



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

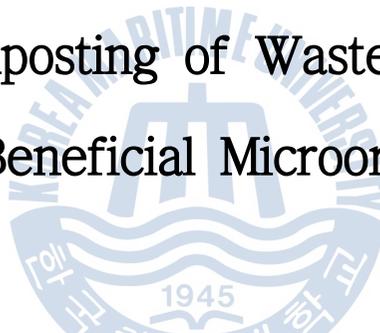
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位請求論文

복합 유용미생물을 우점시킨 폐수
슬러지의 호기성 퇴비화

Aerobic Composting of Wastewater Sludge
Using Beneficial Microorganisms



指導教授 金仁洙

2015年 02月

韓國海洋大學校 大學院 土木環境工學科

河 信 英

本 論文을 河信英의 工學博士 學位論文으로
認准함

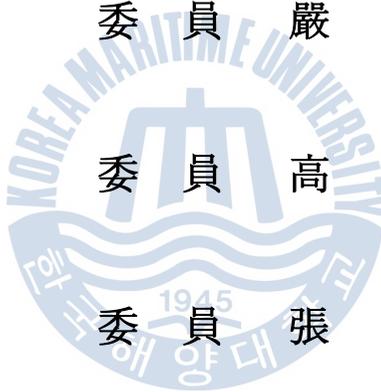
委員長 宋 永 彩 (印)

委 員 嚴 泰 奎 (印)

委 員 高 星 澈 (印)

委 員 張 在 秀 (印)

委 員 金 仁 洙 (印)



2015年 12月 29日

韓國海洋大學校 大學院

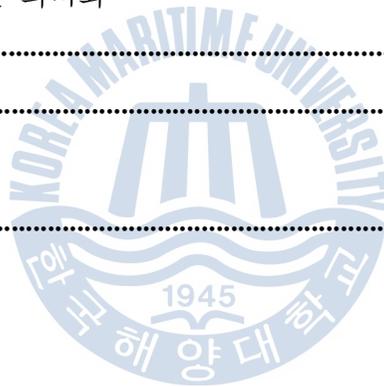
목 차

목 차	i
List of Figures	v
List of Tables	ix
Abstract	xi
제 1 장 서론	1
제 2장 문헌연구	4
2.1 유기성 폐기물	4
2.1.1 하·폐수 슬러지	5
2.1.2 음식물폐기물	7
2.1.3 커피박 발생 및 처리현황	8
2.2 퇴비화	10
2.2.1 호기성 퇴비 단계별 환경변화	10
2.2.2 퇴비의 원료	11
2.2.3 퇴비화 장치의 영향인자	12
2.2.4 퇴비처리장의 악취물질	15
2.3 퇴비의 품질	15
2.4 복합미생물 제제	19
2.4.1 미생물제제 군집구조	20

제 3 장 복합유용미생물을 우점화한 활성슬러지 공법	22
3.1 서론	22
3.2 재료 및 방법	23
3.2.1 실험장치 및 운전방법	23
3.2.2 실험대상 유입원수	25
3.2.3 시험항목 및 측정방법	26
3.3 결과 및 고찰	27
3.3.1 복합미생물제제의 최적주입량의 산정	27
3.3.2 슬러지 EPS함량 변화 비교	28
3.3.4 활성슬러지공정의 MLSS 농도 변화	30
3.3.5 활성슬러지 공정의 처리효율 평가	31
3.4 소결론	33
제 4 장 복합유용미생물 우점슬러지를 이용한 퇴비화	34
4.1 서론	34
4.2 재료 및 방법	36
4.2.1 퇴비화 장치의 운전조건	36
4.2.2 실험장치	37
4.2.3 실험재료	38
4.2.4 시험항목 및 측정방법	39
4.3 결과 및 고찰	43
4.3.1 온도 변화	44
4.3.2 수분 변화	46
4.3.3 pH	48
4.3.4 염분 농도(%)	50
4.3.5 C/N의 변화	52

4.3.6	악취분석	54
4.3.7	카페인 성분의 변화	57
4.3.8	무기성분의 변화	59
4.3.9	퇴비 품질 검증	61
4.3.10	퇴비 공정규격 분석	63
4.4	소 결론	65
제 5 장	퇴비 내 세균군집의 Pyrosequencing 분석	67
5.1	서론	67
5.2	재료 및 방법	68
5.2.1	시료 채취	68
5.2.2	DNA 추출	68
5.2.3	Pyrosequencing 방법	69
5.3	결과 및 고찰	71
5.3.1	Rarefaction curve를 이용한 metagenome 분석	71
5.3.2	Pyrosequencing으로 분석한 Bacteria 군집 다양성	75
5.3.3	복합유용미생물 슬러지와 퇴비의 Community 분석	82
5.4	소 결론	85
제 6 장	퇴비 시용에 따른 토양의 이화학적특성과 식물생장에 관한 연구	86
6.1	서론	86
6.2	재료 및 방법	87
6.2.1	실험장소	87
6.2.2	공시식물	87
6.2.3	시용 퇴비	88
6.2.4	시험항목 및 측정방법	88

6.3 결과 및 고찰	91
6.3.1 퇴비 시용에 따른 식물성장 영향실험	91
6.3.2 토양 이화학적 성분 변화	93
6.3.3 중금속의 변화	102
6.3.4 퇴비에 따른 공시식물 성장률 비교	104
6.4 소 결론	109
제 7 장 경제성 분석	110
7.1 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비화	110
7.2 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비화의 팽화제로 커피 박을 이용한 퇴비화	113
7.3 소결론	115
제 8 장 종합결론	116
참고문헌	118



List of Figures

Fig. 3.1 Photograph and schematic representation of the bioreactor system in this study.	24
Fig 3.2 Removal efficiencies of COD, T-N and T-P depending upon BM inoculation amount.	28
Fig. 3.3 Variations of MLSS in the bioreactor system inoculated with BM.	30
Fig. 3.4 Removal efficiencies for SS, COD, T-N and T-P in the bioreactor system inoculated with BM.	32
Fig 4.1 Schematic diagram of the aerobic composting reactor used in the study.	37
Fig. 4.2 Variation of temperature in the composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds.	45
Fig. 4.3 Variation of moisture content in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds.	47
Fig. 4.4 Variation of pH in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds.	51
Fig. 4.5 Variation of salinity in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds.	51
Fig. 4.6 Variation of C/N in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds.	53

Fig. 4.7 Variation of odor component H ₂ S of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.	55
Fig. 4.8 Variation of odor component CH ₃ SH of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.	56
Fig. 4.9 Variation of odor component NH ₃ of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.	58
Fig. 5.1 Comparison of rarefaction curves of BM sludge and control sludge from the bioreactor system.	72
Fig. 5.2 Comparison in microorganism diversity using rarefaction curves of BCL and SCL composts.	73
Fig. 5.3 Comparison in microorganism diversity using rarefaction curves of PMP, BMP and BCL composts.	74
Fig. 5.4 Comparative analysis of the dominant phyla in BM sludge and control sludge.	76
Fig. 5.5 Comparative analysis of the dominant Species in BM sludge and control sludge.	78
Fig. 5.6 Comparative analysis of the dominant phyla in BM compost and general compost.	80
Fig. 5.7 Comparative analysis of the dominant species in BM compost and general compost.	81
Fig. 5.8 Comparative analysis of the dominant species in the PMP, BMP and BCL composts.	83
Fig. 5.9 Double pie charts of microbial communities of different samples from BM sludge and BM compost. The inner pie represents the compositions of phylum, and the outer pie shows the compositions	

of family.	84
Fig. 6.1 Comparison of germination indices (G.I.) of different composts using sawdust as a bulking agent after 12-days and 28-days.	92
Fig. 6.2 Comparison of germination indices (G.I.) of different composts using coffee grounds as a bulking agent after 12-days and 28-days.	92
Fig. 6.3 Comparison of soil pH's before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	94
Fig. 6.4 Comparison of soil EC before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	94
Fig. 6.5 Comparison of soil organic matter before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	95
Fig. 6.6 Comparison of soil T-N before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	97
Fig. 6.7 Comparison of soil P ₂ O ₅ before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	97
Fig. 6.8 Comparison of soil CaO before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	99
Fig. 6.9 Comparison of soil MgO before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	99
Fig. 6.10 Comparison of soil K ₂ O before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	100
Fig. 6.11 Comparison of soil CEC before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	100
Fig. 6.12 Comparison of soil Fe before and after treatment of compost, and	

after harvest depending on different compost treatment.	101
Fig. 6.13 Comparison of soil Mn before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.	101
Fig 6.14 Effect of composts of beneficial microorganism pig manure (BMP) and photosynthetic microorganisms pig manure (PMP) on growth radish.	105
Fig 6.15 Appearances of chinese cabbage grown on various composts. ..	108



List of Tables

Table 2.1a Compost quality assessment standards of organic matter, moisture contents and inorganic matter recommended by Rural Development Administration	17
Table 2.1b Compost quality assessment standards of heavy metals and Fermentation recommended by Rural Development Administration	18
Table 2.2 Identification of microorganisms in BM agent by pyrosequencing	21
Table 3.1 Operating condition of a bioreactor system for this study	25
Table 3.2 Characteristics of the influent used in this study	25
Table 3.3 Analytical parameters to monitor of bioreactor system for this study	26
Table 3.4 Comparison of protein contents between control sludge and BM sludge	29
Table 3.5 Comparison of carbohydrate contents between control sludge and BM sludge	29
Table 4.1 Operating conditions for aerobic composting reactor	36
Table 4.2 Chemical properties of raw materials for composting	38
Table 4.3 Analytical methods of compost quality	40
Table 4.4 Chemical properties of mixtures of composting materials	43
Table 4.5 Chemical properties of the composts used in this study	60
Table 4.6 Self-Assessment result of compost quality	62

Table 4.7	Analysis result of the experimental compost quality	64
Table 6.1	Analytical method of plant growth characteristics	89
Table 6.2	Changes of heavy metals contents in soil during growth of chinese cabbage	103
Table 6.3	Effect of pig manure compost based on beneficial microorganism (BMP) and pig manure compost based on photosynthetic microorganisms (PMP) on growth of radish	104
Table 6.4	Effect of compost injection by pig manure compost based on photosynthetic microorganisms (PMP), beneficial microorganism sludge with coffee (BCL) and beneficial microorganism pig manure(BMP), on growth of chinese cabbage	107
Table 7.1	Economic benefit analysis of BM compost in terms of food waste disposal costs	112
Table 7.2	Economic benefit analysis of using coffee grounds as a bulking agent in terms of food waste disposal costs	114

Aerobic Composting of Wastewater Sludge Using Beneficial Microorganisms(BM)

Ha, Shin Young

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

Organic waste is an organic resource which can be converted into useful materials by microbes, and can be seen as a resource which can be recycled in a variety of ways. However, until now, organic waste has been disposed of through the inexpensive offshore dumping. However, with the implementation of a ban on offshore dumping set in place since 2014, demand for land-based treatment facilities for the stable and sustained treatment of organic waste has risen, and large budgets are being appropriated to this end. Sewage, wastewater sludge and food waste, which are representative organic wastes, have a high potential for conversion into animal feed or compost, but due to their odor and high moisture content, are difficult to handle. In addition, they have high

concentrations of hazardous materials. This study focused on converting wastewater and sewage sludge treated with beneficial microorganism(BM) into compost, using food waste as a supplementary nitrogen source that the sludge lacks.

First, a laboratory-scale reactor inoculated with BM agents was used to produce sludge treated with BM. In testing to compute the optimal amount of BM, the efficiency was highest when the amount of BM inoculation was 1%(w/w). Observation of changes in concentration of proteins and carbohydrates in the sludge resulting from the introduction of BM showed increases of 52% for protein and approximately 32% for carbohydrate. Also, due to introduction of the BM agent into the wastewater, the removal efficiencies of suspended solid (SS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (T-N) and total phosphorus (T-P) were 94.5%, 91%, 79% and 81%, respectively satisfying domestic standards for the effluent.

Secondly, the composting characteristics of BM sludge and the control sludge were compared. Feasibility of using coffee grounds as a bulking agent was examined, along with sawdust. It was observed that composting of BM sludge had a faster rate of reaction than with the control sludge, and higher temperatures were reached. When using coffee grounds as a bulking agent, the caffeine in the coffee seemed to absorb the odors, allowing a composting with almost no odors. Moreover, when coffee grounds used as the bulking agent, total organic matter content increased by approximately 17% over sawdust, while total nitrogen increased by 49%, and available phosphorus by approximately 3%.

Comparative microbial community analysis based on pyrosequencing analysis was performed for the BM agents used for composting and for the control sludge. Analysis of the diversity of microorganisms showed 559 out of 1580 reads OTU for the control sludge, and 594 OTU out of 2174 reads for BM sludge, indicating a higher diversity control sludge.

Pyrosequencing of BM sludge showed that *Proteobacteria* (41.30%) was the most dominant, followed by *Gemmatimonadetes* (14.12%). microbial diversity analysis in the compost showed 249 OTU out of 3406 reads in the control sludge compost, and 183 OTU out of 2632 reads for BM sludge compost. Whereas the diversity of microorganisms in the control sludge were observed to be slightly higher than that of BM sludge, the diversity were decreasing as the composting proceeded, leading to a larger proportion of *Bacteroidetes*, *Proteobacteria* and *Firmicutes* occurred during composting for both sludges.

Fourthly, a study was conducted to investigate composting efficiency. In the test for germination rate, the control sludge failed in some cases to satisfy the standard of 70 for matured compost after 28 days, but when using composted BM sludge, all cases were shown to satisfy the requirement. The result for BCL compost was highest, at 101.5. Plant germination rate was shown to increase when using coffee grounds as the bulking agent. Use of BCL compost was observed to have a positive growth effect on leaf weight (g), leaf number (ea), leaf length (cm), root weight (g), root diameter (cm), and root length (cm), etc. Lastly, an economic feasibility analysis on BCL compost, which was shown to have the highest efficiency of composting, showed that approximately 22.2% cost savings relative to current food waste composting were possible, mainly because the caffeine in the coffee grounds absorbed odors, removing the need for odor reducing facilities, and enhanced the value of the compost by boosting the organic matter content and total nitrogen content of the completed compost.

제 1 장 서론

우리나라는 현재 음식물 쓰레기나 하폐수 슬러지와 같은 유기성 폐기물의 해양투기가 전면 금지됨에 따라 안정적인 지속적인 육상 처리 시설이 시급히 요구되고 있다. 최근 정부는 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’을 제정하여 유기성 폐기물을 재활용 가능한 자원으로 지정하였고, 다양한 제도적 지원을 마련하여 그 활용을 촉진하고 있다.

하폐수 처리는 대부분 생물학적 처리공정을 사용하고 있기 때문에 응집제 주입에 따른 1차 침전슬러지와 2차 침전조의 활성슬러지를 포함한 상당한 양의 하폐수 슬러지가 배출되고 있다. 여기에는 고농도의 유기 영양물질이 포함되어 있기 때문에 그동안 하폐수 슬러지를 이용한 액비나 퇴비제조, 사료첨가 등에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 아직까지 활성슬러지에 포함된 중금속의 위해성을 제거하는 문제나 자원화 과정 중에 발생하는 악취문제를 완전히 해결하지 못하고 있어 실용적인 재이용이 힘든 실정이다. 음식물 쓰레기 배출량은 2006년의 분리수거 의무화에 힘입어 일일 11,463 톤에서 2007년 13,754으로 대폭 증가한 것을 기점으로 매년 꾸준히 발생량이 증가하고 있다. 음식물쓰레기의 자원화 현황을 살펴보면 사료화와 퇴비화가 주류를 이루고 있는데, 이것은 정부가 전국에 5만개소 이상의 음식물 쓰레기 감량의무 사업장을 고시하고 소규모 사료 및 퇴비화 시설을 의무화한 결과로 볼 수 있다. 그러나 음식물 쓰레기를 사료화하는 방안은 음식물 쓰레기의 신선도유지와 염분과 기타 유해성분의 혼입을 포함한 사료의 환경보건적 문제 때문에 담미사료로서의 재이용이 극히 제한적이 될 수 밖에 없다. 또한 음식물 쓰레기의 퇴비화는 현재 가장 가능성 있는 처리공정으로 평가되고 있으나 농작물의 염해와 더불어 퇴비화가 가능

한 양질의 대량 배출업소 확보가 제한적이며, 투입가격의 상승과 생산량 증가에 따른 상대적 수요감소에 의해 퇴비가격이 하락하여, 퇴비생산 단가도 나오지 않는 열악한 시장이 형성되고 있는 실정이다. 이러한 시장환경을 타개하여 유기성 퇴비의 가격상승과 수요창출을 도모하기 위한 범 정부적인 노력과 아울러, 고농도 유기성 폐기물인 하폐수 슬러지와 음식물쓰레기의 재활용률을 높이기 위한 근본적인 기술개발이 필요하다.

새롭게 발생하고 있는 유기성폐기물인 커피박은 최근 국내 원두커피사용의 증가로 그 발생량이 급격하게 증가하고 있다. 우리나라 커피전문점은 2012년 기준 약 9,500개, 매장당 하루 커피찌꺼기 배출량은 20 kg에 달하며 연간 70톤 이상의 커피찌꺼기가 생활폐기물로 버려지고 있다. 매년 늘어나는 커피원두의 수입량을 고려한다면 폐기물로 배출되는 커피박의 총량은 점차적으로 증가할 것으로 예상된다. 커피원두에서 커피를 짜낸 찌꺼기인 커피박은 0.1%에 해당하는 양만 재활용되고 있으며 나머지 대부분의 커피박이 일반 생활폐기물이나 생활폐수에 혼입되거나, 음식물쓰레기와 함께 배출되어 환경을 오염시키고 있다.

이러한 고농도 유기성 폐기물의 제반문제를 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 복합 유용미생물을 우점시킨 하폐수 슬러지와 음식물 폐기물을 혼합하여 호기성으로 퇴비화시키는 연구를 진행하였으며 폐기물인 커피박을 팽화제로 사용하여 생산단가를 낮춘 고품격 유기성 퇴비를 생산하는 방안을 검토하였다. 기초실험에서 재래식 활성슬러지 공법에 복합 유용미생물을 우점시켜 악취 제거와 안정된 처리수질을 보장하고 아울러 복합 유용미생물이 우점 된 슬러지를 생산하여 슬러지 퇴비화가 유용미생물에 의해 원활하고 빠르게 진행되게 하였다. 또한, 슬러지 퇴비화를 위해 부족한 질소원을 음식물폐기물을 혼합하여 보충하였으며, 투입대신 폐기물 커피박을 팽화제로 사용하여 수분과 C/N 비를 조절하였다. 활성슬러지 공법에 복합 유용미생물을 우점 시켰을 때 수질과 미생물상의 변화특성을 고찰하였으며, 전체 호기성 퇴비 공정의 최적 운전 인자를 도출하고 최종 생성된 부산물의 적용 가능성을 평가하기 위해 함수율, C/N비, 염분 및 각종 중금속

등의 성분을 분석하여 퇴비의 진행 정도와 그 품질을 평가하였으며, 식물 생육 실험을 통해 식물 성장 결과를 도출하여 실험별 생성 퇴비의 성능을 평가하였다.

본 연구의 결과는 고농도 유기성 폐기물의 실용적인 고품질 퇴비화 기술 발전에 기여할 것이며 나아가 하폐수 슬러지와 음식물 쓰레기 및 커피박 폐기물의 효과적인 자원화를 가능하게 하여 관련 산업의 기술적 우위를 담보할 수 있을 것으로 기대된다.



제 2장 문헌연구

2.1 유기성 폐기물

폐기물이란 쓰레기, 연소재, 슬러지, 폐유, 폐산, 폐알칼리 및 동물의 사체 등으로서 사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 아니하게 된 물질을 말한다. 생활환경에서 발생하는 생활폐기물과 산업현장에서 발생하는 사업장폐기물로 크게 분류되고 있으며, 사업장폐기물은 배출원에 따라 사업장일반폐기물(사업장 생활계, 사업장 배출시설계, 건설폐기물)과 지정폐기물로 분류되고 있다[1]. 폐기물의 유·무기성 구분은 고형물 중 유기성물질의 함량 40%이상을 유기성폐기물로 규정하고 있으나 유기물 함량이 40%이상인 폐기물 중 고분자 유기물을 제외하고 생물에서 유래된 동·식물성폐기물을 전제로 유기성폐기물로 정의하고 있다[2]. 현재 환경부에서 관리되고 있는 유기성폐기물은 생활쓰레기 내에 포함되어진 음식물류폐기물(음식물탈리액 포함), 수처리장(하수처리장, 마을 단위 오수처리장, 공단 및 농공단지 폐수처리장, 사업장의 폐수처리장, 정화조폐액 및 분뇨처리장)에서 발생하는 폐액 및 슬러지, 축산폐수슬러지, 사업장에서 발생하는 동·식물성 잔재물로 크게 분류한다[3].

2.1.1 폐수 슬러지

국내 폐수처리장은 주로 활성 슬러지법에 의한 처리방식을 채택하여 운영하고 있으며 활성 슬러지법에 의한 처리 공정에서 발생하는 생 슬러지와 잉여 슬러지의 양은 일반적으로 유입하수량의 약 1% 정도이다. 활성슬러지법에서 발생하는 슬러지 내 고형물 중 40 ~ 90%가 유기물이고 함수율은 97 ~ 99%로 최종 처분하는 데 많은 어려움이 있다. 슬러지 중 다량 포함된 유기물은 극히 불안정하여 부패하기 쉽고 부패 시 악취발생은 물론 인체와 생물에 유해한 물질이 발생될 수 있으며 위생상의 문제를 유발시킬 수 있다. 또한 함수율이 높은 슬러지는 최종 처분장으로서의 운반에 많은 비용이 소요될 뿐 아니라 처리시설의 용량도 커지게 된다[4].

1) 슬러지의 일반 특성

(1) pH

슬러지의 pH는 대체적으로 6.1 ~ 8.2의 범위로 대부분 중성이상을 유지하며, 슬러지의 pH는 소화조의 운전 상태와 주입되는 응집제에 따라 상이하다.

(2) 수분 함량

슬러지의 수분함량에 따라 처리과정의 건조기의 건조조건에 영향을 미치며 최종처분에도 많은 영향을 미친다. 일반적인 슬러지의 수분함량은 77 ~ 85%정도로 평균 80%정도의 수분함량을 가지고 있다.

(3) 휘발성고형물 함량

슬러지 내 유기물 함량은 폐수관거의 종류, 처리 구역의 사람들의 생활수준, 소화조 적용여부에 따라 달라진다. 우리나라의 경우에는 대부분의 폐수처리장에서 최종 처분되는 슬러지의 유기물의 함량이 비교적 낮은 것

으로 알려져 있으며, 농도범위는 40 ~ 70%정도 이다[4].

(4) C/N비

탄소와 질소비가 폐수 슬러지의 재활용 공정에서 중요한 제어인자로 작용한다. 다른 유기성폐기물과는 달리 슬러지는 유기물 내에 질소함량이 높은 것으로 알려져 있다.

(5) 중금속 함량

폐수 슬러지를 퇴비화 하여 농가 혹은 산림에 사용할 경우에는 농림축산식품부의 비료관리법에 준해서 사용할 수 있다. 일반적으로 비료 중에서 유기질비료 및 부산물비료에 대해 크롬, 납, 카드뮴, 수은, 비소, 구리 등의 중금속 위생기준이 설정되어 있다[5]. 현재 읍면단위 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 경우 중금속 농도가 상기의 중금속 위생기준 이하로 유지될 경우 비료의 원료로서 재활용이 가능하다. 하수 슬러지 중 도시형과 농촌형의 경우, 유해중금속의 농도가 규제치 이하로 나타났으며, 공단형의 경우, 규제농도가 5 mg/kg인 카드뮴과 150 mg/kg인 납이 규제치를 상회하는 수치를 보였다. 공단형의 폐수처리장에서 발생하는 폐수 슬러지는 퇴비화의 용도로 부적합할 수 있지만 중금속농도가 규제치 이하인 경우 퇴비화 가능성이 있다.

2) 폐수슬러지의 발생 및 처리현황

사업장배출시설에서 발생하는 유기성 슬러지는 2012년 기준 하루 15,744 톤이 배출되고 있다. 유기성슬러지의 처분형태를 살펴보면, 슬러지 처분과 관련된 국제협약인 런던협약이 체결된 해인 1996년도에는 슬러지 발생량 중 매립과 해양처분이 각각 77.7%와 18.7%를 차지하였다. 하지만 1997년에 발표된 유기성 고형폐기물의 직 매립 금지방안에 따라 1999년에는 매립이 40.2%로 크게 감소한 반면 해양처분이 51.7%로 급증하였다. 하지만 2012년부터 해양투기가 금지되면서 2011년에 1.6%로 급락하여 2012년도에는 0.8%까지 감소하였다. 앞으로 해양투기 제로화가 예상되며 반대

로 해양투기 금지로 인해 폐기물 재활용비율은 증가되는 추세이다[3].

3) 슬러지의 재이용 현황

국내 슬러지 재이용 형태를 살펴보면, 퇴비화, 지렁이 사육 및 매립장 복토용 등으로 일부 사용되며 최근 매립지 복토재료의 이용이 증가하고 있는 추세이다. 이는 2012년부터 슬러지의 해양처분이 금지됨에 따라 슬러지의 처리방법으로는 환경부에서 수도권매립지에 고화 복토시설을 시범 실시하고 복토재료의 활용을 권장하였기 때문이다[6].

2.1.2 음식물 폐기물

음식물 폐기물은 농어촌에서 생산된 농축수산물이 유통과정 중에서 버려지는 폐기물, 가정과 음식점 등에서 조리 과정 중 식품을 다듬고 버리는 식품폐기물, 먹고 남긴 음식물 폐기물 등을 말한다. 발생원별로 보면 가정생활 중에서 배출되는 음식물 폐기물과 음식점소에서 다량으로 배출하는 감량 의무사업장 및 소규모 음식점 등에서 배출되는 음식물 폐기물로 구분할 수 있다. 국내 음식물 폐기물의 특징에는 높은 수분, 이물질, 부패, 염분 및 계절적 편차 등이 있다. 음식물폐기물의 가장 두드러진 특징은 약 80 ~ 85% 정도의 높은 수분함량으로 이는 퇴비화, 사료화 할 경우 수분 감소로 인해 생산 수율이 낮아지는 주요한 요인으로 작용된다. 또한, 다세대에서 수거하는 경우 계절에 따라 발생량과 종류의 편차가 크고 이물질 혼입문제가 음식물폐기물 재활용에 걸림돌이 되고 있다[6].

2013년 기준 하루 1만 4천 톤의 음식물 폐기물이 배출되고 있고 그중 70%가 가정과 소형 음식점에서 배출되었다고 한다. 특히 음식물폐기물의 절반이상이 유통과 조리 과정에서 발생한다. 음식물폐기물은 푸짐한 상차림과 국물음식을 즐기는 우리나라 음식문화와 인구증가, 생활수준 향상, 식생활의 고급화 등으로 인해 매년 3%가량 늘어나고 있는 실정이다. 국내 음식물 폐기물 발생량은 전체 폐기물 발생량의 28.7%를 차지하고 있다[7].

음식물 폐기물 정책은 음식물 폐기물 배출로 인한 경제적, 사회적 비용 증가 문제와 나아가 에너지·기후변화에 미치는 악영향 저감을 위해 사전 발생 억제정책으로 방향이 전환되고 있다. 특히, 배출되는 음식물 폐기물의 증가와 국민의 생활수준 향상 및 1~2인 세대수(전체 가구의 48% 차지)의 증가로 배출되는 음식물 폐기물이 증가하고 있으나 2005년부터 시행된 음식물류 폐기물 직매립 금지로 음식물 폐기물 줄이기 노력이 절실한 시점이다. 음식물폐기물의 자원화 방법으로는 사료화와 퇴비화가 주류를 이루고 있다. 그 이유로 환경부가 전국에 5만 개소 이상의 음식물폐기물 감량의무 사업장을 고시하고 소규모 사료 및 퇴비화 시설을 의무화한 결과로 볼 수 있다[8]. 그러나 사료화 혹은 퇴비화 가능한 음식물의 양질 대량배출업소가 한정 되어 있으며 폐기물자원화 퇴비의 수요처가 부족하여 퇴비를 거의 무료로 제공하여야 되는 실정에 이른 상황이다. 따라서 더 많은 음식물 폐기물의 재활용과 그에 따른 적정처리를 유도하기 위해 다양한 재자원화 혹은 처리기술이 개발될 필요가 있다.

2.1.3 커피박 발생 및 처리현황

커피박은 커피 생두를 로스팅(roasting)한 후 향기를 추출해 음용하고 남은 찌꺼기를 말한다. 커피박은 연간 27만톤으로 일반 생활폐기물 또는 생활폐수, 음식폐기물 속으로 버려져 그 과정에서 메탄가스를 유발시키고 생활폐수로 버려진 것은 하수구로 흘러들어 수질을 오염시키고 있다[9]. 국내 커피소비량의 증가와 함께 폐기량도 증가하고 있어 커피박의 재이용에 대한 연구가 필요한 실정이다.

커피박은 높은 유기물을 함유하고 있음에도 불구하고 물리-화학적 특성 때문에 경제 환경적인 측면에서 만족스럽게 재이용되지 못하고 있다. 그러나 최근 연구에서는 커피박은 토양 내에서 금속이온봉쇄제로서의 잠재

력과 퇴비화 과정에서 발생하는 악취 저감 효과 및 원예 용토로의 사용가능성도 확인되고 있다. 하지만 또 다른 연구에서는 커피박은 적절하게 부숙 되지 않은 채 퇴비로 재활용 하였을 때 식물생육에 악영향을 미칠 수도 있다고 보고하였다[10, 11].



2.2 퇴비화

퇴비는 유기물이 퇴비화 과정에 의해 분해되어 생성된 최종 물질을 말하며, 퇴비화란 가축분, 산야초 등 유기물이 미생물 및 토양동물(지렁이 등)에 의하여 분해되어 토양과 유사한 물질로 안정화 되는 과정을 말한다. 유기물은 미생물 등에 의해 완전히 분해되면 이산화탄소, 물로 전환된다. 그러나 유기물 중에 미생물의 분해 작용에 저항성을 갖는 물질과 분해과정 중에 새로이 합성된 물질은 부식질(humus)으로 잔류한다. 이 과정을 부숙화, 부숙이 완료되는 단계를 완숙이라고 하며 퇴비화는 비교적 고온(40 ~ 60℃)에서 이루어지는 호기성 분해공정으로 보통 유기성 고품 폐기물의 처리에 이용되고 있다[12].

2.2.1 호기성 퇴비 단계별 환경변화

퇴비화는 호기성 미생물에 의해 진행되는 부숙과정으로 중온성(Methanophiles)균과 고온성(Thermophiles)균이 관여한다. 미생물에 의한 퇴비 부숙과정은 다음과 같이 3단계로 구분된다.

- ① 퇴비원료 중에 당류, 아미노산, 지방산 등 분해되기 쉬운 물질들이 분해되는 초기단계로서 부숙온도가 상승한다.
- ② 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴 등 난해성 물질들이 분해되는 단계로서 고온성 미생물이 관여하며 수주간 지속된다.
- ③ 퇴비더미의 온도가 떨어지며 분해속도도 지연되는 단계로서 숙성단계라고 하며 방선균을 중심으로 한 중온성 균들이 관여한다.

일반적으로 퇴비화는 이러한 3단계 과정을 거치게 된다[12].

2.2.2 퇴비의 원료

퇴비 원료에 따라 제조된 퇴비의 품질은 영향을 받게 됨으로 원료 선택에 주의가 요구된다. 과거에는 주로 볏짚 류를 이용하였기 때문에 퇴비제조에 있어 유해물질의 혼입가능성이 낮았으나 최근 폐기물 자원순환 정책에 의해 가축 분을 포함하여 음식물 폐기물 및 산업폐기물과 도시폐기물까지 퇴비화에 사용되고 있다. 이는 유기성 폐기물을 퇴비화 하여 자원을 재 순환하는데 의미가 있지만 퇴비 이용의 목적이 양질의 퇴비를 사용하여 토양의 질을 향상시키고 우수농산물을 생산하기 위한 것임을 감안하여 폐기물 퇴비화 시 현명한 판단이 필요하다.

1) 농산부산물

퇴비 시 농산부산물은 비료가치는 낮고 유기물 함량이 높은 것이 특징이다. 물량이 많은 대표적인 농산부산물은 볏짚과 왕겨로서 볏짚은 칼리 함량이 비교적 높아 1.84%에 달하지만 C/N비는 50정도로 높은 편이다. 주로 농산부산물은 퇴비화의 주원료보다는 가축분뇨 등 유기성 폐기물 퇴비화의 팽화제로 활용이 가능한 자원으로 평가되고 있다.

2) 임산부산물

퇴비 시 임산부산물의 대표적인 것으로는 톱밥이 있다. 톱밥은 흡습성과 통기성이 좋기 때문에 함수율이 높은 재료의 퇴비화에 보조재로 활용되고 있지만 톱밥은 C/N비가 500~1,000정도로 높아 분해가 늦고 비료성분도 낮아 함수율이 높은 재료의 흡습제로서 기능 이외에 퇴비의 품질에는 좋은 영향을 주지 못하는 단점이 있다. 또한 톱밥은 주로 수입 목재 가공 과정에서 생산되고 있기 때문에 계절 변화로 인한 수요 상승, 세계적인 원자재 가격 상승과 국내 목재산업의 쇠퇴로 톱밥의 가격이 계속해서 상승하고 있는 실정이다.

3) 음식물 폐기물

음식물폐기물의 유기물 함량 분포는 22.5 ~ 94.8% 범위이며, 평균값은 83.4%로서 매우 높은 편이다. 질소 함량도 0.76 ~ 6.83%의 범위로 평균 3.31%의 높은 수준을 보이고 있으며 인산과 칼리의 평균함량도 각 1.21%, 0.42%로 높아 퇴비원료로 많이 쓰이는 돈분 퇴비와 비교하여 볼 때 질소와 인산의 비율이 비교적 이상적임을 알 수 있다.

4) 폐수슬러지

폐수슬러지는 평균 탄소함량이 40.4%이고, 질소 0.81 ~ 8.76%, 인산 0.62 ~ 7.70%, 칼리 0.07 ~ 0.76%로써 높은 비료성분 함량을 나타내고 있으나 폐수슬러지 내 중금속 등의 유해물질에 대한 고려 후 퇴비화가 필요하다.

2.2.3 퇴비화 장치의 영향인자

퇴비화는 유기물질이 생물의 작용에 의해 분해되면서 안정화된 형태로 변형되어 가는 과정으로 여러 가지 환경요인에 의해 영향을 받는다. 퇴비화의 영향인자로 온도, 공기공급, 교반, pH, 수분함량, C/N비, 숙성도 등으로 분류 할 수 있다.

1) 온도

온도는 퇴비화 과정의 환경요인 중에서 퇴비화 효율을 높이는 데 매우 유용한 인자이다. 퇴비화가 진행되게 되면 온도의 변화가 일어나는데 이것은 미생물 활동에 의해 발생하는 이산화탄소의 양과 함께 분해력을 알 수 있는 지표로 사용된다. 따라서 온도 변화과정을 관찰하면 퇴비화 진행 정도를 간접적으로 파악할 수 있다.

2) 공기 공급

퇴비화 과정은 주로 유기물의 호기성 산화분해 과정이므로 산소의 존재가 필수적이며, 이 결과 탄수화물이 이산화탄소, 물, 미생물세포, 열 그리고 분해 뒤 부식질로 바뀌어 진다. 퇴비화 과정에서 공급되는 공기는 미생물이 호기성 대사를 할 수 있도록 하고, 온도를 조절하며, 수분과 이산화탄소, 다른 가스들을 제거하는 역할을 한다. 과도하게 많은 공기를 공급하면 수분의 제거와 퇴비온도 저하로 퇴비화가 늦어질 수도 있으며, 이때 수분이 제거되기 위해서는 미생물에 의한 발열반응도 함께 동반되어야 한다[13].

3) 교반

퇴비화 과정에서 교반은 균일한 온도와 산소농도를 유지하고, 미생물과 기질의 혼합 역할을 한다. 이것은 주로 반응기의 형태와 기계적 장치에 관련된 것으로 반응속도 향상에 커다란 영향을 미치게 된다. 퇴비화 기간을 단축시키기 위해 교반이나 공기공급이 과도하게 이루어질 경우 퇴비더미의 온도저하와 건조를 초래하여 퇴비속도를 감소시킬 우려가 있다.

4) pH

퇴비화를 위한 폐기물의 적합한 pH 범위는 미생물의 성장이 가장 활발한 pH 범위인 5.5 ~ 8.0정도인 것이 일반적이다. 일반적으로 음식물폐기물의 경우 발생원에서 보관하는 동안 pH가 감소하여 산성인 경우가 보통이다.

5) 수분

퇴비화 과정에서 미생물은 체외효소를 이용하여 영양물질 및 유기물질을 가수분해하여 세포내로 전달하므로 수분함량은 퇴비화과정에서 중요한 인자이다. 수분함량이 전체 퇴비질량의 30%이하일 경우에는 생물반응기

저하되며 20%이하일 경우에는 반응이 불가능해진다[14]. 퇴비의 수분함량은 처리 폐기물의 종류에 따른 공간부피, 공기 공급량, 온도변화 등의 물리적 환경요인에 따라 다른데 수분함량 역시 미생물의 활동에 결정적 영향을 미치는 환경요인이다.

6) C/N비

C/N비는 미생물의 유기물질 분해과정에서 필요한 영양물질 균형과 퇴비의 질적인 면으로 나눌 수 있다[15]. 탄소는 대부분 미생물에 의한 유기물질 분해과정에서 미생물의 에너지원으로 사용되고 일부는 그들 세포로 합성되며, 질소는 미생물 성장에 결정적인 요소이다. 적절한 퇴비화 초기 C/N비는 약 25정도이며 이 이상이면 질소부족 현상이 나타나기 시작하여 퇴비화속도를 늦추는 동시에 탄소가 많아지므로 생성된 유기산 등이 퇴비의 pH를 낮추고 미생물의 성장과 활성도를 억제하게 된다. 반면 C/N비가 너무 낮으면 질소가 암모니아로 변하여 pH를 증가시키고 이로 인해 암모니아 가스가 발생되어 퇴비화 과정 중 악취를 발생하게 된다.

7) 숙성도

퇴비화의 진행정도는 폐기물의 종류, 환경조건 등에 따라 상이한데 퇴비화 완료를 정확히 결정하는 것은 퇴비화 공법의 효과적 운용과 완료된 퇴비의 사용 측면에서 볼 때 아주 중요한 요인이다. 퇴비의 숙성도와 안정도를 하나의 척도로 판단하기에는 퇴비화를 하는 퇴비의 종류가 너무 다양하므로 세계 여러 나라에서는 그 나라에서 배출되는 유기성폐기물의 특성에 맞는 숙성도 결정방법을 제시하고 있다. 이는 대체적으로 폐기물 종류에 따라 온도, CO₂발생량, C/N비, 식물생육 억제정도 등을 관찰하여 퇴비화 숙성도를 판단하고 있다[16]. 퇴비의 숙성지표인 생물학적 방법에는 미생물의 산소소비량, 발아시험, 지렁이에 의한 판정, 화분관 성장 테스트 등을 진행하며 그중 발아시험은 직접적인 영향 효과를 알아 볼 수 있으며, 발아지표가 70%이상을 숙성퇴비로 간주한다. 퇴비의 숙성지표 중

하나인 C/N비는 미생물의 분해대상 물질인 유기물의 특성을 나타내는 것이며 일반적으로 숙성퇴비의 고형물 C/N비는 20이하로 알려져 있다. 이에 퇴비 용출액 C/N비를 분석해 퇴비 숙성도를 판단하기도 한다[17].

2.2.4 퇴비처리장의 악취물질

퇴비화 과정 중 부산물 중의 유기물 성분인 질소성분(아미노산)은 암모니아 및 시안화합물, 황 성분(시스테인, 메티오딘)은 황 화합물(H_2S , CH_3S 등), 당과 지방산은 휘발성 지방산(volatile fatty acids ; VFA)으로 전환이 되어 암모니아와 같은 악취를 발생하여 농작물에 피해를 입히게 된다. 퇴비화과정 중에 발생하는 악취는 일반적으로 지나치게 낮은 C/N비, 높은 수분함량, 낮은 산소공급도 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 퇴비화 과정에 발생하는 휘발성 가스 158 종을 검출, 분류하여 퇴비화 초기 단계에서는 알코올, 에스테르, 카르보닐산 등이 주성분이고 고온 단계에서는 황 화합물에 의한 악취가 주로 발생하며, 암모니아 가스는 마지막 단계에서의 주요 악취임을 밝혔다[18]. 여러 악취물질은 주관적인 오염물질로 상황이나 개인의 성향에 따라 문제의 정도가 결정되기 때문에 정량적인 측정이 어렵지만 악취로 인한 민원의 발생건수가 증가하고 있고, 특히 본 실험과 같이 여러 폐기물을 이용하여 퇴비화를 하기 위해 악취문제 해결이 필수적이다. 부산물 퇴비의 원재료별 악취, 암모니아, 이산화탄소의 농도를 측정하여 악취와 암모니아간의 상관관계를 확인하였으며 등록 부산물퇴비보다 미등록 부산물퇴비에서 악취, 암모니아가 높은 것을 확인하기도 하였다[19].

2.3 퇴비의 품질

퇴비의 품질은 크게 물리적 요소, 화학적 요소 생물학적 요소로 나눌 수 있다. 물리적 요소는 용적밀도, 색, 함수율, 냄새, 입자크기 분포, 수분 보유능력 등이 있다. 용적밀도는 퇴비의 운반, 취급 저장량을 결정할 수 있으며 색은 퇴비의 안전성과 숙성도와 비례하여 퇴비화가 진행되면서 검

은색으로 변화하게 된다. 함수율은 용적밀도에 영향을 주므로 운반, 저장, 취급에 영향을 미치게 된다. 화학적 요소로는 pH, 유기물함량, 영양소, 용해성염 중금속 등이 있다. pH는 미생물개체 수와 미생물의 영양물질 이용성에 영향을 미치며 유기물함량은 퇴비를 적용할 토양의 부식토 양을 증가시키게 되는데, 이런 부식토는 수분 보유능력을 증가시키는 역할을 한다. 퇴비 내 주요 영양소인 N, P, K는 토질 개선뿐만 아니라 농작물의 수확량을 증대 시키는데 효과가 있는데, 대부분의 영양소들은 염의 형태로 식물에 공급되게 되고 최대 내성 한계도를 초과한 용해성염은 식물에게 독성의 원인이 되기도 한다. 유해성분 중 중금속과 병원성 미생물은 인간, 동물, 식물에게 잠재적인 독성을 주기 때문에 규제를 통해 엄격하게 관리하고 있다[15].

현재 농촌진흥청의 비료 품질검사의 주요 기준은 유기물 함량과 부숙(발효)도이며, 유기물 함량은 30% 이상, 완전히 부숙된 퇴비를 기준으로 하고 있다. 퇴비 중에 있는 유기물은 토양 미생물을 증가시켜 작물이 양분을 잘 흡수하도록 하고, 토양의 공기소통과 투수성을 원활하게 하여 토양의 물리화학적 성을 개선할 뿐만 아니라 농작물의 색깔, 당도 등 품질개선과 저장성 향상에 중요한 역할을 한다[20]. 퇴비 부숙도가 낮으면 퇴비가 토양 내에서 장기간 분해되고, 이 기간 동안 질소 기아 현상이나 유해가스 등이 발생되어 작물에 피해를 입히기도 한다.

Table 2.1a Compost quality assessment standards of organic matter, moisture contents and inorganic matter recommended by Rural Development Administration [5]

Analysis item (Unit)	Amount of manuring (1,000 kg/10a)	Assessment	
Organic matter(%)	< 25	4,000kg <	-
	25 ~ 27	3,700 ~ 4,000kg	1
	27 ~ 29.5	3,400 ~ 3,700kg	2
	29.5 ~ 32.3	3,100 ~ 3,400kg	3
	32.3 ~ 35.7	2,800 ~ 3,100kg	4
	35.7 ~ 40	2,500 ~ 2,800kg	5
	40 ~ 45.5	2,200 ~ 2,500kg	6
	45.5 ~ 52.6	1,900 ~ 2,200kg	7
	52.6 ~ 63	1,600 ~ 1,900kg	8
63 >	1,600kg >	9	
Moisture content(%)	< 55		-
	50 ~ 55		3
	45 ~ 50		4
	40 ~ 45		5
	35 ~ 40		4
	30 ~ 35		3
	25 ~ 30		2
25 >		1	
Inorganic matter(%)	< 55		-
	50 ~ 55		1
	45 ~ 50		2
	40 ~ 45		3
	35 ~ 40		4
	30 ~ 35	-	5
	25 ~ 30		6
	20 ~ 25		7
15 ~ 20		8	
15 >		9	

Table 2.1b Compost quality assessment standards of heavy metals and Fermentation recommended by Rural Development Administration[5]

Analysis Item		permissible concentration (mg/kg)
Harmful Ingredients	As	45
	Cd	5
	Hg	2
	Pb	130
	Cr	200
	Cu	360
	Ni	45
	Zn	900
	E. coli	N.D
	Salmonella	N.D
	C/N ratio	50
Compost	equipment method of solbita	Suitable : 4 ~ 8
	<solbita>	Unsuitable : 1 ~ 3
	equipment method of combak	Suitable : complete
	<CoMMe-100>	Unsuitable : incomplete
	germination rate	Radish : > 70%

2.4 복합미생물 제제

복합미생물제제의 공통적인 특징은 유기물을 분해하면서 항산화물질(Anti-Oxidant)을 생성하는 것이다. 즉 발효세균 합성계의 미생물이 공존하면서 항산화 물질을 생성, 농수축산 및 환경 보전에 영향을 발휘한다고 보고되어 있다. 앞으로 본 연구에서 사용한 복합미생물제제를 BM으로 명명하겠다. BM의 미생물군들은 토양의 항산화 능력을 증대시켜 유기영양이 가능한 것으로 알려져 있으며, 부패 및 악취를 억제·방지하고 오수처리에도 정화 효과가 있는 것으로 보고 있다. 이에 수질 개선, 부패성 폐기물과 각종 유기물의 자원화에 이르는 환경보전 분야에 폭넓게 활용되고 있다[21]. BM 내 주요 미생물인 유산균은 유산을 생성하여 발효 초기에 pH를 급격히 강하시킴으로써 부패균의 성장을 억제하고 불용성 무기성분(인산 등)을 가용화하며, 효모균은 생리활성물질을 합성하여(비타민, 호르몬 등) 다른 혼합미생물의 성장을 촉진하고, 사상균은 고분자 물질을 저분자화시켜 이용을 가능하게 하는 역할을 한다. 또한 방선균은 항균물질을 생성하여 병원균의 증식을 억제하고, 광합성세균은 부패 발효 시 발생하는 이산화탄소 및 황화수소를 흡수 이용하며 오염 및 악취방지 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다[21].

BM은 토양시료(대나무부엽토, 반추위미소화물, 활엽수부엽토)를 채취하여 0.125 - 0.177mm로 분쇄한 배지(쌀겨, 왕겨, 톱밥, 계란껍질, 조개껍질, 피트모스)에 혼합한 후 수분농도 40 ~ 60%가 되도록 조절하여 90 일간 일조량이 적은 토양위에서 배양한다. 배양과정을 거친 시료를 쌀겨 30% 중량, 왕겨 20% 중량, 피트모스 20% 중량, 톱밥 30% 중량으로 혼합한 배지에 수분농도를 60%로 조절 후 전체 배지중량의 0.01%를 접종하여 온도 80 ~ 90℃에서 4시간 동안 회전 발효시킨다. 이 후 3주간 후 발효하여 수분농도 8%이하의 분말상의 혼합미생물균주를 분리한 후 용도에 맞게 원액을 제조한다[22].

2.4.1 미생물제제 균집구조

본 실험에 사용한 미생물제제인 B사의 BM-S-1은 130종의 다양한 세균 및 효모로 구성되어 있으며 Table 2.2에 그 균집구조를 나타내었다. BM 종균의 유산균 균주들은 불용성 염을 가용화 하는 것으로 보고되고 있으며, 동정된 *Rhodospirillales* 종은 광합성세균으로 H₂S 등의 악취 처리에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[23]. *B.subtilis*과 *Saccharomyces cerevisiae*는 GRAS(Generally recognised as safe)로 분류되는 미생물로 대장균의 증식 억제에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[24]. *Candida boidinii*는 암모늄, 질산염, 아질산염 등 질소원을 모두 이용할 수 있는 것으로 보고되고 있어 질소 제거에 도움을 줄 것으로 예상되며 페놀화합물의 분해 효소도 생성하며 증식속도가 빠르고 효소생성능력도 높아 매우 유용한 미생물로 보고되고 있다[25].

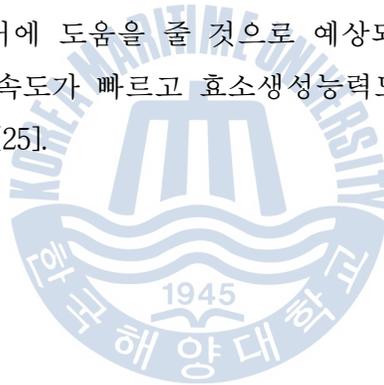


Table 2.2 Identification of microorganisms in BM agent by pyrosequencing[21]

Microorganism	Distribution(%)
Prevotellaceae_uc_s	22.2
Lactobacillus_uc	17.7
Lactobacillus parabuchneri	6.9
Lactobacillaceae_uc_s	6.5
Lactobacillus paracasei	5.8
Lactobacillus parafarraginis	4.3
Lactobacillus camelliae	3.0
Lactobacillus manihotivorans	2.4
Acetobacter lovaniensis	2.3
Lactobacillus collinoides	2.2
Lactobacillus vini	2.0
Lactobacillus hilgardii	1.8
Lactobacillus pentosus	1.7
Lactobacillus rapi	1.5
Lactobacillus pantheris	1.3
Ethanoligenens_uc_s	1.2
Veillonellaceae_uc_s	1.2
Lactobacillus similis	1.2
Lactobacillus harbinensis	1.0
Rhodospirillales_uc_s	0.5
Others	13.8
Total	100.0

Note) uc_s : Unclassified species

3 장 복합유용미생물을 우점화한 활성슬러지 공법

3.1 서론

2012년 기준 하루 약 25,000만톤의 하수와, 하루 5,200천톤의 폐수가 발생되고 있다[26]. 활성슬러지법은 유기성폐수를 정화하는 방법의 하나로 미생물의 대사기능을 이용해서 유기물질을 제거하는 수처리 방법이다. 이 방법은 미생물을 연속적으로 배양하여 생성된 미생물이 하·폐수 중의 부유물이나 용해성물질을 흡착, 산화, 동화시키는 원리로 수처리하는 기술로 활용되는 미생물은 주로 호기성세균, 원생동물, 유훈류, 균류 등이 있다. 활성슬러지 공법은 하폐수 처리공법 중 가장 경제적이고 효과적이기 때문에 우리나라 처리시설 대부분은 활성슬러지법 혹은 활성슬러지 변법을 활용하여 수처리를 하고 있는 실정이다. 하지만 기존 활성슬러지법은 생물학적 처리 방법으로 물리·화학적 처리방법과 비교하여 상대적으로 정상적인 상태 유지를 위해 관리가 필요하고 온도에 따라 반응 특성이 변하거나 악취유발 및 슬러지 발생량이 많은 특징을 가지고 있다. 대규모 처리장 같은 경우에는 지속적인 모니터링 시스템과 악취제어 시스템이 구축되어 있지만 중·소규모 마을하수나 폐수처리사업장과 같은 경우에는 시스템운영 시 유발되는 악취문제로 각종 민원 발생의 원인이 되기도 한다. 일반적으로 활성슬러지 공법에서 나타나는 미생물은 50여종 이라고 알려져 있지만 기질에 따라 미생물 성상이 상이하게 나타나기도 하고 BOD부하가 높거나 포기조 조건이 악화되면 미생물 종의 수가 감소하고 특정 한 종류의 미생물 개체수가 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 활성슬러지법에 복합유용미생물을 주입함으로 인해 활성슬러지 내의 미생물 종의 수와 밀도를 인위적으로

증가시켜 활성슬러지법의 효율성을 증대하고 수처리 후 배출되는 슬러지 내에도 복합유용미생물이 우점 되어 생물학적 재이용 시 도움을 줄 수 있도록 하고자 한다. 특히 본 연구에서 사용하고자 하는 복합유용 미생물 제제는 악취제거에 효과가 탁월하다고 보고되고 있으며, 피혁폐수와 같은 고농도 오염폐수도 전처리 없이 처리가 가능하다고 연구되기도 하였다[21, 27].

3.2 재료 및 방법

3.2.1 실험장치 및 운전방법

본 실험에서 사용한 복합미생물제제의 활성슬러지공법 적용성을 평가하기 위해 실험실규모 활성슬러지공법 장치를 Fig. 3.1과 같이 제작하여 실험에 사용하였다. 실험장치는 유량조정조, 1차폭기조, 1차침전조, 2차폭기조, 2차침전조, 반송라인으로 구성되어 있으며 복합유용미생물제제는 1차 2차 폭기조에 주입하였다. 반응기 전체 용적은 146 L로 하루 50 L 처리 시 폭기에 따른 여유 공간을 두어 제작하고 실험에 사용한 반응기의 미생물식종을 위해 부산 영도구 A 처리장의 농축슬러지를 사용하였다. 반응기 운전인자는 Table 3.1과 같이 유지하여 운전하였으며 유입원수는 정확한 처리효율을 산정하기 위해 인공폐수 제작하여 실험에 사용하였으며 그 재료 및 성상은 Table 3.2와 같다. 유입원수는 정량펌프를 통해 포기조로 공급하였으며 30일간의 반응기 안정기를 거친 후 30일 동안 실험을 진행하였다. 복합유용미생물은 원액의 30배 희석한 활성액을 사용하였으며 앞으로 본 활성액을 복합유용미생물이라 명명하겠다. 복합유용미생물은 최적 주입량 산정 실험을 통해 주입량을 결정하였으며 반응기의 온도는 실온으로 유지하였다. 포기 시 DO농도는 2 ~ 4 mg/L, pH는 6.7 ~ 8.5, HRT는 4 일 SRT는 20 일로 운전하였다. 운전 중 활성슬러지 공법에서 발생된 잉여슬러지는 퇴비화 실험의 재료로 사용하였다.

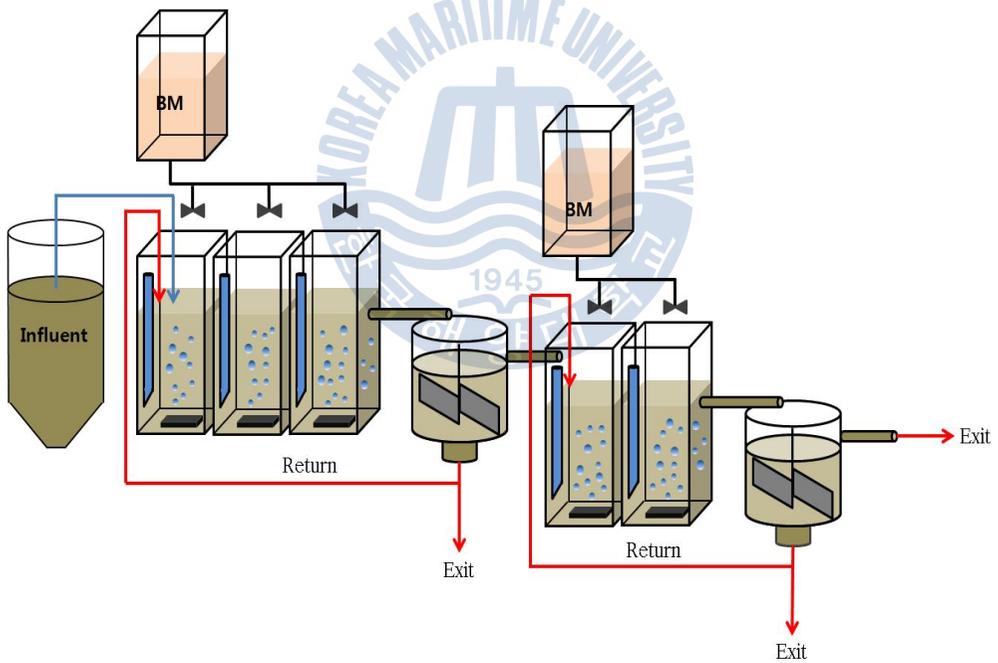


Fig. 3.1 Photograph and schematic representation of the bioreactor system in this study.

Table 3.1 Operating condition of a bioreactor system for this study

Parameter(unit)	Condition
pH	7.0 ~ 8.0
DO(mg/L)	0.2 ~ 4.0
ORP(mV)	-180 ~ 280
MLSS (mg/L)	4,000 ~ 5,500
F/M ratio (Kg BOD /kg MLSS·day)	0.051 ~ 0.068
Temperature(°C)	20 ~ 23
Returned Sludge(%)	30 ~ 35

3.2.2 실험대상 유입원수

본 연구를 위해 사용된 유입원수는 고농도의 폐수처리능력을 파악하기 위해 A시 D식품폐수처리장 유입수 성상과 유사하게 실험실에서 제조 하여 사용하였으며, 제조한 유입원수의 농도범위는 Table 3.2와 같다. 유입원수의 pH는 20% NaOH 용액을 사용하여 6.8 ~ 7.2을 유지하였다.

Table 3.2 Characteristics of the influent used in this study

Item	Chemical	Concentrations(mg/L)
COD	Glucose(C ₆ H ₁₂ O ₆)	2,500
N	NH ₄ Cl	80
P	KH ₂ PO ₄	25
	FeSO ₄	2.5
	MgSO ₄	50
Buffer & Mineral	CaCl ₂	40
	MnSO ₄	1.3
	NaHCO ₃	250

3.2.3 시험항목 및 측정방법

시험항목은 폐수 배출 수 기준으로 정하고 있는 pH, BOD, COD, SS와 T-N, T-P로 하였다. 측정방법은 Standard method와 수질오염공정시험법 등을 참조하여 Table 3.3과 같은 방법으로 분석하였다[28, 29]. EPS 물질분석을 위해 탄수화물과 단백질을 분석하였으며 탄수화물의 함량은 페놀황산법으로 분석하였다. 단백질의 함량은 원심분리 후 Bio-Rad Protein Assay Kit II로 측정하였다[30].

Table 3.3 Analytical parameters to monitor of bioreactor system for this study

Test item	Analytical method
pH	Standard method 4500 (YSI 63)
CODCr	Standard method 5220
SS	Standard method 2540
T-N	Standard method 4500 (Hitachi U3000)
T-P	ES 04362.0
DO	Standard method 4500 (YSI 58)
ORP	ASTM D1496-08 (Thermo Orion 720)
Carbohydrate	Phenol-sulfuric acid method
Protein	Bio-Rad Protein Assay Kit II

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 복합유용미생물의 최적주입량의 산정

복합미생물의 최적주입량 산정을 위해 반응기 주입농도를 달리하여 10일 동안 실험을 진행하였으며 그 결과를 Fig. 3.2에 나타내었다. 본 실험은 생물반응기가 충분히 안정된 상태라고 할 수는 없지만 복합유용미생물의 최적주입량을 산정하기 위한 기초자료로 활용할 수 있다고 판단하였다. 최적주입농도 도출을 위한 COD, T-N, T-P의 제거 효율을 비교해본 결과 COD의 경우 대조구는 약 40%의 처리효율을 보였으나 복합유용미생물 0.1%를 주입하였을 때 약 58%의 제거율이 나타났으며 주입량을 0.5%로 증가해도 비슷한 제거율이 나타났다. 하지만 주입량을 1%와 2%로 증가하였더니 제거율이 78%, 76%로 대폭 상승하는 결과 값이 나타났지만 1%와 2%의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. T-N의 경우 대조구 처리효율은 13%였으나 0.1% 주입하였을 때 21%, 0.5% 주입하였을 때 제거율이 32%로 복합유용미생물 주입량을 증가 했을 때 T-N의 제거율도 함께 증가되는 것으로 분석되었다. T-N는 주입량 1%일 때 가장 높은 43%로 나타났으며 COD와 마찬가지로 주입량 2%일 때와는 큰 차이가 없었다. 마지막으로 T-P의 경우 대조구의 제거율이 42%였으며 0.1% 주입 시 43%, 0.5% 주입 시 44%로 0.1%와 0.5%의 농도로 복합유용미생물을 주입하면 T-P의 제거율이 크게 증가되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 1%와 2%를 주입하였을 때 최대 56%의 제거효율이 나타나 T-P 제거를 위해 적어도 1%이상의 복합유용미생물을 주입할 필요가 있다. 주입량 실험을 통해 COD, T-N, T-P의 제거효율을 분석해본 결과 유기물과 질소는 복합유용미생물 주입량을 증가함에 따라 제거효율도 함께 증가하는 것으로 나타났으나 인의 경우 적어도 1%이상을 주입해야 효과를 볼 수 있었다. 결론적으로 COD와 T-N의 제거율이 주입량이 1%일 때 가장 효과가 높았으며 T-P는 주입량 2% 일 때 제거효율이 가장 높았지만 1%와 크게 차이가 나지 않기 때문에 본 연구에서는 복합미생물 주입량을 1%로 산정하였다.

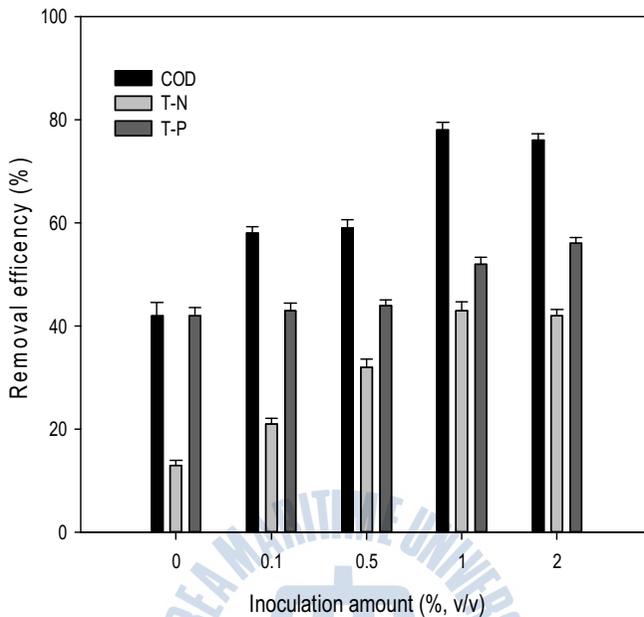


Fig 3.2 Removal efficiencies of COD, T-N and T-P depending upon BM inoculation amount.

3.3.2 슬러지 EPS 함량 변화 비교

본 실험에서 사용한 복합미생물제제의 주입에 의한 슬러지의 EPS의 함량 변화를 비교하기 위해 BM 주입 전후의 단백질과 탄수화물 성분 비교실험을 수행하였다. 유의 연구에서는 미생물 제제를 첨가한 슬러지와 첨가하지 않은 슬러지의 슬러지 내 단백질과 탄수화물 성분을 비교하는 실험을 수행하였으며, 미생물제제 첨가 시 단백질 성분은 41%, 탄수화물 성분은 45.7% 상승한 결과를 보고하였다[31]. 본 실험에서도 복합유용미생물 주입으로 슬러지 내 EPS 함량 변화를 관찰하기 위해 단백질과 탄수화물을 대상으로 비교실험을 진행하였다. 먼저 단백질의 EPS함량 비교실험 결과는 Table 3.4과 같다. 일반슬러지 내 단백질의 농도는 약 500 mg/L였으나 복합유용미생물이 우점된 BM 슬러지의 단백질 농도는 1,270 mg/L로 나타나 약 52%의 증

가율이 나타났다. 탄수화물은 일반슬러지의 농도가 770 mg/L인데 비해 BM 슬러지는 1,140 mg/L로 약 32%가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 복합유 용미생물이 슬러지 활성을 향상시켜 EPS의 분비가 증가된 결과로 판단된다.

Table 3.4 Comparison of protein contents between control sludge and BM sludge

Condition	mg/L	SS (mg/L)	EPS/SS (mg/g)
control sludge	498	822	607
BM added	1,028	812	1,266

Table 3.5 Comparison of carbohydrate contents between control sludge and BM sludge

Condition	mg/L	SS (mg/L)	EPS/SS (mg/g)
control sludge	778	822	946
BM added	1,142	812	1,406

3.3.4 활성슬러지공정의 MLSS 농도 변화

실험기간 동안 반응기의 MLSS 농도변화를 Fig 3.3에 나타내었다. 반응기 운전을 위해 초기 MLSS 농도를 약 4,000 mg/L로 맞추어 실험을 진행하였다. 반응기가 안정되기 전 초기 10일 동안 하루 처리용량을 30 L로 주입하고 그 이후부터 유입용량을 50L로 증가하여 운전을 지속하였다. 1차 포기조의 MLSS는 지속적으로 증가하여 최대 5,330 mg/L까지 상승하였으며 평균적으로 4,810 mg/L로 나타났다. 2차 포기조는 1차포기조에서 처리되지 않은 잔여 영양염류가 유입되기 때문에 상대적으로 MLSS 증가율이 적었으며 최대 4,580 mg/L, 평균 4,340 mg/L의 값을 보였다. 같은 미생물제제를 이용하여 75,000 m³/d 규모의 활성슬러지 시설에 적용한 연구결과를 보면 미생물 제제 적용 이후 포기조의 평균 MLSS는 평균 5,700 mg/L였으나 본 연구는 실험실에서 제조한 원수를 이용하여 운전하였기 때문에 상대적으로 MLSS 농도가 낮은 것으로 사료된다[32].

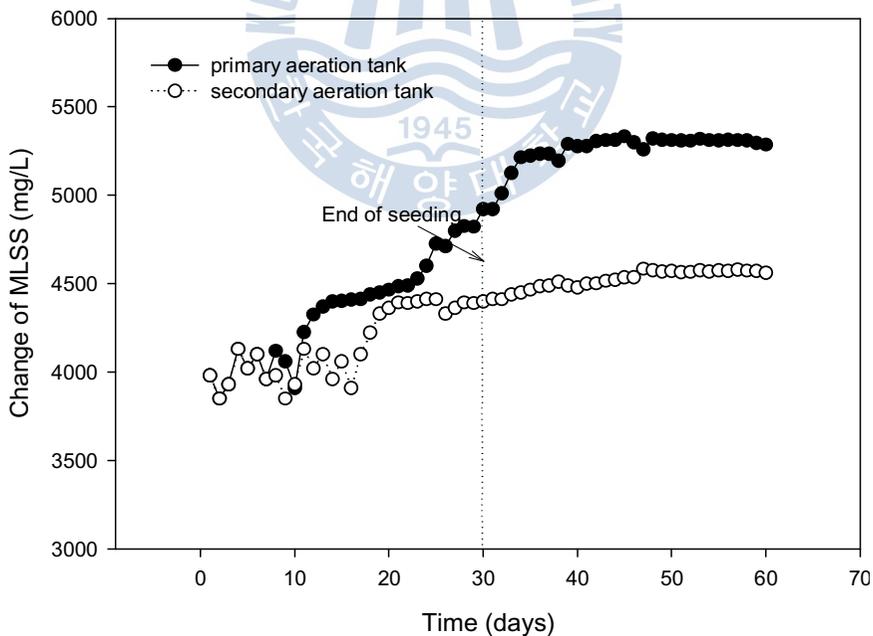


Fig. 3.3 Variations of MLSS in the bioreactor system inoculated with BM.

3.3.5 활성슬러지 공정의 처리효율 평가

실험실 규모 생물반응기가 안정화 된 시점부터 30일 동안 부유물질과 COD, T-N, T-P의 평균 제거효율을 Fig 3.4에 나타냈다. 부유물질의 유입 수 평균 농도는 140 ± 5 mg/L였으며 제조한 원수로 운전하였기 때문에 유입 농도의 변화가 적었다. 유출되는 부유물질의 농도는 평균 7.6 mg/L로 평균 94.5%의 처리효율이 나타났다. 이는 같은 미생물제제를 이용하여 75,000 m³/d 규모의 활성슬러지 시설에 적용한 부유 물질 제거율 97%보다는 효율이 낮지만 안정적으로 부유 물질이 제거되는 것을 확인하였다[32].

유입수의 화학적 산소요구량(COD) 농도는 $2,750 \pm 10$ mg/L였고 유출수는 18 ~ 22 mg/L로 제거효율이 91 ~ 93%로 나타났다. 유입수의 총질소(T-N) 농도는 78 ± 5 mg/L였고 유출수는 14.9 ~ 16.5 mg/L로 상기의 측정치를 살펴볼 때 본 실험공정의 총질소 제거율은 78 ~ 81%로 탈질이 약 80% 가까이 이루어지는 것으로 나타났다. 유출농도는 우리나라 하수도 방류수 수질기준 법적기준인 총질소 20 mg/L 이하를 만족하였다. 활성슬러지 공법의 질소제거율은 약 40%인데 비해 BM을 이용해서 표준 활성슬러지공법에서 총 질소가 제거되는 효율이 약 65% 까지 올라가 표준 활성슬러지 공법에서도 질소제거가 이루어 졌음을 확인한 타 연구결과와 유사함을 확인하였다[32].

총 인의 제거율의 경우 본 실험에 사용된 시료의 유입 총인(T-P) 농도가 28 ± 2 mg/L, 유출수의 총인 농도가 1.26 ~ 1.98 mg/L로 82 ~ 85%의 처리효율이 나타났다. 일반적으로 총 인의 경우 화학적 응집처리법을 이용하여 제어하는 경우가 대부분이나 본 실험에서는 생물학적 처리방법만으로 높은 효율이 나타났으며 이 값은 하수도 방류수수질기준 총인 2 mg/L 이하를 만족하였다. 총인의 제거율을 높이기 위해 별도의 시설을 확충하지 않아도 본 실험에서 사용한 복합유용미생물을 주입한다면 인 제거효율을 상승하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

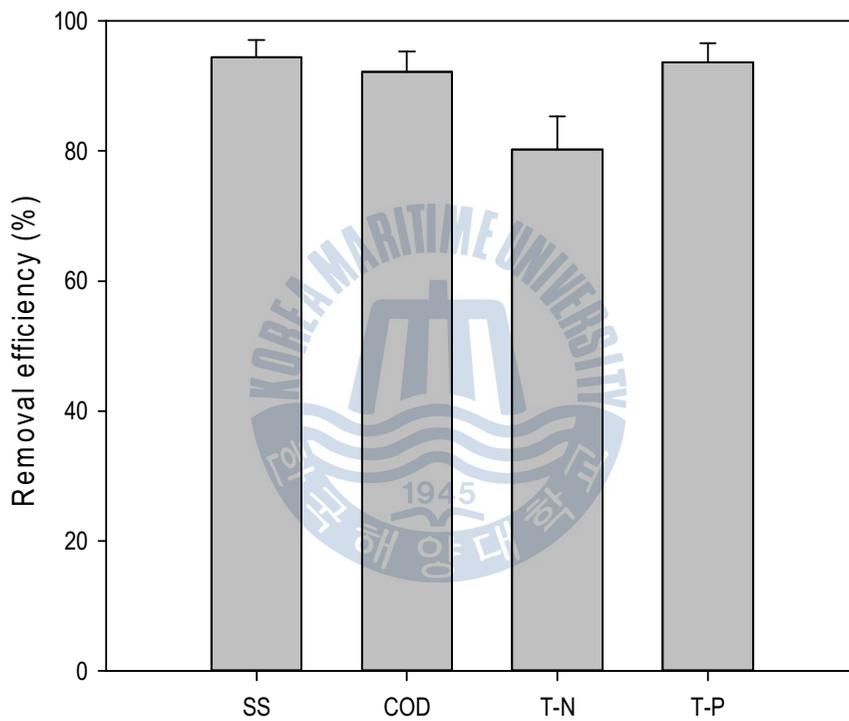


Fig. 3.4 Removal efficiencies for SS, COD, T-N and T-P in the bioreactor system inoculated with BM.

3.4 소결론

복합유용미생물을 이용한 Lab-scale 활성슬러지 처리공정에 관한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 복합미생물의 최적주입량 산정을 위해 반응기 주입농도를 달리하여 10일 동안 실험을 진행한 결과 COD와 T-N은 복합유용미생물 주입량을 증가함에 따라 제거효율도 함께 증가하는 것으로 나타났으나 T-P의 경우 적어도 1%이상을 주입해야 효과를 볼 수 있었다. COD와 T-N의 제거율이 주입량이 1%일 때 가장 효과가 높았으며 T-P는 주입량 2% 일 때 제거효율이 가장 높았지만 1%와 크게 차이가 나지 않기 때문에 본 연구에서는 복합미생물 주입량을 1%로 산정하였다.
2. 본 실험에서 사용한 복합미생물제제의 주입에 의한 슬러지의 EPS의 함량변화를 비교하기 위해 BM 주입 전후의 단백질과 탄수화물 성분 비교실험을 수행한 결과 복합유용미생물 주입으로 단백질이 약 52% 증가하고, 탄수화물이 약 32% 증가되는 것을 확인하였다.
3. 실험실 규모 생물반응기가 안정화 된 시점부터 30일 동안 부유물질과 COD, T-N, T-P의 평균 제거효율을 분석한 결과 화학적 산소요구량(COD)의 제거율은 91 ~ 93%, 총질소(T-N)의 제거율은 78 ~ 81%, 총인(T-P)의 제거율은 82 ~ 85%로 모두 하수도 방류수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났으며 복합유용미생물 주입으로 인해 처리효율이 일반 활성슬러지법보다 향상되는 것을 확인하였다.

제 4 장 복합유용미생물 우점슬러지를 이용한 퇴비화

4.1 서론

우리나라의 하폐수 처리시설은 활성슬러지법을 기초로 하고 있고 활성슬러지 공법에서는 유입유량의 약 1 ~ 2%의 하폐수 처리 부산물인 슬러지가 발생하는 것으로 알려져 있다. 하폐수 슬러지는 일반적으로 농축, 안정화, 탈수 등의 공정을 거쳐 폐기되게 된다. 과거 폐기되는 하폐수 슬러지는 주로 육상매립, 해양투기, 재이용, 소각 등의 방법으로 최종 처분되었는데 런던협약(72)과 런던의정서(96)에 따라 2012년에는 하수슬러지·가축분뇨, 2013년에는 음폐수·분뇨·분뇨 슬러지가 해양배출 금지된 이후 2014년 현재 폐수 및 폐수슬러지의 배출이 전면 금지된 실정이다. 정부에서는 자원순환형 폐기물 관리정책에 따라 폐기되는 슬러지를 하나의 유기성자원으로 보고 과거 단순 매립, 폐기 위주에서 폐자원을 순환하기 위해 노력하고 있다. 대표적인 슬러지의 재활용 방안은 소각, 열건조, 열분해, 용융, 고형화 및 퇴비화 등의 중간처리과정에서 생성되는 부산물을 이용하여 열회수, 경량골재, 복토재, 토양개량제 및 퇴비를 생산하는 방법 등이 있다[33]. 하폐수 슬러지의 주성분은 약 30%의 유기성분과 약 70%의 무기성분으로 이루어져 있으며, 슬러지 중 회분은 실리카 30 ~ 40%, 알루미늄 15 ~ 20%, 철 5 ~ 10%, 인산 7 ~ 20%, 칼슘 10% 정도로 구성되어 있어 자원으로 재이용할 가능성이 높다[34]. 유기성 폐기물 중 음식물쓰레기는 2012년 기준으로 하루 13,290톤이 발생하고, 생활폐기물 중 27.0%의 점유율을 나타내고 있다[26]. 이는 국민생활수준 향상 및 1 ~ 2 인 세대수의 증가에 따른 결과로 보이며 이러한 추세로 미루어, 향후 배출되는 음식물폐기물량 또한 증가할 것으로

예측된다. 국내 음식물 폐기물은 염분이 많고 수분함량이 많아 재이용 시 문제가 되기도 하지만 높은 질소원을 함유하고 있어 퇴비나 사료로 재이용 가능성이 높은 자원이다.

유기성 폐기물을 퇴비로 재활용 할 때 팽화제 재료로 톱밥을 사용하는데 국내 산림법의 강화로 국내 톱밥의 공급이 부족하고 수입 톱밥의 원자재 부족으로 인해 가격이 점차적으로 상승하고 있어 퇴비 제조 단가가 상승하는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 톱밥을 대체할 수 있는 재료로 최근 커피소비의 증가로 인해 폐기물로 발생하는 커피박을 선정하여 대체가능성을 검토하였다. 커피박은 현재 일반생활폐기물 또는 생활폐수, 음식물쓰레기로 버려져 메탄가스를 유발하고 수질을 오염시키고 있는 유기성폐자원이다[9].

본 연구에서는 복합유용미생물이 우점 되어 있는 슬러지와 슬러지에 부족한 질소원을 보충하기 위해 질소원이 풍부한 음식물쓰레기를 혼합하여 퇴비화를 진행하고 커피박의 팽화제 가능성 연구를 통해 폐기물 재 자원화는 물론 원료의 품질상승, 슬러지 내 풍부한 미생물종과 높은 밀도로 퇴비화 과정의 효율성을 높이면서 퇴비화시설의 문제점인 악취물질 발생은 적은 환경을 조성하기 위한 연구를 진행하였다.

4.2 재료 및 방법

4.2.1 퇴비화 장치의 운전조건

퇴비화에 영향을 미치는 요소는 퇴비원료의 성상과 운전조건을 들 수 있다. 호기성 조건하에서 퇴비화가 이루어지기 위해서는 퇴비원료의 수분함량과 C/N비가 적정범위내의 값을 가져야 하며, 적정범위보다 높거나 낮은 수분함량을 가진 퇴비원료는 팽화제를 이용하여 수분량을 조절하고, 과도한 탄소분이 있을 경우는 질소분을 첨가하여 조절한 후 퇴비화 시켜야 한다[15]. 퇴비화의 진행속도는 산소공급을 위한 공기의 주입량과 교반 횟수 등의 운전조건에 따라 변화되며, 운전조건은 시간경과에 따른 온도, 수분함량 및 pH 등의 변화에 따라 유동적으로 변경된다. 본 연구에서 사용한 복합유용미생물제제는 배양온도가 고온이므로 복합유용미생물 우점 슬러지 내 미생물이 퇴비 초기운전 온도가 고온일 때 퇴비의 효과가 더 높을 수도 있다는 가정 하에 초기 온도를 상온과 고온으로 설정하여 운전하였으며 운전조건은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Operating conditions for aerobic composting reactor

Item	Operating Conditions
Operating period	28 day
Air volume(% , v/v)	15 ~ 18%
Agitation	Twice a day
Temperature(°C)	high 55
	low 25
Moisture content(%)	52 ~ 56

4.2.2 실험장치

실험 장치는 유효용량 5 L의 호기성 퇴비화 반응기를 Fig. 4.1과 같이 제작하였으며, 아래쪽에 공기주입장치를 장착시켜 공기량을 15 ~ 18%로 유지시켜 운전하였다. 본 실험에서 사용한 복합유용미생물제제의 활성온도를 도출하기 위해 초기 온도 조건을 저온과 고온으로 나누어 실험을 진행하였으며, 저온조건 실험에서는 상온에서 고온조건 실험에서는 온도조절장치를 이용하여 55℃로 유지되도록 설정하였다.

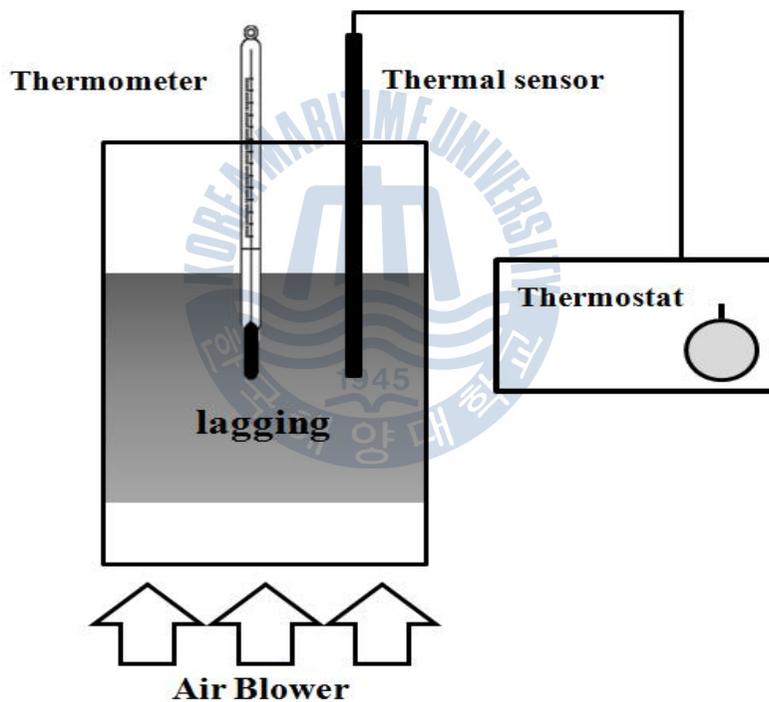


Fig. 4.1 Schematic diagram of the aerobic composting reactor used in the study.

4.2.3 실험재료

본 실험에 사용된 퇴비화 원료는 3.1장 복합유용미생물 우점 활성슬러지 실험실규모 장치에서 생성된 슬러지를 사용하였으며 앞으로 복합유용미생물 우점 슬러지를 ‘BM 슬러지’로 명명한다. 대조군으로는 부산 영도지역 A하수처리장의 탈수슬러지를 사용하였으며 앞으로 대조군을 ‘슬러지’로 명명한다. 퇴비화의 주요 인자인 C/N비를 맞추기 위해 혼합한 음식물쓰레기는 한국해양대학교 구내식당에서 직접 채취하였다. 음식물의 높은 염분을 제거하기 위해 2회 세척 하였으며, 수분이 많기 때문에 체로 여과하여 수분을 상당량 제거하고 음식물쓰레기의 혐기성 분해 막고 실제 배출시와 같은 성장 조건에서 실험하기 위해 즉시 실험을 진행하였다. 음식폐기물 내 분해가 오래 걸리거나 분해되기 어려운 동물의 뼈와 조개류 등은 손으로 직접 분별 제거 하였고 성상이 큰 시료는 분쇄기로 분쇄하였다. 실험에 사용된 톱밥은 시중에 판매하는 재료를 구입하여 사용하였으며 커피박은 한국해양대학교 내 G 카페에서 에스프레소 추출이 끝나고 폐기한 재료를 사용하였다. 실험에 사용한 재료의 성상은 Table 4.2와 같다.

Table 4.2 Chemical properties of raw materials for composting

item materials	Moisture content(%)	T-C(%)	VS(%)	OM(%)	Salinity(‰)
BM Sludge	78.0	20.6	16.2	78.2	0.1
Sludge	72.1	89.5	16.9	60.7	0.4
Garbage	50.8	49.2	48.3	88.2	0.4
Sawdust	10.5	89.5	80.4	89.8	0.0
Coffee	42.1	57.9	53.7	92.7	0.2

복합미생물제제를 접종한 슬러지를 이용한 퇴비화와 일반슬러지의 퇴비화의 성능 비교평가를 위해 혼합시료를 제작하여 사용하였으며 팽화제로 주로 사용하는 톱밥과 커피부산물을 사용하여 커피부산물의 팽화제가능성을 도출하고자 하였다.

슬러지와 음식물폐기물의 혼합비는 1 : 2로 고정하였으며 총 8개의 시료를 제작하였다. 지금부터 일반슬러지 저온 실험은 SSL, 일반슬러지 고온실험은 SSH, 복합유용미생물 저온실험은 BSL, 복합유용미생물 고온실험은 BSH로 명명하도록 하겠다. 커피부산물을 수분조절제로 사용한 실험의 시료명은 지금부터 일반슬러지 저온 실험은 SCL, 일반슬러지 고온실험은 SCH, 복합유용미생물 저온실험은 BCL, 복합유용미생물 고온실험은 BCH로 명명하도록 하겠다.

4.2.4 시험항목 및 측정방법

퇴비화 과정 중 수분, pH, EC, 온도, C/N비, 염도를 측정하였으며 최종 퇴비에 대한 무기성분과 중금속, 커피를 팽화제로 사용한 경우 카페인 분석을 실시하였으며 그 방법은 Table 4.3과 같다[35, 36]. 생산된 퇴비는 유해

물질 함량 및 비료성분 파악을 위해 비료공정규격에서 규정하고 있는 중금속을 비롯한 유해물질 함량과 부숙도, 악취 등을 측정하였다[37]. 퇴비화 기간 중 발생하는 NH_3 , H_2S , CH_3SH GAS의 농도는 가스검지관(GASTEC)을 이용하여 측정하였다.



Table 4.3 Analytical methods of compost quality

Test item	Analytical method
pH	Standard method 4500 (YSI 63)
EC	Standard method 4500 (YSI 63)
Moisture content	ES 06303
Organic matter	ES 06301
T-N	Standard method of RDA (2013-29)
Heavy metal	ES 07400
Salinity	ES 04356
Composting level	Standard method of RDA (2013-29)
Inorganic constituents	Standard method of RDA (2013-29)
Odorous compounds (NH ₃ H ₂ S, CH ₃ SH)	GASTEC
Caffein	Standard method of Ministry of Food and Drug safety (2014-09)

1) pH EC

각각의 습 시료를 건 시료 기준으로 20 g이 되도록 취한 후 1 : 5 비율이 되도록 적량의 증류수를 넣어 30분간 교반하였다. pH meter를 이용하여 pH를 측정하였고 EC는 여과한 후 EC meter를 이용하여 측정하였다.

2) 함수율

함수율은 폐기물공정시험법에 준하여 측정하였으며, 증발접시를 건조기에서 105 ~ 110°C에서 1시간 건조시킨 다음 황산데시케이터에 넣어 방냉하고, 항량이 되게 한 다음 증발접시의 무게(W_1)를 정밀히 달고, 시료 약 20 g 정도를 취하여 증발접시에 넣고 함께 무게(W_2)를 정밀히 달다. 다음에 시료를 건조기에서 105 ~ 110°C, 4시간 건조한 후 황산데시케이터에 넣어 방냉하고, 항량이 되게 한 다음 증발접시의 무게(W_3)를 정밀히 측정한 후 함수율 W 는 식(1)과 같이 계산한다.

$$W(\%) = [(W_2 - W_3) / (W_2 - W_1)] \times 100 \quad (1)$$

3) 염도

시료의 염도측정을 위하여 폐기물 공정시험법에 따라 시료 1 g당 2.5 ml의 증류수를 이용하여 1시간동안 용출한 뒤 염도계를 이용하여 염도를 측정하였다.

4) 무기성분

시료 5 g을 100 ml 삼각플라스크에 취하여 1N-ammonium acetate 용액을 50 ml가 되게 한 다음 1시간 진탕 침출시킨 후 No.2 여과지로 여과한 여액을 atomic absorption spectrophotometer로 분석하였다.

5) 중금속 용출실험

본 실험은 폐기물관리법에 명시되어 있는 폐기물공정시험법에 따라 KLT(Korea Leaching Test)용출시험을 시행하였다[36]. 연소실험이 마무리된 공시체를 입경 5 mm이하가 되도록 분쇄한 후 체의 입경이 5 mm인 체로 체 거름 한다. 준비된 시료를 증류수에 염산을 가하여 pH 5.8 ~ 6.3 으로 한 용액으로 시료 : 용액을 1 : 10(W : V)의 비율로 제조한 후 20℃, 200 rpm, 진폭 4 ~ 5 cm정도인 진탕기를 사용하여 6 시간 동안 연속 교반 후, 고액분리를 위하여 원심분리기에 넣어 3000 rpm으로 20 분간 원심분리 시켰다. 고액분리 후 상등액을 채취하여 0.45 um PVDF로 여과한다. 여과한 여과액을 ICP를 이용하여 Pb, Cu, Cd, As, Ni, Hg의 농도를 측정한다.



4.3 결과 및 고찰

복합미생물접종 슬러지를 이용한 호기성 퇴비화의 특성을 확인하기 위해 Table 4.4와 같이 혼합시료를 제작하여 실험에 사용하였다. 28일 동안 퇴비화 실험을 진행하였으며 팽화제로 톱밥과 커피박을 이용하여 퇴비화에 가장 적합한 수분 양 52 ~ 55% 범위로 맞춰 재료를 혼합하였다. 온도에 따른 퇴비화 반응 변화특성을 확인하기 위해 초기조건을 상온(25℃)과, 고온(55℃)으로 나뉘어 퇴비화 반응실험을 진행한 결과를 분석 항목별로 나타내었다. 혼합 시료의 pH는 5.5 ~ 5.8로 복합유용미생물 슬러지에 커피박을 팽화제로 사용한 경우 가장 높았다. 염도의 경우 음식물폐기물을 2회 세척하여 사용하였기 때문에 음식물 내 염분의 영향을 거의 받지 않았기 때문에 0.6 ~ 1.1%로 나타났으며 커피박을 사용한 경우 염도가 다소 높은 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4.4 Chemical properties of mixtures of composting materials

Item	Moisture content(%)	pH	Salinity(%)	C/N ratio	Temp (°C)	Operating period (day)
SSL	53	5.6	0.9	42.5	55	28
SSH	52	5.6	0.9	42.5	24	28
BSL	53	5.5	0.6	39.5	55	28
BSH	55	5.5	0.6	39.5	24	28
SCL	52	5.5	1.1	40.5	24	28
SCH	53	5.5	1.1	40.5	55	28
BCH	53	5.6	0.8	43.1	55	28
BCL	54	5.8	0.8	43.1	27	28

4.3.1 온도 변화

퇴비화 과정 중 온도가 높고 낮음에 따라 미생물의 다양성과 활동에 현저한 차이가 있는데, 고온성 미생물을 주입한 경우를 제외하면 퇴비화 과정 중 60℃ 이상 온도가 상승하지 않도록 조절하는 것이 퇴비화의 효율성을 높일 수 있다고 보고되고 있다[38, 39]. 본 연구에서는 복합미생물제제 우점 슬러지와 일반슬러지 혼합 시료를 고온조건, 저온조건으로 나누어 실험을 하였으며, 고온과 저온 모두 보온재를 통해 외부 온도에 의한 온도변화가 발생하지 않도록 하였다. 팽화제로 톱밥과 커피를 각각 사용하여 실험을 하였다. 팽화제를 톱밥을 사용한 경우와 커피를 사용한 경우 각각의 온도변화를 Fig. 4.2에 나타냈다. 고온조건에서 실험한 SSH, BSH, SCH, BCH는 초기 온도 조건인 55℃에서 5 ~ 15℃의 온도 상승이 나타났으며 커피박을 사용한 경우 톱밥보다 온도상승이 큰 것으로 나타났다. 퇴비화의 온도상승은 혼합물 내 유기물분해력을 간접적으로 나타내는 척도로 고온에서는 유기물 분해가 크게 일어나지 못한 것으로 사료된다. 이는 복합유용미생물 내 고온성 미생물의 활성도가 높아지기 전 적응기 없이 바로 높은 온도에서 퇴비화를 진행하였기 때문이라 판단되며 고온 조건에서 실험하기 위해서는 점차적으로 온도를 상승시켜 고온성 미생물의 활성도를 높인 후 실험할 필요가 있다고 판단된다. 반대로 저온조건에서 실험한 SSL, BSL, SCL, BCL의 경우 초기 상온 조건에서 약 25 ~ 30정도 온도 상승이 있었고 1차 2차로 나누어 두 차례의 온도상승이 일어났으며 일반슬러지보다 커피박을 사용한 경우 온도 상승률이 더 높았다. 또한 팽화제로 톱밥을 사용한 경우 9일차에 1차 최고온도를 기록하였으나 커피박을 사용한 경우 이틀정도 빠른 7일차에 최고 온도를 기록하였으며 2차 온도상승시점도 마찬가지로 커피박을 사용한 경우 더 빠른 것으로 분석되었다. 온도상승이 2차에 걸쳐 진행된 이유로는 퇴비화 재료 내 혼합물의 분해시간의 차이로 인해 발생된 것으로 추측되며 커피박을 사용한 경우 톱밥을 팽화제로 사용한 경우보다 유기물질 분해가 더 빠르게 이루어지고 퇴비기간도 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

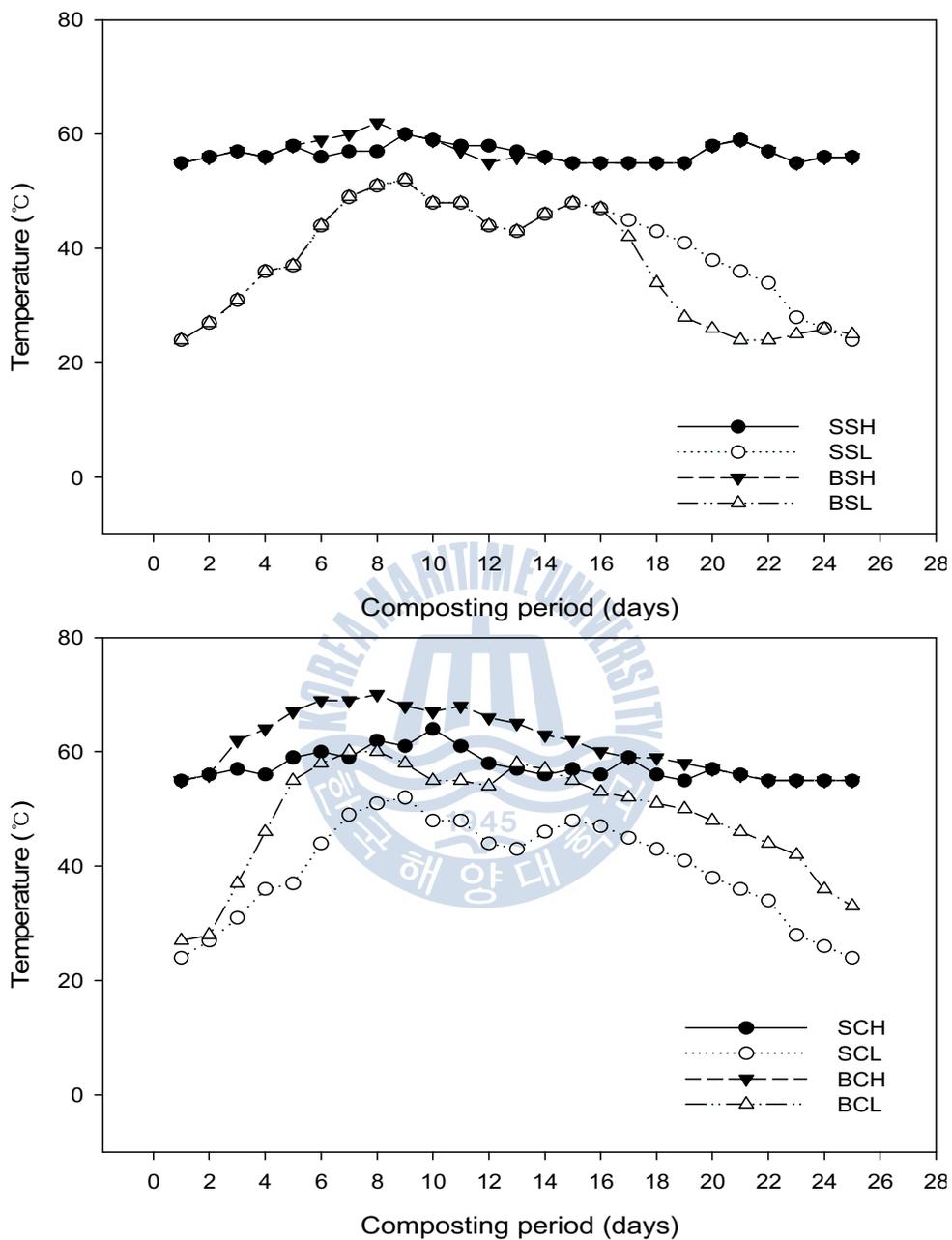


Fig. 4.2 Variation of temperature in the composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds

4.3.2 수분 변화

퇴비화의 과정에서 미생물은 체외효소를 이용하여 영양물질 및 유기물질을 가수분해하여 세포 내로 전달하므로 수분함량은 퇴비화과정에서 중요한 영향인자이다[41]. 수분함량이 전체 퇴비질량의 30% 이하일 경우에는 생물반응이 저하되며 20%이하일 경우에는 반응이 불가능해진다고 보고하였다. 또한 수분함량이 너무 높은 경우에도 산소가 제대로 전달되지 않아 혐기화가 발생하게 되고 반응이 저해되게 된다. 퇴비의 초기혼합 함수율로 55 ~ 65%가 적합하다[42].

본 연구 퇴비 수분 변화는 Fig. 4.3과 같다. 초기 수분함량은 팽화제 톱밥과 커피박을 이용하여 고온, 저온 모두 52 ~ 55% 적정수준에 맞게 조절하여 실험을 진행하였다. 고온으로 실험을 진행한 SSH, BSH, SCH, BCH의 경우 퇴비단의 높은 온도와 송풍으로 빠른 수분증발이 이루어져 급격한 수분감소가 발생하였으며, 초기 퇴비화를 위한 적정 수분을 맞추주기 위해 인위적으로 증류수를 넣어 수분조절을 도모하였다. 그 때문에 고온조건 실험의 수분변화곡선 증가와 감소폭이 매우 큰 것으로 사료된다. 인위적인 수분을 주입했음에도 불구하고 고온 조건의 수분조절이 제대로 이루어지지 않아 안정적인 실험을 진행하지는 못했다고 볼 수 있지만 최종 수분 41 ~ 43%로 실험 종료 하여 퇴비기준 수분함량 50%이하는 만족할 수 있었다. 저온조건의 SSL, BSL, SCL, BCL은 자연스러운 수분 증발이 이루어졌으며, 최종 수분 41%로 실험 종결하였다. 실험결과 팽화제의 차이로 인한 수분변화의 특이점은 크게 없는 것으로 사료되며 고온조건으로 호기성퇴비화 실험하기 위해서는 퇴비화에 필수적인 수분을 유지할 수 있는 습윤공기주입과 같은 고려가 필요하다고 판단된다.

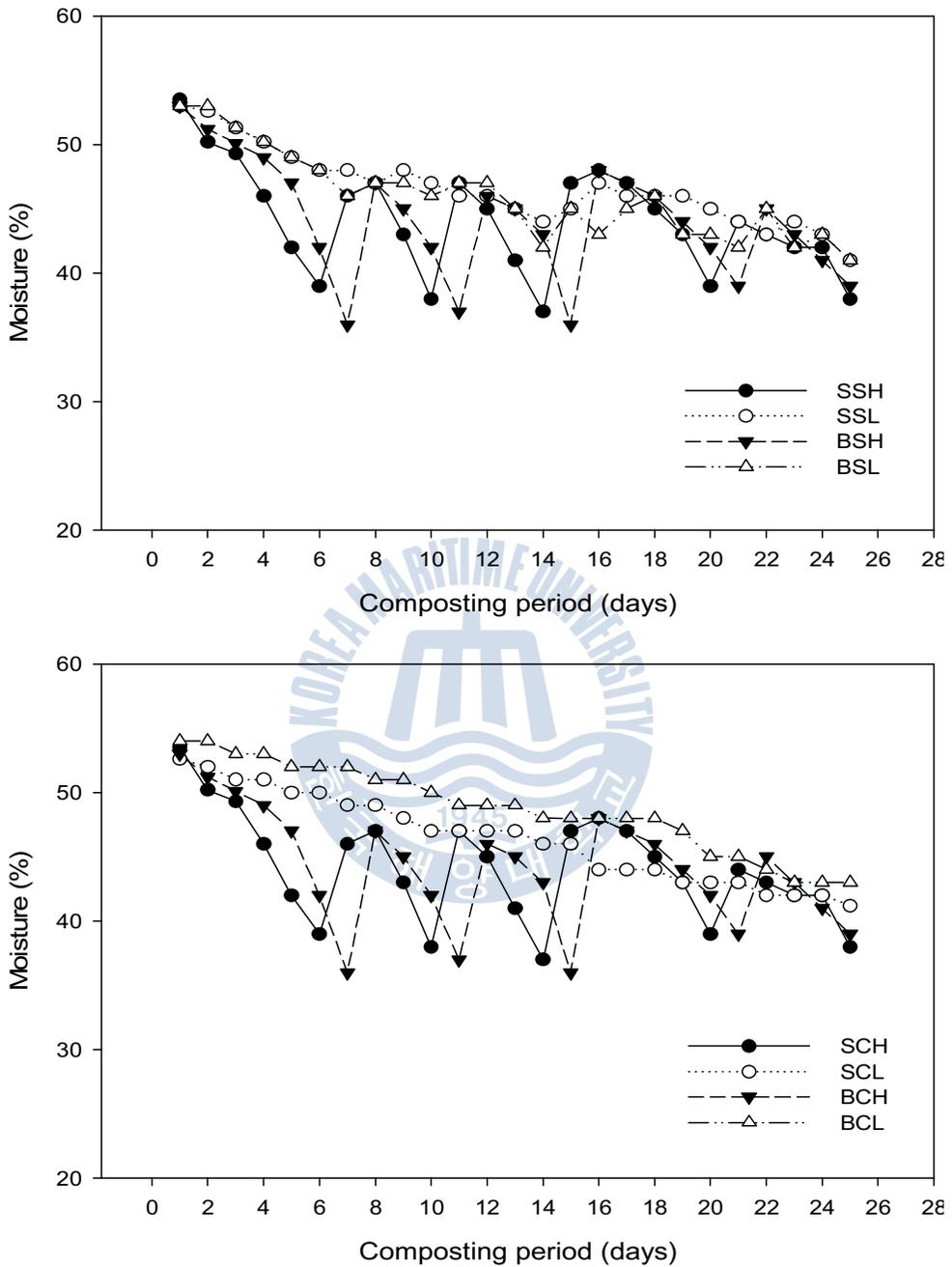


Fig. 4.3 Variation of moisture content in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds

4.3.3 pH

본 연구에서 사용한 복합 재료들을 혼합하였을 때 초기 pH는 5.49 ~ 5.63 범위로 미생물 성장이 활발한 pH 범위인 5.5 ~ 8.0범위를 만족시켰다. 팽화제를 톱밥을 사용한 경우 대조구와 복합유용미생물 우점 슬러지 모두 퇴비화 과정 중 pH가 상승하였으며, 숙성이 진행되는 과정에서 pH가 하강하여 최종 퇴비의 pH는 7.3 ~ 7.5범위로 관찰되었다. 숙성 과정 중 pH의 변동은 퇴비 성상에 따라 상이하지만 주로 10일 전후로 pH가 상승하였다. 이는 다른 호기성 퇴비화 실험의 pH 변화결과와 유사하게 나타났다[15]. 팽화제를 커피박을 사용한 경우도 마찬가지로 퇴비화 과정 중 pH가 상승하였으며, 숙성이 진행되는 과정에서 pH가 하강하여 최종 퇴비의 pH는 7.3 ~ 7.64범위로 톱밥과 유사한 변화가 나타났다. 복합유용미생물 우점 슬러지가 숙성 과정 중 pH가 가장 높았으며 특히 BCL의 경우 8.5정도까지 상승하였다. 이는 유기물의 분해가 활발히 진행되면서 암모니아의 발생량이 높아지면서 퇴비의 pH상승을 가져온 것으로 사료된다. 팽화제로 톱밥을 사용한 경우 퇴비화 16일째부터 pH가 안정기에 접어든 것으로 보이니 커피를 팽화제로 사용한 경우 거의 20일째 되어야 안정기에 접어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 톱밥보다 커피박의 분해기간이 긴 것으로 판단되며 복합유용미생물 슬러지 퇴비가 일반슬러지 보다 pH변동이 큰 것으로 나타났다. 이는 일반 슬러지 보다 복합유용미생물 슬러지의 유기물 분해 능력이 크기 때문이라 추측된다.

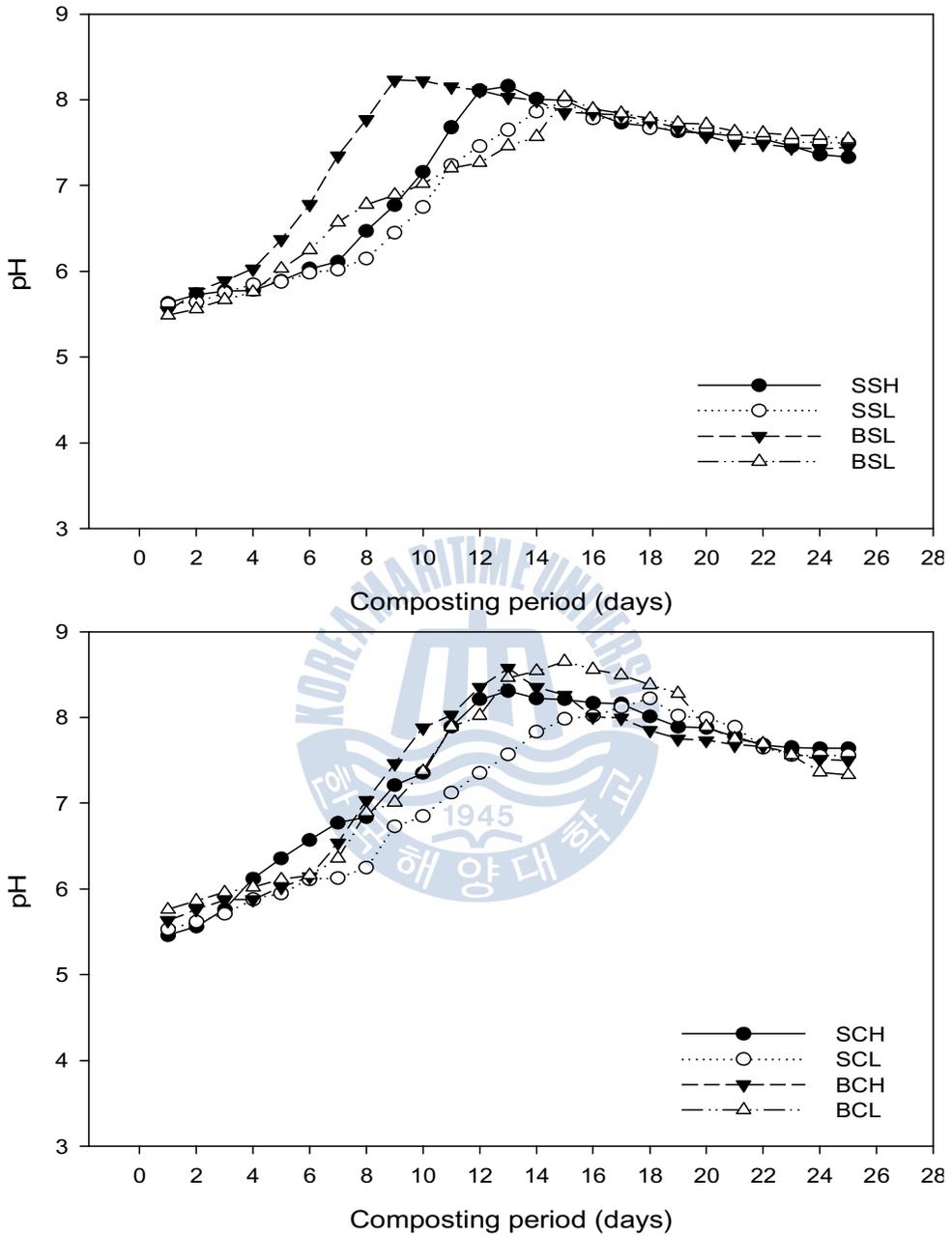


Fig. 4.4 Variation of pH in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds

4.3.4 염분 농도(%)

염분은 최종 퇴비의 감량률에도 영향을 미치며, 숙성이 완료된 퇴비를 토양에 시비하였을 때 염분농도가 작물의 성장에도 영향을 미치는 인자이다. 식물성장에 미치는 염분의 영향은 2% 미만에서는 미미하며, 농촌진흥청의 퇴비품질기준에도 염분농도를 2% 이하로 규정하고 있다[5, 6]. 본 연구에서 제작한 퇴비도 염분농도가 높은 폐기물인 음식물쓰레기가 포함되어 있어 퇴비 제작 전 음식물쓰레기의 2회 세척으로 염분을 제거하였으며, 실험 중 염분농도의 모니터링을 지속적으로 진행되어 왔다. 팽화제를 톱밥을 사용한 경우 평균 염분농도가 0.9%로 평균 0.6%인 복합유용미생물 우점 슬러지보다 높은 것으로 분석되었다. 퇴비화 과정의 염분 농도 변화를 Fig. 4.5에 나타내었다. 퇴비화 중 SSH의 염분농도는 1.3%까지 증가하였다가 숙성이 진행됨에 따라 줄어들어 최종 염분농도 1.1%였으며, BSL는 퇴비화 중 0.9%까지 증가하였다가 염분 농도 0.7%로 숙성이 종료되었다. SSL의 염분농도는 1.4%까지 증가하였다가 숙성이 진행됨에 따라 줄어들어 최종 염분농도 0.9%였으며, BSL는 퇴비화 중 1.2%까지 증가하였다가 염분 농도 0.7%로 숙성이 종료되었다. 대조구, 복합유용미생물 우점 슬러지 모두 염분농도의 변화가 크게 없었다. 팽화제를 커피박을 사용한 경우 퇴비 초기 염분은 톱밥을 사용한 경우보다 높은 0.8 ~ 1.1%였으며, 이는 커피 자체의 염분농도가 톱밥보다 높은 영향이 미친 것으로 판단된다. 퇴비화 중 SCH의 염분농도는 초기 1.1%에서 1.5%까지 증가하였다가 숙성이 진행됨에 따라 줄어들어 최종 염분농도 1.2%였으며, BCH는 초기 0.8%에서 퇴비화 중 1.2%까지 증가하였다가 염분 농도 0.9%로 숙성이 종료되었다. SCL의 염분농도는 1.5%까지 증가하였다가 숙성이 진행됨에 따라 줄어들어 최종 염분농도 1.2%였으며, BCL는 퇴비화 중 1.3%까지 증가하였다가 염분 농도 0.6%로 숙성이 종료되었다. 대부분의 퇴비가 초기에 염분 농도가 증가하다가 숙성이 진행됨에 따라 감소하는 추세로 나타났다. 모든 실험의 염분 농도는 농촌진흥청 기준인 2%보다 낮은 것으로 나타나 염분으로 인한 작물의 성장에도 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

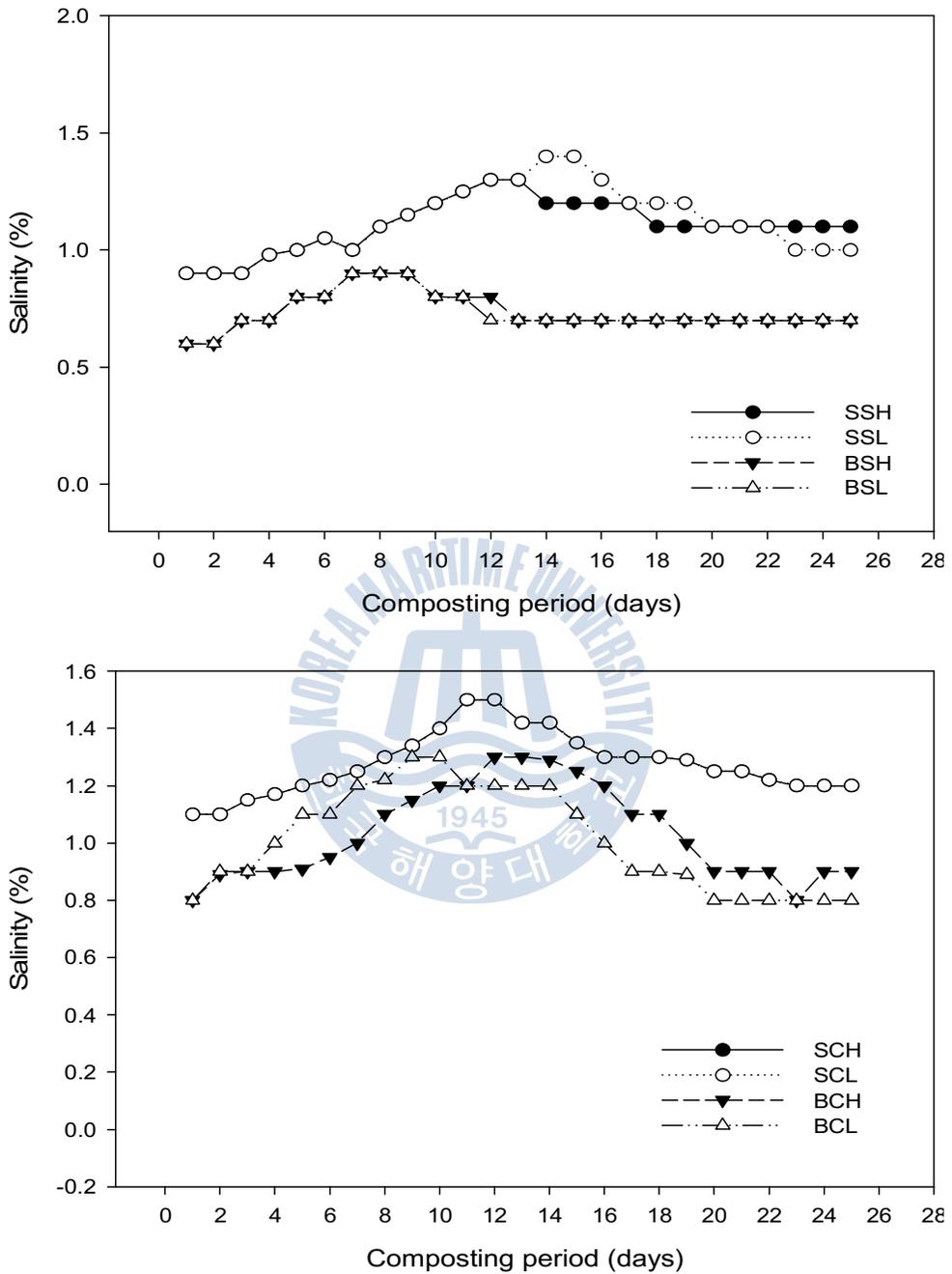


Fig. 4.5 Variation of salinity in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds

4.3.5 C/N의 변화

C/N비는 미생물 단위 개체 당 먹이 공급 척도로, 퇴비의 반응속도와 완속 퇴비의 품질에 영향을 미치는 인자이다. C/N비가 높을 경우 질소 결핍 현상으로 퇴비반응이 길어지고 온도상승이 잘되지 않으며, C/N비가 낮을 경우 악취 발생 가능성이 높고 퇴비화 반응이 느려질 수 있다. 뿐만 아니라 C/N비가 낮은 퇴비를 토양에 시비할 경우 토양 내 질소 유출 현상을 야기할 수 있다. 따라서 퇴비화 완료를 판단하는데 있어 최초의 C/N비로 나눈 값(Final ratio/Initial ratio)이 0.75이하가 되어야 숙성되었다고 판단하기도 한다. 팽화제를 톱밥과 커피를 사용한 경우 C/N비의 변화를 Fig. 4.6에 나타냈다. 고온조건에서 실험한 SSH, BSH, SCH, BCH의 C/N비의 감소율은 저온조건에서 실험한 SSL, BSL, SCL, BCL의 경우보다 매우 적었으며 이는 퇴비화로 인해 유기물 분해가 제대로 이루어지지 않았다고 판단할 수 있다. 앞서 설명한 온도 변화와 마찬가지로 고온조건에서 활발히 유기물분해가 이루어지지 않았기 때문에 C/N비의 변화도 크지 않은 것으로 추측된다. 저온조건의 경우에는 퇴비화가 진행됨에 따라 안정적으로 C/N비가 감소하는 곡선이 나타났으며 커피박을 사용한 경우 C/N비가 20이하로 나타났다. 퇴비화 숙성정도를 판단하기 위해 최초의 C/N비로 나눈 값(Final ratio/Initial ratio)이 0.75이하일 때 숙성도를 판단하는 C/N비 지표를 이용하였다. 실험군 별 C/N비 지표는 SSH, SSL, BSH, BSL 가 0.87, 0.84, 0.65, 0.56로 분석되었다. SSH와 SSL은 C/N비 지표가 0.75이상이기 때문에 미숙퇴비로 판단할 수 있으며, 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비는 고온, 저온 모두 0.75 이하였기 때문에 숙성퇴비로 볼 수 있다. 팽화제를 커피박을 사용한 SCH, SCL, BSH, BSL은 0.81, 0.54, 0.70, 0.38로 분석되었다. SCH의 C/N비 지표는 0.75이상이기 때문에 미숙 퇴비로 볼 수 있으며, 나머지 퇴비 SCL과 BCH, BCL은 모두 0.75이하였기 때문에 C/N비 지표로 판단했을 때 숙성퇴비로 판단된다. 종합적으로 고온으로 실험한 퇴비에서는 C/N비 감소율이 보편적으로 적었으며 C/N비 감소율로 보아 숙성이 저온조건보다 유기물 분해가 원활히 이루어지지 않는 것으로 사료된다.

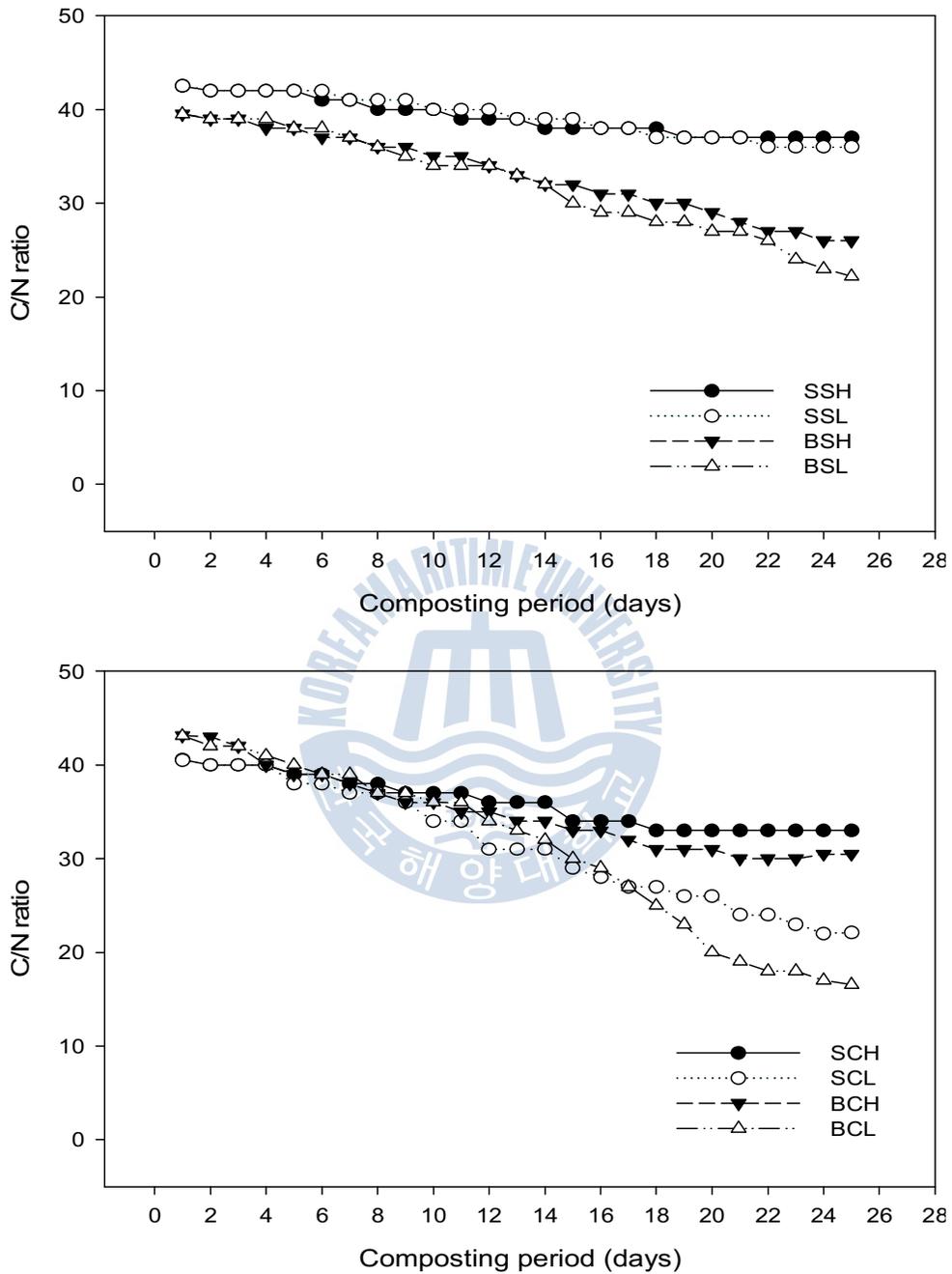


Fig. 4.6 Variation of C/N in composting period with different composting methods. bulking agent : top, sawdust ; bottom, coffee grounds

4.3.6 악취분석

복합유용미생물 우점 슬러지로 제작한 퇴비와 일반슬러지 및 팽화제의 종류에 따른 악취물질의 농도를 비교하기 위해 퇴비화 초기 발생하는 황화수소(H_2S)와 머캅탄(CH_3SH)농도를 8일 동안 측정하였으며, 측정한 결과를 Fig. 4.7에 나타냈다. 팽화제로 톱밥을 사용한 경우 일반슬러지와 복합유용미생물 우점슬러지 모두 퇴비화 초기에는 황화수소의 발생이 없었으나, 퇴비화 5일째에 일반슬러지를 이용한 퇴비에서 악취와 함께 황화수소의 농도가 가장 높게 나타났으며, 악취는 저온조건 고온조건 비슷한 농도로 나타났다. SSH, SSL은 8일째까지 황화수소가 관찰 되다가 9일째부터 검출되지 않았다. 복합미생물 우점 슬러지로 퇴비화한 BSH, BSL은 초기 일반슬러지와 같이 4일정도 농도가 증가하다가 5일째부터 감소되기 시작하였으며 7일째부터 아무런 취기가 느껴지지 않았다. 머캅탄도 마찬가지로 황화수소와 비슷한 검출경향이 나타났으며, 일반슬러지의 경우 최고 70 mg/L까지 나타났다가 퇴비화 7일째부터 검출되지 않았다. 팽화제로 커피를 사용한 경우 퇴비화 초기에는 황화수소의 발생이 없었으나, 퇴비화 5일째에 일반슬러지를 이용한 퇴비에서 악취와 함께 황화수소의 농도가 가장 높게 나타났으며, 악취는 저온조건 고온조건이 비슷한 농도로 나타났지만 복합미생물 우점슬러지 퇴비에서는 퇴비화 진행되는 동안 취기가 느껴지지 않았으며 검지관에도 검출되지 않았다. 머캅탄도 마찬가지로 Fig. 4.8과 같이 황화수소와 비슷한 검출경향이 나타났으며, 일반슬러지의 경우 최고 68 mg/L까지 분석되어 톱밥을 팽화제로 사용한 경우보다 머캅탄이 적게 검출되었고 퇴비화 7일째부터 검출되지 않았다. BCH, BCL 퇴비는 모두 머캅탄이 검출되지 않았다. 복합유용미생물 우점 슬러지를 사용한 퇴비군에서 일반 슬러지 퇴비보다 악취발생정도가 적었으며 특히 커피박을 팽화제로 사용한 경우 그 효과가 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 커피에 함유된 카페인 내 질소가 ‘흡착’ 이라고 불리는 공정을 통하여 공기로부터 ‘황(sulfur)’ 을 정화하는 탄소의 능력을 촉진시키고 복합유용미생물이 잔여 악취성분들을 생물학적 분해하는데 도움을 주었기 때문이라 추측된다.

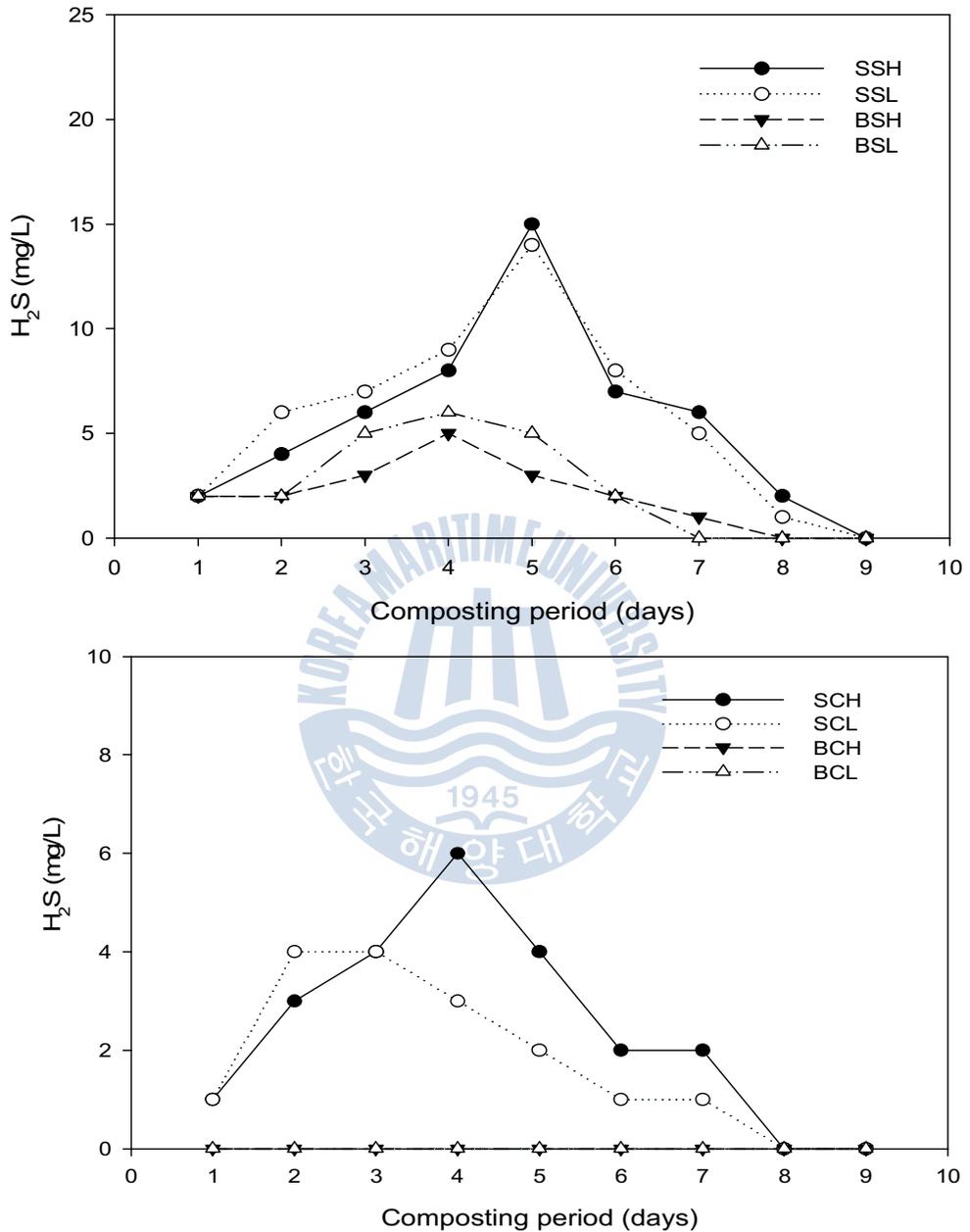


Fig. 4.7 Variation of odor component H_2S of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.

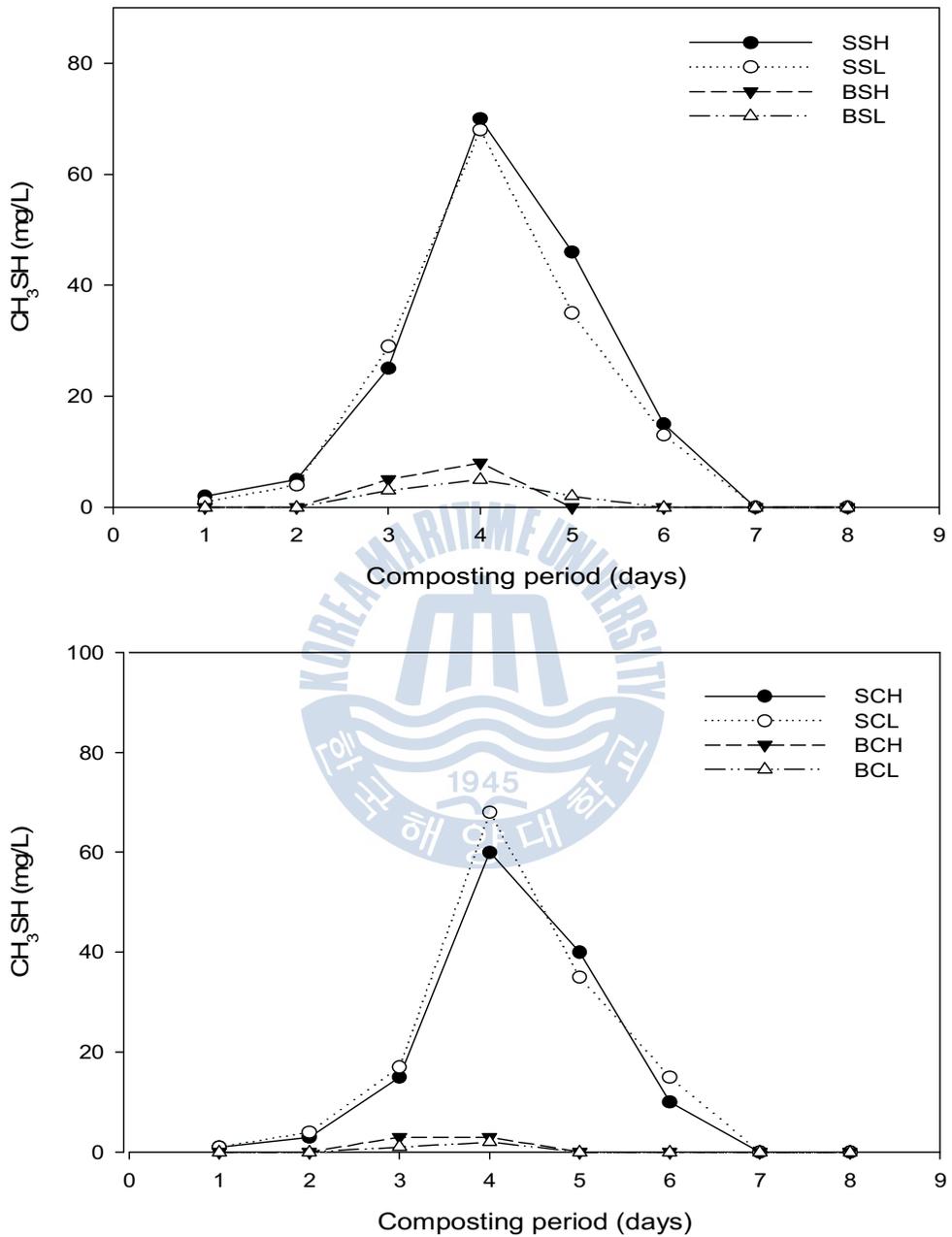


Fig. 4.8 Variation of odor component CH_3SH of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.

퇴비화에서 발생하는 암모니아는 수분, 이산화탄소와 더불어 유기물이 미생물에 의해 분해되면서 생성되는 대표적인 부산물로써 그 발생량에 따라 퇴비의 진행도와 숙성도를 평가할 수 있는 인자이다[43]. 뿐만 아니라 퇴비공장 노동자에게 암모니아가 노출 되었을 때 눈과 목의 따가움과 같은 심미적 고통을 야기하는 원인이 되기도 한다[44]. Fig. 4.9는 퇴비화 기간 중 발생하는 암모니아 농도를 가스검지관을 이용하여 측정한 결과이며 암모니아의 발생량은 퇴비화 기간 동안 복합유용미생물이 우점된 슬러지로 퇴비화한 경우 낮은 농도로 나타났다. 커피박을 팽화제로 사용한 경우 톱밥의 경우보다 일반슬러지, 복합유용미생물 슬러지 모두 암모니아 발생량이 적었으며, 특히 복합유용미생물 우점 슬러지에 커피박을 팽화제로 사용한 퇴비에서 암모니아 발생량이 적은 것으로 분석되어 다른 악취성분들과 마찬가지로 복합유용미생물과 커피박이 흡착과 생물학적 분해에 영향을 미쳐 암모니아 발생을 적게 도움을 준 것으로 판단된다.

4.3.7 카페인 성분의 변화

원두커피를 내린 뒤 버려지는 커피박에는 추출과정에 따라 상이하지만 잔여 카페인이 남아있을 수 있다. 따라서 커피박의 즉시 이용은 불가능하며, 커피박의 재이용을 위해서는 카페인 분해과정을 거쳐 사용할 필요가 있다. 커피의 카페인함량은 커피에서 총 카페인 함량은 아라비카종 커피에는 0.8 ~ 1.5%, 로부스타 종에는 1.6 ~ 2.5%가 각각 함유되어 있는 것으로 알려져 있다[45]. 1회 추출 양인 6 ~ 8 g의 커피를 에스프레소방식으로 25 ml의 물로 커피를 추출하였을 때 포함되어 있는 카페인의 양은 약 60 ~ 80 mg라고 보고되고 있다[46]. 본 연구에서 에스프레소추출을 한 커피박의 카페인 함유율을 분석한 결과 44.08 mg/L로 예상보다 높은 카페인 함유농도였지만 숙성이후의 카페인함유율을 분석해본 결과 0.45 mg/L로 99.98%이상 제거되는 것으로 확인하였다. 따라서 본 퇴비를 토양에 시용하였을 때 카페인으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 사료된다.

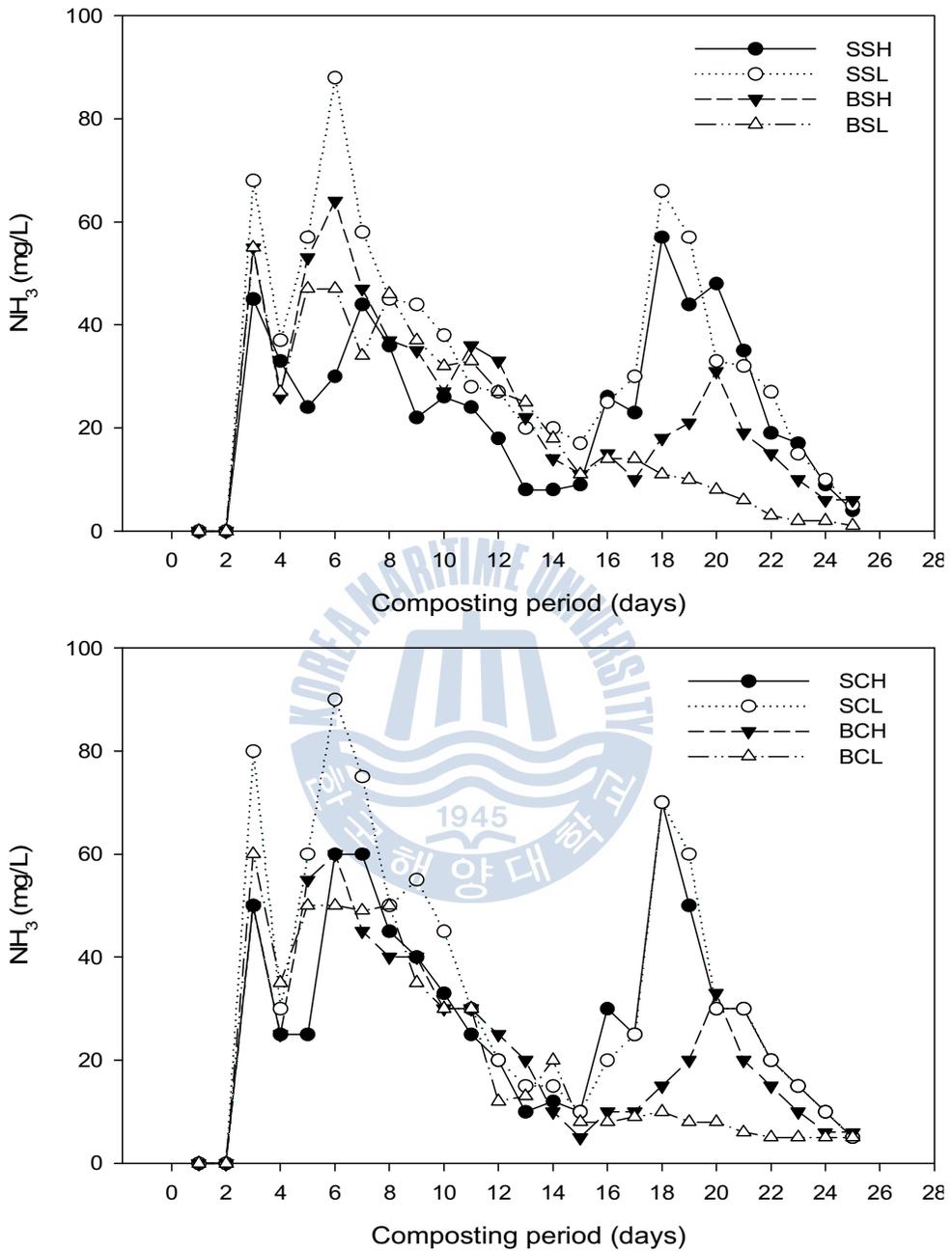


Fig. 4.9 Variation of odor component NH₃ of composting experiment period using sawdust and coffee grounds as bulking agent.

4.3.8 무기성분의 변화

퇴비화 과정 중 무기성분의 함량은 퇴비화 초기에 비해 부숙 후 대체적으로 증가하게 된다. 그 이유로는 퇴비화 과정 중 퇴비 재료 중의 유기물이 분해 소실됨으로써 상대적으로 무기 성분 함량이 증가하기 때문인 것으로 알려져 있다[47]. 본 연구의 퇴비 시료 별 무기성분의 변화를 Table 4.5와 같이 나타내었다. 퇴비화 과정 중 유효 인산의 농도는 4 ~ 16%의 증가율이 나타났으며 특히 복합유용미생물 우점 슬러지를 사용한 BSL, BCL의 실험군의 증가도가 높았다. Fe 농도의 증가율은 3.8 ~ 20%로 BCL이 가장 높은 증가율이 나타났으며 일반슬러지에 팽화제로 톱밥을 사용한 경우 가장 낮은 증가율을 보였다. 망간의 농도는 0.94 ~ 27.3% 범위로 증가하였으며 타 무기 성분과 마찬가지로 BCL의 증가율이 가장 높은 것으로 나타났다. 고온 조건과 저온조건의 무기성분 변화율을 관찰한 결과 고온에서는 무기성분으로 변화하는 효율이 저온보다 떨어지는 것으로 분석되었다. 이는 고온조건의 실험에서 전반적으로 유기물질분해도가 낮았기 때문이라 사료된다. 칼슘도 마찬가지로 저온 퇴비군의 증가폭이 고온 퇴비군 보다 최고 19%로 높았으며, 마그네슘과 칼륨의 변화효율도 다른 성분과 유사하게 나타났다. 본 연구에서도 퇴비화 이후 무기성분이 증가하였으며 이는 재료 중의 유기물이 분해 소실됨으로써 상대적으로 무기 성분 함량이 증가하기 때문인 다른 연구결과와 일치한다고 판단된다. 또한 무기성분 증가폭이 가장 높은 퇴비군은 BCL로 복합유용미생물이 퇴비화 시 유기물질 내 무기성분이 전환되는데 도움을 준 것으로 추측된다.

Table 4.5 Chemical properties of the composts used in this study

Compost	Composting periods(Day)	Av-P ₂ O ₅ (%)	Fe	Mn	CaO	MgO	K ₂ O
			(mg/kg)		(mol ⁺ /kg)		
SSH	0	0.89	7.81	315	30.42	18.45	20.25
	28	0.91	8.13	318	33.24	20.36	21.56
SSL	0	0.89	7.81	315	30.42	18.45	20.25
	28	0.94	8.57	321	35.85	22.79	23.58
BSH	0	0.93	8.60	362	31.52	21.52	24.52
	28	0.95	9.00	371	35.95	22.65	25.29
BSL	0	0.93	8.60	362	31.52	21.52	24.52
	28	1.09	9.58	379	38.96	26.75	27.34
SCH	0	0.89	7.81	315	30.42	18.45	20.25
	28	0.92	9.06	348	39.54	22.56	22.56
SCL	0	0.89	7.81	315	30.42	18.45	20.25
	28	0.98	9.85	412	43.58	26.89	24.58
BCH	0	0.93	8,60	362	31.52	21.52	24.52
	28	0.96	9,42	402	38.45	23.25	26.55
BCL	0	0.93	8,60	362	31.52	21.52	24.52
	28	1.12	10,76	498	46.24	28.45	29.54

4.3.9 퇴비 품질 검증

대표적인 퇴비 숙성 판단정도를 토대로 본 실험에서 제작한 8종의 퇴비에 대한 색, 수분, 냄새, 유기물함량, C/N지표, 병원균, 발아율을 자체평가 지표로 선정하여 평가한 결과는 Table 4.6과 같다. 일반슬러지로 퇴비화한 SSL, SSH는 악취가 발생하고, C/N Index(최종 C/N비를 최초 C/N비로 나눈 값) 0.75이상을 만족하지 못하였으며 병원균도 검출되었다. 발아율도 기준치인 70%보다 낮아 숙성퇴비로 판단할 수 없었다. 일반슬러지에 팽화제로 커피를 사용한 SCH는 색과, 수분함량은 만족하였지만 미세한 악취가 발생하고 유기물농도, C/N 지표를 만족하지 못하고 병원균도 검출되었다. 하지만 일반슬러지에 커피박을 팽화제로 사용한 SCL에서는 다른 조건은 모두 만족하나 악취가 발생하여 자체평가 기준을 만족하였다. 일반슬러지로 퇴비화 한 경우 SCL을 제외한 경우 대부분 병원균이 검출되었는데 이는 일반슬러지 내 병원균이 퇴비화 과정 중 제거되지 못했기 때문이라 판단된다. 그러나 SCL의 경우 병원균이 검출되지 않았는데 이는 퇴비화 과정 중 고온으로 수일간 지속되어 병원균이 제거되었기 때문에 검출되지 않은 것으로 판단된다. 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 BSH은 다른 7가지 지표는 만족하였으나 유기물지표를 만족하지 못하였고 BCH는 미세한 악취가 검출되어 자체평가기준에는 만족하지 못하였다. 그러나 저온조건인 BSL, BCL은 자체평가 8개 지표 모두 만족하여 숙성되었다고 판단되며, 퇴비로서 활용가능성을 확인하였다.

Table 4.6 Self-Assessment result of compost quality

index	standard	SSL	SSH	BSL	BSH	SCL	SCH	BCL	BCH
Color	Dark	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
Moisture content	50% >	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
odor	Soil odor	×	△	◎	△	△	×	◎	△
Organic matter	30% <	◎	×	◎	×	◎	×	◎	◎
C/N Index	0.75 <	×	×	◎	◎	◎	×	◎	◎
infective microorganism	N.D	×	×	◎	◎	◎	×	◎	◎
G.I	70% <	×	×	◎	×	◎	◎	◎	◎

* ◎ : Satisfied △ : capability × : Dissatisfaction

4.3.10 퇴비 공정규격 분석

퇴비 품질 검증 자체평가 결과 숙성된 퇴비 8종 중 BSL, BCL 2종을 대상으로 농촌진흥청의 퇴비 품질평가를 진행하였다[48]. 유해성분과 그밖에 규격에 대한 공정규격과 분석결과를 Table 4.7에 나타내었다. 복합유용미생물 우점 슬러지를 분석해본 결과 유해성분 중 중금속은 미량 검출되거나 N.D로 분석되었으며, 대장균 및 살모넬라도 불 검출되어 퇴비 내 유해성분으로 인한 오염은 발생하지 않을 것으로 사료된다. 이는 본 실험에서 사용한 인공폐수 내 유해물질이 포함되어 있지 않기 때문에 실 폐수로 운전하였을 때는 상이한 결과가 나올 수 있으나, 퇴비 과정 중 온도가 55°C 이상 상승되고 수일간 지속되기 때문에 병원성 세균이 제거될 가능성이 크다고 사료된다. 중금속도 마찬가지로 실제 유해 중금속의 농도가 높은 하폐수를 유입했을 경우 기준치를 초과할 수 있기 때문에 퇴비화 적용 전 중금속 함유량을 확인하여 도입할 필요가 있다. C/N비는 16.57로 조건에 맞게 숙성이 잘 이루어졌을 때 C/N비인 10 ~ 20을 만족 하고 있고, 염분 농도도 1.01로 낮게 분석되었다. 저장이 용이하고 퇴비의 변질이 이루어지지 않기 위해서는 수분 농도가 낮아야 하는데 수분의 농도도 43%로 낮게 분석되었다. 일반적으로 시판되는 유기질퇴비의 질소전량(%) 1.5 ~ 2보다 높아 토양에 시비하였을 때 질소질이 원활하게 공급 될 것으로 보인다. 퇴비는 대량영양소인 N, P, K의 함량 미미하여 따로 기준은 없지만 퇴비내의 영양소 함량은 최종 사용자에게 보충영양소 첨가여부를 결정해주기 위해 필요하다[49]. BSL의 N, P, K의 총합은 2.89%로 나타났으며, BCL의 N, P, K의 합은 4.08%로 팽화제로 커피를 사용한 경우 약 29% 증가한 것으로 나타났다. 이는 팽화제로 사용한 커피박 내 영양소가 퇴비 성분의 N, P, K성분에 영향을 미친 것으로 판단되며 커피박 퇴비를 토양에 시용하였을 때 톱밥을 팽화제로 사용한 경우보다 양질의 영양분을 공급 할 수 있을 것으로 추측된다.

Table 4.7 Analysis result of the experimental compost quality

Analysis Item (Unit)		standard	BSL	BCL
	Organics Meter(%)	> 30	34.7	41.8
	As(mg/kg)	< 45	N.D	N.D
	Cd(mg/kg)	< 5	N.D	N.D
	Hg(mg/kg)	< 2	N.D	N.D
Hazardous Ingredient	Pb(mg/kg)	< 130	2.3	2.2
	Cr(mg/kg)	< 200	12.9	10.4
	Cu(mg/kg)	< 360	76.2	114.0
	Ni(mg/kg)	< 45	9.6	6.5
	Zn(mg/kg)	< 900	157.8	142.8
	E. coli	N.D	N.D	N.D
	Salmonella	N.D	N.D	N.D
	C/N	< 45	19.6	16.6
other	NaCl(%)	< 2.0	0.7	1.0
	Moisture(%)	< 55	42.6	43.3
	Composting		complete	complete
	Insoluble material(%)	< 25	4.3	1.1
	T-N(%)	-	1.3	2.5
	Av-P ₂ O ₅ (%)	-	1.1	1.1
	K ₂ O(%)	-	0.5	0.4
	pH[1:10]	-	7.4	6.3
EC[1:10](dS/m)	-	4.9	1.3	

4.4 소 결론

복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 호기성 퇴비화에 관한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 퇴비화 과정 중의 온도변화를 관찰한 결과 1차 2차로 나뉘어 두 차례의 온도상승이 일어났으며 일반슬러지보다 복합유용미생물 슬러지 퇴비군의 온도 상승률이 더 높은 것으로 나타났다.
2. 고온조건에서 실험한 SSH, BSH, SCH, BCH의 C/N비의 감소율은 저온조건에서 실험한 SSL, BSL, SCL, BCL의 경우보다 매우 적었으며 이는 퇴비화로 인해 유기물 분해가 제대로 이루어지지 않았다고 판단할 수 있다. 퇴비화 숙성정도를 판단하기 위해 C/N비 지표(Final ratio/Initial ratio)가 0.75이하일 때 숙성도를 판단하는 C/N비 지표를 이용하였다. 실험군 별 C/N비 지표는 SSH, SSL, BSH, BSL 가 0.87, 0.84, 0.65, 0.56로 분석되었다. 일반슬러지도 퇴비화한 경우보다 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비의 숙성정도가 더 좋으며 팽화제를 커피박을 사용한 SCL과 BCH, BCL은 모두 0.75이하였기 때문에 C/N비 지표로 판단했을 때 숙성퇴비로 판단된다.
3. 복합유용미생물 우점 슬러지로 제작한 퇴비와 일반슬러지 및 팽화제의 종류에 따른 악취물질의 농도를 비교하기 위해 퇴비화 초기 발생하는 황화수소(H_2S)와 머캅탄(CH_3SH)농도를 8일 동안 측정하였으며 그 결과 팽화제를 톱밥을 사용한 경우 일반슬러지 퇴비보다 복합유용미생물 퇴비의 악취발생농도가 적었으며 팽화제로 커피를 사용한 경우에는 복합미생물 우점슬러지 퇴비에서는 퇴비화 진행되는 동안 취기가 느껴지지 않았으며 검지관에도 검출되지 않았다.
4. 커피박의 카페인 함유율을 분석한 결과 44.08 mg/L로 예상보다 높은 카페인 함유농도였지만 숙성이후의 카페인함유율을 분석해본 결과 0.45 mg/L로 99.98%이상 제거되는 것으로 확인하였다.

6. 대표적인 퇴비 숙성 판단정도를 토대로 본 실험에서 제작한 8종의 퇴비에 대한 색, 수분, 냄새, 유기물함량, C/N지표, 병원균, 발아율을 자체평가 지표로 선정하여 평가한 결과 저온조건인 BSL, BCL은 자체평가 8개 지표 모두 만족하여 숙성되었다고 판단되며, 퇴비로서 활용가능성을 확인하였다.
7. BSL의 N, P, K의 총합은 2.89%로 나타났으며, BCL의 N, P, K의 합은 4.08%로 팽화제로 커피를 사용한 경우 약 29% 증가한 것으로 나타났다. 이는 팽화제로 사용한 커피박 내 영양소가 퇴비 성분의 N, P, K성분에 영향을 미친 것으로 판단되며 커피박 퇴비를 토양에 시용하였을 때 톱밥을 팽화제로 사용한 경우보다 양질의 영양분을 공급 할 수 있다.



제 5 장 퇴비 내 세균군집의 Pyrosequencing 분석

5.1 서론

퇴비 재료 내 미생물 군집성상에 따른 퇴비화 반응의 차이점을 밝히고자 환경의 복잡한 미생물 군집을 간편하게 분석할 수 있는 최신 방법인 파이로시퀀싱을 이용하였다. Pyrosequencing을 이용하여 미생물 군집을 분석할 때 clone library에 필수적인 대장균을 이용한 cloning 단계가 필요 없고, sequencing 비용도 Sanger 방법의 1/100 이하이다. 또한 바코드를 이용하여 샘플을 구분하게 되면서 많은 시료를 한번에 시퀀싱 할 수 있게 되었다. 이처럼 대량의 유전자를 단시간에 분석하는 것이 가능해지면서 환경의 복잡한 미생물 군집을 조사하기에 유용한 방법으로 많이 이용되고 있다[50, 51].

본 연구에서는 퇴비화실험 재료인 복합유용미생물 슬러지와 일반슬러지의 미생물 군집 비교를 통해 복합유용미생물 슬러지에 대한 미생물학적 특성을 밝히고 일반슬러지 퇴비와 비교하여 복합유용미생물 우점 슬러지를 퇴비화 하였을 때 발현되는 미생물의 성상을 비교하여 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비가 토양에 시용 되었을 때 토양에 미치는 영향을 간접적으로 확인하고자 한다. 또한 현재 시판되고 있는 광합성균을 이용한 돈분 퇴비와 같은 공정으로 본 실험에서 사용한 복합유용미생물을 우점 시킨 돈분 퇴비를 제조하여 시판퇴비와의 비교는 물론 퇴비 제조 방법에 따른 복합유용미생물 군집의 차이점을 알아보려고 하였다.

5.2 재료 및 방법

5.2.1 시료 채취

일반슬러지로 제작한 퇴비와, 복합유용미생물로 제작한 퇴비의 미생물학적 차이점을 확인하기 위해 사용된 일반슬러지 시료는 부산시 A 하수처리장에서 발생된 슬러지를 사용하였으며, 복합유용미생물 슬러지는 실험실 규모 생물학적 반응기가 안정된 시점의 슬러지를 채취하여 영하 20℃ 이하의 냉동고에 보관하였다. 퇴비 시료도 마찬가지로 호기성 퇴비화 연구가 끝난 시점인 28일째 각각의 퇴비를 채취하여 영하 20℃ 이하의 냉동고에 보관하였다.

5.2.2 DNA 추출

슬러지와 퇴비 시료는 0.2 μm cellulose nitrate membrane filter (Whatman)를 사용하여 여과하였다. PowerSoil DNA Isolation Kit (MO BIO Lab.)를 사용하여 DNA를 추출하였다[52, 53]. DNA 추출 과정은 설명서에 제공된 방법으로 수행하였으며 그 과정은 다음과 같다. PCR을 저해할 수 있는 토양 입자나 부식산 (humic acid) 같은 토양 성분을 제거하고 DNA가 파괴되는 것을 막을 수 있는 buffer와 세포를 파쇄 하는데 이용되는 bead가 혼합된 상태로 제공된 Power Bead Tube에 0.25 g의 membrane filter를 잘라 넣었다. 시료와 시약을 섞어 준 후 60 μl 의 Solution C1을 첨가한 다음 vortex하여 혼합하였다. 혼합된 용액의 세포를 파쇄하기 위해서 세포파쇄기를 이용하여 최대 속도로 10분간 vortex하였다. 이 시료는 원심분리를 이용하여 상온에서 10,000 x g 로 30초간 원심분리한 후 상층액을 취해 새로운 collection tube로 옮겼다. DNA가 아닌 유기물과 무기물 또는 토양 입자나 세포조각, 단백질 등의 저해물질을 제거하기 위해서 250 μl 의 Solution C2를 첨가하고 5초간 vortex하여 혼합한 다음 4℃로 5분간 incubation하였다. 상온에서 10,000

x g로 1분간 원심분리 한 후 상층액 600 μ l를 새로운 collection tube로 옮겼다. 여기에 저해물질을 제거하기 위한 두 번째 과정으로 200 μ l의 Solution C3를 첨가하고 혼합한 다음 4°C에서 5분간 incubation하였다. 상온에서 10,000 x g로 1분간 원심 분리한 다음 상층액 750 μ l를 취하여 새로운 collection tube로 옮겼다. DNA를 silica filter membrane에 달라붙게 하기 위하여 고염도 용액인 Solution C4 1200 μ l를 상층액에 첨가한 후 5초간 vortex 하여 혼합하였다. 혼합액을 spin filter에 넣은 후 10,000 x g로 1분간 상온에서 원심분리하였다. Spin filter에 흡착된 이물질을 제거하기 위해 500 μ l의 Solution C5를 spin filter에 첨가한 다음 30초 동안 10,000 x g로 상온에서 원심 분리하였다. 걸러진 하층액만 버린 다음 DNA를 elution하기 위하여 spin filter를 새로운 collection tube에 옮긴 다음 100 μ l의 Solution C6를 membrane filter 중간 부분에 떨어뜨렸다. 10,000 x g로 30초간 원심 분리하여 DNA를 추출하고, 추출한 DNA는 -20°C에서 냉동 보관하였다.

5.2.3 Pyrosequencing 방법

실험재료에서 추출한 DNA를 이용하여 Chunlab사에 pyrosequencing을 의뢰하였다. Pyrosequencing 결과를 분석하는 과정은 크게 6단계로 나눌 수 있다. 첫번째 단계는 바코드를 정렬하여 각 샘플의 PCR 프라이머에 포함된 바코드별로 sequence를 정렬하고 2bp의 링커도 제거한다. 두번째는 염기서열을 검증하기 위해 전체 sequence 중에서 그 길이가 짧거나, unambiguous base (N)가 나타난 sequence를 제거한다. 세번째는 증폭에 사용된 프라이머를 잘라내는 과정으로, pairwise alignment 알고리즘을 이용해서 인지하고 잘라낸다. 네번째 단계는 분석하고자 하는 16S rRNA gene이 아닌 다른 read를 제외시켜야 한다. 만약 이 과정에서 분석하고자 하는 대상이 아닌 염기서열을 제거하지 않으면 분석 중 신중으로 인식되어 분석에 오류가 발생할 수 있다. 다섯번째 과정은 template에 존재하지 않는 sequence가 multitemplate로부터 증폭되어 생성되는 chimera를 제거하는 과정이다. 마치

막 여섯 번째 과정은 sequence를 이용하여 similarity search를 통해 분류학적인 동정을 하는 단계이다. ‘EzTaxon server’에서 제공하는 분석방법을 이용하여 동정하며, 원핵 미생물 동정에는 ‘EzTaxon-e’database 를 사용한다[54, 55, 56].

Pyrosequencing을 통해 얻어진 염기서열은 Chunlab 사에서 제공하는 군집 분석 프로그램인 CLcommunityTM을 이용하여 분석하였다[57]. Species richness는 시료내의 종 수를 말하는데 이를 구하는 방법은 매우 다양하다. 분류의 대상이 되는 생명체 개체 또는 군을 의미하는 Operational Taxonomic Unit(OTU)는 97% sequence similarity에 의해 정의된 종(Species)의 의미로 쓰인다. CLcommunityTM 프로그램으로 분석하는 과정에도 같은 의미로 사용하였고, 여러 OTU를 구하는 방법 중에서 CD-HIT 프로그램을 이용하였다[58]. 시료의 OTU 수를 구한 다음 실제로 존재하는 OTU 값을 추정하여 species richness값을 구하게 된다. 특정 지역이나 생태계 내의 종 다양성을 알아보는 방법인 alpha diversity를 분석하였는데, 주로 종풍부도(Species richness)로 나타낸다. 이 방법을 이용하여 Rarefaction curve를 분석하여 종 풍부도를 추정하였다. 또한 생태계 특이적인 전체 종 수를 측정한다음 그 수를 비교하여 생태계 사이의 종 다양성 차이를 분석하는 beta diversity도 조사하였다[59]. 이처럼 생태계 사이의 유연관계를 알아보기 위하여 CLcommunityTM 프로그램을 이용하여 Fast UniFrac analysis를 수행하였다[60]. Chunlab사에서는 기존에 pyrosequencing을 이용한 bacteria 군집분석 결과를 Chunlab의 database 홈페이지(<http://data.chunlab.com>)에 공개하여 제공하고 있다[61].

5.3 결과 및 고찰

5.3.1 Rarefaction curve를 이용한 metagenome 분석

5.3.1.1 슬러지

얻어진 염기서열의 read 수와 프로그램으로 추정된 OTU는 일반슬러지에서 1580 read와 559 OTU, 복합유용미생물 슬러지에서 2174 read와 594 OTU로 나타났다. 각각 sequence의 read 길이는 대체적으로 450~500 bp 정도여서 bacteria의 군집을 분석하기에 적합하였다. 각각의 시료로부터 분석된 OTU의 숫자를 증가곡선으로 표현한 그래프인 rarefaction curve는 Fig 5.1 과 같다. Rarefaction curve를 보면 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비가 일반슬러지보다 다양성이 높은 것으로 분석되며 이는 수처리과정 중 복합유용미생물을 주입했기 때문이라 사료된다.

5.3.1.2 퇴비

Pyrosequencing을 이용하여 일반슬러지 퇴비와 복합유용미생물 슬러지 퇴비의 bacteria 군집 다양성을 분석하였다. 얻어진 염기서열의 read 수와 프로그램으로 추정된 OTU는 일반슬러지퇴비에서 3406 read와 249 OTU, 복합유용미생물 슬러지 퇴비에서 2632 read와 183 OTU로 나타났다.

각각의 시료로부터 분석된 OTU의 숫자를 증가곡선으로 표현한 그래프인 rarefaction curve는 Fig 6.2 과 같다. Rarefaction curve를 보면 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비보다 일반 퇴비의 다양성이 더 높은 것으로 분석되며 이는 복합유용미생물 우점 슬러지가 퇴비화가 진행되면서 우점균의 출현으로 상대적으로 다양성은 감소되었으며 일반슬러지는 우점종이 적고 기타 균들로 인해 다양도가 높은 것으로 사료된다.

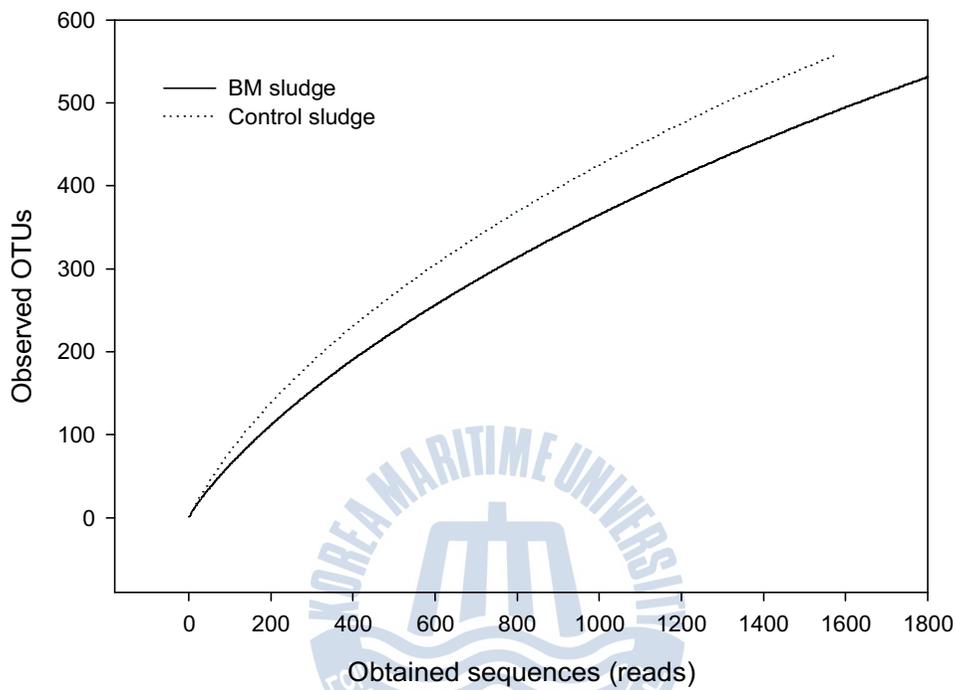


Fig. 5.1 Comparison of rarefaction curves of BM sludge and control sludge from the bioreactor system.

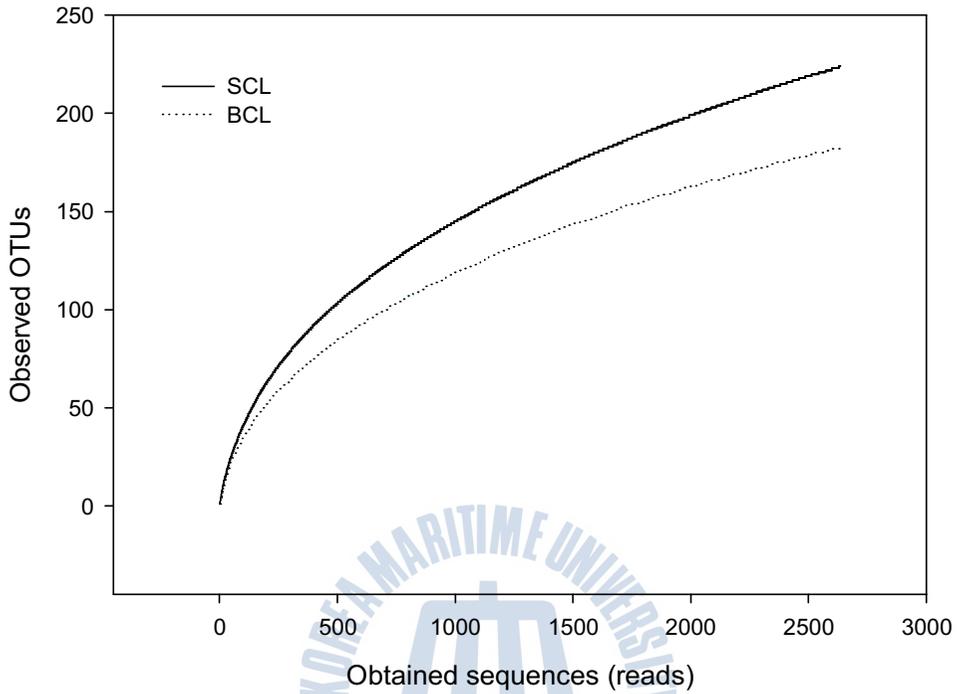


Fig. 5.2 Comparison in microorganism diversity using rarefaction curves of BCL and SCL composts.

5.3.1.3 시판퇴비와 비교

본 연구에서 제작한 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비(커피)와 모 기업에서 판매하고 있는 광합성균 돈분퇴비, 실험용으로 제작한 복합유용미생물을 우점한 돈분퇴비 세가지를 rarefaction curve를 통해 speciesrichness중 풍부도분석을 수행하였다.

본 연구에서 최대 Total reads 수는 제작한 BCL 퇴비에서 2632였고, 최소 Total reads수는 PMP에서 1947로 나타났다. 프로그램으로 추정된 OTU는 BCL에서 183 OTU, PMP 퇴비에서 405 OTU, BMP퇴비 479 OTU로 나타났다. 본 연구에서 제작한 BCL퇴비의 균들이 유사함을 띄고 있는 것으로 나

타났다. 복합유용미생물이 우점 된 슬러지로 제작한 퇴비는 다양성은 다른 퇴비에 비해 떨어졌지만 Total reads수는 가장 많았으며, 일반 시판퇴비에 복합유용미생물제제를 주입한 경우 광합성균 퇴비보다 다양성과 종 풍부도도 높은 것으로 분석되었다.

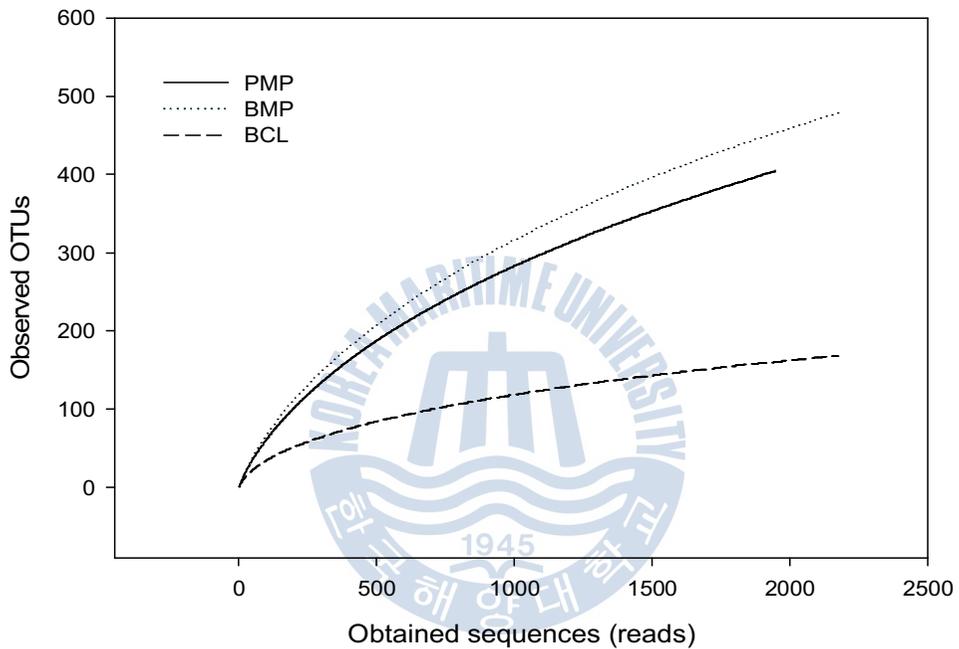


Fig. 5.3 Comparison in microorganism diversity using rarefaction curves of PMP, BMP and BCL composts.

5.3.2 Pyrosequencing으로 분석한 Bacteria 군집 다양성

5.3.2.1 슬러지

Pyrosequencing을 이용하여 일반슬러지와 복합유용미생물 슬러지의 bacteria 군집 다양성을 분석하였다. 일반슬러지의 bacteria 군집을 문(Phylum) 수준으로 분석한 결과 *Proteobacteria* 문에 속하는 *Proteobacteria* 31.2%, *Bacteroidetes* 문에 속하는 *Bacteroidetes* 23.1%, *Chloroflexi* 문에 속하는 *Chloroflexi* 17.4%, *Firmicutes* 문에 속하는 *Firmicutes* 5.126%, *Actinobacteria* 문에 속하는 *Actinobacteria* 6.01%, 기타 (< 5%) 15.25%순으로 나타났다.

복합유용미생물 슬러지의 bacteria 군집을 문(Phylum) 수준으로 분석한 결과 *Proteobacteria* 문에 속하는 *Proteobacteria* 41.30%, *Gemmatimonadetes* 문에 속하는 *Gemmatimonadetes* 14.12%, *Firmicutes* 문에 속하는 *Firmicutes* 11.45%, *Bacteroidetes* 문에 속하는 *Bacteroidetes* 7.58%, *Actinobacteria* 문에 속하는 *Actinobacteria* 7.17%, 기타 (< 5%) 16.65%순으로 나타났다.

복합유용미생물 슬러지의 bacteria 군집은 일반슬러지 보다 다양성이 높았으며, 생물학적 하폐수 처리공정에서 세균군집은 대부분 유기물 농도가 높은 환경에서 유리한 *Proteobacteria*가 최대 군집이라는 보고가 되고 있으며, 도시하수를 처리하는 RABC 공정에서 *Firmicutes*가 43.9%로 가장 우점하였고 *Bacteroidetes*(17.6%)와 β -*Proteobacteria*(14.3%)가 우점하고 있다고 보고하였다[13]. 본 연구에서도 *Proteobacteria*군집이 일반슬러지, 복합유용미생물슬러지 모두 가장 우점 되어 있는 것으로 확인하였으며, 광합성세균은 이산화탄소 및 황화수소를 흡수 이용하며, 오염 및 악취의 방지 효과를 나타낸다고 알려져 있다[21]. 특히 생물학적 인 제거에 도움을 주고 활성슬러지법의 슬러지에서 발견되는 호기성균 *Gemmatimonadetes*이 일반슬러지에서는 0.3%정도 발견되다가 복합유용미생물로 우점된 후 14.12%로 증가하

였다[63]. 일반슬러지에서 *Bacteroidetes*가 23% 검출되었다. *Bacteroidetes* 호기와 혐기환경의 반복일 때 발견될 수 있다고 보고하였는데, 이는 Y처리장의 운전조건에서 호기와 혐기 환경의 반복이 우점과 연관이 있는 것으로 보고하였다[32]. *Actinobacteria*는 일반슬러지 보다 복합미생물유용슬러지에서 많이 검출되었는데 *Actinobacteria*는 항균물질을 만들어 병원균을 억제하거나 유해한 곰팡이나 세균류가 증식하지 못하도록 키틴질을 섭취하여 다른 유용미생물이 살기 좋은 환경을 만드는 것으로 알려져 있으며 건강한 토양에서 주로 나타난다[64]. 이는 복합유용미생물 우점 활성슬러지에 *Actinobacteria*가 증식하여 안정적인 수처리를 도모할 수 있는 조건을 맞춰주는 것으로 사료되며 퇴비화에도 다른 유해 세균이 증식하지 못하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

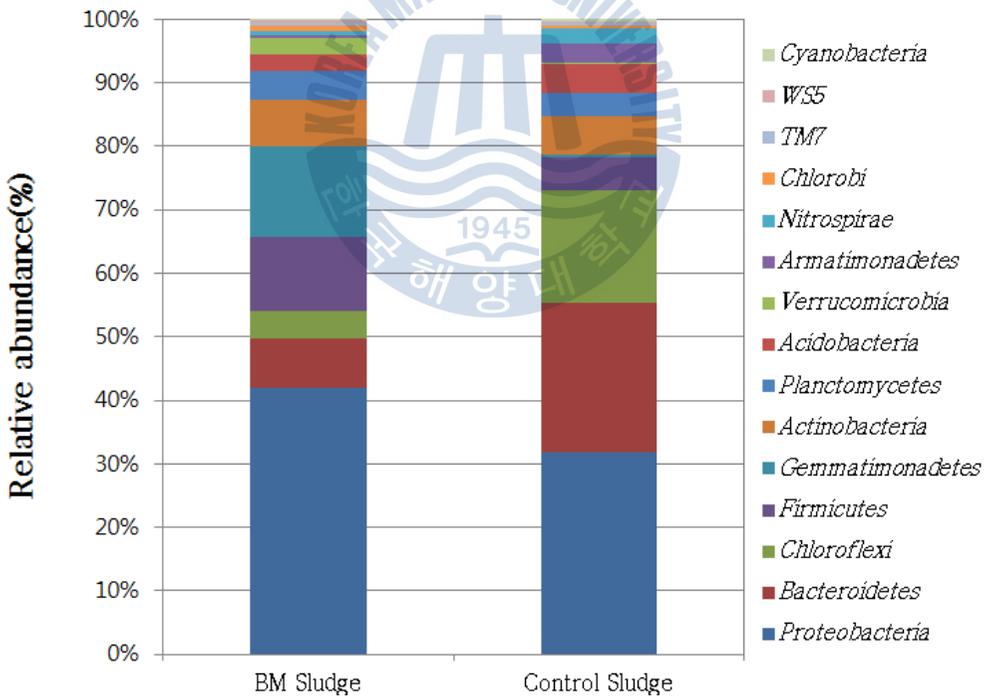


Fig. 5.4 Comparative analysis of the dominant phyla in BM sludge and control sludge.

일반슬러지를 종(Species) 수준으로 분석하면 Saprospiraceae_uc_s가 3.60%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었고, 그 다음으로 Caldilineaceae_uc_s (3.35%)와 FM213038_s (3.22%), HQ014633_s (2.97%), *Nitrospira defluvii* (2.02%) *Fimbriimonas_uc* (1.96%), FJ710748_s (1.83%), 이 외에 *Cloacibacterium rupense* (1.77%), *Cloacibacterium normanense* (1.64%), GU455152_s (1.58%), GU454905_s (1.51%), *GU455152_g_uc* (1.329%), *Macellibacteroides fermentans group* (1.26%), *AB298726_s* (1.26%), *FJ936783_f_uc_s* (1.26%), 기타 (<1%)가 69%분포하는 것으로 나타났다.

복합유용미생물 우점슬러지를 종(Species) 수준으로 분석하면 FQ658948_s가 12.55%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었고, 그 다음으로 *Bacillus funiculus* (9.75%)와 *Pseudomonas monteilii group* (7.03%), *Nakamurella multipartita* (2.62%), AY548945_g_uc (2.25%) *Pseudomonas hunanensis* (2.16%), *Flavimonas oryzihabitans* (1.37%), 이 외에 EU135435_s (1.37%), *Dokdonella_uc* (1.28%), HQ440080_s (1.19%), *FJ936783_f_uc_s* (1.10%), *DQ660884_s* (1.05%), *Saprospiraceae_uc_s* (1.01%), 기타 (<1%)가 55%분포하는 것으로 나타났다.

복합유용미생물 우점 슬러지에서 7.03% 우점된 *Pseudomonas*는 폐수중의 생물학적인 제거에 도움을 주는 것으로 알려져 있으며, 9.75% 우점된 *Bacillus*는 탈질, 철 환원, 망간산화 등에 관여하는 미생물로 알려져 있다 [65][66]. AY548945_g_uc는 ANAMMOX슬러지에서 주로 발견되는 미생물이며 일반미생물 슬러지보다 복합유용미생물 슬러지에서 2.25%로 우점되어 수처리 과정에서 질소제거에 도움을 주는 것으로 사료된다[18].

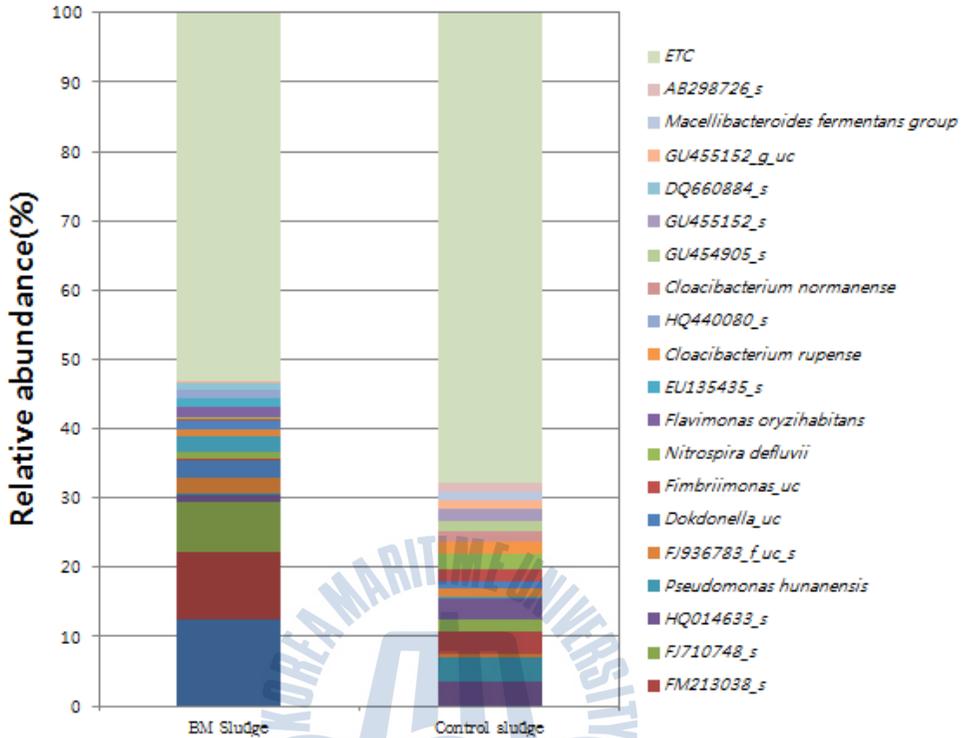


Fig. 5.5 Comparative analysis of the dominant Species in BM sludge and control sludge.

5.3.2.2 퇴비

일반슬러지 퇴비의 bacteria 군집을 문(Phylum) 수준으로 분석한 결과 *Bacteroidetes* 문에 속하는 *Bacteroidetes* (58.86%), *Proteobacteria* 문에 속하는 *Proteobacteria* (30.53%), *Acidobacteria* 문에 속하는 *Acidobacteria* (6.01%), *Actinobacteria* 문에 속하는 *Actinobacteria* (2.75%), *Firmicutes* 문에 속하는 *Firmicutes* (1.7%), 기타 (< 1%) 0.11%순으로 나타났다.

복합유용미생물 슬러지 퇴비의 bacteria 군집을 문(Phylum) 수준으로 분석한 결과 *Bacteroidetes* 문에 속하는 *Bacteroidetes* (62.61%), *Proteobacteria* 문에 속하는 *Proteobacteria* (29.33%), *Actinobacteria*문에 속하는 *Actinobacteria*

(4.71%), *Firmicutes* 문에 속하는 *Firmicutes* (3.26%), 기타 (< 1%) 0.07%순으로 나타났다.

일반적인 퇴비화에서 발견되는 *bacteria*군집은 *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, 그리고 *Actinobacteria*로 보고되고 있다[68]. 본 연구에서도 위의 보고와 같이 *bacteria*군집이 검출되었으며, *Bacteroidetes*가 일반슬러지 퇴비와 복합유용미생물 우점 퇴비 모두 가장 많이 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 퇴비화가 진행될수록 *Bacteroidetes*의 분포가 점차적으로 높아지는데 본 연구에서는 최종 퇴비를 대상으로 하였기 때문에 높게 분포되는 것으로 사료된다[68]. 복합유용미생물 우점 슬러지 분석에서 *Firmicutes*가 11.4%로 다소 많이 검출되었으나 퇴비가 진행된 이후에는 복합유용미생물 우점 퇴비에서 3.26%로 원료에서 보다는 낮게 검출되었다. 이는 퇴비화 초기에는 높게 검출되다가 부숙이 진행되면서 검출범위가 줄어드는 보고와 일치한다[68]. 두 번째로 많이 검출된 *bacteria*는 *Proteobacteria*로 일반슬러지와 복합유용미생물 모두 비슷하게 검출되었다. 복합유용미생물 퇴비에서 *Actinobacteria*가 일반슬러지보다 많이 검출되었는데 *Actinobacteria*는 고정된 질소를 공급하는 역할을 하고 퇴비가 숙성이 진행되면서 온도가 뜨거워질 때 활성도가 높아지는데 복합유용미생물 슬러지가 일반슬러지 보다 부숙 온도가 높고, 기간도 길었기 때문에 많이 검출되는데 도움을 준 것으로 사료된다. 다른 고온성 미생물인 *Chloroflexi*는 일반슬러지 퇴비에서는 전혀 검출되지 않고 복합유용미생물 퇴비에서는 검출되었는데 이도 마찬가지로 퇴비화 기간 동안 온도변화와 관련이 있다고 생각된다. 미네랄이 풍부한 토양이나 제어하고 있는 토양에서 주로 발견되는 *Acidobacteria*는 일반슬러지 퇴비에서 발견되어 일반슬러지 퇴비도 토양에 좋은 영향을 줄 수 있다. 일반슬러지 퇴비를 종(Species) 수준으로 분석하면 *Sphingobacteriales_uc_s*가 29.53%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었고, 그 다음으로 *Chitinophaga terrae* (14.26%)와 *Sphingobacteria_uc_s* (5.56%), *Novosphingobium lindaniclasticum* (4.22%), *Luteibacter jiangsuensis* (3.22%) *Achromobacter pulmonis* (2.67%), *Achromobacter ruhlandii* group (2.23%), 이

외에 *Chitinophaga_uc* (1.67%), *Ochrobactrum anthropi group* (1.64%), *Burkholderia tropica* (1.43), *Pandoraea pnomenusa group* (1.29%), *Burkholderia glumae* (1.26%) 4P005153_s (1.17%), *Granulicella mallensis* (1.17%), *Bryocella_uc* (1.11%), *Hephaestia caeni* (1.05%), *Granulicella_uc* (1.02%), 기타 (<1%)가 19%분포하는 것으로 나타났다.

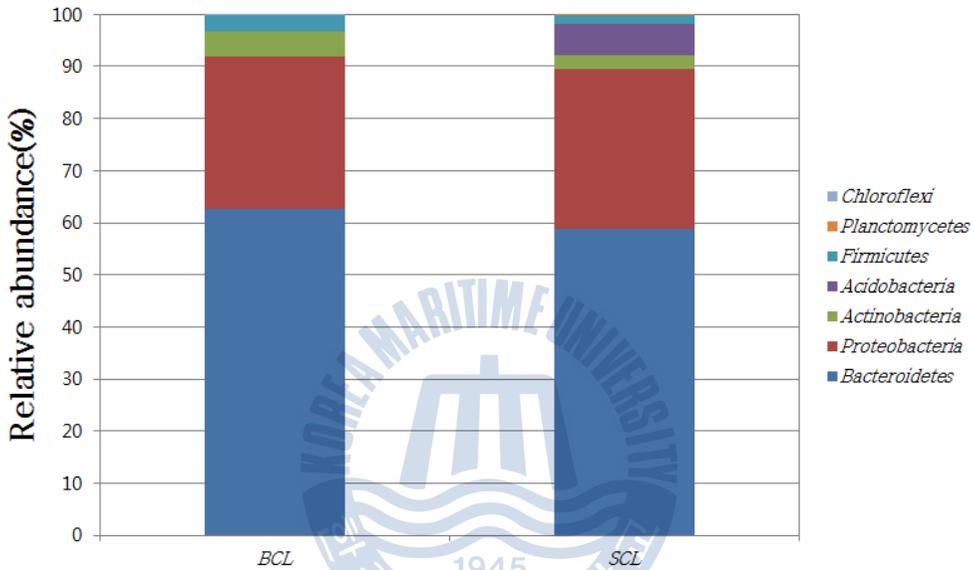


Fig. 5.6 Comparative analysis of the dominant phyla in BM compost and general compost.

복합유용미생물 우점슬러지를 종(Species) 수준으로 분석하면 *Chitinophaga terrae*가 36.96%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었고, *Burkholderia multivorans* (12.27%), *Olivibacter jilunii* (5.01%)와 *Luteimicrobium xylanilyticum* (3.38%), AB274846_s (3.26%), *Sphingobacteriales_uc_s* (2.58%), *Flavobacterium anatoliense* (2.50%), 이 외에 *Bacillus coagulans* (1.89%), *Bordetella hinzii* (1.74%), *Ochrobactrum pseudintermedium* (1.67%), FJ936783_f_uc_s (1.10%), DQ660884_s (1.05%), *Saprospiraceae_uc_s* (1.01%), 기타 (<1%)가 14%분포하는 것으로 나타났다.

일반 슬러지 퇴비와 복합유용미생물 우점 퇴비의 미생물의 특성이 상이하였으며, 복합유용미생물 슬러지 퇴비에서 가장 우점된 종인 *Chitinophaga terrae*은 질산염 감소역할을 도와주고, Chitinophagaceae_uc_s (11.6%)은 안트라센 화합물 분해 역할을 하는 것으로 알려져 있다[69][70]. *phaga_uc* (11.66%), *Bordetella hinzii* (1.67%)는 곰팡이 균의 세포벽인 chitin을 분해하고 향균제를 생성하여 퇴비화 기간동안 유해 균이 번식하지 못하도록 도와주는 것으로 사료된다[71, 72]. *Burkholderia multivorans* (12.27%)은 지방분해 효소인 리파아제를 생산하여 팽화제로 사용한 커피 내 지방산을 분해하는데 도움을 줄 것으로 사료된다[73].

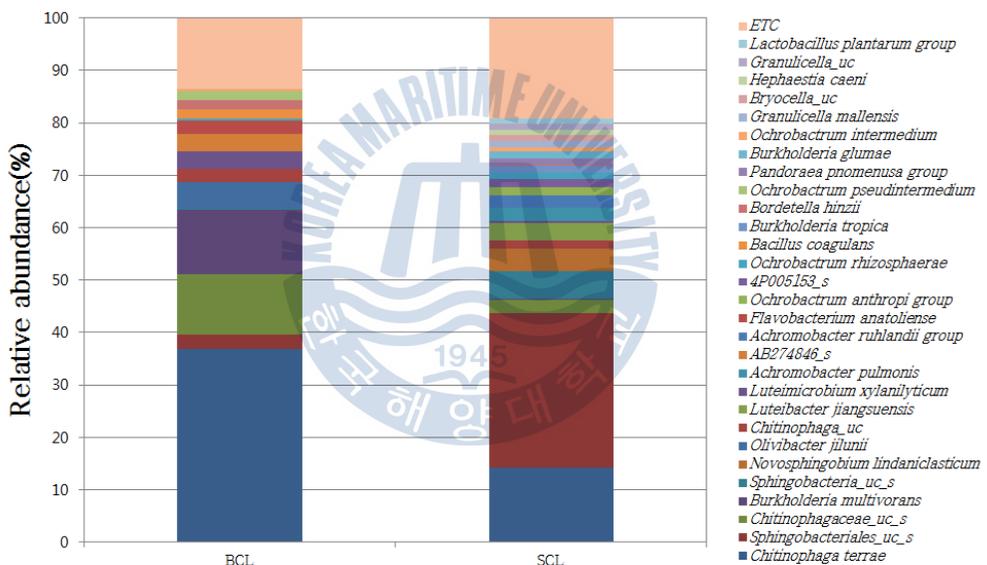


Fig. 5.7 Comparative analysis of the dominant species in BM compost and general compost.

5.3.2.3 시판 퇴비와의 비교

시판 퇴비와의 성능평가를 위해 시중에 판매되고 있는 광합성 돈분퇴비 1종과 복합유용미생물을 접종시킨 돈분퇴비, 본 연구에서 개발한 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비(커피)를 대상으로 bacteria 군집을 종(species) 수준 분석하였다. 복합미생물 우점 슬러지 퇴비는 다른 시판 퇴비보다 종 다양성은 떨어졌지만 작물의 뿌리를 건강하게 유지시켜주는 *Chitinophaga*가 36.96%, *Chitinophagaceae_uc_s*는 11.66%로 다량 검출되었다. 다른 두 종류의 퇴비에서는 위와 같은 종이 전혀 검출되지 않았다. 국내 인삼뿌리를 대상으로 파이로시퀀싱 연구결과에 따르면 건강한 인삼에서는 *Chitinophaga*, *Dokdonela* 등의 세균이 검출되었으나 병에 걸린 인삼에서는 확인되지 않은 것으로 보고하였다[74]. 그리고 복합유용미생물을 돈분 퇴비에 우점 시킨 BMP 퇴비와 복합유용미생물 슬러지 퇴비 BCL의 미생물 연관성은 크게 없는 것으로 분석되었다. 이는 본 실험에서 사용한 복합유용미생물이 퇴비 조건 및 과정과 퇴비재료에 크게 영향을 받는 것으로 사료되며 오히려 같은 조건으로 제작된 광합성군 퇴비 PMP와 연관성이 높은 것으로 분석되었다. bacteria 군집을 종(species)으로 분석한 결과 시판퇴비인 PMP와 복합유용미생물 돈분퇴비 BMP에서는 기타 (<1%)가 각각 49%, 48%로 미생물 상은 다양하지만 우점되어 있다고 보기는 힘든 수치이다. 하지만 본 연구에서 제작한 복합유용미생물 슬러지 퇴비 BCL은 기타 (<1%) 15%로 나타났다.

5.3.3 복합유용미생물 슬러지와 퇴비의 Community 분석

얻어진 염기서열의 read 수와 프로그램으로 추정된 OTU는 복합유용미생물 우점 슬러지에서 2174 read와 594 OTU, 복합유용미생물 슬러지 퇴비에서 2632 read와 183 OTU로 나타났다.

복합유용미생물 슬러지와 복합유용미생물 슬러지 퇴비의 Community 분석한 결과를 Fig 5.10 에 나타내었다. 우선 복합유용미생물 슬러지가 퇴비

보다 다양한 미생물 성상이 나타나는 것으로 분석되었고 종(Species)을 기준으로 분석한 결과 슬러지와 퇴비 모두 *Proteobacteria*가 가장 많이 검출되었으나 그 검출범위는 슬러지가 41% 퇴비는 29.3% 정도 였다. 퇴비화 이후 문(Phylum) *Bacteroidetes*가 가장 우점되어 있는 것으로 분석되었다. 퇴비화 전과 후의 Family 성상은 서로 상이하게 나타났다. 퇴비화 전에는 *Pseudomonadaceae*가 11.08%로 가장 우점되어 있었으나 퇴비화 후에는 0.68%가 검출되었으며, *Burkholderiaceae*도 퇴비화 전에는 0.27%였으나 퇴비화 후에 15.15%로 증가하였다. *Chitinophagaceae*도 마찬가지로 퇴비화 전에는 3.08%였으나 퇴비화 후 51.93%로 증가하였다. 이는 같은 복합유용미생물이 조건에 따라 우점 되는 종이 변화한다는 것을 의미한다. 또한 숙성이 진행되면서 미생물상이 단순화 되었으며 이는 퇴비화 기간별로 미생물 성상을 연구한 타 연구 결과와도 일치한다[68]. 따라서 복합유용미생물 우점 슬러지나 복합유용미생물 제제가 퇴비의 미생물 성상을 결정하는 것이 아니라 퇴비화가 진행되는 데 있어 도움을 주며 완성퇴비 내 존재하는 미생물의 성상은 유사하다고 판단된다.

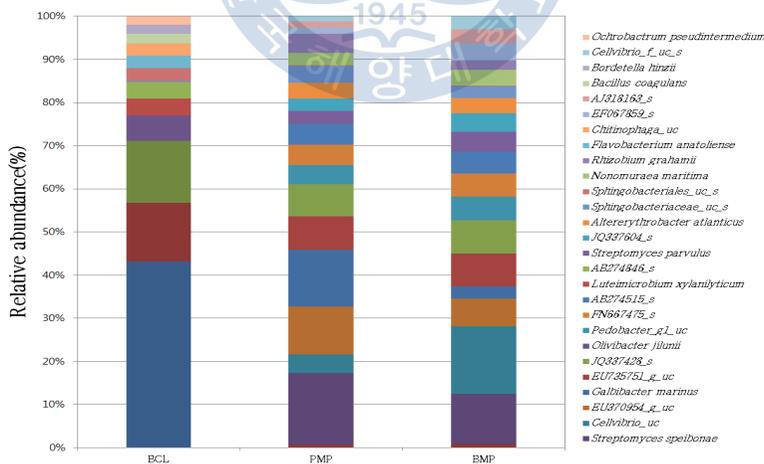


Fig. 5.8 Comparative analysis of the dominant species in the PMP, BMP and BCL composts.

5.4 소 결론

1. Pyrosequencing을 통해 연구에서 사용된 복합유용미생물 우점 슬러지의 bacteria 군집 문(Phylum)의 수준에서 분석한 결과 *Proteobacteria*(41.30%), *Gemmatimonadetes*(14.12%)로 우점 되어 있었다. *Proteobacteria*는 하폐수 처리공정에서 유기물 농도가 높은 환경에서 주로 발견되며, 광합성세균은 이산화탄소 및 황화수소를 흡수 이용하며, 오염 및 악취의 방지 효과를 나타낸다고 알려져 있다. *Gemmatimonadetes*는 활성화된 우수처리장에서 발견되는 호기성균으로 일반슬러지에서는 0.3%정도 발견되었으나 복합유용미생물 우점 슬러지에서는 14.12%로 복합유용미생물 우점 활성화슬러지 공정이 활성화도가 높다고 판단할 수 있다.
2. 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비와 일반슬러지 퇴비의 다양성분석을 한 결과 퇴비화 숙성이 진행되면서 미생물이 단순화 되고 퇴비화에 주로 발견되는 미생물인 *Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, *Firmicutes* 등의 우점도가 높아지는 타 연구결과와 일치하였다. 특히 복합유용미생물에서 4.17% 우점 되어 있는 *Actinobacteria*는 고정된 질소를 공급하는 역할을 하고 퇴비가 숙성이 진행되면서 온도가 뜨거워질 때 활성도가 높아지는데 복합유용미생물 슬러지 퇴비가 일반슬러지 퇴비보다 부숙 온도가 높고, 높은 온도 유지기간도 길었기 때문으로 보인다.
3. 본 연구에서 개발한 BCL의 bacteria 군집을 종(species) 수준 분석하기 위해 시판퇴비인 PMP와 BMP와 비교한 결과 PMP와 BMP에서는 기타 (<1%)가 각각 49%, 48% 였지만 BCL퇴비는 기타 (<1%) 15%로 BCL 퇴비가 다른 시판 퇴비보다 종 다양성은 떨어졌지만 시판퇴비보다 퇴비 내 미생물이 우점 되어 공생역할을 하는 것으로 나타났다.

제 6 장 퇴비 시용에 따른 토양의 이화학특성과 식물생장에 관한 연구

6.1 서론

퇴비의 시용은 토양중의 양분 공급력을 높임과 동시에 이화학성을 개선하고 작물의 생육과 수량 및 품질을 높이는 효과가 있다. 하지만 이런 효과는 퇴비의 성질과 시용조건 등에 의해 크게 다르고, 잘못 시용했을 경우 오히려 작물에 장애가 발생할 수도 있다[75]. 따라서 퇴비의 이용에 있어서는 부숙도, 양분 함유량 등 퇴비 성질을 미리 파악하고 토양의 성질 및 적용작물에 대한 적절한 사용법에 의해 시용해야 한다. 유기성폐기물을 적극적으로 재활용하기 위해서는 생산여건별 유기자원의 실태를 파악하여 물리·화학·생물학적 특성을 평가하고 검정하는 과정이 필요하며 유기성 폐자원을 이용한 퇴비 시용으로 인한 토양의 이화학적 특성과 우수한 퇴비가 생산될 수 있는 기술이 지속적으로 연구될 필요가 있다[76].

또한, 폐기물 내 유해물질이 농경지에 집적되어 작물에 피해를 시키지 않도록 하기 위해 유해성분을 사전 검사 한 후 퇴비화가 시행되어야 하며, 완숙된 퇴비를 토양에 시용해야한다. 본 연구에서는 복합유용미생물이 우점된 슬러지와 음식물쓰레기를 혼합한 시료에 팽화제로 커피박을 사용한 BCL 퇴비의 식물생장 영향실험을 통해 퇴비의 위해성을 분석하고 직접 토양에 시용하였을 때 토양의 이화학적 특성에 미치는 영향 시판 퇴비와의 성능 비교 연구도 함께 실시하였다.

6.2 재료 및 방법

6.2.1 실험장소

첫 번째 복합유용미생물이 작물생장에 미치는 영향에 대해 연구하기 위해 기존 광합성균 접종 퇴비와 복합유용미생물제제 접종 퇴비 15 kg를 토양 3.3 m² × 0.3 m과 혼합하여 3주 동안 경남 의성군 밭에서 실험을 진행하였다. 실험장소인 경상북도 의성군의 기후는 평년 평균기온 24.0℃, 강수량 572.2 mm, 평균풍속 2.6 m/s이며, 남서풍이 주풍으로 나타나고, 태풍이 대한해협을 통과하여 동해상으로 진출할 때 호우현상이 자주 발생하는 기후이다[77]. 두 번째 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비와 일반 시판 퇴비의 식물 생육특성을 비교 실험을 위해 2014년 9월부터 한국해양대학교 웅비관 앞 아치 뜰 4m²에서 3주 동안 실험을 실시하였다. 실험장소인 부산시 영도구 동삼동은 평년 평균기온 17.2℃, 강수량 262.2 mm, 평균풍속 3.4 m/s이며, 태풍으로 인한 피해를 제외하고는 가을철 이동성 고기압의 영향을 주로 받으며 대체로 맑은 날이 많고 가을이 되면서 일교차가 크다[77].

6.2.2 공시식물

첫 번째 실험의 공시식물은 무(열무)를 선정하였으며, 모종을 파종하여 실험을 진행하였다. 열무는 십자화과 무속의 근채류 채소로서 '어린 무'를 말한다. 재배하기가 비교적 간단하고 생육 기간도 짧아서 겨울에는 60일 전후, 봄에는 40일 전후, 제철인 여름에는 25일 전후면 수확하므로 1년에 여러 번 재배할 수 있다. 잎이 연하고 맛이 있어서 뿌리인 무 부분보다는 잎을 주로 이용한다. 잎은 열량이 적고 섬유질이 풍부한 알칼리성 식품으로 비타민A와 비타민C가 풍부하다[78]. 두 번째 실험의 공시식물은 배추를 선정하였으며, 마찬가지로 모종을 파종하였으며 퇴비 시용으로 인한 토양 이화학적 특성을 파악하기 위해 토양분석도 함께 진행하였다.

6.2.3 시용 퇴비

본 연구에서 사용한 복합유용미생물이 식물생장의 유용여부를 판단하기 위해 기존 퇴비화 시설에서 제조하는 광합성균을 접종시킨 돈분퇴비와 같은 공정으로 접종균을 복합유용미생물을 사용한 퇴비를 제조하여 열무를 대상으로 예비실험을 진행하였다. 앞으로 광합성균 접종 돈분퇴비는 PMP, 복합유용미생물 접종 돈분퇴비는 BMP로 명명하겠다. 그 다음으로 본 연구에서 제조한 BCL퇴비의 효능을 검증하기 위해 아무것도 처리하지 않은 대조구와, PMP, BMP, BCL퇴비를 사용하여 배추를 대상으로 실험을 진행하였다.

6.2.4 시험항목 및 측정방법

6.2.4.1 식물성장 영향실험

수분 50% 내외인 퇴비 1.0g을 달아 증류수 10 ml에 넣고 70℃에서 2 시간 환류냉각 추출 후 No.2 여과지로 여과하고, 그 여액 5 ml를 여과지를 바닥에 깔 직경 85 mm 페트리디시에 가하고 대조구는 증류수 50 ml를 가한다. 페트리디시 당 종자의 개수는 무 30개로 한다. 페트리디시는 파라필름으로 감아 수분증발을 막고 통기는 되도록 한다. 실온(20~28℃) 또는 생육상의 온도를 25℃로 하고 빛은 종자의 발아조건에 따르며 특별히 차단하지 않고 5일 후 발아율, 뿌리길이를 측정하여 발아지수 70 이상일 때 부숙 완료로 판정한다[48].

G.I. (germination index) 산출 공식은 다음과 같다.

$$G.I. = (RT \cdot LT / RC \cdot LC) \times 100$$

RC : 실험구의 발아된 종자수

RT : 대조구의 발아된 종자수

LC : 실험구의 발아된 종자의 평균 뿌리의 길이

LT : 대조구의 발아된 종자의 평균 뿌리의 길이

6.2.4.2 토양의 화학적 특성 분석

토양시료 채취는 표토를 15 cm 깊이로 각 처리별로 5 ~ 10개소의 시료를 채취하여 비닐을 깔고 잘 혼합하여 복합시료로 하였다. 토양시료의 건조는 채취한 시료를 그늘에서 깨끗한 종이 위에 얇게 펴서 서서히 풍건토양으로 건조시켰다. 시료조제는 고무망치를 이용하여 곱게 조제하고 2 mm체를 통과시킨 후 이화학적 특성 분석에 사용하였다. 토양 분석은 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법에 준하여 실시하였다[79].

Table 6.1 Analytical methods of plant growth characteristics

Test item	Analytical Method
Moisture	ES 06303
pH	Standard method 4500 (YSI 63)
EC	Standard method 4500 (CONSORT C533)
Organic metter(%)	Walkley-Black method ^[80]
T-N	
T-C	
Av-P ₂ O ₅	
CaO	Standard method of Rural development
MgO	administration (2013-29)
K ₂ O	
CEC	
Heavy metal	ES 07400

6.2.4.3 식물 생육 특성

1) 열무

공시품종으로는 열무를 선택하여 복합유용미생물 우점 퇴비의 비효성 및 비해성을 검증하였다. 이랑거리는 60 cm에 재식거리는 20 cm로 하였고 열무를 2014년 8월 24일 5본씩 파종하였다. 파종일을 기준으로 21일 동안 생육을 확인하였으며 최대엽장(cm), 엽수(ea), 엽중(g), 근장(cm), 근경(cm), 근중(g)의 생육특징을 조사하였다.

2) 배추

퇴비가 식물 생육과 수량에 미치는 영향을 알아보기 위해 모든 시험 퇴비를 토양 무게의 10%를 가하여 작물재배 시험을 진행하였으며 토양수분은 최대 용수량이 50~60%로 되도록 물을 가하였다. 퇴비의 사용량이 적기 때문에 가능한 적게 분쇄하고, 균질화 하였다. 수분은 파종 후 10일간은 초기에 설정된 양을 유지하고 이후에는 생육에 대응해서 적절하게 물을 급수하여 3주간 실험을 진행하였다. 실험구를 조성한 후에 이랑거리는 60 cm에 재식거리는 20 cm로 하였고 배추를 2014년 9월 24일 5본씩 파종하였다. 파종일을 기준으로 21일 동안 생육을 확인하였으며 최대엽장(cm), 엽수(ea), 엽중(g), 근장(cm), 근경(cm), 근중(g)의 생육특징을 조사하였다.

6.3 결과 및 고찰

6.3.1 퇴비 시용에 따른 식물성장 영향실험

본 연구의 호기성 퇴비화 과정 중 12일, 28일째 되던 퇴비를 증류수에 추출하여, 그 여액으로 무의 발아율 및 뿌리 생장률을 조사하였으며 그 결과를 Fig 6.1과 Fig 6.2에 나타내었다. 실험을 시작한 후 12일이 지난 퇴비의 G.I.를 분석한 결과 SSH는 42, SSL는 43, BSH는 63, BSL는 59로 나타났다. 퇴비화 후 12일째의 퇴비는 퇴비기준치인 70을 만족하지 못했지만 일반슬러지 퇴비 보다 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비의 G.I 지수가 높게 나타났다. 이는 일반슬러지를 이용한 퇴비 보다 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비의 숙성속도가 빠르기 때문이라 사료된다. 퇴비화 실험이 끝난 28일째 퇴비의 G.I를 분석해본 결과 SSH는 62.2 SSL는 64.2, BSH는 80.25, BSL는 79.25로 나타났다. 일반슬러지는 28일 이후에도 고온, 저온 조건 모두 완숙퇴비기준치인 70을 만족하지 못하였지만 복합유용미생물 퇴비는 만족하는 것으로 나타났다.

팽화제를 커피박을 사용한 경우 퇴비화 후 12일이 지난 퇴비를 분석해본 결과 SCH는 65, SCL는 61, BCH는 79, BCL는 77로 나타났다. 12일째는 복합유용미생물 우점 슬러지 퇴비의 G.I 지수는 완숙퇴비기준치인 70을 만족하였지만 일반슬러지를 이용한 퇴비 SCH, SCL은 기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 28일째 커피박 퇴비의 G.I를 분석해본 결과 SCH는 83 SCL는 78.2, BSH는 99.1, BSL는 101.5로 나타났다. 팽화제를 커피박을 사용한 경우 모든 퇴비가 완숙퇴비기준치인 70을 만족하는 것으로 나타났고 특히 BCL의 경우 SCH보다 18% 높은 101.5로 나타났다. 이는 복합유용미생물이 퇴비화에 도움을 주고 팽화제로 커피박을 퇴비로 사용할 때 커피박 내 영양성분이 발아율에도 영향을 미친 것으로 추측된다.

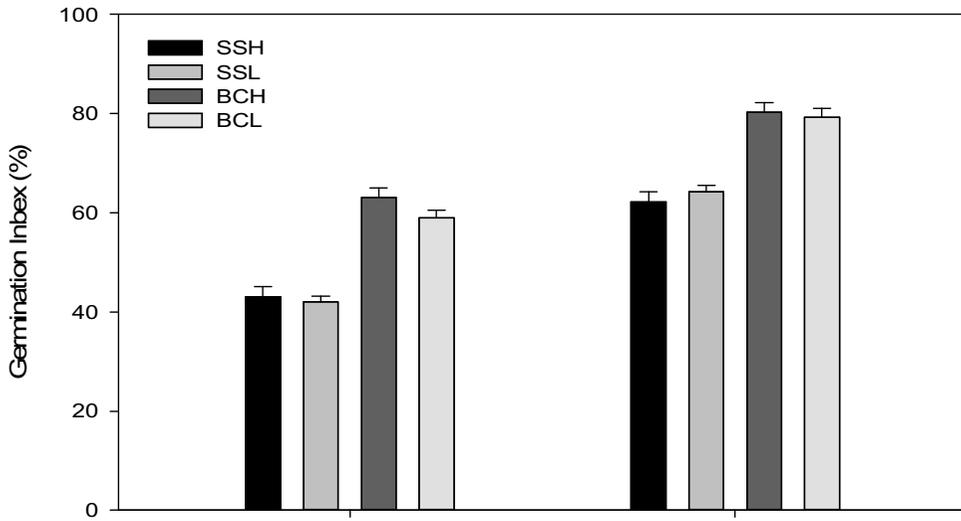


Fig. 6.1 Comparison of germination indices (G.I.) of different composts using sawdust as a bulking agent after 12-days and 28-days.

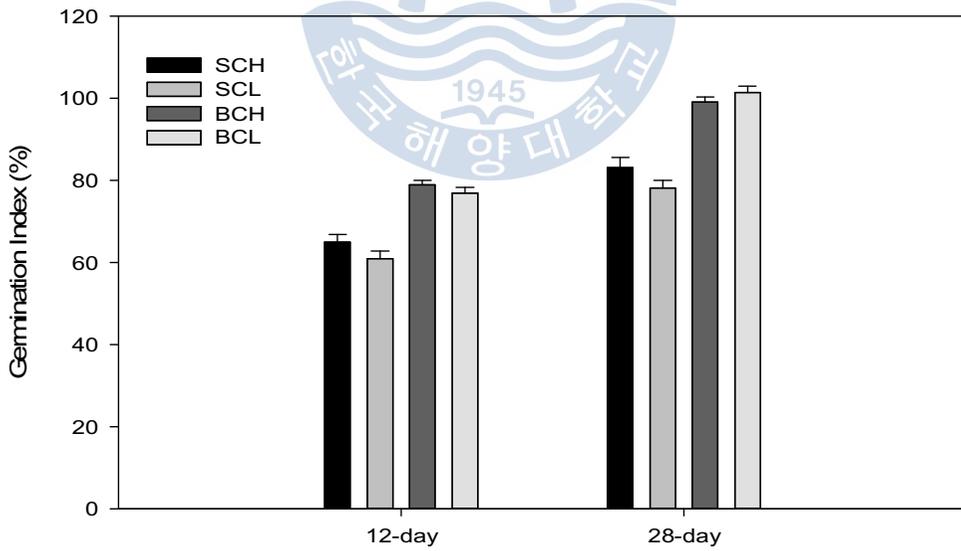


Fig. 6.2 Comparison of germination indices (G.I.) of different composts using coffee grounds as a bulking agent after 12-days and 28-days .

6.3.2 토양 이화학적 성분 변화

6.3.2.1 무기성분의 변화

토양 중의 pH, EC, 유기물 함량의 변화를 조사한 결과는 Fig 6.3 - 6.5와 같다. 시비 전의 공시토양의 평균 pH는 6.07로서 우리나라 평균 밭 토양의 pH 5.5에 비하여 다소 높은 특징을 가지고 있다. 시비 후 대조구를 제외한 모든 실험구에서 토양의 pH는 상승하였으며, 재배 완료 후에도 초기 상태보다 다소 증가한 것으로 나타났으며 이는 퇴비 시용으로 인한 증가로 사료된다. 토양의 퇴비 시비 전 토양의 EC는 0.55 dS/m 이었으며 대조구를 제외한 모든 실험구에서 시비 후 다소 상승하였다가 재배완료 후에 하락하였다. 가장 많이 상승한 실험구는 PMP였으나 BMP, BCL과 거의 차이가 없어 실험구별 퇴비 시용에 의한 EC증가 특이점은 크게 없는 것으로 판단된다. 우리나라 밭 토양의 평균 EC는 2.5 dS/m로 모든 실험구가 이에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 실험에 사용한 토양은 밭으로 사용하는 용도가 아니었기 때문에 퇴비를 시용한 적이 없었으며 그에 따라 염류가 집적되지 않은 토양이기 때문이라 추측된다. 유기물 함량을 조사한 결과 퇴비 시용 전 토양의 평균 유기물 함량은 2.12 % 이었으나, 대조구를 제외하고 퇴비 시용 후 모든 실험구 토양의 유기물함량이 증가하였다. 특히 BCL퇴비를 시용한 토양의 유기물함량이 2.99%로 초기보다 약 29% 증가하였다. 모든 토양의 유기물 함량은 수확 후 감소하는 추세로 분석되었으며 BCL퇴비를 시용한 토양의 유기물함량은 수확 이후에도 초기 토양의 유기물 농도보다 높은 것을 확인 할 수 있었다. 이는 BCL퇴비 내 유기물 함량이 42%로 다른 퇴비보다 높았기 때문이라 사료된다.

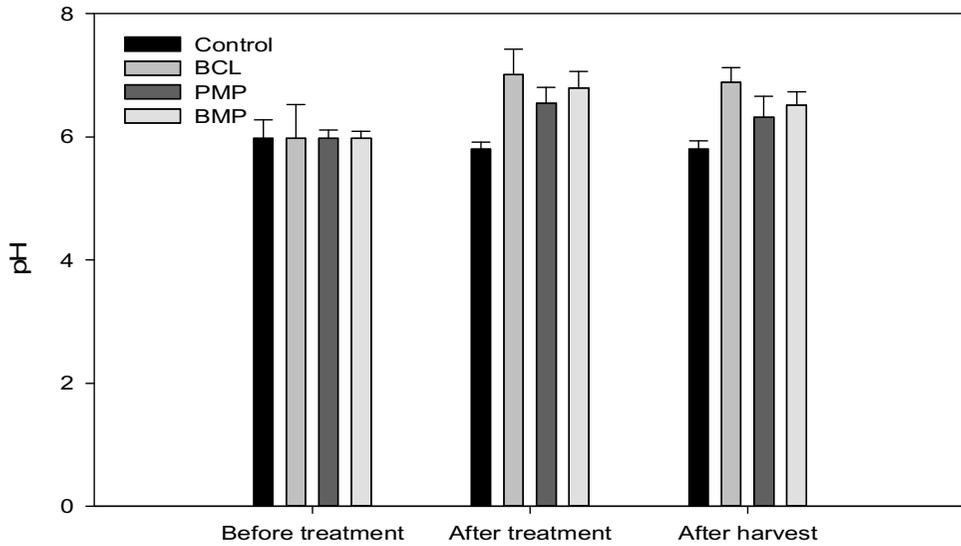


Fig. 6.3 Comparison of soil pH's before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

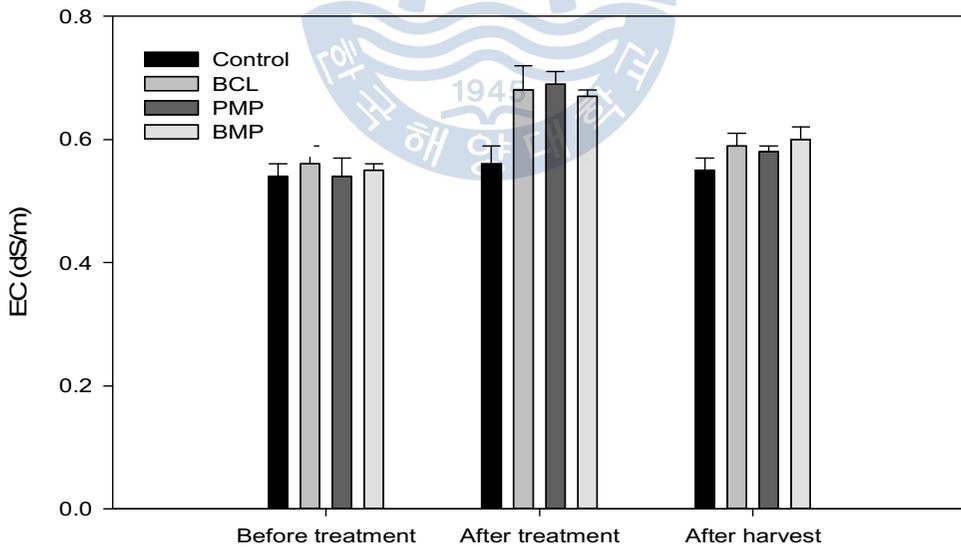


Fig. 6.4 Comparison of soil EC before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

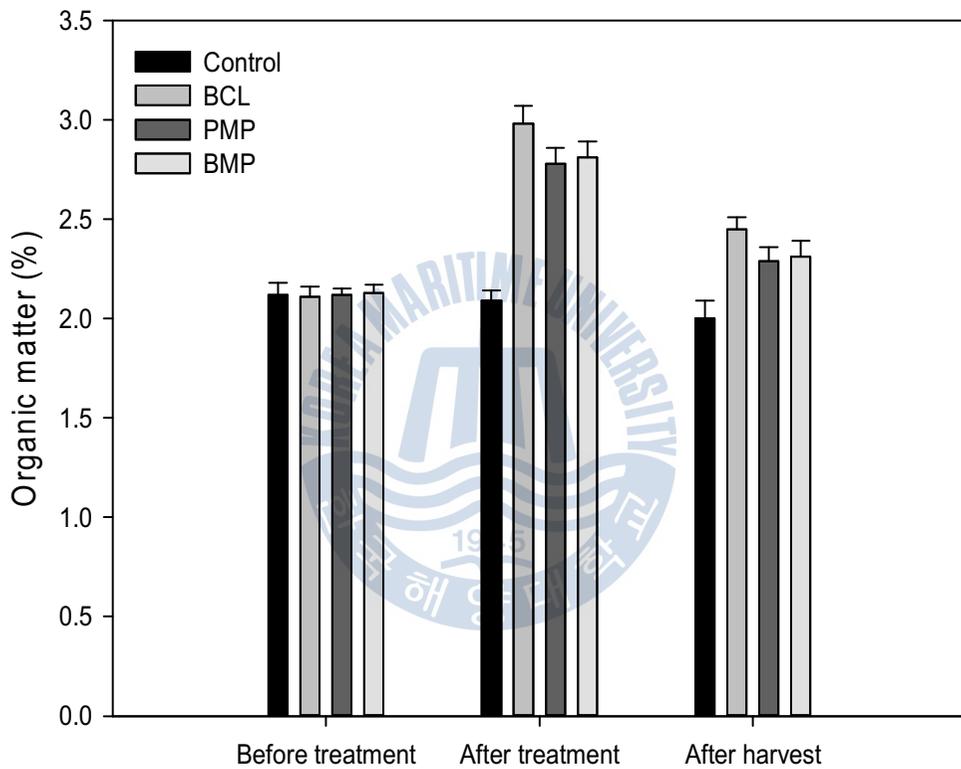


Fig. 6.5 Comparison of soil organic matter before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

토양 중 총 질소와 유효인산의 변화를 조사한 결과를 Fig 6.6 - 6.7에 나타냈다. 실험 전 토양 중 총 질소 함량은 평균 0.13%였으나 시비 후 대조구를 제외한 모든 토양에서 총질소의 함량이 증가하였다. 특히 BCL 시용 토양의 총질소 농도가 평균 0.20%로 약 35% 증가하였다. 대조구는 질소원을 추가하지 않고 토양 그대로 경작하였기 때문에 변함이 거의 없었으며 재배 후 초기 토양 질소농도 보다 감소하는 것을 확인하였다. 경작 후에는 모든 실험구의 질소원이 감소하였으며 이는 질소원을 식물이 대부분 이용했기 때문인 것으로 사료된다. 토양 중 유효인산의 함량은 시비 전 평균 0.009%의 범위로 우리나라 평균 밭 토양의 평균치인 0.05%보다 낮았으며, 실험에 사용한 토양이 유효인산이 매우 결핍되어 작물을 수확하는데 부적합한 상태로 보인다. 그러나 시비 후 대조구를 제외한 모든 실험구에서 유효인산의 농도가 증가하였으며 증가폭이 가장 높은 퇴비는 BCL 퇴비이다. 이는 BCL 퇴비의 유효인산의 함량이 다른 퇴비보다 높았기 때문이라고 판단된다. 재배 완료 후에는 모든 실험구에서 유효인산의 농도가 이전수준으로 감소하였으며 대조구는 초기 유효인산농도보다 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 이는 퇴비를 시용한 경우에는 퇴비 내 인산을 식물이 이용하고 토양의 인산은 거의 이용하지 못하나, 퇴비를 시용하지 않은 경우에는 식물이 성장하기 위해 토양중의 소량의 인산을 작물이 이용한 것으로 추정된다 [47].

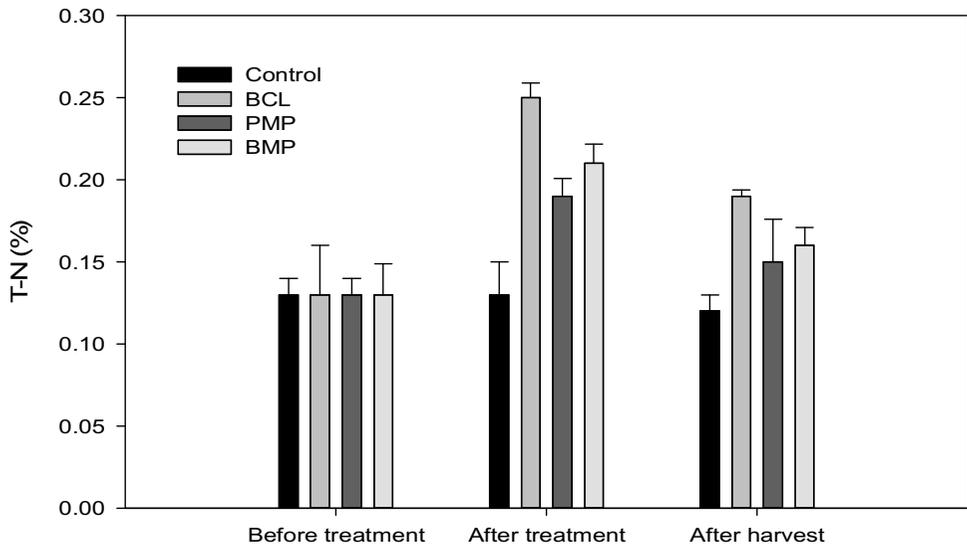


Fig. 6.6 Comparison of soil T-N before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

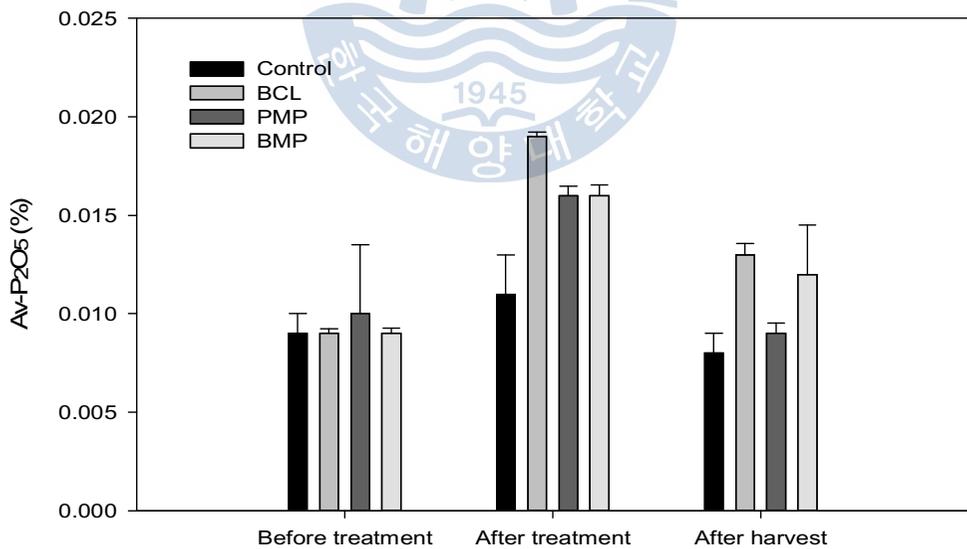


Fig. 6.7 Comparison of soil P₂O₅ before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

6.3.2.2 치환성 양이온

토양 중 치환성 Ca, Mg 및 K 함량 변화는 Fig 6.8 - 6.10과 같다. 치환성 Ca함량은 시비 전 토양보다 시비 후 토양에서 증가하였으며 증가폭은 BCL 퇴비가 가장 컸다. 재배완료 후 Ca함량은 모든 실험구에서 감소하였으며, 처리 전보다 치환성 Ca의 농도가 감소하였다. 치환성 Mg함량은 시비 전 토양보다 시비 후 토양에서 증가하였으며 증가폭은 Ca와 마찬가지로 BCL이 가장 컸다. 재배완료 후 Ca함량은 모든 실험구에서 감소하였으며, 처리 전보다 치환성 Mg의 농도가 감소하였다. 치환성 K함량은 시비 전 토양보다 시비 후 토양에서 증가하였으며 증가폭은 재배완료 후 K함량은 모든 실험구에서 감소하였으며, BCL을 제외한 나머지 실험구는 처리 전 토양의 치환성 K함량 보다 농도가 감소하였다. 토양 중 CEC, Fe 및 Mn 함량 변화는 Fig 6.13 - 6.15과 같다. 토양 중 CEC함량은 대조구를 제외한 모든 실험구에서 퇴비 시비 후 증가하였으며 가장 증가폭이 높은 실험구는 BCL이었다. 이는 퇴비 내 유기물질 함량 차이로 인한 것으로 사료되며 BCL퇴비 내 유기물 함량이 가장 높았기 때문에 CEC가 증가율이 높은 것으로 사료된다. Fe와 Mn의 농도도 토양에 퇴비를 시비 전보다 증가 하였으며 가장 증가율이 높았던 퇴비는 마찬가지로 BCL퇴비였다. 이는 퇴비 시용을 통해 퇴비 내의 영양염이 토양으로 전달되고, 복합유용미생물이 토양미생물의 활동을 왕성하도록 도움을 줘 토양 내 양이온의 용출량이 증가하였기 때문이라 추측된다.[47].

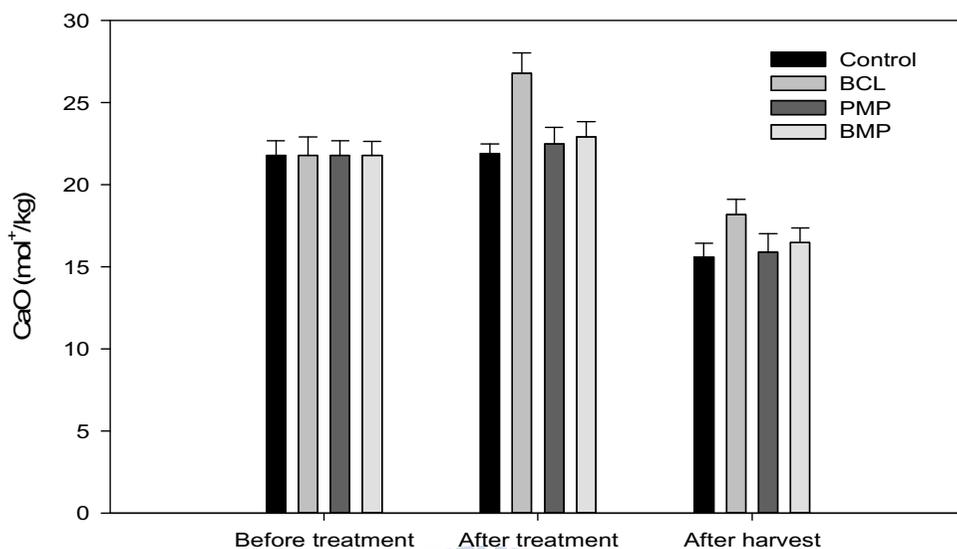


Fig. 6.8 Comparison of soil CaO before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

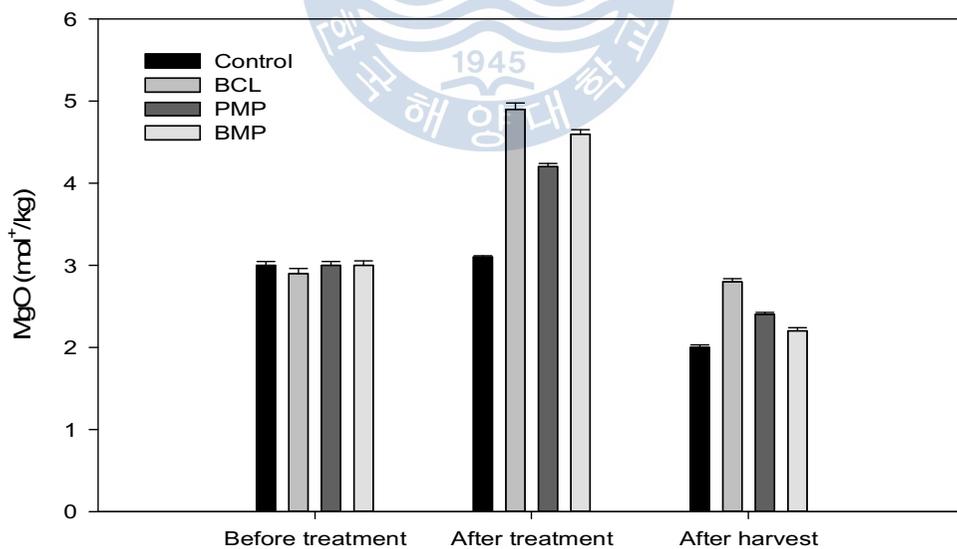


Fig. 6.9 Comparison of soil MgO before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

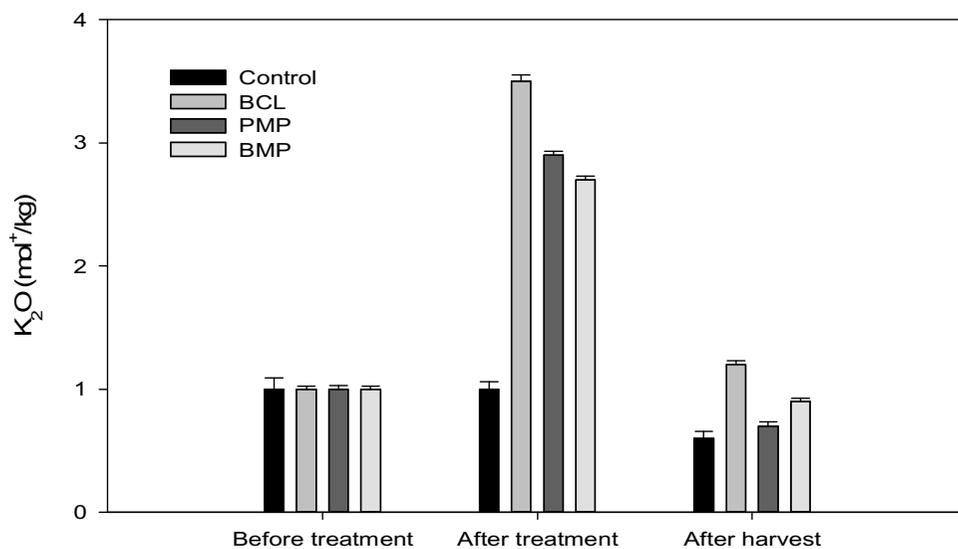


Fig. 6.10 Comparison of soil K_2O before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

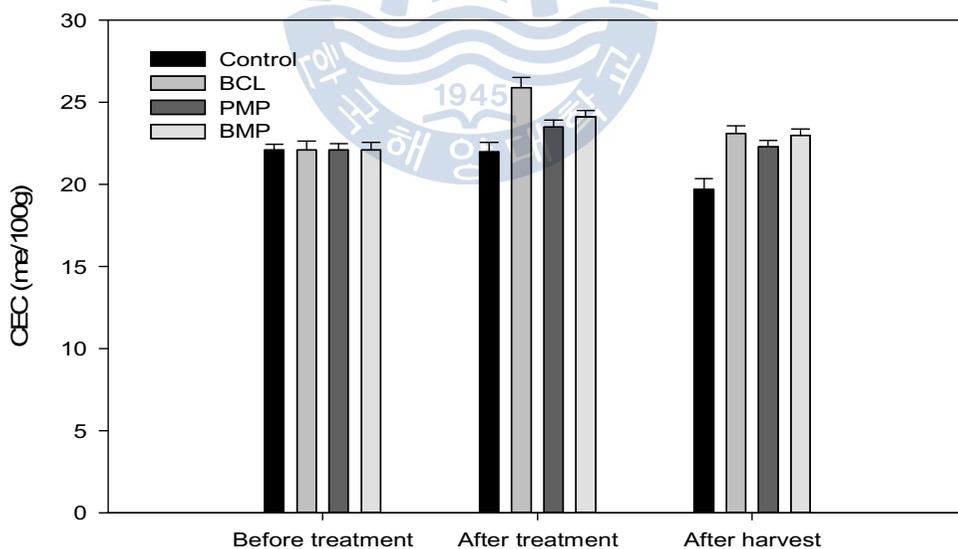


Fig. 6.11 Comparison of soil CEC before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

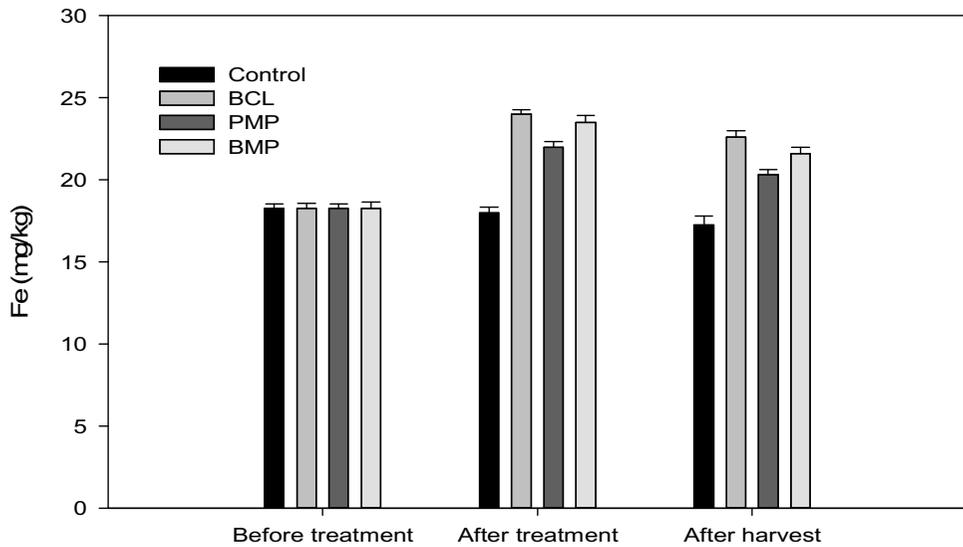


Fig. 6.12 Comparison of soil Fe before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

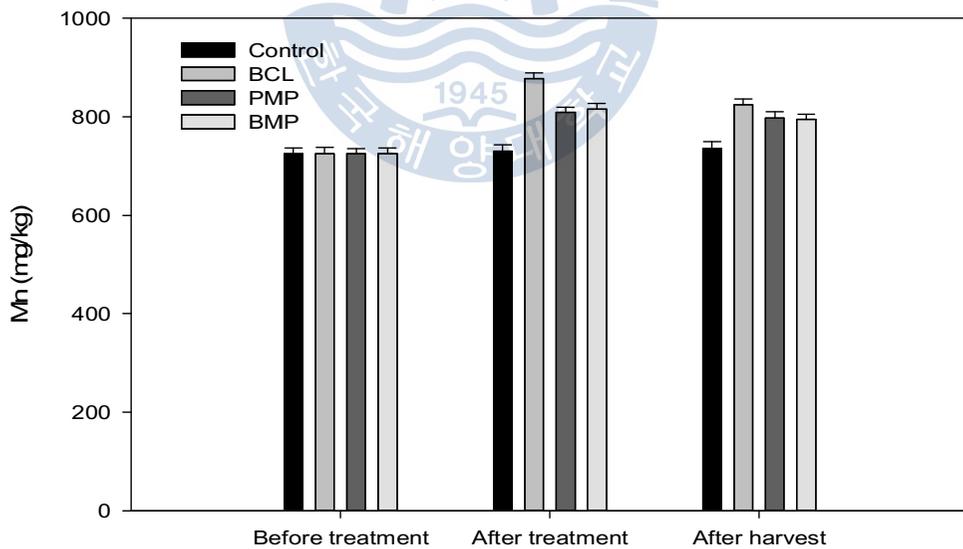


Fig. 6.13 Comparison of soil Mn before and after treatment of compost, and after harvest depending on different compost treatment.

6.3.3 중금속의 변화

퇴비를 토양에 시용하였을 때 중금속함유량은 인간 체내 중금속 유입에 큰 영향을 미치기 때문에 퇴비를 판정할 때 유해 중금속을 규제하고 있다. 본 연구에서 퇴비 시용에 따른 토양 중 중금속의 함량 변화를 조사한 결과는 Table 6.2과 같다. 토양 중의 Cr의 평균함량은 100 mg/kg정도이며, 대부분 난용성으로 존재한다. 본 연구에서 Cr의 함유량은 퇴비시용에 의해 소량 증가하였다가 수확후 초기보다 낮은 상태로 줄어드는 것을 확인하였다. Cu의 경우 우리나라 토양 중 천연함유량이 20 mg/kg정도 인 것으로 보고되고 있으나 본 연구가 진행된 실험장소의 토양은 약 9 mg/kg정도 검출되었다. Cr과 마찬가지로 퇴비 시용에 의해 약 11 ~ 40% 증가하였다가 수확 후 감소하였다. 일반토양 중 Cd함량은 1이하이며, Zn의 함량은 평균 30 ~ 50 mg/kg정도로 알려져 있다. 본 연구 토양의 Cd함량은 약 0.9 mg/kg로 일반토양의 Cd농도와 유사하였다. 다른 중금속과 마찬가지로 퇴비 주입 후 13 ~ 30% 증가하였으며 가장 높은 증가율이 나타난 퇴비는 돈분을 이용한 퇴비인 PMP퇴비였다. 퇴비 시비전 Zn 함유량은 약 46 mg/kg로 평균 토양의 농도와 유사하였으나 시비 후 15 ~ 30% 증가하였다. Zn은 수확 후에도 증가된 농도에서 다른 중금속과 달리 줄어들지 않고 비슷하거나 오히려 증가한 것을 확인할 수 있었다. Zn은 pH 6.5 이상에서 흡수가 감소되는데 토양에 퇴비를 시용 후 실험구의 pH가 증가되었기 때문에 식물에 흡수되는데 오히려 방해되었기 때문이라 추측된다. Zn은 결핍되면 여러 가지 건강장해를 동반하기 때문에 Zn이 식물체에 잘 흡수될 수 있도록 하기 위해 pH조절이 필요하다 사료된다. 토양 중 Pb의 천연 함유량은 10 mg/kg정도이며, 토양 중 Pb의 농도는 $PbCO_3$ 나 $Pb_3(PO_4)_2$ 의 형태로 불용화 되어 있다가 산성 조건 하에서 가용화되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 퇴비 시용 전 약 20 mg/kg로 평균 토양보다 높았으며 퇴비 시용 후 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 수확 후에도 비슷하거나 증가하였는데 이는 Zn과 마찬가지로 pH가 알칼리성이었기 때문이라 사료된다.

Table 6.2 Changes of heavy metals contents in soil during growth of chinese cabbage

Soil	Cd (mg/kg)			Cr (mg/kg)			Pb (mg/kg)			Cu (mg/kg)			Zn (mg/kg)		
	B	A-T	A-H												
Control	0.89	0.91	0.92	35.2	36.0	32.5	19.8	20.2	20.6	8.9	10.1	11.1	46.1	53.0	55.2
BCL	0.89	1.02	0.98	35.2	38.1	33.8	19.8	22.8	22.9	8.9	13.1	11.5	46.1	62.2	70.4
PMP	0.89	1.26	1.11	35.2	37.2	34.1	19.8	25.1	26.2	8.9	14.8	12.1	46.1	59.5	65.7
BMP	0.89	1.16	1.08	35.2	37.9	32.9	19.8	26.4	26.8	8.9	13.9	11.9	46.1	65.4	78.3

B : before treatment A-T : after treatment A-H : after harvest

6.3.4 퇴비에 따른 공시식물 성장을 비교

6.3.4.1 열무 생육 및 수량

무(열무)의 복합유용미생물 퇴비(BMP)와 광합성세균 퇴비(PMP)를 각각 토양에 시용하였을 때의 작물 생육 특성에 대해 관찰한 결과 Fig 6.14과 같은 생육상태를 나타냈다. 복합미생물제제 처리 퇴비와 광합성균 퇴비 처리 토양에 열무 모종을 정식 후 3일이 지나면서 성장속도나 엽색, 엽 면적에서 다소간의 차이가 남을 알 수 있다. 10일 이후 관찰 시 부터 엽색, 엽 면적이 확연하게 차이가 났으며 8일 후 관찰을 진행 하였을 때 퇴비 처리구의 무의 성장속도가 극명하게 차이나 남을 알 수 있다. 3주 실험 이후 실험구 별로 최대엽장, 엽수, 엽중에 대해 관찰한 결과를 Table 6.3에 나타내었다. BMP는 PMP에 비해 잎의 길이가 약 30%정도, 잎의 수가 22% 큰 것으로 나타났다. 뿌리의 길이가 약 10%, 넓이가 약 50% 넓은 것으로 나타났다. 특히 잎의 무게는 65% 뿌리의 무게는 80% 더 무거운 것으로 나타나 복합유용미생물이 광합성균 보다 잎과 뿌리를 더 튼튼하게 생육하는데 도움을 주는 것으로 나타났다.

Table 6.3 Effect of pig manure compost based on beneficial microorganism (BMP) and pig manure compost based on photosynthetic microorganisms (PMP) on growth of radish

	BMP		PMP	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
Leaf length(cm)	30.9	± 2.4	22.0	± 3.2
No. of leaves	11.4	± 0.6	8.9	± 1.3
Fresh weight(g)	110.7	± 14.0	38.8	± 17.1
Root length(cm)	12.5	± 1.9	11.2	± 2.4
Root width(cm)	2.0	± 0.2	1.0	± 0.3
Root weight(g)	22.7	± 4.4	4.6	± 3.1



Fig 6.14 Effect of composts of beneficial microorganism pig manure (BMP) and photosynthetic microorganisms pig manure (PMP) on growth radish.

6.3.4.2 배추 생육 및 수량

BCL 퇴비가 배추의 생육에 미치는 영향에 대해 연구하기 위해 한국해양대학교 응비관 앞 아치뜰에서 26일 동안 식물식재 실험을 진행한 결과 Fig. 6.15와 같이 각 퇴비별 생육에 차이가 발견되었다. 응비관 앞의 토양은 빈 영양상태의 토지로 PMP, BMP, BCL 퇴비를 토지양의 10%를 시비하였으며 비교실험을 위해 대조구(control)에는 아무런 처리를 하지 않았다. 퇴비로 처리한 토양에 배추(chinese cabbage)의 모종을 식재하여 관찰하였다. 초기 5일 동안에는 매일 물을 주었으며, 이후에는 자연적으로 방치하였다가 건조도가 심한 경우 물을 주는 방식을 택하였다. 3주 실험 이후 처리 구 별로 최대 엽장, 엽수, 엽중에 대해 관찰한 결과를 Table 6.4에 나타내었다.

먼저 잎 길이에 대해 분석해본 결과 대조구는 평균 6.20 cm였으나 PMP는 약 27%증가한 8.40 cm, BCL과 BMP는 약 44%증가한 11.0 cm, 11.4 cm로 복합유용미생물이 광합성균퇴비보다 잎 길이를 더 길게 하는데 도움을 주는 것으로 나타났다. 잎의 수도 마찬가지로 PMP는 37%였는데 비해 BCL은 40% BMP는 49%증가한 것으로 나타났다. 뿌리의 길이와 무게의 생육상태는 거의 비슷한 것으로 나타났으나 뿌리의 두께는 대조구 3.5 cm에 비해 BCL이 28% 증가하여 다른 실험구와 비교하여 가장 뿌리생육상태가 좋은 것으로 나타났다. 이는 뿌리를 튼튼하게 도움을 주는 미생물인 Chitinophaga(36.96%)와 , Chitinophagaceae_uc_s(11.66%)가 BCL에 우점되었기 때문이라 추측된다.

Table 6.4 Effect of compost injection by pig manure compost based on photosynthetic microorganisms (PMP), beneficial microorganism sludge with coffee (BCL) and beneficial microorganism pig manure(BMP), on growth of chinese cabbage

	Control		PMP		BCL		BMP	
	Average	Standard deviation						
Leaf length (cm)	6.20	± 1.3	8.40	± 2.7	11.0	± 2.54	11.4	± 1.14
No. of leaves (ea)	3.90	± 1.07	6.16	± 0.5	6.46	± 1.56	7.60	± 1.67
Fresh weight (g)	0.30	± 0.20	0.56	± 0.1	0.63	± 0.44	0.66	± 0.1
Root length (cm)	0.20	± 0.08	0.25	± 0.13	0.22	± 0.07	0.24	± 0.11
Root width (cm)	3.50	± 0.32	3.96	± 1.62	4.80	± 1.77	4.32	± 1.98
Root weight (g)	0.19	± 0.04	0.08	± 0.05	0.20	± 0.06	0.20	± 0.1



Control



PMP



BCL



BMP

Fig 6.15 Appearances of chinese cabbage grown on various composts.

6.4 소 결론

1. 종자발아율을 이용하여 퇴비의 식물성장 영향실험을 진행한 결과 팽화제를 톱밥을 사용한 경우 일반슬러지 퇴비는 완숙퇴비 기준치인 70을 만족하지 못했지만 복합유용미생물 퇴비는 만족하는 결과가 나타났으며 팽화제를 커피박을 사용한 경우 모든 퇴비가 완숙퇴비기준치인 70을 만족하는 것으로 나타났다. 특히 BCL의 경우 SCH보다 18% 높은 101.5로 나타났다.
2. 퇴비 시용으로 인해 토양의 이화학적 특성을 분석한 결과 BCL퇴비를 사용한 실험구가 대조구와 비교하여 유기물함량이 29% 증가하고 총질소의 함량도 약 35% 증가하였다. 유효인산의 농도도 마찬가지로 퇴비 시용 후 증가하였으며 이는 BCL 퇴비의 유기물 함량, 총질소, 유효인산의 함량이 다른 퇴비보다 높았기 때문이라고 판단된다. Ca, Mg, K, Fe, Mn, CEC도 BCL퇴비를 사용한 경우 가장 높은 증가율이 나타났다.
3. 퇴비를 토양에 시용하였을 때 중금속 함유량의 변화를 하기 위해 Cr, Cu, Cd, Zn, Pb의 농도를 분석해본 결과 돈분을 이용하여 퇴비를 제작한 퇴비인 BMP, PMP의 증가율이 높았으며 상대적으로 BCL은 낮은 증가율이 나타났다.
4. 퇴비 시용에 따른 식물 성장률 비교를 위해 열무와 배추를 대상으로 실험을 진행하였다. 그 결과 열무는 BMP가 PMP에 비해 잎의 길이가 약 30%정도, 잎의 수가 22% 큰 것으로 나타났다. 뿌리의 길이가 약 10%, 넓이가 약 50% 넓은 것으로 나타났다. 특히 잎의 무게는 65% 뿌리의 무게는 80% 더 무거운 것으로 나타났다. 배추는 BCL과 BMP를 사용한 경우 잎 길이가 약 44%, 잎의 수도 40 ~ 49% 증가되고 특히 BCL의 경우 뿌리의 두께가 28% 증가하여 가장 뿌리 생육상태가 좋은 것으로 나타났다.

제 7 장 경제성 분석

7.1 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비화

복합유용미생물 우점 슬러지를 이용하여 호기성 퇴비화를 진행할 때 일반슬러지와 비교하여 경제성분석을 진행하였다. 환경부에서 제시하고 있는 음식물류폐기물 호기성퇴비화시설의 운영비 산정(50톤/일)표를 기초자료로 이용하였으며 음식물과 일반슬러지를 혼합한 병합 공정일때와 복합유용미생물슬러지 병합 공정일 때로 나누어서 산정하여 Table 8.1에 나타내었다[81]. 먼저 일반슬러지, 복합유용미생물 우점슬러지 모두 슬러지를 폐기하지 않고 재활용하기 때문에 슬러지 처리비용 톤당 약 160,000원 정도를 절감할 수 있다. 또한 일반슬러지로 퇴비화를 할 때 원활하고 효과적인 퇴비화를 위해 인위적으로 유용미생물제제를 주입하고 있는데 복합유용미생물 우점 슬러지는 미생물제제 주입이 필요 없어 미생물제제 및 약품 주입예산을 절감할 수 있다. 또한, 복합유용미생물 우점 슬러지는 악취발생이 없기 때문에 재활용시설에서 악취로 인한 민원을 줄이고, 악취제어시설도 불필요하기 때문에 악취제어 시설 유지비도 절감할 수 있다.

일반적으로 하루 50톤 규모의 음식물류 폐기물 퇴비화시설에서 퇴비화 공정운영을 위해 톤당 약 95,000원이 소요된다. 이때 부대비용과 인건비를 제외하고 음식물류 폐기물의 이물질 및 슬러지 처리비용 등의 경비가 30%정도 차지하고 있다. 이를 슬러지와 병합 퇴비화를 할 경우 슬러지 처

리비용을 줄일 수 있기 때문에 톤당 약 4% 절감 할 수 있다. 이를 복합유용미생물이 우점된 슬러지를 사용할 경우 톤당 처리비용이 음식물폐기물만 퇴비화 했을 때 보다 약 12%정도 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

퇴비화는 현재 다른 방법들 보다 재활용 단가가 높은 편으로 복합유용미생물 우점 슬러지와 음식물류 폐기물을 병합 퇴비화를 한다면 재활용 단가를 12%정도 낮출 수 있으며, 복합유용미생물의 우점으로 인해 퇴비화 과정 중에 악취발생이 없기 때문에 악취방지시설 운영비가 절감되고 민원이 해소 되는 등의 이득이 예상된다.



Table 7.1 Economic benefit analysis of BM compost in terms of food waste disposal costs

Division	Item of expenditure	Annual average cost (Unit: won / year)		
		Food Waste	combined of Food waste and control sludge	combined of Food waste and bm sludge
Cost of materials ^a	50 tons per day based on material costs	128,016,400	128,016,400	128,016,400
Labor costs ^b	50 tons per day based on labor costs	299,862,822	299,862,822	299,862,822
	Power	23,342,250	23,342,250	23,342,250
	Water utilities	63,980,735	63,980,735	63,980,735
	Depreciation	178,829,400	178,829,400	178,829,400
	Repair	55,209,122	55,209,122	55,209,122
	Test inspection fees	4,953,000	4,953,000	4,953,000
	Insurance	27,754,863	27,754,863	27,754,863
Expenses ^c	Employee benefits	3,829,577	3,829,577	3,829,577
	medicines	127,724,000	127,724,000	-
	Waste treatment	280,125,000	280,125,000	280,125,000
		54,000,000	-	-
	Water regulators costs	248,200,000	248,200,000	248,200,000
	Taxes and dues	19,538,703	19,538,703	19,538,703
Incidental cost	administrative expenses ^d	75,768,294	73,068,293	66,682,093
	Profit	146,311,777	140,641,776	127,230,756
	Total operating expenses	1,737,445,943	1,675,075,941	1,527,554,721
	Operating costs per ton	95,202	91,784	83,701

7.2 복합유용미생물 우점 슬러지를 이용한 퇴비화의 팽화제로 커피박을 이용한 퇴비화

음식물류 폐기물과 복합유용미생물 우점슬러지를 혼합한 퇴비가 경제성도 확보되고 효과도 검증하였다. 본 연구에서 새롭게 도입하는 커피박을 팽화제로 이용할 경우의 경제성을 분석한 결과를 Table 8.2와 같다. 팽화제로 주로 이용하는 톱밥의 대안으로 커피박을 사용한다면 커피박 운송비를 포함하더라도 약 26%의 재활용비용 절감가능성을 확인하였다. 이는 커피박 사용으로 인해 팽화제로 사용하는 톱밥 구입비용이 절감되었기 때문이다. 특히 톱밥의 가격이 매년 증가하고 있으며 산림법 강화로 국내 톱밥공급이 어려워 주로 수입하여 사용하고 있어 수입경비 절감효과까지 기대할 수 있다. 또한 일반폐기물로 분류되어 톤당 처리비용이 약 50,000원인 커피박의 재이용으로 인해 커피박 처리비용이 절감되고 매립되었을 때 발생하는 이산화탄소의 양까지 생각하면 경제적인 효과가 상당할 것으로 판단된다. 또한 커피 내 카페인 성분이 퇴비화 과정 중 악취를 흡착하여 악취물질 발생을 저감시켜 주고 커피박 내 영양성분들이 최종퇴비의 유기물 함량도 증가시켜줘 퇴비의 가치를 상승시켜주기 때문에 재활용의 가치가 높다고 판단된다.

Table 7.2 Economic benefit analysis of using coffee grounds as a bulking agent in terms of food waste disposal costs

Division	Item of expenditure	Annual average cost (Unit: won / year)	
		combined of Food waste and bm sludge	bulking agent using coffee
Cost of materials ^a	50 tons per day based on material costs	128,016,400	128,016,400
Labor costs ^b	50 tons per day based on labor costs	299,862,800	299,862,800
	Power	23,342,200	23,342,200
	Water utilities	Fuel and water	63,980,700
	Depreciation		178,829,400
	Repair		55,209,100
	Test inspection fees	Treatment facility inspection fees	4,953,000
	Insurance		27,754,800
Expenses ^c	Employee benefits	Apparel	3,829,500
	medicines	Deodorants, neutralizing agents, microbial	-
	Waste treatment	Waste water	280,125,000
		Sludge	-
	Water regulators costs	Sawdust	248,200,000
	Taxes and dues	Utilities and car insurance	19,538,700
Incidental cost	administrative expenses ^d	(a+b+c)× 5%	66,682,100
	Profit	(b+c+d)× 10%	127,230,700
	Total operating expenses		1,527,554,400
	Operating costs per ton		83,700
			1,279,354,400

7.3 소결론

1. 음식물류 폐기물을 퇴비화 하기위해 톤당 약 95,000원이 소요 되고 있으나 본 공정에서 슬러지와 병합 퇴비화를 할 경우 슬러지 처리비용을 절감할 수 있기 때문에 톤당 약 4% 절감 할 수 있다.
2. 이때 복합유용미생물이 우점된 슬러지를 사용할 경우 음식물폐기물 만 퇴비화 하는 경우보다 12%정도 절감할 수 있으며 복합유용미생물 제제가 퇴비화 과정 중 발생하는 악취를 제어하는데 도움을 주기 때문에 별도로 악취방지시설을 둘 필요가 없으며 그에 따른 운영비를 절감할 수 있다. 또한 퇴비화시설의 노동자와 인근 주민들에 악취관련 민원을 해소할 수 있다..
3. 현재 팽화제로 주로 사용하는 톱밥을 대체하여 커피박을 사용한다면 커피박의 운송비를 포함하여 톤당 처리비용의 약 22.2% 절감이 가능하며 커피박의 처리비용까지 합산하면 그 가치는 더 커질것으로 사료된다.

제 8 장 종합결론

복합유용미생물을 우점시킨 하폐수 슬러지에 음식물 쓰레기를 혼합하고, 폐기물 커피박을 팽화제로 사용하여 호기성 퇴비화를 시도하였으며 생산된 퇴비의 효과 검증실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 복합미생물제제의 주입에 의한 슬러지의 EPS 함량변화를 비교하기 위해 복합유용미생물 주입 전후의 단백질과 탄수화물 성분 비교실험을 수행한 결과 복합유용미생물 주입으로 단백질이 약 52% 증가하고, 탄수화물이 약 32% 증가되는 것을 확인하였다.
2. 실험실 규모의 활성슬러지시스템에 복합유용미생물을 우점시킨 결과 COD의 제거율은 91 ~ 93%, 총질소의 제거율은 78 ~ 81%, 총인인의 제거율은 82 ~ 85%로 모두 하수도 방류수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났으며 복합유용미생물 주입으로 인해 처리효율이 일반 활성슬러지법보다 향상되는 것을 확인하였다.
3. 커피박을 팽화제로 사용한 경우 톱밥을 사용한 경우보다 유기물질 분해가 더 빠르게 진행되고 퇴비기간도 단축 할 수 있음을 확인하였다.
4. 일반슬러지 퇴비보다 복합유용미생물 슬러지 퇴비의 악취농도가 적었으며 커피를 팽화제로 사용한 경우 복합미생물 슬러지 퇴비에서는 악취가 전혀 발생하지 않음을 확인하였다.
5. 커피박의 카페인 함유율은 퇴비 숙성이후 99.98%이상 제거되어 퇴비를 토양에 시용하였을 때 카페인으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 평가되었으며 커피박을 팽화제로 사용한 퇴비가 대조구와 비교하여

유기물함량이 29% 증가하고 총질소의 함량도 약 35% 증가하였으며 퇴비 내 유기물질의 함량이 높고 복합유용미생물이 토양미생물의 활동을 왕성하도록 도움을 줘 토양 내 양이온의 용출량이 증가함을 확인하였다.

6. 종자발아율을 이용하여 퇴비의 식물성장 영향실험을 진행한 결과 커피박을 팽화제로 사용한 경우 모든 퇴비가 완숙퇴비기준치인 70을 만족하는 것으로 나타났다.
7. 퇴비 시용에 따른 식물 성장률 비교를 위해 열무와 배추를 대상으로 실험을 진행한 결과 열무는 BMP가 PMP에 비해 잎의 길이가 약 30% 정도, 잎의 수가 22% 큰 것으로 나타났으며 뿌리의 길이가 약 10%, 넓이가 약 50% 넓은 것으로 나타났다. 특히 잎의 무게는 65% 뿌리의 무게는 80% 더 무거운 것으로 나타나 복합유용미생물이 광합성균 보다 잎과 뿌리를 더 튼튼하게 생육하는데 도움을 주는 것으로 나타났다. 배추는 BCL과 BMP를 사용한 경우 잎 길이가 약 44%, 잎의 수도 40 ~ 49% 증가되고 특히 BCL의 경우 뿌리의 두께가 28% 증가하여 가장 뿌리 생육상태가 좋은 것으로 나타났다.
8. 복합유용미생물이 우점된 슬러지를 사용하여 퇴비화 할 경우 음식물 쓰레기만 퇴비화 하는 경우보다 12%정도 비용을 절감할 수 있으며 별도로 약취 방지시설이 필요없고, 또한 톱밥을 대체하여 커피박을 팽화제로 사용한 경우 톤당 처리비용의 약 22.2% 절감되는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- [1] Ministry of Environment of Korea, 2013. 폐기물관리법 [시행 2014.8.7.] [법률 제11998호, 2013.8.6., 타법개정] <http://www.law.go.kr>
- [2] National Institute of Environmental Research, 2004. “유기성폐기물 종합관리기술 구축(Ⅰ)”, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/096163.pdf>
- [3] Ministry of Environment of Korea, 2013. “전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2012년도)”, <http://webbook.me.go.kr>
- [4] Ministry of Environment of Korea, 2008. “하수슬러지관리 종합대책 (수정)”, <http://webbook.me.go.kr>
- [5] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2013. 비료관리법 [시행 2014.8.7.] [법률 제11998호, 2013.8.6., 타법개정], <http://www.law.go.kr>
- [6] Joo, Y. S., 2001. “An effect for the plant-growth and compost by salt in garbage”, M.S., University of Seoul
- [7] Ministry of Environment of Korea, 2013. “음식물쓰레기 이대로 괜찮을까요?”, <http://www.me.go.kr>
- [8] Ministry of Environment of Korea, 2003. “음식물쓰레기 감량의무대상 사업장 범위 및 처리방법”, <http://www.me.go.kr>
- [9] Kim, H. S., 2012. Using environmentally friendly composting coffee byproducts, M.S., Kwangwoon University
- [10] Morikawa, C. K. & Saigusa, M., 2008. “Recycling coffee and tea wastes to increase plant available Fe in alkaline soils”, Springer Science+Business Media, Vol. 304, Issue 1~2, pp. 249~255

- [11] Kim, H. Y., et al, 2009. "Growth Responses of Hedera helix on the Potting Medium Mixed with Different Level of Coffee and Tap Water" , Korean journal of horticultural science & technology, Vol. 27, pp. 136~137
- [12] Rural Development Administration, 2002. "친환경농업을 위한 퇴비 제조와 이용" , <http://www.rda.go.kr>
- [13] J. S. Jeris and W. R. Regan, 1973. "Controlling environmental parameters for optimum composting, II. Moisture free air and recycle." , Compost Sci., 14(2), pp. 9~15
- [14] Poincelot, R. P. A., 1974. "Scientific examination of the principles and practice of composting" , Compost Sci., 15(1), pp. 24~31.
- [15] Song, Y. I., 1999. "A study on the composting of garbage wastes by aerobic composting apparatus" , M.S., Chosun University
- [16] P. Keller, 1989. "proper degree of stability" , The biocycle guide to the Art and Science of composting, pp. 178~181
- [17] Morel, J. L., Colin, F., Germon, J. C., Godin, P. and Juste, C., 1985. "Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost" , Composting of Agricultural and other Wastes, ed. J. K. R. Gasser. Elsevier Applied Science Publishers, London & New York, pp. 56~72.
- [18] Pohle, H., et al, 1993. "Odor emissions from composting plants" , pp. 299
- [19] Lee, W. J., 2005. "Evaluation of Characteristics for By-Product Fertilizers Applied in AEFpine Farmland in Gangwon-Do" , M.S., Kangwon University

- [20] Rural Development Administration, 2013. “비료 공정규격설정 및 지정 농촌진흥청 고시 제2013-36호” , <http://www.rda.go.kr>
- [21] Lee, E. S., 2011. “SBR공정을 이용한 선박오수고도처리” , Ph.D. Korea Maritime and Ocean University
- [22] Kim H. G., Kim J. T. , 2011. “난분해성 폐수의 생물학적 처리방법 및 폐수처리제” , 10-2011-0124238
- [23] Lee, Y. H., 2004. “Environmental Purification Using Effective Microorganisms” , M.S., Kyungsoong University
- [24] Yoon, D. K., 2009. “The Effect of Yeast(*Saccharomyces exiguous* SJPAF1) on Odor Emission and Contaminants Reduction in Piggery Slurry” , The Korean Society of Environmental Agriculture, Vol. 28, No. 1, pp. 47~52
- [25] Halah Aissam, Michel J. Penninckx, Mohamed Benlemlih, 2007. “Reduction of phenolics content and COD in olive oil mill wastewaters by indigenous yeasts and fungi” , World J Microbiol Biotechnol Vol.23, Issue 9, pp. 1203-1208
- [26] Ministry of Environment of Korea, 2013. “전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2012년도)” , <http://www.me.go.kr>
- [27] Ha, S. Y., 2012. “Refractory wastewater treatment by Indigenous Microorganisms” , M.S., Korea Maritime and Ocean University
- [28] Leonre, S. E., Aronld, E. G. and Andrew, D. E., 1998. “Standard Method for the Examination of Water and Wastewater” , 20th ed., Am. Pub. Health Assoc., Washington
- [29] Ministry of Environment of Korea, 2013. “수질오염공정시험법 제 2014-163호(2014.9.22.)” , <http://www.me.go.kr>

- [30] Michel. DuBois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, Fred. Smith, 1956. “Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances” , Analytical Chemistry, 28 (3), pp. 350-356
- [31] Kyuseon Yoo, 2005. “The Effect of EM on OUR and Settleability of Activated Sludge” , Journal of Korean solid wastes engineering society, Vol. 22, No. 8, pp. 751~757
- [32] Jung, K. C., 2014. “A Study of Sewage treating process by Activated Sludge with Beneficial Microbe” , M.S. Korea Maritime and Ocean University
- [33] Jung B. G., et al, 2006. “하폐수슬러지 및 폐합성수지의 혼합비율에 따른 인공경량골재의 제조특성” , Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 2006, pp. 487~490
- [34] Oh, H. Y., 2003. “Physico-chemical properties of composting of municipal sewage sludge and the effect of the compost on the growth of Chinese cabbage” , M.S., Pusan University
- [35] Ministry of Environment of Korea, 2014. “폐기물 공정시험 기준 환경부고시 제2014-31호(2014.3.5.)” , <http://www.me.go.kr>
- [36] Ministry of Food and Drug safety of korea, 2014. “식품공전 제 2014-09호” , <http://www.mfds.go.kr/>
- [37] Rural Development administration of korea, 2013. “비료관리법 제 2013-39” , <http://www.rda.go.kr>
- [38] Jeon B. G. & Hur D., 1996. “A Fundamental Study on Composting of Garbage” , Korea Organic Resource Recycling Association, Vol. 4, No. 2, pp. 19~25
- [39] Nakasaki, K., M.Sasaki, M.Shoda and H.Kubota., 1985. “Effect of

- temperature on composting of sewage sludge” *Appl. Env. Microbiol.*, 50(6), pp. 1526~1530
- [40] Ministry of Environment of Korea, 2014. “하수도법 법률 제12844호” <http://www.law.go.kr>
- [41] Chung. Y. R. and H. A. J. Hoitnk., 1990. “Interactions Between Thermophilic Fungi and *Trichoderma hamatum* in Suppression of *Rhizoctonia* Damping-Off in a Bark Compost-Amended Container Medium” , *phytopathol.* 80, pp. 73~77
- [42] Mckinley, U. L. and J. R. Vestol, 1984. “Biokinetic analyses of adaptation and succession, Microbiol activity in Composting Municipal Sewage sludge” , *Appl. Env. Microbiol.* 47(5), p.933~941
- [43] Haug. R. T., 1986. “Composting proress design criteria: part III -aeration” , *Biocycle.* 27(9), pp. 53~57
- [44] K. Y. Kim, H. L. Choi and C. N. Kim, 2002. “Evaluation on the Degree of Satisfaction with Working Environment for Workers Engaged in the Composting Plant with Livestock Manure in the Han-river Watershed” , *J. Anim. Sci & Technol.*, 44(2), pp. 261~270
- [45] Baek. H. H., 2000. “Gas chromatography/olfactometry(GC/O)의 최신 경향” , *Korean society of food science and technology* , dpp. 177~184
- [46] M. Petracco, 2001. “Beverage Preparation: Brewing Trends for the New Millennium” , R. J. Clarke andO. G. Vitzthum, *Coffee: Recent Advances.* Oxford: Blackwell Science, pp. 140~164.
- [47] Lee, H. J., 1997. “Composting of Sewage and Industrial Wastewater Sludges, and Effect of the Compost on Plant” , Ph.D., Gyeongsang University

- [48] Rural Development Administration, 2011. “비료의 품질검사방법 및 시료채취기준 제 2011-46호” , <http://www.rda.go.kr/>
- [49] Lee S. M., Yu I. S., Lee C. S., Pack Y. H., Um M. H., 2000. “Determination of Application Rate of Composted Pig Manure for Wetland Rice” , Korean Journal of Soil Science & Fertilizer Vol.33 No.3 pp. 175-181
- [50] Bae J. W., 2011. “Recent Methodological Approaches to Human Microbiome” , Journal of Bacteriology and Virology, Vol. 41, No. 1, pp. 1~7.
- [51] Lim Y. W., Kim B. K., Kim C., Jung H. S., Kim B. S., Lee J. H. and Chun J., 2010. “Assessment of soil fungal communities using pyrosequencing” , Journal of microbiology, 48(3), pp. 284~289.
- [52] Viau, E. and Peccia, J., 2009. “Survey of wastewater indicators and human pathogen genomes in biosolids produced by class a and class B stabilization treatments” , Appl. Environ. Microbiol. 75, pp. 164~174.
- [53] Ufnar, J. A., Wang, S. Y., Christiansen, J. M., Yampara-Iquise, H., Carson, C. A. and Ellender, R. D., 2006. “Detection of the nifH gene of Methanobrevibacter smithii: a potential tool to identify sewage pollution in recreational waters” , J. Appl. Microbiol. 101, pp. 44~52.
- [54] Chun, J., Lee, J. H., Jung, Y., Kim, M., Kim, S., Kim, B. K. and Lim, Y. W., 2007. “EzTaxon: a web-based tool for the identification of prokaryotes based on 16S ribosomal RNA gene sequences” , J. Syst. Evol. Microbiol., 57, pp. 2259~2261.
- [55] Kim M., Singh D., Lai H., Go, R., Abdul Rahim, R., A, N. A., Chun, J. and Adams, J. M., 2012. “Distinctive Phyllosphere Bacterial Communities in Tropical Trees” , Microbial Ecology, 63(3), pp.

- [56] Kim, H. N, 2012. “The structure of microbial communities at solar saltern in Korea as revealed by pyrosequencing of 16S rRNA genes” , M.S., Hankuk University of Foreign Studies
- [57] Chun, J., Kim, K. Y., Lee, J. H. and Choi, Y., 2010. “The analysis of oral microbial communities of wild-type and tolllike receptor 2-deficient mice using a 454 GS FLX Titanium pyrosequencer” , BMC Microbiol. Vol. 10, pp. 101
- [58] Li, W. and Godzik, A., 2006. “Cd-hit: a fast program for clustering and comparing large sets of protein or nucleotide sequences ” , Bioinformatics, Vol. 22, Issue 13, pp. 1658~1659.
- [59] Heck Jr, K. L., van Belle, G. and Simberloff, D., 1975. “Explicit calculation of the rarefaction diversity measurement and the determination of sufficient sample size” , Ecology, 56, pp. 1459~1461.
- [60] Hill, T. C., Walsh, K. A., Harris, J. A. and Moffett, B. F., 2003. “Using ecological diversity measures with bacterial communities” , FEMS Microbiol. Ecol., 43, pp. 1~11.
- [61] <http://www.chunlab.com>
- [62] Park, S. J., Yoon, J. C., Shin, K. S., Kim, E. H., Yim, S., Cho, Y. J., Sung, G. M., Lee, D. G., Kim, S. B., Lee, D. U., Woo, S. H., Koopman B., 2007. “Dominance of endospore-forming bacteria on a rotating activated bacillus contactor biofilm for advanced wastewater treatment” , The J Microbiol. 45(2), pp. 113~121.
- [63] Zhang H., Sekiguchi Y., Hanada S., Hugenholtz P., Kim, H., Kamagata Y, Nakamura K. 2003. “*Gemmatimonas aurantiaca* gen. nov., sp. nov., a gram-negative, aerobic, polyphosphate-accumulating

micro-organism, the first cultured representative of the new bacterial phylum Gemmatimonadetes phyl. nov.” , Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 53, pp. 1155~1163

- [64] Hotam Singh Chaudhary, et al, 2013. “Diversity and Versatility of Actinomycetes and its Role in Antibiotic Production” , Journal of Applied Pharmaceutical Science, Vol. 3(8 Suppl 1), pp. S83~S94
- [65] Usharani, K., Lakshmanaperumalsamy, P., 2010. “Bio-treatment of phosphate from synthetic wastewater using *Pseudomonas* sp YLW-7” , J. Appl. Sci. Environ. Manage., Vol. 14(2), pp. 75~80
- [66] Vasudevan P., Ajithkumar B., Iriye R. and Sakai T, 2002. “*Bacillus funiculus* sp. nov., novel filamentous isolates from activated sludge” , Int. J. Syst. Evol. Microbiol., Vol. 52(Pt 4), pp. 1141~1144
- [67] Luo, H. Q. and Hu, Y. Y., 2004. “The use of 16S rDNA clone libraries to study microbial communities of ANAMMOX sludge” , Paper Making & Environmental Engineering, South China University of Technology
- [68] Takaku H., Kodaira S., Kimoto A., Nashimoto M. and Takagi M., 2006. “Microbial communities in the garbage composting with rice hull as an amendment revealed by culture-dependent and -independent approaches” , J Biosci Bioeng., Vol. 101(1), pp. 42~50
- [69] Kim, M. K. and Jung, H. Y., 2007. “*Chitinophaga terrae* sp. nov., isolated from soil” , Int. J. Syst. Evol. Microbiol., Vol. 57(Pt 8), pp. 1721~1724
- [70] Zhao D., Huang R., Zeng J., Yu Z., Liu P., Cheng S. and Wu QL., 2014. “Pyrosequencing analysis of bacterial community and assembly in activated sludge samples from different geographic regions in

- China” , Appl. Microbiol. Biotechnol., Vol. 98(21), pp. 9119~9128
- [71] Identification of microbial communities that assimilate substrate from root cap cells in an aerobic soil using a DNA-SIP approach,; Yong Li, Chol Gyu Lee, Takeshi Watanabe, Jun Murase, Susumu Asakawa, Makoto Kimura, Soil Biology & Biochemistry 43 (2011) 1928~1935
- [72] GUIDO FUNKE, THOMAS HESS, ALEXANDER VON GRAEVENITZ, AND PETER VANDAMME, “Characteristics of Bordetella hinzii Strains Isolated from a Cystic Fibrosis Patient over a 3-Year Period“, JOURNAL OF CLINICAL MICROBIOLOGY, Apr. 1996, p. 966~969
- [73] Namita Gupta , Vikram Sahai and Rani Gupta, 2006. “Alkaline lipase from a novel strain Burkholderia multivorans: Statistical medium optimization and production in a bioreactor” , Process Biochemistry, Vol. 42, Issue 4, pp. 518~526
- [74] Rural Development Administration, 2010. “인삼뿌리에 살고 있는 미생물을 파이로시퀀싱(Pyrosequencing)연구” , <http://www.rda.go.kr/>
- [75] Park, Y. H., Jang, G. U. and Hong, J. G., 2002. “Changes of Soil Properties and Evaluation of Plant Utilization According to the Application of Compost Used with Phyllite” , 한국유기성폐자원학회 폐기물자원화, Vol. 10, No. 2, pp. 92~99
- [76] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2000. “The physical quality criteria proposal for management of organic by-product fertilizers” , 농림기술개발사업 연구보고서
- [77] Korea Meteorological Administration, 2014. www.kma.go.kr
- [78] Doosan Encyclopedia, 2014. <http://www.doopedia.co.kr/>
- [79] National Academy of Agricultural Science, 2000. “토양 및 식물체 분

석법 : 물리, 화학, 미생물” , <http://www.naas.go.kr/>

[80] Walkley, A. and I. A. Black. 1934. “An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method” Soil Sci. 37:29-37.

[81] Korea food recycling association, 2012. “음식물류폐기물 처리비용 산정 참고자료” <http://www.kofra.org>



감사의 글

본 논문을 마무리 지으면서 너무나 감사할 분들이 많지만 가장 먼저 떠오르는 분은 너무나 당연하게도 저의 지도교수님 김인수 교수님이 가장 떠오릅니다. 학부때부터 지금까지 끊임없이 부족한 저에게 가르침을 주시고 연구를 할 수 있는 기회를 제공해주셨기 때문에 지금의 제가 있다고 생각합니다. 남들보다 이르게 박사학위를 준비하면서 사랑으로 감싸주시고 더 좋은 연구결과가 나올 수 있도록 성심 성의껏 지도를 해주신 교수님 덕분에 무사히 마무리를 지었습니다. 지금 이 박사학위가 시작이라 생각하고 부족한 저를 완성하기 위해 끊임없이 노력하여 교수님의 자랑스러운 제자 중에 한명이 되겠습니다.

정말 부족했던 저의 논문을 정성으로 심사해주시고 더욱더 나은 논문이 되도록 많은 고민과 노력을 해주신 심사위원장 송영채 교수님, 경성대학교 엄태규 교수님, 고성철 교수님, 장재수 교수님 정말 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 작은 것 하나하나 신경써주시고 심사 중 해주신 많은 조언 덕분에 완성도를 극대화시킬 수 있었습니다. 항상 교수님들의 말씀을 가슴속에 새기며 연구 활동 하도록 하겠습니다. 다시 한번 진심으로 감사드립니다.

환경기기실험실의 일원이 된 게 올해로 8년째입니다. 처음 실험실에 들어온 대학교 3학년 때는 그냥 무작정 배우고 싶다는 생각만을 가지고 실험실문을 두드렸습니다. 그때의 기억을 떠올려보면 실험실은 매 시기별로 연구에 매우 바쁘게 움직였고 밤을 새서 실험을 하기도 하고 군대와 같은 군기가 있는 곳이어서 처음에 적응하기 매우 힘들었던 기억이 있습니다. 하지만 그때 그 실험실 문을 두드린 것이 내 인생의 터닝 포인트가 된 것 같습니다. 실험실에 들어와서 1대 박사님이신 영동엔지니어링 김억조 사장님을 비롯하여 멋진 선배님들을 바라보며 나도 언젠가는 저렇게 되어야지라고 생각하며 꿈을 키워왔습니다. 드디어 실험실의 11대 박사님으로 이름을 올려 그 꿈의 절반은 달성된 것 같아 매우 기쁩니다. 하지만 이제 나머지 절반을 채우기 위해 더 열심히 해서 자랑스러운 실험실의 일

원이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

뜻하지 않았지만 우연히 박사학위에 입학하던 해 한국해양대학교 전임연구원으로 발령받아 학업과 일을 병행하게 되었습니다. 학업과 일을 병행하다 보니 논문의 많은 실험을 환경기기실험실 후배들이 도와주었습니다. 그 중에서도 자신의 전공이 아닌 환경공학대에 석사과정에 입학하여 적응할 시간도 없이 바로 논문 실험을 도와준 지경이와 실험실 후배들에게 고맙다고 꼭 전하고 싶습니다. 그리고 마지막까지 논문 쓴다고 예민했던 내 옆에서 묵묵히 논문 정리를 도와준 민수, 대학시절 내내 함께하고 학위 중에도 학과 조교로 일을 하며 내 옆을 든든하게 지켜주고 많은 힘이 되어준 미정, 박사과정 중에 많은 조언을 해준 우정희 박사님, 바쁘신 와중에도 일일이 논문 검토를 도와주셨던 이연승 박사님, 비록 멀리 있지만 간간히 전하는 소식이 힘이 되는 보영이, 바쁘다는 핑계로 자주 보지 못하지만 항상 그리워하고 있는 우리 수안동 친구들 현진, 신혜 그리고 일일이 언급되지 않았지만 나의 소중한 친구들과 지인들... 이들의 관심어린 말 한마디가 지치고 힘들 때 저의 큰 힘이 되어 주었습니다. 감사합니다.

마지막으로 우리 사랑하는 가족에게 감사드립니다. 박사학위 논문이 나오기까지 가족이 저의 든든한 버팀목이 되어주셨습니다. 제가 어디서든 당당할 수 있는 건 부족한 딸이지만 항상 최고라고 멋있다고 칭찬을 아끼지 않으셨던 부모님 덕분입니다. 부모님의 응원에 힘입어 이 자리까지 오게 되었음을 항상 마음에 새기면서 살도록 하겠습니다. 아프지 마시고 오래오래 행복하게 제 옆을 지켜주시기 바랍니다. 그리고 동생 동균이에게도 크고 작은 도움이 될 수 있는 자랑스럽고 든든한 누나가 될 수 있도록 노력하겠습니다.

이 외에도 제가 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나도 많습니다. 그 분들을 하나하나 되새기지 못함을 죄송스럽게 생각하며, 대신 제 깊은 감사의 말로 이 글을 마칠까 합니다.

“모두들 감사드리고 감사에 보답할 줄 아는 사람이 되려고 노력하겠습니다.”

