



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.

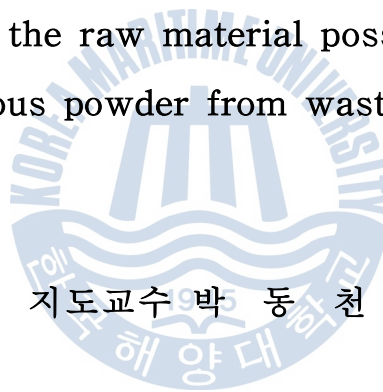
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

폐콘크리트 미분말을 활용한
시멘트 원료화 가능성에 관한 연구

A Study on the raw material possibility using
cementitious powder from waste concrete



지도교수 박 동 천

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해양건축공학과

황 종 욱

본 논문을 황종욱의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

송 화 철 (인)

위 원

도 근 영 (인)

위 원

박 동 천 (인)

2013년 12월 27일

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	ii
표 목 차	iv
그림목차	v
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 방법 및 범위	2
제 2 장 폐콘크리트 미분말의 재활용에 관한 연구동향	4
제 3 장 이론적 고찰	7
3.1 포틀랜드 시멘트의 제조	7
3.1.1 개 요	7
3.1.2 제조공정	8
3.1.3 품질평가	9
3.2 포틀랜드 시멘트의 수화 메커니즘	10
제 4 장 실험 개요	12
4.1 실험 방법	12
4.2 사용재료 및 재생시멘트 제조	14
4.3 다목적최적화를 통한 재생시멘트 제조	19
4.3.1 GRG Method의 원리	19
4.3.2 GRG Method의 적용	20

4.4 클링커의 구성광물 상태분석	23
4.4.1 개요	23
4.4.2 성분 분석	25
4.4.3 XRD 분석	26
4.4.4 F-CaO 분석	8
4.5 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가	30
4.5.1 플로우 측정	30
4.5.2 압축강도 측정	31
제 5 장 실험결과 및 분석	3
5.1 클링커의 구성광물 상태분석 결과	33
5.1.1 성분 분석 결과	33
5.1.2 XRD 분석 결과	36
5.1.3 F-CaO 분석 결과	8
5.2 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가 결과	40
5.2.1 플로우 측정 결과	40
5.2.2 압축강도 측정 결과	42
제 6 장 결 론	45
참고문헌	47
감사의 글	49

표 목차

<표 3-1> 포틀랜드시멘트와 그 원료의 화학 조성(%)	7
<표 3-2> 시멘트의 품질규격 (포틀랜드 시멘트 KS L 5201)	9
<표 3-3> 시멘트 화합물의 수화반응	01
<표 3-4> 시멘트 화합물의 생성과정	01
<표 4-1> 실험항목	21
<표 4-2> 실험인자 및 수준	31
<표 4-3> 폐콘크리트의 실제 화학 성분비	51
<표 4-4> 폐콘크리트 미분말 모델의 화학 성분비	61
<표 4-5> Excel Solver를 이용한 재생시멘트 모델 배합설계 결과	2
<표 4-6> 포틀랜드 시멘트의 주요 화합물과 특성	32
<표 4-7> 모르타르 배합	13
<표 4-8> 모르타르의 압축강도 시험 방법	13
<표 5-1> 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 화학조성	43
<표 5-2> 재생시멘트 클링커의 화학조성(설계값)	4
<표 5-3> 재생시멘트 클링커의 화학조성(성분분석값)	4
<표 5-4> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 소성온도별 F-CaO 측정값(%)	9
<표 5-5> 재생시멘트 모르타르의 플로우	14
<표 5-6> 재생시멘트 모르타르의 압축강도	34

그림 목차

<그림 1-1> 폐기물 발생량 및 점유율	3
<그림 1-2> 폐기물 종류별 구성비율	3
<그림 2-1> 콘크리트 폐기물의 처리방법	6
<그림 2-2> 폐콘크리트 재활용에 관한 연구개발 현황	6
<그림 3-1> 포틀랜드 시멘트의 제조과정	8
<그림 4-1> 재생 시멘트 제조 프로세스-1	3
<그림 4-2> 재생 시멘트 제조 프로세스-2	7
<그림 4-3> 재생 시멘트 제조 프로세스-3	8
<그림 4-4> Excel Solver의 기본 구성	1
<그림 4-5> 석회석 최소량에 따른 Excel Solver의 적용	1
<그림 4-6> 잔골재 혼입율에 따른 조합원료의 성분비	22
<그림 4-7> 재생시멘트 클링커의 제조	52
<그림 4-8> 시멘트 클링커와 시멘트 화합물의 X선 회절도형	72
<그림 4-9> 클링커의 F-CaO 측정 방법	9
<그림 4-10> 모르타르 제조과정	23
<그림 4-11> 모르타르 압축강도 측정	23
<그림 5-1> 재생시멘트 클링커의 화학조성 비교	53
<그림 5-2> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 XRD 분석 결과	73
<그림 5-3> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 소성 온도별 F-CaO 측정값	9
<그림 5-4> 재생시멘트 모르타르의 플로우	14
<그림 5-5> 재생시멘트 모르타르의 압축강도	44

ABSTRACT

A Study on the raw material possibility using cementitious powder from waste concrete

Hwang Jong-Uk

Dept. of Ocean Architectural Engineering

Graduated School, Korea Maritime And Ocean University

Recent environmental problems which are related with waste treatment didn't find the appropriate solutions in the relevant industries and the problems are on the rise as a critical social issue. Examining the nationwide waste occurrence and waste treatment situations, construction wastes occupy the biggest portion in the total wastes and among all wastes, waste concrete shows the biggest percentage.

Accordingly, active recycling plans for waste concrete are required and recycling plans for waste concrete powder where the aggregates are removed are under the basic research stage. Additionally, the plans are not sufficient to reach the commercialization stage and most wastes are reclaimed and discarded.

Therefore, this study has a major objective to evaluate and review the manufacturing and utilization possibility of the waste concrete powder as the substitution material of limestone, using the limestone which is a main material of cement and convert slag which is an industrial by product.

After the materialization possibility of the waste concrete powder as a recycled cement was reviewed through chemical composition and ingredient analysis of the elements which are included in actual waste concrete powders collected from all over the country, the recycling cement model which has similar type of composition with actual waste concrete powder was established and subsequently, chemical composition analysis, instrumental analysis and burning degree analysis were conducted. When establishing the recycle cement model, optimal mix design plan was drawn by applying the multi-purpose optimization method.

Additionally, the degree of materialization possibility of waste concrete powder was reviewed after sufficient theoretical study about chemical composition and structure, hydration mechanism of the cement. Through the recycle cement mortar model which was established using actual waste concrete powder and the comparative analysis with physical performances of regular Portland cement mortar, this study has a research range to suggest the basic data which are related with the recycle cement development using waste concrete powder.

Conclusively, contributing effects to the distribution of low carbon type recycle cement can be expected which deals with the requirement of environment friendly scientific technology, and considering the difficulties in technology development of substitution materials as construction and structure materials, development of complete circulation type concrete can be thought to be indispensable in order to satisfy the construction structures which become High-Rise and Mega structures.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 폐기물 처리에 관련한 환경 문제는 각 분야에서 적절한 해답을 찾지 못한 채 심각한 사회적 문제로 대두되고 있다. <그림 1-1>과 같이 2012년 환경부에서 발표한 전국 폐기물 발생 및 처리현황에 따르면 2011년 기준 국내 총 폐기물 발생량은 무려 373,312톤/일에 달하고 있다.¹⁾ <그림 1-2>과 같이 건설폐기물은 49.9%로서 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 매년 소폭 증가하고 있는 추세이다. 전체 건설폐기물 중에서 폐콘크리트가 65.0%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 다음으로 폐아스팔트가 18.9%를 차지하고 있다. 따라서 건설폐기물 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 폐콘크리트의 적극적인 재활용 처리방안에 대한 대책이 요구되며 실제로 폐콘크리트의 재활용 및 처리방안에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 최근 폐콘크리트의 재활용에 관한 연구로서 폐콘크리트의 골재를 분리하여 고갈중인 골재 공급에 대한 문제를 해결하려는 노력이 나타나고 있으며 여기서 재생된 골재의 품질 확보가 기존의 골재와 유사한 수준이며 가격 또한 매우 저렴하다.²⁾ 또한 대부분의 건설 폐기물 처리시설에서 발생하는 폐콘크리트의 경우 도로공사용 및 일부 콘크리트 제품의 제조용으로 이용되고 있는 실정이다. 하지만 폐콘크리트 내부의 약20% 이상을 차지하고 있는 폐콘크리트 미분말의 잔골재 성분이 제거된 페이스트 성분의 미분말(이하 폐콘크리트 미분말)을 재활용 하려는 연구가 일부 진행되고 있으나 기초적인 연구 단계이다. 또한 실용화 단계에 이르기에는 불충분하며 현재 대부분 매립, 폐기되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 폐콘크리트 미분말 성분을 이용하여 실제 화학조성 및 성분 분석을 실시 후 다목적최적화 배합설계에 따라 그 배합에 해당하는 재생 시멘트 모르타르 모델과 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르를 제조 후 각종 실험 및 분석을 통한 비교 분석을 통하여 시멘트의 석회석 대체원료로서의 활용 가능성에 대하여 평가 하고자 한다.

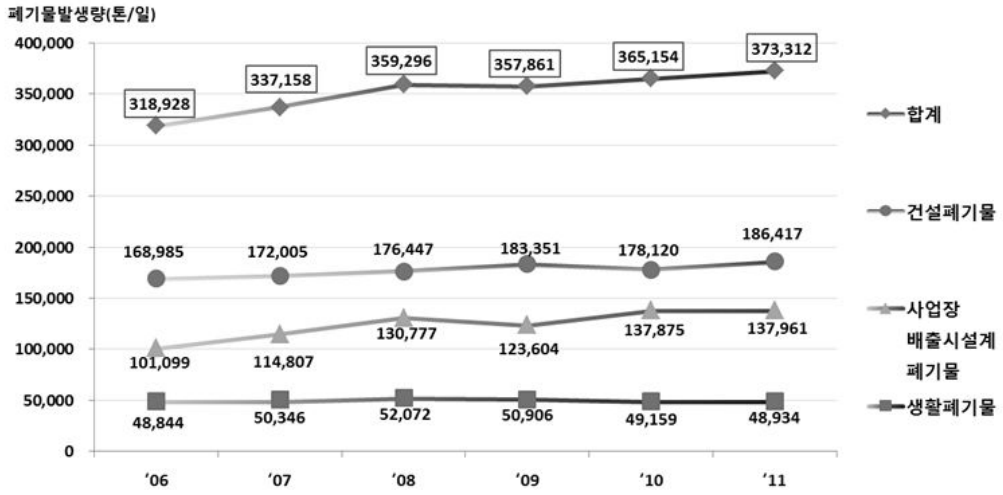
1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 폐콘크리트 미분말, 시멘트의 주원료인 석회석과 산업부산물인 전로슬래그를 이용하여 시멘트의 주원료인 석회석 대체원료로서의 생산 및 활용 가능성 대하여 평가, 검토하는 것을 주 목적으로 한다.

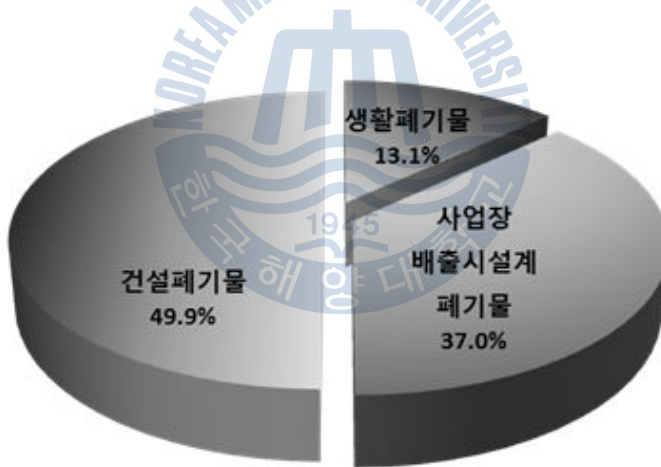
전국에서 수집된 실제 폐콘크리트 미분말에 포함되어 있는 성분의 화학조성 분석을 통하여 시멘트로의 원료화 가능성에 대하여 검토한 후 실제로 폐콘크리트 미분말 모델, 석회석, 전로슬래그를 이용하여 재생시멘트 모델을 제조하여 물리 성능, 수화특성의 검토, 분석을 실시하였다.

시멘트의 화학적 조성과 구조, 수화 메커니즘에 대한 충분한 이론적 배경을 고찰한 후 폐콘크리트 미분말의 시멘트 원료화 가능성, 활용성을 검토하고 실제 폐콘크리트 미분말을 이용하여 제조된 재생시멘트와 보통 포틀랜드시멘트와의 화학성분분석, 기기분석 및 물리성능 평가를 실시하여 비교, 분석을 실시하였다.

본 연구는 친환경 과학기술 요구에 대처, 저탄소형 재생시멘트 보급에 기여하는 기대 효과를 예상 가능하며 건설 구조재료의 대체 재료의 기술개발이 어려운 점을 고려할 때, 고층화, 대형화 되어가는 건설 구조물의 수요를 충족시키기 위하여 완전 순환형 콘크리트의 개발이 필수적이라 할 수 있다.



<그림 1-1> 폐기물 발생량 및 점유율



<그림 1-2> 폐기물 종류별 구성비율

제 2 장 폐콘크리트 미분말의 재활용에 관한 연구동향

폐콘크리트의 경우 일반적으로 분쇄과정을 통하여 재생골재, 노반재, 뒤채움재 등으로 재활용 하여 이용하고 있으며 대표적인 분쇄의 방법으로는 단순파쇄에 의한 방법, 가열을 한 후 분쇄하는 방법을 예로 들 수가 있다. 이는 <그림 2-1>을 통하여 간략히 살펴 볼 수가 있다.

폐콘크리트의 재활용 후 발생하는 미세분말인 폐콘크리트 미분말의 경우 대부분 매립, 폐기되고 있는 실정이다. 이에 폐콘크리트 미분말을 활용하여 재활용하는 방법에 대해서는 국내외에서 몇몇의 연구가 진행되고 있으나 아직 실용화 단계에는 많은 문제점들이 남아 있는 것으로 알려져 있다.³⁾⁴⁾⁵⁾

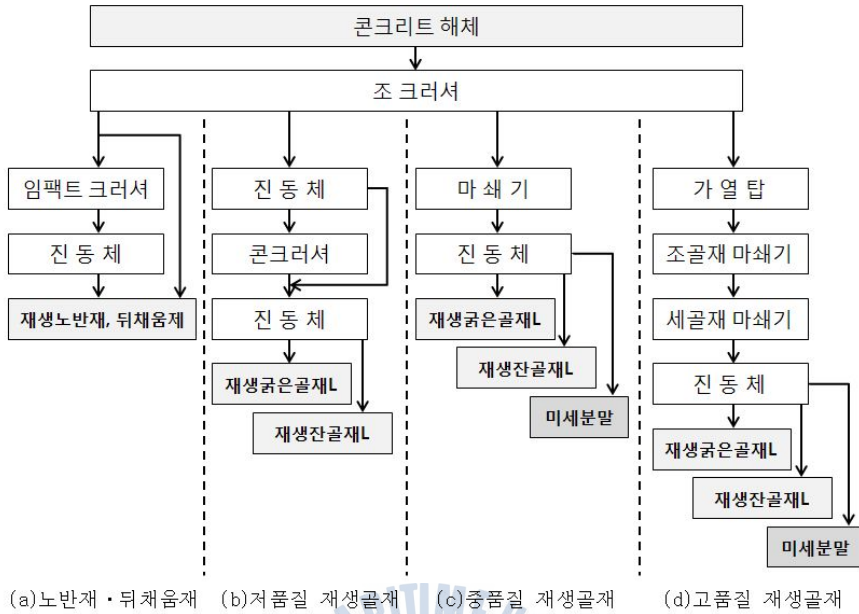
폐콘크리트 미분말을 이용하여 재생시멘트의 제조나 콘크리트의 원료의 일부로서 사용하는 것은 분쇄과정을 통해 폐콘크리트 미분말을 채취하는 과정에서 시멘트 페이스트와 입도가 유사한 잔골재 성분의 다량 함유로 인하여 수화성 회복 및 물리성능 저하에 영향을 미치게 된다. 이에 잔골재 성분을 효율적으로 분리해 내는 방안 또한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

<그림 2-2>는 폐콘크리트의 재활용에 관한 연구개발 현황을 나타낸 것이며 여기서 페이스트, 즉 폐콘크리트 미분말의 경우 크게 두 가지 재생 방법으로 나뉘게 된다. 활성재생의 경우 재생시멘트와 같이 화학적 성질을 이용한 활성재료로서의 재생방법을 말하며, 불활성 재생의 경우 단순히 물리적 성질을 이용한 재생방법으로 잔골재, 도로 노반재 등으로 이용된다.

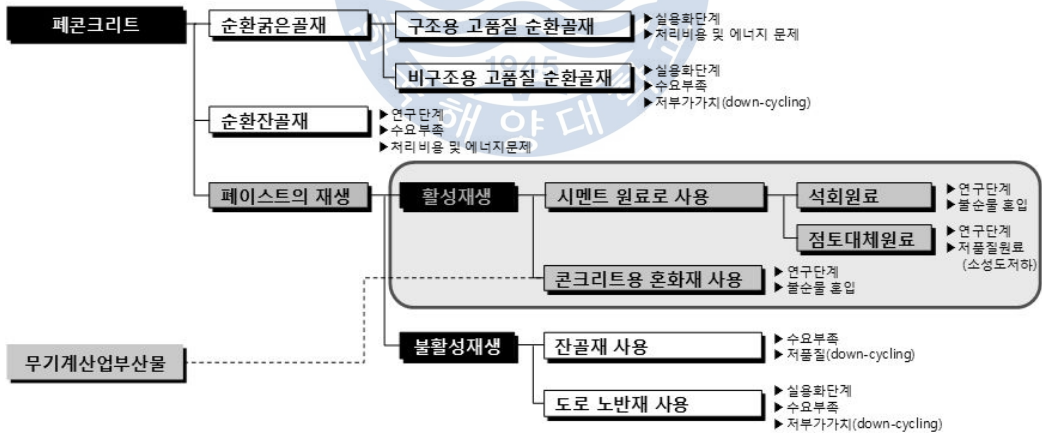
본 연구에서는 폐콘크리트 미분말을 활성 재료로서의 재생방법을 대상으로 시멘트의 원료로서 이용하여 재생시멘트 개발에 적용하고자 한다. 또한 폐콘크

리트 미분말은 기존의 연구와 같이 폐콘크리트 미분말 내부의 시멘트 수화물의 수화성 회복 프로세스를 통하여 화학적으로 응결 및 경화(수화반응)가 가능한 상태로 활성화한 것으로서 정의한다.





<그림 2-1> 콘크리트 폐기물의 처리방법



<그림 2-2> 폐콘크리트 재활용에 관한 연구개발 현황

제 3 장 이론적 고찰

3.1 포틀랜드 시멘트의 제조

3.1.1 개요

포틀랜드 시멘트는 주성분인 석회질 원료와 점토질 원료를 적절한 비율로 혼합하여 미분쇄 한다. 때로는 성분 조절을 위해 산화철 원료 또는 규산질 원료를 첨가하기도 하며 그 후 약1450℃의 소성 과정을 통하여 생성되는 클링커(Clinker)에 응결 시간 조절을 위해 석고를 소량 가하여 미분쇄하여 제조한다.

포틀랜드 시멘트 제조에 필요한 주원료는 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료(동광재, 전로슬래그 등), 석고 등에 해당하며 그 원료의 화학 조성은 아래의 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 포틀랜드시멘트와 그 원료의 화학 조성(%)

	L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SUM
포틀랜드 시멘트	0.6	23.1	5.0	3.0	63.8	1.6	2.0	0.4	0.5	100.0
석회석	42.6	0.5	0.2	0.3	55.2	0.6	-	-	-	99.4
점토	8.0	66.9	13.6	5.5	2.9	1.3	-	-	-	98.2
연규석	2.6	87.0	5.3	3.6	0.4	0.3	-	-	-	99.2
동광재	4.2	36.0	10.6	39.7	7.7	2.4	-	-	-	100.6
인산석고	20.9	0.6	1.2	0.6	31.5	0.2	45.1	-	-	100.1

3.1.2 제조공정

포틀랜드시멘트의 제조공정을 살펴보면 크게 원료공정, 소성공정, 마무리공정의 3단계로 나눌수 있으며 <그림3-1>에 그 개요를 나타내었다.



<그림 3-1> 포틀랜드 시멘트의 제조공정

원료공정의 경우 주원료인 석회석, 점토, 산화철 등을 일정한 비율로 배합하여 혼합하는 공정이며 소성공정은 혼합된 원료를 소성 가마(rotary kiln)에 공급하여 1450℃ 이상의 온도로 소성 후 시멘트 클링커를 제조하는 공정이다. 또한 마무리 공정의 경우 클링커를 약3-5%의 석고를 첨가 후 미분쇄하여 시멘트 제품으로 만드는 공정을 말한다.

소성 가마(rotary kiln)에서 조합원료가 1450℃ 이상의 고온에서 소성을 거쳐 클링커 로 변화하는 과정을 소성반응이라 하며 고온에서 석회석은 CaO로 분해되며 시멘트 성분의 60%이상을 차지하는 주요 성분이 된다. CaO는 수화반응을 통해 대표적인 수화 생성물인 Ca(OH)₂가 생성된다. 시멘트의 제조, 수화반응의 메커니즘을 역으로 이용하여 폐콘크리트 미분말의 수화성 회복에 적용하였다. 재생시멘트의 제조 시 수화반응과 관련한 메커니즘은 아래와 같다.

- ① 시멘트의 제조 : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- ② 시멘트의 수화반응 : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- ③ 재생시멘트의 제조 : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

3.1.3 품질평가

시멘트의 규격은 다양한 시험방법과 품질관리 규격이 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)에 따라 규정되어 있으며 포틀랜드 시멘트의 종류는 1종(보통 포틀랜드 시멘트), 2종(중용열 포틀랜드 시멘트), 3종(조강 포틀랜드 시멘트), 4종(저열 포틀랜드 시멘트), 5종(내황산염 포틀랜드 시멘트)으로 5종이 있으며 <표 3-2>는 시멘트의 품질규격을 나타낸 것이다.

<표 3-2> 시멘트의 품질규격 (포틀랜드 시멘트 KS L 5201)⁶⁾

		보통 (1종)	중용열 (2종)	조강 (3종)	저열 (4종)	내황산염 (5종)
비표면적 (cm ² /g)		2800 이상	2800 이상	3300 이상	2800 이상	2800 이상
응결	초결 (분)	60 이상	60 이상	60 이상	60 이상	60 이상
	종결 (시간)	10 이하	10 이하	10 이하	10 이하	10 이하
안전성 (%)		0.8 이하	0.8 이하	0.8 이하	0.8 이하	0.8 이하
압축강도 (kgf/cm ²)	1일	-	-	130 이상	-	-
	3일	130 이상	110 이상	250 이상	-	90 이상
	7일	200 이상	180 이상	280 이상	75 이상	100 이상
	28일	≥90 이상	285 이상	310 이상	180 이상	210 이상
수화열 (cal/g)	7일	-	70 이하	-	60 이하	-
	28일	-	80 이하	-	70 이하	-
산화마그네슘 (%)		6.0 이하	6.0 이하	6.0 이하	6.0 이하	6.0 이하
삼산화황 (%)	C ₂ A 8% 이하	3.0 이하	3.0 이하	3.5 이하	2.3 이하	2.3 이하
	C ₂ A 8% 초과	3.5 이하	-	4.5 이하	-	-
강열감량 %		3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하	2.5 이하	3.0 이하
규산삼칼슘 %		-	--	-	35 이하	-
알루미늄산화물 %		-	8 이하	15 이하	7 이하	5 이하

주) 전알카리 함량은 종류에 관계없이 0.6% 이하 (Na₂O 기준)로 규정되어 있음

3.2 포틀랜드 시멘트 수화 메커니즘

시멘트의 입자를 구성하는 시멘트 화합물은 물과 반응 시 수화물을 생성하면서 유동성이 없어지며 응결하고 시간의 경과에 따라 수화반응이 더욱 진행되어 경화한다. 이는 수화와 경화는 밀접한 관계가 있는 것을 알 수가 있다. <표 3-3>은 시멘트 화합물의 수화 반응식을 나타냈으며 <표 3-4>은 조합원료의 소성을 통한 시멘트 화합물의 생성과정을 나타내었다.

<표 3-3> 시멘트 화합물의 수화반응

①	$C_3S : 2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$
②	$C_2S : 2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$
③	$C_3A : 3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$
④	$C_4AF : 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2$ $\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 (aq)$ $\rightarrow 3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3CaSO_4 (aq)$

<표 3-4> 시멘트 화합물의 생성과정

~800℃	CA, C ₂ F, C ₂ S의 생성 개시
800~900℃	C ₁₂ A ₇ 의 생성 개시
900~1000℃	C ₂ AS의 생성과 분해, C ₃ , C ₄ AF의 생성 개시, CaCO ₃ 의 열분해 종료 (유리 CaO는 최대량이 된다.)
1100~1200℃	C ₃ A, C ₄ AF의 생성종료 (C ₂ S는 최대량이 된다.)
1250℃	액상의 생성 개시, C ₃ A, C ₄ AF의 액상으로의 용해
1300~1450℃	C ₃ S의 생성, 유리 CaO의 소멸
냉각1200℃	C ₃ S, C ₂ S의 결정 간극에 C ₃ A, C ₄ AF의 정출, 액상의 glass화

시멘트의 수화반응 메커니즘의 고찰에 대해서는 2가지 관점에서 살펴 볼 수가 있다. 첫 번째는 시멘트 화합물이 용해되어서 그 과포화 용액으로부터 수산화 규산염이 침전된다는 것이며 두 번째는 시멘트를 물과 혼합해도 액상중의 SiO_2 , Al_2O_3 성분의 농도는 낮으므로 시멘트 화합물이 지점 물과 반응을 하여 시멘트 입자 표면 주위에 수화물 층을 형성한다고 하는 것이다.

시멘트의 실제 수화의 경우 시멘트 화합물을 각각 단독적으로 수화시킨 경우와 매우 다르며 각각의 반응이 서로에게 상호작용하여 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 시멘트 초기 수화물의 경우 XRD 분석을 실시하면 대부분 피크값이 명확하게 나타나지 않는 저결정성의 수화물이며 결정의 성장을 하는데는 꽤 긴 시간을 요구한다. 이에 시멘트 수화물의 결정의 성장을 촉진시켜 단시간 내에 적절한 강도를 발현 시키는 시멘트 제품이 상용화 되어 있는 실정이다.

시멘트 수화물 중 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 경우 C_3S 또는 C_2S 가 수화 반응을 진행하면서 액상속으로 glass화 된 것이며 용해하여 과포화 상태가 된다. 시간의 경과에 따라 C-S-H gel안에 육각주상결정의 형태로 결정이 석출된다. XRD 분석을 실시할 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ettringite가 확실한 결정의 형태로 검출이 된다.

제 4 장 실험 개요

4.1 실험 방법

본 연구에서는 폐콘크리트 미분말, 잔골재(모래), 시멘트의 주성분인 석회석을 혼합하여 재생시멘트 모델을 제조하였다.

폐콘크리트 미분말의 경우 전국의 11개의 폐기물 처리시설에서 채취하였다. 하지만 수집 장소에 따라 재령이나 배합수준이 상이하여 재료로서 활용함에 편차가 있으므로 본 실험에서는 재령 6개월의 페이스트를 직접 제조하여 잔골재를 분쇄한 분말과 혼합하여 인위적으로 폐미분말 모델을 제조하였다.

재생시멘트 제조과정의 클링커는 화학분석 및 기기분석을 실시하여 보통 포틀랜드시멘트와 비교함으로써 시멘트로서의 활용가능성을 분석 확인하였다.

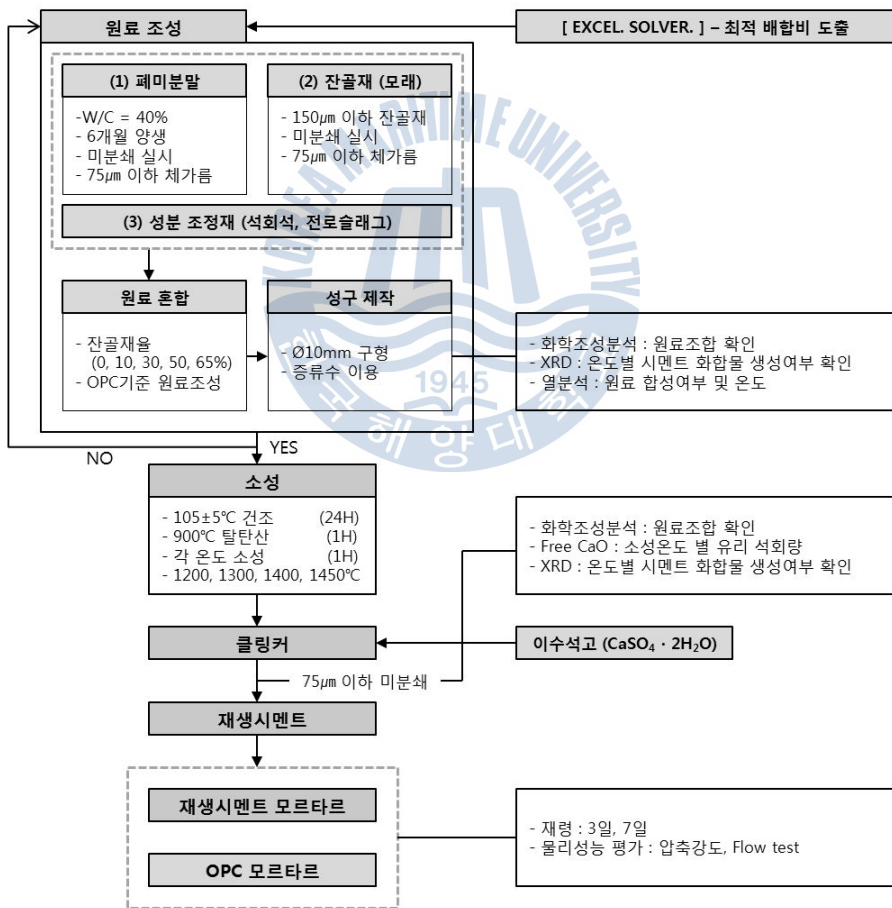
실험항목, 실험인자 및 수준은 아래의 <표 4-1>, <표 4-2>와 같이 화학성분분석, XRD분석, F-CaO분석을 실시하여 구성광물 상태와 소성도를 분석하였고, 역학성능은 플로우 테스트와 압축강도 실험을 통해 실시하였다. 전체적인 재생시멘트 제조 프로세스는 <그림 4-1>과 같이 실시하였다.

<표 4-1> 실험항목

분류	분석방법	분석목적
클링커	① 화학성분 분석 ② XRD ③ F-CaO	- 클링커의 화학조성 확인 - 원료 조합 확인 (클링커 구성광물 상태) - 소성도 정도 확인
물리성능 평가	① 플로우 테스트 ② 압축강도	- 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가

<표 4-2> 실험인자 및 수준

인자	페미분말 모델 (%)	재생시멘트의 제조			
		소성온도	소성시간	조합원료	석고첨가량
수준	S/M 0 S/M 10 S/M 30 S/M 50 S/M 65	1450°C	60min	페미분말모델 석회석 전로슬래그	3%
EA	5	1	1	1	1



<그림 4-1> 재생 시멘트 제조 프로세스-1

4.2 사용재료 및 재생시멘트 제조

본 연구에서는 전국의 11개소의 건설현장에서 폐콘크리트 미분말을 채취하여 화학조성을 성분 분석을 통하여 측정 하였으며. 평균값과 유사한 화학조성을 가지는 폐콘크리트 미분말 모델을 제조하여 실험을 실시하였다.

실제 폐콘크리트 미분말의 화학조성을 에 준하여 화학 성분 분석(KS L 5201)을 의뢰하여 분석한 결과 <표 4-3>를 살펴보면 보통 포틀랜드시멘트에 비해 전국의 평균값을 기준으로 SiO_2 성분이 약 35.8%, Al_2O_3 성분이 약 4.9% 많고, CaO성분이 약 49.8%, Fe_2O_3 성분이 약 0.4% 적은 것으로 나타났다. 이는 직경, 입도가 유사하여 완전히 분리해 내기 힘든 잔골재 미분의 함유에 의한 것으로 추정되며, 기존의 연구에 의하면 폐콘크리트 미분말의 구성물질은 feldspar, α -quartz calcite로 구성이 되며 폐콘크리트 미분말의 feldspar, α -quartz는 폐콘크리트를 분쇄하여 미분말을 채취하는 과정에서 폐콘크리트 속에 포함된 굵은 골재, 잔골재에 함유된 성분으로 추정되며 calcite는 시멘트의 양생 시 수화반응으로 인하여 생성되는 대표적인 수화 생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 탄산화로 인하여 것으로 보고 있다.⁷⁾

제조 시 석회석과 성분조정재로서 산업부산물인 전로슬래그와 사용하였으며, 이는 전로슬래그는 석회석과 폐콘크리트 미분말 만으로는 Fe_2O_3 성분이 부족하므로 재생시멘트 모델 제조 시 부족한 Fe_2O_3 의 원료로서 이용하였다.

전로슬래그는 고로슬래그에 비해 SiO_2 의 함량은 낮고 CaO와 Fe_2O_3 의 함량이 높아 폐콘크리트의 분쇄 과정에서 미분에서 입도 및 밀도가 상당히 유사한 잔골재를 완전히 분리해내기 어려운 폐콘크리트 미분말에 있어서 적합할 것으로 예측되어 성분조정재로서 사용하게 되었다.

폐콘크리트 미분말 모델을 제작하기 위해 사용된 원료 중 페이스트 성분은 실제 폐콘크리트를 이용할 경우 배합 및 재령을 알 수 없기 때문에 재령 6개월의 페이스트를 제조하여 사용하였고, 잔골재는 $75\mu\text{m}$ 이하로 미분쇄하여 사용하

였다.

아래 <표 4-4>는 페이스트와 잔골재를 혼합하여 만든 폐콘크리트 미분말 모델의 화학 성분비를 잔골재의 혼입율에 따라 나타내었으며 잔골재 혼입율이 65%(S65)일 경우에 전국의 실제 화학 성분비의 평균값과 매우 유사한 조성을 보이는 것으로 확인 되었다. 이에 본 연구에서는 S65를 기준으로 S0, S10, S30, S50, S65에 대하여 실험을 실시하였다.

재생시멘트의 제조 프로세스는 실제 보통 포틀랜드시멘트의 제조공정에 근거하여 제조되었으며 이는 <그림 4-2>, <그림 4-3>에 자세한 내용을 나타내었다.

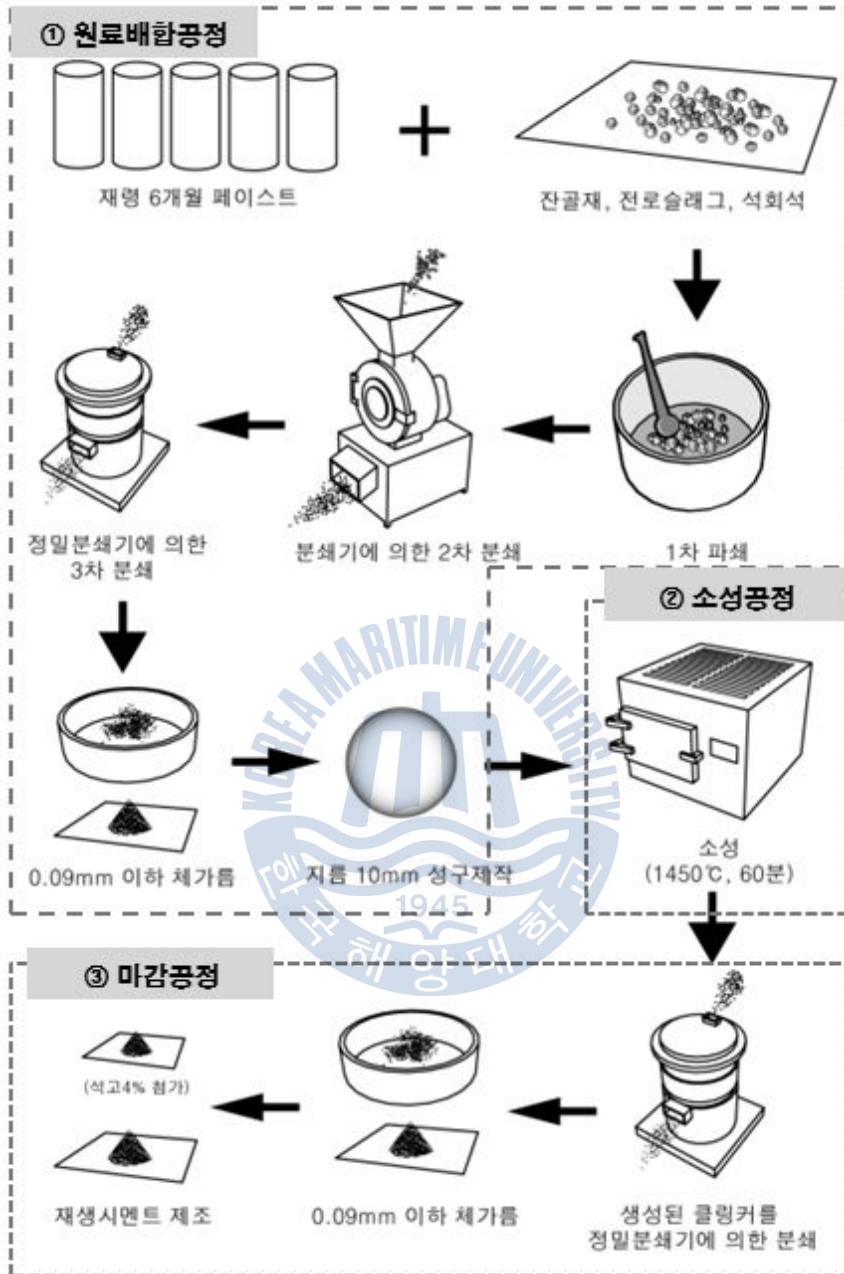
<표 4-3> 폐콘크리트의 실제 화학 성분비

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Sum
전북	58.6	10.3	2.2	13.7	1.1	1.7	2.7	8.6	99.4
경남	56.1	10.3	2.8	15.2	1.4	2.0	2.4	8.8	99.5
경기	58.0	9.7	2.9	15.0	1.3	1.6	2.6	7.7	99.4
경남	56.2	10.2	2.7	15.1	1.1	1.8	2.5	9.4	99.7
경남	50.9	12.5	3.8	15.9	2.1	2.2	2.2	8.9	99.1
경남	54.1	10.3	3.3	16.6	1.7	1.7	2.5	8.6	100.0
전북	60.2	9.2	2.7	14.5	1.4	1.4	2.4	7.2	99.4
강원	57.6	10.2	3.2	14.3	1.4	1.5	2.7	8.1	99.4
경기	58.2	10.5	2.8	13.8	1.2	1.8	2.9	7.6	99.3
충청	56.3	10.3	3.0	14.9	1.6	1.5	2.4	9.0	99.4
경상	47.8	8.7	2.4	17.4	4.0	1.3	2.3	15.0	99.5
평균	55.8	10.2	2.9	15.1	1.7	1.7	2.5	9.0	99.5

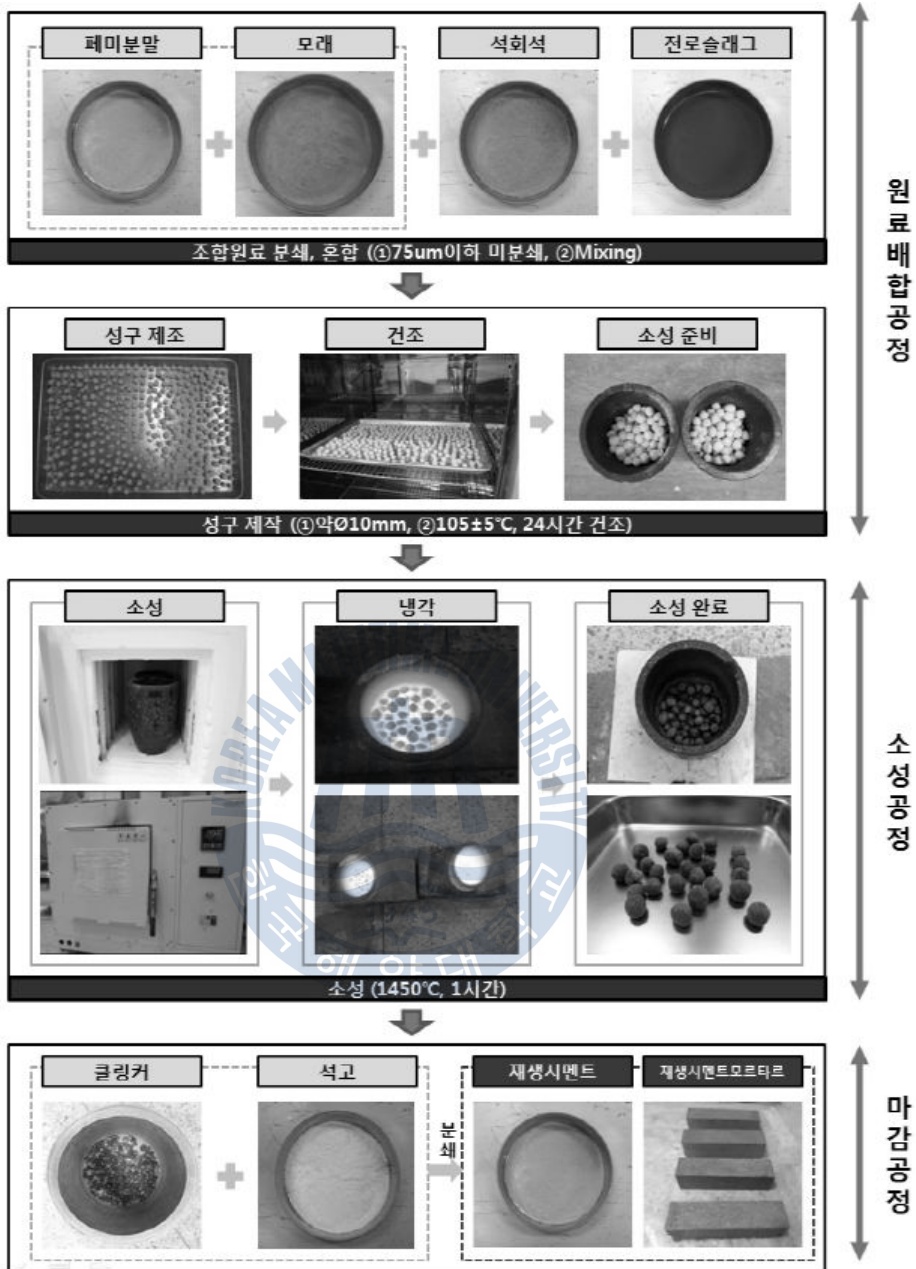
<표 4-4> 페콘크리트 미분말 모델의 화학 성분비

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Sum
S0	18.2	3.9	2.6	47.7	2.4	0.3	0.8	23.1	99.0
S10	23.9	4.7	2.6	43.1	2.2	0.6	1.2	20.8	99.0
S20	29.6	5.5	2.5	38.4	2.0	0.9	1.6	18.6	99.1
S30	35.3	6.3	2.5	33.8	1.8	1.2	2.0	16.3	99.1
S40	41.0	7.2	2.4	29.1	1.6	1.5	2.4	14.1	99.2
S50	46.7	8.0	2.3	24.5	1.4	1.8	2.8	11.8	99.2
S60	52.3	8.8	2.3	19.9	1.2	2.1	3.2	9.5	99.3
S65	55.2	9.2	2.2	17.6	1.1	2.2	3.4	8.4	99.3
S70	58.0	9.6	2.2	15.2	1.0	2.4	3.6	7.3	99.3
S80	63.7	10.5	2.2	10.6	0.7	2.7	4.0	5.0	99.4
S90	69.4	11.3	2.1	6.0	0.5	3.0	4.4	2.8	99.4
100	75.1	12.1	2.0	1.3	0.3	3.3	4.8	0.5	99.5
평균	47.4	8.1	2.3	23.9	1.4	1.8	2.9	11.5	99.2





<그림 4-2> 재생 시멘트 제조 프로세스-2



<그림 4-3> 재생 시멘트 제조 프로세스-3

4.3 다목적최적화를 통한 재생시멘트 제조

4.3.1 GRG Method의 원리

본 연구에서 재생시멘트의 제조는 MEPD(Mechanistic Empirical Pavement Design)의 원리에 근거한 GRG 이론이 적용되었으며 최적화 하고자 하는 여러 가지 조건을 가진 목적함수를 동시에 고려해서 최적의 해를 구하는 것으로 각 목적함수에 해당하는 특성을 모두 만족 시킬 수 있는 값을 찾는 것에 목적이 있다. 모든 목적함수를 고려해서 구한 최적의 해는 그 특성상 어느 한 목적함수를 줄이고자 할 때 다른 목적함수를 증가시켜야 한다. 그래서 다목적 최적화는 유일한 해를 가지지 않고 최적해의 집합을 가지게 되는 것이다.⁸⁾ 이 일련의 과정을 다목적최적화를 통한 재생시멘트의 제조 기법으로 정의한다.

위의 다목적최적화를 통하여 구해진 최적해의 집합들은 설계 프로세스상의 설계자가 어떠한 해를 적용할 것인가에 관하여 선택을 하는데 있어서 매우 유용한 데이터로 활용할 수 있으며 목적으로 하는 각 함수의 변화의 민감도 정도 또한 알 수 있다. 이에 다목적최적화를 위한 적절하고, 효율적인 해석기법이 요구 되는데 MEPD를 적용하는데 있어 Generalized Reduced Gradient Optimization Method (GRG Methods), Genetic Algorithm, Neural Network 등의 원리를 이용할 수 있다.

본 연구에서는 위의 원리 중에서 최적의 해를 찾는 데 매우 신뢰성이 높은 것으로 평가되는 GRG Method를 적용하여 다목적최적화를 통한 재생시멘트 설계를 실시하였으며, Microsoft사의 Microsoft Office Excel의 가상분석 도구인 Excel Solver(해찾기) 기능을 사용하였다.

4.3.2 GRG Method의 적용

(1) 목표값 설정

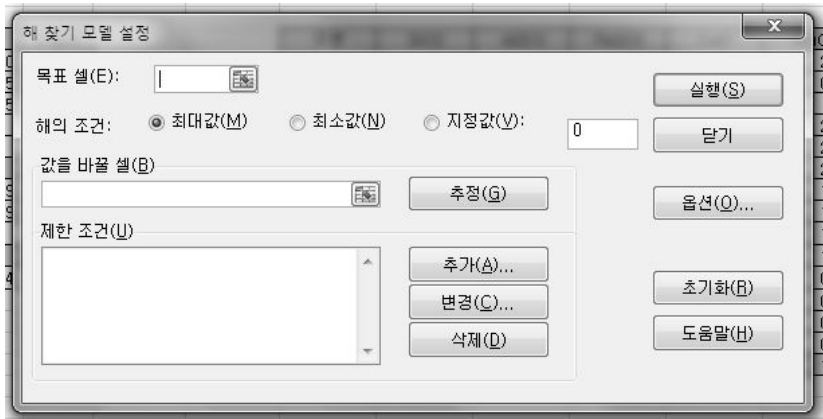
재생시멘트 모델 제조 시 화학분석치로부터 시멘트의 성질을 예측할 수 있는 수치로, 화학 성분의 계산으로부터 얻을 수 있는 시멘트 화합물 조성인 LSD(lime saturation degree, 석회포화도), SM(silica modulus, 규산율) IM(iron modulus, 철율)을 통하여 시멘트의 성질을 파악할 수 있으며 주로 일반 시멘트 제조 시 원료 조합의 관리나 성분 관리에 이용된다.

본 연구에서는 이에 앞서 언급했던 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 및 LSD, SM, IM가 보통 포틀랜드시멘트의 관리 기준에 최대한 유사하도록 Excel Solver를 적용 하였으며 잔골재율의 변화에 따른 적정 값을 구하고자 한다.

(2) 석회석 사용 시 CO_2 발생량 감소를 극대화하기 위해 석회석 사용량 비율을 최소값으로 지정한 후 Excel Solver 프로그램을 이용하여 다목적최적화의 최종 결과값인 성분의 조합비를 찾으며 각 원료의 화학조성을 이용하여 LSD, SM, IM의 기준에 부합하는지 검토 및 확인한다.

Excel Solver는 <그림 4-4>와 같이 구성되어 있으며 <그림 4-5>와 같이 Excel Solver 모델 설정을 통하여 해를 찾는다. 해 찾기 모델 설정은 먼저 석회석 사용량을 최소로 하는 것을 목표 셀로 지정하였으며 LSD의 허용범위 90~100, SM의 허용범위 2.41~2.8, IM의 허용범위인 1.48~1.73을 제한조건으로 수식을 세웠다. 이 기준은 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 성분 관리기준에 근거하였다. 이에 제한조건을 통하여 도출된 값은 폐콘크리트 미분말, 석회석, 전로슬래그 함량의 조합비로 지정하였다.

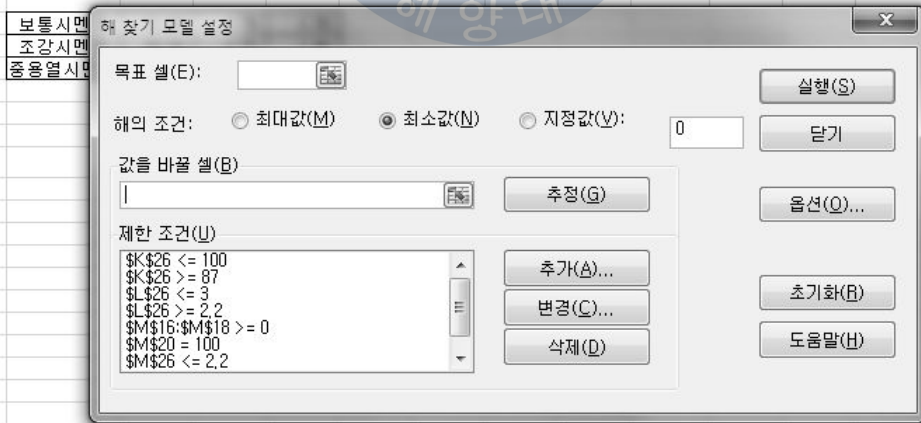
(3) 위의 기준과 조건을 토대로 GRG Method를 적용한 Excel Solver 결과값은 아래 <표 4-5>, <그림 4-5>와 같다.



<그림 4-4> Excel Solver의 기본 구성

1. 주부원료

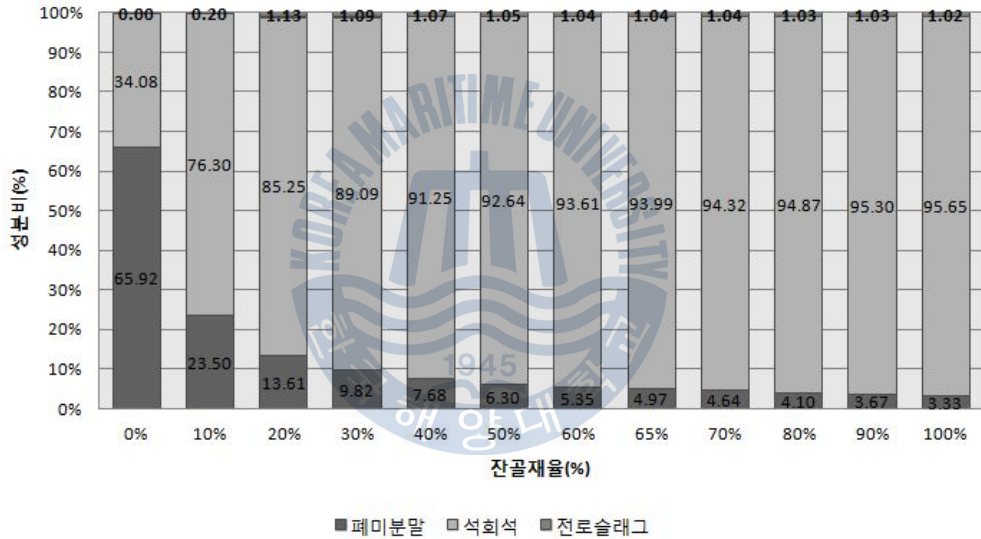
구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Sum	조합비
페미분말	55.19	9.22	2.24	17.55	1.06	2.25	3.39	0.00	8.40	99.30	11.87
석회석	11.15	2.04	0.81	45.20	1.82	0.14	0.88	0.20	37.61	99.85	84.06
전토슬래그	14.90	2.74	38.40	31.80	6.99	0.06	0.05	0.11	0.00	95.05	4.07
											100.00
구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Sum	Factor
조합원료	16.53	2.92	2.51	41.37	1.94	0.38	1.15	0.17	32.61	99.59	1.48
Clinker	24.53	4.33	3.73	61.39	2.88	0.57	1.70	0.26	0.00	99.39	
Clinker 광물 조성				C3S	C2S	C3A	C4AF		LSD	SM	IM
				28.98	48.48	5.18	11.34		80.30	3.04	1.16



<그림 4-5> 석회석 최소량에 따른 Excel Solver의 적용

<표 4-5> Excel Solver를 이용한 재생시멘트 모델 배합설계 결과

구분	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	65%	70%	80%	90%	100%	클링커 성분관리 기준		
	(S0)	(S10)	(S20)	(S30)	(S40)	(S50)	(S60)	(S65)	(S70)	(S80)	(S90)	(S100)	보통	조강	중용열
전로슬래그	0.00	0.20	1.13	1.09	1.07	1.05	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	-	-	-
석회석	34.08	76.30	85.25	89.09	91.25	92.64	93.61	93.99	94.32	94.87	95.30	95.65	-	-	-
페미분말모델	65.92	23.50	13.61	9.82	7.68	6.30	5.35	4.97	4.64	4.10	3.67	3.33	-	-	-
LSF	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90~100		
SM	2.66	2.57	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41~2.8	2.65	2.80
IM	1.55	1.73	1.53	1.56	1.57	1.58	1.59	1.59	1.60	1.60	1.61	1.61	1.48~1.73	1.69	1.00
C ₃ S	50.13	48.73	48.41	48.27	48.19	48.14	48.10	48.09	48.07	48.05	48.04	48.02	50	67	48
C ₂ S	26.11	26.70	26.24	26.34	26.39	26.43	26.45	26.46	26.47	26.48	26.49	26.50	26	9	30
C ₃ A	7.96	9.12	8.48	8.65	8.75	8.81	8.85	8.87	8.88	8.91	8.93	8.94	9	8	5
C ₄ AF	10.00	9.60	10.93	10.81	10.74	10.69	10.66	10.65	10.64	10.62	10.60	10.59	9	8	11



<그림 4-6> 잔골재 혼입율에 따른 조합원료의 성분비

4.4 클링커의 구성광물 상태분석

4.4.1 개요

클링커란 시멘트 제조 공정에서 혼합된 조합원료를 소성과정을 통하여 생성된 물질을 말하며 여기에 약3~5%의 석고를 첨가하여 분쇄하면 시멘트가 된다.

보통 포틀랜드시멘트 클링커를 구성하는 광물은 C_3S (alite), C_2S (belite), C_3A (aluminate), C_4AF (ferrite)로 구성이 되며 일반적인 보통 포틀랜드시멘트의 경우 각각 약50%, 26%, 9%, 9% 정도를 차지하고 있다. 클링커의 성분 중 대부분을 차지하고 있는 4가지 주요 구성광물의 조성비에 따라 시멘트의 응결, 강도, 경화, 강도 및 화학저항성 등의 시멘트의 물성에 영향을 받으므로 클링커를 구성하는 광물의 함량의 정확하고 신뢰성이 있는 파악이 매우 중요할 것으로 사료된다. <표 4-6>은 포틀랜드 시멘트의 주요 화합물의 특성을 나타낸 것이다.

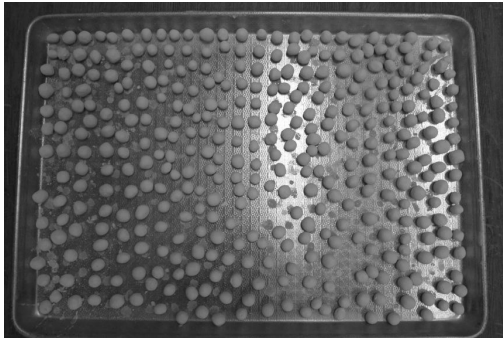
<표 4-6> 포틀랜드 시멘트의 주요 화합물과 특성

분자식	$3CaO \cdot SiO_2$	$2CaO \cdot SiO_2$	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	
화학식약호	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
영문	alite	belite	aluminate	ferrite, celite	
특성	수화 반응속도	빠름	느림	아주 빠름	비교적 빠름
	강도	28일 이내의 초기강도 지배	28일 이후의 장기강도 지배	1일 이내의 초기강도 지배	강도에 거의 관계가 없음
	수화열	높음	낮음	아주 높음	낮음
	건조수축	중간	중간	크다	작다
	화학 저항성	-	-	낮음	-
비고	포틀랜드시멘트의 특징을 갖는 성분	-	수중에서는 불안정 황산염에 의한 침해 우려	시멘트의 특징인 회색을 부여	

현재 클링커의 광물의 함량을 파악하는 방법은 Bogue식에 의한 연산법, XRD 분석에 의거한 내부 표준법, 광학현미경을 활용한 정량 등 여러 가지 방법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 대표적인 정량적 분석 방법인 화학성분 분석과 정성적인 분석 방법인 XRD 분석을 통하여 소성된 클링커의 구성광물의 함량을 정량, 정성적인 방법으로 분석을 실시하였으며 여기에 추가적으로 클링커의 소성 정도를 평가하기 위해 F-CaO 분석법을 추가적으로 실시하였다. 여기서 사용되는 재생시멘트 클링커는 아래의 과정에 따라 제조하였으며 <그림 4-7>에서 간략히 나타내었다.

- ① 조합원료의 성분비에 따라 혼합(폐미분말 모델, 모래, 석회석, 전로슬래그)
- ② 성구 제조 (약 \varnothing 10mm, 10g, 증류수 이용하여 반죽 후 성구 제조)
- ③ 성구 건조 (약 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, 24시간, 건조로)
- ④ 소성 (약 1450°C , 1시간, 고온전기로)
- ⑤ 냉각 (소성이 완료된 클링커를 기중에서 급냉)



(a) 성구 제조



(b) 성구 건조



(c) 소성



(d) 클링커 제조 완료

<그림 4-7> 재생시멘트 클링커의 제조

4.4.2 성분 분석

클링커는 시멘트의 원료를 소성하여 제조된 것으로 여기에서 석고를 첨가하여 분쇄하면 시멘트가 된다. 클링커의 광물이 어떤 조성이나 구조를 취하는지에 따라서 시멘트의 경화나 수화 등의 성질에 매우 중요한 영향을 미친다. 이에 성분분석을 통한 클링커 구성광물 함량의 정확한 파악을 통하여 시멘트 화합물의 화합물의 조성을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 한국세라믹기술원에 의뢰하여 KS L 5120 포틀랜드 시멘트의 화학분석방법에 따라 성분분석을 실시하였다.

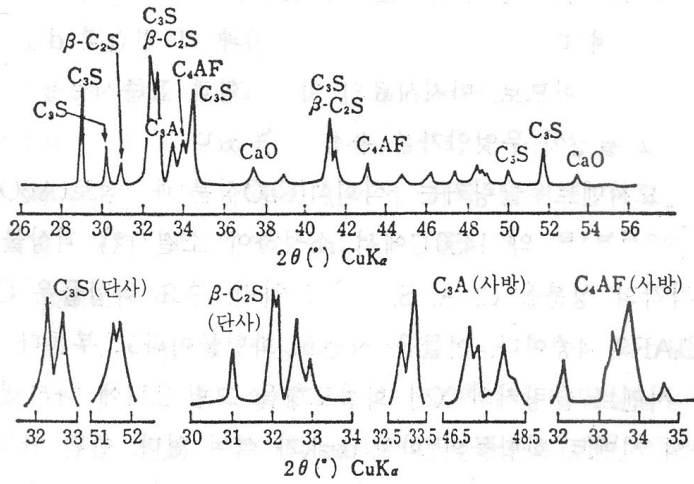
4.4.3 XRD 분석

XRD(X-Ray Diffraction) 분석 방법은 클링커, 골재, 시멘트 수화물 등 물질의 내부 결정성 물질의 구조를 파악하는데 매우 유용한 방법으로 사용되며 성분을 빠르고 정밀하게 분석이 가능하므로 시멘트 산업에서 폭넓게 이용되고 있다.

기본적인 XRD의 원리는 X선(X-Ray)이 결정에 충돌하게 되면 그 중의 일부는 회절(Diffraction)을 일으킨다. X선의 회절 패턴에 따라 물질의 결정 구조를 파악할 수 있다. XRD 분석을 통하여 클링커의 주요 4가지 화합물은 일정 회절각에서 검출이 되며 본 실험을 통하여 시멘트 화합물의 생성 여부 및 특징을 파악할 수가 있다. 아래의 <그림 4-8>은 일반적인 포틀랜드 시멘트와 클링커 화합물의 일반적인 X선 회절도형을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 조합원료의 소성 과정을 통한 클링커의 75 μ m의 입도로 체가름한 미분말에 대하여 XRD 분석을 실시하였으며 이에 따라 재생시멘트 클링커를 통한 재생시멘트의 제조 가능성에 대하여 보통 포틀랜드시멘트와의 비교, 분석을 통하여 평가를 실시하였다.

X선 회절 분석은 동(Cu) ka 를 사용하고, 관전압 40kV, 관전류 20mA, scanning 속도 6°/min, scanning각도(2θ)를 20~50°까지 조사하였다.



<그림 4-8> 시멘트 클링커와 시멘트 화합물의 X선 회절도형



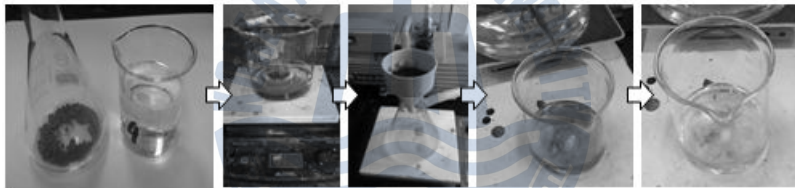
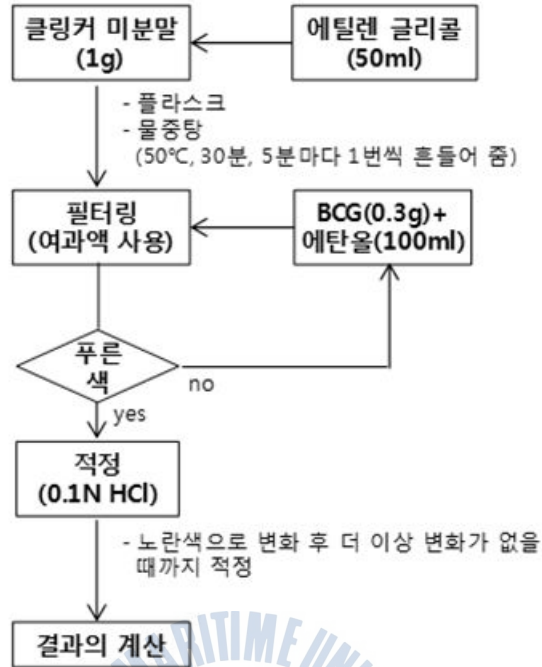
4.4.4 F-CaO 분석

시멘트 클링커의 소성에 영향을 미치는 요소는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용한다. 조합원료가 소성을 통해 클링커화 되는 과정에서 얼마나 잘 되는지를 판단하는 척도를 일반적으로 소성성이라고 하며 소성성의 정도를 파악하는 대표적인 방법은 클링커의 유리석회(이하 F-CaO)양을 측정하는 것이다. 실제 시멘트 생산현장에서는 F-CaO 측정에 의해 클링커의 생성반응의 정도, 소성상태에 대해 시멘트 품질관리의 지표 중 하나로 이용되고 있다.

본 연구에서는 클링커의 성분분석, XRD 분석, 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가를 실시하여 F-CaO 함량의 측정 후 비교, 분석을 통하여 F-CaO의 생성이 각 조건에 미치는 영향에 대하여 종합적으로 평가하고자 한다. 이를 통하여 재생시멘트 클링커의 재생시멘트 원료로의 사용 가능성에 대하여 판단하고자 한다.

아래의 <그림 4-9>는 F-CaO 측정 과정을 나타내는 순서도이다.





<그림 4-9> 클링커의 F-CaO 측정 방법

4.5 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가

4.5.1 플로우 측정

모르타르 플로우 시험은 KS L 5111(시멘트 시험용 플로우 테이블)의 기준에 의거하여 실시하였다. 실험 순서 및 내용은 아래와 같다.⁹⁾

동일한 조건의 보통 포틀랜드시멘트 모르타르를 제조 후 재생시멘트 모르타르와의 비교, 분석을 통하여 플로우 시험을 통한 유동성 평가를 실시하였다.

- ① 마른형겉으로 흐름(flow)시험기의 테이블을 건조하게 하고 흐름몰드를 중앙에 놓는다.
- ② 용기에서 모르타르를 꺼내어 흐름몰드에 2층으로 채워 넣고 다짐봉으로 각 20회 다진다.
- ③ 몰드에 모르타르가 딱 차면 표면을 평평하게 한다. 이때는 흙손의 끝은 날로 몰드의 윗면에 거의 직각이 되게 세우고 몰드 윗면을 따라서 톱질 운동으로 평평하게 한다.
- ④ 테이블 윗면과 몰드 주위의 물기를 마른형겉으로 완전히 없앤 다음 반죽을 끝마친 후 1분 뒤에 몰드를 천천히 들어 올린다.
- ⑥ 흐름판 위에 퍼진 모르타르를 거의 같은 간격으로 4개의 평균 지름을 측정하고 원지름에 대한 증가를 원지름의 백분율(%)로 나타낸다.
- ⑦ 그 후에 모르타르를 강도 시험에 사용한다.

4.5.2 압축강도 측정

모르타르 압축강도 시험은 KS L ISO 679의 방법에 의거하여 실시했으며 모르타르 공시체는 재령3일, 7일에 해당하는 초기재령에 대한 압축강도를 얻기 위하여 배합 및 재령별로 모르타르 공시체를 제작하여 시험을 실시하였다. 모르타르 공시체의 제작 및 강도 시험 측정에 관한 실험 순서 및 내용은 다음과 같다.

앞 절의 모르타르 플로우 시험과 마찬가지로 동일한 조건의 보통 포틀랜드시멘트 모르타르를 제조 후 재생시멘트 모르타르와의 비교, 분석을 통하여 압축강도 시험을 통한 압축강도 평가를 실시하였다. 또한 모르타르의 제조 과정과 압축강도 측정은 <그림 4-10>, <그림 4-11>에 나타내었다.

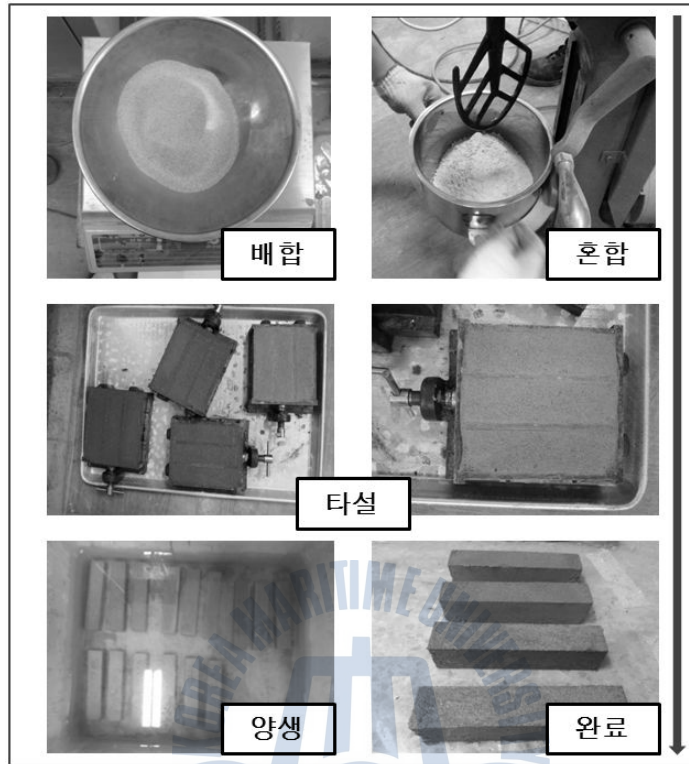
<표 4-7> 모르타르 배합

(배합기준 : KS L ISO 679)

시험체(EA)	W/C	시멘트	표준사	혼합수
3 (각 배합당)	50%	450±2g	1350±5g	225±1g

<표 4-8> 모르타르의 압축강도 시험 방법

시험 방법	KS L ISO 679	
시험체틀	각주형(40×40×160mm)	
배합비율	시멘트:표준사=1:3, W/C=50%	
표준사	ISO 표준사	
다짐방법	기계다짐(1,2회 : 각60초, 60회)	
3일 강도	12.5MPa	3일±45분
7일 강도	22.5MPa	7일±2시간
28일 강도	42.5MPa	28일±8시간



<그림 4-10> 모르타르 제조 과정



<그림 4-11> 모르타르 압축강도 측정

제 5 장 실험결과 및 분석

5.1 클링커의 구성광물 상태 분석 결과

5.1.1 클링커의 성분분석 결과

<표 5-1>의 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 조성을 살펴보면 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO 의 5가지 성분이 주를 이룬다. 이 5가지 성분을 기준으로 성분분석과 평가를 실시하였으며 <표 5-2>, <표 5-3>은 재생시멘트를 이용하여 제조된 클링커의 화학성분의 설계값과 실제 성분 분석 값을 KS L 5120의 기준에 근거하여 측정한 결과를 나타내었다. 또한 클링커의 화학조성 비교를 <그림 5-1>을 통하여 나타내었다.

<표 5-3>의 화학분석 결과 재생시멘트 클링커의 SiO_2 의 함량은 22.50~23.80%, Al_2O_3 함량은 5.52~6.48%, Fe_2O_3 의 함량은 3.50~4.09%, CaO 의 함량은 61.80~62.50%, MgO 의 함량은 3.25~3.63%의 범위를 갖는 것으로 확인 되었다. 이는 <표 5-2>의 다목적최적화를 통하여 도출된 화학 조성비의 설계값과 비교했을 때 매우 유사한 값을 가지는 것으로 볼 수 있다.

실제 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 화학 조성비와 비교해 보았을 때 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 3가지 성분의 함량은 유사한 값을 가지며 CaO 는 낮고, MgO 의 경우는 높은 성분비를 보이는 것을 알 수가 있었다.

<표 5-1> 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 화학조성

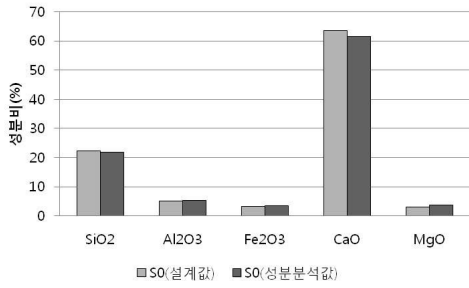
성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	계
분류 클링커 환산치	23.00	5.60	3.20	66.80	1.40	100

<표 5-2> 재생시멘트 클링커의 화학조성(설계값)

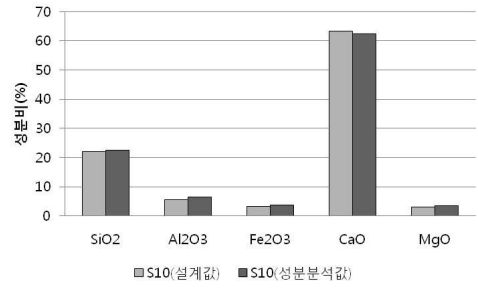
성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	계
분류 S0	22.29	5.10	3.29	63.52	3.13	97.33
S10	22.13	5.45	3.15	63.41	2.99	97.13
S30	21.88	5.53	3.55	63.10	2.99	97.05
S50	21.88	5.57	3.51	63.10	2.98	97.04
S65	21.88	5.58	3.50	63.11	2.97	97.04

<표 5-3> 재생시멘트 클링커의 화학조성(성분분석값)

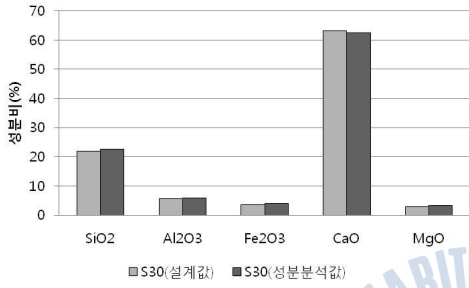
성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	계
분류 S0	23.80	5.44	3.50	62.50	3.63	98.87
S10	22.50	6.48	3.66	62.50	3.48	98.62
S30	22.60	5.92	4.09	62.40	3.41	98.42
S50	22.30	5.52	3.68	61.80	3.28	96.58
S65	22.50	5.71	3.57	62.10	3.34	97.22



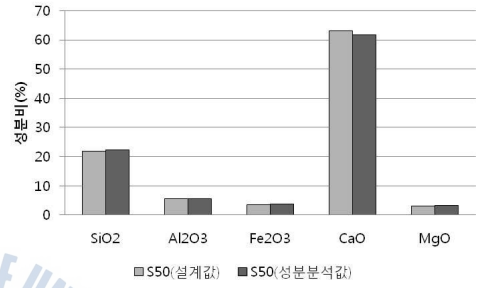
(a) S0



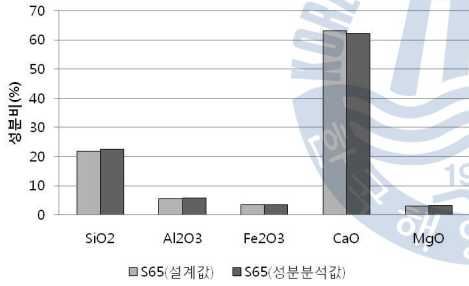
(b) S10



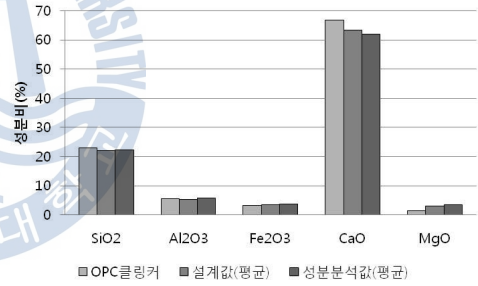
(c) S30



(d) S50



(e) S65



(f) 평균값

<그림 5-1> 재생시멘트 클링커의 화학조성 비교

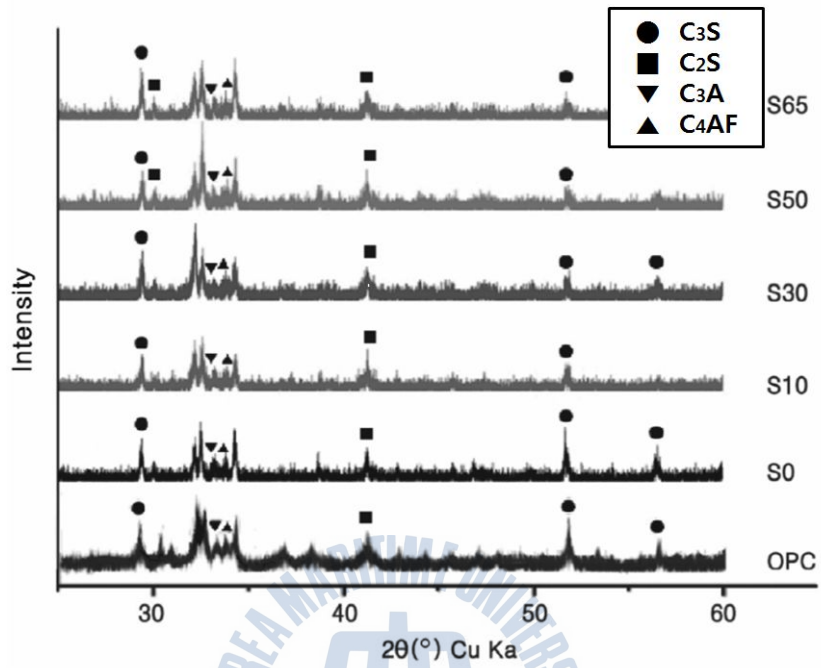
5.1.2 XRD 분석 결과

<그림 5-2>는 잔골재 혼입율에 따라 1450°C로 소성한 재생시멘트 클링커의 XRD 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

XRD 분석 결과를 살펴보면 X축의 2θ는 X선의 회절각, Y축의 피크값은 물질의 함유량에 따라 비례하는 회절의 강도를 나타낸 것이다. 피크값을 통해 성분포함 유무를 판단하는 기준은 Y축의 가장 높은 intensity값을 나타내는 점을 100이라고 보았을 때 각 피크점이 약20% 이상의 비율을 가지면 그 피크점에 해당하는 성분이 포함되어 있다고 할 수가 있다. 또한 피크가 높고 뾰족할수록 결정성이 큰 것으로 판단할 수가 있다.

본 실험에서는 클링커를 구성하는 4종의 주요 화합물의 생성유무 여부로 판별을 실시하였으며 같은 회절각에서 중첩되는 화합물은 제외하였다. 보통 포틀랜드시멘트의 일반적인 회절도형을 기준으로 C₃S는 29°,52°, C₂S는 31°,41°, C₃A는 33°, C₄AF는 34°부근에서 검출된다.

실험결과 모든 배합에서 보통 포틀랜드시멘트 클링커 광물상인 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF가 검출 되는 것을 확인할 수 있었으며 잔골재 혼입율이 낮을수록 피크값이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수가 있었다. 또한 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 52°부근에서 검출되는 C₃S의 피크값이 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 잔골재 혼입율의 증가는 C₃S의 합성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. <그림 5-2>에 기입 되어 있지는 않으나 S65에서 37°부근에서 CaO가 일부 검출되었는데 이는 잔골재 혼입율이 가장 높은 배합으로 Quartz성분의 SiO₂가 다량 혼입되면서 CaO와의 합성이 완전히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 추정된다.¹⁰⁾



<그림 5-2> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 XRD 분석 결과

5.1.3 F-CaO 분석 결과

<표 5-4>, <그림 5-3>은 잔골재 혼입율에 따라 각각 1200°C, 1300°C, 1400°C, 1450°C로 소성한 재생시멘트 클링커의 F-CaO 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

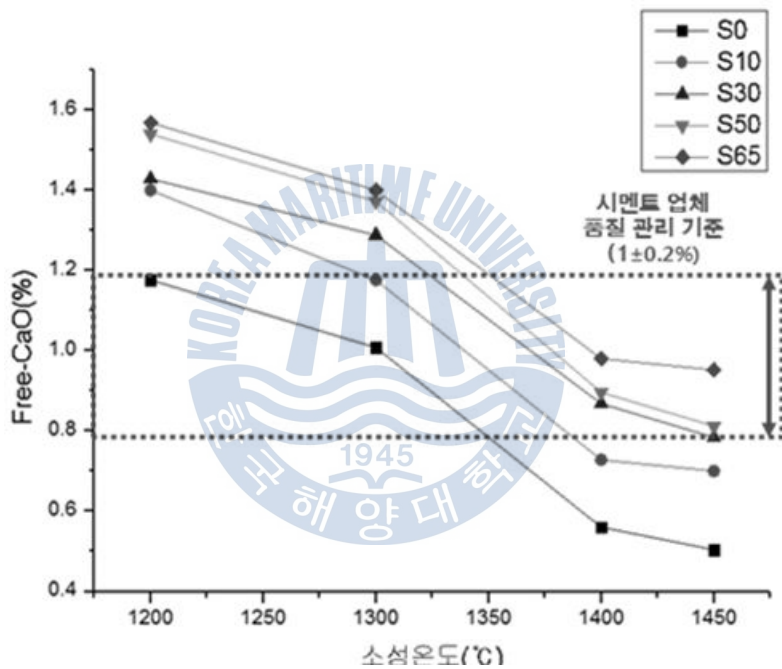
재생 시멘트 클링커의 F-CaO 측정값을 분석 결과 F-CaO값은 최소 0.5%에서 최대 1.57%의 값을 나타냈으며 1450°C 소성 클링커의 경우 모든 배합에서 일반 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준인 $1\pm 0.2\%$ 내에 부합하는 결과를 얻을 수가 있었다. 이에 F-CaO 측정을 통한 재생시멘트 클링커의 소성도 분석 결과 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 관리기준과 유사한 값을 보이는 것을 알 수가 있었다.

전체적으로 잔골재 혼입율의 증가에 따라서 측정된 F-CaO 값이 높게 나오는 것을 확인할 수가 있었다. 이는 앞절에서 언급했듯이 잔골재 혼입율의 증가에 따라 C₃S의 합성이 잘 이루어지지 않으며 잔골재 혼입율의 증가는 소성성의 저하에 영향을 미치는 것으로 추측 할 수가 있다.

모든 배합에서 소성 온도가 증가 할수록 F-CaO값이 낮게 나오는 것을 알 수가 있다. 이는 클링커의 소성 시 최고온도의 해당하는 1450°C 이상의 구간에서 F-CaO가 완전히 소멸되므로 다소 저온의 구간에서는 완전히 소멸되지 않은 F-CaO로 인하여 높은 값이 나오는 것으로 추정할 수가 있다. 또한 잔골재율이 낮은 배합일수록 F-CaO값이 낮게 나오는 것을 알 수가 있었다. 이는 앞절의 XRD 분석 결과와 마찬가지로 잔골재 혼입율이 증가함에 따라서 잔골재에서 기인한 Quartz 결정형태로 다량 함유된 SiO₂로 CaO와의 반응성이 떨어지기 때문인 것으로 추정이 된다.

<표 5-4> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 소성온도별 F-CaO 측정값(%)

배합 \ 소성온도	1200℃	1300℃	1400℃	1450℃
S0	1.18	1.01	0.56	0.50
S10	1.40	1.18	0.73	0.70
S30	1.43	1.29	0.87	0.78
S50	1.54	1.37	0.89	0.81
S65	1.57	1.40	0.98	0.95



<그림 5-3> 잔골재 미분말의 혼입율에 따른 소성 온도별 F-CaO 측정값

5.2 재생시멘트 모르타르의 물리성능 평가 결과

5.2.1 플로우 측정 결과

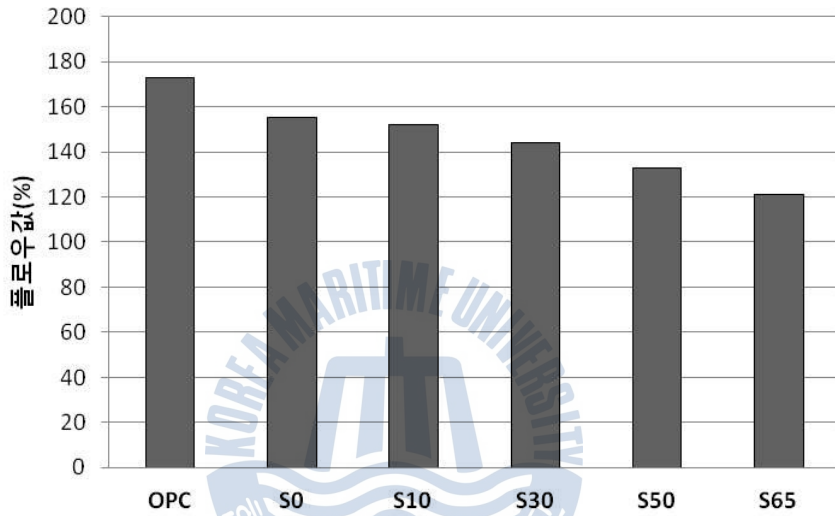
<표 5-5>, <그림 5-4>는 보통 포틀랜드시멘트로 제조한 모르타르와 잔골재 혼입율에 따라 제조된 재생시멘트 모르타르의 플로우 측정 결과를 나타낸 것이다. 여기서 플로우 값은 흐름판 위에 퍼진 모르타르를 거의 같은 간격으로 4개의 평균 지름을 측정하고 원지름에 대한 증가를 원지름의 백분율(%)로 나타낸 값으로 하였다.

보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 재생시멘트 모르타르의 경우 플로우 값이 낮게 나타났으며 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향이 나타났다. 보통 포틀랜드시멘트와 S0를 비교 했을 때 플로우 값이 약18% 감소하였으며, 잔골재율이 최소, 최대값을 나타내는 S0와 S65를 비교 했을 때 약34%가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 재생시멘트 모르타르는 보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 유동성이 작게 나타나며 잔골재 혼입율이 증가함에 따라서 유동성이 급격히 저하하는 것을 볼 수가 있다.

이는 기존의 연구결과에 따르면 폐콘크리트 미분말의 잔골재에서 기인한 SiO_2 (Quarz) 성분으로 인하여 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和)¹¹⁾¹²⁾ 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 유동성이 저하하는 것으로 판단된다.¹³⁾

<표 5-5> 재생시멘트 모르타르의 플로우

	OPC	S0	S10	S30	S50	S65
Flow(cm)	17.3	15.5	15.2	14.4	13.3	12.1
Flow(%)	173	155	152	144	133	121



<그림 5-4> 재생시멘트 모르타르의 플로우

5.2.2 압축강도 측정 결과

<표 5-6>, <그림 5-5>는 보통 포틀랜드시멘트로 제조한 모르타르와 잔골재 혼입율에 따라 제조된 재생시멘트 모르타르의 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 휨강도 측정 후 파단 된 6개의 시편의 재령3일, 7일의 압축강도 측정 평균값으로 하였다.

압축강도 측정 결과를 살펴보면 재령 3일의 경우 최소 2.75~최대 3.98MPa의 값을 나타냈으며 잔골재 혼입율이 증가함에 따라서 강도의 감소가 나타났다. 평균값은 3일 압축강도 기준인 12.5MPa의 약30% 수준이다. 또한 재령 7일의 경우 최소 5.28~7.22MPa의 값을 나타냈으며 여기서는 잔골재 혼입율에 상관없이 강도를 나타내었다. 평균값은 7일 압축강도 기준인 22.5MPa의 약30% 수준이다. 전반적으로 보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비하여 재생시멘트 모르타르의 경우 전반적으로 압축강도가 현저히 낮은 값을 나타내었다.

실험 계획상에서는 초기 재령인 3일, 7일에 대한 압축강도에 대해서만 실험하려고 했으나 초기 재령의 모르타르 압축강도의 결과에 매우 만족스럽지 못한 결과를 얻은 관계로 재령 90일의 모르타르를 제작하여 추가적으로 압축강도 실험을 실시 하였다. 재령 90일의 압축강도 시험 결과 최소 15.56~최대 19.98MPa의 값을 나타냈으며 이는 보통 포틀랜드시멘트 모르타르 강도의 40~50% 수준이다. 초기재령의 압축강도에 비해 많은 강도 증진이 있었으나 낮은 수준의 강도 분포를 보였다.

모르타르의 강도 발현은 시멘트의 종류, 조성, 입도 및 입자의 크기, W/C비, 양생조건 등 여러 요인이 커다란 영향을 미친다. 이는 모르타르 경화체의 강도 발현에 커다란 영향을 미치게 된다.¹⁴⁾

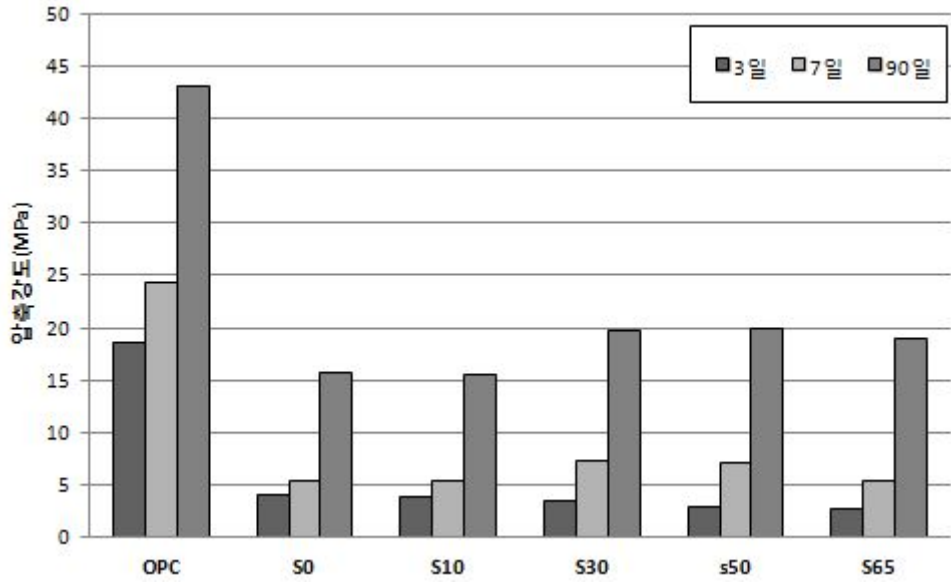
본 연구의 재생시멘트 입도의 경우 75 μ m 이하로 여러번의 분쇄 공정을 통하여 최대한 미분쇄 하였으나 3~30 μ m 크기의 보통 포틀랜드 시멘트에 비해서 다소 큰 입도 분포를 보인다. 기존의 연구에 따르면 시멘트의 입도분포는 강도

발현성과 유동성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 클링커를 입경별로 분급하여 C₃S상의 분포와 영향을 확인 시 입경이 작을수록 C₃S상이 많이 존재하며 미립 부분이 존재할수록 수화반응이 빨라지게 된다.¹⁵⁾ 여기서 C₃S는 초기 수화반응 시 응결과 경화에 가장 큰 영향을 미치는 시멘트 화합물이다. 본 실험에서 제조된 재생 시멘트의 경우 다소 큰 입도로 인하여 C₃S 합성이 충분히 이루어지지 않았으며 이로 인하여 초기 재령의 압축강도가 현저하게 낮게 나오는 이유 중 하나로 예측할 수 있다. 이에 재생시멘트 모르타르의 강도 증진을 위해 향후 연구에서는 재생시멘트 클링커를 더욱 효율적으로 미분쇄 할 수 있는 분쇄 공정의 채택이 필요할 것으로 사료된다.

또한 클링커를 조성하는 광물의 수화반응과 밀접한 관련성이 있으므로 재령별 재생시멘트 모르타르의 수화물의 분석, 평가 등을 통해서 다방면으로 강도 발현 저하의 원인을 규명해 볼 필요가 있다.

<표 5-6> 재생 시멘트 모르타르의 압축강도

재령 \ 분류	KSLISO 679	OPC	S0	S10	S30	S50	S65
3일(MPa)	12.5이상	18.49	3.98	3.85	3.49	2.85	2.75
7일(MPa)	22.5이상	24.38	5.45	5.30	7.22	7.01	5.28
90일(MPa)	-	42.96	15.77	15.56	19.75	19.98	19.04



<그림 5-5> 재생시멘트 모르타르의 압축강도



제 6 장 결 론

본 연구에서는 폐미분말의 석회석 대체재로서 활용을 도모하고자 전로슬래그를 이용한 성분조정을 통해 재생시멘트를 제조하였다. 성분조정기법은 다목적 최적화 배합설계를 활용하여 보통포틀랜드시멘트에 준하도록 실시하였으며 제조된 재생시멘트는 화학성분 분석, XRD, 소성도 분석 및 역학적 물성평가를 통하여 시판 포틀랜드시멘트와 비교하여 석회석 대체재로서의 활용가능성에 대하여 검토하였다. 일련의 실험결과를 분석하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

(1) 전국 11개소에서 채취한 실제 폐콘크리트 미분말의 화학조성에 대한 성분 분석을 실시한 결과 SiO_2 , CaO 가 가장 큰 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이는 폐미분말 속에 수화된 페이스트와 상당량의 잔골재가 혼입되어 있어 나타난 결과라 생각되며 S65, 즉 페이스트에 대해 잔골재 65%를 혼입했을 경우 이뤄지는 구성비와 유사한 값으로 나타났다. SiO_2 의 경우 보통 포틀랜드시멘트의 함량과 비교하여 크게 증가 하였고 CaO 의 경우 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 경화 된 폐콘크리트 분쇄 시 페이스트 미분말과 유사한 입도를 가지는 잔골재 미분에 대한 분리가 어렵기 때문인 것으로 추정된다.

(2) 다목적최적화 기법을 통하여 재생시멘트 제조에 관련한 배합 설계를 실시한 결과 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 성분관리 기준인 석회포화도(L.S.D) 90~100, 규산율(S.M.) 2.41~2.8, 철율(I.M.) 1.48~1.73의 범위 내에 충족하는 값을 가지는 보통 포틀랜드시멘트로의 재생이 가능한 것으로 나타났다. 또한 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 폐콘크리트 미분말의 석회석 대체율이 급격하게 저하되는 경향을 볼 수가 있었다. 이에 폐미분말을 시멘트 원료로 활용하고자 할 경우 잔골재를 최대한 제거할 수 있는 방안이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

(3) 재생시멘트 클링커의 구성광물 상태분석 결과 클링커의 화학 조성, 시멘트 화합물의 생성은 보통 포틀랜드시멘트 클링커와 비교하여 매우 유사한 수준을 나타냈다. 또한 XRD 분석 결과 재생 시멘트 클링커 내에서 주요 시멘트 화합물의 피크가 모두 검출 되었으며 소성도를 판별하는 기준인 F-CaO 측정 결과 시판되는 시멘트 관리기준에 부합하는 값을 얻을 수 있었다. 이는 실제 클링커 품질 관리 기준과 비교하여 우수한 수준인 것으로 판단할 수 있었다.

(4) 재생시멘트 모르타르의 유동성 시험 결과, 보통 포틀랜드시멘트 모르타르에 비해 유동성이 급격히 저하하는 것을 알 수 있었다. 이는 폐콘크리트 미분말의 잔골재에서 기인한 SiO_2 (Quartz) 성분으로 인하여 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 유동성이 저하하는 것으로 판단된다. 이에 유동성 증가를 위해 재생시멘트의 제조 시 입도분포의 조절을 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

(5) 재생시멘트 모르타르의 재령3일, 7일의 압축강도 시험 결과 보통 포틀랜드시멘트 모르타르의 약30% 정도, 재령90일의 장기재령의 경우 40~50% 정도의 강도발현이 나타났다. 본 연구의 재생시멘트의 입도의 경우 $75\mu\text{m}$ 이하로 최대한 미분쇄 하였으나 $3\sim 30\mu\text{m}$ 크기의 보통 포틀랜드 시멘트에 비해서 다소 큰 입도 분포를 보이며, 시멘트의 입도분포는 모르타르의 강도발현에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 이에 모르타르의 강도 증진을 위해 향후 연구에서는 재생시멘트 클링커를 더욱 효율적으로 미분쇄 할 수 있는 분쇄 공정의 채택이 필요할 것으로 사료된다. 또한 추가적으로 수화물의 분석, 평가를 통해서 다방면에서 강도 발현 저하의 원인을 규명해 볼 필요가 있다.

이상의 연구결과 보통 포틀랜드시멘트의 주원료인 석회석의 대체원료로서 재생시멘트를 적용하는 것은 일부분 가능성이 보이는 것으로 나타났으며 향후 모르타르 경화체의 수화물 분석 및 재생시멘트의 제조 프로세스 보완을 통하여 고품질, 고성능의 재생시멘트를 개발할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 환경부, 2012, 2011 전국폐기물 발생 및 처리현황, pp.10
- 2) 서상교, 1996. 재생골재의 품질평가에 관한 연구, 한국콘크리트학회, Vol.1.
- 3) 탁현철, 2006폐콘크리트계 미분말의 재생시멘트 활용방안에 관한 기초적 연구, 동아대학교 대학원석사학위 논문
- 4) 안재철, 오상균, 강병희, 2005, 실제 폐콘크리트 부산미분말을 이용한 재생시멘트의 수화특성, 대한건축학회논문집(구조계), 제21권, 9호, pp.121~129
- 5) 오상균, 홍영태, 2007, 정밀분급방법을 이용한 폐콘크리트 미분말의 고품질 재생시멘트 개발, 대한건축학회논문집(구조계, 제23권, 9호, pp.63~70
- 6) 한국산업표준(KS), 2006, KS L 5201 포틀랜드 시멘트
- 7) 강동우, 2011, 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 물성개선에 관한 연구, 동아대학교 대학원 석사학위논문
- 8) 권은희, 2013, 폐콘크리트 미분말의 시멘트 원료화를 위한 소성도 분석, 동아대학교 대학원 석사학위논문
- 9) 오상균 외 4명, 2006, 건축재료실험, 도서출판서우, pp.54
- 10) 안재철, 박동천, 2013, 폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용한 저온 소성 재생시멘트의 물성, 대학건축학회논문집(구조계), 제29권, 제3호, pp.97~104
- 11) 윤재환 역, 1997, 포틀랜드 시멘트 및 콘크리트, 세진사
- 12) 정일영, 2004, 콘크리트구조 재료공학, 기문당, pp.10-39

- 13) 장중호 외, 2001, 재생미분말의 가열온도에 따른 기초물성 및 시멘트 혼화재 적용성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp.635-640
- 14) Arai Yasuo 외 4명, 1998, 시멘트 材料化學, 전남대학교 출판부
- 15) 변승호, 2010, 포틀랜드 혼합시멘트 물성에 미치는 시멘트 입도의 영향, 단국대학교 대학원 박사학위 논문



감사의 글

우선 3년간의 연구실 생활동안 정성으로 지도해 주신 박동천 교수님께 큰 감사의 인사를 드립니다.

동고동락하며 항상 큰 힘이 되어줬던 연구실 식구들에게도 감사를 표합니다. 즐겁고 행복했던 기억들 많이 만들어 줘서 감사합니다. 졸업 후에도 좋은 얼굴로 만날 수 있었으면 합니다. 그리고 우리 가족, 저를 항상 응원해줬던 친구들도 감사하고 사랑합니다.

연구실 문을 열고 들어왔었던 때가 엇그제 같은데 이제는 새로운 도전을 하려고 합니다. 고마웠고 많이 감사했습니다.

앞으로 건축시공 및 사업관리 연구실의 발전과 번영을 기원하며 항상 즐거움과 밝은 미래가 가득한 연구실이 되었으면 합니다.