

공학석사 학위논문

CFD 및 실험을 이용한 선실 급기구 형상이
실내공기환경에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Indoor Air Quality in the Cabin of Vessel with the
Different Types of Diffuser using Experiments and CFD

지도교수 황 광 일

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과 우 상 우

本 論文을 禹尙禹의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 공학박사 방 광 현 

위 원 공학박사 윤 상 국 

위 원 공학박사 황 광 일 

2008 년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iv
Abstract	v
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	3
1.3 논문의 내용 및 구성	7
제2장 실내오염개론	9
2.1 실내 공기질의 중요성	9
2.2 실내 오염원	10
2.3 실내 공기질 관련 기준	18
제3장 선실에서 건물용 급기구를 이용한 오염물질 제거 실험	20
3.1 연구대상의 개요	20
3.2 실험방법	24
3.3 오염물질 제거에 대한 농도분포	31
제4장 FLUENT를 이용한 공기유동 해석	45
4.1 CFD의 기본 이론	45
4.2 환기효율의 정의	56
4.3 TVOC의 CFD 해석값과 실험값 비교를 통한 CFD 해석의 타당성 검토	60
4.4 선박용 급기구와 건물용 급기구 형상에 대한 공기연령 해석	65
4.5 공기유동형태에 대한 2차원 해석	77
4.6 급기구 형상 개발을 위한 CFD 해석	83
제5장 결론	98
참 고 문 헌	100

그림 목차

그림 3.1.1 한국해양대학교 실습선 한바다호	21
그림 3.1.2 한바다호의 deck의 소개와 실험 대상선실 위치	22
그림 3.1.3 실험 대상선실	23
그림 3.1.4 한바다호의 급기구(CASE #1)	23
그림 3.2.1 건물용 급기구(CASE #2)	25
그림 3.2.2 건물용 급기구(CASE #3)	25
그림 3.2.1.1 실험장비	27
그림 3.2.1.1 측정 포인트	29
그림 3.2.1.2 선실 중앙에서 온·습도와 TVOC 측정	30
그림 3.2.1.3 풍량 측정	30
그림 3.2.1.4 급기 온·습도 측정	30
그림 3.2.1.5 급기구 교체한 모습	30
그림 3.3.1.1 CASE #1의 1차 실험결과	33
그림 3.3.1.2 CASE #1의 2차 실험결과	33
그림 3.3.1.3 CASE #1의 1차 실험결과(30분 후)	34
그림 3.3.1.4 CASE #1의 2차 실험결과(30분 후)	34
그림 3.3.2.1 CASE #2의 1차 실험결과	37
그림 3.3.2.2 CASE #2의 2차 실험결과	37
그림 3.3.2.3 CASE #2의 1차 실험결과(30분 후)	38
그림 3.3.2.4 CASE #2의 2차 실험결과(30분 후)	38
그림 3.3.3.1 CASE #3의 1차 실험결과	41
그림 3.3.3.2 CASE #3의 2차 실험결과	41
그림 3.3.3.3 CASE #3의 1차 실험결과(30분 후)	42
그림 3.3.3.4 CASE #3의 2차 실험결과(30분 후)	42
그림 3.3.4.1 각 CASE별 선실의 수직·수평간 평균 농도 차이	44
그림 4.1.2.1 제어체적에 관한 질량보존	46
그림 4.1.3.1 유한체적법에서의 좌표와 물리량 Φ 의 분포에 대한 가정	53
그림 4.2.1.1 공기연령의 이해	58
그림 4.3.1 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(선실중앙)	62

그림 4.3.2 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 상층)	63
그림 4.3.3 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 하층)	64
그림 4.4.1 선실의 격자형태	67
그림 4.4.2 급기구와 배기구 주변의 격자	67
그림 4.4.3 급기구 형상	68
그림 4.4.4 공기연령을 보여주기 위한 특정 면	69
그림 4.4.5 CASE #1의 국소평균공기연령	70
그림 4.4.6 CASE #2의 국소평균공기연령	71
그림 4.4.7 CASE #3의 국소평균공기연령	72
그림 4.4.8 CASE #1, 급기되는 신선공기 입자 궤적	73
그림 4.4.9 CASE #2, 급기되는 신선공기 입자 궤적	74
그림 4.4.10 CASE #3, 급기되는 신선공기 입자 궤적	75
그림 4.4.11 CASE #1, #2, #3의 공기연령 비교	76
그림 4.5.1 2차원 공기유동을 확인하기 위한 예	78
그림 4.5.2 CASE #A의 국소평균공기연령과 streamline	79
그림 4.5.3 CASE #B의 국소평균공기연령과 streamline	80
그림 4.5.4 CASE #C의 국소평균공기연령과 streamline	81
그림 4.5.5 CASE #D의 국소평균공기연령과 streamline	82
그림 4.6.1 구조물이 없는 선실	84
그림 4.6.2 구조물 없는 선실이 국소평균공기연령($Z=-1.8$)	84
그림 4.6.3 CASE #1에서 급기되는 신선공기의 흐름	85
그림 4.6.4 CASE #4에서 급기되는 신선공기의 흐름	85
그림 4.6.5 급기구 형상(CASE #4)	86
그림 4.6.6 CASE #1과 CASE #4의 공기연령 비교	87
그림 4.6.7 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교	88
그림 4.6.8 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교	89
그림 4.6.9 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교	90
그림 4.6.1.1 CASE #1의 30분 후 TVOC 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	92
그림 4.6.1.2 CASE #4의 30분 후 TVOC 농도 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	92
그림 4.6.1.3 TVOC 농도 비교(CASE #1, #4)	93
그림 4.6.2.1 측정 포인트	95
그림 4.6.2.2 CASE #1의 이산화탄소 농도 변화	96
그림 4.6.2.3 CASE #4의 이산화탄소 농도 변화	97

표 목차

표 2.2.9.1 오염물질이 인체에 미치는 영향	17
표 2.3.1 실내공기질 유지기준	18
표 2.3.2 실내공기질 권고기준	19
표 3.1.1 한바다호의 개요	21
표 3.2.1 급기구 형상에 대한 치수	25
표 3.2.1.1 측정 포인트 위치	29
표 3.3.1.1 CASE #1의 1차 실험결과	32
표 3.3.1.2 CASE #1의 2차 실험결과	32
표 3.3.2.1 CASE #2의 1차 실험결과	36
표 3.3.2.2 CASE #2의 2차 실험결과	36
표 3.3.3.1 CASE #3의 1차 실험결과	40
표 3.3.3.2 CASE #3의 2차 실험결과	40
표 3.3.4.1 각 CASE별 수직·수평간 평균 농도 차이	44
표 4.1.2.1 $k-\epsilon$ 난류모델의 경험상수	52
표 4.3.1 실험값과 CFD값의 TVOC 농도 비교(선실중앙)	62
표 4.3.2 실험값과 CFD값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 상층)	63
표 4.3.3 실험값과 CFD값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 하층)	64
표 4.6.2.1 인체의 활동강도에 이산화탄소 배출량	95

Effect of Indoor Air Quality in the Cabin of Vessel with the Different Types of Diffuser using Experiments and CFD

Sang-woo, Woo

Department of Refrigeration & Air-Conditioning Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

The cabin of the vessel is very narrow and airtight. And it is composed of the structures of the bunk beds, the clothes chest and the desk. According to the results of many previous research work on the air quality in the cabin, very poor indoor air quality was detected. The indoor CO₂ concentration exceeded the standard value due to breath of people in the narrow space, and the large temperature difference appeared in the vertical as well as horizontal distributions.

The purposes of this study are to lower the concentration of indoor air pollution, and to get uniform temperature and concentration distributions in the cabin. We conducted an experiment to examine the removal of Toluene with various diffuser types. An influence on the pollution material removal efficiency and the age of air with different types of diffuser were analyzed by numerical simulation using FLUENT. The data of concentration from the experiments and numerical simulations was relatively consistent each other. We compared the age of air with diffuser of vessel and building, and calculated TVOC (Total Volatile Organic Compounds) and CO₂ removal efficiency to propose new diffuser of vessel. In case of our model, we found that the indoor CO₂ concentration and the age of air are likely to fall within the acceptable air quality.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

2005년 우리나라의 선박수주량은 1,357만CGT(표준화물선 환산톤)로 3위인 EU의 636만CGT와 2배 가까운 격차가 벌어졌고, 2위인 일본의 944만CGT와 상당한 격차를 두고 앞서가고 있으며, 끊임없는 기술개발과 원가경쟁력 확보를 통해 세계 조선 산업을 선도하고 있는 것으로 국제적으로 평가받고 있다. 그러나 최근 발표된 세계조선 통계자료에 의하면 중국은 국가차원의 지원과 저임금 노동력이 결합하여 조선산업이 급속히 발전하고 있으며, 2005년도 중국의 선박 수주량은 660CGT를 달성함으로써 EU를 제치고 세계 3대 조선국으로 부상하였다. 2007년 상반기에는 우리나라가 1,520만CGT를 수주하였고, 중국이 1,380만CGT를 수주하며 세계 1위인 우리나라의 자리를 넘보고 있다.⁽¹⁾ 이러한 세계동향 안에서 우리나라 조선산업이 향후에도 강자로 남기 위해서는 대형 여객선(이하 크루즈선)을 비롯한 초대형 컨테이너선, LNG선, FPSO(부유식 원유생산저장설비 선박, Floating Production Storage Offloading) 등 고부가가치 선박에 대한 기술 개발이 적극적으로 추진되어야 한다. 최근 들어 LNG선, FPSO와 같은 고부가가치 선종의 수주 물량이 늘어나기 시작했으나, 적당 5~10억 달러가 넘는 크루즈선의 경우에는 유럽 조선업체들로부터의 기술이전이 쉽지 않으며 관련된 핵심기술을 확보하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요한 상황이다.⁽²⁾

최근 우리나라에 “웰빙(Well-being)바람”이 불고 있다. 대중매체를 통해 또는 일상생활 속에서 웰빙이란 단어를 하루에도 수십 번씩 접할 수 있을 정도로 일반화 되어있다. 웰빙의 본래 의미는 행복, 안녕, 복지 등 ‘삶의 질’ 즉 여유롭고 조화로운 건강한 삶을 지향하는 것이다. 삶의 질을 위해 가장 주목 받는 분야로 주거공간을 꼽을 수 있다.

주거공간인 선실을 쾌적하게 만드는 요소들은 여러 가지가 있다. 그 요소들은 심리적 요인과 환경적 요소로 크게 분류될 수 있다. 우선 심리적으로는 현재 거주하고 있는 공간에 대한 취향이나 미적 또는 색채적으로 어느 정도 만족시킬 수 있나 하는 정도에 따라 쾌적을 느끼는 정도는 다르게 될 것이다. 또한 실내의 환경적 요소 즉, 열, 빛, 음 및 공기환경이 실내에 사는 사람들에게 어느 정도 만족감을 느끼게 조절되는가 하는 것에 의하여 쾌적한 공간이나 하는 것에 대한 판단기준이 된다. 이 중 열, 빛 및 음은 인체가 쉽게 이러한 요소들의 변화를 느낄 수 있다. 즉, 감각적으로 변화를 인지하고 그 변화에 대하여 쾌적인가 불쾌적인가를 느낄 수 있으며, 불쾌함을 느끼게 되는 것은 결국 ‘웰빙’과는 거리가 먼 실내환경이 되는 것이다. 따라서 오래전부터 실내의 환경 요소 중 열, 빛 음에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 학문적으로도 많은 발전이 이루어져 왔다.⁽³⁾

그러나 오염물질의 농도가 너무 낮은 관계로 공기환경의 변화를 인체가 쉽게 인지하지 못하고 그로 인하여 현재 까지 이에 대한 연구가 다른 환경 요소보다 많이 늦어진 것이 사실이다. 그러나 공기는 인간이 24시간 끊임없이 호흡이라는 과정을 통하여 인간과 연관되고 있으며, 따라서 다른 요소보다 인체의 건강에 직접적으로 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 즉, 공기질(Indoor Air Quality)은 웰빙과 관련된 매우 중요한 요소임이 틀림없다.

최근 국내에서는 초고층 주상복합건물의 등장과 함께 일반 공동주택에서도 주거 공간이 종래에 경험하지 못한 호화로운 공간으로 탈바꿈하고 있다. 하지만 호화로운 외관과 다르게 새집증후군과 같은 질병이 알려지면서 실내공기질 문제가 심각하게 사회적 이슈로 등장하게 되었다. 이러한 문제 인식을 통하여 실내공기질의 중요성을 인식하게 된 정부(환경부)는 2004년 5월 31일 기존의 ‘지하생활공간 공기질 관리법’을 개정하여 ‘다중이용시설등의 실내공기질 관리법’으로 개정하여 공기질에 대한 법적 체제를 이루었다. 따라서 이 법은 지하생활공간에서 다중이 생활하는 공간으로 범위를 확대시키고, 실내 공간에서의 공기질이 어느 정도이어야 하는가 하는 기준을 설정하고, 이를 이행하지 않았

을 경우 불이익이 수반되게끔 하였다. 따라서 현재 건물뿐만 아니라 자동차, 지하철, 선박 등 다양한 실내공간에 대해 공기질과 환기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

1.2 연구의 목적

크루즈선 뿐만 아니라 모든 선박에서는 승객에게 쾌적함을 제공할 의무가 있고, 승무원에게는 쾌적한 환경에서 근무할 권리가 있다. 이러한 쾌적한 실내환경을 제공하기 위한 방법 중에 하나가 깨끗한 공기를 공급하고 신속하게 오염물질(미세먼지, 휘발성유기화합물, 포름알데히드, 이산화탄소, 악취 등)을 제거할 수 있는 능력을 향상시키는 것이다.

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 실내·외 공기 중에 존재하는 수많은 종류의 유기화합물을 총칭하며, 다른 명칭으로는 탄화수소(Hydrocarbons), 반응성 유기가스(reactive organic gases), 비메탄계 휘발성유기화합물(non-methan VOCs) 등이 있다. VOCs는 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고 보건학적으로는 암을 유발하는 등 인간의 건강에 악영향을 줄 뿐만 아니라, 환경학적으로는 오존전구물질(ozone precursor)로서 광화학스모그 형성과 많은 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

건축 내장재의 사용이 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 건축 내장재는 공정상 시공이 가장 늦게 이루어져 실내 공기와 직접적으로 접촉하기 때문에 실내공기질에 영향을 주는 중요한 요소로 작용한다. 이러한 건축 내장재(장판, 벽지, 가구, 페인트, 단열재 등)에는 VOCs와 포름알데히드 등 수많은 종류의 유해화학물질들이 포함되어 있으며, 이 중에서 다량으로 발생하는 VOCs는 실내에서 생활하는 거주자들의 건강에 악영향이 있는 것으로 보고되고 있다. 그리고 이산화탄소는 그 자체는 인체의 건강에 영향을 미치지 않으나, 일반적으로 실내오염지표로 사용되며, 실내에서 농도가 증가하면 호흡할 때 필요한 산소의 양을 부족하게 만들어 호흡기, 대뇌 등의 기능에 영향을 끼친다.

크루즈선이나 모든 선박의 선원이나 승객은 거의 모든 시간을 거의 완전 단열·기밀화된 선실에서 생활하고 있으며, 선실은 VOCs 물질이 많이 방출되는 가구, 벽지, 장판, 페인트 등으로 이루어져 있다. 또한 VOCs를 많이 포함하고 있는 페인트를 이용하여 선박의 부식방지를 위한 작업이 수시로 이루어지고 있고, 바닥 청결유지를 위해 시너(Thinner, 신나)를 사용하여 구두 자국 등 이물질을 제거하고 있어, 선박의 선실 주위에는 항상 오염물질이 유입될 가능성이 매우 높다.

조등⁽⁴⁾의 연구에 의하면 경비 함정의 6척(25톤, 100톤, 250톤, 500톤, 1000톤, 1500톤 선박)에 대한 선실의 이산화탄소, 이산화황, 포름알데히드 등의 오염물질 농도를 측정하였고, 연구결과에 의하면 대부분의 대상실에서 이산화탄소(CO₂)가 ‘다중이용시설등의 실내공기질 관리법’에 정해진 실내공기 환경기준인 1000ppm을 넘고 있었다. 특히 100톤 선박의 침실은 기준치에 3배 가까운 농도가 측정되기도 하였으며, 주로 승무원들이 거주하는 공간에 신선한 외기의 도입량이 부족하다고 밝히고 있다. 그리고 이산화황(SO₂)은 몇몇 침실에서 눈, 코, 목에 자극을 가져다주는 농도까지 측정되기도 하였으며, 포름알데히드 농도는 모든 함정의 대부분 구역에서 포름알데히드의 실내공기환경 농도기준인 0.1ppm의 3~9배에 달하는 높은 농도가 측정되어 매우 열악한 실내 환경임을 확인할 수 있었다.

선박의 환기, 공기질 등에 관한 실내환경에 대한 연구를 사례를 찾기 어려웠다. 승무원과 승객의 건강과 쾌적함에 위한 연구보다는 이등⁽⁵⁾의 ‘선박의 기관실 통풍 해석’과 같은 연기거동에 관한 연구를 하였으며, 박등⁽⁶⁾은 화물창의 환기 덕트의 방향과 위치를 조절하여 화물창 환기효율을 높이고 설치비 및 자재비 절감을 위한 실험을 수행하였다. 선실의 공기질에 관한 연구로는 김등⁽⁷⁾이 CFD 해석을 통해 침실에 대한 CO₂ 농도를 해석하였으며 인체가 수면을 취하는 침대에서 CO₂의 농도가 2000ppm이상으로 실내공기질관리법의 기준치에 2배를 초과하는 것을 확인시켜주었고, 승무원이 수면을 취할 때 머리 위치 변화나 가구 또는 침대의 위치를 변화시킬 필요가 있다고 제안하는 연구를 수행한

바 있다.

건물의 실내 공간의 환기 및 공기질에 관한 연구는 최근 많이 수행하고 있다. 박등⁽⁸⁾은 신축공동주택의 실내마감재 시공에 따른 실내공기질을 실태 조사하였고, 마감재 시공공정에 따라 실내공기질 공정시험방법에 의한 실내오염물질 방출량의 현장 측정결과를 보면, TVOC의 경우 가구 및 붙박이장 그리고 Art-Wall 마감재의 설치에 따라 오염농도가 증가되고, 바닥 마감재 설치에 따른 접착제 시공작업에서 오염방출량이 크게 증가되는 것으로 나타나, TVOC 오염방출량은 가구재 및 마감용 목재 그리고 바닥접착제 등의 마감자재에서 검출되고 있음을 확인하였다. 최등⁽⁹⁾은 학교 건축물의 실내공기질 측정에서 신설 학교 교실내의 유해물질 성분 중에 포름알데히드는 큰 문제가 되지 않으나, TVOC의 농도는 대부분 실내공기질관리법을 초과하고 있으므로 설계시부터 통풍이 용이하게 내부평면을 고려하고, 유해화학물질이 함유된 자재 사용을 최소화한다고 밝히고 있다. 이등⁽¹⁰⁾은 CFD를 이용하여 군 내무실의 재실인원의 호흡으로 인한 CO₂ 농도를 해석하고, 내무실 환기 효율 증대 및 실내 이산화탄소 오염 농도 감소를 위해 추가적인 창문 위치와 개수를 제안하는 연구를 하였다. 노등⁽¹¹⁾은 국소환기시스템의 급·배기구 위치와 유량을 변경하였을 때, 국소평균공기연령을 계산하여 오염도의 평가 및 예측하는 연구를 수행하였다. 장등⁽¹²⁾은 시스템에어컨의 토출각도, 풍량 그리고 환기유닛 적용에 따른 CO₂ 농도와 국소평균공기연령을 계산하여 환기유닛과 시스템에어컨의 토출각도, 풍량에 대한 영향을 연구하였다. 유등⁽¹³⁾은 가구배치 형태에 따른 실내기류 분포 및 환기효율을 CFD로 해석하여, 같은 풍향이라 하더라도 가구의 배치형태가 실내기류에 영향을 미치고, 그 결과 환기효율에도 영향을 미치는 것을 확인하였고, 환기효율을 개선하기 위한 연구를 하였다.

건물의 실내에서 수행된 선행연구를 요약하면, 신축건물의 경우에는 TVOC가 실내공기질관리법에 기준치를 크게 초과하고 있으며, 좁은 실내에서는 재실자의 호흡으로 인한 CO₂ 오염이 일어난다는 것이다. 이러한 건물 실내에서 생기는 공기환경의 문제점을 해결하기 위해 급기 풍량을 증가하는 것은 에너지

소비를 증가시키는 결과를 낳기 때문에 노등⁽¹¹⁾, 장등⁽¹²⁾, 유등⁽¹³⁾과 같은 연구에서는 CFD를 이용한 공기유동해석을 통해 가구의 위치, 급기구의 위치 및 토출각도 등에 따른 공기환경의 영향을 설명하고, 가구의 배치형태, 토출각도 등을 제안하고 있다.

선박의 선실의 경우도 마찬가지로 건물과 마찬가지로 가구, 장판, 접착제 등을 사용하고 있으며, 건물보다 좁은 공간을 이용하고 있다. 따라서 선조의 경우 TVOC의 오염물질을 충분히 제거해 줘야하고, 페인트, 시너 등의 사용 시에는 실내로 유입된 오염물질을 빠르게 제거해야 된다. 그리고 선실은 건물보다 좁기 때문에 조등⁽⁴⁾의 연구결과에서처럼 CO₂ 농도가 대부분 침실에서 실내공기 질관리법의 기준치를 초과했다는 점에서 공기환경을 개선하는 연구가 조속히 진행되어야 할 것이다.

따라서, 본 연구의 대상인 한국해양대학교 한바다호(이하 한바다호)의 선실은 좁은 실내 공간(약 24m³)에 4명이 생활하고 있으며, 실내공간의 구조는 공기유동을 방해하는 2층 침대와 옷장, 책상 등으로 이루어져 있다. 천정의 높이는 약 2m로 일반 건물보다 낮고, 급기구(Diffuser) 형상은 아래 층 침대에는 신선한 공기가 접근하기 어려운 형상을 가지고 있다. 이러한 급기구의 형상에 대한 문제점을 제기하기에 앞서, 평일에는 부산과 오사카를 왕복하고 주말에는 부산 연안관광을 하고 있는 여객선을 대상 선실 환경에 대해 선행 연구를 수행하였다. 선행 연구의 실측한 결과에서 2층 침대 상(上)·하(下)층간의 국부적인 온도차가 약 2~4℃로 나타났고, 그리고 급기 풍량에 따라 수평·수직간의 온도불균형을 확인하였다.⁽²⁾ 이러한 온도불균형은 2층 침대가 구조적으로 공기유동을 방해하고 있으며, 급기구의 형상 또한 상(上)층으로 공기흐름이 집중되어 상(上)·하(下)층간 공기유동에 대한 불균형을 확인하였고, 이에 본 연구를 시작하는 첫 계기가 되었으며, 선박 급기구에 대한 문제점을 인식할 수 있었다

한바다호의 급기구를 적용하여 국소지역(2층 침대 상(上)·하(下)층)에 대한 오염물질(본 실험에서 톨루엔)이 제거되는 농도를 실험하고, 건물용으로 사용하고 있는 급기구를 적용하여 오염물질이 제거되는 농도를 측정하여, 현재 한바

다호에서 사용하고 있는 선박용 급기구와 건물용 급기구를 오염물질 제거에 대해 상호 비교하였다. 실험으로는 오염물질을 고르게 분포시키기 어렵고, 온도의 영향을 받는 VOCs 물질의 특성상 동일한 조건을 만들기 어렵다. 또한 선실 전체 혹은 국소지역에 대한 농도를 정확히 확인하기 어렵기 때문에 실험으로는 많은 문제점에 노출되어 있어, 실험결과만으로는 신뢰도를 확보하기 어려웠다. 따라서 실험과 더불어 여러 가지 파라메타를 자유자재로 정확히 설정할 수 있고, 실험오차 등에 의한 예측결과의 불확실성이 적고, 예측결과에 대한 완전한 재연성이 있고, 그리고 실험에서 얻기 어려운 시간적, 공간적인 상세한 데이터도 얻을 수 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics)기법을 이용하여 공기 환경에 대해 해석하였다.

본 연구의 최종목적은 국소평균공기연령(신선한 공기가 임의의 점으로 이동하는데 걸리는 시간)이 낮은 급기구, 오염물질이 빠르게 제거되는 급기구의 형상을 제안하는데 있다. 최종목적에 접근하기 위해 1차적으로 시중에서 유통되고 있는 건물용 급기구를 적용하여 사용가능성에 대해 검토하고, 2차적으로 선실의 특성에 맞는 선박용 급기구를 제안하는데 있다.

1.3 논문의 내용 및 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있고 1장에서는 연구의 배경 및 목적, 논문의 내용과 구성에 대하여 소개한다.

2장은 공기환경의 유해물질에 대한 소개와 인체에 미치는 영향에 대해 소개한다. 그리고 다중이용시설 등 실내공기질관리법으로 규정하고 있는 실내 공기환경 유지기준과 권고기준을 설명한다.

3장은 한바다호에 대한 간략한 소개와 선실의 크기 및 가구 배치도 등을 소개한다. 실험 방법에 대해 간략히 설명하고, 한바다호 기존 선박용 급기구와 건

물용 급기구 각각에 대한 오염물질 제거 실험에 대한 결과를 설명한다.

4장은 CFD 상용코드인 FLUENT를 이용하여 농도와 공기유동에 대한 해석을 위해 우선 지배방정식과 수치해석 방법에 대해 기술한다. 그리고 격자(Mesh) 생성과 FLUENT에서 지정해준 경계조건에 대해 설명한다. 급기구 형상에 따라 공기유동을 해석하고, 톨루엔과 이산화탄소 농도에 대한 해석으로 선실 전체에 대한 오염물질 제거 성능뿐만 아니라 2층 침대 주위의 국소지역에 대한 농도를 해석하여 국소지역에 대한 오염물질 제거 성능을 확인한다.

마지막으로 5장에서는 본 연구에서 얻은 결과를 요약한다.

제 2 장 실내오염개론

2.1 실내 공기질의 중요성

실내 공기질(Indoor Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업 분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위한 노력으로 건물의 단열을 위한 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 공기의 질이 악화되는 것이다. 또한 그 건물에서 생활하는 사람이 그 건물의 특성을 충분히 이해하지 못하여 적합한 절약을 하지 못하거나, 건축 자재, 공조 시스템 등의 건물 내 특성이 복잡하고 민감한 실내환경 조건을 변형시킴으로 인하여 실내 공기질에 부작용이 발생된 것이다.

실제로 에너지 절약형 건물은 외부로부터 침기(Infiltration)를 막는 것에 초점을 맞추어 건축되었고, 에너지 절약형의 산업용 건물에서는 건물의 유지관리비를 줄이기 위해 의도적으로 환기량을 감소시키기도 하여 공기의 유입과 환기가 감소되어 자연히 실내공기가 오염되고 있다.

실내 공기질의 성분 중 1ppb와 1ppm 사이의 농도를 가진 물질이 250여 가지 이상라고 한다. 이 물질들은 외부의 공기가 실내로 유입될 때 들어오거나 또는 건축자재, 건물의 관리 또는 실내에서의 인간 활동 등에 의하여 발생된 것이다.

특히, 선박의 선실의 경우 가구, 장판, 벽지, 페인트 등의 가구와 마감재로 구성되어 있고, 일반 건물이나 주택에 비해 좁은 실내생활 공간을 가지고 있다. 또한 침기량이 거의 존재하지 않는 완전 밀폐형이며, 거의 24시간을 선실에서 작업, 생활하고 있다는 점에서 선박 선실에 대한 공기질의 중요성을 인식할 필요가 있다.

2.2 실내 오염원⁽¹⁴⁾

2.2.1 연소 오염원

연료를 연소시키면 연료에 따라 일산화탄소, 이산화질소, 이산화탄소, 일산화탄소 같은 무기가스와 입자, 탄화수소, 유기입자 등이 배출되거나 중금속, 이산화황 등을 배출할 수 있다. 대부분의 연소입자는 크기가 커서 쉽게 침강하지만 천여가스를 연소하는 경우에는 $1\mu\text{m}$ 이하의 입자가 발생되기도 하며, 담배는 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 의 입자를 발생시킨다.

환기를 시키지 않고 가스를 연소하면 실내에 일산화탄소와 이산화질소를 배출한다. 가스레인지를 사용하는 가정의 실내 이산화질소 농도는 전기레인지를 사용하는 가정보다 높다. 가스레인지가 가진 가정은 실내 이산화질소의 농도가 실외농도보다 높은 반면, 전기레인지를 이용하는 가정은 실내농도가 실외 농도보다 낮다. 일산화탄소의 배출률은 이산화질소의 약 10배 정도이다. 일반적으로 가스레인지의 사용으로 10ppm이 넘는 경우는 거의 없지만 사용정도에 따라 이보다 높아질 수도 있다.

일산화탄소(CO)는 연탄가스 중독의 대표적인 물질로서 우리나라가 연탄을 연료로 사용하던 시기에는 사회적으로 많은 문제를 야기하였던 가스상 물질이라고 할 수 있다. 일산화탄소(CO)의 특징은 무색, 무취색이며, 자극성이 없는 기체로서 공기중의 비중은 0.976으로 공기보다 가벼운 기체로서 물체가 불완전연소할 때 많이 발생되는데, $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ 의 형태로도 발생된다. CO가스는 물체의 연소 초기에 많이 발생하고, 작렬할 때는 연소 초기의 1/4로 감소한다. 일산화탄소가 실내 공기의 0.005~0.1%만 존재해도 중독이 일어날 수 있는데, 목탄에서 발생하는 CO는 4~13%, 석탄가스 중에는 7~10%, 담배연기에는 0.5~1.5%의 CO가스가 함유되어 있다. CO는 혈중의 헤모글로빈(Hemoglobin, Hb)과 친화성이 산소에 비해서 210~300배나 강해서 HbO₂의 형성을 방해하여, 혈중의 O₂의 농도를 저하시키므로 결과적으로 조직세포에 공급할 O₂의 부족을 초래하게 되므로 무산소증(Anoxia)을 일으키므로, 이를 일산화탄소의 이

중작용이라고 하는데, 혈중의 COHb 포화도는 10% 미만이어야 하며 50%에서는 구토증이 있고, 60%에서는 혼수상태, 70% 이상에서는 사망하게 된다. 특히 신경조직은 산소의 부족에 대하여 저항력이 저하하여 신경 이상증상이 나타나고, 회복 후에도 후유증이 많으며, 저농도의 CO가스에 장기간 또는 반복해서 노출된 경우는 지각이상, 시력장애, 보행실조 등 만성 CO중독이 발생된다.

그리고 등유를 사용하는 난방기는 일산화탄소, 이산화질소, 부유입자 등을 발생시키며, 연료에 황이 불순물로 함유되어 있는 경우엔 이산화황이 배출 될 수 있으며, 이러한 입자는 돌연변이를 일으킬 가능성이 있는 것으로 알려졌다. 담배는 가장 흔한 실내오염원으로 담배연기는 다양한 가스, 증기, 입자를 생성하는데 지금까지 4,500가지 이상의 물질이 확인되었고, 그중 약 50가지는 발암 물질로 알려져 있거나 의심되는 물질이다.

2.2.2 이산화탄소

이산화탄소가 공기를 오염시키는 원인으로는 인체의 호흡에 의한 이산화탄소 증가와, 실내 보조난방기구 및 취사 연료의 불안전연소로 오염되어 진다. 이산화탄소 그 자체는 인체의 건강에 영향을 미치지 않으나, 일반적으로 실내오염 지표로 사용되며, 실내에서 농도가 증가하면 호흡할 때 필요한 산소의 양이 부족하게 된다. 실내에서의 허용기준은 1000ppm(0.1%)으로써 이산화탄소가 증가하면 호흡운동이 늘어나 폐포내 환기를 증대시키며 폐포내 이산화탄소량을 일정하게 유지한다. 호흡 중에 이산화탄소가 3%만 되면 호흡이 커지고, 4%만 되면 폐포내의 이산화탄소가 증가하기 시작하면서 호흡곤란, 두통 등의 증상을 일으킨다. 8~10%에서는 경련 등을 일으켜 호흡이 정지되고, 20%에서는 중추장애를 일으켜 생명이 위험하게 된다.

2.2.3 먼지

실내에는 환경조건에 따른 각종 먼지를 함유하는 양과 종류가 다른데 건조한 실내에서는 습한 곳보다 먼지의 발생이 많고, 겨울철 실내 공기는 난방으로 건

조해지기 쉬우며, 더욱이 사람이 많이 밀집하게 되면 먼지의 발생은 더욱 많아지게 된다. 먼지의 성분은 동물성, 식물성 및 광물성 등 다양하며 이들이 인체에 미치는 피해작용도 달라질 수 있다. 공기중에 부유하는 미립자를 에어로졸(Aerosol)이라고도 하는데 Gibbs는 미립자의 크기가 $10\mu\text{m}$ 이상인 것은 먼지, $10\sim 0.1\mu\text{m}$ 은 증기, $0.1\sim 0.001\mu\text{m}$ 은 연기라고 분류하였다. 먼지는 호흡기계를 통해서 침입될 경우 제일 유해한데 체내에 흡수되는 것은 입자의 크기에 따라 달라서 $5\sim 10\mu\text{m}$ 은 대개 비강이나 상기도에서 배출되어 크게 문제 되지 않으며, 폐포에 도달할 수 있는 것은 $0.25\sim 5\mu\text{m}$ 의 크기이며, 특히 폐포 내에 침착률이 높은 것은 $1\mu\text{m}$ 전후의 것이다.

먼지로 인해 나타날 수 있는 장애는 다음과 같다

- 1) 화분, 유기성 먼지 등에 의한 allergy성 반응
- 2) 유독 화학물질이나 세균 등에 의한 결막염
- 3) 기관지염 등 점막성 질환, 낁, 수은
- 4) 인플루엔자, 결핵 등 전염성 질환
- 5) 진폐증, 폐암 등

2.2.4 포름알데히드

포름알데히드는 다양한 물질과 상품에서 발생하기 때문에 실내에서 가장 흔한 유기물질이다. 포름알데히드는 자극성의 냄새가 있는 무색의 기체로 인화점이 낮아 폭발할 위험성이 있으며 물에 잘 녹는다. 특히 40% 수용액을 포르말린이라고 한다. 포름알데히드는 의약품, 화장품, 화장실용품, 음식의 보존제로 이용된다. 포름알데히드는 여러 가지 건축자재 및 가구, 그리고 여러 형태의 단열재에 흔히 들어 있다. 주택에 단열재로 우레아수지품을 사용한 경우의 포름알데히드 노출이 특히 문제가 되고 있으며 이 분야에 대한 연구도 많이 수행되었다. 그밖에 옷감이나 종이의 염료로 사용되기 때문에 포목점이 밀집한 상가의 포름알데히드 실내 농도가 높게 측정된다. 포름알데히드는 연소에 의해 발생되기도 한다. 특히 디젤엔진에서 많이 나오며, 가솔린, 가스 스토브, 담배 등

의 연소에 의해서도 발생한다. 담배에서 나오는 연기에서 직접 측정된 포름알데히드 농도는 40ppb 정도에 달하지만 실내에서 측정된 농도는 이보다 훨씬 낮고, 담배를 피운 방에서 측정된 포름알데히드 농도는 대부분 1ppb 이하이다.

포름알데히드의 영향을 살펴보면 낮은 농도에서는 눈을 자극할 수 있고, 높은 농도에서는 폐에 자극을 주며 폐기종을 일으킬 수도 있다. 여러 가지 신경계통에 영향을 미쳐서 단기적인 기억상실, 불안 등을 일으키기도 한다. 한편 포름알데히드는 흡입, 흡수, 피부의 경로로 침투하는데 이 중에서 흡입에 의한 독성이 가장 강하다.

2.2.5 석면

석면은 화학구조가 수정 같은 구조를 가지는 섬유성 무기물질을 말한다. 상업적으로 백석면(chrysotile)이 가장 많이 이용되는데 이는 물결모양의 사문석 계열이다. 이 외에 직선형태인 각섬석 계열(amphibole)이 있는데 이 중 청석면(crocidolite)과 갈석면(amosite)이 가장 많이 채굴되었다. 독성을 보면 청석면, 갈석면, 백석면의 순서로 각섬석 계열이 강한 독성을 보인다.

미국에서도 1980년대까지는 건축자재 용도로 특히 천장, 바닥, 파이프의 보온, 발포물질, 콘크리트, 음향 절연물이나 단열재 목적으로 석면을 많이 사용하였다. 석면에 높은 농도로 노출된 근로자를 대상으로 역학조사가 되어 석면의 독성이 알려졌고, 석면에 노출되면 폐암, 흉막중피종 또는 복막중피종이 발생하며, 소화기 계통에도 암을 일으키는 것으로 알려졌다.

2.2.6 라돈

라돈-222는 우라늄-238이 자연 붕괴되면서 생성되는 기체로 기체 자체는 무독하다. 라돈의 반감기는 3.8일이고 자원소들은 반감기가 30분 이내로 polonium-218, lead-214, bismuth-214, polonium-214 등이 형성된다. Polonium-218, polonium-214는 α-입자를 배출하는데 이 α-입자에 의해 폐암이 생기는 것으로 여겨지고 있다.

실내에서 라돈의 주 오염원은 토양에서 자연적으로 배출되는 기체이다. 이 기체는 틈 사이를 통해 집 안으로 스며든다. 라돈가스가 주택 안으로 들어오는 힘은 압력의 차이에 의한 것인데 이 압력차는 기압, 바람, 구름, 주택구조 내의 부력에 의해 결정된다. 대개 건축자재와 물은 실내 라돈 농도에 큰 영향을 미치지 않는 반면, 라돈이 많이 포함된 지하수를 이용할 경우 공기 중의 라돈 농도를 증가시킬 수 있다. 실내 라돈 농도는 토양의 특성, 건물구조, 기후, 환기율 등에 의해 다양하다. 라돈이 집 안으로 들어오는 방식은 다양한데 미국의 단독주택에서 라돈의 유입율은 평균 약 0.5Ci/l/h이다. 라돈이 많이 배출되는 토양 위에 세워진 주택 안에서 라돈 농도는 높는데, 환기장치를 이용할 경우 그 농도가 감소된다. 집 안의 온도차에 의해서도 농도가 변할 수 있는데, 예를 들어 지하실의 온도가 높으면 아래의 공기가 건물 위쪽으로 이동하면서 상층의 라돈 농도가 증가하는 경우도 있다.

2.2.7 미생물 오염물질

실내의 미생물 오염물질은 공기정화기, 에어컨, 생활용품 등 매우 다양한 원천으로부터 발생하며, 각종 호흡기질환 및 알레르기성 질환을 일으킨다. 종류도 매우 다양해서 바이러스, 박테리아, 곰팡이포자, 조류 등 전통적인 미생물 뿐만 아니라, 동물의 털, 곤충 부스러기, 꽃가루 등 기타 생물학적인 오염물질도 포함한다. 생물의 대사물질 중 휘발성을 갖는 것들도 넓은 의미에서 이 범주에 포함된다.

미생물은 공기를 통해 전파되고 인체에 증식하여 병을 유발할 수 있다. 흔히 알려져 있는 질병으로는 레지오넬라병(Legionaire disease, 냉방병)이 있다. 이는 건물의 냉각탑에 있는 냉각수가 오염되었을 때 냉방기를 통해 유입되어 공기를 통해 전파되는 질병이다. 가정 내 공기에서 흔히 발견할 수 있는 먼지와 꽃가루 등은 알레르기성 비염과 천식을 일으키는 중요한 미생물 오염물질이다. 그 외에도 알레르기를 일으킬 수 있는 생물학적 오염물질로는 박테리아, 꽃가루, 곰팡이포자, 곤충 부스러기 등이 있다. 미생물은 온·습도가 적당한 실내에

서 번식할 수 있는데, 특히 지하실이나 화장실에서 쉽게 번식한다. 공냉장치, 가습기, 분무기, 화장실, 냉장고, 카펫 등은 실내에서 미생물이 번식하기 쉬운 곳들이다.

특히, 건물의 콘덴서(condenser)와 환기장치는 미생물이 번식하기 알맞은 조건을 제공하므로 이에 따른 오염이 심각한 것으로 추정되고 있다. 살아있는 병원균에 의한 감염 외에도 내독소(endotoxin), 대사물질 등의 물질에 의한 호흡기 질환 발생이 많은 것으로 추정되고 있다. 생물학적 오염물질은 기타 오염물질과는 달리 측정이 쉽지 않기 때문에 이들의 오염정도를 밝히는데 어려움이 있다.

2.2.8 휘발성 유기화합물질(VOCs)과 TVOC

휘발성 유기화합물은 물질이 존재하는 상(phase)의 형태에 따라 휘발성(volatile), 반휘발성(semi-volatile), 비휘발성(non-volatile)으로 구분하고, 증기압이 10^{-2} kPa 이상을 휘발성(VOCs), $10^{-2}\sim 10^{-8}$ kPa을 반휘발성(SVOCs), 10^{-8} kPa 이하를 비휘발성(NVOCs)으로 분류한다.

건물의 생활공간인 실내에서는 매우 많은 종류의 화학물질의 종류가 검출되고 있다. 미국의 EPA에서는 학교건물의 실내에서 150여종의 VOCs가 측정되었고, 사무소 건물의 경우에는 600여 종류의 VOCs가 측정된 것으로 보고하고 있다. 다양한 종류의 VOCs 물질에 대하여 종류별, 정량/정성적으로 위해성이나 기준농도 등을 제시하고 각각의 특성을 개별적으로 파악하기는 매우 어려운 실정이며, 각각의 측정, 분석, 평가도 쉽지 않는 상황이다. 더욱이 VOCs 물질들은 상호작용에 의하여 제 3의 위해성을 나타낼 수 있는 특성을 지니게 되어 각각의 물질에 의한 특성이 파악된다 하여도 이에 따른 MCS(multiple chemical sensitivity) 영향 등을 파악하기 곤란한 점이 있다. 따라서 선진국에서는 VOCs에 대한 특성을 분석·평가할 경우에 위해성이 큰 물질별 제한을 하는 경우도 있지만 측정평가에 많은 노력과 비용이 소요되고 또한 그 결과에는 VOCs 물질별 상호 작용 등의 특성을 평가하기 곤란한 점을 착안하여 복합

화합물질로서 여러 가지 종류의 VOCs 농도의 총합을 TVOC(total volatile organic compounds)로 정의하여 기준의 설정에 활용하고 있다.

TVOC의 농도를 측정하는 방법에는 여러 가지 방법이 있으나 일반적으로 측정된 가스크로마토그램에 의하여 n-헥산에서 n-헥산데칸까지의 범위에서 검출되는 VOCs를 대상으로 이들 농도를 합산한 값으로 산출한다. 이는 주로 28가지 종류의 각각의 물질에 대한 농도에 의하여 산출하고, 동정 불가능한 화합물은 이들 농도를 톨루엔으로 환산하여 TVOC 농도를 산출한다. 따라서 TVOC는 포집된 공기 중의 VOCs 농도의 합계에 가장 가까운 값으로 표시 된다.

2.2.9 실내 공기 오염물질의 오염원 및 건강영향 요약

실내 공기에는 2.2.1~2.2.8에서 전술한 것과 같이 입자, 가스(CO, CO₂, NO_x, SO₂, HCHO, VOCs, O₃ 등), 담배연기, 라돈, 석면, 미생물 등 다양한 오염물질이 존재하며, 이러한 오염 물질에 높은 농도로 장시간 노출되면 사람의 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 즉, 호흡기 질환, 폐질환, 기관지 질환, 폐암을 비롯한 각종 암을 유발시킬 수 있다. 표 <2.2.9.1>은 미국 환경보호청(EPA, 1989)에서 대표적인 오염물질이 인체에 미치는 영향을 정리하여 나타낸 것이다.

표 2.2.9.1 오염물질이 인체에 미치는 영향

실내공기 오염물질	발생 장소	증 상	
환경담배연기(ETS)	흡연	암, 점막자극, 급·만성 폐질환	
생물학적으로염물질	실외, 인간, 동물 (습한 건물일수록 더 많음)	감염성 질병, 알레르기	
방향성탄화수소족 (PAHs)	ETS, 등유난로, 나모스토브	암, 심혈, 면역기능저하	
일산화탄소(CO)	연소기구, ETS, 침윤된 배 기가스	후두염, 두통, 민첩성감소, 독감, 심폐기능 장애, 기절	
이산화질소(NO2)	연소기구, ETS	폐기능 감소, 면역력감소	
이산화황가스(SO2)	황을 포함한 연료	폐기능 감소	
입자상 물질	연소기구, ETS	암, 눈과 호흡기 자극, 폐기능 감소	
살충제	실내, 실외의 살충제	신경독성, 간독성, 생식계 영향	
석면	석면시멘트, 단열재	석면폐증, 암	
라돈	토양, 생물, 건축자재	암	
먼지, 에어로졸	개인활동	알려져 있지 않음	
포름알데히드	목재 방부제, 화장품, 가구 합판, 단열재, 접착제	어지럼증, 신경계손상, 피로감, 발암	
VOCs	벤젠	연기, 세척 및 청소용품, 페인트, 접착제, 파티클보드	골수손상, 혈소판 감소증, 백혈 구감소증, 빈혈증
	톨루엔	페인트, 접착제, 난방기구, 카펫트, 단열재, 왁스	간, 혈액, 신경 등에 독성, 피로 감, 정신착란
	자일렌	페인트, 접착제, 난방기구, 카펫트, 염료착색제	신경독성이 아주 강함
	에틸벤젠	가구광택제, 페인트, 바닥왁스, 전기용품	신경독성이 아주 강함
	펜타클로로 벤젠	목재 방부제, 곰팡이제거제, 좁약	정서불안, 신경착란, 피로감
	디클로로벤젠	방향제, 곰팡이제거제, 좁약	어지럼증, 신경계손상, 피로감

2.3 실내 공기질 관련 기준⁽¹⁵⁾

거주자의 실내공간에서의 재실시간은 하루 80% 이상으로 거주자의 건강에 직접적으로 영향을 주는 실내 환경에 대한 중요성이 점점 커지고 있다. 특히 일반 성인의 하루 호흡량은 12m³로 환기가 제대로 이루어지지 않고 있는 기밀성이 우수한 건축물의 실내 공기질은 무엇보다 중요한 문제라고 할 수 있다. 따라서 최근 신축 주택에 입주한 거주자들이 일시적 또는 만성적인 두통, 눈, 코, 등의 이상과 구토, 어지러움, 가려움증 등 건강의 이상을 일으키는 증세를 일컫는 새집증후군(Sick House Syndrome)은 가장 큰 실내공기환경 문제로 대두됨에 따라 환경부에서는 2004년 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”을 개정하여 100세대 이상의 신축 공동주택에서 입주 전에 새집증후군의 원인물질로 알려진 포르알데히드와 휘발성유기화합물을 의무적으로 측정하여 고시하도록 하였고, 오염물질에 대해 기준을 제시하고 있다.

표 2.3.1 실내공기질 유지기준

다중이용시설 \ 오염물질 항목	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO ₂ (ppm)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총부유세균 (CFU/ m^3)	CO (ppm)
지하역사, 지하도상가 여객자동차터미널의 대합실, 철도역사의 대합실, 공항시설중 여객터미널, 항만시설중 대합실, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포	150이하	1,000 이하	120이하	-	10이하
의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원	100이하			800이하	
실내주차장	200이하			-	25이하

표 2.3.2 실내공기질 권고기준

다중이용시설	오염물질 항목	NO ₂ (ppm)	Rn (pCi/l)	VOC (μ g/m ³)	석면 (개/cc)	오존 (ppm)
지하역사, 지하도상가 여객자동차터미널의 대합실, 철도역사의 대합실, 공항시설중 여객터미널, 항만시설중 대합실, 도서관, 박물관, 미술관, 장례식장, 찜질방, 대규모점포		0.05이하	4.0이하	500이하	0.01이하	0.06이하
				400이하		
의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원				1,000 이하		0.08이하
실내주차장		0.30이하				

표 <2.3.1>와 표 <2.3.2>는 유지기준과 권고기준이다. 실내공기질 오염물질 중 미세먼지(PM10), 이산화탄소(CO₂), 포름알데히드(HCHO), 총부유세균, 일산화탄소(CO) 등 5개 물질에 대해서는 유지기준을 설정하고 위반시 과태료부과 등 제재 조치하고 있으며, 이산화질소(NO₂), 라돈(Rn), 총휘발성유기화합물(TVOC), 석면, 오존(O₃) 등 5개 오염물질에 대해서는 권고기준을 설정하여 자율적으로 준수하도록 유도하고 있다.

제 3 장 선실에서 건물용 급기구를 이용한 오염물질 제거 실험

3.1 연구대상의 개요

2005년 12월에 조선사로 인도되어, 2006년 2월 공식적으로 취항한 한국해양대학교의 실습선인 한바다호(그림 3.1.1)의 선실을 실험대상으로 하였다. 한바다호는 표 <3.1.1>와 같이 길이 117.2m, 폭 17.8m, 그리고 총톤수는 6,686톤으로 총 246명이 승선할 수 있는 실습선이다. 한바다호의 거주공간은 그림 3.1.2와 같이 조타실이 있는 NAV. BRI. deck, 간부 승무원의 숙소와 비상탈출용 보트 승선장이 있는 Boat deck, 사관식당, 세미나룸, 공조 및 환기 기계실이 있는 Shelter deck, 메인 세미나실, 승무원 숙소 및 식당 등이 있는 Upper deck, 실습생 숙소와 식당 겸용 세미나실이 있는 Main deck, 실습생 숙소와 기관실 등으로 구성되어 있는 2nd deck의 6개 층으로 구성되어 있다.

본 연구에서의 실험대상 선실은 2nd deck에 있는 실습생 숙소로 그림 3.1.3와 같다. 2층 침대와 옷장, 책상이 각각 두 개씩 배치되어 있고, 선실의 총 크기는 가로 4.9m, 세로 3.1m, 높이 2m이고, 가구 부피를 뺀 실제 선실 부피는 약 24m^3 이다. 그림 3.1.4는 한바다호의 급기구의 모습을 나타낸 그림으로 베인(vain)의 직경은 약 240mm이고, 천정과 급기구 베인의 간격은 약 18mm이다.



그림 3.1.1 한국해양대학교 실습선 한바다호

표 3.1.1 한바다호의 개요

용도	실습선	재질	강선
길이	117.2m	폭	17.8m
총톤수	6,686t	선급	KR
정원	총 246명 (승무원 42명, 실습생 204명)		
속력	Max.19, Av. 17.5		

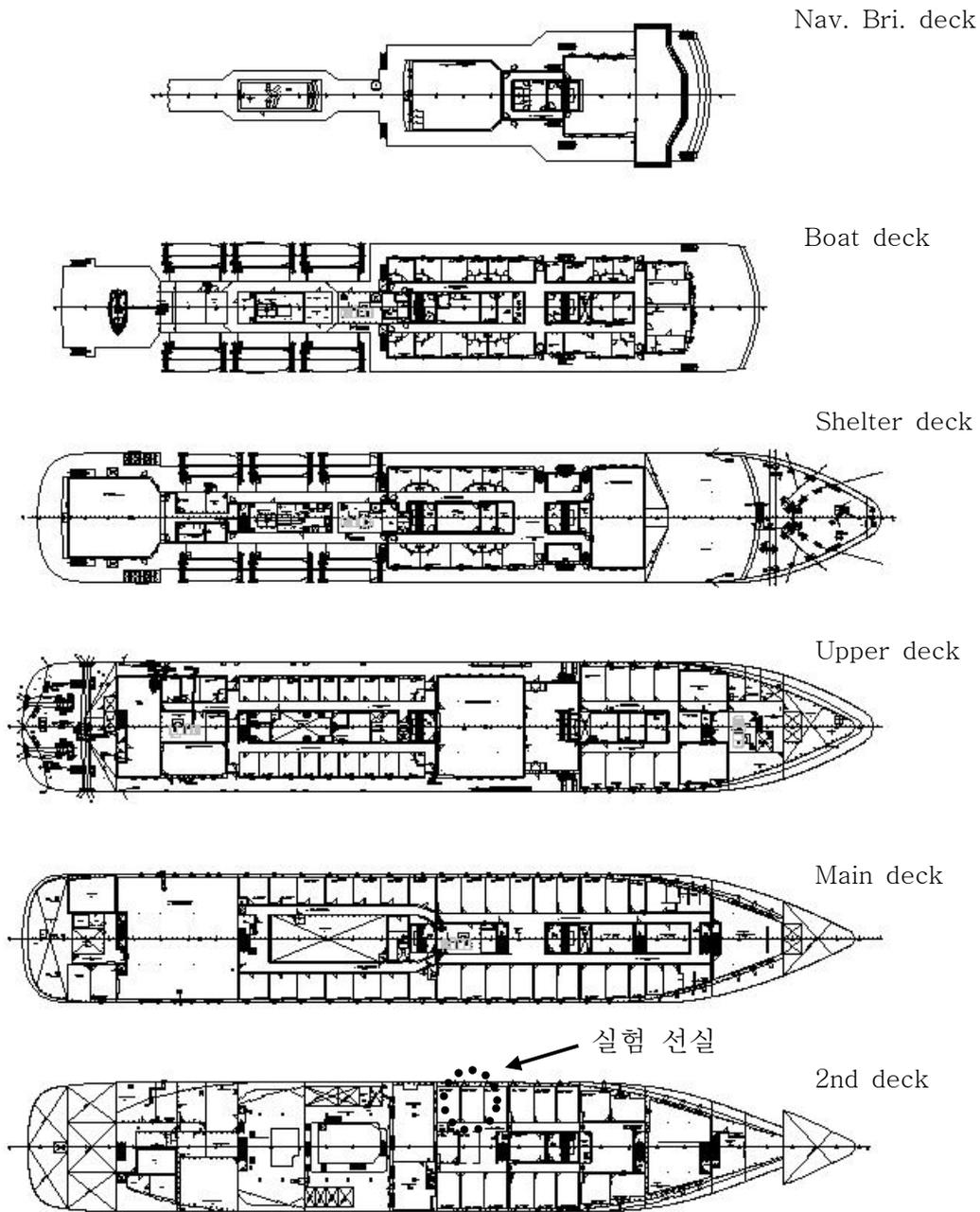


그림 3.1.2 한바다호의 deck의 소개와 실험 대상선실 위치



그림 3.1.3 실험 대상선실

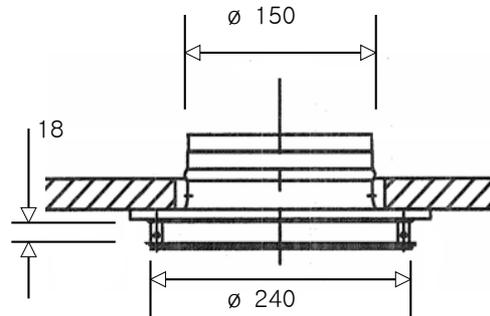


그림 3.1.4 한바다호의 급기구(CASE #1)

3.2 실험방법

국립환경연구원 보고서에서 다중이용시설의 실내공기질 시험방법을 제시하고 있다. 그 내용을 요약 정리하면 아래와 같다. 시료 채취는 해당시설의 실제 운영조건과 동일하게 유지하고 있는 일반환경 상태에서 측정하는 것을 원칙으로 한다. 그리고 기류조건은 0.3m/s 이내가 되도록 하고 채취지점이 이러한 공기유동경로 및 기류 발생원 주변에 위치하지 않도록 최대한 주의한다. 시료 채취 시간대는 08:00~19:00에 실시하는 것을 원칙으로 한다. 시료 채집은 적산유량의 확인 가능한 흡입펌프를 이용하여 유속이 50~200ml/min으로 30분간 오전 및 오후 각 1회 포집하고, 이를 고체흡착열탈착(GC/MS(Gas Chromatography/ Mass Spectrometer)) 분석법을 이용하여 휘발성유기화합물의 농도를 구한다.⁽¹⁶⁾

GC/MS 분석법은 현장의 시간별 농도변화에 대한 모니터링이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 고도의 정밀도가 요구되는 실험실 분석용인 하이(high) 개념의 GC/MS 분석법을 이용하지 않고, 현장 측정에서 일정수준의 정확도가 확보되면서도 현장에서 측정 및 데이터 기록이 용이한 로우(row)개념의 휴대용 현장측정 기기(ppbRAE plus)를 사용하였다.

실험 대상인 한바다호 선실의 경우 환경이 매우 자주 바뀌고 있었다. 잦은 연안항해 실습과 정박실습 그리고 원양항해 실습 등으로 출항 준비에 의한 페인트 작업과 청소 등으로 실내환경은 수시로 변화기 때문에 실험하는데 어려움이 있었다. 뿐만 아니라 각 실험 CASE 마다 동일한 환경 조건을 만들어 주어야하기 때문에 실험 환경을 인위로 조성하여 실험하였다.

급기구는 한바다호 선실에서 사용하고 있는 선박용 급기구(CASE #1), 그리고 건물용으로 흔히 사용하고 있는 그림 3.2.1(CASE #2)과 3.2.2(CASE #3)를 이용하여 급기구간 비교하는 실험을 수행하였다.

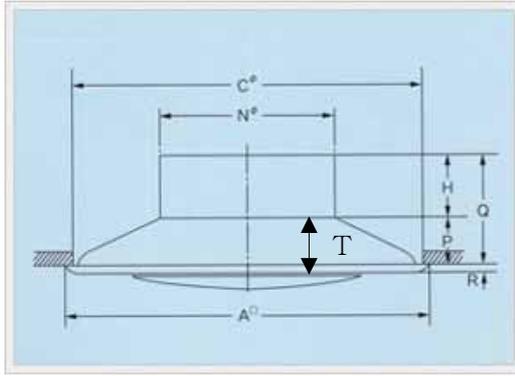


그림 3.2.1 건물용 급기구(CASE #2)

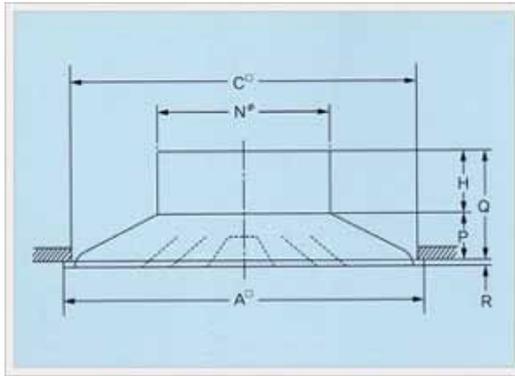


그림 3.2.2 건물용 급기구(CASE #3)

표 3.2.1 급기구 형상에 대한 치수

구 분	도면참조								
	N	C	A*	H	P	Q	R	날개수	T ¹⁾
CASE #2	145	275	320	65	45	110	6	-	50
CASE #3	145	260	320	65	50	115	10	3	-

1) 5mm 이하로 하면 공기소음이 발생하여 5mm로 설정하여 실험하였다.

3.2.1 실험 준비물

① VOC 측정기

- 모델 : ppbRAE Plus
- 사용가능 농도 범위 : 0~2000ppm
- 사용가능 온도 범위 : -10~40℃
- 사용가능 습도 범위 : 0~95%

② 온·습도계

- 모델 : TR-72
- 사용가능 온도 범위 : -60~155℃
- 사용가능 습도 범위 : 10~95%

③ 풍량계

- 모델 : EBT-721
- 제조사 : ALNOR
- 사용 가능 범위 : 42~4,250 CMH
- 측정 오차 : ± 3%

④ 톨루엔(C₇H₈)

- Min : 99.5%
- 제조사 : DC Chemical

⑤ 마이크로 피펫(micro pipette)

- 사용가능 범위(0.001~1ml)

⑥ 바이알(VIAL)

- 용량 : 5ml

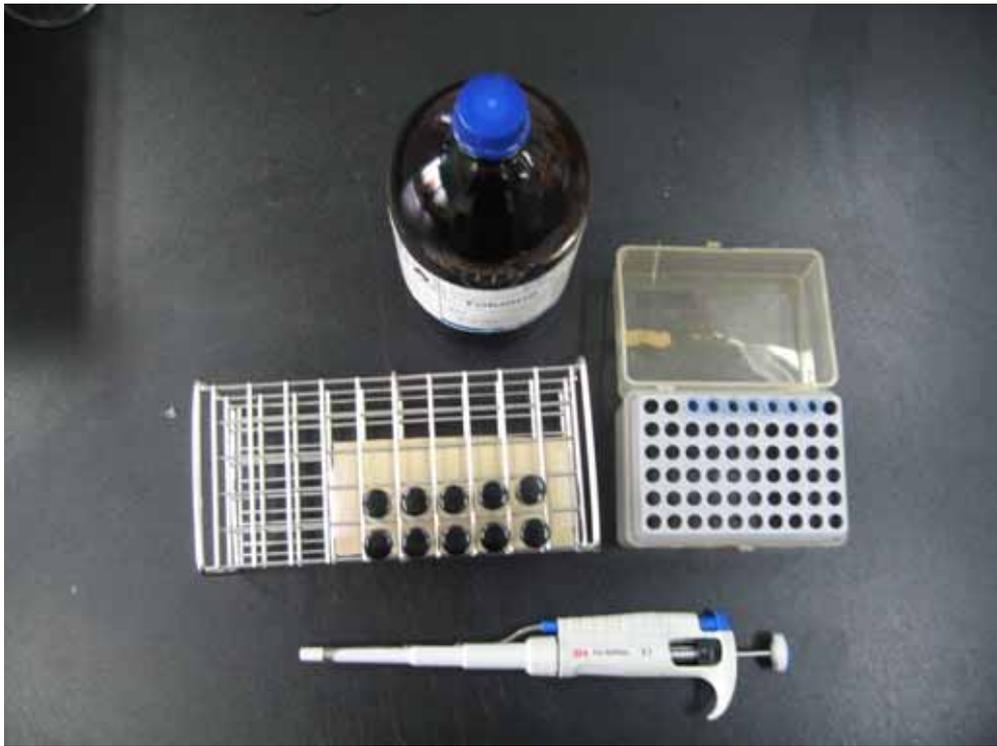


그림 3.2.1.1 실험장비

3.2.1 실험순서

실험 전 미리 톨루엔을 마이크로피펫으로 0.2ml씩 바이알 용기에 넣어 보관하였다. ppbRAE는 zeroing tube를 이용하여 영점을 교정 하였으며, 선실의 스커틀(scuttle)은 모두 닫은 상태로 실험하였다. 선실에는 측정하기 위한 사람 1명만 상주하였고, 문의 틈새는 고려하지 않았다. 측정 포인트는 그림 3.2.1.1과 표 3.2.1.1에서와 같이 선실중앙, 복도측(배기구측) 2층 침대 상·하층, 창측 2층 침대 상·하층 모두 총 5개이다. 동일한 톨루엔 용량을 선실에 퍼뜨리기 위하여 마이크로피펫을 이용하여 0.2ml씩 바이알 용기 담아 두었다. 그리고 재연성을 확인하고, 신뢰도를 높이기 위하여 각 CASE별로 하루 1회씩, 2일간 총 6번의 실험을 수행하였다.

- ① 온·습도계를 선실 중앙에 놓고 측정한다.(그림 3.2.1.2)
- ② 급기 풍량과 온·습도, TVOC를 측정한다.(그림 3.2.1.3, 그림 3.2.1.4)
- ③ 선실을 밀폐하고, 급기 풍량을 0으로 조절한다.
- ④ 톨루엔(0.2ml)을 증발시켜 선실에 고루 분산시키고, ppbRAE를 이용하여 농도를 측정한다.
- ⑤ 인위적으로 만든 농도에서 ppbRAE를 선실 중앙과 2층 침대 상·하층의 농도를 측정한다.
- ⑥ 급기구를 개방하고, 5분마다 총 30분간 선실 중앙과 2층 침대 상·하층의 농도를 측정한다.
- ⑦ 농도 측정이 종료되면 급기 풍량과 온·습도를 확인한다.
- ⑧ 각 CASE의 급기구로 교체(그림 3.2.1.5)하고, ①~⑦의 실험과정을 반복한다.

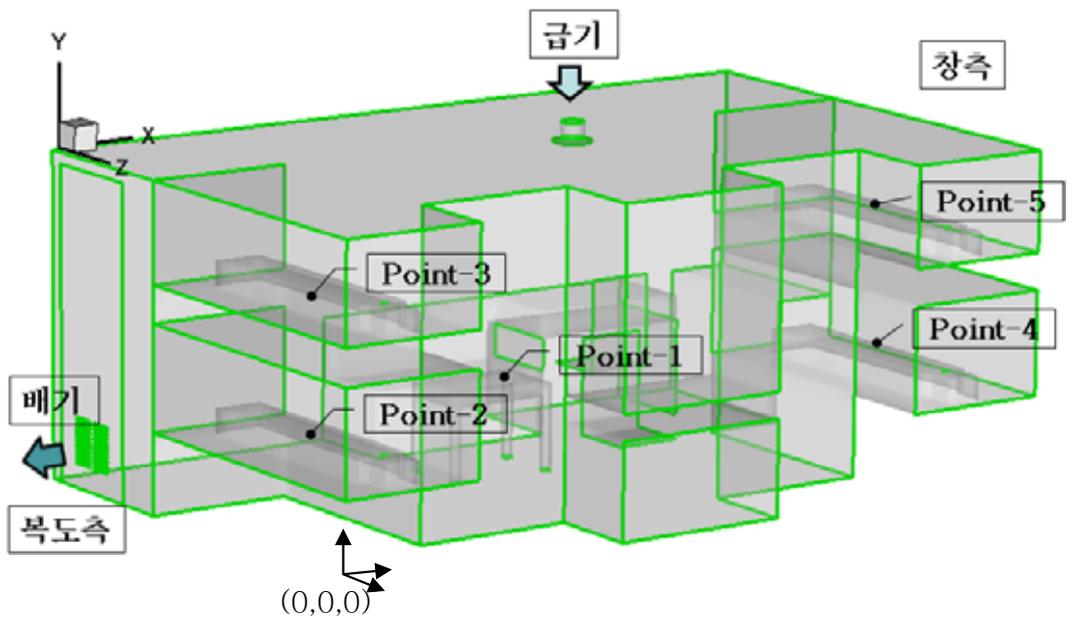


그림 3.2.1.1 측정 포인트

표 3.2.1.1 측정 포인트 위치

위치	X-좌표[m]	Y-좌표[m]	Z-좌표[m]
point-1	2.45	0.8	-1.8
point-2	0.45	0.8	-1.8
point-3	0.45	1.68	-1.8
point-4	4.45	0.8	-1.8
point-5	4.45	1.68	-1.8



그림 3.2.1.2 선실 중앙에서 온·습도와 TVOC 측정



그림 3.2.1.3 풍량 측정



그림 3.2.1.4 급기 온·습도 측정



그림 3.2.1.5 급기구 교체한 모습

3.3 오염물질 제거에 대한 농도분포

실험의 특성상 초기 농도를 동일하게 하기 어렵고, 실내 온·습도 및 급기 온·습도가 수시로 변화하기 때문에 각 CASE별로 직접적인 비교는 어렵다. 하지만 하나의 CASE에서 생기는 국소지역에 대한 농도 변화는 비교가 가능하기 때문에 국소지역의 농도 위주로 결과를 정리하였다.

3.3.1 CASE 1의 실험결과

CASE #1의 실험결과를 표<3.3.1.1>과 표<3.3.1.2>로 정리하였으며, 농도 변화율을 비교하기 위해 그림 3.3.1.1과 그림 3.3.1.2로 나타내었다. 그리고 수직·수평간 농도 불균형을 확인하기 위해 그림 3.3.1.3과 그림 3.3.1.4를 나타내었다. 1차 실험에서의 평균 실내 온·습도는 23℃, 63%로 나타났고, 2차 실험에서의 실내 온·습도는 23.4℃, 64% 나타났다.

1차 실험 30분 후의 결과에서 2층 침대 상·하층간 TVOC 농도를 살펴보면, 상층인 point-3,5에서는 150, 112.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층 point-2,4에서는 222.5, 162.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험 30분 후의 결과에서는 상층이 112.5, 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층은 185, 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 상·하층간 농도 차이가 확연히 드러났다. 1차 실험에서는 하층의 농도가 상층에 비해 약 0.5배 높게 나타났고, 2차 실험에서는 하층의 농도가 약 0.7배 높게 나타났다.

1차 실험에서 복도측(배기구측) 침대 상·하층의 평균 농도는 186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 137.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험에서는 복도측 평균 농도는 149 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 1, 2차 실험 모두 복도측이 창측에 비해 약 0.4배 높은 농도를 나타내고 있었다. 따라서 2층 침대의 상·하층간의 농도 불균형뿐만 아니라 복도측(배기구측)과 창측의 수평간의 농도 불균형이 확인되었다.

표 3.3.1.1 CASE #1의 1차 실험결과

급기구 온·습도 : 19.4℃, 83% 단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	5700	4425	4750	5000	4775
5	2650	3000	2275	-	-
10	1475	2000	1440	-	-
15	790	1175	770	-	-
20	432.5	637.5	432.5	-	-
25	250	382.5	242.5	-	-
30	142.5	222.5	150	162.5	112.5

표 3.3.1.2 CASE #1의 2차 실험결과

급기구 온·습도 : 19.7℃, 84% 단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	5000	4600	4800	4450	4650
5	2430	3052.5	2250	-	-
10	1220	1595	1250	-	-
15	705	900	670	-	-
20	360	612.5	362.5	-	-
25	220	350	215	-	-
30	105	185	112.5	135	75

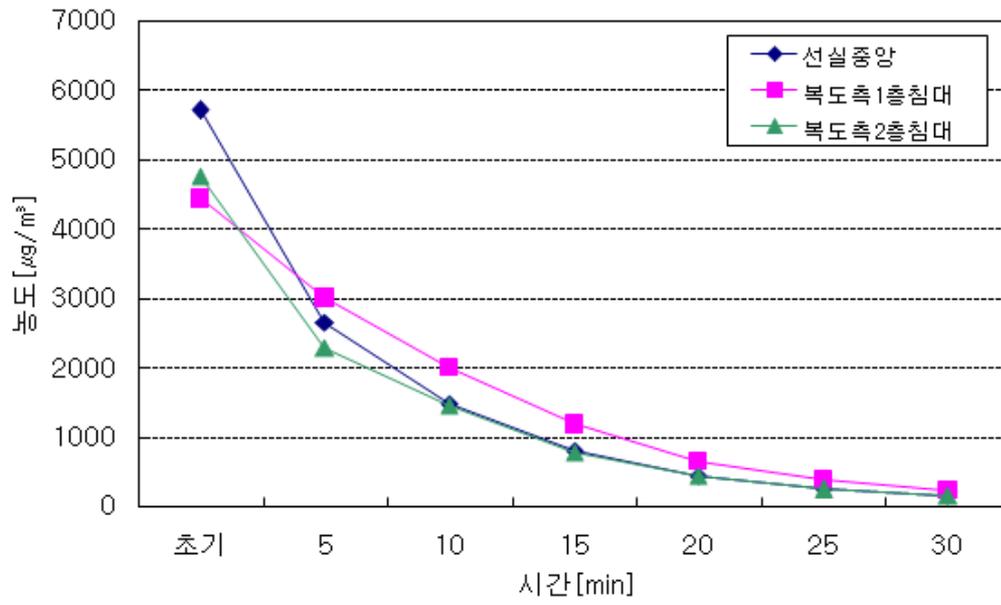


그림 3.3.1.1 CASE #1의 1차 실험결과

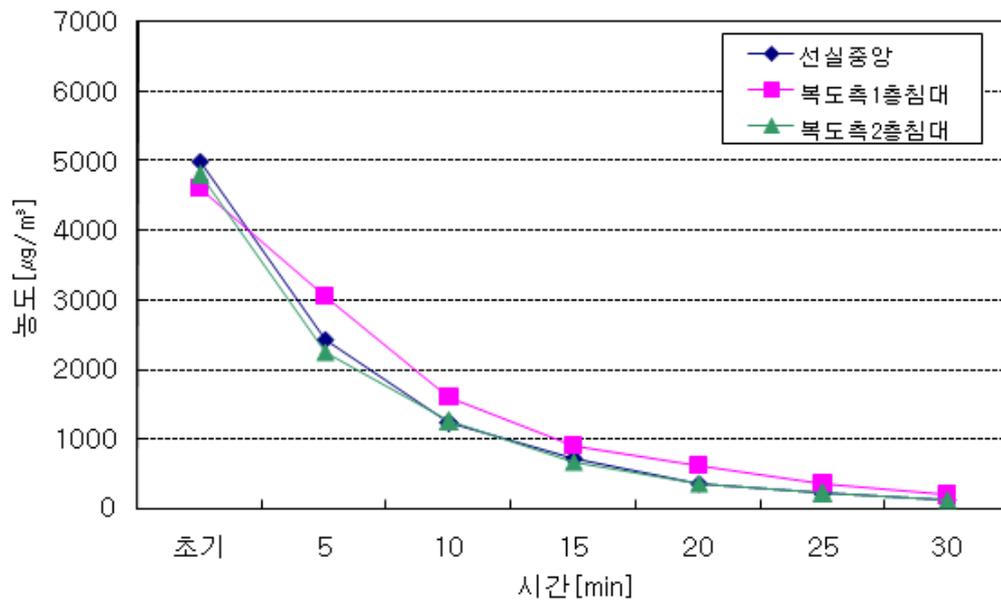


그림 3.3.1.2 CASE #1의 2차 실험결과

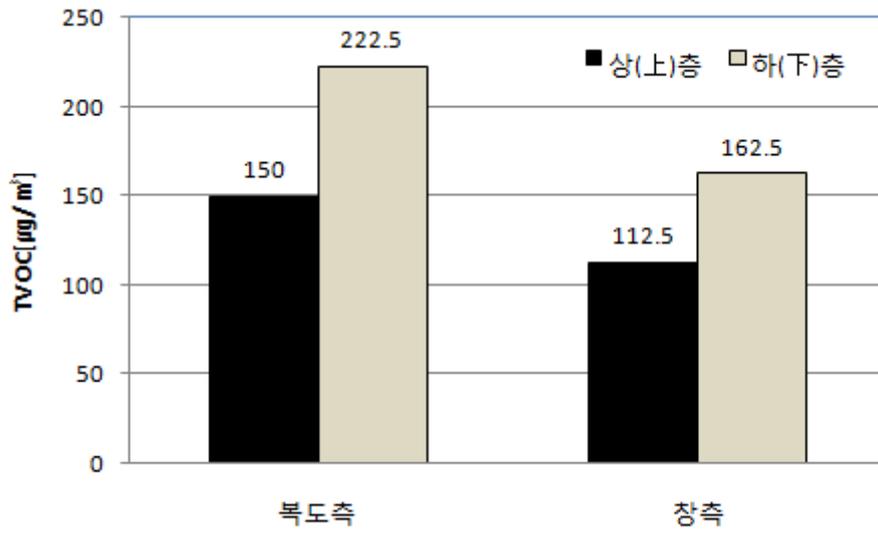


그림 3.3.1.3 CASE #1의 1차 실험결과(30분 후)

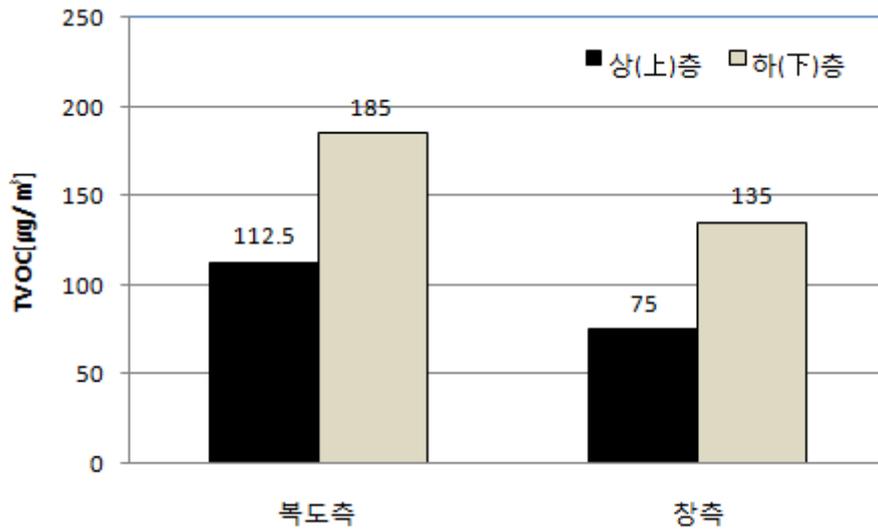


그림 3.3.1.4 CASE #1의 2차 실험결과(30분 후)

3.3.2 CASE 2의 실험결과

CASE #2의 실험결과를 표 <3.3.2.1>과 표 <3.3.2.2>로 정리하였으며, 농도 변화율을 비교하기 위해 그림 3.3.2.1과 그림 3.3.2.2로 나타내었다. 그리고 수직·수평간 농도 불균형을 확인하기 위해 그림 3.3.2.3과 그림 3.3.2.4를 나타내었다. 1차 실험에서의 평균 실내 온·습도는 22.9℃, 64%로 나타났고, 2차 실험에서의 실내 온·습도는 23.4℃, 63% 나타났다.

1차 실험 30분 후의 결과에서 2층 침대 상·하층간 TVOC 농도를 살펴보면, 상층인 point-3,5에서는 105, 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층 point-2,4에서는 172.5, 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험 30분 후의 결과에서는 상층이 90, 52.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층은 115, 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 상·하층간 농도차이가 나타났다. 따라서 1, 2차 모두 하층의 농도는 상층에 비해 약 0.9배 정도 높게 나타났다.

1차 실험에서 복도측 침대 상·하층의 평균 농도는 139 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험에서는 복도측 평균 농도는 102.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 1, 2차 실험 모두 복도측이 창측에 비해 약 0.1배 높은 농도를 나타내고 있었다. 따라서 2층 침대의 상·하층간의 농도 불균형이 컸으나, 수평간의 농도 불균형은 크지 않았다.

표 3.3.2.1 CASE #2의 1차 실험결과

습기구 온·습도 : 19.4℃, 83%

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	6325	4925	5300	6300	6300
5	3315	3435	2875	-	-
10	1700	1725	1510	-	-
15	862.5	982.5	772.5	-	-
20	490	600	425	-	-
25	245	325	215	-	-
30	125	172.5	105	180	80

표 3.3.2.2 CASE #2의 2차 실험결과

초기 습기구 온·습도 : 19.7℃, 84%

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	4500	3850	4075	4375	4450
5	2040	2352.5	1845	-	-
10	1075	1160	950	-	-
15	565	602.5	495	-	-
20	285	345	280	-	-
25	160	212.5	145	-	-
30	90	115	90	135	52.5

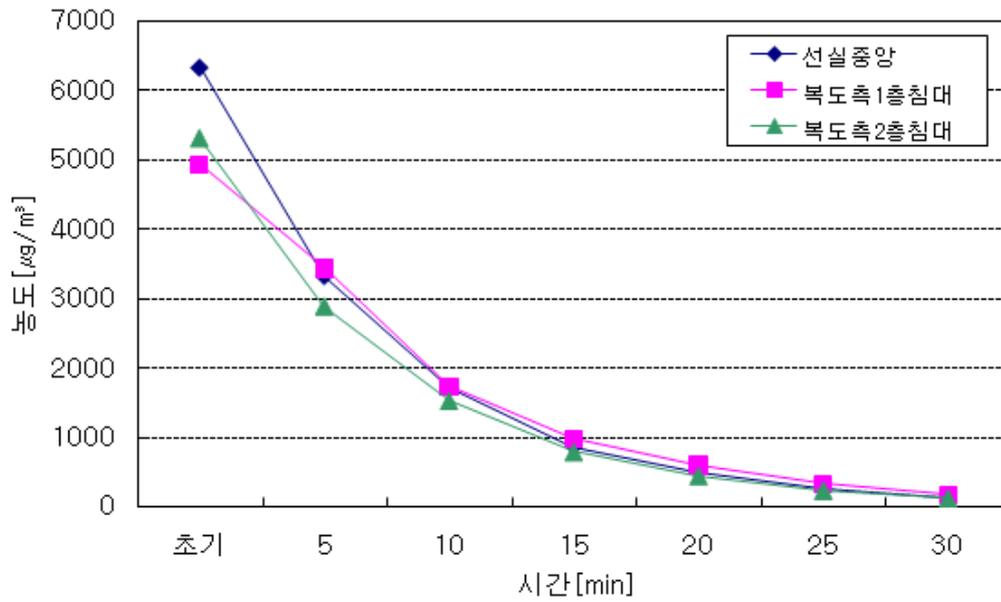


그림 3.3.2.1 CASE #2의 1차 실험결과

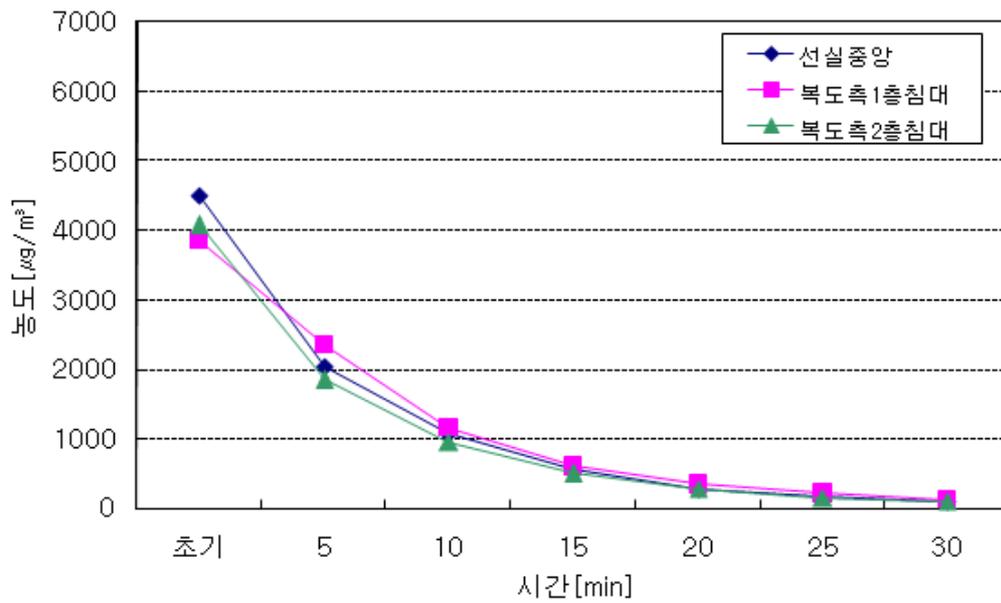


그림 3.3.2.2 CASE #2의 2차 실험결과

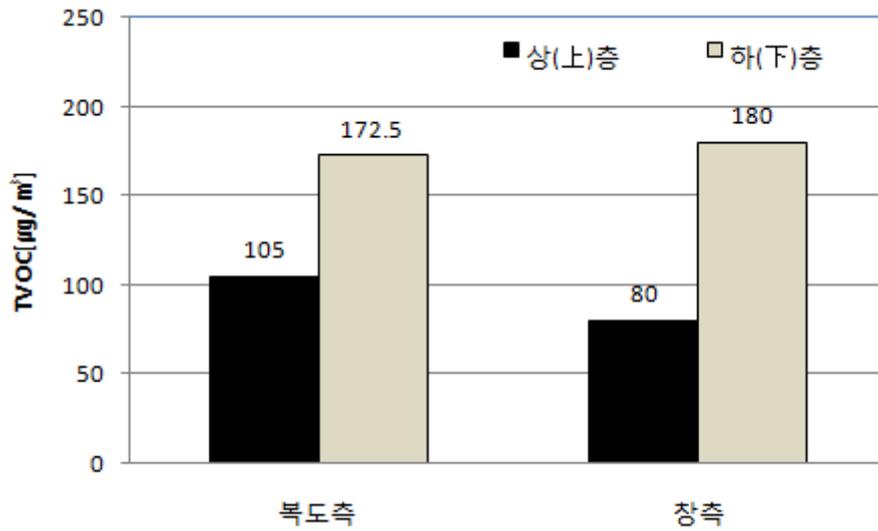


그림 3.3.2.3 CASE #2의 1차 실험결과(30분 후)

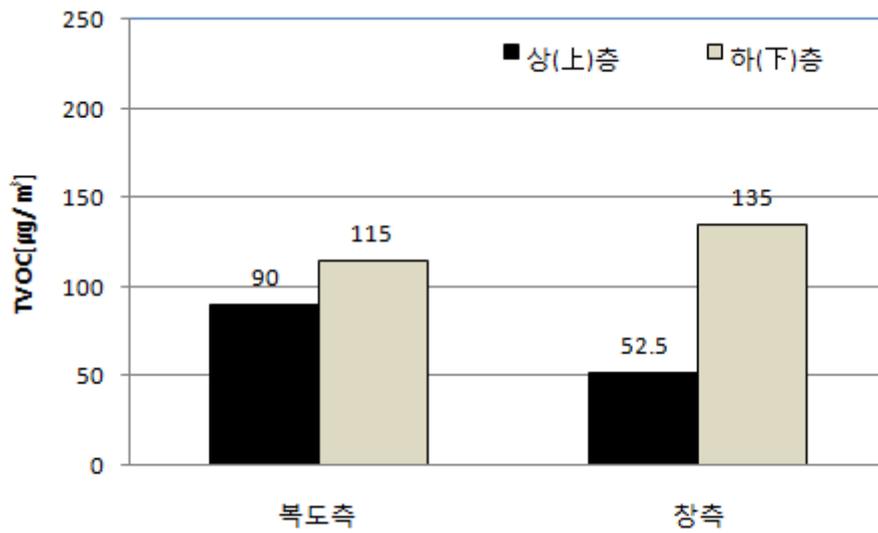


그림 3.3.2.4 CASE #2의 2차 실험결과(30분 후)

3.3.3 CASE 3의 실험결과

CASE #3의 실험결과를 표 <3.3.3.1>과 표 <3.3.3.2>로 정리하였으며, 농도 변화율을 비교하기 위해 그림 3.3.3.1과 3.3.3.2로 나타내었다. 그리고 수직·수평간 농도 불균형을 확인하기 위해 그림 3.3.3.3과 그림 3.3.3.4를 나타내었다. 1차 실험에서의 평균 실내 온·습도는 22.7℃, 64%로 나타났고, 2차 실험에서의 실내 온·습도는 23.8℃, 63% 나타났다.

1차 실험 30분 후의 결과에서 2층 침대 상·하층간 TVOC 농도를 살펴보면, 상층인 point-3,5에서는 80, 82.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층 point-2,4에서는 120, 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험 30분 후의 결과에서는 상층이 352.5, 382.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 하층은 400, 430 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 상·하층간 농도차이가 나타났다. 1차 실험에서는 하층의 농도가 상층에 비해 약 0.5배 높게 나타나 농도 불균형이 확연히 드러났지만 2차 실험에서는 하층의 농도가 상층에 비해 약 0.1배 높게 나타났다.

1차 실험에서 복도측 침대 상·하층의 평균 농도는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2차 실험에서는 복도측 평균 농도는 376 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 창측의 평균 농도는 406 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 1, 2차 실험 모두 복도측이 CASE 1,2와 다르게 더 낮게 나타났으며, 수평간의 농도 차이는 0.1배 이하로 매우 작게 나타났다.

표 3.3.3.1 CASE #3의 1차 실험결과

급기구 온·습도 : 19.1℃, 78%

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	4875	4125	4575	4625	4775
5	3210	3212.5	2575	-	-
10	1782.5	1750	1335	-	-
15	940	900	700	-	-
20	535	475	362.5	-	-
25	220	240	175	-	-
30	100	120	80	125	82.5

표 3.3.3.2 CASE #3의 2차 실험결과

급기구 온·습도 : 20.3℃, 83%

단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

시간 [min]	point-1 (선실 중앙)	point-2 (복도측, 하층)	point-3 (복도측, 상층)	point-4 (창측, 하층)	point-5 (창측, 상층)
초기	5750	5750	5600	5500	5625
5	3070	3190	2470	-	-
10	1912.5	2050	1512.5	-	-
15	1075	1125	995	-	-
20	725	752.5	630	-	-
25	465	500	412.5	-	-
30	375	400	352.5	430	382.5

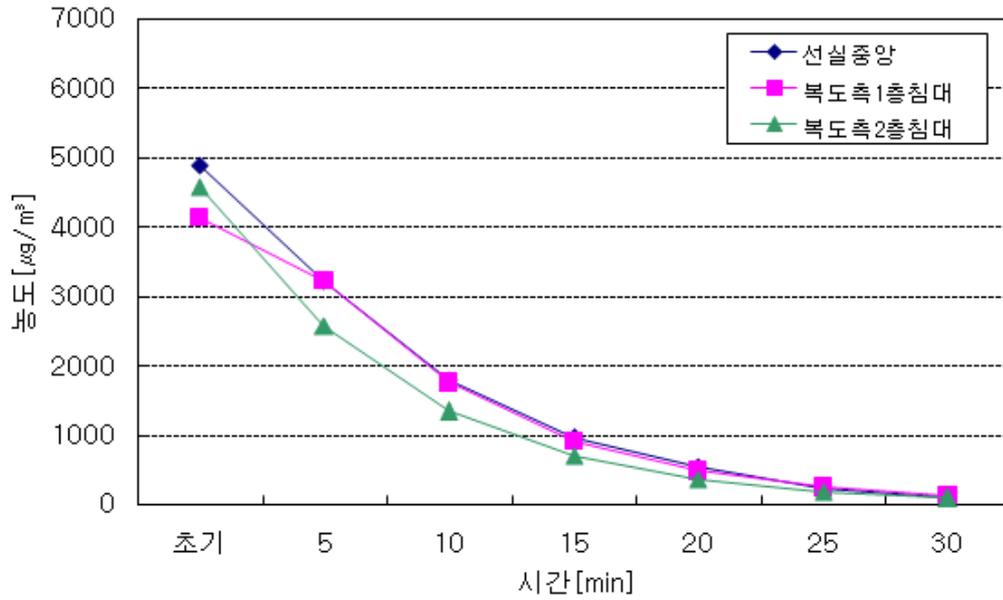


그림 3.3.3.1 CASE #3의 1차 실험결과

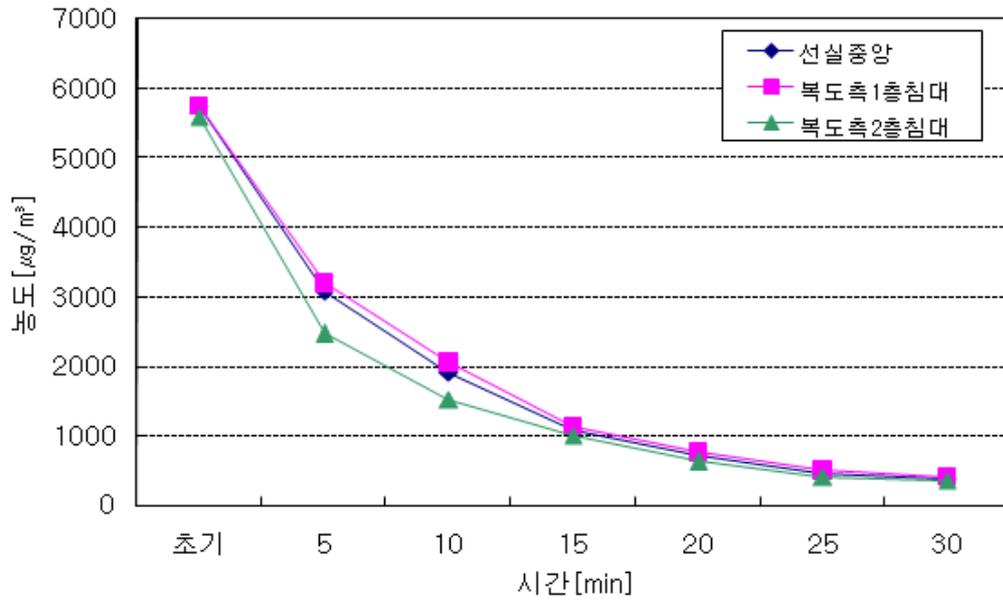


그림 3.3.3.2 CASE #3의 2차 실험결과

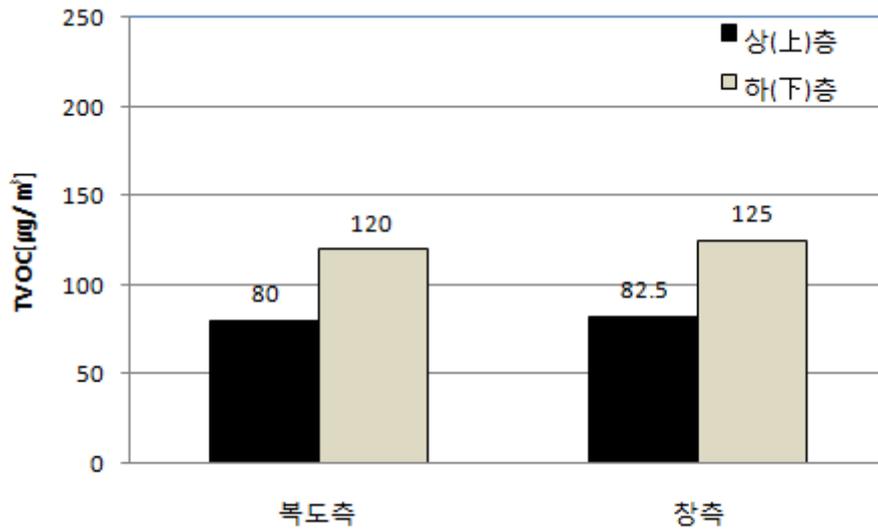


그림 3.3.3.3 CASE #3의 1차 실험결과(30분 후)

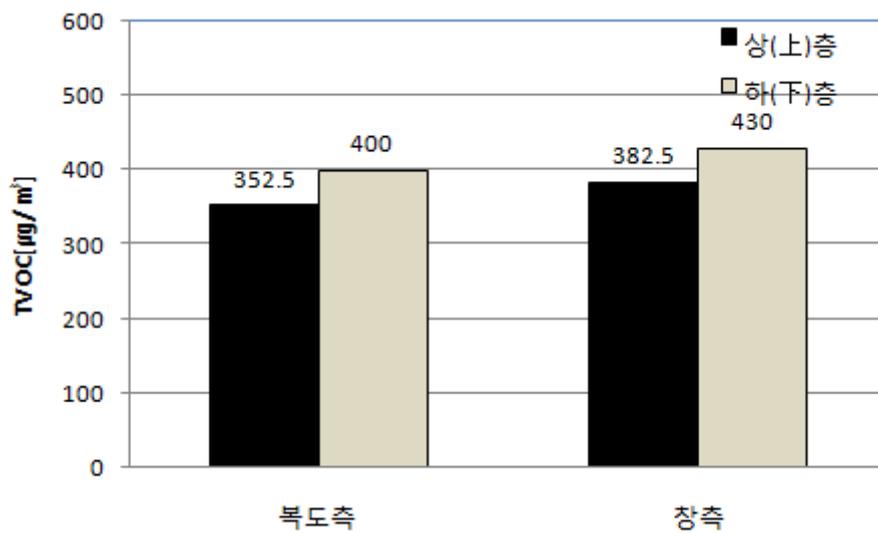


그림 3.3.3.4 CASE #3의 2차 실험결과(30분 후)

3.3.4 각 CASE의 비교 정리

오염물질 빠르게 제거되는 성능을 비교하려 하였으나, 그림 3.3.1.1, 그림 3.3.1.2, 그림 3.3.2.1, 그림 3.3.2.2, 그림 3.3.3.1, 그림 3.3.3.2에서 볼 수 있듯이 거의 모든 CASE에서 비슷한 기울기를 가지며 오염물질의 농도가 낮아지고 있으며, 초기값이 각기 다르기 때문에 직접적인 비교는 하지 않았다.

표 <3.3.4.1>와 그림 3.3.4.1은 1, 2차 실험의 평균 농도 계산하여 수직·수평간 농도 차이를 계산하여 정리한 것이다. 실험에 의하면 모든 CASE에서 2층 침대 하층의 농도가 상층보다 0.6~0.9배 더 높게 나타났고, 주로 창측보다 복도측의 농도가 높게 나타났으며, 각 CASE별 농도 불균형을 정리하면 아래와 같다.

- ① CASE #1은 2층 침대 하층의 농도가 상층보다 약 0.6배 높게 나타났고, 복도측의 농도가 창측보다 약 0.4배 농도가 높게 측정되었다.
- ② CASE #2는 2층 침대 하층의 농도가 상층보다 약 0.9배 높게 나타났고, 복도측의 농도가 창측보다 약 0.1배 농도가 높게 측정되었다.
- ③ CASE #3은 2층 침대 하층의 농도가 상층보다 약 0.6배 높게 나타났고, 창측의 농도가 복도측보다 약 0.1배 농도가 높게 측정되었다.

수직간의 농도 차이는 CASE #2가 가장 컸으며, CASE #1과 #3은 거의 비슷한 수준이었다. 수평간의 농도 차이는 CASE #1이 가장 컸고, CASE #2,#3은 약 0.1배로 크지 않았다.

표 3.3.4.1 각 CASE별 수직·수평간 평균 농도 차이

구 분	CASE 1	CASE 2	CASE 3
2층 침대 상·하층간 농도 차이	하층이 상층보다 0.6배 높음	하층이 상층보다 0.9배 높음	하층이 상층보다 0.6배 높음
복도측과 창측의 농도 차이	복도측이 창측 보다 0.4배 높음	복도측이 창측 보다 0.1배 높음	창측이 복도측 보다 0.1배 높음

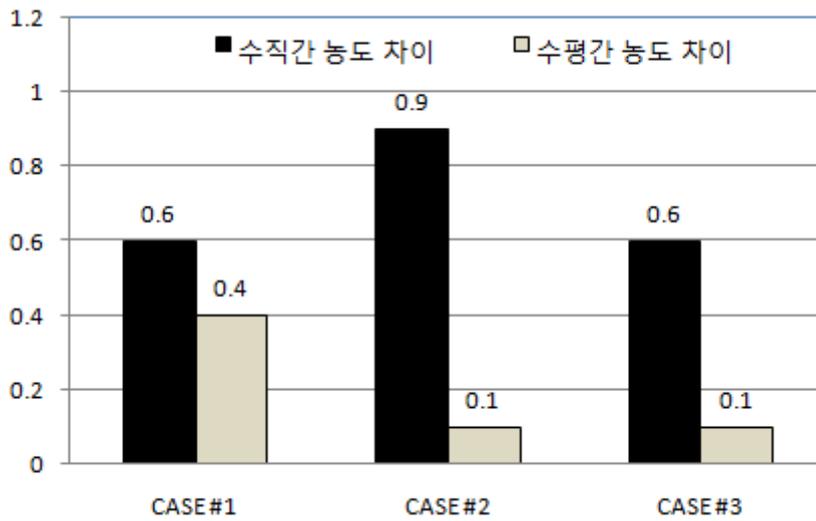


그림 3.3.4.1 각 CASE별 선실의 수직·수평간 평균 농도 차이

제 4 장 FLUENT를 이용한 공기유동 해석

4.1 CFD의 기본 이론

4.1.1 CFD의 개요

CFD(Computational Fluid Dynamics), 즉 전산유체역학은 유동에 쓰이는 편미분방정식을 근사적인 대수방정식으로 바꿔 그 해를 수치적으로 풀어 유동을 해석하는 학문으로, 오늘날에는 급속한 컴퓨터의 발전과 전산유체 S/W의 발달로 계산해법에 있어 충분한 실용가치를 지니게 되었다.

전산유체역학은 대체로 유동에 관계되는 모든 분야에 쓰인다고 할 수 있다. 천문학, 항공, 우주, 전자, 해양, 기계, 토목, 건축, 환경공학 등 많은 분야에서 그 가치를 인정받고 있으며, 특히 기계공학에서는 터보기계, 엔진, 원자로, 반도체 등에 전산유체 S/W의 해석 및 시뮬레이션이 이루어지면서 기술개발, 설계, 성능개선에 큰 영향을 미쳤다. 때문에 전산유체역학은 공학분야의 광범위한 유동 관련 현상의 연구에 유용함이 증명되어 현재 주요 하이테크 기술의 하나로 손꼽히고 있어 무한한 발전 가능성을 남겨놓고 있다. 전술한 바와 같이 컴퓨터의 발달은 이러한 현상에 대한 발전 가능성을 무한대로 만들어 주었고, 전산유체 S/W의 비약적인 발달로 이론적 연구를 바탕으로 실험치에 의한 결과의 정확도는 더욱 높아지고 있다.

실내공간에 대한 공기유동은 해석에서 CFD의 활용가치는 상당히 높다. 관심 영역 내의 모든 지점에서 각종 유동변수를 확인할 수 있다. 특히, 상하간의 높이차가 큰 대형공간, 실내구조가 복잡하거나 실측이 어려운 공간, 그리고 사람이 접근하기 힘든 공간 등 공간적인 제약이 없다는 것이다. 그리고 실험식이나 경험적으로 추측할 수 있는 문제들을 시공전 미리 검토할 수 있고, 더불어 문제점 개선하고 새로운 모델을 제안하는데 빠르게 적용할 수 있다.

4.1.2 지배방정식^(17~20)

본 연구에서는 유한체적법을 기반으로 하는 FLUENT 6.2.16을 이용하여 전산유체를 해석을 수행하였다. 실내공간에 대한 기류를 해석하기 위해 Navier-Stocks 방정식, 연속방정식을 이용하였고, 열이동과 온도 분포를 구하는 에너지보존방정식 그리고 물질농도를 구하는 화학종 보존방정식을 이용하였다.

연속방정식은 일반적으로 질량 보존에 관한 일반형 미분방정식 형태로서 나타낸 것이다. 그림 4.1.2.1에서 나타나 있는 제어체적 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ 의 육면체를 통과하고, 각 방향의 속도 성분이 v_1, v_2, v_3 이고, 유체밀도는 ρ 일 때, 질량이 보존된다면 여섯면을 통과하는 질량의 합은 식 (4.1.2.1)과 같이 0이 되어야 한다.

$$\rho(U_{1,o} - U_{1,i})(\Delta x_2 \Delta x_3) + \rho(U_{2,o} - U_{2,i})(\Delta x_1 \Delta x_3) + \rho(U_{3,o} - U_{3,i})(\Delta x_1 \Delta x_2) = 0$$

(4.1.2.1)

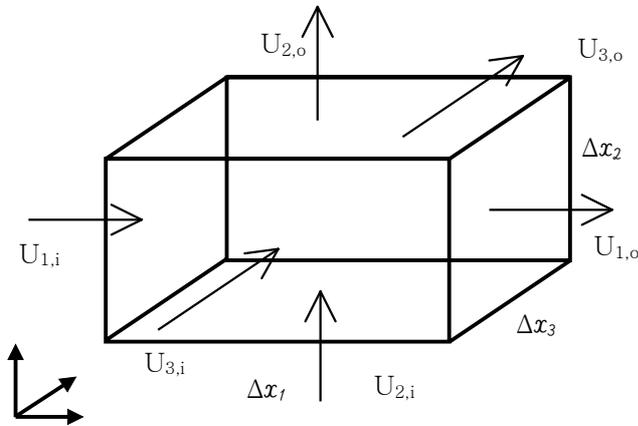


그림 4.1.2.1 제어체적에 관한 질량보존

양변을 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ 으로 나누면 식 (4.1.2.2)와 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\rho\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta x_1}\right) + \rho\left(\frac{\Delta U_2}{\Delta x_2}\right) + \rho\left(\frac{\Delta U_3}{\Delta x_3}\right) = 0 \quad (\text{식})$$

4.1.2.2

위의 방정식을 간결한 미분형식으로 정리하면 아래 식 (4.1.2.3)과 같이 쓸 수 있다. ($i=1,2,3$)

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1.2.3)$$

시간과 공간에 대한 변화율을 고려한다면 식 (4.1.2.4)와 같이 일반적인 형태로 사용할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0$$

(4.1.2.4)

화학종의 보존방정식은 m_i 를 어떤 화학종의 질량 분율(m_i 는 주어진 체적 내에서 혼합물의 전체 질량에 대한 화학종 i 의 질량 분율을 말함)이라 하면, 속도장 U_i 에서 m_i 의 보존 방정식은 식 (4.1.2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \rho J_{i,i} + R_i + S_i$$

(4.1.2.5)

$J_{i',i}$ 는 확산유속(diffusion flux)이며, 대개 $m_{i'}$ 의 구배 때문에 생기는 것으로 난류유동에서는 식 (4.1.2.6)과 같다. $R_{i'}$ 는 화학반응에 의한 생성물이며, $S_{i'}$ 는 추가시킨 생성물을 의미한다. 본 연구에서 화학반응을 고려하지 않았으므로 $R_{i'}=0$ 이다.

$$J_{i',i} = -(\rho D_{i',m} + \frac{\mu_t}{S_{C_{i'}}}) \nabla m_{i'}$$

(4.1.2.6)

여기서, $D_{i',m}$: 화학종 i' 의 확산계수(diffusion coefficient)

$S_{C_{i'}}$: 난류 슈미트수(turbulent Schmidt number)

μ_t : 난류점성(turbulent viscosity)

열전달에서의 보존방정식은 주로 엔탈피의 형태로 표현된 에너지 방정식으로 나타낼 수 있다. 전체 엔탈피의 형태로 표현된 에너지 보존방정식은 식 (4.1.2.7)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} U_i(\rho E + p) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_{j'} J_{i',i} + U_i(\tau_{ij})_{eff}) + S_h \end{aligned}$$

(4.1.2.7)

여기서, $(\tau_{ij})_{eff}$ 는 축차 응력 텐서(deviatoric stress tensor)를 나타내고, k_{eff} 는 유효 열전도도(effective thermal conductivity)를 나타낸다. 본 해석에

서 사용한 $k-\varepsilon$ 난류모델에서는 k_{eff} 를 식 (4.1.2.8)과 같이 나타낼 수 있다.
 (Pr_t : turbulent Prandtl number)

$$k_{eff} = k + \frac{C_{pk} \mu_t}{Pr_t}$$

(4.1.2.8)

위의 식 (4.1.2.7) 방정식에서 에너지 E는 식 (4.1.2.9)과 같이 압력 p와 속도의 크기 U, 정엔탈피(static enthalpy) h로 표현할 수 있다.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \quad (4.1.2.9)$$

화학종 혼합과 관련되어 있는 비압축 유동에서 정엔탈피는 질량 분율 m_j 와 각 화학종의 엔탈피 h_j 를 통해서 식 (4.1.2.10)과 같이 정의될 수 있다.

$$h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

(4.1.2.10)

각 화학종 j '의 엔탈피는 그 화학종의 비열에 대한 온도의 함수로 식 (4.1.2.11)로 나타낼 수 있다. (T, ref : reference temperature[298.15K])

$$h_j = \int_{T, ref}^T C_{P, j} dT \quad (4.1.2.11)$$

일단 엔탈피가 위의 관계식으로부터 결정되면, 온도는 식 (4.1.2.11)으로 구할 수 있다. 식 (4.1.2.7)의 오른쪽 첫 번째 항은 열의 전도, 확산에 의한 열전달을 포함하고 있다. 그리고 둘째 항은 화학종의 확산에 기인한 열전달을 표현하고 있으며, 셋째 항은 속도구배에 의한 응력 텐서를 포함하고 있는데 점성 소산에 의한 열손실을 타나낸다. 본 해석에서는 viscous heat을 고려하지 않았으므로, 셋째 항은 0이다.

운동량 방정식인 Navier-Stocks 방정식은 비선형성을 갖고 있으며, 편미분 방정식으로 특별한 경우를 제외하고는 해석해를 구하는 것이 불가능할 정도로 식 (4.1.2.12)와 같이 매우 복잡한 구조를 지니고 있다.

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}[\mu(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k})] + \rho g_i + F_i$$

(4.1.2.12)

위의 식 (4.1.2.12)에서 오른쪽 항은 압력구배, 점성력, 중력, 부력으로 구성 되어있으며, 총계적으로 위의 세 방향에 대한 운동량 방정식을 종합하여 Navier-Stocks 방정식이라 불린다.

난류해석을 실시하는 경우, 공학적인 유용성의 관점에서 예측 대상이 되는 것은 물리적인 모든 양의 순간치가 아니고, 통상 통계적인 평균량이다. 속도의 순간치를 시간 평균값과 변동성분으로 분해하면 식(4.1.2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = U_i + u_i'$$

(4.1.2.12)

위의 식 (4.1.2.12)를 Navier-Stocks 방정식에 대입한 후, 시간평균 과정을 거친다면 식 (4.1.2.13)과 같은 시간 평균된 난류유동 방정식(Reynolds - Averaged Navier-Stokes equation, RANS)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) \\ = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i + F_i \end{aligned}$$

(4.1.2.13)

위의 식 (4.1.2.13)에서 $\overline{u_i' u_j'}$ 이 포함된 항은 시간평균의 성질로부터 비롯된 것으로 레이놀즈응력항 또는 난류응력항이라 하며, overbar는 시간평균 과정을 거친 항이라는 것을 의미한다. 레이놀즈응력항은 시간 평균된 난류유동의 미지수이며, 유동 평균적 성질의 항으로 나타내는 것이 난류 모델의 과제이다. 많은 난류 모델들이 난류응력과 난류 스칼라플럭스를 나타내기 위하여 난류점성계수 또는 난류확산계수라는 개념을 도입한다. 난류응력은 아래의 식 (4.1.2.14)와 같이 난류응력이 평균속도의 구배에 비례한다는 Boussinesq 가정으로 나타낼 수 있다. 또한 난류 스칼라플럭스는 식 (4.1.2.15)와 같이 가정한다.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

(4.1.2.14)

$$-\rho \overline{u_i' \Phi} = \Gamma_\Phi^t \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}$$

(4.1.2.15)

위의 식 (4.1.2.14)를 구하여, 시간 평균된 난류유동 방정식(RANS)에 대입하여 구하면 된다. 여기서, 난류의 수직응력성분인 $2/3\delta_{ij}$ 는 압력으로 처리되고, 결과적으로 난류점성(μ_t)를 어떻게 구하느냐의 문제이다. 본 해석에 사용한 $k-\varepsilon$ 난류모델은 난류점성을 식 (4.1.2.16)과 식(4.1.2.17)에서와 같이 k 수송 방정식과 ε 수송방정식에서 난류운동에너지(turbulent kinetic energy, k)와 난류운동에너지 소산율(dissipation rate, ε)을 구하고, 식 (4.1.2.18)에 대입하여 난류점성을 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - \rho\varepsilon + G_b$$

(4.1.2.16)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

(4.1.2.17)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

(4.1.2.18)

식 (4.1.2.16)에서 G_k 는 난류운동에너지 생성항으로 식 (4.1.2.19)와 같이 구성되어 진다. G_b 는 부력항을 포함시키는 것으로 중력과 온도변화에 따른 부력을 고려해 주는 것으로 식 (4.1.2.20)과 같이 나타낼 수 있다. (β 는 열팽창 계수)

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

(4.1.2.19)

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

(4.1.2.20)

따라서, μ_t 가 계산되면 Navier-Stokes 방정식에 포함되는 난류응력을 구할 수 있다. 일단 Navier-Stokes 방정식으로부터 새로운 속도성분이 계산되면 G_k 에 영향을 미치게 되고, 위와 같은 과정을 수렴해를 구할 때까지 반복계산하게 된다.

위의 식 (4.1.2.16)~(4.1.2.20)에서 사용한 경험상수, 즉 $k-\epsilon$ 난류모델에서 경험적으로 추정된 경험상수를 정리하면 표 <4.1.2.1>과 같다.

표 4.1.2.1 $k-\epsilon$ 난류모델의 경험상수

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ϵ	Pr_t
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.85

4.1.3 이산화기법(Discretization scheme)

Navier-Stokes 방정식과 같은 미분방정식을 이산화하는 방법으로 크게 유한차분법(finite difference method), 유한체적법(finite volume method), 유한요소법(finite element method)의 3종류로 들 수 있다.

FLUENT에서는 유한체적법으로 운동량 및 질량보존법칙을 만족시키기에 용이하도록 적분하여 기초방정식을 이산화하는 방법을 이용한다. 구체적으로는 고려하고 있는 격자점을 중심으로 한 미소영역 내에서 방정식을 적분하고, 그 경계값을 인접격자점을 이용하여 요구되는 정확도로 주어 적분식을 이산화하는 것이다.

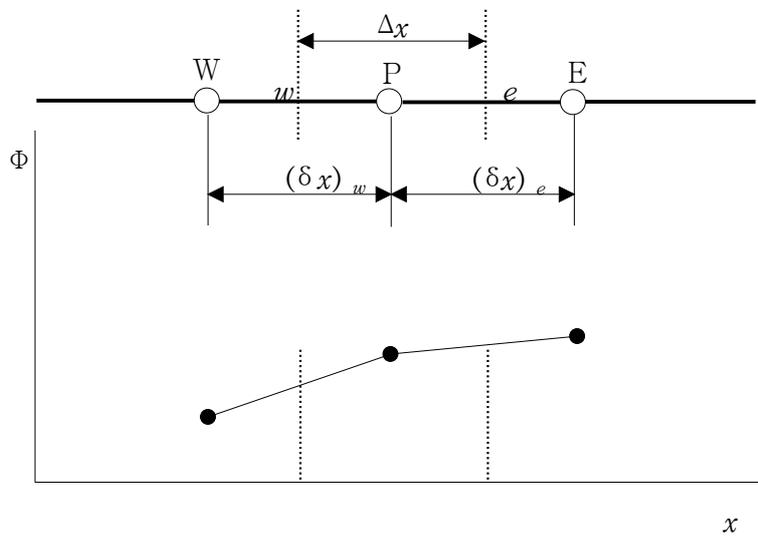


그림 4.1.3.1 유한체적법에서의 좌표와 물리량 Φ 의 분포에 대한 가정

그림 4.1.3.1과 같이 1차원으로 흐르고 있는 유동을 고려해보자. P점을 중심으로하는 제어체적을 적분하기 위해서는 w 과 e 의 값이 계산되어야 한다. 다시 말하면, P점을 중심으로 하는 제어체적과 E점을 중심으로하는 제어체적이 접하는 접촉면 e , 그리고 P점을 중심으로 하는 제어체적과 W점을 중심으로 하

는 제어체적이 접하는 접측면 w 가 제어체적 중심점인 W, P, E에 저장되어 있는 값의 함수로 표현되게 하는 이산화기법을 필요로 한다.

FLUENT에서 사용하는 이산화기법은 1차 상류차분도식(first order upwind scheme), 2차 상류차분도식(second order upwind scheme), QUICK scheme, 멱승도식(Power law scheme), 중심차분도식(Central-Differencing scheme)이 있다. 유동 특성에 따라 난류모델을 선택하듯이 차분식도 마찬가지로 유동특성과 난류모델에 따라 적당한 차분식을 선택하여 한다. 본 연구의 CFD 해석에서는 수렴 정도에 따라 대류항은 1차 상류차분도식과 2차 상류차분도식을 겸하여 해석하였고, 확산항은 2차 정확도를 가진 중심차분으로 해석하였으며, 아래에 간략히 차분식들에 대한 특징을 설명하였다.

1차 상류차분도식의 특징은 그림 4.1.3.1에서 제어체적의 접측면 e 의 물리량 Φ_e 는 유동흐름의 상류측 값을 그대로 이용하는 것이다. 즉, 유체가 W에서 E로 흐르면 식 (4.1.3.1)과 같이 되고, 반대로 유체가 E에서 W방향으로 흐르면 식 (4.1.3.2)와 같이 간주하여 해석하는 것이다.

$$\Phi_e = \Phi_w \qquad \Phi_w = \Phi_P \qquad (4.1.3.1)$$

$$\Phi_e = \Phi_E \qquad \Phi_w = \Phi_P \qquad (4.1.3.2)$$

2차 상류차분도식과 중심차분도식의 특징은 Taylor 전개를 이용한 식 (4.1.3.3)과 같은 차분식을 이용한다.

$$\Phi_e = \Phi_P + \Delta\Phi \cdot \frac{1}{2}(\delta_x)_e \qquad (4.1.3.3)$$

운동량 방정식은 압력장이 주어진다면 일반변수 Φ 에 관하여 정형화된 이산화 방정식을 통해 해를 구할 수 있다. 즉, 주어진 압력장과 구하고자하는 압력장 일치한다면 운동량 방정식을 풀어 속도장에 대한 해를 구할 수 있다. 하지만 이러한 일은 기대하기 어렵다. 구하자고 하는 x, y, z 방향의 속도성분 3개와 압력 p 인 4개의 미지수이고, 주어진 방정식은 x, y, z 속도성분을 가지고 있는 3개의 운동량 방정식과 질량보존을 나타내는 1개의 연속방정식이다.

본 해석에서 사용한 SIMPLE 알고리즘은 압력장을 가정하고 속도를 구한다. 그리고 질량보존이 만족될 때까지 압력장은 수정계수에 의해 계속 반복하여 계산되고 속도성분도 마찬가지로 반복되는 계산으로 개선된 속도장을 얻는다. 속도장과 압력장이 결정되면 유체의 물성값, 생성항 등에 영향을 미친다면, 그에 대한 이산화방정식 계산하게 되고, 다시 압력과 속도장에 대한 해석이 반복하여 수렴해를 얻는다.

4.2 환기효율의 정의

실내 오염물질의 농도분포는 기류분포에 의해 생성되며 불균등하게 확산된다. 완전혼합 등의 특수한 경우를 제외하고는 실내기류가 환기성상의 해석에 가장 기본적이면서도 중요한 정보를 제공한다. 즉, 환기성상을 구조적으로 해석을 기초로 한 환기효율지표의 검토에는 계통적 해석이 용이하고 상세한 고찰이 가능한 CFD(Computational Fluid Dynamics)을 기본으로 한 수치해석이 편리하다.

CFD 는 모형 실험 등을 이용한 해석을 제외하고는 3차원의 상세한 실내기류의 예측, 해석법으로 유일한 것이 된다. 이것은 실내의 공기흐름의 구조적 이해에도 유효하며, 실내 환경의 합리적 설계를 행하는 것에도 중요한 정보를 제공한다.

4.2.1 환기효율지표의 개요⁽²¹⁾

실내 공기질은 실내의 오염물질 발생을 억제하는 것 외에, 실내기류 중에 혼합된 오염물질의 확산 또는 실외에 배출시키는 것에 의해 제어되어진다. 실내기류에 의한 오염물질 운송제어의 좋고 나쁨은 환기효율지표에 의해 정량적으로 평가하여 환기계획에 반영하는 것이 가능하다. 즉, 실내의 공기흐름은 오염물질의 공간 분포를 형성하는 주요인이며, 실내의 환기효율분포는 실내 각점에서 공기흐름에 의한 오염물질의 희석, 배제하는 능력을 평가하는 관점에서 평가되어질 필요가 있다.

(1) 환기효율지표

환기효율지표란 환기성상에 영향을 주는 기류성상과 오염물질농도 등을 고려한 지표이다. 종래, 널리 이용되어지고 있는 아래 Seidel식은 실내공기가 완전 혼합되어진 상태, 즉 실내의 오염물질농도가 균일한 상태에 있는 것을 가정해서 해석되어진 것이며, 국소적으로 오염물질의 농도가 높은 장소가 있는 경우

에는 적당하지 않다. 실제로 유입구와 유출구의 위치, 오염물질의 발생장소, 기류성상, 유입공기와 실내공기의 온도차등의 영향을 받아 완전확산혼합의 가정이 성립되지 않는 경우가 많다.

$$Q = M / (C_r - C_o)$$

여기에서,

- Q : 환기량(도입공기량)
- M : 실내 오염물질 발생량
- C_r : 실내 오염물질 농도
- C_o : 도입공기의 오염물질 농도

여기에 최근에는 실내의 국소영역에 의한 기류분포와 오염물질 농도분포를 고려한 환기성능을 평가하기 위한 지표가 고려되어지고 있으며, 크게 공기령을 이용한 것과 오염물질 농도를 이용한 것이 있다.

① 공기연령을 이용한 지표

공기연령이란 환기에 의해 공급된 공기가 실내의 임의점에 도달하기까지 걸린 평균시간을 말하며, 환기효율에 있어서 중요한 개념이다. 이 개념은 급기구에서 실내 평가점까지 평균도달시간이 짧다면, 도달한 공기가 도중에 오염되어지는 가능성이 낮다는 것을 기본으로 하고 있다. 그림 4.2.1.1은 공기연령과 잔여체류시간의 개념을 나타내고 있다. 급기구를 통하여 실내로 유입된 공기가 실내 임의의점에 도달할 때까지 소요된 시간을 공기연령(air of age)이라고 한다. 공기입자는 여러 가지 경로를 통하여 그 지점에 도달할 수 있기 때문에 그 지점에 도달하는 공기입자 연령의 평균값을 국소평균연령(local mean age)

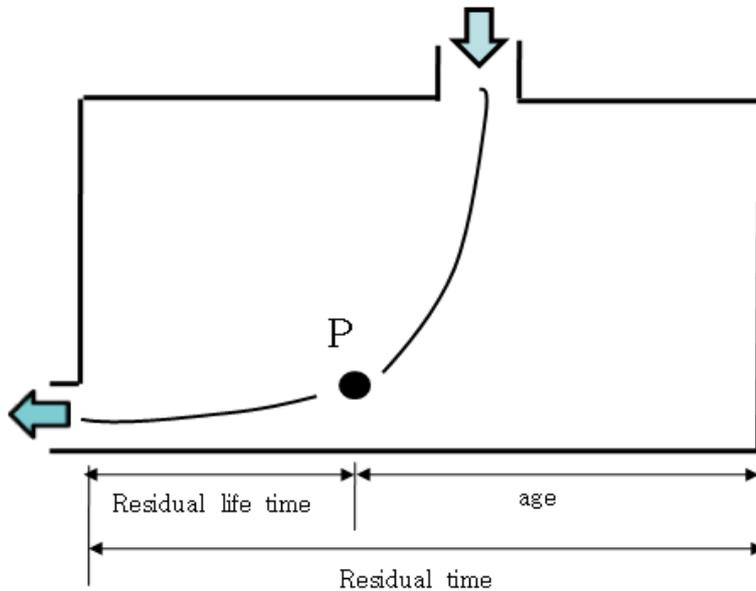


그림 4.2.1.1 공기연령의 이해

이라 한다.

또한 실내 임의의 점으로부터 배기구까지 빠져나갈 때까지 소요된 시간을 잔여체류시간이라고 하는데 이것도 여러 가지 경로를 통한 입자들의 평균값으로서 국소평균 잔여체류시간(local mean residual life time)이라고 한다. 또한 국소평균연령과 국소평균 잔여체류시간의 합은 그 지점을 통과하는 공기 입자의 실내체류시간(resident time)이 된다. 급기구를 통하여 태어난 공기입자가 현재의 위치까지 도달하는데 걸린 시간이 나이이며 현재의 위치로부터 배기구로 사망할 때까지 남은 시간이 여생이다. 또한 나이와 여생의 합은 수명으로 이해하면 될 것이다.

국소평균연령이란 신선외기가 임의의 점 P까지 도달하는 시간을 의미하므로 급기의 실내분배 성능을 정량화하는데 사용될 수 있으며, 국소평균 잔여체류시간이란 그 지점으로부터 배기되는데 소요되는 시간을 의미하므로 오염물이 배기되는 성능을 정량화하는데 이용될 수 있을 것이다. 또한 국소평균연령을 전체 실내공간에 대하여 평균값을 구하면 실평균연령(room mean age)이 된다.

마찬가지로 전체 실내공간에 대한 평균 국소잔여체류시간은 실평균 잔여체류시간(room mean residual life time)이 된다. 실평균연령은 실전체의 급기효율을 나타내고 실평균 잔여체류시간은 실전체의 배기효율을 나타낸다고 볼 수 있다.

② 오염물질농도를 이용한 지표

실내공기의 청정도는 실내에서 발생하는 오염물질농도에 의해 직접적으로 평가되어진다. 그러나 실내 각점의 오염물질농도는 오염물질의 발생위치에 따라서도 크게 변화한다. 따라서 오염물질농도 분포만을 이용하여 보편성있는 환기효율을 일의적으로 정의하는 것은 쉽지 않다. 일본의 Shuzo Murakami, Shinsuke Kato 등은 실내 전역에 균일하게 오염물질이 계속 발생할 때, 흡입구에서 신선공기가 도입되었을 경우의 확산물질농도와 오염물질의 순간확산농도와의 비를 환기효율지표 SVE3라고 제안하였다.

$$SVE3(X) = C_{X'}(X) / C_S$$

$$C_S = q / Q$$

여기에서,

- $C_{X'}(X)$: 실내에 균일하게 총량 q 의 오염물질 발생이 있는 경우 X점의 농도 [kg/m^3]
- q : 오염원에서의 오염물질발생량 [kg/s]
- Q : 환기량 [m^3/s]
- C_S : 순간확산농도 [kg/m^3]

4.3 TVOC의 CFD 해석값과 실험값 비교를 통한 CFD 해석의 타당성 검토

CFD 해석값에 대한 평가를 수행하기 전에 먼저 실험에서 측정한 실험값과 CFD 해석값을 비교하여 CFD 해석의 타당성을 검증하였다. CFD 해석값의 검증을 위해 실험과 유사한 방법으로 선실의 초기 TVOC 농도를 $5000\mu\text{g}/\text{m}^3$, 취출 풍량은 200CMH, 취출 온도는 20°C , 나머지 벽면은 모두 단열로 설정하여 30분간 비정상상태로 해석하였다.

TVOC는 모든 휘발성유기화합물을 뜻하는 것이기 때문에 모든 물질에 대한 시뮬레이션을 수행하는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 CFD 해석에서는 휘발성유기화합물의 대표물질은 톨루엔을 이용하여 TVOC 농도를 비율적으로 예측하였다. 실험장비인 ppbRAE의 경우 TVOC와 개별 VOCs 물질의 농도 관계를 수정계수(Correction factor)를 이용하고 구하고 있다. 즉, ppm 단위로 측정되면 이를 질량단위인 mg/m^3 의 단위로 바꿔주기 위해 식(4.3.1)을 이용하여 나타내고 있다.

$$Cone.(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{Cone.(\text{ppmV}) \times M(\text{g}/\text{mole}) \times CF}{L} \quad (4.3.1)$$

여기서,

- $Cone.(\text{mg}/\text{m}^3)$: 질량단위를 가진 농도
- $Cone.(\text{ppmV})$: 부피단위를 가진 농도
- $M(\text{g}/\text{mole})$: 1몰당 분자량
- CF : 수정계수(톨루엔은 0.51)
- $L(\ell)$: 1몰당 기체부피

그림 4.3.1~그림 4.3.3과 표 <4.3.1>~<4.3.3>은 3.3.3절에서의 2차 실험 결과와 CFD 해석결과를 비교한 그림이다. 그림 4.3.1에서 선실중앙의 실험값

과 CFD 해석값은 매우 일치하는 모습을 보였다. 초기값도 실험값과 CFD 해석값이 동일하였고, 30분간 동일한 패턴으로 TVOC 물질이 제거되는 모습을 보여주고 있다. 그림 4.3.2와 4.3.3에서 2층 침대 부근의 실험값과 CFD 해석값은 차이가 다소 크게 나타난 것은 VOCs의 물질의 특성상 침대나 벽면에 흡착 또는 흡수거나 방출하는 성질이 있다. 하지만 CFD 해석에서는 이러한 흡착과 흡수 그리고 방출에 대해 해석하지 못하기 때문에 생기는 오차로 추측된다. 또한 CFD 해석에서 선실에 대한 대략적인 형상을 나타내어 해석하였고, 실험 시 초기농도와 CFD 시의 초기농도가 서로 다르다는 점에서도 결국 오차는 존재할 수밖에 없다. 그리고 그림 4.3.1~4.3.3에서 볼 수 있듯이 모두 오염물질 제거되는 패턴은 실험값과 CFD 해석값이 거의 일치하고 있다는 점에서 CFD 해석과 실험값은 비교적 잘 일치하는 것으로 간주할 수 있다.

표 4.3.1 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(선실중양)

구분	CFD 해석값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	실험값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	차이
초기	4982.0	5000.0	18.0
5분	2521.8	2430.0	91.8
10분	1248.0	1220.0	28.0
15분	630.5	705.0	74.5
20분	327.2	360.0	32.8
25분	171.1	220.0	48.9
30분	89.4	105.0	15.6

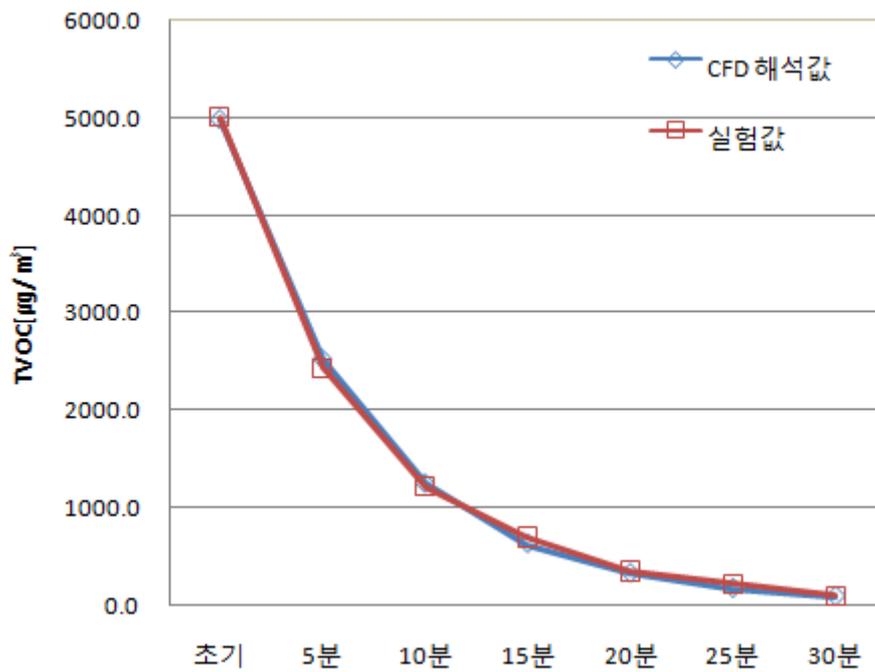


그림 4.3.1 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(선실중양)

표 4.3.2 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 상층)

구분	CFD 해석값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	실험값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	차이
초기	4988.0	4800.0	188.0
5분	2699.5	2250.0	449.5
10분	1296.2	1250.0	46.2
15분	629.1	670.0	40.9
20분	314.5	362.5	48.0
25분	160.5	215.0	54.5
30분	83.6	112.5	28.9

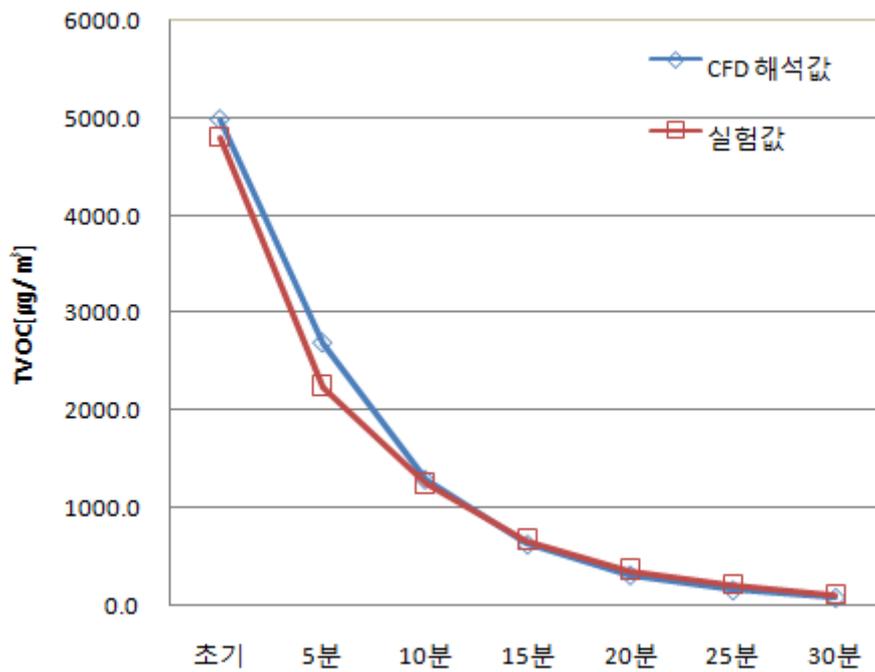


그림 4.3.2 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 상층)

표 4.3.3 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 하층)

구분	CFD 해석값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	실험값[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	차이
초기	4988.0	4600.0	388.0
5분	2787.4	3052.5	265.1
10분	1475.2	1595.0	119.8
15분	783.6	900.0	116.4
20분	417.2	612.5	195.3
25분	233.1	350.0	116.9
30분	128.7	185.0	56.3

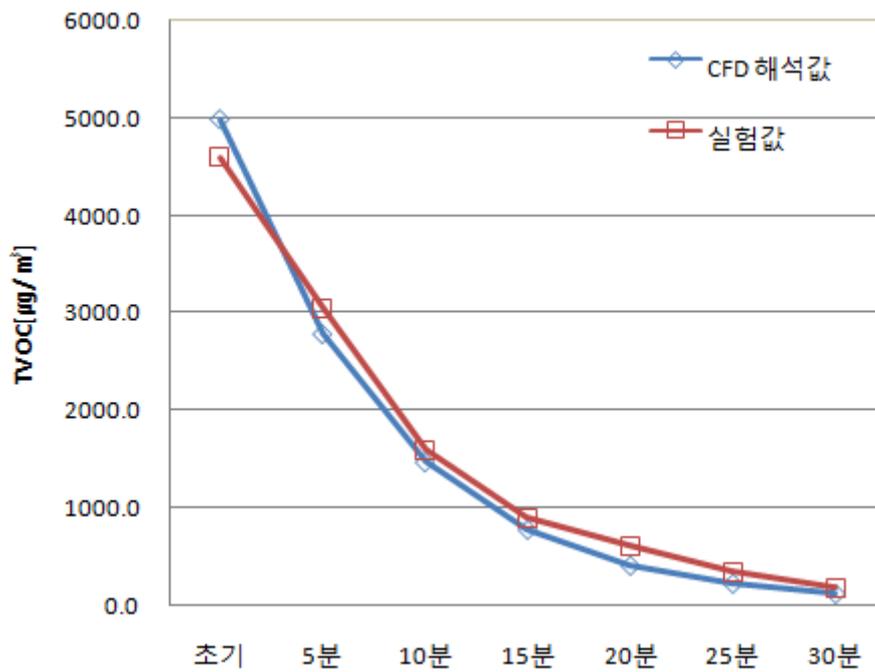


그림 4.3.3 실험값과 CFD 해석값의 TVOC 농도 비교(복도측 2층 침대 하층)

4.4 선박용 급기구와 건물용 급기구 형상에 대한 공기연령 해석

현재 주로 사용되고 있는 선박용 급기구에서 발생하는 국소지역에 대한 공기환경의 불균형을 해소하고, 선실전체에 신선한 급기를 선실에 공급하기 위해 건물용 급기구를 선박용 급기구로서 사용 가능성에 대해 국소평균공기연령으로 검토하였다. 실험을 수행하였던 CASE #1의 선실 및 급기구를 그림 4.4.1과 4.4.2와 같이 형상화하고 격자를 생성하였으며, CASE #2,#3도 마찬가지로 동일한 방법으로 격자를 생성하였다. 해석한 한바다호의 급기구 그리고 건물용 급기구의 총 격자는 그림 4.4.1처럼 약 50~60만개이고, 그림 4.4.2와 같이 급기구와 배기구 주변은 조밀하게 격자를 구성하고 나머지 부분은 정기계 GAMBIT 2.3.16을 이용하여 격자를 구성하였다. 급기구의 형상은 그림 4.4.3과 나타내었고, 급기 풍량은 200CMH, 급기 온도는 27℃이고, 벽면은 단열상태로 해석하였다.

3차원 해석의 내부 국소평균공기연령을 알아보기 위해 그림 4.4.4처럼 3개의 단면으로 표현하여 나타내었고, 그림 4.4.5~4.4.7과 같이 국소평균공기연령이 계산되었다. 최대 국소평균공기연령은 CASE #1이 약 860s이고, CASE #2는 약 960s, CASE #3은 약 870s로 나타났다. 그리고 선실전체에 대한 평균공기연령은 CASE #1은 445s, CASE #2는 463s, CASE #3은 513s로 나타났다. 최대 국소평균공기연령과 평균공기연령을 볼 때, 기존 한바다호의 선박용 급기구인 CASE #1이 공기연령이 가장 낮게 나타났다. 그리고 그림 4.4.5~4.4.7에서 볼 수 있듯이 CASE #2는 공기연령이 급구에 멀어질수록 매우 높은 공기연령을 보였고, 평균공기연령과 최대 국소평균공기연령이 가장 높게 나타났다. 그리고 CASE #3의 경우는 신선공기의 흐름이 바닥방향으로 집중되어 2층 침대 상층의 국소평균공기연령이 높게 나타나고 있다. 또한 CASE #3의 경우는 복도측과 창측의 2층 침대 부근의 국소평균공기연령이 확연히 다르게 나타나고 있다. 이는 창측의 2층 침대가 복도측의 2층 침대보다 급기구와 가까운 위치에 있는 영향으로 보여지며, 급기구 위치 선정의 중

요성을 보여주고 있다. CASE #1의 경우는 2층 침대 상층의 국소평균공기연령은 CASE #2, #3보다 낮게 나타났으나, 하층의 국소평균공기연령은 상층보다 약 2배 높게 나타나, 상·하층간의 국소평균공기연령의 불균형이 존재하고 있음을 확인하였다.

CASE #1~#3 모든 급기구에서의 국소평균공기연령은 복도측 2층 침대 하층이 가장 높게 계산되었다. 이는 그림 4.4.8~4.4.10에서 나타나는 신선공기의 입자 궤적(path line)을 보면 CASE #1,#2,#3 모두 2층 침대의 아래층으로는 신선공기가 원활히 전달되지 못하고 있다는 것을 보여주고 있으며, 급기구 형상이 공간의 공기흐름에 큰 영향이 미칠 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그림 4.4.11은 최대 국소평균공기연령과 실평균공기연령을 정리하여 나타낸 것이고, 이 두가지의 기준으로 보았을 때, CASE #1의 급기구 형상이 가장 우수하며, 그 다음 CASE #3, CASE #2 순서인 것으로 나타났다.

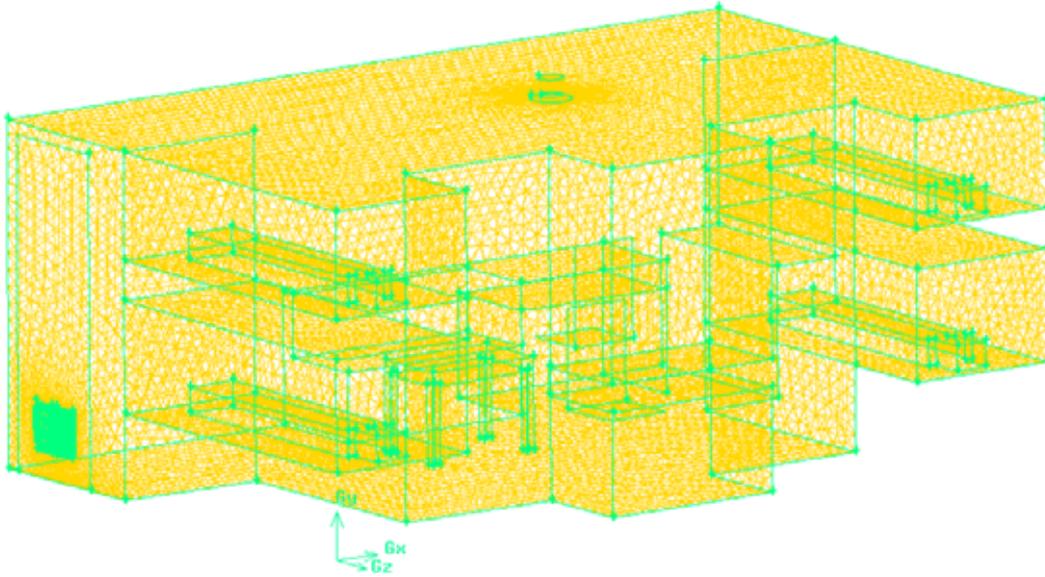


그림 4.4.1 선실의 격자형태

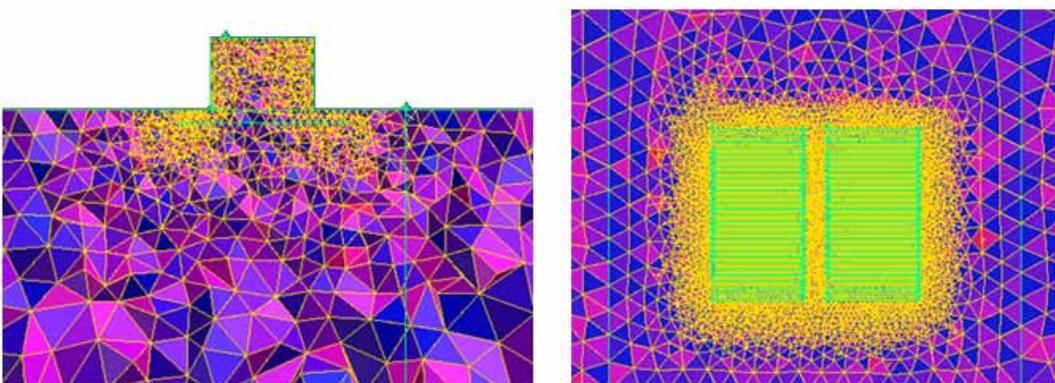


그림 4.4.2 급기구와 배기구 주변의 격자

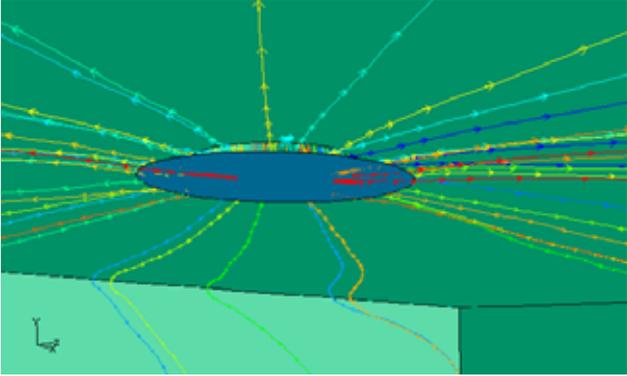
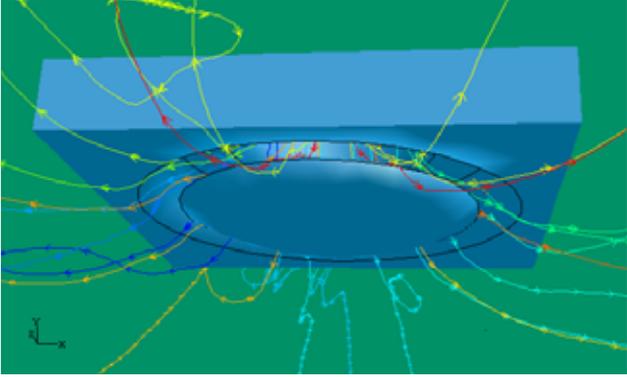
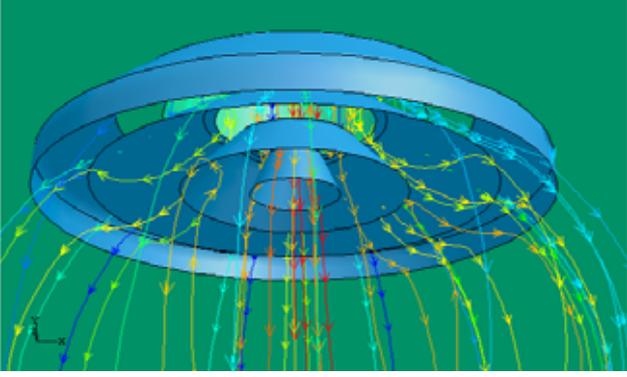
<p>CASE #1</p>	 <p>A streamline plot showing flow around a flat plate. The flow is represented by colored lines (red, yellow, green, blue) with arrows indicating direction. The flow is symmetric about the horizontal axis and passes smoothly over the top and under the bottom of the plate. A small coordinate system is visible in the bottom-left corner.</p>
<p>CASE #2</p>	 <p>A streamline plot showing flow around a curved airfoil. The flow lines are colored and have arrows. The flow is deflected downwards and backwards behind the airfoil, indicating a pressure recovery. A small coordinate system is visible in the bottom-left corner.</p>
<p>CASE #3</p>	 <p>A streamline plot showing flow around a complex, multi-layered structure. The flow lines are colored and have arrows. The flow is highly complex, with many recirculation zones and vortices. A small coordinate system is visible in the bottom-left corner.</p>

그림 4.4.3 급기구 형상

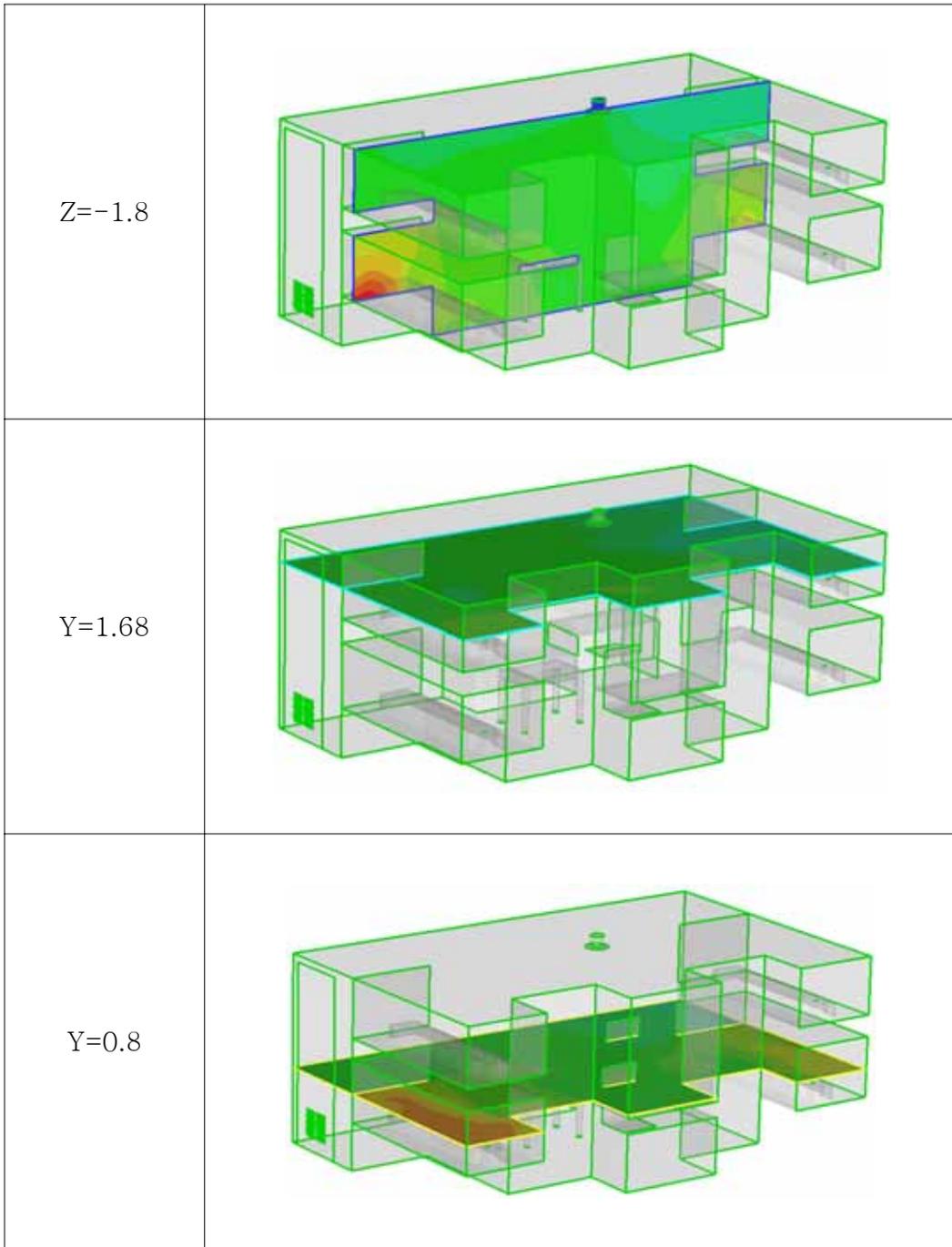


그림 4.4.4 공기연령을 보여주기 위한 특정 면

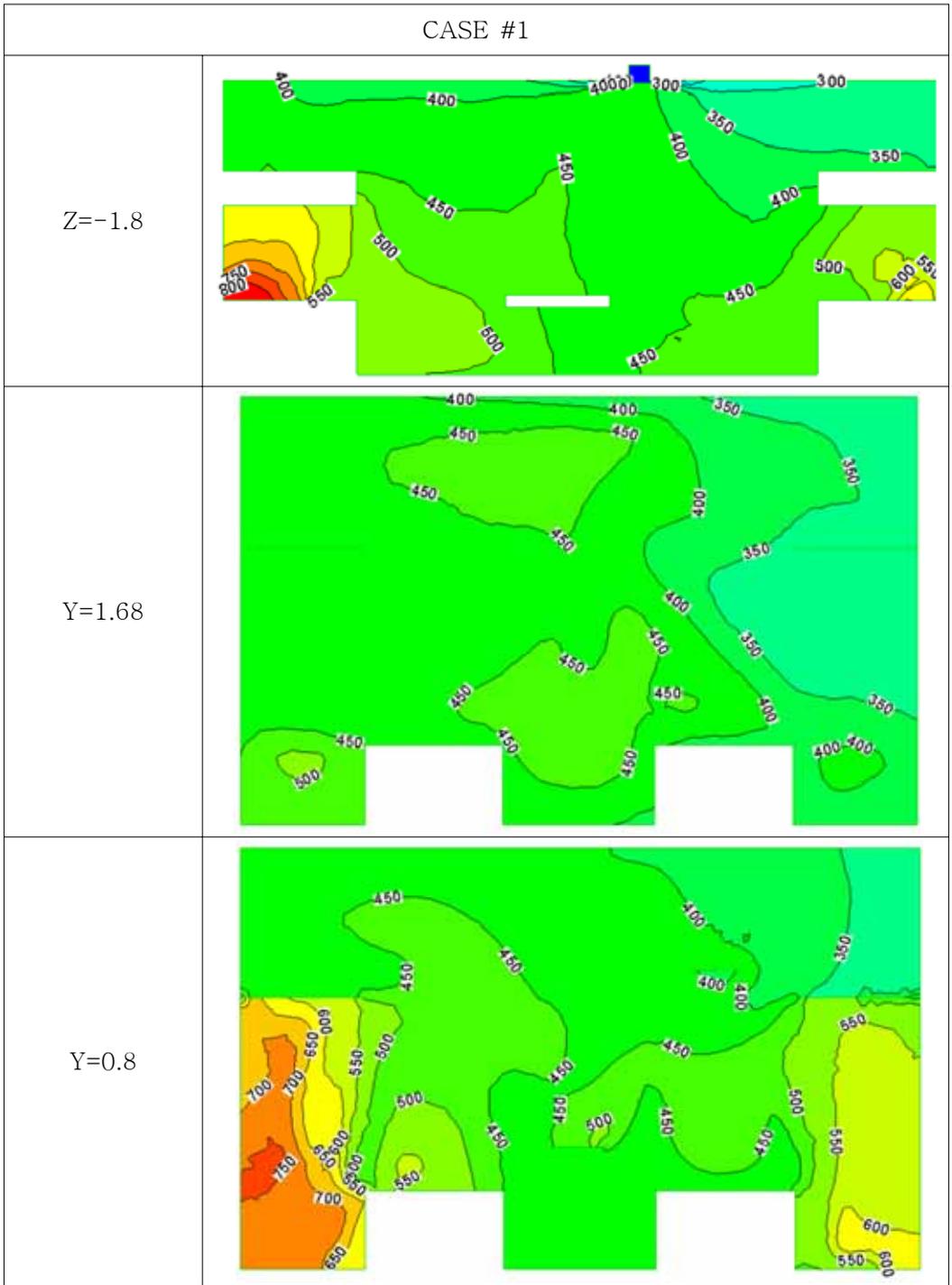


그림 4.4.5 CASE #1의 국소평균공기연령

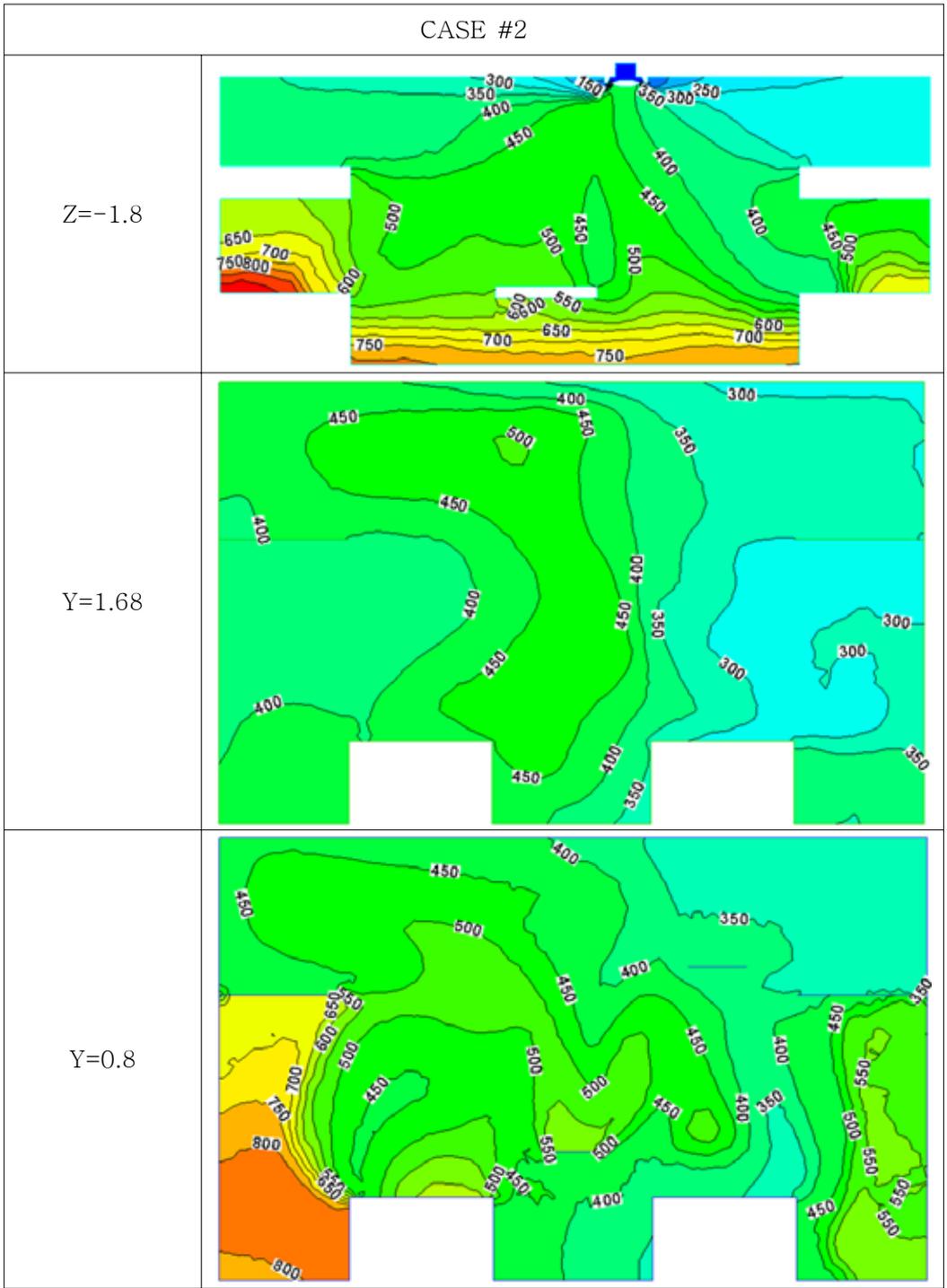


그림 4.4.6 CASE #2의 국소평균공기연령

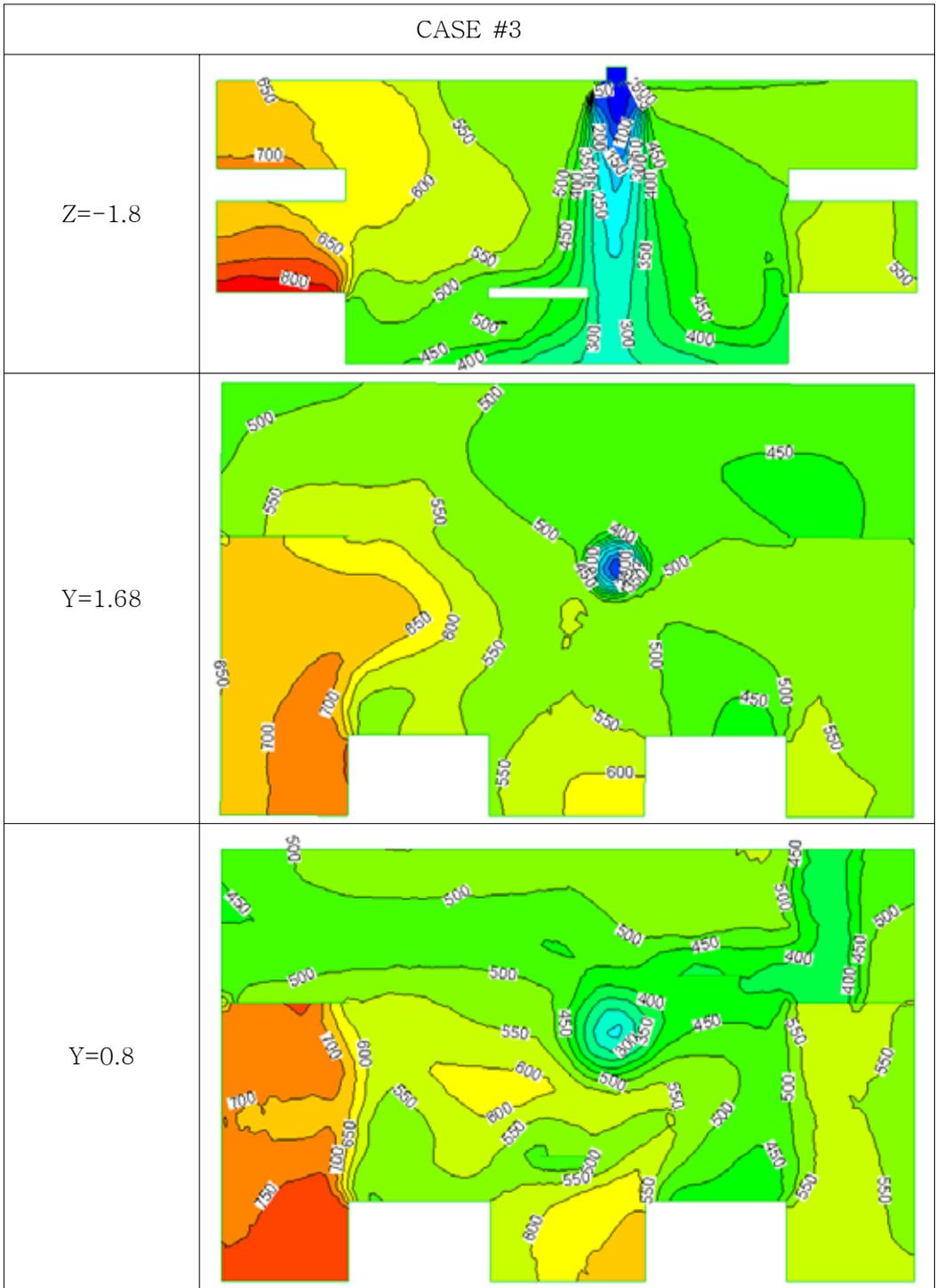


그림 4.4.7 CASE #3의 국소평균공기연령

CASE #1

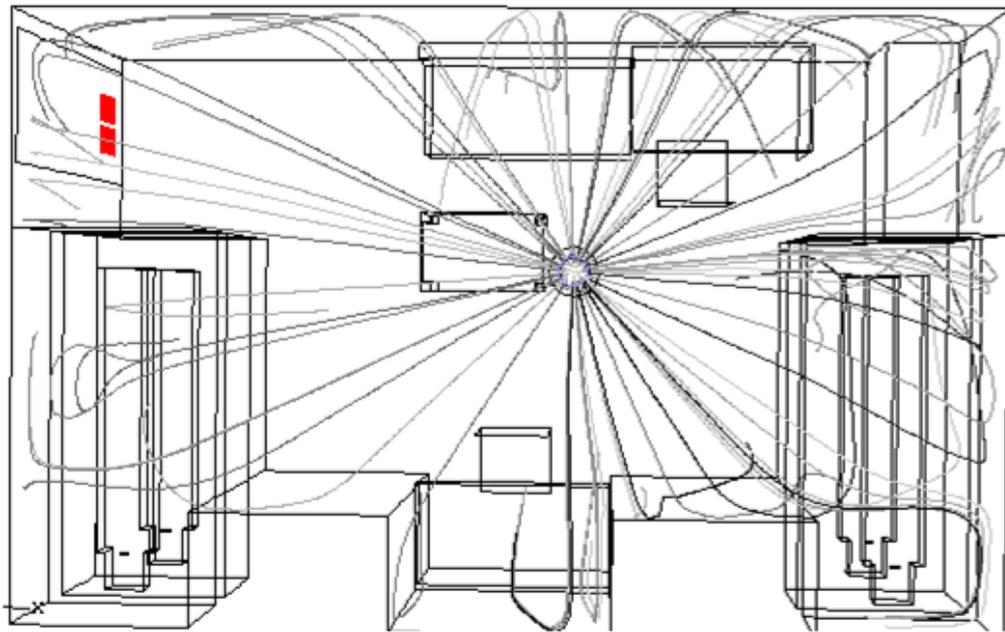
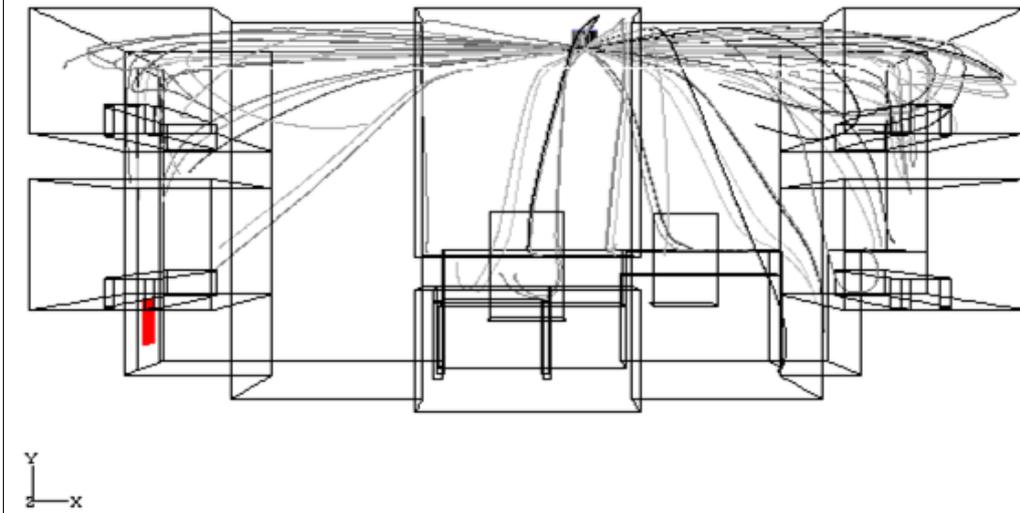


그림 4.4.8 CASE #1, 급기되는 신선공기 입자 궤적

CASE #2

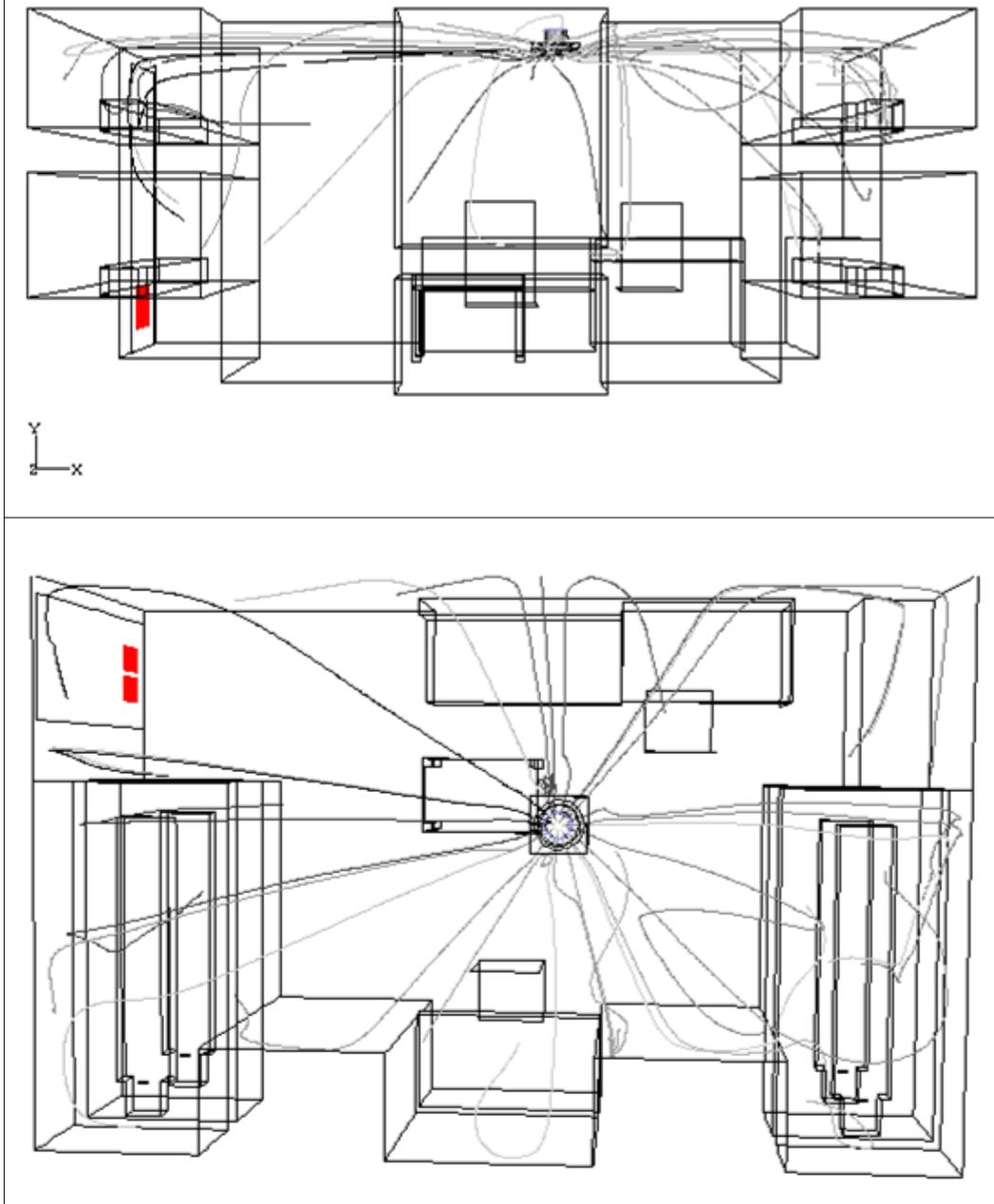


그림 4.4.9 CASE #2, 급기되는 신선공기 입자 궤적

CASE #3

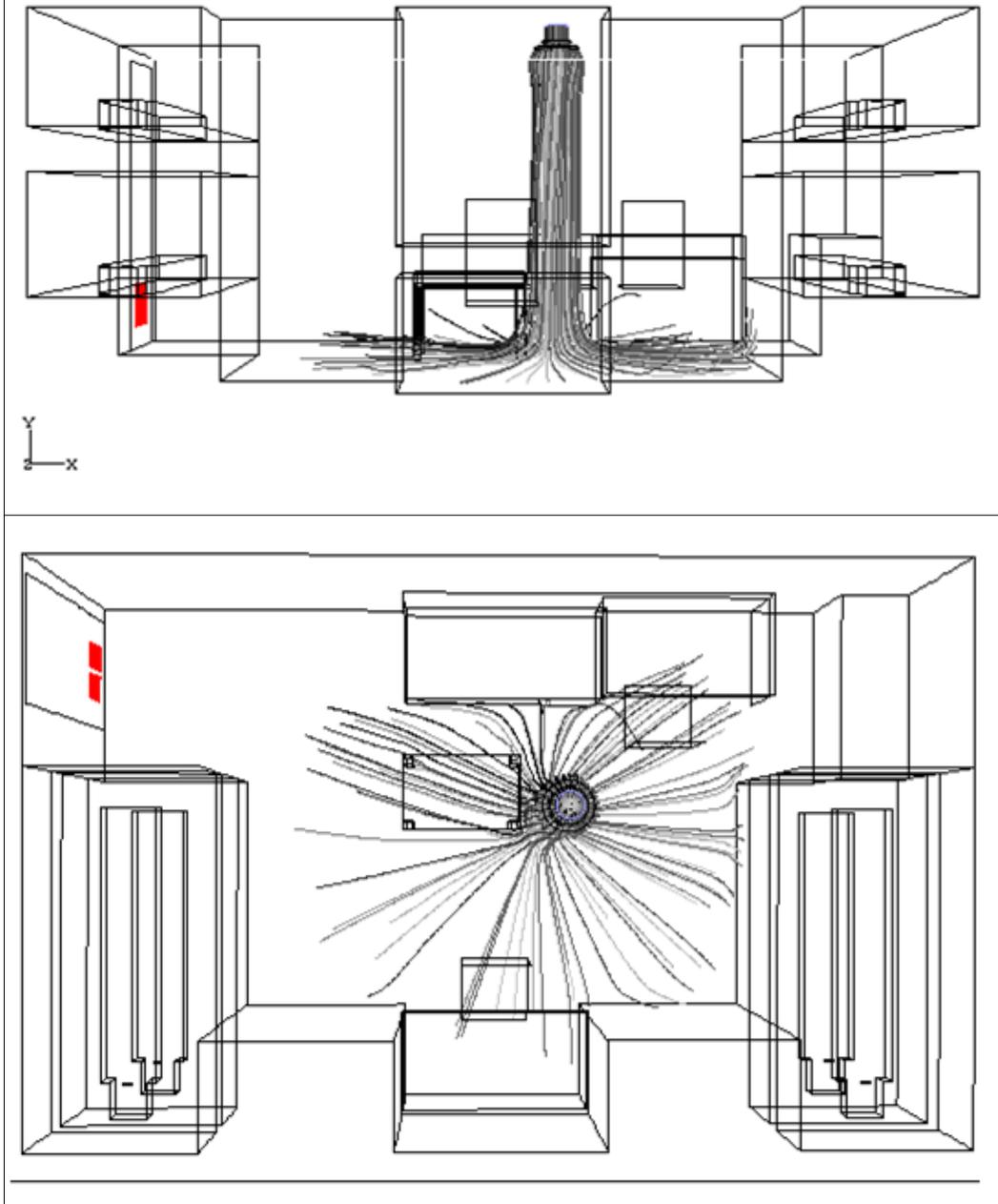


그림 4.4.10 CASE #3, 급기되는 신선공기 입자 궤적

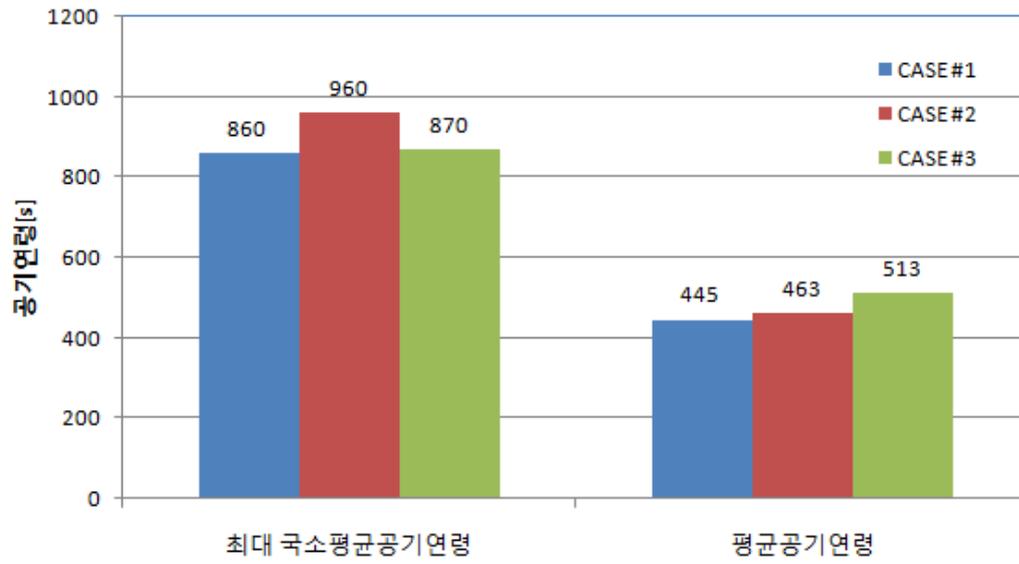


그림 4.4.11 CASE #1, #2, #3의 공기연령 비교

4.5 공기유동형태에 대한 2차원 해석

2차원 해석의 의미는 3차원으로 해석하기에는 시간적으로 너무 많이 소모되고, 3차원 실내 공간의 공기유동은 2차원 보다 복잡한 형태의 유동을 가지기 때문에 공기의 유동을 파악하는데 있다. 따라서 3차원의 공기유동을 이해하기 이전에 2차원으로 급기구 형상에 대한 대략적인 공기연령 분포와 공기의 흐름(Streamline)을 이해할 필요가 있다.

그림 4.5.1에서와 같이 배기구의 위치는 좌측하부에 위치하게 하고, 급기구의 위치는 상부 중앙에 위치하게 하였다. 상부 중앙에 위치한 급기구에서 공기가 토출되는 방향에 따라 4개의 CASE #A, #B, #C, #D에 관하여 해석하고 비교하고자 한다. CASE #A는 급기의 토출 방향을 제어해주는 베인(vane)이 없는 경우, CASE #B는 한바다호 선실처럼 좌우방향으로 분산되는 경우, CASE #C는 급기의 방향을 배기구로 향하게 하였다. 그리고 CASE #D는 급기의 방향을 배기구의 반대방향인 경우이다.

그림 4.5.2~5에서와 같이 2차원 해석결과에 의하면 급기의 토출방향이 배기구와 반대방향인 경우가 가장 국소평균공기연령이 낮게 나타난 것을 알 수 있다. 국소평균공기연령이 가장 높게 나타난 것은 vane이 없는 CASE #A이고, CASE #C, CASE #B, CASE #D 순서로 국소평균공기연령이 낮게 나타났다. 국소평균공기연령의 평균값인 평균공기연령은 CASE #A는 26s로 가장 높게 나타났으며, CASE #C는 20.8s, CASE #B는 19.1s, 그리고 CASE #D는 17.2s로 나타나 CASE #D가 가장 낮은 평균공기연령을 보였다.

국소평균공기연령과 유선(streamline)을 보면 와류영역에서 국소평균공기연령이 높다. 그리고 급기 토출방향이 배기구로 향하면 급기가 공간에 머물거나 고르게 분포되기 전에 배기구로 쉽게 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

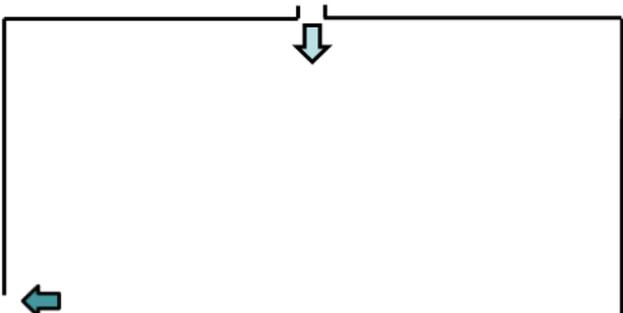
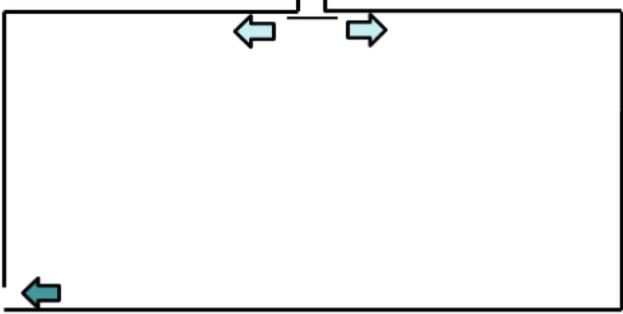
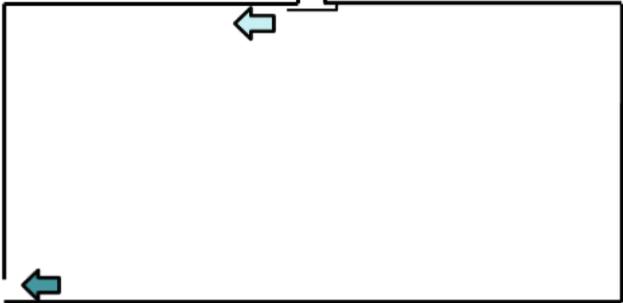
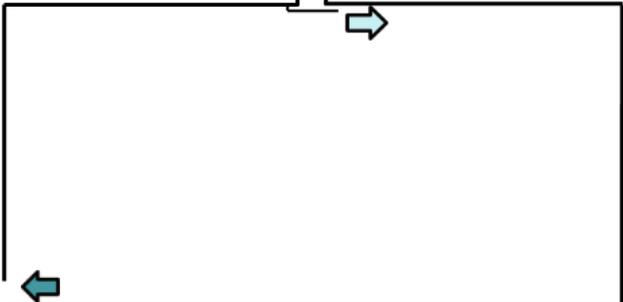
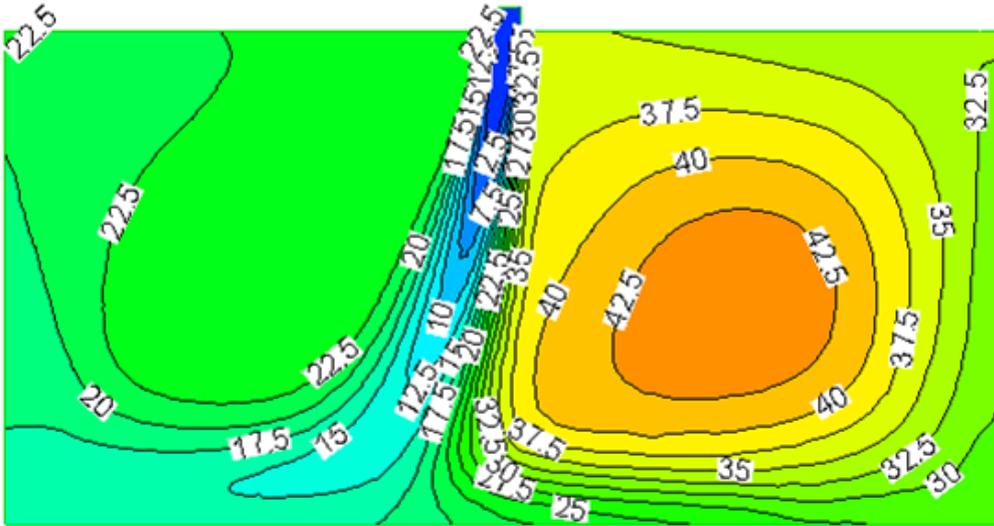
CASE #A	
CASE #B	
CASE #C	
CASE #E	

그림 4.5.1 2차원 공기유동을 확인하기 위한 예

국소평균공기연령



Streamline

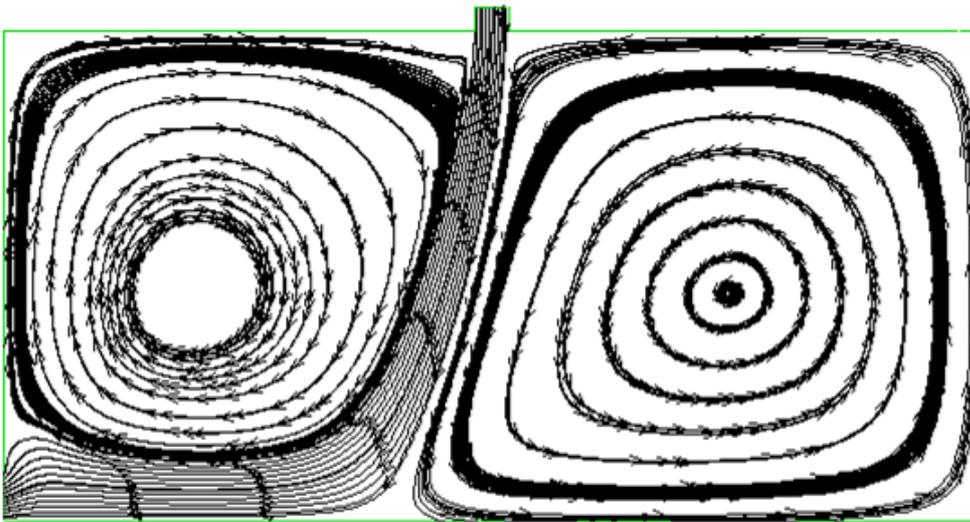
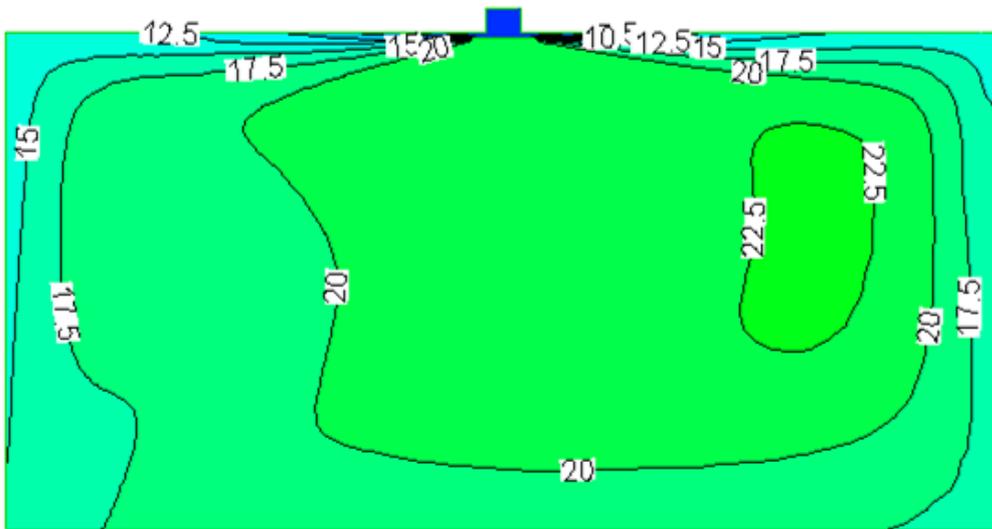


그림 4.5.2 CASE #A의 국소평균공기연령과 streamline

국소평균공기연령



Streamline

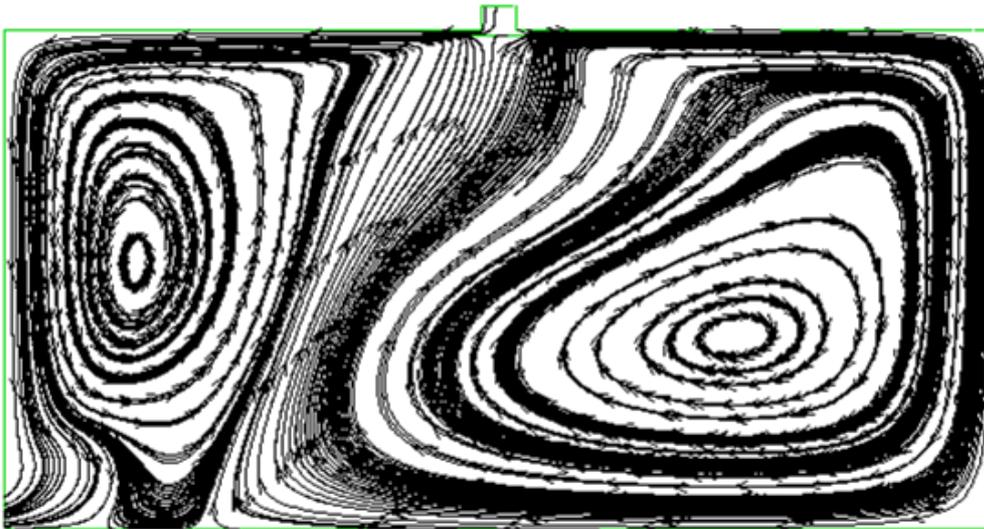


그림 4.5.3 CASE #B의 국소평균공기연령과 streamline

국소평균공기연령



Streamline

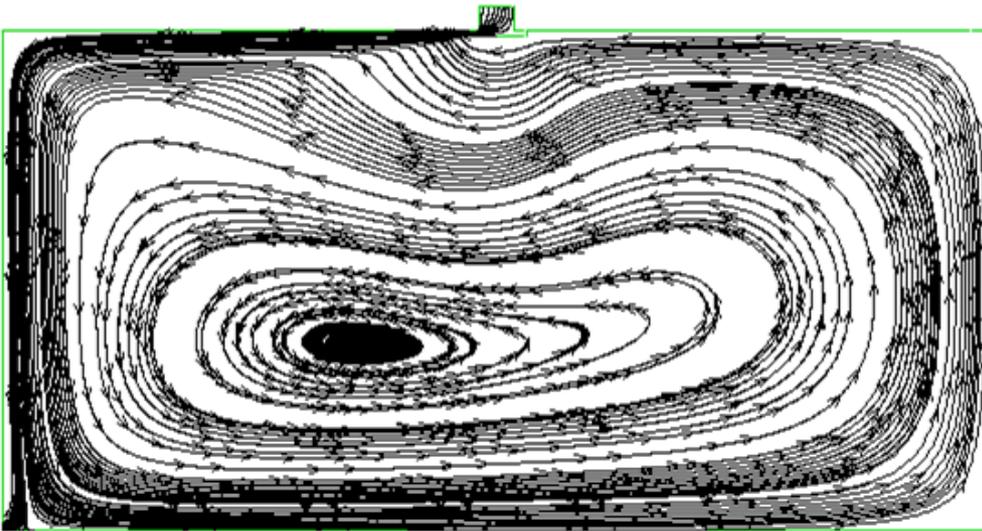
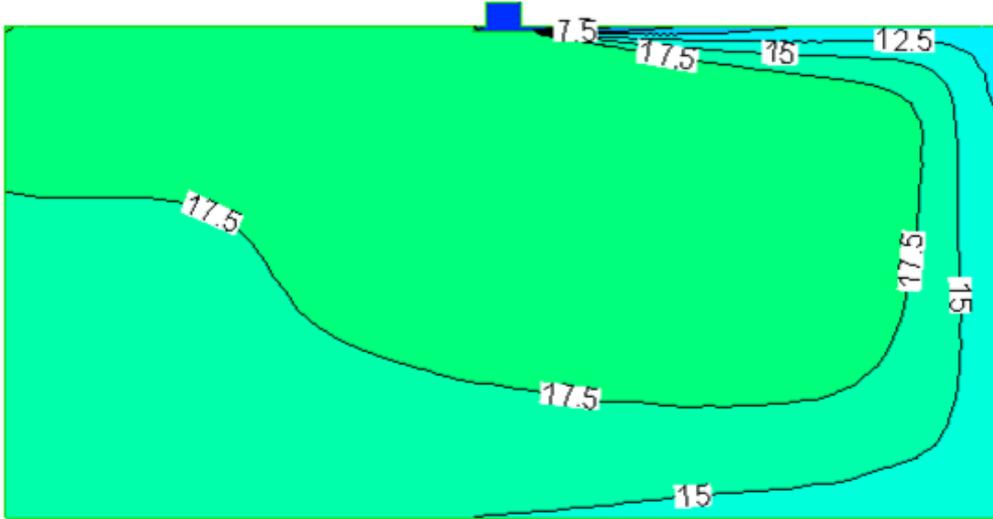


그림 4.5.4 CASE #C의 국소평균공기연령과 streamline

국소평균공기연령



Streamline



그림 4.5.5 CASE #D의 국소평균공기연령과 streamline

4.6 급기구 형상 개발을 위한 CFD 해석

4.5절에서 2차원으로 공기유동형태를 파악함으로써 급기구의 토출각도가 배기구와 반대방향으로 향할 때 국소평균공기연령이 가장 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 기존 선박용 급기구에 간단한 구조물을 삽입하여 토출 방향을 변화시키고 국소평균공기연령과 TVOC와 CO₂를 제거할 수 있는 능력을 상호 비교하여 새로운 급기구를 제안한다.

그림 4.6.1은 선실에서 가구와 같은 구조물이 국소평균공기연령에 미치는 영향을 살펴보기 위해 구조물을 모두 없애고 국소평균공기연령을 해석하였다. 국소평균공기연령은 4.5절에서 2차원으로 해석한 결과와 유사한 분포를 그림 4.6.2와 같이 나타냈다. 그림 4.4.4에서 구조물이 포함된 국소평균공기연령과 비교하면 구조물이 신선공기를 원활히 전달하지 못하도록 방해하는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 즉, 구조물의 위치에 따라 공기환경이 달라질 수 있음을 짐작케 하는 것이다.

본 연구에 앞서 구조물의 위치선정에 따라 변화하는 공기환경의 중요성을 선행연구⁽¹³⁾에서도 확인하였다. 그러나 선실에 구조물이 없을 수는 없으며, 실내디자인 측면에서 미적 환경과 사용의 편리성이 고려되어야 하기 때문에 선실의 구조물 위치선정에 공기환경만을 고려할 순 없다. 따라서 우선 이러한 구조적 문제는 인식하되 본 연구에서는 급기구 형상에 대한 접근으로 공기환경을 개선하고자 하는 것이다.

그림 4.6.3에서 신선공기가 배기구로 바로 빠져나가는 쉬운 영역[A]으로 신선공기가 향하도록 하지 않고, 배기구의 위치와 반대방향으로 신선공기를 그림 4.6.4와 같이 급기가 흐르도록 급기구를 변형하는 것이다. 급기구의 형상을 CASE #4로 표기하고, 급기구의 형상은 그림 4.6.5와 같이 기존의 급기구 베인에서 작은 가이드 베인을 삽입한 것이다.

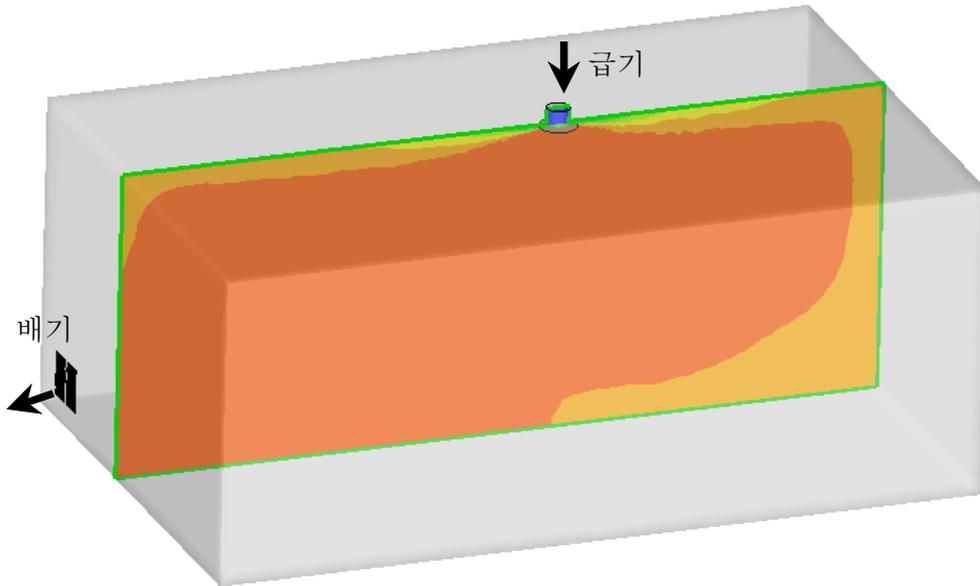


그림 4.6.1 구조물이 없는 선실



그림 4.6.2 구조물 없는 선실의 국소평균공기연령($Z=-1.8$)

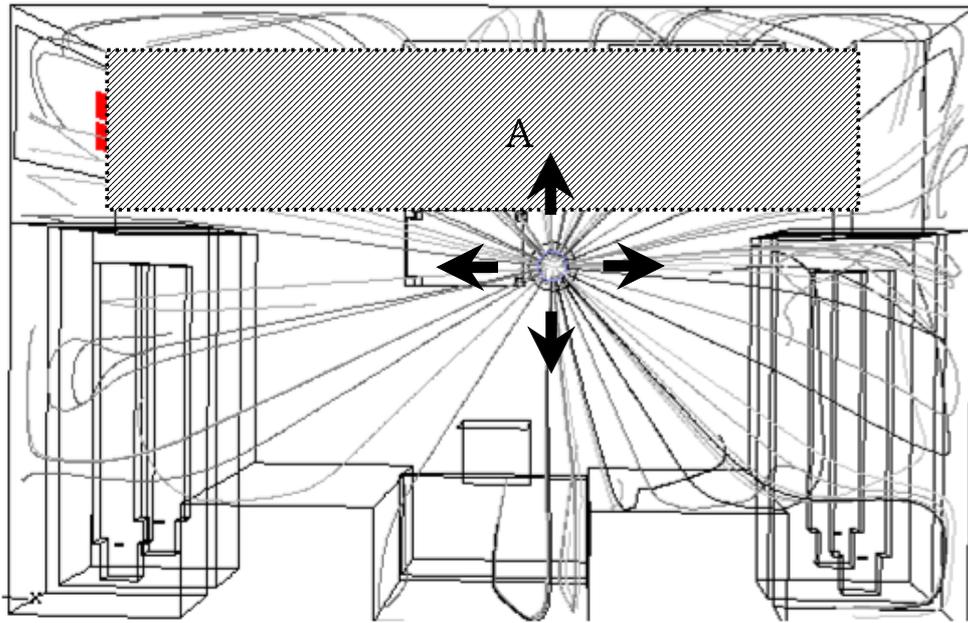


그림 4.6.3 CASE #1에서 급기되는 신선공기의 흐름

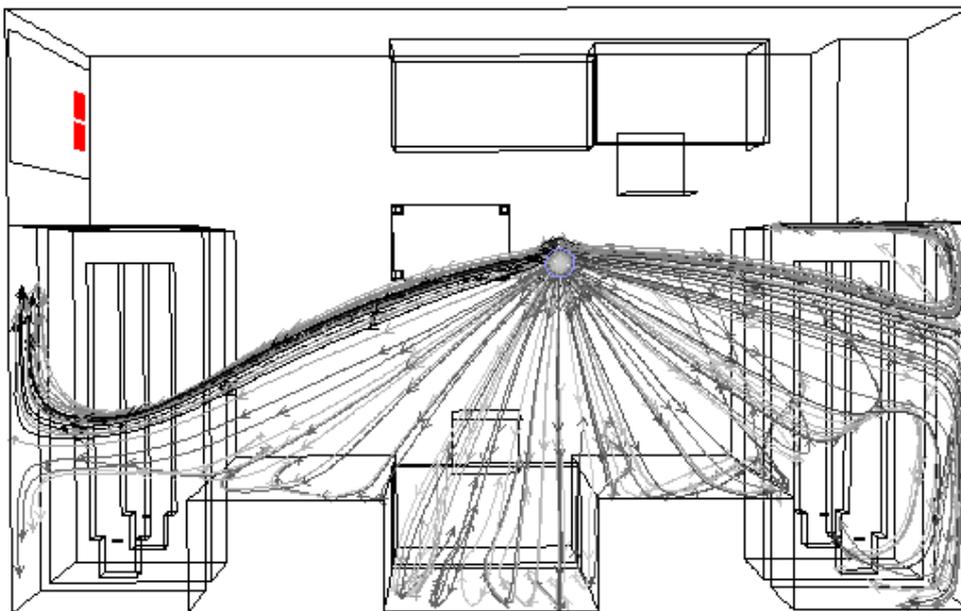


그림 4.6.4 CASE #4에서 급기되는 신선공기의 흐름

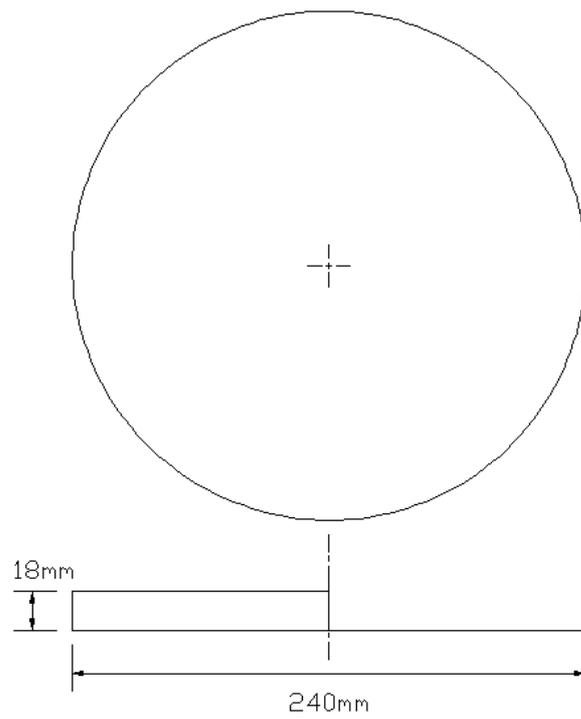
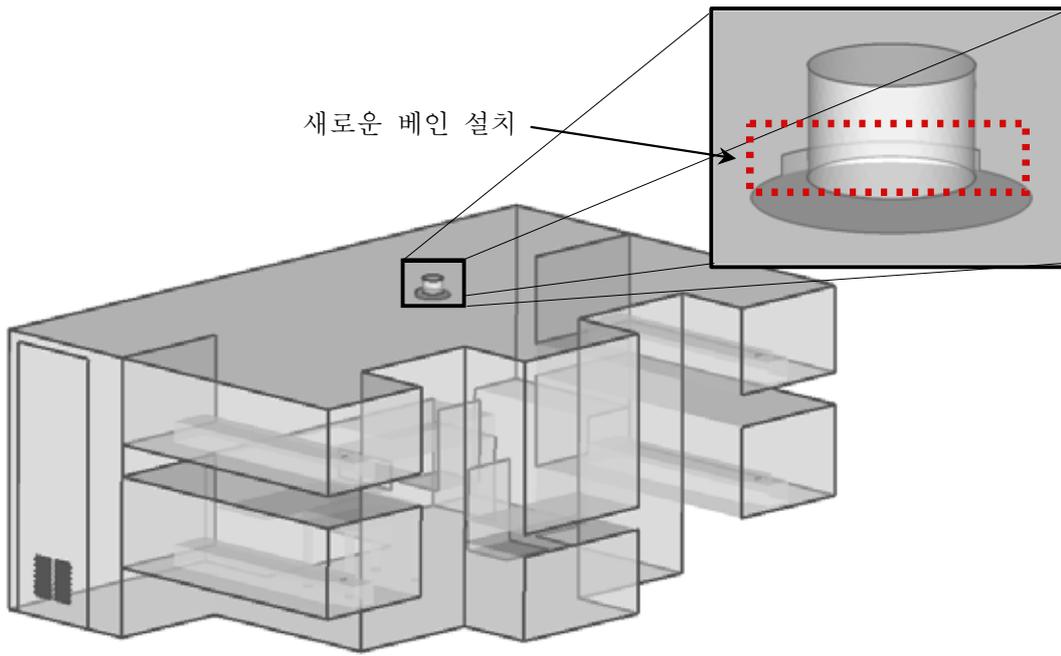


그림 4.6.5 급기구 형상(CASE #4)

공기연령에 대한 CASE #1과 CASE #4를 그림 4.6.6과 같이 비교하였다. 실평균공기연령은 CASE #1에서 445s, CASE #4에서는 396s로 나타나, 실평균공기연령은 기존 급기구 보다 약 10% 개선되었다. 최대 국소평균공기연령은 CASE #1에서 860s, CASE #4에서는 720s로 나타나, 최대 국소평균공기연령은 기존 급기구인 CASE #1보다 약 16% 낮게 계산되었다.

그림 4.6.7~9는 국소평균공기연령을 나타낸 것으로, CASE #1과 #4를 비교하면 상대적으로 거의 모든 국소지역에서 CASE #4의 국소평균공기연령이 낮게 나타나고 있다. CASE #4의 경우, 2층 침대 부근의 국소평균공기연령도 약 100~200s 정도 낮게 계산되었다. 뿐만 아니라 그림 4.6.7에서 CASE #1에서 생긴 상·하간의 국소평균공기연령 불균형이 CASE #4의 경우 다소 개선되었음을 확인할 수 있다.

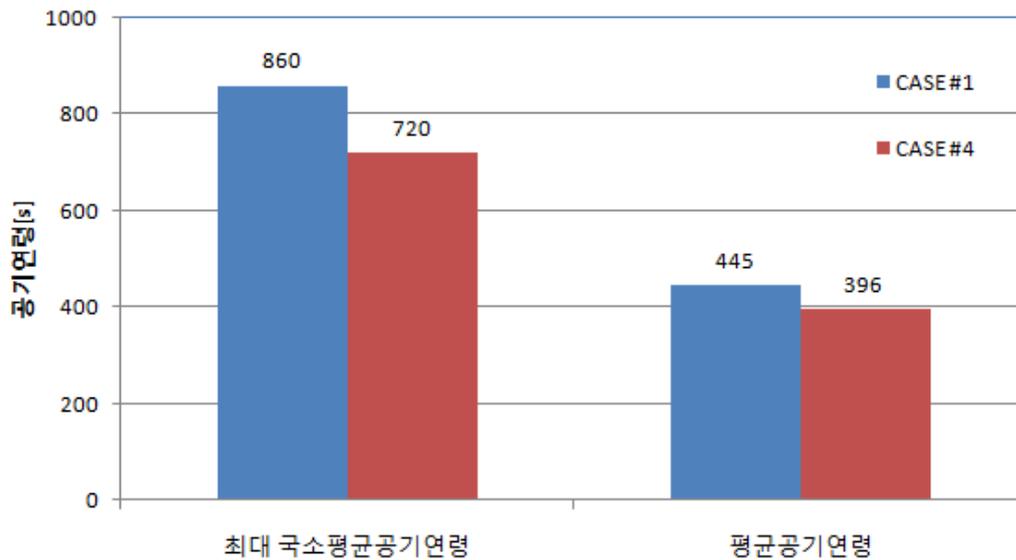


그림 4.6.6 CASE #1과 CASE #4의 공기연령 비교

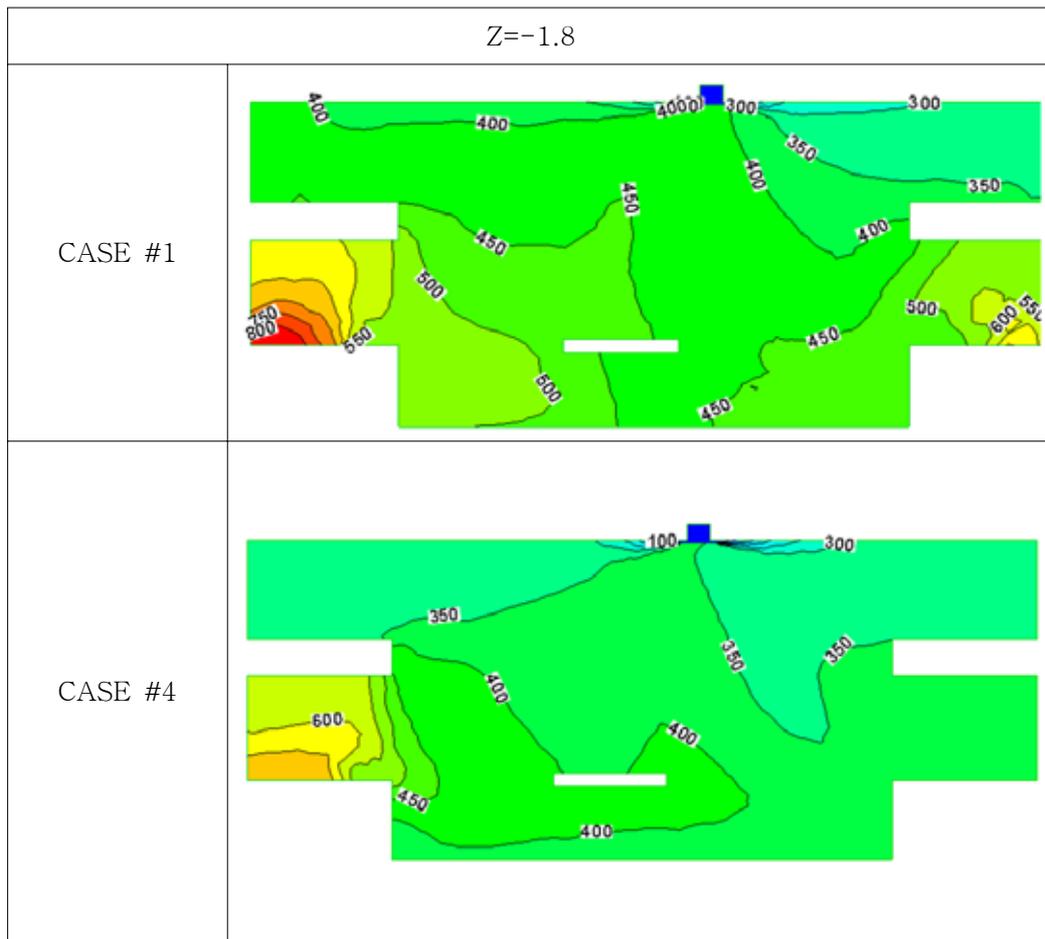


그림 4.6.7 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교

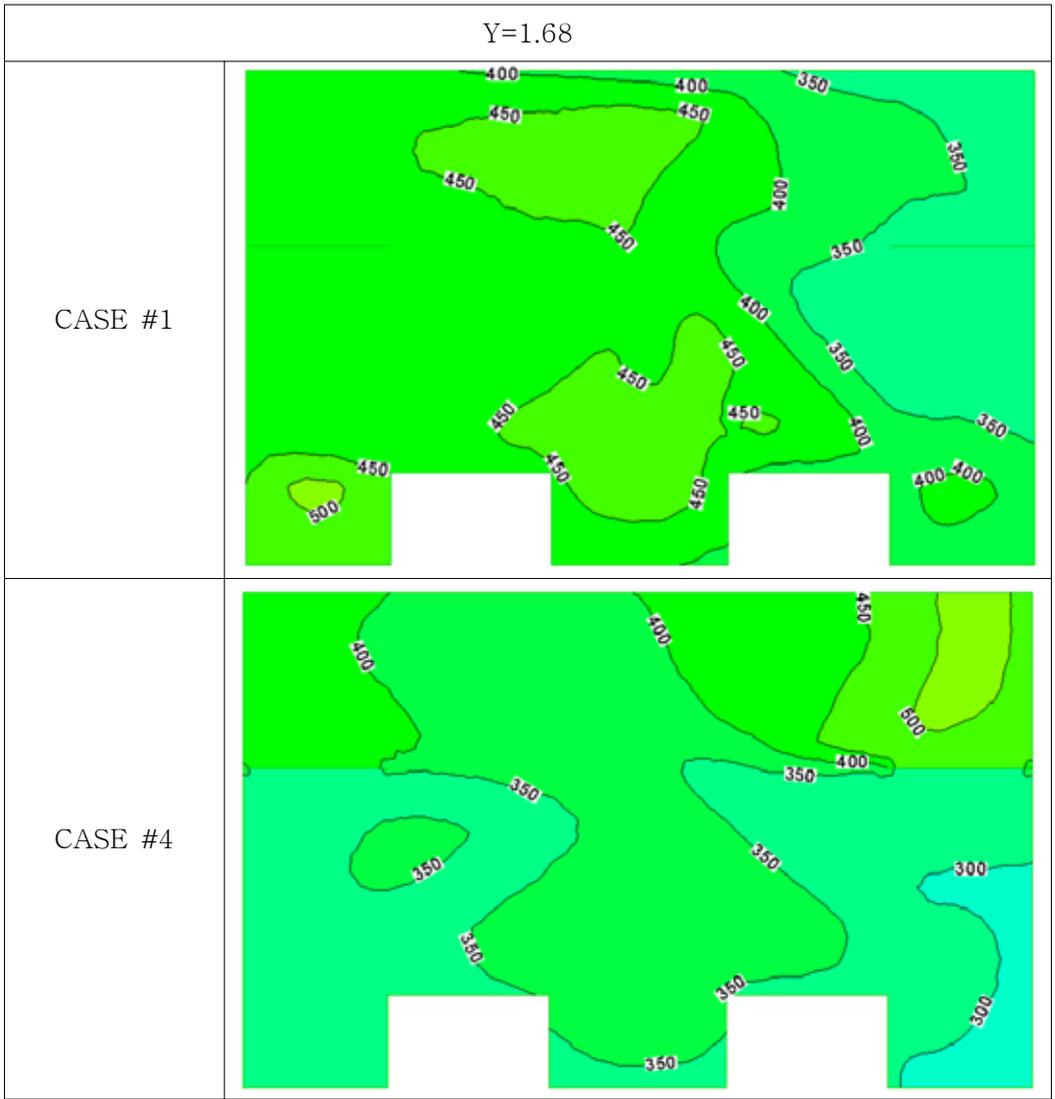


그림 4.6.8 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교

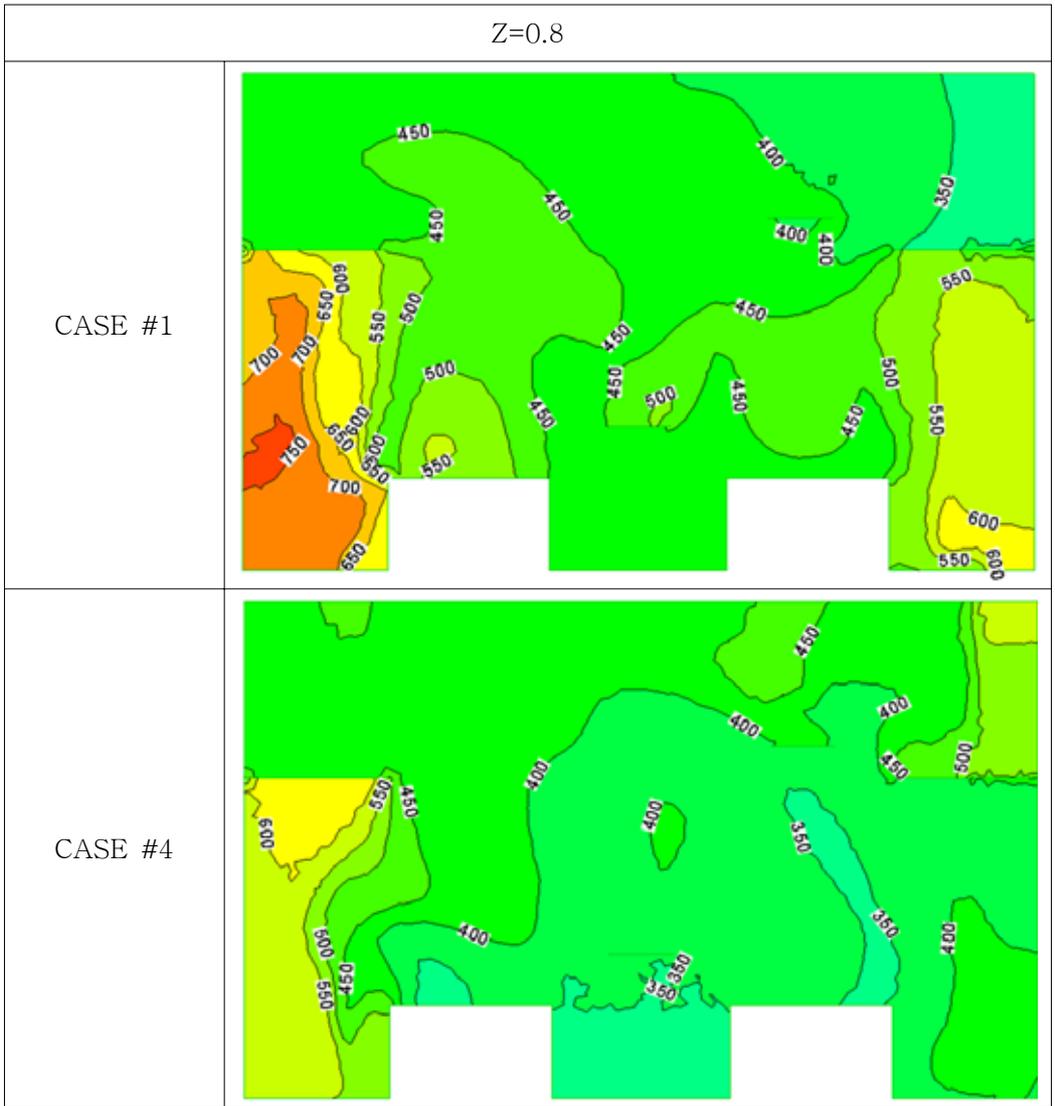


그림 4.6.9 CASE #1과 CASE #4의 국소평균공기연령 비교

4.6.1 실내 TVOC 제거성능 해석

CFD 해석의 타당성을 검토하기 위해 CASE #1에 대해서는 실험값과 CFD 해석값을 비교하여 실험값과 CFD 해석값이 거의 일치함을 보여주었다. 4.6절에서는 CASE 1#과 CASE #4의 공기연령을 차이를 비교하여 CASE #4가 상대적으로 공기연령이 낮아, 오염물질 제거에 대한 성능 또한 CASE #4가 뛰어날 것으로 예측할 수 있다. 4.6.1절에서는 이러한 예측을 확인하기 위하여 실내공간에 오염물질의 초기 농도를 $5000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고르게 분포시키고, 신선공기가 급기 되었을 때를 비정상상태로 해석하여 CASE #1과 CASE #4를 비교하였다.

그림 4.6.1.1은 CASE #1인 경우, 신선공기가 급기 되고 30분이 경과되었을 때, TVOC 농도를 나타내고 있다. 그림 4.6.1.2는 CASE #4인 경우 TVOC 농도를 나타내고 있다. 공기연령이 CASE #1보다 CASE #4가 낮은 것과 마찬가지로 CASE #4는 2층 침대 주변의 국소지역 뿐만 아니라 선실 전체에 대한 오염물질을 제거하는데 소요되는 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4.6.1.3은 그림 3.2.1.1에서 측정 포인트 5개를 평균하여 TVOC 농도를 나타낸 것으로서 CASE #4가 상대적으로 높은 기울기를 가지며 빠르게 오염물질 농도가 낮게 되는 것을 확인할 수 있다.

초기 농도 $5000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 200CMH 실내공기질관리법의 기준치인 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 떨어지게 되는 시간은 CASE #1은 약 18분, CASE #4 16분으로 CASE #4의 오염물질 제거 속도가 빠름을 확인할 수 있다.

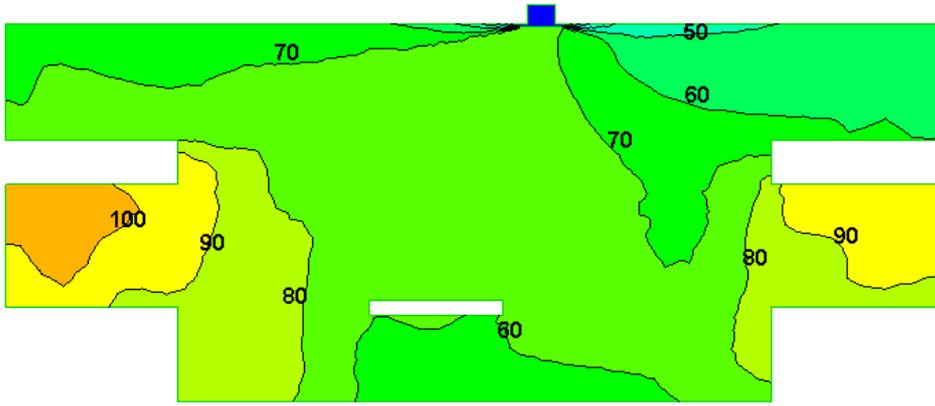


그림 4.6.1.1 CASE #1의 30분 후 TVOC 농도[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

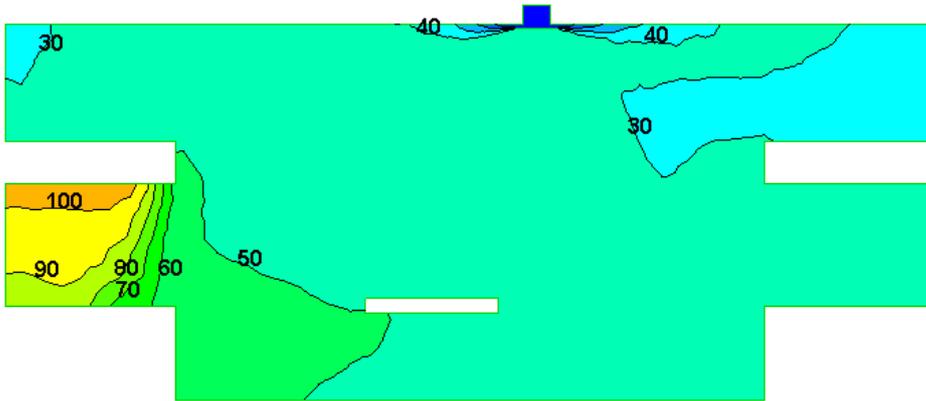


그림 4.6.1.2 CASE #4의 30분 후 TVOC 농도[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

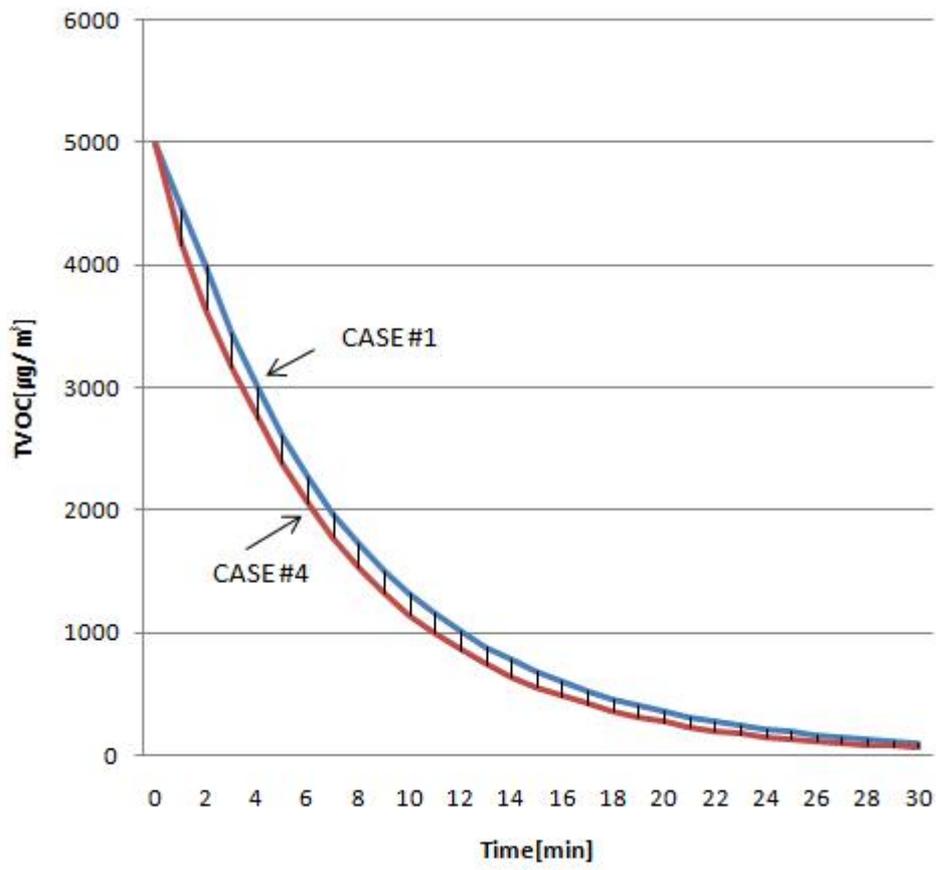


그림 4.6.1.3 TVOC 농도 비교(CASE #1,#4)

4.6.2 실내 이산화탄소 농도 해석

인체의 호흡으로 인한 이산화탄소 오염을 확인하고, CASE #1과 CASE #4의 이산화탄소 농도(ppm)를 비교하였다. 인체의 활동강도에 따른 이산화탄소 배출량은 표 <4.6.2.1>과 같다. 본 연구에서 인체가 취침 시 이산화탄소 배출량인 0.011CMH로 가정하여 총 4명이 생활하고 있으므로, 선실에서 배출되는 총 이산화탄소량은 0.044CMH이다. 공기의 조성은 체적비율로 질소 74%, 산소 21%, 이산화탄소 0.035% 그 외 아르곤(Ar), 헬륨(He) 등으로 구성되어있다. 본 연구에서는 질소(76%), 산소(21%), 이산화탄소(0.035%)만을 고려하여 농도를 해석하였다. 그리고 인체가 산소를 흡입하고 이산화탄소를 배출하는 것이지만, 산소를 흡입하는 과정을 생략하고 이산화탄소만을 배출시켜 30분간 비정상상태로 해석하였다.

측정 포인트는 그림 6.2.2.1과 같으며, Point-1은 선실의 중앙, Point-2~5는 침대의 중앙으로 측정 포인트를 설정하였고, CASE #1과 CASE #4에 대한 CFD 해석결과는 그림 4.6.2.2와 그림 4.6.2.3과 같다. 30분후 CASE #1의 경우 2층 침대 아래층의 이산화탄소 농도는 약 2500ppm(Point-4)과 2200ppm(Point-2)으로 실내공기관련 기준치인 1000ppm보다 약 2배 이상 높게 나타났다. 그리고 실내평균 이산화탄소 농도는 약 1100ppm으로 나타났다. CASE #4의 경우 2층 침대 아래층의 이산화탄소는 농도는 약 1650ppm(Point-4)과 1800ppm(Point-2)으로 나타났다. 이는 실내공기관련 기준치인 1000ppm보다 높으나 CASE #1 보다 각각 35%, 14% 이산화탄소 농도를 낮출 수 있음을 알 수 있다. 그리고 CASE #4의 실내평균 이산화탄소 농도는 800ppm으로 기준치 이하로 나타났을 뿐만 아니라 CASE 1#과 비교하였을 때 약 26%의 이산화탄소 농도를 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

표 4.6.2.1 인체의 활동강도에 따른 이산화탄소 배출량

동작의 강도	CO ₂ 배출량[CMH]	평균 CO ₂ 배출량[CMH]
취침 시	0.011	0.011
가벼운 동작	0.023~0.033	0.028
보통의 동작	0.033~0.0583	0.046
격렬한 동작	0.0583	0.069

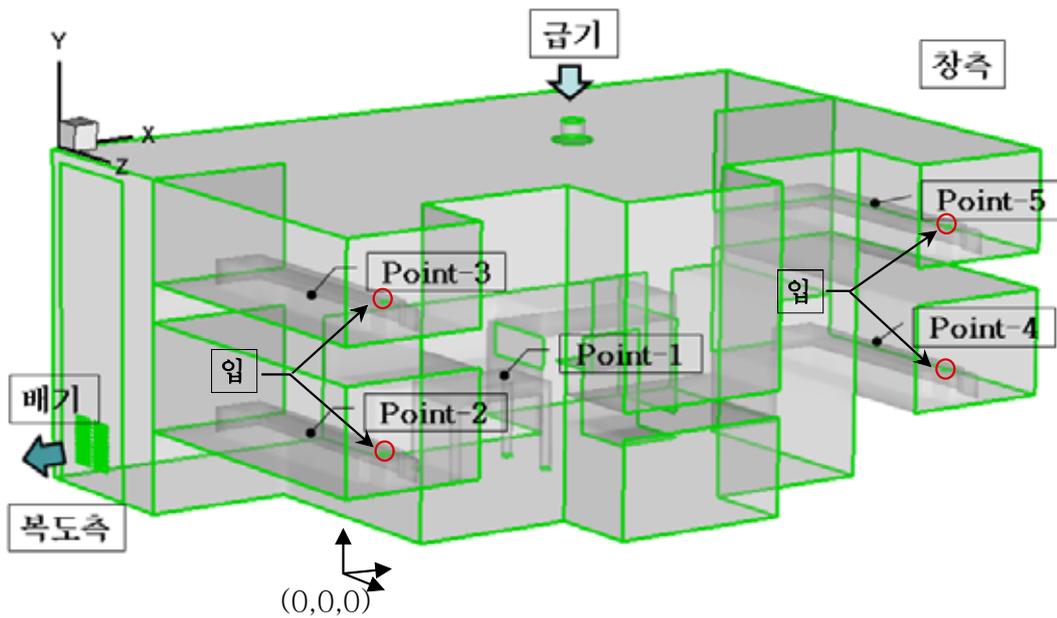


그림 4.6.2.1 측정 포인트

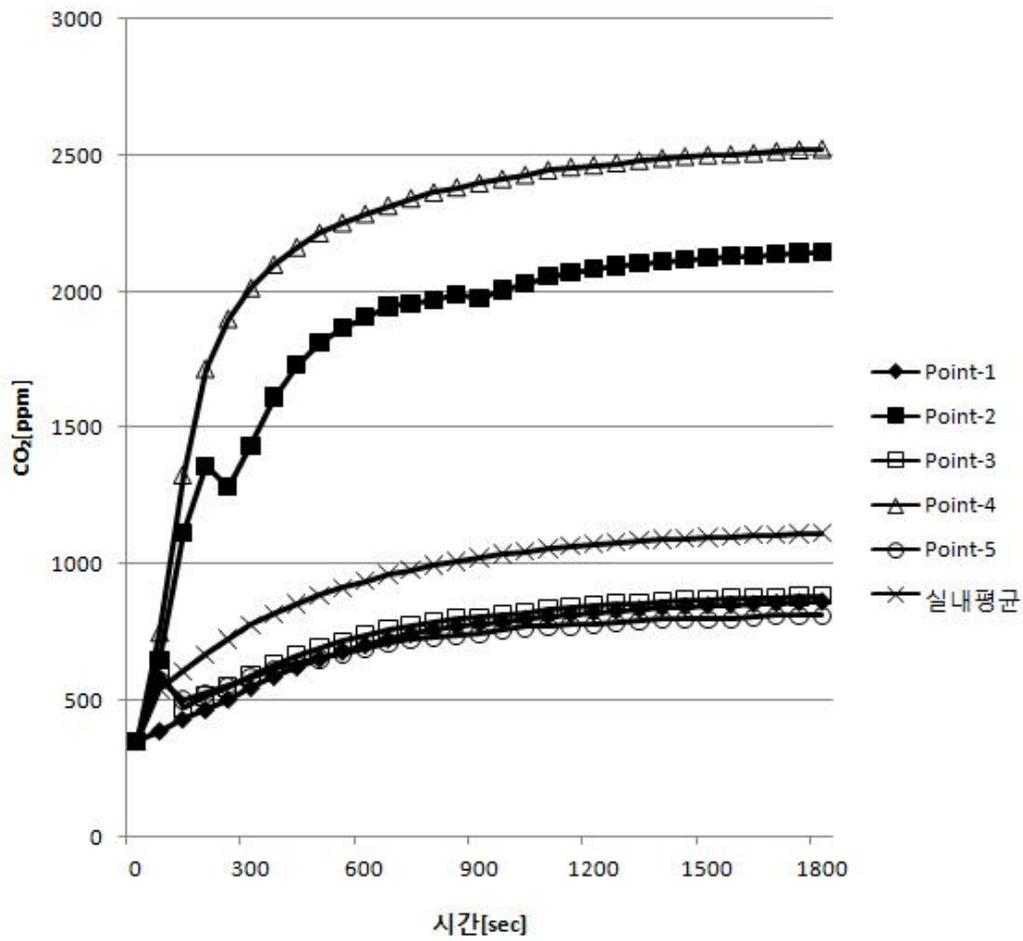


그림 4.6.2.2 CASE #1의 이산화탄소 농도 변화

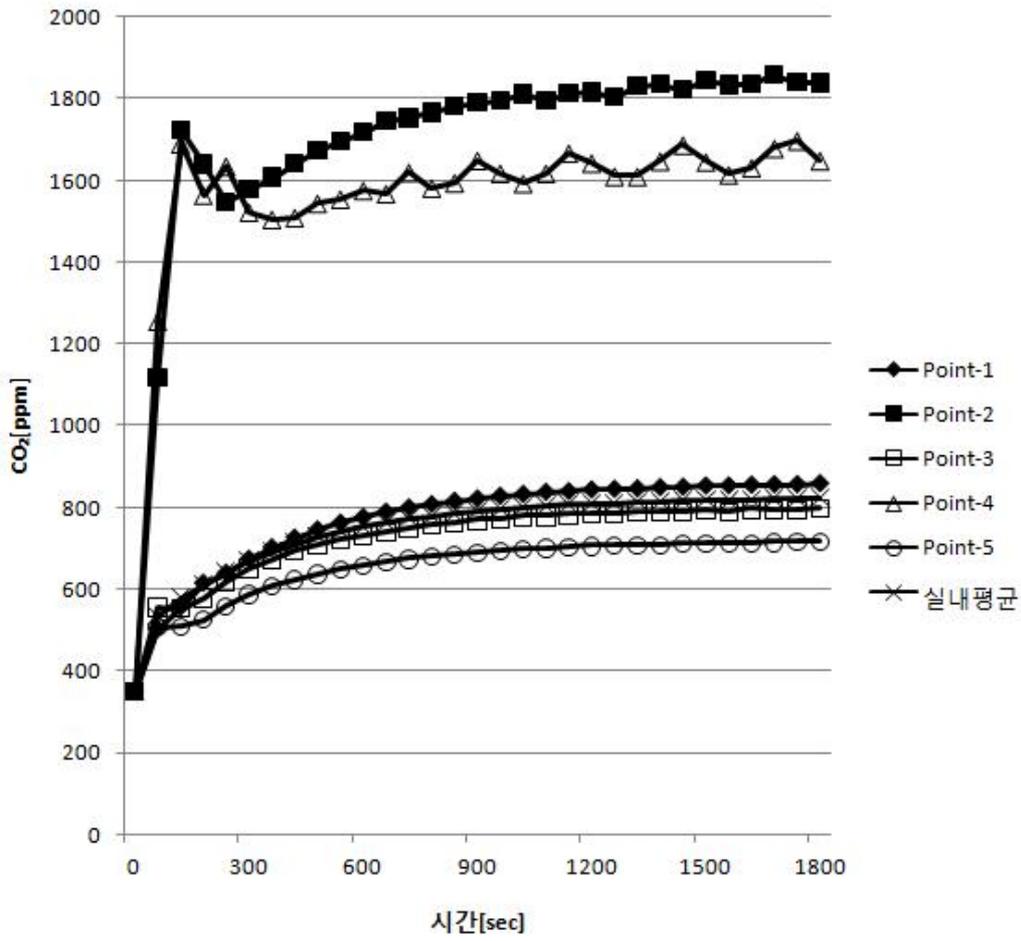


그림 4.6.2.3 CASE #4의 이산화탄소 농도 변화

제 5 장 결 론

본 논문은 선박 선실의 공기환경에 대한 문제점을 찾고, 그 문제점에 대한 선행연구를 조사하였다. 그리고 그러한 문제점을 개선하기 위한 방법들에 대해 고찰하여 문제점을 해결하고자 하였다. 본 연구를 수행하기에 앞서, 여객선, Chemical선 그리고 한국해양대학교의 한바다호에 온열환경 및 공기질에 관한 실태조사를 하였고, 열악한 선박의 공기환경에 대한 문제점을 인지하기 위해 승무원들과 많은 대화를 통해 조언을 구하였으며, 선행연구를 통해하여 현재 이슈가 되고 있는 공기질관련 문제와 환기성능에 대해 학습하였다.

선실의 공기환경의 문제점을 개선하기 위한 방안으로 예측되어지는 여러 변수(풍량, 가구 위치 등)들이 있으나, 본 논문에서는 급기구의 형상에 집중하여 공기환경을 개선하는 방법에 대해 연구하였다. 본 연구에서 제시한 CASE #4의 경우 외에도 많은 CASE 들에 대한 시뮬레이션을 수행하였으나, 공기환경에 큰 개선점을 찾지 못하여 수록하지 않았다.

본 연구의 연구 성과를 정리하면 다음과 같다.

1) 건물용 급기구를 선박 선실에 적용하여 선박용 급기구와 오염물질 제거에 대한 실험을 수행하였다. 그리고 선박용 급기구(CASE #1)와 건물용 급기구(CASE #2, #3) 모두 수직·수평간 농도 불균형이 존재함을 확인 할 수 있었으며, CASE #2가 수직간 농도 불균형이 가장 심하게 나타나 수직간에 공기 흐름이 가장 원활하지 않은 것으로 예측되었고, CASE #3은 수직·수평간 농도 불균형이 가장 낮은 것으로 예측되었다.

2) CFD 해석값에 대한 검증을 위해 실험값과 비교하여 타당성을 검증하여 CFD 해석에 대한 높은 신뢰도를 확인하였다.

3) CASE #1, #2, #3의 공기연령을 CFD로 해석하여 비교하였으며, CASE #1의 공기연령이 가장 낮게 계산되었고, 건물용 급기구인 CASE 2#,3#은 CASE #1보다 상대적으로 높은 공기연령을 보여 건물용 급기구를 선박용 급기구로 사용하는 것은 부적합한 것으로 나타났다.

4) 2차원으로 신선공기의 급기 방향에 따른 공기연령을 계산하여 공기흐름과 공기연령의 관계를 고찰하였다.

5) 2차원 해석과 3차원 해석을 통해, 기존 급기구의 형상에서 간단한 베인을 삽입하여 신선공기의 흐름을 바꾸는 새로운 급기구(CASE #4)를 제안하였다.

6) CASE #4와 기존 선박용 급기구인 CASE #1과 공기연령을 서로 비교하였다. CASE #4가 최대 국소평균공기연령은 약 10%가 개선되었으며, 실평균공기연령도 약 16%가 개선되었다. 그리고 국소평균공기연령도 대부분의 지역에서 약 100~200s 정도 낮게 계산되었다.

7) TVOC를 제거되는 농도를 계산하였으며, 초기 TVOC 농도가 $5000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 실내공기질관리법의 기준치인 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 떨어지는 시간은 CASE 1#이 18분, CASE 4# 16분으로 계산되었다.

8) 인체의 호흡으로 발생하는 이산화탄소 오염에 대한 CFD 해석을 비정상상태로 수행하였다. 가장 공기흐름이 원활하지 않은 2층 침대 아래층의 경우, CASE #4의 이산화탄소 농도는 CASE #1보다 약 14~35% 낮출 수 있었다. 그리고 실내평균 이산화탄소 농도의 경우에는 약 26% 이산화탄소 농도를 낮출 있음을 확인하여, CASE #4의 급기구 형상의 변화만으로 상당부분 실내공기흐름을 원활히 할 수 있는 것으로 예측된다.

마지막으로, 건물용 급기구는 천정 높이가 높아서 사용하기 위해 만든 것으로 선박용으로 사용하기에는 무리가 있을 것으로 보인다. 새롭게 제안한 CASE #4로 기존 급기구보다 선실 전체 평균적으로 약 10~15%정도 공기연령을 낮출 있고, 오염물질 제거율도 개선할 수 있었다. 뿐만 아니라 거주자가 주로 머무는 2층 침대 주변의 공기연령과 오염물질 농도를 낮추는데 기존 급기구보다 확실히 뛰어난 것으로 추측된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국조선공업협회(<http://www.koshipa.or.kr>), 조선자료집
- [2] 황광일, 이상우, 심재건, 박민강, 문태일, 「선박 선실 내의 실내공기환경 실태 조사에 관한 연구」, 한국마린엔지니어링학회지 제31권, 제4호, pp.370~376, 2007. 5
- [3] 백용규, 「웰빙문화 정착을 위한 공기환경」, 설비저널 제 35권 1호, 2006. 1
- [4] 조효제, 도근영, 김동일, 고창두, 김상현, 「연안 소형선박내의 공기오염 및 전자파에 기초한 선상근무 환경의 평가」, 한국항해항만학회지 제 26권 제 5호, pp. 555~561, 2002
- [5] 이혁, 서형균, 「선박의 기관실 통풍 해석」, 대한조선학회논문집 제 41권 제 5호, 2004.10
- [6] 박일석, 박상민, 하지수, 「수평 상향 분사 덕트를 이용한 컨테이너선 화물창 환기개선에 대한 실험적 연구」, 대한조선학회논문집 제 43권 제 2호, 2006.4
- [7] 김학선, 이승수, 이춘주, 장미숙, 「환기량 변화가 선실내 공기질에 미치는 영향의 전산해석」, 2005년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
- [8] 박태신, 조성우, 이경희, 박창섭, 박진철, 「신축공동주택의 실내마감재 시공에 따른 실내공기질 실태조사」, 대한건축학회 학술발표대회논문집 제 26권 제 1호, 2006.10.26~27
- [9] 최정민, 강은혜, 주재욱, 하석용, 손영환, 「창원지역 학교 건축물의 실내공기질 측정 및 평가에 관한 연구」, 대한건축학회 학술발표대회논문집 제 26권 제 1호, 2006.10.26~27
- [10] 이종찬, 김대웅, 박병희, 김병선, 「CFD를 이용한 군 내무실의 환기 개선 방안」, 대한건축논문집 계획계 22권 12호, 2006.12
- [11] 노광철, 이현철, 박정일, 오명도, 「국소평균공기연령을 이용한 국소환경

- 시스템의 청정도 평가 및 예측」, 대한기계학회논문집 B권, 제 31권 제 5호, pp. 457~466, 2007
- [12] 장재수, 노광철, 오명도, 「냉방시시스템에어컨과 환기유닛 적용 강의실에서 실내 CO2 농도와 국소평균공기연령 연구」, 설비공학논문집 제 17권 제 8호, pp.736~745, 2005
- [13] 유복희, 田中辰明, 윤정숙, 「가구배치 형태에 따른 실내기류 분포 및 환기효율 분석」, 대한건축학회논문집 계획계 18권 12호, 2002.12
- [14] 정문식, 김종오, 박석환, 이성홍, 정용택, 조영채, 《환경위생학》, 신광출판사, 2002.8
- [15] 환경부, 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」, 2006.12
- [16] 국립환경연구원, 「실내공기질 공정시험방법 도출 연구」, 2004.2
- [17] 김찬중, “길잡이 전산유체역학”, 문운당, 2002.8
- [18] 신병록, 장근식, 조강래, 《전산유체역학 -기초와 응용-》, 대영사, 1994.7
- [19] Fluent Inc, 「FLUENT User's Guide」, 2003. 2
- [20] 문성록, 「전산 열유체 역학의 개요」, 한국설비기술협회 특집원고 제 23권 제 10호, Vol.23, No. 10, 2006.10
- [21] 한화택, 「환기효율의 정의 관하여」, 설비공학회 설비저널 제 28권 제 1호, pp38~48, 1999.2
- [22] 한화택, 정형호, 「공동주택의 필요환기량 산정 방법」, 대한설비공학회 설비저널 제 34권 제 1호, pp.43~48, 2005.1

감사의 글

어느 덧 기계정보공학부에 몸 담은지 9년이란 시간이 지났습니다. 이렇게 여리해를 보내고, 논문을 마무리 하려고 하니 저에게 사랑을 가르쳐 주신 많은 분들이 생각납니다. 우선 부족한 저를 격려해주시고 이끌어주신 황광일 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 작은 부분까지 섬세히 논문을 심사해주신 방광현, 윤상국 교수님께 감사드립니다. 또 보이지 않는 곳에서 묵묵히 저희를 응원해주시는 기계정보공학부 교수님들.. 왕지석, 정재현, 이영호, 김의간, 김동혁, 정형호, 최형식, 조종래, 도덕희, 유삼상, 박권하 교수님께도 감사드립니다.

말도 많고 탈도 많은 우리 환경설비실험실 식구들도 생각납니다. 함께 실험실의 초석을 다지며 고생한 준혁이와 재건이 그리고 태호에게 고마움을 전합니다. 또한 실험실을 묵묵히 지키며 든든하게 저를 도와준 성근이, 늘 즐겁게 해준 승환이, 대학원 후배이자 저의 버팀목이 되어준 동걸이, 저를 항상 챙겨주는 착한 은수, 간식꺼리 챙겨주는 꼼꼼한 정열이, 귀엽고 터프한 정하까지... 모두 모두 고맙고 사랑합니다. 바쁜 업무 중에도 언제나 따뜻하게 우리를 맞이해 준 기계정보공학부 최영미, 김미현 조교님, 그리고 우리 99학번 동기들과 대학원 친구들 그리고 선·후배님들 모두 감사합니다.

당신의 배부름보다 당신의 따뜻함보다 당신의 행복보다 당신의 미래보다 자식을 먼저 생각하시며 밤·낮으로 항상 잘되라고 빌어주신 사랑하는 나의 어머니..사람됨의 가르침에 어긋나지 않도록 열심히 살겠습니다. 감사합니다. 그리고 사랑합니다. 철없는 동생을 믿고 격려해주는 형들과 누나 역시 고맙고, 사랑합니다.

지금껏 해온 일들보다 앞으로 해야 할 일이 더 많다는 걸 잘 알고 있습니다. 더 많은 언덕이 있을 것이며, 더 세찬 비바람이 불 것이라는 걸 잘 알고 있습니다. 하지만 저에게 힘이 되어주는 많은 사람들을 생각하며 이겨내겠습니다. 그리고 더 열심히 하는 한사람이 되겠습니다.