

T0023291

R&D/

05건설핵심C04

건축기계설비설계용 실내 환경평가 소프트웨어 개발

2007. 11. 1.

주관연구기관 / 국민대학교

협동연구기관 · 참여기업 / 신홍대학

(주) DCS

건 설 교 통 부

한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관 귀하

본 보고서를 “건축기계설비용 실내환경평가 소프트웨어개발”의 2 차년도 최종보고서로 제출합니다.

2007. 11. 1.

주관연구기관 : 국민대학교

산학협력단장 김 철

■ 주관연구책임자

국민대학교	교수	한 화 택	담당업무 연구계획 및 총괄관리
-------	----	-------	---------------------

■ 협동연구책임자

신홍대학	부교수	권 용 일	담당업무 알고리즘연구계획 및 총괄관리
------	-----	-------	-------------------------

■ 참여연구원

국민대학교	연구보조원	조 석 호	자료정리 및 분석
		정 영 균	가시화장치 제작 및 실험
		신 철 용	전산 시뮬레이션 수행
		김 현 미	자료정리 및 분석
신홍대학	연구보조원	김 희 관	자료정리 및 분석
		서 민 욱	개발소프트웨어 기능시험
		박 준 영	개발소프트웨어 기능시험
		최 진	자료정리 및 분석

(주) DCS	연구원	이 진 천	전처리/후처리 GUI구현 총괄
	연구원	이 광 식	전처리 GUI개발
	연구원	이 용 규	후처리 GUI개발

요 약 문

I. 연구제목

건축기계설비설계용 실내환경평가 소프트웨어개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1960대 중반부터 국내기술자에 의해 설계된 건축기계설비는 2007년 현재까지 비약적으로 발전하고 있다. 건축기계설비분야는 급수, 오·배수 및 공조 설비시스템을 효과적으로 구성하는 것이 주요 업무를 수행하고 있다. 이와 같이 건축기계설비분야가 발전하고 있지만 최근까지 공조설비시스템을 설계하는 관점에서 적용되는 이론은 1차원적인 관점에서 정량적으로 열원시스템과 공기분배시스템을 구성하였다. 그러나 최근 들어 건축물이 대형화 고층화됨으로 인해, 대형설비시스템이 빈번하게 설계되고 있는 현실이다. 이러한 대형 설비시스템을 설계할 때, 필수적으로 고려할 사항은 실내환경을 쾌적하게 유지하기 위해, 각 층별 혹은 각 존(zone)별 실내에 공급하는 공기 및 물을 효과적으로 분배할 수 있는 기능을 보유하는가를 판단하는 것이다. 이러한 판단을 위해서는 물을 이송하는 배관의 경우, 균일한 유량분배를 구현하기 위해, 파이프 압력해석 및 수 충격(water hammer)해석하거나 공기를 분배하는 경우에는 실내온열쾌적감(PMV) 및 청정도와 관련 있는 급기 및 배기효율을 설계단계에서 평가해야 한다. 이러한 실내환경평가 프로그램은 물배관의 경우, kypipe와 pipenet을 사용하고 있으며 공기분배시스템의 경우, Phoenix, Fluent 및 Star CD를 사용하고 있다. 지금 현재, 국내 건축기계설비업계에서 사용하고 있는 실내환경평가 프로그램은 모두 국외에서 제작하여 시판되고 있으며 범용성이 있어 비용이 높고 고급기술자가 아니면 이론적으로 정확한 해석을 하는데 어려움이 따르는 것이 단점이다. 이러한 문제점을 개선하고 국내의 건축기계설비설계분야의 기술적인 발전을 도모하기 위해, ASHRAE에서 고안하고 검증된 이론을

적용하여 최대부하계산을 수행할 수 있도록 1990년 초에 국산화한 Loadsys가 국내 건축설비설계분야에서 최초의 소프트웨어이다. 이를 바탕으로 공조설비시스템이 소비하는 에너지량을 정량적으로 평가할 수 있는 K-load가 1999년에 국산화 되었다. 이러한 과정을 통하여 국내의 건축기계설비설계분야에서 에너지절약을 도모하기 위해 사용해야 될 기술적인 소프트웨어의 국산화의 필요성은 충분히 입증되었다. 현재까지 건축기계설비분야에서 개발된 소프트웨어는 공조설비시스템을 구성할 때, 최적의 열원장비를 선정하고 선정된 열원장비의 에너지소비량을 예측, 검토하는 관점에 목표를 두고 있다. 이러한 목적을 정량적으로 달성하기 위해서는 열원설비에서 생성한 냉열과 온열이 공급된 실내에서 형성되는 온열감과 실내공기의 청정도를 종합적으로 평가해야 한다. 이와 같이 온열감과 실내공기의 청정도를 평가하는 소프트웨어가 국산화되지 못하여 전술한 바와 같이 국외에서 시판하는 범용 CFD 프로그램인 Star-CD, Phoenix, Fluent등을 사용한다. 이러한 범용 소프트웨어는 건축기계설비분야 뿐만 아니라 우주항공, 중공업, 조선, 자동차 및 화학 등 모든 분야에 적용할 수 있도록 개발되어 비용이 고가일 뿐만 아니라 전 산업분야에 적용할 수 있도록 제작된 관계로 건축기계설비분야에서 간단히 취급하는 청정도를 평가하기 위한 공기연령이나 온열쾌적감을 해석하기 위해, 입력하는 조건 및 출력조건이 아주 복잡하여 전문적인 전산유체역학 교육을 받은 사람들도 쉽게 입력조건을 적용하지 못하고 출력조건을 입력하는데 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 또한 입출력을 위해, GUI환경으로 구성한 버튼이 많기 때문에 해석조건 입력시 작동에 오류가 발생하기도 한다. 이와 더불어 고가의 소프트웨어이기 때문에 다량으로 구입할 수 없어서 급, 배기구의 위치에 따른 실내청정도 및 온열환경의 영향 평가를 쉽게 할 수 없는 단점이 있다.

본 연구를 이러한 문제점을 개선할 필요성이 업계에서 제기되고 있는 현실을 파악하고 건축기계설비분야의 기술력 발전에 기여하기 위해 수행되었으며 본 연구를 수행한 결과, 건축기계설비설계전용 기류유동가시화 프로그램인 Airview(상품명: 가칭)의 베타버전을 출시하게 되었다.

III. 연구개발의 목표

본 연구는 이러한 문제점을 해결하고 열전달교육을 받은 초급기술자도 쉽게 사용할 수 있는 건축기계설비 설계전용 실내환경평가 프로그램을 개발하고자 2005년 7월부터 지금까지 2년 동안 연구하였으며 그 결과, 초급기술자가 사용가능하도록 실내환경평가 기능을 단순화하고 쉽고 정확한 해석결과를 출력할 수 있는 기능을 탑재한 Airview(상품명)를 개발하여 국내 최초의 건축기계설비분야에 적용 가능한 상업용 CFD프로그램의 베타버전을 출시하였으며, 지금까지 수행한 연차별 연구목표를 정리하면 다음과 같다.

1. 1차년도(2005. 7 ~ 2006. 7) 연구목표

건축기계설비 설계분야에서 요구되는 실내환경(공기청정도 및 온열쾌적감)평가 전용 기류시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위해, 외국에서 개발된 범용 CFD프로그램인 Phoenix를 기본으로 CFD프로그램 구성인자와 기능을 평가하여 건축기계설비설계 분야에서 필요로 하는 인자를 쉽게 표현할 수 있는 소프트웨어의 구성방법을 정립하고 시뮬레이션용 소프트웨어를 구성할 알고리즘을 SIMPLER방법으로 확정하여 압력해석을 수행한 후, 압력보정이 된 속도장을 해석하여 스칼라 방정식(온도, 농도 및 공기연령 장)을 평가하는 기법을 고안하여 주프로그램을 coding하였고 이에 적합하게 입력이 편리한 GUI환경을 구성하여 전처리기를 구성하였다.

2. 2차년도(2006. 7 ~ 2007. 7) 연구목표

1차 년도에 개발한 주프로그램과 이에 연결되는 전처리기의 기능을 완벽하게 유지되도록 디버깅을 수행하였고 해석결과를 검증하여 해석알고리즘의 정확성을 입증하기 위해, 검증실험을 수행하였고 본 연구에서 개발된 Airview의 해석결과와 비교하기 위해, 범용 CFD프로그램인 Phoenix의 해석결과와 비교 검토하는 작업을 수행하였다. 또한 비직교형상의 해석이 가능하도록 전처리에 형상입력조건을 추가하였으며 Airview의 주프로그램에서 해석된 결과를 효과적으로 표현하기 위한 후처리기를 개발하였으며 후처리기의 기능은 계산된 결과를 쉽게 data파일로 변환시키는 결과출력기능과 3차원 결과 데이터를 화면 및 그림파일로 저장할 수 있는 기

능을 구현하였다. 3차원 결과 데이터를 화면으로 출력 및 그림파일로 저장하는 방법은 contour, vector로 표현되는 2차원형 데이터 표현 뿐만아니라 3차원 벡터분포를 활용하여 입자의 유동을 3차원적으로 표현할 수 있는 particle trajectory기능이 구현된다.

IV. 연구개발의 내용 및 범위

1. 총괄

연차	연구내용	세부내용 및 범위
1	□ 경계조건 입력창 구성 (I단계) - freeshop과 연동된 경계조건입력창. - 경계조건 입력변수 선정 - 경계조건 입력 형상구현 - 격자계 구현 - view기능 구현	- freeshop과 연동하여 입력창에 경계조건 계산영역 형상을 생성시킨다. - 경계조건입력변수를 경계조건변수를 3차원속도성분(u, v, w), 온도, 농도 및 난류에너지, 난류소산율에너지방정식으로 구분하여 선택 창을 구성하였다. - 경계조건 형상은 급/배기구, 블록, 벽체로 구분하고 형상이 구성되면 격자계를 구성하는 region이 자동으로 구성되도록 격자계 구성하였다. 3차원입체형상을 관찰하게 수월하도록 회전/줌/확대기능을 적용하였다.
2	□ 주프로그램 알고리즘개발(II단계) - 경계조건과 주프로그램 interface일반화 - Navier stokes알고리즘 일반화 및 프로그램 개발. - SIMPLER알고리즘으로 압력방정식 일반화 및 프로그램 개발 - 난류에너지방정식, 난류에너지 소산율방정식을 High Reynolds수와 Low Reynolds수로 구분하여 일반화 및 프로그램 개발	- 본 연구에서 구성된 경계조건 창에서 입력된 자료를 주 프로그램에서 자동인식하도록 변환하도록 일반화알고리즘을 개발하고 프로그램을 구성하였다. - Patankar에 의해 고안된 일반화식을 활용하여 일반화 알고리즘 개발한 후, 프로그램을 작성하여 계산오차를 검증하였다. - 압력방정식을 SIMPLER알고리즘으로 구성하여 일반화하고 출구조건의 위치를 자동 인식하여 계산을 수행하도록 일반화프로그램을 작성하였다. - 난류방정식을 High/Low Reynolds수 두가지로 구분하여 선택하도록 프로그램을 구성하였으며 난류방정식을 일반화하고 경계조건을 자동 인식하여 계산이 수행되도록 일반화프로그램 작성하였다.
2	□ 계산과정 점검창 구성 계산과정을 쉽게 점검할 수 있는 GUI환경의 출력창 구성	반복 계산과정에서 수렴성, 청정도 및 열량변화를 쉽게 평가 할 수 있는 계산결과 점검창을 GUI환경으로 구성하였다.
2	□ 계산결과 출력창 구성 계산결과 출력을 위한 후처리기 개발	- 계산결과를 변수별로 contour 혹은 vector로 2차원 단면에 대해, 표현할 수 있는 기능을 부여하였하였다. - 계산결과를 3차원 벡터자료를 이용하여 입자유동으로 3차원적으로 표현할 수 있는 particle trajectory기능을 구현하였다. 3차원으로 저장된 계산결과를 면 혹은 선 단위 data로 쉽게 data파일로 저장하는 기능을 구현하여 excel에서 간단히 graph로 표현하는 기능을 구현하였다.

2. 2차년도 연구내용 및 추진방법(2006. 7 ~ 2007. 7)

□ 경계조건 입력창(전처리기) 및 주프로그램 디버깅

1차년도(2005.7-2006.7)에 개발된 전처리기와 주 프로그램의 기능은 다음과 같다.

- 경계조건 변수 도출
- 경계조건 물체(object)의 계산조건 및 크기/위치생성기능
- 격자계(grid system) 생성기능 결정
- 형상 view기능 적용
- 주프로그램 알고리즘 개발
- 주 프로그램 알고리즘의 프로그램
- 계산과정 점검창 구성

상기와 같이 개발된 전처리기와 주 프로그램의 동작 및 기능 오류를 디버깅하였다. 디버깅과정에 발생된 오류를 개선하였고 개선된 결과를 범용 CFD프로그램인 Phoenix를 사용하여 동일한 조건에 대해 해석한 결과와 비교하였다.

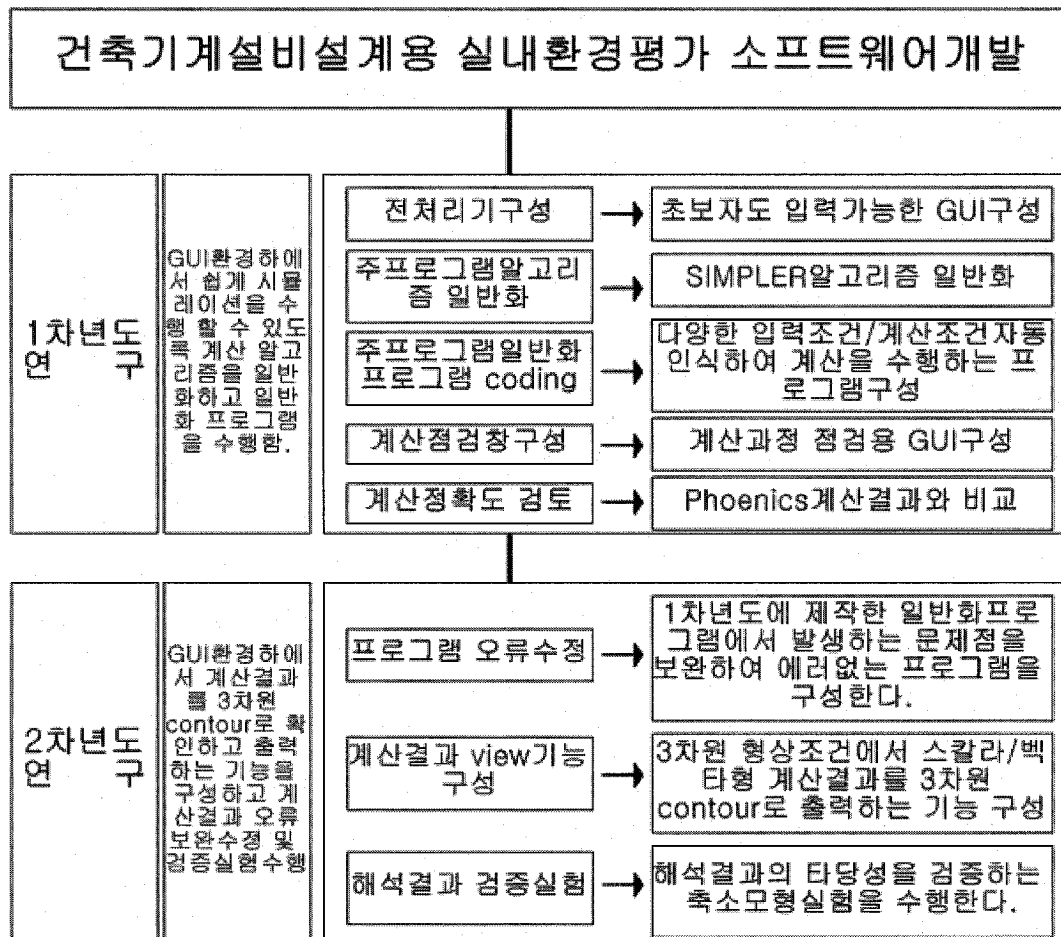
□ 주프로그램 검증실험

- 주프로그램 알고리즘을 정확성을 검증하기 위해, 소형모델을 제작하여 가시화 실험을 수행하였고 실험결과와 정성적으로 비교검토 하였다.

□ 후처리기 개발

- 3차원 계산결과를 2차원 단면으로 contour 및 vector 등을 표현할 수 있도록 기능을 탑재하였다.
- 3차원 속도벡터자료를 이용하여 유동현상을 입체적으로 표현 할 수 있는 particle trajectory기능을 구현하였다.
- 3차원 계산결과를 쉽게 excel파일에서 2차원 graph를 표현할 수 있도록 면(surface)단위, 선(line) 단위 계산결과 출력기능을 탑재하였다.

V. 연구추진체계



VI. 연구개발결과

1. 전처리기능 구성

가. 전처리기화면 구성

본 연구에서 개발되는 건축기계설비설계 전문 소프트웨어의 명칭은 Airview V1.0으로 명칭을 정하였다. Airview V1.0에 형상데이터를 제공하는 프로그램인 Freeshop과 Airview V1.0의 GUI환경을 구현하는 개발환경과 개발언어에 대한 세부적인 내용은 다음과 같으며 전처리기의 화면을 구성한 결

과는 다음과 같다.

소프트웨어명	개발언어 및 개발환경		
Freeshop	개발언어	VC++ 7.0 (MSDN Ent Subscription에 포함)	
	개발환경	AutoCAD 2005실행환경에서 ObjectARX SDK를 사용하여 개발	
Airview V1.0	개발언어	VC++ 6.0	
		3D엔진	OpenGL
		3DS MAX 7.5	3차원 객체 표현 및 조작 방법과 UI 참조

- ① 전처리기 화면은 건축기계설비설계 분야에 종사하는 초급기술자가 쉽게 적용할 수 있도록 기본기능은 선택하지 않도록 하였고 필수적으로 선택해야 될 기능만 적용하였다.
- ② 3차원 공조덕트 배치도를 구성하는 Freeshop에서 구성된 2차원 혹은 3차원 디퓨저 배치도에서 해석영역을 선택하여 시뮬레이션 버튼을 click하면 Airview V1.0이 구동되면서 2차원 데이터의 경우, 실 높이를 입력하게 되면 선택된 해석영역에 위치한 급/배기구가 자동으로 시뮬레이션을 위한 전처리기의 화면에 기본적으로 위치한 3차원 형상이 view되도록 구성하였다.
- ③ Freeshop에서 Airview V1.0으로 전송된 자료가 정확하게 전송된 것인지 확인하기 위해, 전송된 3차원형상을 회전/확대/이동하는 기능을 전처리기의 메인 화면에 텍스트형식 혹은 스크롤바를 이용하여 변경하도록 구성하였다.
- ④ Freeshop에서 전송된 형상(치수) 및 블록의 위치를 변경하거나 삭제하는 기능을 전처리기의 메인화면에 버튼형식으로 구성하였다.

나. 해석메뉴입력화면 구성

- ① 전처리기의 메인화면에 구성된 버튼중의 하나의 기능으로서 해석메뉴를 click하게 되면 해석메뉴입력화면이 보이도록 구성하였다.
- ② 해석메뉴를 구성하고 있는 인자는 정상유동여부 선택, 반복계산횟수 선택, 초기치입력, 이완계수설정, 해석변수(3차원 속도성분(u,v,w), 온도장, 공기연령, PMV, 난류운동에너지, 난류소산율) 선택기능을 부여하였다.
- ③ 비정상해석을 수행하기 위해서 필요한 해석시간 간격과 각 시각에서의 반복계

산횡수를 입력하도록 텍스트창을 구성하였다.

- ④ 해석메뉴에서 온열쾌적감을 계산하는데 필요한 변수인 의복착의량(CLO)와 활동량(MET)를 텍스트창에서 변경하도록 구성하였다.

다. 물체의 경계조건입력과 격자계 구성

- ① Freeshop에서 전송되어 해석영역 내에서 구성되는 형상정보는 해석경계영역 혹은 해석영역 내부에 위치한 급/배기구, 블록 및 벽체의 경계조건을 입력하는 기능을 부여하였다. 예를 들어 블록 및 벽체에 입력하는 온도와 농도경계조건은 임의 값, 열유속을 총량 혹은 단위면적(체적)으로 구분하여 선택한 후, 텍스트창에 입력하도록 구성하였다. 또한 급/배기구의 경우, 속도성분과 난류운동에너지, 난류소산율, 온도 및 농도를 해석조건에 적합하게 설정할 수 있도록 텍스트창으로 구성하였다.
- ② 격자계는 효과적으로 격자계를 구성할 수 있도록 급/배기구, 블록 및 벽체가 생성될 때, 시작점과 종료점을 자동으로 인식하여 각 지점을 하나의 영역으로 자동구획 하도록 구성하였다. 또한 자동구획되어 형성된 격자계 내부에 세부적으로 격자계를 구성할 수 있도록 각 영역을 click하면 세부 격자계를 구성할 수 있는 3차원 격자정보를 수정할 수 있는 화면이 보이도록 구성하였다.

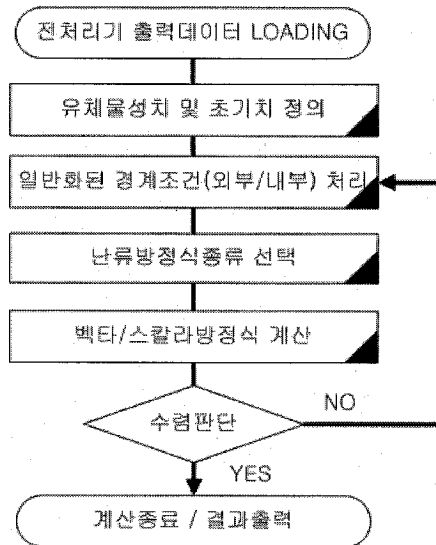
라. 전처리기에서 생성된 자료의 저장

- ① 전처리기에서 작업한 내용은 시뮬레이션을 수행하는 주 프로그램에서 사용하는 것이므로 주 프로그램에서 요구되는 포맷으로 입력자료를 저장하도록 출력문을 구성하였다.
- ② 저장된 입력자료를 활용하여 재 작업시 형상정보 및 계산조건정보가 Airview에 다시 loading할 수 있는 기능을 부여하였다.

2. 주프로그램의 일반화 및 일반화 프로그램 coding

- ① patankar가 제안한 일반화방법을 적용하여 구성된 주 프로그램에서 사용한 방정식과 알고리즘과 대류확산항은 다음과 같다..
 - 압력방정식 구성 : SIMPLER알고리즘

- 대류-확산항 처리 : power-law scheme
 - 일반화방정식 : 벡터방정식, 스칼라방정식
- ② 주 프로그램의 일반화와 더불어 주 프로그램이 범용 프로그램으로 기능을 보유하기 위해, 갖춰야할 기능을 적용한 것은 다음과 같다.
- 전처리기에서 저장된 자료를 주 프로그램에서 loading하여 형상정보 및 계산 조건정보를 계산에 적용할 수 있도록 일반화프로그램을 구성하였다.



- 일반화된 주프로그램을 이용하여 계산을 수행하는 과정은 상기에 표기된 흐름도와 같이 수행되도록 프로그램을 구성하였다.
- ③ 주 프로그램에서 전처리기에서 입력된 자료를 자동으로 인식하도록 일반화프로그램을 구성한 알고리즘과 coding내용은 다음과 같다.
- 급/배기구의 개수, 크기 및 위치를 자동으로 인식하여 경계조건을 전 처리기에서 정의된 조건을 주프로그램 적용함 .
 - 해석영역내부에 위치하는 블록의 개수, 크기 및 위치를 자동으로 인식하여 해석하는 내용을 자동으로 인식하도록 함.
 - 전 처리기에서 입력된 해석조건, 해석변수, 방정식 종류별로 입력된 경계값을 인식하여 주 프로그램의 필요 개소에 적용함.
- ④ Airview V1.0을 이용하여 범용적으로 해석할 수 있도록 일반화한 난류운동에너지와 난류소산율방정식의 종류는 high Reynolds방정식은 standard K-ε방정식이며 low Reynolds방정식은 JL, LS, Davison, LB모델을 구성하여 총 5가지의 난류방정식을 일반화하였다.

3. 계산과정 점검창

- ① 계산과정을 점검하는 창은 사용자가 쉽게 계산과정을 쉽게 검토할 수 있도록 반복계산 중에 관찰지점의 값을 graph를 표현하고 각 변수가 반복계산 중에 나타내는 계산 오차를 화면에 표현할 수 있도록 기능을 구현하였다.
- ② 계산과정을 점검하는 창에 급기효율, 실부하 등을 표현하도록 창을 구성하여 반복계산과정 중, 급기효율이 낮은 경우, 계산을 종료하고 급 배기구의 위치를 변경하여 재 계산을 빨리 선택하도록 기능을 부여하였다.

4. 후처리기

- ① 계산결과를 출력하는 방법은 범용 CFD프로그램에서 채택하는 방법보다 쉽게 구성하였다. 대표적인 특징은 3차원 계산결과를 면(surface)단위, 선(line)단위 data를 출력하는 기능을 구현하였다.
- ② 3차원 해석형상에서 사용자가 선정한 위치에서 2차원 해석결과를 입체적으로 contour와 vector로 표현하는 기능을 구현하였다.
- ③ 3차원 vector분포를 이용하여 기류유동을 입체적으로 예측할 수 있는 particle trajectory기능을 구현하였다.

VII. 연구개발결과의 활용계획

1. 파급효과

- 건축기계설비분야에서 설계하는 공조설비시스템의 품질향상 및 에너지절약적 이면서 쾌적한 실내환경 구현에 기여.
- 기류유동해석용 범용프로그램의 국산화 개발로 인하여 건축설비업무를 IT 관련 산업으로 편입할 수 있는 계기 마련.
- 초급기술자도 사용할 수 있도록 간편한 시뮬레이션 TOOL을 개발함으로써 건축기계설비분야의 기술력 증대와 국가 경쟁력 강화.

2. 활용방안

- 건축기계설비분야에서만 평가하는 인자만을 정확하게 쉽게 해석할 수 있도록 시뮬레이션 프로그램을 구성하여 개발하였기 때문에 다음과 같이 활용하는 가치를 높일 수 있을 것으로 판단된다.
 - 시뮬레이션을 위한 계산조건 입력시간 단축함
 - 열유체공학의 초보적인 지식을 습득한 초급기술자도 편리하게 시뮬레이션이 가능함.
 - 3차원 간섭체크 프로그램인 Freeshop을 사용하는 시공현장이나 건축기계설비 설계사무소에서 많이 사용하는 COME기반에서 구동할 수 있도록 프로그램을 제작하였으므로 쉽게 시뮬레이션프로그램 사용에 접근할 수 있음.
 - 국외에서 제작하여 판매하는 범용프로그램의 1/10가격으로 판매할 예정이므로 건축기계설비 설계업체에서 많이 사용할 것으로 예측된다.

SUMMARY

I . Title

Development of indoor environment evaluation software for building mechanical system design

II . Objectives and R&D Necessities

In designing building mechanical facilities, indoor airflows need to be simulated in order to predict the indoor thermal environment created by the jets discharged through diffusers and to predict indoor air quality provided by the ventilation systems. The PMV(predicted mean vote) and ventilation effectiveness are analyzed from the airflow simulation results. However, commercial CFD programs are usually expensive and can be operated by CFD experts.

The objective of the present study is to develop a 3D simulation program that is capable of evaluating indoor environmental conditions such as indoor air quality and thermal comfort in conjunction with Freeshop, which is based on a building mechanical CAD program. The program needs to be developed easy to use even for non-CFD experts so that can be used in a designing stage.

III. Scopes and Contents

The tasks for the first year of the project are the development of the pre-processor and main solver.

derivation of boundary conditions, the calculation conditions such as size and location for objects, the function generation for grid system, and the application of view function for configurations. It has been focused to develop a pre-processor and a main solver. The program has been coded and developed so as to be in a generalized form applicable to various system configurations. The simulation results need to be validated in comparison with commercial

CFD programs.

The tests for the second year

IV. Results

The pre-processor developed has a capability of simulating indoor airflow patterns equivalent to the commercial CFD programs. The menu has been constructed and simplified so that the program can be used easily by users who are mainly dedicated to the thermal environment simulations.

The main algorithm is based on the SIMPLER algorithm developed by Patankar. Pressure boundary conditions are applied at exhausts to improve the convergence of the iterations. The algorithm utilizing indices has been adapted so that the pre-processor can recognize automatically the locations of supply/exhaust grilles and blocks created in a CAD drawing. The PMV and supply/exhaust effectiveness have been evaluated and displayed successively after the main program finishes calculation.

The post-processor has a capability of displaying calculated results in various formats, such as velocity vector plots, isopleth contours for temperature, local mean age, pressure, velocity magnitude, and etc. The capability of animation of fluid particle trajectories has been added in the post-processor, even though it was not included in the planning stage of this project.

The results obtained in a simple room configuration has been compared with those by a commercial program. Both the temperature and the age of air distributions are in good agreements. It has been found that the relaxation factors should be chosen carefully to increase the convergence rate and the accuracy. The process of data iteration is displayed in a monitoring window in a graphical form.

V. Future Application Plan

The program developed in this project can be used in evaluating thermal environmental conditions in building spaces. It can be used by elementary

design engineers with reduced efforts in inputting various problem boundary conditions.

Since the program is compatible with Freeshop (3D interference checking program) and COME(building HVAC drafting program), it can be accessed easily and utilized during actual designing processes. The price of the program is going to be approximately 1/10 of typical commercial CFD programs, and it can be spread widely in building mechanical system design companies.

- 목 차 -

제1장 서론	1
제1절 연구개발의 필요성	1
제2절 연구목표	3
1. 최종 연구목표	3
2. 1차년도(2005. 7 ~ 2006. 7) 연구목표	3
3. 2차년도(2006. 7 ~ 2007. 7) 연구목표	4
제3절 연구내용	5
1. 총괄	5
2. 1차년도 연구내용(2005. 7 ~ 2006. 7)	6
제4절 연구추진체계	8
 제2장 국내 및 국외 관련기술 동향	9
제1절 국내외 기술동향	9
제2절 기술동향 분석결론	11
 제3장 연구개발 수행내용 및 결과	12
제1절 전처리기	12
1. 저장과 불러오기	15
2. 도메인	15
3. 객체	16
4. 격자	20
5. 기타기능	21
제2절 주프로그램	24
1. 해석변수	24
2. 계산	27
제3절 후처리기	29
1. 결과값의 표현	29

제4절 주프로그램의 일반화	35
1. 주프로그램의 구성변수	35
2. 난류방정식의 일반화	53
3. 실내환경평가 알고리즘	64
제5절 개발프로그램의 계산결과검토	68
1. Airview와 Phoenix의 계산결과 검증	68
2. 모형실험에 의한 타당성 검증	78
 제4장 연구개발목표 달성도 및 관련분야 기여도	84
제1절 연구개발목표 및 평가의 착안점	84
1. 최종목표	84
2. 연차별 연구목표	85
3. 평가의 착안점	86
제2절 연구개발 목표의 달성도	87
1. 연구개발 목표의 달성도	87
2. 상기평가의 착안점에 따른 달성도에 대한 자체평가	88
3. 계획대비 수행실적	89
4. 연구성과	90
 제5장 연구개발결과의 활용계획	91
제1절 추가연구의 필요성 및 타 연구에의 응용	91
제2절 연구의 기대효과	91
1. 기대효과	91
제3절 활용계획	93
제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보	94
제7장 참고문헌	95

- 표 목 차 -

표 1.1	도로터널방재 기술분야의 소요기술	6
표 2.1	범용CFD프로그램의 주요특징	10
표 3.1	유동형태에 따른 3차원 비압축성유동 해석 변수	36
표 3.2	Effective exchange coefficients and source terms for Φ of equation 7	38
표 3.3	실내기류유동의 해석방법과 난류모델의 요약	55
표 3.4	Davidson, LS 및 LB모델에 사용되는 계수 요약	61
표 3.5	쾌적감을 제공하기 위한 전열량 비율	64
표 3.6	작업별 신진대사량	65
표 3.7	PMV값의 정의	66
표 3.8	정확성검토용 시뮬레이션 해석조건 (1조건)	69
표 3.9	정확성검토용 시뮬레이션 해석조건(2조건)	72
표 3.10	정확성검토용 시뮬레이션 해석조건(3조건)	74
표 3.11	CASE별 환기효율 비교	83

- 그림목차 -

그림 1.1 3차원 작도 프로그램 Free Shop의 주요 기능	2
그림 1.2 범용 프로그램과 건축설비설계 전용 실내환경평가 프로그램의 관계 ..	2
그림 1.3 3차원 실내환경평가 프로그램 개발 연구단계	3
그림 3.1 Airview실행 초기화면	13
그림 3.2 전처기의 경계조건입력 기능	14
그림 3.3 3차원도메인 형상입력창	16
그림 3.4 객체정의 기능을 부여한 창	16
그림 3.5 inlet의 속성 부여창	17
그림 3.6 outlet의 속성 부여창	17
그림 3.7 fan의 속성 부여창	18
그림 3.8 Plate속성 부여창	18
그림 3.9 사용자 정의 속성 부여창	19
그림 3.10 blockage속성 부여창	19
그림 3.11 그리드 메쉬 설정창	20
그림 3.12 배경색 선정화면	22
그림 3.13 3차원 형상 투영종류선택화면 결과	22
그림 3.14 해석메뉴 구성화면	24
그림 3.15 해석방정식 선정창	25
그림 3.16 이완계수 선정창	26
그림 3.17 부력항 입력창	26
그림 3.18 온열환경평가 변수 입력창	26
그림 3.19 사용자에게 의해 정의된 격자수 확인창	27
그림 3.20 반복계산횟수 입력창	27
그림 3.21 계산과정 점검창 구성화면	28
그림 3.22 후처리기 구성화면	29
그림 3.23 후처리기 컨트롤패널의 구성과 기능설명	30
그림 3.24 particle trajectory기능을 활용한 3차원유동현상 표현	34

그림 3.25 엇갈린 격자계의 구성 개념도	41
그림 3.26 SIMPLER 알고리즘 구성 흐름도	50
그림 3.27 벽부근영역의 속도성분과 거리	57
그림 3.28 재실자의 착의량에 대한 상대기류속도와 기온의 관계	66
그림 3.29 P지점에서 신선외기의 수명과 체류시간에 대한 개념도	67
그림 3.30 체강방법을 적용하였을 때 오염물질 변화추이과정	67
그림 3.31 Airview결과점증용 해석형상	69
그림 3.32 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교	70
그림 3.33 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 온도분포)	71
그림 3.34 Airview결과점증용 해석형상 2조건	72
그림 3.35 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터분포)	73
그림 3.36 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 속도분포)	73
그림 3.37 Airview결과점증용 해석형상 3조건	74
그림 3.38 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터)	75
그림 3.39 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터 contour)	75
그림 3.40 비교해석조건 3조건의 Airview의 반복계산과정	76
그림 3.41 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 속도분포)	77
그림 3.42 실험장치 개략도	78
그림 3.43 CASE별 급, 배기구 설정조건	80
그림 3.44 CASE 1의 속도벡터 비교	81
그림 3.45 CASE 2의 속도벡터 비교	81
그림 3.46 CASE 3의 속도벡터 비교	82
그림 3.47 CASE 1의 LMA 비교	82
그림 3.48 CASE 2의 LMA 비교	83
그림 3.49 CASE 3의 LMA 비교	83

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

건축물의 기계설비시스템은 실내의 냉난방 부하를 제거하여 쾌적한 실내환경을 제공하는 기능을 수행한다. 건축기계설비 설계 및 시공업체에서는 효율적인 공조시스템을 구성하여 에너지 절약적이면서 쾌적한 실내공기질을 구현하기 위해서 설계 및 시공단계에서 공조설비 시스템의 에너지소비량을 평가뿐만 아니라 실내 온열쾌적감 및 실내 공기질에 대한 평가를 수행해야 된다. 이를 위해 현재 아래와 같이 분류된 시뮬레이션 프로그램이 사용되고 있다.

- ▶ 공조설비 열원시스템의 에너지소비량 평가 : DOE II, Transys 등.
- ▶ 실내온열 쾌적감, 실내 공기질평가 : Phoenix, Fluent, Star-CD, FDS 등.

건축기계설비 업계에서 주로 사용하고 있는 에너지 시뮬레이션 프로그램은 1980년도 초, 국외(미국, 영국 등)에서 개발되었다. 국내의 경우, 이러한 건축기계설비분야에서 사용되는 전문소프트웨어인 DOE-II, Transys와 같이 공조설비 열원시스템의 에너지소비량을 평가하는 프로그램으로 K-Load와 같은 것이 국산화되어 실용화 초기단계까지 응용기술이 발전하였다.

그러나 기류해석을 통하여 실내온열 쾌적감 및 실내 공기질을 평가하는 시뮬레이션 프로그램은 국산화시키지 못하고 주로 연구용으로 대학원에서 알고리즘 교육용으로 사용하고 있을 뿐만 아니라 알고리즘을 일반화시키지 못하여 외국에서 제작된 범용 전산유체역학 프로그램을 그대로 수입하여 활용하고 있다. 상업용 CFD 프로그램은 건물내의 기류유동 뿐만 아니라 산업 전 분야에 사용 가능하도록 범용성을 갖춘 것이다. 국내에서도 실험실 단위에서 CFD프로그램을 상용화하기 위한 노력을 부분적으로 하고 있으나 경쟁력을 갖춘 범용 프로그램을 개발하는 것은 쉬운 일이 아니다.

그나마 다행인 것은, 그동안 덕트 및 배관 설계에 있어서 주로 AutoCAD 등 범용 CAD프로그램을 이용하여 왔으나 (주)DCS의 꾸준한 노력으로 건축기계설비용

3차원 작도 프로그램인 Free Shop이 개발되어 사용상 편의성 덕분에 널리 활용되고 있다. Free Shop은 천정 내부에 설치되는 덕트시스템이 이동하는 경로에 배치되어 있는 구조체(보, 기둥), 급, 배수, 소화배관, 조명등과의 간섭체크를 편리하게 입체적으로 수행한다. 3차원 작도를 쉽게 수행하기 위해, 2차원 건축기계설비 도면을 자동으로 3차원화 할 수 있도록 한다. 천정내부를 이동하는 배관과 조명 및 구조도면을 3차원으로 변형시켜 간섭체크를 수행하고 덕트경로를 수정하는 작업을 수행한다.

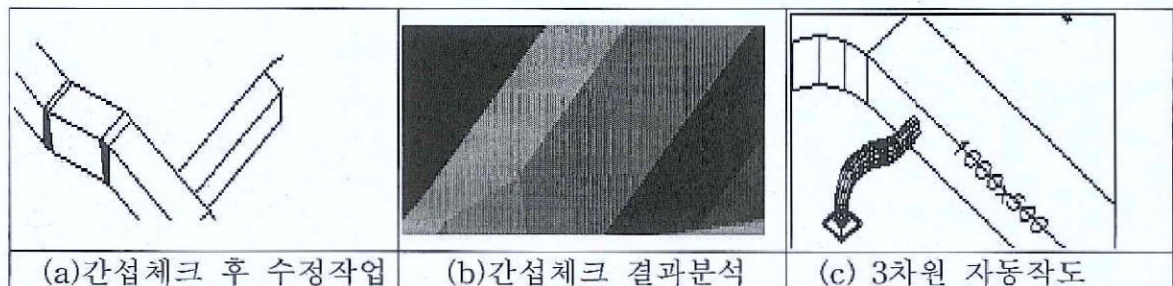


그림 1.1 3차원 작도 프로그램 Free Shop의 주요 기능

본 연구의 목적은 실내 측의 기계설비(천정내부의 덕트망 구성 과 급, 배기 디퓨저 배치) 3차원 작도가 완료된 Free Shop에서 3차원 작도로 사용되고 있는 디퓨저의 종류와 디퓨저 처리풍량을 시뮬레이션을 위한 입력 경계조건으로 활성화시켜 반자동으로 3차원 기류유동해석까지 수행할 수 있도록 기능을 확장함으로써 건축기계설비용 장비의 간섭체크 및 기류유동가시화 해석 및 실내환경 평가를 순차적으로 수행할 수 있는 일체형 설계 프로그램을 개발하는 것이다.

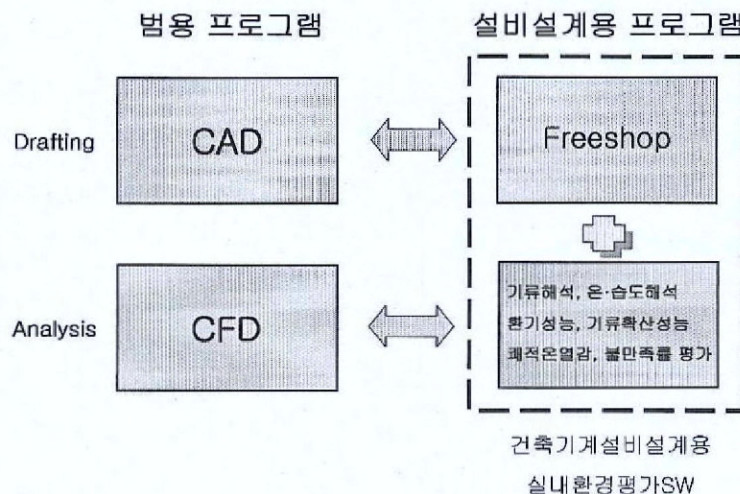


그림 1.2 범용 프로그램과 건축설비설계 전용 실내환경평가 프로그램의 관계

제2절 연구목표

1. 최종 연구목표

본 연구는 CAD 기반 기계설비설계 프로그램인 Free Shop과 연동되어 실내온열 쾌적감과 실내공기질 등의 실내환경을 평가하기 위한 3차원 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위한 것이다. 연구수행 단계는 아래와 같이 3단계(경계조건 입력, 주 프로그램, 계산결과 확인)로 구분된 시뮬레이션절차에 적합하게 개발됨으로써 기계설비의 설계단계에서 편리하고 효과적인 시뮬레이션 작업을 수행하여 설계에 반영할 수 있도록 한다.

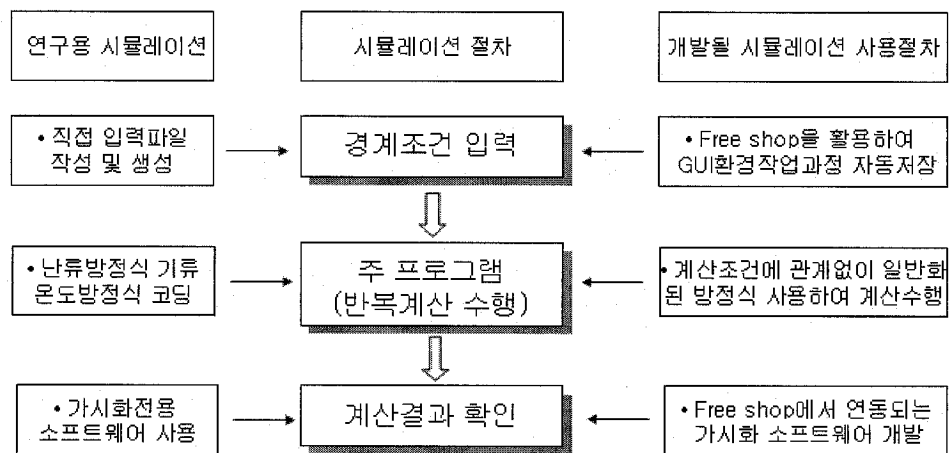


그림 1.3 3차원 실내환경평가 프로그램 개발 연구단계

2. 1차년도(2005. 7 ~ 2006. 6) 연구목표

3차원 기류유동가시화 프로그램을 개발하기 위해서는 경계조건입력창, 시뮬레이션을 수행하는 주 프로그램 알고리즘개발, 계산과정 점검창 및 계산결과 출력창으로 크게 구분할 수 있다. 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위해, 1차년도에 수행해야 될 과제는 경계조건 입력창에 필요한 항목을 검토하여 입력파일의 포맷을 구성하고 시뮬레이션 주 프로그램의 3차원 기류유동가시화 프로그램의 일반화된 알고리즘을 개발과 사용자 정의가 가능한 시뮬레이션 프로그램의 모듈화 작업을 하여 시뮬레이션 프로그램의 계산과정을 알고리즘 개발을 완료하는 것이다. 이와 더불어 계산결과에 대한 contour제작까지는 수행하지 못하지만 본 연구에서 개발된 시뮬레

이전 프로그램에 계산된 결과를 출력하여 국외에서 시판되고 있는 시뮬레이션 프로그램에서 계산한 결과와 비교 검토하는 것이 1차년도 본 연구개발의 목표로 설정한다. 본 연구를 통하여 개발될 시뮬레이션 프로그램은 국외에서 제작되어 시판되고 있는 시뮬레이션 프로그램과 일반적으로 동등한 기능 및 정확도를 보유한 직교좌표계 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램으로 개발되며 건축기계설비 분야의 특화된 기능을 탑재할 것이다.

3. 2차년도(2006. 7 ~ 2007. 6) 연구목표

1차 년도에 완료한 입력창 구성과 주프로그램 알고리즘 개발과정에서 발생한 문제점을 보완하고 1차 년도에 범용프로그램인 Phoenix와 계산결과 검증을 수행한 것과 동일하게 시뮬레이션 주프로그램의 타당성을 실험적으로 검증하기 위해, 유동가시화 실험이 가능한 축소모델을 고안하여 유동가시화 실험을 수행하고 시뮬레이션 계산결과를 실험결과와 비교하여 정확도를 평가한다. 이와 별개로 시뮬레이션 프로그램을 구성하는 GUI환경 중에서 계산결과 출력창을 완성하고 계산된 결과를 scalar변수는 칼라 contour로 구성하여 3차원 형상에 적합하게 계산결과를 표현하고 속도벡터를 칼라로 표현하는 계산결과 출력 창을 완성하여 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션프로그램의 개발을 완료한다.

제3절 연구의 내용

1. 총괄

연차	연구내용	세부내용 및 범위
1	□ 경계조건 입력창 구성 (I단계) - freeshop과 연동된 경계조건입력창. - 경계조건 입력변수 선정 - 경계조건 입력 형상구현 - 격자계 구현 - view기능 구현	- freeshop과 연동하여 입력창에 경계조건 계산영역 형상을 생성시킨다. - 경계조건입력변수를 경계조건변수를 3차원속도성분(u, v, w), 온도, 농도 및 난류에너지, 난류소산율에너지방정식으로 구분하여 선택 창을 구성하였다. - 경계조건 형상은 급/배기구, 블록, 벽체로 구분하고 형상이 구성되면 격자계를 구성하는 region이 자동으로 구성되도록 격자계 구성하였다. 3차원입체형상을 관찰하게 수월하도록 회전/줌/확대기능을 적용하였다.
2	□ 주프로그램 알고리즘개발(II단계) - 경계조건과 주프로그램 interface일반화 - Navier-stokes알고리즘 일반화 및 프로그램 개발. - SIMPLER알고리즘으로 압력방정식 일반화 및 프로그램 개발 - 난류에너지방정식, 난류에너지 소산율방정식을 High Reynolds수와 Low Reynolds수로 구분하여 일반화 및 프로그램 개발	- 본 연구에서 구성된 경계조건 창에서 입력된 자료를 주 프로그램에서 자동인식하도록 변환하도록 일반화알고리즘을 개발하고 프로그램을 구성하였다. - Patankar에 의해 고안된 일반화식을 활용하여 일반화 알고리즘 개발한 후, 프로그램을 작성하여 계산오차를 검증하였다. - 압력방정식을 SIMPLER알고리즘으로 구성하여 일반화하고 출구조건의 위치를 자동 인식하여 계산을 수행하도록 일반화프로그램을 작성하였다. - 난류방정식을 High/Low Reynolds수 두가지로 구분하여 선택하도록 프로그램을 구성하였으며 난류방정식을 일반화하고 경계조건을 자동 인식하여 계산이 수행되도록 일반화프로그램을 작성하였다.
2	□ 계산과정 점검창 구성 계산과정을 쉽게 점검할 수 있는 GUI환경의 출력창 구성	계산과정을 출력하여 계산과정을 GUI환경에서 쉽게 점검할 수 있도록 graph로 구성되는 창을 구성하였다.

2. 1차년도 연구내용 및 추진방법(2005. 7 ~ 2006. 6)

□ 경계조건 입력창 구성

- 경계조건 변수 도출
 - 경계조건입력 변수를 선정함.
(3차원운동량방정식변수 : U, V, W), 온도장(T), 오염장(C), 난류운동에너지(K), 난류에너지소산율(ϵ))
 - 계산조건 입력변수 설정(정상/비정상상태유동, 비정상상태 계산시간간격, high/low Reynolds모델, 온열쾌적감평가 변수, 초기값, 이완계수)
- 경계조건 물체(object)의 계산조건 및 크기/위치생성기능
 - 경계조건을 구성하는 물체에서 입력하는 경계조건은 표 1.1과 같이 변수의 입력값을 적용할 수 있다.

표 1.1 객체종류별 입력조건

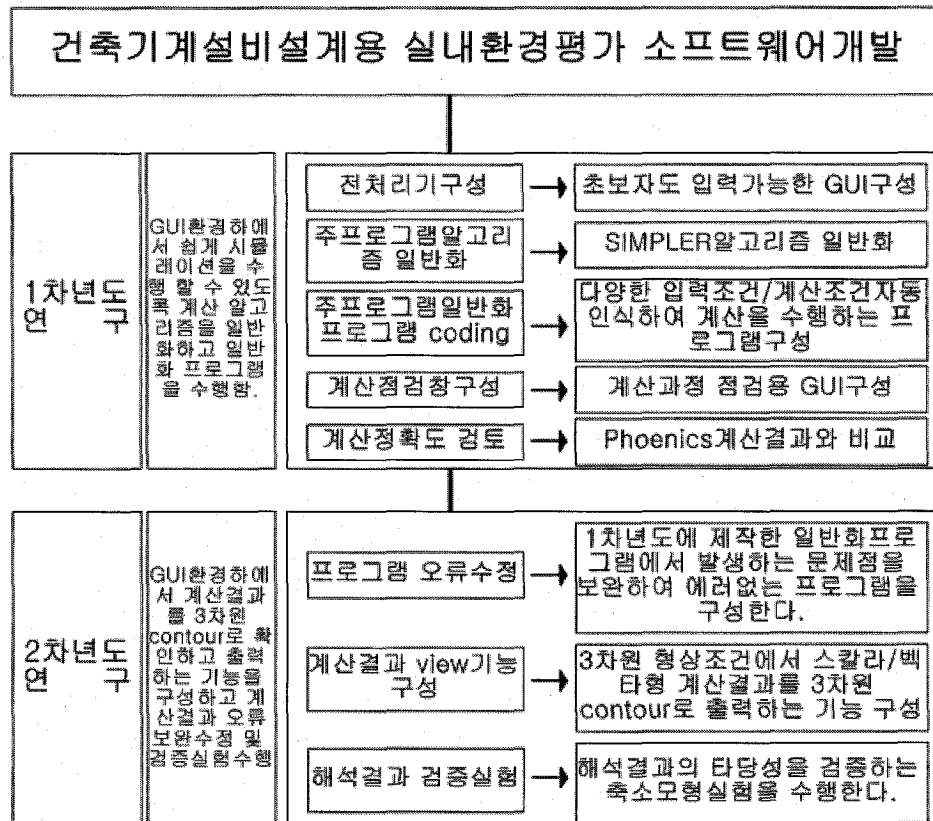
구 분	운동량방정식	에너지방정식	오염장방정식
블럭	u, v, w, k, ϵ	T (열량, 고정값)	C (플럭스, 고정값)
급배기구	u, v, w, k, ϵ	T (고정값)	C (고정값)
벽체	u, v, w, k, ϵ	T (고정값, 열량)	C (플럭스, 고정값)

- 경계조건위치/치수를 변경하는 기능 적용
- 격자계(grid system) 생성기능 결정
 - 해석영역에 물체를 적용하게 되면 자동으로 해석영역의 격자계를 구성할 수 있는 영역(region)이 형성되고 각 영역별로 세부 격자계를 구획하여 세분화하는 기능을 부여함.
- 형상 view기능 적용
 - 계산영역을 구성하는 경계조건내부의 형상이 3차원으로 구성되어 임의 물체에 가려진 부분을 세밀하게 관찰할 수 있도록 회전/줌/확대기능을 부여함.

□ 주프로그램 알고리즘 개발 및 프로그램 제작

- 주프로그램 알고리즘 개발
 - 주프로그램의 알고리즘은 patankar에 의해 제안된 일반화방정식을 적용하였음.
 - 격자계는 3차원해석이 가능하도록 압력방정식을 구성하여야 하기 때문에 엇갈린 격자계(staggered grid)를 적용하였음.
 - 압력방정식은 SIMPLER알고리즘을 적용하였으며 대류와 확산항의 상대적 크기를 평가하는 방법은 power law scheme을 적용하였음.
 - 난류에너지방정식과 난류에너지소산율방정식은 표준 $k-\epsilon$ 2차방정식인 high Reynolds수 모델과 low Reynolds수모델은 LS모델과 LB모델의 알고리즘을 일반화하였음.
- 주 프로그램 알고리즘의 프로그램
 - 경계조건을 입력창에서 생성된 자료를 주 프로그램에서 로딩한 후, 물체별 위치, 크기에 따른 경계조건을 자동 인식하여 주 프로그램의 경계조건으로 적용할 수 있도록 알고리즘을 고안하여 일반화하였고 프로그램을 제작하였음.
 - 주프로그램을 구성하는 일반화 알고리즘인 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식, 압력방정식, 온도장, 오염장을 구성하는 방정식을 프로그램으로 제작하였음.
 - 벽체, 급/배기구 및 블록 등과 같이 물체가 위치한 지점을 자동 인식할 수 있도록 프로그램을 구성하여 물체의 개수와 위치에 관계없이 해석이 수행할 수 있도록 프로그램을 구성하였음.
 - 계산과정을 점검하는 창에 선택된 지점의 해석변수 값이 출력되도록 프로그램을 구성하였으며 계산이 종료되면 재계산이 가능하도록 계산에 필요한 변수 및 변수별 계산 값을 자동저장하고 온열환경평가변수인 PMV와 환기 성능변수인 해석영역 평균 공기연령을 자동으로 저장하도록 프로그램을 구성하였음.
- 계산과정 점검창 구성
 - 계산과정에서 적용한 변수와 경계조건에 적합하게 계산이 수행되는지 선정된 지점에서 계산변수를 graph로 출력하도록 GUI환경을 구성하였고 수렴 정도 graph로 출력하도록 구성하였음.

제4절 연구추진체계



제2장 국내 및 국외 관련기술 동향

제1절 국내·외 기술동향

최근 국내에서는 실내공기질 관리법이 발효되고 환기장치의 설치가 의무화됨에 따라서 일반인들의 실내환경에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 설비설계에 있어서 실내환경 평가에 대한 요구가 많아지고 있다. 그동안 환기성능 및 열적쾌적성 등 실내환경평가 이론에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔고 범용 CFD 프로그램을 이용하여 실제적인 실내환경을 평가하는 업무를 주로 전산유체역학 전문가들에 의하여 수행되어 왔다.

그러나 국내 CFD 시장은 국외에서 개발된 상용코드에 의해 거의 지배당하고 있으며, 국내 기술에 의한 상용코드는 아직 존재하지 않는다. 코드개발을 위한 노력이 없는 것은 아니지만, 아직 대학원 교육과정의 일부를 차지하는 정도에서 벗어나지 못하고 있다. 열, 유체공학 전공과정을 개설한 국내 대학의 대학원 과정에서 CFD에 대한 과정을 포함하여 이 분야의 연구에 의욕적인 활동을 수행하고는 있지만, 학술 연구 목적의 연구용 프로그램 운용에서 크게 나아가지 못하고 있으며, 프로그램의 완성도와 전처리 및 후처리기와와의 연관성 등은 매우 미숙한 단계에 머물러 있다.

더구나 이러한 기술을 널리 현장 엔지니어가 실제 설계에 편리하게 활용할 수 있기 위해서는 편의성이 강조되고 설계 CAD프로그램과 연계된 형태의 프로그램이 필요하다. 그러나 실내환경 평가를 위하여 특화된 프로그램이나 설계단계에서 CAD와 연계된 형태의 프로그램에 대한 필요성을 인지하고 있으면서도 지금까지 이러한 프로그램의 개발이 시도된 바가 없다.

국외의 경우에는 실내환경 평가를 위하여 기류해석 및 환기성능을 시뮬레이션 하는 프로그램이 개발되어 왔다. 일본의 (주)대성건설과 같은 일부 대형 건설사에서는 상업용으로 개발된 것은 아니라 건축기계설비 도면을 작성하는 전문프로그램인 CAD기반에서 3차원 기류해석을 수행하며 태양열취득, 환기 및 쾌적온열감 평가를 수행할 수 있는 프로그램을 자체 개발하여 보유하고 있다. 이러한 실내환경평

가 전용 프로그램의 경우에는 전 세계적으로 보더라도 사용자의 수가 매우 제한되어 있지만 상호 경쟁하는 입장에서 판매를 꺼리며 초고가의 비용지불을 요구하는 것이 당연하다. 따라서 이러한 프로그램을 개발하지 못한 경우에는 불편하지만 상용화되어 있는 범용 CFD를 이용할 수밖에 없는 실정이다. 범용 프로그램에 대한 개발 동향을 소개하면 다음과 같다.

전 세계적으로 이미 1980년대 초반부터 상용 CFD 코드의 출시가 이루어져 상당한 수준의 프로그램들이 판매되고 있는 실정이며, 지속적인 기술개발로 그 기능을 향상시켜오고 있다. 최초의 상용 CFD 코드로는 1980년 영국 Imperial College의 Brian D. Spalding 교수가 직접 설립한 CHAM社가 출시한 Phoenix를 들 수 있으며, 이 후 FLUENT와 STAR-CD를 비롯한 다수의 코드들이 앞 다투어 출시되었다. 다음 표는 상용코드 중 주요한 코드들과 그 특징을 보인다.

표 2.1 범용CFD프로그램의 주요특징

CODE	개발국가	특 징
Phoenix	UK	- 최초의 상용 CFD 코드 - PARSON with Cartesian - Multiphase analysis
FLUENT	USA	- 미국 최대의 상용 CFD 코드 - 국내시장 최대 점유율 - Unstructured solver
STAR-CD	UK	- 일본시장 최대 점유 - Multiblock Technique
CFD-ACE	USA	- 범용 CFD 코드 - CFD-GEOM (전처리기) - CFD-VIEW (후처리기)

제2절 기술동향 분석 결론

위의 국내외 동향을 살펴본 결과, 국외의 범용 CFD의 개발은 성숙기에 접어들었으며 이를 응용하여 전용 CFD를 개발해 사용하고 있지만, 국내의 경우에는 건축기계설비 뿐 아니라 여러 분야에서 CFD에 대한 국내 관심과 수요는 증가일로에 있으나 범용 및 전용 CFD프로그램의 개발은 전무한 실정이다. 전처리 및 후처리 기능을 주프로그램에 탑재하여 범용성을 높인 CFD코드인 경우에도 환기성능 및 쾌적온열감을 평가하기에는 많은 시간과 이 분야의 전문지식을 습득한 전문가를 필요로 하기 때문에 열악한 경제상황을 보유한 건축기계설비 분야에서 기술력 향상을 위해 사용하는데 한계가 있다. 이로 인해, 기류유동해석을 수행하여 환기성능 및 쾌적온열감 등을 쉽게 해석할 수 있는 전용 CFD프로그램의 개발이 절실하게 요구되지만 이에 대한 제작기술은 기술적으로 서로 다른 분야를 구성하여 특정분야 전문가의 유기적인 관계가 매우 요구되게 되는데, 아직까지 국내에서는 이러한 관계를 구성한 예가 없다.

그러므로 국내의 그래픽 프로그래밍 분야 전문가와 건축기계설비 유경험자 그리고 실내환경평가 연구자가 보유한 기술을 한군데로 종합하여 공동으로 전용 프로그램을 개발하는 것이 필요하다는 결론이다.

제3장 연구개발 수행내용 및 결과

건축기계설비전용 실내환경평가 CFD프로그램을 2005년 7월부터 2007년 7월까지 2년 동안 개발한 결과, 전처리기, 주프로그램 및 후처리기로 구분되는 Airview (상품명 : 가칭)의 구성을 완료하였으며 본 프로그램을 이용하여 해석하는 성능검증작업도 완료하였다. 본 연구를 통하여 제작완료 된 프로그램의 구성과 해석결과를 나타내면 다음과 같다.

본 프로그램의 주요특징은 전술한 바와 같이 국외에서 제작된 범용 CFD프로그램과 다르게 초급기술자도 쉽게 사용할 수 있고 계산조건 입력 및 계산결과출력을 간단히 처리할 수 있으며 계산결과 수렴성을 평가하는 짧은 시간이 소요되도록 프로그램을 구성하였다. 또한 계산결과 출력은 scalar변수를 2차원 형태로 표현할 수 있는 contour와 속도분포를 표현할 수 있는 vector 및 3차원 형태의 유동형태를 표현 할 수 있는 particle trajectory기능 구현이 가능하도록 구성하였다.

제 1 절 전처리기

전처리기는 Freeshop과 연동된 형상이나 AirView 자체적으로 생성한 형상에 대한 경계조건을 설정하고, 격자계를 생성한다. 전처리기 작업을 완료한 후 파일을 저장할 경우 아래와 같이 4가지 파일이 생성된다.

- * .avd : 객체정보가 저장된 파일
- * .avr : 해석결과가 저장된 파일
- * .avs : 형상정보가 저장된 파일
- * .avp : 비직교좌표계 정보가 저장된 파일

그림 3.1은 AirView를 처음 실행했을 때 표현되는 초기화면이다. 그림 3.1에 보이는 초기화면은 경계조건입력의 편의성을 강화한 tool.bar와 main screen 및 control panel로 구성된다.

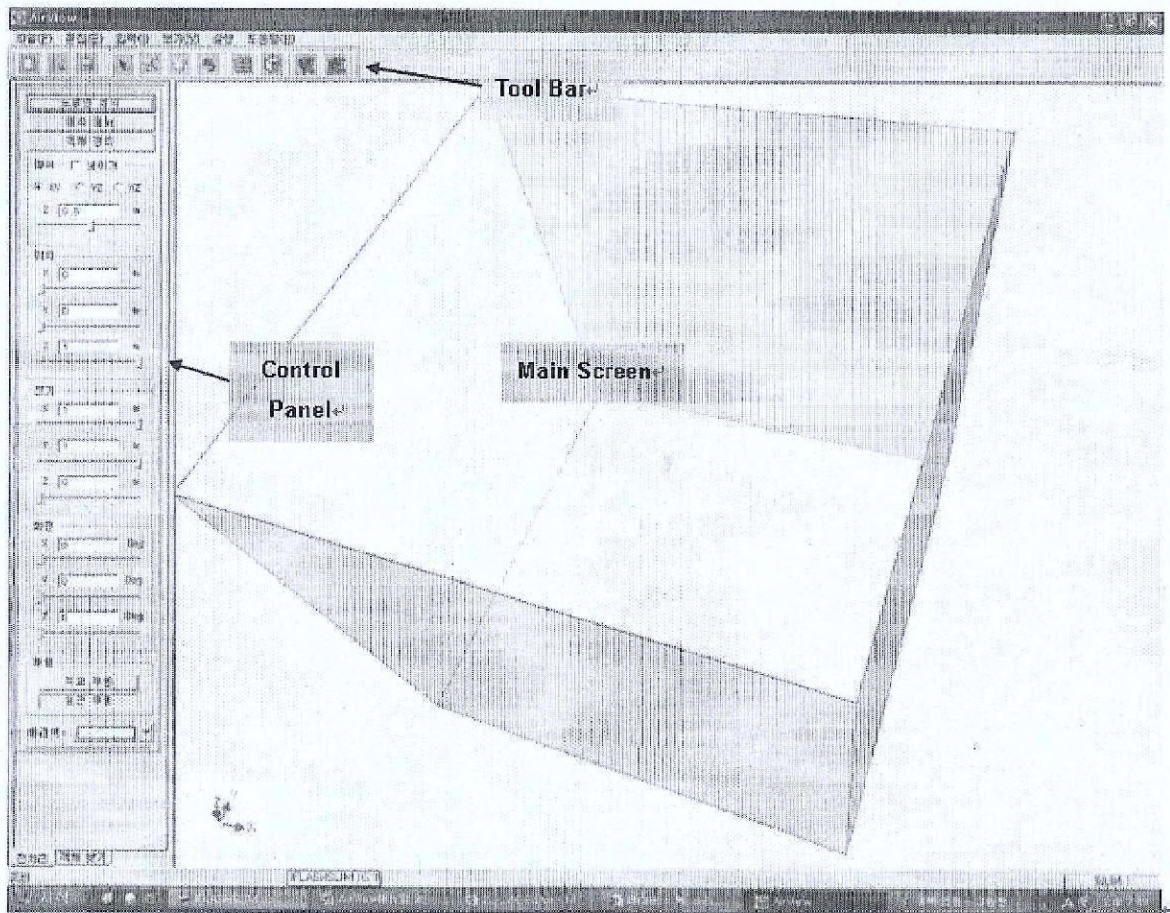


그림 3.1 Airview실행 초기화면

메인화면(main screen)은 3차원 해석형상을 나타내고 있다. 3차원 해석형상은 사용자가 6면의 쉽게 관찰할 수 있도록 회전기능을 부여하였고 회전기능외적으로 사용자 편의성을 향상시키기 위해, 제공하는 부가기능을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 해석도메인 선정 버튼
- 2) 객자계 생성 버튼
- 3) 3차원 형상 zoom in/out기능
- 4) 3차원 객체 정의 버튼
- 5) 메인화면 색상변경 창

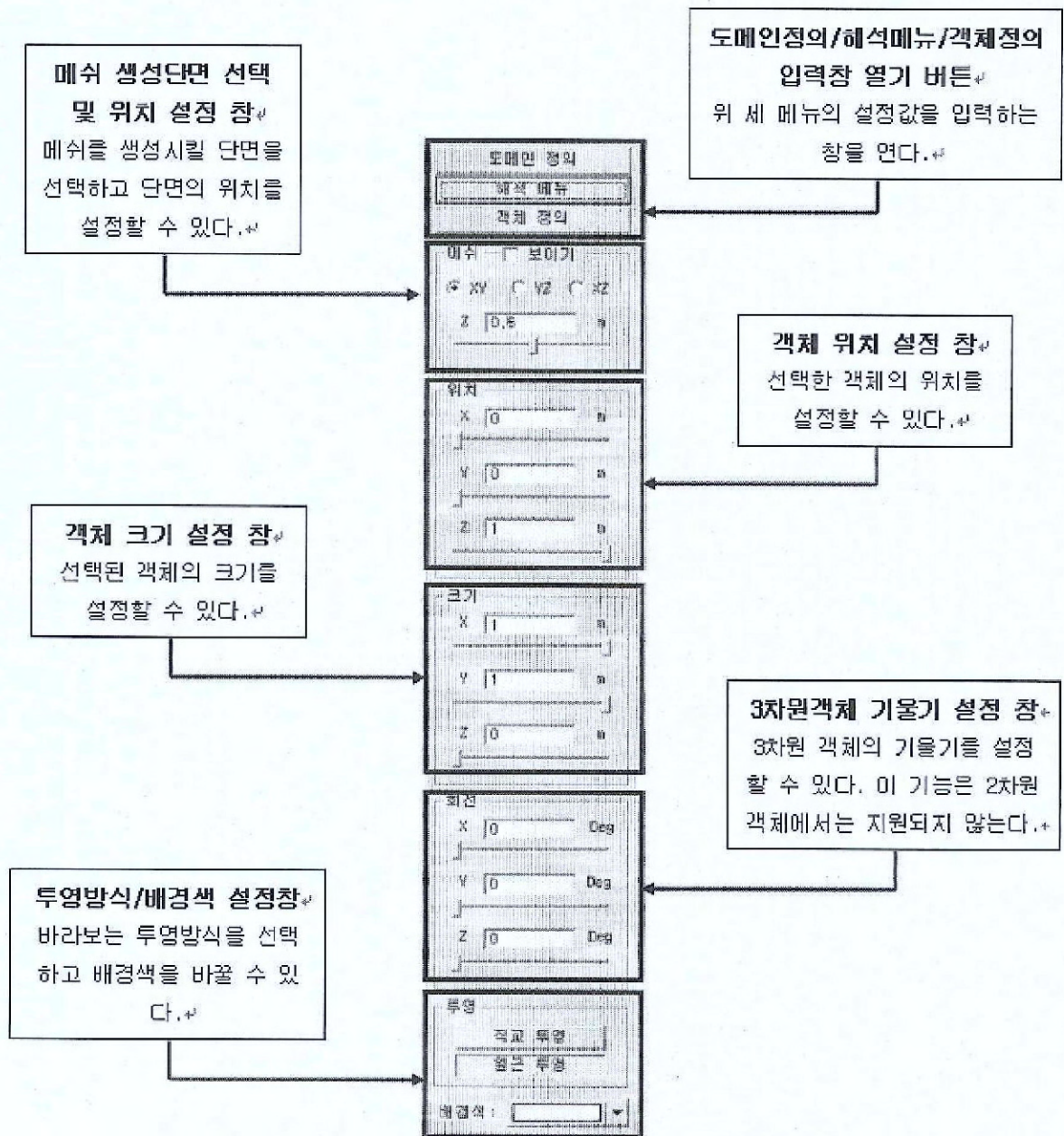


그림 3.2 전처리의 경계조건입력 기능

전처리기에서 경계조건을 입력하도록 편의성을 강화하기 위해, 그림 3.2와 같이 경계조건입력기능을 다양하게 구성하였다. 주요기능에 대한 설명은 그림 3.2에 표기하였으며 그 외적으로 구성된 다양한 기능에 대한 해설은 다음과 같다.

1.저장과 불러오기

(1) 새 창 열기

: 새 파일을 생성하고 새 창을 연다. 처음 프로그램을 실행했을 경우는 사용할 필요가 없겠지만, 기존 작업을 진행 중에 새 작업이 필요할 경우 프로그램을 종료하지 않고 새 파일을 생성할 수 있다. 기존에 진행 중인 작업은 '새 창 열기'를 실행하기 전에 저장하지 않으면 정보를 잃어버리므로 반드시 저장하도록 한다.

(2) 불러오기

: 기존의 저장되어 있는 파일을 불러온다. 전처리부에서는 객체정보가 저장되어 있는 .avd파일을 불러온다. 후처리부에서 계산결과 정보가 저장되어 있는 .avr파일을 불러올 때도 사용한다.

(3) 저장하기

: 입력된 해석형상, 정의된 객체, 해석조건 정보를 저장한다. 이 때 저장된 정보는 .avd파일에 수록되며 현재 해석되는 정보는 avdat파일에도 저장된다.

2.도메인

- 해석대상 실의 전체체적을 말한다. 도메인은 내부에 앞으로 설명할 객체와 해석부분에서 설정한 조건들이 적용되는 부분이다.

(1) 도메인 정의

: 도메인의 크기를 설정한다. 도메인 정의 버튼을 클릭하여 3차원 직교좌표계를 구성하는 X, Y, Z 각 방향의 길이를 입력한다.

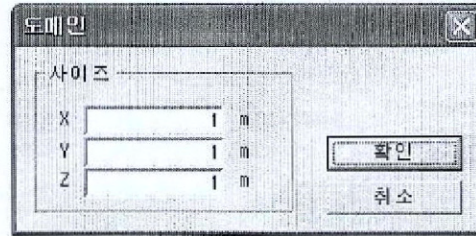


그림 3.3 3차원도메인 형상입력창

3.객체

- 경계조건을 설정하기 위한 각 요소들을 말한다. 본 프로그램에서는 INLET, OUTLET, FAN, PLATE, USRDEF, BLOCKAGE 이 5가지의 2차원과 3차원 객체를 제공한다. INLET, OUTLET, FAN, PLATE은 2차원 객체이고, USRDEF, BLOCKAGE는 3차원 객체이다.

(1) 객체 정의

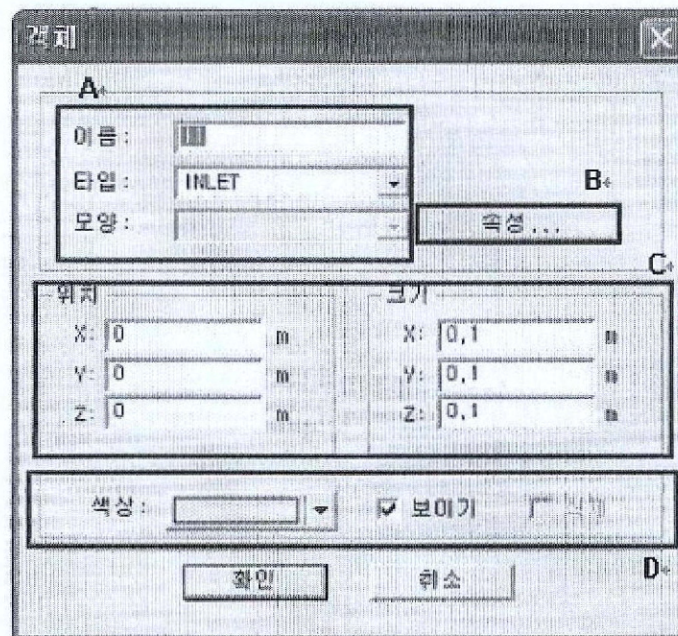
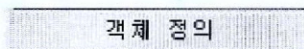


그림 3.4 객체정의 기능을 부여한 창

: 객체의 종류를 선택하고 입력변수, 크기, 위치를 설정하는 창을 연다. (A)객체의 이름은 초기값으로 각 객체의 첫 글자와 생성순서에 따른 번호로 구성되어 있

다. 타입은 앞에서 말한 5가지 중에 선택할 수 있으며, 모양은 3차원 객체인 USRDEF, BLOCKAGE에 대해서 상자, 원통, 원추 3가지를 지원한다. (B)속성 메뉴에서는 입력변수를 설정한다. 이에 대한 자세한 설명은 다음에서 하도록 한다. (C)위치와 크기는 도메인의 내부에 배치되는 2,3차원 객체의 위치와 크기를 설정한다. 위치와 크기의 수정은 키투를 패널에서도 가능한데, 원하는 객체를 선택 후 위치와 크기를 변경하면 된다. (D)사용자의 편의를 위해 각 객체에 대한 색상도 선택이 가능하도록 하였다. 본 프로그램에서 제공되는 각 객체의 속성은 다음과 같다.

① INLET

: 2차원 객체로서 속도벡터를 주 입력변수로 갖는다. 객체정의 창에서 속성메뉴를 통해 유속, 온도, 농도 값을 설정한다. 유속은 U, V, W 3방향 벡터를 통해 3차원적 방향으로 모두 설정이 가능하며 초기값은 0으로 설정되어 있다. 온도는 초기값으로 상온인 25℃가 입력되어 있다. 농도는 기준값으로 순수 공기를 0으로 설정하였다. 오염물질이 유입되는 경우 유입되는 오염물질의 농도를 적용하면 된다.

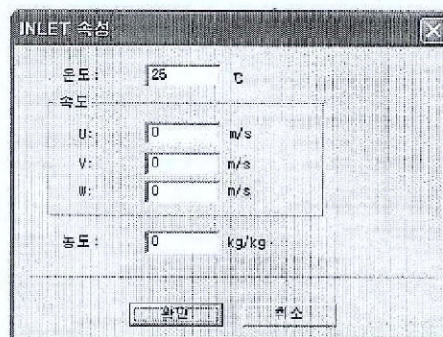


그림 3.5 inlet의 속성 부여창

② OUTLET

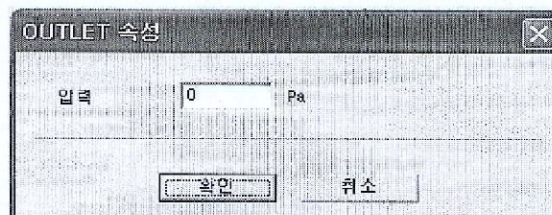


그림 3.6 outlet의 속성 부여창

: INLET과 마찬가지로 2차원 객체이며 압력만을 입력변수로 갖는다. 속성 메뉴

에서 출구영역의 압력을 설정할 수 있다. 초기값은 0으로 설정되어 있다.

③ FAN

: 팬을 설치했을 경우를 나타낸다. 따라서 INLET과는 다르게 속도벡터만을 입력 변수로 가진다. 그러나 벡터의 방향은 INLET과 마찬가지로 3차원적 방향에 대해 모두 설정할 수 있으며 초기값 역시 0으로 설정되어 있다.

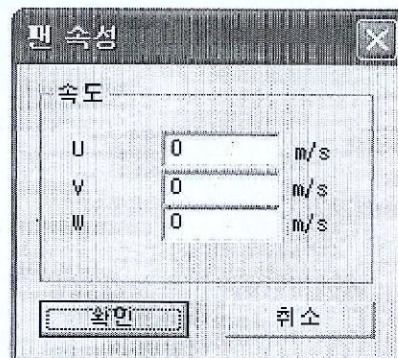


그림 3.7 fan의 속성 부여창

④ PLATE

: 벽체는 위치 및 크기를 2차원으로 정의하도록 구성되어 있으며, 속도경계조건은 0으로 설정되어 있다. 온도와 농도장을 해석할 수 있도록 온도/열량, 농도 경계조건을 입력할 수 있다. 열량과 농도는 총량(W , kg/kg) 또는 단위면적/단위시간당 발생량(W/m^2 , $kg/sec/m^2$, kg/m^2)으로 선택할 수 있다. 초기값은 0으로 설정되어 있다.

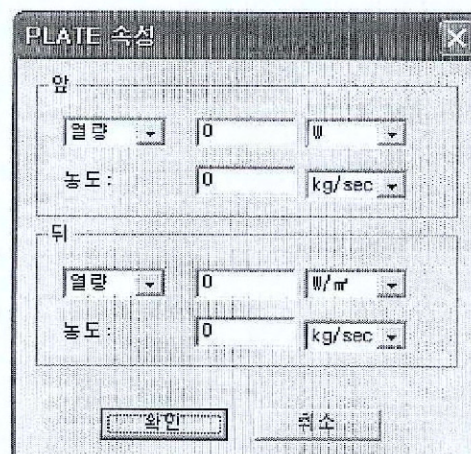


그림 3.8 Plate속성 부여창

⑤ USRDEF

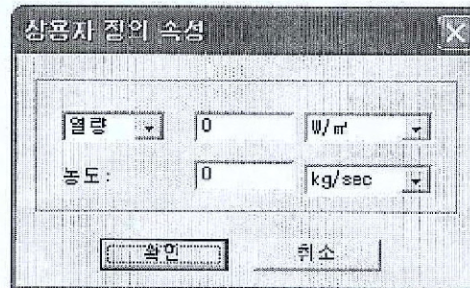


그림 3.9 사용자 정의 속성 부여창

: 사용자정의는 해석영역 내부체적에서 국소적으로 발생하는 열량 및 농도를 설정하는데 사용하는 3차원 객체이다. USRDEF의 객체 모양은 상자, 원통, 원추 세 가지 모양을 지원한다. 열량과 농도는 총량이나 단위시간/단위체적당 발생량으로 설정할 수 있다. USRDEF는 원 기능은 임의체적에 온도/농도 경계조건을 설정하는 기능 외에 격자체를 조밀하게 형성할 때에도 유용하게 쓰인다.

⑥ BLOCKAGE

: 해석영역 내부에 고체영역을 표현하는 3차원객체이다. 상자, 원통, 원추 세 가지 모양을 선택할 수 있으며, Solid 형태이므로 대류와 전도가 결합된 conjugated heat transfer를 해석할 수 있도록 열전도 계수, 열량(온도), 밀도, 비열 값을 입력하도록 구성되어 있다. 열량조건을 0으로 할 경우 단열조건으로 설정된다.

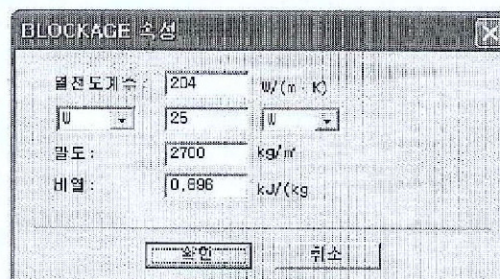


그림 3.10 blockage속성 부여창

4. 격자

(1) 격자생성



: 해석영역 내부에 생성된 각 객체의 경계선을 따라 Region이 생성된다. 각 Region의 구분선(적색선)이 격자계가 된다. Region 내부에 좌표 축과 평행하게 격자를 생성한다. 격자생성 메뉴에서는 각Region마다 좌표 축에 대한 격자의 개수를 입력한다. 메쉬설정창에서 Region을 선택하여 격자 수를 입력할 수 있다. 화면에서 마우스로 직접 Region을 선택도 메쉬설정창이 뜬다.

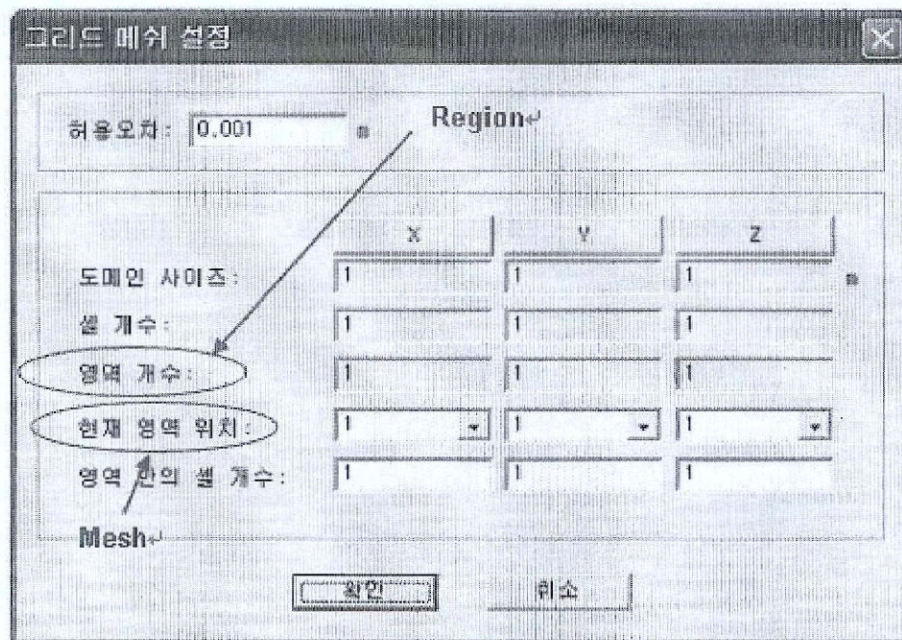


그림 3.11 그리드 메쉬 설정창

5.기타기능

(1) 관측시점 변경

① 이 동



: 현재 시점에서 스크린과 평행한 평면상에서 2차원 이동을 한다. 크기는 변하지 않고 시점만 변하게 된다.

② 배 율



: 화면 중앙(노란색 기점)을 기준으로 확대 또는 축소할 수 있다. 시점은 변하지 않고 크기만 변한다.

③ 회 전



: 마우스를 드래그하여 회전시킨다. 화면 중앙(노란색 기점)을 기준으로 회전한다.

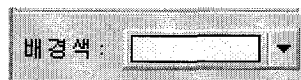
④ 선 택



: 관측시점 변경모드를 해제하고 객체를 선택할 수 있게 된다.

(2) 배경과 투영

① 배경색



: 배경색을 변경할 수 있다. 색상의 선택은 초기값으로 40가지의 색상을 지원하고, 사용자의 필요에 따라서 색상을 만들어 사용할 수 있다.

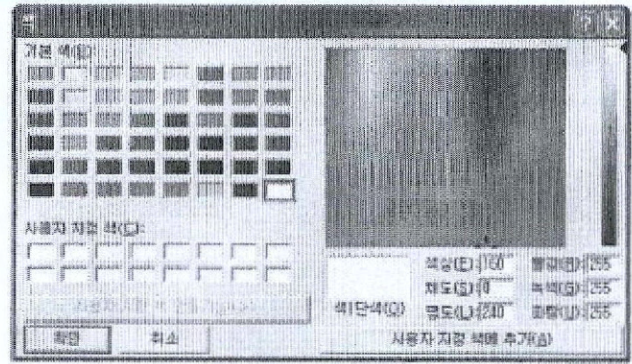
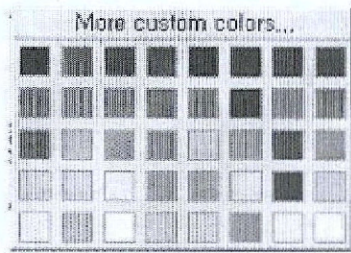
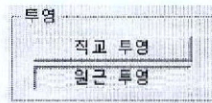
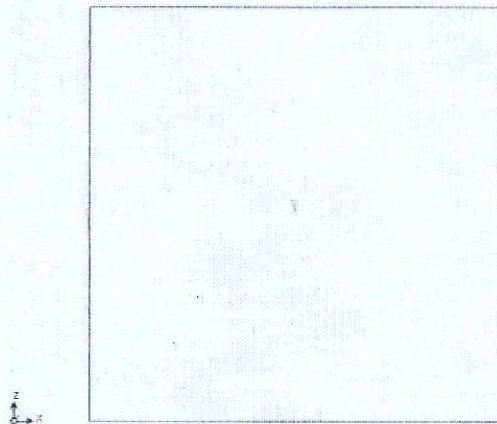


그림 3.12 배경색 선정화면

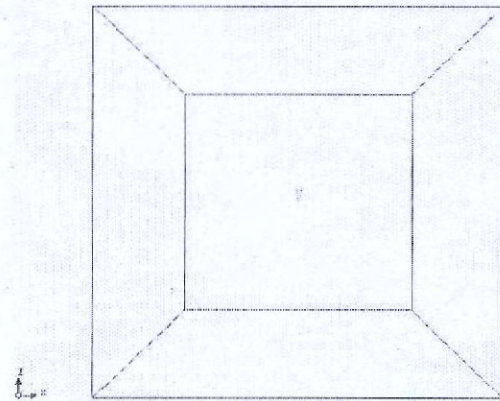
② 투영



: 직교 투영과 원근 투영의 2 가지 모드가 있으며, 직교 투영은 평행 육면체 모양의 관측공간을 사용한다. 시점과의 거리와 관계없이 공간의 양 끝면의 크기가 동일하기 때문에 객체의 크기와 각도를 정확하게 파악할 수 있다. 반면 원근 투영은 시점으로부터의 거리가 멀수록 작게 나타낸다. 때문에 실제 눈으로 보는 것과 같은 현실감 있는 표현이 가능하다.



직교 투영



원근 투영

그림 3.13 3차원 형상 투영종류선택화면 결과

(3)경계면 생성

① 벽



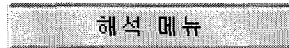
: 도메인 외부의 경계면에 벽체를 생성한다. 6면이 한 번에 생성되므로 편리하게 사용할 수 있다. 이 때 생성되는 벽은 객체 부분에서 설명한 PLATE와 동일한 객체이다.

제 2 절 주프로그램(해석: Solver)

해석에서는 전처리부에서 입력된 정보를 이용하여 연속방정식, 운동량방정식, 난류방정식, 에너지방정식, 농도방정식을 계산하고 급기효율, 실부하, 공기연령 등 실내환경변수를 평가할 수 있도록 구성되어 있다. 주 해석변수는 컨트롤 패널부분에서 설명한 해석메뉴 버튼을 선택하면 아래와 같은 입력 창이 나타난다. 해석변수는 그림에서와 같이 6개의 부분으로 구성되어 있으며 주요기능은 다음과 같다.

1. 해석변수

(1) 해석메뉴



: 난류모델, 이완계수, 온열환경변수 등 해석에 필요한 조건들을 설정한다. 해석 메뉴는 전처리 컨트롤 패널에 있는 해석메뉴 버튼을 통해 설정할 수 있다.

해석 메뉴

해석 방정식 난류모델: LOW REYNOLDS Davidson model 시간변화: STEADY 온도: T 농도: T 초기값: [] ...		이완계수 압력: 1 U 속도: 0.9 V 속도: 0.9 W 속도: 0.9 난류에너지: 0.9 난류소산율: 0.9 농도: 0.9 온도: 0.9	
부력 (nb) X-방향: 0 Y-방향: 0 Z-방향: -9.8		온열환경평가변수 의복착의량: 1 CLO 활동량: 1.2 MET 실내상대습도: 50 RH(%)	
격자 수 X-방향: (6) Y-방향: (2) Z-방향: (1)		반복 계산 횟수 초기 반복계산횟수: 3000 회	

확인 취소

그림 3.14 해석메뉴 구성화면

① 해석 방정식

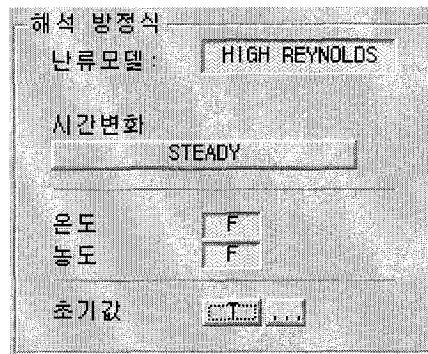


그림 3.15 해석방정식 선정창

: 해석 방정식에서는 난류모델, 시간변화, 온도방정식과 농도방정식의 유무, 초기값을 설정할 수 있도록 구성하였다. 본 프로그램은 해석변수의 선택기능을 최대한 간편하게 하였다. 벡터방정식, 압력방정식 및 온열패적감 및 공기연령평가 방정식이 기본적으로 설정되어 있어 사용자가 직접 설정하지 않고 해석이 가능하므로 사용자는 온도장과 농도장에 대한 해석여부만 선택하면 된다.

난류모델은 k- ϵ 모델을 바탕으로 아래와 같이 고레이놀즈수와 저레이놀즈수로 구분하여 해석할 수 있도록 하였다.

- HIGH REYNOLDS
- LOW REYNOLDS
 - 1) Davison model
 - 2) Lam-Bremhorst(LB) model
 - 3) Launder-Sharma(LS) model

저레이놀즈수에는 3가지 모델이 있으며 선택적으로 사용할 수 있으며, 각 모델의 차이점은 'Part1. REFERENCE'에 자세히 설명되어 있다.

② 이완계수

: 해석에 사용되는 모든 방정식의 반복계산에 대한 이완계수를 선택할 수 있도록 구성하였다. 온도장과 농도장은 고려하지 않을 경우 이완계수 입력창이 생성되지 않는다.

이완계수	
입력	1
U 속도	0.3
V 속도	0.3
W 속도	0.3
난류에너지	0.3
난류소산율	0.3

그림 3.16 이완계수 선정창

③ 부력

: 해석조건에 온도방정식이 포함될 경우 사용되며, 초기값으로 Z축 방향으로 -9.8이 설정되어 있다. 온도장을 해석하지 않으면 부력창은 비활성화 된다.

부력 (m/s²)	
X-방향:	0
Y-방향:	0
Z-방향:	0

그림 3.17 부력항 입력창

④ 온열쾌적감(PMV)

: 실내온열환경을 평가하기 위한 입력변수를 설정할 수 있다. 변수로는 의복착의량, 활동량 및 실내상대습도이다. 온도장을 해석하지 않으면 온열환경평가변수 입력창은 비활성화 된다.

온열환경평가변수		
의복착의량	1	CLO
활동량	1.2	MET
실내상대습도	50	RH(%)

그림 3.18 온열환경평가 변수 입력창

⑤ 격자 수

: 각 좌표축에서 생성된 최종 격자의 개수에 대한 정보를 사용자에게 보여준다. 격자의 개수는 해석시간에 영향을 미치므로 해석결과에 영향을 미치지 않는 한도 내에서 가능한 적게 만드는 것이 효율적이다.

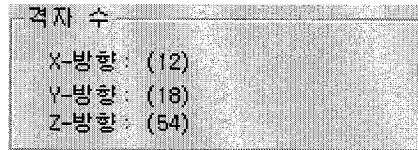


그림 3.19 사용자에게 의해 정의된 격자수 확인창

⑥ 반복계산 회수

: 계산의 반복횟수를 설정할 수 있다. 본 프로그램에서는 수렴조건에 대한 설정이 따로 있지 않으므로 반복계산 회수를 이용하여 계산이 종료되도록 구성되어 있다.



그림 3.20 반복계산횟수 입력창

2. 계산

(2) 실행



: 해석조건 및 격자계 생성이 완료되면 해석을 수행하게 되며 해석을 수행하기 위해서는 실행에서 솔버를 클릭한다. 솔버를 실행하면 계산점검창이 나타나게 된다. 계산점검창은 관찰지점에서 각 변수의 계산단계에서의 변화값과 수렴성을 판단하는 연속방정식의 변화값을 그래프로 나타내며 퍼센트오차가 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ 이하이면 수렴했다고 판단한다.

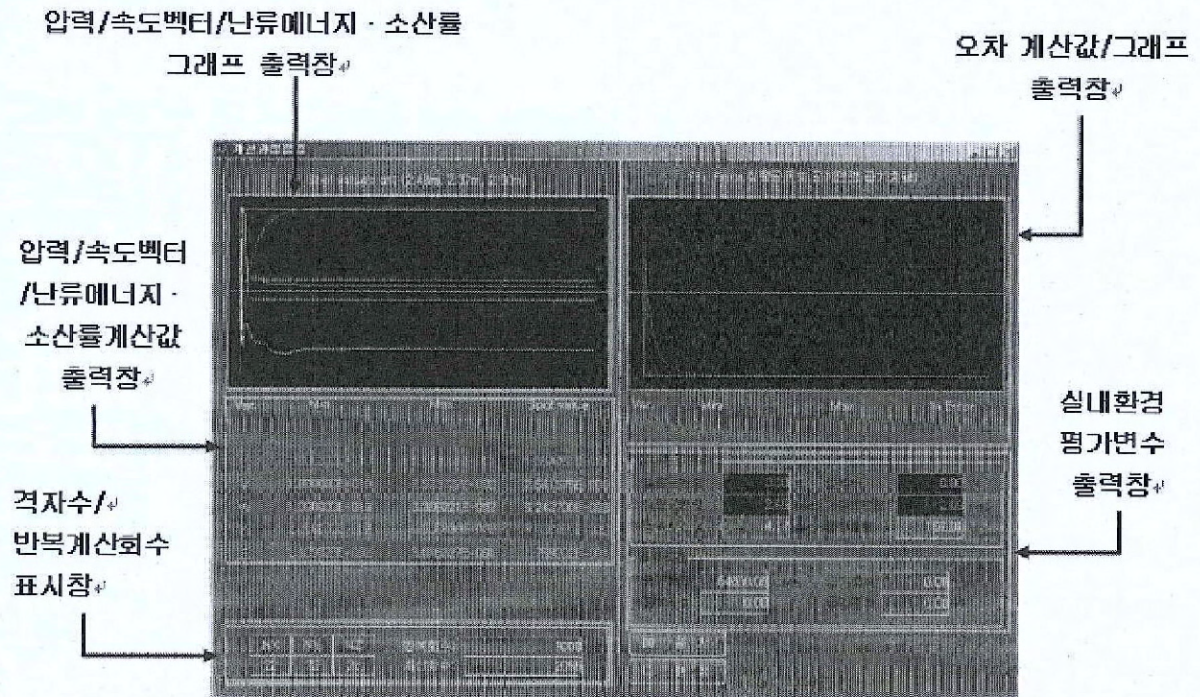


그림 3.21 계산과정 점검창 구성화면

주 프로그램의 실행을 최대반복계산회수 이전에 종료하길 원할 경우 '중지'버튼을 2회 클릭한 뒤 3초 후에

'종료'버튼을 클릭한다. 그러면 계산과정점검 창이 사라지고 중지시점까지 계산된 결과가 .avr파일에 저장되게 된다. 이후 후처리를 이용하여 계산결과를 검토할 수 있다.

제 3 절 후처리(Post-Process)

후처리부에서는 계산된 결과를 바탕으로 벡터와 컨투어를 표현한다. 이를 위해 변수선택창, 컨투어·벡터선택창이 구성되어 있고 컨투어의 색상분할도, 단면분리 및 단면위치의 조절이 가능하다. 또한 유동현상의 이해를 돕기 위해 입자유동을 표현할 수 있는 기능을 부여하였으며, 계산결과를 출력하는 기능을 가지고 있다.

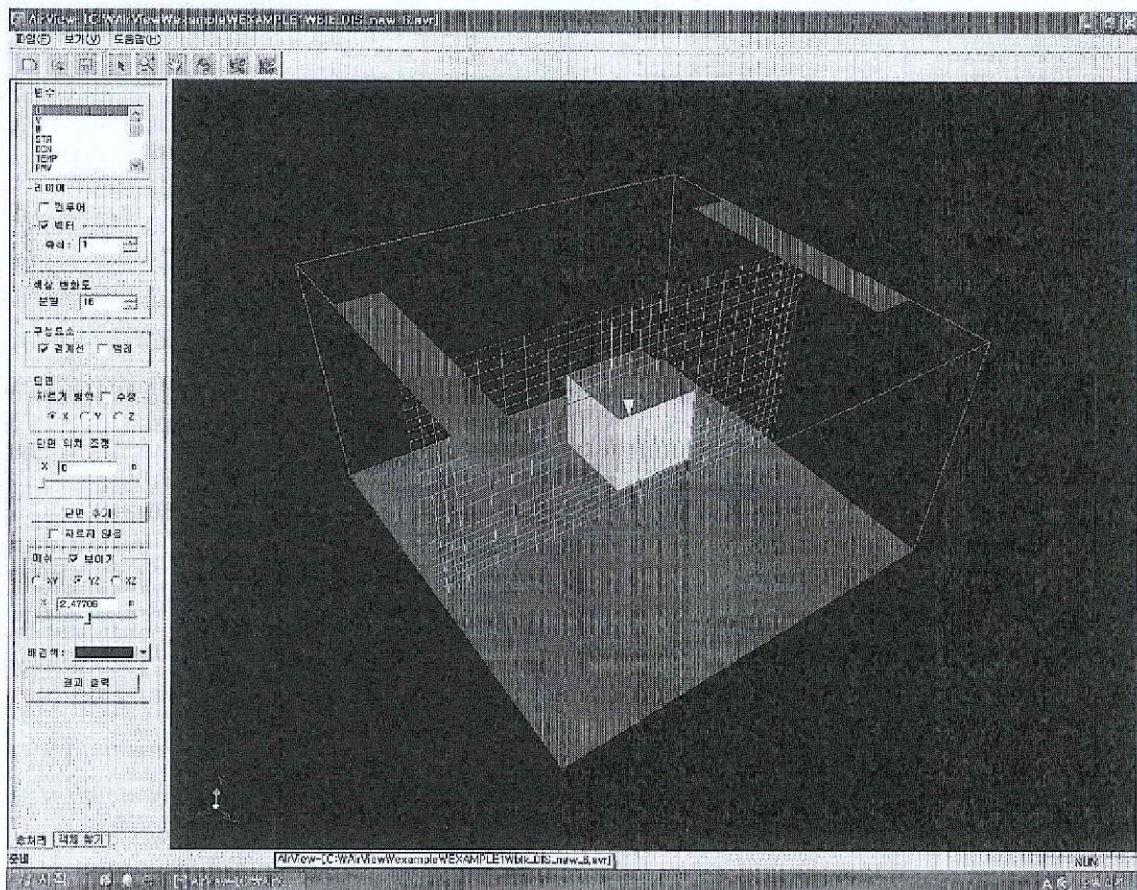


그림 3.22 후처리기 구성화면

1. 결과값의 표현

- 해석의 결과값을 여러 형태로 표현할 수 있게 하여 보다 쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 여러가지 변수를 지원하여 원하는 변수의 결과를 효율적으로 표현할 수 있고, 2차원과 3차원적인 표현이 모두 지원된다. 또한, 파티클메뉴를 통하여 입자의 이동경로를 쉽게 파악할 수 있다. 후처리부의 메뉴는 다음과 같다.

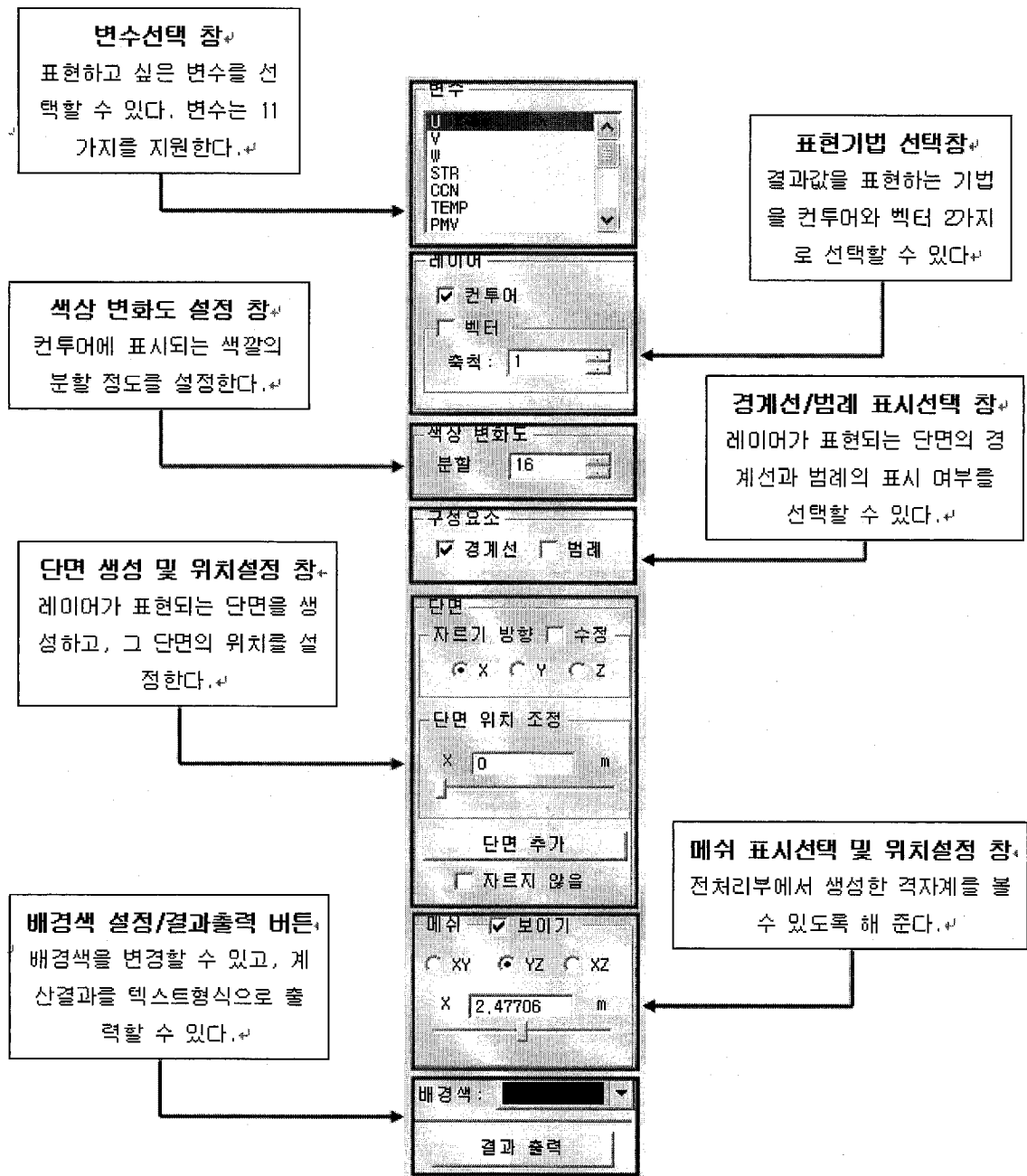
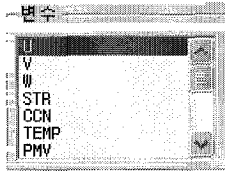


그림 3.23 후처리기 컨트롤패널의 구성과 기능설명

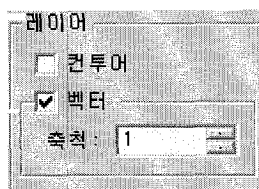
(1) 변수



: 관찰하고자 하는 변수의 종류를 선택한다. 변수는 12가지가 지원되며 다음과 같다.

- 1) U 좌표계의 X축방향에 해당하는 속도벡터를 보여준다.
- 2) V 좌표계의 Y축방향에 해당하는 속도벡터를 보여준다.
- 3) W - 좌표계의 Z축방향에 해당하는 속도벡터를 보여준다.
- 4) Velocity 속도벡터의 분포를 보여준다.
- 5) CCN 농도장을 해석하였을 경우 해석된 농도분포를 보여준다.
- 6) TEMP 온도장을 해석하였을 경우 해석된 온도분포를 보여준다.
- 7) PMV 온열쾌적감을 보여준다.
- 8) AKE 난류 에너지 분포를 보여준다.
- 9) DIS 난류 소산을 분포를 보여준다.
- 10) AGE 공기연령 보여준다.
- 11) P 압력분포를 보여준다.

(2) 레이어



: 표현하고자 하는 기법을 선택한다. 컨투어는 결과값의 일정한 범위에 따라 다른 색상으로 표현함으로써 색상의 변화로 값의 변동을 보여준다. 벡터는 값의 범위에 따라 화살표의 크기와 색깔로 표현한다. 값의 변화는 범례에서 확인할 수 있다. 벡터의 축척은 벡터를 표현하는 화살표의 크기를 나타낸다. 이 때 화살표의 크기는

벡터값에 비례하여 길이가 정해지므로 전체적이 크기의 비율을 변화시키기 위해 비율계수를 변경하도록 구성되어 있다.

(3) 색상 변화도



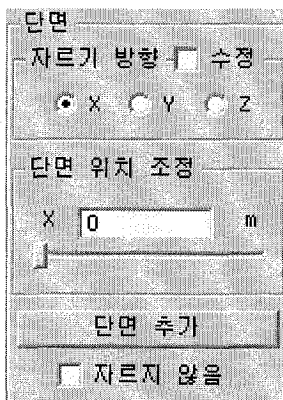
: 컨투어에 표시되는 색상의 분할 범위를 설정한다. 분할이 많아질수록 한 색상에 대한 값의 범위가 작아지므로 좀 더 세밀한 표현이 가능하다.

(4) 구성요소



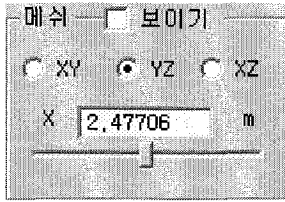
: 경계선 메뉴는 벡터나 컨투어를 표시하는 단면의 경계선 유무를 선택할 수 있고, 범례 메뉴는 범례표시 유무를 선택할 수 있다.

(5) 단면



: 벡터나 컨투어를 표시하기 위해서는 좌표축의 방향으로 단면을 잘라야 한다. 그리고 그 단면을 관찰하고자 하는 부분으로 이동시킨다. 단면은 원하는 만큼 계속해서 생성가능하며 서로 다른 방향의 단면을 교차시키면 좀 더 효과적으로 관찰할 수 있다. '자르지 않음'메뉴를 선택할 경우 3차원으로 모든 방향에 대해 입체적으로 변수들을 표현한다. 또한 단면은 계산결과 출력에 사용된다.

(6) 메쉬



: 전처리부에서 생성한 격자를 보여준다. 후처리기에서 메쉬기능은 입자유동의 시작위치를 선정하기 위해 사용된다. 입자유동 시작위치 선정은 '(8)파티클'부분에서 설명하기로 한다.

(7) 결과출력



: 본 프로그램은 계산된 결과를 출력하는 기능을 제공한다. 결과출력 메뉴를 선택하면 변수창에 선택된 변수에 대해 현재 위치하고 있는 단면의 위치에 해당하는 정보를 출력할 수 있으며 해당면에 존재하는 선 상의 정보도 저장할 수 있다.

※결과출력은 DAT파일로 저장되며 TEXT형태로 볼 수 있다.

(8) 파티클 Ctrl+A

: 해석된 결과를 바탕으로 입자의 이동경로를 확인할 수 있다. '메쉬'를 이용하여 입자생성기점(노란색)을 선택한 후 Tool바 메뉴에서 '보기' 메뉴에서 파티클시작을 선택한다. 단축키 'Ctrl+A'를 누르면 기점위치에서 입자가 생성되어 그림 3.24와 같이 계산된 유체의 이동경로(stream line)를 따라 흘러간다. 입자는 단축키를 한번 누를 때마다 5개씩 생성된다. 입자생성기점은 앞에서 설명한 '(6)메쉬' 메뉴에서 단면(XY, YZ, XZ)을 선택하여 X,Y,Z 방향의 위치를 선정한다.

※시작 : 기점 위치 선택→'보기'→'파티클 시작'→'Ctrl+A'

종료 : '보기'→'파티클 종료'

(9) 해석결과 자료활용

해석이 종료되면 해석된 결과를 검토하는데 사용하는 "INDOOR.DAT"와 "NET_BAL.OUT"이라는 2종류의 파일이 자동생성된다. INDOOR.DAT는 해석을 위해, 적용된 입구 및 실내에서 발생하는 오염농도, 열량, 온도, 풍속 및 풍량조건

을 나타내며 이러한 조건을 이용하여 해석된 결과를 명목시간상수, 급기효율, 실내 평균농도 및 PMV 등으로 표현한다. 또한 NET_BAL.OUT이라는 파일은 출력되는 자료는 계산이 종료된 시점의 입출구 질량유량 차이 및 x, y, z방향의 질량유속 등을 나타내므로 수렴성 검증에 유용하게 사용할 수 있다.

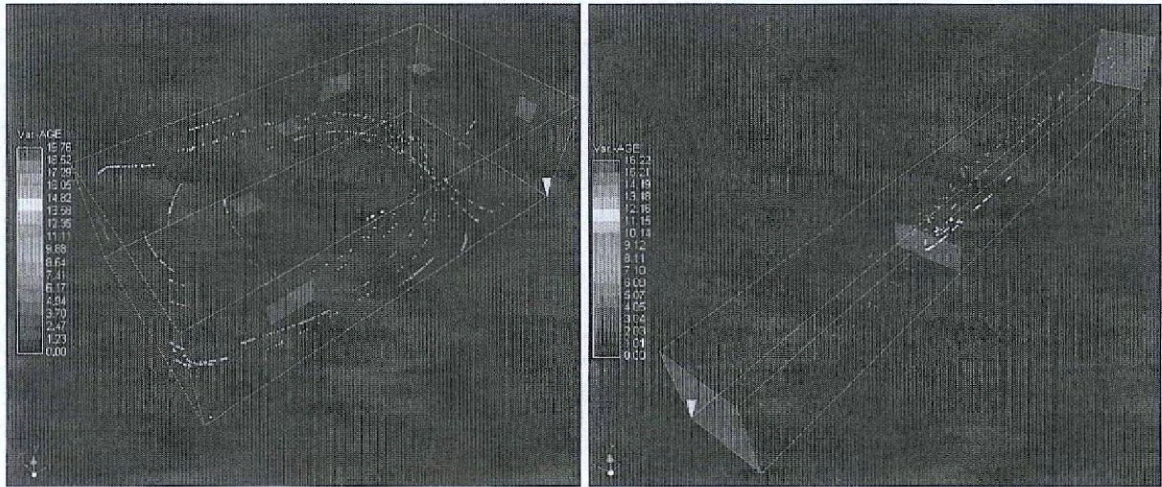


그림 3.24 particle trajectory기능을 활용한 3차원유동현상 표현

제 4 절 주 프로그램 일반화

Airview 베타버전에 구성된 주 프로그램은 범용성 있게 계산을 수행하는 기능을 부여하기 위해, 다양한 형상에 적용된 급배기구, 블록 및 벽체의 위치를 자동인식하도록 하고 각 객체에서 제공하는 각 변수의 조건을 주 프로그램에 받아들이도록 프로그램을 구성하였으며 일반화 내용을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1. 주 프로그램 구성변수 일반화와 격자계
2. 난류방정식의 일반화
 - High Reynolds수의 난류운동에너지방정식, 난류소산율방정식
 - Low Reynolds수의 난류운동에너지방정식, 난류소산율방정식
3. 실내 환경평가 변수인 공기연령, PMV계산 프로그램개발

1. 주 프로그램 구성변수

시뮬레이션을 수행하는 프로그램은 크게 2가지 방법, 즉, 유한차분법(finite difference method ; FDM)와 유한요소법(finite element method ; FEM)을 이용하여 구성한다. 본 연구에서 채택한 해석 알고리즘은 직교좌표계의 해석이 가능하도록 차분화를 수행할 수 있는 유한차분법(FDM)이며 주프로그램을 구성하는 Navier's stokes방정식과 압력방정식, 실내환경 평가방정식의 구성방법과 더불어 이산화된 변수해석을 수행할 때, 적용한 대류-확산항 처리 및 격자계의 구성을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

가. 실내환경평가 방정식의 구성

3차원 운동량방정식을 구성할 때, 사용하는 변수는 유동현태에 따라 표 3.1과 같이 정리될 수 있다. 실내환경을 평가할 때, 사용되는 3차원 운동량방정식, 난류에너지방정식과 난류소산율방정식, 온도 및 농도 장을 해석할 때, 사용되는 미분방정식은 식(1)-식(6)와 같이 정의된다.

표 3.1 유동형태에 따른 3차원 비압축성유동 해석 변수

해석 방정식	순수유동	강제대류	자연대류
연속 방정식	u, v, w	u, v, w	u, v, w, T
x 방향운동량방정식	u, v, w, p	u, v, w, p	u, v, p, w, T
y 방향운동량방정식	u, v, w, p	u, v, w, p	u, v, w, p, T
에너지 방정식	-	u, v, w, T	u, v, w, T
미 지 수	u, v, w, p(4개)	u, v, w, p, T(5개)	u, v, w, p, T(5개)

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \overline{u_i u_j}] + \delta_{ij} \rho g \beta \Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

난류에너지방정식(k) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k \\ & - \rho \epsilon + G_B \end{aligned} \quad (3)$$

난류에너지소산방정식(ε) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k \\ & + G_B) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

에너지방정식 :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{1}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

농도방정식 :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \left(\frac{1}{Sc} + \frac{v_t}{Sc_t} \right) \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + R_c \quad (6)$$

상기 식 (3)과 식(4)에서 사용된 난류모델상수와 온도장 혹은 농도장을 해석하기 위해, 정의 되는 난류와 층류의 프란틀수와 Schmidt수는 아래와 같이 정의된다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad G_B = -g\beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{1}{\rho},$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, Pr_t = 1.0, Sc_t = 1.0,$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, C_3 = 1 + \frac{G_B}{G_k}, \mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon},$$

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

식(1)-식(6)에서 정의된 운동량, 에너지 및 농도장에 해당하는 미분방정식을 해석하여 구한 속도장과 농도장을 활용하여 공기연령을 산정할 수 있으며 이 값을 이용하여 실내에 적용된 공조 및 환기시스템이 제공하는 환기효율을 평가할 수 있으며 이에 대한 자세한 내용은 다음 절에서 세부적으로 언급한다.

1) 명목시간상수(nominal time constant)

$$\tau_n = \frac{V}{Q} \text{ (sec)}$$

여기서, V = 실내의 체적 (m³)

Q = 급기풍량(m³/sec)

2) 국소교환효율(local air exchange efficiency)

$$\varepsilon_{a.p} = \frac{\tau_n}{\tau_p} \text{ (sec)}$$

여기서, τ_p = 각지점의 국소평균 연령

3) 국소평균연령(local mean age)

$$\tau_p = \int_0^\infty \frac{C(t)dt}{C_0} = \frac{C_\infty}{R_c}$$

시뮬레이션을 위해, 사용하는 식(1)-식(6)을 구성하는 미분방정식은 식(7)과 같이 방정식의 종류에 관계없이 대류항과 확산항 그리고 소스항으로 구분하여 모든 변수명을 Φ 로 일반화하고 각 방정식 Φ 에 해당되는 확산계수를 Γ_Φ 으로 소스항을 S_Φ 으로 정의함으로써 일반화방정식을 구성할 수 있다고 patankar가 제안한 정의를 사용하였고 이에 적합한 알고리즘을 구성하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}) + S_\Phi \quad (7)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j}) + g_j$$

식(7)의 일반화된 미분방정식에 적용되는 확산계수와 소스항은 표 3.2와 같이 정리할 수 있다.

표 3.2 Effective exchange coefficients and source terms for Φ of equation 7

방정식	Φ	Γ_Φ	S_Φ
연속	1	0	0
운동량	u_j	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j}) + g_j$
엔탈피	T	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	S_T
난류운동에너지	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k + G_B + \rho \epsilon$
난류에너지소산율	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [(G_k + G_B)(1 + C_3 R_f) C_1 - C_2 \rho \epsilon]$
농도/물질전달	m_i	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{m_i}}$	S_C

여기서, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $\sigma_f=1.0$, $\sigma_m=1.0$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_\mu=0.09$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j}, \quad G_B = -g \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{1}{\rho}$$

실내공간에서 발생하는 유동현상은 공조시스템에 의해, 강제적으로 실내에 신선 공기 혹은 가열/냉각된 공기가 공급되는 강제대류가 발생한다. 이러한 유동해석을 시뮬레이션으로 구현하기 위해서는 기류의 유동해석을 가능하게 하는 유한차분식을 구성해야 한다. 유한차분법을 이용하여 운동량을 계산하기 위해서는 Navier's stokes equation을 적용하여야 되며 유동을 해석하기 위해 다음과 같은 가정이 필요하며 운동량방정식의 구성하는 제어체적에서 힘의 평형을 해석하는 이론은 다음과 같다.

- ① 유체는 비압축성이고 흐름은 정상류이다.
- ② 판(고체면)에 수직한 방향으로의 압력변화는 없다.
- ③ 점성은 일정하고 제어체적내에서 물질의 질량변화는 없다.
- ④ 판(고체면)에 수직한 방향으로의 점성전단력은 무시할 정도이다.
- ⑤ 모든 유체는 Newton운동의 제2법칙을 따른다.

이상과 같은 가정을 적용하여 운동량방정식을 해석하는 과정을 완료하게 되면, 연속방정식은 운동량방정식(대류방정식)의 해의 적합성을 검증하는데 필수적으로 적용하여야 되면 본 연구에서 이러한 일련의 과정을 압력방정식을 해석하면서 SIMPLER 알고리즘을 이용하여 구현하였으며 그 절차는 일반화된 미분방정식의 이산화과정 혹은 반복계산과정에서 설명하고자 한다.

운동량방정식과 더불어 에너지방정식을 해석하는 경우는 부력의 영향을 고려하여야 한다. 이러한 부력의 크기를 평가하기 위해서는 운동량방정식을 해석하는 방법과 유사하게 다음과 같이 에너지방정식(energy equation)을 구성하는 이론을 도입하여 적용하여야 한다. 제어체적면에서 에너지방정식을 유도하기 위해서는 다음과 같은 가정이 수립된 상태에서 해석방정식을 일반화하였다.

- ① 비압축성 정상유동이다.
- ② 점성, 열전도율 및 비열이 일정하다.
- ③ 흐름방향으로의 열전도는 무시할 정도이다.

자연대류의 흐름을 일으키는 부력은 체적력(body force)라고 정의되며 자연대류는 가열과정에서 일어나는 밀도의 변화로 인해 생기는 유체유동의 결과이다. 부력

은 중력의 반대방향으로 발생하며 미소체적요소(dx dy dz)에서의 운동량변화와 같다고 놓으면 운동량방정식의 마지막 항에 아래와 같은 부력항이 구성할 수 있게 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho_{\infty} g \quad (\Delta P = \gamma h \text{의 정의로부터 유도되었음})$$

본 연구에서 처리하는 부력항은 Boussinesq Approximation에 따르면 밀도는 다음과 같이 온도의 함수로 변화된다.

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})]$$

여기서, β 는 열팽창계수이며 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{1}{(T_{ref} + 273.15)}$$

그러므로 부력에 의한 체적력(body force)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\rho g = -\rho_{ref} g(1 + \beta T_{ref}) + \rho_{ref} g \beta T$$

상기 식의 우측항의 제1항은 상수이고 결과적으로 체적력을 고려한 압력항은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P = p + \rho_{ref} g x (1 + \beta T_{ref})$$

그러므로 부력 항은 $\rho_{ref} g \beta T$ 이 되며 부력이 작용하는 운동량방정식 마지막 항에 이 항을 삽입하면 아래 식과 같이 부력항이 고려된 차원 비분방정식이 구성되었고 이 방정식을 시뮬레이션 프로그램을 구성하는데 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho_{ref} g_i \beta T$$

운동량 방정식을 구성하는 대류항, 압력항, 확산항을 수치해석으로 적용하기 위해, 차분화시켜 일반화 알고리즘을 구하여 격자계를 형성시키는 방법은 다음과 같다.

나. 비균일 엇갈린 격자계(Nonuniform Staggered grid system)

본 연구에서 개발되는 3차원 실내기류유동시물레이션 프로그램을 구성하기 위해서는 운동량방정식을 구성하고 있는 압력항을 해석할 수 있는 SIMPLER 알고리즘을 적용해야 되며 이러한 매개변수에 대한 해석을 편리하게 수행하기 위해서 patankar에 의해 고안된 비균일 엇갈린 격자계를 본 연구에서 수행되는 알고리즘 구성에 적용하였다. 비균일 엇갈린 격자계를 구성하는 기본개념은 다음과 같다.

- ① 유동에 관련된 모든 물리량의 확산은 속도에 의존되어 발생하며 이 속도성분은 제어경계면에 존재한다.
- ② 격자의 간격은 항상 균일할 필요는 없다.
- ③ T-x, u, v, w-x의 변화가 많은 곳의 격자계는 더 조밀하게 하는 것이 바람직하다.
- ④ T-x, u, v, w-x의 변화를 모르는 곳의 격자계는 coarse grid(성긴 격자계)를 적용한 후 결과를 보고 격자계를 조정한다.

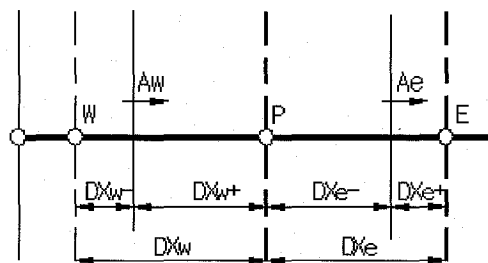


그림 3.25 엇갈린 격자계의 구성 개념도

엇갈린 격자계는 제어체적면(실선)은 먼저 구성한 후, 그림 3.25와 같이 제어체적 중간에 엇갈린 격자계(점선)를 구성한다. 제어체적면에는 u, v, w의 인자가 위

치한다. 질량유속 및 열유속, 압력 등과 같은 스칼라변수 및 각종 계수는 P, E, W 지점에 존재한다. 그러므로 P지점의 열전도율은 제어체적면까지만 존재된다. 이 경우, P점에서 E점으로 전달되는 열전달계수는 제어체적면에 존재하므로 불균일격자계에서는 P지점과 E지점의 사이 위치를 예측하기 어렵다. 이런 경우, Ae자점의 값을 정확히 예측해야된다. 그렇기 위해, 엇갈린격자계에서는 다음과 같이 선형화한다. 예를 들어, P지점의 열전도계수가 k_P 이고 E지점의 열전도율이 k_E 이면 P지점과 E지점사이의 열전도율의 경계면이 존재해야 되며 그 경계면이 P와 E지점 사이에 있는 제어체적면이다.

P와 E지점의 제어경계면으로 전달되는 열유속은 다음과 같이 표현되며 이와 같은 방법으로 일반화를 수행하였다.

$$q_e = \frac{k_e (T_p - T_e)}{DX_e}$$

P와 E지점의 제어 경계면에서 전도열전달계수는 아래와 같이 선형화 할 수 있다.

$$k_e = f_e k_P + (1 - f_e) k_E$$

$$\text{여기서, } f_e = \frac{DX_{e+}}{DX_e}$$

만약 제어경계면의 온도를 T_e 로 가정하면 아래와 같은 열전달량 방정식이 성립된다.

$$q_e = \frac{k_P (T_P - T_e)}{DX_{e-}}, \quad q_e = \frac{k_E (T_e - T_E)}{DX_{e+}}$$

상기 방정식을 정리하면 아래와 같은 식이 성립한다.

$$q_e = \frac{(T_P - T_E)}{\frac{DX_{e+}}{k_E} + \frac{DX_{e-}}{k_P}}$$

그러므로 경계면의 열전달계수는 아래와 같이 성립하여 적용한다.

$$k_e = \frac{DX_e}{\frac{DX_{e+}}{k_E} + \frac{DX_{e-}}{k_P}}$$

엇갈린 비균일격자계에서는 상기와 같은 계수표현을 경계면에서 적용시키도록 프로그램을 구성하였다.

다. 해석방정식의 이산화

본 연구에서 개발하는 실내의 쾌적온열감을 평가하고 기류유동을 해석하기 위해, 식(7)과 같이 일반화된 방정식을 차분화한 후, 이산화 된 프로그램을 구성하는 방법을 3차원 전도방정식을 사용하여 설명하면 다음과 같다.

$$k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) = 0$$

전도방정식의 2차 미분항은 아래 식 과 같이 표현할 수 있다.

$$k[\frac{\partial}{\partial x}(\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial T}{\partial z})] = 0$$

상기 식을 다음과 같이 dxdydz면에 대해 적분한다.

$$k[\int_b^t \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\partial T}{\partial x}) dxdydz + \int_b^t \int_w^n \int_s^e \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial T}{\partial y}) dydxdz + \int_w^e \int_s^n \int_b^t \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial T}{\partial z}) dzdydx] = 0$$

$$k[\int_b^t \int_s^n (\frac{\partial T}{\partial x} |_e - \frac{\partial T}{\partial x} |_w) dydz + \int_b^t \int_w^n (\frac{\partial T}{\partial y} |_n - \frac{\partial T}{\partial y} |_s) dxdz + \int_s^n \int_w^e (\frac{\partial T}{\partial z} |_t - \frac{\partial T}{\partial z} |_b) dxdy] = 0$$

여기서, T_e , T_w 는 y, z축에 대해 변화되지 않고 T_s , T_n 는 x, z축에 대해 변화하지 않고 T_b , T_t 는 x, y축에 대해 변화하지 않는다고 가정하면 아래와 같은 정상상태 전도열전달에 대한 이산화방정식이 유도된다.

$$k[(\frac{T_E - T_P}{\delta x_E} - \frac{T_P - T_W}{\delta x_W}) dydz + (\frac{T_N - T_P}{\delta y_N} - \frac{T_P - T_S}{\delta y_S}) dxdz + (\frac{T_t - T_P}{\delta y_t} - \frac{T_P - T_b}{\delta y_b}) dxdy] = 0$$

상기 식을 T_P 에 대해 정리하면 다음과 같이 프로그램에 적용할 수 있는 이산화 방정식이 성립된다.

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a_s T_s + a_b T_b + a_t T_{t+s}$$

$$a_e = k_e \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e}, \quad a_w = k_w \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w}, \quad a_n = k_n \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n},$$

$$a_s = k_s \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s}, \quad a_b = k_b \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b}, \quad a_t = k_t \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_t},$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_b + a_t - S_p \Delta x \Delta y, \quad S = S_c \Delta x \Delta y \Delta z$$

여기서 S항은 내부발열이 발생할 때 적용되는 항이며 이 값은 오직 Tp에 영향을 줄뿐 x, y축에 인접한 온도에 직접적인 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있다.

상기와 같이 이산화된 방정식을 해석하는 방법은 반복계산이 가능하도록 일반화를 수행해야 되며 이산화 방정식에서 Tp를 구하는 방법은 다음과 같이 수행하였다.

라. 반복계산알고리즘

본 연구와 같이 3차원 유동해석을 수행하는 경우, 미지수가 6개이고 계산방향은 3방향인 경우, 반복계산을 수행하는 방법은 SOR법과 TDMA법으로 구분된다.

- ① SOR법 : 반복계산과정 중, 계산하고자하는 지점 Tp를 구하기 위해, Te, Tw, Tn, Ts, Tb, Tt를 기지 값으로 가정하여 계산하는 방법
- ② TDMA법 : 반복계산 중, 계산방향의 상/하, 좌/우 및 전/후 지점의 값만을 기지값으로 가정하여 계산하는 방법

그러므로 한 지점의 온도를 계산하기 위해, 사용되는 컴퓨터의 기억용량은 TDMA법이 작게 되므로 본 연구에서 운동량방정식, 난류장, 온도장 등의 방정식의 반복계산을 위해, 적용한 방법은 TDMA법이다. 아래와 같이 2차원 이산화방정식을 이용하여 x방향으로 구성된 일반화 알고리즘은 다음과 같다.

$$a_p T_{i,j} = a_e T_{i+1,j} + a_w T_{i-1,j} + a_n T_{i,j+1} + a_s T_{i,j-1}$$

i방향(x방향)으로 계산할 경우, 상하지점의 계수값은 d_i라는 상수로 아래와 같이 표현할 수 있다. 모든 해석에서는 경계조건이 주어지므로 i=1인 지점에서부터

TDMA를 해석하여 전진 대입과정(forward substitution process)를 수행하면 $i=2, 3, \dots, n$ 까지의 관계식을 P, Q에 대해 정리할 수 있다.

$$d_i = a_n T_{i,j+1} + a_s T_{i,j-1}$$

그러므로 $a_p T_{i,j} = a_e T_{i+1,j} + a_w T_{i-1,j} + d_i$ 이 된다.

$$i=1 \text{인 경우, } a_p T_{1,j} = a_e T_{2,j} + d_1$$

그러므로,

$$T_{i,j} = T_{1,j} = \frac{a_e}{a_p} T_{i+1,j} + \frac{d_i}{a_p} = P_i T_{i+1,j} + Q_i = P_1 T_{2,j} + Q_1$$

$$i=2 \text{인 경우, } a_p T_{2,j} = a_e T_{3,j} + a_w T_{1,j} + d_2$$

$$a_p T_{2,j} = a_e T_{3,j} + a_w T_{1,j} + d_2$$

상기 식에서, $T_{1,j}$ 는 $P_1 T_{2,j} + Q_1$ 이므로 이 값을 상기 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$a_p T_{2,j} = a_e T_{3,j} + a_w (P_1 T_{2,j} + Q_1) + d_2$$

$$T_{2,j} = \frac{a_e}{a_p - P_1} T_{3,j} + \frac{(a_w Q_1 + d_2)}{a_p - P_1}$$

일반적으로 경계조건은 주어지므로 특수한 경우(heat flux가 경계조건으로 주어지는 경우)를 제외하고는 아래와 같은 TDMA formula를 사용하여 반복계산을 수행한다.

$$T_{i,j} = \frac{a_e}{a_p - P_1} T_{i+1,j} + \frac{(a_w Q_1 + d_i)}{a_p - P_1} = P_i T_{i+1,j} + Q_i$$

P_i 와 Q_i 는 P_{i-1} 와 Q_{i-1} 의 항으로 나타내므로 Gauss 소거법과 같이 TDMA는 순환관계식(recurrence relation)으로 표현될 수 있어 수렴성을 향상시킬 수 있는 기법을 구현할 수 있다.

마. 압력방정식알고리즘

3차원 운동량방정식을 구성할 때, 발생하는 주요 문제점은 압력항의 해석에 어려움이 존재하고 압력은 연속방정식을 통해 간접적으로 결정된다. 본 연구에서 개발하는 프로그램은 원시변수방법(primitive variable method)을 적용하여 u , v , w , p 를 각각 계산하는 방법을 적용하였다. 이때, 구성하는 압력방정식이 속도를 계산하는 지점과 동일한 지점에서 압력을 계산하면 압력장이 오류를 갖게 된다고 Patankar는 발표하였다. 지금까지 범용프로그램에서 압력방정식을 해석하기 위해, 적용한 방법을 요약하면 다음과 같다.

대부분의 실내기류유동해석은 3차원 유동해석이 불가능한 와도흐름함수접근법(vorticity-stream function approach)을 사용하지 않고 원시변수접근법(primitive variable approach)을 사용한다. 이러한 원시변수접근법을 이용하여 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 방법은 SIMPLE, SIMPLER, MAC 등이 있다.

① SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)

Patankar and Spalding(1972)에 의해 고안된 SIMPLE알고리즘은 지배방정식을 해석할 때, 가정과 수정과정을 반복적으로 수행하도록 고안되었다. 압력장을 초기에 가정한 후, 속도장을 운동량방정식을 해석함으로써 구한다. 이 때, 압력장과 속도장은 연속방정식에 만족하도록 지속적으로 수정된다. 이러한 절차를 수렴에 도달할 때 까지 반복한다. 해석하는 과정에 사용되는 이완계수는 빠른 수렴을 위해, 압력장에 대해, 하향이완계수를 적용하도록 권장하고 있다.

② SIMPLER(SIMPLE Revised)

SIMPLER알고리즘(Patankar 1981)은 수렴성을 향상시키기 위해, SIMPLE알고리즘을 보완하여 구성되었다. SIMPLER는 SIMPLE방정식과 다르게 압력장을 대신해서 속도장을 초기치로 가정한다. 속도수정은 SIMPLE방식과 동일한 과정을 거치게 된다. 그러나 연속방정식으로부터 유도된 완전한 압력방정식은 압력장을 계산함으로써 사용된다. 대부분의 문제에서 타당한 속도장은 압력장으로부터 쉽게 평가될

수 있다. SIMPLER에서 계산된 압력이 정확한 압력에 근사하기 때문에 SIMPLE알고리즘과 다르게 압력장을 해석할 때, 하향이완계수를 사용하지 않아도 쉽게 수렴 상태에 도달하게 된다. 그러므로 SIMPLER방법을 사용하게 되면 SIMPLE알고리즘을 사용하여 해석하는 것 보다 30-50%정도 계산시간을 단축할 수 있다.

③ MAC(Marker and Cell)

MAC(Harlow and Welch 1965, Welch 등 1966)은 점성비압축성을 해석하고 자유표면을 포함한 천이유체유동문제를 해석할 수 있는 수치해석기법이다. 이 해석방법은 연속방정식을 대신하여 압력장을 해석할 수 있도록 Poisson방정식을 사용하는 것이 포함되어 있다. 계산은 임의 시간증분에 대해, 비정상해석을 수행하게 되며 운동량방정식에서 사용되는 압력장은 유한차분형으로 구성된 속도함수를 소스항으로 갖고 있는 Poisson방정식을 해석함으로써 구할 수 있다. Poisson방정식의 새로운 소스항은 새로운 속도장을 계산함으로써 구할 수 있고 이러한 과정을 반복함으로써 수렴에 도달하게 된다.

이상과 같이 국외에서 널리 사용하고 있는 압력방정식해석 방법 중에서 SIMPLER알고리즘을 본 연구에서 적용하였다. 본 연구에서는 엇갈린 격자계의 중심에서 압력을 계산할 수 있도록 압력방정식을 구성하였다.

아래와 같이 표현되는 압력항이 포함된 운동량방정식을 이산화 하는 방법을 2차원 운동량방정식을 이용하여 설명하면 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}$$

상기에 표기된 방정식을 제어체적면에 대해 이산화한 결과는 다음과 같다.

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (P_P - P_E) A_e$$

y 방향 운동량방정식을 적분하면 다음과 같은 이산화 식이 표현된다.

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + (P_P - P_N) A_n$$

상기식과 같은 y 방향 운동량방정식을 해석하기 위해서는 압력(P)를 계산하는 방법은 압력을 가정하여 속도를 산정하는 SIMPLE 알고리즘과 속도를 가정하여 압력방정식을 별도로 계산하는 SIMPLER 알고리즘이 있다. 본 연구에서는 수렴성이 양호하여 짧은 시간에 해석을 수행할 수 있는 SIMPLER 알고리즘으로 압력방정식을 해석하였으며 본 알고리즘을 이용하여 압력방정식을 구성한 후, 해석하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

SIMPLER 알고리즘을 이용하여 압력방정식을 해석하기 위해서는 상기에 표현된 운동량방정식의 이산화식을 아래와 같이 정리하여 가상속도(pseudo velocity)를 계산한다.

$$\overline{u}_e = \frac{\sum a_{nb} u_{nb} + b}{a_e}$$

가상속도를 인접한 지점의 속도(unb)를 이용하여 계산한 후, 아래 식을 이용하여 압력방정식을 계산한다.

$$a_P P_P = a_E P_E + a_W P_W + a_S P_S + a_N P_N + b$$

$$\text{여기서, } a_P = a_E + a_W + a_S + a_N, \quad a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad a_W = \rho_w d_w \Delta y,$$

$$a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad a_S = \rho_s d_s \Delta x$$

$$b = [(\rho \bar{u})_W - (\rho \bar{u})_E] \Delta y + [(\rho \bar{v})_S - (\rho \bar{v})_N] \Delta x$$

상기 식을 이용하여 구한 압력장(P)를 P^* 로 가정하여 구한 속도 u^*, v^* 를 아래와 같이 구한다.

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n$$

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e$$

여기서 구한 u^* 및 v^* 를 이용하여 질량평형식을 계산한 후, 압력방정식 P' 를 계산한다.

$$b = [(\rho u^*)_W - (\rho u^*)_E] \Delta y + [(\rho v^*)_S - (\rho v^*)_N] \Delta x$$

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_S P'_S + a_N P'_N + b$$

u^* , v^* 와 P' 를 이용하여 수정된 속도인 u , v 를 구한다.

$$u_e = u_e^* + (P'_P - P'_E) D_{eP}, \quad u_w = u_w^* + (P'_W - P'_P) D_{wP}$$

$$v_n = v_n^* + (P'_P - P'_N) D_{nP}, \quad v_s = v_s^* + (P'_S - P'_P) D_{sP}$$

SIMPLER 알고리즘을 활용하여 압력방정식을 수행할 경우, 수렴성을 향상시키기 위해, 출구에서는 압력경계조건을 제공하는 것이 타당하며 아래와 같이 이완계수를 over-relaxation factor로 적용하여 계산을 수행한다.

$$P = P^* + \alpha P' \text{ (여기서 } \alpha \text{는 수렴속도에 영향을 주는 factor임)}$$

이상과 같은 순서로 구성된 운동량방정식과 압력방정식을 해석하는 SIMPLER 알고리즘을 이용하여 구성한 일반화한 방법을 흐름도로 구성하면 그림 3.26와 같다.

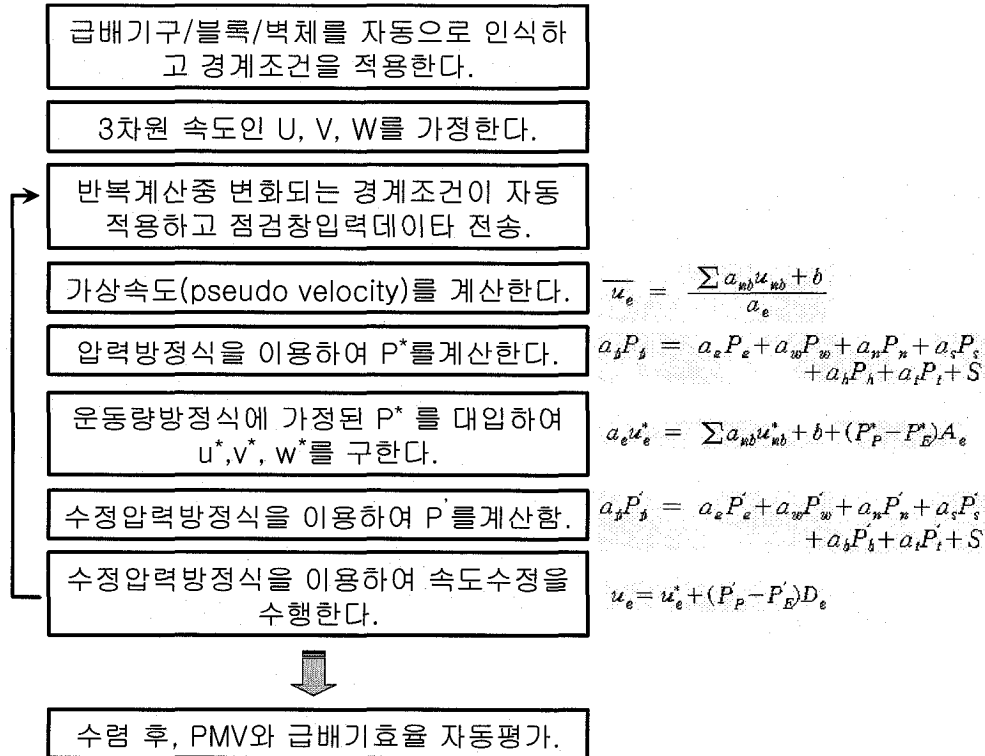


그림 3.26 SIMPLER 알고리즘 구성 흐름도

바. 비정상 방정식해석 일반화(열전도 방정식을 기준으로 표현)

본 연구에서 실내온도환경 및 청정도를 평가하기 위해, 구성된 시뮬레이션 프로그램에 적용되는 알고리즘은 비정상해석이 가능하도록 알고리즘을 개발하는 것이다. 이러한 비정상상태 해석을 수행 할 때, 시간은 격자계와 관계없는 일방향성 좌표이므로 주어진 초기 온도분포로부터 시간에 따라 전진하면서 확산항에 대한 해를 구하는 방법이다. 이러한 방법을 marching method라 정의한다. 시간이 변화되면 시간이 $t=0\text{sec}$ 일때, 격자점에서 온도(T)값을 계산한 후, 다시 $t+\Delta t$ 일때의 온도값을 구한다. 이때 과거의 온도(T)값은 T_P^o, T_E^o 로 표기하고 $t+\Delta t$ 일때의 온도값은 T_P^1, T_E^1 로 표기한다.

본 연구에서 비정상상태 미분방정식을 이산화한 방법을 소개하기 위해, 사용한 방정식은 아래와 같이 2차원 에너지방정식이다. 아래와 같이 표현되는 정상상태 에너지방정식에 비정상항과 열생성항을 포함시키면 다음과 같은 비정상 2차원 에너지

지방정식이 성립된다.

$$\rho C_p(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + S$$

상기방정식을 차분화하기 위해 dx dy dt 구간에 대해 적분한다.

$$\rho C_p \int_s^e \int_w^m \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = k \int_t^{t+\Delta t} (\int_s^n \int_w^e \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy dt + \int_w^e \int_s^m \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dy dx dt) + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^m S dx dy dt$$

상기식을 적분하면 시간변화에 따른 온도 및 온도구배 및 발열량변화는 fully implicit method를 적용하면 아래와 같이 전개된다.

$$\rho C_p (T_P^l - T_P^o) \Delta x \Delta y = k \int_t^{t+\Delta t} (\int_s^n \frac{\partial T}{\partial x} |_w^e dy dt + \int_w^e \frac{\partial T}{\partial y} |_s^n dx dt) + \int_t^{t+\Delta t} S \Delta x \Delta y dt$$

여기서, T_E, T_W 는 y축에 대하여 변하지 않고 T_s, T_n 는 x축에 대해 변하지 않는다고 가정하고 시간증분에 대해서는 현재 시간의 계산에서 과거의 값은 오직 계산하는 지점의 값만을 받아들여 계산하는 방법인 완전암시적 방법(fully implicit method)를 적용하면 다음과 같은 이산화방정식이 유도된다.

$$\rho C_p (T_P^l - T_P^o) \Delta x \Delta y = k (\frac{\partial T}{\partial x} |_e - \frac{\partial T}{\partial x} |_w) \Delta y \Delta t + k (\frac{\partial T}{\partial y} |_n - \frac{\partial T}{\partial y} |_s) \Delta x \Delta t + S \Delta x \Delta y \Delta t$$

$$\rho C_p (T_P^l - T_P^o) \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} = k_e \frac{(T_E^l - T_P^l)}{\delta x_e} \Delta y - k_w \frac{(T_P^l - T_W^l)}{\delta x_w} \Delta y + k_n \frac{(T_n^l - T_P^l)}{\delta y_n} \Delta x - k_s \frac{(T_P^l - T_s^l)}{\delta y_s} \Delta x + S \Delta x \Delta y$$

결과적으로 이산화방정식은 다음과 같이 유도되었으며 이와 같은 형태로 각 방정식에 대해 비정상 상태해석이 가능한 이산화 방정식을 수립하였다.

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a_s T_s + b$$

$$a_e = k_e \frac{\Delta y}{\delta x_e}, \quad a_w = k_w \frac{\Delta y}{\delta x_w}, \quad a_n = k_n \frac{\Delta x}{\delta y_n}, \quad a_s = k_s \frac{\Delta x}{\delta y_s},$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_p^0, \quad b = S \Delta x \Delta y + a_p^0 T_p^0, \quad a_p^0 = \rho C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

2. 난류방정식 일반화

실내의 형상, 급, 배기를 위한 디퓨저의 구성 및 위치, 기류속도, 환기율, 실내의 급기온도와 실내공기와의 온도차에 의해 발생하는 부력 및 기기 혹은 인체에 발생되는 열량과 같은 많은 변수는 실내기류이 난류유동을 발생시키는 인자로 작용하게 된다. 오랫동안 많은 과학자들은 Navier-stokes 방정식의 시간평균개념을 보유하고 있는 난류전달항을 결정하는 근사방정식을 활용하여 많은 난류모델을 고안하고 보완 발전시켰다. 실내의 기류유동을 해석하기 위해, 광범위하게 사용되는 난류모델은 저레이놀즈수 모델과 표준 벽함수를 가지고 있는 고레이놀즈 모델, 대수학(algebraic)응력모델, 레이놀드 응력모델(DSM)을 포함하는 k-ε 2차방정식을 사용한다. k-ε 난류모델을 근간으로 한 실내기류유동의 수치해석은 현재까지 실내유동해석을 위한 효과적인 방법이고 대부분의 실질적인 문제를 해석하는데 사용하고 있다.

가. k-ε 2차방정식 모델

k-ε 난류모델에서 난류응력($\rho(\overline{u_i' u_j'})$)은 와점성 또는 평균속도구배와 난류점성계수의 곱으로 표현된다.

$$\rho(\overline{u_i' u_j'}) = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \rho \delta_{ij} - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (8)$$

k-ε 모델은 난류유동의 난류에너지(k)와 난류에너지의 점성소산율의 영향을 평가하기 위해, 전달방정식을 해석하는 과정이다. 식(9)와 같이 정의되는 난류에너지(k)는 난류유동에서 나타나는 요동에 포함된 난류에너지를 설명하는 것이다.

$$k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (9)$$

Launder와 Spalding(1974), Harlow와 Nakayama(1967)에 의해 정의된 난류에너지

의 점성소산율은 분자점성력의 작용에 의한 난류에너지의 소산율로 설명된다. 분자점성력이 높은 영역에서는 소산율이 증가되고 난류영향은 감소하게 된다. 이와 같은 원리로 이용하여 구분되는 high Re 난류모델과 low Re 수 난류모델의 특징은 다음과 같다.

1) High Re 수 $k-\epsilon$ 모델

실내기류유동을 해석하기 위해, 고 Re 수 $k-\epsilon$ 2차 방정식을 처음 적용한 Nielsen(1974, 1978, 1979)은 벽함수를 사용하여 천장에서 급기되고 바닥에서 배기되는 실내의 기류유동을 해석을 수행하는데 성공하였다. 몇 년 후, $k-\epsilon$ 방정식에 부력발생항을 추가하여 환기되는 실에서 난류유동에 영향을 받는 부력을 연구하여 실험결과 유사한 현상을 도출하여 수치해석방법을 이용하여 실내기류유동해석이 가능하도록 연구한 초창기 과학자이다. Murakami(1987, 1988, 1989) 등은 Nielsen과 유사하게 천정에서 급기되고 바닥에서 배기되는 단순한 실내공간에 대해, 실험과 수치해석결과를 비교하여 고 Re 수 $k-\epsilon$ 난류모델을 실내기류유동해석에 적합한 것을 입증하였고 LES 모델을 활용하여 3차원 등온 실내공간에 대한 기류해석을 수행하여 LES 모델의 타당성을 검증하였다. 3차원 실내에서 발생하는 기류유동의 예측은 타당성을 나타내었지만 많은 계산시간을 소요하는 단점이 있다고 보고하였다. 또한 Murakami는 2차원 고 Re 수 $k-\epsilon$ 난류모델과 ASM 모델에 부력항을 적용하여 비등온 기류해석을 수행하였다. $k-\epsilon$ 모델과 ASM 모델을 사용하여 해석한 2차원 등온 속도장은 유사한 결과를 나타내었지만 ASM 모델에 의해 계산된 레이놀즈응력이 $k-\epsilon$ 모델보다 증가하는 것을 보고하고 있다. ASM 모델을 이용한 비등온 시뮬레이션을 수행한 결과 재순환영역에서의 속도가 $k-\epsilon$ 모델보다 크게 나타나는 것을 보고하였다. Haghighat 등(1990)은 3차원 고 Re 수 난류모델에 벽함수법을 적용하여 측벽하부에서 급기되고 천정으로 배기되도록 기계환기와 자연환기시스템이 적용된 밀폐된 실내공간에서 오염장의 확산현상을 출입문의 개폐율을 변수로 하여 해석하였다.

Kurabucho 등(1987, 1989)은 고 Re 수 $k-\epsilon$ 난류모델을 활용하여 2차원 3차원 실내에서 발생하는 기류유동해석을 수행하였다. 연구결과 고 Re 수 $k-\epsilon$ 난류모델은 상대적으로 단순한 형상에서 발생하는 등온 실내기류유동에 적용하는 것이 적합하다는 결론을 발표하였다. 더불어 고 Re 수 $k-\epsilon$ 난류모델은 이방성을 갖고 있는 부력에 영향을 받는 유동해석에 신뢰성이 없는 것을 알 수 있다.

Sakamota등(1980)은 천정에서 급기되고 측벽하부에서 배기를 수행하는 3차원 실내 기류유동을 수치해석방법과 실험적방법으로 검증하였다. 이 때, 적용한 난류 모델은 고 Re 수 k-ε 난류모델과 LES모델이다. 두가지 방법으로 해석한 결과는 실험적결과와 일치하는 것을 알 수 있었으며 고 Re 수 k-ε 난류모델이 LES모델보다 계산시간이 현저히 절약된다고 발표하였다.

Chow등(1992)은 체육관 혹은 소형사무소건물의 3차원 실내에서 비등은 기류유동해석을 부력항과 벽함수법을 적용한 고 Re 수 k-ε 난류모델을 이용하여 수행하였다. 수치해석을 통하여 구한 속도장과 온도장은 현장 측정을 통하여 구한 실험결과와 유사한 결과를 나타내었다. 그러므로 고 Re수 k-ε 난류모델을 아트리움, 크린룸 등의 설계에 적용하는 것이 타당한 것을 입증하였다.

Takemasa(1992)는 벽함수법과 부력항을 적용한 고 Re수 k-ε 난류모델을 이용하여 해석을 수행한 결과 벽함수는 벽체에 인접한 지점에서의 난류에너지에 지배적으로 영향을 받으며 점성저층의 두께를 구하는 적용하는 것을 규명하였고 대부분의 해석에 실험과 수치해석결과가 잘 일치하는 것을 입증하였다.

표 3.3 실내기류유동의 해석방법과 난류모델의 요약

연 구 자	난류모델	해석절차 및 방법	수치기법
Nelson (1974,1978,1979)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델(부력 효과포함)	-압력수정방법 -반복계산 :선분법	제어체적법
Murakami등 (1987,1988)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델 -LES모델 -ASM모델	-MAC법	-제어체적법 -중심차분법 -QUICK법
Haghighat(1990)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델	-ADI법	-제어체적법 -혼합기법
Kurabuchi(1987,1989)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델(부력 효과포함)	-MAC법	-제어체적법 -중심차분법 -QUICK법

연구자	난류모델	해석절차 및 방법	수치기법
Sakamota(1980)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델 - LES모델	- SIMPLER	-제어체적법 -Adams-Bashforth 법
CHow(1992)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델(부력 효과포함)	- SIMPLER	-제어체적법 -Powerlaw기법
Takemas(1992)	-벽함수법을 적용한 고 Re k-ε모델	-MAC법	
Davidson(1990)	- 수정된 저Re 수 k-ε모델(JL, LB모 델)	- SIMPLEC - CELS	-제어체적법 -중심차분법 -QUICK법
Han(1992)	- - 수정된 저Re 수 k-ε모델(JL모델)	-SIMPLE	-제어체적법
Chikamoto(1992)	- 수정된 저Re 수 k-ε모델(LS모델)	- MAC법	-제어체적법 -QUICK법

지금까지 다양한 연구자들에 의해 적용된 난류모델과 해석방법을 표 3.3에 요약하였다. High Reynolds수를 이용하여 난류유동을 해석할때, 대다수의 과학자들은 Launder와 Spalding(1974)에 의해 제안된 고Reynolds수모델 혹은 완전 난류 k-ε모델은 완전발달 된 난류유동에서 다양한 고Reynolds수 난류유동을 예측할 때, 높은 정확성을 나타내므로 광범위하게 사용된다. 고 Reynolds수 k-ε2차방정식모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v k) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w k) &= \frac{\partial}{\partial x}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x} \\
&+ \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial z} + G_k - \rho \epsilon + S_{kb} \\
\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \\
&+ \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} + [c_{\epsilon 1} G_K - c_{\epsilon 2} \epsilon] \frac{\epsilon}{k} + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} S_{kb}
\end{aligned}$$

여기서, k = 난류운동에너지, $k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$,

$$\varepsilon = \text{난류소산율}, \quad \varepsilon = \nu_f \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2, \quad G_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right],$$

$$S_{kb} \text{ (부력항)} = -g\beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \mu_t \text{ (난류점성계수)} = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

난류상수는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_T = 0.9, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09,$$

여기서, $Re_t(k^2/\nu\varepsilon)$ 는 난류 Reynolds수이다.

그러나 벽체부근에서는 난류현상보다 층류현상이 많이 발생한다. 벽체부근에서 난류저층(laminar sublayer)현상을 취급하기 위해서, 완전난류k-e모델은 표준벽함수 모델을 사용한다. 벽함수방법은 벽체에서 가장 근접한 첫 번째 격자점이 층류영향을 무시할 정도로 충분히 멀리($y^+ > 11.5$) 있도록 권장한다. 벽 함수방법은 그림 3.27과 같이 고체표면과 고체표면에 인접한 첫 번째 격자점 사이를 연결하는 기능을 갖고 있다. 벽면 전단응력은 대수법칙을 이용하여 다음과 같이 일반화하였다.

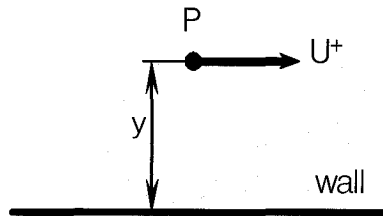


그림 3.27 벽부근영역의 속도성분과 거리

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+), \quad \tau_w = \gamma_w \frac{u}{y}$$

$$\text{여기서, } \gamma_w = \frac{\tau_w y}{u} = \frac{y + \mu_t}{u^+} = \frac{\mu_t y + \kappa}{\ln(Ey^+)}$$

E = 벽체거칠의 함수(완만한 벽체의 경우, 9.0에 근사한 값을 갖는다.)

κ = 본칼만상수($\kappa=0.41 \pm 0.015$)

$$u += \frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}, \quad y += y \frac{\sqrt{\tau_w \rho}}{\mu_l} = \rho k^{1/2} C_\mu^{1/4} y / \mu_l$$

난류운동방정식의 경우, 벽체를 통한 확산플럭스는 0에 도달한다고 고려한다. 소산율방정식의 경우, 벽체부근의 값은 다음과 같이 평가한다.

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y}$$

2) Low Re수 k-ε모델

표준벽함수방법을 갖는 높은 Reynolds수 K-ε모델은 벽체의 플럭스가 중요하지 않을 때 즉, 난류레이놀즈수가 150이하로 급격히 감소하는 벽체 부근에서 매우 유용하게 사용된다. 그러나 벽체인접한 영역에서 국소벽체플럭스와 난류로 천이되는 현상을 예측할 수 없다. 벽체부근영역에서 난류는 간헐있게 되고 층류점성계수(μ_l)는 난류점성계수(μ_t)와 유사하게 되어 벽체부근에서 점성효과가 중요한 변수로 작용한다. 난류운동에너지 및 소산율방정식에 추가적인 항이 요구된다. 난류상수는 국소난류 레이놀즈수의 함수인 R_t , R_y 가 된다. 저레이놀즈수 K-ε모델은 고레이놀즈수 모델의 난류전달방정식에서 사용하는 함수와 상수를 이용하여 벽체에 의한 간헐효과(damping effect) 혹은 분자점성의 직접효과를 각각 고려하거나 동시에 고려한다. 제 2k-ε방정식모델은 아래와 같이 구성된다.

$$u \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + [c_{\epsilon 1} f_1 (P_K + c_{\epsilon 3} G_K) - c_{\epsilon 2} f_2 \bar{\epsilon}] \frac{\bar{\epsilon}}{k} + E$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u k) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v k) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w k) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} + P_k + G_k - \bar{\epsilon} + D \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } \mu_t (\text{난류점성계수}) = c_\mu f_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$$

$$\varepsilon = \overline{\varepsilon} + D$$

벽체영역에서 간헐현상을 평가하기 위해, low Re수 난류모델을 고안한 과학자들은 벽체부근 저층의 점성계수를 평가하기 위한 계수인 f_μ 를 다음과 같이 다양하게 고안하여 수치해석결과의 정확도를 높이기 위해 노력하고 있다.

① Launder and Sharma(1974)

$$f_\mu = \exp(-3.4/(1+R/50)^2)$$

② Lam and Bremhorst(1981)

$$f_\mu = (1 - e^{-0.0165R_t})^2 [1 + \frac{20.5}{R_t}]$$

③ Rodi -Monsour(1993)

$$f_\mu = 1 - \exp(-0.0002y^+ - 0.00065y^{+2})$$

④ Goldberg(1994)

$$f_\mu = \frac{1 - \exp(-A_\mu R_t)}{1 - \exp(-\sqrt{R_t})} \max[1, \xi^{-1}]$$

$$\text{여기서, } R_t = \frac{\rho k^2}{\varepsilon \mu}, \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}, \quad y^+ = \frac{\rho u y}{\mu}, \quad \xi = \sqrt{R_t}/C_T$$

Ince and Launder(1989)는 저 Re k- ε JL모델을 사용하여 사각형 공간에서 자연대류유동과 2차원 부력현상을 해석하였다. Chen등 (1990)은 저 Re k- ε LB모델을 자연대류공간에서의 열전달과 부력에 의해 유인되는 기류유동현상해석에 적용하였으며 고 Re k- ε 모델을 이용하여 해석한 결과와 비교 고찰하였다. Davidson(1990)은 LS모델과 LB모델을 결합하여 수정된 저 Re k- ε JL모델을 고안하였다. 이 모델에서 f_μ 는 LS모델과 동일하지만 f_1 은 LB모델과 동일하게 구성하면서 아래와 같이 수정하였으며 벽 부근에서 난류물성을 만족하는 결과를 유도하기 위해, f_2 를 아래와 같이 개선하였다.

$$f_1 = 1 + \left[\frac{0.14}{f_\mu} \right] , \quad f_2 = [1 - 0.27 \exp(-R_l^2)][1 - \exp(-R_y)]$$

Cheesewright 등은 Davidson이 고안한 저 Re 난류모델과 LB모델을 이용하여 실내기류유동을 해석하여 실험결과와 비교한 결과 두 모델이 유사한 결과를 나타내었으며 실험결과와 잘 일치하였다고 보고하고 있다. 이는 Davidson모델이 실내환기를 해석하는 관점에서 벽체에서 먼 영역의 자유유동현상의 예측의 정확성이 높은 것을 입증하기 때문이라고 발표하였다. Han(1993)은 등온조건이 챔버에서 농도의 확산현상을 예측하기 위해, JL모델을 적용하였다. Chikamoto등(1992)은 LS모델이 적용된 저 Re수 모델을 사용하여 아트리움내에서의 온도장과 열성층화유동을 해석하였다. Moser(1992)는 “Air flow patterns within Buildings”라는 논문에서 전 세계에 분포한 과학자들이 발표한 난류에너지에 대한 실험, 검토결과를 수집하여 상호비교하였으며 9개의 시뮬레이션 코드를 활용하여 각 과학자들이 수행한 실험결과와 비교한 의견에 따르면, 실내에서 발생하는 강제대류에 의한 기류유동을 해석하기 위해, 많은 과학자들은 잘 알려진 k-ε방정식을 사용하고 있으며 저 Re모델을 이용한 난류방정식을 해석할 때, 정확한 해석을 위해서는 많고 다양한 격자계가 필요하며 벽체근처에서 얇은 격자계를 적용해야 한다고 발표하였다.

Patel(1984) 등은 다양한 저레이놀드수 k-ε 방정식을 검증하기 위해, 다수의 시험조건에 대해 검증실험을 수행하였다. 실험을 수행한 저레이놀드수 k-ε 방정식은 Jones and Launder(이하는 JL모델로 표기한다.)(1972, 1973), Launder and Sharma(이하 LS모델로 표기한다.)(1974), Lam and Bremhorst(이하는 LB모델로 표기한다.)은 다른 모델보다 우수한 결과를 나타내었다. Henkes(1989)는 고온인 평판면에서 발생하는 자연대류열전달에 적용할 저레이놀드수 모델을 선정하기 위해, 다양한 저레이놀드수를 비교한 결과 LB, JL모델이 벽체열전달을 실험적으로 구한 값이 유사하게 표현되는 것을 입증하였다. 표 3.4는 본 연구에서 채택하여 적용한 low Re 수 난류해석모델인 Davidson, LS 및 LB모델을 요약 정리한 것이다.

표 3.4 Davidson, LS 및 LB모델에 사용되는 계수 요약

함수	JL모델	LS모델	LB모델
f_μ	$(1 - \exp[-0.0165R_\nu]^2) \times (1 + \frac{20.5}{R_t})$	$\exp[\frac{-3.4}{(1 + R/50)^2}]$	$(1 - e^{-0.0163R_\nu})^2 [1 + \frac{20.5}{R_t}]$
f_1	$1 + (\frac{0.14}{f_\mu})^3$	1	$1 + (\frac{0.05}{f_\mu})^3$
f_2	$[1 - 0.27 \exp(-R_t^2)] \times [1 - \exp(-R_\nu^2)]$	$1.92[1 - 0.3 \exp(-R_t^2)]$	$1 - \exp(-R_t^2)$
E	0	$\frac{2\mu\mu_t}{\rho} [\frac{\partial^2 u_j^{1/2}}{\partial x_j x_k}]^2$	0
D	0	$2\mu_t [\frac{\partial^2 k^{1/2}}{\partial x_j}]^2$	0
벽면 조건	$k=0$ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$	$k=0$ $\varepsilon=0$	$k=0$ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$

2.1) Large eddy 시뮬레이션 모델

난류유동은 큰와(eddy)와 작은와(eddy)를 분리할 수 있다는 가정은 기본으로 하여 큰와와 작은와(small eddy) 사이의 분리는 큰와(large eddy)의 변화에 중요한 영향을 미치지 않는다. 큰와(large eddy)시뮬레이션(LES)방법은 Smagorinsky등(1965)에 의해, 고안되었고 본 시뮬레이션 방법은 Deardorff(1970)에 의해 채널유동(channel flow)에 관한 연구를 수행할 수 있도록 확장되었다. LES난류모델은 작은와운동(small eddy motion)은 유동형상으로부터 독립적으로 해석하도록 구성되었고 큰와유동은 3차원공간에서 시간중속이 가능하도록 Navier-Stokes방정식을 구성하였다. 해석하는 과정에서 큰와와 작은와의 비선형 상호관계와 작은와운동은 와점성 모델을 통하여 근사되었다. LES모델에서 사용하는 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial (u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (u_i)(u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial (v + v_s)(e_{ij})}{\partial x_j}$$

$$v_s = (C\Delta)^2 \left[\frac{(e_{ij})^2}{2} \right]^{1/2}$$

여기서, C=Smagorinsky 상수(Deardorff에 의해 1.0으로 정의됨.)

$$\Delta = \text{평균국소격자치수} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$$

$$e_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (i=1,2,3)$$

큰와(large eddy)시뮬레이션은 난류전송은 큰와운동에 의해 지배적으로 영향을 받고 k-ε모델은 실험적인 난류전달항을 이용하여 구성되었으므로 큰와시뮬레이션(large eddy simulation)이 k-ε 방정식보다 양호한 결과를 나타낸 것으로 알려져 있다. LES방법은 많은 실험상수를 사용하는 k-ε방정식과 다르게 오직 Smagorinsky 상수(C=1.0)만을 사용하므로 단순화된 해석을 수행한다. 그러나 이 방법은 격자계의 간격에 영향을 지배적으로 받지만 시간간격에는 영향을 받지 않는다. 그러므로 LES모델은 정상상태해석은 불가능하기 때문에 실내 공기질 및 온열환경을 평가하기에는 계산시간이 다량으로 요구되고 대용량의 기억장치가 탑재된 컴퓨터를 사용해야 되는 문제점이 있다.

2.2) 레이놀즈응력 모델(DSM: differential stress model)

k-ε 모델에서 사용되는 레이놀즈응력($-\rho \overline{u'_i u'_j}$)의 표현은 특성 속도치수의 전달이 차이나는 경우, 개별적인 응력의 전달이 정확히 설명할 수 없다. 그러므로 다양한 레이놀즈응력(복합유동에서는 다양한 속도크기가 존재한다.)이 존재하는 문제를 해결하기 위해, 레이놀즈응력모델은 개별적인 응력 및 스칼라플럭스($\overline{u'_i \mu'_j}$, $\overline{u'_i \rho'_j}$)을 해석할 수 있는 전달방정식으로 발전시켰다. 이러한 난류모델은 개발적인 레이놀즈응력과 스칼라플럭스가 해석 가능하도록 전달방정식을 구성하고 있다. 그러므로 k-ε 방정식은 6개의 레이놀즈스트레스($\overline{u'_i u'_j}$)와 3개의 스칼라플럭스($\overline{u'_i \rho'_j}$)로 구성된다. 이러한 방정식의 구성은 복잡하지만 현실적으로 발생하는 난류유동문제를 쉽게 해석할 수 있는 전기를 마련한다.

2.3) 대수응력모델(ASM)

상기에서 언급한 레이놀즈응력모델(DSM)은 매우 복잡하고 비실용적인 문제가 대두되었다. 난류대류와 확산이 적은 경우(전단력이 높은 유동)는 대류와 확산이 거의 동일한 값을 나타낸다. 대다수의 경우에 충분히 적절한 근사해는 전달방정식에서 레이놀즈응력($\overline{u_i' u_j'}$)을 모델링함으로써 해석하기 위해, 엄밀해를 구하는 방법을 활용함으로써 구할 수 있다. 또한 난류전달항과 변화율 및 스칼라플럭스($\overline{u_i' \phi'}$)를 무시하는 경우(Gibson and Launder 1976), 레이놀즈응력과 스칼라플럭스가 방정식 유도과정에서 무시되므로 난류방정식은 대수형태로 구성된다. 이 난류방정식의 특징은 9개로 구성되는 차분방정식을 대신하여 1개의 방정식만 해석하도록 구성된 것이다. 만약 유동이 국소 등방성 혹은 높은 전단력을 갖지 않는 경우라면 대류와 확산항이 크게 감소하지 않기 때문에 이 경우, 스칼라플럭스와 레이놀즈응력을 보완하여 대류와 확산항의 영향을 고려할 수 있는 대수방정식이 요구되어 Rodi(1982)가 이 방정식을 고안하였다. Rodi가정의 성립은 대류 및 확산항을 무시하는 ASM모델이 발전하는 전기를 마련하였다. 그러나 본 방정식은 제트유동 및 환상공간에서 발생하는 중심선 영역에서 사용하는 것은 적합하지 않다.

DSM모델과 ASM모델은 전단층에 의해 유도되는 재순환영역에 의해 발생하는 유동을 해석할 때, 정확성이 탁월한 것을 입증하였으나 대용량의 대수를 해석해야 되므로 k-ε방정식보다 많은 계산시간이 소요된다.

3. 실내환경평가 알고리즘

실내기류유동을 평가하기 위해 수행한 시뮬레이션결과를 이용하여 실내의 온열 쾌적감을 평가하기 위해 적용한 방법은 아래에 표현된 활동온도와 온열쾌적지표 (PMV)가 있으며 본 연구에서 제작된 프로그램에서 시뮬레이션을 수행한 후, 자동으로 구할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

① 인체의 열지수

인간의 체온은 실내의 부하에 관계없이 항상 일정한 일정한 체온을 유지하기 위해 에너지를 방출해야한다. 인체에 방출하는 에너지의 변화를 에너지대사라 하며 생명을 유지하기 위한 기초대사와 활동하기 위한 안정시 대사로 구분된다. 성인남자의 기초대사량은 32kcal/hr m^2 이며 쾌적한 상태의 안정시 대사량은 50kcal/hr m^2 이다. 본 대사량은 인체표면에서 전열현상(대류, 전도, 복사 및 증발)에 의해 표 3.5 같은 비율로 방열된다.

표 3.5 쾌적감을 제공하기 위한 전열량 비율

대류 및 전도	복 사	증 발
20 - 30%	40 - 45%	20 - 25%

인체의 열평형식은 아래와 같은 식으로 표현되며 인체의 작업상태에 따라 신진대사량이 표 3.6과 같은 차이를 나타낸다.

$$M = E \pm R \pm C \pm S$$

여기서, M = 신진대사량(kcal/hr인), E = 증발에 의한 방열량(kcal/hr인)

R = 복사에 의한 열교환량(kcal/hr인), S = 인체에 축적되는 열량(kcal/hr인)

표 3.6 작업별 신진대사량

작업내용	신진대사량 (kcal/hr인)	작업정도
수면	62.5	아주 가볍다
정좌	100	
사무작업 및 타자	113-138	가볍다
정좌, 중간정도의 팔다리운동	138-163	
기계에서 가벼운작업(선자세)	138-163	
심한 팔다리운동(정좌)	163-200	중간정도
가벼운작업과 보행 동반	188-250	
중간정도의 작업	250-350	무겁다
단속적인 중작업	375-500	
지속적으로 심한 작업	500-600	

주) 체중이 70kg인 남자를 기준으로 함.

② 실내환경 지표

인체의 방열량은 작업정도나 실내환경(온도, 습도 및 기류)에 따라 큰 차이를 나타내어 쾌적감이나 생리기능도 영향을 받게 된다. 쾌적한 실내환경은 건구온도, 복사온도, 습도 및 기류와 인체인자(의복착의량 및 대사량)에 의해 상호영향을 받는다.

일반적으로 0.3m/sec정도면 재실자가 기류를 느끼므로 설계 시 권장하는 실내 기류는 사무실의 경우 0.13-0.18 m/sec이지만 백화점은 사무실보다 3배정도 높은 기류를 요구한다.

Fanger는 기류속도와 재실자의 활동량의 변화에 따라 재실자에게 쾌적(중성점)을 제공하는 건구온도가 그림 3.28과 같다고 발표했다.

실내환경의 좋고 나쁨을 나타내는 환경지표의 연구가 추진되고 있으며 감각적 또는 생리적인 상태의 눈금에 의한 단일척도를 나타내기 위한 방법이 다음과 같이 제안되었다.

가) 작용온도(Operative Temperature)

실내기류와 습도의 영향을 무시하고 건구온도와 주위벽 온도의 평균온도에 의해 체감상태를 표현한 값임.

$$OT = \frac{T_a + T_w}{2}$$

여기서, T_a = 실내기온(℃), T_w = 평균복사온도(℃)

나) PMV모델

Fanger는 PMV와 PPD값을 이용하여 온열감을 평가하는 방법을 제안하였다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036PMV} + 0.028)L_b$$

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)$$

PMV 값에 따라 쾌적감은 표 3.7 같이 구분하였으며 $-0.5 < PMV < +0.5$ $PPD < 10\%$ 인 경우를 쾌적범위로 정의하였다.

표 3.7 PMV값의 정의

-3 : 조금덥다, -2 : 서늘하다, -1 : 조금 서늘하다, 0 : 쾌적하다,
+1 : 조금덥다, +2 : 덥다, +3 : 무덥다

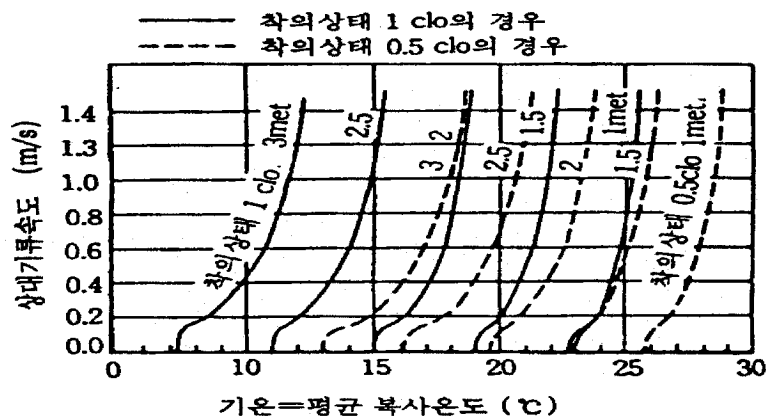


그림 3.28 재실자의 착의량에 대한 상대기류속도와 기온의 관계

또한 실내 청정도를 평가하는 환경지표는 환기효율을 이용하여 평가하는 것이다. 환기효율을 평가하는 방법은 그림 3.29와 같이 급기구에서 유입된 신선공기가 배기구를 통하여 죽음에 이르는 과정을 추적하여 실내로 유입된 신선공기의 연

령(age)을 산정하여 수명으로 정의하며 이 값은 공기입자의 실내체류시간에 해당된다.

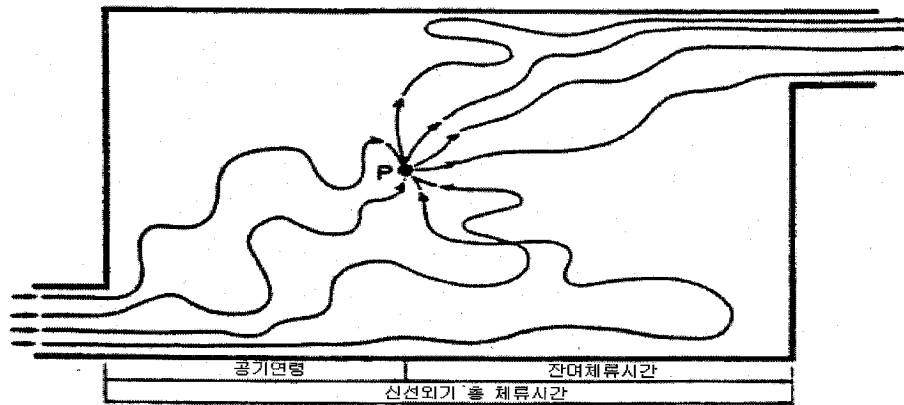


그림 3.29 P지점에서 신선외기의 수명과 체류시간에 대한 개념도

실내 각 부분은 각기 연령이 다른 공기 입자들의 혼합으로 이루어져 있다고 생각하여 위치별 공기입자들의 연령분포를 정의할 수 있다. 이러한 연령분포를 산정하는 방법은 펄스(pulse)방법, 체승(step-up)방법 및 체강(step-down)방법이 있다. 이 방법 중 본 연구에서 제작한 프로그램에서는 정상상태 기류유동해석을 수행한 후, 자동으로 환기효율을 평가하기 위해, 실내 및 배기구에서 그림 3.30과 같은 거동을 나타내는 체승법을 적용하였다.

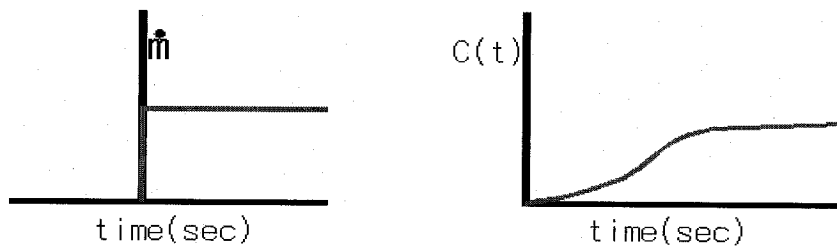


그림 3.30 체강방법을 적용하였을 때 오염물질 변화추이과정

제 5 절 개발프로그램 계산결과 검토

건축기계설비 설계분야에서 설계하는 공조시스템이 실내에 제공하는 환기성능 및 온열쾌적감을 설계단계에서 쉽게 평가하기 위해, 본 연구에서 제 2절에 정리된 바와 같이 시뮬레이션 알고리즘을 고안하여 전처리기와 주 프로그램의 알고리즘을 개발하여 고안한 후, 임의 소규모 실에 대해 시뮬레이션을 수행하여 출력된 계산값과 영국에서 제작되어 국내에 시판되고 있는 Phoenix에서 계산된 값을 공기연령 분포, 온도분포 및 속도분포에 대해 비교하며 유동가시화실험을 수행하여 실험적으로 유동현상 및 공기연령을 비교 검토하여 본 연구를 통하여 개발한 Airview의 베타버전 성능을 검증하였다. 검증방법을 요약하면 다음과 같다.

- 1) Airview를 사용하여 계산한 결과와 Phoenix계산결과를 검증한다.
(해석형상은 4개의 조건에 대해 수행함.)
- 2) 소형챔버를 구성하여 가시화실험을 수행하고 Airview계산결과에 비교검토를 수행한다.

1. Airview와 Phoenix의 계산결과 검증

본 연구에서 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실내온열감을 평가하기 위한 대상실은 대공간에서 해석을 수행하지만 본 연구에서는 시뮬레이션결과의 정확성을 평가하는 것이 개발자로서 우선적인 과제이다.

따라서 본 연구에서는 비교 대상실을 소규모 단일 실을 기준으로 해석을 수행하였으며 본 연구에서 개발한 난류알고리즘의 종류를 변화시켜 Phoenix에서 계산된 결과와 비교 고찰하였다.

본 연구에서 개발한 Airview 베타버전과 Phoenix에서 해석한 결과를 비교하기 위해, Phoenix에서는 low Re수 난류방정식을 구성한 LB모델을 이용하여 해석하였고 본 연구에서 개발한 Airview는 low Re수 난류에너지 방정식인 LB, Davidson, LS을 이용하게 계산한 결과를 비교하였다.

1) 해석형상 1조건

(가) 경계조건 및 해석 조건

본 연구에서 개발한 실내환경평가 프로그램과 Phoenix를 이용하여 구한 결과를 비교한 조건은 표 3.8과 같다. 또한 본 해석을 수행하기 위한 형상은 그림 3.31과 같다.

표 3.8 정확성검토용 시뮬레이션 해석조건(1조건)

구 분	입력수치	비고
실 치 수	4m(W)×2.4m(H)×4m(L)	
급기구풍속	1.6m/sec	
오염발생률	1kg/secm ³	
열 부 하	20W/m ³	수직높이 1.6m이하에 배치
급/배기구 개수	급기구:1EA ,배기구 :1EA	
격 자 수	45(W)×15(H)×25(L)	
명목시간상수	600sec	
급배기구면적	0.2m×0.2m	
난 류 모 델	Phoenix = LB모델(low Re수) Airview = LB, Davidson, LS(low Re수)	

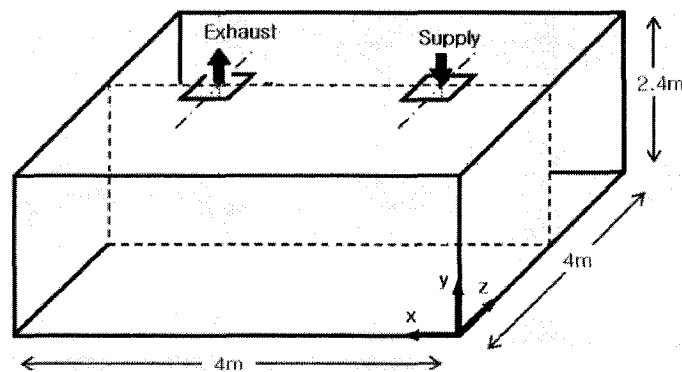


그림 3.31 Airview 결과점증용 해석형상

Airview와 Phoenix를 이용하여 그림 3.31과 같은 형상에 대해, 해석한 시뮬레이션결과를 비교한 결과를 그림 3.32-그림3.33까지 비교하였다. 그림 3.32에 나타난 결과는 범용프로그램인 Phoenix에서 low Re 난류모델인 LB계산된 온도분포, 속도분포, 공기연령분포를 3차원적으로 표현하고 본 연구를 통해 개발된 Airview를 통해서 개발된 low Re 난류모델인 LB, LS, Davidson모델을 사용하여 계산한 결과를 Phoenix를 통해 나타난 결과와 동일하게 속도분포, 온도분포, 공기연령을 표현하였다.

(나) 해석결과

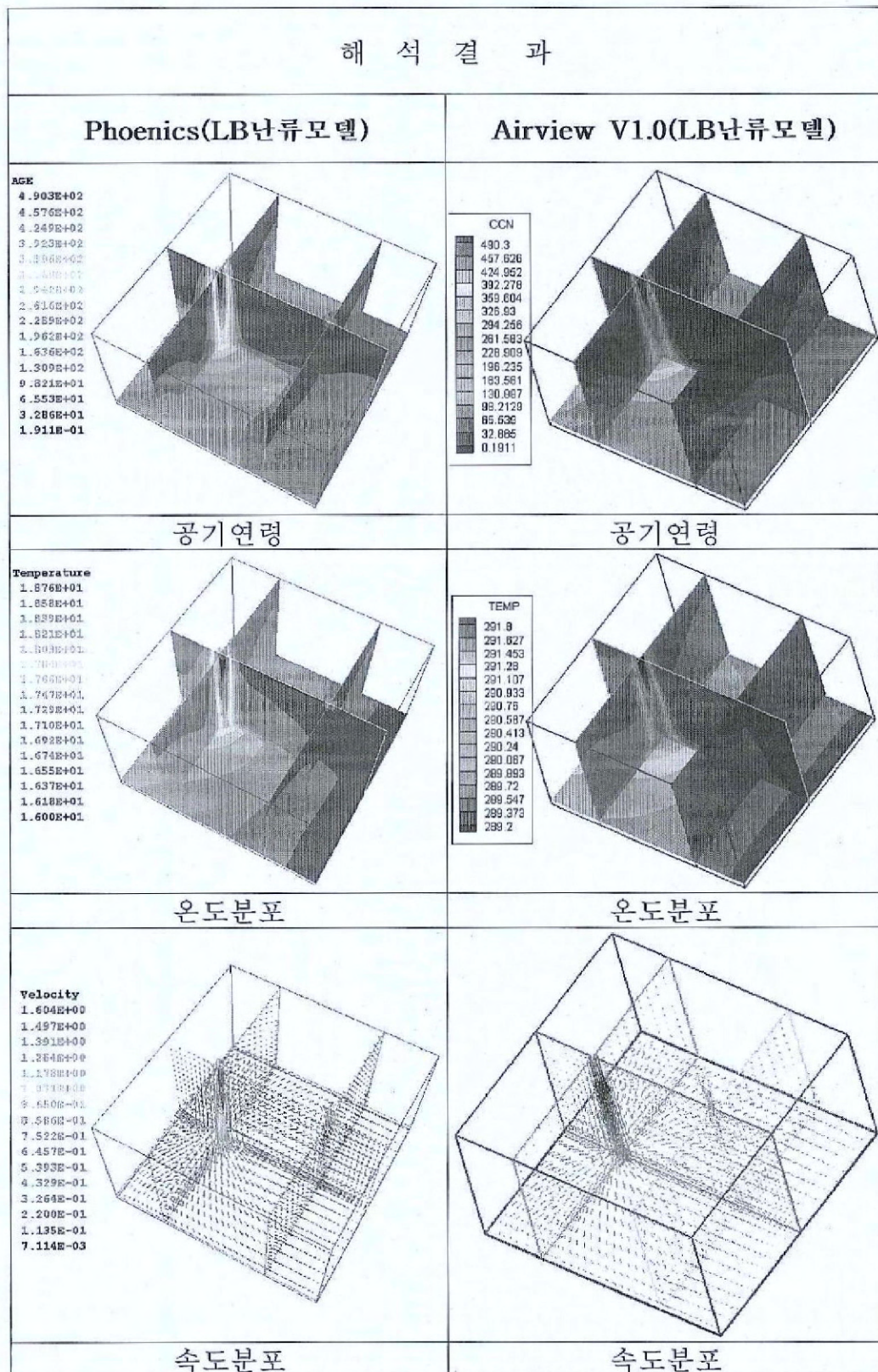


그림 3.32 Phoenics와 Airview의 해석결과 비교

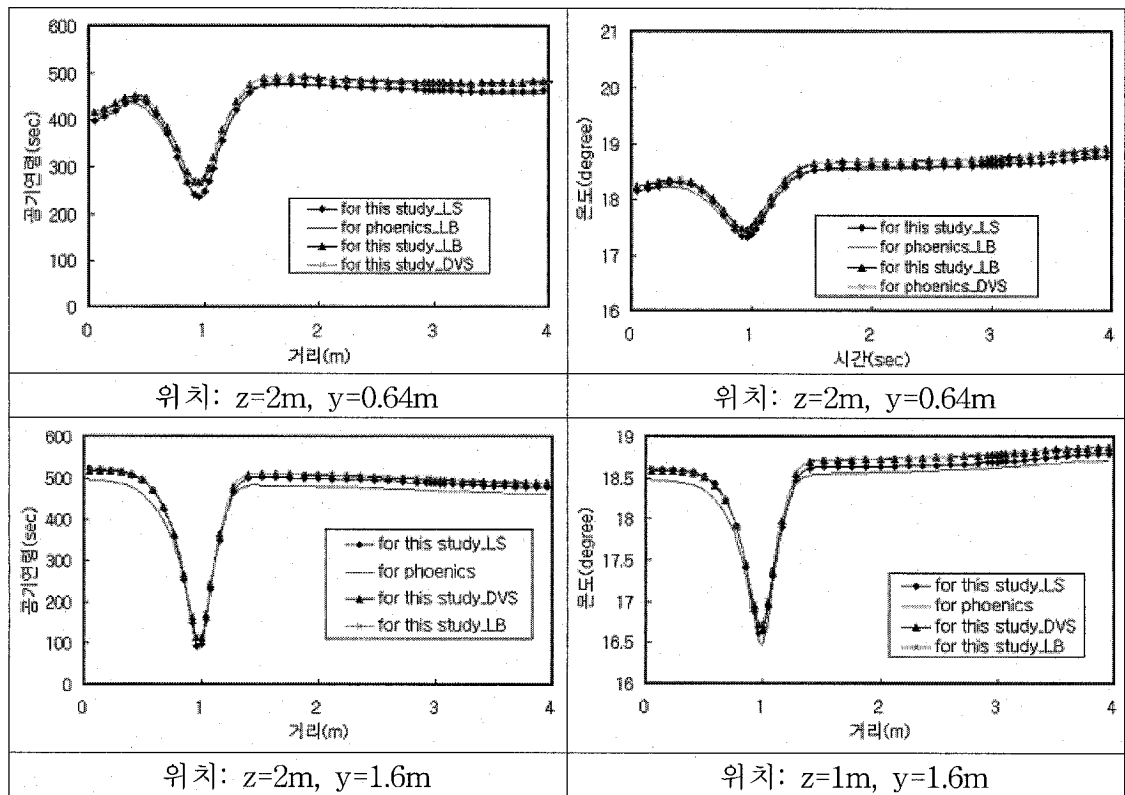


그림 3.33 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 온도분포)

단, Phoenix에서 제공하는 low Re 난류모델이 LB모델만 제공하기 때문에 범용 프로그램에서의 비교대상은 하나로 고정하였다. 결과로 나타난 contour와 벡터를 비교한 결과 유사한 결과를 나타내고 있음을 쉽게 알 수 있었다. 이는 본 연구개발 과정에서 고안되어 프로그램화 한 연구결과가 양호한 것을 입증하는 것으로 판단된다.

그림 3.33은 그림 3.31에서 z방향 거리가 2.0m이고 y방향의 거리가 0.64m인 경우, LB모델을 적용하여 Phoenix로 해석한 결과와 LS, LB, Davidson모델을 적용하여 구성된 Airview를 사용하여 해석한 결과를 공기연령과 온도에 대해 나타내고 있다. 이 값은 모델에 관계없이 유사한 분포를 나타내고 있으며 Phoenix에서 계산값과 Airview에서 계산값의 국소 오차가 0.1%이하로 나타났다. 그러나 수직거리가 높은 1.6m지점에서는 그림 3.33과 같이 국소영역에서 최대 2%의 오차를 나타내

고 있으나 공기연령과 온도분포의 변화거동은 유사하게 나타나고 있어 본 연구에서 개발된 Airview의 해석결과가 타당함을 일차적으로 검증하였다.

2) 해석형상 2조건

(가) 경계조건 및 해석 조건

Phoenics와 해석결과를 비교하기 위한 해석형상 2조건은 그림 3.34와 같다. Phoenics와 비교해석을 수행하기 위해, 적용한 경계조건은 표 3.9에 나타내었다.

표 3.9 정확성검토용 시뮬레이션 해석조건(2조건)

구 분	경계조건	비고
실 치 수	5m(W)×3m(H)×5m(L)	
급기구풍속	3m/sec	급기구 내부에 위치함.
오염발생률	1kg/secm ³	
급/배기구 개수	급기구:6EA ,배기구 :2EA	
격 자 수	30(W)×20(H)×30(L)	
명목시간상수	600sec	
급배기구면적	1mx1m(급기구)	3mx0.5m(급기구)
난 류 모 델	Phoenics = High Re모델(standard k-ε모델) Airview = High Re모델(standard k-ε모델)	

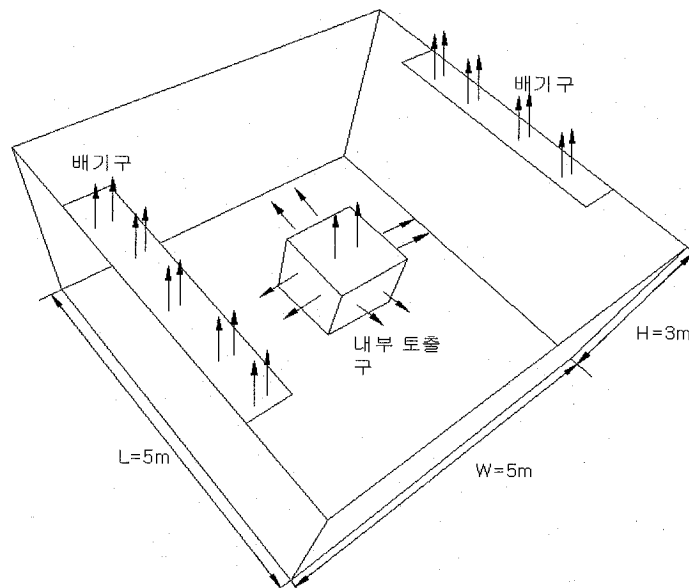


그림 3.34 Airview결과점증용 해석형상 2조건

(나) 해석결과

Airview 및 Phoenix를 이용하여 해석한 결과의 속도벡터분포를 비교하면 그림 3.35와 같다.

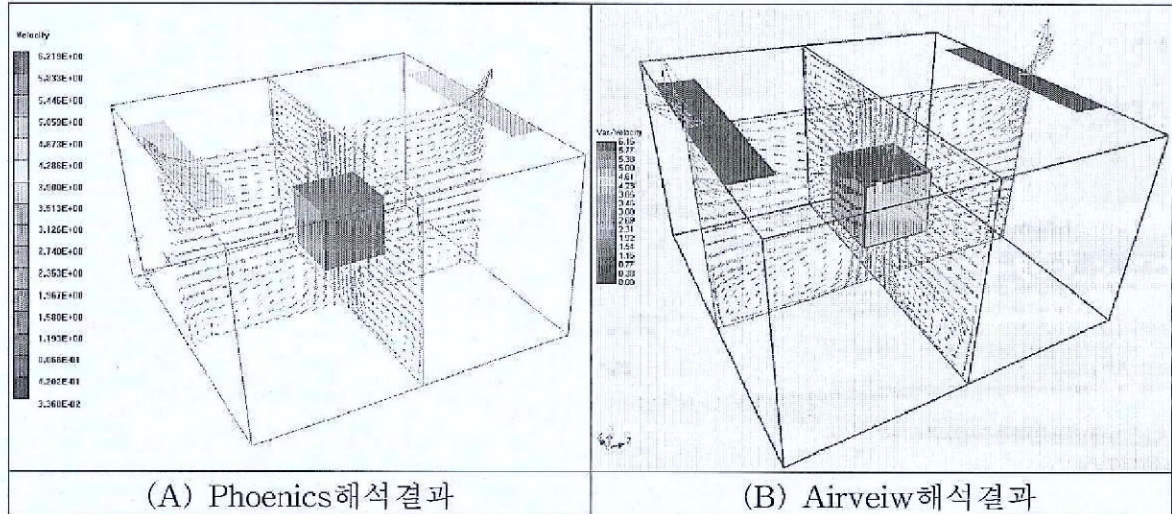


그림 3.35 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터분포)

각 단면에 의해, 표현되는 속도벡터분포는 근사하게 형성되었으며 높이가 1.5m 지점이면서 배기구의 중앙지점(L=2.5m)에서 폭(W)방향의 거리변화에 따른 속도분포와 공기연령분포를 그림 3.36에 나타내고 있다. Airview에서 해석된 속도분포와 공기연령분포가 Phoenix에서 해석된 결과와 최대 2%내의 오차를 나타내고 있다. 이는 본 연구를 통하여 개발된 Airview의 해석결과를 갖고서 주프로그램의 오류가 없는 것으로 판단할 수 있는 충분한 자료이다.

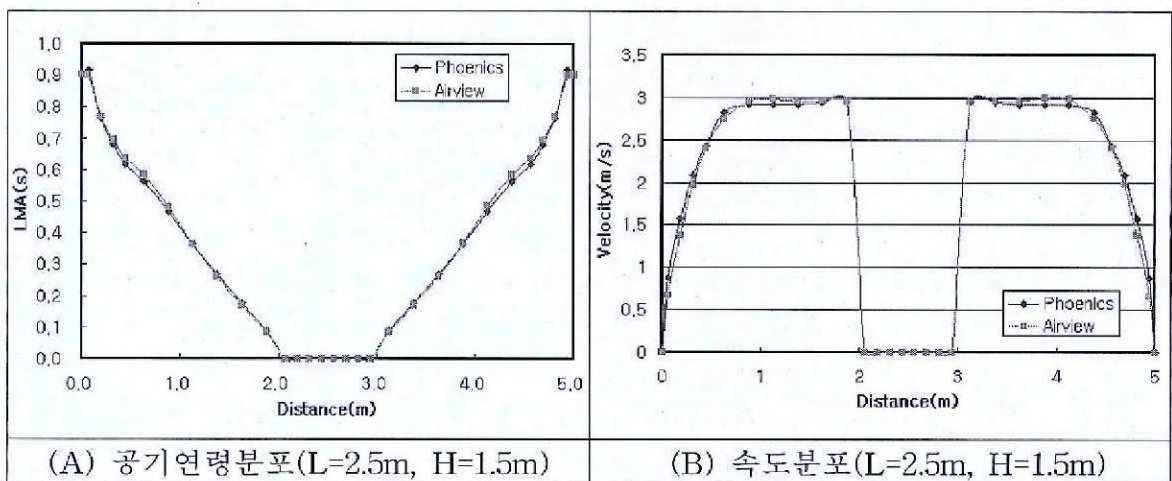


그림 3.36 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 속도분포)

2) 해석형상 3조건

(가) 경계조건 및 해석 조건

Phoenics와 해석결과를 비교하기 위한 해석형상 3조건은 그림 3.37과 같다. Phoenics와 해석결과를 비교하기 위한 상기의 2개조건과 다르게 그림 3.37에 나타난 3번째 비교조건은 회전형 유동현상이 발생하도록 급배기구의 위치를 복잡하게 구성하였다. 이 때 적용한 경계조건은 표 3.10에 나타내었다.

표 3.10 정확성검토용 시뮬레이션 해석조건(3조건)

구 분	경계조건	비고
실 치 수	20m(W)×5m(H)×10m(L)	
급기구풍속	10m/s(장변에 위치한 급기구) 15m/s(단변에 위치한 급기구)	
오염발생률	1kg/secm ³	
급/배기구 개수	급기구:4EA ,배기구 :3EA	배기구는 천정면에 위치함.
격 자 수	85(W)×32(H)×52(L)	
명목시간상수	600sec	
급배기구면적	1mx1m(단변 급기구)	1mx1m(배기구)
난 류 모 델	Phoenics = High Re모델(standard k-ε모델) Airview = High Re모델(standard k-ε모델)	

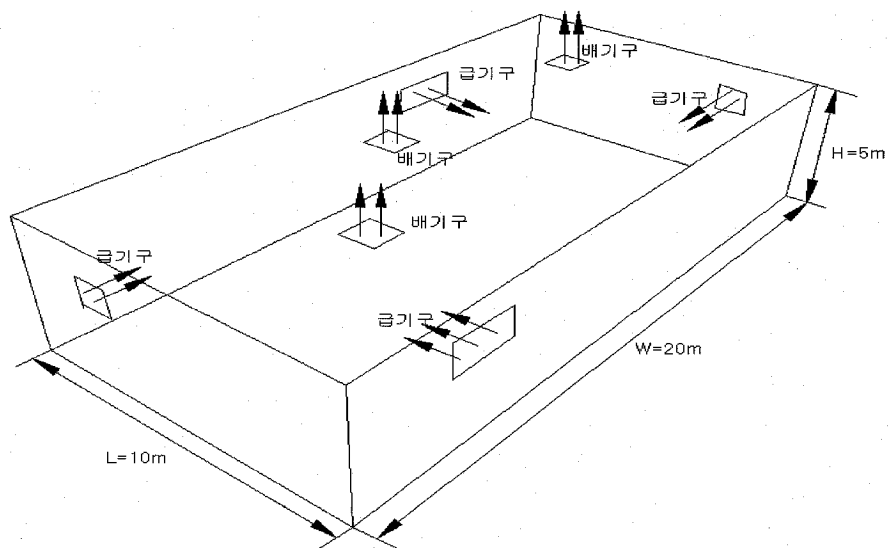


그림 3.37 Airview결과검증용 해석형상 3조건

(나) 해석결과

Airview 및 Phoenix를 이용하여 해석한 결과의 속도벡터분포를 그림 3.37에 나타내고 있으며 속도벡터를 contour로 표현한 결과를 그림 3.38에 나타내고 있다. 이때, 높이 3.6m지점이다.

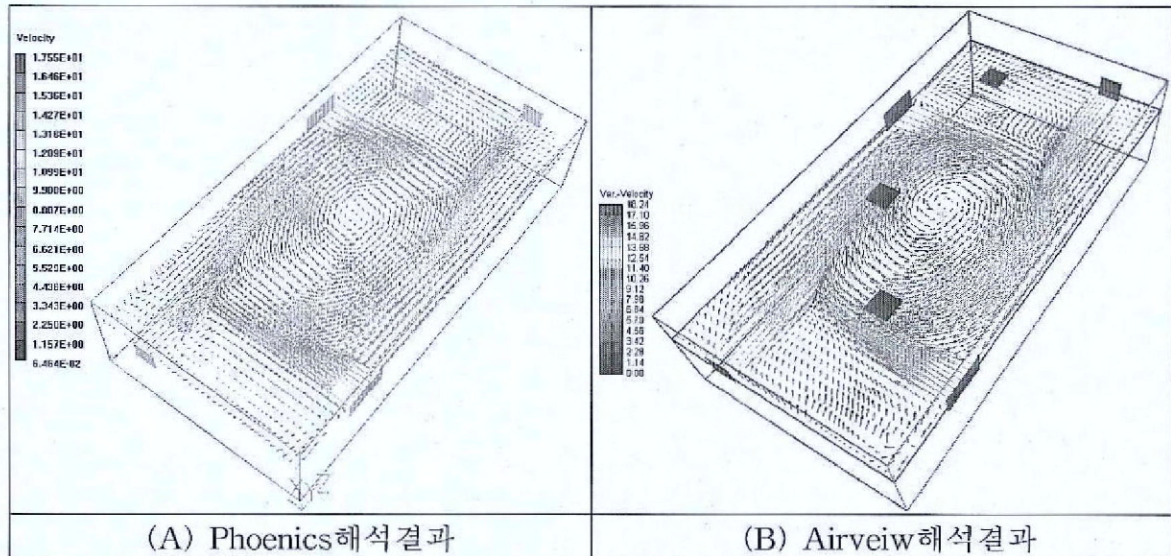


그림 3.38 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터)

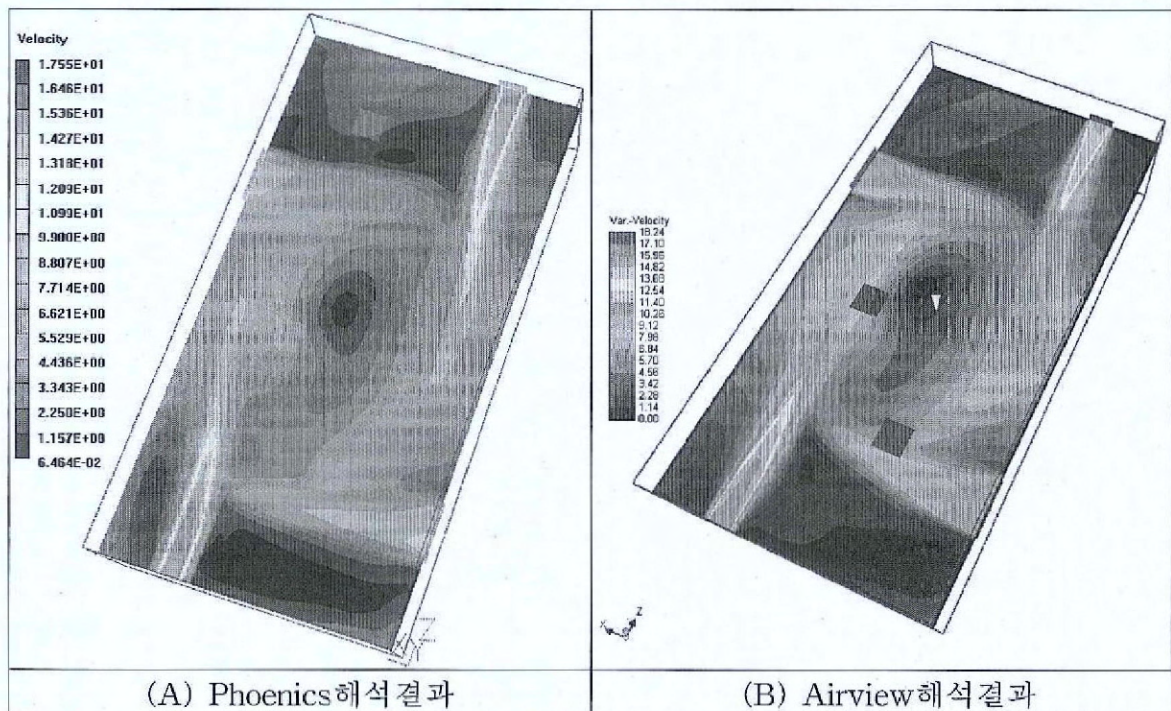


그림 3.39 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(속도벡터 contour)

3번째 비교조건의 경우, 최대속도벡터의 크기가 Airview에서 1.82m/s로 배기구에서 나타났으나 속도벡터분포는 유사하게 나타났으나 Phoenix에서 최대 속도벡터크기는 1.725m/s로 나타나 10%정도의 속도벡터의 크기가 차이 나고 있다. 이로 인하여 수직높이 3.6m지점의 속도벡터크기가 미소하게 차이남을 그림 3.39의 contour에 나타내고 있다. 본 해석조건이 복잡하지만 Phoenix의 경우, 이완계수를 변화시켰으나 아주 낮은 하향이완계수를 적용해야 해석을 수행할 수 있을 정도였다. Airview경우는 수렴조건에 쉽게 도달하여 그림 3.40과 같이 반복계산을 2500정도 수행하였을 때, 유입유출오차가 10^{-5} 정도 유지되었다. 해석결과의 수렴성은 타당한 것으로 판단하였다.

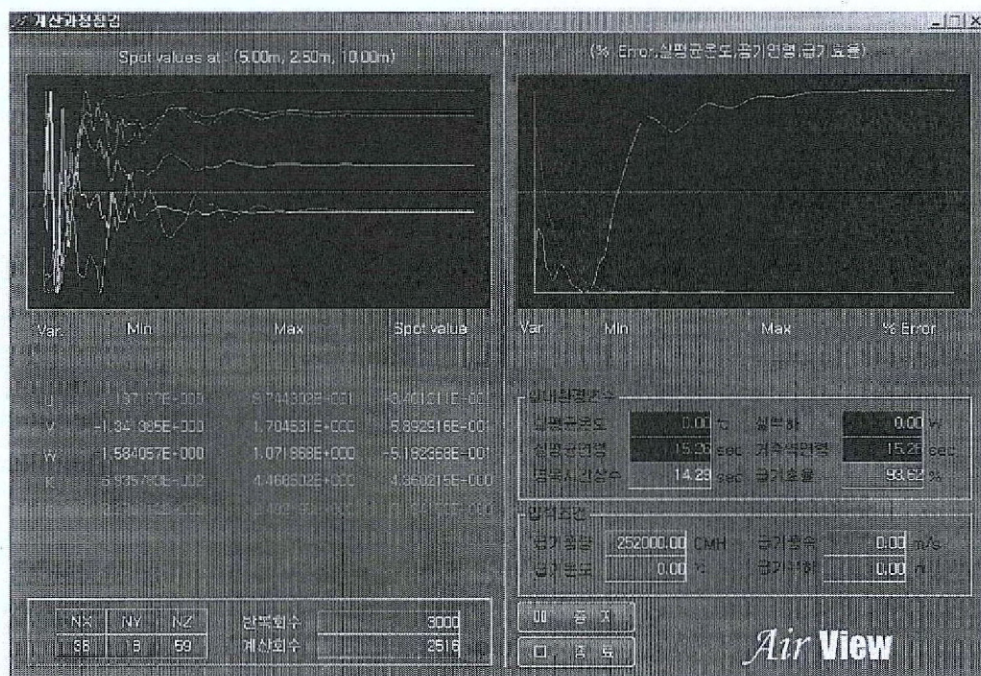


그림 3.40 비교해석조건 3조건의 Airview의 반복계산과정

이와 같은 계산과정은 차이로 인하여 비교조건 3조건의 공기연령과 속도벡터분포는 Phoenix보다 본 연구에서 개발된 Airview에서 계산된 결과가 속도벡터분포가 10%정도 증가하고 이로 인하여 공기연령이 Phoenix에 의해, 해석된 결과보다 10%정도 낮게 나타내는 영역이 그림 3.41에 존재하고 있다. 이런 것으로 보다 해석된 결과의 오차는 발생하지만 속도벡터증가에 따른 공기연령감소가 유사하게 나타남으로 인해 해석의 타당성은 검증되었으며 Phoenix를 이용하여 해석한 결과, 배

기구의 최대속도가 Airview와 유사하게 1.824m/s로 상향되는 결과를 나타내면 유사한 본 연구에서 개발된 Airview와 유사한 결과를 나타낼 것으로 예측된다.

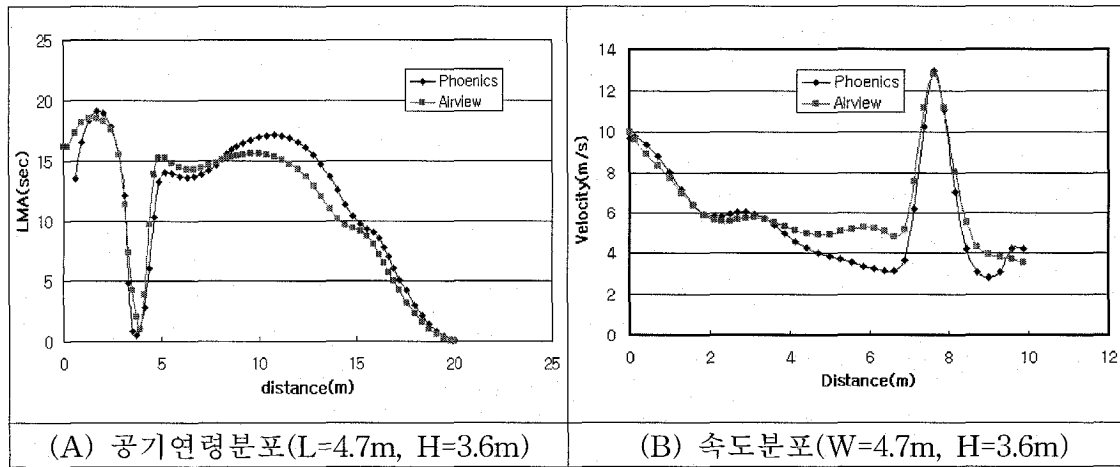


그림 3.41 Phoenix와 Airview의 해석결과 비교(공기연령 및 속도분포)

지금까지 본 연구결과인 Airview를 이용하여 해석한 결과를 지금 국내에 시판되고 있는 Phoenix에 동일한 조건으로 적용하여 해석한 결과를 비교검토하였다. 비교검토결과 단순한 형상 및 복잡한 형상에서도 Airview의 해석결과가 타당함을 검증하였다. 이러한 검증결과와 더불어 가시화실험을 수행한 결과를 살펴보고자 한다.

2. 모형실험에 의한 타당성 검토

가. 실험 장치

본 실험에서 사용된 챔버는 가로 1.8m, 세로 1.2m, 폭 0.9m로서 우측 상단부에 폭 0.825m, 높이 0.025m의 슬릿형 급기구가 설치되어 있다. 좌측 상·하단부와 우측 하단부에 급기구와 동일한 크기의 슬릿형 배기구가 설치되어 있다. 배기구의 한 곳만 개방하고 나머지 두 개의 배기구는 항상 차단하여 세 가지 조건의 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 실험 장치의 개략도가 그림 3.42에 나타나 있다.

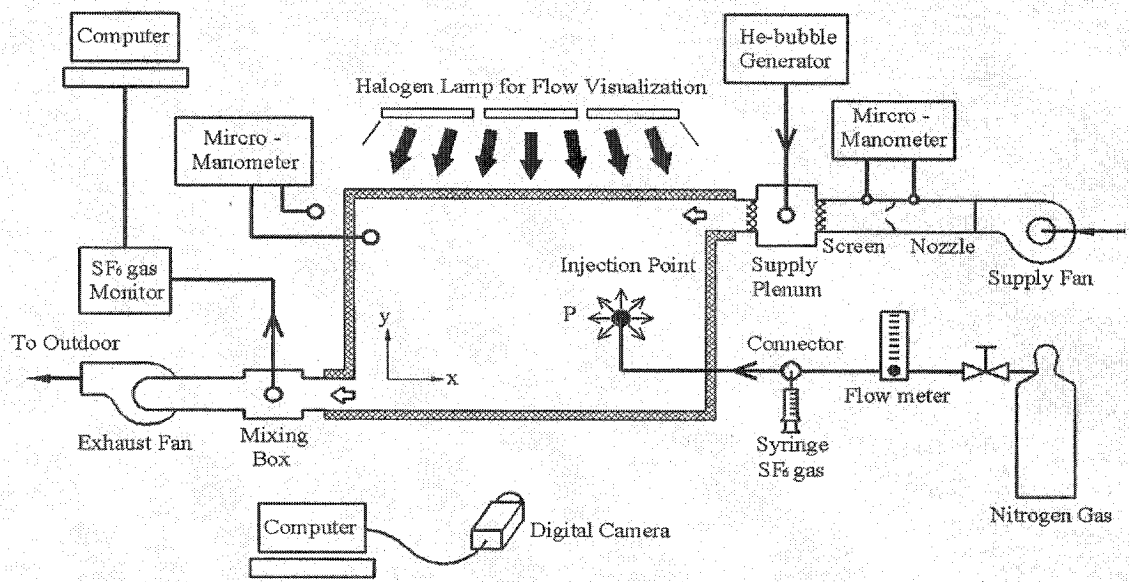


그림 3.42 실험장치 개략도

급기팬을 통해 급기된 공기는 유량측정을 위한 노즐을 지나 플리넘(plenum) 내에 설치되어 있는 정류장치를 통해 플리넘에 저장되었다가 급기구를 통해 챔버 안으로 급기 되도록 하였다. 급기풍량은 송풍기의 회전수를 조절하여 제어하며, 급기덕트 내에 있는 노즐 전후의 압력차를 마이크로 마노미터를 사용하여 측정함으로써 챔버에 공급되는 풍량을 측정하였다. 노즐은 KS규격의 ISA1932를 사용하였으며 노즐의 지름은 19mm와 49mm 두 개를 사용하였다. 관의 지름은 100mm로 조임지름비는 각각 0.19, 0.49이고 노즐의 유량계수는 0.99로 계산하였다. 플리넘은 급기되는 공기가 균일하도록 하기 위하여 설치되었으며 규격은 가로 0.4m, 세로 0.9m,

높이 0.6m 이다. 배기 덕트는 배기 팬과 연결되어 있고 배기 팬을 통과한 추적가스와 공기가 혼합된 실내의 공기는 재순환되지 않도록 실외로 직접 배출시켰다. 챔버의 한쪽 면에는 마이크로 마노미터를 설치하여 모델내부와 실험실 안의 압력차가 발생하지 않도록 하였다. 또한 챔버 내의 공기 누설이나 외부공기의 침기를 막기 위하여 챔버의 모든 모서리와 접착부를 밀폐시켰다. 추적가스는 SF_6 를 사용하였다. 추적가스의 밀도차에 의한 영향을 줄이기 위하여 질소가스로 희석한 SF_6 가스를 사용하여 방출장치의 연결부에 주사하였으며 관내에 남아있는 추적가스를 제거하기 위하여 실험 간에 수 초간 질소가스를 추가적으로 주입하였다. 따라서 밀도차에 의한 영향은 고려하지 않았다. 추적가스 농도측정기는 적외선 흡수법(NDIR)에 의한 멀티가스모니터를 사용하였다. 실험 전 추적가스 농도측정기에 대한 보정을 수행하였다. 측정기의 반응시간은 약 35~45초 정도로 측정간격을 1분으로 하였다.

나. 시험조건 및 방법

유동장 가시화를 위하여 헬륨-기포발생기를 사용하였다. 헬륨-기포발생기에서 발생한 기포를 급기구에 주입시켰으며 측정은 2차원 유동조건으로 가정하여 챔버 내의 정중앙 사각단면을 대상으로 측정하였다. 챔버의 중앙단면을 따라 평면광을 조사하여 챔버 내의 유동장을 가시화하였다. 국소평균잔여체류시간의 분포를 측정하기 위하여 환기횟수를 12ACH로 고정시키고 급기구에서 추적가스를 주입하고 실내 15개의 측정점에서 시간에 따른 농도변화를 측정하였다. 15개의 주입점 중 원하는 위치에 추적가스 주입장치를 고정시키고 챔버를 밀폐시킨 후 배기구에 배기되어 빠져나가는 공기를 혼합하기 위한 혼합장치를 장착한 후 혼합장치 하단에 추적가스 측정기의 흡입필터를 부착하였다. 가스포집 주머니에 포집되어 있는 30%의 SF_6 가스 50cc를 주사기로 채취하여 추적가스 주입장치 커넥터에 주사하여 배기구에서의 농도변화를 측정하도록 하였다. 주입되는 추적가스는 챔버 내에 기류속도에 영향을 미치지 않아야 하므로 추적가스 측정기의 흡입량 15cc/sec를 기준으로 하여 주입장치를 설계하였다. 국소평균연령의 측정은 국소평균잔여체류시간의 실험 조건과 모두 동일하나 100%의 SF_6 가스를 급기구에 주사하였다.

환기량의 변화에 따른 실험평균환기효율의 변화를 측정하기 위해 4, 8, 12, 23, 38, 57, 76 ACH 환기량에 대하여 배기구의 농도변화를 반복 측정하였다. 모든 조건은

국소평균잔여체류시간 실험의 조건과 동일하나 추적가스 주입장치를 급기구 정중앙에 위치시켰다.

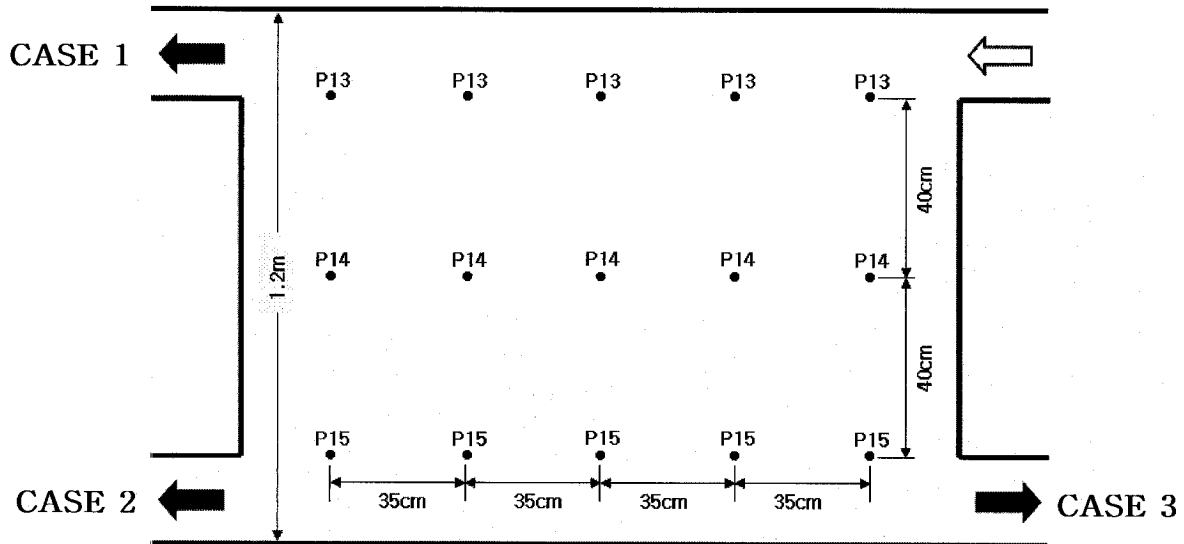


그림 3.43 CASE별 급,배기구 설정조건

다. AIRVIEW에 의한 시뮬레이션

AIRVIEW에서 계산된 결과를 검증하기 위해, 실험조건과 동일한 형상과 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였고 아울러 상용 CFD프로그램인 Fluent Ver.6.2 의 결과와도 비교하였다.

AIRVIEW와 Fluent 모두 5544개의 격자로 동일하게 구성하였으며 급기구는 속도유입조건(0.3 m/s), 그리고 배기구는 압력유출조건(0 Pa)으로 설정하였다. 급배기구를 제외한 부분은 벽으로 설정하였고, 난류모델은 AIRVIEW는 High Re모델, Fluent는 k-ε 모델을 이용하였다. 비교대상은 실험결과의 유동가시화 사진과 LMA(Local Mean Age)측정결과로서 CASE별로 AIRVIEW와 Fluent를 이용하여 시뮬레이션한 속도벡터와 환기효율 분포와 각각 비교하였다.

라. CASE별 해석결과

그림 3.44~3.46은 CASE 1, 2, 3에 대한 속도벡터의 시뮬레이션 결과와 유동가시화 실험결과를 비교해서 보여주고 있다. CASE 1(좌상단 배기)에서는 유입되는

공기는 일정부위에 큰 와류유동영역을 발생하는 영역으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 이는 AIRVIEW, Fluent를 이용하여 해석한 속도벡터 분포에서도 중심부에서 발생하는 재순환영역을 비교한 결과 유사성을 입증할 수 있다. CASE 2(좌하단 배기)에서는 유입되는 공기가 일정거리에 도달한 후 좌하단 배기구를 향해 대각선으로 빠져나가고 양쪽 모서리에 와류유동영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. CASE 3(우하단 배기)에서는 유입되는 공기가 벽면을 따라 배기구로 빠져나가고 있고 중심부에 재순환영역이 크게 발생함을 알 수 있다. 이도 AIRVIEW, Fluent를 이용하여 해석한 속도분포를 비교하면 중심부에서 발생하는 영역과 유사함을 보인다.

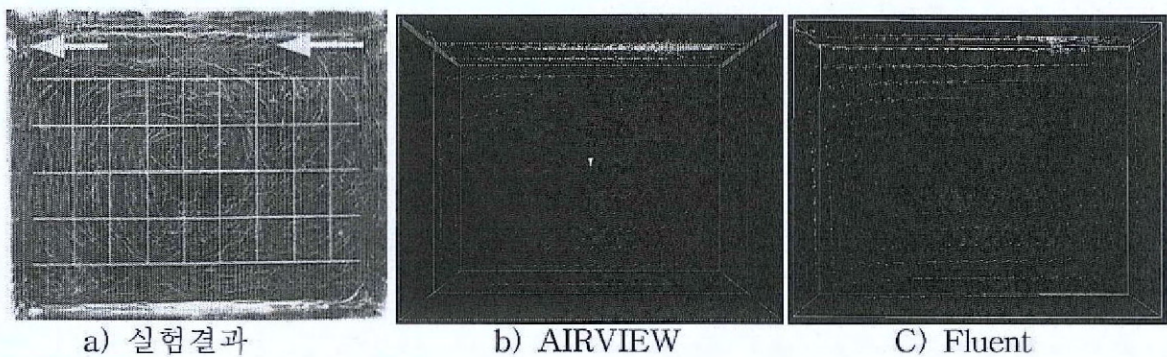


그림 3.44 CASE 1의 속도벡터 비교

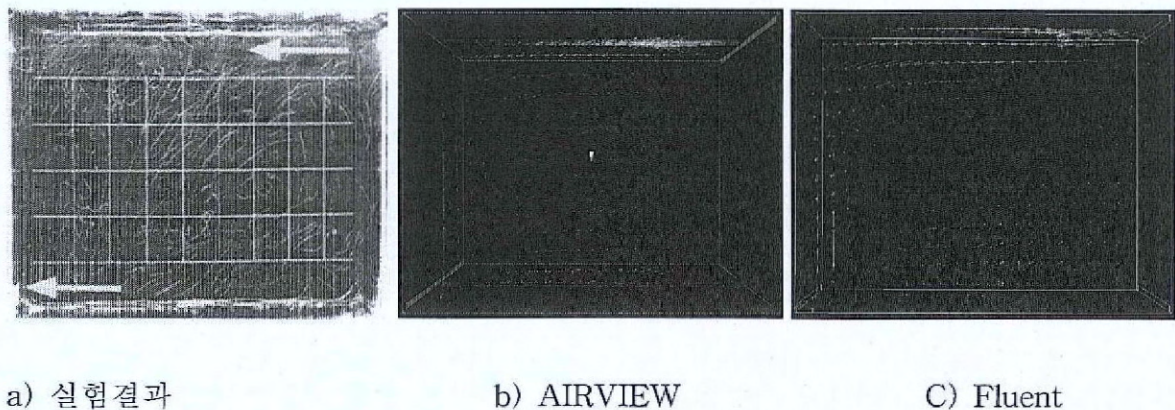
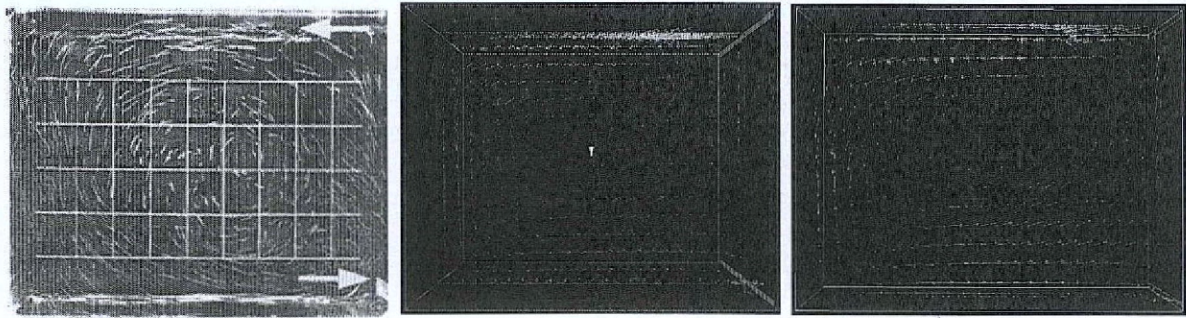


그림 3.45 CASE 2의 속도벡터 비교



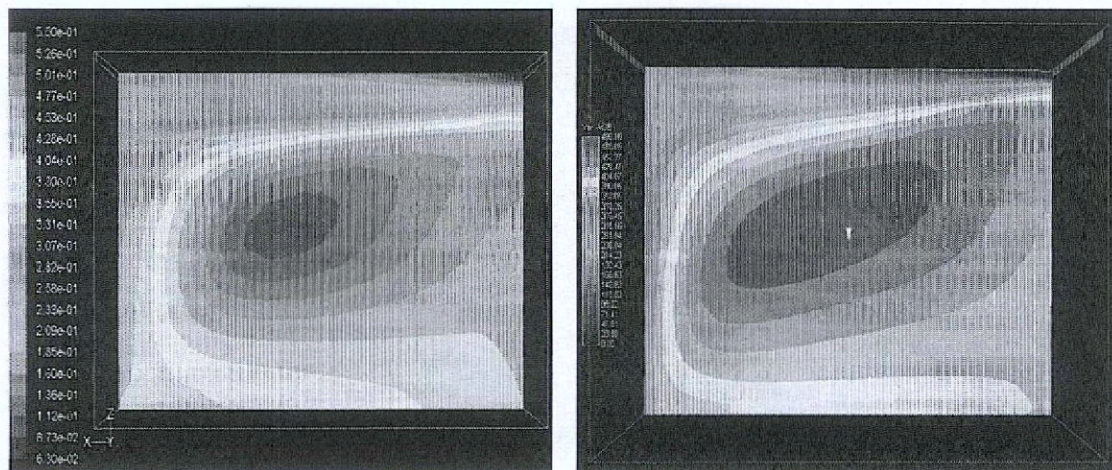
a) 실험결과

b) AIRVIEW

c) Fluent

그림 3.46 CASE 3의 속도벡터 비교

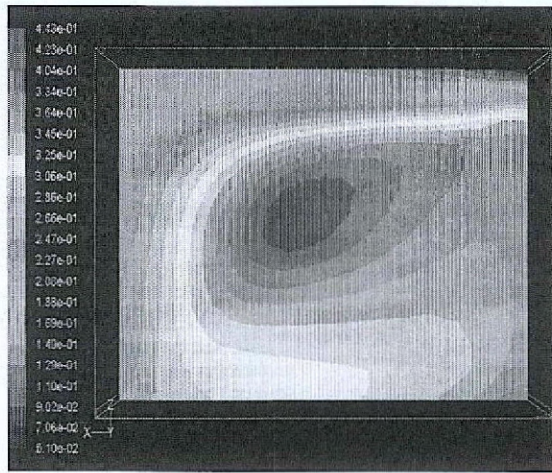
그림 3.47~3.49은 CASE별 AIRVIEW, Fluent의 LMA의 결과를 비교해 보여주고 있다. 각각의 그림에서 영역별 색상분포가 다소 다르게 보이는 것은 범례의 색상분포가 다소 다르기 때문이나 전반적으로 유사한 분포를 보인다. 실 전체의 환기 효율을 비교하기 위해 그림 3.43에 나타난 15개 지점의 농도변화를 평가하여 실험 균연령을 구하였다. 표 3.11에는 측정된 실험균연령값을 AIRVIEW, Fluent의 결과와 비교해 보여주고 있다. 실험과 시뮬레이션 결과의 오차가 약 10%내에 존재하고 있다.



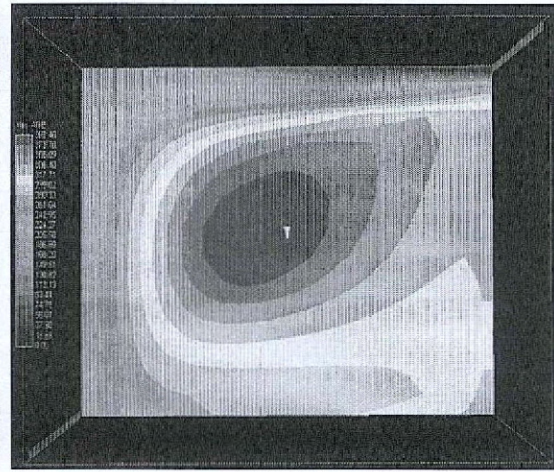
a) AIRVIEW

b) Fluent

그림 3.47 CASE 1의 LMA 비교

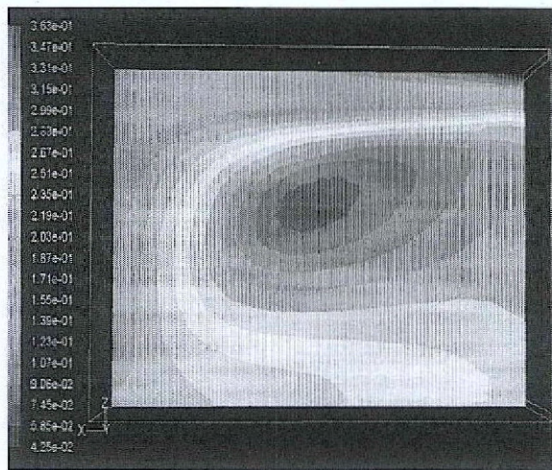


a) AIRVIEW

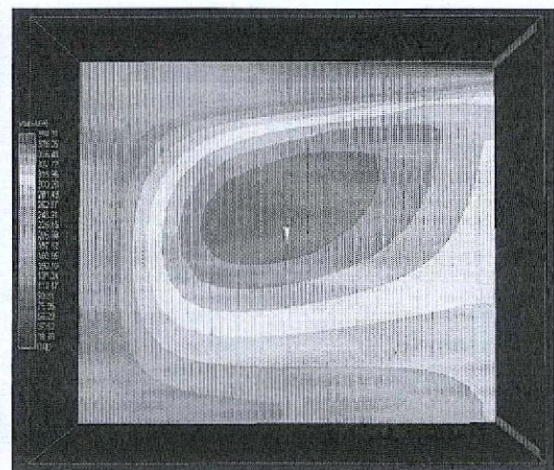


b) Fluent

그림 3.48. CASE 2의 LMA 비교



a) AIRVIEW



b) Fluent

그림 3.49 CASE 3의 LMA 비교

표 3.11 CASE별 환기효율 비교

	실험결과	AIRVIEW	Fluent
CASE 1	0.40	0.41	0.46
CASE 2	0.62	0.53	0.56
CASE 3	0.61	0.55	0.67

제4장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제1절 연구개발목표 및 평가의 착안점

1. 최종 목표

본 연구는 공조설비시스템을 구성하는 주요목적인 쾌적한 실내환경평가를 위해, 이론적 해석방법을 탑재한 실내의 환기성능/쾌적온열감 평가전용 CFD프로그램을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구를 통하여 개발되는 CFD프로그램이 보 유해야 될 기능적 목표는 다음과 같다.

- 전처리가 보유해야 될 기능
 - 벽체 및 내부 블록(block)의 경계조건 구성 (속도, 온도 및 농도조건)
 - 급기, 배기구 경계조건 자동생성 기능구성 (속도, 온도 및 농도조건)
 - 급기구 종류별로 토출각도 자동선정 및 입력 기능구성
 - 실내의 균일 열유속, 균일 오염농도처리 블록(block)자동생성 기능구성
 - 벽체부근의 비균일격자계 자동생성 기능구성
 - 벽체형상에 따른 벽체밀착형 직교좌표계 자동생성 기능구성
- 주프로그램이 보유해야 될 기능
 - 유한체적법(finite volume method)을 적용한 SIMPLER알고리즘
 - staggered grid system
 - High Reynolds turbulence model
 - Low Reynolds turbulence model
 - 환기효율 자동평가 알고리즘
 - 쾌적온열감 자동평가 알고리즘
 - 기류확산성능 자동평가 알고리즘
 - 계산결과를 변수별로 출력할 포맷 결정
- 후처리가 보유해야 될 기능
 - 1, 2, 3차원 계산결과를 데이터파일로 출력하는 기능

- 3차원 해석형상에 계산결과를 2차원 단면에 contour, vector로 표현기능
- 3차원 유동현상을 입체적으로 표현하는 particle trajectory기능

2. 연차별 연구목표 및 내용

목 표	내 용
전처리기 개발	전처리기는 국외에서 제작된 범용프로그램과 동일한 기능을 보유하고 실내온열환경평가 전용프로그램으로 쉽게 작동할 수 있도록 구성메뉴와 작업내용을 단순화하도록 구성하였다.
주프로그램 일반화	주프로그램은 patankar에 의해 고안된 SIMPLER알고리즘을 근간으로 제작하였으며 다음과 같은 특징을 갖고 있다. -배기구의 압력경계조건을 적용하여 수렴성을 향상시켰다. -범용성을 부여하기 위해, 급 배기구 위치, 블록위치를 자동 인식할 수 있는 인덱스를 부여하여 다양한 급 배기구 및 블록위치를 인식하도록 알고리즘을 구성하였다. -계산과정이 종료된 후, PMV와 급 배기구 효율을 자동으로 평가하여 출력되도록 알고리즘을 구성하였다.
계산프로그램의 정확성검증	-계산프로그램의 정확성 검증은 단순한 형상에 대해 수행한 결과 온도와 공기연령분포가 유사하게 나타났으며 각 지점의 온도와 공기연령이 동일한 값을 나타내고 있다. 시판중인 범용프로그램이 정확한 해석을 수행하기 위해서는 계수 값을 정교하게 설정해야 되는 문제점을 확인하였다.
계산과정 점검창	주프로그램에 출력된 관찰지점의 데이터를 계산과정 점검창에 graph로 출력하도록 화면을 구성하였다.
후처리기	주프로그램에서 수렴된 결과를 3차원/2차원으로 해석형상에 사용자가 정의되는 위치를 인식하여 Contour 및 vector로 쉽게 표현하는 기능을 구현함.

3. 평가의 착안점

(1) 총괄

- 1차년도/2차년도에 수행한 세부연구목표에 따른 평가 착안점에 타당한지 평가함.

(2) 1차 년도

년 도	세부연구 목표	평가의 착안점 및 척도
1 차 년 도	경계조건 입력	▶ 경계조건 입력창에 의해 생성된 경계조건이 입력된 파일과 주 프로그램의 데이터 교환의 정확도 ▶ 경계조건 입력창의 3차원 활성화 유연성과 경계조건 입력 편리성
	주프로그램 알고리즘 개발	▶ 주 프로그램에 사용될 변수 및 소스항의 입력창의 편리성과 주 프로그램으로 데이터 전송의 정확도 ▶ 주 프로그램의 반복 계산과정을 표현하는 GUI환경의 작동 정확성과 계산과정 중 이완계수, 확산계수의 데이터 전송 정확도
	계산결과 출력	유동가시화 실험이 불가능한 대형건물에 대해 유동가시화 시뮬레이션을 수행하여 구한 주 프로그램의 반복 계산결과와 국외에서 제작하여 시판하고 있는 상업용 시뮬레이션 결과와의 오차 검증

(3) 2차 년도

년 도	세부연구 목표	평가의 착안점 및 척도
2 차 년 도	계산결과 출력	계산결과를 일반인이 쉽게 인식할 수 있도록 3차원 graphic기술을 적용하여 scalar변수와 vector변수의 결과 표현이 다양하게 유지되는지 평가함.
	유동가시 화 실험	축소 모델을 선정하여 3차원 기류유동 가시화 시뮬레이션과 실험을 수행하여 결과를 비교 검토한 후, 불일치 하는 부분에 대해 주 프로그램의 보완하거나 개선방안을 제시하는 것이므로 실험방법의 타당성 및 실험의 정확성을 평가한다.

제2절 연구개발 목표의 달성도

1. 연구개발 목표의 달성도

가. 2차년도(2007년)

번호	연구개발목표	연구개발목표의 달성도
1	○ 계산결과 출력	- 후처리기 구성 (100%) - 2차원 contour/vector를 변수별로 3차원형상에 사용자지정된 위치에 구현하고 저장하는 기능(100%) - 3차원 유동현상을 입체적으로 표현하는 particle trajectory기능구현(100%) - 계산결과를 2차원, 1차원 데이터 파일로 출력하는 기능구현(100%)
2	○ 유동가시화 실험	- 유동가시화 장치 및 모형실험 챔버구성(100%) - 유동가시화 실험 및 급, 배기조건에 따른 공기연령분포 구함(100%) - 실험적으로 구한 공기연령과 이론적으로 구한 공기연령분포의 비교검토 (100%)
3	○ 1차년도 수행결과 프로그램 디버깅	- 1차년도에 개발한 주프로그램과 전처리기의 에러를 찾는 디버깅작업 수행 • 주프로그램 해석결과 검증작업 수행(100%) • Phoenix와 Airview계산결과 비교 검증결과 정확도(100%) • 전처리기의 조작오류 검토하여 발생한 오류를 수정함.(100%)

2. 상기 평가의 착안점에 따른 달성도에 대한 자체 평가

가. 2차년도(2007년)

연차	평가의 착안점	자체평가
2차년도	○ 계산결과 출력	- 후처리기에서 필요한 기능을 현재 시판되고 있는 범용프로그램과 큰 차이가 없도록 구현하기 위해, 필요한 기능과 편리한 기능으로 구분하여 기능향상에 노력하도록 연구를 수행하였음. - 현재 시판되는 범용프로그램과 차별화된 기능은 3차원 유동현상을 입체적으로 표현하는 particle trajectory기능과 계산결과를 2차원, 1차원 데이터 파일로 쉽게 저장하는 기능구현임.
	○ 유동가시화 실험	- 소형 환기시스템을 구성하고 그 시스템 중앙에 모형실험 챔버 구성한 후, 공기연령 및 유동현상 가시화실험을 수행하였으며 수행된 결과를 갖고서 본 연구에서 개발된 Airview해석결과에 비교 검토한 결과 정성적으로 유사한 결과를 나타내는 것을 입증하였음.
	○ 1차년도 수행결과 프로그램 디버깅	- 1차년도에 개발한 주프로그램과 전처리기의 에러를 찾는 디버깅 작업을 수행하여 에러의 발생빈도를 최소화 하였다. - 주 프로그램으로 해석된 결과를 범용 프로그램인 Phoenix에서 계산된 결과와 비교하는 작업을 반복적으로 수행하였으며 그 결과, 본 연구에서 개발된 Airview프로그램으로 계산된 결과가 국외에서 개발된 프로그램인 Phoenix,에서 계산된 결과와 큰 차이가 없으며 수렴성이 더 양호한 것으로 판단되었음.

3. 계획대비 수행실적

가. 2차년도(2007년)

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 계산결과 출력				6.0	6.0	6.0	6.0	1.0	1.0	4.0			30%
				6.0	6.0	6.0	6.0	1.0	1.0				
- 후처리기 구성 및 개발				.....									
- 2차원 단면에 표현된 컨투어(백터)결과검증						.....							
													30%
- 계산결과 출력기능 구 현 및 출력결과 검증							.....						
○ 유동가시화 실험	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	5.0			30%
	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0				
- 실험장치제작 및 문헌 조사	.....												
- 실험장치 제작 및 예비 실험			.....										
													35%
- 해석 및 모형실험						.....							
- Airview해석결과와 비 교검토									.....				
○ 1차년도 수행결과 프로 그램 디버깅	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5			35%
	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5				
- 1차년도 수행결과 정리	.....												
- 발생되는 에러 수정			.....										
													5%
- 범용 CFD프로그램계산 결과와 Airview해석결 과의 비교검토					.....								
- particle trajectory기능 후처리에 구현									.....				
최종보고서작성											2.5	2.5	5%
													
총 진도율	9.5	19.0	28.5	38.0	47.5	57.0	66.5	76.0	85.5	95.0	97.5	100	
	9.5	19.0	28.5	38.0	47.5	57.0	66.5	76.0	85.5	95.0	97.5	100	

4. 연구성과

가. 논문발표 (총 3건)

구분	연구기관	발표논문제목	논문게제기관	비고
	국민대학 / 신 흥 대 학	환기효율 및 PMV평가하여 최적화 공기조화설비를 구현하기 위해, 개발 된 범용CFD프로그램 AIRVIEW소개	대한설비공학회 2007 하계학술대회	
		건축기계설비 전용 실내환경평가 CFD 프로그램	대한설비공학회 2006년 환기부문 학술강연회	
		지능형 건물의 위치인식에 의한 환기장 치 제어방안	한국실내환경학회 2006년 연차 학술대회	

나. 장비개발

기관	장비명	개발 장비 개요		활용
국민대학	유동가시화장치		- 축척 : 1/40 - 치수 : - 풍속 :	Airview해석결과 검증에 활용

다. 연구결과의 정책반영

실정 없음

라. 산업재산권

실적 없음

제5장 연구개발결과의 활용계획

제1절 추가연구의 필요성 및 타 연구에의 응용

본 연구개발 사업으로 개발될 건축기계설비 전용 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램을 구성하는 알고리즘은 유한체적법(finite volume method)이다. 이 방법은 3차원해석으로 Navier-Stokes 방정식을 쉽게 확장할 수 있는 장점을 보유하고 있지만 적용할 수 있는 격자계는 직교좌표계로 제한되고 있어 후속 연구는 비직교 좌표계의 일반화방법에 대한 연구가 진행되어야 하고 현실성 있는 기류유동을 표현하기 위해, 난류방정식의 발전에 맞춰 실내유동해석을 현실화 할 수 있는 알고리즘을 채택하여 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 프로그램의 기능을 지속적으로 향상시켜나가야 될 것이다.

또한 CAD 프로그램과 연계하여 냉난방 부하를 예측할 수 있는 모듈까지 개발하여 추가된다면 좀 더 종합적인 실내 환경 및 에너지 평가 프로그램으로 발전할 것이다.

제2절 연구의 기대효과

1. 기대효과

가. 기술적 측면

본 연구가 완료되어 건축기계설비 전용 프로그램이 개발되면 가격이 저렴하여 건축설비 설계, 시공업체의 많은 기술자가 사용하게 될 것이고 이로 인하여 설계능력 향상뿐만 아니라 시공업체의 시공능력이 발전하여 쾌적한 주거환경을 실현하여 국가경쟁력강화 및 국민건강에 기여할 것으로 판단된다.

- 국내에서 최초로 건축기계설비분야 전용 상업용 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램을 개발함으로써 이 분야에 종사하는 초급설계자 및 초급시공자가 시뮬레이션 방법에 대한 특별한 지식 없이 시뮬레이션이 가능하다.

- 건축기계설비 전문 상업용 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램을 독자적으로 개발함으로 인해, 이 분야에 종사하고 있는 국내연구자들이 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램을 상업용 알고리즘으로 개발하게 될 것이며 이로 인해, 다양한 시뮬레이션 프로그램의 개발되어 국외에 수출할 수 있도록 경쟁력 있는 상품으로 발전할 수 있는 계기가 될 것이다.
- 건축기계설비분야인 설계, 시공분야에서 환기효율이 높고 에너지 절약적인 공조시스템을 구성할 수 있는 응용 기술력이 향상되어 이 분야의 국가 경쟁력이 향상에 기여한다.
- 건축기계설비분야에 종사하는 공조시스템 설계자 및 시공자가 실내로 공급되는 신선외기 및 조화된 공기의 급기온도 및 급기각도에 따라 확산되는 현상을 시뮬레이션을 통하여 반복적으로 검증함으로써 공조시스템을 설계, 시공하는 초급기술자 도 환기성능, 온열쾌적감, 기류확산성능 및 기류 불만족률을 쉽게 예측할 수 있는 기술을 보유하게 된다.

나. 경제·산업적 측면

- 국외에서 제작된 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램을 기업체에서 구입할 경우, 6,000~9,000만원 정도이다. 본 연구를 통하여 제작된 시뮬레이션 프로그램은 Freeshop과 별도로 300~500만원에 시판할 계획이므로 국외제품 1 copy구입비용으로 본 연구로 개발된 시뮬레이션 프로그램을 20개~30개 구입할 수 있어 많은 공조시스템 설계자 및 시공자들이 시뮬레이션 프로그램을 사용할 수 있는 기회를 얻게 되어 열, 유체관련 엔지니어링 분야도 지식기반산업에 진출할 수 있는 가능성을 제공하게 될 것으로 판단된다.
- 국내 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램(CFD) 시장은 국외제작된 시뮬레이션프로그램 시장의 독무대이므로 본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 프로그램이 국내 건축기계설비분야에 판매되므로 이 분야의 기술력향상과 더불어 외화소비가 감소하게 될 것이다.
- 본 연구를 계기로 건축기계설비 분야뿐만 아니라 다른 기계분야에도 상업용 3차원 기류유동가시화 시뮬레이션 프로그램이 개발될 것으로 판단되며 장기적으로 지식기반산업분야의 주요 수출품목으로 자리 잡을 것으로 판단된다.

제3절 활용계획

건축기계설비분야에서만 평가하는 인자만을 정확하게 해석할 수 있도록 시뮬레이션 프로그램을 구성하여 개발하였기 때문에 다음과 같이 활용하는 가치를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

- 시뮬레이션을 위한 계산조건 입력시간을 단축한다.
- 열·유체 공학의 초보적인 지식을 습득한 초급기술자도 편리하게 시뮬레이션이 가능함.
- 3차원 간섭체크 프로그램인 Freeshop을 사용하는 시공 현장이나 건축기계설비 설계사무소에서 많이 사용하는 COME기반에서 구동할 수 있도록 프로그램을 제작하였으므로 쉽게 시뮬레이션프로그램 사용에 접근할 수 있다.
- 국외에서 제작하여 판매하는 범용프로그램의 1/10가격으로 판매할 예정이므로 건축기계설비 설계업체에서 많이 사용할 것으로 예측된다.

본 프로그램의 상업화를 위하여 (주)DCS에서 총괄하여 영업활동을 수행하며 국민대와 신홍대에서는 Upgrade 및 기술지원을 하는 것으로 역할분담을 하였고, 이에 따른 학회 및 협회를 통한 홍보계획 그리고 업그레이드 일정에 대한 계획을 수립하였다.

또한 대학 및 연구기관에서 학술적인 목적으로 실내환경 평가 시뮬레이션 알고리즘을 개발하거나 프로그래밍 작업에 활용될 수 있도록 본 프로그램에서 실제적인 해석이 수행되는 가장 핵심적인 주프로그램의 소스를 공개할 계획이다.

향후 비직교좌표계 적용, 고온의 복사열전달 해석 등의 추가적인 기능을 보완하기 위하여 지속적인 소프트웨어 개발 및 연구지원이 이루어져야 할 것이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

제7장 참고문헌

1. Han, H., Kwon, Y. I., Kim, K. H., Lee, G. S., Choi, H. S., and Lee, G. G., 2004, Improvements of ADPI and Ventilation Effectiveness of a Classroom by a Dedicated Outdoor Air System, Healthy Building 2003, pp. 528-534, Dec. 7-11, Singapore.
2. Jurng-Jae Yee, Hwataik Han, Kwang-Seop Chung and Young-Chil Park, 2002, Thermal and Ventilation Characteristics in a Workstation Area by Personal Air Conditioning System, Asian J. of Air-Conditioning, Vol. 1, No.2, pp.101-106.
3. Han, H., Kang, K. H., and Cha, C. H., 2002, Simplified model for ventilation characteristics by piston effect in a railway tunnel with a vertical shaft, Proc. of ISRM Regional Symposium, July 22-24, Seoul, Korea.
4. Han, H. and Kwon, Y. I., 2002, Identification of Ventilation Problems in an Underground Bus Terminal in Korea, Proc. of 9th Int conf on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 2002, pp. 337-342, Monterey, USA.
5. Chang, Y.J., Park, Y.C., Chung, K.S., Han, H., Lee, J.J., 2001, A Control of Supply Duct Outlet Air Temperature in PEM, Proc. of IAQVEC, pp. 1105-1112, Chiangsha, China.
6. Han, H., Chung, K.S., Park, Y.C., Lee, J.J., 2001, Room Airflow Distributions and Ventilation Characteristics by Personal Air-Conditioning System, Proc. of IAQVEC, pp. 1113-1120, Chiangsha, China.
7. Lee, J.J., Yoon, C.O., Chung, K.S., Park, Y.C., Han, H., 2001, The Thermal Environmental Characteristics for Task-Ambient Air-Conditioning System, Proc. of IAQVEC, pp. 1649-1656, Chiangsha, China.
8. Han, H., 2001, Measurements of Local Mean Age Distributions for Heating Air Supply Conditions, Proc. of BUEE 2001, pp. 33-38, Seoul, Korea.
9. Han, H., Jang, K. J., and Choi, S. H., 2000, Comparison of Local Supply and Exhaust Effectiveness Distributions in a Ventilated Space, Proc. of Healthy Building 2000, Helsinki, Finland.
10. Han, H., Chung, K. S., and Jang, K. J., 1999, "Thermal and Ventilation Characteristics in a Room with Underfloor Air Conditioning System," Proc. of Indoor Air 99, Edinburgh, Scotland.
11. Han, H., Chung, K. S., Jang, K. J., 1999, Thermal and Ventilation Characteristics in a Room with Underfloor Air Conditioning System, Proc. of Indoor Air 99, pp. 344-349, Aug. 8-13, 1999, Edinburgh, Scotland.
12. Chung, K. S., Han, H., Kong, S. H., Cho, M. K., and Cho, C. K., 1999, "A Study on the Characteristics of Indoor Environment and Comfort in Office Building with Underfloor Air-Conditioning (UFAC) System," Proc. of Indoor Air 99, Edinburgh, Scotland.
13. Chung, K. S., Han, H., Kong, S. H., Cho, M. K., and Cho, C. K., 1999, A Study on the Characteristics of Indoor Environment and Comfort in Office

- Building with Underfloor Air-Conditioning (UFAC) System, Proc. of Indoor Air 99, pp.362-367, Aug. 8-13, 1999, Edinburgh, Scotland.
14. Han, H., Kuehn, T. H., and Kim, Y. I., 1999, "Local Mean Age Measurements for Heating, Cooling and Isothermal Supply Air Conditions," ASHRAE Trans., Vol. 105, Pt. 2, pp. 275-282.
 15. Han, H., Choi, S. H., and Lee, W. W., 2002, Distributions of Local Supply and Exhaust Effectiveness according to Room Airflow Patterns, Vol. 10, no. 4. pp. 177-183
 16. 김원갑, 한화택, 홍진관, 2002, CFD를 이용한 대강당 환기 시뮬레이션, 설비공학회 동계학술대회 논문집, pp. 502-507.
 17. 권용일, 한화택, 신현준, 유지오, 강기호, 성순경, 서종원, 김정엽, 2002, 지하승차장 환기시스템의 진단 및 개선사례, 설비공학회 동계학술대회 논문집, pp. 369-374.
 18. 권기태, 한화택, 2002, 비정상 유한요소법을 이용한 고속응답 솔레노이드 밸브의 동적거동 해석, 대한기계공학회 논문집, 제26권, 제7호, pp. 959-965.
 19. 우경범, 김원갑, 한화택, 2002, "화재시 터널내 열유동 시뮬레이션 모델 연구," 설비공학회 논문집, 제14권, 제7호, pp. 584-591.
 20. 한화택, 김민규, 박명규, 이성수, 2002, 다채널 피부온 센서를 이용한 인체표면 온도분포의 측정, 감성과학회 추계학술대회 논문집, 부산대 상남홀.
 21. 최익순, 한화택, 정광섭, 박영철, 이정재, 2002, 개별공조시스템에 의한 기류분포 및 환기특성, 건축학회논문집(계획계), 제18권, 제4호, pp. 221-226.
 22. 장영준, 박영철, 정광섭, 한화택, 이정재, 2002, Fuzzy PID 방법을 이용한 개별공조시스템의 급기온도 제어, 설비공학회 논문집, 제14권, 제4호, 278-284.
 23. 황성목, 한화택, 김원갑, 2001, 원심 압축기 베인 디퓨저내 비정상유동의 수치해석적 연구, 유체기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 113-119.
 24. 강영모, 한화택, 2001, 보급공기방식에 따른 주방배기시스템의 포집효율에 관한 연구, 설비공학회 동계학술대회 논문집, pp. 594-599.
 25. 장영준, 박영철, 정광섭, 한화택, 이정재, 2001, 개별공조시스템을 위한 전기히터의 Fuzzy PID 제어, 설비공학회 동계학술대회 논문집, pp. 504-509.
 26. 김원갑, 한화택, 강기훈, 차철현, 2001, 지하철 본선터널의 환기방식이 역내 환경에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구, 설비공학회 동계학술대회 논문집, pp. 389-394.
 27. 김성환, 지용주, 이성수, 김태훈, 김묘향, 한화택, 2001, 다채널 온습도 분포 측정기 개발, 한국감성과학회 추계학술대회 논문집, pp. 216-221.
 28. 한화택, 김민규, 지용주, 바닥급기 공조공간내의 온열환경의 측정, 한국감성과학회 추계학술대회 논문집, pp. 211-215.
 29. 한화택, 최선호, 장경진, 2001, 실내기류패턴에 따른 급기효율과 배기효율의 분포, 대한설비공학회, 제13권, 제9호, pp. 853-859.
 30. 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재, 2001, 고온발열장비주위에 설치된 분리벽이 배기효율에 미치는 영향에 관한 연구, 대한설비공학회 논문집, 제13권, 제7호, pp. 647-652.
 31. 권용일, 한화택, 권순석, 2001, 고온발열장비주위에 설치된 분리벽이 배기효율에 미치는 영향에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, pp.

908-913.

32. 우경범, 한화택, 2001, 화재시 터널내 열 및 연기확산 시뮬레이션, 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, pp. 784-790.
33. 강영모, 한화택, 2001, 보조급배기 방식에 의한 주방환기시스템의 성능, 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, pp. 707-713.
34. 권기태, 한화택, 2001, 유한요소법을 이용한 고속 솔레노이드 밸브의 거동해석, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 927-932.
35. 한화택, 김성환, 김묘향, 박명규, 지용주, 2001, 온열쾌적성 평가를 위한 다채널 운습도 분포측정 시스템의 설계, 한국감성과학회 춘계학술대회 논문집.
36. 권기태, 한화택, 2001, 자동차용 솔레노이드 액추에이터의 동적 시뮬레이션에 관한 연구, 자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 129-136.
37. 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재, 2001, 개별공조시스템(PACS)을 적용한 작업공간에서의 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 대한설비공학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 106-114.
38. 이정재, 윤창오, 정광섭, 한화택, 박영철, 2001, Task-Ambient 공조시스템의 난방시 열환경 특성에 관한 실험적 연구, 대한설비공학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 115-121.
39. 장영준, 박영철, 정광섭, 한화택, 이정재, 2001, 개별공조시스템을 위한 전기히터의 PID제어, 대한설비공학회 논문집, 제13권, 제1호, pp.59-65.
40. 최선호, 한화택, 정광섭, 이정재, 박영철, 2000, 냉방조건시 개별공조시스템에 의한 환기특성, 대한설비공학회 동계학술대회, pp. 164-169.
41. 정현종, 한화택, 2000, 보급공기가 주방배기시스템의 성능에 미치는 영향, 대한설비공학회 동계학술대회, pp. 170-174.
42. 강기훈, 한화택, 차철현, 2000, 환기갱 설치에 따른 열차터널내 교통환기력 해석, 대한설비공학회 동계학술대회, pp. 175-180.
43. 김원갑, 한화택, 2000, 화재시 터널 구배에 따른 연소가스 거동에 관한 연구, 대한설비공학회 동계학술대회, pp. 188-193.
44. 윤동원, 이정재, 정광섭, 한화택, 정순성, 2000, 건축설비시설의 갱신을 위한 최적 대체안 선정모델 개발에 관한 연구, 대한설비공학회 논문집, 제12권, 제10호, pp.950-961.
45. 윤창오, 이정재, 한화택, 정광섭, 박영철, 2000, 개별공조시스템의 열환경 특성에 관한 실험적 연구, 공기조화 냉동공학회 하계학술대회 논문집, pp. 582-587.
46. 최선호, 한화택, 정광섭, 박영철, 이정재, 2000, 개별공조시스템에 의한 기류 분포 및 환기특성, 공기조화 냉동공학회 하계학술대회 논문집, pp. 588-593.
47. 정광섭, 한화택, 2000, 바닥급기 공조시스템 (UFAC)을 적용한 작업공간의 실내환경 평가기법 개발연구, 공기조화 냉동공학회 논문집, 제12권. 이우원, 한화택, 1999, "배기구 위치 및 풍량변화에 따른 실내환기효율의 측정실험," 공기조화 냉동공학회 하계학술대회 논문집, pp. 372-378.
48. 한화택, 최선호, 1999, 배기효율의 정의 및 측정기법에 관한 연구, 공기조화 냉동공학회 동계학술대회 논문집, pp. 315-319.
49. Han, H, 1999, Measurements of Airflow Distribution and Ventilation Effectiveness in an Underfloor Air-Conditioned Space, Proc. of Fluid Engineering Division Conference, KSME.
50. 한화택, 이우원, 1999, 배기구 위치 및 풍량변화에 따른 실내환기효율의 측정

실험, 공기조화 냉동공학회 하계학술대회 논문집, pp. 372-378.

51. Han, H., Seo, S. Y., Kim, M. H., and Kim, Y. I., 1999, "Measurements of ventilation effectiveness in an underfloor air-conditioned space using a tracer gas technique," J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 7, pp. 91-100.