

# 집중기획

## 대공간 건축물의 온도 및 기류분포 예측 기술

대공간의 건축물의 합리적인 설계를 위해서는 온도 및 기류분포의 정확한 예측이 필요하다. 예측 방법으로 정밀해석 모델(CFD)만을 최선의 방법으로 생각하는 경우가 대부분이지만, 비용과 시간을 줄이기 위해서는 설계 단계별로 보다 적합한 예측 방법을 적용 할 필요가 있다. 이것은 다양한 예측 모델들의 장·단점 및 실용성에 대한 충분한 이해가 전제될 때 가능할 것이다.

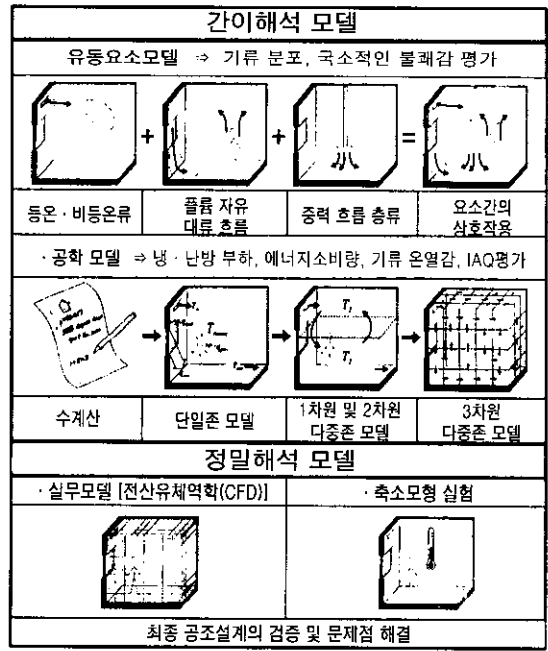
본고에서는 열환경·설비 설계시, 설계 단계에 따른 적합한 예측 모델들을 소개한다. 더불어, 적절하고 타당한 예측 기술이 설계에 반영되어 대공간 건축물의 실내 열환경 개선 및 에너지 절약이 이루어지기를 기대한다.

손장열, 안병욱, 박종수

양호한 건축물을 만들기 위해서는 재실자에게 만족할 만한 열적 쾌적감과 실내 공기질 (IAQ)을 제공할 수 있어야 하며, 이외에도 에너지 효율성, 경제성, 안전성, 음향, 빛(조명), 미적감각 등에 대한 충분한 고려가 필요하다.

위와 같은 목적들을 실현하기 위해 설계자들은 열적 쾌적감, IAQ, 환기 효율, 그리고 에너지 소비량을 평가하는데 도움을 주는 분석 도구들을 필요로 한다. 대부분의 분석 도구들은 사용자가 편리하게 활용할 수 있는 상업용 시뮬레이션 소프트웨어들로 개발되어져 왔기 때문에, 오늘날의 설계자들은 정교한 수학적 모델에 대한 깊이 있는 이해 없이도 많은 정보 및 결과를 손쉽게 얻을 수 있었다. 그러나 대공간 건축물에 대해 적용되는 수학적 모델의 한계 및 난해한 해석 기술 등의 문제로 설계자들은 보다 많은 지식을 확보할 필요가 있다.

본고에서는 대공간 건축물의 열적 쾌적감 조성을 위한 환경 제어 기술에 대해 전반적인 이해를 돕고,



[그림 1] 대공간의 온도 및 기류분포 예측 기술

손 장 열 한양대학교 건축공학부 (jysohn@email.hanyang.ac.kr)

안 병 욱 충청대학 건축학부 (bwahn@ok.ac.kr)

박 종 수 인하공업전문대학 건축과 (jspark@ture.inhac.ac.kr)



<표 1> 대공간 건축물의 열환경 설계 과정과 도구

| 구 분   | 기획 설계   | 기본 설계  | 상세설계  |
|-------|---|--|---|
| 계획 내용 | 건물 형태와 외피 재료<br>실내 환경의 질<br>HVAC 시스템 개념           | 건물 전체 배치와 외피 설계의 재조정<br>급기구, 공기 체적과 급기 온도의 결정<br>건물과 HVAC 시스템의 운영 개요   | 건물 배치와 외피 재료 등의 최종 결정<br>HVAC 시스템의 세부내역<br>건물과 HVAC의 운영과 제어 시스템 |
| 분석 결과 | 냉난방 부하의 대략적인 평가<br>기류와 온도 분포의 대략적인 예측             | 에너지 소비와 운영 비용과 관련한, 냉난방 부하의 정확한 예측<br>기류와 온도 분포<br>열적 쾌적 지표(즉, PMV)<br>햇빛에 의한 불쾌 지역, 창 아래에 콜드 드래프트, 결로 문제 등<br>전(前) 냉·난방의 상황 |   |
| 설계 도구 | 경험과 비슷한 기존 건물에서의<br>측정 자료<br>첫 평가를 위한 간단한 간이해석 모델 | 두 번째 평가를 위한, 진보된 간이해석<br>모델과 가능한 정밀해석 모델   | 설계 타당성과 '문제 해결'을 위한 정밀<br>해석 모델 → CFD 혹은 축소모형 실험                |
|       |   | 환기 효율 모델 → 환기 성능 평가  |   |

적절하고 타당한 설계 기술의 반영을 위해 대공간 건축물의 온도 및 기류분포 예측 기술들에 대해 단계적으로 기술하고자 한다.

## 기술 개요

대공간 건축물의 열환경 설계과정을 정리하여 나타내면 표 1과 같다.

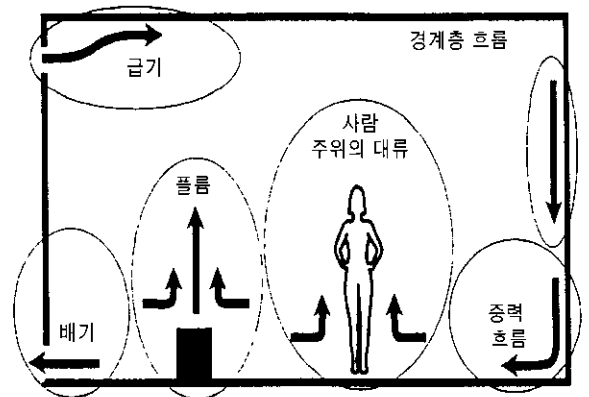
대공간 건축물의 온도 및 기류분포 예측 기술들은 모델링 세부 수준에 따라, 그림 1과 같이 크게 두 그룹으로 나누어 질 수 있다.

- 초기 평가와 설계 발전을 위한 단순 모델 ⇒ 간이 해석 모델
  - 유동요소모델(flow element models)
  - 공학모델(engineering models)
- 설계 타당성과 문제 해결을 위한 상세 모델 ⇒ 정밀해석 모델
  - 실무모델(field models) [전산유체역학(computational fluid dynamics)]
  - 축소모형실험(scale model experiments)

## 온도 및 기류분포 예측 모델

### 유동요소 모델

환기되는 실에서의 공기의 분배는 그림 2에서



[그림 2] 공조되는 공간에서의 유동 요소들의 예

와 같이 급기, 배기, 열 플룸, 경계층 흐름, 침기, 중력흐름과 같은 유동 요소들로 나누어질 수 있다. 이 유동요소들은 공기의 움직임이 제한적인 수의 변수들로 조절되는 분리된 공간으로 간주될 수 있으며, 공기의 움직임은 구획된 공간에서의 일반적인 유동에 대해 완전히 독립적으로 고려할 수 있다. 대부분의 실제 상황에서, 가장 유용한 방법은 유동요소 모델을 이용하여 실내 기류패턴을 계획하는 것이다.

유동 요소법은 실내의 기류패턴이 단일 유동요소



또는 상호 작용하지 않는 유동요소들에 의해 지배 되는 상황에서 매우 유용하다. 치환 환기(displacement ventilation)에서, 낮은 위치에 있는 장치로부터의 공기의 공급과 바닥 위 열원으로부터의 열 풀림은 서로 영향을 주지 않는 서로 다른 유동요소들의 좋은 예가 되고, 공기 분배 시스템의 설계에 이 두 가지 유동요소 모델들이 기초가 될 수 있다.

대공간에서의 기류는 동시에 일어나는 여러 가지 유동요소들로 구성된다. 유동요소들은 실내 공간의 작은 부분에서만 서로 영향을 미치게 되지만 유동 경로는 유동요소들의 복합적인 영향에 의해 결정된다. 따라서 대공간에서는 유동요소 모델로 공기 분배를 예측할 수 없는 경우가 상당 부분 있게 된다. 그런 경우에, 유동요소 모델은 설계 비용을 절감하기 위한 설계과정의 첫 단계에서만 유용할 것이고, 실내 공간의 특정 지역에서의 기류 상태는 다른 방법으로 평가되어야 할 것이다.

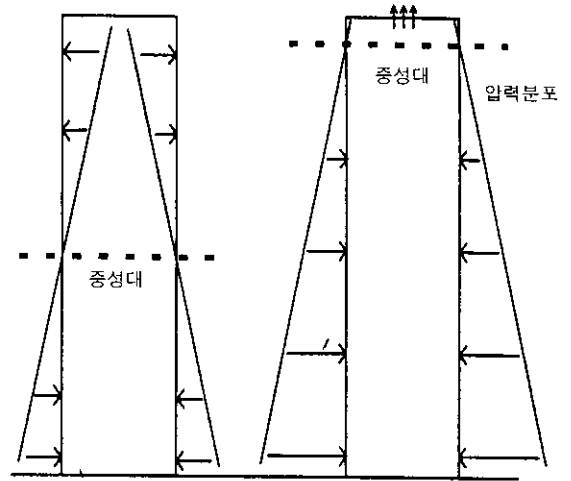
### 공학모델

대공간 건축물에서 에너지 효율적인 사용을 위해서는 실내 기류를 결정하는 요소들을 잘 이해하여야 할 뿐만 아니라 기류와 건물과 주위 환경의 열적 특성 사이의 상관 관계도 파악하는 것이 필요하다. 이러한 복잡한 문제들에 대한 정확하고 빠른 결과를 도출하기 위하여 실용적인 공학 도구들이 개발되어져 왔고, 현재도 많은 도구들이 개발중에 있다.

공학모델은 설계자들이 많이 사용하는 방법이다. 이것은 일반적으로 특별한 설계를 계획하기 위해서 사용되어 지므로, 실내 공간의 계산에서부터 매우 복잡한 문제를 설명하는 정교한 컴퓨터 모델까지 다양한 모델이 존재하게 된다. 간단한 모델의 경우는 계산기나 스프레드시트 프로그램 정도만으로도 결과를 얻을 수 있으나, 대부분은 반드시 컴퓨터 프로그램으로 실행되어야 한다.

### 자연환기 모델

대공간 자연 환기의 일반적인 특징은 베르누이 법칙에서 나온 모델로 설명이 가능하다. 건물 외피의



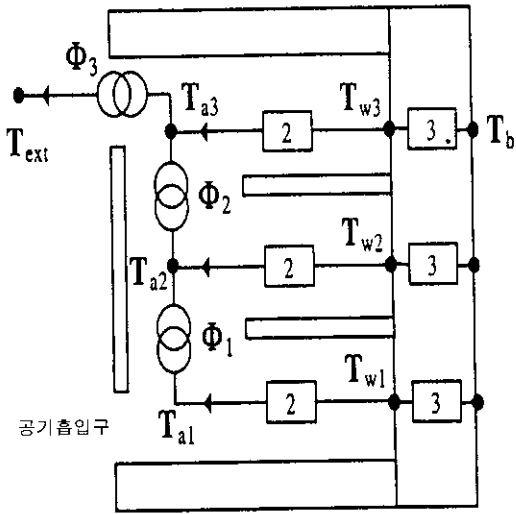
[그림 3] 난방이 되는 건물 주위의 일반적인 압력 분포

압력 분포는 지형과 바람의 특성(풍압) 그리고 굴뚝 압력으로 가정할 수 있다. 자연 환기는 외피의 침기 특성에 따라 이러한 바람과 굴뚝 압력에 의해 일어난다.

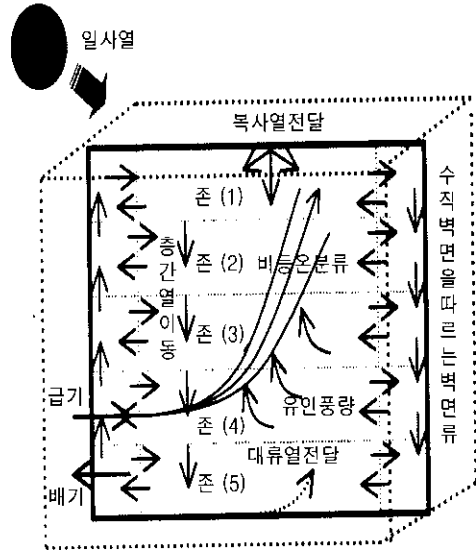
에너지 손실을 평가하고 자연환기를 조절하기 위해서는 자연 환기량을 예측하는 것이 중요하다. 환기에 의한 열손실량은 자연 환기량과 내·외부 온도차에 의해 결정된다. 자연 대류를 포함한 일반적인 환기 문제는 여름철의 과열 방지, 화재중이나 후의 연기 제거(즉, 연기 조절), 문의 개폐에 따른 유동의 예측들이다. 그림 3은 건물 상부의 배기구가 열렸을 때 중성대(NPL, 내·외부의 압력 차가 0인 지점)의 이동을 설명해 주고 있다. 그림 3의 왼쪽은 일정한 침기 분포를 갖는 건물이고, 오른쪽은 옥상 근처에 배기구가 있는 건물이다.

### 존 모델

최근 수년간 건물에서 열대류에 대한 모델링 기술은 많은 발전이 있었다. 존 모델은 열적적과 에너지 절약, 실내 공기 환경에 관련된 공조 시스템들의 비교에 적합하지 않은 유동요소 모델들의 한계를 극복



[그림 4] 세 개의 존을 가진 다중 존 냉방 모델



[그림 5] 2차원 다중 존 모델 개념

하는 것을 목표로 하였다.

존 모델은 실내 공기를 몇 개의 커다란 체적(존)으로 구획하고 온도와 기류분포를 구하는 것으로 각 존의 질량과 에너지 평형식을 수립하여 계산하는 것이다.

• 단일 존 모델

대부분의 동역학 모델은 각 실을 단일 존으로서 취급한다. 단일 존이라는 가정은 건물의 기류가 충분히 혼합되어 있기 때문에 대공간에 적용하는 것은 어렵다.

단일 존 모델은 온도나 냉·난방 부하를 예측할 수 있을 때에는 다중 존 모델만큼 정확하다.

• 1차원 다중 존 모델

기류가 피스톤 흐름이나 치환 환기와 유사할 때, 공기와 벽체 사이의 상호 작용은 단일한 환기 경로를 따르는 일련의 존으로서 간단히 설명된다. 각 존에서 기류 모델, 벽체의 열전달 모델, 축열 모델은 열적으로 연결되어 있다. 그림 4의 (2)는 열전달 저항이고 (3)은 동적 벽체 저항(축열 모

델)이다. 기류 패턴은 입구와 출구 사이의 단일 기류 경로로 제한된다. 열원  $\Phi$ 는 내부 열 취득과 환기에 의한 열 손실의 복합적인 영향을 나타낸다.

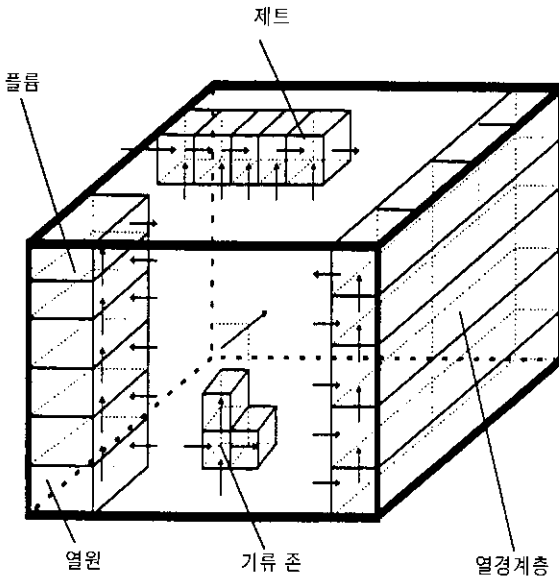
• 2차원 다중 존 모델

1차원 모델과 달리 2차원 모델은 하향 드래프트, 열 플룸이나 취출 기류 등에 의해 발생하는 존 사이의 혼합 효과를 계산할 수 있다.

대부분의 2차원 대상 모델의 기본 형태는 혼합계수  $\beta$ 에 기본을 두고 매우 단순한 공식을 가지고 있는 '두개의 존 모델'이다. 두개의 존 모델은 야금 산업에서의 커다란 실처럼 잘 구분된 온도 성층화 높이를 갖는 공간에 가장 적합하다. 대부분의 대공간들은 그림 5에서와 같이 두 개 이상의 존으로 세분화하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

그림 5의 2차원 다중 존 모델은 아트리움처럼 큰 내부공간의 시각에 따른 수직온도분포를 예측하는데 유용하다.

이 모델에서 공간의 수평온도분포는 벽체에 인접



[그림 6] 3차원 다중 존 모델 개념

한 지역과 취출기류 주위의 지역을 제외하고는 일정한 것으로 가정한다. 이 가정에 기초를 두고 공간을 수직적인 존으로 나눈다. 대공간의 공기 유동의 주요소는 수직 벽체 표면을 따르는 벽면류와 급기에 의한 기류로 가정된다.

### • 3차원 다중 존 모델

내부 공기 체적은 삼차원 평행 격자를 가정한 등온의 존들로 나누어져 각 존에서 질량과 에너지 평형식이 세워진다. 공기의 질량 흐름을 평가하기 위해 표준 존, 기류 요소 존인 두가지 유형이 사용된다. 그림 6은 사용되는 존의 유형을 나타낸다.

### 실무 모델

전산유체역학(CFD) 프로그램은 공간 전체의 기류속도, 온도 그리고 유동 특성을 비교적 정확하게 보여주는 실무 모델, 혹은 정밀해석 모델로 말할 수 있다. 본고에서는 대공간에서 매우 중요한 공기의 흐름을 모델링 하는 CFD 기술의 관점에서 기술

하고자 한다.

CFD 방법의 모든 변형은 150년 전부터 알고있는 유체 유동의 지배 방정식(Navier-Stokes 방정식)에 기초를 두고 있다.

이러한 방정식은 질량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙, 운동량 보존의 법칙인 기본 법칙에서 유래되어졌다.

지배 방정식은 너무 비선형적이고 복잡적이어서 극도의 단순화가 이루어지지 않는다면 분석적인 수학적 방법으로는 풀 수 없다.

따라서 지배 방정식을 이산화(FDM, FEM, FVM, 스펙트럼법 등)된 대수 방정식으로 따로따로 분리하여 컴퓨터를 이용한 수치 해석방법으로 풀어야 한다. 방정식의 해를 구하는 수치 해석적 방법을 선택하기란 매우 어렵다. 대공간 모델링의 경우에는 만약 잘못된 방법을 선택한다면 해를 구하는 것이 어렵거나 계산속도가 느리게 되므로 더욱더 그렇다. 따라서 CFD 사용자들은 유동장에서 일어나는 물리적인 진행 과정과 더불어 계산방법과 격자시스템의 특징에 대해서도 많은 지식이 있어야 한다.

표 2는 현재까지 제안 되어져 있는 난류모델들의 적용성을 기류형상에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

### 존 모델과의 연계 해석

건물에서 기류와 열 전달을 시뮬레이션하는 수치 기법의 두 범주인, 간이해석 모델(즉, 존 모델)과 정밀해석 모델(즉, CFD)은 실제적인 활용에서 각각 그것들만의 장점과 단점을 가지고 있다.

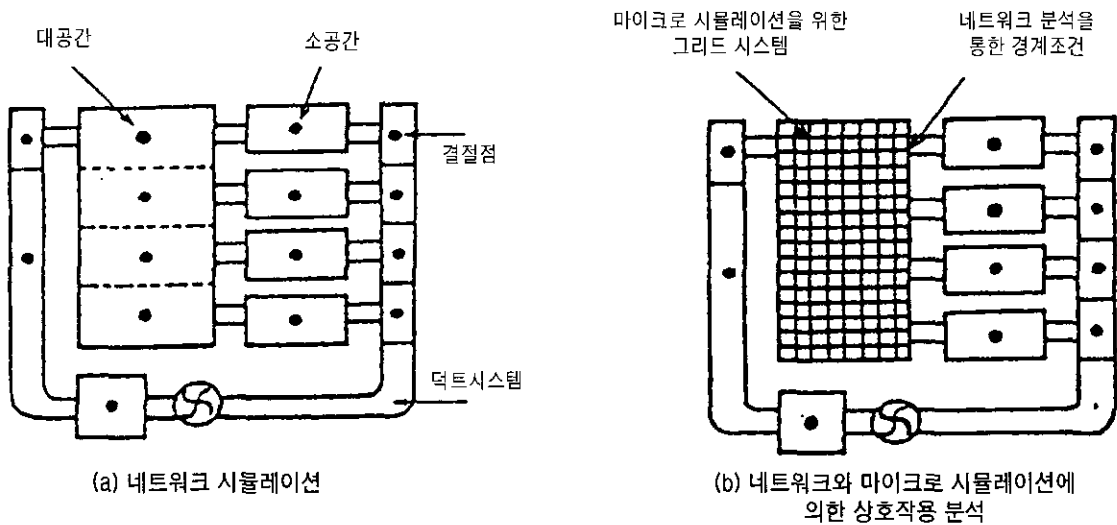
간이해석 모델에서는, 각 실(혹은 실내의 존)은 그림 7에서 보여지는 것처럼 노드점에 의해 나타내어지고 네트워크 경로에 따라 점 사이에서 질량, 열 혹은 오염 물질의 전달이 예측된다.

그러므로 간이해석 방법은 중앙 공조기가 있는 건물에서 모든 실들의 연속적인 분석, 구조적인 축열과 대류, 전도와 복사 열전달 등이 있는 복잡한 모델을 다룰 수 있는 간단하고 빠른 방법이다.



<표 2> 난류 모델들의 비교

| 난류 모델            | 표준 k-ε | 저 레이놀즈 k-ε | 표준 DSM (ASM) | 저 레이놀즈 DSM(ASM) | LES (표준) | LES (동적) |
|------------------|--------|------------|--------------|-----------------|----------|----------|
| 벽면 경계 조건         | 벽 함수   | 점착조건       | 벽 함수         | 점착조건            | -        | -        |
| 1. 간단한 기류        | i      | i          | i            | i               | i        | i        |
| 2. 곡선인 흐름        |        |            |              |                 |          |          |
| 1) 약한 곡률         | ○      | ○          | i            | i               | i        | i        |
| 2) 강한 곡률         | ●, ⊙   | ●, ⊙       | i (i)        | i (i)           | i (i)    | i        |
| 3. 충돌류           | ●, ⊙   | ●, ⊙       | i, i         | i, i            | i        | i        |
| 4. 낮은 레이놀즈 수 유동장 | ●, ⊙   | ⊙, i       | ●, i         | i, i            | i, i     | i        |
| 5. 비등온 기류        |        |            |              |                 |          |          |
| 1) 약한 성층화        | ○      | ○          | i            | i               | i        | i        |
| 2) 강한 성층화        | ●, ⊙   | ●, ⊙       | i            | i               | i        | i        |
| 6. 벽에서 대류 열전달    | ●, ⊙   | i          | ●, i         | i               | i, i     | i        |
| 7. 비정상 기류 혹은 확산  |        |            |              |                 |          |          |
| 1) 높은 비정상        | ●      | ●          | ●            | ●               | i (i)    | i        |
| 2) 와류 발산         | ●      | ⊙          | i            | i               | i        | i        |
| 8. 취출 기류         |        |            |              |                 |          |          |
| 1) 일반적           | ○      | ○          | i            | i               | i        | i        |
| 2) 소용돌이          | ●      | ●          | i            | i               | i        | i        |



[그림 7] 정밀해석 모델과 네트워크 모델에 의한 대공간 해석



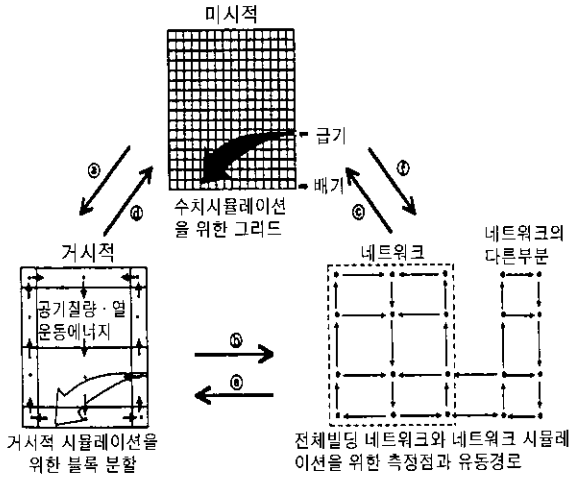
<표 3> 예측 모델의 설계 적용을 위한 특징 비교

| 구 분            | 간이해석 모델   |   | 정밀해석 모델  |  |
|----------------|---|---|--|--|
|                | 유동요소 모델   | 존 모델  | 실무모델(CFD)  | 축소모형실험   |
| 모델 개요          | · 유동장의 각 요소들(급기류, 열플룸, 경계층 등)이 분리되어 해석됨<br>· 전체 유동장은 각 유동요소를 결합하여 평가함 | · 전체 공간은 몇 개의 존으로 구분<br>· 풍량 및 열평형을 통해 존의 평균 기류속도, 온도, 농도가 계산 | · 공간을 작고 많은 셀로 구분함<br>· 전체 셀수 : $10^4 \sim 10^6$<br>· 속도, 온도, 농도의 이산화 방정식들은 FDM, FEM, FVM에 의해 풀림 | · 대공간의 환경을 작은 모형을 이용하여 측정<br>· 실제 크기와 축소모형의 상사조건 설정이 중요함 |
| 적용 단계          | 기획설계 및 기본설계 단계  |   | 상세 설계 단계   |  |
| 장 점            | · 매우 간단함<br>· 수계산에 적합   | · 간단하고 빠르다.<br>· 시간 변화에 따른 현상을 해석 가능(예: 축열, 일사, 외기온 변동...)    | · 상세한 분석이 가능<br>· 컴퓨터 그래픽을 이용한 현실감 있고 유용한 결과 출력  | · 결과의 신빙성이 크다.   |
| 단 점            | · 유동요소간의 상호 영향이 클시 적용 불가함   | · 유동장이 복잡할 시 정밀도가 낮다  | · 격자 생성시 많은 시간이 소요<br>· 긴 컴퓨터 계산시간과 많은 컴퓨터 메모리가 필요   | · 많은 시간과 비용, 업무량 소요                                      |
| 한 계            | · 하나의 유동요소만 해석  | · 상세한 분포 예측 불가함   | · 대공간 해석시 대단히 많은 셀수 필요   | · 정확한 상사조건이 만족이 어렵다.                                     |
| 입력 데이터         | · 유동요소 타입<br>· 급기류의 실험 상수<br>· 급기온도, 벽체 표면온도                          | · 존 구획<br>· 벽체의 경계조건<br>· 급배기구의 위치<br>· 급기온 및 속도 ...          | · 격자(셀) 생성<br>· 속도, 열류 ... 경계조건  | · 아르키메데스 수를 모사하기 위한 급기류의 값<br>· 내부 열원 및 벽체 표면의 온도 경계조건   |
| 출력 데이터         | · 각 유동요소들의 기류 패턴 및 온도 분포  | · 각 존 평균온도, 압력, 농도 등<br>· 냉난방 부하<br>· CFD 경계조건                | · 온도와 기류의 상세분포<br>· 복사 연성해석이 되었을 때 벽면온도  | · 측정점수에 따른 온도 및 기류 분포                                    |
| 필요한 장치(컴퓨터)    | 개인용 컴퓨터 등   |   | 워크 스테이션, 슈퍼컴퓨터   | 센서가 있는 축소모형  |
| CPU 시간         | 몇 초, 분  |   | 각 경우당 10~100시간   | -  |
| 적용을 위해 요구되는 시간 | 입력자료 작성 : 반나절   |   | 입력자료 : 경우당 약 1주  | 모델실험 : 각 경우당 1~3주  |

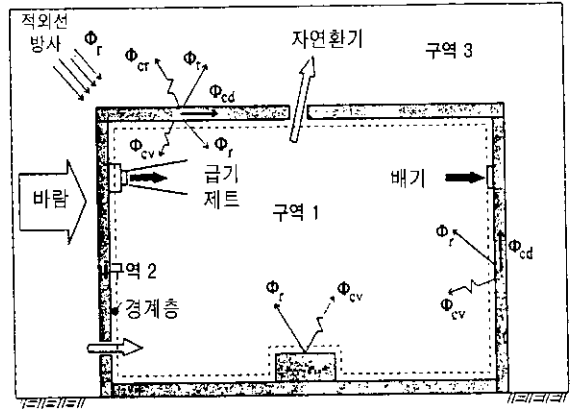
정밀해석 모델은 보통 하나의 실에 대해서 온도와 기류분포를 상세하게 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, 인접실과 공유하는 벽과 같은 건물의 다른 부분과 관련된 경계 조건은 알 수 없고, 축열 등이 있는 동적 경계조건을 실행하는 데에는 시간과 비용이 많이 든다.

결과적으로, 두 방법의 장점들을 이용하는 방법

으로 정밀해석 시뮬레이션에 대한 경계 조건을 간이해석 시뮬레이션의 결과로부터 얻는 연계 해석 방법을 선택할 수 있다. 정밀해석 시뮬레이션에 기초가 되는 간이해석 모델은 비록 그 자체로는 시뮬레이션 모델이 아니라 하더라도 간이해석과 정밀해석 시뮬레이션을 연결하는 역할을 한다. 이 방법들간의 상호 작용을 그림 8에 나타내었다.



[그림 8] 간이해석, 정밀해석과 네트워크 시뮬레이션을 이용한 상호 연계 해석



[그림 9] 온도 및 기류분포에 영향을 주는 물리적인 현상도

### 축소모형 실험

CFD 모델링이 최근에 등장하기는 했지만, 축소 모형 실험은 기류의 가시화를 가능하게 해주고, 특정한 위치에서의 공기의 온도와 평균 속도를 측정할 수 있게 해주어 대공간의 온도나 기류분포를 예측하기 위해서는 아직도 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 축소모형의 열적 상사와 기류상사를 얻는 것이 대공간에서는 쉽지 않다.

실험의 정밀도를 높이기 위해서는 실내 공기가 난류가 되도록 충분한 레이놀즈의 수의 확보, 적절한 아르키메데스 수의 설정, 경계층 열이동 조건에 대한 충분한 검토가 요구된다. 또한 축소모형 실험을 발전시키기 위해서는 모델을 제작하는 방법과 측정방법을 잘 설정하는 것이 중요하다.

그림 9는 대공간을 3개 지역으로 분리하여 표현한 것으로 각 지역을 분리하여 다루고 취급하는 것이 중요하다는 것을 나타낸 물리적인 현상도이다.

### 예측 모델의 설계 적용

위에서 살펴 본 바와 같이 대공간의 온도 및 기류분포를 예측하는 모델들은 다양하며, 각각의 모델들은 서로 상이한 장·단점을 가지고 있는 동시에 상호 연계의 가능성을 내포하고 있다.

이러한 예측 모델들의 설계 적용시에, 가장 중요한 것은 설계 단계 및 시간, 비용, 결과물 등을 고려하여 적절한 모델을 선택하고 효과적으로 활용하는데 있다고 생각된다. 표 3에 예측 모델을 선택하기 위한 지침이 될 수 있는 각 모델들의 특징을 비교하여 나타내었다. ㉔