

# 대공간 건축물 공조설계의 연구과제 및 최근 연구동향

(The research issues and recent activities in HVAC design for large enclosures)

송 규동  
한양대학교 건축공학과

## 1. 머릿말

대공간 건축물은 문자 그대로 우리들이 일상적으로 거주하는 건축 공간에 비해 상당히 큰공간을 가지고 있는 건물이라고 말할 수 있다. 건축환경적인 측면에서 대공간 건축물을 좀 더 구체적으로 정의하자면, 바닥면적에 비해서 천장이 높은 공간으로서 수직방향으로 큰 온도 분포가 생기기 쉬운 건축물을 지칭한다. 즉, 아무리 용적이 큰공간이라도 천장은 낮고 바닥면적이 넓은 공간은 대공간에 포함되지 않는다. 관람시설, 스포츠시설 및 아트리움과 같은 천장이 높은 건축공간은 대부분의 경우 사용공간이 바닥근처에 치우쳐 있고 전체공간에 비해서 극히 일부분만 사용되는 특성이 있기 때문이다. 또한, 건물 운용의 측면에서 볼 때, 대공간 건축물은 일반적인 건물에 비해서 비간헐적으로 사용되며 동시에 많은 인원이 한정된 시간에 수용되는 특징을 갖고 있다. 또한, 많은 대공간은 실내에 기동과 같은 시각적 장애물이 없는 대신 넓은 면적의 지붕을 경량외피 재료로 시공하여 일반적인 건물에 비해 건물외피의 단열성이 낮아 지붕을 통한 열 출입량이 많은 특성을 갖고 있다.

이러한 특성을 갖고 있는 대공간에서는 바닥 근처의 사용 공간만을 대상으로 온열환경 및 공조설비를 계획함으로써 에너지 절약 효과를 볼 수 있다. 그리고, 대공간에서 바닥근처의 사용공간만을 대상으로 효과적인 냉·난방을 성취하기 위해서는 여러 가지 공조 방식에 대한 공간 내 상하 온도 분포를 예측할 필요가 있다. 즉, 취출구의 위치 및 취출 기류의 온도와 속도의 결정은 대공간의 공조 시스템 설계시 우선적으로 고려되어야 할 사항들이다. 최근 들어 우리 나라에서도 건물의 로비에 아트리움 방식을 채택하는 경우가 많아졌고, 대형 돔구장의 건설이 계획되는 등의 움직임에 대응하여 대공간 건축물의 설계기술 확보에 많은 노력을 기울이고 있다.

본 고에서는 대공간 건축물의 에너지 절약적 공조 설계기술을 확보하기 위해 해결해야 할 당면과제에 대해 논하였고, 최근 약 8년에 걸쳐서 IEA (International Energy Agency)의 지원에 의해 수행된 해외의 연구사례(Annex-20, Annex-26)에 대해 고찰해 보았다.

## 2. 대공간 건축물의 합리적 공조설계를 위한 당면 연구과제

대공간의 온열환경 및 공기환경과 관련된 공조설비시스템의 설계와 성능의 평가는 주로 실내 기류 해석용 수치 모델을 사용하여 행하고 있다. 현재 가장 많이 이용되고 있는 수치해석용 모델은 CFD (Computational Fluid Dynamics)모델로서, 공간을 많은 수의 3차원 격자로 분할한 다음 취출구에서의 공기의 운동에너지와 열에너지를 수치적으로 해석하여 공간내의 각각의 격자가 갖는 열에너지로부터 공기의 온도를 결정하고, 각각의 격자의 운동방향 및 속도를 벡터로서 가시화하여 나타낸다. 그러나, 모든 컴퓨터 모델들이 공통적으로 갖고 있는 문제는 입력 데이터가 정확하지 않으면 그 결과도 부정확하게 되는데, CFD모델의 경우도 예외는 아니어서, 공기 및 기류해석을 위한 초기 경계조건을 잘 못 설정할 경우, 그 결과는 전혀 무의미한 것이 되고 만다. 또한, 계산된 결과를 어떻게 해석하느냐에 따라서 공조설계안의 타당성이 입증될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있게 된다. CFD모델을 대공간의 공조설계에 적용할 경우 계산의 정확성을 향상시키고 계산 결과를 효과적으로 사용하기 위해 가장 우선적으로 연구되어야 할 사항들은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 해석도구의 선정: 설계의 진행 단계별 정보의 양과 질을 고려
- 벽체 근처에서의 기류 성상: 난류 또는 층류
- 격자 체계: 벽과 근접한 공기와 그렇지 않은 공기의 격자 밀도를 다르게

- 초기 표면온도: 복사 및 대류 열전달 동시에 고려
- 건물구조체의 열적 거동과 실내 기류와의 상호 관계
- 자연 대류와 혼합대류(자연+강제 대류)의 구분 적용
- 계산결과의 실제 건물에의 적용법: 온도분포, 기류분포, 환기효과, 열적쾌적도 평가

그러나, CFD 모델의 경우 실의 기하학적 제원, 구조체의 열전도율, 마감 재료의 방사 및 복사 열 흡수율, 취출구의 위치, 취출공기의 온도 및 기류와 같은 상당히 구체적인 입력자료를 요구하므로 이와 같은 구체적인 정보가 없는 초기 설계 단계에서는 적용하기 어려운 문제가 있다. 따라서, 본 고에서는 우선, 여러 가지 기류 해석 방법에 대해 먼저 알아보기로 한다.

### 3. 건물의 온도 및 기류분포 해석방법에 대한 고찰

#### 3.1 건물의 기류 및 온도분포 예측을 위한 수치해석 모델의 개요

실내의 온도 및 기류분포를 예측할 수 있는 수치해석 모델은 크게 CFD 모델, 블록 모델 및 네트워크 모델의 세 가지로 구분할 수 있다. 이들 기류해석 모델들은 독립적으로 건물의 공조설계에 이용될 수 있는 것이지만 각각 장단점을 지니고 있으며, 그림 1에 보인 것처럼 상호 보완적인 관계를 가지고 있다.

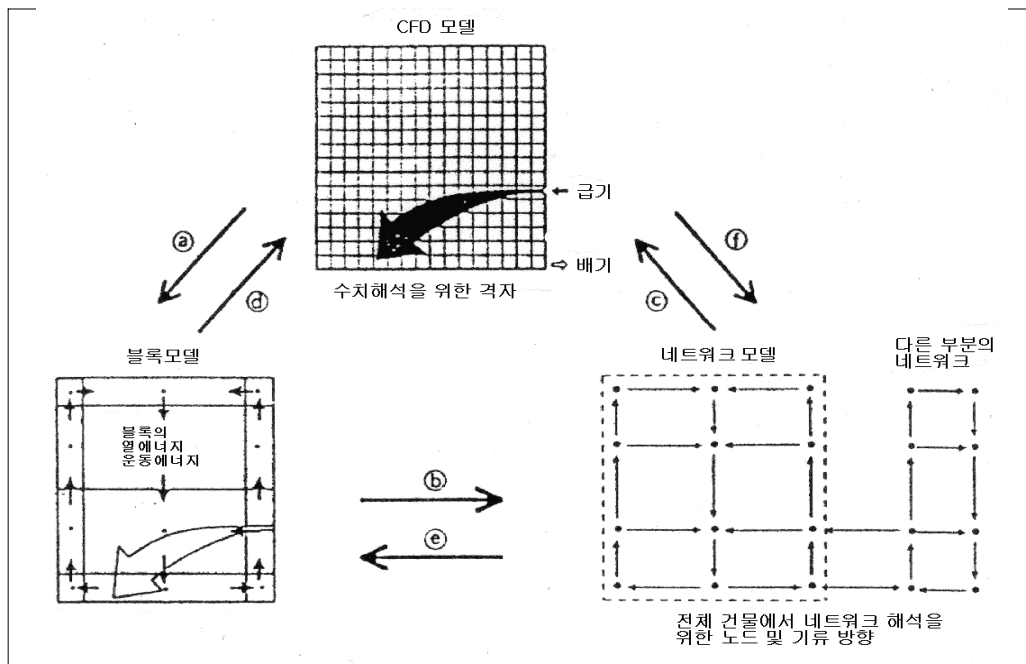


그림 1 CFD, 블록 및 네트워크모델의 개념 및 상호 관계

위 그림에 ①~⑥로 표시된 상호 보완성은 다음과 같이 설명된다.

- ①: CFD 해석 결과에 의해 좀더 큰 범위의 블록간의 기류와 열전달을 계산한다.
- ②: 블록모델의 해석결과에 의해 네트워크모델의 노드별 상수를 구한다.
- ③: 전체 건물에 대한 네트워크 해석결과를 CFD모델의 경계조건으로 사용한다.
- ④: 블록모델의 해석결과에 의해 CFD모델에 필요한 기류속도와 온도의 개략적인 원리를 알 수 있다.
- ⑤: 네트워크 모델의 계산결과를 검증한다.
- ⑥: 전체 건물의 기류 해석에는 네트워크모델을 사용하고 각각의 방의 기류 해석에는 CFD 모델을 사용한다.

이들 해석 방법들은 각각 나름대로의 장단점을 가지고 있으므로 각 모델의 장점을 고려하여 혼용하는 것이 바람직하다. CFD 모델의 경우 하나의 큰공간은 미소입방체(finite volume)로 나누어져 이들 입방체 사이의 열 및 운동에너지 전달이 계산되므로 공간 내의 기류속도 및 온도분포의 계산이 가능하게 된다. 블록 모델의 경우 CFD 모델보다 크게 구획된 공기 블록 사이의 기류 및 열전달이 계산된다. 비록 블록 모델 자체로는 실내 기류분포를 해석할 수는 없지만 CFD 모델과 네트워크 모델을 연결시켜 주는 모델이라는 점에서 의의를 찾을 수 있다.

### 3.2 블록 모델

블록모델은 기류요소 모델(flow element model)이라고도 불리며, 이 모델은 기류의 특성에 따라서 그림 2에 보인 것과 같이 벽면을 따라 하강 또는 상승하는 공기를 모델링하기 위한 壁面流 모델, 공조 취출기류를 자유분류로서 취급하는 非等溫噴流 모델 및 대공간 내의 상부와 하부의 온도차에 의한 열이동을 평가하는 熱移動係數의 3개로 구성되어 있다. 이 모델의 장점은 대공간의 상하 온도분포를 비교적 신속하게 계산할 수 있다는 것이다. 이 모델은 대공간을 상하 방향으로 약 5개 정도의 블록으로 나누고, 수평방향으로는 벽체에 면한 공기 블록과 중앙부의 공기블록으로만 나누게 된다. 이처럼 CFD 모델보다 훨씬 적은 수의 격자를 설정하는 이유는 대부분의 대공간에서는 수평 방향의 온도분포는 거의 균일하게 되기 쉽다는 것이 경험적으로 잘 알려져 있고 더운 공기의 부력에 의한 열층화 현상에 의해 수직방향으로의 온도분포가 현저하기 때문이다.

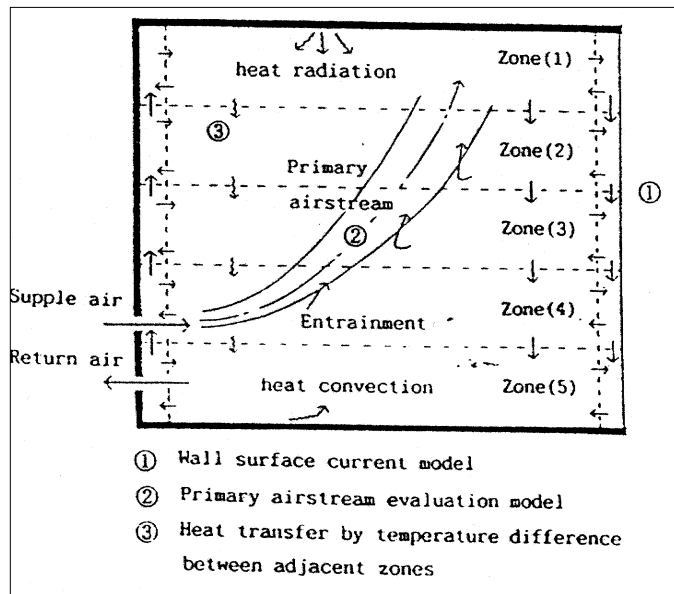
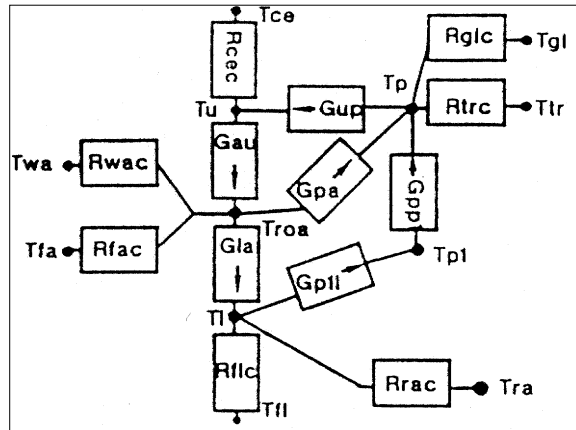


그림 2 블록 모델의 개념  
(Togari et al. 1993)

### 3.3 네트워크모델

네트워크모델은 일명 존-모델이라고도 불리는데 주로 여러 개의 실로 구성된 건물 전체의 기류를 해석하는데 적용된다. 즉, 네트워크모델에서는 각실 (또는 존)이 하나의 노드점(nodal point)으로 표현되어 하나의 건물은 여러 개의 노드점으로 구성된 네트워크로서 모델링된다. 그리고 이 모델에서는 기류와 열전달은 기본적으로 일차원적 에너지 보존, 연속 법칙 및 일차원 열전달 방정식에 의해 분석된다. Inard 와 Buty (1991)는 네트워크 개념을 적용하여 실내 공기의 열적 성상을 예측하는 연구를 했다. 그들은 실내 공기를 기류와 엔탈피의 흐름에 의해 몇 개의 존으로 분할하는 방법을 개발하였다. 그림 3은 한 개의 방열기에 의해 난방되는 하나의 실을 5개의 노드로 나눈 것을 보인 것이다. 그림에서  $T_{p1}$ 은 방열기에 의해 가열되어 막 상승하려는 공기,  $T_p$ 는 상승된 공

기의 흐름, Tu는 상부 존, Troa는 중심 존, Tl은 하부 존을 나타내고 있다.



Gxx	엔탈피의 흐름
Txx	표면온도
Rxxx	대류열저항
ce	천정
wa	벽면
fa	바닥
fl	방열기
tr	리창기
gl	유방중심존
ra	방열기에 의해 가열되는
au	상부존
l	하부존
p	방열기에 의해 가열되어 상승하는 공기류
pl	방열기로부터 이탈하는 것을 나타냄

그림 3 다섯 개의 존으로 표현되는 실내 대류 해석 네트워크 (Inard and Buty, 1991)

위의 그림 3에서 방열기의 밑부분이 바닥으로부터 0.1m 떨어진 곳에 위치하고 있다고 가정하면 방열기에 의해 가열된 공기가 막 상승하려고 할 때의 엔탈피 흐름은 식(1)에 의해 구할 수 있고 그 공기가 상부 존으로 상승할 때의 엔탈피 이동은 식(2)로 표현된다.

$$G_{pp1} = 9.10^{-3} C_p \left[ \frac{(Tra - Tl)}{Rra} \right]^{1/3} (Hra + 0.1 - z_0) Lra \quad (1)$$

$$G_{up} = 9.10^{-3} C_p \left[ \left( \frac{Tra - Tl}{Rrac} - \frac{Tp - Tgl}{Rglc} - \frac{Tp - Ttr}{Rtrc} \right) \right]^{1/3} (height - z_0) Lra \quad (2)$$

단, Lra 와 Hra는 각각 방열기의 길이와 높이를 나타내는 것이며 z0는 공기가 방열기에 의해 가열되는 곳의 바닥위 수직 높이를 가리키는 것이다.

### 3.4 CFD 모델

오늘날 컴퓨터를 이용한 실내 기류 및 온도분포 해석에 가장 많이 사용되고 있는 CFD 모델들의 기본 이론은 두개의 에너지 전달 방정식으로 구성된 k-ε 모델이다. k-ε 모델에서 k는 난류(turbulent flow)의 운동에너지를 나타내는 것이며 ε은 그 운동에너지를 확산을 나타내는 것이다. 표 1은 k-ε 모델의 기본 방정식들을 보인 것이다. k-ε 모델은 그 간략성 때문에 매우 복잡한 형상을 갖는 건물에서의 복잡한 비등온 3차원 기류를 해석하는데는 그 정확성에 한계가 있지만, 현재로서는 컴퓨터 프로그래밍에 가장 적합한 이론으로 평가되고 있다. 그러나 기존의 k-ε 모델의 가장 큰 단점은 층류(laminar flow)에 가까운 기류(즉 Reynolds 수가 작은 기류)를 해석할 때 결과의 오차가 크다는 것이다. 왜냐하면 k-ε 모델은 완전등온난류(fully turbulent isothermal flow)를 해석하기 위해 개발된 것이기 때문에 대공간처럼 열층현상이 두드러지는 공간에 그대로 적용할 경우 결과의 정확성이 낮아진다. 대공간의 경우 그 중앙 부분에 층류에 가까운 기류분포가 생기는 경우가 많은데 그 이유는 높은 온도의 공기가 상부에 위치하고 낮은 온도의 공기가 하부에 위치하는 열층현상으로 인하여 부력에 의한 기류의 수직 방향으로의 흐름이 약화되기 때문이다. 따라서 대공간의 기류 해석에 적용할 때 좀더 그 결과의 정확성을 높이기 위해 Reynolds수가 작은 기류를 해석할 수 있도록 기존의 k-ε 모델을 발전시키려는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.

표 1 k-ε 모델의 기본 방정식 (Murakami and Kato, 1989)

$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$	연속방정식
$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\}$	모멘트방정식
$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t S - \varepsilon$	k방정식
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$	ε 방정식
$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$	점성방정식

여기서,  $S = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$   
 $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, C_D = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$

Chen 등(1990)은 대공간 내에서의 부력에 의한 난류의 해석을 위해 여러 가지 이론식들을 적용하는 연구를 진행하였는데 k-ε 난류 해석 모델에서 낮은 Reynolds수를 사용하고 k와 ε 식을 부력을 고려하도록 개정한 모델이 가장 정확한 결과를 보여주었다. Chikamoto 등(1992)도 열층현상에 의한 안정효과를 좀더 정확하게 예측할 수 있는 low-Reynolds-number k-ε 모델을 개발하였다. 그들은 개발된 모델의 정확성을 실제의 대공간에서의 실험 결과와 비교함으로써 입증하였다. 그들이 개발한 개정 k-ε 모델의 기본 방정식은 표 2와 같다.

k-ε 모델을 사용하여 실내 기류를 정확하게 시뮬레이션하기 위해서는 먼저 경계조건을 정확하게 설정해 주어야 한다. 기존의 k-ε 난류 해석 모델은 완전 난류 즉,  $\nu_t \gg \nu$  (난류의 운동점성이 분자의 운동점성보다 매우 크다)의 가정 하에서 개발된 것이다. 그러나 벽면에서의 경계면 내부에서는 벽체와 공기와의 마찰 때문에 난류 현상이 억제되므로 난류는 벽체로부터 멀리 떨어진 곳에서 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 기존의 k-ε 모델에서 공간을 그리드로 나눌 경우 벽체 부근에서는 매우 정밀한 그리드를 설정해야 한다. 그러나 많은 연구자들(Chen and Jiang 1992; Chen et al. 1990)은 벽체로부터 공기의 열전달량은 벽체 부근에서의 그리드 간격에 매우 민감하게 영향을 받는다는 연구 결과를 발표하였다. 벽면 근처에서 그리드 간격을 크게 할 경우 벽체와 공기 사이의 대류열전달량을 과소 평가 하게 되고 너무 촘촘하게 할 경우 과대 평가하게 된다. Henke와 Hoogendoorn(1990), Yuan 등(1992), Takemaza 등(1992)은 벽면 근처의 그리드의 크기에 구애받지 않는 벽면대류 열전달 함수를 개발하고 측정을 통해 검증하였지만 이 분야에 대해서는 더 많은 연구가 필요한 것으로 나타났다.

한편, 낮은 Reynolds 수를 채용한 k-ε 난류 모델(low-Reynolds-number k-ε turbulence model)은 대부분의 경우 실내 표면에서의 대류 열전달을 가장 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. Chen 등(1990) 과 Beghein 등(1993)은 이 모델에 의한 수치해석 결과와 실험치를 비교하는 연구를 수행한 결과 둘 사이가 매우 잘 일치한다는 결론을 얻었다. 그러나 이 모델을 사용할 경우 벽면 근처에서 더 많은 그리드를 설정해야 하므로 대공간의 기류를 3차원적으로 해석할 경우 컴퓨터 메모리가 과대하게 요구되고 계산시간도 긴 단점이 있다. 그러므로, 현재로서는 낮은 Reynolds 수를 채용한 k-ε 모델은 대공간의 중앙 부분에만 적용하고 벽면에서의 대류열전달 해석에는 벽면대류 열전달 함수를 사용하는 것이 권장되고 있다.

현재 실내의 기류성상을 수치적으로 해석하여 실내의 온도 및 기류분포를 예측하는데 사용되는 상업용 또는 연구용 컴퓨터 프로그램은 표 3과 같다. 표에서 보인 것처럼 대부분의 컴퓨터 프로그램들은 공간을 미소입방체(finite volume)로 나누어 계산하고 있지만 몇 가지 프로그램들은 finite element 방법을 사용하고 있다.

표 2 대공간에서 열층현상에 의한 안정효과를 고려한 개정 k-ε 모델  
(Chikamoto, Murakami and Kato, 1992)

---

$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) - g_i \cdot \beta \cdot \theta$	모멘트방정식
$\frac{\partial k}{\partial t} = D_k + P_k + G_k - \varepsilon$	k방정식
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = D_\varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$	ε 방정식
$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - \overline{u_j \theta} \right)$	온도방정식
$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad G_k = -g_3 \cdot \beta \cdot \overline{u_3 \theta}$	
$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}, \quad D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\}$	
$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k$	
$\overline{u_i \theta} = -\frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x_i}, \quad \nu_t = C_\mu \cdot f_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad f_\mu = f_B \cdot f_{Rt}$	
$f_{Rt} = \exp \left\{ \frac{-3.4}{(1 + Rt/50)^2} \right\}$	
$f_B = 0.0 (B \leq \frac{1}{a_0}), \quad 1 - a_0 B (\frac{1}{a_0} < B < 0), \quad 1.0 (0 \leq B), \quad B = G_k / \varepsilon$	
$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_\theta = 0.9$	
$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92$	
$C_{\varepsilon 3} = 1.44 (G_k > 0), \quad 0.0 (G_k \leq 0), \quad a_0 = -0.1$	

---

단,

$U_i$ : i 방향으로의 평균 풍속,  $u_i$ : i 방향으로의 실제 풍속,  $k$ : 난류 운동에너지,  $\varepsilon$ : 난류 운동에너지 확산,  $\theta_\varepsilon$ : 평균 기온,  $\theta$ : 실제 온도,  $P_k$ : 평균 전단력을 고려한 k방정식의 일부,  $G_k$ : 부력을 고려한 k방정식의 일부,  $\nu_t$ : 난류 운동점성치,  $\nu$ : 운동점성치,  $B$ : 부력 변수 ( $G_k/\varepsilon$ ),  $Rt$ : 난류 Reynolds 수 ( $k^2/\nu \cdot \varepsilon$ ),  $Rt$ : Richardson 수 ( $-G_k/P_k$ ),  $f_\mu$ : 댐핑 함수 ( $f_B \cdot f_{Rt}$ ),  $f_B$ : B의 댐핑 함수,  $f_{Rt}$ :  $Rt$ 의 댐핑 함수,  $g_i$ : i 방향으로의 중력 가속도,  $Pr$ : Prandtl 수,  $\beta$ : 부피 확장 상수

---

표 3 기류해석을 위한 컴퓨터 프로그램

프로그램 명	개발회사 (기관)	국가	상업용 연구용	방법
ARIA	Abacus	영국	상업용	FV
ASTEC	Harwell	영국	상업용	FV
CALC-BFC	Chalmers	스웨덴	연구용	FV
CHAMPION	TUD	네덜란드	연구용	FV
EOL-3D	INRS	프랑스	연구용	FV
EXACT3	NIST	미국	연구용	FV
FEAT	-	영국	상업용	FE
FIDAP	FDI	미국	상업용	FE
FIRE	AVL	호주	상업용	FV
FLOTRAN	Compuflow	-	상업용	FE
FLOVENT	FLOMERICS	영국	상업용	FV
FLOW-3D	Harwell	영국	상업용	FV
FLUENT	Fluent, Inc.	미국	상업용	FV
JASMINE	BRE-FRS	영국	연구용	FV
KAMELEDN	SINTEF	노르웨이	연구용	FV
PHOENICS	CHAM	영국	상업용	FV
SIMULAR AIR	AVL	호주	상업용	FV
STAR-CD	CD	영국	상업용	FV
TEACH-3D	Aalborg	덴마크	연구용	FV
TEMPEST	Battelle	미국	연구용	FV
WISH-3D	TNO	네덜란드	연구용	FV

단, FV: finite volume FE: finite element

#### 4. IEA의 Annex 프로젝트

IEA에서는 사회전반에 걸쳐서 에너지 절약방안을 강구하기 위해 국제적인 협력과제인 Annex 프로젝트를 수행해 오고 있다. IEA는 1974년에 OECD내에 설립된 기관으로서, 그 설립 목적은 23 개 IEA 참여 국가간의 협동연구를 지원하여 에너지 절약방안, 대체 에너지 개발 및 기타 에너지와 관련된 연구 개발을 통해 지구의 자원 고갈에 대한 해결방안을 마련하는 것이다. 그동안 수행된 IEA의 Annex 프로젝트 중에서 대공간의 기류해석 및 온도 분포 예측과 관련된 것은 Annex-20 과 Annex-26으로서, 다음은 이 두 연구프로젝트의 개요와 결과에 대해 고찰해 보았다.

##### 4.1 Annex-20 프로젝트

Annex-20 프로젝트의 공식 명칭은 “Air Flow Patterns within Buildings”로서 그 목적은 단 일실과 건물 전체에서의 공기 및 오염물질의 확산을 해석하는 수치적인 기법과 실험적인 기법들의 정확성을 평가함으로써, 각종 기법들의 설계 도구로서의 타당성을 검토하는 것이었다. 연구 기간은 1988년 5월부터 1991년 11월까지 약 3년 6개월에 걸쳐 진행되었고, 벨기에, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이태리, 네덜란드, 노르웨이, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국 등 13 개국이 참가하였다. 이 프로젝트는 두개의 분과인 Subtask-1과 Subtask-2로 나누어 연구가 진행되었는데, 이들 두 연구 분과의 연구과제는 표 4와 같다.

표 4 Annex 20 프로젝트의 연구 과제

연구 분과	연구 과제
Subtask-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 실내 기류패턴, 에너지 전달 및 IAQ를 3차원적으로 해석하는 모델들의 성능 평가</li> <li>● 각종 기류해석 모델의 정확성 향상방안</li> <li>● 각종 기류해석 모델의 설계 도구로서의 적용성 평가</li> <li>● 각종 기류해석 모델의 검증을 위한 실험 데이터의 수집</li> </ul>
Subtask-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 큰 개구부를 통한 기류, 기류에 의한 공기오염 또는 다수실 환기효율 등과 같은 특수한 문제들의 해결을 위한 새로운 해석기법의 개발</li> <li>● 기존의 측정법의 개선 또는 새로운 측정법 개발</li> </ul>

이 연구프로젝트에서는 기류해석을 위한 상용 및 연구용 모델들의 정확성과 성능을 상대적으로 평가하기 위해 여러 참여 연구자들이 동일하게 사용할 2차원적 해석조건과 3차원적 해석조건을 설정하였다. 2차원적 해석 대상실과 조건은 그림 4 및 표 5와 같으며 3차원적 해석 대상실과 조건은 그림 5, 그림 6 및 표 6과 같다. 그림 7은 위와 같은 다양한 경계 조건에 대한 기류의 수치해석 결과의 예를 보인 것이다.

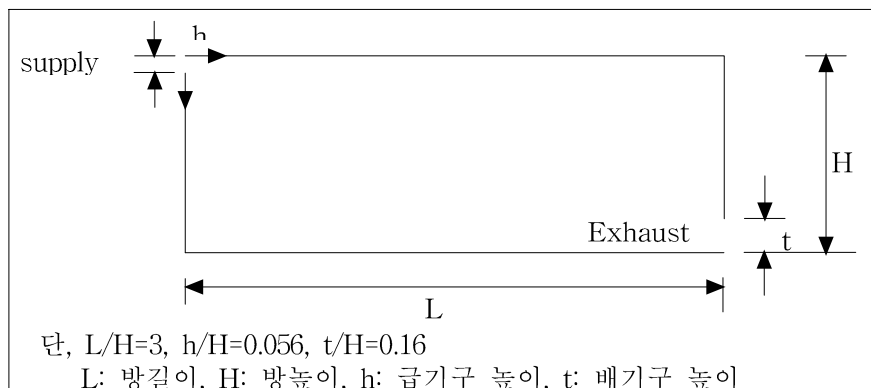


그림 4 Annex-20 프로젝트 2차원적 해석 대상실

표 5 Annex-20 프로젝트 2차원 기류 해석을 위한 조건



해석조건 번호	주위 온도	기타 조건
2D1	등온	급기구에서의 Reynolds 수 = 5,000 난류 정도 = 4%
2D2	비등온	바닥 가열 아르키메데스 수를 변화

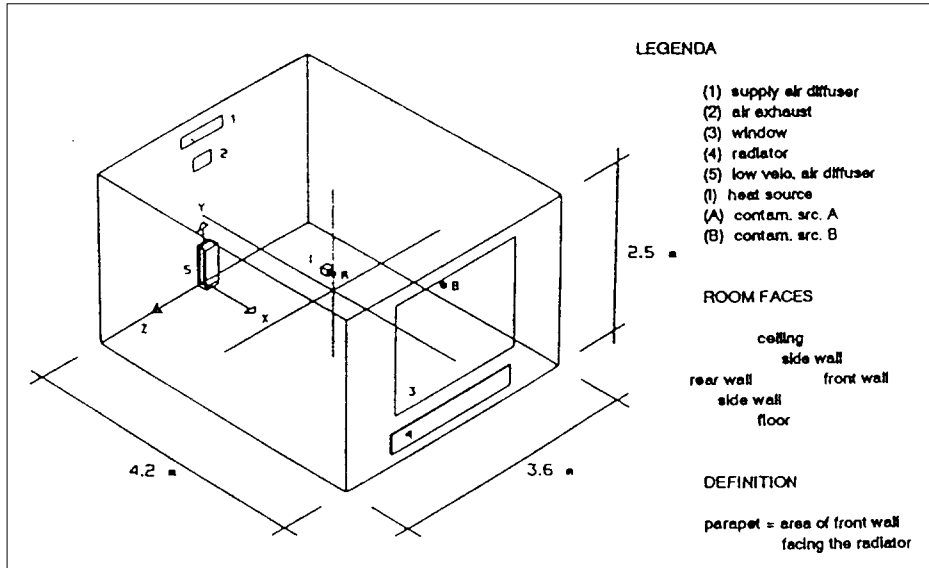


그림 5 Annex-20 프로젝트의 3차원적 기류해석을 위한 모델실의 형상과 계산점 A, B, C의 위치

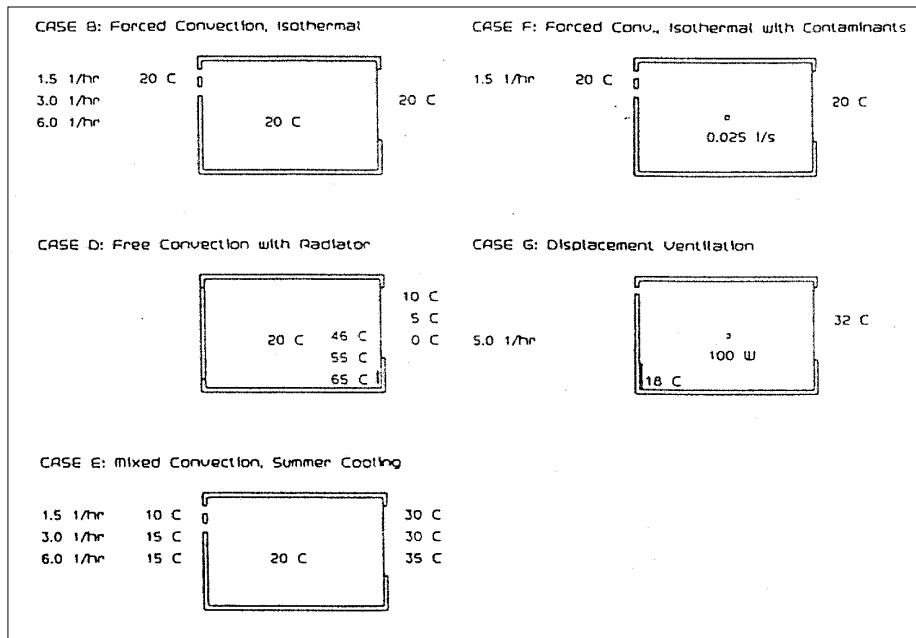


그림 6 Annex-20 프로젝트의 3차원적 기류해석을 위한 실내외 기온 및 공조조건

표 6 Annex-20 프로젝트의 3차원적 기류해석을 위한 경계조건

각 해석조건의 기호 및 기류 조건	세부 조건
B (강제대류, 등온류)	B1 : 급기량 = 0.0158m <sup>3</sup> /s B2 : 급기량 = 0.0315m <sup>3</sup> /s B3 : 급기량 = 0.0630m <sup>3</sup> /s
D (방열기에 의한 자연대류)	D1 : 방열기 표면온도 = 46°C, 유리창 표면온도 = 10°C D2 : 방열기 표면온도 = 55°C, 유리창 표면온도 = 5°C D3 : 방열기 표면온도 = 65°C, 유리창 표면온도 = 0°C
E (강제+자연대류, 여름철 냉방)	E1 : 급기량 = 0.0158m <sup>3</sup> /s, 급기온도 = 10°C 창문표면온도 = 30°C E2 : 급기량 = 0.0315m <sup>3</sup> /s, 급기온도 = 15°C 창문표면온도 = 30°C E3 : 급기량 = 0.0630m <sup>3</sup> /s, 급기온도 = 15°C 창문표면온도 = 35°C
F (실 중앙부에 오염 발생원이 존재하는 강제 대류) 기류조건 및 급기량은 B1과 동일	F1 : 오염물질 농도 = 0.8kg/m <sup>3</sup> F2 : 오염물질 농도 = 1.2kg/m <sup>3</sup> F1 : 오염물질 농도 = 1.8kg/m <sup>3</sup>
G (환기) 여름 냉방 상태에서 실 중앙에 열과 오염물질을 발생하는 재실자가 있고 창문 근처 상부 구석에 또 다른 오염물질 발생원이 있다.	G1 : 급기량 = 0.0525m <sup>3</sup> /s, 급기온도 = 18°C 창문표면온도 = 32°C, 열원 = 100W전구 오염물질발생량 = 0.025 l/s (A, B 각각) 오염물질농도 = 1.2kg/m <sup>3</sup> , 냉방부하 = 20W/m <sup>2</sup>

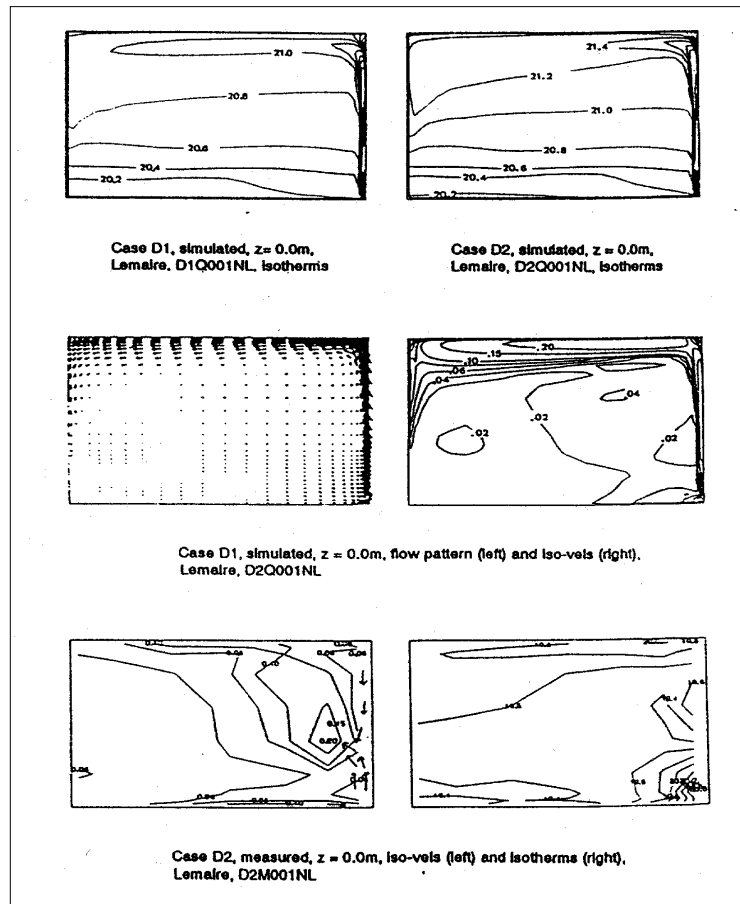


그림 7 Annex-20 조건별 기류해석 결과 예

서로 다른 국적의 많은 연구자들이 참여하여 앞에서 보인 동일한 조건을 갖고 다양한 컴퓨터 프로그램을 사용하여 기류해석을 한 결과 Annex-20 프로젝트의 최종 보고서는 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- CFD 모델을 이용한 기류해석은 실내 기류성상 등 측정하기 어려운 변수들을 실내의 모든 점에 대해 계산해 줄 수 있는 장점이 있다.
- CFD 모델은 경계조건의 미세한 변화가 기류흐름에 주는 영향을 연구하는데 유용하게 이용될 수 있으므로 설계도구로서 뿐만 아니라 연구도구로서의 가치도 갖고 있다.
- CFD 모델은 보통의 건물과는 상이한 조건을 갖는 공간에서 설계자들의 경험에 의한 공조계획이 불가능할 때에도 기류성상을 예측할 수 있는 장점을 갖고 있다. (즉, 대공간, 새로운 방식의 환기시스템, 강한 부력현상 등)
- 단순화된 해석기법들은 급기류의 성상, 거주역에서의 최대 기류 속도, 방열기에서의 공기 가열 효과 등을 예측하는데 편리하게 사용될 수 있다.
- 이미 완공된 건물에서 얻은 기류해석 결과는 다른 조건을 갖는 사무실과 같은 보편적인 공간에서의 기류성상을 정확하지는 않지만 신속하게 예측할 수 있는 자료로서 이용될 수 있으므로 실측에 의한 결과를 데이터베이스화할 필요가 있다.
- 장래 좀 더 연구되어야 할 과제로서 대공간에서의 에너지 절약적 환기대책을 채택하였으며, 이 과제가 바로 Annex-26 프로젝트의 주제가 되었다.

#### 4.2 Annex-26 프로젝트

Annex-26 프로젝트의 명칭은 “Air Flow Patterns in Large Enclosures”로서 대공간의 에너지 절약적인 환기 방법과, 공기오염물질의 효과적인 제거방법을 연구하였다. 이 프로젝트는 1992년 4월부터 1993년 3월까지 1년간의 준비기간을 거친 다음 1993년 4월에서 1996년 7월까지 약 3년에 걸쳐 연구가 수행되었으며, 참여국가는 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이태리, 일본, 네덜란드, 노르웨이, 폴란드, 스웨덴, 스위스, 영국 등 12 개국이었다. 연구의 초기단계에서 여러 나라의 공조설계 실무자들을 대상으로 설문조사를 실시한 결과 국적에 관계없이 다음과 같은 공통된 현황 및 관심 사항이 도출되었다.

- 대부분의 공조설계 실무자들은 대공간의 공조설계시 보통의 공간에서와 같은 방법으로 설계하고 있는 실정이지만 대공간과 보통공간 사이의 주요 차이점에 대해 알고 싶어하였다.
- 대공간 설계시 실내 온도 및 공기 환경의 설계 조건의 설정기준 및 적절한 공조 시스템을 선정하기 위한 지침이 필요하다고 응답하였다.
- 또한, 컴퓨터 프로그램과 같은 설계 도구의 신뢰도가 실제의 프로젝트에서 입증된 것인지를 알고 싶어하였다.

여러 나라 공조설계 실무자들의 이러한 공통적인 관심사에 대한 해답을 제공하고자 Annex-26 역시 Annex-20 프로젝트에서와 같이 두 개의 연구분과(Subtask-1, Subtask-2)에 의해 연구가 수행되었다. Subtask-1은 주로 실측 및 모형실험에 관한 연구를 수행하였고, Subtask-2에서는 주로 CFD 모델링 기법에 관한 연구를 수행하였다. 이들 두 연구분과의 연구 내용은 다음과 같다.

##### 1) Subtask-1

이 연구분과에서는 측정 대상으로 선정된 건물들을 측정결과로부터 얻을 수 있는 정보의 양과 질을 고려하여 “참고용 건물”, “기본적 조사대상 건물”, 및 “상세 측정대상 건물”의 세 가지로 분류하였다. 각 각의 사례연구 대상 건물은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

○ 참고용 건물: 대공간에 관해서 비교적 한정적이기는 하지만 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있는 건물로서, 일본의 실험용 아트리움 모형을 포함한 총 네 개의 건물이 선정되었다. 특히, 일본의 실험용 아트리움 모형은 유리재의 종류, 환기 및 공조방식 등을 다양하게 변화시킬 수 있도록 제작되었다. 참고용 건물에서 얻은 값들은 추후 Subtask-2에서 연구한 컴퓨터 모델들의 정확성을 검증하는데 쉽게 이용될 수 있도록 데이터베이스로 만들어졌다.

○ 기본적 조사대상 건물: 이미 측정이 완료되어 그 결과를 참고 할 수 있는 건물 또는 간단한 측정을 행하는 건물이다. 측정을 하지 않을 경우에는 최소한 설문조사를 실시하는 건물로서, 각국이 공통적으로 행한 설문 조사의 주요 내용은 건물의 개요, 환기설비 방식, 공조설비 방식, 설계 부하, 에너지 절약 기법 및 유지 관리상의 문제점 등이었다.

○ 상세 측정대상 건물: 대공간 내의 온도 및 기류분포, 에너지 소비량 등 각 종의 환경요소를 장기간에 걸쳐서 측정하는 건물로서 상세한 보고서를 작성하기 위한 건물들이다.

## 2) Subtask-2

이 연구분과에서는 설계단계에서 대공간의 온도 및 기류분포 성상을 해석할 수 있는 각종 모델링 수법을 개발 또는 비교 평가하기 위하여 기류요소모델(flow element model)과 네트워크 모델과 같은 거시적 모델(macro model), CFD 모델이나 축소모형실험과 같은 미시적 모델 (micro model), 그리고 환기효율 모델 등에 대하여 연구하였다. 이 분과의 연구결과 이들 온도 및 기류분포 해석 모델들의 특징 및 장단점 등을 표 7과 같이 요약하여 제시하였다.

표 7 대공간 실내 기류 해석 및 예측용 모델의 특징 및 장단점

모델 항목	기류요소 모델	네트워크 모델 (또는 zonal model)	CFD 모델	축소모형실험	환기효율모델
개요	- 기류의 요소 즉, 노즐 분사, 연돌효과에 의한 기류, 경계면류 등이 개별적으로 분석된다. - 전체 기류장은 이들 기류 요소들을 합성하여 분석	- 예상공간을 몇 개의 존으로 구획 - 기류 및 열흐름의 평형에 기초한 계산 수행 - 따라서 각 존의 평균기류속도, 평균온도 및 오염물질의 평균 농도가 계산된다.	- 계산 대상공간을 다수의 작은 격자로 구획 ( $10^1 \sim 10^6$ 개) - 미분차분법 등을 적용하여 속도, 온도 및 오염물질 농도계산	- 대공간의 축소모형 제작하여 대공간 실내 기후 측정 - 실제 공간과 모형 공간의 상사법칙(아르키메데스수)의 적용이 매우 중요	- 다양한 평가 모델을 사용하여 얻은 결과를 사용하여 신선 공기 급기 및 오염공기 배기 효율 분석
모델분류	거시적 모델	거시적 모델	미시적 모델	미시적 모델	다른 모델에 종속
동적분석	어렵다	가능	가능	불가능	다른 모델에 종속
한계	기류요소 분야만 계산 가능	자세한 분포는 해석 불가능	대공간 분석에 셀업청난 수의 셀 구획 필요	정확한 상사법칙의 구현이 어렵다	다른 모델의 결과의 정확성에 의해 좌우된다
입력자료	- 기류종류 정의 - 기류요소의 실험적 상수 - 급기의 온도, 실내온도 및 표면온도 - 열원의 열류량	- 존 구획 데이터 - 벽면의 경계조건 - 열원의 위치 - 기류 요소의 속도, 온도, 방향 등의 데이터	- 기하학적 격자 - 경계조건	- 상사조건을 계산하기 위한 급기의 속도, 온도, 방향 등의 데이터	- 실내기류 분포 - 오염물질 발생원의 위치 - 취출구 위치 및 신선 공기 시간당 취출량
출력정보	- 각 기류 요소들의 속도 및 온도 분포	- 각 존의 평균 온도, 기압 및 오염 물질 농도	- 각 셀의 기류 속도 및 온도 분포 - 복사열 전달 계산 할 경우 벽면 온도	- 공간내 기류 속도 및 온도 분포	- 환기 효율 평가 - 오염물질 농도 분포
장점	- 응용하기 쉽고 계산이 신속하다.	- 응용이 쉽다 - 동적 계산 가능	- 상세분석 가능 - 컴퓨터 그래픽을 이용한 가시적 표현	- 실제의 현상을 측정하는 것이므로 신뢰도 높다.	다른 모델에 종속
단점	- 기류요소가 서로 연관되어 작용할 경우 적용 불가능	- 기류장이 복잡할 경우 계산 결과의 정확도 낮다	- 그리드 디자인과 입력자료 준비에 시간과 노력필요 - 컴퓨터의 용량이 커야 하고 계산 시간이 길다.	- 실험에 많은 시간, 비용 및 노력이 필요	다른 모델에 종속

또한, Annex-26 프로젝트에서는 기존의 CFD 모델들의 경계조건을 좀더 정확하게 설정하기 위하여 태양 복사열을 모델링하는 방법, 벽체의 열전달 및 마주하는 벽체와 벽체사이의 열 전달량 해석 방법 등에 대한 연구도 수행하였다.

## 5. 결 론

대공간 건축물의 에너지 절약적 공조 설계기술을 확보하기 위해 해결해야 할 당면과제 및 해외에서의 최근의 연구동향을 문헌을 통해 조사·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 현재까지 개발되어 있는 실내 기류 및 온도분포 해석이론은 크게 CFD모델, 블록 모델, 네트워크 모델의 세 종류로 나눌 수 있다. CFD 모델은 실내 기류의 거동 및 온도 분포 등을 매우 정확하게 계산할 수 있는 장점은 있지만 컴퓨터 기억용량을 많이 요구하고 소요되는 계산시간이 매우 긴 단점이 있다. 블록 모델은 개략적인 실내 상하온도분포를 예측할 수 있지만 기류성장(즉, 기류속도 분포) 등은 예측이 불가능한 단점이 있고, 네트워크 모델의 경우 실내 온도분포와 기류 분포 등은 예측할 수는 없지만 CFD 모델이나 블록 모델의 경계조건 설정에 사용될 수 있다.

2) 이와 같은 각 모델들의 장단점을 고려할 때 CFD 모델은 설계과정 중 맨 나중에 사용하는 것이 가장 경제적이고 유리하다. 즉, 건축설계 및 공조설계가 거의 완성되었을 때 CFD 모델을 사용하여 당초 계획했던 대로 실내 기류 및 온도가 분포되는지를 검토할 수 있고, 설계조건을 만족시키지 못할 경우 문제점들을 해결하기 위한 도구로서 사용하는 것이 권장된다.

3) 설계 초기 단계에서는 건물 데이터와 공조설비 데이터가 불충분하므로 설계자의 경험을 바탕으로 블록 모델이나 네트워크모델 등 좀더 간단한 모델들을 사용하여 여러 설계 방안들을 비교 평가하는 것이 권장된다.

4) OECD에서는 산하 에너지 관련 전담 기관인 IEA(International Energy Agency)를 통해 국제적 협력연구인 Annex 프로젝트를 수행하여 왔고, 이미 완료된 연구 프로젝트 중에서 Annex-20 과 Annex-26 프로젝트는 현재까지 개발되어 있는 여러 종류의 실내 기류해석 이론과 컴퓨터 프로그램들의 정확성과 설계도구로서의 실용성을 검토하였다. 그 결과를 토대로 에너지 절약적 대공간 설계 지침을 제공하였고, 이는 우리 나라에서 대공간 전용의 설계 기준 마련에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

5) 향후 우리 나라에서도 대공간 건축물에 대한 에너지절약적 설계 방침을 설정하고, 공조시스템 설계안의 정확한 성능평가를 위해 다음과 같은 사항에 대해서 중점적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

- 태양복사열 취득량 및 실내 구조체의 열용량을 고려한 장파장 복사량의 정확한 계산법
- 실내표면 간의 복사열전달을 고려한 CFD모델의 초기 경계조건 설정방법
- 에어노즐에 의한 대공간 상하부분 공기의 차단방법
- 대공간에 대한 에너지 절약형 공조 시스템의 선정 및 평가기술 (대류 냉난방, 복사 냉난방)
- 대공간 건축물의 기밀성과 환기율 사이의 관계 (에너지 對 공기 오염도)
- 대공간 건축물의 거주후 평가(P.O.E.)방법

## 참고문헌

1. Beghein, C.; Penot, F.; Mergui, S.; and Allard, F. 1993. "Numerical and Experimental Evaluation of Turbulent Models for Natural Convection Simulation in a Thermally Driven Square Cavity," Proc. the ASME Winter Annual Meeting, ASME, New York, NY. Paper 93-WA/HT-46, pp.1-12.
2. Chen, Q. and Jiang, Z. 1992. "Significant Questions in Room Air Motion," ASHRAE Transactions, Vol. 98, Part 1, pp.929-938.
3. Chen, Q; Moser, A.; and Huber, A. 1990. "Prediction of Buoyant, Turbulent Flow by

Low-Reynolds-Number  $k-\epsilon$  Model," ASHRAE Transactions Vol. 96, Part 1, pp.564-573.

4. Chikamoto, T.; Murakami, S.; and Kato, S. 1992. "Numerical Simulation of Velocity and Temperature Fields within Atrium based on Modified  $k-\epsilon$  Model Incorporating Damping Effect due to Thermal Stratification," Proc. Int'l Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, 22-24 July, Tokyo, Japan, ASHRAE. pp.501-509.

5. Henkes, R. and Hoogendoorn, C. 1990. "Numerical Determination of Wall Functions for the Turbulent Natural Convection Boundary Layer," Int'l Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.33, No.6(June), pp.1087-1097.

6. Inard, C. and Buty, D. 1991. "Simulation of Thermal Coupling Between a Radiator and a Room with Zonal Models," IEA Annex 20, Research Item 1.26, Proc. 12th AIVC Conference, 24-27 September, Ottawa, Canada

7. Murakami, S. and Kato, S. 1989. "Numerical and Experimental Study on Room Airflow - 3D Predictions using the  $k-\epsilon$  Turbulence Model," Building and Environment, Vol.24, No.1, pp.85-97.

8. Takemasa, Y.; Kurabuchi, T.; and Kamata, M. 1992. "Numerical Simulation of Indoor Air Temperature and Wall Heat Flow Distribution of a Heated and Cooled Room," Proc. Int'l Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, 22-24 July, Tokyo, Japan, pp.99-107.

9. Togari, S.; Arai, Y.; Miura, K. 1993. "A Simplified Model for Predicting Vertical Temperature Distribution in a Large Space," ASHRAE Transactions Vol. 99, Part 1, ASHRAE. pp.84-99.

10. Yuan, X.; A. Huber, A.; Hachmann, P.; and Moser, A. 1992. "New Wall Functions for the Numerical Simulation of Air Flow Pattern in Rooms," Proc. 3rd Int'l Conference on Air Distribution in Rooms (ROOMVENT '92), Vol. 1, pp.75-91.