

## 열환경 시뮬레이터를 위한 국부공조 수치해석

김요섭<sup>1</sup>, 김영일<sup>1</sup>, 유호선<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, <sup>2</sup>송실대학교 기계공학과

### NUMERICAL STUDY OF TASK AIR-CONDITIONING FOR THERMAL ENVIRONMENT SIMULATOR

Joseph Kim<sup>1</sup>, Youngil Kim<sup>1</sup>, H. Yoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Soongsil University

#### 서론

경제발전에 의해 사람들의 생활수준이 향상됨에 따라 제품과 환경의 설계시 인간의 감성이 중요한 요인으로 고려되고 있다. 감성이란 외부의 물리적 자극에 의한 감각, 지각으로부터 인간의 내부에 야기되는 심리적 체험으로, 쾌적함, 고급감, 불쾌감, 불편함 등의 복합적인 감정이다. 따라서 기능, 품질, 견고성, 가격만으로 제품의 성공을 좌우하는 시대는 지났고 이제는 제품이 인간에게 주는 개성화된 이미지, 즉 고급감, 쾌적감, 인간친화감 등 더 나아가 인간을 감동시킬 만한 사용편리성이나 인텔리전트함 등 세밀한 부분까지 신경 써야 하는 시대가 도래하였다. 선진국에서는 이미 제품 또는 환경 설계에 있어 인간의 감성을 고려하는 시도가 오래 전부터 이루어지고 있으며 많은 성공을 거두고 있다. 최근 국내에서도 감성공학 연구가 활발하게 진행되고 있는데 감성공학은 제품과 환경에 대한 감성을 객관적이고 과학적으로 측정하여 이를 제품 또는 환경에 응용하는 것이 목표이다<sup>(1)</sup>.

감성을 측정, 평가하기 위해서는 실제 상황에서 인간을 대상으로 하여야 하며, 그 전제로서 주변 환경을 명확히 정의할 수 있어야 한다. 외관상 유사한 상황에서 측정 및 평가된 결과라도 미묘한 차이로 인하여 상이한 결과가 도출될 수 있다. 따라서 명확히 정의된 그리고 재현이 가능한 환경을 제시할 수 있는 기술은 감성공학에 있어 가장 핵심적인 공통 기반 기술이 된다. 본 연구에서는 주변환경 중 열환경 인

자를 임의로 제시할 수 있는 공조 방식에 대한 연구를 수행한다.

인간의 감성에 영향을 미치는 요인은 다양하나 이 중에서도 열환경은 인간에게 미치는 정도가 어떠한 요인보다도 큰 것으로 알려져 있다. 열환경이라 함은 온도, 습도, 기류, 복사열을 말하며 이 요소들과 인간의 감성과는 밀접한 관련을 지닌다.

본 연구에서는 급기 및 배기 위치가 각각 다른 3 가지 공조 방식에 대하여 관심 대상인 국부 영역의 온도를 얼마나 효율적으로 유지하는지를 수치해석적으로 계산한다. 각 공조 방식의 성능은 국부영역과 거주지역의 평균온도와 표준편차(standard deviation, STD)를 계산하여 비교한다. 본 연구결과는 실시간으로 열환경 제어가 필요한 열환경 시뮬레이터의 개발에 기초 자료로 활용된다.

#### 국부공조

국부공조는 에너지 절약과 더불어 개인에게 만족스러운 온열환경을 만들고, 컴퓨터나 복사기 등, 사무기기들에 의한 국부적으로 큰 열부하가 생기는 것을 효과적으로 처리하기 위해 연구되어 왔다. 즉, 공조를 함에 있어 특별히 관심이 있는 영역, 즉 큰 부하가 걸리는 곳이나 재실자가 있는 영역을 집중적으로 공조하는 효율적인 공조 방식이다<sup>(2,3,4)</sup>.

감성을 측정, 평가할 수 있는 열환경 시뮬레이터를 제시하기 위해서는 임의의 열환경을 실시간으로 제시할 수 있는 기

술의 개발이 필요하다. 열환경은 열유체 현상의 복잡성, 공조설비의 열용량, 열원기기의 유한용량, 열매체의 이송지연, 측정 및 제어 주기의 불연속성 등의 요인으로 비선형 특성을 지니므로 제어가 대단히 어렵다. 따라서 열환경을 전체 영역에 대하여 제어하기보다는 관심 영역만 국부적으로 제어하는 방식이 국부공조이며 본 연구의 연구 대상이다.

최근에는 컴퓨터 산업이 발달함에 따라 사람들이 실제로 그 장소에 있지 않더라도 동일한 상황이 재현되고 체험할 수 있는 가상현실 기술이 개발되고 있다. 가상현실은 피실험자가 마치 실제 상황에 있는 것처럼 해주는 공간이므로 모든 주변 환경이 실제처럼 구현되어야 한다. 가상현실의 몰입감을 증대시키기 위해서는 시청각, 운동감, 후각, 미각, 촉각 외에 열환경이 제시되어야 한다. 이 경우 열환경은 일반 공조와는 달리 정해진 프로그램이 아닌 실시간으로 임의의 조건을 구현하여야 한다. 즉 피실험자가 어떤 가상현실을 체험할 때 상응하는 온열환경을 즉각적으로 만들어 주는 것이 필요하다. 이 목적을 달성하기 위하여 응답성이 느리고 대용량의 공조설비가 요구되는 비효율적인 전체공조 방식보다는 피실험자가 있는 관심 영역만 공조하여 소용량으로 응답성을 높일 수 있는 국부공조의 도입이 필요하다.

본 연구에서는 급기 및 배기 위치에 따른 3 가지 공조 방식을 열환경 시뮬레이터에 응용하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 주어진 국부 공간을 목표 온도인 16 °C로 유지하고 기타 공간은 쾌적한 온열환경 조건으로 유지하는 것이 목표이다. 세 가지 공조 방식은 (1) 일반적인 공조방식인 천장분출-천장배기, (2) 천장분출-천장배기 방식에 국부공조용 바닥분출이 추가된 방식, (3) 천장분출-천장배기 방식에 국부공조 영역 4 모서리에 급기용 기둥을 세워 수평으로 공기가 분출되도록 한 방식이다. 각 방식에 대해 국부지역과 기타 거주지역의 평균온도와 표준편차를 계산하여 그 성능을 비교하였다.

#### 해석 모델 공간

해석 대상이 되는 공간의 크기는 면적

10 m × 10 m, 높이 5 m이고 국부공조 영역은 그 공간의 중심부에 위치한 면적 1.2 m × 1.0 m, 높이가 2.0 m인 공간이다. 개략적인 그림을 Fig. 1에 나타내었다. 실제 공간의 부하 조건과 유사하게 만들기 위하여 공간 안에는 컴퓨터 4 대, 사람이 5 명, 천장에는 형광등이 4 개 있는 것으로 가정하였다. 외기 부하는 앞쪽과 뒤쪽 벽으로부터 일정한 열유속이 있는 것으로 가정하였다. 각 부하 조건은 Table 1에 나타난 바와 같고 총 내부부하는 9,380 W로 단위 면적당 93.8 W/m<sup>2</sup>이 되어 일반적인 사무공간의 부하량과 유사한 값을 가진다<sup>(5)</sup>. 국부공조 영역에는 사람이 한 명 있는 것으로 가정하였다.

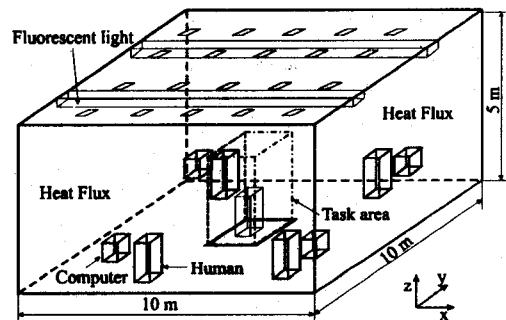


Fig. 1 Thermal environment simulator

Table 1 Internal heat gain

	heat gain	quantity	total
wall	50 W/m <sup>2</sup>	10 m × 5 m × 2	5000 W
computer	600 W	4	2400 W
fluorescent light	320 W	4	1280 W
human	140 W	5	700 W
total			9380 W

비교 대상의 3 가지 공조 방식은 Fig. 2에 나타내었다. Case 1은 일반적인 공조 방식으로서 천장에서 급기하고 천장으로 배기한다. Case 2는 앞의 방식에 국부공

조를 위하여 바닥 급기가 추가되었고, case 3은 국부공조를 위하여 국부영역 4 모서리에 높이 2 m의 급기용 기둥이 세워져 수평으로 공기가 분출된다.

Case 1과 case 2는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 질게 칠해진 평면을 경계로 대칭이 되므로 계산의 효율성을 위해 1/4만 계산을 하였고, case 3은 대칭면이 존재하지 않으므로 전체영역을 계산하였다.

급기 풍량은 실내의 평균온도를 일반적인 사무실 설계 기준 온도인 25 °C가 유지되도록 부하계산을 통하여 결정하였다. 세 방식 모두 처리 부하량인 입출구 온도차와 풍량과의 곱은 동일한 조건으로 하였다. Case 1은 천장에서 급기되는 공기의 온도는 14 °C, 풍량은 환기횟수 5 회/h가 되도록 하였다. Case 2와 case 3은 천장에서 급기되는 공기와 국부공조를 위해 급기되는 공기의 풍량비가 1:1이 되게 하였고 천장에서 급기되는 공기의 온도는 23 °C, 국부공조를 위해 바닥이나 기둥에서 공급되는 공기의 온도는 14 °C로 하였다. Case 2와 case 3의 두 경우 환기횟수 9 회/h가 된다.

수치해석

실내 유동장 해석시 난류의 유동장을 계산하기 위해 레이놀즈의 시간 평균과 k-ε 난류모델을 사용하였다. 지배방정식은 식 (1) - (5)과 같다.

연속 방정식 :

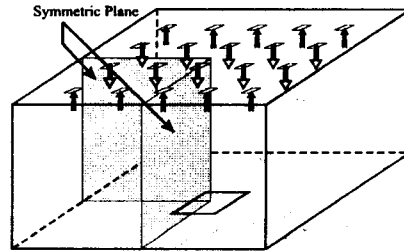
$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

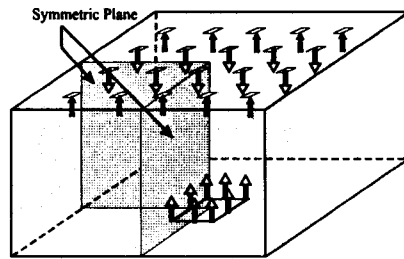
$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

에너지 방정식 :

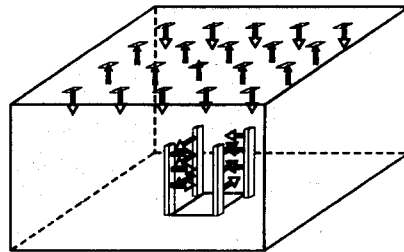
$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h - F_{h,j}) \\ = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}p) + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} \\ + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_k \end{aligned} \quad (3)$$



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 2 Various supply and exhaust system

난류에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho k) \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) \\ = \mu_t P - \rho \epsilon \\ - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

난류에너지 소산율 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \epsilon) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) \\ & = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} [\mu_t P \\ & - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}] \\ & - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \\ - \overline{\rho u_i' u_j'} &= 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k) \delta_{ij} \end{aligned}$$

$$P = 2 s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

부력항을 처리하기 위해 식 (6)과 같이 밀도를 계산을 하였고 알고리즘은 PISO 알고리즘을 사용하여 비정상 계산을 하였다.

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_T (T - T_0)} \quad (6)$$

계산은 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하였다. STAR-CD는 FVM을 기반으로 프로그램되어 있으며 비조직 격자계를 사용하기 때문에 본 연구 대상인 공간과 같이 복잡한 형상을 가진 열유동 문제를 해석하는데 적합하다.

평균온도와 표준편차를 구하기 위해 각 계산 격자의 체적을 가중치로 두어 식 (7)과 (8)과 같이 정의하였다.

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i T_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (7)$$

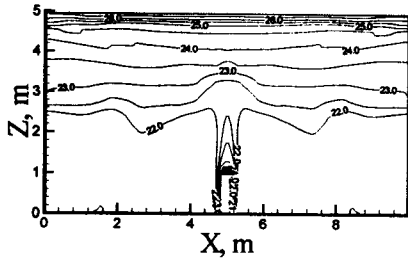
$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}} \quad (8)$$

### 결과

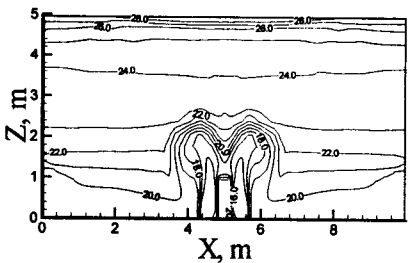
국부영역은 16 °C, 기타 거주지역은 쾌적한 온도로 유지하기 위하여 3 가지 공조 방식을 적용하고 비교하였다. 일반 공조 방식인 case 1, 바닥에서 국부공조를 추가한 case 2, 그리고 4 개의 기둥을 이용하여 국부공조를 추가한 case 3에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 각 방식별로 한 수직 단면에서의 온도 분포를 보여 주고 있다. Case 1에서는 국부영역의 평균 온도는 20.7 °C로 목표치보다 4.7 °C 높게 유지되고 있어 비효율적인 공조 방식임을 알 수 있다. 기타 거주지역은 23 °C로 유지되고 있다. Case 2는 국부영역은 16 °C에서 17 °C의 온도 분포를 보이며 국부영역 외 지역은 20 °C에서 23 °C의 온도 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있다. Case 2의 경우 바닥분출 방식을 적용하므로 이 방식의 특징인 온도의 성층화가 잘 나타나고 있다. Case 3에서는 유동 특성상 2 m 이상인 국부영역 위 부분까지 공조를 하고 있어 case 2보다 효과적이지 못하다.

Table 2에 국부영역과 기타 거주지역의 평균온도와 표준편차를 나타내었다. 거주지역은 사람들의 일반적인 활동공간으로 지상으로부터 높이 2 m까지의 공간을 지칭한다.

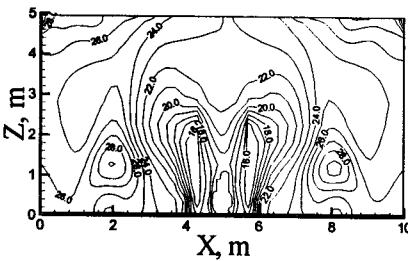
Case 1인 경우는 국부영역과 거주영역 모두 평균온도가 비슷한 것을 볼 수 있다. 표준편차도 작아 온도의 분포가 균일한 것을 볼 수 있다. Case 2의 경우 거주지역에서는 평균온도가 20 °C 정도이고 국부영역은 16 °C 정도로 목표치에 근접한 것을 알 수 있다. 표준편차를 볼 때 국부영역은 0.79 °C로 온도 분포가 균일하고 거주지역은 온도의 성층화의 영향으로 표준편차가 1.24 °C로 비교적 높게 나왔다. Case 3에서 거주지역의 평균온도는 25.93 °C로 나왔고 표준편차는 3.37 °C로 가장 높게 나왔다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 3 Temperature distribution at  $y = 5$  m section

Table 2. Mean Temperature and standard deviation of ambient and task areas

	ambient area(°C)		task area(°C)	
	$\bar{T}$	STD	$\bar{T}$	STD
Case 1	20.92	0.06	20.68	0.57
Case 2	20.68	1.24	16.15	0.79
Case 3	25.93	3.37	17.19	1.47

국부영역에서는 평균온도가 17.19 °C이고 표준편차는 1.47 °C이다. Case 3의 국부영역 공조 성능은 case 2보다 약간 낮지만 배기구를 국부영역 하부에 설치하면 그 성능이 향상되리라고 예측된다.

결론

본 연구에서는 국부공조를 실현하기 위하여 3 가지 공조 방식에 대하여 수치해석을 수행하였다. 세 공조 방식은 (1) 일반적인 천장분출-천장배기, (2) 천장분출-천장배기 방식에 국부공조용 바닥분출이 추가된 방식, (3) 천장분출-천장배기 방식에 국부공조 영역 4 모서리에 급기용 기둥을 세워 공기가 분출되도록 하는 방식이다. 국부영역의 목표온도는 16 °C이며 각 공조 방식의 평균온도와 표준편차를 계산하여 공조 방식의 성능을 비교하였다.

Case 1과 같은 일반적인 천장분출-천장배기 공조방식은 국부영역이나 2 m 이하 거주역 모두 평균온도가 약 20 °C 근치이고 표준편차도 작아 모든 공간에서 온도분포가 균일한 것을 알 수 있다. 이 방식으로서는 효율적인 국부공조를 할 수 없음을 알 수 있다. 바닥분출을 추가한 case 2의 경우는 국부영역의 평균온도가 목표치에 가까우며 온도분포도 균일하게 유지됨을 알 수 있다. 네 기둥에서 급기되는 case 3 방식은 국부영역에서 평균온도가 case 2보다는 약간 높게 나왔고 온도분포도 case 2보다 좋지 않다. 이는 case 2와는 달리 국부영역의 하부공간 공조를 효율적으로 수행할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 배기구의 위치를 국부영역 하부에 설치하면 공조 성능이 향상되리라고 예측된다.

비교 대상인 3 가지 공조 방식에 대하여 주위보다 온도가 낮은 온열환경을 국부적으로 만들 경우, case 2와 같이 바닥에서 저온의 공기가 급기되는 방식이 가장 효과적임을 알 수 있었다. 이번 연구는 국부영역을 냉방하는 경우에 대한 결과이고 반대의 경우, 즉 난방의 경우에는 다른 결과가 나올 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 이순요, 長町三生, 1996, 정보화시대의 감성인간공학, 양영각.
2. Y. Nakamura, M. Mizuno, Y. Sekimoto, K. Akagi, Y. Kunimatu, K. Otaka and M. Kohyama, 1996, Study on Thermal Comfort and Energy Conservation of Task-Ambient Air Conditioning System, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent, pp. 91-98.
3. M. Kohyama, M. Mizuno, Y. Nakamura, Y. Sekimoto, K. Akagi, Y. Kunimatsu, and K. Otaka, 1996, Field Measurements of the Indoor Environment of an Office with a Task-Ambient Air Conditioning System, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent, pp. 141-148.
4. L. R. Glicksman, S. Taub, 1997, Thermal and Behavior Modeling of Occupant-Controlled Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems, Energy and Buildings, 25, pp. 243-249.
5. ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook, Fundamental, Georgia, USA.

김요셉, 구연,

1.감성측정 및 평가, 2. 기타 (열환경 시뮬레이터),

02-958-5594, Fax 02-958-5588,

joseph@kistmail.kist.re.kr