

급기구 유입각도에 따른 실내 환기효율

진 현 준, 장 용 준*, 양 경 수†
 인하대학교 기계공학과, *철도기술연구원

Indoor Ventilation Efficiency Depending on Diffuser Inlet Angle

Hyun-Jun Jeon, Yong-Jun Jang*, Kyung-Soo Yang†

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

*Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea.

(Received January 18, 2011; revision received January 20, 2011)

ABSTRACT: In this study, numerical simulation has been conducted to investigate dispersion of a pollutant released from a new furniture, a kind of Sick Building Syndrome (SBS). A sofa which generates formaldehyde is implemented by using an immersed boundary method. Large Eddy Simulation (LES) is employed to obtain time-dependent velocity and concentration fields. It is shown that the ventilation efficiency in this room can be improved by changing inlet angle of diffuser, even though other conditions still remain unchanged. Both active diffusion near a sofa and air flow pattern are important parameters to enhance the ventilation efficiency.

Key words: Diffuser(디퓨저), Spread range(확산범위), Indoor pollutant dispersion(실내오염물질 확산), Ventilation efficiency(환기효율)

———— 기 호 설 명 ————		τ : 아격자응력성분 [kg/m · s]
x_i : 직교 좌표계에서의 각 방향 성분 [m]		상첨자
u_i : x_i 방향으로의 속도성분 [m/s]		
t : 시간 [s]		$-$: 여과된(filtered) 물리량
P : 여과된(filtered) 압력 [Pa]		
f : 운동량부가 [kg/m ² · s]		하첨자
C : 농도 [kmol/m ³]		
D : 질량 확산 계수 [m ² /s]		
q : 아격자질량확산항 [kmol/m ² · s]	i, j : 좌표성분	
F : 농도 원천/흡입 [kmol/m ³ · s]		

그리스 문자

α : 디퓨저 급기 유입각도 [°]

1. 서 론

최근 들어 에너지효율적인 측면을 고려하여 실내의 밀폐화가 극대화됨에 따라 자연환기를 통한 실내환기량이 부족하게 되었다. 2004년 6월, 당시 공동주택의 공기질에 대한 객관적인 제한 기준이 없는 상황에서 '새집증후군'으로 인한 유아 발병에 대

† Corresponding author

Tel.: +82-032-860-7322; fax: +82-032-868-1716

E-mail address: ksyang@inha.ac.kr

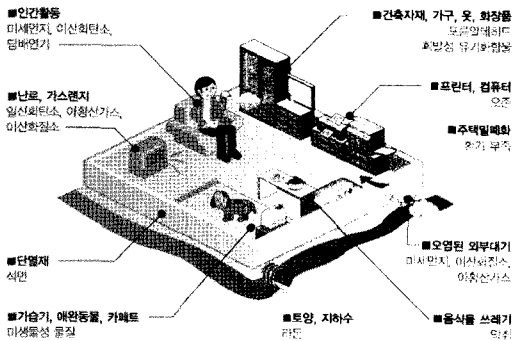


Fig. 1 Main reason of indoor pollutant.

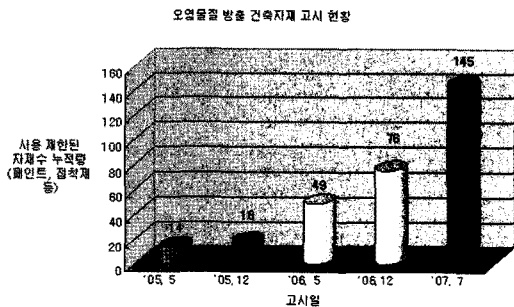


Fig. 2 Government's regulation for indoor pollutant.⁽²⁾

해 300만원 상당의 배상금 지불 판결이 결정⁽¹⁾되면서부터 Fig. 1에 보인 바와 같은 다양한 실내오염원에 대해 실내공기질을 향상시키는 기술에 대한 관심이 고조되었다. 실 실내공기질을 향상시키는 방법은 오염물질이 방출되지 않는 친환경소재를 이용하거나 오염물질이 덜 방출되는 다소 안전한 건축자재를 이용해 시공하는 것이다. 이런 움직임은 환경부의 규제를 통해 다년 간 이루어져 왔으며 오염물질이 특정 기준 이상으로 방출되는 자재에 대해 Fig. 2와 같이 규제해 오고 있다. 그러나 이러한 규제가 효과적으로 관리되지 않는다는 것이 언론을 통해 알려지고 있으며, 준공 당시 유지기준을 통과하더라도 리모델링을 하거나 새로운 가구를 들여놓게 됨으로써 2차적인 오염이 유발될 수 있는 실정이다. 그 외에 실내공기질을 향상시킬 수 있는 방법은 물리화학적인 방법으로서 이미 공사가 완료된 건축물 내부마감재에 오염물질을 제거 혹은 흡착시킴으로써 방출을 억제하게 된다. 그러나 이 방법은 아직 그 실질적인 효과에 대한 검증이 충분이 이루어지지 않았다.

실내공기질 향상을 위한 가장 확실한 방법은 강제환기를 통한 실내오염물질을 외부로 배출시키는 방법이며 이에 관련된 설비시장의 규모가 크게 성장하고 있다.^(2, 3) 또한 컴퓨터의 발달로 인해 최근 실내공기질과 관련한 수치해석이 활발히 이루어지고 있다. Kim et al.⁽⁴⁾은 유입구 및 유출구 위치 및 크기가 상자형 공간의 환기량에 미치는 영향을, Kim et al.⁽⁵⁾은 급·배기 위치에 따른 환기성능 연구를 진행한 바 있다.

본 연구에서는 실내공간에 오염원(여기서는 소파로 가정)이 있는 경우에 대해 고정된 위치에 급·배기구가 각각 1개씩 설치된 강제환기 시스템을 구현하고, 급기구에 디퓨저를 설치하여 급기유입각도에 따른 환기효율을 수치해석적 방법으로 검토하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 지배방정식으로 상자필터(box filter)를 사용하여 여과된(filtered) 3차원 비압축성 연속 방정식과 운동량 방정식, 농도이송 방정식을 사용하였다. 또한 사각 실린더 형상을 구현하기 위해 가상경계법⁽⁶⁾이 사용되었다. 해석에 사용된 코드는 저자가 직접 작성한 하우스코드이며, 가상경계법과 LES를 동시에 적용한 지배 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \tau_{ij} \right) + f_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{C} \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - q_j \right] + F \tag{3}$$

여기서, \bar{u}_i 는 x_i 방향으로의 속도성분, P 는 압력성분, τ_{ij} 와 q_j 는 아격자응력성분과 아격자질량확산항을 나타낸다. f_i 와 F 는 각각 운동량 부가^(6, 7)와 농도 원천/흡입(concentration source/sink)을 나타낸다. τ_{ij} 와 q_j 의 모델링에는 Lagrangian Dynamic Subgrid-scale Model(LDSM)^(8, 9)을 사용하였다.

3. 검증

본 연구는 “새집증후군 저감대책을 위한 실내오염물질 확산 해석코드 개발 및 적용”의 후속 연구로서 본 연구의 해석에 사용된 코드의 검증은 Jeon et al.⁽¹⁰⁾의 논문을 참고하기 바란다.

4. 결과

4.1 해석대상 및 경계조건

천장에 급·배기구가 각각 1개씩 설치되어 있으며 급·배기구의 위치가 도시된 천장의 단면을 Fig. 3에 나타내었다. 급·배기구의 배치는 Choi and Cho⁽¹¹⁾가 수행한 실내 급·배기구 위치변화에 따른 실 공기유동에 관한 연구를 참고하여 효율적

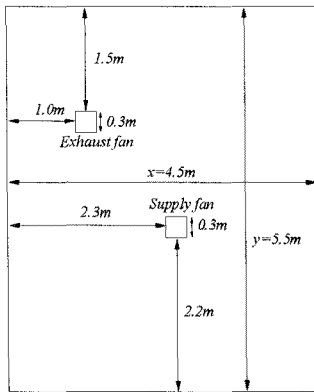


Fig. 3 Location of supply fan and exhaust fan.

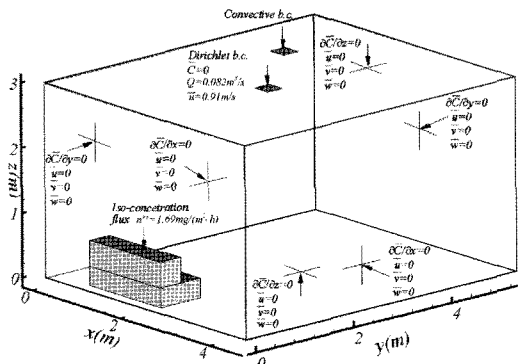


Fig. 4 Indoor configuration, boundary condition and initial setting.

인 위치로 선정하였다. 급·배기구는 한 변의 길이가 0.3 m인 정사각형이고, 급기구의 유량은 0.082 m³/s이며 사각덕트 내 층류유동의 완전 발달된 평균 유동장을 급기구면에서의 속도 경계조건으로 사용하였다. 방의 크기는 x방향으로 4.5 m, y방향으로 5.5 m, z방향으로 3 m이다. z방향은 바닥면으

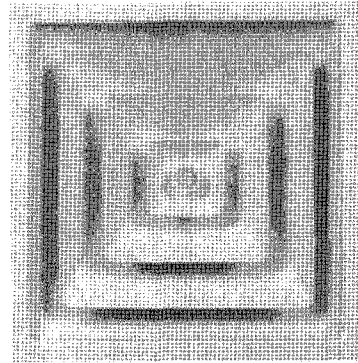


Fig. 5 Configuration of square duct.⁽¹²⁾

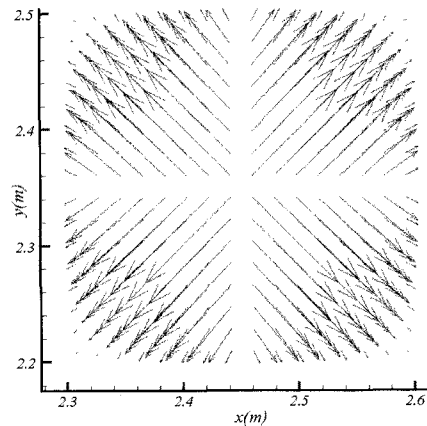


Fig. 6 Velocity vector at inlet square duct (x-y plane).

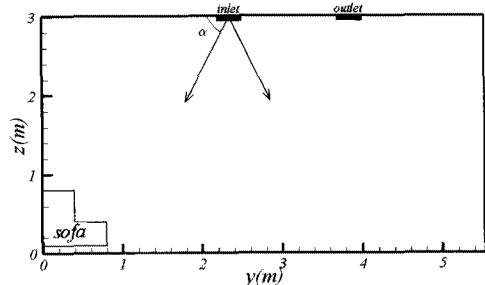


Fig. 7 Indoor configuration, inlet angle α .

로부터의 높이를 의미한다. 소파는 $x = 1.0 \sim 2.6$ m, $y = 0.0 \sim 0.8$ m, $z = 0.1 \sim 0.8$ m의 공간에 위치하며 구현하지 않은 소파의 다리높이 0.1 m(z 방향)가 고려되었다. 소파에서 방출되는 오염물질은 폼알데히드라 가정하였고, 소파부근에서의 정확한 유동장 및 농도장 계산을 위해 $96 \times 128 \times 128$ 개의 격자를 사용하였다. 초기조건은 $\bar{C} = 0$, $\bar{u}_i = 0$ 이고, 급기구에서는 Dirichlet 경계조건으로 $\bar{C} = 0$, 즉 신선한 공기가 급기된다. 경계조건 및 소파를 나타낸 실내의 투시도를 Fig. 4에 나타내었다. 폼알데히드 방출량은 한국건설기술연구원 자료⁽¹²⁾를 참고하여 일반자재에 해당하는 1.69 ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)로 주었으며 편의상 이 구조물을 소파로 명하였다. Sc 는 공기와 폼알데히드간의 분자확산 계수를 기준으로 0.9803 이다. 급기구에 위치한 디퓨저는 시중에서 판매되고 있는⁽¹³⁾ 사각디퓨저(Fig. 5)로 가정하였고, 이를 토대로 급기구에서의 유동을 Fig. 6의 형태로 가정하였다(디퓨저를 정면에서 바라본 경우, $x-y$ 단면 기준으로 45° , 135° , 225° , 315°). 급기구면($x-y$ 단면)과 이루는 유입각도 α 가 45° , 60° , 75° , 90° (Fig. 7), 총 4가지 경우에 대해 해석을 수행하여 이에 따른 환기효율을 비교하였다. 일반적으로 환기효율은 급기효율과 배기효율로 나누어 생각한다. 급기효율은 신선급기가 실내로 적절히 공급 또는 분배되는가를 나타내는 지표이며, 배기효율은 실내에서 발생한 오염물질이 효과적으로 제거되는가를 나타내는 지표이다. 본 연구에서는 소파에서 방출되는 오염물질이 정체되지 않고 빠르게 배출 되는 것에 주안점을 두어 배기효율만을 고려하고자 한다. 이에 대한 자세한 내용은 Han⁽¹⁴⁾의 논문을 참고하기 바란다.

4.2 유입각도에 따른 오염물질 확산 해석

Fig. 8은 유입각도에 따른 유입공기의 확산 범위를 나타낸 것이다. 90° 인 경우 유입공기는 그대로 바닥면에 도달하지만 75° , 60° 로 유입각도가 감소할수록 바닥면에 도달하는 확산 범위가 넓어지게 된다. 45° 의 경우에는 유입공기가 바닥면에 도달하기 전에 벽에 부딪히게 되는 부분이 발생하게 된다(바닥면에 도달하는 확산범위가 바닥 단면보다 넓다).

Fig. 9는 유입각도에 따라 바닥면으로부터 1.5 m 높이에서 먼 평균된 시간에 따른 폼알데히드의 농도를 ppm 단위로 나타낸 것이다. 4가지의 유입

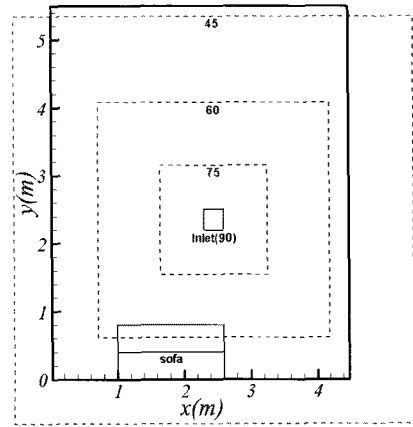


Fig. 8 Spread range with respect to inlet angle α .

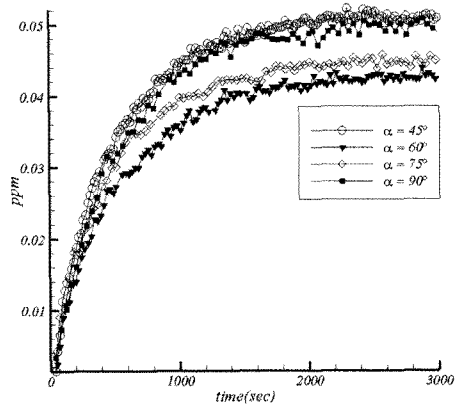


Fig. 9 Spatially averaged concentration at $z = 1.5$ m.

각도 모두에 대해 먼 평균된 농도가 수렴해 가는 양상이며, 이는 전체적인 공간에 대해서도 마찬가지로 확인되었다(전체 공간에 대해 수렴해가는 농도 순위도 같음). 1.5 m 높이에서의 평균농도를 나타낸 것은 환경부에서 실내오염도를 측정할 때 기준치로 삼는 높이이기 때문이다. 4가지 경우 모두 소파에서 방출되는 오염물질의 농도는 동일하기 때문에 실내공간에 대한 평균농도가 낮을수록 오염물질의 배출이 잘 이루어지는 것으로 간주하여 이를 배기효율의 순위로 정하였다. 유입각도 60° , 75° , 90° , 45° 의 순으로 환기가 잘 이루어지고 있다. 유입각도 60° , 75° 인 경우 90° 의 경우보다 배기효율이 좋지만, 유입각도가 45° 인 경우는 오히려 유입각도 90° 인 경우보다 배기효율이 떨어지게 된다. Fig. 10

의 (a), (b), (c), (d)는 각각 유입각도가 45°, 60°, 75°, 90°인 경우에 대해 평균농도장의 등 농도면 (0.078 ppm)을 나타낸 것이다. 등 농도면을 통해 소파주위에서의 농도확산을 확인해 볼 수 있으며 60°, 75°, 90°의 경우 농도확산이 원활하여 거주 공간인 방 중앙부에서의 농도정체가 덜 되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 유입각도 45°의 경우는 유입각

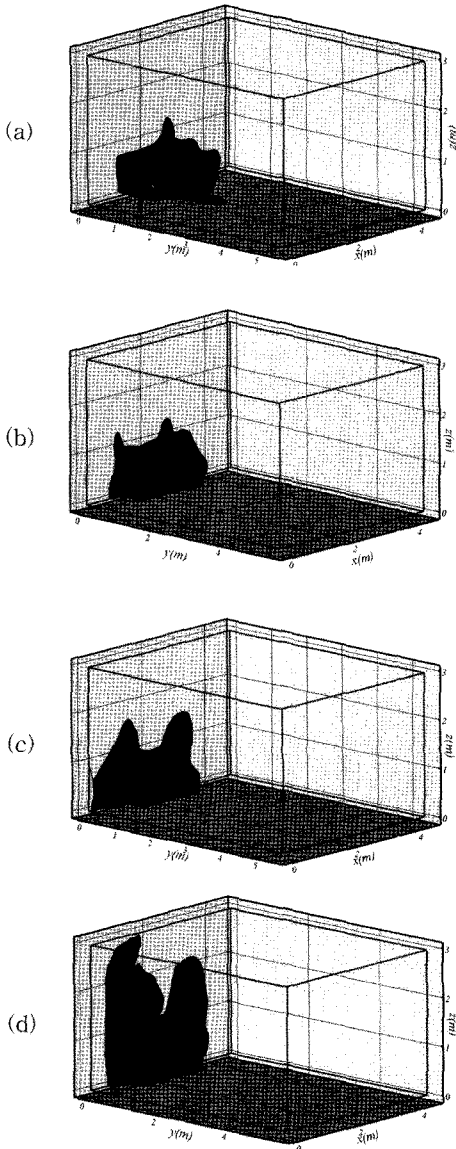


Fig. 10 Iso-surface of mean concentration (0.078 ppm) around a sofa; (a) 45°, (b) 60°, (c) 75°, (d) 90°.

도 60°, 75°인 경우와 비슷하게 소파주위에서의 농도확산은 잘 이루어지고 있지만 방 중앙부로 농도가 정체되어 배기효율이 나쁘다. 이의 원인분석을 위해 배기효율이 가장 좋은 유입각도 60°와 가장 나쁜 45°에 대해 평균유동장에 의한 유선과 평균농도장의contour를 $y-z$ 단면($x=1.15$, 출구의 중심에 해당하는 단면)에 나타내어 분석하였다. 유입각도가 60°인 Fig. 11(a)의 경우 y 축의 중앙부에서 한 쌍의 와류 구조를 관찰할 수 있다. 이는 유입각도 60°지점을 경계로 하여 안쪽으로는 고립된 와류가 발생하며 경계의 좌측부분에는 소파에서 z 방향으로의 농도확산이 활발히 이루어지고 있다. 반면 유입각도가 45°인 Fig. 11(b)의 경우 Fig. 11(a)에서 관찰되는 중앙지점의 한 쌍의 와류구조의 범위가 더 커지게 되어 고립된 와류 범위 내에 소파가 위치하게 된다. Fig. 11(a)에서 농도의 확산이 z 방향으로 이루어지고 있는 반면, Fig. 11(b)의 경우 벽면을 타고 내려오는 하강기류에 의해 소파주위에서의 농도확산이 y 방향으로 이루어지고 있다. 고립된 와류 쪽으로 농도확산이 이루어져 오염물질이 부분에 정체되게 되는 것이다. 이러한 유동장의 형성으로 인해 유입각도가 45°인 경우에는 중앙부에서 높은 농도분포가 형성된다. Fig. 12는 $x-y$ 단면에 대한 평균농도장을 contour로 나타낸 것이다. Fig. 12(a), (b), (c)는 유입각도 45°인 경우 각

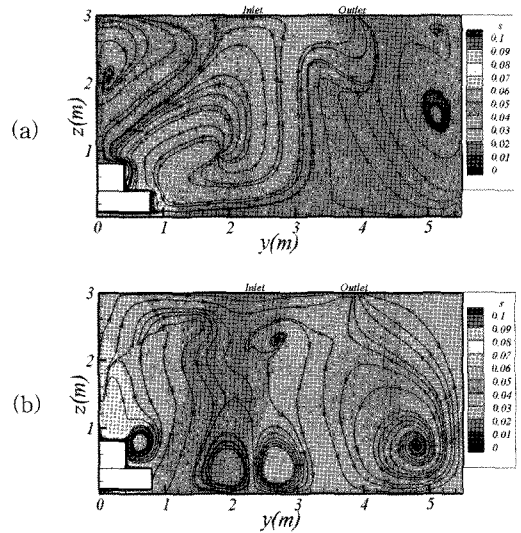


Fig. 11 Streamlines of time-averaged velocity field and contour of time-averaged concentration field; (a) 60°, (b) 45°.

각 $z = 0.5$ m, 1.0 m, 1.5 m에서의 단면에 해당하며 Fig. 12(d), (e), (f)는 유입각도 60° 인 경우 $z = 0.5$ m, 1.0 m, 1.5 m에서의 단면에 해당한다. 모든 높이에 대해 유입각도 45° 의 경우가 방 중앙부에서 농도가 높게 분포된 것을 확인할 수 있다. 소파 주위에서의 확산(Fig. 12(a), (d))은 오히려 유입각도 45° 인 경우가 더 활발히 이루어지고 있지만 Fig. 11(b)에서 관찰되는 고립된 와류 쪽으로 농도가 확산됨으로써 중앙부분에 높은 농도가 정체된 것을 확인할 수 있다(Fig. 12(a), (b), (c)). 이로써 배기효율을 높이기 위해서는 오염원 주위에서의 확산을 활발하게 하는 것도 중요하지만 동시에 유동장의 형성을 적절하게 조절하는 것도 중요하다는 것을 알 수 있다.

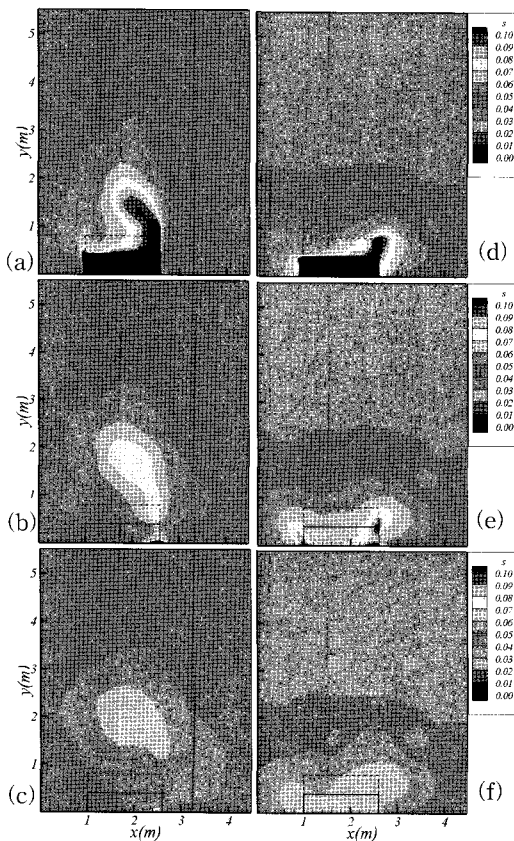


Fig. 12 Contour of time-averaged concentration field; (a) 45° , $z = 0.5$ m, (b) 45° , $z = 1.0$ m, (c) 45° , $z = 1.5$ m, (d) 60° , $z = 0.5$ m, (e) 60° , $z = 1.0$ m, (f) 60° , $z = 1.5$ m.

5. 결 론

본 연구는 기존연구의 후속연구로서 기존연구에서 개발된 실내 오염물질 확산해석용 코드를 이용하여 급기구 유입각도에 따른 환기효율에 대해 검토하였다. 코드에 대한 자세한 내용은 Jeon et al.⁽¹⁰⁾의 논문을 참고하기 바란다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같으며 모든 경우에 대해 일반적으로 적용 가능한 것이 아니라 본 연구에서 제시한 상황(실내 체적, 급·배기구 위치, 오염원의 위치)에 국한된 것이다.

(1) 급기구에서의 유입각도가 45° 인 경우 디퓨저가 없는 경우인 유입각도 90° 인 경우보다 배기효율이 떨어지는 경우가 발생한다. 이는 디퓨저가 있는 것이 때로는 배기효율을 저하시킬 수 있음을 의미한다. 적절하지 못한 유입각도의 형상을 갖는 디퓨저의 사용은 그 자체로 급전적인 낭비를 가져다줄 뿐만 아니라 배기효율을 더 떨어뜨리는 상황이 발생할 수 있으므로 신중히 사용하여야 할 것이다.

(2) 유입각도 4가지의 경우를 분석해 보았을 때, 60° 의 경우가 가장 배기효과가 좋았다. 45° 의 경우 60° 인 경우보다 소파주위로의 확산이 잘 이루어졌지만 농도의 확산방향이 고립된 와류의 방향으로 이루어져 농도정체가 발생하는 것을 관찰하였다. 이로써 오염원에서의 확산을 활발하게 일으키는 것도 중요하지만 실내에 적절한 유동장이 형성될 때 배기효율이 높아지는 것을 알 수 있다.

(3) 하나의 형상의 실내에 대한 해석이므로 여러 가지 변수요인에 따라 결과가 달라질 가능성을 염두에 두어 향후 추가적인 연구가 수행될 예정이며 본 연구의 해석결과는 디퓨저의 설계 시 기초자료로서 유용하게 사용될 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 도시철도 시설물 표준화 연구개발 사업(SW10002)의 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. First compensation judgement of Sick House Syndrome, 2004, Chosun-Ilbo.
2. Reduction of the Sick House Syndrome with

- the ventilation system, 2006, Korean Intellectual Property Office News.
3. www.kipo.go.kr.
 4. Kim, H. J., Kim Y. G. and Chung K. S., 2010, Effect of location and size of the inlet and outlet diffusers on ventilation flow rate of a box type space, Proceedings, the SAREK Summer Annual Conference, Pyeongchang, pp. 311-316.
 5. Kim, M. S., Kim Y. G. and Chung K. S., 2010, Effect of supply and exhaust diffuser locations on ventilation performance, Proceedings, the SAREK Summer Annual Conference, Pyeongchang, pp. 317-323.
 6. Balaras, E., 2004, Modeling complex boundaries using an external force field on fixed Cartesian grids in large-eddy simulations, *Comp. and Fluids*, Vol. 33, pp. 375-404.
 7. Kim, J. and Choi, H., 2004, An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for simulation of heat transfer in complex geometries, *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 6, pp. 1026-1035.
 8. Meneveau, C., Lund, T. S. and Cabot, W. H., 1996, A lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol. 319, pp. 353-385.
 9. Lilly, D. K., 1992, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *hys. Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
 10. Jeon, H. J., Yang, K. S. and Choi C. B., 2010, Development and application of a computer code for prediction of indoor pollutant dispersion, *Korean Journal of the SAREK*, Vol. 22, No. 11, pp. 735-744.
 11. Choi, J. M. and Cho, S. W., 2009, A study on the indoor airflow pattern by changing the location of mechanical terminal unit, *Korean Journal of the SAREK*, Vol. 21, No. 3, pp. 193-200.
 12. http://iaenv.kict.re.kr/sub3/data_01_3_2.asp.
 13. <http://www.diffuser.co.kr>.
 14. Han, H. T., 1999, On the definition of ventilation effectiveness, *Korean Journal of the SAREK*, Vol. 28, No. 1, pp. 38-47.