

다양한 덕트유동해석에 사용된 AIRVIEW의 정확성 비교에 관한 연구

권 용 일[†], 염 동 석^{**}, 한 화 택^{***}
 신흥대학 건축설비과[†], ACT2000, 국민대학교 기계자동차공학부^{*}

Study on the Accuracy Comparison of AIRVIEW used for various duct flows

Yong-Il Kwon[†], Dongseok Yeom^{**}, Hwataik Han^{***}

[†] Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College, Euijungbu, 480-701, Korea
^{**} ACT2000 corporation, Seoul, 138-816, Korea
^{***} School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

ABSTRACT : We are now developing a CFD program, AIRVIEW, with several numerical models and the SIMPLER solving method for constructing flow field and thermal comfort. This study is carried out for evaluating an accuracy of AIRVIEW. Comparisons of accuracy are carried out using Phoenics Version 3.4. In this study, we compare the turbulent kinetic energy distribution and local turbulent Re number obtained with Phoenics with those results simulated by AIRVIEW for three kinds of duct. It is observed from comparison of results that the turbulent kinetic energy values are significant due to the large velocity gradients in the region of flow. Numerical results for turbulent kinetic energy distribution and local turbulent Re number are that a good degree of agreement is found.

Key words: AIRVIEW, Indoor Air Quality, Thermal Comfort, SIMPLER

Nomenclature

k : turbulent kinetic energy
 S_φ : constant part of the linearized source term
 u_τ : wall velocity
 Y⁺ : dimensionless coordinate
 C_μ : Constants in turbulence models
 y : coordinate

ε : turbulent dissipation rate
 φ : general dependent variable

Greek symbols

1. 서론

열, 유체공학분야는 기계장치에서 발생하는 유동과 열전달 및 연소현상을 이론적으로 해석하기 위한 방법 수치해석을 수행하는 것이다. 수치해석은 유동량의 크기와 방향을 해석하기 위해 벡터(vector)량을 계산하는 Navier's stokes 방정식과 스칼라(scalar)량인 물질 및 열전달을 해석하는 방정식을 해석하는 것이다. 건축기계설비분야에서 수치해석을 활용하는 분야는 공기조화설비, 위생설비 및 소방설비분야로 다양하지만 사용되는 분야는 건축물 내부에 화재가 발생하였을 때, 화염전파현상분석, 실내온열감해석 및 청정도해석에

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-031-870-3319; Fax: +82-031-870-3742
 E-mail address: yikwon@shc.ac.kr

사용되고 있다. 이러한 해석을 수행하기 위해, 엔지니어들이 사용하는 상용프로그램은 국외에서 개발되어 판매되고 있는 star CD, Fluent 및 Phoenics등을 사용하고 있다. 국외에서 개발되어 상업적으로 판매되고 있는 CFD프로그램 중에서 건축기계설비분야에 적용 가능한 범용프로그램은 Table 1과 같으며 총 50여개의 상용 CFD프로그램이 시판되고 있는 현실이다.

Table 1. CFD codes capable of modeling^{(1)~(2)}

products name	kinds of modeling					
	thermal comfort	multi phase	electro-nic component	combustion	fire	flow around ships
PORFLOW		○				
ARSoftware				○		
Fluent Inc.	○	○	○	○	○	
Flowtech						○
Fluid Dynamics		○				
CFX	○	○		○	○	
ICEM CFD			○			
KIVA		○		○		
ACE		○		○		
STAR-CD	○	○	○	○	○	
CFD++		○		○	○	
FLO++	○	○				
FIRE				○	○	
FLOTTRAN	○	○	○	○	○	
PHOENICS	○	○	○			

상용 CFD프로그램 중에서 KIVA, FIRE, ARSoftware는 연소 및 화염전파해석을 전문으로 수행할 수 있도록 제작된 프로그램이다. 건축기계설비에서 주로 평가하는 온열환경(PMV) 및 공기연령(LMA)를 직접적으로 평가할 수 있는 프로그램은 전무한 실정이다. 본 연구에서 계산의 정확성을 평가하는 AIRVIEW는 건축기계설비분야에서 주로 평가하는 온열환경 및 공기연령분포를 쉽게 계산할 수 있도록 제작된 건축기계설비분야 전용 CFD프로그램이다. 이러한 목적으로 개발된 AIRVIEW의 계산에 대한 정확성을 평가하기 위해, 본 연구는 수행되었으며 계산정확성 비교는 동일한 덕트형상을 기준으로 해석한 Phoenics의 결과를 갖고서 수행하였다. 또한 계산정확성을 비

교한 덕트형상은 일자형, 7자형 및 ㄷ자형의 3개의 덕트형상에 대해 수행하였다.

2. AIRVIEW의 알고리즘

본 연구에서 사용된 AIRVIEW는 압력방정식을 해석하기 위해, SIMPLER알고리즘⁽³⁾을 적용하였으며 난류방정식을 해석하기 위해, High/Low Reynolds수 난류운동에너지방정식을 적용하였으나 본 연구에서는 High Reynolds 수 난류방정식⁽⁴⁾을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 벡타 및 스칼라방정식의 일반화식은 식(1)와 같이 구성하였으며 확산계수를 계산하기 위해 사용된 유체(점성계수) 및 열물성치(열전도율)는 20℃의 공기를 기준으로 선정하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\Phi \partial \Phi) + S_\Phi \quad (1)$$

실내기류유동을 해석하기 위해, 고 Re수 k-ε 2차 방정식을 처음 적용한 Nielsen^{(5)~(6)} (1974, 1978, 1979)은 벽함수를 사용하여 천장에서 급기되고 바닥에서 배기되는 실내의 기류유동을 해석을 수행하는데 성공하였다. 몇 년 후, k-ε방정식에 부력발생 항을 추가하여 환기되는 실내에서 난류유동에 영향을 받는 부력을 연구하여 실험결과 유사한 현상을 도출하여 수치해석방법을 이용하여 실내기류유동해석이 가능하도록 연구한 초창기 과학자이다. 이 때, 벽부근의 난류에너지의 생성과 소산이 균형을 유지하고 속도분포가 대수함수로 표현될 수 있도록 아래와 같이 난류에너지와 난류에너지소산율은 정의하였다.

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{ky}, \quad Y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (2)$$

3. AIRVIEW해석결과 검증조건

AIRVIEW에서 계산된 결과를 Phoenics와 비교 검토하기 위해, 수치해석을 수행한 형상은 Fig.1과 같다. 본 연구에서 사용되고 있는 AIRVIEW는 직교좌표계를 사용하고 적용하고 있으므로 7자형 및 ㄷ자형의 덕트를 구성하기 위해, Fig. 1와 같이 덕트가 구성되지 않는 영역은 블록

(blockage)를 적용하였다. 또한 덕트의 길이는 10m로 가정하였고 단면의 면적(가로×세로)은 1m²으로 가정하였다.

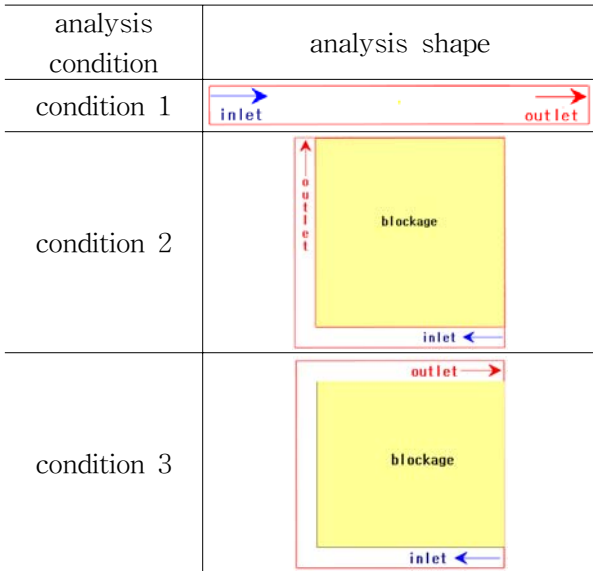


Fig. 1 Analysis shape used for evaluating accuracy.

Fig.1과 같이 구성된 덕트의 입출구에 적용된 경계조건은 Table 2와 같이 입구조건은 법선방향 속도가 일정한 것으로 가정하였고 출구조건은 압력이 0 Pa인 것으로 가정하였고 수렴조건은 연속 방정식이 10⁻⁸이하 인경우로 가정하였다.

Table 2 Boundary condition for inlet and outlet

analysis condition	inlet condition	outlet condition
condition 1	1.5 m/s	0 Pa
condition 2	10 m/s	0 Pa
condition 3	10 m/s	0 Pa

4. 결과 및 고찰

유동해석을 위해, 필수적으로 해석해야 될 난류 방정식 중 high Re k-ε난류모델은 난류효과(turbulent effects)가 큰 유동장에서 사용되기 위해, 고안된 모델인데 점성영향이 지배적인 벽체부근과 완전 발달된 난류영역의 유동현상을 연결하는 역할을 벽함수(wall function)가 해결함으로써

일반화된 난류방정식이 구성된 것이다. 그러므로 난류유동이 발생하는 덕트 유동해석의 정확성을 상업용 CFD프로그램과 비교하기 위한 인자를 본 연구에서는 벽체에서 가장 인접한 점에서 난류에너지와 국소난류Re수(Y⁺)로 선정하여 Fig. 1에 표현된 3종류의 덕트형상에 대해 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 2는 condition 1조건인 국소 난류 Re수를 나타내는 무차원 거리(Y⁺)분포를 벽체의 길이변화에 따라 나타내고 있다. 이 값은 폭방향의 위치(x)에 관계없이 입구효과에 의해, 입구쪽에서 높은 값을 나타내고 출구에서 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 전 구간에서 이 값은 11.5이상의 값을 나타내어 high Re k-ε모델을 적용하는데 무리가 없는 것을 알 수 있다. 계산의 정확성 평가관점에서 Phoenics에서 계산한 결과와의 최대오차는 폭방향위치에 관계없이 0.3%로 나타났고 계산영역에서 오차범위는 0.5% 이내로 유지되고 있어 AIRVIEW를 이용하여 계산된 결과의 정확성을 입증할 수 있다.

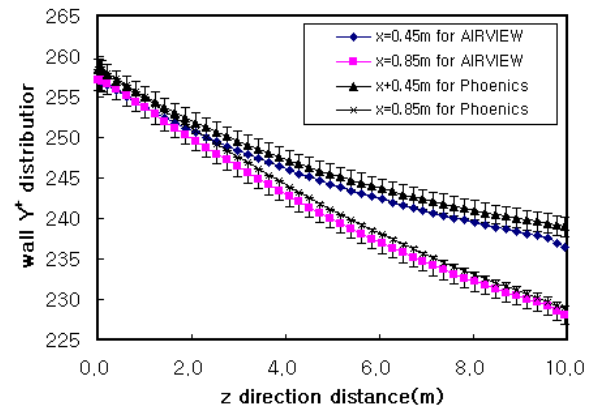


Fig. 2 Wall Y⁺ distribution along z direction distance for various x locations for condition 1.

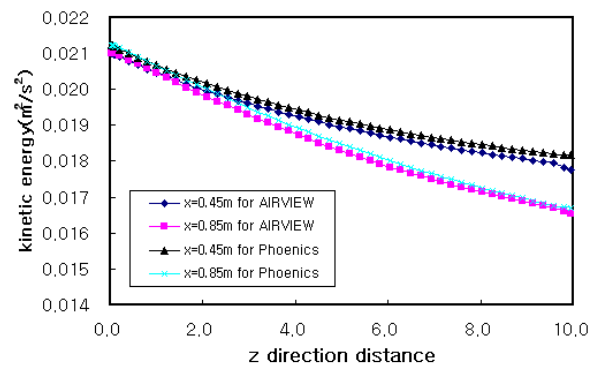


Fig. 3 Kinetic energy distribution along z

direction distance for various x locations for condition 1.

이로 인하여 덕트길이 변화에 따른 무차원거리 (Y^+)를 구한 동일한 지점의 난류에너지는 Fig. 3과 같이 입구효과를 나타내는 입구($z=0m$)에서 높은 값을 출구 쪽에서 낮은 값을 나타내며 덕트 폭의 중앙지점($x=0.5m$)부근에서 큰 값을 나타내고 있다. ㄱ자형 덕트인 해석조건이 condition 2의 무차원거리(Y^+)와 난류에너지는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내고 있다. 이 값을 나타내는 $x=0.45m$ 지점은 유동단면을 구성하는 수평면의 중앙부근이다. 또 벽체길이가 20m로 표현된 것은 10m이하의 수평면이고 10m이상은 수직면을 의미하는 것으로 10m지점이 수평면과 수직면이 공존하는 지점이 된다. Fig. 4에 나타난 무차원거리(Y^+)는 Fig.2와 다르게 현저히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 입구속도를 10m/s로 가정하였기 때문이다. 이 값은 전체적으로 11.5이상의 값을 나타내며 입구(0m)에서 유입된 유체가 수평면으로 이동하다가 수직면으로 상승되는 10m부근에서 이 값이 급격히 감소하다가 수직면의 상부로 이동하면서 이 값은 입구에서 나타난 무차원거리보다 큰 값으로 회복된 후, 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이러한 현상은 AIRVIEW와 Phoenix로 구한 결과가 동일하게 나타났다. 정확성관점에서 유동이 90°로 변화된 후, 지점에서 5%정도의 오차를 나타내고 있다.

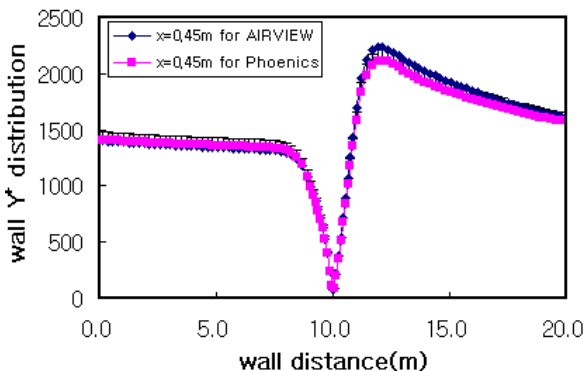


Fig. 4 Wall Y^+ distribution along wall distance parallel to clockwise flow direction for condition 2.

Fig. 5에 나타난 난류에너지의 분포는 Fig. 4에 나타난 무차원거리(Y^+)와 동일한 경향을 나타내

고 있으며 이로 인해, AIRVIEW와 Phoenix로 구한 결과에 대한 오차가 유동이 90°로 변화된 지점 부근에서 최대 10%발생정도 차이를 나타내고 있다.

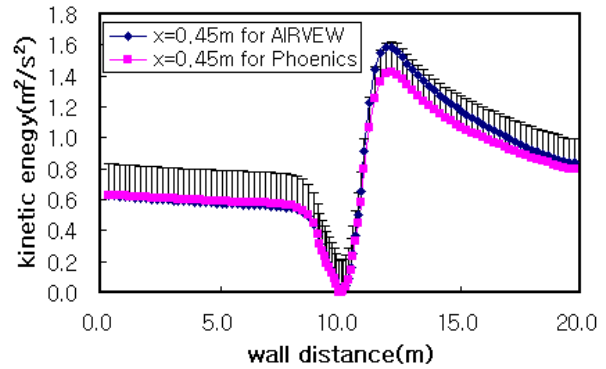


Fig. 5 Kinetic energy distribution along wall distance parallel to clockwise flow direction for condition 2.

ㄱ자형 덕트인 해석조건이 condition 3의 무차원거리(Y^+)와 난류에너지는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내고 있다. 이 값을 나타내는 $x=0.46m$ 지점은 유동단면을 구성하는 수평면의 중앙부근이다. 또 벽체길이가 30m로 표현된 것은 10m이하의 하부에 위치한 수평면이고 10m~20m범위는 수직면이며 20m이상은 상부에 위치한 수평면을 의미하는 것으로 10m과 20m지점은 수평면과 수직면이 공존하는 지점을 나타내는 것이다.

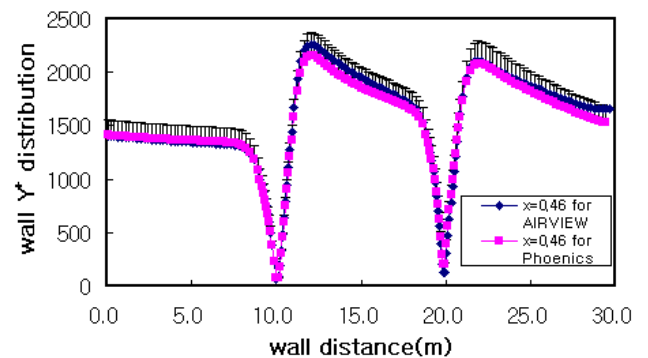


Fig. 6 Wall Y^+ distribution along wall distance parallel to clockwise flow direction for condition 3.

ㄱ자형 덕트에서 국소난류 Re수를 나타내는 무차원거리(Y^+)를 나타내는 이 값은 Fig. 6과 같이 유동방향이 90°로 변경되는 10m지점과 20m지

점에서 현저히 낮은 값을 나타내며 그 지점을 벗어난 영역에서는 거리변화에 따라 선형적으로 감소하는 현상을 나타내고 있다. 이는 유동방향이 90°로 변화되는 지점은 유속이 현저히 낮은 정체영역이 발생하기 때문이며 이 영역을 벗어나면 복귀 후, 직관의 저항으로 인해, 선형적으로 감소하기 때문이다.

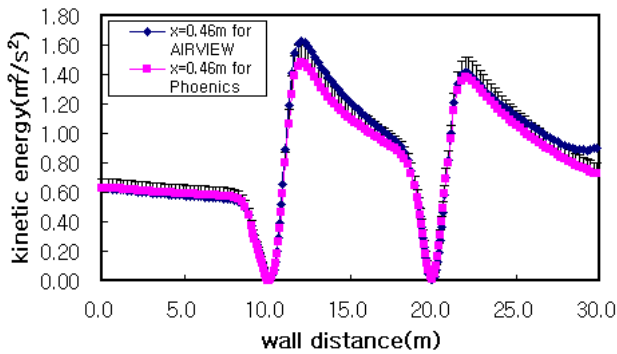


Fig. 7 Kinetic energy distribution along wall distance parallel to clockwise flow direction for condition 3.

Fig.8에서 Fig.10은 본 연구의 3종류의 해석조건에서의 해석된 속도분포의 결과를 Phoenix와 비교하여 나타내고 있다. 속도분포를 표현한 위치는 유동폭은 중앙영역($x=0.45\text{m}$ 혹은 $x=0.46$)이다. 해석 condition 1인 경우, Fig. 8과 같이 유사한 분포를 나타내고 있으며 벽체인접점의 속도분포는 Fig. 9와 같이 0.5%이하의 오차를 나타내고 있다.

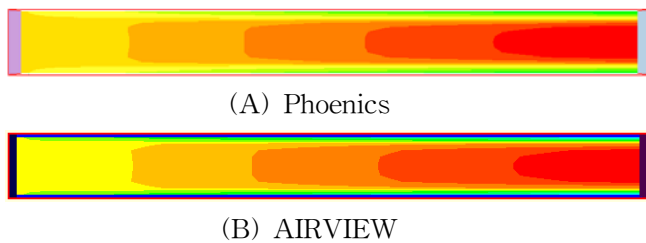


Fig. 8 Velocity contour at $x=0.45\text{m}$ for condition 1.

Fig.10은 해석조건이 condition 2인 경우, 유동단면의 수평면의 중앙지점에서 속도분포를 나타내고 있다. condition 2인 경우, 유동방향이 90°로 변환되는 코너부근에서 정체영역이 발생하며 최대속도발생지점 등 Phoenix의 해석결과와 전체

적으로 유사한 속도분포를 나타내고 있다. 최대속도를 나타내는 영역은 수직면과 수평면이 만나 유동방향이 90°로 변환된 만나는 수직벽체에서 나타나고 있으며 Phoenix로 해석한 결과와 비교한 결과, 최대값은 3%정도 차이난다. 이로 인하여

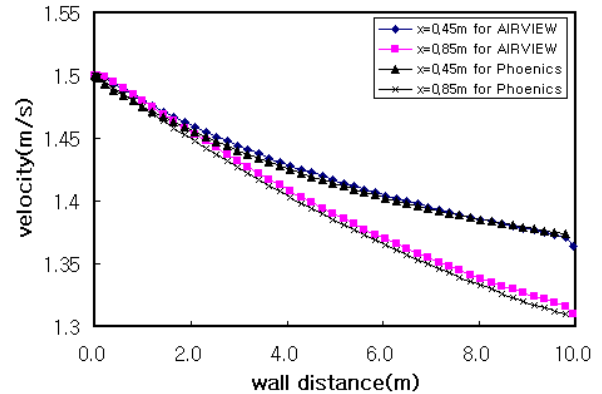
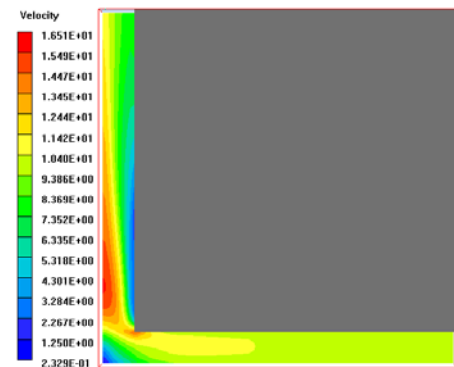
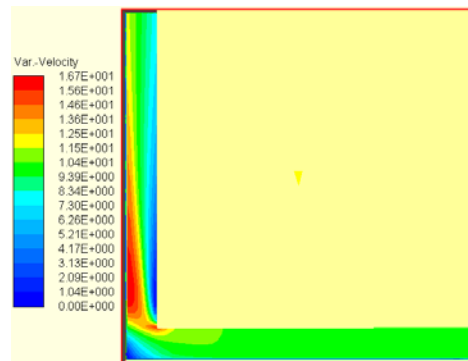


Fig. 9 Velocity parallel to wall along wall distance for condition 1.



(A) Phoenix

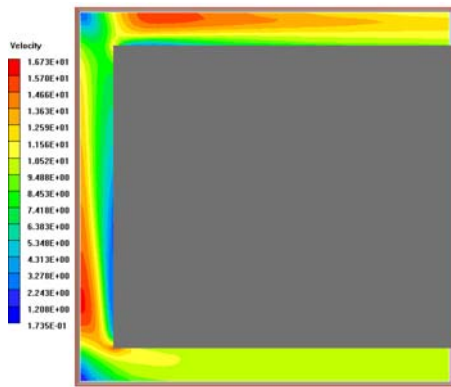


(B) AIRVIEW

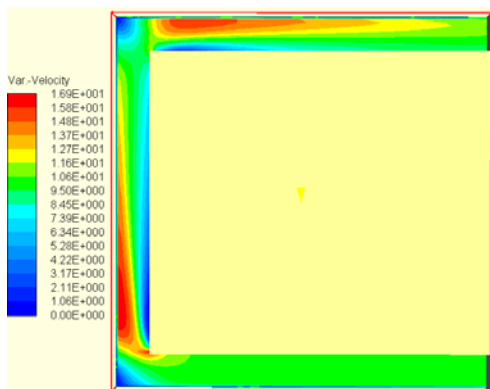
Fig. 10 Velocity contour at $x=0.45\text{m}$ for condition 2.

Fig. 11은 해석조건이 condition 3인 경우, 유동단

면의 수평면의 중앙지점에서 속도분포를 나타내고 있다. condition 3인 경우, condition 3과 유사하게 유동방향이 90°로 변환되는 코너부근에서 정체영역이 발생하며 최대속도발생지점 등 Pheonics의 해석결과와 전체적으로 유사한 속도분포를 나타내고 있다. 최대속도를 나타내는 영역은 수직면과 수평면이 만나 유동방향이 90°로 변환된 만나는 수직벽체에서 발생하고 있으며 최대유속이 5%정도 오차를 나타내고 있다.



(A) Phoenix



(B) AIRVIEW

Fig. 11 Velocity contour at $x=0.46m$ for condition 3.

5. 결론

3종류의 덕트형상에 대해, 유동현상을 해석하여 상용프로그램인 Phoenix와 무차원 길이와 난류에너지 및 속도분포를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 덕트형상의 종류와 관계없이 본 연구진이 개발한 AIRVIEW의 해석결과가 전체적으로 Phoenix의 해석결과와 유사한 경향을 나타내고

있어 건축기계설비분야의 공기분배성능해석에 적용하는 것은 큰 문제가 없는 것으로 예측하였다.

2) 유동방향이 90°로 변경되는 지점에서 난류에너지와 국소난류 Re수를 나타내는 무차원길이가 최대 10%까지 Phoenix보다 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이는 출구압력경계조건의 처리방법에 대한 차이점 때문으로 예측되며 출구압력경계조건의 처리기법에 대한 연구를 지속적으로 수행하여 수렴성이 향상될 수 있도록 보완할 예정이다.

3) 본 연구에서 정확성검토를 위해, 무차원길이 및 난류에너지만을 평가하였으나 압력분포, 난류에너지소산율 및 scalar방정식의 해석결과도 Phoenix해석결과와 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다.

References

1. Barker, A.J., and R.M. Kelso, 1990, On Validation of Computational Fluid Dynamics Procedures for Room Air Motion Prediction, ASHRAE Transaction, Vol.96, Part 1, pp760-774.
2. Lam, C.K.G., and K. Bremhost, 1981, A Modified Form of the $k-\epsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence, Transaction of the ASME, Vol.103, pp.456-460.
3. Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation.
4. Rodi, W., 1980, Turbulence Models For Environmental Problems, Prediction Methods of Turbulent Flows, Hemisphere Publishing Corporation.
5. Nielsen, P.V., A. Restivo and J.H. Whitelaw, 1979, Buoyancy-Affected Flows in Ventilated Rooms, Numerical Heat Transfer
6. Nielsen, P.V., 1988, Numerical Prediction of Air Distribution in Rooms-Status and Potentials, Building Systems : Room Air and Air Contaminant Distribution.