

# 유입부 형상이 저전압 전동기 냉각팬의 공력성능에 미치는 영향

박재민\* · 허만웅\* · 김광용\*\*†

## Effects of Inlet Vent Shape on Aerodynamic Performance of a Low-Voltage Electric Motor Cooling Fan

Jae-Min Park\*, Man-Woong Heo\*, Kwang-Yong Kim\*\*†

*Key Words* : Aerodynamic Performance(공력성능), Fan Cover(팬 덮개), Low-Voltage Electric Motor(저전압 전동기), Motor Cooling Fan(모터 냉각팬), RANS Equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

### ABSTRACT

Aerodynamic analysis of a low-voltage electric motor has been performed with various inlet vent shapes. Effects of inlet vent shape on aerodynamic performance of a motor cooling fan have been investigated numerically using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The k- $\epsilon$  turbulence model was used for the analysis of turbulence. The finite volume method and unstructured tetrahedral grids were used in the numerical analysis. Optimal grid system in the computational domain was selected through a grid-dependency test. From the results of the flow analysis, considerable energy loss by flow separation was observed in the flow passage. It was found that mass flow rate through the cooling fan in the low-voltage motor can be increased by modifying the inlet vent shape. And, some inlet vent shapes were suggested to improve the aerodynamic performance of the motor cooling fan.

### 1. 서 론

유도 전동기는 고정자에 교류 전압을 가하여 전자가 유도됨으로써 회전자에 전류를 흘려 회전력을 생기게 하는 전동기이며, 취급과 운전이 쉽고 값이 싸며 내구성이 좋기 때문에 가정이나 공장에서 가장 많이 사용된다. 전동기의 개발은 그 역사를 거슬러 올라가면 100년이 넘으며, 최근에는 자석과 전기 강판 등의 성능 향상과 각종 반도체 스위칭 소자의 발전에 힘입어 출력은 향상되고 크기와 무게는 감소된 제품이 개발되고 있다. 이러한 전동기의 소형 경량화로 인하여 전동기 내부와 외부의 온도가 상승하게 되는데 적절한 냉각이 이루어지지 않을 경우 전동기의 수명 단축과 효율 저감을 유발하는 원인이 된다. 이와 같은 이유로 유도 전동기의 성능을 유지하기 위해서는 냉각팬을 사용한 효과적인 냉각 시스

템에 관한 연구가 필요하다.

최근 컴퓨터 성능의 발전으로 전산유체역학(CFD)을 기반으로 한 삼차원 수치해석을 통하여 저전압 전동기의 냉각 성능 향상을 위한 연구가 수행되고 있다. Li 등<sup>(1)</sup>은 마그넷 전동기의 임펠러 형상 변화에 따른 공력학적 성능에 관한 연구를 수행하였고, Grimes 등<sup>(2)</sup>은 모터를 냉각시키는 축류 팬의 형상이 성능에 미치는 영향을 수치해석과 실험을 통해 규명하고자 하였다. Chang 등<sup>(3)</sup>은 대형 전동기 덮개 내부에 설치되어 있는 가이드 베인의 모양과 개수에 따라 유량의 변화를 평가하는 연구를 수행하였다. Farsane 등<sup>(4)</sup>은 전동기 몸체 부분의 핀 배열에 따른 전동기의 온도 변화 특성을 실험을 통해 조사하였다. Staton 등<sup>(5)</sup>은 3상 유도전동기의 회전수에 따른 유속 측정 및 열 성능 특성 변화를 분석하기 위한 실험을 하였고, Staton과 Cavagnino<sup>(6)</sup>는 전동기에 부착되어 있

\* 인하대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University)

\*\* 인하대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Inha University)

† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

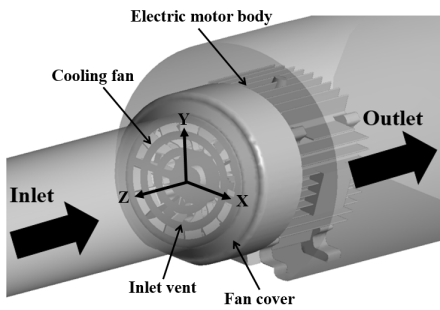


Fig. 1 Computational domain of a low-voltage electric motor

는 핀의 배열 및 형상에 따른 열전달 변화를 분석하였다. 이와 같이 이전의 연구들은 전동기 냉각팬의 임펠러나 전동기 냉각팬의 형상 변화에 따른 성능특성에 대해 주로 수행되었다. 공기가 유입되는 냉각팬의 입구부에 대한 연구는 체계적으로 진행되지 않았다. 하지만 입구부는 유입되는 공기의 유량에 민감한 영향을 미치는 부분이므로, 입구부 형상에 대한 체계적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 저전압 전동기용 냉각팬의 팬덮개(fan cover)위에 설치된 공기 유입부(inlet vent) 형상이 공력학적 성능에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 전동기 냉각팬의 공력성능을 분석하기 위하여 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 해석을 수행하였으며, 11가지의 냉각팬 입구부 형상에 대해 냉각팬의 공력학적 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 유동해석방법

본 연구에서는 저전압 전동기의 공기 유입부 형상에 따른 냉각팬의 공력학적 특성을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하고 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-15.0<sup>(7)</sup>을 사용하여 삼차원 정밀 유동해석을 수행하였다.

본 연구 대상인 저전압 전동기의 유동해석을 위한 계산영역은 Fig. 1에 도식화하였다. 선행연구<sup>(8)</sup>에서 서로 다른 계산영역에 대해 실험값과 수치해석 결과를 비교하였으며, 이 두 결과가 가장 잘 일치하는 경우의 계산영역을 본 계산의 계산영역으로 설정하였다. 유동방향은 z 축의 음의 방향이다. 계산영역은 입구부 덕트, 전동기용 냉각팬, 그리고 전동기 몸체 등 세 부분으로 구성하였다. 전동기용 냉각팬은 15개의 임펠러 날개를 갖고 임펠러 날개 끝단에서의 회전속도는 21.67m/s, 작동유량계수는 0.084이다. 팬에 대한 자세한 설계사양은 Table 1에 기술하였으며, 본 연구에 사용된 팬날개의 날개 형상을 Fig. 2에 도식화하였다.

유동해석을 위해 전동기 냉각팬을 통과하는 작동유체는 표준상태의 25℃ 공기로 가정하였으며, 계산 영역의 입구와

Table 1 Design specifications of the cooling fan for low-voltage motor

Tip speed, m/s	21.67
Motor height ratio (Impeller diameter / Frame height)	0.861
Flow coefficient	0.084
Number of blades, EA	15

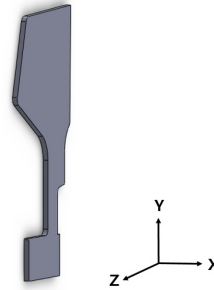


Fig. 2 Blade of cooling fan

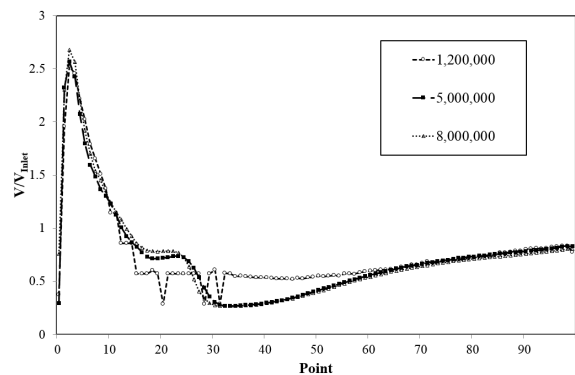


Fig. 3 Results of grid-dependency test

출구에는 각각 전압력(total pressure)과 정압력(static pressure) 경계조건을 적용하였다. 회전영역과 고정영역 사이의 경계면 처리는 격자면에서 계산값을 그대로 정지좌표계에 입력 값으로 사용하는 방식인 고정회전자 기법(frozen-rotor method)을 적용하여 계산을 수행하였으며, 모든 벽면에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 반복계산은 질량보존방정식의 RMS(root mean square) 잉여값(residual)이 10E-05 이하가 되었을 때 수렴되었다고 판정하였다.

유동해석을 위한 삼차원 RANS 방정식은 유한체적법으로 이산화되었으며, 한번의 해석에는 Intel(R) core(TM) i7-3930K CPU를 사용하여 약 15-18시간이 걸렸으나 계산시간은 공기 유입부 형상에 따라 다소의 차이를 보였다.

### 2.2 격자의존성테스트 및 난류모델

본 연구의 수치해석을 위한 격자의존성 테스트의 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림은 전동기 외부에 설치된 핀들

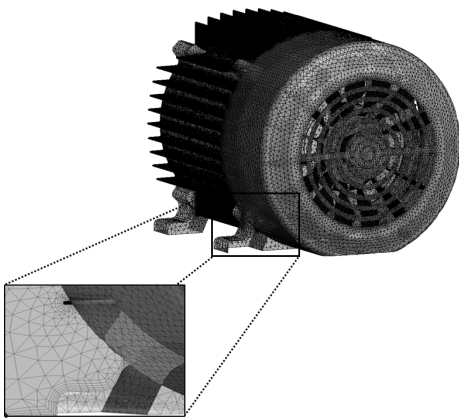
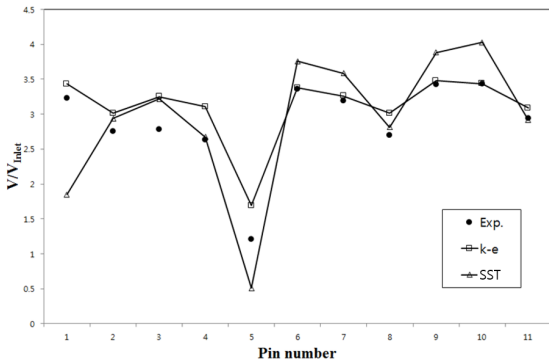
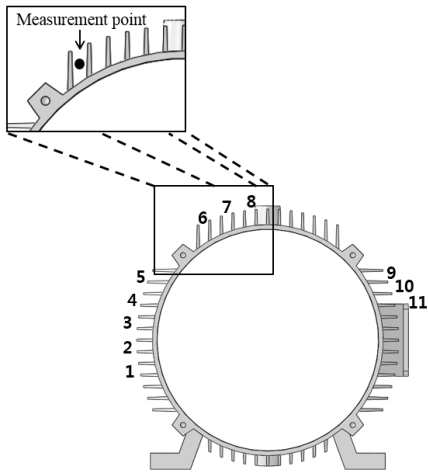


Fig. 4 Structure of the grid system



(a) Predictions of different turbulence models compared to experimental data



(b) Locations of pin numbers

Fig. 5 Results of turbulence model test

중 가장 위쪽에 위치한 두 개의 핀 사이에서 z 방향 100개의 점에서 속도를 나타내고 있다. 속도는 덕트 입구 속도로 무차원화되었다. 120만, 500만, 그리고 800만 개 등 세 가지의 격자수에서 격자의존성 테스트를 수행한 결과 약 500만 개의 격자를 계산의 경제성을 고려한 최적의 격자로 결정하

였고, 이를 사용한 격자계의 구성을 Fig. 4에 나타내었다.

해석에 사용할 난류모델을 결정하기 위해 Fig. 5와 같이 두 가지 난류모델, 즉 SST 모델과 k-ε 모델을 적용한 유동 해석을 각각 수행하여 해석 결과를 실험치와 비교하였다. 실험치는 저전압 전동기 몸체의 각 핀 사이에서 측정된 속도 값으로 측정위치를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 실험치는 선행연구(8)에서 얻은 결과이며, 3상 인버터를 이용하여 웬이 일정한 회전수로 회전할 때 전동기 벽면으로부터 수직으로 1.5 cm 떨어진 지점에서 Testo 425 열선풍속계에 의해 측정되었다.

난류 모델 테스트를 위하여 벽으로부터 첫 번째 격자의 위치에 대하여 SST 난류모델은 y+ 최대 값을 1 이하로 유지되도록 하여 저레이놀즈수 SST모델이 적용되도록 하였고, k-ε 난류모델을 사용할 경우에는 y+를 20보다 크게 격자계를 구성하여 벽근처에서 실험적인 벽함수(wall function)가 적용되도록 하였다. 난류모델 테스트 결과는 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 k-ε 난류모델을 사용한 유동해석 결과가 SST 모델을 사용한 결과와 비교하여 전반적으로 실험 데이터와 더 잘 일치하는 경향을 보였으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 k-ε 난류모델을 해석을 위한 난류 모델로 선정하였다. k-ε 모델에 의한 해석결과는 1-5번 핀 위치에서 실험치와 정량적인 차이를 다소 보이고 있으나 정성적인 분포에 있어 실험치와 잘 일치하고 있다.

### 3. 형상변수 및 성능함수

본 연구에서는 전동기용 냉각웬의 공기 유입부 형상변화에 따른 웬의 성능 변화를 분석하기 위하여 유입부

의 11가지 형상에 대해 공력성능을 평가하였다. 유입부 형상 변화에 따라 유입부의 단면적 변화의 영향을 배제하기 위해 선행연구(8)에서의 유입부의 단면적과 11가지 형상의 유입부 형상의 면적을 일정하게 유지시켰다.

냉각웬의 공기 유입부 형상은 상하와 좌우 모두 대칭이 되도록 설계하여 임펠러가 정방향이나 역방향으로 회전하여도 공력 성능에는 영향을 미치지 않도록 하였다. 본 연구에서 고려한 11 가지 공기 유입부 형상들을 Fig. 6에 나타내었다.

유입부 형상에 따른 공력성능을 평가하기 위해 아래의 식 (1)과 (2)에서 각각 정의한 유량계수(flow coefficient)와 토크계수(torque coefficient)<sup>(9)</sup>를 성능변수로 사용하였다.

$$\varphi = \frac{\pi}{4} \frac{\dot{m}}{\rho} D^2 U \quad (1)$$

$$C_Q = \frac{T}{\rho(\omega R)^2 \pi R^2} \quad (2)$$

여기서 ρ는 공기의 밀도를 나타내며, U(=ωR)는 날개 끝에

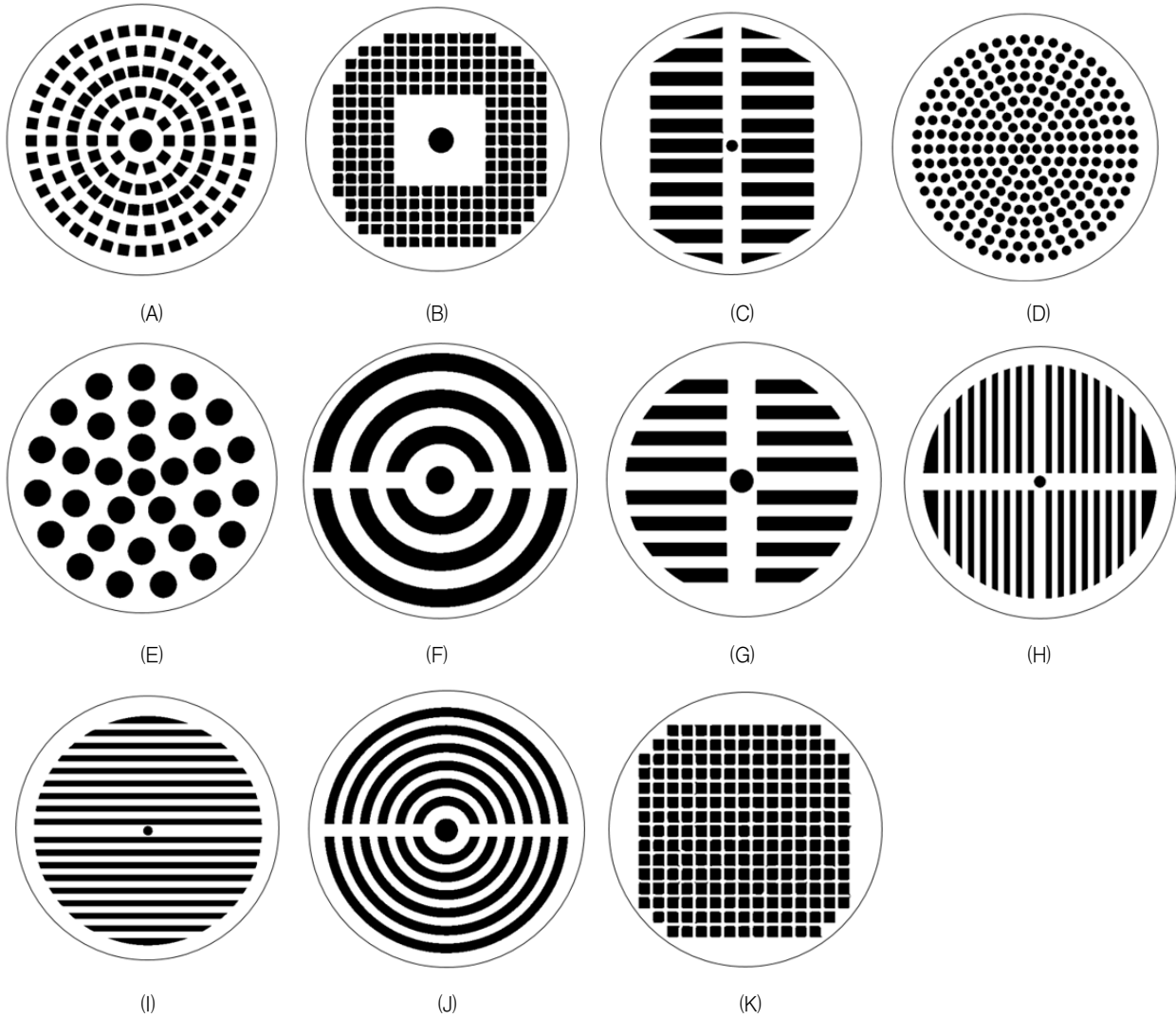


Fig. 6 Tested inlet vent shapes

서 회전속도,  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $D$ 는 임펠러의 직경,  $R$ 은 임펠러의 반지름,  $\omega$ 는 각속도,  $T$ 는 임펠러 토크를 나타낸다.

아울러, 위와 같이 정의되는 유량계수를 토크계수로 단순히 나눈 것을 식 (3)과 같이  $MT$ 로 정의하였다.

$$MT = \frac{\varphi}{C_Q} \quad (3)$$

#### 4. 결과 및 검토

본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 저전압 전동기에서 공기 유입부 형상이 냉각팬의 공력성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 6에 나타난 11가지 유입부 형상을 테스트하였다.

Fig. 7은 전동기용 냉각팬의 공기 유입부 형상 변화에 따른 유량계수의 변화를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 Case

J의 유입부 형상이 본 연구에서 고려한 형상들 중에서 가장 큰 유량계수 값인 0.0852를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, Case E의 형상이 가장 작은 유량계수 값인 0.0739를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 고려한 11개의 형상 중 가장 큰 유량계수 값을 갖는 Case J와 가장 작은 유량계수 값을 갖는 Case E가 약 15.3%의 큰 유량계수 값 차이를 나타내고 있어 유입부 형상이 유량 계수에 매우 민감한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

냉각팬의 공기 유입부 형상 변화에 따른 토크계수 변화는 Fig. 8에 나타나 있다. 이 그림에서 Case K의 토크 계수가 0.0107로 가장 크고, Case A의 토크 계수가 0.0095로 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 이 두 가지 경우에서도 토크계수 값의 차이가 약 11.6%에 달해 유입부 형상은 토크계수에 대해서도 민감한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. Fig. 7과 8을 비교해 볼 때 예외가 없는 것은 아니지만 대부분의 경우 유량계수가 증가함에 따라 토크계수도 증가함을 알 수 있다.

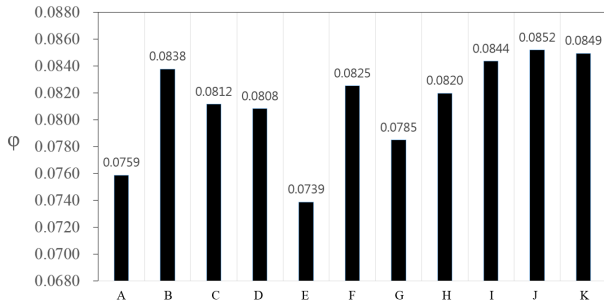


Fig. 7 Mass flow coefficients for various inlet vent shapes

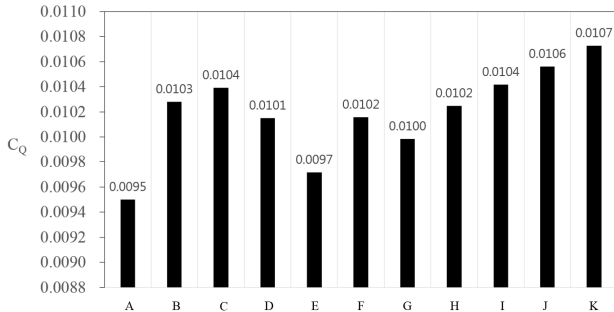


Fig. 8 Torque coefficient for various inlet vent shapes

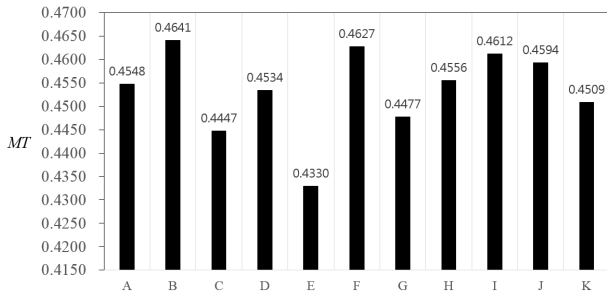
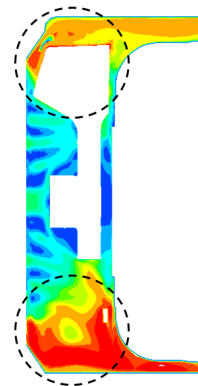


Fig. 9 Variation of MT ( $MT = \varphi / C_Q$ )

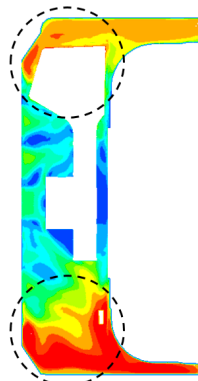
상충되는 두 성능변수(유량계수와 토크계수)를 감안하여 새롭게 정의한 성능변수,  $MT$ 를 Fig. 9에 나타내었다. Case B가 가장 큰 값인  $MT=0.4641$ 을 갖고, Case E가  $MT=0.4330$ 으로 가장 작은 값을 갖는 것을 확인하였다. 이를 통하여, Case B의 유량계수와 토크계수를 종합한 성능이 가장 우수하고, Case E의 경우 유량계수와 토크계수 성능이 가장 낮음을 알 수 있다.

Fig. 10은 냉각팬의 공기 유입부 형상 변화에 따른  $y-z$ 평면에서의 속도 분포를 보여준다. Case J는 다른 형상들과 비교하였을 때, 임펠러 상단과 하단(원형 점선)에서 높은 속도 영역이 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 유입부 면적이 같음에도, 형상에 따라 유입되는 유동의 속도가 달라져 유량의 차이가 나타난다는 것을 알 수 있다. 이에 따른 유량의 차이는 Fig. 7에 나타나 있다.

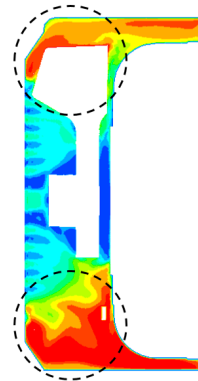
저전압 전동기용 냉각팬의 유입부 형상 변화에 따른 임펠러의 90% 스펠(span)에서의 유선분포는 Fig. 11에 나타내었



(a) Case A



(b) Case E



(c) Case J

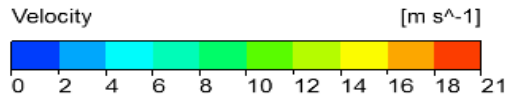
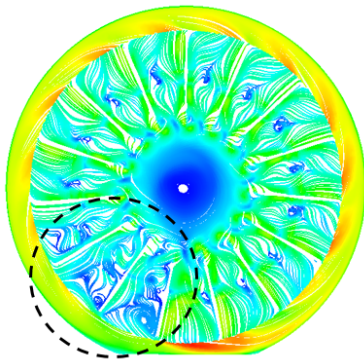
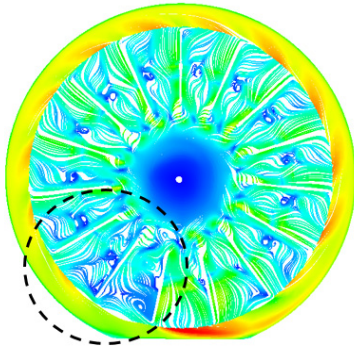


Fig. 10 Velocity contours on  $y-z$  plane at  $x=0$  for different inlet vent shapes

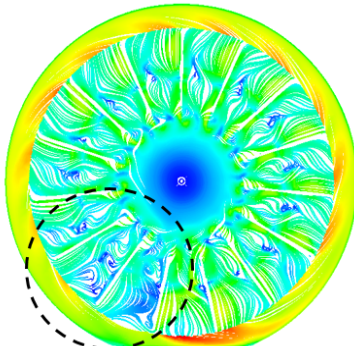
다. Fig. 7에서 가장 큰 유량을 갖는 Case J의 경우 임펠러 내부 유로(원형 점선)에서 와류(vortex)가 다른 형상들에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것을 Fig. 11(c)에서 확인할 수 있다. 이로부터 임펠러 내부 유로에서 발생하는 와류의 크기가 작아지면서 손실이 감소되어 냉각팬의 유량이 증가된다



(a) Case A



(b) Case E



(c) Case J

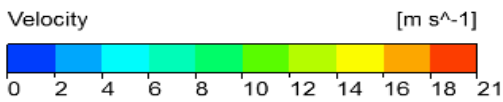
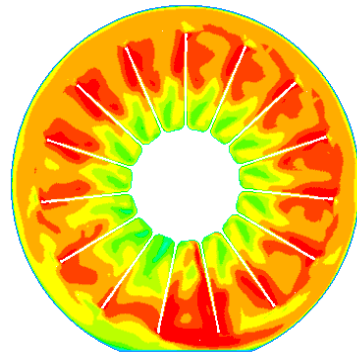
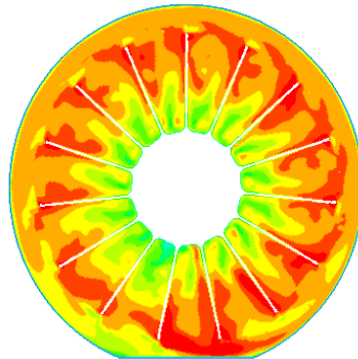


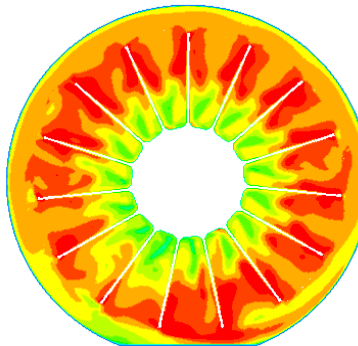
Fig. 11 Streamlines at 90% blade span for different inlet vent shapes



(a) Case A



(b) Case E



(c) Case J

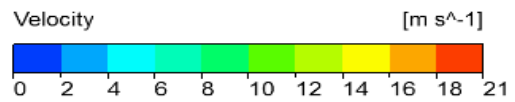


Fig. 12 Velocity contours at 80% blade span for different inlet vent shapes

는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 임펠러의 80% 스펠에서의 속도분포를 나타내고 있다. 유량계수가 가장 큰 Case J는 Fig. 12(c)에서 보는 바와 같이 블레이드 사이에서 비교된 다른 형상들에 비해 전체적으로 높은 속도 영역이 가장 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 Fig. 7에서 보는 것과 같이 Case J

의 유량계수가 가장 크고, Case E의 유량계수가 가장 작은 것을 알 수 있다. 날개 끝 부분의 속도 차로 인해 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 이 부분과 인접한 모터 몸체 외부 통로를 통과해 이동하는 공기의 유량에 차이가 나타나고 있다.

Fig. 13은 공기 유입부 형상 변화에 따른 y-z평면에서의 압력 분포를 보여준다. Fig. 13(c)와 같이 Case K의 경우 냉

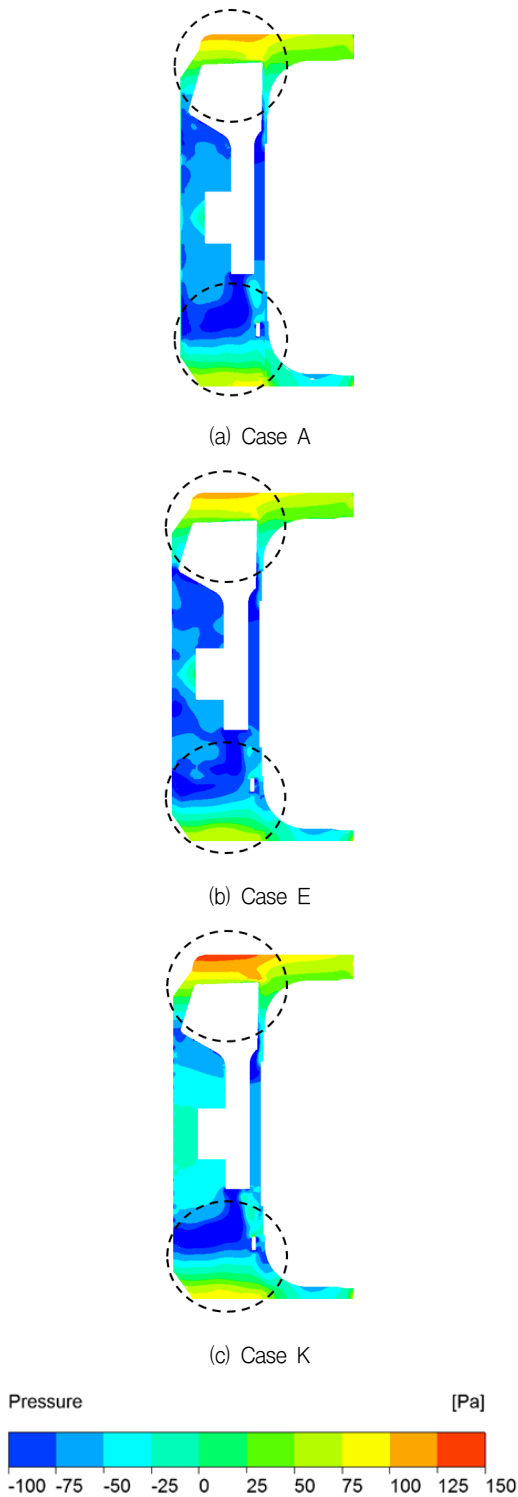


Fig. 13 Pressure contours on y-z plane for different inlet vent shapes

각각의 유입부를 지나면서 Case A 와 E(Fig. 13(a)와 (b))에 비해 임펠러 상단과 하단(원형 점선)에서 압력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 팬 날개에 미치는 힘을 증가시켜 Fig. 8에서 보는 것과 같이 다른 형상들과 비교 하였을 때, Case K의 토크계수가 가장 큰 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 저전압 전동기용 냉각팬의 공기 유입부 형상이 냉각팬의 공력성능에 미치는 영향을 삼차원RANS해석을 이용하여 평가하였다. 난류모델 시험에서는 저레이놀즈 수 SST모델에 비해 실험치에 보다 접근하는 결과를 보인 k-ε 모델을 본 연구의 난류모델로 선정하였다. 총 11개의 냉각팬 유입부 형상을 시험하였으며, 이 형상들에 있어 공기가 유입되는 유로의 총 단면적을 일정하게 유지하였다. 성능변수로는 유량계수와토크계수를 사용하였는데 유입부의 형상은 이 두 변수에 대해 모두 민감한 영향을 미쳤다. 유량계수가 가장 큰 Case J의 토크계수는 11개의 형상 중에서 두 번째로 컸으며, 토크계수가 가장 작은 Case A의 경우 유량계수가 두 번째로 작은 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 유량계수가 증가할 때 토크계수도 같이 증가하는 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 아울러, 상충되는 유량계수와 토크계수를 종합한 성능을 나타내 주기 위해 정의한 새로운 성능변수 MT를 비교해 본 결과, Case B가 가장 우수한 성능(MT=0.4641)을 보이고, Case E가 가장 낮은 성능(MT=0.4330)을 보였다. 공기 유입부 면적이 일정함에도 불구하고 유입부 형상에 따라 유량계수와 토크계수 모두 큰 차이를 보인 것은 유입부 형상이 팬덮개 내부의 유동구조에 민감한 영향을 미쳤기 때문이다. 내부 유동장을 비교한 결과, 유량계수가 작은 형상들은 손실을 유발하는 와류와 같은 복잡한 유동구조가 다른 형상들에 비해 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여, 냉각팬의 공기 유입부 형상은 냉각팬 형상에 못지 않게 전동기의 냉각성능에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 본 연구결과를 바탕으로 향후 최적설계 기법을 적용하여 유입부의 형상을 최적화하는 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- (1) Li, H., 2010, "Cooling of a Permanent Magnet Electric Motor with a Centrifugal Impeller," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 4, pp. 797~810.
- (2) Grimes, R., Davies, M., Punch, J., Dalton, T., and Cole, R., 2001, "Modeling Electronic Cooling Axial Fan Flows," Journal of Electronic Packaging, Vol. 123, No. 2, pp. 112~119.
- (3) Chang, C. C., Kuo, Y. F., Wang, J. C., and Chen, S. L., 2010, "Air Cooling for a Large-Scale Motor," Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1360~1368.
- (4) Farsane, K., Desevaux, P., and Panday, P. K., 2000,

- “Experimental Study of the Cooling of a Closed type Electric Motor,” Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 14, pp. 1321~1334.
- (5) Staton, D., Boglietti, A., and Cavagnino, A., 2005, “Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors,” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 20, No. 3, pp. 620~628.
- (6) Staton, D. A. and Cavagnino, A., 2006, “Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Analytical Modelling of Electric Machines,” IEEE Industrial Electronics Conference, Paris, France, pp. 4841-4846.
- (7) ANSYS CFX-15.0, 2014, Ansys inc.
- (8) Park, J. M., Heo, M. W., Kim, K. Y., Shim, H. S., Choi, J. U., and Lee, J. Y., 2015, “Aerodynamic Characteristics of a Cooling Fan in a Low-voltage Electric Motor,” Proceedings of the Fan 2015 Conference, Lyon, France, 7 Pages.
- (9) Dingeldein, R. C., 1954, “Wind-tunnel Studies of the Performance of Multirotor Configurations,” NACA TN-3236.