

## 환기용 축류송풍기의 유동해석 및 모터 위치에 따른 성능 특성 연구

김재우\* · 김진혁\* · 김광용\*\*†

### Flow Analysis and Performance Evaluation of a Ventilation Axial-Flow Fan Depending on the Position of Motor

Jae-Woo Kim\*, Jin-Hyuk Kim\*, Kwang-Yong Kim\*\*†

*Key Words* : Ventilation Axial-flow Fan(환기용 축류송풍기), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Turbulence Model(난류모델), Performance characteristics(성능 특성).

#### ABSTRACT

Flow analysis and performance evaluation have been performed for a ventilation axial-flow fan with different positions of the motor. Two different positions of motor have been tested; one is in front of the impeller and the other is behind the impeller. Flow analyses are performed by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations through a finite-volume solver. Preliminary numerical calculations are carried out to test the performances of different turbulence models, i.e., SST model,  $k-\omega$  model, and  $k-\epsilon$  model with and without using empirical wall function in the flow analysis. The validation of numerical analyses has been performed in comparison with the experimental data. The numerical results for the performance characteristics of the ventilation axial-flow fan with two different positions of the motor have been presented.

#### 1. 서론

고풍량 특성을 갖는 축류송풍기는 주거환기용에서부터 항공 엔진에 이르기까지 다양한 목적으로 널리 사용되어지고 있다. 사용되는 분야 및 목적의 다양성으로 인해 축류송풍기 설계는 매우 다양하게 이루어지고 있고, 고효율 설계를 위한 공력해석의 정확성에 대한 요구가 갈수록 높아지고 있다. 최근 발전하고 있는 전산유체역학(CFD)적 삼차원 유동해석 기법은 이러한 요구에 부응하는 정밀한 해석수단을 제공하고 있다.

급속히 발전하는 컴퓨터성과 더불어 전산유체역학을 기초로 하는 삼차원 수치해석은 복잡한 터보기계 내부의 유동을 해석할 수 있는 유용한 도구로써 그 실용성이 증대되고 있다. 삼차원 수치해석을 통해 내부 유동구조를 예측함으로써 관련기계의 공력 성능을 정밀하게 분석하여 설계에 응용

할 수 있다. 최근에는 더 나아가 삼차원 수치해석과 최적화 기법을 조합한 수치최적설계를 수행하여 성능을 효과적으로 최적화하는 사례도 많은 연구자들에 의해 보고되고 있다. 이러한 목적으로 수치계산의 정확성에 대한 요구도 점차 증가되고 있는 실정이다<sup>(1~2)</sup>.

난류모델로서 기존의 와점성계수(eddy viscosity)를 도입한 2-방정식 모델들은 대부분 역압력 구배에 의해서 발생하는 유동 박리를 예측하는데 어려움을 겪었으나, Menter<sup>(3)</sup>는 SST(shear stress transport)모델을 제안하여 난류 전단 응력의 수송에 대한 영향을 고려하도록 하여 유동의 박리를 비교적 정확히 해석할 수 있도록 하였다. Choi 등<sup>(4)</sup>은 상용 CFD 코드에서 사용 가능한 다양한 수치기법과 난류모델 및 격자계 등을 변화시켜가며 원심펌프 임펠러의 내부 유동장 해석을 수행하였고, 그 결과를 성능시험 결과와 비교 분석하였다.

축류송풍기의 성능은 주변장치들에 의한 입구나 출구유동의 교란으로부터 민감한 영향을 받는다. 예를 들어, 송풍기 유입구의 허브 형상이나 설치된 모터 위치에 따라 입구유동은 영향을 받을 수 있다. Jang 등<sup>(5)</sup>은 허브형상에 따른 입구유동의 불균일 특성이 축류송풍기의 성능에 미치는 영향을

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

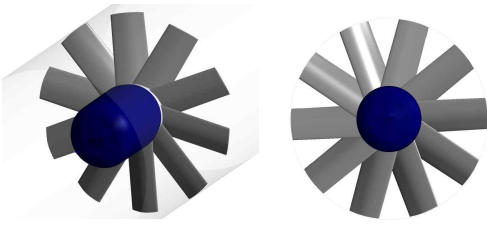


Fig. 1 Diagram of the ventilation axial-flow fan

Table. 1 Design specifications of the ventilation axial-flow fan

|                      |      |
|----------------------|------|
| Flow coefficient     | 0.20 |
| Pressure coefficient | 0.16 |
| Rotating speed, rpm  | 1100 |
| Tip diameter, mm     | 506  |
| Hub diameter, mm     | 150  |
| Tip clearance, mm    | 2    |
| Number of blades     | 10   |

수치해석을 통해 고찰하였다. 그들은 서로 다른 형상을 갖는 허브 캡을 장착하여 그에 따른 입구 측의 불균일 유입이 유동장에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Jiang 등<sup>(6)</sup>은 저속 축류압축기에서 입구의 불균일한 조건에 따른 효율, 전압상승 및 실속구간 등의 유동 특성에 대해 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 환기용 축류송풍기에 대하여 유동 특성을 파악하고자 삼차원 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용한 수치해석을 수행하였다. 정확한 수치해석을 위해 난류모델 및 벽 근처의 격자구성을 변화시켜가며 삼차원 수치해석을 수행하였고, 그에 따른 결과를 토대로 모터 위치 변경에 따른 수치해석을 수행하여 성능곡선 상의 각 유량계수에서 압력계수 및 효율과 같은 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 축류송풍기 사양

본 연구에서는 환기용 축류송풍기를 대상으로 삼차원 정상상태 수치해석을 수행하였으며, Fig. 1에 본 연구대상인 축류송풍기의 3차원 형상을 도시하였다. 현 설계점에서의 유량계수( $\phi$ ) 및 정압계수( $\Psi$ )는 각각 0.2 및 0.16이고, 팁 간극(2mm)을 포함한 케이싱 직경은 510mm이며, 날개에 NACA 6509 계열의 익형을 사용하였고, 상세한 사양은 Table 1에 수록하였다.

## 3. 수치해석방법

### 3.1 유동해석방법

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0<sup>(7)</sup>을 사용하여 축류송풍기의 내부유동장을 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 수치

해석을 수행하기 위한 축류송풍기의 형상 정의, 격자생성, 경계 조건의 정의, 유동해석 및 결과정리는 각각 Design-Modeler, Blade-Gen, Turbo-Grid, CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.

유동해석을 위한 삼차원 RANS 방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 송풍기를 통과하는 작동유체는 표준상태의 25°C 공기로 하였다. 입구의 경계조건은 균일한 상태의 전압력을 주었고, 출구조건으로는 질량유량을 주었으며, 임펠러 회전 속도는 실험에서 회전수 속도계를 통하여 얻어진 조건을 적용하였다.

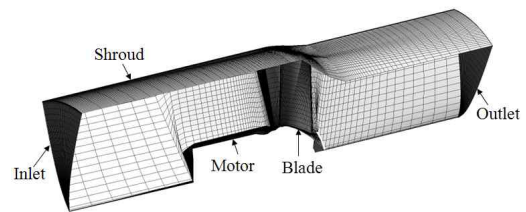
해석대상인 축류송풍기는 날개가 10개로 구성이 되어있으나, 계산시간의 단축과 수렴성 향상을 위해 인접하는 두 날개 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 날개와 날개 사이 하나의 유로에 대해서 주기조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 격자계 구성

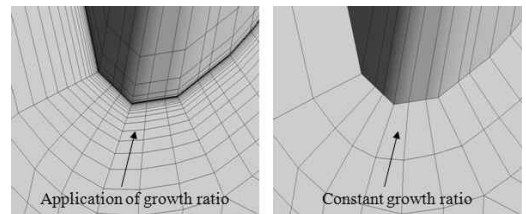
본 연구에서 사용된 상용코드 ANSYS CFX-11.0에서는 벽 근처 격자를 구성할 때 벽으로부터 첫 번째 격자의 위치가  $y^+ < 2$ 의 조건을 만족할 경우 저레이놀즈수(low-Reynolds number) 모델이 적용되고, 이 조건을 만족하기 위해서는 경계층(boundary layer) 내에 적어도 10개 이상의 격자를 구성하는 것이 요구되며, 또한 벽함수(wall function)가 적용되기 위해서는 벽으로부터 첫 번째 격자의  $y^+$  값이 20에서 100 사이에 분포되는 것이 요구된다<sup>(7)</sup>.

본 연구에서는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 다양한 난류모델 적용과 함께 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델 및 벽함수를 선택적으로 적용하기 위해 각 축류송풍기의 날개 벽 근처에 두 종류의 격자계를 구성하였다.

따라서 저레이놀즈수 모델을 적용하기 위해 벽에서 첫 번째



(a) Computational domain



(b) Low-Re number model (c) Wall-function model

Fig. 2 Structure of the grid system

제 격자점의  $y+$  최대값을 1미만으로 설정하였고, 벽함수를 적용하기 위해 허브 근처에서 낮은 속도가 발생하는 일부구역을 제외한 구역에서 30이상의  $y+$  값을 갖도록 격자계를 구성하였다<sup>(4)</sup>.

해석대상인 축류송풍기의 전 영역에 대해서 육면체 격자계로 구성을 하였다. 저레이놀즈수 모델을 사용할 경우 회전하는 날개면 인근에는 O형 격자계를 사용하였고, 그 외의 영역에는 H/J/C/L형 격자계를 사용하였다. H/J/C/L형 격자계는 기존의 H형 격자계에서 진보된 격자계로써 전연 및 후연 부근에서는 날개의 허브 및 팁의 단면이 놓여진 각도에 따라 H, J 및 L형 격자계가 선택적으로 적용되고, 비교적 격자가 구성되기 어려운 모서리 부분에 격자의 구성을 정밀히 하기 위해 C형 격자계가 적용되는 격자계이다<sup>(7)</sup>.

### 3.3 난류모델

본 연구에서는 RANS 방정식 내 레이놀즈응력항의 난류단립(turbulence closure) 문제를 해결하기 위해 상용코드 ANSYS CFX-11.0에서 주로 사용하는 와점성 난류모델 중  $k-\omega$ ,  $k-\epsilon$  및 SST모델을 사용해 수치해석을 수행하여 그 성능을 비교 평가하였다.

$k-\omega$ 모델<sup>(8)</sup>은 일반적으로 역압력 구배의 해석에서 뛰어난 정확성을 가지지만 박리에 의한 특성을 해석하는 데는 어려움이 수반된다. 그러나 벽 근처에서 복잡한 감쇄함수를 필요로 하지 않으므로 저레이놀즈 영역의 유동을 해석할 경우에는 유용하다. 본 연구에서는  $k-\omega$ 모델 사용 시 벽 근처 영역에 저레이놀즈수 모델이 적용되도록 격자를 구성하여 해석을 수행하였다<sup>(9)</sup>.

$k-\epsilon$ 모델<sup>(10)</sup>은 외부 경계층의 해석에 뛰어난 성능을 지닌다. 경계층을 제대로 해석하기 위해서는 벽 근처에도 격자를 비교적 조밀하게 배치해야 하는데 이 경우 벽 근처 격자의  $y+$ 가 작아지게 되고 일반적인 벽함수가 적용될 경우 오차가 커지게 된다. ANSYS CFX-11에서는  $k-\epsilon$ 모델에 대해, 벽 근처영역에서 수정된 벽함수(scalable wall function)가 적용되어 격자점 $y+$ 의 최소값이 항상 층류저층과 대수영역의 경계값인 11.06 이하가 되지 않도록 제한을 하여 계산을 수행한다. 본 연구에서도  $k-\epsilon$ 모델에 대해 벽 근처에서 수정된 벽함수를 적용하여 해석을 수행하였다<sup>(7)</sup>.

SST모델<sup>(11)</sup>은 일반적으로 역압력 구배로 인한 유동박리현상을 예측하는데 있어 다른 2-방정식 난류모델들에 비해 성능이 우수하고, 난류 전단응력의 수송을 고려한 와점성의 예측을 통해 실속 등의 성능을 정확하게 예측한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 SST모델 사용 시 벽 근처 영역에서 벽함수와 저레이놀즈수 모델이 선택적으로 적용되도록 각각의 격자를 구성하여 해석을 수행하였다.

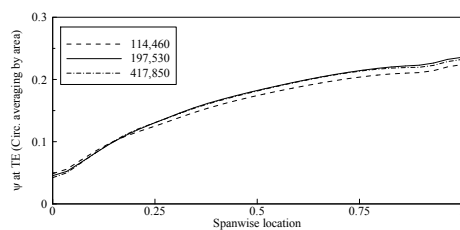
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 유동해석에 대한 난류모델의 영향

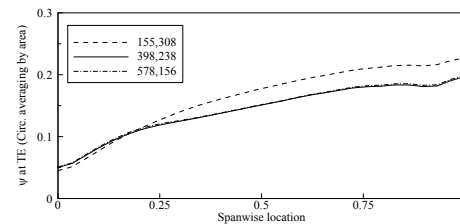
본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 SST모델과 함께 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델 및 벽함수를 선택적으로 적용하여 해석을 수행하기 위해 Fig. 2와 같이 두 가지 격자구조를 갖는 격자계를 구성하였다. SST모델과 함께 벽 근처영역에서 벽함수를 적용시키기 위한 모델의 계산에 사용된 격자수는 Fig. 3(a)의 날개면 인근 격자점의 평균  $y+$ 를 고려한 격자의존성 시험결과를 통해 약 20만개로 결정을 하였고, 날개면 인근 격자점의 평균  $y+$ 는 약 60 정도로 결정되었다. Choi 등<sup>(4)</sup>은 벽 근처 영역에서 벽함수를 사용할 경우 첫 격자점의  $y+$ 를 최소 20 이상으로 구성해야 해석결과를 신뢰할 수 있다고 언급한 바 있다. 또한 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델을 적용시키기 위해서는 날개면 인근 격자의 해상도를 높이기 위해 격자수를 Fig. 3(b)의 격자의존성 시험결과에서 보는 바와 같이 약 40만개로 구성을 하였고, 그 결과 날개면 인근 격자점의 평균  $y+$ 는 약 0.16으로 결정되었다<sup>(7)</sup>. Fig. 3은 날개 후연 부근에서의 날개 높이에 따른 원주방향으로 면적 평균된 압력계수 분포에 대하여 벽 근처 영역에서

Table. 2 Results of turbulence model test

| Design   | Turbulence model   | Near wall treatment    | $\Psi$ at design- $\phi$ |
|----------|--------------------|------------------------|--------------------------|
| REF RANS | SST model          | Wall function          | 0.141                    |
|          |                    | Low-Re number          | 0.126                    |
|          | $k-\omega$ model   | Low-Re number          | 0.120                    |
|          | $k-\epsilon$ model | Scalable wall function | 0.120                    |
| EXP      | -                  | -                      | 0.126                    |



(a) Applying wall-function model near wall-region



(b) Applying low-Re number model near wall-region

Fig. 3 Grid dependency test results

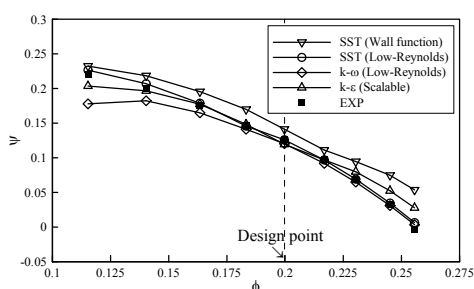
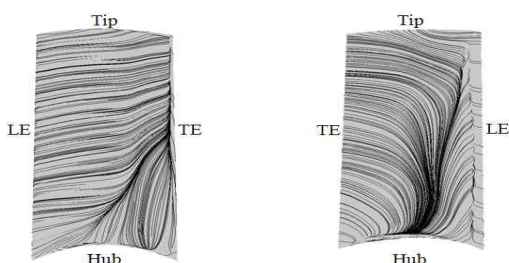
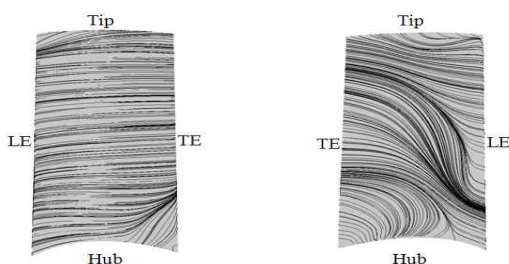


Fig. 4 Test of various turbulence models for the prediction of performance curve



Suction surface Pressure surface

(a) SST model with low Reynolds number formulation



Suction surface Pressure surface

(b) SST model with wall function

Fig. 5 Streamlines on the blade surfaces at design flow coefficient

벽함수 및 저레이놀즈수 모델을 적용하기 위한 각 격자계 구성의 격자의존성 시험결과를 보여주고 있다.

Table 2는 벽 근처 영역에서 각각 저레이놀즈수 모델 및 벽함수가 적용된 SST모델, 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델이 적용된 k- $\omega$ 모델 및 수정된 벽함수가 적용된 k- $\epsilon$  모델을 사용한 수치해석의 결과로 설계유량계수에서의 정압계수 값들을 보여주고 있다. Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델이 적용된 SST모델의 정압계수가 실험결과와 가장 일치하는 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4는 위에서 언급한 각 난류모델에 의해 예측된 성능곡선을 실험에서 측정된 성능곡선과 비교하고 있다. 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델이 적용된 SST모델은 전체 유량 영역에서 실험결과와 가장 유사한 정압계수를 나타내는 반

면, 벽함수가 적용된 SST모델은 전 유량범위에서 과도하게 큰 정압계수를 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델이 적용된 k- $\omega$ 모델의 정압계수는 설계유량계수 부근 및 고유량계수 영역에서는 실험결과와 유사한 경향을 보이나, 저유량계수 영역에서는 실험결과에 비해 상대적으로 낮게 예측을 하고 있다. k- $\epsilon$ 모델은 설계유량계수에서 유사한 값을 예측하나, 고유량 및 저유량계수 영역에서는 실험결과와 차이를 보이고 있다.

Fig. 5는 벽 근처 영역에서 각각 저레이놀즈수 모델 및 벽함수가 적용된 SST모델로 예측한 설계유량계수에서의 날개 흡입면과 압력면에서의 유선 분포를 보여주고 있다. Table 2의 결과에서 볼 수 있듯이 벽 근처 영역에 저레이놀즈수 모델이 적용된 SST모델의 정압계수가 실험결과와 가장 일치하는 경향을 나타내므로 Fig. 5(a)의 저레이놀즈수 모델을 적용한 SST모델은 날개의 흡입면과 압력면에서 발생하는 유동 박리현을 잘 예측하고 있는 것으로 볼 수 있다. 한편, 벽함수를 적용한 SST모델이 Table 2와 Fig. 4에 나타난 바와 같이 잘못된 예측결과를 보이는 것은 Fig. 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 날개 흡입면 및 압력면에서 발생하는 유동의 박리를 잘 예측하지 못하기 때문으로 사료된다.

#### 4.2 모터 위치 변경에 따른 성능 특성 분석

본 연구에서는 환기용 축류송풍기를 대상으로 모터 위치의 변경에 따른 수치해석을 수행하여 성능곡선 상에서 모터 위치가 성능곡선에 미치는 영향을 검토해 보고자 하였다.

성능시험은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 챔버형(chamber type) 테스트 장치에서 축류송풍기의 모터 위치를 바꿔가며 수행되었다. 본 연구에서 사용된 챔버형 테스트 장치는 940mm(W)×1,180mm(H)×4,150mm(L)의 크기 및 1.109m<sup>2</sup>의 설치 단면적을 가지는 산업용 송풍기 전용 시험설비로, 크게 테스트 웬 설치 부분, 메인 챔버, 풍량과 압력을 조절하기 위한 제어 댐퍼 및 보조 웬 부분으로 구성된다. 본 챔버형 테스트 장치의 자세한 사양 및 제원은 참고문헌<sup>(12)</sup>에 자세히 기술되어 있다. 유량에 따른 정압력 등 유동 파라미터들의



Fig. 6 Performance test of the ventilation axial-flow fan

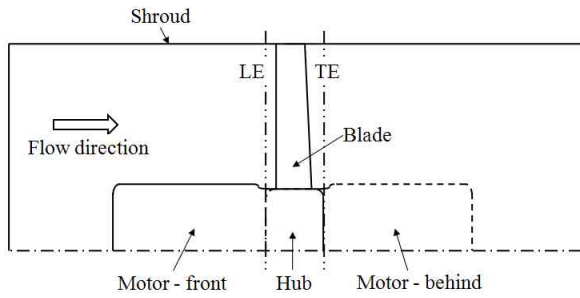


Fig. 7 Meridian view for two different positions of the motor

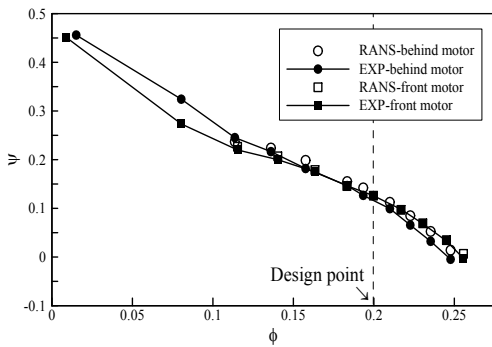


Fig. 8 Comparison of CFD results with experimental data

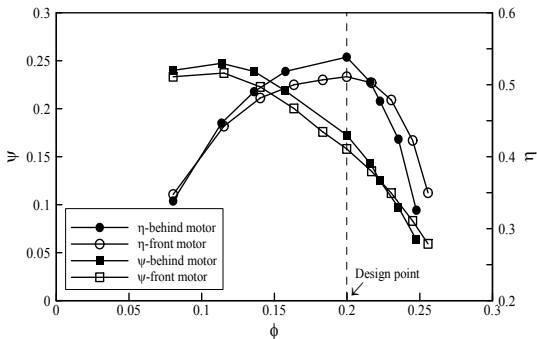


Fig. 9 Predictions for performance curves depending on the location of the motor

측정은 ISO 5801 규격<sup>(13)</sup>에 명기된 방법으로 측정되었으며, 회전속도는 회전수 속도계(tachometer) 측정 장치를 통하여 측정되었다.

Fig. 7은 두 가지 모터 위치에 따른 형상을 자오면에서 도식화 한 것으로서 임펠터를 중심으로 각각 유입부(기준형상)에 모터가 장착된 형상과 토출부에 장착된 형상을 나타내고 있다. 여기서 모터의 직경 및 길이는 송풍기의 팁 직경과 비교하였을 때 약 0.32 및 0.47배의 크기를 가진다.

수치해석은 상기 4.1절에서 이루어진 난류모델 시험결과를 바탕으로 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델이 적용된 SST모델을 사용해 수행하였다. Fig. 8은 모터의 위치에 따른 실험결과와 수치해석의 결과를 비교한 그림으로 각 모터 위치에 따른 수치해석결과는 실험결과와 전반적으로 일치하

는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 성능곡선 상에서 모터 위치의 변경에 따른 압력계수 및 효율 분포의 계산치를 보여주고 있다. 모터 위치 변경에 따른 특성을 살펴보면 모터가 임펠러의 토출부에 장착된 경우가 유입부에 장착된 경우에 비해 압력계수 및 효율이 설계유량점 이하 저유량계수 영역에서 전반적으로 높은 값을 보이고 있으며, 특히 설계유량계수에서 효율이 가장 크게 증가한 모습을 보이고 있다. 그러나 설계유량보다 큰 고유량계수 영역에서는 압력계수와 효율이 유입부에 모터가 장착된 경우에 비해 다소 감소한 경향을 보이고 있다. 그러므로 설계유량점에서 토출부에 모터가 장착된 경우가 유입부에 장착된 경우에 비해 더 높은 압력 및 효율을 갖는다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 환기용 축류송풍기에 대하여 유동 특성을 파악하고자 삼차원 RANS 방정식을 사용한 수치해석을 수행하였다. 축류송풍기의 정확한 수치해석을 위해 난류모델의 영향을 시험하였고, 모터 위치의 변경에 따른 영향을 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 벽 근처 영역에서 저레이놀즈수 모델을 적용한 SST모델의 수치계산은 전 유량범위에서 실험치에 가장 근접하는 결과를 보여준다.
2. 임펠러의 토출부에 모터가 장착된 경우가 유입부에 장착된 경우에 비해 성능곡선 상에서 설계유량점을 포함하는 저유량계수 영역에서 우수한 효율과 압력 특성을 갖는다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 전략산업기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힌다. (No. 10031771)

## 참고문헌

- (1) Kim, J. H., Choi, J. H., and Kim, K. Y., 2009, "Design Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Using Radial Basis Neural Network Method," ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59666.
- (2) Samad, A., and Kim, K. Y., 2009, "Surrogate Based Optimization Techniques for Aerodynamic Design of Turbomachinery," International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 179~188.
- (3) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA

- Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (4) 최영석, 이용갑, 홍순삼, 강신형, 2001, “상용 CFD코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능해석,” 유체기계저널, 제4권, 제1호, pp. 38~45.
- (5) 장춘만, 최승만, 김광용, 2006, “허브 캡 형상에 따른 축류 송풍기 성능특성,” 유체기계저널, 제9권, 제6호, pp. 9~16.
- (6) Jiang, H. B., Lu, Y. J., Yuan, W., and Li, Q. S., 2009, “Experimental Investigation of the Influence of Inlet Distortion on the Stall Inception of a Low Speed Axial Compressor,” ASME, Turbo Expo, GT2009-59139.
- (7) ANSYS CFX-11.0 Solver Theory, 2006, Ansys Inc.
- (8) Wilcox, D. C., 1988, “Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models,” AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1299~1310.
- (9) 이용갑, 육진환, 강만호, 2004, “CFX의 Pressure- Based Coupled과 다양한 난류모델을 이용한 유체기계의 유동해석,” 유체기계저널, 제7권, 제5호, pp. 82~90.
- (10) Jones, W. P., and Launder, B. E., 1972, “The prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301~314.
- (11) Bardina, J. E., Huang, P. G., and Coakley, T., 1997, “Turbulence Modeling Validation,” 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA-1997- 2121.
- (12) 이승진, 조홍준, 송우석, 이승배, 2009, “공조용 축류팬 설계 및 설계변수에 따른 성능과 소음비교,” 2009 유체기계 연구개발 발표회, pp. 293~298.
- (13) ISO 5801, 1997, Industrial Fans-Performance Testing Using Standardized Airways.