

## 산업용 원심블로어 수치해석을 위한 수치모델 평가

이중성 · 장춘만<sup>†</sup>  
한국건설기술연구원

### Evaluation of Numerical Models for Analysing an Industrial Centrifugal Blower

JONGSUNG LEE, CHOONMAN JANG<sup>†</sup>

Environmental Engineering Research Div., Korea Institute of Construction Technology,  
Daehwa-Dong 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi, 411-712, Korea

**Abstract** >> The present study represents the effects of boundary condition on the performance of a centrifugal blower at the interference plane between rotational and stationary domains using three dimensional compressible Navier-Stocks equations. Two boundary conditions, frozen-rotor and stage, are compared to analyze the blower performance. Installation angle between the cutoff of a volute casing and a impeller blade is also introduced to evaluate the blower performance and to understand the internal flow inside the blower. Throughout numerical simulation, it is found that the frozen rotor interface method at the interference plane represents well the variations of flow field inside the blower compared to stage interface method. However, pressure has maximum two percent error according to the installation angles while pressure is almost constant for the stage interface method. And stage interface method can relatively well predict the blower performance. Detailed internal flows of the centrifugal blower are compared and analyzed by numerical simulation.

**Key words** : Centrifugal blower(원심블로어), Numerical simulation(수치해석), Frozen-rotor interface(프로즌 로터 기법), Stage interface(스테이지 기법), Installation angle(설치각)

## 1. 서 론

전 세계적으로 플랜트산업의 시장 확대와 더불어 플랜트설비의 핵심요소부품 중의 하나인 유체기계의 성능개선 및 국내 기술자립화가 중요하다. 특히 환경 플랜트 분야의 유체기계는 운전범위가 넓어, 고압 및 고유량 특성이 요구된다. 압력과 유량특성을 고려하여, 환경플랜트용 유체기계는 뒷보기구배(backward

curved)를 갖는 원심블로어가 많이 사용된다. 플랜트용 원심블로어는 규모측면에서도 임펠러 직경이 0.7~3m에 이르며, 개발에 따른 시험용 블로어의 제작비도 막대하게 든다<sup>1)</sup>. 이러한 점을 고려하여, 최근 들어 제작에 앞서서 수치해석을 이용한 블로어의 성능평가가 활발하게 이루어지고 있다<sup>2-3)</sup>.

원심블로어는 내부유동 특성을 볼 때 비정상 수치해석(unsteady numerical simulation)을 통한 블로어 성능평가가 타당하나, 계산시간 등의 제약으로 정상상태(steady state)의 조건으로 수치평가를 통하여 성능을 주로 평가한다. 정상상태에 의한 수치평가에서

<sup>†</sup> Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

[ 접수일 : 2012.11.27 수정일 : 2012.12.27 게재확정일 : 2012.12.31 ]

Copyright © 2012 KHNES



Fig. 1 Test blower

는 회전체인 임펠러와 비회전체인 볼류트케이싱 간의 경계면을 설정하는 기법으로 스테이지(stage) 및 프로즌로터(frozen rotor) 기법이 사용된다. 스테이지 기법은 두 경계면 사이의 유동을 회전방향으로 평균화하기에 상류에서 발생한 유동특성이 하류로 전달되지 못하고 평균화 된다<sup>4)</sup>. 한편 프로즌로터 기법은 두 경계면의 데이터를 1:1로 전달하기에 회전방향에 따라 변화량이 큰 유동을 실제현상과 유사하게 모사할 수 있다는 점에서 지금까지 많은 연구에 적용되어 왔다<sup>5-7)</sup>. 그러나 프로즌로터 기법을 블로어에 적용할 때, 볼류트케이싱의 컷오프(cutoff)와 임펠러 날개와의 상대위치(설치각)에 따라 성능값이 달라지는 단점이 있으며, 플랜트용 원심블로어에 대한 관련 연구결과가 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 플랜트용 원심블로어를 대상으로 정상수치해석에서 적용되는 회전 및 고정영역간의 경계면 설정기법, 즉 프로즌 로터와 스테이지 기법에 따른 성능 및 내부 유동장 특성을 분석하였다. 분석 방법으로는 설계 유량점에서 볼류트케이싱의 컷오프와 임펠러 날개의 상대각을 변화시켜 가면서 정상수치해석을 수행하였다.

## 2. 원심블로어 및 실험장치

본 연구에서는 환경플랜트용으로 사용되는 130kW 급 원심블로어를 대상으로 하였으며, 실험용 원심블로어 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 본 원심블로어는

Table 1 Design specifications of a test blower

Name	Value
Flow coefficient	0.139
Pressure coefficient	1.29
Rotational frequency of impeller	1780 rpm
Efficiency	72%
Inlet diameter of impeller	568 mm
Outlet diameter of impeller	1625 mm
Diameter of inlet/outlet duct	710 mm
Blade thickness	4.5 mm
Number of blade	11 ea

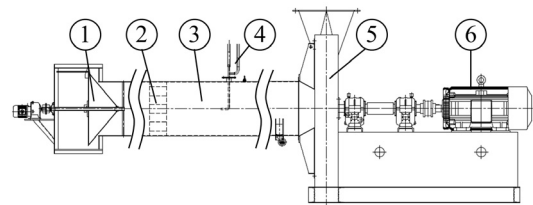
입구가이드베인, 임펠러 및 볼류트케이싱으로 구성되며, 설계유량조건에서 기본사양은 Table 1에 나타낸다. 설계유량 및 압력계수는 각각 0.139 및 1.29이며, 임펠러의 날개 수는 11매이다.

원심블로어의 유량에 따른 압력을 측정하기 위하여 덕트식 성능시험장치를 설계, 제작하였다. 시험장치는 AMCA 210 및 KS B 6530 등의 규격을 참조하여 설계하였다. 원심블로어 성능시험장치의 구성도는 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서와 같이 유량조절을 위한 댐퍼를 덕트상류에 설치하고, 흡입덕트의 길이는 7.2m로 덕트직경의 약 10.5배로 하여 댐퍼에 의한 기류영향을 최소화하였다. 흡입덕트의 직경은 0.685m이며, 피토관을 이용하여 유량을 측정하였다.

## 3. 수치해석 방법

### 3.1 수치계산 방법

원심블로어의 수치해석을 통한 성능평가를 위해



1: Damper, 2: Screen, 3: Inlet duct, 4: Pitot tube, 5: Blower, 6: Driving motor

Fig. 2 Layout of experimental apparatus

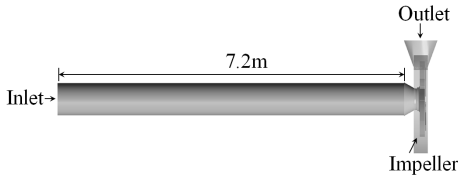


Fig. 3 Computational domain

여 상용코드인 ANSYS-CFX 13<sup>8)</sup>을 사용하였다.

수치계산은 3차원, 압축성 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 유한 체적법으로 이산화하였으며, Pressure based fully coupled implicit방법으로 정상 수치해석을 수행하였다. 난류모델은 유동의 박리현상 해석에 유용한 전단응력이송모델(shear stress transport model)을 사용하였다.<sup>9)</sup>

### 3.2 계산영역 및 경계조건

수치계산에 적용된 블로어의 계산영역은 Fig. 3에 나타낸다. 계산영역은 송풍기 성능시험장비와 동일하게 설정하기 위하여, 입구 덕트길이를 직경의 10.5 배가 되도록 하였다. 입구덕트, 임펠러 및 볼류트케이싱에 대한 해석격자는 Fig. 4에 나타낸다. 임펠러는 ANSYS사의 Turbo-Grid를 적용한 정렬격자를, 볼류트케이싱은 ANSYS사의 ICFM CFD를 사용하여 비정렬 격자로 생성하였다. 입구덕트는 정렬격자로 구성하여 계산부하를 줄였다. 본 수치계산에 사용한 원심블로어의 전체 격자수는 3,700,000 노드이다.

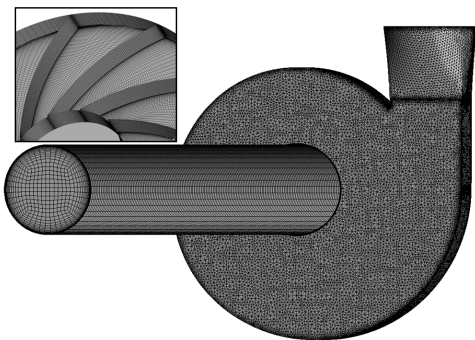


Fig. 4 Computational grid system

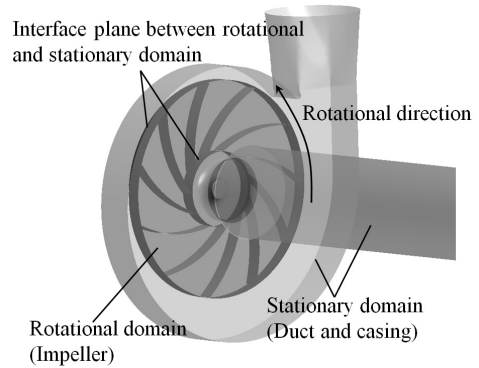


Fig. 5 Perspective view of a test blower

Fig. 5는 원심블로어의 주요 명칭들을 나타낸다. 고정영역인 볼류트케이싱과 회전영역인 임펠러의 경계면에는 상호 데이터의 전달을 위하여 다양한 계산 스킴이 적용된다. 본 연구에서는 원심블로어의 수치 해석에 주로 사용되는 프로즌로터(frozen rotor) 및 스테이지(stage) 기법을 각각 적용하여, 원심블로어의 성능에 미치는 특성을 비교·평가하였다.

계산 경계조건으로는 덕트 입구에 압력 및 상온 조건을, 출구에 질량 유량 조건을 각각 적용하였다. 입구 및 출구면을 제외한 전체 벽면은 점착(no-slip) 조건을 적용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 수치해석의 타당성 검토

수치해석의 타당성을 검토하기 위하여, 설계유량 조건(유량계수: 0.139)에서 실험을 통해 구한 압력특성값들을 비교하였다. 유량계수는 다음과 같이 정의한다.

$$\phi = \frac{Q}{AU_t} \quad (1)$$

여기서 Q, A,  $U_t$  는 유량, 입구 단면적, 임펠러 끝단의 회전방향 속도를 각각 의미한다. 설계유량점에서 실험으로 구한 압력값과 유량에 따른 수치계산값

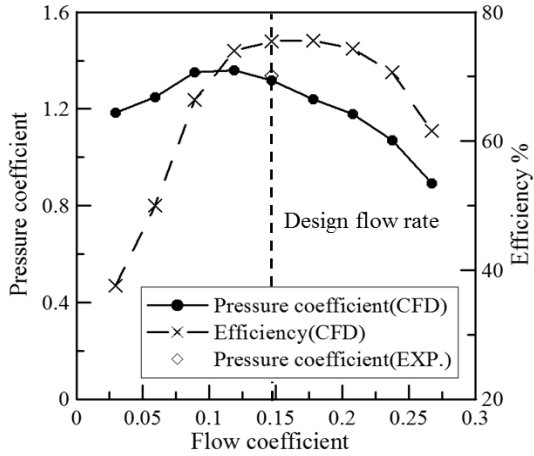


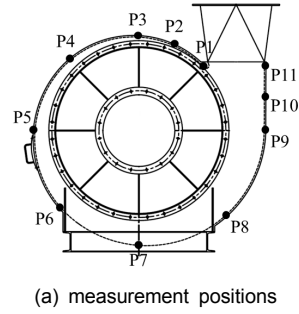
Fig. 6 Blower performance curve using stage method

력 및 효율을 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서와 같이 효율은 설계유량점 근방에서 최대값을 가진다. 설계 유량점에서의 압력의 실험값은 수치해석에서 구한 압력과 잘 일치함을 알 수 있다.

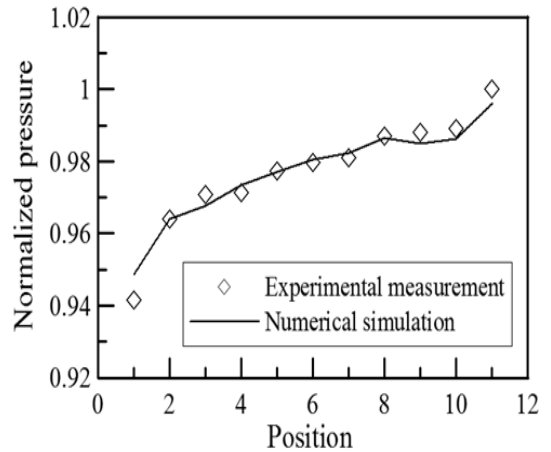
Fig. 7은 설계유량 조건에서 블류트케이싱 외측면을 따른 압력 특성을 실험 및 수치해석 결과로 비교하여 나타낸다. Fig. 7(a)에는 블류트케이싱 외측면 중양을 따라 총 11개의 압력 측정점의 위치를 나타낸다. 그림에서 P1은 블류트케이싱의 컷오프 근방에, P11은 블류트케이싱의 출구근방에 각각 위치한다. Fig. 7(b)에서와 같이 실험과 스테이지법을 적용한 수치해석에서 구한 블류트케이싱 압력들이 최대 2% 이내의 편차범위 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 한편 Fig. 7(c)는 프로즌로터 기법을 적용하여 실험값과 비교한 것으로 Fig. 7(b)의 스테이지 기법을 적용한 경우에 비하여 상대적으로 차이가 크음을 알 수 있다.

4.2 경계조건에 따른 성능비교

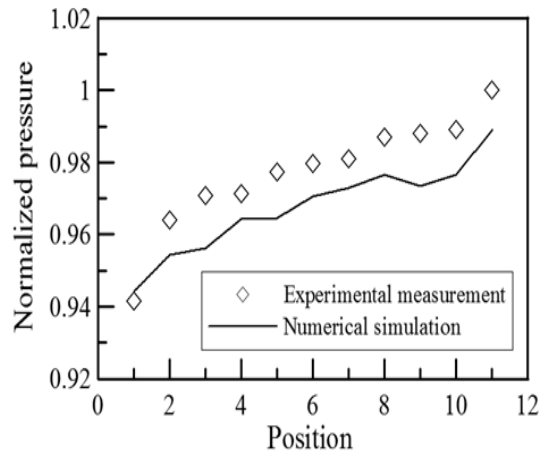
원심블로어의 수치해석을 위해, 고정영역인 블류트케이싱과 회전영역인 임펠러의 경계면에 프로즌로터(frozen rotor) 및 스테이지(stage) 기법이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 Fig. 8에서와 같이 최초



(a) measurement positions



(b) Pressure comparisons using stage method( $\theta=0^\circ$ )



(c) Pressure comparisons using frozen rotor method( $\theta=0^\circ$ )

Fig. 7 Comparisons of pressure along the volute casing

모델링된 블류트케이싱 컷오프(cutoff)와 임펠러 날개사이의 각도(설치각)를 0°으로 정의하여, 설치각 변화에 따른 두 가지 경계면조건 적용이 성능 특성

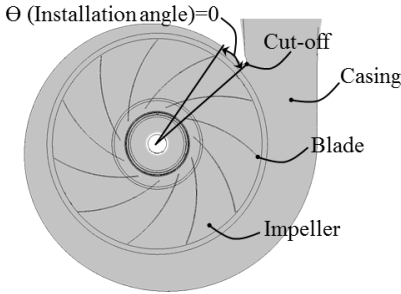


Fig. 8 Definition of an installation angle between a cut-off and a impeller

에 어떠한 영향을 미치는지 비교 분석하였다. 날개가 11개인 테스트 블로어는 두 날개 사이의 피치각이 32.73°이며, 한 피치를 8등분한 4.09°씩 각각 변경시켜가면서 분석하였다.

Fig. 9는 프로즌로터 경계조건을 적용한 블로어 성능특성을 나타낸다. 그림에서와 같이 날개와 볼류트케이싱 컷오프의 상대 설치각에 따라 블로어 효율 및 압력이 사인함수와 유사한 형태를 갖는다. 압력의 경우에는 설치각이 16.36°에서 최소값을 갖으며, 8.18°에서 최대값을 갖는다. 압력계수의 최대 및 최소값의 차이는 0.053으로, 약 2%의 편차를 나타낸다. 블로어 효율도 압력과 유사한 변동을 보이며, 편차도 2% 정도이다. 즉 원심블로어의 성능을 프로즌로터 기법을 적용하여 평가할 때, 설치각에 따라 최대 2%

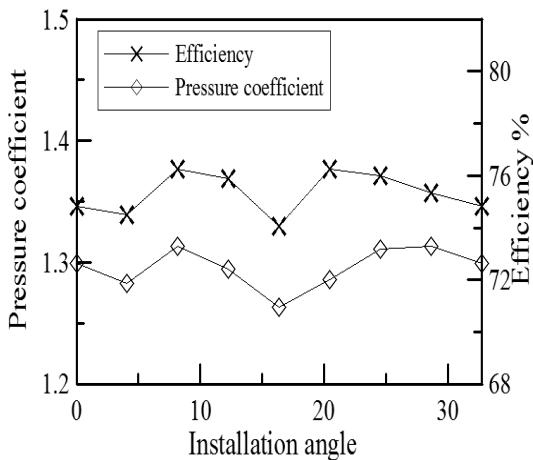


Fig. 9 Blower performance using frozen rotor interface

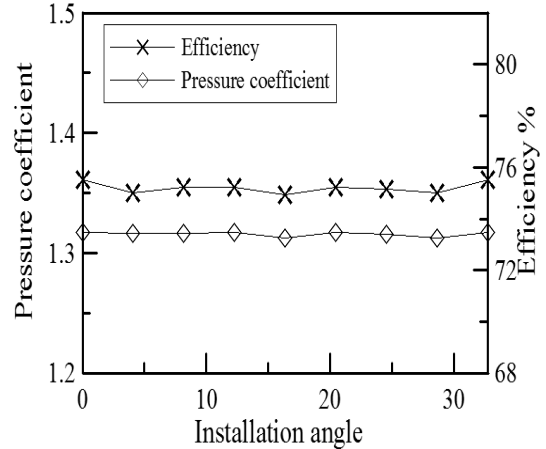


Fig. 10 Blower performance using stage interface

의 성능차가 나타남을 의미한다.

Fig. 10은 스테이지 경계조건을 적용한 블로어 성능특성을 나타낸다. 프로즌로터 적용과는 다르게, 설치각의 변화에 따라 효율 및 압력값이 일정함을 알 수 있다.

프로즌 로터 및 스테이지 기법에 따른 압력 및 효율특성을 Table 2에 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이, 평균압력계수의 경우 프로즌로터 및 스테이지의 경우 각각 1.3 및 1.315로 1% 이내의 차이를 나타낸다.

Fig. 11은 날개의 설치각이 0°, 8.18° 및 16.36° 인 경우, 볼류트케이싱 측면 압력값을 나타낸다. 압력값의 측정위치는 Fig. 11(a)와 같이 케이싱 외측 중앙이다.

Fig. 11(b) 및 Fig. 11(c)에서 알 수 있듯이, 설치각이 변함에 따라 프로즌로터 기법이 적용된 압력분포

Table 2 Comparison of performance using frozen rotor and stage interface

Method	Variable	Maximum	Minimum	Mean value
Frozen rotor interface	Pressure coefficient	1.313	1.26	1.3
	Efficiency	76.4	74.1	75.4
Stage interface	Pressure coefficient	1.317	1.312	1.315
	Efficiency	75.6	74.9	75.2

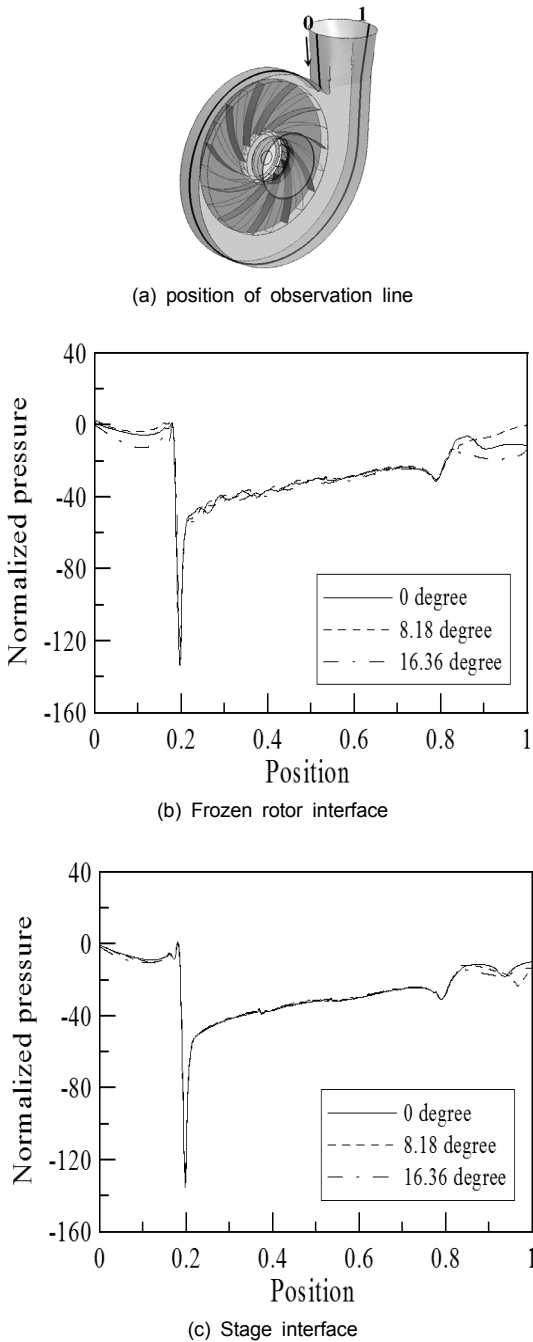


Fig. 11 Pressure distributions along the volute casing

는 스테이지 기법에 비하여 압력편차가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 정상해석(steady

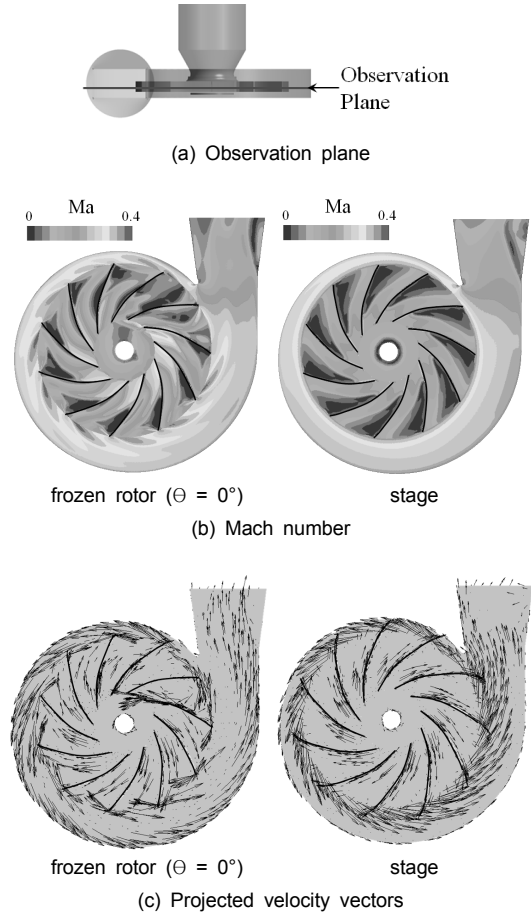


Fig. 12 Comparisons of flow fields

numerical simulation)을 통한 원심블로어의 성능평가에 있어서는 설치각의 변화와 관계없이 일정한 성능을 나타내는 스테이지 기법을 고정 및 회전경계면에 적용할 수 있다. 한편, 원심블로어의 성능평가에 프로즌로터를 적용할 경우에는 설치각에 따라 성능차가 나타남을 유의해야 한다.

### 4.3 경계면 적용 기법에 따른 내부유동장 분석

경계면 설정조건 및 설치각에 따른 원심블로어 내부유동장 특성을 속도, 압력 및 속도벡터 분포를 이용하여 분석하였다.

Fig. 12는 프로즌 로터 및 스테이지 경계조건에 대

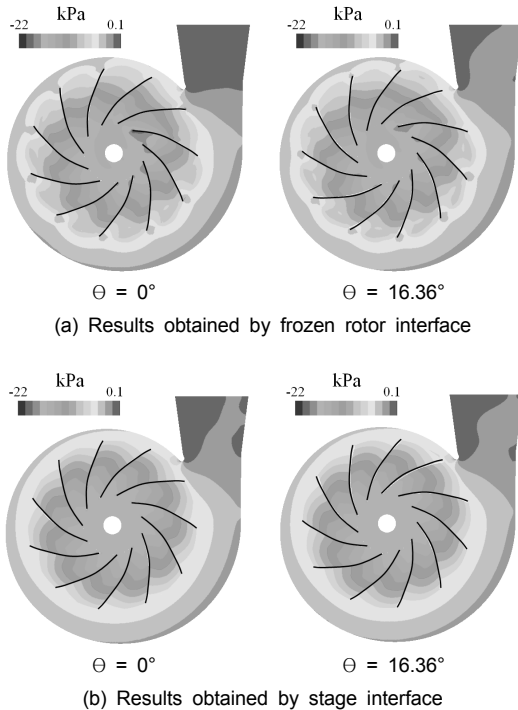


Fig. 13 Pressure contours

한 속도 및 속도벡터 분포를 나타낸다. 관측면은 Fig. 12(a)와 같이 날개의 중간폭이다. Fig. 12(b)의 속도 분포에서 보면, 경계면에서 데이터를 1:1로 공유하는 프로즌로터 설정조건에서는 임펠러 날개 끝단에서 날생하는 고속기류가 볼류트 케이싱측으로 전달됨을 알 수 있지만, 임펠러 토출측의 물리량을 평균화하는 스테이지 설정조건에서는 평균화된 기류분포가 나타남을 알 수 있다.

임펠러 내부유동장 분포에서도 프로즌로터 조건에서는 볼류트케이싱의 컷오프 위치에서는 익간에 큰 저속영역이 나타나며, 날개 부압면의 끝단에 익면 유동박리에 의한 서로 다른 크기의 저속영역이 나타난다. 그러나 스테이지 조건에서는 평균화의 영향으로 모든 익단에서 유사한 내부유동장 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 Fig. 12(c)의 속도벡터 분포에서도 확인할 수 있다. 프로즌 로터를 적용한 경우 유동장은 그림에서와 같이 블로어 임펠러 끝단에서 가속되어, 볼류트케이싱 내부로 영향이 그대로 전달되는 반

면에, 스테이지 기법을 적용한 결과에서는 회전체인 임펠러와 정지하는 볼류트케이싱 경계면에 일정한 속도벡터 분포를 나타낸다.

Fig. 13은 날개의 설치각이 0°와 16.36인 경우 두 경계조건에 대한 압력분포를 나타낸다. 관찰면은 Fig. 12(a)와 같다. Fig. 13(a)와 같이 프로즌 로터를 경계면에 적용할 경우에는 설치각( $\theta$ )가 0°일 경우가 상대적으로 볼류트케이싱을 따라 출구측으로 압력증가 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 9의 압력특성과도 동일한 경향임을 알 수 있다. 스테이지 경계조건에서는 Fig. 13(b)에 나타냈듯이, 설치각과 무관하게 유사한 압력분포를 보인다.

정상해석(steady numerical simulation)을 통한 원심블로어의 내부 유동장 평가에 있어서는, 프로즌로터를 적용한 경우가 스테이지 조건보다 상대적으로 실제유동과 유사하게 유동장을 잘 묘사 할 수 있음을 알 수 있다. 반면에 스테이지의 경우에는 설치각이 성능에 미치는 영향이 적어서, 원심블로어의 성능 평가에는 유리하다고 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 원심블로어의 3차원 정상 수치해석을 수행할 경우, 정지 및 회전 도메인의 경계면에 적용되는 수치기법에 따라 블로어의 성능 및 내부 유동장 특성에 미치는 영향을 조사하였으며, 결과는 아래와 같다.

- 1) 원심블로어의 성능 평가를 위해 설계 유량점에서 정상 수치해석을 수행 하였으며, 스테이지 기법을 적용한 성능특성 결과와 실험값과 잘 일치하였다.
- 2) 프로즌 로터를 적용한 경우 날개의 설치각에 따라 블로어 효율 및 압력이 사인함수 형태를 갖고 변동하였으며, 이때 성능의 최대 및 최소값은 약 2% 이내의 편차를 보였다. 이에 반해 스테이지 기법을 적용한 경우, 설치각의 변화에 대해 효율 및 압력값이 일정하게 나타는 경향을 보였으며 이는 프로즌 로터의 성능특성 결과의 평균값과

일치하는 수치임을 알 수 있었다.

- 3) 원심블로어의 내부유동장 평가를 위해 정상 수치 해석을 수행할 때, 프로즌 로터를 이용한 경계조건이 스테이지 조건보다 회전방향에 따라 변화량이 큰 유동장을 잘 모사할 수 있음을 알 수 있었다.
- 4) 원심블로어의 성능평가에 있어서는 설치각의 변화에 성능의 편차가 적으며 실험데이터와 잘 일치하는 스테이지 경계면조건이 유리함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 제조기반산업원천기술개발사업(No. 10032063)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. J.-H. Choi, "Design and Experimental Study on a Turbo Air Compressor for Fuel Cell Applications," Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 1, 2008, pp. 26-34.
2. C. M. Jang, and S. H. Yang, "Performance Analysis on the Design Variables of a Turbo Blower," Journal of Fluid Machinery, Vol. 14, No. 2, 2011, pp. 47-51.
3. Y. B. Park, C. M. Jang and S. H. Yang, "Pressure Characteristics According to the Duct Shapes of Turbo Blowers Connected in Serial," Journal of Fluid Machinery, Vol. 13, No. 2, 2010, pp. 30-35.
4. R. V. Chima "Calulation of Multistage Turbomachinery Using Steady Characteristic Boundary Condition," AIAA 98-0968.
5. J. G. Noh, E. H. Jeong, E. S. Lee and J. H. Kim, "Numerical Flow Analysis of a Partial Admission Turbine Using a Frozen Rotor Method," Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 6, 2004, pp. 15-20.
6. C. M. Jang, K. R. Choi and S. H. Yang, "Performance Analysis of a Centrifugal Fan with Splitters," Journal of Korean Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 35, No. 10, 2011, pp. 1067-1073.
7. N. N. Bayomi, H. A. Abdel, and A. M. Osman, "Effect of Inlet Straighteners on Centrifugal Fan Performance," Energy Conversion & Management, Vol. 47, 2006, pp. 3307-3318.
8. CFX-13 User Manual, 2010, Ansys inc.
9. F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.