

## 임펠러 입출구각에 따른 양흡입 원심송풍기 성능특성

이종성<sup>1</sup> · 장춘만<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원

### Performance Characteristics of Double-Inlet Centrifugal Blower According to Inlet and Outlet Angles of an Impeller

JONG-SUNG LEE<sup>1</sup>, CHOON-MAN JANG<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Environmental Engineering Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Daehwa-Dong 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi, 411-712, Korea

**Abstract** >> Effects of design variables on the performance of a double-inlet centrifugal blower have been analyzed based on the three-dimensional flow analysis. Two design variables, blade inlet and outlet angles, are introduced to enhance a blower performance. General analysis code, ANSYS-CFX13, is employed to analyze internal flow and a blower performance. SST turbulence model is employed to estimate the eddy viscosity. Throughout the shape optimization of an impeller at the design flow condition, the blower efficiency and pressure are successfully increased by 4.7 and 1.02 percent compared to reference one. It is noted that separated flow observed near cut-off region can be reduced by optimal design of blade angles, which results in stable flow pattern in the blade passage and increase of a blower performance. The stable flow at the impeller also makes good effects at the outlet of a volute casing.

**Key words** : Double-inlet centrifugal blower(양흡입 원심송풍기), Numerical simulation(수치해석), Design optimization(최적 설계), Response surface method(반응면 기법), Efficiency(효율)

## 1. 서 론

원심송풍기는 축류송풍기에 비하여 고압 특성을 갖으며, 산업 플랜트 분야에 널리 사용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 이러한 산업용 원심송풍기, 펌프 등 유체기계는 플랜트설비의 핵심기자재로 플랜트 운용에너지의 상당부분을 점하고 있다.

따라서 이러한 플랜트 설비의 에너지 절감을 위해

서는 에너지 부하량이 큰 산업용 원심송풍기의 고효율화가 매우 중요하다. 산업용 원심송풍기의 고효율화를 위해서는 송풍기 내부 손실을 최소화할 수 있는 설계 기술이 필요하다.

최근 들어 컴퓨터 기술의 급격한 발달로 전산유체역학을 기반으로 하는 원심송풍기의 고효율 설계 연구가 활발히 발표되고 있다. Jang 등<sup>3-5)</sup>은 최적화 방법 중의 하나인 반응면기법(response surface method)을 이용하여 산업용 단흡입 원심송풍기 임펠러 입출구각, 볼류트 케이싱, 입구 형상 및 스플리터 등의 설계변수를 선정하여 고효율 설계를 위한 설계인자 최

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

[ 접수일 : 2014.3.13 수정일 : 2014.4.21 게재확정일 : 2014.4.30 ]

Copyright © 2014 KHNES

적화 연구를 수행하였다. Park 등<sup>6)</sup>은 터보블로어 임펠러 블레이드 두께에 따른 성능 및 임펠러 출구유동 특성을 실험 및 3차원 수치해석으로 수행, 블레이드의 두께에 따른 전압 및 효율 상승 그리고 미끄럼계수 특성을 분석하였다. Kim 등<sup>7)</sup>은 원심송풍기에 전향익과 후향익에 따른 출구에서의 속도변화가 송풍기에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 이러한 연구들은 단흡입 원심송풍기를 대상으로 하며, 고유량 특성을 갖는 양흡입 원심송풍기에 대한 연구는 적은 실정이다.

본 연구에서는 고압 및 고품량이 요구되는 산업용 양흡입형 원심송풍기를 대상으로 하였으며, 성능향상을 위하여 임펠러 입출구각을 최적화 하였다. 성능평가 및 최적설계는 삼차원 수치해석 및 최적설계기법을 각각 적용하였다. 또한 최적설계에 의한 임펠러 내부 유동장을 기준형상과 비교 분석하였다.

## 2. 양흡입 원심송풍기

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 공기 흡입덕트가 두 개 설치된 양흡입 원심송풍기를 대상으로 하였다. 양흡입 원심송풍기는 단흡입 송풍기에 비하여 고품량 특성을 갖으며, 비속도도 상대적으로 높다. 저자들은 양흡입 원심송풍기의 효율향상을 위하여 입구 덕트 형상<sup>8)</sup>, 임펠러 날개 개수와 코드길이에 대한 최적화 연구<sup>9)</sup>를 수행하였다. 산업용 원심송풍기는 일반적으로 제작 가격을 고려하여 균일 두께를 갖는 임펠러

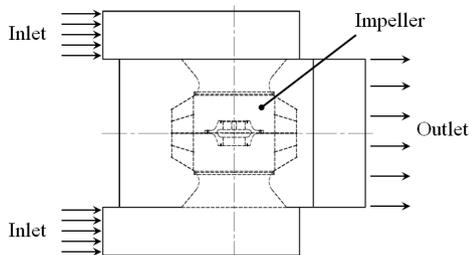


Fig. 1 Configuration of a double-inlet centrifugal blower

를 사용하지만, 본 연구에서는 익형(airfoil type)의 임펠러를 적용하였다. 익형 임펠러는 평판익(flat-typed blade)에 비하여 상대적으로 고효율 및 저소음 특성을 갖는 것으로 알려졌다<sup>10-11)</sup>. 본 연구의 기준 원심송풍기의 사양 및 형상은 Table 1과 Fig. 2에 각각 나타난다. 설계조건에서의 유량계수( $\phi$ ) 및 압력계수( $\psi$ )는 각각 0.215와 0.622이며, 정의식은 아래와 같다.

$$\phi = \frac{Q}{AU_i} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{2\Delta P}{\rho U_i^2} \tag{2}$$

여기서,  $Q$ ,  $A$ ,  $U_i$ ,  $\Delta P$ ,  $\rho$ 는 유량, 입구 덕트 단면적, 임펠러 끝단의 회전방향 속도, 압력상승 및 송풍기 입구 공기밀도를 각각 나타낸다.

Table 1 Design specifications of a reference blower

Name	Value
Flow coefficient	0.243
Pressure coefficient	0.839
Efficiency, %	75
Rotational frequency of an impeller, rpm	1500
Inlet diameter of an impeller, mm	603
Outlet diameter of an impeller, mm	950
Number of blade, ea	11



Fig. 2 Reference blower and blower performance tester

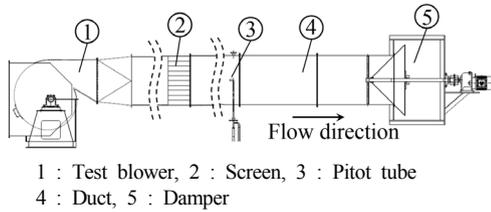


Fig. 3 Layout of a blower performance tester

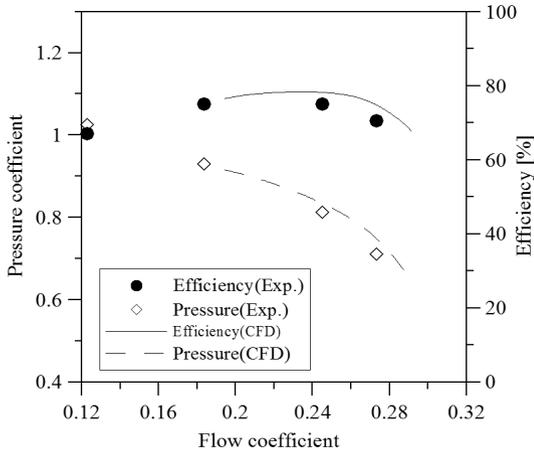


Fig. 4 Performance curve

원심송풍기의 성능평가를 위하여 덕트타입 송풍기 성능시험장치를 설계, 제작하였다. 송풍기 시험장치는 KS B 6530의 규격에 따라 설계하였으며, 구성도는 Fig. 3에 나타낸다. 그림에서와 같이 유량조절을 위한 댐퍼를 덕트 하류에 설치하고, 덕트 길이는 12m로 덕트직경의 약 10배로 하여 댐퍼에 의한 기류영향을 최소화하였다. 토출 덕트의 직경은 1.165m이며, 피토관을 이용하여 유속을 측정하였다. 송풍기의 성능곡선은 Fig. 4에 나타낸다.

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 수치계산 방법

원심송풍기 성능평가 및 내부 유동장을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 상용코드인 ANSYS-CFX 13<sup>12)</sup>을 사용하였다. 3차원, 압축

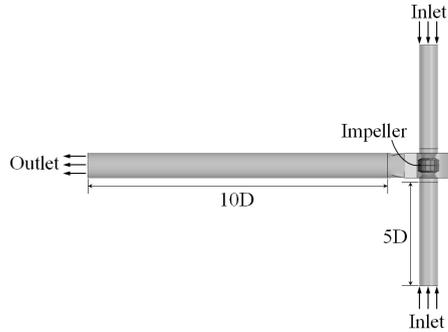


Fig. 5 Computational domain

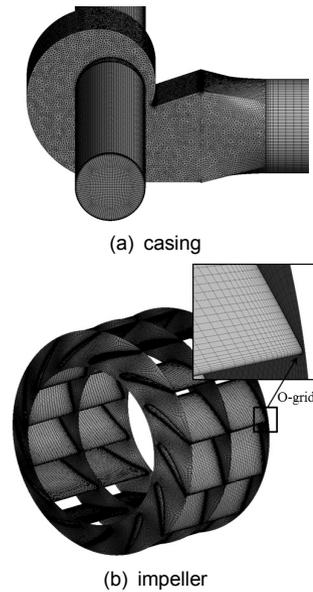


Fig. 6 Computational grid

성 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한체적법으로 이산화하였으며, Pressure based fully coupled implicit 방법으로 정상(steady state) 수치해석을 수행하였다. 난류모델은 유동의 박리현상에 유용한 전단응력 이송모델(shear stress transport model)<sup>13)</sup>을 사용하였다.

#### 3.2 계산영역 및 경계조건

수치해석을 위한 송풍기 입구덕트의 계산영역 및 격자시스템은 각각 Figs. 5, 6에 나타낸다. 해석영역

은 충분히 안정된 출구조건을 고려하였으며, 출구 덕트의 길이를 실험과 동일한 길이로 설정하였다. 해석 격자는 ANSYS사의 ICFM CFD를 사용하여 정렬 및 비정렬의 하이브리드 격자로 생성하였다. 수치 해에 미치는 격자 의존성 테스트를 계산 전에 실시하였으며, 본 수치계산에 적용한 격자수는 약 450만 노드이다.

계산 경계조건으로는 덕트 입구에 압력 및 상온 조건을, 출구에 유량을 각각 적용하였다. 수치해석은 회전(임펠러부) 및 정지영역으로 분리하여, 성능평가를 위해서는 컷오프(cut off)와 임펠러 날개 설치각의 상대적인 위치에 따라 성능특성이 일정한 Stage Interface를 내부 유동장 평가를 위해서는 Frozen Rotor Interface를 적용하였다. 입구 및 출구면을 제외한 벽면은 점착(no-slip) 조건을 적용하였다.

### 3.3 수치해석 타당성 검토

수치해석의 타당성을 검토하기 위하여, 성능 실험을 통해 측정된 결과를 수치해석 값과 비교하여 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 실선과 점선은 수치해석 결과를, 원과 마름모는 성능 실험결과를 각각 나타내며 최대 4% 이내의 편차범위 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 유량계수 0.12 이하인 저유량 영역은 스톨(stall)로 인한 불안정한 유동발생으로 수치 해를 얻을 수 없었다. 본 원심송풍기 설계 최적화연구는 설계유량 조건에서만 실시하였다. 한편 성능평가를 위한 수치해에는 임펠러와 볼류트 케이싱 경계면에 Stage Interface를 적용하여 평가하였다.

## 4. 형상최적화 방법 및 설계 변수

### 4.1 형상최적화 방법

본 연구에서는 양흡입 원심송풍기의 임펠러 형상 최적화를 위하여 두 개의 설계변수를 선정하고, 각각의 설계변수들이 목적함수(objective function)에 미치

는 영향을 수리 통계적인 방법으로 분석 할 수 있는 반응면기법(response surface method)<sup>15)</sup>을 도입하였다. 반응면은 다음과 같이 2차 다항식을 적용하였다.

$$f = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

여기서  $\beta$   $n$  그리고  $x$ 는 각각 다항식의 계수, 설계 변수의 개수 그리고 설계변수를 나타낸다. 각항의 미정계수는 회귀분석(regression analysis)을 통하여 구하였으며, 미정계수의 타당성은 ANOVA(analysis of variance)와 회귀분석을 이용하여 검증하였다.

### 4.2 설계변수

Fig. 7은 설계변수에 대한 정의를 나타낸다. 선행 연구결과<sup>9)</sup>로 설계된 임펠러 형상을 기반으로 연구를 진행하였으며, 설계변수는 임펠러 입출구각도( $\beta_1$ ,  $\beta_2$  in Fig. 7)를 선정하였다.  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 의 각도에 대하여 각각 3수준의 인자, 즉 24°, 29°, 34° 그리고 35°, 40°, 45°로 설정하였다. 반응면 기법으로 최적설계인자를 구하기 위한 설계 경계값은 예비계산을 통하여 결정하였으며, 각각의 설계값은 Table 2에 나타낸다.

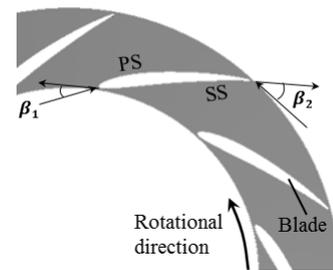


Fig. 7 Definition of design variables

Table 2 Design space

Variables	Lower bound	Middle	Upper bound
Inlet angle ( $\beta_1$ ), deg.	24	29	34
Outlet angle ( $\beta_2$ ), deg.	35	40	45

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 설계변수의 최적화

Fig. 8은 목적함수인 효율에 대한 3차원 반응면을 나타낸다. 그림에서 가로 및 세로축은 최적 설계 변수인  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 를 각각 의미하며, 높이 방향으로는 목적 함수인 효율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 설계 최적값이 설계 공간의 범위 내에 존재함을 알 수 있다. 임펠러  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 의 최적값은 각각  $29^\circ$  및  $38^\circ$ 이다. Table 3과 같이 기준 원심송풍기 대비 효율은 약 4.7%, 압력은 약 1.02% 향상되었다. 기준 및 최적화된 임펠러 형상을 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 10은 설계 인자에 따른 원심송풍기 성능특성을 나타낸다. Fig. 10(a)는  $\beta_1$  각도의 효과를 분석하기 위하여  $\beta_2$ 를  $40^\circ$ 로 고정하고 3가지의  $\beta_1$ 의 각도에 대한 성능 특성을 비교한 결과이다. 압력 및 토크값은 입구각이 증가할

수록 함께 증가함을 알 수 있다. 즉, 효율은 각도가 증가함에 따라 향상되다가  $29^\circ$ 에서 최고값을 가진 후 다시 감소됨을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 출구각의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 10(a)에서 최고 효율값을 갖는 입구각을  $29^\circ$ 로 고정하고, 출구각에 대한 성능특성을 비교한 결과이다. Fig. 10(a)와 반대로 출구

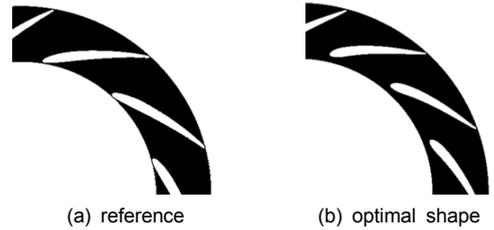


Fig. 9 Comparison of blade shape

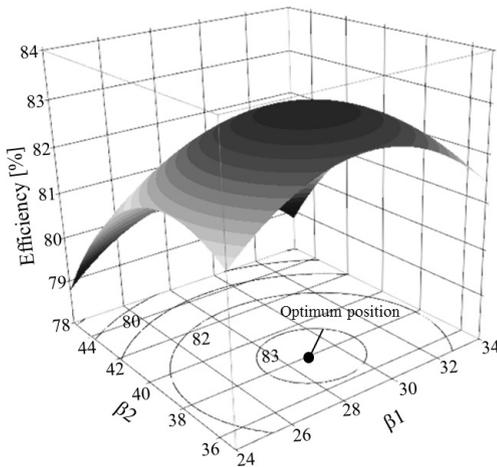
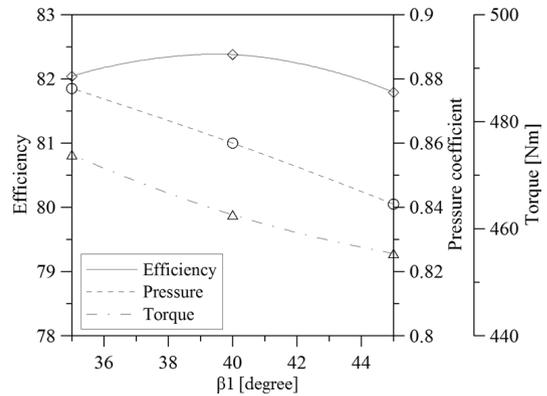


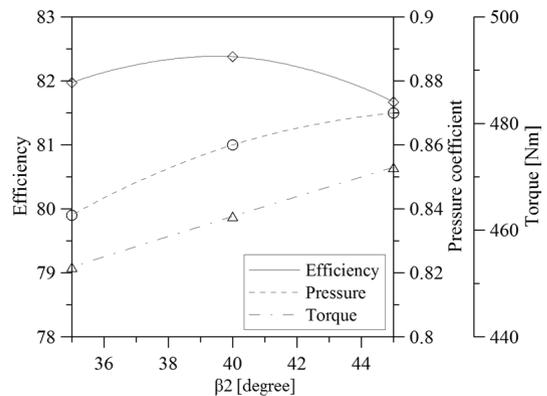
Fig. 8 Response surface

Table 3 Results of shape optimization

Performance	Reference model	Optimum model	Increment
Efficiency, %.	78.35	83.12	4.77%
Pressure coefficient	0.839	0.862	1.02%
Torque, Nm.	474.9	459.6	1.03%



(a)  $\beta_1$  ( $\beta_2=40^\circ$ )



(b)  $\beta_2$  ( $\beta_1=29^\circ$ )

Fig. 10 Comparison of blower performance for design variable

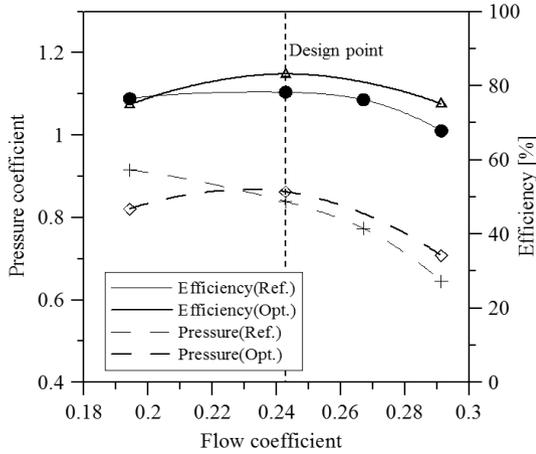


Fig. 11 Comparison of performance curve

각이 증가할수록 압력과 토크 값이 감소하는 경향을 갖는다. 그러나 효율은 각도가 증가할수록 일정량 증가하는 경향을 보이다가 출구각이 40°일 때 효율은 최대값을 가지며, 이후는 감소한다. 즉 임펠러의 입출구의 특정 각도에서 적절한 압력과 토크값을 가질 때 최고 효율이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 8의 반응면에서 최적점을 갖는 임펠러 형상을 적용한 송풍기의 성능 곡선을 나타낸다. 그림에서와 같이 효율은 저유량 영역에서 최적설계를 통해 개선되었음을 알 수 있으며, 압력은 설계유량 보다 적은 영역에서 다소 감소함을 알 수 있다.

### 5.2 내부유동장 특성 분석

Fig. 12는 기준 및 최적설계 원심송풍기 내부 속도 분포를 나타낸다. 관측면은 Fig. 12(a)에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, Fig. 12(b)의 기준 송풍기는, 그림에서 “A”로 나타난 컷오프(cut-off)영역 근방의 임펠러의 넓은 영역에서 저속흐름이 나타난다.

임펠러 내부의 저속영역은 컷오프와 임펠러간의 좁은 간극으로 가속된 속도로 인하여 익면 박리(separation)<sup>3)</sup>가 발생되어 효율이 감소된다. 컷오프 지점의 불균일 속도의 영향으로 디퓨저 입구인 “B”

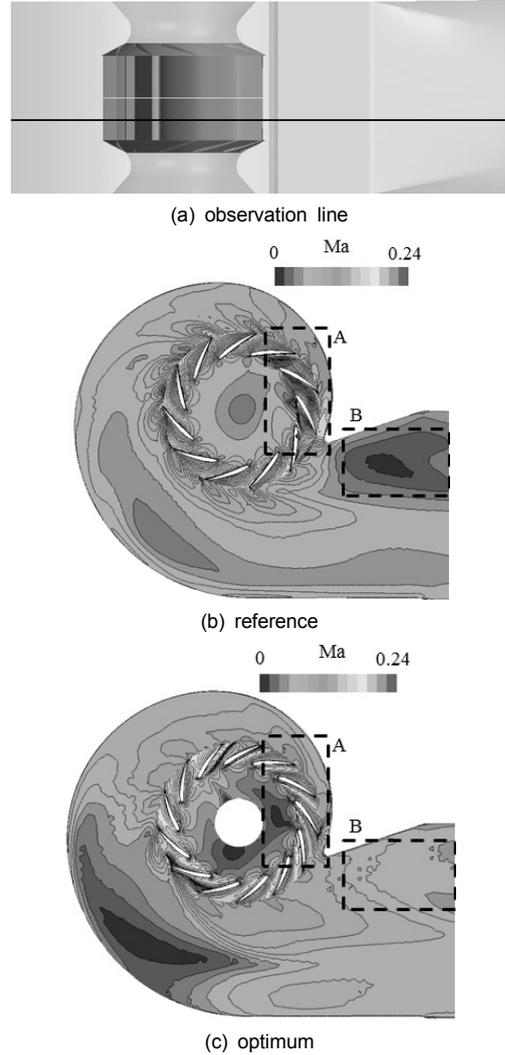


Fig. 12 Mach number contours

영역에서도 기준 송풍기에서는 넓은 영역의 저속흐름이 나타난다. Fig. 12(c)의 최적형상의 임펠러의 경우 컷오프영역(“A”영역)에서의 기준송풍기에 비하여 저속유동이 상대적으로 감소됨을 알 수 있다. 즉 임펠러 입출구각의 최적설계로 임펠러 출구유속과 컷오프영역의 기류 속도를 잘 매칭 시켜 임펠러 내부의 저속영역을 줄임으로써 효율은 향상되었다.

Fig. 13은 컷오프 영역과 인접한 임펠러의 날개 벽면에서의 한계유선(limiting streamline)을 나타낸다.

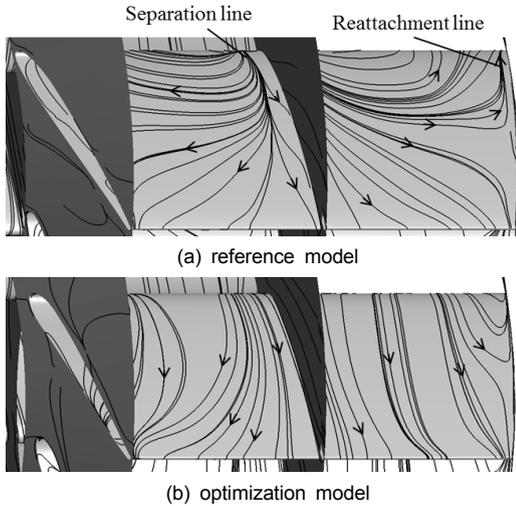


Fig. 13 Limiting streamlines on impeller near cut-off region

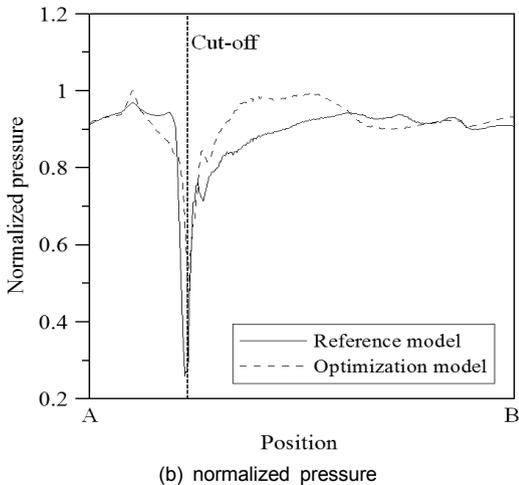
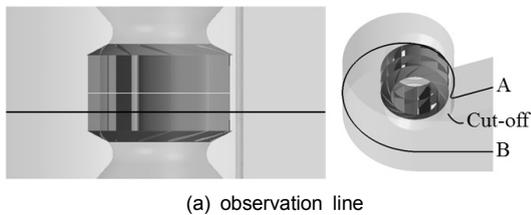


Fig. 14 Normalized pressure along an observation line

Fig. 13(a)의 기준 원심송풍기의 경우 박리와 재부착이 익면상에 발생하여 유동장이 복잡함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 13(b)의 최적 설계 모델의 경우 상대적으로 안정적인 흐름을 보임을 알 수 있다.

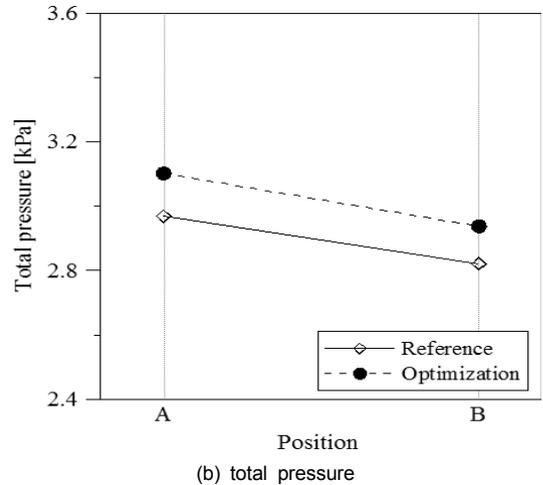
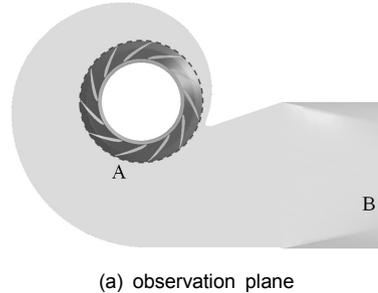


Fig. 15 Average pressure at the impeller outlet(A) and volute casing outlet(B)

Fig. 14는 기준 및 최적설계 원심송풍기 볼류트 케이싱의 벽면을 따른 압력을 나타낸다. 압력은 최대 압력(2.98kPa)으로 무차원화 하였다. 압력 측정위치는 Fig. 14(a)와 같다. 기준모델의 경우 컷오프(cut-off)지점에서 압력이 급격히 감소하였다가, 볼류트 케이싱을 따라 압력이 회복됨을 알 수 있다. 최적설계 모델의 경우 컷오프지점 이후에 압력 증가값이 기준 모델보다 상대적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 15는 기준 및 최적 설계 원심송풍기의 임펠러 출구 및 볼류트 케이싱 출구에서 평균 압력을 나타낸다. Fig. 15(a)에 임펠러 출구("A") 및 케이싱 출구("B")의 위치를 각각 나타낸다. 최적설계 임펠러 출구에서의 전압차가 기준 송풍기에 비하여 약 0.17 kPa 증가함을 알 수 있다.

이상에서와 같이 날개의 입구 및 출구 각도 최적

화를 통하여 익간 유동의 개선을 확인할 수 있었으며, 또한 원심송풍기 효율 및 압력이 향상됨을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 산업용 양흡입 원심 송풍기의 성능 향상을 위하여 임펠러 형상인자인 입출구각을 설계 변수로 선정하여, 삼차원 압축성 유동해석 및 반응면 기법을 이용한 수치최적설계를 각각 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 양흡입 원심송풍기 임펠러 입출구각의 최적화로, 최적설계 원심송풍기는 기존 원심송풍기에 비하여 효율은 4.7%, 압력은 1.02% 향상되었다.
- 2) 기존 원심송풍기는 컷오프 근방에 위치하는 임펠러 내부에서 박리에 의한 저속 유동이 발생하며, 이는 볼류트 케이싱의 출구에서의 불균일한 유동을 발생시킨다. 임펠러 입출구각의 최적화를 통하여 임펠러 내부와 볼류트 케이싱 출구 영역에서 압력손실을 증가시키는 저속영역을 감소시킬 수 있었다.
- 3) 기존 설계 원심송풍기 임펠러 전연 압력면에서부터 발생하는 박리 및 재부착 유동은 입출구각의 최적화로 억제하여, 익면상의 압력손실을 줄일 수 있었다.
- 4) 임펠러 출구에서의 유동분포에 따라 볼류트 케이싱 출구 속도 분포도 결정되며, 입출구각 최적 설계를 통해 상대적으로 균일한 출구속도를 나타낼 수 있었다.

## References

1. Frank P. Bleier, Fan Handbook and McGraw-Hill, 1998, pp. 7.1-7.16
2. Logan, E. Jr., Turbomachinery(Basic theory and

- applications), MARCEL DEKKER INC., New York, 1993, pp. 45-47.
3. 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.
4. J. H. Kim, K. H. Cha, K. Y. Kim, and C. M. Jang, "Numerical Investigation on Aerodynamic Performance of a Centrifugal Fan with Splitter Blades", International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 5, No. 4, 2012, pp. 168-173.
5. C. M. Jang, "Optimal Operation of Turbo Blowers Serially Connected Using Inlet Vanes", Proceedings of 3rd Asian Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2010, pp. 98-103.
6. J. Y. Park, M. R. Park, S. C. Hwang, and K. Y. Ahn, "Effects of Impeller Blade Thickness on Performance of a Turbo Blower", Journal of Fluid Machinery, Vol. 13, No. 4, 2010, pp. 5-10.
7. J. W. Kim, and E. Y. Ahn, "A Study on the Performance of Centrifugal Blower by Blades Characteristics", Journal of Fluid Machinery, Vol. 7, No. 5, 2004, pp. 13-19.
8. J. S. Lee, and C. M. Jang, "Evaluation of Inflow Uniformity on the Performance of Double-Inlet Centrifugal Blower Using Optimal Design Method", Journal of Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 326-333.
9. J. S. Lee, and C. M. Jang, "Performance Characteristics of the Double-Inlet Centrifugal Blower according to the Shape of an Impeller", Journal of Fluid Machinery, to be published.
10. S. H. Kang, and Y. J. Kim, "Effects of the Impeller Inlet Tip Clearance on the Flow and Performance of Airfoil Fans", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 23, No. 8, 1999, pp. 957-968.
11. Cory, W. T. W., Fan and Ventilation a Practical Guide, Roles and Associates Ltd., New York, 2005, pp. 22-26.
12. CFX-13 User Manual, 2010, Ansys inc.
13. F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Tur-

- bulence Models for Engineering Applications,” AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.
14. J. S. Lee, and C. M. Jang, “Evaluation of Numerical Methods for Analyzing an Industrial Centrifugal Blower,” Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, 2012, Vol. 123, No. 6, pp. 688-695.
15. R. H. Myers, and D. C. Montgomery, “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments”, 1995, John Wiley & Sons, New York.