

# 양흡입 원심블로어 성능향상을 위한 입구 유동 최적화 연구

이종성 · 장춘만<sup>†</sup> · 전현준

한국건설기술연구원

## Evaluation of Inflow Uniformity on the Performance of Double-Inlet Centrifugal Blower Using Optimal Design Method

JONG-SUNG LEE, CHOON-MAN JANG<sup>†</sup>, HYUN-JUN JEON

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

**Abstract** >> This paper presents the performance enhancement of a double-inlet centrifugal blower by the shape optimization of an inlet duct. Two design variables, a length of anti circulation vane and an angles of inlet guide, are introduced to improve the inlet flow uniformity leading to the blower performance. Three-dimensional Navier-Stokes equations are used to analyze the blower performance and the internal flow of the blower. From the shape optimization of the inlet duct of the double-inlet centrifugal blower, the optimal positions of each design variable are determined. Throughout the analysis of sensitivity, it is found that the angle of the inlet guide is more effective than the length of the anti-circulation vane to increase flow uniformity at the outlet of the duct. Efficiency and pressure for the optimal inlet duct shape are successfully increased up to 3.55% and 3.2% compared to those of reference blower at the design flow condition, respectively. Detailed flow field inside the blower is also analyzed and compared.

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

### 1. 서 론

산업용 플랜트의 핵심요소부품으로 사용되고 있는 원심블로어는 고압, 고풍량을 갖으며, 화력 및 원자력 발전소, 제철소, 시멘트, 석유화학, 반도체, 자동차 산업 등 다양한 산업분야에 적용되고 있다. 대형 산업용 원심블로어는 펌프와 함께 전체설비의 유체 이송 및 공조를 담당하며, 시스템 전체의 에너지 사

용 많은 부분을 차지한다. 시스템 에너지 절감을 위해서는 에너지 사용이 많은 원심블로어의 고효율화가 중요하다.

최근 들어 최적화 기법을 적용한 원심블로어의 고효율화 연구가 컴퓨터의 발달과 함께 설계단계부터 이용되고 있다. 원심블로어의 주요 설계변수로는 임펠러 입, 출구각, 블류트 케이싱 및 입구가이드 형상 등이 있다<sup>1-4)</sup>. 최적화기법 중에서 반응면 기법<sup>5)</sup>도 원심송풍기의 최적화 설계에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 고압 및 고풍량이 요구되는 제철/제강/파워 플랜트 등에 적용되고 있는 양흡입형 원심

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

[ 접수일 : 2013.7.30 수정일 : 2013.8.21 게재확정일 : 2013.8.31 ]

Copyright © 2013 KHNES

블로어를 대상으로 하였으며, 블로어 성능향상을 위하여 블로어 상류측의 입구덕트 형상을 최적화하여 블로어 유입유속 분포를 균일화하고자 하였다. 입구 덕트 형상을 최적화하기 위하여 반응면 기법과 3차원 수치해석을 실시하였으며, 설계인자의 최적화 및 블로어 내부유동장 특성을 분석하였다.

## 2. 양흡입 원심블로어

### 2.1 양흡입 원심블로어 사양

본 연구에서는 2,500kW급 플랜트 메인 프로세스용 대형 원심블로어의 축소모델을 대상으로 하였으며, 실험용 원심블로어 설계사양 및 형상은 Table 1 과 Fig. 1에 각각 나타내었다. 본 모델의 설계점에서의 유량 계수( $\phi$ ) 및 정압계수( $\psi$ )는 0.215과 0.622이며, 유량계수 및 정압계수는 다음과 같이 정의한다.

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

Table 1 Design specifications of a blower

Name	Value
Flow coefficient	0.215
Pressure coefficient	0.622
Rotational frequency of impeller, rpm	1500
Inlet diameter of impeller, mm	603
Outlet diameter of impeller, mm	950
Number of blade, ea	11



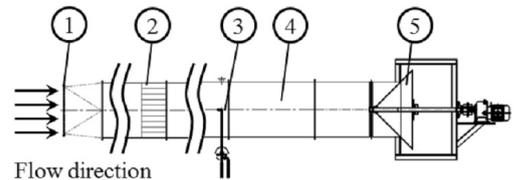
Fig. 1 Double-inlet centrifugal blower

$$\psi = \frac{2\Delta P}{\rho U_t^2} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ ,  $A$ ,  $U_t$ ,  $\Delta P$ ,  $\rho$ 는 유량, 입구 덕트 단면적, 임펠러 끝단의 회전방향 속도, 전압상승 및 블로어 입구 공기밀도를 각각 의미한다.

### 2.2 성능시험

원심블로어의 시험성능평가를 위하여 토출 덕트 타입 블로어 성능시험장치를 설계, 제작하였다. 블로어 시험장치는 KS B 6530 등의 규격을 참조하였으며, 구성도는 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서와 같이 유량조절을 위한 댐퍼를 덕트하류에 설치하고, 토출덕트의 길이는 12m로 덕트직경의 약 10.3배로 하여 댐퍼에 의한 기류영향을 최소화하였다. 토출 덕트의 직



1 : Test blower, 2 : Screen, 3 : Pitot tube & Static pressure tube, 4 : Duct, 5 : Damper

Fig. 2 Layout of experimental apparatus

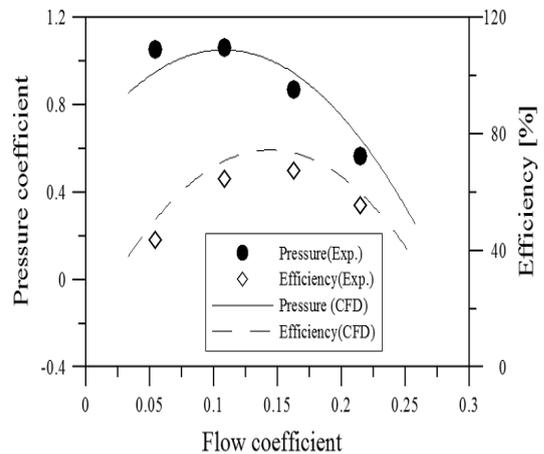


Fig. 3 Performance curve of a test blower

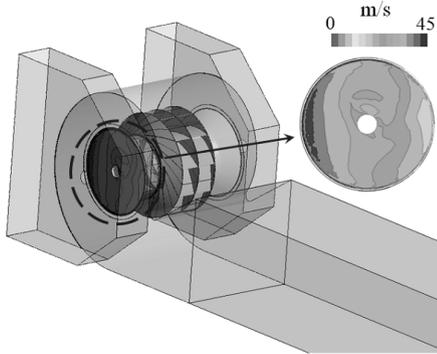


Fig. 4 Velocity distribution at the plane of a blower inlet

경은 1.165m이며, 피토관을 이용하여 유량을 측정하였다. 블로어의 성능곡선은 Fig. 3에 나타낸다.

### 3. 형상 최적화 방법 및 변수 정의

양흡입 원심블로어의 성능향상을 위하여 블로어 입구덕트의 형상을 최적화하여, 블로어 유입유로의 속도 분포를 균일화하고자 한다.

양흡입 원심블로어는 Fig. 4에서와 같이 덕트 입구에서 블로어 입구까지 90° 덕트로 연결되어 기류의 유입유동이 복잡하고, 급격한 유로방향 변환으로 유동이 불균일한 특징을 갖는다. 즉 블로어 입구속도 분포에서와 같이 좌우측이 비대칭적인 속도분포를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 블로어 유입유동의 불균일화는 블로어 입구각도에 부합되지 않는 기류분포를 가져오며, 이로 인하여 블로어 효율이 떨어지는 원인이 된다.

#### 3.1 형상최적화 방법

본 연구에서는 블로어 유입 속도의 균일화를 위하여 두 개의 설계변수를 선정하고, 선정된 설계변수들이 목적함수에 미치는 영향을 수리 통계적인 방법으로 분석 할 수 있는 반응면 기법(response surface method)을 도입하였다<sup>6)</sup>.

2차 다항식으로 구성된 반응면 모델은 다음과 같이 표현된다.

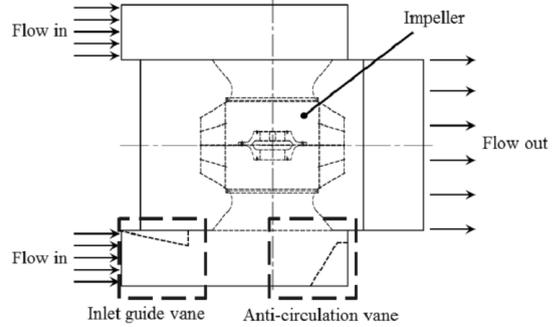


Fig. 5 section view of the test blower

Table 2 Design space of an inlet duct

Variables	Lower bound	Middle	Upper bound
Angle of inlet guide (A), deg.	5	10	15
Length of anti circulation vane (L), m	25	50	75

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

여기서  $\beta$ ,  $n$  그리고  $x$ 는 각각 다항식의 계수, 설계 변수의 개수 그리고 설계변수를 나타낸다. 각항의 미정계수는 회귀분석을 통하여 구하였으며 미정계수의 타당성은 ANOVA(Analysis of Variance)와 회귀분석을 이용하여 검증하였다<sup>7)</sup>.

#### 3.2 형상변수

본 연구에서는 블로어 입구 유동 균일화를 위하여, Fig. 5와 같이 유동이 편중되는 입구 덕트에 Inletguide와 Anti-circulation vane을 적용하여, 베인의 각도와 형상에 대한 수치최적화를 수행하였다.

Fig. 6과 같이 Inlet-guide의 각도를 A로, Anticirculation vane의 길이 L로 정의하였으며, 각의 변수에 대하여 3수준의 인자를 설정하였다. 즉, Fig. 6(a)와 같이 Inlet-guide 설치각은 5°(A1), 10°(A2), 15°(A3)로, Fig. 6(b)와 같이 Anti-circulation vane 폭은

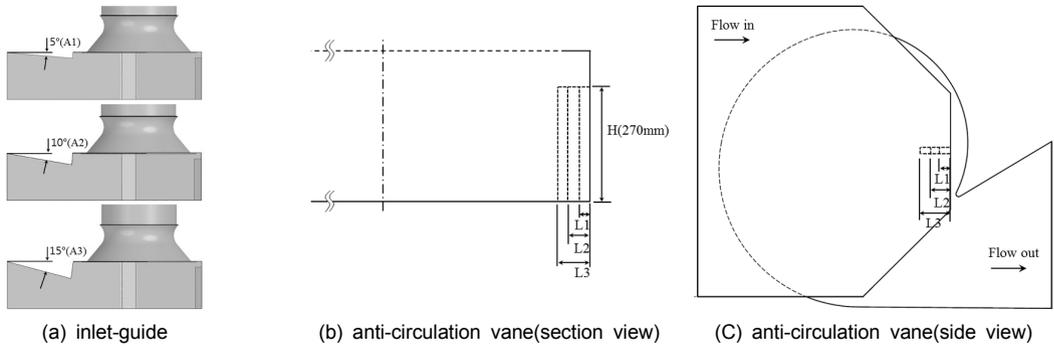


Fig. 6 Definition of design variables

25mm(L1), 50mm(L2), 75mm(L3)로 각각 설정하였다.

반응면 기법으로 최적설계인자를 구하기 위한 설계값의 경계치는 예비계산을 통하여 결정하였으며, 변수 각각의 경계값은 Table 2에 나타내었다.

#### 4. 입구유동 균일도 정의 및 평가

본 연구에서는 블로어로 유입되는 유동의 균일도를 평가하기 위한 목적함수로 다음과 같이 유동 균일도를 정의 하였다.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(v_{avg} - v_{local})^2}{n}}}{v_{avg}} \quad (4)$$

여기서, v와 n은 각각 속도와 데이터 개수를 의미하며, 하첨자 avg와 local은 속도의 평균값과 국소값을 각각 의미한다. 각각의 속도성분은 Fig. 7과 같이 입구덕트 출구(Fig. 7(a)의 검은색 단면)면에서 계산된 값을 기준으로 하였으며, 계산점은 Fig. 7(b)와 같이 기류의 대표성을 갖는 41개의 포인트를 등간격으로 선정하여 평가하였다.

#### 5. 수치해석 방법

##### 5.1 수치계산 방법

본 연구에서는 두 가지 단계로 수치해석을 진행하

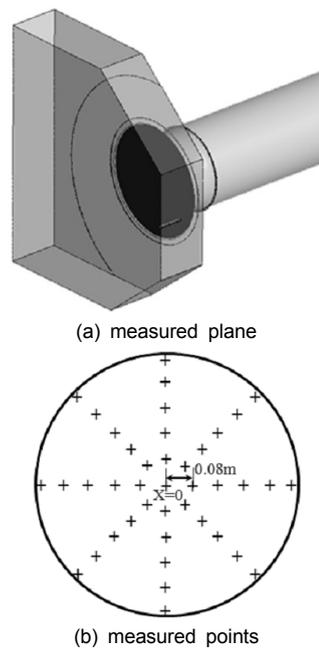


Fig. 7 Uniformity at the outlet of an inlet duct flow

였다. 먼저 블로어 입구 유동 균일도를 최적화 하기 위하여 양흡입 원심블로어의 입구덕트 부분 만 모델링하여 형상최적화를 수행하였다. 다음단계로 최적화된 형상의 덕트를 적용하여 양흡입 원심블로어 성능평가를 수행하였으며, 이 경우만 전체 형상을 3차원 모델링하여 수치해석으로 블로어 성능을 평가하였다. 수치시뮬레이션은 상용코드인 ANSYS-CFX 13<sup>8)</sup>을 사용하였다. 3차원, 압축성 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stocks)방정식을 유한 체적법으로 이산화하였

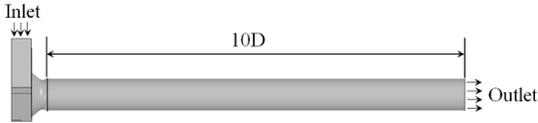


Fig. 8 Computational domain

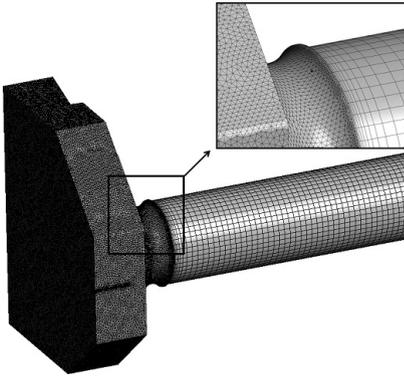


Fig. 9 Computational grid

으며, Pressure based fully coupled implicit 방법으로 정상 수치해석을 수행하였다. 난류모델은 유동의 박리현상 해석에 유용한 전단응력 이송모델(shear stress transport model)을 사용하였다<sup>9)</sup>.

## 5.2 계산영역 및 경계조건

수치시물레이션을 위한 블로어 입구덕트의 계산영역 및 격자시스템은 각각 Fig. 8, 9에 각각 나타낸다. 해석영역은 충분히 안정된 출구조건을 고려하였으며, 본 해석에서는 출구 덕트의 길이를 관경의 10배로 설정하였다. 해석격자는 ANSYS사의 ICFM CFD를 사용하여 정렬/비정렬 격자로 생성하였다. 본 수치계산에 사용한 전체 격자수는 67만 노드이다.

계산 경계조건으로는 덕트 입구에 압력 및 상온 조건을, 출구에 질량 유량 조건(설계유량=1250CMM)을 각각 적용하였다. 원심블로어 전체 형상을 모델링한 수치해석의 입출구 조건은 동일하며, 회전도메인의 회전속도는 1500RPM, 회전/정지 도메인의 경계는 Stage/Frozen Rotor interface<sup>10)</sup>를 적용하였다. 입구 및 출구면을 제외한 전체 벽면은 점착(no-slip) 조

건을 적용하였다.

## 5.3 수치해석 타당성 검토

7수치해석의 타당성을 검토하기 위하여, 성능 시험

을 통해 측정된 결과를 수치해와 비교하였다. 평가된 블로어 성능곡선은 Fig. 3에 나타낸다. 성능곡선에서 실선과 점선은 수치해석결과를, 원과 마름모는 성능 시험결과를 각각 나타내며 최대 5% 이내의 편차범위 내에서 실험값을 잘 모사하였음을 알 수 있다. 한편 성능평가를 위한 수치해는 스테이지 기법을 적용한 결과이다.

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1 설계변수의 최적화

설계변수의 최적화를 위해 반응면 기법을 이용하여 목적함수인 유동 균일도 특성을 분석하였다. 9가지의 경우의 블로어 입구 균일도의 정량적인 값을 Table 3에 나타내었다. 변수 A가 L에 비해 균일도에 더 민감하게 영향을 미치는 것으로 보이며, A2L2의 경우가 가장 낮은 균일도 값을 가짐을 알 수 있다.

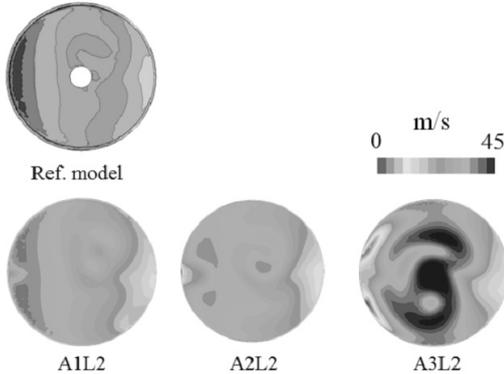
Fig. 10은 균일도에 더 큰 영향을 미치는 입구가이드 베인 각도(A)에 따른 균일도 영향을 분석하기 위하여, 길이 L은 50mm로 고정하고, 3가지 베인 각도에 따른 블로어 입구면의 속도분포를 나타낸다. 기존 입구가이드(좌측 상단)는 비대칭 유로로 인하여 고속의 유동이 편중되어 분포하고 있음을 알 수 있다.

입구가이드 베인의 각도(A)가 증가함에 따라 고속 영역이 좌측에서 중심측으로 이동되며, 속도분포가 비교적 균일해져가는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 입구 베인 각도가 15°(A3L2)인 경우 고속영역이 가운데 넓게 분포하며, 속도구배도 상대적으로 매우

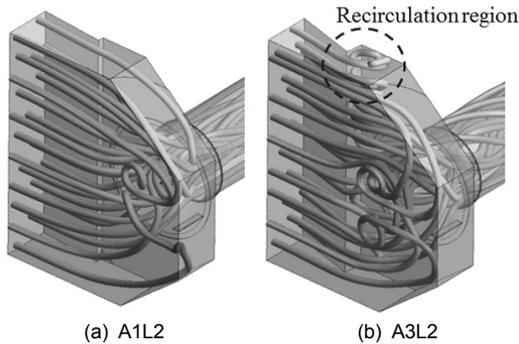
크게 나타나 유동장이 매우 불안정함을 알 수 있다. 베인 각도에 대한 효과를 분석하기 위해, L=50mm로 고정하고, A= 5°(A1L2), 15°(A3L2)로 적용하

**Table 3** Uniformity on design variable

	L1	L2	L3
A1	0.1397	0.1425	0.1557
A2	0.1673	0.1314	0.1895
A3	0.1863	0.2384	0.2109

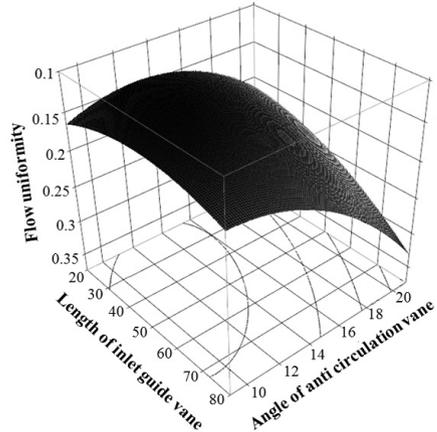


**Fig. 10** Velocity contours at the plane of a blower inlet



**Fig. 11** Streamline inside an inlet duct

였을 때 입구 덕트에서의 유선을 Fig. 11에 나타낸다. 그림과 같이 입구 가이드베인의 각을 일정이상으로 증가시킬 경우 베인(vane) 하류에 재순환유동이 발생하여, 오히려 불안정한 유속 분포의 유동이 임펠러로 유입하게 됨을 확인 할 수 있다. 이러한 재순환 유동은 입구 균일도 뿐 만 아니라 압력손실로 인한 블로어 효율저하에도 영향을 미침으로 적절한 각도 선정이 중요한 것으로 판단된다. Fig. 12는 반응면 기법을 적용한 수치최적화를 통하여 도출된 3차원 반응면(response surface)을 나타낸다. 그림에서 가로



**Fig. 12** Response surface for the inflow uniformity

및 세로축에는 설계변수인 Inlet guide 설치 각도(A) 및 Anti-circulation vane 폭(L)을 각각 나타내며, 높이 방향으로의 목적함수인 유동 균일도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 설계 최적값이 설계 공간의 한계 범위 내에 존재함을 알 수 있다.

2가지 변수에 대한 최적 Inlet guide 설치 각도 및 Anti-circulation vane 폭은 각각 11.5°, 43.8mm 이며, 설계 모델의 균일도 대비 약 27% 향상되었다.

## 6.2 유동장 특성 분석

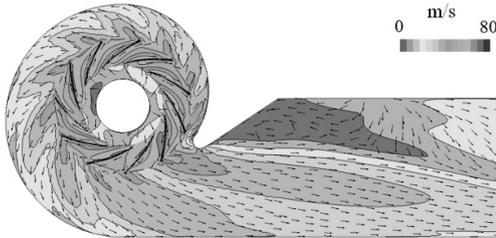
수치최적화를 통하여 도출된 최적형상의 입구 덕트를 모델 블로어에 적용하여, 3차원 수치해석을 수행하였으며, 기존 모델 결과와 성능특성 및 내부유동장 특성을 비교 분석하였다.

수치최적화를 통한 입구유동 균일화를 통하여 설계모델대비 효율 3.55%, 압력은 3.2% 증가하였으며, 이는 Table. 4에 나타내었다.

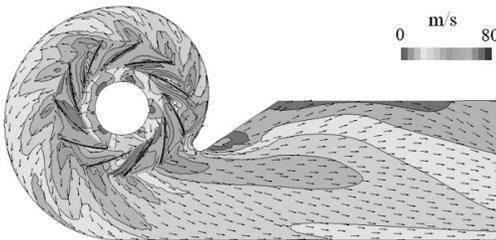
Fig. 13은 양흡입 원심블로어의 내부속도분포와 벡터를 비교하여 나타낸다. 관측면은 원심블로어 스펀중앙이다. 그림에서 알 수 있듯이, Fig. 13(a)의 기존모델 블로어 경우 입구에서의 불균일한 공기유입은 임펠러 및 컷오프(cut-off) 영역 하류에서 상대적으로 큰 저속영역이 분포하며, 저속영역에 재순환 유동이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 13(b)와 같이 최적입

**Table 4** Optimized result

Design Variables	Reference	Optimized shape	Increment
Efficiency, %	61.89	65.44	3.55%
Pressure coefficient	0.622	0.642	3.2%



(a) reference model



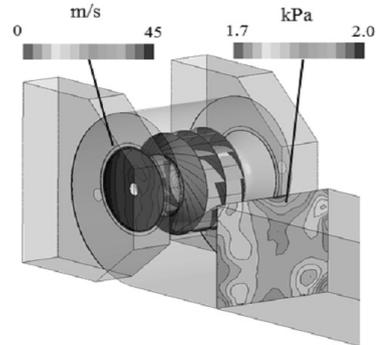
(b) optimal model

**Fig. 13** Velocity contours with tangential vector at mid-span of blower

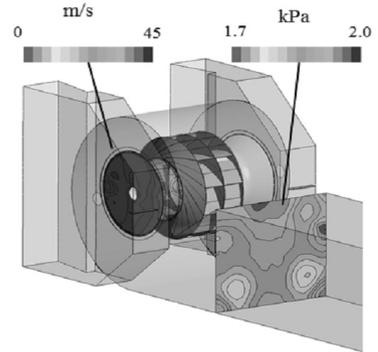
구덕트 형상을 적용한 블로어의 경우 재순환 유동 및 저속영역이 크게 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 블로어 입구의 속도분포와 케이싱 출구 압력분포를 각각 나타낸다. 그림과 같이 Fig. 14(b)의 최적입구덕트 형상을 적용한 케이싱 출구면에는 Fig. 14 (a)의 기존모델에 비해 고압 특성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 15는 블로어의 전압변동을 정량적으로 비교 분석한 결과이다. Fig. 15(a)의 단면위치와 같이 컷오프 하류의 a ~ c까지 3단면에서 전압 평균값을 측정하여 Fig. 15(b)에 도시하였다. 실선은 기존모델 블로어이며, 점선은 최적형상덕트를 적용한 블로어이다. 두 모델 모두 입구 덕트에서 임펠러 출구까지의 전압 상승은 유사하다. 그러나 임펠러 출구에서부터 컷오프를 통과하여 케이싱 출구까지의 압력은 최적화된 블로어의 결과가 설계 모델에 비해 평균 92.44Pa

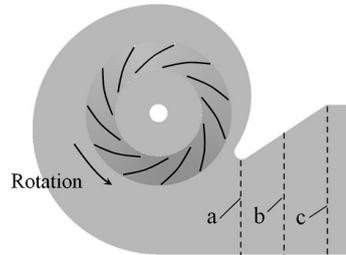


(a) velocity and pressure contours (reference model)



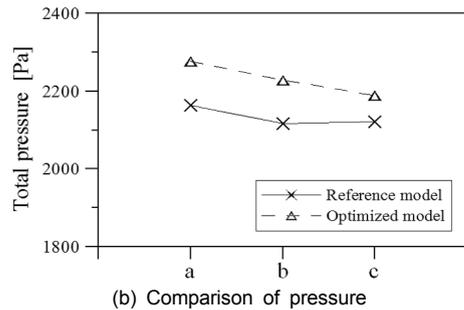
(b) velocity and pressure contours (optimal model)

**Fig. 14** Comparison of internal flow fields



(a) observation plane

(a : plane near blower cut-off, b : middle plane between blower cut-off and casing outlet, c : duct outlet)



(b) Comparison of pressure

**Fig. 15** Total pressure distribution

높게 측정되었다. 이는 입구유동균일화가 임펠러 출구이후의 유동을 안정화하여, 전압손실에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 양흡입 원심 블로어의 블로어 입구 유동 균일화를 위하여, 3차원 나비에 스톡스 방정식을 이용한 입구 덕트 형상 최적화를 수행하였다. 또 최적화된 입구덕트 형상을 원심블로어에 적용하여 성능 및 내부유동장 특성 조사하였으며, 결과는 아래와 같다.

- 1) 양흡입 원심블로어 입구덕트의 형상최적화를 통하여 블로어 입구유동 균일도를 기존형상 대비 27퍼센트 향상시켰다.
- 2) 입구덕트 형상설계 최적화를 통하여 Inlet guide 각도가 Anti-circulation vane 길이에 비해 균일도에 더 민감하게 영향을 미침을 알 수 있었다. 즉 Inlet guide 각도가 증가함에 따라 블로어 입구면의 고유속이 비대칭에 대칭형상으로 이동하여 속도분포가 균일해 짐을 알 수 있었다.
- 3) 입구덕트의 형상최적화를 통하여 기존 원심블로 대비 효율 및 압력이 각각 3.55% 및 3.2% 증가함을 알 수 있었다. 이는 블로어 입구유동 균일화를 통하여 임펠러 및 볼류트케이싱 내부의 재순환유동에 의한 유동손실을 줄인 결과임을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

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

## References

1. 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.
2. N. N. Bayomi, A. Abdel Hafiz, and A., M., Osman., "Effect of Inlet Straighteners on Centrifugal Fan Performance," *Energy Conversion & Management*, Vol. 47, 2006, pp. 3307-3318.
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. 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.
5. K. Y. Kim, and S. J. Seo, "Application of Numerical Optimization Technique to Design of Forward-Curved Blades Centrifugal Fan," *JSME International Journal-Series B*, Vol 49, No. 1, 2006, pp. 152-158.
6. R. H. Myers and D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, New York, 1995.
7. JMP 10, The Statistical Discovery Software, Version 10, SAS Institute, INC., Cary, North Carolina, USA, 2012.
8. VCFX-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.
10. 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*, Vol. 123, No. 6, 2012, pp. 688-695.