

터보블로어 설계인자의 성능특성 연구

장춘만*† · 양상호**

Performance Analysis on the Design Variables of a Turbo Blower

Choon-Man Jang*†, Sang-Ho Yang**

Key Words : Turbo blower(터보블로어), Efficiency(효율), Design variables(설계변수), Numerical simulation(수치해석), Optimal design(최적설계), Inlet and outlet angle(입출구각)

ABSTRACT

This paper describes the shape optimization of a blower impeller used for a refuse collection system. Two design variables, which are used to define the blade angles of an impeller, are introduced to increase the blower performance. A blower efficiency is selected as an object function, and the shape optimization of the blade angles is performed by a response surface method (RSM). Three-dimensional Navier-Stokes equations are introduced to analyze the internal flow of the blower and to find the value of object function for the training data. Relatively good agreement between experimental measurements and numerical simulation is obtained in the present study. Throughout the shape optimization, blower efficiency for the optimal blade angles is successfully increased up to 3.6% compared with that of reference at the design flow rate. Detailed flow field inside the turbo blower is also analyzed and discussed.

1. 서론

고압특성을 갖는 터보블로어는 산업용송풍기로써 각종 건설플랜트, 환경플랜트, 발전소 및 조선분야 등에 다수 적용되고 있다. 본 연구에서는 환경플랜트용으로 사용되고 있는 130 kW급 터보블로어를 대상으로 하였으며, 주로 생활폐기물 관로이송용 집하장에 사용되고 있는 흡입용 블로어이다. 생활폐기물 관로이송용 터보블로어의 전력소비량은 시스템 전체 소비 에너지의 90퍼센트 이상을 차지하며, 시스템의 운전에너지 절감을 위해서는 터보블로어의 고성능 설계 및 최적운전기술 개발이 필요하다. 즉 고성능의 터보블로어 설계를 위한 설계인자 성능특성 파악이 중요하다.^{(1),(2)}

터보블로어의 효율향상을 위한 주요 설계인자로는 터보블로어 임펠러의 입출구 각도, 입구 가이드베인의 형상 및 볼류트 케이싱 폭/ 확장각 등을 들 수 있다.⁽³⁾ 최근 들어 블로어의 설계인자 특성의 분석을 위해 통계적인 분석기법인 반응면(response surface)을 이용한 최적설계기법들이 많이

사용되고 있다.^{(4),(5)}

본 연구에서는 생활폐기물 관로이송 설비의 집하장에 설치되는 터보 블로어의 고효율 설계를 위하여 터보블로어 볼류트케이싱의 최적화 결과⁽³⁾를 바탕으로 터보블로어의 주요 설계인자인 임펠러 입출구 각도를 반응면기법을 이용하여 분석하였다. 설계인자의 분석 및 블로어 내부유동장 특성을 파악하기 위하여 블로어 성능평가장치를 이용한 실험 및 나비에·스톡스 방정식에 의한 3차원 수치해석을 각각 적용하였다.

2. 터보블로어

본 연구에서는 생활폐기물 관로이송 설비의 공기흡입용 터보블로어를 대상으로 하였으며, 실험용 터보블로어 형상도 및 성능곡선은 Fig.1에 나타낸다. Fig.1의 성능곡선은 설계시점의 임펠러 및 볼류트케이싱을 장착한 경우의 결과이며, 챔버형 성능실험장치를 이용하여 평가하였다.⁽³⁾ Table 1에는 본 연구에서 사용한 터보블로어의 설계사양을 나타낸다. 설계점에서의 유량 계수 및 압력계수는 0.175과 1.06이며, 효율은 76.1%를 갖는다.

* 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

** (주)삼원이앤비 기술연구소

† 교신저자, E-mail : jangcm@kict.re.kr

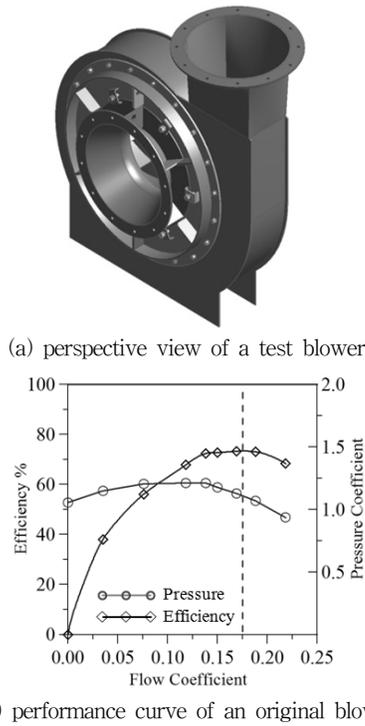


Fig. 1 Configuration and performance curve of a test blower

Table 1 Design specifications of a test blower

Name	Value
Flow Coefficient (Design Point)	0.175
Pressure Coefficient (Design Point)	1.06
Rotational Frequency of Impeller	3550 rpm
Efficiency	76.1 %
Outlet diameter of impeller	885 mm
Inlet diameter of impeller	465 mm
Blade thickness	3.2 mm
Number of blade	11 ea

3. 유동해석

3.1 계산격자

수치해석에 사용된 임펠러, 덕트 및 볼류트 케이싱의 격자를 Fig. 2에 나타낸다. 볼류트 케이싱은 CFX격자 생성 전용 프로그램을 이용하여 비정렬 격자로 생성하였으며, 임펠러부의 격자는 Turbo-grid를 이용하여 정렬 격자로 구성하였다.

입구와 출구덕트는 ICEM CFD를 이용하여 정렬격자로 구성하여 계산부하를 줄였다. 각 격자에 대한 수치해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX12를 사용하였다.⁽⁶⁾ 난류모델은 유동의 박리현상 해석에 적합한 전단응력이송 (shear stress transport)모델을 사용하였다. 입출구 덕트를 포함하는 터보 블로어 전체 계산격자수는 2,650,000 노드이다.

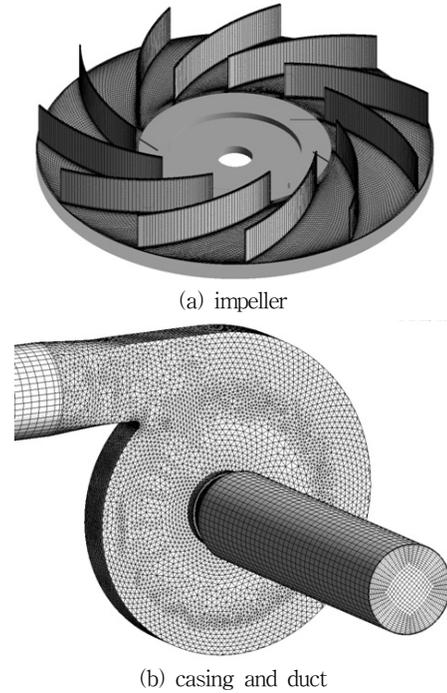


Fig. 2 Computational grids

3.2 경계조건

입구 경계조건은 압력(-1500 mmAq) 및 상온 조건을, 출구에서는 질량유량 조건을 각각 적용하였다. 입구면과 출구면을 제외한 전 벽면에서는 점착조건을 적용하였다. 고정영역인 볼류트 케이싱 부분과 회전영역인 임펠러 영역간의 경계면 계산은 프로즌 로터(frozen-rotor)방법을 적용하여 계산을 수행하였다.

4. 형상최적변수 및 반응면기법

본 연구에서는 터보블로어 임펠러 입출구각의 형상을 최적화하기 위하여 선정된 입출구각의 설계변수들이 목적함수에 미치는 영향을 수리 통계적인 방법으로 분석할 수 있는 반응면 기법(response surface method)⁽⁷⁾을 도입하였다.

반응면을 구성할 때 사용하는 반응면 함수는 2차 다항식으로 반응면 모델을 형성하고, 각 항의 미정계수는 회귀분석을 통하여 구하였다. 미정계수의 타당성은 ANOVA (Analysis of Variance)와 회귀분석을 이용하여 검증하였다.

본 연구에서는 터보블로어 입출구각의 형상최적화를 평가하기 위한 목적함수로 다음과 같이 정의된 블로어 효율 η (blower efficiency)을 사용하였다.

$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta P}{P_{input}} \quad (1)$$

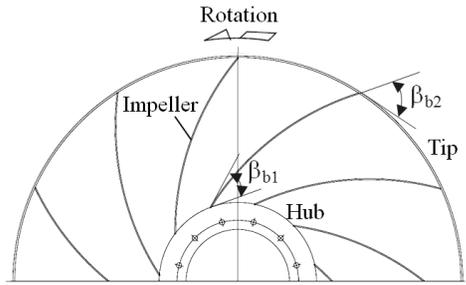


Fig. 3 Definition of blade inlet and outlet angle

Table 2 Design space of blade inlet and outlet angle

Name	Lower	Middle	Upper
inlet angle (β_{b1}), deg.	23	30	37
outlet angle (β_{b2}), deg	34	39	44

여기서, Q , DP , P_{input} 은 유량, 블로어 압력차(정압) 및 블로어 입력동력을 각각 나타낸다.

수치최적설계의 설계변수인 입출구각의 정의를 Fig. 3에 나타낸다. 뒷보기 구배를 갖는 터보블로어 임펠러의 날개 입구각(β_{b1}) 및 출구각(β_{b2})은 예비계산을 통하여 Table 2와 같이 경계 조건값으로 설정하였다. Table 2에서 중간값은 기준값(reference value)으로 설정하였다. 최대 및 최소 경계값은 등간격으로 설정하여 평가하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 임펠러 입출구각의 설계 최적화

본 임펠러 입출구각의 설계최적화는 일련의 터보블로어 설계인자의 최적화 연구의 일환으로 진행하였으며, 본 연구에서 사용한 볼류트 케이스는 1차적으로 최적화된 형상⁽³⁾을 모든 입출구각도에 대하여 적용하였다.

먼저 수치해석의 타당성 검토를 위하여, Fig. 4에 챔버타입의 블로어 실험장치를 이용한 성능시험결과와 비교를 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 일점쇄선으로 나타난 설계 유량점(유량계수= 0.175) 근방에서 실험값과 수치해석 결과가 최대 5% 오차 이내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

터보블로어 임펠러 형상설계를 위해 반응면 기법을 이용하여 설계변수인 임펠러 입출구각을 최적화하고 목적함수인 효율 특성을 분석하였다.

각각의 수치 설계점에서 삼차원 나비어-스톡스 방정식을 통하여 구한 목적함수를 이용하여, 반응면 구성에 필요한 미정계수를 결정하였으며, 이를 위하여 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS를 도입하였다. 완성된 반응함수는 t-검정과 adjust R2법⁽⁸⁾로 분석하였다. SPSS를 이용한 회귀분석 결과는 Table 3에 정리하였다. 통산 R^2_{adj} 가 0.9~1.0의 값을 가질 경우 타당한 반응모델이라고 판단⁽⁹⁾ 할 수 있으며, 본 계

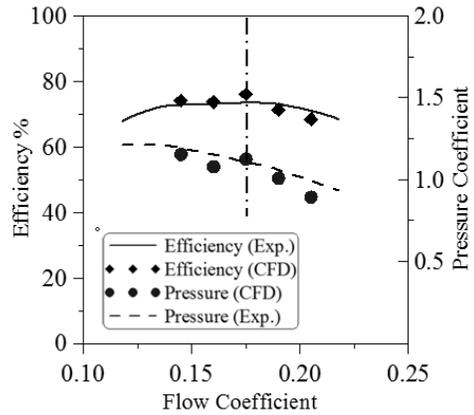


Fig. 4 Comparisons of blower performance⁽⁸⁾

Table 3 Results of ANOVA and regression analysis

Object Function	R	$R^2_{adjusted}$
Efficiency	0.999	0.989

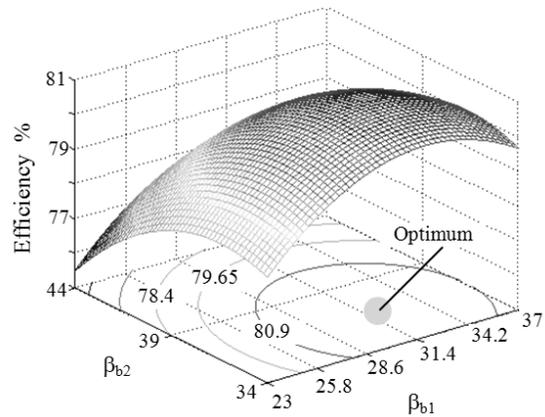


Fig. 5 Response surface

산에서는 신뢰구간 영역인 0.989임을 알 수 있다.

Fig. 5는 수치최적화를 통하여 얻은 반응면을 나타낸다. 그림에서 가로 및 세로축에는 설계변수인 입구각(β_{b1}) 및 출구각(β_{b2})을 각각 나타내며, 높이 방향으로는 목적함수인 효율을 나타낸다. 설계변수인 입구각과 출구각이 각각 31.8도 및 36.6도인 지점에서 목적함수인 블로어 효율이 최대가 됨을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 반응면의 최대 효율 점은 설계변수 입구각 과 출구각의 설계범위 내부에 존재함을 알 수 있다.

목적함수인 터보블로어 효율에 대하여 설계변수인 입구각 및 출구각이 미치는 효과에 대한 민감도 분석 결과, Fig. 6에서와 같이 입구각이 출구각에 비하여 주어진 설계영역에서 민감하게 변수값에 반응함을 알 수 있다. 이는 임펠러 입구유동방향에 부합하는 입구 설계각 설계가 중요함을 의미한다.

본 연구에서는 터보블로어 설계인자의 최적화연구의 일환

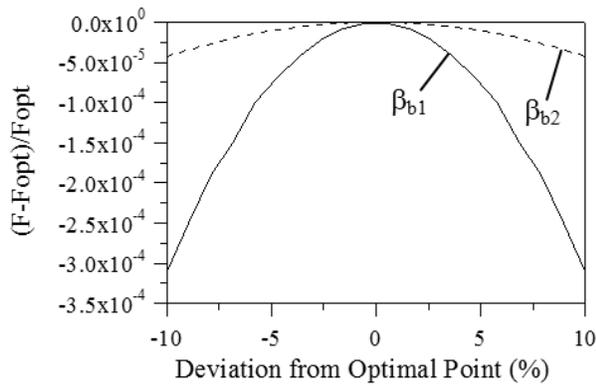


Fig. 6 Sensitivity analysis

Table 4 Optimization result for the object function of efficiency

Design Variables	Reference	Optimized Shape	Increment
Volute Casing ⁽³⁾	76.1	78.2	2.8 %
Inlet & Outlet Angle	78.2	81.0	3.6 %

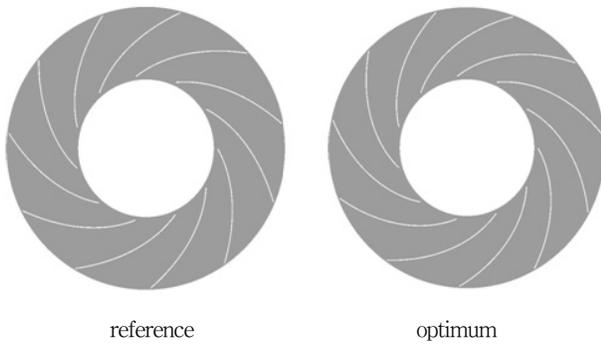


Fig. 7 Blade shape

으로 연구된 볼류트케이싱의 최적화 결과⁽³⁾를 임펠러 입출구 각 설계 최적화에 적용하였다. 즉 Table 4에서와 같이 볼류트 케이싱의 최적화를 통하여 약 2.8%의 블로어 효율을 향상시켰으며, 본 연구의 기준 블로어의 볼류트케이싱에는 최적화된 케이싱을 적용하였다.

임펠러 입출구각을 최적화한 본 연구에서는 최적화된 볼류트 케이싱을 설치한 기준 터보블로어에 비하여 약 3.6% 효율향상을 가져왔다. 즉 초기의 터보블로어에 대해서는 전체적으로 6.4%의 효율향상을 최적화를 통하여 달성할 수 있었다. 기존 및 최적화된 임펠러 형상을 Fig. 7에 나타낸다.

5.2 설계유량 조건에서의 내부유동장 특성

Fig. 8 및 9는 기존 및 최고효율을 갖는 임펠러 입출구각에 대하여 접선방향 속도벡터 분포 및 속도Contour 분포를 각각 나타낸다. 해석단면의 위치는 Fig. 8a에서와 같이 터보블로어 임펠러 중간높이로 설정하였다.

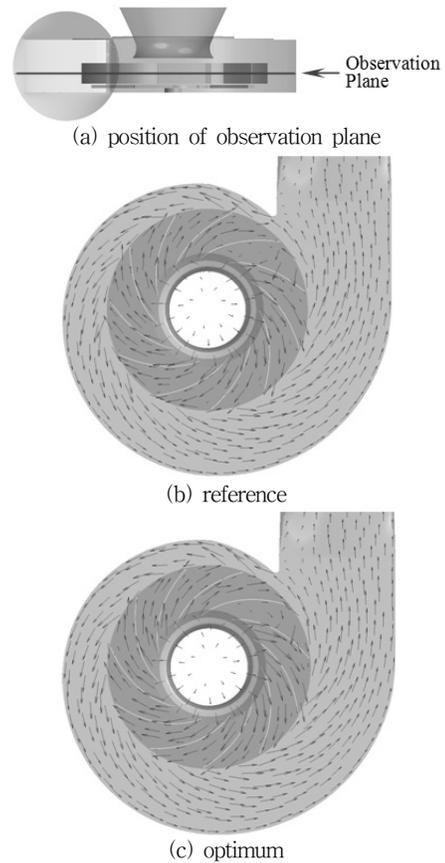


Fig. 8 Tangential velocity vectors on the mid-height of an impeller

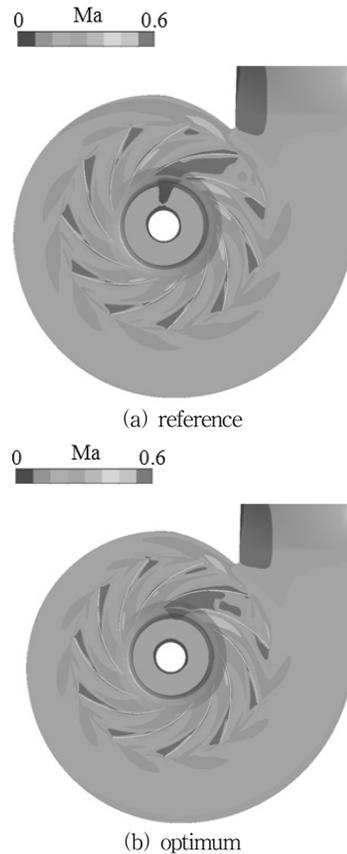


Fig. 9 Velocity contours on the mid-height of an impeller

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 10032063)

참고문헌

- (1) Jang, C.-M, Kim D.-W., and Lee, S.-Y., 2008, "Performance Characteristics of Turbo Blower in a Refuse Collecting System According to Operation Conditions," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 1896-1901.
- (2) Bayomi, N. N., Abdel Hafiz, A., and Osman, A. M., 2006, "Effect of Inlet Straighteners on Centrifugal Fan Performance," *Energy Conversion & Management*, Vol. 47, pp. 3307-3318.
- (3) Jang, C.-M., 2010, "Optimal Operation of Turbo Blowers Serially Connected Using Inlet Vanes," *Proceedings of 3rd Asian Workshop on Thermophysics and Fluid Science*, pp. 98-103.
- (4) Jang, C.-M., and Kim, K. Y., 2005, "Optimization of a Stator Blade using Response Surface Method in a Single-Stage Transonic Axial Compressor," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A- Journal of Power and Energy*, Vol. 219, pp. 595-603.
- (5) Kim, Kwang-Yong and Seo, Seoung-Jin, 2006, "Application of Numerical Optimization Technique to Design of Forward-Curved Blades Centrifugal Fan," *JSME International Journal-Series B*, Vol. 49, No. 1, pp. 152-158.
- (6) CFX-12 User Manual, 2008, Ansys inc.
- (7) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., 1995, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York.
- (8) Box, M. J. and Draper, N. R., 1971, "Fractional Designs, the XTX Criterion, and Some Related Matters," *Technometrics*, Vol. 13, No. 4, pp. 731-742.
- (9) Guinta, A. A., 1997, "Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods," Ph. D. Dissertant, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.

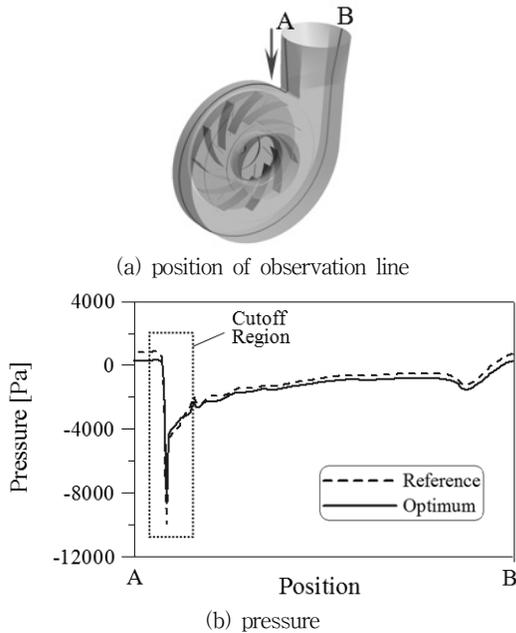


Fig. 10 Pressure along an observation line

1차적으로 최적화된 블류트 케이싱을 적용하였기에, 기존 및 최적화된 입출구각에서의 케이싱 내부유동은 두 경우 모두 케이싱 면을 따라 역류나 박리없이 케이싱 출구쪽으로 이동함을 알 수 있다.

Fig. 9의 속도Contour에서 알 수 있듯이, 임펠러 내부에서는 기존의 임펠러 형상이 최적화한 것에 비하여 커트오프(cutoff) 근방에서 상대적으로 임펠러 익간에 저속유동이 많이 발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 속도벡터 분포에서도 확인 할 수 있다.

6. 결 론

고압용 터보블로어의 고효율 설계를 위하여 터보블로어의 주요 설계인자인 임펠러 입출구 각도를 반응면기법으로 분석한 결과 최적인 입출구각을 선정할 수 있었으며, 기존의 형상과 대비하여 효율이 약 3.6% 상승함을 확인하였다. 또한 최적형상에 대한 터보블로어 내부유동장을 수치해석 결과를 이용하여 상세히 분석하였다.