삼차원 Navier-Stokes 해석을 이용한 원심다익송풍기의 최적설계

서성진† 김광용*

Design Optimization of A Multi-Blade Centrifugal Fan with Navier-Stokes Analysis

Seoung-Jin Seo, Kwang-Yong Kim

Key Words: Multi-Blade Centrifugal Fan(원심다익송풍기), Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation(레이놀즈평균 나비어-스톡스 방정식), Blade Force(블래이드힘), k- ε Turbulence Model(k- ε 난류모델), Response Surface Method(반응면 기법)

Abstract

In this paper, the response surface method using three-dimensional Navier-Stokes analysis to optimize the shape of a forward-curved blades centrifugal fan, is described. For numerical analysis, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with standard k-e turbulence model are transformed into non-orthogonal curvilinear coordinate system, and are discretized with finite volume approximations. Due to the large number of blades in forward-curved blades centrifugal fan, the flow inside of the fan is regarded as steady flow by introducing the impeller force models for economic calculations. Linear Upwind Differencing Scheme(LUDS) is used to approximate the convection terms in the governing equations. SIMPLEC algorithm is used as a velocity-pressure correction procedure. Design variables, location of cur off, radius of cut off, expansion angle of scroll and width of impeller were selected to optimize the shapes of scroll and blades. Data points for response evaluations were selected by D-optimal design, and linear programming method was used for the optimization on the response surface. As a main result of the optimization, the efficiency was successfully improved. It was found that the optimization process provides reliable design of this kind of fans with reasonable computing time

기호설명

b : 스크롤 폭
D_1 : 임펠러 입구 직경
D_2 : 임펠러 출구 직경
f : 목적함수
H : 압력수두
n : 설계변수
R_c : 설부 반경
U_1 : 임펠러 입구에서의 회전속도
U_2 : 임펠러 출구에서의 회전속도
V_θ : 원주방향 절대속도 성분
α : 확대각
η : 수력효율
θ_c : 원주방향 설부 위치

† 인하대학교 대학원
E-mail : g1991010@inhavision.inha.ac.kr
TEL : (02)860-7317 FAX : (032)1868-1716
* 인하대학교 기계공학부

1. 서 론

원심다익송풍기는 고효율, 저소음 및 고풍량의 특성을 가져 공기조화시스템에 널리 사용되고 있다. 이 원심송풍기는 임펠러의 반경비와 폭이 크고 날개수가 많다는 점에서 다른 종류와의 원심송풍기와 외형적으로 차별이 되고 있다.

고성능의 송풍기를 설계하기 위해서는 송풍기 유동장에 대한 정밀한 정보가 필수적이다. 원심다익송풍기 내부유동장에 대해서는 5공 프로브[1,2]와 spark tracing method[3]를 이용한 실험적 연구가 수행된 바 있다. 이 실험들의 결과는 공히 임펠러 입구부에 재순환유동이 발생하고, 스크롤(scroll) 내부에는 강한 삼차원 유동이 형성됨을 보여주었다.

전산유체역학의 괄목할 만한 발전에 힘입어 Navier-Stokes방정식을 기반으로 하는 전산유체역학적 해석이 최근 송풍기와 같은 터보기계의 해석과 설계에 매우 유용한 수단을 제공할 수 있게 되었다. Seo 등[4]은 임펠러내의 힘을 모델링하여 원심다익송풍기 내 유동장의 삼차원해석의 계산시간을 획기적으로 단축하였으며, 임펠러 출구면에서의 속도성분들, 정압, 그리고 유동각들의 계산치가 높은 유량계수에 대해 실험치와 잘 일치함을 보였다. Han 등[5]은 동일한 송풍기에 대해 재순환유동으로 인한 임펠러의 유동차폐영역에 대해 연구하였으며, 스크롤 내 유동장을 2차원유동으로 가정하고 설부(cut off)의 형상을 반응면 기법(response surface method)을 이용하여 최적화하였다.

본 연구에서는 삼차원 Navier-Stokes해석을 바탕으로 하는 반응면 최적화기법을 효율을 최대화하기 위한 목적으로 원심다익송풍기의 공력학적 형상 최적설계에 적용하였다. 유동해석에 소요되는 계산시간을 절약하기 위해 임펠러 힘에 대해 Seo 등[4]이 제시한 수학적 모델을 사용하였다. 설부의 위치(θ_c)와 반경(R_c), 스크롤의 확대각(α) 및 임펠러의 폭(b) 등 네 가지의 설계변수를 채택하여 최적화를 수행하였다. 반응면 구성을 위한 자료점(data point)들은 D-optimal 설계를 이용해 42개를 선택하였고, 반응면 상의 최적화를 위해서는 선형계획법을 사용하였다.

2. 유동 해석

Seo 등[4]의 임펠러 모델을 사용하여 원심다익송풍기 내의 유동을 정상상태로 가정하고 비압축성 난류유동의 삼차원 Reynolds평균 Navier-Stokes 방정식을 계산하였다. 난류모델로는 표준 k-ε모델을 사용하였다. 지배방정식들은 비직교곡선좌표계로 변화하였으며 유한체적법으로 이산화하였다. 대류항에 대한 수치도식으로는 linear upwind 도식이 사용되었다. 선형대수방정식의 계산을 위해서는 SIP(strongly implicit procedure)[6]가 사용되었다. 압력계산을 위해서는 SIMPLEC알고리듬이 사용되었다.

Fig. 1과 같은 구조의 원심다익송풍기의 계산을 위해서 다양한 경계조건이 사용되었다. 입구에서의 속도와 난류특성에 대한 실험치가 존재하지 않으므로 입구에서는 이들 변수에 대한 균일한 분포가 가정되었다. 각 블록(block)의 출구에서는 Neumann조건이 사용되었다. 점착조건이 고체벽면에 적용되었으며, 난류에 대한 벽 경계조건으로는 실험적인 벽함수가 사용되었다.

본 연구에서는 격자계에 대한 다중블록시스템(multi-block system)이 적용되었다. 전체 계산영역은 세 블록으로 분할되었는데, 이들은 중심부, 임펠러 및 스크롤 블록이다. 블록 경계를 따른 격자점들은 인접 블록의 대응 격자점들과 일치되도록 하였다. 압력 뿐아니라 압력구배가 블록 경계면에서 연속이 되도록 조건을 부여하였다.

임펠러를 통과하는 유동은 움직이는 블래이드로 인해 힘을 받게 되는데, 이 힘은 유동의 방향과 각운동량을 변화시킨다. 그러므로 수치계산에서 회전 블래이드에 의한 힘은 임펠러 블록내 각 계산격자에 작용하는 체적력의 형태로 수학적으로 모형화 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 개념에 의해 얻어진 Seo 등[4]의 임펠러 모델을 도입하여 반복적인 유동해석에 소요되는 계산시간을 상당히 단축하였다. 이 모델에서는 임펠러 블록 내에서 작용하는 블래이드에 의한 힘의 반경과 원주방향 성분을 공히 임펠러 입구와 출구에서의 유량과 유동조건들의 함수로 나타낸다. 이러한 힘들의 모델은 이산화된 운동량방정식의 생성항(source term)에 포함되어 실제 임펠러 블래

이드의 형상을 삽입하지 않아도 임펠러 블레이드의 역할을 묘사할 수 있게 된다.

3. 수치 최적화

반응면 기법[7]을 이용한 최적화는 최적화에 필요한 일련의 통계학적 및 수학적 기법의 적용과정이다. 이 과정은 수치해석(혹은 실험)에 의한 자료의 취득, 이 자료를 바탕으로 한 반응면의 구성 및 반응면 상에서의 목적함수의 최적화이다. 이 반응면 기법은 원래는 실험치로부터 실험식을 얻기 위해 고안되었으나, 실험의 횟수를 단축할 수 있는 잇점이 있어 최근에는 최적화 문제에 폭 넓게 적용되고 있다[8].

다항식형태의 반응면이 보편적으로 사용되고 있으며, 이 경우 다항식의 미지의 상수들은 회귀과정(regression process)에 의해 결정된다. 반응면은 보통 2차의 다항식으로 나타내어진다. 본 연구에서는 다항식의 계수들을 구하기 위해 표준최소자승법을 사용하였다. 이 경우 자료의 수는 최소한 계수들의 수 보다는 많아야 한다.

반응면을 구성하는데 필요한 자료의 수를 줄이기 위해 실험계획법(DOE; design of experiment)이 사용되었다. 특히, 실험계획법 중 D-optimal design[9]이 사용되었다. 계수 수의 단지 1.5배에서 2.5배 정도 되는 수의 자료들만 가지고도 신뢰할 만한 결과가 얻어질 수 있다고 보고되고 있다[10]. Giunta 등[11]은 이 기법이 다섯 개의 설계변수를 사용한 경우에 대해 충분히 신뢰할 만한 반응면을 구성하였음을 보였다.

목적함수는 다음과 같이 정의되었다.

$$f = 1 - \eta \tag{1}$$

여기서 효율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{actual\ head\ rise}{ideal\ head\ rise} = \frac{g(H_{ex} - H_{in})}{U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1}} \tag{2}$$

하첨자 in과 ex는 각각 송풍기의 입구와 출구를 나타낸다.

Table 1 Design Space

Variable	Lower Limit	Upper Limit
Location of cutoff(θ_c)	70	84
Radius of cutoff(R_c)	0.004	0.006
Expansion angle of scroll	3.7	5.7
Width of Scroll	0.8	1.4

Fig.1은 임펠러와 스크롤에 대한 설계변수들을 나타낸다. 여기에 나타난 설계변수는 설부의 위치(θ_c)와 반경(R_c), 임펠러의 폭(b) 등이다. 또 다른 설계변수인 스크롤의 확대각(α)은 Table 1에 나타난 바와 같이 스크롤의 형상을 규정하는데 사용된다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서 대상으로 하는 송풍기의 단면도는 Fig. 1과 같다. 계산에 사용된 계산격자계는 Fig. 2에 나타내었다. 각 블록에서의 계산격자수는 중심부에서 30×18×18, 임펠러부에서 6×66×20, 그리고 스크롤부에서 96×12×20개를 사용하였다. 작동유체는 20。C에서 밀도 1.22 kg/m^3, 점성계수 1.8×10-5 Ns/m^2 인 공기이다. 임펠러의 회전속도는 1140 rpm이다. 한번의 완전히 수렴된 유동해석 결과를 얻기 위해 1×10^{-5}의 수렴조건을 사용하였으며 2GHz의 Pentium-IV 프로세서에서 약 2시간의 CPU시간이 소요되었다.

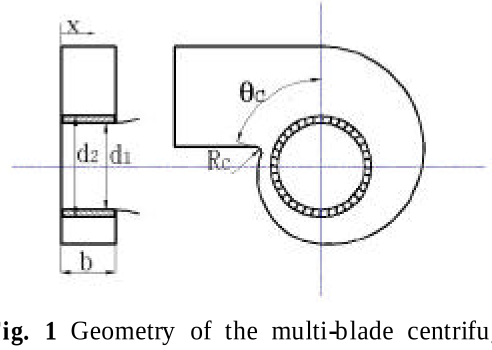


Fig. 1 Geometry of the multi-blade centrifugal fan

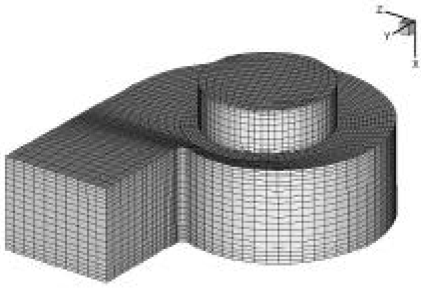


Fig. 2 Grid alignments for numerical calculation

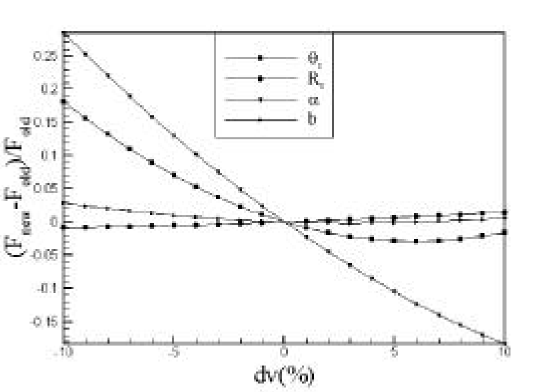
수치 실험점을 결정하기 위해서 각 설계 변수들은 -1에서 1까지 무차원화 하였다. 반응면 기법에서 4개의 설계변수를 사용할 경우 $n_t = (n+1)(n+2)/2$개 즉, 15개의 미지 상수를 결정하여야 하는 데 이를 위해 본 연구에서는 D-optimal 기법에 의해 총 42개의 수치 실험점을 선택하였다. 각각의 미지상수는 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS를 사용하여 구하였다. 완성된 반응함수는 T-검정과 ADJUST R^2법을 사용하여 신뢰도를 높였다. ANOVA와 회귀분석의 결과는 Table 2에 나타내었다. 최적화 기법은 선형계획법(linear programming)을 사용하였다. 설부의 원주방향 위치와 설부의 반경은 각각 75°와 $0.064\,D_2$의 근처에서 효율을 최대로 하였으며 이는 Han 등[5]의 연구와 비슷한 결과이다.

Fig. 3에 초기 형상과 최적화된 형상에서의 각 변수에 대한 민감도를 나타내었다. Fig. 3를 살펴보면 설부의 위치 및 스크롤의 확대각이 목적함수에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며 Fig. 3(b)에서는 선형계획법에 의해 탐색된 최적점에서의 민감도를 보여주고 있다.

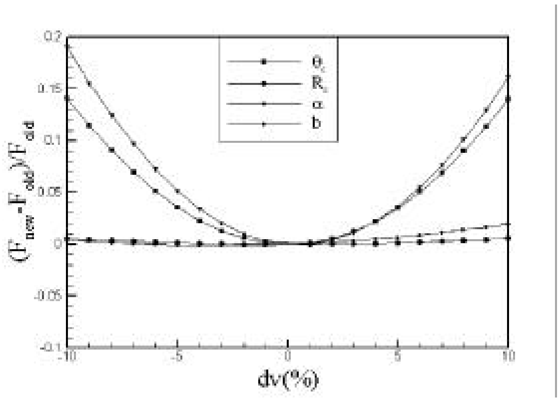
초기 형상과 최적화된 형상에서의 효율을 Table 3에 나타내었다.

Table 2 The quality of the 2nd order Response Surface

Model I	R^2	R^2_{adj}	Std. error of the estimate
1	0.983	0.973	2.08E-02



(a) Initial



(b) Final

Fig. 3 Sensitivity analysis for initial and final shape

Table 3 Result of optimization

	Initial shape	Final shape (flow analysis)	Increment (%)
Efficiency	87.6 %	96.9 %	10.6 %

4. 결 론

본 연구에서는 원심다익송풍기를 대상으로 설부의 위치(θ_c)와 반경(R_c), 스크롤의 확대각(α) 및 임펠러의 폭(b) 등의 네가지 설계변수를 사용하여 효율향상을 꾀하고자 삼차원 유동해석을 바탕으로 한 수치최적설계기법을 적용하였다.

원심다익송풍기의 임펠러 힘에 대한 수학적 모델을 사용하여 유동해석의 계산시간을 줄이고 반응면기법을 사용하여 유동해석의 횟수를 42회로 줄임으로써 효과적인 최적설계가 가능하였다. 아울러, 설계변수에 대한 민감도 해석을 통해 설부의 원주방향 위치 및 스크롤의 확대각이 효율에

매우 민감한 인자임을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Kind, R. J. and Tobin, M. G., 1990, "Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type", Transactions of ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 112, 84-90.

(2) Kim, J. K. and Kang, S. H., 1997, "Effects of the Scroll on the Flow Field of a Sirocco Fan", ISROMAC-7, Hawaii, 1318-1327.

(3) Kadota, S., Kawaguchi, K., Suzuki, M., Matsui, K., and Kikuyama K., 1994, "Experimental Study on Low-Noise Multiblade Fan"(1st Report, Visualization of Three-Dinensional Flow between Blades), Vol. 60, 102-113.

(4) Seo, S. J., Xi Chen, Kim, K. Y. and Kang, S.H., 2001, "Modeling Blade Forces in The Analysis of Three-Dimensional Viscous Flow in A Multi-Blade Centrifugal Fan", Recent Advances in Transport Phenomena(ed. I. Dincer and M. F. Yardim), Elservier Science Publishers, 215-220

(5) Han, S. Y., Maeng J. S., and Yoo, D. H., "Shape Optimization of Cutoff in A Multiblade fan/Scroll System Using Response Surface Methodology, " Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 42, 1-12

(6) Fletcher, C. A., 1991, Computational Techniques for Fluid Dynamics 1, Springer-Verlag.

(7) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R, and Tucker, K., 2001, Progress in Aerospace Science, Vol. 37, pp. 59-118.

(8) Myers, R. H., 1999, "Response Surface Methodology-Current Status and Future Direction," Journal of Quality Technology, Vol. 31, No. 1, 30-44.

(9) Box, M. J. and Draper, N. R., 1971, "Fractional Designs, the XTX Criterion, and Some Related Matters," Technometrics, Vol. 13, No. 4. 731~742.

(10) Venter, G., Haftka, R. T., and Starnes, J. H. Jr., 1996, "Construction of Response Surfaces for Design Optimization Applications", AIAA 96-4040-CP.

(11) Guinta, A. A., 1997, "Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods", Ph. D. Thesis, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.