

익형의 형상최적화를 통한 고효율 축류송풍기 설계

이기상* · 김광용** · 최재호***

High-Efficiency Design of Axial Flow Fan through Shape Optimization of Airfoil

Ki-Sang Lee*, Kwang-Yong Kim**, Jae-Ho Choi***

Key Words : Axial Flow Fan(축류형 송풍기), Design Optimization(최적설계), RBNN Method(라디얼베이스 신경회로망 기법), Latin Hypercube Sampling(라틴하이퍼큐브 샘플링)

ABSTRACT

This study presents a numerical optimization to optimize an axial flow fan blade to increase the efficiency. The radial basis neural network is used as an optimization method with the numerical analysis by Reynolds-averaged Navier-Stokes equations using SST model as turbulence closure. Four design variables related to airfoil maximum camber, maximum camber location, leading edge radius and trailing edge radius, respectively, are selected, and efficiency is considered as objective function which is to be maximized. Thirty designs are evaluated to get the objective function values of each design used to train the neural network. Optimum shape shows the efficiency increased by 1.0%.

기호설명

1		η	: 효율
f	: 목적함수	τ	: 토크
p	: 정압력	ω	: 각속도
P	: 전압력 또는 조절점	하첨자	
Q	: 유량	a	: 축 방향
U, V	: 속도	t	: 접선 방향
α	: 최대캠버		
β	: 최대캠버위치		
γ	: 앞전반경		
δ	: 뒷전반경		

1. 서론

터보기계의 설계에 최근 널리 사용되고 있는 전산유체역학을 활용하고자 하는 시도가 폭 넓게 시도되고 있다. 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어의 발전으로 인하여 전산유체역학의 광범위한 사용이 더욱 가속화 됨으로써 전산유체역학은 단순한 해석의 수단 뿐 아니

* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 인하대학교 기계공학부 (교신저자)
*** 삼성테크윈 파워시스템연구소
E-mail : kykim@inha.ac.kr

라 최적설계의 수단으로도 사용될 수 있게 되었다.

전산유체역학을 바탕으로 하는 최적설계기법은 터보기계 블레이드의 단면 형상과 스테킹 라인 등의 형상을 변화시켜서 날개 톱 누설과 유동박리 및 이차유동에 의한 에너지의 손실 등 송풍기의 성능을 저하시키는 요인들을 감소시키고 효율 및 압력을 증가시켜 성능을 효과적으로 증진시킬 수 있다.

유전 알고리즘을 이용한 터보기계 블레이드의 공력학적 형상최적화 연구는 Lotfi 등⁽¹⁾에 의해 수행되었는데 블레이드 단면형상에서 베지어 곡선(Bezier curve)에 의해 정의되는 캠버라인을 변형시켰다. 송풍기에 대해 유전 알고리즘과 결합된 다중목적함수 최적화 연구는 Kelner 등⁽²⁾에 의해 수행되었고, 그들은 설계변수로서 최대캠버와 최대두께 등을 고려하였다. 그리고 B-Spline곡선에 의해 정의되는 블레이드 단면 형상과 관련된 최적화연구는 Chung 등⁽³⁾에 의해 수행되었다. 그들은 설계변수로서 최대두께를 비롯하여 총 세 가지의 변수를 선택하여 목적함수인 양력계수와 항력계수의 비를 최대화시켜 스팀터빈의 성능을 향상시켰다. 천음속 압축기에서 최대캠버 위치가 미치는 영향에 대한 수치적 연구는 Chen 등⁽⁴⁾에 의해 수행되었다. 그들은 최대캠버의 위치를 변화시킴으로써 효율을 증가시킬 수 있음을 보였다. 한편, 터빈 블레이드 단면형상에서의 공력학적 형상 최적화에 대한 연구는 Mengistu 등⁽⁵⁾에 의해 수행되었고, 그들은 설계변수로 뒷전반경을 선택하여 단열효율을 향상시켜 터빈의 성능향상에 기여하였다.

본 연구에서는 NACA65계열 단면의 축류 송풍기 블레이드의 설계 최적화를 수행하였다. 블레이드 단면 형상에서의 최대캠버, 최대캠버위치, 앞전반경 및 뒷전반경을 설계변수로 선택하였다. 목적함수로는 전압효율을 선택하였고, 저속 축류 송풍기 날개의 형상을 래디얼베이스 신경회로망(radial basis neural networks) 기법을 사용해 최적화하였다. 축류 송풍기의 내부 유동에 대한 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식 해석결과를 실험 결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하고, 이 해석을 바탕으로 한 최적화설계를 통해 효율을 극대화할 수 있는 각 설계변수의 값을 찾아내었다.

2. 축류송풍기 사양

본 연구에서는 NACA65 계열의 익형을 사용한 축

류송풍기를 대상으로 최적화 연구를 수행하였다. 본 축류송풍기의 사양은 외경이 287.5 mm이며, 회전수는 1,000 rpm으로 일정하다. 이는 Jang과 Kim⁽⁶⁾의 실험에 사용한 송풍기와 동일하다. 위 송풍기에 대한 자세한 사양은 Table 1에 기술하였다.

Fig. 1은 자오면상의 허브 및 케이싱면 그리고 블레이드의 설치 위치 및 자오면 형상을 나타내고 있다. 화살표는 유동이 흐르는 방향을 나타낸다. 날개 끝단의 틈새는 2 mm (1.5% 톱 코드)로 균일하며, 설계점에서의 유량계수 ϕ 및 전압계수 ψ 는 각각 0.41과 0.3이다. 유량계수와 전압계수의 정의는 각각 Jang과 Kim⁽⁶⁾에서 쓰인 정의와 같다. 또한, 각 설계변수들에 대한 사양을 Table 2에 나타내었다. 4개의 변수들에 대한 각각의 0%, 50%, 및 100% 스펠에 대해 나타내었다. 최대캠버, 최대캠버위치, 앞전반경 및 뒷전반경은 설계형상의 실시수 값이다.

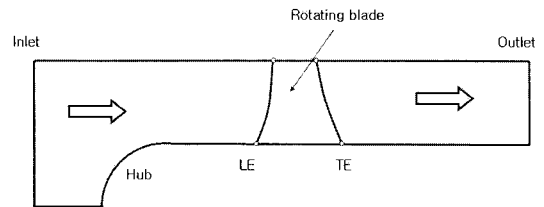


Fig. 1 Meridional geometry

Table 1 Specifications of reference fan blade

Flow Coefficient	0.41
Total Pressure Coefficient	0.3
Rotor Rotational Speed (rpm)	1000
Tip Radius (mm)	287.5
Hub-Tip Ratio	0.52
Inlet Angle at Rotor Tip (degree)	68.8
Outlet Angle at Rotor Tip (degree)	63.8

Table 2 Specifications of design variables

Variables	Hub	Mean	Tip
Maximum Camber(deg)	4.55	-6.74	-8.91
Maximum Camber Location(mm)	27	21	16
Leading Edge Radius (mm)	0.7	1.1	1.2
Trailing Edge Radius (mm)	1.2	0.9	1.1

3. 유동해석 방법 및 계산격자

축류송풍기의 유동해석을 위해 상용소프트웨어인 ANSYS CFX 11.0⁽⁷⁾을 사용하였으며, 블레이드 형상 설계 및 격자생성은 Bladegen과 Turbogrid를 사용하였다. CFX 11.0은 CFXpre, CFXsolver, CFXpost로 구성된다. 비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식과 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식 등의 지배방정식은 유한체적법으로 이산화된다. 난류모델로는 SST (Shear Stress Transportation) 모델을 사용하였다. 기본적으로 SST 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점만을 취한 모델이다. 육면체 격자계를 사용하여 격자를 구성하였으며, 계산격자는 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 블레이드 근처 격자에서는 H-O-L 격자계를 사용하였고, 그 이외의 격자는 육면체 격자계를 사용하여 구성하였다. 난류모델로 사용된 SST 모델의 정확한 계산을 위해 벽 근처 격자에서 y^+ 는 1 이하로 설정하였다. Fig. 3에서와 같이 격자의존성을 없애기 위한 격자 테스트를 거친 후 약 63만 개의 격자점을 채택하였다.

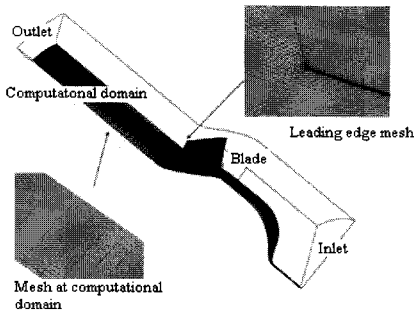


Fig. 2 Computational domain and grids

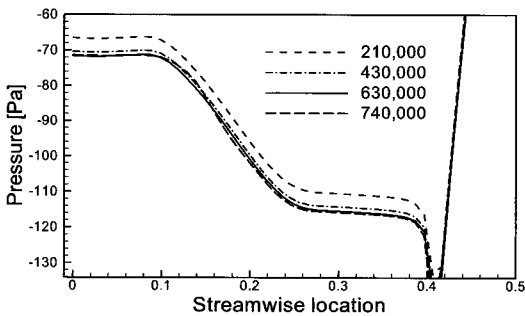


Fig. 3 Grid dependency test

주기조건을 사용하여 총 9 개의 블레이드 중 1 개의 블레이드 주위 유동만을 계산하였다. 입구조건으로 균일 유량조건을 적용하였고 출구경계에서는 일정압력 조건을 적용하였다. 벽면경계조건으로는 점착조건을 사용하였고, 측면경계조건으로는 물리량이 주기적으로 반복되는 주기조건을 주었다. 작동유체는 20℃의 공기이다. 한 번의 완전히 수렴된 유동해석 결과를 얻기 위해 3.0 GHz의 Pentium-IV 프로세서에서 약 12 시간의 CPU시간이 소요되었다.

4. 목적함수 및 설계변수

수치최적화를 위해서는 기본적으로 설계변수와 목적함수의 선정이 우선되어야 한다. 블레이드의 형상을 최적화하기 위한 목적함수는 전압효율로서 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_t = \frac{(P_{out} - P_{in}) \times Q}{\tau \times \omega} \quad (1)$$

여기서, P는 전압을 의미하며, 하첨자 in과 out은 각각 입구부와 출구부를 나타낸다. Q는 유량이며, τ 와 ω 는 각각 토크와 각속도이다.

블레이드 익형 형상에서 최대캠버, 최대캠버위치, 앞전반경 및 뒷전반경과 관련된 변수들, 즉 α , β , γ 및 δ 등 네 개의 설계변수를 선정하였다. 블레이드 단면 형상은 Fig. 4와 같이 3차 베지어 곡선에 의해 변화시킬 수 있다. 곡선은 3차 방정식에 의해 정의되고, α , β , γ 및 δ 는 베지어 곡선의 제어점 (control point) 들 P1, P2와 P4 에서의 제어변수들이다. 익형의 형상은 0%, 50% 및 100% 스팬에서 각각 변화시켰다.

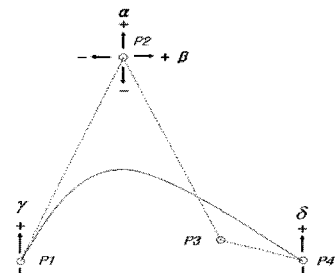


Fig. 4 Control points for airfoil shape

지정한 세 스캔 위치를 제외한 나머지 스캔 위치에서의 익형 형상은 지정된 스캔에서의 익형으로부터 보간되었다. 최대캠버 제어점 P2는 다른 점들이 고정된 상태에서 조절한다. Fig. 4에서 P2가 수직으로 움직이면, 블레이드 최대캠버가 변하는 것이고, P2가 수평으로 움직이면 최대캠버위치가 변하는 것이다. 즉, α 의 양의 값은 최대캠버의 증가를 의미하고, β 의 양의 값은 최대캠버위치가 뒷전으로 이동함을 의미한다. 조절점 P1과 P4는 각각 앞전반경과 뒷전반경에 관한 제어점이다. P1과 P4가 수직으로 움직이면 각각 앞전반경과 뒷전반경이 조절된다. γ 의 양의 값은 앞전 반경을 증가시키는 것이고, δ 의 양의 값은 뒷전 반경을 증가시키는 것이다. 따라서 최대캠버, 최대캠버위치, 앞전반경 및 뒷전반경과 관련된 네 개의 변수로서 블레이드 형상을 결정하게 된다.

5. 최적설계기법

본 연구에서는, 저속 축류형 송풍기 날개의 형상을 래디얼베이스 신경회로망 (RBNN)기법을 사용해 최적화하고자 하였다.

수치해석과 최적화 과정에 대한 순서도는 Fig. 5에 표시하였다. 우선 목적함수와 설계변수를 선택하고 설계영역을 결정하게 된다. 이후 적절한 샘플링 과정을 통하여 실험점을 얻게 되는데 이 수치 실험점에서 유동해석을 통하여 목적함수가 계산된다. RBNN모델과 같은 대리모델(surrogate model)이 사용되어 자료곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다.

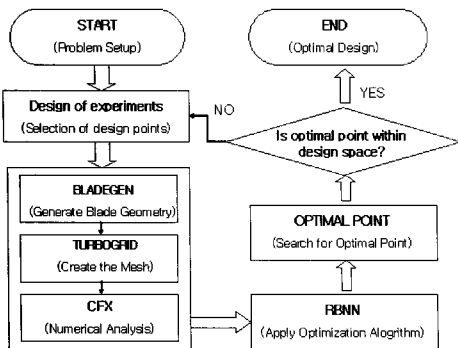


Fig. 5 Flow chart showing blade design and optimization procedure

신경회로망의 기본개념은 경험으로부터 배우고 기존 자료로부터 예측하는 인간의 기능을 모사하는 것이다. 신경회로망의 기본요소는 뉴런인데, 각 뉴런의 출력은 여기에 저장되었거나 도착하는 국부적인 정보에만 의존한다. 망의 예측능력은 가중치들에 의해 반영된다. 망의 훈련은 데이터를 통한 반복에 의해 수행된다. RBNN은 래디얼베이스 전달함수와 선형 출력으로 구성되는 두 겹의 망이다.

본 연구에서는 신경회로망을 MATLAB⁽⁸⁾의 함수 newrb를 사용하여 구성하였다. 여기서 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$a = \text{radbas}(\|w - p\|) \tag{2}$$

여기서 b 는 바이어스이고 w 는 뉴런가중치벡터, p 는 입력벡터이다. 래디얼베이스 함수 radbas는 다음과 같다.

$$\text{radbas}(n) = e^{-n^2} \tag{3}$$

이 방법을 이용할 경우의 가장 큰 장점은 함수의 선형성으로 인해 계산시간을 줄일 수 있다는 것이다. 이 함수에 대한 선형 모델 f 는 N 개 기본 함수들의 선형결합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \sum_{j=1}^N w_j y_j \tag{4}$$

여기서 w_j 는 가중치이고 y_j 는 기본함수이다. 기본함수를 선택하는 데는 여러 가지 방법이 있다. 만일 기본 함수와 다른 변수들이 훈련과정에서 고정된 값을 가지면 모델은 선형이다. 그러나 기본 함수가 훈련과정에서 변한다면 비선형 모델이 된다. 학습과정은 다차원 공간에서 훈련 데이터를 가장 잘 맞추는 곡면을 찾는 과정과 동일하고, 이 곡면은 최적화의 기반이 되는 자료곡면이 된다. SQP(Sequential quadratic programming)가 자료곡면 상에서 최적점을 찾기 위한 방법으로 사용되었다.

RBNN과 같은 대리모델을 구성하기 위해서는 설계 공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해 실험계획법이 사용되는 데, 본 연구에서는 실험계획법으로 라틴하이퍼큐브 샘플링 (Latin Hypercube Sampling)⁽⁹⁾을 사용하였다. 이를 이용해 30 개의 최적점을 채택하여 이 점들에서 RANS

해석에 의해 목적함수 값들을 계산하였다. 이 기법은 $m \times n$ 의 행렬을 구성하는데 여기서 m 은 각 변수에 대한 레벨의 수(샘플의 수)이고 n 은 설계변수의 수이다. 1부터 m 까지의 레벨을 포함하는 행렬의 n 개 열 각각은 라틴하이퍼큐브를 구성하기 위해 임의로 짝지어진다. 결국, 설계공간의 모든 부분을 대표하는 설계점들이 이 과정을 통해 얻어진다.

6. 결과 및 고찰

앞에서 기술된 송풍기에 대해 수치최적설계를 수행하기 전 단계로서 유동해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 Jang과 Kim⁽⁶⁾의 연구에서 측정된 실험결과와 유동해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험에서 축방향과 회전방향 속도분포는 블레이드의 후연으로부터 200 mm (150% 팁 코드) 떨어진 지점에서 측정되었다. 한편 본 연구에서는 이 지점을 송풍기 출구로 정의하였다. 여기서 y 축은 스패 길이로서 허브와 팁까지의 블레이드 길이, x 축은 팁에서의 원주속도로 각각 무차원화하였다. Fig. 6에서 축 방향과 회전 방향 속도분포는 날개 끝단부를 제외하고는 다른 영역에서는 실험값과 대체적으로 잘 일치함을 볼 수 있다. 속도분포의 비교를 통하여 본 수치계산에서 도출된 물리량이 실험값과 대체적으로 잘 일치함으로써 수치계산이 타당함을 알 수 있다.

최적설계 과정에서 변경될 설계변수들의 상한과 하한은 예비계산을 통해 결정하였으며, Table 3에 그 범위를 나타내었다. 기준 블레이드에 사용된 설계변수 값들을 최적설계시 초기값으로 사용하되 각 변수들의 초기값을 기준으로 상대변위에 대한 값을 최적설계 과정에서 사용하였다. 즉, 최적설계에서의 네 설계변수들의 초기값은 모두 0이다.

실험계획법으로 라틴하이퍼큐브 샘플링을 통해 총 30개의 실험점들을 얻었으며 이 점들에서 3차원 유동해석으로 평가한 목적함수값을 바탕으로 최적설계를 수행함으로써 신뢰할 만한 최적치를 얻었다. 최적설계된 각 설계변수는 Table 4(a)에 나타나 있고, RANS 해석에서 계산된 기준 블레이드와 최적 블레이드의 목적함수값은 Table 4(b)에 나타났다. 최적 블레이드의 목적함수인 전압효율은 86.9%로 초기형상대비 1.0%의 효율이 증가됨을 알 수 있다.

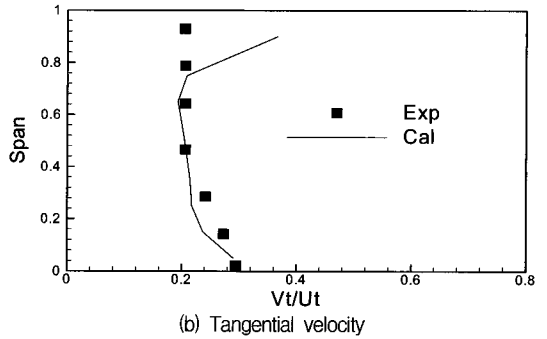
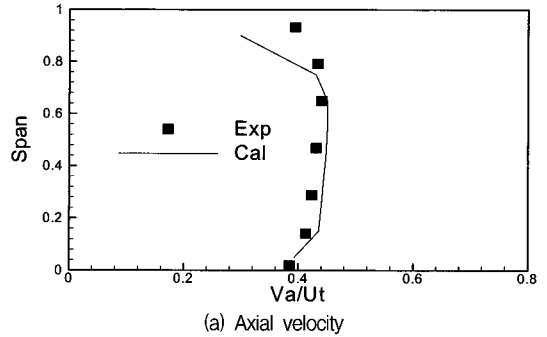


Fig. 6 Distributions of axial and tangential velocity components downstream of the fan rotor

Table 3 Design space

Variables	Lower Bounds	Upper Bounds
α	-4.0	4.0
β	-12	12
γ	-0.5	1.0
δ	-0.75	0.5

Table 4 Results of Design Optimization

(a) Design variables				
Design	α	β	γ	δ
Reference	0.0	0.0	0.0	0.0
Optimum	2.89	-3	0.8	0.076
(b) Objective function				
Design	Efficiency	Increment		
Reference	85.9%	-		
Optimum	86.9%	1.0%		

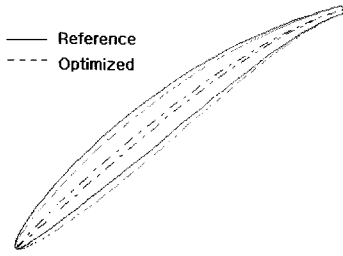


Fig. 7 Reference and optimized blade profiles

Fig. 7에는 기준 블레이드와 최적 블레이드 단면 형상을 비교하였다. 최적 형상에서 최대캠버(α)가 증가되면서 최대캠버위치(β)가 앞선 방향으로 이동함에 따라 블레이드 전반부에서의 각이 후반부에 비해 많이 변경되어 있다.

축류 송풍기 블레이드의 다중목적함수 최적화에 대한 연구는 Samad 등⁽¹⁰⁾에 의해 수행되었고, 그들은 설계변수로 스테킹라인에서의 스윙과 린(lean)을 선택하여 목적함수인 전압을 높이고 블레이드 토크를 줄여 전압효율을 증가시켜서 송풍기의 성능을 향상시키는데 기여를 하였다. 이 연구에서 중요하게 고려된 전압과 토크는 본 연구에서도 목적함수인 효율을 정의할 때 사용되었다. Figs. 8과 9에는 기준 형상과 최적 형상에서의 토크와 전압이 비교되어 있다. Fig. 8에 블레이드 스펠 방향에 따른 토크비(torque ratio)를 그래프로 나타내었다. 블레이드 출구에서의 반경 방향에 따른 토크비 분포를 알아보기 위해 국부적인 토크비를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Torque Ratio} = \frac{\tau_{\text{local}}}{\tau_{\text{average}}} \quad (5)$$

즉, 토크비는 각 스펠에서의 토크를 평균 토크로 무차원화한 것이다. 스펠 방향에 따른 토크의 분포를 볼 때 최적설계된 송풍기 형상에서는 약 75% 스펠 인근에서의 토크가 다른 영역에 비해 상대적으로 증가된 것을 알 수 있다.

한편, 스펠 방향에 따른 전압력비 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 블레이드 출구에서의 스펠 방향에 따른 전압비 분포를 알아보기 위해 국부적인 전압비를 다음과 같이 정의하였다.

여기서 전압은 각 스펠 위치에서 질량유량 평균된 값을 사용하였다. 스펠 방향에 따른 전압비 분포를 살펴

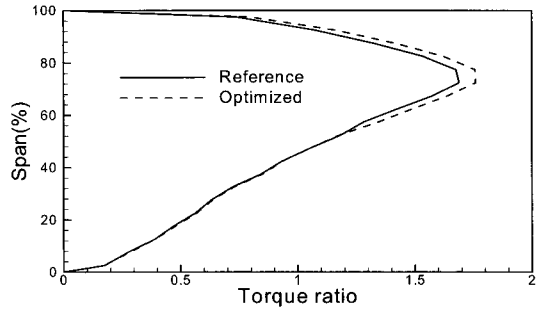


Fig. 8 Comparison of the torque ratio

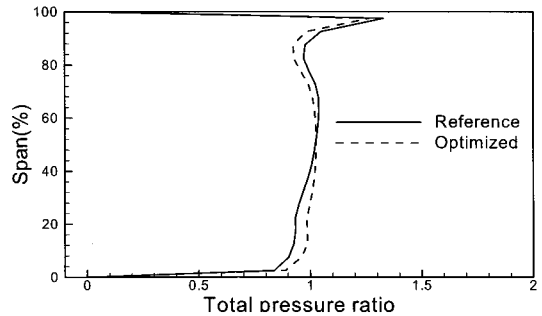


Fig. 9 Comparison of the total pressure ratio

$$\text{Total Pressure Ratio} = \frac{P_{\text{local}}}{P_{\text{average}}} \quad (6)$$

보기 위해 송풍기 출구면에서의 평균 전압력으로 무차원화하였다. 최적설계 결과, 송풍기 출구에서 스펠 방향, 즉 반경 방향으로의 전압력비 분포는 기준 형상에서의 그 분포에 비해 더 균일해졌다. 팁 영역에서의 높은 전압력비는 다소 낮아진 반면 허브 영역에서의 전압력비는 다소 높아져서 반경 방향으로 매우 균일한 수준의 전압력비 분포가 형성되었다.

기준 형상과 최적 형상에 대해 수치해석을 통해 성능을 비교해 보았다. 최적설계의 결과로서 설계점 유량계수 0.41에서 목적함수인 전압효율이 1.0% 증가한 것을 알 수 있었다

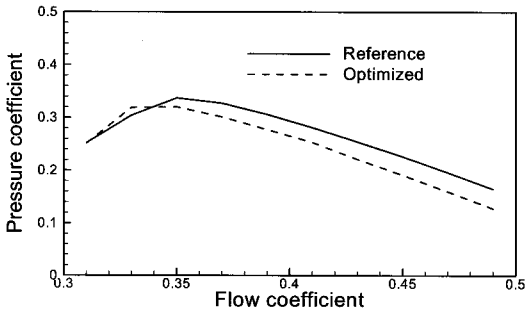
한편, Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 압력계수의 경우 최적설계 후 최고 압력 상승이 일어나는 유량이 저 유량 영역으로 이동되고 전체적으로 압력계수가 감소하였다. 최적형상에서 압력 계수 저하의 원인은 Fig. 11과 12에서 고찰해 보도록 한다. Fig. 10(b)에서 유량에 따른 토크의 변화를 살펴보면 최적 형상이 기준

형상에 비해 블레이드의 회전에 의한 토크가 감소되었음을 알 수 있다. 이는 최적 형상에서의 압력계수가 감소되었기 때문으로 생각된다.

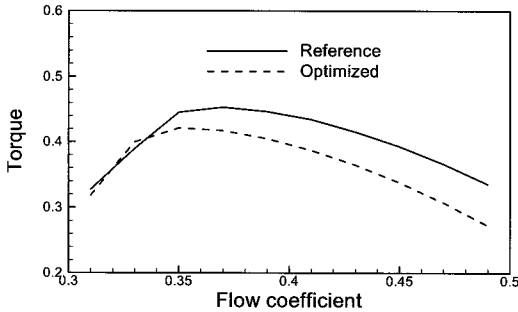
기준 형상과 최적 형상의 공력 하중을 비교하기 위해 Fig. 11과 같이 각 35%, 50%와 85% 스패에서 하중을 분석하였다. 블레이드 하중은 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \frac{2\Delta p}{\rho U_t^2} \quad (7)$$

비교한 세 위치에서 공히 유선 방향의 0의 인근, 즉 블레이드 앞전 인근에서의 하중이 뒷전 인근에서의 하중보다 많이 변경된 것을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 최적화 과정에서 최대캠버



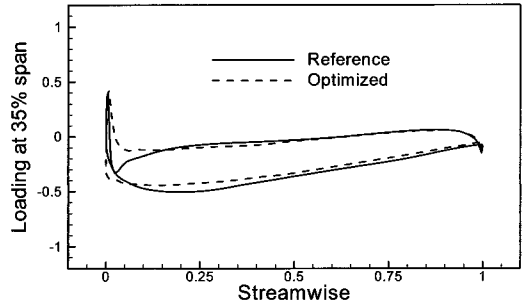
(a) Pressure coefficient



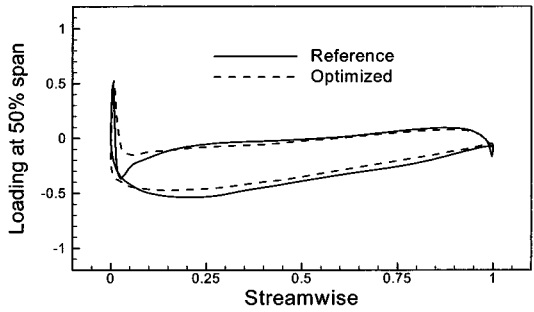
(b) Torque

Fig. 10 Comparison of performance and torque curves

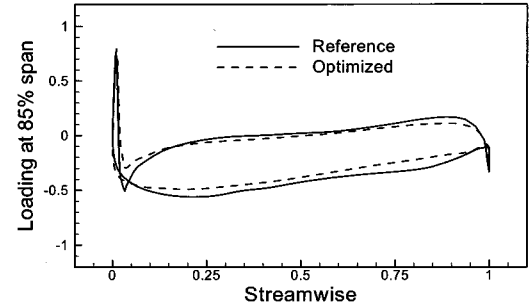
와 최대캠버위치가 변경됨에 따라 블레이드의 캠버라인이 변경되고, 이로 인해 블레이드 각이 블레이드 후반부에 비해 전반부에서 상대적으로 많이 변했기 때문으로 사료된다. 블레이드 전반부의 블레이드 각의 상대적인 큰 변화로 인해 입구에서 블레이드 각과 유동



(a) At 35% span



(b) At 50% span

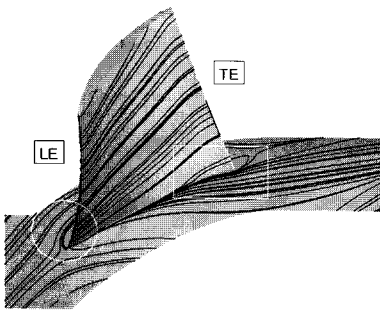


(c) At 85% span

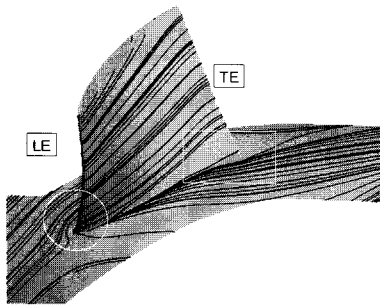
Fig. 11 Comparison of blade loading

각의 차이인 영각이 기준 형상에서의 영각과 다르게 되고 이로 인해 압력 분포와 하중이 변하는 것으로 생각된다.

그리고 최적화 과정을 통한 앞전반경의 변화량이 0.8mm로서 뒷전반경의 변화량 0.076mm보다 크게 변경된 것도 앞전 근처 하중의 큰 변화를 가져온 하나의 원인으로 고려될 수 있다. 한편 최적 형상에서의 블레이드 앞전부터 뒷전까지의 하중분포가 기준 형상에서의 분포보다 비교적 균일한 것으로 나타났다. Fig. 12에서는 기준 형상과 최적 형상의 블레이드 압력면을



(a) Reference blade



(b) Optimized blade

Fig. 12 Comparison of stream lines

중심으로 한 유선 분포를 나타내고 있다. 블레이드 허브 앞전에서의 유선을 살펴보면, 그림 내 원형 표시된 영역에서 잘 비교할 수 있듯이 기준 형상에서는 허브 앞전에서 유선이 흡입된 방향으로 크게 변경되고 미소한 영역에서 박리가 발생하는 것으로 보이나 최적 형상에서는 상대적으로 원활하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 최적화된 형상에서는 블레이드 입구 각이 변경되어 블레이드각과 유동각의 차이인 영각이 줄어들었기 때문으로 사료된다. 이와 같이 영각이 줄어들면 유동은 안정화되는 반면 압력비의 저하를 가져올 수도 있다. 일반적으로 동일 회전수에서 유량이 감소하여 영각이 증가하면 블레이드 입출구에서의 유동각 변화가 커져서 압력비가 증가하는 것과 같은 원리로 여기에서는 영각이 다소 감소함으로써 효율은 증가하는 반면 Fig. 10(a)에서와 같이 압력비의 감소가 수반될 수 있다.

아울러 압력면 허브 후반부에서의 유선을 살펴보면, 그림 내 사각형 표시된 영역에서 잘 비교할 수 있듯이 최적 형상에서는 기준 형상에서 나타나는 유동 불안정성이 감소하는 것으로 관찰된다. 이는 Fig. 9에서 살펴본 바와 같이 최적 형상에서는 허브 인근에서의 전압

력이 상대적으로 증가하고 전압력 분포가 균일하게 나타나는 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

이와 같은 결과로 볼 때 효율을 목적함수로 한 최적화 과정을 통해 효율이 증가된 것은 위에서 검토된 바와 같이 최적 형상에서 블레이드 각이 최적화됨에 따라 유동이 안정화되어 블레이드의 회전 에너지가 효과적으로 전압력으로 전환되었기 때문으로 생각된다. 그러나 최적화 과정에서 압력비가 낮아진 것은 영각의 감소로 인한 영향으로 사료된다. 한편 특정 압력비를 얻고자 하거나 압력비를 최대화시키고자 한다면 압력비 또는 압력계수를 목적함수로 하는 최적화 설계를 수행하면 쉽게 해결될 수 있을 것으로 본다.

7. 결론

본 연구에서는 축류 송풍기의 블레이드에 대한 형상 최적화를 RANS 해석과 래디얼베이스 신경회로망기법을 통해 수행하였다. 송풍기 성능시험 결과와 비교하여 검증된 유동해석 모델을 해석수단으로 하여 네 가지 설계변수에 대해 얻은 30개의 실험점에서 목적함수 값을 평가하고, 이를 바탕으로 최적설계를 수행하여 신뢰할 만한 최적값을 도출하였다. 목적함수는 전압 효율로 정의하였으며 최적설계 결과, 1.0%의 효율이 향상되었다. 블레이드 단면 형상의 변화로 최적 형상에서 허브에서의 유동이 안정화되고 반경방향으로의 전압력이 균일화되는 것을 확인할 수 있었으며, 영각이 감소함으로써 압력비가 다소 감소되는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 송풍기의 설계에 신경회로망기법을 사용한 최적설계가 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 '제10차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'의 지원으로 수행되었음을 밝힌다. 아울러 최적점 계산을 위해 도움을 준 박사과정 압두스 사마드군에게 감사드린다.

참고문헌

- (1) Lofti, O., Teixeira, J. A., Ivey, P. C., Sheard, G. and Kinghorn, I. R., 2005, "Aerodynamic

- Optimization of Industrial Fan Blades,” ASME Turbo Expo 2005, Nevada, USA, GT2005-68385.
- (2) Kelner, V., Grondin, G., Leonard, O. and Moreau, S., 2005, “Multi-objective Optimization of a Fan Blade by Coupling a Genetic Algorithm and a Parametric Flow Solver,” Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, EUROGEN 2005.
- (3) Chung, K. N., Kim, Y. I., Sung, J. H., Chung, I. H. and Shin, S. H., 2005, “A Study of Optimization of Blade Section Shape for a Steam Turbine,” ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, Texas, USA, FEDSM2005-77385.
- (4) Chen, N., Zhang, H. W., Du, H., Xu, Y. J. and Huang, W. G., 2005, “Effect of Maximum Camber Location on Aerodynamics Performance of a Transonic Compressor Blade,” ASME Turbo Expo 2005, Nevada, USA, GT2005-68541.
- (5) Mengistu, T., Ghaly, W. and Mansour, T., 2007, “Aerodynamic Shape Optimization of a Turbine Blades Using Design-Parameter-Based Shape Representation,” ASME Turbo Expo 2007, Montreal, Canada, GT2007-28041.
- (6) Jang, C. M. and Kim, K. Y., 2003, “Flow Measurements and Performance Analysis Using a 5-Hole Pitot Tube and a Rotating Hot-Wire Probe in an Axial Flow Fan,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 27, No 12, pp. 1750~1757.
- (7) ANSYS CFX 11.0 Reference Guide, ANSYS Inc., 2006.
- (8) MATLAB®, The language of technical computing, Release 14, The Math Works Inc.
- (9) McKay, M. D., Beckman, R. J., and Conover, W. J., 1979, “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code,” Technometrics, Vol. 21, pp. 239~245.
- (10) Samad, A., Kim, K. Y. and Lee, K. S., 2007, “Multi-objective Optimization of A Turbo-machinery Blade Using NSGA-II,” 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, USA, FEDSM2007-37434.