

## 중첩선과 단면형상을 고려한 축류 송풍기 날개의 최적설계

압두스 사마드\* · 이기상\*\* · 정상호\*\*\* · 김광용\*\*\*\*

### Optimization of Stacking Line and Blade Profile for Design of Axial Flow Fan Blade

Abdus Samad\*, Ki-Sang Lee\*\*, Sang-Ho Jung\*\*\* and Kwang-Yong Kim\*\*\*\*

**Key Words** : PBA Method(가중평균기법), Axial Flow Fan(축류형 송풍기), Design Optimization(최적설계), Surrogate model(대리모델), RBNN Method(레이얼베이스 신경회로망 기법)

#### Abstract

This present work is to find optimum design of a NACA65 axial fan blade with weighted average surrogate model. The numerical analysis by Reynolds-average Navier-Stokes equations with shear stress turbulence(SST) is discretized by finite volume approximations and solved on hexahedral grids for flow analysis. The blade aerodynamic shape is modified by six design variables for the optimization. The blade profile as well as stacking line is modified to enhance blade total efficiency. Six design variables, airfoil maximum camber, maximum camber location, leading edge radius, trailing edge radius, lean angle at 50% span and lean angle at 100% span, are selected for blade profile to enhance the total efficiency. The PBA model which is basically weighted average of the basis surrogates is used to find the optimal design in the design space from the constructed response surface model for the objective function. By the optimization, the total efficiency is increased by 1.4%.

#### 1. 서론

대리모델(surrogate model)을 이용한 최적설계는 계산 시간을 획기적으로 줄일 수 있다는 점과 형상변수들의 특성을 보다 정확하게 나타낼 수 있다는 점에서 매우 유용하다. 하여 여러 대리모델들이 블레이드 최적설계에 쓰이고 있다. Queipo 등[1]과 Li와 Padula[2]는 항공 우주 산업에 적용되는 여러 가지 대리모델들에 대해서 검토하였다. Goel 등[3]은 가중평균모델을 개발하였으며, 이 모델이 하나의 대리모델을 사용하여 최적설계를 하는 것보다 보다 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있는 것을 보였다. Samad 등[4,5]은 각각 열전달축진장치와 블레이드 형상의 최적설계에 몇 가지 대리모델의 성능을 비교하였으며, Goel 등[3]이 개발한 가중평균모델의 신뢰성이 높다는 것을 확인하였다. 본 연구에 쓰인 PBA(Press-based Averaging)기법의 구성요소 중 하나인 RBNN(Radial Basis Neural network)기법은 Huppertz 등[6]과 Pierette와 Braembussche[7]가 블레이드 설계에 적용하였다. 그 외에도 최대캠버[8], 캠버라인[9,10], 단면의 두께[11], 후연반경[12] 등을 변수로 하여 최적설계를 하는 연구에 RBNN기법이 사용되었다.

베지어 곡선(Bazier Curve)에 의해 정의되는 블레이드 단면 형상과 관련된 최적화연구는 Burguburu 등[10]에 의해 수행되었다. 목적함수로 효율과 전체압력을 사용한 압축기 블레이드의

다중 목적함수 최적화연구는 Benini[13]에 의해 수행되었고, 그는 설계변수로서 중첩선과 블레이드 단면 형상에서의 두께를 고려하였다. 유속압축기에서 최대캠버위치가 미치는 영향에 대한 수치적 연구는 Chen 등[14]에 의해 수행되었다. 이들 모두는 단면 형상을 변화시킴으로써 효율을 증가시킬 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 NACA65 계열 단면의 축류 송풍기 블레이드의 설계를 위해 가중평균모델 기법을 사용하여 최적화를 수행하였다. 최적설계를 위해 블레이드 단면 형상에서 총 6개의 설계변수를 선택하였다. 목적함수로는 전압효율(total pressure efficiency)을 선택하였고, 블레이드 단면 형상을 베지어 곡선과 PBA기법을 사용하여 최적화하였다. 목적함수의 평가를 위한 유동해석은 삼차원 RANS 해석으로 수행하였다.

#### 2. 유동해석

본 연구의 기준모델인 NACA65 계열의 블레이드의 형상과 메쉬는 Figure 1과 같고 사양은 Table 1에 기술하였다. 육면체 격자계(hexahedral grid system)를 사용하여 격자를 구성하였다. 유동해석의 난류모델로 사용된 SST(Shear Stress Turbulence)모델의 정확한 계산을 위해, 벽근처격자에  $y^+$ 는 1이하로 설정하였으며, 벽근처에서 보다 조밀한 격자를 주었다.

비압축성 삼차원 정상상태의 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX 11.0[15]을 사용하였다. 지배방정식은 유한체적법으로 이산화하였으며, 총 9개의 블레이드로 구성된 터보기계를 주기조건을 사용하여 1개의 블레이드를 유동해석하였다. 입구유량은 0.307 kg/s로 균일 유량조건을 적용하였고 출구경계는 일정압력조건을 적용하였다. 작동유체는 20℃의 공기이다.

\* 인하대학교 대학원, abdussamad77@inha.ac.kr  
\*\* LG V-ENS Co. Ltd., kslee@v-ens.com  
\*\*\* 인하대학교 대학원, jungsh06@inha.ac.kr  
\*\*\*\* 인하대학교 기계공학과, kykim@inha.ac.kr

Table 1 Specifications of reference fan blade

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

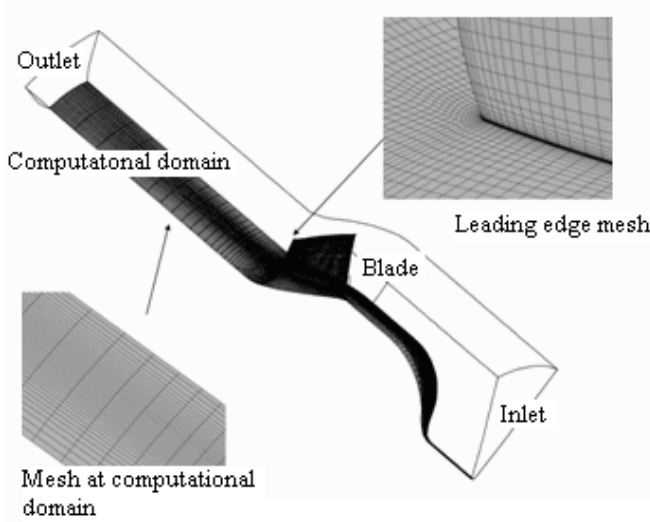


Figure 1 Reference blade meridional view and mesh

한번 완전히 수립된 유동해석 결과를 얻기 위해 3.0GHz Pentium-IV 프로세서의 컴퓨터에서 약 12 시간이 소요되었다.

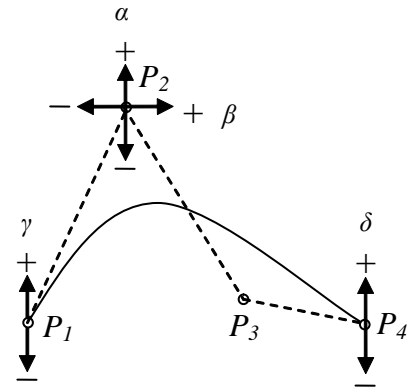
### 3. 목적함수 및 설계변수

블레이드의 형상 최적설계를 위한 목적함수로 전압효율을 사용하였으며, 아래 수식과 같다.

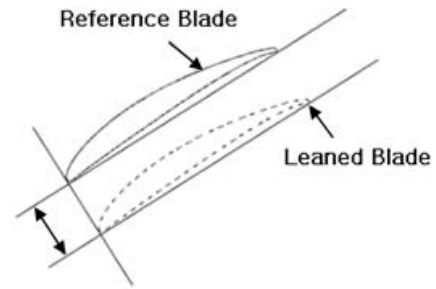
$$\eta = \frac{(P_{t,o} - P_{t,i}) \cdot Q}{\tau \cdot \omega} \quad (1)$$

위 식에서  $P_t$ 는 전압을 의미하며, 하첨자  $i$ 와  $o$ 는 각각 입구부와 출구부를 의미한다.  $Q$ 는 유량을 나타내며,  $\tau$ 와  $\omega$ 는 각각 토크와 각속도이다.

블레이드 형상에서 선택한 여섯 개의 변수들은 최대캠버( $\alpha$ ), 최대캠버위치( $\beta$ ), 앞전반경( $\gamma$ ), 후연반경( $\delta$ ), 블레이드 중간(50% span)에서의 린( $\kappa$ ), 블레이드 팁(100% span)에서의 린( $\xi$ )이며, 그 외의 변수들은 고정하였다. 블레이드 단면 형상은 Figure 2(a)와 같이 3차 베지어 곡선(bezier curve)에 의해 변화시킬 수 있으며, 결정되는 변수들은 최대캠버( $\alpha$ ), 최대캠버위치( $\beta$ ), 앞전반경( $\gamma$ ), 후연반경( $\delta$ )이다. 곡선은 3차 방정식에 의해 정의되며, 베지어 곡선의 조절점들(control points)은 P1,P2,P3,P4이다. 최대두께 조절점인 P2는 다른 점들이 고정되어 있는 상태에서 조절하며, P2가 수직으로 움직이면 블레이드 최대두께가 변하게 되고, 수평으로



(a) Blade thickness and variables



(b) Blade lean

Figure 2 Definitions of variables

움직일 경우, 최대두께위치가 변하게 된다. P1,P2는 각각 앞전반경과 후연반경을 결정하는 조절점이다. 베지어 곡선에 + 의미는 각 변수들의 증가, 최대캠버위치는 경우는 최대두께 위치를 후연방향으로 이동, 을 의미하며, -의 경우 그 반대를 의미한다. 블레이드 형상결정에 쓰이는 나머지 두 변수들은 블레이드 중간과 블레이드 팁에서의 린이다. 총 6개의 변수와 블레이드 허브에서 팁까지의 보간법에 의해서 블레이드 형상이 결정된다.

### 4. 최적설계기법

본 연구에서는 축류 송풍기 블레이드 형상을 PBA기법을 사용해 최적화하였다. PBA와 같은 대리모델을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있다. 이 점들을 얻기 위해서 실험계획법(DOC)이 사용되는데 본 연구에서는 실험계획법으로 LHS(Latin Hypercube Sampling)[16]을 사용하였다.

Goel 등[3]에 의해 제안된 가중평균모델인 WTA3 모델은 Samad 등[4,5]의 연구에서 PBA 모델이라고 명명되었다. PBA 모델에 의한 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{F}_{wt.avg}(\mathbf{x}) = \sum_i^{N_{sm}} w_i(\mathbf{x}) \hat{F}_i(\mathbf{x}) \quad (2)$$

위 식에서  $N_{sm}$ 은 가중평균모델을 구성하는데 사용된 기본 대리모델들의 개수이다. 설계점  $\mathbf{x}$ 에 위치한  $i$ 번째 대리모델은  $w_i(\mathbf{x})$ 의 가중치를 주고,  $\hat{F}_i(\mathbf{x})$ 는  $i$ 번째 대리모델이 예측한 목적함수이다. 가중치의 결정방법은 Goel 등[3]이 제시한 방법을 따른다. 본 연구에서 가중평균모델을 구성하는 기본 대리모델로 RSA[17], KRG[18], RBNN[19], 3가지 모델이 사용되었다. PBA

Table 2 Results of Design Optimization

(a) Design variables

Design	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\kappa$	$\xi$
Reference	0.0	0.0	0.0	0.0	-19.2	-19.9
PBA	2.60	-6.51	-0.44	-0.24	-22.3	-13.6

(b) Objective function

Design	Efficiency	Increment
Reference	85.9%	-
PBA	87.3%	1.4%

모델에서 최적점을 찾기 위해 SQP(Sequential Quadratic Programming)[20]이 사용되었다. SQP의 결과는 초기 가정에 좌우되기 때문에 대리모델로부터 최종의 최적점을 찾기 위해서는 몇 번의 반복계산이 필요하다.

### 5. 결과 및 고찰

예비계산과 설계자의 경험을 바탕으로 설계변수들의 범위를 결정한 후, LHS 실험계획법을 통해 총 50개의 블레이드 형상을 유동해석하였다. PBA모델의 가중치 함수에 각각 값을 부여해주면 식(2)는 아래의 식과 같이 나타난다.

$$F = 0.423 F_{RSA} + 0.215 F_{KRG} + 0.326 F_{RBNN} \quad (3)$$

CV(Cross-Validation) 에러[3]는 가중평균모델에 쓰인 대리모델 RSA, KRG, RBNN에서 각각 0.853, 1.733, 1.002의 값이 나온다. 식(3)에서 확인할 수 있듯이 에러를 보정해주기 위해 에러가 큰 모델은 낮은 가중치를 주고, 에러가 작은 모델은 큰 가중치를 주었다. 하나의 대리모델을 쓸 경우, 신뢰도가 높지 않고 다양한 형상에 대한 적용이 어렵지만 가중평균모델을 사용할 경우 신뢰도가 높고 다양한 형상에 대해서 적용할 수 있다.

Table 2(a)와 기준 블레이드와 최적 블레이드의 최적 설계치를 나타내며, Table 2(b)는 목적함수값을 나타낸다. 최적 블레이드의 목적함수인 전압효율은 87.3%로 기준 블레이드에 비해 1.4% 증가하였다.

Figure 3에서 기준 형상에 비해 80% span부터 90% span까지 구간에서 토크비가 증가하지만, 15% span부터 60% span에서는 감소함을 알 수 있다. Figure 4에서 힌지부터 50% span까지 구간

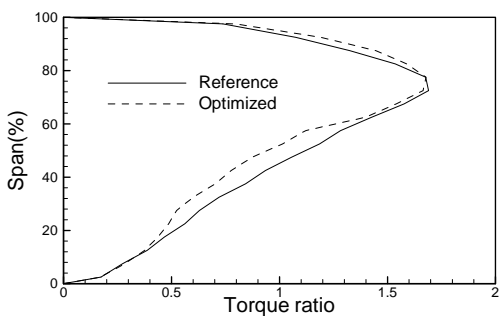


Figure 3 Spanwise torque ratio

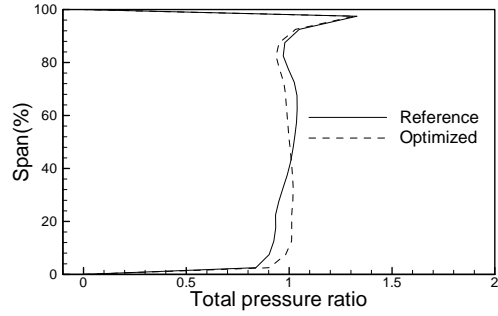


Figure 4 Spanwise total pressure ratio

에서 전압비가 증가하고, 50% span부터 팁까지 구간에서는 감소함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 전압효율을 목적함수로 정하고, RANS 해석과 가중평균모델인 PBA 모델을 이용하여 축류 송풍기 블레이드의 형상을 최적설계하였다. 가중평균모델은 세 가지 대리모델로 구성되었으며, 각각 RSA, KRG, RBNN 모델이다. 각 대리모델의 CV 에러의 크기에 따라 가중치를 결정하여 가중평균모델을 완성하였으며, 가중평균모델을 사용할 경우에 최적화된 결과치의 값의 신뢰도를 보다 높일 수 있고 보다 다양한 형상에 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 절차에 따라 설계한 최적 블레이드 형상은 기준 형상보다 목적함수인 전압효율이 1.4%가 증가하였으며, 최적 형상과 기준 형상의 비교와 토크비와 압력비가 스펀 방향에 따라 어떻게 변하는지를 그래프로 통해 확인하였다. 최적설계의 형상은 기준 형상에 비해 최대캠버위치는 앞전방향으로, 최대캠버는 약간 감소하였으며, 전압반경과 후연반경은 약간 감소하였다. 본 연구를 통해서 충분히 향상된 전압효율을 달성하였으며, 이는 RANS 해석과 PBA 모델을 사용한 최적설계가 다른 계열의 블레이드에도 적합함을 나타낸다.

### 후기

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 '제10차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'의 지원으로 수행되었음을 밝힌다.

### 참고문헌

- [1] Queipo, N. V., Haftka, R.T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R. and Tucker, P.K., "Surrogate-based analysis and optimization," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 41(2005), pp. 1-28.
- [2] Li, W., and Padula, S., "Approximation Methods for Conceptual Design of Complex Systems," Eleventh International Conference on Approximation Theory (eds. Chui, C., Neaumtu, M., Schumaker, L.) (2004).
- [3] Goel, T., Haftka, R., Shyy, W., and Queipo, N., "Ensemble of Surrogates.StructuralandMultidisciplinaryOptimization," Vol. 33. No. 3(2007), pp. 199-216.

- [4] Samad, A. and Kim, K.Y., "Multiobjective optimization of turbomachinery blade," *Journal of Mechanical Science and Technology* (accepted for publication) (2008).
- [5] Samad, A., Kim, K.Y., Goel, T., Haftka, R. T. and Shyy, W., "Multiple Surrogate Modeling for Axial Compressor Blade Shape Optimization," *Journal of Propulsion and Power*, (accepted for publication) (2007).
- [6] Huppertz, A., Flassig, P.M., Flassig, R.J. and Swoboda, M., "Knowledge-Based 2D Blade Design Using Multi-Objective Aerodynamic Optimization and a Neural Network," *ASME Turbo Expo 2007, Montreal, Canada, GT2007-28204*(2007).
- [7] Pierret, S. and Braembussche, R. A. V., "Turbomachinery blade design using a Navier-Stokes solver and artificial neural network", *Journal of Turbomachinery*; VOL. 121; ISSUE: 2(1999), pp. 326-332.
- [8] Chung, K.N., Kim, Y.I., Sung, J.H., Chung, I.H. and Shin, S.H., "A study of optimization of blade section shape for a steam turbine," *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, Texas, USA, FEDSM2005-77385*(2005).
- [9] Lofti, O., Teixeira, J.A., Ivey, P.C., Sheard, G. and Kinghorn, I.R., "Aerodynamic Optimization of Industrial Fan Blades," *ASME TurboExpo2005, Nevada, USA, GT2005-68385*(2005).
- [10] Buruguburu, S., Toussaint, C., Bonhomme, C. and Leory, G., "Numerical optimization of turbomachinery bladings" *Journal of Turbomachinery*, January 2004, Vol. 126(2004), pp. 91-100.
- [11] Xu, C. and Amano, R.S., "A turbomachinery blade design and optimization procedure," *ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, GT 2002-30541*(2002).
- [12] Mengistu, T., Ghaly, W. and Mansour, T., "Aerodynamic Shape Optimization of a turbine blades using Design-parameter-Based Shape Representation," *ASME Turbo Expo 2007, Montreal, Canada, GT2007-28041*(2007).
- [13] Benini, E., "Three-Dimensional Multi-Objective Design Optimization of a Transonic Compressor Rotor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 3(2004).
- [14] Chen, N., Zhang, H.W., Du, H., Xu, Y.J. and Huang, W.G., "Effect of Maximum camber Location on aerodynamics performance of a transonic compressor blade," *ASME turbo Expo 2005, Nevada, USA, GT2005-68541*(2005).
- [15] ANSYS CFX 11.0, Reference Guide, ANSYS Inc.(2006).
- [16] JMP® 5.1, SAS Institute, Inc.(2004).
- [17] Myers, R. H., and Montgomery, D. C., "Response Surface Methodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, Inc: NewYork(1995).
- [18] Martin, J. D., and Simpson, T. W., "Use of Kriging Models to Approximate Deterministic Computer Models," *AIAA Journal*, Vol. 43, No. 4(2005), pp. 853-863.
- [19] Orr, M.J.L., "Introduction to radial basis neural networks," Center for cognitive science, EdinburghUniversity, Scotland, UK.<http://anc.ed.ac.uk/rbf/>(1996).
- [20] MATLAB®, The Language of Technical Computing, Release 14, The MathWorks Inc.(2004).