

NSGA-II 를 통한 송풍기 블레이드의 다중목적함수 최적화

이기상[†] · 김광용* · 압두스사마드**

Multi-Objective Optimization of a Fan Blade Using NSGA-II

Ki-Sang Lee, Kwang-Yong Kim and Abdus Samad

Key Words : Axial Fan (축류 송풍기), Stacking Line (스태킹 라인), RANS Analysis (레이놀즈 평균 나비에-스톡스 해석), Optimization (최적화)

Abstract

This work presents numerical optimization for design of a blade stacking line of a low speed axial flow fan with a fast and elitist Non-Dominated Sorting of Genetic Algorithm (NSGA-II) of multi-objective optimization using three-dimensional Navier-Stokes analysis. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with $k-\epsilon$ turbulence model are discretized with finite volume approximations and solved on unstructured grids. Regression analysis is performed to get second order polynomial response which is used to generate Pareto optimal front with help of NSGA-II and local search strategy with weighted sum approach to refine the result obtained by NSGA-II to get better Pareto optimal front. Four geometric variables related to spanwise distributions of sweep and lean of blade stacking line are chosen as design variables to find higher performed fan blade. The performance is measured in terms of the objectives; total efficiency, total pressure and torque. Hence the motive of the optimization is to enhance total efficiency and total pressure and to reduce torque.

기호설명

f : 목적함수
 p : 압력
 Q : 유량
 r : 무차원화된 반경
 R : 반경
 γ : 스윙
 ρ : 밀도
 η : 효율
 δ : 린

τ : 토크
 ω : 각속도
 U, V : 속도

하첨자

a : 축방향
 h : 허브
 m : 허브와팁의 중간
 t : 블레이드 팁
 T : 전체
 in, out : 입구, 출구

1. 서론

최근에 컴퓨터의 성능향상에 힘입어 3 차원 Reynolds-averaged Navier-Stoke 방정식을 기반으로 하는 수치최적화는 유체기계 블레이드 설계에 실용적으로 쓰이게 되었다. 최적화 방법의 적용은

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 전산유체공학연구소

E-mail : carinos1@inhaian.net

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

* 회원, 인하대학교 기계공학부

** 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

유체기계 블레이드의 스택킹 라인(stacking line)과 캠버라인(camber line) 등의 형상을 변화시켜서 무게, 토크 및 유동손실을 줄이거나 효율, 압력을 증가시켜 성능을 효과적으로 증진시킬 수 있게 되었다.

스윙(sweep), 린(lean), 스큐(skew) 등을 이용한 스택킹 라인의 변형은 많은 연구자들^(1,2,3)에게 유체기계 설계의 중요한 관심사로 떠올랐다. 3 차원 스택킹 라인을 결정하는 이 형상 변수들은 충격 손실(shock loss), 블레이드 허브에서의 유동박리 및 틱간극에서의 손실을 줄이기 위해 도입되었다. 수치최적화기법을 이용한 블레이드 스택킹라인의 설계에 관한 연구는 Jang 등⁽⁴⁾과 Jang과Kim⁽⁵⁾에 의해 수행되었다. 이 연구들에서는 반응면기법(RSM)을 사용해 단일 목적함수인 효율을 최적화하였다. Seo 등⁽⁶⁾도 축류송풍기 형상 최적화에서 단일 목적함수로 효율을 사용했고, 설계변수로는 스택킹 라인 관련 변수를 사용하였다.

대부분의 공학적인 문제들은 다중의 분야를 포함하고, 각각의 분야에 관련된 다중목적함수의 최적화를 요구한다. 다중목적함수 최적화문제들을 푸는 데에는 여러 가지 해결방법들과 알고리즘이 있다. 터보기계블레이드와 관련된 최적화에는 효율, 전압, 정압, 압력손실, 무게, 응력 등이 목적함수로 쓰이고, 블레이드 단면과 스택킹라인에 관련된 변수들은 설계변수로 쓰인다. 다중목적함수 최적화의 해는 파레토 최적해(Pareto-optimal solutions)라 불리는 많은 최적해로 구성된다. 설계자는 설계 범위 안에서 가능한 한 많은 최적해를 찾는 것이 목적이다.

본 연구에서는 NACA65 축류형 송풍기 블레이드의 설계에서 다중목적함수 최적화를 수행한다. 혼합다중목적함수 최적화⁽⁷⁾는 부분탐색법과 함께 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용해 적용된다. 목적함수로 전압, 토크(torque), 및 효율이 채택되었고, 스택킹 라인의 린과 스윙에 관련된 네가지 변수들이 설계변수로 채택되었다. 삼차원 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) 해석을 이용해 유동장을 해석하여 효율과 압력비 및 토크를 구하였다.

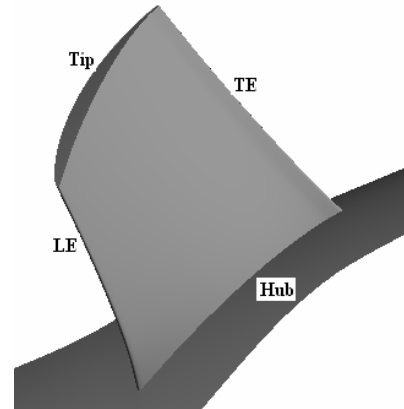


Fig. 1 Shape of the reference fan blade

2. 유동해석

본 연구에서는 비압축성 삼차원 정상상태의 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 CFX-5.7⁽⁸⁾을 사용하였다. 지배방정식은 유한체적법으로 이산화하였으며, 난류유동의 해석을 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 벽함수를 적용하였다. 기준모델인 NACA65 블레이드를 대상으로 Fig. 1 에서와 같이 계산영역을 설정하였다.

비정렬격자계를 사용하여 격자를 구성하였으며, 격자의존성을 없애기위한 격자 테스트를 거친후 약 4.3×10^5 개의 격자점을 채택하였다. 총 9 개의 블레이드중 1 개의 블레이드만을 계산하였으며, 주기조건을 이용하였다. 입구조건으로 균일 유량조건을 적용하였고 출구경계에서는 일정압력조건을 적용하였다. 작동유체는 20°C 의 공기이다. 한번의 완전히 수렴된 유동해석 결과를 얻기 위해 3.0GHz의 Pentium-IV 프로세서에서 약 12 시간의 CPU시간이 소요되었다.

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

3. 목적함수 및 설계변수

블레이드의 효율을 증가시키고 전압을 높이면서 축에 걸리는 토크를 줄여서 송풍기의 성능을 향상시키기 위해 다음과 같은 성능변수들은 NSGA-II 를 사용한 다중목적함수 최적화의 목적함수로 채택하였다.

- 전압효율 (Total efficiency), η
- 전압상승 (Total pressure rise), $p_T = p_{T,out} - p_{T,in}$
- 블레이드 토크 (Blade torque), τ

본 연구에서는 이들로부터 각각 2 개의 목적함수들을 선택하여 동시에 최적화하는 두 가지 최적화 문제를 다루고자 한다.

스태킹 라인을 변형하기 위해 4 개의 설계변수를 채택하여 송풍기의 성능향상을 도모하였다. 스택라인은 스윙과 린에 의해 정의되었고 스윙과 린 각각에 대해 2 개의 변수를 적용하였다. 스윙과 린의 정의는 Fig. 2 에 나타내었다. 스윙과 린의 반경방향 분포로 아래 식과 같은 2 차 다항식을 사용하였는데, 날개 중간(50% span)과 날개 팁(100% span)에서의 스윙 또는 린의 값을 정의함으로써 블레이드의 형상을 결정하게 된다.

$$\xi = ar^2 + br + c \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \xi &= 0 & \text{at } r &= 0. \\ \xi &= \xi_m & \text{at } r &= 0.5 \\ \xi &= \xi_t & \text{at } r &= 1.0 \end{aligned}$$

여기서 ξ 은 스윙 또는 린이고 r 은 무차원반경을 나타낸다. 본 연구에서는 설계변수로 날개 팁과 날개 중간에서의 스윙과 린의 정도를 나타내는 γ_t , γ_m , δ_t 그리고 δ_m 등 4 개의 변수를 설계변수로 채택하였다. 최적화 기법으로서 D-optimal 기법을 사용할 경우 설계변수들에 대한 실험 영역의 설정이 중요하므로 예비계산을 통하여 최적점의 위치가 실험 영역에 위치하도록 설계변수들의 범위를 결정하였다.

4. 다중목적함수 최적화

MOEA (Multi-objective evolutionary algorithm)⁽⁹⁾ 최적화 과정은 Fig. 3 과 같은 과정을 따른다. 초기에 설계변수가 선택되어지고, 시스템 성능의 향상을 결정할 설계변수 범위가 결정된다.

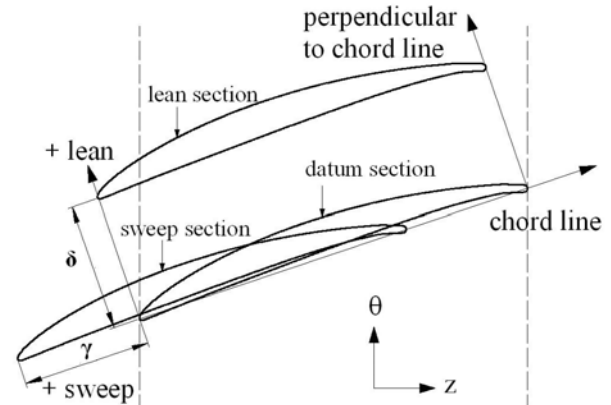


Fig. 2 Definition of sweep and lean

설계점은 실험설계법 (DOE)⁽¹⁰⁾를 이용해 채택되어진다. 목적함수는 유동해석을 이용해 이들 설계점에서 계산된다. 여기서, DOE는 three-level fractional factorial 설계를 이용해 수행된다. 이들 설계점에서 목적함수의 평가는 3 차원RANS해석에 의해 수행된다. RANS해석 데이터는 다항식 반응면 함수를 구축하는데 사용된다.

다중목적함수 최적화는 단일 최적해가 아닌 다수의 최적해를 제공한다. 이 최적해들은 파레토 최적해라 불리고 이들의 함수적인 표현을 파레토 최적선(Pareto-optimal front)이란 용어로 표현한다.

다중목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Minimize } \bar{f}(\bar{x}) \quad (\text{M function to be optimize})$$

조건

$$\bar{g}(\bar{x}) \leq 0 \quad (\text{m inequality constraints})$$

$$\bar{h}(\bar{x}) = 0 \quad (\text{p equality constraints})$$

여기서 $\bar{f}(\bar{x}) = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), \dots, f_M(\bar{x})\}$ 는 n 값 목적함수들의 벡터이고 \bar{x} 는 n 설계변수의 벡터이다. $\bar{x} \in R^n$, $\bar{g}(\bar{x}) \in R^m$, $\bar{h}(\bar{x}) \in R^p$. 다중목적함수의 집합 \bar{x} 의 각 가능한 해는 지배해 또는 비지배해이다. 모든 비지배해는 파레토-최적해라 불리워진다. NSGA-II 코드가 MOEA 로 파레토-최적선을 산출하기 위해 사용된다.

서로 다른 변수들은 문제의 성질을 맞추기 위해 하나씩 조정된다. Population size=100, Generation=250, Crossover=20, and Mutation =200. NSGA-II 는 근사 파레토-최적해를 제공하고, 부분탐색법의 가중합계법(weighted sum strategy)이 파레토 최적해의 질을 향상시키는 데 사용된다. 가

중합계법에서, 모든 목적함수들은 하나의 목적함수로 합쳐지게 된다. 가중치는 다음 공식을 이용해 각각의 목적함수에 대해 계산된다:

$$\bar{w} = \frac{(f_j^{\max} - f_j(X))/(f_j^{\max} - f_j^{\min})}{\sum_{k=1}^M (f_k^{\max} - f_k(X))/(f_k^{\max} - f_k^{\min})} \quad (2)$$

그리고 목적함수는 다음과 같다:

$$f = \sum_{k=1}^M f_k w_k \quad (3)$$

여기서 \bar{w} 는 j^{th} 목적함수의 가중치이다. M 은 목적함수의 갯수이다. f_j^{\min} , f_j^{\max} 그리고 $f_j(X)$ 는 j^{th} 목적함수의 최소, 최대 그리고 초기값으로 설정된다. 혼합목적함수는 Sequential Quadratic Programming⁽¹¹⁾을 이용해 부분적으로 최적화된다. 이들 최적해들은 NSGA-II에 의해 얻어진 해들과 합쳐지고, 여기서 지배해들은 버려진다. 포괄적인 파레토-최적해들은 비지배해들로부터 이중해를 제거한 다음에 얻어진다.

5. 결과 및 고찰

본 연구는 송풍기 블레이드의 성능향상을 위해 스택킹라인 형상을 최적화하였다. 격자테스트를 거친후, 계산영역을 결정하기 위해 예비계산을 하였다. D-optimal design은 계산영역에서 설계점을 찾는데 이용되었다. 또한 RANS 방정식은 목적함수 값을 찾기 위해 사용되었다. 설계점에서 계산된 목적함수값들은 각 목적함수에 대한 반응면 다항식을 생성하는데 사용된다. 다음 단계로 이 곡선들은 NSGA-II에 의한 설계범위에서 population을

Table 2 Ranges of design variables

Variables	Lower Bounds	Upper Bounds
γ_t	-0.02	0.04
γ_m	-0.03	0.03
δ_t	-0.04	0.02
δ_m	-0.01	0.01

생성하는 데 사용된다. 생성된 population은 파레

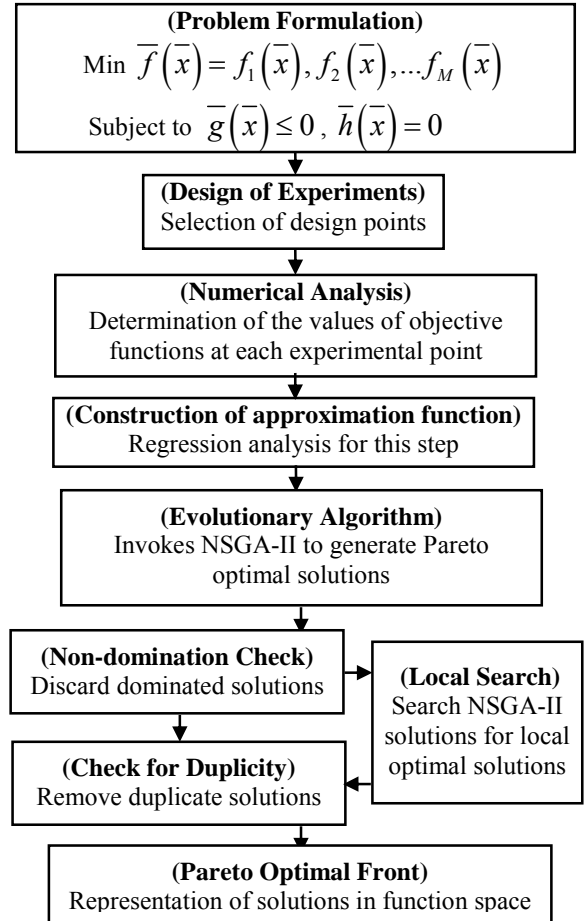


Fig. 3 Optimization procedure for hybrid MOEA

토-최적선을 형성하고 최적점들은 부분탐색법의 가중합계법에 의해 정제된다. 예비계산 후에 설계범위가 정해지는데 이를 Table 2에 나타내었다.

두가지 최적화 문제는 다음과 같이 각각 두 개의 목적함수로 구성된다.

- 효율과 전압
- 효율과 토크

이 두가지 문제에 대해 파레토 최적선이 생성된다. 타당성 검증의 목적으로 임의로 선택된 점들에 대해 RANS 해석이 수행되었다. Fig. 4와 5에 나타난 곡선은 가중합계법으로 정제된 곡선들이다. 여기서, 커브는 성능향상을 명백히 보여준다.

Fig. 4은 가중합계법과 결합된 NSGA-II에 의해 생성된 파레토 최적선을 보여준다. 효율과 전압상승이 반비례함으로써 목적함수들은 서로 상충됨을 보여준다.

이와 유사하게, Fig. 5 는 효율과 토크를 목적함수들로 선택했을 경우의 파레토-최적선을 나타낸다. 이 경우에도 토크와 효율은 상충되어 토크가 증가함에 따라, 효율은 감소한다.

Fig. 4 와 5 에 나타낸 파레토 최적선 상의 무작위로 선택된 점에서의 결과는 Fig. 3 과 4 에 나타내었다. RANS 해석으로 계산된 목적함수값들도 나타내었다. 기준모델과 최적화된 형상과의 비교는 성능향상을 보여준다. 효율과 토크에 대해 파레토 최적선이 생성되었을 때 효율은 1.34% 향상되었고 토크는 9.88% 감소하였다. 유사하게, 효율과 전압 (Fig. 4)에 대해 최적화를 하면 효율은 1.08% 증가하고 전압은 3.07% 증가한다. 이는 분명히, 다목적함수 최적화가 단일 목적함수 최적화보다 더 효과적으로 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다. Seo 등⁽⁶⁾은 같은 데이터를 이용하여 효율이라고 하는 하나의 목적함수로 최적화를 수행하였다. 그들의 최적화결과는 1.75%의 효율증가를 보여준다.

Table 3 Design variables for reference and optimal shapes

Blade shapes	Sweep		Lean	
	Tip	Mid	Tip	Mid
Reference	0	0	0	0
η - τ optimum	0.04	-0.03	-0.029	0.01
η - P_T optimum	0.034	0.021	0.006	0.01

Table 4 Reference and optimized blade efficiency, torque and total pressure

Blade shape	Result	τ ($\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$)	η (%)	P_T
Reference	RANS Calculation	0.447	85.10	153.3
η - τ optimum	RANS Calculation	0.403	86.24	-
	Improvement	9.88%↓	1.34%↑	-
η - P_T optimum	RANS Calculation	-	86.02	158.0
	Improvement	-	1.08%↑	3.07%↑

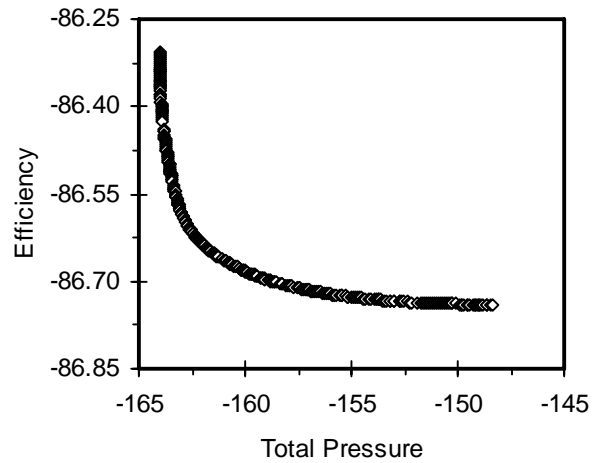


Fig. 4 Pareto optimal solutions for efficiency and total pressure (P_T).

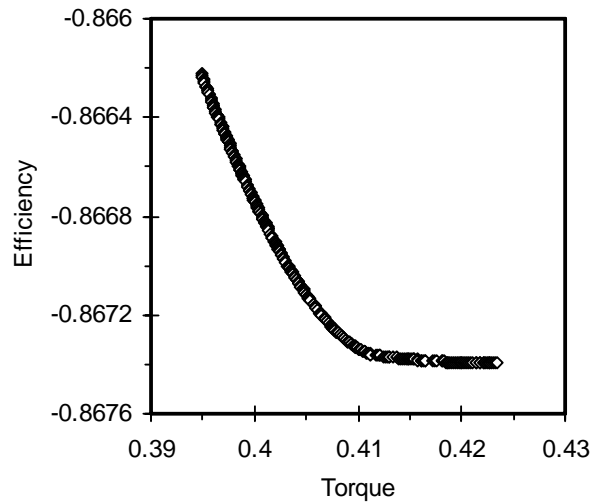


Fig. 5 Pareto optimal solutions efficiency and torque (τ).

6. 결론

본 연구에서 수치최적화는 각각 두개의 목적함수로 구성되는 두 가지 최적화 문제에 대해 수행되었다. 네 개의 설계변수가 선택되었고 목적함수는 효율, 전압, 및 토크 등 세 개 목적함수 중에서 선택되었다. 부분탐색법에 의해 강화된 NSGA-II 가 파레토-최적선을 구하는데 이용되었다. 최적화 결과는 다중목적함수 최적화가 단일 목적함수 최적화에 비해 송풍기 블레이드의 성능을 향상시키는 데 효과적이라는 것을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Gallimore, S. J., Bolger J. J., and Cumpsty, N. A., 2002, "The Use of Sweep and Diahedral in

- Multistage Axial Flow Compressor Blading, Part 1: University Research and Methods Development,” *Proceedings of ASME*, GT-2002-30328.
- (2) Denton, J. D. and Xu, L., 2002, “The Effects of Lean and Sweep on Transonic Fan Performance,” *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT-2002-30327.
- (3) Fischer, A., Riess, W., and Seume, J., 2003, “Performance of Strongly Bowed Stators in a 4-Stage High Speed Compressor,” *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT-2003-38392.
- (4) Jang, C.-M., Li, P., and Kim, K. Y., 2005, “Optimization of Blade Sweep in a Transonic Axial Compressor Rotor,” *JSME International Journal-Series B*, Vol. 48, No. 4, pp.793~801.
- (5) 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, No. 8, pp. 595~603.
- (6) Seo, S. J., Choi, S. M., and Kim, K. Y., 2005, “Design of an Axial Flow Fan with Shape Optimization,” *8th Asian International Fluid Machinery Conference*, China.
- (7) Deb, K., and Goel, T., 2001, “A Hybrid Multi-Objective Evolutionary Approach to Engineering Shape Design,” *Proceedings of evolutionary multi-criterion optimization conference*, Zurich, pp. 385-399.
- (8) CFX-5.7 Solver Theory, 2004, Ansys Inc.
- (9) Collette, Y., and Siarry, P., 2003, “Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies,” New York, Springer.
- (10) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., 1995, “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments,” *John Wiley & Sons*, New York.
- (11) MATLAB®, The language of technical computing, Release 14. 2004, The MathWorks Inc.