

유전자 알고리즘을 이용한 축류 송풍기 설계최적화

유인태* · 안철오* · 이상환**

Design Optimization of Axial Flow Fan Using Genetic Algorithm

In-Tae Yoo*, Cheol-O Ahn*, Sang-Hwan Lee**

Key Words : Multiobjective optimum design(다목적 최적설계), Weighting(가중값), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Pareto-optimal(파레토 최적해), Streamline curvature method(유선곡률법)

ABSTRACT

In an attempt to solve multiobjective optimization problems, weighted sum method is most widely used for the advantage that a designer can consider the relative significance of each object functions by weight values but it can be highly sensitive to weight vector and occasionally yield a deviated optimum from the relative weighting values designer designated because the multiobjective function has the form of simple sum of the product of the weighting values and the object functions in traditional approach.

To search the design solution well agree to the designer's weighting values, we proposed new multiobjective function which is the functional of each normalized objective functions and considered to find the design solution comparing the distance between the characteristic line and the ideal optimum. In this study, proposed multiobjective function was applied to design high efficiency and low noise axial flow fan and the result shows this approach will be effective for the case that the quality of the design can be highly affected by the designer's subjectiveness represented as weighting values in multiobjective design optimization process.

1. 서론

최근 비약적인 컴퓨터 성능의 향상에 힘입어 송풍기 내부 유동장에 대한 많은 연구사례가 발표되고 있고, 유동해석과 최적화 알고리즘을 연결하여 송풍기 설계에 직접 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다.^(1,2,3)

그러나 송풍기 내부의 유동은 복잡한 3차원 유동으로 해석에 소요되는 시간이 길고 최적화 기법과 연동되는 격자 생성이 쉽지 않다는 문제점 등으로 인해 실제 최적화 기법을 이용하는 축류형 송풍기의 설계에 있어서는 준 3차원 유동해석방법이 주로 이용되고 있다.

송풍기의 설계에 있어서 운전점에서의 유량과 정압, 회전수등의 기본적인 설계요구사항을 바탕으로, 설계에 고려되는 대표적인 인자는 날개수, 허브비, 그리고 반경에 따른 날개 코드길이를 결정하는 간격대 익현비 등을 들 수 있다. 대개의 설계인자는 단독적으로 결정되거나 단순하게 성능과 소음에 영향을 미치는 것이 아니라 여타의 여러 인자와 복잡한 관계를 가지고 있으며, 다양한 운전조건에 따라서 이들 설계인자는 그 운전점에서의 설계 최적해가 존재하므로 특정한 설계 기준을 명확히 제시하는 것이 어렵다. 또한 송풍기 설계변수에는 설계자에 의해 경험적으로 결정되는 불확실한 요소들이 존재하였는데, 대표적인 것이 날개의 형상을 결정짓는 간격대 익현비이며 대부분의 경우 팁과 허브에서의 간격대 익현비를 기준으로 임의반경에

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : radiocheck@hanmail.net

대해서는 단순하게 선형분포시키는 방법을 사용하여 왔다. 틱과 허브에서의 간격대 익현비는 송풍기의 성능과 총소음도에 직접적인 영향을 미치고 있으나 이를 결정하는데에는 역시 명확한 근거가 존재하는 것이 아니라 실험과 경험에 의한 추천값을 기준하는 것이 보통이며, 이 경험적 지식을 설계에 적극적으로 고려하기 위하여 피지논리를 도입하여 결정방법을 보다 체계화한 연구사례도 있다.⁽⁴⁾

아울러 전형적인 다목적 최적화 문제에 있어서 설계 가능한 설계점들 중 목적함수 공간을 생각할 때, 최소한 하나의 목적함수가 다른 목적함수보다 작거나 같은 설계점이 존재할 때 그 설계점을 파레토(Pareto) 최적해라고 하며 이러한 최적해들은 집합을 구성하고 있으며, 당연히 파레토 집합의 여집합에 비하여 우수한 해로 구성된 집합이므로, 다목적 최적화의 최종적인 목적은 이 파레토 집합들 중 설계자의 의도에 부합하거나 여타의 설계조건을 만족하는 하나의 해를 선택하는 것이다.

이와 같이 파레토 해집합 중 설계자의 의사가 반영된 해를 구하는 방법으로는 가중합방법(Weighted sum method)이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 가중합 방법의 경우 가중목적함수가 가중값과 각각의 목적함수가 단순한 내적으로 표현되므로 임의의 파레토선단에 대해서 가중값 벡터에 따라 최적해가 매우 민감하게 영향을 받을 수 있기 때문에 가중값 벡터를 이용함으로써 설계자의 의도대로 최적해를 제어하기에 힘들고 따라서 설계자가 가중값의 선정에 매우 주의를 기울여야 한다.

본 연구는 전역적 최적화 방법으로 널리 사용되는 유전자 알고리즘을 이용하여 임의의 운전점에 대하여 송풍기의 효율과 총소음도를 고려한 다목적 최적화에 대하여 논한다. 또한 가중값 벡터를 이용하여 최적해를 구하는데 있어서, 설계자가 설정한 가중값을 보다 적극적으로 제어가능한 방법으로 최적화에 반영할 수 있도록 하기 위한 방법과, 얻어진 파레토 집합을 구성하는 최적해의 구성에 대해 고찰하여 보았다.

2. 축류송풍기 설계

2.1 효율예측

송풍기 유동해석에 있어서 축방향으로는 준3차원 유동해석방법인 유선곡률법(streamline curvature method)을 적용하였고 반경방향으로 자유와형식을 채택하여 축류

송풍기를 해석하였다.

설계는 기본설계 사양 즉 유량, 압력차와 회전수에 몇 가지 가정과 경험식들을 이용하여 진행되며, 이 기본설계 사양으로 Codier curve⁽⁵⁾의 도표를 이용하여 최적의 직경을 결정할 수 있다.

축류 송풍기의 실제유동은 유한개의 날개 수로 인해, 날개각과 유동각이 일치하지 않는다. 이런 날개각과 유동각은 입사각과 편각으로 표시된다. 편각을 계산하는 식으로는 Howell⁽⁶⁾의 경험식과 Constant의 식을 수정하여 만든 Carter's rule⁽⁷⁾ 등이 있으나 본 연구에서는 NACA 경험식⁽⁵⁾을 이용하였다.

2.1.1. 손실모델

손실모델은 송풍기의 효율을 결정하는 요소로서 정확한 성능을 얻기 위해서는 손실모델의 선정이 중요하다. 날개 형상 손실은 날개 표면에서 발생하는 경계층으로 인한 손실로서 Lieblein⁽⁸⁾이 경계층이론을 적용한 모델을 사용하였고 탈설계점에서는 Zhner⁽⁹⁾의 식을 개선한 Petrovic & Riess⁽⁹⁾ 모델을 사용하였다. 벽면손실은 유체와 유체기계 내벽간의 경계층 발달로 인해 생겨나는 압력손실로 본 연구에서는 Howell⁽⁶⁾의 상관관계식이 사용되었다.

이차 유동손실은 실제의 익형이 3차원적인 모양을 하고 있기 때문에 익렬을 통과하는 유체가 이상적인 축대칭 유동이 아닌 3차원 유동을 하게 되고 벽면과의 마찰에 의한 경계층 발달로 인한 날개와 벽면간의 상대유동, 원주속도성분에 의한 유동의 전향 등에 이차유동이 형성되어 초래되는 압력손실인데, 본 연구에서는 Lakshminarayana⁽¹⁰⁾와 Horlock⁽¹⁰⁾의 손실모델을 채택하였다. 끝간격 손실은 회전익의 익렬과 외벽과의 간격으로 인해 압력면으로부터 흡입면으로의 유량의 유출이 초래되는데 따른 손실로 Fujie⁽¹⁰⁾의 식을 이용하였다.

2.1.2. 유선곡률법

유선곡률법은 유선을 각 계산위치에서 반경방향으로 질량유량의 분포를 가정하여 구하고, 반복계산을 하면서 구해진 질량유량 분포에 맞추어 보간법을 이용하여 유선의 분포를 다시 구하게 된다. 이때 유동은 정상, 비점성 유동이며 축대칭 유동으로 가정한다. 그러나 각 계산위치에서 축적된 점성의 효과를 무시하지 않고 엔트로피항의 증가로 고려해 준다. 내부적으로 각 계산위치에서 연속방정식의 만족여부를 판단하여

전체적으로 유선이 일정한 수렴조건에 만족할 때까지 반복계산 한다.

송풍기의 유동이 정상, 비점성, 비대칭유동이라 가정하고 Novak⁽¹¹⁾이 제안한 운동방정식을 이용하였고, 연속방정식은 각 계산위치에서 환형을 지나는 축대칭 유동에 적분형 연속방정식을 적용하였으며 에너지식, 전압손실식, 상태식을 동시에 고려하여 해석한다.

2.2. 소음예측

송풍기에서 가장 지배적인 소음은 날개주위에서 발생하는 소음이다. 이런 유동소음은 양력을 일으키는 날개면의 주변 유동장의 상대속도에 의한 것으로 복잡하고 불균일하게 분포한다.

축류송풍기 소음예측은 이러한 주변유동장의 유동현상으로 소음성분을 분류하여 예측한다. 우선 소음스펙트럼상에서 넓은 주파수 분포에서 나타나는 광대역 소음성분은 날개의 Trailing edge에서 발생하는 난류 경계층소음, 회전하는 날개 표면에서 유동박리에 의한 층류 경계층 소음으로 분류한다. 날개 통과 주파수의 정수배가 되는 주파수에서 높은 SPL을 갖는 이산 주파수소음은 정상추력에 의한 소음, 유입류의 외란에 의한 간섭소음등으로 분류한다.

Wright⁽¹²⁾는 난류경계층 소음을 다음과 같이 식으로 예측하였다.

$$SPL = 10 \log \frac{\Delta f V_i^2 D^2 B c e^{0.46\alpha}}{R^2} - 69dB \quad (1)$$

식(1)에서 Δf 는 소음측정 밴드폭, V_i 는 팁에서의 속도, D 는 송풍기의 직경, B 는 날개수, c 는 코드길이, α 는 영각, R 은 관측거리를 나타낸다.

정상 추력 소음은 날개가 회전하면서 받는 힘에 의해 발생하는 소음을 말하는데 Gutin noise⁽¹³⁾라고도 하며 다음과 같은 식으로 예측된다.

$$\begin{aligned} SP_{mB} &= (NT_T / Ra_0) \sin \sigma m B J_{mB} (m B M_e \cos \sigma) \\ M_e &= 2\pi N r_e / a_0 \\ T_T &= 0.5 \rho A V_i^2 C_1 \\ A &= 0.33 B c r_e \\ C_1 &= 2\pi \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

이때 N 은 회전 주파수, T_T 는 총추력, a_0 는 음속, σ 는 축정각, mB 는 모드수와 날개수의 곱, J_{mB} 는 그에 따른 Bessel 함수, M_e 는 유효 동익 마하수, r_e 는 유효반경, C_1 은 양력계수, A 는 날개면적이다.

3. 최적화 방법

3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 전역적 최적화 방법으로서 복잡한 비선형 문제의 근사 최적해를 찾는 데 적합하고, 기술기 정보를 필요로 하지 않으므로 함수의 연속이나 미분가능의 제약을 받지 않는다. 이 알고리즘은 유전적 변이와 자연선택의 개념으로부터 개발된 것으로, 주어진 문제에 대한 후보해들을 이진수로 표현하고, 이 두개의 개체(후보해)가 서로 일부 정보를 교환하는 교배연산에 의하여 자손을 만들고(근거리 후보해 탐색), 일부 유전자를 변이시키며(임의적 전역적 탐색) 적합도(목적함수)에 근거하여 가장 우수한 개체(후보해)들을 선택하여 다음 세대로 진화한다. 이 알고리즘은 매 세대마다 다수의 개체에 대해 적합도를 기준하여 판단하는 병렬적 탐색방법이다.

3.2 다중목적함수

다목적 최적화문제에 있어서 가장값을 고려하는 가중합 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } \Phi &= \sum_{i=1}^n w_i f_i(\vec{X}) \\ X_j^0 &\leq X_j \leq X_j^1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\left(\vec{X} = [X_1, X_2, \dots] \text{ in } R^m \right)$$

이때 n 은 목적함수의 수를, m 은 설계인자의 수를 의미하며, 각각의 목적함수 f_i 는 서로 다른 물리량을 가지며 주어진 설계범위 내에서 서로 다른 최대값과 최소값을 가진다. 주어진 설계영역내에서 목적함수 f_i 가 가지는 최대값과 최소값을 이용하여 다음과 같이 서로 다른 물리량을 가지는 목적함수를 정규화 할 수 있다.

$$f_i^* = \frac{f_i - f_{\min, i}}{f_{\max, i} - f_{\min, i}} \quad (4)$$

이때 설계영역내에 각각의 목적함수가 가지는 최대 값과 최소값으로부터 설계자가 설계영역내에서 최소 요구사항을 만족하는 설계가 가능한지를 우선적으로 판별할 수 있으며 각각의 목적함수가 가지는 최대, 최소값에 근거하여 다수의 목적함수를 단일목적함수로 만들 수 있도록 하는 가중값을 선정할 수 있는, 보다 객관적인 근거를 설계자에게 제공한다.

두개의 목적함수를 동시에 최소화하도록 하는 문제에 대해서 고려하여 보면, 어느 경우든 가장 이상적인 최적해는 원점이 되므로 설계자가 목적함수의 중요도 등을 고려하여 주관적으로 결정한 가중값이 각각 w_1, w_2 이고 이들의 합이 1이라면 두개의 목적함수로 이루어지는 정규화된 목적함수 공간내에서 가중값 벡터로 표현되는 직선을 정의할 수 있다. 가중값을 보다 적극적으로 고려하는 일반적인 경우에 대해서, 설계자가 의도하는 최적해는 정규화된 목적함수 공간내의 파레토 집합 중 이 직선과 가장 가까운 점이라 할 수 있다. 따라서 앞으로의 단계는 가중값 벡터에 의해 정의되는 직선상에 존재하는 파레토 집합중에서 가장 이상적인 설계에 가까운 설계해를 탐색하는 작업이다.

가중합 방법은 개개의 목적함수에 가중값을 곱함으로써 정규화된 목적함수 벡터와 가중값 벡터의 내적을 최소화하는 것이 되므로 알려지지 않은 파레토 선단에서 설계자 의도에 부합하는 최적해를 구하는 것은 많은 시간과 노력을 요하게 될 수 있다. 파레토 집합 중에서 가중값에 의해 생성되는 특성직선상의 설계해를 찾지 못하게 되는 경우, 설계자의 의도를 적극적으로 반영하지 못한다고 할 수 있으며 그러한 경우 설계해는 가중값 벡터에 의해 좀처럼 제어되지 않는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 가중값에 따라 목적함수 공간내의 특성직선상에 존재하는 다목적 최적해를 얻기 위하여 새로운 단일화 목적함수를 고려한다. 우선 가중값 벡터를 이용하여 정규화된 목적함수 공간에서의 특성직선의 방향벡터를 결정한다. 이때의 목적함수는 다음의 식 (5)과 같이, 특성곡선상에 존재하는 파레토 집합에 대해서만 선별적인 값을 가지도록 하기 위해서는 목적공간내에서 연속이며, 특성곡선에서 멀어질수록 충분히 감소하며, 이상적인 설계해 쪽으로 접근할수록 단조 증가하는 함수이다.

$$\begin{aligned} \text{maximize } \Phi &= \exp \left[-\frac{(ag_1)^2 + g_2^2}{2\sigma} \right] \\ \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1^* \\ f_2^* \end{bmatrix} \\ \theta &= \frac{\pi}{2} w_1 \quad (w_1 + w_2 = 1) \end{aligned} \quad (5)$$

이때 α 는 특성직선상의 해와 그렇지 않은 해를 분리할 수 있는 특성을 결정할 수 있는 값이며, σ 는 이상해에 가까워질수록 단일화 목적함수의 값이 증가하는 정도를 결정한다. 제시된 단일화 목적함수는 정규화된 설계점 (f_1^*, f_2^*) 이 특성직선에 가까울 수록, 그리고 이상해에 가까울 수록 1에 가까운 값을 가진다. 해의 분리특성이 크면 클수록 설계자의 의도에 가까운 최적해의 탐색이 이루어지나, 수렴성에 좋지 않은 결과를 초래할 수 있다. Fig. 1은 가중값이 0.5인 평형최적해 문제에 대해서 α 와 σ 에 따른 단일화 목적함수의 예를 나타낸 것이다.

4. 최적화 결과

본 연구에서 대상으로 하는 송풍기는 터널 지하공간등의 급배기용으로 사용되는 것으로써 기본적 설계사항은 Table 1과 같다. 최적화의 대상이 되는 설계인자는 날개수, 반경방향에 따른 날개의 코드길이를 결정하는 허브와 팁에서의 간격대 익현비, 그리고 허브비등의 4개로 택하였다.

프로그램은 설계자로부터 유량, 정압상승, 회전수와 같은 기초설계인자를 입력받아 팁직경을 선정하고 주어진 설계인자 범위내에서의 최대, 최소효율과 최대, 최소소음을 탐색한다. 설계프로그램은 이 결과를 바탕으로 얼마의 효율과 소음을 타협할 것인지를 결정하여 사용자에게 가중값을 설정할 것을 요구한다.

유전자 알고리즘에 있어서 유전자의 길이는 변수당 10비트씩을 이용하였고 한 세대에서의 개체수는 10으로 하였으며 전 과정에 대해 교배율은 1로 하였으며 효율적인 탐색을 위해 비대칭 탐색을 실시하였고, 돌연변이율은 연산 초기에 작은 값으로 출발하여 점차로 증가하도록 하였다.

Table 2와 같이 설계인자의 상하한이 설정된 경우, 효율의 최소, 최대값은 각각 55%, 89.5%를 얻었고 총소음도의 경우 약 93.6dB(A)와 105dB(A)를 얻었다. 따라서 주어진 설계범위에 대해 효율 34%정도와 총소음도 약 11.4dB(A)정도가 타협가능한 것으로 얻어진다.

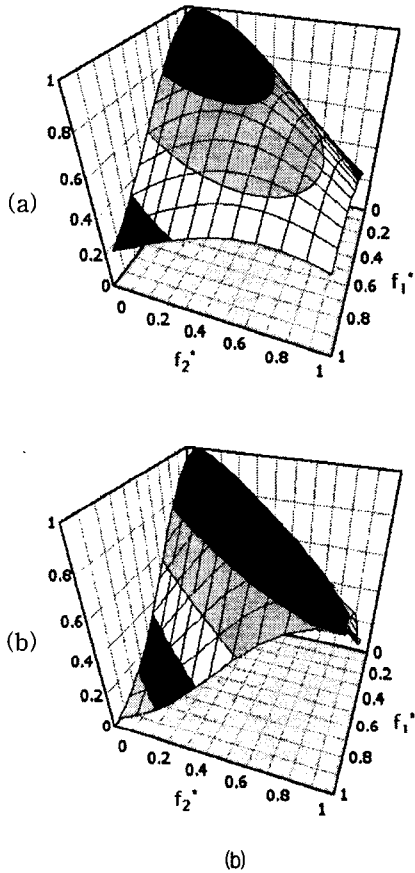


Fig. 1 Proposed multiobjective function in normalized space

(a) $\alpha=0.3, \sigma=0.2$ (b) $\alpha=0.15, \sigma=0.1$

Table 1 Design requirement

Volume flowrate (CMM)	950
Static pressure (mmAq.)	70
Rotational speed (rpm)	1250
Tip diameter (mm)	1140
Tip clearance (mm)	10

Table 2 Design variables and side constraints

Design variables	Range
The number of blades	6~12
Hub ratio	0.4~0.6
Pitch-chord ratio at hub	0.5~1.5
Pitch-chord ratio at hub	1.0~2.5

경우에 따라서 날개의 수는 설계자에 의해서 결정되기도 하지만 특정한 날개수로 설계조건에 포함되기도 한다. 그러므로 모든 설계인자를 동시에 고려하여 파레토 집합을 구하는 것보다는 날개수별로 파레토 집합을 이루는 설계점에서의 설계해를 살펴보는 것이 설계자 입장에서 더욱 의미가 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 제시한 방법에 따라 송풍기의 날개수가 6인 경우에 대해 식(5)와 같은 다중목적함수에 가중값을 순서대로 변화시켜가며 구해진 파레토 집합과 기존의 가중합방법에 따라 얻어진 파레토 집합을 비교한 것이다. 두 결과는 파레토 선단이 일치하지만 일반적인 가중합방법을 사용하는 경우, 가중값에 따라 얻어진 개개의 설계점들의 분포와 그 순서가 불규칙하여 파레토 집합상에서 설계자가 원하는 설계점을 정확히 탐색하는 것은 적지 않은 노력과 시간을 필요로 한다. 실제의 설계는 효율만을 극대화 한다거나 소음만을 낮추기 위한 설계가 이루어지는 것이 아니고 이 둘 간의 타협이 이루어지게 되며, 가중값이 설계자의 의사를 반영한다는 점을 상기하면 본 연구에서 제시한 방법을 통해 설계자의 의사를 충실히 반영하는 최적해를 손쉽게 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 3은 날개수 8개인 경우에서 동일한 가중값을 가지는 평형최적해의 결과와, 가중값을 각각 0.7, 0.3으로 한 경우의 최적해를 정리한 것이다. 파레토 집합에 대해서 가중값에 따라 선별된 것이므로 이들 해가 가지는 효율과 총소음도간의 차이는 그리 크지 않다. Fig. 3은 날개수 8개의 경우에 대해 얻어진 파레토 해를 구성하는 설계인자의 해를 나타낸 것이다. 효율을 중시하는 설계가 될 수록 허브에서의 간격대 익현비가 감소하고 허브비도 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig 3에는 날개수에 따라 얻어진 파레토 집합을 동시에 도시한 것으로, 이들이 만드는 합집합이 날개수까지 동시에 최적화의 대상으로 하는 경우의 파레토 집합을 의미한다. 날개수가 비교적 적은 경우 저소음화는 가능하나 효율 향상에 한계가 있고 반대로 날개수가 많은 경우, 효율은 향상되나 저소음화에 한계를 가진다.

5. 결론

축류 송풍기의 효율과 소음을 목적함수로 하는 다중목적 최적설계에 있어서 가중값으로 표현되는 설계자의 의사를 적극적으로 반영하고자 가중값에 따라

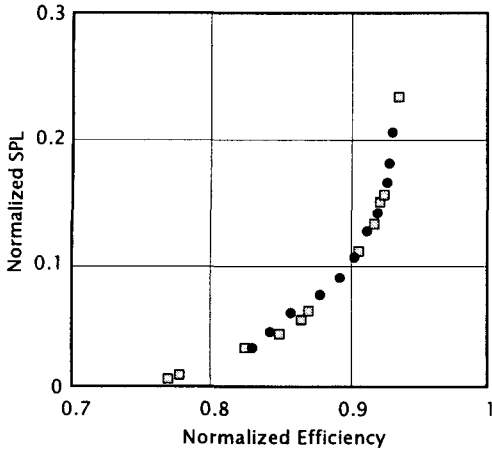


Fig. 2 Comparison of the two Pareto-optimal solutions (for 6-rotor blades):

1. ○, by proposed method
2. □, by weighted sum method

Table 3. Optimum values according to different 3-weighting vectors (for 8-rotor blades)

w_1	0.3	0.5	0.7
w_2	0.7	0.5	0.3
The number of blades	8	8	8
Pitch-chord ratio at hub	0.844	0.742	0.688
Pitch-chord ratio at tip	2.478	2.375	2.25
Hub ratio	0.532	0.515	0.504
Efficiency(%)	86.20	86.72	87.03
OASPL(dB(A))	95.05	95.34	95.41

보다 제어가능한 설계해를 구하는 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 제시된 방법은 기존의 가중합 방법과는 달리 각각의 목적함수를 차원으로 하는 공간에서 정의되는 범함수를 사용하였으며, 범함수를 사용함으로써 발생할 수 있는 목적함수의 복잡성을 극복하고자 전역적 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 이용하였고 기존의 방법과 비교를 통해 본 연구에서 제시된 방법이 효과적임을 알 수 있었다. 다목적 설계 최적화문제에 있어서 설계자의 주관에 설계의 질에 비교적 큰 영향을 미치는 경우, 본 연구에서 제시하는 방법이 효과적이라 생각된다.

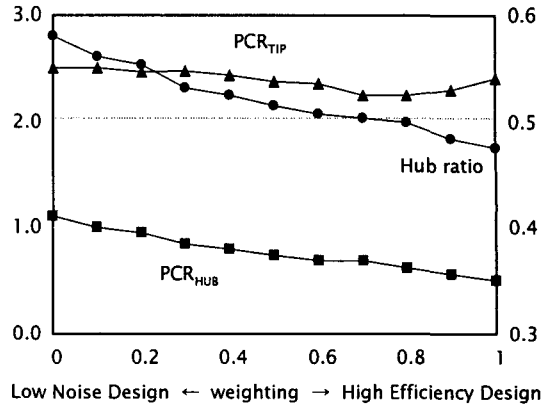


Fig. 3 Optimal solutions according to weighting for 8-rotor blades

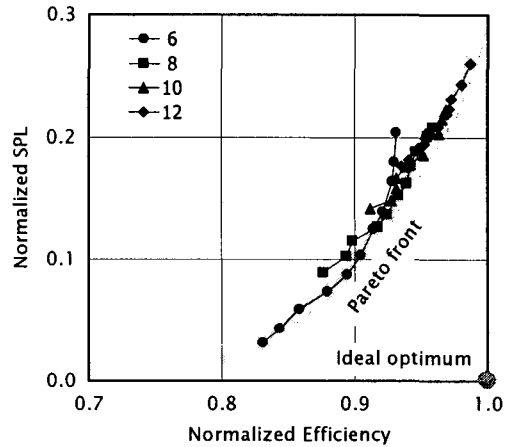


Fig. 4 Pareto-optimal solutions according to the number of blades

참고문헌

- (1) Akira, O., M.S. Liou, Shigeru O., 2002, "Transonic Axial-Flow Blade Shape Optimization Using Evolutionary Algorithm and Three-Dimensional Navier-Stokes Solver", AIAA
- (2) 김진영, 김광용, 이상배, 조치안, 1997, "축류팬을 지나는 유동에 대한 비정상 Navier-Stokes 해석", 공기조화 냉동공학회, 97'동계학술발표회 논문집 pp. 580~585
- (3) 조성신, 최재호, 김광용, 1997, "축류송풍기의 유동 해석 및 최적설계", 98'동계학술발표회 논문집 pp. 135~140

- (4) 안철오, 1995, “퍼지논리를 이용한 고성능 축류 송풍기의 설계이론에 관한 연구”, 한양대학교 대학원 공학 석사 논문
- (5) Terry. Wright, 1999, “Fluid Machinery”, CRC Press
- (6) Horlock, J., H., 1973, “Axial Flow Compressors” Krieger Publishing Co
- (7) Cumpsty, N., A., 1989, “Compressor Aerodynamics”, Longman
- (8) Lieblein, S., 1959, “Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades”, ASME J., of Basic Eng., Vol. 81, pp.387-400
- (9) Ning Wei, 2000, “Significance of Loss Models in Aerothermodynamics Simulation for Axial Turbines” Academic
- (10) Lakshminarayana, B., and Horlock, J., H., 1963, “Review: Secondary Flows and Losses in Cascades and Axial-Flow Turbomachines”, Int., J. Mech. Sci., Vol. 5, pp. 287~307
- (11) Novak, R. A., 1967, “Streamline Curvature Computing Procedures for Fluid-Flow Problems”, ASME Trans., J. of Eng. for Power, Vol. 89, pp. 478~490
- (12) Wright, S., E., 1976, “The Acoustic Spectrum of Axial Flow Machines”, J of sound and Vib., Vol. 45, pp. 165~223
- (13) L., Gutin, 1942, “On the Sound Field of a Rotating Propeller”, NACA Tech Memo