

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.8.763

ISSN 1226-4881

가중평균대리모델을 이용한 환기용 축류송풍기의 고효율 최적설계

김재우* · 김진혁* · 이 찬** · 김광용*†
* 인하대학교 기계공학부, ** 수원대학교 기계공학과

High-Efficiency Design of a Ventilation Axial-Flow Fan by Using Weighted Average Surrogate Models

Jae-Woo Kim*, Jin-Hyuk Kim*, Chan Lee** and Kwang-Yong Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Suwon Univ.

(Received August 20, 2010 ; Revised June 23, 2011 ; Accepted June 23, 2011)

Key Words: Ventilation Axial-Flow Fan(환기용 축류송풍기), High Efficiency Design(고효율 설계), Numerical Optimization(수치 최적화), Surrogate Model(대리 모델)

초록: 본 연구에서는 환기용 축류송풍기에 대하여 효율을 목적함수로 하는 수치최적설계를 수행하였다. 유동해석은 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 통하여 이뤄졌으며, 난류모델로는 Shear Stress Transport 모델을 사용하였다. 최적설계를 위한 설계변수로는 허브비, 날개의 중간 및 팁 스펠에서의 엇갈림각을 사용하였다. 실험계획법으로 라틴하이퍼큐브 샘플링 방법을 사용하여 설계영역 내에서 25개의 실험점을 추출하였다. 최적설계기법인 가중평균대리모델과 삼차원 RANS 해석을 결합하여 수치최적설계를 수행하였으며, 가중평균대리모델로는 WTA1, WTA2 및 WTA3 모델을 사용하였다. 수치 최적설계에 의해 얻어진 최적형상들의 성능을 기준형상과 비교하였으며, 성능이 가장 좋은 모델에 대하여 기준형상과의 내부유동장 비교 및 분석을 통해 성능이 향상된 원인을 규명하였다.

Abstract: An optimization procedure for the design of a ventilation axial-flow fan is presented in this paper. Flow analyses of the preliminary fan are performed by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations via a finite-volume solver with the shear-stress transport turbulence model as a turbulence closure. Three variables, the hub-to-tip ratio and the stagger angles at the mid and tip spans, are selected for the optimization. The Latin-hypercube sampling method as a design-of-experiments technique is used to generate twenty-five design points within the design space. and the weighted average surrogate models, WTA1, WTA2, and WTA3, are applied for find optimal designs. The results show that the efficiency is considerably enhanced.

- 기호설명 -

dh : 허브 직경 (mm)
ds : 축 직경 (mm)
dt : 팁 직경 (mm)
F : 목적함수
in : 송풍기 입구부
LE : 블레이드의 전연
lr : 루트 길이 (mm)
OPT : 최적형상

out : 송풍기 출구부
PS : 압력면
Q : 체적유량 (m³/s)
REF : 기준형상
RH-T : 허브비, dh/dt
SS : 흡입면
TE : 블레이드의 후연
 β_{mid} : 중간 스펠에서의 엇갈림각 (deg.)
 β_{tip} : 팁 스펠에서의 엇갈림각 (deg.)
 η : 전압효율
 τ : 토크 (N·m)
 ω : 각속도 (rad/s)

† Corresponding Author, kykim@inha.ac.kr

1. 서 론

터보기계는 에너지변환과 관련하여 전 산업분야에서 폭 넓게 사용되고 있고, 이에 따라 국내산업의 전력소비량 중 상당 부분을 차지하고 있는 기기이기도 하다. 최근 정부는 환경보호 차원에서 에너지 소비 절감을 위한 저탄소 녹색성장을 추진하고, 고효율기기의 사용을 독려하기 위해 여러 활동을 벌이고 있다. 이에 대응하는 노력으로써 국내에서도 많은 연구자들에 의해 터보기계의 효율을 향상시키기 위한 연구가 매우 다양하게 수행되고 있다. 그 중 삼차원 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 기초로 하는 전산유체역학(CFD)적 삼차원 유동해석기법은 급속히 발전하는 컴퓨터성과 더불어 복잡한 터보기계의 내부유동장을 분석할 수 있는 도구로써 그 실용성이 증대되고 있다. 삼차원 수치해석을 통한 유동해석기법은 터보기계의 복잡한 내부유동구조를 정확히 예측함으로써 공력 성능을 보다 정밀하게 분석할 수 있고, 이를 설계에 반영할 수 있도록 도움을 준다.

최근에는 더 나아가 삼차원 수치해석과 최적화기법이 결합된 수치최적설계기법을 통한 터보기계 설계에 대한 사례가 다양하게 보고되고 있다. 특히 대리모델(surrogate model)을 활용한 수치최적설계는 최적화에 소요되는 계산시간을 줄이면서 예측의 정확성을 높일 수 있는 방법으로 다양한 형상변수를 갖는 터보기계의 설계에 매우 유용하게 사용되고 있을 뿐 아니라 이미 많은 연구자들에 의해 경제성과 효율성이 입증된 바 있다. Seo 등⁽¹⁾은 가장 보편적인 대리모델 중의 하나인 RSA(response surface approximation) 모델을 적용한 수치최적설계를 통해 축류송풍기의 효율을 1.75% 증가시키는 결과를 얻었고, Kim 등⁽²⁾과 Wang 등⁽³⁾은 각각 RBNN(radial basis neural network) 및 KRG(Kriging)와 같은 대리모델을 사용하여 RANS 해석과 결합한 수치최적설계를 통해 원심압축기 임펠러의 중요한 성능변수인 압력비와 효율을 개선시킨 바 있다.

이처럼 다양한 대리모델을 적용한 수치최적설계기법이 발달함에 따라 더욱 진보된 대리모델의 개발에 관한 연구도 수행되어지고 있다. 최근 Goel 등⁽⁴⁾은 여러 가지 대리모델 중 반응면기법, 신경회로망기법 및 크리깅기법을 혼합하여 오차율에 따라 다양한 가중치를 적용하는 가중평균대리모델들을 개발하였다. 그들은 이 모델들을 사용한 최적설계기법이 하나의 대리모델만을 사용하는 기법에 비해 비교적 작은 오차율

과 높은 신뢰성을 갖는다고 밝혔다. Samad 등⁽⁵⁾은 가중평균 대리모델을 사용하여 천음속 축류압축기 블레이드의 린(lean) 및 최대두께와 관련된 변수들에 대하여 수치최적설계를 수행하여 압력비 및 효율을 향상시켰다. Kim 등⁽⁶⁾은 축류송풍기 블레이드를 설계 시 가중평균대리모델을 적용하여 효율을 증가시키는 결과를 얻었으며, Kim과 Kim⁽⁷⁾은 가중평균대리모델을 적용하여 사류펌프 디퓨저의 수치최적설계를 통해 사류펌프의 전체 시스템 성능을 개선시켰다.

본 연구에서는 주로 산업분야에서 사용되는 환기용 축류송풍기에 대하여 기초설계된 초기형상의 효율을 향상시키고자 선택된 설계변수에 대해 삼차원 RANS 해석과 가중평균대리모델을 결합한 수치최적설계를 수행하였다. 가중평균대리모델로는 Goel 등⁽⁴⁾에 의해 제시된 WTA(weighted average surrogate)1, WTA2 및 WTA3 모델을 사용하였으며, 수치최적설계에 의해 얻어진 최적형상들의 성능을 기준형상과 비교하였다. 아울러, 그 중 성능이 가장 좋은 모델에 대하여 기준형상과의 내부유동장 비교 및 분석을 통해 성능이 향상된 원인을 규명하고자 하였다.

2. 기초설계 전산체계 및 설계대상 모델

본 연구의 대상인 환기용 축류송풍기는 설계의 초기 단계에서 Lee와 Kil⁽⁸⁾에 의해 개발된 축류송풍기용 기초설계 프로그램을 이용하여 설계되었다. 이 기초설계 프로그램은 설계요구조건을 근거로 자유설계변수인 팁 직경, 허브비, 시위길이 및 블레이드 개수 등을 입력하면, 날개 각도에 맞는 캠버선 설계 및 날개의 데이터베이스로부터 익형두께분포를 결정할 수 있다. 본 연구에서 사용된 기초설계 전산체계 프로그램의 설계 및 해석방법은 참고문헌⁽⁸⁾에 자세히 기술되어 있다.

본 연구에서 사용된 환기용 축류송풍기의 초기설계요구조건은 설계점에서의 유량조건인 60CMM에서 토

Table 1 Design requirements and specifications of the ventilation axial-flow fan

Design volume flow rate, CMM	60
Rotational speed, rpm	1170
Pressure rise, mmAq	10
Tip diameter, mm	510
Hub-tip ratio	0.294
Tip clearance, mm	2
Number of blades, EA	10

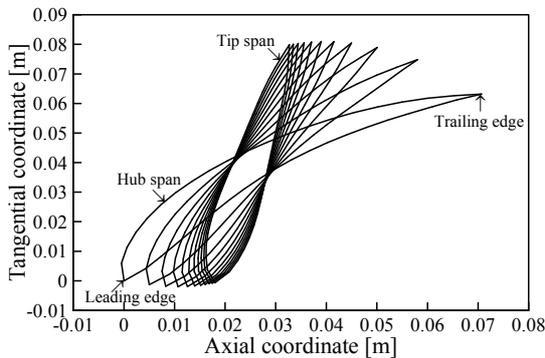


Fig. 1 The sections of blade profiles from hub-to-tip spans

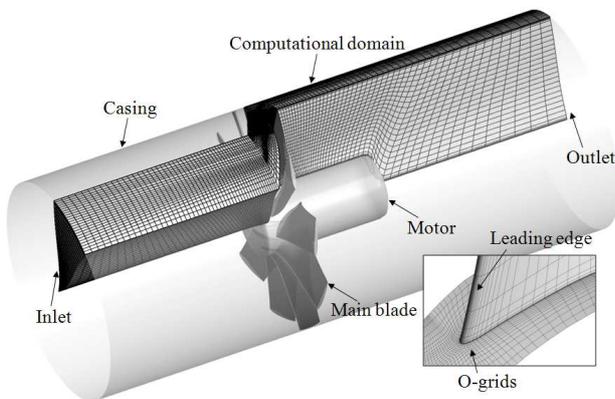


Fig. 2 Geometry of the model fan and the computational domain

출압력 10mmAq 이상이다. 또한 임펠러의 회전속도는 1170rpm이며, 10개의 블레이드를 갖는다. 팁 간극(2mm)을 포함한 케이싱 직경은 510mm이고, 허브비는 0.294이다. 자세한 사양은 Table 1에 기술하였다.

최종적으로 설계된 익렬의 단면들에 대해서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 무게중심이 일치하도록 허브에서 팁까지 축적하여 삼차원 축류송풍기 블레이드의 기초형상을 설계하였다.

3. 수치해석방법

본 연구에서는 환기용 축류송풍기의 내부유동장을 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 수치해석을 수행하기 위한 축류송풍기의 형상 정의, 격자생성, 경계조건의 정의, 유동해석 및 결과과정리는 각각 Design-Modeler, Blade-Gen, Turbo-Grid, CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.⁽⁹⁾

해석 대상인 축류송풍기의 블레이드는 Fig. 2에서

보는 바와 같이 총 10개로 구성이 되어있으나, 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위하여 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 단일유로에 대해서만 해석을 수행하였다.

작동유체는 표준상태의 25℃ 공기로 하였고, 입구에서의 경계조건은 대기와 동일한 조건을 주었으며, 출구의 조건으로는 단일유로에 대한 질량유량을 부여하였다. 난류모델로는 SST(shear stress transport)모델을 사용하였다. SST모델을 사용 시 벽 근처 영역에서의 격자는 첫 번째 격자의 위치가 $y^+ < 2$ 의 조건을 만족하도록 하였고, 경계층(boundary layer) 내에 적어도 10개 이상의 격자를 구성하여 저레이놀즈수(low-Reynolds number) 모델이 적용되도록 하였다.⁽¹⁰⁾

격자계로는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전체적으로 육면체 격자를 통하여 구성을 하였고, 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계를 사용하였으며, 그 외의 영역에는 H형 격자계를 구성하였다.

4. 최적설계기법

최적설계기법의 적용을 위해서는 우선 설계변수 및 목적함수가 정의되어야 한다. 각 설계변수들은 목적함수에 대한 민감도 테스트를 통하여 각각의 설계범위를 얻게 되고, 이를 통해 결정된 설계영역 내에서 실험계획법에 의해 특정 개수의 설계점을 추출하게 된다. 각 설계점에서 유동해석을 통하여 구한 목적함수의 값들은 주어진 대리모델을 구성하는데 사용된다. 각 대리모델이 구축되면 최적화 알고리즘을 통하여 최적점을 찾게 된다. 본 연구 대상인 환기용 축류송풍기에 대한 최적화 과정은 아래에 자세히 기술한다.

4.1 목적함수 정의

본 연구에서는 환기용 축류송풍기의 중요한 성능변수 중 하나인 효율을 향상시키고자 목적함수로 다음과 같이 정의되는 전압효율을 선정하였고, 수치 최적설계를 통해 이를 최대화하고자 하였다.

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

여기서, P 는 전압을 의미하며, 하첨자 in 과 out 은 각각 입구부와 출구부를 나타낸다. 또한 Q 는 유량이며, τ 와 ω 는 각각 토크와 각속도를 의미한다.

4.2 설계변수 정의

선행 연구로 Kim 등⁽¹¹⁾은 기초설계 프로그램 및 삼차원 RANS 해석을 통해 현 설계점에서 내부유동장 분석을 수행하여 성능을 고찰하였다. 그 결과, 그들은 확산계수(diffusion factor) 분포를 통해 허브 인근에서 국부적 실속발생으로 인한 유동박리를 예측하였고, 이는 송풍기 전체 시스템 효율에 상당한 영향을 미친다는 것을 알아내었다.

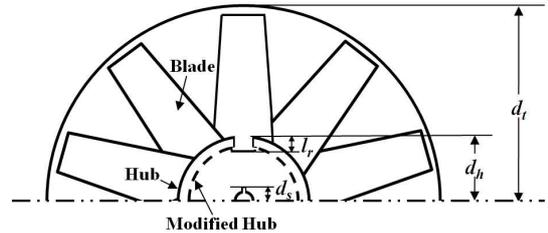
본 연구에서는 Kim 등⁽¹¹⁾의 선행 연구결과를 토대로 본 축류송풍기의 성능 향상을 도모하고자 수치최적설계를 위한 설계변수로 허브비(hub-tip ratio, R_{H-T})와 블레이드의 중간(β_{mid}) 및 팁(β_{tip}) 스패에서의 엇갈림각(stagger angle)을 사용하였다. 여기서 허브비는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{H-T} = d_h/d_t \tag{2}$$

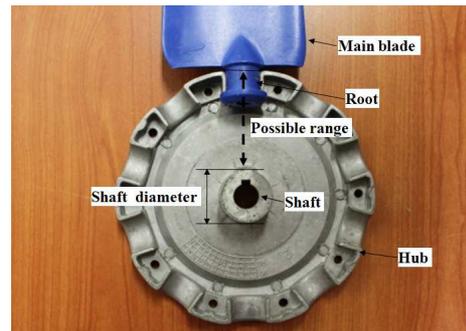
여기서 d_h 및 d_t 는 각각 허브와 팁 직경을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 송풍기의 크기를 제한하기 위하여 구속조건으로써 팁 지름(d_t)은 고정을 시켰고, 허브 지름(d_h)만 변화시켰다. 여기서 허브를 변화시킬 때에도 모터의 중심 샤프트 축과 허브의 커플링 체결 지름(d_s) 및 날개와 허브 사이의 체결을 위한 루트의 길이(l_r)를 고려하여 허브비 변화에 대한 구속조건을 부여하였다. 여기서 허브의 지름을 줄여 허브비가 줄어들 시 늘어난 블레이드의 길이는 초기의 지정된 허브 스패에서의 형상으로부터 B-spline방식⁽⁹⁾을 통하여 보간 되었다. Fig. 3(b)는 실제 날개 및 허브의 체결 내부구조를 보여주고 있다. Fig. 4는 엇갈림각으로 인한 블레이드의 변화된 형상을 보여주고 있으며, 지정된 중간 및 팁 스패의 위치를 제외한 나머지 스패 위치에서의 블레이드 형상도 지정된 스패의 형상으로부터 B-spline방식을 통하여 보간 되었다.

4.3 최적화 문제

본 연구에서는 최적화 문제를 구성 시 설계 영역 내 목적함수의 분포를 모르는 상태에서 다양한 대리모형을 적용하였을 때 어떤 대리모형이 가장 효율적이며, 가장 정확한 예측을 할 것인지 알 수 없기 때문에 반응면기법, 신경회로망기법 및 크리깅기법과 같은 세 가지 대리모형의 오차율에 따라 가중치를 적용한 가중평균대리모형⁽⁴⁾을 사용하여 수치최적설계를 수행하였다. Goel 등⁽⁴⁾이 제시한 가중평균 대리모형에 의해 예측되는 반응 함수는 다음과 같



(a) Schematic diagram



(b) Internal structure

Fig. 3 Definition of the hub-to-tip ratio

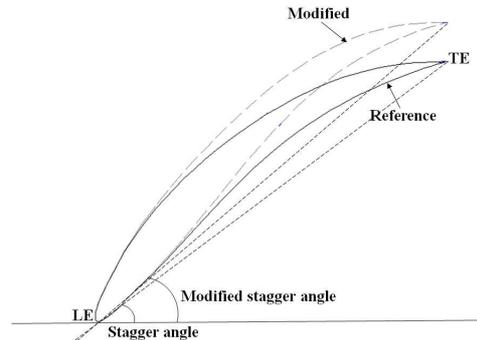


Fig. 4 Definition of the stagger angle

이 정의된다.

$$\hat{F}_{wt, avg}(x) = \sum_i^{N_{SM}} w_i(x) \hat{F}_i(x) \tag{3}$$

여기서, N_{SM} 은 가중평균대리모형을 구성하는데 사용된 기본 대리모형의 전체 개수이며, i 는 가중평균모형을 구성하는 각 기본 대리모형을 나타낸다. 그리고 $w_i(x)$ 는 가중치이고, $\hat{F}_i(x)$ 는 예측된 반응면으로 즉, 예를 들면 $w_1(x)$ 와 $\hat{F}_1(x)$ 은 첫 번째 대리모형에서의 가중치와 반응면을 나타낸다. 이 식은 아래와 같이 간단히 형태로도 정의할 수 있다.

$$F_{wt, avg} = w_{RSA}F_{RSA} + w_{RBNN}F_{RBNN} + w_{KRG}F_{KRG} \tag{4}$$

여기서, F_{RSA} , F_{KRG} 및 F_{RBNN} 의 값들은 각각 RSA,

KRG 및 RBNN 대리모델들에 의해 예측된 목적함수 값들이다.

각 대리모델의 가중치를 구하기 위해 사용되는 오차값은 각 기본 대리모델로부터 얻은 교차검증에러(GSME)를 이용하여 계산되는데 이는 전역 데이터 기반의 적합도에 대한 측도이며, 다음과 같이 계산된다.

$$GMSE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (F_i - \hat{F}_i^{(-i)})^2 \quad (5)$$

여기서, k 는 설계점들의 수이다. F_i 는 i 번째 설계점에서의 RANS해석을 통한 계산값이며, $\hat{F}_i^{(-i)}$ 는 i 번째 설계점을 제외한 나머지 설계점을 이용하여 구성된 j 번째 대리모델을 통해 구한 i 번째 설계점에서의 예측값을 나타낸다.

본 연구에서는 Goel 등⁽⁴⁾에 의해 제안된 세 가지의 가중평균대리모델인 WTA1, WTA2 그리고 WTA3을 사용하였으며, 가중치를 적용하는 방식은 다음과 같다.

4.3.1. WTA1

WTA1 대리모델 방식은 가중치가 오차값의 상대적인 크기에 따라 결정되며, i 번째 대리모델에 적용하기 위한 가중치는 다음과 같이 정의된다.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_{SM}} E_j}{(N_{SM} - 1) \sum_{j=1}^{N_{SM}} E_j} \quad (6)$$

$$E_j = \sqrt{GMSE_j}, j = 1, 2, \dots, N_{SM} \quad (7)$$

여기서, E_j 는 j 번째 대리모델에서 측정된 오차값을 나타낸다. 이러한 가중치 적용 방식은 대리모델에 의한 오차값들이 발생하지 않도록 방지함으로써 보다 정확한 반응면을 구성할 수 있게 된다.

4.3.2 WTA2

WTA2 대리모델 방식은 전통적인 방법으로써, 기본적인 대리모델 중 최고의 대리모델을 결정하는 방식이다. 따라서 최소의 오차값을 가진 대리모델만을 선택하고, 그 외의 대리모델의 가중치는 모두 '0'을 주게 된다. 이 모델은 'best PRESS(predicted error sum of squares) model'이라고도 불리어 진다.

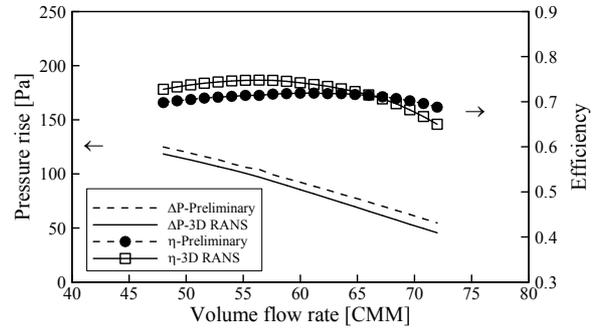


Fig. 5 Performance curves predicted by preliminary analysis and RANS calculation⁽¹¹⁾

4.3.3 WTA3

WTA3 대리모델과 관련된 가중치의 결정방식은 다음의 두 가지 원칙에 따른다. 1) 가중치들은 각 대리모델에 대한 확신을 반영해야 한다. 그리고 2) 가중치들은 모델의 역효과 즉, 탐색하지 않은 영역에서의 좋지 않은 예측성능을 보완해야 한다. 이 두 가지를 반영하기 위해 선택된 WTA3 대리모델의 가중치 결정방식은 다음과 같다.

$$w_i^* = (E_i / E_{avg} + \alpha) \quad (8)$$

$$w_i^* = (E_i + \alpha E_{avg})^\beta \quad (9)$$

$$w_i = w_i^* / \sum_i w_i^* \quad (10)$$

$$E_{avg} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{SM}} E_i}{N_{SM}}; \quad \beta < 0, \alpha < 1 \quad (11)$$

$$E_i = \sqrt{GMSE_i}, i = 1, 2, \dots, N_{SM} \quad (12)$$

이 모델에서는 평균값과 각각 대리모델의 중요도를 조절하는 α 와 β 값을 결정해야 한다. 작은 값의 α 와 큰 음수 값의 β 는 최고의 성능을 보인 대리모델에 높은 가중치를 부여하며, 큰 값의 α 와 작은 음수 값의 β 는 평균과정에서 높은 확신을 나타낸다. 최근 WTA3 대리모델은 Samad 등⁽¹²⁾에 의해 PBA(PRESS-based average) 대리모델로 개명된 바 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 기초설계 예측치와 수치해석결과의 비교

앞에서 소개한 축류송풍기의 수치최적설계를 수행하기에 앞서 기초설계에 의한 성능예측치와 삼차

원 수치해석결과를 비교 검토할 필요가 있다. Fig. 5는 Kim 등⁽¹¹⁾에 의해 수행된 선행 연구의 결과로, 본 환기용 축류송풍기의 기준형상에 대하여 기초설계 프로그램을 통해 예측된 결과와 이를 바탕으로 삼차원 RANS 해석을 수행한 수치해석결과를 비교해 보여주고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 각 유량점에서 예측한 기초설계 및 RANS 해석 결과의 비교는 효율에 대해서는 전 유량 영역에 걸쳐 정성적인 분포에서 다소의 차이를 보이고 있으나, 압력 상승에 대해서는 전 유량영역에서 정량적으로 매우 작은 균일한 차이만을 보이고 있다.

5.2 다양한 대리모델에 의한 최적설계결과와의 비교

기초설계 프로그램을 활용하여 설계된 축류송풍기 초기모델에 대해서 최적설계를 수행하였다. 최적설계 과정에서 변경될 설계변수들의 상한과 하한은 목적함수의 각 설계변수들에 대한 민감도 해석결과 및 구속조건 등을 반영하여 결정하였으며, Table 2에 그 범위를 나타내었다.

대리모델을 통해 최적점을 산출할 반응면을 구성하기 위해 실험계획법 중 라틴하이퍼큐브 샘플링 방법(Latin hypercube sampling method)⁽¹³⁾을 사용하여 설계영역 내에서 25개의 실험점을 추출하였고, 삼차원 유동해석을 수행하여 각 실험점에서의 목적함수 값을 계산하였다. 이를 바탕으로 각각의 가중평균대리모델들 즉, WTA1, WTA2 및 WTA3를 구성하여 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 각 대리모델들의 가중치에 의한 최종 모델들은 다음과 같이 결정되었다.

$$F_{WTA1} = 0.492F_{RSA} + 0.022F_{RBNN} + 0.486F_{KRG} \quad (13)$$

$$F_{WTA2} = F_{RSA} \quad (14)$$

Table 2 Ranges of design variables

Variables	Lower	Reference	Upper
R_{H-T}	0.235	0.294	0.304
β_{mid} , (deg.)	62.7	67.9	69.0
β_{ip} , (deg.)	67.9	74.7	75.9

$$F_{WTA3} = 0.560F_{RSA} + 0.019F_{RBNN} + 0.421F_{KRG} \quad (15)$$

여기서 구성된 최종 모델들의 가중치를 살펴보면 기본모델들 중 RSA 모델의 가중치가 가장 큰 것으로 보아 이 모델이 최소의 오차값을 가진 대리모델임을 알 수 있고, RBNN 모델이 최대의 오차값을 가지는 모델임을 확인할 수 있다.

Table 3은 각 가중평균대리모델에 의해 예측된 설계변수 및 목적함수 값과 예측된 최적점에서 RANS 해석을 통해 얻어진 목적함수 값들을 기준형상의 값과 함께 비교하고 있다. 현 설계점에서의 최적설계의 결과를 살펴보면 대리모델 WTA1, WTA2 및 WTA3은 각각 76.14%, 76.11% 및 76.13%의 효율을 예측하였고, RANS 해석은 각각 75.91%, 75.95% 및 75.92%의 효율을 예측하였다. 따라서 각각의 최적화기법을 통한 예측 오차는 0.2~0.3%이며, 그 중 WTA2 모델이 0.21%로 가장 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 한편, 대리모델 중 WTA1 모델이 76.14%로 가장 높은 목적함수 값을 예측하였으나, RANS 해석결과로는 WTA2 모델이 75.95%로 가장 높은 예측결과를 보여주었다. 또한 RANS 해석을 통해 얻어진 각 대리모델의 효율 값들은 공통적으로 기준형상 대비 약 1.7%대의 증가를 보이고, WTA2 모델이 약 1.74%로 가장 큰 증가를 보여주었다.

Fig. 6은 최적점 근처에서 세 가지 설계변수군에 대한 목적함수의 민감도 분석을 보여주고 있다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 수평축은 최적점에서 $\pm 10\%$ 범위 내의 값을 나타내며, 수직축의 하첨자 opt는 최적형상을 나타낸다. 이 결과로부터 설계변수 β_{mid} 는 최적점으로부터 $\pm 10\%$ 범위 내에서 목적함수에 가장 민감한 영향을 줄 수 있다.

5.3 기준 및 최적형상(WTA2)의 특성 비교

앞서 최적설계결과를 토대로 가장 우수한 성능을 보여준 가중평균대리모델 WTA2(RSA모델)에 대하여 성능이 향상된 원인을 알아보려고 기준형상과 내부유동특성을 비교 검토하였다.

Table 3 Results of the design optimizations

Designs	Design variables			Prediction	Calculation	Error rate	Increment,
	R_{H-T}	β_{mid} , (deg.)	β_{ip} , (deg.)	η , (%)	η , (%)	%	η , (%)
Reference	0.294	67.9	74.7	-	74.21	-	-
WTA1	0.235	65.3	74.1	76.14	75.91	0.30	1.70
WTA2	0.235	65.2	74.4	76.11	75.95	0.21	1.74
WTA3	0.235	65.3	73.9	76.13	75.92	0.28	1.71

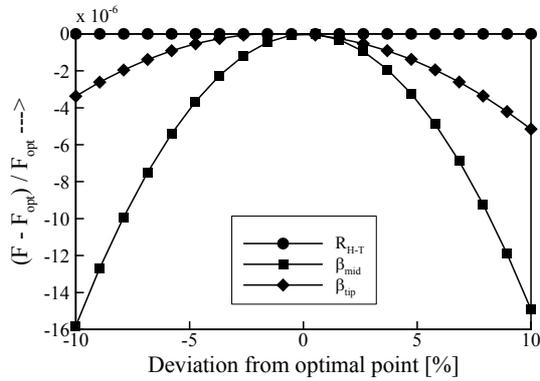


Fig. 6 Sensitivity analysis results

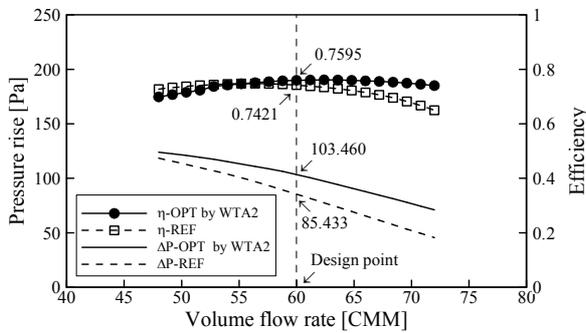
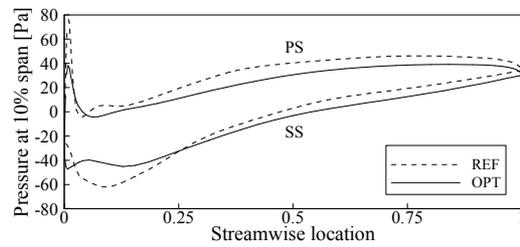
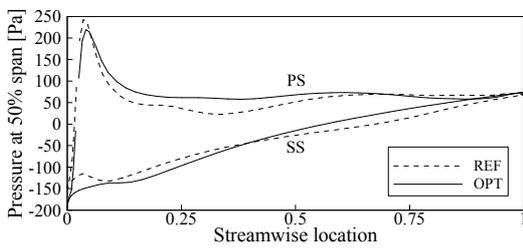


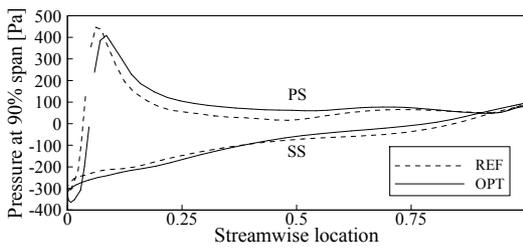
Fig. 7 Comparison of the performance curves



(a) At 10% span

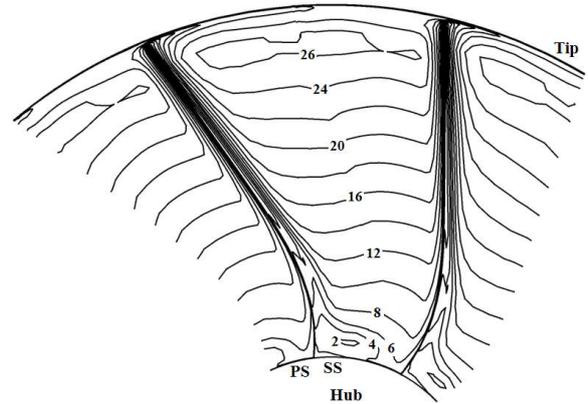


(b) At 50% span

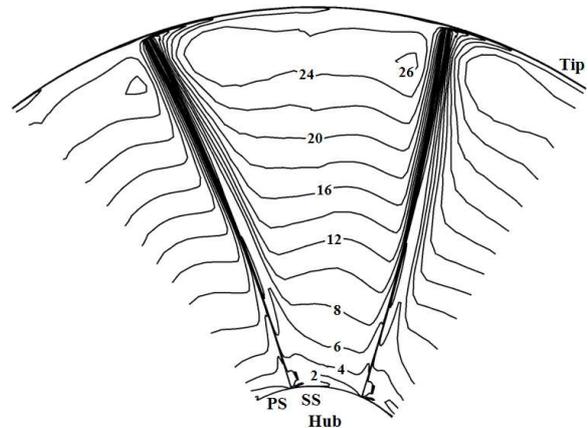


(c) At 90% span

Fig. 8 Static pressure distributions on the blade surfaces



(a) Reference model



(b) Optimum model

Fig. 9 Axial velocity distributions at trailing edge (unit: m/s)

Fig. 7은 기준형상과 최적형상의 성능곡선 상에서 효율 및 압력상승에 대한 수치해석결과를 비교하고 있다. 최적형상의 성능곡선을 살펴보면 현 설계점에서 압력이 기준형상에 비해 약 18Pa 상승된 결과를 보여주고 있고, 효율은 1.74% 상승했음을 알 수 있다. 또한 최적형상의 효율 및 압력상승이 전반적으로 높은 분포를 보이고 있으며, 특히 설계점에서부터 고유량 영역으로 갈수록 성능의 향상 폭이 커짐을 알 수 있다. 그러나 저유량 인근에서는 기준형상에 비해 효율이 다소 감소된 모습을 보이고 있다. 이와 같은 성능곡선 상의 특성을 살펴보았을 때 현 설계점에서의 수치최적설계 후 도출된 본 송풍기 최적형상은 설계점에서 뿐만 아니라 대부분의 탈설계점에서도 전반적으로 고르게 성능이 향상된 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 기준형상과 최적형상에 대하여 블레이드 10%, 50% 및 90% 스패에서의 압력 분포를 비교하고 있다. 10% 스패에서의 블레이드 압력 분포를 살

펴보면 최적형상이 기준형상에 비해 압력면과 흡입면에서 공히 대체적으로 압력 분포가 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 최적설계 결과, 낮아진 허브비에 의해 허브의 직경은 줄어들고, 블레이드의 길이가 길어지면서 그로 인해 상대적으로 반경방향으로 낮은 위치의 허브를 갖고 있기 때문으로 사료된다. 최적형상의 50% 및 90% 스펠에 대하여 압력면에서의 압력 분포는 전반적으로 기준형상에 비해 높은 압력 분포를 보이고 있으며, 흡입면에서는 블레이드의 약 40% 영역을 지나면서 대체적으로 압력이 상승된 모습을 보여주고 있다.

Fig. 9는 기준형상과 최적형상에 대하여 블레이드 후연부에서의 축방향 속도 분포를 보여주고 있다. 블레이드를 지나 유출되는 기류의 축방향 속도 성분은 최적형상의 경우, 허브 지름의 감소로 허브 인근에서 기준형상에 비해 속도가 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 팁 부근에서도 속도가 감소하여 허브에서 팁까지의 축방향 속도 분포는 전반적으로 균일해진 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 환기용 축류송풍기의 중요한 성능 변수인 효율을 향상시키고자 삼차원 RANS 해석과 가중평균대리모델을 결합한 수치최적설계를 수행하였다. 가중평균대리모델로는 WTA1, WTA2 및 WTA3 모델을 사용하였으며, 각각에 대한 최적설계를 수행한 결과, 대리모델이 예측한 최적점에서 RANS 해석결과로 WTA2 모델이 효율 75.95%로 가장 높은 예측결과를 보여줌으로써 기준형상 대비 1.74%의 효율이 증가된 형상을 얻을 수 있었다. 성능이 향상된 주요원인을 내부유동분석을 통하여 고찰한 결과, 설계변수인 허브비의 감소에 의해 반경방향으로 길어진 블레이드와 엇갈림각의 영향으로 인한 압력 상승과 함께 유동장 내 속도분포의 균일화가 효율상승에 기여한 것으로 사료된다. 본 연구의 최적화에 사용된 가중평균대리모델은 개별 대리모델만을 사용하였을 경우에 초래될 수 있는 예측의 부정확성의 위험을 완화하여 예측의 신뢰성을 높이는 결과를 가져온다.

후 기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힌다. (No. 10031771)

참고문헌

- (1) Seo, S. J., Choi, S. M. and Kim, K. Y., 2008, "Design Optimization of a Low-Speed Fan Blade with Sweep and Lean," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A- Journal of Power and Energy*, Vol. 222, No. 1, pp. 87~92.
- (2) Kim, J. H., Choi, J. H. and Kim, K. Y., 2010, "Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 29~38.
- (3) Wang, X. F., Xi, G. and Wang Z. H., 2006, "Aerodynamic Optimization Design of Centrifugal Compressor's Impeller with Kriging Model," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A-Journal of Power and Energy*, Vol. 220, No. 6, pp. 589~597.
- (4) Goel, T., Haftka, R. T., Shyy, W. and Queipo, N. V., 2007, "Ensemble of Surrogates," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 33, No. 3, pp. 199~216.
- (5) Samad, A., Kim, K. Y. and Choi, J. H., 2008, "Blade Optimization of a Transonic Compressor Using a Multiple Surrogate Model," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32, No. 4, pp. 317~326.
- (6) Kim, J. H., Choi, J. H. and Kim, K. Y., 2008, "Shape Optimization of Axial Flow Fan Blade Using Surrogate Model," *Proceedings of the KSME 2008 Spring Conference*, pp. 2440~2443.
- (7) Kim, J. H. and Kim, K. Y., 2010, "Optimization of Vane Diffuser in a Mixed-Flow Pump for High Efficiency Design," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 172~178.
- (8) Lee, C. and Kil, H. G., 2010, "A Computerized Design System of the Axial Fan Considering Performance and Noise Characteristics," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 13, No. 2, pp. 48~53.
- (9) ANSYS CFX-11.0 Solver Theory, 2006, Ansys Inc.
- (10) Kim, J. W., Kim, J. H. and Kim, K. Y., 2009, "Flow Analysis and Performance Evaluation of a Ventilation Axial-Flow Fan Depending on the Position of Motor," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting 2009*, pp. 353~358.
- (11) Kim, J. W., Kim, J. H., Lee, C. and Kim, K.

- Y., 2010, "A Study on Flow Characteristics in a Ventilation Axial-Flow Fan through Three-Dimensional Numerical Analysis," *Proceedings of the KSME Spring Conference*, pp. 90~91.
- (12) Samad, A., Kim, K. Y., Goel, T., Haftka, R. T. and Shyy, W., 2007, "Multiple Surrogate Modeling for Axial Compressor Blade Shape Optimization," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, March-April 2008, Vol.24, No.2, pp. 302~310.
- (13) JMP® 5.1, 2004, SAS Institute, Inc.