

재생형 송풍기의 고효율 저소음 설계를 위한 통합형 최적설계 프로그램 개발

허만웅* · 김진혁** · 서태완* · 구경완* · 이충석* · 김광용***†

Development of An Integrated Optimal Design Program for Design of A High-Efficiency Low-Noise Regenerative Fan

Man-Woong Heo*, Jin-Hyuk Kim**, Tae-Wan Seo*, Gyoung-Wan Koo*,
Chung-Suk Lee* and Kwang-Young Kim***†

Key Words : High Efficiency(고효율), Low Noise(저소음), Axial Fan(축류형), Centrifugal Fan(원심형), Regenerative Blower(재생형), Optimization(최적설계), Integrated Computer Program(통합설계전산체계)

ABSTRACT

A multi-objective optimization of a regenerative fan for enhancing the aerodynamic and aeroacoustic performance was carried out using an integrated fan design system, namely, Total FAN-Regen[®]. The Total FAN-Regen[®] was developed for non-specialists to carry out a series of design process, viz., computational preliminary design, three-dimensional aerodynamic and aeroacoustic analyses, and design optimization, for a regenerative fan. An aerodynamic analysis of the regenerative fan was conducted by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations using the shear stress transport turbulence model. And, an aeroacoustic analysis of the regenerative fan was implemented in a finite/infinite element method by solving the variational formulation of Lighthill's analogy based on the results of the unsteady flow analysis. An optimum shape obtained by Total FAN-Regen[®] shows the enhanced efficiency and decreased sound pressure level as much as 1.5 % and 20.0 dB, respectively, compared to those of the reference design. The performance test was carried out for an optimized regenerative fan to validate the performance of the numerically predicted optimal design.

1. 서 론

최근 들어 에너지 저감과 관련된 기계장치들의 고효율 설계의 필요성이 부각되고 있고, 생활수준 향상, 도시화 및 산업화의 진전으로 인해 생활소음 저감의 중요성도 대두되고 있어 여러 분야에서 이에 대한 연구가 진행 있다. 특히, 송풍기는 우리 생활과 밀접한 관계를 맺고 있는 보편적인 기계장치로서 고효율 저소음 설계의 필요성은 매우 높다.

선진국 송풍기 전문업체들의 경우 송풍기의 고효율화 및

저소음화를 위해 3차원 공기역학적 현상과 공력 소음 발생에 대한 이해를 바탕으로 송풍기 블레이드 형상의 최적설계와 소음저감 설계를 수행하고 있고, 이러한 단계별 개발과정의 효과적 수행을 위해 신뢰성 있는 공력-음향학적 해석을 위한 CAE (computer aided engineering) 도구들을 적용하고 있다. 그러나, 아직 3차원 해석을 바탕으로 하는 최적설계과정은 하나의 설계수단을 통해 일관적으로 이루어지지 못하고 있으며 3차원 음향해석을 사용해 공력과 소음을 동시에 최적화하는 설계 또한 아직 제대로 이루어지지 못하고 있다.

* 인하대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University)

** 한국생산기술연구원 열유체시스템연구실용화그룹(유체기계분야) (Thermal & Fluid System R&BD Group(Turbomachinery), Korea Institute of Industrial Technology(KITECH))

*** 인하대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Inha University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : kykim@inha.ac.kr

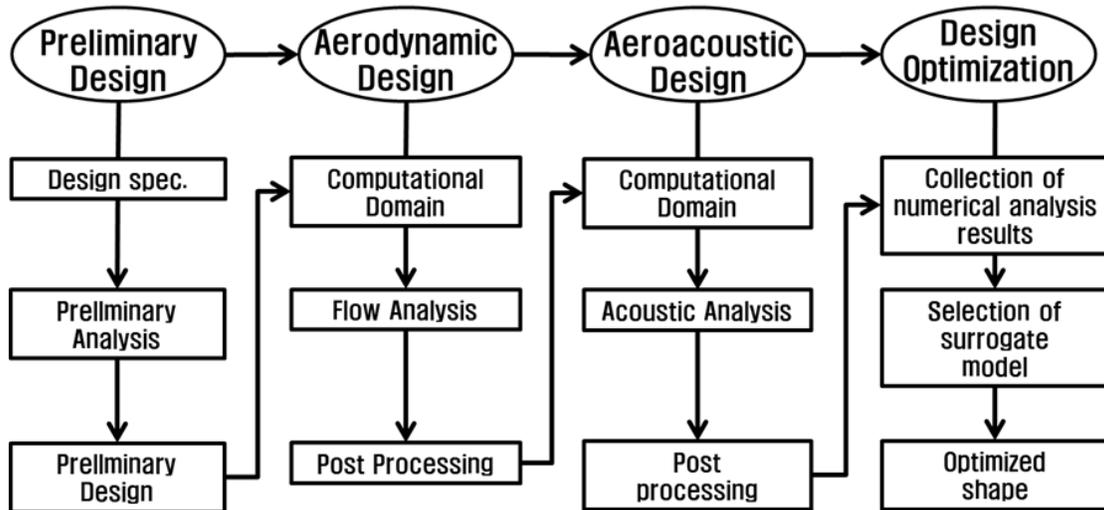


Fig. 1 Flow chart of Total FAN[®] system

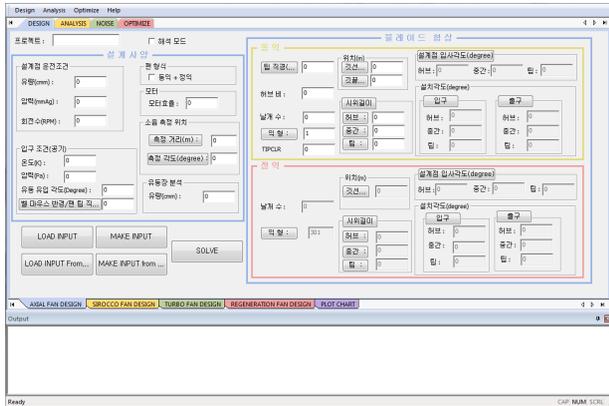


Fig. 2 Graphic User Interface(GUI) of Total FAN[®]

본 연구에서는 송풍기 설계를 위한 기초설계, 삼차원 유동 및 소음해석, 그리고 최적설계와 같은 일련의 설계과정을 수행할 수 있는 통합형 송풍기 전산설계 프로그램인 Total FAN[®]을 개발하였으며, 이 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 이 프로그램의 한 부분인 Total FAN-Regen[®]을 사용하여 재생형 송풍기에 대한 기초설계, 삼차원 유동 및 소음해석 그리고 공력-음향학적 성능을 고려한 다목적 최적설계를 수행하였고, 도출된 최적형상에 대해 시제품 제작 및 성능시험을 수행하였다.

2. 송풍기 통합형 전산설계

Total FAN[®] 프로그램은 축류형, 원심다익형, 원심터보형 및 재생형 송풍기 등 네 가지 유형의 송풍기 각각에 대해 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 기초설계, 3차원 유동 및 소음해석, 그리고 최적설계로 이어지는 일련의 설계과정을 하나로 결합한 통합형 설계 프로그램이다. 개발된 프로그램은 유동

해석이나 최적설계에 대해 전문적인 지식이 없는 비전문가들도 어렵지 않게 첨단 해석 및 설계기법을 사용한 송풍기 설계를 수행할 수 있도록 Fig. 2와 같이 GUI환경을 구축하였다. 이 프로그램에서 기초설계, 유동해석, 소음해석, 그리고 최적설계는 각각 Design, Analysis, Noise, 그리고 Optimize 파트에서 수행되도록 구성하였다. Total FAN[®] 프로그램에서는 외부 상용프로그램인 Blade-Gen[®], ICEM-CFD[®] 및 Turbo-Grid[®] 등이 형상 및 격자생성에 사용되고 유동해석에는 ANSYS-CFX[®](1), 그리고 소음해석에는 ACTRAN[®](2)이 사용된다. 그리고 기초설계를 위해서는 FAN-DAS[®](3) 프로그램이 사용된다.

3. 기초설계

송풍기 기초설계 과정에서는 재생형 송풍기의 임펠러 및 채널의 기초형상을 구성하고 기초성능을 예측하는 전산기초설계 시스템인 FAN-DAS⁽³⁾ 프로그램이 사용된다. FAN-DAS 프로그램은 기본적인 분석방법에 의해 재생형 송풍기의 공력-음향학적 성능을 예측할 수 있는 시스템으로 재생형 송풍기의 임펠러와 날개형상 그리고 작동유량 등과 같은 기본적인 설계사양을 입력하면 재생형 송풍기의 효율, 압력, 전력, 그리고 음압과 같은 성능을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 재생형 송풍기의 기초설계를 위해 Table 1에 나타낸 것과 같은 설계사양을 사용하였다. 기준형상에 대해 설계유량에서의 압력과 유량은 각각 588 Pa, 2.567 kg/s이다. 그리고 임펠러의 직경은 0.138 m이고, 41개의 날개를 갖는다. 이러한 설계사양을 바탕으로 기초설계를 수행하여 Fig. 3과 같은 기초형상을 구할 수 있으며, 또한 이에 대해 예측된 기초성능 값을 얻을 수 있다.

Table 1 Specifications for the regenerative fan

| Parts | | Values |
|-------------------|-----------------------|--------|
| Impeller | Diameter [m] | 0.138 |
| | Thetac [deg.] | 46.15 |
| | Clearance [m] | 0.0003 |
| Blades | Number of blades | 41 |
| | Width [m] | 0.012 |
| | Height [m] | 0.024 |
| | Thickness [m] | 0.0002 |
| Working condition | Mass flow rate [kg/s] | 2.567 |
| | Pressure [Pa] | 588 |
| | Rotational Speed | 6743 |

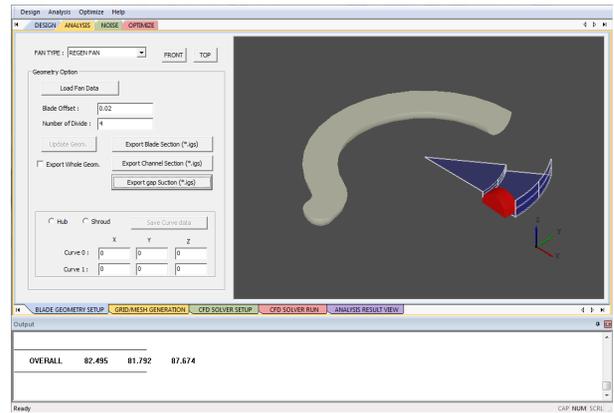


Fig. 4 3D computational domain of regenerative fan

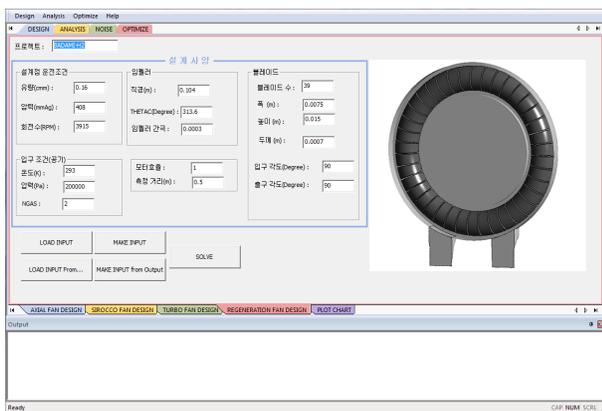


Fig. 3 Graphic user interface(GUI) for preliminary design part of Total FAN-Regen®

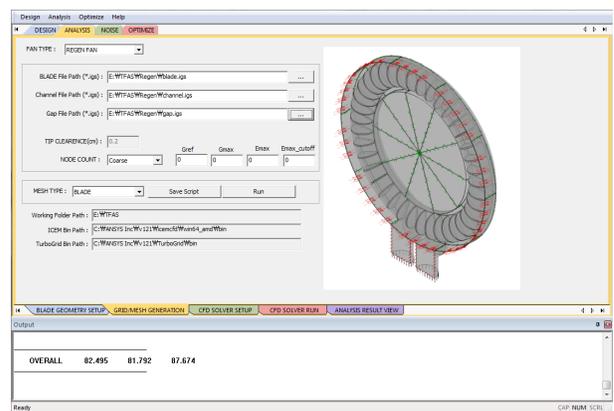


Fig. 5 GUI for preconditioning process for aerodynamic analysis part of Total FAN-Regen®

4. 유동해석

기초설계 과정에서 구해진 기초형상을 바탕으로 3차원 정밀유동해석을 수행하기 위하여 Fig. 4와 같이 3차원 계산영역을 자동으로 설정한다. 그리고, 계산영역에 대하여 계산격자를 자동으로 구성한다. 계산영역에 대한 격자를 구성하는 과정에서 사용자는 격자수를 선택할 수 있으며, 이를 바탕으로 계산영역에 대한 격자의존성 시험을 수행할 수 있다. 재생형 송풍기의 임펠러, 간극 및 채널 영역에 대한 계산격자를 생성하는 과정에서는 ICEM-CFD가 사용된다.

Fig. 5는 Total FAN-Regen의 3차원 정밀유동해석을 위한 전처리 과정을 보여준다. 계산을 위해서는 계산영역에 대한 입출구의 경계조건과 임펠러의 회전수와 같은 기본적인 조건을 입력해야 한다. 이 과정에서 사용자는 정상 및 비정상 계산을 선택할 수 있고 병렬계산을 위한 CPU 개수를 지정할 수 있다. 유동해석은 외부 프로그램인 ANSYS-CFX를 통해 수행되며 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이 유동해석에 사용된다. 그리고 난류유동 해석을 위한 난류모델로는 Shear stress transport(SST) 모델이 사용되며 25°C 공기가 작동유체로 사용된다. 그리고

Blade-Gen®, ICEM-CFD® 및 Turbo-Grid® 등이 형상 및 격자생성에 사용된다. Total FAN-Regen의 후처리 작업은 Fig. 6에서 보는 것과 같다. 효율, 압력 등과 같은 송풍기의 공력학적 성능을 확인할 수 있고, 유동장과 압력 및 속도 분포를 자동으로 확인할 수 있다.

5. 소음해석

Total FAN-Regen® 프로그램의 소음해석은 외부 소음해석 상용 프로그램인 ACTRAN과 연계하여 이루어지고, 비정상 유동해석에서 추출된 유동장 데이터를 바탕으로 소음해석을 수행한다.

Fig. 7은 재생형 송풍기의 소음 해석을 위한 GUI 환경을 보여준다. 이 과정에서는 소음의 방사를 모사하기 위하여 입출구에 반구 형상을 추가시켜 계산영역을 다시 정의한다. 또한, 소음해석을 위한 계산영역 내에 격자를 자동으로 생성시키며, 격자의 크기(L)는 식(1)의 기준보다 작게 설정한다. (2)

$$L = c/6f \quad (1)$$

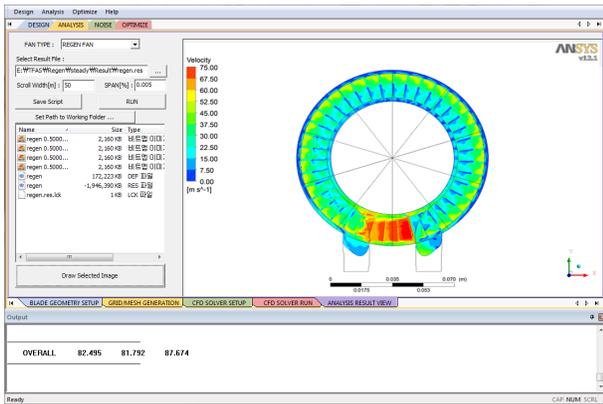


Fig. 6 GUI of Total FAN-Regen[®] for post-process of aerodynamic analysis

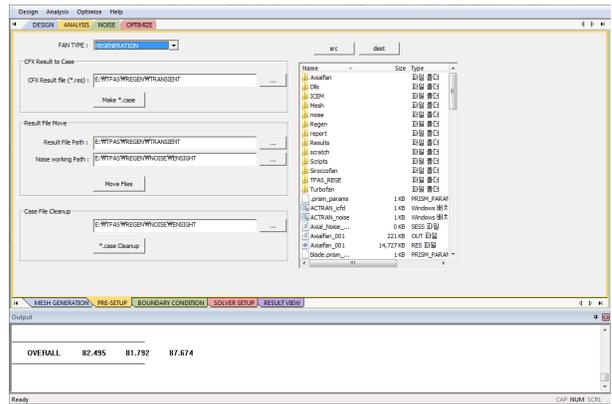


Fig. 9 GUI of Total FAN-Regen[®] for data export process of aero-acoustic analysis

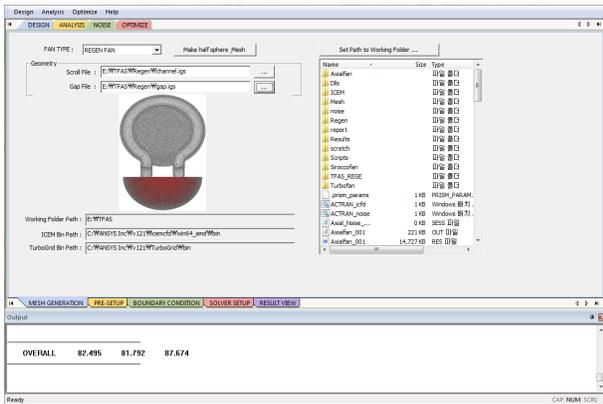


Fig. 7 GUI of Total FAN-Regen[®] for design process of aero-acoustic analysis

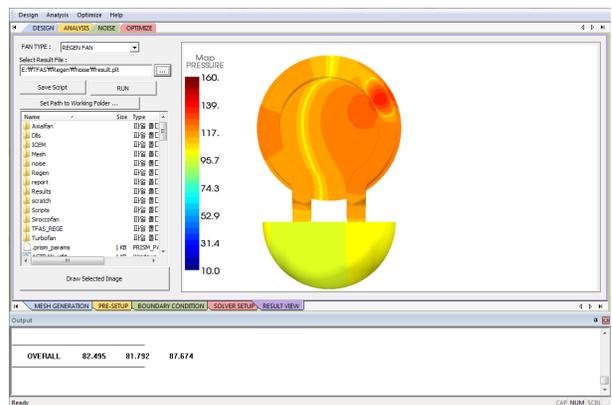


Fig. 10 Post-process GUI of Total FAN-Regen[®]

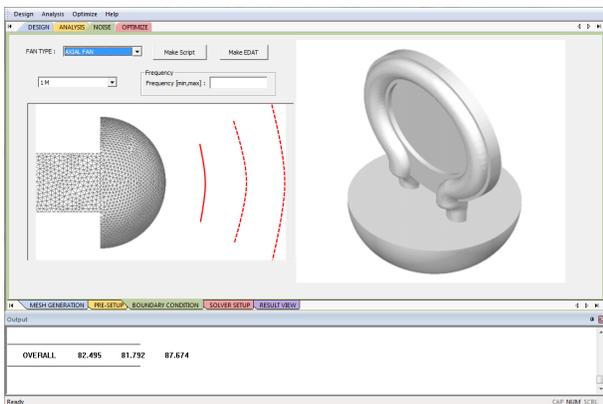


Fig. 8 GUI of Total FAN-Regen[®] for preconditioning process of aero-acoustic analysis

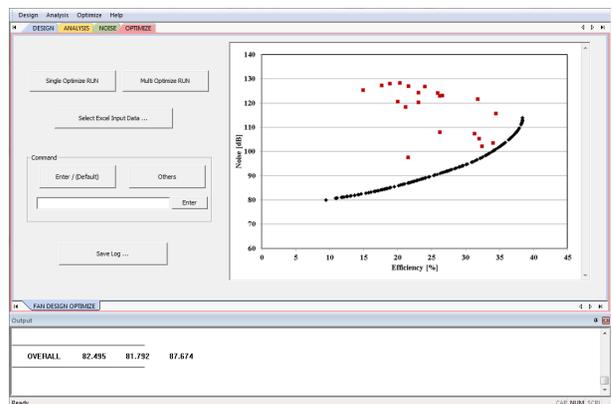


Fig. 11 Optimization GUI of Total FAN-Regen[®]

여기서, c 와 f 는 음속과 최대 주파수를 의미한다. 소음을 측정하기 위한 측정위치, 주파수 범위 설정과 같은 기본적인 소음해석을 위한 경계조건을 Fig. 8에서 보이는 GUI 환경 입력창에 입력 후 소음해석을 수행하게 된다. 전처리과정에서는 해석을 원하는 주파수 범위와 소음값을 측정하고자 하는 위치를 설정할 수 있다. 소음해석은 Lighthill's

analogy를 기반으로 수행되며, 비정상 유동해석에서 추출된 결과값들은 ACTRAN S/W와 연계되어 소음해석에 필요한 값들로 전환된다. Fig. 9에서 비정상 3차원 유동해석으로부터 추출된 결과값을 시간 영역에서 주파수 영역으로 자동 전환시키는 과정을 보여주고 있다. 또한, Fig. 10에서 보는 것과 같은 후처리과정에서는 소음해석결과를 바탕으로 계산영역 내의 음압장과 주파수에 따른 SPL 값과 같은 소음성능을

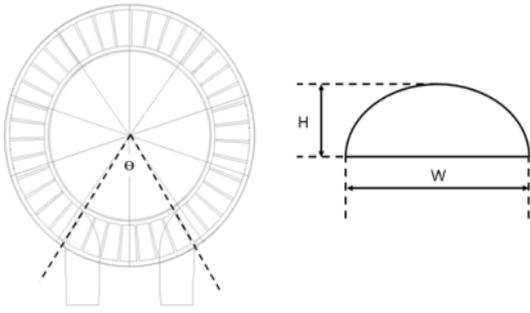


Fig. 12 Definition of design variables

Table 2 Results of the design optimization

| Design | Design variables | |
|-----------|--------------------------------------|----------|
| | H/W | θ |
| Reference | 0.5 | 46.40 |
| Optimum | 0.38 | 42.78 |
| Design | Objective function 1 (Efficiency, %) | |
| | RBNN | CFD |
| Reference | - | 34.00 |
| Optimum | 37.00 | 35.50 |
| Design | Objective function 2 (Noise, dB) | |
| | RBNN | CAA |
| Reference | - | 115.00 |
| Optimum | 103.59 | 101.62 |

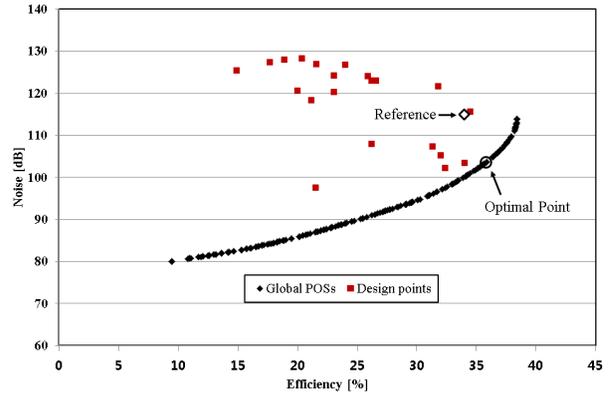


Fig. 13 Pareto-optimal solutions



Fig. 14 Performance test

자동으로 확인할 수 있다.

6. 최적화설계

최종적으로 유동해석과 소음해석 결과들을 바탕으로 다중 목적 최적설계가 수행된다. Total FAN-Regen[®]의 최적설계 과정에서는 radial basis neural network (RBNN), response surface approximation (RSA), kriging (KRG), predicted error sum of squares (PRESS)-based averageing (PBA) 등 네 가지 대리모델 중 하나를 선택하여 최적설계를 수행한다.

본 연구에서는 재생형 송풍기의 효율을 향상시키고 동시에 소음을 감소시키는 다중목적 최적설계를 수행하였으며, Fig. 11에서 보는 것과 같이 대리모델을 이용하여 최적점들의 집합인 pareto-optimal curve를 도출하게 된다.

본 연구에서는 기초설계된 재생형 송풍기 모델 (Table 1)의 효율 향상과 소음 저감을 동시에 실현시키기 위한 다목적 최적설계를 수행하였다. Fig. 12에서 보는 것과 같이 입구와 출구 사이의 각도(θ)와 임펠러 날개의 폭과 높이의 비(H/W)를 두 개의 설계 변수로 선정하고, 최적설계를 수행하기 위하여 두 가지 설계변수의 범위를 $0.2 < H/W < 0.7$, $30^\circ < \theta < 60^\circ$ 로 설정하였다. 이를 바탕으로 실험계획법인 Latin Hypercube

Sampling(LHS) 기법을 이용하여 설계영역 내에서 15개의 실험점들을 추출하였다. 이 15개의 실험점에 대하여 3차원 유동해석 및 소음해석을 수행하고, 각 실험점에 대한 설계 변수와 목적함수 값을 바탕으로 대리모델로 선택한 RBNN을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

Table 2는 다목적 최적설계의 결과로 얻어진 Fig.13의 pareto-optimal curve상에서 임의로 선택한 최적점에서의 목적함수 값들의 예측치와 계산치를 기준모델의 값들과 비교한 것이다. RANS해석 결과값과 비교한 RBNN대리모델의 예측값의 상대오차는 재생형 송풍기의 효율과 소음에 대해 각각 4.2%와 1.9%로 나타나, 비교적 정확한 예측을 하였음을 보여준다. 아울러 최적설계된 재생형 송풍기는 기준형상의 재생형 송풍기와 비교하여 효율이 1.5% 향상되고 소음 값이 약 13.4dB 감소한 결과를 보여준다. 최적형상의 경우 기준형상과 비교하여 두 설계변수 값들이 모두 감소한 것을 확인할 수 있다.

7. 최적설계 모형의 검증

최종적으로 Total FAN-Regen[®]으로부터 도출된 최적형상에 대하여 시작품 제작과 이에 대한 성능시험을 수행하여

Table 3 Results of Performance test

| 항목 | Performance data | Numerical results | Error (%) |
|---------------------------|------------------|-------------------|-----------|
| Efficiency (%) | 32.90 | 35.50 | 7.32 |
| Sound Pressure Level (dB) | 94.99 | 101.62 | 6.52 |

Total FAN[®] 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

성능시험은 Fig.14에서 보는 것과 같이 AMCA- 210⁽⁴⁾ 규격에 명기된 방법으로 수행하였으며, 최적형상에 대한 성능 시험 결과는 Table 3에 나타내었다. Total FAN[®]프로그램으로부터 산출된 효율과 소음 값은 성능시험 결과와 비교하여 각각 약 2.6%와 6.6dB의 절대오차(각각 상대오차 7.3%와 6.5%)를 보이며 성능시험치와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 송풍기의 설계를 위해 통합형 설계 프로그램인 Total-FAN[®] 프로그램을 개발하였다. Total-FAN[®] 프로그램은 송풍기 설계를 위한 일련의 과정, 즉, 기초설계, 3차원 유동 및 소음해석, 그리고 최적설계 과정을 하나의 GUI로 결합하여 비전문가도 어렵지 않게 첨단 기법들을 사용해 송풍기 설계를 수행할 수 있도록 개발되었다. 본 연구에서는 Total-FAN[®] 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 이 프로그램의 일부인 Total-FAN Regen[®]을 사용하여 재생형 송풍기의 기초설계와 3차원 유동 및 소음해석을 바탕으로 한 고

효율 저소음 최적설계를 수행하였으며, 최적설계된 형상에 대한 시제품 제작과 성능시험을 수행하여 최적설계의 타당성을 검증하였다. 재생형 송풍기의 고효율화와 저소음화를 동시에 실현시키기 위해 두 가지 기하학적 설계변수를 사용해 RBNN대리모델을 이용한 다중목적 최적설계를 수행하여 최적점들의 집합인 Pareto-Optimal 곡선을 도출하였다. 이 곡선 상에서 임의로 선택한 최적형상은 기준형상과 비교하여 각각 1.5%와 13.38dB의 효율 증가와 소음 감소를 보였다. 최적설계된 재생형 송풍기의 효율과 소음에 대한 설계값은 성능시험 결과 값과 비교하여, 각각 7.3%와 6.5%의 상대 오차를 보여 Total-FAN[®] 프로그램의 신뢰성을 입증하였다.

후 기

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

REFERENCES

- (1) ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2006, Ansys Inc.
- (2) ACTRAN 2013 User's Guide, Free Field Technologies SA, www.fft.be.
- (3) Fan DAS S/W manual 2013.
- (4) ANSI/AMCA Standard 210-07|ANSI/ASHRAE 51-07, 2007, Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating, Air Movement and Control Association International, Inc., Arlington Heights, Illinois.