

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 903-910(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.903>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

CFD를 이용한 선풍기 날개의 스테킹 라인 최적 설계

박승환*, 류민형*, 조이상**, 조진수***

Design optimization of the staking line
for an electric fan blade using CFD

Seunghwan Park*, Minhyoung Ryu*, Leesang Cho** and Jinsoo Cho***

Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.*,

Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung Univ.**

School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.***

ABSTRACT

Electric fans, which consist of axial blades, are operated by the induction motor. In this paper, the objective of this study is the performance improvement of the base model fan using the design optimization. In order to aerodynamic analysis, computational simulations are performed using commercial tool ANSYS-CFX ver. 14.5. And $k-\omega$ SST turbulence model is used for the CFD analysis. The design variables are set up as sweep and lean angles. Volumetric flow rate and torque of the fan blades are fixed to objective function. The optimized model is shown the increment of the volumetric flow rate and the reduction of the torque compared with the base model. The experimental procedure is followed KS C 9301. CFD results and experimental results are fairly well matched.

초 록

선풍기는 유도 전동기에 의해 구동되는 축류형 날개를 가진 기계이다. 본 연구에서는 기본 설계된 선풍기의 날개를 바탕으로 스테킹 라인의 최적 설계를 통해 선풍기의 성능 향상을 목표로 하였다. 전산 해석을 위해 상용 툴인 Ansys社의 CFX 14.5를 이용하였고, 난류 모델은 $k-\omega$ SST를 사용하였다. 설계 변수는 스윙 각과 기울기 각으로 설정하였고, 유량과 토크를 목적함수로 설정하여 스테킹 라인의 최적화를 수행하였다. 최적화 결과 풍량이 증가하였고, 토크가 감소함을 확인 하였다. 최적화된 모델과 기본 모델은 KS C 9301을 이용하여 측정되었으며, 전산 해석 결과를 검증하였다.

Key Words : Electric Fan(선풍기), Computational Fluid Dynamics(전산 유체 역학), Design of Experiments(실험계획법), Design Optimization(최적 설계)

† Received : August 1, 2014 Revised : October 13, 2014 Accepted : October 13, 2014

*** Corresponding author, E-mail : jscho@hanyang.ac.kr

I. 서론

선풍기는 유도 전동기에 의해 구동되는 축류형 날개를 가진 기계이다. 선풍기는 일반적인 축류형 송풍기와 달리 블레이드를 감싸고 있는 슈라우드(shroud)가 존재하지 않고 블레이드가 항상 외부로 노출되어 있는 상태이다. 이러한 선풍기의 특징 때문에 일반적인 축류형 송풍기와 다른 유동 현상이 발생한다. 선풍기에 대한 최근 연구 동향을 살펴보면 기존 축류형 송풍기들과 달리 연구가 거의 진행되지 않았다.

Cho 등[1]은 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 선풍기의 블레이드의 수에 따른 유동 특성을 분석을 하였다. 또한, 선풍기 블레이드를 모델링하여 전산해석 절차를 소개하였으며 날개수가 많을수록 바람이 한곳으로 모이게 되어 더욱 부드러운 자연풍에 가까워짐을 확인하였다. 선풍기의 콘셉트 디자인을 중심으로 Hwang[2]은 선풍기를 편리하게 사용할 수 있도록 조작성에 대한 연구를 통하여 편리한 디자인에 대한 연구를 수행하였다.

기존 축류형 송풍기들의 경우, Cho[3]등에 의해 산업용 축류형 송풍기에서 팁 간극이 성능에 미치는 영향이나, Kim[4]에 의해 축류 송풍기의 고효율을 위한 최적설계에 대한 연구가 진행되었다. 이외에도 Estevadeorda[5]는 DPIV(Digital Particle Image Velocimetry)를 이용하여 축류형 송풍기의 유동장을 분석하였고 블레이드 익형 끝단 근처에서 후류를 관측하였다.

터빈 및 압축기의 블레이드에 사용되는 스위프 형상은 전방 스위프(forward sweep)이 날개 끝단에서 엔트로피의 생성을 억제하고 이차 유동을 줄이는 효과가 있고, 후방 스위프(backward sweep)은 충격 손실을 억제하는 효과가 있는 것을 C. Xu[6]의 연구를 통해 확인하였다. Vad[7]는 저속 축류형 유체 기계의 경우, 후방 스위프가 효율면에서 우수함을 나타낸다고 설명하였다. Denton[8]는 천음속 영역대의 팬에서 전방을 향한 기울기 각도를 조정하는 경우 약간의 풍량이 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 기본 설계된 선풍기의 기본 날개 형상을 바탕으로 스테킹 라인 최적 설계를 수행하여 성능 향상을 목적으로 한다. 최적화 기법으로 DOE(Design of Experiment) 기법을 이용하여, 선풍기의 기울기 각도(lean angle)와 스위프 각(sweep angle)을 이용하여 스테킹 라인을 최적화하였다. KS C 9301[9]에 제시된 선풍기의 성능 시험 방법을 통하여 선풍기의 성능을 확인한다.

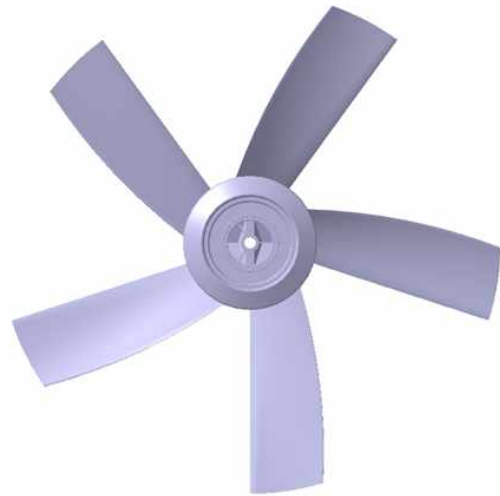


Fig. 1. Shape of the base model

Table 1. Specifications of the base model

Fan diameter	350.38	[mm]
Hub diameter	93.6	[mm]
Number of blades	5	
Rotational speed	1020	[RPM]

II. 본론

2.1 기본모델

본 연구에 사용된 선풍기 블레이드의 기본 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 선풍기 블레이드의 회전수는 시중 제품의 3단에서의 회전속도 1,020RPM으로 설정하였다. 선풍기 블레이드의 기본 모델에 대한 세부적인 제원은 Table 1에 나타내었다.

2.2 전산 해석

선풍기의 유동해석을 위해 상용 CFD 툴인 Ansys 社의 CFX 14.5를 이용하였다. 선풍기의 블레이드의 회전을 묘사하기 위해서 등속도 회전 운동에 대한 정상상태 해석 기법인 MFR (Multiple Frame of Reference)을 사용하였다. MFR 기법은 회전영역과 고정영역을 함께 해석하며, Mixing Plane 혹은 Sliding mesh의 비정상 상태 해석 기법에 비하여 쉽게 회전 영역을 확인할 수 있다. 그리고 상대적으로 계산 시간 및 비용을 줄여주며 후처리 및 분석을 유리한 장점을 가지고 있다[10].

선풍기 블레이드의 유동해석에 적용된 난류 모델은 정상상태 유동해석을 위하여 $k-\omega$ SST(Shear

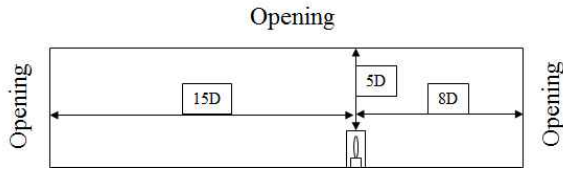


Fig. 2. Computational domain for the electric fan

Stress Transport) 모델을 이용하였다. $k-\omega$ SST 모델은 경계층(Boundary Layer) 내부 영역에서 비교적 정확한 예측을 수행할 수 있는 $k-\omega$ 의 장점과 경계층 외부 영역에서는 유동을 잘 예측하는 $k-\epsilon$ 의 장점을 결합되었다. 그리고 $k-\omega$ SST 난류 모델의 특성을 이용하여 경계층 내부의 점성을 예측하여 정확한 토크 계산에 활용하였다[11].

전산해석을 위해 선풍기 블레이드 표면 부근의 해석 격자의 y^+ 를 1 이하로 낮추었고, 블레이드 주변에 Inflation을 15점으로 설정하여 경계층 영역에서 정확한 점성 효과를 예측할 수 있도록 설정하였다. 그리고 선풍기 블레이드의 회전 영역은 5면체(Prismatic) 격자와 4면체(Tetrahedral) 격자를 이용하여 총 70만개로 구성되었고, 선풍기 블레이드 외부의 고정영역은 330만개의 6면체(Hexahedral) 격자로 구성되었다. 따라서 선풍기 블레이드 내부와 외부 영역을 포함한 전체 해석영역의 해석격자는 총 400만개로 구성되었다.

선풍기 블레이드의 전산해석을 위한 계산 시간을 감소하기 위하여 회전 주기 조건(Rotational periodicity)을 사용하여 회전축에 대하여 5등분 하여 72° 로 나누어서 계산하였다.

선풍기의 성능시험은 외부의 영향을 받지 않는 상태에서 진행되기 때문에 이를 반영하여 선풍기 블레이드의 전체 해석영역은 Fig. 2 와 같이 충분히 크게 영역을 설정하였다. 그리고 외부의 경계 조건은 유동 출입이 자유로운 개방(Opening) 상태로 설정하였고, 블레이드 표면의 경우 접촉 조건(No-slip condition)을 적용하는 벽면(wall)로 설정하였다.

2.3 성능시험

선풍기의 성능시험은 KS C 9301[9]의 표준화된 규격에 따라 수행되었다. 성능 시험은 조용한 대기에서 바닥 면 그리고 외부 물체의 영향을 받지 않는 상태가 되도록 한 후 정격 주파수의 정격 전압을 가하여 최고 속도로 작동시켜 유량을 측정한다. 측정 거리는 날개 지름의 3배만큼 떨어진 축 중심선 위를 지난 수평선 위의 각 측정점에서 풍속을 측정한다. 측정 점은 수평선 위의 중심에서 좌우로 각각 2.5 cm 떨어진 점에서 시

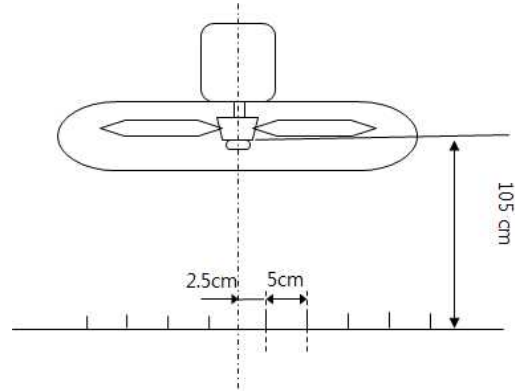


Fig. 3. Position of the measure points

작하여 이후 5 cm 간격의 모든 점을 측정한다.

본 연구에서는 선풍기 날개의 지름이 35 cm이므로 Fig. 3과 같이 1.05 m 떨어진 곳에서 측정한다. 좌우의 각 측정 점에서 풍속의 최고값 평균을 최대 풍속 값으로 한다. 스윙의 영향으로 발생한 속도 차이를 96 최소화 하고자 측정 시간은 원칙적으로 2분으로 하며, 예비 운전을 충분히 한 후에 측정하도록 한다. 선풍기의 풍속은 TSI 社의 Veloccalc plus를 이용하여 측정되었다. TSI 社의 Veloccalc plus는 열센서를 이용하여 속도를 측정하며 정확도는 0.015 m/s 분해능은 0.01 m/s 이고, 측정 범위는 $0 \sim 50 \text{ m/s}$ 이다.

2.4 최적설계

최적설계는 실험계획법을 이용하여 진행되었다. 실험계획법은 실험 데이터를 분석하는 방법으로 적은 횟수로 최대한 많은 정보를 얻기 위한 방법이다[12]. 실험계획법은 Fig. 4 와 같은 방법으로 진행된다.

본 연구에서 실험 계획의 결과로 얻을 수 있는 특성치는 유량(Q)과 토크(τ)를 목적 함수로

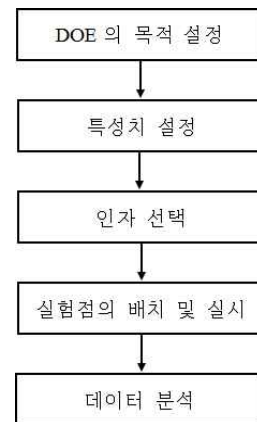


Fig. 4. Procedure of the DOE

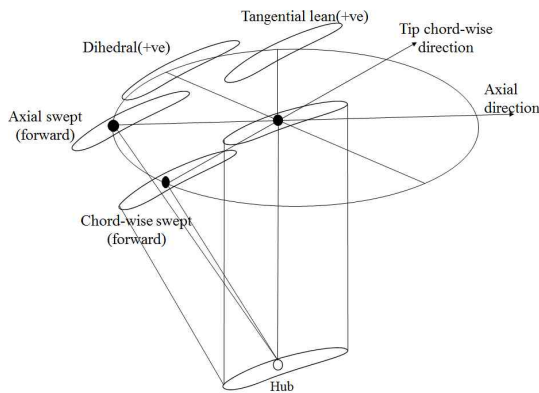


Fig. 5. Definition of the sweep, lean and dihedral angles

Table 2. Sampling points of the electric fan

No.	Sweep angle	Lean angle
1	-15	-20
2	7.5	-15
3	30	-10
4	-22.5	-5
5	0	0
6	22.5	5
7	-30	10
8	-7.5	15
9	15	20

설정하여 선풍기의 성능을 확인하였다. 인자는 설계변수로 블레이드의 스윙 각과 기울기 각을 설정하였고 스윙 각과 기울기 각의 조절을 통해 상반각(Dihedral angle)을 조절하였다. 블레이드의 스윙 각, 기울기 각 그리고 상반 각의 정의는 Fig. 5에 나타내었다. 스윙 각의 경우 블레이드의 허브와 스캔방향으로 40 %되는 위치의 각도를 0° 설정하고 팁 부분의 각도를 변경하였다.

인자로 선택한 스윙 각과 기울기 각의 최적화를 통해 스테킹라인 최적 설계를 진행하였다. DOE 생성을 위한 실험점(Sampling Points) 배치는 OLHD(Optimal Latin-Hypercube Design)를 이용하였다. OLHD는 Space-filling Sampling 기법 중 하나로, 무질서도(Randomness)에 강점을 가지고 있는 LHD (Latin-Hypercube Design)를 최적화하여 공간 배치성(Space-filling)을 향상시켰다[12].

선풍기 블레이드의 형상 최적화를 위한 실험 횟수를 정하는 기준은 다음과 같다.

$$nSAT = (NDV+1)(NDV+2)/2 \quad (1)$$

인자의 수가 10 이하인 경우 “1.5 * SAT”를 추천하고 인자의 수가 11 이상인 경우는 “10 *

NDV”를 추천한다[12].

본 연구의 경우 인자의 수가 2개 이므로 “1.5 * SAT”에 의하여 총 9개의 실험 점을 Table 2 와 같이 설정하였다.

크리깅은 전역모델(Polynomial Model)과 국부 편차(Stochastic Process with Mean and Covariance)의 합으로 구성된다.

$$j(x) = f(x) + z(x) \quad (2)$$

$f(x)$ 는 전역적 근사를 담당하는 부분이고, $z(x)$ 는 평균이 0, 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 크리깅 모델에서 국소적인 변동을 만들어내는 부분을 나타낸다. 크리깅 모델은 비선형성을 잘 표현하지만 생성이 어렵다는 단점이 있다.

2.5 평가방법

성능의 평가 방법은 에너지 관리공단에서 제공하는 소비효율등급 부여지표(R)로 평가한다[13].

$$\gamma = \frac{10332}{29.44 \times (273 + T[^\circ\text{C}])} \quad (3)$$

$$Q = Q_{\max} [m^3/\text{min}] / \sqrt{\frac{1.178}{\gamma}} \quad (4)$$

$$n = \frac{Q [m^3/\text{min}]}{H \cdot \eta} \quad (5)$$

$$R = \frac{Q}{n} \quad (6)$$

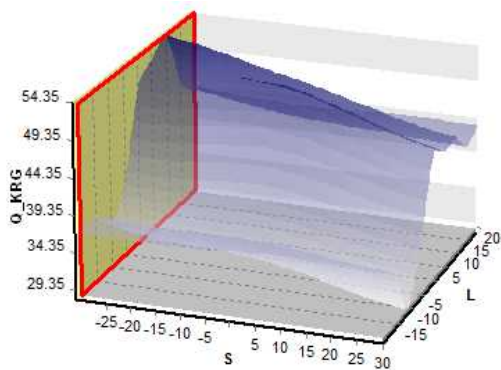
식 (3)에 의하여 구해진 R에 의하여 에너지 효율 등급이 평가된다. R 값이 작을수록 높은 등급을 받으며, 2등급에서 1등급이 되기 위해서는 R 값은 1이하로 동일하나 대기 전력(수동대기모드 소비전력)이 1.0 W 이하가 되어야 한다. 수동 대기모드는 리모콘을 이용해 전원을 끄거나 리모콘이 없는 경우는 본체의 전원을 끈 상태이다. 본 연구에서는 소비 전력의 경우 선풍기의 모터 성능 시험 결과를 바탕으로 블레이드에 걸리는 토크를 예측하여 소비 전력을 확인하였다.

III. 결 과

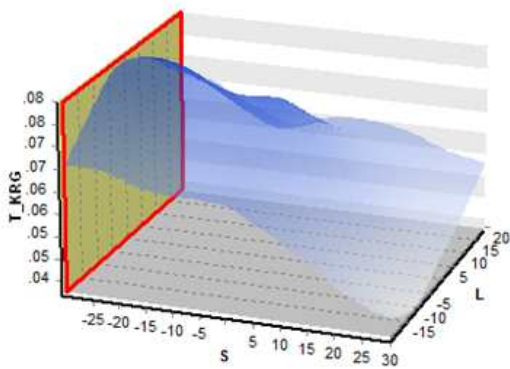
선풍기 블레이드의 CFD 해석을 통해 예측된 전산해석 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 결과를 이용하여 크리깅 기법으로 Fig. 6의 반응면을 생성하였다. Fig. 6(a)는 스윙 각과 기울기 각에 따른 유량을 바탕으로 생성된 반응면이고, Fig. 6(b)는 스윙 각과 기울기 각에 따른 토크를 바탕

Table 3. CFD result of the sampling points

No.	Sweep angle	Lean angel	Q [m ³ /min]	τ [mN·m]
1	-15	-20	36.88	64.4
2	7.5	-15	36.95	60.15
3	30	-10	28.64	39.28
4	-22.5	-5	38.73	80.73
5	0	0	51.67	75.56
6	22.5	5	45.58	49.43
7	-30	10	54.21	75.45
8	-7.5	15	43.39	59.85
9	15	20	47.84	84.62



(a) Response surface of flow rate



(b) Response surface of torque

Fig. 6. Response surface of flow rate and torque

으로 생성한 반응면이다. 생성된 근사 모델을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 소비효율등급 부여지표 R을 계산한다.

직경이 35 cm의 선풍기의 경우 KS C 9301에 의하면 45 m³/min 이상의 유량을 만족시켜야 한다. 따라서 유량을 만족하며 최소한의 토크를 만족시켜 최적의 R값을 갖는 포인트로 선정하였다.

Table 4. Result of the optimization

	Base Model	Opt. Model
Sweep angle	0	-24.071
Lean angel	0	9.341
Q [m ³ /min]	51.67	53.684
T [mN·m]	75.56	74.94
R	1.2890	1.2305



Fig. 7. Shape of the optimized model

선풍기 블레이드에 대한 최적의 포인트 선정 과정은 수렴성을 보장하고 Trust region 알고리즘의 개념을 사용한 근사 최적화 알고리즘인 PQRS (Progressive Quadratic Response Surface Method)에 따라 진행되었다[14].

선풍기 블레이드에 대한 최적의 포인트를 Table 4에 나타내었다. 그리고 최적화 결과를 적용한 선풍기 블레이드의 최적화된 형상은 Fig. 7과 같다. 최적화된 선풍기 블레이드는 기본 모델에 비해 유량은 3.72% 상승하였고, 토크의 경우 4.02% 감소하였다. 따라서 선풍기 성능에 중요한 소비효율등급 부여지표(R)는 기본 모델의 경우보다 3.98% 감소함을 확인 할 수 있었다. 그리고 최적화 결과의 검증에 위한 CFD 해석 결과는 유량의 경우 근사모델의 추정 값과 0.03%의 오차를 나타내었고, 토크 값은 4.18% 그리고 소비효율 등급 부여지표는 4.14%의 오차를 나타내어 비교적 신뢰 할 수 있는 결과를 얻었다는 것을 확인하였다.

Figure 8은 선풍기 블레이드의 측면에서 관찰된 속도 분포를 나타낸 것이다. 선풍기의 경우 슈라우드가 없기 때문에, 블레이드의 출구부분에서 공기가 블레이드로 흡입되면서 유동의 흐름을 방해하는 역할을 하게 된다. 기본 모델과 최적

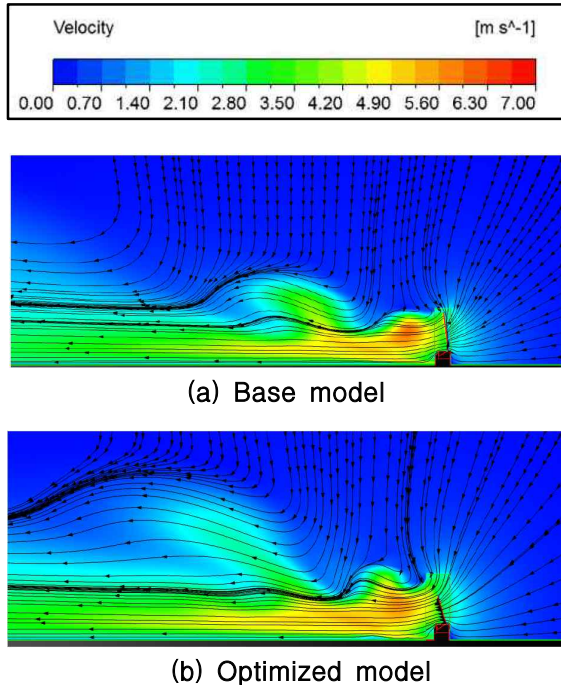


Fig. 8. Comparison of the velocity contour at side view

설계된 모델을 비교하면, 기울기 각이 0도인 기본 모델에 비하여 최적화된 모델은 기울기 각의 영향으로 인하여 스펀 방향으로 유동이 넓게 퍼져 있는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 최적 설계된 모델의 유동영역이 기본모델에 비해 비교적 넓은 범위를 형성하는 것을 의미한다.

Figure 9는 블레이드로부터 1.05 m 떨어진 측정위치에서 반경에 따른 유량의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 선풍기 블레이드의 기본 모델은 0.625 m 까지만 풍속이 측정된 반면에, 최적 설계된 모델의 경우 더 넓은 범위까지 유동이 분포하는 것을 확인 할 수 있었다.

Figure 10은 선풍기 블레이드의 축방향 속도 분포를 나타낸 것이다. 스위프 각이 적용된 최적화 모델은 기본 모델에 비해 축방향 속도 분포가 코드 방향으로 넓게 분포되어 기본 모델보다 높은 유량을 나타냄을 확인할 수 있다.

실험계획법을 이용한 최적화 결과를 검증하기 위해 Fig. 11의 시제품을 제작하였고, KS C 9301 표준화된 규격에 따라 성능시험을 수행하였다. 최적화된 모델은 기본모델에 비해 낮은 토크로 작동되어 모터의 회전수가 1145 RPM이었다. 이것은 모터 성능 시험 결과에 따르면 모터에 걸리는 토크가 74 mN·m 일 때의 회전속도이다.

Figure 12는 KS C 9301 표준화된 규격에 따른 시험 결과와 CFD 해석 결과를 비교한 것이다.

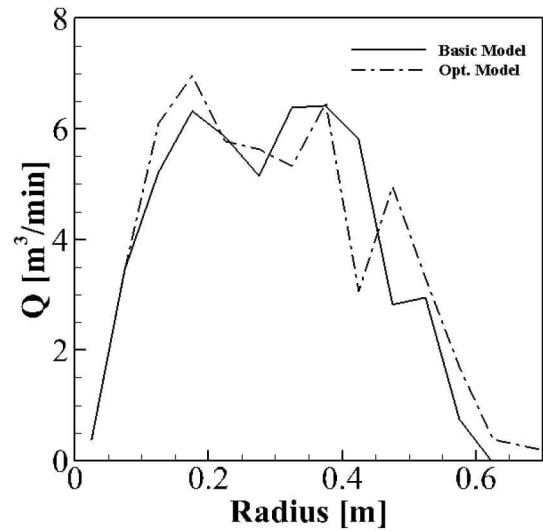


Fig. 9. Volumetric flow rate at measure planes

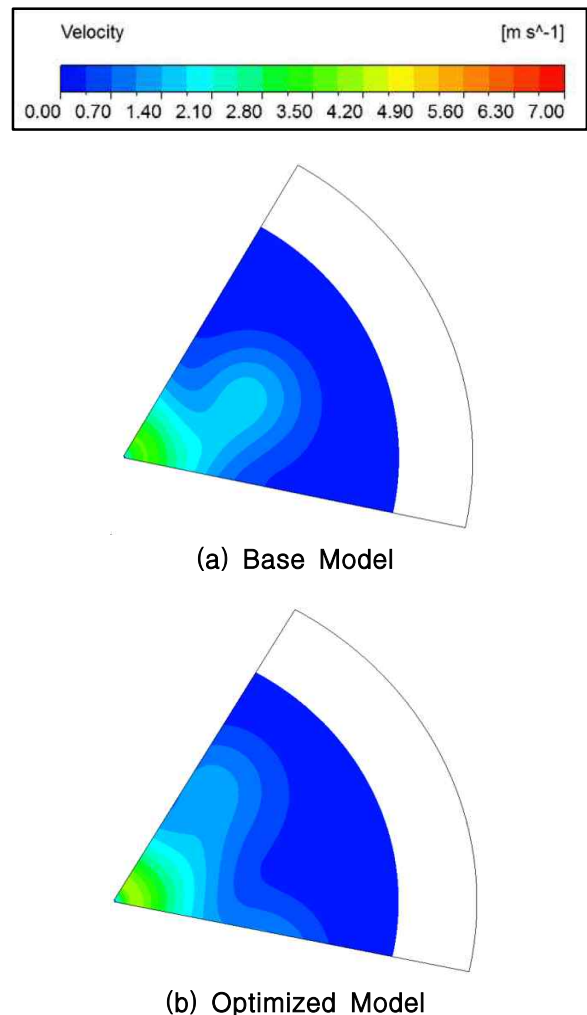


Fig. 10. Comparison of the velocity contour at measured plane



Fig. 11. Prototype of the optimized model

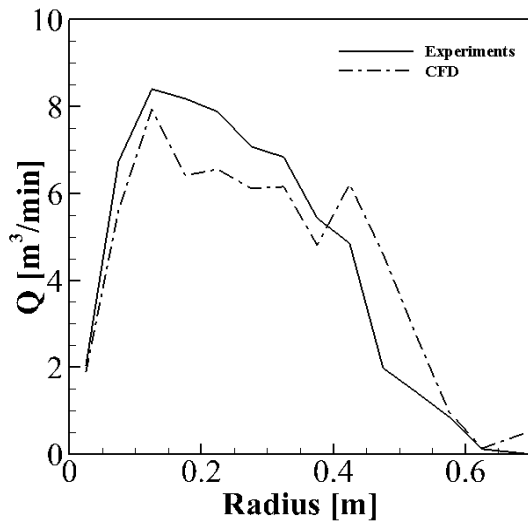


Fig. 12. Comparison of the volumetric flow rate with CFD and experimental results

선풍기 블레이드의 축방향 속도분포는 전체적으로 시험 결과와 CFD 해석 결과가 일치하는 경향을 나타내었다. KS C 9301의 표준화된 규격에 따른 시험 결과를 살펴보면, 최적화된 모델의 유량은 $61.84 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 측정되었다. 그리고 소비효율등급 부여지표의 경우 1.2890(기본모델)에서 1.099로 17.29% 향상됨을 확인하였다.

CFD 해석은 성능시험과 동일한 작동조건인 1,145 RPM에서 진행하였다. 유량은 $60.44 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 예측되어 시험결과와는 약 2.26%의 오차를 나타내었다. 측정시험 과정에서 나타나는 측정 오차를 고려하는 경우, 전산해석 기법이 비교적 타당함을 확인 할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 선풍기의 성능을 향상시키기 위해 블레이드에 대한 최적설계를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선풍기 블레이드의 기본 모델과 최적화된 모델에 대해 CFD를 수행한 결과, 최적화 모델은 기본 모델에 비해 유량은 3.72% 상승하였고, 토크의 경우 4.02% 감소하였다. 따라서 선풍기 소비효율등급 부여지표(R)는 3.98% 감소함으로써 효율이 상승함을 확인하였다.

(2) 선풍기 블레이드의 기본 모델은 0.625 m까지만 축방향 속도가 발생하는 것이 예측되었고, 최적 설계된 모델은 더 넓은 범위인 0.725m까지 유동이 분포하는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) CFD 해석은 성능시험과 동일한 작동조건에서 수행되었고, 유량은 $60.44 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 예측되어 시험결과와는 약 2.26%의 오차를 나타내었다. 또한, 선풍기 블레이드의 축방향 속도분포는 전체적으로 시험 결과와 CFD해석 결과가 일치하는 경향을 나타내었다.

References

- 1) Cho, J. U and Hwang, M. S, "Analysis of the Sir Flow due to the Number of Electric Fan Blades", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, 2012, pp. 107-112.
- 2) Hwang, J. H, "A Study on Electric Fan Design for Usability Enhancement - Mainly with propose concept design", Journal of Digital Design, Vol.13 2013, pp 203~212.
- 3) Cho, C. H, Jung, Y. B, Kim, Y. C and Cho, S. Y, "A Study of the Tip Clearance Effect to the Performance of an Axial-Type Fan", Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, 2008, pp. 7-17.
- 4) Kim, J. W, Kim, J. H, Lee, C and Kim, K. Y, "High-Efficiency Design of a Ventilation Axial-Flow Fan by Using Weighted Average Surrogate Models", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 35, 2011, pp. 763~771.
- 5) Estevadeordal, J and Gogineni, S, W. Compenhaver, M. Brendel, "Flow field in a low-speed axial fan: a DPIV investigation",

Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 23, 2000, pp 11~21.

6) Xu, C. and Amano, R. S., "Computational Analysis of Swept Compressor Rotor Blades", International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, Vol. 9, 2008, pp. 374~382.

7) Vad, A, Kwedikha, A and Jaberg, H, "Effects of blade sweep on the performance characteristics of axial flow turbomachinery rotors", Journal of Power and Energy, Vol. 220, 2006, pp. 737~749.

8) Denton, J. D, "The effects of lean and sweep on transonic fan performance: a computational study", Task Quarterly, No 1, 2002, pp. 7~23.

9) Korean Agency for Technology and Standards, "Electric fans and ceiling fans",

2013.

10) Ansys Inc, "Ansys 14.5 User's Manual", 2013

11) Menter, F. R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,", AIAA journal, Vol. 32, 1994, pp. 625~632.

12) Pidotech Inc, "Piano User's Manual", 2011.

13) Korea's energy standards, "Korea Energy Management Corporation", 2011.

14) Kim, Y. H, Choi, J. H, Jung, J. I, Kim, s, Lee, J, Chu, M. S, Hong, K. J and Choi, D. H, "Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method", Journal of Applied Physics, Vol. 91, 2002, pp. 763~771.