

횡류팬 설계 인자들의 성능/소음 특성 해석 및 최적화

조 용*, 문영준**,곽지호***

Analysis on Performance and Noise Characteristics of the Design Parameters of a Cross-Flow Fan and its Optimization

Yong Cho*, Young J. Moon** and Jiho Kwak***

Key Words : Cross-Flow Fan(횡류팬), Blade Setting Angle(블레이드 취부각), Diffusing Angle(확산각), Stabilizer Installation Angle(스테빌라이저 장착각), Taguchi Method(다구찌 방법)

Abstract

The performance and noise characteristics of the design parameters of a cross-flow fan are investigated by computational methods. The incompressible Navier-Stokes equations in moving coordinates are time-accurately solved for obtaining the pressure fluctuations due to the aerodynamic interactions between the impeller blades and the stabilizer, and sound pressure is then computed by the Ffowcs Williams-Hawkings equation. Design parameters of the cross-flow fan include blade setting angle, exit-diffusion angle, and stabilizer installation angle. Also, an optimization of the aforementioned design parameters has been performed using the Taguchi method.

1. 서론

횡류팬(cross-flow fan)은 축류팬 또는 원심팬과는 달리 축 반경 방향으로 공기가 유입되고 유출되는 즉, 블레이드 사이를 두 번 통과하는 특징을 가지고 있으며, 가늘고 긴 원통 형상으로 인해 가정용 에어컨 실내기, 자동차 또는 지하철 전동차의 환기팬 그리고 에어커튼과 같은 compact한 실내용 공조기에 널리 사용되고 있다. Fig. 1은 횡류팬 임펠러, 스테빌라이저 그리고 리어가이드 등으로 구성된 가정용 에어컨 실내기 단면을 보여주고 있다.

횡류팬은 팬 내부에 커다란 편심 와류(eccentric vortex)가 존재하여 내부 유동장을 지배하게 되는데, 팬 성능 및 소음 특성과 관련된 편심 와류의 위치 및 크기는 횡류팬의 여러 설계 인자들에 의하여 결정된다. 아직까지는 횡류팬 설계 인자와 성능

및 소음 특성에 관한 이론 해석 기술이 확립되지 못하고, 제한된 설계 인자에 대하여 팬 성능 및 소음 특성에 관한 실험 연구가 진행되어 왔다. Jung et al.^[1]은 임펠러 블레이드 취부각에 대한 풍량과 소음 특성을 조사하였으며, 진심원 등^[2]은 블레이드 취부각과 리어가이드 형상 설계 인자들에 대한 성능 특성을 조사하였다. 또한, 서상호 등^[3]과 구형모^[4]는 리어가이드 형상과 스테빌라이저의 위치 및 형상에 대하여 성능 및 소음 특성을 조사하였다. 최근에는 실험에 비해 시간과 비용이 절약되는 전산해석을 통해 횡류팬 설계 인자들의 유동 및 소음 특성에 대한 연구가 수행되어지고 있다. 허남건 등^[5]은 임펠러 블레이드 형상 변화에 의한 성능 변화를 예측해 보았으며, 조석규 등^[6]은 블레이드 취부각과 확산각 변화에 따른 성능 및 소음 특성을 연구하였다. 한편, 여러 설계 인자들에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 아직까지 체계적인 설계 방법이 확립되지 못하여 신경망 회로 기법이나 다구찌 방법과 같은 최적 설계법을 횡류팬 설계에 적용하는 시도가 이루어지기도 하였다^[7,8].

본 연구에서는 비정상 전산해석을 수행하여 내부 유동장을 분석하고, 블레이드 취부각, 확산각, 스테빌라이저 장착각의 3가지 횡류팬 설계 인자들에 대하여 다구찌 방법을 적용하여 최적화하였다. 또한, 각 설계 인자들의 팬 성능과 소음 특성 그리고 내부 유동 특성에 대하여 조사하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 비정상 유동 해석 기법

횡류팬 전산해석시 팬 부분의 격자는 실제로 회전하기 때문에 이동좌표계로 나타낸 시간중속 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 횡류팬은 케이싱 내부에 많은 임펠러 블레이드가 회전을 하는 매우 복잡한 유로를 형성

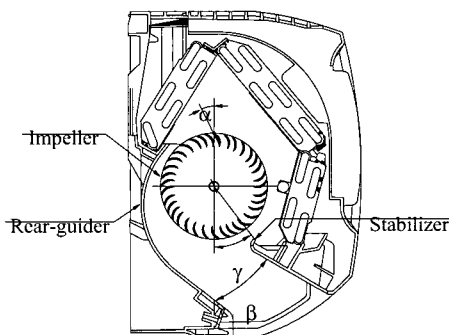


Fig. 1 A cross-flow fan configuration

* 고려대학교 대학원, choyong@korea.ac.kr
** 고려대학교 기계공학과, yjmoon@korea.ac.kr
*** 만도공조 위니아연구소, jiho_kwak@winia.co.kr

하기 때문에 비정렬 삼각형 격자를 사용하여 전산해석을 수행하였다. 격자 영역은 실제로 회전을 하는 웬 부분과 고정되어 있는 케이싱 부분으로 나누어져 있고, 그 경계에서는 미끄러짐 격자(sliding mesh) 기법을 사용하였다. 비정상 전산해석은 projection method의 일종인 SMAC 기법을 이용하여 계산하였고, 시간 적분에는 외제적 4단계 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 대류항 계산에는 2차 풍상 차분법을 적용하였고, 집중격자계에서 발생할 여지가 있는 압력장 떨림 현상을 제거하기 위하여 운동량 선형 보간법(momentum linear interpolation)을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 비정상 전산해석 기법에 관한 사항은 Moon et al.^[9]에 비교적 자세히 서술되어 있다.

2.2 유동 소음 해석 기법

웬이 회전을 하면서 공기역학적으로 발생하는 유동소음의 원인으로 날개의 두께에 의한 질량 유량, 날개가 유체에 작용하는 힘 그리고 난류 유동 등이 있다. 일반적으로 저속으로 회전하는 웬은 날개가 유체에 작용하는 힘과 관련된 쌍극자 형태의 소음이 주 소음원으로 작용하게 되며, 횡류웬에서는 회전하는 블레이드와 고정된 스테빌라이저의 상호 작용에 의한 압력 요동이 주 소음원으로 알려져 있다^[10].

본 연구에서는 유동 유사(acoustic analogy)에 기반하고 이동하는 소음원에서 발생하는 소음을 예측할 수 있는 FW-H^[11]식을 이용하여 스테빌라이저와 임펠러 블레이드 표면의 압력 요동에 의해 발생하는 음압을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 횡류웬 유동장 분석

본 연구의 전산해석 대상인 횡류웬 기본 모델은 Fig. 1에 나타난 블레이드 취부각(α), 확산각(β), 스테빌라이저 장착각(γ)이 각각 27° , 8° , 37° 이며, 다른 모델에서도 공통으로 사용된 임펠러 치수는 Table 1에 나타내었다. 임펠러는 1,200 rpm으로 회전하고, 임펠러 블레이드 코드 길이와 블레이드 끝단 속도를 기준으로 한 Reynolds 수는 4,745이며, 내부 유동은 층류로 가정되었다. 또한, 횡류웬 임펠러는 축 방향으로 길고, 축과 수직인 방향으로 주 유동이 흐르기 때문에 2차원 유동으로 가정되었다^[12].

횡류웬은 내부 유로 형상이 매우 복잡하여 비정렬 삼각형 격자를 사용하여 계산 격자를 구성하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 임펠러 블레이드 주변의 점성 유동을 정확하게 예측하기 위하여 블레이드 주변에 격자를 밀집시켰으며, 회전하는 웬 부분에는 38,581개, 고정된 케이싱 부분은 8,496개의 삼각형을 사용하였다.

횡류웬의 내부 유동장이 보다 안정된 상태로 발달하도록 출구에서 임펠러가 2회전하는 동안 일정한 유량까지 부드럽게 증가하도록 하였다. 정지된 상태에서 임펠러가 회전하기 시작하여 약 3회전만에 준 정상상태에 도달하였으며, 그 이후 10회전 동안의 압력 상승값을 시간 평균하여 Fig. 3에 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 여기서, ϕ 는 유량계수이고 Ψ_s 는 정압계수이다. 전산해석으로 예측한 결과는 실험결과와 오차 내에서 잘 일치하고 있어 본 전산해석 기법의 타당성과 신뢰성도 함께 검증되었다.

Fig. 4는 유량계수가 0.50인 경우 횡류웬 내부와 토출구 근처 임펠러 블레이드 주위의 전압 분포를 나타내고 있다. 입구에서 유입된 유동이 임펠러 블레이드를 통과하면서 전압이 상승하고 있으며, 특히 블레이드 사이를 두 번째 통과하는 토출구에서 전

Table 1 Impeller dimensions

blade count	35
blade chord length	11.9 mm
impeller outer diameter	95 mm
impeller inner diameter	74 mm
impeller block count	9
impeller span	642 mm

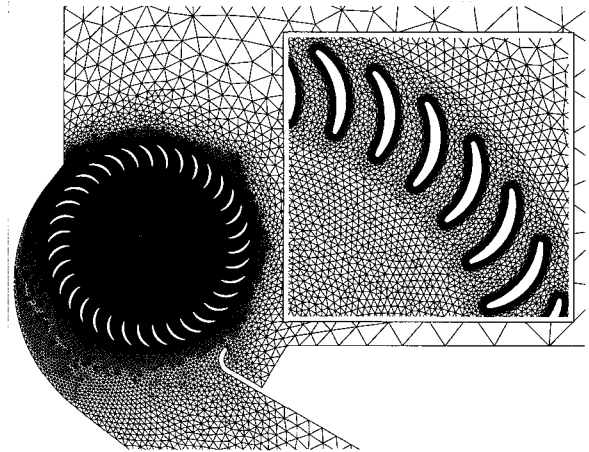


Fig. 2 Computational meshes (basic model)

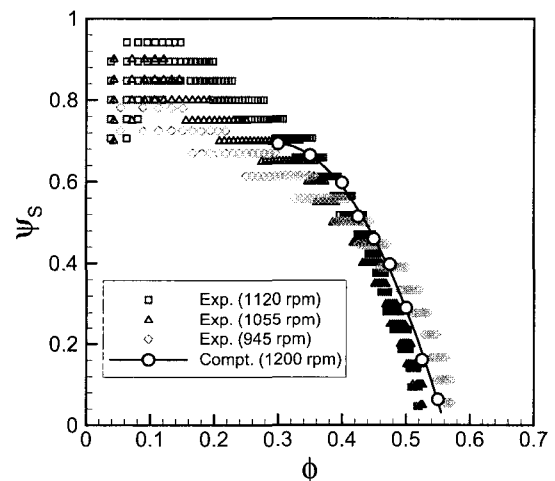


Fig. 3 Fan performance (basic model)

압이 크게 상승한다. 토출된 유동 중 일부는 재순환되어 편심 와류로 유입되는 과정에서 블레이드 압력면에서 발생한 심한 박리로 인해 유동 에너지가 크게 줄어들게 된다. 한편, 유동이 리어가이드를 따라 원활하게 흘러가지 못하고 있으며, 토출 영역에서 유동 에너지가 스테빌라이저 쪽으로 치우치고 있다. 이는 리어가이드가 토출된 유동의 동압을 정압으로 회복시켜주는 디퓨저 역할을 제대로 수행하지 못하고 있음을 보여준다. 또한, 토출구 근처 블레이드 흡입면에서는 박리현상이 크게 발생하여 유동 에너지의 손실이 발생하고 있다. 이러한 유동장은 블레이드 취부각(α)과 스테빌라이저 장착각(γ)을 수정하여 스테빌라이저로 치우친 유동을 균일하게 토출되도록 할 수 있을 뿐만 아니라 토출구 블레이드 흡입면에서의 유동 박리현상을 개선할 수 있을 것으로 추측된다. 또한, 확산각(β)을 변경하여 토출되는 유동의 동압을 원활하게 정압으로 회복시켜주는 디퓨저 역할도 제대로 할 수 있을 것으로 추측된다. 이러한 추론에 의하여 블레이드

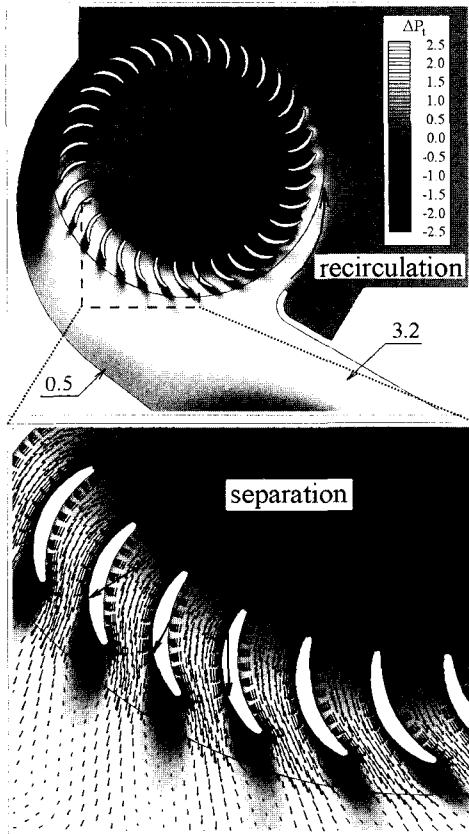


Fig. 4 Total pressure contours at $\phi=0.50$ (basic model)

취부각(α), 확산각(β), 스테빌라이저 장착각(γ)을 웬 성능과 소음 특성을 개선할 수 있는 설계 인자로 선택하게 되었다.

3.2 횡류팬 최적화 및 성능/소음 특성 분석

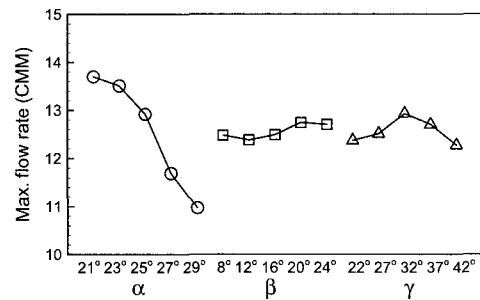
기본 모델 횡류팬의 유동장을 분석하여 블레이드 취부각(α), 확산각(β), 스테빌라이저 장착각(γ)을 설계 변수로 선정하였다. 각 설계 변수들은 등간격으로 5개의 값이 선택되었으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 다구찌 방법을 적용하기 위해 직교 배열표(orthogonal array)를 작성하여 계산할 경우의 수를 25가지로 줄였으며, 유량계수 0.50인 경우에 대하여 각각을 전산해석하였다.

평균치 분석을 통해 각 설계 인자들이 최대 유량, 전체소음과 비소음에 미치는 효과를 Fig. 5에 나타내었다. 3가지 설계 인자 중에서 블레이드 취부각이 최대 유량과 전체 소음에 상대적으로 큰 영향을 미치고 있으며, 블레이드 취부각이 작아질수록 최대 유량은 늘어나지만 전체 소음이 증가하고 있다. 성능과 소음을 동시에 고려할 수 있는 비소음의 경우에도 블레이드 취부각에 따라 크게 변화하고 있으며, 확산각은 커질수록 비소음이 작아지고 스테빌라이저 설치각은 최적의 값이 존재하고 있다. 비소음을 고려한 경우, 블레이드 취부각이 23° , 확산각이 24° , 스테빌라이저 장착각이 32° 일 때 성능과 소음이 가장 우수한 최적 모델로 예측되었다. 최적 모델에 대하여 전산해석을 수행하여 성능과 소음을 예측한 결과(13.8CMM, 54.4dB(A))와 식 (1)로 나타낸 예측 모델의 결과(14.0CMM, 53.5dB(A))와 비교한 결과 오차율이 각각 1.9%, -1.6%로 나타났으며, 최적 모델은 기본 모델에 비해 풍량은 1.63CMM 증가하고, 전체소음은 0.54dB(A) 저감되었다.

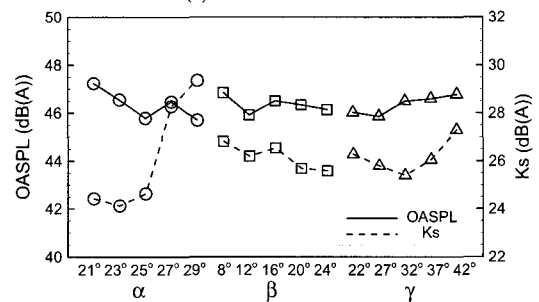
$$q_{pred}(\alpha, \beta, \gamma) = \bar{q} + (\bar{q}_\alpha - \bar{q}) + (\bar{q}_\beta - \bar{q}) + (\bar{q}_\gamma - \bar{q}) \quad (1)$$

Table 2 Design parameters

Blade setting angle, α	$21^\circ, 23^\circ, 25^\circ, 27^\circ, 29^\circ$
Diffusing angle, β	$8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ, 24^\circ$
Stabilizer installation angle, γ	$22^\circ, 27^\circ, 32^\circ, 37^\circ, 42^\circ$



(a) Max. flow rate



(b) Overall SPL and specific noise level

Fig. 5 Effects of α, β, γ

설계 인자들의 변화가 내부 유동 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기본 모델과 최적 모델의 리어가이드와 임펠러 외곽에서의 시간 평균된 정압, 유량, 전압을 Fig. 6에 나타내어 비교하였다. Fig. 6(a)에서 기본 모델은 리어가이드를 따라 정압 상승이 잘 이루어지지 않고 있지만, 최적 모델은 리어가이드가 디퓨저 역할을 충실히 수행하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서 양의 값은 임펠러에서 토출되는 유량을, 음의 값은 임펠러로 유입되는 유량을 나타낸다. 기본 모델은 유동이 스테빌라이저 쪽으로 치우쳐 유출되고 있으며 전압도 스테빌라이저 쪽으로 치우쳐 유출되고 있는 반면, 최적 모델은 유량과 전압 모두 비교적 균일하게 유출되고 있다. 토출 유동이 균일하게 유출되면, 리어가이드에서 압력 회복이 잘 이루어질 뿐만 아니라 스테빌라이저와 충돌하는 유동이 줄어들어 BPF 소음 저감 측면에서도 유리할 것으로 추측된다.

Fig. 7은 최적 모델의 전압 유동장과 3가지 설계 인자들의 변화값을 나타내고 있다. 최적 모델의 유동장을 Fig. 4의 기본 모델 유동장과 비교해 보면, 임펠러에서 토출된 유동이 리어가이드를 따라 잘 흐르고 있으며 스테빌라이저 쪽으로 치우치지 않고 대체로 균일하게 흐르고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 임펠러 블레이드의 후류도 크게 개선되는 것이 확인되었다.

4. 결론

횡류팬 내부 유동장에 대하여 비정상 전산해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 횡류팬 성능 곡선에 대한 전산해석 결과와 실험 결과가 오차 내에서 일치하여 본 전산해석 기법의 신뢰성이 검증되었다.
- (2) 기본 모델에 대한 유동장 분석을 통해 개선되어야 할 3가지 설계 변수를 선정하였으며, 다구찌 방법을 이용하여 최적

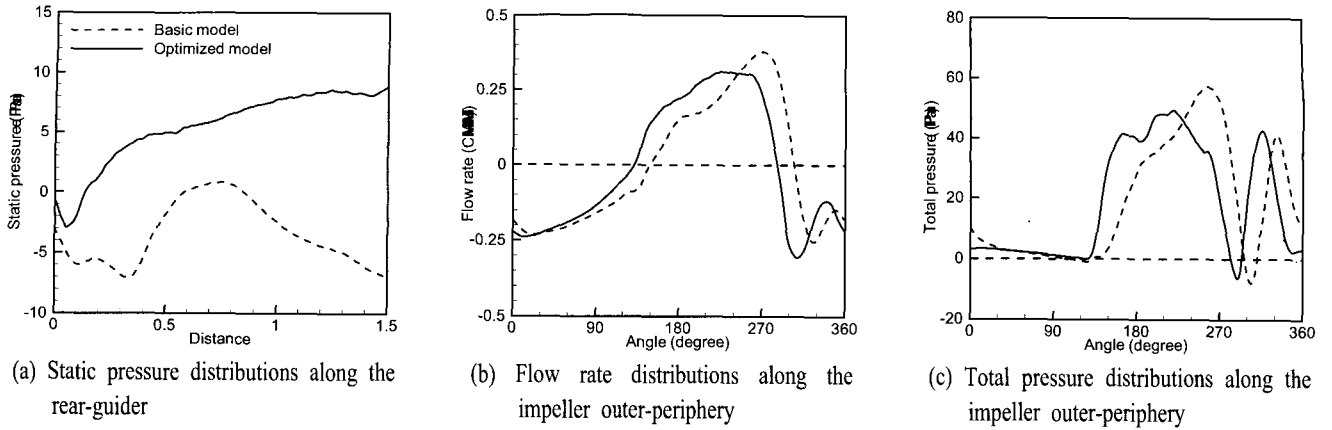


Fig. 6 Comparison between the basic model and the optimized model ($\phi=0.50$)

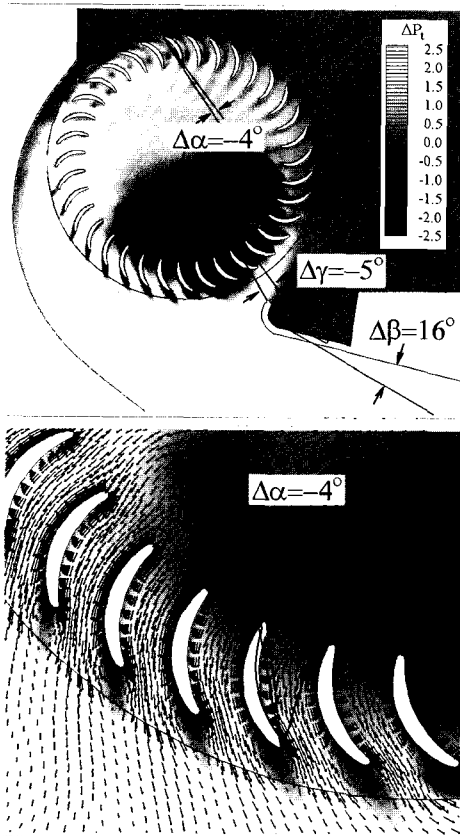


Fig. 7 Total pressure contours at $\phi=0.50$ (optimized model)

화하였다. 또한, 각 설계 변수가 성능과 소음에 미치는 영향을 조사하여 블레이드 취부각의 영향이 크게 나타남을 확인하였다.

(3) 다구찌 방법으로 찾은 최적 모델($\alpha=23^\circ$, $\beta=24^\circ$, $\gamma=32^\circ$)은 기본 모델($\alpha=27^\circ$, $\beta=8^\circ$, $\gamma=37^\circ$)과 비교하여 풍량은 1.63CMM 증가하고, 전체소음은 0.54dB(A) 저감되었으며, 다구찌 방법의 예측 오차는 2% 이내로 나타났다. 또한, 최적 모델은 유동이 리어가이드를 따라 잘 흐르고 출구에서의 유동이 균일하게 분포되었으며, 임펠러 블레이드에서의 박리 현상도 감소되었다.

후기

본 연구는 만도공조(주)와의 산학협동연구과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jung, S. T., Koo, H. M., Oh, S. K., and Lee, H. W., "An Experimental Study for the Design of a Cross Flow Fan in Room Airconditioner," Proceedings of the 2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference (1992), pp. 337-340.
- [2] 진심원, 이진하, 서상호, 이내영, 임금식, "에어컨용 횡류팬의 고풍량화에 대한 실험적 연구," 공기조화 냉동공학회 동계학술대회논문집 (1995), pp. 234-241.
- [3] 서상호, 이내영, 이진하, 진심원, 임금식, "룸에어컨 소음저감을 위한 Stabilizer에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집 (1995), pp. 136-141.
- [4] 구형모, "에어컨용 직교류팬 시스템의 성능특성에 대한 기본적인 설계변수의 영향에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제6호 (1999), pp. 695-702.
- [5] 허남건, 김육, 강신형, "직교류 팬의 유동 해석: 깃 형상 변화가 성능에 미치는 영향," 유체기계저널, 제2권, 제1호 (1999), pp. 96-102.
- [6] 조석규, 조용, 문영준, 라종래, 박지호, 김재원, "횡류팬 블레이드 취부각 및 확산각 변화에 따른 성능 및 소음 특성 연구," 대한설비공학회 동계학술대회 논문집 (2001), pp. 369-374.
- [7] 안철오, 류호선, "실험에 의한 Cross Flow Fan 소음 분석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집 (1997), pp. 615-620.
- [8] 진심원, 이내영, "횡류팬 응용의 실험적 연구," 공기조화 냉동공학회 동계학술대회논문집 (1998), pp. 544-549.
- [9] Moon, Y. J., Cho, Y., and Nam, H. S., "Numerical Prediction of the Cross-Flow Fan Performances and Noise Characteristics by an Unstructured Flow Solver Algorithm," Proceedings of the 4th KSME-JSME Fluid Engineering Conference (1998), pp. 185-188.
- [10] 조용, 문영준, 박진무, "등/부등피치 횡류팬의 유동 소음 특성," 설비공학 논문집, 제13권, 제7호 (2001), pp. 621-626.
- [11] Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. S., "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 264, No. A 1151 (1969), pp. 321-342.
- [12] Chen, C., "On Similitude of Cross-Flow Fan in Dynamic Performance and Noise Character," Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 3 (1997), pp. 203-208.