

리어가이더 형상변화에 따른 횡류팬 성능해석

김동원[†] · 이준화* · 박성관* · 김윤제**

Analysis of Performance of Cross-Flow Fan with Various Rear Guiders

D.-W. Kim, J.-H. Lee, S.-K. Park and Youn J. Kim

Key Words : Archimedes spiral(아르키메데스 나선), Cross-flow fan(횡류팬), Fan performance (팬 성능), Rearguider(리어가이더), Stabilizer(스태빌라이저)

Abstract

A cross-flow fan is widely used on many industrial fields: mining industry, automobile and home appliances, etc. The design point of the cross-flow fan is generally based on the region within low static pressure and high flow rate. It relatively makes high dynamic pressure at low speed because a working fluid passes through an impeller blade twice. However, it has low static pressure efficiency between 30% and 40% because of relative high impact loss. Recently, in the air-conditioning systems, the operating behaviors at the off-design points are highly regarded to broaden the application area for various air-cooling loads. Especially, at the lower flow rate, there exists a rapid pressure head reduction, a noise increase and an irregular flow field against a rearguider as a scroll of centrifugal fan. Numerical analyses are carried out for investigating the flow characteristics in a cross-flow fan including the impeller, the rearguider and the stabilizer. Especially, various types of rearguiders are estimated by numerical and experimental methods to insure the stable operation in the region of lower flow rate. Numerical domains are discretized by hexahedral cells. Three-dimensional, unsteady governing equations are solved using FVM, PISO algorithm, sliding grid system and standard $k - \varepsilon$ turbulence model. ASHRAE standard fan tester is also used to estimate the performance of the modeled cross-flow fan.

기호설명

b	폭[mm]
C	유동의 상대속도[m/s]
C_p	압력회복계수
k	손실계수
Q	체적유량[m ³ /min, CMM]
r	반경[mm]
U	임펠러 원주속도[m/s]
W	유동의 상대속도[m/s]

[†] 성균관대학교 기계공학부 대학원
E-mail : yjk@skku.ac.kr
TEL : (031)290-7448 FAX : (031)290-5849

* 삼성전자 DA 총괄 기반기술연구소

** 성균관대학교 기계공학부

Greek Symbols

α	임펠러 유동각[degree]
β	임펠러 날개각[degree]
ε_1	리어가이더 간극[mm]
ε_2	스태빌라이저 간극[mm]
λ	스웰계수
θ	각도[degree]

아래첨자

2	임펠러출구
3	리어가이더 기초원
m	반경방향
r	리어가이더
s	스태빌라이저
θ	접선방향

1. 서론

많은 산업기기 분야에 사용되고 있는 횡류팬(cross-flow fan)은 임펠러 입·출구각의 구분 없이 유체가 날개(blade)를 두 번 통과하기 때문에 높은 동압(dynamic pressure)을 얻을 수 있고, 전향깃을 채용하기 때문에 원주속도가 큰 특성을 갖고 있다. 따라서, 동일 풍량에서 원주 속도가 다른 팬보다 작아도 되므로 소형, 고풍량을 요구하는 공기조화 설비분야에 많이 적용되고 있다. 효율은 날개의 설치각(θ_1)이 클수록 높으므로 전향깃을 갖는 횡류팬은 날개의 충돌 손실이 커서 30~40%의 낮은 정압효율을 보인다. 그러나 전향깃 일수록 최고효율점에서 전압과 풍량이 크므로 효율이 낮더라도 소형화하기 위해서 전향깃을 사용한다. 원심팬에서 스크롤(scroll) 역할을 하도록 설계된 리어가이더(rearguider)와 스테빌라이저(stabilizer)의 형상은 팬의 성능에 미치는 상호인과 관계가 커서 정압(static pressure)-풍량 곡선 및 효율 특성 범위를 다양하게 조절할 수 있는 특징을 갖는다. 또한 그 응용분야가 광범위하여 광산용 등의 산업용 환기팬과 자동차용 환기팬에 사용되어 왔고, 최근에는 에어컨 실내기에서도 일반적으로 장착되어 사용되고 있는 실정이다.

일반적으로 횡류팬은 임펠러, 스테빌라이저, 리어가이더로 구성되는데, 에어컨에 적용될 경우 증발기도 포함한다 (Fig. 1 참조). 횡류팬의 작동 원리는 원심펌프와 같다고 볼 수 있는데, 내부유동은 임펠러와 스테빌라이저 사이의 역류에 의해 편심와유동(eccentric vortex)이 형성되며, 임펠러 내부에서도 펌프 및 터빈 영역을 각각 갖는다. 특히, 편심와의 강도 및 위치 제어가 횡류팬의 성능과 직결된다. 그러나 설계 이론이 확립되어 있지 못하고 편심와에 관련하여 상호 영향을 미치는 형상변수가 매우 다양하지만 이에 대한 연구가 미약한 실정이다.

연구 방법에 있어서도 이론적 연구보다는 반복적인 실험과 수치해석에 의한 경험적 연구가 주로 이루어져 왔다. Eck⁽¹⁾는 횡류팬의 전반적인 이론을 실험을 통해 연구하였다. Hiromu 등⁽²⁾은 횡류팬 내부유동을 particle tracking velocimetry (PTV)를 사용하여 가시화 실험을 하여 속도 분포 및 경로선(path line)을 구하였다. Bert 등⁽³⁾은 횡류팬에 대한 2차원 FEM 비정상 유동해석을 수행하였으며 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. Tohru 등⁽⁴⁾은 direct boundary element method 와 discrete vortex method 를 사용하여 2차원 비점성 비압축성 유동에 대한 해석을 수행하였다. 국내에서는 구형모 등⁽⁵⁾이 실험을 통한 횡류팬 설계요소 변경에 따른 성능특성을 고찰하였으며, 진심원 등⁽⁶⁾은 횡류팬의 에어컨 적용에 따른 효율 및 정압-풍량곡선을 설계변수를 변경해

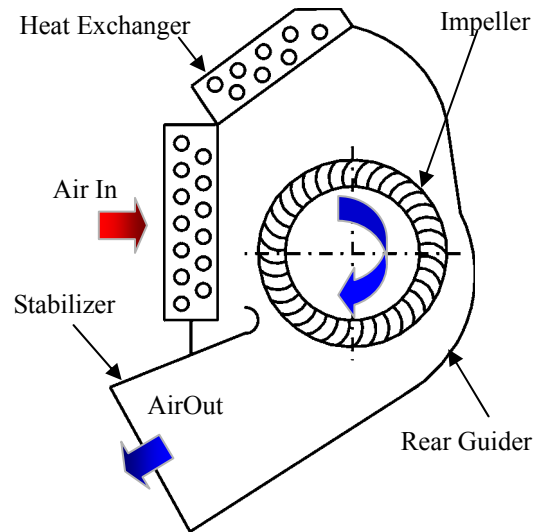


Fig. 1 Schematic diagram of a cross-flow fan.

가며 실험을 수행하였다. 김재원 등⁽⁷⁾은 평균유선법을 이용하여 횡류팬의 성능 예측 방법의 타당성을 검증하였다. 허남건 등⁽⁸⁾은 횡류팬의 임펠러 입·출구각의 변화를 통한 성능 특성을 수치해석과 실험을 통해 비교하였다. 이러한 연구를 통해 횡류팬의 성능은 세가지 구성요소 모두가 서로 상호작용 하는 것으로 밝혀졌지만, 실제 세가지 설계변수의 유기적 관계는 정립되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 횡류팬의 리어가이더 곡선의 설계이론을 정립하고, 실험과 수치해석을 통해 설계형상에 대한 성능평가를 수행하고자 한다.

2. 형상설계방법

횡류팬 내부 유동은 비압축성유동($M < 0.3$)이므로 원심펌프의 작동원리와 같다고 할 수 있다. 특히, 작동유체가 임펠러를 두 번 통과하면서 에너지를 공급 받게 되며, 임펠러의 특정 범위에서만 리어가이더로 토출이 이루어지게 된다. 유체기계에서 임펠러 다음으로 가장 큰 손실을 가져오는 리어가이더의 형상은 매우 중요하다. 본 연구에서는 기존 유체기계의 스크롤 역할을 하는 리어가이더의 곡선시작부에서 토출구까지 아르키메데스 나선(Archimedes spiral)을 이용하여 설계하였다. 아르키메데스 나선은 기존 유체기계의 스크롤 설계 방법의 하나로 우수한 압력회복성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 전술한 바와 같이 임펠러의 특정각도에서만 토출이 이루어지기 때문에 θ_0 의 값은 360° 가 아닌 경험적 수치를 사용하였으며, 성능평가를 위해 S사의 기존 모델과 비교하였다.

$$r_4(\theta) = r_3 \exp[Q_d \theta / (C_{\theta 2} \cdot r_2 \cdot b_2 \cdot \theta_0)] \quad (1)$$

여기서,

$$r_3 = r_2 + \varepsilon_1$$

$$C_{\theta 2} = C_{m2} / \tan \alpha_2$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}[W \sin \beta_2 / (U + W \cos \beta_2)]$$

$$U = \pi DN / 60$$

$$W = C_{m2} / \sin \beta_2 = (Q_d / A_{exit} \sin \beta_2)$$

이며, 사용된 각종 변수는 Fig. 2 에 도시하였다.

3. 수치해석방법

3.1 지배방정식

연속방정식과 비정상상태 난류 점성유동을 해석하기 위하여 미끄럼 격자를 사용하는 경우 지배방정식을 Cartesian tensor 로 표현하면 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + s_i \quad (3)$$

여기서 t 는 시간, \sqrt{g} 는 메트릭 텐서의 행렬식, ρ 는 밀도, u 는 속도, 그리고 s_i 는 운동량 소스이다.

위와 같은 비선형 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 이산화하였고, 대류 및 확산항의 처리는 복합도식(hybrid scheme)을 사용하였다. 또한, 난류해석을 위하여 벽함수를 이용한 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였으며, 횡류팬 내의 유동이 정상상태에 도달하는 시점까지 수치해석을 수행하였다.

3.2 설계변수 및 격자계구성

횡류팬의 대표적인 설계 변수와 사용된 좌표계는 Table 1 과 Fig. 2 에 기술하였다. 리어가이더 시작 곡선의 형상을 변경하면서 유량에 따른 차압성능을 실험을 통해 측정하였고, 수치해석을 통해 내부유동과 차압을 비교하였다.

복잡한 횡류팬의 형상은 다중블럭(multi-block) 기법을 이용하여 작성하였으며, 회전체의 비정상해석이 비교적 정확한 STAR-CD⁽⁹⁾를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 격자 생성을 위해 횡류팬의 입구부분, 임펠러, 스크롤(scroll) 역할을 수행하는 리어가이더와 스테빌라이저를 형상화하였다. 이러한 격자 생성은 성능에 대한 설계인자의 상호관계가 큰 횡류팬의 수치해석을 위해 필수적이다.

Table 1 Design parameters of the modeled cross flow fan.

D_2	95mm
β_1	29°
ε_1	5.9mm
θ_2	19°
θ_3	100°

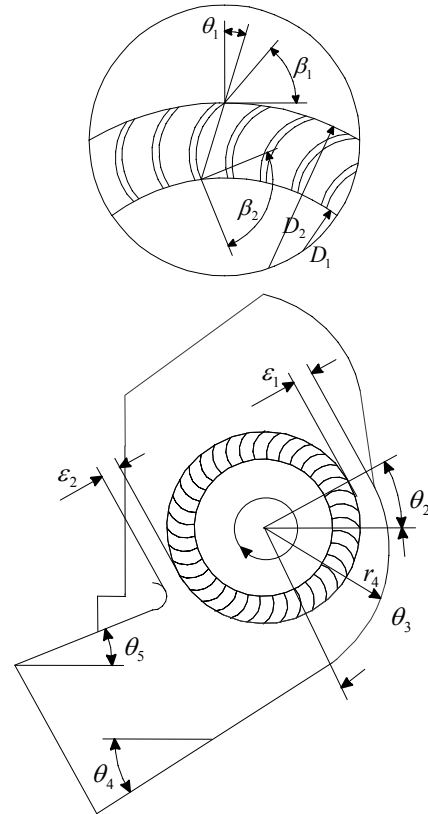


Fig. 2 Design parameters of the modeled cross-flow fan.

유동변화가 급격한 리어가이더와 임펠러 사이의 간극 (ε_1)과 스테빌라이저와 임펠러 사이의 간극 (ε_2)에 조밀격자(enhanced grid)를 적용하였다. 회전하는 임펠러에 대한 비정상 수치모사를 위해 해석 코드에서 제공되는 미끄럼격자(sliding grid)를 이용한 이벤트 모듈(event module)을 사용하였다. 한편, STAR-CD 에서 제공하는 미끄럼격자는 격자의 형태와 수가 변하는 것이 아니고, 오직 시간에 대한 격자의 위치를 변화시키는 것으로 회전을 모사하는 특성을 갖고 있다. 격자계는 횡류팬 내부 유동을 2 차원으로 가정하여 작성하였으며, 전체 격자수는 65,000 개를 사용하였다. 격자수의 변화에 따른 오차를 최소화하기 위해 80,000 개까지 격자를 증가 시켰으나 계산 값의 변화가 없어 본 연구에서는 계산시간을 단축하기 위하여 65,000 개로 하였다 (Fig. 3 참조).

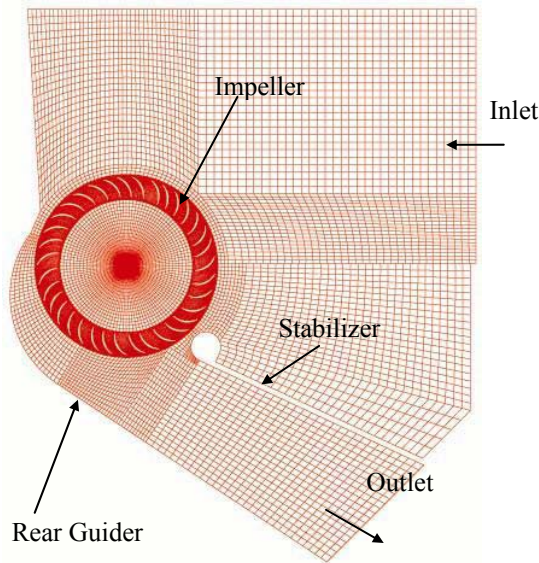


Fig. 3 Grid systems of the modelled cross-flow fan.

3.3 경계조건

수치영역의 입구와 출구는 Fig. 3 에서 볼 수 있는 것과 같이 최대 유량점에서는 압력경계조건 (pressure boundary condition), 그외 유량점에서는 입구조건에 특정 질량 플럭스를 입력하였다. 최대 유량조건에서 입·출구 모두 대기압 조건이 가해지는 횡류팬의 특성상 압력차는 영으로 하였다. 임펠러 내부의 회전영역 격자와 주변의 고정좌표계에 고정된 격자 사이는 경계접착조건을 사용하였으며, 시간이 경과함에 따라 앞쪽의 격자와 맞물리면서 새로운 영역이 연결되도록 하였다. 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였고, 벽면에 수직한 방향으로의 질량유량은 존재하지 않는 것으로 하였다. 또한, 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위해 벽합수를 사용하였다.

4. 실험장치 및 방법

횡류팬의 성능시험을 위해서 ASHRAE 표준에 부합한 전방흡입형으로 실험장치를 구성하였으며 Fig. 4 에 이를 나타내었다. 팬에 의해 발생하는 정압은 실험장치 상류에 위치한 안정실의 정압탭을 통해 측정하였으며, 유량은 실험장치 내에 설치된 노즐 전후의 정압차를 측정하여 경험식을 사용하여 계산하였다. 차압성능 측정 및 유량측정을 위해 micromanometer(FCO510)를 사용하여 압력을 측정하였다. Micromanometer 의 측정오차는 $\pm 0.25\%$ 이며, 유량의 불확도는(uncertainty)는 $\pm 2.83\%$ 이다.

팬 성능실험장치에 장착된 노즐은 정방향 실험 단면의 중심에서 대칭으로 모두 다섯개의 노즐이 설치되어, 유량 변화에 따라 적합한 노즐들이 개

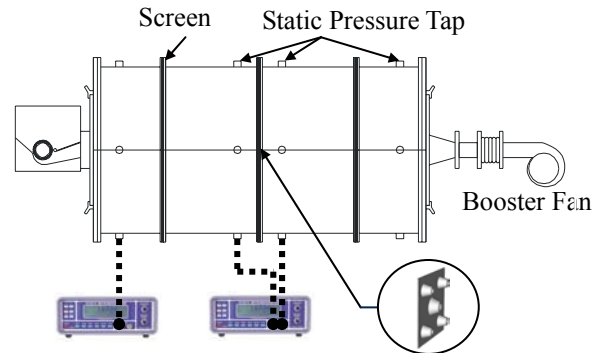


Fig. 4 Schematic apparatus of a fan tester.

방 또는 폐쇄되도록 제작하였다.

팬에 연결된 모터 동력은 회전축에 torquemeter 를 장착하여 측정된 후 이에 회전수를 곱하여 구하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 digital power meter(Yokogawa, WT1000 series)를 사용하여 구동 모터의 작동 동력을 측정된 후 모터의 성능 곡선을 이용하여 이를 보정하였다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 횡류팬의 리어가이더 형상을 변화시켜가면서 횡류팬 내부에서 발생하는 유동 변화를 수치해석과 실험을 통해 고찰하였다.

기존모델로 리어가이더 곡선을 단순 원호를 사용한 형태 중에서 반경 56(R56)에 대한 해석결과를 Fig. 5 에 도시하였다. Figure 5(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 입구 경계면 전체에서 유입이 발생하는 것이 아니라 하단부 일부에서만 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 유동은 임펠러 근처에서의 유동을 자세히 표현한 Fig. 5(b)에서 그원인을 찾을 수 있다. 임펠러 주위에서 유동이 일어날 경우 그림에 표시한데로 두개의 펌프 영역과 두개의 터빈 영역이 발생하게 되는데, 이 중 토출 쪽의 스태빌라이저 근처에 발생하는 영역은 편심 와가 발생하는 영역으로 이의 크기나 위치가 횡류팬의 성능에 미치는 영향이 크다는 것은 주지의 사실이다. 또 하나의 터빈 영역은 본 횡류팬의 전체 유동이 굴곡이 심하여 크게 발생하는 것을 알 수 있는데, 터빈영역에서 발생한 유동이 입구로 다시 토출 됨을 알 수 있다. 이러한 터빈 영역은 성능을 저하시키는 원인이 된다. 또한, 펌프영역으로부터 토출된 유동은 리어가이더의 단순 원호부를 지나 토출측으로 이송되는데, 단순 원호부가 유동에 적합하게 설계되지 않아 정체영역이 발생하며 충돌부가 생김을 알 수 있다. 이러한 충돌 영역은 유동 손실을 유발하며, 리어가이더 압력회복 성능 및 전체 횡류팬의 성능에서 부정적 영향을 미친다.

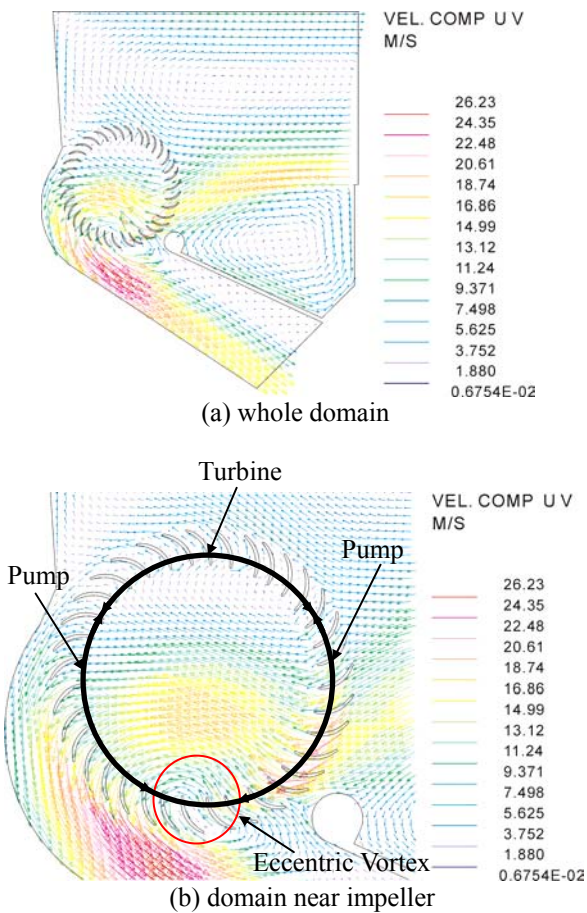


Fig. 5 Velocity vector of a cross-flow fan with R-type.

Figure 6 은 아르키메데스 나선을 이용한 리어 가이드의 유동해석 결과이다. 아르키메데스 나선형에서도 입구 유동에서 토출 유동이 발생하지만 그 양은 반경형과 비교해 볼 때 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 리어가이드 형상 변화로 인해 유입되는 펌프영역이 확대된 결과로, 터빈영역이 줄어들면서 발생하는 현상으로 판단된다. 임펠러를 1 차 통과한 유동은 2 차 토출측으로 이송되며, 2 차 토출 영역을 통과한 유동은 리어가이드 쪽으로 토출된다. 여기서, 토출 유동이 처음 만나게 되는 리어가이드 곡선 시작부를 보면 반경형과는 달리 정채영역이 거의 없으며, 유동이 리어가이드 곡선을 따라서 충돌 없이 흘러가는 것을 알 수 있다. 충돌이 감소한 유동은 손실없이 임펠러에서 받은 에너지를 토출구까지 이송하게 된다. 아르키메데스 나선을 사용한 리어가이드에서 또 하나의 특징적인 결과는 기존 반경형과는 달리 편심와 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 편심와는 횡류웁이 구동되면 필히 발생하는 현상으로 그 크기가 작을 수록, 그리고 스테빌라이저와 가까운 위치에 있을 수록 성능에 유리한 결과가 나온다고 알려져 있다. 반면 두 결과를 비교해 볼 때 편심와의 위치에는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있는데, 위치 변화는

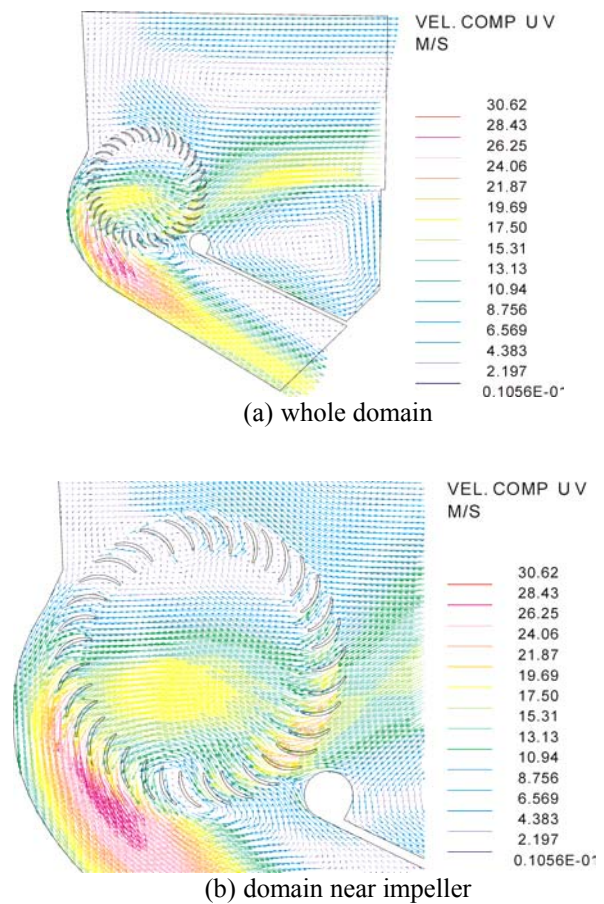
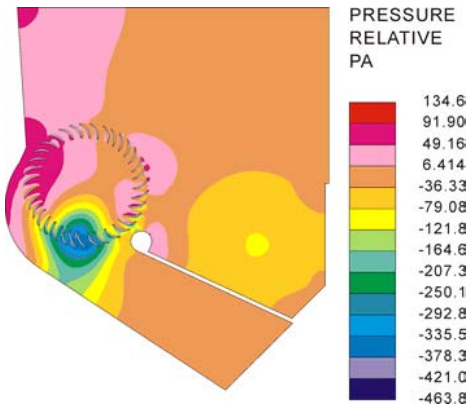


Fig. 6 Velocity vector of a cross-flow fan with Ar-type.

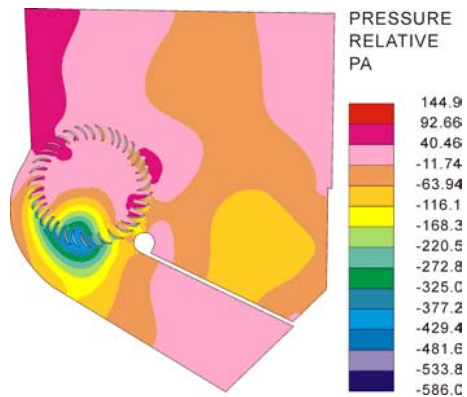
스테빌라이저의 위치변화를 통해 제어가 가능할 것으로 판단된다.

횡류웁 내부 압력분포는 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 정채영역에서 압력이 감소하게 되는데 특히 편심와 부분에서 압력강하가 가장 심하게 발생하는 것을 알 수 있다. 임펠러를 통해 토출된 유동은 편심와를 지나 유동하게 되는데 이부분에서 속도가 가장 빠르게 분포하기 때문에 압력이 낮은 것으로 판단된다. 반경방향으로는 충돌 유동으로 인해 저압영역이 리어가이드 벽면 근처까지 분포하지만 아르키메데스 나선형에서는 편심와 근처에만 분포함을 알 수 있다.

수치해석을 통해 아르키메데스 나선형 리어가이드가 반경형보다 우수한 성능이 나타남을 알 수 있는데, 이를 검증하기 위해 웁 성능장치를 이용하여 성능 시험을 수행하였다. Figure 8 에 도시한 바와 같이 반경형은 반경이 각각 51, 56, 61mm 로 구성된 형태이며, 아르키메데스 나선형은 설계 차압을 고정하고, 설계유량을 4, 5, 6CMM 으로 변경 시



(a) R-type



(b) Ar-type

Fig. 7 Pressure contour of cross-flow fan.

켜가면서 설계한 형상을 이용하였다.

반경형에 대한 성능 시험결과를 살펴보면 유량이 증가하면서 3.6CMM 까지 불안정 영역, 5.13CMM 까지 약간의 불안정 영역이 발생하였다. 반면 Ar4 (4CMM 형)는 3.2CMM 까지 불안정 영역으로 가장 우수한 저유량 운전 특성을 나타냈는데, 이는 시험시 사용된 간극(ϵ_1)이 Ar4의 설계 간극과 동일하기 때문인 것으로 판단된다. Ar5(5CMM 형)와 Ar6(6CMM 형)에는 4와 4.4CMM 보다 큰 유량 범위에서 우수한 차압성능을 갖지만 저유량 영역에서 기존의 반경형보다 좋지 않은 차압성능과 불안정 운전특성을 갖는다.

실험을 통해 구한 횡류팬 효율곡선은 Fig. 9에 도시하였다. 효율곡선에서도 최대 효율점이 가장 저압 영역에 있는 타입은 Ar4 타입으로 저압영역 효율이 다른 타입에 비해 높게 분포함을 알 수 있다. 차압에서와 같이 고유량 영역에서는 Ar5와 Ar6이 높은 효율을 갖지만, 저유량 영역에서는 반경형보다 효율이 낮은 것을 알 수 있다.

6. 결론

- (1) 아르키메데스 나선을 이용한 리어가이더 곡선

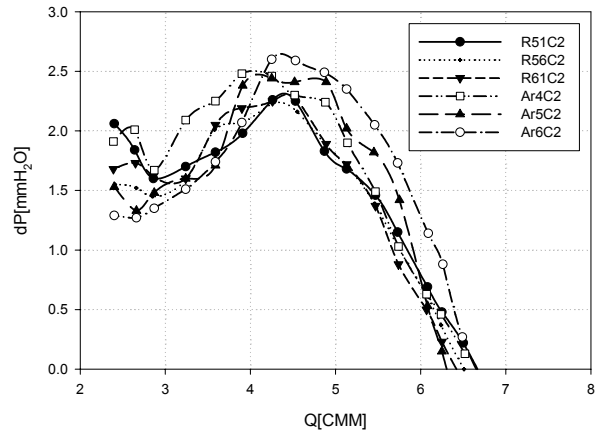


Fig. 8 Static pressure difference versus flow rate.

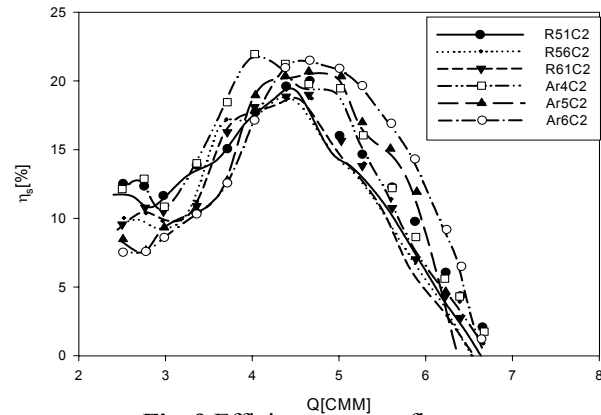


Fig. 9 Efficiency versus flow rate.

의 설계 상관관계식을 정립하였다.

- (2) 설계 상관식에 따라 제작된 형상에 대한 수치 해석과 실험을 수행하여 기존 형상보다 최대 차압이 10% 정도 상승하였으며, 저유량 대역 운전영역에서 불안정성을 해결할 수 있는 설계안을 구축하였다.
- (3) 리어가이더의 곡선 형상으로 아르키메데스 나선을 이용함으로써 유동의 충격손실을 줄여 비정상성을 감소하였으며, 이는 성능 뿐만 아니라 비정상 소음 감소에도 이바지 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Eck, B., 1973, Fans, Pergamon Press, New York.
- (2) Hiromu, T., Yoshinobu, T., Yoshiki, Y. and Koichi, K., 1997, "Visualization Measurement and Numerical Analysis of Internal Flow in Cross-Flow Fan", Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 633-638.
- (3) Bert, P. F., Pessiani, J. F., Combes, J. F. and Kueny, J. L., 1996, "Unsteady Flow Calculation in a Cross-Flow Fan Using a Finite Element Method", ASME 96-GT-443.
- (4) Tohru, F., Cichang, C. and Yoshinori, H., 1995, "A

- Numerical Analysis of Flow in a Cross-Flow Fan”, Numerical Simulations in Turbomachinery, Vol. 227, pp. 53-58.
- (5) Koo, H. M., Choi, W. S., Oh, B. J. and Lee J. K., 1998, “An Experimental Study on the Cross-Flow Fan in Airconditioning Devices: Study on the Influence of Some Basic Design Parameters”, KSME 98S226. (in Korean)
 - (6) Jin, S. W., Lee, J. H., Seo, S. H., Lee, N. Y. and Im, K. S., 1995, “An Experimental Study on High-Flowrate Cross-Flow Fan for Room Airconditioner”, SAREK 95-W-037. (in Korean)
 - (7) Kim, J. W. and Chung Y. Y., 1999, “Experimental Work on Flows by Cross-Flow Fan”, SAREK 99-W-098. (in Korean)
 - (8) Hur, N. K., Kim, W. and Kang, S. H., 1999, “A Numerical Study on Flow through a Cross Flow Fan: Effect of Blade Shapes on Fan Performance”, Journal of Korea Fluid Machinery, Vol. 2, pp. 96-102. (in Korean)
 - (9) CD-adapco, 1999, “STAR-CD Methodology v3.100”, Computational Dynamics Ltd.