

치수효과를 고려한 횡류팬의 작동특성연구

김형섭* · 김윤제**

A Study on the Operational Characteristic with the Scale Effect of the Cross-Flow Fan

H.-S. Kim* and Youn-J. Kim*

Key Words: Scale effect (치수효과), Rearguider (리어가이더), Archimedes spiral (아르키메데스 나선), Cross-flow fan (횡류팬).

ABSTRACT

One of noticeable features in the cross flow fan is that a working fluid passes through impeller blade twice without distinction between the inlet and exit angles. Also, it does produce higher circumferential velocity than other types of blade at the same flow rate in accordance with the application of the forward curved shape. However, a design theory for the cross-flow fan has not yet been formed owing to an eccentric vortex, which is the remarkable characteristics, occurred in a cross-flow fan. Furthermore, the eccentric vortex, which is difficult to control the size and position, is the important cause of performance decrease. In this study, experiments are carried out to estimate the similarity of the cross-flow fan with various scales and rotational velocity changes. Pressure coefficients to flow coefficients with various scales of the cross-flow fan are plotted to the application of the general similarity law of the turbomachinery in the cross-flow fan with Archimedes spiral, which is the important factor having an effect on it.

1. 서론

Mortier에 의해 1892년 고안된 횡류팬은 30개 이상의 블레이드로 구성된 임펠러, 유로의 기하학적 형상이 비교적 단순한 스테빌라이저 (stabilizer)와 리어가이더 (rearguider)로 구성되며, 공기조화 설비 분야 및 에어컨에 많이 장착되고 있다 (Fig. 1 참조).

횡류팬은 축방향 길이가 반경방향에 비해 매우 긴 형상이므로 2차원 유동특성을 가지고 있으며, 열교환

기와 임펠러가 길이 방향으로 나란히 배열됨으로써 시스템을 compact하게 구성할 수 있다. 또한, 임펠러 지름이 제한받을 경우, 축류 및 원심팬과 다르게 횡류팬은 필요한 유량을 얻기 위해 임펠러 지름을 크게 하거나 회전수를 증가시키지 않고 임펠러 길이만을 증가 시킴으로서 필요한 유량을 큰 소음 증가 없이 얻을 수 있다. 횡류팬은 임펠러의 입·출구각을 구분하지 않고 동일한 외경에 대해 유체가 날개를 횡으로 2번 통과 하므로 높은 동압을 발생시키며, 전향깃 (forward blade)의 채용으로 원주 속도가 크지만, 날개의 충돌 손실이 커서 30-40%의 낮은 정압효율을 나타낸다. 그러나 전향깃은 후향깃 (backward blade)과 반경

* 성균관대학교 기계공학부 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yjkim@skku.edu

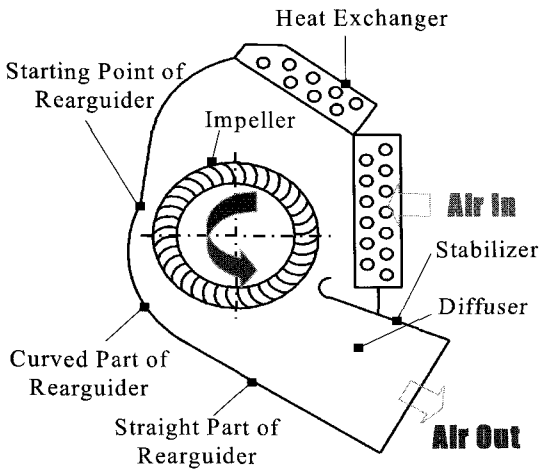


Fig. 1 Schematic of a cross-flow fan

깃 (radial blade)보다 정압효율이 낮을지라도 최고 효율점에서 전압과 풍량이 크므로 소형화에 적합하다. 전향깃의 특성상 동압 대 정압의 비율이 7:3이므로 동압을 정압으로 바꾸는 것이 중요하며, 이 역할을 리어가이더와 스테빌라이저가 수행하므로 다른 유체기계보다 성능에 대한 임펠러의 영향이 상대적으로 작고 스크롤 역할을 하는 리어가이더와 스테빌라이저의 영향이 크다.

횡류팬의 내부 유동이 자유와 (free vortex)와 강제와 (forced vortex)로 존재한다는 사실은 가시화 실험을 통해 Eck⁽¹⁾에 의해 밝혀졌다. 리어가이더 곡선부에서 발생하여 형성되는 유동은 자유와이고, 임펠러와 스테빌라이저 사이의 역류에 의해 발생하는 편심와 (eccentric vortex)는 강제와이다. 특히, 편심와의 위치는 임펠러의 토출영역에서 유출된 유체가 입구로 재순환하는 양을 결정하는 주요 요소이며, 이 재순환이 에너지 손실의 상당부분을 차지하게 되어 횡류팬 효율이 순환되는 역류의 양에 비례하여 저감되는 결과를 초래한다.

횡류팬은 실내 공기를 순환시키는 불박이 서큘레이터 (circulator), 공기 제트의 막을 이용한 건물 입구에서 공기 유동을 차단하는 에어커튼 (air curtain), 공기조화 장치 등에 대한 수요가 증가하고 있지만, 횡류팬 내부 유동의 복잡성과 설계 변수의 상호 연관성이 다른 유체기계보다 크므로 아직까지 형상 설계에 대한 이론적인 접근보다는 실험적인 방법으로 연구가 진행되고 있는 실정이다. Eck⁽¹⁾는 1950년대에 가시화 실험을 통해 팬 내부에 편심된 와류가 존재한다는

사실을 발견하였고, 일반적인 유체기계에서 확립된 이론을 수정 적용하였다. Murata 등^{(2)~(4)}은 횡류팬의 회전수와 직경에 따른 치수효과 (scale effect)에 관한 연구를 수행하였다. 직경과 회전수 변화가 작아 Reynolds 수의 변화가 작은 경우 기존 유체기계에서 사용되는 유량계수와 압력계수의 사용이 타당함을 밝혔다. Lazzarotto 등^{(5)~(7)}은 리어가이더 곡선부에 대수 나선 (logarithmic spiral)을 적용하였으며, 리어가이더의 폭에 따른 임펠러 지름과 회전수 변화가 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 구형모 등⁽⁸⁾은 실험을 통한 횡류팬 설계요소 변경에 따른 성능 특성을 연구하였다. 진심원 등^{(9),(10)}은 설치각 (setting angle)에 의한 성능 변화는 리어가이더의 토출각도 (angle of rearguider)와 밀접한 관계가 있으며, 임펠러의 기하학적 인자 변화에 따른 치수효과에 대해 연구하였으며 지름과 길이에 따른 영향이 큼을 밝혔다.

횡류팬 성능에 영향을 미치는 형상변수가 다양하지만, 일반적으로 임펠러를 가로방향으로 2번 통과한 후 유출된 유체는 리어가이더 곡선부로 토출되므로 곡선부 형태가 횡류팬의 성능 특성에 대부분을 차지한다. 본 연구에서는 아르키메데스 나선 (Archimedes spiral)을 리어가이더 곡선부에 적용한 횡류팬에 대하여 리어가이더와 스테빌라이저의 설계변수를 포함한 횡류팬의 설계 인자를 익현 길이 기준으로 축소, 확대하여 일반적인 유체기계에서 사용되는 상사성이 횡류팬에 적용가능한지를 파악했다.

2. 관련 이론

구조물이나 실물, 원형 (prototype)의 성능을 예측하기 위하여 원형과 모형사이에 반드시 성립하여야 하는 법칙을 상사법칙이라고 하며, 기하학적 상사, 운동학적 상사 및 역학적 상사가 있다.

기하학적 상사란 원형 흐름과 모형 흐름이 기하학적으로 상사한 경계면을 가질 때의 상사흐름이라 한다. 기하학적 상사가 성립되기 위해서는 모형과 실물 사이의 두 흐름에서 서로 대응하는 모든 길이의 비가 일정해야 한다. 또한, 기하학적으로 상사인 두 유동계에서 운동학적 물리량 (변위, 속도, 가속도)의 비가 동일할 경우 운동학적 상사 흐름이라 한다.

두 유동장에서 기하학적 상사와 운동학적 상사가 이루어지는 경우 모든 대응점에 작용하는 결과력은 각 힘들, 즉 점성력, 중력, 압력 등의 방향이 같고 크기의

비가 같을 때 두 흐름을 역학적 상사 유동이라고 한다. 유체력들이 작용하는 두 유동계에서 역학적 상사가 이루어지면 원형과 모형 사이에서 무차원수가 동일하여야 한다. 일반적으로 무차원 변수 1~2개가 같으면 역학적으로 상사조건이 충족된다.

원심송풍기나 축류송풍기 등의 유체기계에서는 일반적으로 상사법칙이 존재한다. 구조적으로 상사성을 갖는 송풍기에서는 성능곡선도 서로 상사가 되며 2개의 성능곡선에서 서로 대응하는 위치 즉, 성능곡선에서의 유량을 각각 Q_1, Q_2 , 전양정을 H_1, H_2 , 축동력을 L_1, L_2 라 하면 2대의 송풍기에서는 다음과 같은 상사법칙이 성립한다.

$$\phi = \frac{Q_1}{A_1 U_1} = \frac{Q_2}{A_2 U_2} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{H_1}{U_1^2/2g} = \frac{H_2}{U_2^2/2g} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{L_1}{A_1 \rho_1 U_1^2/2} = \frac{L_2}{A_2 \rho_2 U_2^2/2} \quad (3)$$

위 식은 각각 무차원수인 유량계수, 압력계수, 그리고 출력계수를 의미한다.

3. 실험

3.1 실험모델

임펠러를 2번 통과하면서 에너지를 공급받는 횡류팬은 유동특성이 매우 복잡하며, 임펠러의 특정 범위에서만 리어가이더로 토출이 이루어지므로 리어가이더 형태가 매우 중요하다. 일반적으로 아르키메데스 나선은 대수 나선보다 최고유량 및 최고 효율점에 있는 유량이 크고, 정압 및 효율이 전 유량범위에서 일정하므로 케이싱의 외류곡선으로는 아르키메데스가 널리 사용된다. 그러므로 본 연구에서는 아르키메데스 나선을 리어가이더 곡선부에 적용하였다.

임펠러와 스테빌라이저 간극을 3.5 mm, 스테빌라이저 설치각은 21°, 그리고 리어가이더 시작부와 임펠러 간극은 6.7 mm로 설계하였다. 에어컨 실내기에 부착된 횡류팬의 임펠러 익현길이 (scale=1)를 기준으로 하여 리어가이더와 스테빌라이저의 설계 변수 및 블레이드 두께를 포함한 횡류팬의 설계인자를 0.74,

Table 1 Design parameters of the modeled impeller and operating conditions.

Impeller diameter	71 mm, 82 mm, 95 mm, 100 mm, 109 mm
Diameter ratio	0.70
Blade angles	$\beta_1=90^\circ, \beta_2=32.5^\circ$
Blade profile	circular arc
Number of blades	35 (uneven pitch)
Chord length	12.2 mm, 14.4 mm, 16.2 mm, 17.1 mm, 18.4 mm

0.86, 1.00, 1.06, 1.15의 비율로 동일하게 축소, 확대하였다. 특히, 벽면영향을 최소화하기 위해 임펠러 지름변화에 따른 길이 변화도 축소·확대 비율에 맞게 제작 구성하였다. 본 연구에 사용된 임펠러의 주요 제원은 Table 1에 기술하였다.

3.2 실험장치 및 방법

치수효과를 고려한 횡류팬의 성능 평가를 위해 미국 공조학회 (ASHRAE 표준 51-75) 규격에 따라 전방흡입형으로 실험장치를 구성하였다 (Fig. 2 참조). 실험장치는 시험팬 장착부, 압력 및 유량 측정부, 유량 조절부, 그리고 각종 계측부로 구성된다. 시험팬 장착부는 팬의 회전수 조절과 입력 전력, 압력 및 유량 측정부는 팬의 압력상승과 유량을 측정하는 부분이다. 압력은 ASHRAE 규격에서 정하는 측정위치에서 압력구멍을 내어 평균값으로 구한다. 유량 조절부는 보조송풍기 (booster fan)가 붙어있는 부분으로 실험

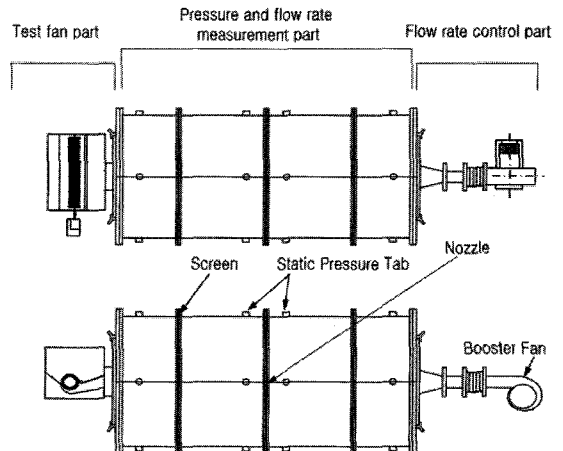


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus.

팬의 유량을 조절하여 주는 곳이다. 팬의 성능곡선을 구하기 위해서는 여러 작동점에 해당하는 유량범위에서의 운전이 필요하다. 이를 위해 보조 송풍기를 이용하여 팬 흡입구의 압력을 조절한다.

횡류팬에 의해 발생하는 차압은 실험장치 상류에 위치한 안정실 (settling chamber)의 정압공을 통해 micromanometer (FCO510, ±0.25%)를 사용하여 압력을 측정하였으며, 유량은 실험장치 중간에 설치된 노즐 전후의 정압차를 측정한 후 실험식을 사용하여 계산하였다 (불확도 ±2.83%).

팬 성능실험장치의 노즐을 모두 개방하고 최대 유량점이 되도록 팬을 구동한 다음 30분 이상 예열하여 실험을 수행하였다. 팬 성능실험장치내 5개의 노즐 제원은 Table 2와 같다. 임펠러는 총 4.5단으로 이루어져 있으며, 리어가이더 제작시 곡선부와 직선부를 별도로 제작하였고, 스테빌라이저 형상은 성능이 우수한 원형으로 제작하였다. 기존에 양산되는 벽걸이형 에어컨의 횡류팬 치수를 1로 기준으로 하여 총 5가지 치수 (scale)에 따라 회전수를 790 rpm, 895 rpm, 1,000 rpm, 1,105 rpm, 1,210 rpm으로 변경하면서 전 운전 유량범위에대하여 실험을 실시하였다. 모든 데이터는 준정상상태 (quasi-steady state)에 도달한 후 1분 동안 발생하는 데이터의 평균값을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

횡류팬의 슬림화로 인해 최근에는 일반적인 유체기계 상사성이 횡류팬에 적용가능한지의 여부가 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나, 횡류팬의 치수효과에 관한 대부분의 연구는 단지 하나의 설계인자, 즉 임펠러 직경 및 임펠러 축방향 길이에 대한 설계인자만을 변경하여 연구를 수행하였으므로 횡류팬의 일반

Table 2 Specifications of five nozzles in fan-tester

Nozzle No.	Diameter [mm]	Flow rate [CMM]	
		minimum	maximum
1	16	0.23	0.42
2	21	0.40	0.72
3	27	0.65	1.15
4	35	1.15	2.00
5	45	1.80	3.20

Table 3 Reynolds numbers with scale and rpm changes in the cross-flow fan

rpm \ scale	1210	1105	1000	895	790
1.15	8,470	7,735	7,000	6,264	5,529
1.06	7,257	6,620	6,000	5,369	4,739
1.00	6,475	5,913	5,350	4,789	4,227
0.86	4,840	4,420	4,000	3,580	3,160
0.74	3,630	3,315	3,000	2,670	2,370

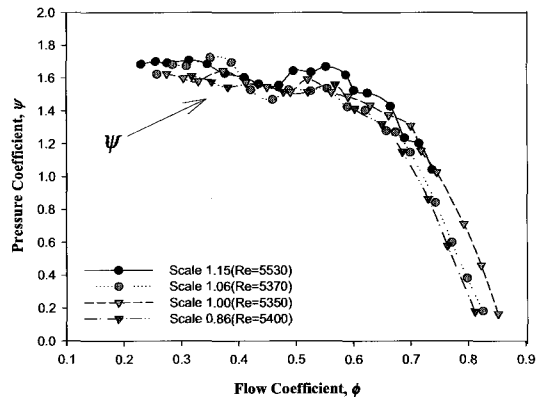


Fig. 3 Pressure coefficients in the cross-flow fan similar to Reynolds numbers.

적인 상사성을 정의하기는 어렵다. 그러므로, 본 연구에서는 리어가이더와 스테빌라이저의 설계변수를 포함한 횡류팬의 설계인자를 치수에 따라 동일하게 축소, 확대하여 설계하였으며, 각 Reynolds 수를 Table 3에 기술하였다.

Fig. 3은 치수에서 회전수 변화에 따라 Reynolds 수가 유사한 횡류팬의 유량계수에 대한 압력계수 분포를 나타내고 있다. Reynolds 수가 5,350~5,500인 경우 유량계수가 0.45의 우측인 고유량 대역에서 치수에 관계없이 압력계수가 약간 증가하다가 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 저유량 대역에서는 유량계수가 감소함에도 압력계수가 1.5에서 1.7사이에 분포함을 알 수 있다. 일반적으로 기하학적 상사란 원형 흐름과 모형 흐름이 기하학적으로 상사한 경계면을 가질 때의 상사흐름을 의미하므로, 무차원화하여 표현된 유량계수와 압력계수가 치수에 관계없이 일정하므로 기하학적 상사, 즉 설계대로 횡류팬의 치수가 동일하게 축소 확대되어 제작되었음을 의미한다.

일반적으로 횡류팬은 역학적 상사는 성립되지 않지

만, 회전수 변화에 따른 상사성은 성립한다. 회전수 변화에 따른 실험을 수행하여 무차원 변수를 사용한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 무차원 변수의 특성상 상사특성이 좋으면 각 회전수에 따라 성능이 일치한다. 치수가 1.00인 횡류팬의 경우, 회전수에 관계없이 압력계수가 유량계수 0.6인 범위까지 일정할 뿐만 아니라 각 지점에서의 압력 변동치가 매우 안정함을 나타냈으며, 유량계수가 0.6 이상에서는 압력계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 횡류팬이 회전수 변화에 따른 상사성이 성립함을 의미한다. 하지만 회전수가 790와 895 rpm인 경우 유량계수가 0.45 근방에서 압력계수가 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

횡류팬은 축류 또는 원심팬과 달리 편심와로 인해 유동특성이 복잡하며 임펠러가 기하학적으로 대칭임에

도 불구하고 토출영역에서의 유동이 비대칭이다. 또한, 리어가이더 형상이 횡류팬의 성능특성에 미치는 영향은 매우 크므로 단면 통과 유속이 통과 유량 증가에 대응하여 순차적으로 설계되는 아크키메데스 나선을 리어가이더 곡선부에 적용하여 횡류팬의 역학적 상사성을 고찰하였다. 회전수를 고정한 채 횡류팬의 치수에 따른 성능 특성을 무차원화하여 Fig. 5에 도시하였다.

회전수가 1,200 rpm인 경우 횡류팬의 치수에 따른 유량계수에 대한 압력계수를 Fig. 5(a)에 도시하였다.

치수가 1.15, 1.06 및 1.00인 횡류팬은 저유량 대역에서 유량계수에 대한 압력계수가 비교적 일정한 경향을 나타냈으며, 각 지점에서의 압력 변동치는 매

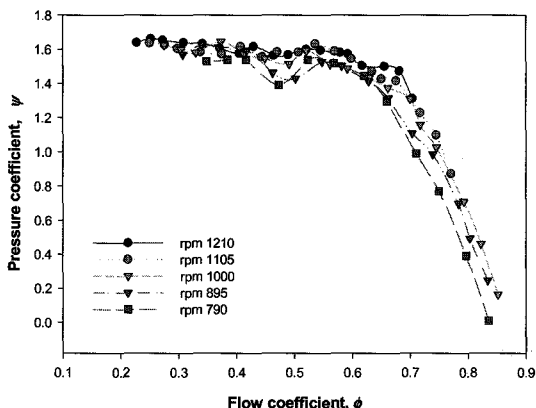
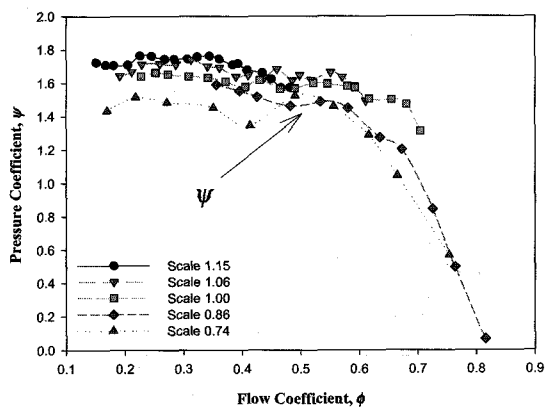
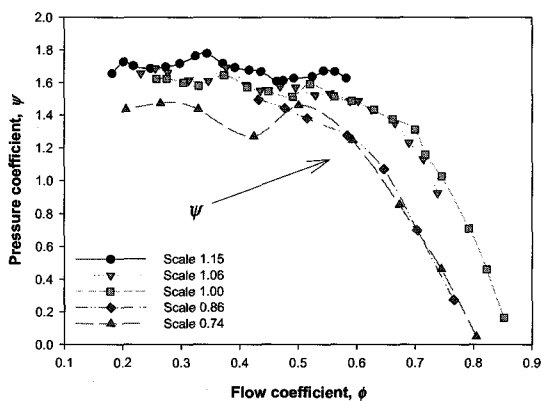


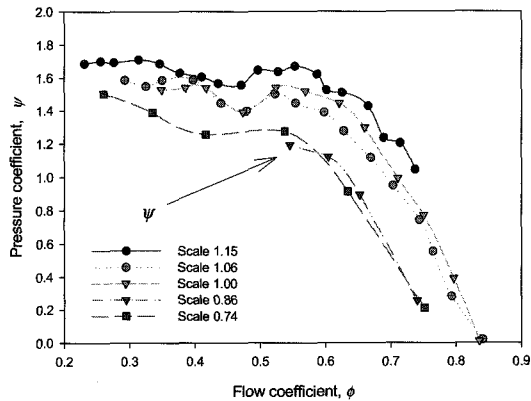
Fig. 4 Pressure coefficients with various rotational velocities for scale=1.00.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Pressure coefficients with various scales and rotational velocities with (a) 1,210 rpm, (b) 1,000 rpm and (c) 790 rpm

우 안정적이었다. 하지만, 고유량 대역에서는 팬 성능 실험장치의 사용범위 제한으로 인해 성능을 파악할 수 없었다. 저유량 대역에서의 압력계수는 1.6에서 1.8 범위 내에 분포하고 있다. 치수가 0.74인 경우 일반적인 경향은 비슷하지만 저유량 대역에서 불안정한 유동영역이 형성되었으며, 압력계수도 낮은 분포를 나타내고 있다. 또한, 0.74에서는 입력 전력이 매우 불안정하였다.

Fig. 5(b)는 회전수가 1000 rpm일 때 횡류팬의 치수에 대한 압력계수 분포를 나타내고 있으며, 회전수가 1210 rpm일 경우와 마찬가지로 1.15, 1.06, 1.00에서는 동일한 경향을 나타내고 있다. 이 경우 Reynolds수는 각각 7,000, 6,000 및 5,350을 나타내고 있으며, 이 범위에서는 횡류팬의 상사성이 성립됨을 알 수 있다. 또한, 0.86과 0.74인 횡류팬은 고유량 대역에서 압력계수가 감소하는 경향이 매우 일치하였다. 회전수가 790 rpm이고 치수 1.00 이상인 횡류팬은 전술한 바와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 0.86과 0.74는 고유량 대역에서 압력계수가 일정하게 감소하지만, 최대 유량계수는 0.77로 감소함을 알 수 있다 (Fig. 5(c) 참조).

아르키메데스 나선을 갖는 횡류팬의 치수 변화에 따라 수행한 연구 중 상사성이 성립되는 Reynolds 수를 Fig. 6에 도시하였다. Reynolds 수의 범위는 4,300 ~ 8,500이며, 유량계수 0.6을 기준으로 하여 좌측에서는 압력계수차가 0.25를 나타냈으며, 우측에서는 0.2 정도의 압력계수차를 나타내었다. 리어가이더 곡선부에 아르키메데스 나선을 적용한 횡류팬은 유량계수가 0.6인 범위까지 압력계수가 일정하게 분포함을 알 수 있으며, 고유량 뿐만 아니라 저유량 대역의 각 지점에서 압력 변동치는 안정된 경향을 나타내었다. 또한, 횡류팬의 상사성이 성립하는 성능 곡선의 오차 범위는 약 15% 이내이다. 그러므로, Fig. 6에 도시한 바와 같이 Reynolds 수가 4,300 ~ 8,500 범위에서는 기존 유체기계에 적용되는 일반적인 상사법칙이 횡류팬에서도 적용 가능한 것으로 판단된다. 본 연구에서 치수가 1.15인 경우 회전수 1,210, 1,105 및 1,000 rpm에서 약 ± 25 rpm이 변동하는 경향을 나타냈으며, 0.86에서는 1,000 rpm 이하, 그리고 0.76에서는 전체 회전수에서 입력 전력이 불안정한 양상을 나타내었다. 이는 임펠터를 회전시키는 모터의 치수를 1.00으로 기준으로하여 설계되었으므로 모터의 가용범위를 벗어났기 때문으로 사료된다.

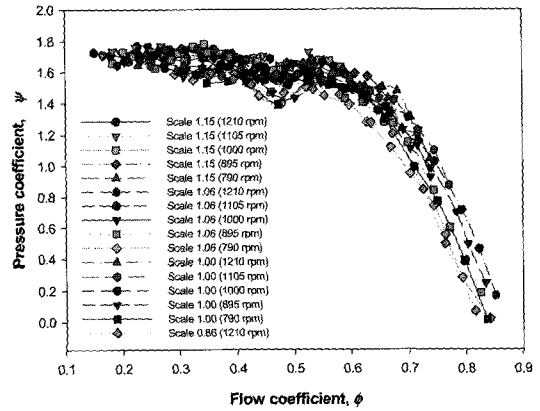


Fig. 6 Pressure coefficients with various Reynolds numbers.

또한, 횡류팬의 임펠러 강도상 문제 때문에 임펠러 두께를 치수가 1.00 이하에서는 동일하게 제작하였으며, 이로 인해 Reynolds 수가 4,300 이하에서는 상사성이 성립되지 않는 것으로 판단되며, 차후 수치 해석적 연구를 통해 이에 대한 보완이 필요하다.

5. 결론

아르키메데스 나선을 갖는 횡류팬에 대하여 리어가이더와 스테빌라이저의 설계변수를 포함한 설계 인자를 익힌 길이 기준으로 축소, 확대하였고, 치수에 따라 회전수를 변경하면서 횡류팬의 상사실험을 수행하였다.

유량계수에 대한 압력계수가 회전수 변화에 관계없이 매우 일정하므로 회전수 변화에 대한 상사성이 성립됨을 알 수 있었다. 단면 통과 유속이 통과 유량 증가에 대응하여 순차적으로 설계되는 아르키메데스 나선을 적용한 횡류팬의 치수 변화에 따라 Reynolds 수가 4,300 ~ 8,500 범위에서는 종래의 무차원 유량계수와 정압계수로 상사법칙이 성립되는 것으로 판단된다. 또한, 저유량 대역에서 비교적 안정한 영역이 형성되었으므로, 아르키메데스 나선은 저유량 대역에서 운전이 가능한 형상으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Eck, B., 1973, Fans, Pergamon Press, New York.
- (2) Murada, S. and Nishihara, K., 1976,

- "An Experimental Study of Cross Flow Fan (1st Report, Effects of Housing Geometry on the Fan Performance)", JSME, Vol. 19, No. 129, pp. 314~321.
- (3) Tanaka, S. and Murata, S., 1994, "Scale Effects in Cross-Flow Fans (2nd Report, Effects of Fan Dimensions on Flow Fields and the Universal Representation of Characteristics)", JSME, Vol. 59, No. 560, pp. 1153~1160.
- (4) Tanaka, S. and Murata, S., 1995, "Scale Effects in Cross-Flow Fans", JSME International Journal series B, Vol. 38, No. 3, pp. 388~397.
- (5) Lazzaretto, A., Toffolo, A., and Martegani, A. D., 2001, "On Cross-Flow Fan Similarity: Effects of Casing Shape", Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 523~531.
- (6) Lazzaretto, A., 2003, "A Criterion to Define Cross-Flow Fan Design Parameters", Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, pp. 680~683.
- (7) Lazzaretto, A., Toffolo, A., and Martegani, A. D., 2001, "A Systematic Experimental Approach to Cross-Flow Fan Design", Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 684~693.
- (8) 구형모, 최원석, 오병재, 이진교, 1998, "공조기기용 횡단류팬에 대한 실험적 연구: 기본적인 설계변수의 영향에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 438~443.
- (9) 진심원, 이진하, 서상호, 이내영, 임금식, 1995, "에어컨용 횡류팬의 고품량화에 대한 실험적 연구", 공기조화냉동공학회, 동계학술발표 논문집, pp. 234~241.
- (10) 진심원, 이내영, 1998, "횡류팬 응용의 실험적 연구", 공기조화냉동공학회, 동계학술발표회논문집, pp. 544~549.