

<논 문>

# 직교류 팬의 설계인자가 성능 및 소음 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study of the Influences of Basic Design Parameters on the Performance and the Noise Characteristics of Cross-flow Fans

구 형 모\*

Hyoung-Mo Koo

(1999년 12월 9일 접수 : 2000년 4월 4일 심사완료)

**Key Words :** 직교류 팬(Cross-flow Fan), 스테빌라이저(Stabilizer), 스크롤 케이싱(Scroll Casing), 토출구(Flow Exit), 성능 특성(Performance Characteristics), 소음 특성(Noise Characteristics), 비소음(Specific Noise)

### ABSTRACT

The cross-flow fans have been widely used to constitute the air moving systems in many air-ventilating and air-conditioning units. The cross-flow fan system has many design parameters which have crucial influence on the performance and the noise characteristics of the units. As a result, there are many difficulties in the design stage of the system and the general design guide has not been sufficiently established yet. This study presents the experimental results of the parametric investigation of some chosen design parameters, which are directly related to the shape of the stabilizer, the profile of the scroll casing, and the diffusion angle of the flow exit. The results are expressed in terms of the fan performance and the specific sound pressure level characteristics. Some parameters have been found to have crucial effects on the system performance/noise characteristics and should be considered with care in the design stage.

#### 기 호 설 명

$BPF$  : 익통과 주파수 (NZ)

$D$  : 팬 직경 (m)

$K_s$  : 비소음 수준 (dB)

$L$  : 직교류 팬의 축방향 블록 길이 (m)

$N$  : 팬 회전수 (rps)

$\Delta P_t$  : 전압 상승 (Pa)

$Q$  : 체적유량 ( $m^3/sec$ )

$Re$  : 팬 레이놀즈 수 ( $Re = \frac{\pi N D^2}{\nu}$ )

$SPL$  : 음압 수준 (dB)

$T$  : 팬 토크 (kgf·cm)

$Z$  : 팬 날개 수

$\phi$  : 유량 계수

$\psi$  : 전압 계수

$\eta$  : 팬 전압 효율

$\nu$  : 공기의 동점성계수( $m^2/s$ )

$\epsilon$  : 스테빌라이저와 직교류 팬 끝단 사이 거리 (mm)

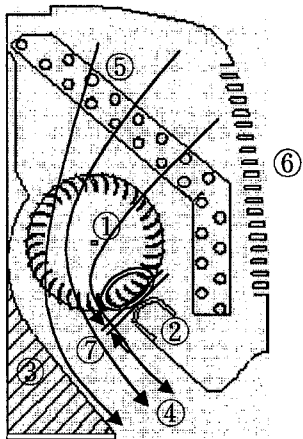
### 1. 서 론

최근 공조기기 제품의 개발 추세는 제품의 크기를 축소 하고 에너지 효율을 향상시키는 방향으로 진행되고 있다. 이는 필연적으로 제품을 구성하는 각 요소 부품의 부하를 증가시키는 결과를 가져오며 이와 동반하여 제품에서 발생하는 소음이 증가한다. 따라서 공조기기의 주된 소음원 중

\* 정회원, 삼성전자 냉공조사업부, 에어컨개발팀

의 하나인 팬의 저소음화가 요구되며 이를 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

가정용 공조기기인 분리형 에어컨에 사용되는 직교류 팬은 팬 원주 상에 다수(30~40)의 날개가 전향 깃의 형태로 부착된 원심식 팬으로서, 유체가 팬을 두 번 통과하는 형태의 유선을 구성하기 때문에 횡단류 팬 또는 접선 팬(tangential fan)이라고도 불린다(Fig. 1). 이러한 유선의 형태는 직교류 팬을 축류팬이나 일반 원심 팬과 구분짓는 공기역학적인 원인이며 일반적으로 다른 종류의 팬에 비해서 낮은 효율을 갖기 때문에 널리 사용되지는 못하였다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 축방향의 유동이 거의 없고, 팬의 직경이 일반 원심 팬에 비해서 작으며, 축방향 길이만을 변경함으로써 유량을 조절할 수 있는 특징을 갖기 때문에 근래에는 가정용 또는 산업용 공조기기에 널리 사용되고 있다. 직교류 팬은 Fig. 1에서 나타나 있듯이 팬 주위에 스테빌라이저와 스크롤 케이싱등으로 덕트를 구성하여 사용하므로 다양한 설계 인자를 가지고 있다. 따라서 팬의 저소음화가 요구되는 최근의 개발 과정에서 이들 설계 인자의 변화에 의한 성능 최적화와 소음의 저감화 연구가 제품의 설계 단계에서 필수적인 부분이 되고 있다. 그러나 팬 자체는 물론이고 주변 덕트 부품까지를 포함하는 다양한 설계 인자의 존재로 인하여 최근까지의 연구 결과로서도 초기 디자인 단계에서 요구되는 설계 사양을 확정할 수 있는 기초적인 데이터가 부족하고 일반적인 설계 방법이 확립되어 있지 못하다.



- |                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| ① Cross-flow fan | ⑤ Heat exchanger                    |
| ② Stabilizer     | ⑥ Inlet grill                       |
| ③ Scroll casing  | ⑦ Fan-stabilizer gap ( $\epsilon$ ) |
| ④ Flow exit      |                                     |

Fig. 1 Schematic cross sectional diagram and the flow streamlines of the cross-flow fan system of the indoor unit of the split type room air-conditioner.

직교류 팬에 대한 연구는 가정용 공조산업이 발달되어 있는 일본과 한국 등지에서 비교적 활발하게 이루어지고 있다. Matsuki등<sup>(3)</sup>은 여러 형태의 에어컨 구조에서 직교류 팬 주위의 유동을 측정하는 실험적인 연구를 수행하였고, Fukano<sup>(4-6)</sup>는 다양한 실험을 수행하여 팬의 날개, 스테빌라이저의 축방향 형상 및 케이싱의 형태에 의한 성능과 소음특성의 변화를 연구하였다. 국내에서는 서상호등<sup>(7)</sup>이 스테빌라이저의 단면 형상이 소음 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 진심원등<sup>(8)</sup>은 에어컨에 장착된 직교류 팬 시스템의 내부유동을 측정하였다. 그러나 이상과 같은 다양한 연구 결과에도 불구하고 현재까지도 실제적인 관점에서 직교류 팬 시스템을 설계하기에 필요로 하는 기초적인 데이터가 부족한 실정이다.

이상과 같은 이유로 본 연구에서는 직교류 팬과 주변 덕트 부품들(스테빌라이저, 스크롤 케이싱 및 토출구 각도)을 개별적으로 변화시켜 가며 이들의 설계인자가 직교류 팬의 성능과 소음특성에 미치는 영향을 실험적으로 파악하고 이를 정성적으로 데이터 베이스화하여 실질적으로 최적의 시스템을 구성하는 방법을 설명하고자 한다.

## 2. 실험장치

본 연구에서는 팬의 성능측정을 위해서 ASHRAE standard(51-1985, laboratory methods of testing fans for rating)에 의거한 토출식 성능시험장치를 사용하였고, 이 장치의 끝에 직교류 팬 시스템을 모사하는 실험장치를 부착하였다(Fig. 2). 이 실험장치는 직교류 팬의 주요구성부품(팬, 스크롤, 및 스테빌라이저) 등을 부착할 수 있으며, 필요에 따라서 스테빌라이저와 스크롤 케이싱 또는 토출구를 바꿔서 설치할 수 있도록 제작하여 다양한 형상을 시험할 수 있도록 하였다. 또한 토출구의 각도를 변화시킬 수 있도록 팬과 스테빌라이저 사이의 거리가 일정한 상태에서 스테빌라이저가 부착되어 있는 토출구 상면이 회전할 수 있으며, 팬의 상류 측에는 스크린을 설치하여 시스템 저항을 부과할 수 있도록 구성하였다(Fig. 3). 실험에 사용된 직교류 팬은 날개 수 35 개, 날개의 부착각이 27°이며, 직경이 35 mm이고 전체 길이는 네 개의 블록으로 구성되어 있다. 또한 BPF 성분소음을 저감하기 위하여 각 블록의 날개가 인접한 블록의 날개와 반피치 잇갈려 제작되었다. 여기에서 직교류 팬의 피치는 날개 사이의 평균 각이며 본 연구에서 사용된 팬의 경우  $360^\circ/35 \approx 10.3^\circ$ 이다. 그리고 팬의 회전축에 두개의 커플링을 이용하여 서보모터(TOEI, 0.4 kW, 4000 rpm)와 토크메타(ONOSOKI, 5 kgf-cm)를

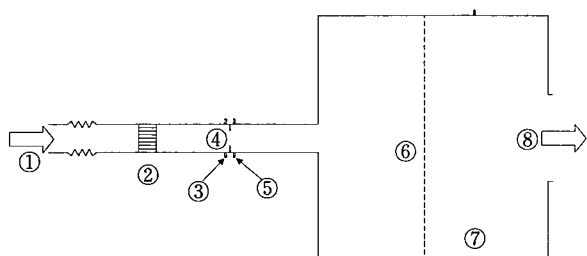
연결하여 팬의 회전수를 조절함과 동시에 토크를 측정하여 공기역학적 효율을 계산하였다. 팬의 성능은 무차원 양인 유량계수,  $\phi$ , 압력계수,  $\psi$ , 및 효율,  $\eta$  등으로 표현하며 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{Q}{\pi N D^2 L} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{\Delta P_t}{\rho N^2 D^2 / 2} \quad (2)$$

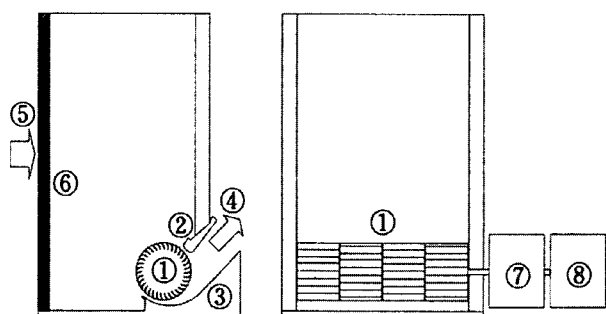
$$\eta = \frac{Q \cdot \Delta P_t}{2\pi T N} \quad (3)$$

여기에서  $L$  은 직교류 팬의 축방향 길이를 표시하며  $T$  는 팬의 토크를 의미한다.



- ① Flow from auxiliary(booster) fan and damper
- ② Honeycomb section
- ③ Ppstream pressure hole of the nozzle
- ④ Nozzle(80 mm)
- ⑤ Downstream pressure hole of the nozzle
- ⑥ Screen
- ⑦ Sstatic pressure hole
- ⑧ Flow towards plenum of the indoor unit(Fig. 3)

Fig. 2 Apparatus used to measure the performance characteristics of the cross-flow fan system



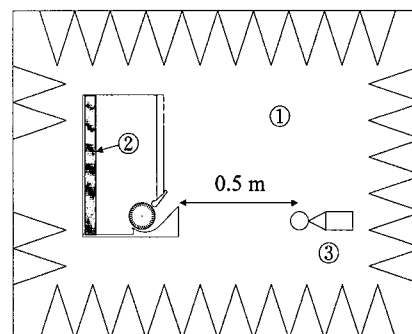
- ① Cross-flow fan
- ② Stabilizer
- ③ Scroll casing
- ④ Flow exit
- ⑤ Flow from the fan tester(Fig. 2)
- ⑥ Screens
- ⑦ Torque meter
- ⑧ Servo-motor

Fig. 3 Plenum to simulate the cross-flow fan system

실험장치의 소음은 암소음과 cut-off 주파수가 각각 15 dB와 125 Hz인 5m×5m×3m 크기의 무향실에 Fig. 3의 실험장치를 설치하여 측정하였다(Fig. 4). 이 경우에 서보 모터와 토크메타에서 발생하는 기계적 소음의 영향을 제거하기 위하여 동일한 실험 장치에 에어컨의 실내기에 사용되는 저소음 교류모터를 부착하여 이용하였다. 이 때 모터에서 발생하는 기계적 소음값은 실험에서 측정하고자 하는 소음수준에 비해서 무시될 수 있었으며 회전수는 PID (proportional integrated differentiation) 제어를 통하여 원하는 값에 일정하게 고정되었다. 또한 모든 소음값은 실험장치의 후방 50 cm 지점에 B & K 1/2" 마이크로폰을 설치하여 그 신호를 B & K 2032 파형 분석기를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 측정된 직교류팬의 소음값을 측정이 수행된 작동점의 송풍능력에 무관하게 비교될 수 있도록 다음과 같은 비소음값( $K_s$ )으로 변환하여 표현하였다<sup>(4)</sup>.

$$K_s = SPL - 20 \log(\Delta P_t^2 Q) \quad (4)$$

비소음,  $K_s$ 는 크기가 서로 다른 팬들간 또는 동일한 팬에 대해서는 상이한 작동점간의 소음을 비교할 때 유용하며 식 (4)에서와 같이 사용되는 단위에 따라서 달라질 수 있는 값이다. 본 연구에서 소음의 측정은 성능곡선상의 최대압력점 우측의 영역에 국한해서 수행하였다(Fig. 6). 이곳은 팬의 안정적인 동작이 이루어지기 때문에 일반적으로 작동점(operating point)이 설정되는 영역이다. 또한 모든 실험은 회전수 1000 rpm에서 수행하였고 이 때의 팬직경에 기초한 레이놀즈 수는 27,000이다.



- ① Anechoic chamber (5 m×5 m×3 m)
- ② Screens
- ③ B&K 1/2" microphone

Fig. 4 Anechoic chamber to measure the noise level of the cross-flow fan system

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 스테빌라이저의 영향

스테빌라이저는 직교류팬 유동장 내에서 편심와(eccentric vortex)의 위치를 고정시켜 주어서 팬의 비정상작동을 방지하고 유동을 안정시키는 역할을 하는 중요한 덕트 부품이다(Fig. 1). 이 스테빌라이저는 직교류 팬의 압력 상승, 효율의 결정에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라 특정 주파수(또는 익통과 주파수) 소음 성분의 발생에 기여를 하기 때문에 다양한 모습의 단면과 축방향 형상에 대한 연구가 수행되었다<sup>(4,5)</sup>. 그러나 공조기기의 직교류 팬 시스템 설계와 제작에서는 가능한 한 단순한 형상의 스테빌라이저가 선호되기 때문에 본 연구에서는 Fig. 5의 flat, upper/lower wedge 및 concave/convex의 다섯 가지 단면 형상을 선정하여 성능과 소음 실험을 수행하였다. 특히 스테빌라이저와 직교류팬 사이의 최단 거리,  $\epsilon$  (Fig. 1)이 중요한 설계 변수이나 본 연구에서는 이 거리를 5.5 mm ( $\epsilon/D \sim 0.058$ )로 일정하게 유지되도록 스테빌라이저를 설치하여  $\epsilon$ 에 따른 성능과 소음의 변화가 없도록 하였다.

Fig. 6(a)의 성능곡선 측정 결과를 보면 앞서 설명한 바와 같이 스테빌라이저의 형상은 직교류팬의 압력성능에 매우 큰 영향을 가짐을 알 수가 있다. 특히 압력성능에서는 upper wedge 형상의 압력상승이 상대적으로 크다는 것을 알 수가 있다. 그러나 공조기기를 설계함에 있어서 더욱 고려되는 것이 소음 특성이다. Fig. 6(b)에서 upper wedge 형상의 소음특성을 보면 소음값(SPL)과 비소음이 동시에 높은 것을 알 수 있다. 이와는 반대로 lower wedge 형상의 스테빌라이저는 소음값은 낮으나 상대적으로 낮은 압력성능으로 인하여 오히려 높은 비소음값을 갖는다. 따라서 송풍능력이 고려된 비소음값의 결과로 판단하면 flat, concave 및 convex 형상을 선택할 수 있으나 성능과 효율을 고려하면 concave와 convex 형상이 상대적으로 우수하다고 판단된다. 그러나 설계 후의 제작성을 역시 고려한다면 convex 형상이 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

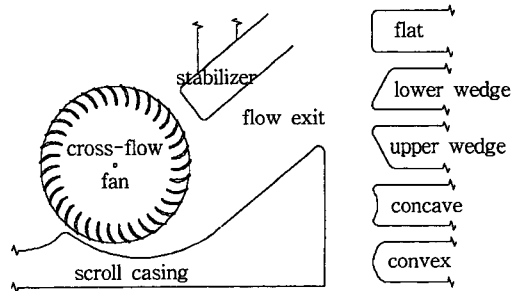
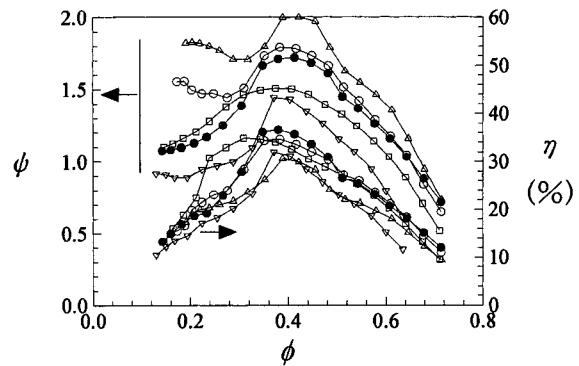
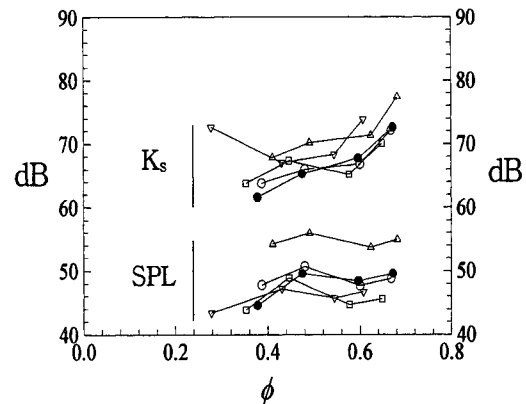


Fig. 5 Various shapes of stabilizers



(a) Performance characteristics



(b) Noise characteristics

Fig. 6 Performance and noise characteristics with various stabilizer shapes(□ : Flat ; △ : Lower wedge ; ▽ : Upper wedge ; ○ : Concave ; ● : Convex)

이상의 결과들을 고려하여 스크롤 케이싱과 토출구 각도의 영향에 대한 이 후의 실험은 스테빌라이저의 단면을 원호로 구성된 convex 형상을 선정하여 수행하였다.

#### 3.2 스크롤 형상의 영향

스크롤케이싱(이하 스크롤이라 칭함)은 직교류 팬의 출구로부터 토출되는 공기의 흐름을 system 토출구로 향하게 방향을 변경해 주며 유동의 운동에너지를 압력에너지로 변환시키는 일종의 확산기(diffuser)역할을 한다. 본 연구에서는 팬 출구로부터 시스템의 토출구까지의 영역을 스크롤 부분과 토출구 부분으로 구분하여 연구를 수행하였다. 이는 직교류 팬 시스템을 설계할 때 제작상 이 두 영역은 서로 구분되어 설계하는 것이 일반적이기 때문이다. 본 연구에서 고려된 스크롤은 원호의 일부로 구성하였고, 그 반경은 각각 90 mm, 76 mm, 67 mm, 61 mm 및 56 mm이다(Fig. 7). Fig. 8(a)의 성능측정 결과는 스크롤의 반경이 작을수록 즉 급격한 확대가 이루어질수록 압력성능과 효율이 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 확대형 스크롤에서의 압력

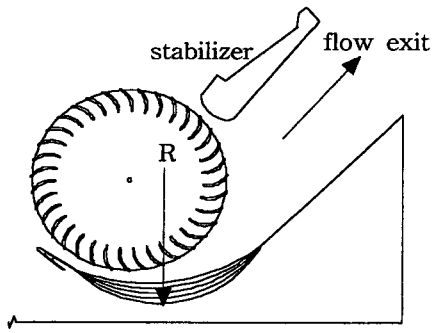
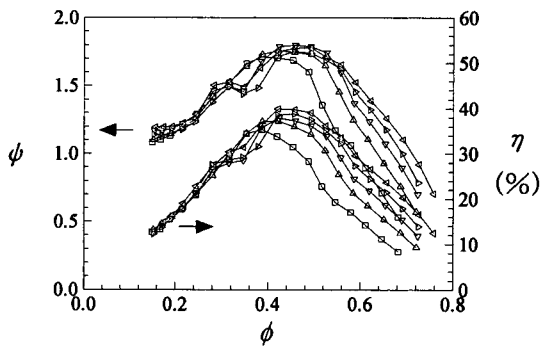
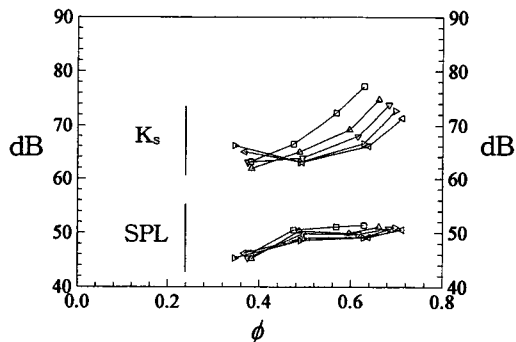


Fig. 7 Various shapes of scroll casing



(a) Performance characteristics



(b) Noise characteristics

Fig. 8 Performance and noise characteristics with various scroll shapes. (□: R=90 mm; △: R=76 mm; ▽: R=67 mm; ▷: R=61 mm; ◁: R=56 mm)

변환이 효율적으로 진행되는 것을 의미한다. 특이한 점은 토출구 덕트를 고정시킨 상태에서 중간의 스크롤만을 변경함으로써도 큰 성능향상을 기할 수 있다는 점이다. 이는 앞서 설명한 대로 공기 토출영역을 스크롤과 토출덕트의 두 영역으로 구분하여 개발하는 방법이 불합리한 것은 아니라는 것을 의미한다. Fig. 8(b)의 소음측정 결과를 보면 전 절의 스테빌라이저의 경향과는 반대로 높은 압력성능을 갖는 스크롤이 낮은 비소음을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 스테빌라이저의 경우와는 반대로 스크롤은 압력을 높여줌과 동시에 효율이 향상되기 때문이라고 판단된다. 그러나

유체기계에서 발생하는 소음과 공기역학적인 효율과의 관계는 현재까지 명확하게 규명되어 있지는 못하다. 결론적으로 직교류 팬에 있어서 요구되는 송풍능력 하에서 낮은 소음을 유지하기 위해서는 스크롤부의 확산을 상대적으로 증가시키는 것이 필요하다. 또한 높은 유량 영역으로 갈수록 스크롤의 변화에 따른 비소음의 차이가 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 물론 성능곡선으로부터 유추할 수 있지만 유량이 클수록 스크롤에 따른 변화가 심하며 높은 유량영역에서 작동점이 설정되는 경우에 스크롤의 형상을 변경하여 소음값을 저감할 수 있다는 것을 의미한다.

### 3.3 토출구 형상의 영향

직교류 팬의 토출구는 상류의 스크롤에 연결되어 연속적으로 운동에너지를 압력에너지로 변환시켜주는 확산기 역할을 수행한다. 본 연구에서 사용한 실험장치(Fig. 3)에 일정한 형상의 스크롤을 사용하고 원형의 단면을 갖는 스테빌라이저가 부착되어 있는 상면을 회전시켜가며 성능과 소음특성의 변화를 연구한다(Fig. 9). 이 때 스테빌라이저의 헤드를 팬을 원점으로 한 반경 53mm 원주상의 세 점(P1:30°, P2:39°, P3:50°)에 설치하고 상면을 회전시켜서 각각의 경우에 토출구의 확산각을 변화시킨다. 이 경우 토

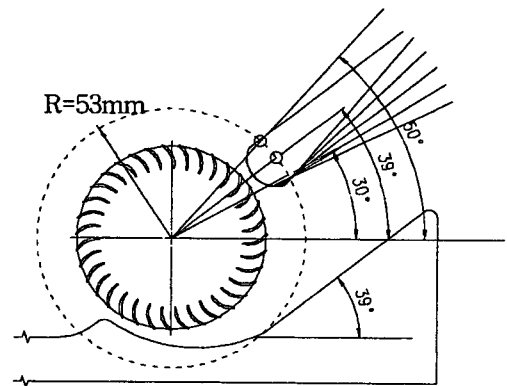
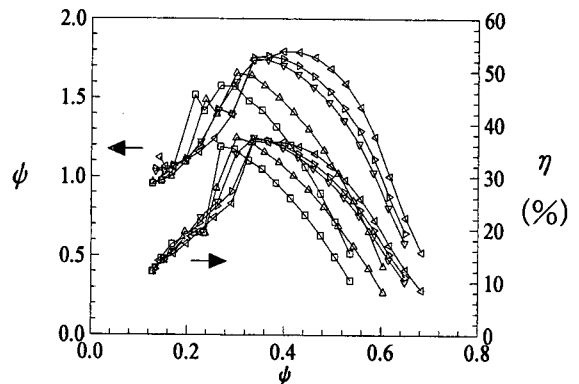
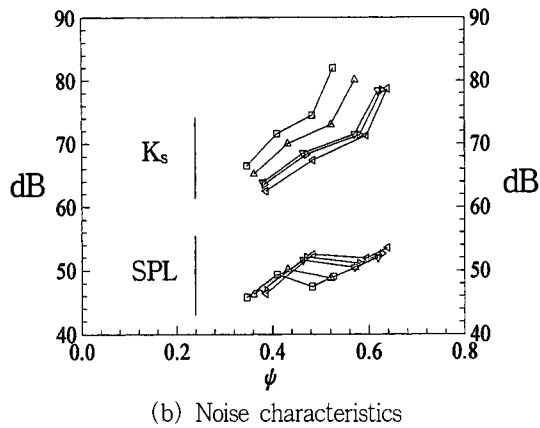


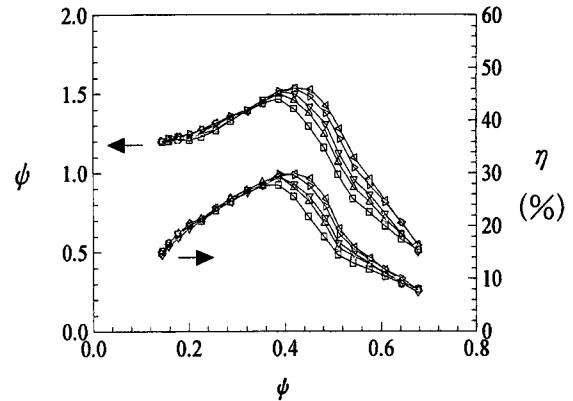
Fig. 9 Various shapes of flow exits



(a) Performance characteristics

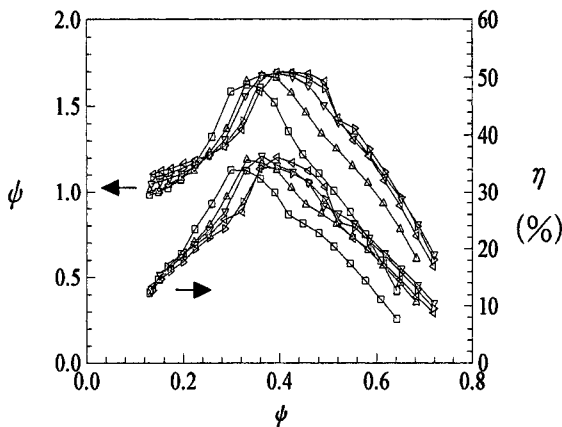


(b) Noise characteristics

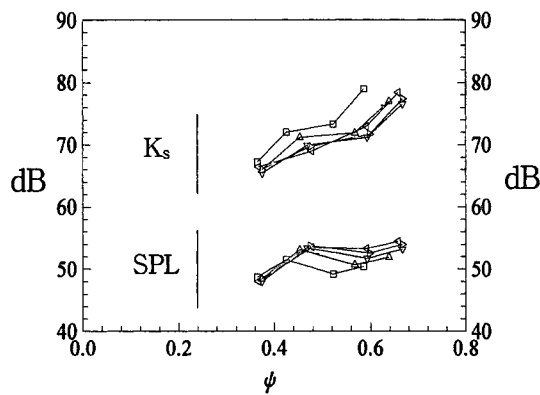


(a) Performance characteristics

Fig. 10 Performance and noise characteristics with various flow exit(30°). (□: -8.2°; △: -5.4°; ▽: 0°; ▷: 2.7°; ◁: 8.2°)

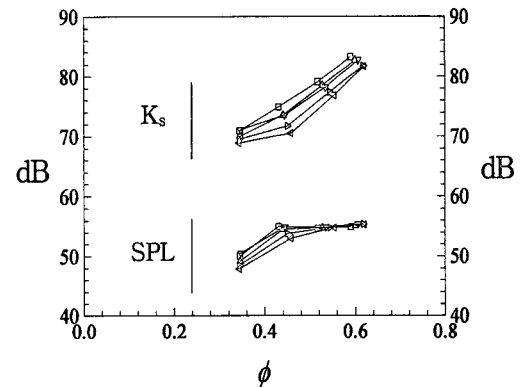


(a) Performance characteristics



(b) Noise characteristics

Fig. 11 Performance and noise characteristics with various flow exit(39°). (□: -8.8°; △: -4.4°; ▽: 0°; ▷: 4.4°; ◁: 8.8°)



(b) Noise characteristics

Fig. 12 Performance and noise characteristics with various flow exit(50°). (□: -2.8°; △: -0.9°; ▽: 0°; ▷: 8.4°; ◁: 12.2°)

출구의 입구를 스크롤의 끝과 밀면이 만나는 지점에서 스테빌라이저가 위치해 있는 상면까지의 수직거리라고 정의하면 각각 45 mm, 55 mm, 및 67 mm이며 상면 회전각 변화 범위는 각각 -8.2°~8.2°, -8.8°~8.8°, 및 -2.8°~12.2°이다. 또한 스크롤 시작점으로부터 반시계방향으로 상면의 스테빌라이저까지의 영역을 직교류 팬의 토출영역으로 정의하면 각각 147°, 156°, 및 168°로 구성된다.

Fig. 10, 11, 및 12는 위의 세 가지 경우에 대한 압력성능과 효율을 보여 준다. 우선적으로 알 수 있는 것은 토출구 영역이 큰 P3의 경우에 토출구의 확산각의 변화에 대한 성능 및 소음의 변화가 작다는 것을 알 수가 있다. 특히 최고 압력점 좌측의 불안정 영역에서조차 성능과 소음의 변화가 작은 경향을 보여 준다. 또한 소음 측정 결과를 비교해 보면 앞 절 스크롤의 결과에서 설명한 바와 같이 높은 유량 영역으로 갈수록 압력성능의 차이가 커지고 이에 따라서 비소음값 차이 역시 증가하는 현상이 토출구가 넓어질수록 감소하는 현상을 알 수가 있다.

이상의 세 가지 경우의 소음값과 비소음값을 서로 비교해보면 동일한 무차원 압력성능 조건하에서 소음값이 낮은 경우는 팬의 토출 영역이 좁고( $P1, 147^\circ$ ) 토출각이 큰 형상( $8.2^\circ$ )이라는 것을 알 수가 있다. 이는 직교류 팬 시스템은 스크롤뿐만 아니라 토출구에서도 충분한 확산이 필요하다는 것을 의미하며, 직교류 팬의 토출영역 크기에 따른 스크롤과 토출구의 최적 확산 비율이 존재할 것이라고 추정된다.

#### 4. 결 론

이상 직교류 팬 시스템에 대한 성능과 소음특성에 대한 실험적인 연구의 결과로서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 비소음수준을 고려할 때 직교류 팬의 스테빌라이저는 convex 또는 concave 형상이 유리하다

(2) 스크롤은 제품의 주어진 크기 한계 내에서 충분한 확산을 할 수 있도록 구성해야 높은 압력과 낮은 소음값을 유지할 수 있다.

(3) 직교류 팬 시스템의 토출덕트 형상은 토출영역의 입구를 좁게 하고(본 연구에서는  $147^\circ$ ) 충분한 확산각(본 연구에서는  $8.2^\circ$ )을 갖도록 구성해 주어야 비소음값을 낮게 할 수 있다.

(4) 높은 압력 성능조건하에서 소음을 낮추기 위해서는 스테빌라이저의 형상을 개발하는 것보다는 스크롤과 토출덕트의 최적화가 더욱 효율적이다.

(5) 성능과 소음을 고려하여 직교류팬 시스템을 개발할 때 스크롤과 토출덕트 간의 확산 비율에 대한 최적 설계가 이루어져야 할 것이며 이에 대한 연구는 추후 진행될 예정이다.

본 연구에서 얻은 수치적 값들은 물론 실험에 사용된 실험장치와 실험 범위 내에서 얻어진 값들이나, 상이한 시스템을 구성할 때에도 본 연구의 정성적 결과를 고려하여 각 설계인자의 최적화를 도모할 수 있으리라고 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) Bruno Eck, 1973, FANS, Pergamon Press, New York
- (2) Inoue et al., 1988. Turbo Fans and Compressors, Corona, Tokyo.
- (3) Matsuki K., Shinobu Y., Takushima A. and Tanaka S., 1988, "Experimental study of internal flow of a room air conditioner incorporating a cross-flow fan," ASHRAE Transactions, Vol. 94, Pt. 1, pp. 350~364.
- (4) Fukano et al., 1992, "A Study on the Noise Reduction of the Cross Flow Fans (1st Report: Effects of the Shapes of Stabilizer and the Fan Blades)," Turbo-machinery, Vol. 20, No. 8, pp. 22~28.
- (5) Fukano et al., 1993a, "A Study on the Noise Reduction of the Cross Flow Fans (2nd Report: Effects of the Shapes of Stabilizers)," Turbo-machinery, Vol. 21, No. 6, pp. 28~35.
- (6) Fukano et al., 1993b, "A Study on the Noise Reduction of the Cross Flow Fans(3rd Report: Effects of Scroll Shapes)," Turbo-machinery, Vol. 21, No. 8, pp. 16~22.
- (7) 서상호, 이내영, 이진하, 진심원 및 임금식, 1995, "룸에어컨 소음저감을 위한 Stabilizer에 관한 연구," 한국소음진동공학회 1995년도 추계학술대회 논문집, pp. 136~141.
- (8) 진심원, 이진하, 서상호, 이내연 및 임금식, 1995, "에어컨용 횡류팬의 고품량화에 대한 실험적 연구," 공기조화 냉동공학회 1995년도 추계학술대회 논문집, pp. 234~241.