

## 고 흡입저항을 가진 원심 송풍기

김재원\*

### Centrifugal Blower with High Inlet Resistance

Jae-Won Kim\*

*Key words* : Centrifugal Fan (원심팬), Air Purifier (공기 정화기), Scroll Casing (스크롤 케이싱), Cut-Off (설부), Air Filter (공기 필터)

#### ABSTRACT

Comprehensive study on a centrifugal blower for air-purifier involving a few physical filters for percolation process has been accomplished for an optimal design of the air handling system. The filtering media causes a flow resistance for induced flows by a rotating impeller. The present methodology is to adopt PIV system for velocity measurements and wind tunnel connected with an anechoic chamber for total performance test of the blower. Trial prototypes for the blades of a rotor and casing are presented for satisfaction of both flow rate and noise level set by design objectives. Tapered blades with a special casing for a fan show good performance data. The results of velocity fields also explain the reason of improvements of the blower performance.

#### 1. 서 론

인간의 삶의 개선과 고급화 욕구에 의해 쾌적한 주거환경과 업무환경을 조성하고자 고급 공조기에 대한 관심이 높아졌다. 본 연구는 공조 산업의 중요한 한 축인 공기 질의 개선에 관한 장치인 공기정화 시스템의 개발에 관한 연구이며, 구체적으로는 공기 정화 장치에 채택되는 공기 정화용 필터 박스와 그 정화 장치에 연결된 송풍기에 관련된 공기 역학적 현상에 대하여 논하고자 한다. 이 연구 대상은 기존의 원심형 송풍기와는 매우 다르게 입구 측에서 공기 정화 장치에 의해 매우 큰 정압이 대두되므로 그 요구 성능과 소음을 모두 만족시키는 송풍기의 개발이 매우 곤란한 경

우이다. 또한 이에 관한 공학적 자료도 축적되어진 것이 미비하여 입구 정압이 대기압인 기존의 송풍기 설계 개념과는 크게 다른 상황이다.

본 연구의 대상이 되는 원심형 송풍기는 주로 시로코 팬 (Sirocco fan)을 많이 채택하며 이 공기 공급 장치는 고 유량과 고 효율에 적합한 팬으로 널리 활용되고 있다<sup>(1-2)</sup>. 이 원심 팬은 가정용 에어컨 및 가전제품, 산업용 공조기에 이르기까지 그 적용범위가 날로 증가하고 있다. 그 주된 이유로는 원심 팬의 경우 동일한 원주 속도를 갖는 다른 팬들에 비하여 풍량이 많고 소음이 비교적 낮은 특성이 있다. 그러나 내부유동이 복잡하고 성능에 영향을 미치는 설계 변수가 많고 그 변수들 간의 상호간의 관계가 매우 복잡하여 설계 시 예상했던 결과와 다른 경우들이 종종 발생하는 특징이 있다<sup>(3-5)</sup>. 마찬가지로 원심 팬의 개발에 있어서 원심 팬 단독으로 성능이 만족하였더라도 실제 제품에 적

\* 선문대학교 기계 및 제어공학부  
책임저자 E-mail : jwk@email.sunmoon.ac.kr

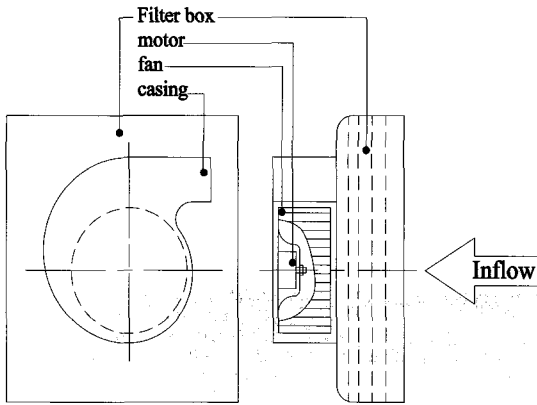


Fig. 1 Schematic diagram of present blower and filter box

용해서는 기대에 못 미치는 경우도 발생한다. 본 연구는 공기 정화기에 사용되는 원심 팬으로서 Fig. 1과 같이 흡입 측에 공기정화용 고 효율 공기 여과 장치 (HEPA Filter, High Efficient Particulate Air Filter)가 장착되어 있고, 제품 내부가 매우 협소하여 유로 (flow path)의 확보에 많은 어려움이 있는 성능 손실 요소를 갖고 있다. 실제로 연구 대상인 공기 정화기기의 필터 박스에는 집진과 탈취를 위한 여러 개의 필터가 순차적으로 설치되어있고 그 필터들을 통과한 공기가 송풍기로 흡입된 후 에너지를 얻어 실내로 토출되는 형태를 갖추고 있다. 그러나 이러한 손실의 요소들은 제품의 목적상 필요한 부분들임으로 기피할 수 없는 실정이다. 일반적으로 가정용 에어컨의 경우 열교환기로 인한 압력손실이 약 2 mm Aq.로 말하고 있다<sup>(6)</sup>. 반면에, 본 연구대상의 공기필터는 약 19 mm Aq.로서 전자에 비하여 약 9.5배의 손실이 더 많다.

본 논문에서는 이와 같은 불리한 유체역학적 조건에 적용될 수 있는 송풍 시스템의 개발에 관련된 설계 개선의 대상은 원심 송풍기의 핵심 구성품인 팬과 설부 (cut-off) 형상을 포함한 그 케이싱 (casing)이다. 결과적으로 본 연구에서는 팬의 날개는 에어포일 (airfoil)의 형상을 채택하였고, 팬의 허브 (Hub) 방향과 팁 (Tip) 방향의 코드 길이 (Code length)를 일정비율로 감소시키는 경사 날개 길이를 갖는 송풍기를 고안하였다. 구체적으로 그 날개는 두 원호의 조합으로 이루어지는 형상이다. 또한 팬의 케이싱의 설부 (Cut-off)의 형상은 등근형 (Convex)으로 설계하였고 그 회전 반경은 일반적인설계방법에 따라 팬 외경의 1.2배로 설계하였으며, 설부 전체에 경사 형상을 인가하였다. 이는 설부와 송풍기의 날개가 상호 작용하여 발생시키는 소음을

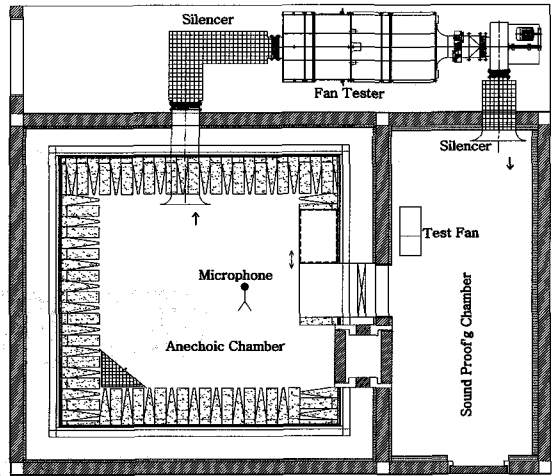


Fig. 2 Drawing of fan tester

완화시키기 위한 것으로 바람직한 효과가 확인되었다. 또한 그 설부는 유체의 유입에서부터 팬의 통과시 까지 그 경로가 전체 유동의 입장에서 노즐 형상이 되게 구상하여 유량의 경우 25CMM (cubic meter per minute), 완제품 장착 시의 소음 48dB의 성능을 갖는 송풍기를 개발하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

공기정화기에 사용되는 원심 팬의 가장 큰 손실은 공기정화용 필터로부터 발생된다. 공기정화기에서 공기의 질의 개선은 화학적 방법을 이용하는 것과 물리적 필터를 이용하는 방법으로 구분될 수 있는데 본 시스템의 경우는 광 촉매를 이용한 화학적 방법과 물리적 기법인 필터들을 사용하여 여과하는 방법 두 가지 모두를 채택하고 있다. 광 촉매 장치는 몇 개의 광원을 지나는 단순한 구조로 여기에서 발생하는 정압 손실은 극히 미소하며 대략 1.0 내지 1.5 mmAq. 정도이다<sup>(7)</sup>. 반면 HEPA 등을 사용하는 물리적 여과장치는 그 여과 방법의 특성상 매우 큰 정압 손실이 흡입 저항으로 등장한다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 공기 정화의 목적상 불가피하게 피할 수 없는 부분이므로 원심 팬의 풍량 증대 및 소음 저감이 주요 연구대상이 되었다. 이를 위하여 몇 가지 스크롤 케이싱을 고안 및 제작하여 그 성능을 평가하여 최적의 설계 조건을 찾기 위해 노력하였다. Fig. 2는 성능실험을 위한 팬 성능 시험장치인 무향 풍동이다. 본 성능 시험 장치는 미국 공조학회 (ASHRAE) 규격<sup>(8)</sup>에 의하여 설계하였으며, 실험

방법은 KS 6311 송풍기 성능시험에 관한 규격<sup>(9)</sup>에 의거하여 실험하였다. 또한 이 풍동은 압소음 17dB의 완전 무향실에 연결되어 유체역학적 성능과 공기 역학적 소음을 동시에 측정할 수 있도록 준비하였다. 성능 시험 장치로부터 획득되는 공학적 자료는 팬에서 발생하는 유량과 그 토출 정압, 소음 준위, 온도 등이다. 또한 필터로 인해 발생하는 저항을 정량적으로 가늠하기 위해 필터박스 내부 정압 ( $p_i$ )을 측정하였다.

추가로 유동의 형상을 정확히 파악하기 위한 영상 유속계(Particle Image Velocimetry)를 사용하여 원하는 영역에서의 유속을 정량적으로 관찰하였다. 이 유속 측정 시스템은 레이저로부터 발광된 광원을 렌즈를 통하여 평면을 발생시켜 관찰 대상 영역에 투사하고 이 레이저 평면과 수직된 방향에서 영상 획득 장치(주로 디지털 카메라)를 이용하여 촬영한 후 입자를 추적, 분석하는 2차원 유동분석 실험 장치이다. 실험방법을 살펴보면 관찰 대상영역에 입자를 부유 시키고, 레이저를 이용하여 레이저 평면을 발생시킨다. 이렇게 발생된 평면을 카메라로 촬영한 후 입자추적 알고리즘을 사용하여 유동장을 해석하는 방법으로 이루어진다. 기본적으로 본 연구에서 사용된 PIV 시스템은 최소 2장의 이미지를 획득하여 두 장의 영상 사이의 입자의 이동간격, 이동시간을 추적함으로써 순간 속도를 구할 수 있다. 본 연구에 사용된 주요 장비는 레이저는 ND-YAG Dual Pulse laser이고, 그 레이저의 power는 50mJ이며 발광 주파수는 최대 15 Hz 이다. 아울러 영상의 획득은 CCD 카메라를 이용하였고 그 해상도는 1k(pixel)×1k(pixel)이었다. PIV를 이용한 속도측정에서는 산란 입자를 첨가한 유동장에서 측정하고자 하는 단면을 레이저 빛을 이용하여 가시화 시키고 이와 수직인 방향에서 CCD 카메라로 유동을 따르는 입자들의 움직임을 촬영한다. 본 연구에서 사용된 입자는 올리브 오일(Olive Oil)을 사용하여 분사하였다. 이때 짧은 시간 간격을 가지는 한 쌍의 영상을 얻기 위하여 펄스 레이저를 사용하였다. 카메라로 획득한 영상은 컴퓨터로 저장된 후, 두 장의 영상으로부터 입자의 변위를 결정하기 위하여 상호 상관법(cross correlation method)을 이용하였다. 이와 관련된 자세한 기법은 Adrian<sup>(10)</sup>의 결과를 활용하였다.

### 3. 실험 모델

실험대상의 원심 팬은 일반적인 형상의 임펠러와

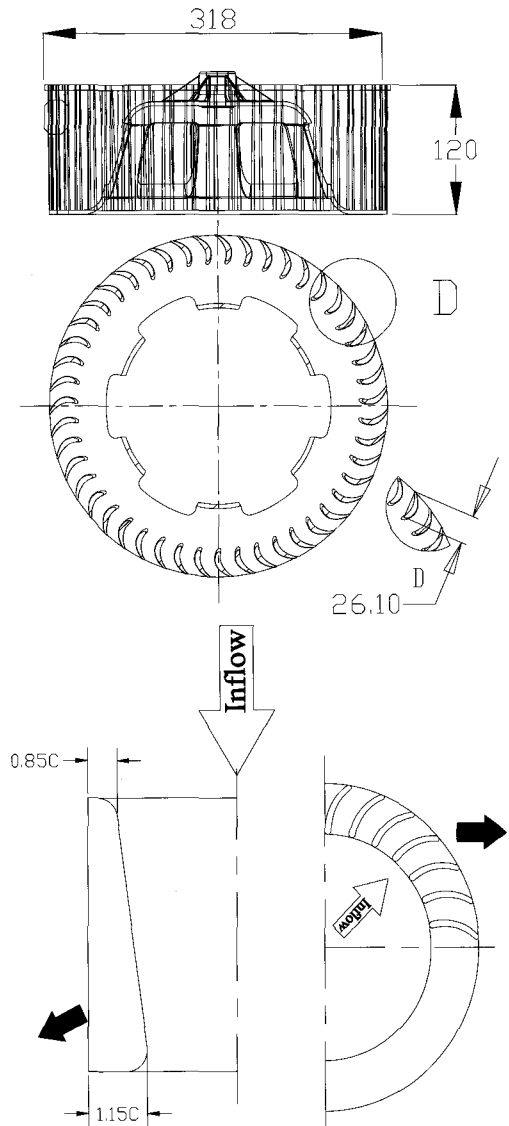


Fig. 3 Drawings of impeller and taper blade

그 스크롤 케이싱의 구조이다. 맹주성<sup>(11)</sup>, Konieczny<sup>(12)</sup>의 실험에서 임펠러의 날개는 그 역할에 있어 날개의 팁 부분이 거의 기능을 발휘하지 못함이 판명되었다. 그 결과를 활용하여 본 연구의 날개는 Fig. 3과 같은 위 부분은 그 익현의 길이를 짧게 조정하였다. 또한, 그 축소된 익현의 길이는 원래의 길이보다 5%, 10%, 15%, 20%의 네 가지 경우에 대해 소음 실험을 수행한 후 소음 측면에서 가장 유리한 조건인 15%의 경사를 갖는 형상으로 준비하여 임펠러를 선택하였다. 임펠러와 날개의 상세한 형상은 Fig. 3에 도시되어있다.

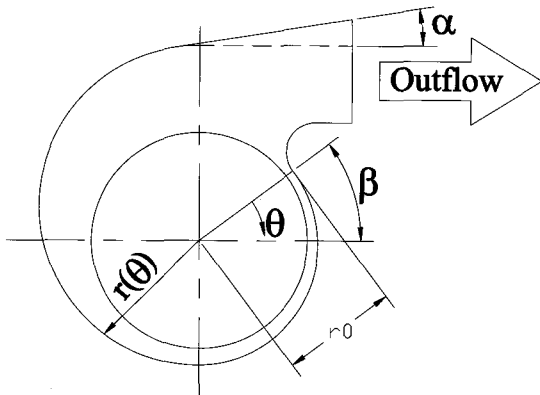


Fig. 4 Configuration of typical scroll casing

원심형 팬의 케이싱은 해당 송풍기의 성능을 주요하게 결정하는 요소이며, 운동에너지로부터 압력에너지로의 에너지 변환이 이 요소를 통해 이루어진다. 따라서, 임펠러의 설계와 더불어 케이싱의 설계 역시 매우 중요하다. 케이싱의 중요 역할은 운동에너지의 압력에너지로의 변환이므로 유동 유체의 유로의 단면적이 증가하는 방향으로 결정되며 이에 대한 대응으로 팽창의 정도를 주로 대수나선의 형상이거나 또는 아르키메데스 (Archimedes)곡선으로 설계하는 것이 일반적이다<sup>(1)</sup>. 이 두 종의 스크롤 형상도 기존의 연구 자료<sup>(2)</sup>에 따르면 주로 효율의 측면에서 아르키메데스 곡선으로 케이싱의 팽창을 결정하는 것이 유리하다고 보고하고 있다. 이 방법으로 스크롤의 팽창을 결정하면 다음의 식 (1)과 같이 반경( $r$ )에 관한 연속 표현식이 등장하는데 여기서  $\theta$ 는 케이싱의 회전 방향의 각도 좌표이고, 지수  $n$ 에 의해 팽창 정도를 결정한다 (Fig. 4 참조). 또한 초기 반경  $r_0$ 에 의해서는 설부 간격이 결정되므로 이 식(1)의 여러 표현에 대한 결정이 송풍기 전체의 성능에 매우 중요한 영향을 미친다. 특히, 스크롤의 팽창 지수는 임펠러 출구의 절대유동각과 같은 값을 갖도록 설계한다. 따라서 선행 연구 자료<sup>(2)</sup>에서 지정한  $n$ 의 값에 대한 범위 내에서 선정하여 모델의 제작한 후 이에 대한 검증은 실험을 통해 확인 할 수 있다.

$$r = r_0 e^{n\theta} \quad (1)$$

마지막으로 고려된 케이싱 관련 개선 사항은 설부의 경사를 고려하는 것이다. Neise<sup>(13)</sup>의 논문에 의하면 팬의 유동 소음을 팽 대역으로 확산시키기 위해서는 설부의 형상을 경사지게 구성하는 것인데 이 경우에서

Table 1 Types of scroll casing for comparisons

Item Type	Expansion angle, $\alpha$	Out-let angle, $\beta$	Cut-off angle, $\gamma$
1	0°	45°	15°
2	0°	45°	10°
3	0°	45°	-10°
4	10°	65°	0°
5	0°	65°	15°
6	10°	45°	-10°

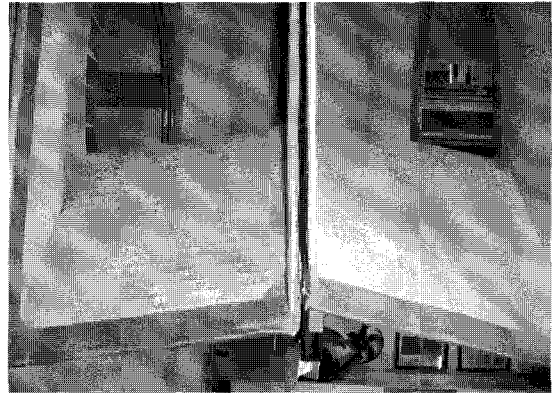


Fig. 5 Photographs to show inclined angle of cut-off at 15° for right one and -15° for left one with respect to bottom of casing

도 그 경사의 정도를 확대 형상으로 할 것인지 또는 축소 형상으로 할 것인지를 모두 고려하여 실험적으로 결정하였다. 이와 같은 내용을 바탕으로 준비된 케이싱의 주요 형상은 Table 1과 같다. 위의 Table 1에서 설부의 각도 (cut-off angle)가 (-)로 표기된 것은 설부의 경사가 확대 형상을 의미한다. 즉, 유체가 유입 후 그 유동의 경로가 확대관의 형상을 갖는 경우가 (-)각도를 갖는 설부이다. 따라서 본 연구에서 고려하는 실험 대상의 송풍기는 공기 정화를 위한 필터로 인해 흡입 압력이 대기압 보다 큰 원심형 송풍기를 대상으로 그 설계 목적을 달성하기 위해 준비되었다. 특히, 날개의 형상은 익현의 길이가 연속적으로 변화하는 테이퍼 형상으로 고정하였고, 케이싱은 경사 설부의 정도 ( $\gamma$ )와, 설부의 시작 위치 ( $\beta$ ), 그리고 토출 관로의 형상 ( $\alpha$ )에 따른 성능을 비교하여 최적의 성능을 발휘하는 송풍기 구조를 찾는 것이 본 연구의 목적이다. 물론 다른 운전조건 (회전수나 임펠러 직경 등)은 모두 동일한 경우 이다. Fig. 5는 설부의 경사각에 따른 케이싱의 모습을 비교하여 나타낸다.

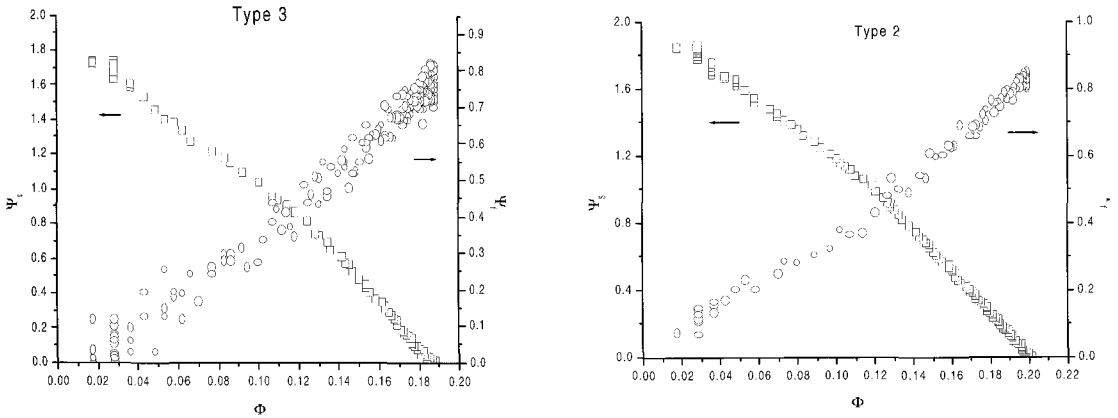


Fig. 6 Comparison of performance for type 3 (upper one,  $\nu=-10^\circ$ ) and type 2 (lower one,  $\nu=10^\circ$ )

#### 4. 실험결과

풍동 실험 장치의 데이터는 압력을 활용한 유량과 압력 자체가 대부분이다. 이 압력 자료는 압력 변환기를 통해 전산기에서 초당 250개의 비율로 저장되었으며, 소비전력과, 회전수등도 아울러 기록 되었다. 성능의 해석을 위한 자료는 다음의 관계식 (2) ~ (4)의 무차원 식을 사용하여 표현하였다. 식들의 표현에서 Q는 유량, D는 팬의 직경, N은 팬의 회전수,  $\rho$ 는 공기의 밀도, 그리고 g는 중력 가속도를 의미한다.

$$\phi \text{ (유량계수)} = \frac{4Q}{\pi D^3 N} \quad (2)$$

$$\Psi_s \text{ (정압계수)} = \frac{2g p_s}{\rho g (DN)^2} \quad (3)$$

$$\Psi_s \text{ (필터 정압계수)} = \frac{2g p_f}{\rho g (DN)^2} \quad (4)$$

위의 식들에서 정압은 풍동의 안정실에서 측정된 상대 압력이므로 구체적으로는 송풍기가 만든 압력과 대기압과의 차이가 된다.

Fig. 6은 설부의 방향에 따른 정압과 풍량의 변화 모습이다. 모든 경우에서 유량은 토출 유량의 정압에 반비례하고 필터 박스 내부의 압력에 비례함을 알 수 있다. 이 두 가지의 경우에는 모두 다른 기하학적 형상의 케이싱 조건에 대해 실험이 수행되었으므로 어느 경우의 기하학적 조건이 가장 성능이 우월한지를 비교하여 보이고 있다. 이 비교에서는 설부의 경사 유무, 케이싱 팽창의 위치, 그리고 토출구의 단면적 변화

에 따른 비교가 가능하도록 준비하였다. 우선 Type 2와 Type 3을 비교하면, 양의 경사 설부를 가진 모델에서 유량이 더 크게 발휘됨을 알 수 있다. 따라서 전체 소음의 저감을 위해 시도된 경사 설부의 형상이 오히려 유량의 확대도 보장함을 알 수 있다. 그러나 Type 3의 경우에서 필터 내부 압력의 변동이 상당히 관찰되고 있으며 그 이유는 설부의 각도로 인한 유로의 형상이 확대 노즐의 형상으로 구성되어 압력 에너지와 운동에너지의 변환이 매우 활발히 이루어지기 때문이라고 판단된다.

앞서 Fig. 6의 결과에서 (+)각도의 설부가 유량에 유리함을 알았다. 이제는 동일한 설부의 기하학적 조건에서  $\beta$ 의 효과를 가늠하고자 한다. Fig. 7의 두 경우, Type 1과 Type 5의 비교에서 방향이 다른 동일한 설부의 각도 조건에서도 팽창의 시작각 (outlet angle,  $\beta$ )이 작은 경우가 유량에서 유리함을 알 수 있었다. 이는 유량의 증대를 위해 설부의 역할에 대해 고려할 필요가 있음을 의미한다. 설부는 팽창 유동의 시작이고 케이싱의 종착에서는 유로를 토출 방향으로 유도하는 기능을 갖고 있다. 따라서 유량의 확대를 위해서는 유속의 어느 범위까지는 단면적의 증대가 요구된다. 이를 수용한 경우가 Type 1인데 이 경우의 유량 증대가 되어 팽창의 시작각이 유량 증대에 영향을 미치고 있음이 발견되었다. 이러한 결과를 종합적으로 정리한 것이 Table 2이다. 이 성능 비교의 예에서는 전체 소음의 비교도 표시하였다. Table 2의 Type 3과 Type 6의 비교에서 동일한 케이싱의 조건에서 직선 토출구의 형상이 확대 형상의 토출에 비해 성능 면에서 유리하다고 판명되었다. 이는 PIV를 사용한 유속의 확인 (Fig. 8

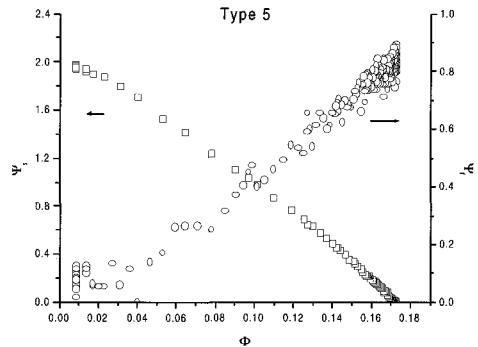
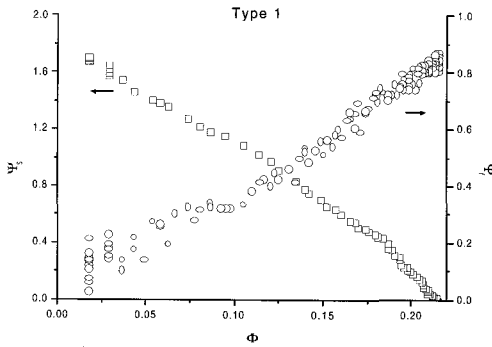


Fig. 7 Comparison of performance according to staring angles ( $\beta$ ) of expansion for upper plot at  $\beta=45^\circ$  and lower for  $65^\circ$

Table. 2 Performance test results (1068rpm)

Model \ Performance	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
$\Phi$	0.21	0.2	0.18	0.18	0.17	0.16
$\Psi_s$	1.7	1.9	1.8	1.85	2.0	1.85
$\Psi_f$	0.85	0.83	0.70	0.75	0.77	0.79
Noise (dB)	53.4	55.7	56.1	56.1	56.2	57.8
Consuming Power(W)	92	92.5	95	95.2	95.8	96

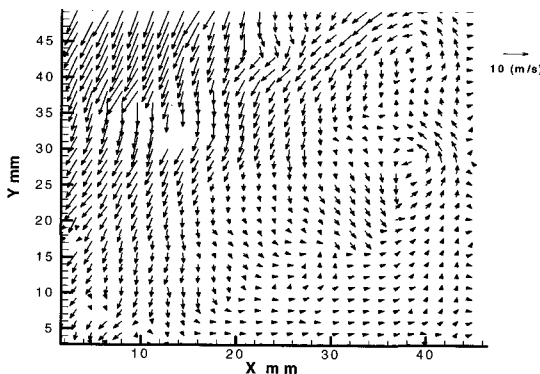


Fig. 8 Plots of outlet velocities toward exit at (46, 46)

참조)에서 역류 (Fig. 8에서 좌측을 향하는 유동)의 발생이 발견되어 확대 형태의 토출 관로가 유동의 구동 압력을 저하시켜 역 압력 구배를 유발하고 아울러 역류가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

스크롤 케이싱의 토출구에서의 유속을 열선 유속계를 사용하여 측정하였다. 열선 유속계는 Tsi사의 IFA300의 모델이고 유속의 측정은 토출구의 단면적에 걸쳐 2차원으로 이루어졌다. Fig. 9는 그 케이싱의 토

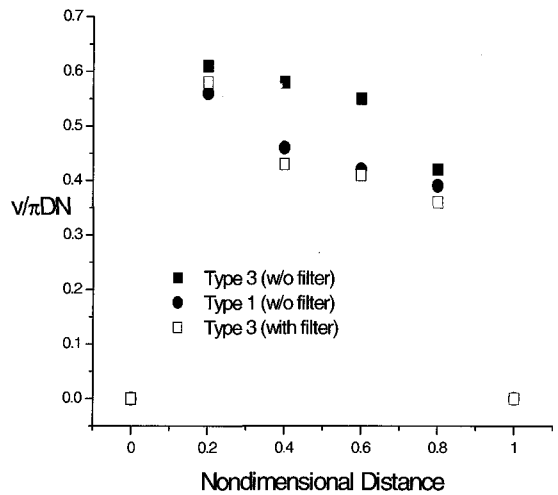


Fig. 9 Comparison of outlet velocity for different casings with and without filters

출 관로에서의 유동을 표시하고 있다. 유속의 측정은 송풍기의 출구에서부터 토출 방향으로 휠의 직경과 같은 거리 (Non-dimensional distance =1.0)까지 등 간격으로 측정되었다. 유속의 비교는 가장 성능이 우수한 Type 1과 Type 1에 비해 설부의 경사각도가 반대인 Type 3를 준비하였다. 또한 Type 1의 경우에서도 필터 박스의 장착 유무에 따른 유속을 비교하여 필터 박스의 존재가 유동에 미치는 영향을 알 수 있게 준비하였다. Fig. 9의 결과를 살펴보면 케이싱의 최적 설계를 통하여 동일한 휠을 장착하여 케이싱에 의해 그 유량에 영향을 미치는 토출 유속의 크기가 크게 영향을 받을 수 있다. 또한 동일한 케이싱이라 할지라도 필터 박스에 의해 정압의 손실로 그 토출 유속이 크게 변화함을 알 수 있다. 그 필터에 의한 정압의 손실은 케이싱의 설계를 통해 부분적으로 극복할 수 있음도 밝혀졌다.

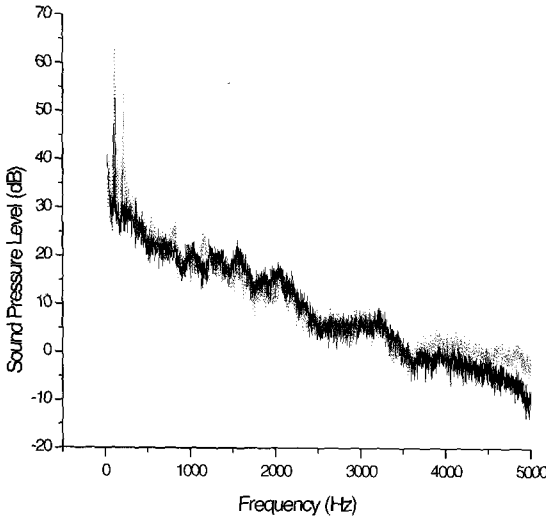


Fig. 10 Comparisons of noise levels for inclined cut-off (solid lines) and straight cut-off (dotted line)

송풍기의 종합적인 성능은 유체역학적 성능과 소음을 고려한 공력학적 성능 모두를 포함한다. 이를 본 논문에서 반영하기 위해 설부의 형상에 따른 소음의 비교 분석도 실시하였다. Fig. 10은 10° 경사 설부를 가진 송풍기와 직선 형태의 설부를 가진 송풍기의 소음 스펙트럼 분석이다. 두 자료의 비교를 위해 동일한 운전 조건에서 단지 설부 형상에 따른 차이만을 관찰하였다. 그 결과 경사 설부에서는 날개 통과 주파수에서의 소음 (BPF Noise)가 현저히 감소되었음을 알 수 있었고 그 결과 전체적인 소음의 준위도 감소함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

일반적으로 원심 팬의 설계는 팬 단독으로 설계 개발되어 실제 제품에 적용하면 의도한바와 다른 성능특성을 보인다. 이러한 원인은 흡입유로를 비롯하여 주변 구조물들로 인한 간섭과 흡입 손실이 발생하기 때문이다. 본 연구대상의 원심 팬은 흡입구 전단에 정압 손실이 큰 공기 청정용 필터를 장착하고 있어 풍량과 소음에 불리한 조건을 갖고 있다. 이러한 손실은 제품 목적상 필요한 부분임으로 스크롤 형상을 최적으로 설계하여 그 요인을 극복하였다. 구체적으로는 팬의 날개를 경사 형상으로 설계하여 불필요한 소음원과 무게를 배제하였고, 케이싱의 설계 개선에서는 스크롤의 설부에 기울기를 주어 팬의 날개 통과주파수에서의 소

음을 확산시켰으며 아울러 이 개선을 통해 풍량 증대의 효과도 얻을 수 있었다. 구체적으로는 설부 기울기의 방향은 흡입구와 근접한 방향을 넓게 해 주는 것이 풍량에 유리하다는 것이 확인되었다. 마지막으로 케이싱의 출구 단면적 증대는 풍량에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 또한 소음 및 정압 특성이 우수한 모델에서 소비전력도 유리하게 관찰되었다.

#### 후 기

본 연구는 선문대학교 공조기술연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Barten, H. J. and Scheurenbrand, J. A., 1971, "Stress and Vibration Analysis of Turbopump Inducer Blades by Finite Elements," *Journal of Spacecraft*, Vol. 8, No. 6, pp. 657-664.
- (2) 원진행부 (전운학 역), 1986, *유체기계*, 문운당, pp. 182~200.
- (3) Wright, T. G. 1999, *Fluid Machinery*, CRC press, New York.
- (4) Cau, G., Mandas, N., Manfrida, G., and Nurzia, F. 1987, "Measurement of Primary and Secondary Flows in an Industrial Forward-Curved Centrifugal Fan," *J. Fluids Engineering*, Vol. 109, pp. 353-358.
- (5) Morinushi, K. 1987, "The Influence of Geometric Parameters on F.C Centrifugal Fan Noise," *Trans. ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 109, pp. 227-234.
- (6) Morinushi, K. 1991, "Noise Source of a Multiblade Fan," *JSME*, Vol. 57, No. 543, pp. 3834-3844.
- (7) Raj, D. and Swim, W. B. 1981, "Measurements of the Mean Flow Velocity and Velocity Fluctuation at the Exit of a FC Centrifugal Fan Rotor," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, pp. 393-399.
- (8) Kim, H. 2002, "Development of Optical LED for Air Cleaner," Report for RRC-ACCT, pp. 363-375.
- (9) ASHRAE Standard, 1985, *Laboratory Methods of Testing Fans for Rating*, American Society

- of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- (9) 한국산업표준심의회, 1992, 송풍기의 시험 및 검사 방법 (KS B 6311), 한국표준협회, pp. 1~13.
- (10) Adrian, R. 1991, "Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 261~304.
- (11) 맹주성, 유달현, 이광호, 박인규, 2000, "다익 팬/스크롤 시스템의 형상변수와 내부 유동장 특성과의 관계," 대한기계학회 논문집 제B권, Vol. 9, pp. 1139~1147.
- (12) Konieczny, J. P. and Bolton, S. 1995, "Design of Low-noise Centrifugal Blowers - Part2 : Optimization Study," Institute of Noise Control Engineering J., Vol. 43, pp. 117~127.
- (13) Neise, W., 1992, "Review of Fan Noise Generation Mechanism and Control Method," An International INCE Symposium, pp. 45~56.