

## 다익 송풍기의 이산 주파수 소음 저감을 위한 실험적 연구

### An experimental study for reduction of B.P.F. noise level of multi-blade fan

김 영 찬\*, 이 상 환\*\*  
Y. C. Kim, S. W. Lee

**Key words:** B.P.F. noise(이산주파수소음), 5-hole probe(5공 튜브), Multi-blade fan(다익팬), Cut-off(설부)

#### ABSTRACT

B.P.F.(Blade Passing Frequency) levels were measured with the cut-off clearance changes. The velocity inside the scroll, pressure fluctuation at cut-off region, and the scroll surface pressure distribution along the scroll from the cut-off to outlet were measured. With a certain cut-off clearance the improvement of efficiency and attenuation of B.P.F. noise level could be achieved. The measured results of pressure fluctuation and scroll surface pressure distribution showed that the secondary flow inside the scroll increased B.P.F. noise level at the cut-off region as the cut-off clearance got wide.

#### 기 호 설 명

$C_p$  : 압력 회복 계수  
 $r$  : 설부(Cut-off) 간격[mm]  
 $R$  : 임펠러의 반경[mm]  
 $t$  : 날개 두께[mm]  
 $Z$  : 임펠러 날개 수[개]

#### 하첨자

s : 정압  
t : 동압  
1 : 안쪽  
2 : 바깥쪽

#### 1. 서 론

다익 송풍기 소음 저감에 대한 연구를 살펴보면, Neise<sup>(1)</sup>가 60년대 말부터 80년대 초에 걸친 다익 송풍기와 원심송풍기의 광대역 소음 및 날개 통과 주파수(Blade Passing Frequency: B.P.F.) 소음을 줄이기 위한 여러 연구들을 종합, 정리한 것을 보면 cut-off 간격 조정, cut-off edge 반경 조정, 임펠러에 철사망 부착, Resonator의 cut-off 부착 등 다양한 아이디어를 동원한 소음 저감의 노력을 볼 수 있다. 최근까지 일본에서 Shibata<sup>(2)</sup>의 연구가 진행되고 있다.

#### 그리스 문자

$\delta$  : 미소 거리  
 $\eta$  : 효율  
 $\theta$  : 스크롤 각도  
 $\psi$  : 압력 계수

\* 한양대학교 대학원

\*\* 정회원, 한양대학교 기계공학과

또한 국내에서도 소비자의 보다 향상된 욕구에 대처하기 위하여 산업 현장뿐 아니라 에어컨 등 가전 제품 등에 많이 쓰고 있는 다익 송풍기의 소음 저감에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광대역 소음에 대한 실험적 고찰에 있어서는 Morinushi<sup>(3)</sup> 같이 임펠러 날개 사이에서의 유동 현상 이해와 스크롤 주변 소음의 자세한 분석이 필요하는 등 고가 장비와 고도의 실험 기술이 필요하다. 반면에 B.P.F. 소음은 그 발생 위치가 설부 부분에 국한되어 그 부분 형상 변화에 의하여 비교적 손쉽게 B.P.F. 소음레벨을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 B.P.F. 소음 저감이라는 목적을 성취하기 위해 파라미터로서 설부 간격을 설정하였다. 파라미터를 조정함에 있어 중요한 점은 다른 연구들과는 달리 스크롤의 모형에는 변형을 가하지 않고 임펠러의 위치를 이동함으로써 설부 간격을 변형한다는 것이다. 이는 설부 간격이 넓어짐에 따라 스크롤의 크기가 커지지 않는다는 장점이 있는 반면, 임펠러 위치가 설부 반대쪽으로 이동함에 따라 이미 설계된 유로 단면적에 영향을 줄 수 있다는 단점이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 압력 측정 시스템 및 송풍기 성능 실험 장치

압력 데이터 측정 시스템은 Fig. 1에서 그 흐름도를 나타내었고 사용된 압력계는 양의 압력에서는 전체 측정 범위의 ±0.2% 오차를 갖고, 음의 압력에서는 ±0.5%의 오차를 갖는다. 송풍 실험 장치는 K.S. 규격으로 제작 하였다.

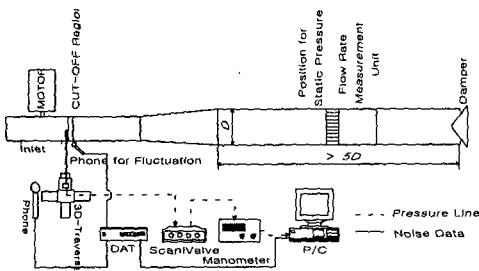


Fig. 1 Schematic view of experimental facility.

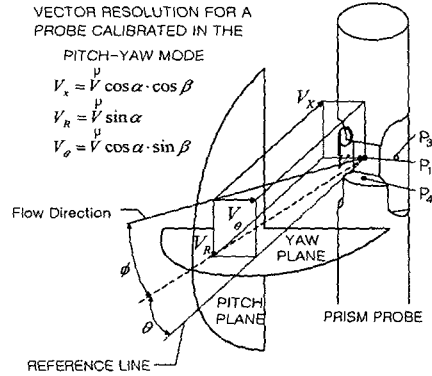


Fig. 2 Geometry of the prism probe.

2.2 5공 튜브 보정

유체기계 내부에서와 같이 복잡한 3차원 유동을 보여주는 유동장을 측정하기 위해서는 5공 튜브를 사용하는 것이 속도 성분 및 전압, 정압을 동시에 측정할 수 있는 유일한 방법이지만 5공 튜브를 사용하기 위해서는 보정도를 사전에 작성하여야 한다. 유동과 5공 튜브가 이루는 작은 요각, 피치각이 있으며 Fig. 2에 상세히 나타내었다.

2.2.1 보정 이론

요각(θ)과 피치각(φ)은

$$\phi = f_1(\Delta P_1/\Delta P, \Delta P_2/\Delta P) \quad (1)$$

$$\theta = f_2(\Delta P_1/\Delta P, \Delta P_2/\Delta P) \quad (2)$$

라 쓸 수 있다.

본 연구에서 식(3)의 Brayer & Pankhurst Method를 사용하였다.

$$\Delta P = P_1 - \frac{P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{4} \quad (3)$$

Fig. 3의 보정 차트를 역으로 테스트 해 볼 때에 요 및 피치각도는 최대 1.5° 내에서 정확하게 추적하고 정압, 전압 및 속도는 약 ±20° 내

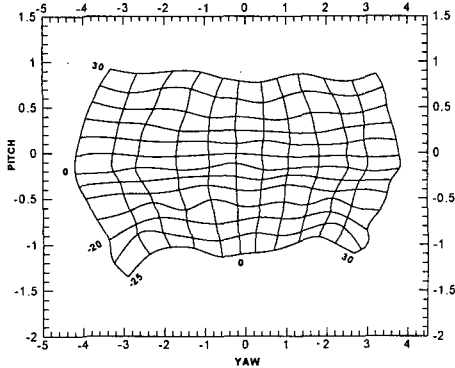


Fig. 3 Prism type 5-hole probe calibration chart using B-spline at velocity 18.2 m/s.

에서 최대 2 mmAq, 0.5 mmAq, 2%의 오차를 보이고 약 ±20°를 넘어서는 이보다 조금 더 큰 오차를 보인다. 이는 요각이 ±20°를 넘어감에 따라서 피치각에 상관없이 5공 튜브의 P<sub>2</sub> 혹은 P<sub>3</sub>가 후류에 들어가는 것을 볼 수 있다. 이는 코브라형과는 형상이 전혀 다른 프리즘형만의 독특한 형상에 의한 것으로 압력 계산시 오차를 높이는 데 작용한다.

이에 본 연구에서는 정확성을 높이려는 의도와 더불어 측정하고자 하는 송풍기의 형상을 고려할 때 널링(non-nulling) 기법과 널링(nulling) 기법을 혼합하여 사용하였다.

2.3 B.P.F. 소음 및 압력 변동 측정 장치

본 연구에서 사용한 MICROTTECH GEFELL

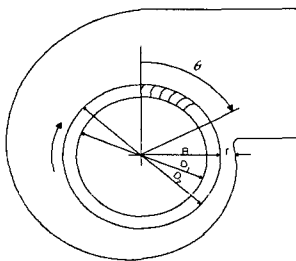


Fig. 4 Schematic view of experimented multi-blade fan.

GMBH사의 Phone과 SONY사의 PC-208A DAT(Digital Audio Tape) 레코더는 압력 변동을 측정하기 위한 가장 효율적인 방법이라 할 수 있다. 녹음된 데이터는 Difa measuring system사의 APB200 보드를 사용하여 PC로 옮기고 Auto power spectrum 처리를 하여 압력 변동을 소음 측정 단위인 데시벨(dB)로 변환하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 제원 및 파라미터

본 연구에 사용된 다익 송풍기는 일반적으로 널리 쓰이고 있는 크기의 것을 선택하였다. 실험에 사용된 다익 송풍기의 모형 및 변수는 Fig. 4에 나타내었다.

스크롤의 외형 곡선은 지수 함수형으로 r과 θ의 관계는 다음과 같다.

$$r = 12.55 \cdot \exp(\theta \cdot \tan 6.473) \quad (4)$$

파라미터로써 cut-off 간격 r을 무차원화하기 위해 임펠러 반경과의 비 r/R을 사용하였고 실험에 사용된 cut-off 간격비 r/R을 사용하였고 실험에 사용된 cut-off 간격비는 Table 1에 나타내었다.

표에서 알 수 있듯이 cut-off 간격비 r/R=0.24는 실험이 실시된 다익 송풍기의 원래 cut-off 간격이다.

3.2 성능 실험 비교

$$\phi = \frac{Q}{\pi d_2 b u_2} \quad (5)$$

Table 1 Experimented cut-off

r/R	r[mm]
0.06	7.53
0.10	12.55
0.24	30.0*
0.35	43.9

\*Designed cut-off distance

$$\psi = \frac{P}{(\rho/2) u_2^2} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{L}{(\rho/2)\pi D_2 b u_2^3} \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 유량계수,  $\psi$ 는 압력계수,  $\lambda$ 는 동력계수를 ratio나타낸다.

Fig. 5의 파라미터별 효율곡선 비교에서  $\phi=0.21$ 를 기점으로, 네 가지 경우 모두 유사한 경향을 보이는 좌측부와 각각의 특징적 효율을 보이는 우측부로 나뉘게 된다.  $r/R=0.06$ 의 경우 완만한 연속적인 상승을 보이고  $r/R=0.1$ 과  $r/R=0.24$ 는 서로 유사한 정상적 상승을 보이지만 전자의 경우가 3.4% 향상된 효율을 보인다.

반면  $r/R=0.35$ 에서는  $\phi=0.2$ 를 지나 효율 하강이 나타나는데 이는 임펠러 위치 이동에 따른 cut-off 부분 영역 확대와  $\theta=270^\circ$  부분의 상대적인 영역 축소로 인한 유로 손실 증가에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 6에서는 실험이 실시된 다익 송풍기의 파라미터별 성능 실험 결과를 나타내었다. 본 실험에서 사용된 모터 및 제어판의 성능 제한으로 유량계수의 제한이 있었지만 그림에서 볼 수 있듯이 곡선에 있어 최고점을 지나 하강하는 국면을 잘 보이고 있으므로 모터 회전 속도를 1700RPM으로 고정하고, 향후 진행되는 실험은 저 유량계수  $\phi=0.1$ , 최고 효율을 보이는 중간 유량계수  $\phi=0.27$ , 대 유량계수  $\phi=0.35$ 로 각각 실험하였다.

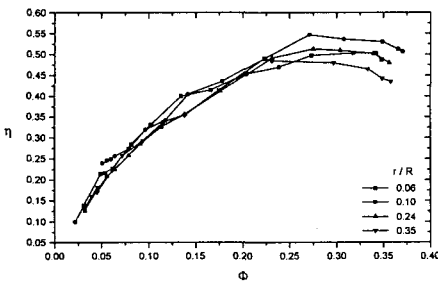
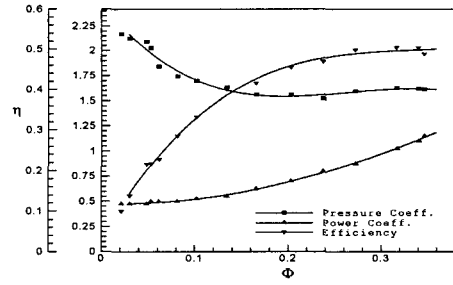
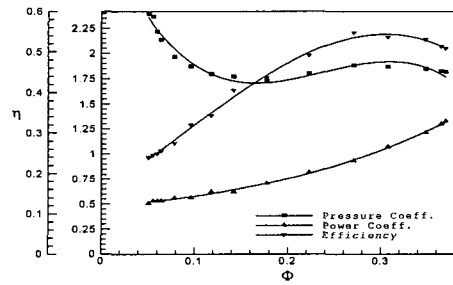


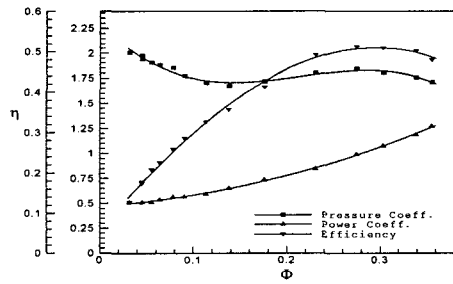
Fig. 5 Comparison of efficiency with respect to  $r/R$ .



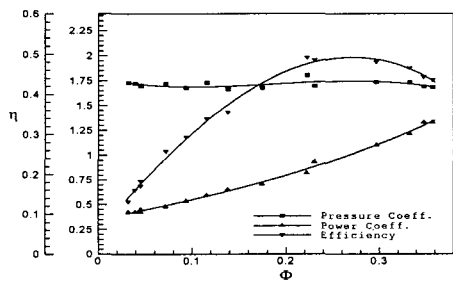
(a)  $r/R = 0.06$



(b)  $r/R = 0.1$



(c)  $r/R = 0.24$



(d)  $r/R = 0.35$

Fig. 6 Influence of cut-off clearance upon the aerodynamics multi-blade fan performance.

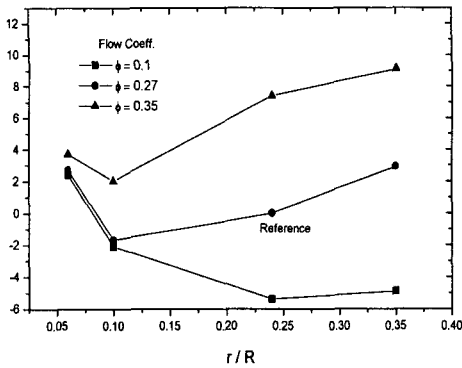


Fig. 7 Comparison of B.P.F. noise level at each  $r/R$  and flow coefficient.

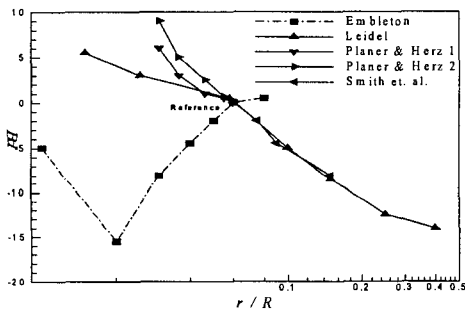


Fig. 8 Effect of enlarging cut-off clearance or rib clearance<sup>(1)</sup>,  $\Delta r$  and  $\delta$ , respectively :

- (a)  $r/R, \delta/R$  and
- (b)  $\Delta r, \delta$  as a abscissa. Ploner and Herz,  $D=430\text{mm}, Z=21$ (radial),  $n=2500\text{rev/min}, \phi > \phi_{opt}$  ; Smith et al.,  $D=464\text{mm}, Z=12$ (backwards),  $n=1500\text{rev/min}, \phi_{opt}$  ; Embleton,  $D=54\text{mm}, Z=8$ (radial),  $n=2400\text{rev/min}, \phi > \phi_{opt}$  ; Leidel,  $D=199\text{mm}, Z=6$ (backwards),  $n=3150\text{rev/min}, \phi_{opt}$ .

### 3.3 B.P.F. 소음 변화

Fig. 7는 B.P.F. 소음을 나타낸 것인데, 측정 위치는 실험이 실시된 다익 송풍기 스크롤이 철판으로 되어 있어 측정거리가 멀어질 경우 각

cut-off 간격 및 유량계수에 따른 B.P.F. 소음 변화를 살피기 어렵기 때문에 입구 유동에 영향을 미치지 않는 최단 거리 30cm로 하였다.

Fig. 8에서 다른 연구자들의 연구와 비교하여 볼 때, 사용된 송풍기의 사양 및 실험 조건이 달라 cut-off 간격비는 정확히 일치하지 않지만 특정 cut-off 간격비에서 최저 B.P.F. 소음을 나타내는 Embleton<sup>(6)</sup>의 결과와 경향에 있어 정확히 일치한다는 것을 볼 수 있다.

본 실험결과에서는 예외적으로  $\phi=0.1$ 일 때 상이한 결과를 보인다. 이는 Fig. 6에서 보듯이  $\phi=0.27$ 과  $\phi=0.35$  경우와는 달리 상당히 낮은 효율을 나타내는 운전상태이므로 스크롤 내부 유동이 안정되지 않아 나타나는 현상이라 사려된다.

### 3.4 스크롤 표면 압력 비교

표면압력은 Fig. 9에 보는것과 같이  $\theta=90^\circ \sim 405^\circ$  까지 여덟 곳, 각도마다  $x/b=0.25, 0.5, 0.75$ 의 세 곳 해서 총 24곳을 측정하였다.

Fig. 10(d)는 Fig. 10(a)의 경우와 반대 성향을 갖는데 임펠러 이동에 의한 cut-off 부분 유로 확대와  $\theta=270^\circ$  부분유로 축소는  $\theta=90^\circ$  부분과  $\theta=315^\circ$  부분을 제외한 전 영역에서 비슷한 표면 압력을 보임으로써 스크롤 전 영역에서 유동 정체가 발생함을 알 수 있다.

이는 B.P.F. 소음 증가만이 아닌 2차 유동에 의한 스크롤 방사 소음의 원인이 된다. Fig. 10(b)와 Fig. 10(c)는 위에서 언급한 두 경우의

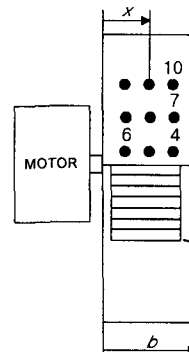
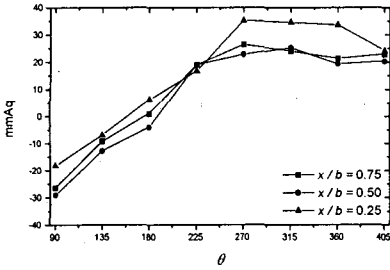
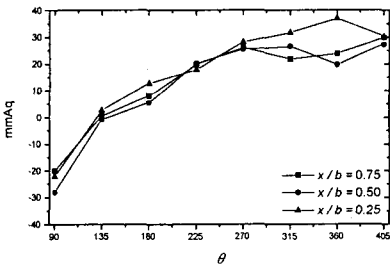


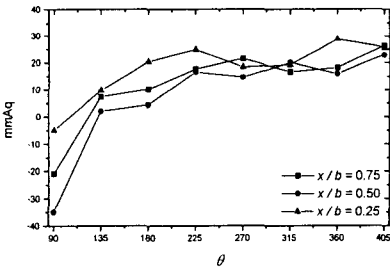
Fig. 9 Schematic view of scroll surface pressure measurement position.



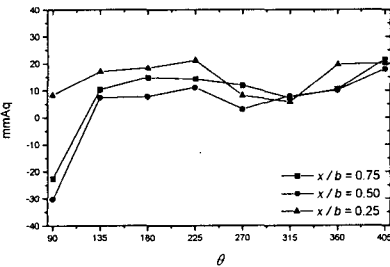
(a)  $r/R = 0.06$



(b)  $r/R = 0.10$



(c)  $r/R = 0.24$



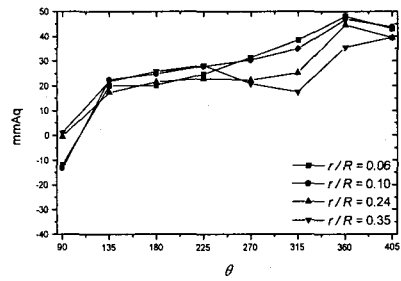
(d)  $r/R = 0.35$

Fig. 10 Comparison of scroll inner surface pressure with respect to  $x/b$  at  $\phi=0.27$ .

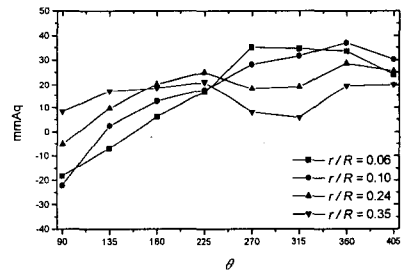
중간 발전 형태로 볼 수 있다.

앞의 고찰에서 입구쪽이나 스크롤 윗면쪽 보다는 스크롤 안쪽에서의 유동 정체 및 충돌이 가장 큰 것으로 밝혀졌으므로 Fig. 11에서는 허브쪽 ( $x/b=0.25$ ) 압력을 cut-off 간격과 유량에 따른 압력 분포를 나타냈다.

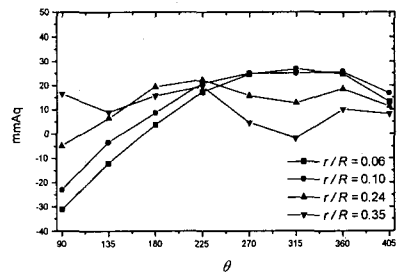
먼저 Fig. 11(a)의  $\phi=0.1$ 에서 임펠러 이동에 따라 유로 단면적 변화가 크지 않은  $\theta=130^\circ$



(a)  $\phi = 0.1$



(b)  $\phi = 0.27$



(c)  $\phi = 0.35$

Fig. 11 Comparison of pressure of scroll inner surface with respect to  $\phi$  at  $b/x=0.25$ .

와  $\theta=250^\circ$  사이에서  $r/R$ 에 상관없이 유사한 압력값을 보인다.  $\theta=315^\circ$  지점에서 임펠러 이동에 따른 유동 정체 차이를 가장 명확하게 나타내며 출구로 진행됨에 따라 다시 비슷한 압력 회복을 보여준다. Fig. 11(b)는  $\theta=225^\circ$  부근을 중심으로 좌우 대칭 성향을 갖고  $r/R$ 에 따라서 명확한 차이를 보인다.  $\theta=90^\circ$  에서 일반적인 경향과는 달리  $r/R=0.1$ 의 압력이  $r/R=0.06$ 보다 작은 값을 보이는데 이는  $r/R=0.1$ 에서 오히려 cut-off 부분을 치는 유동이 더 적고 접선 방향 성분이 크다는 것을 의미한다. 이는  $r/R=0.1$ 에서 B.P.F. 소음이 최소가 될 수 있는 가능성을 제시해 준다. Fig. 11(c)의  $\phi=0.35$ 에서는  $\phi=0.27$ 보다  $\theta=90^\circ$  에서 각  $r/R=0.35$ 인 경우 급격한 압력 상승을 보이고 cut-off 부분이 반대 방향인  $\theta=270^\circ$  보다 더 큰 압력 정체를 보이는 현상이 발생한다. 이는  $r/R=0.35$ 의 경우 임펠러 이동으로 인하여  $\theta=270^\circ$  까지의 유로 단면적 확대율이 급격히 떨어지고 임펠러를 빠져 나온 유동이 전체에 걸쳐 스크롤면 정체로 나타나 Fig. 10(d)에서 보듯이 스크롤 벽 안쪽 ( $x/b=0.25$ )과 스크롤벽 바깥쪽 ( $x/b=0.75$ ) 즉, 스크롤 면 전체에서 유도 정체가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는  $r/R=0.35$  경우 Fig. 6에서와 같이 유량계수  $\theta=0.21$ 이후로 효율이 하강함을 설명한다.

### 3.5 스크롤 내부 유동 비교

Fig. 12는  $\theta=90^\circ$  부분 스크롤 내부 2차 유동을 보이고 있다. 그림에서는  $r/R=0.06$ 의 경우가 빠져 있는데 이는 cut-off 간격이 5공 튜브를 사용하기에 너무 좁아졌기 때문이다. Fig. 12는 cut-off 간격 증가에 의한 유동 변화를 명확하게 보여준다. 첫째, 2차 유동 중심의 이동이다.  $r/R=0.1$ 에서  $x=20$  부근,  $r/R=0.24$ 에서  $x=50$  부근,  $r/R=0.35$ 에서  $x=60$  부근으로 점차 임펠러 중심방향으로 이동하고 있다. 둘째, cut-off 거리가 좁을수록 스크롤 벽면에서의 유동 정체가 심화되어 임펠러를 통하여 나오는 유동의 양에 영향을 준다는 것이다. 이는  $\theta=90^\circ$

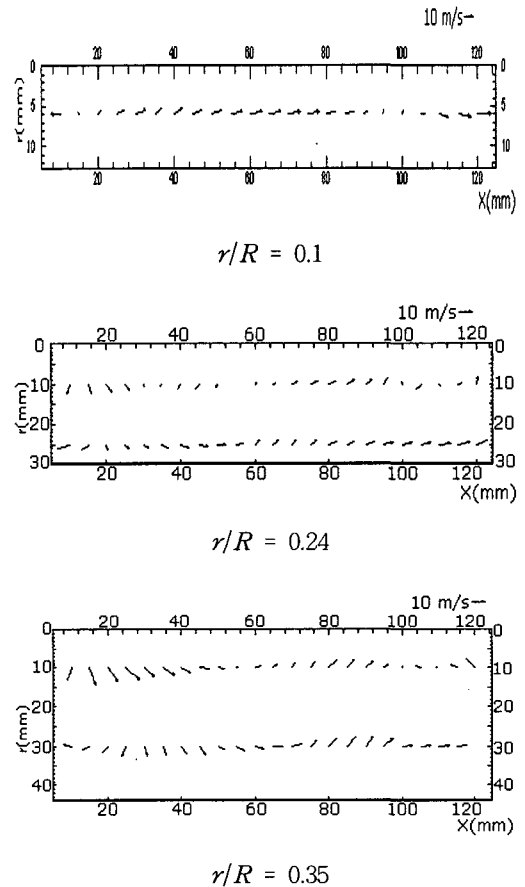
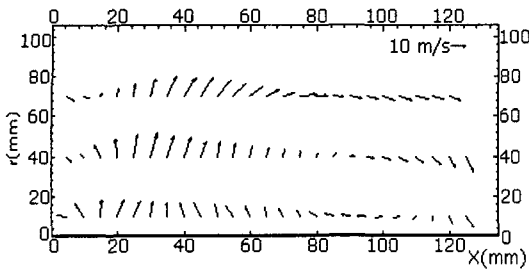


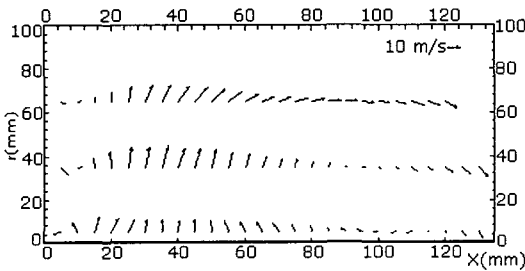
Fig. 12 Secondary flow in the scroll at  $\theta=90^\circ$  with respect to  $r/R$  at  $\phi=0.27$ .

지점(cut-off edge를 약간 지난 지점)에서는 2차 유동에 의하여 간격이 넓어짐에 따라 B.P.F. 소음이 오히려 증가할 수 있음을 보여준다. 셋째, 스크롤과 임펠러의 간격이 넓어질수록 내부 2차 유도의 회전 중심 상승으로 이차 유동이 명확해진다. 이는

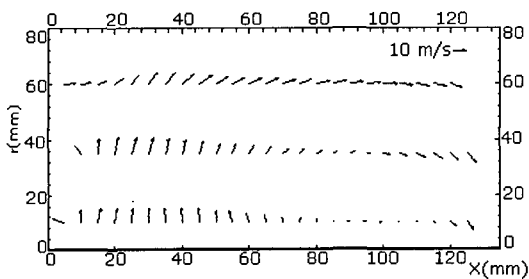
Fig. 13은  $\theta=270^\circ$  에서의 스크롤 내부 2차 유동이다. Fig. 13(a)에서부터 Fig. 13(d)까지  $r/R$  변화에 따라 유로 단면적이 좁아지면서 변화에 따라 유로 단면적이 좁아지면서 일정한 경향을 보이는데 첫째, 단면적이 넓어질수록 2차 유동이 명확해진다. 이는 입구쪽 임펠러에서 유동이 유입되는 부분이 넓어짐과 동시에 2차 유동



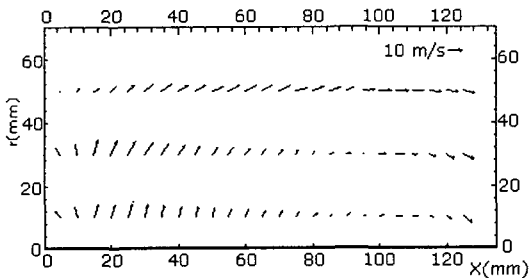
(a)  $r/R = 0.06$



(b)  $r/R = 0.1$



(c)  $r/R = 0.24$



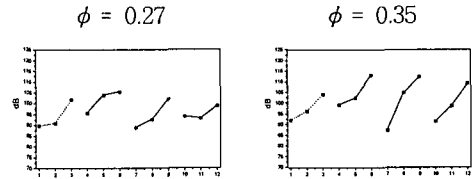
(d)  $r/R = 0.35$

Fig. 13 Secondary flow in the scroll at  $\theta = 270^\circ$  with respect to  $r/R$ .

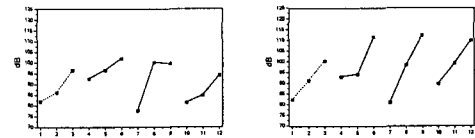
중심이 입구쪽에서 임펠러 중심쪽으로 이동하는 것과 이차 유동 중심이 스크롤 벽쪽으로 이동하는 것을 의미한다. 그림에서와 같이 2차 유동의 명확성과 2차 유동 중심의 스크롤 벽면쪽 이동은 스크롤 벽 허브쪽에 국소적인 Vortex를 형성한다. 이는 Fig. 13(a)와 Fig. 13(b)에서 확인할 수 있다.

### 3.6 Cut-off 근방에서의 압력 변동 비교

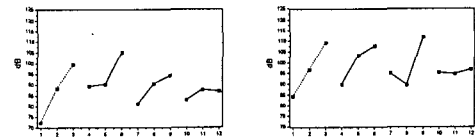
Fig. 14은 각 위치에서의 B.P.F. 소음 크기이다. 그림에서 x축의 point는 Fig. 9에서 볼 수 있는 압력 변동 측정 위치이고, y축은 측정된 압력 변동을 Auto power correlation 처리하여 소음 단위인 데시벨(dB)값으로 변환한 것이다. 그림을



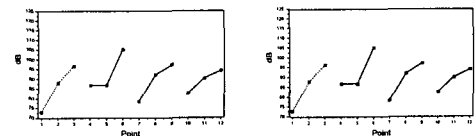
(a)  $r/R = 0.06$



(b)  $r/R = 0.10$



(c)  $r/R = 0.24$



(d)  $r/R = 0.35$

Fig. 14 Pressure fluctuation at each hole.



전체적으로 살펴보면 유량계수에 상관없이 cut-off 간격에 따라 일정한 경향을 보이는데 cut-off 간격이 작으면 cut-off 부분 유로가 전체적으로 좁아지고 그 부분 전체에서 높은 B.P.F. 소음을 발생시킨다. 이는 유량계수가 크고 B.P.F. 소음이 커질수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 14에서 첫번째 두번째  $\phi=0.35$ 에서 스크롤 안쪽인 6, 9, 12번 크기가 비슷함으로 알 수 있다. 반면 cut-off 간격이 넓어지면서 9, 12번 레벨이 6번에 비하여 급격히 낮아지고 6번 위치가 주된 역할을 한다. 이것으로 보아 cut-off 부분 스크롤 안쪽인 즉, 6번 위치의 B.P.F. 소음 크기 기여도가 매우 크다는 것을 알 수 있고 4, 5, 6번 크기 비교에서도 허브쪽으로 갈수록 월등히 높아지는 것으로 보아 2차 유동이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

Cut-off 간격 변화에 따라 성능 곡선을 구하고 유량계수를 선정, 각각에 대하여 소음 측정 및 스크롤 표면 압력 측정, 내부 유동 측정 및 압력 변동 측정 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스크롤 내부 유동 측정과 압력 변동 측정을 위한 신뢰성 있는 실험 방법 및 절차를 확립하였다.

(2) 임펠러 위치 이동에 따른 cut-off 간격 확대는 cut-off 주위의 2차 유동 발달을 야기하고 이는 B.P.F. 소음을 증가시킨다.

(3) 최적 유량계수로 운전 시  $r/R=0.1$ 에서의 B.P.F. 소음 저감과 효율 향상을 위한 최적점이다.

(4) Cut-off 부분 ( $\theta=90^\circ$  부분)의 스크롤 안쪽 위치가 B.P.F. 소음 발생 기여도에 있어서 가장 크다.

(5) 측정된 데이터는 다익의 송풍기 설계 및

수치 해석 타당성 검증에 사용될 수 있다.

#### 참고 문헌

1. W. Neise, 1982, "Review of Noise Reduction Methods for Centrifugal Fans", Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 151-161.
2. Satoshi SHIBATA et al., 1996, "Control of BPF Noise for Multiblade Fan by Additional Method of Auxiliary Cut-off Shear", 日本機械學會論文集(B編), 62卷, 604號, pp. 160-168.
3. Ken MORINUSHI, 1991, "Noise Source of a Multiblade Fan", 日本機械學會論文集(B編), 57卷, 543號, pp. 197-204.
4. Treaster, A.L. et al., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes", ISA Transactions, Vol. 18, pp. 23-34.
5. Bryer, D.W. and Pankhurst, R.C., 1971, "Pressure Probe Methods for Determining Wind Speed and Flow Direction", London; HMSO.
6. Judd, A.M., 1975, "Calibration of a Five Tube Probe for Measuring Wind speed and Direction", Journal of Physics E; Scientific Instruments, Vol. 3, pp. 356-362.
7. 김진권 외, 1996, "5공 튜브의 전범위 압력 계수 지도와 새로운 검정 매개변수", 대한 대한 기계학회 추계 학술대회 논문집, B, pp. 518-524.
8. Embleton, T. F. W., 1963, "Experimental Study of Noise Reduction in Centrifugal Blowers", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 35, pp. 700-705.
9. Bruno Eck, 1973, "Fans", 2nd Edition, Pergamon Press.