

# 다익 팬/스크롤 시스템의 로터 내부 유동 특성에 관한 실험적 연구

맹주성\*, 윤준용\*, 안태범\*\*, 윤종은\*\*\*, 한덕전\*\*\*

(1998년 12월 9일 접수)

## An Experimental Study for Flow Characteristics Inside the Rotor of a Multiblade Fan/Scroll System

Joo-Sung Maeng, Joon-Yong Yoon, Tae-Beom Ahn, Jong-Eun Yoon and Doug-Jeon Hahn

**Key Words :** Multiblade Fan(다익 팬), Scroll(스크롤), 5-Hole Pitot Tube(5공 피토관), Inactive Zone(유동 차단 영역), Hub(허브), Smoke Test(유동 가시화)

### Abstract

Detailed characteristics of the mean flow field inside the rotor of a multiblade fan with scroll are presented in this paper by measurements and visualizations. The measurements were taken with a five-hole probe and conformed by smoke test. Flow field is distinguished clearly in 3 regions with respect to the flow directions. The first region is near the exit of scroll where the fluid flows the opposite direction to the rotation of rotor. The second is opposite side of the scroll exit where the fluid flows the same direction to the rotation of rotor. The third is the region where the fluid flows toward the blades directly with the largest values comparatively. The strongest recirculation is happened in the second region, and the weakest one is in the third region. This complex configuration makes the flow field highly non-uniform and may cause to generate a noise and ineffective flow efficiency.

### 기호설명

- A, B, C, D, E : 축 방향 5개 단면
- b : 임펠러 폭
- Cp, Cy, Ct, Cs : 무차원 보정 계수
- d<sub>1</sub> : 임펠러 안지름
- d<sub>2</sub> : 임펠러 바깥지름
- n : 팬 운전 속도[rpm]
- P<sub>1</sub> ~ P<sub>5</sub> : 5공 피토관 각 구멍에서의 압력
- P<sub>m</sub> : (P<sub>2</sub>+P<sub>3</sub>+P<sub>4</sub>+P<sub>5</sub>)/4
- P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub> : 전압 및 정압
- Q : 유량
- r, θ, z : 반경, 원주 그리고 축 방향 좌표
- r1 ~ r5 : 반경 방향 측정 위치
- U<sub>2</sub> : 임펠러 외주에서의 원주 속도
- V<sub>r</sub> : 반경 방향 속도 성분

V<sub>θ</sub> : 원주 방향 속도 성분

V<sub>r</sub> : 축 방향 속도 성분

### 1. 서론

다익 팬/스크롤 시스템은 공조기기, 환기장치

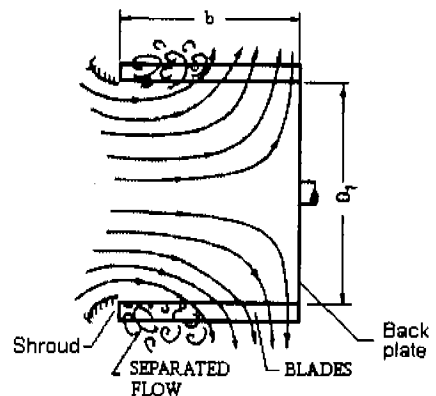


Fig. 1 Sketch of flow into impeller.

\* 회원, 한양대학교 기계공학부

\*\* 한양대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 만도기계 주식회사

전자기기 등에 광범위하게 이용되고 있으며 저소음화가 해결되어야 할 가장 시급한 문제점이다. 이 시스템의 소음원 중에 하나는 팬/스크롤의 상호작용으로 인한 복잡한 유동장에 의한 것이다. 따라서 유동효율 증대를 통한 저소음화에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

Raj 등은 유동가시화를 통해 팬 입구 쉬라우드 부근에서 유동박리(Fig. 1)가 발생하여 유동차단 영역(Inactive zone)이 존재하고 그 크기는 원주방향에 따라 불균일하게 분포한다는 것을 정성적으로 고찰하였다.<sup>(1)</sup> Kind 등은 5공 피토판을 사용하여 날개 입출구에서 유동장을 측정하였으며 유동의 비대칭성과 스크롤의 설부(Cut-off)주위에서 역류가 발생함을 보여주었다.<sup>(2)</sup> Katota 등은 Spark Tracing 법으로 날개사이 유동을 가시화 하였다.<sup>(3)</sup> 최근에는 Vadari 등이 환형 안내깃을 달아 유동차단 영역의 크기를 최소화 시키기 위한 연구를 수행하였고<sup>(4)</sup> Humbad 등은 스크롤의 설부에서 발생하는 유동박리 현상이 소음의 주요 원인이라는 사실도 밝혔다.<sup>(5)</sup> 1997년 Kind는 모모터가 팬 외부에 있는 경우에 대하여 내부 유동 특성을 예측하는 유

동 모델을 제시하였다.<sup>(6)</sup>

위와 같은 내용을 바탕으로 본 연구에서는 모모터가 팬 내부에 존재하는 경우에 대해 5공 피토판으로 내부 유동장을 측정하여 그 특성을 알아내고자 하였고 연기를 사용한 유동가시화를 통하여 유동특성을 확인하였다.<sup>(7)</sup>

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 모델은 상용화된 일반적인 형상으로 모모터가 임펠러 내부에 장착된 것(Fig. 2)이고 주요 제원은 Table 1에 제시하였다.

평균속도 및 압력을 측정하기 위하여 사용된 5공 피토판은 미국 United Sensor 사의 제품으로 Fig. 3에 도시하였고, KANOMAX에서 제작한 난류강도 1%의 패쇄형 풍동을 사용하여 보정하였다. 피토판의 각 구멍에서 얻은 압력은 스케닝 박스를 통하여 0.01mmH<sub>2</sub>O 정밀도의 마이크로마노메타로 전달되고 A/D 변환기에서 디지털 신호로 바뀌어

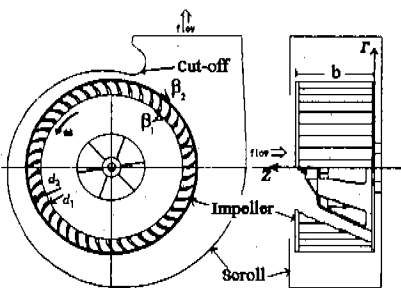


Fig. 2 Tested fan configuration.

Table 1 Fan specification and operation condition.

| Designation                     | Size  |
|---------------------------------|-------|
| b (mm)                          | 138   |
| d <sub>1</sub> (mm)             | 252   |
| d <sub>2</sub> (mm)             | 306   |
| d <sub>1</sub> / d <sub>2</sub> | 0.82  |
| β <sub>1</sub> (deg.)           | 70    |
| β <sub>2</sub> (deg.)           | 30    |
| Δ β (deg.)                      | 30.5  |
| No. of Blades : N               | 43    |
| n (rpm)                         | 530   |
| Q (cmm)                         | 19.92 |

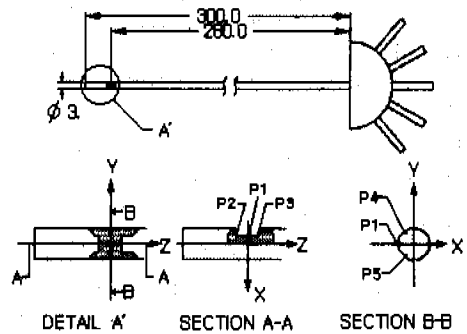


Fig. 3 Schematic diagram of 5-Hole Pitot tube.

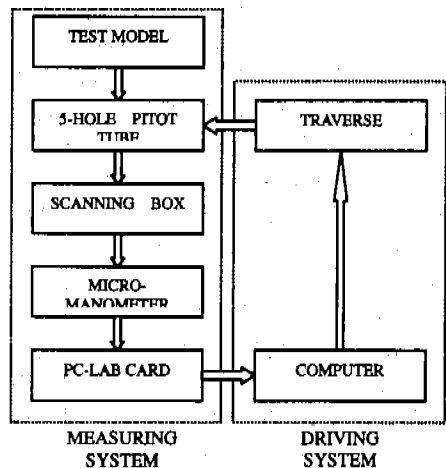


Fig. 4 On-line system.

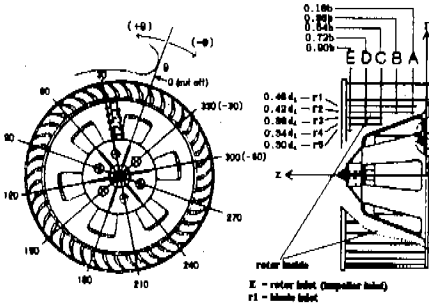


Fig. 5 Pressure and velocity measurement location.

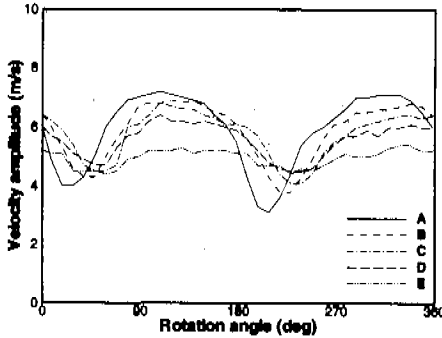


Fig. 6 Velocity distribution by the Hot-film Anemometer rotation ( $\theta = 0^\circ$ ).

하드디스크에 저장된다. 이 과정은 1/100mm 정밀도의 3차원 자동이송장치를 이용하여 측정위치를 결정한 다음 각 위치에서 매번 반복 수행하였다.(Fig. 4) 측정위치는 Fig. 5와 같이 축 방향으로 5개 단면(A,B,C,D,E), 원주방향으로 30°간격 그리고 반경방향으로 2~5개의 점을 선택하여 총 204개 점에서 측정하였다.

5공 피토판은 측정 가능한 유동각에 한계가 있기 때문에 측정점에서 대략적인 평균유동방향을 알아내기 위하여 Hot-Film Anemometer을 360° 회전시켜가며 속도분포를 측정한 후 (Fig. 6) 최대 속도를 갖는 각을 피토판의 측정각으로 하였다. 그렇게 얻은 각 홀의 압력값을 이용하여 피치각 계수  $C_p = (P_2 - P_3)/(P_1 - P_m)$ , 요각 계수  $C_y = (P_4 - P_5)/(P_1 - P_m)$ 의 보정 곡선으로부터 유동벡터에 대한 피치각, 요각을 구하고 그 다음에 전압 계수  $C_t = (P_1 - P_2)/(P_1 - P_m)$ , 정압 계수  $C_s = (P_m - P_1)/(P_1 - P_m)$ 로부터 전압과 정압을 구한다. 전압과 정압차로 구한 동압과 이미 구한 피치각, 요각으로부터 반경방향, 원주방향 그리고 축방향 속도 성분을 구한다.  $\pm 30^\circ$ 내에서 얻어진 보정 곡선은 그 범위에서 연속적이고 일대일 대응이며 외삽하여  $\pm 40^\circ$ 까지 유용하게 사용되어 졌다.

Table 2 Uncertainty estimates.

| Parameter  | Estimated Uncertainty<br>( 20:1 odds) |
|------------|---------------------------------------|
| $V_r$      | $\pm 1.5 \%$                          |
| $V_\theta$ | $\pm 1.3 \%$                          |
| $V_z$      | $\pm 1 \%$                            |
| $V$        | $\pm 1.6 \%$                          |
| $U_2$      | $\pm 0.37 \%$                         |
| $Q$        | $\pm 1 \text{ cm}$                    |

ASME 표준에 따른 주요 변수에 대한 불확실성 정도를 Table 2에 나타내었다. 로터의 회전수는 530rpm으로 유지시켰으며, 피토판을 사용한 측정 결과의 보다 현실적인 분석을 위하여 연기를 이용한 유동가시화를 수행하여 정성적인 유동특성을 비교하였다. 이때, 연기의 유입속도는 초기조건이 영(zero)이었다.

### 3. 결과 및 고찰

팬 내부 유동의 특성을 이해하기 위해서 모든 측정 점에 대해 반경, 원주 그리고 축 방향 속도를 구하였으며, 그 중 임펠러에 가장 가까운 측정 위치( $r = 0.46d_1$ )의 값을 성분별로 나타내었다. 각각의 속도성분은 임펠러 외경속도  $U_2$ 로 무차원화시켰으며, 축 방향 성분( $V_z$ )은 주 유동 방향 속도가 좌표축에서 음의 방향이기 때문에 이를  $-V_z$ 로 바꾸어 양의 값을 갖도록 표시하였다.

#### 3.1 로터 내부의 유동 특성

Fig. 7은 204개의 모든 측정점에서 속도벡터를 각 단면별로 나타낸 것으로 공통적인 유동특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 유동 방향이  $\theta = 90^\circ$  근방에서 서로 반대가 됨을 알 수 있으며 벡터의 크기가  $\theta = 270^\circ \sim 330^\circ$  근방에서 상대적으로 최대 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라  $r = 0.46d_1$ 인 곳, 즉 날개 입구에서의 속도벡터를 단면별로 비교하여 보면 A, B, C 단면의 경우는 임펠러를 향하고 있음이 명확하나 D, E 단면의 경우는 점차적으로 로터 안쪽을 향하고 있다. 이것은 Fig. 1에서 보듯이 D, E 단면에서 유동차단 영역이 존재하며 그 영역을 지난 곳 A, B, C 단면에서는 유체가 날개 방향으로 향하게 됨을 말해주는 것이다. 이 곳에서의 속도 성분을 보다 더 구체적으로

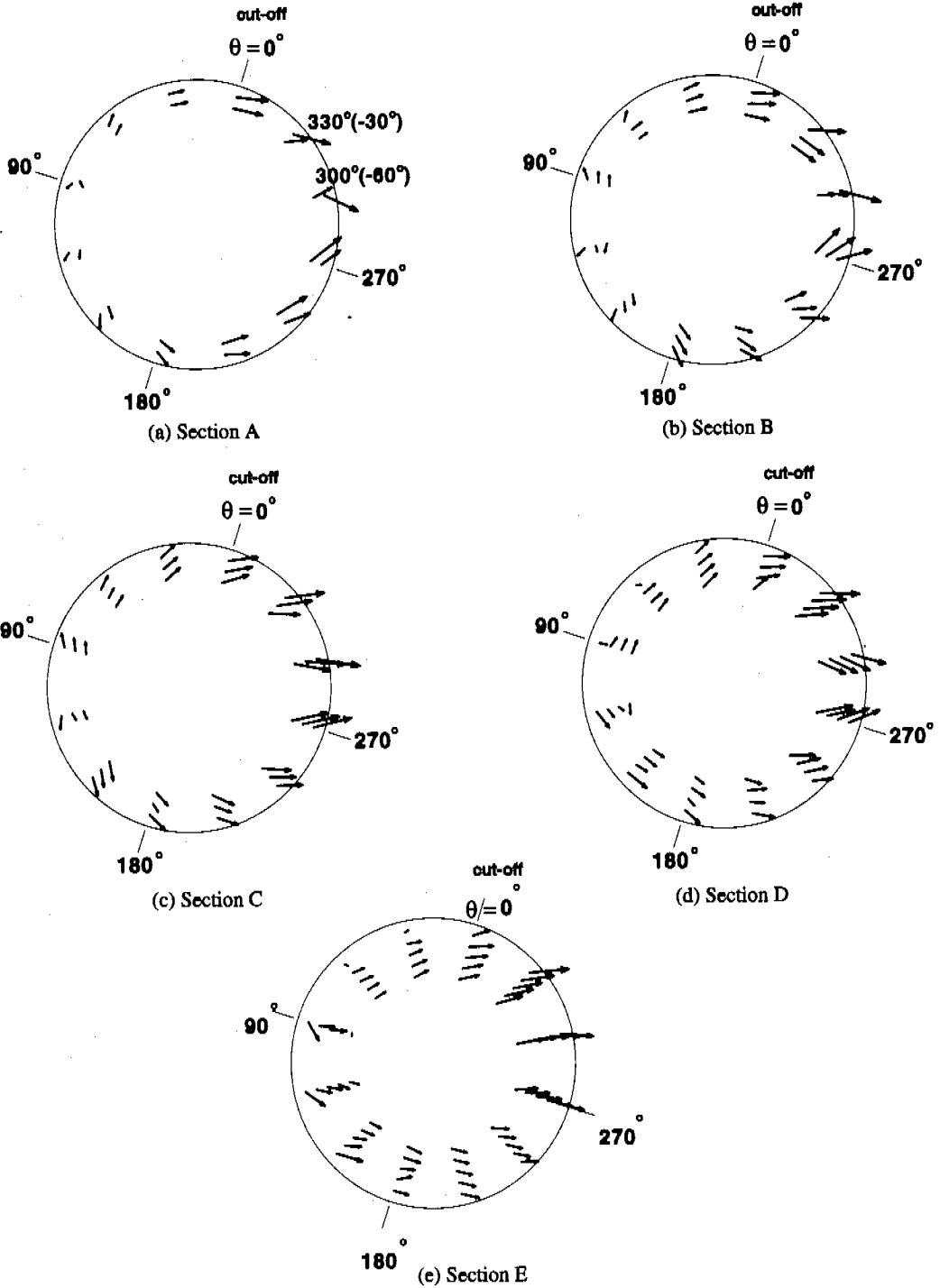
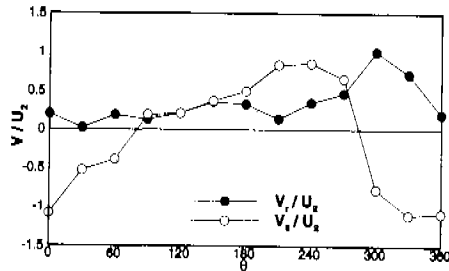


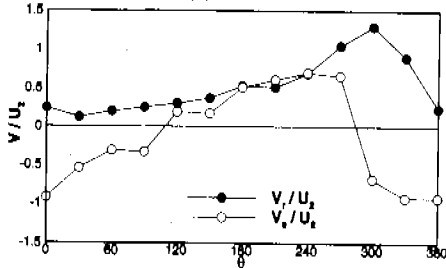
Fig. 7 Velocity vectors in r -  $\theta$  plane.

고찰하기 위하여 Fig. 8 에  $V_r$  과  $V_\theta$  를 각각 나타내었다. 이 두 그림으로부터 로터 내부의 유동은

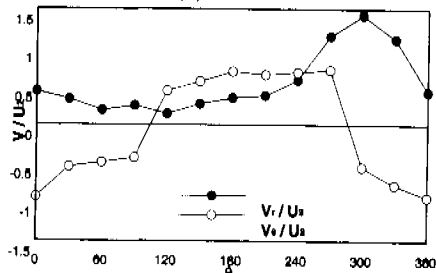
대략 다음과 같이 3 가지 영역으로 구분이 된다. 제 1 영역은  $-30^\circ < \theta < 90^\circ$  인 곳으로  $V_\theta / U_2 < 0$



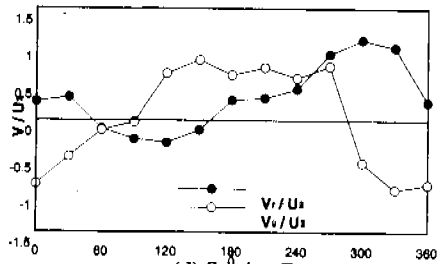
(a) Section A



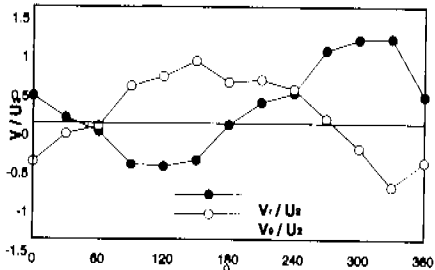
(b) Section B



(c) Section C

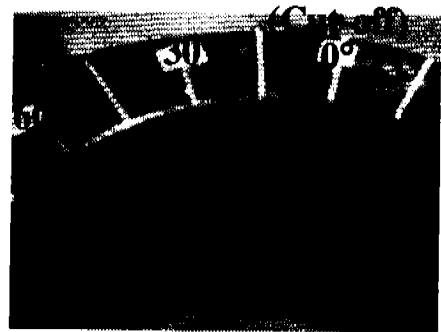


(d) Section D

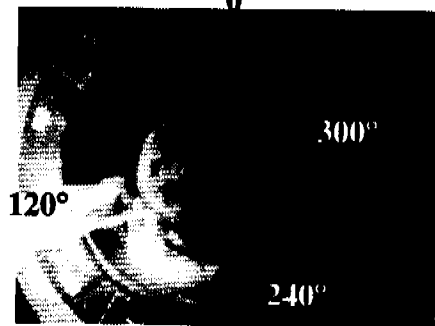


(e) Section E

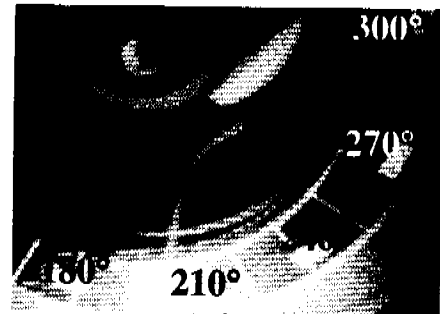
Fig. 8 Velocity distributions at the blade inlet ( $r = 0.46d_1$ ).



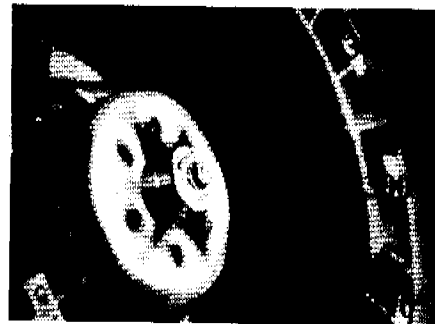
(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 120^\circ$



(c)  $\theta = 210^\circ$



(d)  $\theta = 330^\circ$

Fig. 9 Flow visualization.

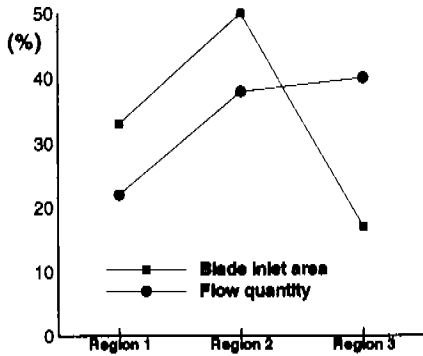


Fig. 10 Blade inlet area and flow quantity.

을 나타내어 임펠러 회전과 반대 방향의 유동이 존재한다. 이 현상은 스크롤이 없는 경우에는 나타나지 않는 것으로 스크롤 출구가 위치하기 때문에 그 근방에서의 압력이 로터 내부에 영향을 주기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

제 2 영역은  $90^\circ < \theta < 270^\circ$  의 구간으로 전 단면에 걸쳐서  $V_\theta / U_2 > 0$ 를 나타내며 임펠러 회전과 같은 방향으로 유동이 존재한다. 뿐만아니라, 임펠러 입구에 가까운 단면(E, D 단면)에서  $V_r < 0$  인 것을 보여주고 있어 박리로 인한 유동 차단 영역이 크게 존재하며 특히  $90^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$  근방에서 가장 강한 역류가 발생한다는 것도 알 수 있다.

제 3 영역은  $270^\circ < \theta < 330^\circ$  인 곳으로  $|V_r| > |V_\theta|$ ,  $V_r > 0$  이며  $V_r$  이 최대값을 가지고 있어 유동 차단 영역의 크기가 최소가 되는 곳임을 알 수 있다. 유동 차단 영역의 크기에 관한 고찰은 참고 문헌(9)에 수록하였다.

Fig. 9는 이 3 가지 영역에서 연기물 사용한 유동 가시화의 대표적인 예를 보여주는 것으로  $\theta = 30^\circ$  에서 연기가 회전 방향과 반대로,  $\theta = 120^\circ$ ,  $210^\circ$  에서는 같은 방향으로,  $\theta = 330^\circ$  에서는 직접 날개로 유입됨을 보여 주고 있다. 이 결과는 5공피토관을 사용하여 측정한 Fig. 7의 결과와 정성적으로 매우 잘 일치하고 있다.

이상의 결과는 Yamazaki<sup>(6)</sup> 등이 측정한 스크롤 내 압력 분포가  $\theta = 330^\circ$  근방에서 최저 압력을 갖는 것과 일치하는 것이다.

Fig. 10은 날개 입구 면적 및 통과 유량에 대한 각 영역별 비중을 나타낸 것이다. 각 영역에서 날개 입구 면적은  $\int_0^b \int_{\theta(rad)} (d_1/2) d\theta dz$  을, 날개 통과 유량은  $\int_0^b \int_{\theta(rad)} V_r (d_1/2) d\theta dz$  을 계산하여 구하였다.  $V_r$  ( $r = 0.5d_1$ )은 r1과 r2 지점의 유동장 측정용 바탕으로 외삽법을 사용하여 구하였으며 역

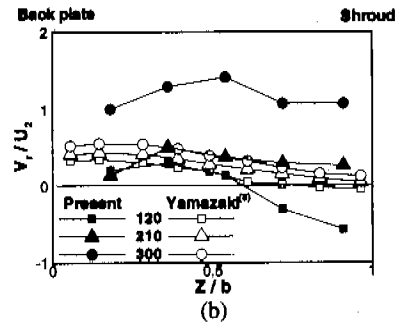
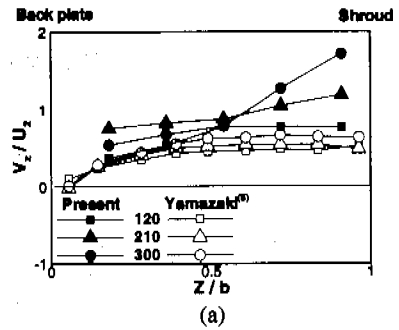


Fig. 11 Axial and Radial Velocity distribution at the blade inlet ( $r = 0.46d_1$ ).

류를 의미하는 음의 값은 제외되었다. 제 3 영역은 면적(약 17%)이 상대적으로 작음에도 많은 유량(약 40%)이 날개를 통과하는 것은  $V_r$ 의 값이 크기 때문이다. 반면에 면적이 큰 제 2 영역(약 50%)과 제 1 영역(약 33%)에서는 상대적으로 유량이 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 제 1, 2 영역에서보다 제 3 영역에서 유입각이 좋도록 날개 설계각을 결정하는 것이 바람직할 것이다.

### 3.2 허브가 유동에 미치는 영향

팬 내부에 구동 모오터가 위치하는 경우 복잡한 경계면이 유동장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Yamazaki<sup>(6)</sup>의 구동 모오터가 팬 외부에 위치하는 연구 결과와 정성적인 비교를 하였다. Fig. 11은 세가지 영역의  $\theta = 120^\circ, 210^\circ, 300^\circ$  에서  $V_z$  와  $V_r$  의 분포를 Yamazaki의 실험 결과와 비교한 것이다. 여기서 측정 위치는 같지만 실험 모오터의 크기가 다르기 때문에 정량적 비교는 의미가 없다는 것을 말해준다. 구동 모오터가 외부에 있는 경우는  $V_z$  와  $V_r$  의 값이 완만하게 변화하고 있는 반면 본 연구의 경우는 상당히 큰 구배를 가지고 변화하고 있다. 특히,  $V_r$  의 값이  $\theta = 120^\circ$  에서 음의 값을 나타내는 지역이 존재함을 명확히 알 수 있으며 각도가 커짐에 따라 속도 편차가 커질 뿐 아니라  $\theta = 300^\circ$  근방에서  $V_r$  이 최대값을 갖는

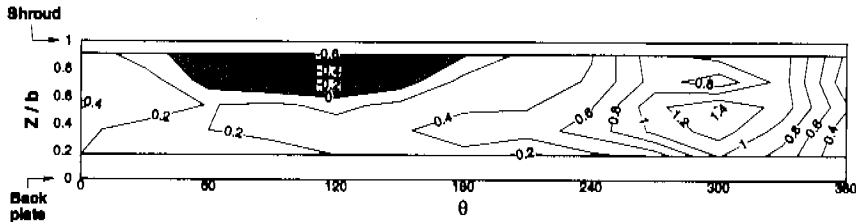


Fig. 12 Radial Velocity distribution at the blade inlet.

다. 이 결과는 구동 모터로 인한 허브의 회전과 스크롤 출구의 위치가 유동장 전체에 걸쳐 복잡한 압력 변화를 유발시키기 때문인 것으로 판단되며 유동 차단 영역을 크게 하여 유동 효율을 저하시키는 요인이 될 것이다.

### 3.3 임펠러 입구 유동의 불균일성

Fig. 12는 날개 입구( $r=0.46d_1$ )에서의  $V_r$ 을  $U_2$ 로 무차원화하여  $\theta - z$  평면에 분포시킨 것이다.  $0.6 \leq z/b \leq 1$  이고  $30^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  인 영역에서  $V_r$ 이 음수 값을 나타내고 있는 바 유동 차단 영역임을 알 수 있다. 또한  $0.4 \leq z/b \leq 1$  이고  $240^\circ \leq \theta \leq 330^\circ$  인 곳에서  $V_r$ 이 다른 영역보다 3배 ~ 5배 정도 큰 값을 갖는다. 이와 같이 유동 차단 영역의 존재는 반경 방향 속도에 영향을 주게 되어 유동장 전체를 불균일하게 하며 유동효율을 저하시킨다. 따라서, 유동 차단 영역을 최소화하고 전단면에 걸쳐 유동의 균일도를 증가시키는 것이 바람직하다.

## 4. 결론

본 실험에 사용된 팬/스크롤 시스템의 로터 내부 유동 특성은 다음과 같다.

- (1) 팬 내부 유동은 원주 방향에 따라 크게 3 영역으로 구분되어 제 1 영역( $\theta = -30^\circ \sim 90^\circ$ )에서는 임펠러 회전 방향과 반대 방향으로, 제 2 영역( $\theta = 90^\circ \sim 270^\circ$ )에서는 같은 방향으로, 그리고 제 3 영역( $\theta = 270^\circ \sim 330^\circ$ )에서는 날개 방향으로 향하는 유동이 형성된다.
- (2)  $\theta = 90^\circ \sim 150^\circ$  부근에서 가장 강한 역류가 형성되며,  $\theta = 270^\circ \sim 330^\circ$ 에서는 반경 방향 속도가 최대이고 날개를 빠져나가는 총 유량의 약 40%가 이 부분을 통과한다.

- (3) 로터 내부에 허브가 위치하는 경우 유동 차단 영역을 크게 하여 유동장의 불균일성을 증가시키고 유동효율을 저하시킨다.

## 참고문헌

- (1) Raj, D. and Swim, W. B., 1981, "Measurements of the Mean Flow Velocity and Velocity Fluctuations at the Exit of an FC Centrifugal Fan Rotor", *J. of Engineering for Power*, Vol.103, pp.393-399
- (2) Kind, R. J. and Tobin, M. G., 1990, "Flow in a centrifugal Fan of the Squirrel-Cage Type", *Transaction of the ASME*, vol.112, pp.84-90
- (3) Shigeru KADOTA, et al., 1994, "Experimental Study on Low-Noise Multiblade Fan", *Transaction of the JSME*, Vol.60, No.570, pp.102-107
- (4) Vadari, V. R., et al., 1996, "Effect on Annular Inlet Guide on the Performance of Low-Speed Centrifugal Fans", *Proceedings of the ASME Noise Control and Acoustics Division*, pp. 219-226
- (5) Humbad, N. G., et al., 1996, "Case Study on Reducing Automotive Blower Rumble Noise", *Proceedings of the ASME Noise Control and Acoustics Division*, pp. 233-242
- (6) Kind, R. J., 1997, "Prediction of Flow Behavior and Performance of Squirrel-Cage Centrifugal Fans Operating at Medium and High Flow Rates", *J. of Fluids Engineering*, Vol.119, pp. 639-646
- (7) Maeng, J. S., et al., 1998, "Theoretical and Experimental studies for development of low noise-high efficiency fan/scroll", *Technical Report HYCFEL9707*, Hanyang Univ.
- (8) Susumu Yamazaki and Ryohji Satoh, 1986, "An Experimental study on the Aerodynamics Performance of Multi-Blade Blowers", *Transaction of the JSME*, Vol. 52, No. 484, pp.3987-3991
- (9) Maeng, J. S., Yoon, J. Y. and Jung, K. Y., 1998, "Quantification and Application of Inactive zone to Design Multiblade Fan/Scroll System", *J. of Fluid Engineering*, submitted