

전향 스위프 프로펠러 팬의 성능 및 유동특성

김진권* · 감신형**
(1999년 6월 26일 접수)

Performance and Flow Characteristics of a Forward Swept Propeller Fan

Jin-Kwon Kim and Shin-Hyoung Kang

Key Words : Forward Swept Propeller Fan (전향 스위프 프로펠러 팬), Performance (성능), Flow Field (유동장), Phase-Lock Average (위상평균), Rotating Stall (회전실속)

Abstract

Performance and flow characteristics of a small forward swept propeller fan for home refrigerators are studied experimentally. An unusual discontinuity is observed in the performance curve of the fan. Mean flow fields measured with a 5-hole Pitot probe reveal that the flow is axial at the high flow rate and radial at the low flow rate. The flow structure changes abruptly across the discontinuity. Unsteady flow measurements with a set of hot-wire probes indicate that near the discontinuity a single-cell stall rotates at 40% speed of the fan speed, while away from the discontinuity the flow shows periodic variation corresponding to the blade passage frequency. Phase-lock averaged flow fields measured with a triple-sensor hot-wire probe show that there appears radially inward flow over the pressure side of the blade and the outward passage flow over the tip.

기호설명

- e_1, e_2 : 열선 및 위상신호 출력 (volt)
- $P_{S,FAN}$: 팬 정압 (Pa)
- u_t : 날개 팁 선속도 (m/s)
- v, w : 절대 및 상대속도 (m/s)
- x, y, z, r, θ : 좌표계 (Fig. 2)
- N : 팬 회전수 (rpm)
- Q : 유량 (m^3/s)
- ρ : 공기 밀도 (kg/m^3)
- ω : 각속도 (1/sec)
- Φ, Ψ : 유량계수 및 압력계수 (Fig. 3)

하첨자

- a, r, t : 축방향, 반경방향, 접선방향

1. 서론

프로펠러 팬은 압력상승은 크지 않지만 많은 유량을 낼 수 있어서, 냉장고, 에어컨, 전자레인지, 컴퓨터 등의 가전제품에서 냉기순환, 열전달 촉진, 마그네트론 및 전자부품 냉각 등의 용도와 건물 환기용으로 많이 사용된다. 전향 스위프 프로펠러 팬은 후향 스위프이나 스위프가 없는 프로펠러 팬에 비해서 우수한 소음특성을 가진다고 알려져 있어서,⁽¹⁾ 최근에는 대부분의 프로펠러 팬이 전향 스위프 날개를 채택하고 있다. 일부 전향 스위프 프로펠러 팬의 성능시험에서 작동점 부근에서 유량과 압력 상승이 동시에 감소하는 특이한 성능저하현상이 관찰되었다.^(2,3) 이 성능저하 현상은 작동점 부근에서 나타나기 때문에, 유로의 작은 부하 변동에 의해서 팬의 성능 및 소요동력이 크게 변하여 운전 상태가 불안정해 지는 원인이 된다. 본 논문에서는 이런 특성을 가지는 대표적인 전향 스위프 프로펠러 팬을 선택하여, 정밀한 성능 및 유동장 측정을 실시하여 성능저하현상의 원인을 연구하였다. 5

* 회원, 서울대학교 터보동력기계연구센터
E-mail : jk@fluidmachin.com
TEL : (02)874-6852 FAX : (02)889-6205

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

공 피토 프로브와 3 차원 열선유속계를 사용하여, 평균 및 위상 평균 유동장을 측정하고, 몇 개의 단일 열선 유속계를 이용하여 회전속특성 등 순간유동특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 전향 스윙 프로펠러 팬의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 가정용 냉장고의 냉기 순환용으로 사용되는 이 팬은 플라스틱 제품이지만, 회전할 때의 팬 변형과 진동에 의한 영향을 없애기 위해서 알루미늄 합금으로 기계 가공하여 실험에 사용하였다. 가공된 모델 프로펠러 팬을 삼차원 형상 측정기로 측정하여 정확한 사양을 Table 1에 나타내었다.

팬 성능은 AMCA 규격⁽⁴⁾에 따라 측정되었다. 유량은 900x900 mm 챔버 사이에 설치된 5개의 장반경 노즐에서 측정되었다. 유량설정은 인버터에 의해서 제어되는 보조송풍기의 회전수와 스톱밸브를 조절함으로써 이루어졌다. 프로펠러 팬은 0.9도 단위로 위치를 제어하고 토크변화에 관계없이 일정한 회전수를 내도록 피드백 제어하는 서보모터에 의해서 구동된다. 자세한 팬 성능측정 방법은 김진권⁽⁵⁾에서 설명하였다. 실제 냉장고에서 팬의 회전수는 유로의 부하에 따라 2000 - 3000 rpm에서 작동하기 때문에, 본 연구에서 성능 및 유동장 측정은 2000 rpm과 3000 rpm에서 각각 이루어졌다. 각 유량계수에서 측정된 성능 및 유동장은 무차원화 했을 때 회전수에 관계없이 잘 일치하여, 중간 회전수에서도 같은 무차원 성능 및 유동장을 나타냄을 보였다.

유량계수에 따라 유동구조가 축방향에서 반경방향으로 변하는 것을 고려하여, 유동장 측정은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 $z = 25, 50, 100$ mm의 축방향 측정위치와 $r = 60, 80, 100$ mm의 반경방향 측정위치에서 이루어졌다. 5공 피토 프로브의 측정 각도 범위를 요, 피치각 $\pm 45^\circ$ 까지 넓은 김진권과 강신형⁽⁶⁾의 넓은 각도 범위의 5공 피토 프로브 검정계수를 사용하여 평균 유동장을 측정하였다. 위상평균 유동장은 열선배치각도와 열선의 요, 피치계수를 알 필요가 없도록 개발된 김진권과 강신형⁽⁷⁾의 3차원 열선유속계 검정 및 측정법을 적용하여 측정하였다. 프로펠러 후류의 유동장은 공간 및 시간적으로 변화가 크기 때문에 5공 피토 프로브에 의해서 측정된 평균유동장 데이터를 사용

하여 3차원 열선프로브를 평균유동장의 방향과 일치시켜서 측정하였다. 서보모터로부터의 기준위상신호와 3차원 열선 유속계의 유속 데이터를 동시에 기록하여, 위상평균 유동장을 계산하는데 사용하였다. 프로펠러 한 회전에 200개의 위상의 가지도록 3000 rpm에서는 10 kHz로, 2000 rpm에서는 6.67 kHz의 속도로 데이터 추출이 이루어졌고, 수렴성을 확인을 거쳐 500개의 데이터를 앙상블 평균하였다.

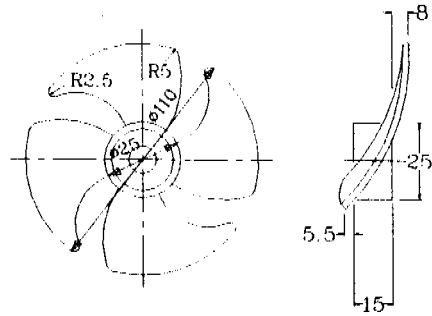


Fig. 1 Drawing of the forward swept propeller fan

Table 1 Specification of the propeller fan

Specification	Tip	Mean	Hub
Radius (mm)	55.0	33.7	12.5
R/Rtip	1.0	0.61	0.23
Chord (mm)	76.9	45.4	15.9
Pitch (mm)	86.4	52.9	19.6
Stagger angle (deg.)	72.9	63.8	58.7
Inlet blade angle (deg.)	80.1	76.2	63.3
Outlet blade angle (deg.)	56.4	67.3	57.0
Blade height (mm)	28.5		
Hub height (mm)	15.0		

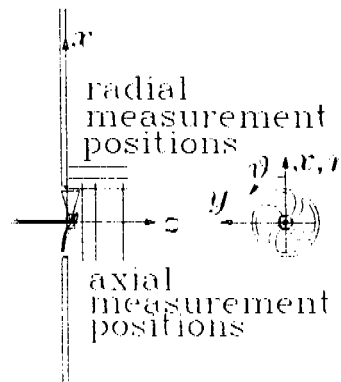


Fig. 2 Coordinate system and flow field measurement locations

요, 피치각 $\pm 45^\circ$ 까지 확장된 측정각도에서 5공 피토 프로브의 측정 오차는 95%의 신뢰도로 요각 $\pm 2.1^\circ$, 피치각 $\pm 1.4^\circ$, 속도 $\pm 0.7\%$, 정압은 동압의 $\pm 2.6\%$ 이다.⁽⁶⁾ 삼차원 열선유속계 측정의 오차는 95%의 신뢰도로 유동각에 대해서 1.0° , 속도에 대해서 1.2%이다.⁽⁷⁾ 프로브들은 낮은 난류강도의 균일유동에서 검정되었고, 프로펠러 후류의 유동은 유속의 구배가 크고, 섭동이 심하며, 난류강도가 크기 때문에, 실제 측정오차는 이보다 더 클 것이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 성능특성

유량계수에 따른 압력계수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 압력상승은 유량이 증가하면서 감소하는데, 이는 전형적인 프로펠러 팬의 성능특성이다. 그러나 $\Phi = 0.3$ 부근에서 유량을 증가시키기 위해서 스톱밸브를 조금 더 열면 유량과 압력상승이 동시에 감소하는 짧은 구간이 발생한 후, 불연속적인 성능감소 구간이 나타난다. 2000, 3000 rpm에서 측정된 성능은 회전수에 관계없이 동일한 무차원 성능을 나타내는데, 이러한 상사성은 성능의 불연속 구간에서도 성립한다. 실제 작동유량이 불연속점 부근이기 때문에, 냉장고 내부 내용물이나, 성에 형성 등에 의해서 유로의 저항이 약간 변할 때, 팬은 불안정한 부하변동을 겪을 수 있다.

자유송출 유량으로부터 스톱밸브를 닫으면서 성능을 측정해도 거의 동일한 성능곡선이 구해진다. 그러나, Fig. 3의 삽입 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 불연속점 부근에서 약간의 이력현상이 발생한다. 스톱밸브를 열 때의 불연속점의 시작점은 스톱밸브를 닫을 때 불연속의 종착점보다 약간 왼쪽 아래에 존재하고, 스톱밸브를 닫을 때의 불연속 시작점은 스톱밸브를 열 때의 불연속 종착점 보다 약간 왼쪽 위에 존재한다. 이것은 불연속이 일어나기 직전에 현재의 성능상태를 유지하려는 경향이 있음을 나타낸다.

이러한 불연속 성능특성은 프로펠러 팬의 회전수가 정밀하게 일정한 상태를 유지할 때 만 관찰된다. 강신행 동⁽³⁾에서는 동일한 프로펠러 팬을 직류모터로 구동하여 성능 측정을 하였다. 이때 불연속점에서 멀리 떨어진 유량계수에서는 회전수 변동이 $\pm 1\%$ 이내로 유지되었지만, 불연속점 부근에서는 회전수 변동이 $\pm 5\%$ 에 달했다. 이 경우에는 성능곡선이 불연속적 변화를 보이지 않고, 불연속점 사이에서도 점진적인 변화를 나타내었다.

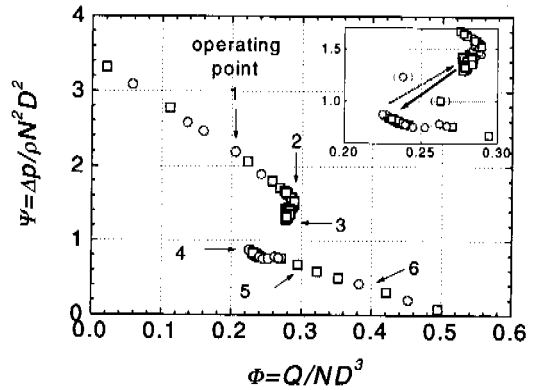


Fig. 3 Performance of the propeller fan in the open space

이와 같은 불연속적인 성능특성은 본 논문의 프로펠러 팬 뿐만 아니라 몇몇 전향 스위프 프로펠러 팬에 공통적으로 나타나는 현상으로 생각된다.^(2,3)

통상적인 프로펠러 팬의 성능곡선은 설계 유량의 약 80% 되는 유량에서 변곡점을 가지는 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 그러나, Fig. 3에 나타난 형태의 불연속은 잘 알려지지 않은 현상이다. 전형적인 다단 축류 압축기도 불연속 성능특성과 성능의 이력현상을 나타내지만,⁽⁹⁾ 이와는 다른 형태이다.

3.2 평균유동특성

성능곡선 상의 불연속점과 관련된 유동현상을 파악하기 위하여 팬 출구에서의 유동장 측정이 이루어 졌다. 프로펠러 팬 후류의 평균유동장을 5공 피토 프로브로 측정하여, 유량계수에 따른 전반적인 유동구조의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 작동점 1에서 6까지는 Fig. 3의 성능곡선에 나타낸 작동점을 의미한다. Figure 3에서 작동점 1과 6은 불연속점에서 멀리 떨어진 저유량 및 고유량부분에서 안정적인 작동을 하는 점으로, 유량계수로는 $\Phi = 0.2, 0.4$ 에 해당한다. 작동점 2는 저유량 부분에서 성능곡선이 방향을 바꾸는 부분이며, 작동점 5는 고유량 부분에서 비슷한 유량계수에 해당하는 부분으로 $\Phi = 0.3$ 이다. 작동점 3과 4는 각각 저유량 및 고유량에서의 불연속점으로, 성능곡선의 점프가 일어나기 직전의 작동점을 나타낸다.

불연속 성능곡선상의 고유량 부분에서는 Fig. 4의 작동점 6, 5, 4에서와 같이 유동이 측방향으로 형성된다. 불연속 성능곡선의 저유량 부분에서는 작동점 1, 2, 3에서와 같이 유동이 벽면을 따라 반경방향으로 나간다. 작동점 3과 4의 스톱밸브 상태는 거의 동일하지만 유량 및 압력상승특성과

유동구조는 Fig. 3 과 4 에서와 같이 큰 차이를 보인다.

유동이 축방향으로 나가는 작동점 6, 5, 4 의 경우에, 하류로 가면서 중심축 부근에 축방향 운동량이 작은 부분 혹은 역류영역을 가지면서 확산한다. 작동점 6 에서 4 로 유량계수가 줄어 상대적인 선회성분이 증가함에 따라 유동의 확산각은 커진다. 작동점 4 의 경우에 프로펠러 직후인 $z=25$ mm 에서는 축방향 속도성분이 반경방향 속도성분과 유사한 크기이나, 하류에서는 유동은 완전히 반경방향으로 바뀐다. 이 경우에 벽 근처에서 역류영역이 광범위하게 형성되고, 벨마우스와 프로펠러 팁 사이의 간격을 통해서 역류가 발생한다. 유동구조가 반경 방향으로 바뀌어 벽면을 따라 흐르기 시작한 이후에는 작동점 3, 2, 1 에서 유동형태가 거의 동일하다. 유동이 $r=60$ 에서 80, 100 mm 로 반경방향으로 진행함에 따라 벽쪽으로 밀착되고, 주위공간으로부터 유입이 발생한다. 벨마우스와 프로펠러 팁 사이의 공간을 통한 역류는 작동점 3, 2, 1 에 대해서 모두 발생하고 있다.

축방향 및 반경방향 위치에서의 자세한 속도 성분 및 압력의 변화를 Figs. 5 와 6 에 나타내었다. 프로펠러 팁의 선속도 u_t 및 그 동압 $\rho u_t^2/2$ 으로 무차원화된 속도와 압력은 프로펠러의 회전수에 관계없이 잘 일치한다.⁽⁵⁾ 축방향의 안정된 유동이 발생하는 작동점 6, 5 에서의 축방향 및 접선 방향 속도성분은 Figs. 5 (a), (b) 에 나타낸 바와 같이 평균 반경인 $r/r_t = 0.61$ 근처에서 최대값을 보이고 내부와 외부로 감에 따라 감소한다. 이는 공기역학적 부하가 평균반경 근처에 집중되어 있음을 나타낸다. 작동점 6 에서 5, 4 로 유량이 줄어들어 따라 유동 확산각은 증가하고, 중심축 주위에 음의 축방향 속도를 가지는 역류영역이 확대된다. Figure 5(b)에서 작동점 6 인 경우에 중심축에 가까운 영역에서의 상대적으로 큰 접선방향 속도성분은 허브 바로 뒤에서 작은 축방향 운동량을 가지고 강하게 선회하는 유동 부분이 있음을 나타낸다.

축방향 위치에서의 반경방향 속도성분을 나타낸 Fig. 5(c)에서, 중심축 가까운 부분에서는 중심축을 향하는 수축유동이, 중심축에서 먼 부분에서는 외부로 향하는 확산유동이 존재함을 알 수 있다. 작동점 6, 5, 4 로 유량계수가 줄어들어 따라 원심력이 상대적으로 커지기 때문에, 반경방향 속도성분이 증가한다. 평균반경 부근에서의 압력은 Fig. 5(d)에서와 같이 거의 일정한 분포를 나타내는 반면, 허브와 팁 부근에서는 양의 압력구배를 갖는다. 반경방향 평형유동의 압력구배는 원심력과 균형을 이룬다고 알려져 있다. 그러나 Fig. 5(d)에서 평균반경 부근의 균일한 압력부분에서는 반경방향 압력구배가 원심력과 균형을 이룰 만큼 크지 않으므로, Fig. 4 에서와 같이 하류로 감에 따라

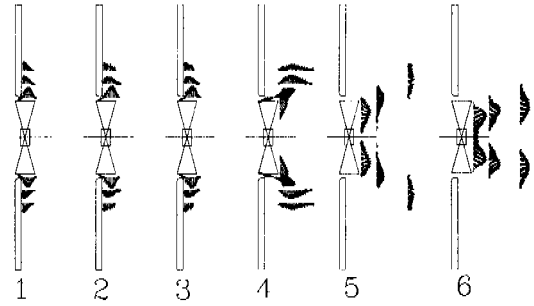


Fig. 4 Measured mean flow structures around the propeller fan at each operating point

반경방향으로 외부로 향하는 유동이 발달한다.

유동이 일단 반경방향 구조를 가진 이후에는 Fig. 6 에서와 같이 작동점 1, 2, 3 에 대한 속도 성분 및 압력의 분포가 서로 비슷하다. 반경방향 속도성분의 분포를 나타낸 Fig. 6(a)는 최대값이 벽에서부터 15 mm 정도 떨어져서 발생하고, 역류가 존재하는 벽면쪽과 외부로 가면서 감소한다. Fig. 6(b)에 나타낸 접선방향 속도성분은 벽쪽에서 최대값을 나타내고, 정지한 대기쪽으로 가면서 줄어든다. 축방향 속도성분은 Fig. 6(c)에서와 같이 벽에 가까운 부분과 대기와의 경계면에서 음의 값을 가지는데 이외에는 거의 0 에 가깝다. 반경방향 측정위치 $r=60$ mm 는 프로펠러 팁과 벨마우스 사이의 공간에 해당하는 부분으로, 벽에 가까운 부분의 음의 축방향 성분은 이 공간 사이로의 역류를 나타낸다. 정지한 대기와의 경계부분에 나타난 음의 축방향 속도는 대기로 부터의 유입을 나타낸다. 정압은 Fig. 6(d)에서와 같이 역류가 존재하는 벽 부근에서 음이고, 벽에서 멀어지면서 대기압으로 회복한다. 작동점 4 에서의 속도 성분 및 압력을 Fig. 6 에 함께 나타내었는데, 작동점 3 상태로 부터의 급격한 변화를 알 수 있다. 이 경우에 Fig. 6(a)에서 프로펠러 높이의 3/4 에 해당하는 15 mm 정도에 까지 벽쪽의 역류영역이 존재한다. 벽쪽 역류영역에서 Fig. 6(b)에서와 같이 큰 접선방향 속도성분을 가지는 것은 주목할 만하다. 작동점 4 에서서는 프로펠러가 축방향 입구로부터 뿐만 아니라 출구 쪽의 반경방향으로부터도 유체의 유입이 발생함을 나타낸다. Figure 6(c)에서 다른 경우와 마찬가지로 작동점 4 에서도 벨마우스와 프로펠러 팁 간격 사이로 역류가 존재한다.

축방향 및 반경방향으로 더 하류에서의 유동 발달과정을 대표적인 작동점 6 과 1 에 대해서 Figs. 7 과 8 에 나타내었다. 다른 작동점에서의 유동 발달 과정도 이 두 경우와 유사한 특성을 나타낸다. Figure 7(a)와 (b)에서 유동이 하류로 감에 따라 축방향 및 접선방향 속도는 감소한다. Figure 7(c)로부터 축방향 측정위치 $z=25$ mm 에서는 반경방향

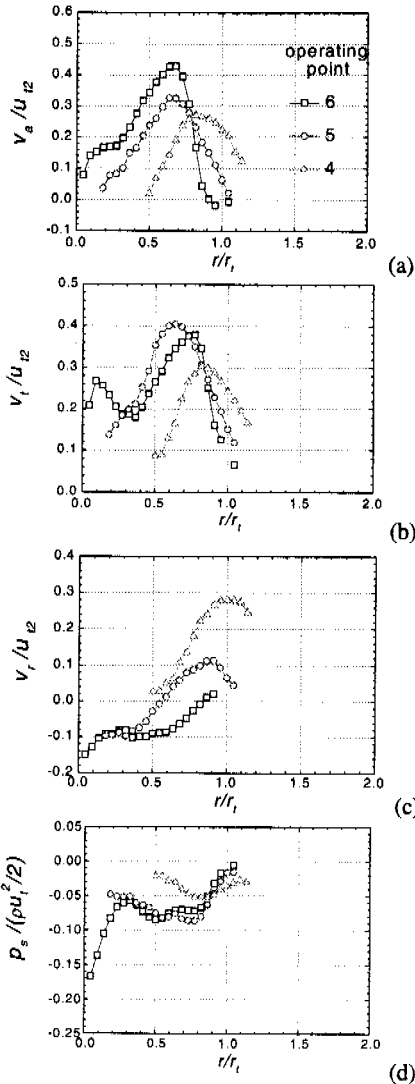


Fig. 5 Mean flow components at $z=25$ mm plane : (a) axial, (b) tangential, (c) radial velocity components, and (d) static pressure

속도성분이 팁 부근을 제외하면 대체로 음이지만, 더 하류에서는 대체로 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 압력분포의 변화를 나타낸 Fig. 7(d)에서 프로펠러 직후인 $z=25$ mm에서는 압력분포가 평균반경 부근에서 일정한 음의 압력값을 가지고 허브와 팁 부근에서 큰 반경방향의 구배를 가지는데 비해서, $z=80, 100$ mm에서는 거의 일정한 반경방향 구배를 가짐을 알 수 있다.

반경방향 측정위치에서의 반경방향 속도분포는 Fig. 8(a)에서와 같이 $r=60$ mm와 80 mm 사이에서 급격히 변화한다. 프로펠러 팁과 벨마우스 간격 위에 위치한 $r=60$ mm에서는 벽 쪽에 음의 반경방향 속도성분을 가지는 역류영역이 크게 존재하지만, 이후에는 유동이 벽쪽에 밀착되어

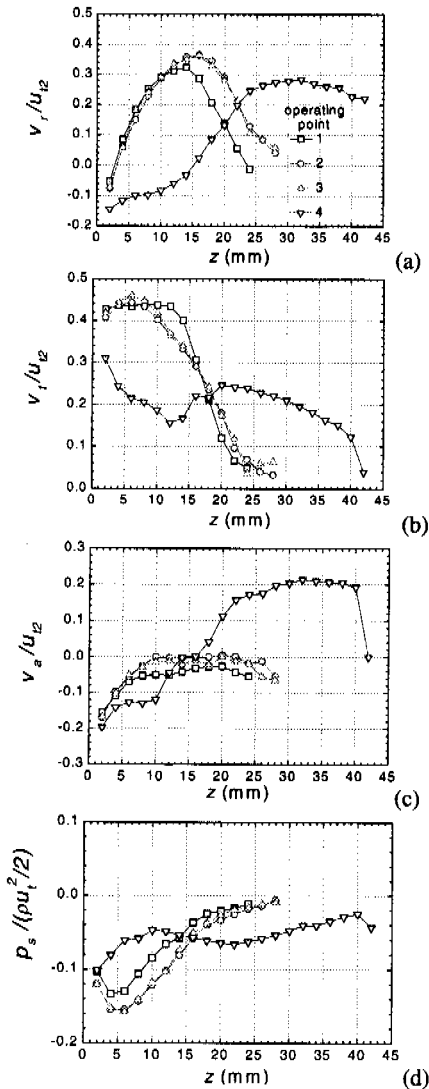


Fig. 6 Mean flow components at $r=60$ mm plane : (a) radial, (b) tangential, (c) axial velocity components, and (d) static pressure

$r=80, 100$ mm에서는 반경방향 속도성분이 벽쪽에서 최대값을 가지고 주위의 정지한 대기 쪽으로 가면서 감소한다. 접선방향 속도성분을 나타낸 Fig. 8(b)에서는 역류의 여부 및 반경방향 위치에 관계없이 벽쪽에서 최대값을 가지고 주위의 대기로 가면서 감소한다. 반경의 증가에 따른 접선방향 속도성분의 감소는 각운동량 보존으로 계산되는 것보다 큰데, 벽면 및 정지한 대기와의 전단력 작용에 의한 것이다. Figure 8(c)에서 벽면에 가까운 부분의 축방향 속도성분은 $r=60$ mm 위치에서는 벨마우스 간격을 통해서 역류하는 유동의 의해서 음의 값을 가지지만, 하류에서 벽면에 부착된 후에는 거의 0의 값을 가진다. 축방향 속도성분이 외부 대기와의 경계면에서 작지만 음의 값을

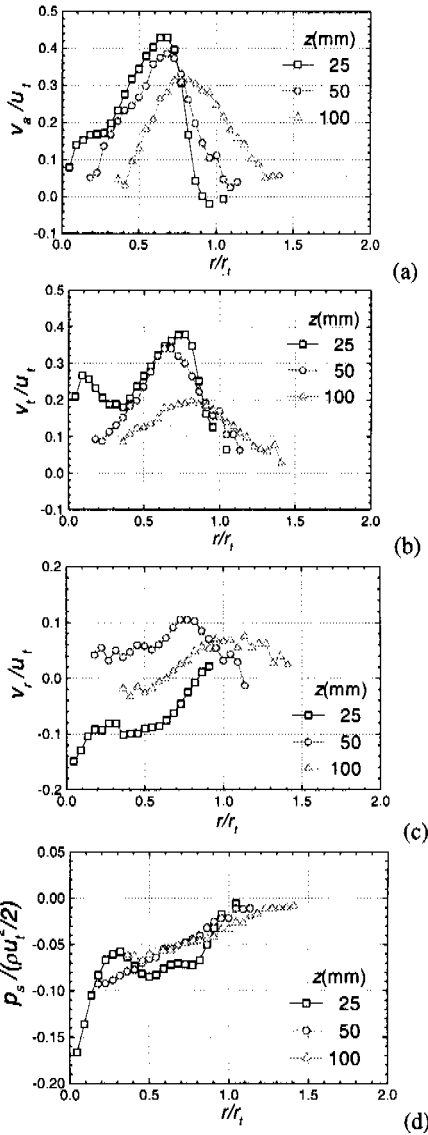


Fig. 7 The development of the axial downstream flow at the operating point 6: (a) axial, (b) tangential, (c) radial velocity components and (d) static pressure

가지는 것은 정지한 대기로부터의 유입에 의한 것이다. 정압분포를 나타낸 Fig. 8 (d)에서 프로펠러에 가까운 $r=60$ mm에서는 음의 압력을 가지고, 하류에서는 대기압과 거의 같음을 알 수 있다.

3.3 순간유동특성

성능과 평균유동장이 급격히 변하는 유량계수 부근에서는 성능 및 평균유동장 측정과정에서 유동의 섭동성분이 크게 관찰되었다. 프로펠러 출구 $z=25$, $r=30$ mm 위치에 세 개의 단일 열선 프로브를 정해진 각도 간격으로 설치하여

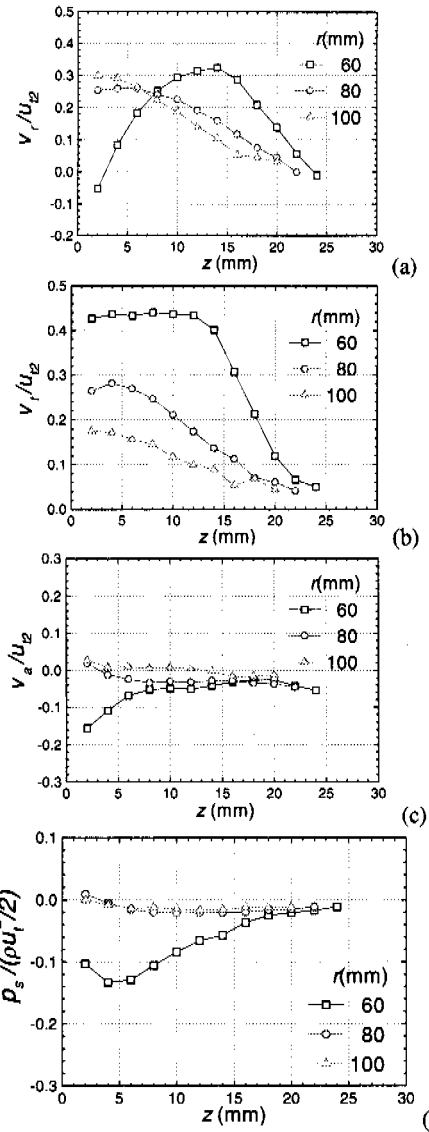


Fig. 8 The development of the radial downstream flow at the operating point 1: (a) radial, (b) tangential, (c) axial velocity components and (d) static pressure

순간유동특성을 측정하였다. 성능 불연속점에서 멀리 떨어진 작동점 6과 불연속점에 가까운 작동점 4에서의 3000 rpm에 대한 순간 유동 특성을 각각 Figs. 9와 10에 나타내어 비교하였다. Figure 9(a)에서 작동점 6에 대한 열선유속계 신호는 규칙적인 주기성을 잘 나타내고 있다. 함께 나타낸 위상신호가 하락하는 위치는 정해진 날개의 선단이 설정된 위치를 통과하는 순간을 나타내므로, 프로펠러가 한 회전하는 3000 rpm, 즉 50 Hz의 주기에 해당한다. 프로펠러가 한 회전하는 동안 4개

의 날개가 측정위치를 지나가며 4 번의 주기적인 후류 유동형태를 나타낸다. 이 신호를 FFT 한 결과를 나타낸 Fig. 9(b)에서 200 Hz 의 날개 통과 주파수와 그 하모닉스인 400, 600 Hz 등 만이 지배적인 주파수 임을 알 수 있다. 다른 주파수에서의 신호는 이들에 비해서 무시할 정도의 크기를 가지므로, 작동점 6 에서의 순간유동은 주로 날개 통과에만 조직적으로 반응함을 알 수 있다.

유동구조가 축방향에서 반경방향으로 바뀌기 직전인 작동점 4 의 열선유속계 순간속도 신호를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 주기적인 날개 통과에 의한 신호는 보이지 않고, 느리게 변하는 불규칙적인 신호가 반복적으로 나타난다. 이 신호를 FFT 한 Fig. 10(d)로부터 가장 영향력이 있는 주파수는 약 20 Hz 이고, 200 Hz 의 날개 통과 주파수와 그 하모닉스에서는 거의 기여가 없음을 알 수 있다. 이것은 작동점 4에서는 유동이 날개 통과에 의해서는 거의 반응하지 않으며, 20 Hz로 발생하는 훨씬 느린 현상에 반응함을 의미한다. 이 현상의 회전여부를 확인하기 위하여 첫번째 열선 프로브와 90° 및 135°의 간격을 두고 설치된 두개의 열선 프로브의 신호가 함께 측정되었다. 90° 간격을 가진 열선 신호를 나타낸 Fig. 10(b)에서 Fig. 10(a)와 유사한 형태의 신호가 나타나지만, Fig. 10(a)에 비해서 시간지연을 가진다. 이 시간 지연은 약 12.5 msec 인데, 이는 Fig. 10(a)와 (b)의 신호의 상호상관관계계수를 나타낸 Fig. 10(c)에서 첫번째 최대값이 나타나는 시간으로부터 확인 가능하다. 135°의 간격을 가진 세번째 열선 프로브로부터의 신호를 분석하여 위상지연의 방향을 결정하고, 지연시간을 재확인하였다. Figures 10(a) - (c)에서 90° 만큼 떨어진 열선 프로브를 지나가는데 걸리는 시간이 12.5 msec 이므로, 이 현상은 20 Hz의 속도로 회전한다. 고정된 위치에서 측정된 신호의 반복주기도 Fig. 10(d)에서 20 Hz 이므로, 회전하는 현상의 셀은 한 개임을 알 수 있다. 즉 작동점 4에서는, 프로펠러 회전속도 50 Hz의 40%에 해당하는 20 Hz로 회전하는 셀이 1개인 회전실속이 존재한다.

허브 후류의 역류영역에서 멀어지고 최대속도가 발생하는 반경에 가까운 $r=40$ mm에서도 같은 특성의 회전실속이 발생하지만, 실속의 강도가 줄어들고 날개통과 주파수에서의 성분이 회전실속 주파수에서의 신호와 비슷한 크기를 나타낸다.⁽⁵⁾

3.4 위상평균유동특성

유동구조의 급격한 변화가 발생하는 원인을 조사하기 위해서 각 작동점에서의 위상평균 유동장을 3차원 열선 유속계를 사용하여 측정하였다. 축방향 측정위치 $z=25$, $r=30$ mm에서 작동점 6에 대해서 측정된 위상평균된 각 속도성분의 위상

에 따른 변화를 Fig. 11에 나타내었다. $\theta=28\sim 46^\circ$ 의 영역에서 축방향 속도성분이 최소값을 보이고, 반경 및 접선방향 속도성분이 급격한 변화를 보이므로, 이 부분이 날개의 후류영역이라고 생각된다. 속도성분들이 점진적인 변화를 보이는 $\theta=46\sim 118^\circ$ 는 날개와 날개 사이의 통로를 통한 유동이다. 이영역에서 유동속도성분들은 $\theta \approx 46^\circ$

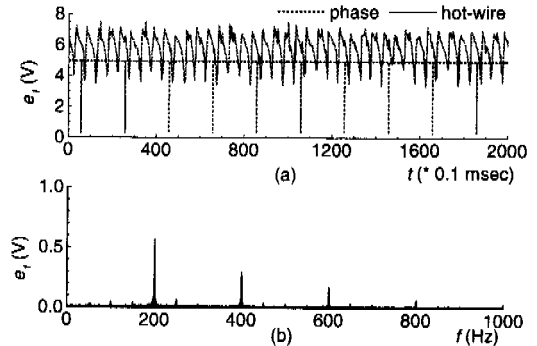


Fig. 9 (a) Time history of hot-wire signal and (b) FFT result measured at $z=25$, $r=30$ mm for the operating point 6, 3000 rpm

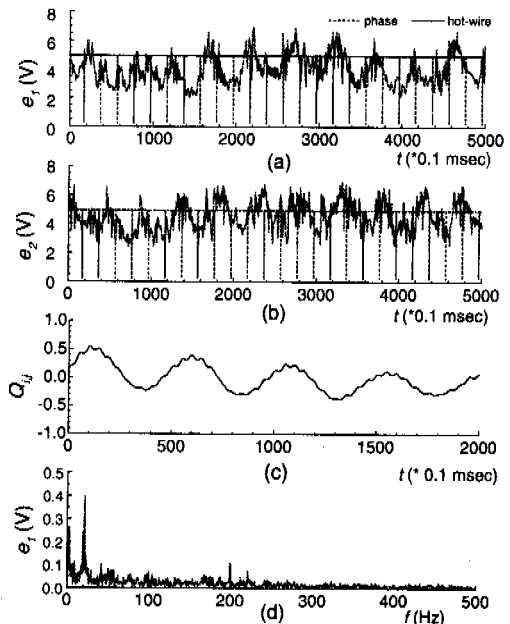


Fig. 10 (a) Time history of hot-wire signal #1 and (b) #2 measured at $z=25$, $r=30$ mm for the operating point 4, 3000 rpm, (c) their cross-correlation coefficient and (d) FFT result of #1

부근의 날개 흡입면에서 큰 값을 나타내고, 통로를 가로지르며 감소하다가 $\theta \approx 118^\circ$ 부근의 날개 압력면에서 최소값을 보인다.

3차원 열선 유속계에 의한 위상평균 유동장의 측정으로 날개와 날개 사이 및 반경방향 위치에서의 위상평균 유동장을 파악할 수 있다. 작동점 6에 대한 위상평균 유동장을 Fig. 12에 나타내었다. Figure 12(a)에 나타낸 축방향 속도성분은 평균 반경 부근에서 최대값을 나타내고, 허브와 팁 쪽으로 가면서 급격히 감소한다. 날개와 날개 사이에서의 축방향 속도성분의 변화는 평균반경 부근에서는 크지만, 다른 반경에서는 작다. 회전하는 프로펠러에 대한 상대유동의 이차유동 벡터와 축방향 와도의 등고선을 Figs. 12(b)와 (c)에 나타내었다. 기준 위상신호는 특정한 날개의 선단이 $\theta = 0^\circ$ 로 정의된 $x-z$ 평면을 지나갈 때 발생한다. 삼차원 열선 유속계에 의한 순간유동의 측정은 x 축을 따라서 이루어 졌고, 프로펠러는 반시계방향으로 회전하므로, Fig. 11에 나타낸 위상각도는 Fig. 12에서는 시계방향으로 증가한다. Figure 11에서 평균 반경에서의 날개 후류 유동이 $\theta \approx 30^\circ$ 에서 발생하므로, 측정된 위상평균유동을 발생시킨 프로펠러의 상대위치는 Figs. 12 (b) 와 (c) 에서와 같이 프로펠러 휠을 시계방향으로 30° 만큼 회전시킴으로써 구해질 수 있다. Figure 12 (b)에서 프로펠러 말단 부근에서 반경방향 속도의 부호가 바뀌는 부분이 각 반경에서의 날개 후류에서 생성된 유동이라고 생각할 수 있다. 평균반경에서는 Fig. 12(b)에 나타낸 프로펠러의 말단과 일치하지만, 허브와 팁 쪽으로 가면서 차이가 생기는데, 프로펠러 출구 유동편차각과 프로펠러 말단과 측정위치 사이의 거리가 반경에 따라 다르기 때문이다.

상대속도의 이차유동 벡터를 표시한 Fig. 12(b)에서 날개와 날개 사이의 통로 유동은 압력면 쪽에 존재하는 중심을 향하는 유동영역과 흡입면 쪽 반경이 큰 부분에 존재하는 외부를 향하는 유동영역

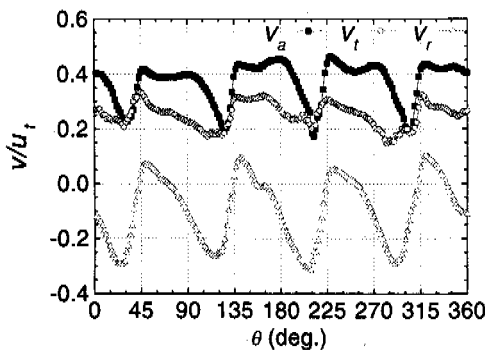
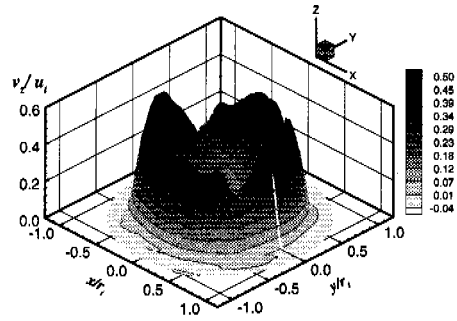
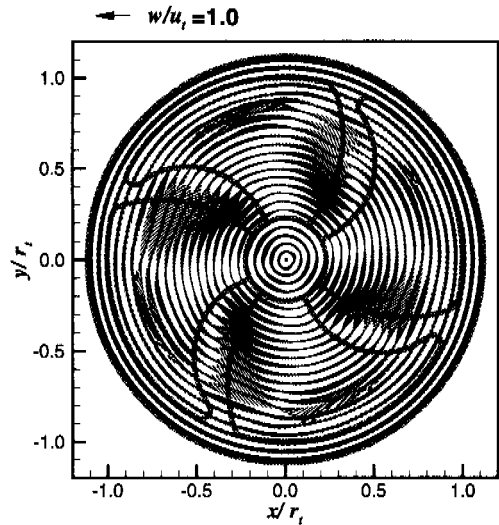


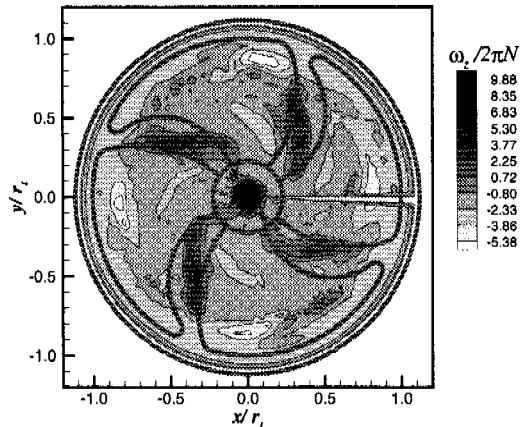
Fig. 11 Variations of the phase-lock averaged velocity components measured at $z = 25$, $r = 30$ mm for the operating point 6



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Phase-lock averaged (a) axial velocity component, (b) the secondary flow vectors of the relative flow to the propeller blade and (c) the axial vorticity at the downstream plane $z = 25$ mm for the operating point 6

역으로 명확히 구분이 된다. 날개와 날개 사이 통로의 압력면 쪽에서 형성된 반경방향의 압력구배에 의해서, 압력면 쪽에서는 중심축을 향하는 유동이 유도된다고 추정된다. 또 상대적으로 속도가 빠른 흡입면 쪽에서는 속도가 압력으로 충분히 회복되지 못해서 반경방향의 압력구배가 약하고, 원심력의 작용으로 외부를 향하는 유동이 생성된다고 생각된다. 반경이 커질수록 원심력의 영향이 커져서, 중심축을 향하는 유동영역은 줄어들고 외부를 향하는 유동영역이 강해진다. 이와 같은 압력면 쪽의 내부로 향하는 유동영역과 흡입면 및 반경이 큰 쪽의 외부로 향하는 유동영역의 상대적인 강도에 의해서 3.2 절에서 나타난 평균 유동장에서의 반경방향 속도가 결정된다. 즉, 허브 가까운 부분에서는 압력면 쪽의 유동이 강하므로 평균 유동이 중심을 향하고, 팁에 가까운 부분에서는 흡입면 쪽의 유동이 강하므로 평균유동이 외부를 향하게 되는 것이다. 이러한 상대속도의 이차유동에 의해서 날개 말단과 팁 부근에서 Fig. 12(c)에 나타난 것과 같은 강한 양의 축방향 와도가 생성되고, 날개와 날개 사이의 통로를 빠져 나온 유동영역에서는 음의 축방향 와도가 형성된다.

작동점 6 에서 5로 유량계수가 줄어들어 원심력의 영향이 상대적으로 커지면, 흡입면 및 날개 팁 부근의 외부로 향하는 유동영역은 강해지고 넓어지며, 압력면 및 허브 부위의 중심축을 향하는 유동영역은 약해진다. 유량계수가 줄어들어 따라 외부를 향하는 유동이 강해져서 어느 순간에 급격한 유동구조의 변화가 일어난다고 추정된다. 작동점 4 에 대해서 측정된 위상평균유동은 모든 위치에서 외부를 향하고 유동이 날개의 상대적인 위치에 크게 영향을 받지 않는다. Figure 12 에서 관찰된 이차유동과 와도의 정확한 근원을 밝히기 위해서는 측정이나 수치해석적 방법에 의한 날개와 날개 사이 통로 내부의 유동상태의 파악이 필요하다.

4. 결론

가정용 냉장고에서 냉기 순환용으로 사용되는 전향 스윙 프로펠러 팬에서 나타나는 특이한 성능특성의 원인을 조사하기 위하여 정밀한 성능특성, 평균유동특성, 순간유동 및 위상평균유동 특성의 측정이 이루어졌고, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

소형 전향 스윙 프로펠러 팬의 성능곡선 상에 유량과 압력상승이 동시에 감소하는 특이한 형태의 불연속점이 관찰되었다. 이 불연속점을 경계로 고유량 영역에서는 축방향의 유동구조가, 저유량 영역에서는 반경방향의 유동구조가 형성되고, 유동구조의 변화는 성능곡선상의 불연속점을 경계로 급격히 일어난다. 성능의 불연속점에서 먼 유량에

서는 날개통과에 반응하는 규칙적인 유동이 발생하는 반면, 성능의 불연속점에 가까운 영역에서는 프로펠러 회전속도의 약 40%의 속도로 회전하는 실속셀 1 개의 회전실속이 발생한다. 국소적으로는 날개의 압력면 부근에서는 중심을 향하는 유동이 발생하고, 흡입면 및 팁 부근에서는 외부를 향하는 유동이 발생하는데, 이들의 상대적인 크기에 의해서 평균유동장이 수축 또는 확산한다. 유량계수가 줄어들어 따라 원심력의 영향이 커져서 중심을 향하는 유동영역은 약화되고, 외부를 향하는 유동영역은 강화되어 마침내 유동구조의 변화가 발생한다고 추정된다.

후 기

본 연구는 부분적으로 삼성전자와 한국과학기술원 지원 서울대학교 터보동력기계연구센터 지원으로 이루어졌고, 저자들은 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Fukano, T., Kodama, Y., and Takamatsu, Y., 1978, "Noise generated by low pressure axial flow fans, III: Effects of rotational frequency, blade thickness and outer blade profile," *J. Sound and Vibration*, Vol. 56(2), pp. 261~277.
- (2) 삼성전자, 1995, 내부연구보고서.
- (3) 강신형, 김진권, 이승배, 1996, "뒷판울 가진 소형 프로펠러 팬의 성능 및 유동특성," 대한기계학회논문집 (B), 제 20 권, 제 4 호, pp. 1491~ 1500.
- (4) AMCA, 1987, *Fan Application Manual, Publication 201, Fans and Systems*, AMCA, Illinois, pp. 2~6.
- (5) 김진권, 1998, "전향 스윙 프로펠러 팬의 성능 및 유동특성," 서울대학교 박사학위 논문, pp. 11~20, 136.
- (6) 김진권, 강신형, 1997, "5 공프로브의 전 각도 범위 압력계수 지도와 새로운 보정계수," 대한기계학회 논문집 (B), 제 21 권, 제 11 호, pp. 1437~ 1448.
- (7) 김진권, 강신형, 1999, "삼직교 열선유속계의 간편측정법 개발," 대한기계학회 논문집 (B), (채택)
- (8) Baumeister, Jr., T., 1935, *FANS*, McGraw-Hill, New York, p. 31.
- (9) Greitzer, E. M., 1981, "The Stability of Pumping Systems - The 1980 Freeman Scholar Lecture," *J. Fluids Engineering, ASME Transactions*, Vol. 103, pp. 193~242.
- (10) Tanaka, S. and Murata S., 1994, "Scale Effects in Cross-Flow Fans (Effects of Fan Dimensions on Flow Details and the Universal Representation of

Performances)," *JSME International Journal Series B*, Vol. 38, No. 3, pp.388~397.

(11) Goto, A., 1998, "Stall Margin Improvement Using Circumferential High-Speed Fluid Injections," *ISROMAC-7*, pp. 1123~1138.