

프로펠러 팬과 덕트와의 상대위치가 유동특성에 미치는 영향

The effect of position of propeller fan relative to duct inlet on flow characteristics

심 우 찬*, 조 강 래**, 주 원 구***
W. C. Sim, K. R. Cho, W. G. Joo

Key words : Propeller fan(프로펠러 팬), Distance of propeller fan from duct inlet(팬과 덕트와의 거리), Inlet flow field(전방유동장), Relative flow angle(상대유동각)

Abstract

The position of propeller fan from duct inlet is one of basic parameters for the design of propeller fan. To investigate the effect of its position on fan characteristics, the inlet flow fields and relative flow angles were measured by a 5-hole pitot tube. The experimental results indicate that the ratio of radial flow introduced from propeller circumference to total inlet flow increases with the increase of propeller distance from duct inlet. When fan operates without duct, the total flow rate and the radial flow ratio are higher than those of any other positions of propeller relative to duct inlet. The radial flow ratio decreases as a flow coefficient and the propeller distance decrease. Therefore the front flow fields can be adjusted in some extent by varying the propeller distance according to a fan loading. The inlet flow angles are decreasing a little as a rotational speed and the propeller distance decrease. In the present case it was judged that the deviation angle of outlet flow became negative owing to a flow separation near a trailing edge.

기 호 설 명

N : 팬의 회전수
q_r : 축방향으로 유입되는 유동
q_c : 반경방향으로 유입되는 유동
W : 팬의 전연에서 축방향으로의 위치
W₀ : 최대날개폭

W_d : 팬의 전연과 덕트입구와의 거리

그리스문자

β, β' : 상대유동유입각 및 날개유입각
 β_0, β'_0 : 상대유동유출각 및 날개유출각

* 연세대학교 대학원
** 연세대 기계공학과
*** 연세대 기계공학과

1. 서 론

프로펠러 팬은 환기용과 냉각용으로 광범위하게

사용되고 있으며 일반적으로 작은 종횡비(aspect ratio)를 가지기 때문에 익현 길이와 날개폭이 큰 것이 특징이다. Fukano등⁽¹⁾은 덕트 입구형상 및 덕트 입구와 프로펠러의 상대위치가 효율에 미치는 영향을 연구하였으며, 팬의 효율이 입구형상보다 프로펠러 위치에 영향을 크게 받으며, 프로펠러가 익폭의 반정도 상류쪽으로 나와 있는 경우에 최고 효율이 얻어질 수 있음을 확인하였다. 또, Sato등⁽²⁾은 덕트 입구의 벨마우스의 형태를 바꾸어 실험하여 반원형 벨마우스의 경우에 짧은 벨마우스보다 저유량에서 유량-정압곡선과 비소음레벨을 크지는 않으나 개선하는 효과가 있음을 확인하였다. 그리고 Kinoshita등⁽³⁾은 프로펠러의 캠버각과 하우징의 형태가 유동특성에 미치는 영향을 연구하여 하류쪽에 설치된 안내깃이 큰 유량에서 정압계수와 정압효율을 높이는 효과가 있고 비소음레벨을 낮추는 긍정적인 효과가 있음을 확인하였다.

이상과 같이 덕트입구의 형태 및 덕트 입구단과 프로펠러의 상대위치등이 팬의 효율이나 특성곡선 그리고 소음에 영향을 미치는 것이 확인되었다. 이것은 팬 주변의 유동에 영향을 미친 결과임을 의미한다.

또 히트펌프의 실외기에서 냉각용으로 사용되는 프로펠러 팬의 경우 프로펠러는 실외기 바깥면보다 안쪽에 위치하는 경우가 일반적이며, 안쪽에서 열교환기에 의한 유동부하를 받고 있다. 따라서 열교환기의 효율을 높이기 위해서는 프로펠러 외주에서 반경방향으로 유입하는 유동도 고려하여야 할 것이다. 이러한 반경방향 유입에 영향을 미칠 수 있는 인자로서 덕트 입구의 형태와 프로펠러와 입구단의 거리, 그리고 열교환기에 의해 가해지는 유동부하 등이 있다.

이상에서의 설명과 같이 프로펠러와 덕트와의 상대위치가 프로펠러 주변의 유동장에 상당한 영향을 미치고 있다는 점과 냉각용으로 팬을 이용할 때, 프로펠러 주변의 유동장을 알 필요가 있는 점을 고려하여 본 연구에서는 유동부하를 팬의 출구쪽에서 댐퍼에 의한 유량변화로 대신하고 프로펠러와 덕트와의 상대위치 및 유량변화가 전방유동장과 팬날개에서의 상대유동각에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

팬과 덕트와의 상대위치는 날개를 고정시킨채 덕트전체를 전후로 이송시킴으로서 변화시켰으며 열교환기마다 달리 가해지는 공기부하는 댐퍼를 전후로 이송시킴으로서 유량변화를 모사하였다. 또한 덕트 입구부에 배플(baffle)판을 부착하여 열교환기에서의 흡입상태와 가깝게 하였다.

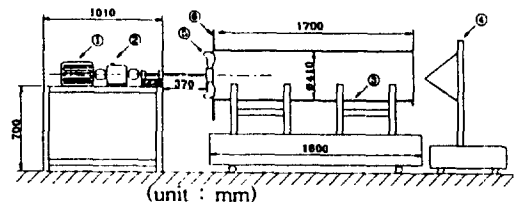
본 연구를 위해 사용된 실험장치는 Fig.1과 같다.

팬의 전방과 후방에서 유동장의 측정을 위해 원통형 5공 피토판을 사용하였다. 5공 피토판에 의한 전방 및 후방의 유동장측정은 특히 전방유동장이 주변의 영향을 받기 쉽고 측정압력이 대기압에 가까운 압력이었기 때문에 널링(nulling)방법을 채택하였으며, 회전각의 간격은 1°로 하고 검정곡선으로부터 3차원 속도성분, 유동방향의 정압과 총압을 구하였다.

5공 피토판에 의한 각도 측정의 정확도는 검정했을 때의 유속 10m/s를 기준으로 역검정한 결과 피치(pitch)각 ±20°에서 요우(yaw)각의 RMS의 평균오차가 0.1°였다. 그리고 압력계의 최소 측정압력은 0.001mmH₂O이다.

2.2 실험용 프로펠러 팬 및 기호설명

실험용 프로펠러 팬은 히트펌프 실외기의 냉각용



- ① motor
- ② torque meter
- ③ duct
- ④ damper
- ⑤ propeller fan
- ⑥ baffle plate

Fig.1 Experimental apparatus

으로 사용되고 있는 것이며 직경이 400mm, 허브 직경이 120mm, 날개높이가 140mm, 최대날개폭이 114mm의 크기의 박판으로 만들어져 있다. 개략적인 형상은 Fig.2와 같으며, 일정반경위치에서 원주방향으로 휘어있는 축방향에 대한 원주거리의 측정치는 Fig.3과 같다. 그림에서 z는 유동하류쪽을 양으로 하였으며 z=0은 측정상의 기준점이다. 그리고 R은 축중심으로부터의 반경거리이며, θ 는 원주방향으로의 각도(rad)이다.

날개와 덕트와의 상대위치 및 속도측정위치를 무차원화하기 위해 사용된 기호들이 Fig.4에 제시되어 있다. W는 날개의 최전방 전연으로부터 축방향으로의 위치를 나타내며, W_0 와 W_d 는 각각 최대날개폭과 팬의 전연과 덕트입구와의 거리를 나타낸

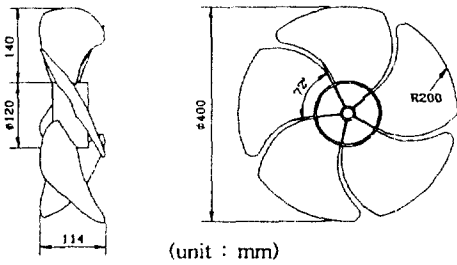


Fig.2 Schematic view of propeller fan

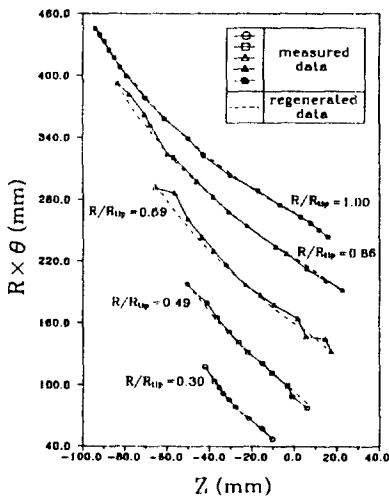


Fig.3 Fan shapes along each radial direction

다. 날개와 덕트와의 상대위치를 나타내는 W_d/W_0 는 날개가 덕트입구에서 전방으로 돌출된 정도를 나타낸다.

q_c 는 전방에서 축방향으로 유입되는 유량을 가리키며 q_c 는 돌출된 날개의 주위로부터 유입되는 유량을 가리킨다. 깃의 전연관 후연에서의 접선방향이 축방향과 이루는 각은 각각 β', β' 라고 하고 유입유동과 유출유동이 축방향과 이루는 각은 β, β 로 표시한다.

2.3 측정위치 및 방법

전방에서 축방향으로 유입되는 유량(q_f)과 날개 주위에서 유입되는 유량(q_c)은 각각 날개의 전연에서 축방향으로 5mm 떨어진 수직선(반경선)과 날개의 외주에서 반경방향으로 5mm 떨어진 수평선상에서의 속도분포를 측정하여 구했다. 또한 상대유입각도 같은 전방위치에서 측정하였다. 상대유출각은 날개의 최대후연위치에서 축방향으로 5mm 떨어진 단면에서 측정하였으며 팬의 총유량은 덕트 입구에서 후방으로 400mm 떨어진 단면에서의 속도분포로부터 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프로펠러 팬주위의 유동

본 실험에서 사용된 프로펠러 팬의 축방향의 최

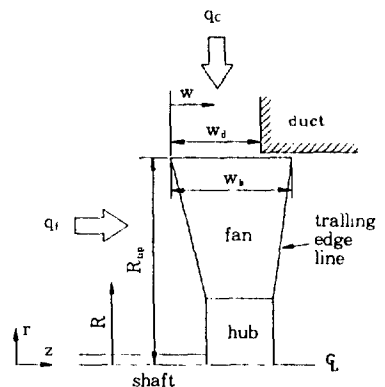


Fig.4 Notations

대날개폭은 팬의 외주반경의 57%의 크기로 되어 있다. 이처럼 프로펠러 팬의 날개폭이 큰 경우, 프로펠러 팬이 회전할 때 전방에 있는 유체는 정면측(축방향)과 날개바깥주위측(반경방향)에서 유입된다. 따라서 프로펠러 팬의 전방유동은 크게 축방향으로 유입되는 유동(q_f)과 반경방향으로 유입되는 유동(q_c)으로 나눌 수 있다. 이러한 팬주위의 유동 특징은 팬이 덕트없이 작동하는 경우에 잘 나타난다. 팬이 덕트없이 작동하는 경우의 속도벡터를 Fig.5에 나타냈다.

날개전방의 유동은 거의 축방향으로 유입되고 날개외주의 유동은 팬중심을 향하고 있다. 날개외주에서 반경방향으로 유입되는 유동은 후연근처를 제외한 날개주위에서 균일하게 팬으로 유입되고 있다. 하류로 배출되는 유체는 축방향과 반경방향으로 유입된 유동이 합쳐지기 때문에 전방의 속도에 비해 상대적으로 큰 속도를 가진다. 또한 날개바깥 후연부근에서는 상당히 미약한 속도를 가지며 허브 근처에서는 유동고관현상이 관찰된다.

팬이 덕트없이 800rpm으로 회전하는 경우 축방향으로 유입되는 유동의 3차원속도분포는 Fig.6의 (a), (b), (c)에, 그리고 날개바깥주위에서 반경방향으로 유입되는 유동의 3차원속도분포는 Fig.6의 (d)에 나타냈다. 이와같은 무차원속도분포는 회전속도를 1000rpm으로 하였을 때도 거의 똑같이 나타났다.

Fig.6의 (a)에 나타났듯이 V_z 은 날개를 지나면

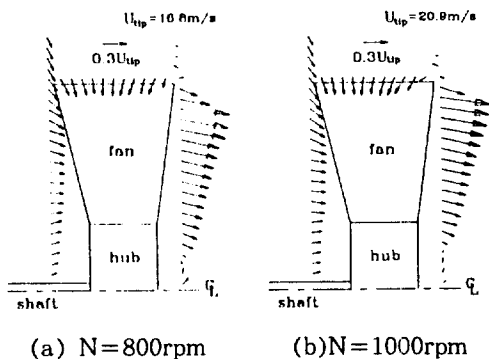


Fig.5 Meridional velocity vectors

서 축방향으로 가속되며 전방과 후방의 V_z 의 차이에 해당되는 유량은 날개주위에서 반경방향으로 유입된 것이다. Fig.6의 (d)에서 볼 수 있듯이 유체는 날개주위에서 반경방향으로 균일하게 유입되며 반경방향평균속도는 전방에서 축방향으로 유입되는 축방향의 평균속도보다 큰 것을 알 수 있다. 반경방향으로 유입되는 유량(q_c)이 전체유량($q_f + q_c$)에 대해 차지하는 비율은 58%로서 전방에서 축방향으로 유입되는 유량보다 많다. 따라서 축류팬과는 달리 프로펠러 팬의 경우 날개바깥주위에서 반경방향으로 유입되는 유동이 전방유동장에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig.6(d)에서 V_r 가 허브 안쪽에서 최대치로 나타나 있다. 이것은 허브 뒷쪽 중심부에서 하류쪽으로 강한 와류가 발생하고 있기 때문인 것으로 생각되며⁽⁴⁾, 중심부근에서 허브 바깥쪽까지 자유와류운동에 의해 V_r 는 감소하고 다시 V_r 가 증대하고 있다. V_r 가 증대하는 것은 프로펠러에 의해 V_z 성분이 부가된 결과라고 설명할 수 있다.

3.2 특성곡선

특성곡선에서 유량계수 ϕ 는 $4Q/[\pi(1-\nu^2)D^2U_{tip}]$

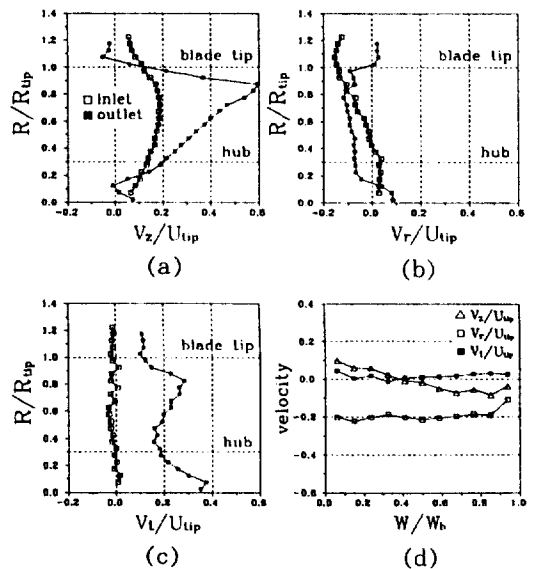


Fig.6 Velocity distributions around the fan(N = 800rpm)

이며 압력계수 ψ 는 $2\Delta P/(\rho U_{up}^2)$ 이다. 여기서 Q 는 총유량, ν 는 허브비, D 와 U_{up} 은 날개의 외경과 외주속도, ΔP 는 전압상승을 나타낸다. Fig.7은 팬 날개와 덕트와의 상대위치를 3가지로 변화시킨 경우의 특성곡선을 나타낸다. 상대위치인 W_d/W_b 의 변화에 따라 특성곡선의 기복의 크기와 위치가 틀리다. 이와 같은 현상은 프로펠러가 덕트안에 완전히 들어 있는 일반 축류형 터보기계에서는 볼 수 없는 현상이다. 그래서 이것이 측정오차나 실험의 착오가 아닌지를 확인하기 위해 반복실험을 한 결과 오차가 아님이 확인되었다. 이 때, 유량측정은 입구 유동장의 측정에 의한 유량과 덕트 내부유동 측정에 의한 유량과의 차이가 3%이내에 들어 있음이 확인되었다.

이와 같이 특성곡선이 W_d/W_b 에 따라 분명히 차이를 보이고 있으나 크게 보면 ψ 는 ϕ 에 대해 전체적으로 선형적인 감소를 보이고 있다고 설명할 수 있다.

3.3 팬과 덕트와의 상대위치가 유동장에 미치는 영향

날개의 상대위치인 W_d/W_b 와 유량계수 ϕ 의 변화에 따른 날개입구주변에 나타나는 유동장의 속도 벡터분포가 Fig.8에 제시되어 있다.

Fig.8의 (A)는 $W_d/W_b=0.88$ 의 경우이며 최대 유량계수인 $\phi_{max}=0.41$ 에서는 날개주위에서 유체

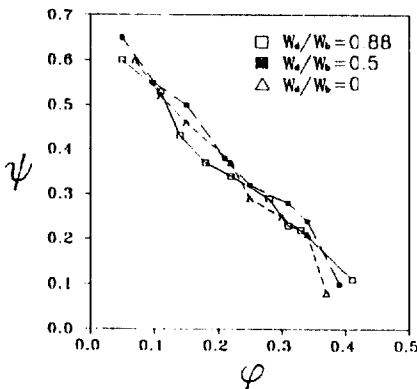


Fig.7 Performance curves of propeller fan(N=800rpm)

가 반경방향으로 균일하게 유입된다. 그러나 유량이 어느 정도($\phi=0.31$)이하로 감소되면 유체는 덕트입구 또는 입구근처에서 날개밖으로 방출되며 유량이 감소할수록 이 현상은 심해진다.

Fig.8의 (B)는 날개의 절반이 덕트입구에서 밖으로 나와있는 $W_d/W_b=0.5$ 의 경우이다. 이 경우를 대상으로 축방향으로 유입되는 유동과 날개주위에서 반경방향으로 유입되는 유동의 3차원속도분포를 각각 Fig.9와 Fig.10에 나타냈다.

Fig.9의 (a)에서의 전방유동장의 축방향 속도성분 V_x 은 날개반경의 70~80%위치에서 최대치를 나타내는 속도분포를 보이며, 그 분포의 형태는 유량계수 ϕ 에 거의 무관함을 알 수 있다. Fig.9(b)의 전방유동장의 반경방향 속도성분 V_r 은 날개말단위치에서 최대가 되며, Fig.9(c)의 선회속도성분 V_t 은 유량에 거의 관계없이 0부근에 분포하고 있다.

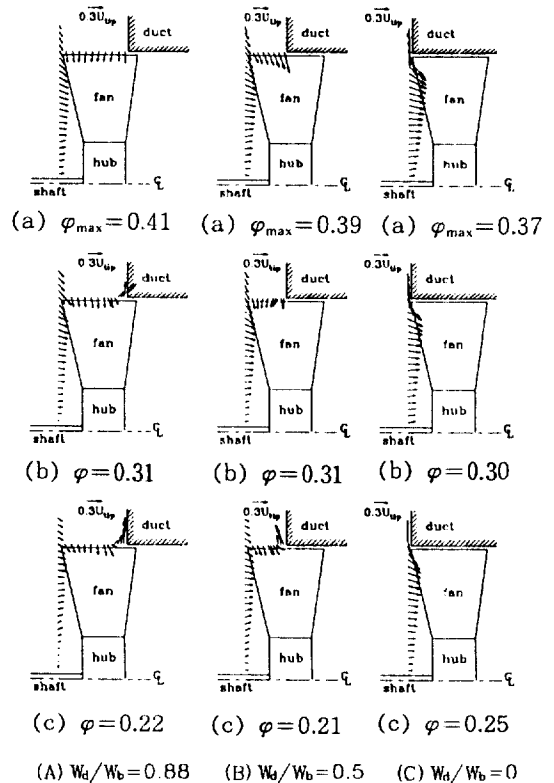


Fig.8 Meridional velocity vectors(N=800rpm)

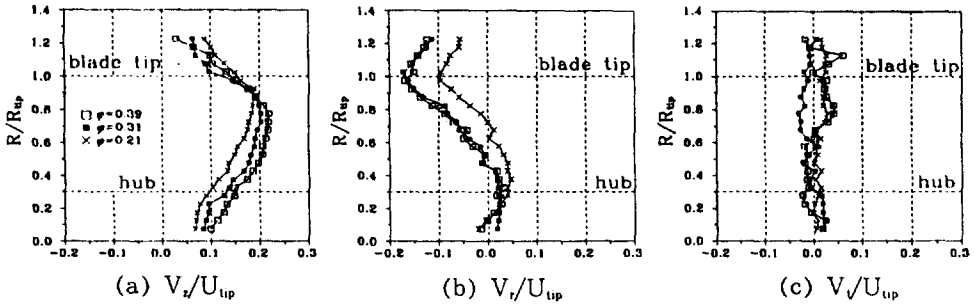


Fig.9 Velocity distributions at the front of fan rotor ($W_d/W_b=0.5$, $N=800\text{rpm}$)

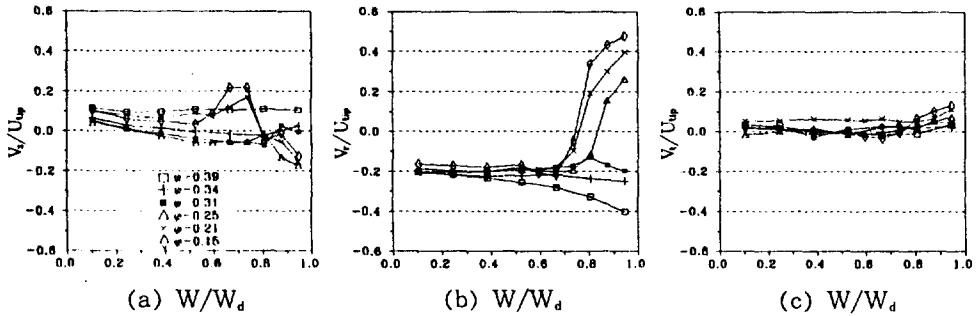


Fig.10 Velocity distributions on the circumference of fan rotor ($W_d/W_b=0.5$, $N=800\text{rpm}$)

Fig.10은 날개주위의 속도분포를 나타내며 특히 그림 (b)에서 유량이 감소하였을때, 즉 출구압력이 높아졌을때 덕트 입구부근에서 유동이 날개밖으로 유출되는 것이 잘 나타나있다. 그림 (c)에서 날개주위의 선회속도성분 V_t 는 저유량에서 날개밖으로 유출되는 유동에 약간의 회전속도성분이 추가되어 있기는 하나 사실상 유량에 관계없이 거의 무시할 수 있는 정도이다.

날개전방에서 유입되는 유량(q_r)과 날개주위에서 유입되는 유량(q_c)의 총유량($Q=q_r+q_c$)에 대한 비율이 유량계수 ϕ 에 따라 변화하는 양상은 $W_d/W_b=0.5$ 와 0.88 의 두경우에 대해 Fig.11에 제시되어 있다.

유량계수가 작아지면 날개주위의 덕트입구부근에서 유체가 팬으로 유입되는 정도가 작아지기 때문에 날개주위에서 유입되는 유량(q_c)의 총유량에 대한 비율은 감소하고 날개전방에서 유입되는 유량(q_r)의 비율은 반대로 증가한다. 따라서 유량감소

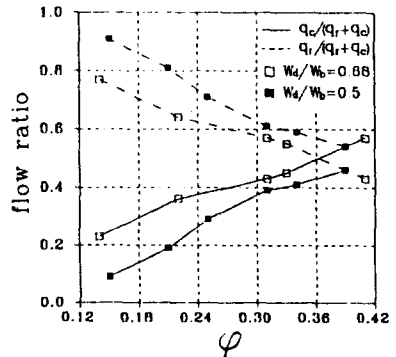


Fig.11 Variations of flow ratios versus flow coefficient ($N=800\text{rpm}$)

는 Fig.8 또는 Fig.10의 (b)에서 이해할 수 있듯이 날개바깥주위의 덕트입구부분 또는 입구부근에서의 유입유동의 감소 또는 역류(유출)에 의한 것으로 설명할 수 있다. 이와같은 유동현상은 축류송풍기 또는 압축기의 저유량에서 관찰되는 현상과

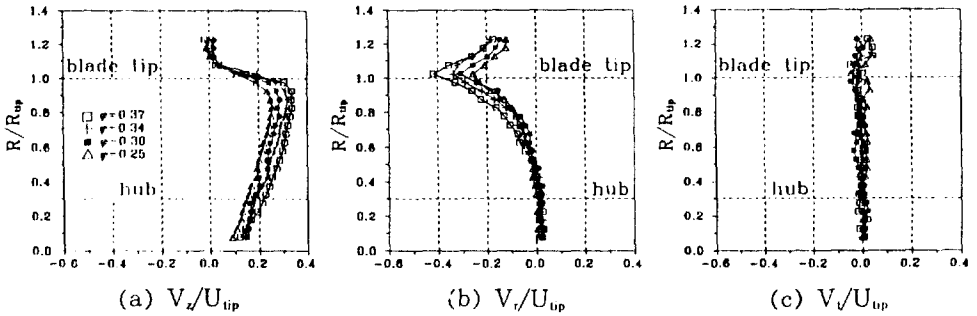


Fig.12 Velocity distributions at the front of fan rotor($W_d/W_b=0$, $N=800\text{rpm}$)

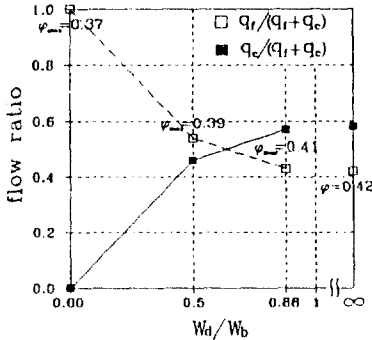


Fig.13 Variations of flow ratios with the position of fan($N=800\text{rpm}$)

같다고 할 수 있다.

W_d/W_b 가 0인 경우의 전방에서의 속도벡터분포는 Fig.8의 (C)와 같다. 이 경우는 반경방향으로 유입되는 유동은 없고 축방향으로의 유입만 존재하기 때문에 W_d/W_b 가 0.5와 0.88인 경우에 비해 축방향으로 유입되는 유동의 속도벡터는 상대적으로 크다. 축방향으로 유입되는 유동의 3차원속도분포는 Fig.12와 같다. 이들의 속도 성분별 분포의 특징은 W_d/W_b 가 0.5와 0.88인 경우의 날개전방유동의 경우와 유사하며, V_x 는 날개반경의 약 90% 위치에서 최대, V_y 는 날개외경위치에서 최대가 되고, V_z 는 사실상 0으로 되어있다.

W_d/W_b 의 변화가 최소공기부하조건(최대유량계수)하에서 유량비 $q_f/(q_f+q_c)$ 또는 $q_c/(q_f+q_c)$ 에 미치는 영향이 Fig.13에 제시되어있다. 횡축의 ∞ 는 날개가 덕트없이 작동하는 경우를 나타낸다.

반경방향으로 유입되는 유량비 $q_c/(q_f+q_c)$ 는 팬

이 덕트없이 작동하는 경우에 최대 58%였으며, W_d/W_b 가 작아질수록 감소하며 축방향으로 유입되는 유량비 $q_f/(q_f+q_c)$ 는 반대로 증가한다. Fig.13에서 총유량이 W_d/W_b 에 따라 변화하는 양은 크지 않으나 팬이 덕트없이 작동하는 경우에서 $\phi=0.42$ 로 가장 크며 W_d/W_b 가 감소할수록 작아져서 $W_d/W_b=0$ 에서 $\phi_{max}=0.37$ 로서 가장 작다. 이것은 W_d/W_b 의 감소에 대해 날개외주에서 유입되는 유량의 감소율이 전방에서 유입되는 유량의 증가율보다 크다는 것을 의미한다. 이상의 결과로부터 유량계수 ϕ 와 날개의 상대위치 W_d/W_b 의 크기에 따라 q_f 와 q_c 의 비율이 변화하는 것을 고려함으로써 팬 입구의 유동장을 적절하게 조절할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 팬과 덕트와의 상대위치가 유동각에 미치는 영향

Fig.14는 $W_d/W_b=0.88$ 인 경우 팬의 회전속도 변화에 따른 날개전방과 후방에서의 상대유동각(축방향에 대한 각도)을 나타낸다.

날개의 입구각(β')은 Fig.3으로부터 산출한 결과 허브($\beta' \approx 71^\circ$)에서 익말단($\beta' \approx 75^\circ$)까지 거의 직선적으로 점증되고 있다. 유동의 상대유입각 β 도 유량변화에 거의 관계없이 허브에서 익말단까지 β' 보다 약간 큰 기울기로 거의 직선적으로 나타나고 있다. 이 기울기 차이로 날개에 대한 유동의 입사각은 반경방향의 바깥쪽일수록 크게 되어있다. 이와같은 경향은 회전속도와 유량에 관계없이 거의 유사하나 회전속도에 대해서는 회전속도가 감

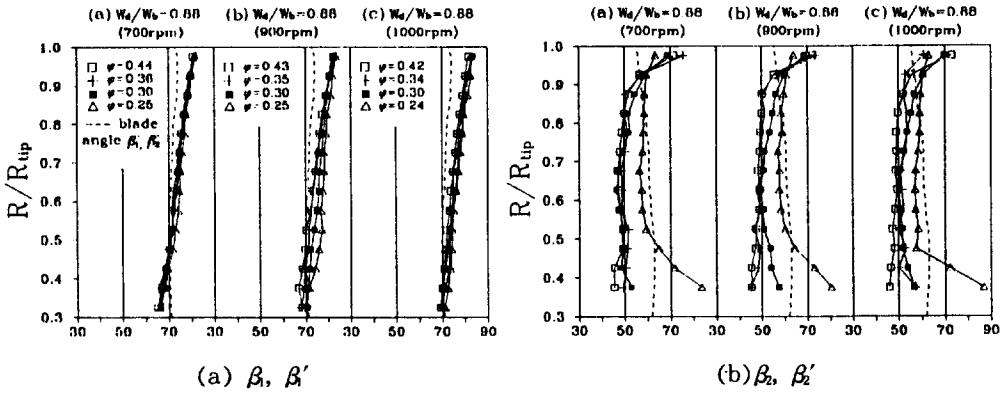


Fig.14 Variations of relative flow angles with the angular velocity of fan

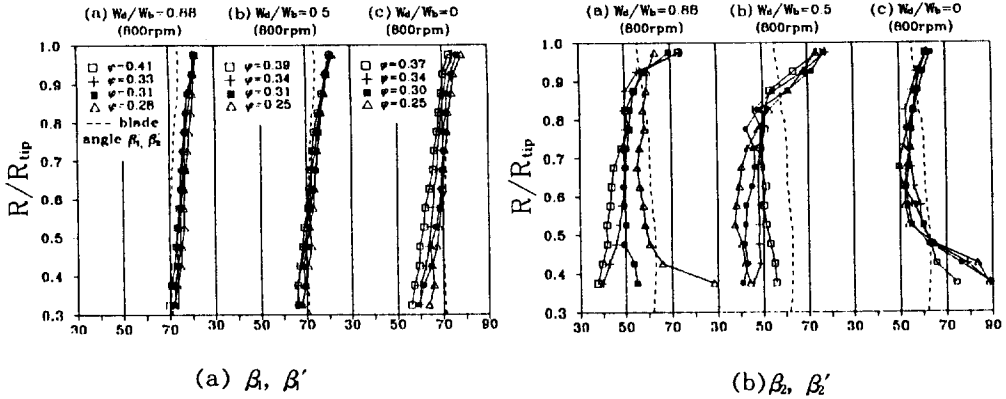


Fig.15 Variations of relative flow angles with the position of fan

소함에 따라 입사각은 작아지고 있다.

상대유출각 β_2 는 제일 작은 유량의 경우를 제외 하면 β_2' 보다 작게, 즉 편차각이 음으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 축류송풍기나 압축기에서는 보통 볼 수 없는 현상이다. 그러나 본 연구용 날개의 경우 날개형상에서 이를 설명할 수 있다. Fig.3의 날개형상을 보면 전연에서 후연으로 갈수록 날개각 β 는 작아지다가 후반부에서 커지는 형태로 되어있다. β 가 커지는 부분에서는 유동박리가 일어날 것으로 예상된다. 박리는 날개사이의 압력분포 등으로 인해 압력면(회전면측)에서 발생한 것으로 날개면에 부착된 먼지의 위치에서 확인할 수 있었다.

따라서 압력면 후연부근에서의 유동박리로 인하여 편차각이 음으로 나타난 것으로 풀이될 수 있다. 한편 유량이 작을때는 유동박리가 발생하지 않음으로써 β_2 가 날개유출각 β_2' 에 가까운 각으로 나타난 것으로 풀이된다.

Fig.15는 β 및 β_2 가 W_d/W_b 에 따라 변화하는 관계를 보여주고 있다. W_d/W_b 의 크기마다 나타나는 β 의 분포는 W_d/W_b 가 작아짐에 따라 β 값이 약간 작아지는 쪽으로 평행이동하고 있으며, $W_d/W_b=0$ 에서는 허브근처에서 상당히 큰 음의 입사각으로 나타나고 있다. 이 결과 허브부근에서의 β_2 가 유량에 관계없이 커져서 상당히 큰 양의 편차각으로 나타난 것으로 풀이된다.

4. 결 론

참 고 문 헌

열교환기에서 사용되고 있는 냉각용 팬에 대해 날개와 덕트입구까지의 거리를 바꾸어 팬의 유동특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 팬의 특성곡선(유량-압력곡선)은 날개의 상대위치 W_d/W_b 의 크기에 따라 약간의 변화를 나타냈으나 전체적으로 같다고 볼 수 있다.

2) 팬의 무부하에서의 최대유량은 W_d/W_b 에 큰 영향을 받지 않으나 덕트가 없는($W_d/W_b = \infty$) 경우일 때, 유량계수 $\varphi = 0.42$ 로 가장 크며, $W_d/W_b = 0$ 일때 $\varphi_{max} = 0.37$ 로서 가장 작았다.

3) 날개바깥주위에서 유입되는 유량의 총유량에 대한 비율은 φ 와 W_d/W_b 의 감소에 따라 크게 감소한다. 따라서 팬의 부하에 따라 W_d/W_b 를 조정함으로써 전방유동장을 조절할 수 있다.

4) 상대유입각은 회전속도와 W_d/W_b 의 감소에 따라 약간이지만 감소한다. 본 날개의 경우 유출편차각이 음으로 나타났다. 이것은 후연부근에서의 박리에 의한 것으로 판단된다.

1. T. Fukano, et. al., 1990, "Experimental Study on the Noise Reduction of a Propeller Fan", J. of the JSME(B), Vol.56, No.531, pp. 174~178.
2. S. Sato and K. Kinoshita., 1993, "Improvements in Performance of Propeller Fans for Outdoors Units of Airconditioners", The 4th Asian International Conference on Fluid Machinery, pp. 166~170.
3. K. Kinoshita and M. Yamamoto., 1990, "Improvements in Performance of Propeller Fans for Airconditioning Outdoor Units", The 3rd Japan-China Joint Conference on Fluid Machinery, pp. 89~94, Osaka April 23 ~25.
4. Bruno Eck., 1973, "Fans", Pergamon Press, pp. 303~304.