

운전점이 다른 소형 축류팬의 난류 유동장 고찰 Investigation on the Turbulent Flow-Field of a Small-size Axial Fan with Different Operating Points

김 장 권
J. K. Kim

(접수일 : 2008년 5월 7일, 수정일 : 2008년 8월 4일, 채택확정 : 2008년 10월 1일)

Key Words : Aerodynamic Performance(공력성능), Characteristic Curve(특성곡선), Flow Coefficient(유량계수), Laser Doppler Anemometer(LDA, 레이저유속계), Operating Point(운전점), Small-size Axial Fan(SSAF, 소형 축류팬), Turbulent Flow Characteristic(난류유동특성)

Abstract : The turbulent flow characteristics around a small-size axial fan(SSAF) for a refrigerator are strongly dependent upon the operating points. Four operating points such as $\phi=0.1, 0.18, 0.25$ and 0.32 were adopted in this study to investigate three-dimensional turbulent flow characteristics around the SSAF by using a fiber-optic type Laser Doppler Anemometer(LDA) system. Downstream mean velocity profiles of the SSAF along the radial distance show that axial and tangential velocity components exist predominantly, except $\phi=0.1$, and have a maximum value at $r/R=0.8$, but radial velocity component having a relatively small value only turns flow direction to the outside or the central part of the SSAF. The turbulent intensity shows that the radial component exists most greatly after $r/R=0.5$. Downstream turbulent kinetic energy at $\phi=0.25$ and 0.32 together has the largest peak value at $r/R=0.9$.

기호 설명

A : 축류팬의 공기 통과면적 [m^2],

$$\{A = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_H^2)\}$$

D_2 : 팬의 외경 [m]

D_H : 팬의 허브직경 [m]

KE : 난류운동에너지 [m^2/s^2],

$$\{KE = \frac{1}{2}(v_z^2 + v_r^2 + v_\theta^2)\}$$

N : 회전수 [rpm]

P : 압력 [Pa]

Q : 유량 [m^3/min]

T : 토오크 [$N \cdot m$]

U_T : 팬 팁(tip) 속도 [m/s], $\{U_T = \frac{\pi D_2 N}{60}\}$

V_z, V_r, V_θ : 각 방향성분의 평균속도 [m/s]

v_z^2, v_r^2, v_θ^2 : 난류변동속도 성분들의 분산 [m^2/s^2]

v_z, v_r, v_θ : 난류변동속도 성분들의 RMS [m/s]

$v_z v_r, v_z v_\theta, v_r v_\theta$: $z-r, z-\theta$ 및 $r-\theta$ 성분의 레이놀즈전단응력 [m^2/s^2]

X, Y, Z : 직교좌표계의 거리 및 방향

η : 축류팬의 효율 [%], $\{\eta = \frac{PQ}{2\pi NT}\}$

λ : 동력계수 [-], $\{\lambda = \frac{2 \times 9.807 T \omega}{\rho U_2^3 A}\}$

ρ : 공기밀도(=1.205) [kg/m^3]

ϕ : 유량계수 [-], $\{\phi = \frac{Q}{A U_T}\}$

ψ : 압력계수 [-], $\{\psi = \frac{2 \times 9.8 P}{\rho U_T^2}\}$

ω : 팬의 각속도 [s^{-1}]

하첨자

김장권 : 군산대학교 동력기계시스템공학전공
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

s : Static
t : Total

1. 서 론

현재 대부분의 냉장고에서 사용되고 있는 소형 축류팬(SSAF)은 냉동실 및 냉장실의 냉기류를 적정하게 분배하거나 순환시키기 위해 사용되고 있으며, 또 냉장고 뒷면 기계실 내에서도 콤프레서 및 콘덴서의 냉각을 위해서 사용되고 있다. SSAF는 일반적으로 날개 두께가 매우 얇은 플라스틱 사출물로 만들어져 있기 때문에 부하 변동에 따른 소음과 진동 그리고 풍량 성능의 변화가 큰 문제점이 있다. 그러나 냉장고의 경우 한정된 외곽크기 내에서 될 수 있는 한 수납공간을 많이 확보해야 하기 때문에 가격이 저렴하고 공간 배치가 용이한 SSAF가 성능 상 많은 문제점이 있는데도 불구하고, 현재까지도 많이 사용되고 있다.

Akaike 등¹⁾과 Kamaya 등²⁾은 저소음화와 효율향상을 위해 축류팬의 기하학적 치수와 시스템의 배열구조 등을 변경하여 팬의 공력특성과 주변 유동장의 속도분포를 연구하였으며, 결과적으로 유동소음을 개선한 바가 있다. Kawaguchi 등³⁾은 날개 면에 작용하는 압력분포를 다루었으며, Adachi 등⁴⁾과 Rew 등⁵⁾은 열선풍속계나 레이저유속계(LDA)를 이용하여 날개 캐스케이드(cascade)에서의 유동속도 벡터를 분석한 바 있다. 또 Hoshino 등⁶⁾과 Vad 등⁷⁾은 설계점을 만족하는 운전점에서 형성되는 팬 하류의 유동속도를 회전각도별로 측정 분석한 바 있다.

본 연구에서는 냉장고에서 실제 냉기순환용으로 사용 중인 SSAF를 가지고 공력성능을 확보한 후 저유량역과 최대유량역을 포함한 4개의 운전점을 결정하였으며, 각 운전점 조건에 따라 팬 하류에서 형성된 난류유동장의 3차원 속도성분들과 난류특성값들을 반경방향의 위치 변화에 따라 3차원 LDA 시스템으로 측정하여 그 특징들을 상호 비교 분석하고자 한다. 따라서 본 연구의 목적은 SSAF의 각 방향 성분의 평균속도들과 난류특성값들이 부하조건이 다른 4개의 운전점에서 반경방향에 따라 각각 어떻게 변하고 또 그 절대크기들이 얼마인지를 명확히 밝히는 데 있다. 궁극적으로는 냉장고와 같이 SSAF를 사용하는 복잡한 덕트유동에서는 부하조건에 따른 팬의 유동패턴을 정확히 이해하는 것이 많은 어려움이 있기 때문에, 이 값들을 효율적인 CFD 적용에 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

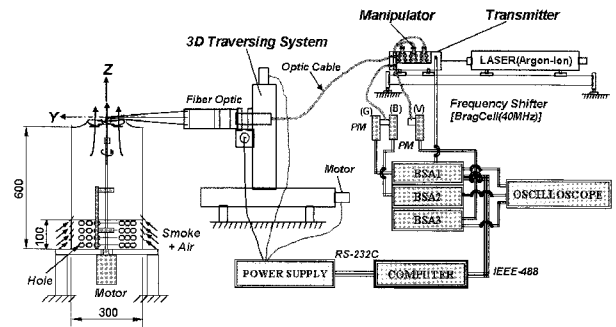


Fig. 1 Schematic diagram for data acquisition using 3-dimensional LDA system

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 SSAF의 구동장치와 3차원 난류유동장을 측정하기 위해서 사용한 후향산란(back-scatter) 방식인 3차원 LDA 시스템(Dantec Co.)을 나타낸다. 여기서 사용된 SSAF의 상세한 제원은 Table 1과 같다. 먼저 SSAF의 운전점을 조정할 수 있도록 만들어진 구동장치는 크게 300 mm(가로) x 350 mm(세로) x 600 mm(높이) 크기의 사각통과 사각통 상부에 부착된 오리피스, 그리고 사각통 하부에 설치된 모터(Toei, VLBSE-04040, 400 Watt) 등으로 구성되어 있다. 여기서 사각통은 4개의 PVC 기둥과 두께 1 mm인 투명 아크릴 측면판, 그리고 두께 10 mm인 상하부 판재로 만들었다. 직경 10 mm인 구동축은 팬의 입구유동흐름에 나쁜 영향을 미치지 않도록 Fig. 1과 같이 하부 측면판 위에 두께 8 mm, 폭 60 mm, 높이 300 mm인 수직 강판을 이용하여 키플링과 두 개의 베어링으로 모터와 연결하였으며, 축 끝에는 척(chuck)을 설치하여 다시 직경 2 mm인 SSAF의 축을 연결하였다. 한편 사각통을 구성하는 300 mm의 측면에는 하단부로부터 높이 100 mm까지의 공간에 직경 10 mm인 구멍을 좌우 모서리부분을 제외하고 20 mm간격으로 1줄에 10개씩 뚫어 4줄 형성하였다. 또 350 mm 측면에도 같은 방법으로 하여 13개씩 4줄 형성시켜 모두 184개의 구멍을 확보함으로써 이 구멍들을 통해서 외부로부터 공기와 연기가 들어가도록 설계하였다. 이 구멍들의 총면적(144.5 cm²)은 실제 팬이 오리피스를 빠져나가는 단면적(90.1 cm²)보다 크게 설정하였다. 또 팬 구동장치에서 SSAF와 오리피스와의 조립조건은 Fig. 2에

서와 같이 SSAF가 오리피스 출구 끝단부를 기준하여 팬 깊이의 1/3이 돌출 되도록 하였다. 여기서 오리피스 틈새는 SSAF의 외경 대비 3 %의 크기로 유지하였다.

Table 1 Specification of the SSAF for refrigerator

Item	Specification
Outer diameter (mm)	110
Hub diameter (mm)	25
Orifice diameter (mm)	116.6
Blade number (ea)	4
Blade thickness (mm)	2
Blade curvature radius (mm)	109
Chord length at tip (mm)	73.6
Chord length at hub (mm)	14.54
Blade aspect ratio (-)	0.4076
Camber ratio at tip (-)	0.08
Solidity at tip (-)	0.8519
Solidity at hub (-)	0.7408
Blade attachment angle (°)	24

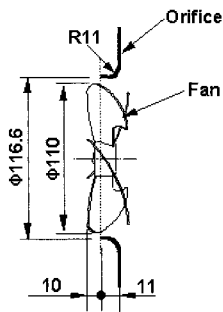


Fig. 2 Configuration of the SSAF and an orifice geometry

본 연구에서 사용한 3차원 LDA 시스템은 용량 5 Watt인 수냉식 아르곤-이온 레이저(Coherent Co.)와 Fiber-optic 방식의 광원전달장치 그리고 자료 취득용 BSA(burst spectrum analyser) 및 3차원 자동이송장치 등으로 구성되어 있다. 여기서 속도 자료의 연산처리 및 각 시스템의 원활한 제어를 위해 사용된 컴퓨터는 이들 시스템과 온라인으로 연결되어 있다. 특히 본 연구에서 속도 자료의 연산처리에 사용된 광학장치의 상세 내용들은 Table 2와 같다. 한편 SSAF의 공력특성곡선을 얻기 위해 사용한 소형 팬테스터는 KSB 6311 및 AMCA STANDARD 210- 85를 참고로 하여 제작되었으며, 직경 30 mm

인 노즐 1개로 유량을 얻을 수 있도록 흡입식으로 설계하였다.^{8,9)} 또 SSAF의 속도측정에 필요한 산란 입자로서는 연기발생기(Invent Co.)에서 얻어지는 파라핀 계통의 연기를 사용하였다.

Table 2 Specification for the optical setup of the LDA system

Item	Specification		
	BSA1	BSA2	BSA3
Calibration factor ($m/s/MHz$)	8.824	8.369	8.172
Wavelength (nm)	514.5 (Green)	488 (Blue)	476.5 (Violet)
Beam separation (mm)	70	70	70
Focal length (mm)	1200	1200	1200

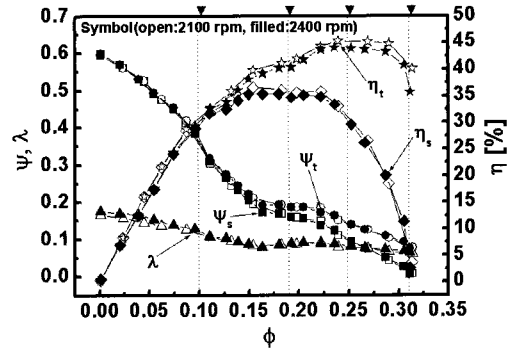


Fig. 3 Non-dimensional characteristic curve of the SSAF

2.2 실험방법

본 연구에서는 SSAF를 Fig. 2와 같은 조건으로 팬테스터에 조립한 다음 팬의 회전수를 각각 2,100 rpm과 2,400 rpm의 일정 회전수로 동작시킨 후, 정압과 풍량 그리고 토크를 측정하였다. 여기서 Fig. 3은 위의 측정값들을 이용하여 유량계수에 따른 정압계수, 전압계수, 동력계수, 정압효율 및 전압효율로 각각 산출하여 나타낸 SSAF의 무차원 공력 특성곡선이다. 따라서 본 연구에서는 이 공력특성곡선으로부터 SSAF의 운전점으로 4개의 유량계수들을 각각 $\phi=0.1, 0.18, 0.25, 0.32$ 로 결정하였다. 이 유량계수들은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 각각 저유량역, 최고정압효율, 최고전압효율 및 최대유량역을 만족하는 위치이다. 한편 SSAF의 하류에서 형성되는 반경방향에 따른 3차원 속도 분포의 측정은 팬의 회전수가 변하더라도 공력특성값들이 상사성을 보이기 때문에, 본 연구에서는 편의상 팬의 회전수

를 2,400 rpm으로 고정을 하였다. 또 이 운전점 위치들을 만족하는 풍량 대 정압조건들은 Fig. 1의 좌측에 나타난 팬 구동장치에서와 같이 4면에 형성된 아크릴 측판의 구멍들을 통해 공기와 연기가 균일하게 통과하도록 상부측 구멍부터 비닐 접착테이프로 막아 설정하였다.

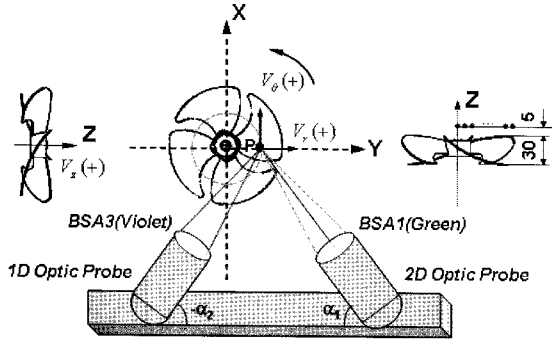


Fig. 4 Definition of velocity direction at the measuring point of the SSAF

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 SSAF의 유동 측정점에 대한 속도방향의 기준을 나타내고 있다. 축방향 속도성분(V_z)은 상방향, 반경방향 속도성분(V_r)은 바깥쪽을, 그리고 접선방향 속도성분(V_θ)은 반시계방향을 각각 양(+의 값)으로 하여 처리하였다.¹⁰⁻¹²⁾

본 연구에서는 자동이송장치에 탑재된 1차원 속도 측정용 광학 프로브(probe)와 2차원 속도 측정용 광학프로브로부터 나온 레이저빔들이 공간상의 한 점에서 정확하게 교차할 때, 이송장치와 각 프로브들이 이루는 일정각도들은 $\alpha_1=18.9^\circ$, $\alpha_2=-20.9^\circ$ 로 얻어져, 3차원 속도성분을 연산하는데 이 각도들을 적용하였다. 또 모든 속도의 측정은 3개의 BSA들로부터 얻어지는 속도 측정 데이터의 유효성(validation)과 정보수집률(data-rate)의 상태를 살펴가며 각 방향 속도성분의 정보들이 양호하게 얻어지도록 각각의 BSA를 지배하는 소프트웨어의 각종 변수들과 연기발생기의 연기량을 최적으로 제어해가며 행하였다. 한편 3차원 속도성분의 측정위치는 레이저빔이 팬 날개에 부딪치지 않는 최소한의 떨어진 거리로 날개 후연에서 Z축 상부로 5 mm 떨어진 위치를 기준으로 반지름 0 mm에서부터 2 mm간격으로 58 mm까지 총 30개 지점을 선택하였다.(Fig. 4 참조) 또 각 방향 평균속도 성분의 통계학적 연산 방법은 앙상블 평균처리기법을 이용하였다. 이때 각 측정위치에서 3차원 LDA로부터 얻어

진 유효한 총 버스트(burst) 수는 3개의 BSA들 모두 일치모드(coincidence mode)인 "Master" 기능으로 선택하여 각 BSA당 5,000개가 샘플링 되도록 설정하여 사용하였다.¹⁰⁻¹³⁾

3. 실험 결과 분석

3.1 벡터 및 평균속도 분포

Fig. 5는 SSAF의 각 운전점에 따라 하류에서 측정된 축방향과 반경방향성분의 평균속도들로부터 얻어진 벡터분포를 나타낸 그림들이다. 저유량역인 $\phi=0.1$ 에서는 속도벡터크기가 현저히 작게 나타나며, 그 유동방향도 균일크기의 벡터분포로 나타난 우측의 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모두 반대방향으로 나타나 측정구간에서는 역류현상이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 역류현상은 $\phi=0.1$ 의 경우 SSAF가 사각통에서 형성된 높은 시스템정압을 극복하지 못하여 하류측으로 유동을 정상적으로 내 보내지 않고 날개 끝단부를 벗어난 반경방향으로 확산됨으로서 주로 측정구간 내에서 발생하며^{4,14,15)}, 결과적으로 상류 및 하류로 흐르는 유량은 동시에 현저히 줄어들게 된다. 즉, 유량계수가 증가한 운전점 $\phi=0.18$ 에서는 $r/R=0.3$ 이전까지는 역류현상을 보이나, 그 이후부터는 반경방향의 거리 증가에 따라 속도벡터크기가 증가하여 약 $r/R=0.8$ 근처에서 최대값을 보이다가 그 이후부터 점차 감소하여 나타난다. 또 날개 끝단부에서는 유동의 슬립(slip)과 누설 등으로 인한 역류현상이 시작되는 모습을 볼 수 있다. 특히 최대전압효율을 보이는 $\phi=0.25$ 와 최대유량역을 나타내는 $\phi=0.32$ 에서는 날개 끝단부에서만 역류현상을 나타내고, 반경비 약 0.8부근에서 최대의 속도크기를 보여주는데, 이것은 날개의 형상에서 오는 양력이 가장 크게 발생되기 때문으로 얻어지는 결과라 생각된다.

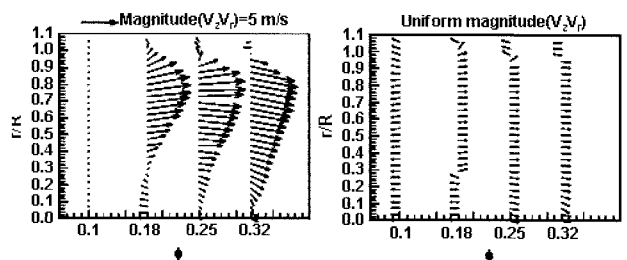


Fig. 5 Vector plot of velocity(V_z, V_r) according to the operating point of the SSAF

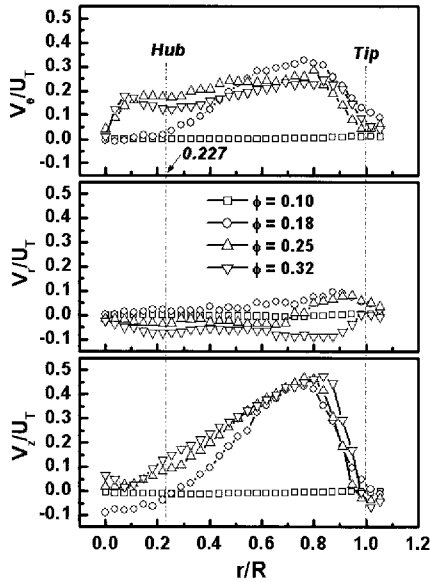


Fig. 6 Mean velocity profiles along the radial distance

Fig. 6은 각 운전점에 따른 SSAF의 하류에서 측정된 3차원 평균 유동속도 성분들을 날개 팁으로 기준한 원주속도(U_T)로 무차원화한 그림이다. 유량계수 $\phi=0.1$ 의 경우 반경비에 관계없이 각 방향성분의 속도들은 거의 0에 가까운 크기 분포를 보여주는데, 축방향 속도성분(V_z)은 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 전체적으로 음의 값을 보여주고 있다. V_z 는 반경비 약 0.8부근까지는 계속 증가하며, 특히 유량계수 $\phi=0.18$ 에서는 반경비 약 0.3 이전까지 여전히 음의 값으로 나타나 허브 내측에서는 역류가 이루어지나, 허브를 벗어나서는 정상적으로 하류측으로 유동이 형성됨을 알 수 있다. 그러나 $\phi=0.18$ 을 벗어난 다른 유량계수에서의 V_z 는 전 반경비에서 모두 양의 값을 보이며, 반경비의 증가에 따라 현저히 증가하는 모습을 보여준다. 또 반경비 약 0.8부근에서는 원주속도 대비 약 0.45배로 가장 큰 속도값을 보여주나, 그 이후부터 날개 끝단부까지는 현저히 감소하는 분포를 보여주고 있다. 특히 유량계수 $\phi=0.25$ 와 $\phi=0.32$ 의 경우 무차원 축방향 속도분포가 비교적 상사성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 같은 평균속도크기는 Kim 등¹⁴⁾과 Hoshino 등⁶⁾의 연구에서도 측정 조건은 서로 다르지만 유사한 크기로 분포됨을 확인할 수 있다.

반경방향성분의 평균속도(V_r)는 전체적으로 그 절대값이 원주속도 대비 약 0.1배 미만으로써 상대적으로 작은 속도값을 보여주고 있다. 유량계수 $\phi=0.1$ 의 경우 거의 0에 가까운 값을 보이며, $\phi=0.18$

의 경우 전체적으로 양의 값을 보여 그 유동방향이 SSAF 바깥쪽으로 향하는 유동 방향성을 보여주고 있다. 그러나 $\phi=0.25$ 의 경우 반경비 약 0.7 부근 전까지는 음의 값으로 비교적 완만한 기울기로 나타나 역시 SSAF 중심쪽으로 향하는 유동방향성을 가지나, 약 0.7 이후 영역부터는 양의 값으로 증가하다가 날개 끝단부에서 약간 감소하는 분포를 보여 주는데 이곳에서는 축류팬 바깥쪽으로 향하는 유동 방향성을 보여주고 있다. 그러나 유량계수 $\phi=0.32$ 의 경우 전체적으로 음의 값으로 나타나 축류팬 중심부쪽으로 향하는 유동방향성을 가지는 것을 알 수 있다. Kim 등¹⁴⁾은 이 같은 현상을 중심축에 가까운 곳에서는 중심축을 향하는 수축유동이, 중심축에서 먼 부분에서는 외부로 향하는 확산유동이 존재한다고 언급한 바 있으며, Adachi 등⁴⁾와 Myung 등¹⁵⁾도 외부로 향하는 반경방향 유동이 원심력과 반경방향 압력기울기 사이의 불균형에 기인되어 발생하는 것으로 언급한 바 있다. 따라서 날개 허브와 팁 사이에서 존재하는 V_r 는 Fig. 5의 좌측 그림과 같이 날개 압력면 쪽에 존재하는 중심축을 향하는 유동영역과 날개 흡입면 쪽에 존재하는 외부로 향하는 유동영역의 존재로 인해 양, 음의 크기 분포를 동시에 보여주고 있다.^{14,15)}

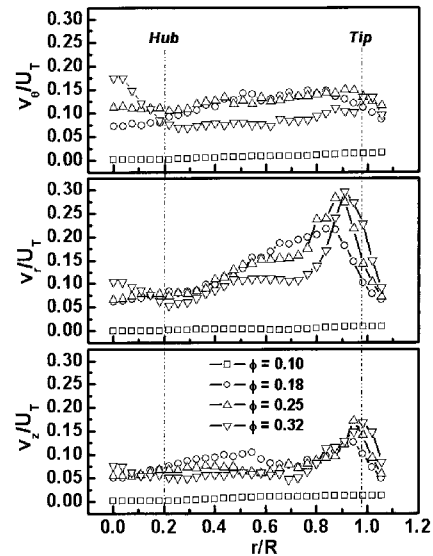


Fig. 7 Turbulent intensity profiles along the radial distance

접선방향성분의 평균속도(V_θ) 크기분포는 모두 양의 값으로 나타나 축류팬의 회전방향과 동일한 반시계방향을 보여주고 있다. 유량계수 $\phi=0.1$ 의 경우 거의 0에 가까운 값을 보여준다. 또 $\phi=0.18$ 의 경

우 반경비가 허브영역이전까지는 거의 0에 가까운 값을 보이거나, 그 이후부터는 급속히 증가하다가 반경비 약 0.8 부근에서 원주속도 대비 약 0.3배로 최대값을 보여 강한 선회류가 존재함을 알 수 있다.⁶⁾ 유량계수 $\phi=0.25$ 와 $\phi=0.32$ 에서도 반경비 약 0.8부근에서 원주속도 대비 약 0.2배의 최대값을 보이고 있으며, 전체적으로 비슷한 분포모습을 볼 수 있다. 반경비 약 0.8 이후부터 V_θ 의 크기분포는 모두 급속히 감소하다가 날개 팁 부근에서는 다시 완만한 분포를 보여주고 있다.

3.2 난류강도 및 난류운동에너지 분포

Fig. 7은 각 운전점에 따른 SSAF의 하류에서 측정된 3차원 난류속도의 RMS(root-mean-square) 성분들을 원주속도로 나누어 무차원화한 축방향, 반경방향 및 접선방향 성분의 난류강도 분포들이다.

저유량역에 해당하는 유량계수 $\phi=0.1$ 에서는 각 방향 성분의 난류강도들이 모두 거의 0에 가까운 크기로 나타나 이 운전점에서는 난류가 형성되지 않음을 알 수 있다. 그러나 최대유량역을 나타내는 유량계수 $\phi=0.32$ 를 제외하곤 모두 허브 안쪽의 반경비에서 최소값을 보이고 있으며, 축방향성분의 난류강도(v_z/U_T)는 반경방향의 거리 증가에 따라 약 5 %의 크기부터 증가하다가 반경비 약 0.7 부근에서 약간 변곡된 현상을 보이며, 반경비 약 0.95 부근에서 약 17.5 %의 최대값에 도달한 다음 급격히 감소한다.

반경방향 성분의 난류강도(v_r/U_T)는 약 5 %의 크기부터 증가하다가 반경비 약 0.9 부근에서 최대값 약 30 %에 도달한 다음 급격히 감소하고 있다. 특히 v_z/U_T 와 v_r/U_T 가 최대값을 나타내는 반경비 위치는 유량계수가 증가함에 따라 날개 팁 쪽으로 약간 옮겨감을 알 수 있다.

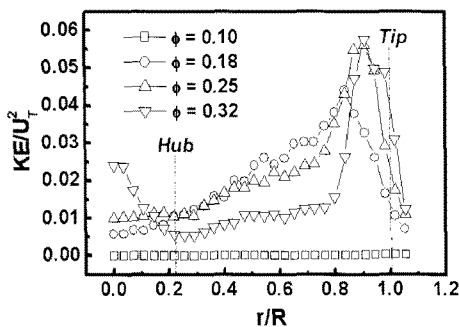


Fig. 8 Turbulent kinetic energy profiles along the radial distance

한편, 접선방향 성분의 난류강도(v_θ/U_T)는 허브 내측의 경우 유량계수 증가에 따라 크기가 증가하는 분포를 보여준다. 허브 외측의 경우 최대유량역을 나타내는 $\phi=0.32$ 의 v_θ/U_T 는 서로 크기가 비슷한 $\phi=0.18$ 이나 $\phi=0.25$ 에서보다도 더 작은 크기 분포를 보이고 있다. 이것은 모든 난류강도성분에서 같은 현상을 보이고 있는데, $\phi=0.32$ 의 경우 시스템 정압이 전혀 존재하지 않기 때문에 환 단독으로 운전하는 것과 같아 상대적으로 난류가 작게 발생하기 때문이다. 또 허브 외측의 영역에서 v_θ/U_T 는 반경방향의 거리 증가에 따라 약 7 %부터 서서히 증가하다가 반경비 약 0.9부근에서 최대값 약 15 %에 도달한 다음 감소하는 경향을 보이고 있다. 여기서 가장 큰 특징은 v_r/U_T 의 최대값과 난류강도 분포의 기울기가 가장 크게 형성되는 반면에 v_θ/U_T 는 전체 반경비에 걸쳐 상당히 큰 크기를 나타내지만 난류강도 분포의 기울기는 비교적 완만한 모습을 보여준다는 것이다. 또한 전 반경비에 걸쳐 v_r/U_T 가 가장 큰 크기를 보여주며 v_θ/U_T , v_z/U_T 순으로 크기분포가 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 운전점에 따른 SSAF의 하류에서 측정된 3차원 난류속도의 RMS성분들로부터 얻어진 난류운동에너지를 원주속도의 제곱으로 무차원화한 그림이다. 난류운동에너지는 저유량역에 해당하는 유량계수 $\phi=0.1$ 에서는 거의 존재하지 않고 있으며, 허브 내측에서는 유량계수의 증가 순서대로 난류운동에너지의 크기가 나타난다. 또 허브를 벗어난 외측 영역에서의 난류운동에너지는 반경방향 거리 증가에 따라 점차 증가하다가, 반경비 약 0.7 이후부터 급격히 증가한 다음 반경비 약 0.9에서 최대값 약 5.7 %에 도달하고 그 이후 급격히 감소해 가는 경향을 보여주고 있다. 특히 최대유량역을 나타내는 유량계수 $\phi=0.32$ 에서 난류운동에너지는 유량계수 $\phi=0.18$ 과 $\phi=0.25$ 보다 허브를 벗어난 반경비 약 0.85까지는 더 작은 크기 분포를 이루고 있다.

3.3 난류전단응력 분포

Fig. 9는 각 운전점에 따른 SSAF의 하류에서 측정된 3차원 난류속도의 전단응력 성분들을 원주속도의 제곱으로 무차원화한 축방향 및 반경방향 성분, 축방향 및 접선방향 성분, 반경방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력 그림들이다.

저유량역에 해당하는 유량계수 $\phi=0.1$ 에서는 각 방향 성분들의 난류전단응력들이 모두 0의 값을 보

여 이 운전점에서는 난류전단응력이 형성되지 않음을 알 수 있다. 그러나 축방향 및 반경방향 성분의 난류전단응력($v_z v_r$) 분포는 허브 내측에서는 모두 음의 값을 보이며, 유량계수가 증가함에 따라 음의 값을 보이는 반경비는 $\phi=0.18$ 의 경우 약 0.5, $\phi=0.25$ 의 경우 약 0.4, $\phi=0.32$ 의 경우 0.3으로 나타나 점점 감소하는 경향을 보이고 있다. 또 양의 최대값을 나타내는 반경비 위치는 유량계수가 증가함에 따라 날개 팁쪽으로 옮겨가는 분포 모습을 보여주며, $v_z v_r$ 의 최대값은 최대유량역을 나타내는 유량계수 $\phi=0.32$ 의 반경비 0.9위치에서 약 2.1 %의 크기를 보이고 있다.

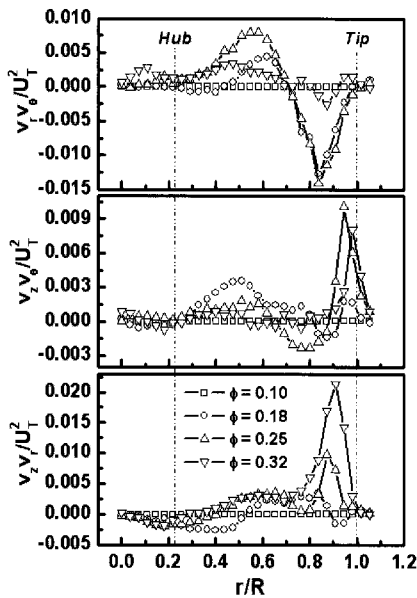


Fig. 9 Reynolds shear stress profiles along the radial distance

축방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력($v_z v_\theta$) 분포는 허브 내측에서는 유량계수의 크기에 관계없이 양, 음의 미소한 값으로 산재해 나타나나 허브를 벗어나서는 반경비 약 0.65까지는 유량계수의 증가에 따라 크기가 감소하는 경향을 보인다.

또 $v_z v_\theta$ 의 두드러진 특징은 최고 효율점을 나타내는 유량계수 $\phi=0.25$ 의 반경비 약 0.8의 위치에서 음의 최소값을 보이는 반면에 반경비 약 0.95 부근에서는 약 1 % 크기의 최대값을 보인다는 것이다. 그러나 전체적인 $v_z v_\theta$ 는 다른 성분의 값들보다 다소 작은 크기 분포를 보이고 있다.

한편, 반경방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력($v_r v_\theta$) 분포는 허브 내측에서는 유량계수의 크기에 관계없이 모두 양의 값으로 나타나며, 허브를 벗어

나서는 반경비의 증가에 따라 서서히 증가하다가 양의 최대값을 보인 다음 다시 감소하여 음의 최소값을 보인 후 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 $v_r v_\theta$ 는 최고 효율점을 나타내는 $\phi=0.25$ 의 반경비 약 0.6에서 양의 최대값 0.75 %를 가지며, 반경비 약 0.83에서는 유량계수 $\phi=0.18$ 과 더불어 약 1.4 %의 음의 최소값을 갖는다. 여기서 몇몇 연구자들은^{4,14,15)} $v_z v_r$ 및 $v_r v_\theta$ 가 양, 음의 크기로 각각 크게 존재하는 현상을 두고 반경방향 유동이 원심력과 반경방향 압력기울기 사이의 불균형에 기인되어 날개사이에서 순환류 혹은 이차유동(secondary flow)을 발생시킴으로 날개 압력면 쪽에 존재하는 중심을 향하는 유동영역과 날개 흡입면 쪽에 존재하는 외부로 향하는 유동영역이 동시에 존재하여 나타난 결과로 해석한 바 있다.

4. 결론

현재 냉장고에서 사용되고 있는 SSAF의 저유량역에서 최대유량역까지 모두 4개의 운전점에 따라 형성된 3차원 난류유동장을 3차원 LDA 시스템으로 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저유량역 운전점인 $\phi=0.1$ 의 측정구간 내 모든 반경위치에서 그리고 $\phi=0.18$ 의 $r/R < 0.3$ 에서는 모두 역류현상을 보이나, $\phi=0.25$ 와 $\phi=0.32$ 에서는 날개 끝단부에서만 역류현상을 나타내고 있다.

2) 운전점 $\phi=0.18$ 이후부터 평균속도 V_z 와 V_θ 들은 약 $r/R=0.8$ 근처에서 최대의 속도크기를 보여주는데, 이것은 날개의 형상으로 인해 양력이 가장 크게 발생되기 때문이다.

3) 난류강도 v_r/U_T 가 반경비 약 0.9부근에서 약 30 %로 가장 큰 크기를 보이는데, 이것은 평균속도 기울기가 이 위치에서 가장 크게 발생하기 때문이다. 또 각 방향성분의 난류강도들은 최대값이 형성되는 반경비 위치를 제외하고는 모두 운전점 $\phi=0.18$ 과 0.25에서 상대적으로 크게 형성된다.

4) 반경비 약 0.85까지는 유량계수 $\phi=0.32$ 에서의 난류운동에너지가 유량계수 $\phi=0.18$ 과 $\phi=0.25$ 에서보다 더 작은 크기 분포를 이루고 있지만, 반경비 약 0.9 근처에서는 $\phi=0.25$ 에서와 유사한 크기를 보이면서 최대값 약 5.7 %를 갖는다.

5) 난류전단응력 $v_z v_r$ 과 $v_r v_\theta$ 는 $r/R=0.8\sim 0.9$ 부근에서 각각 상대적으로 양과 음의 최대값을 보여주며, $v_z v_\theta$ 에 비해 상대적으로 큰 크기분포를 나타낸다.

후 기

본 논문은 2008년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. S. Akaike and K. Kikuyama, 1991, "Noise Reduction of Condenser Cooling Fans for Auto-motive Air Conditioners", Trans. of the JSME (Part B), Vol. 57, No. 541, pp. 239~244.
2. S. Kamaya and S. Kanabayashi, 1990, "Improvement of the Characteristics of the Low-Flow-Rate Region for Axial Flow Fans", Trans. of the JSME (Part B), Vol. 56, No. 532, pp. 3769~3773.
3. K. Kawaguchi, S. Kadota, M. Suzuki, K. Matsui and K. Kikuyama, 1993, "Study on Low-Noise Fan (Noise Reduction of Pusher-Type Condenser Cooling Fan)", Trans. of the JSME (Part B), Vol. 59, No. 558, pp. 453~459.
4. T. Adachi, M. Yamashita, K. Yasuhara, and T. Kawai, 1996, "Effects of Operating Conditions on the Flow in the Moving Blade Passage of a Single Stage Axial-Flow Fan", Proc. of the 6th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 199~208.
5. H. S. Rew, S. H. Kim, Y. G. Jung, C. J. Kim and J. E. Cha, 1996, "LDA Measurement and Calculation in a Small Axial Fan", Proc. of the 6th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 209~218.
6. T. Hoshino and A. Oshima, 1986, "Measurement of Flow Field Around Propeller by Using a 3-Component Laser Doppler Velocimeter (LDV)", Technical Review, Mitsubishi Heavy Industries, Vol. 23, No. 3, pp. 343~350.
7. J. Vad and F. Bencze, 1998, "Three-Dimensional Flow in Axial Flow Fans of Non-Free Vortex Design", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 19, pp. 601~607.
8. AMCA, 1985, "AMCA STANDARD 210-85".
9. J. K. Kim, 1993, "A Study on the Performance Test of Self-made Fan Tester", J. of the KSAS Sciences, Vol. 21, No. 1, pp.45~51.
10. Dantec, 1991, "Burstware 2.00 Installation Guide".
11. P. Buchhave, 1984, "Three-Component LDA Measurements", DISA Information, No. 29, pp. 3~9.
12. J. K. Kim, 2000, "A Study on the Three-Dimensional Turbulent Flow Characteristics of a Small-Sized Axial Fan at the Maximum Flowrate Region", J. of the KSPSE, Vol. 4, No. 3, pp. 25~33.
13. J. K. Kim, 2001, "A Study on the Three Dimensional Statistical Turbulent Flow Characteristics Around a Small-Sized Axial Fan for Refrigerator", Trans. of the KSME (Part B), Vol. 25, No. 6, pp. 819~828.
14. J. K. Kim and S. H. Kang, 2000, "Performance and Flow Characteristics of Forward Sweep Propeller Fan", Trans. of the KSME (Part B), Vol. 24, No. 1, pp. 75~84.
15. H. J. Myung and J. H. Baek, 1999, "Mean Velocity Characteristics behind a Forward-Swept Axial-Flow Fan", JSME Int. J. (Series B), Vol. 42, No. 3, pp. 476~488.