

# 냉장고용 소형 축류팬의 통계학적 3차원 난류유동 특성에 관한 연구

김 장 권\*

(2000년 10월 4일 접수, 2001년 4월 19일 심사완료)

## A Study on the Three Dimensional Statistical Turbulent Flow Characteristics Around a Small-Sized Axial Fan for Refrigerator

Jang-kweon Kim

**Key Words:** Axial Fan(축류팬), Characteristic Curve(특성곡선), Design Point(설계점), Flow Coefficient(유량계수), LDA(레이저 유속계), Operating Point(운전점), Turbulent Flow(난류유동)

### Abstract

The operating point of a small-sized axial fan is strongly dependent upon the system resistance. Therefore, the turbulent flow characteristics around a small-sized axial fan may change significantly according to the operating point. This study represents three-dimensional turbulent flow characteristics around a small-sized axial fan measured at the ideal design point  $\phi=0.25$ , which is equivalent to the maximum total efficiency point, by using three dimensional fiber-optic type LDA system. This LDA system is composed of a 5 W Argon-ion laser, two optics in back-scatter mode, three BSA's, a PC, and a three-dimensional automatic traversing system. A kind of paraffin fluid is used to supply particles by means of fog generator. Mean velocity profiles downstream of a small-sized axial fan along the radial distance show that the streamwise and the tangential components exist in a predominant manner, while the radial component has a small scale distribution and shows the inflection which its flow direction is inward or outward. Moreover, the turbulent intensity profiles show that the radial component exists the most greatly among turbulent energies.

### 기호설명

B : 날개 폭 [m]  
 C : 캠버(camber) [m]  
 $C_{D1}, C_{D2}, C_{D3}$  : 각각 BSA1, BSA2, BSA3의 도플러(Doppler) 주파수에 대한 유동속도의 교정인자(calibration factor)  
 D : 직경 [m]  
 $f_{D1}, f_{D2}, f_{D3}$  : 각각 BSA1, BSA2, BSA3의 도플러 주파수  
 L : 현(chord) 길이 [m]  
 KE : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]

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

N : 회전수 [rpm]  
 P : 압력 [mmH<sub>2</sub>O]  
 Q : 유량 [ $m^3/min$ ]  
 R : 외주반경 [m]  
 $R_c$  : 날개 폭을 반경 [m]  
 r : 반경방향의 거리 [m]  
 T : 토크(torque) [ $kg \cdot m$ ]  
 $T_b$  : 날개 두께 [m]  
 t : 날개 피치(pitch) [m]  
 $U_1, U_2, U_3$  : 각각 BSA1, BSA2, BSA3으로부터 얻어지는 순간속도  
 V : 평균속도 [m/s]  
 $U_T$  : 날개 팁 기준 원주속도 [m/s]

\* 회원, 군산대학교 기관공학과  
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr  
 TEL : (063)469-1848 FAX : (063)469-1841

- $v^2$  : 난류속도의 평균제곱(mean-square)  $[m^2/s^2]$
- RMS(v) : 난류속도의 평균제곱근(root-mean-square) [m/s]
- $v_z v_r, v_z v_\theta, v_r v_\theta$  : z와 r방향, z와  $\theta$  방향 및 r과  $\theta$  방향의 Reynolds 전단응력  $[m^2/s^2]$
- X, Y, Z : 직교좌표계 방향 및 거리
- $Z_b$  : 날개수
- L/t : 솔리디티(solidity) [-]

그리스문자

- $\gamma$  : 공기의 비중량(=1.205)  $[kg/m^3]$
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  : BSA1, BSA2 및 BSA3에 각각 해당하는 녹색, 청색 및 보라색 레이저(laser) 빔(beam)사이의 반각  $[^\circ]$
- $\phi$  : 축류팬 유량계수 [-]  

$$\left\{ = \frac{0.4053 \cdot Q}{N \cdot D_2^3 (1 - (D_H/D_2)^2)} \right\}$$
- $\psi$  : 축류팬 압력계수 [-]  

$$\left\{ = \frac{5937.2 \cdot P}{D_2^2 \cdot N^2} \right\}$$
- $\lambda$  : 축류팬 동력계수 [-]  

$$\left\{ = \frac{15118.96 \cdot T}{D_2^3 \cdot N^2 (D_2^2 - D_H^2)} \right\}$$
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  : BSA1, BSA2 및 BSA3에 각각 해당하는 녹색, 청색 및 보라색 레이저의 파장(wavelength)
- $n$  : 축류팬 효율 [-]  $\left\{ = \frac{15.92 \cdot P \cdot Q}{N \cdot T} \right\}$

하첨자

- 2 : Outer
- H : Hub
- o : Orifice
- r : 반경방향
- s : Static
- T : Tip
- t : Total
- z : 축 방향
- $\theta$  : 접선방향

프로펠러(propeller) 팬(fan)이라고도 말하는 축류팬(axial fan)은 냉장고, 컴퓨터, 에어컨, 자동차 등의 각종 산업 전반에 걸쳐서 기기의 열전달 현상을 촉진하기 위해서나 또는 건물 등의 실내 공기를 쾌적하게 환기시키는 용도로 인간생활에 매우 밀접하게 응용되고 있다. 일반적으로 축류팬은 다른 팬에 비해 낮은 압력, 많은 풍량이 발휘되는 환경에 적절한 것으로 잘 알려져 있으며, 사용되는 환경에 따라 소형, 중형, 대형 등으로 제작되어 응용되고 있다.

특히 냉장고에서 사용되고 있는 소형 축류팬은 냉동실 및 냉장실에서 냉기류의 적정 분배 및 순환을 제어하기 위해 사용되고 있으며, 또 냉장고 밖의 뒷면 기계실 내에서 콤프레서 및 콘덴서의 냉각을 위해 널리 사용되고 있다. 이런 소형 축류팬은 날개(blade) 두께가 매우 얇은 플라스틱 사출물로 만들어져 있어 부하 변동에 따라 소음, 진동 및 풍량 성능의 변화가 발생하는 문제점이 있다. 그러나 냉장고의 경우 한정된 외곽크기 내에서 될 수 있는 한 고(庫)내 수납 공간을 많이 확보해야 하는 기술적인 필연성이 있고 또 소형 축류팬이 다른 팬에 비해서 매우 값도 싸고, 공간 배치가 용이하기 때문에 성능상 많은 문제점이 있는데도 불구하고 현재까지도 많이 사용되고 있다.

축류팬에 대한 연구는 크게 실험적 연구와 전산유체역학(이하 CFD로 표기함) 기법을 이용한 이론적 해석 연구가 지배적으로 이루어지고 있다. 실험적 연구내용에는 저소음화 및 효율향상을 위해 축류팬의 기하학적 치수 변경이나 적용하고자 하는 시스템과의 배열구조나 치수 변경을 통해 공력특성과 주변 유동장 속도분포 및 유동소음의 개선 효과를 다룬 내용들이 있다.<sup>(1~4)</sup> 또 날개 면에 작용하는 압력분포를 다루거나,<sup>(5)</sup> 열선 풍속계나 레이저유속계(이하 LDA로 표기함)를 이용한 날개 캐스케이드에서의 유동속도 벡터를 다루는 경우<sup>(6~10)</sup>와 설계점을 만족하는 운전점에서 형성되는 팬 후류의 유동속도를 회전각도별로 분석한 경우<sup>(11~13)</sup>가 대부분이다. 한편, CFD 기법을 이용한 이론적 연구내용에는 축류팬에 대한 보다 정확한 유동 정보를 얻고자 새로운 CFD 기법을 개발하는 방법의 소개나 그 기법을 적용한 유동장 결과들을 실험결과와 비교하는 연구<sup>(14~18)</sup>가 주를 이루고 있는 실정이다.

본 연구에서는 냉장고에서 냉기순환용으로 사용 중인 소형 축류팬을 가지고 최고효율을 만족하는 설계점에서 축류팬의 유동장 속도분포를 분

1. 서 론

석하고자 한다. 한편 소형 축류팬을 가지고 일정한 회전수로 운전시킨 상태에서 팬 테스트를 이용하여 공력특성자료를 얻을 수 있는데, 이때 얻어진 무차원 공력특성곡선으로부터 최대효율을 만족하는 설계점의 운전점을 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 조건에서 소형 축류팬의 상류 및 후류에서 형성되는 난류유동장의 3차원 속도성분들, 즉 축방향 속도성분  $V_z$ , 반경방향 속도성분  $V_r$ , 접선방향 속도성분  $V_\theta$ 를 반경방향의 위치 변화에 따라 3차원 LDA 시스템으로 측정하여 소형 축류팬의 상류 및 후류에서 형성되는 난류의 평균 유동장을 상호 비교 분석하고자 한다.

본 연구의 목적은 직접적으로는 소형 축류팬의 최고효율을 만족하는 설계점 조건하에서 팬 후류의 3차원 각 방향 속도성분의 분포가 팬의 회전수와 기하학적 형상변수에 의해서 입구유동장으로부터 어떻게 변하고 또 그 절대크기들이 얼마인지를 LDA시스템을 이용하여 명확히 밝히고자 한다. 또 간접적으로는 직접 실험을 통하여 유동양상을 규명하는데 많은 어려움이 있는 냉장고의 냉동실과 같은 복잡한 공간내에서 축류팬을 이용하는 덕트 연구 등에 CFD를 비교적 쉽게 적용할 수 있도록 입력변수로 필요한 축류팬의 반경방향에 따른 3차원 평균속도성분들의 크기분포들을 제공하는데 있다

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 소형 축류팬의 구동장치와 3차원 난류 유동장으로부터 평균 난류 특성치들을 측정하기 위해서 사용한 3차원 LDA 시스템(Dantec)을 나타낸다.

Fig. 2는 축류팬과 오리피스(orifice)의 기하학적 배치도를 나타내는 것이다. 특히 본 연구에서는 오리피스 틈새가 축류팬의 외경 대비 3%의 크기를 갖고, 또 축류팬이 오리피스 출구 끝단부를 기준하여 팬 깊이의 1/3이 돌출 되도록 하였다. 여기서 축류팬은 실제 냉장고에서 사용하는 소형 축류팬으로 외경 110mm, 허브(hub) 직경 25mm, 오리피스 직경 116.6mm, 날개두께 2mm, 날개수 4개 등의 제원을 갖는다. Table 1은 축류팬의 기타 자세한 상세 자료를 나타내고 있다. 먼저 소형 축류팬을 구동시켜 부하를 조정할 수 있도록 만든 소형 팬 구동장치는 먼저 4개의 지주(支柱)와 함께 투명아크릴(acryl)로 만들어진 두께 1mm인 측면판과 두께 10mm인 상하부 판재로 만들어

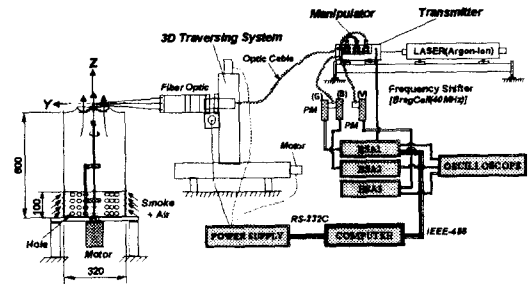


Fig. 1 Schematic diagram of data acquisition by using 3-dimensional LDA system

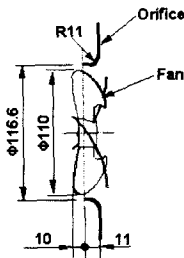


Fig. 2 Geometry configuration of axial fan and orifice

진 300mm(가로) x 350mm(세로) x 600mm(높이)의 사각통 상부에 부착된 오리피스와 사각통 하부내에 설치된 모터(Toei, VLBSE-04040, 400Watts) 등으로 구성되어 있다. 여기서 모터와 직경 10 mm인 구동축은 입구유동에 영향을 미치지 않도록 Fig. 1과 같이 두께 8mm, 폭이 60mm, 높이가 300mm인 수직 강판위에 커플링과 두 개의 베어링으로 연결하였으며 축 끝에 척(chuck)을 결합하여 직경 2mm인 소형 축류팬의 축을 연결하였다. 그리고 사각통을 구성하는 300mm의 측면에는 하단부로부터 높이 100mm까지의 위치에 직경 10mm인 구멍을 좌우모서리부분을 제외한 공간에 20mm간격으로 10개를 4줄 형성시켰으며, 350mm 측면에는 같은 방법으로 13개를 4줄 형성시켜 모두 18개의 구멍을 확보한 다음 이 구멍들을 통해서 외부로부터 공기가 들어가도록 하였다. 또 이 구멍들의 총면적(144.5cm<sup>2</sup>)은 실제 팬이 오리피스를 빠져나가는 단면적(90.1cm<sup>2</sup>)보다 크게 설정하였다. 이때 소형 축류팬과 오리피스는 구동장치에 Fig. 2와 같은 조건으로 조립하였다.

축류팬으로부터 3차원 난류유동장을 측정하기 위한 3차원 LDA 시스템의 하드웨어 구성요소들은 먼저 레이저 광원으로 Coherent사의 용량 5Watt의 수냉식인 아르곤-이온 레이저를 사용하

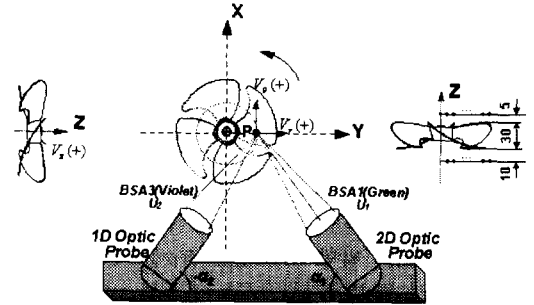
**Table 1** Specification of a small-sized axial fan

Item	Specification
Outer diameter, $D_2$	110
Hub diameter, $D_H$	25
Orifice diameter, $D_0$	116.6
Blade number, $Z_b$	4
Blade thickness, $T_b$	2
Blade curvature radius, $R_c$	109
Chord length at tip, $L_T$	73.6
Chord length at hub, $L_H$	14.54
Blade aspect ratio, $B/L$	0.4076
Camber ratio at tip, $C/L_T$	0.08
Solidity at tip, $(L/t)_T$	0.8519
Solidity at hub, $(L/t)_H$	0.7408
Blade attachment angle, $\theta$	24

**Table 2** Specification of optical setup of three dimensional LDA system

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

였고, 광원의 전달장치는 Fiber방식의 Optic 시스템을 사용하였다. 또 자료 취득 및 연산에는 PC와 On-line으로 연결된 Dantec사의 BSA(burst spectrum analyser)들을 사용하였으며, 레이저빔의 초점거리로부터 형성된 Probe 체적의 정밀이송에는 Dantec사의 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 그리고 Table 2는 실험자료의 연산처리에 사용된 광학장치의 상세내용을 나타내고 있다. 한편, 축류팬의 공력특성을 얻기 위해 사용한 소형 팬테스터는 KSB6311 및 AMCA STANDARD 210-85를 참고로 하여 직경 30mm의 노즐 1개를 갖는 흡입식으로 제작되었다. 그리고 정압측정에는 마이크로 마노메터(Furness, FC012)를 사용하였으며, 팬테스터의 전용 팬 구동장치는 소형 모터(Toei, VLBSE-01040, 100Watts)와 회전수 검출기(OnoSokki, MP-981)가 부착된 토크 센서(OnoSokki, MD-502R)를 각각 축상에 커플링으로 상호 연결한 다음, 이 축상에 팬 축을 물릴 수 있도록 축 끝에 척을 연결하여 제작하였다. 이때 토크와 회전수를 측정하기 위해서는 신호지시계(OnoSokki, TS-3600A)를 사용하였다.<sup>(19)</sup>



**Fig. 3** Definition of velocity direction at the measuring point of axial fan

2.2 실험방법

소형 축류팬의 유동은 운전점이 저유량역에서 최대유량역에 이르기까지 어느 위치에서 팬이 동작하느냐에 따라 3차원 각 방향 성분의 크기 변화와 유동방향이 모두 다르게 나타난다. 일례로 냉장고의 냉동실내에 설치되어 동작되는 소형 축류팬은 좁고 복잡한 덕트 구조로 인한 높은 시스템저항에 의해 보통 저유량역에서 운전점이 형성되는데, 이때 얻어지는 유동특성을 살펴보면, 최대유량역에서 얻어지는 유동양상과 비교해 볼 때 축방향 성분의 속도는 감소하며, 상대적으로 반경방향 성분이 증가하는 현상을 파악할 수 있다.<sup>(4)</sup> 그러나 이에 대한 정확한 크기나 흐름방향은 3차원 LDA를 이용하지 않고서는 그 정확한 정보를 쉽게 파악할 수가 없게 된다. 그러나 실제 냉장고에서는 냉동실내에 설치된 소형 축류팬의 3차원 유동을 직접 LDA시스템으로 측정하기에는 좁은 공간 때문에 레이저빔의 초점거리 및 각 Fiber Optic Probe들의 유효 교차각 형성에 그 적용한계가 있어 실험을 하기에는 많은 문제점들이 있다. 따라서 본 연구에서는 소형 축류팬 단품을 냉장고로부터 분리하여 팬테스터에 Fig. 2와 같은 조건으로 조립한 다음 실제 냉장고에서 운전되는 2400rpm의 일정 회전수로 동작시킨 후, 정압, 풍량 및 토크를 측정하였다. 여기서 유량계수에 따른 정압계수, 전압계수, 동력계수, 정압효율, 전압효율을 산출하여 특성곡선을 확보한 후 최고전압효율을 만족하는 유량계수 위치를 결정하였다. 따라서 소형 축류팬의 상하류에서 형성되는 반경방향에 따른 3차원 속도 분포 측정은 이 위치를 만족하는 풍량 대 정압조건을 Fig. 1의 좌측의 팬 구동장치에서 똑같이 형성시킨 후 수행하였다.

Fig. 3은 축류팬의 유동 측정점에 대한 속도방

향의 기준을 나타내고 있다. 설정된 설계점의 운전점에서 소형 축류팬의 3차원 속도성분, 즉 축방향 속도  $V_z$ , 반경방향 속도  $V_r$ , 접선방향 속도  $V_\theta$ 를 측정하기 위해서는 먼저 3차원 정밀 이송이 가능한 이송장치 위에 1차원 측정용 Fiber Optic Probe와 2차원 측정용 Fiber Optic Probe를 서로의 초점이 일치하도록 마주보게 한 후, 각각의 Fiber Optic Probe와 이송장치가 서로 이루는 일정각도  $\alpha_1=18.9^\circ$ ,  $-\alpha_2=20.9^\circ$ 를 각각 구한다. 레이저 초점위치를 소형 축류팬의 중심점에 일치하도록 이송장치를 조정하는 순서를 필요로 한다.<sup>(20~22)</sup>

본 연구에서는 축류팬의 속도측정에 필요한 산란 입자로 파라핀 계통의 연기를 사용하였다. 이때 연기공급에는 Invent사의 연무(fog) 발생기를 사용하였다. 그리고 모든 속도의 측정은 BSA1, BSA2, BSA3으로부터 얻어지는 속도 측정 데이터의 유효성(validation)과 정보수집률(datarate)의 상태를 살펴가며 각 방향 속도성분의 정보들이 양호하게 얻어지도록 BSA를 지배하는 소프트웨어의 각종 변수들과 연기발생장치의 연기량을 제어해가며 행하였다. 한편 소형 축류팬의 3차원 속도성분의 측정위치는 Fig. 3의 우측 그림과 같이 축류팬으로 유입되는 상류측에서는 날개 전면 끝단에서 Z축 하부로 10mm떨어진 위치에서 축표면을 벗어난 반지름 4mm부터 2mm간격으로 58mm까지 총 28개 지점을 측정위치로 하였으며, 축류팬에서 빠져나가는 후류측에서는 레이저빔이 날개에 부딪치지 않는 최소한의 떨어진 거리로 날개 후연에서 Z축 상부로 5mm떨어진 위치에서 반지름 0mm에서부터 2mm간격으로 58mm까지 총 30개 지점을 선택하였다. 또 각 방향 속도성분의 연산을 통계학적으로 앙상블(ensemble)평균처리를 원활히 하기 위해 각 측정위치에서 얻어진 총 버스트(burst) 수는 BSA1, BSA2, BSA3 모두 일치모드(coincidence mode)를 "Master" 기능으로 선택하여 각각 5000개로 설정하였다.<sup>(23)</sup>

한편, 후향산란(back-scatter) 방식의 3차원 LDA로부터 얻어지는 각 방향 성분의 순간속도는 원통좌표계를 만족하는 식 (1)과 식 (2)에 의해서 각각 구해진다.

그밖에 3차원 각 방향 성분의 평균속도, 난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈 전단응력 등은 컴퓨터에 내장된 "Burstware" 소프트웨어에 의해서 식 (1)과 식 (2)를 바탕으로 3차원 순간속도들의 통계학적 앙상블 평균처리에 의해 얻을 수 있다. 그리고 본 연구에서는 3차원 속도성분의 각

$$V_z = U_3$$

$$V_r = \frac{-U_1 \sin \alpha_2 + U_2 \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (1)$$

$$V_\theta = \frac{U_1 \cos \alpha_2 - U_2 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}$$

$$U_1 = f_{D1} \left( \frac{\lambda_1}{2 \sin \frac{\theta_1}{2}} \right) = f_{D1} \times C_{D1}$$

$$U_2 = f_{D2} \left( \frac{\lambda_2}{2 \sin \frac{\theta_2}{2}} \right) = f_{D2} \times C_{D2} \quad (2)$$

$$U_3 = f_{D3} \left( \frac{\lambda_3}{2 \sin \frac{\theta_3}{2}} \right) = f_{D3} \times C_{D3}$$

방향을 Fig. 3에서와 같이 각각 정의하였다. 즉 축방향 속도성분은 상방향, 반경방향 속도성분은 바깥쪽을, 그리고 접선방향 속도성분은 반시계방향을 각각 양(+)의 값으로 하여 처리하였다.<sup>(23)</sup>

### 3. 실험 결과 분석

#### 3.1 소형 축류팬의 공력특성

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 소형 축류팬 단품을 팬 테스터에 부착한 후 팬의 회전수를 2400rpm으로 일정하게 구동시켰을 때 팬테스터로부터 측정된 매 위치별 풍량, 정압, 토크로부터 계산된 유량계수에 대한 정압계수, 전압계수, 동력계수 및 효율을 나타내는 무차원 특성곡선의 그림이다. 유량계수의 증가에 따라 압력계수 및 동력계수는 감소하나 효율은 증가하다가 유량계수가 약 0.16위치에서는 불안정 영역을 나타내는 약간의 변곡지점을 보이며, 이후 최고 효율점에 도달한 다음 다시 감소하는 분포 구조를 보이고 있다. 본 연구에서는 전체효율의 최대값을 나타내는 유량계수 0.25를 이상적인 설계점으로 간주하여 축류팬의 유동장 속도분포를 분석하는데 기준점으로 정하였다. 이때 유량계수 0.25를 만족하는 기타 특성치들은 참고로 Table 3에 나타내었다. 이때 유량계수의 변화는 Fig. 1의 좌측에 있는 팬 구동장치에서 볼 수 있듯이 아크릴 측판의

Table 3 Specification of a small-sized axial fan

Item	$\phi_s$	$\phi_t$	$\lambda$	$\eta_s(\%)$	$\eta_t(\%)$
$\varphi=0.25$	0.0982	0.1427	0.081	30.15	43.94

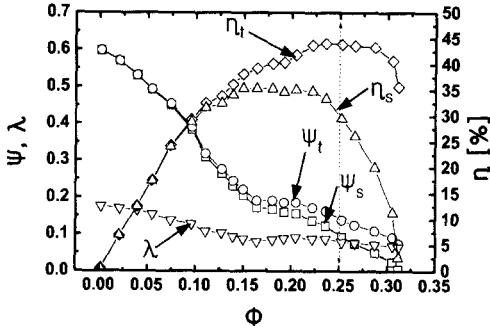


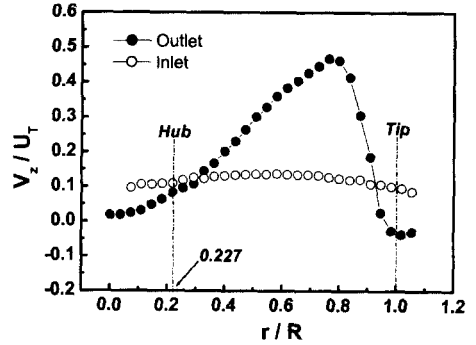
Fig. 4 Non-dimensional characteristic curve of small-sized axial fan

구멍들을 4면에 고루 공기와 연기가 통과하도록 하면서 상단부의 구멍부터 비닐 접착테이프로 막아 이 조건을 설정하였다. 이 결과 총 184개의 구멍중 63개의 구멍을 폐쇄하고, 121개의 구멍만을 확보하는 조건에서 최고효율점  $\phi = 0.25$ 를 만족시킬 수 있었다. 특히 Fig. 4의 압력계수 분포의 결과는 김진권 등<sup>(4)</sup>의 연구결과와 매우 다르게 나타나는데 이는 Fig. 2와 같이 사용한 축류팬과 오리피스 사이에서 형성되는 틈새비, 오리피스의 곡률크기 및 형상, 팬의 돌출부 깊이 등이 서로 다르기 때문으로 사료된다.

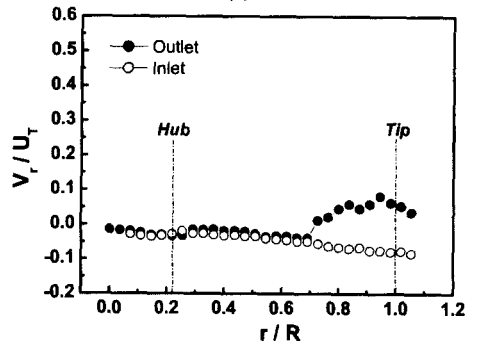
3.2 평균속도 분포

Fig. 5는 최고효율을 나타내는 설계점  $\phi = 0.25$ 에서 축류팬 상류와 하류에서 각각 측정된 3차원 평균 유동속도 성분들을 날개 팁 기준 원주속도로 나누어 무차원으로 나타낸 그림이다. 여기서 Fig. 5(a), 5(b) 및 5(c)는 각각 축방향 성분, 반경방향 성분 및 접선방향 즉 회전방향 성분의 평균속도분포이다. 또한 Fig. 5에서 속이 빈 동그라미 심벌을 나타내는 Inlet은 축류팬 이전의 상류흐름을 나타내고, 속이 검게 채워진 동그라미 심벌을 나타내는 Outlet은 축류팬 이후의 하류흐름을 나타낸다.

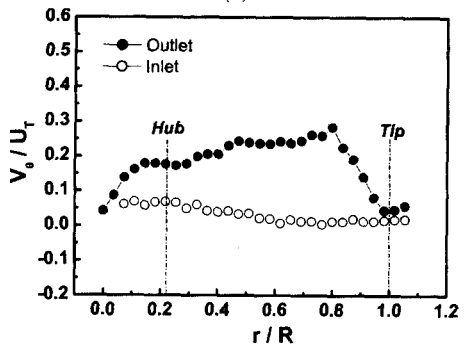
한편 Fig. 5(a)로부터 축방향 평균속도 크기 분포는 날개 끝단에서 음의 값을 제외하곤 전체적으로 상류와 하류에서 모두 양의 값으로 나타나 있다. 그리고 상류측 측정점에서는 반경방향의 거리 증가에 따라 완만한 기울기를 갖는 비교적 균일 분포를 보이나, 하류측에서는 허브 위치 이전에서의 크기분포가 상류측보다 작게 나타나 있다. 전체적으로 축방향 평균속도 분포는 반경방향의 거리 증가에 따라 급속히 증가하다가 반경비 0.5~0.9에서는 축류팬의 평균 유입속도보다



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Mean velocity profiles along the radial distance( $\phi = 0.25$ )

가속되어 크게 나타나며, 반경비 약 0.8 부근에서 최대치를 보이고, 그 이후부터는 급속히 감소하다가 반경비 1인 날개 팁에서 음의 값으로 최소치를 보여 역류현상을 감지할 수 있다. 이 같은 평균속도크기는 김진권 등<sup>(4)</sup>과 屋野 등<sup>(11)</sup>의 연구에서도 측정 조건은 서로 다르지만 유사한 크기로 분포됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5(b)로부터 반경방향 평균속도 크기 분포는 상류측에서 크기 분포가 반경방향의 거리 증

가에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타내며, 또 전체적으로는 음의 값을 보여 주고 있다. 이것은 상류측에서의 반경방향 평균속도 크기 분포가 축류팬 중심부 쪽으로 향한다는 것을 알 수 있다. 한편 하류측에서의 반경방향 평균속도 크기 분포는 반경비 약 0.7 부근 전까지는 음의 값으로 비교적 완만한 기울기로 나타나 역시 축류팬 중심 쪽으로 향하는 유동방향성을 가지나, 약 0.7 이후 영역부터는 양의 값으로 증가하다가 날개 팁부근에서 약간 감소하는 분포를 보여주는데 이곳에서는 축류팬 바깥쪽으로 향하는 유동 방향성을 보여주고 있다. 김진권 등<sup>(4)</sup>은 이 같은 현상을 중심축 가까운 곳에서는 중심축을 향하는 수축유동이, 중심축에서 먼 부분에서는 외부로 향하는 확산유동이 존재한다고 언급한 바 있으며, Adachi<sup>(7)</sup>와 Myung 등<sup>(10)</sup>도 외부로 향하는 반경방향 유동이 원심력과 반경방향 압력기울기 사이의 불균형에 기인되어 발생하는 것으로 언급한 바 있다. 따라서 날개 허브와 팁 사이에서 존재하는 반경방향 유동성분은 Fig. 5(b)와 같이 날개 압력면 쪽에 존재하는 중심을 향하는 유동영역과 날개 흡입면 쪽에 존재하는 외부로 향하는 유동영역의 존재로 인해 양, 음의 크기 분포를 동시에 보여주고 있다.<sup>(4,10)</sup>

Fig. 5(c)의 접선방향 평균속도 크기분포는 상류 및 하류측에서 모두 양의 값으로 나타나 축류팬의 회전방향과 동일한 반시계방향을 보여주고 있다. 상류측에서 접선방향 평균속도 크기분포는 반경방향의 거리 증가에 따라 서서히 감소해가는 경향을 보여주나, 하류측에서는 반경방향의 거리 증가에 따라 증가하다가 반경비 약 0.8 부근에서 최대값을 보이며 강한 선회류가 존재함을 알 수 있다.<sup>(11)</sup> 또 반경비 약 0.8 이후부터는 급속히 감소하다가 날개 팁 부근에서는 다시 완만한 분포를 보여주고 있다. 특히 반경비 0.5~0.8에서는 접선방향 평균속도 크기분포가 축류팬으로 유입하는 평균 유속크기와 동일한 크기를 갖는다. 한편 Fig. 5로부터 설계점  $\phi = 0.25$ 의 하류측에서 현저히 나타나는 현상은 축방향 평균속도 성분과 접선방향 평균속도 성분이 지배적으로 존재하며, 축류팬의 반경방향 평균속도 크기 분포는 축방향 및 접선방향 평균속도 크기보다 현저히 작게 형성되고 있다.

### 3.3 난류강도 및 난류운동에너지 분포

Fig. 6은 최고효율을 나타내는 설계점  $\phi = 0.25$ 에서 축류팬 상류와 하류에서 각각 측정한 3차원

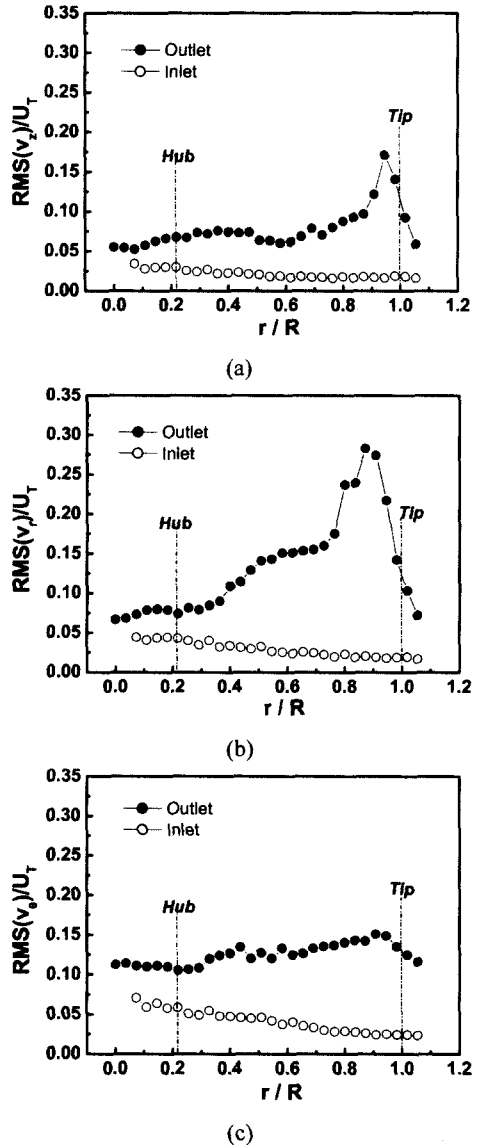


Fig. 6 Turbulent intensity profiles along the radial distance( $\phi = 0.25$ )

난류속도의 RMS(root-mean-square) 성분들을 날개 팁 기준 원주속도로 나누어 무차원으로 나타낸 난류강도들의 그림이다. 여기서 Fig. 6(a), 6(b) 및 6(c)는 각각 축방향 성분, 반경방향 성분 및 접선방향 성분의 난류강도 분포이다.

상류측에서 난류강도 성분들을 살펴보면, 각 방향 성분들 모두 반경방향의 거리 증가에 따라 서서히 완만하게 감소하는 경향을 보여주고, 최대값이 허브 반경비 안쪽에서 일어나며, 축방향 성분이 약 3%미만, 반경방향 성분이 약 5%미만,

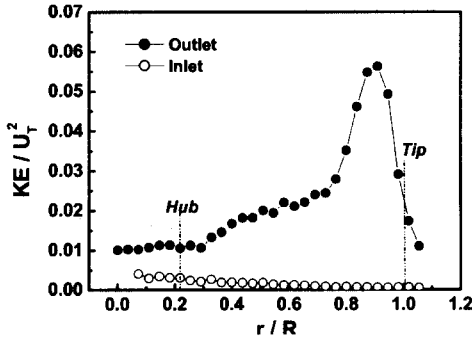
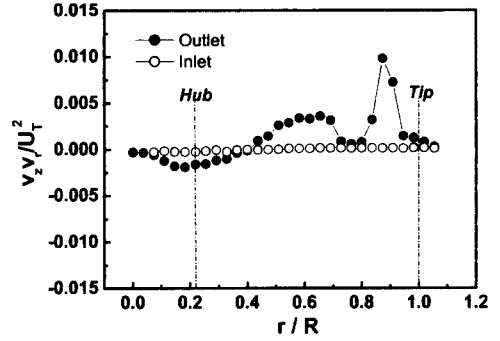


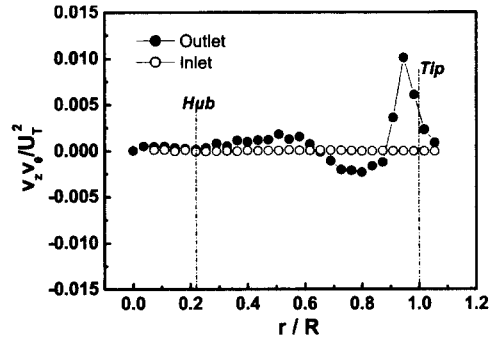
Fig. 7 Turbulent kinetic energy profile along the radial distance( $\Phi=0.25$ )

접선방향 성분이 약 7.5%미만의 크기로 각각 매우 작게 나타나고 있다. 그러나 하류측에서의 난류강도 분포들을 살펴보면, 모두 허브 반경비 안쪽에서 최소값을 보이고 있으며, Fig. 6(a)로부터 축방향 난류강도분포는 반경방향 거리 증가에 따라 난류강도가 약 6%부터 증가하다가 반경비 약 0.95부근에서 최대값 약 17.5%에 도달한 다음 급격히 감소한다. 또 Fig. 6(b)로부터 반경방향 난류강도분포는 반경방향 거리 증가에 따라 난류강도 약 7%부터 증가하다가 반경비 약 0.9부근에서 최대값 약 29%에 도달한 다음 급격히 감소하고 있다. 한편, Fig. 6(c)로부터 접선방향 난류강도 분포는 반경방향 거리 증가에 따라 난류강도 약 11%부터 증가하다가 반경비 약 0.9부근에서 최대값 약 15%에 도달한 다음 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 6에서 가장 현저한 현상은 반경방향에서 난류강도의 최대 Peak 크기가 가장 크게 발생하고 난류강도 분포의 기울기 역시 가장 크게 형성됨을 알 수 있으며, 반면에 접선방향 난류강도는 전체 반경비에 걸쳐 상당히 큰 크기를 나타내며, 난류강도 분포의 기울기는 비교적 완만한 모습을 보여준다.

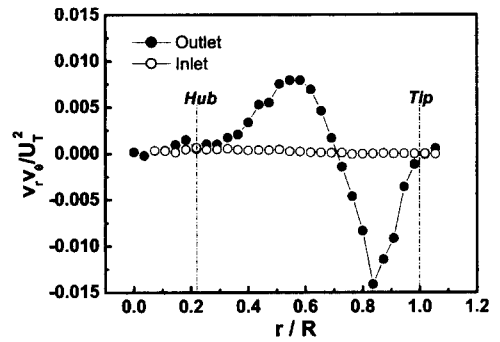
Fig. 7은 최고효율을 나타내는 설계점  $\phi=0.25$ 에서 축류팬 상류와 하류에서 각각 측정된 3차원 난류속도의 RMS성분들로부터 얻어진 난류운동에너지를 날개 팁 기준 원주속도로 나누어 무차원으로 나타낸 그림이다. 상류측에서의 난류운동에너지는 매우 작은 크기로 분포되어 반경방향 거리 증가에 따라 서서히 감소해 가는 경향을 보인다. 그러나 하류에서의 난류운동에너지는 허브 근처까지 비교적 일정한 크기로 나타나고, 반경비 약 0.3부터는 반경방향 거리 증가에 따라 점차 증가하다가, 반경비 약 0.7이후부터 급격히 증가한 다음 반경비 약 0.9에서 최대값 약 5.7%에



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Reynolds shear stress profiles along the radial distance( $\Phi=0.25$ )

도달하고 그 이후 급격히 감소해 가는 경향을 보여주고 있다.

### 3.4 난류전단응력 분포

Fig. 8은 최고효율을 나타내는 설계점  $\phi=0.25$ 에서 축류팬 상류와 하류에서 각각 측정된 3차원 난류속도의 전단응력 성분들을 날개 팁 기준 원주속도로 나누어 무차원으로 나타낸 난류전단응력들의 그림이다. 여기서 Fig. 8(a), 8(b) 및 8(c)는 각각 축방향 및 반경방향 성분, 축방향 및 접선



방향 성분 및 반경방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력 분포이다.

Fig. 8로부터 상류측에서 난류전단응력 성분들은 모두 반경방향 거리 변화에 관계없이 거의 0에 가까운 크기 분포를 보이고 있어 초기 유입되는 흐름에는 난류전단응력 성분들이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8(a)로부터 하류에서의 축방향 및 반경방향 성분의 난류전단응력 분포는 반경방향의 거리 증가에 따라 반경비 약 0.4 까지는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이며 모두 음의 값으로 나타나고 있다. 그리고 반경비 0.4 이후부터는 모두 양의 값을 나타내는데, 특히 4개의 정점을 갖는 구조를 보이며 반경비 약 0.9 근처에서 최대값 약 1%를 보이고 있다. 또 Fig. 8(b)로부터 축방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력 분포는 반경비 약 0.6까지는 반경방향 거리 증가에 따라 서서히 증가하는 모습을 보이다가 그 이후 약 0.9까지 음의 값을 보이며 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고, 반경비 약 0.95 부근에서 최대값 약 1%를 보인 후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서는 3개의 정점을 갖는 구조특성을 보이고 있다. 한편, 반경방향 및 접선방향 성분의 난류전단응력 분포는 Fig. 8(c)로부터 반경비 약 0.3까지는 반경방향의 거리 증가에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 그 이후부터는 급격히 증가한 다음 반경비 약 0.55 부근에서 최대값 약 0.8%를 보인 후 다시 감소하여 반경비 약 0.7을 기점으로 음의 값으로 감소한 후 반경비 약 0.83 근처에서 최소값 약 -1.4%를 나타낸 다음 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 여기서는 2개의 정점을 갖는 유동 구조를 볼 수 있다. 특히 R- $\theta$  성분의 난류전단응력분포가 Fig. 8(c)과 같이 양, 음의 크기로 각각 크게 존재하는 것은 반경방향 유동이 원심력과 반경방향 압력기울기 사이의 불균형에 기인되어 날개사이에서 존재하는 순환류 혹은 이차유동(secondary flow)에 의해 날개 압력면 쪽에 존재하는 중심을 향하는 유동영역과 날개 흡입면 쪽에 존재하는 외부로 향하는 유동영역의 동시 존재로 인해<sup>(4,7,10)</sup> 반경방향 속도크기의 부호가 다르게 나타나기 때문으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

냉장고용 소형 축류팬의 최고효율점에 해당하는 설계점  $\phi = 0.25$ 의 운전점에서 형성되는 난류유동으로부터 역(reverse) 유동방향까지도 정확히

측정 가능한 3차원 LDA 시스템을 이용하여 3차원 난류속도 성분들을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 설계점에서 평균속도 성분은 축방향과 접선방향 성분이 지배적이며, 반경방향 성분의 평균속도는 날개사이에 존재하는 이차유동에 의해 반경비 약 0.7을 전후로 유동방향이 축류팬 중심축쪽과 반대로 외측으로 향하는 변곡지점을 보이고 있다.

(2) 난류강도크기는 반경방향 성분이 가장 크게 나타나며, 반경비 약 0.9에서 최고치 약 29%를 보이고 있다. 또한 난류운동에너지 역시 반경비 약 0.9에서 최고치 약 5.7%를 나타내고 있다.

(3) 난류전단응력 분포크기는 반경방향 및 접선방향 성분  $v_r, v_\theta$  가 가장 크게 분포되어 있으며, 그 크기분포 특성은 각각  $v_z, v_r$ 의 경우 4개의 정점,  $v_z, v_\theta$ 의 경우 3개의 정점, 그리고  $v_r, v_\theta$ 의 경우 2개의 정점을 갖는 구조로 되어 있다.

이밖에도 본 연구에서는 소형 축류팬의 설계 운전점을 만족하는 3차원 난류유동의 평균속도, 난류강도, 난류운동에너지, 난류전단응력 등의 크기 분포들을 제시할 수가 있었기 때문에, 향후 중형, 대형 크기의 축류팬에서 얻어지는 3차원 유동정보 자료로도 쉽게 활용될 수 있을 것으로 사료되며, 직접 실험을 통해 유동양상을 규명하는데 많은 어려움이 있는 냉장고내의 유동구조와 같은 축류팬을 이용하는 복잡한 덕트 유동의 연구 등에 있어, 본 3차원 성분의 속도분포결과들을 초기치로 적용하게 되면 많은 유동장 정보를 쉽게 그리고 정확하게 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 1999년도 군산대학교 학술연구비에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) 青木美昭, 近藤文男, 松田憲兒, 山口信行, 富永哲雄, 林昌照, 1987, "カーエアコン用コンデンサ冷却ファンの低騒音化," 三菱重工技報, Vol. 24, No. 2, pp. 161~167.
- (2) 赤池茂, 北田基博, 松島尚義, 菊山功嗣, 1993, "車兩用冷却ファンの低騒音化研究," 日本機械學會論文集(B編), 59卷, 558號, pp. 447~452.
- (3) 釜谷周滋, 金林新二, 1990, "小形軸流送風機に

- における低流量域特性の改善,” 日本機械學會論文集(B編), 56卷, 532號, pp. 3769~3773.
- (4) 김진권, 강신형, 2000, “전향 스윙 프로펠러 팬의 성능 및 유동특성,” 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제1호, pp. 75~84.
- (5) 川口清司, 門田 茂, 鈴木昌彦, 松井數馬, 菊山功嗣, 1993, “低騒音ファンの研究,” 日本機械學會論文集(B編), 59卷, 558號, pp. 453~459.
- (6) 近藤文男, 青木美昭, 山口信行, 富永哲雄, 新田堯, 1990, “空調用 プロペラファンの 騒音低減,” 三菱重工技報, Vol. 27, No. 3, pp. 267~272.
- (7) Adachi, T., 1998, "Flow in the Moving Blade Passage of an Axial-Flow Fan," *Proceedings of the 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Volume C, pp. 1285~1294.
- (8) Adachi, T., Yamashita, M., Yasuhara, K. and Kawai, T., 1996, "Effects of Operating Conditions on the Flow in the Moving Blade Passage of a Single Stage Axial-Flow Fan," *Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 199~208.
- (9) Rew, H. S., Kim, S. H., Jung, Y. G., Kim, C. J. and Cha, J. E., 1996, "LDA Measurement and Calculation in a Small Axial Fan," *Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 209~218.
- (10) Myung, H. J. and Baek, J. H., 1999, "Mean Velocity Characteristics behind a Forward-Swept Axial- Flow Fan," *JSME International Journal Series B*, Vol. 42, No. 3, pp. 476~488.
- (11) 星野徹二, 大島明, 1986, “3成分 Laser Doppler Velocimeter(LDV)によるプロペラ周りの流場計測,” 三菱重工技報, Vol. 23, No. 3, pp. 343~350.
- (12) 星野徹二, 1990, “後流渦モデルの改良によるプロペラ翼面壓力分布及び流場の高精度計算,” 三菱重工技報, Vol. 27, No. 4, pp. 368~373.
- (13) Vad, J. and Bencze, F., 1998, "Three-Dimensional Flow in Axial Flow Fans of Non-Free Vortex Design," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 601~607.
- (14) Beiler, M. G. and Carolus, T. H., 1999, "Computation and Measurement of the Flow in Axial Flow Fans with Skewed Blades," *Transactions of the ASME (Journal of Turbomachinery)*, Vol. 121, pp. 59~66.
- (15) Kim, K. Y., Chen, Xi, Kim, J. Y., Chung, D. S., and Hong, S. L., 1996, "Computational and Experimental Investigations on the Flow through an Axial Flow Fan," *Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 190~198.
- (16) Uto, S., 1993, "Computation of Incompressible Viscous Flow Around a Marine Propeller," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 173, pp. 67~75.
- (17) 조진수, 한철희, 조이상, 1999, “고성능 2단 축류송풍기의 공력설계를 위한 수치해석 및 실험에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제8호, pp. 1048~1062.
- (18) 조진수, 원유필, 이문철, 2000, “엇회전식 축류팬의 공력특성에 관한 전산해석 및 실험,” 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제3호, pp. 325~337.
- (19) 김장권, 1993, “FAN TESTER의 성능평가에 대한 연구,” 한국항공우주학회지, 제21권, 제1호, pp. 45~51.
- (20) Buchhave, P., 1984, "Three-Component LDA Measurements," *DISA Information*, No. 29, pp. 3~9.
- (21) Ptacnik, M., Lamka, J. and Fort, I., 1993, "Velocity Vector LDA Measurement Inside a Pitched Blade Impeller," *DISA Information*, No. 12, pp. 6~9.
- (22) Kuhlman, J. M. and Gross, R. W., 1993, "Three-Component Velocity Measurements in an Axisymmetric Jet Using LDV," *DISA Information*, No. 12, pp. 10~16.
- (23) Dantec, 1991, *Burstware 2.00 Installation Guide*.