

# 벨마우스 깊이가 다른 소형축류팬의 공력특성에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on the Aerodynamic Performance Characteristics of a Small-Size Axial Fan with the Different Depths of Bellmouth

김장권<sup>\*†</sup> · 오석형<sup>\*\*</sup>  
 Jang-Kweon Kim<sup>\*†</sup> and Seok-Hyung Oh<sup>\*\*</sup>

(접수일 : 2013년 05월 20일, 수정일 : 2013년 08월 12일, 채택확정 : 2013년 08월 13일)

**Abstract :** A Small-size axial fan(SSAF) has widely been utilized to circulate a cooling air in a refrigerator, etc. Generally, the aerodynamic performance of SSAF is strongly dependent upon the depth between SSAF and bellmouth, and it includes axial, partially stalled, mostly stalled and radial flow regions according to the flow coefficient. In this study, four kinds of bellmouth depths were considered to analyze the aerodynamic performance of SSAF. As a bellmouth depth increases, a maximum flowrate decreases, but a maximum static pressure increases. Also, stall region includes an inflection point in all aerodynamic performance curves. Finally, a static pressure efficiency shows the maximum value of 37%.

**Key Words :** Aerodynamic Performance, Bellmouth, Flow Coefficient, Operating Point, Power Coefficient, Small-Size Axial Fan(SSAF), Static Pressure Coefficient, Static Pressure Efficiency

### — 기호설명 —

$A$  : SSAF의 공기통과 단면적 [ $m^2$ ]  
 $(A = \pi(D_2^2 - D_h^2)/4)$   
 $D_2$  : SSAF의 외경 [m]  
 $D_h$  : SSAF의 허브(hub) 외경 [m]  
 $D_o$  : 벨마우스(bellmouth) 직경 [m]  
 $L$  : 동력 [W], ( $L = 2\pi N \cdot T/60$ )  
 $N$  : 팬 회전수 [RPM]  
 $n$  : 데이터의 수  
 $p_s$  : 정압 [Pa]  
 $\Delta p_s$  : 정압차 [Pa]  
 $Q$  : 유량 [ $m^3/min$ ]

$T$  : 토크(torque) [ $N \cdot m$ ]  
 $U_2$  : SSAF의 원주속도 [ $m/s$ ], ( $U_2 = \pi D_2 N/60$ )  
 $w_i$  :  $i$ 번째의 가중치(weight)  
 $y_i$  :  $i$ 번째의 데이터  $y$ 의 값  
 $\hat{y}_i$  :  $i$ 번째 예측된  $y$ 의 값  
 $\bar{y}$  :  $y$ 값의 평균  
 $\eta_s$  : 정압효율 [%], ( $\eta_s = \frac{p_s \cdot Q}{60L} \times 100$ )  
 $\lambda$  : 동력계수, ( $\lambda = \frac{2L}{\rho U_2^3 \times A}$ )  
 $\rho$  : 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\psi_s$  : 정압계수, ( $\psi_s = \frac{2p_s}{\rho U_2^2}$ )

\*† 김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과  
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

\*\* 오석형 : 군산대학교 기계공학부

\*† Jang-Kweon Kim(corresponding author) : Department of Power System Engineering, Kunsan National University.  
 E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

\*\* Seok-Hyung Oh : School of Mechanical Engineering, Kunsan National University.

$$\phi : \text{유량계수}, \left( \phi = \frac{Q}{60A \times U_2} \right)$$

## 1. 서론

일반적으로 날개 두께가 매우 얇은 플라스틱 사출물로 만들어진 소형 축류팬(SSAF)은 가격이 저렴하고 공간 배치가 용이하기 때문에 컴퓨터의 냉각장치로 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 냉장고내에서 냉동실 및 냉장실에 냉기류를 적정하게 분배하거나 순환시키는데 지금까지 널리 사용되고 있다. 또 냉장고 뒷면 기계실 내에서도 압축기 및 응축기의 냉각을 위해서 사용되고 있다.

축류팬에 대한 연구를 살펴보면, Akaike 등<sup>1)</sup>과 Kamaya 등<sup>2)</sup>은 축류팬의 기하학적 치수와 시스템의 배열구조 등을 변경하여 팬의 공력특성과 주변 유동장의 속도분포를 연구하여 유동소음을 개선한 바가 있다. 또 Kawaguchi 등<sup>3)</sup>은 날개 면에 작용하는 압력분포를 다루었으며, Adachi 등<sup>4)</sup>은 열선풍속계를 이용하여 날개 열(cascade)에서 유동속도 벡터를 분석한 바 있다. 또 Kim<sup>5-7)</sup>은 운전점(operating point)의 위치에 따라 레이저유속계를 이용하여 팬 하류에서 형성된 난류유동장의 3차원 속도성분들과 난류특성값들을 반경방향의 위치 변화에 따라 측정하여 그 특징들을 상호 비교 분석하였다. 또 Vad 등<sup>8)</sup>은 설계점을 만족하는 운전점에서 형성되는 팬 하류의 유동속도를 회전각도별로 측정 분석한 바 있다.

본 연구에서는 실제 냉장고에서 냉기순환용으로 사용 중인 SSAF가 벨마우스와 이루는 설치 깊이에 따라 형성되는 각 회전수에서의 유량대정압 및 토크를 정확히 측정하여 SSAF의 공력성능을 면밀히 분석하고자 하였다. 또 공력성능의 자료들은 향후 CFD해석 시 사용하는 난류모델들의 성능 평가에도 활용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 풍량에 따른 정압, 토크 및 회전수들을 측정하기 위한 실험장치이다. 여기서 웬테스터(fan tester)<sup>5-7)</sup>는 KSB 6311

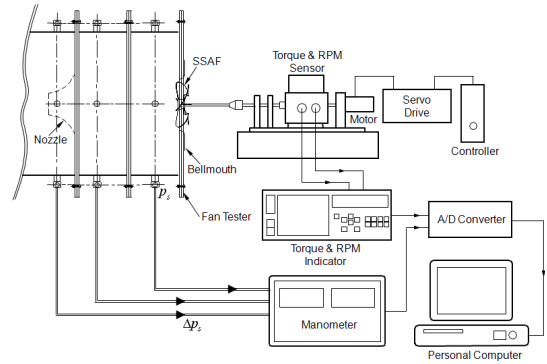


Fig. 1 Experimental setup for data acquisition

과 AMCA STANDARD 210-85를 참고로 하여 흡입형 단일 노즐방식으로 설계 제작하여 사용하였다. 웬테스터의 풍량은 교정작업을 통해 출구 내경이 45 mm인 노즐 전후의 차압만 직접 측정하면 얻을 수 있도록 하였다. 웬테스터의 구동장치는 정격출력이 100 W인 AC 서보모터(Samsung, CSM-01)와 서보드라이브(Samsung, CSDJ-01BX1)를 사용하여 인버터(inverter)방식으로 구동된다. 또 구동장치에는 최대용량이 100 mN·m인 토크검출기(Onosokki, MD-105R)와 최대용량이 20,000 RPM인 회전수감지기(Onosokki, MP-981)가 부착되어 있다. 구동축(shaft) 끝은 웬 축을 쉽게 결합할 수 있도록 척(chuck)을 이용하였다. 또한 웬테스터에서의 정압과 차압은 최대용량이 199.99 mmH<sub>2</sub>O인 전자식압력계(Furness, FCO12)를 이용하여 각각 측정하였으며, SSAF의 토크와 회전수 측정은 전용지시기(Onosokki, TS-3600B)를 사용하였다.

한편, 컴퓨터에서 차압센서들과 토크검출기 및 회전수감지기 등에 대한 신호(signal)들을 받아들이기 위해서는 A/D컨버터(Keithley, KPCI-3101)를 사용하였다. 이때, 채널별 순간신호들을 취득하여 평균화할 수 있도록 만든 웬테스터 프로그램은 Testpoint(Keithley, version 4.5) 소프트웨어로 만들었으며, 계측 시 사용한 컨버터의 채널당 샘플링(sampling) 주파수는 10 kHz이며, 채널당 샘플링 수는 32768개이다.

### 2.2 실험방법

Fig. 2는 벨마우스를 웬테스터 입구에 조립하였을 때 SSAF와 이루는 기하학적 형상을 나타내

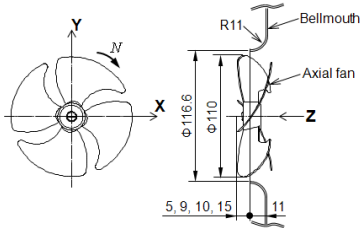


Fig. 2 Geometry configuration of SSAF

Table 1 Specification of SSAF

Item	Specification
Blade depth	27.315
Blade thickness (mm)	Max 2
Blade curvature radius (mm)	109.24
Chord length at tip (mm)	65.58
Chord length at hub (mm)	13.33
Blade inlet angle (°)	98.08
Blade outlet angle (°)	51.16
Blade rake angle (°)	5.14
Solidity at tip (-)	0.7591
Solidity at hub (-)	0.6789
Blade attachment angle (°)	24.28

고 있다. 본 연구에서 사용한 SSAF는 L사의 냉장고에서 사용하는 날개 팁(tip)직경이 110 mm, 허브(hub)직경이 25 mm, 날개수가 4장인 팬이다. 여기서 SSAF를 3차원측정기로 측정하여 구한 그 밖의 제원은 Table 1과 같다. 또 벨마우스는 곡률반경 및 깊이를 각각 11 mm로 하고, 틈새를 SSAF의 외경대비 3%의 크기로 설계 제작하였다. 또 본 연구에서 적용한 SSAF가 벨마우스와 이루는 설치깊이들은 각각 5, 9, 10, 15 mm로 하였다. 각 설치깊이에서 SSAF를 구동하는데 필요한 회전수는 유동의 상사성(similarity)을 확보하기 위해서 각각 2400, 2600, 2800 RPM으로 적용하였다. 또 각 회전수를 시계방향으로 일정하게 동작시킨 상태에서 팬테스터로부터 댐퍼(damper)와 보조용 원심팬을 차례로 사용하여 정압과 풍량 그리고 토크를 측정하였다. 특히 본 연구에서는 위의 측정값들을 이용하여 유량계수에 따른 정압계수, 동력계수 및 정압효율로 각각 산출하여 SSAF의 공력특성들을 분석하였다.

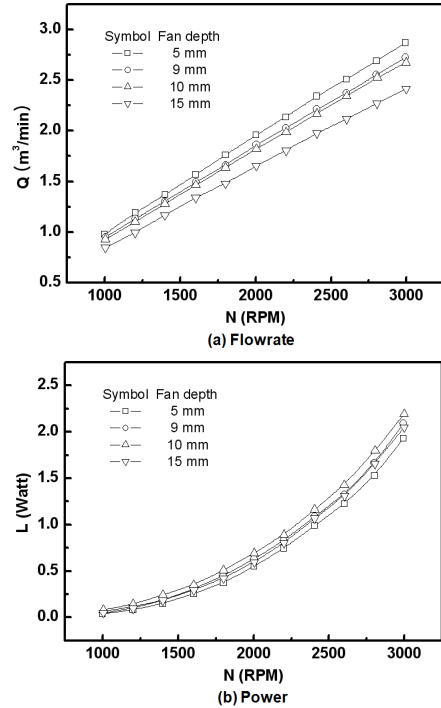


Fig. 3 Flowrate and power profiles at maximum flowrate condition

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 회전수별 최대유량 및 동력특성

Fig. 3은 SSAF가 벨마우스와 이루는 각 깊이에 따라 정압을 0 Pa로 맞춘 최대유량조건에서 회전수별로 측정된 SSAF의 최대유량 및 동력분포들을 나타낸다. 회전수 증가에 따른 최대유량 및 동력분포는 벨마우스의 깊이와는 관계없이 각각 선형 및 곡선 형태로 증가하는데, 이것은 이론적으로 유량과 동력이 각각 회전수에 1승 및 3승에 비례하기 때문이다. 한편, SSAF를 벨마우스 출구 쪽으로 집어넣을수록 회전수별 최대유량은 감소하지만, 동력은 증가함을 알 수 있다. 여기서 벨마우스 깊이를 9 mm 및 10 mm로 좁혀서 나타낸 이유는 보통 축류팬을 벨마우스 출구 쪽으로 날개깊이에 1/3쯤 집어넣어 사용하므로 본 연구에서는 SSAF의 날개깊이를 이에 맞추어 그 영향을 살펴보고자 한 것이다.

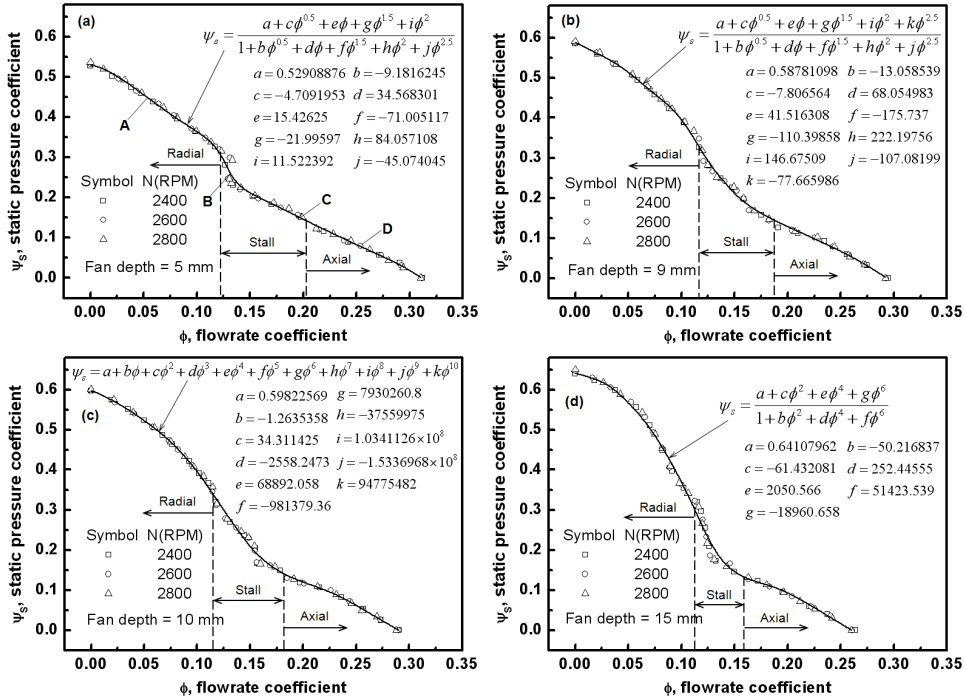


Fig. 4 Static pressure coefficient profiles for the various depths of bellmouth

### 3.2 무차원 공력성능 특성

Fig. 4는 벨마우스 깊이에 따라 얻어진 유량계수별 정압계수의 분포를 나타낸다. 먼저 Fig. 4(a)에서 A는 주로 반경방향으로 유동이 형성되는 영역이며, B는 대부분 실속(stall)이 발생하는 영역, C는 부분적인 실속이 일어나는 영역, 그리고 D는 전형적인 축류유동이 일어나는 영역으로 각각 정의된다.<sup>4,5,9</sup> 이런 구분은 각 영역의 해당 위치들(A, B, C, D)에서 형성되는 SSAF의 후류에 대한 유동을 직접 측정하거나 해석을 함으로서 정확히 알 수 있지만, 본 연구에서는 Fig. 5의 동력계수 분포를 통해 변곡점이 발생하는 유동영역을 토대로 구분하였다. 이것은 Fig. 4(a)를 제외한 나머지 그림들에서도 다소 변곡점이 일어나는 구간을 쉽게 확인할 수가 있다. 모든 벨마우스 깊이에서 정압계수 분포는 회전수에 관계없이 중첩되어 나타나 유동의 상사성을 보여준다. 또 유량계수별 정압계수분포는 각 벨마우스 깊이에서 하나의 곡선함수로 나타낼 수 있지만 변곡점을 보이는 실속구간에서 다소 벗어남을 알 수 있다. 참고로 각 벨마우스 깊이별 곡선함수는 2차원 커

브피팅(curve-fitting) 프로그램인 TableCurve2D<sup>10</sup>에 의해 구해진 근사함수식들이다. 각 곡선함수별 우수성(goodness,  $r^2$ )은 차례로 약 0.9965, 0.9986, 0.9983, 0.9965이다. 여기서  $r^2$ 은 커브피팅 통계치의 분산분석<sup>10</sup>에서 우수성을 나타내며, 식 (1)로 정의한다.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

여기서  $r^2 = 1$ 은 오차가 전혀 없는 완벽함을 의미한다.

한편, Fig. 4로부터 SSAF를 벨마우스 출구 쪽으로 집어넣을수록 최대유량은 감소하지만, 최대정압은 오히려 증가하며, 실속을 나타내는 유량계수 범위는 점차 줄어들음을 알 수 있다. 여기서 벨마우스 출구 쪽으로 SSAF를 집어넣을 때 최적의 날개깊이는 축류유동만을 목적으로 한다면, Fig. 4(a)와 같은 날개깊이의 1/3이전에서는 결정되어야 한다고 판단된다. 그 이유는 같은 정압에서 유량성능이 더 우수하기 때문이다.

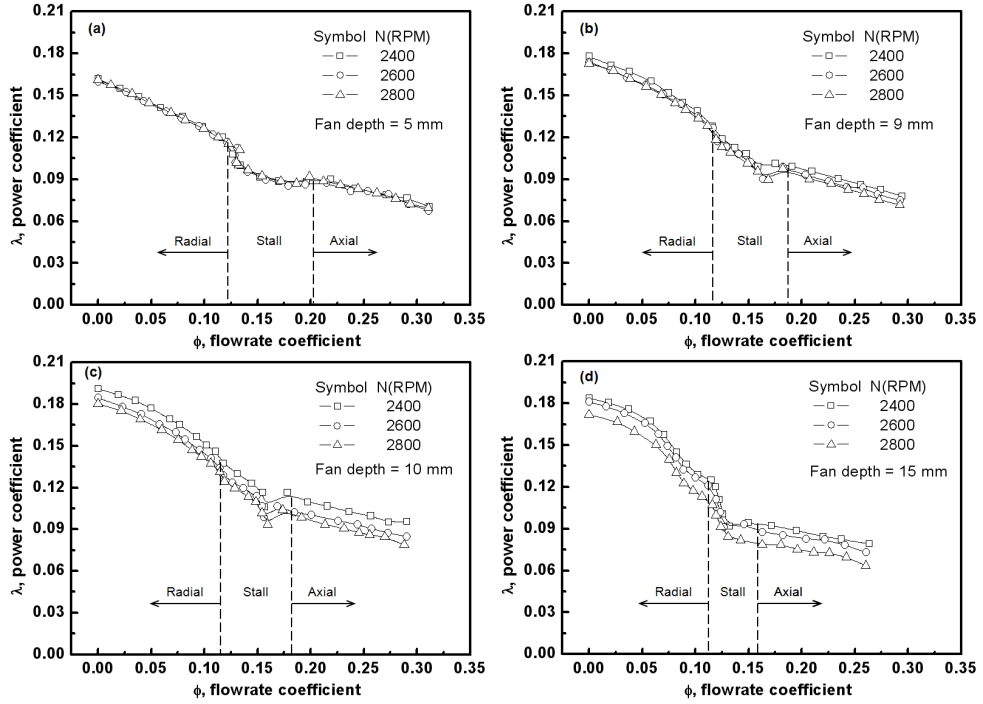


Fig. 5 Power coefficient profiles for the various depths of bellmouth

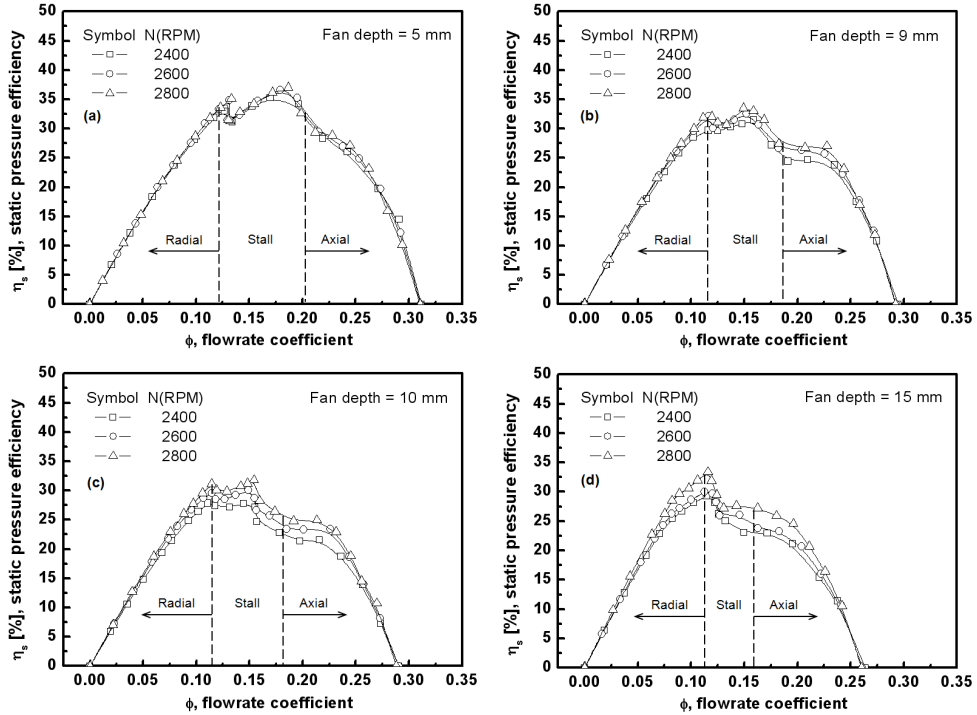


Fig. 6 Static pressure efficiency profiles for the various depths of bellmouth

Fig. 5는 벨마우스 깊이에 따라 얻어진 유량계 수별 동력계수의 분포를 나타낸다. 여기서는 변곡점을 나타내는 실속영역을 쉽게 구분할 수가 있다. 유량계수별 동력계수의 분포는 유량계수가 증가함에 따라 감소하며, 실속영역에서 변곡점을 포함하고 있다. 또 벨마우스 깊이가 증가할수록 회전수별 동력계수의 분포는 중첩을 이루지 못함을 알 수 있다. 이것은 SSAF가 벨마우스 출구 쪽으로 집어넣을수록 Fig. 4에서와 같이 정압이 상승하여 부하가 증가함으로 얇은 플라스틱 SSAF의 날개가 떨어져 토크에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 반면 이 떨림 현상은 정압분포에는 크게 영향을 미치지 않음을 Fig. 4로부터 알 수 있다.

Fig. 6은 벨마우스 깊이에 따라 얻어진 유량계 수별 정압효율 분포를 나타낸다. 벨마우스 깊이에 관계없이 실속영역에서는 정압효율은 높지만 변곡지점을 포함하고 있다. 또 최대효율은 벨마우스 깊이가 5mm일 때 가장 큰 약 37%를 나타내며, 나머지 벨마우스 깊이에서는 대략 32~33%의 크기를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

SSAF를 벨마우스 깊이에 따라 회전수별로 얻어진 공력특성들을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) SSAF를 벨마우스 출구 쪽으로 집어넣을수록 최대유량은 감소하지만, 최대정압은 오히려 증가하며, 실속을 나타내는 유량계수 범위는 점차 줄어든다.

(2) 실속범위 내에서는 정압계수, 동력계수 및 정압효율분포에 모두 변곡지점을 포함하고 있다.

(3) SSAF를 벨마우스 출구 쪽으로 집어넣을수록 정압상승은 토크변동에 큰 영향을 미치나 정압변동에는 큰 영향을 미치지 않는다.

(4) 최대정압효율은 적용된 모든 벨마우스 깊이에서 37%를 넘지 않는다.

#### References

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. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 199~208.

5. J. K. Kim, 2008, "Investigation on the Turbulent Flow-Field of a Small-Size Axial Fan with Different Operating Points", J. of the KSPSE, Vol. 12, No. 5, pp. 40~47.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. S. C. Morris, J. J. Good and J. F. Foss, 1998, "Velocity Measurements in the Wake of an Automotive Cooling Fan", Exp. Thermal and Fluid Science, Vol. 17, pp. 100~106.

10. SYSTAT Software Inc., 2002, TableCurve2D User's Manual, Ver.4 for Windows.