

자동차 에어컨용 전곡형 원심 송풍기의 공력성능 분석

권의용* · 조남효*

Experimental Study on the Performance of a Forward-Curved Centrifugal Fan for an Automotive Air-Conditioner

Eui-Yong Kwon*, Nam-Hyo Cho*

Key Words: Centrifugal Fan(원심송풍기), Forward-Curved Blade(전곡형 깃), Reverse Flow(역유동), Vorticity(와류), Aerodynamic Performance(공력성능), 5-Hole Pitot Probe(5공 피토관)

ABSTRACT

Aerodynamic optimization of an automotive air-conditioning blower is a hard task because of the highly complex flow phenomena related to three-dimensional flow separations and the unsteady nature caused by the interaction between primary and secondary air flows throughout the fan. In this paper, an aerodynamic study on a forward-curved centrifugal fan has been carried out. Firstly we obtained the fan performance curves versus flow rates showing its unstable nature in the surging operation range. Secondly aerodynamic characterizations were carried out by investigating the velocity and pressure fields in the casing flow passage using a 5-hole pitot probe, at different operating conditions. Surface flow pattern near the cut-off area exhibits similar flow behavior above the best efficiency operating point, although the pressure level increases substantially with the increase of flow rate. Vorticity in the casing passage flow occurs in all flow rates, downstream from the r-Z plane $\theta=120$ deg., where the position of its core changes with the circumferential location. Although complex, the general flow behavior were common, giving insight in its main aerodynamic features.

1. 서 론

자동차 에어컨용 송풍기의 유동제어 및 고효율화와 저소음화를 위해 많은 노력이 이루어지고 있다. 최근 들어서 자동차 에어컨용 송풍기의 설계 경향은 고성능, 저소음 뿐 아니라 엔진룸내의 효율적인 패키징(packaging)을 위해 소형화가 요구되고 있다. 이러한 요구조건은 에어컨 모듈의 핵심부품인 송풍기의 깃 형

상의 최적화 작업을 통해 어느 정도 만족될 수 있다. 잘 알려진 전곡형 송풍기의 특성을 고려하여, 즉 낮은 회전속도에서 높은 유량을 발생하여 성능이 향상되고 상대적으로 소음이 저감하는 특성, 전곡형 다익 송풍기가 자동차 에어컨용으로 널리 사용되고 있다. 반면에 이러한 송풍기는 서지(surge)영역에서 불안정한 유동현상을 유발하여 전체 유효작동영역을 감소시킬 뿐만 아니라 비교적 짧은 코드길이(chord length)와 강한 곡률로 구성되기 때문에 상대적으로 유동안내, 유동박리, 스톨 등의 유동제어가 어려워짐으로 인하여 고난

* 고등기술연구원

도의 것 최적설계가 요구된다.

본 논문에서는 양산용 전곡형 원심 송풍기에 대한 공력성능과 유동특성을 분석하였다. 우선 공력성능곡선으로부터 세 개의 작동점을 선정하여 케이징(casing) 내부표면의 압력분포를 측정하였고 특수 제작된 초소형 5공 피토판을 사용하여 케이징 내부유동의 3차원 유속분포를 측정하였다.

2. 시험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 측정방법

실험장치의 단면도와 주요 구성품은 Fig. 1과 같다. 본 실험장치는 향후 송풍기 형상변경에 따른 성능고찰이라는 전체연구목적에 부합하기 위하여 ANSI/AMCA 210-85 및 ISO CD-5801 규격에 기초하여 설계되었으며 케이징 디퓨저(diffuser)와 출구덕트를 연결하는 부위를 별도로 들으로써 디퓨저 면적이 변하더라도 쉽게 변경할 수 있도록 제작되었다. 케이징 입구에 벨마우스(bellmouth)형 입구덕트를 설치하였고 출구덕트에는 허니컴(honeycomb)을 설치하여 균질한 유동을 생성하도록 하였다. 출구덕트는 가로 155mm, 높이 112mm의 직사각형이며 전체 길이는 1800mm이다. 선행된 기초 실험결과로부터, 다양한 유량조건에서 축방향 압력구배가 매우 작고 횡방향 단면에서의 압력분포가 균일하게 나타나는 위치에 평균피토판과 4개의 정압탭, 그리고 온도센서를 설치하여 질량유량 또는 체적유량을 측정하였다. 송풍기 케이징 표면에는 직경 0.3mm의 압력탭이 44개 설치되어 있으며 $\pm 63.5\text{mmH}_2\text{O}$ (Setra사)의 압력변환기(Scanivalve사)를 이용하여 순차적으로 압력을 측정하였다. 케이징 내부유동의 3차원 속도벡터는 외경 2mm의 쉘뿔형 5공 피토판을 이용하여 구하였다. 유량을 조절하여 송풍기의 작동점을 가변하기 위하여 웨지(wedge)형 댐퍼(damper)를 사용하였으며 이송장치에 의해 트로트링(throttling) 현상을 구현하였다. 송풍기의 회전수는 섬유광원센서(optical fiber sensor)를 이용하여 측정하였으며 이를 제외한 모든 유동변수들의 데이터 처리는 컴퓨터에서 실시간으로 이루어진다.

측정방법은 Fig.2의 시스템구성에 표시된 바와 같이 이루어진다. 측정된 각 압력, 온도신호는 컴퓨터로 입력되어 후처리과정을 거치게되며 이송장치를 비롯한

압력변환기와 5공 피토판의 제어는 LabVIEW 프로그램에 의해 수행된다.

2.2. 송풍기 제어

Table 1은 송풍기의 주요 제원을 나타낸다. 본 연구에 사용된 송풍기는 깃 형상이 원호로 되어 있고 캠버 선을 따라 일정한 두께를 갖는 일반적인 모델이다.

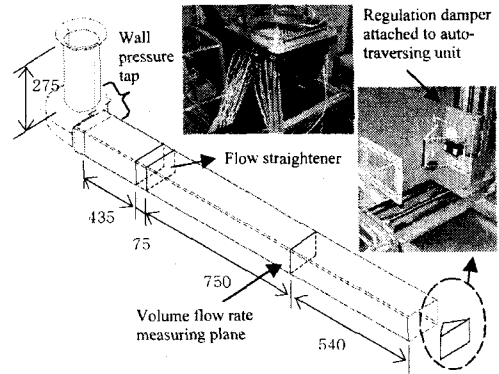


Fig. 1 Fan test apparatus

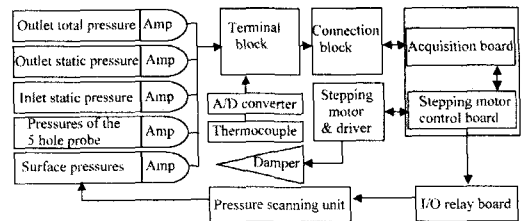


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

Table 1 Design specifications of the tested model

Fan		Casing	
Inlet/outlet diameter(mm)	116/140	Casing width(mm)	84
Width(mm)	65	Cut-off clearance(mm)	11.8
Inlet/outlet blade angle(deg.)	15/156	Expansion angle at $\theta = 210\text{deg.}$	5
Number of blades	44	Diameter of inlet opening(mm)	113

3. 결과 및 고찰

3.1. 공력성능 곡선

Fig. 3는 송풍기 주변 유동장의 정밀분석에 앞서 송풍기의 기본성능을 파악하기 위하여 덕트 출구에 장착된 댐퍼를 사용하여 공기의 유량을 조절하며 측정된 특성곡선을 나타낸다. 유량에 대한 전압력계수(total pressure coefficient) 및 송풍기 효율(total-to-total fan efficiency)의 변화량을 잘 보여준다. 서지유량구간에서 나타나는 전압력계수가 증가하는 경향은 공기역학적으로 불안정한 유동현상이 이 작동영역에서 발생함을 예측케 한다. 또한 최고효율 작동점이 이 영역 내에 포함되는 것으로 보아 송풍기의 압력상승 및 효율곡선이 서지구간을 비롯하여 고유량 조건에서도 높은 수준을 유지하기 위해서는 송풍기의 최적설계가 필요함을 알 수 있다. 결국 송풍기의 유효작동 범위를 넓히기 위해서는 소음 증가와 기계적 진동, 그리고 유동 박리, 역유동 등으로 인한 공력성능 감소의 원인이 되는 이러한 불안정한 공력현상의 발생을 최소화하는 것이 핵심 설계요소가 되겠다.

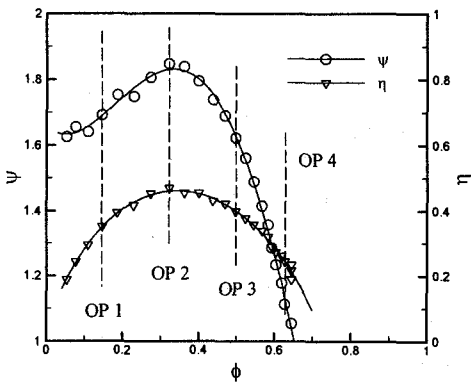


Fig. 3 Fan performance curves

Fig. 4는 유량별 특성 레이놀즈수(characteristic Reynolds number)의 변화량을 나타낸다. 두 레이놀즈수(Re_{U_2} , Re_{U_c})는, 송풍기와 케이징이 전체성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 각각 송풍기의 깃끝 속도, 출구 지름과 출구덕트 내부의 속도, 지름으로 계산하였다. 유량이 증가함에 따라 Re_{U_2} 는 급격하게 선형으

로 감소하는 반면에 Re_{U_c} 는 $\phi=0.6$ 까지 비교적 일정하다가 완만하게 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 송풍기와 케이징의 역할이 각각 서지영역과 고유량 영역에서 송풍기 공력성능에 중요하게 작용함을 의미하는 것으로 판단된다. 따라서 성능곡선에서 보이는 고유량 영역에서의 급격한 압력하강은(Fig. 3 참고) 케이징 설계를 개선함으로써 어느정도 해소될 수 있을 것으로 판단된다.

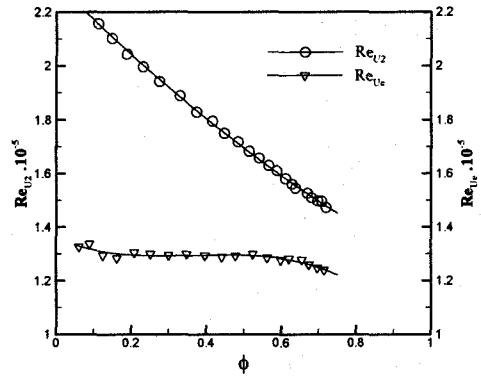


Fig. 4 Relation between characteristic Reynolds numbers and flow coefficient

3.2. 케이징 표면압력장

Fig. 5는 Fig. 3에서 표시된 4개의 작동점(OP 1, OP 2, OP 3, OP 4)에서 측정된 표면압력분포와 압력탭의 위치를 보여준다. 각각의 작동점은 유량계수 $\phi=0.15$, 0.32, 0.50, 0.63에 해당하며 OP 2는 본 송풍기의 최고 효율점이 된다. 표면압력은 성능계수와 마찬가지로 송풍기 시스템의 모델변경에 따른 출구유속의 변화와 무관하게 압력장을 비교분석하기 위해 무차원 압력계수(C_{pw})로 표시하였다. 여기에서 $C_{pw}=2(p_w-p_e)/(\rho_e U_e^2)$ 이며 p_w 는 케이징 표면압력을 나타내고 p_e , ρ_e , U_e 는 각각 체적유량 측정단면에서의 공기 정압력, 밀도와 유속을 나타낸다. 그림으로부터 OP 1을 제외한 나머지 작동점에서의 유동형태는 매우 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 다만 최고효율점에서 유량이 증가할수록 케이징 하단부($Z/b < 0.5$)에 압력이 크게 작용하면서 축방향 압력구배가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 고유량 영역에서 반경방향 속도성분이 접선방향 속도

성분에 비해 상대적으로 크게 발생함으로써 야기되는 강한 유동방해(flow obstruction)에 기인하는 것으로 판단된다. 케이징 상단부 상류에서 발생하는 저압영역은 유량이 증가할수록 점차 작아지는 경향을 보이는데 이는 본 실험에 앞서 수행된 전산유체해석결과⁽¹⁾에서 알 수 있듯이 컷오프 상단면에서 국부적으로 발달하는 역유동(reverse flow) 현상에 기인할 것으로 판단된다.

이와 같은 표면압력장 분석은 케이징 설계에 보다 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 일반적으로 전곡형 원심송풍기는 후곡형 깃과는 달리 케이징이 쉘에서 발생하는 압력결정에 주된 요인이 되기 때문에 그 역할이 매우 중요시된다⁽²⁾.

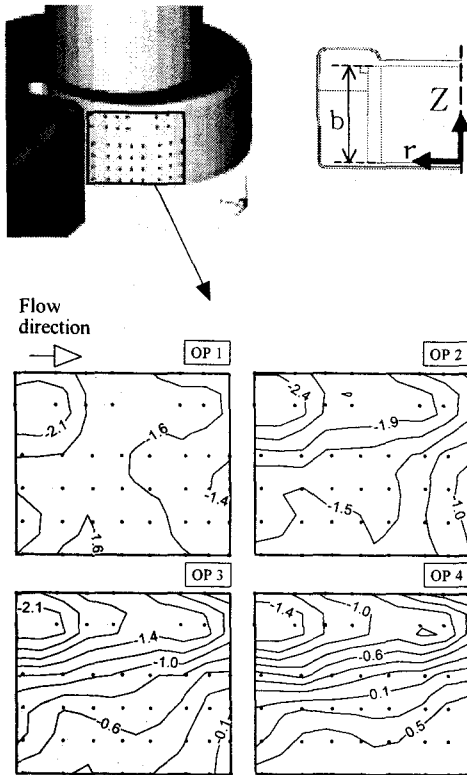


Fig. 5 Distributions of non-dimensional pressure coefficient on the casing at four operation points

3.3. 케이징 내부 유동장

Fig. 6은 세 개의 r-Z 단면, 즉 $\theta=120, 210, 300$ deg.에서 측정된 속도벡터와 접선방향 속도성분 V_t 의 분포를 나타낸다. 각각의 단면은 세 개의 작동점에서 측정되었다. 3.2절의 표면압력장에서 OP 3와 OP 4의 유동형태가 매우 유사하게 나타나는 결과로부터 두 작동점에서의 케이징 내부유동장이 크게 변화하지 않을 것으로 판단되어 최고효율점 이후의 작동점으로는 OP 4에서만 유속벡터를 측정하였다. 예상대로 유량이 증가할수록 케이징 상단부($Z/b > 0.5$)에서 와류가 발달하는 것을 볼 수 있다. $\theta=120$ deg. 단면의 경우, 다른 단면과 달리 모든 유량조건에서 깃 길이(span-wise) 방향으로의 V_t 분포가 비교적 균일하게 나타나며 다만 OP 1에서 케이징 중간부($Z/b \sim 0.5$)에 국부적으로 강하게 발생한다. 다른 속도성분에 비해 V_t 가 높게 측정되며 유량이 감소할수록 속도가 낮아지는 전곡형 송풍기의 일반적인 특성을 확인할 수 있다. r-Z 단면과 송풍기 작동점이 컷오프 후류방향과 고유량으로 이동할수록 축방향 속도구배 dV_t/dZ 가 증가하고 상대적으로 높은 V_t 가 케이징 상단부에 작용하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 OP 4에서 측정된 전압, 정압상승분포와 V_r-V_z 속도벡터로부터 계산한 유선을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 최대, 최소전압상승치($\Delta P_{t,max}, \Delta P_{t,min}$)는 컷오프상류($\theta=120$ deg.)에서 측정되며 후류로 향할수록 점차 약해진다. 모든 r-Z면에서 $\Delta P_{t,min}$ 는 와류코어(vortex core)보다 조금 낮은 위치에서 측정되며 $\theta=210$ deg.까지 케이징 하단부로 향하다가 $\theta=300$ deg.에서 반대로 상단부로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 원주위치($\theta=const.$)에 따라 복잡하고 불균일하게 변하는 깃사이 유동형태(blade passage flow pattern)에 기인한다고 판단된다. 즉 서로 다른 원주위치에서 깃 길이를 따라 축방향 입구속도분포가 달라지게 되고 이로 인해 3차원 유동박리 토폴로지(three dimensional separated flow topology)가 변화하여 송풍기 입구유동의 압력에너지가 속도에너지로의 변환되는 과정이 원주위치와 함께 달라지는 것과 밀접한 관계가 있을 것으로 간주된다. 본 연구결과에서는 r-Z 단면이 $\theta=210$ deg.에서 $\theta=300$ deg.로 이동할 때 접속방향 속도성분 V_t 에 비해 V_r 이 상대적으로 크게

증가하는 것(특히 케이징 하단부, Fig. 8)을 볼 수 있는데 이는 깃사이유로를 통과하는 공기의 반경방향 운동량이 증가하여 깃 흡입면(suction surface)에서 발달하는 박리현상을 다소 둔화시킬 것으로 판단된다.

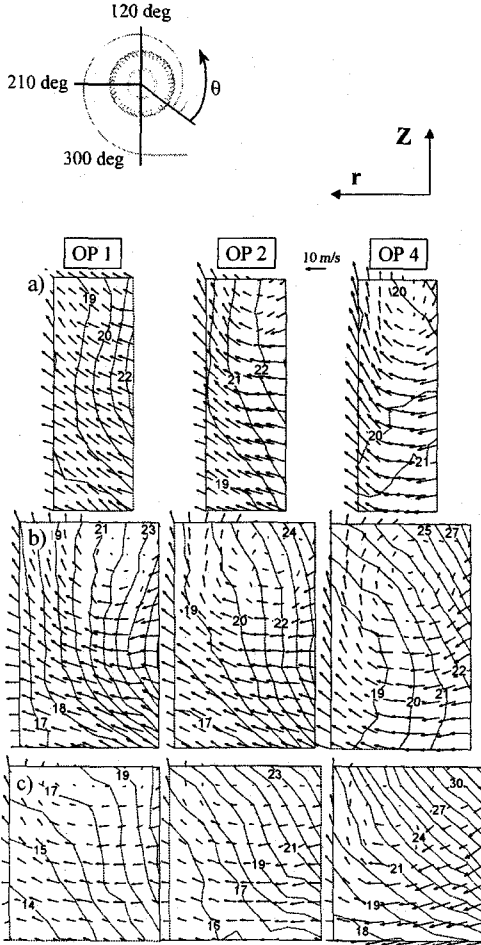


Fig. 6 Velocity vectors and iso-value contours of the tangential velocity at three operating points, in three r - Z planes (a) $\theta=120\text{deg.}$, (b) $\theta=210\text{deg.}$, and (c) $\theta=300\text{deg.}$

Fig. 7의 압력분포도로부터 전압상승치에서 정압이 차지하는 비중이 상대적으로 작음을 알 수 있는데 이는 고유량 조건 OP 4에서 송풍기 입구면의 유동에너지가 깃사이유로를 통과하면서 운동에너지로 많이 변환되었음을 의미한다고 볼 수 있겠다. 기존 연구결과

에서 유량이 감소할수록 전압상승대비 정압상승치가 증가하는 현상은 이를 뒷받침해 준다.

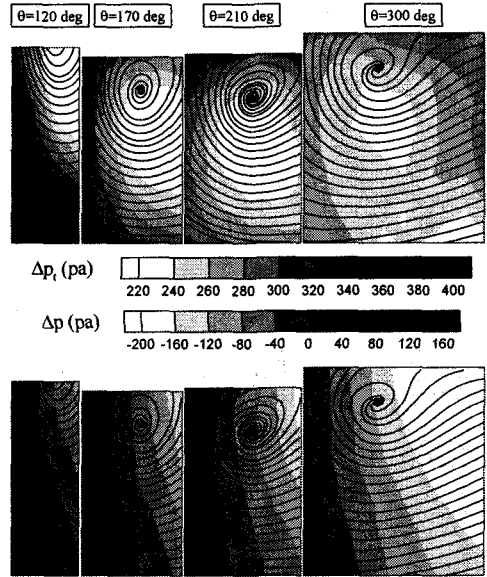


Fig. 7 Streamlines and iso-value contours of the differential total pressure in four r - Z planes at high flow rate (OP 4)

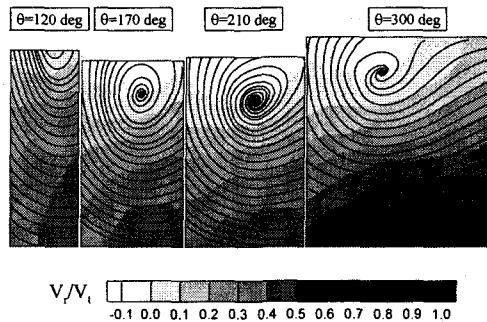


Fig. 8 Streamlines and iso-value contours of the radial-to-tangential velocity ratio in four r - Z planes at high flow rate (OP 4)

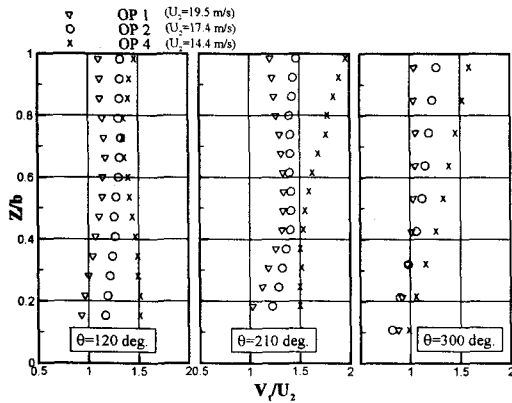


Fig. 9 Span-wise distributions of the tangential velocity on the plane $r/D_2=0.1$ for three circumferential locations, at three operating points

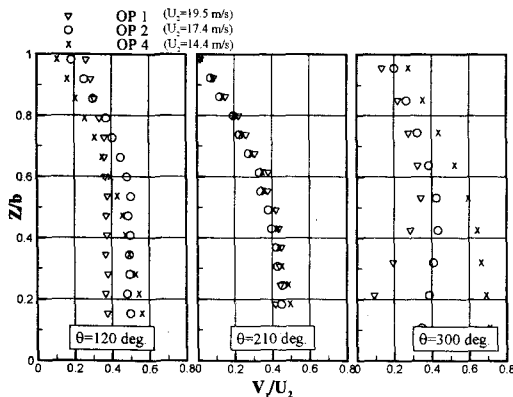


Fig. 10 Span-wise distributions of the radial velocity on the plane $r/D_2=0.1$ for three circumferential locations, at three operating points

Fig. 9와 Fig. 10은 송풍기 중심축으로부터 반경방향으로 $0.1D_2$ 떨어진 위치에서 깃 길이를 따라 측정된 V_t 와 V_r 의 분포를 나타낸다. 여기서 D_2 는 송풍기 출구 지름을 나타내며 두 속도성분은 깃 끝속도(blade tip velocity)로 무차원화 하였다. 예상대로 유량이 증가할수록 V_t 도 증가하는 경향을 보이며 컷오프 상류에서는 전체 유량조건에서 V_t 가 비교적 일정한 분포를 나타낸다. 반면에 r - Z 단면이 컷오프 후류로 이동할수록 캐이

징 상단부에서 높은 V_t 가 발생하는 것을 볼 수 있다. 유량조건별 V_t 와 V_r 분포를 비교하면 먼저 OP 1의 경우, 모든 r - Z 단면에서 V_t 가 비교적 균일한 분포를 보이는 반면에 V_r 는 Z/b 와 함께 크게 바뀌는 것을 볼 수 있다. 특히 캐이징 입구에 근접할수록 급격히 낮아지는데 이는 입구유동의 박리현상에 기인할 것으로 사료된다. 이러한 경향은 최고효율점에서는 $\theta=210$ deg.까지 나타나고 OP 4의 경우 컷오프 상류지점 $\theta=120$ deg.에서만 발견된다. 이러한 경향은 일반적으로 잘 알려진 서지유량구간에서 발생하는 송풍기 출구면에서 입구면으로의 역유동 현상^{(3), (4)}이 본 모델에서는 컷오프 상류에서 가장 뚜렷이 존재함을 예측케 하며 후류로 진행할수록 점차 약해질 것으로 판단된다. $\theta=300$ deg.에서의 V_r 분포를 살펴보면 OP 1에서 송풍기 축방향으로 나타나는 “U”형 속도분포가 유량이 증가함에 따라 일정한 기울기로 발전하는 것을 발견할 수 있다. 이러한 현상은 송풍기 입구유동이 서지유량구간에서 $Z/b \sim 0.5$ 에서 국부적으로 강하게 유출되다가 유량이 증가하면서 점차 캐이징 하단부로 움직이는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 양산용 전곡형 원심송풍기에 대한 공력성능 및 내부유동장 분석이 수행되었다. 사용된 송풍기의 깃은 비교적 높은 앞전반경과 일정한 두께의 원호형을 지닌 일반적인 모델로서 캐이징 표면압력장 및 3차원 유속장을 측정한 결과 전곡형 송풍기의 일반적인 유동특성, 즉 서지유량구간의 불안정한 유동상태, 와류생성 등을 확인하였다. 유량이 증가할수록 측정된 모든 r - Z 단면에서의 유동구조가 매우 유사하게 나타나는 반면에 와류코어의 위치는 컷오프 후류를 향할수록 캐이징 상단부로 이동하는 것을 발견하였다. 기존 송풍기의 성능 향상 및 소음 저감을 위해, 컷오프 후류에서 캐이징 중심부에 국부적으로 강하게 발생하는 반경방향 속도분포가 깃 길이를 따라 균일해지도록 함으로써 서지구간에서는 급격한 압력상승을 피하고 고 유량 영역에서는 상대적으로 와류의 생성을 둔화시킬 필요성을 확인하였다. 본 논문에서의 실험결과를 토대로 핵심설계인자인 깃 입사각/출사각, 깃 수, 송풍기 입출구 면적비, 컷오프 클리어런스 등의 영향에 대한 상세한 분석이 진행될 예정이다.

참고 문헌

- (1) 백경욱, 권의용, 김한경, 조남효, 2000, "CFD를 이용한 송풍기 내부의 유동해석", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 수록 예정.
- (2) Bleir F.P., 1998, "Fan Handbook: Selection, Application, and Design", McGraw-Hill.
- (3) Cau G., Mandas N., Manfrida, Nurzia F., 1987, "Measurements of Primary and Secondary Flows in an Industrial Forward-Curved Centrifugal Fan", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 109, pp. 353~358.
- (4) Roth H.W., 1981, "Optimierung von Trommellaufer Ventilatoren", Stromungsmechanik und Stromungsmaschinen, Vol. 29, pp. 1~45.