

자동차 HVAC용 Blower Unit 내부 유동장의 PIV 계측

지 호 성¹⁾ · 김 보 램²⁾ · 이 상 준^{*1)}

포항공과대학교 기계공학과¹⁾ · 포항공과대학교 환경대학원²⁾

PIV Measurement of Flow Inside of HVAC Blower Unit

Ho Seong Ji¹⁾ · Bo Ram Kim²⁾ · Sang Joon Lee^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Gyeongbuk 790-784, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Pohang University of Science and Technology, Gyeongbuk 790-784, Korea

(Received 12 April 2007 / Accepted 10 May 2007)

Abstract : Flow characteristics inside a blower unit of an automotive HVAC module were investigated experimentally using a high-resolution PIV technique. The PIV system consists of a 2-head Nd:YAG laser, a high-resolution CCD camera, optics and a synchronizer. The prototype sirocco-fan with forward-curved blades was operated under the same condition of real car. The scroll casing was made transparently for capturing clear flow images. The time-averaged velocity fields were measured in three cross sections. Flow is accelerated with going toward the outer wall of scroll due to centrifugal force and large pressure gradient formed in the region between the fan and the outer casing wall. The presence of the cut-off region and diffusing duct of fan outlet influences largely the flow structure inside the blower unit.

Key words : HVAC(공기조화), PIV(입자영상유속계), Sirocco fan(시로코 팬), Scroll(스크롤), Flow visualization(유동가시화)

Nomenclature

- N : number of blades
- t : thickness of blade [mm]
- b : fan width [mm]
- w : scroll width [mm]
- D_1 : inlet diameter of fan [mm]
- D_2 : outlet diameter of fan [mm]
- β_1 : angle of inlet blade [deg]
- β_2 : angle of outlet blade [deg]
- δ : forward curved angle [deg]
- u : streamwise velocity at outlet [m/s]
- v : normal velocity at outlet [m/s]
- Q : flow rate [m³/hr]

1. 서론

최근 들어 생활수준의 향상으로 자동차의 쾌적성에 대한 소비자들의 관심이 크게 증가하고 있다. 이에 따라 차량 내부의 온도, 습도 및 통풍을 제어하는 HVAC(Heating Ventilating Air Conditioning) 공조시스템과 자동차 내부 환기유동에 대한 관심이 증대되고 있다.¹⁾ 차량의 쾌적성을 향상시키기 위해서는 HVAC 공조시스템의 성능향상이 필수적이며, 이를 위해 송풍장치 내부의 유동특성을 정확히 파악하는 연구가 선행되어야 한다.

HVAC 공조시스템의 핵심부품인 송풍장치의 내부에는 팬 날개짓의 고속회전으로 인하여 복잡한 3차원 유동이 발생한다. 송풍기 및 송풍 챔버는 복잡한 구조를 가지고 있으며, 스크롤도 3차원 벌류트 곡선 형상을 띄고 있다. 이와 같은 복잡한 구

*Corresponding author, E-mail: sjlee@postech.ac.kr

조로 인하여, 실험적 연구 수행이 용이하지 않은 실정이다.

이에 따라 많은 선행연구들은 수치해석적 방법을 이용한 해석적 접근을 수행하였고, 일부 실험적 연구는 열선유속계나 5공 프로브와 같은 점 측정방식으로 이루어 졌다. 그리고 원심형 송풍기의 주요 설계변수인 팬의 형상, 날개갯의 갯수 및 날개의 형상이 팬 주위 유동과 소음발생의 상관관계에 대한 연구의 대부분이 수치해석적 방법으로 이루어졌으며, 실험적 연구는 수치해석 결과를 정성적으로 검증하는 수준에 머무르고 있다.²⁻⁸⁾ 그리고 대부분의 실험 연구들이 고전적인 계측기법을 이용하여 수행되었기 때문에, 몇몇 지점에서 시간 평균화된 결과만 측정되었을 뿐, 시간에 따른 유동구조의 변화나 난류 특성과 같은 주요 유동정보들은 획득되지 못하였다. 그리고 고전적 방법의 실험적 연구의 경우, 측정기법의 한계로 인하여 복잡한 3차원 유동 특성을 지닌 팬 주위의 유동과 스크롤 내부의 유동구조를 해석하기 위한 접근이 어렵기 때문에 전체 유동장에 대한 정보를 제공하기가 불가능하였다.

최근 들어, 컴퓨터와 전자산업 및 화상처리 기술의 급속한 발달로 인하여 PIV(Particle Image Velocimetry)등과 같은 새로운 속도장 측정기법이 개발되어 복잡한 유동의 속도장 계측에 활용되고 있다. PIV 기법은 유동전체의 속도장을 직접적으로 측정함으로써, 높은 신뢰성을 가지며, 시간 평균된 결과뿐 아니라 시간에 따른 유동구조변화 및 난류성분의 공간분포와 같은 정보를 얻을 수 있어 보다 정밀한 유동해석을 가능하게 하였다. 일부 선행연구에서는, PIV기법을 원심형 송풍기 주위 유동계측에 적용한 사례가 있지만, 실제 공기유동과 같은 빠른 유속에 따른 실험적 어려움을 극복하지 못하고 공기 유동이 아닌 물을 이용한 모사 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 실제 자동차의 현품 HVAC 모듈을 이용하여 송풍기 주위 유동에 실제와 같은 조건으로 적용하여, 다양한 운전조건에서 송풍기 주위 흐름의 유동특성을 고해상도 CCD카메라를 적용한 첨단 PIV 속도장 측정기법을 이용하여 실험적으로 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도와 실험배치를 보여주고 있다. 실험장치는 실제 자동차의 현품 HVAC 모듈을 그대로 사용하였으며, 스크롤 부분은 유동가시화 실험을 위해 투명아크릴로 제작하였다. 그리고 송풍장치의 토출부와 확산되는 형상의 덕트가 만나는 절부(cut-off) 부위는 실제 HVAC의 송풍장치 형상과 일치하도록 제작하였다. 이밖에 차량 내부의 열교환기, HVAC 내부 배플 및 토출 덕트에 기인한 유동부하와 동일한 효과를 가지는 부하장치를 제작하여 실험장치에 적용하였다.

실제 자동차에 사용되고 있는 12볼트, 21암페어의 직류 모터를 그대로 사용하여 실제와 동일한 조건으로 구동하기 위해 직류 전압공급기를 사용하였다. 이때 실험조건에 따른 회전수와 유량은 타코메타와 터빈식 유량계를 이용하여 계측하였다.

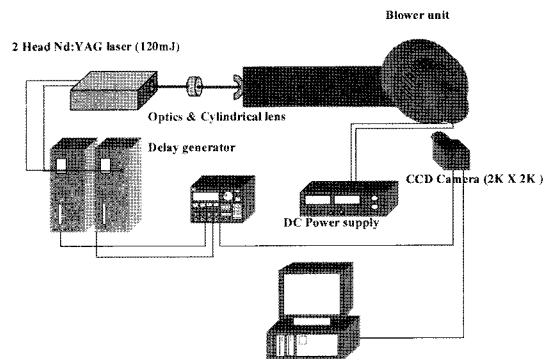
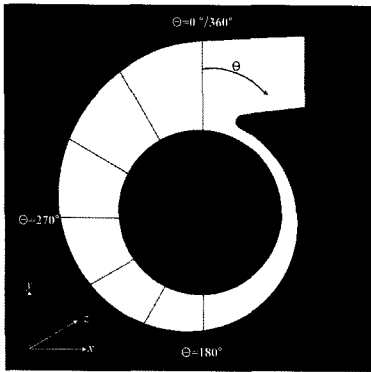


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

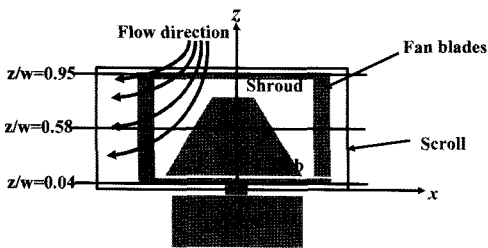


Fig. 2 Photograph of experimental set-up used in this study

Fig. 3은 본 연구에서 다룬 시로코 팬의 형상과 좌표축, 그리고 측정단면을 나타낸 것이다. HVAC용 송풍기로 사용된 시로코 팬은 전향익(forward curved)형상의 블레이드 44개 가지고 있다. 블레이드의 두께(t)는 1.8mm이고 스펠(b)은 약 70mm이다. 팬 외경(D_2)은 72mm이고, 팬 내경(D_1)은 60mm이다. 그리고 블레이드의 입구 각(β_1)은 80° 이고, 출구 각(β_2)은 150° 이며, 블레이드 전향각(δ)은 70° 이다. 스크롤의 폭(w)는 80mm이다. 축 방향 단면에서 스크롤 각도 θ 는 Fig. 3(a)에 나타낸 것처럼 시계방향으로 회전하는 것으로 정의하였다. Fig. 3(b)는 시로코 팬을 거쳐 스크롤 내부로 유입되는 유동의 방향과 축방향 측정단면을 나타낸 것이다.



(a) Frontal view



(b) Cross-sectional view

Fig. 3 Configuration of experimental coordinate system and definition for angle of scroll

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 PIV 시스템은 2-head Nd:Yag 펄스 레이저, 고해상도 CCD 카메라, 제어 및 계산용 컴퓨터, 그리고 동기장치로 구성되어 있다. CCD 카메라의 해상도는 2048×2048 pixels이며, 초당 15프레임까지 촬영할 수 있으며, 프레임 straddling 기법

을 이용하여 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. 최적의 실험 조건을 찾기 위해 예비실험을 수행하여 영상 획득 조건을 결정하였는데, 본 연구에서는 4fps로 입자영상을 획득하였다. Nd:Yag 레이저의 노출시간은 약 7ns이며, 에너지 레벨은 펄스당 125mJ이다. 측정하고자 하는 유동단면을 광학 거울과 원통형렌즈(cylindrical lens)들을 적절히 조합하여 얇은 레이저 평면광(laser sheet)으로 조사하고 추적입자(tracer particles)에 의해 산란된 유동영상을 CCD카메라로 획득하였다. 이때 CCD 카메라는 조사된 평면광과 수직되게 배치하였으며, 산란된 입자영상을 취득하기 위하여 85mm 매크로 렌즈를 CCD 카메라 전방에 부착하였다. 관측장(field of view)의 크기는 약 $7\text{cm} \times 7\text{cm}$ 이며, 송풍장치의 스크롤 전체 단면을 Fig. 4와 같이 9개의 소구간으로 나누어 속도장을 측정하였다. 스크롤 내부를 지나는 흐름의 3차원 유동구조를 관찰하기 위하여 Fig. 3(b)에 나타낸 3개 측정단면, 즉 $z/w=0.58$ 인 중앙 단면(center plane)과 좌·우 방향으로 일정거리 이격된 위치($z/w=0.95, 0.04$)의 입구측(shroud)단면, 바깥쪽(hub)단면에서 PIV 실험을 수행하였다.

추적 입자로는 직경이 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 인 올리브 오일 액적을 사용하였으며, 실제 자동차에서 운전자가 선택

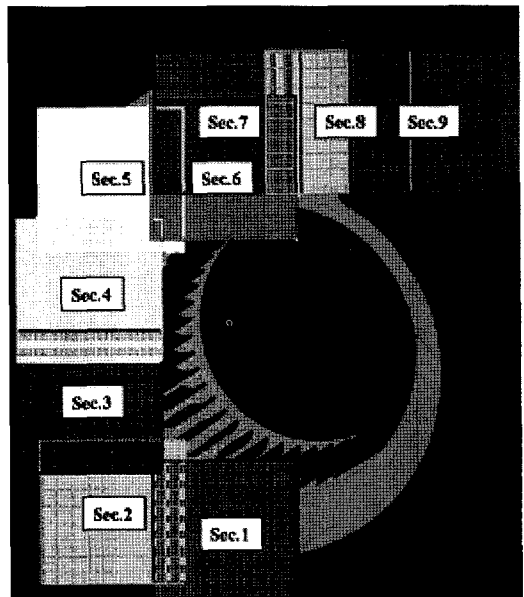


Fig. 4 Measurement sections for PIV experiment

Table 1 Experimental condition tested in this study

유속	인가전압 (Volt)	인가전류 (A)	회전수 (RPM)	토출유량 (m ³ /hr)
저속	4.7	3.7	1100	116
중저속	5.5	5.5	1490	154
중고속	8.1	10.2	2000	220
고속	12	19	2880	316

할 수 있도록 설계되어 있는 4단계의 송풍유량과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 다른 실험조건을 요약하면 Table 1과 같다.

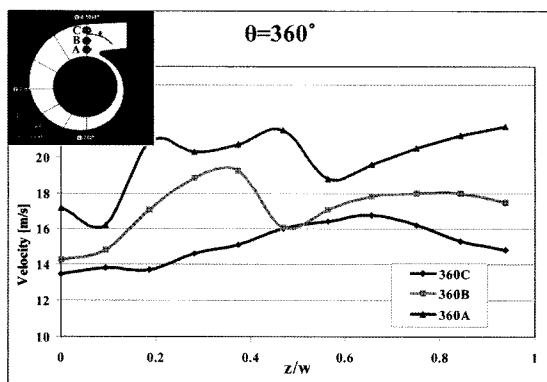
CCD카메라를 통해 얻은 입자영상에 2화상(2-frame) 상호상관(cross correlation)기법의 속도장 추출 알고리즘을 적용하여 시로코 팬 주위 유동의 속도장을 측정하였다. 이때 미소조사구간(interrogation window)의 크기는 64×64 pixels이며, 각 구간을 50% 중첩하였다.⁹⁾ 얻어진 순간속도장은 본 연구실에서 개발한 후처리 프로그램(CleanVec)을 이용하여 에러벡터를 제거하고, 통계적 처리 과정을 거쳐 평균 속도장을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

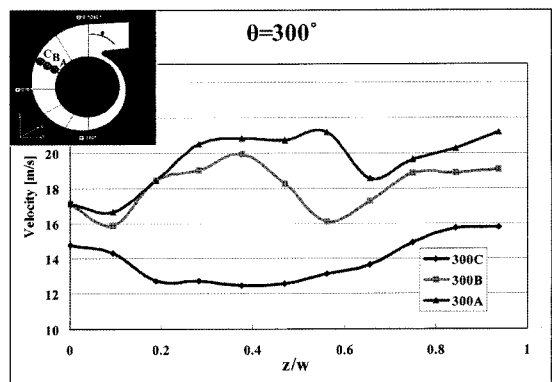
Fig. 5는 스크롤 각도가 $\theta=360^\circ$ 와 300° 인 횡단면에서 z축 방향으로 피토크관을 일정간격으로 이동시키면서 측정된 속도분포이다. 동일한 스크롤 각도에서 z축방향 위치에 상관없이 블레이드 팁 가까운 A 지점에서 측정된 속도가 스크롤 벽면에 인접한 C 지점의 속도에 비해 빠른 것으로 나타났다. 이것은 빠르게 회전하는 블레이드를 통하여 유입되는 공기

의 유체에너지가 스크롤 벽면으로 나아갈수록 감소한다는 것을 의미한다. 스크롤 각도 360° 에서 측정된 속도분포인 Fig. 5(a)를 보면, 전체적으로 허브에 가까운 $z/w=0\sim 0.15$ 의 바깥쪽 부분에서 상대적으로 낮은 속도값을 가지는 것으로 나타났다. 이 영역은 유입되는 공기의 입장에서 가장 안쪽에 위치하고 있어 블레이드를 통한 공기의 1차 유입량이 상대적으로 적기 때문인 것으로 생각되어진다. 그리고 블레이드 팁에 가까운 지점인 360A에서 측정된 속도분포가 z축 방향을 따라 변동이 심하게 나타났다. 이것은 하류에 위치한 설부에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 강한 3차원 유동특성은 스크롤 벽면 쪽으로 나아갈수록 크게 개선되는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 스크롤 각도 $\theta=300^\circ$ 일 때 z축 방향을 따라 측정된 속도분포이다. 블레이드 팁에 가까운 300A 지점과 중간위치인 300B 지점에서 스크롤 각도 360° 의 경우와 유사하게 z축을 따라 속도값이 변동하는 것이 나타났다. 그러나 설부의 영향이 상대적으로 적어 변동폭은 다소 감소한 것으로 판단되어진다.

Fig. 6은 Q를 변화시키면서 HVAC모듈의 송풍기 입구측(shroud) 안쪽 단면에서 측정된 공기 유동의 속도장 결과를 나타낸 것이다. 각각의 그림은 400장의 순간 속도장을 얻고 이들을 앙상블 평균하여 평균속도장 결과를 보여주고 있다. 유량에 상관없이 설부(cut-off) 주위에서 유속이 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 이는 앞서 기술한 Fig. 5(a) $\theta=360^\circ$ 지점 A의 속도분포에서 관찰할 수 있듯이 블레이드



(a) $\theta = 360^\circ$



(b) $\theta = 300^\circ$

Fig. 5 Variation of streamwise mean velocity along z-direction

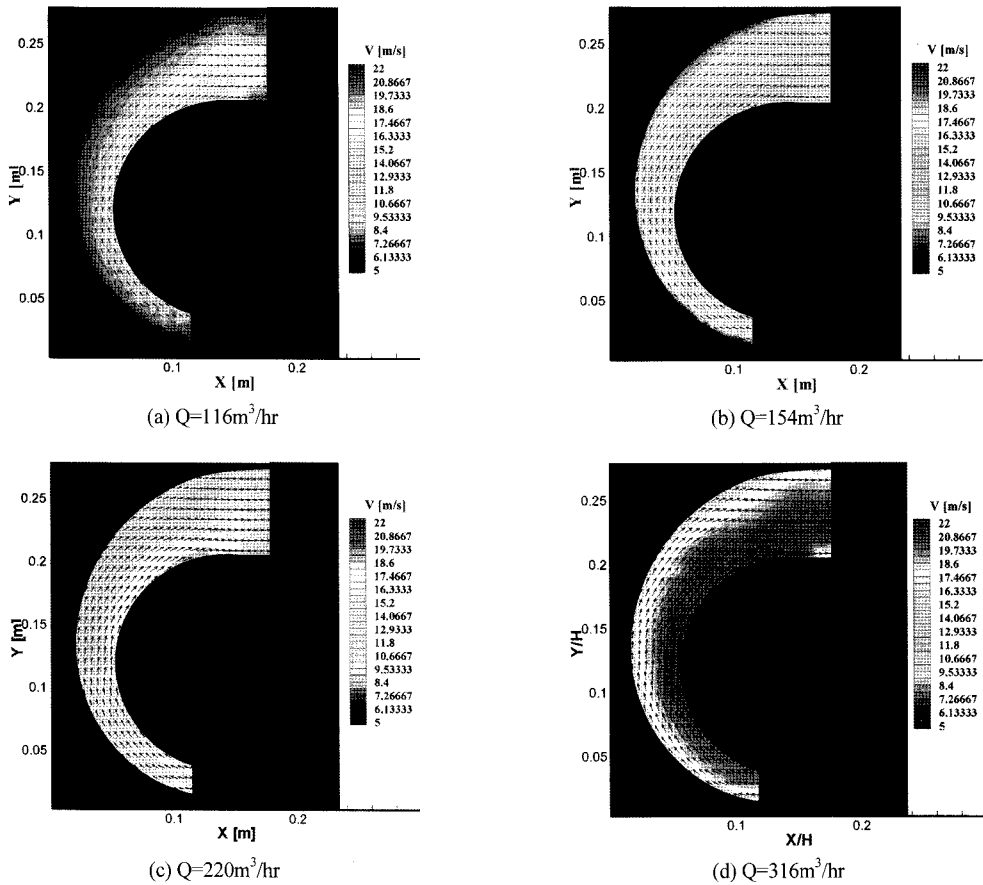


Fig. 6 Mean velocity field shroud section at $z/w=0.95$

팁 주변의 유동은 하류위치에 존재하는 설부가 유동저항으로 작용하여 유동이 영향을 받는 것으로 생각되어진다.

Fig. 6(a)는 유량이 $Q=116\text{m}^3/\text{hr}$ 인 경우, 스크롤 쉬라우드측 단면($z/w=0.95$)에서 측정된 속도분포를 나타낸 것이다. 스크롤 내부에서는 최소 5m/s에서 최대 약 10m/s의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 유량이 $Q=154\text{m}^3/\text{hr}$ 로 증가한 경우에 대한 실험결과로 스크롤 내부에서 최대속도는 약 16m/s이었다. 유량이 $Q=220\text{m}^3/\text{hr}$ 로 커지게 되면 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 스크롤 내부에서의 최소속도와 최대속도가 각각 12m/s, 19m/s로 크게 증가하였다. Fig. 6(d)는 유량이 $Q=316\text{m}^3/\text{hr}$ 인 조건에서 속도장 결과를 나타낸 것으로 스크롤 내부에서 약 22m/s의 최대 속도값을 가졌다. 전체적으로 유량조건에 관계없이

거의 유사한 유동구조를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 같은 유량조건에서 중앙단면($z/w=0.58$)이나, 허브측 단면($z/w=0.04$)에 비해 상대적으로 큰 속도값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 팬으로 유입된 공기의 많은 부분이 블레이드 안쪽의 허브 단면까지 도달하기 이전에 블레이드를 거쳐 스크롤로 바로 유입되는 것을 의미한다. 그리고 블레이드를 통해 유체가 유입되는 블레이드 팁 부근에서 전체적으로 빠른 유동이 관찰되는데, 이것은 Fig. 5의 결과와 유사한 결과이다. 그리고 블레이드의 회전에 따른 원심력에 기인하여 고속유동이 하류로 나아갈수록 보다 넓게 확대되는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 7은 스크롤 중앙단면($z/w=0.58$)에서 유량을 변화시키면서 측정된 평균 속도장 분포를 나타낸

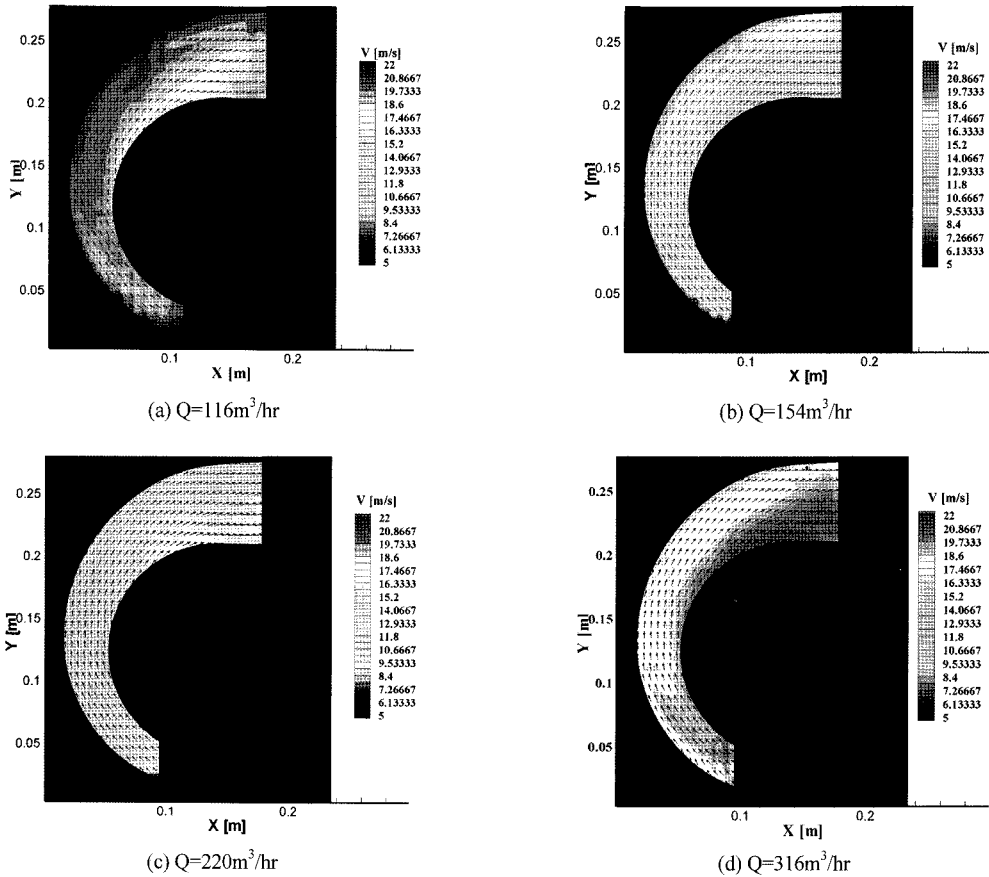


Fig. 7 Mean velocity field int the center section at $z/w=0.58$

것이다. 전체적인 유동구조 및 속도분포는 앞서 기술한 쉬라우드구축 단면과 크게 차이 나지 않으나, 고속유동의 영역이 상대적으로 감소한 것으로 나타났다. 이것은 입구측 단면에 비해 상대적으로 낮은 운동량을 가진 유체 유동이 블레이드를 통하여 스크롤 내부로 유입되는 것에 기인한 것으로 판단되어진다.

Fig. 8은 전동기가 위치한 바깥쪽 허브측 단면 ($z/w=0.04$)에서 획득한 평균 속도장 결과를 나타낸 것이다. 전체적인 유동구조는 쉬라우드측 단면과 중앙단면에서 관찰한 유동구조와 유사한 패턴을 가지는 것으로 나타났다. 3개의 측정단면 모두 설부 영역에서 유속이 감소하고 있지만, 쉬라우드 단면 ($z/w=0.95$)과 중앙단면($z/w=0.58$)의 설부 부근에서의 유속 감소가 두드러진 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 취득한 HVAC 팬의 스크롤 내

부 유동구조를 살펴보면, 시로코 팬의 내부 경사면을 따라 공기가 유입되며, 전향익 형태의 블레이드를 통하여 방사형으로 스크롤 내부로 유입되고 있다. 블레이드를 거쳐 스크롤 내부로 유입된 공기는 회전하는 팬에 기인한 원심력의 영향으로 하류로 나아갈수록 유선이 점차 스크롤 면 쪽으로 나선형으로 나아가는 유동구조를 보여주고 있다. 그리고 블레이드를 통해 공기가 스크롤 내부로 유입되고, 지속적으로 유체에너지가 공급되므로 스크롤 내부에서 하류로 나아갈수록 유동 에너지가 추가되므로 블레이드 끝단 가까운 영역에서 속도가 빠른 것으로 나타났다. 반면에 스크롤 바깥쪽 벽면근처에서는 하류로 나아갈수록 유속이 감소하는 형태를 보여주고 있다.

Fig. 9는 유량조건 $Q=316\text{m}^3/\text{hr}$ 일 때 중앙단면에서 측정된 속도장 결과인 Fig. 7(d)로부터 몇 개의 스

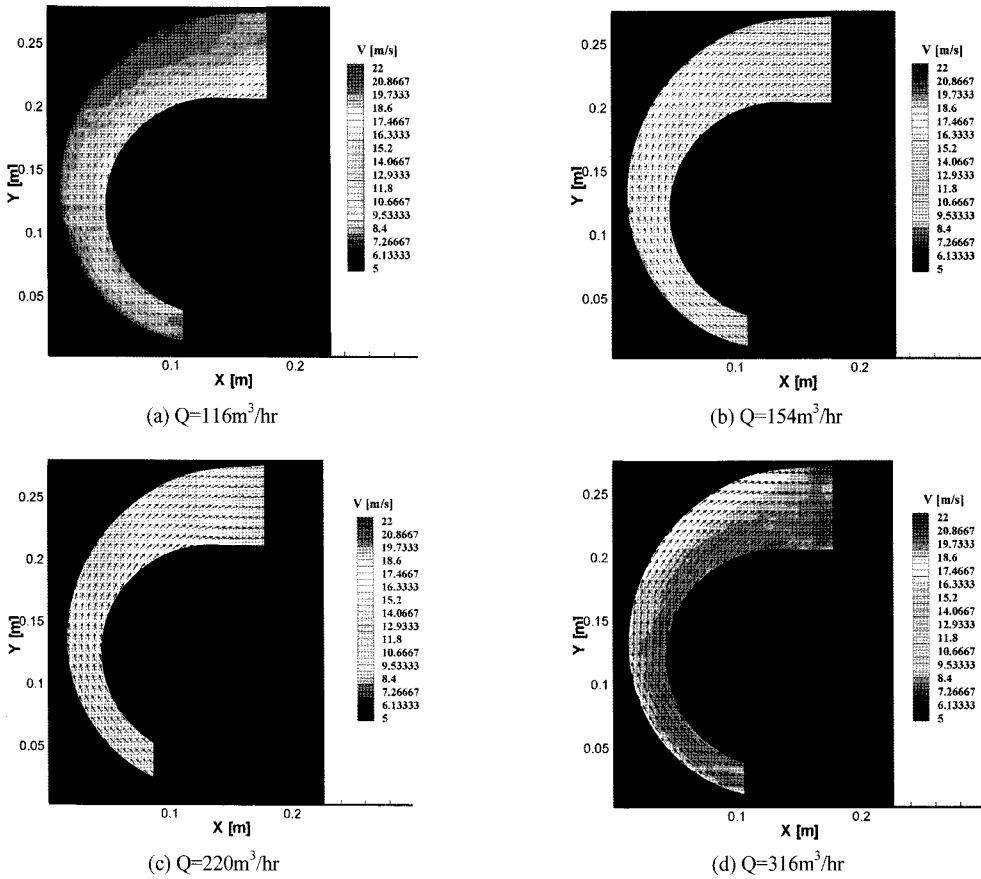


Fig. 8 Mean velocity field in the hub section at $z/w=0.04$

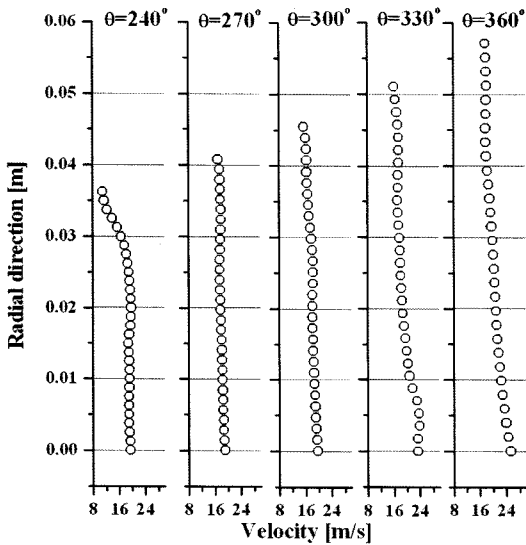


Fig. 9 Variation of velocity profile in the center plane for $Q=316\text{m}^3/\text{hr}$

크롤 각도(θ)에서의 반경방향 속도분포를 추출하여 나타낸 것이다. 여기서 보면 모든 위치에서의 블레이드 팁 부근 영역에서 빠른 속도를 가지며, 스크롤 바깥쪽 벽면 부근에서 상대적으로 낮은 속도값을 가지고 있다. 스크롤 각도가 $\theta=240^\circ$ 인 위치에서는 스크롤 관로의 안쪽 2/3 구간에서 비슷한 속도값을 가지다가, 바깥쪽 벽면근처에서 유속은 급격히 감소하였다. 이것은 이 영역에서 블레이드를 벗어난 공기유동이 팬의 원심력에 의해 스크롤 벽면에 부딪히면서 유체가 가진 에너지 일부를 상실하기 때문으로 보인다. 그러나 스크롤 관로가 넓은 $\theta=300^\circ, 330^\circ$ 그리고 360° 영역에서는 유동이 스크롤 벽면 형상을 따라 유연하게 하류로 나아가므로 급격한 에너지 감소는 발생하지 않는 것으로 판단되어 진다. 블레이드 끝단 부근에서의 유속은 스크롤 각도 $\theta=240^\circ$ 에서 약 20m/s 이며, $\theta=360^\circ$ 일 때는 약

26m/s로 증가하였다. 이것은 회전하는 블레이드를 통해 유체의 에너지가 지속적으로 유입되기 때문으로 생각되어 진다. 이를 스크롤 각도에서 바깥쪽 벽면근처에서의 속도값은 유연하게 약 11m/s, 18m/s로 상대적으로 작은 값을 가졌다.

Table 2는 PIV로 측정된 속도장 결과와 피토포관으로 측정된 속도값을 비교한 결과이다. 전체적으로 5%이하의 오차를 가지나 작은 스크롤 각도 하에서 상대적으로 큰 오차율을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 스크롤 내부 주유동 속도에 대한 팬 내부로 들어오는 유동의 z축 방향 속도 성분의 비가 상대적으로 커서 복잡한 3차원 유동이 형성되고 이에 따라 큰 측정오차를 발생시키는 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of PIV results and Pitot tube data

Scroll angle	PIV	Pitot tube	Error (%)	
360°	z/w=0.95	17.0	17.5	2.9
	z/w=0.58	16.4	17.1	4.1
	z/w=0.04	14.5	14.8	2.0
300°	z/w=0.95	18.0	19.0	5.3
	z/w=0.58	15.4	16.1	4.3
	z/w=0.04	15.0	15.9	5.7

4. 결론

PIV 속도장 측정시스템을 이용하여 실제 자동차와 동일한 조건하에서 HVAC 공조시스템의 핵심부품인 송풍장치 내부유동의 속도장을 측정하고 유동 특성을 분석한 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 스크롤 내부 흐름을 스크롤 각도, 반경방향 거리, z축 방향 위치에 따라 유동구조가 크게 변화하는 3차원 유동이며, PIV결과는 pitot관으로 측정된 속도값과 5% 범위내로 잘 일치하였다.
- 2) 블레이드 팁으로부터 나오는 유동은 나선형(spiral)형태로 스크롤 내부로 배출되며, 하류로 나아갈수록 지속적으로 블레이드로부터 유입되는 유동에 의해 유속이 증가하였다. 회전하는 블레이드에 의한 원심력에 기인하여 유체가 스크롤 외벽 쪽으로 향하게 되며, 스크롤 외벽 부근의 영역에서는 하류로 나아감에 따라 점진적으로 유속이 감소하는 것으로 나타났다.

- 3) 회전축(z)을 따른 스크롤 내부 유속 변화는 스크롤 각도가 커질수록 증가하였으며, 특히 입구측(shroud)단면과 중앙단면 사이 구간에서 속도값이 크게 변동하였다. 이 같은 속도변동은 반경방향 거리가 증가하여 스크롤 외벽으로 나아갈수록 감소하였다.
- 4) 송풍기의 출구부에 위치한 설부는 유속을 감소시키고 송풍기 효율을 저하시키는 요인으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 자동차 핵심기반기술개발사업의 기술 개발 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) G. H. Lee, J. Y.G Park and J. H. Baek, "A Study on the Vehicle Passenger Compartment Interior Flow Simulation for the Air-conditioning Mode," Spring Conference of Proceedings, KSAE, pp.475-480, 1998.
- 2) W. H. Jeon and D. J. Lee, "A Numerical Study of the Effects of Design Parameter upon Fan Performance and Noise," Journal of Korea Fluid Machinery, Vol.2, No.3, pp.45-51, 1999.
- 3) K. H. Kim, K. C. Park and S. B. Lee, "Measurement and Prediction of Aerodynamic Noise from Siroco Fans," Journal of Korea Fluid Machinery, Vol.2, No.4, pp.57-64, 1999.
- 4) W. H. Jeon, S. J. Baek and C. J. Kim, "A Numerical Study on the Generation of Aeroacoustic Sound from Siroco Fans," Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.12, pp.42-47, 2002.
- 5) K. J. Park, S. H. Lee and B. J. Son, "A Study on Low-noise and High Efficiency Siroco Fan Development," Journal of Korea Fluid Machinery, Vol.2, No.2, pp.46-56, 1999.
- 6) E. Y. Kwon and N. H. Cho, "Experimental Study on the Mean Flow Characteristics of Forward Curved Centrifugal Fans," KSME International Journal, Vol.15, No.12, pp.1728-

- 1738, 2001.
- 7) Y. D. Choi, J. Kurokawa and J. Matsui, "Performance and Internal Flow Characteristics of a Very Low Specific Speed Centrifugal Pump," *Journal of Fluid Machinery*, Vol.128, pp.341-349, 2006.
 - 8) A. J. Pesarini, R. Bigot, V. J. Nadal Mora, C. A. D. Bernardi and P. J. Ringegni, "Theoretical Analysis Related to Aspects of the Pitot Probe Methodology in Flow Rate Determination for Blowers Performance Tests," *Flow Meas. and Instrumentation*, Vol.12, pp.373-377, 2002.
 - 9) S. J. Lee, "PIV/PTV Velocity Field Measurement Techniques-theory and Practice," PIV05 Lecture Note, POSTECH, 2005.