

PIV 유동 계측을 통한 자동차 프론트 엔드 쿨링 팩 시스템의 외부 유동특성 평가

허형석^{*1,3)} · 한창평¹⁾ · 박경석^{*2)} · 이기수³⁾ · 배석정³⁾ · 원종필³⁾

경희대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 경희대학교 테크노 공학대학²⁾ · 자동차부품연구원³⁾

PIV Analysis of the External Flow Field of Front End Cooling Pack System

Hyungseok Heo^{*1,3)} · Changpyung Han¹⁾ · Kyoungsuk Park^{*2)}

Geesoo Lee³⁾ · Sukjung Bae³⁾ · Jongphil Won³⁾

¹⁾College of Advanced Technology, Kyunghee University, Gyeonggi 449-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Gyeonggi 449-701, Korea

³⁾Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-Ri, Pungse-Myun, Chonan-Si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 7 May 2004 / Accepted 14 September 2004)

Abstract : The major trend in global automotive market is changing drastically in the way that a vehicle FECPS(Front End Cooling Pack System) is designed and manufactured as an assembly part. The system can encompass many functions, be assembled into a vehicle as a module, and reduce the production cost as well as time. The FECPS consists of an impact beam, an aluminum condenser and a radiator, a carrier and a cooling fan with a BLDC motor. In order to predict the performance of a FECPS accurately, it is essential to properly model the air flow field through various heat exchangers, such as a condenser or a radiator. In this study, the flow field of the system is measured by a PIV(Particle Image Velocimetry) system. The result is compared with that measured with multi-channel anemometer.

Key words : FECPS(프론트 엔드 쿨링 팩 시스템), Module(모듈), Cooling fan(냉각 팬), Heat exchanger(열교환기), PIV(입자영상속도계), Multi-channel anemometer(다점 풍속계), Vorticity(와도)

1. 서론

최근 세계 자동차 산업은 생산능력 확장 및 세계 자동차 수요가 둔화됨에 따른 공급과잉 및 환경규제 강화의 두 축으로 커다란 변화를 겪고 있다. 이에 대응하기 위하여 각 자동차 회사들은 국제 경쟁력 확보 및 환경규제에 대응하는 핵심 부품 및 엔진 개발에 초점을 맞추고 있다. 이에 따른 경쟁력 있는 생산규모의 확보, 안전과 환경법규 강화에 대응할 수

있는 신기술 개발, 글로벌 아웃소싱을 통한 플랫폼의 축소 및 부품의 모듈화 등의 기술개발과 원가절감 활동에 전력을 기울이고 있다. 이 중에서 모듈화는 부품 수 저감, 조립시간 단축에 따른 원가절감 및 차량개발 인력의 재배치 등의 효과가 높아 생산효율을 극대화시킬 수 있어 초미의 관심사로 부상되고 있다.^{1,2)}

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 자동차 부품의 모듈화 시스템의 하나인 프론트 엔드 쿨링 팩 시스템(FECPS: front end cooling pack system)은 자동차 전면에 위치하고 있는 충돌 빔, 알루미늄으로 제작된

*To whom correspondence should be addressed.
hsheo@katech.re.kr, ks2507@khu.ac.kr

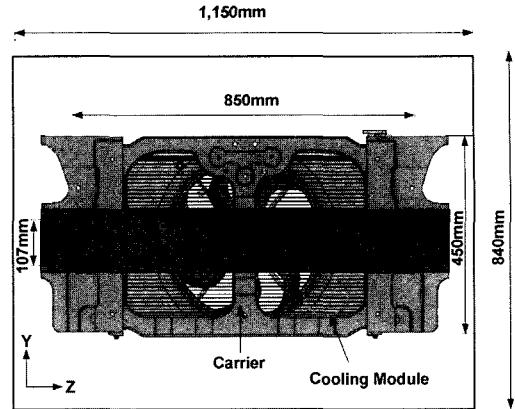
응축기 및 방열기, 이들 열교환기들을 지지해 주는 캐리어 및 BLDC 전동기(brushless DC motor)로 구동되는 냉각 팬을 하나의 모듈로 통합 설계한 것이다. FECPS는 고효율화, 경량화 측면에서 소형화를 이루고자하는 기본 설계 개념을 바탕으로 구상되었다. 또한 기존의 응축기 팬과 냉각 팬의 병렬 배치에서 단일 냉각 팬으로 방열기 뒤쪽 중심부에 장착하여 모듈의 소형화 및 부품 수 저감을 시도했다.

이러한 FECPS에 있어 실제 언더후드 환경에서의 성능을 정확히 예측하기 위해서는 응축기 및 방열기 등의 다양한 열교환기로부터 공기로의 열유속을 정확히 모델링하는 것이 필수적이다.^{2,4)} 따라서 시뮬레이션 모델은 열교환기의 외부 공기와 내부 유체의 유동장과 온도장 예측을 포함하여야 한다. 최근 차량 엔진 룸이 복잡해지고 공간이 부족해짐으로써 선진국에서는 실차 풍동(wind tunnel) 환경에서 외부 공기 유동특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 FECPS의 외부 유동장 특성 분석은 CFD 해석과 다점 풍속계를 사용하는 경우가 대부분이다.^{3,5)} 그러나 복잡한 핀 형상을 갖는 열교환기들과 팬 후류의 복잡한 유동장을 CFD 해석으로 정확히 예측하기에는 많은 어려움이 따른다. 다점 풍속계에 의한 측정의 한계와 센서에 의한 유동 교란이 발생하는 단점이 있다. 그러나 최근에 유동장 계측에 있어 입자영상속도계(PIV: particle image velocimetry)를 이용한 속도장 계측기법이 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으며,^{6,10)} 이를 통한 자동차용 냉각 팬 및 엔진 연소실 내부 유동 특성 분석에 사용되고 있다.^{7,9)}

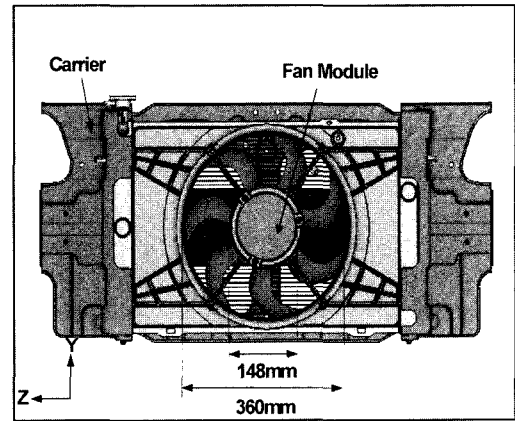
본 연구에서는 PIV 계측기법을 이용하여 풍동에서의 FECPS 외부 속도장을 측정하여 다점 풍속계에 의한 측정값과 비교하였다. 본 연구결과는 향후 실차 환경에서의 FECPS의 냉각 모듈의 열유동 성능을 예측할 수 있는 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 적용된 FECPS의 형상과 풍동에서의 장착 상태를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 실험에 적용된 FECPS는 응축기 앞에 총



(a) Front view



(b) Rear view

Fig. 1 FECPS geometry and wind tunnel test section

둘 빔이 중심부에 배치되어 있으며, 응축기와 방열기의 코어 부 치수는 590mm×390mm로 동일하며 간극은 8mm이다. 방열기 뒤쪽 중심부에 장착된 냉각 팬의 외경은 360mm, 허브의 직경은 148mm이며 블레이드의 갯수는 7개이다. Fig. 2는 FECPS 부속도장 가시화를 위한 PIV 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 풍동의 크기는 7,000mm(x)×840mm(y)×1,150(z)mm이며, 가시화 영역은 투명 아크릴로 제작하였다. Photo. 1은 실제의 PIV 실험장치의 구성을 보여주고 있다.

PIV 계측을 위한 장비는 크게 광원인 레이저, 화상을 취득하는 카메라, 그리고 레이저와 카메라를 동기시키는 동기화 장치(synchronizer)로 구성된다. PIV 계측을 위한 광원은 532nm에서 펄스당 최대에

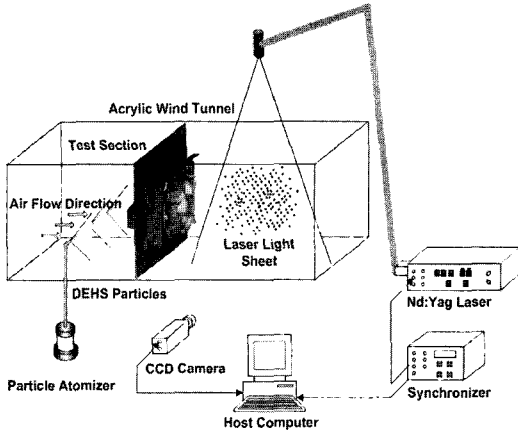


Fig. 2 Schematic diagram for PIV measurements

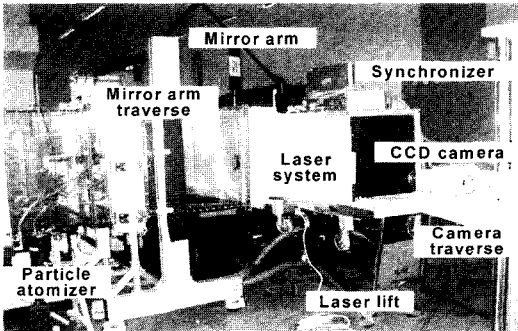


Photo. 1 Photo of PIV experimental set-up

너지가 120mj인 Nd-YAG 레이저를 사용하였다. 첫 번째와 두 번째 펄스는 Q-switch delay를 이용하여 발생된다. 레이저에서 발생된 광은 360° 회전 가능한 mirror arm의 cylindrical lens를 통해 두께 2mm 내외의 2차원 평면광으로 유동장에 직접 조사된다. 카메라는 1K×1K의 CCD 카메라를 사용하여 Photo 1에 나타낸 바와 같이 3축 이송이 가능한 이송장치(camera traverse)에 장착하여 다양한 위치에서의 2차원 화상을 취득할 수 있도록 하였다. 입자의 선별은 유동장의 속도와 계측방법에 따라 달라지며 부력 또는 침강력의 영향이 최소화 될 수 있도록 해야 한다. 또한 입자의 선별은 PIV 입자영상의 질에 중요한 영향을 미치며, 특히 개방형 풍동의 경우 실험자의 건강에도 중요한 문제가 된다. 본 연구에서는 입경이 0.2~1.1 μ m인 DEHS(di-ethyl-hexyl-sebacate)를 사용하였다. 미세 입자의 생성과 유동장에 충분

한 입자 공급을 위하여 2대의 분무기(atomizer)를 사용하였다. 분무기에는 입자의 공급량을 조절하기 위한 레귤레이터가 부착되어 있다.

다점풍속계(multi-channel anemometer)는 측정 범위가 0 - 25m/s이고, 16 채널 동시 측정이 가능한 KANOMAX 사의 M-1560을 사용하였다.

3. 계측 방법

PIV 실험은 FECPS 시스템에서 1,700rpm으로 회전하는 냉각 팬에 의해서만 외부 공기 유동장을 형성하도록 하였다. 이 회전수에서 팬의 풍량은 23 m³/min이며 회전 방향은 CCW(counter-clockwise)이다. 유동을 형성한 후에 추적입자를 유동에 주입시킨 다음 풍동의 상단에서 평면광을 조사하고, 풍동 측면에서 CCD 카메라로 화상을 취득하였다. 레이저의 첫 번째와 두 번째 펄스 간격(Δt)는 50 μ s, 펄스 폭은 25 μ s로 하였다. 또한 순간 속도장은 초당 4장씩 얻었다.

계측 영역은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 BLDC 구동기의 중심점을 좌표의 중심으로 하여 팬의 중간 단면(z=0)과 즉 좌, 우 블레이드 중간 단면(z=±127mm) 그리고 좌, 우 팁(z=±190mm) 단면의 총 5개의 단면에서 측정하였다. 전체 측정영역(400mm×600mm)을 100mm×100mm 크기의 24개 구간으로 나누어 속도장을 측정하였다. 또한 조사구간(interrogation size)은 32 pixel × 32 pixel로 하였고, 50%

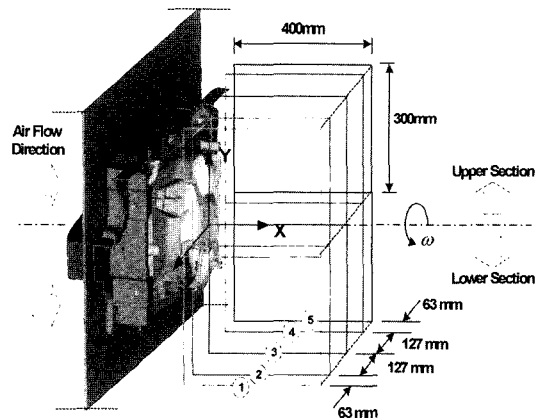


Fig. 3 PIV measurement planes of FECPS external flow

overlapping하여 각 조사구간내 평균 속도를 상호상관법으로 추출하였다. 최종적인 속도장은 24개 영상에서 얻은 속도장들을 합성하여 하나의 단면에 대한 속도장 결과가 얻어진다. 속도 벡터의 정량화는 실제 차원의 이미지를 획득하여 입자의 변위 정보로 제공하고, 시간 간격, Δt 로 나누어 계산하였다.

Photo. 2는 다점 풍속계를 이용한 속도 측정 장치를 나타낸 것이다. 다점 풍속계의 프로브를 PIV 계측시 미소 계측 영역의 중앙부에 위치시켜 총 120개소에서 측정하였다.



Photo. 2 Photo of multi-channel anemometer experimental equipment

4. 결과 및 고찰

Figs. 4-6은 PIV와 다점 풍속계로 측정된 속도의 크기를 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과는 PIV 계측과 다점 풍속계 모두 400개의 계측 데이터를 평균하여 나타낸 것이다. 계측 결과를 보면 PIV와 다점 풍속계로 계측한 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 후류 쪽으로 갈수록 속도가 감소하고 있으며, 좌측 블레이드 중간면(Fig. 5)에서의 속도가 우측 블레이드 중간면(Fig. 6) 보다 다소 크게 나타났다. 이는 반시계 방향으로 회전하는 팬의 우측 블레이드에 의한 회전방향 속도성분이 좌측 블레이드 후류에 영향을 주기 때문이다.

Figs. 7-11은 각 계측 영역에서의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 이것은 400개의 순간 속도장을 앙상블 평균한 시간 평균 속도장이다. 이 속도장 결과를 보면 팬의 회전 방향에 따른 전반적인 속도 패턴과 정량화된 속도 크기를 파악할 수 있다. CCW 방향으로

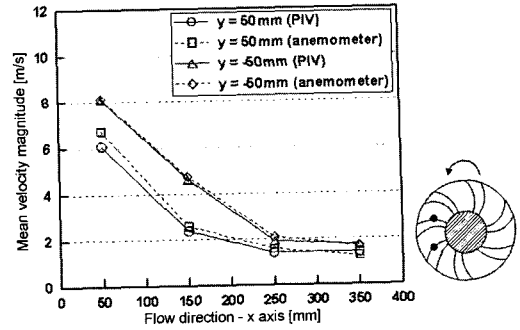


Fig. 4 Mean velocity magnitude (z surface : ②)

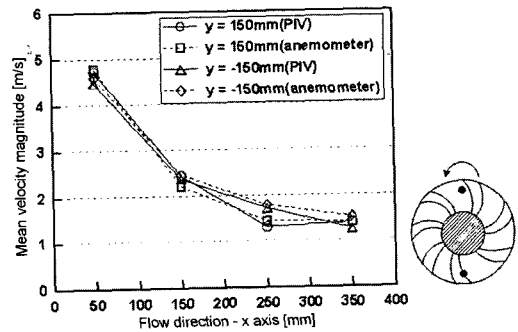


Fig. 5 Mean velocity magnitude(z surface : ③)

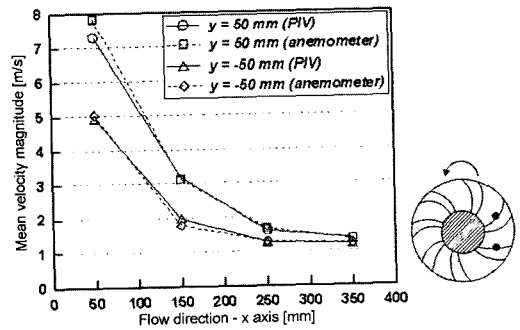
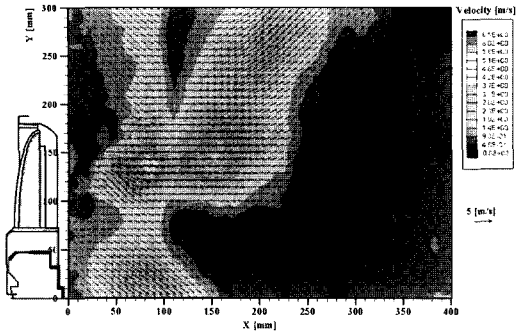


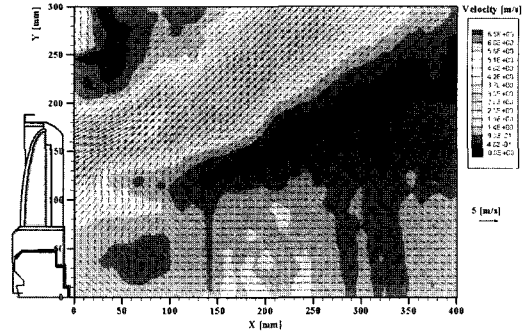
Fig. 6 Mean velocity magnitude(z surface : ④)

회전하는 팬의 특성상 좌측 블레이드와 팁의 하단부(Figs. 7-8(b))에서는 아랫방향으로 향하는 속도 성분이 강하게 나타나고, 우측 블레이드와 팁의 상단부(Figs. 10-11(a))에서는 위 방향으로 향하는 속도 성분이 크게 나타나고 있다. 팬의 중심 단면(Fig. 9)의 상단부에서는 유동이 위 방향으로 향하고 하단부에서는 아래 방향으로 향하는 특성을 보여주고 있으나 블레이드 중심단면 보다는 상승 및 하강 각도가 작게 나타나고 있다. 전체 계측 영역에서 후류

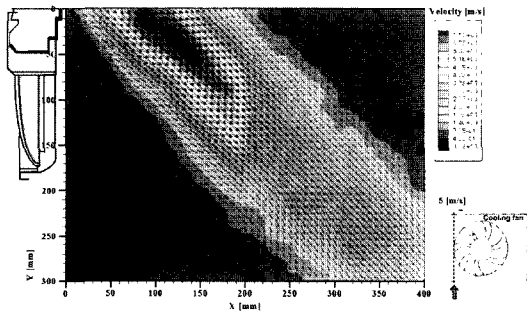
PIV Analysis of the External Flow Field of Front End Cooling Pack System



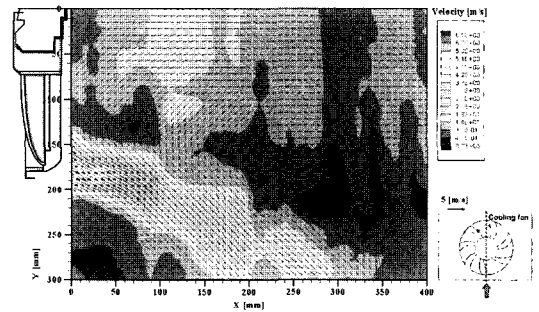
(a) Upper section



(a) Upper section



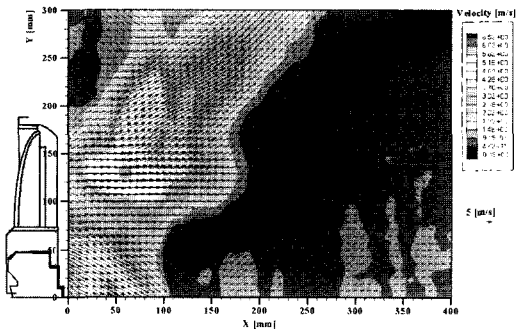
(b) Lower section



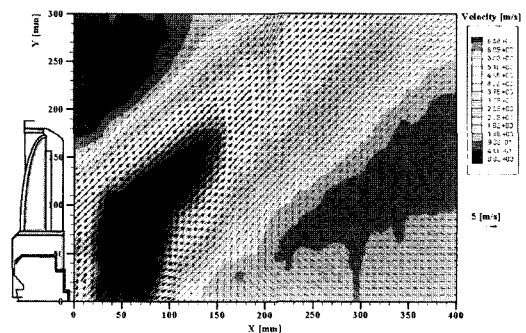
(b) Lower section

Fig. 7 Mean velocity fields in the tip section of left blade(①)

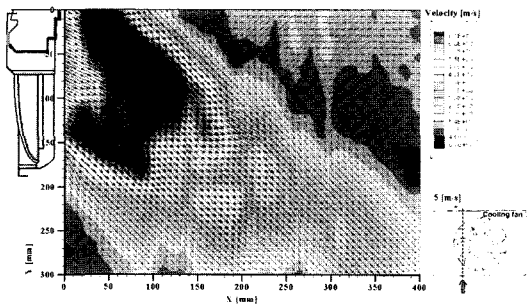
Fig. 9 Mean velocity fields in the FECPS mid section(③)



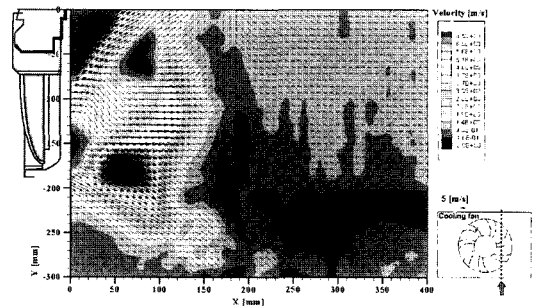
(a) Upper section



(a) Upper section



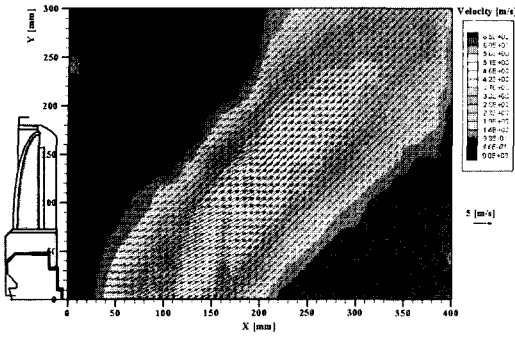
(b) Lower section



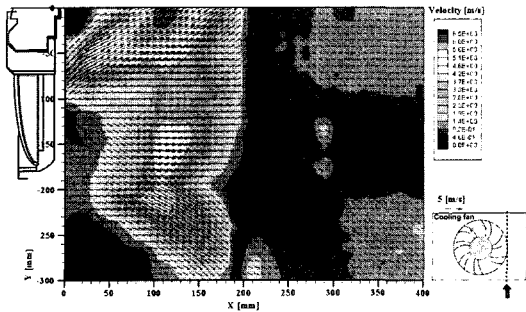
(b) Lower section

Fig. 8 Mean velocity fields in the mid section of left blade(②)

Fig. 10 Mean velocity fields in the mid section of right blade(④)



(a) Upper section

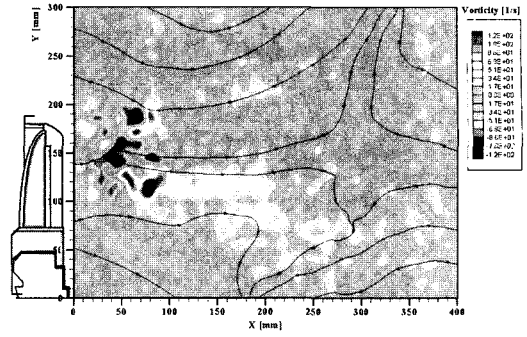


(b) Lower section

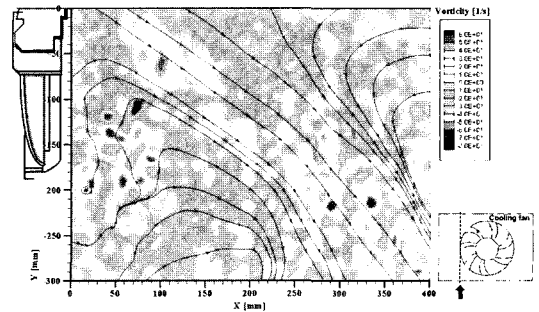
Fig. 11 Mean velocity fields in the tip section of right blade(⑤)

쪽으로 갈수록 속도가 감소하며, 최대 속도는 약 7 m/s으로써 좌측 블레이드 단면의 하단부와 우측 블레이드 단면의 상단부에서 나타나고 있다.

Figs. 12-16은 속도장 결과로부터 계산한 와도와 유선을 동시에 나타낸 것이다. 와도의 강도는 팬 소음 발생에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 팬 설계에 있어 유동 패턴과 함께 중요한 설계 인자이다. 전체적으로 와도 발생은 허브 근처(Fig. 14)에서 많고, 좌측 블레이드 중간면의 상단부에서 그리고 우측 블레이드 중간면의 하단부에서 와도의 크기가 가장 크게 나타나고 있다. 그러나 1K×1K 카메라 100mm×100mm의 큰 영역으로 측정시 공간 해상도가 떨어져 상대적으로 크기가 작은 tip vortex를 제대로 추적하지 못하고 있는 것으로 판단된다. 팬 중심 단면에서 계측한 속도장 결과를 보면 유동이 허브 쪽으로 역방향으로 흐르다가 허브 중심에서 상단부는 다시 위 방향으로, 하단부는 아랫방향으로 방향 전환을 하여 후류 쪽으로 재순환되어 나아가는 속도성분이 강하게 존재함을 알 수 있다. 이러한 재순환 영역은 블레이드와 팁 부근에서도 나타나는데

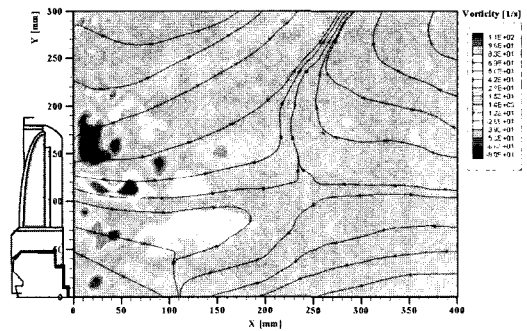


(a) Upper section

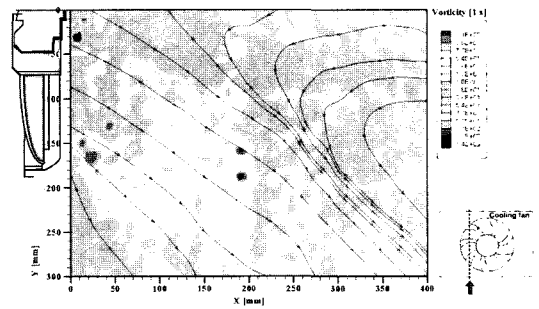


(b) Lower section

Fig. 12 Mean vorticity fields in the tip section of left blade(①)



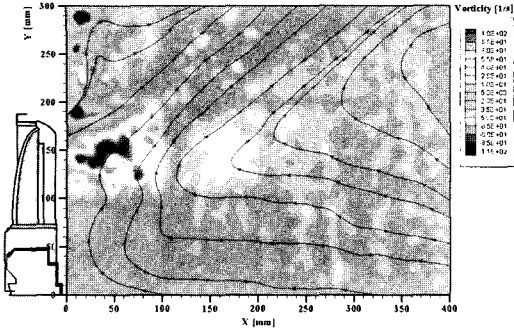
(a) Upper section



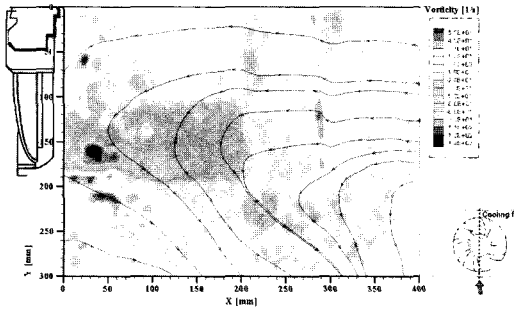
(b) Lower section

Fig. 13 Mean vorticity fields in the mid section of left blade(②)

PIV 유동 계측을 통한 자동차 프런트 엔드 쿨링 팩 시스템의 외부 유동특성 평가

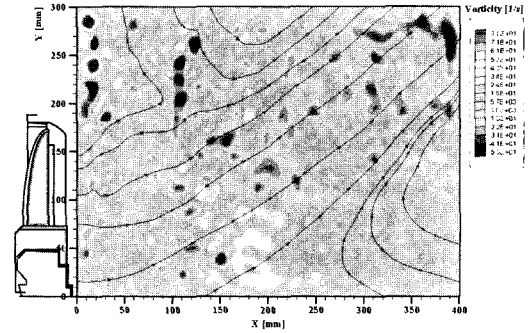


(a) Upper section

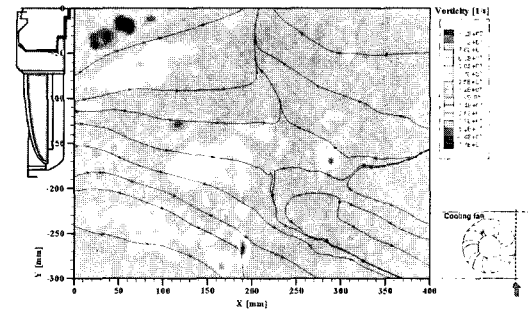


(b) Lower section

Fig. 14 Mean vorticity fields in the FECPS mid section(③)

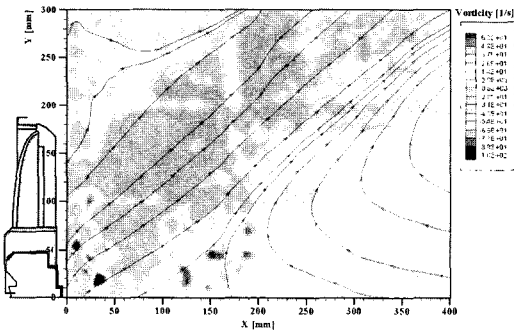


(a) Upper section

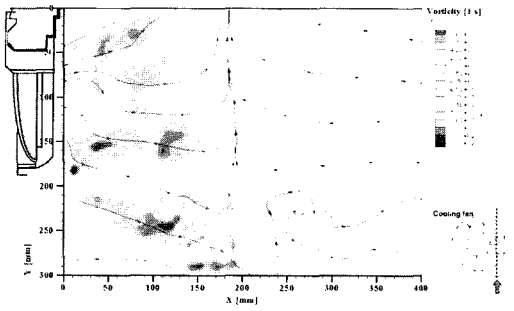


(b) Lower section

Fig. 16 Mean vorticity fields in the tip section of right blade(⑤)



(a) Upper section



(b) Lower section

Fig. 15 Mean vorticity fields in the mid section of right blade(④)

속도성분이 강하게 나타나는 영역을 제외한 저속 영역에서는 심한 재순환 영역이 존재함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 PIV 계측기법을 이용하여 풍동 내부에 설치한 자동차 FECPS 외부 속도장을 측정하여 다점 풍속계로 측정된 결과와 비교하였다. 본 연구결과는 향후 FECPS 냉각 모듈의 정확한 열유동 성능 예측과 실제 차량의 운전조건에서 팬의 성능과 소음 예측에 기초 자료로 사용될 수 있으리라 판단된다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) PIV로 측정된 FECPS 외부 유동의 속도와 다점 풍속계로 계측한 속도는 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.
- 2) 블레이드 중간 단면에서의 유동 패턴은 팬의 회전방향(CCW)에 영향을 받아 좌측 블레이드 하단부의 경우 아래방향, 그리고 우측 블레이드 상단부의 경우에는 위 방향으로의 속도 성분이 강

하게 나타났다.

- 3) 최대 속도 벡터는 좌측 블레이드 중간면의 하단부와 우측 블레이드 중간면의 상단부에서 최대 속도 벡터 영역이 존재하였다.
- 4) FECPS 중간 단면에서는 후류 쪽에서 허브 중심을 향하여 움직이는 속도 성분이 강하게 나타나며, 이 흐름은 허브 근처에서 허브 중심을 기점으로 해서 상단부는 위 방향으로 하단부에서는 아래 방향으로 방향이 전환되어 후류 쪽으로 재순환되어 나아가는 속도성분이 발생하였다.
- 5) 허브 근처에서 큰 와도의 값을 가지며 좌측 블레이드 중간면의 상단부에서 그리고 우측 블레이드 중간면의 하단부에서 와도의 크기가 큰 값을 가진다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 지원한 중기거점 연구개발 사업의 일환으로 수행된 연구의 일부로써 관계제위께 감사드립니다.

References

- 1) H. Cheron, J. Moulin and M. Orlando, "Modular Systems: A New Architecture for the Front of the Car," SAE 1999-01-0844, 1999.
- 2) N. S. Ap, P. Guerrero and P. Jouanny, "Influence of Front End Vehicle, Fan and Shroud on the Heat Performance of A/C Condenser and Cooling Radiator," SAE 2002-01-1206, 2002.
- 3) B. Uhi, F. Brotz, J. Fauser and U. Kruger "Development of Engine Cooling Systems by Coupling CFD Simulation and Heat Exchanger Analysis Programs," SAE 2001-01-1695, 2001.
- 4) P. White, J. Smith and I. Murdoch, "Cooling System Performance Evaluation," SAE 980431, 1998.
- 5) S. C. Morris, J. J. Good, J. F. Foss, "Velocity Measurements in the wake of an Automotive Cooling Fan," ETF, Vol.17, pp.100-106, 1998.
- 6) A. M. Sardar, W. K. George, J. R. Sonnenmeier and S. Woodward, "Flow Visualization Study of an HVAC Module Operated in Water," SAE 2001-01-1702, 2001.
- 7) J. H. Choi, H. B. Kim, S. J. Lee and I. S. Lee, "Velocity Field Measurement of Flow Around an Axial Fan Using a Phase Averaged 2-Frame PTV Technique," KSME, Vol.24, pp.114-123, 2000.
- 8) M. Inoue and M. Kuroumaru, "Three Dimensional Structure and Decay of Vortices Behind an Axial Flow Rotating Blade Row," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.106, pp.561-569, 1984.
- 9) K. H. Lee, C. S. Lee, H. G. Lee, M. S. Chon and Y. C. Joo, "Spatial Analysis of Turbulent Flow in Combustion Chamber Using High Resolution Dual Color PIV," Transactions of KSAE, Vol.6, pp.132-141, 1998.
- 10) A. Boillot and A. K. Prasad, "Optimization Procedure for Pulse Separation in Cross-Correlation PIV," Exp. in Fluids, Vol.21, pp.87-93, 1996.