

<일반기사>

## 열 및 물질 제어 실험실 (Heat and Mass Control Laboratory)

고한서

성균관대학교 기계공학부 교수

### 1. 서 론

열 및 물질 제어 실험실은 2001년에 개설 후 열전달 및 유체역학의 현상을 유동 가시화 실험에 의해 분석하는 연구들을 수행해오고 있으며, 보다 다양한 현상의 분석을 위해 수치해석 프로그램을 이용한 연구도 병행하고 있다. 본 실험실은 유동 가시화 실험을 위해 Particle Image Velocimetry (PIV), Digital Speckle System, Mach-Zehnder Interferometry, Phase Doppler 등을 보유하고 있으며, 온도 분포 측정을 위해 Infrared (IR) Camera와 Thermo-chromic Liquid Crystal (TLC) 등을 사용하고 있다.

본 실험실은 현재 박사과정생 2명과 석사과정생 5명으로 구성되어 있으며 일본의 University of Tokyo, 미국의 Johns Hopkins University, University of Cincinnati 등과 국제공동연구를 지속적으로 수행해 오고 있다. 본 실험실에서는 첨단 유동가시화 기술 개발을 위한 창의적인 국가 과제뿐만 아니라 기업체 과제들도 활발히 수행함으로써 실제 산업 현장에서 사용되

는 유동 분석 기술 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

### 2. 주요 연구내용

본 연구실에서 수행한 주요 국가 과제 및 산업체 과제를 표 1과 2에서 볼 수 있다.

#### 2.1 디지털 스펙클 토모그래피와 입자 영상 유속계에 의한 밀도장 및 속도장 동시 측정에 관한 연구

고속으로 분출되는 이산화탄소 유동의 속도장과 밀도장을 동시에 측정하기 위하여 Pulsed Nd:YAG Laser와 Continuous Nd:YAG Laser, 그리고 3대의 고속카메라를 이용하여 디지털 스펙클 시스템과 입자 영상 유속계 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 유동장이 비대칭 비정상이므로 토모그래피를 사용하여 스펙클 이동거리로부터 밀도장을 재건하였고, 2/15,000초 간격으로 얻어진 영상으로부터 상호상관법에 의해 속도장을 계산하였다. 노즐이 분사된 후 29/15,000초와

**표 1.** 본 연구실 수행의 주요 국가 과제

시행부처/기관 (프로그램명)	과 제 명	기간
교육부/학술진흥재단 (신진교수과제)	3차원 밀도 분포 분석을 위한 레이저 간섭계와 디지털 스펙클 토모그래피의 동시 측정에 관한 연구 (연구책임자)	2001. 10-2002. 9
과기부/과학재단 (젊은과학자과제)	광학기법을 이용한 기계장치 내부의 열유동 정밀 분석에 관한 연구 (연구책임자)	2003. 7-2006. 4
과기부/과학기술평가원 (프론티어과제)	정전기력을 이용한 나노 Jetting 기술 개발 (연구책임자)	2004. 4-2005. 3
교육부/학술진흥재단 (협동연구과제)	친수성/소수성 표면에서의 마이크로/나노 스케일 유동 특성 연구 (연구책임자)	2005. 12- 2007. 11
국방과학연구소 (기초연구과제)	복합구조체 및 유동체(DF)의 열전달 동특성 연구 (연구책임자)	2006. 6 - 2011. 12
교육부/학술진흥재단 (협동연구과제)	정전기장 유도에 의한 Drop-on-Demand 마이크로/나노 액적 형성과 분리에 관한 원리 규명 및 모델링 (공동연구원)	2008. 7- 2009. 6
한국기계연구원	비접촉식 박막 프린팅 핵심요소 공정기술 (공동연구원)	2009. 1 -2009. 12
교과부/과학창의재단	룸에어컨에서 토출되는 냉기 유동 분석을 위한 가시화 기법 개발 (연구책임자)	2009. 5 - 2010. 3
교과부/과학재단 (일반연구과제)	노즐로부터 분무된 마이크로 액적의 거동 분석을 위한 3차원 토모그래피 기법 개발 및 적용 (연구책임자)	2009. 5 -2011. 4

표 2. 본 연구실 수행의 주요 산업체 과제

지원기관	과제명	기간
삼성전자	로터리 압축기 내부 Oil순환 Mechanism 분석 (연구책임자)	2002. 9- 2005. 8
두산메카텍	CNC공작기계의 열응력 및 열분포 해석에 관한 연구 (연구책임자)	2003. 1- 2005. 7
삼성전자	LCD TV 전극부의 비접촉식 온도 측정 및 LCD모니터의 열분포 분석 (연구책임자)	2003. 1- 2006. 9
삼성중합기술원	Speckle pattern의 정상적 측정 방법 제안과 측정 시스템 구성에 관한 연구개발 (연구책임자)	2003. 6- 2004. 9
삼성전자	Reciprocating Compressor Oil 급유해석 및 설계기술 (연구책임자)	2004. 9-2007. 3
두산중공업	유동가시화를 이용한 저압 응축증기 터빈내의 물성치 분석 (연구책임자)	2005. 1-2005. 12
삼성전기	미세배선을 위한 jetting 시스템 (공동연구원)	2005. 3-2006. 2
삼성전자	황류팬 내부 유동가시화 및 저소음 형상 개발 (연구책임자)	2005. 10-2008. 4
삼성전자	냉장고 냉매 2상 유동 소음 저감에 관한 연구 (공동연구원)	2008. 7-2009. 6
삼성전자	프린터 기내 온도/오염 저감을 위한 방열/유로 설계 (연구책임자)	2009. 7-2010. 6

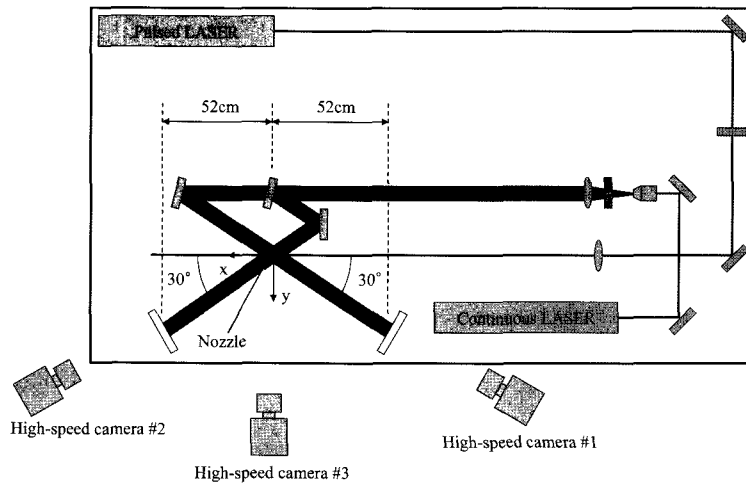


Fig. 1. Optical setting for digital speckle system and PIV.

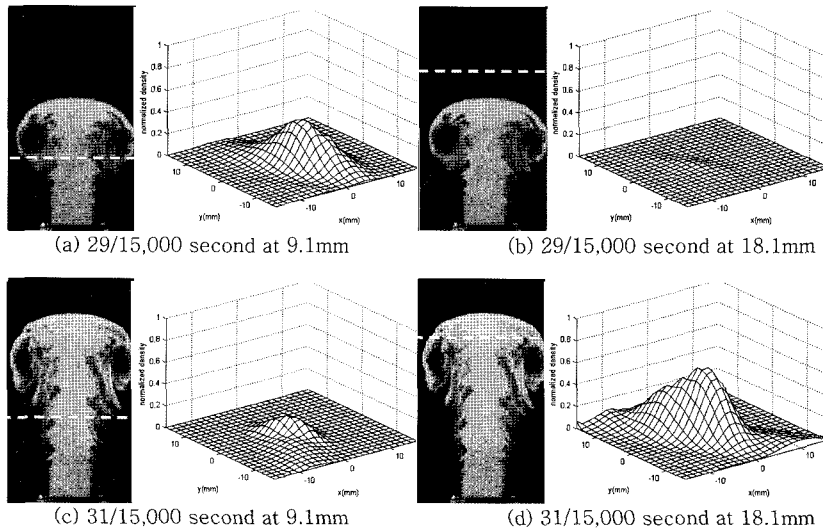


Fig. 2. Reconstructed density distributions with height and time variation for high-speed CO<sub>2</sub> flow.

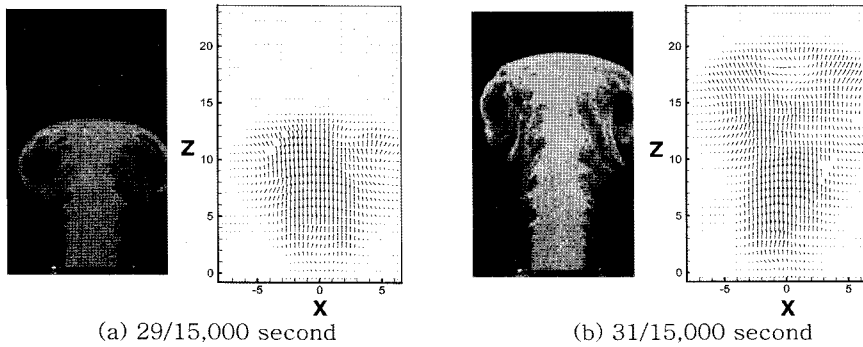


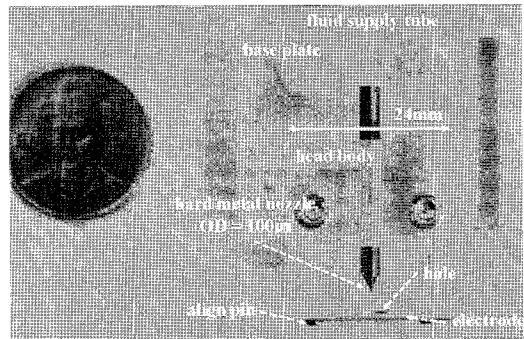
Fig. 3. Measured PIV images and velocity distributions with time variation for high-speed CO<sub>2</sub> flow

31/15,000초가 지났을 때 노즐로부터 9.1 mm와 18.1 mm 떨어진 지점의 상대 밀도장을 Fig. 2에서 보여주고 있다. Fig. 3는 동시에 얻어진 영상으로부터 계산된 29/15,000초와 31/15,000초 시점에서의 속도장을 나타내고 있다. 본 연구를 통하여 초고속 비대칭 비정상 유동장에서 밀도장과 속도장의 동시 재현이 가능함을 알 수 있었다.

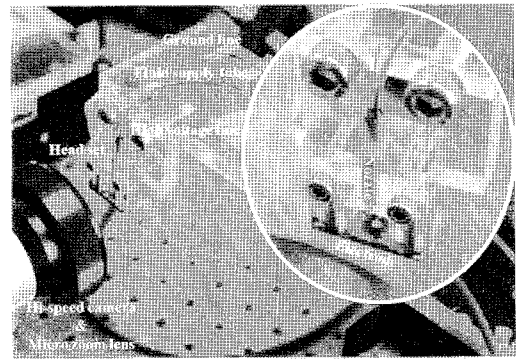
2.2 정전기적 액적의 토출 메커니즘 분석

향후 다양한 분야에서의 실제적인 활용을 위해 노즐과 전극이 하나의 몸체로 구성된 일체형 구조를 가지는 전기수력학 (Electrohydrodynamic; EHD) 제트 (Fig. 4)를 설계하여 제작하였다. 전기수력학 제트 싱글 헤드는 초경 정밀 노즐, 액체 공급 관, 구멍이 뚫린 전극과 이 부품들의 위치를 정밀하게 고정시켜주는 바디로 구성되어 있다. 전극의 경우 액적의 형성 및 토출을 위해 충분한 크기를 가지고 있으며 형성된 액적이 대상 물체에 도달하도록 하기 위해 정 중앙에 구멍을 설치하여 통과하도록 하였다. 전기수력학 제트 싱글 헤드는 정밀한 위치 제어 및 토출 현상의 정확도를 높이기 위하여 정밀 가공된 초경 노즐을 사용하였으며, 전기수력학 분무 특성상 노즐 외경 보다 훨씬 작은 수  $\mu\text{m}$  크기의 액적의 토출도 가능하다. 또한 반복된 토출로 인한 노즐의 오염을 방지하고자 테플론 재질로 코팅하여 소수성 특성을 가지도록 하였다.

실제 정전기장 잉크젯 헤드로서의 가능성을 파악하기 위해 Fig. 5에서 보는 것과 같이 drop-on-demand 실험을 수행하였다. Drop-on-demand 방식의 토출은 원하는 순간에만 액적을 토출하는 것으로서 잉크젯 헤드분야에서 필히 요구되는 성능 중 하나이다. 이를 위해 1.4 kV의 직류 전압으로 액체의 메니스커스를 긴장



(a) Head set part



(b) Head system

Fig. 4. Experimental setup for hard metal precision nozzle

시키고 원하는 순간에 액적을 토출하기 위해 1.1 kV의 구형파 교류 전압을 추가하여 실험하였다. 따라서 낮은 전압이 1.4 kV, 높은 전압이 2.5 kV에 이르는 파형을 형성하고 있다.

2.3 친수성/소수성 표면 처리된 마이크로 채널에서의 유동 제어에 관한 연구

본 연구에서는 표면 에너지가 변화하는 채널 벽면에

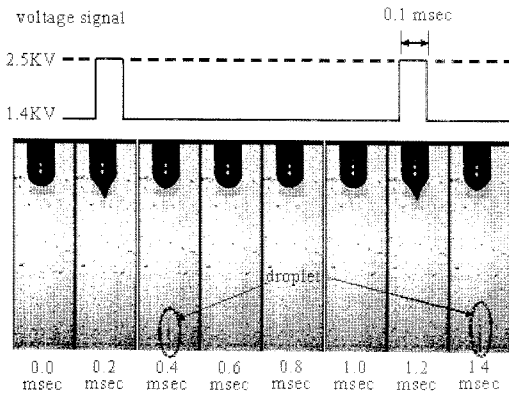


Fig. 5. Drop-on-demand ejection phenomena from EHD jet

서 계면의 변화를 관찰하기 위한 유동 실험과 그에 따른 유동의 속도장을 분석하기 위한 마이크로 PIV (Particle Image Velocimetry) 실험을 진행하였다. 유동 계면의 형태 변화를 보기 위해서 유동 진행 방향을 변화시켜가며 실험을 진행하였으며, 표면 특성이 바뀌는 영역에서의 유동 계면 변화를 관찰하기 위해서 고속카메라를 이용하여 마이크로 채널의 중심부를 촬영하였다. 제작된 마이크로 채널 양 끝단에 테플론 튜브를 Fig. 6과 같이 각각 연결하고, 튜브가 연결된 마이크로 채널을 슬라이드 글래스 위에 올려놓은 후, 에폭시를 이용하여 접착시켰다. 채널의 좌측 끝단에 연결된 테플론 튜브의 반대쪽에 주사기 펌프를 연결시켜서 작동 유체를 유입시켰으며, 유입된 작동 유체는 채널의 우

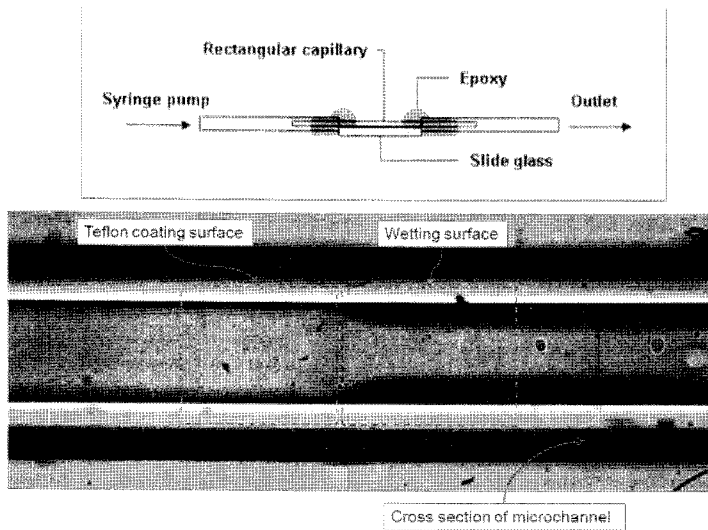


Fig. 6. Photograph of micro-channel with hydrophobic/hydrophilic coatings

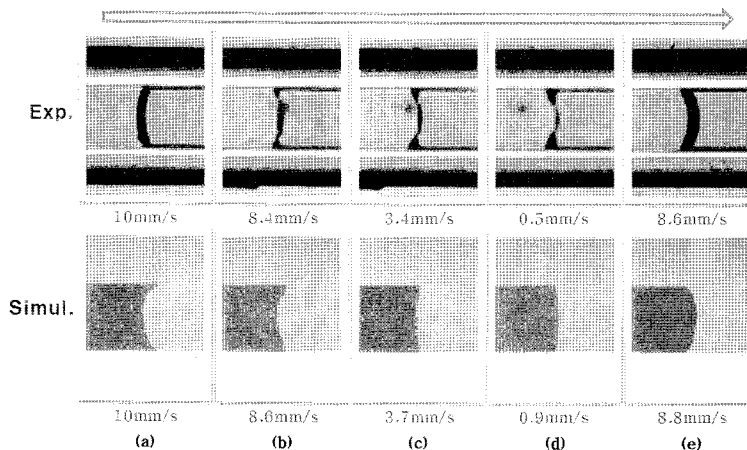


Fig. 7. Meniscus movement across interface for flow from hydrophilic to hydrophobic surface

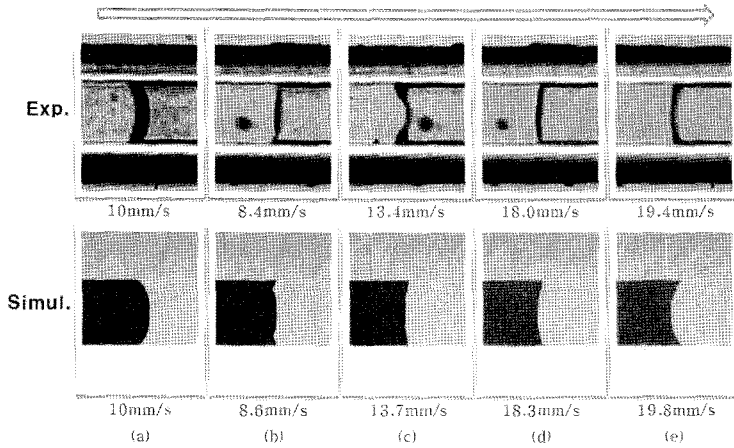


Fig. 8. Meniscus movement across interface for flow from hydrophobic to hydrophilic surface

측 끝에 연결되어 있는 테플론 튜브를 통해 배출 장소로 빠져나갈 수 있도록 하였다. 위와 같은 설정으로 친수성 표면으로 유체가 유입되어 소수성 표면으로 유출이 되는 실험 (Fig. 7)을 실시하였고, 동일한 설정으로 반대의 경우인 소수성 표면으로 유체가 유입되어 친수성 표면으로 유출이 되는 실험 (Fig. 8)을 실시하였다.

**2.4 LCD Module의 열분포 분석 및 내부 유동 해석**

LCD TV는 그 크기가 경박 단순해지면서 내부의 전자부품에서 발생하는 고발열 때문에 휘도 저하 및 수명 감소 등과 같은 열적인 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이므로 본 연구에서는 다양한 TFT-LCD를 연구대상으로 LCD module의 내부 온도를 측정하고 내부 유동 형태를 분석하였다. 또한, LCD TV의 방열 효율 향상을 위해 인버터와 LCD 모듈의 이격 간격 및 이격 각도를 조절하고 인버터 위치를 변경하며 실험을 시행하였으며, Bottom chassis에 공기 입출구를 생성하여 방열 효율 향상을 관찰하였다. 본 연구에서는 TV 표면의 전체적인 온도 분포 및 열전달 추이를 관찰하기 위해서 열화상 카메라를 사용하였고 기준 온도를 측정하기 위해서 열전대를 사용하였다. Fig. 9은 실험 장치 구성도를 나타내고 있다. 주변의 온도, 습도 조건을 일정하게 조성하기 위하여 온도 및 습도를 조절할 수 있는 항온·항습조를 제작하였다. 열화상 카메라에 의해 측정된 TV를 켜 후 90분 정도가 경과한 후의 LCD TV 표면 온도를 Fig. 10에서 보여주고 있다.

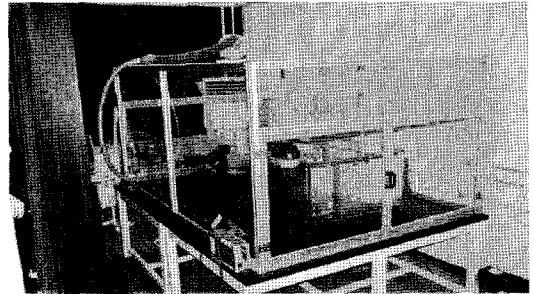


Fig. 9. Photograph of experimental setup for LCD TV

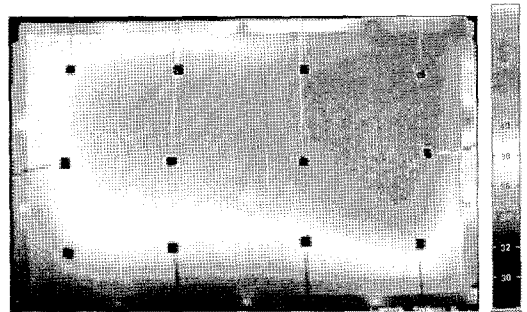


Fig. 10. Temperature distribution of front panel for LCD TV by IR camera

**2.5 룸에어컨 유동 분포 분석에 관한 연구**

개인 공간을 중요시하는 현대인의 생활 문화로 인하여 룸 에어컨(RAC: Room Air Conditioner)의 보급이 점차 확대됨에 따라 냉난방이 가능하면서도 온도, 습도, 기류를 종합적으로 제어하여 쾌적 영역을 증대시키는 고효율 에어컨에 대한 연구를 본 실험실에서 수

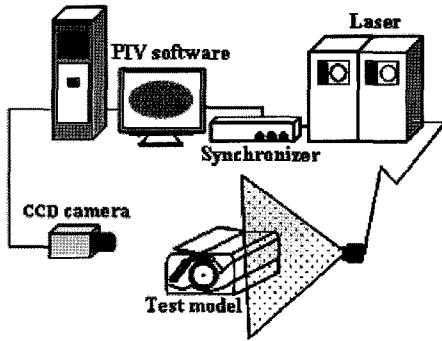


Fig. 11. Schematic diagram of PIV system for room air conditioner

행하였다. 본 연구에서는 PIV(Particle Image Velocimetry)와 Pitot tube를 이용하여 RAC 토출구의 속도 분포 측정을 수행하였고, 수치해석에 의해 유동 해석 모델을 개발하여 RAC 내부의 유동 분포를 분석하였다. 본 연구에 사용된 실험 기법인 PIV System은 Fig. 11과 같다. 광원인 레이저와 입자영상을 취득하는 카메라, 레이저와 카메라를 동기화해주는 동기화장치, 영상처리 및 후처리과정을 하는 컴퓨터로 구성된다. 레이저는 50 mJ의 dual-head Nd-Yag 레이저를 사용하였고, 유동 조건에 따라 Laser 펄스의 시간간격( $\Delta t$ )은 10~100  $\mu s$ 으로 설정하였다.

토출 영역에서의 유동 분포를 PIV (Fig. 12) 및 Pitot tube 실험을 통하여 확인하였다. 근거리에서 속도의 고저현상이 뚜렷이 일어날 경우 압력 차로 인하여 파동(Fluctuation) 현상이 일어나게 되어 유동소음 발생과 토출 유동의 효율을 저감시키는 원인을 제공할 수 있다는 사실을 확인하였다. 실험으로 분석된 유동 분포를 통하여 토출 유동의 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 인자를 확인하면 앞으로 개발될 RAC의 설계조건으로 활용할 수 있음을 검증하였다.

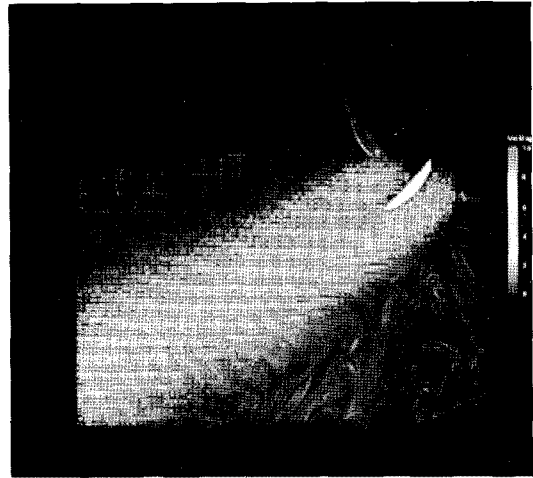


Fig. 12. Velocity distribution for room air conditioner by PIV

### 3. 맺음말

성균관대학교 열 및 물질 제어 실험실은 새로운 열 유동 가시화 기법을 개발하여 자연 현상 및 산업 현장에서 일어나는 다양한 열유동 제어 문제를 해결하고자 노력하고 있으며, 기존에 개발된 유동 가시화 기법을 새로운 분야에 적용하는 연구도 병행하여 수행하고 있다. 따라서, 다상 유동, 연소 현상, 마이크로/나노 유동의 정밀 분석을 위한 가시화 기법 개발뿐만 아니라 압축기, 공작기계, LCD, 증기터빈, 룸에어컨, 냉장고, 프린터 등과 같이 실제 가정 및 산업 현장에서 많이 쓰이는 제품에 다양한 가시화 기법을 적용하여 에너지 효율 및 성능 향상을 달성하기 위한 연구도 활발히 수행하고 있다. 또한, 다양한 조건에서의 열유동 현상 분석을 수치적으로 해석하기 위한 각종 프로그램을 개발하여 전산 열유동 해석 분야에서도 많은 연구 결과를 도출하고 있다.