



첨단 유동가시화 기술을 이용한 수치해석 검증용 실험

이 상 준*¹

EXPERIMENTS FOR VALIDATING NUMERICAL ANALYSIS USING ADVANCED FLOW VISUALIZATION TECHNOLOGIES

S.J. Lee*¹

Recently, several advanced flow visualization techniques such as Particle Image Velocimetry (PIV) including stereo PIV, holographic PIV, and dynamic PIV have been developed. These advanced techniques have strong potential as the experimental technology which can be used for verifying numerical simulation. In addition, there would be indispensable in solving complicated thermo-fluid flow problems not only in the industrial fields such as automotive, space, electronics, aero- and hydro-dynamics, steel, and information engineering, but also in the basic research fields of medical science, bio-medical engineering, environmental and energy engineering etc. Especially, NT (Nano Technology) and BT (Bio Technology) strongly demand these advanced measurement techniques, because it is difficult for conventional methods to observe most complicated nano- and bio-fluidic phenomena. In this paper, the basic principle of these advanced visualization techniques and their practical applications which cannot be resolved by conventional methods, such as flow in automotive HVAC system, ship and propeller wake, three-dimensional flow measurement in micro-conduits, and flow around a circulating cylinder will be introduced.

Key Words : 유동가시화(Flow Visualization), 입자영상유속계(PIV), 실험적 검증(Experimental Verification)

1. 서 론

최근 들어 컴퓨터와 전자산업의 발달과 디지털 화상처리기술의 도입으로 유동 내부 입자(particle)들의 변위(displacement) 정보를 담고 있는 유동화상(flow image)을 이용한 첨단 PIV (Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법이 개발되어 정성적인 유동정보 뿐만 아니라 정량적인 속도장 정보를 구할 수 있게 되었다. 이와 같은 정량적인 유동가시화기술은 기존의 유속측정법을 획기적으로 개선한 첨단 기술로써 난류유동 연구에 새로운 변화를 가져오고 있다. 선진국에서도 활발하게 연구 개발하고 있는 PIV속도장 측정기술의 경우, 현재 3차원 난류유동의 시간에 따른 속도의 공간적 변화를 측정할 수 있으며, 연속적으로 구한 속도장을 통계 처리하여 주어진 유동의 난류구조까지도 해석할 수 있다. 빠른 속도로 발전하고 있는 컴퓨터 및 전자기술에 힘입어 PIV 측정기법은 다양한 열

유동 문제 해석에 활용하게 되었으며, 수치해석 결과와 바로 비교 분석할 수 있는 단계에 이르렀다. 본 논문에서는 수치해석 연구의 비교 검증용으로 사용할 수 있는 몇 가지 첨단 유동가시화기법을 이용한 실험을 소개하고자 한다.

2. 첨단 유동가시화 기법 및 적용 연구

2.1 SPIV기법을 이용한 프로펠러 후류 유동장 측정

우리가 다루는 유체문제는 정도의 차이는 있지만 대부분 3차원 난류유동이다. 3차원 난류유동을 일반적인 2D PIV 속도장 측정기법으로 평면광 내부의 in-plane 속도성분을 측정하게 되면 out-of-plane 속도성분에 기인한 측정오차가 발생하게 된다. Stereoscopic PIV(SPIV)는 일반적으로 두 대의 카메라를 사용하여 레이저 평면광으로 조명된 측면단면 내부유동에 대하여 stereo matching기법으로 3차원 속도성분을 측정하게 되며, out-of-plane 속도성분은 두 대의 카메라로 측정된 평면 데이터로부터 도출하게 된다. SPIV기법에서는 측정하고자 하는 유동을 2개의 서로 다른 각도에서 관찰하여야 하는데,

¹ 정회원, 포스텍 기계공학과

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

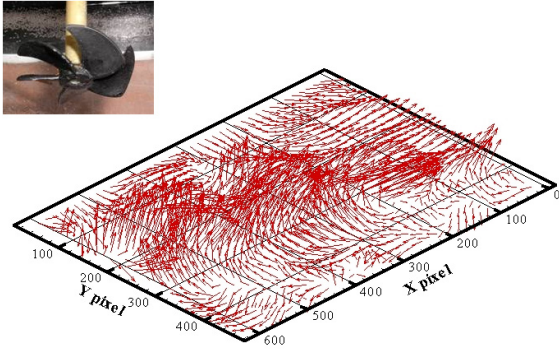


Fig. 1 Instantaneous velocity field of flow behind a rotating propeller using a stereoscopic PIV technique

stereoscopic 영상취득 방법에 따라 translation 방법과 angular displacement 방법으로 나누어진다. 먼저 카메라의 광학축(optical axes)이 측정단면에 수직인 translation 방법의 경우 보정이 간단하나 카메라 배치가 까다롭다. 반면에 angular displacement 방법은 카메라의 광학축이 측정평면과 일정 각도를 이루어 활용 용도가 넓으나 보정과정이 까다롭다. SPIV 기법은 하나의 입자 변위를 여러 대의 카메라로 동시에 촬영하여야 하므로 한 번에 구할 수 있는 속도벡터의 수가 많지 않고, 아직까지 복잡한 3차원 난류유동을 쉽고 정확하게 측정하기에는 개선의 여지가 많이 남아 있다.

본 연구실에서는 translation 배치기법으로 카메라를 설치하여 영상의 왜곡을 최소화 하였으며, 3차원 보정기법을 적용하여 굴절을 변화를 보정하였다. 수조 내부에 설치된 프로펠러 주위 유동을 레이저 평면광으로 조명하고 산란된 입자영상을 취득하고, 프로펠러의 회전 위상에 따른 위상 평균화된 속도장을 획득하였다. Fig. 1은 프로펠러 후류의 순간 속도장 결과를 보여주고 있다. 위상평균된 속도장 결과로부터, 직진 위상의 유동구조가 프로펠러의 회전에 따라 하류로 이동되어 다음 위상의 속도장 결과에 나타나는 주기적인 유동특성을 관찰하였다. 날개의 상부에는 반시계 방향으로 회전하는 끝단 와류에 기인한 양의 값을 갖는 와동이 존재하는 반면, 날개 중앙에는 음의 와도를 갖는 유동구간이 넓게 존재하고 있다.

2.2 Holographic PTV기법을 이용한 미세곡관 내부의 3차원 유동장 측정

Holographic PTV(HPTV)기법은 진정한 의미의 3차원 PIV 속도장 측정기법이다. 본 연구에서는 지금까지 밝히기 힘들었던 미세유동 분야의 3차원 속도장 측정에 HPTV기법을 이용하고자 한다. Fig. 2는 미세튜브 내부의 3차원 속도장 측정에 사용된 디지털 HPTV 시스템의 개략도이다. 일반적인 HPTV 시스템과 달리 현미경을 이용하게 되며 광원으로는 단일 광

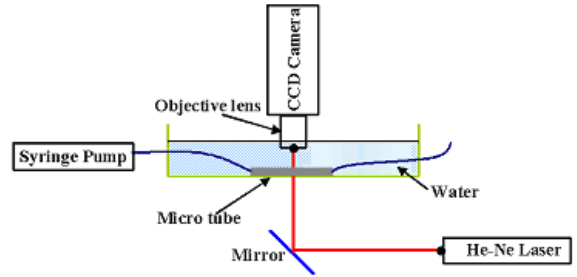


Fig. 2 Schematic diagram of digital HPTV system for measuring 3D flow inside a micro-tube

경로를 이용한 He-Ne 레이저($\lambda=633\text{nm}$)를 사용하였다. 미세튜브 내부 유동에 HPTV기법을 적용하기 위해 물과 굴절율이 같은 FEP 재질의 미세튜브를 이용하였다. 현미경에 20배 대물렌즈를 부착하였으며, 입자로써 직경이 약 $2\mu\text{m}$ 인 폴리머 입자를 사용하였다. 회전된 입자영상은 고속카메라를 이용하여 1024×512 픽셀 해상도로 초당 4,000장씩 획득하였다. 레이저의 노출시간은 약 66ns이었다. 현미경을 이용함에 따라 대물렌즈의 배율과 NA(numerical aperture)값에 따라 깊이방향의 측정영역이 정해지게 되며, 적절한 대물렌즈의 선택을 통해 $100\mu\text{m}$ 직경의 미세곡관 튜브내부 3차원 유동을 측정할 수 있었다. Fig. 3은 획득된 3차원 속도장 결과로 이론치와 매우 유사하며, 특히 미세관의 벽면 근처영역에서도 속도정보를 측정할 수 있었다. 기존의 연구에서는 약 $40\sim 60\mu\text{m}$ 의 깊이정보 밖에는 측정이 불가능하였다. 향후 본 시스템을 이용하여 지금까지 밝히기 힘들었던 다양한 미세유동의 3차원 속도장 측정에 이용하고자 한다.

2.3 주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 Dynamic PIV 속도장 측정

고속카메라와 고속 펄스레이저를 이용하여 시간에 따라 변화하는 유동의 속도장 변화를 연속적으로 측정하여 유동구조의 시공간적 변화를 측정할 수 있는 PIV기법을 Dynamic PIV라고 한다. 이 측정기법은 일반적인 PIV기법의 시간분해능에 대한 한계를 극복하여 시간에 따른 변화를 측정 및 분석함으로써 시간상의 상관관계 정보도 제공한다.

본 연구에서는 Dynamic PIV기법을 이용하여 시간에 따라 변화하는 불안정한 유동특성을 보이는 원주 후류에서의 와(vortex)유출 특성 및 주기적으로 회전진동하는 원주 후류의 유동특성을 살펴보았다. 원주에 주기적인 회전진동을 가하는 것은 능동제어기법의 일종으로 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 회전 진동하는 원주 후류의 유동특성을 정확히 이해하고 그 제어효과를 보다 명확히 밝히기 위해서는 원주 후류 유동장의 변화를 시간이 함수로 측정하는 것이 필요하다.

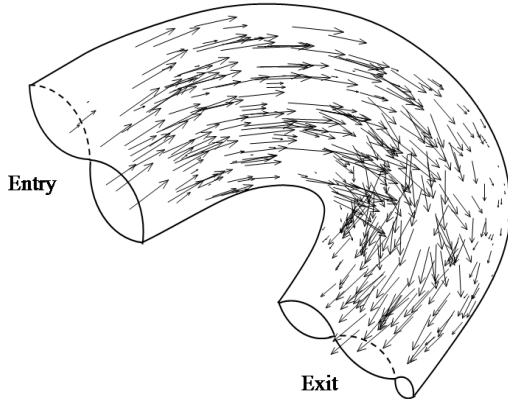


Fig. 3 Typical 3D instantaneous velocity vector field in a curved micro-tube

본 실험은 폐쇄형 아음속 풍동에서 수행되었으며 원주모델의 중형비는 13.3으로 아크릴 재질로 제작되었다. 원주 직경에 기준한 레이놀즈 수는 약 4,140이며, 자연발생 와류출 주파수는 약 15 Hz이다. 원주 후류의 속도장 측정을 위한 Dynamic PIV 시스템은 고속 펄스레이저, 고속 CMOS 카메라, 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, 레이저와 카메라는 동기장치로 동기시킴으로써 깨끗한 입자영상을 획득할 수 있었다.

회전 주파수 비가 $F_R=0.4, 1.0$ 인 경우의 원주 후류의 순간 속도장 결과를 정지된 원주($F_R=0$) 후류와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 주기 0T는 시계방향으로 회전하는 순간, 0.5T는 반시계방향으로 회전하는 순간을 의미한다. 주파수 비가 증가할수록 원주 회전방향으로의 가속과 감속이 빨라져 하류로 유출되는 와의 roll-up 현상이 원주에 가까운 위치에서 발생하게 되며 와형성 영역의 길이도 짧아지게 된다. 또한 후류의 saddle point(S) 주위에서는 하류로 발달해 나가는 vortex에 와도(vorticity)공급이 억제되는데, F_R 값이 커질수록 saddle point 위치가 원주 쪽으로 이동하게 된다. 이상의 결과를 통해 원주 부근에서 와가 빠르게 발달되고, 충분히 발달되어진 큰 규모의 와가 하류로 나아감을 알 수 있다.

2.4 자동차 HVAC 내부 유동장의 PIV 계측

차량 내의 온도, 습도 및 통풍을 제어하는 HVAC(Heating Ventilating Air Conditioning) 공조시스템은 탑승객의 쾌적성을 향상시키기 위해서 성능 향상이 필수적이며, 이를 위해 HVAC 내부의 유동특성을 정확히 파악하는 연구가 선행되어야 한다. HVAC 공조시스템 내부 유동은 복잡한 내부구조와 3차원 유동으로 실험적 연구 수행이 용이하지 않으며, 이로 인해 많은 선행연구들은 수치해석적 방법을 이용한 해석적 접근으로 이루어져 왔다. 일부 실험적 연구로 열선유속계나 5공 프로브와 같은 점 측정방식이 사용되었으나, 고전적인 계

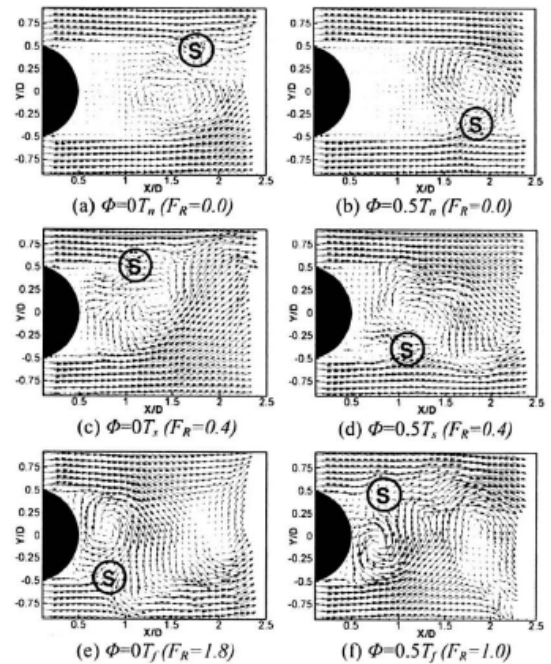


Fig. 4 Instantaneous velocity vector fields at periods 0T and 0.5T for $F_R=0, 0.4$, and 1.0

측기법의 한계로 인해 시간에 따른 유동구조의 변화나 난류 특성과 같은 주요 유동정보들은 얻지 못하였으며 전체 유동장에 대한 정보를 제공하기란 사실상 불가능하였다.

본 연구에서는 실제 자동차의 현품 HVAC 모듈을 이용하여 실제 자동차 운전시 사용하는 운전조건에서 HVAC 내부 유동을 PIV기법으로 측정하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 PIV 시스템은 2-head Nd:Yag 펄스 레이저, 고해상도 CCD 카메라, 제어 및 계산용 컴퓨터, 그리고 동기장치로 구성되어 있다. CCD카메라의 해상도는 2048×2048 pixels이며, 초당 15프레임까지 촬영할 수 있다. 측정하고자 하는 유동단면을 광학거울과 원통형렌즈(cylindrical lens)들을 적절히 조합하여 얇은 레이저 평면광(laser sheet)으로 조사하고 추적입자(tracer particles)에 의해 산란된 유동영상을 CCD 카메라로 획득하였다. 프레임 straddling 기법을 이용하여 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였으며, 속도장은 한 쌍의 유동영상을 미소관측구간으로 나눈 후, 상호 상관 PIV알고리즘을 적용하여 얻게 된다.

Fig. 6은 HVAC 내부 모듈에서 난방 운전조건하에 측정된 평균속도장 결과이다. 내부 공기흐름은 증발기와 히터 unit을 모두 통과하여 차량 내부와 연결되는 덕트 시스템으로 나아간다. 최대속도는 증발기와 히터 unit을 빠져나온 유동이 좁아지는 유로를 지날 때 나타났으며 이때 그 값은 약 6.4m/s이었다. 정체유동은 갑작스럽게 유동경로가 변하는 영역(B, B' 그

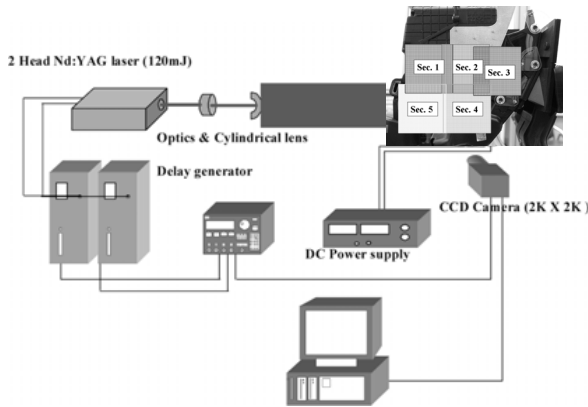


Fig. 5 Experimental setup for measuring flow inside a automobile HVAC system

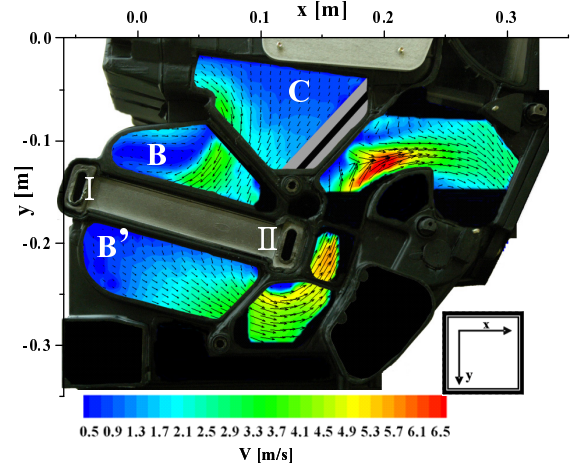


Fig. 6 Mean velocity fields inside the HVAC module

리고 C영역)에서 관찰되었다. 유속이 급격하게 변화하는 영역 중에서 정체현상이 관찰되는 B와B' 영역의 경우 히터 unit으로 지나가는 공기 흐름이 기하학적으로 경사지게 배치된 히터와 증발기 사이의 공간적 특성을 따르지 못하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다.

이와 관련된 연구로 HVAC 송풍용 fan 주위 유동과 대형 공장 내부 환기유동을 PIV기법으로 속도장 변화를 실험적으로 연구하였다. 이밖에 수치해석으로 비교하기 좋은 실험적 연구로는 본 연구실에서는 원주나 구 주위 유동의 속도장을 측정하였으며, 황사와 관련한 two-phase 연구로 비산하는 사막모래 입자들과 주위 바람의 속도장을 동시에 측정하여 이들 사이의 에너지와 운동량 전달과정을 연구하였다.

3. 결 론

첨단 화상처리를 이용한 PIV 속도장 측정기법은 점점 발달되어 가는 컴퓨터 및 화상처리 기술에 힘입어 공간분해능과 시간분해능이 크게 향상될 것이며, 측정 정확도가 크게 향상 되어 수치해석 결과와의 바로 비교할 수 있는 수준으로 발전하고 있다. 특히 stereoscopic PIV기법과 홀로그래픽 PIV기법을 이용한 3차원 속도장과 Dynamic PIV 측정의 경우, 향후 수치해석 연구와 동반자적인 관계에서 함께 수행하여 비교 검토함으로써 상호발전을 이룰 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 자동차핵심기반기술개발사업, 과학재단의 국가지정연구실(NRL)사업, 2단계 국가지정연구실사업(M110600000276-06J0000-27610)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2003, Lee, S.J., Yoon, J.H. and Choi, J., "Phase-averaged Velocity Field Measurement of the Flow around an Isolated Axial-fan Model," *J. Fluids Eng.*, Vol.125(6), pp.1067-1072.
- [2] 2004, Lee, S.J., Baek, B.G., Yoon, J.H. and Lee, C.M., "Three-component Velocity Field Measurement of Propeller Wake Using a Stereoscopic PIV Technique," *Exp. in Fluids*, Vol.36(4), pp.575-585.
- [3] 2007, Kim, S. and Lee, S.J., "Measurement of 3D Laminar Flow inside a Micro Tube Using Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry," *J. of Micromechanics and Micro-engineering*, Vol.17, pp.2157-2162.
- [4] 2007, Lee, S.J. and Lee, J.Y., "Temporal Evolution of Wake behind a Rotationally Oscillating Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol.19, p.105104.
- [5] 2008, Jang, Y.I. and Lee, S.J., "PIV Analysis of Near-wake behind a Sphere at a Subcritical Reynolds Number," *Exp. in Fluids*, Vol.44, pp.905-914.
- [6] 2008, Zhang, W., Wang, Y. and Lee, S.J., "Simultaneous PIV and PTV Measurements of Wind and Sand Particle Velocities," *Exp. in Fluids*, Vol.45, pp.241-256.
- [7] 2008, 지호성, 이상준, "온도조절 격판 변화에 따른 차량용 HVAC 내부 유동의 PIV 속도장 측정 연구," *한국가시화정보학회지*, Vol.6(1), pp.27-33.