

PIV에 의한 유동장 계측

이 영 호 <한국해양대학교 교수>

1. 처음말

유동장의 속도를 계측하기 위한 방법으로서 레이저광선의 특성을 이용한 LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 널리 사용되고 있다. LDV는 비접촉 측정으로 인한 유동장의 보존, 빠른 응답성 및 높은 시공간 해상도 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 유체계측 고유의 문제점이 그대로 상존하고 있다. 즉 비정상 유동의 거시적인 해석을 위한 동시다점계측이 실용상 불가능하여 연속체고유의 유동현상을 파악하는데 있어 한계를 지니고 있다. 이와 같은 배경으로부터 종래의 정성적인 가시화기법과 컴퓨터의 영상처리기법을 결합하여 속도계측을 정량적으로 행할 수 있는 새로운 방법으로서 PIV(Particle Image Velocimetry: 입자영상유속계, 이하에서 PIV로 부름)가 제안되었다.

PIV에서 속도를 구하기 위한 기본적인 개념은 질점역학에서와 마찬가지로 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 백터변위 관계로부터 구해진다. 즉, 유동장에 추종성(traceability)이 우수한 입자를 균일하게 분포시키고 이들 입자의 운동을 카메라 등을 이용하여 기록한 다음, 보존된 유동장을 미소시간 간격으로 영상처리하여 각각의 입자변위를 자동으로 추적하고 있다. PIV에서는 입자의 인식 및 관련된 연산기능을 컴퓨터를 이용하여 효율적으로 행하고 있으며, 최근에는 개인용컴퓨터의 영상처리능력이 비약적으로 발전하여 많은 적용예를 보이고 있다.

한편, PIV는 유동장을 영상기록매체에 기록하여 보존 및 재생이 가능함으로써 유동장의 재현성문제를 쉽게 해결할 수 있는 장점을 아울러 가지고 있다. 따라서, PIV는 비정상, 동시다점 계측 및 유동장의 재현성확보가 원리적으로 가능함으로써 CFD에 필적할 수 있는 유일한 실험기법으로 평가되고 있다. 본 해설에서는 이에 관한 내용을 개설적으로 정리하고자 하며, 상세한 것은 후기하는 참고문헌을 인용하

기로 한다.

2. 영상처리장치

디지털 영상처리에 필요한 장치를 대별하면 영상입출력장치, 처리장치본체인 이미지프로세서 및 주변기기 그리고 처리를 행하기 위한 소프트웨어로 대별할 수 있다. 입력을 위한 기초적인 방법으로는 유동장의 정지사진을 적당한 시간간격으로 촬영한 다음 이를 대형의 인화지에 현상하고 각각의 입자의 위치를 디지털라이저 등을 이용하여 판독함으로써 입자의 변위를 계산하는 방법이다. 보다 본격적인 입력 방법으로서 기계적 스캐너 및 CCD 또는 TV카메라를 들 수 있다.

기계적 스캐너는 해상도 및 대규모의 영상처리 능력 면에서 장점을 갖고 있으나 영상의 위치제어에 따른 문제점이 있다. CCD카메라는 해상도에서는 떨어지나 가격, 변환속도 및 기동성의 면에서 우수하다. 입력은 CCD카메라에서의 영상을 디지털신호로 변환하여 영상처리장치에 직접 공급하거나 비디오테이프 등에 일단 수록한 뒤 재생장치를 통해 영상을 공급하는 방식을 택할 수 있다. 계측기법의 궁극적인 목표가 유동장을 직접 리얼타임으로 입력, 분석하여 필요한 정보를 현장에서 얻는 데 있다고 한다면 일관된 온라인처리방식이 바람직하다. 그러나 대개의 실험은 재현성이 요구되며, 이러한 경우에는 유동장을 기록 보존하여 반복처리함으로써 보다 융통성 있는 해석이 가능하다.

고속유동장에 대해서는 이에 대응할 수 있는 입력장치가 반드시 필요하다. 현재 시판되고 있는 고속도 카메라가 대응책이 될 수 있다. 또는 필스레이저나 초퍼(chopper)를 이용하여 시간해상도를 높힐 수가 있으며, 이에 대응하는 처리소프트웨어의 개발이 필요하다.

화상출력장치는 대별하면 영상데이터의 보존을 위

한 대용량의 보조기억장치, 비디오신호의 기록을 위한 VTR 또는 아날로그 광디스크 비디오 신호방식 변환을 위한 NTSC 엔코더 및 하드카피작성용 칼라 이미지 프린터 등을 들 수가 있다. 이 가운데 대용량의 영상메모리는 데이터의 입출력속도와 함께 처리효율에 큰 영향을 미친다. 예를 들어, 1프레임(frame, 우리나라 텔레비전의 NTSC 주사방식은 30frame/초임)의 칼라영상을 저장하기 위해서는 약 1MB(512×480×8bit×3)의 기억용량이 필요하게 되어 연속된 영상을 처리하는 경우에는 대용량을 갖춘 외부기억장치가 반드시 필요하게 된다.

이미지프로세서는 처리해야 할 영상데이터를 저장하기 위한 이미지 메모리와 메인프로세서, 가속처리용 액셀러레이터 및 FFT 등의 연산 유닛트를 갖춘 영상처리전용의 하드웨어이다. 최근에는 이미지 프로세서의 성능이 발전하여 호스트컴퓨터의 부담을 대폭 경감시킬 수 있게 되어 PC를 호스트 컴퓨터로 대체할 수 있게 되었다. 한편, 퍼스널컴퓨터의 비약적인 성능개선에 따라, 영상처리용의 내장형 이미지 보오드(image board 또는 image grabber:H×V=512×480 픽셀, 256 계조, 흑백 또는 칼라)를 활용한 PIV 시스템이 효과적으로 운용되고 있다.

영상처리용의 소프트웨어로서는 대개의 경우, 서브루틴 팩키지형으로 공급된다. 영상처리 고유의 다양한 기법이 매크로커맨드에 의해 실행되며, 사용자는 계산기언어를 익히는 것과 같은 요령으로 그 내용을 숙지하여야 한다. PIV에서는 이미지프로세서가 제공하는 다양한 기능중 일부를 이용하고 있으며, 보통, 입자의 도심(centroid)데이터까지를 자동으로 제공한다. 따라서, 속도벡터의 계산에 필요한 동일입자의 추적은 호스트 컴퓨터에서 별도로 행하며, 이를 위한 다양한 알고리즘이 제안되고 있다.

이미지보오드를 이용하는 경우에는 입자의 인식을 위한 제반 전처리(pre-processing)도 호스트컴퓨터에서 별도로 행하여야 한다. 따라서, 전용의 이미지프로세서를 이용하는 경우보다 복잡한 처리과정을 거치게 되며, 결국 처리속도나 효율면에서 뒤떨어지게 된다.

3. PIV시스템

PIV시스템은 상술한 장치 및 기기의 다양한 조합에 의해 이루어지나 그 일례를 들어 보면 Fig. 1과 같다. 유동장의 영상은 CCD카메라 또는 캠코우더에 의해 촬영되며 이 영상은 이미지프로세서에 직접 공

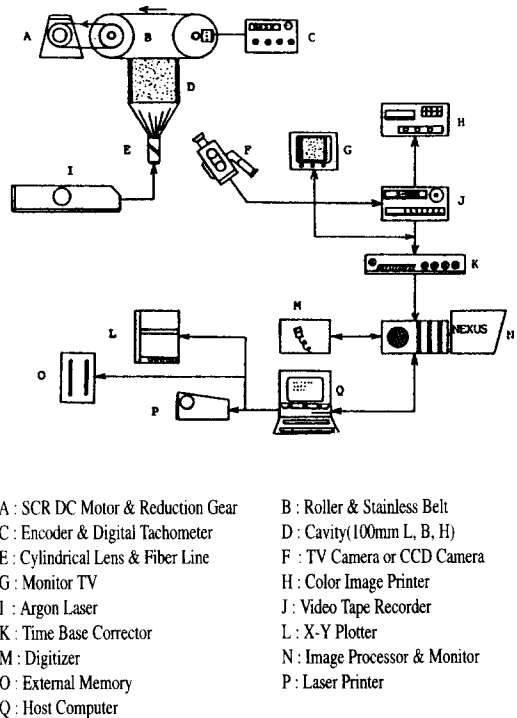


Fig.1 Schematic arrangement of PIV system

급하거나 일단 비디오테이프에 기록한 뒤 VTR에 의해 재생된다. 영상신호는 고속A/D 변환기를 거쳐 512×480×8bit의 칼라 디지털 신호로 변환되어 자체의 이미지 메모리에 저장된다.

이미지프로세서에서는 입력시간간격조정, 역치부여(thresholding), 2치화(2値化), 윤곽선 검출, 영상강조, 공간필터링, 영상분리, 잡음제거, 히스토그램분석, 프레임간 연산, 라벨링(labeling), 입자의 도심좌표계산 등의 작업이 행해진다.

호스트컴퓨터로는 퍼스널컴퓨터가 사용되며 인터페이스를 통하여 이미지프로세서의 제어, 영상처리 명령어의 전달 및 데이터의 입출력을 행한다. 또한, 동일입자의 확인을 위한 처리 및 데이터의 후처리(post-processing)가 동시에 행해진다. 이미지보오드에 의한 경우에는 별도의 이미지프로세서 대신 퍼스널컴퓨터 내장형의 전용보오드를 이용하며, 운용 소프트웨어의 명령어들을 용도에 맞게 프로그래밍하여야 한다.

4. 속도계측에의 적용

PIV에서는 종래의 트레이서입자 가시화기법에 의해 얻어진 영상을 처리하여, 미소시간 간격 동안 움직인 다수입자의 이동변위를 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다. 그러나 가장 큰 문제가 되는 것은 수 많은 입자들을 서로 다른 시간간격의 영상에서 추적하여 각각 동일입자임을 자동적으로 판별하는 일이다. 즉, 사람이 지니고 있는 시각판단작용을 컴퓨터의 장점인 대용량, 고속의 데이터 처리능력에 맡길 수 있도록 하기 위한 효율 좋은 처리 알고리즘의 개발이 중요하다.

PIV는 원리상 추적입자로부터의 산란광을 영상정보로서 기록을 한다. 따라서, 추종성 및 표면반사율이 좋은 입자의 선택이 무엇보다 필요하다. 물의 경우에는 나이론12 또는 폴리스틸렌 구형입자가 주로 사용되며, 공기의 경우에는 헬륨기포 또는 수미크론의 알루미늄분말이 사용되기도 한다. 입자가 작을수록 추종성은 양호하나 조명조건이 까다로워진다. 유동특성에 적합한 입자를 선별하는 것은 실험의 성패에 커다란 영향을 미친다.

광원으로는 레이저가 주로 이용된다. 2차원 PIV의 경우에는, 실린드릭컬렌즈 및 광섬유케이블에 의한 시이트라이트 프로젝터(sheet-light projector)가 한조를 이룬다. 3차원의 경우에는 일반적으로 큰 검사체적이 필요하므로 2차원의 시이트라이트를 만들 필요가 없다. 대신 보다 복잡한 광학적 배치가 요구된다. 광원으로는 백색광원도 가능하다. 그러나, 조명방향으로 균일한 폭을 갖는 시이트라이트를 만드는 것이 어렵다.

다음으로 연속된 영상에서 동일입자를 확인하는 작업이 반드시 필요하다. 연속된 영상프레임간의 시간간격은 유동장의 레이놀즈수에 따라 조정된다. 유동변화가 큰 곳에서는 보다 짧은 시간간격이 필요하나 대신 계측정도는 떨어지게 된다. 지금까지 동일입자를 추적하기 위한 많은 기법들이 소개가 되어 있다. LSV에서는 LDV에서의 Young's fringe 해석기법을 응용하고 있으며, 무엇보다 공간해상도가 뛰어난 점이 장점이다. 그러나, 사진촬영 및 현상에 따른 번거로움과 FFT분석에 필요한 CPU시간이 크게 소요되는 단점이 지적된다.

한편, 각각의 연속된 프레임상에서 동일입자를 추적하는 방식이 이전부터 제안되어 많은 적용예를 보이고 있다. 프레임수를 늘리면 원리적으로는 동일입자의 검색에 수반하는 오차를 줄일 수가 있다. 그러

나, 이 경우에는 처리시간이 더 걸리고 무엇보다도 입자의 직선, 등간격이동이라는 원래의 조건을 벗어나기 쉬움으로서 최종적으로 얻어진 속도값에 수반하는 불확실 성분이 커지게 된다. 그중 2프레임방식은 기억용량면에서 유리하다. 특히, 이미지보오드를 장착한 PC시스템의 경우에는 이에 관련된 제약을 크게 받을 수가 있다.

Fig. 2는 선박모델에 PIV를 적용한 경우의 조명 및 광학적배치를 보이고 있다. 구체적인 사항은 유동장의 특성 및 제반 실험조건에 따라 결정될 수 있을 것이다. Fig. 3은 3차원캐비티 유동장의 적용예를 보이고 있다. 이미지보오드 및 호스트컴퓨터로서 486D×2를 이용하여 앞서의 2프레임방식을 채택한 경우, 약450개의 입자를 처리하여 보간된 속도벡터를 얻기까지 걸리는 시간은 2-3초 전후이다. 본격적인 리얼타임 계측으로는 볼 수 없으나, 실용적인 관점에서는 유용하다고 보여진다.

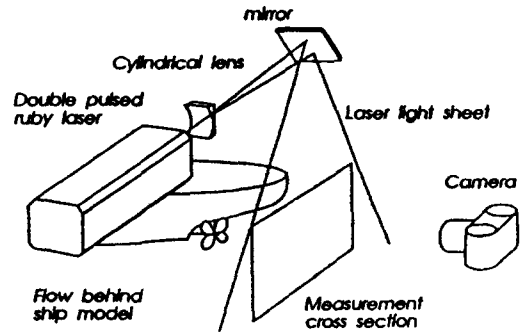


Fig. 2 PIV system for model ship

5. 맺음말

이상과 같이 디지털영상처리를 이용한 PIV속도계측방법에 관하여 개설적인 고찰을 행하였으나, 여러 가지의 문제점이 해결되어야 한다. 우선 사용되는 입자의 추종성이 충분히 검토가 되어야 한다. PIV에서는 텔레비전주사방식을 택한 경우에 최대 60HZ의 시간해상도를 유지할 수 있다. 이보다 높은 해상도를 얻기 위해서는, 별도의 고속프레임의 영상기록장치가 필요하다. 또한, 현재의 일반적인 영상입출력장치는 1프레임당 512×512(또는 480)픽셀의 공간해상도를 제공한다. 따라서, 유동장의 공간해상도를 높이기 위해서는 고가의 촬영장치 또는 별도의 실험적인 기법이 요구된다. 처리 알고리즘, 특히, 동일입자의

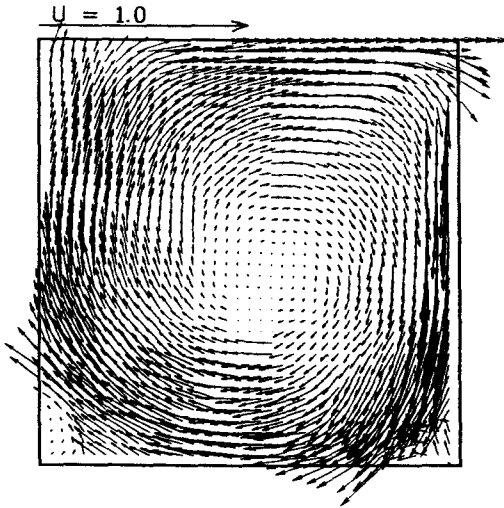


Fig. 3 Velocity vectors of cavity flow by PIV

확인기법은 현재에도 PIV관련연구에서 중요한 위치를 차지하고 있으나, 장래에는 표준적인 몇가지의 방법으로 압축될 것으로 보여진다. 한편, 3차원의 입자 추적 및 온도장까지를 동시에 계측하고자하는 연구가 행해지고 있으며, 근간에 그 성과가 공표될 것으

로 예상된다.

PIV에 관련된 당면의 목표로서는 속도값을 이용하여 물체벽면에서의 공력특성값을 정도 높게 구하기 위한 알고리즘의 확립, 보다 간편한 3차원 계측기법의 개발, 2차원 PIV의 실용화, 영상처리에 수반하는 불확실성성분의 계통적인 고찰, 이미지보오드를 활용한 고속처리 기법의 개발 등을 들 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] L.Hesselink, Digital Image Processing in Flow Visualization, Annu. Rev. Fluid Mech., (1988)
- [2] R.J.Adrian, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech.,(1991)
- [3] C.Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, IMechE Workshop-Optical Method & Data Processing in Heat and Fluid Flow, (1992)
- [4] P.Buchhave, Particle Image Velocimetry -Status and Trends, Exp. Thermal and Fluid Science Vol. 5,(1992)

提案募集