일반기사

수공구조물 주위의 유동장 해석을 위한 PIV(Particle Image Velocimetry)의 활용방안

김 종 섭 (대전산업대학교 도시공학과 조교수)

1. 개 요

이론유체역학은 일반적으로 연속의 식과 세 방향의 운동방정식 그리고 열역학적 에너지방정식으로부터 구성되는 지배방정식의 해를 해석적으로 구하여 다섯 가지의 기본 물리량(u, v, w, p, T)을 구하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 전산유체역학은 다양한 정식화 기법을 적용하여 얻어진 대수방정식을 효과적으로 풀기 위하여 컴퓨터를 이용하고 있다. 그리고 실험적인 방법으로서 속도의 계측에는 피토관, 열선유속계, LDV등이 사용되고 있으며 압력계와 열전대를 이용하여 벽면의 정압 및 공간온도분포를 정도높게 구하고 있다.

유체역학에 관련된 기기의 설계 또는 성능향상을 위한 제반 과정에서 가장 기본적인 것은 수반하는 유동장의 거동을 파악하는 일일 것이다. 이 경우에 눈에 잘 보이지 않는 흐름중에 추적입자를 넣고 적당한 조명을 가한 뒤에 카메라 등으로 순시 또는 시간평균의 유동장을 기록하여 유체역학적인 특성을 고찰하는 작업을 가시화(visualization)라고 부른다. 이 가시화영상에는 정성적인 정보 이상의 유용한 정보가 포함되어 있다. 따라서 가시화영상으로부터 정량적인 정보를 추출할 수 있다면 유체의 유동현상을 동반하는 제반 공학적 문제의 해결을 위하여 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 이들에 관하여 많은 연구자들이 다양한 기법을 제시하여 왔으며 최근에는 발달된 영상매체의 기술에 힘입어 지금까지는 원리적으로만 가능하였던 기법들이 실용가능한 단계에 이르렀다. 특히 디지털 영상처리기법(digital image processing)은 컴퓨터를 비롯한 관련 하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 수많은 적용예를 보이고 있다. 이와 같은 추이 속에서 유체의 기본물리량을 동시다점으로 계측할 수 있는 PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)가 최근에 각광을 받고 있다. 이 방법은 원리적으로 3성분의 속도를 동시에 전영역에 걸쳐 연속으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 NS(Navier-Stokes)방정식에 대입하여 압력구배항을 공간적분하면 벽면의 정압까지를 포함한 수시의 압력장을 구할 수가 있다. 또한 추적입자로서 온도감온 입자를 이용하면 공간의 온도분포까지도 동시에 구해진다. 이와 같이 PIV는 5종류의 기본물리량을 모두 한꺼번에 측정할 수 있음으로서 장래에는 전산유체역학에 대응할 수 있는 유일한 계측기법으로 인식되고 있다.

2. PIV 연구의 배경

PIV에 관련된 문헌을 크게 분류해 보면 속도벡터의 추출을 위한 알고리즘을 새롭게 제안하거나 이들의 성능을 개선하고자 하는 내용과 PIV를 실제유동장에 적용하여 유체역학적인 고찰을 행한 결과가 거의 같은 비율로 나타나고 있다. 즉 지금까지의 다양한 기법들이 소개되어 왔으며 이들에 대한 계통적인 분류는 매우 어려운 작업에 속할 수 있다.

디지털 영상처리는 1960년대 초기부터 문자인식, 의료용 영상처리, 물체인식, 우주탐색선으로부터의 사진해석 등에 이용되어 왔다. 초기에는 대형컴퓨터를 이용한 배치처리가 주류를 이루었으나 이후 반도체 기술의 급속한 발달에 힘입어 미니컴퓨터를 중심

으로 한 영상처리장치가 보급되었다. 1920년에 발표된 의료용의 CT(Computed Tomography)는 선명한 인체단층사진을 제공하게 되어 실용적인 평가를 더하게 되었다. 또한 지구자원탐사를 위한 인공위성은 디지털영상을 전송하였고 이를 계기로 리모트센싱에서의 영상처리기법이 널리 이용되게 되었다. 1970년대 후반에 이르러서는 LSI로 대표되는 대규모 기억소자의 발달로 영상처리기법이 실용화의 단계로 접어들었다.

따라서 종래에는 원리적으로는 가능하다고 생각되었어도 가격면에서 실용화가 될 수 없었던 영상처리용의 전용하드웨어가 저가격으로 생산된 점, 기술적으로 제일 문제점이 되었던 영상처리용의 입출력장치가 쉽게 입수되기 시작한 점 등에 힘입어 이 기법이 갖는 특유의 장점을 충분히 발휘하게 되었다고 볼 수 있다.

한편 이와 같은 영상처리기법을 공학의 분야, 특히 유체의 속도계측기법에 적극적으로 이용하고자 하는 기초적인 연구가 꾸준히 행해져 왔고 1983년에는 미시간대학에서 개최된 제 3 회 가시와 국제 심포지엄에서 처음으로 독립된 세션이 설치되었다. 현재는 영상처리장치 및 주변기기의 성능개선을 위한 기술적인 연구와 함께 처리효율의 향상을 위한 알고리즘의 개량, 극한 조건에서의 유동계측 또는 입자의 추종성해석, 오차해석 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

3. PIV의 기본원리

PIV는 유체의 속도계측을 위한 정량적 가시화기법의 한 종류로 구분할 수 있으며, 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 질점역학에서와 마찬가지로 임의의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 이 경우에 추적입자(단독 또는 입자군)는 미소시간 동안 직선 등속도이동을 하여야 한다는 전제조건이 필요하며 이렇게 얻어진 추적입자의 영상으로부터 속도벡터를 추출하기 위한 효율적인 알고리즘의 개발이 중요한 연구과제이다. 유동장에 추종성(traceability)이 우수한 입자를 분포시키고 이들 입자의 순시적인 위치를 미소시간간격을 두고 기록한 다음 각각의 입자의 변위를 계산하면 되나 수동의 인위적인 방법으로서는 정도 및 처리능력 등의 문제가 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 대용량의 고속처리능력을 갖는 컴퓨터를 활용하면 된다. 이러한 원리를 적용하여 종래에는 유동장을 촬영한 사진을 확대인화한 뒤에 목측에 의하여 다수의 속도벡터를 구하는 작업이 행해져 왔으며 이 과정을 좀더 편하게 하기 위하여 디지타이저 또는 스캐너 등이 이용되어 왔다.

영상처리장치로부터 얻어지는 유동장의 디지탈 영상정보는 보통 2차원의 입자위치(x, y 픽셀) 및 각 픽셀에서의 밝기(grey level : 계조치)의 값이다. 이들의 정보량을 구해보면 일례로서 HDTV 칼라TV화면의 1프레임은 약 0.92 MB(≒ 640 픽셀(H)×480 픽셀(V)×8비트(1바이트)/픽셀×3(R,G,B)의 용량을 필요로 한다. 이들 영상을 1분간 저장하기 위해서는 약 1.66 GB(≒ 0.92 MB/프레임 × 30 프레임/초×60초)의 대용량의 영상저장장치가 요구되며 이들의 영상처리를 위해서는 컴퓨터의 주기억용량이 크게 증가하게 된다. 이와 같이 PIV의 성능은 하드웨어의 면에서는 호스트컴퓨터의 대용량 고속연산기능에 의존하며 소프트웨어의 관점에서는 속도벡터의 추출알고리즘의 효율에 좌우되는 특성을 지니고 있다.

한편 디지털 영상처리분야는 컴퓨터 관련기술과 병행하여 급속하게 발달하여 왔으며 가시화에 관련된 연구자들이 이와 같은 기술을 적극적으로 수용하여 유동장의 영상처리를 신속하고도 정도 높게 또한 경제적으로 행할 수 있게 되었다. 그 결과 유동장의 영상처리를 신속하고도 정도높게 또한 경제적으로 행할 수 있게 되었으며 현재에는 레이저의 광학특성과 정지사진기법을 적용한 초기의 기법에서 크게 발전하여 디지털 영상데이터에 대하여 순수하게 컴퓨터의 고속연산기능만을 활용하여서 종래의 PIV성능을 상회하는 우수한 방법들이 제안되고 있다.

지금까지의 관련문헌을 보면 수많은 알고리즘의 제시와 함께 이들에 대한 다양한 명칭으로 인하여 PIV

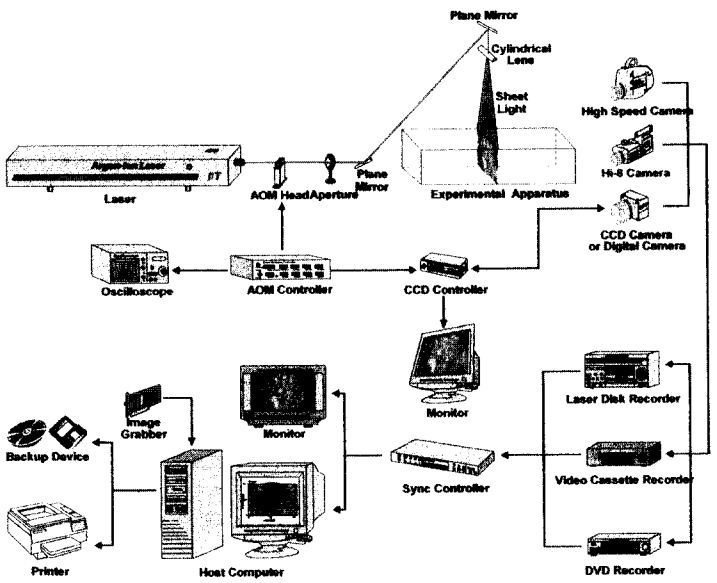


그림 3.1 PIV의 시스템 구성도

에 대한 체계적인 이해가 어려우며 특히 상용제품의 성능에 대해서는 전적으로 공급자의 정보에 의존하는 것이 실정이다. 이것은 PIV의 원리상 속도벡터의 추적알고리즘이 소프트웨어적인 성격이 강하며 광학이나 영상처리에 관한 지식을 동시에 요하는 경계영역 분야에 속하기 때문이다.

PIV를 이해하기 쉽게 요약하여 설명한다면, PIV는 컴퓨터의 고속연산기능과 영상처리기법을 활용하여 가시화유동장으로부터 정량적인 속도벡터를 동시다점으로 획득할 수 있는 최신 계측기술로써 비정상의 유동장에 대하여 순시의 속도분포를 연속적으로 구할 수 있으며, 기록된 영상은 반복처리가 가능하여 데이터의 재현성확보에 유리하다. 또한 PIV는 LDV나 열선유속계 등의 점계측기법과 상호보완적으로 사용될 수 있다고 하겠다.

그림 3.1은 이러한 PIV의 원리에 대한 시스템 구성도를 나타내고 있으며, 또한 그림 3.2는 PIV에 의한 유동장의 계측과정을 유동장 형성에서부터 Display까지의 각 단계별로 수행되어지는 내용을 요약하여 간단히 설명한 것이다.

4. 적 용 예

지금까지 PIV를 적용하여 유동장의 해석을 행한 결과는 국제 및 국내에서 여러편의 연구결과가 제시되고 있으며, PIV의 연구내용을 크게 정리해 보면 다음과 같이 구분할 수 있다.

1) 속도벡터 추출을 위한 알고리즘의 개발 및 이의 성능향상
2) 3차원 계측
3) 온도장 동시계측
4) 비정상 난류를 포함한 기초 유동장의 해석
5) 연소실내 유동해석
6) 이상류 계측
7) 유체기계 내부류 계측
8) 조류 및 해양구조물의 유동해석
9) 공조 및 건축, 토목, 환경관련유동
10) 오염물질 확산예측

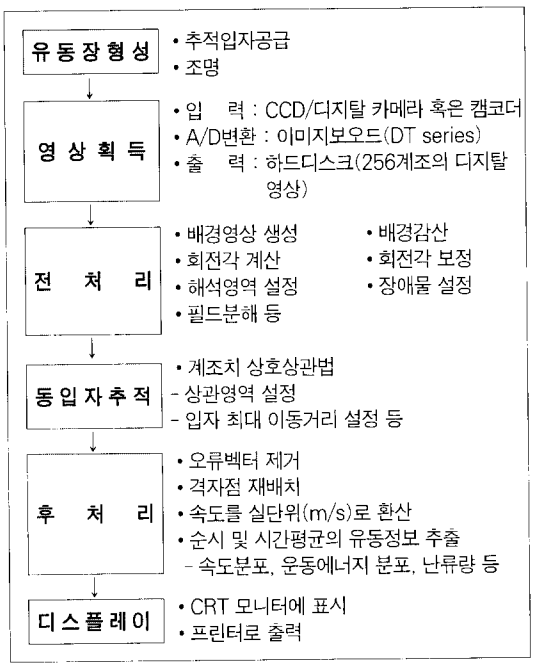


그림 3.2 PIV에 의한 유동장의 계측과정

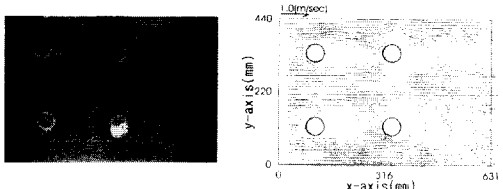


그림 4.1 해양구조물 부유체 모델

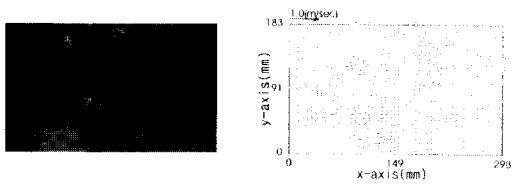


그림 4.2 담배연기에 의한 공기유동

다음은 적용예로써 그림 4.1은 해양구조물 부유체 모델의 경우이며 그림 4.2는 담배연기에 의한 공기유동을 나타내고 있다.

또한 PIV를 이용한 벨트구동 정방형 캐비티흐름의 유속측정에 대하여 2차원과 3차원의 다양한 방법으로 분석하고 그 결과를 그림 4.3에 나타내었다.

5. 맺음말

유체역학은 고체역학의 경우보다 형상자체가 복잡하여 해석적 방법만으로는 항상 만족할 만한 결과를 얻을 수는 없으므로 각종의 실험적, 경험적 요소에 힘입어 실제문제를 해결하게 됨이 보통이다. 예를 들면 물의 이용과 관리를 위한 수공구조물의 경우 흐름은 유한장내에서 발생하므로 경계조건이 복잡하여 순수한 해석적 방법만으로는 문제의 해결이 곤난하기 때문에 여러 가지 실험결과에 의한 경험적 방법을 응용하게 된다. 이러한 실험에 있어서 수공구조물 주위의 일정한 간격에 따른 점유속의 측정은 결과를 좌우하는 가장 중요한 요소로써 신중을 기하여야 할 사항임에도 불구하고 정밀하게 계측하기가 대단히 어렵다. 따라서 컴퓨터의 고속연산기능과 영상처리기법을 활용하여 가시화유동장으로부터 정량적인 속도벡터를 동시다점으로 획득할 수 있고 비정상의 유동장에 대하여 순시의 속도분포를 연속적으로 구할 수 있는 PIV의 시스템을 도입한다면 좀더 정확하고 다양한 해석을 통하여 흐름에 관한 연구에 큰 도움이 될수 있으리라 생각된다.

〈참 고 문 헌〉

이영호 (1996). "PIV에서의 동시다점계측의 원리 및 적용", 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연논문집, pp.30-44.

Y.H.Lee (1996) Outlines on PIV(Particle Image Velocimetry), PIV Study Group(KOSEF).

Y.G.Kim (1995) "Digital Vector Image Processing of Lid-Driven Rotating Cavity Flow", J. of KSME Vol.9 No.2, pp.187-196.

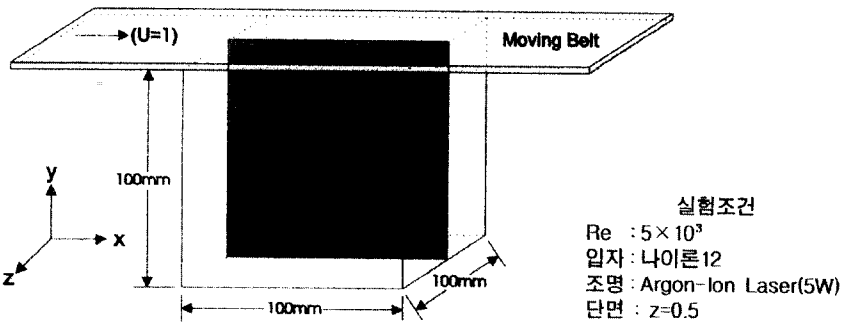
Y.H.Lee, D.H.Doh, J.W.Choi (1997) "A Study on Video-Fields Correlation PIV for High Speed Flows", Proc. of 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Hawaii (submitted).

R.D.Keane and R.J.Adrian (1993) "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images, Flow Visualization and Image Analysis" F.T.M.Nieuwstadt (ed.) Kluwer Academic Pub., pp.1-25.

D.H.Doh (1995) "A Study on Three Dimensional Particle Imaging Thermometry and Velocimetry Using Liquid Crystal", Ph.D. Thesis Univ. Tokyo.

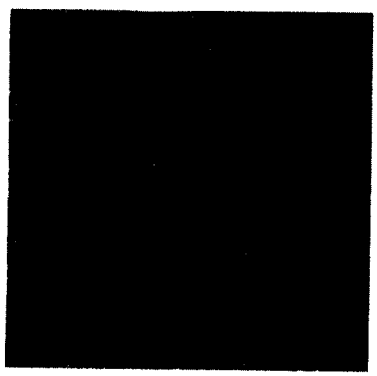
T.S.Kwon,H.J.Sung and J.M.Hyun (1992) "Experimental Investigation of Uniform - Shear Flow past a Circular Cylinder", ASME JFE Vol114, pp.457-460.

벨트구동 정방형 캐비티흐름

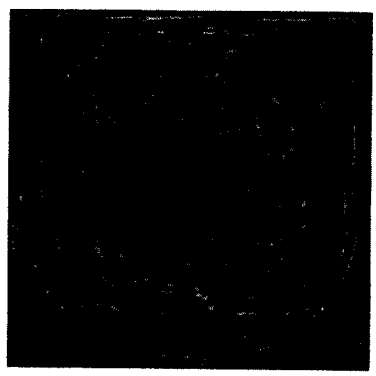


실험조건
Re : 5×10^3
입자 : 나이론12
조명 : Argon-Ion Laser(5W)
단면 : z=0.5

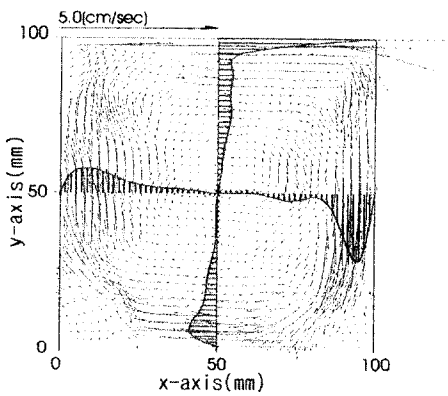
유동장 구성도



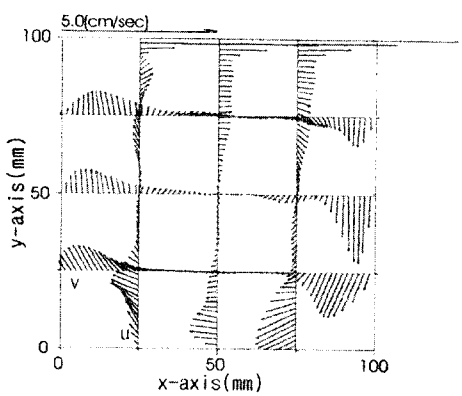
원시영상



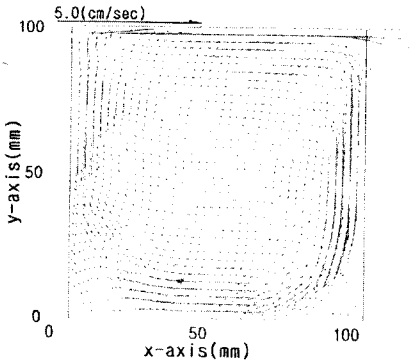
유적선



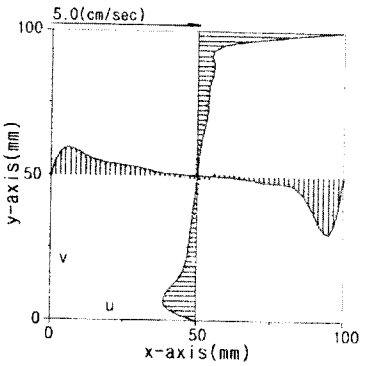
순시 속도벡터



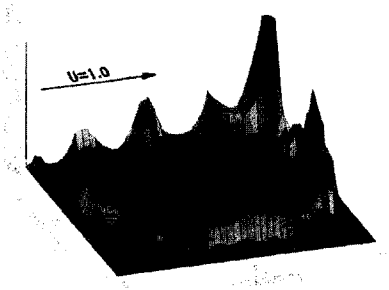
순시 단면속도분포



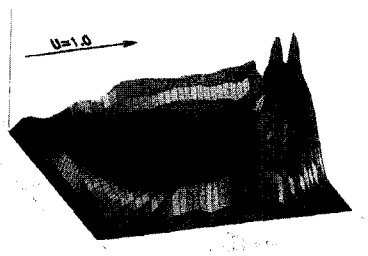
시간평균 속도벡터



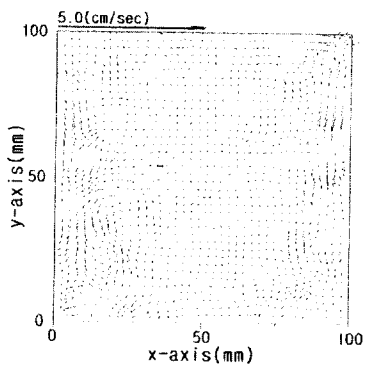
시간평균 중앙단면 속도



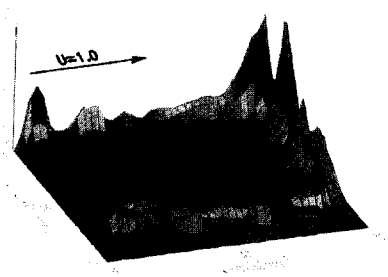
순시 운동에너지



시간평균 운동에너지



난류 변동속도



시간평균 난류 운동에너지

그림 4.3 PIV에 의한 벨트구동 정방형 캐비티흐름의 유속측정 분석결과