

PIV(입자영상유속계)의 원리와 적용(I)

- 시스템의 구성과 고속유동 계측 -

Principle and Application of Particle Image Velocimetry(I)

조 대 환 · 이 영 호

D. H. Cho and Y. H. Lee

1. 머리말

열·유체 유동현상은 항공기, 자동차, 선박 등의 교통수송기관의 성능에 많은 영향을 미치며, 각종 동력장치의 설계에 있어서도 유동패턴을 고려되어야 한다. 이러한 유체역학에 관련된 기계나 기기의 설계 또는 성능향상을 위한 제반 과정에서 가장 기본적인 것은 유동장의 거동을 파악하는 것이며 주요한 계측항목은 우선적으로 속도성분을 들 수가 있다. 이는 유동현상을 지배하는 N-S방정식의 구성에서 나타나듯이 3차원적인 유체입자의 궤적을 기술하는데 있어서는 뉴우튼역학의 범위를 벗어나지 못하며, 따라서 속도, 가속도, 변위에 관한 기초적인 물리량의 파악이 우선적으로 필요하기 때문이다. 지금까지 속도계측에 주로 사용되었던 LDV(laser doppler velocimetry)나 열선유속계(hot wire)와 같은 점계측 속도측정기법은 신뢰성과 정도 면에서 우수한 성능이 입증되었으나 유동현상의 기본특성인 비정상의 순시 다점계측이 원리적으로 불가능하다.

PIV(particle image velocimetry)^{1,2)}는 진 유동장의 속도성분을 동시에 계측할 수 있는 계측기법으로서 특히 실험유체역학의 분야에서 비정상유동의 계측 및 해석, 난류유동의 계측까지 폭넓게 활용되고 있고, 컴퓨터의 발전과 함께 매우 빠르게 발전하고 있으며, 국내에서도 급속히 보급되고 있다.

필자는 이러한 점에 주목하여 PIV의 원리와 시스템의 구성 그리고 고속유동장에 적용되고 있는 현황을 우선 이번 호에 해설하고, 다음 호에 내연기관과 유체기계에 적용되고 있는 최신 계측기법을 기술하고자 한다.

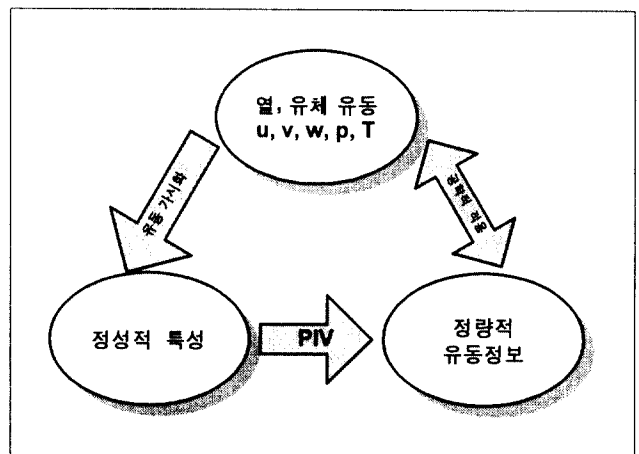


그림 1 유동가시화와 PIV

2. PIV의 개요

2.1 유동가시화

유동가시화(flow visualization)³⁻⁵⁾의 원리는 대상 유동장에 추적입자를 넣고 적절한 조명을 가하여 얻어진 영상을 이용하여 순시 또는 시간평균의 유동장에 대해 유체역학적인 특성을 고찰하는 방법이다.

이러한 유동가시화는 시각적으로 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동장의 전체적인 정성적 특성을 파악할 수 있어 거시적인 유동형태를 쉽게 알 수 있는 장점 때문에 많은 연구자들이 이용해온 기본적인 실험기법이다. 추적입자로는 유동장 내부의 유체와 비중이 비슷한 PVC, Nylon12, smoke 등이 이용된다. 그러나 그림 1에서 보이고 있듯이 열·유체의 유동해석을 위해서 기본적으로 필요한 다섯 가지의 물리량(x방향의 속도성분 u, y방향의 속도성분 v, z방향의 속도성분 w, 압력 p, 온도 T)이 정량적으로 구해질 수 없다는 단점이 있다.

접수일 : 1998년 9월 16일

조대환 : 목포해양대학교 기관공학부

이영호 : 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

2.2 PIV의 개요

유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격 동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 종래에는 이러한 원리를 적용하여 유동장을 촬영한 사진을 확대 인화한 후에 거리를 측정하여 다수의 속도벡터를 구하였으며, 이 과정을 좀 더 편리하게 하기 위하여 디지털라이저 또는 스캐너 등을 이용하기도 하였다. 이 경우에는 번거로운 수작업이 필요할 뿐만 아니라 속도벡터의 방향판별이 어려워서 복잡한 유동장의 해석에는 실용상 이용되지 못하였다. 이와 같은 실험기법은 LDV나 열선속속계와 같은 속도측정 기법들에 비하여 유동장을 훼손하지 않고 전 영역에 걸쳐서 동시에 비정상속도벡터를 얻을 수 있다는 점과 한번 기록된 유동장의 영상을 차후에 다시 처리할 경우 재현성을 갖는 점이 큰 장점이다. 그러나 지금까지는 기록장치의 한계로 고속 유동장에 대한 적용이 어려우며 특히 계측 정도 면에서도 불확실성 성분을 다소 수반하는 문제점 때문에 널리 이용되지 못하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 가시화의 영상을 카메라나 여러 영상저장매체를 이용하여 얻은 정보를 분석하여 결과를 정량화 하는 기법이 필요하다.

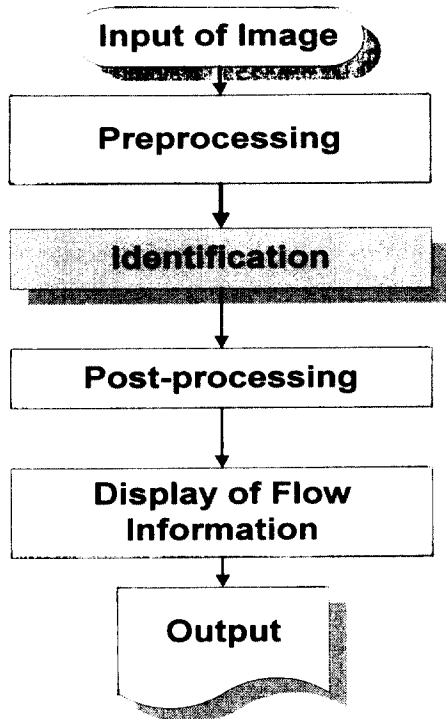


그림 2 PIV처리 흐름도

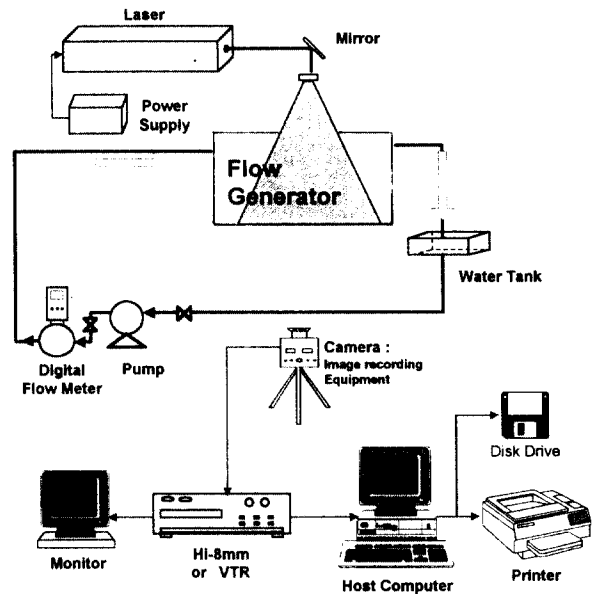


그림 3 PIV시스템의 구성도

따라서 유동가시화의 결과 영상에 담겨있는 정보를 활용하기 위해서는 화면상의 노이즈 제거와 같은 여러 과정의 디지털 영상처리(digital image processing)⁶⁾기법이 도입되어야 한다.

최근에 이러한 기술 및 집적회로와 관련된 기술의 동향은 고속 대용량의 데이터 저장 시스템과 고속연산장치 및 고성능의 이미지보오드 등이 개발되어 종래에 비해 소형, 경량이며 가격도 저렴한 하드웨어가 상품화되고 있는 추세이며, 영상처리를 위한 컴퓨터 및 주변장치와 관련 소프트웨어의 보급이 빠른 속도로 진행되고 있는 실정이다. 이러한 배경에서 PIV는 가시화의 결과를 디지털 영상처리 기술과 접목한 새로운 계측기법으로서 각광을 받고 있다.

그림 2는 PIV의 처리과정의 계통도를 나타내고 있다. PIV의 원리는 유동가시화의 결과를 영상으로 입력받아 컴퓨터상에서 동일입자를 확인하기 위한 반복계산을 수행하여 속도벡터를 얻는 기법이다. 즉, PIV는 원리적으로 세 성분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속으로 계측할 수 있다. 또한 추적입자로서 감온액정입자(thermo sensitive liquid crystal particle) 등^{7,8)}과 같은 온도에 감응하는 추적입자를 사용할 경우 공간의 온도분포까지도 동시에 구할 수 있다. 따라서 LDV등이 갖는 점계측의 한계를 근본적으로 해결할 수 있으며 컴퓨터기술 및 영상처리장치의 개발과 더불어 빠른 기술적 진보를 보이고 있다. 그리고 다양한 유동장에 대한 적용결과⁹⁻¹⁴⁾가 보고 되고 있다.

3. PIV 시스템 구성

PIV계측을 위해서는 광원 및 광원을 제어할 수 있는 장치, 영상의 기록과 입력을 위한 장치 그리고 영상처리장치 등의 장비가 필요하며 유동가시화로부터 얻어진 영상으로부터 속도를 구하는 동일입자 추적 소프트웨어가 필요하다. 그림 3은 PIV계측시스템의 구성을 보이고 있다.

3.1 광원

광원은 PIV계측에 있어서 많은 영향을 미치는 초기 영상을 얻는데 중요한 요소이다. 레이저(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)는 유도방출에 의한 빛의 증폭기이며 간섭성이 극히 양호하면서도 직진성이 좋은 특성을 갖고 있다. 다른 광원은 빛을 파동으로서 제어하는 수단이 없고 다만 무질서하게 발광하므로 유동장의 3차원 공간에서 계측단면 만을 비추는 것이 어렵지만 레이저는 전파처럼 규칙적인 진동을 연속하여 발생하므로 파장이 만배 내지 십만배 짧은 영역의 전자파가 형성된다. 이러한 짧은 파장은 회절에 의한 빛의 퍼짐을 감소시켜 포물면의 안테나에 의하여 형성되는 마이크로파 빔보다 훨씬 가늘고, 광선이라고 해도 좋을 정도의 직진 광이 만들어진다.

레이저 빛의 파면은 평면 또는 약간의 곡면을 가진 구면을 하고 있어서 다른 방향으로 진행하는 파(波)와 섞이지 않으며, 좁은 입체각 내로만 빛을 방출하므로 에너지밀도가 높아 매우 좁은 각도범위에 에너지가 집중되어 매우 양호한 지향성을 갖는다. 또한 레이저는 단색광이므로 파장에 의한 굴절률 차이를 고려할 필요가 없다. 단색성이 양호하다는 것은 광원에서 공간의 어떤 점까지 두개의 경로를 통하여 빛이 도달하는 경우 그 시간의 차가 있어도 같은 파장의 파가 연속되고, 시간이 경과해도 파장의 변화가 없으며 스펙트럼 폭이 매우 좁아 간섭성이 매우 좋다는 것을 의미한다.

PIV에는 아르곤이온 레이저(Argon-ion laser)와 같은 연속광 레이저가 많이 사용된다. 이 레이저는 플라즈마 튜브에 채워진 아르곤이온에 의해 유도 방출된 빛이 연속적으로 출력되며 간섭성이 높은 특징을 갖는다. 500mW 이하의 저출력 레이저에는 공냉식이 채용되며 그이사의 경우에는 대부분 수냉식이다. 사용할 때 두 개의 파장(0.4579 μm (청), 0.514 μm (녹))을 멀티방식으로 운용하면 하면 단색광에 비해 약 5배 이상 높은 출력을 얻을 수 있다. 레이저의 출고시 최대출력은 상기한 멀티방식의

결과이다. 레이저 광을 유동장의 전 영역에 조사하기 위해서는 직진광을 원통형렌즈에 통과시켜 2차원 시이트라이트를 만들어야 한다. 그리고 레이저 광을 유동장의 계측단면에 원하는 각도로 조사하기 위해서는 그림3의 반사거울을 이용하면 된다.

3.2 영상처리장치

영상을 기록하여 입력하는 형태는 유동장의 실시간 정보를 이미지보오드에 직접 입력하는 경우와 스틸사진의 촬영과 같은 영상정보를 우선적으로 수록하고 미캐니컬스캐너 등의 장치를 통하여 입력하는 방법 등으로 대별된다. 실시간에 직접 영상을 입력하는 경우 해상도에서 다소 뒤떨어지나 입력장치의 가격, A/D 변환속도, 장비의 조작에 따른 오차의 감소 및 유동장으로부터의 정보를 실시간으로 입력할 수 있는 장점이 있다. 이 때의 시간해상도는 프레임의 속도에 의존하게 된다.

가시화실험의 결과가 기록된 영상은 계조치와 휘도 등이 아날로그 형태로 저장되어 있으므로 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 바꾸어주는 아날로그-디지털 변환이 필요하다. 이미지보오드는 처리해야 할 영상 데이터를 축적하여 처리하기 위한 이미지메모리와 영상데이터처리 전용하드웨어를 구비한 장치로서 외부로부터의 동작지시에 의해 A/D 변환을 행하는 장치이다.

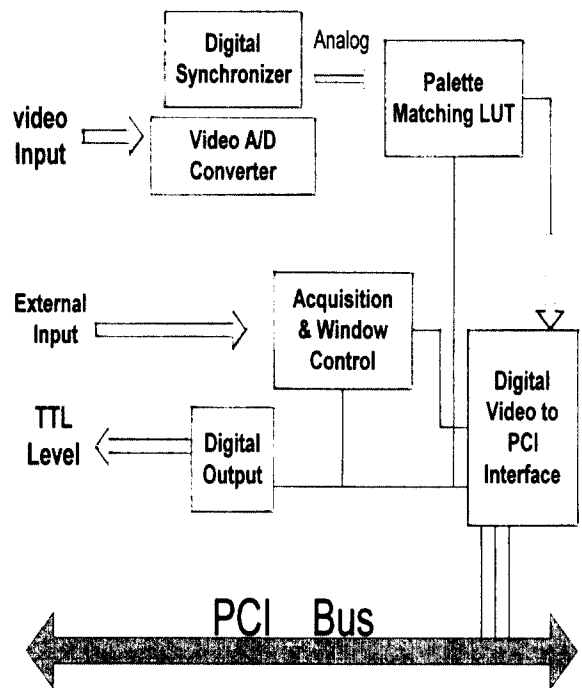


그림 4 이미지보오드의 신호처리 계통도

NTSC(National Television System Committee) 방식의 경우 시간에 따른 비월주사 방식의 입력이 이미지보오드의 A/D 변환기에 입력되게 되며 동기 신호 조정기를 채용하면 화질을 개선할 수 있다. 이미지보오드는 이처럼 VTR 등으로부터 입력된 아날로그 영상을 2차원으로 배열된 화소(pixel, 640×480)로 변환하고, 각각의 화소에 있어서 농도치(8 bit=256계조치)를 부여한다.

그림 4에서는 이미지보오드의 전체적인 처리계통도를 보여주고 있다. 이러한 이미지보오드는 퍼스널 컴퓨터에 내장하여 영상을 처리할 수 있는 프레임 그레버의 일종이다. 비월주사방식의 경우 입력 영상은 고속의 A/D 변환기(8비트)를 통하여 계수화하여 640×480 픽셀좌표에서 계조치의 정보를 갖는 디지털영상으로 변환된다. 이미지보오드의 자체램(RAM)이 없는 경우에는 일반적으로 주처리 컴퓨터의 램을 영상의 임시저장장소로 이용하게되며 선택된 영상에 한해 하드디스크에 저장할 수 있다. 이처럼 이미지보오드는 가시화에서 원시영상을 얻는 기본장치이므로 처리 알고리즘의 효율에 많은 영향을 미치게 된다. 영상을 입력할 때에 사용주파수(50/60 Hz)에 따라 수직동기신호 보정을 해주면 화질을 개선할 수 있다.

4. 동일입자추적

유동장에 분포된 입자의 속도벡터를 얻는 방법은 입자가 일정거리를 통과하기 위하여 요하는 시간을 측정하거나, 일정시간 내의 트레이서 입자의 이동거리를 계측하여야 한다. 전자의 경우 유동방향을 미리 예측할 수 있는 경우에는 유효한 수단이나, 유동방향이 복잡하게 변화하는 경우에는 적용이 곤란하다. 따라서 PIV에 있어서는 후자의 경우를 이용하여 기본적으로 한 입자의 시간에 따른 위치를 측정한다.

PIV의 처리는 먼저 유동장을 가시화하고, 얻어진 영상을 처리하여 미소시간간격 동안에 이동한 다수의 입자의 이동 변위를 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다. 그러나 각 프레임의 다수 입자중에서 미소시간의 경과 후 자동적으로 동일입자를 정확하고 고속으로 식별하는 방법이 가장 어려운 문제이다. 이를 해결하기 위하여 PIV는 사람이 갖고 있는 시각판단작용을 처리컴퓨터가 행할 수 있도록 하고, 컴퓨터의 최대 장점인 고속, 반복 데이터 처리를 적극적으로 활용하는 기법이다.

4.1 PIV 분류

PIV관련 연구에서 가장 핵심이 되는 내용은 적은 연산량으로 에러의 발생 없이 대량의 속도벡터의 추출을 위한 효율적인 알고리즘의 개발 및 이들 알고리즘의 시·공간해상도를 향상시키기 위한 기법의 개발이다. 속도벡터의 추출에 관련해서 지금까지 많은 방법들이 제안되어 있으나 크게 추적입자를 별개로 인식하여 이들의 도침좌표를 이용하는 방법과 일정영역내의 입자군이 형성하는 정보의 상관관을 이용하는 방법으로 나뉘어 진다. 두 방법간의 장단점을 일률적으로 정의하기는 어려우나 크게 계측에 적합한 유동장 형성의 어려움, 속도벡터추출을 위한 호스트컴퓨터의 연산부하 등의 관점에서 구분될 수 있을 것이다.

그림 5는 동일입자 확인 기법에 따른 PIV의 분류를 보이고 있다.

Willert와 Gharib¹⁵⁾는 상호상관 PIV에 관하여 체계적으로 설명을 하고 있으며 특히 영상의 기록에 30 Hz의 샘플링간격을 갖는 비디오시스템을 채택하고 이를 DPIV로 호칭하였다. 영상의 기록에 1초당 30프레임의 연속저장이 가능한 비디오방식을 택하였기 때문에 이들중 두 프레임을 선정하여 FFT 연산에 의하여 CCF(cross correlation function)를 구하였다. 다음으로 Keane과 Adrian¹⁶⁾은 종래의 자기상관 방식에서 벗어나 연속된 사진영상을 CCD로 받아들여 CCF를 직접 계산하고자 하는 이론적 연구를 시도하였다.

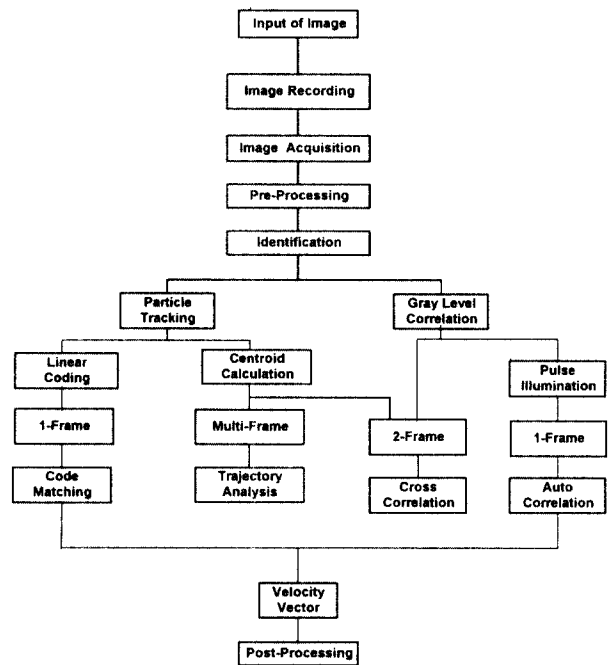
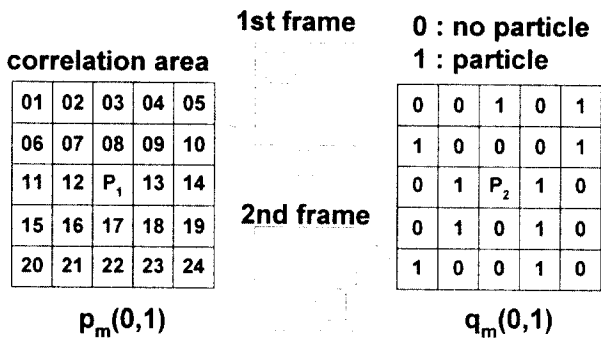
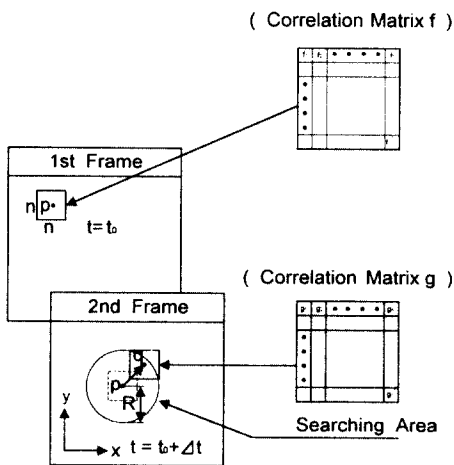


그림 5 동일입자추적방식에 따른 PIV 계통도



(a) 개별입자 추적법



(b) 계조치 상관법

그림 6 동일입자추적의 원리도

이와 같은 동일입자 확인방법은 대부분 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별한다.

여기에서는 국내에 소개가 되어 많이 사용되고 있는 알고리즘중 입자추적기법과 계조치상관법에 관하여 기술한다.

4.2 입자 추적법

그림 6(a)은 알고리즘의 개념도를 보이고 있다. 제 1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대거리의 중심을 제 2프레임에 설정한다. 각각의 입자의 중심에 대하여 상관값의 계산영역(p, q)을 선정한다. 이 영역에서 입자의 유무에 따라 1과0의 값을 부여하고 대응되는 양쪽의 상관값을 곱한다.

$$C = \sum_{m=1}^{24} p_m \times q_m \quad (4.1)$$

이와 같은 조작을 상관영역전체에 걸쳐 행하여 식(4.1)을 평가함수로 하며 이 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정한다.

입자를 추적해 속도를 구하는 방법에서 동일입자 추적알고리즘과 함께 중요한 것은 입자의 중심좌표를 구하는 것이다. 이미지보드에 의해 얻어진 영상은 픽셀 모두가 256계조의 값을 갖는 농담영상이므로 이치화 및 필요한 전 처리를 거쳐 잡음성분을 모두 제거하고 윤곽선추적(boundary trace)등의 처리를 통하여 단일 입자임을 확인한다. 입자의 중심위치를 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 쉽게 처리할 수 있는 방법으로는 윤곽선의 좌표만을 이용하는 것이다. 속도벡터를 구할 때의 내부까지 고려하여 식(4.2)와 같은 면적모멘트 공식을 이용하여 입자중심좌표는 구하면 오차성분을 감소시킬 수 있다. 여기서 x_i, y_i 는 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표이며, A_i 는 그 면적이다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.2)$$

4.3 계조치상호상관법

계조치를 이용한 상호상관법은 개개의 입자의 중심좌표를 이용하는 4.2절의 입자추적법(PTV)과는 달리 입자선별의 문제점이 크게 나타나지 않는다.

그림 6(b)는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상을 이용하여 이들의 계조치에 대하여 식(4.3)과 같은 상호상관계수¹⁷⁾를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 중점좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (4.3)$$

단, f_i, g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 나타낸다. 다음으로 계조치 상호상관법에서는 최대상관계수의 위치를 정수로 표시되는 픽셀값 이하의 정도로 정확하게 구하여야 한다. 즉 PIV의 다이내믹레인지지를 증가시키기 위해서는 이와 같은 서브픽셀 해상도문제를 해결하여야 하며 이것은 PIV의 계

측성능을 크게 좌우한다. 특히 벡터의 시점과 종점 간의 거리가 2-3픽셀 이하인 경우에는 얻어진 벡터의 정도에 결정적인 영향을 미친다. 도심을 이용하는 경우에는 기법의 단순함이 장점으로 거론되고 있으나 유동가시화를 통한 실험이 상대적으로 어렵다는 결점이 있다.

4.4 에러처리

PIV에서는 최초로 기록된 영상의 화질에 따라 고유의 에러 성분을 갖는다. 에러에 의한 이상치(outlier)는 통계적인 방법 또는 대화형의 화면처리로 제거할 수 있다. 계조치상관법의 경우 동일입자를 추적하기 위해 일정간격의 격자를 배치하게 된다. 따라서 이 경우에는 유효한 동일입자만으로 속도벡터를 도출하고 제거된 벡터는 주위의 값을 보간 하여 나타내는 방법이 많이 채택된다.

통계적인 에러처리의 판별은 이동거리와 각도에 의하였다. 판별대상입자를 중심으로 하여 주변의 가장 가까운 몇 개의 입자를 채택하여 대상입자 자신을 포함하여 이동한 거리의 평균을 구하고 대상입자가 이 평균이동거리보다 2-4배정도 이상으로 크면 에러로 처리하면 된다. 각도에 대해서도 같은 방법을 적용할 수 있다.

5. PIV 후처리

PIV의 결과에는 기본적으로 전유동장에 걸친 순간의 속도벡터분포를 얻을 수 있다. 그리고 시간평균속도벡터분포 및 운동에너지, 난류강도, 난류 운동에너지, 3종류의 난류 응력 성분, 와도의 계산과 유맥선, 유적선 및 유선을 구할 수 있다. 이러한 후처리는 실험적결과를 전산유체역학의 결과와 비교할 수 있게 하며 특히 비정상유동장과 난류유동장의 해석에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 결과를 얻기 위해서는 PIV에서 얻은 의 결과를 바탕으로 CFD의 후처리기법의 도입이 필요하다.

그림 7은 시계열 PIV결과를 중심으로 애니메이션을 제작하기 위한 순서를 보여주고 있다. PIV에서 이러한 후처리 기법의 개발은 공학적으로 유용할 것으로 기대된다.(동영상 <http://iit.kmaritime.ac.kr>)

6. 고속유동장의 적용

고레이놀즈수의 영역에서 가시화를 위해 분포시킨 추적입자의 이동 변위가 매우 클 경우에 직선 등속도 조건을 만족하기 위해서는 짧은 시간 간격이 필요하다. 이를 해결하는 방법에는 PIV의 해석에 적합할 만큼 시공간적인 해상도를 제공할 수 있는 고속도카메라를 사용하거나 고출력 펄스레이저¹⁸⁾ 또는 기계식의 회전 초퍼(mechanical chopper)를 이용하여 영상을 기록할 때 필요한 조명을 제어하여 매우 짧은 시간간격을 얻는 방법, 그리고 AOM을 이용한 CCD(charge coupled device)카메라가 있다.

이 해설에서는 우선적으로 고속도카메라와 AOM에 관하여 기술하고자 한다.

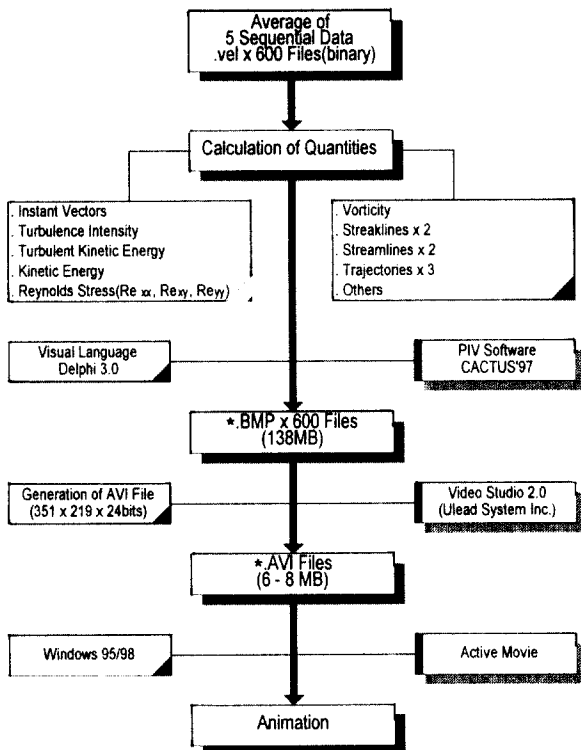


그림 7 애니메이션(Animation)의 처리 계통도

6.1 고속도카메라

현재 시간 해상도면에서 PIV에 가장 쉽게 접근할 수 있는 것으로 고속도 비디오카메라를 들 수가 있으나 장비가 가격이 매우 높은 점을 고려하여야 한다. 그러나 최근의 전자기술과 광학기술의 발전으로 그 가격이 빠른 속도로 낮아지는 추세이다. 여기에서는 카메라가 제공하는 기계적인 프레임수에 따라 공간해상도가 자동으로 설정되며 단지 충분한 조명이 필요하다. 고속카메라는 자체 메모리에 연속 영상을 임시로 저장한 뒤 매초 30장의 비율로 다시 재생되어 영상기록장치에 기록된다. 그러나 현재의 고속도비디오 카메라는 일반적으로 공간해상도가 낮

으며(최대 500 x 500 픽셀 수준) 풀사이즈에서 프레임수도 10^3 오더에 머물고 있다. 이때에 얻을 수 있는 최대 계측속도는 10 m/sec 전후 라고 보여진다.

6.2 음향광학변조기

레이저의 연속광을 단속적으로 절단(chopping)하여 짧은 펄스조명의 발생을 비디오의 동기신호와 연계시키면 PIV계측에서의 짧은 시간 간격을 얻을 수 있다. 국내에서 적용하기에는 비월주사방식(interlace scanning)의 비디오프레임(frame, 1/30 초)의 두 피일드(odd field 와 even field, 1/60 초)에 임의의 미소 펄스 폭과 간격을 갖는 펄스 광을 연속적으로 발광시켜서 유동장의 영상을 비디오방식으로 저장하는 것이 유리하다.

AOM(Acoustic Optical Modulator : 음향광학변조기)은 기록매체와 광원의 단속적인 공급이 전기적인 신호에 의하여 제어가 되어 원하는 시각에 영상의 기록이 가능하도록 하기 위한 방법으로 광음향의 특성을 이용한다. 이것은 레이저에서 나온 직진 광에 대하여 음향격자(acoustical grating)를 직각방향으로 고주파수로 진동시킬 때에 발생하는 음파의 회절작용에 의하여 레이저광의 진행각도가 미소하게 변하는 성질을 이용한 것이다.

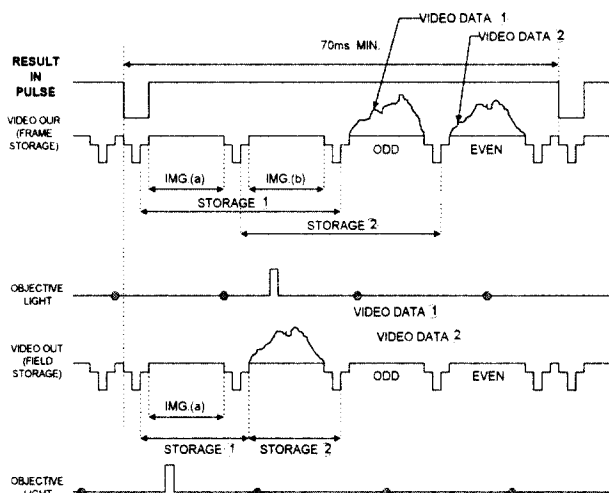


그림 8 비월주사방식(NTSC)의 영상신호

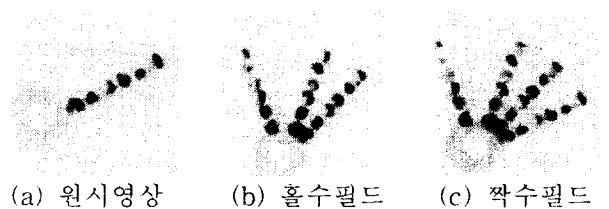


그림 9 Aom(4pulse)에 의한 영상신호

AOM은 외부에서의 인가신호에 대하여 빛의 경로가 바뀌므로 이 신호를 영상기록장치와 동기를 이루도록 하여 보다 정밀한 제어가 가능하다.

그림.8는 비디오 신호와 AOM의 펄스사이의 관계를 보여주고 있다. NTSC방식의 TV주사에서 1초간의 영상은 흑백 또는 칼라영상의 구분에 관계없이 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있다. 즉, 1프레임은 1/30초의 시간간격을 유지한다. 1프레임은 다시 1/60 초의 시간간격을 갖는 짝수피일드와 홀수피일드의 화면으로 구성된다. AOM은 홀수피일드의 수직동기신호를 기준으로 1/30 초의 펄스사이클을 제공한다. 따라서 제1펄스를 홀수피일드에 제2펄스를 짝수피일드에 공급하게 되면 CCD카메라의 한 프레임의 영상에는 홀수 및 짝수피일드에서의 펄스조명에 의한 입자가 기록된다. 이 영상은 연속적으로 영상기록장치(Hi-8 mm 캠코더 등)에 녹화되며 이렇게 저장된 영상이 속도벡터의 추출에 이용된다. NTSC방식의 경우 CCD카메라는 필드축적(field integration) 및 비월주사(interlace scanning) 방식으로 선정하여야 하며 카메라의 조리개는 광량을 최대로 받아들일 수 있도록 최대 값으로 선정하는 편이 좋다. AOM 컨트롤러는 이와 같이 설정된 펄스간격 및 펄스 폭으로 레이저출력부 전방에 위치한 AOM 유니트에 인가신호를 100 MHz의 고주파수로 공급하며 이 유니트는 레이저에서 출력된 직진광을 미소각도(약 1~2도)로 편향시킨다. 이 때에 밝기의 강도가 약 1/2로 감소된 제1차(first-order)의 편향광 및 강도는 미약하나 편향각이 더 큰 고차의 편향광이 동시에 방출되므로 조리개를 이용하여 제1차 편향광만을 통과시킨다. 이 편향광은 원통형렌즈를 통과하면서 2차원의 시이트 광을 계측영역에 조사되게 된다.

그림.9는 4개의 펄스를 AOM에 인가한 경우 시간간격과 펄스폭에 따른 결과 영상이다. 원시영상은 펄스가 주어질 때만 짝수필드와 홀수필드에 나누어 저장됨을 알 수 있다.

Lee 등^{19,20)}이 AOM(Kanomax, 10 μsec해상도)을 이용하여 수중프로펠러의 후류계측과 이중원관의 흐름에 관한 PIV계측 결과를 발표하였다. 이 방식으로 고출력의 연속광 레이저와 고감도의 CCD카메라를 조합하면 약 수십 m/sec 까지의 속도계측이 원리적으로 가능하다.

7. 맺음말

이 해설에서는 PIV의 원리와 시스템의 구성 그리고 PIV계측기술이 고속유동의 계측에 활용되고 있

는 사례를 소개하였다. 유체공학에 있어서 가시화
계측기술의 백미라고 여겨지는 PIV계측기술을 이
용하고자 하는 연구자에게 조금이라도 기여가 된다
면 더한 보람이 없겠다.

참고문헌

1. 이영호, 최장운, "PIV분류와 원리", 대한기계학
회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162, 1996
2. 도덕희, "PIV(입자영상유속계) 계측기술", 대한
기계학회지, 제38권, 제10호, pp. 36~41, 1998
3. Visualization Society of Japan, "Handbook of
Flow Visualization," Asakura Book Co.
(Japanese), 1986
4. W. J. Yang, "Handbook of Flow Visual-
ization", Hemisphere Pub. Co. 1989
5. W. Merzkirch, "Flow Visualization", 2nd ed.,
Academic Press Inc. 1987
6. R. C. Gonzalez, "Digital Image Processing",
Addison Wesley Pres., 1987
7. D. H. Doh, A Study on Three Dimensional
Particle Imaging Thermometry and Velo-
cimetry Using Liquid Crystal, Ph.D. Thesis
Univ. Tokyo, 1995
8. 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, "화상처리기법
을 이용한 온도장 및 속도장 동시측정기법 개
발", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(2), pp.
653~658, 1996
9. T. S. Kwon, H. J. Sung and J. M. Hyun,
"Experimental Investigation of Uniform -
Shear Flow past a Circular Cylinder," ASME
JFE Vol. 114, pp. 457~460, 1992
10. Y. G. Kim, "Digital Vector Image Processing
of Lid-Driven Rotating Cavity Flow," J. of
KSME Vol. 9 No. 2, pp. 187~196, 1995
11. 김재원, 엄정섭, 임택규, "영상처리기법을 이용
한 원통형 용기내의 회전유 속의 측정", 공기
조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제1호, pp. 13~
19, 1995
12. 심준환, 조민태, 서상호, 유상신, "입자영상유속
계를 이용한 분기형 덕트내 유동의 가시화," 대
한기계학회 춘계학술대회논문집(2), pp. 641~
646, 1996.
13. 최장운, 도덕희, 이영호, "PIV에 의한 가정용
냉장고팬 유입부의 속도계측", 대한기계학회
춘계학술대회논문집(2), pp. 670~674, 1996
14. 이창식, 이기형, 전문수, 임경수, "PTV시스템
을 이용한 가솔린 기관의 실린더내 정상유동
해석," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집,
pp. 421~426, 1996
15. C. E. Willert and M.Gharib, "Digital Particle
Image Velocimetry", Exp. in Fluids, Vol. 10,
pp. 181~193, 1991
16. R. D. Keane and R. J. Adrian, "Theory of
Cross-Correlation Analysis of PIV Images,
Flow Visualization and Image Analysis," F.
T. M. Nieuwstadt (ed.) Kluwer Academic
Pub., pp. 1~25, 1993
17. R. C. Gonzales and R. E. Woods, Digital
Image Processing, Addison-Wesley Pub.,
1992
18. R. D. Keane and R. J. Adrian, "Optimization
of Particle Image Velocimeters. Part 1:
Double Pulsed Systems", *Meas. Sci. Technol.*
Vol. 1, pp. 1202~1215, 1990
19. Y. H. Lee, D. H. Doh, J. W. Choi, "A Study
on Video-Fields Correlation PIV for High
Speed Flows", Proc. of 1st Pacific Sym-
posium on Flow Visualization and Image
Processing, Hawaii, 1997
20. Y. H. Lee, D. H. Cho, M. S. Seo, "A PIV
Analysis of Confined Jet Mixing Flow
within Circular Pipe," Proceedings of
International Conference on Fluid Engineering,
VOL. II ICFE'97, pp. 663~668, 1997