

PIV 기술의 현황과 발전

· 이 상 준 | 포항공과대학교 기계공학과, 교수
e-mail : sjlee@postech.ac.kr

이 글에서는 화상처리를 이용한 PIV 속도장 측정기법에서의 하드웨어 및 소프트웨어의 발전 추이와 현황 그리고 발전 전망에 대해 소개한다.

PIV Hardware

PIV (particle image velocimetry : 입자영상 유속계) 속도장 측정시스템은 크게 레이저, 광학부품, CCD 카메라, 산란입자, 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 컴퓨터와 화상처리기술의 발달로 인해 PIV 속도장 측정기법은 하루가 다르게 발전하고 있다. 하드웨어(hardware) 측면에서 보면 CCD 카메라와 레이저가 분야가 크게 발전하고 있다. 최근 들어 1K x 1K 픽셀(pixel) 해상도로 1,000fps(frame per second)까지 찍을 수 있는 고속 디지털 카메라가 개발되었으며, 일반 필름 카메라의 분해능과 비슷한 수준인 해상도 4K x 4K 픽셀의 고해상도 디지털 카메라가 상용화되어 활용되고 있다.

레이저 분야도 그 동안 많이 발전하여 고 출력력을 내면서도 크기를 크게 줄이고 신뢰성을 향상시킨 제품이 개발되었다. 특히 최근에는 열유체 분야에서 PIV 시스템의 수요가 크게 늘어남에 따라

PIV 전용의 디지털 카메라와 2-head Nd:Yag 레이저가 개발되어 동기(synchronization)와 호환이 예전에 비해 훨씬 쉽게 되었다.

초기의 PIV 속도장 측정기법에서는 레이저 평면광에 의해 산란된 입자영상을 필름에 이중노출(double-exposure) 방식으로 저장하고, 유동 화상의 미소 조사구간 내 영상을 Young's fringe 분석이나 광학적 방법으로 조사구간을 대표하는 속도벡터를 구하였다. 최근에는 이와 같은 광학적

PIV 기법은 거의 이용하지 않고 있으며, 디지털 CCD 카메라를 이용하여 입자화상을 구한 후 조사구간에 대한 상관함수를 직접 계산하여 속도장을 구하는 상관방식의 디지털 PIV 기법이 주류를 이루고 있다. 그런

데, 자기상관(auto-correlation) 방식의 PIV 측정에 있어서 야기되는 속도벡터의 방향 모호성(directional ambiguity) 문제는 컬러 코딩(coding), 회전거울과 같은 여러 가지 방법을 활용하여 해결하고 있으며, 최근에는 영상을 편이(shifting)시키는 기능을 가진 디지털 카메라가 개발되어 이 문제를 쉽게 해결할 수 있게 되었다.

상호 상관방식 PIV의 경우, 방향의 모호성은 없으나, 고속유동

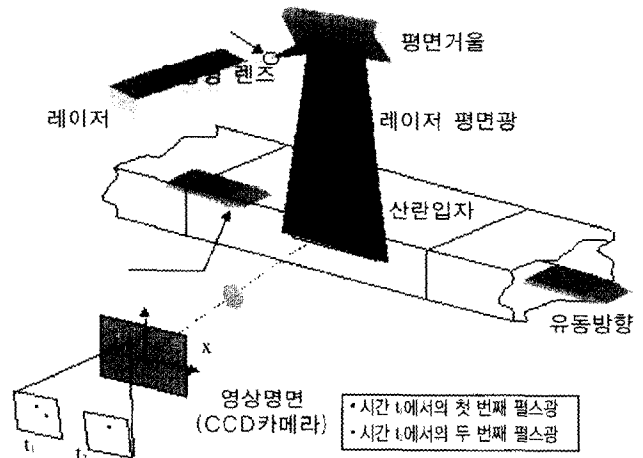


그림 1 PIV 속도장 측정시스템의 구성

을 측정하기 위해서는 짧은 frame straddling 기능이 있는 CCD 카메라를 주로 사용하고 있다. 고해상도 CCD 카메라를 사용하면 이산화 오차(digitizing error)와 화상처리에 기인한 에러도 크게 줄일 수 있다.

PIV 속도장 측정기법을 난류운동에 적용하기 위해서는 미소 조사구간을 작게 하여 충분한 공간 분해능을 확보하여야 한다. 예를 들어 해상도가 1K x 1K인 CCD 카메라를 이용하여 작은 스케일(scale)의 eddy 거동을 연구하고자 할 경우에도 관측구간은 30mm x 30mm을 넘기 힘들다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 유동화상을 35mm 이상의 초대형 필름이나 2K x 2K 픽셀 이상인 고해상도 카메라를 사용하여 입자영상을 획득하거나 서브 픽셀 수준의 정확도를 가진 PIV 시스템을 사용하여야 한다. 또한, 난류구조를 정확히 해석하기 위해서는 무수히 많은 순간 속도장을 앙상블(ensemble) 평균하여 난류강도, Reynolds 전단응력, 난류운동에너지 등과 같은 난류통계치들의 공간적 분포를 구하여야 한다. 일반적으로 앙상블 평균에 사용된 순간 속도장의 개수가 증가할수록 난류통계치의 정확도는 증가하게 되나, 처리해야 할 유동영상의 갯수가 증가하게 되므로, 화상기억장치의 메모리 용량 증가와 함께 속도장 계산 및 후처리 과정에 들어가는 전체 계산시간이 급격히 늘어나게 된다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 속도장 취득에 필요한

계산시간을 획기적으로 줄일 수 있는 새롭고 효과적인 PIV 알고리즘의 개발도 요구되고 있다.

실제 대부분의 유동은 3차원 난류이므로 유동특성을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 속도장 측정시스템이 필요하다. 현재는 두 개 이상의 CCD 카메라를 사용하여 stereoscopic 영상기법으로 측정단면 내부의 3차원 속도 성분을 추출해내는 stereoscopic PIV 기법이 주로 사용되고 있다. 또 다른 3차원 속도장 측정기법인 홀로그래픽 PIV-(HPIV)는 이중펄스(double pulse) 방식의 시준된(collimated)레이저 빔에 의해 산란된 3차원 입자영상을 한 장의 홀로그래픽 필름 위에 압축 저장하였다가 나중에 다시 재생하는 3차원 volume 속도장 측정법이다. 그러나 HPIV 시스템에는 코히어런스(coherence)특성이 좋은 고가의 펄스형 레이저와 정밀도가 높은 광학부품들이 필요하고, 광학적 조절이 쉽지 않으며, 엄청난 양의 데이터 처리에 소요되는 계산시간이 너무 길다는 단점이 있다. 그러나 향후 화상처리 기술 및 홀로그램 관련 기술이 발달함에 따라 이 분야 연구도 크게 발전할 것으로 예상된다.

PIV Software

PIV 소프트웨어 (software) 측면에서

보면, 최근 들어 여러 가지 미소 조사구간(interrogation) 분석과정이 개발되어 활용되고 있다. 예를 들어, 두 번째 미소조사구간의 오프 셋을 국부적인 변위와 같은 값으로 사용하면 최대 상관값과의 SNR 값이 증가되기 때문에 보다 많은 데이터를 얻을 수 있다. 그리고 조사구간을 세밀하게 구분하고, 그 크기를 줄임으로써 이러한 다중 미소조사구간 분석방식의 성능을 향상시키고 있다.

그리고 기존의 PIV 기법의 공간해상도를 증가시키기 위하여 순환상관방식(iterative scheme)이 제안되었다. 이 방법은 상대적으로 넓은 조사구간에 대해서 추출된 PIV 속도벡터를 예측자(predictor)를 사용하여 미리 설정되어진 단계에 따라 조사구간의 크기를 줄여가면서 속도벡터를 추출하는 방법이다. 그러나 조사구간을 너무 작게 설정하면 조사구간 내에 있는 입자 쌍이 감소하게 되어 정확한 상관함수 값을

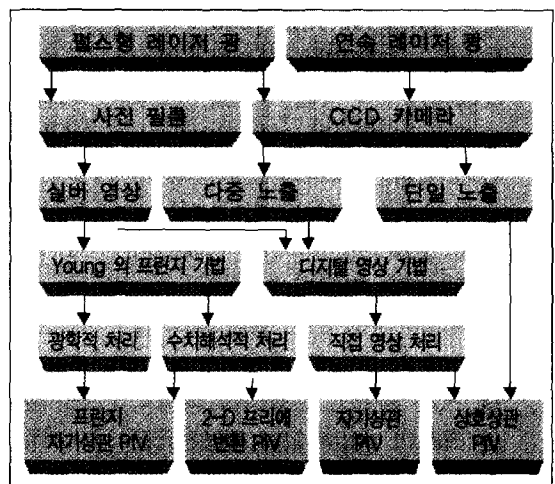


그림 2 PIV 속도장 측정기법의 분류

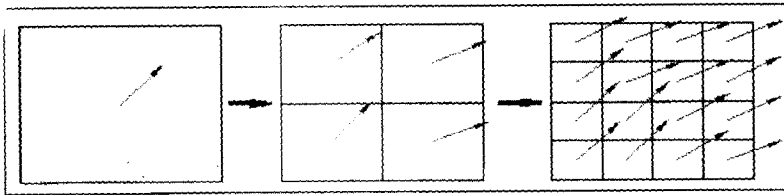


그림 3 미소조사 구간의 크기를 순차적으로 줄여나가는 순환상관방식 PIV 측정기법의 개략도

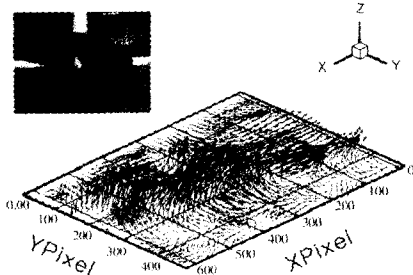


그림 4 Stereoscopic PIV를 이용하여 측정된 한 종류의 3 차원 순간속도장

찾기가 어렵다. 조사구간 내에 입자 쌍의 수가 네 개보다 적으면, 취득률(detection rate)은 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 순간상관방식에서 상관관계의 최대값을 찾기 위한 특별한 방법들을 적용하여 입자 쌍의 수가 작은 미소 조사구간에서도 정확한 속도벡터를 구할 수 있다. 최근에는 조사구간 내에 존재하는 입자들을 PIV방식으로 순환

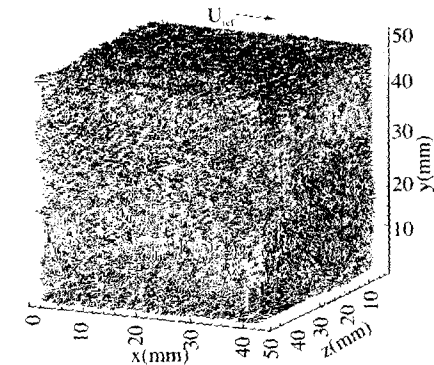


그림 5 3-D 홀로그래픽 PIV를 이용하여 측정된 사각 덕트 내부유동의 3차원 순간속도장 (속도 벡터 : 818,583개)

상관방식 하여 공간해상도를 높일 수 있는 하이브리드 PIV 방식도 개발되어 사용되고 있다.

기존의 고정된 조사구간에서의 상관관계를 이용한 PIV기법의 단점을 극복하기 위하여 제안된 또 다른 PIV 신호처리 기법으로는 두 번째 조사구간의 입자영상을 유동의 속도구배를 고려하여 변형을 주는 입자영상왜곡(Pid : particle image distortion)방식과 상관관계 유동영상의 매핑(mapping)을 기초로 하여 영역변환(domain transformation)을 이용한 CIV (correlation image velocimetry)방법 등이 제안되었다. 이 방식들은 상관함수 계산 시 입자 변위의 공간미분까지 고려하므로 2차원 혹은 3차원 공간에서도 적용이 가능하다.

디지털 PIV속도측정기법에 있어서, 최근 들어 가장 두드러진 특징 중 하나는 최대 상관값의 위치를 서브 픽셀 범위의 작은 정밀도로 계산할 수 있다는 것이다. 이 방식으로 8-비트(bit) 디지털 영상의 경우 1/10 혹은 1/20 픽셀 단위까지의 정확도를 얻을 수 있다. 이러한 평가 방식을 통해 서브 픽셀 정확도로 미소조사구간 내 입자

영상을 효과적으로 분석할 수 있다.

PIV속도장 측정에 있어서 유동의 3차원성 및 난류변동, 레이저 평면광의 강도분포 불균일성, CCD 카메라의 노이즈 등에 기인하여 에러벡터가 발생할 수 있다. 이와 같은 에러벡터 문제를 해결하기 위해서 레이저 평면광의 강도분포를 균일하게 만들고, 고해상도 카메라를 사용하고 있다. 그러나 실제로 구한 난류유동의 순간속도장은 에러벡터 처리 과정을 거치더라도 약간의 에러벡터를 포함할 수 있는데, 이 에러벡터들을 검출하기 위해 사용자가 직접 데이터 파일을 일일이 검사하는 것은 상당한 시간이 소요되며, 매우 지루한 작업이다. 향후 이러한 에러벡터 검출과정을 효과적이고 자동적으로 처리할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다.

맺음말

결론적으로 이러한 화상처리를 이용한 PIV속도장 측정기법은 점점 발달되어 가는 컴퓨터 및 화상처리 기술에 힘입어 공간분해능과 시간분해능이 크게 향상될 것이며, 측정 정확도가 크게 향상되어 멀지 않은 장래에 수치해석 결과와의 바로 비교할 수 있는 수준이 될 것으로 예상된다. 또한 3차원 속도장 측정, 특히 stereoscopic PIV와 홀로그래픽 PIV 분야가 향후 큰 발전을 이룰 것으로 기대된다.