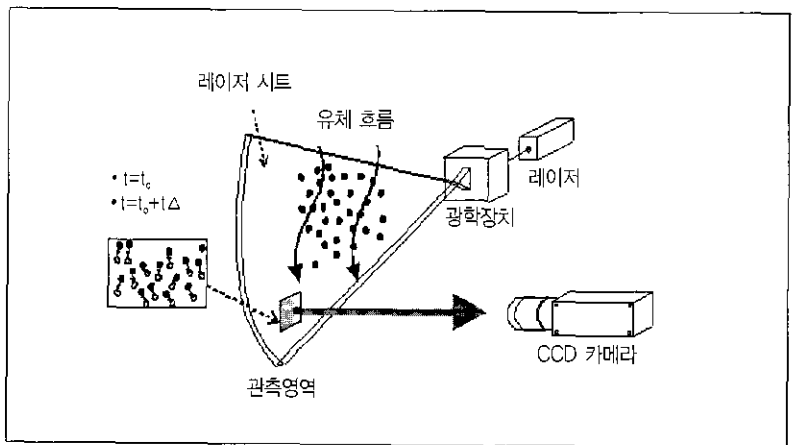


난류유동의 PIV속도장 측정

이 글에서는 3차원 난류유동의 시간에 따른 속도의 공간적인 변화와 난류구조를 해석할 수 있는 PIV 속도장 측정기법을 소개하고자 한다. 이상준

자연과 산업현장에서 일어나는 대부분의 유동은 비정상, 3차원 난류유동이며, 우리의 생활은 이들 유체유동과 밀접한 관련을 맺고 있다. 특히 산업발달과 함께 생활수준이 향상됨에 따라 열유체 관련 제품의 성능 및 효율 향상, 에너지 절약, 환경오염의 감소 등에 대한 사회적 요구가 크게 증가하고 있다. 이와 관련된 난류유동의 물리적 특성을 이해하고 이를 효과적으로 제어하기 위해서는 시간에 따라 빠르게 변화하는 난류유동의 속도장(velocity field)변화를 정확하게 측정하고 해석하는 것이 필요하다. 그러나 난류유동은 유동구조가 매우 복잡하고 유동속도는 시간(t)과 공간(x, y, z)의 함수로 주어지므로 국부적인 속도정보만을 제공하는 LDV나 열선유속계와 같은 기존의 점(point)계측 방법으로는 시간에 따라 변화하는 유동의 공간변화를 정확하게 해석하기 어렵다.

최근 들어 컴퓨터와 전자산업



레이저, CCD카메라 및 화상처리장치로 구성된 PIV 속도장 측정시스템의 구성도

의 발달과 디지털 화상처리기술의 도입으로 유동 내부 입자 (particle)들의 변위(displacement) 정보를 담고 있는 유동화상(flow image)을 이용한 PIV(Particle Image Velocimetry)속도장 측정기법이 개발되어 정성적인 유동정보뿐만 아니라 정량적인 속도장 정보를 구할 수 있게 되었다. 이와 같은 정량적인 유동가시화 기술은 기존의 유속측정법을 획기적으로 개

선한 첨단 기술로써 난류유동 연구에 새로운 변화를 가져오고 있다. 현재 선진국에서도 활발하게 연구 개발하고 있는 PIV속도장 측정기술은 3차원 난류유동의 시간에 따른 속도의 공간적인 변화를 측정할 수 있으며, 연속적으로 구한 속도장을 통계 처리하여 주어진 유동의 난류구조까지도 해석할 수 있다. 이러한 속도장 측정기술은 빠른 속도로 발전하고 있는 컴퓨터 및 전자기술에 힘입

이상준 / 포항공과대학교 기계공학과, 교수 / E-mail : sjlee@postech.ac.kr

어 향후 복잡한 열유동 문제의 진단 및 규명에 있어서 가장 효과적이고 강력한 계측방법이 될 것이다.

PIV 속도장 측정원리

PIV 속도장 측정기법의 기본 원리는 주어진 시간간격(ΔT) 동안 움직인 유동입자들의 변위정보를 CCD카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후, 화상처리기법을 이용하여 입자의 이동 변위를 계측하고 이를 시간간격 ΔT 로 나누어줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다. 따라서 한 순간에 유동단면 전체의 속도장을 구할 수 있어 유동구조의 변화를 쉽게 해석할 수 있다. 화상처리를 이용한 속도장 측정시스템은 크게 레이저 및 optics, 영상기록장치, 유동입자, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다.

속도장 측정은 입자영상 (particle image)을 취득, 속도벡터를 추출하고, 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어진다. 입자영상을 취득하는 과정에서 우선해야 할 일은 작동유체에 맞는 입자를 선정하는 것이다. 입자는 유동을 정확히 추종할 수 있도록 충분히 작아야 하며, 선명한 입자영상을 얻을 수 있도록 레이저 평면광에 잘 산란되고 또 입자농도가 충분히 높아야 한다. 이러한 조건들을 고려하여 입자를 선정 후, 실린더형 렌즈를 이용하여 레이저 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동

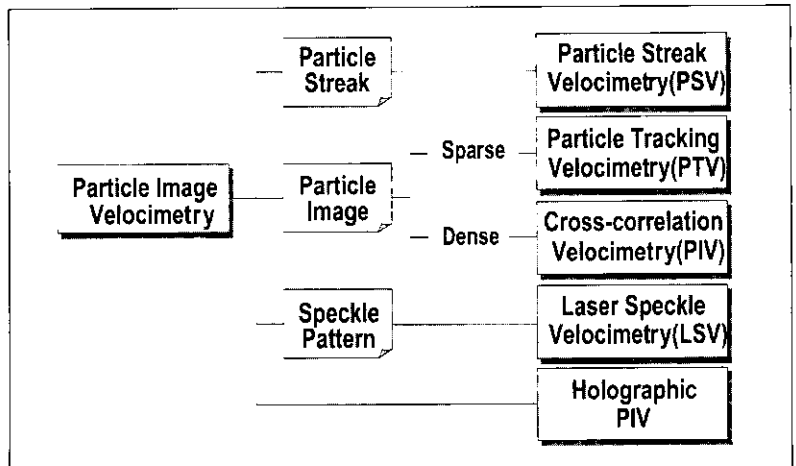
평면을 조사하게 된다. 마지막으로 CCD 카메라를 평면광에 수직으로 설치하여 입자영상을 취득하게 된다.

화상처리를 이용한 속도장 측정법에는 일정 시간간격(ΔT) 동안 움직인 입자변위를 구하는 방법에 따라 PSV(Particle Streak Velocimetry), PTV(Particle Tracking Velocimetry), PIV, LSV(Laser Speckle Velocimetry) 등으로 나뉜다. 그리고 이와 같은 화상처리를 이용한 속도장 측정기법 모두를 넓은 의미의 PIV라 부르기도 한다. 이 중에서 PSV와 LSV는 초기에 주로 사용된 방법으로 난류유동의 속도장 측정에는 적합하지 않다. 최근에는 PIV와 PTV(Particle Tracking Velocimetry)의 두 가지 방법이 주로 사용되고 있다.

PIV기법은 유동화상의 미소 조사구간 (interrogation window) 내 산란입자 영상들의 계조치(grey level) 분포에 대한 Fourier 변환이나 직접적인 상관

계수를 계산함으로써 조사구간을 대표하는 평균속도를 구한다. 초기에는 두 개 이상의 펄스 (pulse)광에 의해 산란된 입자영상을 고감도 필름이나 CCD카메라에 저장하고 조사구간 내부 입자영상을 Young's fringe 분석이나 자기상관(autocorrelation)함수를 이용하여 속도장을 계측하는 PIV방식이 주류를 이루었다. 이 방법은 속도벡터 방향결정의 모호성과 SNR(signal/noise ratio)이 낮다는 문제점을 갖고 있다. 최근에는 순간 입자화상을 디지털화한 후 조사구간 내 입자 분포사이의 상호상관(cross-correlation) 함수를 직접 혹은 FFT 연산으로 계산하여 가장 큰 상관계수 값을 갖는 위치를 구해 속도장을 구하는 상호상관방식의 PIV가 주류를 이루고 있다. 일반적으로 PIV방식은 입자밀도가 높은 경우에 적용되며, 조사구간의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다.

PTV방식은 연속적으로 획득



입자 변위를 구하는 방법에 따른 속도장 측정기법의 분류

된 여러 장의 입자화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후, 입자들의 궤적을 추적함으로써 입자변위를 결정한다. 입자추적 알고리즘은 보통 연속된 2장 이상의 화상을 요구하며, 각 입자의 가능한 변위 벡터들 모두를 고려하여 변위의 크기나 각도가 최소 분산을 갖는 입자경로를 유효한 변위로서 간주하게 된다. PTV방식은 각 입자위치에서의 진정한 Lagrangian 속도벡터를 제공하며, 속도의 방향 모호성이 없는 반면, 각 입자의 화상이 분별 가능할 정도의 입자밀도를 갖는 유동에 유용하다.

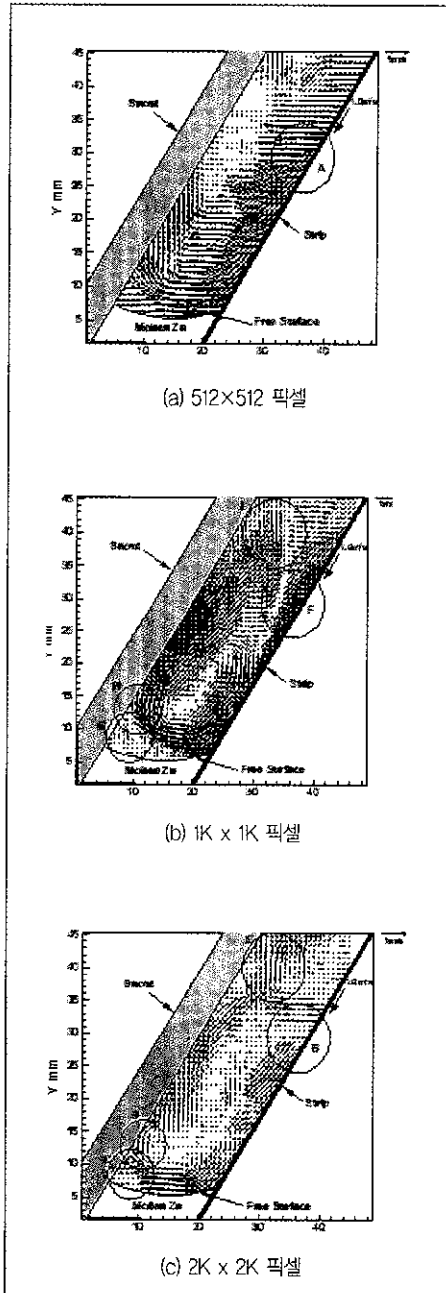
선진국에서는 이와 같은 화상처리를 이용한 속도장 측정의 정확도와 측정 가능한 속도범위를 확대시키기 위한 연구를 활발히 진행중이다. 예를 들어, 고해상도 CCD카메라와 PIV전용 2-head 펄스레이저를 도입함으로써 시간 및 공간해상도를 증가시켜 측정 정확도와 측정 가능한 유속범위를 크게 향상시켰으며, 계산시간을 감소시키기 위한 새로운 알고리즘 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 최근 들어 복잡한 난류유동의 3차원 계측과 관련한 새로운 측정기술의 개발도 시도하고 있다.

난류유동의 PIV계측

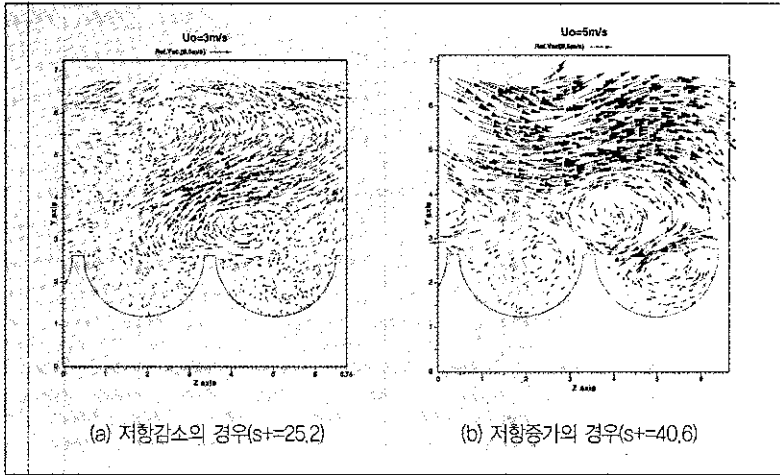
속도장 측정기법으로 난류유동을 정확히 계측하기 위해

서는 난류 eddy 거동을 충분히 잡을 수 있을 만큼 충분한 시간분해능과 공간분해능을 가져야만 한다. 특히 PTV에 비해 낮은 공

간분해능을 가지는 PIV방식에서는 고해상도 카메라와 높은 강도의 레이저를 활용하여야 난류유동을 정확히 계측할 수 있다. 예를 들어 난류에너지의 소멸과 관련한 난류구조를 해석하고자 한다면 난류소멸과 관련된 특성길이인 Kolmogorov scale 보다 더 작은 공간분해능으로 측정하여야 한다. 경계층과 같은 난류전단유동의 경우 가약 0.2 mm 정도이므로 이것을 분해능이 1K×1K 픽셀(pixel)인 CCD카메라를 이용하여 32×32 subpixel 정확도를 갖는 PIV기법으로 측정한다면 관측창(field of view)의 크기를 3×3 mm² 이내로 줄여야 한다. 그리고 작은 크기의 eddy거동을 연구하고자 할 경우에는 이웃한 속도벡터 사이의 거리나 미소조사구간의 크기를 유동의 Taylor microscale λ 보다 작게 하여 충분한 공간분해능을 확보하여야 한다. 그러나 λ 가 몇 개의 조사구간을 차지할 정도로 공간분해능을 증가시키게 되면 측정구간이 너무 작아져 전체적인 유동정보를 얻고자 하는 본래 취지를 벗어나게 된다. 만약 Taylor micro-scale λ 를 두 개의 조사구간 크기로 하여 측정할 경우에는 관측창은 30×30 mm²을 넘기 힘들다. 이와 같은 공간분해능 문제를 해결하기 위해서는 유동화상을 35 mm 이상의 필름이나 해상도가 2K×2K 픽셀 이상인 CCD카메



CCD카메라의 해상도 변화에 따른 아연도금공정의 SNOUT 내부 유동의 속도장 비교



(a) 저항감소의 경우($s=25.2$)

(b) 저항증가의 경우($s=40.6$)

Cinematic PIV로 측정된 반원형 리블렛 상부 난류경계층의 속도장

를 사용하여야 한다. 최근에는 4K×4K의 분해능을 가진 디지털 카메라도 상용화되었는데, 이 정도면 일반 필름카메라의 분해능과 비슷한 수준이다.

PTV방식의 경우 연속적으로 획득된 입자영상으로부터 각 입자위치에서의 Lagrangian 속도 벡터를 측정하고 속도벡터의 방향 모호성도 없으나, 입자밀도가 상대적으로 낮다는 단점을 극복해야만 난류유동을 효과적으로 계측할 수 있다. 이를 위해서는 효율적인 particle tracking 알고리즘을 개발하여 측정 정확도와 측정 가능한 속도범위를 확대시키고, 추출되는 속도벡터의 수를 크게 늘려야 한다. 일반적으로 2-frame PTV방식이 multi-frame PTV방식에 비해 높은 속도벡터 회복비, 짧은 계산시간 등의 장점이 있어, 난류유동 계측에 보다 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 PTV의 경우 PIV방식에 비해 상대적으로 큰 산란입자를 사용하므로 높은 주파수의 난류유동

을 tracer 입자들이 제대로 잘 추종하는지를 점검하여야 한다.

속도장 측정에 사용되는 펄스형 레이저는 펄스 폭이 5-7nSec로 Kolmogorov 시간적도 보다 훨씬 작아 시간분해능이 매우 우수하다. He-Ne 혹은 Ar-ion 같은 CW 레이저의 경우, 다면경 (polygon mirror)을 회전시키거나, AOM(Acoustic Optical Modulator)을 사용하면 수십 KHz의 펄스형 레이저 평면광을 형성시킬 수 있다.

고속유동의 속도장 계측에는 짧은 시간간격 ΔT 사이에 두 장의 영상을 독립적으로 얻어야 하는데, 여기에는 2대의 카메라를 동기시켜 사용하거나 이중노출의 single-frame 방식, 혹은 frame straddling이 가능한 프레임 이송 방식의 CCD카메라로 입자영상을 취득하여야 한다. 자기상관 방식의 single-frame PIV에 나타나는 방향모호성 문제는 컬러 coding, 회전거울, 영상편이 (image shifting) 등을 활용하여

해결할 수 있다. 최근에는 속도장 측정과 관련한 여러 가지 문제점들을 크게 해소시킨 PIV 전용의 CCD카메라와 2-head Nd:Yag 펄스 레이저가 개발되어 활용되고 있다. 이 밖에 회로기술의 발달로 실험장치와 레이저와 카메라를 동기(synchronize) 시키고 on-line측정하는 것도 가능하게 되었다.

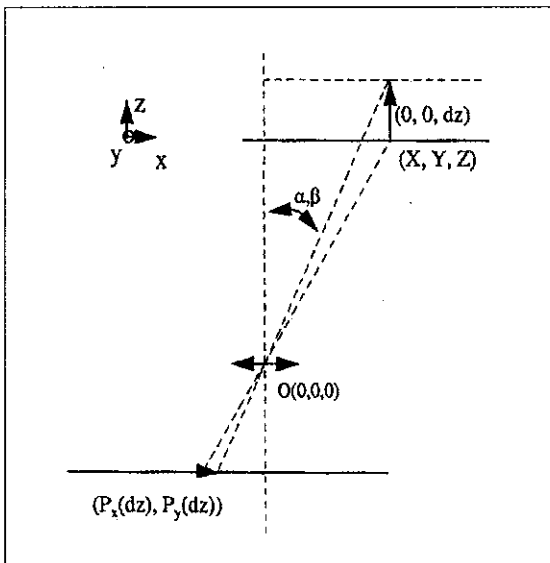
팬이나 펌프와 같은 유체기계 내부의 회전유동을 측정할 때에는 조건부 위상평균 PIV 측정법으로 회전 날개의 위상에 맞추어 순간 속도장을 측정하여야 위상 변화에 따른 유동구조를 해석할 수 있다. 그리고, DNA chip이나 마이크로 채널 내부 유동처럼 관측장이 마이크로 미터(μm) 크기인 경우에는 nano-meter 크기의 형광입자를 추적입자로 사용하고 카메라 앞에 마이크로 렌즈를 부착한 micro-PIV시스템을 구성하여야 한다.

난류유동의 PIV속도장 측정에 있어서 유동의 3차원성 및 난류 변동에 기인하여 시간간격 ΔT 사이에 측정영역 내부로 새로운 입자가 들어오거나 기존 입자가 나감으로써 에러벡터가 발생하게 된다. 그리고 레이저 평면광 강도 분포의 불균일성 등에 의한 입자 변위정보의 손실에 기인하여 에러벡터가 발생하기도 한다. 또한 CCD 카메라 자체의 dark current 노이즈와 비디오 출력신호에 외부 노이즈가 섞여 영상의 SNR이 나빠져 입자영상의 질이 저하된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 레이저 평면광

의 강도를 균일하게 하고 고해상도 카메라를 사용하여 이산화(digitizing) 에러와 화상처리에 기인한 에러를 줄여야 한다. 그리고 속도구배가 큰 난류전단층 영역에서는 올바른 벡터도 에러벡터로 잘못 인식할 가능성이 높으므로 이점에 유의하여야 한다. 그리고, 추출된 속도장 결과를 후처리 과정에서 분석하거나 검출해 내지 못한 에러벡터를 수작업으로 처리하는 단계에서 GUI(Graphic User Interface)를 이용하게 되면 에러벡터를 용이하게 제거할 수 있다.

Cinematic PIV와 난류구조 해석

고속 CCD카메라를 사용하여 순간 속도장을 연속적으로 측정하는 Cinematic PIV방식은 난류 유동 연구에 크게 도움이 된다.



Out-of plane 속도성분에 기인한 2-D PIV 측정의 변위 error (Px, Py)

이 Cinematic PIV방법을 활용하면 시간에 따라 변화하는 유동구조의 공간적 evolution을 파악할 수 있으므로 난류유동에 대한 물리적 이해를 크게 향상시킬 수 있다. 또한 순간 속도장 전체를 앙상블 평균하여 난류통계값 들을 구하게 되면 난류구조를 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이다. 이때 얼마나 정확한 난류 통계치를 얻느냐는 앙상블 평균에 사용된 순간 속도장 개수 N이 증가할수록 측정 정확도는 증가하게 된다. 그러나 N이 증가할수록 처리해야 할 입자영상의 숫자가 증가하게 되므로, 영상기억장치의 메모리 용량 증가와 함께 속도장 계산에 들어가는 전체 계산시간이 크게 늘어나게 된다. 이 문제를 해결하기 위해서는 새롭고 효과적인 속도 취득 알고리즘의 개발과 컴퓨터 계산용량의 확대가 요구된다. PTV방식의 경우, 일반적으로 평균속도분포는 100 장의 순간 속도장으로도 충분한 수렴성을 얻을 수 있지만, 난류 통계치는 최소한 400 장 이상의 순간속도장을 앙상블 평균하여야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

난류통계 처리시, PIV 방식은 일정 간격의 격자점에서 속도벡터를 구하므로 문제가 없으나, PTV방식의 경우 입자위치(x_i, y_i)에서 구한 속도벡터(u_i, v_i)를 균일 사각격자로 보간해 주는 과정이 필요하다. 따라서 실제 난류유동을 측정할 때에는 주어진 유동에 대해 수 백장의 순간속도장을 구한 후, 이들을 앙상블 평균하여 각 격자점에서의 평균속도를 구하고, 순간속도장에서 평균속도장을 빼준 변동속도장을 다시 통계처리 하여 난류강도, 레이놀즈 전단응력, 난류 운동에너지 등의 공간분포를 구하게 된다.

3차원 PIV 속도장 측정

우리가 다루는 유체문제는 정도의 차이는 있지만 대부분 3차원 난류유동이다. 3차원 유동을 일반적인 2-D PIV 속도장 측정 기법으로 평면광 내부의 in-plane 속도성분을 측정하게 되면 out-of-plane 속도성분에 기인하여 측정오차가 발생하게 된다. 따라서, 이들 난류유동을 정확하게 해석하기 위해서 3-D PIV 속도장 측정기술을 적용하여 3차원 유동정보를 얻고자 하는 시도는 자연스럽게 큰 관심을 끌고 있다. 그동안 많은 연구를 통해 다양한 3차원 PIV기법들이 개발되었으나, Stereoscopic PIV(SPIV)와 Holographic PIV(HPIV)가 주로 사용되고 있다.

Stereoscopic PIV(SPIV)는 일반적으로 두 대의 카메라를 사용하여 레이저 평면광으로 조명

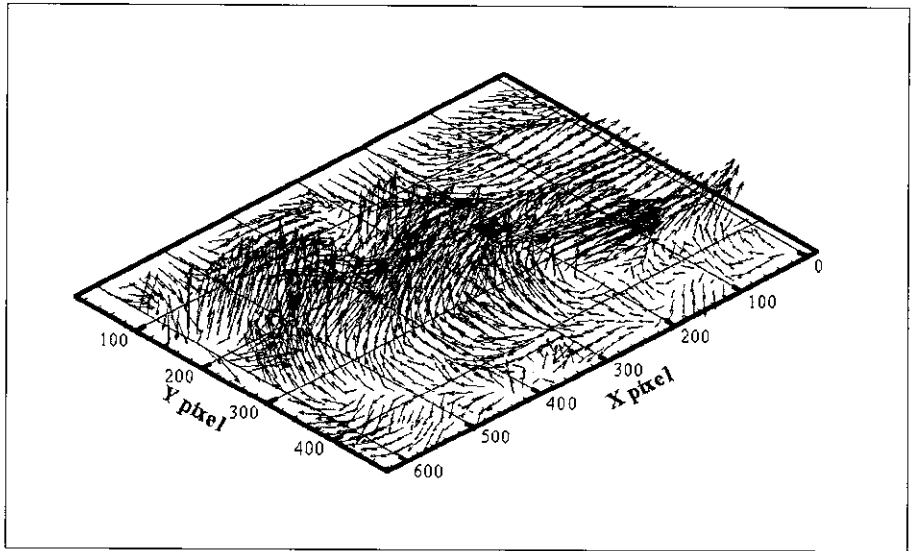
된 유동단면에 대하여 stereo matching 기법으로 3차원 속도성분을 측정하게 된다. 여기서 out-of-plane 속도성분은 두 대의 카메라로 측정한 평면 데이터로부터 도출하게 된다. SPIV 기법에서는 측정하고자 하는 유동을 2개의 서로 다른 각도에서 관찰하여야 하는데, stereoscopic 접근 방법에 따라 translation 방법과 angular displacement 방법으로 나누어진다. 먼저 카메라의 광학축(optical axes)이 측정 단면에 수직한 translation 방법은 보정이 간단하나 카메라 배치가 까다롭다. 반면에 angular displacement 방법은 카메라의 광학축이 측정평면과 일정 각도를 이루어 활용 용도가 넓으나 보정과

장이 까다롭다. SPIV 기법은 하나의 입자 변위를 여러 대의 카메라가 동시에 촬영하여야 하므로 한번에 구할 수 있는 속도벡터의 수가 많지 않고, 아직까지 복잡한 3차원 난류유동을 쉽고 정확하게 측정하기에는 개선의 여지가 많이 남아 있다.

Holographic PIV(HPIV)는 double pulsed된 레이저 빔에 의해 산란된 3차원 입자영상을 한 장의 hologram 위에 압축 저장

한 후, 나중에 다시 재생하여 입자변위를 측정하고 속도장을 측정하는 방법이다. 따라서 HPIV는 3차원 체적 내부 입자들의 u,v,w 속도성분을 측정할 수 있는 이상적인 3차원 속도장 측정 기법이다. 그러나 HPIV 시스템

적용되고 있으며, 자동차, 항공 및 우주, 에너지, 철강, 전자산업과 같은 모든 산업 전반에 걸쳐 나타나는 유체문제뿐만 아니라, 대기오염이나 해양오염과 같은 환경 관련 열유체 문제 해석에 있어서도 필수적인 계측기술이 되



Translation 방식의 Stereoscopic PIV로 측정된 축류팬 후류 중앙 단면에서의 3차원 속도장

은 펄스형 coherent 레이저가 고가이고, optics들의 광학적 alignment에 어려움이 따르며, 데이터 처리에 소요되는 계산시간이 너무 길어 아직까지는 비현실적인 요소가 많다. 그러나 향후 화상처리기술 및 hologram 관련 기술의 발달로 이 분야 연구도 크게 발전 할 것이다.

PIV 속도장 측정기술은 미세 가공기술(MEMS) 응용분야와 Bio-fluid 분야의 유동해석에도

고 있다. 결론적으로 PIV 속도장 측정기술은 컴퓨터 및 전자기술의 급속한 발전에 힘입어 공간분해능과 측정 정확도가 크게 향상되어 CFD 결과와 바로 비교할 수 있을 것이며, 향후 복잡한 난류유동의 해석 및 제어 연구에 있어서 가장 효과적이고 강력한 계측방법이 될 것이다.