

PIV의 터보유체기계 적용

이영호*

1. PIV의 기술현황

PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)는 1980년대 중반부터 본격적으로 사용되기 시작한 새로운 유동장 속도계측기법이다.⁽¹⁾ 이 방법은 디지털 영상처리기술과 종래의 정성적인 가시화기법을 병용한 것으로서 최근의 비약적인 컴퓨터관련 기술의 발달에 힘입어 매우 효율적으로 비정상 유동장의 속도를 전 영역에 걸쳐 동시다점 그리고 연속적으로 계측할 수가 있다. 디지털 영상처리는야는 컴퓨터 관련기술과 병행하여 급속하게 발달하여 왔으며 가시화(visualization)에 관련된 연구자들이 이와 같은 기법을 적극적으로 수용하여 유동장의 영상처리를 신속하고도 정도높게 또한 경제적으로 수행할 수 있게 되었다. 현재는 레이저의 광학특성과 정지사진을 적용한 초기의 기법에서 크게 발전하여 종래의 PIV성능을 상회하는 우수한 방법들이 다양하게 제안되고 있으며 많은 적용예가 보고되어 있다.

한편, PIV에서 영상으로 기록된 유동장은 언제나 재처리가 가능하여 실험반복에 따른 유동장의 재현성 문제로부터 자유로운 특징이 있다. 또한 이 방법은 원리적으로 3성분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속적으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 N-S방정식에 대입하여 압력구배향을 공간적분하면 벽면의 정압까지를 포함한 순간 압력장까지도 구할 수가 있다. 또한 추적입자로서 온도감온입자를 이용하면 액체공간에서의 상온범위의 온도분포까지도 동시에 구해진다. 이와 같이 PIV는 5종류의 유체의 물리량을 원리적으로 모두 한꺼번에 측정할 수 있음으로서 전선유체역학에 대응할 수 있는 유일한 계측기법으로 인식되고 있다.

그러나, 이와 같은 원리적인 장점을 갖는 PIV를 터보기계의 유동장해석에 본격적으로 적용하기 시작한 것은 1990년대 초반부터인 것으로 조사가 되고 있다.

또한 대부분의 결과가 임펠러와 같은 회전동익보다는 정지익에 대한 계측결과가 주류를 이루고 있다. 이것은 일반적으로 터보기계에서와 같은 임펠러의 내부흐름을 대상으로 하는 경우에는 고속회전에 따른 유동계측의 문제, 즉, PIV에 적합한 영상을 얻기에 충분한 조명조건의 확보가 어려운 점과 카메라에 입력되는 입력장치의 시간간격을 매우 짧게 하여 선명한 추적입자의 영상을 얻는 하드웨어기술의 구축이 어려웠기 때문이다. 따라서, PIV를 회전유체기계 내부 유동장의 계측에 적용함에 있어서 발생하는 제반 문제점의 완전한 해결은 아직까지 용이하지 않은 실정이다. 이러한 배경으로부터 현재 2차원의 유동장에 대하여 실용적인 계측성과를 자랑하는 PIV연구자의 관점에서 보면 매우 불만족스러운 것이 현실이다. 이러한 첫 번째 이유로서는 원심 임펠러의 회전체모델을 제작할 경우에 조명이 잘 투과할 수 있도록 투명한 재질로서 설계치수에 맞고, 실험환경에 견딜 수 있는 고강도의 것을 확보하는데 큰 어려움이 있기 때문이다. PIV는 원리상 유동장의 영상정보를 이용하기 때문에, 임펠러 내부의 유동장을 계측하려 한다면 이러한 문제가 완전히 해결되어야 한다. 모델재질로서는 아크릴이 주로 사용되고 있으나, 곡면형상의 얇은 블레이드를 다수 제작하여, 임펠러전체를 구성하는 작업자체가 고도의 가공기술을 갖춘 전문가적인 기법을 요하고 이에 따른 제작경비가 크게 소요되는 문제점이 있을 수 있다. 다음으로는 회전하는 임펠러내부의 상대속도를 계측하기 위하여는 임펠러와 함께 회전할 수 있는 영상입력 카메라의 설치가 요구된다. 이때에 출력영상신호를 케이블로서 외부로 연결하여 영상처리장치에 입력하도록 하여야 하며, 신호의 전달을 위하여 회전축과 연결된 슬립링이 사용될 수 있으나 실제 적용예가 드문 실정이다. 한 가지 대안으로서, 임펠러내부의 절대속도를 일반적인 PIV계측기법으로 구한 뒤에 각 속도계측점에서의 해당원주속도를 빼줌으로서 상대속도를 간접적으로 구하는 방법이 제시되고 있다. 그러나 이러한 방법은 원주속도의 산정에 오차가 커질 수가 있으며, 자동 데

한국해양대학교, 기계·정보공학부, 교수
E-mail : lyh@pivlab.net, http://w3.pivlab.net(유동정보연구실)

이더 처리에 어려움이 크게 나타날 수가 있다. 이와 같은 배경으로부터, 지금까지의 연구는 주로 원심 임펠러 출구부근, 디퓨저펌프에서의 입구상호작용 영역, 또는 후류계측에 중점을 두어왔다. 그러나, PIV고유의 계측특성을 최대로 발휘하여, 유체기계의 회전 내부유동장을 해석하기 위하여 여러 가지의 관련기법들이 앞으로 개발될 수 있으며, 이 결과는 궁극적으로 CFD분야와의 상호보완에 의하여 유체기계의 성능해석 및 설계기법에 결정적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

이러한 배경으로부터 이 해설에서는 고속유동장의 PIV 계측요령 및 몇 가지의 적용예를 소개함으로써 유체기계의 연구개발에 종사하는 회원 및 전문가에게 필요하다고 판단되는 정보를 요약하여 제공함을 목적으로 하였다.

2. 회전체내부의 계측기술

터보기계에서 PIV를 적용하는 경우에 다른 유동장파 비교하여 보면 회전체내의 속도벡터를 표시하기 위한 좌표계의 설정이 중요한 문제가 될 수가 있다. 일반적으로 회전차와 함께 회전하는 좌표상에서의 상대속도의 표시가 행해지고 있으나 계측시스템으로서 절대좌표, 즉, 지면에 받침대를 둔 카메라로부터의 영상획득이 이루어지는 경우가 많다. 이러한 때에는 회전차의 모든 속도계측 지점에서의 원주방향 속도를 기지의 회전 각속도 및 반경값으로부터 계산하여 이를 속도벡터 삼각형에서 감산하여 상대속도를 구하고 있다. 단, 절대속도의 값이 회전차의 반경방향에 따라 커짐으로서 PIV에서의 고속유동 계측을 위한 광학조건이 더욱 까다로워지는 점에 유의하여야 한다. 반면, 유동장의 영상획득을 회전차와 동일한 각속도로 회전하면서 행할 수가 있으면 이 영상으로부터 얻어지는 속도는 곧 바로 상대속도분포가 될 수 있음으로서 유동장의 해석이 보다 용이해 질 수가 있다. 또한 원주속도의 증가에 따른 고속유동 계측의 문제점이 크게 경감된다. 따라서 원리적으로는 이와 같이 상대속도를 바로 구하는 것이 유리하나 실제상황에서는 고속회전시 카메라의 부착에 따른 기계적인 진동 등의 문제점의 해결이 어려울 수가 있다. 그러나 최근에는 고해상도의 소형 CCD카메라 기술이 크게 발달하여 이를 활용하는 방안이 적극적으로 검토될 수가 있을 것이다.

한편, PIV에서는 해석유동장의 영상정보를 이용하며, 이때에 유동장에는 작동유체와 동일한 미소추적입자가

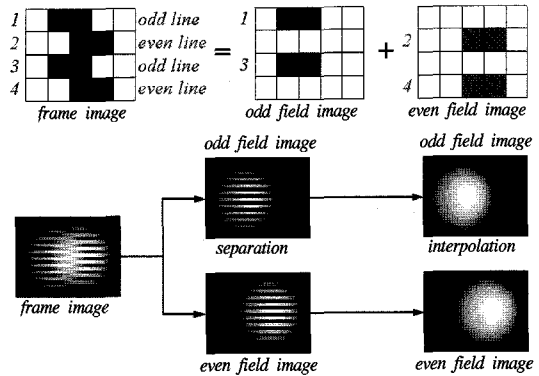


Fig. 1 Arrangement of Video Signal in PIV

분포되어 있으며, 다양한 영상입력장치를 이용하여 한 순간의 입자분포를 얻게된다. 일반적으로 입력장치로서는 고해상도의 CCD카메라가 이용되거나 고속도 비디오카메라가 채택된다. 현재는 CCD카메라가 입력장치로서 널리 사용되고 있으며, CCD카메라의 비디오 동기신호와 연계된 펄스발생기가 펄스조명의 간격 및 펄스 폭을 정확하게 조정한다.

다음으로, PIV의 발전사를 보면, 초기에는 정지카메라 및 펄스레이저를 이용한 단일 프레임(frame, 카메라로부터의 얻을 수 있는 한 순간의 유동장 정보)의 자기상관PIV가 주류를 이루었으나, 현재에는 미소시간간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상정보를 이용한 상호상관PIV가 각광을 받고 있다. Fig. 1은 상호상관PIV에서 사용되는 영상정보의 포맷을 보이고 있다.

아날로그 또는 디지털 CCD카메라로부터 얻어지는 영상은 그 기록방법에 따라 interlace/non-interlace 주사방식 및 field/frame축적 방식으로 대별된다. 그중 상호상관PIV에서 가장 보편적으로 사용되는 것은 interlace-field의 조합에 의한 기록방식이다. 이 경우에, 한 프레임의 영상정보를 살펴보면 수평주사선의 홀수(odd)번호에 먼저 첫 프레임(odd field)의 정보가 기록되며 1/60초 뒤에 짝수(even)번호에 두 번째(even field)의 유동장이 기록되게 된다. 따라서, 한 프레임의 영상에는 연속된 두 프레임의 영상이 겹쳐서 나타나게 되며, 상호상관PIV에서는 우선 간단한 조작에 의하여 두 field의 영상정보로 분리할 필요가 있다. 다음으로 정보가 전혀 나타나지 않는 주사선, 즉 밝기정보인 계조치(grey level, 일반적으로 8비트 256단계)의 값이 0인 주사선을 상하 주사선의 계조치값을 이용하여 보간을 행한다. 이렇게 하여 얻어진 두 field의 영상을 이용하여 본격적인 상호상관계수의 연산 및 최대상호상관계수의 탐색에 들

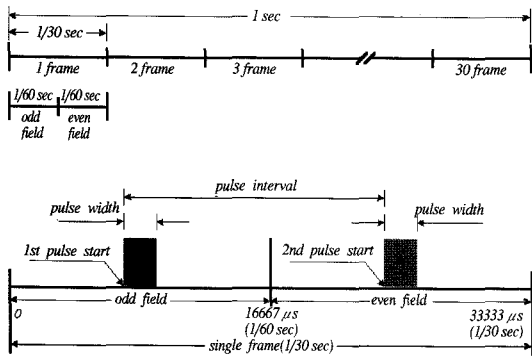


Fig. 2 Time Definition in Video Signal and Pulse Arrangement

어가게 된다. 상호상관PIV에 대한 자세한 원리는 참고 문헌 [1]을 참조하기로 한다.

Fig. 2는 CCD카메라에서 채택되고 있는 시간정보의 정의를 나타낸다. 우선, 60Hz에서 작동되는 모든 비디오 기기(CCD카메라 포함)는 1초에 30 프레임의 영상이 연속적으로 획득되거나 디스플레이 되도록 되어 있다. 우리가 시청하는 TV도 마찬가지이며, 가정용 비디오 카메라, VTR에도 모두 같은 시간규약을 적용하고 있다. 그리고 1프레임의 영상정보는 앞서 언급한대로 두 필드(odd, even)의 영상으로 구성된다. 그리고 이들 두 필드간의 시간간격은 1/60초이다. 따라서, 약 0.5m/s이하의 저속유동장에서 PIV를 적용하는 경우에는 특별한 펄스제어기능이 없어도 1/60초의 시간해상도를 갖는 완벽한 시계열 PIV데이터 처리가 가능해진다. 따라서 이때의 데이터샘플링속도는 60Hz가 된다. 그러나, 우리가 경험하는 대개의 유동장, 특히, 고속으로 회전하는 터보유체기계에서는 계측속도가 수 m/s에서 수십 m/s에 이르며, 이러한 상황에서 가장 문제가 되는 것은 카메라로부터 얻어진 영상에서 저속유동장의 경우와 마찬가지로 추적입자의 구별이 뚜렷이 될 수 있도록 하는 적절한 조명의 확보가 관건이 된다. 일반적으로 PIV의 기술변천의 큰 줄기중 한가지는 이와 같은 조명의 안정적인 확보여부에 의존하고 있으며, 현재도 PIV의 사용자로 하여금 구입단계에서부터 고민을 하게 만드는 요소이다.

Fig. 2를 다시 참고하기로 한다. 우리가 가정용 스틸카메라에서 경험하는 것과 마찬가지로 선명한 사진을 얻기 위해서는 셔터속도와 조리개의 조합을 이용하여 일정한 양의 광선(조명)이 카메라렌즈를 통해서 필름에 도달하도록 한다. 또한, 빠르게 움직이는 물체를 정확하게 촬영하기 위해서는 셔터속도를 높게 되며,

부족한 광량은 렌즈의 조리개를 열어서 확보한다. PIV에서도 동일한 조건이 요구된다. 일반적으로 PIV용 CCD카메라는 이와 같은 셔터속도-조리개의 조절기능을 가지고 있으나, 문제는 두 필드의 시간간격이 1/60초로 정해져 있기 때문에, 고속유동장의 영상획득에는 적합하지 않다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위한 방법이 강구되어야 한다. 그 중 가정 보편적인 방법은 한 프레임의 영상을 구성하는 두 필드사이의 물리적인 간격을 이용하는 기법이다. 즉, 홀수필드와 짝수필드의 시간간격은 1/60초이나 영상의 기록을 위한 조명의 공급을 펄스발생기 등을 이용하여 정교하게 제어하는 방법을 채택하고 있다.

이러한 펄스조명에는 두 가지 요소가 항상 동시에 검토되어야 한다. 우선, 펄스간격이다. 즉, 필드영상마다 단일 조명을 공급하게 되며, 이들 간격은 계측대상의 유동장의 속도에 따라서 다르게 된다. 유동장의 속도가 빠른 경우에는 이 펄스 간격을 작게 하며, 보다 저속이 되면 펄스 간격을 크게 한다. 계측영역의 크기가 100mm×100mm의 경우를 예로 들어 보면, 20~30m/s의 계측속도가 예상되는 경우에 펄스 간격은 50~100μs의 범위가 적당하다. 100m/s 이상이라면 수μs의 매우 작은 펄스 간격이 필요하다. 결국, 펄스 간격은 계측의 다이나믹레인지에 결정짓는 요소이며, 이 기능은 PIV용의 펄스발생기가 담당하게 된다. 따라서, CCD카메라의 비디오 수평 및 수직 동기신호와 연계된 펄스발생기는 매초마다 30쌍의 상호상관PIV용 유동장을 확보하게 되며 이 경우에 데이터획득 샘플링속도는 30Hz로 정해진다.

다음으로 고려해야 할 요소는 펄스 폭이며 펄스발생기의 조정기능에 의하여 마찬가지로 정확하게 제어된다. 문제가 되는 것은 고속유동장의 경우에 유동장의 추적입자가 프레임영상에서 정지된 것처럼 보이도록 하기 위해서는 가정용카메라에서의 셔터속도 조절과 동일한 방법으로 펄스 폭을 가능한 한 작게 하여야 한다. 그러나, 선명한 영상을 얻기 위한 조명의 확보가 전제조건이며 이를 위해서는 펄스광원의 세기가 반드시 커져야 한다. 즉, PIV에서 조명용으로 사용되고 있는 연속광레이저 또는 펄스레이저의 출력이 큰 것을 사용하여야 한다. 따라서, 계측유동장의 속도범위에 따라서 알맞은 출력의 레이저가 확보되어야 하며, PIV연구자에게는 구입예산의 관점에서 아킬레스건이 되고 있다. 현재 보편적으로 사용되고 있는 아르곤이온 연속광 레이저의 경우에는 300mW-10W급이 보통이며,

Nd-Yag 펄스레이저는 30 mJ/pulse-300 mJ/pulse급이 주류를 이루고 있다. 많은 문헌을 참조하여 보면, 계속 영역의 크기를 100 mm×100 mm로 한 경우에 5W의 연속광레이저-펄스발생기-AOM(Acoustic Optical Modulator) 사용시 10 m/s, AOM대신 게이트기능 영상강화CCD카메라(Gated Image Intensifier CCD)의 사용시 50 m/s 정도까지의 계속이 가능하다. 한편, 100 mJ/pulse 출력의 Nd-Yag dual 펄스레이저(펄스 폭은 40-50 ns로 고정되어 있음)를 이용하는 경우에는 100 m/s-200 m/s 범위의 속도계측이 가능하다. 또는 초음속유동장의 계속에도 보고되어 있다. 따라서, 펄스레이저가 고속 유동장의 계속용으로 널리 사용되고 있으나, 가격 면에서 연속광 레이저에 비하여 고가인 점이 단점이며, 고출력의 펄스레이저는 펄스반복속도, 즉, 샘플링레이트가 30 Hz 이하인 경우가 많다. 반면, 연속광레이저는 고속도비디오카메라의 광원용으로서나 일반적인 가시화용 조명으로도 활용이 가능하며, 펄스레이저에 비하여 저가인 점이 장점이 될 수가 있다.

가장 진보된 고속유동장 계속용PIV 시스템으로서 펄스레이저의 경우에는 고해상도의 디지털CCD카메라(현재에는 1K×1K가 표준임) 및 펄스발생기와 연동된 시스템이며, 연속광레이저의 경우에는 게이트기능을 갖는 영상강화CCD카메라와 펄스발생기와의 조합시스템이다. 2차원 PIV의 경우에는 펄스레이저의 출력만 확보되면 나노초의 시간해상도를 갖는 펄스발생기와의 조합에 의하여 마하수 2~3까지의 속도계측도 가능하다고 보여진다. 즉, PIV에서는 속도벡터의 검출을 위한 알고리즘이 소프트웨어로서 일단 확보되면, 유동장의 속도에 관계없이 동일하게 적용되며, 단지, 조명을 비롯한 하드웨어의 조건만이 달라진다는 점이다. 이러한 점들 때문에 최근에는 저가이면서 신뢰성있는 영상정보의 A/D보드가 PC용으로서 공급되면서부터, 많은 연구자들이 PIV에 관심을 갖게 된 이유이기도 하다. 한편, PIV에 적합한 영상입력장치는 원리적으로 고속도카메라이다. 그러나 현재 사용되고 있는 대개의 고속도카메라는 full 프레임조건에서 최대 2,000~3,000프레임/초의 시간해상도를 가지며 공간해상도도 최대 640×480 pixel 수준이다. 그러나, 기술의 발달에 따라서, 머지않아 1K×1K급의 고해상도를 가지면서 10,000 full 프레임/초급의 고속비디오카메라가 등장할 것으로 예상된다. 이때에는 고출력의 연속광레이저의 지원하에 완전한 비정상 PIV 계속이 가능해질 것으로 기대되며, PIV의 후처리기능으로서 CFD분야에서만 가능하였던

고속유동장의 3차원 애니메이션제작까지도 실현할 수 있을 것이다.

다음으로 유동장에 투입되는 입자의 공급문제이다. 물의 경우에는 비중이 1.0에 가까운 고분자화합물의 구형입자(Nylon12, 폴리스틸렌 또는 PVC입자)가 자주 사용되며 그 크기는 보통 10~100 μm 범위이다. 공기의 경우에는 금속재질의 수 μm의 미소분말(TiO₂, Al₂O₃)이 사용될 수 있으며, 전용의 입자발생기를 이용하여 액체미립자를 다량으로 발생시키기도 한다. 고속유동장에 대응하기 위하여 기술적으로 입자의 대량공급은 가능하나 가장 문제가 되는 것은 유동장 전체에 균일하게 분포되도록 하기 위한 추적입자의 주입방법이다. 이것은 저속유동장에서도 마찬가지이며, 특히 실험물체의 영향 등으로 입자가 한 영역에 과도하게 모여 있거나 반대로 입자가 희박하게 되면 PIV의 처리과정에서 에러백터의 발생을 초래한다. 추적입자의 양은 조명조건, 유동장의 크기, 입자크기, 적용 알고리즘 등에 따라서 시행착오적으로 결정하여야 하며 유동장이 훼손되지 않는 범위에서 조절하여야 한다.

3. PIV의 유체기계적용

PIV의 유체기계 적용에로서 종래의 연구중 가장 체계적인 내용은 Dong 등이 행한 일련의 실험결과이다.⁽²⁻⁵⁾ 이들은 2차원의 원심펌프를 대상으로 하여 벌루트케이스의 내부유동 및 케이싱과 회전차와의 누설을 방지하기 위한 혀(tongue)부와 회전차사이의 상호작용 등에 관하여 논하고 있다. 이 연구에서는 특히 PIV의 속도 데이터를 이용하여 난동성분 및 와도를 비롯하여 제반 유체역학적 물리량을 구하고 있으며, 특히 N-S방정식을 이용한 순간 압력값의 산출 및 실험결과와의 비교 그리고 이를 바탕으로 한 소음특성과의 연계성을 논하고 있는 점이 주목된다.

Fig. 3은 실험장치의 구성을 보여주고 있다. Fig. 3a는 펌프실험장치의 광학배치를 보이고 있으며 Fig. 3b는 회전차 및 수정된 형상의 벌루트를 나타내고 있다. 조명용 광원으로서 출력 불명의 Nd-Yag 펄스레이저를 이용하여 같은 시간간격(160 μs)으로 세 번의 연속 펄스조명을 행하여 35 mm 카메라에 유동장의 추적입자 영상을 기록하고 있다. 또한 입자로서는 작동유체와 유사한 밀도를 갖는 30 μm 이하의 형광염료재질로 만든 자체제조품을 사용하고 있다. 회전차의 회전수는 890 rpm이며 직경은 약 250 mm이다. 얻어진 사진을 현상하여

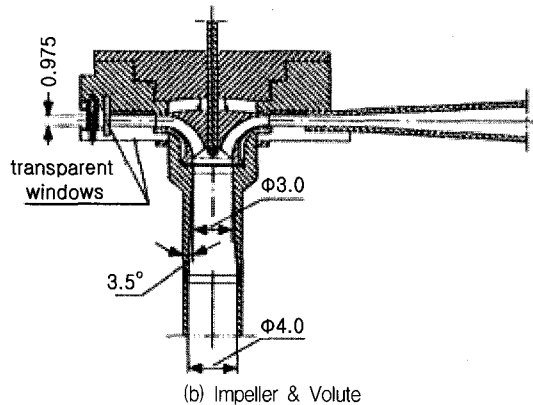
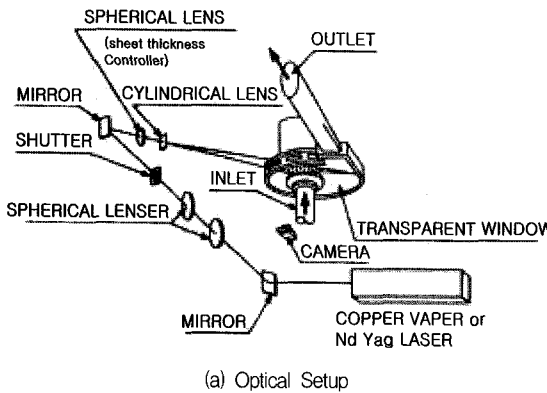


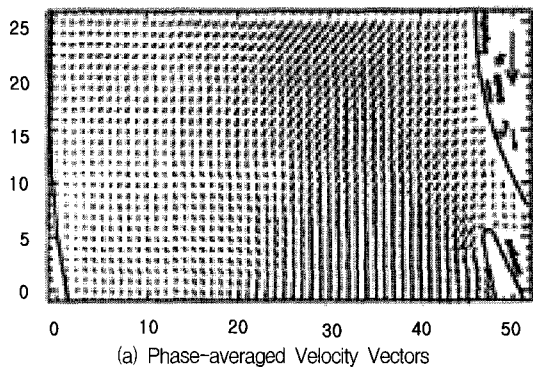
Fig. 3 Schematic Arrangement of Experimental System(Dong, 1990)

이를 CCD카메라로 입력한 다음 영상의 계조치를 대상으로 자기상관계수를 구하여 속도벡터를 구하고 있다. Fig. 4는 이들이 행한 연구결과의 일부이다. Fig. 4a는 계측된 시간평균의 속도벡터를 나타내고 있으며 Fig. 4b는 회전차의 각도에 따른 허주변의 압력분포를 보여준다. 그러나 이들의 결과에서는 회전차 내부에서의 속도벡터의 계측결과가 결여되어 있는 점이 지적될 수 있다.

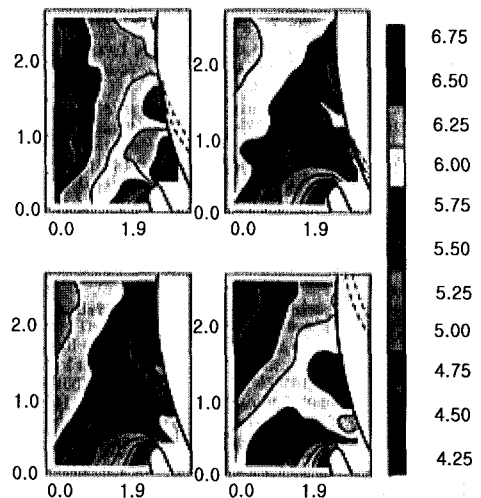
Akin과 Rockwell^(6,7)은 고밀도영상 자기상관PIV기법을 적용하여 원심펌프의 회전차주변의 디퓨저정역을 포함한 영역에 대하여 순간 속도벡터를 구하였다. 또한 이 데이터를 이용하여 와도의 분포를 도시하였다. 실험에 이용된 회전차의 내경은 57mm이며 외경은 171mm이다. 회전차 내경에서의 접선속도는 0.27 m/s이며 입구유입 속도는 0.1 m/s이다. 조명은 4W의 연속광 Argon이온 레이저를 이용하였으며 72면 회전경(rotating mirror) 및 영상전위를 위한 진동경(oscillating mirror)을 채택하여 펄스 조명기능을 행하였다. 작동유체 중의 입자는 12 μ m 전후의 금속코오팅 재질의 것을 사용하였다. 영상은 35mm 카메라에 기록하였으며 이중FFT를 행하여 자기상관계수를 구하였다.

Kawahashi 등⁽⁸⁾은 두 종류의 원심식 송풍기의 내부 유동에 대한 일련의 PIV 계측결과를 제시하고 있다. Fig. 5a는 이중빔조명의 원리를 나타내며 Fig. 5b는 전체의 구성을 보여주주고 있다. 반경환의 경우에는 24매의 평판익으로 구성되어 있으며 내경은 150mm, 외경은 200mm, 익폭은 70mm 그리고 익판두께는 2mm이다. 또한 다익환의 내경은 122mm, 외경은 152mm, 익폭이 70mm이며 전방향 익수는 42매이다. 고속의 펄스광을 연속으로 공급하기 위하여 고가의 펄스레이저

를 사용하는 대신 회전경 및 출력 4W의 Argon연속광



(a) Phase-averaged Velocity Vectors



(b) Pressure Distribution due to Impeller Rotating Angles

Fig. 4 Example of PIV Results by Dong et. al.

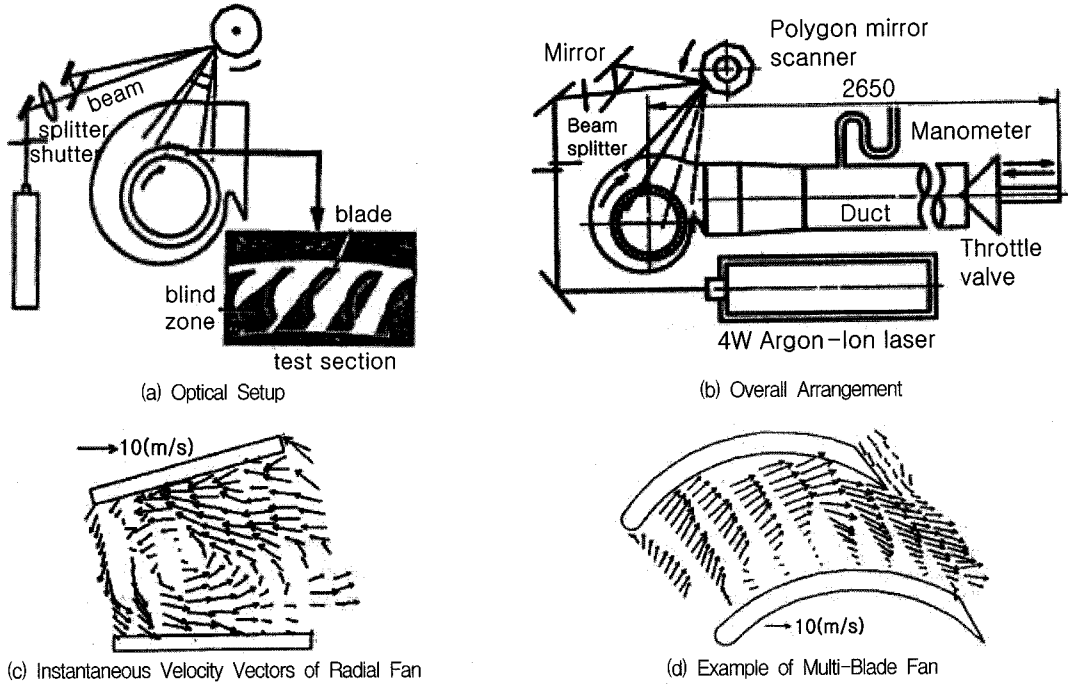


Fig. 5 PIV Application to Radial and Multi-Blade Fans(Kawahashi, 1996)

레이저를 채택하여 이를 이중빔 스위프(dual beam sweep) 방법으로 명칭하였다. 추적입자는 직경 $10\mu\text{m}$ 전후의 운모입자이며 영상의 기록은 35mm 카메라를 이용하였다. 속도벡터의 획득기법으로는 고영상밀도의 레이저 스펙클법을 채택하였고 광 Fourier 변환에 의한 Young의 프린지해석을 행하였다. 반경환의 회전수는 1,000 rpm 이고 다이환의 경우에는 2,000 rpm이다. Fig. 5c는 반경환에서의 실제측정을 보이며 Fig. 5d는 다이환 내부의 순간속도벡터를 나타내고 있다. 어느 경우에도 계측속도가 10 m/s 전후의 고속이며 이 값은 상대속도이므로 실제로는 최대 40 m/s 정도의 절대속도를 계측하였음을 알 수가 있다. 공기를 대상으로 하여 본격적으로 회전차의 내부유동을 실측한 예가 될 수가 있다. 특히 저출력의 연속광레이저를 이용한 것과 레이저 시트광을 이용한 가사화기법을 동시에 채택한 점 등이 주목할 만하다.

Hayami⁽⁹⁾는 Francis형의 펌프수차의 내부유동에 계조치 상호상관법을 적용하여 상대속도를 직접 계측하였다. Fig. 6a는 이 때의 실험배치를 보여준다. 여기서 특기할 만한 것은 비디오카메라를 회전차의 축에 직접 연결하였으며, 이 축에 설치된 슬립링을 이용하여 외부모니터에서 유동장의 영상확인을 행할 수 있도록 한

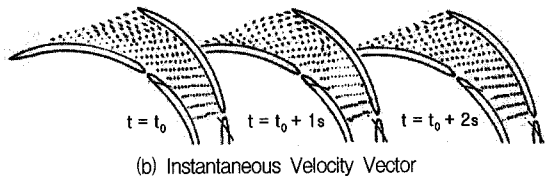
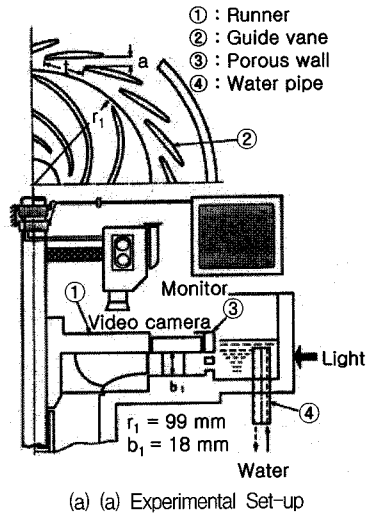
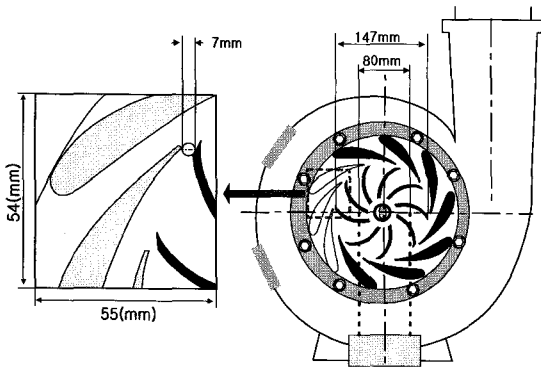
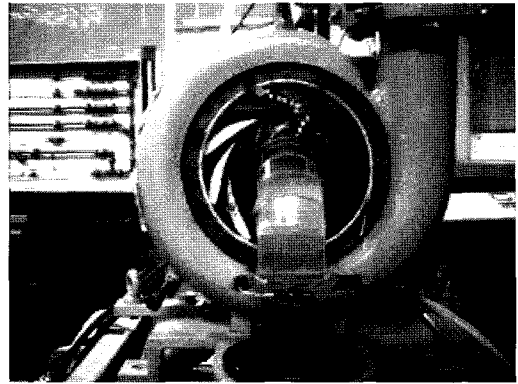


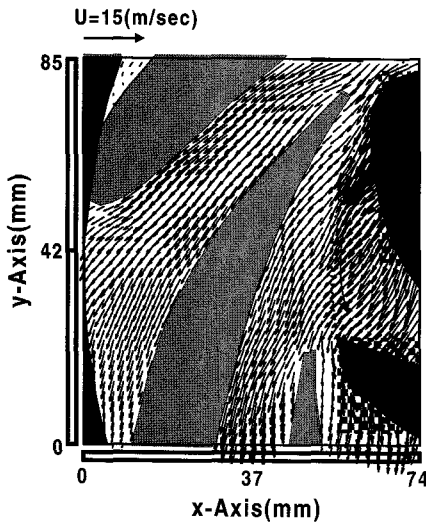
Fig. 6 Experimental Apparatus and Example of Unsteady Flow in Turbine(Hayami, 1995)



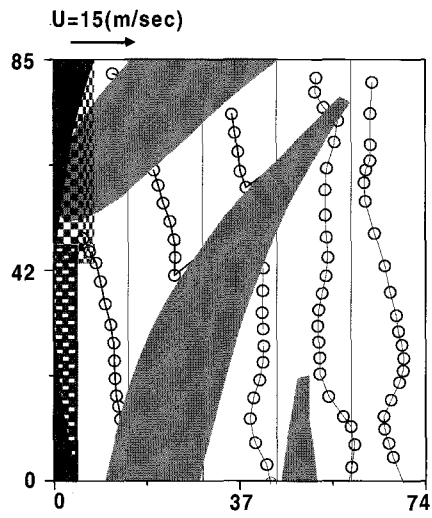
(a) Measuring Region



(b) Diffuser Pump Rig



(c) Instantaneous Velocity Vectors at 2500 rpm



(d) Instantaneous Velocity Profiles at 2500 rpm

Fig. 7 Diffuser Pump Experiment(Y.H. Lee et al., 1999, 2000)

점이다. 따라서 비디오카메라에 기록된 영상을 해석하면 회전차내의 상대속도를 바로 얻을 수가 있다. 이때의 회전차속도는 18~30 rpm이다. 또한 조명으로는 300 W의 할로겐램프를 12개 사용하여 두께 2 mm의 시트광을 얻고 있다. 추적입자는 농도 3 ppm의 알루미늄분말을 사용하고 있다. 따라서 개별입자의 확인이 실용상 불가능하며 미소 시간간격(1/30초)을 갖는 두 유동장 영상에서 미소영역내의 제조치의 상관계수값을 비교하여 최대값을 나타내는 검사영역내의 기하학적 중심위치를 속도벡터의 종점으로 결정하는 기법을 적용하고 있다. 또한 이 연구는 영상을 개선하기 위하여 간단한 영상조정법을 소개하고 있으며 상호상관계수의 계산영역에 따른 이상치(outlier)의 발생을 비교하고 있다. Fig. 6b는 해석결과 얻어진 회전차 내부의 비정상

속도분포의 예이다.

이 등^(10,11)은 디퓨저펌프의 정압회복용 가이드베인의 입구의 유동장을 중점적으로 계측한 연구결과를 제시하고 있다. 광원으로는 5 W의 아르곤이온 레이저를 이용하였으며, 부족한 광원의 역할을 보강하기 위하여 게이트기능을 갖는 영상강화CCD카메라를 채택하고 있다. 그 결과 펄스폭과 간격을 100 μs 이하로 하여 2,500 rpm으로 회전하는 임펠러의 출력 절대속도를 최대 20 m/s까지 획득하였다. 추적입자로는 직경 100 μm 전후의 PVC 입자를 이용하였다. Fig. 7a는 계측영역의 정의이며 Fig. 7b는 펌프모형을 보여주고 있다. Fig. 7c는 2500 rpm에서의 순간속도벡터이며, Fig. 7d는 이때의 속도분포를 나타낸다.

Pederson 등⁽¹²⁾은 원심펌프의 임펠러내부를 계측하기

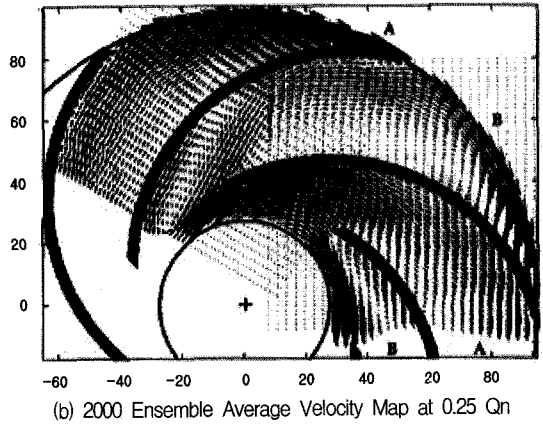
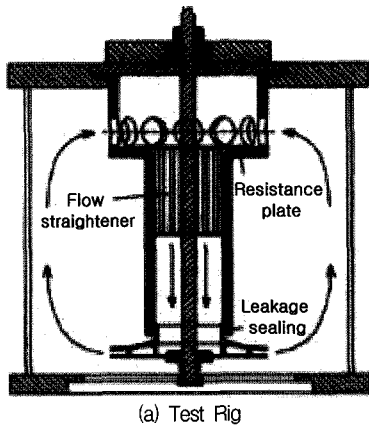


Fig. 8 Pump Impeller Measurement(Pederson et al., 2000)

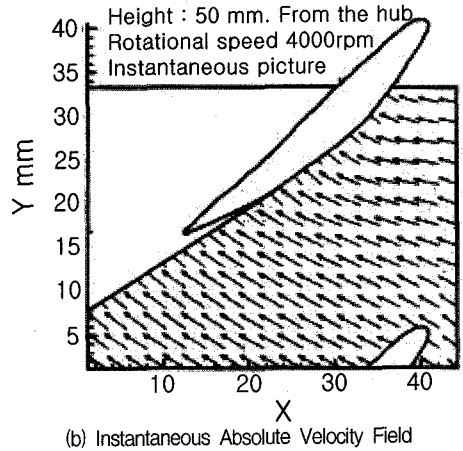
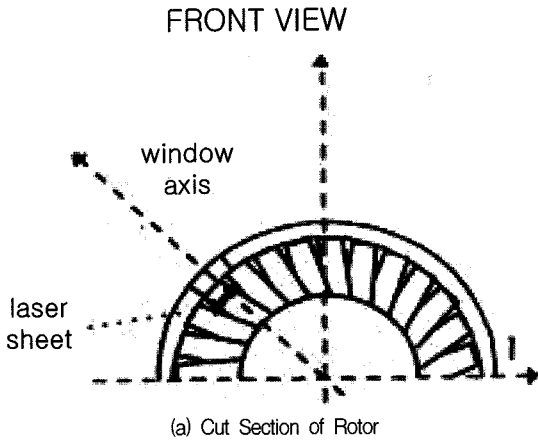


Fig. 9 Axial Compressor Experiment(Balzani et al., 2000)

위하여 투명재질로 된 임펠러를 제작하였으며, 펄스레이저를 이용하여 속도벡터의 계측을 행하였다. 사용된 임펠러의 직경은 190 mm이며 블레이드수는 6매이다. 계측영역의 크기는 93 mm×94 mm이다. 펌프회전수는 725 rpm이며 규정유량은 3.05 l/s이다. 듀얼펄스레이저는 10 Hz급이며, 추적입자로는 30 μm의 평균직경을 갖는 형광로다민B입자를 사용하였다. 1K×1K급의 상호상관CCD카메라를 이용하였으며, 탐색영역은 32×32 pixel이고 오버랩비율은 50%로 하였다. 시간평균을 위하여 2000회의 순간속도벡터를 구하였다. Fig. 8a는 실험장치구성도를 나타낸다. Fig. 8b는 정규유량의 1/4에 해당하는 부분유량 운전조건하에서 2000조의 순간벡터로부터 구성된 양상을 평균속도벡터를 보여주고 있다.

Balzani 등⁽¹³⁾은 단단 축류압축기의 내부 유동장을 계측하기 위하여 전용의 특수조명장치를 개발하여 적용한 결과를 보고하고 있다. 로터의 선단직경은 400 mm이며 허브직경은 200 mm이다. 사용된 광원은 200 mJ/pulse, 10 Hz 펄스 레이저이며 추적입자로는 글리세린 스모크 증기를 사용하였다. 입력장치로서는 640×480 pixel의 상호상관CCD카메라를 이용하였으며, 펄스간격은 25 μs로 고정하였으며 회전수는 4000 rpm으로 하였다. 추적알고리즘은 상호상관PIV이며, 탐색원도의 크기는 32×32 pixel이며 오버랩은 75%이다. Fig. 9a는 실험장치 로터의 절단 단면을 나타내며, Fig. 9b는 4000 rpm에서 순간 절대속도를 나타내고 있다.

참고문헌

1. 이영호, 최장운, 1996, “해설-PIV의 분류 및 원리, 대한기계학회지,” 제36권, 제12호, pp. 1146~1162.
2. Dong, R., Chu, S., and Katz, J., 1992, “Quantitative Visualization of the Flow Within the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Technique,” *Trans. ASME, JFE, Vol. 114*, pp. 390~395.
3. Dong, R., Chu, S., and Katz, J., 1992, “Quantitative Visualization of the Flow Within the Volute of a Centrifugal Pump. Part A : Results and Analysis,” *Trans. ASME, JFE, Vol. 114*, pp. 396~403.
4. Chu, S., Dong, R., and Katz, J., 1995, “Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump-Part A : Use of PDV Data to Compute the Pressure Field,” *Trans. ASME, JFE, Vol. 117*, pp. 24~29.
5. Chu, S., Dong, R., and Katz, J., 1995, “Relationship between Unsteady Flow, Pressure Fluctuations, and Noise in a Centrifugal Pump-Part B : Effects of Blade-Tongue Interactions,” *Trans. ASME, JFE, Vol. 117*, pp. 30~35.
6. Akin, O. and Rockwell, D., 1994, “Interaction of Zones of Flow Separation in a Centrifugal Impeller Stationary Vane System,” *Exp. in Fluids, Vol. 17*, pp. 427~433.
7. Akin, O. and Rockwell, D., 1994, “Flow Structure in a Radial Flow Pumping System Using High-Image Density Particle Image Velocimetry,” *Trans. ASME JFE, Vol. 116*, pp. 538~544.
8. Yamamoto, K., Kawahashi, M., and Sekimoto, O., 1996, “Analysis of Impeller Flow Field in Centrifugal Fan by Image Processing,” *J. Visualization Soc. Japan, Vol. 16, No. 60*, pp. 27~33.(Japanese)
9. Hayami, H., 1995, “PIV in Fluid Machinery,” *Proc. of Int. Workshop on PIV-Fukui'95*, pp. 237~242.
10. 임유청, 서민식, 이영호, 1999, “PIV를 이용한 터빈 펌프의 동·정익 속도장 계측,” *유체기계저널, 제2권, 제1호*, pp. 35~42.
11. Im, Y. C., Kobayashi, T., Saga, T., Taniguchi, N., and Lee, Y. H., 2000, “PIV Measurement of Interaction Region between Stator and Rotor in a Diffuser Pump,” *Proc. of 9th Int. Symp. on Flow Visualization* paper#186.
12. Pederson, N. and Jacobson, C. B., 2000, “PIV Investigation of the Internal Flow Structure in a Centrifugal Pump Impeller,” *Proc. of 10th Int. Symp. Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon 2000*.
13. Balzani, N. and Scarano, F., Riethmuller, M. L., and Breugelmans, F. A. E., 2000, “Experimental Investigation of the Blade-to Blade Flow in a Compressor Rotor by Digital Particle Image Velocimetry,” *ASME J. of Turbomachinery, Vol. 122*, pp. 743~750.