

단일 광경로 스캔PIV기법의 개발

김형범[†], 정인영^{*}, 이상혁^{**}, 류청환^{**}, Jean Hertzberg^{***}

Development of single optical axis scanning PIV method

Hyoung-Bum Kim, In-Young Jeong, Sang-Hyuk Lee, Chung-Hwan Ryu and J. Hertzberg

Abstract

PIV(Particle image velocimetry) presents the flow velocity of whole flow fields in a fraction of a second. Conventional PIV method uses two optical axis configuration during the image grabbing process. That is, the illumination plane and the recording plane must be parallel. This configuration is very natural to grab the whole field without the image distortion. In the real problem, it is often to meet the situation which this configuration is hard to be fulfilled. In this study, we developed new PIV method which only uses single optical axis to grab the particle images. This new PIV method become possible by utilizing the scanning method similar to echo PIV technique. One particle image of scanning PIV consists of scanned several line images and by repeating this scanning process, two particle images were grabbed and processed to produce the velocity vectors.

Key Words : PIV(입자영상속도계), Single Optical Axis(단일광경로), Scanning Method(스캔 기법)

1. 서 론

최근 들어 실험 유체역학분야에 레이저(laser) 광원이 도입됨으로써 우수한 유동가시화 영상을 얻을 수 있게 되었다. 레이저 빛은 유동을 교란

시키지 않으며, 높은 직진성과 큰 광강도(light intensity), 그리고 펄스형태로 빔을 발생시킬 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 레이저 광학기술과 함께 디지털영상처리기술이 발달함에 따라 유동의 순간 속도 혹은 온도장을 짧은 시간 내에 정량적으로 구할 수 있는 측정기법이 개발되어 실험 유체역학분야 연구에 활발히 이용되고 있다.

이러한 광학기술을 이용한 유동 해석은 주어진 유동의 전체적인 속도장 또는 온도장 변화를 순간적으로 측정할 수 있고, 또한 순간 속도장과 온도장 결과들을 통계 처리하여 난류구조를 정확하게 해석함으로써 난류유동 문제를 진단하고 해

† 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : kimhb@gsnu.ac.kr

* 경상대학교 전기전자공학부

** 경상대학교 기계항공공학부

*** Univ. of Colorado, Boulder, USA

결책을 제시하거나 유동제어에 필요한 정보를 제공할 수 있다.

PIV(Particle Image Velocimetry)라고 불리는 속도측정법은 이러한 레이저 광학과 영상처리기술을 이용한 대표적인 속도장 측정방법으로 산란입자에 의해 반사된 레이저광을 카메라에 담아서 그 입자영상으로부터 알려진 시간간격(Δt)동안 움직인 입자의 변위를 구하는 방법으로 속도장을 측정한다.

1980년대 이후 계속하여 PIV측정기법의 성능향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 고해상도 CCD카메라와 PIV 전용 펄스 레이저를 도입함으로써, 측정 정확도와 속도측정범위(dynamic range)를 향상시켜 음속이상의 고속유동의 측정이 가능하게 되었으며, 난류유동 측정에 적합한 새로운 PIV 알고리즘(algorithm)도 계속 개발되고 있다.

지금까지의 PIV기법은 Fig.1에서 보는 바와 같이 입자영상을 획득하기 위하여 이중 광경로 방식(dual optical axis)이 사용되어 왔다(1). 이중 광경로 방식은 속도측정 알고리즘에 상관없이 입자영상을 획득하기 위해서는 유동을 조사하기 위한 두 개의 광경로(optical pass)가 필요하다. 따라서 Fig.1에서와 같이 실린더형 렌즈에 의해 만들어진 레이저 평면광(light sheet)과 CCD카메라의 촬상면(image plane)은 항상 수직을 이룬다.

이와 같은 이중 광경로 PIV기법의 사용은 PIV기법의 장점이라고 할 수 있는 스냅샷(snapshot)영상획득을 가능하게 하였다. 즉, 레이저와 동기된 카메라는 순간적으로 동일 시간에 레이저 평면광이 조사된 유동 전체의 입자영상을 획득하여 저장한다. 또한 레이저의 발광시간 간격을 짧게 하고 카메라의 노출시간조정(frame straddling)기법을 이용하여 음속이상의 고속유동측정도 가능하게 되었다. 이러한 장점을 갖고 지금까지 개발되어 사용하고 있는 모든 광학PIV기법은 이중 광경로 구성으로 입자영상을 획득하고 있다.

그러나 이러한 이중 광경로 조건은 실험실과 같이 측정 대상 및 조건을 쉽게 조절할 수 있는 경우에는 문제가 없지만, 산업현장이나 실조건에서 측정을 할 경우, 이중 광경로 조건을 충족시키지 못하는 경우가 많이 발생한다. 예를 들어 엔진의 실린더 내부, 터빈이나 압축기 등의 유동

측정과 같은 내부유동실험이나 수중이나 대기유동과 같은 외부유동을 측정하고자 할 때, 이중 광경로 조건을 구성하기는 매우 어렵다. 이는 순간속도장을 비점측식으로 정확히 측정할 수 있는 PIV기법의 응용분야를 제한하는 결과를 낳았다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단일 광경로(single optical axis) 스캔(scanning) PIV기법을 개발하고자 한다. 즉, 하나의 광경로만을 사용함으로써 이중 광경로 구성이 불가능한 상황에서도 광학PIV기법의 사용이 가능하도록 한다.

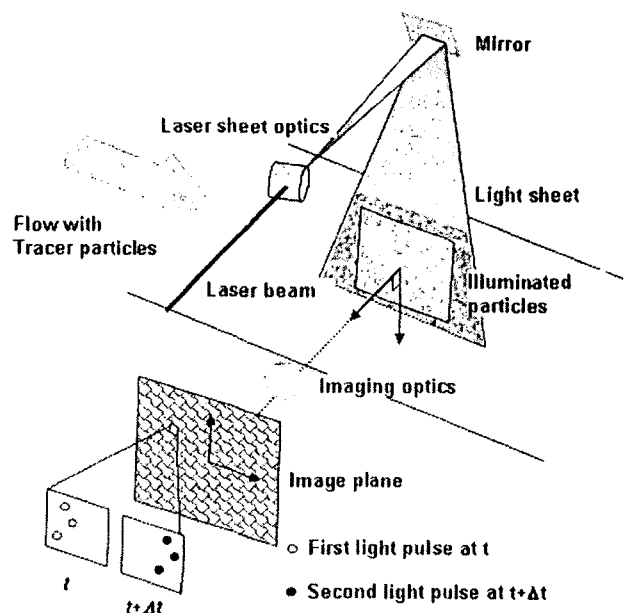


Fig. 1. Schematic diagram of conventional PIV method.

2. Single optical direction scanning PIV기법의 개발

2.1 Line scan image 획득

단일 광경로 스캔PIV기법은 라인스캔(line scan) 방식을 이용한 입자영상 획득기법을 사용함으로써 속도벡터 추적에 필요한 입자영상을 획득한다. 라인스캔 방식의 영상획득은 초음파 영상(ultrasound image)의 B(brightness)-mode 영상 획득 방법과 그 기본구조가 동일하다. 즉, 하나의 초음파 영상은 수에서 수백 개까지의 각각의 독립적인 스캔라인(scan line)으로 이루어져 있다. 스캔 방식의 영상획득에서는 영상의 크기는 스캔빔의

길이(초음파의 경우, A/D sampling time)와 스캔범의 수로 입자영상의 크기가 결정된다. 즉, 동일한 횡 방향(lateral) 해상도의 가정하에서 스캔라인의 수를 조정하여 영상획득 구간의 크기를 변경할 수 있다. 예를 들어 총 35개의 스캔라인으로 이루어진 한 장의 초음파 영상이 약 2cm의 측정구간의 크기를 갖는다면 동일한 횡 방향 해상도를 갖는 350개의 스캔라인으로 이루어진 영상은 10배가 증가된 20cm의 측정구간을 갖는다.

이러한 라인 스캔 방식의 이미지 획득방법에서는 이중 광경로 PIV기법과 같이 레이저의 두 펄스(pulse)사이의 발광시간을 바꿈으로써 두 장의 입자영상 사이의 시간간격(Δt)을 조절할 수 없다. Fig.2에서처럼 단일 광경로 스캔PIV기법은 한 장의 입자영상을 획득하는데 걸리는 시간, 즉 총 스캔 타임(scan time)이 두 장의 입자영상 사이의 시간간격(Δt)이 된다. 이는 전체 입자영상을 동일 시간에 획득하는 이중 광경로 PIV기법과 비교하여 서로 다른 점이다. 이 그림으로부터 측정구간의 크기변화가 또한 입자영상사이의 시간간격에 영향을 준다는 것을 또한 알 수 있다. 이는 PIV기법의 속도측정범위(dynamic range)가 획득된 입자영상의 크기와 반비례함을 의미한다.

섹터 스캔(sector-scan) 방식으로 획득한 라인영상(line image)의 좌표계와 실제 물리적 좌표계는 서로 다르기 때문에 이 물리적 신호데이터로부터 실제 측정구간의 좌표를 나타내기 위한 변환 과정이 필요하다. 이 과정을 통해 스캔 방식의 라인영상(line image)은 파이(pie)형의 입자영상을 이루게 된다.

단일 광경로 PIV기법에서 사용될 광원은 기존의 이중 광경로 PIV기법과 달리 실린더형의 렌즈를 사용한 평면광(laser light sheet)을 사용하지 않고 단일 레이저 빔을 그대로 사용한다. 이는 고가의 고출력 레이저를 사용하지 않고 낮은 파워의 레이저로도 PIV측정이 가능하고 이는 현장에서 적용성을 높일 수 있다.

단일 광경로 PIV기법에서의 입자영상은 다음의 과정을 거쳐 획득된다. 기계적인 회전 미러(rotating mirror)장치나 혹은 AOM(acoustic optic module)에 의해 측정구간을 레이저빔으로 스위프(sweep)하게 된다. 이때 CCD카메라는 스위프되는 레이저빔에 의해 유동속의 산란입자가 반사한 입

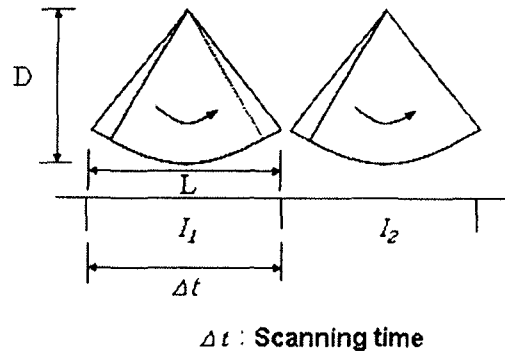
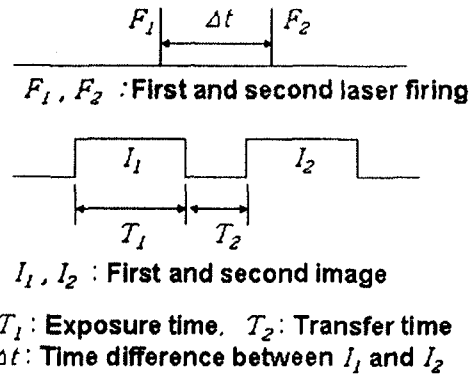


Fig. 2. Timing diagram of conventional PIV and scanning PIV method.

자영상을 저장한다. 여기서 하나의 CCD영상은 입자에 의해 반사된 하나의 레이저 반사광을 획득하게 되고, 이렇게 획득한 여러 개의 라인영상을 합치면 초음파 영상과 마찬가지로 전체 측정구간의 입자영상을 얻게 된다. 이러한 과정을 거치면서 획득된 입자영상은 기존의 PTV(particle tracking velocimetry)나 PIV기법과 유사한 속도추적 알고리즘을 사용하여 속도장 결과를 얻는다.

이러한 단일 광경로 스캔PIV기법은 이중 광경로 기법이 사용될 수 없는 실제 환경에서 매우 우수한 속도장 측정 방법이 될 것이다. 단일 광경로PIV기법을 현장에 적용되기 위해서는 다음과 같은 여러 가지 선행 문제점을 해결하여야 한다.

첫째로 초음파영상을 이용한 echo PIV기법⁽²⁾의 경우에는 초음파 프로브 자체가 광학PIV기법에서의 광원과 카메라의 두 가지 역할을 동시에 한다. 초음파 빔이 산란입자에 의해 반사되고 이 반사된 초음파 빔을 추적하여 초음파 경로상에서 입자의 위치를 측정함으로써 초음파 입자영상이

만들어진다. 즉, 초음파 영상 획득 시스템의 경우에는 광원과 카메라가 내부적으로 상호관련되어 있어 초음파 영상의 최적화가 매우 쉽다. 그러나 단일 광경로 스캔PIV기법의 경우에는 광원과 카메라는 독립적으로 작동되므로 광원의 물리적 특성 변화가 자동적으로 카메라의 영상 획득에 영향을 주지 못한다. 이러한 문제를 해결하고 속도 측정 성능을 향상시키기 위한 입자영상의 최적화 연구가 필요하다.

다음으로 스캔방식 영상 획득과 기존의 스냅샷(snapshot)기법과의 중요한 차이 중의 하나는 획득된 입자영상에서 각각의 픽셀간의 상호관계이다. CCD카메라를 이용한 스냅샷방식의 영상 획득 방법의 경우, 각각의 픽셀은 주위 픽셀과 독립적인 정보를 담고 있다. 스캔방식의 영상에는 하나의 빔으로 이루어진 각각의 라인영상에서는 픽셀들이 독립적으로 존재하지만, 여러 라인영상을 합쳐 하나의 입자영상을 만드는 과정에서 주위 빔간의 겹침이 나타난다. 초음파 영상의 경우, 영상의 S/N비를 향상시키기 위하여 빔간의 겹침비를 75%까지 하는 경우도 있다. 이러한 스캔방식의 입자영상의 차이는 일반적으로 스냅샷방식과 비교하여 낮은 S/N비를 갖게 된다. 본 연구에서는 입자영상의 영향을 최소화하고 정확한 속도벡터 추적과 측정벡터의 공간해상도를 향상시키기 위해 재귀기법(iterative recursive scheme)⁽³⁾과 조사구간 이동(window offsetting)⁽⁴⁾기법을 적용하였다. 재귀기법은 일차로 조사구간의 크기를 크게 잡아 속도벡터를 구한다. 이렇게 해서 구한 속도벡터를 다시 참고로 하여 조사구간의 크기를 줄여 다시 속도벡터를 구한다.

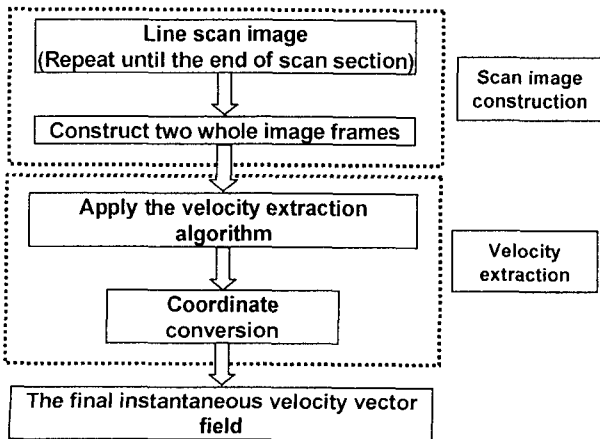


Fig. 3. Flowchart of single optical direction scanning PIV method.

이때 입자 쌍의 감소로 인한 S/N비의 감소를 막기 위해 두 번째 입자화상에 있는 조사구간의 위치를 일차속도벡터 결과를 이용해 이동시킨다. 이와 같은 방법을 사용하면 입자 쌍의 수가 작은 경우에도 높은 S/N비를 유지할 수 있다. 속도추적에서의 에러벡터를 제거하기 위하여 CBC(correlation based correction)⁽⁵⁾기법을 적용하였다. Fig.3에 스캔PIV의 순서도를 나타냈다.

2.2 Scanning PIV 모사실험 및 결과

개발된 스캔PIV기법의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 모사실험을 수행하였다. 실제 유동 문제에 적용하기 위해서는 고속의 레이저 빔 scanning 장치와 영상 획득용 카메라간의 정확한 동기화가 필요하다. 본 연구에서는 자동화된 동기 대신에 수동 회전장치(manual rotation stage)를 이용하여 레이저 빔을 스캔하여 실험을 수행하였다. 수동장치의 특성상 고속유동에 적용할 수 없으므로 사각상자에 유체를 채운 후 추적입자를 투입하고 사각상자를 선형이송장치를 이용하여 이송시키면서 영상을 획득하였다. 즉, 유체는 정지해있고 유체를 채운 상자가 이동하는 조건에서 입자영상을 취득하였다. Fig.4에 실험장치의 간략도를 나타냈다.

추적입자로 폴리스티렌 입자를 사용하였고 입자의 평균지름은 약 50 μm이다. 이 입자크기는 일반적인 PIV실험에 사용되는 입자에 비해 다소 큰 편이나 본 실험에서는 입자의 추종성이 중요하지 않기 때문에 크기로 인한 문제는 없다. 레이저 빔의 스캔영상을 획득하는 동안 유체에 투입된 입자가 뜨거나 가라앉지 않고 처음의 자기 위치를 유지하도록 점성이 매우 큰 실리콘 오일(KF-96, 1000cSt)을 작동유체로 선택하였다.

입자영상을 획득하기 위하여 Ar-ion레이저를 사용하였다. 하나의 입자영상을 획득하는데 총 16번의 스캔과정을 통하여 16개의 라인영상을 획득하였고, 두 번째 입자영상은 유체가 담긴 사각상자를 선형 이송장치를 이용하여 정확히 5mm를 이동시킨 후 다시 총 16개의 라인영상을 획득하였다.

Fig.5에 획득한 각각의 16개의 스캔영상을 이용하여 만든 두 장의 입자영상을 나타내었다. 이 입자영상은 아직 좌표축 변환과정을 거치지 않은 상태이다.

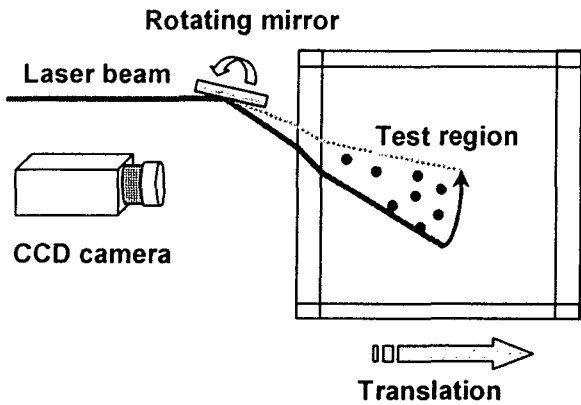


Fig. 4. Schematic diagram of scanning PIV.



Fig. 5. Particle images consist from scanned line image.

이 두 장의 입자영상을 이용하여 앞에서 설명된 PIV알고리즘을 적용하여 속도벡터를 추적하였다. Fig.6에 순간속도벡터 결과를 나타냈다.

PIV 연산시 최종 조사구간의 크기는 12×12pixel이고 조사구간간의 겹침비는 50%를 적용하였다. 속도벡터는 스캔 라인의 겹침이 심한 상단과 스캔 라인사이의 간격이 넓어지는 하단부를 제외한 부분에서 선형 이송장치로 이동시킨 변위와 비교한 결과 4.8%의 표준편차이내에서 변위와 잘 일치함을 알 수 있었다.

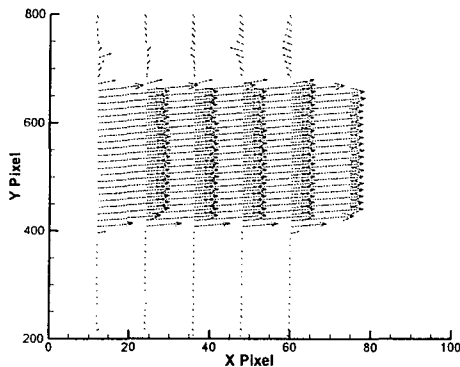


Fig. 6. Velocity vectors from two scanned images.

3. 결론

본 연구에서는 기존의 PIV기법과 달리 하나의 광축을 사용하고 여기에 스캔방식으로 입자영상을 획득하는 새로운 PIV기법을 개발하였다. 실제 유동을 모사하는 장치를 이용하여 모사실험을 수행한 결과, 스캔 방식의 입자영상을 사용하여도 정확한 속도측정이 가능함을 확인하였다. 실제 유동장에 적용하기 위해서는 레이저 빔의 스캐닝 장치와 CCD카메라간의 정확한 동기가 필요하다. 또한 정확한 속도측정을 위한 입자영상의 최소 필요 스캔 라인수와 스캔 라인간의 겹침비등의 영상최적화 연구등도 추후 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 261~304.
- 2) Kim, H. B., 2004, "Development of Echo PIV using ultrasound contrast agent," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 12, pp. 1528~1534.
- 3) Westerweel, J., Dabiri, D. and Gharib, M., 1997, "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings," *Exp. Fluids*, Vol. 23, pp. 20~28.
- 4) Hart, D. P., 1999, "Super-resolution PIV by Recursive Local-correlation," *J. Visualization*, Vol. 10, pp. 1~10.
- 5) Okamoto, K., 1999, "Checker Board Cross-correlation Technique for PIV," *Proc. Of PSFVIP-2*, Honolulu, No. PF116.