

< 논문 >

단일 광경로 스캐닝 PIV기법 개발

김 형 범*
(2006년 9월 21일 접수, 2006년 11월 30일 심사완료)

Development of the Scanning PIV Method with Single Optical Axis

Hyoun-Bum Kim

Key Words: PIV(입자영상속도계), Single Optical Axis(단일 광경로), Scanning Method(스캐닝 기법), Synthetic Image(합성화상)

Abstract

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 when this configuration is hard to be fulfilled. In the present study, the new PIV method which uses only single optical axis to grab the particle images is developed. This new PIV method becomes possible by utilizing the scanning method similar to the echo PIV technique. One particle image of the 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. An optimization study was performed to find parameters which minimize the measurement errors. The effects of particle diameter, beam overlap ratio and particle number density were investigated.

기호설명

d_r : 입자지름(pixel)
 I_0 : 최대강도
 w : 빔폭(pixel)
 x_c, z_c : 최대강도를 갖는 입자위치
 Δt : 시간간격(sec)

1. 서론

최근 들어 실험 유체역학분야에 레이저(laser) 광원이 도입됨으로써 우수한 유동가시화 영상을 얻을 수 있게 되었다. 레이저 빛은 유동을 교란시키지 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 디지털 광학기술을 이용한 유동 해석기법은 주어진 유동의 전체적인 속도장 또는 온도장 변화를 순간적으로 측정할 수 있고, 또한 순간 속도장과 온도장 결과들을 통계 처리하여 난류구조를 정확하게 해석함으로써 유동 문제를 진단하고 제어하는 데에 필요한 정보를 제공한다.

PIV(Particle Image Velocimetry)라고 불리는 속도측정법은 이러한 레이저 광학과 영상처리기술을 이용한 대표적인 속도장 측정방법으로 산란입자에 의해 반사된 레이저광을 카메라에 담아 그 입자영상으로부터 알려진 시간간격(Δt)동안 움직

* 회원, 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : kimhb@gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-6076 FAX : (055)762-0227

인 입자의 변위를 구하는 방법으로 속도장을 측정한다.

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

지금까지의 대부분의 PIV실험기법 구성은 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 레이저광과 입자로부터 산란된 광을 획득하기 위한 두 개의 광경로(optical pass)가 필요하다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 실린더형 렌즈에 의해 만들어진 레이저 평면광(light sheet)과 CCD카메라의 영상저장면(image plane)은 항상 수직을 이룬다.

이와 같은 이중 광경로 PIV기법의 사용은 PIV 기법의 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 노출시간을 조정하는 기법(frame straddling)을 이용하여 고속유동측정도 가능하게 되었다. 이러한 장점을 갖고 현재 사용되고 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, 실제 유체관련 문제가 발생하는 산업현장 등에 적용할 경우, 이중 광경로 조건이 불가능할 때가 많이 발생한다. 예를 들어 엔진의 실린더 내부, 터빈이나 압축기 등의 유동측정과 같은 내부유동실험이나 수중이나 대기유동과 같은 외부유동을 측정하고자 할 때, 이중 광경로 조건을 구성하기는 매우 어렵다. 이는 순간속도장을 비접촉식으로 정확히 측정할 수 있는 PIV기법의 응용분야를 제한하는 결과를 낳았다.

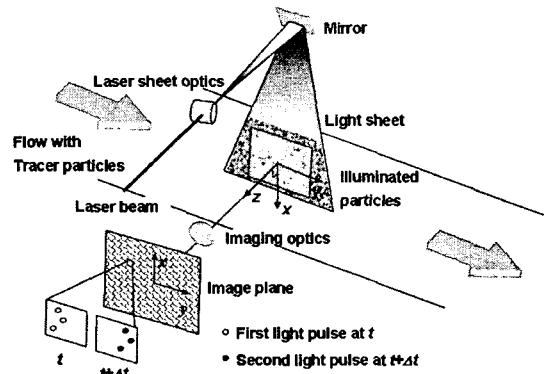


Fig. 1 Schematic diagram of conventional PIV method

이와 함께 기존의 PIV구성에서는 기본적으로 xy평면상의 속도 성분을 측정하고, 만일 영상저장면에 수직방향(z)의 속도성분을 측정하려면 추가의 카메라⁽²⁾나 복잡한 광학계가 필요하고⁽³⁾ 이는 PIV의 현장응용을 더욱 어렵게 하는 원인이 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단일 광경로(single optical axis) 스캐닝(scanning) PIV기법을 개발하였다. 즉, 하나의 광경로만을 사용함으로써 이중 광경로 구성이 불가능한 상황에서도 광학PIV기법의 사용이 가능하고 또한 단순한 광학구성으로 영상기록면의 수직방향 속도를 측정할 수 있다.

2. Single optical axis scanning기법

2.1 Line scan image 획득

새로 개발된 스캐닝 PIV기법과 일반적인 광학 PIV기법과의 가장 큰 차이점은 영상획득과정이다. 스캐닝 PIV기법의 영상획득과정은 Echo PIV 기법의 초음파를 이용한 영상획득과정과 유사하다.^(4,5)

B(brightness) 모드를 이용한 Echo PIV는 관심영역으로 초음파 빔을 발진시키고 산란입자에 의해 반사된 초음파를 측정하여 초음파 빔의 진행상에서 산란입자의 위치를 측정하게 된다. 이 과정을 스캐닝하여 여러 개의 초음파 빔 영상으로 형성된 2차원영상을 획득하게 된다.

스캐닝 PIV의 경우는 레이저 빔이 초음파 빔의

역할을 대신한 경우이다. 단일 광경로 PIV기법에서의 입자영상은 다음의 과정을 거쳐 획득된다. 회전 거울(rotating mirror)장치나 혹은 AOM(acoustic optic module)등의 빔 스캔장치(beam stirring device)에 의해 측정구간을 레이저빔으로 스위프(sweep)하게 되고, 방향은 카메라의 영상저장면에 수직방향이 된다. 디지털 카메라는 스위프되는 레이저빔에 의해 유동속의 산란입자가 반사한 입자영상을 저장한다. 하나의 레이저 빔 영상은 하나의 디지털 영상에 저장되고, 이렇게 획득한 여러 개의 라인영상을 합치면 초음파 영상과 마찬가지로 전체 측정구간의 입자영상을 얻게 된다. Fig. 2에 스캐닝 PIV의 개략도를 나타내었다.

산란입자의 위치는 초음파 B모드와 마찬가지로 빔에서의 상대적 위치(x)와 빔 자체의 위치(z)에 의해 결정된다. 이러한 스캔과정을 반복하여 획득된 2장의 2차원 영상으로부터 속도장을 추출하게 된다. 획득된 입자영상은 기존의 다양한 PTV (particle tracking velocimetry)나 PIV기법의 속도 추적 알고리즘을 적용하여 속도장 결과를 얻는다. 따라서 스캐닝PIV는 기존의 PIV와 달리, xz평면상의 속도정보를 획득하게 된다.

이러한 스캔방식 영상획득과 기존의 스냅샷(snapshot)기법과의 중요한 차이중의 하나는 획득된 입자영상에서 각각의 픽셀간의 상호관계이다. 디지털 카메라를 이용한 스냅샷방식의 영상획득 방법의 경우, 각각의 픽셀은 주위 픽셀과 독립적인 정보를 담고 있다. 스캐닝PIV에서는 하나의 빔으로 이루어진 각각의 라인영상에서는 픽셀들이 독립적으로 존재하지만, 여러 라인영상을 합쳐 만들어진 2차원영상에서는 주위 빔간의 겹침이 나타난다. 이러한 스캔방식 구성과 z방향으로 제한된 스캔 빔 수는 획득된 2차원 입자영상의 화질열화(degradation)의 원인이 되고 스냅샷방식과 비교하여 영상내 입자의 밀도도 작다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 이러한 입자영상의 영향을 최소화하고 정확한 속도벡터 추적과 측정벡터의 공간해상도를 향상시키기 위해 FFT-based 상호상관관계 알고리즘에 반복적 재귀기법(iterative recursive scheme)⁽⁶⁾과 조사구간 이동(window offsetting)⁽⁷⁾기법을 적용하여 속도벡터를 추출하였다. 재귀기법은 일차로 조사구간의 크기를 크게 잡아 속도벡터를 구한다. 이렇게 해서 구한 속도벡터를 다시 참고로 하여 조사구간의 크기를 줄여 다시 속도

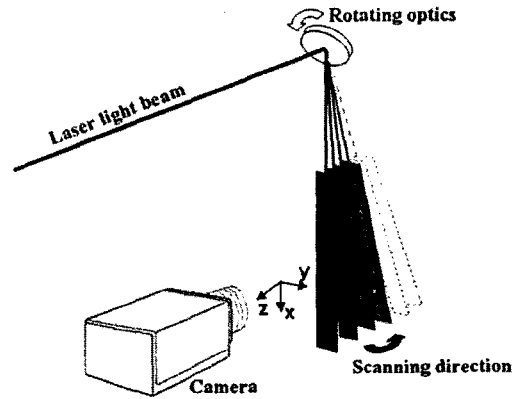


Fig. 2 The schematic diagram of in-plane scanning PIV method

벡터를 구한다. 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 오차벡터를 제거하기 위하여 CBC(correlation based correction)⁽⁸⁾기법을 적용하였다.

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. 3에서처럼 단일 광경로 스캐닝PIV기법은 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 입자영상사이의 시간간격에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 즉, 측정구간의 크기가 커지면 영상을 구성하기 위한 레이저 빔의 수도 같이 증가하여 전체 스캔시간을 늘리게 된다. 이는 개발된 스캐닝PIV기법의 속도측정범위가 획득된 입자영상의 크기(measurement region)와 반비례함을 의미한다.

섹터 스캔(sector-scan) 방식으로 획득한 라인영상(line image)의 좌표계와 실제 물리적 좌표계는 서로 다르기 때문에 이 물리적 신호데이터로부터

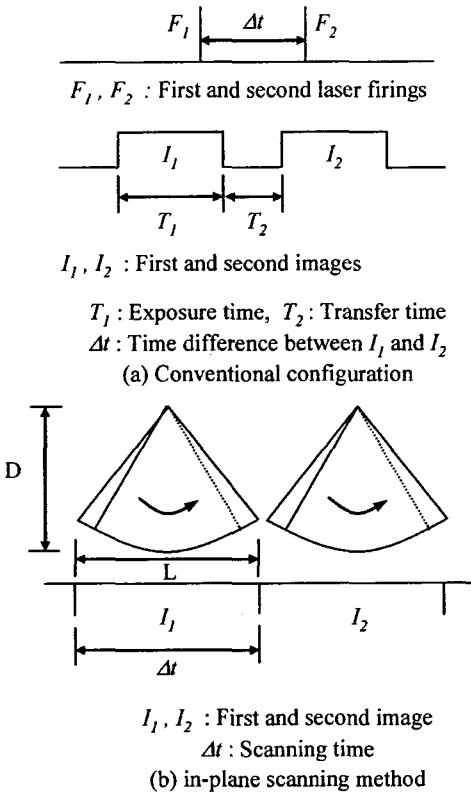


Fig. 3 Timing diagram of conventional PIV and scanning PIV method

실제 측정구간의 좌표를 나타내기 위한 변환 과정이 필요하다. 이 과정을 통해 스캔 방식의 라인영상은 파이(pie)형의 입자영상을 이루게 된다.

단일 레이저빔을 사용하는 스캐닝PIV기법은 고가의 고출력 레이저를 사용하지 않고 낮은 파워의 레이저로도 PIV측정이 가능함을 의미한다.

Fig. 4에 개발된 스캐닝PIV의 순서도를 나타냈다.

2.2 스캐닝 PIV모사실험 및 결과

새로 개발된 스캐닝 PIV기법의 성능 최적화를 위하여 컴퓨터로 모사된 영상을 이용하여 측정결과에 영향을 주는 변수들에 대한 연구를 수행하였다. 우선, $32 \times 32 \times 128$ (pixel) 공간의 임의의 위치에 입자를 배열시키고 속도가 반지름에 비례하는 강체회전을 모사하여 입자의 위치를 변경시켰다. 각각의 입자 위치에 다음과 같은 정규강도분포를 갖는 커널 행렬을 적용하여 입자영상을 만

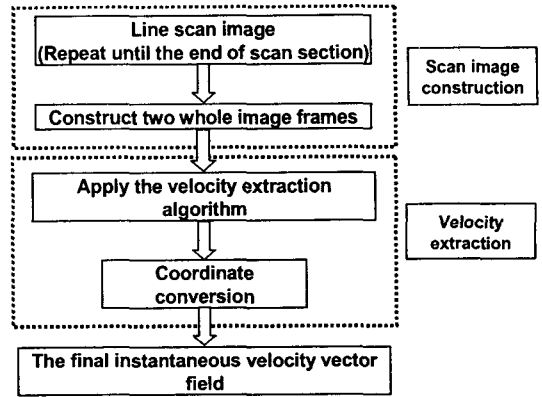


Fig. 4 Flowchart of single optical direction scanning PIV method

들었다.⁽⁹⁾

$$I(x,y) = I_0 \exp \left[- \frac{(x-x_c)^2 - (z-z_c)^2}{(1/8)a_r^2} \right] \quad (1)$$

최적화 연구를 위해 선택한 변수는 입자 크기, 입자 수, 그리고 빔 겹침비(overlap ratio)이다.

빔 폭은 공간해상도를 결정하는 중요한 변수로서 이 빔 폭을 기준으로 위의 변수 값들을 결정하였다. 본 연구에서는 빔 폭을 8 pixel로 정하고 연구를 수행하였다. 빔 겹침비는 레이저 빔이 측정구간을 스윕할 때, 인접한 빔간에 겹치는 측정영역의 크기이다. 따라서 겹침비가 클수록 동일 크기의 측정구간을 스윕하는 데 필요한 빔의 수는 증가한다.

입자의 크기는 각각, $0.25w$ (2 pixel), $0.38w$ (3 pixel), $0.5w$ (4 pixel)를 사용하였고 겹침비는 $0.25w$, $0.5w$, $0.75w$, $0.875w$ 를 선택하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 파이 모양의 스캔 기법에서는 빔의 진행방향으로 겹침비가 달라진다. 회전축에서 멀어질수록 겹침비는 감소한다. 본 연구에서는 측정단면의 가장 아래쪽의 겹침비를 변수로 결정하였다. 즉, 측정면의 위쪽으로 갈수록 겹침비는 선택된 겹침비보다 더 커지게 된다. 입자수는 가상공간 안에서 만들어진 입자수를 의미하고 본 연구에서는 각각 400, 600, 800 그리고 1000개의 입자수 변화를 연구하였다.

Fig. 5는 모사입자화상을 이용하여 생성된 하나의 라인 영상과 여러 개의 라인 영상을 이용하여 만들어진 2차원 입자영상을 보여준다. Fig. 5(a)는 하나의 라인 스캔영상이고 Fig. 5(b)는 여러개의

라인 스캔 영상으로부터 2차원 입자화상을 재구성하는 과정을 보여준다.

3. 최적화 연구 결과

Fig. 6은 합성된 입자영상으로부터 추출된 순간 속도장 그래프이다. 그림으로부터 개발된 스캐닝 PIV기법이 z방향으로의 속도성분을 정성적으로 추출함을 알 수 있다.

Table 1은 최적화 연구에 사용된 매개변수에 따른 속도측정 결과표이다. 스캐닝 PIV기법의 성공 및 실패는 정량적 결과에 상관없이 Fig. 6의 순간속도결과와 같이 정성적으로 묘사된 회전운동과 유사한 속도결과를 얻게 되면 측정 성공으로 가정하고 속도벡터의 정성적 추출에 실패하면 x로 표시하였다. 정성적인 판단이 어려울 경우, Δ을 표시하였다.

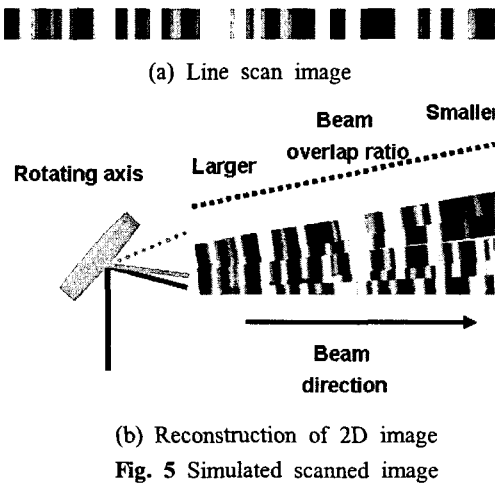


Fig. 5 Simulated scanned image

본 결과로부터 겹침비가 50% 이하인 경우, 다른 매개변수들의 값에 상관없이 속도를 추출하는데 모두 실패하였다. 이는 스캐닝 PIV의 성능에 가장 큰 영향을 주는 요소가 빔 겹침비임을 의미한다.

다음으로 속도 추출의 정확성에 영향을 주는 요소는 입자 크기이다. 입자 크기가 클수록 동일 입자수와 겹침비에서 스캐닝 PIV기법의 속도추출 능력이 낮아졌다. 이는 입자의 크기가 커질수록 입자간의 겹침 현상이 증가하고 이는 PIV 상관관계값의 S/N비를 낮추게 된다.

상대적으로 입자수의 변화는 결과에 영향을 주지 않았다. 이는 본 연구에서 사용된 입자수의 범위가 측정에 영향을 주는 입자수 영역에 아직

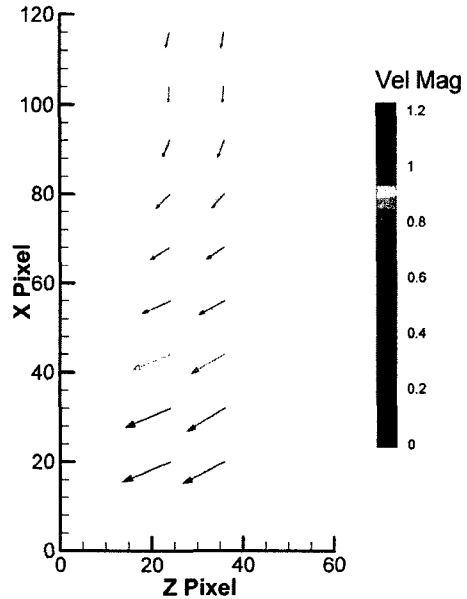
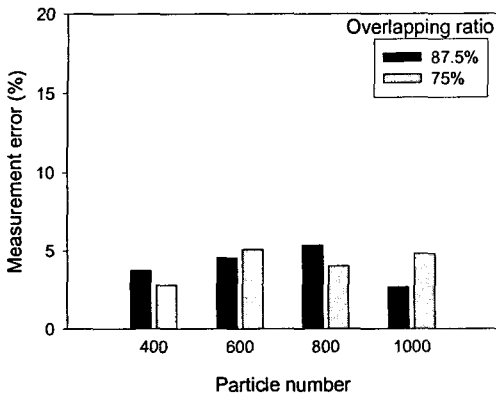


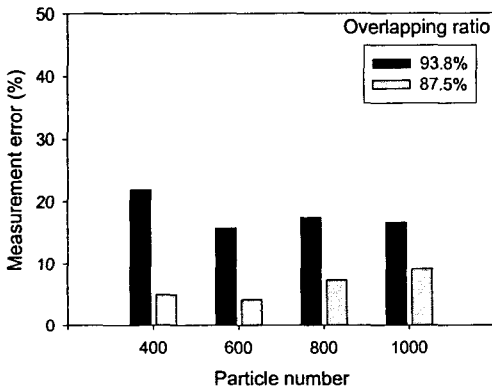
Fig. 6 Instantaneous velocity vector field from synthetic particle image (2 pixel, 75%, 600 particle number)

Table 1 The feasibility test of parameter study (O: success, Δ: mediocre, x: failure)

		Particle number											
		400			600			800			1000		
Beam overlap ratio (%)		87.5	75	50	87.5	75	50	87.5	75	50	87.5	75	50
Particle diameter	0.25	O	O	x	O	O	x	O	O	x	O	O	x
	0.375	O	Δ	x	O	x	x	O	x	x	Δ	x	x
(xw)	0.5	Δ	Δ	x	Δ	x	x	Δ	x	x	Δ	x	x



(a) At the farthest location from the rotating axis



(b) At the mid location from the rotating axis

Fig. 7 The error ratio comparison by varying the particle number and overlapping ratio

포함되지 않았기 때문에 입자수 변화를 더 크게 주어 입자수 범위의 극한값을 찾을 필요성이 있다.

이러한 정성적인 결과를 바탕으로 입자의 크기가 $0.25w$ 이고 겹침비가 87.5%와 75%일 때의 오차비를 정량적으로 비교하였다.

여기서 겹침비의 빔 진행방향으로의 변화를 고려하여 회전축으로부터 가장 먼 쪽과 측정영역의 중간부분으로 각각 나누어 오차분석을 실시하였다.

Fig. 7(a)는 측정단면의 가장 아래쪽에서의 오차비이다. 결과로부터 비교대상인 겹침비와 입자수에 상관없이 약 3에서 5%의 오차를 갖는다. 따라서 개발된 스캐닝PIV기법의 유용성을 알 수

있다.

측정단면의 중앙부에서의 오차비도 그래프는 Fig. 7(b)에 나타났다. 앞의 Fig. 7(a)의 결과에서와 같이 입자수에 따른 오차 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 겹침비가 87.5%인 경우에는 오차범위가 Fig. 7(b)에서의 결과와 큰 차이가 없었다. 반면에 93.8%의 큰 겹침비를 가지면 오차가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 오차에 가장 큰 영향을 준 요소는 겹침비임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 스캔 기법을 이용한 PIV기법을 개발하고 성능에 영향을 주는 요소들의 최적화를 수행하였다.

연구결과로부터 단순한 광학구성으로 xz평면상의 속도성분을 측정할 수 있음을 보여주었다. 최적화 연구로부터 인접 빔간의 겹침비가 75%에서 87.5% 사이에서 속도벡터의 정확한 측정이 가능하였다. 상대적으로 입자수에 의한 측정결과 오차는 본 연구에서는 무시할 수준으로 나왔다.

파이 형태의 스캔 기법에 따른 회전축 가까이에서의 oversampling은 PIV의 측정오차를 증가시켜, 회전축 근처에서는 정확한 속도측정이 어려운 문제가 발생하고 이는 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2004-003-D00058)으로 수행되었습니다. 영상 처리에 도움을 준 류청환, 이상혁군에게 감사를 전합니다.

참고문헌

- (1) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 261-304.
- (2) Anderson, S., Khalitov, D. and Longmire, E., 1999, "High Spatial Resolution, Stereoscopic PIV Measurements in Fully Developed Turbulent Channel Flow," *PIV3rd*, pp. 95-100, Santa

- Barbara, USA.
- (3) Meng, H. and Hussain, F., 1995, "In-line Recording and Off-axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 1827~1840.
- (4) Kim, H. B., 2004, "Development of Echo PIV Using Ultrasound Contrast Agent," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 12, pp. 1528~1534.
- (5) Kim, H. B., Hertzberg, J. R., Lanning, C. and Shandas, R., 2004, "Non-invasive Measurement of Steady and Pulsating Velocity Profiles and Wall Shear Stress in Arteries Using Echo PIV: In Vitro Validation Studies," *Ann. Biomed. Eng.*, Vol. 32, pp. 1067~1076.
- (6) 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.
- (7) Hart, D. P., 1999, "Super-resolution PIV by Recursive Local-correlation," *J. Visualization*, Vol. 10, pp. 1~10.
- (8) Okamoto, K., 1999, "Checker Board Cross-correlation Technique for PIV," *Proc. of PSFVIP-2*, Honolulu, No. PF116.
- (9) Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluid*, Vol. 10, pp. 181~193.