



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

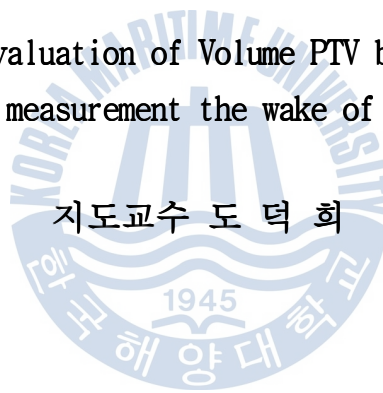
[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# Affine 변환을 이용한 Volume PTV의 알고리즘 성능평가 및 실린더 후류계측

Performance evaluation of Volume PTV based on Affine  
transformation and measurement the wake of a circular cylinder

지도교수 도 덕 희



2012년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

김 영 호

# 목 차

Abstract .....	1
<b>제1장 서론 .....</b>	<b>3</b>
1.1 연구배경 및 목적 .....	3
1.2 연구목적 및 구성 .....	5
<b>제2장 Volume PTV 와 Tomo PIV의 이론적 배경 .....</b>	<b>6</b>
2.1 PIV 및 PTV .....	6
2.2 3차원 계측방법 및 원리 .....	7
2.3 Affine 변환 기반 Volume PTV .....	9
2.3.1 Affine 변환 .....	9
2.3.2 확률일치법 .....	12
2.3.3 Deformation PIV와 Affine PTV의 성능비교 .....	14
2.3.4 Volume PTV .....	26
2.4 Tomographical Reconstruction Method (ART & MART method) .....	28
<b>제3장 Volume PTV의 구축 및 성능평가 .....</b>	<b>32</b>
3.1 가상영상 입자생성 .....	32
3.2 가상영상 유동장 .....	32
3.3 계산결과 .....	34
3.4 결론 및 고찰 .....	46
<b>제4장 Volume PTV를 이용한 실린더 후류 계측 .....</b>	<b>47</b>
4.1 실험장치 및 실험방법 .....	47

4.2 실험결과 .....	49
제5장 결론 및 고찰 .....	54
참고문헌 .....	55



# Performance evaluation of Volume PTV based on Affine translation and measurement the wake of a circular cylinder

by Yeong Ho Kim

*Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University*

## Abstract

The paper discusses about the performances of the constructed affine transformation based tomographic PTV algorithm. Before commencing the performance tests on the tomographic PTV, the performance tests were carried out for the artificial images of which data were numerically generated for the two-dimensional Taylor-Green Vortex. The two-dimensional vector fields were calculated for these artificial images by changing several factors such as, particle maximum movement(PM), particle neighbors(PN), particle number of density and particle diameter. For the tests of the two-dimensional cases, two-dimensional affine transformation was used.

Three-dimensional vector fields were also calculated by using the artificial images of a three-dimensional ring vortex, in which three-dimensional affine transformation was used. For the reconstruction of the artificial particles, the MART(multiplicative algebraic reconstruction technique) was used for the tests the tomographic PTV algorithm. The three-dimensional distribution of the particles and their locations were reconstructed by the use of this MART method.

After confirming the performances, the constructed algorithm was tested for the wake flows of a circular cylinder(Reynolds number = 630), through which the flow features obtained by the conventional tomographic PIV and by the constructed tomographic PTV were compared, and eventually the performances of the constructed algorithm was evaluated qualitatively.

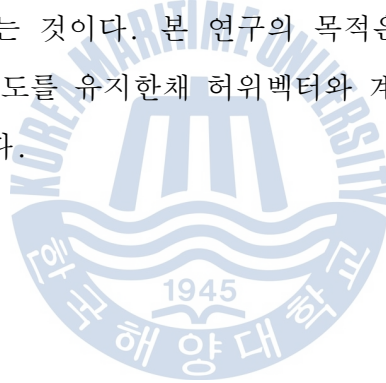


# 제1장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

유체의 유동장으로부터 3차원 유동정보를 얻기 위해서 Arroyo and Greated (1991), Kähler and Kompenhans(2000)는 Stereo-PIV법을 Hinsch(2002), Chan et al.(2004)은 Holography-PIV를 이용하여 복잡한 유동을 정량적으로 가시화하는 방법들을 제시하고 있다. 카메라의 CCD에 촬영된 영상은 빛밝기 정보로 구성되는 인텐시티 필드(Intensity field)로 재구성하여 속도벡터를 구하는 방식이지만 기록매체인 홀로그래픽(Holographic) 필름을 습식공정(Wet Processing) 해야 한다는 단점이 있다. 습식공정은 촬영입자의 재구성을 위한 공정시간이 길며 필름의 왜곡이나 정렬불량이 있을 경우 부정확하다는 단점이 있다. 이후 영상을 포토그래픽 플레이트(photographic plate)를 사용하는 방식 대신에 홀로그램을 CCD센서로부터 직접적으로 저장하는 방식을 Coëtmelec et al. (2001)이 Digital-Holographic PIV (DHPIV)로 명명하여 제안하였다. 그러나 포토그래픽 플레이트(photographic plate)를 사용하는 것에 비해 아주 제한적인 공간해상도를 가지며 큰 픽셀피치 때문에 패턴의 간섭을 해결하기 위해 상대적으로 적은 각도로 촬영해야 하므로 조리개 값과 심도가 아주 제한적이다. 최근 Kim and Lee(2008)가 고해상도의 카메라로 디지털 홀로그래픽(Digital Holographic) PIV를 제안하였으나  $25 /\text{mm}^2$  입자밀도를 가진 유동장에서 측정된 영역에서 입자추적률이 65% 이었다. 이것은 촬영된 3차원 영상 내 전체 구별가능한 입자수가 전체 13,000개중 8,500개 정도 라는 것을 의미한다. 또한 Scarano et al.(2006)가 토모그래픽(Tomographic) PIV를 발전시켜 실린더 후류측정에 접목하였다. 촬영영역은 80 mm x 80 mm x 15 mm 이었으며 측정 가능한 벡터의 수를 늘렸다. Doh dt al.(2002, 2004)은 3D-PTV를 바탕으로 발전된 유전알고리즘을 사용하여 50 mm x 50 mm x 50 mm 영역의 실린더 후류를 측

정하였다. 이러한 방법으로 1k x 1k 크기의 3차원 측정영상으로 부터 10,000개 이상의 벡터를 얻을 수 있게 되었다. Pereira et al.(2000)은 디포커싱(defocused) 3D-PTV를 개발하였으며 100 mm x 100 mm x 100 mm 의 공간이 측정 가능하게 되었다. 벡터의 개수라는 관점에서만 본다면 단위공간당( $1 \text{ mm}^3$ ) 벡터 수가 DHPIV 또는 볼륨-PIV(Volume-PIV)에서 얻어지는 벡터의 수에 비해 3D-PTV에서는 적다. 하지만 3D-PTV와 Volume-PIV의 측정공간의 크기가 최적화된 광학 배치에 의해 얻어지는 HPIV의 영상오차 정도로 같으므로 같은 입자 밀도에서 분별가능한 입자의 수는 동일하다고 볼 수 있다. 반면 Volume-PIV에서 측정가능 영역의 두께는 카메라의 심도 증가와 함께 입자의 공간적 패턴의 불확실성이 커져 측정가능한 정보가 없어지므로 특정한 길이로 제한되어야 한다. 현재까지 3D-PTV의 단점은 계산된 벡터중 다량의 허위벡터가 존재한다는 것과 상대적으로 계산시간이 길다는 것이다. 본 연구의 목적은 Volume-PIV에 비해 3배 정도 두꺼운 카메라의 심도를 유지한채 허위벡터와 계산 시간을 줄이는 새로운 3D-PTV를 구축하는 것이다.





## 1.2 연구목적 및 구성

본 논문은 최근 각광받고 있는 Volume-PTV에 Pin-hole모델기반의 교정법을 접목한 토모그래픽기법을 바탕으로 재구성된 입자로부터 유체의 신축, 전단, 회전을 고려한 어파인(Affine)변환 유동해석법 구축 및 성능평가를 연구의 목적으로 삼고 있다. 이를 위한 논문의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제2장에서는 PTV 및 토모그래픽에 대한 이론적 배경을 설명한다. PTV기법의 원리, 3차원 계측의 원리에 대한 내용과 측정입자의 3차원 복원알고리즘인 ART(Algebraic Reconstruction Technique)법, MART법(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique)에 대한 설명, 그리고 이를 이용한 Volume PTV에 관한 설명을 포함한다. 제3장에서는 MART법을 이용하여 재구성된 입자영상으로부터 어파인 변환이 적용된 Volume-PTV 기법에 대한 성능평가를 다룬다. 본 성능평가는 가상영상을 이용한 Core Vortex를 대상으로 한다. 또한, 토모그래픽(Tomographic) PIV측정기법으로 동일 유동장에 대한 측정결과와의 비교검정을 실시한다. 제4장에서는 제3장에서 검증된 Volume-PTV를 이용하여 실제 원형실린더 후류의 유동구조에 관한 정량적 해석을 실시한다. 마지막으로 제5장에서는 실험결과에 대한 분석과 평가를 정리한다.

## 제2장 Volume PTV와 Tomo-PIV의 이론적 배경

### 2.1 PIV 및 PTV

PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)는 계측하려는 유체와 거의 같은 비중을 가진 입자를 유동장에 투입한 후 광원(레이저, LED, 자외선 등)을 조사하여 고속카메라 등으로 촬영하여 속도를 계측하여 유체의 정량적인 값을 도출하는 비접촉 측정방식을 말한다. 이때 추적입자의 직진성과 등간격성이 유지 되어야 정확한 계측이 되므로 영상사이의 간격을 조정하여 촬영한다.

PIV는 분류하는 기준에 따라 여러 방향으로 정의할 수 있으나 영상입자밀도의 개념을 적용하여 고영상입자밀도(High-image-density) PIV와 저영상입자밀도(Low-image-density) PIV로 나눈다. 일반적으로 저영상입자밀도 PIV는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)라고 하며, 고영상입자밀도 PIV는 PIV(Particle Image Velocimetry)라고 한다. PIV의 경우 영상에서 픽셀(pixel) 당 입자의 개수를 나타내는 영상입자밀도는 0.12이며, PTV의 경우는 0.023이다. PIV의 경우 영상 간 입자군집의 패턴을 변화를 비교하고 PTV의 경우는 입자 각각의 이동을 추적하여 유동장의 속도를 계측한다. 그러므로 패턴의 비교를 위해 PIV는 PTV보다 영상 속 입자의 밀도가 높다.

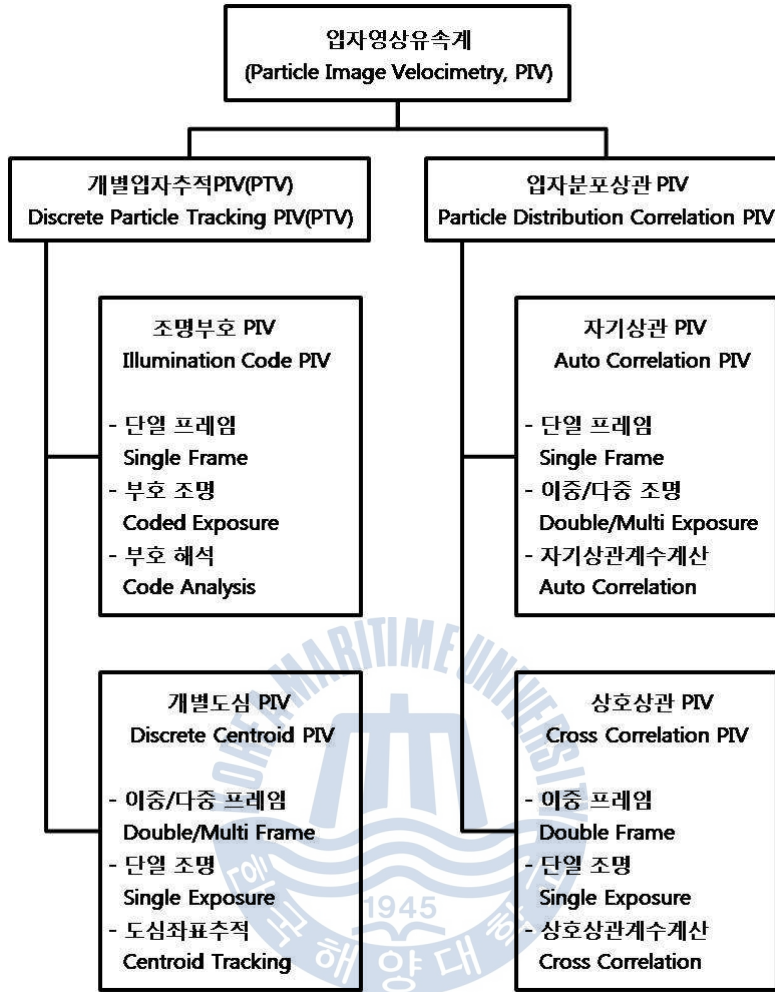


Fig. 2.1 Tree of PIV methods

## 2.2 3차원 계측방법 및 원리

3차원 복잡한 유동을 계측하기 위해 2대 또는 그 이상의 카메라를 이용하여 얻은 2장 또는 그 이상의 영상들(Images)을 매칭(Matching)하면 3차원의 정량적인 값을 얻을 수 있다. 그러나 얻은 영상들을 매칭하기 위해서는 사진좌표계(Photographical Coordinate)와 물리좌표계(Physical Coordinate)사이의 정확

한 관계를 알 수 있어야 한다. 그 관계를 알 수 있도록 수치적으로 데이터화 하는 과정을 카메라 캘리브레이션(Camera Calibration)이라 한다. 캘리브레이션은 10-파라미터 메소드(10-parameter method)를 사용하여 구하게 된다. 10개의 변수(Parameter)에는 6개의 외부변수(6 Exterior parameters:  $dis, a, \beta, \gamma, m_x, m_y$ )와 4개의 내부변수(4 Interior parameters:  $c_x, c_y, k_1, k_2$ )로부터 3개의 변수( $a, \beta, \gamma$ )가 구해지며 이것은 사진좌표계축의 경사 각도를 의미한다. 두 좌표계 사이의 모든 점에 대해서 공선식(Collinear equation)은 식(2.1), 식(2.2)와 같이 나타낼 수 있으며  $c_x, c_y$  는 좌표계에서  $x, y$  성분의 초점거리를 의미한다.  $\Delta x, \Delta y$ 는 렌즈의 왜곡을 의미하며 식(2.3), 식(2.4), 식(2.5)로 나타낼 수 있다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \quad (2.1)$$

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y \quad (2.2)$$

$$\Delta x = \frac{X}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.3)$$

$$\Delta y = \frac{Y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.5)$$

식(2.3), 식(2.4), 식(2.5)는 식(2.6), 식(2.7)로 변환이 가능하다.

$$F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \quad (2.6)$$

$$G = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \quad (2.7)$$

## 2.3 Affine 변환 기반 Volume-PTV

### 2.3.1 어파인 변환 (Affine Transformation)

PIV 및 PTV의 기본적인 소개가 Doh(2001)에 의하여 되어 있으며 수많은 선행 연구들이 실시되었으나 회전, 전단, 축소, 확장등과 같은 강한 변형을 가지는 유동장에서는 PIV 실험결과와 정확도가 떨어지게 된다. 이러한 계산 결과값의 정확도를 높이기 위해서 새로운 알고리즘(Algorithm)에는 이러한 에러(Error)를 줄이고 정확도를 높이기 위한 것이 목적이며 상기 변형의 정확한 해석을 하기 위해 어파인 변환(Affine transformation)이 해법이 될 수 있다. 기본 유체 운동과 같이 어파인 변환은 회전, 전단, 축소, 확장 등을 포함하는 선형변형이다. 2차원 유동에서 속도(Velocity)  $u$ 는 테일러전개의 식으로 나타낼 수 있고, 이차항 이상을 무시하고,  $(x_0, y_0)$ 을 중심으로 주변의 상관영역을 만들면,  $u, v$  속도성분은 식(2.8)에서 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u / \partial x & \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial x & \partial v / \partial y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

식(2.8)의 우변은 변형(Deformation)과 이동(Translation)에 대한 항이며 이동항은 상관영역의 속도벡터 또는 총 이동량을 나타낸다. 또한, 어파인 변환(Affine translation)은 식(2.9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13} \\ y &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23} \end{aligned} \quad (2.9)$$

변형(Deformation)항과 이동(Translation)항을 분리하여 정리하면 식(2.10)와

같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_s - x_0 \\ y_s - y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_0 \\ y_f - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

식(2.10)에서 첨자  $f, s$  는 첫 번째(first)와 두 번째(second) 프레임의(frame) 입자 영상을 의미한다. PIV의 입자 영상에서 변형(deformation) 전, 후에 시간차(Time interval:  $\Delta t$ )가 존재한다. 식(2.10)를  $\Delta t$ 로 나누고  $x_f - x_0$ ,  $y_f - y_0$ 를 첫 번째 행과 두 번째 행에서 뺀 후 정리하면 식(2.11)이 된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} a_{11} - 1 & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$u = \frac{x_s - x_f}{\Delta t}, \quad v = \frac{y_s - y_f}{\Delta t}, \quad u_0 = \frac{a_{13}}{\Delta t} \quad \text{and} \quad v_0 = \frac{a_{23}}{\Delta t}$$

식(2.10)과 식(2.11)을 이용해 어파인 변환의 계수(Coefficient of affine translation)로부터 변형행렬(Deformation matrix)을 계산해 낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \partial u / \partial x & \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial x & \partial v / \partial y \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} a_{11} - 1 & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

그러므로 영상의 어파인 변환을 이용하여 유체의 이동과 변형 매트릭스(Matrix)를 계산해 낼 수 있으며 이는 작은 범위의 변형 텐서(Strain tensor), 와류(Vorticity)등을 더 정확하고 명확하게 계산 할 수 있다. 어파인 변환의 계수를 알기위한 계산 과정은 다음과 같다.

입자 중심 추적 미소시간간격으로 촬영된 두 장의 연속적인 이미지의 입자의

중심은 영상필터링 기법 중에 하나인 가우시안 입자형상필터(Gaussian particle shaped filter)를 사용하는 가우시안 필터법(Gaussian filtering method)으로 계산가능 하다.

입자의 이동량을 계산하기 위해서는 먼저 입자의 최대 이동량을  $T_m$  이라 정의 하고 식(2.13)에 의거하여 계산한다. Fig. 2.2의 Second frame을 참고한다.

$$|d_{i,j}| = |s_j - f_i| < T_m \quad (2.13)$$

$f_i, s_j$  는 첫 번째와 두 번째 영상의 입자 중심점들이다. 이동량 계산의 두 번째 과정은 첫 번째 사진의 입자( $f_i$ )에 매치가가능한 모든 후보 입자들( $s_j$ )과, 식 (2.14)을 만족하는 모든 이웃입자들(Neighborhood particles)을 찾는 것이다.

$$|d_{i,j}|_{i \neq j} = |f_j - f_i| < T_n \quad (2.14)$$

여기서  $T_n$  은 이웃입자의 이산화 거리를 의미하며, Fig. 2.2의 First frame을 참고한다. 다음 과정으로 Baek and Lee(1996)이 제안한 확률일치 PTV 알고리즘(Match probability PTV algorithm)을 계산한다. 확률일치 PTV 알고리즘은 이동을 바탕으로 하기 때문에 강한 변형을 가진 유동장 해석에는 적합하지 않다. 그래서 확률일치 알고리즘을 어파인 변환 알고리즘을 바탕으로 재계산하여 초기화 시킨다. 마지막으로 종래의 PTV 알고리즘들은 와동, 응력과 같은 물리량을 계산하기 위하여 보간과정을 거친다. 이때 계산되는 물리량들은 보간법에 크게 의존하는 경향이 있다. 하지만 새로운 알고리즘은 속도( $u, v$ )뿐 아니라 변형률( $\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x$ )이 그리드 상에 바로 계산이 된다.

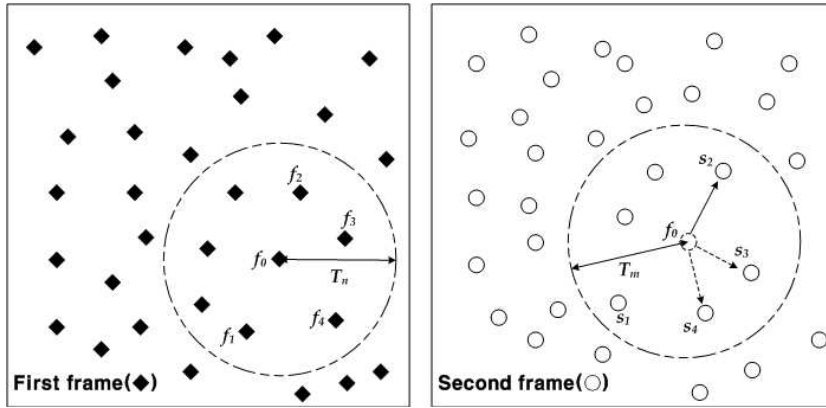


Fig. 2.2 The application of threshold

### 2.3.2 확률일치법 (Match Probability Method)

PTV에서 속도분포를 알기 위해서는 입자의 위치들을 각각의 영상으로부터 알아내고 입자 쌍을 구분할 수 있어야 한다. 입자 쌍을 찾기 위한 방법으로 Beak과 Lee(1996)이 제안한 확률일치법(Match probability method: MPM)이 있다.  $P_{ij}$ 는 첫 번째 프레임의  $i$ 번째 입자와 두 번째 프레임의  $j$ 번째 입자 중 벡터 쌍에 적합한 입자의 확률 일치도를 나타낸다.  $P_i$ 는 벡터 쌍에 불합하는 확률을 말한다. 벡터 쌍의 후보 입자의 수가 식(2.13)를 만족하면  $f_i$  입자들의 전체 확률일치도인  $M$ 은 1로 수렴하며 식(2.15)로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^M P_{ij} + P_i^* = 1 \quad (2.15)$$

$P_{ij}$ 와  $P_i$ 의 예상값은 식(2.16)로 구해진다.

$$P_{ij}^{(0)} = P_i^{*(0)} = \frac{1}{M+1} \quad (2.16)$$



반복계산과정은 식(2.17), 식(2.18)로 나타낼 수 있다.

$$P_{ij}^{(t)} = \frac{\tilde{P}_{ij}^{(t)}}{\sum_j \tilde{P}_{ij}^{(t)} + P_i^{*(t-1)}} \quad , \quad P_i^{*(t)} = \frac{\tilde{P}_i^{*(t-1)}}{\sum_j \tilde{P}_{ij}^{(t)} + P_i^{*(t-1)}} \quad (2.17)$$

$$\tilde{P}_{ij}^{(t)} = AP_{ij}^{(t-1)} + BQ_{ij}^{(t-1)} \quad (2.18)$$

A와 B는 수렴속도를 높이기 위한 상수이며  $t$ 는 반복계산수를 나타낸다. 매 반복계산마다  $Q_{ij}$ 는 준강성(Quasi-Rigidity)등을 만족하는 변위벡터  $d_{ij}$ 의 모든 이웃의 확률일치도의 합을 의미한다.

$$Q_{ij}^{(t-1)} = \sum_k \sum_l P_{kl}^{(t-1)} \quad (2.19)$$

식(2.19)에서  $k$ 는  $i$ 와 관련 있는  $f_k$ 라는 이웃 점의 인덱스(index)를 의미하며  $l$ 은 식(2.20)을 만족하는  $s_l$ 의 인덱스이며 Fig. 2.3로 나타낼 수 있다.

$$|d_{ij} - d_{kl}| < T_q \quad (T_q \text{는 준강성 이산화: Quasi-rigidity threshold}) \quad (2.20)$$

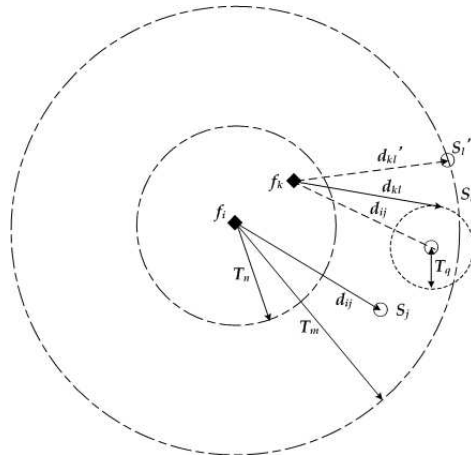


Fig. 2.3 Definition of  $T_q$

반복계산을 수행하면 입자의 이동량이 비슷할 경우 확률 일치값이 1로, 비슷하지 않은 경우 0으로 수렴한다. 그러나 준강성(Quasi-rigidity)상태를 바탕으로 한 이 알고리즘은 유체의 변형에 대해서는 표현이 불가능하다.

### 2.3.3 Deformation PIV와 Affine PTV의 성능비교

Affine Transformation의 적용가능 여부를 확인하기 위하여 기존의 PIV를 발전시킨 Deformation PIV와 Affine PTV의 성능을 비교하였다. Deformation PIV는 Affine PTV의 신축, 회전, 전단등의 변화를 고려하지 않고 영상의 이동 방향만을 고려한 계산법이며 PIV에 비해 나은 정확도를 보이는 것으로 알려져 있다. 성능평가는 Taylor-Green vortex flow의 유동패턴을 이용한 2차원 가상영상 100쌍을 제작하여 PIV, Deformation PIV, PTV, Affine PTV에 대하여 계산을 수행하였으며 결과를 벡터영상과 그래프로 나타내었다.

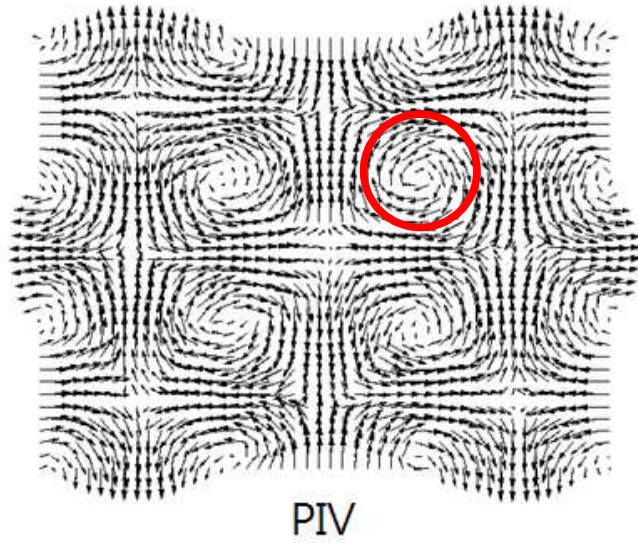


Fig. 2.4 Vector Image of PIV result

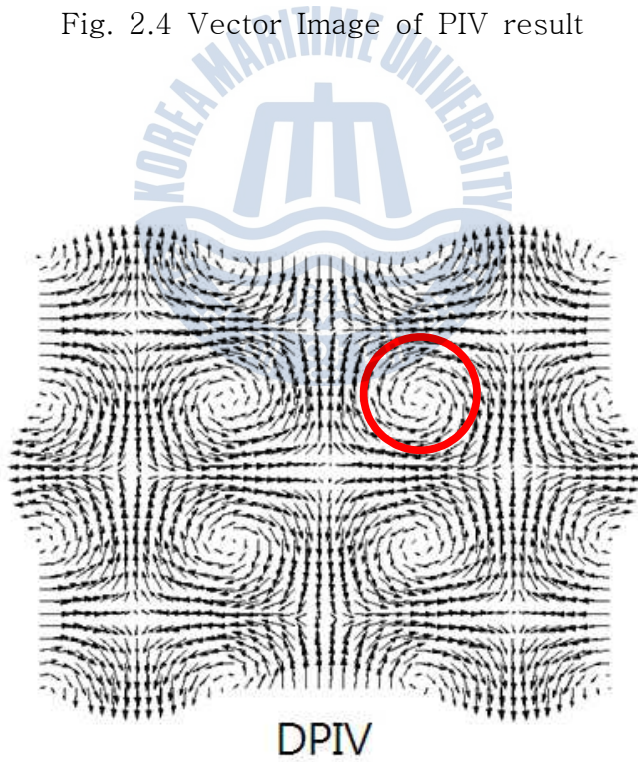


Fig. 2.5 Vector Image of DPIV result

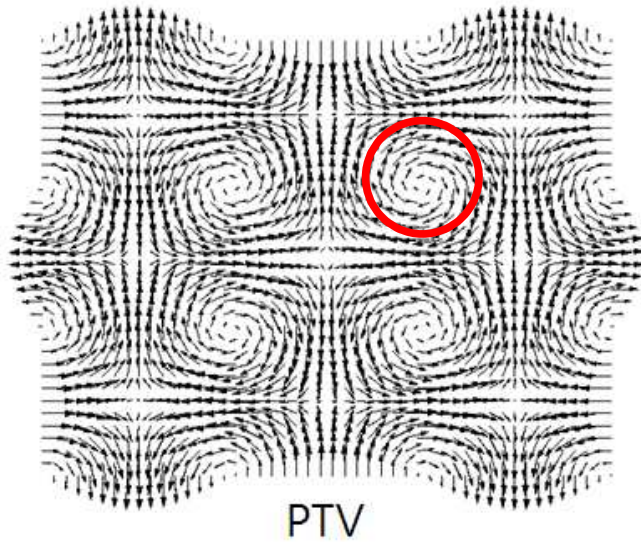


Fig. 2.6 Vector Image of PTV result

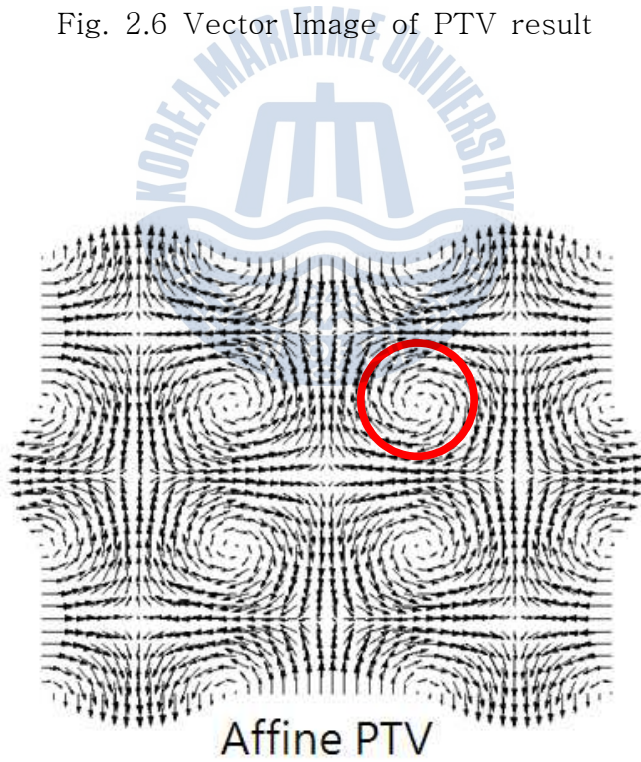


Fig. 2.7 Vector Image of Affine PTV result

Fig. 2.4 ~ Fig. 2.7 은 PIV, Deformation PIV, PTV, Affine PTV의 벡터영상을 나타내고 있다. 기존의 PIV에 비해 Deformation PIV가 와의 중심을 더 잘 계산해 내고 있다. 그러나 여전히 입자 각각을 추적하는 PTV가 PIV보다 와의 중심을 잘 구현해 내고 있는 것을 알 수 있다. 또한 Affine법을 적용했을 시 PTV보다 더 정교한 와의 중심을 계산해 낼 수 있다는 것도 보여주고 있다.



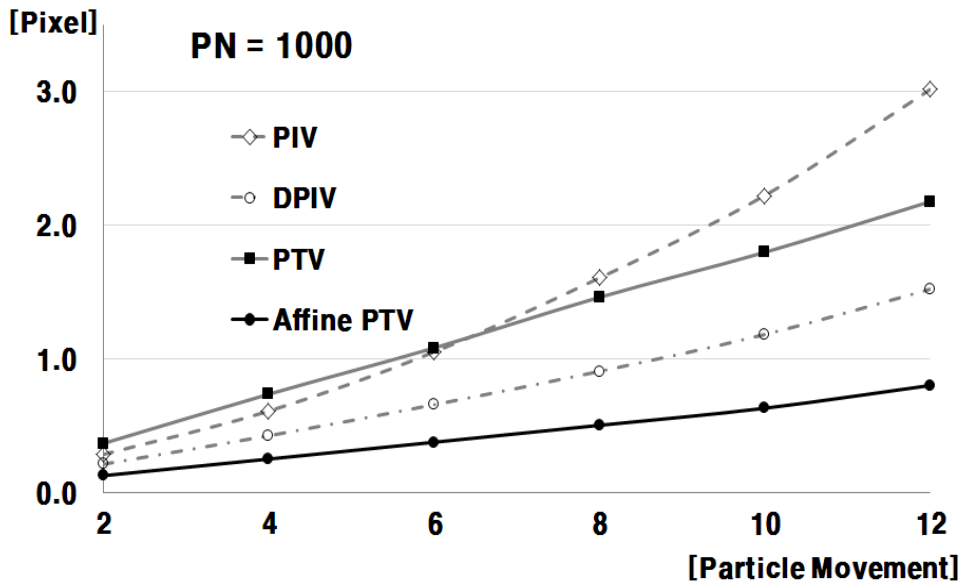


Fig. 2.8 Result of Velocity Error Vector in PN-1000

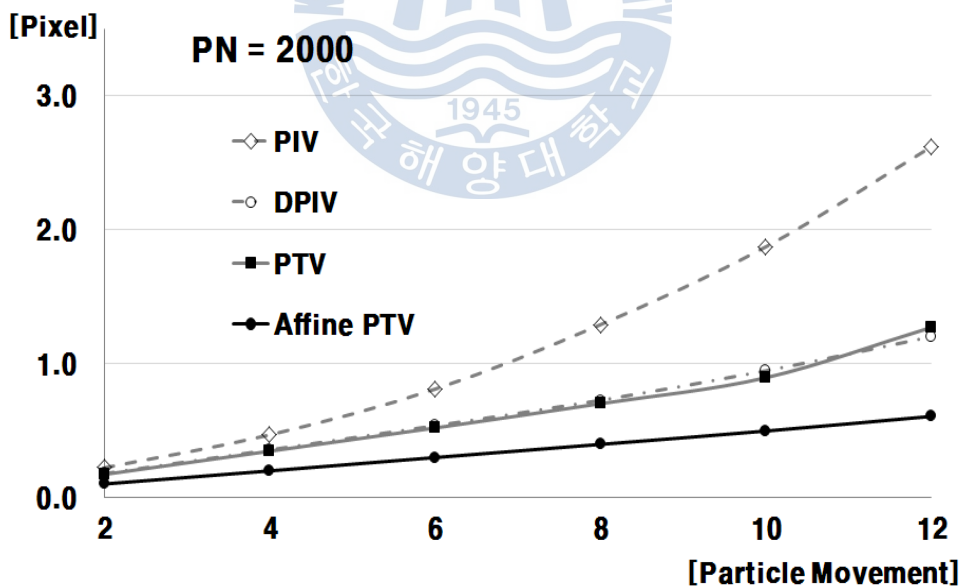


Fig. 2.9 Result of Velocity Error Vector in PN-2000

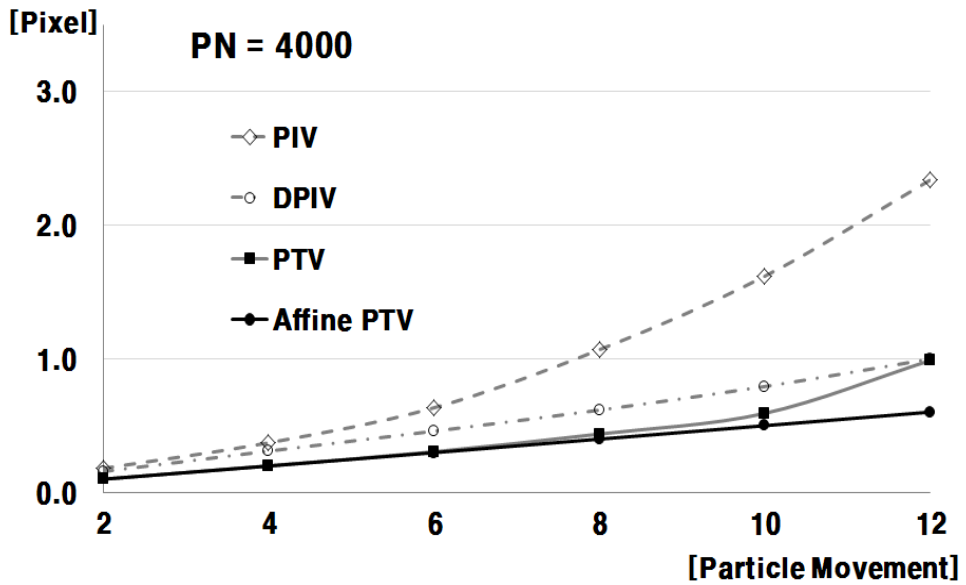


Fig. 2.10 Result of Velocity Error Vector in PN-4000

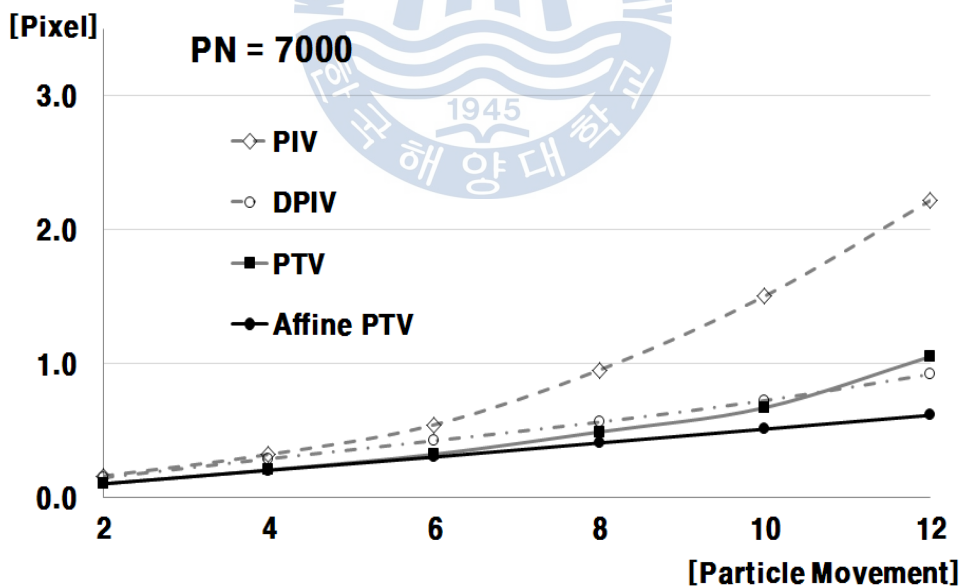


Fig. 2.11 Result of Velocity Error Vector in PN-7000



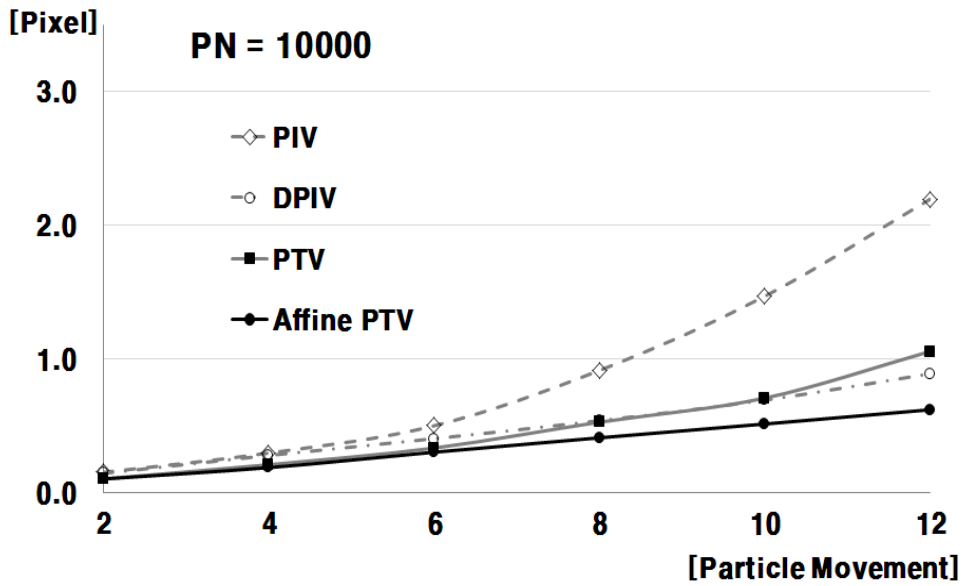


Fig. 2.12 Result of Velocity Error Vector in PN-10000

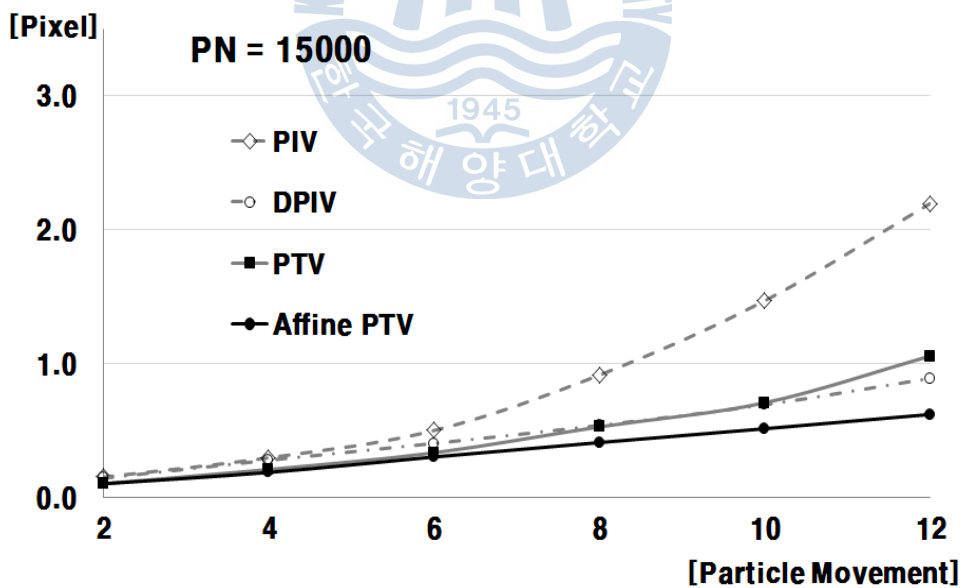


Fig. 2.13 Result of Velocity Error Vector in PN-15000



Fig. 2.8 ~ Fig. 2.13은 각 입자 수 별 속도벡터의 에러를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보이는 것과 같이 Affine PTV가 가장 낮은 에러율을 보여주고 있으며 기존의 PTV와 Deformation PIV가 비슷한 경향을 나타내고 있다. Deformation을 고려한 PIV는 기존의 PIV에 비해 좋은 계산 결과를 보여주고 있으나 Affine PTV가 한층 나은 정확도를 보여주고 있음을 알 수 있다. PTV에 이동, 회전, 신축, 전단 등의 기하학적 변화를 적용하면 한층 정확한 입자 추적을 할 수 있음을 알 수 있다.



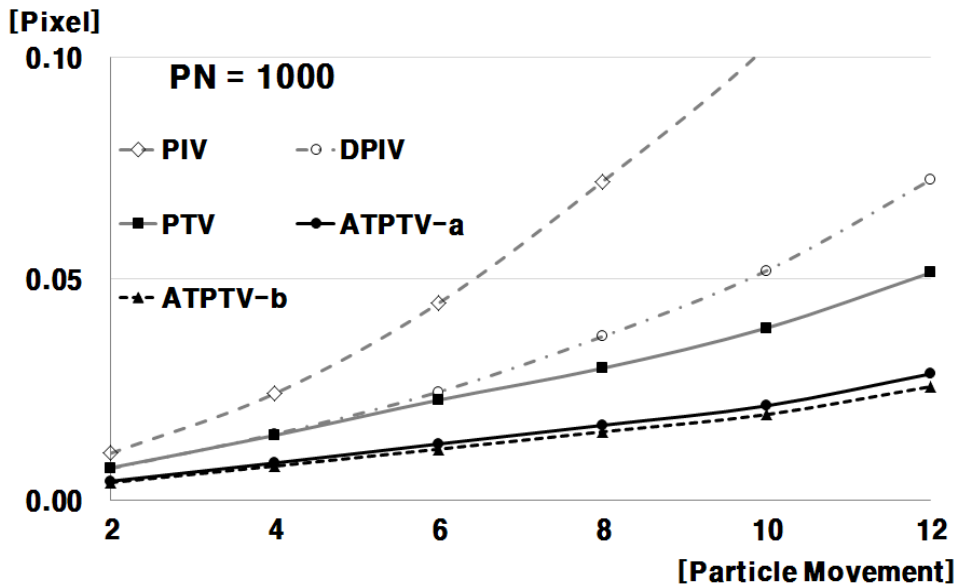


Fig. 2.14 Result of Vorticity Error in PN-1000

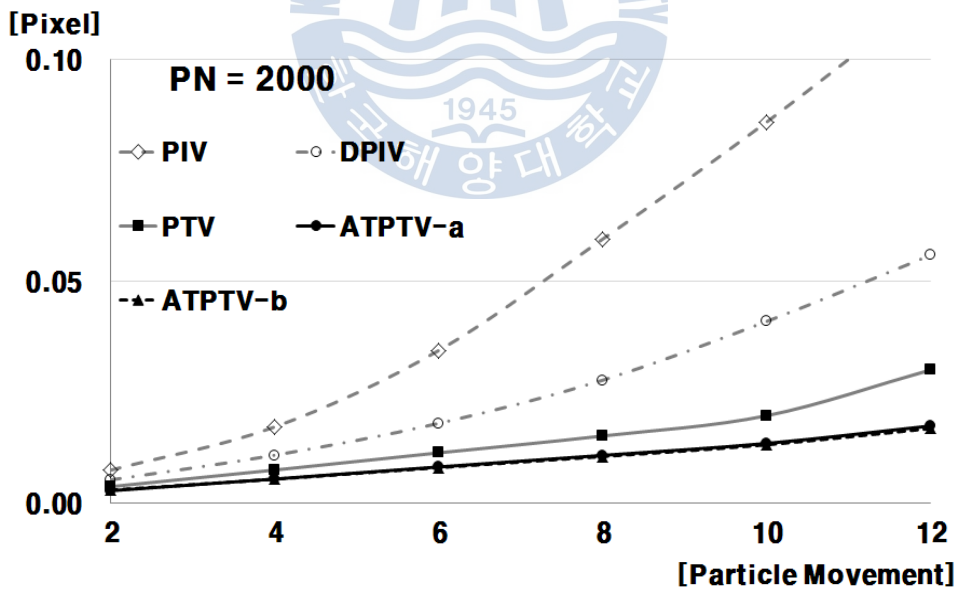


Fig. 2.15 Result of Vorticity Error in PN-2000

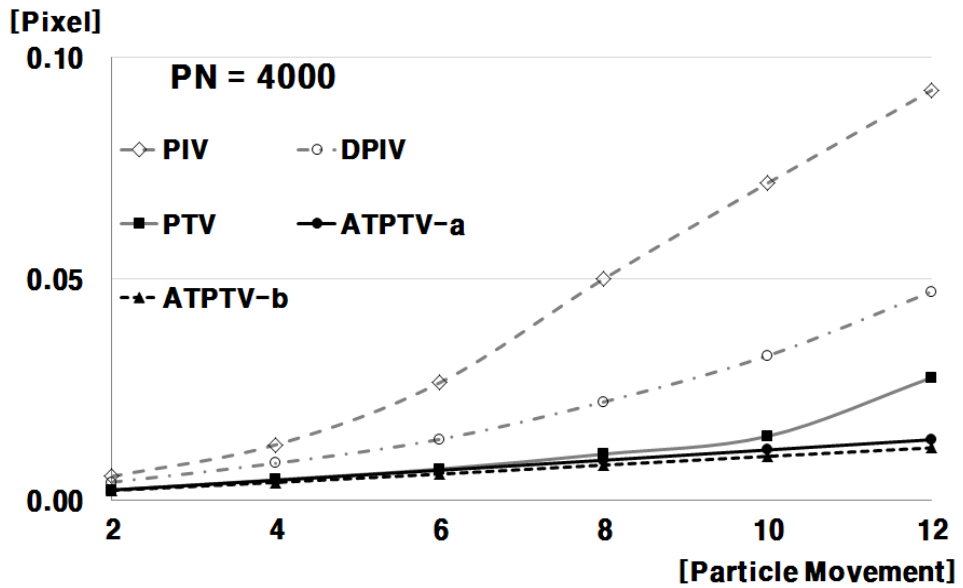


Fig. 2.16 Result of Vorticity Error in PN-4000

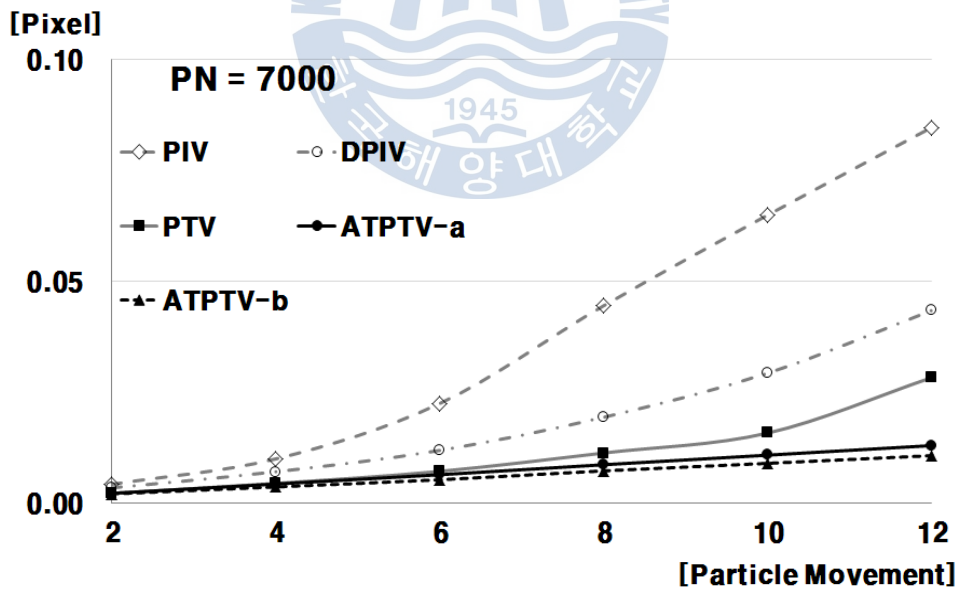


Fig. 2.17 Result of Vorticity Error in PN-7000

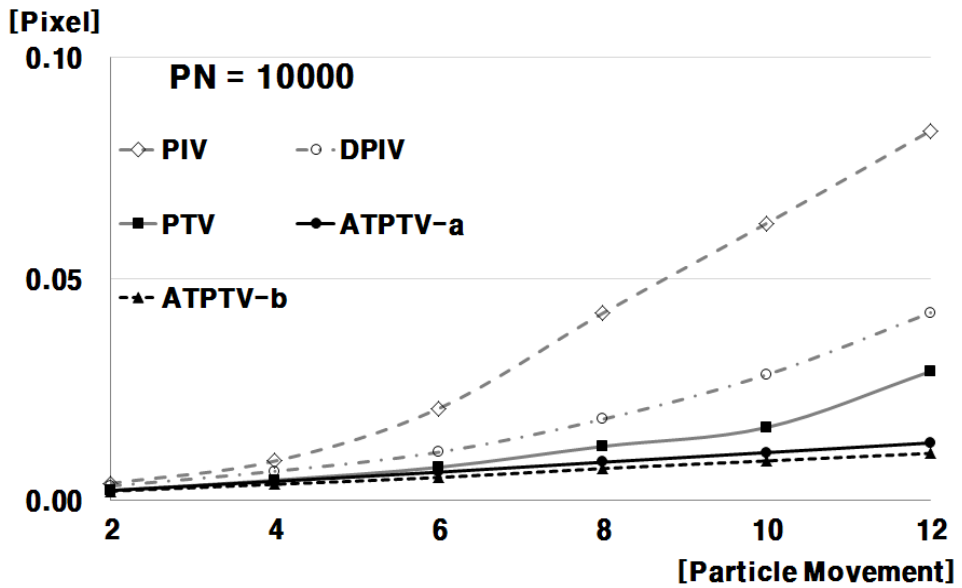


Fig. 2.18 Result of Vorticity Error in PN-10000

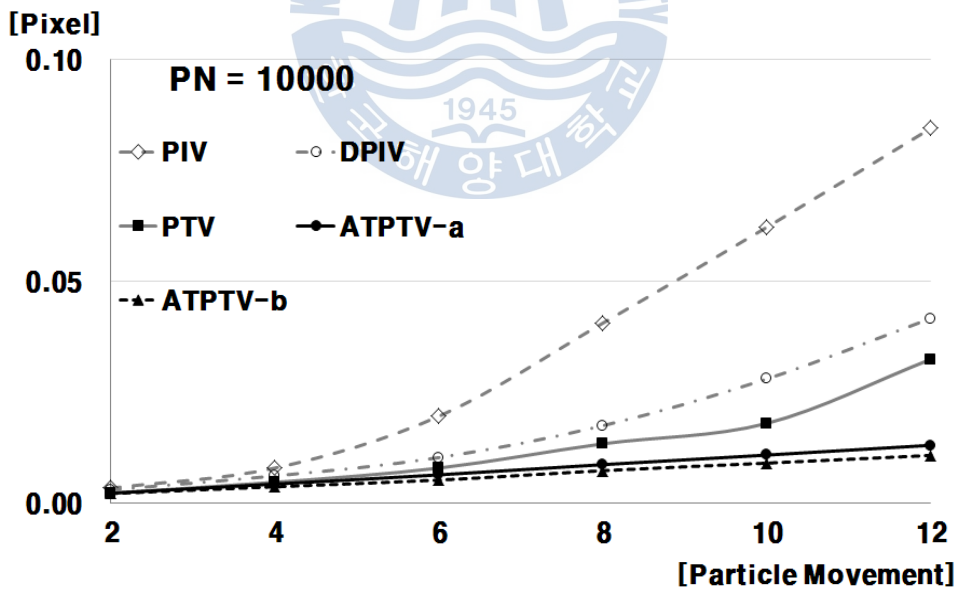


Fig. 2.19 Result of Vorticity Error in PN-15000

Fig. 2.15 ~ Fig. 2.19 은 각 입자 수 별 Vorticity Error를 그래프로 나타낸 것이다. 각 그래프를 참고하면 Affine Transformation을 적용한 계산법이 에러가 적으므로 와의 중심을 찾는 데 최적화 되어 있다고 말할 수 있다. Deformation PIV도 와의 중심을 찾는 데 기존의 PIV법에 비해 좋은 성능을 나타내나 Affine Transformation 에 비해 에러율이 현저히 높으므로 와의 중심을 효과적으로 추적하였다고 하기에는 어려움이 있다. 그러므로 와도를 효과적이고 정확하게 계산하기에는 Affine Transformation이 적합하다.



### 2.3.4 Volume PTV

확률일치법은 변형이 적은 유동장 해석에는 좋은 성능을 보여주며 어파인 변환(Affine Transformation)의 초기값을 찾는 데 최적의 방법이다. 만약 벡터의 3차원 성분을 안다면 어파인 변환의 값은 쉽게 구할 수 있다. 하지만 에러벡터가 다수 존재하는 PTV에서는 적절하지 못하였다. 그러므로 에러벡터의 영향을 줄이고 어파인 변환으로 풀기 위해 더 많은 PTV 벡터들이 필요하며 최소자승법을 이용해 계산해 낼 수 있다. 식(2.8)의  $x-x_0$ ,  $y-y_0$ 를 변수  $b$ 와  $c$ 로 두면 식(2.21)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} b_s &= a_{11}b_f + a_{12}c_f + a_{13} \\ c_s &= a_{21}b_f + a_{22}c_f + a_{23} \end{aligned} \quad (2.21)$$

어파인 변환의 계수는 최소자승법에 의하여 구해질 수 있다.

에러벡터의 영향을 줄이기 위해서 변수  $d$ 를 추가 하였으며 영상 속 입자의 이동량과 어파인 변환이 계산된 이동량의 적합도를 의미한다. 식(2.21)를 적합도 변수  $d$ 를 이용하여 기술하면 식(2.22)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} db_s &= d(a_{11}b_f + a_{12}c_f + a_{13}) \\ dc_s &= d(a_{21}b_f + a_{22}c_f + a_{23}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

$x$ 와  $y$ 의 위치정보로부터 역행렬을 곱함으로써  $a_{13}$ 과  $a_{23}$ 을 구할 수 있다. 첫 번째 영상의  $i$ 번째 입자를 중심으로 두고 검사창의 반지름을  $T_n$  이라 하면  $a_{11}$ 과  $a_{23}$ 은 총 이동량과  $i$ 번째 입자의 이동량을 의미한다. 식(2.21)를 계산하기 위해 적합도  $d$ 는 확률일치법에 의해 초기화하며 확률일치법의  $P$ 는 식(2.23)에 의해 재계산된다.

$$\begin{aligned}
D &= \left\{ (a_{13,i} - b_{s,ij})^2 + (a_{23,i} - c_{s,ij})^2 \right\} / T_q^2 \\
\tilde{d}_{ij} &= \begin{cases} 1 - 0.5D, & \text{at } D \leq 1 \\ 0.5 / D, & \text{at } D > 1 \end{cases} \\
d_{ij}^{(t)} &= Ad_{ij}^{(t-1)} + B\tilde{d}_{ij}^{(t-1)} / \left( \sum_j \tilde{d}_{ij}^{(t-1)} + d_i^{*(t-1)} \right) \\
d_i^{*(t)} &= Ad_i^{*(t-1)} + Bd_i^{*(t-1)} / \left( \sum_j \tilde{d}_{ij}^{(t-1)} + d_i^{*(t-1)} \right)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

식(2.24)에서  $i$ 는 첫 번째 영상의  $i$ 번째 입자를 의미하며  $j$ 는 두 번째 영상의 벡터로써 가능한 후보입자를 의미한다.  $A$ 와  $B$ 는 반복계산에서 수렴을 위한 계수를 의미하며  $D$ 는  $a_{13}$ 과  $a_{23}$ 으로 계산된 이동량과 준강성 이산화값(Quasi-rigidity threshold)  $T_q$ 에 의한  $j$ 번째 후보벡터의 이동량과의 정규거리(Normalized square distance)를 뜻한다. 계산 시간 소비를 줄이기 위해 가우시안 방정식(Gaussian equation)과 유사한 하이브리드 방정식(Hybrid equation)을 이용할 수 있다. 하이브리드 방정식에 의해  $\tilde{d}_{ij}$ 는 적합도가 높을수록 1에 가까운 값을 가지며 적합도가 낮을수록 0에 가까운 값을 가진다. 이후 확률일치법과 같이 각 값의 적합도의 합을 정규화(Normalized) 시킨다. 반복계산이 끝나게 되면 기존의 PTV는 와동, 압력, 응력 등의 각종 물리량을 구하기 위하여 보간 과정(Interpolation process)을 거치며 보간법의 영향을 많이 받는다. Cohn 과 Koochesfahani(2000)가 보간법의 영향에 대해 기술하였으며, 보간의 영향을 적게 하기 위해서는 높은 격자밀도와 고차원의 적합함수가 필요하다. 물리량에 있어서 편미분값을 얻을 때 오차의 확산과 전파가 존재하므로 보간된 벡터장으로부터 물리량을 계산하는 것 보다 실제 유동장의 벡터로부터 계산하는 것이 정확하다. 그러므로 새로운 Volume PTV 알고리즘은 속도성분 뿐 아니라 2차원 공간의 편미분 성분이 기준 격자점에 바로 도출된다는 점이 이전 알고리즘에 비해 진보한 것이라 할 수 있다.

## 2.4 Tomographical Reconstruction Method (ART & MART method)

3차원공간에서 2차원 공간으로 투영하는 방법에는 Angular method와 Translation method가 있다. Angular method에는 matrix를 이용하는 방법으로 식(2.24)과 도형의 길이 비를 이용한 pin-hole 모델법이 있다. Translation method는 카메라를 평행하게 배치하고 대상체를 촬영하는 일종의 기하학모델을 이용한 투영법이다. 본 연구에서는 pin-hole모델을 이용한 투영법을 활용하였다.

$$[4 \times 4] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X = \frac{X'}{Z'} \\ Y = \frac{Y'}{Z'} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Fig. 2.21은 Tomographical Method중 pin-hole 모델기반의 교정법을 나타내었다. 실제 3차원 공간에서의 광원으로부터 빛 밝기정보  $E(X_j, Y_j, Z_j)$ 를 가지는 입자들과 2차원의 카메라 CCD 센서에 맺힌 2차원의 빛 밝기정보  $I(x_i, y_i)$ 와의 관계는 식(2.25)로 나타낼 수 있다.

$$I(x_i, y_i) = \sum_{j \in N_i} w_{ij} E(X_j, Y_j, Z_j) \quad (2.25)$$

$w_{ij}$ 는 가중치로 복셀(voxel) 입자밝기가 픽셀(pixel)에 미치는 영향도를 의미하며 상대적인 복셀의 크기와 복셀중심과 카메라의 시선 사이의 거리에 영향을 받으며,  $0 \leq w_{i,j} \leq 1$ 의 값을 가진다. Fig. 2.22는 2차원영상으로부터 3차원 공간으로 투영관계를 이용한 토모그래픽 복원 모델을 나타낸다. 토모그래픽을 이용한 입자 재구성법은 ART법(Algebraic Reconstruction Technique)과 MART법(Multiply Algebraic Reconstruction Technique)이 있으며 ART법은



입자의 밝기정보(계조치값)의 실제값과 계산된 값의 차를 이용하는 방법이며, 식(2.26)으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 ART &: E(X_j, Y_j, Z_j)^{k+1} \\
 &= E(X_j, Y_j, Z_j)^k + \mu \frac{I(x_i, y_i) - \sum_{j \in N_j} w_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j)^k}{\sum_{j \in N_j} w_{i,j}^2} w_{i,j}
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

$\mu$ 는 수렴속도를 높이기 위한 가중치이며,  $0 \leq \mu \leq 2$  사이의 값을 가진다. 하지만, 가중치를 곱함에도 불구하고 상대적으로 계산 값이 큰 경우 수렴속도가 늦다. MART법은 계조치값과 계산된 값의 비를 이용하며, ART법에 비해 신속하게 계산 결과를 얻을 수 있다. 식(2.27)은 MART 법의 계산식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 MART &: E(X_j, Y_j, Z_j) \\
 &= E(X_j, Y_j, Z_j)^k \left( \frac{I(x_i, y_i)}{\sum_{j \in N_j} w_{i,j} E(X_j, Y_j, Z_j)^k} \right)^{\mu w_{i,j}}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

$\mu$ 는 계산의 수렴속도를 높이기 위한 가중치로  $\mu \leq 1$ 의 값을 가진다. 본 연구에서는 입자의 재구성을 위해 수렴속도가 빠른 MART법을 적용하였다. Fig. 2.23에 입자재구성의 원리를 도식하였다.

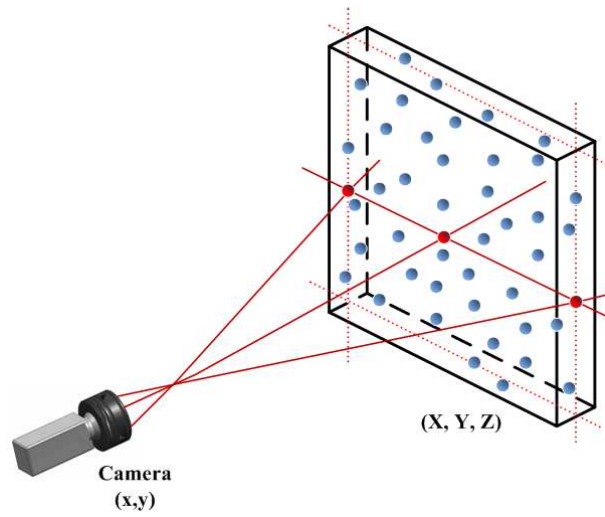


Fig. 2.21 Pin-hole method

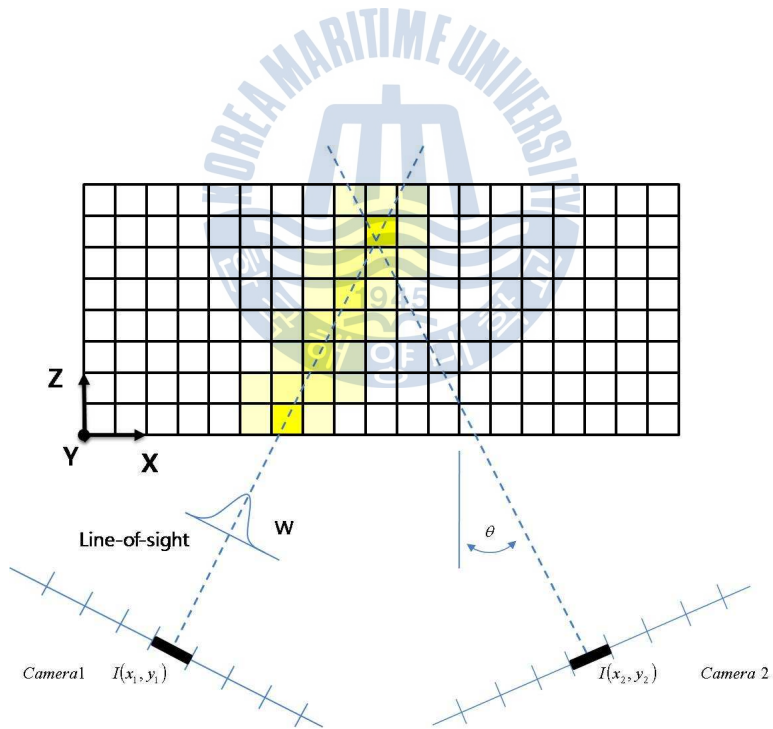


Fig. 2.22 Tomographical reconstruction method

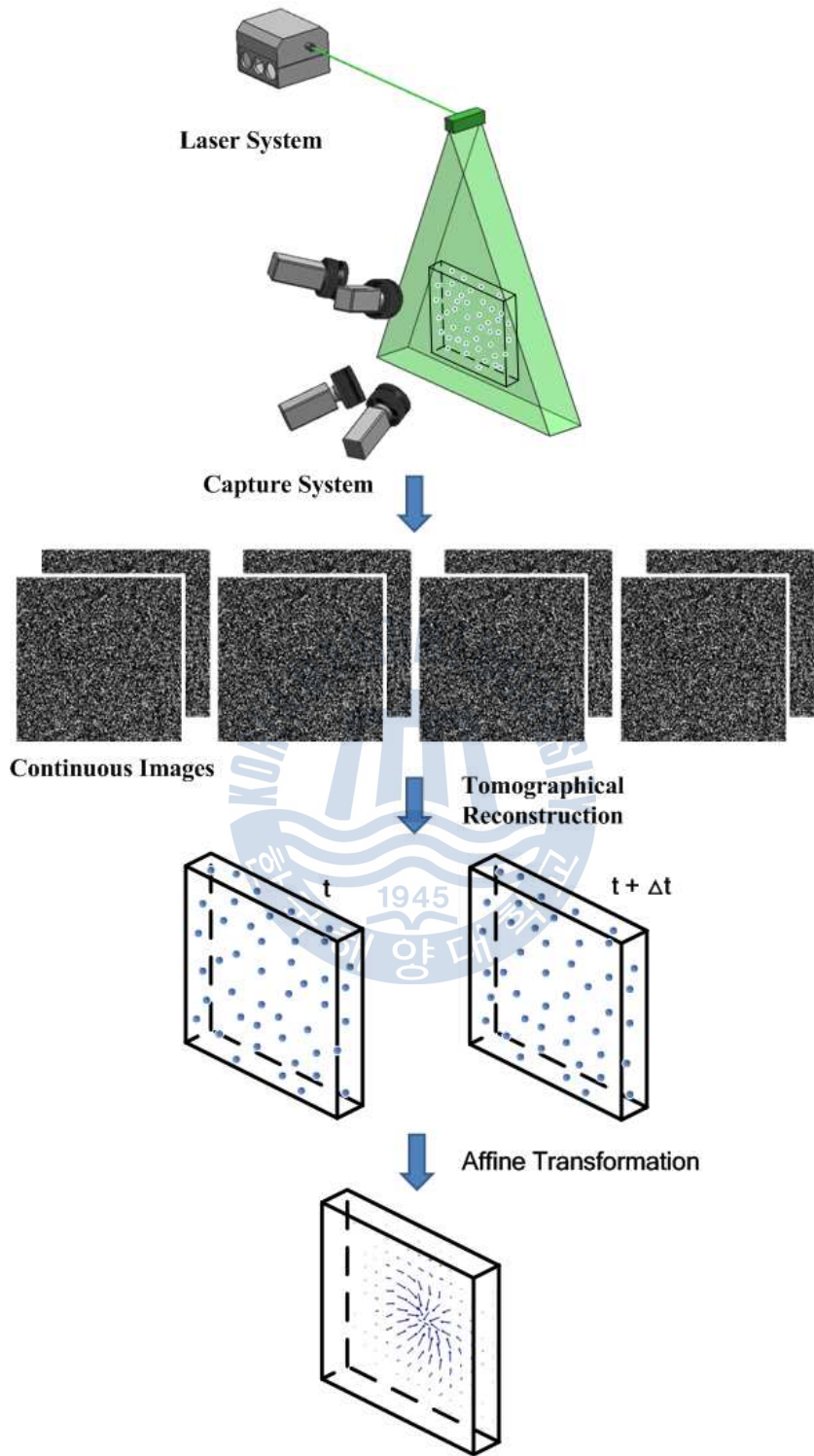


Fig. 2.23 Flow chart of experiment

## 제3장 Volume PTV의 구축 및 성능평가

### 3.1 가상영상 입자생성

앞서 기술한 Volume PTV의 성능평가를 위해 수치해석을 실시하였으며 가우시안 계조치 분포(Gaussian intensity distribution)로 생성된 512 x 512 픽셀의 가상입자를 이용하였다.

$$I(X) = I_0 \exp\left(-\frac{X - X_c}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

$I_0$ 는 최대 입자 밝기,  $X_c$ 는 입자의 무게중심,  $\sigma$ 는 표준편차를 의미한다. PIV와 PTV 결과는 입자의수, 입자의 이동량, 입자의 크기 등에 영향을 많이 받으나 본 연구에서는 주된 영향을 받는 입자의 수를 위주로 성능평가를 실시하였다.

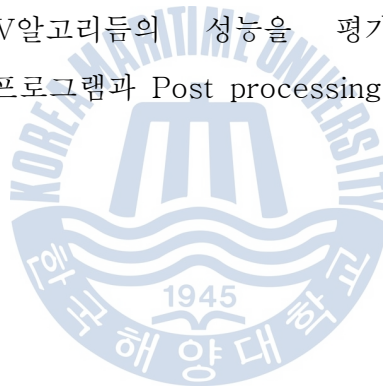
### 3.2 가상영상 유동장

입자의 유동패턴은 3차원 형상의 Vortex Ring flow를 선택하였으며 입자의 수에 따라 5,000개 / 10,000개 / 20,000개 / 50,000개 / 100,000개를 갖는 가상영상을 시간간격 1/500초로 100쌍을 만들어 시뮬레이션 하였다.

Vortex Ring은  $z = 0$  mm의 중심선에 위치하며, 직경은 10 mm이며 복셀 내에서  $d$ 를 통해 변위장 분석을 하였고, 식(3.2)에  $d$ 를 구하는 식을 표현하였다.

$$d = \left\| \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} \right\| = \frac{8R}{l} e^{-\left(\frac{R}{l}\right)} \quad (3.2)$$

$R$  은 Vortex Ring의 센터에서부터의 Ring의 중심까지의 거리를 나타내며  $l$  은 Vortex의 길이 스케일을 나타낸다. 여기서,  $l$  의 값은 2 mm 를 설정하였다. 측정볼륨( 35 x 35 x 8 mm<sup>3</sup> ) 내부에는 5,000~100,000개의 입자를 사용하였고, 4대 카메라를 이용한 측정시스템을 기반으로 하였다. 또한, 각각의 카메라는 좌, 우, 상, 하 방향으로 15°의 각도를 가지게 설정하였고, 저장된 영상은 512 x 512 픽셀의 해상도를 가진다. 영상에서 입자의 크기는 1.0~3.0 픽셀이다. 측정볼륨은 350 x 350 x 80 복셀의 해상도를 가지며, Vortex Ring 주변 입자들의 전체적인 변위동향을 69 x 69 x 13의 벡터장으로 나타내었다. 같은 유동장을 상호상관법을 이용한 Tomo-PIV 결과와 비교하여 새로운 PTV알고리즘의 성능을 평가 하였다. 이를 위해 ThinkersEyes 유동해석프로그램과 Post processing을 위해 Tecplot360을 사용하였다.



### 3.3 계산결과

Tomo PIV와 Volume PTV의 입자의 수에 따른 이동량별 에러율을 Fig. 3.1 ~ 3.5에 그래프로 나타내 보았다. 전체적으로 이동량이 커질수록 에러가 증가했다. Fig. 3.1 에서 파티클 수가 5000개의 경우 Tomo PIV가 Volume PTV에 비해 에러율이 낮으나 입자의 수가 늘어나면서 Volume PTV의 에러율이 감소했다. 이는 입자의 수가 많을수록 Affine 변환의 후보군들이 증가함에 따른 결과로 볼 수 있다. 이를 통해 고밀도 입자에서 3차원 유동의 해석에 있어서 Volume PTV도 사용가능 함을 알 수 있으며 종전보다 계산시간을 단축하면서 정확도를 높일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3.5에서 입자수 100000개의 경우 전체적인 에러율이 50000개에 비해 증가하여 너무 많은 입자는 Tomographic의 방법에서 입자의 재구성에 방해가 되는 것으로 사료된다.

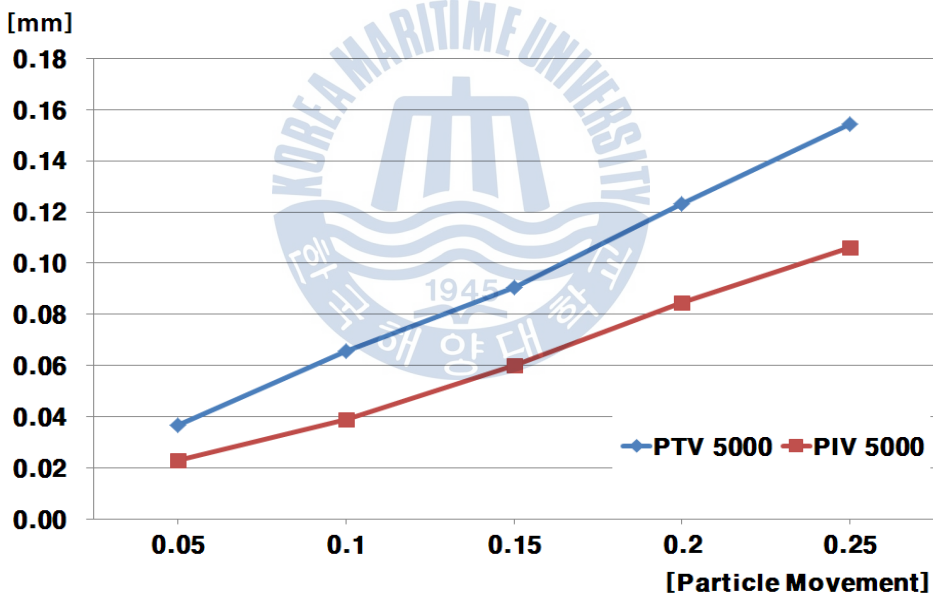


Fig. 3.1 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV in Particle Number(PN)-5000

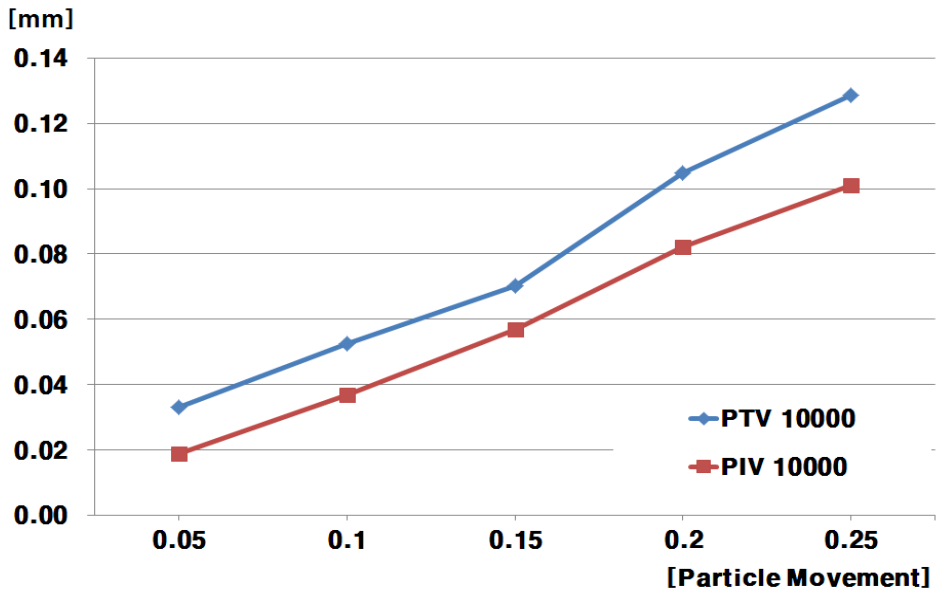


Fig. 3.2 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV in Particle Number (PN)-10000

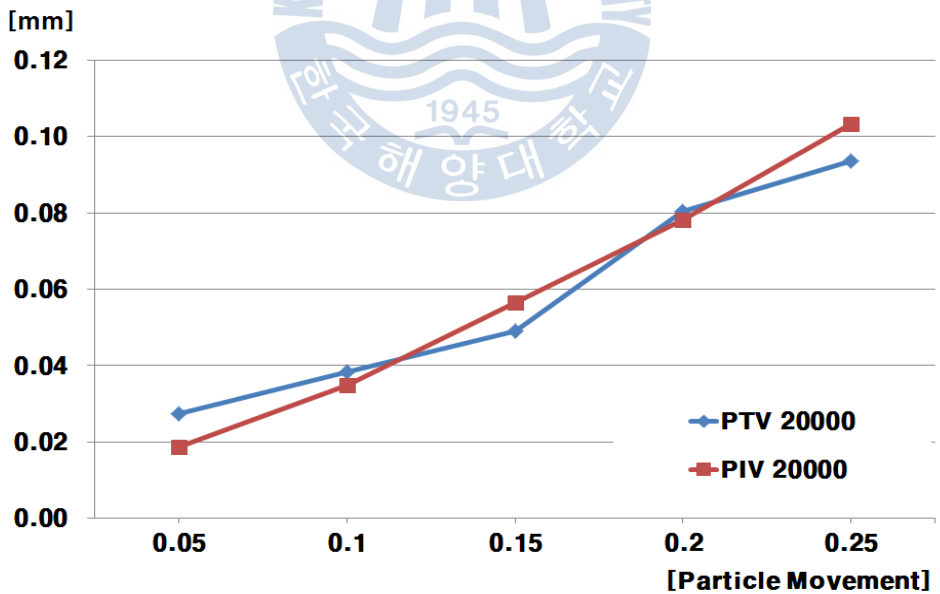


Fig. 3.3 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV in Particle Number (PN)-20000

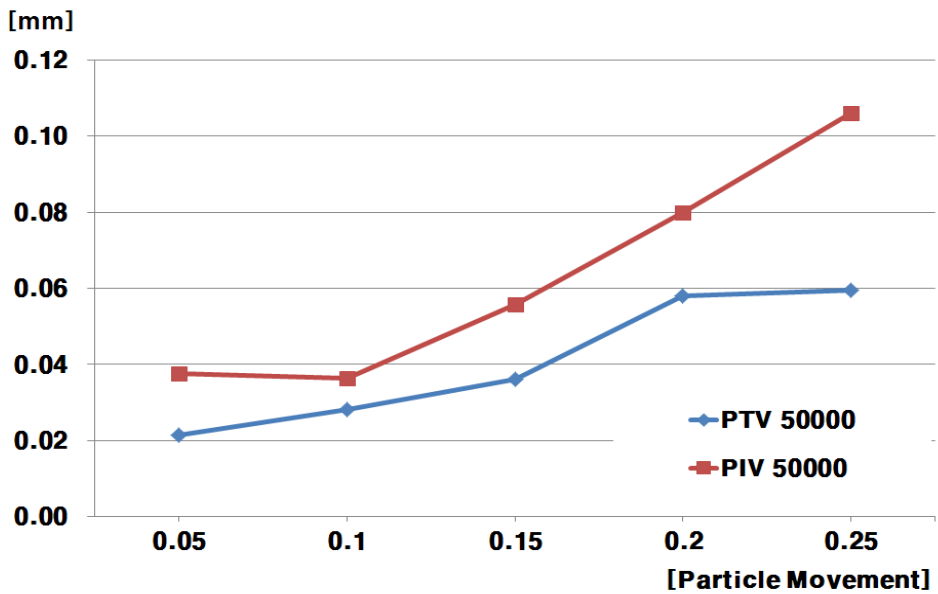


Fig. 3.4 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV in Particle Number (PN)-50000

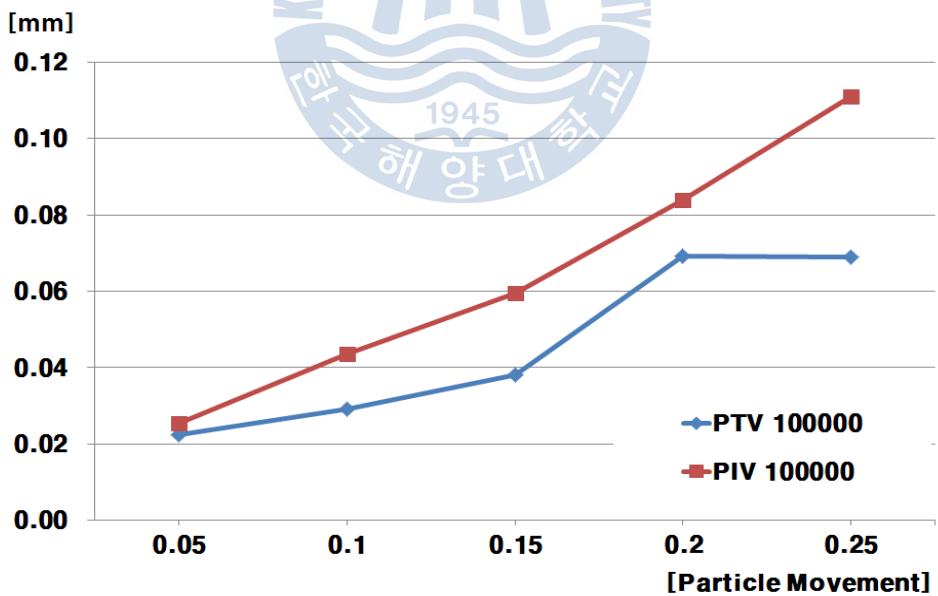


Fig. 3.5 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV in Particle Number (PN)-100000



Fig. 3.6 ~ 3.13은 Tomo PIV와 Volume PTV의 Vorticity를 표현한 것으로 Tomo PIV에 비해 Volume PTV가 와도를 더 잘 표현하고 있다. Tomo PIV의 경우 균일한 와를 만들어 내지 못하고 와의 모양이 상하로 긴 형태를 취하고 있으나 Affine변환을 채용한 Volume PTV에서는 와의 중심을 더욱 정확히 표현함을 알 수 있다. 또한 Fig. 3.1에서 같은 속도를 나타내는 ISO Surface도 Tomo PIV의 경우 전체적으로 상하로 긴 Ring Vortex를 형성하고 있으나 Fig. 3.2에서 Volume PTV의 경우 비교적 정확한 Ring Vortex의 모양을 나타냄을 알 수 있다.



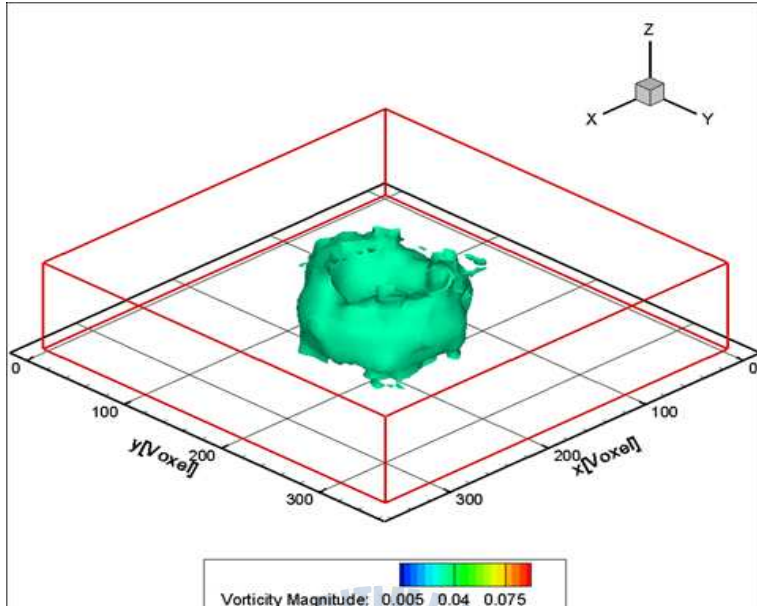


Fig. 3.6 Vorticity of Tomo PIV in particle number(PN)-50000

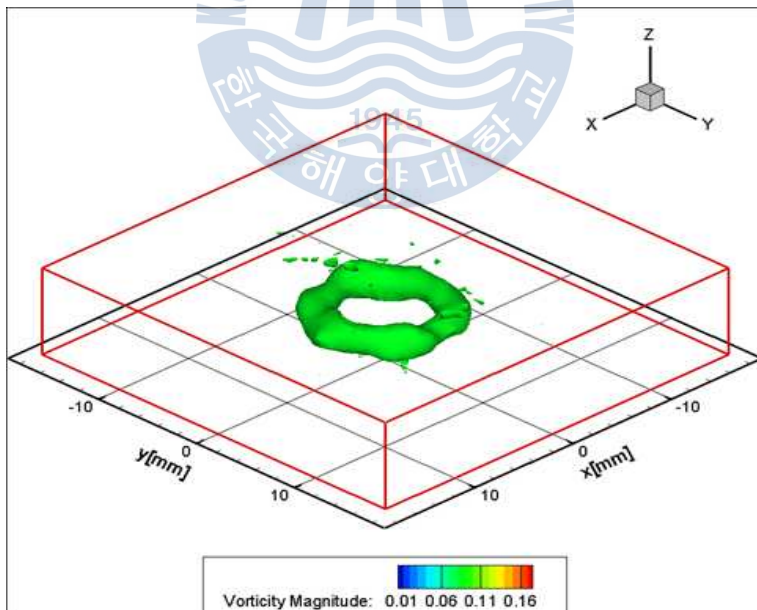


Fig. 3.7 Vorticity of Volume PTV in particle number(PN)-50000

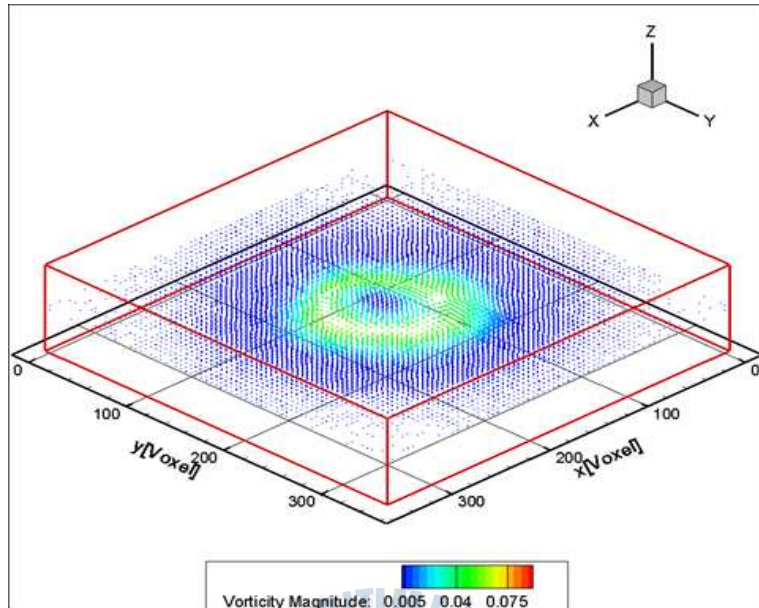


Fig. 3.8 Vorticity of Tomo PIV in particle number(PN)-50000 (XY Plane)

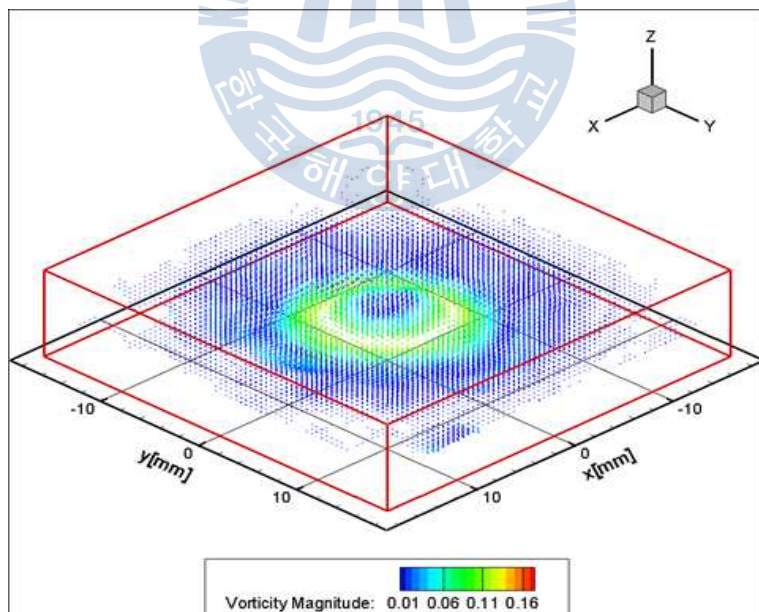


Fig. 3.9 Vorticity of Volume PTV in particle number(PN)-50000 (XY Plane)

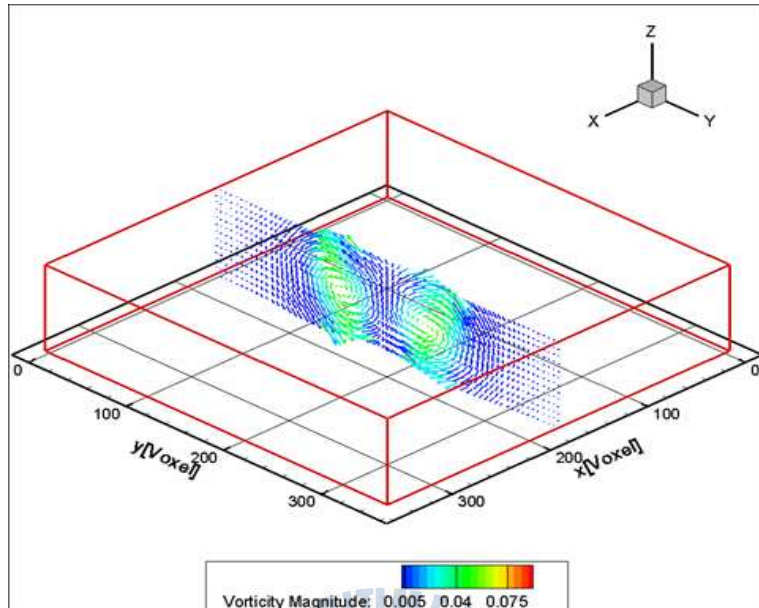


Fig. 3.10 Vorticity of Tomo PIV in particle number(PN)-50000 (YZ Plane)

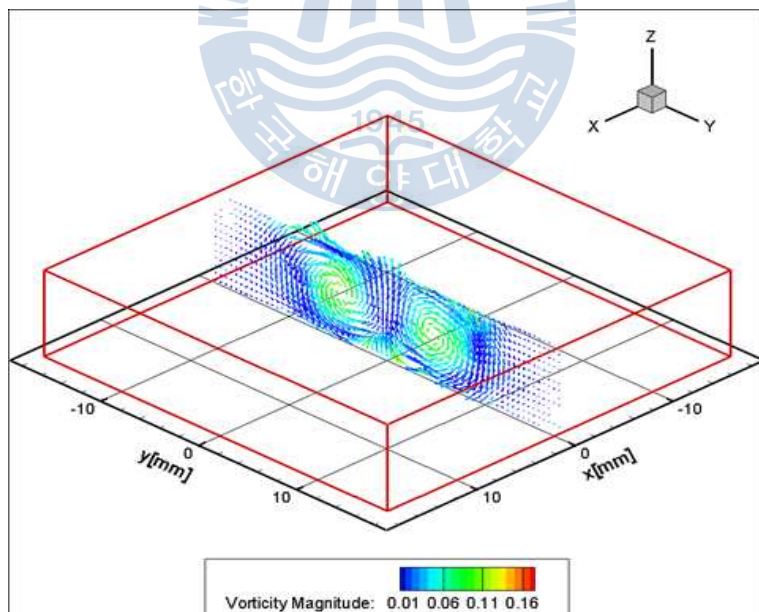


Fig. 3.11 Vorticity of Volume PTV in particle number(PN)-50000 (YZ Plane)

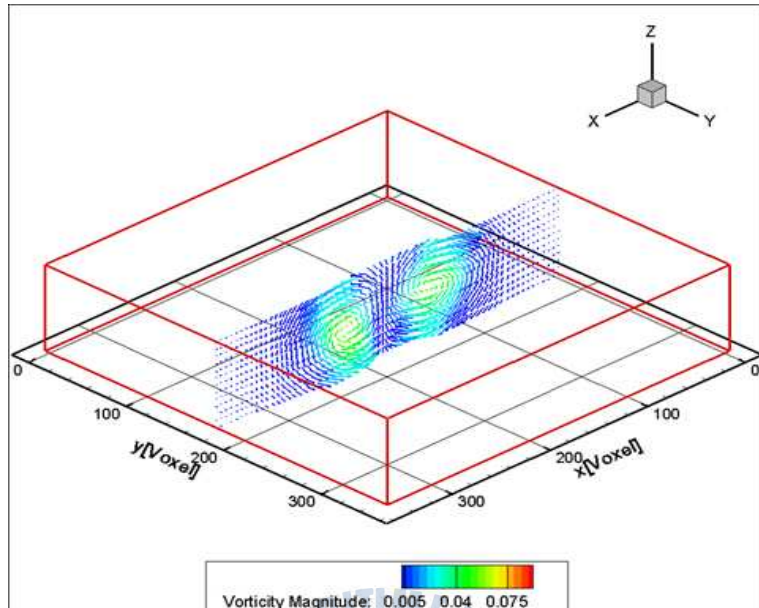


Fig. 3.12 Vorticity of Tomo PIV in PN-50000 (XZ Plane)

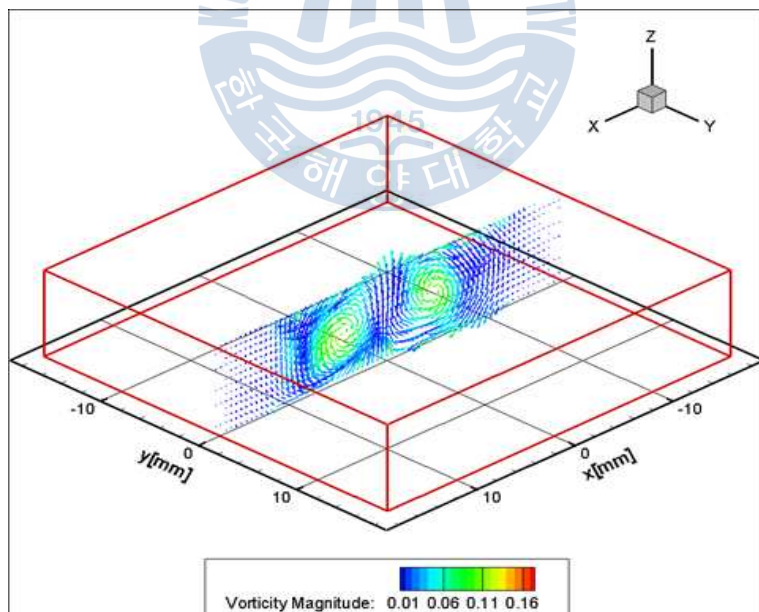


Fig. 3.13 Vorticity of Volume PTV in PN-50000 (XZ Plane)



Fig. 3.14 ~ 3.18은 동일한 입자의 이동량 내에서 입자의 크기에 따라 Tomo PIV와 Volume PTV의 벡터 에러율을 나타낸 그래프이다. 이동량이 증가함에 따라 에러율의 절대적인 값은 증가하는 것을 알 수 있으며 동일 이동량 내 입자의 크기가 커질수록 PIV의 에러율은 감소하는 반면 PTV의 에러율은 소량 증가하는 것을 보여준다. 이것은 Tomography 방식을 채택함에 있어서 입자가 커질수록 입자의 그림자가 다른 입자를 가리게 되어 입자 구성의 정확도가 떨어진다는 것을 나타내며 Ghost particle의 존재 또한 에러율 증가에 기여를 하고 있다. 그러나 PIV의 경우 입자의 크기가 커질수록 전반적으로 에러율이 감소하는 것으로 보인다. 이것은 재구성된 입자가 정확하지 않으나 PIV의 특성인 패턴을 찾아가는 방식 때문에 상대적으로 에러율이 낮게 나오는 것을 보여준다. 그러나 단순히 에러율이 낮은 것으로 알고리즘의 우위를 판단할 수 있는 기준이 되지 못하며 정확한 입자의 위치를 재구성 하는 것이 중요함을 알 수 있다.



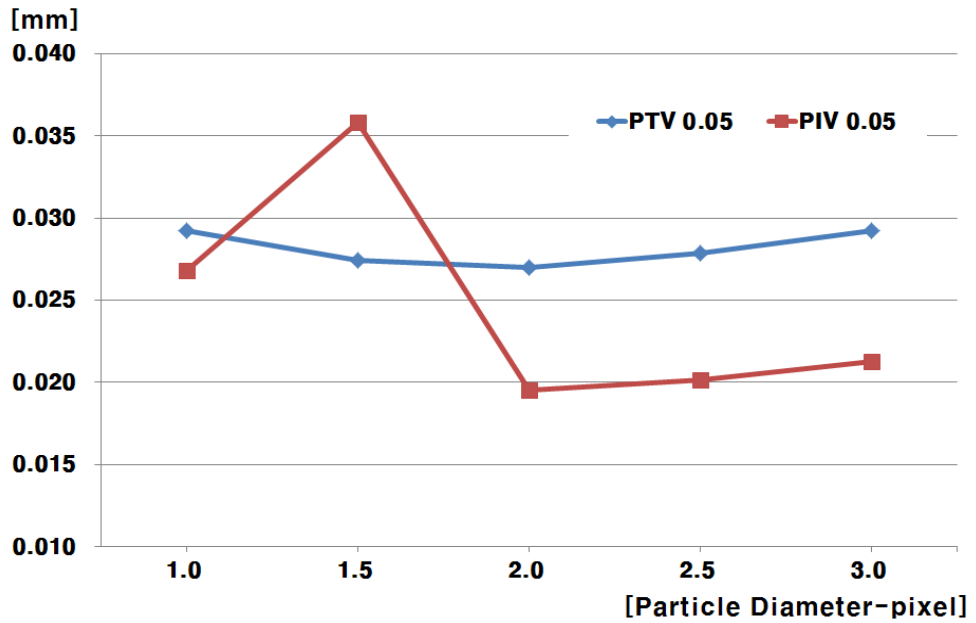


Fig. 3.14 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV of particle diameter in particle movement (PM) 0.05

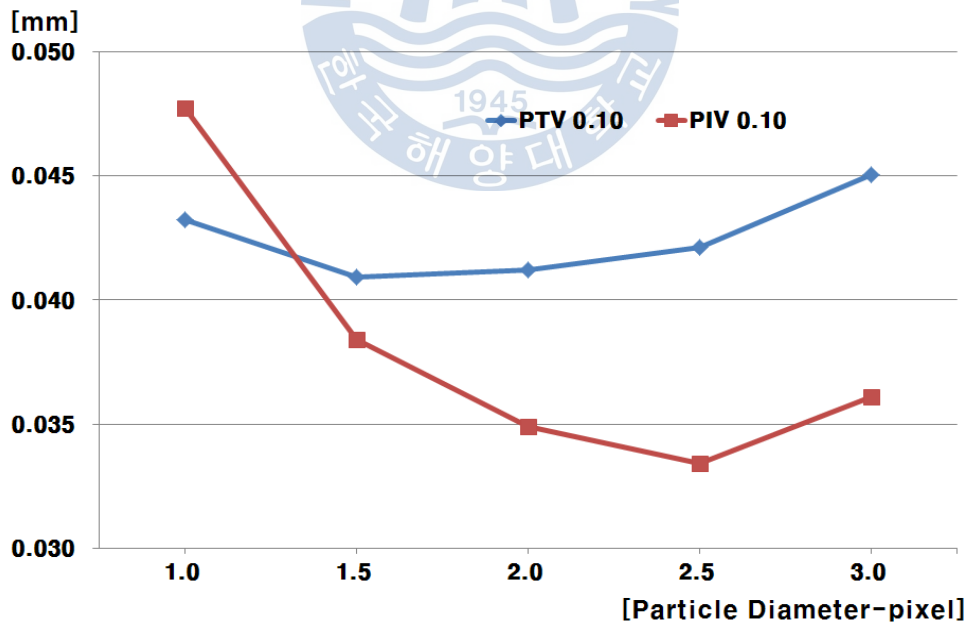


Fig. 3.15 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV of particle diameter in particle movement (PM) 0.10

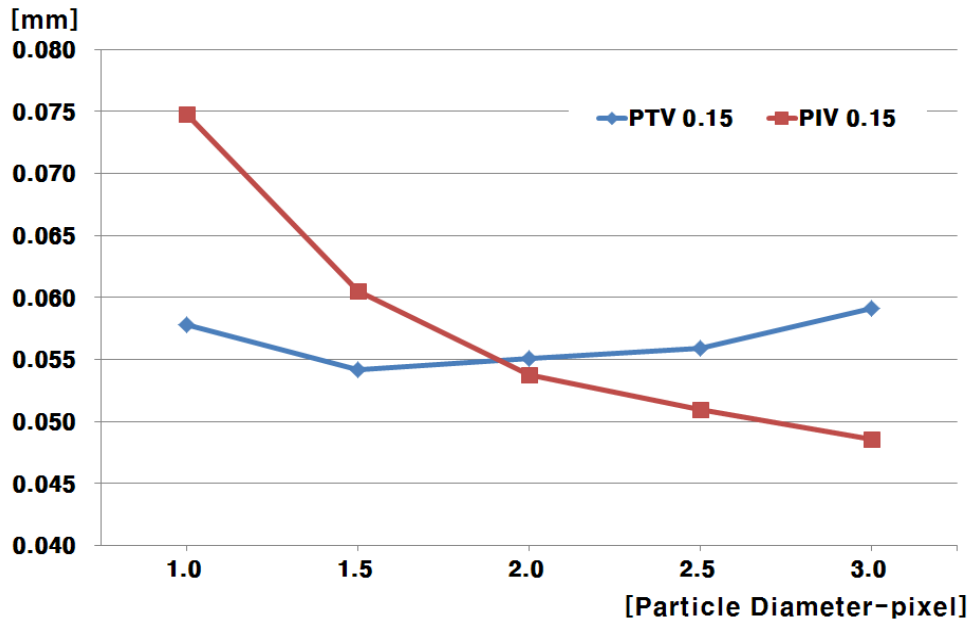


Fig. 3.16 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV of particle diameter in particle movement (PM) 0.15

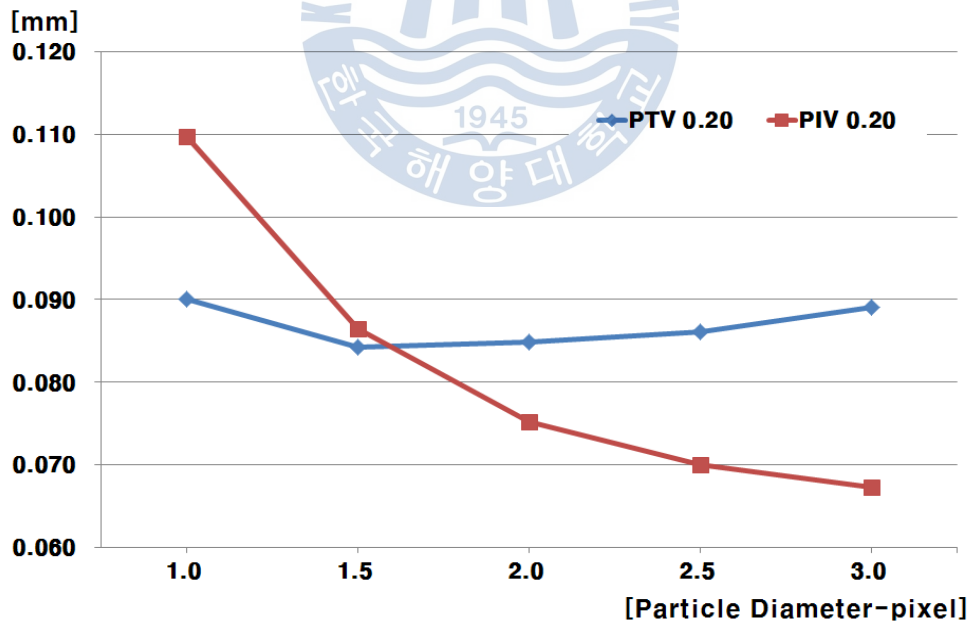


Fig. 3.17 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV of particle diameter in particle movement (PM) 0.20



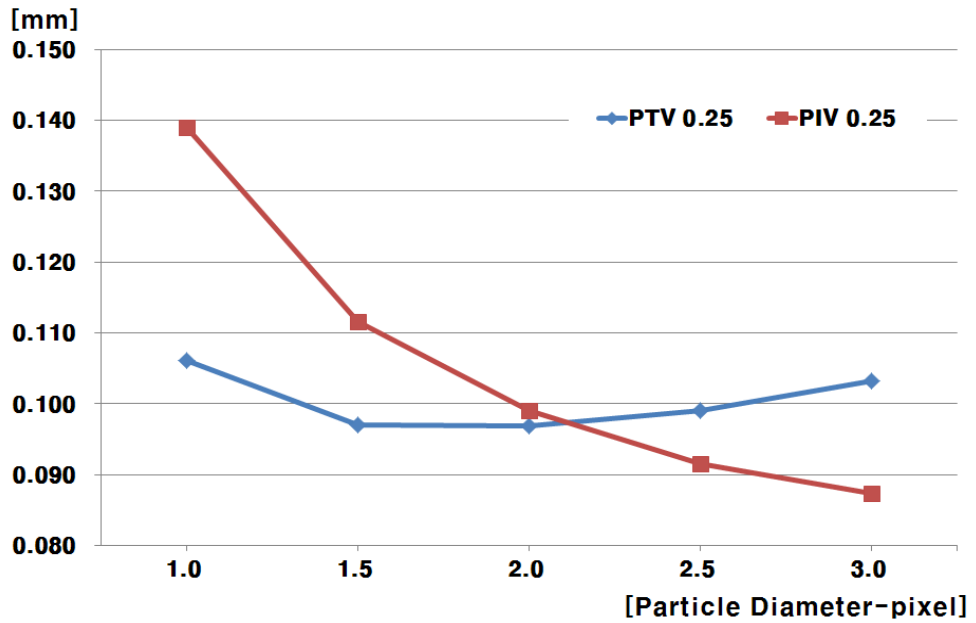
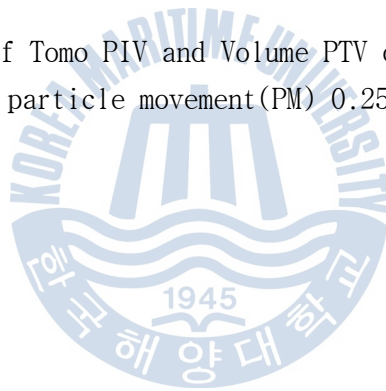


Fig. 3.18 Error rate of Tomo PIV and Volume PTV of particle diameter in particle movement (PM) 0.25



### 3.3 결론 및 고찰

앞 절에서 3차원 Vortex Ring flow를 모델로 하여 가상영상을 제작하고 Volume PTV와 Tomo-PIV의 결과를 비교해 보았다. 가상영상을 이용한 계산은 입자크기 1.0 / 1.5 / 2.0 / 2.5 / 3.0 픽셀 일 때 5,000~100,000개의 입자수별로 형성되는 Vortex Ring의 벡터를 살펴보았다. 각 결과를 비교하면 전체적인 유동장은 비슷하나, 입자의 수에 지배적인 영향을 받으며 고 입자밀도의 경우에도 PIV에 비해 PTV의 에러양이 줄어들을 알 수 있다. 주어진 영상에서, 512 x 512 pixel의 제한적인 공간 내에서 입자의 수와 크기는 에러율에 있어서 비례적인 함수관계를 가지고 있다. 따라서 최적의 조건과 유사한 조건에서 실린더 후류유동에 대한 고찰이 있어야 한다. 전체적인 에러율은 입자의 수 또는 입자의 이동량이 커질수록 전체적으로 증가하는 방향으로 진행된다. 입자의 수가 적은 경우 Affine 변환이 에러율이 크나 입자수 20,000개를 상회하면서 상호상관법을 채택한 PIV보다 에러율이 감소하여, 입자의 밀도가 높은 경우에도 PTV를 적용가능하다는 소결론을 내릴 수 있다. 밀도가 높은 경우에도 상대적으로 계산시간이 적게 걸리며 신뢰할 수 있는 결과를 낼 수 있는 Volume PTV를 적용가능하다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 Tomography 알고리즘에서 최적의 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 제4장 Volume PTV를 이용한 실린더 후류 계측

### 4.1 실험장치 및 실험방법

Fig. 4.1은 실린더 후류계측을 위해서 적용된 시스템을 나타내고 있다. 계측 시스템은 4대의 고속카메라(HAS-500, 1024 x 992 pixels, 500fps), 레이저광원(Nd-Yag Laser, 8W, 532 nm wavelength), 회류수조 및 실린더 등으로 구성하였다. 실험에 사용된 카메라는 Fig. 4.2에서 같이 각각 15°의 계측각도를 가지고 실린더 후류를 측정하는데 초점의 보정을 위해 Scheimpflug를 사용하였다. 회류수조의 제원은 300 x 300 x 1200 mm<sup>3</sup>이며, 지름 5 mm의 실린더를 사용하였으며 광원의 산란 및 굴절을 줄이기 위해 흑무광도료로 코팅하였다. 실린더의 위치는 회류수조의 출구에서 약 2/3 지점인 840 mm이며, 입구에는 Honeycomb을 설치하여 흐름이 일정하게 되도록 하였다. 입구로부터의 평균유속은 0.125 m/s이며, 물의 동점성계수  $\nu$ 는  $1.0 \times 10^{-6}$ 이며, 레이놀즈수는 약 630이다. 추적 입자를 유동장에 투입한 후 레이저의 광원을 실린더 후류에 설치하여 관측 영역 전체에 걸쳐 조사하였다. 실린더 후류의 계측영역은 x축 -30 ~ 25 mm, y축 -30 ~ 25 mm, z축 -4 ~ 4 mm로 정하여 볼륨형태로 빔을 조사하였다. 3차원 공간 내 입자의 공간적 위치를 계산하기 위해 캘리브레이션(Calibration)을 실시하여 카메라의 위치값 및 좌표값을 구한다. 이 작업은 3차원 공간에서 입자의 공간적 위치를 판단하기 위한 기준이 된다. 캘리브레이션을 위해 Fig. 4.3과 같이 가로 110 mm, 세로 130 mm의 평판에 두께 0.5 mm의 선을 5 mm 간격으로 그은 캘리브레이션 플레이트(Calibration Plate)를 사용하였으며, z축 방향으로 레이저 광원의 볼륨두께 10 mm를 감안하여 -6 ~ 6 mm 까지 1 mm의 간격으로 이동하였다.

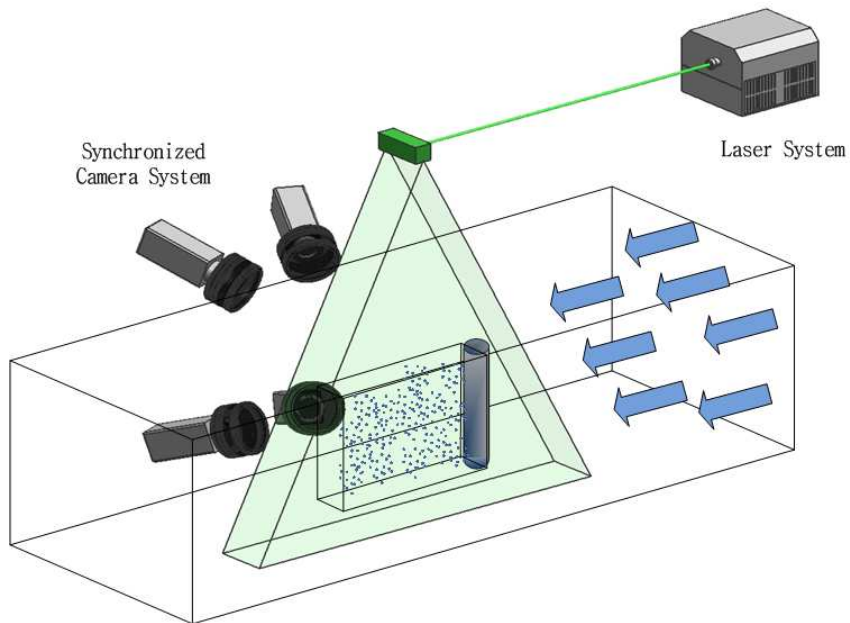


Fig. 4.1 Experimental apparatus

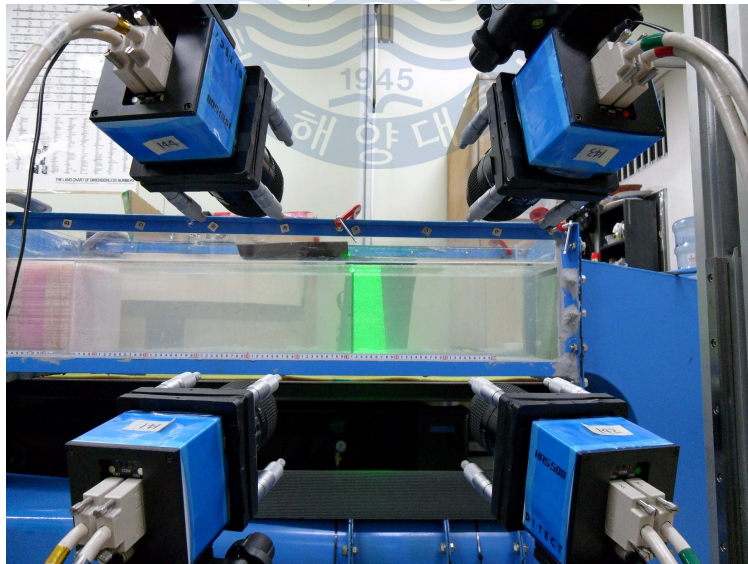


Fig. 4.2 4-Camera System

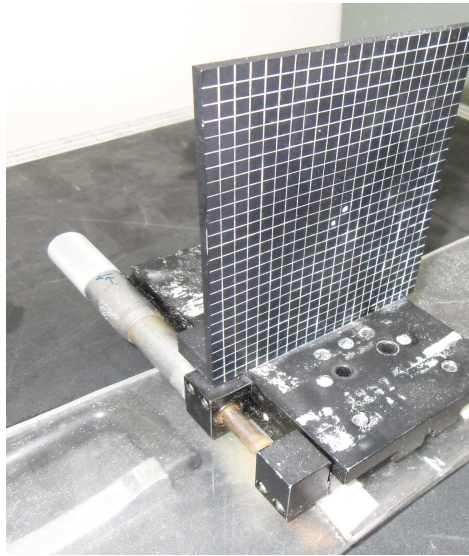


Fig. 4.3 Calibration plate

## 4.2 실험결과

Voltex Ring flow의 가상영상을 이용한 Volume PTV의 결과를 바탕으로 실린더 후류측정을 시행하였다. 측정볼륨은 x축  $-30 \sim 25$  mm, y축  $-30 \sim 25$  mm, z축  $-4 \sim 4$  mm의 영역을 가지며,  $660 \times 660 \times 96$  복셀(Voxel)의 공간을 가진다. 벡터 계산을 위한 어파인 변환(Affine Transformation)도 실험측정볼륨과 같은 x축  $-30 \sim 25$  mm, y축  $-30 \sim 25$  mm, z축  $-4 \sim 4$  mm의 영역으로  $660 \times 660 \times 96$  voxel의 공간에 벡터를 표시하였다. 어파인 변환을 이용한 Volume PTV로 실린더 후류유동에서의 와동을 계산해 낼 수 있음을 알 수 있다. 결과를 Fig. 4.4 ~ 4.9에 나타내고 있으며 Tomo PIV와 Affine Transformation을 적용한 Volume PTV를 비교하였다. Fig. 4.6 과 4.7을 비교하면 두 가지 방법 모두 실린더 뒤편의 와도를 볼 수 있으나 와의 형상에서 실린더의 아래로부터 올라오는 와도가 확인되는 것은 Affine Transformation을 적용한 Volume PTV임을 알 수 있다. Tomo PIV의 경우, 와의 중심을 정확히 계산해 내지 못하여 와가 있음은 알

수 있지만 정확한 와도를 알 수 없다. Fig. 4.8 과 4.9는 Tomo PIV와 Volume PTV의 Z방향의 속도벡터를 나타낸 것이다. Tomo PIV에서는 실린더 후류에서 유속방향으로만 벡터가 형성되나 Volume PTV에서는 실린더와 평행한 방향으로 형성된 벡터를 통해 실린더를 감아 도는 와도뿐 아니라 실린더와 평행한 와도를 확인할 수 있다. 따라서 Affine Transformation을 적용한 Volume PTV가 Tomo PIV에 비해 더 정확한 와도를 계산해 낼 수 있음을 알 수 있다.





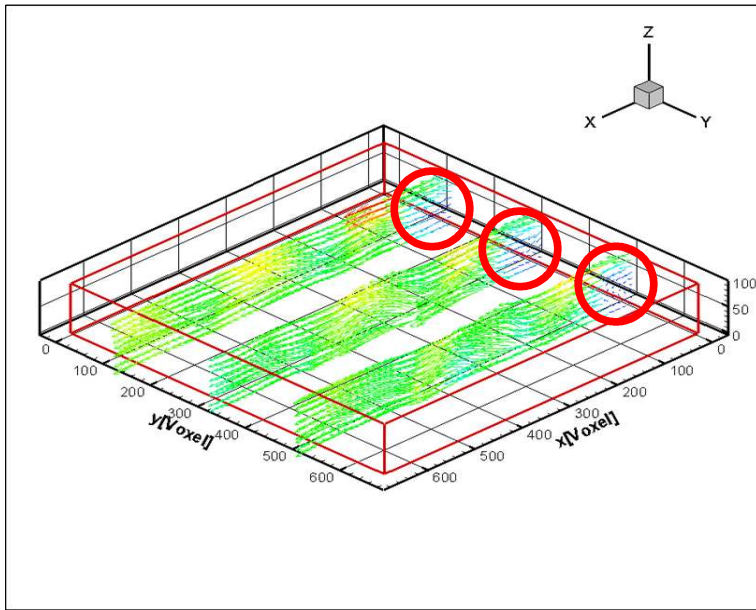


Fig. 4.4 Instantaneous vector field in Tomo PIV

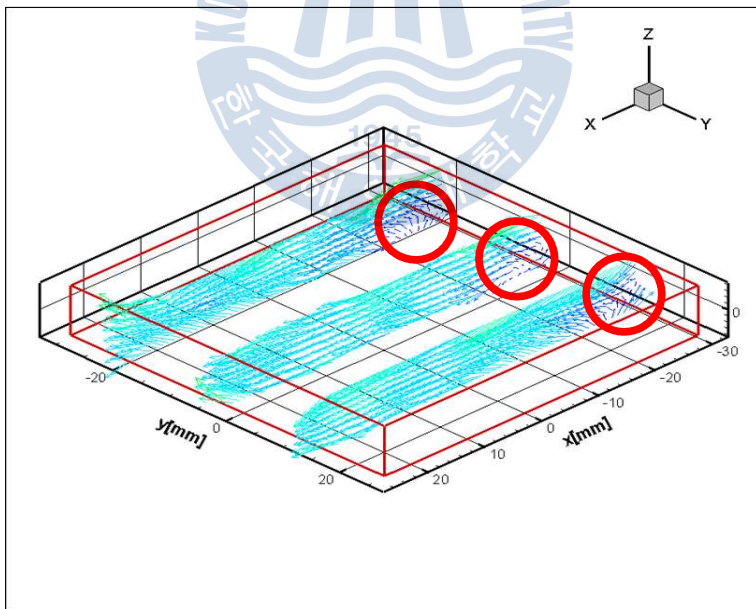


Fig. 4.5 Instantaneous vector field in Affine Transformation Volume PTV

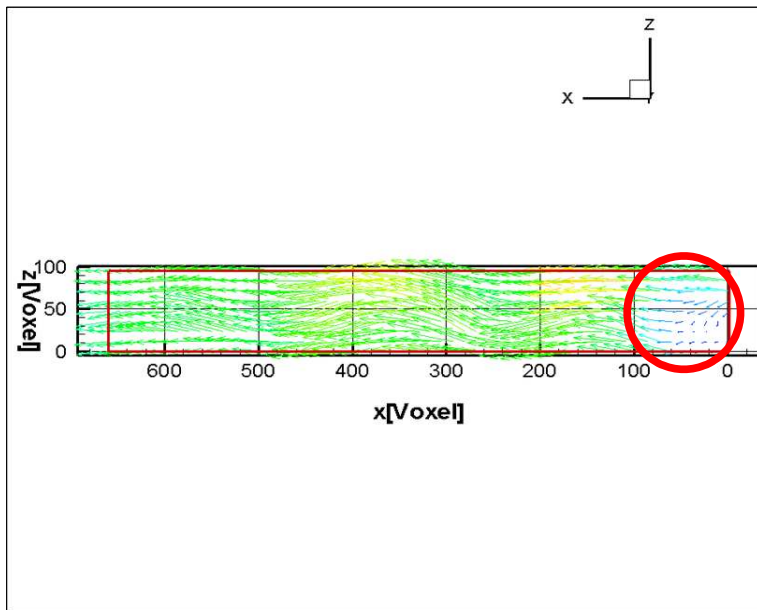


Fig. 4.6 Tomo PIV in XZ plane

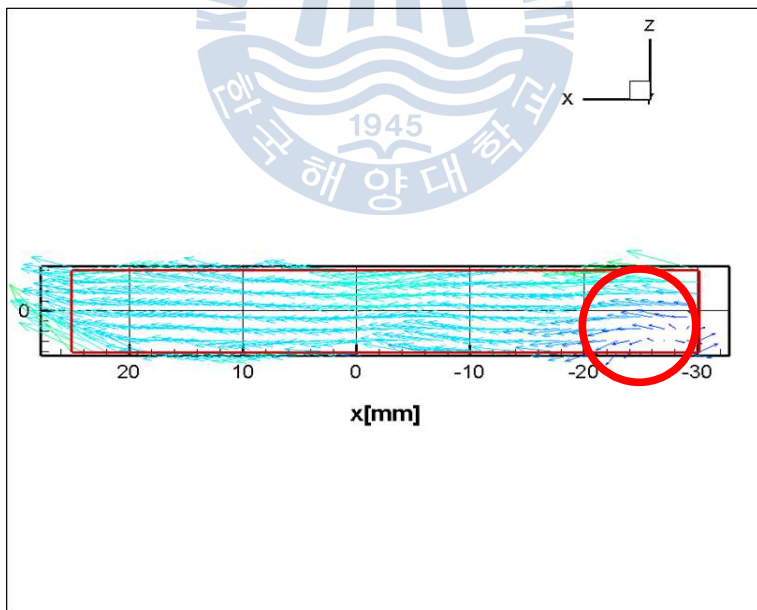


Fig. 4.7 Affine Transformation Volume PTV in XZ plane



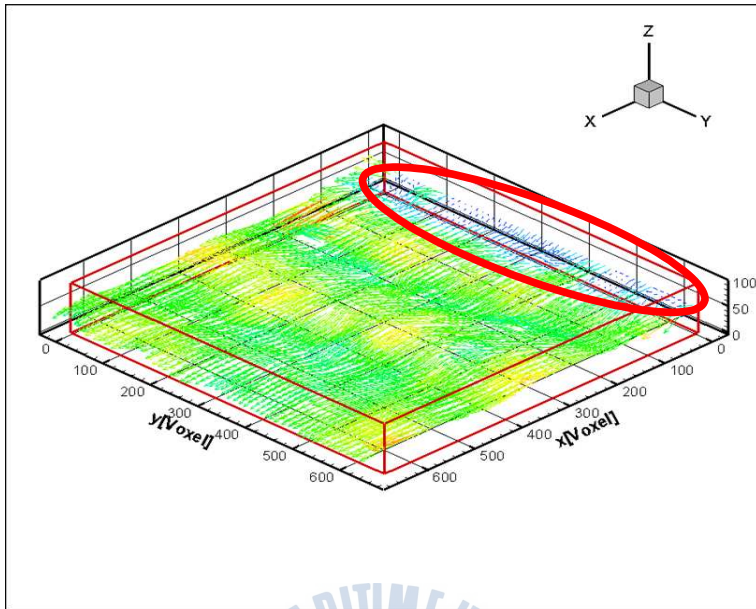


Fig. 4.8 Tomo PIV in XY plane

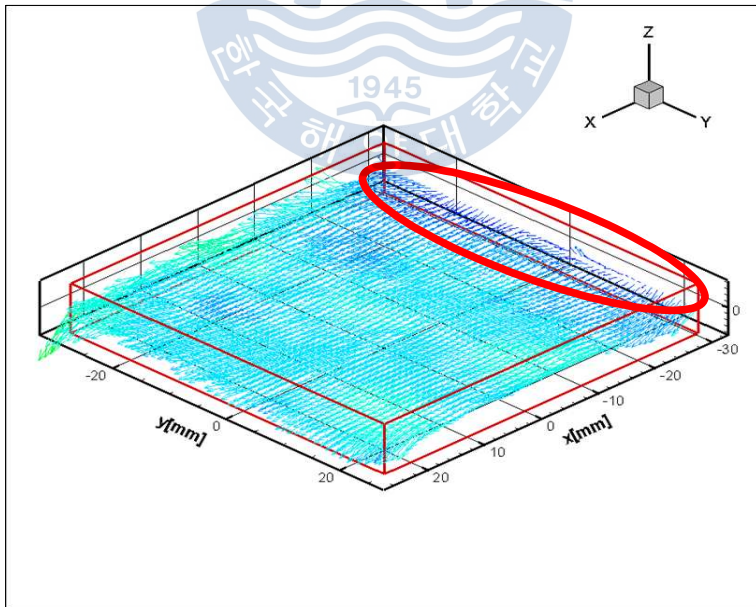


Fig. 4.9 Affine Transformation Volume PTV in XY plane

## 제5장 결론 및 고찰

Affine Transformation을 적용한 Volume PTV를 3차원 속도측정법으로 소개하였다. 측정볼륨 내의 3차원 입자분포를 다각도로 촬영한 카메라로부터 얻은 2차원 영상을 Tomographical Method를 이용하여 3차원영상으로 복원, 입자들의 빛 밝기정보로부터 두 영상의 3차원 속도를 어파인 변환을 이용하여 속도벡터를 얻었다. 기존의 PIV를 향상시킨 Deformation PIV와 비교하여 Affine PTV가 한층 정확하고 빠른 계산이 가능함을 알 수 있었다. 기하학적 선형변형이나 유체는 짧은 시간이라도 회전한다는 것을 알 수 있으며 이를 고려해야 더욱 정확한 계산이 가능하다. Volume PTV의 수치적 성능평가에서는 ART법에 비해 좀 더 빠른 수렴속도를 가진 MART법을 사용하였으며 실험 진행 과정에서 고려해야할 실험적 인자인 측정카메라의 개수 및 계측각도, 입자밀도, 입자크기, 보정작업(calibration)의 정확도등을 확인했다. 벡터 계산 시 영상의 배경제거와 같은 사전작업은 랜덤한 영상 노이즈의 영향을 감소시킴을 알 수 있었다. 측정시스템에서 카메라 개수의 증가는 측정입자의 빛 밝기(Intensity)의 해상도(resolution)를 증가시켜 입자영상의 복원 정확도를 높이지만 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. Core vortex 링을 대상체로 ThinkersEye와 Tecplot 360 소프트웨어를 이용한 3차원 시뮬레이션에서는 3차원 측정볼륨(  $35 \times 35 \times 8 \text{ mm}^3$  ) 내에서  $660 \times 660 \times 96$ 개의 속도벡터를 생성하여 측정볼륨 내 입자의 크기와 밀도 간의 최적화 조건을 비교하였으며, 그와 유사한 조건으로 Re수 630에서 실린더 후류유동을 측정하여 Tomo PIV와 어파인 변환을 적용한 Volume PTV의 결과를 고찰하였다. 순시벡터장에서 어파인 변환을 이용한 Volume PTV가 실린더와 근접한 곳의 와도를 표현하고 정확한 와도를 계산해 낼 수 있음을 알 수 있었다. 이렇듯 3대 이상의 카메라 시스템에서 어파인 변환을 적용한 새로운 Volume PTV 알고리즘이 고전적인 상호상관법을 이용한 Tomo-PIV에 비해 실제 유동장을 좀 더 정확하고 빠르게 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

Baek SJ, LeeSJ (1996) A new two-frame Particle tracking algorithm using match probability. *Exp. Fluids* 22: 23-32

Soloff SM, Adrian RJ, Liu ZC (1997) Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. *Meas Sci Technol* 8:1441--1454

Doh DH, Kim DH, Cho KR, Cho YB, Saga T, Kobayashi T (2002) Development of genetic algorithm based 3D-PTV technique. *Journal of Visualization* 5(3): 243-254.

Doh, KimDH, Choi SH, Hong SD, Saga T, Kobayashi T. (2000) Single Frame 3D-PTV for high speed flows. *Experiments in Fluids, Suppl.*: 85-98

Hwang TG, Doh DH, Okamoto K (2005) 4D-PTV. Measurements of an impinged jet with time-resolved 3D-PTV, *Journal of Visualization*. 8(3):245-252

Doh, D.H., Cho, G.R. and Jo, H.J. (2008) 5th Korea-Japan Seminar on Particle Image Velocimetry.

Arroyo MP, Greated CA (1991) Stereoscopic particle image velocimetry. *Meas Sci Technol* 2:1181--1186

Bruker Ch (1995) Digital-particle-image-velocimetry (DPIV) in a

scanning light-sheet: 3D starting flow around a short cylinder. *Exp Fluids* 19:255--263

Chan VSS, Koek WD, Barnhart DH, Bhattacharya N, Braat JJM, Westerweel J (2004) Application of holography to fluid flow measurements using bacteriorhodopsin (bR). *Meas Sci Technol* 15:647--655

Coe t̃mellec S, Buraga-Lefebvre C, Lebrun D, O zkul C (2001) Application of in-line digital holography to multiple plane velocimetry. *Meas Sci Technol* 12:1392--1397

Elsinga GE, Van Oudheusden BW, Scarano F (2006) Experimental assessment of tomographic-PIV accuracy. In: 13th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, paper 20.5

Herman GT, Lent A (1976) Iterative reconstruction algorithms. *Comput Biol Med* 6:273--294

Herrmann S, Hinrichs H, Hinsch KD, Surmann C (2000) Coherence concepts in holographic particle image velocimetry. *Exp Fluids* 29(7):S108--S116

Hinsch KD (2002) Holographic particle image velocimetry. *Meas Sci Technol* 13:R61--R72

Hori T, Sakakibara J (2004) High-speed scanning stereoscopic PIV for 3D vorticity measurement in liquids. *Meas Sci Technol* 15:1067--1078

Huang JF, Zhou Y, Zhou T (2006) Three-dimensional wake structure measurement using a modified PIV technique. *Exp Fluids* 40:884--896

Kähler CJ, Kompenhans J (2000) Fundamentals of multiple plane stereo particle image velocimetry. *Exp Fluids* 29:S70--S77

Maas HG, Gruen A, Papantoniou D (1993) Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows. *Exp Fluids* 15:133--146

Mishra D, Muralidhar K, Munshi P (1999) A robust MART algorithm for tomographic applications. *Num Heat Transfer Part B* 35:485--506

Pereira F, Gharib M, Dabiri D, Modarress D (2000) Defocusing digital particle image velocimetry: a 3-component 3-dimensionalDPIV measurement technique. *Exp Fluids* 29(7):S78--S84

Scarano F, Riethmuller ML (2000) Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Exp Fluids* 29:S51--S60

Scarano F, David L, Bsibsi M, Calluad D (2005) S-PIV comparative assessment: image dewarping + misalignment correction and pinhole + geometric back projection. *Exp Fluids* 39:257--266

Scarano F, Elsinga GE, Bocci E, Van Oudheusden BW (2006) Investigation of 3-D coherent structures in the turbulent cylinder wake using Tomo-PIV. In: 13th international symposium on applications of laser techniques to

fluid mechanics, Lisbon, Portugal, paper 20.4

Schimpf A, Kallweit S, Richon JB (2003) Photogrammetric particle image velocimetry., 5th international symposium on particle image velocimetry, Busan, Korea, paper 3115

Schroeder A, Geisler R, Elsinga GE, Scarano F, Dierksheide U (2006) Investigation of a turbulent spot using time-resolved tomographic PIV. In: 13th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, paper 1.4

Astarita, T., Analysis of velocity interpolation schemes for image deformation methods in PIV: Experiments in fluids / v.45 no.2, 2008, pp.257-266

B.J.Kim, C.Swarup and H.J.Sung, "Interpolation for Image Deformation in PIV", 6th KSME-JSME Thermal & Fluids Engineering Conference, Jeju, Korea, March, 20-23, 2005.

Scarano, F. 2002 Iterative image deformation methods in PIV. Measurement Science & Technology, Vol.13, R1