

◎ 解 說

3차원 PTV(입자영상유속계) 계측기술

3-Dimensional particle Tracking Velocimetry

도 덕 회

D. H. Doh



• 1962년 10월 10일생
• 한국해양대학교 교수

1. 3차원 PTV의 공학적 의의

공학적으로 중요도가 높은 유동현상인 벽면난류, 분류, 박리류 등의 난류유동장의 물리기구를 이해하기 위해서는 유동장의 넓은 영역에 있어서 순시속도의 3성분을 정량적으로 측정할 필요가 있다. 특히, 스케일이 큰 조직구조의 발생으로부터 소멸에 이르기까지의 메카니즘을 해석하기 위해서는 유동장의 공간적 구조에 관한 정보가 필요하다.

종래의 유체계측법인 열선유속계가 가지고 있는 단점(유동장의 한 점에서만 속도정보를 제공, 유동장에 교란을 초래)과 레이저도플러 유속계의 단점(유동장의 한 점에서만 속도정보를 제공)을 극복하기 위하여 개발된 것이 2차원 PIV계측기술인데^{1), 2)}, 이 2차원 PIV계측법은 유동장의 2차원적 단면의 전체에 걸친 정보를 제공하므로 공학적으로 실용적인 非定常 유동장에 대한 정성적 평가에 유리하다는 장점은 있으나, 유동의 본질적 구조를 파악함에 있어서 필수요건인 유동의 전 공간에 걸쳐 속도 3성분을 계측해야하는 걸림돌을 극복하지 못한다.

3차원 PTV계측기술은 이를 극복한 기술이며 본 내용에서는 지금까지 구현된 3차원 PTV계측기술의 전반에 관한 내용을 다루고 있다.

2. 3차원 PTV란 무엇인가?

유체와 동일 비중의 미소입자(粒子)들이 들어 있는 유동장을 2차원 가시화(可視化) 광원으로 조사(照査)하고 조사된 영역을 CCD(Charge Coupled Camera)카메라를 이용하여 영상화 한 후 화상처리과정을 거침으로써 유동장의 전체에 걸쳐서 한꺼번에 속도분포를 얻어내는 방법이 2차원 PIV(Particle Imaging Velocimetry) 계측법이다¹⁾. 그런데, 이 방법은 단면에 대한 수직성분 즉 3차원 속도성분에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이를 극복하기 위하여 2대 이상의 CCD카메라와 디지털 화상처리를 이용하여 유동장의 3차원 속도성분을 전역에 걸쳐 동시에 계측하는 시스템을 3차원 PTV라고 한다. 3차원 PIV(Particle Imaging Velocimetry)라고도 하나, PTV로 통일한다.

3. 3차원 PTV의 원리

우리가 3차원 공간을 정량적으로 인식하려면 최소한 2개 이상의 눈이 필요하듯이 카메라를 이용한 계측의 세계에서도 2대 이상의 카메라가 필요하다. 우리의 두 눈이 안면에 고정되어 있으면서 두 눈간의 상대적 운동이 순간적으로 신경세포로 전달되므로 우리는 공간을 실시간(real time)으로 인식할 수 있게 된다. 이처럼 카메라를 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라간의 상대적 운동을 인식시킬 필요가 있게 된다. 이를 3차원 계측에서는 카메라교정(校正)이라 한다. 로봇이 쳐다보는 세계를 인식시키기 위해서는 로봇의 두 눈의 3차원 위치 및 각도에 대한 시간적 변화정보가 필요하지만 유체유동장의 3차원 속도계측을 위해서는 카메라가 고정되어 있고 유체가 움직이는 관계에 있으므로 카메라교정을 한 후 유동장의 수많은 입자들에 대한 시간적 공간이동의 정보가 필요하게 된다.

입자들의 시간적 공간이동의 정보는 각 카메라들이 쳐다보는 공선(共線)의 교점을 시간적으로 추적하는 과정을 거침으로써 얻어지는데 유동장에 들어 있는 수많은 입자들 중 동일입자 쌍들을 찾아야 만이 올바른 공간이동의 정보가 구해지게 된다. 다시 말하면, 공간상에서 동일한 입자들이 찾아지게 되면 공간이동벡터가 구해지고 이를 일정 시간간격으로 나누면 3차원 속도성분이 되는 것이다.

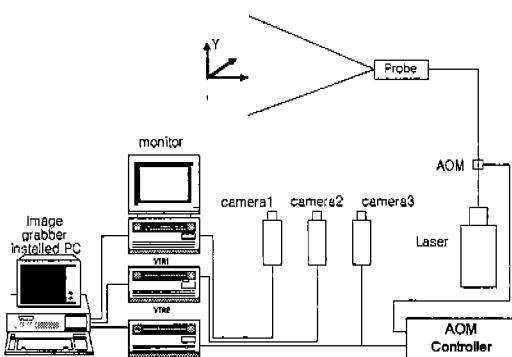


Fig. 1 Arrangement of measurement system

3.1 3차원 PTV계측 시스템의 구성

그림1은 3차원 PTV 계측시스템의 전형적인 구성을 나타낸다. 추적입자의 3차원속도를 비접촉 계측하기 위해서는 2대 이상의 CCD카메라가 필요하게 된다. PIV계측을 위해서는 왜 CCD카메라가 필요한가에 대한 내용은 문헌(2)에 기술되어 있다.

계측시스템은 구성요소들의 성능과 특징에 따라 다양하게 구성될 수 있으나 계측시스템의 작동 원리 등에 대한 이해를 돋기 위하여 현재 필자보유의 계측시스템을 예로 들어 설명하고자 한다.

3대의 CCD카메라(Sony, SSC-M370)를 계측 대상물을 향하여 설치하고 이를 통하여 가시화 된 영상은 VTR1(Panasonic, AG-7350) 혹은 VTR2(Sony, RS1) 및 VTR3(SLV-595HF)와 호스트컴퓨터(Pentium 360MHz)에 내장된 이미지 그래비(DT64)에 기록된다. 이미지그래비에 입력된 화상은 호스트컴퓨터에 의해 추적입자의 사진좌표(x, y)를 구하는데 쓰인다.

화상처리되는 도중의 결과는 처리과정의 확인을 용이하게 하기 위하여 호스트컴퓨터의 모니터에 각각 표시되도록 한다.

3.2 카메라의 교정법

전술한 바와 같이 추적입자의 3차원위치 $P(X, Y, Z)$ 를 계산하기 위하여 카메라의 3차원위치 및 자세를 구하는 작업을 교정작업이라 하였다. 다시 말하면, 카메라의 교정작업은 절대좌표계(지상좌표계)에서 측정영역 내에 기지의 값으로 3차원적으로 배치되어 있는 점들을 추적입자로 가정하여 이들의 기준점들과 카메라의 사진좌표와의 상관관계를 나타내는 식인 공선(共線)조건 식을 이용하여 카메라의 외부 파라메타(표정요소:標定要素 라고도 함)($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$)와 내부 파라메타 (c, x_0, y_0, k_1, k_2)를 구하는 작업이다⁶⁾.

Fig. 2는 카메라교정의 원리를 나타내는 그림이다. (X, Y, Z) 는 대상물 P 의 절대좌표, (X_0, Y_0, Z_0) 는 투영중심의 절대좌표, c 는 화면거리, (x, y) 는 대응하는 사진상의 사진좌표를 나타내는데 이를 세 점이 일직선상에 위치한다는 공선조건에 카메라

렌즈의 왜곡에 의한 수정량과 카메라 제작상 CCD 소자중심의 위치와 렌즈중심이 어긋나 이동되는 주점위치의 이동량을 각각 고려하여 최소자승법과 접목한 축차근사해법(東京大學出版會, 1983)을 적용함으로써 카메라의 내부 및 외부파라메타들을 구할 수가 있다.

Fig. 3은 교정을 위한 기준점들의 배치를 나타내는 예를 나타내는 사진이다. Fig. 3(a)는 회전원판 위에 설치된 36개의 기준점을 나타내며 카메라의 교정을 위해서는 원판을 정지한 상태에서 실험을 해야한다. Fig. 3(b)는 교반탱크내부의 3차원 유동을 측정하기 위해서 적용한 42개의 기준점을 나타낸다. 이 기준점은 카메라의 교정을 위하여 탱크 내부에 설치된다. Fig. 3(c)는 후향단 유동의 3차원 계측을 위하여 사용된 교정판을 나타낸다. 이 교정판은 가로 및 세로가 $115\text{mm} \times 110\text{mm}$ 이며 판 위에는 직경이 $0.2\text{mm} \pm 0.002\text{mm}$ 인 흰색 도포의 원들이 가로 및 세로로 5mm간격으로 배치되어 있다. 이 판은 마이크로미터에 부착되어 있으며 수직 상방향으로 5mm간격으로 수동으로 0에서 50mm까지 이동시켜서 카메라에 대한 교정을 하게 된다.

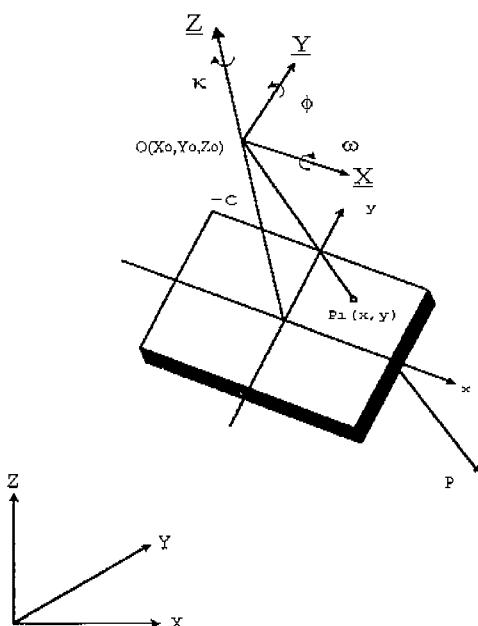
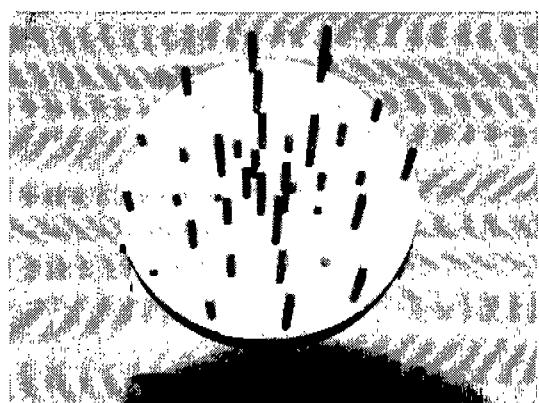
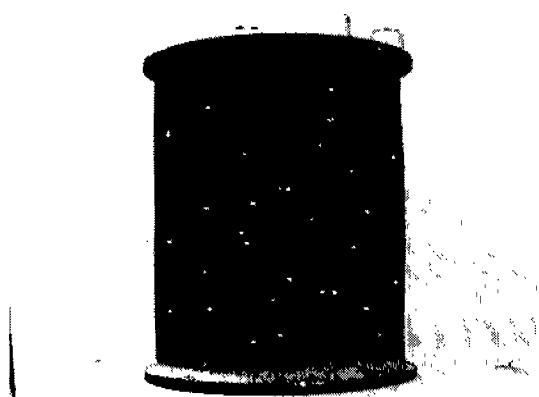


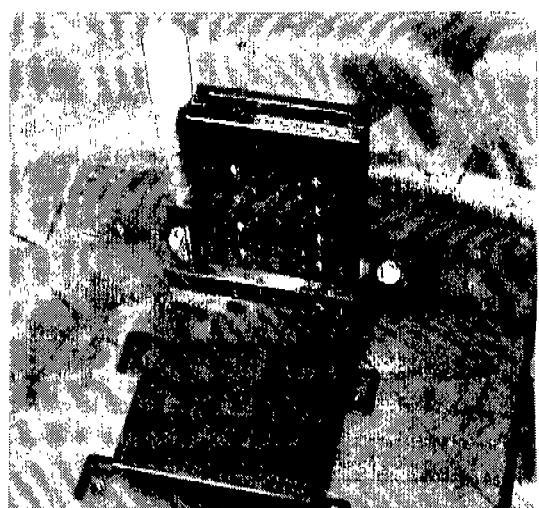
Fig. 2 Principle of camera calibration



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Various basic landmarks

3.3 3차원 위치결정법

카메라의 교정작업을 통하여 절대좌표계에 대한 카메라들의 위치 및 자세가 구해지면 이번에는 역으로 3차원 공간상에서의 놓여진 미지의 점에 대하여 각 카메라들로부터의 직선들의 교점을 구하면 미지의 점에 대한 3차원 위치가 결정되게 된다. Fig. 4는 위치와 기울기가 서로 다른 3대의 카메라로 촬영했을 때의 관계를 나타낸다. 지상좌표계의 좌표가 (X, Y, Z) 인 표적 P 를 투영 중심이 $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_1, \phi_1, \kappa_1)$ 인 카메라 1과 투영중심이 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_2, \phi_2, \kappa_2)$ 인 카메라 2와 투영중심이 $O_3(X_{03}, Y_{03}, Z_{03})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_3, \phi_3, \kappa_3)$ 인 카메라 3으로 촬영했을 때, 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전 절에서와 같이 카메라의 파라메타가 구해지면, 투영중심, 사진좌표, 피사체간에 공선(共線)조건식을 얻을 수가 있고 일반적으로 피사체의 3차원 좌표는 이들 세 개의 공선들이 만나는 교점으로 정의한다⁶⁾.

3.4 3차원 속도결정법

3차원 속도를 구하기 위해서는 추적대상물이 공간상에서 적어도 두 시각 이상에서 인식되어져야 한다. 다시 말하면, 3차원 속도는 임의의 시간동안 동일한 추적대상물이 공간상에서 움직인 공간좌

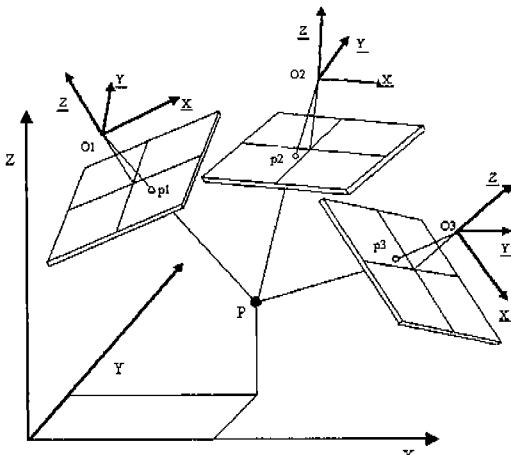


Fig. 4 Principle of 3-D position decisions

표의 이동량을 알기만 하면 구해지게 된다. 그런데, 유동장 속에 수많은 추적입자들이 들어 있기 때문에 동일입자를 어떻게 인식하느냐가 문제가 되는데 이는 전술의 3차원 위치를 결정함에 있어서 각 카메라의 화상에 나타나는 수많은 입자들의 사진좌표들이 형성하는 공간직선들간의 거리가 가장 작은 쌍을 동일한 입자로 판정한다.

3차원 속도는 두 시각사이에서의 입자의 이동량에 시각차를 나눔으로서 구해지게 된다. 이를 위하여 최소한 두 장 이상의 프레임화상(frame image)을 카메라를 통해 이미지그래비로 불러 들여야 한다. 불러 들여진 프레임화상에 나타나 있는 입자들의 도심좌표(면심)를 구한 뒤 이를 사진좌표로 하여 전술의 3차원 위치결정법에 의하여 입자들의 3차원 좌표를 구한다. 또 다른 시각에서의 3차원 좌표를 구한 뒤 프레임시각을 나누면 3차원 속도가 구해지게 된다. 추적입자의 도심좌표는 어떤 기준 농도치(threshold value)로부터 화상의 농도를 이진화(binarization)한 뒤, 그 입자들의 형상에 대한 면심을 계산함으로써 구해진다.

3.5 3차원 속도계측 알고리듬의 종류

3차원 속도계측을 하기 위한 계측의 알고리듬에는 크게 두 가지로 나누어 질 수 있다. 하나는 시간·공간대응법이고 또 다른 하나는 공간·시간

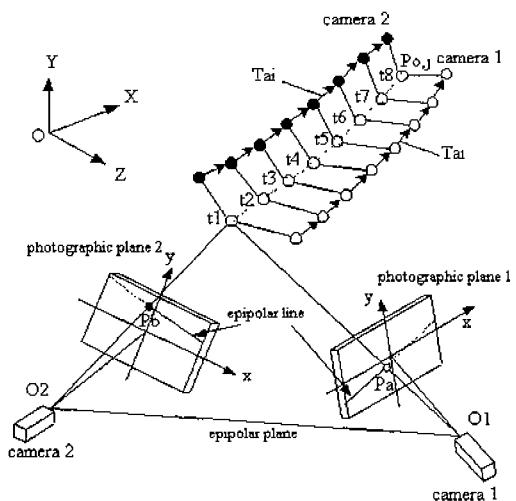


Fig. 5 Temporal-Spatial pair matching(T-S method)

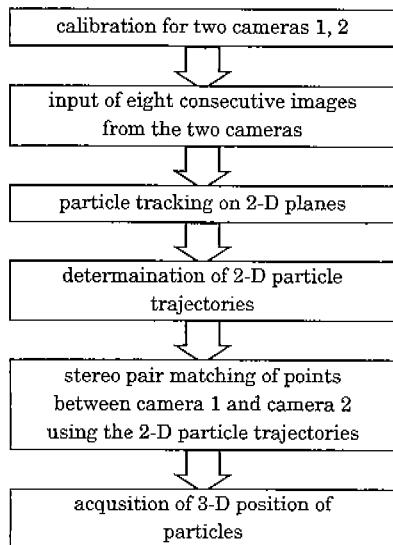


Fig. 6 Procedure of T-S pair matching method

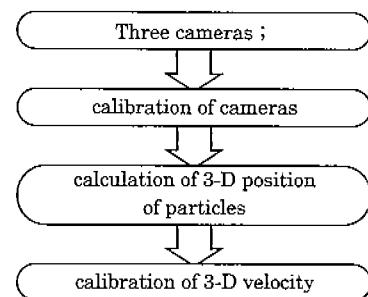


Fig. 8 Procedure of S-T pair matching method

후자는 직접 3차원 공간상에서 입자의 위치를 먼저 대응시킨 다음 시간상에서 동일의 입자를 찾아서 시계열상에서 대응시키는 방법이다^{5,6)}. Fig. 7은 후자의 방법의 한 예를 나타내고 있다. 공간상에서 한 시각에서의 3차원 위치를 계산한 다음 그 다음 시각에서의 공간상의 동일한 입자를 찾아내는 방법이다⁶⁾. 이때 동일의 입자추적은 일치확률방식⁷⁾을 공간상에 확장하여 공간상에서 추적할 수 있도록 하였다. 이것은 2장의 연속된 디지털화상 내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후 각 변위들에 대한 일치확률(match probability)을 정의(T_i내부에 제2시각점 T_j이 있을 때)하고 불일치확률(no-match probability)과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 결정하는 방식이다. S_i는 제 1시각에서의 입자들의 3차원 위치를 T_i는 제 2시각에서의 입자들의 3차원 위치를 나타낸다. Fig. 8은 이 방법에 있어서의 3차원 속도벡터를 얻는 절차를 나타내고 있다. 즉, 이 방법에서는 먼저 카메라의 교정작업을 끝낸 후 입자들의 3차원 위치를 계산한 다음, 또 다른 시각에 있어서 3차원 위치를 계산하여 움직인 3차원 벡터에 두 시각차를 나누면 3차원 속도가 얻어지게 되는 방법이다.

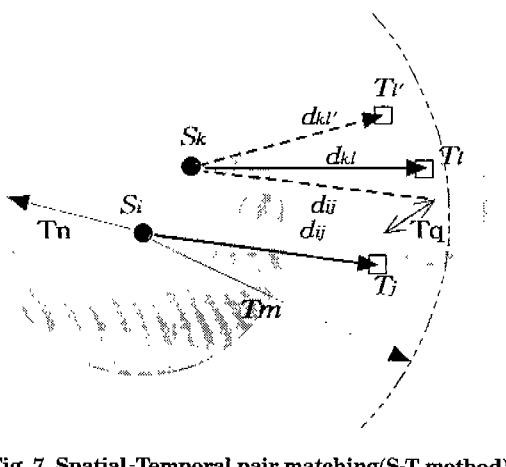


Fig. 7 Spatial-Temporal pair matching(S-T method)

대응법이다. 전자는 복수대의 각 카메라의 화상으로부터 구해지는 입자의 2차원 유적을 먼저 구한 뒤에 2차원 유적선(流跡線)끼리 공간상에서 대응 시킴으로써 3차원 속도를 구하는 방법⁴⁾이며 Fig. 5는 이 방법중의 한 예를 보이며 Fig. 6은 이 방법의 3차원 속도를 얻기까지의 절차를 보인다. 먼저 카메라의 교정작업이 각 카메라에 대해 끝나면 8시각분의 2차원 유적을 추적한 다음 이들 유적에 대하여 3차원 공간상에서 벡터를 대응(matching)시키는 방법이다.

4. One-Frame 3D-PTV (Particle Tracking Velocimetry)

한편, 측정영역이 작거나 아니면 실제 유동장의 속도가 비교적 빠른 유동의 계측인 경우에는 일반적으로 쓰이고 있는 CCD카메라의 시간해상도가

국제표준규격(NTSC : National Television System Committee)으로서 1/60초에 한정되어 있으므로 입자추적이 불가능한 경우가 많다. 이를 극복하기 위하여 유동장을 가시화하기 위해서 사용되는 레이저광원 자체를 간헐적으로 조사(照査)함으로써 광학적으로 시간해상도를 올리는 방법이 있다⁸⁾. 이를 위해서는 음향광학장치라는 AOM(Acousto Optical Modulator)시스템을 도입하는데 Fig. 9와 같이 NTSC표준규격의 카메라 신호체계와 광학적 단속(斷續)기구인 AOM신호체계와의 관계처럼 시간해상도가 Tvar로 되어 1/60초보다 작음을 알 수가 있다. 또한 이 시간해상도는 조정이 가능하므로 유동장의 속도에 따라 최적의 시간해상도의 선택을 자유롭게 할 수 있다. 즉, 카메라의 고정된 촬영시간(1/60sec)에 대하여 레이저광원을 원하는 시각에 간헐적으로 단속이 가능하므로 계측영역을 통과하는 입자의 이동속도가 비교적 빠른 경우 속도벡터의 시점과 종점의 coding이 가능하게 된다. 지금 Fig. 9와 같은 신호에 의해 광원이 coding되었을 경우에는 두 개의 피일드화상(odd and even fields)으로 분리시키기만 하면 시점과 종점의 결정은 용이하게 되어 속도벡터의 시점 및 종점판정이 가능해 진다. 이와 같은 아이디어를 3차원 계측에도 도입함으로써 계측영역에 비하여 상대적으로 입자속도가 빠른 경우의 3차원 속도계측을 가능하게 한 방법이 One-Frame 3D-PIV 계측법이다⁶⁾.

5. 3차원 계측의 실례

화상처리를 이용한 유동장의 3차원 속도계측을

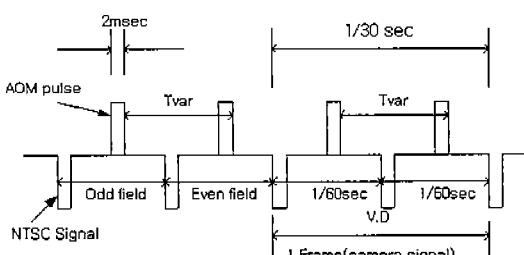


Fig. 9 Relation between NTSC camera signal and AOM signal

한 예는 아직 국내에는 보고된 바가 없기 때문에 실제 계측의 예로서 필자가 한 연구결과의 일부를 소개하고자 한다.

5.1 고속회전 원판 위의 입자 3차원 속도계측

Fig. 10 및 Fig. 11은 회전속도가 각각 300rpm 일 때와 400rpm일 경우에 계측결과를 나타내 보이고 있다. Fig. 3(a)와 같이 원판 위에 3차원적으로 설치되어 있는 36개의 추적점들을 원판 하부에 설치된 전동기로 회전시킨 후 이들 점들의 3차원 속도를 계측한 결과를 나타낸다. 회전원판이 카메라의 시간해상도 보다 상대적으로 빠르게 움직이므로 One-Frame 3D-PIV계측법으로 계측하여야 한다.

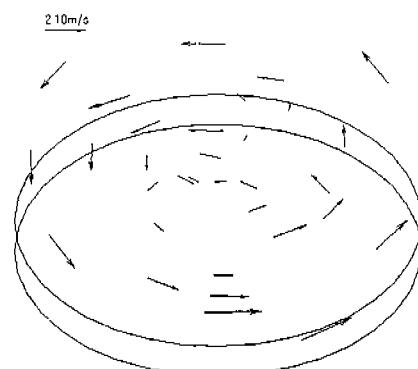


Fig. 10 Obtained 3-D velocity vectors (300rpm)

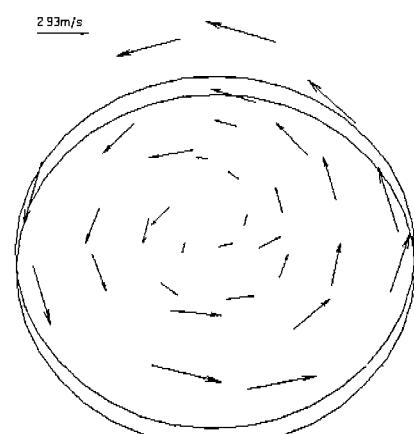


Fig. 11 Measured 3-D velocity vectors (400rpm)

3차원 계측을 위해서는 전술과 같이 카메라의 교정이 필요한데 여기서는 원판이 정지한 상태에서의 기준점들의 절대좌표를 이용하여 카메라파라메타를 구한 뒤 추적입자점의 3차원 좌표를 구한 뒤 동일 입자판정은 전술의 Spatial-Temporal Pair Matching(S-T 법) 알고리듬을 적용한 예이다. 36개의 추적입자 중에서 얻어진 총 개수는 32 개였는데 전부 추적이 되지 않은 것은 추적점(편)이 회전할 때 길이가 작은 편이 큰 편에 가려져서 카메라가 입자상(像)을 상실했기 때문이다. 그럼의 좌상단에 나타나 있는 화살표는 기준속도벡터를 의미하며 각각 2.10m/sec 와 2.93m/sec를 나타낸다. 3차원 속도계측 알고리듬의 유효성 검정은 회전원판상의 추적점의 3차원 속도를 계측하여 실시하는 것이 용이하다.

5.2 원통형 탱크내의 3차원 속도분포

Fig. 12는 직경이 300[mm]이며 높이가 460 [mm]인 아크릴제의 원통형 교반(攪拌)탱크내에서 회전하고 있는 블레이드에 의해 형성되는 3차원 유동장의 3차원 속도계측을 위한 계측시스템의 구성도를 나타낸다. 3차원 속도계측을 위해서는 Temporal-Spatial Pair Matching(T-S 법) 알고리듬을 적용하고 두 대의 카메라의 파라메타는 Fig. 3(b)와 같이 원통형으로 배치된 42개의 기준점들을 이용하여 구해진 예이다. 이 경우에서는 照射광으로서 레이저사이트광을 쓰지 않고 수은등(250W)을 이용하였다.

Fig. 13은 구축된 계측시스템으로 100회 정도 계측하여 얻어낸 약 20,000개의 3차원 순간속도벡

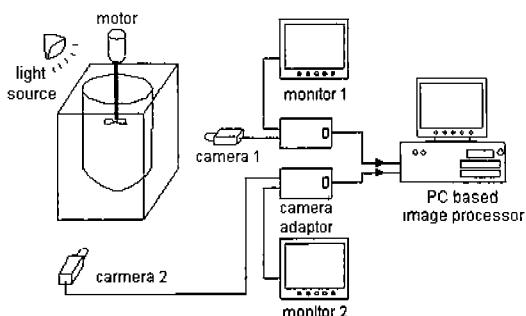


Fig. 12 Schematics of measurement system

터들을 나타낸다. 한번의 실험으로 150개에서 200 개정도의 속도벡터를 얻어 낼 수 있는데 수많은 3 차원 벡터들이 겹쳐져 있기 때문에 이를 데이터로 부터 유동의 구조를 이해하기란 쉽지가 않다. 따라서, 가중합수법⁹⁾ 등과 같은 공간보간법을 도입하여 균일한 3차원 격자상에서 보간을 행한 결과를 얻게 되는데 Fig. 14는 탱크 바닥면으로부터 200mm의 높이에 있어서의 보간된 3차원 평균속도분포를 나타낸다. 그럼상의 화살표의 길이는 10 cm/sec의 속도크기를 나타낸다. 3차원 속도계측을 통하여 3차원성이 강한 교반탱크내의 유동장의 특

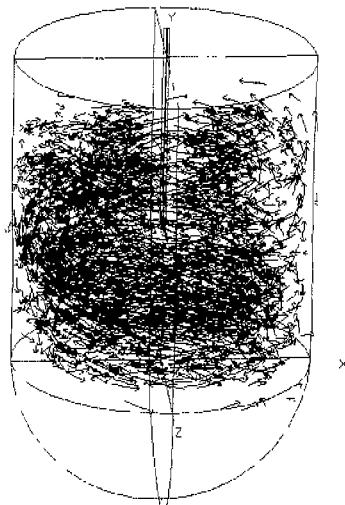


Fig. 13 Measured 3-D instantaneous velocity vectors

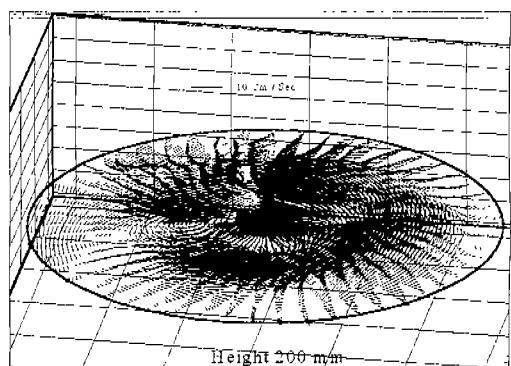


Fig. 14 Obtained 3-D velocity vectors(at the height of 200 mm from bottom)

정적인 유동구조를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 이는 다른 계측방법으로 계측할 수 없는 단점을 극복하고 있음을 시사한다. 이를 속도벡터데이터와 벽면의 압력계측데이터를 이용하면 탱크 내부유동장의 압력분포도 계산할 수 있다.

5.3 후향단 유동장 계측

Fig. 15는 높이가 25mm인 후향단의 유동을 계측하기 위해 구축된 계측시스템을 나타내고 있다. Fig. 16은 후향단의 높이 25mm를 대표 길이로 하여 레이놀즈수가 약 7000정도에서 S-T법의 알고리듬과One-Frame 3D-PTV알고리듬을 적용하

여 얻어낸 3차원 순시속도벡터의 분포를 나타낸다. Fig. 15에 보인 바와 같이 배치된 3대의 카메라의 파라메타는 Fig. 3(c)와 같은 정교한 교정판을 이용하여 구해진다. 일반적으로 3차원 PTV계측시스템으로 얻어지는 순시속도벡터의 개수는 약 150개에서 300개 사이이며 유동장의 정량적 정보를 얻기 위해서는 공간격자상에 보간을 행하여야 한다. Fig. 16은 Gaussian Window법⁹으로 보간한 3차원 평균속도벡터의 분포를 나타낸다. 그림상의 속도벡터는 후향단의 높이로 무차원화한 속도의 크기를 나타낸다.

공학적으로 의미가 있는 물리량은 3차원 순시속도벡터의 분포인데 한 번의 계측으로 획득되는 3차원 속도벡터의 개수는 사용된 카메라(Sony, SSC-M370)의 해상도의 영향으로 인하여 최대 약 300개 정도이다. 난류유동의 구조가 메커니즘의 연구를 위해서는 한 번에 계측되는 3차원 속도벡터의 개수가 적어도 600개 이상이 되어야 하는데 이를 위해서는 카메라의 수를 늘리거나 카메라의 공간해상도를 향상시킬 필요가 있음을 지적하고 있다¹²⁾. 한편, 얻어진 3차원 속도벡터들 중에서는 오류로 획득된 벡터들도 포함이 되어 있기 때문에 이들을 제거하지 않으면 안 되는데 일반적으로 통계적 방법이 주로 쓰이고 있다⁷⁾.

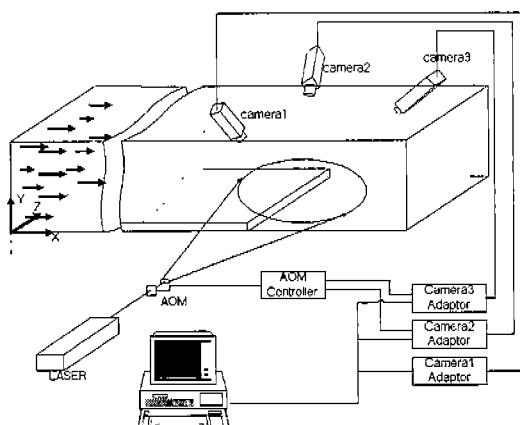


Fig. 15 Schematics of measurement system

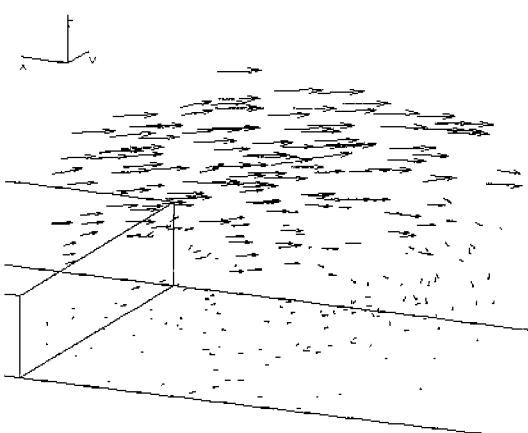


Fig. 16 Instantaneous 3-D velocity vectors of backward-facing step flow

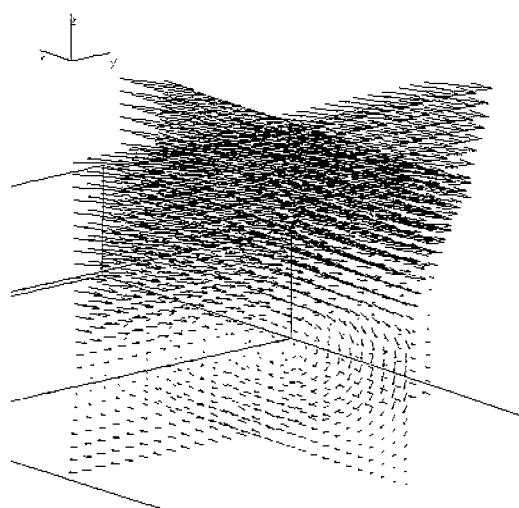


Fig. 17 Mean velocity distribution of the center plane of X-Y and X-Z planes

6. 3차원 입자영상유속계의 계측오차

3차원 입자영상유속계를 이용하여 유동장의 3 차원 속도계측에 있어서의 오차로서는 추적입자의 3차원위치를 계산할 때의 오차와 사진좌표축정시의 오차 등이 고려될 수 있는데, 카메라의 파라메타를 구함에 있어서 추적입자의 3차원위치계산과 사진좌표축정시의 오차 등을 계산과정에서 단순한 함수관계가 성립하지 않으므로 오차전파의식으로부터 오차를 검정하기란 쉽지 않다. 따라서, 일반적으로 교정용으로 쓰이게 되는 기지의 기준점의 위치와 카메라파라메타를 사용해서 계산한 기준점의 위치를 비교함으로써 3차원 속도계측의 오차를 평가하는 경우가 많다⁸⁾.

7. 맷 는 말

본 내용에 포함되어 있는 3차원 PTV계측결과 및 실험장치에 관한 내용은 필자가 실제로 계측시스템을 구축 및 실험하는 과정에서 경험한 내용을 바탕으로 구성되어 있다.

유동장에 방해를 주지 않으면서 유동장 전체에 걸쳐서 속도분포를 얻어낼 수 있다는 장점으로부터 2차원 PIV(Particle Imaging Velocimetry)계측법은 현재 유체유동의 연구분야의 적용에 세계적으로 급증해 해가고 있는 추세이다. 이와 같은 상황에서 이·공학분야의 넓은 분야에 있어서 나타나는 유동현상은 대부분이 3차원성이 강한 유동이라는 점을 고려하면 3차원 PTV계측법의 공학적 의의는 날로 증대되어 가고 있다.

3차원 PTV계측기술로부터 얻어진 실험적 데이터는 가상현실(Virtual Reality) 구현기술과 접목 시킨다면 좋은 교육자료가 될 수 있다.

참고문헌

- Adrian R. J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, 1991, pp.261~304.
- 도덕희, "PIV(입자영상유속계) 계측기술", *기계저널*, 제38권, 제10호, 1995, pp.36~41.
- 東京大學出版會, "最小自乗法による實驗データ解析", 1983.
- Doh, D.H., "A Study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, 1995.
- Kasagi, N. and Nishino, K., "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry", *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol.4, 1991, pp.601~612.
- 도덕희, 최성환, 홍성대, 이연원, "디지털 화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발", *대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B)*, 1999, pp.20~25.
- 백승조, 이상준, "일치확률방식의 2-프레임 PTV 알고리듬 개발", *대한기계학회논문집*, 제19권 제7호, 1995, pp.1741~1748.
- Kobayashi, T., Saga, T. Haeno, T., and Tsuda, N., "Development of a real-time velocimetry measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design", *ASME FED-Vol.128*, 1991, pp.1220~1227.
- Agui, C., Jimenez, J., "On the performance of the particle tracking", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.185, 1987, pp.447~468.
- ASME, "Measurement uncertainty for fluid flow in closed conduits", *ANSI/ASME MFC-2M-1983*, 1983.
- 流れの可視化學會, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, p. 158, 1986.
- Doh, D. H., Choi, S. H., Cho, K. R., Y. W. Lee, Virtual images for a benchmark test of 3-dimensional PIV algorithm for unsteady turbulent flows, KSME Fluid Engineering Division, 1999 Annual Fall Meeting, Seoul National Univ. Samsung Convention Center, 1999, 10, 8, pp.152~158.