

3D-PTV 측정기법

도 덕 희 · 한국해양대학교 기계정보공학부, 교수 _e-mail : doh@hhu.ac.kr

이 글에서는 3D-PTV 측정기법의 개요와 3D-PTV 측정기법 원리에 대해 소개하고 이어서 원통형 교반기 내의 속도장 측정, 원주후류 측정, 구후류 측정, 유탄성 운동해석용 돌발 충돌제트 측정, 선박 프로펠러 주위 유동장 측정, 마이크로 믹서 유동장 측정, 4D-PTV에 의한 제트유동 측정 등 3D-PTV 적용의 대표적인 사례를 소개한다.

3D-PTV 측정기법 개요

3D PTV측정기술이란 유체와 함께 운동하는 동일 비중의 미소 입자(粒子)들의 운동을 두 대 이상의 카메라로 영상화한 다음, 이들 영상에 대하여 사진측량의 원리에 의거 3차원 디지털영상처리 과정을 거쳐 미소입자들의 개별적 이동량을 구함으로써 공간에 걸친 3차원 속도벡터 분포를 얻어내는 기술을 말한다.

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 조직 구조의 발생으로부터 소멸에 이

르기까지의 메커니즘을 해석하기 위해서는 유동장의 공간적 구조에 관한 정보가 필요하게 되는데, 3D PTV는 이를 충족시키는 데 현실적으로 가장 근접한 기술로

각광받고 있다.

그림 1은 정량적 유동가시화 기법의 분류를 나타내는데 3D-PTV 측정기법은 홀로그래피 PIV법(HPIV)과 같이 유동장의

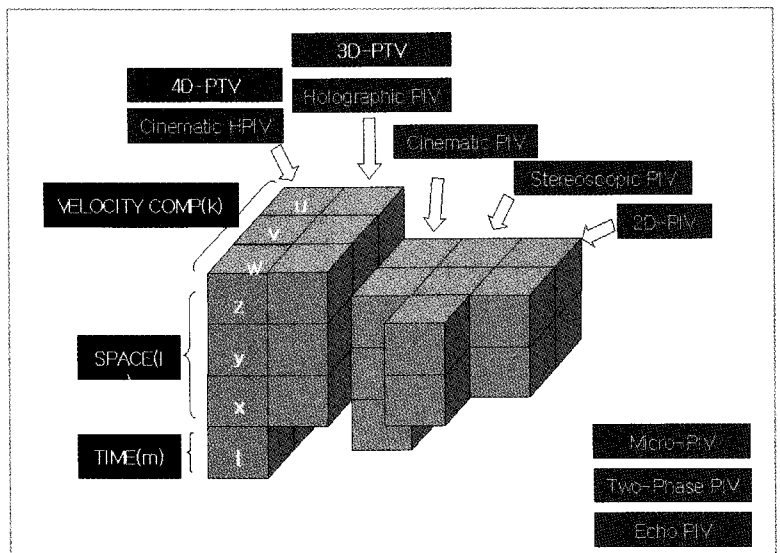


그림 1 정량적 유동가시화 기법의 분류

공간(x, y, z)에 속도벡터 3성분(u, v, w)을 얻어내는 기술에 해당된다. 3D-PTV는 HPIV에 비하여 측정의 공간해상도가 다소 떨어지지만, 레이저 및 광학장비의 고정밀성에 유의를 해야 하는 HPIV 측정에 비하면 실용성이 뛰어나다. 최근 디지털카메라 기술의 발달에 힘입어 공간분해능도 HPIV 수준으로 근접해감에 따라 3D-PTV의 실용성이 날로 증가되고 있다. 4D-PTV는 3D-PTV의 한계인 시간해상도를 극복한 측정법을 말한다.

3D-PTV 측정기법 원리

그림 2는 3D-PTV 측정을 위한 기본 구성요소를 나타낸다. 유동장을 가시화하기 위한 광원(레이저 또는 일반광원), 두 대 이상

의 카메라, 유동장의 입자거동을 3차원 디지털영상처리를 수행하기 위한 호스트컴퓨터로 구성된다. 카메라영상을 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라에 나타난 미소입자들의 사진좌표계와 측정 공간좌표계와의 상관관계를 계산할 필요가 있다. 이를 위해서 수행하는 작업을 3D-PTV에서는 카메라교정(校正)이라 한다. 즉, 카메라교정이란 측정공간 좌표계상으로 변환하는 작업으로 볼 수 있다. 교정작업이 종료되면, 유동장에 투입된 수많은 입자들의 3차원 속도를 측정하기 위해서는 이들 입자들의 공간이동량 정보가 필요하게 된다. 입자들의 공간이동량 정보를 얻기 위해서는 서로 다른 시각의 영상에 나타난 입자영상들 간에 동일한 입자들을 찾아내

는 과정을 거쳐야 한다. 이를 입자동정(matching)이라고 한다. 공간상에서 동일한 입자들이 찾아지면 공간이동벡터가 구해지고 이를 일정 시간간격으로 나누면 3차원 속도성분이 되는 것이다. 한편, 카메라교정을 위해서는 측정 공간상의 물리좌표를 설정해야 할 필요가 있는데 그림 3은 이를 위해 사용되는 교정기(calibrator)를 나타낸다. 이 교정기에는 측정이 완료된 기준점들이 배치되어 있으며 이들 기준점들의 카메라 영상에 대한 3차원 디지털영상처리를 수행함으로써 카메라의 사진좌표계와 측정 공간좌표계와의 상관관계를 확보할 수 있게 된다. 교정기의 형상은 측정 유동대에 따라 변경하게 된다. 입자동정을 위한 방법으로서 시간상에서 입자의 2차원 벡터를 먼저 구한 다음 벡터합성에 의하여 3차원벡터를 구하는 시간·공간대응법, 공간상에서 입자의 3차원 위치를 먼저 구한 다음 시간상에서 동일입자를 찾아내어 3차원벡터

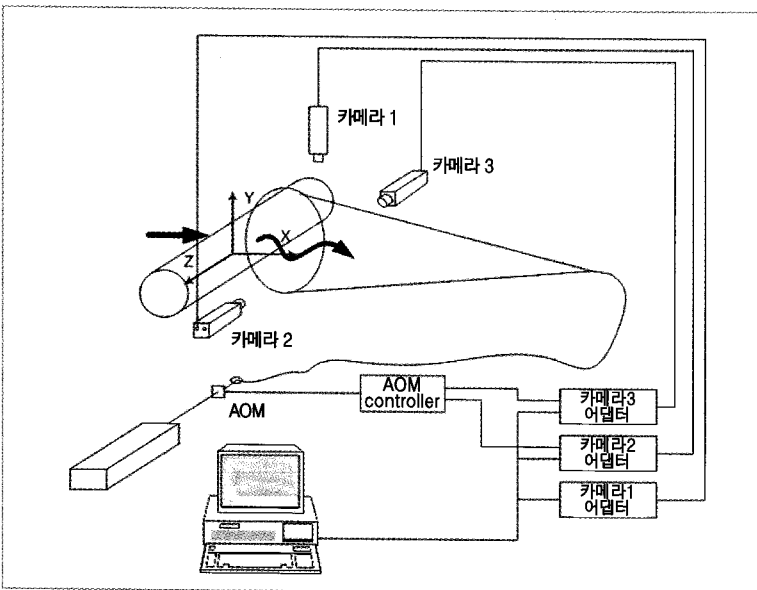


그림 2 3D-PTV 측정기법의 구성요소

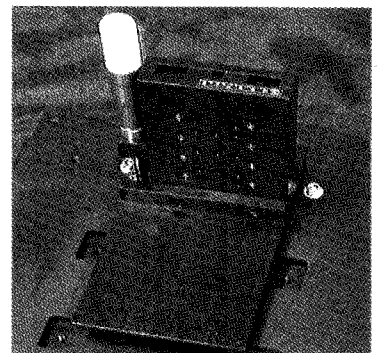


그림 3 카메라 교정기

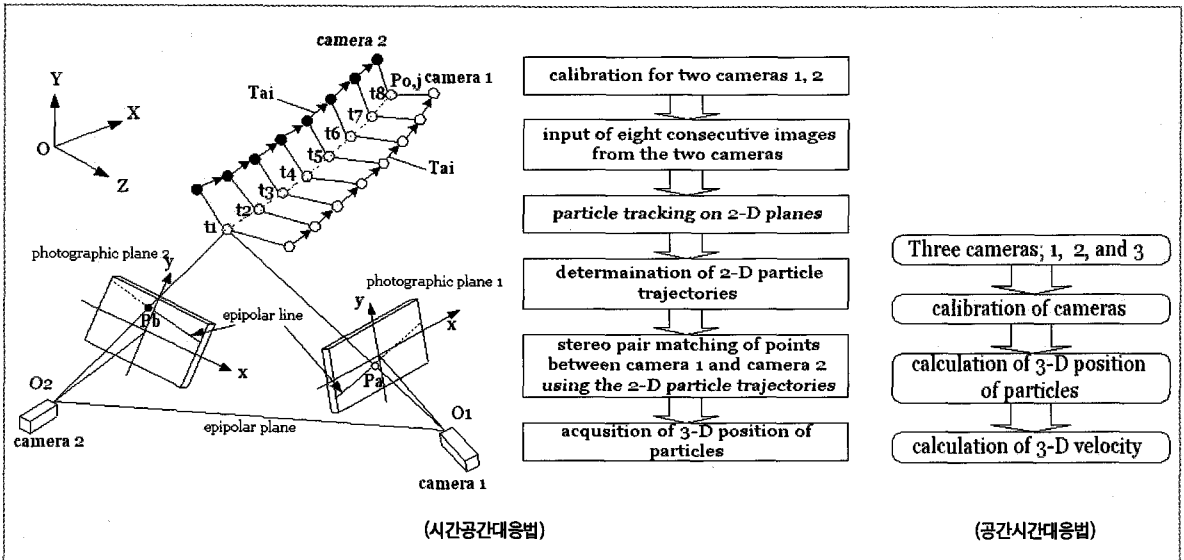


그림 4 입자동정법

를 구하는 공간·시간대응법, 입자영상의 시간정보와 3차원 위치 정보를 동시에 활용하여 3차원벡터를 구하는 시공간대응법이 있다.

3D-PTV 적용 대표적 사례

원통형 교반기 내의 속도장 측정

그림 5는 직경이 300mm이며 높이가 460mm인 아크릴제의 원통형 교반(攪拌)탱크 내에서 회전하고 있는 블레이드에 의해 형성되는 3차원 유동장의 3차원 속도계측을 위한 계측시스템의 구성도와 카메라조정기를 나타낸다. 3차원 속도계측을 위해서는 시간·공간대응법을 적용하고 두 대의 카메라의 파라메타는 그림과 같이 원통형으로 배치된 42개

의 기준점들을 이용하여 구해진다. 이 경우에는 광원으로서 레이저 시트광을 쓰지 않고 수은등(250W)을 이용하였다. 그림 6은 100회 계측하여 얻어진 약 20,000개의 3차원 순간속도벡터들을 나타낸다. 한 번의 실험으로 150개에서 200개 정도의 속도벡터가 얻어졌는데 수많은 3차원 벡터들이 겹쳐져 있기 때문에 이들 데이터로부터 유동의 구조를 이해하기란 쉽지가 않다. 따라서 공간보간법을 도입하여 균일한 3차원 격자상에서 속도벡터결과가 얻어지게 된다. 그림 7은 탱크 바닥면으로부터 200mm의 높이에 있어서의 보간된 3차원 평균속도벡터장을 나타낸다. 그림상의 화살표의 길이는 10cm/sec의 속도 크기를 나타낸다. 3차원 속도계측을 통하여 3차원성

이 강한 교반탱크 내의 유동장의 특징적인 유동구조를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 이는 다른 계측방법으로 계측할 수 없는 단점을 극복하고 있음을 시사한다. 이들 속도벡터데이터와 벽면의 압력계측데이터를 이용하면 탱크 내부유동장의 압력분포도 계산할 수 있다.

원주후류 측정

그림 8은 직경이 1cm인 원주후류에 대한 3차원 속도장을 얻기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸다. 레이놀즈수는 500의 경우이며, 측정을 위하여 3대의 카메라(Sony, SSC-M370)가 사용되었다. 이 결과는 저해상도 카메라인 512 x 512 화소의 카메라를 이용하여 한 순간에 약 3,000개의 속도벡터로부터 얻어

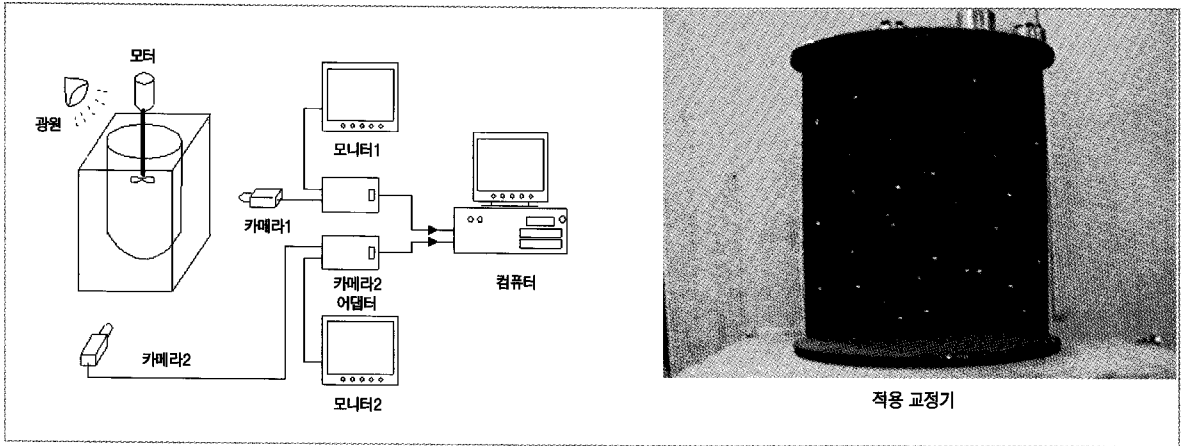


그림 5 교반탱크 내 3D-PTV 측정(도덕희, 해양대)

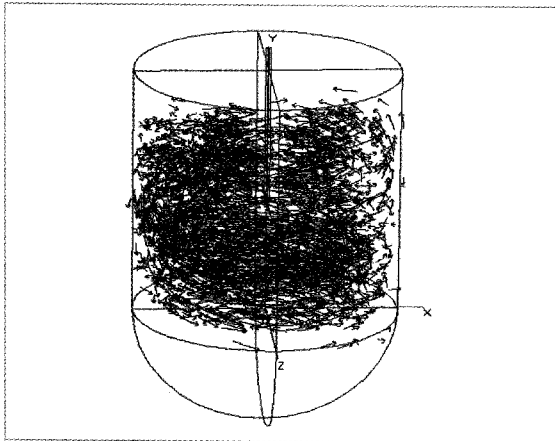


그림 6 3차원 순간속도벡터

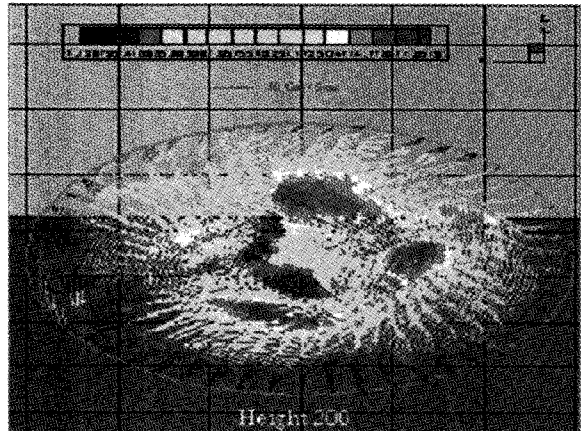


그림 7 격자상 3차원 평균속도벡터장

진 결과로부터 발표 당시 주목된 성과였다. 한편, 얻어진 3차원 속도벡터들 중에서는 오류 벡터들을 제거하기 위하여 통계적 처리 방법이 적용되었다. 그림 9는 이들 3차원 순간벡터분포들로부터 얻어진 순간 난류운동에너지 분포(임의 등고선 값을 표시)를 나타내고 있는데, 후류의 대규모 난류운동에너지 분포에 대한 표현이 실질적으로 잘 나타나 있음을 알 수 있다.

구후류 측정

그림 10은 직경이 30mm인 구의 후류 유동장을 측정하기 위한 3D-PTV 측정시스템을 나타내며 사진은 구가 회류수조 내에 설치된 모습을 나타낸다. 레이놀즈수는 1,150이며 측정을 위하여 3대의 카메라(Sony, SSC-M370)가 사용되었다. 그림 11은 한 순간에 얻어진 3차원 속도벡터분포를 나타내며 약 4,000개의 순간속도벡터가 얻어졌다. 약

100시간분의 순간속도벡터로부터 유동장의 통계량인, 난류강도, 난류운동에너지 등이 계산될 수 있다. 그림 12는 구후부 위치($x/D=1.0$)에서의 유선과 순간와도분포를 나타낸다. 본 연구성과는 구후류에 대한 상세한 거동구조를 제시한 것으로 각광받았다. 특히 구후류에 헤어핀구조가 존재함을 실험적으로 증명한 최초의 성과이다.

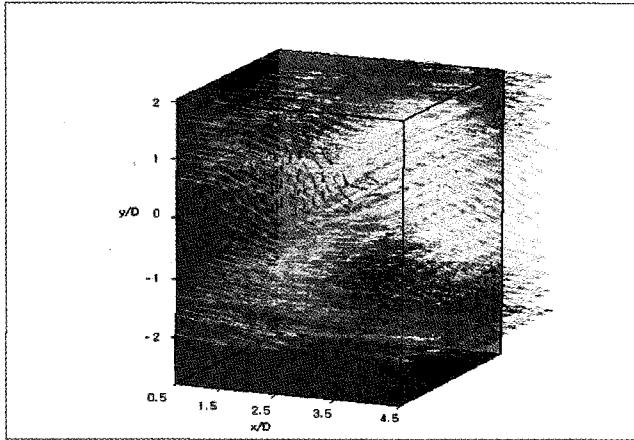


그림 8 원주후류 3차원 순간속도벡터장
(40 x 40 x 40mm 계측공간)(도덕회, 해양대)

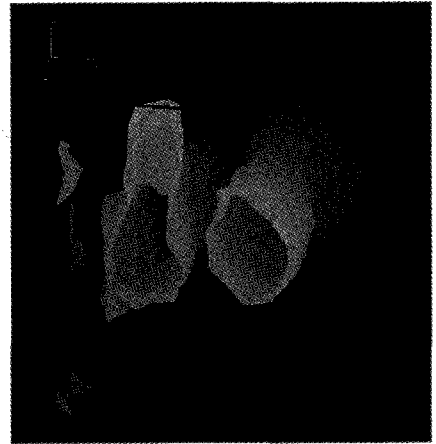


그림 9 순간 난류운동에너지 분포

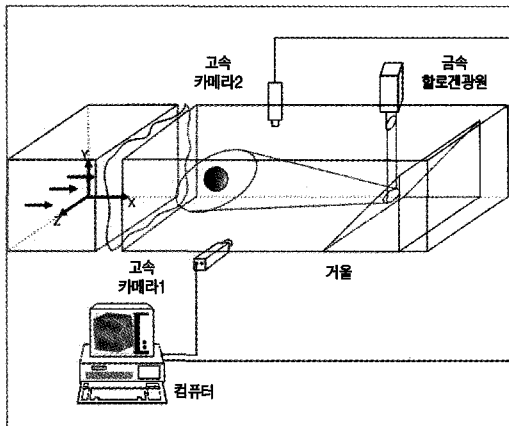


그림 10 구후류 유동장 3D-PTV 측정(도덕회, 해양대)

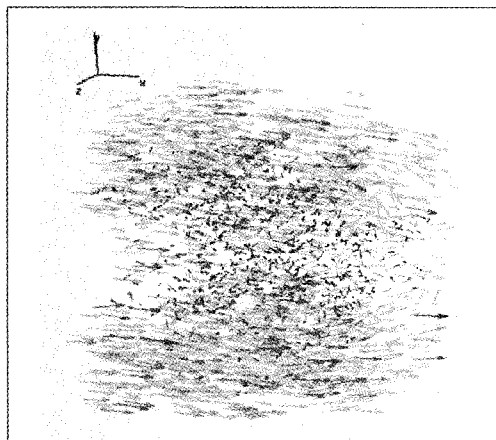
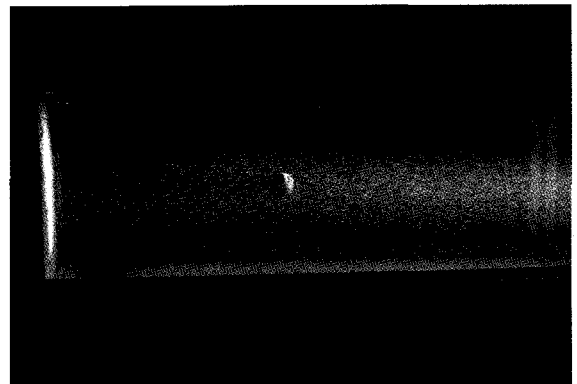


그림 11 구후류 3차원 순간속도벡터장

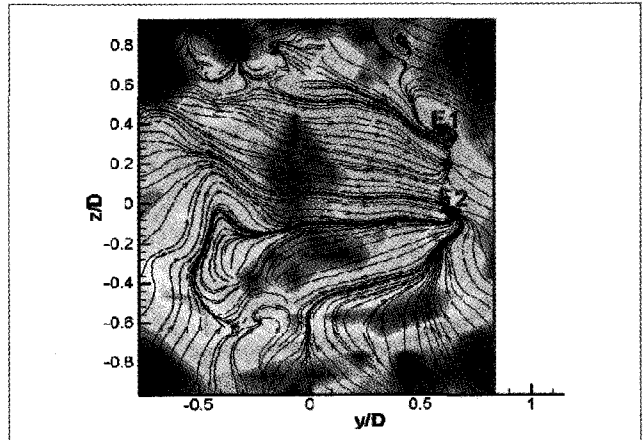


그림 12 구 후부위치($x/D=1.0$)에서의 유선과 순간속도분포

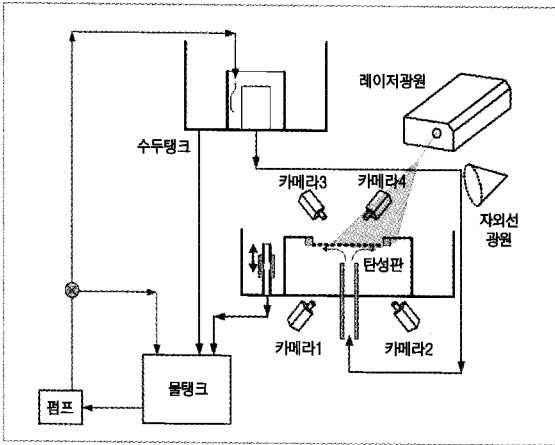


그림 13 돌발제트 유탄성 측정시스템(도덕회, 해양대)

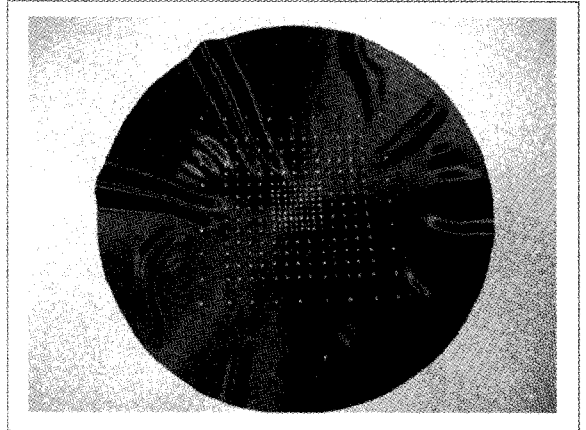


그림 14 탄성 충돌판

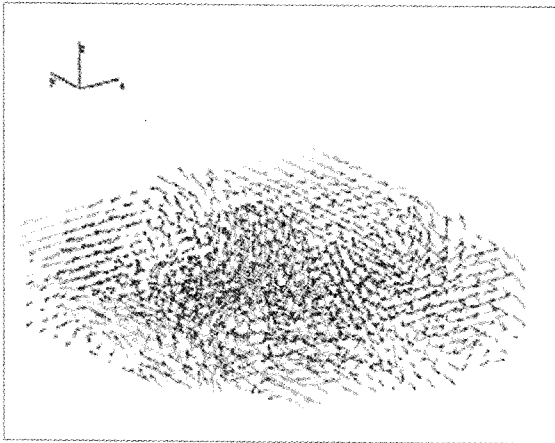


그림 15 돌발제트 3차원 순간속도벡터장

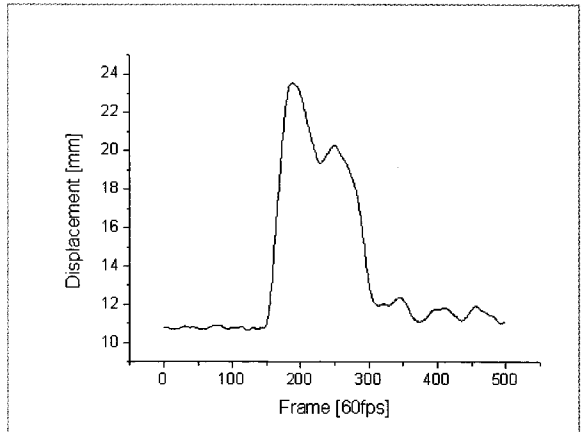


그림 16 탄성판 중심의 실시간 거동변화

유탄성 운동해석용 돌발 충돌제트 측정

슬로싱(sloshing)에 의한 LNG선박 내 화물창의 손상문제는 화물창 설계에 있어서 매우 중요한 사항이다. 슬로싱에 의한 화물창과 화물펌프타워(pump tower)의 유체-구조 유탄성(hydroelastic) 연성운동에 대한 모델링 실험이 수행되었다. 그림 13은 돌발 충돌제트 유동에 대한 3D-PTV 측정과 탄성을 가진 충

돌판의 운동에 대한 6자유도 운동에 측정이 동시에 수행된 사례를 나타낸다. 노즐직경이 직경이 15mm인 노즐로부터 그림 14와 같은 탄성판(직경 350mm, 두께 0.5mm, 경도 15)을 향하여 돌발제트가 분사되었을 때 형성된 탄성판 중심 하부의 유동장과 탄성판의 거동이 동시에 측정되었다. 하부의 두 대 카메라(camera 1, 2)는 3D-PTV에 의한 유동장의 거동을 측정하기 위하여 사용되

었고 상부의 두 대 카메라(camera 3, 4)는 탄성판의 거동을 측정하기 위하여 사용되었다. 탄성판의 거동은 판 위에 그려진 표적물에 대하여 '양방향탐색법'이라는 6자유도운동 측정법의 원리를 도입함으로써 구해진다. 그림 15는 3D-PTV에 의하여 구해진 3차원 순간속도벡터장을 나타내고 그림 16은 3D-PTV 측정과 동시에 측정된 판의 중심의 시간 연속 거동을 나타낸다. 본 연구는

탄성판 하부에 형성되는 와구조가 탄성판의 제2차 진동모드를 유발하는 메커니즘을 밝힘으로써 유탄성 운동해석의 초석을 마련하였다.

선박프로펠러 주위 유동장 측정

그림 17은 DDPIV(Defocusing Digital PIV)법으로 직경이 66mm인 프로펠러 주위의 유동장을 측정한 사례를 나타낸다. 속도벡터장과 와도분포를 나타낸다. DDPIV는 그림 18에 나타난 바와 같이 측정영역에 대하여

defocusing된 상태의 3대의 카메라가 관찰하여 얻어지는 세 개의 defocusing된 입자영상에서 얻어지는 기하학적 상관관계로부터 입자의 3차원 위치가 결정되게 된다. 이 방법에서는 카메라의 교정작업이 카메라 설치초기에 수행 완료되므로 이후 카메라에 대한 교정작업이 필요없다는 것이 장점이지만, 측정에 있어서 장소의 제약을 수반하게 된다. 900rpm(15Hz)으로 회전하고 있는 프로펠러 주위의 유동장을 5

도씩 위상 이동하여, 동일한 위상일 때의 순간속도벡터들을 200쌍 합산한 속도벡터로부터 각종 물리량을 추정해 내었다. 1k x 1k카메라 3대가 한 번의 측정으로 7,000여 개의 순간벡터 획득이 가능하나 상용화된 측정시스템이므로 고가이며 본 측정시스템으로는 단순외관을 가진 측정 대상에 유리하다.

마이크로 믹서 유동장 측정

그림 19는 마이크로 3D-PTV



그림 17 프로펠러 주위 3차원 순간속도벡터장 (이태리, 국립조선공학연구소)

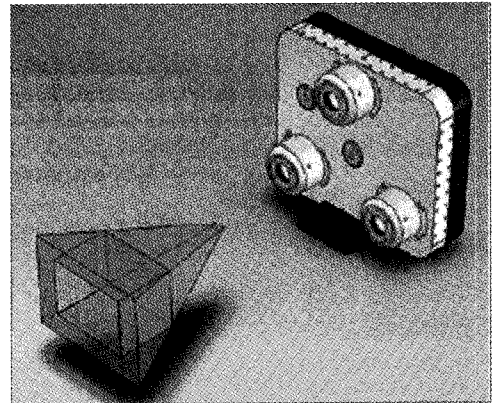


그림 18 DDPIV 측정시스템

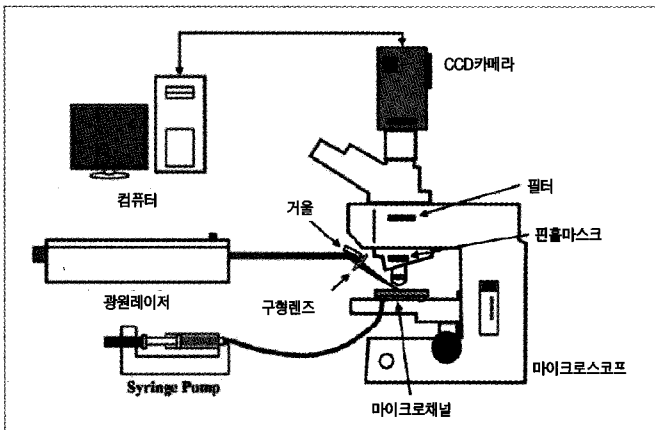


그림 19 마이크로 3D-PTV 측정시스템(김경천, 부산대)

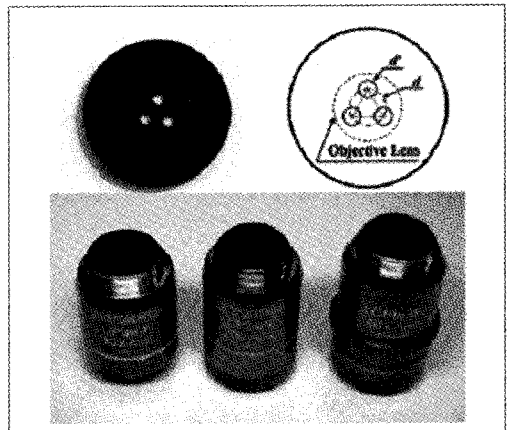


그림 20 마이크로렌즈와 핀홀판

측정시스템의 구성을 나타내며 필자의 지식범위 내에서 본 연구가 최초의 사례로 되어 있다. 측정시스템은 광원(레이저), 마이크로렌즈 시스템, 측정대상, 고해상 카메라(1k x 1k), 호스트컴퓨터로 구성된다. 마이크로 렌즈후면에 그림 20과 같은 세 개의 구멍을 가진 핀홀판을 부착함으로써 DDPIV와 같이 세 개의 defocusing된 입자영상이 얻어지며, 이들 입자영상이 만들어내는 기하학적 상관관계(세 개의 입자영상 점으로 구성되는 원의 직경이 z방향의 위치정보를 가짐)로부터

입자의 3차원 위치가 결정되게 된다. 그림 21은 폭이 210미크론이고, 높이가 110미크론, 60미크론인 요철형 마이크로믹서의 형상을 나타낸다.

한 번의 측정으로 약 수십여 개의 순간속도벡터가 얻어지게 되는데, 0.8 μ l/min의 물이 마이크로믹서를 통과할 때 유동의 특성을 조사하기 위하여 입자들(직경은 3 미크론)이 이동한 유적선을 나타낸 것이 그림 22에 나타나 있다.

4D-PTV에 의한 제트유동 측정 카메라의 시간해상도가 유동장

의 물리적 특성시간보다 클 경우에는 3D-PTV 측정시스템으로 얻어진 물리량은 유동장의 특성을 충분히 반영하지 못하며 대규모 와구조에만 국한되게 된다. 유동의 물리적 특성시간에 제약을 받지 아니한 측정을 수행하고자 할 경우에는 3D-PTV시스템에 적용된 카메라의 시간해상도가 물리적 특성시간보다 높아야 한다. 즉, 카메라의 작동주파수는 최소 나이퀴스트율(Nyquist rate)의 원리에 따라 유동장의 물리적 특성시간보다 두 배 이상의 짧은 간격으로 되어야 한다.

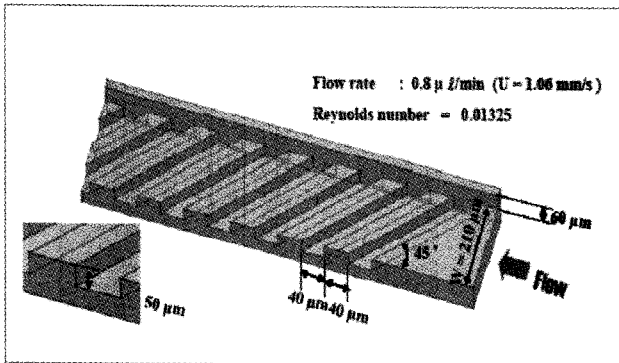


그림 21 마이크로믹서 형상

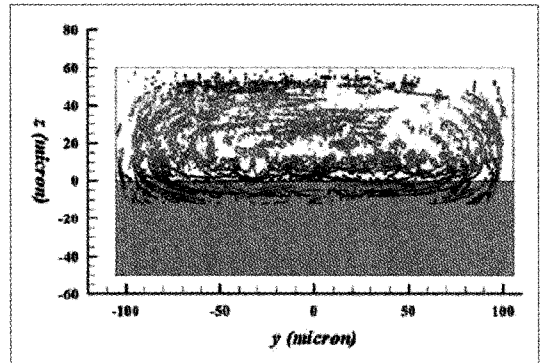


그림 22 입자들의 유적선

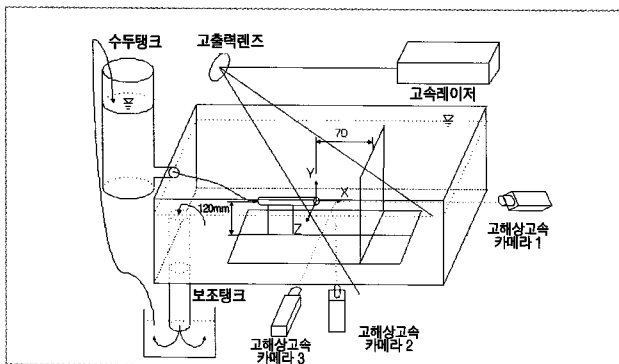


그림 23 4D-PTV 측정시스템(도덕희, 해양대)

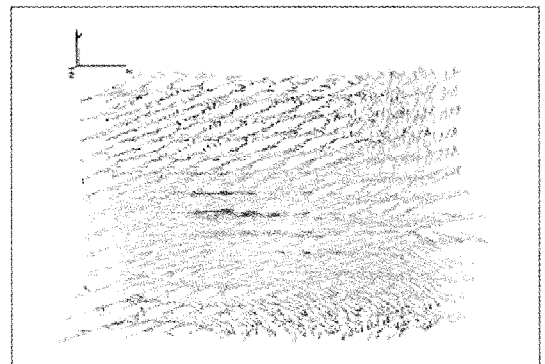


그림 24 4D-PTV에 의한 순간속도벡터장

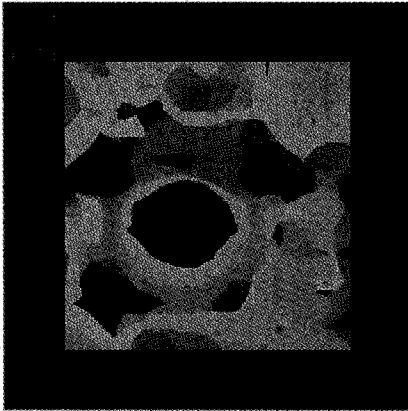


그림 25 와도의 공간분포

4D-PTV 측정시스템은 물리적 특성주파수보다 높은 주파수의 카메라를 사용하게 되는 점이 3D-PTV 측정시스템과 다른 점이다. 그림 23은 3대의 고해상고속카메라(1k x 1k, 2,000Hz)와 고속의 펄스레이저(20mJ, 2,000Hz)로 구성된 4D-PTV 측정시스템으로 총돌분류(직경 20mm, 레이놀즈 수 40,000)를 측정할 사례를 나타낸다. 그림 24는 순간속도벡터장을 나타내고 그림 25는 순간속도벡터장으로부터 구한 순간의 와도분포를 나타낸다. 3D-PTV 측정법이 4D-PTV 측정시스템으로 확장되기 위해서는 유동장의 라그랑주 주파수(Lagrange Frequency)보다 빠른 속도로 고해상의 3차원 측정이 이루어져야 한다.

맺 음 말

열·유체공학분야의 넓은 분야에 있어서 나타나는 유동현상은 대부분이 3차원성이 강한 유동이라는 점을 고려하면 3D-PTV계측법의 공학적 의의는 날로 증대되어 가고 있다. 스테레오 PIV(일명, 3D-PIV)는 단면상의 3차원 속도벡터성분을 제공하는 반면 3D-PTV는 공간상의 3차원 속도벡터성분을 제공한다라는 점으로부터 유동장의 거동구조를 파악하는 데에는 보다 실질적인 계측법이다.

3D-PTV는 측정알고리즘상 현재 한 순간에 얻어 낼 수 있는 공간의 3차원 속도벡터의 개수가 한정된 개수만을 얻어내는 관계로 고정밀의 유동의 구조를 파악하는 데에는 한계가 있다. 그러나 최근 고해상 디지털카메라의 출현에 힘입어 측정알고리즘을 개선을 통하여 한순간에 얻어낼 수 있는 속도벡터의 개수도 1만 개 이상으로 향상되었다. 점점 발달하는 카메라 기술의 발달과 함께 10k x 10k 이상의 카메라를 활용한다면 HPIV와 동일 수준의 3차원 속도벡터를 획득할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 카메라 성능향상에 따라 3D-PTV는 공간해상도와 시간해상도의 한계를 극복한 형태의 4D-PTV로 전환되고 있다.

한편, HPIV기술에 있어서 극복을 해야 하는 난제는 물체로부터 반사되어 온 빛의 정보를 여하히 정교하게 홀로그램에 기록하는 것과 방대한 량의 데이터처리 하느냐에 관건이 있었다. HPIV는 최근의 고해상도 디지털카메라의 출현으로 방대한 양의 데이터 처리에 대한 부담을 경감시킬 수 있게 되었다. 이로 인하여 HPIV는 이제 DHPIV(Digital Holography PIV)로 전환되고 있다. 이는 3D-PTV측정의 성능을 좌우하는 카메라의 해상도 문제와 동일한 맥락의 문제이므로, 속도벡터 성능측면에서는 3D-PTV는 DHPIV와 대등소이한 수준으로 될 것임을 추정할 수 있다. 아직 개발되지는 않았지만 16K x 16K 해상도의 카메라를 사용한 3D-PTV시스템에 적절한 측정알고리즘이 적용된다면 한 순간의 측정으로 약 1,000,000개의 3차원 속도벡터의 획득이 가능해짐을 시사한다고 볼 수 있다. 이는 수치계산의 DNS(Direct Numerical Simulation)처럼 순간유동구조의 완전계측 및 예측가능을 의미한다. DHPIV기술이 실용화 단계에 접어들어 각광받을 단계에는 3D-PTV측정기술도 어느 정도 수준까지 갈 것인지 감히 짐작해 볼만 하다.