

PTV 기술의 현황과 발전

· 도 덕 희 | 한국해양대학교 기계·정보공학부, 교수
e-mail : doh@hanara.kmaritime.ac.kr

이 글에서는 필자가 실제 적용해 왔던 2차원 및 3차원 PTV의 사례와 경험을 토대로 기술하고자 한다.

PTV의 특징

유동장에 떠돌아다니는 부유물 혹은 먼지의 움직임을 보면 개략적으로 유동의 유속을 알 수 있다. 이것은 태양의 빛이나 실내 조명 등에 의하여 가시화된 부유물 혹은 먼지(추적입자)의 움직임을 인간의 눈으로 포착한 뒤 그 시각정보를 인간의 뇌가 적절히 처리하고 있기 때문이다. 이와 같은 일련의 작업과정이 카메라, 화상처리장치 및 컴퓨터의 구성에 의하여 이루어지는 것이 PTV (particle tracking velocimetry) 이다.

가시화에 의한 유체계측법은 추적입자의 화면밀도(image-density)에 따라 분류되는데 추적입자의 화면밀도가 낮아 각각의 입자추적이 용이한 경우(그림 2)에 적용하는 방법이 PTV방법으로 보이며, 추적입자의 화면밀도가 높아서 각각의 입자추적

이 용이하지 않는 경우에 적용하는 방법은 PIV로 보면 된다. PTV에서는 입자들 하나 하나의 움직임을 추적하므로 입자이미지의 중심위치데이터만 있으면 되며, 이들 위치데이터를 2시각 이상에 걸쳐서 획득하여 입자추적을 실시하면 유속분포를 얻어낼 수 있다. 화상처리장치 및 주변기기의 발달에 힘입어 최근에는 입자이미지의 위치정보를 거의 실시간으로 얻을 수 있게 되었다. PIV에서는 값비싼 레이저를 써야 만이 그 효용이 발휘하는데 반하여 PTV는 스트로보가 이용될 수 있다는 점으로부터 PIV에 관련된 연구를 개시하는 연구자에게는 초기도입이 용이한 측정법이다. PTV에는 속도2성분(u, v) 혹은 속도3성분(u, v, w)이 얻어지느냐에 의하여 2차원 PTV와 3차원 PTV로 구분될 수 있다. 2차원 PTV는 단면형상의 광원 안에 나타난 입자의 움직임을 카메라

로 촬영하여 이하에 기술된 여러 가지의 측정알고리즘에 의하여 그 단면 내에서의 2차원 속도벡터분포를 측정하는 방법이다. 2차원 PTV를 보다 발전시킨 것이 복수대의 CCD(charge coupled device)카메라를 이용한 3차원 PTV로 보면 된다. 이것은 유동장의 입체적인 영역의 속도3성분을 동시에 측정하는 방법이다.

2차원 PTV의 현황과 발전에 관한 내용은 2차원 PIV의 경우와 유사하므로 3차원 PTV의 현황과 발전에 관한 내용을 기술함으로써 PTV의 현황 및 발전에 관한 보고에 대하고자 한다. 이 글에서는 필자가 실제 적용해 왔던 2차원 및 3차원 PTV의 사례와 경험을 토대로 기술하고자 한다.

PTV시스템 구성의 현황과 전망

PTV시스템은, PIV시스템과

그 구성이 거의 동일하게, 촬영부, 기록부, 처리부, 조명부 등으로 구성되어 있으며, 목적과 예산에 맞추어 적절한 기기가 선택되고 있다.

촬영부로서는 CCD로 대표되는 고체촬상소자를 이용한 TV카메라가 주류를 이루고 있다. 시판되는 TV카메라를 이용하면, A/D변환해서 얻어진 화상데이터는 512~640 x 480 화소 정도의 분해능인데, 최근에는 고해상도 TV카메라 혹은 디지털 카메라가 등장하여 4,096 x 4,096 화소 정도가 사용되고 있다. 전자기술의 발달로 촬영부의 용량 혹은 성능 향상은 더욱더 가속화될 것으로 사료된다. 전술과 같이 2차원 PTV시스템은 카메라 1대를 사용하는 반면에 3차원 PTV시스템에서는 2대 이상의 카메라를 사용하고 있다. 2차원 시스템이라 할지라도 측정영역이 매우 넓은 경우에는 2대 이상의 카메라를 평행으로 배치하여 사용하는 경우(panoramic 측정법)도 있다.

기록부로서는 여러가지가 사용되고 있는데 일반적으로 촬영부의 성능에 맞추어 구성되고 있다. 촬영부가 NTSC방식의 TV카메라인 경우에는 가정용 VTR을 기록부로 쓰는 경우가 있는데 이것은 가끔씩 정확한 프레임 제어가 되지 않아 PTV의 자동처리에 문제가 되는 경우가 있다. 이를 해결하기 위하여 컴퓨터로 제어가 가능한 전문가용 VTR이 사용되기도 한다. 한편, VTR의 테이프의 열화문제로 광디스크에 아날로그 방식으로 실시간 저장이 가

능한 광디스크(optical disc)가 사용되는 경우도 있는데 고가인 것이 단점으로 남아 있다. 최근에는 컴퓨터 자체의 메모리 용량의 향상 및 처리속도의 향상으로 화상정보를 컴퓨터 메모리에 직접 기록이 가능한 이미지 그래버를 많이 쓰고 있는 추세에 있으며, 앞으로도 고속대용량화가 가속되어 PTV 알고리즘만 개선된다면 방대한 량의 실험데이터의 실시간 처리가 가능하게 될 것으로 사료된다.

처리부는 속도분포를 얻어내기 위하여 사용되는 화상처리장치(하드웨어부)와 알고리즘(소프트웨어부)으로 구성되는데, 하드웨어로서 매우 고가인 전용화상처리장치에서부터 컴퓨터용의 저렴한 이미지 그래버까지 다양한 것이 시판되고 있다. 선정시 주의사항은 하드웨어 구입시 달려 있는 소프트웨어의 충실도인데 일반적으로 이는 가격에 비례하므로 기본 소프트웨어 개발에 어디까지 시간을 투입할 것인가를 고려하여 선택하여야 한다. 최근에는 개인용 컴퓨터상에서 PTV를 위하여 필요하게 되는 기본화상처리(배경처리, 입자 중심 계산)가 가능하도록 되어 있는 화상처리장치도 시판되고 있다. 또한, 연구 환경에 따라 고해상도 카메라 혹은 여타 다른 고기능의 카메라를 사용할 경우 그들에 대응한 처리부를 선택할 필요가 있다. 예를 들면, 디지털 카메라에서는 화상데이터가 직접 컴퓨터에 전송되므로 인터페이스와 화상데이터 보존을 위하여 대용량 메모리가

필요하게 될 뿐만 아니라 화상의 저장, 표시, 전송과정을 고속화가 가능한 처리부가 필요하게 되었다.

조명부로서는 연속발광레이저를 많이 사용하여 왔지만 최근에는 펄스발광장치의 성능향상으로 인하여 점차 Nd-Yag 레이저 혹은 루비레이저와 같은 펄스레이저를 쓰고 있는 추세에 있다. PTV가 개발된 초기에는 슬라이드 프로젝터나 일반 광원들을 사용하여 예산절감효과를 누릴 수 있었으며, 지금도 예산상의 제약이 따를 경우에는 가끔씩 이 방법을 도입하는 경우도 있다. 이 경우는 계측데이터에 대한 고정도는 기대하기는 힘들다고 봐야 한다. PIV용으로는 부적절하지만 PTV용 적절한 스트로보장치는 펄스발광이 가능할 뿐만 아니라 안전하면서 저렴하므로 PTV 조명부로서 종종 쓰이기도 한다. 특히, 3차원 PTV인 경우에는 유동장의 유속이 특별히 빠르지 않는 한 스트로보장치를 쓰더라도 얻어진 데이터에 대하여 고정도를 보이는 연구성과들이 보고되고 있다. 한편, 통상의 연속광 레이저에 음향광학변조기(AOM : acoustic optical modulator)를 사용하면 임의 패턴의 펄스광원을 발생시킬 수 있으므로 이를 이용한 고속유동장 PTV계측 사례가 있다.

PIV나 PTV시스템은 구성품 하나 하나가 독립적으로 발달 및 변모하고 있는 상황이므로 시스템의 기능향상을 기하고자 할 경우에는 구성품을 새롭게 교체해

야 하는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 펄스광원의 발광시간과 카메라와의 동기문제가 자주 대두되고 있으나, 최근에는 동기문제를 어느 정도 쉽게 해결할 수 있는 신호발생장치가 시판되고 있는 상황이다.

PTV 계속 알고리즘의 현황과 전망

표 1은 속도계측을 위해서 사용된 입자화상의 개수와 적용된 계측알고리즘에 따라 정리한 PTV 분류표이다. 2차원 PTV에 적용되고 있는 알고리즘에는 사용되는 화상의 수에 따라 4시각(4-image) 입자추적법, 3시각 입자추적법, 2시각 입자추적법이 등이 있다. 또한, 이들 입자화상간의 입자대응을 위하여 퍼지이론, 신경망이론, 유전알고리즘, 확률에 의거한 확률일치법 등이 적용되기도 한다.

그림 1은 2시각 입자추적법의 경우에 입자상을 나타내었으며, 2시각의 화상간에 동일한 입자를 찾아냄으로써 속도분포를 얻게 된다. 이 동일한 입자상을 찾아내는 과정을 대응(pair matching) 과정이라 한다. 현재 2시각 입자추적법이 가장 많이 이용되고 있으며, 시각간의 동일한 입자대응을 위해서는 유동장의 특성에 따라 상기의 다양한 방법들을 적용하고 있다. 그림 3은 2차원 유전알고리즘을 이용한 2차원 PTV법의 계측결과의 예를 나타내고 있으며, 그림 2의 원화상에 대한 결과이다. 이 방법은 여타 다른 알

	동일입자대응을 위하여 사용된 영상수에 따른 분류	동일입자대응을 위하여 사용된 알고리즘에 따른 분류
2차원 PTV	<ul style="list-style-type: none"> · 4 - 프레임 추적법 · 3 - 프레임 추적법 · 2 - 프레임 추적법 	<ul style="list-style-type: none"> · 벡터히스토그램법 · 확률일치법 · 통계 및 분산처리법 · 유전알고리즘법 · 퍼지법 · 신경망이론법 · 기타
3차원 PTV	<ul style="list-style-type: none"> · 8 - 프레임 추적법(TSM) · 3 - 프레임 추적법(STM) · 2 - 프레임 추적법(STSM) 	<ul style="list-style-type: none"> · 벡터히스토그램법 · 확률일치법 · 통계 및 분산처리법 · 유전알고리즘법 · 기타

※TSM : 시간-공간 입자 대응법
 ※STSM : 동시 시간-공간 입자 대응법

※STM : 공간-시간 입자 대응법

고리들보다 작은 스케일의 유동에도 속도벡터의 복구 능력이 우수함이 알려져 있다.

유동장의 대부분이 3차원적인 것을 감안할 때 3차원 PTV의 필요성이 대두된다. 3차원 PTV에 적용되고 있는 알고리즘에는 사용되는 화상의 수에 따라 8시각(8-image) 입자추적법, 3시각 입자추적법, 2시각 입자추적법 등이 있으며, 시각간의 동일한 입자대응을 위해서는 유동장의 특성에 따라 유전알고리즘, 확률일치법, 벡터히스토그램 등을 바탕으로 한 알고리즘들을 적용하고 있다. 한편, 3차원 PTV법은 각 카메라에 나타난 추적입자들간의 공간대응 및 시간인식 과정이 필요하게 되며, 3차원 속도벡터의 복구방법의 적용순서에 따라 시간·공간 대응법(spatial-temporal pair matching method)과 공간·시

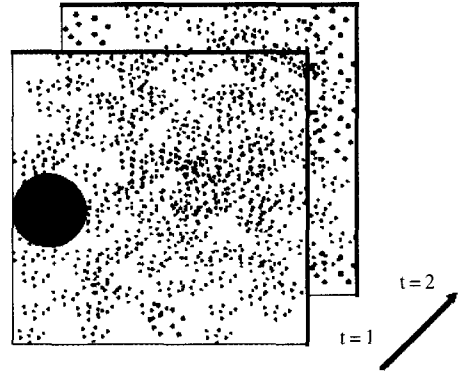


그림 1 2시각 입자추적법의 입자화상

간대응법(temporal-spatial pair matching method), 동시시·공간대응법(simultaneous temporal spatial pair matching method)으로 분류될 수 있다. 시간·공간대응법은 한 대의 카메라의 영상을 이용하여 2차원 속도벡터를 먼저 구한 후 두 대의 카메라에 의한 속도벡터를 공간상에 3차원 대응시켜 3차원 속도벡터를 얻어내는 방법을 말하며, 공간·시간대응법은 두 대의 카메라의 영상을 이용하여 추적입자들의 3차원 공간점을 먼저 구



그림 2 2차원 PTV에 적용되는 원화상의 예

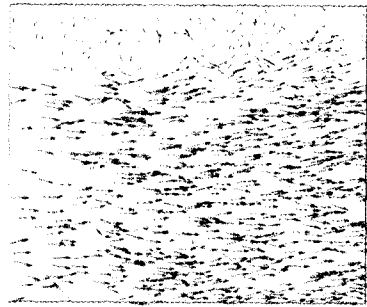


그림 3 그림 2의 원화상에 2D-PTV 유전알고리즘을 적용하여 얻어낸 속도벡터 분포

한 후 두 시각 사이의 동일한 입자를 대응시켜 3차원 속도벡터를 얻어내는 방법을 말한다. 동시시·공간대응법은 위의 두 방법의 개념을 동시에 고려하여 계산함으로써 3차원 속도벡터를 얻어내는 방법이다.

그림 4는 3D-PTV의 구성 예를 나타내고 있다. 원주후류에 대한 유동구조를 계측하기 위하여 3대의 카메라가 사용되었으며, 광원으로서는 Ar-ion 레이저가 사용되었다. 그림 5는 유전알고리즘 기반의 동시시·공간 대응법을 적용하여 획득한 원주후류의 격자상의 3차원 순간속도벡터분포를 나타내고 있다.

이 결과는 저해상도 카메라인 512 x 512 화소의 카메라를 이용하여 한 순간에 약 3,000개의 속도벡터로부터 얻어진 결과임에

대하여 주목이 된다. 현재, 1,024 x 1,024 화소의 카메라로 약 1만 개의 3차원 순간속도벡터가 획득되고 있는 상황이며, 아직 개발되지는 않았지만 16K x 16K 해상도의 카메라를 사용한 3D-PTV 시스템에 적절한 대응알고리즘의 적용이 이루어진다면 약 100만 개의 3차원 순간속도벡터의 획득이 가능해짐을 시사한다고 볼 수 있다. 이는 수치계산 DNS(Direct Numerical Simulation)처럼 순간유동구조의 완전계측 및 예측가능성을 예고한다.

그림 6은 이들 3차원 순간속도벡터 분포들로부터 얻어낸 원주후류의 순간와도분포(Z축 성분)를 나타내고 있으며, 와도의 분포가 잘 재현되고 있음이 보인다.

그림 7은 그림 4의 3차원 순간속도벡터들을 통계처리하여 얻은 레이놀즈 응력의 분포를 나타내고 있다. 3D-PTV에 의한 결과는 2D-PIV, Hot-wire 등에 의하여 얻어진 결과들과 비교해 볼 때 정량적으로 완전하게 일치하지는 않으나, 정성적 경향이 일치하고 있음이 보인다. 이들의 결과들이 2차원적인 것에 의한 결과라는 점과 레이놀즈수가 다른 점을 고려하면 3D-PTV계측에 의한 계측결과가 매우 신뢰할 만한 수준에 있음을 알 수 있

다. 동일한 조건하에서 여타 다른 계측법에 의하여 얻어진 난류통계량과 3D-PTV에 의하여 획득된 난류통계량과의 정량적 비교를 통하여 3D-PTV계측에 대한 신뢰성은 이미 많은 연구논문에서 검정이 된 상태이다.

PTV의 전망

PIV에서는 얻어지는 속도벡터 수가 많고 PTV에서는 적다라는 잘못 이해하는 경우가 종종 있는데, 독립적으로 얻어지는 속도벡터 수는 동일한 카메라 계를 쓰는 한 얻어지는 속도벡터 수는 큰 차이가 없다. 예를 들어, NTSC 규격의 CCD카메라를 사용하는 것을 전제하면, PIV에서 32 x 32 화소의 검사영역을 설정했다면 얻어지는 속도벡터 수는 300 정도이다. 한편, PTV에서도 200~500개 정도의 속도벡터가 얻어지는 것이 보통이다. 이와 같은 인식은 PIV에 인식된 high-image-density와 PTV에 인식된

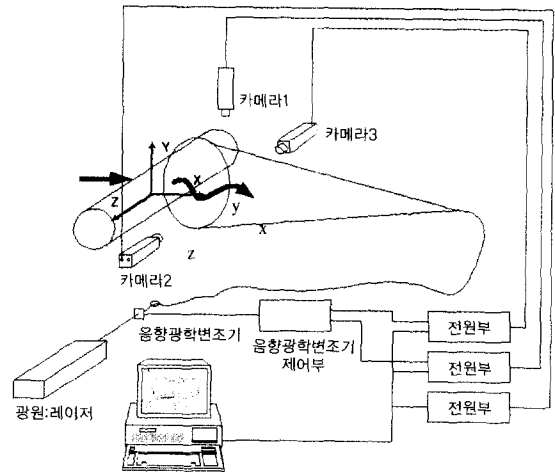


그림 4 원주 후류 계측을 위한 3D-PTV시스템 구성 예

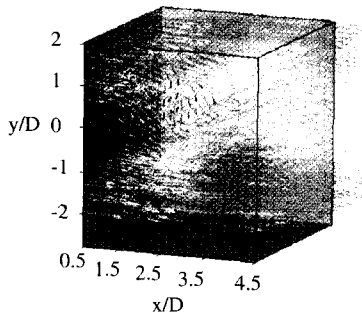


그림 5 3D-PTV에 의한 원주후류 3차원 순간속도 벡터분포(40 x 40 x 40mm 계측공간)



그림 6 3D-PTV에 의한 원주후류 순간외도 분포(Z축 성분)

low-image-density라는 단어 자체가 내포한 것에 기인하는 오해로 생각되는데 PIV와 PTV의 차이점은 화면명도에만 있을 뿐 얻어지는 속도벡터 수는 동일 정도의 수준으로 봐야 할 것이다. PTV는 실험할 때 요구되는 여러 가지 광학적 제약조건 등을 개선한다면, 각각의 입자를 추적하므로 공간분해능이 높아 속도구배나 난류변동이 큰 벽 근처에서도 계측이 가능하고, 처리시간이 짧고 보존해야 할 데이터 양도 적으며, 3차원계측으로의 확장이 가능하다는 장점이 있으므로 그 이용가치가 점점 높아지고 있다. 현재 컴퓨터 능력의 한계로

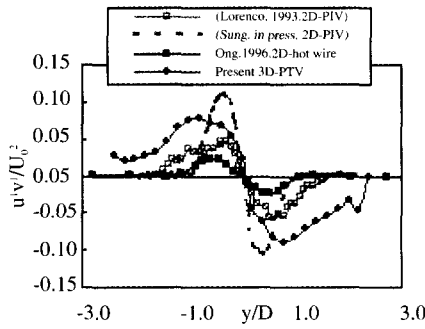


그림 7 3D-PTV에 의한 원주후류 레이놀즈 응력의 분포

DNS(direct numerical simulation)계산은 컴퓨터 관련 기술의 한계로 저레이놀즈수에 국한되고 있는데 반해 현재의 광학, 비디오기기 및 전자장비 등의 기술 발달 속도를 고려한다면 레이놀즈수에 제약을 받지 않고 순간유동구조의 완전재현이 가능한 3D-PTV의 고해상도 계측이 가능한 단계에 접어들었다고 볼 수 있다.

21세기 꿈의 기술 중의 하나로 여겨지고 있는 것이 홀로그램 기술이다. 이 기술을 이용한 HPIV 홀로그램(holographic PIV)은 유동장의 고해상도 3차원 계측기술의 종착역으로 여겨지

고 있으나, 홀로그램에서 가장 중요한 부분 중의 하나인 필름 막의 재료기술 혁신을 요하고 있는 이유로 2030년 전후에 대량의 정량적 데이터 처리가 가능할 것으로 예측되고 있다.

이를 위해서는 Nano기술 등이 응용된 형태의 재료기술의 혁신이 지원되어야 할 것으로 보인다.

그림 8은 PTV 기술의 현주소를 나타내고 있으며, 3D-PTV와 PIV기술이 유동장의 공간에 걸쳐 속도3성분을 동시에 계측할 수 있다는 점에서 각광을 받을 단계에 있다 하겠다. 3D-HPTV 기술은 현재 산업현장에 직접 응용되어 그 성과가 보고 있는 상황에 있다. HPIV 기술이 실용화 단계에 접어들어 각광받을 단계에는 3D-PTV가 어떤 수준까지 갈 것인지 감히 짐작해 볼 만 하다.

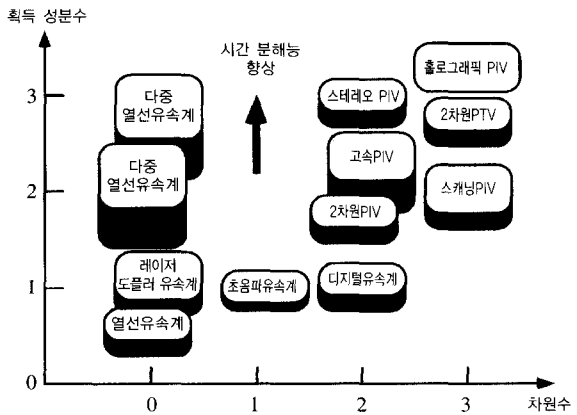


그림 8 PTV 기술의 현주소(3D-PTV는 유동장의 3성분을 3차원 공간에 계측함을 의미한다)