

정량적 유동가시화 기술

이 글에서는 대표적인 정량적 유동가시화 기술인 입자영상유속계(PIV)와 레이저형광여기법(LIF) 기술에 대한 현황과 전망을 구체적으로 소개한다.

김경천

유동가시화 기술의 진보

바람과 물의 흐름, 피의 순환, 굴뚝에서의 연기 등 유체의 유동은 우리의 생활과 밀접하게 연관되어 있다. 하지만 유체의 유동은 눈으로 쉽게 관찰되지 않으므로 해석과 예측에 어려움이 따른다. 특히 인류의 생활 수준이 향상됨에 따라 자동차의 항력과 유동 소음의 감소, 에너지 절약, 유체기계의 효율 향상, 대기오염의 저감 등에 대한 요구가 증대되면서 유동을 정확하게 예측하고 제어하기 위한 연구의 필요성이 증대되었다. 주어진 유동문제를 제대로 해석하기 위해서는 전체 유동의 속도장에 대한 정확한 정보가 있어야 한다.

현재 대부분의 유동장에 대한 해석적 연구는 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의존하고 있으나, 난류와 같은 복잡한 유동장의 계산 결과는 비교할 만한 실험결과가 없어서 정확도를 검증하는데 어려움이 따르고 있다. 한편, 실험

적 연구에 있어서도 현재 많이 사용되고 있는 레이저도플러유속계(LDV)나 열선유속계들은 점측정(point measurement)방법들로서 국소적인 위치에서의 속도정보를 제공하고 있다. 이러한 기존의 계측기법으로는 시간에 따라 변화하는 비정상 유동이나 난류 유동의 공간변화를 해석하고 정확하게 예측하기가 거의 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전체 유동장에 대한 유동 정보를 시간의 함수로 얻을 수 있어야 한다.

유동장 정보를 가장 손쉽게 얻을 수 있는 방법은 유동가시화(flow visualization) 기술이다. 유동가시화는 전달현상(transport phenomena)과정을 가시화하는 것으로 속도, 압력, 밀도 및 온도 등과 같이 우리 눈에는 보이지 않는 유동정보의 공간분포를 시간과 공간의 어떤 범위 안에서 눈에 보이도록 하는 실험방법을 지칭한다. 유동가시화는 대부분 비접촉 방식으로 유동 자체를 교

란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유동에 대한 공간적인 유동정보를 제공한다.

유동가시화는 정성적 유동가시화 기술과 정량적 유동가시화 기술로 나눌 수 있다. Leonardo da Vinci 시대부터 시작된 모든 고전적 유동가시화 기법들은 정성적 유동가시화 기술에 속한다. 여기에는 염료주입법, 수술(tuft)법, 수소기포법, 연기선기법, 광학적(optical) 기법 등이 포함된다. 광학적 기법에는 유동장의 밀도변화, 즉 매질의 굴절률 변화를 이용하여 유동장 전체를 가시화하는 Shadowgraph법, Schlieren법, Mach-Zenherd 간섭계 등이 있다. 이러한 고전적인 유동가시화 기법은 단지 유동의 정성적인 정보만을 제공하며 정량적인 정보를 제공하지 못한다는 단점이 있다.

최근 컴퓨터 및 광학기술의 눈부신 발전으로 말미암아 유동가시화 분야도 많은 발전을 하였고,

· 김경천 | 부산대학교 기계공학부, 교수 / e-mail : kckim@pusan.ac.kr

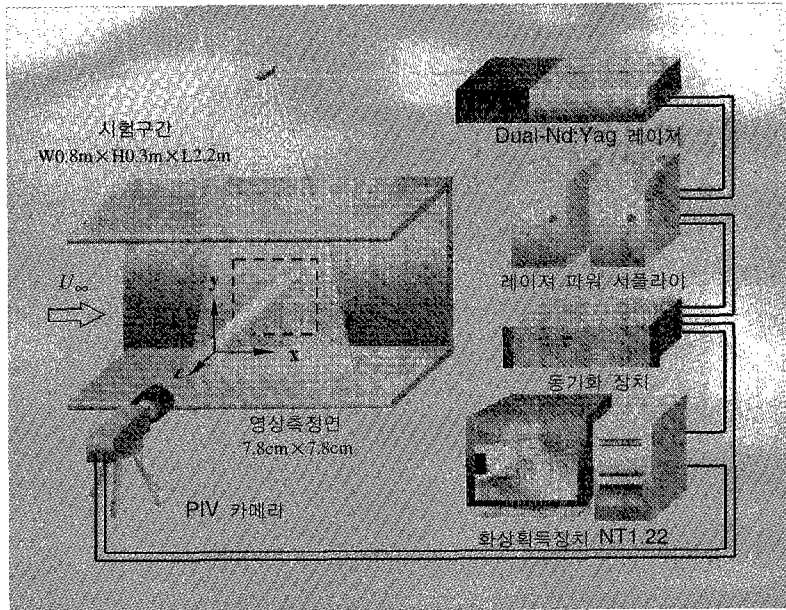


그림 1 입자영상유속계의 기본 구성

드디어 정량적 유동가시화 기술이 등장하게 되었다. 보다 선명한 유동영상을 얻기 위하여 각종의 레이저가 조명장치로 사용되고 있다. 레이저광은 유동을 교란시키지 않으며, 짧은 파장, 우수한 지향성과 직진성, 그리고 높은 빛강도를 가지며, 펄스형태로 광파를 발생시킬 수 있는 장점도 있다. 유동장 속으로 투입된 입자 (particle)들은 디지털 카메라에 의해 획득되어 입자의 변위 정보를 컴퓨터에 저장하고, 저장된 유동화상(flow image)을 이용하여 속도장을 계산함으로써 정성적인 순간 유동정보뿐만 아니라 우수한 공간분해능을 갖는 정량적인 속도장(velocity field)정보를 제공하게 되었다.

유동의 순간적인 속도분포를 짧은 시간 내에 구할 수 있는 이와 같은 정량적 유동가시화 측정 기법은 열유체 분야의 실험적 연

구에 혁명적인 변화를 가져오고 있다. 즉, 기존의 점측정 방식으로는 측정이 불가능하였던 국부적인 난류 유동의 공간변화를 정확하게 측정하는 것이 이제는 가능하게 되었다. 입자영상유속계 (PIV : Particle Image Velocimetry)로 불리는 속도장 측정기

술은 현재 전 세계적으로 가장 활발하게 연구되고 있는 첨단 유동 측정기술로 그 발전 속도가 매우 빠르다. 최근에는 시간적으로 연속적인 속도장을 측정할 수 있는 Cinematic PIV 기법으로 유동의 비정상 현상의 규명이 가능하며, 3차원 속도장 측정 방법인 Stereoscopic PIV와 Holographic PIV 등이 개발되어 유동 해석 연구에 활용되고 있다.

유동장의 측정과 함께 농도나 온도 등의 스칼라량의 정량적 가시화 기술도 함께 발전하고 있다. 온도에 따라 색깔이 바뀌는 감온성 액정(themochromic liquid crystal)을 이용한 TLC themometry나 농도 및 온도에 따라 형광의 강도가 변하는 성질을 이용하는 평면레이저형광여기법 (PLIF : Planer Laser Induced Fluorescence)으로 농도장과 온도장의 공간정보를 측정함으로써 열유체 분야의 실험적 연구는 획기적인 전환점을 맞고 있다. 이

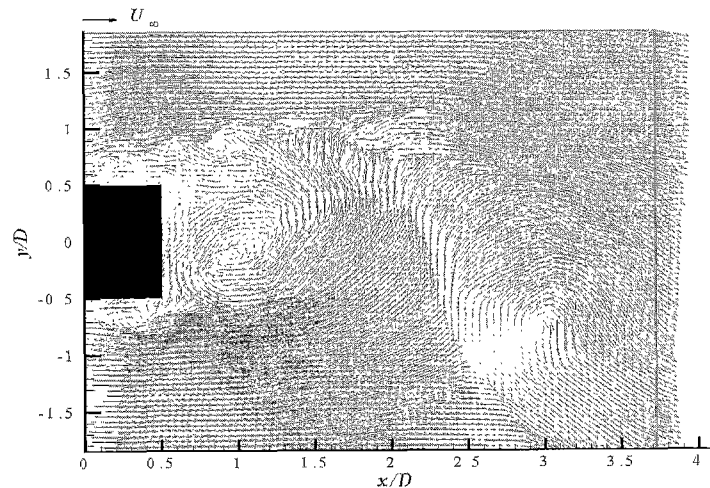


그림 2 PIV 기법으로 구한 사각주 후류의 순간속도장

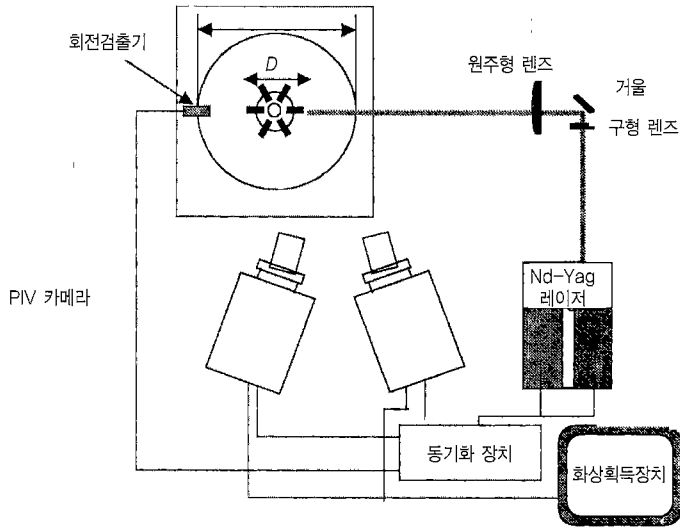


그림 3 3차원 속도장 측정을 위한 Stereoscopic PIV 시스템의 구성 예

글에서는 대표적인 정량적 유동 가시화 기술인 입자영상유속계 (PIV)와 레이저형 광여기법 (LIF) 기술에 대한 현황과 전망을 구체적으로 소개한다.

입자영상유속계

유동속에 투입된 추적입자 (tracer)들의 영상을 화상처리 하여 주어진 유동의 속도장을 측정하는 입자영상유속계(PIV : Particle Image Velocimetry)의 기본 구성은 그림 1과 같다. 화상처리를 이용한 속도장 측정시스템은 크게 레이저와 광학장치, 영상기록장치, 입자발생장치 등으로 구성되어 있다. 속도장 측정을 위해서는 먼저 유동을 잘 추종하는 작은 입자를 유동 속에 주입한다. 그 다음, 측정하고자 하는 유동단면을 레이저 평면광으로 조사하게 되면, 입자들에 의해 산란된 빛이 카메라에 기록된다. 레이

저 평면광은 원주형 렌즈와 구형 렌즈로 이루어진 광학장치로써 만들 수 있다.

레이저 평면광에 산란된 입자 영상 1장을 시간 $t=t_0$ 순간에 CCD 카메라와 같은 영상입력장치로 취득한다. 그리고 시간간격

Δt 가 지난 $t=t_0 + \Delta t$ 순간에 두 번째 입자영상을 취득한다. 시간간격 Δt 는 유동의 속도에 따라 다르게 설정한다. 이렇게 얻어진 두 장의 입자영상을 2차원 화상데이터로 컴퓨터에 저장한 후 디지털 화상처리기술로 분석함으로써 시간간격(Δt) 동안 움직인 유동입자들의 변위(displacement) 정보 ΔS 를 계측한다. 여기서 입자들의 변위는 시간과 공간의 함수로 $\Delta S = \Delta S(x,y,t)$ 로 표현된다. 속도벡터 $U(x,y)$ 는 입자들의 변위벡터 ΔS 를 시간간격 Δt 로 나누어줌으로써 구할 수 있다. 그림 2는 사각주 후류의 순간 속도장을 PIV 기법으로 측정한 예이다. 순간적으로 7,000 개 정도의 속도벡터가 약 1 mm 간격의 공간분해능으로 얻어진 예이다.

3차원 속도장의 측정기법으로는 Stereoscopic PIV와 Holo-

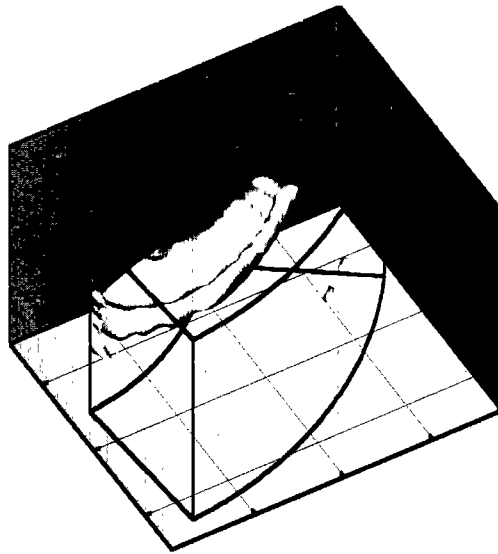


그림 4 회전교반기 임펠러로부터 형성된 끝단와류의 3차원 와류구조

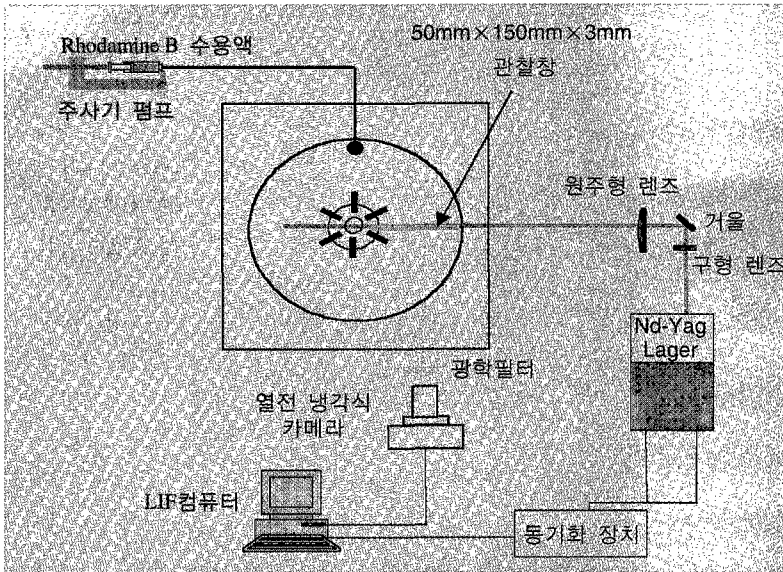


그림 5 레이저형광여기법으로 농도장을 측정하는 시스템의 구성 예

graphic PIV 기술을 들 수 있다. Stereoscopic PIV 방식은 레이저 평면광으로 조명된 입자영상을 두 대 이상의 CCD 카메라로 동시에 촬영하여 stereoscopic imaging 방식으로 영상을 분석하면 평면의 입자변위뿐 아니라 레이저 평면의 수직방향으로의 out of plane 속도성분도 도출할 수 있다. 그림 3에 Stereoscopic PIV의 기본 구성이 나와 있다. 이 방법으로는 2차원 평면(2-D)에서의 세 가지 속도성분(3-C)을 구할 수 있다. 반면에 Holographic PIV 방법은 영상 압축이 가능한 holograph 기법을 이용하여 3차원 volume 전체(3-D)의 3차원 속도성분(3-C)을 구하는 진정한 의미의 3차원 속도장 계측 방법이다. 그러나 시스템 구성이 복잡하고 고가여서 현재로서는 3차원 속도장 측정은 주로 Stereoscopic PIV 방식에 의해 이

루어지고 있다.

그림 4에는 다중평면 Stereoscopic PIV 기법으로 구한 교반기 임펠러 주위의 와류구조를 보여주고 있다. 이 와류구조는 3차원 속도장의 앙상블 평균으로부터 속도구배를 구하고 이를 이용

해 등와도면을 추출함으로써 임펠러의 끝단와류의 3차원 구조를 가시화하고 있다.

레이저형광여기법

평면 레이저형광여기법(PLIF)은 난류유동장에서 순간 농도장을 측정함에 있어서 매우 유용한 방법이다. 종래의 기법인 전기전극에 의한 커패시터 프로브에 비해 PLIF 기법은 유동에 교란을 주지 않을 뿐 아니라, 순간적으로 평면의 정보를 얻을 수 있는 획기적인 방법으로 난류 스칼라 확산 연구에 획기적인 진전을 가져올 수 있는 새로운 측정기술이다. 이 기술은 어떤 특정한 염료 분자가 빛을 흡수하면 형광을 발산하는 성질을 이용한다. 특히 매우 낮은 농도의 염료 용액인 경우($10^{-9} \sim 10^{-6}$ mol/l), 형광의 강도 I_f 는 몰농도 c 와 다음 식과 같은 선형

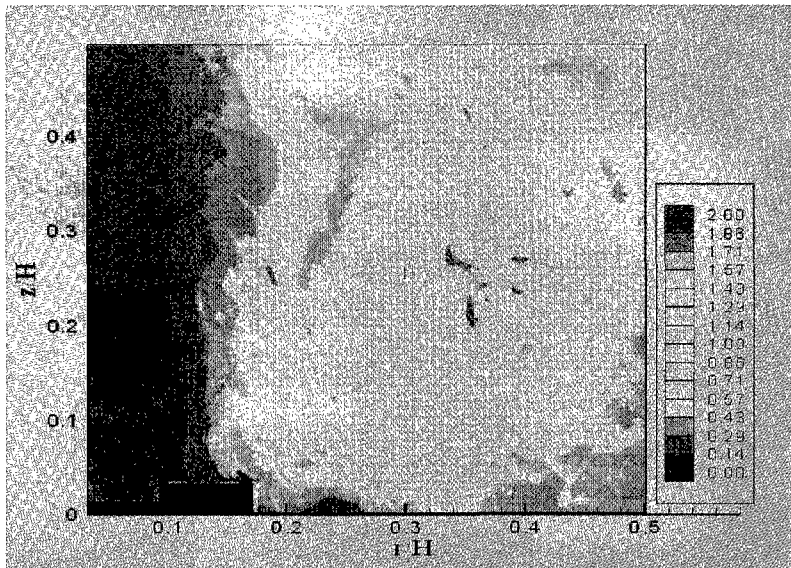


그림 6 회전교반기의 임펠러 상부 영역에서 난류혼합이 진행 중인 순간농도장

관계를 갖는다.

$$I_f = \Phi I_0 \epsilon b c \quad (1)$$

여기서 Φ 는 양자효율(quantum efficiency)이고, I_0 는 입사광의 강도, ϵ 는 분자의 흡수율, b 는 흡수경로길이(absorption path length)이다. 염료가 방사하는 형광의 파장은 흡수하는 파장보다 길다. 따라서 형광 염료는 최대흡수 파장이 레이저광의 여기 파장과 가깝게 선택해야 하며, 적절한 필터를 사용하여 방사광만 CCD 카메라에 입사되도록 해야 한다. 형광 강도 I_f 는 농도 측정의 동적범위(dynamic range) 즉, 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 커지도록 최대한 크게 잡을수록 좋다. 이 경우 입사광이나 농도를 높여주면 되지만, 너무 농도를 높여 주었을 때, 상당한 양의 빛이 흡수됨으로 인하여 방사광과 농도의 선형성이 깨어지게 된다. 입사광 역시 너무 높여주면 광화학적 분해(photochemical decomposition)이 일어나서 형광 분자가 파괴되고 방사 에너지가 줄어들게 된다. 그리고 ϵ 는 형광 물질의 물성이고 b 는 농도장 측정 체적과 광학적 배치와 관련된 문제이므로 교정 실험시 상수로 취급될 수 있다.

농도장 측정 시스템의 예가 그림 5와 같이 구성되어 있다. 사용된 레이저는 Nd : Yag 레이저로서 532 nm의 파장을 가지며, 4 nsec 동안 12 mJ의 펄스 레이저를 방출한다. Rhodamine B는 물속에서 화학적 안전성과 스펙트럼 특성이 매우 우수하기 때문에 가장 널리 사용되는 형광물질 이

다. Rhodamine B에서 나온 형광 빛은 Cooled CCD 카메라(KX-85)로 촬영된다. 카메라 앞에는 입사광이나 광학적 잡음을 제거하기 위해 OG-550 (Melles Griot) 컬러 필터를 장착한다. Cooled CCD는 열전(thermoelectric) 방식으로 CCD를 냉각시켜 매우 작은 량의 광자(photon)도 받아들일 수 있도록 설계된 카메라로 LIF 실험에 적합한 카메라이다. 그림 6에는 교반기의 난류혼합에 의해 염료가 확산되고 있는 순간농도장을 보여준다.

대부분의 유기 염료에서 양자 효율 ϕ 는 온도에 의존적이다. 형광강도의 변화는 대체로 1K당 1%의 비보다 작다. 그러나 Rhodamine B와 같은 복합체의 감도는 2%/K 정도로 높은 편이다. 대조적으로 흡수율 ϵ 은 0.05

보다 작으므로 온도에 잘 감응하지 않는다. 따라서 입사광의 강도 I_0 와 농도 C 가 일정하다고 가정하면 용해물질의 온도 측정이 가능하다. 이때 I_0 는 온도장을 통과하는 동안 빛의 굴절 등 다양한 요인 때문에 변화하게 되는데, 이런 I_0 의 변화를 막기 위해 양자효율이 온도에 감응하지 않는 형광 염료를 동시에 사용한다. 양자효율이 A, B인 다른 염료는 다른 파장의 빛을 방출하게 되므로 광학적 기구를 통해 방출된 빛을 분리시킬 수 있다. 두 개의 다른 카메라(α, β)를 통해 각각의 측정된 형광강도의 전압이 V^α, V^β 라면, 다음 식을 정의할 수 있다.

위 식의 비들은 입사광의 강도 I_0 에 영향을 받지 않는다. 그러나

$$\frac{V^\alpha}{V^\beta} = \frac{I_A}{I_B} = \frac{C_A \phi_A \epsilon_A}{C_B \phi_B \epsilon_B} \quad (2)$$

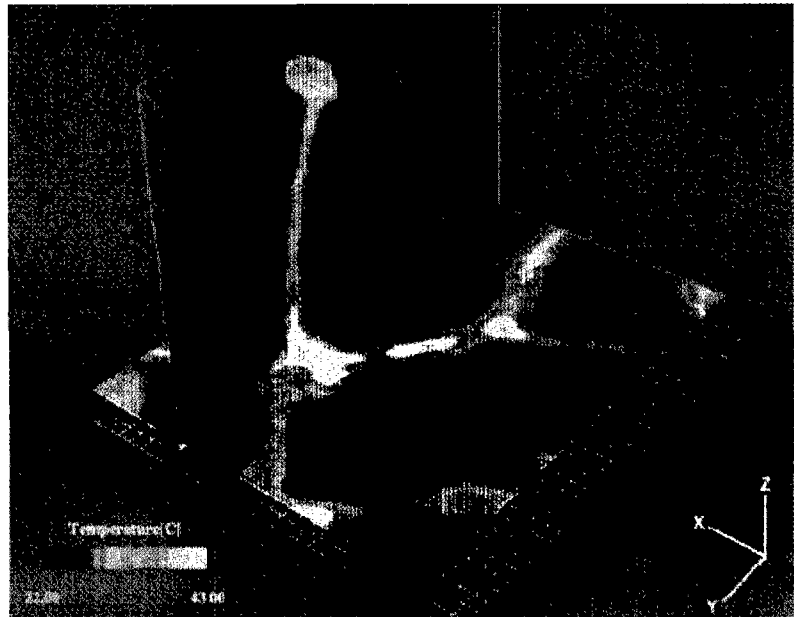


그림 7 두 가지의 염료를 사용하여 LIF기법으로 획득한 3차원 온도장 (Univ. of Illinois, Sakakibara and Andrian, 2000)

$\frac{\phi_A}{\phi_B}$ 에 의해 온도에 영향을 받을 수가 있다. 실제로 두 가지 열료에서 방출되는 파장의 간섭으로부터 생기는 중첩은 I_A 의 굴절이 카메라 β 에 찍히고, I_B 의 굴절이 카메라 α 에 찍힘으로써 I_A 와 I_B 를 완전하게 분리시키지 못하게 한다. 그러므로, V_α 와 V_β 는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$V^\alpha = F_A^\alpha I_A + F_B^\alpha I_B = I_0 (F_A^\alpha C_A \phi_A \epsilon_A + F_B^\alpha C_B \phi_B \epsilon_B) \quad (3a)$$

$$V^\beta = F_A^\beta I_A + F_B^\beta I_B = I_0 (F_A^\beta C_A \phi_A \epsilon_A + F_B^\beta C_B \phi_B \epsilon_B) \quad (3b)$$

여기서, F_A^α 와 F_A^β 는 카메라 α , β 로 들어오는 I_A 을 굴절들인데, 각각 F_B^α , F_B^β 와 같다. 이런 굴절들은 형광열료의 농도를 0으로 만들고 카메라를 사용하여 빛의 강도를 측정하여 측정할 수 있다. Rhodamine B는 온도에 민감하고, 470~600nm의 흡수스펙트럼을 가지고, Argon-ion, Nd-YAG 레이저 등으로 쉽게 여기(Excitation)상태로 만들 수 있기 때문에 온도감응용 형광열료로 사용한다. 온도에 민감하지 않은 열료로 적합하려면, Rhodamine B와 비슷한 흡수파장을 가져야 되지만, Rhodamine B와는 다른 방출파장을 가져야 한다. Xanthene 열료 중 Rhodamine 110은 비슷한 파장 특성($\lambda_{abs}=496\text{nm}$, $\lambda_{em}=520\text{nm}$)을 가지면서 온도에 거의 민감하지 않다(0.13%/K). 그림 7은 두 가지의 열료를 사용하여 자연대류의 3차원 온도장을 측정하는 예를 보여준다.(University of

Illinois, Sakakibara and Adrian, 2000)

향후 전망

컴퓨터와 화상처리기술의 발달은 PIV 속도장 측정기법은 하루가 다르게 발전하게 하고 있다. 이 중에서 가장 급속히 발전하고 있는 분야는 컴퓨터와 CCD카메라 분야이다. 최근 Kodak사에서 개발한 MegaPlus 16.8i 디지털 카메라는 $4K \times 4K$ 의 분해능을 가지고 있어서 일반 필름 카메라의 분해능과 비슷한 수준이다. 고성능 카메라로부터 획득된 영상데이터의 저장을 위해서는 엄청난 기억공간이 요구된다. 앞으로 PC-Cluster를 이용한 슈퍼컴퓨터가 일반화 되면 수백 기가바이트 정도의 데이터도 대용량 데이터 저장장치에 손쉽게 저장할 수 있고, 데이터 처리비용도 크게 내려갈 것이다.

레이저 분야도 그 동안 많이 발전하여 같은 출력을 내면서도 크기를 반으로 줄이고 신뢰성을 크게 향상시킨 제품이 개발되었다. 특히 최근에는 기존의 잡다한 문제점들을 크게 해소시킨 PIV전용의 2-head Nd:Yag laser가 개발되어 PIV속도장 측정 연구에 많이 활용되고 있다. 3차원 유동장을 측정할 수 있는 Holographic PIV용으로 그 동안 주로 사용되어 오던 Rudy laser 대신에 최근에는 저렴하고 제어가 용이하며, 성능이 우수한 Nd:Yag laser제품이 사용되고 있는 추세이고 이 분야의 연구도 빠르게 발

전할 전망이다.

미래기술의 총아로 떠오르는 MEMS 가공기술의 발전으로 Micro-sensor, micro-actuator, micro-channel등과 같은 micro-fluidics들에 대한 연구가 최근 들어 급속도로 늘어나고 있다. 그러나 기존의 측정기법으로는 이와 같은 미소 크기의 micro-fluidics 주위의 복잡한 유동을 제대로 측정할 수 없기 때문에 미소유체의 내부유동 속도장을 측정할 수 있는 micro-PIV 시스템 개발이 필요하다. 이 경우 측정구간(field of view)의 크기가 매우 작기 때문에 CCD 카메라 앞에 높은 배율의 현미경을 부착하여야 한다. 또한 측정구간이 미소하므로 광량이 부족하게 되므로 깨끗한 입자영상을 얻기 위해서는 레이저의 광량을 증가시키거나 저밀도의 광량에도 반응하는 cooled CCD 카메라를 사용하여야 한다. 또한 microfluidics의 크기가 μm 단위이기 때문에 유동의 추적입자들은 나노단위이어야 한다. 나노입자는 벽면에서의 점착력과 응집력이 크고 실제 크기가 CCD 카메라의 센서에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 입자영상의 취득에 특별히 주의하여야 한다. Micro-PIV 시스템은 미래기술과 더불어 지속적인 개발이 요구되는 분야이다.