

< 논문 >

LIF 및 CLSM 을 결합한 미소 간극 내 유체의 단면 온도 분포 측정 기법

정 동 운[†] · 이 상 용^{*}

(2006년 2월 10일 접수, 2006년 6월 19일 심사완료)

Measurement of Cross-sectional Temperature Distribution in Micro-scale Gap Fluid Using LIF Technique in Combination with CLSM

Dong Woon Jeong and Sang Yong Lee

Key Words : LIF(레이저 유도 형광), CLSM(공초점 레이저 주사 현미경), Cross-sectional Temperature Distribution(단면 온도 분포), Micro-scale Gap(미소 간극)

Abstract

In the present work, the Laser-induced Fluorescence (LIF) technique and Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) have been combined to measure the temperature distribution across a micro-scale liquid layer as a direct and non-invasive method. Only the fluorescent light emitted from a very thin volume around a focal plane can be selectively detected, and it enables us to measure the liquid temperatures even at the close vicinity of the walls. As an experimental verification, a test section consists of two flat plates (for heating and cooling, respectively) separated by about 240 microns was made, and the methanol mixed with a temperature-sensitive dye, Rhodamine B, was filled in the gap between them. The measured temperature distribution across the gap showed good linearity, which is a typical characteristic of conduction heat transfer through a thin liquid layer. In result, the CLSM-LIF technique proposed in the present study was found to be a promising method to measure the local temperatures in the liquid flow field in microfluidic devices.

1. 서 론

최근 MEMS 기술의 눈부신 발달과 함께 NT, BT 분야의 적용 가능성을 근거로 미소 유체역학이 주목을 받고 있다. 미소 영역에서는 유체의 단위 체적당 표면적 비율이 비약적으로 증가하므로, 높은 전달 특성에 기인하여 반응 속도의 향상을 기대할 수 있다. 또한 고정도의 미소 유동 제어 및 성능 향상과 함께 제반 비용의 절감 그리고 환경 문제에서의 강점도 기대할 수 있다.

따라서 1990년대 초반부터 연구 개발과 산업화가 빠르게 이루어지고 있는 실정이다.

비교적 최근까지도 미소 유체역학에 대한 대부분의 연구 사례들이 유량 및 압력 손실과 같은 평균 특성만을 측정하는데 머물러 있었다. 최근 Micro-PIV(Particle Image Velocitmetry) 기법의 개발로 미소 영역 내 국소 유속의 정량적 측정이 가능하게 되었다. 이외에도 유동의 상태를 기술하는 주요 변수인 압력, 농도 및 온도를 측정하기 위한 여러 실험 기법들도 고려되고 있다. 특히 농도 및 온도에 관한 비접촉식 측정 기법으로 LIF(Laser-induced Fluorescence)가 높은 관심을 얻고 있다. 형광을 이용한 측정은 작동 유체에 용해된 염료가 농도 및 온도의 변화에 반응하여 방출 형광 신호의 변화를 보이는 특성을 이용한 것으로, 유동장에 전혀 간섭을 일으키지 않는다는

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : d.w.jeong@kaist.ac.kr
TEL : (042) 869-3066 FAX : (042) 869-8207

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

장점을 지닌다.

미소 유동장의 가시화 및 정량적 측정은 대부분 광학 현미경에 의존한다. 현미경은 조명 방향에 따라 투과 또는 낙사 방식으로 나뉘며, 모두 시편의 후방 또는 전방에서 체적 조명의 형태를 띄게 된다. 일부 연구⁽¹⁻³⁾에서 유로의 측면으로부터 매우 얇은 두께의 레이저를 조사한 경우도 있으나, 일반적인 형상의 유체 장치에 적용이 곤란하다. 체적 조명에 의존한 LIF는 초점 심도 내에서 발생한 모든 형광이 결상에 기여하여 위치(광축 깊이 방향)에 따른 정량적 신호로 환산되기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 기존에 이루어진 미소 유동장의 농도 및 온도 측정에 관한 실험적 연구^(4,5)는 유동 단면의 평균 특성만을 살피는데 그쳤다.

본 연구⁽⁶⁾에서는 미소 유동장에 대한 LIF 기법이 갖는 본질적 한계인 체적 조명 방식의 문제를 극복하기 위한 방안으로 공초점 레이저 주사 현미경 기법(Confocal Laser Scanning Microscopy or CLSM)과의 결합을 고려하였다. 이 기법의 광학적 절편 기능을 이용하여 깊이 방향에 따른 정확한 위치 선정이 가능하며, 따라서 유로 단면의 평균이 아닌 3 차원 국소 변수의 측정이 가능함을 보이교자 하였다. CLSM-LIF 기법의 활용 가능성을 검증하기 위하여 약 240 μm 의 미소 간극 양 편에 각각 일정한 온도를 유지할 수 있는 평판을 두고, 얇은 정지 액체층을 통한 전도 현상을 측정하였다. 측정된 온도는 우수한 선형성을 보여 본 기법이 미소 유동장의 국소 온도 측정에 매우 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

2. 관련 이론 및 기존 연구

2.1 LIF

본 절에서는 특히 온도 측정과 관련한 LIF 기법의 기본 원리에 대하여 간략히 기술하였다. 일반적으로 액체에 용해된 염료로부터 방출되는 형광의 강도는 다음과 같다.

$$I = I_0 c \epsilon \phi \quad (1)$$

여기에서 I_0 는 조사광의 강도, c 는 염료의 농도, ϵ 는 흡수 계수, 그리고 ϕ 는 양자 효율을 나타낸다. 일반적으로 온도 변화에 민감한 형광 염료는 대체로 온도 상승에 따라 양자 효율이 낮아지는 특성을 갖는다. 대표적 형광 염료인 Rhodamine B(최대 흡수 파장 = 554 nm, 최대 방출 파장 = 575 nm)는 1도의 온도 상승에 대하여 대략 2.3%

의 양자 효율 감소를 갖는다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 따라서 온도 이외의 변수를 일정하게 유지할 경우, 방출 형광의 강도는 온도만의 함수가 되므로 이를 적절하게 교정하면 2-D 또는 3-D의 온도장 해석이 가능하다.

2.2 CLSM

본 연구는 미소 유체 장치에 대한 기존의 LIF 실험과 다르게 공초점 레이저 주사 현미경을 사용하여 광학적 절편 기능에 따른 깊이 방향 분해능을 확보하는데 주력하였다. 따라서 본 연구에서 얻은 영상은 초점면 주위의 극히 한정된 체적 내부(수 마이크로미터 이내)에서 발생한 형광만이 기여한 것이다. 이러한 2-D 영상 획득을 깊이 방향에 따라 촘촘하게 실시하면 검사 체적 내부의 3-D 온도 구조에 대한 해석도 가능하다.

Fig. 1에 일반적인 공초점 레이저 주사 현미경의 구조를 나타내었다. 형광 염료에 따라 선택된 적절한 파장의 레이저는 광 분리기와 대물렌즈를 거쳐 시편으로 향한다. 이 때 중간 경로에 미세한 움직임의 조절이 가능한 편향 거울을 두어 광경로를 변경시킴으로써, 초점면(x-y 평면) 상의 주사가 가능해진다. 시편에서 발생한 형광은 다시 대물렌즈와 광 분리기 그리고 적절한 파장 대역의 광 필터를 거쳐 수광부로 향하게 된다. 여기까지의 원리는 레이저 광원에 의한 주사 부분을 제외하면 일반적인 광학 현미경과 유사하다. 즉, 체적 조명에 의하여 초점 심도 내의 모든 형광이 결상에 기여할 수 있는 가능성이 존재한다. 그러나, 공초점 레이저 주사 현미경은 공초점면

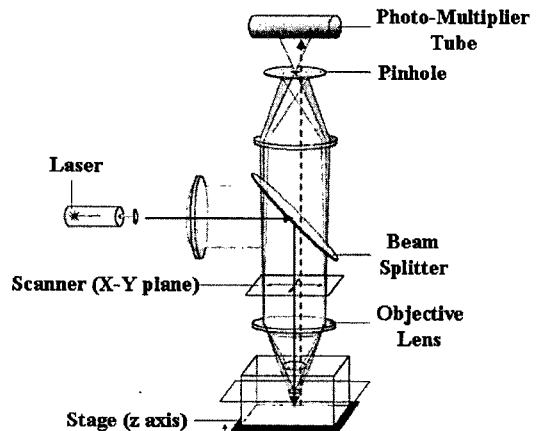


Fig. 1 Principles of CLSM

에 이르러 한 점으로 모이는 형광의 외각 성분(초점면의 전방 또는 후방에서 빛이 모여 공초점면에서는 완전한 초점이 형성되지 못한 성분)을 바늘 구멍(pinhole)을 이용하여 원천적으로 차단한다. 일반적으로 바늘 구멍의 직경은 점 광원의 결상에 있어 회절 한계에 의한 Airy 무늬의 가장 밝은 중심부 원 직경과 유사한 값을 선택한다. 이러한 방법으로 공간적 필터링된 형광은 초점면과 아주 가까운 지점에서만 방출된 신호이며, 이를 LIF에 접목하여 국소 유동장의 온도를 정량적으로 파악하기 위한 시도를 수행하였다. 바늘 구멍을 지난 형광은 매우 미약하여 일반적인 CCD(Charge Coupled Device)보다 감도가 훨씬 높은 광전자 증배관(Photo-Multiplier Tube or PMT)를 이용하여 측정한다. 깊이 방향의 미세 움직임은 대물렌즈를 압전 구동기에 부착하여 조절하며, 본 연구에서 이용한 상업용 공초점 레이저 주사 현미경의 경우, 50 nm 단위 수준의 위치 제어가 가능하였다.

2.3 기존 연구

본 절에서는 미소 유체 장치에 대한 LIF 기법 그리고 공초점 레이저 주사 현미경 및 유사 광학계를 이용한 실험적 시도에 대한 기존의 연구를 간략히 정리하였다.

먼저 한 가지 형광 염료를 이용한 미소 장치 내 유체의 평균 온도 측정은 Ross 등⁽⁴⁾과 Erickson 등⁽⁵⁾에 의해 시도되었다. 이들은 Rhodamine B를 이용하여 동전기(electrokinetic) 펌프 내 유체의 Joule 발열에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

한 가지 형광 염료를 유로 벽면에 코팅하여 벽면 온도를 가시화하는 실험적 연구는 Sato 등⁽⁶⁾과 Jung 등⁽⁹⁾에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 MEMS 공정용 감광제에 염료를 녹여 유로 벽면에 코팅하는 방법을 통해 형광에 의한 벽면 온도 측정을 수행하였다. 코팅 두께, 염료 함량 및 조사광 강도의 국소적 불균일 문제를 해결하기 위하여 획득한 영상을 각 화소 위치 별로 교정하는 것이 특징이다.

한 가지 염료만을 사용하는 경우 필수적인 화소 교정의 번거로움을 피하고자, 온도에 덜 민감한 형광을 추가로 이용한 2 색 형광 기법(2-color ratiometric LIF) 연구도 Kim 등⁽¹⁾과 Kim⁽²⁾에 의해 수행되었다. Rhodamine B와 함께 사용된 Rhodamine 110은 온도에 따라 형광 강도가 거의 변하지 않는 특성을 가지며, 두 형광 신호의 비는 입사광 및 염료 농도 불균일에 의한 국소 형

광 변화와는 이론적으로 무관하다. 그러나, 두 형광을 동시에 기록하지 못하여, 각각 한 대의 CCD와 광 필터를 교환하는 방식으로 순차적 기록을 수행하였다.

Yoon 등⁽³⁾은 매우 얇은(약 5 μm) 평면 레이저 광을 유로 측면에서 조사하고 국소 농도의 측정을 수행하였다. 이 연구는 전술한 LIF 관련 실험적 연구가 대부분 관심 변수의 유로 평균값만을 측정하는데 반하여, 얇은 레이저 광을 이용해 국소 측정을 시도한 것이 특징이다. 그러나 광원이 극히 짧은 거리 이내(수 백 마이크로미터 정도)에서만 균일한 두께를 유지하므로 유로에 매우 가깝게 근접할 필요가 있었다. 따라서 일반적인 미소 유체 장치의 연구에 적용하기는 어려움이 예상된다.

Migler and Bur⁽¹⁰⁾와 Bur and Roth⁽¹¹⁾는 고분자 중합 공정의 온도 모니터링을 위하여 바늘 구멍을 광섬유로 대체한 단일 공초점 광학계를 제작하고 이송을 위하여 마이크로미터와 결합하여 실험을 수행하였다. 그 결과, 수 백 마이크로미터 정도의 광축 방향 분해능을 갖는 온도 측정이 가능함을 입증하였다. 최근 Park 등⁽¹²⁾은 미소 유체 장치에 공초점 레이저 주사 현미경을 적용하여 국소 유속 계측을 위한 Micro-PIV 실험을 수행하였다. 광학적 절편 효과에 의해 매우 얇은 관심 영역 이내의 입자만이 속도 계측에 이용됨으로써 일반적인 현미경을 이용한 실험에 비하여 측정 정밀도가 향상됨을 입증하였다.

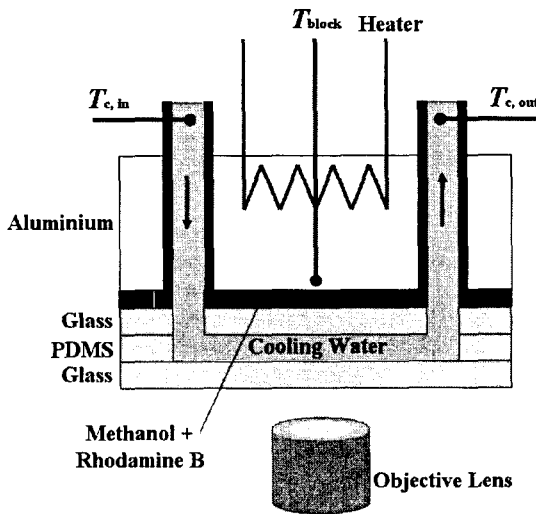
3. 실험 장치, 방법 및 조건

3.1 실험 장치

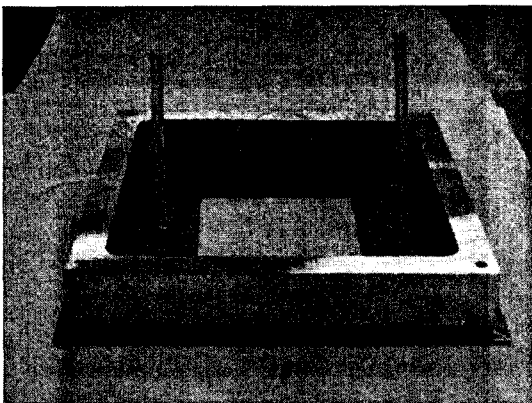
Fig. 2(a)에 미소 간극에 충전된 액체층(Methanol + Rhodamine B)을 통한 전도 열전달 시험부의 개념도를 제시하였다. 본 연구에서 이용한 독립형 공초점 레이저 주사 현미경은 시편 받침대 하단에 위치한 대물렌즈를 통해 위쪽을 관찰하는 구조이다. 따라서 편평한 받침대에 시험부를 두기 위하여 아래면에 돌출부가 없도록 유체의 출, 입구 및 센서 연결부를 모두 상향으로 설계하였다. 액체의 자연 대류를 통한 온도장의 왜곡을 막고자, 미소 간극 상단에 원통형 알루미늄 블록을 두었고, 액체층 바닥면 구조물에 삽입된 채널은 항온 순환조로부터 공급된 일정한 온도의 냉각수를 흘리되, 현미경 관찰을 위하여 투명하게 제작하였다. Fig. 2(b)는 실제 제작된 냉각수 채널의 사진을 나타낸다. 대물렌즈의 작동 거리가 매우 짧은 관계로 대물렌즈와 알루미늄 블

록면 사이의 거리를 약 3 mm 이내로 유지할 필요가 있었다. 따라서 펄초 레이저로 구멍 가공된 박판 유리(Schott, 0.55 mm 와 0.3 mm) 2 장 사이에 PDMS(polydimethylsiloxane) 수지로 얇은(약 0.75 mm) 채널 형상을 제작하였다. 각 박판 유리는 PDMS 평판에 산소 플라즈마 접합하였으며, 최종 냉각수 채널의 두께는 약 1.6 mm로서 액체층의 두께를 포함해도 약 2 mm 를 넘지 않는다. 알루미늄 블록 바닥면에 인접한 K 형 열전대(Omega)와 ON/OFF 제어기를 이용해 더운 면의 온도를 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하였고, 항온

순환조에서 공급된 냉각수는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 범위 이내의 온도로 유지하였다. 냉각수가 채널을 지나는데 동안 상승되는 온도는 약 1°C 이하이다. Fig. 3 은 실험에 사용한 공초점 레이저 주사 현미경의 내부 광 경로를 간략히 도시한 그림이다. 본 그림은 실제 사용된 현미경 내부의 모든 장치의 실제 모습을 나타낸 것은 아니며, 기능의 이해에 필요한 주요 부품의 대략적 위치 및 역할 만을 나타낸다. 현미경 내부로 유입된 특정 파장의 레이저 광선은 광 분리기를 지나 대물렌즈를 거쳐 시험부에 도달한다. 시험부에서 발생한 형광 신호는 다시 대물렌즈와 내부 광학계를 거쳐 튜브 렌즈에 이르게 되어 공초점으로 집광된다. 공간 필터링을 위한 바늘 구멍은 이 공초점에 위치하며, 일반 CCD 를 이용한 가시화를 위해 일시적인 제거도 가능하다. 바늘 구멍을 지난 미약한 형광은 광전자 증배관을 통해 위치에 따른 강도가 기록되며 컴퓨터를 통해 영상으로 기록된다.



(a) Schematic of test section



(b) Transparent cooling water jacket

Fig. 2 Experimental facility

3.2 실험 방법

먼저 미소 간극 내 각 위치(깊이 방향)에 따른 기존 온도에서의 형광 강도를 측정하기 위한 교정 실험을 수행하였다. 다음으로 위, 아래에 온도차를 부과하고 이에 따른 액체층 내 전도를 측정하는 실험을 수행하였다. 교정 실험은 가열 블록과 냉각수 채널의 온도를 동일하게 유지한 다음, 액체층 바닥(냉각면)으로부터 상향으로 일정 간격을 두고 영상을 획득하는 방법을 수행하였다. 그리고 전도 실험은 냉각수 채널에 유입되는 냉각수의 온도를 낮게 유지한채, 가열 블록의 온도만 올리는 방법을 취하였고, 앞서와 마찬가지로 동일한 깊이 위치에서 형광 영상을 얻었다.

3.3 실험 조건

교정 실험 동안, 가열 블록과 냉각수 채널의 평균 온도는 각각 25, 35 그리고 45°C 로 유지하였다. 온도 민감 형광 염료로는 Rhodamine B(Aldrich, 95 wt % 이상 순도)를, 작동 유체로는 Methanol(Merck, 99.6 wt % 이상 순도)을 이용하였고, 용액의 농도는 3.95 mg/liter 로 유지하였다. 형광 여기를 위한 조사 광원은 상업용 도립형 공초점 레이저 주사 현미경(Carl Zeiss, LSM 5 PASCAL)과 함께 공급된 He-Ne 레이저(543 nm, 1 mW)를, 관측용 대물렌즈로는 40 배 공기용(LD Achromat, 작동 거리 = 2.0 mm, 개구수(numerical aperture) = 0.6)을 사용하였다. 공초점 레이저 주사 현미경에 장착된 560 nm 장파장 필터를 거친 형광은 12 bit(4096 단계)의 명암 단계로서 결상되었다. 본 연구에서는 깊이 방향 분해능의 실험적

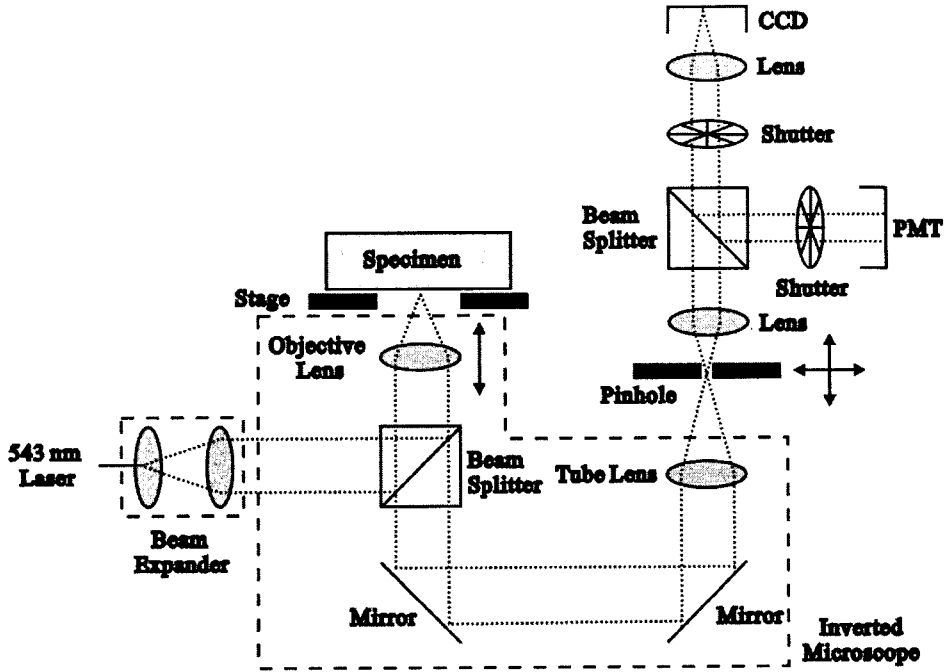


Fig. 3 System configuration of CLSM

검중에 주안을 두고, 각 위치에서 영상 내 모든 화소의 명도 평균값을 12 번 반복 평균하여 온도로 산출하였다. 바늘 구멍의 직경은 약 158 μm 로서, 각 영상은 초점면 인근 약 3.2 μm 이내 두께의 유체로부터 형성된 것이다.

Fig. 4 는 대물렌즈의 공기 내 실제 이송 거리와 액체 영역 내에서의 초점 이동 거리의 관계를 설명하기 위한 그림이다. 공기용 대물렌즈는 공기 매질 내에서 완전한 초점이 형성되지만, 만일 굴절율이 다른 매질이 중간에 존재한다면, 초점의 위치는 경계면에서의 굴절로 인해 공기 중에서 대물렌즈가 실제로 움직인 거리보다 더 많이 움직이게 된다. 이 때 신장율은 두 매질의 굴절율 비 정도의 값을 갖는다. 깊이 방향의 온도 변화 측정은 대물렌즈를 공기 내 총 400 μm 구간에서 매 10 μm 간격으로 상향 이동하여 수행하였다. 이 영역은 정지 액체층 외에도 대물렌즈와 가까운 쪽의 유리 가시화 창 그리고 먼 쪽의 알루미늄 블록 내부를 모두 포함한 것이다. 그 중 초점 체적이 정지 액체층(미소 간극) 내부에 존재하는 영역(형광 신호가 검출된 구간의 길이)은 약 180 μm 정도이다. 따라서 실제 초점의 이동 거리는 액체 내에서 공기(상온)와 Methanol (35 $^{\circ}\text{C}$)의 굴절율 비를 감안할 때 약 240 μm 정도임

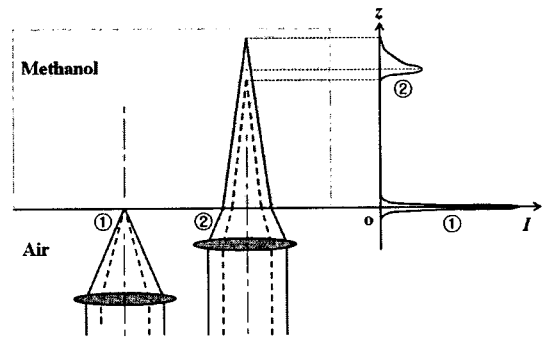


Fig. 4 Spherical aberration due to penetration into refractive index mismatched medium

을 알 수 있다. 2-D 영상의 화소 분해능은 256(가로) \times 256(세로)이었다. 영상은 초점면 상에서 가로, 세로 각각 약 230 μm 의 길이를 나타내며, 한 화소의 길이는 약 0.9 μm 이다.

4. 결과 고찰 및 토의

4.1 결과 고찰

Fig. 5(a)는 25 $^{\circ}\text{C}$ 교정 실험에서 얻은 매 13.23

μm 간격(액체층 내) 측정의 형광 영상과 이를 3-D 로 재구성한 모습을 나타내었다. 경계면 부근에서 형광의 강도가 약해지는 일부 영상을 제외한다면, 액체층 전체에 걸쳐 밝기가 대체로 유지되는(그러나 약간 어두워지는) 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 25(아랫면)-45(윗면) $^{\circ}\text{C}$ 전도 실험에서 얻은 형광 영상과 이를 3-D 로 재구성한 모습을 나타내었다. 바닥면(냉각수 채널) 근처의 형광 영상은 상대적으로 낮은 온도 조건에 의하여 밝고, 윗면(가열 블록) 근처의 형광 영상은 상대적으로 많이 어두워지는 것을 알 수 있다.

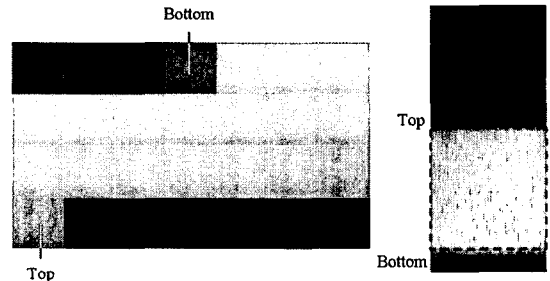
Fig. 6 은 액체층 내 각 깊이 위치에서 온도에 따른 형광 강도의 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이, 교정 실험에서 온도가 높아지면 형광의 전체적인 강도가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 액체층 경계면 부근을 제외한 나머지 영역의 형광은 일정 온도에서도 공통적으로 깊이에 따라서 완만한 감소 경향을 나타낸다. 이러한 일정 온도 조건(깊이 방향의 온도 구배가 없음)에서 관측 깊이의 증가에 따른 형광 강도의 감소는 대략 세 가지 원인에 의한 것으로 여겨진다. 하나는 다층 매질 구조의 굴절을 불일치에 따른 구면 수차(spherical aberration)에 의한 여기 조사광 강도의 감소이고(초점 흐려짐에 의한 광 에너지 분산), 다른 하나는 여기 파장의 조사광이 흡수성 매질(형광 용액)을 오래 통과할 경우(즉 흡수 용액의 질량 농도가 높거나, 투과 길이가 긴 경우)에 나타나는 흡수 현상 때문이며, 마지막으로 방출된 형광의 파장 대역이 염료의 흡수 파장 대역과 일부 겹쳐 나타나는 재흡수 현상을 들 수 있다. Fig. 4 는 특히 본 연구에서 형광 신호 감소의 가장 큰 원인으로 생각하는 구면 수차의 영향을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이, 대물렌즈 본래의 설계 매질 이외에서 발생하는 구면 수차는 투과 깊이에 비례하여 초점을 광축 방향으로 넓게 분산시키고 그 강도를 크게 감소시키는 역할을 한다. 따라서 여기 조사광 강도의 감소는 방출 형광의 감소로 직결된다. 그러나 기타 형광 감소 원인의 정량적 기여에 대한 고찰도 추후 필요하다.

전도 실험에서 얻은 형광의 강도는 매 위치에 따라 25 $^{\circ}\text{C}$ 와 45 $^{\circ}\text{C}$ 교정 결과 사이에 분포하는 것을 알 수 있다. 이를 온도 변화로 환산하기 위하여 매 위치에서 25 $^{\circ}\text{C}$ 조건의 형광 강도로 정규화한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 일정 온도 조건에서 액체층 경계면 부근을 제외하면 깊이 거의 일정함을 알 수 있으며, 전도 실험에서 얻은 형광 신호는 깊이에 따라 전체 온도 영역에

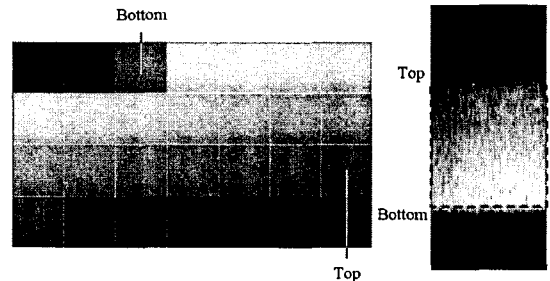
걸쳐 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 전도 실험에 의한 매 위치의 형광 측정 결과를 교정 결과와 비교하여 선형 내삽법으로 산출한 액체층 내부 온도의 변화를 Fig. 8 에 제시하였다. 실험 오차 등에 의해 측정 불확실성이 큰 액체층 경계면 부근(벽면 주위 30-40 마이크로미터 영역)을 제외한다면, 액체층 내부의 온도 변화는 부과된 온도 경계 조건 이내에서 1 차원 전도의 전형적인 특징인 거의 완벽한 선형성을 보인다. 함께 제시한 점선은 온도 측정 결과의 선형성을 강조하기 위하여 제시한 선형 보간 결과이다. 이를 통해 기존의 온도 측정 기법으로는 불가능했던 약 240 μm 미소 간극 내 유체층의 온도 변화를 매 13.23 μm 간격으로 비접촉 측정하는 실험 기법의 가능성을 확인하였다.

4.2 토의

본 실험은 CLSM-LIF 기법의 가능성을 검토하기 위한 예비 단계의 실험으로서, 정상 상태, 전도 경계 조건이 부과된 미소 간극 내 유체의 국소 위치 온도 측정에 적용 가능함을 확인하였다. 그러나 본 기법을 일반적으로 적용하기 위해서 해결이 필요한 몇 가지 문제점도 파악되었다.



(a) Top 25 $^{\circ}\text{C}$, Bottom 25 $^{\circ}\text{C}$



(b) Top 45 $^{\circ}\text{C}$, Bottom 25 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Sample images at every 13.23 μm scanning and cross-sectional variation of fluorescence intensity

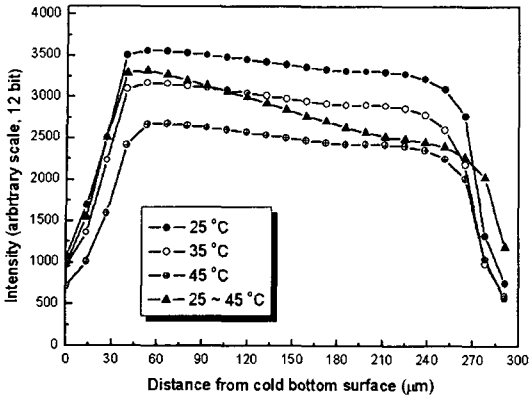


Fig. 6 Raw fluorescence intensity data

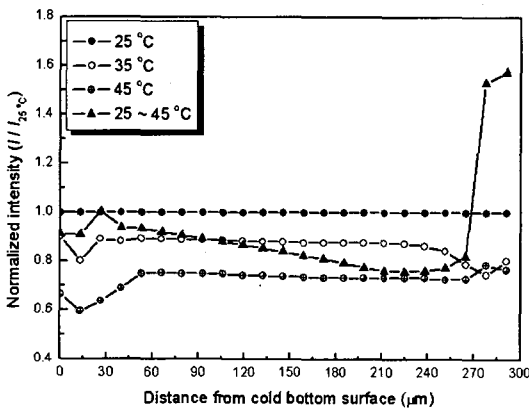


Fig. 7 Normalized fluorescence intensity data

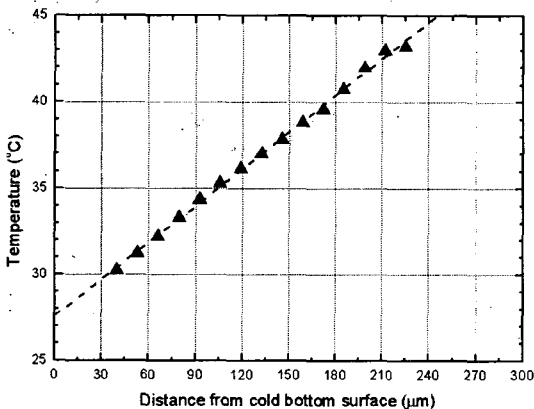


Fig. 8 Measured temperature distribution along the depthwise direction

먼저, 본 연구에서 제작한 실험 장치는 온도 상승에 의한 열팽창 및 압력에 의한 냉각수 채널 구조물의 변형 등을 완전히 억제하지 못하여 실험 조건에 따라 액체층 영역의 위치가 다소 불안

정했음을 밝힌다. 그 결과, 광학적 절편 두께(약 3.2 μm)보다 충분히 긴 13.23 μm 간격의 깊이 방향 영상 획득을 수행했음에도 불구하고, 액체층의 경계면을 정확히 정의할 수 없었으며, 따라서 벽면에 매우 인접한 유체의 온도를 측정하는 것이 불가능하였다. 추후 연구에서는 실험 장치를 보완하여 정확한 경계면 인식을 수행하고자 한다. 본 연구에서는 상업용 공초점 레이저 주사 현미경의 제한된 기능에 따라 초점면 내 순차적 주사에 의해 형광 영상을 획득하였다. 따라서 엄밀하게는 같은 영상 내에서도 각 화소에 따라 측정된 시간이 다르다. 아울러 매 위치에서의 반복 측정 그리고 깊이 방향의 순차적 주사 등에 의해 전체 측정에 소모된 시간이 상당하므로, 과도적 물리 현상의 해석에 적용하기 어려운 단점이 있다. 최근 많은 바늘 구멍이 설치된 디스크의 고속 회전을 이용한 특수 공초점 레이저 주사 현미경도 출시되었으나, 높은 가격에 비해 성능의 개선 효과는 높지 않을 것으로 여겨진다.

또 본 연구에서 이용한 상업용 공초점 레이저 주사 현미경은 매 측정에 단일 광전자 증배판만 활성화되어 한 가지 종류의 형광만 측정이 가능하였다. 따라서 본 실험은 온도 변화에 민감한 단일 염료만을 이용한 것이며, 이를 정량적으로 이용하기 위해서는 조사광 강도와 염료의 농도가 실험 내내 일정해야 했다. 특히 형광 강도의 절대 측정값을 온도로 환산하기 위해서는 조사광 강도의 변화를 감안하여 깊이 위치에 따른 매 측정 면적(초점면) 내 모든 화소에 대한 교정이 필요한 단점이 있다. 결국 측정 위치를 바꾸거나 관측창의 매질 종류 또는 두께가 바뀔 경우, 매번 교정을 수행해야만 한다.

전술한 측정 속도 한계와 외란에 대한 민감성 및 이로 인한 교정의 번거로움은 본 기법의 활용 가능성에 제한 요소가 될 것으로 본다. 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 기존의 연구에서 제안된 2 색 형광 기법과의 접목이 필요하다고 여겨진다. 다만 고속 계측 및 두 형광 신호의 동시 측정을 위해서는 상업용 공초점 레이저 주사 현미경의 기능 제약을 해결해야 한다.

이상에서 실험 장치 자체의 한계에 기인한 문제점을 살펴 보았다. 이와 함께 광학적 기법의 문제점에 따른 보완도 필요하다. 앞에서 설명한 것과 같이, 현미경의 대물렌즈는 원래의 설계 목적에 부합되지 않은 경우, 상당한 구면 수차가 반드시 수반되며, 이는 측정 신호의 급격한 감소 및 오차의 증가로 연결된다. 특히 고배율의 정밀 렌즈일 경우 매질의 굴절을 불일치나 깊은 투과

거리 등에 의한 수차 정도는 더욱 심하게 나타난다. 이를 보완하기 위하여 부가적 광학 장치가 대물렌즈에 설치되어 있으나, 이를 정량적으로 조절하여 측정 정밀도를 향상시키는 보정 기법이 매우 부족한 실정이다. 구면 수차의 예측 및 보정을 위한 광학적 모델 수립 및 검증에 위한 연구는 현재 별도로 진행되고 있다.⁽¹³⁾

이상의 문제점을 개선한다면, 본 연구에서 제안한 CLSM-LIF 기법은 미소 영역의 국소 스칼라량 측정이 필요한 많은 경우에 적용이 가능할 것으로 여겨진다. 예를 들면, 미소 전기 삼투 펌프 내 Joule 발열 해석, 저온 수술 또는 온열 치료 기법 연구를 위한 세포 주위의 열전달 해석, 나노 유체 또는 고분자 박막의 열물성 계측, 미소 교반 장치 내 농도장 계측, 미소 발열 또는 냉각 장치의 열전달 해석 등에 본 기법을 적용할 수 있을 것으로 본다.

5. 결론

유체 내의 국소 위치 온도 및 농도를 측정하기 위하여 LIF 기법이 고려되고 있다. 이 공간 분해능을 비약적으로 향상시키기 위한 방법으로, 공초점 레이저 주사 현미경 활용을 예비적으로 시도하였다. 그 결과, CLSM-LIF 기법을 이용해 미소 간극 내 유체의 3 차원 온도장의 측정이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 미소 유체 장치 내의 국소 열전달 현상을 정량적으로 규명하기 위한 비접촉식 측정 방법으로서 유용할 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 한국과학기술원 기본 연구사업 및 2000 년도 한국학술진흥재단 연구비(KRF-2000-042-E0004)의 일부 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- (1) Kim, H. J., Kihm, K. D. and Allen, J. S., 2003, "Examination of Ratiometric Laser Induced Fluorescence Thermometry for Microscale Spatial Measurement Resolution," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3967~3974.
- (2) Kim, H. J., 2005, "Measurements of Temperature and Flow Fields with Sub-millimeter Spatial Resolution Using Two-color Laser Induced Fluorescence(LIF) and Micro-Particle Image Velocimetry(PIV)," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 716~727.
- (3) Yoon, S. Y., Kim, J. M., Kim, S. H. and Kim, K. C., 2004, "Micro-LIF Measurements in a Micro-channel Using a Micro Laser Light Sheet," *Proc. KSME Fall Annual Meeting*, pp. 1540~1545.
- (4) Ross, D., Gaitan, M. and Locascio, L. E., 2001, "Temperature Measurement in Microfluidic Systems Using a Temperature-dependent Fluorescent Dye," *Analytical Chemistry*, Vol. 73, pp. 4117~4123.
- (5) Erickson, D., Sinton, D. and Li, D., 2003, "Joule Heating and Heat Transfer in Poly(Dimethylsiloxane) Microfluidic Systems," *Lab on a Chip*, Vol. 3, pp. 141~149.
- (6) Jeong, D. W. and Lee, S. Y., 2005, "Measurement of Cross-sectional Temperature Distribution in Micro-scale Gap Fluid Using LIF Technique in Combination with CLSM," *Proc. KSME Spring Annual Meeting*, pp. 2589~2594.
- (7) Sakakibara, J. and Adrian, R. J., 1999, "Whole Field Measurement of Temperature in Water Using Two-color Laser Induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol. 26, pp. 7~15.
- (8) Sato, Y., Irisawa, G., Ishizuka, M., Hishida, K. and Maeda, M., 2003, "Visualization of Convective Mixing in Microchannel by Fluorescence Imaging," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 114~121.
- (9) Jung, W., Kim, S., Kim, H-Y. and Yoo, J. Y., 2004, "Surface Temperature Measurements in Microscale with Temperature Sensitive Fluorescence," *Proc. KSME Fall Annual Meeting*, pp. 1225~1230.
- (10) Migler, K. B. and Bur, A. J., 1998, "Fluorescence Based Measurement of Temperature Profiles During Polymer Processing," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 213~221.
- (11) Bur, A. J. and Roth, S. C., 2004, "Temperature Gradients in the Channels of a Single-screw Extruder," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 44, No. 11, pp. 2148~2157.
- (12) Park, J. S., Choi, C. K. and Kihm, K. D., 2004, "Optically Sliced Micro-PIV Using Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM)," *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 105~119.
- (13) Jeong, D. W. and Lee, S. Y., 2006, "Correction of Spherical Aberration by Refractive-index Mismatch in Multi-layer Medium in Using Confocal-LIF Technique," *Proc. KSME Spring Annual Meeting*, pp. 2241~2246.