

전자 스페클 패턴 간섭법을 이용한 반경방향 대칭 유체의 정량적 가시화 및 물성치 측정에 관한 연구

강영준[†] · 채희창* · 김경석**
(2000년 5월 6일 접수, 2001년 12월 7일 심사완료)

A Study on Quantitative Visualization and Measurement of Physical Properties of Radial Symmetric Fluids Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

Young-June Kang, Hee-Chang Chae and Koung-Suk Kim

Key Words: Radial Symmetric Fluid(반경방향 대칭유체), Visualization(가시화), Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자 스페클 패턴 간섭법), Physical Property(물성치), Refractive Index(굴절률), Mass Density(밀도), Temperature(온도)

Abstract

It is very important to measure and visualize the changes in the physical properties of fluid flow because this is the foundation of measurement techniques used in aerodynamics, heat transfer, plasma diagnostics, and stress analysis of transparent models. The optical methods are advantageous over probe-based techniques in the optical methods are of high speed, non-contact and are capable of providing full-field results with high spatial resolution. Therefore we propose the electronic speckle pattern interferometry(ESPI) that gives us a solution to overcome those limitations. In this paper the experimental results show qualitative and quantitative visualization of changes in the physical properties of the candle and alcohol lamp with 3D plotting. And we obtained the refractive index, mass density and temperature distribution of fluids. The results clearly show the process of flow phenomena and give the feasibility of quantitative interpretation of gasdynamics.

1. 서 론

원자력 산업을 비롯한 많은 산업분야에서 유체의 흐름을 이해하는 것은 중요하다. 특히, 유체의 역학적인 특성을 고려한 항공기나 자동차 산업에서 새로운 모델의 고안을 위해서 유체의 흐름을

가시화하고 유동을 해석하는 것은 대단히 중요한 일이다. 현재까지 유체의 유동현상을 가시화하기 위해서 사용되었던 일반적인 방법에는 새도우 그래프(Shadowgraph)와 슐리렌 방법(Schlieren method)⁽¹⁾ 마하젠더 간섭법(Mach-Zehnder Interferometry)과 홀로그래피 간섭법(Holography Interferometry)⁽²⁻⁵⁾을 이용한 광학적 방법 등이 있었으나, 새도우 그래프나 슐리렌 방법은 실험 데이터의 정량화가 어렵고, 마하젠더 간섭법은 사용하는 광학요소(optical elements)와 관측창(window)의 질에 민감하고 균일성에 크게 의존하여 실용화에 많은 제약이 따르며 홀로그래피 간섭법은 매번 필름의 현상처리 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있다.

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 메카트로닉스 연구센터

E-mail : yjkang@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2453 FAX : (063)270-2460

* 전북대학교 기계항공시스템공학부

** 회원, 조선대학교 기계설계학과

초기의 유동장 가시화 연구를 살펴보면 아르곤 가스를 통과하는 탄환(bullet) 주위의 유동 변화를 홀로그래피를 이용하여 짧은 시간동안 두 번의 노출을 주어서 순간의 유동현상을 가시화 한 것⁽⁶⁾과 램프나 토치(torch) 등을 가시화 한 것⁽⁶⁾이 있으며 근래에 들어서는 가시화 된 정보의 정량적 해석에 초점을 맞추고 있다. 따라서 본 연구에서는 가시화 된 정보의 정량화가 가능하고 사용하는 광학요소나 매질에 거의 영향을 받지 않을 뿐만 아니라, CCD 카메라와 화상처리시스템을 이용하여 한번에 간섭패턴을 얻어 낼 수 있는 장점을 가진 전자스펙클 패턴 간섭법^(7,8)(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)을 사용하여 본 연구를 수행하였다. 굴절률의 변화가 반경방향으로 대칭인 촛불이나 알콜램프의 유동장 변화를 화상모니터를 통하여 간섭무늬 형태로 실시간적인 가시화 작업을 수행하였고, 가시화 된 정보를 위상이동장치인 PZT(piezoelectric transducer)를 이용하여 유체에 관한 물성치의 정량화 및 3차원 가시화 과정에 유동의 대칭성을 고려한 유체역학적 관계식을 적용하였다. 정량화 및 3차원 가시화 작업을 수행한 유체의 물성치는 굴절률, 밀도 및 온도이다.

2. 적용이론

Fig. 1과 같은 매질을 통과하는 광선의 광로길이(optical path length)는 식 (1)과 같이 표현되고 광선을 따르는 굴절률의 경로 적분이라 할 수 있다. n 은 굴절률을 나타낸다.

$$\Phi = \int n \, ds \quad (1)$$

Fig. 1에서와 같이 광로의 축을 z 축으로 하면 $ds \approx dz$ 이므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi(x, y) = \int n(x, y, z) \, dz \quad (2)$$

불꽃점화 전의 굴절률 분포는 균일하게 n_0 라 할 때, 광로차는 다음식과 같이 나타난다.

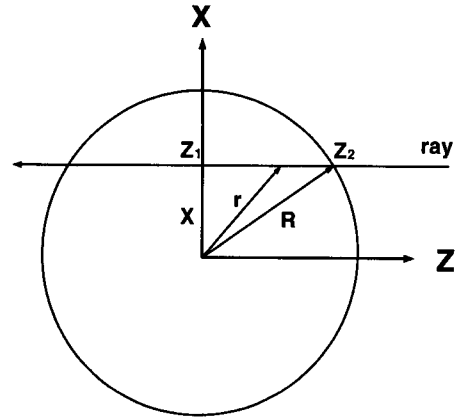


Fig. 1 Radial symmetric object

$$\Delta\Phi(x, y) = \int [n(x, y, z) - n_0] \, dz \quad (3)$$

중심에서 x 만큼 떨어진 곳을 지나는 광선의 광로차는 다음 식과 같다.

$$\Delta\Phi(x, y) = \int_{z_1}^{z_2} [n(x, y, z) - n_0] \, dz \times 2 \quad (4)$$

굴절률 n 을 r 에 관한 식으로 변환하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(x, y) &= \int_x^R [n(x, y, z) - n_0] \\ &\quad \times 2 \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \, dr \\ &= 2 \int_x^R \frac{[n(r) - n_0] r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \, dr \end{aligned} \quad (5)$$

위상에 관한 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta\Phi(x, y) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \int_x^R \frac{[n(r) - n_0] r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \, dr \end{aligned} \quad (6)$$

$[n(r) - n_0]$ 을 구하기 위해 식 (6)은 다음과 같이 정리될 수 있으며,

$$\psi(x, y) \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = 2 \int_x^R \frac{[n(r) - n_0] r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr \quad (7)$$

위와 같이 정리된 식 (7)은 $[n(r) - n_0]$ 의 Inverse Abel transform의 형태이다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} [n(r) - n_0] &= -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{\{\psi(x, y) \cdot \frac{\lambda}{2\pi}\} dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \quad (8) \\ &= -\frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^\infty \frac{\psi'(x, y) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \end{aligned}$$

$$n(r) = n_0 - \frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^\infty \frac{d\psi(x, y)}{dx} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad (9)$$

이 식을 화상처리에 적용시킬 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n(r) = n_0 - \frac{\lambda}{2\pi^2} \sum_{x=r+1}^\infty \psi'(x, y) \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 - r^2}} \quad (10)$$

여기서, n_0 는 화염이 없는 상태의 굴절률, 즉 공기의 굴절률을 나타낸다. 또한 $\psi'(x, y)$ 를 구하기 위해 다음과 같은 과정을 갖는다.

① 간섭무늬와 PZT를 이용한 위상 추출 알고리즘을 통해 gray level 값(phase unwrapping)으로 표현되는 위상정보 획득한다.

② scaling factor를 이용하여 실제 위상값 $\psi(x, y)$ 으로 환산한다.

$$\text{gray level}(0 \sim 255) \times \text{scaling factor}(\mu\text{m}/\text{step}) \times \frac{2\pi}{\lambda(nm)} + C$$

$$\textcircled{3} \psi'(x, y) = \frac{d\psi}{dx} = \frac{\psi(x + \frac{d}{2}) - \psi(x - \frac{d}{2})}{d} \quad (11)$$

여기서 d 는 이동량이다.

이 세 단계의 과정을 통해 이미지 화상의 모든 위치에서의 기울기 값을 한 번에 얻을 수 있다.

또한 위 식에서 사용한 Abel transform은 다음과 같이 정의 된다.

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int G(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (12)$$

식 (12)에서 $g(x, y)$ 는 진폭이 $G(f_x, f_y)$ 인 연속

적인 사인파의 합으로 표시 될 수 있는데, $G(f_x, f_y)$ 를 $g(x, y)$ 의 Fourier transform이라 한다. Fourier transform의 1차원적 적용이 Abel transform이다.

함수 $f(r)$ 의 Abel transform $f_A(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f_A(x) = 2 \int_x^\infty \frac{f(r) r dr}{(x^2 - r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

또한, Abel transform의 Inverse transform은 다음과 같이 표현된다.

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{f_A(x) dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

최종적으로 얻은 식을 프로그램에 의해 처리해서 원형 축대칭 유체의 굴절률을 반경 r 에 관한 분포로 획득할 수 있다.

이렇게 획득한 데이터를 굴절률 분포와 관계가 있는 Gladstone-Dale 방정식⁽¹⁰⁾에 적용하여 단위 체적당 질량, 즉 밀도를 구하는 식으로 변환하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$n - 1 = K\rho \rightarrow \rho(r) = \rho_0 + \frac{f(r)}{K} \quad (15)$$

여기서, K 는 Gladstone-Dale 상수로서 온도와 압력에 거의 독립적이며 광선의 파장에 관계하는 상수이다. 또한 ρ_0 는 실험물체로부터 상당히 멀리 떨어진 곳(대기상태)에서의 밀도이다.

그리고 $f(r)$ 은 다음 식과 같이 정의된다.

$$f(r) = n(r) - n_0 \quad (16)$$

앞에서 구한 굴절률 분포값과 K , ρ_0 에 대한 자료를 참고, 적용⁽¹⁰⁾하여 유체내의 밀도분포를 구할 수 있다. 그리고, 이렇게 구한 밀도분포와 이상기체의 상태방정식을 이용하여 온도분포를 구하게 된다.

$$Pv = RT \quad (17)$$

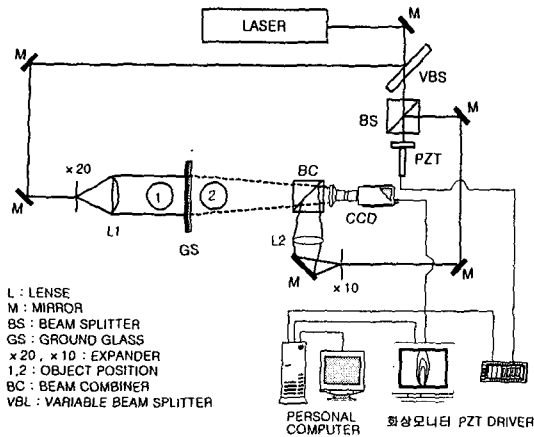


Fig. 2 Schematic diagram of electronic speckle pattern interferometry

$$T = \frac{Pv}{R} = \frac{R [N/m^2]}{\rho(\gamma) R [kg/m^3] \times [Nm/kgK]} \quad (18)$$

알콜의 경우 거의 완전연소가 가능한데, 이때 조성비는 이산화탄소가 14.3%, 질소가 84.6%임을 적용한 기체상수 값을 구해서 상태방정식에 적용시킨다.⁽¹¹⁾

3. 실험

3.1 광학계의 구성

실험에서 구성한 광학계는 Fig. 2와 같다. 본 광학계는 1.5m×3m 면적의 진동방지용 광학 테이블 위에 구성되었다. 광원은 파장이 532nm인 Nd-YAG 레이저(COHERENT사의 DPSS532)를 사용하였으며, 실험시의 출력은 100mW 정도였다. 발진된 레이저는 광분할기(beam splitter)를 통하여 두 개의 빔으로 나뉘는데 하나는 측정물체를 투과하여 물체의 변형 위상정보를 지닌 물체빔이며 또 다른 하나의 빔은 측정물체를 투과하지 않고 CCD카메라에 직접 조사되어 물체빔의 상대적인 기준이 되도록 하는 기준빔이다. 기준빔은 빔 확대기(expander)로 확산시킨 후 직경 25mm, 초점 거리 26mm의 렌즈와 빔 합성기(beam combiner)를 통하여 CCD 카메라에 결상하도록 하고, 물체빔은 직경 60mm, 초점 거리 300mm인 collimating 렌즈를 통하여 시준빔(collimated beam)이 형성하

도록 했으며, 그 후 확산판(ground glass)을 통하여 균일하게 투과되도록 한 후 빔 합성기를 통하여 CCD 카메라에 결상하도록 했다.

여기서, 물체가 각각 확산판의 전후, 즉 ①과 ②의 위치에 있을 때 각각 스펙클 패턴 형성에 영향을 미칠 수 있는지에 대해서도 비교해 보았으며 이때, 광학계의 모든 구성 및 CCD를 비롯한 화상처리 장치의 제반 입력값도 같도록 하였다.

측정물체는 확산판을 전후로 각각 8cm 거리에 위치하도록 했고, 기준빔과 물체빔의 간섭현상에 의해 생기는 빔의 세기는 CCD카메라를 통하여 밝기 정보(grey level)로 획득되도록 하였다. 먼저 측정물체가 없는 상태에서 기준빔과 물체빔에 의해 형성된 빔의 세기정보를 갖는 화상 프레임을 저장하고, 측정물체를 실험장치에 위치시킨 뒤 기준빔과 물체빔에 의해 형성된 화상 프레임을 저장하여 이 두 화상 프레임간의 감산연산을 수행하게 되면 유체의 유동분포가 간섭무늬 형태로 화상 모니터 상에 실시간적으로 가시화 되도록 했다. 또, 위상이동 장치인 PZT를 이용하여 위상정보를 0에서 255의 밝기 정보로 정량적으로 나타내주었고 이 위상 정보와 관련된 유체역학식을 적용하여 굴절률과 밀도분포 및 온도분포를 구하여 3차원적으로 가시화하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 물체의 위치에 대한 간섭패턴 형성 비교

Fig. 3은 물체의 위치에 대한 영향을 알아보기 위한 그림이다.⁽¹²⁾ Fig. 3(a)는 물체가 관찰자쪽에 위치하면 빔이 확산판을 거쳐 물체를 통과하게 되고 Fig. 3(b)는 물체가 광조사쪽에 위치할 때는 빔이 물체를 통과한 후 확산판을 거쳐 바로 CCD상으로 들어가도록 되어 있다. Fig. 3(a)의 경우 원추의 끝을 잘라 놓은 듯한 부분에서 일어나는 굴절률의 변화로 인해서 간섭패턴의 형성과 콘트라스트(contrast)에 영향을 줄 것으로 보이지만, 실험을 통해 획득한 간섭무늬 패턴을 비교해 보면 그 영향이 아주 경미하다. 렌즈에서 확산판까지의 거리가 물체의 지름에 비해 상대적으로 컸던

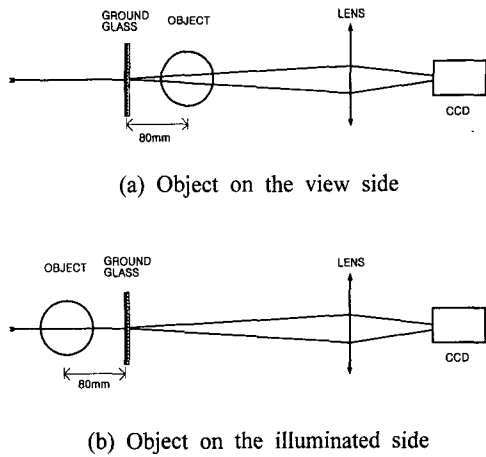


Fig. 3 Object position effect

이유도 있지만 모든 광학 요소들의 조건을 같게 놓은 상태로 실험을 수행한 결과를 볼 때 물체의 위치가 간섭무늬의 형성 및 콘트라스트에는 그다지 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

4.2 촛불과 알콜 램프의 가시화

Fig. 4와 Fig. 5는 촛불과 알콜 램프에 대하여 유동장의 가시화와 PZT를 이용하여 위상분포의 정량적 분석을 수행한 결과이다. Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)는 불꽃이 없는 기준상태와 불꽃이 있는 비교상태를 화상처리 프로그램을 이용해서 실시간적으로 빼주는 과정을 통해 화상모니터에서 간섭패턴의 변화를 가시화 한 것이고, Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)는 PZT를 이용한 상대적 위상차를 이용하여 위상도(phase map)를 구한 것이다.

불꽃의 경계부분으로 갈수록 간섭무늬가 조밀하고 불꽃의 내부쪽은 간섭무늬가 별로 없음을 알 수 있는데, 이를 통해 굴절률, 밀도, 온도분포에서 불꽃의 경계쪽은 구배(gradient)가 크고, 내부는 구배가 적다는 것을 알 수 있다. 이것은 또한 실제로 구한 분포에서의 구배정도와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

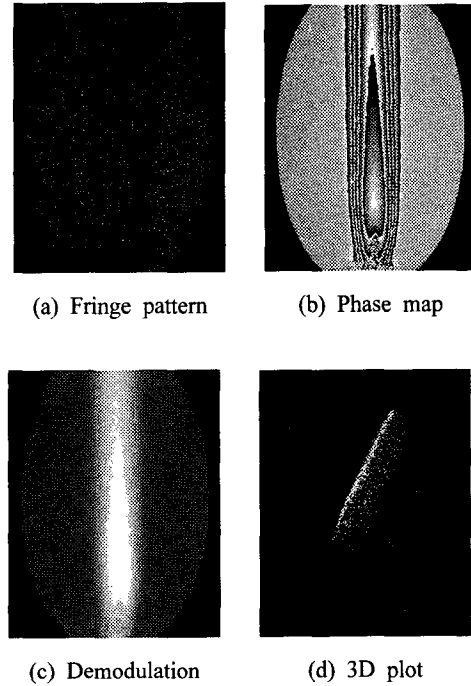


Fig. 4 Visualization of candle

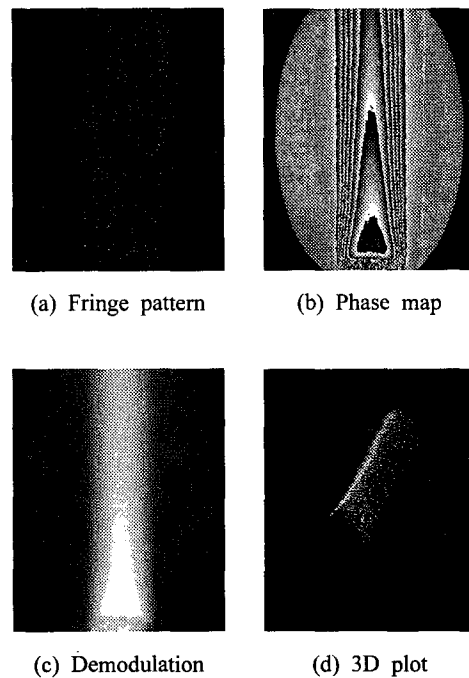
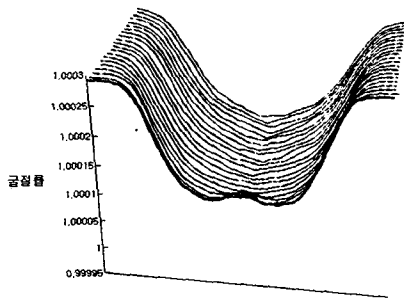
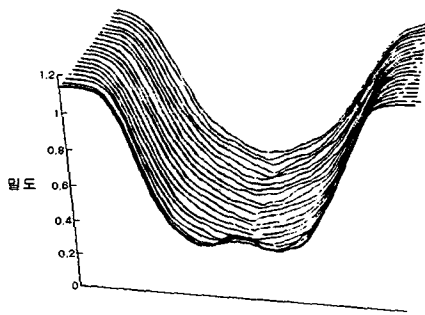


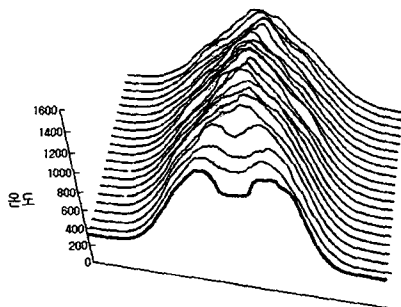
Fig. 5 Visualization of alcohol lamp



(a) Refractive index distribution



(b) Density distribution



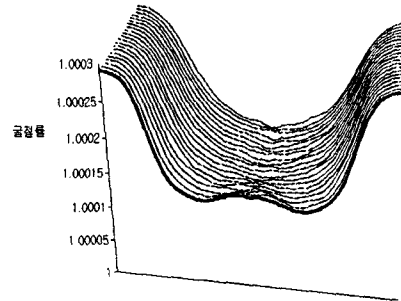
(c) Temperature distribution

Fig. 6 Physical properties distribution of candle

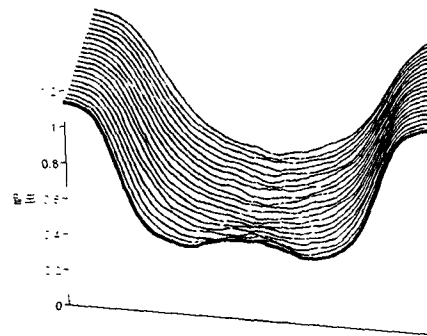
Fig. 4(c)와 Fig. 5(c)는 위상펼침(demodulation)을 한 그림이며, Fig. 4(d)와 Fig. 5(d)는 3차원적인 분포를 정량적으로 나타낸 것이다.⁽¹³⁾

4.3 굴절률, 밀도 및 온도분포

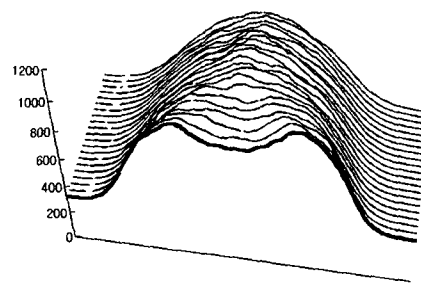
위상분포와 관계식을 이용하여 각각의 물리량의 정량적 해석을 수행한 결과가 Fig. 6과 Fig. 7



(a) Refractive index distribution



(b) Density distribution



(c) Temperature distribution

Fig. 7 Physical properties distribution of alcohol lamp

에 나타나 있다. 결과는 512×512 화상 중 불꽃의 밀부분을 기준으로 200pixel까지의 부분을 10pixel 간격으로 분포한 것으로, Fig. 6에서 가로축은 불꽃의 반경, 세로축은 각 물성치를 나타낸다.

전체 분포를 살펴볼 때 Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)는

굴절률분포를 나타내고, Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)는 밀도분포를 나타낸다.

굴절률 분포와 밀도분포는 불꽃의 내부로 갈수록 W자 형태로 감소함을 알 수 있고, 또한 Fig. 6(c)와 Fig. 7(c)에서 온도분포는 M자 형태로 증가함을 알 수 있었다.

또한, Fig. 4(c)와 Fig. 5(c)의 위상분포는 분포양상이 굴절률, 밀도, 온도분포와 비교했을 때 조금 다른데, 이는 위상분포 자체가 이런 물리량의 분포를 나타내는 것은 아님을 나타내는 결과이다. 또한 본 연구방법에 의해서 구해진 온도분포는 적외선 투시법과 열전대(thermocouple)에 의한 측정이 표면온도 측정과 센서 부위의 국부적인 온도 측정이라는 점을 생각 할 때 본 방법은 탁월한 방법이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 실험에서는 전자 스펙클 패턴 간섭계를 이용하여 촛불과 알콜 램프와 같은 반경방향 대칭인 유체의 흐름을 전면적으로 가시화 하였고, 위상이동 장치인 PZT를 이용하여 정량적 해석을 수행하였다.

획득한 위상정보와 유체역학적 관계식을 이용하여 촛불과 알콜 램프의 불꽃 유동에서의 굴절률, 밀도분포를 정량적 물리량으로 구하고 3차원적으로 전면적으로 가시화 하였다. 여기에 상태 방정식을 적용하여 온도분포를 구하였으며 온도 분포를 더 정확하게 정량적으로 추출할 수 있는 가능성도 확인하였다. 따라서 기존의 센서에 의한 측정방법은 점단위 측정으로 측정시간이 오래 걸리고, 국부적인 측정을 할 수 밖에 없다. 또한 센서에 의한 유체의 흐름을 방해함으로써 정확한 실험결과를 얻기가 힘들다. 반면에 전자 스펙클 패턴 간섭법은 유체의 흐름을 가시화하고 정량화 하기에 보다 유용한 방법으로 전체적으로 측정이 가능하며, 측정시간을 단축할 수 있다. 비접촉식 방법으로 유체의 흐름을 방해하지 않아 보다 정확한 실험결과를 얻을 수 있다.

응용분야로서는 로켓(rocket)의 연소 베기, 제트(jet)엔진과 로켓 엔진의 연소실, 석탄 및 석유 화로의 발화과 그 불꽃의 전달과 같은 부분의

응용연구와 유체역학의 연구에 많은 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.^(13,14)

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-042-E00009)

참고문헌

- (1) Giglio, M., Musazzi, W. and Perini, U, 1981, "A White Light Speckle Schlieren Technique," *Optics Communications*, Vol. 36, No. 2, pp. 117~120.
- (2) Takayama, K., Itoh, K., Onodera, O. and Ojima, H, 1988, "Holographic Interferometric Study of Shock Wave Propagation," *Proceedings of SPIE*, Vol. 1032, p. 389.
- (3) Takayama, K., Obara, T. and Onodra, O., 1988, *Proceedings of SPIE*, Vol. 1358, p. 1180.
- (4) Takayama, K., Izumi, M., Itoh, K. and Sugiyama, H, 1988, "Holographic Interferometric Observation of Shock Tube Flows," *Proceedings of SPIE*, Vol. 981, p. 281.
- (5) Cullis, I. C., Parker, R. J. and Sewell, D, 1990, "Holographic Visualization of Hypervelocity Explosive Events," *Proceedings of SPIE*, Vol. 1358, p. 52.
- (6) Heflinger, L. O., Wuerker, R. F. and Brooks, R. E, 1965, "Holographic Interferometry," TRW Systems.
- (7) Kim, K. S., Jung, H. C., Kang, K.S.,Kang.Y.J, 1999, "Experimental Analysis of Vibration Mode of Plate Using ESPI," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 10, pp. 677~686.
- (8) Racca R. G. and Dewey, J. M, 1990, "Optics & Laser Technology," Vol. 22, p. 199.
- (9) Bracewell, R, 1978, "The Fourier Transform and Its Applications," McGraw Hill, New York, pp. 262~266.
- (10) Vest, C. M, 1978, *Holographic Interferometry*, John Wiley & Son, New York, pp. 344~347.
- (11) 허라오사수, 1982, "알콜연료의 문제(3)," p. 126.

- (12) Dupont, O., Dewandel, J. L. and Legros, J.C, 1995, "Use of Electronic Speckle Pattern Interferometry for Temperature Distribution Measurements Through Liquids," *Optics Letters*, Vol. 20, No. 17, pp. 1824~1826.
- (13) Tieng, S. M., Lin, C. C., Wang Y. C. and Fujiwara, 1966, "Effect of Composition Distribution on Holographic Temperature Measurement of a Diffuse Flame," *Meas. Sci. Technol*, Vol. 7, pp. 477~488.
- (14) Philbert M. and Surget, J., 1966, "Application de L'interferometrieen Soufflerie," *Rech. Aerosp.*, No. 122, p. 55.