

홀로그래피/스페클 가시화를 이용한 온도분포 측정

Measurement of Temperature Field using Holographic and Speckle Visualization Techniques

백성훈, 박승규, 김철중 (한국원자력연구소)

Sung-Hoon Baik, Seung-Kyu Park, Cheol-Jung Kim (Korea Atomic Energy Research Institute)

Abstract

The real-time holographic interferometer with a digital high-speed camera is applied to the visualization of transient temperature field. Collimated and diffused laser beams are used to the object beam according to the shape and transmittance of the phase object. Also, ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometer) technique is used to the visualization and quantitative measurement of slow-varying temperature field. The experimental results obtained from these two techniques are discussed.

Key Words : holography(홀로그래피), speckle(스페클), interferometer(간섭계), ESPI(전자스페클간섭계), visualization(가시화), high-speed camera(고속카메라), temperature field(온도장)

1. 서 론

투명유동물체에서의 온도나 압력의 변화는 일반적인 영상장치로는 보이지 않으며, 접촉식으로 측정이 어렵워서 광학적인 방법이 많이 사용되고 있다. 이런 목적으로 사용되는 광학계측 기술로는 홀로그래피 간섭계, Mach-Zehnder 간섭계, Schlieren 및 Shadow-Graph 등이 있다. 홀로그래피 간섭계는 정량적인 해석이 가능하고, 사용되는 광학부품이나 매질의 영향을 거의 받지 않는다는 장점을 가지고 있어, 실험이 복잡하다는 단점에도 불구하고 많이 사용되는 방법이다.

홀로그래피 간섭계를 사용한 유동현상의 가시화(visualization)는 1960년대부터 시작되어⁽¹⁾, 전구⁽²⁾, 불꽃의 온도 측정⁽³⁾에 계속적으로 사용되어 왔다. 또한 홀로그래피의 단점인 복잡한 화학적 처리를 대폭 없엔 ESPI(전자 스페클 패턴 간섭계 ; Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 유동 및 온도분포의 측정에 사용하고자 하는 연구도 계속적으로 이루어지고 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 시준빔(collimated beam)과 산란빔(diffused beam)을 사용하는 유동물체용 홀로그래피 간섭계와 ESPI 장치를 구성하고, 전구와 불꽃의 온

도분포 측정실험에 적용하였다. 영상획득 장치로 고속카메라를 사용하여 온도의 시간에 따른 전파를 측정하였고, CCD camera 와 3-frame 위상이동 방식을 적용하여 정량적으로 분석할 수 있었다.

2. 실험장치 구성

전구의 온도장 분포 측정을 위한 Diffused object 빔을 사용하는 실시간 홀로그래피 간섭계의 구성도는 그림1과 같다. 레이저는 5 W rmq의 Ar-ion 레이저(Spectra-Physics 2025) 514.5nm 단일파장에서 200-300mW 의 출력을 사용하였다. 레이저에서 나온 빛은 빔분할기를 거치면서 직접 홀로그램으로 입사되는 기준빔(reference beam)과 물체로 가는 물체빔(object beam)으로 나뉜다. 기준빔의 경로에는 PZT가 장착된 거울을 넣음으로써 위상이동 방법의 전산처리를 할 수 있게 하였다.

열 및 유동의 가시화를 위한 실시간 홀로그래피 장치에서 물체빔은 시준빔(collimated beam) 또는 산란빔(diffused beam)을 사용하는데, 전구의 경우 시준빔을 사용하면 광경로의 휘어짐이 너무 커서 그림 1과 같이 diffuser을 이용한 산란빔을 사용하는 구성을 택하였다. 홀로그램 앞에는 $\varphi 3''$ 거울과

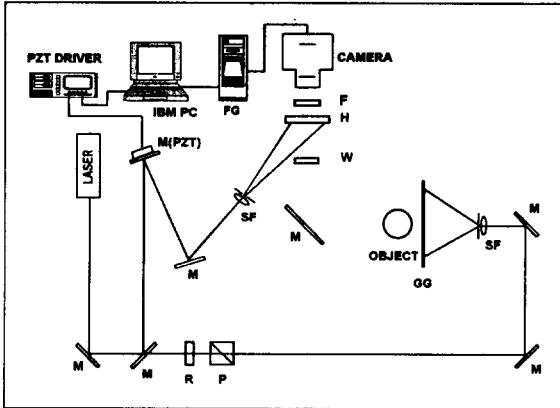


그림 1. 산란 물체빔을 사용하는 실시간 홀로그래피 간섭계 구성도

optical wedge를 넣어 초기 간섭무늬조절(fringe localization)에 사용하였다. 초기상태를 기록한 홀로그램을 현상 후에 제자리에 넣고 재생하면 홀로그램에 기록된 물체의 상태와 현재 있는 물체의 상태의 차이가 간섭무늬의 형태로 나타나게 된다. 이 간섭무늬를 홀로그램 뒤에 있는 카메라로 받아서 처리하게 되는데, 전구에 불을 켜 경우 전구에서 나오는 빛은 노이즈로 작용하게 되로 카메라 앞에는 레이저 광장만을 통과시키는 bandpass filter를 장치하였다.

홀로그램은 Ilford SP-695T 4x5" plate를 Kodak D-19 현상액과 Ilford SP-679C holographic bleach로 표백처리하여 회절효율을 높였으며, 레이저 조사시의 노출은 150 erg/cm² 이다. 홀로그램 재생시 홀로그램에서 회절되어 나오는 빛의 세기와 실제 물체에서 오는 빛의 세기가 다르면 간섭무늬의 가시도 (visibility)를 저하시키므로 이를 조절하기 위해 물체빔의 경로에 half-wave plate와 선형 편광자를 사용하여 물체빔의 세기를 조절하였다.

간섭무늬 영상을 획득하는 카메라는 RS-170 타입의 CCD camera(Pulix TM-7CN) 와 고속현상을 기록할 수 있는 digital high-speed camera (Kodak Ektapro1000)를 사용하였다. CCD camera로 취득된 영상은 computer로 보내져 처리하게 되는데 본 연구에서는 PZT mirror와 3-frame 위상이동 방식을 사용하여 간섭무늬를 처리하였다.

투명 물체가 공간중에 노출되어 있거나 광학적 불균일도가 크지 않은 경우에는 물체빔으로 시준빔을 사용하는 홀로그래피 간섭계가 더 효율적이다. 본

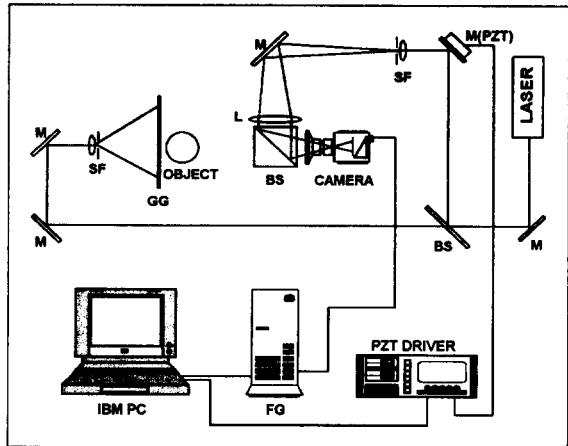


그림 2. 온도장 측정을 위한 ESPI 장치 구성도

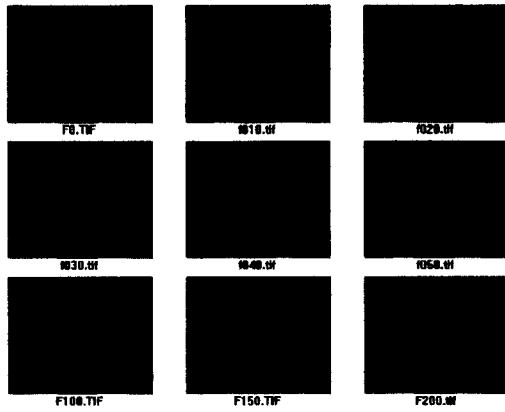
연구에서는 collimating을 위해 2개의 Schlieren mirror를 사용한 Test section φ 200mm의 홀로그래피 간섭계를 별도로 구성하여, 라이타 가스의 점화 현상 가시화에 사용하였다. 홀로그램의 제작과 처리, 그리고 PZT mirror를 이용한 전산처리 등의 전술한 실험 내용과 동일하다.

그림 2는 온도장 측정을 위해 구성한 ESPI 장치 구성도이다. ESPI 장치는 전형적인 out-of-plane 방식으로, 그림 1의 홀로그래피 간섭계와 같이 물체빔을 유동 물체 뒤편의 diffuser로 보내 산란빔을 만들어 측정하였다.

3. 실험결과 및 논의

사진 1은 인가된 전압에 따른 백열전등 내부의 온도 분포를 산란 홀로그래피 간섭계와 고속카메라를 사용하여 시간에 따라 기록한 실험결과이며, 사진 2는 백열전등을 거꾸로 놓고한 동일한 실험결과이다.

사진 1의 (a) 와 사진 2는 초당 125 frame의 속도로 기록한 것이며 사진 1의 (b), (c)는 초당 250 frame의 속도로 기록한 것이다. 그림 caption에 있는 수치는 각 frame 번호를 가리키는 것으로 전등의 점멸과 고속카메라를 동기시켜 frame 번호 0에서 전구를 켰으므로 frame 번호가 10이면 사진 1의 (a)에서는 전등을 켜고 10/125초 후의 상태를 기록한 것이다. 사진 1과 2에서 시간에 따른 온도분포 변화와, 인가하는 전압을 높일수록 나중의 온도포화상태에 가는 시간이 짧은 것도 확인해 볼 수 있다.



(a) Voltage = 50 V, Frame rate = 125f/s

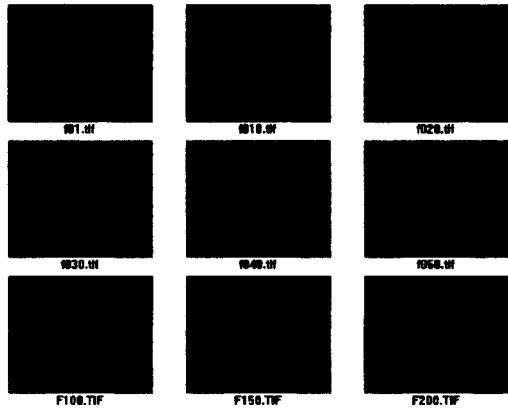
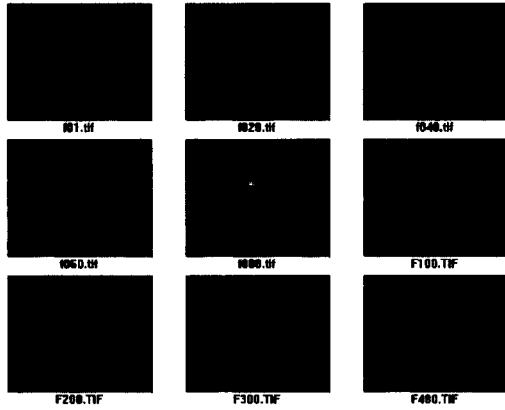


사진 2. 전구를 거꾸로 놓았을 때의 실험결과



(b) Voltage = 100 V, Frame rate = 250f/s

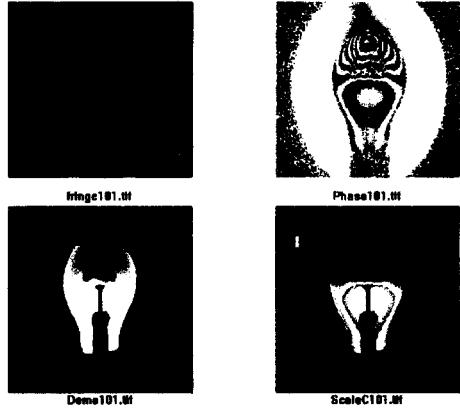
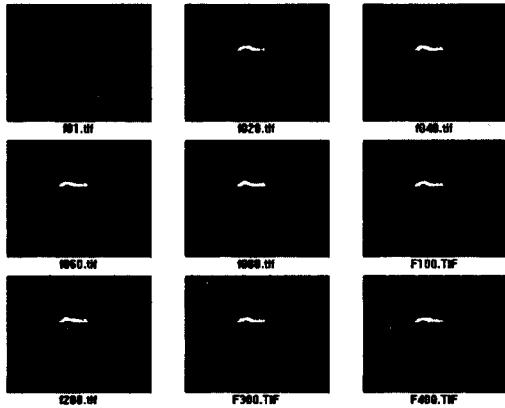


사진 3. 홀로그래피 간섭계로 측정한 전구온도분포



(c) Voltage = 150 V, Frame rate = 250f/s

사진 1. 전압에 따른 온도변화 측정실험 결과

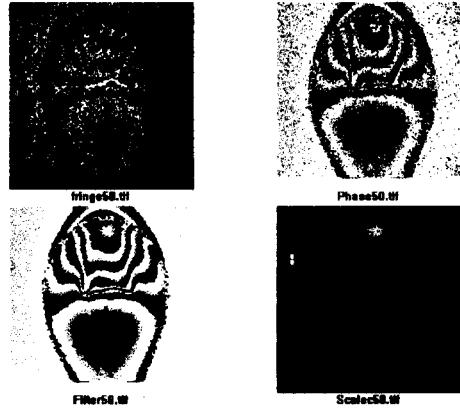


사진 4. ESPI로 측정/처리한 전구의 온도분포

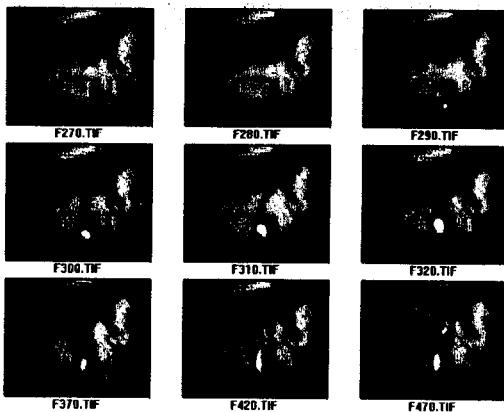


사진 5. Gas의 점화에 따른 불꽃전파 가시화

사진 3은 전압 50 V를 인가해 켜고 5초가 지나 온도분포 상태에 들어간 후의 온도분포를 위상이동 홀로그래피 간섭계 방법을 사용해 전산처리한 결과이다. 사진 (a)는 초기의 전산처리를 거치지 않은 상태의 간섭무늬 패턴이고, (b)는 3 frame의 간섭무늬를 계산하여 얻은 위상지도(phase map), (c)는 (b)의 위상지도를 demodulation 하여 얻은 온도의 농도 분포도, (d)는 농도에 따라 pseudo-coloring 하여 display한 사진이다.

사진 4는 동일한 상황을 ESPI를 이용해 측정/처리한 결과이다. 사진에서 보듯이 초기 간섭무늬의 절은 ESPI로 얻은 것이 홀로그래피 간섭계로 얻은 결과보다 현저히 떨어지나, 위상이동을 거치면서 필터링되어, 위상지도를 필터링하고 펼친 후의 최종 결과는 홀로그래피 간섭계로 얻은 결과와 거의 비슷한 수준까지 됨을 알 수 있다.

사진 5는 라이터 가스의 점화를 collimating beam을 사용하는 홀로그래피 간섭계로 가시화하여 고속 촬영한 사진이다. 이 방식은 전형적인 고속 실시간 홀로그래피 간섭계 방식으로 빛의 이용률과 홀로그램 효율이 좋아서 고속 유동현상 연구에 많이 사용되는 방법이다. 사진에서 하얀 색으로 나타나는 부분은 불꽃의 빛이 너무 세어서 레이저 광장의 bandpass 필터로도 거르지 못한 빛을 나타낸다.

4. 결 론

홀로그래피 간섭계와 ESPI 장치를 사용하여 전구

내부의 온도 분포와 가스의 점화에 따른 온도장을 가시화시키고, 위상이동 방식을 도입하여 정량적으로 분석하였다. ESPI를 사용한 온도분포 측정방식은 홀로그래피 간섭계 방식에 비해 간섭무늬가 절적으로 많이 떨어지지만, 위상이동 방법 자체가 큰 필터링 효과를 가지고 있고, 추가의 필터링 방법을 사용함으로써 최종적으로는 거의 비슷한 수준의 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로 정확한 온도 값을 얻기 위해서는 Abel transform 등을 이용한 보다 정확한 정량화가 필요할 것이며, 각각의 geometry에 따른 다양한 계산 model이 필요할 것으로 보인다.

또한, ESPI 장치는 사용이 간단하고, 물체의 미소 변위나 진동의 측정에도 많이 활용도를 가지고 있으며, 변형/진동 측정장치를 약간 변화시킴으로써 유동이나 온도의 측정이 가능하기 때문에 앞으로 많은 활용이 예상된다.

참 고 문 헌

1. L.O. Heflinger, R.F. Wuerker, R.E. Brooks, "Holographic Interferometry", J. Appl. Phys., 37, 642(1966).
2. J. Fitzgerald, H. Horster, "The temperature distribution in gas-filled incandescent lamps", Phillips Tech. Rev., 32, 206(1971)
3. S.M. Tieng, C.C. Lin, Y.C. Wang, T. Fujiwara, "Effect of composition distribution on holographic temperature measurement of a diffuse flame", Meas. Sci. Technol., 7, 477(1996)
4. Y. Song, R. Kulenovic, M. Groll, Z. Guo, "Effects of speckle displacement on speckle interferometry for measurement of phase object", Optics communications, 139, 24(1997)