

# 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 유체의 가시화

엄철\*·강영준\*\*·김동우\*\*·유원재\*\*\*·안중근\*\*\*

## Visualization and Measurement of Fluids with Real-time Holographic Interferometry

Chul Eom, Young-june Kang, Dong-woo Kim, Weon-jae Ryu, Jung-keun An

**Key Words:** Holographic interferometry(홀로그래픽 간섭계), Real-time measurement(실시간측정), Fluids visualization(유체가시화), LDV(Laser Doppler Vibrometer), Wave front(파면)

### Abstract

The holographic measurement techniques can be applied to various industrial fields such as automobile, airplane, construction, electronics, medical, mechanics and physics. The visualization of fluids is very important in aerodynamics, heat transfer and stress analysis. There are classically optical methods such as shadowgraph, schlieren method, and Mach-Zehnder interferometry for visualizing the fluid flow phenomena. But, it is difficult to understand the continuous state of fluids well in those methods. In this study, the real-time holographic interferometer with high-speed camera is applied to the flow visualization. In addition, collimated laser beam and rotating wedge are used for recording and formation of carrier fringes, respectively.

### 1. 서론

홀로그래피 기술은 3차원 전시, 변형 및 진동 측정, 회절 광학 소자제작, 광신호 처리등 산업의 여러 분야에 응용되고 있다. 특히 홀로그래픽 간섭법<sup>(1-4)</sup>을 이용한 비파괴 검사(Holographic Non-destructive Testing ; HNDT)은 항공기 산업과 자동차 산업등 고도의 계측 기술을 필요로 하는 많은 영역에서 그 활용 연구가 활발히 진행되고 있다. HNDT 기술은 비록 아직은 보편적인 계측 기술로 이용되고 있지 못하지만 원격의 비접촉 특성과 아울러 고도의 정밀도를 가지고 있는 점들로 인해 앞으로 정밀 계측 분야등 많은 영역에서 그 응용이 증진할 것으로 기대된다.

원자력 산업을 비롯한 많은 산업 분야에서 유체의 흐름을 이해하는 것은 중요하다. 특히 유체

흐름을 가시화 하는 것은 유동의 분석에 기초적인 역할을 한다. 유체의 가시화에는 광학적인 방법이 많이 응용되고 있는데 주로 PIV(Particle Image Vibrometer), Schlieren Method<sup>(5)</sup>, Mach-Zehnder 간섭계 등이 있다. 최근 들어 많이 연구 되는 홀로그래픽 간섭을 이용한 방법은 유동의 가시화에 있어서 여타의 광학적인 방법에 비해 상대적으로 많은 장점을 가지고 있다. 대표적인 홀로그래피 방법의 장점은 아래와 같다.

- 비접촉 방법으로 검사 대상에 영향이 없다.
- 레이저빔이 조사되는 영역 전체의 동시 측정이 가능하다.
- 정량적 측정이 가능하다.
- 측정 정밀도가 우수하다.
- 실시간 측정이 가능하다.
- 결과를 가시화하며, 정성적인 분석이 즉시 가능하다

홀로그래피를 이용한 유체의 가시화는 검사 및 계측기술의 한 분야로서, 유체의 역학적인 특성이 중요한 항공기 산업이나 자동차 산업에서 유동의 상태 검사 및 새로운 모델의 고안을 위한

\* 전북대학교 메카트로닉스공학과 석사과정

\*\* 전북대학교 기계공학부

\*\*\* 전북대학교 기계설계학과 박사과정

응용연구가 활발히 진행되고 있다. 홀로그래피를 이용한 가시화는 1960년대부터 그 연구가 시작되었으나 활발한 연구가 시작된 것은 1970년대 중반이후라고 할 수 있다. 홀로그래피 기술을 이용한 유동의 가시화는 여타의 유동 분석 방법에 비해 넓은 범위를 한 순간에 측정할 수 있는 점과 삼차원 분석이 가능하다는 장점으로 그 응용이 기대된다.

본 연구에서는 응용 광학 기술 개발의 일환으로 축적된 홀로그래피 기초 기술을 바탕으로 기체 역학에서의 고속 현상 및 유체의 열 유동의 가시화를 통하여 열 분포, 기체 및 액체의 유체 운동에 의해 형성된 장(fields), 파(wave)의 분포를 파악함으로써 물체의 상태에 관한 많은 정보를 알고, 장 또는 파의 모습을 눈으로 보면서 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 진동 측정을 함으로써 유체의 장, 또는 파가 LDV의 진동측정에 미치는 영향에 대해 분석하는데 그 목적을 둔다. 일반적으로, 홀로그래픽 간섭계를 이용한 유동의 가시화 연구에 있어서 대부분이 펄스 레이저를 이용한 이중 노출 방식<sup>(6)</sup>을 사용하고 있기 때문에, 유동 현상의 이해에는 연속적인 특성을 중시하는 점을 감안하면 많은 한계를 가지는 방법으로 생각된다. 본 연구를 통해 실험되는 홀로그래픽 간섭계는 이러한 점을 고려한 실시간 홀로그래픽 간섭계로서, 연속 발진 레이저를 이용한 유동 현상의 실시간 관측 및 고속 카메라를 이용하여 고속 유동현상을 가시화<sup>(7)</sup>하도록 하였다.

## 2. 실험 1

### 2.1 광학계의 구성

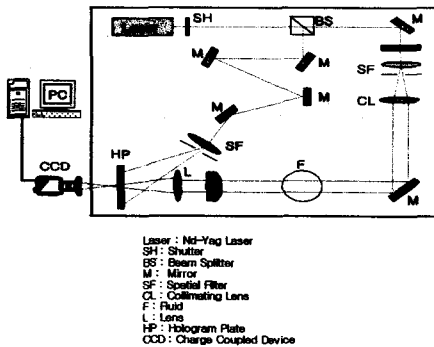


Fig. 1 Experimental setup for holography

### 2.2 실험 방법

실험에서 사용한 광학계의 구성은 Fig.1과 같다. 구성된 광학계는 홀로그래피 간섭계로서 그림에서 모든 광학요소는 1.5×3m 크기의 진동 제거용 광학 테이블 위에 구성되었다. 광원은 COHERENT사의 최대 500mW급 DPSS532 Nd-YAG 레이저 532nm 파장을 사용하였다. 발진된 레이저는 광분할기(beam splitter)를 통하여 기준빔과 물체빔으로 나뉜다. 기준빔은 빔 확산기(expander)로 확산시킨 후 홀로그래피 건판에 결상하도록 하였다. 물체빔은 Collimating lens로 시준광을 만들어 홀로그래피 건판에 기준빔과 마찬가지로 결상하게 된다.

먼저 기준 홀로그램을 제작하기 위하여 빛이 거의 없는 암실에서 유동체가 없을 때 홀로그램 필름을 HP의 위치에 놓은 다음 셔터를 열어 홀로그래피 건판을 노출시켜 기준 홀로그램을 홀로그램 플레이트에 기록한다. 이 홀로그래피 건판을 화학처리 과정을 거친후 제작리에 고정하여 놓았다 이때 사용된 화학처리는 현상액에서 4분 정도 현상 후 30초 수세하고 표백액에서 40초 정도 넣어 완전히 표백한 후 흐르는 물에 5분 정도 수세하여 정착액에 1분 동안 담근 후 꺼내어 자연건조 하였다. 홀로그램 앞에는 Fig. 1에서 보는 바처럼 wedge를 넣어서 유한간격 간섭무늬(finite fringe interferogram)를 얻을 수 있도록 기준무늬(carrier fringe)를 실었다<sup>(8)</sup>. 사용된 wedge는 회전과 tilt로 기준무늬의 방향 및 간격을 임의로 조절할 수 있게 하였을 뿐만 아니라 화학 처리된 홀로그램의 위치가 노출시의 위치와 달라서 생기는 간섭무늬를 없애는 데에도 유용하게 이용된다. 화상획득은 inspector 2.2라는 상용 소프트웨어를 사용하였고 획득한 화상은 matrox frame grabber board가 부착된 컴퓨터에 의해 처리 되었다.

### 2.3 실험결과

#### 2.3.1 저속유동의 기록

유체의 유동속도가 느린 현상들은 일반적인 CCD카메라에 의해 충분히 기록 가능하므로, 실험이 용이하다. 이때의 기록 시간은 수십~수백분의 1초 정도이므로 노출이 충분하다. 홀로그램 뒤에 CCD 카메라를 놓아 촬영하였다. 이러한 현

상의 영역에는 대류현상 및 서서히 일어나는 화학반응과 정상상태에 이른 유체의 흐름과 파동 등이 포함될 수 있다.

일반적으로 화염의 대표적인 표본으로 유동가시화 실험의 전형적인 대상물인 촛불의 가시화<sup>(9)</sup>를 기본적인 특성 분석을 위해 실험하였다. Fig. 2 (a)는 기준 무늬를 넣지 않은 촛불의 간섭무늬 패턴이고 Fig. 2(b),(c)는 기준 무늬를 넣은 간섭무늬 패턴이다. 기준무늬를 실은 Fig. 2(b),(c)에서 촛불의 모양이 위 아래로 바뀐 듯한 것은 기준 무늬의 방향을 반대로 실었기 때문이다. Fig. 2(b)에서 간섭무늬가 기준 무늬의 기준선보다 위쪽으로 올라가면 위상이 감소하고 아래로 내려가면 위상이 증가한다는 것을 의미한다. Fig. 2(c)에서는 이와 반대로 설명된다. 그림에서 기준무늬 하나의 간격은  $2\pi$ 의 위상차를 의미하므로 위상의 변화가 급격한 현상의 경우에는 기준 무늬의 간격을 좁게 해서 간섭무늬 패턴을 얻을 수 있다.

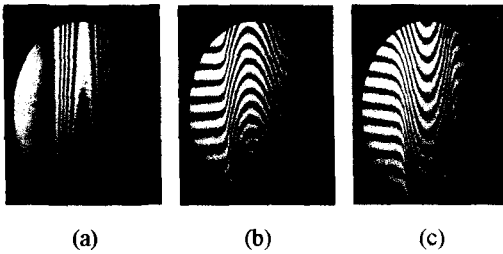


Fig. 2 Interferogram of candle

Fig. 3은 실험실에서 보통 사용되는 압축 질소 가스의 노즐에서 나오는 분사를 간섭무늬로 기록한 것이다. 그림에서 생성된 간섭무늬는 일견 순간적인 고압에 의한 분사로 생기는 공기밀도의 소·밀차에 의한 효과일 것으로 생각될 것이다. 그러나 이 효과는 무시 가능할 만큼 찾기 힘들며, 실제로는 촛불에서와는 달리 압축 공기가 순간적으로 팽창하여 저압이 되면서 온도가 내려가는 현상 때문이다. 실제로 홀로그래픽 간섭계 실험을 통해서 유체에서 빛의 광로차에 영향을 많이 미치는 것은 압력차에 의한 밀도의 소·밀이라기 보다는 온도차에 의한 것이라는 것을 알 수 있는데 노즐 분사 실험이 그 중요한 예라 할 수 있다.

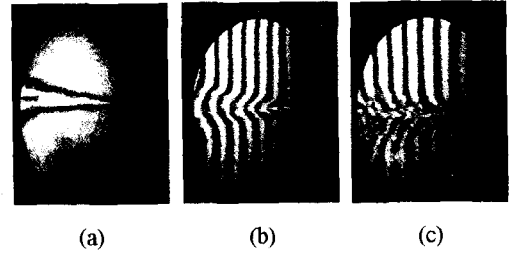


Fig. 3 Interferogram of nozzle

Fig. 4는 hot plate 주위의 공기흐름을 보이고 있다. hot plate는 수평으로 누워 있다. hot plate 위의 경계면 주위에서는 간섭무늬의 간격이 너무 조밀해서 거의 간섭무늬를 구분하기가 힘이 든다. 또, 그림에서 온도가 높은 경우에 hot plate 경계면의 이미지가 선명치 않음을 볼 수 있다. 이는 hot plate의 열이 위로만 영향을 미치는 것이 아니라 레이저 진행 방향인 앞·위로도 불균일한 열 분포를 가짐으로써 초기의 image geometry에 영향을 가해 나타나는 현상으로 보인다.

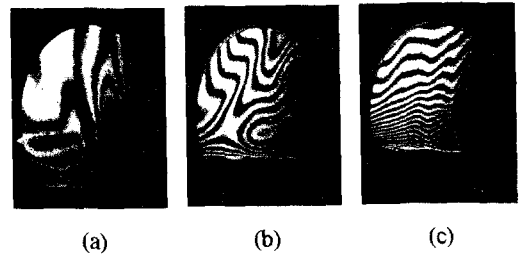


Fig. 4 Interferogram of air flow around hot plate

#### 2.4 고찰

각 그림들에서 (a)는 기준 무늬가 없는 경우, (b),(c)는 기준 무늬를 실은 경우들이다. 보통 기준 무늬를 실지 않은 경우에는 유동의 정성적 이해에는 도움이 된다. 그러나 (b)와 (c)의 경우에는 기준 무늬를 기본적으로 실어서 유체의 정량화를 도모할 수 있었다. 또한 Holographic 간섭법을 이용하여 기존의 유체의 유동 가시화 방법들에 비해 높은 분해능으로 유체의 유동을 더욱 자세히 분석 가능함을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 3과 같이 고속의 유동 현상의 경우에는 일반 1/30초로 찍은 것인데 이 정도의 기록속도로는 고속으로 분사되는 nozzle의 가스 흐름을 가시화 하는 것이

가능하지 않다는 것을 미루어 짐작할 수 있다. 그래서 보다 빠른 고속 카메라<sup>(10)</sup>의 기록장치가 필요하게 된다.

### 3. 실험 2

#### 3.1 광학계의 구성

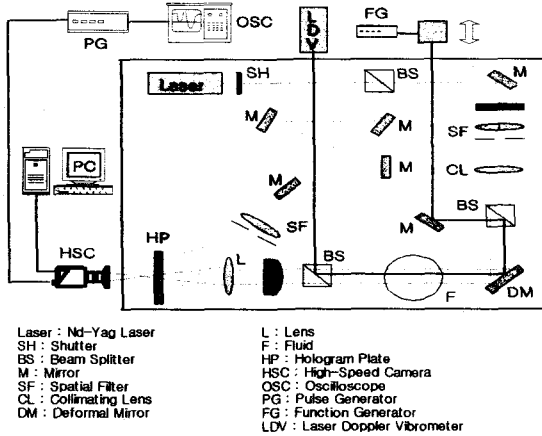


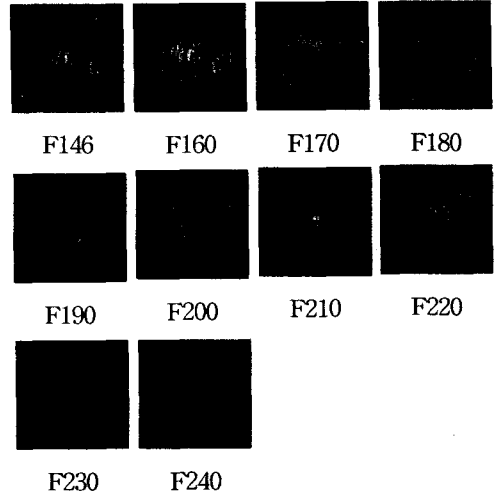
Fig. 5 Experimental setup

#### 3.2 실험 방법

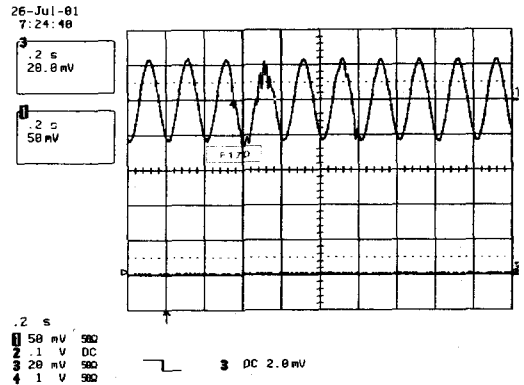
실험에 사용한 광학계의 구성은 Fig. 5와 같다. 실험 1과 거의 같은 조건이지만 단지 진동물체와 LDV 및 오실로 스코프, 펄스제너레이터 그리고 LDV의 레이저 빔을 위한 광분할기가 2개 더 첨가되었을 뿐이다. 홀로그램은 실험 1에서 제작된 홀로그램을 계속 사용하였다. 이번 실험에서는 유동체가 LDV의 진동측정에서 LDV레이저 빔의 파면(wave front)에 미치는 영향에 대해 분석한다. Function generator에서 가진기에 5~10Hz의 주파수를 발생시켜주며, 고속 카메라(High-speed camera)로 유동체에 의해 빔의 파면(wave front)의 찌그러짐 정도를 파악한다. 먼저 유동체로는 일반적으로 사용되고 있는 라이터 불과 실험실에서 사용되어지는 압축 질소 가스를 사용하였다. 이런 유동체로 유동장을 발생시켜 각 레이저 빔의 경로에 밀도 차와 파면(wave front)를 찌그러트림과 동시에 Pulse Generator에서는 pulse를 발생시켜 Oscilloscope 와 고속카메라에 동시에 trigger 신호를 준다. 고속카메라에서 이미지를 2 초간 약 1100 frames을 잡는다. 또한 오실로스코

프에서도 같은 시간동안 동시에 LDV에서 나온 신호를 기록하게 된다.

#### 3.3 실험결과



(a) Recorded interferograms

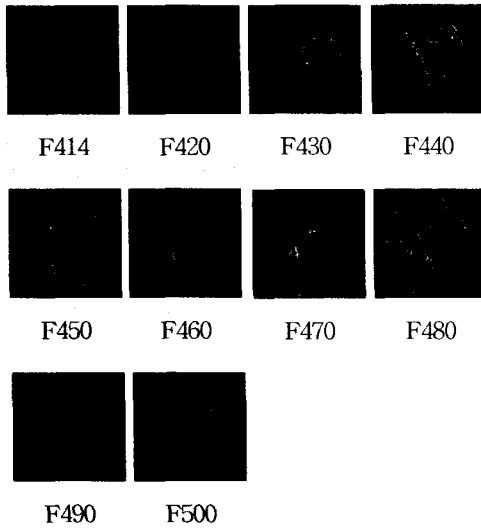


(b) LDV signal

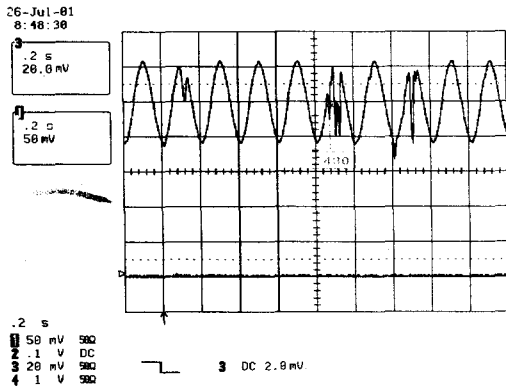
Fig. 6 Interferograms and LDV signal at 5Hz

Fig. 6은 trigger 신호와 동시에 인위적으로 라이터 불을 LDV 레이저 빔의 경로에 집어넣어서 LDV의 front wave에 영향을 주었다. 이때 진동물체의 주파수는 5Hz로 신호를 주었다. Fig. 6(a)는 고속 카메라로 얻은 간섭무늬이며, Fig. 6(b)는 LDV의 신호이다. 약 170번째 고속 카메라의 image와 LDV 신호와 비교하여 볼때 fringe가 무수히 많아져 LDV 레이저 빔 경로가 유체의 굴절

에 의해 불균일하게 되어 LDV에 의한 진동측정이 불가능해 짐을 알 수 있다.



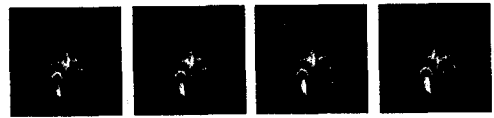
(a) Recorded interferograms



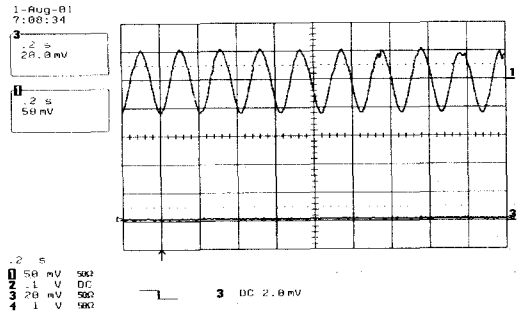
(b) LDV signal

Fig. 7 Interferograms and LDV signal at 5Hz

Fig. 7은 라이터 불과 마찬가지로 LDV의 경로에 뜨거운 바람이 나오는 Nozzle을 통과시켰을 경우이다. 이때 진동물체의 주파수는 5Hz로 신호를 주었다. Fig. 7(a)는 고속카메라로 얻은 간섭무늬이며, Fig. 7(b)는 LDV의 신호이다. 약 430번째 고속카메라 이미지와 LDV 신호를 비교하면 뜨거운 바람에 의한 굴절에 의해 고속카메라로 얻은 간섭무늬가 많아짐과 동시에 LDV에 의한 진동측정이 불가능해 짐을 알 수 있다.



(a) Recorded interferograms



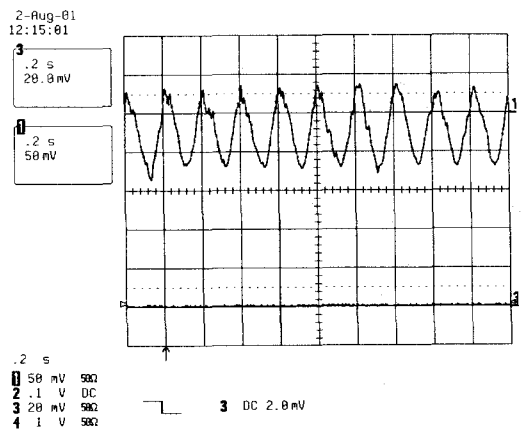
(b) LDV signal

Fig. 8 Interferograms and LDV signal at 5Hz

Fig. 8은 Deform Mirror(DM)의 채널 10번에 -2000V의 전압을 걸어 파면(wave front)을 찌그러트렸을 경우이다. LDV로 진동하는 물체 측정에 별 문제가 없는 것을 확인할 수 있다.



(a) Recorded interferograms



(b) LDV signal

Fig. 9 Interferograms and LDV signal at 5Hz

Fig. 9는 Deform Mirror의 채널 10, 11, 15번에 각각 -1000V, -2000V, -5000V의 전압을 인가하였을 경우이다. LDV로 진동하는 물체를 측정하기에는 신호가 불규칙함을 알 수 있다.

### 3.4 고찰

여기서 Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 보면 레이저의 파면(wave front)의 찌그러짐 정도에 의해 LDV의 진동측정 가능성을 알 수 있음을 확인하였다. Fig. 8의 간섭무늬를 보면 fringe가 약 4개가 걸쳐있고, Fig. 9는 간섭무늬가 약 6개 정도가 걸쳐있다. 이는 파장의 2 wave 정도의 파면(wave front)의 변형이 있다면 파면의 변형에 관계없이 LDV로 진동측정이 가능하지만 파장의 3wave 정도의 파면의 변형이 있다면 진동측정이 불가능함을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유동체의 굴절을 변화에 의해서 발생하는 레이저 빔의 광로차에 의해 생성되는 간섭패턴을 통하여 유동장에서 발생하는 유동 양상을 가시화 하였다. 정량적인 해석을 위한 유한 간섭무늬(finite fringe pattern)을 얻기 위해 기준 무늬(carrier fringe)를 실을 수 있게 하였다. 물론 정성적인 분석이 쉬운 무한간섭무늬(infinite fringe pattern)도 얻을 수 있음을 확인 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 요약한다.

첫째, 일반적인 유체의 가시화 방법으로 홀로그래픽 간섭법이 다른 방법들보다 분해능이 높기 때문에 유동의 상태를 더욱 면밀히 관찰 할 수 있었다.

둘째, Wedge를 넣은 광학요소를 사용함으로써 기준무늬(carrier fringe)를 실어 정량적인 해석을 도모할 수 있었다.

셋째, 저속유동의 경우 일반 CCD카메라를 이용하여 유동을 가시화 하였고, 고속 유동의 경우에는 고속 카메라의 사용으로 고속유동양상을 가시화 하는데 성공하였다.

넷째, 유동장이 LDV의 파면(wave front)에 미치는 영향을 파악하고 파면(wave front)의 찌그러짐 정도를 분석하여 LDV로 진동측정 가능성을 확인 하였다.

## 참고문헌

- (1) Takayama, K., Itoh, K., Onodera, O. and Ojima, H, 1988, "Holographic Interferometric Study of Shock Wave Propagation", Proceedings of SPIE, Vol. 1032, pp. 389.
- (2) Takayama, K., Obara, T. and Onodra, O., 1988, "Proceedings of SPIE", Vol. 1358, pp. 1180.
- (3) Cullis, I. C., Parker, R. J. and Sewell, D, 1990, "Holographic Visualization of Hypervelocity Explosive Events", Proceedings of SPIE, Vol. 1358, pp. 52.
- (4) Takayama, K., Izumi, M., Itoh, K. and Sugiyama, H, 1988, "Holographic Interferometric Observation of Shock Tube Flows", Proceedings of SPIE, Vol. 981, pp. 281.
- (5) Giglio, M., Musazzi, W. and Perini, U, 1981, "A White Light Speckle Schlieren Technique", Optics Communications, Vol. 36, No. 2, pp.117~120.
- (6) R. J. Parker, 1989, "Holographic interferometry for flow visualization studies in high speed fans", Int. J. of Turbo and Jet Engines, Vol. 6, pp. 281.
- (7) J. F. Lockett, and M. W. Collins, 1987, "Holographic interferometry applied to rib-roughness heat transfer in turbulent flow", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp. 2439.
- (8) D. W. Sweeney, and C. M. Vest, 1973, "Reconstruction of three dimensional refractive index fields from multidirectional interferometric data", Applied Optics, Vol. 11, pp. 2649
- (9) Racca R. G. and Dewey, J. M, 1990, " Optics & Laser Technology", Vol. 22, pp. 199.
- (10) Udo Reinert, 1988, "HOLODATIC - The modern holographic camera system", Proceedings of SPIE, Vol. 1026. pp. 75