

<논 문>

## 실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법

문상준\* · 강영준\* · 백성훈\*\* · 김철중\*\*

(1995년 8월 3일 접수)

### A Measurement Method of Internal Defects of Pressure Vessels by Using Real-Time Holographic Interferometry

Sang-Joon Moon, Young-June Kang, Sung-Hoon Baik and Cheol-Jung Kim

**Key Words:** Quantitative Measurement(정량적 측정), Real-Time Holographic Interferometry(실시간 홀로그래픽 간섭법), Nondestructive Testing(비파괴 검사), Internal Flaw(내부결함), Pressure Vessel(압력용기)

#### Abstract

Conventional measurement methods using ultrasonic wave or x-ray, eddy current for non-destructive testing(NDT) in nuclear power plants and other industrial plants have been utilized as the method of contact with objects to be inspected. For this reason these methods require relatively much time and inspection area is limited by the location of probe or film. But holographic interferometry which is a non-contact optical measurement method using a coherent light source has an advantage that quantitative measurement can be performed at a time. In this paper a new method using realtime holographic interfreometry and image processing for detecting internal flaws of pressure vessels is presented.

#### 1. 서 론

고도의 산업사회가 도래되면서 산업의 에너지의 공급문제는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 특히 우리 나라는 에너지의 많은 부분을 원자력 그리고 화력발전소에서 얻고 있는데 근래에 들어와서 원자력발전소에 의한 에너지 공급비율은 증가되고 있는 추세이다. 지속적이고 안정적인 에너지 공급원으로서의 위치를 확보하기 위해서는 원자력발전소의 유지보수 체계를 보다 확실히 정립하고 발전소 설비에 대한 검사를 보다 정확하게 수행할 수 있는

방법을 필요로 한다.<sup>(1)</sup> 특히 발전소에서 가장 보편적인 부재인 배관이나 압력용기에 대한 검사의 비중은 상당히 큰 편이다. 현재 그 신뢰성이 인정이 되어 사용되고 있는 비파괴 검사방법으로는 초음파(ultrasonic wave)나 x선 그리고 와전류(eddy current) 등을 이용하는 방법들이 있다.<sup>(2)</sup> 그렇지만 이러한 방법들을 검사하고자 하는 대상과 접촉에 가까운 형태로 진행되고 있으며 결함을 넓은 영역에 걸쳐 단시간에 검출하지 못하고 탐촉자(probe)나 필름이 위치하는 지점으로 그 검사영역이 한정되는 단점이 있다. 이러한 단점으로 인해 검사에 많은 시간과 경비가 소요되고 있기 때문에 이를 극복할 수 있는 방법으로 홀로그래픽 간섭법(holographic interferometry)을 이용한 광학적인 비접촉 결함검

\* 회원, 전북대학교 기계설계학과

\*\* 한국원자력연구소

출방법이 되고 있다.<sup>(3)</sup> 이 방법은 광원으로 사용되는 가간섭성 광원인 레이저 빔(beam)이 확산, 조사되는 넓은 범위에 걸쳐 원거리에서 한번에 검사가 가능하게 되고 결함뿐만 아니라 부재에 가해지고 있는 고응력의 영역을 쉽게 판단할 수 있어 검사대상에 대한 보다 많은 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 홀로그래픽 간섭법을 이용하여 결함을 검출해 내었고 이 결과에 화상처리(image processing)를 이용하여 결함크기를 측정할 수 있는 방법을 제안했다.

## 2. 측정원리

### 2.1 홀로그래픽 간섭법

홀로그래픽 간섭법은 홀로그래피(holography)의 응용의 한 예인데, 이 홀로그래피는 1948년 Gabor에 의해 최초로 시도되었으며, 1960년대 홀로그래피에 있어서 필수적이라 할 수 있는 가간섭성 광원인 레이저가 개발됨으로써 획기적인 발전을 가져오게 되었다.<sup>(4)</sup> 물체로부터 반사되는 빛의 강도(intensity)만을 기록하게 되는 일반적인 사진(photography)과는 달리, 홀로그래피는 가간섭성 빔(beam)을 둘로 나누어 한 빔은 물체파(object beam)로서 물체에 확산, 조사시켜 물체로부터 반사된 빛이 기록매체에 닿을 수 있도록 하고 다른 한 빔은 기준파(reference beam)로서 확산시켜 직접 기록매체에 닿을 수 있도록 구성한 광학계를 사용하여 빛의 강도와 위상(phase)을 동시에 기록한다.<sup>(5)</sup>

홀로그래픽 간섭법의 종류로는 이중노출법(double exposure), 시간평균법(time average), 실시간법(real time)을 들 수 있다.<sup>(6)</sup> 이중노출법은 최초의 노출과 두번째 노출 사이의 물체의 변형을 하나의 기록매체에 기록시켜 현상(development)과 같은 화학적 처리과정을 거쳐 간섭무늬를 관측할 수 있는 홀로그램(hologram)을 제작하는 간편한 방법이지만 변형의 정량적인 결과를 얻기 위해서는 이중기준빔(dual reference beam)을 사용하는 광학계를 구성해야 하는 등의 어려움이 있다. 시간평균법은 물체의 공진모드 형태를 가시화해낼 수 있는 간섭법으로서 베셀함수 형태의 진폭을 보이는 간섭무늬를 관측하게 된다. 본 연구에서 사용이 되는 실시간법은 물체가 변형되기 전 한번의 노출로서 홀로그램을 제작하고, 노출이 이루어졌던 위치에 장착

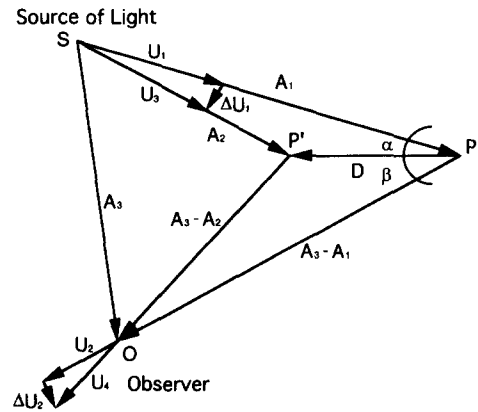


Fig. 1 Optical arrangement for real-time holographic interferometry

한 후 물체의 변형을 관측하는 방법으로 광학계의 구성은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 실시간 홀로그래픽 간섭법의 원리

실시간 홀로그래픽 간섭법의 원리는 다음과 같다. 물체가 변형되기 전 한번의 노출을 주고 현상과정을 거쳐 제작된 홀로그램을 원래의 위치에 정확히 일치시켜 놓고 물체빔과 기준빔을 동시에 조사시킨다. 만일 이 물체에 변형이 일어나게 되면 변형된 물체의 파면(wavefront)이 홀로그램에 의하여 재생된 파면과 간섭을 일으키게 되어 실시간으로 그 물체의 변형을 나타내는 간섭무늬를 만들어 낸다. 즉 홀로그램에 기록된 물체의 상과 실제의 물체의 상이 간섭을 일으키게 된다. 이 방법을 사용하면 시시각각 변하는 물체의 변형과정을 실시간으로 관측이 가능하게 된다. 과거에는 화학적인 현상과정을 그 자리에서 수행할 수 있는 별도의 장비를 부착시켜 사용하는 번거로움이 있었으나 본 연구에서는 사용이 간편한 열가소성수지<sup>(7)</sup>를 기록매체로 이용하는 장비를 사용하였다. 이 방법은 화학적 현상과정을 거치는 경우 시간이 많이 소모되고, 노출이 이루어진 위치에 정확히 홀로그램을 위치시키기 어려운 점을 극복할 수 있는 방법으로, 현상과정을 노출이 이루어진 위치에서 곧 바로 수행할 수 있으므로 위치의 정렬과정이 필요없어진다. 그리고 재사용이 가능하다는 장점을 지닌다.

물체가 변형하기 전의 상을 기록한 홀로그램을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I(x, y) = |R(x, y) + S(x, y)|^2 \quad (1)$$

위의 식 (1)에서  $S$ 는 변형을 가하기 전의 물체 빔을 의미하고,  $R$ 은 기준빔 그리고  $I$ 는 사진건판에서의 빛의 강도이다. 노출과 현상과정을 거쳐 제작된 홀로그래프의 진폭투과율은 다음 식과 같다.

$$t(x, y) = t_0 + \beta TI(x, y) \quad (2)$$

여기서,  $t(x, y)$ 는 실시간 간섭법에서는 변형이 되기 전의 물체의 상이 기록된 홀로그래프의 진폭투과율을 의미한다.  $\beta$ 는 사진건판의 노출특성에 따르는 상수이고,  $t_0$ 는 노출이 없는 필름을 현상했을 경우의 진폭투과율에 해당하는 상수이며,  $T$ 는 노출시간이다. 제작된 홀로그래프를 노출이 되었던 원래의 위치에 고정시키고 물체빔과 기준빔이 홀로그래프에 조사되도록 하면, 변형이 되는 물체로부터 반사되는 빛인 물체빔  $S'$ 과 기준빔  $R$ 이 사진건판을 투과한다. 이때 형성되는 파면  $u(x, y)$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$u(x, y) = [S'(x, y) + R(x, y)]t(x, y) \quad (3)$$

위의 식에 의하여, 원래의 기록된 물체의 상과 실제 놓여있는 물체의 상이 간섭무늬를 형성하게 되고, 이것을 관찰대상이 되는 간섭무늬의 향에 대하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$u'(x, y) = \beta TR^2 S(x, y) + (t_0 + \beta TR^2) S'(x, y) \quad (4)$$

최종적인 빛의 강도분포는 다음과 같은 코사인함수 형태의 진폭으로 나타나게 된다.

$$I(x, y) = |S(x, y)|^2 \{ \beta^2 T^2 R^4 + (t_0 + \beta TR^2)^2 + 2\beta TR^2 (t_0 + \beta TR^2) \cos[\phi'(x, y) - \phi(x, y)] \} \quad (5)$$

### 2.3 민감도벡터에 의한 변위의 결정

물체 변형의 결과로서 발생한 간섭무늬 패턴으로부터 Fig. 2와 같이 광원에서 관측점까지의 광경로차(optical path difference)를 계산하여 물체의 각 지점의 변위를 계산할 수 있다.<sup>(8)</sup>

Fig. 2에서  $S$ 는 광원의 위치이고  $O$ 는 관측점이다. 이때 변형에 의하여 물체의 한 점  $P$ 가  $P'$ 로 이동되었을 경우 광경로는  $SP + PO$ 에서  $SP' + P'O$ 로 변화된다.  $SP$ ,  $SP'$  그리고  $SO$ 를 각각 벡터  $\vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_2$  그리고  $\vec{A}_3$ 로 나타내면  $PO$ 와  $P'O$ 는  $\vec{A}_3 - \vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_3 - \vec{A}_2$ 로 표현할 수 있다. 그리고 단위벡터  $\vec{U}_1$ ,  $\vec{U}_2$ ,  $\vec{U}_3$ ,  $\vec{U}_4$ 를 도입하여 각각  $\vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_3$

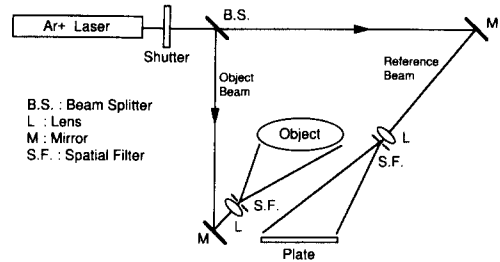


Fig. 2 Determination of displacement by holographic interferometry

$-\vec{A}_1$ ,  $\vec{A}_2$ ,  $\vec{A}_3 - \vec{A}_2$ 에 내적하면  $SP$ ,  $SP'$ ,  $PO$ ,  $P'O$ 의 길이를 나타낼 수 있다. 광경로  $SPO$ 와  $SP'O$ 의 위상을 각각  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 라 하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} (|\vec{SP}| + |\vec{PO}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_1 + \vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_1)] \\ \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} (|\vec{SP}'| + |\vec{P'O}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [\vec{U}_3 \cdot \vec{A}_2 + \vec{U}_4 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 + \Delta\vec{U}_1) \cdot \vec{A}_2 + (\vec{U}_2 + \Delta\vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\lambda$ 는 가간섭광원으로 사용된 레이저의 파장을 나타낸다.

광경로가 물체의 변형으로 인하여  $SPO$ 에서  $SP'O$ 로 변경되었을 경우의 위상차  $\phi_1 - \phi_2$ 를  $\delta$ 라 하면 다음 식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2) - \Delta\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 - \Delta\vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2)] \end{aligned} \quad (7)$$

이때 물체의 변위가 아주 작다면  $\Delta\vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 = 0$ , 그리고  $\Delta\vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2) = 0$ 이라 놓을 수 있으므로 식 (7)은 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\vec{D}$ 는 변위벡터를 의미하고,  $\vec{U}_1 - \vec{U}_2$ 는 민감도벡터에서 검출되는 변위의 방향을 의미한다.

변위는  $2\pi$ 의 위상차에 의한 간섭무늬의 개수로서 결정이 되므로  $\delta$ 를  $2\pi n$ 이라 놓으면 간섭무늬 개수에 대한 변위가 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$n\lambda = (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

식 (9)는 3차원 공간상의 벡터로 표현된 식이므로 해를 구하기 위해서는 3개의 식이 필요하게 되지만 광학계를 구성할 때  $\beta$ 를  $0^\circ$ 로 하고, 측정하려는 변위를  $PO$ 의 방향과 일치시켜 면외(out-of-plane) 변위, 즉 관측방향과 평행한 변위를 측정한다면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} d &= n\lambda / (\cos\alpha + \cos\beta) \\ &= n\lambda / (\cos\alpha + 1) \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (10) \end{aligned}$$

2.4 결함추출

기존의 홀로그래픽 간섭법에서의 결함추출방법은 결함이 없는 압력용기의 하중조건과 경계조건 등을 정한 후 컴퓨터를 이용하여 수학적 방법으로 변형의 결과를 계산해 내고 이 결과를 실제 결함에 의한 변형이 기록된 화상의 결과에 대하여 곡선맞추기(curve fitting) 등의 방법을 도입하여 결함을 검출해내는 방법이었다.<sup>(9)</sup> 그러나 이 방법은 수학적 계산과정을 수차례 반복해야하므로 시간이 많이 소모되는 단점이 있어 빠른 속도로 검사를 진행시키기 어려운 방법이며, 또한 이상적인 조건 하에서의 시뮬레이션의 결과가 실제의 조건과는 다를 경우 정확한 검출을 기대하기 어려워진다. 이러한 단점을 극복하고 보다 고속으로 결함을 검출해내기 위해 본 연구에서는 결과화상에 차분의 방법을 적용시켰고, 결함부위의 급격한 변형을 기울기의 양으로서 검출해 내었다. 기과정을 구체적으로 언급하면 다음과 같다.

변형이 없는 물체에 대한 정보를 지니는 홀로그램이 제작되고 이후 물체를 변형시키게 되면 앞서 언급한 민감도벡터에 의하여 특정방향에 대한 변위의 정보가 간섭무늬로서 나타나게 된다. 본 실험의 경우에는 면외변위, 즉 관찰방향과 평행한 변위에 대해 간섭무늬가 나타나도록 광학계가 구성되었으므로 간섭무늬는 마치 지도에서 지표면의 고저를 등고선으로 나타내는 것과 같은 형태이다. 그러나 간섭무늬만으로는 물체에서 발생된 변위의 방향을 알 수 없으므로 위상을 상대적으로 이동시키면서 화상을 몇 개 입력받은 후, 이를 화상처리하여 변위의 방향을 알 수 있는 위상도의 형태의 화상으로

만든다. 이 위상도는 간섭무늬와 간섭무늬 사이의 변위를 위상의 분포로서 알게 되므로 화상의 한 임의의 직선에서의 화소의 강도분포를 살펴보면 톱니파 형태의 간섭무늬가 언어짐을 알 수 있다. 이러한 위상도의 불연속성을 제거하기 위하여 위상의 꺾임을 수행하는 화상처리기법으로써 연속적으로 변위의 양이 표현되는 화상을 얻는다. 이 화상이 얻어지면 변형시 발생된 변위의 크기는 물체표면의 각 지점에 해당하는 화소의 강도로서 나타내지는데 결함이 있는 부위는 주변의 부분에 비해 상대적으로 기울기가 큰 변형을 보이게 된다. 그러므로 주변 화소간의 강도값에 대한 차분을 구해주게 되면 결함부위의 추출이 가능해지게 된다.

3. 실험방법

본 실험은 Fig. 3과 같은 구성의 광학계에서 이루어졌다. 가간섭광원으로서 514.5 nm 파장의  $Ar^+$  레이저를 사용하였고 열가소성수지를 기록매체로 이용하는 홀로카메라를 사용하였다. 그리고 정량적인 변형의 측정을 위하여 홀로그램의 관찰면에 CCD 카메라를 설치시키고, 기준과의 광경로를 변화시켜 위상차를 주기 위해 광학계 내에 PZT(piezoelectric transducer)를 설치하였다. 시편은 Fig. 4와 같이 길이 33 cm, 외경 10 cm, 두께 0.5 cm인 강관(steel tube)으로 제작된 압력용기이며 표면에는 무광택 백색도료를 도포하였다. 압력용기 내부의 결함은 방전가공으로써 인공적으로 만들었으며 변형을 여기시키기 위한 방법으로 압축질소가스를 이용하여 내부에 압력을 가하였다.

본 실험에서는 Table 1과 같은 다양한 길이를

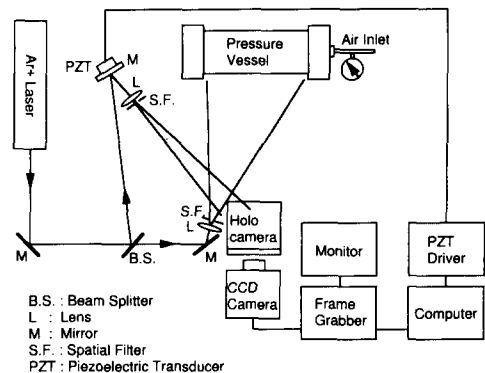


Fig. 3 Optical arrangement

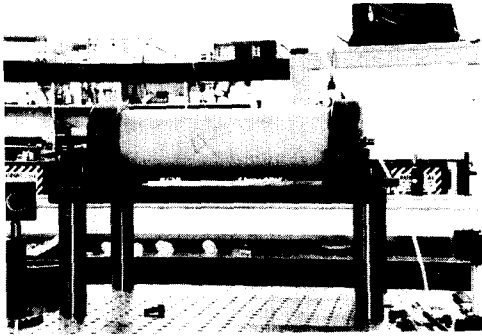


Fig. 4 Specimen

Table 1 Specification of axial defects

unit : mm

Defect	Length	Depth	Thickness
0	0	0	5
1	5	2	5
2	10	2	5
3	15	2	5
4	20	2	5
5	25	2	5

지나는 축방향 결함<sup>(10)</sup>이 인공적으로 가공된 압력용기에 대하여 결함 검출이 수행되었다. 변형의 정량화를 위해 화상처리장비를 이용하여 변위의 크기와 부호를 계산하였고 화상처리를 통하여 결함부위를 찾아내고 결함길이를 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 실시간 홀로그래피 간섭법을 결함이 없는 압력용기에 대하여 적용시킨 결과의 화상으로서 시편 전체에 걸쳐 간섭무늬가 관찰되고 있다. 이 간섭무늬는 결함이 존재하지 않는 이상적인 압력용기가 변형되는 형태와 같음을 알 수 있다. 그리고 좌우에 대하여 대칭적이지 않은 간섭무늬를 보이고 있는데 이는 가압시 시편의 좌우가 완전히 구속되지 못하여 약간의 강체운동(rigid body motion)에 의하여 발생된 변위가 가압시 발생된 변형에 포함되어 발생된 것이라 추정된다.

Fig. 6은 축방향 결함이 존재하는 압력용기에 대한 결과로서 결함부위에 가로방향으로 간섭무늬를

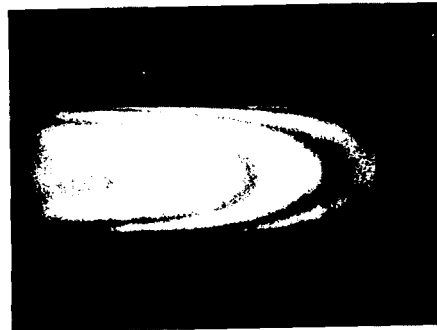


Fig. 5 Fringe pattern of defect-free tube



Fig. 6 Fringe pattern of axial-defective tube



Fig. 7 Fringe pattern of circumferential-defective tube

관찰할 수 있다.

Fig. 7은 원주방향 결함이 도입된 시편의 내부에 압력을 가했을 경우의 결과로서 세로형태의 간섭무늬가 관찰되고 있다.

Figs. 8, 9, 10은 각각 무결함, 축방향 결함, 원주방향결함이 존재하는 시편에 대하여 발생된 변위를 위상이동법을 이용하여 위상도로서 나타낸 결과이다.

위상이동법은 PZT에 일정크기로 변화되는 전압

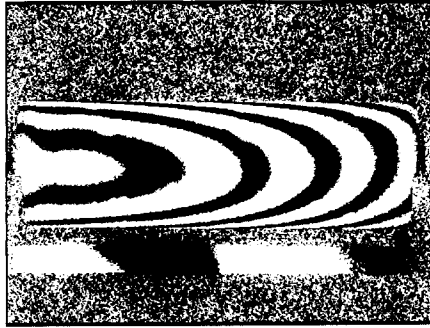


Fig. 8 Phase map of defect-free tube

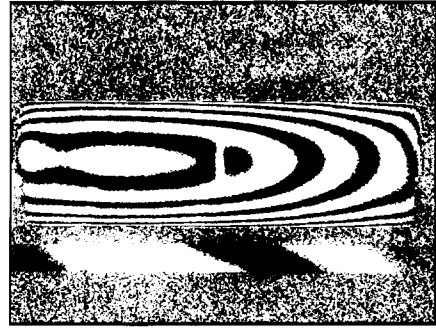


Fig. 10 Phase map of circumferential-defective tube

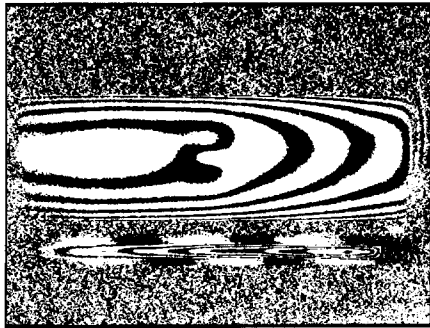


Fig. 9 Phase map of axial-defective tube

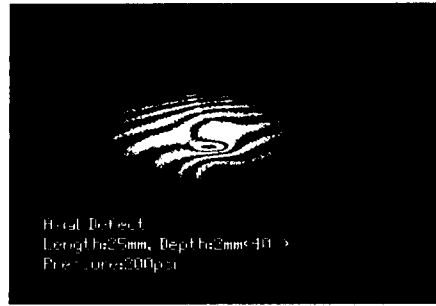


Fig. 11 Fringe pattern of pressurized axial-defective tube

을 가해주어 각각의 화상이 일정한 위상차를 지니게 하고 이 화상들을  $\arctan$  함수에 대입하여 시편의 각 지점에 대한 위상값을 얻게 하는 방법이다. 결과 화상인 위상도는  $\arctan$  함수의 특성상 Figs. 8, 9, 10에서와 같이  $2\pi$ 마다 불연속성을 지니게 된다.

결함검출의 어려움이 제거되고 자동화된 결함검출방법의 도입이 축방향 결함에 대하여 다음과 같은 과정을 거쳐 시도되었다. 다음의 Fig. 11은 실시간 홀로그래피 간섭계에서 관찰할 수 있는 압력용기의 변형에 의한 간섭무늬이다.

Fig. 12는 압력에 의해 발생된 변위가 위상의 분포로서 표현된 화상으로서, 맨처음 관측된 간섭무늬는 발생된 변위의 방향에 대한 정보가 없는 반면, 위상도는 위상의 분포로서 변위의 방향을 판단할 수 있게 된다. 위상이동법에 의한 결과는 위상 분포를 계산시 이용되는  $\arctan$  함수의 특성상  $2\pi$ 마다 불연속성을 지니게 된다. 이러한 불연속성을 위상펼침(phase unwrapping)으로 제거하면 변위의 분포가 연속적으로 나타나는 화상을 얻을 수 있다. Fig. 13은 불연속성이 제거된 화상으로서 변위의

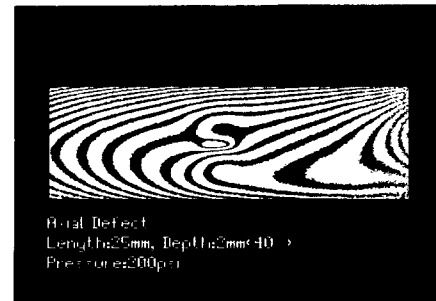


Fig. 12 Phase map of pressurized axial-defective tube

양이 해당화소의 강도로서 나타나는 결과를 보이고 있다. 이 결과로서 내부결함이 존재하는 부분을 내부에서 압력이 가해지면 용기 내부로 함몰이 됨을 알 수 있다.

Fig. 14은 Fig. 13을 세로방향에 대하여 일차미분 처리한 결과로서 압력튜브의 강제운동의 효과를 제거시키고 국부적인 변형을 증폭한 결과이다. Fig. 14에서 보이는 것과 같이 결함에 의한 변형을 확실하게 파악할 수 있으므로 검사자의 시각에 의존하는 검사형태라면 일차미분한 결과만으로도 충분히

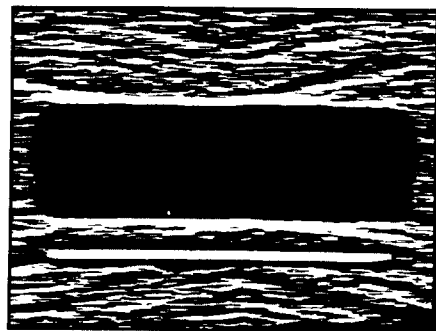
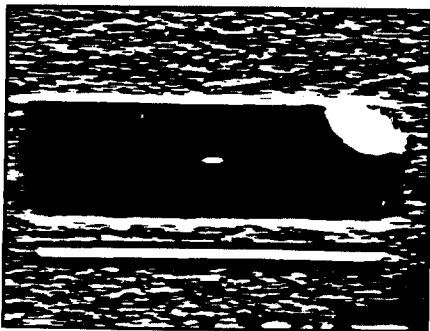
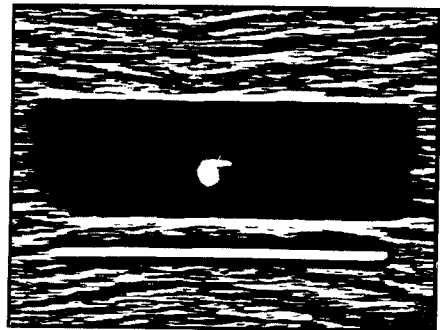
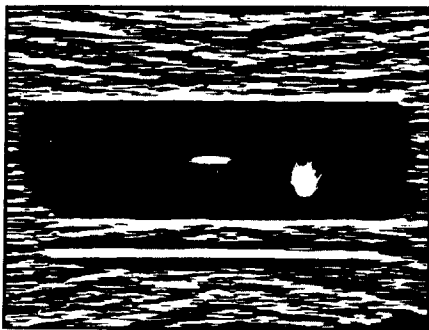
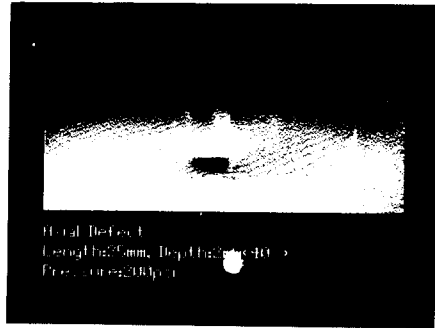
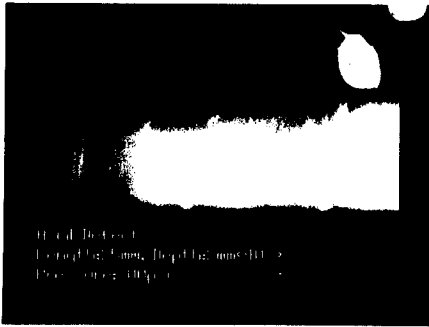


Fig. 15 Threshold image of second derivative image

결함이 검출이 가능하다. 그러나 이 결과를 자동적인 결함검출에 응용하기 위하여 재미분처리를 행하면 결함이 있는 위치에서 변형의 강조가 가능하고, 이를 이치화시켜 주게 되면 Fig. 15(a), (b), (c), (d)와 같은 결과화상을 얻게 되어 결함의 위치와 크기를 결정할 수 있게 된다.

Fig. 15(a), (b), (c), (d)는 축방향 결함의 길이가 각각 20, 15, 10, 5 mm일 때의 결과이며 검출된 결함의 크기는 실제의 결함의 크기에 따라 달라짐

을 알 수 있다.

다음의 Fig. 16은 각 압력에 대하여 얻어진 결함부위 패턴의 길이를 나타내고 있으며 그림의 직선은 최소자승법에 의하여 구해졌고, 이 직선을 이용하여 패턴의 길이를 안다고 가정했을 때 실제 결함의 길이를 추정할 수 있게 된다. 그리고 검사시 10 mm 이상의 결함을 대상으로 압력변화를 일정하게 가할 경우 60 psi, 100 psi, 150 psi, 200 psi에서 각각 6%, 6%, 7%, 8% 정도의 오차를 지니며 결함

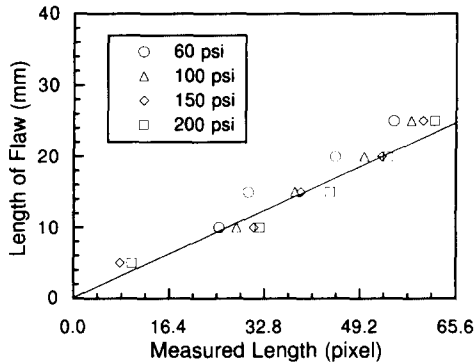


Fig. 16 Comparison of actual and detected size of defects

의 길이가 측정가능하였으며, 만일 압력변화를 60~200 psi 사이의 임의의 압력을 가한다면, 즉 일정한 압력변화로서 변형을 여기서시키지 않는다면 약 12.7% 정도의 오차를 지니며 결함길이의 측정이 가능함을 보였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 실시간 홀로그래피 간섭법을 이용하여 압력용기 내부에 압력을 가해주었을 경우의 변형을 가시화하였고, 물체 내부의 결함으로 인한 국부적인 변형의 검출을 통하여 물체내부의 결함을 검출하였다. 본 연구의 얻어진 결론을 다음과 같이 정리하였다.

(1) 압력용기 내부에 결함이 있는 경우, 압력으로 인한 결함부위에서의 표면의 변위발생은 용기 내부방향으로 진행된다.

(2) 실시간 홀로그래피 간섭법에 의한 결과에 화상처리를 수행함으로써 압력용기의 내부결함이 가시화되었다. 특히 일차미분한 화상결과는 시험중 물체에 도입될 수 있는 강제운동으로 인한 변위발생을 제거할 수 있었고, 결함에 의한 국부적인 변형을 증폭하여 검사자의 판단을 보다 용이하게 하였다. 그리고 본 연구에서는 자동화된 결함검출의 기준을 마련하고자 일차미분된 화상을 화상처리과정의 정을 거친 후 다시 미분하여 줌으로써 결함부위의 강도를 강조하였으며 2차화를 통하여 검사자의 주관이 배제된 결함길이의 측정이 가능함을 보였다.

(3) 홀로그래피 간섭법과 화상처리를 통하여 압력용기 내부의 결함이 정량적으로 측정이 가능하였다. 일정한 압력이 주어지지 않은 경우에 측정된

결함의 평균오차는 약 12.7%였고, 압력을 일정하게 가해준 경우에는 약 6~8% 정도의 오차를 지니면 내부결함의 측정이 가능하였다.

본 실험은 단순화한 형태의 인공제작된 결함에 대하여 수행되었으므로 이후 복잡, 다양한 형태의 결함을 지닌 시편의 변형에 대하여 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 그리고 사용되는 광학계의 안정성과 정도를 검증하기 위하여, 광학계의 구성상 내재되는 오차에 대한 이론적 해석과 실험이 병행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Nichols, R. W., 1975, "In-serve Inspection as an Aid to Steel Pressure Vessel Reliability," *Reactor Inspection Technology, Proceeding of a BNES Symposium*, pp. 24~37.
- (2) Mader, D. L., 1986, "Holographic and Nonholographic NDT for Nuclear and Coal-fired Power Plants," *SPIE Holographic Nondestructive Testing*, Vol. 604, pp. 37~56.
- (3) Erf, R. K., 1974, *Holographic Nondestructive Testing*, Academic Press, pp. 289~301.
- (4) Gabor, D., 1948, "A New Microscopic Principle," *Nature(London)*, Vol. 161, pp. 777~778.
- (5) Hecht, E., 1987, *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 593~610.
- (6) Jones, R. and Wykes, C., 1989, "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, pp. 64~121.
- (7) Smith, H. M., 1977, *Holographic Recording Materials*, Springer-Verlag, pp. 171~172.
- (8) Hariharan, P., 1992, *Basic of Interferometry*, Academic Press, pp. 95~98.
- (9) Mader, D. L., 1984, "Use of Non-linear Least-squares Curves Fitting for Analysis of Holographic Fringe Patterns," *Ontario Hydro Research Report No. E84-17-K*, pp. 1~5.
- (10) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 1989, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An America National Standard, Section XI: Rules for Inservice Inspection and Testing of Components of Light-Water Cooled Plants, The American Society of Mechanical Engineers.