

홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법  
The measurement method for internal defect of pressure vessels  
by using holographic interferometry

문 상 준\* · 강 영 준 · 최 장 섭  
Moon, Sang-Joon · Kang, Young-June · Choi, Jang-Seob  
(전북대학교 대학원) (전북대학교) (전북대학교 대학원)

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 performed as the method of contact with objects to be inspected. With this reason these methods have been taken relatively much time and the inspected 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 the quantitative measurement can be performed at a time. In this paper a new method using holographic interferometry and image processing for detecting internal flaws of pressure vessels is presented.

1. 서 론

고도의 산업사회가 도래되면서 산업의 기반이라 할 수 있는 에너지의 공급 문제는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 특히 우리 나라는 에너지의 많은 부분을 원자력 그리고 화력 발전소에서 얻고 있는데 근래에 들어와서 원자력 발전소에 의한 에너지 공급 비율은 증가되고 있는 추세이다. 지속적이고 안정적인 에너지 공급원으로서의 위치를 확보하기 위해서는 원자력 발전소의 유지 보수 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 압력 용기에 대한 검사의 비중은 상당히 큰 편이다. 현재 그 신뢰성이 인정이 되어 사용되고 있는 비파괴 검사 방법으로는 초음파(ultrasonic wave)나 x선 그리고 와전류(eddy current) 등을 이용하는 방법들이 있다.<sup>2)</sup> 그렇지만 이러한 방법들은 검사하고자 하는 대상과 접촉에 가까운 형태로 진행되고 있으며 결함을 넓은 영역에 걸쳐 단시간에 검출하지 못하고 탐촉자(probe)나 필름이 위치하는 지점으로 그 검사 영역이 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 결함 검출 방법이 있다.<sup>3)</sup> 이 방법은

광원으로 사용되는 가간섭성 광원인 레이저 빔(beam)이 확산, 조사되는 넓은 범위에 걸쳐 원거리에서 한번에 검사가 가능하게 되고 결함 뿐만 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 검출해내었고 이 결과에 화상처리(image processing) 기법을 이용하여 결함의 크기의 계측이 가능한 방법을 제안했다.

2. 측정 원리

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 물체 파(object beam)로서 물체에 확산, 조사시켜 물체로부터 반사된 빛이 기록매체에 닿을 수 있도록 하고 다른 한 빔은 기

준파(reference beam)로서 확산시켜 직접 기록매체에 닿을 수 있도록 구성한 광학계를 사용하여 빛의 강도와 위상(phase)을 동시에 기록한다.<sup>5)</sup> 이를 간단한 수식으로 나타내면 다음과 같다. 식(1)은 일반적인 사진의 상(image)을 나타내고 식(2)은 홀로그래피의 상을 나타낸다.<sup>6)</sup>

$$\begin{aligned} R(x, y) &= R_0 \exp[-i\phi_R(x, y)] \\ S(x, y) &= S_0 \exp[-i\phi_S(x, y)] \end{aligned}$$

$$I(x, y) = |S(x, y)|^2 = SS^* = S_0^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |R(x, y) + S(x, y)|^2 \\ &= RR^* + SS^* + R^*S + RS^* \\ &= R_0^2 + S_0^2 + R^*S + RS^* \\ &= R_0^2 + S_0^2 + 2R_0S_0 \cos(\phi_R - \phi_S) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 R은 기준파를 나타내고 S는 물체파를 나타낸다. 일반적으로 전시용 등의 홀로그래피는 단일 노출을 통하여 물체의 3차원의 상이 보이는 홀로그램(hologram)을 제작하지만 본 연구에서는 변형되기 전의 물체의 3차원 상과 변형이 된 물체의 3차원 상을 지니는 홀로그램을 중첩시키는 원리로서 식(3)으로 표현이 되는, 즉 코사인 함수의 형태의 진폭변화가 보이는 간섭무늬(interference pattern)를 관측하게되는 홀로그래픽 간섭법을 이용하게 된다.<sup>7)</sup> 다음의 식(3)은 물체의 변형에 의해 발생한 간섭무늬가 관측되는 상을 나타낸다.

$$I_r \propto S_0^2 \{ 1 + \cos[\delta\phi(x, y)] \} \quad (3)$$

이러한 홀로그래픽 간섭법의 종류로는 이중노출법(double exposure), 시간평균법(time average), 실시간법(real time)을 들 수 있다.<sup>8)</sup> 이중노출법은 최초의 노출과 두번째 노출 사이의 물체의 변형을 하나의 기록매체에 기록시켜 현상(development)과 같은 화학적 처리과정을 거쳐 간섭무늬를 관측할 수 있는 홀로그램을 제작하는 방식으로 간편한 방법이지만 변형의 정량적인 결과를 얻기 위해서는 이중기준빔(dual reference beam)을 사용하는 광학계를 구성해야하는 어려움이 있다. 시간평균법은 물체의 규칙적인 진동을 가시화해낼 수 있는 간섭법으로서, 이중노출법에 의한 결과로서 코사인 함수의 형태를 갖는 진폭변화를 관측하는 것과는 달리 이 방법으로는 베셀함수 형태의 진폭을 보이는 간섭무늬를 관측하게 된다. 본 연구에서 사용이 되는 실시간법은 물체의 변형과정을 실시간으로 관측할 수 있는 방법으로서, 물체가 변형되기 전 한번의 노출로서 홀로그램을 제작하고 원래의 위치에 장치한 후 물체의 변형을 관측하는 방법으로 과거에는 현상과정을 그

자리에서 수행할 수 있는 별도의 장비를 부착시켜 사용하는 어려움이 있는 방법이지만 화학적처리과정을 거치지 않는 열가소성수지(thermoplastic)를 기록매체로 사용하는 방법이 있다.<sup>9)</sup>

## 2.2 민감도 벡터(sensitivity vector)

물체의 한 지점에서 변형 전과 변형 후의 광경로차(optical path difference)는 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>10)</sup>

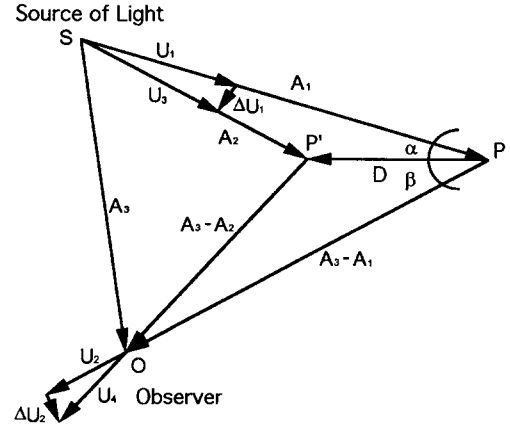


Fig.1 Determination of Displacement by Holographic Interferometry

Fig.1에서 물체의 한점 P가 P'로 이동되었을 경우 광경로는 SP+PO에서 SP'+P'O로 변화된다. SP를 A1, SP'를 A2 그리고 SO를 A3라 하면 PO와 P'O는 A3-A1, A3-A2로 나타낼 수 있다. SP, SP', PO, P'O의 길이를 구하려면 단위벡터 U1, U2, U3, U4를 각각 A1, A3-A1, A2, A3-A2에 내적하면 된다. 광경로 SPO와 SP'O의 위상을 각각  $\phi_1, \phi_2$ 라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} (|\overrightarrow{SP}| + |\overrightarrow{PO}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [ \overrightarrow{U}_1 \cdot \overrightarrow{A}_1 + \overrightarrow{U}_2 \cdot (\overrightarrow{A}_3 - \overrightarrow{A}_1) ] \\ \phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} (|\overrightarrow{SP}'| + |\overrightarrow{P'O}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [ \overrightarrow{U}_3 \cdot \overrightarrow{A}_2 + \overrightarrow{U}_4 \cdot (\overrightarrow{A}_3 - \overrightarrow{A}_2) ] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [ (\overrightarrow{U}_1 + \Delta\overrightarrow{U}_1) \cdot \overrightarrow{A}_2 + (\overrightarrow{U}_2 + \Delta\overrightarrow{U}_2) \cdot (\overrightarrow{A}_3 - \overrightarrow{A}_2) ] \end{aligned} \quad (4)$$

위상의 차이  $\phi_1 - \phi_2$  를  $\delta$ 라 하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [ (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2) - \\ &\quad \Delta \vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 - \Delta \vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2) ] \end{aligned} \quad (5)$$

이때 물체의 변위가 아주 작다면  $\Delta \vec{U}_1 \cdot \vec{A}_2 = 0$  , 그리고  $\Delta \vec{U}_2 \cdot (\vec{A}_3 - \vec{A}_2) = 0$  이므로 위 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} [ (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot (\vec{A}_1 - \vec{A}_2) ] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D} \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$n\lambda = (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{D} \quad (7)$$

위 식은 3차원 공간상의 벡터로 표현된 식이므로 3개의 식이 필요하게 되지만 광학계를 구성할 때  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 0°로 하여 측정하려는 변위를 PO방향과 일치시켜 면외변위(out-of-plane displacement), 즉 관찰방향에 대한 변위를 측정한다면 다음과 같은 1개의 식으로써 변위가 결정된다.

$$d = n\lambda / (\cos \alpha + \cos \beta) = n\lambda / 2 \quad (8)$$

### 2.3 위상변이법(phase stepping method)

변위의 정량화를 위해 사용된 위상변이법은 PZT(piezoelectric transducer)를 이용하여 물체의 변형에 따른 간섭 위상값을 구하는 방법이다.<sup>11)</sup> 이 방법은 식(3)으로부터 물체의 각 지점의 위상값을 알아내기 위하여 PZT를 부착시킨 거울을 레이저 파장의 수분의 일 정도로 미세이동시켜 식(9)와 같이 상대적인 위상차를 지니는 화상을 3개 또는 4개를 화상처리 장비에 입력한 후 이를 식(10)에 대입하여 물체의 각 지점에서의 위상값을 구하여 변위의 크기와 부호를 알 수 있게 되는 위상도(phase map)를 계산해낼 수 있다. 그리고 위상도는  $2\pi$ 마다 불연속성을 지니게 되는데 이 불연속성은 펼침(unwrapping)에 의하여 해소되어 물체 표면에서 발생된 변위의 양이 연속적으로 나타나게 된다.<sup>12)</sup>

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi] \\ I_3(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\Delta\phi] \\ I_4(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\Delta\phi] \end{aligned} \quad (9)$$

$(\Delta\phi = 90^\circ)$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (10)$$

### 2.4 결함 추출

기존의 홀로그래픽 간섭법에서의 결함추출방법은 결함이 없는 압력용기의 하중조건과 경계조건 등을 정한 후 전산기를 이용하여 수학적 방법으로 변형의 결과를 계산해내고 이 결과를 실제 결함에 의한 변형이 기록된 화상의 결과에 대하여 곡선맞추기(curve fitting)등의 방법을 도입하여 결함을 검출해내는 방법이다.<sup>13)</sup> 그러나 이 방법은 수리적인 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 사용하여 결함부위의 급격한 변형을 검출해내었다.<sup>14)</sup> 즉 식(10)에 의해 구해진 위상도의 불연속성이 제거된 화상이 얻어지면 변형시 발생된 변위의 크기는 각 지점의 화소의 강도로써 나타내지는데 결함이 있는 부위는 주변의 부분에 비해 상대적으로 기울기가 큰 변형을 보이게 된다. 그러므로 주변 화소간의 차분값을 구해주게 되면 결함부위의 추출이 가능해지게 된다.

### 3. 실험 방법

본 실험은 실시간 홀로그래픽 간섭법을 적용한 광학계에서 이루어졌다.(Fig. 2) 가간섭성광원으로서 514.5nm의 파장을 지니는 Ar<sup>+</sup>레이저를 사용하였고 열가소성수지를 기록매체로 이용하는 홀로카메라를 사용하였다. 그리고 정량적인 변형의 측정을 위하여 홀로그래프의 관찰면에 CCD카메라를 위치시키고 기준파의 광경로를 변화시켜 위상차를 주기 위해 광학계 내에 PZT를 설치하였다. 시편은 길이 33cm, 외경 10cm, 두께 0.5cm인 강관(steel tube)으로 제작된 압력용기이며 표면에는 무광택 백색도료를 도포하였다.(Fig. 3) 압력용기 내부의 결함은 방전가공으로써 인공적으로 도입되었으며 변형을 여기시키기 위한 방법으로 압축가스를 이용하여 내부에 압력을 가하였다.

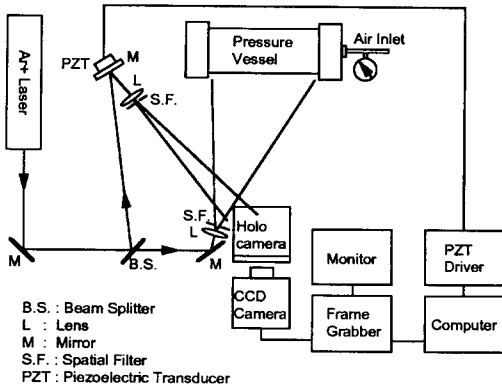


Fig.2 Optical Arrangement

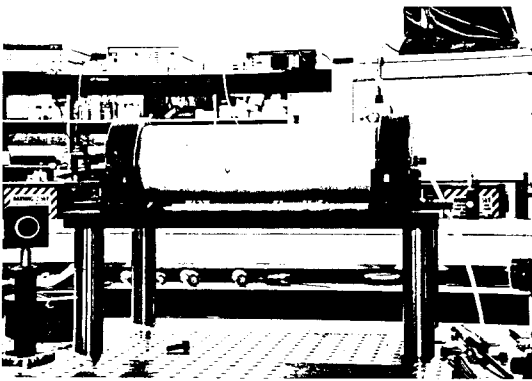


Fig.3 Specimen

ASME section XI은 원자로에 관계되는 압력용기에 대한 규정으로서 이 내용에 의한 결함의 차원은 결함의 길이, 그리고 용기의 두께에 대한 결함 깊이의 비로써 정의되어있다. 그리고 결함의 방향에 따라 축방향 결함(axial flaw)과 원주방향 결함(circumferential flaw)으로 분류하고 있다.<sup>15)</sup>(Fig.4)

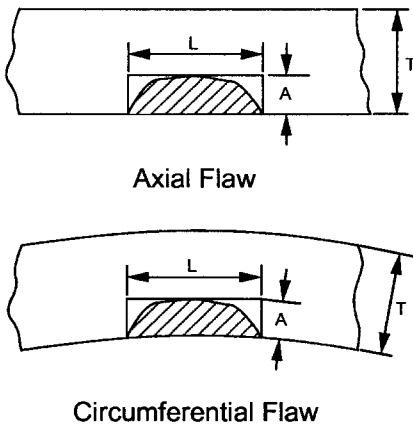


Fig.4 Defect Characterization

본 실험에서는 Table 1과 같은 다양한 길이와 방향을 지니는 결함이 인공적으로 가공된 압력용기에 대하여 결함 검출이 수행되었다. 변형의 정량화를 위해 화상처리장비를 이용하여 변위의 크기와 부호가 계산되었고 화상처리를 통하여 결함부위를 찾아내고 방향 및 크기를 검출하였다.

Table 1 Specification of Axial Defects

defect	length	depth	thickness
1	10	2	5
2	25	2	5

UNIT : mm

#### 4. 결과 및 고찰

Fig.5는 홀로그래픽 간섭법을 결함이 없는 압력용기에 대하여 적용시킨 결과로서 시편의 관측 가능한 면에서는 비정상적인 변형은 보이지 않고 있다. 그리고 좌우에 대하여 그다지 대칭적이지 않은 간섭무늬를 보이고 있는데 이는 가압시 시편의 좌우가 완전히 구속되지 못하여 약간의 강체운동(rigid body motion)에 의하여 발생된 변위가 압력에 의한 변형에 포함되어 발생된 것이라 추정된다.

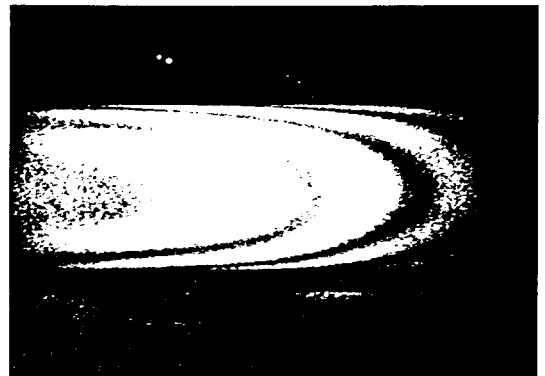


Fig.5 Fringe without Defect

Fig.6은 축방향 결함에 대한 가압시의 변형이 간섭무늬로서 가시화되었다. 관찰되는 간섭무늬에 의하여 가로방향으로 결함이 존재하고 있는 것을 볼 수 있다.

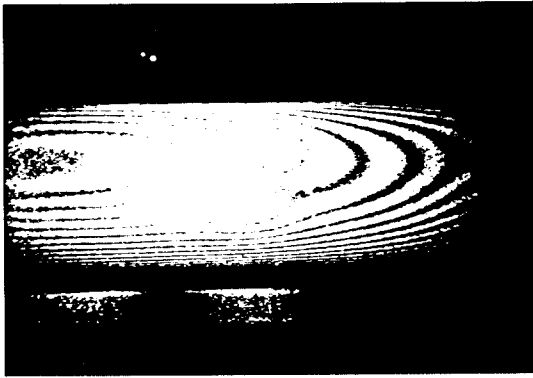


Fig.6 Fringe with Axial Defect

Fig.7은 원주방향 결함에 대한 변형의 간섭무늬를 보이고 있으며 간섭무늬의 형태에 의해 세로 방향으로 존재하는 결함이 가시화되었다.

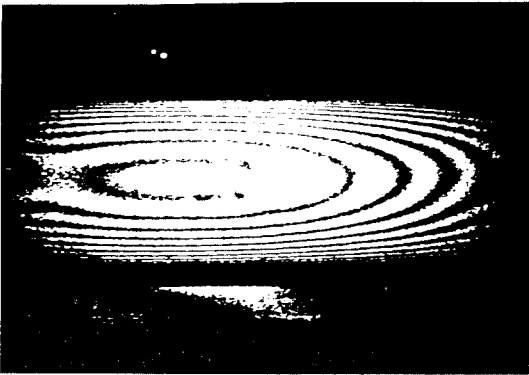


Fig.7 Fringe with Circumferential Defect

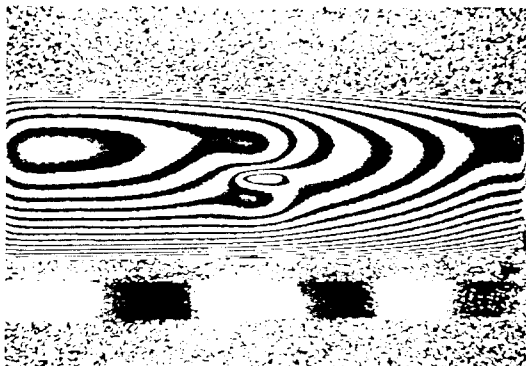


Fig.8 Phasemap of Displacement

Fig.8은 축방향으로 존재하는 결함에 대한 변형을 위상변이법에 의해 위상도로서 나타낸 사진으로 이 위상도를 화상처리 기법으로 불연속성을 제거하여줌으로써 시편의 전체의 변위를 화소의 강도로서 나타낼 수 있다. 이 결과를 3차원화하여 표시한 결과는 Fig.9와 같다. 그리고 결함에 의한 변형의 특성을 살펴보면, 결함이 없는 압력용기는 가압시 전체적으로 팽창이 이루어진 결과를 보이게 되고 내부의 결함이 존재하는 압력용기의 경우에는 결함이 존재하는 부위의 외부표면은 압력용기의 내부방향으로 후퇴되는 양상을 보였다.

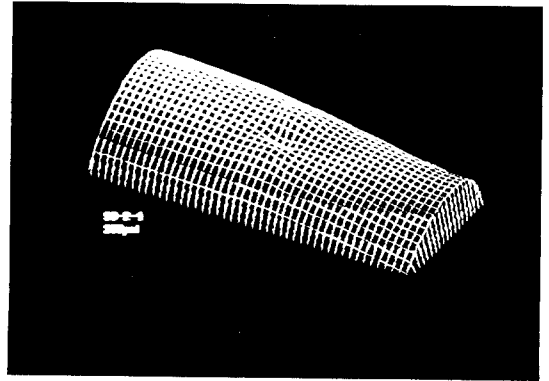


Fig.9 3-Dimensional Plot for Unwrapped Image

Fig.10은 Fig.9의 원화상을 화상처리하여 얻어진 결과로서 축방향으로 존재하는 결함을 깨끗하게 검출해낼 수 있었다. 그리고 화상의 전체적인 형태는 초음파법의 C-scan의 결과와 유사한 점을 볼 수 있다.

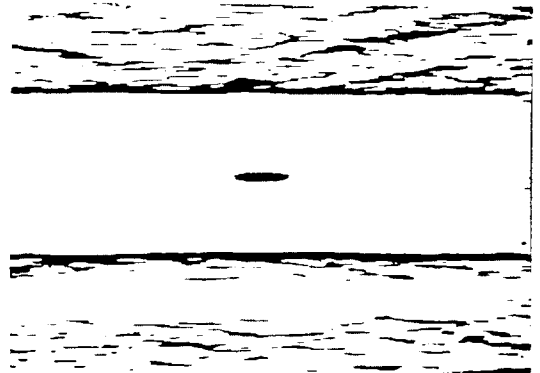


Fig.10 Defect Extraction by Image Processing

Fig.11은 실제의 축방향 결함의 크기와 홀로그래픽 간섭법과 화상처리에 의해 얻어진 결함의 크기를 비교한 도표로서 위상단에서 좌하단으로 연결된 대각선은 화면상의 화소의 갯

수와 실제 실이와의 관계를 나타내는 직선이고 결함1과 결함2에 대하여 압력변화량에 대한 검출된 결함패턴의 길이방향의 축소수의 변화량을 보여준다. 각 결함이 존재하는 시편에 대하여 60, 100, 150, 200 psi의 압력차를 가해주었을 때의 검출된 결함길이를 나타내고 있다. 이 도표로부터 압력의 차가 일정한 경우에는 쉽게 결함의 크기를 결정할 수 있음을 알 수 있고, 압력의 차가 일정하지 않은 경우에는 어느 정도 오차를 지니리라 예상이 된다.

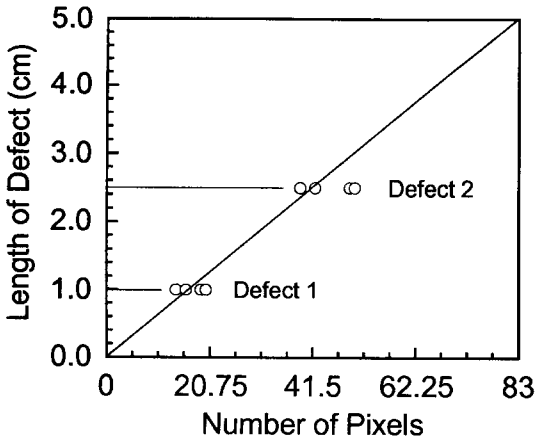


Fig.11 Comparison Actual and Detected Size of Defect

## 5. 결 론

홀로그래픽 간섭법과 화상처리기법을 이용한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 결함의 방향을 파악할 수 있었다.
- 2) 결함의 길이를 정량적으로 판단할 수 있었다.

이외에도 내부에 결함이 존재하는 압력용기의 내부에 압력이 가해지면 결함이 위치한 지점의 외경의 표면이 주변이 팽창되는 현상과는 달리 함몰이 됨을 알 수 있었다. 그리고 화상처리기법에 의해 얻어진 결함데이터에 대한 패턴인식 등의 알고리즘을 적용시키면 결함검사의 자동화도 가능할 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

1. R.W. Nochols, "In-service Inspection as an aid to steel pressure vessel reliability", Reactor Inspection Technology, Proceeding of a BNES symposium, pp.24-37, 1975

2. D.L. Mader, "Holographic and nonholographic NDT for nuclear and coal-fired power plants", SPIE Vol.604 Holographic Nondestructive Testing, pp37-56, 1986
3. R.K. Erf, "Holographic Nondestructive Testing", Academic Press, pp.289-301, 1974
4. D. Gabor, "A New Microscopic Principle", Nature(London) Vol.161, pp.777-778, 1948
5. E. Hecht, "Optics", Addison-Wesley Publishing Company, pp.593-610, 1987
6. J.R. Meyer-Arendt, "Introduction to Classical and Modern Optics", Prentice Hall, pp.346-351, 1989
7. P. Hariharan, "Optical Holography", Cambridge University Press, pp.207-212, 1984
8. R. Jones, C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, pp.64-121, 1989
9. H.M. Smith, "Holographic Recording Materials", Springer-Verlag, pp.171-172, 1977
10. 강영준, 문상준, 최장섭, "홀로그래픽 간섭법을 이용한 미소변형 측정법", 한국정밀공학회 '94년도 추계학술대회 논문집, pp.273-278, 1994
11. P. Hariharan, "Basic of Interferometry", Academic Press, pp.95-98, 1992
12. W. Ostren, R. Hofling, J. Saedler, "Two computer-aided methods for data reduction from interferograms", SPIE Vol.863 Industrial Optoelectronic Measurement Systems Using Coherent Light, pp.105-113, 1987
13. D.L. Mader, "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, 1984
14. 河田 聡, 南 茂夫, "科學計測のための画像データ處理", CQ 出版社, pp.169-173, 1994
15. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 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, 1989