

전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구(I)

A Study on Measurement of Internal Defects of Pressure Vessel by Digital Shearography(I)

강영준*†, 박낙규**, 유원재**, 김경석***

Young-June Kang*†, Nak-kyu Park**, Won-Jae Ryu** and Kyung-Suk Kim***

초 록 원자력 발전소나 화학공장 등에서 사용되는 보편적인 부재중 하나인 압력배관은 사용중에 내부에 부식 등의 원인으로 결함이 발생되어 구조적 강도나 안전에 문제를 야기한다. 따라서, 이런 결함의 검출은 중요한 문제이다. 현재 신뢰성이 인정되어 사용되는 기존의 비파괴검사법으로는 초음파나 X선 그리고 와전류에 의한 방법 등이 있다. 그렇지만 이러한 방법들은 검사하고자 하는 대상과 거의 접촉에 가까운 형태로 검사가 진행되고 있으며, 결함은 넓은 영역에 걸쳐 한번에 검출되지 못하고 탐촉자나 필름이 위치하는 부분으로 검사영역이 한정되는 단점이 있다. 그래서 검사에 많은 시간과 경비가 소모되고 있다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 극복할 수 있는 레이저를 이용한 전자 전단 간섭법으로 결함을 측정하였다. 그리하여 압력용기의 내부에 존재하는 다양한 결함의 유무와 결함의 방향을 변위구배를 나타내는 간섭무늬로 검출하고, 검출된 결함에 위상 이동법을 적용하여 정량적으로 측정할 수 있었다. 본 연구는 두 편으로 구성된다. 그 첫 번째는 전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 검출에 관한 연구이고, 두 번째는 그 측정시스템의 오차분석에 관한 연구로 구성되어 있다.

주요용어: 배관, 내부결함, 전단 간섭법, 압력용기, 광학적 방법

Abstract Pipelines in power plants, nuclear facilities and chemical industries are often affected by corrosion effects. It is important to inspect the internal defects in pipelines in order to guarantee safe operational condition. We have taken relatively much time, cost and manpower to use conventional NDT methods because these methods are contact measuring methods. In this paper, we used digital shearography, a laser-based optical method which allows full-field measurement of surface displacement derivatives. This method has many advantages in practical use, such as low sensitivity to environmental noise, simple optical configuration and real time measurement. The experiment was performed with pressure vessels which has different internal cracks and detected internal cracks in the pressure vessels at a real time using phase shifting method.

Keywords: pipeline, internal defect, shearography, pressure vessel, optical method

1. 서 론

원자력 발전소나 화학공장 등에서 많이 사용되어지고

있는 보편적 부재의 하나인 배관이나 압력용기는 종종 부식작용에 의해서 내부에 결함이 발생하게 된다. 이러한 내부결함을 검출하고 검사할 수 있는 보다 정확하고 신

속한 유지보수방법의 개발에 대한 필요성이 날로 커져 가고 있다[1]. 주기적인 점검을 위해 현재 주로 사용되고 있는 비파괴검사 방법으로는 초음파(Ultrasonic Wave)[2]를 이용하거나 X선[3] 또는 와전류[4] 등을 이용하는 방법들이 있다. 위의 방법들은 검사 시 검사대상과 거의 접촉에 가까운 상태에서 검사가 진행되므로 취급이 어렵고, 넓은 영역에 걸쳐서 결함을 검출하고자 할 때는 검사에 많은 시간이 소모된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 방법이 갖고 있는 이러한 단점을 극복하는 비접촉 방법이며 한번에 검출하지 못하는 단점을 개선해 줄 수 있는 새로운 방법인 전자 전단 간섭계를 이용하였다[5-7].

전자 전단 간섭계는 기존에 결함검출을 위해 사용되었던 홀로그래피 방법을 이용한 광학적 결함검출 방법[7]에 비해 광학적인 구성이 간단하고, 진동 등 환경적인 소음에 상당히 둔감하기 때문에 소형 경량화를 통해서 실제 현장에 적용하기가 대단히 유용한 방법이다. 또한 이 방법 역시 레이저빔의 가간섭성을 이용하기 때문에 레이저가 조사되는 영역에 대해서 한번에 결함을 검출해 낼 수 있고 CCD 카메라와 화상처리 시스템을 이용해서 실시간적으로 계측할 수 있기 때문에 기존의 비파괴 검사 방법의 가장 큰 단점으로 지적되어 온 시간소비를 획기적으로 줄일 수 있다.

본 연구는 두 개의 세부연구로 구성되어 있다. 그 첫 번째는 전자 전단 간섭계를 이용하여 압력용기의 내부결함을 검출하기 위한 연구이고, 두 번째는 그 측정시스템의 오차 분석에 관한 연구이다. 본 논문은 이중 첫 번째

연구에 관한 것으로, 방전가공을 통해서 길이와 깊이가 서로 다른 축 방향의 결함과 원주 방향의 결함을 압력용기의 내부에 가공하는 방법을 통해서 인위적인 결함을 도입한 압력용기를 제작하였다. 먼저, 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS 프로그램을 이용하여 내부에 결함을 가진 압력용기를 2D와 3D로 모델링하여 내압을 가했을 때 결함의 위치에 따른 변형 형상과 이 때 발생하는 변위구배의 형태에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 압력용기의 내부를 질소가스로 가압하는 방법에 의해서 변형을 여기시킨 후 래터럴 전자 전단 간섭계로 결함을 검출하고 그 결과값을 유한요소해석 결과와 비교하여 보았고, 결함의 길이와 깊이 그리고 방향에 대해서 서로 비교하여 보았다.

2. 래터럴 전자 전단 간섭계 (Lateral Digital Shearography)의 원리

Fig. 1은 홀로그래피와 전단 간섭법의 간섭무늬를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전단 간섭법으로 측정하는 홀로그래피와 같은 동심원이 아닌 나비(butterfly) 무늬로 불리는 특유의 형태로 측정되어진다.

Fig. 2는 래터럴 전자 전단 간섭계의 개략도이다. 레이저에서 나온 빛이 물체면에 조사된 후 반사되어 나와서 광분할기에서 두 개의 빔으로 나누어진 후 하나는 위에 있는 거울에 반사되어 상면에 맺히고, 나머지 하나는 옆에 있는 거울에서 반사되어 다시 광분할기로 들어가서 상면에 맺히게 된다. 이때 그림에서 볼 수 있듯이 옆에 있는 거울을 살짝 회전시켜주면 회전된 거울에서 반사

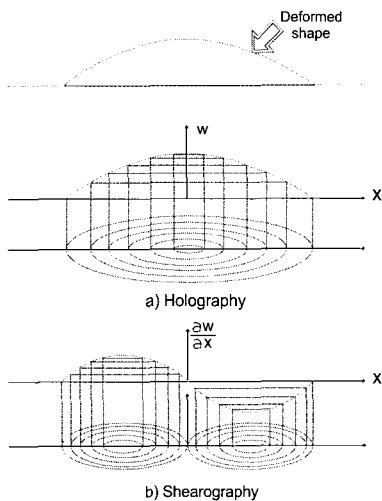


Fig. 1 Holographic & shearographic fringe

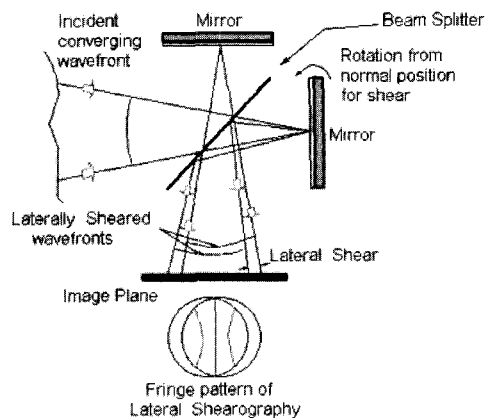


Fig. 2 Schematic diagram for a lateral digital shearography

된 파면은 회전하지 않은 거울에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단되어 상면에 맞히게 된다. 이렇게 변형전의 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서의 같은 방식으로 저장한 스펙클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 Fig. 1에서 보는 것처럼 나비 모양의 간섭무늬가 형성된다.

Fig. 3에서 보면, 정적인 변위구배 미분(displacement gradient derivative)[8]을 측정하기 위한 래터럴 전자 전단 간섭계에서는 전단량 S_x 만큼 떨어진 두 점 P와 Q가 상면에서 서로 간섭[9,10]을 일으킨다. 즉, 화상모니터 상에서 두 점 P와 Q가 서로 겹쳐진 형태로 보여진다. 따라서 래터럴 전자 전단 간섭계에서는 변형량이 아닌 변형 후 두 점의 변형량의 차이인 Δd 의 위상차가 간섭무늬[11] 정보로써 표시되어진다. 이 두 점 사이의 거리를 전단량 S_x 라하고 사용된 레이저의 파장을 λ , 편이상 확대 배율을 1이라 하면, 상 이동이 x방향이면 결상면의 한 점을 비추는 두 영역의 거리도 x방향이다. 여기서 \vec{d} 를 변형전의 한 점 P가 전단 되어 나타나는 변형 후의 상응하는 점으로의 벡터라고 하고 그 수직 성분을 d_1 , 수평 성분을 d_2 라고 하면, 또 다른 한 점 Q에서 변형 후의 상응하는 점으로의 벡터는 $\vec{d} + \Delta \vec{d}$ 로 나타낼 수 있으며 \vec{d} 에 대한 수직, 수평 성분을 각각 $\Delta d_1, \Delta d_2$ 라고 하자. P점과 Q점에서 변형 전과 후의 위상차를 구해보면, P 점에서의 위상차[6]는

$$\Delta \phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d}) \quad (1)$$

Q 점에서의 위상차는

$$\Delta \phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot [(\vec{d} + \Delta \vec{d})] \quad (2)$$

래터럴 전자 전단 간섭계는 두 점 P와 Q사이에서의 변형의 차이를 계측하기 때문에 간섭계에서 간섭무늬가 나타내는 위상차 $\Delta \phi$ 는 식 (2)에서 식 (1)를 뺀 것과 같다.

따라서

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot [(\vec{d} + \Delta \vec{d}) - \vec{d}] \quad (3)$$

P점과 Q점에서 변형 전후의 위상차를 Fig. 3에서 직접 구해보면

$$\Delta \phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} [(1 + \cos \theta)d_1 + (\sin \theta)d_2] \quad (4)$$

$$\Delta \phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(1 + \cos \theta)(d_1 + \Delta d_1) + (\sin \theta)(d_2 + \Delta d_2)] \quad (5)$$

식 (3)에서 Δd 는 테일러 정리를 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta \vec{d} = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (6)$$

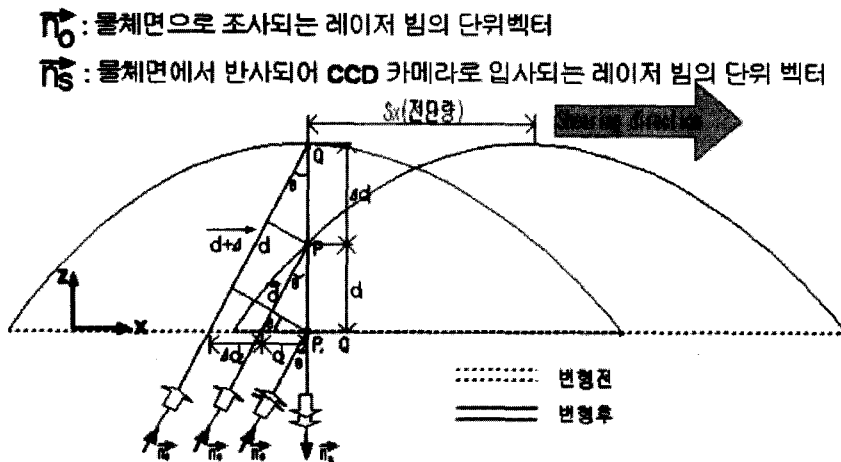


Fig. 3 Vector diagram to calculate phase difference

Δx 는 상면에서 S_x 와 같고 이 값은 충분히 작기 때문에 위의 식에서 2차 이상의 고차항은 무시할 수 있다. 따라서 식 (6)은

$$\Delta \vec{d} = \sum_i \frac{\partial d_i}{\partial x_i} S_x, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

그러므로 식 (7)에서 Δd_1 과 Δd_2 를 구해서 이 값을 식 (5)에 대입하면

$$\Delta \phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(1 + \cos \theta)(d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x) + \sin \theta (d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x} S_x)] \quad (8)$$

θ 가 작으면 $\sin \theta \cong 0$ 이므로

$$\Delta \phi = \Delta \phi_Q - \Delta \phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (9)$$

$$\Delta \phi \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (10)$$

따라서 전단 간섭계에 의해 측정되는 간섭무늬는 인접한 두 점에서의 변형률인 $\partial d_1/\partial x$ 와 전단량, S_x 의 함수로 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 전단량 S_x 의 값이 0에 가까울 수록 식 (10)은 오차가 작은 정확한 식이 되지만, 반대로 S_x 의 값이 0에 가까울 수록 결함을 검출할 수 있는 간섭계의 민감도가 반비례해서 감소함을 알 수 있다. 따라서 적절한 S_x 값을 정하는 것이 중요하다. 또한, 간섭계의 구성 상 전단량을 주는 거울을 조정하여 전단량을 변화시켜주면 간단히 광학계의 민감도를 조절할 수 있는 특징이 있음을 알 수 있다.

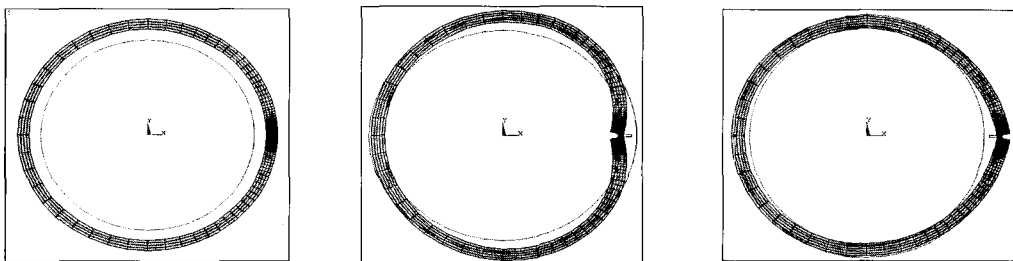
3. 압력용기의 유한요소 해석

본 해석에서 사용된 유한요소 해석코드는 상용의 ANSYS 범용 해석코드이며, 모델링에는 사각형 솔리드 요소인 PLANE82를 사용하였다. 이 요소는 2차원 요소로서 8개의 절점을 가지고 있고, 자유도는 x, y축에 대한 변위이다. 사각형 솔리드 요소를 사용하여 결함의 주변은 작고 많은 요소를 배치하고, 결함이 없는 반대쪽에는 크고 적은 개수의 요소를 배치하여 해석을 수행하였다.

모델링한 시편은 모두 7종류로서 한 개는 결함이 없는 압력용기를 모델링하였고, 나머지 2개는 모두 25mm의 결함길이와 60%의 결함깊이로 결함이 시편의 내부와 외부에 존재하는 경우로 모델링하였다.(Fig. 4) 변형 여기 방법은 내압을 주는 방법을 선택하였다.

결함이 존재하지 않는 시편의 경우에는 내부에서 압력을 가해주면 전체적으로 균일하게 팽창함을 알 수 있었다. Fig. 4(a)에서 내부의 점선은 압력을 가하기 전의 압력용기의 형태이고 외부의 큰 원형 단면은 압력이 가해진 후의 압력용기의 변형된 결과를 나타낸다.

Fig. 4(b)는 압력용기의 내부에 결함이 존재하는 경우의 해석 결과이다. 이 결과를 통해서 결함이 존재하는 부분 이외의 부분이 팽창하는 형태를 띄는데 비해 결함이 존재하는 부분의 표면에서의 변형은 안쪽으로 함몰되어 가는 형태로 나타남을 알 수 있으며 또한 Fig. 4(c)는 압력용기의 외부에 결함이 존재하는 경우의 해석 결과인데 결함이 외부에 존재하는 경우에는 내부에 결함이 존재하는 경우와는 반대로 외부로 돌출되는 형태로 변형이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해서 가압 시 결함이 존재하는 압력용기의 변형의 양상을 알 수 있었고



(a) defect-free tube

(b) Internal defect

(c) External defect

Fig. 4 2D FEM Results

아울러 압력용기가 파괴로 진행 시 결함이 존재하는 위치에 따라 파괴 형태가 달라지리라는 것을 예상할 수 있다. 특히 결함 측정 시 외부 결함의 영향과 내부 결함의 영향이 다른 특성을 이용하면 변형의 방향을 비교함으로써 결함의 존재 위치를 파악할 수 있는 자료로서 이용이 가능하리라 예측된다. 압력용기의 3차원 모델링은 8개의 노드를 가지는 SOLID45를 이용하여 생성하였다.

SOLID45는 3차원 공간상에서 8개의 절점을 지나며 각 절점에 대하여 x, y, z의 3방향의 자유도를 갖는 요소이다. 먼저 ASME code section XI에서 정한 검사방법으로서의 기준이 되는 결함의 길이와 깊이인 25mm의 길이와 40%의 깊이의 축 방향과 원주 방향의 결함을 가진 압력용기를 모델링하여 해석을 수행하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 축 방향과 원주 방향의 결함에 대한 변형과 변위구배에 대한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5는 축 방향으로 결함이 존재하는 압력용기의 해석 결과로 (a)에서 보면 가운데 부분에 결함이 존재함으로써 타원형 형태로 함몰된 부분을 나타내는 영역이 나타남을 확인할 수 있다. (b)는 (a)에서의 변형에 대한 변위구배에 해당하는 나비(butterfly)모양의 전형적인 전단 간섭법의 간섭무늬 형태가 나타남을 확인할 수 있어서 이 실험결과를 통해서 광학적 방법인 전단 간섭법을 이용하여 압력용기의 내부결함을 검출할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 6은 원주 방향으로 결함이 존재하는 압력용기의 해석결과로써 Fig. 5와 비교해보면, 같은 길이와 깊이의 결함을 갖고 있지만 변형의 영향은 축 방향 결함에 비해 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 이론적으로 원통형 용기에서 내압을 가해지면 축 방향에 작용하는 응력은 원주 방향에 작용하는 응력의 1/2에 불과하기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 같은 길이나 깊이의 결함의 경우에는 압력용기의 안정성의 관점에서는 축 방향의 결함이 원주 방향의 결함보다 훨씬 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 축 방향의 결함을 검출하고 길이를 측정하는 데 관심을 집중시키는 것이 타당하다고 생각하여 이에 대한 실험을 수행하였다. 또한 해석결과를 보면 축 방향 결함의 경우는 축 방향으로 길쭉한 타원형 형상을 띄고 있고 원주 방향의 결함은 원주 방향으로 길쭉한 타원형 형태로 변위구배가 나타날 것임을 예측할 수 있다.



(a) Deformation result



(b) Displacement derivatives of Z direction

Fig. 5 Contour plot of 3D solid model with axial flow

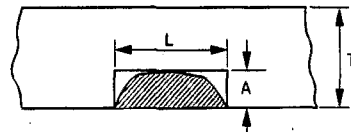


(a) Deformation result

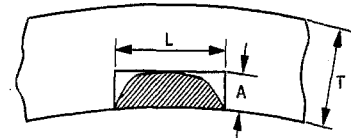


(b) Displacement derivatives of θ direction

Fig. 6 Contour plot of 3D solid model with circumferential flow



(a) Axial flow



(b) Circumferential flow

Fig. 7 Flow of pressure vessel

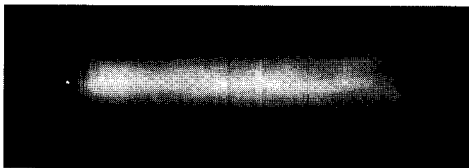
4. 실험 및 결과

실험에 사용된 레이저는 Argon 레이저로 파장이 514nm이며 150mW의 출력의 레이저 빔으로 실험을 수행하였다. 또한 시편으로 사용된 압력용기는 ASME code section XI에 나와 있는 압력용기에 대한 규정에 의거한 결함을 가진 것으로, 결함의 생성은 방전가공법을 이용하여 압력용기의 내부에 축 방향과 원주 방향의 결함을 결함의 길이와 깊이를 다르게 해서 가공하였다. 이 결함의 형상과 내용이 Fig. 7과 Table 1에 표시되어 있다

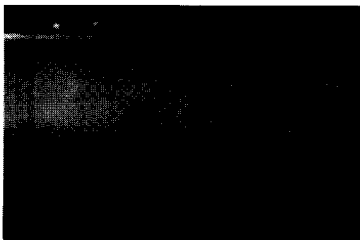
Fig. 8은 실험에 사용한 시편과 검사영역을 나타내는 사진으로 압력용기의 재질은 탄소강이고 시편의 길이는 33cm, 외경은 10cm, 두께는 0.5cm로 되어 있으며 그림에서 보듯이 시험을 위해서 양끝의 덮개 부분을 앞과 뒤 그리고 옆에서 구속하여 주었다. 압력용기의 변형을 여기

Table 1 Specification of axial defects

Specimen	Length of defect(mm)	Depth of defect(mm)
0	0	0
1	5	2
2	10	2
3	15	2
4	20	2
5	25	2



(a) The shape of specimen(33cm × 10cm)



(b) Defect examination area (9.89cm × 9.27cm)

Fig. 8 Photograph of specimen

시키는 방법은 질소가스를 사용하여 내부를 가압하는 방법을 사용하였다. 여기서 가압을 해준 압력은 1960kPa (20kgf/cm²)로 Raju와 Newman의 계산식(식 11참조)으로 실험에 사용된 모든 시편에 대하여 응력 확대계수를 계산하여 보면, 그 최대값이 2350 kPa√m (2.14 ksi√in) 정도로 계산되어진다. 이 값은 일반적인 강재의 K_{Ic} 에 비해서 수십 분의 일 정도에 불과하기 때문에, 변형을 여기 시켜 주기 위해서 가한 압력은 압력용기의 결함 진전에 영향을 미치지 않았다고 판단할 수 있었다. 실험 시 광학계의 구성을 통해서 가로 9.89cm×세로 9.27cm 크기의 검사영역을 한번에 조사하였다.

$$K_I = \frac{bR}{t} \sqrt{\frac{\pi b}{Q}} F_i \left(\frac{b}{a}, \frac{b}{t}, \frac{t}{R}, \phi \right) \quad \text{(Fig. 10, Table2 참조) (11)}$$

여기서

$$F_i = \frac{t}{R} \left(\frac{R_0^2}{R_0^2 - R^2} \right) [2G_0 - 2 \left(\frac{b}{R} \right) G_{1+3} + \left(\frac{b}{R} \right)^2 G_2 - 4 \left(\frac{b}{R} \right)^3 G_3]$$

로 경계 보정 인자 (boundary-correction-factor)이며 $Q = 1 + 1.164(b/a)^{1.65}$ 이다. 또한 a, b, t, R은 각각 결함길이의 1/2, 결함의 깊이, 시편의 두께, 압력용기의 내경을 나타내고 있다.

본 실험을 위해 구성된 레터럴 전자 진단 간섭계를 Fig. 9에 개략적으로 나타내었으며 이를 살펴보면 레이저에서 나온 빔이 M1거울과 확산판을 지나 확산된 파의 형태로 압력용기에 조사된다. 압력용기에서 반사된 빔은 광분할기에서 두 개의 파로 나누어져서 M2와 M3로 입사한다. 물체면을 기준으로 M2에서 반사되어 CCD 카메라에 들어온 빛과 M1에서 반사되어 CCD에 들어온 빛의 강도 분포가 CCD 카메라를 통해 화상을 저장하는 프레임 그래버에 저장되고 가압을 통해 변형을 준 후의 화상을 다시 한번 프레임 그래버에 저장한 후, 이 두 값을 서로 빼주면 화상 모니터에 변위구배의 형태의 간섭무늬가 나타난다. 이런 정적 변형 상태에서 변형률을 정량적으로 측정하기 위해 M3에 부착된 PZT를 PZT 컨트롤러를 이용해서 4번의 위상이동을 수행해 주면 변위구배 정보에 대한 위상지도를 얻게 된다. 전단량과 가압량은 여러 번의 실험을 통해서 시편의 모든 결함을 검출할 수 있는 값으로 결정하였으며 오차값에 특히 영향을 미칠 수 있는 전단량의 결정은 시편에 제작된 1cm의 크랙길이와 실험을 통하여 구해진 크랙길이에 대한 결과값을 비교하여 오차가 가장 적은 10mm로 하였다.

결합방향과 깊이가 그리고 결함길이에 따른 실험 결과가 Fig. 11와 Fig. 12에 나와 있다. Fig. 11(a)는 결합이 없는 경우의 간섭무늬 형태로서 아무런 간섭무늬가 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 결합 길이가 5mm정도로 아주 작은 경우의 간섭무늬로서 가운데 부분에 약하

게 검정 원과 흰 원의 형태로 나비모양의 간섭무늬가 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 11(c)는 결합 길이가 10mm로 가공된 시험편의 간섭무늬로 Fig. 11(b)에 비해서는 보다 더 선명한 나비 모양 무늬를 가운데 부분에서 발견할 수 있다. Fig. 11(d)에서 Fig. 11(f)까지 결함의 길이가 증가함에 따라서 간섭무늬가 선명해지고 크기도 커지며, 간섭무늬의 개수도 증가함을 확인할 수 있다. 또한 결함의 길이가 증가함에 따라 주변부에 미치는 변형의 영향이 점점 증가함을 확인할 수 있는데, 이는 유한요소법을 이용한 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 결과이다.

Fig. 12는 원주 방향의 결함에 대한 실험결과로 축 방향에 비해 보다 선명하고 큰 간섭무늬를 확인할 수 있는데, 이는 유한요소해석 결과에서는 축 방향에 비해 상당히 작은 변형과 변위구배를 보여 주었던 것과 실험결과가 차이가 나는 결과이다. 이러한 결과를 보여주는 이유는 전단 간섭계에서 전단을 축 방향으로 주었고, 전단량이 1cm로 상당히 큰 값이기 때문에 비록 변형량이 작다고 하더라도 변위구배를 나타내는 간섭무늬의 형성에 영향을 주는 인접한 두 점의 상대적 변위의 차가 축 방향 결함의 경우에 비해서 상대적으로 크기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 결론지을 수 있다. 원주 방향 결함 역시 길이가 증가함에 따라서 간섭무늬의 크기가 커짐을 확인할 수 있다. 축 방향 결함의 경우는 결함의 길이가 증가할수록 결함부의 주변에도 결함이 영향을 미치고 있음이 간섭무늬에 나타나 있는데, 원주방향의 결함의 경우는 결함이 있는 부분에서만 간섭무늬가 나타나고, 주변부는 비교적 영향이 적은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 축 방향 결함이 원주 방향의 결함보다도 배관의 강도에 큰 영향을 준다는

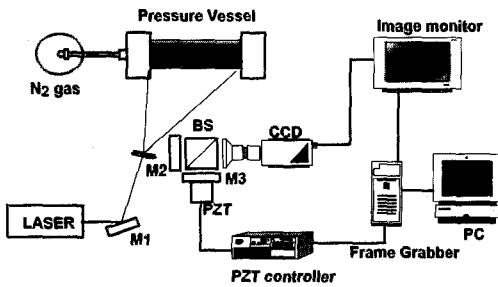


Fig. 9 Schematic diagram of lateral digital shearography

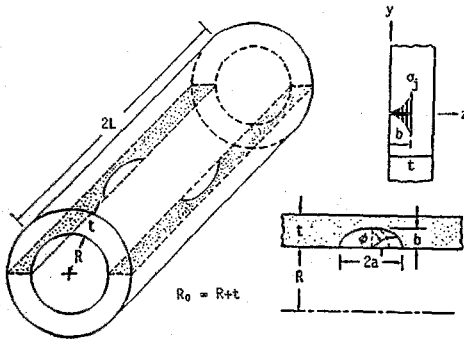


Fig. 10 Internal crack(Raju & Newman)

Table 2 Specification of specimen and flaw(Raju & Newman)

Type of loading	$\frac{2\phi}{\pi} \frac{b}{t}$	0.2			0.4			1.0		
		0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Uniform (G_0)	0	0.607	0.791	1.179	0.777	0.936	1.219	1.140	1.219	1.348
	0.25	0.740	0.932	1.284	0.810	0.948	1.164	1.068	1.126	1.200
	0.5	0.945	1.188	1.568	0.940	1.076	1.242	1.033	1.074	1.091
	0.75	1.073	1.366	1.798	1.038	1.180	1.357	1.019	1.055	1.090
	1.0	1.115	1.427	1.872	1.072	1.217	1.393	1.015	1.050	1.090
Linear (G_1)	0	0.079	0.138	0.253	0.125	0.176	0.259	0.197	0.221	0.255
	0.25	0.206	0.268	0.374	0.246	0.291	0.356	0.359	0.377	0.397
	0.5	0.422	0.503	0.619	0.442	0.487	0.538	0.541	0.554	0.555
	0.75	0.603	0.705	0.859	0.608	0.657	0.727	0.669	0.683	0.703
	1.0	0.673	0.783	0.960	0.672	0.723	0.806	0.715	0.729	0.760
Quadratic (G_2)	0	0.023	0.052	0.104	0.043	0.069	0.106	0.074	0.085	0.099
	0.25	0.075	0.105	0.154	0.097	0.119	0.149	0.153	0.162	0.170
	0.5	0.237	0.277	0.331	0.256	0.279	0.302	0.333	0.339	0.337
	0.75	0.429	0.480	0.560	0.441	0.466	0.505	0.514	0.520	0.533
	1.0	0.514	0.571	0.671	0.523	0.549	0.601	0.588	0.596	0.618
Cubic (G_3)	0	0.010	0.027	0.056	0.021	0.036	0.056	0.038	0.044	0.051
	0.25	0.032	0.049	0.077	0.044	0.058	0.074	0.075	0.080	0.085
	0.5	0.146	0.169	0.199	0.161	0.174	0.187	0.218	0.222	0.219
	0.75	0.332	0.363	0.412	0.346	0.360	0.385	0.417	0.420	0.429
	1.0	0.438	0.462	0.529	0.441	0.456	0.493	0.512	0.515	0.532

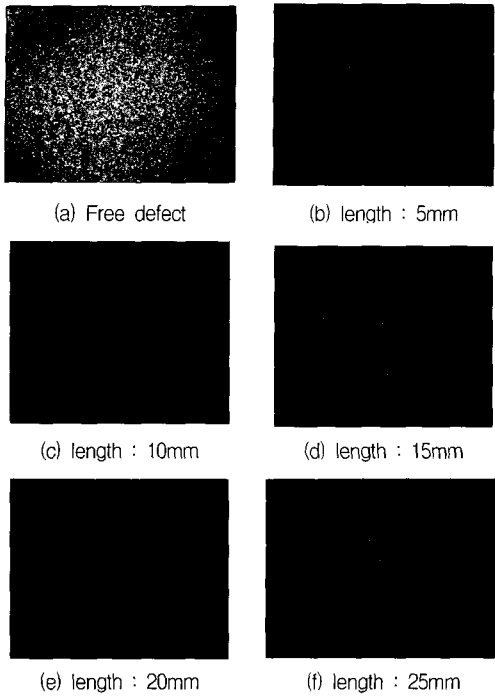


Fig. 11 Experimental results of axial defect (depth of defect : 2mm)

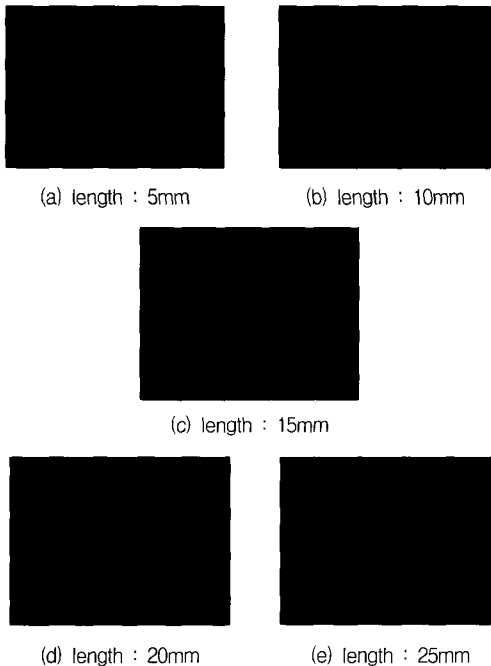


Fig. 12 Experimental results of circumferential flaw (depth of defect : 2mm)

사실을 알 수 있고, 이러한 결론은 유한요소해석 결과와도 잘 일치하는 것이다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교해 보면 가장 먼저 간섭무늬의 형태가 다름을 알 수 있다. 축 방향의 결함이 옆으로 길쭉한 형태를 띄는데 비해, 원주 방향의 결함은 세로방향으로 길쭉한 형태를 띠어 확인할 수 있다. 따라서 간섭무늬의 형태만 가지고도 결함의 방향을 판단할 수 있음을 확인할 수 있다.

본 실험에서 다양한 결함깊이를 가진 결함에 대한 실험결과들도 위 결과들과 마찬가지로 결함의 깊이가 증가함에 따라서 간섭무늬의 크기와 주변부에 미치는 영향이 증가함을 확인할 수 있었다.

Fig. 13과 Fig. 14는 위상이동법[9]을 이용해서 결함의 길이가 25mm이고 깊이가 40%인 시험편의 간섭무늬를 정량적으로 평가해 본 실험 결과이다. 결함 변형부의 각

부분에 대한 변형률을 정량적으로 분석한 3차원 그림에서 보면 래터럴 전자 진단 간섭계에 의해 측정된 간섭무늬가 들어가고 나오는 형태를 띄고 있음을 명확히 알 수 있다. 또한 변위구배의 형태가 처음에는 (-)기울기를 갖고 나중에는 (+)의 기울기를 갖는 것을 알 수 있는데, 이는 압력용기의 결함부가 내부로 함몰되기 때문에 나타나는 변위구배이다. 이러한 변위구배의 모양 또한 2차원 유한요소해석에서 내부에 결함이 있을 때의 해석결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

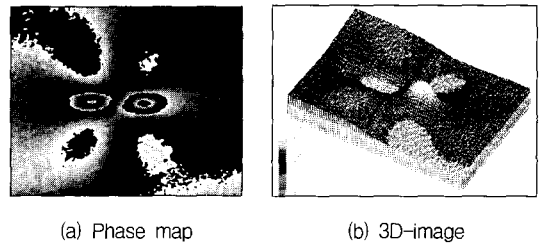


Fig. 13 3-D visualization image of the axial defect in pressure vessel

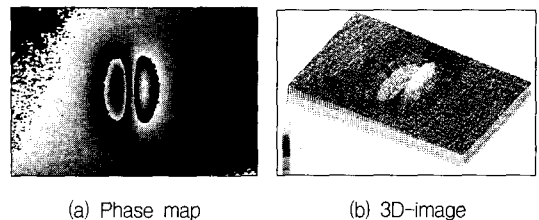


Fig. 14 3-D visualization image of the circumferential defect in pressure vessel

5. 결 론

본 연구는 레이저 전자기 전단 간섭계를 이용하여 원자력 발전소나 화학 공장 등의 보편적인 부재인 파이프 배관이나 압력용기의 내부에 부식 등의 효과로 발생하는 결함을 효과적으로 검출하는 방법에 대하여 shearography를 적용하여 보았으며, 결론은 다음과 같다. 첫째로, 레이저 전자기 전단 간섭계를 이용하여 압력용기의 내부 결함을 실시간으로 계측하였다. 둘째로, 간섭무늬의 형태를 통해서 압력용기의 내부에 존재하는 결함의 방향을 정성적으로 판별 가능함을 확인하였다. 또한, 결함의 깊이와 길이에 따른 간섭무늬의 형태를 측정 비교함으로써 결함깊이가 일정할 경우 간섭무늬를 상호 비교함으로써 결함의 길이의 대소를 정성적으로 판별할 수 있고, 그 반대의 경우도 가능함을 보였다. 셋째로는 위상이동법을 이용하여 레이저 전자기 전단 간섭계로 측정된 변형을 값을 정량적으로 측정하여 3차원 정보로 표시하여 결함의 검출을 보다 용이하게 할 수 있었다. 마지막으로, 일반적인 테이블 위에 시스템을 구성한 후, 실험을 수행하여서 결함을 바로 검출할 수 있었기 때문에 진동이나 외란 등에 의하여 실험 조건이 비교적 좋지 않은 현장에서도 본 시스템을 이용하여 비교적 손쉽게 결함을 검출할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] R.W. Nichols, "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, pp. 37-56, (1986)
- [3] Warren J. McGonagle, "Nondestructive testing," 2nd ed., McGraw-Hill, pp. 92-178, (1961)
- [4] Ernest O. Doebelin, "Measurement systems: application and design," 4th ed, McGraw-Hill, pp.251-253, (1974)
- [5] A. Ettemeyer, "Nondestructive Inspection with Shearography," SPIE, Vol. 2248, pp. 222-228, (1994)
- [6] Wolfgang Steinchen and Lianxiang Yang, "Nondestructive testing of micro-cracks using digital speckle pattern shearing interferometry," SPIE Vol. 3098, Holography and Shearography, pp. 528-535, (1997)
- [7] Y. Y. Hung, "Shearography: A Novel and Practical Approach for Nondestructive Inspection," Plenum Publishing Corporation, pp. 55-67, (1989)
- [8] W. Steinchen, L. X. Yang, M. Schuth and G. Kupfer, "Electronic Shearography(ESPI) for direct measurement of Strains," SPIE, Vol. 2248, pp. 210-221, (1998)
- [9] P. Hariharan, "Basic of Interferometry," Academic Press, pp. 95-98, (1992)
- [10] Eugene Hecht, "Optics," Addison-Wesley, pp. 760-773, (1987)
- [11] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry," Cambridge University Press, pp. 122-164, (1989)