

레이저 전단 간섭계를 이용한 압력용기의 내부 결함 평가

장경영*(한양대 기계공학부), 장석원 (한양대 대학원), 현민관 (한양대 대학원)

The Evaluation of Thin Pressure Vessel's Internal Defects by Laser Shearography

Kyoung- Young Jhang^{*} (Division of Mech. Eng., Hanyang Univ.), Seog-Weon Chang (Graduate School, Hanyang Univ.), Min-Gwan Hyun (Graduate School, Hanyang Univ.)

ABSTRACT

Internal defects of thin pressure vessel used in the power plants or the chemical plants may be created and grow due to corrosion or creep fatigue to reduce the strength and cause critical failure during operation. Therefore it is very important to detect this defect at the early stage. For this purpose, non-destructive, non-contact and highly sensitive method should be considered for on-line application. In this paper, a laser shearographic interferometer is applied to inspect circular defects and notch defects existed inside of thin pressure vessel under the presence of pressure up to 3 times of atmospheric pressure. The influences of the defect shape and size as well as the internal pressure to the characteristic pattern in the shearography fringe are investigated, and the quantitative evaluation of the defect size is tried. Also the experimental results are compared with the destructive test results to show the applicability of this method to the quantitative evaluation of internal defects in the thin pressure vessel.

Key Words : Laser Shearography (레이저 전단 간섭계), Pressure Vessel (압력용기), Internal Defect (내부결함), Reliability (신뢰성)

1. 서론

고부가, 고정밀도의 제품을 요구하는 최근의 산업 경향은 제품의 신뢰성 평가와 그 방법에 대한 관심을 증대시키고 있다. 신뢰성 평가 방법 중에서도 특히 비파괴적인 신뢰성 평가 방법에 대한 관심이 증대되고 있는데, 대표적으로는 초음파 검사법, 방사선 투과 검사법, 자분 탐상 검사법 그리고 와전류 탐상 검사법이 있다. 초음파 검사법은 내부 결함 검출에 용이하지만 접촉식이고 매질이 필요하고, 방사선 투과 검사법은 제품의 크기와 형상에 제약이 있고, 안전관리가 어렵다. 자분 탐상 검사법은 표면 결합 검출만 가능한데 강자성체의 검사에 국한되고 전극식 장비 사용 시 Arc 발생으로 검사 대상에 악영향을 끼칠 수 있고, 와전류 탐상 검사법은 표면 결합 검출에 국한된다는 단점이 있다. 위에서 열거한 방법들의 단점을 극복하기 위해 종래의 홀로그래피 간섭법에서 발전된 레이저 전단 간섭계를 이용한 신뢰성 평가 기법이 활발하게 연

구되고 산업현장에서 적용되고 있다.

레이저 전단 간섭계(Shearography)는 CCD 카메라와 컴퓨터를 이용하기 때문에 다른 계측 방법과 달리 비접촉식이고, 진영역을 실시간 고정밀도로 계측할 수 있다는 장점을 가진다. 이런 장점을 이용해 Shearography 는 지금까지 대형 구조물의 표면 변형이나 진동의 측정등에 많이 이용되어져 왔다. 그런데 만약 구조물의 내외부에 결함이 존재한다면 재료가 변형할 때 결함으로 인해 결함 이면에서의 표면 변형에 영향을 주게 되는데, 결함으로 인한 불연속적인 변형을 측정할 수 있다면 내외부의 결함의 위치와 크기를 측정하는데 이용할 수 있다고 예상된다. 하지만 아직 이 분야에는 정량적인 평가 기준이 확립되지 않았으며, 정성적인 평가에 그치고 있는 실정이다. 선행 연구들^{[1], [2]}에서는 Shearography 를 통해 결함의 검출 가능성 및 크기를 확인하였으나 정량적으로 평가 분석하기가 어려웠으므로 이 연구들은 정량 평가에 영향을 줄 수 있는 몇 가지 인자들에 대해서만 확인하였다.

본 연구에서는 측정 대상을 압력 용기로 하여 결함의 형태, 방향, 길이, 깊이와 같은 인자와 최적 조건에 따른 여러 가지 정량 평가의 데이터들을 그 래프로 나타내어 현장에서 적용 가능한 결함의 정량적인 분석을 시도하였다. 압력용기는 원자력 발전소나 화학공장에서 많이 사용되는 보편적인 부재로 사용 중 내부 부식 등의 원인으로 인한 결함으로 구조적 강도나 안전에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 따라서 인공적으로 제작한 내부 결함을 Shearography 를 이용해 정량적 정성적으로 검출함으로써 본 방법의 산업적 활용도를 높이고 적용의 타당성을 검출한다.

2. Shearography 의 기본 원리

2.1 스페클 이론

Fig. 1 에서 보듯 레이저를 평판에 조사하고 이를 CCD 카메라로 이미지를 얻었을 때 나타나는 검고 흰 작고 불규칙한 반점들을 의미한다. 이는 간섭성을 갖는 레이저가 물체에 조사되었을 때 조사된 물체의 표면이 레이저 파장에 비해 상당히 거칠기 때문에 난반사가 일어나고 난반사된 빛들 사이에서 간섭현상이 일어나 검고 흰 작은 반점들이 나타나는데 이러한 점들을 스페클이라고 한다. 스페클은 하나 하나가 그 면의 특정 점과 1:1로 대응한다는 특징 때문에 물체가 변형하게 되면 스페클 분포도 함께 변하게 된다.

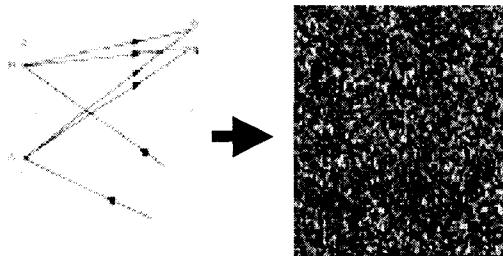


Fig. 1 Speckle Formation

2.2 스페클 간섭무늬 형성

스페클은 물체 표면에서의 정보를 나타내고, Shearography 시스템은 이러한 스페클 패턴의 정보를 이용하여 물체 표면의 변위를 측정한다. 면외 변위는 변형전과 변형후의 스페클 패턴 이미지를 차감하여 얻어지는 프린지 패턴을 통해 얻을 수 있다. 변형 전후의 스페클 정보 각각은 강도 정보만

을 기록한 것이지만, 두 정보의 이미지 처리 과정과 광학적 이론을 통하여 각 스페클의 위상정보를 얻을 수 있고 얻어진 위상 정보를 이용하여 수치적으로 정량화 할 수 있다. 따라서 물체의 변형 또는 변위 정보를 측정하기 위해서는 물체의 변형전과 변형후의 스페클 패턴이 필요한 것이다.

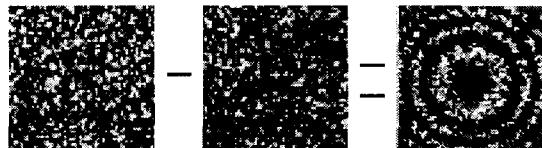


Fig. 2 Speckle theory

이 과정을 수학적으로 표현을 하면 다음과 같다.^[3] 먼저 변형전과 변형후의 이미지 강도에 관한식은 다음과 같다.

$$I_{before} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos \phi \quad (1)$$

$$I_{after} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos (\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

여기서 I_r 은 기준빔의 강도, I_o 는 물체에서 반사되어 오는 물체빔의 강도, ϕ 는 기준빔과 물체빔에 서의 위상차를 나타내고, $\Delta\phi$ 는 물체의 변형에 의해 변화된 위상차를 나타낸다.

$$\begin{aligned} I &= |(I_{before} - I_{after})| = 2\sqrt{I_r I_o} [|\cos\phi - \cos(\phi + \Delta\phi)|] \\ &= 4\sqrt{I_r I_o} \left| \sin\frac{\phi}{2} \sin\frac{1}{2}\Delta\phi \right| \end{aligned} \quad (3)$$

빛의 강도 분포는 스페클 패턴의 변형전과 변형후의 이미지를 차감한 후의 이미지(I)이며 I 값은 양과 음의 값을 동시에 가지는데 음의 값을 이미지 상에서 모두 검은색으로 표현되므로 이런 신호의 손실을 줄이기 위해 식(3)처럼 절대값을 취한다. 그러면 모니터상의 이미지 밝기는 일정한 주기성을 가지게 된다.

2.3. Shearography 의 개략도

Shearography 에서는 레이저에서 나온 빛이 물체 면에 맞고 조사된 후 반사되어 다시 광 분할기에 의해 동일한 CCD 카메라의 상면에 맷하고, 나머지 하나는 옆에 있는 거울에서 반사되어 다시 광 분할기에 의해 동일한 CCD 카메라의 상면에 맷하게 된다. CCD 카메라의 상면에 비추어진 두 개의 빔 즉 Object Beam 과 Reference Beam 에 의해 Fig. 3 에서

보듯이 CCD 카메라 상면의 두 개의 CCD Array 가 서로 보강과 소멸이라는 레이저의 간섭효과가 발생 한다. 이 때 일어나는 물체표면의 스펙클 강도분포를 스펙클 패턴이라고 한다.^[4] 또한 Fig. 3 에서 보듯이 옆에 있는 거울에 전단량을 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면은 기울어지지 않은 거울에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단되어 상면에 맷하게 된다. 이렇게 변형 전 물체의 정보를 가진 스펙클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서와 같은 방식으로 저장한 스펙클 패턴을 전자적으로 차감하게 되면 간섭무늬가 형성된다. 이는 간섭무늬의 선명도와 형태가 변위, 전단거울의 전단량에 영향을 받아 결정된다는 것을 의미한다.^[4]

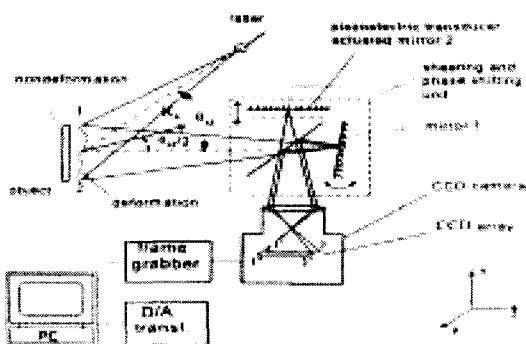


Fig. 3 Schematic diagram of shearography

2.4 면외변위 측정 원리

변형전과 변형후의 빛의 강도는 식 (1), (2)와 같고 프린지 패턴은 식 (1), (2)의 차로서 얻을 수 있다. 위상 변화량 $\Delta\phi$ 는 변형 전후의 광경로의 차 (L)와 K (Sensitivity Vector)의 곱으로 얻어진다. 즉

$$\Delta\phi = K \cdot L \quad (4)$$

광경로차는 (d_1-d_2) 을 대입하고 K 값을 풀어서 정리하면,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta)(d_1 - d_2) \quad (5)$$

테일러 급수 전개를 이용해 (d_1-d_2) 을 나타내면 전단거울에 의한 전단량 Δx 와는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta d = d_1 - d_2 \approx \frac{\partial d}{\partial x} (\Delta x) \quad (6)$$

최종적으로 $\Delta\phi$ 를 표현하면

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta)(\Delta x) \frac{\partial d}{\partial x} \quad (7)$$

으로 표현된다. 따라서 전자 전단 간섭계에서 얻어지는 간섭무늬는 잔단방향에 대한 면외 변위의 1차 미분 형태로 얻어진다. 이는 변형률 정보를 나타낸다. 이런 특성으로 인해 Shearography 는 외란의 영향을 덜 받는다고 할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 시편

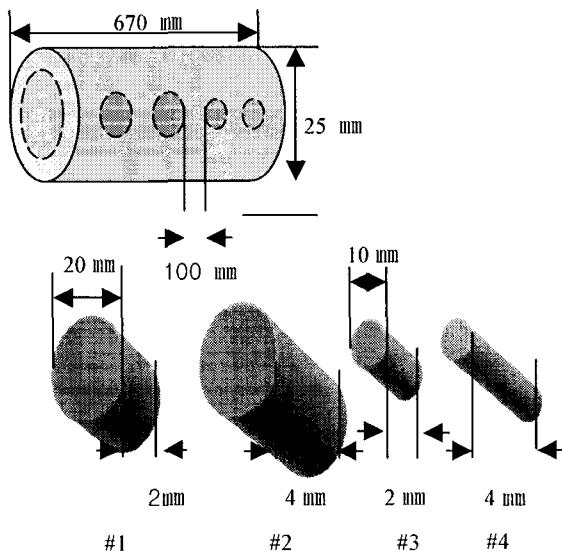


Fig. 4 Specimen 1 with 4 kinds of circular defects of different diameter and depth.



Fig. 5 Real image of circular defects

실험에 사용된 압력용기의 재질은 산업 현장에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 스텐레스이며,

압력용기의 내부에는 Fig. 4에 나타냈듯이 4개의 인공의 원형 결함이 존재한다. Fig. 5는 최종 실험 후 파괴한 압력용기의 절단면 사진이다. 최초에 설계한 치수대로 가공이 되었음을 확인할 수 있었으며, 본 실험에 의한 정량적 분석 처리와 비교될 것이다.

3.2 실험 방법

본 실험에서는 독일 Ettemeyer 사의 Shearography 시스템을 사용하였다. 광학테이블을 사용하여 외란을 최소화하였으며 변형이 면외 방향으로만 일어날 수 있게 앞과 뒤를 고정대로 구속하였다.

압력 용기의 변형을 발생시키기 위해 질소 가스를 사용해 내부를 1 kg f/cm^2 , 2 kg f/cm^2 , 3 kg f/cm^2 으로 늘려가며 실험하였다. Raju&Newman의 계산식으로 응력 확대 계수를 구해보면 이 값은 일반적인 강재의 K_{IC} 에 비해서 매우 작은 값을 가지므로 압력용기에 가한 압력이 결합의 진전에 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 프린지 패턴 분석 결과

Shearography를 이용한 결합 정량화는 전단량 및 가해지는 압력에 따라 영향이 많으며, 정량평가를 위해서는 이 두 조건에 대해 최적의 조건을 결정하여 보다 정밀하고 쉽게 결합의 정량평가를 할 수 있도록 한다. Fig. 6, 7에서 볼 수 있듯이 전단량이 클수록, 압력이 커질수록 프린지의 개수가 많아지고 선명도가 높아짐을 알 수 있다. 또한 프린지의 개수나 선명도는 결합의 길이나 깊이에 비례함을 알 수 있다.

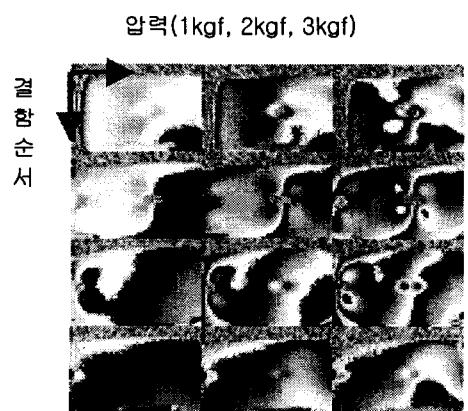


Fig. 6 Fringe patterns of circular defects in shear 1 cm

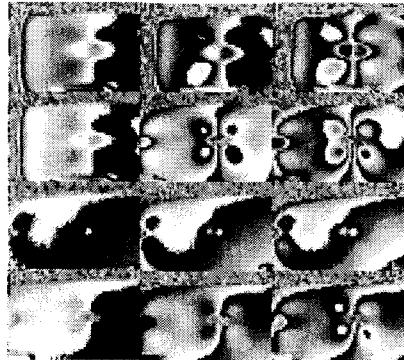


Fig. 7 Fringe patterns of circular defects in shear 2 cm

4.2 결합의 정량적 분석

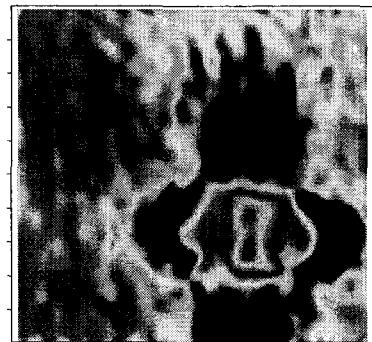


Fig. 8 Fringe pattern of circular defect #1

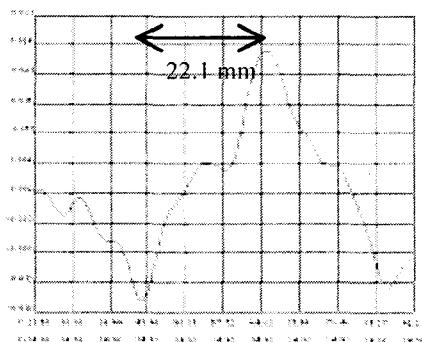


Fig. 9 Differential image of circular defect #1

Fig. 8은 결합 1의 변위의 프린지 패턴을 나타내고 Fig. 9은 전단량을 주고 차감한 이미지로 변형의 구배를 나타낸다. 결합부에서는 면외방향으로 받는 응력으로 인한 변형률이 크게 차이가 생기므로 변형량의 급격히 변하는 결합의 경계 영역에서

는 최소값과 최대값의 변곡점을 나타내게 된다. Fig. 9 의 두 변곡점 사이의 길이가 결합의 지름으로 위 실험에서는 22.1 mm로 측정되었다. 압력 용기를 절단하여 확인한 실제 결합의 지름은 20.0 mm이므로 비교적 정확하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

위의 기법으로는 결합의 가로, 세로 길이의 확인은 가능하지만 결합의 두께 정보는 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 두께 정보를 얻기 위해 변형률의 최소값과 최대값 사이의 기울기인 Peak Value 값을 이용하였다. Table 1, 2에서 같은 면적을 갖는 결합 1과 결합 2, 결합 3과 결합 4의 하중에 따른 Peak Value 를 비교해보면, 두께가 깊은 결합 2, 4가 각각 결합 1, 3의 Peak Value 보다 큼을 알 수 있다. 따라서 두께가 깊을수록 결합부위에서 민감하게 반응함을 알 수 있다.

Table 1 PV value of circular defects in shear 1 cm.

No.	1Kgf/cm ²	2gf/cm ²	3gf/cm ²
1	0.145	0.276	0.409
2	0.428	0.537	0.671
3	0.176	0.316	0.566
4	0.176	0.331	0.467

Table 2 PV value of circular defects in shear 2 cm.

No.	1Kgf/cm ²	2gf/cm ²	3gf/cm ²
1	0.224	0.451	0.667
2	0.608	0.811	1.110
3	0.220	0.415	0.566
4	0.211	0.424	0.631

5. 결론

본 연구를 통해 Shearography 를 이용한 압력용기 내부 결합의 검출 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 정량적으로도 응력의 최대 집중점에서 변위의 최대점이 발생하는 점을 이용하여 최대 변위점 사이의 거리를 측정하는 방법으로 구한 결합의 크기가 실제의 크기와 잘 맞음을 알 수 있었다.

결합 두께가 깊을수록 결합부에서 민감하게 반응하여 Peak Value 값이 거지는 경향을 확인할 수 있었다. 두께의 정량적 분석은 상당히 많은 반복실험과 데이터 분석 과정이 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 수행했던 원형 결합뿐만 아니라 부식, 피로 같이 더욱 복잡한 형태의 열화에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- Y. Y. Hung, W. D. Luo, H. M. Shang., "Evaluation the Soundness of Bonging using Shearography", Composite Structure, Vol. 50, pp. 353-362, 2000.
- 김경석, 강기수, 조영학, "Shearography 와 ESPI에 의한 내부 결합의 영향인자 Database 및 정량평가에 관한 연구", 조선대학교, 2001
- Vest. C. M., "Holographic Interferometry", John Wiley and Son, 1979
- Hecht, "Optics" Addison Wesley, pp. 486-572, 1987