Shearography를 이용한 Aluminum Liner 내부 결함의 변형량과 변형을 측정 및 FEM 검증

최인영^a, 홍경민^a, 고광수^a, 강영준^{b*}

Measurement of Aluminum Liner Internal Defect Deformation and Strain Using Shearography and FEM Verification

In-Young Choi^a, Kyung-Min Hong^a, Kwang-Su Ko^a, Young-June Kang^{b*}

^a Department of Mechanical Design, Graduate School of Chonbuk Univ. Republic of Korea

^b Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ. Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	11	April	2013
Revised	25	July	2013
Accepted	29	July	2013

Keywords:

Aluminum liner
Shearography
Strain
FEM

ABSTRACT

Today, environmental issues have become a matter of worldwide concern. In particular, automobile industries engage in considerable research and investment to develop high-efficiency and ecofriendly cars. Most ecofriendly cars use natural gas or hydrogen gas instead of fossil fuels. In this regard, low-weight and high-pressure vessels have gradually been developed to increase the driving distance of a car. However, most pressure vessels installed in cars develop many defects over time owing to shocks sustained when the car is being driven. Such defects can cause the explosion of the pressure vessel. Therefore it is important to prevent such explosions due to internal defects. The use of shearography for measuring the internal defects of objects afford many advantages. It is a non-contact and non-destructive method, and it is not limited by the object shape. In this study, the internal defect deformation and strain of an aluminum liner that is used in a CNG bus for the fuel storage tank is measured using shearography. It is important to measure the strain and deformation in order to detect defects and repair the pressure vessel. To verify the accuracy of the shearography measurement method, the measurement results of shearography, out-of-plane ESPI, and FEM are compared quantitatively.

1. 서론

현대 사회에서 자동차는 없어서는 안 될 필수품이 되었다. 그러나 자동차의 급증으로 인한 온실가스 및 유해물질은 전 세계적인 문제로 부각되고 있다. 이에 따라 유럽과 미국과 같은 선진국들의

온실가스와 유해물질의 배출 규제를 강화하고 있으며 고효율 친환경 자동차의 개발에 많은 연구와 투자를 병행하고 있다.

대부분의 친환경 자동차의 경우, 화석연료를 대신하여 온실가스 및 유해물질의 배출이 적은 천연가스와 수소를 연료로 사용하며 이를 저장하기 위하여 압력용기를 사용한다. 기체를 연료로 사용하

* Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2453

Fax: +82-63-270-2460

E-mail address: yjkang@jbnu.ac.kr (Young-June Kang).

는 자동차의 경우, 자동차의 주행거리를 늘리기 위하여 경량소재를 이용하며 저장압력을 높이기 위해 많은 연구를 진행하고 있다.

자동차에 사용되는 압력용기의 경우, 주행 중 수많은 충격을 받게 되며 이에 따라 저장된 가스의 누출 및 폭발의 위험성을 갖고 있다. 따라서 이러한 위험성을 사전에 예방하는 검사 기술이 매우 중요하다. 현재 가장 신뢰성이 있는 비파괴 검사 기술은 초음파, X-ray, CT 등이다. 그러나 이러한 검사 방법의 경우, 검사 재료의 재질 및 형상에 많은 영향을 받는다^[1].

본 논문은 천연가스 버스에 사용되는 대용량 심리스 알루미늄 라이너의 내부 결함을 측정하기 위하여 Shearography를 이용하였다. Shearography는 빛의 간섭현상을 이용하여 물체의 변형에 대한 구배를 측정하는 방법으로서 재료의 재질 및 형상에 관계없이 레이저 빛의 조사 영역에 대한 내부 결함을 비접촉/비파괴적인 방법으로 검사가 가능한 장점을 갖고 있다. 이러한 Shearography를 이용하여 천연가스 버스에 사용되는 알루미늄 라이너의 내부 결함 변형량과 변형율을 측정하였으며, 이를 FEM 해석과 Out-of-plane ESPI의 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

2. 이 론

2.1 전단간섭계의 간섭무늬 생성원리

Fig. 1은 Shearography 구성도를 나타내는 그림으로서, ESPI 간섭계와 달리 하나의 레이저 빛을 이용하여 물체의 조사를 한 후 반사된 빛을 광분할기(Beam Splitter)를 이용하여 전단거울(Shear Mirror)과 위상이동 거울(PZT Mirror)로 경로를 분리한 후 다시 합쳐지는 과정에서 전단거울과 위상이동 거울에 의한 두 개의 상이 겹쳐 빛의 간섭현상이 발생한다. 이때, 두 거울의 상이 일치하게 되면 소멸간섭이 발생하게 되어 빛의 위상을 측정할 수 없다. 그러므로 완전한 소멸간섭이 일어나지 않게 전단량을 조절하여 두상의

Fig. 1 Schematic of shearography

변형구배를 빛의 위상으로 측정가능하다^[1,2,3,4,7].

2.2 위상이동법(Phase Shifting Method)

일반적으로 빛의 간섭현상을 이용한 간섭계의 간섭무늬는 식 (1)과 같은 수식으로 표시되며, 수식에서 $\phi(x,y)$ 는 측정하고자하는 물체의 변형 위치 (x,y) 에서의 위상을 나타낸다.

$$I(x,y) = I_0(x,y) + \gamma(x,y)[\cos\phi(x,y)] \quad (1)$$

여기서 I_0 는 간섭무늬의 배경 밝기, γ 는 가시성(Visibility), ϕ 는 그 위치에서의 위상 값을 나타낸다. 따라서 빛의 위상을 측정하기 위해선 위의 값들을 측정하는 추가적인 장치가 필요하다. 그러나 위상이동법을 적용할 경우, 추가적인 장치가 필요 없이 빛의 위상을 측정가능하다. 위상이동법을 적용하기 위해선 PZT를 이용하여 사용한 빛의 특정 위상만큼을 이동하여 빛의 위상변화를 측정함으로써 가능하다. 크게 PZT의 이동횟수에 따라 3Bucket, 4Bucket, 5Bucket으로 구분되며, 4Bucket 방법이 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 아래 식 (2)는 4Bucket 위상이동법을 이용하여 측정된 4개의 간섭무늬 분포를 나타내는 식이며, 식 (3)은 4개의 간섭무늬 분포를 통하여 물체의 변형을 나타내는 빛의 위상을 구하기 위한 식이다^[1,2,3,4].

$$I_1(x,y) = I_0(1 + \gamma[\cos\phi(x,y)]) \quad (2)$$

$$I_2(x,y) = I_0(1 + \gamma[\cos\phi(x,y)] + \frac{1}{2}\pi)$$

$$I_3(x,y) = I_0(1 + \gamma[\cos\phi(x,y)] + \pi)$$

$$I_4(x,y) = I_0(1 + \gamma[\cos\phi(x,y)] + \frac{3}{2}\pi)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right] \quad (3)$$

2.3 Shearography를 이용한 변형량 및 변형율 측정

Shearography는 물체의 변형에 대한 구배를 빛의 위상으로 측정한다. 따라서 빛의 위상을 변환하는 과정이 필요하다. Fig. 3은 Shearography를 이용하여 빛의 위상차를 구하는 그림으로서 점 P와 Q의 값을 빛의 위상으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi_p = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_0 - \vec{n}_s)(\vec{d}) \quad (4)$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_0 - \vec{n}_s)(\vec{d} + \Delta\vec{d}) \quad (5)$$

Shearography의 경우, 두 점 P와 Q의 차 Δd_1 을 빛의 위상으로서 측정하기 때문에 식 (4)와 (5)의 차를 구하면 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_0 - \vec{n}_s)[(\vec{d} + \Delta\vec{d}) - (\vec{d})] \quad (6)$$

이를 각각의 점P와 Q에 Fig. 2를 통해 직접 구하면

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)d_1 + \sin\theta d_2] \quad (7)$$

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

이 값을 식 (6)에 대입한 후 테일러 정리를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (9)$$

이때, Δx 는 상면에서 전단량 S_x 와 같고, 이 값은 충분히 작기 때문에 위식에서 2차항 이상의 고차 항은 무시할 수 있어 식 (9)는 다음과 같이 간단히 사용할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} S_x \quad (10)$$

또한 식 (10)에 Δd_1 과 Δd_2 를 구해서 이 값을 식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)(d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x) + \sin\theta(d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x} S_x)] \quad (11)$$

이때 $\theta \cong 0$ 일 경우, $\cos\theta \cong 1$ 임으로 위 수식을 간단히 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta\phi \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (12)$$

식 (12)에서 $\Delta\phi$ 는 Shearography에 의하여 측정된 물체의 변형 전 후의 위상 값의 변화를 나타내는 값이며, 이를 물체의 변형율을 나타내는 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\phi}{(4\pi)(S_x)} \quad (13)$$

Shearography의 경우, 위상이동법을 적용하여 $2N\pi$ 에서 나타나는 빛의 위상 불연속 지점을 고려하며 아래 수식과 같다.

Fig. 2 Vector diagram to calculate phase difference

$$\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\phi}{(4\pi)(S_x)} = \frac{N\lambda}{2S_x} \quad (14)$$

위 수식에서 λ 는 사용된 레이저 빛의 파장(Wave length), N 은 Shearography를 통하여 획득한 위상도의 간섭무늬 개수, S_x 는 Shearography의 전단량이며 Shearography를 이용하여 변형량을 측정하려면 식 (14)를 적분함으로써 가능하다^[5,6].

3. 실험 방법

3.1 시편

Fig. 4는 실험에 사용된 심리스 대용량 알루미늄 라이너를 나타낸 사진으로서, 천연가스 버스의 연료를 저장하는 압력용기이다. Table 1은 알루미늄 라이너의 기계적인 물성치와 형상조건을 나타

Table 1 Mechanical property and shape of aluminum liner

	Mechanical Property
Material	Aluminum 6061 - T4
Elastic modulus	68.9 MPa
Density	2.70 g/cc
Poisson's ratio	0.33
Shape	Length : 1790 mm, Diameter : 356 mm Thickness : 5.5 mm

Table 2 Internal defects information

Defect No	Length	Width	Depth
1	10 mm	1 mm	3 mm
2	20 mm	1 mm	3 mm
3	30 mm	1 mm	3 mm

Fig. 3 Photography of aluminum liner

넨 표이며, Shearography를 이용하여 알루미늄 라이너 내부 결함을 측정하기 위하여 Table 2와 같은 조건의 내부 결함을 방전가공으로 원통축의 90°로 식각하였다.

Table 3 FEM analysis conditions

ANSYS Workbench V13.0		
Mesh Type	Hexa Dominant	Input and Interpreted symmetry condition into 1/2 model shape
Mesh Size	10 mm	
Nodes	115864	
Elements	28753

Fig. 4 Photography of shearography setting

Fig. 5 Photography of out-of-plane ESPI setting

3.2 실험 방법

알루미늄 라이너의 내부 결함 변형량과 변형율을 측정하기 위하여 Fig. 4와 5같이 Shearography와 Out-of-plane ESPI를 구성하였다. 두 간섭계 모두 Nd:YAG 레이저를 이용하였으며, 측정결과를 정량적으로 비교하기 위하여 CCD 카메라와 시편의 거리를 동일하게 세팅하였다. 또한 각각의 내부 결함에 대하여 0.1 MPa의 동일한 압력으로 가압하여 변형을 유도하였으며, 두 간섭계를 이용하여 측정한 각각의 내부 결함 변형량과 변형율을 FEM 해석 결과와 비교하여 두 측정 방법의 오차를 분석하였다. Table 3은 알루미늄 라이너의 변형을 해석하기 위해서 사용된 FEM 해석 조건을 나타낸 표이다.

4. 실험 결과

4.1 Shearography를 이용한 내부결함 변형량 측정결과

Table 4는 FEM을 이용하여 Shearography와 Out-of-plane ESPI를 이용하여 측정한 변형량 값을 비교하기 위하여 0.1 MPa의 압력하에서 30 mm 내부 결함을 변형량을 해석한 결과를 나타낸다. FEM 해석 결과에서 보듯 결함이 위치하는 부분에서 변형량

Table 4 Deformation results of 30 mm internal defect length using the FEM analysis photography of shearography setting

Defect No.	Deformation
3	

Table 5 Deformation result at 0.1 MPa

Measurement Unit : μm				
Defect No.	FEM	Shearography	ESPI	Error rate
1	0.51	0.48	0.46	Shearography : 5.75% ESPI : 9.68%
2	1.61	1.60	1.56	Shearography : 0.62% ESPI : 3.14%
3	2.22	2.21	2.15	Shearography : 0.48% ESPI : 3.18%

Table 6 Deformation measurement results of 10 mm internal defect length using the shearography and out-of-plane ESPI **Table 7** Deformation measurement results of 20 mm internal defect Length using the shearography and out-of-plane ESPI **Table 8** Deformation measurement results of 30 mm internal defect length using the shearography and out-of-plane ESPI

이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. Table 5는 FEM, Shearography와 Out-of-plane ESPI를 통하여 측정된 각각의 내부결함의 변형량을 나타낸 결과로서, FEM과 비교하여 Shearography를 이용하여 측정된 내부 결함의 변형량 값이 오차가 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 Shearography를 이용한 계측 방법의 경우, 빛의 위상에 영향을 미치는 진동 및 공기의 와류에 의한 영향이 적어 오차가 적게 발생하기 때문이다. 또한 내부 결함의 크기가 증가할수록 변형량이 크게 발생하여 두 측정방법 모두 측정오차가 적게 발생하였으며, 내부 결함이 존재하는 부분에서 간섭무늬가 증가하여 내부 결함이 존재하는 것을 쉽게 측정할 수 있었다. Table 6, 7, 8은 Shearography와 Out-of-plane ESPI를 통하여 측정된 Phase Map, 3D와 결함 중심부 Line Profile 결과를 나타내는 표이다.

4.2 Shearography를 이용한 내부결함 변형을 측정결과

외력에 의한 물체의 변형은 외력이 작용하는 모든 부분에서 발생하기 때문에 내부 결함을 크기를 정량적으로 측정할 수 없다. 그러므로 정략적으로 내부 결함의 크기를 측정하기 위해선 내부 결함에 의하여 발생하는 변형율의 변화를 통하여 결함의 길이를 측정할 수 있다. Table 9는 FEM을 통하여 30 mm 내부 결함이 0.1 MPa의 압력에 의하여 발생하는 변형율을 해석한 결과이다. 결과에서 보듯 내부 결함의 시작점과 끝지점에서 응력의 집중현상에 의하여 변형율이 크게 발생함을 알 수 있다.

Table 9 Strain results of 30 mm internal defect length using the FEM analysis

Table 10 Strain measurement result at 0.1 MPa

Defect No.	Measurement			Error rate
	FEM	Shearography	ESPI	
1	0.172	0.168	0.158	Shearography : 2.33 % ESPI : 8.34 %
2	0.348	0.338	0.321	Shearography : 2.87 % ESPI : 7.76 %
3	1.113	1.104	1.088	Shearography : 0.80 % ESPI : 2.25 %

Table 11 Strain measurement results of 10mm internal defect length using the shearography and Out-of-plane ESPI

Table 12 Strain measurement results of 20 mm internal defect length using the shearography and out-of-plane ESPI

Table 13 Strain measurement results of 30 mm internal defect length using the shearography and out-of-plane ESPI

Table 10은 FEM, Shearography와 Out-of-plane ESPI를 통하여 측정된 각각의 내부 결함 변형율과 오차를 나타낸 표이다. 표에서 알 수 있듯 Shearography를 이용하여 측정된 내부 결함의 변형율 오차가 작은 것을 알 수 있으며, 3% 미만의 측정오차를 나타냈으며, 변형율의 최대값과 최소값의 위치를 통하여 내부결함의 크기를 확인 할 수 있다.

Table 11, 12, 13은 Shearography와 Out-of-plane ESPI를 통하여 측정된 Strain Map, Vector Filed와 변형율의 Line Profile을 나타낸 표이다. 표에서 보듯 결함의 시작점과 끝점에서 변형율의 값이 최대값과 최소값을 나타남을 알 수 있으며 결함 중심부 변형율의 Line Profile을 통하여 결함의 크기 및 응력의 크기를 정량적으로 측정할 수 있다. 또한 Vector Filed를 통하여 응력의 집중 분포형태 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 Shearography를 이용한 알루미늄 라이너 내부 결함의 변형량과 변형율을 정량적으로 측정하였으며, 이를 FEM 해석 값과 비교하여 Shearography를 이용한 계측 방법의 신뢰성을 확보하였다. 또한 Out-of-plane ESPI를 이용하여 측정된 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Shearography를 이용하여 측정된 알루미늄 라이너 내부 결함의 변형량을 FEM 해석결과와 비교한 결과, Out-of-plane ESPI 방법에 비하여 측정 오차가 작았으며 6% 미만의 신뢰할 수 있는 결과를 얻었다.
- (2) Shearography를 이용하여 측정된 내부 결함의 변형율을 FEM 해석과 비교한 결과, Out-of-plane ESPI 방법에 비하여 측정 오차가 작았으며, 3% 미만의 신뢰할 수 있는 결과를 획득하였다.
- (3) 따라서 진동과 열 등의 환경적인 변수에 민감한 ESPI를 대신하여 간섭계의 구성이 간단하며 외부 환경적인 변수에 둔감한 Shearography를 이용하여 알루미늄 라이너 내부 결함의 검출 및 변형량과 변형율 측정이 가능함을 증명하였으며, 변형율을 이용하여 내부 결함의 길이를 정량적으로 측정할 수 있다.

후 기

본 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2010-0024952).

References

- [1] Kang, Y. J., Kang, H. S., Chea, H. C., 2001, A Study on Measurement of Internal Defect of Pressure Vessel by Digital Shearography and Finite Element Method, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineering, 10:2 29-37.
- [2] Chang, H. S., Lee, K. J., Kim, K. S., Jung, H. C., 2006, Quantitative Out-of-plane Deformation Measurement of Pressure Vessel with the Defect Using Shearography, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 23:10 36-43.
- [3] Chong, H. S., Jung, S. W., Kim, K. S., Jung, H. C., 2007, Quantitative Measurement of Out-of-plane Deformation Using Shearography, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 24:4 131-137.
- [4] Kim, J. P., Kang, Y. J., Park, S. K., 2009, A Study on the Measurement of the Internal Crack in Flange Welding Zone by Digital Shearography, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 26:1 97-104.
- [5] Lobanov, L. M., Pivtorak, V. A., Kyyanets, I. V., Savytska, O. M., 2007, Nondestructive Testing of Composite and Metallic Pipes by the Method of Electronic Shearography, Materials Science, 43:4 522-527.
- [6] Houang, S. J., Liu, Y. F., 2007, The Out-of-plane Strain Measurement of Composite Sandwich Plate with Fully-Potted Insert Using Digital Phase-Shifting Shearography, ICCES, 4:3 187-194.
- [7] Moon, S. J., Kang, Y. J., Baik, S. H., Kim, C. J., 1996, A Measurement Method of Internal Defects of Pressure Vessels by Using Real-time Holographic Interferometry, The Korean Society of Mechanical Engineers, 20:4 1233-1240.