레이저 스펙클 전단간섭법을 이용한 압력용기 내부결함의 측정 가능한 결함 크기의 평가

Evaluation of Detectable Defect Size for Inner Defect of Pressure Vessel Using Laser Speckle Shearing Interferometry

김경석*, 선상우**, 최태호**, 강찬근**, 나만균***, 정현철*†

Kyeong-Suk Kim*, Sang-Woo Seon**, Tae-Ho Choi**, Chan-Geun Kang**,
Man-Gyun Na*** and Hyun-Chul Jung*†

초 록 최근 압력용기가 다양한 산업분야에서 사용되고 있다. 압력용기의 내부 또는 외부에 결함이 발생하면 대형 사고를 유발하게 된다. 압력용기의 외부에 발생하는 결함은 육안검사를 통해 어느 정도 해결이 가능하지만, 압력용기 내부에 발생하는 결함은 육안검사로는 측정하기 어렵다. 이러한 형태의 결함을 측정하기 위해서는 비파괴검사가 적합하다. 전단간섭법은 광계측을 이용한 비파괴검사법 중 하나이며, 비접촉식으로 전체 측정영역에 대해 실시간으로 한 번의 실험을 통해 결함을 측정할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 레이저 스펙클 전단간섭법을 이용하여 측정할 수 있는 압력용기의 내부에 존재하는 결함 크기를 평가하였다. ASTM A53 Gr.B 재질로 제작된 압력용기 시험편 내부에 인위적인 결함을 가공하고 공압을 이용하여 압력용기에 내압을 가하여 결함을 측정하였다. 실험을 통해 0.2 MPa의 압력차에서도 압력용기의 원래 두께의 25 %의 깊이로 발생한 결함까지는 측정 가능함을 확인하였다.

주요용어: 레이저 스펙클 전단간섭법, 압력용기, 내부결함, 결함 크기

Abstract Pressure vessels are used in various industrial fields. If a defect occurs on the inner or outer surface of a pressure vessel, it may cause a massive accident. A defect on the outer surface can be detected by visual inspection. However, a defect on the inner surface is generally impossible to detect with visual inspection. Nondestructive testing can be used to detect this type of defect. Laser speckle shearing interferometry is one nondestructive testing method that can optically detect a defect; its advantages include noncontact, full field, and real time inspection. This study evaluated the detectable size for an internal defect of a pressure vessel. The material of the pressure vessel was ASTM A53 Gr.B. The internal defect was detected when the pressure vessel was loaded by internal pressure controlled by a pneumatic system. The internal pressure was controlled from 0.2 MPa to 0.6 MPa in increments of 0.2 MPa. The results confirmed that an internal defect with a 25 % defect depth could be detected even at 0.2 MPa pressure variation.

Keywords: Laser Speckle Shearing Interferometry, Pressure Vessel, Internal Defect, Defect Size

1. 서 론

현재 압력용기는 다양한 형태로 산업분야에서 사용되고 있으며, 크기 및 형태도 다양하다. 크게

는 원자력발전소의 원자로와 각종 압력배관 형태로 사용되고 있으며, 대형 플랜트에서도 사용되고 있다. 또한, 회사 사무실이나 일반 가정집 등에서 사용하는 가스난로의 가스통 및 요리용 가

[접수일: 2013. 10. 8, 수정일: (1차: 2014. 2. 10, 2차: 2014. 3. 7) 게재확정일: 2014. 3. 12] *조선대학교 기계설계 공학과, **조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, ***조선대학교 원자력공학과, †Corresponding Author: Dept. of Mechanical Design Engineering, Chsoun University, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: yonggaryjung@gmail.com)

스버너의 연료통으로도 활용된다. 이와 같이 크기와 형태는 다르지만 압력용기에 문제가 있어서 사고가 발생한다면 대형사고를 유발하게 된다. 이처럼 압력용기나 압력배관은 외부나 내부 표면에 결함이 발생할 경우 빨리 조치를 취해야 할 필요가 있다. 외부에 발생하는 결함은 육안검사로도 확인이 어느 정도는 가능하지만 미세한 결함의 경우에는 정밀검사가 필수적이다. 또한, 내부에 발생한 결함의 경우는 육안검사를 실시할 수 없기 때문에 비파괴검사를 수행하는 것이 일반적이다.

최근, 비파괴검사를 이용하여 압력용기의 건전성을 평가하는 연구가 시도되고 있다. 음향방출 시험을 이용하여 새로 제작된 압력용기에 대하여 다양한 성능시험을 통해 압력용기의 건전성을 평가하고 있으나, 시험을 통해 획득된 신호에 잡음이 포함되므로 이에 대한 제거를 반드시 해야 한다[1]. 초음파를 이용하여 압력용기에 발생하는 결함의 깊이를 측정하기 위해, 위상배열 초음파 탐촉자를 이용한 TOFD(time of flight differaction) 검사에 대한 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 방법들은 접촉식이거나 대상물에 전처리를 필요로 하는 문제점이 있고 point by point canning 검사 방식에 따른 검사 시간의 소요 및 복잡한 구조물의 형상 및 이방성 재질의 대상물에 대한 적용 한계성을 가지고 있다. 이러한 문제점으로 인해 아직 압력용기 자체에 적용을 시키지는 못하였다[2,3].

일반 ESPI(electronic speckle pattern interferometry) 간섭계와 광섬유로 구성된 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)를 이용하여 압력용기 내부의 결함 측정 오차를 비교하였다[4]. 그러나 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)는 레이저 스펙클 전단간섭법에 비해 현장에 적용하기에 적합하지 않다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 비파괴검사 기법을 이용하여 측정할 경우 실제로 현장 적용성 및 안전성이 뛰어나고 비접촉 결함 검사를 통한 결함 형상 측정 및 정량적 크기 측정이 가능하다.

본 논문에서는 압력용기 시험편 내부에 인위적인 결함을 가공하고 공압 시스템을 이용하여 압력용기 내부에서 내압을 가한 후, 레이저 스펙클 전단간섭법[5]을 이용하여 결함을 측정하였다. 또

한, 측정 대상체의 원래 두께에 비해 어느 정도의 깊이에 있는 결함까지 측정이 가능한지를 평가하였다.

2. 레이저 스펙클 전단간섭법의 원리

레이저 스펙클 전단간섭법은 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)와는 달리 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 간섭계의 구성이 간단하고 간섭계의 특성상 한 개의 레이저 빔을 대상체에 조사하기 때문에 외부 환경에 의한 영향을 적게 받는다는 장점을 지니고 있어서 현장 적용이 가능하다.

Fig. 1에서 한 개의 레이저 빔이 측정 대상체로 조사되고 대상체 표면으로부터 반사되어 나온 레이저 빔은 beam splitter를 통해 두 개의 빔으로 나뉜다. 두 빔 중 기준이 되는 Mirror1을 거쳐 반사되어 나오는 빔에 대해 다른 한 빔은 일정 각도로 기울어져 있는 Mirror2를 거쳐 반사되어 나오기 때문에, 이미징 렌즈를 통해 이미지 평면으로 들어오는 두 개의 이미지는 서로 δx 만큼의 전단이 발생하게 되고, 이러한 특성을 이용하여 측정 대상체를 측정할 수 있게 된다.

측정 대상체로 조사되는 레이저 빔의 각도와 이미지 평면의 각도가 수직하면 각 점에서의 레이저 빔의 위상 변화는 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. $\Delta\phi$ 는 간섭무늬가 나타내는 위상차를 나타낸 것이다. Δd 값은 Eq. (2)와 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (1)$$

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \quad (2)$$

이 식을 토대로 Δd 는 테일러급수 전개가 가능하고, 전단량이 매우 작은 경우 2차 이상의 고차항을 무시할 수 있으므로 이를 적용하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) s \quad (3)$$

레이저 스펙클 전단간섭법에 의한 측정 결과는 Eq. (3)의 식으로 표현되기 때문에 Fig. 2에서와 같이 실제 변형의 도함수 형태로 얻어지게 된다. 여기서 $\delta d/\delta x$, S 값은 전단량을 나타낸 것이다.

Fig. 1 Schematic of a laser speckle shearing interferometer

Fig. 2 Comparison of experimental result pattern of ESPI and LSSI

3. 실험

3.1. 시험편

실험에 이용된 시험편은 ASTM A53 Gr.B 규격의 강관의 내부에 길이와 폭, 깊이를 달리하여 결함을 가공하고 캡을 용접하여 제작하였다. 압력용기에 가해지는 압력을 측정하기 위해 압력용기의 공압 주입부와 공압시스템에 각각 압력 게이지를 부착하여 정확한 압력이 가해질 수 있도록 하였다.

Table 1에 제작에 사용된 강관의 기계적인 특성을 나타냈으며, Table 2에 압력용기 내부에 가공된 결함의 종류 및 정보를 나타냈다.

Table 1 Mechanical properties of pipe material

Yield strength (MPa)	Tesile strength (MPa)	Longitudinal elongation (%)
240	415	30

Table 2 Type of specimen and defect shape

Specimen No.	PV-1	PV-2	PV-3
Min. thickness (mm)	2.775 (6/8 t)	2.3125 (5/8 t)	1.85 (4/8 t)
Width of defect (mm)	10		
Length of defect (mm)	5, 10, 20

Fig. 3 Shape of pressure vessel specimen

Table 3 Date of pressure vessel specimen

Description	Specimen Data
Length of pipe (L)	400 mm
Outside diameter (Do)	76.4 mm
Inside diameter (Di)	69 mm
No Defect thickness (tp)	3.7 mm

Fig. 3에서 보는 바와 같이 압력용기 좌측에 디지털 방식의 압력게이지를 부착하였고, 우측과 좌측에 공압 주입부와 안전을 위한 밸브를 부착하였다. 결함은 지름이 76.4 mm인 압력용기에 결함간 거리가 150 mm가 되도록 축방향으로 각각 2개씩 가공하였다. Table 3에는 압력용기 시험편에 대한 정보를 나타냈다.

3.2. 실험장치

실험에 사용된 전단간섭계는 상용제품인 Q-800 (Dantec Dynamics Co.)이며, 파장이 660 nm인 출력 70 mW의 다이오드 레이저를 사용하고 있다.

장비의 기본 사양을 Table 4에 나타냈다.

시험편에 내압을 가하기 위하여 공압시스템을 제작하여 사용하였으며 안전을 위해 자동압력차단 기능을 적용하여 최대 0.7 MPa를 넘지 못하도록 설계하였다. Fig. 4에 공압시스템을 나타냈다.

Table 4 Specification of Q-800 shearography system

CCD resolution	1392 × 1040 px
Inspection Speed	300 mm × 300 mm / 20s
Shear Distance	up to 1/20 FOV
Measuring Sensitivity	0.03 μm /shear distance
Sensor Head Dimension	W×H×D = 70×70×160 mm ³
Laser Diode	2 × 70 mW

Fig. 4 Pneumatic system for internal pressure loading

Fig. 5 Constructed shearography system

Fig. 6 Specimen of line profile

3.3. 실험방법

압력용기 시험편의 결함 측정을 위해 Fig. 5에서 보는 바와 같이 공압시스템을 이용하여 압력용기에 압력을 가하고 압력용기의 상태 변화를 전단간섭계 센서를 이용하여 측정하였다.

전단간섭계는 압력의 변화에 대한 결과를 제공해 주기 때문에, 공압시스템을 이용하여 각각 0.2, 0.4, 0.6 MPa의 압력차를 주어 실험하였으며 각각 전단량을 동일하게 X축 방향으로 5 mm (1 mm = 17 px) 주고 압력에 의한 압력용기의 내부결함을 전단간섭계를 이용하여 측정하였다. Fig. 6은 압력용기 시험편에 대한 측정 결과인 위상지도를 나타내었고 모든 시험편의 측정 결과를 x축 방향의 프로파일을 그어 측정 결과를 획득하였다. 실험 결과에 대하여 라인 프로파일을 구하여 실제 결함의 존재 여부와 길이를 확인하였다. 본 논문에서는 어느 정도의 결함까지 측정이 가능한지를 알고자 하였으므로 결함의 깊이와 길이, 폭 등에 따라서 결함의 측정 여부에 주목하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

전단간섭계를 이용한 결함 측정 실험을 통하여 획득한 실험 결과를 Table 5 ~ Table 7에 나타냈다. 각각의 Table에서는 압력차에 따른 결함 형상 측정 결과를 나타내었는데 본 압력용기의 변형 값은 압력용기의 내부에 공압을 이용하여 주었고 이를 통한 내부의 압력변화에 따라 측정하였고, 각각의 압력차에 따른 실제 phase map의 명확함을 알 수 있었다.

Table 5 Defect measurement results with shearography for PV-1 specimen

Pressure Diff. (MPa)	Defect Length (mm)		
	5	10	20
0.2
0.4
0.6

Table 6 Defect measurement results with shearography for PV-2 specimen

Pressure Diff. (MPa)	Defect Length (mm)		
	5	10	20
0.2
0.4
0.6

Table 7 Defect measurement results with shearography for PV-3 specimen

Pressure Diff. (MPa)	Defect Length (mm)		
	5	10	20
0.2
0.4
0.6

실험 결과에서 알 수 있듯이 결함의 폭(10 mm)과 결함의 길이(5, 10, 20 mm)에 상관없이 결함의 깊이가 2/8 t (25%), 3/8 t (37.5%), 4/8 t (50%), 즉 압력용기의 남아있는 두께가 각각 6/8 t, 5/8 t, 4/8 t인 결함에 대해서 압력차가 최소인 0.2 MPa일 때에도 측정이 가능하다는 것을 확인하였다.

전단간섭계를 이용하여 측정한 결과는 실제 변형의 도함수 형태로 나타나기 때문에 실제 변형과 동일한 형태의 결과를 얻기 위하여 수치적분을 수행하였으며, 적분을 통해 결과를 얻을 수 있다. 따라서 Table 5의 phase map 결과에 대하여 결함부를 중심으로 Fig. 6과 같이 라인 프로파일을 그어 측정한 결과를 Table 8에 나타냈으며 각 결함 길이에 따른 최대변형량과 측정된 결함 크기 결과는 Table 9에 나타냈다.

Table 8 Line profile of defect measurement results with shearography for PV-1 specimen

Table 9 Measurement length and maximum deformation amount results for PV-1 specimen

Defect Length (mm)	Pressure Diff. (MPa)	Measurement Length (mm)	Maximum Deformation Amount (mm)
5	0.2	5.05	0.0047
	0.4	7.02	0.0102
	0.6	8.12	0.0142
10	0.2	10.73	0.0212
	0.4	11.6	0.0261
	0.6	12	0.0288
20	0.2	20.35	0.0286
	0.4	21.05	0.0349
	0.6	22.09	0.0548

5. 결 론

본 논문에서는 압력용기의 내부에 존재하는 결함의 측정 가능한 크기가 어느 정도인지를 파악하고자 결함의 길이, 폭, 깊이를 서로 달리하여 인공결함을 압력용기 내부에 가공하였으며, 압력차를 0.2 MPa 간격으로 0.2 MPa에서 0.6 MPa까지 가하여 실험하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 진단간섭계를 이용한 압력용기의 결함 측정 여부는 같은 결함크기, 두께라도 압력차에 따라서 결과값이 다르게 측정됨을 알 수 있다.
- 2) 본 논문에서 실험한 압력용기에 대하여 진단 간섭계로 측정 가능한 결함의 깊이는 2/8 t (25%), 즉 결함부의 압력용기 두께가 6/8 t인 결함까지는 측정이 가능하다.
- 3) 진단간섭계를 이용한 압력용기의 결함 측정 실험을 통하여 진단간섭계의 유용함을 확인하였고, 향후 다양한 비파괴검사를 위해 활용될 것으로 확신한다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 방사선기술개발사업(2012M2A2A9035705)과 원자력연구개발사업(원자력선진기술연구센터, No. 2012-0668) 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] J.-O. Lee, W.-H. Yoon, T.-H. Lee and J.-K. Lee, "Pre-service acoustic emission testing for metal pressure vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 3, pp. 280-284 (2003)
- [2] B.-S. Yoon, Y.-S. Kim, H.-J. Lee and Y.-H. Lee, "A study on TOFD inspection using phased array ultrasonic technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 25, No. 4, pp. 304-310 (2005)
- [3] C.-S. Park, "Reliability assessment on thickness measurement of pressure vessel using laser diagnostics," M.S. thesis, Chosun University, (2012)
- [4] S.-J. Kim, Y.-J. Kang, K.-M. Hong, J.-H. Lee and N.-J. Choi, "Performance comparison between optical fiber type ESPI and bulk type ESPI for the internal defect in pressure vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 177-184 (2012)
- [5] W. Steinchen and L. Yang, "Digital shearography: theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry," SPIE Press, Washington, USA (2003)