

## 전단간섭계를 이용한 직관시험편의 결함 깊이 측정

### Defect Depth Measurement of Straight Pipe Specimen Using Shearography

장호섭\*, 김경석\*\*†

Ho-Seob Chang\* and Kyung-Suk Kim\*\*†

**초 록** 원자력 산업에 있어서 파이프의 감육결함은 수명평가 및 안전평가에 막대한 손실을 발생 할 수 있다. 비파괴검사 기법을 이용하여 변형, 진동, 결함 평가를 수행하고 있지만, 넓은 면적의 결함을 평가하는 기법이 적으며, 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 원자력 발전소의 2차계통에서 주로 사용되는 탄소강 배관을 대상으로 내부에 인공 감육결함을 가공하고 두께를 서로 다르게 하여 제작하여 Shearography를 이용하여 감육결함부의 변형을 측정하였다. 또한 광 계측을 통하여 변형, 진동, 결함 평가뿐만 아니라 압력용기의 결함깊이를 정량적으로 평가하고자 한다. 본 논문은 전단간섭계를 이용하여 파이프의 내부 감육 결함을 측정하고, 압력에 따른 변형을 제시한 기법을 이용하여 정량적인 결함의 잉여두께를 평가하고자 한다. 변형량을 이용하여 잉여두께 예측결과 실제 결함깊이와 약 7%의 오차로 신뢰성을 확보하였으며, 압력에 따른 변형량과 잉여두께의 DB구축을 통하여 원전 배관의 감육부 건전성 평가에 활용될 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 압력용기 결함깊이 측정법은 원자력배관의 감육결함 예측 및 건전성 평가 기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 압력용기의 안정성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반확립에 기여할 것으로 기대한다.

**주요 용어:** 전단간섭계, 직관시험편, 결함깊이

**Abstract** In the nuclear industry, wall thinning defect of straight pipe occur the enormous loss in life evaluation and safety evaluation. To use non-destructive technique, we measure deformation, vibration, defect evaluation. But, this techniques are a weak that is the measurement of the wide area is difficult and the time is caught long. In the secondary side of nuclear power plants mostly used steel pipe, artificiality wall thinning defect make in the side and different thickness make to the each other. wall thinning defect part of deformation measure by using shearography. In addition, optical measurement through deformation, vibration, defect evaluation evaluate pipe and thickness defects of pressure vessel is to evaluate quantitatively. By shearography interferometry to measure the pipe's internal wall thinning defect and the variation of pressure use the proposed technique, the quantitative defect is to evaluate the thickness of the surplus. The amount of deformation use thickness of surplus prediction of the actual thickness defect and approximately 7 percent error by ensure reliability. According to pressure the amount of deformation and the thickness of the surplus through DB construction, nuclear power plant pipe use wall thinning part soundness evaluation. In this study, pressure vessel of thickness defect measure proposed nuclear pipe of wall thinning defect prediction and integrity assessment technology development. As a basic research defected theory and experiment, pressure vessel of advanced stability and soundness and maintainability is expected to contribute foundation establishment.

**Keywords:** Shearography, Straight Pipe Specimen, Defect Depth

## 1. 서론

원자력발전소의 경우, 배관에 많이 사용되는 원전 설비 및 부재들은 사용기간의 증가로 인하여 배관에 유동가속부식(FAC, flow accelerated corrosion)에 의한 감육결함의 발생 가능성이 높고, 실제 원전 설비의 손상으로 인하여 배관의 건전성 저해와 손상 메커니즘으로 알려져 있다 [1,2]. 이러한 배관계통은 국부적인 응력집중이 일어나며 결국 배관의 파괴의 원인이 된다.

따라서 결함을 신속하고 정확하게 검출하기 위해 레이저를 응용한 계측기술 활용이 점차적으로 높아지고 있는 추세이며, 이러한 레이저 응용 계측기술은 간섭계 기반의 변위 측정 기술로서 ESPI(electronic speckle pattern interferometer), shearography, holograpy 등의 분야로 진동 또는 변형해석, 진동해석, 비파괴검사 등을 다양하게 측정한다는 장점이 있다[3,4].

현재 원자력 배관의 감육부의 배관의 측정 시간이 오래 걸리며, 주위 환경 제약 조건에 영향을 많이 받기 때문에 정량 평가에 어려움이 있다. 또한 형상이 복잡한 경우 그 측정이 더욱 어렵다. 하지만, 레이저 전단간섭법은 비접촉·비파괴, 대면적, 복잡한 형상에 구애 받지 않으며, 진동 및 외란에 영향을 받지 않기 때문에 현장 적용성이 우수한 장점이 있다.

본 논문에서는, 비접촉·비파괴적인 기법인 레이저 응용 계측 기술을 이용한 전단간섭계를 통하여 직관시험편의 결함깊이 측정을 통해서 원자력발전소, 각종 구조물의 안전성, 보수성을 증진시킬 수 있도록 배관의 건전성 확립에 기반이 될 기초자료로서 적용될 것을 기대한다.

## 2. 이론

### 2.1. 스페클 전단간섭계

전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. ESPI와 달리 전단간섭계는 레이저의 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 대상물로부터 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나뉜 후, 하나의 빔은 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히게 되고 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다

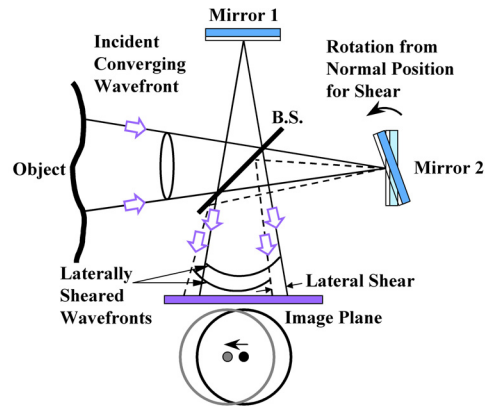


Fig. 1 Single-beam shearography interferometer

시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때 Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면이 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 shearing 되어 CCD camera 상면에 이미지로 맺히게 된다[5,6]. 변형 전·후 이미지를 서로 간섭하여 감산처리를 통해 발생하는 간섭줄무늬를 형성한다. Mirror 1을 기준거울이라 하며, Mirror 2를 전단거울이라 한다. 전단거울은 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라 한다[9,10].

## 3. 실험 구성 및 방법

### 3.1. 실험 구성

#### 3.1.1. 직관시험편

Fig. 2와 같이 본 실험에 사용한 시험편은 직관 모사시험편에 인공 감육결함을 가공하여 결함 깊이를 예측하기 위해 ASTM A106 Gr. B 재질의 직관 모사시험편을 만들어 결함을 측정하였다. A106 Gr. B 관은 이음매가 없는 탄소강 파이프 재질이며, 항복강도는 240 MPa, 인장강도는 415 MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. 직관 내부에 감육결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공시 정확한 가공이 어려워 측방향으로는 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하였다. Table 1은 시험편의 재질과 규격에 대해 나타내었다. SSP-2H, SSP-2F는 외경, 내경, 결함의 크기는 동일하며, 결함깊이만 다른 시험편을 제작하였다.

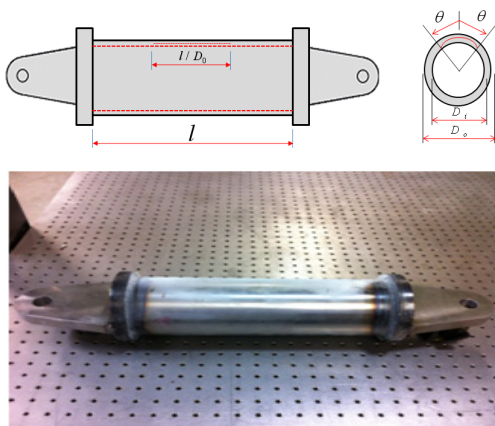


Fig. 2 Shape of straight pipe specimen

Table 1 Specifications of specimen

ID No.	Outside diameter (Do)	Inside diameter (Di)	Defect thickness (tp)	Defect Length (L/Do)	Defect angle (2θ)
SSP-2H	113.4mm	99.0mm	1.8mm	113.4mm	90°
SSP-2F	113.4mm	99.0mm	5.4mm	113.4mm	90°

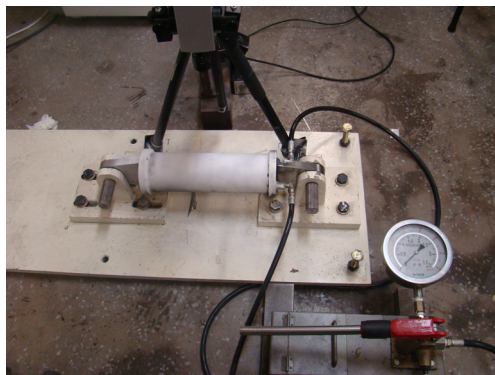


Fig. 3 Configuration of shearography experiment system

### 3.1.2. 실험 장치

전단간섭시스템은 독일 Dantec Dynamics사의 상용 shearography 시스템(Q-800 HR model)을 이용하였으며 구성은 Fig. 3와 같이 shearography 센서, 센서 내부의 diode laser, controller, PC로 구성되어 있다. 상용 프로그램인 ISTRA 시스템을 이용하여 장치의 제어, 필터링, 결편침을 수행한다. 레이저는 diode laser(출력: 50 mw, 파장: 780 nm)를 이용하였으며 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으

로 물체에 조사된다. 전단량과 전단반향은 센서 내부의 모터를 ISTRA 4D 프로그램을 이용하여 전단 각도와 픽셀을 설정하여 조절할 수 있다. 시스템(system)은 PZT에 의해 위상이동이 되며 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도를 얻게 된다. 최종 위상지도는 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 해석함으로써 상대 변위량을 얻을 수 있게 된다.

### 3.2. 실험 방법

직관시험편의 결함깊이를 측정하기 위해 독일 Dantec dynamics사의 상용 shearography 시스템(Q-800HR model) 이용하여 감육부를 측정하기 위하여, 원자력 배관 모사 압력용기를 제작하고 전단량을 5 pixel로 고정하고 압력차를 0.02 Mpa ~0.08 Mpa까지 0.02 Mpa씩 일정하게 증가 시키면서 실험하였다. 내부 압력 변화에 따른 결함부의 변형을 측정하고 이를 이용하여 압력용기 시험편 결함의 두께를 측정하였다. 시험편의 내부 감육결함의 원주방향 경계부를 곡선 가공하였으며 시험편을 고정하기 위해 bed를 제작하였으며 내압을 가하기 위해 유압잭의 작동 및 밸브 개방 방식으로 가압과 감압을 조절할 수 있는 유압식 수동 가압장치를 제작하였다. 실험장치 구성은 Fig. 3과 같이 구성하였다. 본 실험을 통해 시험편에 압력을 주었을 때의 감육 결함부의 결함 및 변형을 측정함으로써 그때의 변형량을 이용하여 압력용기 두께 이론식에 대입하여 압력용기의 두께를 계산하였으며 압력에 변화를 증가시켜 그 변화를 관찰하였다.

### 3.3. 압력용기의 결함 깊이 측정 방법

본 연구에서 압력용기의 결함깊이를 측정하기 위하여 기본 개념은 압력용기에 압력을 가하였을 경우 시험편이 변형전에서 변형후로  $\delta$ 만큼 늘어남을 확인할 수 있다. 이를 착안하여 전단간섭 계측 시스템을 이용하여 압력용기의 내압변화에 따른 면외변형을 측정하여 최대변형량, 압력, 결함깊이를 이용하여 압력용기의 결함깊이를 정량 평가하였다. 압력용기 결함깊이의 측정은 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 내압변화에 따른 결함깊이( $t_p$ )는 외부표면과 내부표면 간의 두께( $t_1$ )과 결

합표면과 외부표면 간의 두께( $t_2$ )차이를 통해 식(1)로 구할 수 있다.

$$t_p = t_1 - t_2 \tag{1}$$

$t_p$  = 결함의 두께

$t_1$  = 외부표면과 내부표면 간의 두께

$t_2$  = 결함표면과 외부표면 간의 두께

압력용기에 압력을 가했을 경우 결함이 있는 부분에 작용하는 변형은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.  $y$ 에 대한 함수는 식(2)로 표현할 수 있으며, 호의 길이( $y$ 함수의 변의 길이)를 구하게 되면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[7]. 또한, 식(3)에서  $L_s$ 는 전단간섭계를 통하여 측정된 결과를 적분을 취하여 계산되어 질 수 있다.

$$y = k(1 - \cos \frac{2\pi}{L_o}x) \tag{2}$$

$$L_s = L_o \frac{k \cdot 2\pi \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o}}{2} \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o})^2 + 1} + \frac{1}{2} \ln \left| k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o} + 1 \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o})^2 + 1} \right| \tag{3}$$

또한 변형량  $\delta$ 는 결함 부위를 평판으로 가정하고, 인장력을 받는 빔과 같다고 가정하게 되면, 식(4)와 같이 표현할 수 있다. 이는 변형을 받는 배관의 단위면적을 빔이라고 가정하게 되면 일정 압력이 받는 빔의 해석으로 표현할 수 있다. 이때,  $L_s$ 의 호의 길이를 구한 값은 변형전의 길이와 연신된 변형량  $\delta$ 의 합으로 표현될 수 있다. 여기서,  $L_s$ 는 전단간섭계를 통하여 획득된 변형의 기울기를 길이 방향으로 적분과정을 통하여 구할 수 있다[8].

$$L_s = L_o + \delta \tag{4}$$

여기서,  $L_s$ 는 변형의 변위 길이,  $L_o$ 는 결함의 길이,  $\delta$ 는 변형량을 나타낸다.  $L_o$ 는 Fig. 5와 같이 전단간섭계를 통하여 획득된 미분 기울기를 통하여 적분을 수행하고, 변형량 기울기를 통하여 양 끝단의 길이를 통하여 획득한다.

식(4)를 정리하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s - L_o = \delta = \frac{PL_o}{bt_2E} \tag{5}$$

$P$  = 압력                       $b$  = 시험편 결함의 폭

$t_2$  = 결함표면과 외부표면 간의 두께

$E$  = 탄성계수

식(5)의 미지변수  $t_2$ 를 구하기 위해 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$t_2 = \frac{bE(L_s - L_o)}{PL_o} \tag{6}$$

$t_2$  = 결함표면과 외부표면 간의 두께

식(6)을 이용하여  $t_p$ 에 대한 압력용기의 결함깊이를 구하는 식(7)과 같이 최종적으로 쓸 수 있다.

$$t_p = t_1 - t_2 \tag{7}$$

$t_p$  = 결함의 두께

이 식을 이용하여 전단간섭계를 이용하여 압력용기 시험편의 변형량 및 결함의 길이를 획득할 수 있으며 획득한 결함의 길이와 변형량을 이용하여 압력용기 결함부의 두께를 얻을 수 있다.

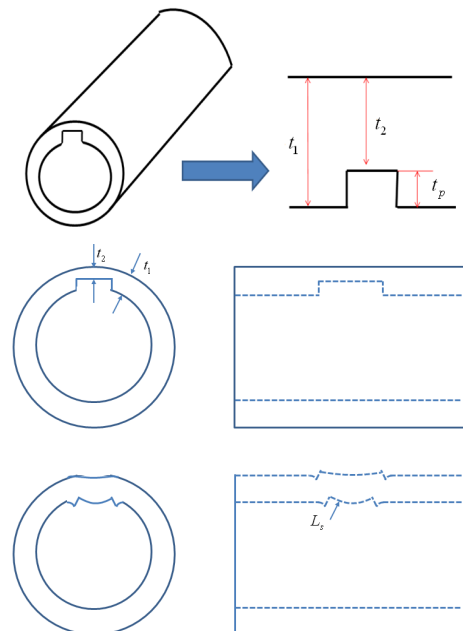


Fig. 4 Thickness defects due to changes in pressure

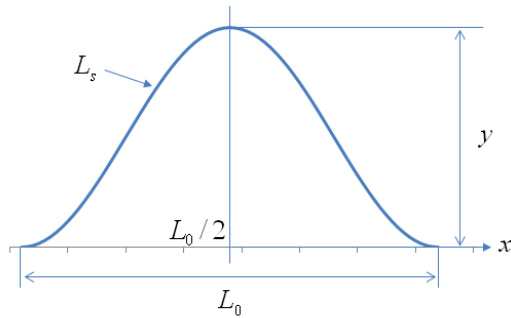


Fig. 5 Surface deformation internal defect by external load

4. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 제시한 압력용기의 결함깊이를 측정하기 위해 전단간섭법을 이용하여 각각의 SSP-2H, SSP-2F 압력용기의 결함부위의 변형 측정을 위해 일정한 압력차를 주어 변형을 측정하였다. 전단간섭법의 전단방향은 시험편의 축방향인 X 축 방향으로 실험하였으며 측정 결과 모두 위상 이동에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험을 통하여 시험편 SSP-2H, SSP-2F의 축방향 결함의 길이는 120 mm, 126 mm로 측정되었다. 실제 결함의 크기인 113.4와는 약간의 오차가 발생하였다. 각 시험편에 대한 측정 결과로부터 압력용기의 결함깊이를 구하기 위한 결함의 길이인  $L_0$ 를 구할 수 있다. 또한 각 압력의 변화에 따른 최대변형량을  $\delta$ 를 구할 수 있다. 각 시험편의 압력에 따른 결과를 Table 2에 나타내었다. 압력(P)에 대한 최대변형량( $\delta$ ), 최대변형량에 대한  $L_s$ 에 대한 상수 값, 상수 k에 대한 결과를 나타내었다. 본 시험을 통하여 구한 결과 값을 이용하여 압력용기의 결함깊이를 구하는 공식을 이용하여 압력용기의 결함의 두께( $t_2$ )를 정리하여 표에 나타내었다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 압력의 증가에 따라서 측정된 결함의 최대변형량이 증가함을 확인할 수 있다. 이때, 변형의 형태는 cosine 함수의 형태로 나타난다. 최대변형량을 통하여 상수 k값을 유추함에 있어서, 이상적인 cosine 함수에 대하여 식(1)을 가정하였다. 하지만 상수 k값을 통하여 최종 잉여 두께를 측정함에 있어서 최대변형량 값을 실험 측정값을 사용함으

로써 오차율을 최대한 줄이고자 했다. 또한 최대 변형량 증가에 따라 상수 k값이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 선형적으로 증가된 상수 k값을 통하여 함수를 정의하고, 이를 통하여 1 MPa의 압력에 따른 최대변형량에 따른 상수 k의 값을 예측할 수 있다. 또한 이를 통하여 압력용기의 결함깊이를 측정할 수 있으며 각 시험편에 따른 압력의 변화에 따른 최대변형량과 상수 k의 예측으로 압력용기 결함깊이를 예측할 수 있는 계측 이론을 제시하였다. 측정 결과, 실제 제작된 결함의 두께인 SSP-2H( $t_p=1.8$  mm)의 경우, 제시한 계산식을 통하여 구한 결과 같은 결과를 나타내었고, SSP-2F( $t_p=5.4$  mm)의 경우 약 7%의 오차율을 확인하였다. 현재의 압력용기의 결함을 측정할 때는 shearography를 이용하여 측정된 이미지의 위상지도의 변형률 결과를 통하여 측정 결함의 유무를 판단하였지만 압력용기의 결함깊이 측정을 통하여 결함의 크기와 변형량의 측정뿐만 아니라 결함부의 두께도 예측할 수 있다.

Table 2 Phase map by pressure difference

$\Delta P$	SSP-2H	SSP-2F
	phase-map	phase-map
0.02		
0.04		
0.06		
0.08		

Table 3 Result of SSP-2H specimen

$\Delta P$ (MPa)	$\delta$ ( $\mu m$ )	k	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.02	0.315	0.073	120.000315	5.34
0.04	0.921	0.103	120.000921	5.31
0.06	1.312	0.127	120.001312	5.36
0.08	1.707	0.147	120.001707	5.36

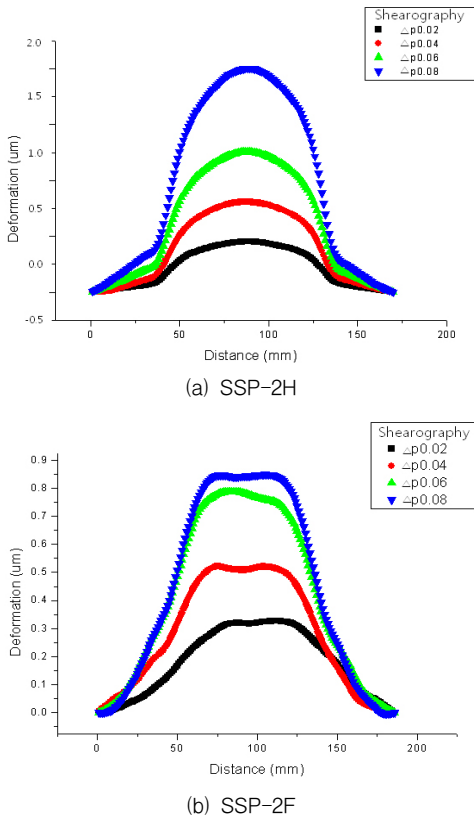


Fig. 6 Shearography result

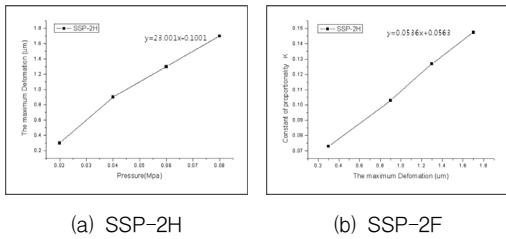


Fig. 7 (a) Maximum displacement according to pressure, (b) Constant K according to maximum displacement

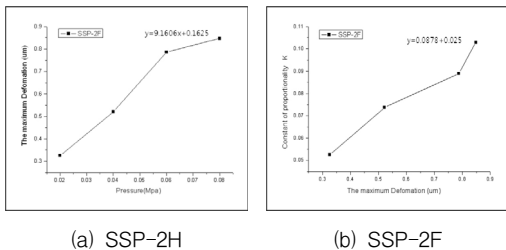


Fig. 8 (a) Maximum displacement according to pressure, (b) Constant K according to maximum displacement

Table 4 Result of SSP-2F specimen

$\Delta P$ (MPa)	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	k	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.02	0.326	0.052	126.000326	1.7
0.04	0.521	0.073	126.000521	1.8
0.06	0.787	0.089	126.000787	1.7
0.08	0.848	0.102	126.000848	1.7

5. 결론

본 논문에서는 전단간섭계를 이용하여 감육 시험편의 결함부를 측정하였으며, 변형량을 통하여 변수들의 가정을 통한 두께 측정 방법을 제시하였다.

- 1) 두께별로 감육결함부의 변형 측정 실험을 통하여 미세한 압력변화에도 전단간섭법으로 측정하였을 때는 결함의 최소두께가 1.8 mm로 가공된 SSP-2H, 5.4 mm로 가공된 SSH-2F의 변형을 측정하였다.
- 2) 전단간섭법으로부터 얻어진 결과를 이용하여 본 논문에서 제시한 압력용기의 결함깊이를 측정할 수 있는 계산식에 대입한 결과 결함의 두께 ( $t_p$ )는 SSP-2H는 실제 결함의 두께인 1.8 mm의 같은 결과를 나타내었고 SSP-2F에서는 압력에 변화에 따라 결함의 두께가 실제 결과와 다르게 약 7% 정도의 오차로 실제 두께와 차이를 보였다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부 원자력기금으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

[1] M. Frank, R. Hans and S. Helmut, "Experience with piping in German NPPs with respect to ageing-related aspects," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 207, pp. 307-316 (2001)

[2] Virginia Electric and Power Co., "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report," (1989)

- [3] P. Hariharan, "Optical Holography 2nd Edition, New York," Cambridge University Press (1996)
- [4] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition," London Cambridge University Press (1989)
- [5] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry: A discussion of the theory," Practice and Application of the Technique, 2nd Edition, Cambridge University Press (1989)
- [6] K. Creath "Temporal phase measurement method, in interferogram Analysis: digital fringe pattern measurement techniques," IOP Publishing, pp. 94-140 (1993)
- [7] S. P. Timoshenko and J. M. Gere, "Theory of Elastic Stability," 2nd Edition, McGraw-Hill, pp. 1-45 (1961)
- [8] W. Steinchen and L. Yang, "Digital shearography, theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry," *SPIE Press*, pp. 55-62, 237-241 (2003)
- [9] C. S. Mun, H. S. Chang, S. S. Park, S. S. Hong, D. L. Kim, W. J. Kim, J. G. Song and K. S. Kim, "Quantitative comparison of wall thinning defect size of NPP pipeline using SSI and DIC," *Proceedings of the Annual Fall Conference of the KSNT*, pp. 414-418 (2011)
- [10] H. C. Jung, K. S. Kim, H. S. Chang, S. W. Jung and K. S. Kang, "Deformation measurement of wall thinning elbow by using shearography," *Journal of the KSNT*, Vol. 26, No. No. 5, pp. 321-328 (2006)