

## 전단간섭법을 이용한 감육 곡관부의 변형 계측

### Deformation Measurement of Wall Thinning Elbow by Using Shearography

정현철\*<sup>†</sup>, 김경석\*\*, 장호섭\*, 정성욱\*, 강기수\*\*\*

Hyun-Chul Jung\*<sup>†</sup>, Kyoung-Suk Kim\*\*, Ho-Sub Chang\*, Sung-Wook Jung\* and Ki-Soo Kang\*\*\*

**초 록** 본 논문에서는 전단간섭계를 이용하여 감육 곡관부의 변형을 계측하고 내부 감육 결함의 위치를 찾고자 하였다. 전단간섭법은 비파괴검사(NDT)와 응력/변형을 해석에 적용되어왔던 광학적 방법의 한가지이다. 이 기술은 간섭계에서 tilt mirror를 조작함으로써 조절이 가능한 민감도를 갖는 변위의 1차 도함수를 직접 측정할 수 있다는 이점을 지니고 있다. 본 논문에서는, 국부적으로 감육이 발생한 탄소강 곡관부에 대해 실험하였으며, 전단간섭법을 곡관부의 변형량 측정과 내부 감육결함 검사에 적용하였다. 실험 결과로부터, 이 기술이 내부 결함이 있는 배관부에도 적용이 가능함을 확인하였다.

**주요용어:** 전단간섭법, 감육 곡관부, 내부 감육 결함, 내압, 면외변형

**Abstract** In this study, the deformation of wall thinning elbow is measured and the position of the internal thinning defect is found out by shearography. Shearography is an optical method which has applied to nondestructive testing (NDT) and the strain/stress and deformation analysis. This technique has the merit of the directly measuring the first derivative of displacement with sensitivity which can be adjusted by handling the tilt mirror in the interferometer. In this paper, we tested carbon steel pipe locally wall thinned and loaded internal pressure and the shearography was applied to measure the out-of-plane deformation of wall thinning elbow and to investigate the internal thinning defect of it. From the results, it was confirmed that this technique is proper to the practical application on the pipe line system with internal defect.

**Keywords:** Shearography, Wall Thinning Elbow, Internal Thinning Defect, Internal Pressure, Out-of-Plane Deformation

#### 1. 서 론

일반적으로 곡관은 그 쓰임새에 따라 사용되는 재질이 달라진다. 특히 발전소나 화학공장 등에서 쓰이는 곡관은 강도와 재질면에서 우수하다. 원전 2차계통 배관에 사용되는 재질은 크게 스테인레스강과 탄소강으로 구분할 수 있다. 각 재질별로 배관에 발생하는 결함은, 스테인레스강의 경우 용접 과정 도중 또는 용접후 발생하는 열적 손상으로 인하여 관의 용접부에서 균열 결함이 주로 발생하며,

탄소강의 경우 유동가속부식 등에 의해 곡관부 두께가 감소하는 감육 결함이 곡관부 내부에 발생한다. 특히, 곡관의 건전성을 저하시키는 대표적인 결함인 국부적인 감육 결함은 내부에서 발생하기 때문에 발견하기가 어렵고, 손상에 대한 징후를 예견하기 힘들다는 특징이 있다. 따라서, 원자력발전소에서는 최근 배관의 감육현상을 주요 관리대상으로 분류하여 관리하고 있다[1]. 그러나 이러한 배관들은 지속적으로 관리하고 있지만, 내부의 치명적인 결함 때문에 배관의 계속적인 사용, 정비, 교체 등

을 판단하기 위한 평가 방법이 요구되고 있다. 지금까지 원전 배관의 감육 결함에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나[2,3] 대부분 직관의 감육현상에 대한 연구이며, 곡관에 대한 적절한 평가 방법은 제시되지 못하고 있는 실정이다. 최근에는 국내에서도 감육 배관에 대한 연구가 수행되었으나 [4,5] 곡관에 대한 비접촉식 비파괴 결함 및 변형 측정방법 개발이 절실히 필요한 상태이다. 비파괴 계측 기법으로는 주로 광학적인 방법이 이용되고 있으며, 열온도측정법(thermography), 홀로그래피(holography), ESPI (electronic speckle pattern interferometry)와 전단간섭법(shearography) 등이 있다. 이 중에서도 특히 전단간섭계를 이용한 방법은 공기 요란이나 외부 환경에 의한 영향에 둔감하여 실제 산업현장에 적용이 가능하며, 변형의 구배를 직접 측정할 수 있어서 변형을 해석과 결함 검사 등에 주로 사용된다[6]. 따라서, 본 논문에서는 곡관의 감육결함을 찾기 위해, 전단간섭법(Shearography)을 이용하여 내압이 작용하는 감육 곡관부의 변형을 계측하고자 한다.

2. 전단간섭계

전단간섭법[6,7]에서 사용되는 간섭계는 마이켈슨(Michelson)간섭계의 변형된 형태가 많이 사용된다. Fig. 1은 전단간섭법에서 사용되는 대표적인 간섭계 구성으로서, 참조광로 상에 참조 거울이 위치하며, 참조광과 상대변위를 만드는 물체광로 상에 전단 거울이 각각 설치되어 있다.

참조 거울은 위상이동기법을 적용하기 위해 PZT가 장착이 되어 있으며, 전단 거울의 기울기의 조절에 따라 전단량(shearing,  $\delta x$ )이 변하게 된다.

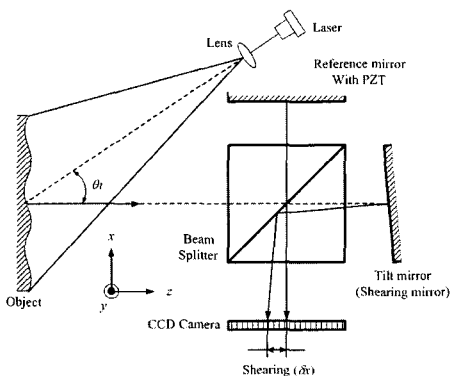
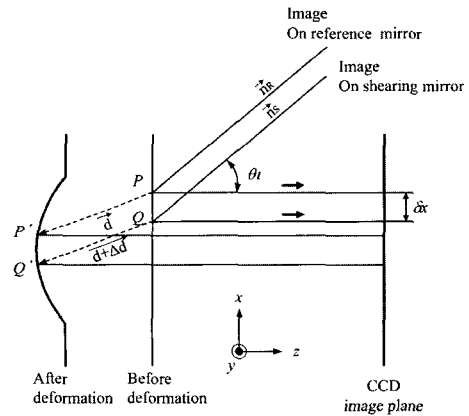


Fig. 1 Schematic of shearography interferometer

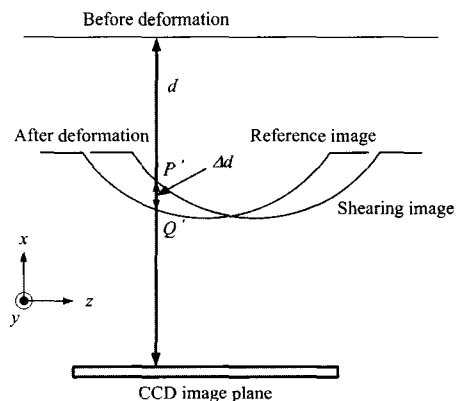
CCD 카메라에서 이미지는 참조광과 물체광의 중첩으로 나타나게 되며, 전단량에 의존하여 측정 민감도가 결정되게 된다. 전단간섭계를 이용하여 검출하는 최종 변위정보는 전단량에 의존한 상대변위량이다. 즉, 전단간섭계는 두 점사이의 물체의 상대변위값을 측정하게 되므로 외부환경 진동외란 등에 의한 물체의 강체운동에 둔감한 특성이 있다. 전단간섭계에서 상대변위는 CCD 결상면에서 중첩하여 간섭하는 두 점의 위상차로 구할 수 있다.

Fig. 2(a)는 물체 위의 임의의 점 P와 전단량에 의해 점 P가 이동된 점 Q에서 물체의 변형에 따른 광로변화를 나타내었으며, Fig. 2(b)는 전단량에 의한 두 점의 중첩을 나타내었다.

Fig. 2(a)에서 점 P와 Q가 물체의 변형  $\vec{d}$ 에 의해 점 P'과 Q'으로 이동할 때 위상차는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.



(a) Optical path trace



(b) Superposition of wavefront by shearing

Fig. 2 Optical path tracing in Shearography

$$\Delta\Phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} [d_z (1 + \cos\theta_i) + d_x \sin\theta_i] \quad (1)$$

$$\Delta\Phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_z + \Delta d_z)(1 + \cos\theta_i) + (d_x + \Delta d_x) \sin\theta_i] \quad (2)$$

식 (1), (2)에서  $\Delta d$  는 테일러 정리를 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial^2 d_z}{\partial x^2} \frac{\delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^{(n-1)} d_z}{\partial x^{(n-1)}} \frac{\delta x^{(n-1)}}{(n-1)!} \quad (3)$$

전단량  $\delta x$ 로 매우 작은 값을 취한다면, 식 (3)에서 2차 이상의 고차항은 무시할 수 있다. 그리고 각 방향  $i = 1, 2, 3$ 에 대하여 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_i} \cdot \delta x \quad (4)$$

따라서, 식 (2)의  $\Delta\Phi_Q$ 는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\Phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \left( d_z + \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x \right) (1 + \cos\theta_i) + \left( d_x + \frac{\partial d_x}{\partial x} \delta x \right) \sin\theta_i \right] \quad (5)$$

전단간섭법에서는 전단량에 의해 Fig. 2(b)에서 점 P과 점 Q'의 중첩으로 인한 두 점의 위상차를 측정하며, 물체에 조사되는 조사각이  $\theta_i \approx 0$  이 된다면  $d_x$ 의 성분을 무시할 수 있으며, 식 (6)으로 쓸 수 있다. 물체의 상대변위  $\partial d_z / \partial x$ 는 물체 변형위상을 식 (6)에 대입함으로써 구할 수 있게 된다.

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_Q - \Delta\Phi_p \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x \quad (6)$$

$$\frac{\partial d_z}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\Phi \frac{1}{\delta x} \quad (7)$$

위 식 (7)에서 알 수 있듯이 전단간섭법에서는 작은 전단량의 경우에 면의 변위량에 대한 미분값  $\partial d_z / \partial x$ 을 직접 측정할 수 있음을 알 수 있다. 전단량  $\delta x$ 가 작을수록 도함수에 가까워지게 되며, 전단량에 의해 광학계의 민감도를 조절할 수 있다.

전단간섭법은 간섭계의 특성으로 물체 변위변위의 전단량만큼 떨어진 두 점의 상대 변위값을 측정하며, 식 (7)에서 전단량이  $\lim \delta x \rightarrow 0$ 일 경우, 측정

결과는 1차미분에 근접하게 된다. 그러나, 실제 적용실험에서는  $\lim \delta x \rightarrow 0$ 의 조건을 만족시킬 수 없으므로, 정확한 면의변위의 1차도함수  $\partial d_z / \partial x$ 를 구할 수 없게 된다. 결과적으로 이론적 조건  $\lim \delta x \rightarrow 0$ 을 만족하지 못하는 경우에는 전단간섭법에서는 Fig. 3과 같이 전단량으로 두 점 사이의 상대변위량을 측정하므로, 전단량은 결함검출에 있어서 매우 중요한 영향인자로 고려된다.

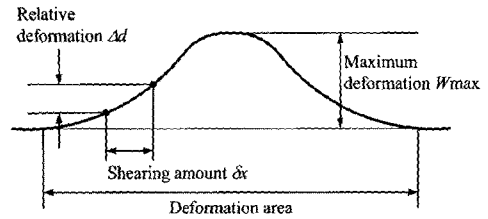


Fig. 3 Relationship between relative displacement and shearing amount

너무 작은 전단량은 상대변위량이 너무 작게되고, 상대변위량이 측정시스템의 민감도보다 작게되면 결함을 검출하지 못한다. 즉, 측정시스템의 민감도 이하가 되면 작은 변형을 일으키는 결함에 대해 검출이 어렵게 된다. 그러나, 작은 전단량은 수치적으로 구하여지는 1차미분 결과에 가장 근접하게 되며, 변형을 분포를 구하기 위해서는 민감도를 고려한 최소 전단량을 활용해야 한다.

### 3. 실험 및 결과

본 논문에서는 곡관 내부의 내호면과 외호면에 감육결함을 인위적으로 가공한 Butt 용접용 연강인 A234 WPB 재질로 된 곡관을 대상으로 감육 곡관부의 변형을 측정하였다. Fig. 4에 실험에 사용된 시험편을 나타냈다. A234 WPB의 기계적 특성은 허용응력이 240 MPa, 인장응력은 415-585 MPa, 세로방향 연신율은 25%이다. 곡관의 두께는 8.56 mm, 직경은 114.3 mm이다. 감육 곡관 시험편은 곡관(elbow)에 감육 결함을 가공하고, 동일한 재질의 직관(pipe)과 용접하여 제작하였다. 이때 감육 결함은 내호면과 외호면에 가공하였으며, 외호면에 가공된 감육 결함의 형상과 치수를 Fig. 5에 나타냈다. 이때 감육 결함의 길이는 곡관의 직경과 동일하고, 각도는 90° 이다.

Fig. 6에 본 연구에서 사용한 전단간섭계를 포함

한 실험장치 구성을 나타냈다. 감육 곡관은 가압 펌프와 연결되어 있으며, 가압 펌프에 압력계이지를 부착하여 곡관에 가해지는 압력을 확인할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 전단간섭계는 독일 Etemeyer사에서 제작한 Q-800 shearography system이며, 실험시 설정한 전단량은 10mm이다. 감육 결함 위치에 대한 변형량, 전단방향에 대한 변형량 및 압력차에 따른 변형량을 각각 측정하였다.

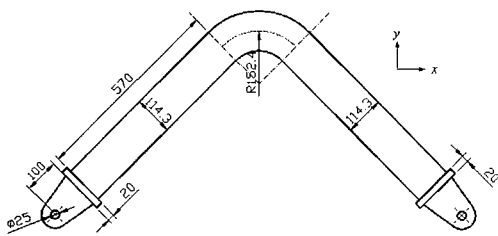
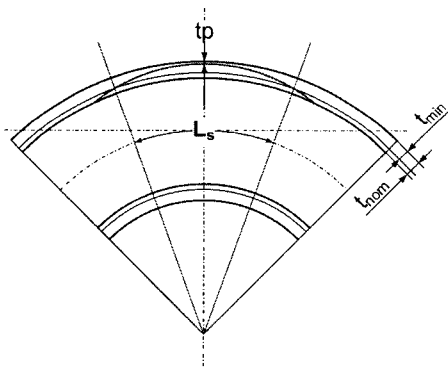
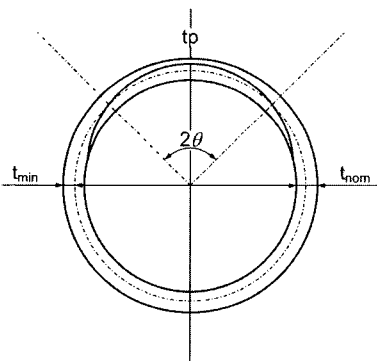


Fig. 4 Specimen used in experiment with shearography



(a) Internal defect size



(b) Internal defect angle

Fig. 5 Internal defect shape and dimension (extrados)

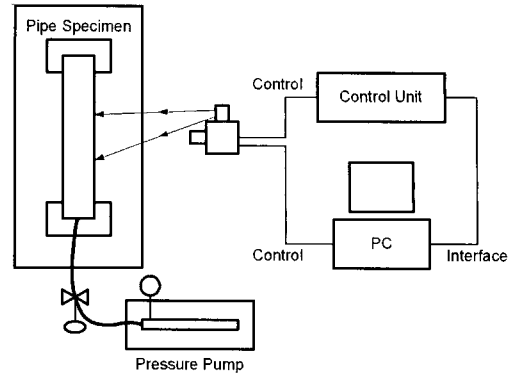


Fig. 6 Layout of shearography setup

3.1. 감육 결함 위치에 따른 변형 계측

감육 결함 위치가 내호면인 경우와 외호면인 경우, 간섭 줄무늬의 형상만으로 감육 결함의 위치를 손쉽게 확인할 수 있었다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 감육 결함이 특히 심하게 가공된 곡관 상하부에서 가장 많은 간섭 줄무늬를 관측할 수 있었으며, 이것은 해당 부분에 응력 집중이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에 감육 결함 위치에 따른 간섭 줄무늬 패턴을 나타냈다.

3.2. 전단방향에 따른 변형 계측

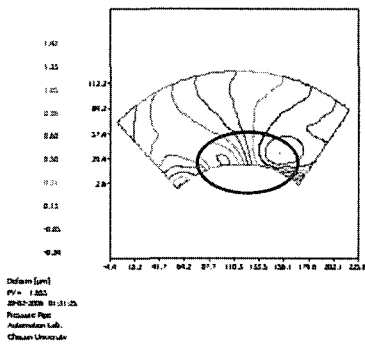
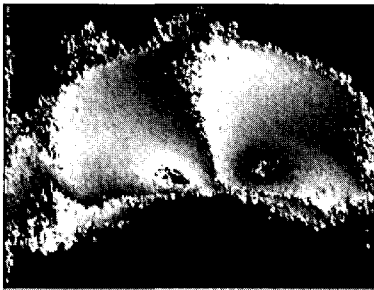
전단방향을 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 x-, y-방향으로 각각 설정하고, 각각의 전단량을 10 mm로 하여 실험을 수행하였다. 전단방향이 x-방향인 경우는 y-방향 전단과는 달리 축방향 압력에 더 크게 반응을 하게 되므로 간섭 줄무늬의 수가 적게 발생하였다. 전단방향이 y-방향인 경우는 직경방향 압력에 더 크게 반응을 하게 되어, 미소한 압력차에 의해서도 쉽게 감육 결함의 위치를 확인할 수 있었다. Fig. 8과 Fig. 9에 전단방향이 x-, y-방향인 경우, 내호면과 외호면에 발생하는 간섭 줄무늬를 나타냈다.

3.3. 압력차에 따른 변형 계측

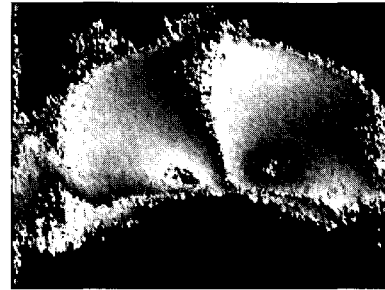
압력차를 각각 1 MPa과 2 MPa로 하였을 때 감육 결함의 위치와 전단방향에 따른 변형량을 측정하였다. Fig. 10과 Fig. 11에 나타낸 바와 같이, 2D로 표현한 변형 분포 등고선도에서는 압력차에 따른 간섭

줄무늬 패턴에서 줄무늬 수가 2배 차이가 나는 것과는 달리, 등고선의 패턴 자체에는 별 차이 없이 변형량의 수치만 2배 차이가 나고 있음을 알 수 있었다. 변형량을 2D 그래프로 표현할 때 기준이

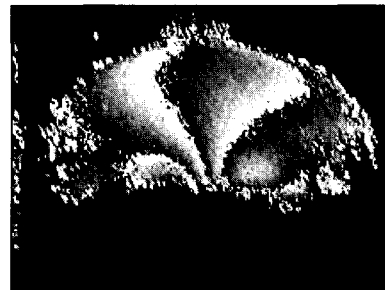
되는 점에 대한 상대 변위량을 표현하고 있기 때문에 등고선 표현은 압력차에 무관하게 거의 동일한 형태가 됨을 알 수 있다.



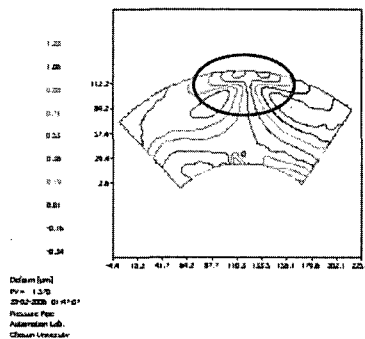
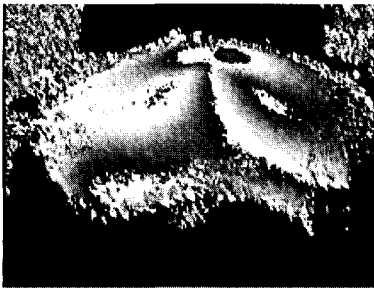
(a)



(a) intrados, 1MPa



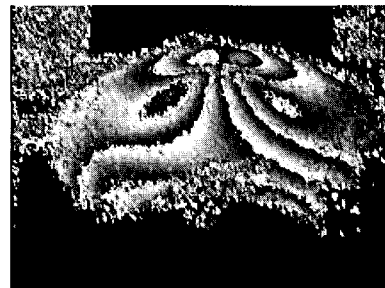
(b) intrados, 2MPa



(b)



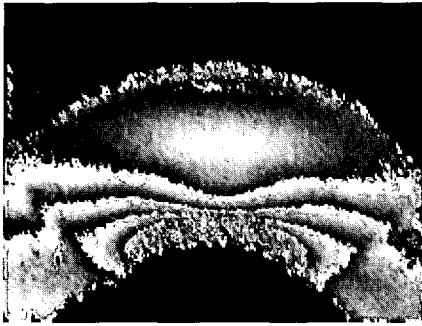
(c) extrados, 1MPa



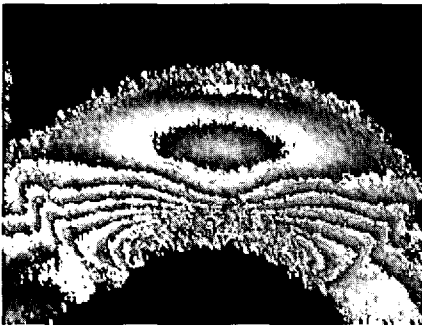
(d) extrados, 2 MPa

Fig. 7 Interference fringe patterns respected to position of internal wall thinning defect; (a) intrados and (b) extrados

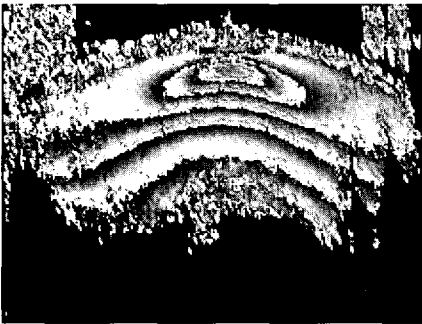
Fig. 8 Interference fringe patterns respected to shearing direction of shearography system (intrados)



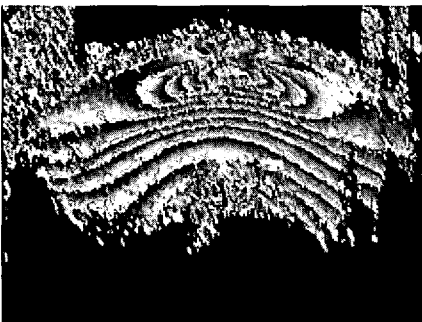
(a) intrados, 1Mpa



(b) intrados, 2Mpa

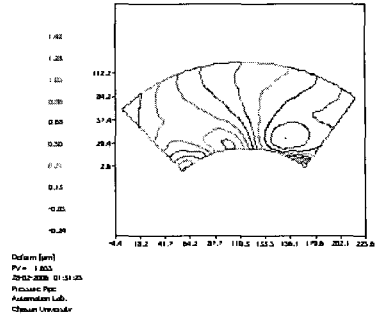


(c) extrados, 1Mpa

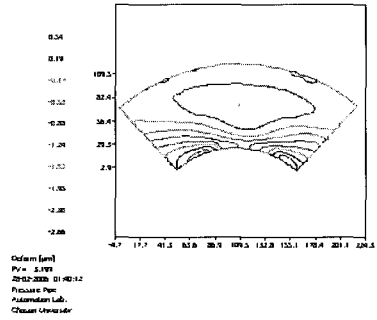


(d) extrados, 2Mpa

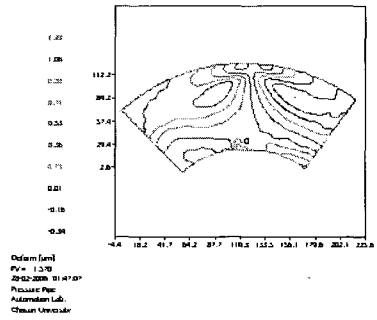
Fig. 9 Interference fringe patterns respected to shearing direction of shearography system (y-direction)



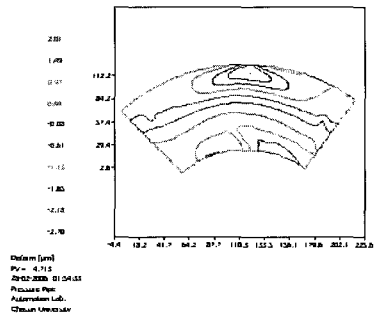
(a) intrados, x-direction



(b) intrados, y-direction



(c) extrados, x-direction



(d) extrados, y-direction

Fig. 10 2D plots of deformation distribution respected to pressure variation of 1 MPa

3.4. 고찰

곡관부의 감육 결함의 발생위치는 내호면과 외호면으로 구분하여 고려할 수 있으며, 전단간섭계를 이용한 실험결과로부터 아주 작은 압력차를 통해서 손쉽게 감육 결함의 위치를 관측할 수 있음을 확인하였다. 또한, 전단방향에 따른 실험결과에서 알 수 있듯이 전단방향이 x-방향에 비해 y-방향일 때 더욱 쉽게 감육 결함을 계측할 수 있었다. 압력차에 따른 실험결과는 압력차가 2배일 경우 간섭 줄무늬의 수는 2배로 증가하며, 2차원 변형 분포 등고선도는 압력차에 무관하게 동일한 패턴을 나타내고 있음을 보여주

고 있다. 이 때, 각각의 조건에서 측정된 최대 변형량을 Table 1에 나타냈다.

또한, 전단방향과 감육 결함의 위치에 따른 최대 변형량의 비를 Fig. 12에 나타냈다. Fig. 12와 Table 1에서 보는 바와 같이 내호면과 외호면에 대한 최대 변형량의 비는 2배의 압력차의 변화에 대해 정확하게 2배로 측정되지 않았다. 그러나 전단방향이 y-방향일 때 x-방향인 경우보다는 조금 더 정확하게 2배로 근사하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 전단간섭계를 이용한 감육 곡관부의 감육 결함 변형 측정에 있어서는 전단방향을 y-방향으로 설정하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

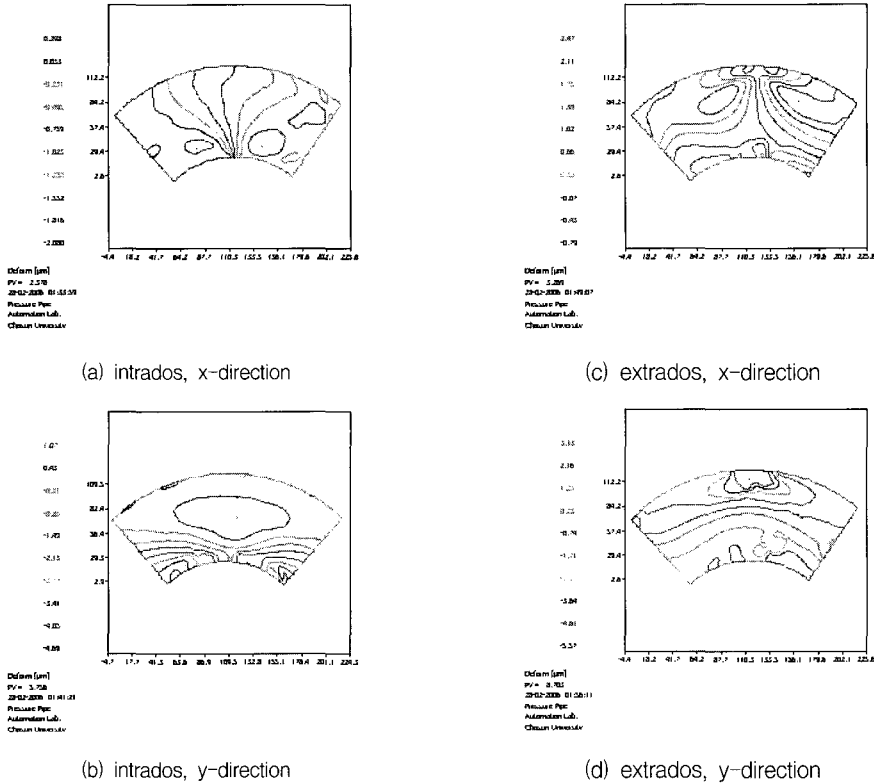


Fig. 11 2D plots of deformation distribution respected to pressure variation of 2 MPa

Table 1 Maximum deformation amount to each experimental condition

Shearing direction	x-direction				y-direction			
	Intrados		Extrados		Intrados		Extrados	
Position of defect								
Pressure Variation (MPa)	1	2	1	2	1	2	1	2
Max. Deformation (µm)	1.6	2.58	1.37	3.26	3.17	5.73	4.71	10.7

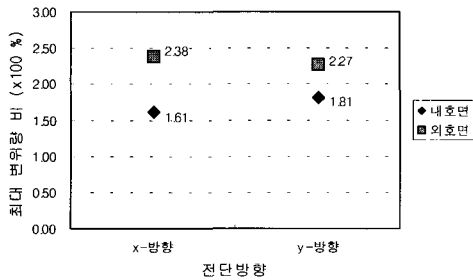


Fig. 12 Maximum deformation amount ratio by pressure variation respected to shearing direction and position of wall thinning defect

#### 4. 결론

본 연구에서는 전단간섭계를 이용하여 곡관의 감육 결함에 대한 변형량을 정량적으로 계측하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 전단간섭계를 이용하여 측정결과를 통해 손쉽게 감육 결함의 위치를 확인할 수 있었다. 또한, 전단방향이 x-방향에 비해 y-방향인 경우 적은 압력차에서 쉽게 결함의 위치를 확인할 수 있었다. 최대 변형량은 압력차가 2배일 때, 내호면에 대해서 x-방향 전단에서는 1.61배, y-방향 전단에서 1.81배, 외호면에 대해서 x-방향 전단에서는 2.38배, y-방향 전단에서 2.27배로 측정되었다. 따라서, 압력차에 따라 정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 전단방향을 y-방향으로 설정해야 함을 확인하였다. 본 연구를 통하여 곡관의 감육 결함은 물론 직관의 경우에도 손쉽게 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 추후 측정 결과를 직분함으로써 결함의 위치는 물론 결함의 범위를 측정할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 논문은 2006년도 원자력연구기반확충사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] B. Chexal, J. Horowitz, B. Dooley, P. Millett, C. Wood, and R. Jones, "Flow-accelerated corrosion in power plant," EPRI/RT-106611-R2, (1998)
- [2] A. F. Deardorff and S. H. Bush, "Development of ASME Section XI criteria for erosion-corrosion thinning of Carbon steel piping," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol-186, NDE-Vol. 7, pp. 71-75, (1990)
- [3] K. Miyazaki, S. Kanno, M. Ishiwata, K. Hasegawa, S. H. Ahn, and K. Ando, "Fracture behavior of Carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load," Nucl. Eng. & Des., Vol. 191, pp. 195-204, (1999)
- [4] K. M. Hwang, T. E. Jin, S. H. Lee, and W. S. Kim, "Wall thinning analyses for secondary side piping of domestic NPPs using CHECWORKS Code," Spring Proceeding of KSME, pp. 807-812, (2001)
- [5] J. W. Kim, T. S. Kim, and C. Y. Park, "An evaluation of the effect of internal thinning defect on the failure pressure of elbow," J. of the KIIS, Vol. 18, No. 4, (2003)
- [6] W. Steinchen and L. Yang, "Digital shearography: theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry," SPIE Press, Washington, USA, (2003)
- [7] G. P. Guo and Y. W. Qin, "Quantitative analysis on sensitivity of shearography in NDT," Proceedings of SPIE 2002, pp. 341-344, (2002)