

Shearography 기법에 의한 압력 배관 내부 결함 검출에서 전단량의 영향

Influence of Shearing Amount on Detection of Internal Defect of Pressure Pipeline by Shearography

김경석*[†], 강기수**, 최만용**, 강영준***

Koung-Suk Kim*[†], Ki-Soo Kang**, Man-Yong Choi** and Young-June Kang***

초 록 본 논문에서는 레이저 응용 비파괴검사 기술인 Shearography를 이용하여 압력 배관 내부 결함의 검출에 있어서 미치는 전단량의 영향을 분석하였다. Shearography는 레이저 응용기법에 비하여 환경 외란에 둔감하며, 대상체 표면의 상대 변위를 검출함으로써 비파괴검사 분야에서 많은 활용이 기대된다. 현재까지 연구는 적용 가능성의 평가와 적용 대상의 확대에 중점을 두어 연구가 진행되어 왔으며, 결함의 정량평가를 위해서는 결함 검출에 있어서 영향을 주는 인자들에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 결함의 검출에 영향을 줄 수 있는 전단량의 변화에 따라 결함의 크기 측정과 결함의 위치 결정에 대한 영향을 예측하고, 압력용기 내부의 길이 방향 인공 결함에 대해 적용하여 검출 결과를 분석하였다.

주요용어: 레이저 스펙클 전단 간섭법, 압력 배관, 전단량, 결함 위치 검출, 결함 크기

Abstract Shearography is one of optical methods that has been applied to nondestructive testing (NDT) and strain/stress analysis. The technique has the merit of the directly measuring relative displacement, which is insensitive to environmental vibration disturbance. Previous studies about the method have emphasized on extending its application to new fields and lack insufficient research on effective parameters for qualitative and quantitative evaluation of defects. In this paper, the influence of shearing amount on the detection of an internal defect is investigated. In experiment, slender defects along longitudinal direction of pipeline are artificially designed and detection results according to the change of shearing amount are analyzed. Based on the investigation, we propose the technique for the determination of defect size and accurate source location.

Keywords: Shearography, Pressure Pipeline, Shearing Amount, Source Location, Defect Size

1. 서 론

비파괴검사 기술은 검사 결과의 신속성, 경제성, 검사 대상의 다양성 등의 장점으로 대형 구조물의 안전 진단에서 소형 제품의 신뢰성 평가 분야까지 산업 전반에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 현대

의 비파괴검사 기술은 검사 대상의 확대 및 경제성을 충족시키기 위해 접촉식 검사기술에서 비접촉식으로, point by point 검사 기술에서 전면(whole field) 검사 기술로 그리고 실시간 검사 기술로 변하고 있다[1,2]. 이러한 측면에서 비파괴검사 기술의 발전방향은 짧은 시간에 많은 대상체를 비접촉, 실시

(접수일: 2005. 12. 9, 심사완료일: 2006. 3. 24) * 조선대학교 기계설계공학과, ** 한국표준과학연구원 안전그룹, *** 전북대학교 기계항공시스템공학부, † Corresponding author: Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Gwangju, 501-759 (E-mail: gsckim@chosun.ac.kr)

간, 고분해능으로 검사가 가능한 기술을 원하고 있으며, 이러한 요구들은 광학 기반의 비파괴검사 기술이 충족할 수 있을 것이다[3]. 특히, 스페클 전단간섭법(Shearography)에서 변형전·후 이미지의 비교 처리라는 기본 개념은 비파괴검사 분야로 활용되고 있다. 즉, 중력, 진공, 진동, 열 등의 외력에 의해 물체의 내부 또는 외부에 존재하는 결함에 의해 변형 집중이 일어나며, 이 변형 집중은 표면 변위 분포로 나타나게 된다. 이 변형 집중은 Shearography에서 상관 간섭 줄무늬의 왜곡으로 나타나게 된다. 이러한 기본 개념을 응용하여 물체 외부 또는 내부의 결함을 비접촉, 비파괴, 실시간으로 검사를 할 수 있다. 특히, Shearography는 간섭계의 특징으로 물체의 상대 변위를 측정함으로써 외부의 진동 등에 둔감한 특성을 가지고 있어 비파괴검사 분야에서 많은 활용을 기대하고 있다. 우주항공, 원자력 등 다양한 분야에서 적용 가능성이 검증되고 있으며, 최근에는 결함의 유해도 평가를 위해 정량적 비파괴평가(quantitative nondestructive evaluation; QNDE)에 관한 연구가 진행되고 있다. 이에 관한 연구를 살펴보면, Shang [4], Fulton [5], Etmeyer [6] 은 결함의 정량화를 위한 기초 연구를 수행하여 정량화 방법에 대해 서술하였다. 그러나, 이들 논문은 Shearography의 광학적 구성을 고려하지 않은 상태에서 결함의 정량적인 크기만 실험적으로 제시하였다. 결함의 정량 평가를 위해서는 Shearography가 갖는 광학적 특성을 고려하여 이들의 변화에 따라 결함평가에 미치는 영향에 대해 조사를 하여야 한다. 본 논문에서는 Shearography 광학간섭계에서 결함 검출에 있어 가장 많은 영향을 미치는 전단량의 영향을 분석하기 위해 Shearography의 측정 결과를 기존의 1차 도함수의 개념에서 상대 변위의 차이의 개념으로 재해석하여 전단량 변화에 따른 결함의 크기와 결함의 위치에 대한 영향을 조사하였다. 적용 실험에서는 길이 방향의 내부 결함을 갖는 압력용기에 대해 실제 면외변위 분포를 electronic speckle pattern interferometry(ESPI)를 이용하여 측정하고 Shearography 측정 물리량과 물체의 표면 변위의 관계로부터 수치 해석적으로 결함의 크기를 예측하였으며, Shearography에서 전단량의 변화에 따라 결함 크기와 결함 위치에 미치는 영향을 분석하여 결함의 위치 검출에서의 오차 보정과 결함의 크기를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. Shearography 원리 및 전단량의 영향 분석

2.1. Shearography 원리

Shearography 광학간섭계는 물체의 표면 정보를 가지고 있는 기준 광위상(reference optical phase) 신호와 그 기준 영상에 전단 거울을 이용하여 형성한 전단 영상이 겹치면서 간섭을 일으키게 된다. 일반적으로 digital Shearography에서는 Fig. 1과 같은 형태의 간섭계를 사용하게 된다. Fig. 1에서 간섭성이 우수한 광원이 물체 표면에 확산 조사되면 물체표면 거칠기에 의해 산란과 간섭으로 물체표면에서 제 1의 스페클 패턴이 형성되며, 이 스페클 패턴은 물체의 표면 정보를 CCD camera에 전달하는 정보 전달자 역할을 한다. 스페클 패턴은 기준 거울(reference mirror)에 반사된 이미지와 임의의 각도로 기울어진 전단 거울(tilt mirror)에 의해 반사된 이미지가 CCD camera에서 겹쳐져 보이게 된다[7].

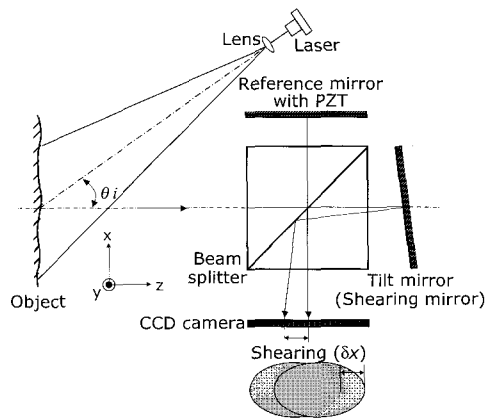
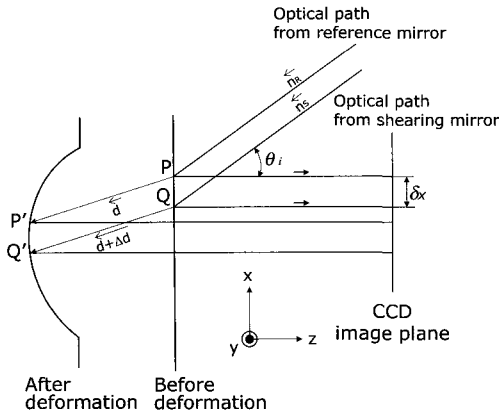


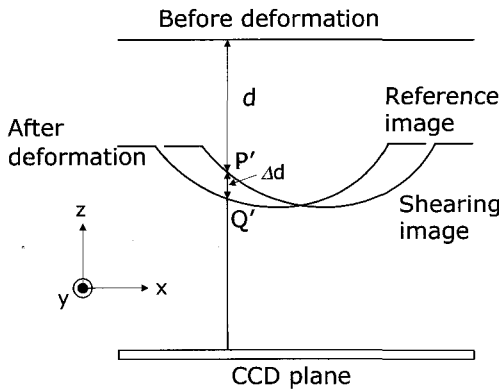
Fig. 1 Shearography optical interferometer

전단 거울에 의한 이미지는 전단 거울의 기울기 각도에 비례하여 일정한 전단량(shearing amount)을 가지고 기준 이미지와 겹쳐져 제2의 스페클 패턴을 형성하게 된다. 스페클 상관 간섭법(speckle correlation interferometry)은 변형 전후의 스페클 패턴의 감산 처리로부터 스페클 상관 간섭 무늬(speckle correlation fringe pattern)를 얻게 되며 간섭 무늬는 물체의 변형 정보를 나타내게 된다. Fig. 2(a)는 물체위의 임의의 점 P와 전단량에 의해 점 P가 이동된 점 Q에서 물체의 변형에 따른 광로 변화를

나타내었으며, Fig. 2(b)는 전단량에 의해 두 점의 중첩을 나타내었다.



(a) Optical path trace in Shearography



(b) Superposition of wavefront by shearing

Fig. 2 Optical path trace in Shearography

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

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

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

Shearography에서는 전단량에 의해 Fig. 2(b)에서 점 P 와 점 Q 의 중첩으로 인한 두 점의 위상차

를 측정하며, 물체에 조사되는 조사각이 $\theta_i \approx 0$ 이 된다면 d_x 의 성분을 무시할 수 있으며, 식(3)으로 쓸 수 있다. 물체의 상대 변위 $\left(\frac{\partial d_z}{\partial x}\right)$ 는 물체 변형 위상을 대입함으로써 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_P \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x \quad (3)$$

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

위 식 (4)에서 알 수 있듯이 Shearography는 작은 전단량의 경우에 면의 변위량에 대한 미분값 $\frac{\partial d_z}{\partial x}$ 을 직접 측정할 수 있음을 알 수 있다. 전단량 δx 가 작을수록 도함수에 가까워지게 되며, 전단량에 의해 광학계의 민감도(상대 변위량)를 조절할 수 있다.

2.2. 결함 검출에 있어서 전단량의 영향

Shearography는 간섭계의 특성으로 물체 면의 변위의 전단량 만큼 떨어진 두 점의 상대 변위값을 측정하며, 식 (4)에서 전단량이 $\text{Lim } \delta x \rightarrow 0$ 일 경우에 측정결과는 1차미분에 근접하게 된다. 그러나 실제 적용 실험에서는 $\text{Lim } \delta x \rightarrow 0$ 의 조건을 만족하지 못하게 하며, 정확한 면의 변위의 1차도 함수 $\left(\frac{\partial d_z}{\partial x}\right)$ 를 구할 수가 없게 된다. 일반적으로 Shearography의 측정 결과를 1차도 함수로 표현하고 있으나, 미분 조건($\text{Lim } \delta x \rightarrow 0$)을 만족하지 못하는 Shearography는 1차도함수보다는 전단량의 변화에 따라 두 점사이의 상대 변위량을 측정한다고 해야 할 것이다. Shearography의 측정 결과를 상대 변위의 관점에서 재해석하게 되면, 전단량 변화에 따른 결함 크기와 위치 결정에 영향을 규명할 수 있다. 상대 변위량 (Δd)와 전단량(δx)과의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 즉, Shearography에서 측정하는 상대 변위량은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d = \delta x \cdot \tan\theta \quad (5)$$

식 (5)에서 상대 변위량은 대상체의 표면 변위 기울기 ($\tan\theta$)와 전단량에 의해 결정이 된다. 물체

표면 기울기가 일정하다 할지라도 전단량의 변화에 의해 상대 변위량이 결정되고, 일정한 전단량에서는 기울기의 최대값에서 상대 변위량의 최대값이 나타나게 된다. 기울기의 최대값은 변형의 최대값으로 변형 집중점이라 할 수 있으며, 길이 방향의 결함은 결함의 양 끝단에서 2개의 변형 집중점을 가지게 되고 2개의 변형 집중점에서 최대 기울기는 Shearography의 측정결과에서 상대 변위량의 최대점과 최소점으로 나타나게 된다. 또한, Fig. 3에서 알 수 있듯이 작은 전단량은 상대 변위량이 작게 되고, 상대 변위량이 Shearography 시스템의 측정 민감도보다 작게 되면 결함을 검출하지 못한다. 즉, 상대 변위량이 측정시스템의 민감도 이하가 되면 작은 변형을 일으키는 결함에 대해 검출이 어렵게 된다.

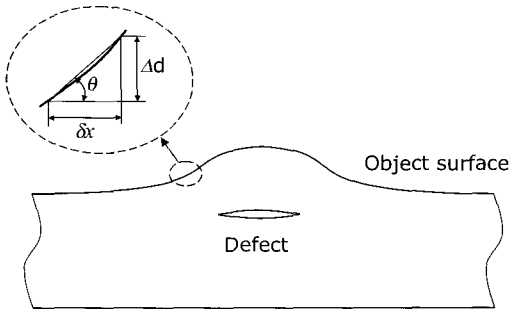


Fig. 3 Relation between relative displacement and shearing amount

전단량은 결함의 위치 결정에도 영향을 주게 된다. Fig. 2(b)에서 CCD camera에 기록된 상대 변위를 전단량의 변화에 따라 Fig. 4와 같이 다시 나타낼 수 있다. 결함의 위치를 변형의 최대점(Max) 즉, 기울기가 "0"인 점으로 가정하고, Shearography에서는 측정된 상대 변위의 "0"인 점을 결함의 중심 위치이라고 할 수 있다. Fig. 4에서 전단량이 δx_1 과 δx_2 의 경우에 상대변위의 "0" 점은 ps_1 과 ps_2 점으로 나타나게 된다. 즉, 전단량의 변화에 따라 측정된 결함의 위치가 이동하게 되며, 결함의 위치는 전단 방향과 같은 방향으로 $\frac{\delta x}{2}$ 만큼 이동하게 된다. 이러한 문제는 결함의 위치 결정에 영향을 주게 되며, 이는 Shearography 간섭계 특징으로 나타나는 고유 오차이다.

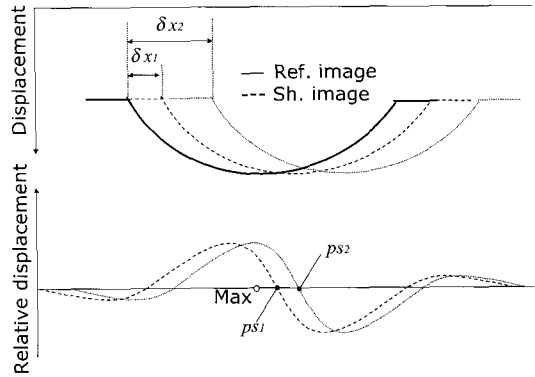


Fig. 4 Change of source location according to the shearing amount

3. 검사 시스템 및 적용 실험

3.1. 검사시스템

Shearography 시스템은 독일 Etemeyer 사의 상용 시스템(Q-800 model)을 이용하였으며, 전체 시스템 구성은 Fig. 5와 같이 Shearography 센서, 센서 내부에 장착된 diode laser, controller, PC로 구성이 되어 있다. 레이저는 diode laser (출력: 50 mW, 파장: 780 nm)를 사용하며, 센서 위쪽의 가이드에 장착된 거울을 통해 물체에 조사된다. 전단량과 전단 방향은 센서 뒷면의 수동식 조절 장치를 이용하여 조절할 수 있다. Piezo-electronic transducer(PZT)에 의해 위상 이동이 되며 4단계 위상 이동 기법을 적용하여 위상 지도(shearogram)를 얻게 된다[8]. 위상 지도는 상용 프로그램 (ISTRA, Etemeyer GmbH)을 이용하여 해석함으로써 상대 변위량을 얻었다.

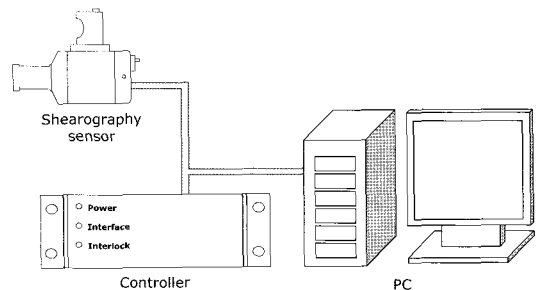


Fig. 5 Configuration of Shearography system

3.2. 검사 대상체

압력 파이프는 발전 설비의 70 ~ 80%를 구성하는 구조물로서 유속에 의한 감속(thinning), 용접부 잔류 응력에 의한 결함 등이 발생할 수 있으며, 일반적으로 초음파탐상기법을 이용한 검사가 수행되고 있으나, point by point 검사 및 접촉식의 한계로 표본 검사를 하고 있으며, 접근이 어려운 지역에서 검사는 실질적으로 어려운 상태이다. 결함 검출에 있어서 전단량의 영향을 조사하기 위해 Fig. 6와 같이 STS304 재료의 소형 압력 배관을 제작하였다. 압력 배관의 내부에는 길이 12mm, 깊이 1.00, 1.60, 1.95mm의 결함을 각 0°, 90°, 270° 지점에 방전 가공으로 제작하였으며, 질소 가스를 이용하여 내부 압력을 가하여 압력용기에 변형을 가하였다. 결함 가공 정확도를 검사하기 위해 기존 검사 방법인 방사선투과시험법과 초음파탐상기법을 이용하여 결함의 크기를 측정하였다. 방사선투과시험법에 의해 검사한 결함 크기는 12mm로 정확히 가공된 것을 확인하였다. 방사선발생장치는 일본 Regaku사 제품으로 용량은 250kVp 5mA이며, 사용된 필름은 FUJI #80이다. 초음파탐상시험 장치는 미국 Panametrics사 Epoch III (K2300) 탐상기와 M-208, 주파수 20MHz, 크기 Ø 4.5mm 탐촉자를 사용하였다.

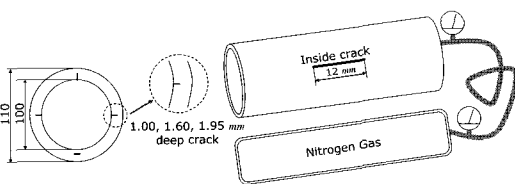


Fig. 6 Pipeline simulator with artificial defect

3.3. Shearography 결과로부터 결함 크기의 결정

Fig. 6의 압력 배관에 전단량의 변화를 2mm씩 증가하여 28mm까지 변화하면서 결함의 크기를 평가하였다. Fig. 7은 전단량의 변화에 따른 Shearography 위상지도(shearogram)를 나타내었다. 결함의 크기를 결정하는 방법은 Fig. 7의 위상지도를 결필침(unwrapping)과 필터링 처리하고 결필침 이미지로부터 line profile을 Fig. 8과 같이 얻고 상대 변위의 최대 최소값 사이를 보간으로 구하여 결함의 크기로 결정하였다.

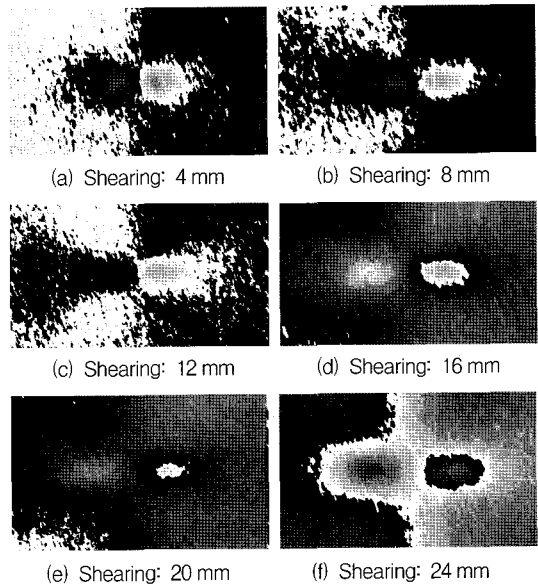
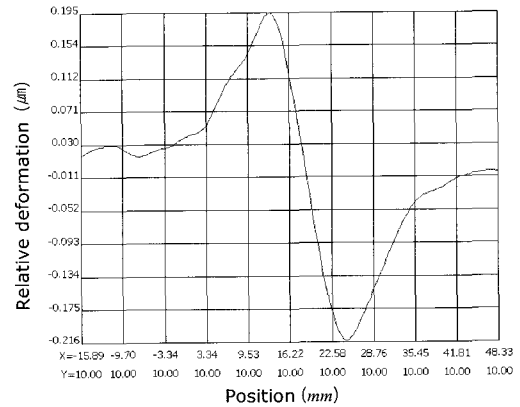
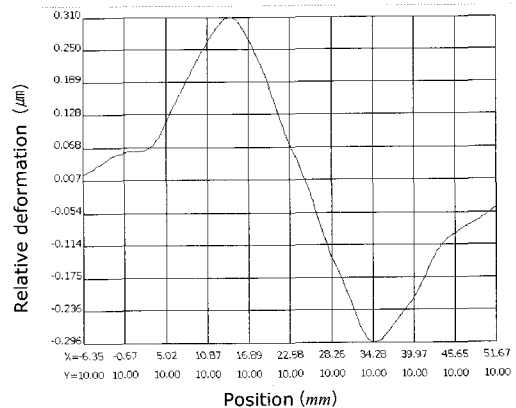


Fig. 7 Shearogram as the change of shearing amount



(a) Shearing: 10 mm



(b) Shearing: 20 mm

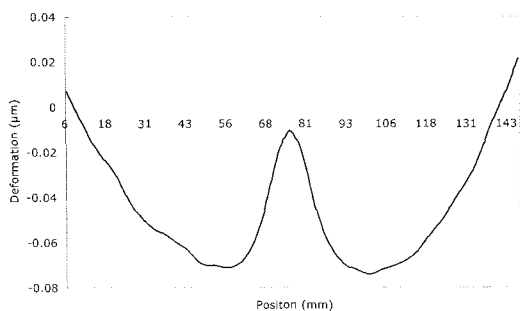
Fig. 8 Relative displacement as shearing amount

4. 실험 결과

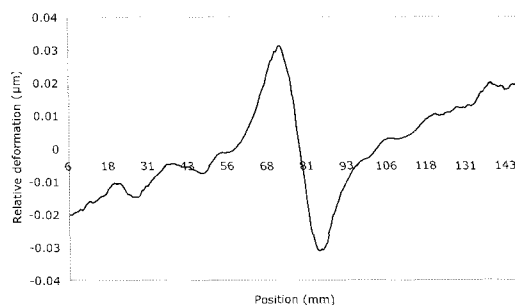
4.1. 결함의 크기 측정에 미치는 영향

전단량의 변화에 따라 결함 크기에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 6의 압력 배관의 실제 면외 변위 분포를 electronic speckle pattern interferometry (ESPI)를 이용하여 측정하고 수치 해석적으로 전단량의 변화에 따른 결함 크기 변화를 시뮬레이션하였다. 또한, 그 결과를 sheography의 결과와 비교함으로써 전단량의 변화에 따른 결함 크기 검출에 영향을 규명하였다. ESPI에 의해 측정된 면외 변위 분포를 Fig. 9(a)에 내었다. 실험실내에서 적용 실험으로 외란에 대한 영향이 적어 정확한 결과를 얻을 수 있었으며, 결함 검출에 있어서 Shearography의 실험보다 상대 변위량이 작게 나타났다. 즉, 작은 압력 변화로 결함을 검출할 수 있으며, 결함부에서 함몰이 일어나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4와 같이 중첩하여 식 (6)을 적용함으로써 Fig. 9(b)의 Shearography 결과인 상대 변위 분포를 수치 해석적으로 얻을 수 있다.



(a) Surface deformation of pressure pipeline by ESPI

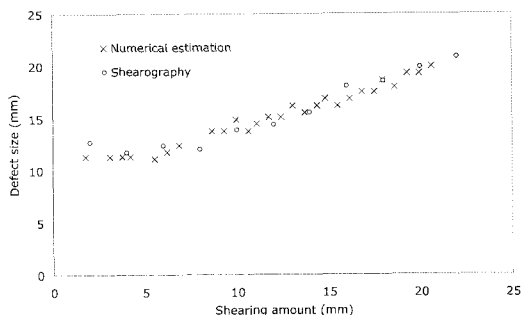


(b) Numerical processing result at shearing amount (5.77mm)

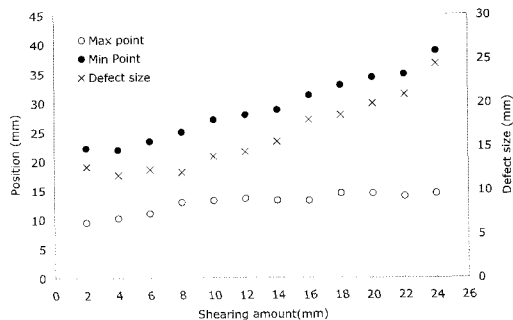
Fig. 9 Shearography simulation from ESPI result

$$\Delta d(x) = d_z(x) - d_z(x + \delta x) \tag{6}$$

여기에서 $d_z(x)$ 는 ESPI를 이용하여 측정된 물체 표면 x 점에서 면외 변위량이며, $d_z(x + \delta x)$ 는 x 점에서 전단량 δx 만큼 떨어진 점의 면외 변위량이다. Fig. 9(b)는 전단량을 5.77mm로 하여 구한 상대 변위 분포이며, 결함의 크기는 Shearography와 같은 방법으로 Fig. 9(b)에서 상대변위의 최대 최소점 사이로 결정하였다.



(a) Comparison of numerical and experimental results



(b) Position tracking of maximum and minimum point from Shearography results

Fig. 10 Estimation of defect size as the change of shearing amount

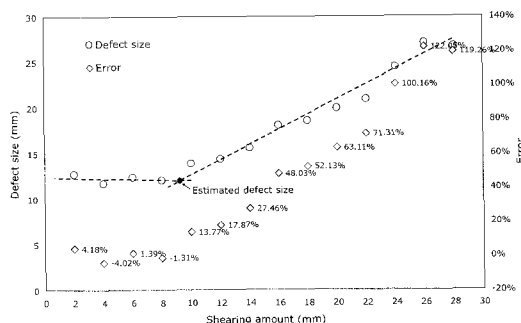


Fig. 11 Estimation of defect size by Shearography

ESPI결과를 이용하여 수치 해석으로 예측한 결함 크기와 Shearography를 이용하여 진단량을 2mm씩 증가하여 28mm까지 변화하면서 측정된 결함의 크기를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 진단량의 변화에 따라 결함의 크기가 일정하게 변하고 있는 것을 알 수 있으며, 수치 해석 결과와 Shearography 측정 결과가 같은 분포를 보이고 있다. 결함의 크기 검출에 영향을 주는 인자를 세부적으로 조사하기 위해 각 진단량에서 최대점과 최소점의 위치변화를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 진단량의 변화에 따라 최대점의 위치는 22%이나, 최소점의 위치변화는 75%의 변화를 보이고 있다. 즉, 결함의 크기는 최소점의 위치 변화에 주요한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 11의 진단량과 결함의 크기에서 특정 진단량(8mm) 이내에서는 결함의 크기를 최대 4.18% 이내로 검출하게 되며, 그 이상의 진단량에서는 오차가 많아진다. 특히 8mm 진단량에서 오차율 -1.31%를 보이면서 최적 진단량으로 나타났다. Fig. 11에서 결함의 크기와 진단량 관계로부터 결함 크기를 예측하기 위해 오차율 변화를 기준으로 추세선을 그어 두 직선의 교점을 결함의 크기로 예측하는 방법으로 결함의 크기를 실험적으로 검출할 수 있다.

4.2. 결함의 위치 검출에 미치는 영향

진단량의 변화에 따라 Shearography를 이용하여 검출한 결함 위치를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 6의 압력 배관의 중심에 인공적으로 가공된 결함의 중심 위치는 14.5mm이며, 이 위치를 기준으로 각 진단량의 변화에 따라 결함의 위치를 나타내었다. Shearography 결과로부터 결함의 위치 결정은 Fig. 8에서 상대변위가 "0"인 위치를 결함의 중심 위치로 결정을 하여 비교하였다. Fig. 12의 결과에서 결함의 위치는 진단량의 방향으로 진단량의 약 $\frac{1}{2}$ 만큼 이동하여 검출되었다. 이는 Shearography의 결과를 상대 변위라고 보았을 때, 상대 변위가 "0"인 지점이 진단량의 변화에 따라 이동하게 되며, 이는 2.2절에서 예측한 결과와 일치한다. 즉, shearography에서 측정된 결함의 위치로부터 실제 결함의 위치는 식(7)를 이용하여 상대 변위량이 "0"인 위치에 진단 방향에 따라 진단량의 $\frac{1}{2}$ 을 보정함으로써 구할 수 있다.

$$SL = x(\Delta d = 0) \pm \frac{\delta x}{2} \quad (7)$$

여기에서 SL 는 실제 결함 위치(source location), $x(\Delta d = 0)$ 는 상대 변위량이 "0"인 위치이며, x 축의 + 방향으로 진단에 대해서는 $-\frac{\delta x}{2}$ 가 되고, x 축의 - 방향으로 진단에 대해서는 $+\frac{\delta x}{2}$ 를 보정하여야 한다. 이러한 오차는 Shearography 간섭계가 갖는 고유 오차라고 볼 수 있다.

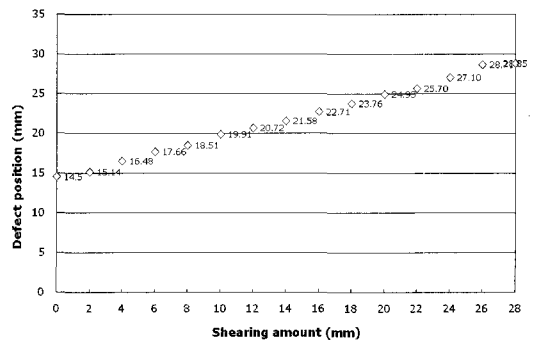


Fig. 12 Defect source location as the change of shearing amount

5. 결 론

본 논문에서는 Shearography 광학간섭계에서 결함 검출에 있어 가장 많은 영향을 미치는 진단량의 영향을 분석하기 위해 Shearography의 측정 결과를 기존의 1차 도함수의 개념에서 상대 변위의 차이의 개념으로 재해석함으로써 진단량 변화에 따른 결함의 크기와 결함의 위치에 대한 영향을 평가하였다. Shearography 실험 결과와 시뮬레이션 결과에서 진단량의 변화에 따라 결함의 검출 크기 변화의 급변점이 존재하며, 이 급변점에서 최적의 결함 크기를 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 결함의 위치 결정에 있어서 Shearography 간섭계의 특성으로 결함의 위치 평가에 영향을 주어 진단량의 1/2 만큼 진단 방향으로 고유 오차를 갖는다는 사실을 밝혀 내었다. 현재의 연구는 길이 방향의 결함으로 한정하여 적용 실험을 수행하였으나, 복잡한 형상의 결함에 대한 연구를 보완함으로써 Shearography를 기존 비파괴검사 기법의 한계를 보완할 수 있는 기법으로 활용되기를 기대한다.

후 기

이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- [1] 박은수, 박익근, "비파괴검사개론", 도서출판 골드, 서울, (2000)
- [2] A. Gachagan, G. Hayward, S.P. Kelly and W. Galbraith, "Characterization of air-coupled transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 43, No. 4, pp. 678-689, (1996)
- [3] P. K. Rastogi and D. Inaudi, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Elsevier Science Ltd., Netherlands, (2000)
- [4] H. M. Shang, S. L. Toh, F. S. Chau, V. P. W. Shim and C. J. Tay, "Locating and sizing disbonds in glassfiber-reinforced plastic plates using shearography," Journal of Engineering Materials and Technology Vol. 11, pp. 99-103, (1991)
- [5] J. P. Fulton, J. B. Deaton, R. S. Rogowski and M. Namkung, "Capabilities and limitations of electronic shearography for detection of cracks in thin plates," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, pp. 365-372, (1994)
- [6] A. Etemeyer, "Technical engineering note laser shearography for inspection of pipelines," J. Nucl. Eng. Design, Vol. 160, pp .237-240, (1996)
- [7] W. Steinchen and L. Yang, "Digital shearography: theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry," SPIE Press, New York, (2003)
- [8] G. L. Cloud, "Optical methods of engineering analysis," Cambridge University Press, London, (1990)