

◆특집◆ 비전응용계측기술

전단간섭계를 이용한 결함이 있는 압력용기의 면외변형 정량 측정

장호섭*, 이건정**, 김경석***, 정현철*

Quantitative Out-of-plane Deformation Measurement of Pressure Vessel with the Defect Using Shearography

Ho-Seob Chang*, Kun-Jung Lee**, Kyoung-Suk Kim***, Hyun-Chul Jung*

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자처리 스페클 간섭법, ESPI), Gradient (구배), Out-of-plane deformation (면외변형), Shearing (전단), Shearography (전단간섭계)

1. 서론

산업기계, 원자력 발전소, 항공기 등에서 많이 사용되는 산업 설비 및 부재들에 발생하는 결함의 검출을 위하여 초음파, X선, 와전류 등을 이용하는 여러 가지 비파괴 검사 기법이 이용되고 있다.

이러한 방법들은 접촉식이거나 대상물에 전처리 과정이 필요한 제한이 있는데, 레이저를 이용한 계측 방법은 비접촉식이며, 특별한 전처리 없이 비파괴 검사를 수행할 수 있다. 그러나 ESPI는 대상물에 발생하는 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나 외부에서 발생하는 외란에 매우 민감하여 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없는 산업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다.^{1,2}

전단간섭법(Shearography)은 광학간섭계를 적절하게 구성하여 변형의 도함수 성분을 구할 수 있다는 개념으로 대상물의 결함을 계측하는데 매우 우수하며, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 결함

의 정량화,³ 복합재 구조물의 해석⁴ 등 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 많이 사용되고 있으며, 또 다른 연구자는 압력용기의 결함 정량화에 있어서 결함계측에 최적의 전단량이 있음을 제시하였다.⁵

이렇게 전단간섭법의 장점이 지속적으로 연구되고 있으나, 대상물에 발생하는 결함의 측정에만 연구 분야가 머무르고 있으며, 대상물에 발생하는 변형을 측정하는 방법은 ESPI가 주도적 역할을 하고 있다.

본 논문에서는 전단간섭법의 제한을 극복하고 산업적 활용을 높이고자, 전단간섭법과 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 결함의 가시화와 면외변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

이를 위하여 전단간섭법을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 정량적으로 계측하고, ESPI를 이용한 계측결과와 비교하여 압력용기에 발생하는 결함의 가시화와 면외변형을 정량적으로 계측하여 전단간섭법의 산업적 활용성을 높이고자 하였다.

2. 원 리

2.1 전단간섭계의 원리

Fig. 1은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도

* 조선대학교 산학협력단 레이저센터
Tel. 062-230-7282, Fax. 062-233-6423
Email hschang@chosun.ac.kr

** 조선대학교 대학원 기계설계공학과

*** 조선대학교 기계설계공학과

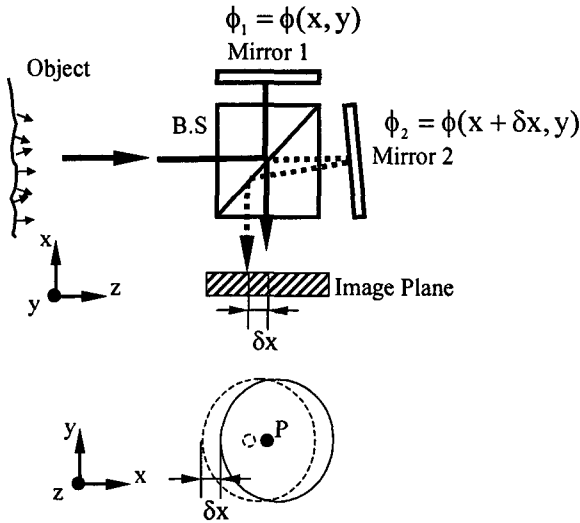


Fig. 1 Speckle pattern shearing interferometry

로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스페클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 입사의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면(Image plane)에 맺히게 된다.

이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 변형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형 측정 간섭계와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δx 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 P_1 과 P_2 에 $\phi_1 = \phi(x, y)$ 와 $\phi_2 = \phi(x + \delta x, y)$ 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같다.

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y)$$

변형에 의한 위상차의 변화 $\Delta\phi$ 는 식 (1)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 ESPI와 유사하기 때문에 수식 (2)에 표현한 바와 같이 \mathbf{d} 와 \mathbf{d}' 은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.^{6,7}

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi \\ &= (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot (\mathbf{d} - \mathbf{d}') \quad (2)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (2)을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (3)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, Δx 는 상면에서 전단량 δx 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식 (4)에서 2차 이상의 고차항은 무시하면, 식 (4)은 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x \quad (5)$$

2.2 변형계측에 이용되는 전단간섭법의 개념

전단간섭법을 적용하는 식(5)과 포함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내의 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을

측정조건에 맞게 임의로 부여하며, 통상 대상물에 존재하는 결함의 1/2정도를 전단량으로 한다. 이 또한 결함의 크기를 알고 있는 경우에 해당되며, 전단량이 50%라고 하는 것은 전단량이 ‘매우 작다’는 조건을 적용할 수 없게 된다.

본 논문에서 제안하는 사항은 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \Delta x \quad (6)$$

ESPI나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 식(4)와 식(5)의 각각의 기호를 변형 f , 대응좌소 x_i , 전단량좌소 h 로 바꾸어 쓰면, 식 (7)와 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f' 으로 정리하면 식 (8)와 같다.

$$f'(x_i) h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (7)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (8)$$

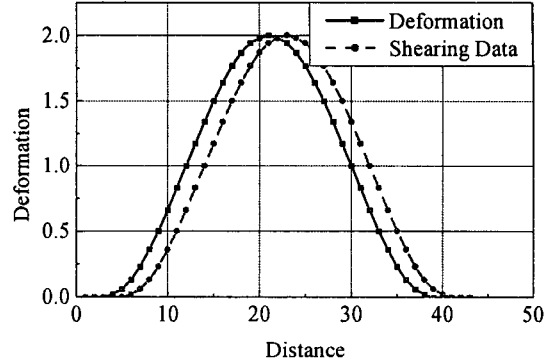
식 (8)는 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단 방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

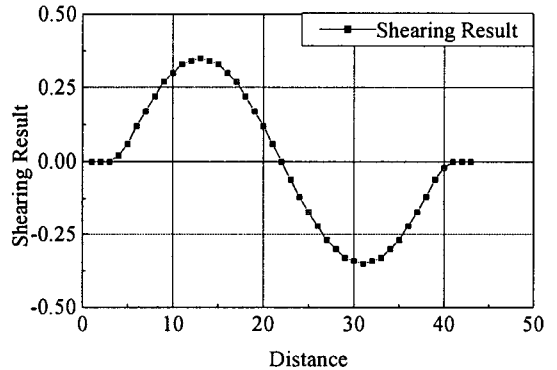
$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f' h \quad (9)$$

Fig. 1에서 표현된 전단간섭계의 전단거울 (Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 좌소수만큼 평행이동 되어 나타난다.

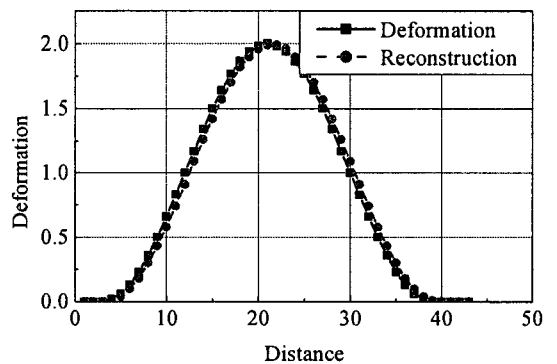
Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 표현된 두 값을 감산한



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2 Algorithm of deformation reconstruction

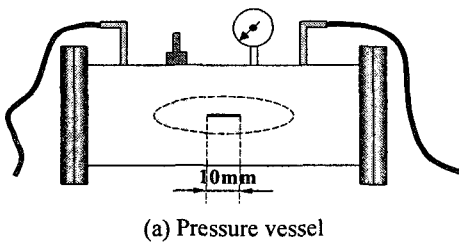
결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.

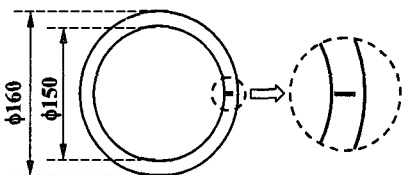
3. 실험장치 및 방법

현재까지 전단간섭법은 배관 등 내부에 존재하는 결함에 대한 측정에 가장 많이 적용되고 있기 때문에, 내부 결함이 발생 가능한 배관을 가정하여 압력용기를 제작하였다. 제작된 압력용기에 압력차이를 발생시키기 위하여 유압유와 유압잭을 사용하였으며, Fig. 3(a)와 같이 안전변과 압력계이저를 부착하였다.

결함길이에 대한 정량해석을 위하여 Fig. 3(b)와 같이 두께 5 mm, 지름 160mm인 압력용기의 중심부위에 가로방향으로 길이 10mm, 깊이 3mm의 내부결함을 방전 가공하였다. 실험시 유압잭의 작동 및 밸브의 개방의 방법으로 가압 또는 감압하였으며, 이때 외란이 발생하지 않도록 파이프는 방진테이블의 바닥에 고정하였다.



(a) Pressure vessel



(b) Position of defect and size

Fig. 3 Schematic diagram of pressure vessel with line defect

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전단량 일정 압력차 변화

압력차 변화에 따른 압력용기 결함부위의 변형 측정 실험은 전단간섭계의 전단량을 5mm로 고정하고, 압력차를 0.25MPa부터 1.0MPa까지 0.25MPa씩 일정하게 변화시키면서 실험하였고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 압력의 변화에 따라 ESPI와 전단간섭계 모두 위상지도에 나타난 줄무늬의 수가 증가함을 알 수 있으나, ESPI는 압력용기 전체에 발생하는 변형을 측정하므로 위상지도의 줄무늬 수가 매우 많으며, 결함부위를 쉽게 인지하기가 어렵다. 반면, 전단간섭계 측정결과는 낮은 압력차에서도 결함의 위치를 쉽게 인지할 수 있음을 보여주고 있다.

Table 1 Shearography and ESPI phase-map according to pressure variation

Pressure Difference (MPa)	Shearography (Shearing 5mm)	ESPI
0.25		
0.5		
0.75		
1.0		

ESPI를 이용하여 압력차 변화에 따른 변형에 대한 실험 결과로써 Table 1의 위상지도에서 보는

바와 같이 변형이 경사져서 발생하였다.

Fig.4는 변형 측정 프로파일을 보정한 결과이며, 압력차 증가에 따라 변형량이 증가함을 알 수 있고, 변형영역이 약 29.5~37.6mm로 계측되었다

Fig.5는 전단간섭계를 이용한 변형 측정 결과이며, 두 그래프에서 압력차 변화에 따라 변형이 일정한 비율로 증가하고 있음을 알 수 있으며, ESPI 측정결과는 노이즈가 심하게 나타나 변형의 최고점이 불규칙하게 나타나고 있으나, 제안된 방법에 의한 측정결과는 노이즈가 제거된 결과를 보여주고 있다.

또한, 동일한 결함부위에 대해 압력차 변화와 무관하게 변형영역은 일정함을 알 수 있으며, 이는 결함길이의 정량측정이 가능함을 제시하고 있다.

Fig.6은 두 실험방법에 의한 최대변형값의 비교로서 ESPI는 노이즈에 의해 변형측정결과가 불규칙하게 나타나고 있으며, 전단간섭법에 의한 측정결과가 압력차에 대한 선형성을 보여주고 있다.

두 방법에 의한 차이는 8.3%이며, 전단간섭법에 의한 측정결과가 선형성을 나타내고 있어, 제안된 방법에 의한 변형측정 결과가 신뢰성이 높음을 보여주고 있다.

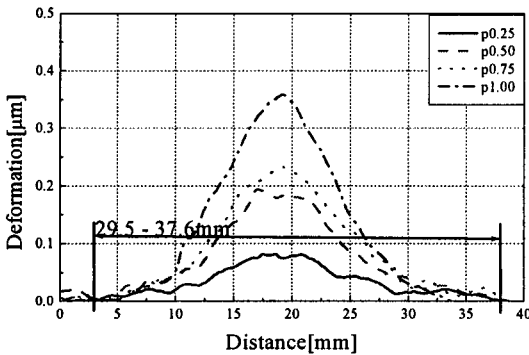
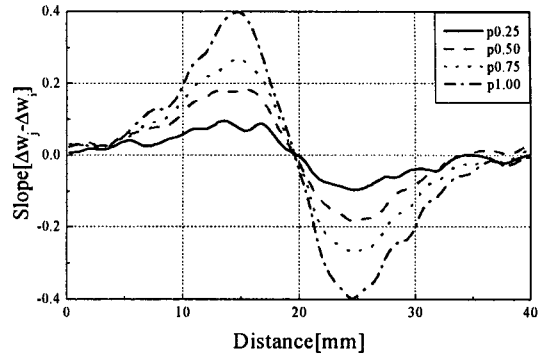
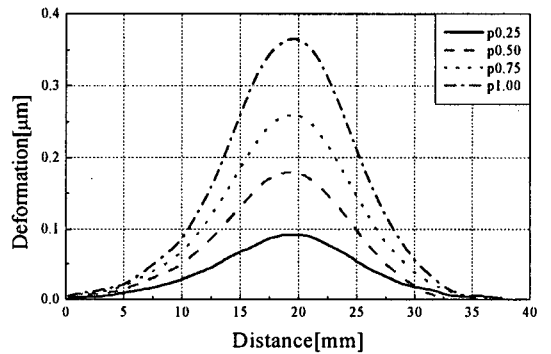


Fig.4 Deformation profile according to pressure variation of ESPI



(a) Slope profile



(b) Deformation profile

Fig.5 Result of shearography according to variation of pressure difference

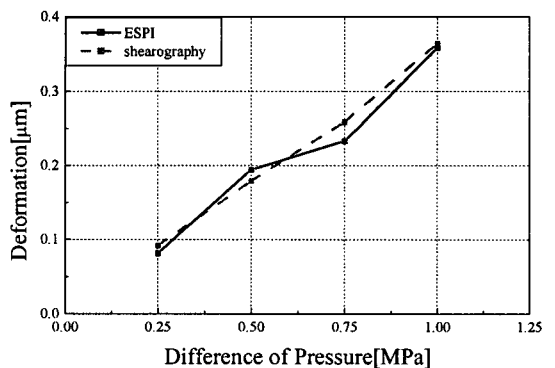


Fig.6 Comparison of result according to variation of pressure difference

4.2 압력차 일정 전단량 변화

압력용기의 압력차를 0.5MPa로 고정하고, 전단 간섭계의 전단량을 1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 15mm로 일정하게 변화시키면서 그 결과를 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

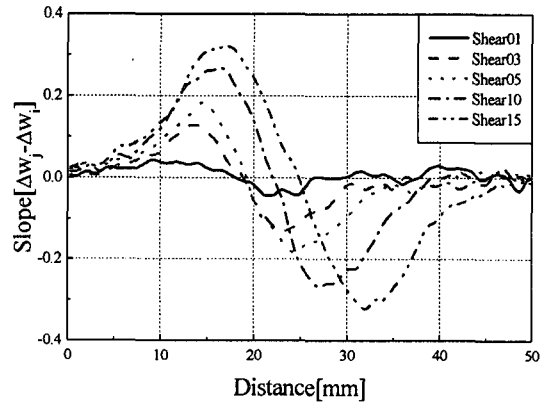
원형 평판의 변형 측정결과와 마찬가지로 동일한 압력차에 대한 전단량의 증가가 위상지도의 줄무늬를 더욱 선명하게 하고 있으며, Fig. 7(a)에서 보는바와 같이 기울기가 점차 증가하고 있으며, 기울기가 0(zero)인 위치가 점차 오른쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 전단량이 증가함에 따라 해석영역 범위가 넓어지며, 최대변형점 또한 점차적으로 낮아지는 결과를 볼 수 있었다.

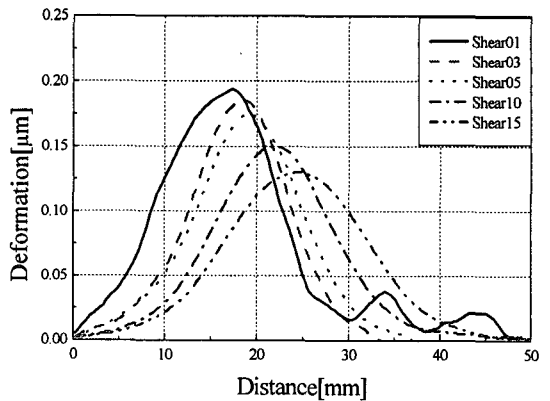
Fig. 8과 Table 3는 압력차가 0.5MPa로 일정하고, 전단량이 점차 증가할 경우의 최대변형 측정결과를 ESPI 측정결과와 비교하였다. 전단량의 증가에 따라 오차가 점차 증가함을 알 수 있으며, 선형보간을 통하여 전단량이 0(zero)일 경우의 최대변형을 측정한 결과 1.983 μm 로 측정하였으며, 이는 ESPI 측정결과가 보정된 것을 고려하면 전단간섭계 측정결과를 신뢰할 수준이라고 판단된다.

각각의 전단량에 의한 변형프로파일에 있어 결합 영역에 대한 최대변형점의 위치가 변형의 중심점이라고 할 때, Fig. 7(b)의 프로파일에서 추출한 해석영역과 변형영역을 Table 4와 Fig. 9에 정리하였다.

ESPI가 압력변화에 따라 약 29.5 ~ 37.6mm까지 넓은 영역에 걸쳐 결합부위에 발생하는 변형영역을 측정한 반면 제안된 방법에 의한 전단간섭법의 해석영역은 거의 일정한 수준으로 변형영역이 계산되며 평균 33.9mm로 측정하였다.



(a) Slope profile



(b) Deformation profile

Table 2 Shearography phase-map according to shearing variation

Shearing		Phase map
Distance[mm]	Pixel	
1	4.25	
3	12.55	
5	21.00	
10	42.40	
15	65.75	

Fig. 7 Result of shearography according to shearing amount variation

Table 3 Maximum deformation according to shearing amount variation

Shearing[mm]	Deformation[μm]	Error[%]
1	0.194	0.09
3	0.185	4.73
5	0.175	9.88
10	0.149	23.27
15	0.130	33.05

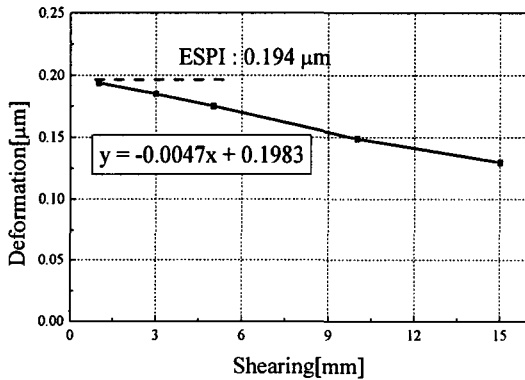


Fig. 8 Maximum deformation according to shearing amount variation

Table 4 Measurement of deformation area by using shearography

shearing		Maximum Position [mm]	Analysis Area [mm]	Deformed Area [mm]
Distance [mm]	Pixel			
1	4.25	17.463	34.926	33.926
3	12.55	18.643	37.286	34.286
5	21.00	19.115	38.230	33.230
10	42.40	21.947	43.894	33.894
15	64.75	24.543	49.086	34.086

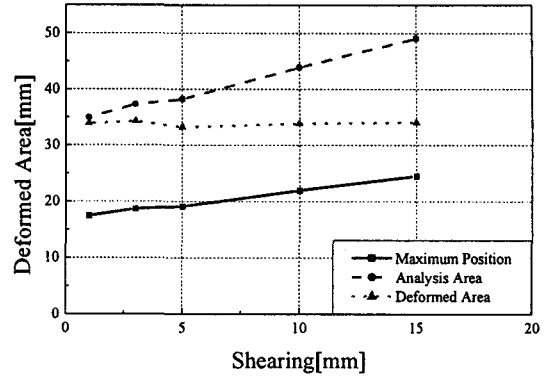


Fig. 9 Measurement of deformation area by using shearography

5. 결론

압력용기에 발생하는 면외변형 측정에 있어서 제안된 방법에 의한 전단간섭법이 압력용기의 결함에 의한 변형영역을 더 정확하게 측정함을 알 수 있었으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) ESPI는 결함부위에 발생하는 실제 변형을 측정하기 위하여 보정이 필요하고 노이즈가 심하게 나타나는 반면, 제안된 방법은 노이즈가 제거되었음을 알 수 있다.

(2) 압력용기에 발생하는 면외변형의 측정결과, 전단량 5mm에서는 ESPI 측정결과와 제안된 방법의 전단간섭법에 의한 측정결과의 오차는 약 8.3%이며, 전단량 변화에 따른 실험에서는 오차가 선형적으로 증가하므로 선형보간을 통하여 1.983 μm 로 측정하였고, ESPI 측정결과 0.194 μm 와 약 2.12%의 오차를 보였다.

(3) 본 실험에서 압력용기의 압력차에 의한 결함부위의 변형영역은 압력차의 변화와 무관하게 일정한 변형영역을 발생함을 알 수 있으며, ESPI는 약 29.5 ~ 37.6mm로 넓은 영역을 제시한 반면, 제안된 방법에 의한 전단간섭법은 평균 33.9mm로 일정하게 측정하였다.

후 기

이 논문은 산업자원부 한국산업기술평가원지정

지역협력연구센터인 조선대학교 산학협력단 레이저 응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Baik, S. H., Park, S. K. and Kim, C. J., "Applications of Speckle Interferometer," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 14-18, 2004.
2. Kang, Y. J., Lee, J. S., Park, N. K. and Kwon, Y. K., "Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 20-26, 2002.
3. Fulton, J. P., Deaton, J. B., Rogowski, R. S. and Namkung, M., "Capabilities and Limitations of Electronic Shearography for Detection of Cracks in Thin Plates," Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, pp. 365-372, 1994.
4. Hung, Y. Y. "Applications of digital shearography for testing of composite structures," Composites Part B, Vol. 30, pp. 765-773, 1999.
5. Kim, K. S., Kang, K. S., Kang, Y. J. and Jung, S. K., "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography," Optics & Laser Technology, Vol. 35, pp. 639-643, 2004.
6. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry: A discussion of the theory," practice and application of the techniques, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1989.
7. Creath, K., "Temporal Phase Measurement Methods, in Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques," IOP Publishing, pp.94~140, 1993.