

스펙클 간섭계를 이용한 평판 이면결함의 검출 특성

김동한*(한양대 대학원), 장석원(대우전자), 장경영(한양대 기계공학부)

Speckle Interferometric Detection of Defects on the backside of steel plate

D. H. Kim(Graduate School, HYU), S. W. Chang(Daewoo Electronics Co.), K.Y.Jhang(Mech. Eng. Dept., HYU)

ABSTRACT

Backside defect of plate structure may grow due to fatigue or overload to cause critical failure during operation, so it is important to detect this kind of defect in line. For this purpose, nondestructive, non-contact and highly sensitive method is required. ESPI and Shearography are considered as useful method to satisfy these requirements.

In this paper, the possibility of application of ESPI and Shearography to detect the backside defect of steel plate and to quantify the defect size was tested. For the experiment, some steel plates with defect on the backside were prepared. Experimental results for these plates showed that location and size of defect could be detected correctly by both of ESPI and Shearography.

Key Words : ESPI (전자 스펙클 패턴 간섭계), Shearography(전단 간섭계), Non-destructive testing(비파괴 검사), Backside defect(이면 결함)

1. 서론

최근의 산업은 고부가, 고정밀도를 가진 제품이 요구되면서 제품의 신뢰성 평가에 관심이 증가하고 있다. 특히 레이저를 이용한 광계측법은 매우 정밀한 계측이 가능하기 때문에 제품의 신뢰성 평가에 많이 응용 될 수 있다. 또한 CCD 카메라를 이용한 화상처리 기술이 급격히 발전하게 되면서, 종래의 홀로그래피 간섭법(Holographic Interferometry:HI)에서 발전한 ESPI^{1,2,3}, Shearography^{4,5}와 같은 기술이 활발히 연구되고 산업현장에도 적용되고 있다. 이들은 CCD 카메라와 컴퓨터를 이용하기 때문에 다른 계측 방법들에 비해 비접촉식이고, 전영역(full-field)을 실시간 고정밀도로 계측할 수 있다는 장점을 가진다.

이런 장점을 이용해 ESPI 와 Shearography 는 지금까지 고온구조물, 대형구조물의 표면변형이나 진동의 측정에 많이 이용되어져 왔다. 그런데 구조물의 내외부에 결함이 존재하면 재료가 변형할 때 결함으로 인하여 표면변형에 영향을 주게 되므로, 이를 측정할 수 있다면 내외부의 결함의 위치나 크기를 측정하는데 이용할 수 있을 것으로 예상할 수

있다. 실제로 최근 표면결함이나 표층부 내부결함의 검출에 적용한 사례가 보고되고 있다.^{6,7} 깊은 내부결함에 대해서는 다른 방법들에 비해 한계를 가지는 것은 사실이지만, 검출 가능한 결함을 가진 구조물에 적용하면 시간적, 경제적으로 많은 장점을 가질 수 있어 이에 대한 연구는 반드시 필요하다. 그러나 지금까지의 결함 검출에 대한 열거는 정성적인 평가가 대부분이며 또한 이면 결함의 검출에 대한 적용은 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 ESPI 와 Shearography 를 이용하여 평판의 이면에 존재하는 결함을 찾을 수 있는지를 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 스틸(steel)로 된 평판 이면에 깊이와 크기가 다른 원형 결함을 인위적으로 만들어 측정하였다. 평판에 열을 가한 후 서서히 냉각하면서 변형전과 변형후에 얻은 스펙클 패턴을 통해 위상지도도를 만들고 위상 이동법(Phase shifting)⁸ 을 실시하여 정량화하였다. Shearography 의 경우는 전단량을 각각의 결함의 크기와 같게 하였다. 다음으로 위상펼침(Unwrapping)⁹ 을 하여 얻어진 위상을 연속 하였고, 마지막으로 필터링(filtering) 과정을 거쳤다. 측정된 결함의 위치와 크기는 비교적 정확하게 얻어 졌으

며 이를 통하여 ESPI 와 Shearography 의 평판 이면 결함검출에 대한 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

2. 스펙클 패턴 간섭계의 측정 원리

2.1 ESPI 에 의한 면외변위 측정원리^{1,2,5}

ESPI 의 면외변위는 변형전과 변형후의 스펙클 패턴 이미지를 차감 하여 얻어지는 간섭무늬를 통해 얻을 수 있다. 즉, 변형전과 변형후의 빛의 강도에 관한 식은 다음과 같다.

$$I_{before} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos \phi \quad (1)$$

$$I_{after} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

여기서, I_r 은 기준빔의 강도, I_o 는 물체에서 반사되어 오는 물체빔의 강도, ϕ 는 기준빔과 물체빔 사이의 위상차를 나타내고, $\Delta\phi$ 는 변형으로 인한 위상변화를 나타낸다. 따라서 $\Delta\phi$ 는 면외방향 변위 d_z 와 다음의 관계를 가지며

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_i + \cos\theta_v] d_z \quad (3)$$

생성된 프린지 수가 N 개 일 때, d_z 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$d_z = \frac{N\lambda}{(\cos\theta_i + \cos\theta_v)} \quad (4)$$

여기서, θ_i 는 조사각도(illumination angle), θ_v 는 관측각도(viewing angle)를 나타낸다.

2.2 Shearography 의 면외변위 측정원리^{4,5}

Fig.1 은 Shearography 에 사용되어지는 마이켈슨(Michelson)형 간섭계를 나타낸다. 광원으로부터 나온 빛이 물체면에 조사되고 반사된 빛이 광 분할기(Beam splitter)를 거쳐 하나는 거울 M1 을 거쳐 상면에 입사 되고, 다른 하나는 거울 M2 를 거쳐 상면(image plane)에 입사된다. 이 때 거울 M2 를 각 α 만큼 경사지게하면 상면에 입사 되는 상은 서로 전단 되어 나타난다. 변형전과 변형후의 빛의 강도는 식(1), (2)와 같고 간섭무늬는 식(1), (2)의 차로 얻을 수 있다. 위상 변화량 $\Delta\phi$ 는 K(sensitivity vector)와 광 경로차(변형전, 변형후)의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉 $\Delta\phi = K(OPD_2 - OPD_1)$ 이다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta)(d_1 - d_2) \quad (5)$$

Δd 는 근사적으로 전단량 Δx 와 다음의 관계에 있으므로

$$\Delta d \approx \frac{\partial d}{\partial x} (\Delta x) \quad (6)$$

식(5), (6)에 의해서

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) \frac{\partial d}{\partial x} (\Delta x) \quad (7)$$

이 된다. 따라서 전단 간섭계에서 일어나는 간섭 무늬는 전단방향에 대한 면외 변위의 1 차 미분 형태로 나타난다.

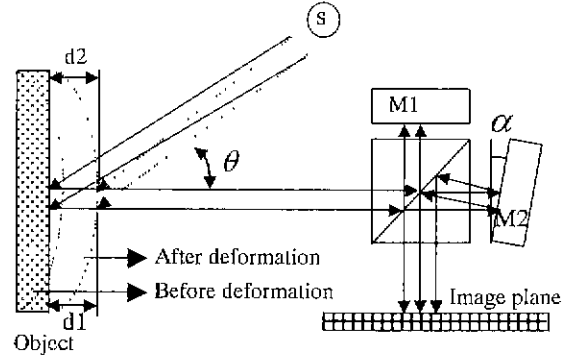
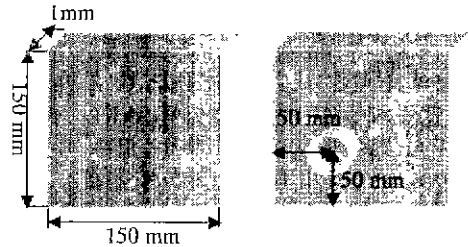


Fig. 1 Michelson Interferometry in Shearography system

3. 평판 이면결함의 측정

3.1 시편제작

(Specimen without defect) (Specimen with defect)



Diameter of defect (D)	Depth of defect (t)
5 mm	0.3, 0.5 mm
10 mm	0.3, 0.5 mm
15 mm	0.3, 0.5 mm

Fig. 2 Shape and size of specimens in experiment

평판에서의 이면결함 검출에 대한 스펙클 간섭계 방식의 성능을 정량적으로 평가 하기위해 스틸(Carbon steel)의 이면에 Fig. 2 와 같은 형태의 인위적인 결함을 만들어 측정하였다.

3.2 실험장치

본 실험에서는 독일 Eltemeyer 사의 3D ESPI 와 Shearography 시스템을 사용하였다. 레이저 발생장치는 DPSS 332(Diode-Pumped Solid State) Nd-YAG 이고, 출력은 500mW, 파장은 532nm, 광원의 직경은 0.7mm 이다. ESPI 의 경우는 방진 테이블을 사용하여, 외부의 외란(disturbance)을 최소화 했다. 시편의 네 끝 단을 고정하여, 열 응력을 받았을 때 면의 변위 방향으로 변형하도록 하였다. 시편 이면의 결함은 열에 의한 중심부의 변형을 결함으로 오인하지 않게 하기위해 모서리 쪽으로 만들었다. ESPI 장치의 개략도는 Fig. 3 에 나타내었으며, Shearography의 개략도는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다.

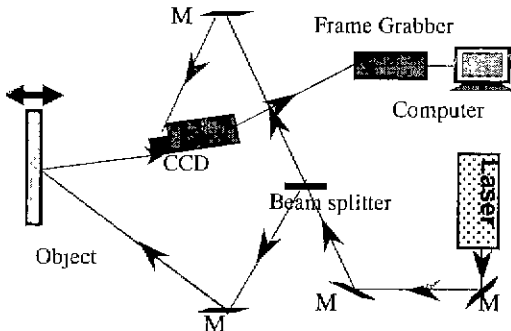


Fig. 3 Schematic diagram of ESPI system (out of plane)

3.3 실험방법

각각의 시편을 클램프에 의해 고정시키고, 100W의 백열전구로 결함이 있는 뒷면을 3 분 정도 가열한 후 천천히 냉각 시키면서 변형전과 후의 스펙클 이미지를 각 시스템에서 얻는다. 이들의 정보를 서로 차감하여 위상지도(Phase map)를 얻고, 위상 이동법에 의해 정량화 된 데이터를 얻는다. 위상 필름을 시행하여 연속화 된 이미지(image)를 얻는다. ESPI 의 경우는 얻어진 데이터를 한 번 미분하여 강채변형 성분을 제거한다.

4. 실험결과

Fig.4, Fig.5 는 ESPI, Shearography 시스템에 의한 실험데이터를 한 번 미분 한 결과이다. ESPI 의 경우는 x 축에 대한 1 차 미분형태 이므로 밝은 부분과 어두운 부분으로 나타난다. 그러나 전자진단 간섭계의 경우는 전단방향의 1 차 미분형태를 미분하였기 때문에 Fig.5 와 같은 두개의 밝은 무늬와 하나의 어두운 무늬 형태로 나타난다. Shearography의 경우는 반경 5mm 결함도 쉽게 찾을 수 있다. 결함의 크기는 Fig. 4 와 Fig.5 의 결함부위의 단면으로 구할 수 있는데, 그 예를 Fig.6 에 나타내었다

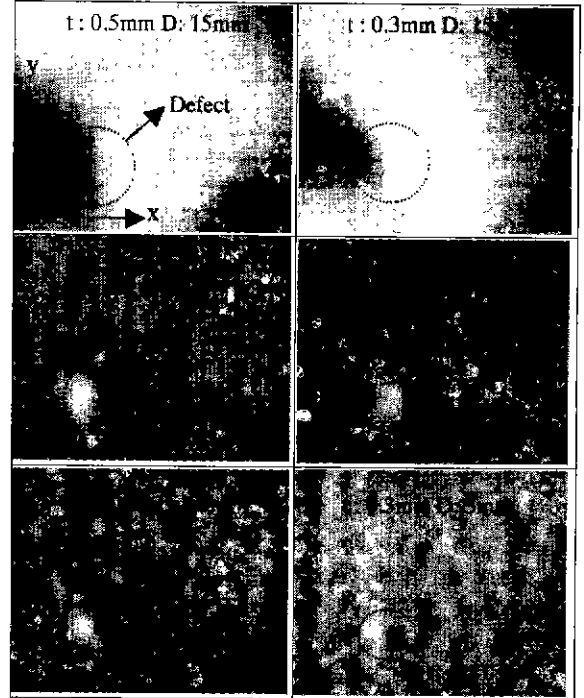


Fig. 4 Derivative results of ESPI measurement

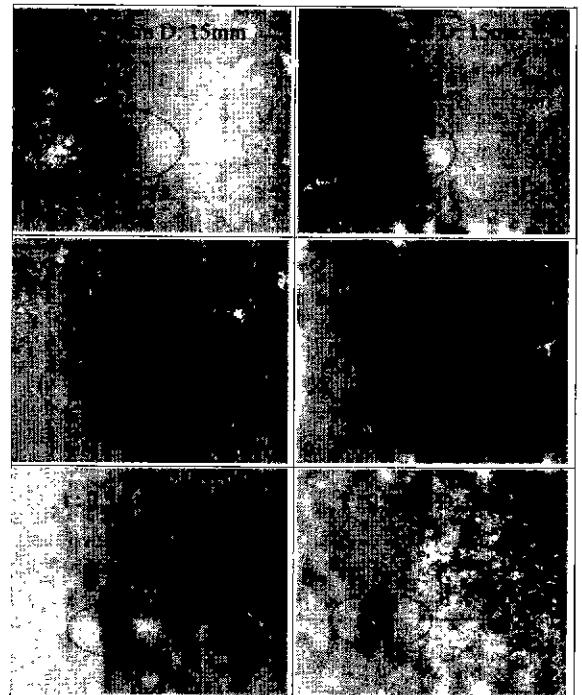


Fig. 5 Derivative results of Shearography measurement

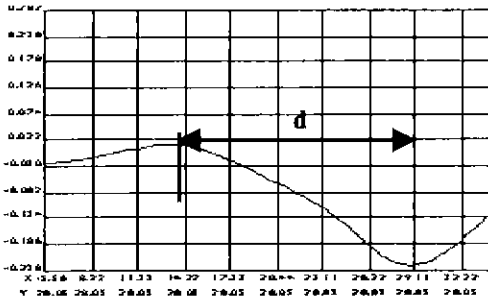


Fig. 6 The detection of defect size in ESPI(0.3 thickness, 15mm)

즉, 최대값과 최소값 사이의 x 좌표의 차를 결함 크기로 산출하는 것이다. 이러한 방법으로 구한 결함의 크기를 실제 크기별로 정리하여 Table. 1 에 나타내었다. 결함의 직경이 작아질수록 Shearography 의 오차가 상대적으로 크게 나타났지만, ESPI, Shearography 모두 이면 결함의 검출이 가능함을 알 수 있다. 결함의 깊이의 변화에 따른 변화는 크게 나타나지는 않았다. Fig.7 은 Table. 1 을 그래프화 한 것이다

Table. 1 Measured data of ESPI and Shearography

Dia.	thi.	ESPI		Shearography	
		0.3t	0.5t	0.3t	0.5t
15 mm		14.94	15.37	15.55	15.52
10 mm		10.26	9.61	11.26	10.2
5 mm		5.65	5.2	6.3	6.22

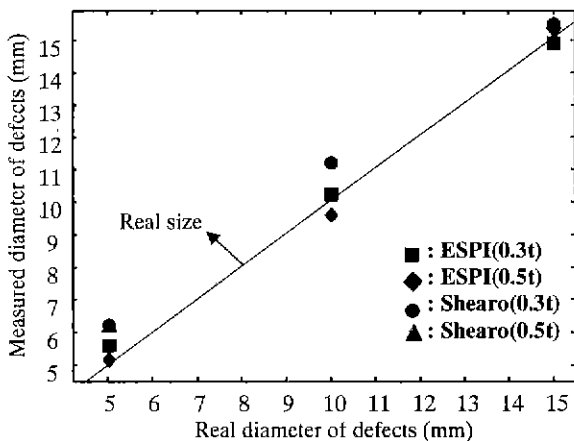


Fig. 7 Correlation between measured size and real size

5. 결론

본 연구를 통하여 ESPI, Shearography 모두 평판의 이면에 위치한 직경 5mm 이상의 원형결함이 검출 가능함을 확인 하였다. 대체로 결함의 직경이 커질수록 더 정확한 측정이 가능하였으며 Shearography 보다는 ESPI 가 다소 정확성이 우수하였다. 단, 외부진동에 약해서 실험 시 많은 주의가 필요했다. 이에 반해 Shearography 는 자체적으로 강제변형의 영향을 줄여 주므로 방진테이블이 없이 실험이 가능 하였으며, 따라서 생산현장에 직접 사용하는 데 유리하다고 할 수 있다. 두 방법 모두 광학계 구성과 실험시의 오차와 시편의 결함 자체의 오차를 고려 한다면 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 대우전자(주)의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, pp. 343 ~ 491, 1995.
2. Valery P. Shchepinov, Vladimir S. Pisarev, Sergey A. Novikov, Vitaly V. Balalov, Igor N. Odintsev, and Mikhail M. Bondarenko. "Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry." John Wiley & Sons, pp. 15 ~ 78, 1996.
3. R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle interferometry," 2nd ed., Cambridge University Press, 1989.
4. Pramod K. Rastogi, "Holographic Interferometry", Springer-Verlag Press, pp.236 ~ 252, 1994.
5. Luciana M. Rizzi, Pierino Delvo, Enrico Galletti and Sergio Musazzi "Review of Quantitative Evaluation of Materials Stress Response by Optical Methods," Nondestr. Test. Eval. , Vol. 15, pp. 237 ~ 264, 1999.
6. F. Lanza di Scalea, J. B. Spicer, R. E. Green, Jr. "Electronic Shearography with Thermal Loading for Detecting Debonds in thick Polyurethane / Steel Panels for Marine Applications," Res Nondestr Eval. , Vol 12, pp. 43 ~ 51, 2000.
7. Y. Y. Hung, W. D. Luo, L. Lin, H. M. Shang "Evaluating the Soundness of Bonding using shearography," Composite Structures, Vol. 50, pp. 353 ~ 362, 2000.