

이중기능 간섭계에 의해 측정된 면외변형의 정량적 비교

Quantitative Comparison of Out-of-Plane Deformation Measured by Dual-Function Interferometer System

김경석*, 장호섭**, 이승석***, 정현철****, 곽재호*****†

Kyoungsuk Kim*, Hoseob Chang**, Seungseok Lee***, Hyunchul Jung**** and Jaeho Kwag*****†

초 록 이중기능 간섭계는 ESPI와 전단간섭계의 모든 기능이 하나의 간섭계로 구성되어 있다. ESPI는 대상물의 변형을 측정하고 전단간섭계는 대상물의 변형의 기울기를 측정한다. 제안된 전단간섭법은 전단간섭계의 결과를 평행이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데 이를 ESPI의 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 고무판과 알루미늄 시험편을 이용하여 이중기능간섭계로 동시에 두 기법의 면외변형 결과를 측정하여 비교하였다. 이중기능간섭계는 동일한 한번의 변형에 두 가지의 결과를 동시에 측정 함으로써 두 기법의 정확한 비교가 가능하였다. 본 연구에서는 제안된 전단간섭법과 ESPI의 결과를 이중기능 간섭계를 이용하여 정량계측하여 만족한 결과를 도출하였다.

주요어: 이중기능, ESPI, 전단간섭계, 면외변형, 정량측정

Abstract Dual-function interferometer is an interferometer that has all features of ESPI (electronic speckle pattern interferometry) and shearography in one interferometer setup. The deformation of an object is directly obtained by ESPI while the slope of the deformation of an object is obtained by shearography. If the result of shearography is divided by shearing amount and integrated by numerical analyzing, then finally the reconstructed deformation of an object that is the same as the results directly obtained by ESPI can be measured by shearography. In this study, rubber and aluminum plates are used as specimen and its out-of-plane deformation is measured by ESPI and shearography setup of the dual-function interferometer. Each of the results obtained by ESPI and shearography is compared by using numerical integration to the result of shearography. From this study, it is confirmed that the reconstructed deformation results obtained by numerical integration good agree with the results obtained by ESPI.

Keywords: Dual-Function, ESPI, Shearography, Out-of-plane Displacement, Quantitative Measurement

1. 서 론

산업현장의 설비 및 부재의 결함, 부식은 막대한 손실을 가져온다. 이러한 손실을 줄이기 위하여 대상물을 파괴하지 않고 결함을 검출하는 비파괴검사 기법으로써 초음파법, 자기탐상법등이 사용되고 있

다. 그러나 이러한 기법들은 시간적, 공간적 절차 등이 매우 복잡하거나 제한이 있다[1]. 따라서 이러한 제한이 없는 레이저 스페클기법이 이용되고 있으며, 스페클기법의 종류로는 전자처리 스페클간섭법(ESPI)과 전단간섭법(shearography)이 있다. 이러한 스페클 기법은 특별한 전처리 과정이 필요하지

(접수일: 2007. 12. 17. 심사완료일: 2008. 2. 12) * 조선대학교 기계설계공학과, ** 조선대학교 산학협력단 레이저센터, *** 한국표준과학연구원 안전그룹, **** 조선대학교 기계설계공학과, ***** 조선대학교 대학원 기계설계공학과, † Corresponding Author: Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, 375 Seoseok-Dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea, (E-mail: boccaccio@nate.com)

않고, 실시간으로 화상영역 전체에 발생하는 변형 및 변형률을 측정할 수 있다. 그러나 ESPI는 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나 외란에 매우 민감하여 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없는 산업 현장에서는 그 적용성이 매우 낮다[2-4]. 반면에 스펙클을 이용하는 또 다른 방법인 전단간섭법은 간섭계의 구성이 비교적 간단하며 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사되며, 전단미러를 이용하여 전단량을 조절하는 특징이 있는 간섭계로써 변형에 대한 기틀기를 측정하기 때문에 방진테이블을 필요로 하지 않으며 대상물의 결함을 계속하는데 매우 우수하고, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 산업현장에서 내부결함 검출기법으로 많이 사용되고 있다.

이와 같이 전단간섭법의 장점이 지속적으로 연구되고 있으나, 대상물에 발생하는 결함의 측정에만 연구분야가 머무르고 있고 대상물에 발생하는 변형을 측정하는 방법은 ESPI가 주도적인 역할을 하고 있다.

Bhaduri 등은 하나의 간섭계로 얻은 결과를 ESPI와 전단간섭법을 비교하였으나, ESPI와 전단간섭법 각각의 결과만을 측정했다[5]. 그러나 본 연구에서는 이중기능 간섭계는 대상체의 변형을 ESPI와 전단간섭법을 이용하여 동시에 측정함으로써 정확한 비교가 가능하였고, ESPI의 측정결과와 전단간섭계 결과의 적분값을 정밀 비교함으로써 전단간섭법이 결함뿐만 아니라 면외변형 또한 정확하게 측정할 수 있음을 확인하고자 하였다.

2. 원리

2.1. ESPI, 전단간섭법, 이중기능 간섭계의 원리

스펙클 간섭법의 원리는 간섭에 의해 물체의 정보를 기록하고, 이 기록된 정보를 재생하거나 변형 전후의 정보를 비교함으로써 변형의 측정 등으로 활용하고 있다. 광원으로부터 나온 빔은 광분리기 (beam splitter)를 통하여 CCD 카메라에 직접 입사되는 참조빔(reference beam)과 대상체에 조사되어 반사된 빔이 CCD 카메라에 입사되는 물체빔(object beam)으로 나누어진다. 두 개의 빔은 카메라 앞에서 간섭을 일으키고 간섭된 이미지가 CCD 수광소자에 결상된다.

식 (1)은 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전(I_{before})과 변형후(I_{after}) 빔의 세기 분포식이다.

여기에서 I_R 과 I_O 는 물체 빔과 기준 빔의 강도이며, ϕ 는 물체빔과 참조빔의 초기위상, $\Delta\phi$ 는 물체의 변위에 의한 위상변화이다.

$$\begin{aligned} I_{before} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos\phi \\ I_{after} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

ESPI에서는 두 식의 밝기분포를 감산처리 함으로써 식 (2)와 같은 수식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} I &= I_{after} - I_{before} \\ &= 2\sqrt{I_R I_O} [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos\phi] \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.1. ESPI의 원리

ESPI의 면외변형 측정 원리는 확산된 레이저 빔 (물체빔)이 대상물에 조사될 때 임의의 변형이 대상물에 발생하면, 대상물의 임의의 한 점은 변형에 의해 다른 한 점으로 이동하게 되고, 이때 발생하는 위상변화량을 식 (3)으로 나타낼 수 있고 이를 다시 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o + n_s)d \quad (3)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_o + \cos\theta_s)d \quad (4)$$

여기서, $\Delta\phi$ 는 변형에 의한 위상변화이고, λ 는 레이저의 파장, θ_o 는 대상물의 표면과 물체빔의 조사방향이 이루는 입사각, θ_s 는 대상물의 표면과 관측방향이 이루는 관측각, d 는 물체빔의 광경로차, n_o 는 조사방향이고, n_s 는 관측방향 벡터이다. 이때 관측방향이 대상물의 표면과 수직하다고 하면, $\cos\theta_s = 1$ 이 되므로, 식 (4)는 식 (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta_o)d \quad (5)$$

따라서, 식 (5)를 이용하면 대상물에 발생한 변형을 구할 수 있다.

2.1.2. 전단간섭법의 원리

Fig. 1은 전단간섭법계를 개략적으로 도식화한 것으로, 해석과정은 ESPI와 유사하며 차이점은 임의의 점 P에 조사된 두 점의 변형을 식 (6)에 표현한 바와 같이 d와 d'에 의한 차이로 표현한다는 것이다[6,7].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_0 - n_s) \cdot (d - d') \quad (6)$$

레이저 빔이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (6)을 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (7)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식 (8)과 같이 표현할 수 있으며, x 방향의 변형 Δx 는 상면에서 전단량 s 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식 (8)에서 2차 이상의 고차항은 무시할 수 있으므로, 식 (7)을 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (8)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) s \quad (9)$$

2.1.3. 이중기능 간섭계의 원리

본 연구에서는 ESPI와 전단간섭법의 모든 특징을 이중기능 간섭계로 구현하였다. Fig. 2는 이중기능 간섭계의 개략도이다.

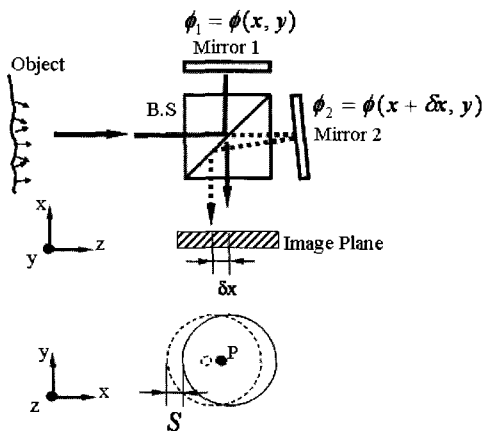


Fig. 1 schematic of interferometer for shearography

ESPI와 전단간섭법을 한 시스템에서 구현하기 위해 가변거울(M2: variable mirror)을 이용하여 참조빔을 조절한다.

거울에 반사하여 참조빔이 광분리기를 통해 들어가게 되면 ESPI의 변형을 측정할 수 있고 참조빔을 차단하게 되면 전단간섭법의 변형을 측정할 수 있다.

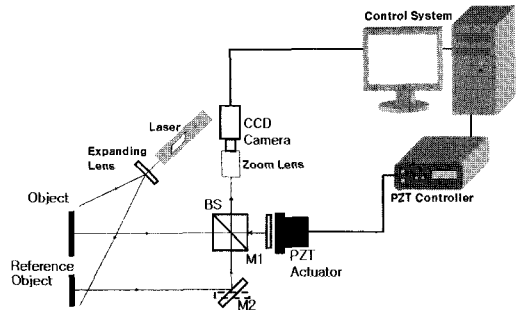


Fig. 2 Dual-function interferometer

2.2. 전단간섭법 결과로부터 수치적분에 의한 면외 변형 복원 개념

전단간섭법의 면외변형은 cosine 함수로서, Fig 1에 표현된 가변거울(mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig 3(a)는 ESPI 측정결과이며, Fig 3(b)는 일정한 전단량 (shearing)을 부여한 결과이며, Fig 3(c)는 전단량에 따른 전단간섭계의 결과와 동일한 기울기 곡선으로 이를 평행 이동한 화소수로 나누고, 적분하면, Fig 3(d)의 수치적분을 통한 복원된 변형의 결과를 얻을 수 있게되어 전단간섭법으로써 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있다[8,9].

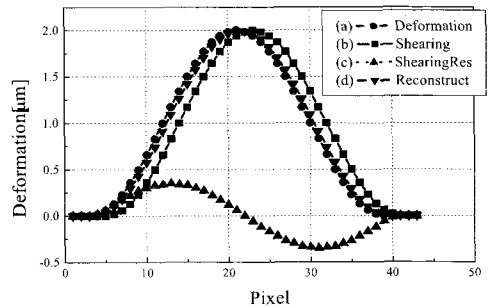


Fig. 3 Algorithm of deformation reconstruction

3. 시험장치 및 시험편

본 연구에서는 이중기능 간섭계를 이용하여 ESPI와 전단간섭법을 한 개의 CCD 카메라로 측정하였으며, 레이저 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저(Verdi, Coherent사)를 사용하였다.

두 기법의 비교를 위한 시험편인 외팔보 시험편의 고정부는 (100 mm × 100 mm)이며, 폭(B)은 12 mm, 두께(t)는 5 mm 의 시험편을 사용하였고, 길이(l)는 152 mm로 Fig. 4에 경계조건을 나타내었다.

시험편의 끝부분에 PZT를 이용하여 변형을 주었으며 실제 측정영역은 74 mm 부분까지 측정하여 비교하였다.

또한 동시측정과 정량해석을 위해 얇은 고무판을 이용하여 두께 0.1 mm, 지름이 60 mm인 고무판의 중심부위에 PZT를 이용하여 동일한 변형을 주었다.[10]

Labview 프로그램을 이용하여 ESPI와 전단간섭법의 변형전과 변형후의 이미지를 저장하고 이미지의 감산 처리를 할 수 있도록 하였다.

그리하여, ESPI와 전단간섭법을 하나의 시스템을 가지고 동일한 변형을 가하면서 측정하였다.

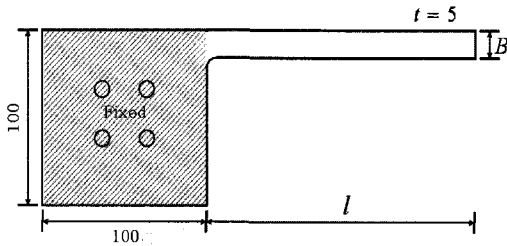


Fig. 4 Boundary condition of specimen for verifying the developed system reliability

4. 실험결과 및 고찰

이중기능간섭계 단일모드(single-mode)의 ESPI기능인 SF-E(single-function ESPI)와 전단간섭계 기능인 SF-S(single-function Shearography)의 측정결과를 비교하여 두 기법의 비교를 하였으며, 동시측정인 이중모드(dual-mode) DF-E(daul-function ESPI), DF-S(dual-function Shearography)의 측정결과를 상용 ESPI의 결과와 비교하였다.

동일한 한번의 변형으로 동시측정을 하여 이중모드를 통한 두 기법의 정확한 비교가 가능하였으며, 이를 상용 ESPI와 비교함으로써 신뢰성을 검증하

였다. 또한, 단일모드의 측정결과를 이중모드와 비교하여 오차가 적음을 확인함으로써 단일모드의 측정결과에도 신뢰성을 가질수 있었으며 두 기법의 비교검증을 통해 장비의 신뢰성을 검증하였다.

먼저 외팔보의 면외변형을 단일모드를 이용하여 측정하였으며 전단간섭계의 경우 전단량을 5 mm, 10 mm 두 가지로 부여하여 실험하였다.

Table 1 은 동일한 변형을 가했을 때 얻은 ESPI와 전단간섭법 실험결과이며, 변형에 대한 위상도(phase map)를 보여주고 있다. 15, 13.5, 12 μm는 실제로 가한 변형량이며, Fig. 4 시험편전체길이의 74 mm부분까지 측정하였으므로 피크값이 작게 측정되었다.

ESPI는 대상물에 발생하는 실제 변형을 측정하며 전단간섭법은 변형의 실제 기울기를 구하게 된다.

Fig. 5는 SF-E의 결과이며, Fig. 6은 전단량에 따른 SF-S의 결과 그래프이다.

Table 1 SF-E and SF-S phase-map according to deformation variation

TYPE	Single-function ESPI	Single-function Shearography	
		Shearing 5	Shearing 10
15 μm	Phase map		
	P.V	4.51 μm	4.514 μm
13.5 μm	Phase map		
	P.V	4.015 μm	4.025 μm
12 μm	Phase map		
	P.V	3.423 μm	3.473 μm

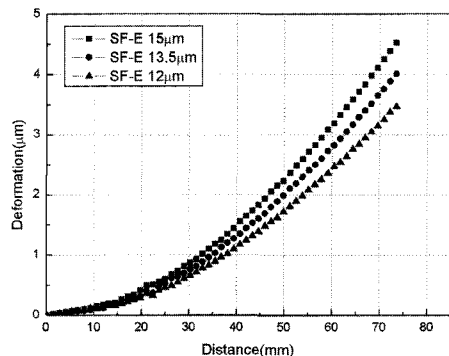
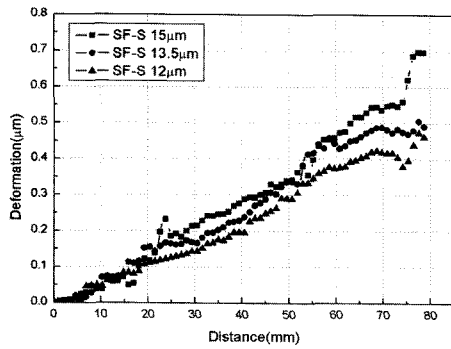
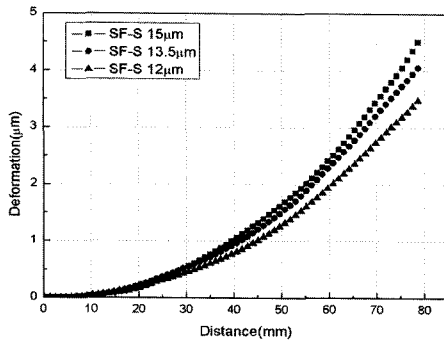


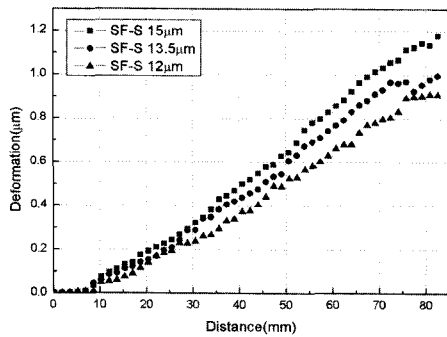
Fig. 5 SF-E result according to deformation variation



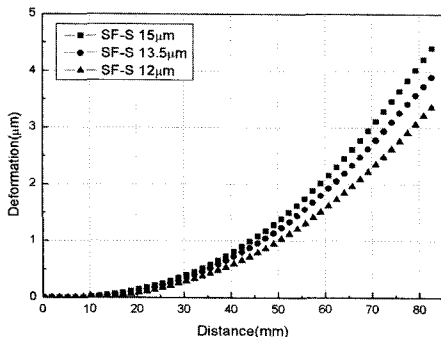
(a) Slope profile(Shearing amount 5mm)



(b) SF-S(Shearing amount 5mm) result



(c) Slope profile(Shearing amount 10mm)



(d) SF-S(Shearing amount 10mm) result

Fig. 6 Comparison of SF-S result according to deformation variation

Fig. 7은 최대값을 비교하여 나타낸 것이며, SF-E의 최대값은 4.51, 4.015, 3.423 μm , SF-S의 측정결과를 적분한 최대값은 전단량 5 mm의 경우 4.514, 4.025, 3.473 μm 였으며, 10 mm의 경우 4.515, 4.023, 3.467 μm 로 거의 일치함을 알 수 있었다.

Table 2에서 SF-E와 SF-S의 전단량에 따른 측정결과를 비교하여 편차를 나타내었다. 이때 편차는 약 $\pm 1\%$ 로 낮게 측정되어 SF-E, SF-S의 단일모드시 신뢰도가 높음을 보여주었다.

이상의 단일모드의 비교 실험을 통하여 ESPI결과와 전단간섭법 결과의 수치적분에 의한 복원결과를 비교하였다.

이중기능간섭계의 면외변형 동시측정을 고무판 시험편을 이용하여 정량측정하였으며, 동시에 상용 ESPI 장비와 비교를 하였다.

Table 3은 면외변형에 대해 두가지 기능을 동시에 적용하여 측정한 결과와 상용 ESPI 결과의 위상도(phase map) 및 변형의 최대값을 보여주고 있다.

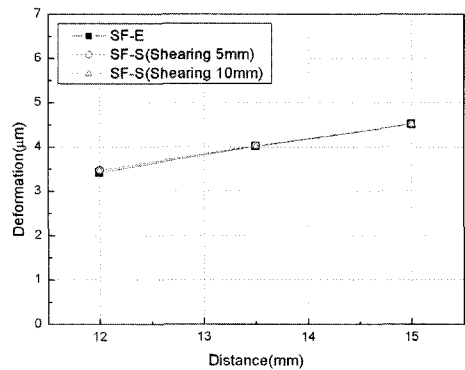







Fig. 7 Comparison of SF-E and SF-S peak value according to deformation variation

Table 2 Comparison of SF-E and SF-S deviation

Type		Deviation(%)	
		SF-S (Shearing 5 mm)	SF-S (Shearing 10 mm)
Single-Function ESPI (SF-E)	15 μm	0.62	0.58
	13.5 μm	0.06	0.02
	12 μm	0.30	0.49
	7.5 μm	0.86	0.33

Table 3 ESPI, DF-E, DF-S, SF-E and SF-S phase-map according to deformation variation

Type	상용 ESPI	DF E and S		SF-E	SF-S
	ESPI	ESPI	Shearography		
Phase map					
Def	2.267	2.22	2.139	2.202	2.201

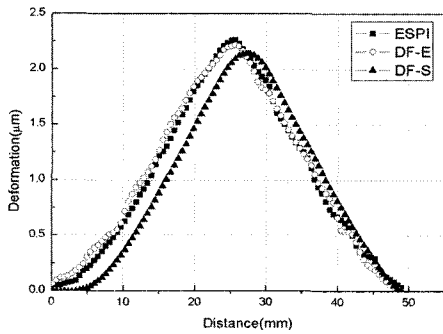


Fig. 8 Comparison of deformation profile of ESPI, DF-E and DF-S result

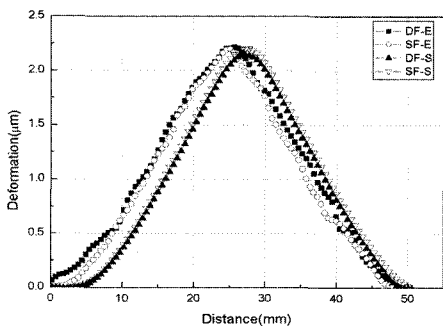


Fig. 9 Comparison of deformation profile dual-function result and single mode

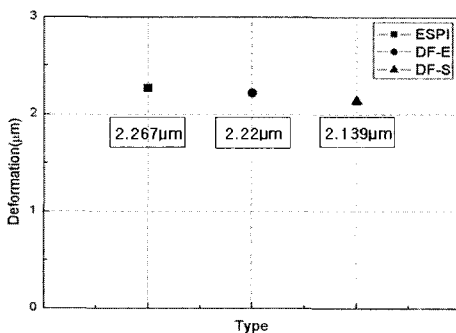


Fig. 10 Comparison of result according to peak value

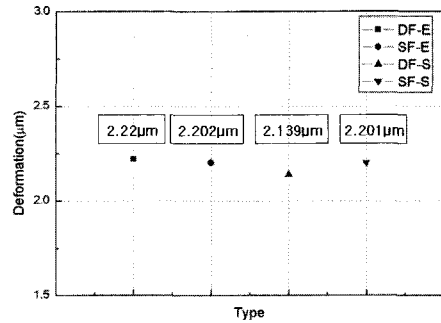


Fig. 11 Comparison of result according to peak value

Fig. 8은 동시 측정된 DF-E와 DF-S의 결과를 상용 ESPI 장비와 비교하여 나타내었으며, 여기서, 이중기능간섭계의 두기능의 동시측정시 ESPI의 결과를 DF-E로 나타냈으며, 전단간섭법의 결과를 DF-S로 나타내었다. Fig. 9는 단일모드와 이중모드(dual-mode)의 결과를 비교하여 나타내었다.

Fig. 10은 Fig. 8 결과의 최대값을 나타내어 비교하였으며, Fig. 11은 Fig. 9 결과의 최대값을 비교하여 나타내었다.

상용 ESPI를 이용한 측정결과와 동시측정된 DF-E,S에 의한 측정결과와 그 오차는 DF-E는 2.07%, DF-S는 5.64%이며, DF-E, DF-S의 측정결과와 SF-E, SF-S에 의한 측정결과를 비교 하여 ESPI는 0.81%, 전단간섭법은 2.89%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구 결과 동시측정이 가능한 이중기능간섭계를 개발하여 단일모드 측정시에도 두기법의 비교가 가능하였으나, 이중모드 측정을 이용하여 동일한 한변의 변형에 두 가지의 결과를 동시측정하여 비교함으로써 두 기법의 정확한 비교가 가능하였다. 이중기능간섭계를 이용하여 동일한 대상물의 변형 계측 실험을 통해 얻은 변형의 결과들을 비교하여 전단간섭법의 산업 현장의 적용성을 높이며, 결합의 계측과 동시에 전단간섭법의 면의변형 신뢰도를 확인할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 이중기능간섭계의 단일모드 측정을 통하여 SF-E와 SF-S의 변형을 측정된 결과, SF-E의 최대값과 SF-S의 전단량에 따른 최대값은 1% 미만의

오차를 가지며 거의 일치함을 알 수 있었다.

- 2) 이중기능간섭계를 이용하여 기존에 정량측정을 통한 비교가 어려웠으나, 대상체의 변형을 ESPI와 전단간섭법을 동시측정함으로써 두 기법의 정확한 비교가 가능하였으며, 상용 ESPI 장비와 비교를 통하여 이중기능간섭계의 신뢰성을 검증할 수 있었다.
- 3) 동시 측정결과 DF-E, DF-S의 최대값과 상용 ESPI의 최대값을 비교한 결과 그 오차는 DF-E는 2.07%, DF-S는 5.64%의 오차를 가지며 일치하였다.
- 4) 단일모드와 이중모드의 정량측정을 통한 비교 결과, 그 오차는 ESPI는 0.81%, 전단간섭법은 2.89%로 측정되었다.
- 5) 동일한 하나의 간섭계를 가지고 전단간섭법의 수치적분을 통한 면외변형 측정결과를 ESPI의 측정결과와 비교를 한 결과, 전단간섭법을 이용하여 결함 검출 및 면외변형의 측정이 동시에 수행 가능하여 산업현장 적용성은 증대될 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 과학기술부와 한국과학재단의 원자력 연구개발사업(방사선기술개발사업)으로 연구 지원한 구조물의 Mid-infraRed 측정에 의한 응력 및 피로한계 Real-Time 예측 시스템 개발의 결과물입니다.

참고문헌

- [1] Advanced Materials and Processes, Vol 10, pp. 18, (2004)
- [2] S. H. Baik, S. K. Park and C. J. Kim, "Applications of speckle interferometer," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 14-18, (2004)
- [3] Y. J. Kang, J. S. Lee, N. K. Park and Y. K. Kwon, "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)
- [4] K. S. Kim, K. S. Kang, Y. J. Kang and S. K. Hang, "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography," Optics&Laser Technology, Vol. 35, pp. 639-643, (2004)
- [5] B. Bhaduri, N. K. Mohan and M. P. Kothiyal, "A dual-function ESPI system for the measurement of out-of-plane displacement and slope," Optic and Lasers in Engineering, Vol. 44, pp. 637-644, (2005)
- [6] R. Jones and C. Wykes : "Holographic and speckle interferometry : a discussion of the theory, practice and application of the techniques," 2nd Edition, Cambridge University Press, pp. 165-196, (1989)
- [7] K. Creath, "Temporal phase measurement method, in interferogram analysis: digital fringe pattern measurement techniques," IOP Publishing, pp. 94-140, (1993)
- [8] H. S. Jang, "Quantitative measurement method of out-of-plane deformation using the shearography", Chosun Univ. Doctorate Paper, (2006)
- [9] J. H. Kwag, M. K. Kim, H. M. Kim, T. H. Choi, K. S. Kang, S. P. Yang and K. S. Kim. "Defect detection based on measurement of thermal deformation using laser speckle interferometry," Autume Proc. of KSPE, pp. 311-312, (2007)
- [10] J. H. Kwag, S. W. Jung, M. G. Kang and K. S. Kim. "Comparison of out-of-plane deformation results measured by dual-function interferometer," Autume Proc. of KSPE, pp. 81-84, (2006)