

레이저 스페클과 디지털 화상관련법을 이용한 변위 측정방법의 평가

이정현*, 전문창*, 강기주#

Evaluation of Displacement Measurement Technique Using Laser Speckle and Digital Image Correlation Method

Jeong-Hyun Lee*, Moon-Chang Jeon* and Ki-Ju Kang#

ABSTRACT

As a tool for strain measurement to work with screw driven or hydraulic material test systems, in which mechanical vibration is inherent, SSDG (Speckle Strain/Displacement Gage), ESP (Electronic Speckle Photography) and its 3-dimension version SDSP are evaluated for the theory and practical appliance. Through tension test of steel strips, their validity and shortcomings are examined. As the results, it has been shown that, although SSDG and ESP provide direct measurement of in-plane strain in one direction, they are so sensitive to the out-plane displacement. On the other hand, SDSP which is aided with DIC (Digital Image Correlation) technique to trace the movement of the speckles provides not only in-plane 2-dimensional displacement field, but also out-of-plane displacement simultaneously. However, because the DIC is time-consuming, not automated yet and it needs post-processing to evaluate strain from the displacement field, SDSP appears to be not adequate as a real time sensor.

Key Words : Laser Speckle (레이저 스페클), Speckle Strain/Displacement Gage (SSDG, 스페클변형율/변위계), Electronic Speckle Photography (ESP), Stereoscopic Digital Speckle Photography (SDSP), Digital Image Correlation (DIC, 디지털화상관련법)

1. 서론

레이저 스페클을 이용하여 물체의 변위를 측정하는 방법으로는 HI(Holography Interferometry)^{1,2},³, ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)^{4,5,6,7},^{8,9}, ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gauge)¹⁰, SSDG(Speckle Strain/Displacement Gage)^{11~13} ESP (Electronic Speckle Photography)^{14~16} 등이 있다. 위

의 방법 중 앞의 두 방법은 두개의 스페클빔을 간섭시키기 위한 복잡한 광학계를 필요로 한다. 또한 간섭무늬가 측정대상과 광학 장비들 사이에 상대적인 변위에 민감하기 때문에 기계적 진동이 필연적으로 발생하는 대부분의 유압식/기계식 재료 시험기와 연동하여 시편의 변형을 측정하는 것이 곤란하다. 반면에 뒤의 3 가지 방법은 개개의 스페클 이미지를 일단 저장한 후 물체의 변형에 따

· 2002년 7월 19일 접수
* 전남대학교 대학원
교신저자, 전남대학교 기계시스템 공학부
Email : kjkang@chonnam.ac.kr, Tel : (062) 530-1668

른 스펙클 이미지의 변화를 해석한다. 따라서 진동에 상대적으로 둔감하다. 이중 SSDG 는 측정과 해석이 간편하나 물체에 압흔(indentation)과 같은 표식을 해야 하고 한점의 변형만이 측정된다는 한계가 있다. SSDG 와 ESP 는 스펙클 이미지 상의 각 점(speckle)의 움직임을 해석하여 일정영역의 변위/변형을 장(field)을 측정할 수 있다. 디지털 화상(image)의 취득 및 처리 장치가 대중화 됨에 따라 물체의 변형 진후에 촬영된 화면을 비교하여 변위/변형을 측정하는 디지털화상관련법(DIC; Digital Image Correlation)이 널리 활용되고 있다.^{17,18} 두 화상에 존재하는 불규칙한 무늬를 디지털 신호(pixel)의 조합으로 기록하고 변형 전 화상내의 각 픽셀이 변형 후 화상 내의 어느 점에 매핑되는가를 알아내기 위하여 각 픽셀 주위의 일정 영역(subset) 안의 모든 픽셀이 최소오차를 갖고 연관(correlate)되는 상대편 화상내의 해당 픽셀을 찾아낸다. 필요한 장비로서 현대의 카메라와 백색광 등의 광원만 있으면 되고 픽셀크기의 최고 1/100의 분해능을 가진다. 따라서 SSDG 와 ESP 에 연계하여 보다 정밀하게 각 스펙클의 변위를 추적하는 용도로 사용되고 있다.

ESP 법의 개발자인 Sjö Dahl 은 최근 이를 발전시켜 두개의 CCD 카메라를 이용하여 면내(in-plane)와 면외(out-of-plane) 변위를 동시에 측정하는 방법인 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography) 제안하였다.¹⁹ 위의 DIC 를 이용하여 변형장을 해석하기 때문에 고정밀도의 측정이 가능하며 실험장치가 간단하고 또한 외부진동에 둔감하기 때문에 획기적인 방법으로 간주된다.

SSDG 와 ESP 는 그 장치와 해석방법의 유사성 때문에 혼동되기 쉽다. 본 연구에서는 먼저 재료시험기와 연동하여 사용할 수 있는 레이저 변형측정법으로서 SSDG 와 ESP 의 기초이론을 검토하여 그 차이점을 명확히 하고 3 차원 변위 측정의 가능성을 검토하였다. 금속판에 대한 인장 실험을 통하여 ESP 의 3 차원 형인 SDSP 법의 타당성을 검증하고 그 장단점과 유용한 수단이 되기 위한 개선방안을 논의하였다.

2. 이론적 배경; 변위/변형과 스펙클

레이저광은 공간 가간섭성(coherent)이 뛰어나서 물체의 표면에서 반사할 때 표면의 거칠기를

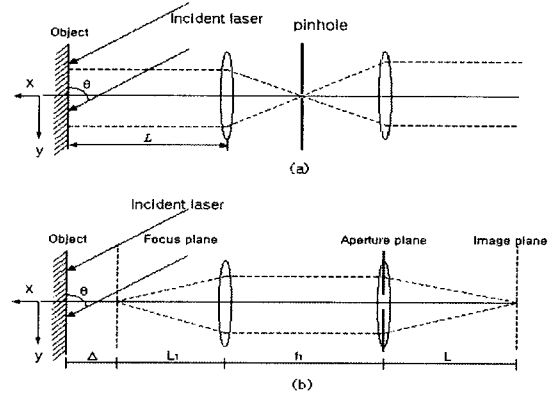


Fig. 1 Optical alignment of (a) SSDG (b) ESP (telecentric imaging system)

반영하는 반점모양의 무늬를 나타내는데 이를 레이저 스펙클이라고 한다. 레이저 스펙클은 그 이미지를 취득하는데 사용되는 카메라렌즈의 초점과 물체 표면의 상대적인 위치에 따라 민감하게 달라진다. Fig. 1 은 SSDG 와 ESP 법의 광학계를 나타낸 것이다. SSDG 법에서는, Fig. 1(a)와 같이, 물체로부터 나오는 반사광 중 평행성분만을 화상면(CCD 촬상소자)에 받기 때문에 표면의 거칠기에 따른 레이저 광의 간섭 무늬를 얻는다. y 방향 변형에 따른 동 방향의 스펙클의 이동량 A_y 는 다음과 같이 표현된다.⁸

$$A_y(\theta) = -u_y + L(\Omega_z + \varepsilon_y \tan \theta) \quad (1)$$

여기서 u_y 는 강체변위를 포함한 물체 자체의 변위, L 은 물체와 상면사이의 거리, Ω_z 는 강체회전각, θ 는 레이저의 입사와 반사각이 이루는 각도이다. 물체의 변형을 ε_y 는 거리 L 에 의하여 증폭되어 스펙클을 민감하게 이동시킨다.

반면에 물체의 한점에서 나오는 모든 빛을 상면에서 다시 한점으로 모아 얻는 스펙클 무늬를 주관적스펙클(subjective speckle)²⁰ 이라고 하는데 물체 표면 거칠기에 의한 빛의 반사전후의 경로차뿐 아니라 반사 후 경로차도 위상에 영향을 미친다. 이것은 우리 눈이 가시광선 하에서 물체에 초점을 맞추어 얻는 상과 같이 물체 표면의 이동을 가감 없이 그대로 반영한다. ESP 법에서는 Fig. 1(b)와

같이 초점을 물체의 표면 전방에 두어 얻어지는 스페클을 해석하였다. 이것을 defocused 또는 telecentric 화상 장치라고 한다. 이 경우 스페클의 이동량 A_y 는 다음식으로 표현된다.¹¹

$$A_y(\theta) = -\frac{u_y}{M} + \frac{\Delta}{M}(\Omega_z(1 + \cos \theta) + \varepsilon_y \sin \theta) \quad (2)$$

여기서 M 은 광학적축소율로서 $M=f_i/L_2$ 이다. Δ 는 defocused 된 거리이다. 이 경우에 변형을 ε_y 는 Δ/M 만큼 증폭되어 스페클을 민감하게 이동시킨다.

식(1)과 (2)에는 시편의 강제운동 영향이 포함되어 있으므로 이를 배제하기 위하여 레이저를 시편에 수직으로 입사하고 상하(또는 좌우)에 두개의 카메라를 배치하거나^{7, 8} 카메라 상하에 두개 레이저 광원을 배치하는 방법⁹이 사용되기도 한다. Fig. 2는 두개의 카메라를 이용한 SSDG 시스템을 나타내고 있다. 레이저 입사각과 반사각 사이의 각도는 Fig. 1(a)와 같다고 할지라도 카메라가 시편에 경사지므로 식(1)은 다음과 같이 수정된다.

$$A_y(\theta) = -u_y \cos \theta + u_x \sin \theta + L(\Omega_z + \varepsilon_y \tan \theta)$$

$$A_y(-\theta) = -u_y \cos \theta - u_x \sin \theta - L(\Omega_z - \varepsilon_y \tan \theta) \quad (3)$$

여기서 $A_y(\theta)$ 와 $A_y(-\theta)$ 와는 각각 상부, 하부 카메라에서의 스페클 이동을 나타낸다. u_x 는 면외 변위로서 경사진 카메라 때문에 이 영향이 나타난다. $A_y(\theta)$ 와 $A_y(-\theta)$ 의 차이는 u_y 와 Ω_z 가 상쇄되어 다음식과 같이 된다.

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = 2u_x \sin \theta + 2\varepsilon_y L \tan \theta \quad (4)$$

u_x 가 무시할 수 있을 때 이식을 이용하여 면내 변형율을 구할 수 있다.

한편 ESP 법에서도 시편에 경사진 카메라를 이용한다면 식(2)는 다음과 같이 수정된다.

$$A_y(\theta) = -\frac{u_y \cos \theta}{M} + \frac{u_x \sin \theta}{M} + \frac{\Delta}{M}(\Omega_z(1 + \cos \theta) + \varepsilon_y \sin \theta)$$

$$A_y(-\theta) = -\frac{u_y \cos \theta}{M} - \frac{u_x \sin \theta}{M} + \frac{\Delta}{M}(\Omega_z(1 + \cos \theta) - \varepsilon_y \sin \theta) \quad (5)$$

$A_y(\theta)$ 와 $A_y(-\theta)$ 의 차이는 u_y 와 Ω_x 가 상쇄되어 다음식과 같이 된다.

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = \frac{2u_x \sin \theta}{M} + \frac{2\Delta}{M}\varepsilon_y \sin \theta \quad (6)$$

Sjödahl 이 최근 제안한 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography) 법¹⁴에서는 시편의 표면에 초점을 맞추는 주관적스페클을 이용하므로 식(2)와 (5)에서 $\Delta=0$ 이 되고 $A_y(\theta)$ 는 다음과 같이 단순히 물체표면 자체의 변위 u_x 와 u_y 만의 함수이다

$$A_y(\theta) = -\frac{u_y \cos \theta}{M} + \frac{u_x \sin \theta}{M}$$

따라서 $A_y(-\theta)$ 와의 차이와 합은 다음 식과 같다

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = -\frac{2u_x \sin \theta}{M} \quad (7)$$

$$A_y(\theta) + A_y(-\theta) = \frac{2u_y \cos \theta}{M} \quad (8)$$

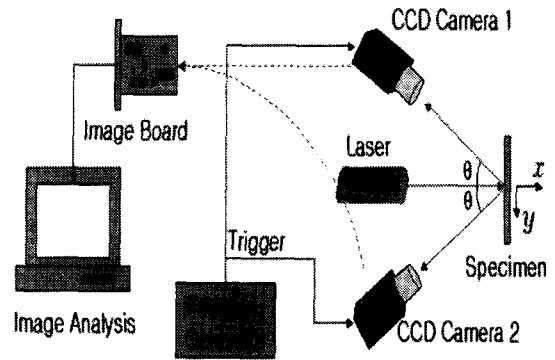


Fig. 2 Schematic diagram of a stereoscopic speckle measurement system

여기서 두 변위 u_x 와 u_y 는 물체표면 자체의 변위로서 강체 병진이동과 변형을 모두 포함한다. SSDG 와 ESP 법에서는 이 변위에 의한 스페클 이동량이 측정하기에 너무 미세하다고 간주되어 대신 광학적인 방법으로 변형을 ϵ_y 의 영향을 증폭하였다. 반면에 SDSP 법에서는 미세한 변위 u_x 와 u_y 를 DIC (Digital Image Correlation)법으로 직접 측정한다. 서론에서 언급한 바와 같이 최근 DIC 기술의 발전에 따라 카메라 픽셀 크기의 1/100 까지 변위 측정이 가능하다. 따라서 한 개의 장치로 일회 실험하여 상하 카메라에서 얻어진 스페클 이미지로부터 식(6)에 의하여 면외(out-of-plane) 변위를, 식(7)에 의하여 면내(in-plane) 변위를 동시에 독립적으로 측정하는 것이 가능하다.

3. 실험장치 및 절차

3.1 실험장치

레이저 스페클 취득을 위한 시스템의 개략도는 Fig. 2 와 같다. 시편에 상하방향으로 기계적인 하중을 가하면서 상/하 두대의 CCD 카메라로 스페클을 녹화한다. 레이저와 CCD 카메라, 영상 처리 보드 그리고 자체적으로 작성한 스페클 추적 프로그램을 장착한 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다. 레이저는 He-Ne 레이저(632.8nm)를 사용하였으며 CCD 카메라는 Pulnix TM-72EX 이다. 스페클 영상 취득 및 저장을 위해서 Data Translation 사의 DT3133 보드를 사용하였다. 두 개의 CCD 카메라로 촬영한 각각의 이미지를 동시에 최고 초당 30 프레임씩 저장할 수 있다.

사용한 시편은 폭 40mm, 길이 300mm, 두께 1mm 의 연강판이다. 시편 앞면에 레이저를 조사하고 스페클 화상을 취득함과 아울러 전기저항형 스트레인 게이지(foil strain gage)를 부착하여 변형을 측정하였다. 시편의 초기 굽음이나 상하그립 사이의 치우침에 의하여 인장 시 시편에 굽힘(또는 퍼짐)이 발생할 수 있고, 이에 따라 앞/뒤면 변형이 달라질 가능성이 있으므로 스트레인 게이지를 레이저 입사점 바로 옆에 부착하였다. 또한 시편의 뒷면, 레이저 입사점의 바로 뒤에는 수직으로 변위센서를 접촉시켜 면외변위 u_x 를 측정하였다. 스트레인 게이지는 게이지길이 5mm 인 KYOWA 사의 모델 KFG-5-350-C1-11 이다. 변위센서는 MPE 사의 LSC transducer 이다.

시편을 INSTRON 8800 유압식 재료시험기에 장착하여 변위제어로 인장하중을 가하면서 초당 1 회씩 스페클을 녹화하였다. 식(5)나 (6)으로 변위/변형율을 측정하고자 하면 카메라와 시편 사이의 거리를 정확하게 유지할 필요가 있다. 이를 위하여 렌즈의 끝에 레이저포인트를 부착하여 두 포인트로부터 나온 레이저 광이 만나는 거리에 시편을 위치시켰다. Fig. 3 은 레이저 포인트가 장착된 모습을 보여준다.

3.2 ESP 법에 의한 변위/변형율 측정

먼저 Fig. 1(b)와 같이 한 시편 SP-1 을 대상으로, 초점을 시편표면 100mm 전방에 두고 defocused 된 상태로 스페클 이미지를 기록하였다. Fig. 4 는 이 스페클 이미지의 한 예를 보여주고 있다. 이 경우

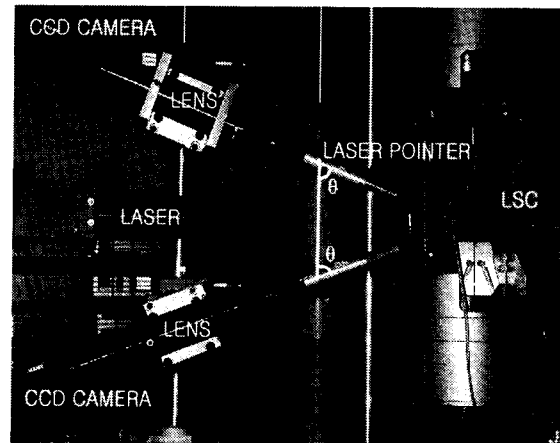


Fig. 3 Alignment of imaging system using laser pointers

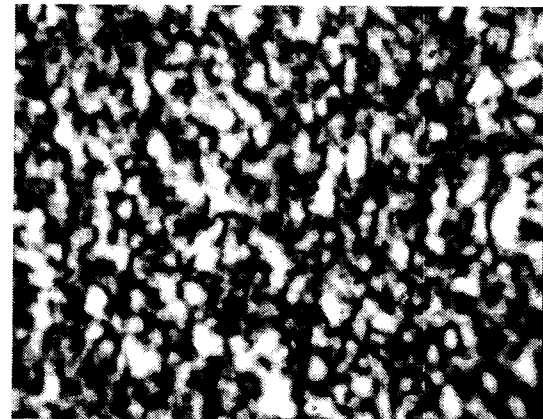


Fig. 4 An example of defocused speckle image

스페클은 물체의 변위에 민감하게 움직이기 때문에 그 이동량이 스페클 이미지 상에서 수내지 수십 픽셀에 달한다. 따라서 DIC 를 사용하지 않아도 비교적 간단하게 측정할 수 있다. 스페클의 움직임을 해석하여 각 점의 변위를 Visual C++ 이용하여 자체적으로 작성한 프로그램을 이용하였다. 프로그램의 순서도는 Fig. 5 와 같다. 먼저, 시편을 인장하면서 얻어진 일련의 스페클 영상 중 최초의 영상에서 한 점을 선택하여 그 주위의 픽셀 400 개 정도의 밝기 값과 위치를 저장한다. 뒤 이은 스페클 영상에서 각 픽셀에 대한 그 주위 400 개 픽셀의 밝기를 최초 이미지 픽셀의 밝기 값들과 비교하여 가장 차이가 적은 점을 찾아 내어 그 점을 최초 영상에서 선택한 점이 이동한 새로운 좌표로 간주하였다. 이렇게 구한 각 점의 이동량을 식(6)에 대입하여 변위/변형율을 구하였다.

3.3 SDSP 법에 의한 변위/변형율 측정

다른 한 개의 시편 SP-2 을 대상으로 초점을 시편초점에 맞추어 주관적(subjective) 스페클 이미지를 녹화하였다. Fig. 6 은 이 스페클 이미지의 한 예이다. 앞에서 설명한 바와 같이 이 경우 스페클의 이동량은 미세하므로 DIC 법을 사용해야 한다. 본 연구에서는 Correlated Solution 사의 2 차원 DIC 소프트웨어인 VIC-2D 를 사용하였다. 스페클 입자의 크기가 픽셀에 의하여 비교적 크므로 subset 사이즈를 65 픽셀로 하여 각 점의 이동량을 구하였다. 다음 식 (7)과 (8)에 대입하여 각각 면외, 면내 변위를 계산하였다. 이 변위 장으로부터 변형율을 구하기 위하여 상하로 약 1mm 떨어진 두 점의 변내 변위의 차를 사이거리로 나누어 구하였다.

4. 결과 및 분석

Fig. 7 은 시편 SP-1 의 실험과정에서 측정된 변형율의 변화를 면외변위와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 변형율은 면외변위가 없다고 가정하고 ESP 법의 식(6)에 의하여 측정된 것과 스트레인 게이지로 측정된 것인데 두 변형율의 차가 매우 크다. 이때 LSC 로 측정된 면외변위는 최대 약 200 μ m 이다. 이것은 ESP 법에 의한 변형율 측정 결과의 오차가 함께 발생한 면외 변위와 연관이 있다는 추정을 하게 한다. 실제로 식(6)에 면외 변위 측정결과를 대입하여 변형율을 다시 계산한

결과가 Fig. 8 에 나타나 있다. 비록 LSC 센서의 정밀도가 낮아 ESP 에 의한 변형율이 스트레인 게이지에 의한 것과 완전히 일치하지는 않지만 Fig. 7 에서와 같은 큰 오차는 보이지 않는다. 이것은 보통 ESP 나 SSDG 법을 사용할 때 무시해온 면외 변위의 영향이 얼마나 큰 것인지를 보여준다. 다시 말해서 면외변위가 100 μ m 만 발생하여도 ESP 나

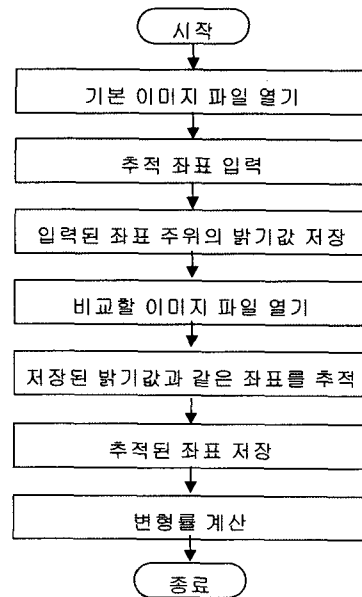


Fig. 5 Flowchart of speckle trace program



Fig. 6 An example of focused (subjective) speckle image

SSDG 에 의해 측정된 1000×10^{-6} 정도의 스트레인의 오차가 100%를 넘기 때문에 사용될 수 없다는 것이다.

Fig. 9는 시편 SP-2의 실험과정에서 측정된 변위 u_y 의 변화를 나타낸 것이다. 상하 스페클 이미지 상의 한 점의 이동량의 합을 SDSP 법의 식(8)에 대입하여 변위를 구하였다. DIC에 의한 스페클 이동량 측정과정이 번거롭기 때문에 5초 간격으로 구한 것이기는 하지만 표준편차 0.1 픽셀 이하의 매우 흠어짐이 적은 경향을 보여준다. 카메라의 분해능이 가로 세로 약 500 픽셀이며, 시편의 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 영역을 촬영한 것이므로 한 픽셀은 $2\mu\text{m}$ 에 해당한다.

Fig. 10은 이 변위 측정 결과로부터 구해진 변형율을 스트레인 게이지로 측정한 것과 비교하여 나타낸 것이다. 대체로 잘 일치하지만 변위에 비해 큰 흠어짐(scatter)을 보인다. 스트레인 게이지를 기준으로 약 100×10^{-6} 정도의 오차를 가진다. 이것은 변위 데이터를 식으로 근사화하고 미분하는 과정의 정확도가 미흡하다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 상하 스페클 이미지 상의 한 점의 이동량의 차를 SDSP 법의 식(7)에 대입하여 측정된 면외변위 u_x 를 LSC 센서로 측정된 것과 비교

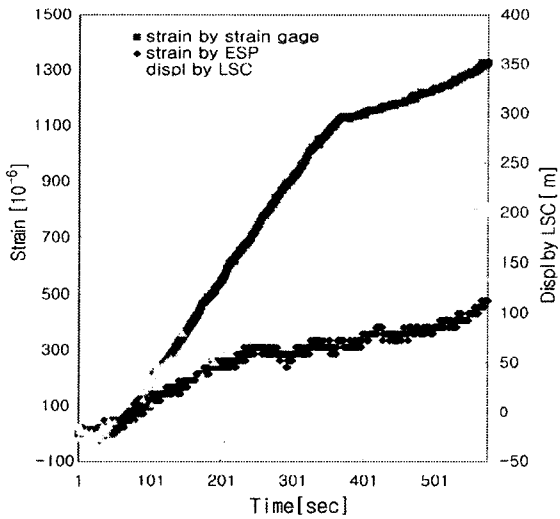


Fig. 7 Variation of ϵ_y of the specimen SP-1 measured by the ESP, in comparison with the one by the foil strain gage. And variation of out-of-plane displacements measured by the LSC transducer

하여 나타낸 것이다. LSC 센서의 분해능이 낮기 때문이거나 기계적진동의 영향으로 잡음이 심하지만 두 측정결과 사이에 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

식(7)에 의하면 u_x 의 오차는 u_y 오차의 $\cos\theta/\sin\theta$ 배로 실험에서는 $\theta=20^\circ$ 이므로 약 3 배만큼 발생한다.

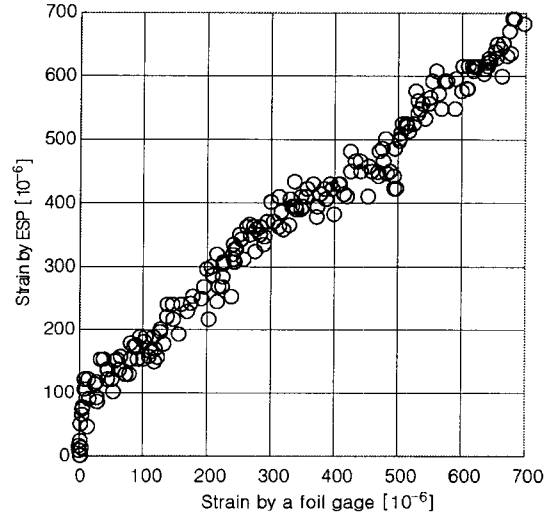


Fig. 8 Strain ϵ_y of the specimen SP-1 measured by ESP taking account of the out-of-displacement u_x in comparison with the one measured by the foil strain gage

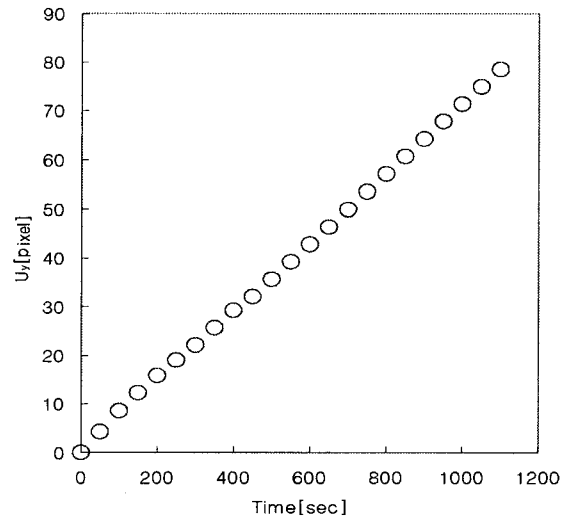


Fig. 9 Variation of the displacement u_y measured by the SDSP on the specimen SP-2

SSDG 와 ESP 법에서는 본 연구에서와 같이 두개의 카메라를 이용할 경우 면내 변형율은 한방향 성분만 측정 가능하다. 만일 완전한 2 차원 면내 변형율장을 구하고자 하면 상하/좌우 4 대의 카메라가 필요하다. SSDG 의 경우 시편과의 거리 L ,

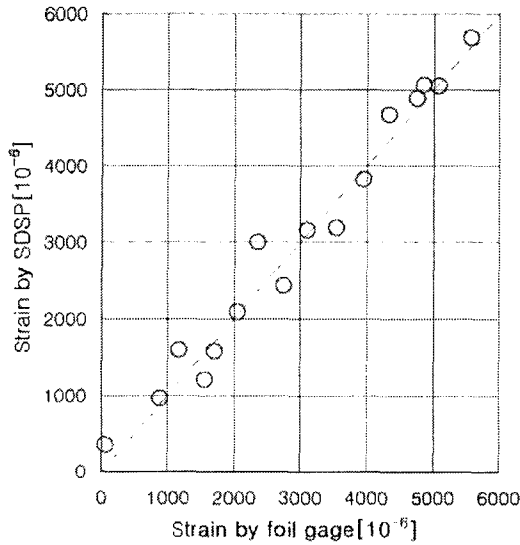


Fig. 10 Strain ϵ_x measured by SDSP in compared with the one measured by the foil strain gage

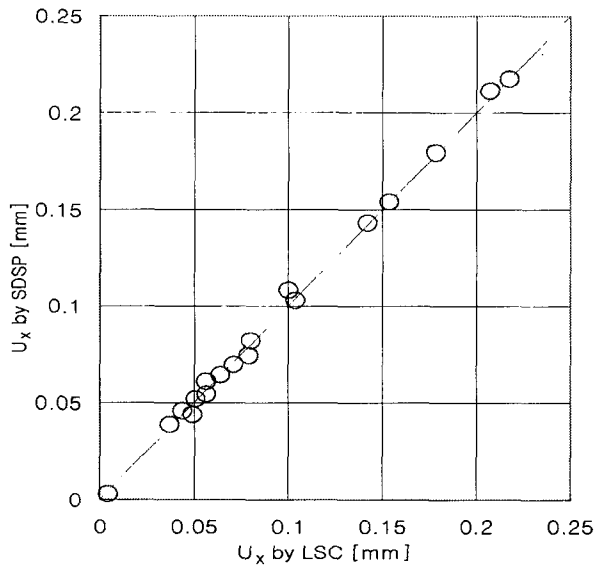


Fig. 11 The out-of-displacement u_x measured by SDSP in compared with the one measured by the LSC transducer

ESP 의 경우 시편으로부터 초점이 오프셋된 거리를 정밀하게 측정해야 한다. 또한 면외변위에 매우 민감하여 이에 대한 보정이 필요하다.

반면 SDSP 법은 두 대의 카메라만으로 3 차원 변위 장을 측정할 수 있다. 즉, 면내 변위 중 y 에 수직 방향인 변위 u_z 는 다음과 같이 단순히 표현되므로 DIC 법에 의하여 측정한 스페클 이동량 A_z 로부터 구할 수 있다.

$$A_z = \frac{u_z}{M}$$

다만 DIC 에 의한 스페클 이동량 계산이 상대적으로 번거롭고 시간이 소요되어 즉응답성(fast response)이 나빠 실시간 센서로 사용되기 어렵다. 또한 변위 데이터로부터 미분하여 변형율을 계산해야하기 때문에 오차가 커질 위험이 있다.

5. 결론

1. SSDG 와 ESP 법에 의한 변형율 측정결과는 면외변위에 민감하게 변하여 면외변위가 $100\mu\text{m}$ 가 발생될 경우 1000×10^{-6} 정도 변형율 측정치의 오차는 100%를 초과할 수 있다.

2. 레이저 스페클과 디지털 화상관련법을 이용하여 SDSP 법으로 면내 변위 및 변형율과 면외 변위를 측정된 결과 오차가 각각 $2\mu\text{m}$, 100×10^{-6} , $6\mu\text{m}$ 정도이다

후 기

본 연구는 2002 년도 과학기술부의 원자력 기초 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Tyrer, J. R., "Critical Review of Recent Development in Electronic Speckle Pattern Interferometry," Holographic Nondestructive Testing Proc. SPIE, Vol. 604, pp. 55-111, 1986.
2. Vest, C. M., Holographic Interferometry, John Willey

- & Sons Press, pp. 146-245, 1979.
3. Kim, I. K., "A Study on Vibration Characteristic of Thin Plate in Crack Propagation by Laser Holography Method," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 10, pp. 200-205, 2000.
 4. Jia, Z. and Shah, S. P., "Crack Detection in Concrete Using Real-Time ESPI Technology," *SPIE*, Vol. 2455, pp. 385-391, 1995.
 5. Jia, Z. and Shah, S. P., "Two-dimensional Electronic-Speckle-Pattern Interferometry and Concrete-Fracture Processes," *Experimental Mechanics*, Vol. 34, No. 3, pp. 262-270, 1994.
 6. Jang, S. S., "A Study on the Development of Image Processing Measurement System for Structural Analysis by Optical Non-contact Measurement," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp. 149-154, 2001.
 7. Her, Y. H., "Measurement of Micro-Tensile Properties using ESPI technique," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 5, pp. 90-97, 2001.
 8. Kim, D. H., "Speckle interferometric Detection of Defects on the backside of steel plate," *KSPE*, pp. 195-198, 2001.
 9. Back, T. H., "Measurement of Out-of plane Displacement in a Spot Welded Cantilevered plate using Laser Speckle interferometry with 4-step Phase shifting Technique," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 66-72, 2002.
 10. William, N., Sharpe, Jr., "Applications of the Interferometric Strain/Displacement Gauge," *Optical Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 483-488, 1982.
 11. Yamaguchi, I., "A Laser-Speckle Strain Gauge," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 14, pp. 1270-1273, 1981
 12. Noh, S. and Yamaguchi, I., "Two-Dimensional Measurement of Strain Distribution by Speckle Correlation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. L1299-L1301, 1992.
 13. Ogura, K. and Nishikawa, I., "Laser Speckle Strain/Displacement Gauge and its application to Fracture problems of ceramics and ceramic coating," *Pro. of APCFS'96, Korea*, pp. 749-754, 1996.
 14. Johnson, P., "Strain field measurements with dual-beam digital speckle photography," 1998.
 15. Sjödaahl, M., "Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting," *Applied Optics*, Vol. 33, No. 28, pp. 6667-6673, 1994.
 16. Sjödaahl, M., "Electronic speckle photography: measurement of in-plane strain fields through the used of defocused laser speckle," *Applied Optics*, Vol. 34, No. 25, pp. 5799-5808, 1995.
 17. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F. and McNeil, S. R., "Determination of displacements using an improved digital correlation methods," *Image Vision Comp.*, Vol. 1, No. 3, pp. 133-139, 1983.
 18. Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton and Peters, W. H., "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics," *Exp. Mech.*, Vol. 25, pp. 232-244, 1985.
 19. Synnergren, P. & Sjödaahl, M., "A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displ. Field measurements," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, pp. 425-443, 1999.
 20. Lee, S. S., "Laser Speckle and Holography," *Kye-Hak Press*, 1987.