

레이저 스페클을 이용한 재료 변형 측정

전 문 창*, 강 기 주**

Measurement of Material Deformation Using Laser Speckle

Moon-Chang Jeon and Ki-Ju Kang

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

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 investigated 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.

1. 서 론

레이저스페클을 이용하여 물체의 변위를 측정하는 방법으로는 HI (Holograpy Interferometry)^(1,2), ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)^(3,4), ISDG (Interferometric Strain/Displacement Gauge)⁽⁵⁾, SSDG (Speckle Strain /Displacement Gage)⁽⁶⁻⁸⁾, ESP (Electronic Speckle Photography)⁽⁹⁻¹¹⁾, 등이 있다. 위의 방법 중 앞의 두 방법은 두개의 스페클빔을 간섭시키기 위한 복잡한 광학계를 필요로 한다. 또한 간섭무늬가 측정대상과 광학장비들 사이에 상대적인 변위에 민감하기 때문에 기계적 진동이 필연적으로 발생하는 대부분의 유압식/기계식 재료 시험기와 연동하여 시험의 변형을 측정하는 것이

곤란하다. 반면에 뒤의 3 가지 방법은 개개의 스페클 이미지를 일단 저장한 후 물체의 변형에 따른 스페클 이미지의 변화를 해석한다. 따라서 진동에 상대적으로 둔감하다. 이중 ISDG 는 측정과 해석이 간편하나 물체에 압흔 (indentation)과 같은 표식을 해야 하고 한점의 변형만이 측정된다는 한계가 있다. SSDG 와 ESP 는 스페클이미지 상의 각 점 (speckle)의 움직임을 해석하여 일정영역의 변위/변형율 장 (field)을 측정할 수 있다.

디지털 화상 (image)의 취득 및 처리 장치가 대중화 됨에 따라 물체의 변형 전후에 촬영된 화면을 비교하여 변위/변형율을 측정하는 디지털화상 관련법 (DIC; Digital Image Correlation)이 널리 활용되고 있다.^(12,13) 두 화상에 존재하는 불규칙한 무늬를 디지털 신호 (pixel)의 조합으로 기록하고 변형 전 화상내의 각 픽셀이 변형 후 화상내의 어느 점에 매핑되는가를 알아내기 위하여 각 픽셀 주위의 일정 영역 (subset) 안의 모든 픽셀이

* 전남대학교 대학원

** 전남대학교 기계시스템공학부

최소오차를 갖고 연관 (correlate)되는 상대편 화상 내의 해당 픽셀을 찾아낸다. 필요한 장비로서 현대의 카메라와 백색광 등의 광원만 있으면 되고 픽셀크기의 최고 1/100 의 분해능을 가진다. 따라서 SSDG 와 ESP 에 연계하여 보다 정밀하게 각 스페클의 변위를 추적하는 용도로 사용되고 있다.

ESP 법의 개발자인 Sjödahll 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.⁽¹⁴⁾ 위의 DIC 를 이용하여 변형장을 해석하기 때문에 고 정밀도의 측정이 가능하며 실험 장치가 간단하고 또한 외부진동에 둔감하기 때문에 획기적인 방법으로 간주된다.

SSDG 와 ESP 는 그 장치와 해석방법의 유사성 때문에 혼동되기 쉽다. 본 연구에서는 먼저 재료 시험기와 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. 이론; 변위/변형과 스페클

레이저광은 공간 가간섭성 (coherent)이 뛰어나서 물체의 표면에서 반사할 때 표면의 거칠기를 반영하는 반점모양의 무늬를 나타내는데 이를 레이저 스페클이라고 한다. 레이저스페클은 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 스페클의 이동량 A_y 는 다음식으로 표현된다.⁽⁸⁾

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

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 변형율 ε_y 는 거리 L 에 의하여 증폭되어 스페클을 민감하게 이동시킨다.

반면에 물체의 한점에서 나오는 모든 빛을 상

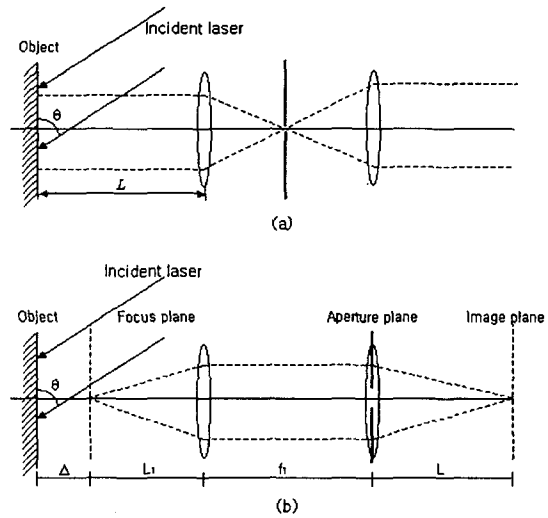


Fig. 1 Optical alignment of (a)SSDG (b)ESP (telecentric imaging system)

면에서 다시 한점으로 모아 얻는 스페클 무늬를 주관적스페클 (subjective speckle)⁽¹⁵⁾이라고 하는데 물체 표면 거칠기에 의한 빛의 반사전후의 경로차 뿐 아니라 반사 후 경로차도 위상에 영향을 미친다. 이것은 우리 눈이 가시광선 하에서 물체에 초점을 맞추어 얻는 상과 같이 물체 표면의 이동을 가감없이 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⁾

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

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

식(1)과 (2)에는 시편의 강제운동 영향이 포함되어 있으므로 이를 배제하기 위하여 레이저를 시편

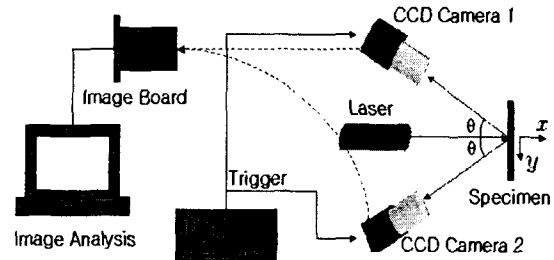


Fig. 2 Schematic diagram of a stereoscopic speckle measurement system

에 수직으로 입사하고 상하 (또는 좌우)에 두개의 카메라를 배치하거나^(7,8) 카메라 상하에 두개 레이저 광원을 배치하는 방법⁽⁹⁾이 사용되기도 한다. Fig.2 는 두개의 카메라를 이용한 SSDG 시스템을 나타내고 있다. 레이저 입사각과 반사각사이의 각도는 Fig.1(a)와 같다고 할지라도 카메라가 시편에 경사지므로 식(1)은 다음과 같이 수정된다.

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

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

여기서 $A_y(\theta)$ 와 $A_y(-\theta)$ 는 각각 상부, 하부 카메라에서의 스페클 이동을 나타낸다. u_x 는 면외변위로서 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.

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

u_x 가 무시할 수 있을 때 이식을 이용하여 면내변형율을 구할 수 있다.

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

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

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

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

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

식(3)과 (5)에서 알 수 있듯이 경사진 카메라의 영향은 물체표면 자체의 변위 u_x 와 u_y 에 대응한 부분으로만 나타난다. Sjödahl 이 최근 제안한 SDSP (Stereoscopic Digital Speckle Photography) 법⁽¹⁴⁾에서는 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.

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

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

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 변형율 ε_y 의 영향을 증폭하였다. 하지만, 최근의 DIC (Digital Image Correlation) 기술에 힘입어 스페클의 이동을 높은 해상도로 측정하는 것이 가능해졌다. 즉, u_x 와 u_y 만의 스페클 이동을 측정할 수 있게 되었다. 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 1mm의 연강판이며 항복점은 197MPa, 인장강도는 325MPa 이다. 시편 앞면에 레이저를 조사하고 스페클 화상을 취득함과 아울러 전기저항형 박막 변형율계(foil strain gage)를 부착하여 변형율을 측정하였다. 시험편의 초기 굽음이나 상하그립 사이의 치우침에 의하여 인장 시 시험편에 굽힘 (또는 퍼짐)이 발생할 수 있고, 이에 따라 앞/뒤면 변형이 달라질 가능성이 있으므로 박막 변형율계를 레이저 입사점 바로 옆에 부착하였다. 또한 시험편의 뒷면, 레이저 입사 점의 바로 뒤에는 수직으로 변위센서를 접촉시켜 면외변위 u_x 를 측정하였다. 박막 변형율계는 게이지길이 5mm 인 KYOWA 사

의 모델 KFG-5-350-C1-11 이다. 변위센서는 MPE 사의 LSC transducer 이다.

시험편을 INSTRON 8800 유압식 재료시험기에 장착하여 변위계로 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 레이저포인터를 부착하여 두 포인트로부터 나온 레이저 광이 만나는 거리에 시편을 위치시켰다. Fig.3 은 레이저 포인터가 장착된 모습을 보여준다.

3.2 ESP 법에 의한 변위/변형을 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 스페클은 물체의 변위에 민감하게 움직이기 때문에 그 이동량이 스페클 이미지 상에서 수~수십 픽셀에 달한다. 따라서 DIC 를 사용하지 않아도 비교적 간단하게 측정할 수 있다. 스페클의 움직임을 해석하여 각 점의 변위를 구하기 위하여 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

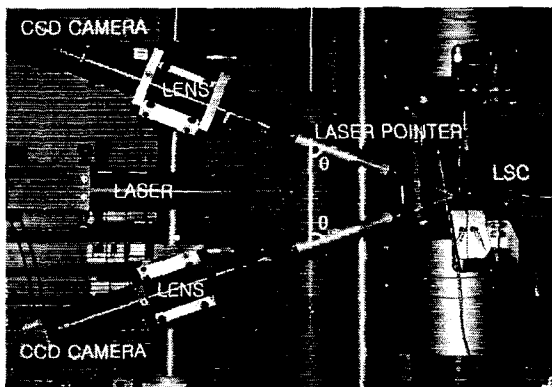


Fig. 3 Alignment of imaging system using laser pointers

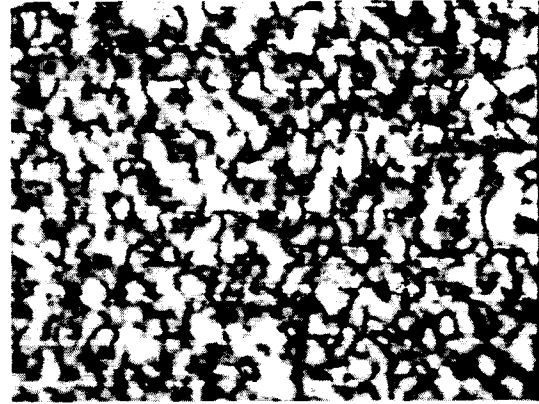
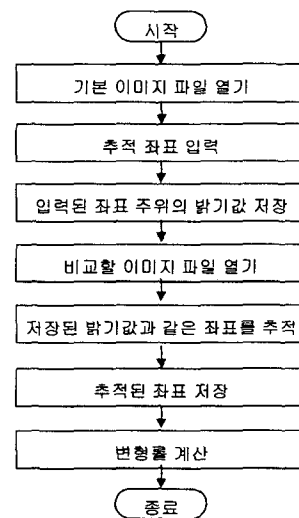


Fig. 4 An example of defocused speckle image

각 점의 이동량을 식(6)에 대입하여 변위/변형율을 구하였다.

3.3 SDSP 법에 의한 변위/변형을 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 면의, 면내



변위를 계산하였다. 이 변위 장으로부터 변형율을 Fig. 5 Flowchart of speckle trace program

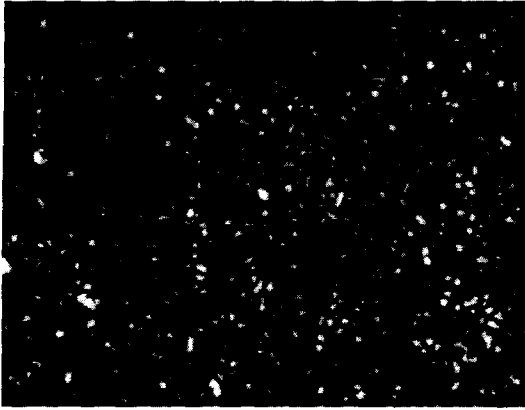


Fig. 6 An example of focused (subjective) speckle image

구하기 위하여 다음과 같은 두 가지 방법이 사용되었다. 즉, Correlated Solution 사의 전용 소프트웨어인 STRAIN-2D 를 사용하거나 상하로 약 1mm 떨어진 두 점의 변위차를 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 박막 변형율계로 측정된 것인데 두 변형율의 차가 매우 크

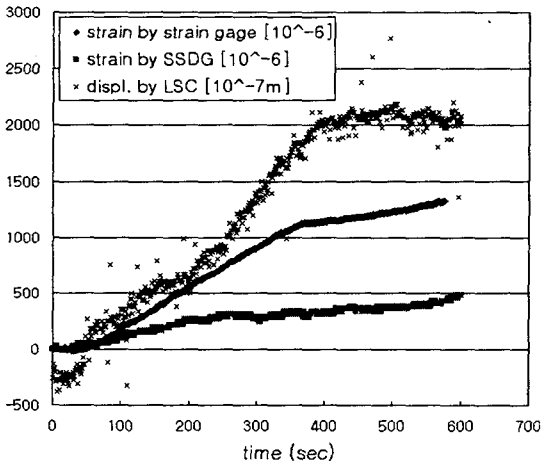
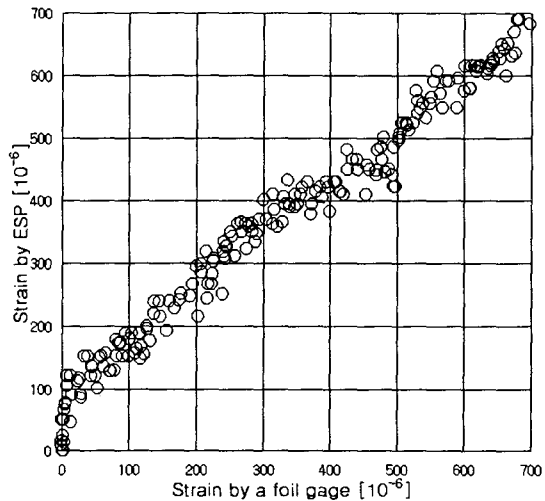


Fig. 7 Variation of ϵ_y of the specimen SP-1 measured by the ESP, in comparison with the one by the foil strain gage. And variation of out-of-plane displacements measured by the LSC transducer

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

다. 또한 면외변위는 LSC 센서로 측정된 것인데 최대 약 200 μm 이다. Fig.8 은 식 (6)에 이 면외변위를 대입하여 구한 변형율을 박막 변위계로 측정된 것과 비교한 것이다. 면외변위를 포함하여 계산하면 두 변형율이 잘 일치한다. 이것은 보통 ESP 나 SSDG 법을 사용할 때 무시해온 면외변위의 영향이 얼마나 큰 것인지를 보여준다.

Fig.9 는 시편 SP-2 의 실험과정에서 측정된 변



위 u_y 의 변화를 나타낸 것이다. 상하 스페클 이미지 상의 한 점의 이동량의 합을 SDSP 법의 식(8)

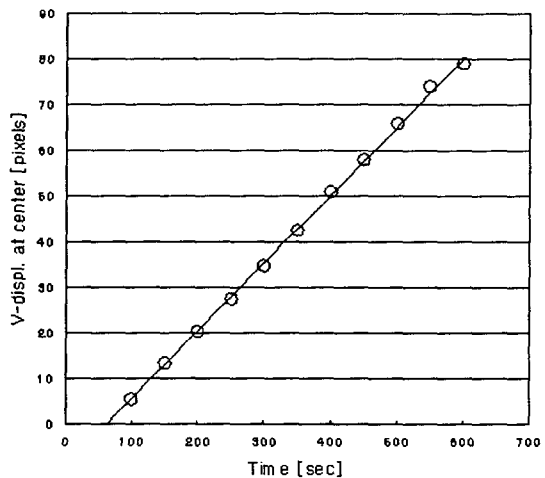


Fig. 9 Variation of the displacement u_y measured by the

SDSP on the specimen SP-2

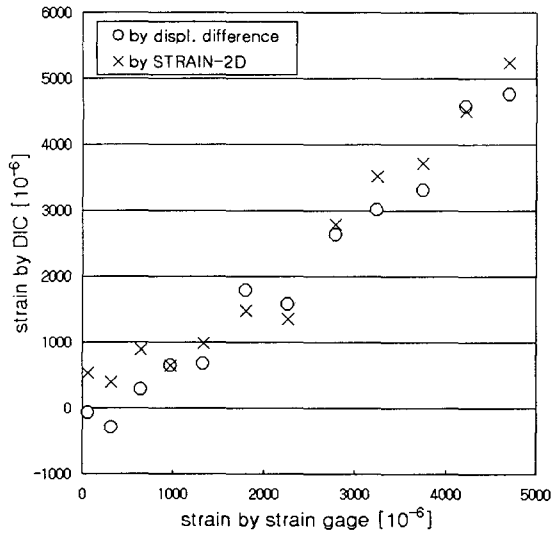


Fig. 10 Strain ϵ_x measured by SDSP in compared with the one measured by the foil strain gage

이동량 측정과정이 번거롭기 때문에 50 초 간격으로 구한 것이기는 하지만 매우 일관적인 경향을 보여준다. Fig.10 은 이 변위측정 결과로부터 구해진 변형율을 박막 변형율계로 측정한 것과 비교하여 나타낸 것이다. 대체로 잘 일치하지만 변위에 비해 큰 흠어짐 (scatter)을 보인다. 단순히 상하 변위차로부터 구한 것이 전용 소프트웨어인 STRAIN-2D 로 구한 것보다 오히려 양호한 결과를 보인다. 이것은 변위 데이터를 식으로 근사화하고 미분하는 과정의 정확도가 미흡하다는 것을 의미한다. Fig.11 은 상하 스페클 이미지 상의 한 점의 이동량의 차를 SDSP 법의 식(7)에 대입하여 측정

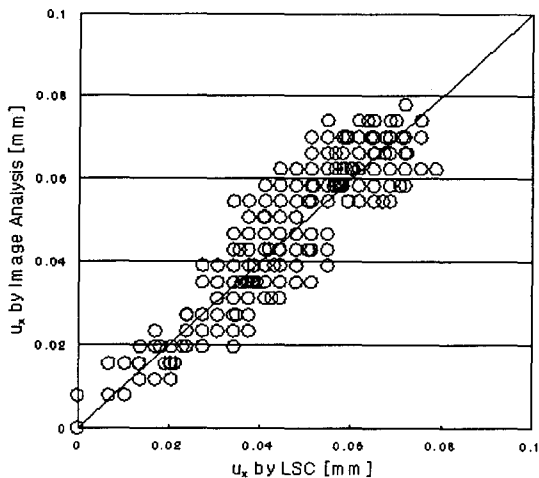


Fig. 11 The out-of-displacement u_x measured by SDSP

in compared with the one measured by the LSC transducer

된 면외변위 u_x 를 LSC 센서로 측정된 것과 비교하여 나타낸 것이다. LSC 센서의 분해능이 낮기 때문이거나 기계적진동의 영향으로 잡음이 심하지만 두 측정결과 사이에 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

SSDG 와 ESP 법에서는 본 연구에서와 같이 두 개의 카메라를 이용할 경우 한 방향으로의 면내 변형율은 한방향 성분만 측정 가능하다. 만일 완전한 2 차원 면내 변형율장을 구하고자 하면 상하/좌우 4 대의 카메라가 필요하다. SSDG 의 경우 오시편과의 거리 L , ESP 의 경우 시편으로부터 초점이 오프셋된 거리 Δ 를 정밀하게 측정해야한다. 또한 면외변위에 매우 민감하여 이에 대한 보정이 필요하다. 반면 SDSP 법은 두 대의 카메라만으로 3 차원 변위 장을 측정할 수 있다. 즉, y 에 수직방향 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.

후 기

본 연구는 1999 년도 과학기술부의 원자력 기초 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Tyrer, J. R., 1986, "Critical Review of Recent Development in Electronic Speckle Pattern Interferometry", *Holographic Nondestructive Testing Proc. SPIE*, Vol.604, pp. 55-111
- (2) Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, John Willey & Sons Press, pp. 146-245
- (3) Jia, Z. and Shah, S. P., 1995, "Crack Detection in Concrete Using Real-Time ESPI Technology", *SPIE*, Vol.2455, pp. 385-391
- (4) Jia, Z. and Shah, S. P., 1994, "Two-dimensional Electronic-Speckle-Pattern Interferometry and Concrete-Fracture Processes", *Experimental Mechanics*, Vol.34, No.3, pp. 262-270
- (5) William, N., Sharpe, Jr., 1982, "Applications of the

- Interferometric Strain/Displacement Gauge”, *Optical Engineering*, Vol.21, No.3, pp. 483-488
- (6) Yamaguchi, I., 1981, “A Laser-Speckle Strain Gauge”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.14, pp. 1270-1273
- (7) Noh, S. and Yamaguchi, I., 1992, “Two-Dimensional Measurement of Strain Distribution by Speckle Correlation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.31, pp. L1299-L1301
- (8) Ogura, K. and Nishikawa, I., 1996, “Laser Speckle Strain/Displacement Gauge and its application to Fracture problems of ceramics and ceramic coating”, *Pro. of APCFS'96, Korea*, pp. 749-754
- (9) Johnson, P., 1998, “Strain field measurements with dual-beam digital speckle photography”,
- (10) Sjö Dahl, M., 1994, “Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting”, *Applied Optics*, Vol.33, No.28, pp. 6667-6673
- (11) Sjö Dahl, M., 1995, “Electronic speckle photography: measurement of in-plane strain fields through the use of defocused laser speckle”, *Applied Optics*, Vol.34, No.25, pp. 5799-5808
- (12) Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F., and McNeil, S.R., 1983, “Determination of displacements using an improved digital correlation methods,” *Image Vision Comp.*, Vol.1, No.3, pp.133-139
- (13) Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, and Peters, W.H., 1985, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics,” *Exp. Mech.*, Vol.25, pp.232-244
- (14) Synneregu, P. & Sjö Dahl, M., 1999, “A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displ. Field measurements”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.31, pp. 425-443
- (15) 이상수, 1987, 레이저스펙클과 홀로그래피, 교학연구소