

## Stereo Vision 과 디지털 화상상관법을 이용한 파괴시험편의 측면 함몰의 현장 측정

이정현\*, 강기주#

### In situ Measurement of Lateral Side-Necking of a Fracture Specimen Using a Stereo Vision and Digital Image Correlation

Jeong-Hyun Lee\*, Ki-Ju Kang#

#### ABSTRACT

An experimental method for measuring side-necking deformation near a crack-tip is described. It is based on Stereoscopic Digital Speckle Photography and Digital Image Correlation, and it is simple and robust to mechanical vibration inherent to a hydraulic material test system. The validity and accuracy are evaluated through a calibration for rigid body translation. A case study has been performed for a CT specimen made of a ductile steel and the three dimensional profiles of the side-necked region are presented as the load increases. Also, the details of the procedure and the surface treatment are discussed.

**Key Words** : Stereoscopic Digital Speckle Photography(SDSP), Side-Necking(측면함몰), Digital Image Correlation(DIC), Plastic Deformation Region(소성변형역)

#### 1. 서론

탄소성 변형을 하는 재료의 파괴 거동은 균열 선단 근처에서 발생하는 소성영역의 크기에 직접적인 영향을 받는다. 즉 소성영역의 크기가 다른 기하학적 크기보다 아주 작으면 소성영역의 존재에 무관하게 파괴 거동은 선형탄성 파괴역학 매개변수인  $K$ 의 함수로 표현할 수 있으나 소성영역의 크기가 어느 정도 커졌지만 그 주위는 여전히 탄성  $K$ -응력장으로 둘러싸인 경우에는  $J$ -적분 또는 CTOD의 함수로 표현된다. 만일 소성영역의 크기가 어느 한계 이상 커져서 주위에 더 이상 탄성  $K$ -응력장이 유지되지 못하는 소위 '대규모 항복'

상태가 되면 파괴 거동은 더 이상 한 개의 매개변수로 표현되지 못한다. 이러한 상태의 파괴 거동을 설명하는 이론으로 소위 2-매개변수법이 있다. 이 사실들은 재료의 파괴에 대한 소성영역의 크기의 중요성을 웅변한다. 재료의 소성변형은 가해진 응력 중 정수압적 응력(hydrostatic stress)을 제외한 편차 응력(deviatoric stress)의 지배를 받는다. 따라서 균열 선단에서 소성영역이 증가한다는 것은 정수압적 응력의 감소, 또는 응력 삼축성(stress triaxiality)의 약화를 말한다.

균열 선단 근처의 시편 측면표면에서 발생하는 함몰(side-necking)현상은 재료의 탄성 변형과 소성 변형에 의해서 발생한다. 이중 탄성변형에

접수일:2003년 12월 27일 ; 게재승인일:2004년 8월 13일

# 교신저자; 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail kjkang@chonnam.ac.kr Tel. (062)530-1668

\* 전남대학교 대학원 기계공학과

의한 것은 응력과 변형의 선형성에 의하여 시편의 형태와 크기가 주어지면 쉽게 예측될 수 있다. 소성변형에 의한 부피변화는 없으므로 시험편내에 면내방향으로 소성변형이 생기면 반드시 면외변위, 즉 두께방향으로 수축이 발생한다. 따라서 탄성변형에 의한 것을 제외하면 합물부피는 소성변형이 일어난 영역의 부피와 비례하는 관계가 존재할 것이다. 시편 측면에서 측정된 합물에 대한 정보로부터 소성영역의 크기와 더불어 균열선단 응력장의 응력삼축성 정도를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 저자는 이와 같은 논리에 입각하여 합물량으로부터 연성재료 파괴 시 균열선단 응력의 응력 삼축성의 감소정도를 나타내는 2 번째 변수  $Q$  를 측정할 수 있음을 보인 바 있다.<sup>1,2</sup>

한편, 소성영역의 크기를 측정하는 효과적인 방법은 아직까지 잘 알려져 있지 않다.  $K$  나  $J$ -적분으로부터 간접적으로 예측하거나 보다 정확한 결과를 위해서는 3 차원 유한요소해석을 수행할 수도 있다. 직접적인 측정방법은 광탄성법이나 ESP 나 모아레 간섭법으로 시편 표면의 면내 변형을 측정하는 방법이 있으나 기술상의 어려움을 제외하더라도 표면에서의 정보만 제공할 뿐 시편 내부의 변형을 측정하기에는 어려움이 있다. 파단된 시험편을 재결정하여 소성영역을 측정할 수도 있으나<sup>3,4</sup> 파괴과정에서 실시간 정보를 얻을 수는 없다.

균열 진전시 동반되는 시편 측면의 합물을 측정할 예는 많지 않다. Kim<sup>5</sup> 은 동적으로 진전하는 균열의 응력확대계수  $K$  를 측정하기 위해서 시편의 측면에 평행광을 입사하고 시편 합물에 의한 반사광(또는 투과광의 경우 투과광)의 빛의 세기를 측정할 바 있다. 즉, 측면합물을 오목거울(또는 투명시편의 경우 오목렌즈)의 역할을 하게 하여 이것에 의한 반사광(또는 투과광)의 세기 변화로부터  $K$  를 측정할 것이다. 이것은 직접적인 합물 측정이 아니고, 본 연구의 관심사인 소성변형에 의한 합물을 측정하는데 이용할 수 없다. 이밖에 Pardoen 등<sup>6</sup> 이 시편의 파면으로부터 합물량을 측정할 바 있을 뿐, 파괴 실험과 병행하여 실시간으로 시편 측면의 합물을 측정할 예는 발견할 수 없었다.

실시간 합물 측정에 사용할 수 있는 방법으로 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)<sup>7</sup>, ESP(Electronic Speckle Photography)<sup>8</sup>, SSDG(Speckle

Strain/Displacement Gauge)<sup>9</sup> 등이 있으나 레이저의 간섭을 이용하므로 진동 등 외란이 민감하여 유압식 시험기를 사용한 파괴실험에 적용하기 곤란하다. Kim 등<sup>10</sup> 의 모아레(geometric Moiré)를 이용하여 면외변위를 측정할 바 있으나 정밀도가 그다지 높지 않고 면내 변위를 동시에 측정할 수 없으며 표면이 거울면이거나 확산(diffused)면이어야 하므로 일반 금속재료의 파괴실험에 적용하는데 어려움이 있다.

Synergren and Sjö Dahl<sup>11</sup> 은 최근 두대의 CCD 카메라를 이용하여 물체의 3 차원 변위를 측정하는 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)를 제안하였다. 이 방법에서는 각각의 카메라로 촬영된 변형 전/후 두 화상내의 매 화소(pixel)별 변위를 측정하고, 다시 카메라 위치에 따른 변위의 차이로부터 물체의 3 차원 변형 정보를 얻는다. 이때 화소(pixel)별 변위를 정밀하게 측정하기 위한 방법으로 디지털 화상 관련법(Digital Image Correlation Method; DIC 법)을 사용하였다.

Lee 등<sup>12</sup> 은 레이저 스펙클 패턴을 대상으로 SDSP 법을 적용하여 유압식 재료시험기에서 인장시험을 하는 금속판의 3 차원 변형을 정밀하게 측정할 수 있음을 입증한 바 있다. 이것은 SDSP 법이 두 빛의 간섭(interference)을 이용하지 않아 진동에 둔감하기 때문에 가능한 것이다. 본 연구에서는 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 취득이 유리한 백색광을 광원으로 하여 CT 시편의 파괴실험 시 발생하는 측면 합물 변형

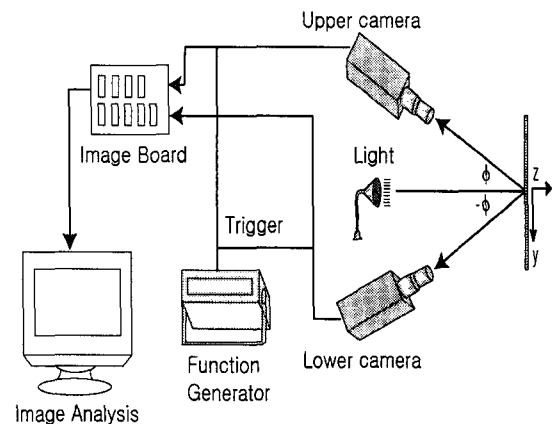


Fig.1 Schematic diagram of the measurement system for SDSP

을 측정하고자 하였다. 장치가 간단하고 비접촉이며 3 차원, 즉 면내(in-plane)와 면외(out-of-plane) 변위를 동시에 측정할수 있어 파괴 시 동반되는 소성변형과 그에 따른 함몰현상 연구에 유용할 것으로 기대된다.

## 2. 이론

### 2.1 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)법

Fig.1 과 같이 시편표면 수직에서  $\phi$  만큼 기울여 기계 카메라가 설치되어 있는 경우, 카메라에 포착되는 화상내의 한 점의  $y$  방향 변위  $A_y$  는 시편상의 해당점의  $y$  방향변위  $u_y$  와 함께 면외변위  $u_z$  와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$A_y(\phi) = -\frac{u_y \cos \phi}{M} + \frac{u_z \sin \phi}{M}$$

따라서  $A_y(-\phi)$  와의 차이와 합은 다음 식과 같다.

$$A_y(\phi) - A_y(-\phi) = -\frac{2u_z \sin \phi}{M} \quad (1)$$

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

여기서  $M$  은 광학적 축소율 또는 배율로서 카메라와 물체표면 사이의 거리 및 광학계에 의하여 결정된다. 두 변위  $u_z$  와  $u_y$  는 물체의 강체이동에 의한 것과 자체변형에 의한 것 모두를 포함한다. SSDG 와 ESP 법에서는 이 변위에 의한 스펙클 이동량이 측정하기에 너무 미세하다고 간주되어 대신 광학적인 방법으로 변형을 자체를 증폭하였다. 반면에 SDSP 법에서는 미세한 변위  $u_x$  와  $u_y$  를 DIC (Digital Image Correlation)법으로 직접 측정한다. 서론에서 언급한 바와 같이 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 사용이 간단한 백색광을 광원으로 변형 측정이 가능하다. 상하 카메라에서 얻어진 스펙클 이미지로부터 DIC 법을 이용해 변위를 구하고 식(1)에 의하여 면외 (out-of-plane) 변위를, 식(2)에 의하여 면내 (in-plane) 변위를 동시에 독립적으로 측정하는 것이 가능하다. 자세한 설명은 Lee 등<sup>12</sup>에 기술되어 있다.

### 2.2 DIC(Digital Image Correlation)법

DIC(Digital Image Correlation)법<sup>13,14</sup> 은 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 회색값(gray value) 패턴을 사용한다. 모든 픽셀이 최소오차를 갖고 상관(correlate) 되는 상대편 화상내의 해당 픽셀을 찾아낸다. 필요한 장비로서 한대의 카메라와 백색광 등의 광원만 있으면 되고 픽셀크기의 최고 1/100 의 분해능을 가진다. 따라서 SSDG 와 ESP 에 연계하여 보다 정밀하게 각 스펙클의 변위를 추적하는 용도로도 사용되고 있다.

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

시편은 원자력 발전소 주증기 배관재로 사용되는 저 합금 페라이트 강인 SA106 Gr.C 으로 제작된 CT 시험편을 사용하였다. 250KN 용량의 유압식 인장시험기(INSTRON 8800), 균열 진전을 확인하기 위한 전원 공급 장치(DC Power Supply, HP6573A), 신호 증폭과 노이즈 제거를 위한 스트레인 앰프(Vishay 2311) 2 대, COD 게이지(INSTRON A5710C-1001), 시편 표면의 스펙클을 측정하기 위한 디지털 CCD 카메라 (Kodak Megaplus ES1.0,

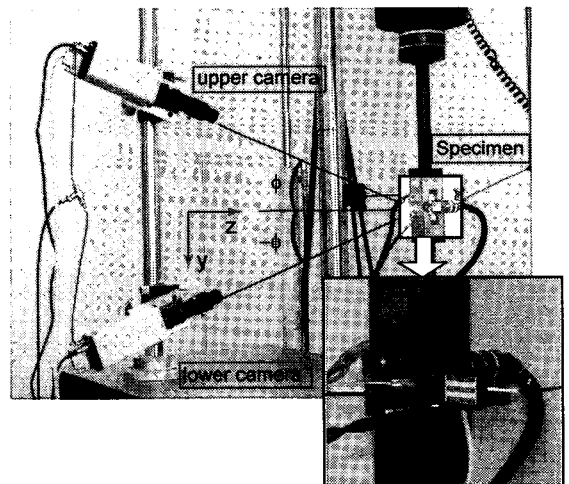


Fig.2 Experimental Set-up

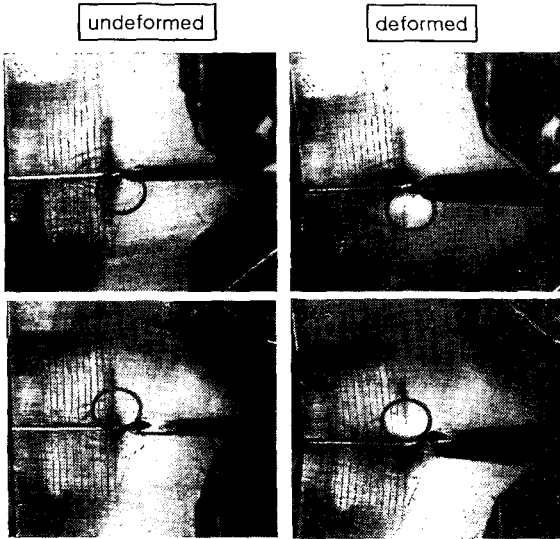


Fig.3 Undeformed and deformed images

1008× 1018pixels) 2 대와 Zoom Lens(Navitara 1-60135), 균열 개시점을 찾기 위한 별도의 아날로그 CCD 카메라(Vision-Q), Data 저장을 위한 DT322 보드, 화상 캡처 및 저장을 위한 DT3157 보드, 신호취득과 화상 처리를 위한 두 대의 PC 로 구성되어 있다.

### 3.2 실험장치

#### 3.2.1 시편의 표면 처리

금속 시험편의 표면은 연마를 하지 않더라도 광택이 난다. 이것은 표면이 거울과 같이 특정 방향으로 반사를 선호하는 특성이 있다는 것으로 시험편이 국부적인 면의변형을 하는 경우 조명이 고정되어 있다고 할지라도 반사 화면상의 광택면이 움직이게 된다. 이러한 현상은 각 화소의 회색값을 기준으로 변위를 결정하는 DIC 법에 심각한 오류를 유발하게 된다. 이를 방지하기 위해서 랜덤한 스페클 패턴이 존재하는 무반사 표면이 바람직하다. 본 연구에서는 시편 표면을 사포(#400)로 연마한 후 흑색 무광택 래커로 얇게 도포하였다. 시편에 표면처리를 하지 않았을 때 변형에 따른 반사의 영향을 조사하기 위해 한 개의 시험편에는 래커를 도포하지 않은 채 파괴실험하여 반사의 영향을 살펴보았다.

#### 3.2.2 실험 방법의 교정

본 측정법을 교정(calibration)하고 정확성을 검증하기 위하여 강체 이동하는 시험편을 대상으로 변위를 측정하였다. Fig.1 과 같이 설치된 두 대의 카메라 앞에 정밀한 변위제어가 가능한 이동 스테이지(SURUGA SEIKI D121MS, 0.05 $\mu$ m/step)를 설치하고 그 위에 시험편을 고정한 후 수평으로 0.1mm 씩 총  $U_z=1$ mm 를 이동하면서 촬영, 디지털 화상을 취득하였다. 각 카메라별로 이동거리에 따른 화상 내 화소의 변위  $A_y$  를 DIC 소프트웨어 (Correlated-Solution, Inc., VIC-2D)로 구한 후 식(1) 과 (2)에 대입하여 각각 면의변위  $u_z$  와 면내변위  $u_y$  를 계산하였다.

#### 3.2.3 파괴 실험에의 적용

Fig.2 는 통상적인 파괴실험과 SDSP 에 의한 합물변형 측정을 병행하기 위한 실험장치이다. 파괴 실험은 ASTM 표준 E1737-96 에 의거하여 수행되었다. 균열길이는 직류전위차법(DCPD), 균열개시점은 후방에 근접하여 설치된 별도의 아날로그 카

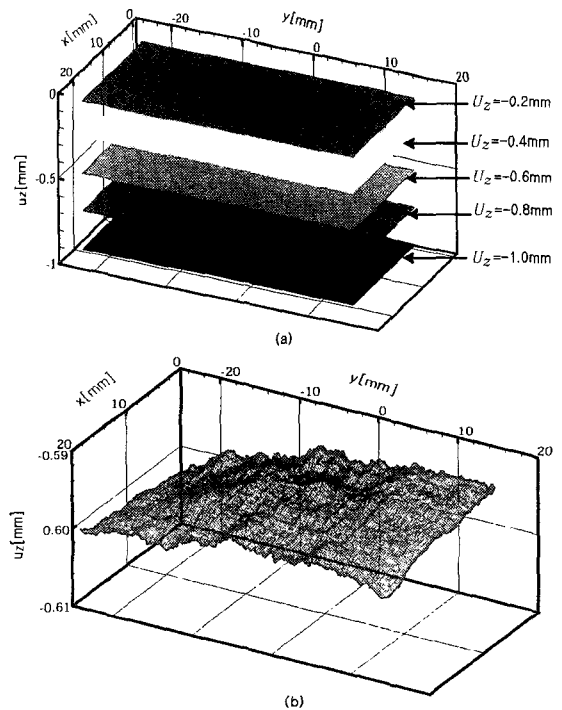


Fig.4 (a) Measured out-of-plane displacement field at various positions, (b) Magnified displacement field

at  $U_z = -0.6\text{mm}$

메라로 측정되었다. 실험은 초당 0.01mm 의 변위 제어로 총 8mm 인장하였다. 자세한 파괴실험 절차는 Kim 등<sup>15, 16</sup>에 기술되어 있다. 함몰변형 측정을 위하여  $\phi = \pm 20^\circ$ 의 경사각을 갖는 두 대의 카메라와 화상캡처보드(DT3157)를 이용하여 초당 1 프레임씩 PC에 저장하였다.

#### 4. 결과 및 분석

Fig.3은 실험 전/후 시편 표면을 촬영한 이미지의 예를 보여주고 있다. 그림내에 동그라미로 표시된 구역의 밝기가 변형 후 현저히 변하고 있음을 볼 수 있다. DIC법에서는 각점 주변의 회색 값으로부터 그 위치를 판별하기 때문에 이와 같은 현상은 오류를 유발한다. 따라서 교정 및 파괴 실험에서는 흑색 래커로 표면처리된 시험편을 사용하였다.

Fig.4(a)는 본 측정법의 교정 실험결과로서 위에서부터 순서대로 스테이지의 위치를  $\Delta U_z = -0.2\text{mm}$ 씩 이동했을 때 얻어진 해석영역의 변위장을 보여주고 있다. Fig.4(b)는  $\Delta U_z = -0.6\text{mm}$ 인 경우 변위장을 확대하여 보여주고 있다. 시편의 면외변위의 흠어짐이 최대  $6\mu\text{m}$ 로서 본 측정법이 함몰 변형 측정에 사용되기에 충분한 정밀도를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig.5는 측정된 면외 및 면내변위  $u_z, u_y$ 를 이동 스테이지의 이송거리  $U_z$ 와 비교하여 나타낸 것이다. 이론상으로 면내변위가 0이 되어야 하나 최대  $u_y = 0.02\text{mm}$  정도의 변위가 있는 것으로 측정되었다. 이것은 이동 스테이지와 카메라 사이의 상대적인 위치나 경사각이 부정확하기 때문에 발생한 것이다. 한편 면외변위  $u_z$ 를 이송거리  $U_z$ 와 최대  $10\mu\text{m}$  정도의 오차를 가지고 잘 일치하였다.

Fig.6은 CT 시험편 파괴 실험에서 얻어진 하중-COD 곡선이다. 그림에서 P<sub>3</sub>로 표시된 지점에서 균열 진전이 개시되었다.

Fig.7은 Fig.6에 표시된 각 하중에서 상하 두 카메라에 의해서 촬영된 화상을 보여주고 있으며, 카메라 측정픽셀의 크기는 1 픽셀당 0.04265873mm이다. Fig.3에 나타내었던 사포질만한 시편에 비하여 흑색래커가 도포된 표면은 국부적인 반사가 현저히 감소하고 뚜렷하고 미세한 스펙클이 분포하

는 것을 볼 수 있다.

Fig.8은 VIC-2D를 이용하여 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>~P<sub>6</sub> 일때의 균열전방의 화상(image)을 하중 P<sub>0</sub> 일때의 것과 비교하여 구해진 각 화소의 변위  $A_y$ 의 분포를 나타낸 것이다. Fig.7의 양호한 스펙클 패턴 덕분에 국부적인 노이즈 없이 하중의 증가에 따라 일관되게 변화하는 양상을 보이고 있다.

Fig.9는 상하카메라로 촬영된 각각의 화상으로부터 측정된  $A_y(\phi), A_y(-\phi)$  데이터를 식(1)에

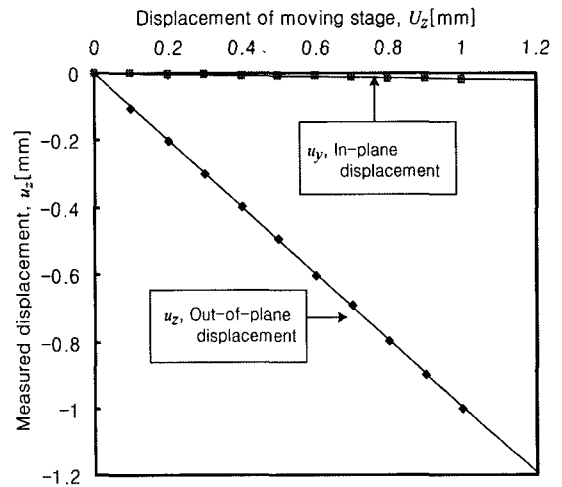


Fig.5 In-plane and out-of-plane displacement

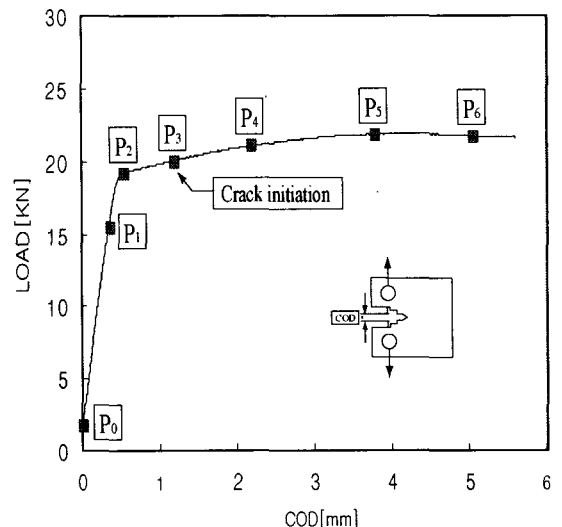


Fig.6 The Load-COD curve

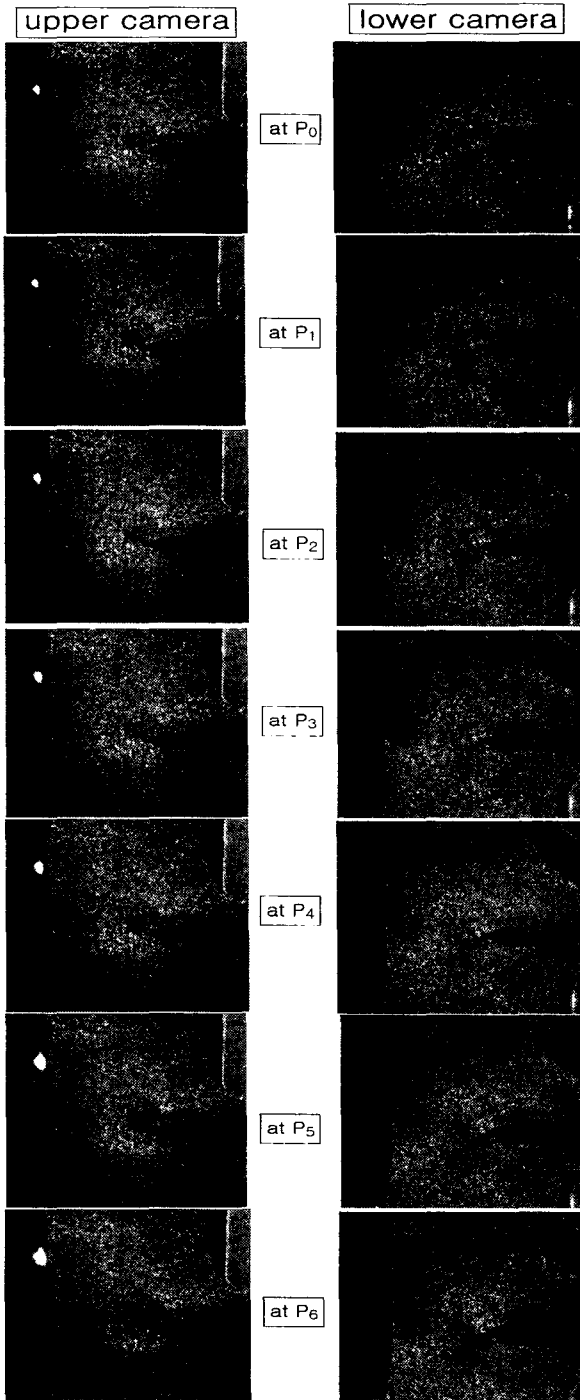


Fig.7 Series of images taken on the side of specimen by the upper and lower cameras as the load increases during fracture test

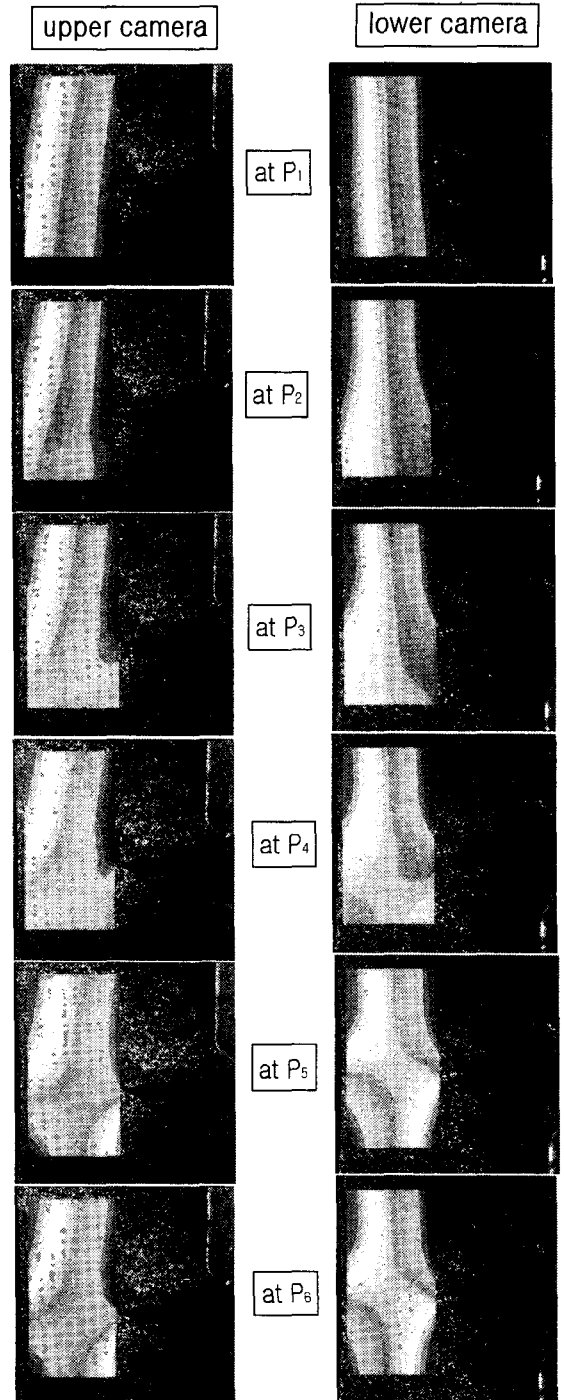


Fig.8 Maps of displacement  $A_y$  at various load levels obtained by VIC-2D

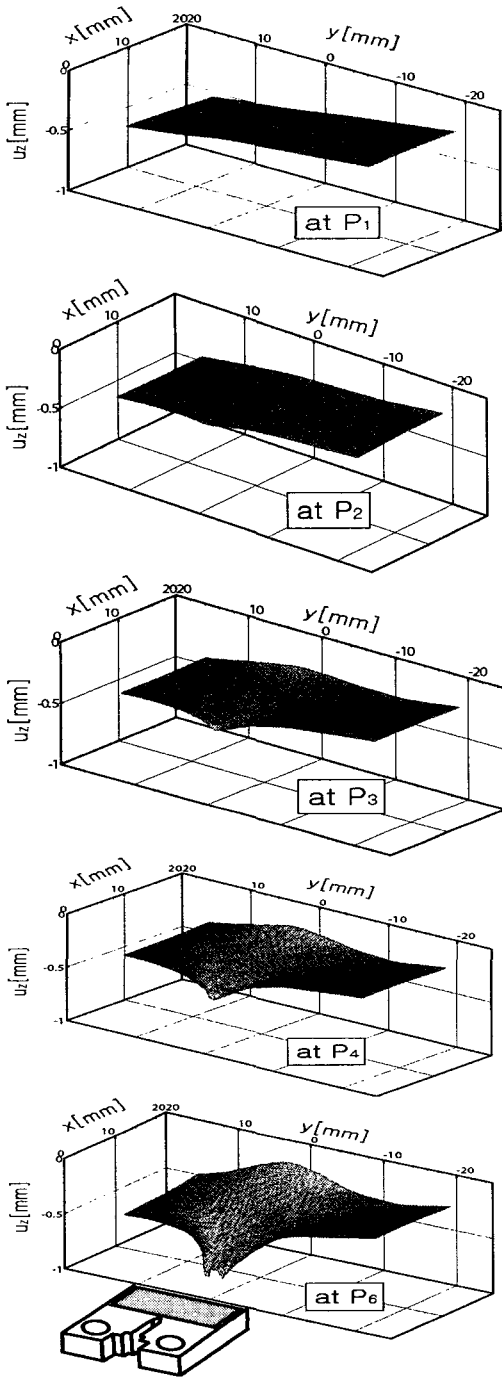


Fig.9 Maps of out-of-plane displacement  $u_z$  on a lateral surface of the specimen measured by Stereoscopic Digital Speckle Photography

Table I Maximum depth of side-necking and maximum upheaval at various load levels

Load(kN)	Max.depth of side-necking, $u_z$ (mm)	Max.upheaval, $u_z$ (mm)
P <sub>1</sub> (11.14)	-0.05	0.04
P <sub>2</sub> (19.82)	-0.26	0.15
P <sub>3</sub> (20.86)	-0.78	0.56
P <sub>4</sub> (21.54)	-1.30	1.10
P <sub>5</sub> (21.84)	-1.85	1.65
P <sub>6</sub> (21.81)	-2.93	2.65

대입하여 계산된 면외변위  $u_z$  를 그래픽 소프트웨어 Tecplot 7 을 이용하여 나타낸 것이다. 하중이 증가함에 따라 균열선단에서 깊은 함몰이 발생하는 것을 보여주고 있다. 또한 하중이 큰 경우에는 시험편의 뒷면에서도 소성변형이 발생하여 표면이 융기되는 것을 볼 수 있다. Table.1 에는 각 하중에 따른 최대 함몰량과 최대 융기량을 보여주고 있다 강체운동에 의해 하중이 P2 인 지점에서는 시험 표면이 전체적으로 위로 상승한 것을 알 수 있으며 최대 함몰량은 -2.93mm, 최대 융기량은 2.65mm 임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

SDSP 법과 디지털 화상관련법을 이용하여 CT 시험편의 측면함몰 변형을 측정하는 방법을 기술 하였다. 표면처리 교정 및 실제 파괴시험편에 대한 적용실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- i) 사포로 연마된 표면은 변형에 따른 부분적 반사의 변동에 의하여 본 측정법에 심각한 오류를 유발할 수 있다. 반면에 흑색무광래커를 도포하면 위와 같은 문제점을 완벽하게 제거할 수 있다.
- ii) 40mm× 20mm 영역의 화상을 취하여 면외변위를 측정할 때 오차는 최고 6 $\mu$ m 정도이다.
- iii) 본 연구에서 제안된 방법은 통상의 파괴실험과 병행하여 균열선단 근처의 측면함몰을 측정하는데 효과적으로 이용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2003 년 과학기술부의 원자력 기초 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. Kim, D. H., Lee, J. H. and Kang K. J., "An Experimental Method for Measuring Q," Tran. of KSME, Vol. 27, 9, 1607-1613, 2003.
2. Kim, D. H., Lee, J. H. and Kang K. J., "An Experimental Method to Measure Q-parameter for Two Parameter Theory of Ductile Fracture," Proceedings of IMECH'03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, D.C., November 16-21, 2003.
3. Shoji, T., "Evaluation of Intense Strain Region at Crack Tip in Fracture Toughness Testing," Non Destructive Evaluation, Vol.28, 1978. (in Japanese)
4. Shoji, T., "Deformation of Crack Tip Energy Dissipation and Elastic-Plastic Toughness Parameter with Ductile Crack Extension," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 6, pp. 324-334, 1981.
5. Kim, K. S., "A Stress Intensity Factor Tracer," Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, pp. 291-297, 1985.
6. Pardoen, T., Marchal, Y. and Delannay, F., "Thickness Dependence of Cracking Resistance in Thin Aluminum Plates", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 47, pp. 2093-2123, 1999.
7. Kim, D. H., "Speckle Interferometric Detection of Defects on the Backside of Steel Plate," Proceedings KSPE Spring Annual Meeting, pp. 195-198, 2001.
8. Yamaguchi, I., "A Laser-Speckle Strain Gauge," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol.14, pp. 1270-1273, 1981.
9. Johnson, P., "Strain field measurements with dual-beam digital speckle photography," Optics and Lasers in Engineering, Vol.30, pp.315-326, 1998.
10. Kim, J. H., Moon, H. J and Earmme, Y. Y., "A Study on Measurement of Mechanical Properties of Thin Membrane Using Moiré Method," Proceedings KSME Spring Annual Meeting A, pp. 19-24, 1996.
11. Synnergren, P. and Sjö Dahl, M., "A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displ. Field measurements," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, pp. 425-443, 1999.
12. Lee, J. H., Jeon, M. C. and Kang, K. J., "Evaluation of Displacement Measurement Technique Using Laser Speckle and Digital Image Correlation Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol. 20, No. 6, pp. 47-54, 2003.
13. Sutton, M. A., Cheng, M., Peters, W.H, Chaou, Y. J., and McNeill, S. R., "Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis," Image and Vision Computing 4, pp. 143-151, 1986.
14. Schreier, H.W., Braasch, J. R. and Sutton, M. A., "Systematic errors in digital image correlation caused by gray-value interpolation," Opt. Eng. 39, pp.2915-2921, 2000.
15. Kim, H. J., Kim, D. H., Yang, K. J. and Kang, K. J., "Variation of  $A_2$  with Crack Propagation in a Ductile Metal; Experimental Evaluation," Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineering. Vol. 27, pp. 119-125, 2000.
16. Kim, S. Y., Kang, K. J. and Jeung, D. Y., "Estimation of Crack Initiation with DCPD Method on Dynamic Fracture Testing of Ductile Materials," Proceedings KSME Spring Annual Meeting A, pp. 147-152, 1999.