SENB 시험편의 측면함몰과 소성영역관계

이정현* • 김도형† • 김동학* • 강기주**

Relationship between Side-Necked Volume in a SENB specimen and Plastic Deformation Volume

Jeong-Hyun Lee, Do-Hyung Kim, Dong-Hak Kim, Ki-Ju Kang

Key Words : Digital Image Correlation(DIC), Plastic Deformation Region(소성변형역), Section Necking(함몰), Stereoscopic Digital Speckle Photography(SDSP)

Abstract

Lee and Kang measured side-necking deformation near a crack-tip for CT specimen using Stereoscopic Digital Speckle Photography and Digital Image Correlation. In this work the same technique was applied to SENB specimen. We happened to find that the deformation shape of the side-necking is similar to the one of plastic region estimated by McClictock using slip line theory. Based on volume constancy of plastic deformation as well as this finding, it is expected that a linear relationship holds between the volume of plastic deformation region and the one of side-necking upon the lateral surface of a specimen. To prove the idea, a preliminary study has been performed using 3-D finite element method on a model with modified boundary layer formulation. As the result, it is shown that the idea works well with acceptable error.

1. 서 론

균열 선단 근처의 시편 측면표면에서 발생하는 함몰(side-necking)현상은 재료의 탄성 변형과 소성 변형에 의해서 발생한다. 이중 탄성변형에 의한 것은 응력과 변형의 선형성에 의하여 시편의 형태와 크기가 주어지면 쉽게 예측될 수 있다. 소성변형에 의한 부피변화는 없으므로 시험편내에 면내 방향으로 소성변형이 생기면 반드시 변위, 즉 두께방향으로 수축이 발생한다. 따라서 탄성변형에 의한 것을 제외하면 함몰부피는 소성변형이 일어난 영역의 부피와 비례하는 관계가 존재할 것이다. 시편 측면에서 측정된 함몰에 대한 정보로부터 소성영역의 크기와 더불어 균열선단 응력장의 응력 삼축성 정도를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 저자는 이와 같은 논리에 입각하여 함몰량으로부터 연성재료 파괴 시 균열선단 응력의 응력 삼축성의 감소정도를 나타내는 2 번째 변수 Q 를 측정할 수 있음을 보인바 있다.(1)

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 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)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 측정한 바도 있으나(2,3) 파괴과정에서 실시간 정보를 얻을 수는 없다. 본 연구의 관심사인 소성변형에 의한 함몰을 측정하기 위해 Lee and Kang(4)은 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 취득이 유리한 백색광을 광

† 전남대학교 대학원 기계공학과
E-mail : dhkim-71@hanmail.net
TEL : (062)530-0304 FAX : (062)530-1689
* 전남대학교 대학원 기계공학과
** 전남대학교 공과대학 기계시스템공학부

원으로 한 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)으로 CT 시편의 파괴실험을 하여 측면 함몰 변형을 측정한 바 있다. 본 연구는 Lee and Kang[4]의 연구의 연장선에서 SENB 시편에 대한 측면 함몰 변형 측정 및 소성영역과 함몰부피의 관계를 조사하였다.

2. 이 론

2.1 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)법

Fig.1 과 같이 시편표면 수직에서 ϕ 만큼 기울어지게 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.

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

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

여기서 두 변위 u_z 와 u_y 는 물체의 강체이동에 의한 것과 자체변형에 의한 것 모두를 포함한다. SSDG(Speckle Strain/Displacement Gague)와 ESP(Electronic Speckle Photography)법에서는 이 변위에 의한 스페클 이동량이 측정하기에 너무 미세하다고 간주되어 대신 광학적인 방법으로 변형율 ε_y 의 영향을 증폭하였다. 반면에 SSDG 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 스페클 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.

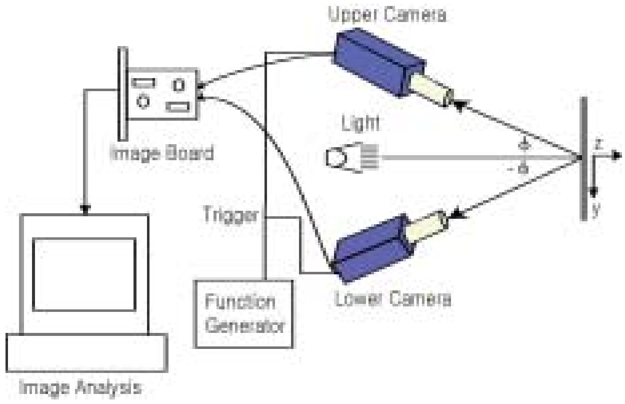


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system for SDSP

2.2 DIC(Digital Image Correlation)법

DIC(Digital Image Correlation)법[5,6] 은 두 화상에 존재하는 불규칙한 무늬를 디지털 신호 (pixel)의 조합으로 기록하고 변형 전 화상내의 각 픽셀이 변형 후 화상 내의 어느 점에 매핑되는 가를 알아내기 위하여 각 픽셀 주위의 일정 영역 (subset) 안의 회색값(gray value) 패턴을 사용한다. 모든 픽셀이 최소 오차를 갖고 연관 (correlate)되는 상대편 화상내의 해당 픽셀을 찾아낸다. 필요한 장비로서 한 대의 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 용도로도 사용되고 있다.

3. 실 험

3.1 실험장치

시편은 원자력 발전소 주증기 배관재로 사용되는 저 합금 페라이트 강인 SA106 Gr.C 으로 제작된 SENB 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 스페클을 측정하기 위한 디지탈 CCD 카메라(Kodak Megaplus ES1.0) 2 대와 Zoom Lens(Navitar 1-60135), 균열 개시점을 찾기 위한 별도의 아날로그 CCD 카메라(Vision-Q), Data 저장을 위한 DT322 보드, 화상 캡쳐 및 저장을 위한 DT3157 보드, 신호취득과 화상 처리를 위한 두 대의 PC 로 구성되어 있다.

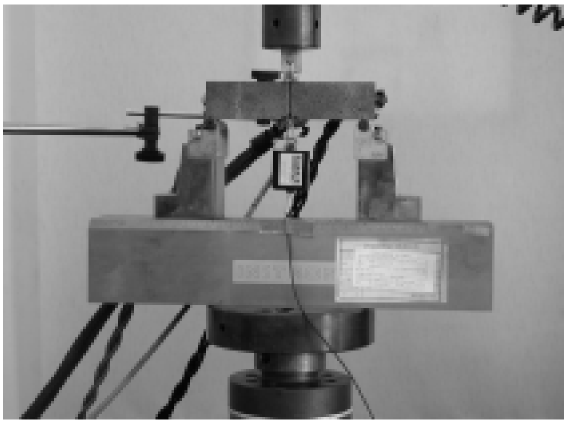


Fig. 2 Experimental Set-up

3.2 실험 절차

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 면외변형을 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 스패클 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 않은채 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, 0.05μm/step) 를 설치하고 그위에 시험편을 고정한 후 수평으로 0.1mm 씩 총 U_z=1mm 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 면외변위 u_z 와 면내변위 u_y 를 계산하였다.

3.2.3 파괴 실험에의 적용

Fig.2 는 통상적인 파괴실험과 SDSP 에 의한 함몰변형 측정을 병행하기 위한 실험장치이다. 파괴실험은 ASTM 표준 E1737-96 에 의거하여 수행되었다. 균열길이는 직류전위차법(DCPD), 균열개시점은 후방에 근접하여 설치된 별도의 아날로그 카메라로 측정되었다. 측정을 위하여 $\phi = \pm 20^\circ$ 의 경사각을 갖는 두 대의 카메라와 화상캡쳐보드(DT3157)를 이용하여 초당 1 프레임씩 PC 에 저장하였다. 실험 후 시편의 파단면 관찰을 위해 고온로 내에서 300°C 에서 약 2 시간 정도 열처리를 한 후 완전 파단 하였다. 비디오 촬영한 화면을 통해 균열 개시점을 확인한 후, 취득한 Data 를 이용하여 J_{IC}, *J-R* CURVE 를 취득하였다.

4. 결과 및 토의

Fig.3 은 굽힘하중아래에서 모서리균열이 있는(SENB) 시편의 좌우에서 카메라로 촬영된 각각의 화상으로부터 측정된 $A_y(\phi)$, $A_y(-\phi)$ 데이터를 식 (1)에 대입하여 계산된 면외변위 u_z 를 그래픽 소프트웨어 Tecplot 7 을 이용하여 나타낸 것이다. 지난번 연구에서 CT 시편의 균열선단에서 함몰이 발생하는 것을 보여주듯이 하중이 증가함에 따라 균열선단에서 깊은 함몰이 발생하는 것을 보여주고 있다. Fig.4(a)는 Fig.3 의 결과를 하나의 그림으로 묶어놓은 것이고 Fig.4(b)는 함몰량을 등고선으로 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 소성에 의해 균열선단 부분은 함몰이 일어나고 반대로 균열선단 밖의 부분은 융기가 되는데 이 결과를 보면 McClintock[7]이 슬립라인 이론을 이용하여 평면변형률과 완전소성 조건 아래에서 굽힘하중아래에서 모서리균열이 있는 형상(SENB)에 대해 응력을 산정한 결과 Fig.5 와 유사한 형상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 측면 함몰부피와 소성영역의 크기의 관계를 알 수만 있다면 측면함몰량의 측정으로 대략적인 소성영역의 크기와 형상을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

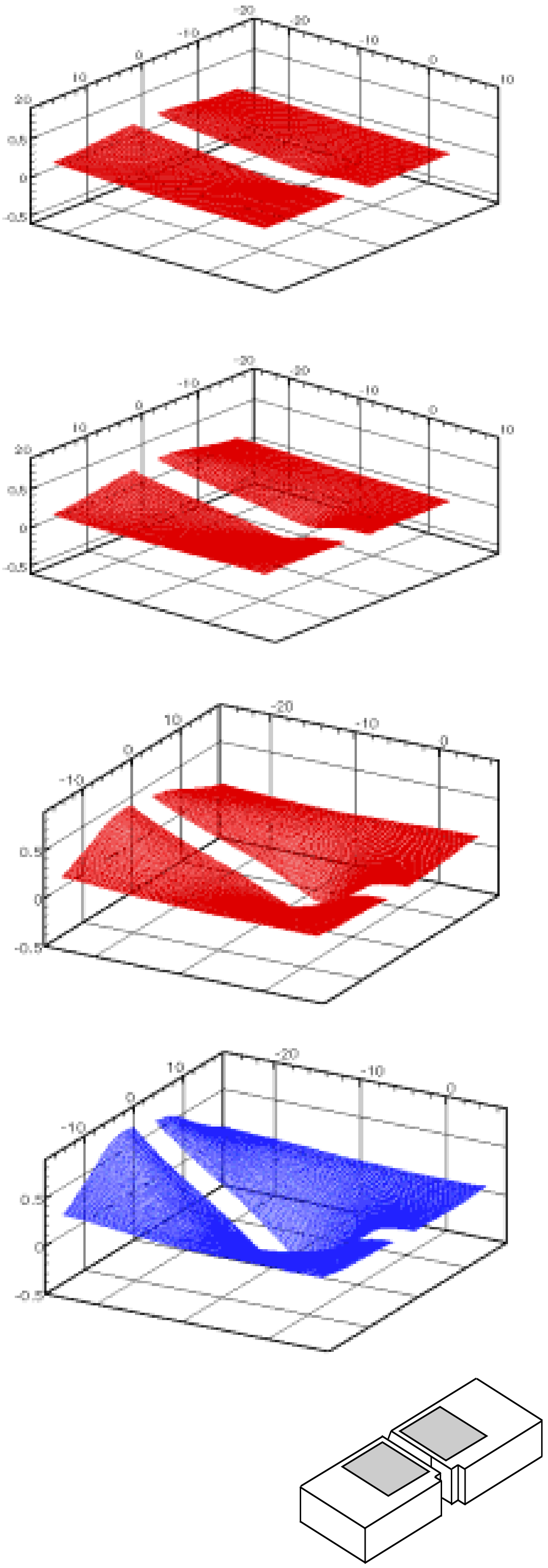
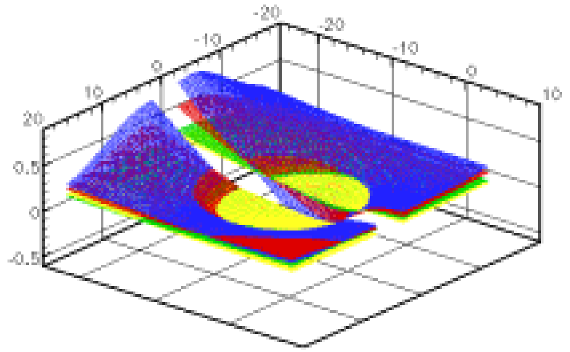
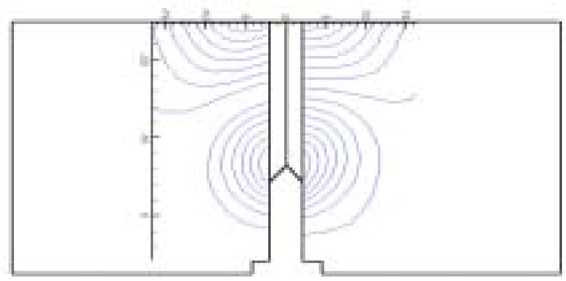


Fig. 3 Maps of out-of-plane displacement u_z on a lateral surface of the specimen measured by Stereoscopic Digital Speckle Photography



(a)



(b)

Fig. 4 Maps(a) and Contour(b) of out-of-plane displacement u_z on a lateral surface of the specimen

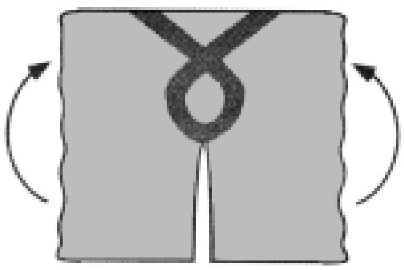


Fig. 5 McClintock's estimation of plastic deformation in a SENB specimen[7]

5. 함몰부피와 소성영역부피와의 관계

소성영역과 측면에서의 함몰부피와의 관계를 알아보기 위해 식(3)과 같은 재료에 식(4)와 같은 외부경계조건을 주고 3 차원 수정된경계층문제(modified boundary layer formulation)에 대해서 탄소성 유한요소해석을 하였다. 모델 형상은 Fig.6과 같고 요소수는 5280 개이며 노드수는 24517 개이며 해석은 ABAQUS6.3 을 사용하였다.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad \alpha = 1,\, n = 10 \tag{3}$$

$$u_X = \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{2\mu} K_I \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \tag{4}$$

$$u_Y = \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{2\mu} K_I \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

Fig.7 은 등가소성변형량(ε_{eq}^{p})이 0.2%일때 소성변형이 된다고 보고 구해진 소성영역을 각 층에 대해서 두께방향으로 나타낸 것이다. 소성영역의 부피(V_P)계산은 각층의 위 아래 소성영역 단면적의 평균과 높이를 곱해 구한 후 전체 두께에 대해 합계를 냈다. Fig.8 은 소성영역의부피(V_P)와 측면에서 소성에 의한 함몰부피(전체함몰부피-탄성에 의한 함몰부피, V_S)의 관계를 나타내고 있다. Fig.8 를 보면 소성영역의 부피와 측면에서의 함몰부피의 관계가 비례관계를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 볼 때 측면에서의 함몰량을 측정할 수 있다면 소성영역의 크기 및 형상을 예측할 수 있을 것으로 보인다. 앞으로 실제 심험편(CT, SENB)의 형상에 대해 좀더 많은 연구를 통해 구체적으로 소성영역의 크기 및 형상과 측면에서의 함몰량의 관계를 조사하고자 한다.

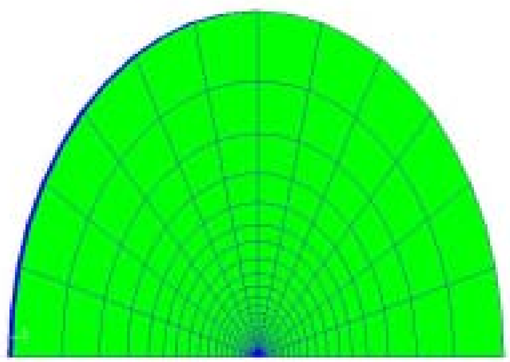


Fig. 6 Model of modified boundary layer formulation

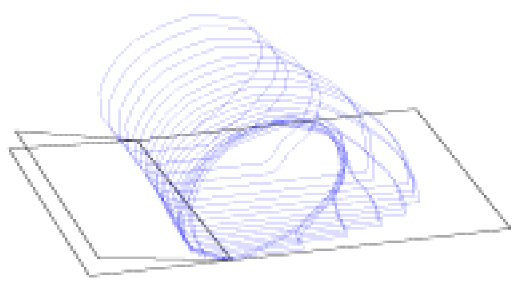


Fig. 7 Plastic deformation region estimated for the MBL model

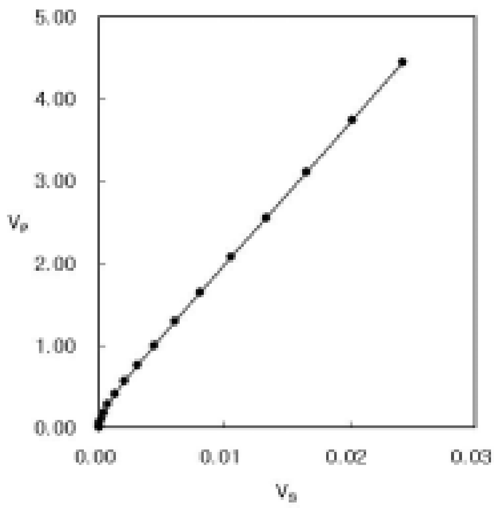


Fig. 8 The volume of plastic deformation region vs volume of side-necking deformation by plastic

6. 결론

6.1 SDSP 법과 디지털 화상관련법을 이용하여 SENB 시험편의 측면함몰 변형을 효과적으로 측정하였다.

6.2 측면함몰부분의 소성에 의한 변형 형상이 McClintock(8)의 결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

6.3 MBL 모델의 해석을 통해 소성에 의한 측면함몰부피와 소성영역부피가 선형적인 관계를 보이고 있음을 확인하였다. 즉, 측면함몰부피로 소성영역의 크기 및 형상을 예측할 수 있을것으로 보인다.

후 기

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

참고문헌

(1) Kim, D. H., Lee, J. H., and Kang K. J., 2003, “An Experimental Method for Measuring Q”, *Tran. of KSME*, Vol. 29, No. 9, pp.1607~1613.

(2) Shoji, T., et al., 1978, “Evaluation of Intense Strain Region at Crack Tip in Fracture Toughness Testing”, *Non Destructive Evaluation*, Vol.28.

(3) Shoji, T., 1981, “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.

(4) Lee, J. H. and Kang, K. J, 2003, "*In situ* Measurement of Lateral Side-Necking of a Fracture Specimen Using a Stereo Vision and Digital Image Correlation " *Proceedings of Material and fracture Division of KSME Fall Annual Meeting*, pp.144~150.
(5) Sutton, M. A., Cheng, M., Peters, W.H, Chaou, Y. J., and McNeill, S. R., 1986, "Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis" *Image and Vision Computing*, Vol. 4, pp.143~151.
(6) Schreier, H.W., Braasch, J. R., and Sutton, M. A., 2000 "Systematic errors in digital image correlation caused by gray-value interpolation" *Opt. Eng*. 39, pp.2915~2921.
(7) McClintock, T. L., " Plasticity Aspects of Fracture. " *Fracture: An advanced treatise*, Vol. 3, Academic press, New York, 1971, pp. 47-225.