

< 논문 >

연성 금속의 파괴과정에서 발생하는 소성영역의 현장 측정

백정현* · 김도형* · 강기주†

(2005년 9월 6일 접수, 2006년 3월 24일 심사완료)

In-situ Measurement of Plastic Zone Developed During Ductile Fracture Process

Jung-Hyun Back, Do-Hyung Kim and Ki-Ju Kang

Key Words: Digital Image Correlation(DIC, 디지털화상관련법), Plastic Region(소성변형역), Recrystallization(재결정), Stereoscopic Digital Speckle Photography(SDSP, 입체디지털스펙클포토해석법)

Abstract

A plastic zone size is regarded as a measure of material resistance, and also it determines the fracture behavior. The importance of estimating or measuring the plastic zone size cannot be too emphasized. In this article, SDSP(Stereo Digital Speckle Photography) is examined as a new techniques to measure the plastic zone developed in a ductile metal. This technique is simple, vibration free and non-contact, and measures simultaneously in-plane displacements as well as out-of plane displacements like the side necking. Experimental results for a CT specimen are presented to demonstrate the accuracy in comparison with those obtained by recrystallization technique and finite element analysis.

1. 서 론

일반적으로 재료의 파괴 거동은 균열선단에서 발생하는 소성영역의 크기에 큰 영향을 받는다. 파괴 현상을 다루는 이론도 소성영역의 크기에 따라 선형탄성파괴역학(LEFM), 탄소성파괴역학(EPFM), 대변형소성파괴역학으로 분류된다. 또한 각각의 파괴역학에서 지배 매개변수도 K , J -적분 그리고 소성영역이 매우 큰 경우는 $J + Q$, T , A_2 와 같은 2매개변수로 달라진다. 따라서 소성영역 크기의 정확한 측정과 예측은 매우 중요하다. 기존의 많은 연구가들에 의한 소성영역의 크기를 측정하는 노력이 있었다. Irwin과 Dugdale Barenblatt의 모델은 선형탄성파괴역학(LEFM)에 기반을

둔 일차원 모델이다. K-field나 HRR field 같은 균열선단부근의 2차원적 응력장을 재료의 항복조건에 대입하여 소성영역의 2차원 형상을 결정하는 방법도 있으나 재료의 항복에 의한 응력의 재분포나 재료의 표면과 내부의 구속의 차이 그리고 시편 경계로 부터의 간섭등의 영향으로 실제적인 사용이 가능한 정밀한 수단이 될 수 없다. 따라서 소성영역의 크기를 실험에 의해 측정하는 방법들이 제안되었다. Iino,⁽¹⁾ Shoji,⁽²⁾ Tschegg et al.⁽³⁾ 등은 소성영역이 일정 온도에서 재결정이 일어나는 것을 이용 소성영역의 크기 및 형상을 측정하였다. 그러나 이것은 진공고온에서 열처리가 필요하며 재료에 따라 소성변형의 재결정 정도가 달라지는 등의 문제점이 있다. Biognonnet et al.,⁽⁴⁾ Yokobori et al.,⁽⁵⁾ Matsumoto and Kiagawa⁽⁶⁾ 등은 재료가 변형되면 x-ray 빔의 회절패턴이 달라진다는 성질을 이용 소성영역의 크기 및 형상을 측정하였다. 그 외에도 가공경화에 따른 경도

† 책임저자, 회원, 전남대학교 공과대학 기계시스템공학부

E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 대학원 기계공학과

값의 변화, 예칭에 대한 반응정도, 모아레 간섭 등을 이용하는 방법이 있다. 그러나 기존의 방법들은 많은 제한조건을 가지며 물체의 표면에서의 소성영역 측정에 한정되고, 사실상 현장측정이나 실시간 측정이 불가능하다. 대신 탄소성 유한요소해석에 의한 예측에 거의 의존하였다.

Lee and Kang⁽⁷⁾은 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 둔감하고 취득이 유리한 백색광원을 이용한 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography) 법으로 CT(Compact Tension)와 SENB(Single Edge Notched Bend) 시편의 파괴실험을 하여 측면 함몰 변형을 측정하는 바 있다. 이 방법은 장치가 간단하고 비접촉이며 면내변위 및 면외변위를 동시에 측정할 수 있어 파괴 시 동반되는 소성변형과 그에 따른 함몰현상 연구에 유용한 것으로 기대된다. 또한 Kim and Kang⁽⁸⁾은 이 SDSP법으로 측정된 측면 함몰량이 시편편의 두께 평균 소성영역의 면적을 예측하는 유용한 수단이 될 수 있음을 보인 바 있다. 즉, SDSP법으로 측정된 일정 깊이 이상의 함몰 영역의 면적과 두께 평균 소성영역의 면적이 넓은 범위에서 선형 관계를 갖는다고 보고하였다. 본 연구에서는 Kim and Kang⁽⁸⁾의 소성영역측정방법을 보완하는 수단으로서 시편 표면의 소성영역을 측정하는 2가지 방법을 제시하였다. 즉, 기존의 SDSP법 응용 과정에서 얻어진 시편 측면 화상(images)을 디지털 화상관련법으로 분석하는 방법과 전술한 재결정법으로 시편 표면의 소성영역 크기를 결정하고 탄소성 유한요소해석에 의한 결과와 비교함으로써 그 정밀도를 평가하였다.

2. 이론

2.1 SDSP법 (Stereoscopic Digital Speckle Photography)

Fig. 1 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.

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

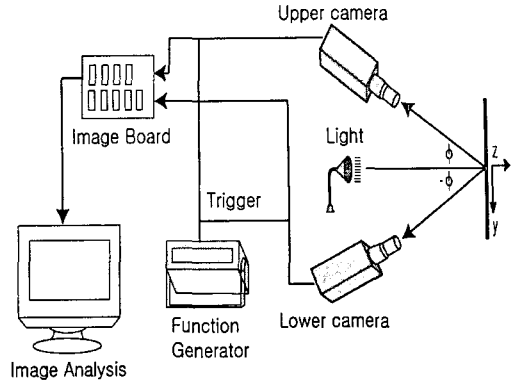


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system for SDSP

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 두 변위 u_z 와 u_y 는 물체의 강체이동에 의한 것과 자체변형에 의한 것 모두를 포함한다. SSDG(Speckle Strain / Displacement Gage)⁽⁹⁾와 ESP(Electronic Speckle Photography)⁽¹⁰⁾법에서는 이 변위에 의한 스페클 이동량이 측정하기에 너무 미세하다고 간주되어 대신 광학적인 방법으로 변형률 ϵ_y 의 영향을 증폭하였다. 반면에 SDSP법에서는 실화상(real image)을 DIC(Digital Image Correlation)로 처리하여 미세한 스페클의 이동량인 변위 u_z 와 u_y 를 직접 측정한다. 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 사용이 간단한 백색광을 광원으로 변형 측정이 가능하다. 상하 카메라에서 얻어진 스페클 이미지로부터 DIC법을 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.

2.2 재결정법

이 방법에 의한 소성영역의 관찰과 소성변형 에너지의 해석에 관한 가능성은 이미 Iino,⁽¹⁾ Shoji,⁽²⁾ Tschegg et al.⁽³⁾ 등이 실험적으로 가시화 및 정량화의 타당성을 설명한 바 있으나, 재결정법은 재료의 종류에 따라 재결정 성향과 재결정

조건들이 크게 바뀌므로 활용상에 있어 어려움이 있다. 일반적으로 소성가공을 받은 금속의 풀립 열처리 시 온도 및 유지시간에 따른 기계적 성질과 상태변화의 양상은 잔류응력의 회복(recovery) → 재결정(recrystallization) → 결정립조대화(grain growth)의 단계를 거친다고 알려져 있다. 각 단계가 진행되는 온도 및 시간은 재료마다 다르다. 구체적으로, 재결정 생성과정에 영향을 미치는 인자들은 소성변형량의 크기, 재결정 온도, 재결정 시간 등이다. 일정량 이상의 소성 변형이 가해지면 재결정온도와 재결정 시간을 적절히 조절하여 원하는 소성영역을 가시화 시킬 수 있게 된다. 하지만 재결정에 의해 가시화 할 수 있는 소성변형의 크기에는 한계가 있기 때문에 대상재료마다 한계 소성 변형률의 크기를 미리 실험적으로 결정해 놓아야 한다.

3. 실험

3.1 시험편 및 실험장치

시험편 재료는 저탄소강(SS41)으로서 압연방향으로 채취하여 4점굽힘시험편과 표준 CT시험편을 제작하고 풀림처리 하였다. 4점굽힘 시험편은 길이 200mm, 폭 8mm, 높이 20mm로 가공되었으며 표면에 남아 있을 가공에 의한 소성변형의 효과를 제거하기 위해 얇은(fine) 연삭 및 연마가 행해졌다. 4점굽힘을 위한 실험장치는 250kN용량의 유압식 재료시험기(INSTRON 8800)와 신호취득을 위한 DT322보드와 데이터 저장을 위한 PC로 구성되어 있다. Fig. 2는 그 시험편 및 지그를 나타내고 있다. 표준 CT시험편을 이용한 파괴실험의 장치 및 과정은 Lee and Kang⁽⁷⁾의 것과 동일하다.

3.2 실험 절차

3.2.1 표면 변형률 측정

랜덤한 스페클 패턴을 얻기 위해서 4점굽힘과 표준 CT 시험편 표면을 사포로 연마한 후 흑색 무광택래커로 얇게 도포하였다. 하중을 가하면서 SDSP 법을 이용하여 표면에서의 변형률을 측정하였다. 즉, CCD 카메라로 연속 촬영된 표면의 화상을 DIC 소프트웨어인 VIC-2D와 식 (2)로 처리하여 x-y 면상의 변위를 측정후 ASTM 표준

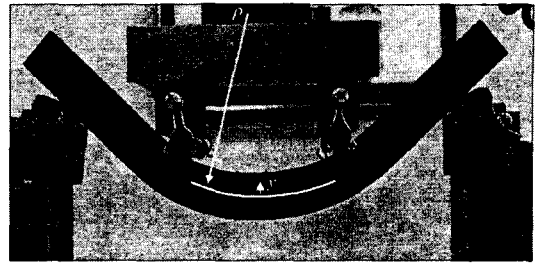


Fig. 2 Specimen configuration deformed by a four point bending jig

E647의 7점 최소자승법 (seven point least square method)으로 수치미분하여 변형률을 계산하였다. 파괴실험에서는 표준 CT시험편을 초당 0.01mm의 변위제어로 최대하중 37.2kN까지 인장하였다. 이때 J-적분 값은 330.8kPa m였다.

3.2.2 재결정 조건 선정 실험 및 적용

재결정 시간 및 온도는 750℃~850℃와 12~24시간 범위에서 수차례 시행착오를 거쳐 800℃/24시간으로 결정하였다. 탈탄 현상을 막기 위해 분당 0.3ml의 Ar(알곤)분위기로 수행하였다. 재결정 한계소성변형률은 4점굽힘시험편을 이용하여 결정되었다. 즉, 하중을 가하여 순수 굽힘 (pure bending)된 시험편을 위의 방법으로 재결정 열처리한 후 단면을 절취하고 연마/에칭하여 미세조직을 관찰하였다. 외부 형상의 곡률반경으로부터 측정된 소성변형률과 비교하여 한계소성변형률을 결정하였다. 파괴 실험한 표준 CT시험편도 같은 조건으로 열처리하여 표면에서의 소성영역을 확인하였다.

3.3 유한요소 해석에 의한 소성영역 예측

유한요소해석에는 상용프로그램인 ABAQUS 6.3을 이용하였고, 사용된 시험편의 모델은 Fig. 3과 같다. 3차원 요소(C3D20R)로 구성되었으며 CT시험편은 xy평면과 xz평면에 대해서 대칭이므로 전체 모델의 1/4만을 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 시험편 핀 구멍 중심의 변위를 증가시키는 방법으로 하중을 가하였다. 표면에서의 변형양상을 잘 나타내기 위해 표면근처에서 더욱 조밀하게 모델링하였다. 탄소성변형은 J₂-점진소성이론(incremental plasticity theory)에 의하여 모사

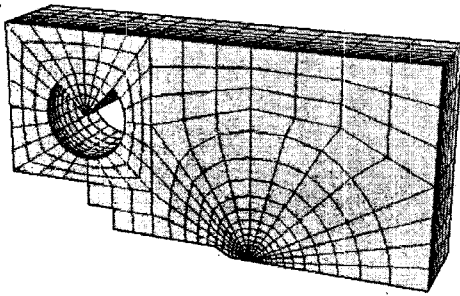


Fig. 3 Finite element mesh of CT specimen

Table 1 Mechanical properties of SS41

Yield Stress, σ_o	Young's Modulus, E	Poisson's Ratio, ν	Hardening Exponent, n	Hardening Constant α
257MPa	194GPa	0.3	4.37	7.9

되었다. 총 요소 수는 7180개이며 노드 수는 32449개이다. 해석에 사용된 재료물성은 SS41을 인장실험 결과를 다음과 같은 Ramberg-Osgood 식으로 근사하여 결정된 것으로 Table 1과 같다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \sigma \leq \sigma_o$$

$$\epsilon = \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{n-1} \quad \sigma > \sigma_o$$

4. 결과 및 토의

4.1 SDSP법을 이용한 표면 변형을 측정

Fig. 4는 촬영된 표면 화상을 DIC (Digital Image Correlation) 소프트웨어인 VIC-2D로 처리하여 얻은 x, y 방향 변위인 u_x, u_y 변위의 분포를 나타내고 있다. 이것을 미분하여 면내변형률 ϵ_{xx} 와 ϵ_{yy} 그리고 ϵ_{xy} 값을 구한다. 면의 변형률은 식 (1)에 의하여 계산된 면의 변위 u_z 로부터 $\epsilon_{zz} = \frac{u_z}{B/2}$ 에 의해 구해진다. 여기서 B는 시험편의 두께이다. 구해진 변형률 값을 다음 식에 대입하여 등가변형률을 계산한다.

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 6\epsilon_{xy}^2]^{1/2}$$

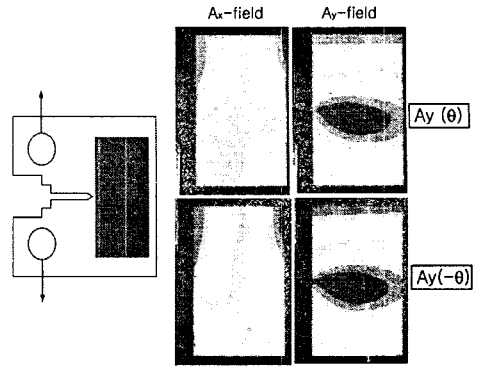


Fig. 4 u_x and u_y displacement fields of images from the upper and lower cameras

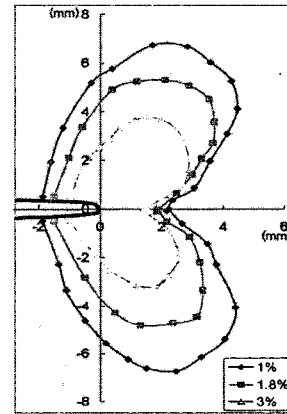


Fig. 5 Equivalent strain, $\tilde{\epsilon}$ contours measured by SDSP from CT specimen surface

Fig. 5에는 계산된 등가 변형률을 등고선으로 나타내었다.

4.2 재결정법에 의한 변형을 측정

Fig. 6은 재결정된 4 점굽힘시험편의 단면 사진이다. 중립면(neutral surface) 근처의 소성변형이 작은 구역은 전혀 재결정이 되지 않았으나, 시험편의 상하(사진에서는 좌우) 방향으로 일정거리를 지나면 갑자기 심한 결정립조대화가 발생한 것을 볼 수 있다. 그리고 가장 심한 변형이 발생한 시험편의 상하면 근처에서는 오히려 재결정된 결정립의 크기가 작았다. 따라서 한계변형률의 경계가 뚜렷하게 나타난다. 변형률 ϵ_x 는 재료역학 보

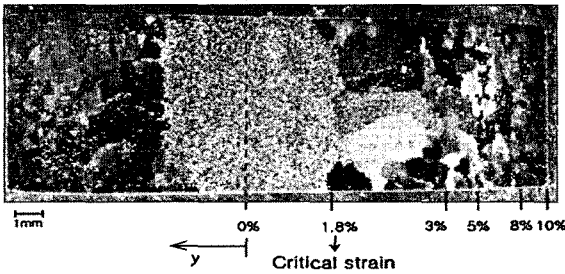


Fig. 6 Cross section of recrystallized specimen and strain rate after bending

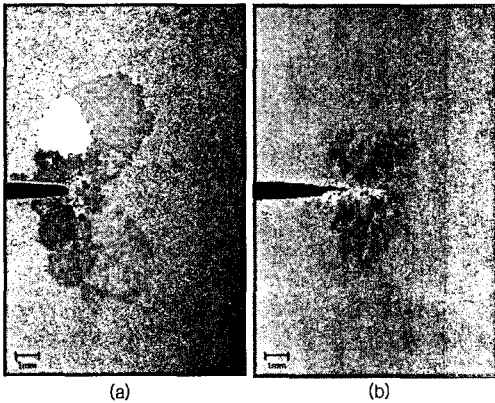


Fig. 7 Recrystallized (a)Surface and (b) Center near the crack tip of a CT specimen

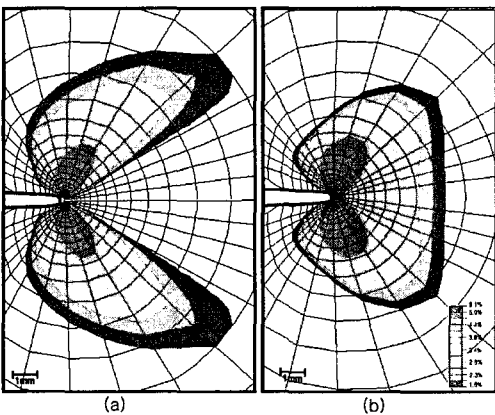


Fig. 8 (a)Surface and (b) Center near the crack tip of a CT specimen using FEA

의 순수굽힘 이론에 따라 $\epsilon_x = -\frac{y}{\rho}$ 로 구하였다. 여기서 y 는 중립면으로부터의 거리이고, ρ 는 시

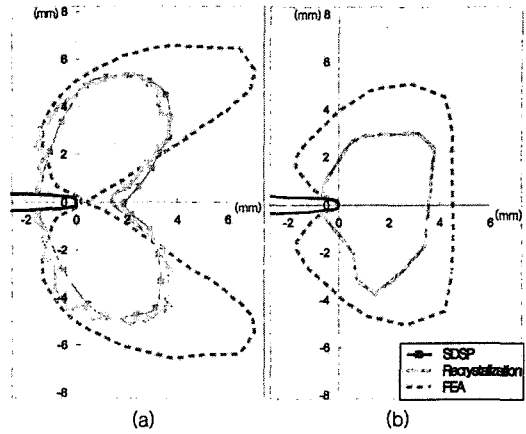


Fig. 9 Comparison of 1.8% equivalent strain zone obtained by the three methods (a) on the surface and (b) the middle plane

편의 굽힘 형상의 곡률반경이다. 이 값은 굽힘 실험 후 시편의 전체적인 형상을 촬영하여 사진을 분석함으로써 결정하였다. 이 시편에서 갑작스러운 재결정이 발생한 y 좌표는 $y = -2.16\text{mm}$ 이고, $\rho = 120\text{mm}$ 이므로 한계소성 변형률은 1.8%로 결정되었다. Fig. 7 (a)와 (b)는 각각 파괴실험한 CT시험편의 표면과 중앙부위의 재결정 후 미세조직으로 표면의 경우 변형률 1.8% 이상의 영역에서 재결정에 의한 소성영역이 확연히 구분된다. 중앙부위에서는 더 좁은 영역에서 재결정영역이 나타남을 볼 수 있다.

4.3 유한요소 해석에 의한 표면 변형률 분포

Fig. 8에서는 유한요소해석 결과로 등가 변형률 1.8%이상인 표면과 중앙부위에서의 영역을 나타내고 있다.

4.4 토의 및 결론

Fig. 9에서는 SDSP법과 재결정법, 그리고 유한요소해석의 결과로 표면에서의 등가변형률 1.8% 이상인 영역을 서로 비교하였고, 중앙부위에서의 재결정영역과 유한요소 해석 결과를 비교하였다. Fig. 9에서 보이듯이 표면에서의 SDSP법과 재결정법에 의한 영역은 매우 잘 일치함을 알 수 있고, 유한요소 해석의 결과와 차이가 있다. 본 연구의 시험편과 같은 연성금속의 균열선단에서는 대규모의 소성변형과 이에 따른 형상변화(둔화

(blunting 포함)가 발생하기 때문에 유한요소해석의 오차가 커지게 된다. Fig. 8(a)의 해석결과를 보면 균열선단에 변형이 집중되어 대규모소성변형에 따른 선단둔화나 응력재분포의 효과를 제대로 반영하지 못하였음을 나타내고 있다. 반면에 균열선단으로부터 멀리 떨어진 구역에서는 변형률의 구배가 완만하여 약간의 변형률 계산 오차만 있어도 해당하는 영역은 크게 다르게 나타난다. 본 시험재료는 풀림처리된 연강으로 항복점에서의 Lüders band⁽¹²⁾의 발생에 따른 불안정 거동을 나타낸다. 따라서 Ramberg-Osgood 식으로 모사된 응력-변형률 곡선도 변형률 $\epsilon=0.1\sim 1.1\%$ 범위에서 거의 완전소성(perfectly plastic) 거동을 하는 것으로 표현되어 유한요소해석 상 오차를 유발한 것으로 추정된다.

중앙부위의 경우도 유한요소 해석 결과와 재결정법에 의한 소성영역 차이가 있었다. 이것은 위에서 언급한 원인과 함께 시편표면과는 달리 균열이 이미 진전하여(tunneling) 균열선단의 응력분포가 부분적으로 재분포된 데에도 원인이 있다고 추정된다. 하지만 각 방법의 오차를 감안하면 서로 잘 일치한다고 말할 수 있다. 이는 결과적으로 SDSP법이 소성영역을 측정하는 유력한 수단이 될 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 사용한 SDSP법은 균열선단의 소성영역뿐만 아니라 함몰과 같은 면외변형까지 측정하기 위해 고안된 것으로 두 대의 카메라와 화상취득장치(frame grabber)가 필요하다. 그러나 만일 소성영역 생성 및 변화만을 측정하고자 한다면 널리 보급되어 있는 열가의 디지털카메라 한대를 시편정면에 설치하여 파괴실험 과정에 연속 촬영하는 것만으로 원하는 목적을 이룰 수 있다. 만일 디지털 화상으로부터 변위를 측정하는 DIC 소프트웨어만 열가로 보급된다면 소성영역을 측정하는 매우 유용한 수단이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 2004년도 원자력 연구 기반 확충 사업 기초분야의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Iino, Y. 1976, "Accumulated Plastic Zone Around Fatigue Crack in Type 304 Stainless Steel," *Metal Sci.* Vol. 10, pp. 159~164
- (2) 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
- (3) Tschegg, E., Faltin, C. and Stanzl, S. 1980, "X-Ray Microbeam and Recrystallization Studies of Plastic Deformation Around Fatigue Crack," *J. Mater. Sci.* Vol. 15, pp. 131~138
- (4) Biognonnet, A., Dias, A. and Lebrun, J. L. 1989, "Fatigue Failure Analysis by X-Ray Fractography," *Proc. 7th Conf. on Fracture(ICF7)V*, Pergamon Press, Oxford, pp. 3457~3463
- (5) Yokobori, T., Sato, K. and Yaguchi, H. 1973, "Observation of Microscopic Plastic Zone and Slip Band Zone at the Tip of Fatigue Crack," *Report of the Research Institute for Strength and Fracture of Materials*, Vol. 9, Tohoku University, pp. 1~10
- (6) Matsumoto, T. and Kiagawa, H. 1972, "X-Ray Investigation of Fatigue Crack Growth on Critical Strain for Fracture at the Crack Tip," *Proc. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials II*, The Society of Materials Science, Japan, pp. 59~66
- (7) Lee, J.H., Kang, K.J. 2004, "In-situ Measurement of Lateral Side-Necking of a Fracture Specimen Using a Stereo Vision and Digital Image Correlation," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, pp. 154~161
- (8) Kim, D.H., Kang, K.J. 2006, "Relationships between Side Necking and Plastic Zone size Near a Crack Tip in Ductile models. Part I: Modified Boundry Solutions," submitted to *Engineering Fracture Mechanics*.
- (9) Johnson, P. 1998, "Strain Field Measurements with Dual-Beam Digital Speckle Photography", *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 30, pp. 315~326
- (10) Yamaguchi, I, 1981, "A Laser-Speckle Strain Gauge," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. Vol.14, pp. 1270~1273.