파괴 시 발생하는 측면함몰과 소성영역크기와의 관계

김도형[†]. 김동학[*]. 강기주[**]

Relationship between Side-Necking and Plastic Zone Size at Fracture

Do-Hyung Kim, Dong-Hak Kim, Ki-Ju Kang

Key Words : Plastic zone size(소성영역), Section Necking(측면함몰),EPFM(탄소성파괴역학)

Abstract

Generally, fracture of a material is influenced by plastic zone size developed near the crack tip. Hence, according to the relative size of plastic zone in the material, the mechanics as a tool for analyzing the fracture process are classified into three kinds, that is, Linear Elastic Fracture Mechanics, Elastic Plastic Fracture Mechanics, Large Deformation Fracture Mechanics. Even though the plastic zone size is such an important parameter, the practical measurement techniques are very limited and the one for in-situ measurement is not virtually available. Therefore, elastic-plastic FEA has been performed to estimate the plastic zone size. In this study, it is noticed that side necking at the surface is a consequence of plastic deformation and lateral contraction and the relation between the plastic zone and side necking is investigated. FEA for modified boundary layer models with finite thickness, various mode mixities 0°, 30°, 60°, 90° and strain hardening exponent n=3, 10 are performed. The results are presented and the implication regarding to application to experiment is discussed.

1. 서 론

일반적으로 재료의 파괴현상은 파괴시 균열선단에서 발생하는 소성영역의 크기에 큰 영향을 받는다. 따라서 파괴현상을 해석하는데 사용되는 역학도 물체에 대한 소성영역의 상대적인 크기에 따라 선형탄성파괴역학(LEFM), 탄소성파괴역학(EPFM), 대변형소성파괴역학으로 분류된다. 선형탄성파괴역학은 소성영역이 균열선단근처의 작은 영역에 제한되어 있는 경우에맘 유효하며 응력장은 응력확대계수 K 에 의해서 표현된다. 탄소성파괴역학은 더 이상 선형탄성파괴역학을 적용할 수 없을 만큼 소성영역이 큰 경우 균열선단근처의 응열장이 J-적분값에 의해 표현되는 경우 적용된다. 대변형소성파괴역학은 균열선단 근처의 소성영역이 매우 큰 경우 균열선단근처의 응력장이 더 이상 J 와 같은 한 개의 매개변수 만으로는 푠현되지 못하고 또 다른 변수인 Q, T, A_2 와 같은 2 매개변수로 표현되는 경우 적용된다. 이와같이 소성영역의 크기는 파괴역학에서 아주 중요한 변수로 작용한다. 따라서 기존에 많은 연구자들이 소성영역의 크기를 측정하고자 하였다.

Bathias[(1)], Pineau[(2)], Petit[(3)], Saxena[(4)]등은 재료가 가공경화가 되면 경도값이 달라지는 성질을 이용하여 마이크로 경도계로 소성영역의 크기를 측정하였다. 그러나 이방법은 가공경화가 큰 재료에만 가능하다. Hahn[(5)], Clavel[(6)]등은 재료의 변형된 영역과 변형되지 않은 영역이 에칭에 달리 반응하는 성질을 이용 소성영역의 형상과 크기를 측정하였다. 이방법의 문제점은 각각의 재료에 따라 에칭조건 및 에칭액을 선정해야하는 문제점이 있다. Lino[(7)], Shoji[(8)], Tschegg[(9)]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. Liu[(10)], Nicoletto[(11)]등은 모아레 간섭법으로 이용 소성영역을 측정하였다. 이방법은 표면에서의 정보만 제공할 뿐 시편 내부

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

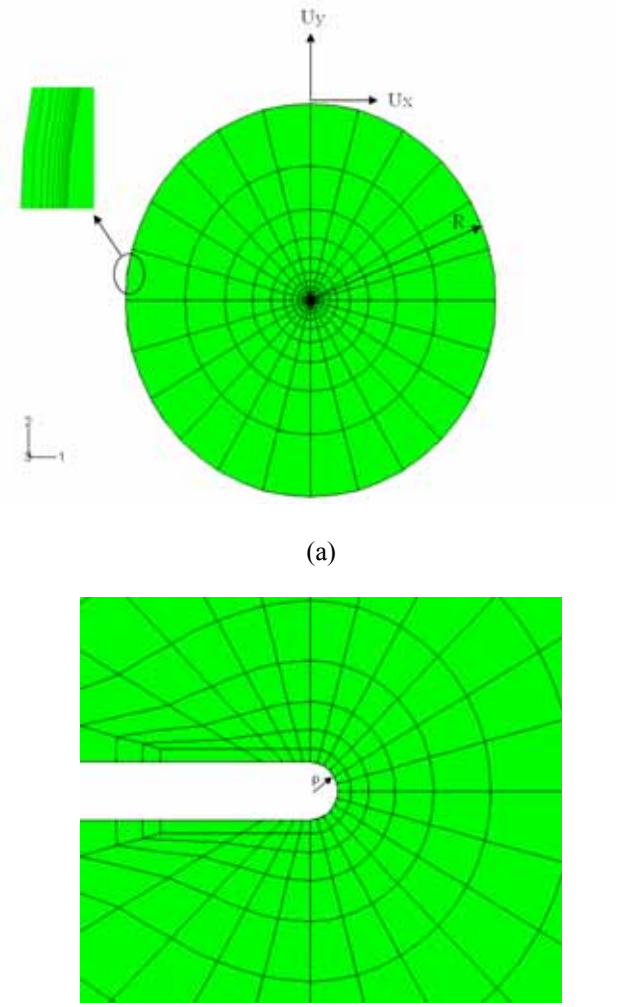
의 변형을 측정하기에는 어려움이 있으며 진동에 매우 민감하다는 단점이 있다. Biognonnet[12], Latiere[13], Matsumoto[14]등은 재료가 변형되면 x-ray 마이크로빔의 회절 패턴이 달라진다는 성질을 이용 소성영역의 크기 및 형상을 측정하였다. 위와 같은 방법으로 많은 연구자들이 소성영역의 크기 및 형상을 측정하였다. 그러나 기존의 방법들은 많은 제한조건을 가지며 물체의 표면에서의 소성영역 측정에 한정 되거나, 사실상 현장측정이나 실시간 측정이 불가능하다. 그래서 대신 탄소성 유한요소해석에 의한 예측에 많이 의존하였다.

Lee and Kang[15]은 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 취득이 유리한 백색광을 광원으로 한 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)로 CT 시편의 파괴실험을 하여 측면 함몰 변형을 측정한 바 있다. 이 방법은 장치가 간단하고 비접촉이며 면내변위 및 면외변위를 동시에 측정할 수 있어 파괴시 동반되는 소성변형과 그에 따른 함몰현상 연구에 유용한 것으로 기대된다. 그러나 아직까지는 표면에서의 변형이나 함몰현상과 시편내부에서 발생하는 소성영역의 크기의 관계를 조사한 예가 없다.

본 연구에서는 재료의 소성변형에 의한 부피변화는 없으므로 면내 반향으로 소성변형이 생기면 반드시 면외 방향으로 함몰이 발생한다는 사실에 주목하여 재료내의 균열에서 파괴가 발생할 때 물체표면, 균열선단근처에서 발생하는 함몰영역크기와 소성영역크기의 관계를 조사하였다. 수정된 경계조건을 갖는 유한두께의 모델에 대해 0°, 30°, 60°, 90°의 모두혼합도와 소성경화지수 n=3,10 에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과와 실제실험에 대한 적용성등을 검토하였다.

2. 유한요소모델

함몰영역의 크기와 소성영역크기의 관계를 알아보기 위해 Fig. 1 과 같이 외부경계조건을 주고 3 차원 수정된 경계층문제(modified boundary layer formulation)에 대해서 탄소성 유한요소해석을 하였다. 균열선단의 대변형 및 균열둔화(blunting)의 효과를 고려하기 위해 균열선단은 Fig. 1(b)처럼 노



(a)

(b)

Fig. 1 Model of modified boundary layer formulation

치로 표현하였다. 모델의 두께는 20 ㎜이며 균열길이 및 반경 R 은 300 ㎜이며 노치반경대 균열길이 비 $\rho/\mathrm{R}=1/100000$ 이다. 두께방향으로는 표면에서의 함몰영향을 잘 나타내기 위해 표면으로 갈수록 조밀하게 모델링 하였다. 그리고 xy 평면에 대해서 대칭이므로 전체의 1/2 만을 모델링 하였다. 사용된 요소수는 7180 개이며 노드수는 32559 개이며 해석은 ABAQUS 6.3 을 사용하였다. 해석에 사용된 재료의 응력-변형률의 관계는 식(1)과 같다. 여기서 n 은 소성경화지수(strain hardening exponent)이며 탄성계수 E 는 210Gpa 이며 항복응력 σ_0 는 320Mpa 이다.

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{\mathrm{E}} \qquad \sigma<\sigma_0$$
$$\varepsilon=\alpha\frac{\sigma}{\mathrm{E}}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n-1} \qquad \sigma\geq\sigma_0 \quad \alpha=1,\ n=10 \tag{1}$$

외부경계조건은 식(2)와 같다. 여기서 μ 는 전단탄성계수, $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$, ν 는 포와송비로 0.3 이다.

$$u_X=\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}\frac{1}{2\mu}\left[\begin{array}{l}K_I\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa-1+2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)\\+K_{II}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa+1+2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)\end{array}\right] \quad (2)$$

$$u_Y=\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}\frac{1}{2\mu}\left[\begin{array}{l}K_I\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa+1-2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)\\-K_{II}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\kappa-1-2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)\end{array}\right]$$

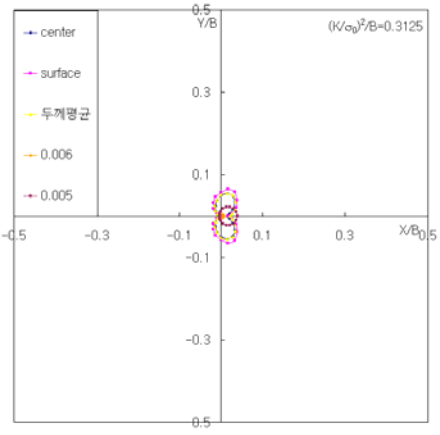
모드혼합도는 식(3)과 같이 정의하였으며 네가지 모드혼합도(ϕ=0°, 30°, 60°, 90°)에 대해서 해석을 수행하였다.

$$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{K_{II}}{K_I}\right) \quad (3)$$

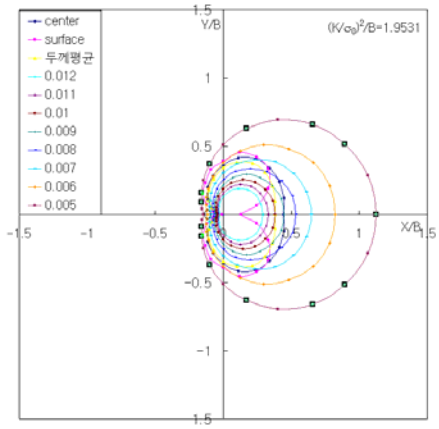
3. 유한요소 해석결과

3.1 측면함몰량과 소성영역형상비교

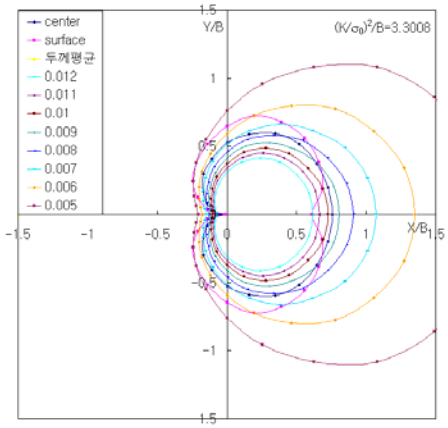
Fig.2 는 ϕ=0°에서 n=3 인 경우 하중을 증가시키면서 측면함몰량에 따른 형상과 소성영역의 형상을 나타낸 것이다. 소성영역은 두께평균, 표면, 중심부로 나누어서 나타냈다. 이때 소성영역의 정의는 Mises 등가 응력이 항복응력에 도달하면 소성이 일어난다고 보고 소성영역의 크기 및 형상을 구하였다.



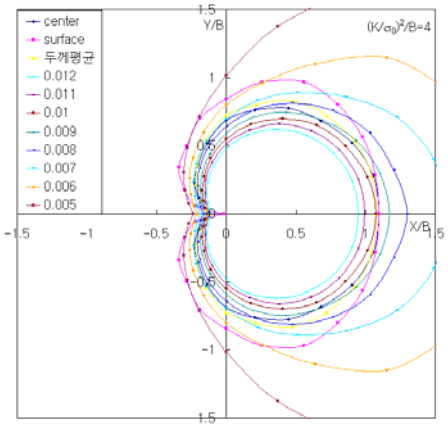
(a)



(b)



(c)

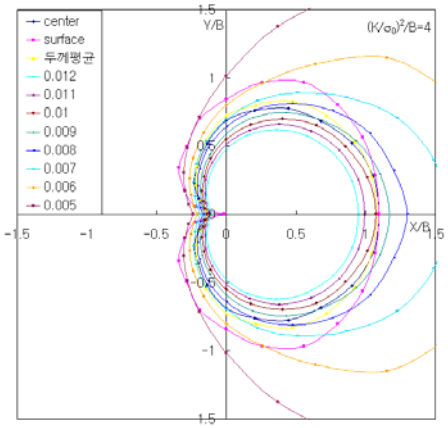


(d)

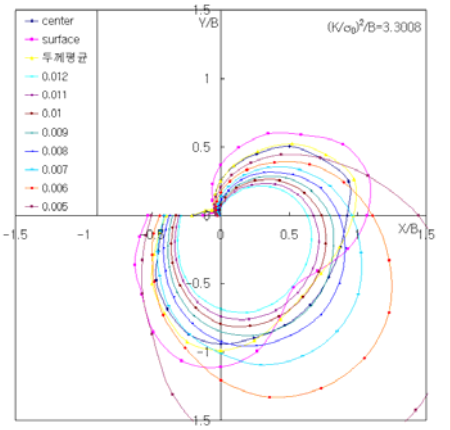
Fig. 2 Plastic zone and side necking shape.
(a) $(K/\sigma_0)^2/B$=0.3125, (b) $(K/\sigma_0)^2/B$=1.9531 ,
(c) $(K/\sigma_0)^2/B$=3.3008 , (d) $(K/\sigma_0)^2/B$=4

측면함몰량에 따른 형상은 표면에서 측면함몰량의 절대값이 일정 값 이상의 영역을 나타낸 것으로 측면함몰량이 12 ㎛ ~5 ㎛까지 1 ㎛씩 증가시키면서 구한 영역을 나타냈다. 예를들면 측면함몰

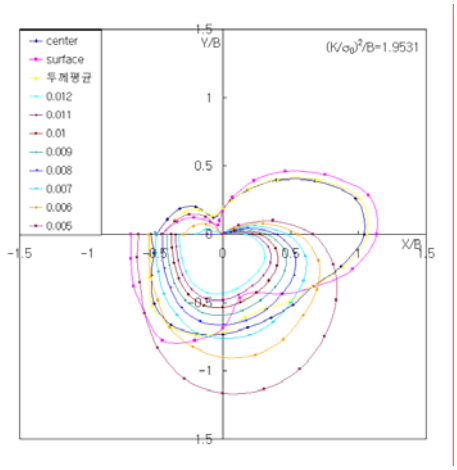
량이 10 ㎛인 영역은 측면함몰량 값이 균열선단부터 10 ㎛일 때 까지의 영역을 각도별로 나타낸 것이다. 소성영역의 크기는 두께(B)로 무차원화 했으며 하중의 크기는 $(K/\sigma_0)^2/B$로 무차원화 했다. Fig. 2(a)와 같이 하중이 $(K/\sigma_0)^2/B=0.3125$ 로 작은 경우 균열선단에서 측면함몰량이 작아 12 ㎛~7 ㎛인 영역은 존재하지 않는다. 그리고 측면함몰영역과 소성영역의 형상비교도 불가능 하다. 하중 증가에 따라 측면함몰영역과 소성영역의 형상을 비교해 보면 소성영역의 크기가 대략 모델두께의 1/2 이상일 때부터 측면함몰영역으로부터 소성영역의 형상을 유추할 수 있다. 모드혼합도 ϕ=30°, 60°, 90° 에서도 비슷한 결과를 보인다. Fig. 3은 모드혼합도 ϕ=0°, 30°, 60°, 90° 에서 n=3 인 재료에서 소성영역크기가 대략 모델의 두께정도일때 측면함몰량에 따른 형상과 소성영역의 형상을 나타낸 것이다.



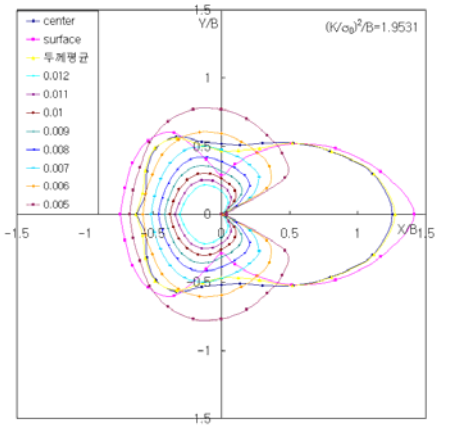
(a)



(b)



(c)



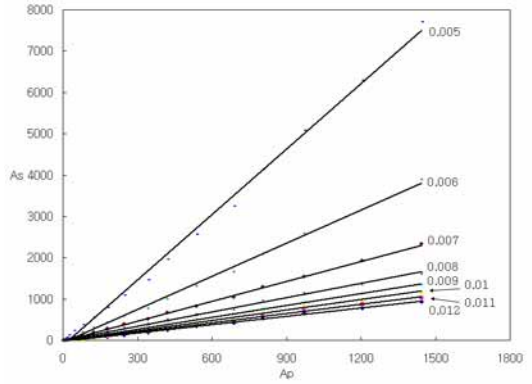
(d)

Fig. 3 Plastic zone and side necking shape.
(a) ϕ=0°, (b) ϕ=30°, (c) ϕ=60°, (d) ϕ=90°

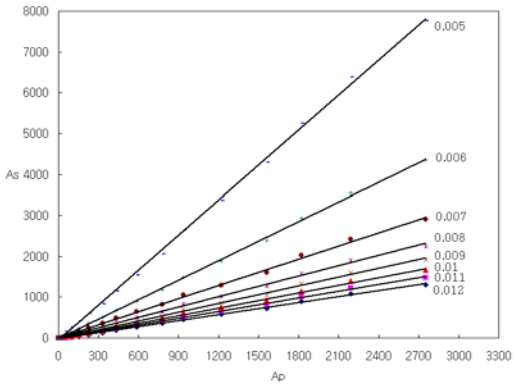
이 결과를 보면 ϕ=0°, 30°, 60°인 경우 측면함몰량이 10 ㎛ ~ 8 ㎛인 일 때의 영역의 형상으로부터 소성영역의 형상을 대략적으로 유추할 수 있다. 그러나 ϕ=90°인 경우는 측면함몰량의 형상으로부터 소성영역의 형상을 유추할 수 없다. n=10 인 경우도 n=3 인 경우와 비슷한 결과를 보여주고 있다.

3.2 측면함몰영역과 소성영역의 면적 비교

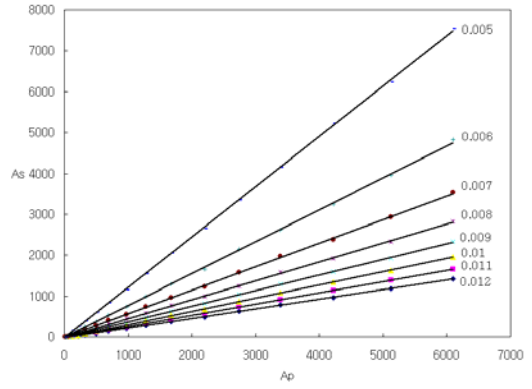
Fig. 4 는 ϕ=0°, 30°, 60°, 90° 에서 n=3 인 경우 측면함몰영역면적(As)과 소성영역의 면적(Ap)을 나타낸 것이다. 소성영역의 면적은 두께평균의 소성영역면적을 나타냈다. 이 결과를 보면 측면함몰영역의 면적과 소성영역의 면적과의 관계가 전반적으로 선형적인 관계다. 특히 모드혼합도가 증가할수록 더욱 선형적인 관계를 보여주고 있다. 따라서 이와 같은 결과를 볼 때 측면함몰량을 알 수



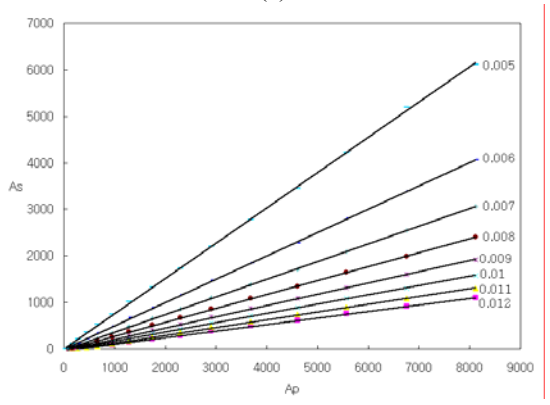
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Compare with plastic zone and side necking area. (a) ϕ=0°, (b) ϕ=30°, (c) ϕ=60°, (d) ϕ=90°

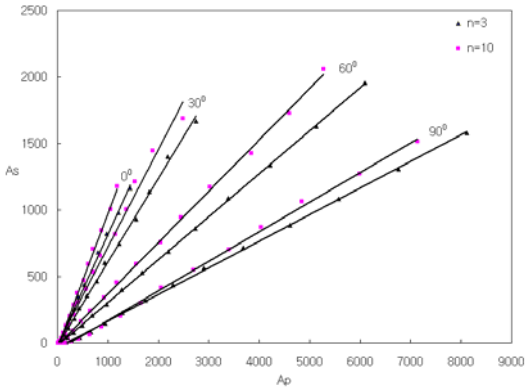


Fig. 5 Compare with plastic zone and side necking area at Uz =10 ㎛.

있으면 소성영역의 크기를 알 수 있다. Fig. 5 는 n=3,10 인 경우 측면함몰량(Uz)이 10 ㎛일 때 ϕ=0°, 30°, 60°,90° 에서의 측면함몰영역과 소성영역의 면적을 나타낸 것이다. 소성경화지수값이 증가하는 경우 측면함몰영역과 소성영역의 면적의 선형성이 떨어지나 여전히 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 토론

Fig. 3 를 보면 모드혼합도가 ϕ=0°, 30°, 60°인 경우는 어느정도 함몰영역으로 소성영역의 형상을 예측 할 수 있다. 그러나 ϕ=90° 인 경우는 그럴수 없는데 이것은 X 축에 대해서 한쪽은 융기가 일어나고 한쪽은 함몰이 일어나면서 X 축에서 함몰량이 0 이 되면서 Fig. 3(d)와 같은 결과를 보여준다. 그러나 함몰영역면적 과 소성영역면적은 여전히 선형성을 보여준다. 하중변화에 따른 함몰영역의 면적을 보면 하중이 $(K/\sigma_0)^2/B$=0.7031 이하일 경우 측면함몰량값이 아주 작아 측정영역인 12 ㎛ ~5 ㎛안에는 존재하지 않아 측면함몰영역의 면적이 0 이 된다. 따라서 하중이 $(K/\sigma_0)^2/B$ =0.7031 이상일 경우에만 함몰영역면적 과 소성영역면적이 선형성을 보인다.

Lee and Kang[15]은 레이저보다 가간섭성이 낮아 진동에 더욱 둔감하고 취득이 유리한 백색광을 광원으로 한 SDSP(Stereoscopic Digital Speckle Photography)로 CT 시편의 파괴실험을 하여 Fig. 6 과 같이 측면 함몰 변형을 측정한 바 있다. 이때 실험에 의한 측면함몰량의 최대 오차는 6 ㎛이다. 이와 같이 실험적인 방법으로 파괴실험과 동시에 측면함몰량을 측정할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구의 결과로 볼 때 함몰영역측정을 10 ㎛ ~8 ㎛

로 하면 SDSP 로 측면함몰량을 측정하여 소성영영의 대략적인 형상과 크기를 예측할 수 있을 것으로 보인다. 차후 이것을 검증하기 위해 여러 가지 시험편에 대한 측면함몰량 측정, 재결정법을 이용한 소성영역 형상측정 및 유한요소해석을 하려고 한다.

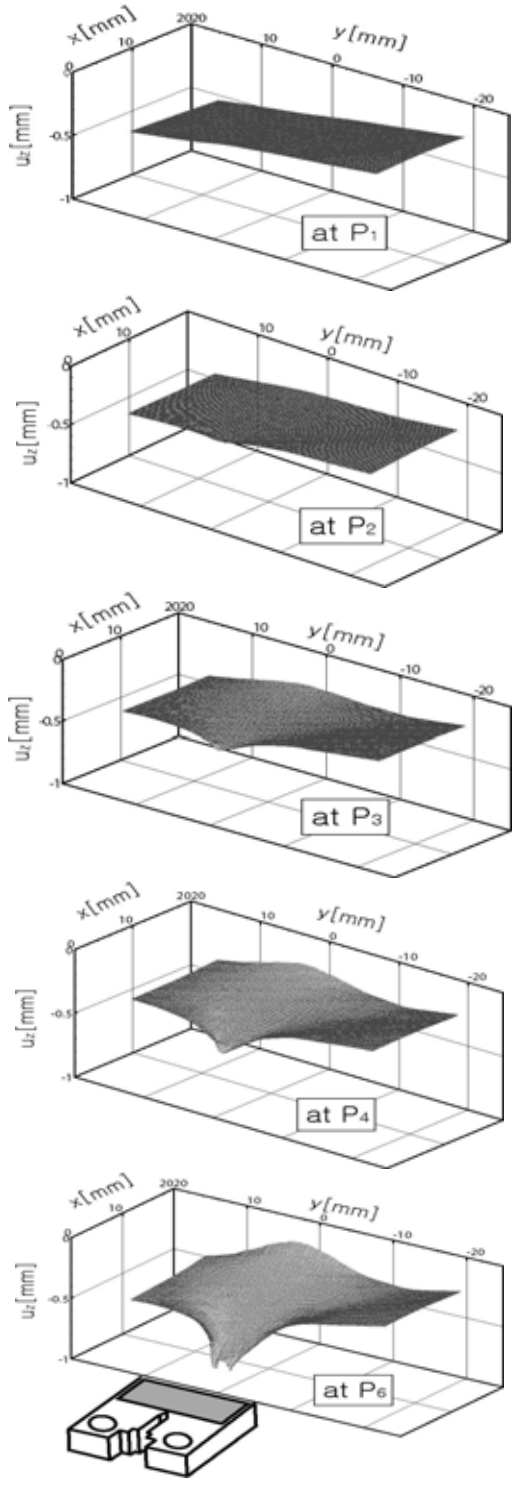


Fig. 6 Maps of out-of-plane displacement u_z on a lateral surface of the specimen measured by Stereoscopic Digital Speckle Photography

5. 결론

5.1 측면함몰영역과 소성영역의 형상을 비교한 결과 소성영역의 크기가 모델두께의 1/2 이상으로 하중이 작용할 때 ϕ=0°, 30°, 60°이고 함몰량이 10 ㎛ ~ 8 ㎛인 경우 측면함몰영역으로부터 대략적인 소성영역형상을 유추할 수 있다.

5.2 측면함몰영역과 소성영역의 면적을 비교한 결과 선형적인 관계가 성립하며 모드혼합도가 증가할수록 선형성은 증가한다. 따라서 측면함몰량을 알면 소성영역의 대략적인 형상이나 크기를 예측할 수 있다.

5.3 n=3,10 인 두 가지 재료에 대한 해석 결과 소성경화지수가 증가할 경우 측면함몰영역과 소성영역의 면적의 선형성이 조금 떨어지나 여전히 선형성을 유지함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2004 년 과학기술부의 원자력 기초연구 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) C. Bathias, “Plastic zone formation and fatigue crack growth.” Proc. 4th Int. Conf. on fracture II(ICF4), pp. 1307-1312, 1977
(2) A. G. Pineau and R. M. pelloux, “Influence of strain-induced martensitic transformations on fatigue crack growth rates in stainless steels.” *Metall. Trans.* Vol. 5, pp. 1103-1112, 1974
(3) J. Petit, B. Bouchet, C. Gase and J. de fouquet, “A contribution to the study of the influence of environment on the crack growth rate of high-strength aluminum alooys in fatigue.” Proc. 4th Int. Conf. on fracture II(ICF4), pp.867-872, 1977
(4) A. Saxena and S. D. Antolovich, “Low cycle fatigue, fatigue crack propagation and substructures in a series of polycrystalline Cu-Al alloys.” *Metall. Trans.* Vol. 6A , pp. 1809-1828, 1975
(5) G. T. Hanh, R. G. Hoagland and A. R. Rosenfield, “Local yielding attending fatigue crack growth.” *Metall. Trans.* Vol. 3, pp. 1189-1202, 1972
(6) M. Clavel, D. Fournier and A. Pineau, “Plastic zone sizes in fatigue specimens of INCO 718.” *Metall. Trans.* Vol. 6A , pp. 2305-2307, 1975
(7) Y. Iino, “Accumulated plastic zone around fatigue crack in type 304 stainless steel.” *Metal Sci.* Vol. 10, pp. 159-164, 1976
(8) 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

(9) E. Tschegg, C. Faltin and S. Stanzl, "X-ray microbeam and recrystallization studies of plastic deformation around fatigue crack." *J. Mater. Sci.* Vol. 15, pp. 131-138, 1980

(10) H. W. Liu and N. Iino, "A mechanical model for fatigue crack propagation." Proc. 2nd Int. Conf. on Fracture(ICF2), Chapman and Hall, London, pp.812-823, 1969

(11) G. Nicoletto, "Plastic zones around fatigue cracks in metals." *Int. J. Fatigue*, Vol. 2, pp. 107-115, 1989

(12) A. Biognonnet, A. Dias and J. L. Lebrun, "Fatigue failure analysis by X-ray fractography." Proc. 7th Conf. on Fracture(ICF7) V, Pergamon Press, Oxford, pp. 3457-3463, 1989

(13) T. Yokobori, K. Sato and H. Yaguchi, "Observations of microscopic plastic zone and alip band zone at the tip of fatigue crack." in *Report of the Research Institute for Strength and Fracture of Materials,* Vol. 9, Tohoku University, pp. 1-10, 1973

(14) T. Matsumoto and H. Kiagawa, "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, 1972

(15) Lee, J. H. and Kang, K. J, "*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, 2003