

동하중 충격시에 시험편의 소성영역에 관한 연구

한문식^{*1)} · 조재웅²⁾

계명대학교 기계·자동차공학부¹⁾ · 천안공업대학 자동차과²⁾

A Study on the Plastic Zone of the Specimen at the Impact of Dynamic Load

Moonsik Han ^{*1)} · Jaeung Cho²⁾

¹⁾Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾Department of Automobile, Cheonan National Technical College, Cheonan 330-717, Korea

(Received 11 March 2004 / Accepted 12 April 2004)

Abstract : Dynamic crack initiation in ductile steel is investigated by means of impact loaded 3 point bend(PB) specimens. Results from non-viscoplastic and viscoplastic materials are compared. Their materials are applied with various impact velocities and static strain rates. The specimen has the size 320 x 750 mm with a thickness of 10 mm. A modified 3PB specimen design with reduced width at the ends has been developed in order to avoid the initial compressive load of the crack tip and also to avoid the uncertain boundary conditions at the impact heads. Numerical simulations are made by using the FEM code ABAQUS. Therefore, their results are plotted by shapes of the von Mises plastic stress and equivalent plastic strain of the specimens applied by various impact velocities.

Key words : Viscoplastic material(점소성재료), Crack tip(크랙선단), von Mises plastic stress(폰미세스 소성응력), Equivalent plastic strain(등가소성변형율), Impact velocity(충격속도)

1. 서론

동적파괴역학에 대한 기초적인 연구를 수행하는 데는 3점 굽힘시험편들이 자주 사용되고 있다. 이들 중에서는 Rosakis¹⁾와 Van Elst²⁾ 등에 의한 실험적인 연구와 유한요소 해석들이 있으나 지금까지 발표된 많은 연구들에 사용되어진 하중 속도는 제한되어져 있었다. 그리고 고속 하중을 받는 구조물들의 동적 파괴 거동에 관한 실험적인 연구에서는 높은 성능을 가진 고속 트랙을 사용하고 있으며³⁾ 이러한 장치로서는 10 m/s로부터 60 m/s까지의 충격속도들을 얻을 수 있었다. 또한 자동차 충돌 분야에서도 다수

의 연구들이 발표되어 있다.^{4,5)}

본 연구에서는 다양한 충격 하중 속도를 받는 구조물의 소성 영역의 분포특성을 검토하기 위하여 점소성이 없는 경우와 점소성이 있는 경우에서의 여러 가지 충격 속도 하중을 받는 3점 굽힘 시험편을 모델로 만들어서 해석하였다. 유사한 연구들로서는 충격 하중을 받는 3PB 시험편의 동적 거동과^{1,6)} 충격점들에서의 경계 조건의 영향에 대하여 실험연구가 되어 있다. 본 연구에서는 불확실한 경계 조건들의 영향을 제거하기 위하여 시험편의 양쪽 가장 자리들을 잘라 내었고 3PB 시험편들은 15, 30, 45, 60 m/s 에 대한 속도들에서 충격하중을 받는 것으로 가정하였다.⁷⁾ 이러한 시험편에서의 동적 거동은 Hammer와 시험편 사이의 경계 조건들에 의해서

*To whom correspondence should be addressed.
sheffhan@kmu.ac.kr

많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 또한 충격 하중을 가한 경우와 비교하기 위하여 정하중을 가한 경우와도 비교하였다. 따라서 충격 하중 및 정하중이 가해졌을 때 시험편의 어느 부위에서 응력 및 변형을 많이 받는가를 유한요소법을 통하여 도식적으로 그리고 충격 시험편의 소성영역 형상에 대한 응력 및 등가 변형율을 검토하였다. 또한 그 결과를 충돌 문제에 있어서의 안전성 평가 및 그 설계 자료에 활용하고자 하는 데에 본 연구의 목적이 있다.

2. 유한 요소 모델

Fig. 1은 3PB 시험편의 모양과 그 치수를 나타내고 있다. 또한 Fig. 2는 본 해석에서 사용한 재료의 정적 응력 및 변형률 곡선이다.

수치 시뮬레이션은 유한요소 해석으로 수행되었으며 유한요소 전용 프로그램인 ABAQUS8)가 사용되었다.

또한 재료는 등방성으로 정화된 von Mises 모델로서 탄소성 재질로 되어 있으며 그 특성들은 다음과 같다.

- Young's Modulus $E = 206 \text{ GPa}$,
- Poisson's Ratio $\nu = 0.3$,
- 밀도 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$,
- 항복강도 $\sigma_y = 360 \text{ MPa}$ 이다.

시뮬레이션 중 속도에 의존되는 점소성 해석은 Malvern 점소성 Model⁹⁾에 따른 것이다.

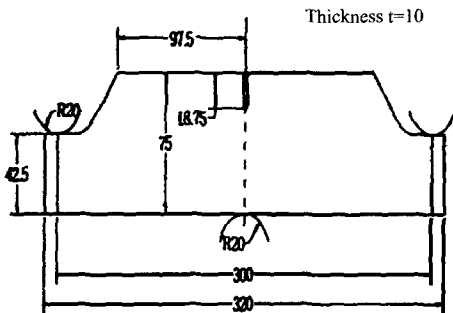


Fig. 1 Dimensions of the new designed 3PB specimen. All dimensions are in mm

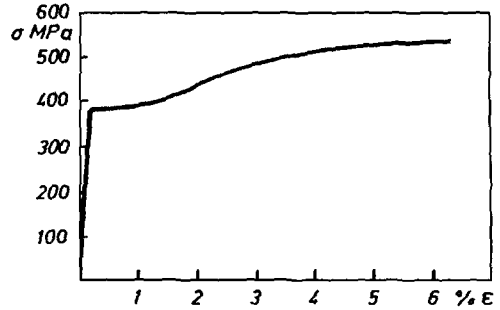


Fig. 2 Static tensile test diagram (engineering strain and stress)

3. 경계조건 및 점소성 특성

사용된 시뮬레이션 모델은 Fig. 3과 같이 대칭성에 의해서 시험편의 반쪽만으로 수행되었다. 왼쪽 아래의 원호는 충격헤드이고 오른쪽 위의 원호는 지지를 받는 헤드이다. 충격헤드에서 충격시작시의 시간은 '0'이고 충격 Head점의 질량은 Hammer의 반쪽 무게에 해당하는 0.49 kN이다. 충격 속도는 $V = 15, 30, 45, 60 \text{ m/s}$ 로 택하였으며 이 속도는 시간이 '0'에서 가하여져 일정 속도를 계속 유지한다고 가정한다. 정적으로 하중을 작용하는 경우는 2초 동안 가하고 동적인 경우는 400 μs 동안 가하였으며 그 동안 크랙은 진전하지 않는다고 가정하였다.

사용된 재료로서는 Malvern 점소성 모델에 따른 속도 의존 특성으로 하여 1차원 형태로서 다음과 같이 하였다.⁹⁾

$$\epsilon^{sp} = \beta \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} - 1 \right)^n$$

- 여기서, ϵ^{sp} : 소성변형률
- σ : 응력
- σ_y : 항복응력

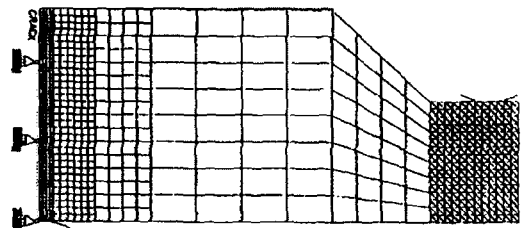


Fig. 3 FEM-model for the 3PB specimen with a quarter edge crack

β , n = 점소성계수

여기에서 점소성계수는 $\beta=4000, n=2$ 이다.¹⁰⁾

4. 해석 결과

Fig. 4부터 Fig. 5까지는 정적인 경우로서 변위속도를 0.01 m/s로 작용하여 각각 2초의 경과 시간에 따른 소성응력 및 등가소성 변형률 곡선을 보이고 있다.

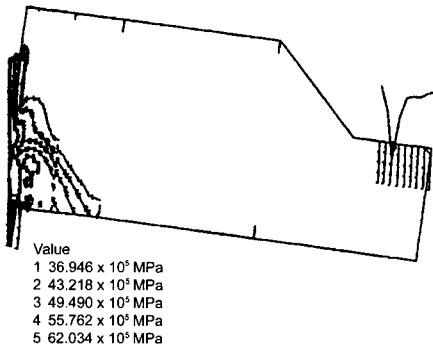


Fig. 4 Shape of von Mises plastic stress of specimen under static displacement speed(0.01m/s)

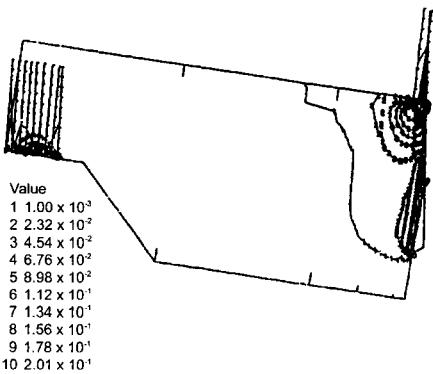


Fig. 5 Shape of equivalent plastic strain of specimen under static displacement speed(0.01m/s)

Fig. 6부터 Fig. 9까지는 점소성 특성이 없는 경우로서 충격속도가 각각 15, 30, 45, 60 m/s로서 400 μ s의 경과 시간에 따른 von Mises 소성 응력을 그린 것이다.

또한 Fig. 10부터 Fig. 13까지는 점소성 특성이 없는 경우로서 충격속도가 각각 15, 30, 45, 60 m/s로서 400 μ s의 경과 시간에 따른 등가 소성 변형률을 그린 것이다.

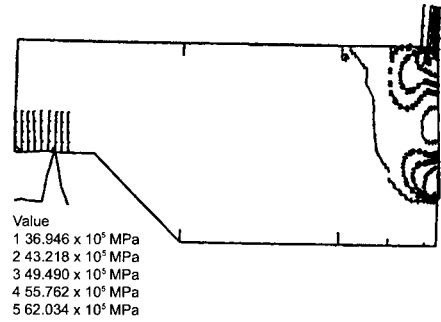


Fig. 6 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity(15m/s) (no visco-plasticity)

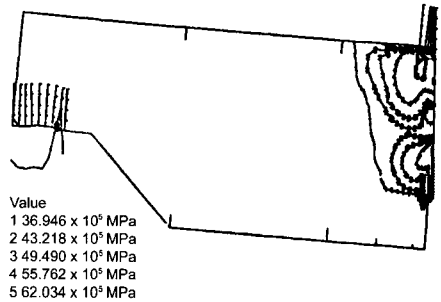


Fig. 7 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity(30m/s) (no visco-plasticity)

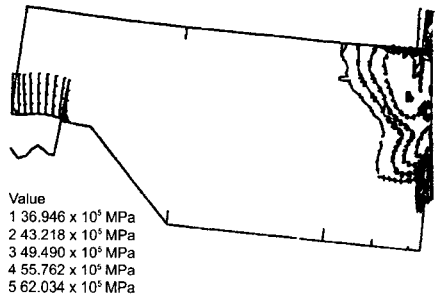


Fig. 8 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity(45m/s) (no visco-plasticity)

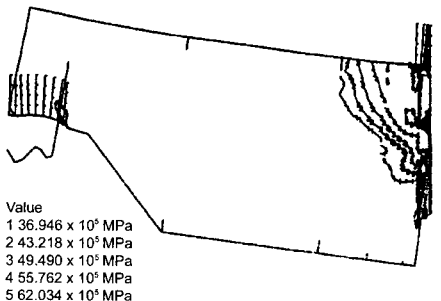


Fig. 9 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity(60m/s) (no visco-plasticity)

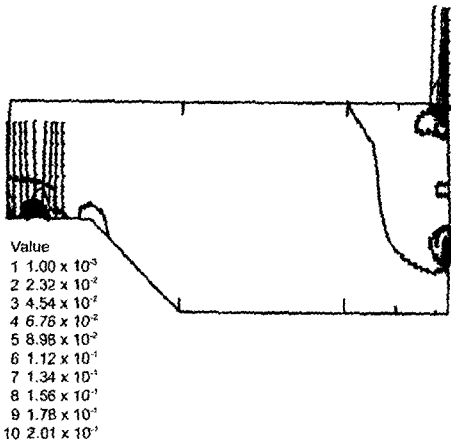


Fig. 10 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(15m/s) (no visco-plasticity)

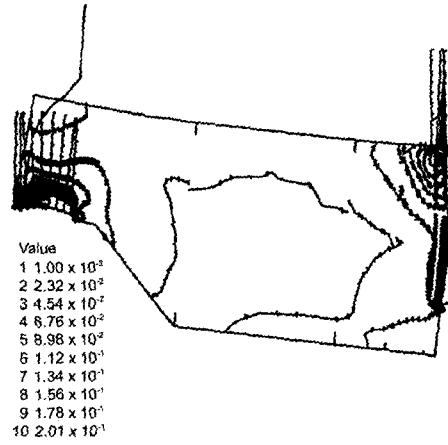


Fig. 13 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(60m/s) (no visco-plasticity)

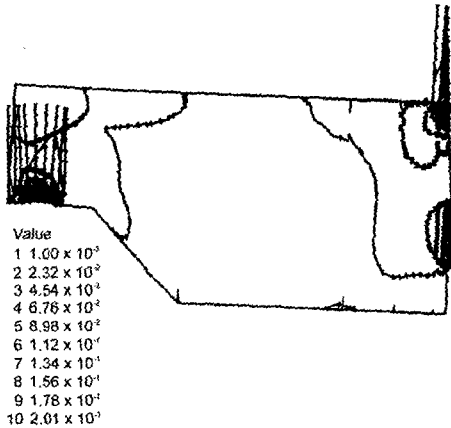


Fig. 11 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(30m/s) (no visco-plasticity)

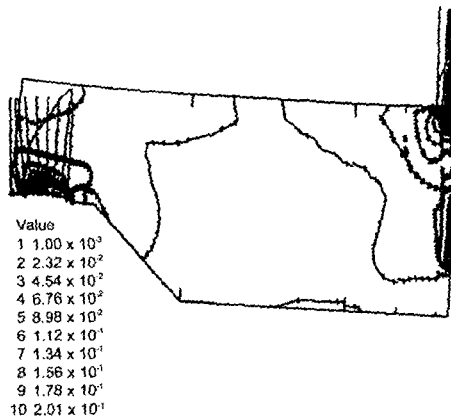


Fig. 12 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(45m/s) (no visco-plasticity)

다음으로 Fig. 14부터 17까지는 30, 45 m/s의 경우로만 해석하였다. Fig. 14부터 Fig. 15까지는 점소성 특성이 있는 경우로서 충격속도가 각각 30, 45 m/s로서 400 μ s의 경과 시간에 따른 von Mises 소성 응력을 그린 것이다.

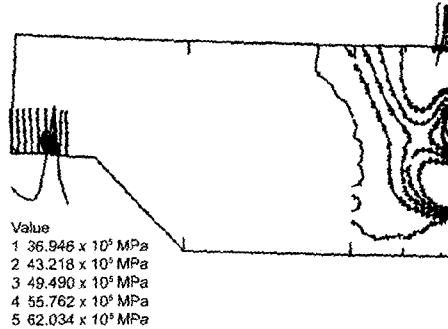


Fig. 14 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity (30m/s) (visco-plasticity)

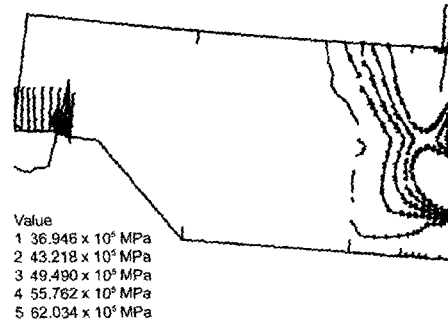


Fig. 15 Shape of von Mises plastic stress of specimen under impact velocity (45m/s) (visco-plasticity)

또한 Fig. 16부터 Fig. 17까지는 점소성 특성이 있는 경우로서 충격속도가 각각 30, 45 m/s로서 400 μ s의 경과 시간에 따른 등가 소성 변형율을 그린 것이다.

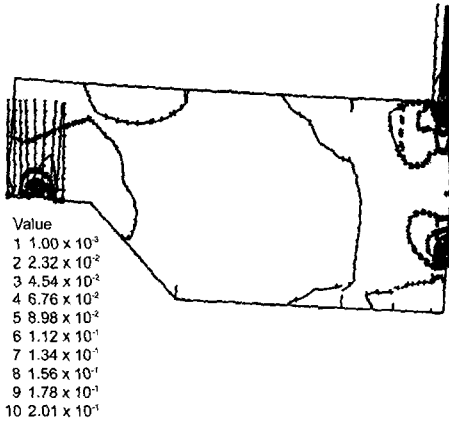


Fig. 16 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(30m/s)

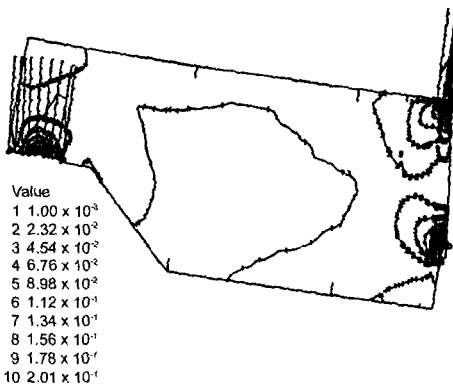


Fig. 17 Shape of equivalent plastic strain of specimen under impact velocity(45m/s) (visco-plasticity)

5. 해석결과에 대한 고찰

먼저 Fig. 4에서 보는 바와 같이 정하중 시험편의 경우는 von Mises 소성 응력곡선에서 보는 바와 같이 충격 헤드 근방에서 그 크기가 약간 크게 나타나지만 주로 Crack 선단 위쪽 부분과 가운데 지지점 아래 부분에 집중적으로 그 응력이 크게 나타남을 보이고 있다.

역시 정하중 시험편으로서 Fig. 5에서는 등가 소성 변형률이 충격헤드 근방과 Crack 선단 위쪽 부분과 가운데 지지점 아래 부분에 집중적으로 나타남

을 보이고 있다. 또한 점소성 특성이 없는 경우로서 하중속도가 15 m/s가 작용되는 Fig. 6에서 보면 von Mises 응력의 세기가 Crack 선단 주변과 지지점 사이에서 36.946×10^5 MPa 이 된다. 또한 Crack 선단 부분 사이에서 소성응력이 크게 나타나면서 지지점에서 그 응력이 크게 나타났다.

또한 충격 하중속도가 30 m/s인 Fig. 7에서 보면 소성 영역의 길이가 다소 작아지면서 von Mises 응력이 가운데 지지점과 Crack 선단 부위의 위아래로 커짐을 알 수 있다. 그리고 충격 하중속도가 45 m/s 로 Fig. 8에서는 소성영역이 점차 한 곳으로 몰리면서 지지점 부위와 Crack 선단 부위의 응력이 커짐을 알 수 있었다. 하중 속도가 60 m/s인 Fig. 9에서는 지지점 부위와 Crack 선단 부위사이에서 균일하게 응력이 분포되어서 지지점 부근으로 올라가면서 증가되는 경향을 보이고 있다. 다음으로 점소성 특성이 없는 경우로서 등가 소성 변형률 곡선을 보면 그 충격 하중 속도가 15 m/s인 Fig. 10에서는 등가소성변형률이 2.01×10^{-1} 으로서 Crack 선단 부근 및 지지점 근방에서 크게 생겨남을 알 수 있다. 또한 충격 하중속도가 30m/s 경우인 Fig. 11에서는 충격 헤드 부분과 지지점 근처 및 Crack 선단 부근에서 그 소성 변형률이 크게 생겨남을 알 수 있다. 충격 하중속도가 45m/s 경우인 Fig. 12에서는 충격 헤드 부분과 지지점 근처 및 Crack 선단 부근에서 소성 변형률이 점점 더 커짐을 알 수 있었다. 하중 속도가 60 m/s인 Fig. 13에서는 Fig. 12과 같은 양상을 가지고 있으나 시험편이 더 크게 변형된 것을 보이고 있다. 마지막으로 점소성이 있는 경우로서의 충격 하중속도가 30 m/s 의 경우인 Fig. 14를 보면 소성영역이 점소성이 없는 경우보다 시험편의 지지점 부근과 Crack 선단 주위에서 더 크게 나타나 있음을 보이고 있다. 그리고 충격 하중속도가 45 m/s인 Fig. 15에서도 Fig. 14와 같은 양상을 보이고 있으나 다소 그 von Mises 응력의 세기는 커져 있음을 알 수 있다. 그리고 하중 속도가 각각 30, 45 m/s 로서의 등가 소성 변형률 곡선들인 Fig. 16과 Fig. 17에서도 보는 바와 같이 대체로 점소성 특성이 없는 경우보다는 등가 소성 변형률이 약간 더 크게 나타나지만 그 변형률 곡선은 유사한 모양을 가지고 있다.

6. 결 론

본 연구에서 수행한 정적 및 동적 하중을 받는 3점 굽힘 시험편에 대한 유한 요소법 Simulation 해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정적 시험의 경우가 동적 하중을 받는 경우보다 소성 영역이 지지점과 크랙 선단 부근의 가운데 부근에 더 크게 작용됨을 보이고 있다.
- 2) 점소성이 있는 경우가 없는 경우보다 소성 응력 및 등가 소성 변형률이 더 크게 나타남을 보이고 있다.
- 3) 하중 속도가 빨라질수록 시험편 중앙의 크랙 선단 부위로부터 지지점 근방으로 소성 응력이 커짐을 알 수 있다.
- 4) 소성응력은 대체로 시험편의 충격점 및 크랙 선단 부근과 지지점 근처가 다른 부위에서보다도 더 크게 나타나고 있고 등가 소성 변형률은 충격점 부위에서 더 크게 나타남을 보이고 있다. 이러한 경향들은 재료의 동적 파단에 있어 그 안정성을 판정할 귀중한 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) A. J. Rosakis, A. T. Zehnder, R. Narasimhan, "Caustics by Reflection and Their Application to Elastic-Plastic and Dynamic Fracture Mechanics," SPIE Conference on Photomechanics and Speckle Metrology, San Diego, California, 1988.
- 2) H. G. van Elst, "Assessment of Dynamic Fracture Propagation Resistance at Instru-

mented High Velocity Gasgun Impact Tests on SENB-Specimens," ICF6, Vol.5, pp.3089-3097, 1984.

- 3) G. Wihlborg, "Design and Application of a Rig for High Energy Impact Tests," IUTAM Symposium, Tokyo, Japan, 1985.
- 4) H. D. Kim, J. H. Song, C.Y. Oh, "Development of a Finite Element Model for Crashworthiness Analysis of a Small-Sized Bus," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.153-161, 2002.
- 5) C. W. Kim, B. K. Han, J. C. Kim, H. Jung, "Effect of the Main Structure Stiffness on the Frontal Collision Behavior," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.234-241, 2002.
- 6) H. R. Kao, "Correlation between J and CMOD of an Impact Loaded 3-point Bend Specimens," Technical Report LUTFD2 / (TFHF-3040), pp.1-14, 1991.
- 7) A. Bergmark, H. R. Kao, "Dynamic Crack Initiation in 3 PB Ductile Steel Specimens," Technical Report LUTFD2 / (TFHF-3041), pp.1-23, 1991.
- 8) ABAQUS Manual, Version 4.8, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., 1989.
- 9) L. E. Malvern, "The Propagation of Longitudinal Waves of Plastic Deformation in a Bar of Material Exhibiting a Strain-Rate Effect," J. Appl. Mech., Vol.18, pp.203-208, 1951.
- 10) B. Brickstad, "A Viscoplastic Analysis of Rapid Crack Propagation Experiments in Steel," J. Mech. Phys. Solids, Vol.31, No.4, pp.307-332, 1983.