

## 평판에 충돌하는 사각봉의 소성응력해석

김기선<sup>1)</sup> · 조재웅<sup>2)</sup> · 최두석<sup>\*2)</sup>

천안공업대학 기계과<sup>1)</sup> · 천안공업대학 자동차과<sup>2)</sup>

### An Analysis of Plastic Stress in Square Bar Impacting Plate

Key-sun Kim<sup>1)</sup> · Jae-ung Cho<sup>2)</sup> · Doo-seuk Cho<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Cheonan National Technical College, Chungnam 330-717, Korea

<sup>2)</sup>Department of Automotive Engineering, Cheonan National Technical College, Chungnam 330-717, Korea

**Abstract** : Dynamic fracture is investigated in plate applied by impacting bar. Numerical simulations of the experiments are made by using a finite element method(FEM) code, LS-DYNA. The eroding surface-to-surface contact allows between impacting bar and impacted plate. The occurrence of hourglass deformations in an analysis can invalidate results and hourglass energy is minimized to obtain the good accuracy of result. Total, internal and kinetic energies, von Mises plastic stress and X,Y,Z velocities of impacting bar are analyzed in this study.

**Key words** : Dynamic fracture(동적 파괴), Impacting bar(충격봉), Hourglass energy(아우어그래스 에너지), Total internal energy(전 내부 에너지), Total kinetic energy(전 동적 에너지), Von Mises plastic stress(폰 미세스 소성 응력)

#### Nomenclature

- $\sigma_y$  : yield stress
- $E_{tan}$  : tangent modulus
- $\beta$  : hardening parameter
- C and P: strain rate parameter
- $\epsilon_f$  : failure strain.

#### 1. 서론

최근 차량들이 급격히 증가함에 따라 대중화 되면서 사고를 예방할 수 있는 안정성에 대하여 관심이 고조되고 있다. 특히 충돌 시 발생하는 사고에 대한 고려를 설계에 반영하고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 충돌 시 발생하는 하중은 짧은 시간 동안 전달되어 구조물을 변형하거나 파괴시킨다.

따라서 충격문제에 대한 정확한 해석은 구조 안전성의 관점에서 매우 중요하며 특히 순간적으로 집중되는 충격하중은 자동차 충돌 시 차체 변형의 직접적인 원인이 된다.<sup>1,2)</sup> 그리고 실제적으로는 충돌 상황이 다양하고 재료의 특성에 따라 그 강도가 달라져 소성 형태가 변하므로 여러 조건에 대한 설계 파라메타를 구하는 것이 필요하다. 충격 하중을 받는 구조물의 소성 영역에 대한 분포특성을 검토하기 위한 연구로서 사각 봉과 3점 굽힘 시험편을 모델로 하여 동적 거동과 충격점들에서의 경계조건들의 영향에 관한 연구 결과가 발표되었다.<sup>3,4)</sup> 해석 결과를 보면 충격 후에 소성응력은 대체로 시험편의 충격점 및 지지점 근처에서 다른 부위보다 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 세라믹 봉이 알루미늄 판에 충격되었을 때 일어나는 현상을 규명하고자 하는 기초연구로서 소성 모델을 설정 한 후 그 봉에 대한 동적 파

\*To whom correspondence should be addressed.  
dschoi@cnc.ac.kr

괴 해석을 하였다. 이를 위하여 세라믹 충격 봉에 대한 소성 모델을 정의하고 그 봉에 대한 파괴 변형률을 구하였으며 동적 해석 조건은 다음과 같다. 해석 요소들이 파괴 변형률을 초과할 경우 표면 대 표면 접촉을 통하여 그 요소들이 안쪽 요소들 쪽으로 침식되면서 내부 표면에 깔려 있는 요소들로 전환되게 한다. 한편 사용한 적분요소는 디폴트로서 One-Point 적분요소<sup>5)</sup>를 사용하며 이 요소는 재료의 과도 변형 해석에 있어서 그 CPU 시간을 범용 소프트웨어보다도 4배의 시간을 절약할 수가 있는 장점이 있는 반면에 해석 시 재료에 Zero에너지 변형을 일으킨다. Zero에너지 변형은 충격봉의 전체적인 반응보다 지그재그 변형을 일으키게 되어 실제적인 모양과는 차이가 있다. 이러한 변형을 hourglass라고 하며 이를 방지하기 위하여는 충격봉의 재료에 강성을 추가하거나 점성 감쇄의 변화에 따라서 hourglass조절을 하도록 한다. 본 해석 결과 세라믹 충격봉이 알루미늄판재에 부딪혔을 때의 운동양상은 비선형적 거동과 유사한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 연구 결과는 자동차의 충돌 해석에 있어 비선형 소성부분의 기초적인 설계 파라메타로 응용될 수 있을 것이다.

## 2. 모델링 및 해석 조건

충격봉의 재질은 세라믹이고 그 크기는 폭 0.28 m(X 방향)와 길이 6 m(Y 방향) 및 높이 0.38m (Z 방향)로 각각 정하였으며 그 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

한편 충격받는 판은 알루미늄의 재질이며 X 방향의 폭, Y 방향의 길이 그리고 Z 방향의 높이는 각각 3m, 1.7 m, 2m이며 그 기계적 물성치는 Table 2와 같다.

본 해석에 적용된 소프트웨어는 미국 Ansys사에서 개발한 충격 해석의 전용인 LS-DYNA를 사용하여 수행하였다.<sup>6)</sup> 충격봉과 알루미늄판은 8-절점의 벽돌(brick) 요소로서 각각 272개의 절점들, 144개의 요소들과 3087개의 절점들, 2400개의 요소들로 분할하였으며 충격봉의 속도는 아래쪽 Y축 방향으로 800 m/s이다.

한편 본 해석의 모델은 비선형 운동 가공 경화성을 갖고 있으며<sup>7-9)</sup>, 식 (1)과 (2)와 같다. 여기에서 변

Table 1 The impacting material

Material	Ceramic
Density ( $\rho$ )	8400 Kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus (E)	330 X 10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.24

Table 2 The impacted material

Material	Aluminium
Density ( $\rho$ )	7860 Kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus (E)	100 X 10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.34
Failure strain ( $\epsilon_f$ )	12.5%
Yield stress ( $\sigma_y$ )	500 X 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>
Strain rate parameter (C)	40(1/s)
Strain rate parameter (P)	50

형률 의존성과 파단이 일어났을 경우의 등방성 및 운동적인 요소들을 고려하며 가공 경화 계수  $\beta$ 로 조정될 수 있으며  $\beta$ 값이 0 인 경우 운동 가공경화만의 조건이고 1의 경우는 등방성 가공 경화를 나타낸다.

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_P^{eff}) \quad (1)$$

$$E_P = \frac{E_{\tan} E}{E - E_{\tan}} \quad (2)$$

변형률 의존 요소에 의해 항복 응력 값을 조정할 수 있는 Cowper -Symonds Model로 쓸 수 있다.<sup>10)</sup> 여기에서  $\sigma_0$ 는 초기항복응력이고  $\epsilon$ 는 변형률이며 C와 P는 Cowper-Symonds 변형률 변수들이다.  $\epsilon_P^{eff}$ 와  $E_P$ 는 각각 유효 소성 변형률과 탄성계수에 의해 주어지는 소성 경화 계수이다.

또한  $\sigma_y$ ,  $E_{\tan}$ ,  $\beta$ , C, P 및  $\epsilon_f$ 는 항복 응력, 점선 계수, 경화 변수, 변형률 변수들 및 파괴 변형률이다. 접촉 표면들은 한 모델에 있어서 요소들 사이에서의 간섭에 대한 광범위한 형태들을 나타내게 해 준다. 접촉은 한 물체의 표면이 다른 물체의 표면에 침투할 때 이루어지며 이 형태는 과도한 접촉 영역들을 가진 임의의 물체들에 대하여 사용되어진다. 따라서 본 연구에서는 봉과 판 사이에서 동적으로 충격하는 동안에 발생하는 과도한 변형 접촉과 간섭으로 인하여 침식되는 표면 대 표면 접촉을 고려하여 해석하였다.

### 3. 해석 결과

본 연구의 해석 모델로서 위의 모델은 사각 충격 봉이고 아래쪽은 충격받는 판재로서 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 2는 시간의 경과에 따른 hourglass 에너지를 나타내고 hourglass 에너지는 초기인 0.132ms에서 약  $0.37 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로 최대치를 보이고 있다. 다음으로 Fig. 3은 시간에 따른 내부 에너지의 변화를 나타내고 내부에너지의 최대치는 0.851ms 지난 후  $4.5 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로 되었다. 일반적으로 해석 모델에 대한 전체의 hourglass 에너지가 그 내부 에너지의 10% 이상이라면 해석 결과를 신뢰할 수 없다.<sup>11)</sup> 전반적인 내부에너지와 비교하여 hourglass 에너지의 비율

은 10% 범위 내의 8.2% 미만으로 되어 본 해석의 결과는 신뢰할 수 있다고 사료된다. 한편 Fig. 4부터 Fig. 8까지는 충격을 가한 직후부터 종료시간까지 증가(von Mises) 소성응력의 변화를 5등분으로 구분하여 나타낸 결과이다. Fig. 4는 시작 초기인 0.198 ms 시간에서의 증가 소성응력의 최대 값이  $0.119 \times 10^5 \text{ MPa}$ 로 증가되어 있고 그 위치는 충격 받는 판의 바닥으로부터 약 1m에서 발생됨을 알 수 있다. Fig. 5는 0.399 ms의 경과 시간에서의 결과로서 충격 받는 판의 바닥으로부터 약 2.5m 위치에서 그 최대 응력이 발생한다. Fig. 6과 Fig. 7은 충격하여 각각 0.6ms, 0.798ms의 경과 시간이 지난 후 판을 뚫고 나가기 전까지의 증가소성응력을 나타낸 것이다. Fig.

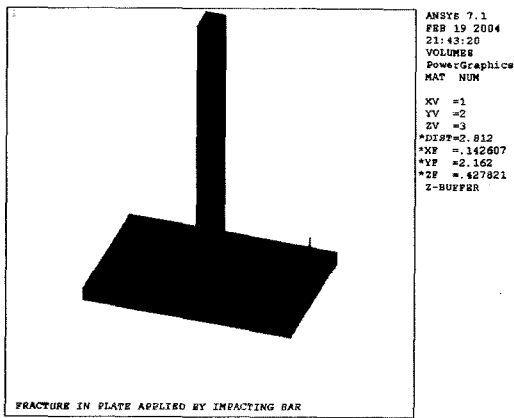


Fig. 1 The models of impacting bar and impacted plate

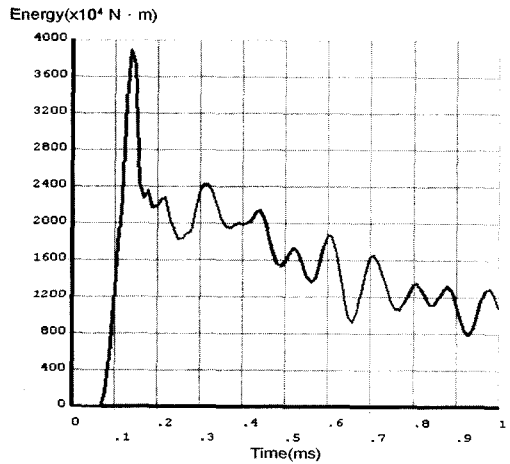


Fig. 2 The hourglass energy(N · m) according to time(s)

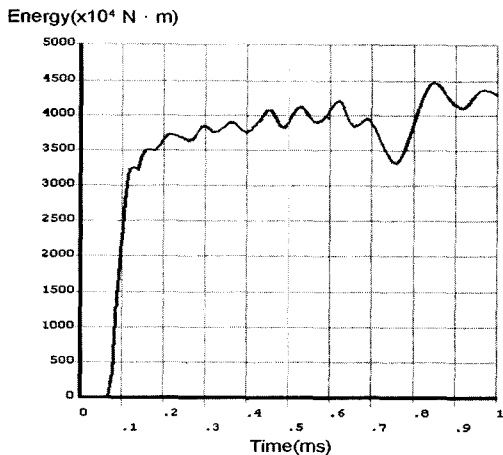


Fig. 3 The internal energy(N · m) according to time(s)

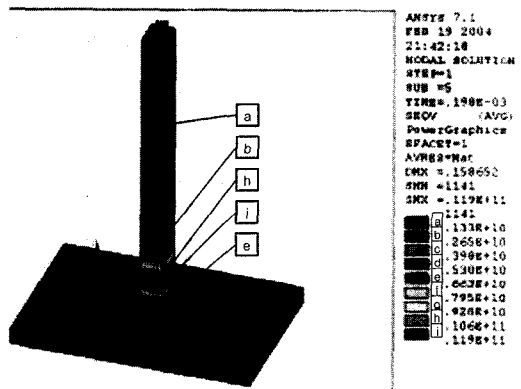


Fig. 4 Von mises plastic stress (Pa) at time (0.198 x 10<sup>-3</sup>s)

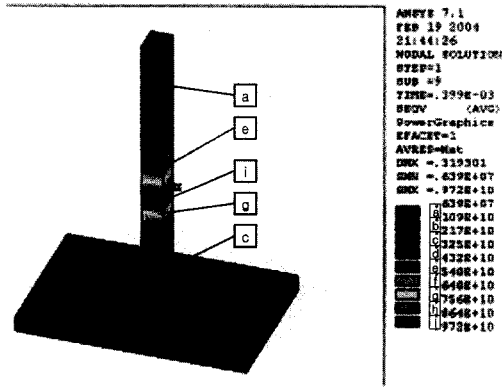


Fig. 5 Von mises plastic stress (Pa) at time  $(0.399 \times 10^{-3} \text{ s})$

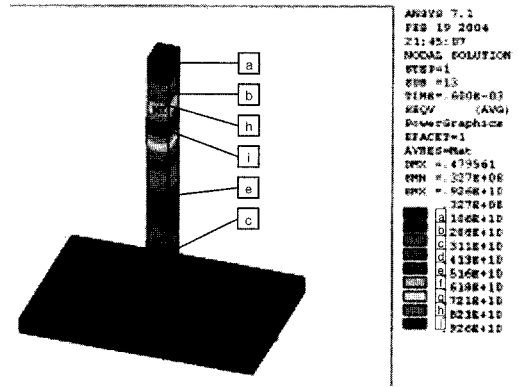


Fig. 6 Von mises plastic stress (Pa) at time  $(0.600 \times 10^{-3} \text{ s})$

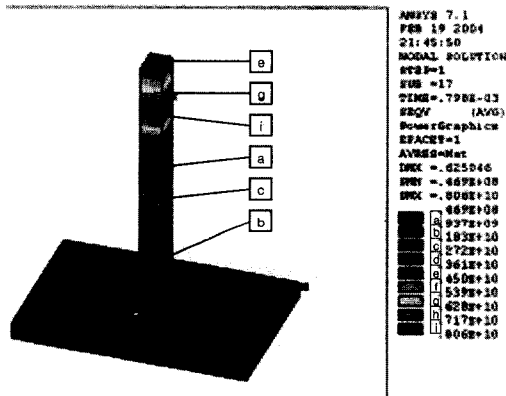


Fig. 7 Von mises plastic stress (Pa) at time  $(0.798 \times 10^{-3} \text{ s})$

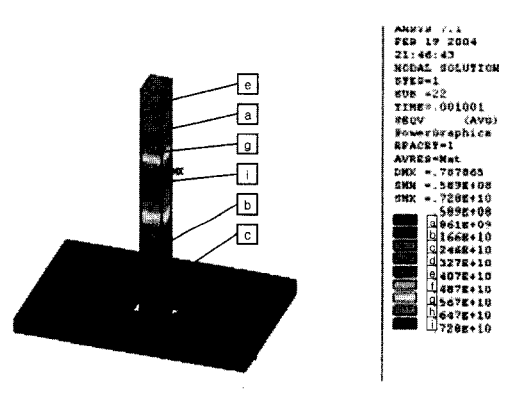


Fig. 8 Von mises plastic stress (Pa) at time  $(0.001001 \text{ s})$   
Velocity  $(\times 10^{-2} \text{ m/s})$

6은 판의 바닥으로부터 약 4.8m 위치에서 그 최대응력이  $0.926 \times 10^4 \text{ MPa}$ 로 나타나고 Fig. 7은 거의 위쪽 상부인 5.3m 지점에서 그 최대 응력이  $0.806 \times 10^4 \text{ MPa}$ 이 됨을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 충격 봉이 판을 뚫고 나감에 따라 해석의 종료 시간인 0.001초에서의 최대 응력 값의 위치는 충격 받는 판을 뚫고 나가기 전의 Fig. 7의 경우에서보다 그 위치가 좀 더 아래쪽인 약 4m 지점에서 발생된다.

이 결과들로부터 알 수 있는 바와 같이 충격 후 0.198ms의 시간에서 최대 응력이 발생되어 시간이 지남에 따라 점점 작아짐을 볼 수 있다. 또한 최대응력의 발생 지점은 판을 뚫고 나가기 전까지는 충격 지점으로부터 가까이에서 발생되나 시간이 지남에 따라 점점 위쪽으로 이동하여 멀어지는 것을 볼 수 있다. 반면에 판을 뚫고 나가게 되면서 그 최대 응력

의 위치는 반대로 충격 지점으로 가까이 접근됨을 확인할 수 있다. 따라서 충격 봉에 있어서의 von Mises 소성 응력의 최대치는 시간에 따라서 충격받는 판의 바닥으로부터 약간 위쪽의 위치로 점점 더 올라감을 볼 수 있다. 그러나 충격 봉이 판을 뚫고 나감에 따라서, 이 응력의 최대치의 위치는 판을 뚫고 나가기 전의 경우보다도 더 아래 쪽 위치에서 일어남을 볼 수 있다.

한편 Fig. 9부터 Fig. 11까지는 각각 충격봉의 충격 시간에 따른 X, Y, Z 방향의 속도들을 나타내고 있으며 Fig. 9는 충격봉의 폭 방향인 X 방향의 속도이며 시간이 증가함에 따라 증가함을 보이고 있으나 그 값은 다소 진동하는 것으로 보인다.

Fig. 10은 충격봉의 길이 방향인 Y 방향의 속도이며 충격 후 속도가 점점 증가하다가 0.5ms 경과 후

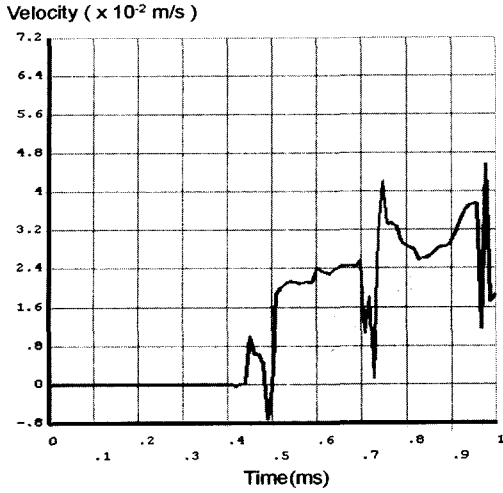


Fig. 9 X-velocity (m/s) of impacting bar according to time(s)

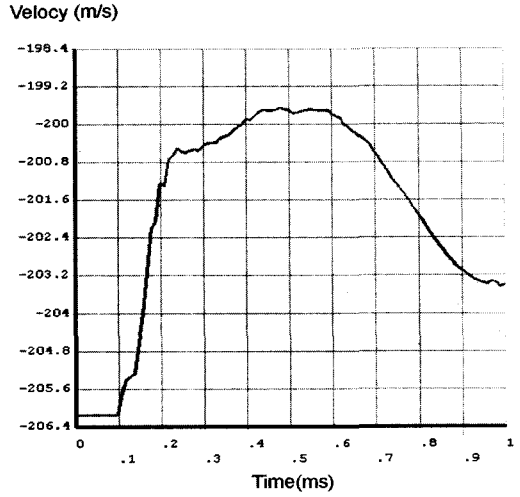


Fig. 10 Y-velocity (m/s) of impacting bar according to time(s)

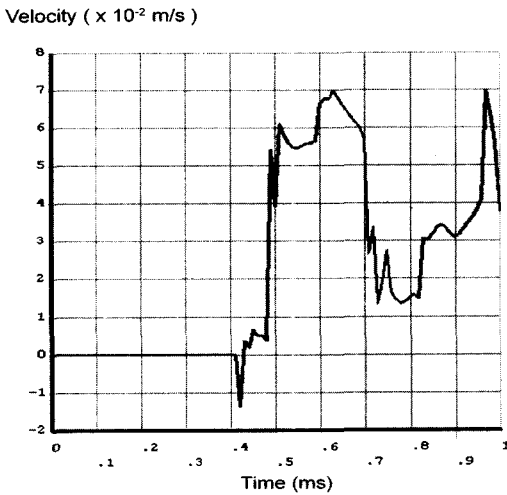


Fig. 11 Z-velocity (m/s) of impacting bar according to time(s)

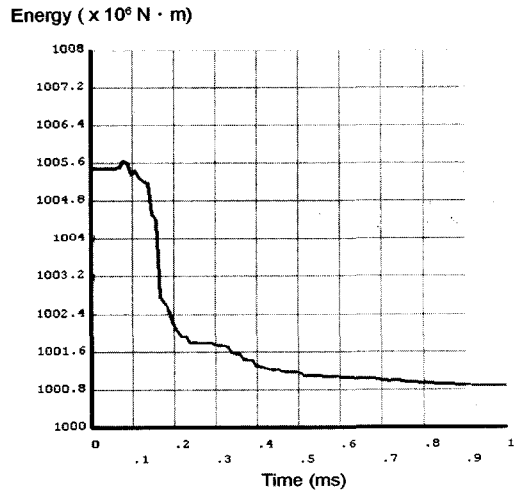


Fig. 12 The total energy(N · m) according to time(s)

최대의 속도를 보여 199.1 m/s까지 증가함을 볼 수 있으며 그 후 감소함을 보이고 있다. 그리고 충격봉의 Y방향 속도는 그 재료의 정적 비선형 거동과도 유사한 경향을 보이고 있다. 0.2ms의 시간까지는 탄성영역이고 0.6ms 이후는 항복응력을 지난 소성영역과 유사하다고 사료된다. Fig. 11은 충격봉의 Z방향의 속도이며 Fig. 9와 같이 시간이 증가함에 따라 증가함을 보이고 있으나 Fig. 9보다는 훨씬 더 높은 속도를 보이고 있다.

다음으로 경과 시간에 따른 전 에너지와 운동 에

너지를 각각 Fig. 12와 13에 나타내고 있다. Fig. 12에서는 0.22ms의 경과 시간까지는 전 에너지의 값이  $0.1 \times 10^{10}$  N·m로 유지하다가 그 후 급격히 감소함을 볼 수 있으며 운동 에너지의 값에 대한 Fig. 13에서도 Fig. 12와 같은 경향을 보이고 있다.

따라서 충격봉의 전 에너지와 운동에너지는 시작 시간부터 220  $\mu$ s 시간까지 매우 많이 감소되고 있다. Fig. 14는 경과 시간에 따른 미끄럼 에너지(sliding energy)의 변화를 보이고 있다. 시작 시간부터 220  $\mu$ s 시간까지 매우 많이 증가되고 있고 약 0.22ms에서

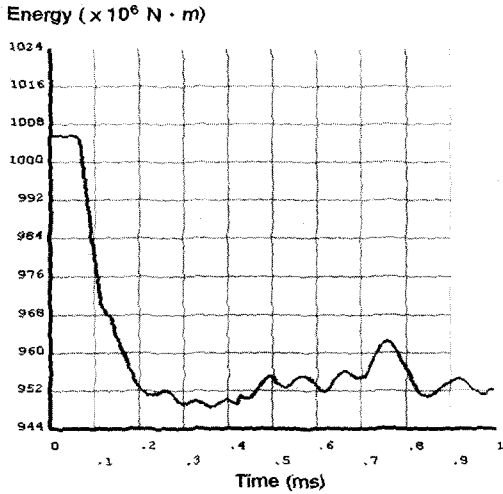


Fig. 13 The kinetic energy(N · m) according to time(ms)

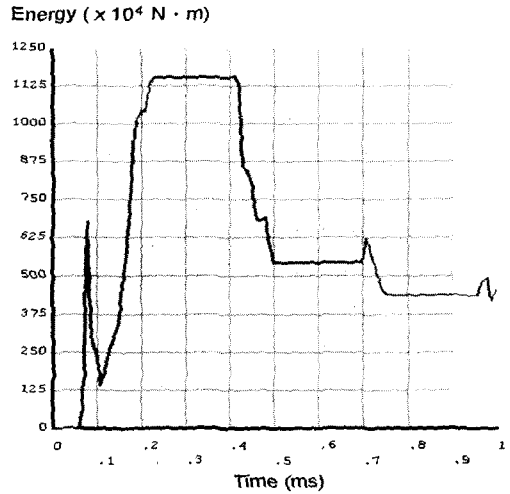


Fig. 14 The sliding energy(N · m) according to time(ms)

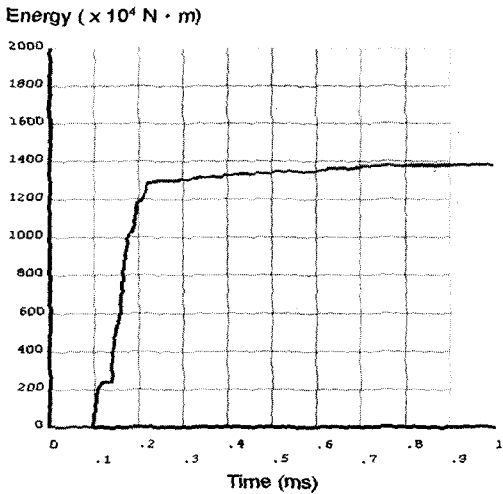


Fig. 15 The eroding kinetic energy(N · m) according to time(ms)

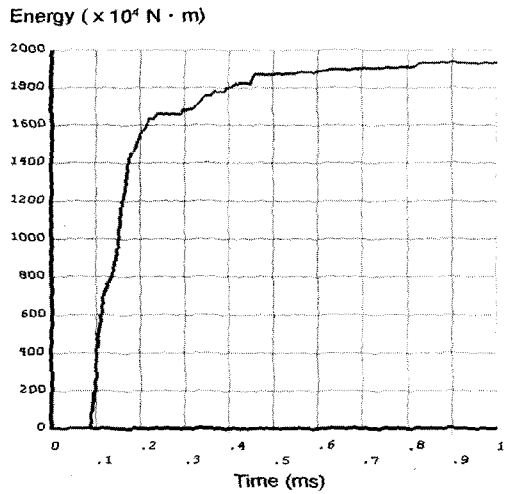


Fig. 16 The eroding internal energy(N · m) according to time(ms)

0.4ms까지  $1150 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로 일정한 최대값이 형성되었다. 또한 미끄럼 에너지는 Fig. 15는 경과 시간에 따라서의 침식하는 운동에너지(eroding kinetic energy)를 나타내고 있으며 0.22ms 시간까지는  $0.129 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로 매우 많이증가하다가 종료시간까지 완만히 증가하다가 일정해 짐을 보이고 있다.

Fig. 16은 침식하는 내부 에너지의 변화를 보인 것으로 그 경향은 Fig. 15와 유사한 경향을 보이며 0.22ms 시간까지는  $0.164 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로 매우 많이 증가되고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 세라믹 봉이 알루미늄 판에 충격되었을 때 일어나는 현상을 규명하고자 하는 기초연구로서 소성 모델을 설정 한 후 그 봉에 대한 동적 파괴 해석을 하였다. 이를 위하여 세라믹 충격 봉에 대한 소성 모델을 정의하고 그 봉에 대한 파괴 변형률을 구하였으며 그 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 해석에 있어 전반적인 내부 에너지에 대한 hourglass 에너지의 비율은 10% 이내이다. 따라

서 충격에 대한 응력 해석 결과는 신뢰할 수 있다고 판단된다.

- 2) 충격봉에 있어서의 von Mises 소성 응력의 최대치의 위치는 시간에 따라서 충격받는 판의 바닥으로부터 약간 더 위쪽으로 올라감을 볼 수 있다. 그러나 충격 봉이 충격 받는 판을 뚫고 나가면서, 이 응력의 최대치는 충격 봉을 뚫고 나가기 전의 위치에서 보다도 더 아래 쪽 위치에서 일어남을 볼 수 있다.
- 3) 충격 봉의 전 에너지와 운동에너지는 시작 시간부터 220  $\mu$ s 시간까지 매우 많이 감소되고 있다.
- 4) 미끄럼 에너지, 침식하는 운동에너지 그리고 침식하는 내부에너지는 시작 시간부터 220  $\mu$ s 시간까지 매우 많이 증가되고 있다.
- 5) 충격봉의 충돌방향과 같은 Y방향 속도는 그 재료의 정적 비선형 거동과 유사한 경향을 보이고 있다.

이러한 해석 결과들을 이용하여 충격에 의한 재료의 동적 파단에 있어 어느 부위에서 응력 및 변형을 많이 받아 위험성이 있는가를 판단할 수 있다. 또한 이 결과들은 충돌 문제에 대한 안전성 평가 및 그 설계 자료에 활용할 수 있는 귀중한 자료라 사료된다.

### References

- 1) I. S. Jang, D. B. Chae, "The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.177-185, 2000.
- 2) J. H. Song, J. M. Park, H. C. Chae, Y. H. Kang, S. M. Yang, "The Estimation of Dynamic Strength Characteristics of High Tensile Steel by Dynamic Lethargy Coefficient," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.96-100, 2002.
- 3) A. Bergmark, H. R. Kao, "Dynamic Crack Initiation in 3PB Ductile Steel Specimens," Technical Report, LUTFD2 TFHF-3041, Lund Institute of Technology, Sweden, pp.1-23, 1991.
- 4) H. R. Kao, "Correlation between J and CMOD of an Impact Loaded 3-point Bend Specimens," Technical Report, LUTFD2 TFHF-3040, Lund Institute of Technology, Sweden, pp.1-14, 1991.
- 5) Training Manual Explicit Dynamics with ANSYS LS-DYNA, ANSYS Version 7.1, pp. 4-7, 2003.
- 6) LS-DYNA Theoretical Manual, ANSYS Version 7.1, 2003.
- 7) F. Barlat, J. Lian, "Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals. Part I: A Yield Function for Orthotropic Sheets Under Plane Stress Conditions," Int. Journal of Plasticity, Vol.5, pp.51-66, 1989.
- 8) F. Barlat, D. J. Lege, J. C. Brem, "A Six-Component Yield Function for Anisotropic Materials," Int. Journal of Plasticity, Vol.7, pp.693-712, 1991.
- 9) R. Hill, "A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals," Proceedings of the Royal Society of London, Series A., Vol.193, pp.197-281, 1948.
- 10) F. K. Chang, K. Y. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration," Journal of Composite Materials, Vol.21, pp.834-855, 1987.
- 11) Training Manual Explicit Dynamics with ANSYS LS-DYNA, ANSYS Version 7.1, pp.4-7, 2003.