

판에 고속 충돌하는 봉의 동적 파괴에 관한 연구

조재웅*, 한문식⁺

(논문접수일 2007. 5. 29, 심사완료일 2007. 6. 28)

Study on the Dynamic Fracture of Rod Impacting on Plate at High Speed

Jae-Ung Cho*, Moon-Sik Han⁺

Abstract

This study analyzes the dynamic fracture phenomenon that aluminum rod impacts aluminum plate or rigid plate and deforms. The value of von-Mises stress in the instance that aluminum rod deforms on rigid plate after contact becomes 1.3 times as large as that in the instance of contact. On the contrary, the value of von-Mises stress in the instance that aluminum rod goes through aluminum plate after contact becomes 0.7 times as small as that in the instance of contact. The value of internal energy in the instance that aluminum rod contacts aluminum plate becomes 2.3 times as large as that in the instance that aluminum rod contacts rigid plate. But the value of kinetic energy in the instance that aluminum rod contacts aluminum plate becomes 0.9 times as small as that in the instance that aluminum rod contacts rigid plate. The value of internal energy in the instance that aluminum rod goes through aluminum plate after contact becomes 0.7 times as small as that in the instance that aluminum rod impacts rigid plate and deforms. And the value of sliding energy in the instance that aluminum rod contacts aluminum plate becomes 0.2 times as small as that in the instance that aluminum rod contacts rigid plate. The value of total energy in case that aluminum rod impacts aluminum plate becomes 0.9 times as small as that in the case that aluminum rod impacts rigid plate.

Key Words : impact(충돌), rigid plate(강재로 된 판), von-Mises stress(폰 마이즈 응력), internal energy(내부에너지), sliding energy(미끄럼에너지), total energy(전에너지)

1. 서론

최근 차량들이 급격히 증가함에 따라 그 사고를 예방 할

수 있는 안정성에 대하여 관심이 고조되고 있다. 특히 제품 생산 과정 중에서 설계와 충돌테스트 과정을 가장 중요하게 생각한다. 제품의 안전함이 곧 자동차의 안전성과도 직결되

* 공주대학교 기계·자동차공학부
+ 교신저자, 계명대학교 기계·자동차공학부 (sheffhan@kmu.ac.kr)
주소: 대구광역시 달서구 신당동 1000번지

기 때문이다. 그러므로 충돌문제에 대한 정확한 해석은 차체 안전성의 관점에서 매우 중요하며 특히 순간적으로 집중되는 충돌하중은 차체 변형으로 인한 사고의 직접적인 원인이 된다^(1,2). 이와 유사한 연구들로서는 충돌 하중을 받는 3PB 시험편의 동적 거동과 충돌 점들에서의 경계 조건의 영향에 대하여 연구되어 있다⁽³⁾. 실제적인 충돌 상황에 따라서는 차체의 강도가 달라져 그 형상과 변형이 변하므로 여러 가지 설계 조건들을 구하는 것이 필요하다. 그러나 차체의 안정성을 테스트하기 위해 매일 신제품이 나올 때 마다 직접 자동차를 충돌시켜 그 안정성을 테스트 해 볼 수는 없다. 말 그대로 충돌테스트기 때문에 자동차 모형도 크게 망가지게 되며, 매번 이를 새로 제작하여 실험을 거치는 것은 많은 비용을 필요로 하기 때문이다. 때문에 컴퓨터를 활용해 가상의 충돌 테스트를 거치게 된다. 자동차 부품을 설계하고 충돌테스트 등을 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행함으로써 가상의 충돌 환경을 구성하고 이를 통해 차체의 안전성과 재질을 검증하게 된다. 본 연구에서는 충돌 하중을 받는 구조물의 형상 변화를 검토하기 위하여 충돌을 가하는 사각봉과 충돌을 받는 사각형 판에 대하여 해석하였다. 알루미늄 사각 봉이 알루미늄 판이나 강재로 된 판에 충돌되었을 때 일어나는 현상을 규명하고자 하는 기초 연구로서 이 충돌 봉이나 판에 대한 파괴 해석을 한다. 따라서 봉이나 판의 형상이나 소성 응력 및 운동에너지 등을 검토하여 충돌 시 어떻게 변형을 받고 파괴되는 가를 조사한다. 또한 봉과 판의 동적 충돌 시 표면 대 표면의 접촉 조건을 주어서 과도한 변형과 간섭으로 인한 접촉이나 판의 파괴에 의한 봉의 판에 대한 침투를 고려하여 해석한다. 이러한 연구 결과는 차체나 구조물의 충돌 해석에 있어 안전성 평가 및 설계 자료에 활용이 될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 유한 요소 해석

Fig. 1과 같이 본 연구의 해석 모델로서 왼쪽은 사각 충돌 봉이고 오른쪽은 충돌 받는 판재를 나타낸다. 충돌봉의 모델은 알루미늄이고 그 크기는 폭 0.28m(X 방향)와 길이 0.38m(Y 방향) 및 높이 4m(Z 방향)로 각각 정하였으며 그 물성치는 Table 1과 같다. 충돌 받는 판은 알루미늄이나 강재로 가정하였다. 이 판은 X 방향의 폭, Y 방향의 길이 그리고 Z 방향의 높이는 각각 3m, 2m, 0.2m이다. 본 해석에 적용된 프로그램은 ANSYS LS-DYNA를 사용하여 수행하였다⁽⁴⁾. 충돌 봉이나 판은 8-절점의 Brick 요소로서 각각 272개의 절점들, 144개의 요소들과 3087개의 절점들, 2400개

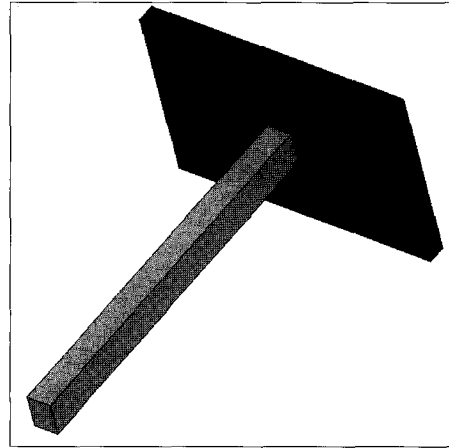


Fig. 1 The Model of Impacting rod and the plate in impact load

Table 1 Mechanical properties of the Model

Material	Aluminium
Density(ρ)	7860Kg/m ³
Elastic modulus(E)	100×10 ⁹ N/m ²
Poisson's Ratio(ν)	0.34
Failure Strain(ϵ_f)	12.5%
Yield Stress(σ_y)	500×10 ⁶ N/m ²
Strain Rate Parameter(C)	40(1/s)
Strain Rate Parameter(P)	50

의 요소들로 분할하였으며 충돌봉의 속도는 Z축의 음 방향으로 800m/s이다. 한편 본 해석에서 사용된 알루미늄은 비선형 운동 가공 경화성을 갖고 있으며⁽⁵⁻⁷⁾, 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

여기에서 σ_0 는 초기항복응력이고 ϵ 는 변형률이며 C와 P는 Cowper-Symonds 변형률 변수들이다. ϵ_p^{eff} 와 E_p 는 각각 유효 소성 변형률과 탄성계수에 의해 주어지는 소성 경화계수이다. 그리고 σ_y , E_{tan} 및 β 는 항복응력, 접선계수, 경화변수이다.

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

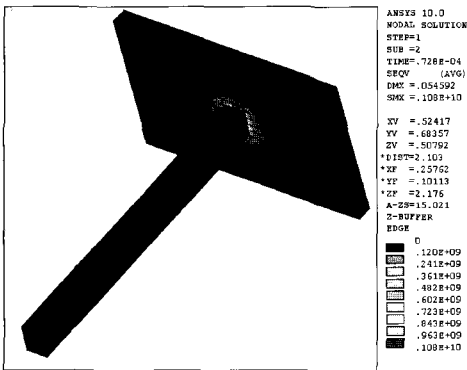
$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (2)$$

Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 접촉한 시점인 7.28×10^{-5} 초의 경과시간에서의 등가응력을 나타낸다. 대체로 봉이 접촉하는 끝 부분에서 최대의 등가응력을 보이고 있다. (a)의 경우는 최대의 등가응력이 $0.109 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 이고 (b)의 경우는 $0.5 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 로서 (a)의 경우가 (b)의 경우의 2 배로 그 등가응력이 커짐을 알 수 있다.

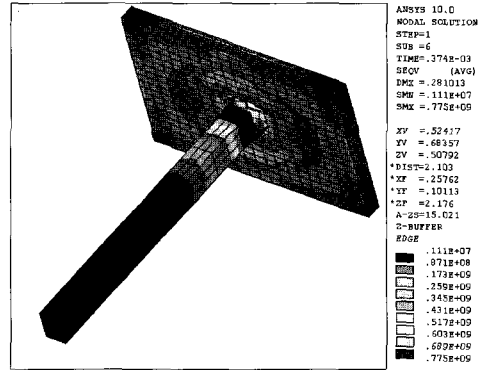
또한 Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 접촉한 후인 0.374×10^{-4} 초의 경과 시간에서의 등가응력을 나타 낸 것으로서 (a)의 경우는 알루미늄 봉이 알루미늄 판을 뚫고 나간 후의 바로 그 시점으로서 최대의 등가 응력은 $0.775 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 이다. 그리고 (b)의 경우는 알루미늄 봉이 강체의 판을 뚫고 나가지 못하고 알루미늄 봉이 찌그러드는 현상을 보이고 있고 그 응력은 $0.645 \times 10^9 \text{N/m}^2$

이다. (a)의 경우가 (b)의 경우보다 1.2배 정도로 커져 있다. 또한 알루미늄 봉이 강체로 된 판에 접촉하여 시간이 경과된 (b)의 경우는 접촉한 시점인 (b)의 경우보다는 그 등가응력의 크기가 1.3배 정도 커져 있음을 알 수 있다. 반면에 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 접촉되어 뚫고 나가는 (a)의 경우는 접촉한 시점인 (a)의 경우보다는 그 등가응력의 크기가 0.7배 정도로 낮아져 있음을 알 수 있다.

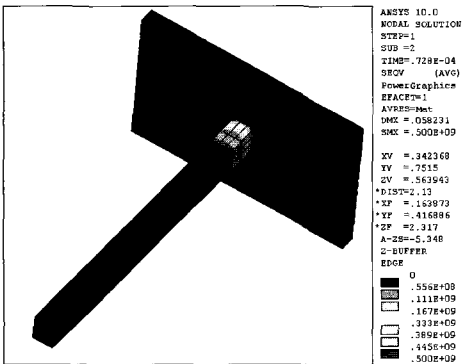
Fig. 4는 충돌봉의 시간에 따른 내부에너지의 변화를 나타 낸 것으로 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 접촉 되는 경우이다. 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 판에 접촉한 시점인 7.28×10^{-5} 초의 경과시간에서의 내부에너지는 201769N·m 이었고 강체로 된 판에 충돌되는 경우는 88805.2N·m로서 2.3 배 정도 훨씬 컸음을 알 수 있다. 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 접촉되어 뚫고 나가는 시점에서는 강체로 된 판에 알루미늄 봉



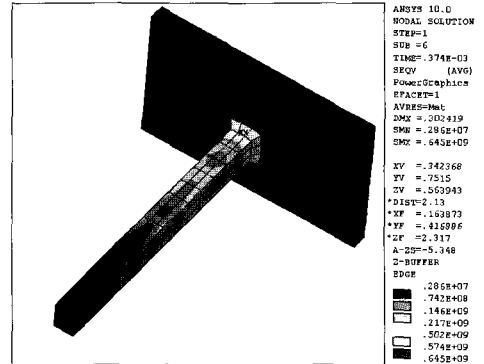
(a) aluminum rod impacts aluminum plate



(a) aluminum rod impacts aluminum plate



(b) aluminum rod impacts rigid plate



(b) aluminum rod impacts rigid plate

Fig. 2 Equivalent stress contour line(The elapsed time of 7.28×10^{-5} sec)

Fig. 3 Equivalent stress contour line(The elapsed time of 0.374×10^{-4} sec)

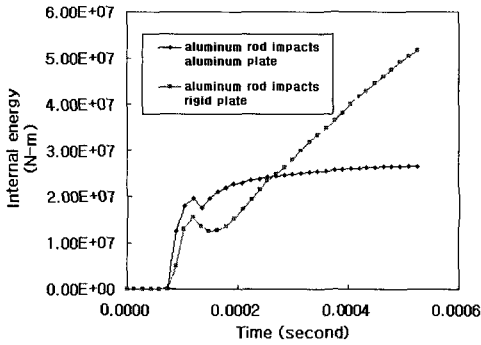


Fig. 4 The change according to the time of the internal energy in impacting rod

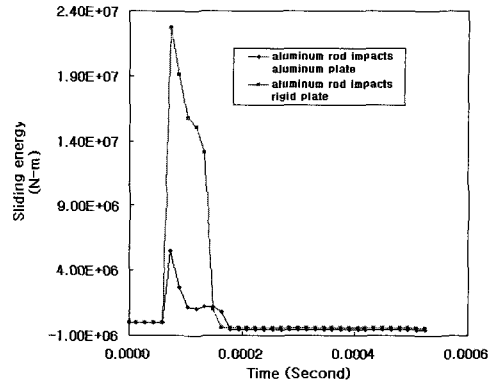


Fig. 6 The change according to the time of the sliding energy in impacting rod

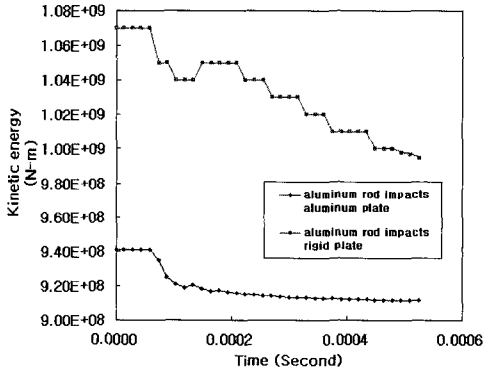


Fig. 5 The change according to the time of the kinetic energy in impacting rod

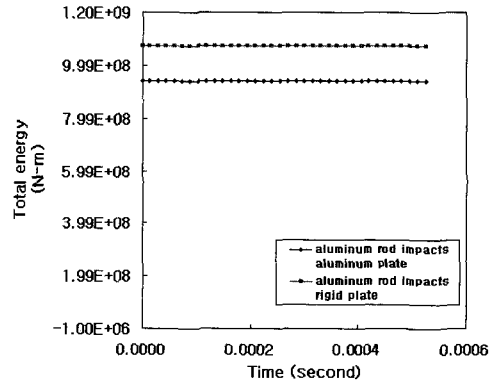


Fig. 7 The change according to the time of the total energy in impacting rod

이 충돌하여 알루미늄 봉이 찌그러드는 경우의 $3.64 \times 10^7 \text{N-m}$ 보다 $2.57 \times 10^7 \text{N-m}$ 로서 오히려 내부에너지는 0.7배 정도 작아짐을 알 수 있다. Fig. 5는 충돌봉의 시간에 따른 운동에너지의 변화를 나타낸 것으로 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 접촉하는 경우이다. 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 판에 접촉하는 시점에서부터 운동에너지는 $9.41 \times 10^8 \text{N-m}$ 로서 강체로 된 판에 충돌되는 경우의 $1.07 \times 10^9 \text{N-m}$ 보다 오히려 0.9배 정도 작아짐을 알 수 있다. 두 경우 공히 접촉 후 시간이 경과함에 따라 그 운동에너지는 작아져 감을 알 수 있다.

Fig. 6은 충돌봉의 시간에 따른 미끄럼 에너지의 변화를 나타낸 것이다. 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 충돌되는 경우로서 판에 접촉한 시점인 7.28×10^{-5} 초의 경과 시간 전까지의 미끄럼 에너지는 없다. 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 접촉한 시점에서 그 에너지가 $5.53 \times 10^6 \text{N-m}$ 로서 강체로 된 판에 충돌하는 경우의 $2.28 \times 10^7 \text{N-m}$ 보다

0.2배 정도 작아짐을 알 수 있다. 두 가지 경우 공히 그 시점 이후의 경과 시간에서는 에너지는 급격히 작아져서 일정해짐을 알 수 있다. Fig. 7은 충돌봉의 시간에 따른 전 에너지의 변화를 나타낸 것으로 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 충돌되는 경우로서 두 경우 공히 일정함을 알 수 있다. 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 $9.41 \times 10^8 \text{N-m}$ 로서 강체로 된 판에 충돌하는 경우의 $1.07 \times 10^9 \text{N-m}$ 보다 0.9배 정도 작아짐을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구는 알루미늄 봉이 알루미늄 판이나 강체로 된 판에 충돌하여 변형되어 동적으로 파괴되어 가는 현상을 해석한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 알루미늄 봉이 강체로 된 판에 접촉하여 찌그러드는 경우는 접촉한 시점 보다는 그 등가응력의 크기가 1.3배 정도 커진다. 반면에 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 접촉되어 뚫고 나가는 경우는 접촉한 시점의 경우보다는 그 등가응력의 크기가 0.7배 정도로 낮아진다.
- (2) 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 판에 접촉한 시점에서의 내부에너지는 강체로 된 판에 충돌되는 경우보다 2.3배 정도 훨씬 컸으나 운동에너지는 0.9배 정도 작아진다. 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 접촉되어 뚫고 나가는 시점에서는 강체로 된 판에 알루미늄 봉이 충돌하여 알루미늄 봉이 찌그러드는 경우보다 오히려 내부에너지는 0.7배 정도 작아진다.
- (3) 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 판에 접촉한 시점 전까지의 미끄럼 에너지는 없다가 접촉 후 바로 그 시점에서 알루미늄 판에 충돌하는 경우는 강체로 된 판에 충돌하는 경우보다 0.2배 정도 작아진다. 두 가지 경우 공히 그 시점 이후의 경과 시간에서는 에너지는 급격히 작아져서 일정해진다.
- (4) 알루미늄 봉이 알루미늄 판에 충돌되는 경우는 강체로 된 판에 충돌하는 경우보다 전에너지는 0.9배 정도 작아진다.

참고 문헌

- (1) Jang, I. S. and Chae, D. B., 2000, "The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis," *Trans. KSAE*, Vol. 8, No. 4, pp. 177~185.
- (2) Song, J. H., Park, J. M., Chae, H. C., Kang, Y. H. and Yang, S. M., 2002, "The Estimation of Dynamic Strength Characteristics of High Tensile Steel by Dynamic Lethargy Coefficient," *Trans. KSAE*, Vol. 10, No. 2, pp. 96~100.
- (3) Bergmark, A. and Kao, H. R., 1991, "Dynamic Crack Initiation in 3PB Ductile Steel Specimens," *Technical Report*, LUTFD2 TFHF-3041, Lund Institute of Technology, Sweden, pp. 1~23.
- (4) *LS-DYNA Theoretical Manual*, ANSYS Version 10.0, 2005.
- (5) Barlat, F. and Lian, J., 1989, "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.
- (6) Barlat, F., Lege, D. J. and Brem, J. C., 1991, "A Six-Component Yield Function for Anisotropic Materials," *Int. Journal of Plasticity*, Vol. 7, pp. 693~712.
- (7) Hill, R., 1948, "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.