

동적 구성방정식을 적용한 자동차 차체 구조물의 충돌 특성 분석

Crashworthiness of Auto-body Structures with the Dynamic Constitutive model

강우종*, 허훈*, 이영우**, 이기수**
Woojong Kang, Hoon Huh, YoungWoo Lee, GiSu Lee

ABSTRACT

The crashworthiness of vehicles with finite element method depends on the geometry modeling and material properties. In order to ensure the impact characteristics of auto-body structures by a finite element method, the dynamic behavior of sheet metals must be examined. In this paper, high strain rate tensile tests have been carried out with a tension type split Hopkinson bar apparatus specially designed for sheet metals. Simulation of auto body structures has been carried out by an elasto-plastic finite element method with explicit time integration. The crashworthiness of auto-body structures analyzed with quasi-static constitutive relation is compared with the one with rate dependent constitutive model. The frontal frames and a square tube used in numerical simulation. The impact characteristics such as the deformed shapes and the impact energy absorption of auto-body structures are investigated with the variation of the strain rate.

주요기술용어 Hopkinson Bar(홉킨슨바), Crashworthiness(충돌해석), Strain rate hardening(변형률 속도 경화)

1. 서론

차량의 연비감소는 환경오염의 억제를 위하여 각 자동차 관련 회사에서 중점을 두어 연구하고 있는 분야이다. 경량 차체의 개발을 위하여 알루미늄 차체를 개발하는

등의 노력을 하고 있으며 철강 업계에서도 고장력 강판을 개발하여 차체의 경량화를 위한 연구를 수행하고 있다. 차량의 경량화 문제는 근본적으로 차량의 충돌 안전성의 문제와 직결되기 때문에, 자동차용 냉연강판의 충돌특성에 관한 연구가 선결되어야 하며 이를 바탕으로 한 차체 구조의 충돌 특성 분석이 필요하게 된다. 충돌 특성 분석을 위하여 실험적 방법과 더불어 유한요소법을 이용한 수치해석 방법이 많이 쓰이고 있다. 차체 구조물의 충돌해석을 위해서는 변형률 속도 효과가 고려된 냉연강판의

구성방정식이 필요하지만, 많은 경우에 있어서 동적 실험을 이용하여 구성방정식을 구하는 데는 어려움이 있기 때문에 정적인 물성치를 이용하여 충돌해석을 수행하여 왔다. 해석 결과를 바탕으로 구조물의 충돌 안정성을 확보하기 위해서는 보다 정확한 재료의 물성치의 확보가 필요하게 되며 그에 따른 적절한 시험 방법이 요구되고 있다.

재료의 동적 항복 응력을 결정하기 위한 대표적인 시험 방법으로 Taylor 봉 충격 시험과 홉킨슨 바 시험법이 있다. 홉킨슨 바 시험은 주로 압축시험에 사용되어왔으며, Harding등¹⁾에 의하여 인장 시험에도 적용되어졌지만, 인장 시험은 압축 시험에 비하여 많은 연구가 진행된 편은 아니다. Staab와 Gilat²⁾은 봉형 시편의 기하학적 형상에 관한 연구를 수행하였으며, 인장형 시험기의 오차 분석에 관한 연구도 수행되었다³⁾. 국내에서도 홉킨슨 바 시험법을 이용한 동적 물성치 실험방법이 사용되고 있으며, 주로 압축형 홉킨슨 바를 이용한 구리 및 복합재료 등에 대한 고속 변형거동에 대하여 연구되었다. Kang등^{4,5)}은 최근 인장형 홉킨슨 바의 그림과 시편의 형상에 관한 연구를 수행하고 자동차용 금속 박판의 고속 인장 시험을 수행하였으며, 자동차용 강판의 동적 구성방정식을 제안하였다.

본 논문에서는 차체 구조물의 충돌 해석을 수행하고자 하며, 쉘 요소를 이용한 외연적 유한요소법을 사용하였다. 해석에 필요한 물성치를 얻기 위하여 인장형 홉킨슨 바 시험기를 사용하였으며, 자동차용 냉연 강판의 고속 인장 시험을 수행하여 그 결과를 충돌해석에 적용하였다. 동적 구성방정식은 Johnson-Cook이 제안한 모델을 적용하였다.

2. 외연적 탄소성 유한요소 수식화

외연적인 방법에서는 시간 간격의 크기가 해의 안정성에 직접적인 영향을 주게 되므로 일반적으로 내연적인 방법보다 훨씬 작은 시간 간격을 가지고 해석을 수행하게 된다. 이

와 같은 이유로 인하여 충격파의 전파 거동을 관찰하기 위한 해석에서는 외연적 유한요소법이 적합하며, 구조물의 관성 효과가 관심의 대상인 문제에서는 내연적 유한요소법이 적합하다고 할 수 있다. 그러나 구조물의 형상이 복잡해지면 상대적으로 해석에 많은 시간이 필요하고 용량이 커지게 되므로, 충돌 해석의 경우처럼 기하학적 및 재료의 비선형성이 강한 문제에서는 내연적 유한요소법보다 외연적 유한요소법이 더욱 적합하게 된다.

개량 라그랑지 수식화에서는 임의의 시간 t 에서의 형상 Ω' 를 기준좌표계로 지정하는 Δt 동안에 미소변형을 하는 것으로 가정한다. 이 때의 변형이 미소하므로 모든 정적, 동적변수를 Ω' 에서의 값으로 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\int_{\Omega'} \rho \dot{u}_i^{t+\Delta t} \bar{u}_i d\Omega = \int_{\Omega'} \rho b_i^{t+\Delta t} \bar{u}_i d\Omega + \int_{\Gamma_f'} t_i^{t+\Delta t} \bar{u}_i d\Gamma - \int_{\Omega'} \sigma_{ij}^{t+\Delta t} \bar{u}_{i,j} d\Omega, \forall \bar{u}_i \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 는 변형된 형상 Ω' 에서 정의되는 Cauchy 응력텐서이고, ρ 는 물체의 밀도를 나타내며 b_i 는 물체력벡터이다.

Δt 동안 전체 변위에서 강체 운동에 의한 변위를 효율적으로 배제하기 위해 Belytschko 등^{6,7)}이 제안한 co-rotation좌표계를 도입하였다. 여기서 위 첨자 \wedge 는 지역좌표계에서 정의된 물리량을 의미한다. Mindlin-Reissner의 이론을 적용하여 각 요소에서의 속도를 형상함수를 이용하여 co-rotation 좌표계에 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{V}_i(\xi, \eta, \zeta) = N_i(\xi, \eta) \left[\hat{v}_i + \frac{d}{2} (-\delta_{12} \hat{\omega}_{1i} + \delta_{11} \hat{\omega}_{2i}) \right] \quad (2)$$

여기서 d 는 요소의 두께를 나타내고 $N_i(\xi, \eta)$ 는 형상 함수를 나타낸다. 지역 좌표계에서 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\widehat{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\widehat{v}_i}{x_j} + \frac{\widehat{v}_j}{x_i} \right) \quad (3)$$

요소의 뒤틀림(warping) 효과를 방지하기 위하여 요소의 곡률과 변위관계를 나타내는 항을 변형률-변위관계에 도입한 Belytchko 등⁶⁾의 방법을 적용하였으며, 저감적분시 발생할 수 있는 무에너지 모드를 제어하기 위하여 Belytchko 등⁷⁾이 도입한 방법을 적용하였다. 지역좌표계에서 계산된 힘과 모멘트 등은 다음의 방향코사인 행렬에 의하여 광역좌표계로 변환될 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} R_3 \times 3 & 0_3 \times 3 \\ 0_2 \times 3 & R_2 \times 3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서

$$R_{ij} = \widehat{e}_i \cdot e_j \quad (5)$$

이다. 각 요소에서의 변위와 가속도를 형상 함수를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$M_{ij} \ddot{u}_j^{t+\Delta t} = P_i^{t+\Delta t} - F_i^{t+\Delta t} + H_i^{t+\Delta t} \quad (6)$$

여기서, M_{ij} 는 질량 행렬성분이고 $P_i^{t+\Delta t}$ 는 시간 $t+\Delta t$ 일 때 외부로부터 작용한 외력 벡터 성분이며 $F_i^{t+\Delta t}$ 는 $t+\Delta t$ 일 때의 잔류력 벡터 성분이고, $H_i^{t+\Delta t}$ 는 이때 발생할 수 있는 무 에너지 모드를 제어하기 위한 힘 벡터 성분이다.

본 논문에서는 운동 방정식을 시간에 대해 적분하기 위해 중앙 차분법(central difference method)을 적용하여 사용하였다. 중앙 차분법에 의한 해는 조건적으로 안정하며, Courant 안정 조건에 의한 시간 증분은 시스템의 최대 고유 진동수(ω_{\max})에 의한 주기보다 작은 값을 사용하며 일반적으로 Courant 등이 제한한 1자유도의 최대 고유 진동수를

아래와 같이 사용한다.

$$\omega_{\max} = \frac{2C}{L_e} \quad (7)$$

여기서, C는 소재 내에서의 응력 전파속도이고 L_e 는 유효 요소크기를 나타낸다.

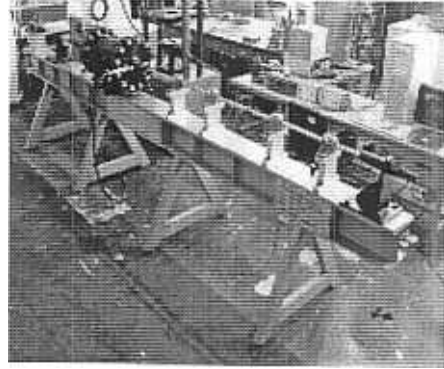


Fig.1 Tension Split Hopkinson bar apparatus.

3. 자동차 부재의 충돌해석

일반적으로 차량은 고무, 복합재료, 금속 등의 여러 가지 재료로 구성되어져 있으며, 유한요소 법에 의하여 차량의 충돌특성을 분석하기 위해서는 정확한 물성치의 확보가 필수적이다. 충돌해석과 같은 대변형 문제에서 이들 재료 특성은 비선형성이 매우 강하기 때문에 실험 방법 및 그 수학적 모델링에 많은 어려움이 따르게 된다. 그러나 신뢰성 있는 해석 결과를 도출하기 위해서는 해결되어야 할 문제이다. 변형률 속도의 영향도 고려되어야 할 요인중의 하나이며, 본 연구에서는 차체 충돌시 변형률 속도의 영향을 알아보고자 한다. 이를 위하여 실험으로부터 구한 냉연강판의 동적 물성치를 사용하였으며, 준 정적인 물성치를 이용한 해석결과와 비교를 하여보았다. 동적 물성치 고려를 위하여 다음과 같은 Johnson-Cook 구성 방정식을 적용하였으며, 구성방정식의 계수는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 인장형 홉킨슨 바 시험기를 사용하여 구하였다. 구하여진 구성방

정식의 계수는 냉연강판의 종류에 따라 Table 1에 나타내었다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \log \dot{\epsilon})(1 - T^{*m}) \quad (8)$$

여기서

$$T^* = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \text{이다.}$$

Table 1 Constants in the Johnson-Cook constitutive relation for sheet metals.

	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
SPCEN	208	350	0.48	0.140	0.31
60TRIP	432	800	0.59	0.075	0.55
60C	463	800	0.63	0.036	0.63

일반적으로 자동차 충돌시 얻어지는 재료의 변형률 속도는 대략 10/sec-300/sec 정도⁸⁾이다. 그러나 많은 경우 재료는 1/sec-5000/sec의 구간에서 변형률 속도에 대한 재료 거동이 이차 근사 또는 이차 근사와 크게 다르지 않으며, 변형률 속도가 10⁴/sec 이상일 경우 재료 거동이 급격히 변하여 정수압 상태의 거동을 하는 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서 구하여진 구성 방정식을 충돌해석에 충분히 이용할 수 있다고 생각된다.

정면 충돌 해석으로 Ford사의 Taurus 모델에 대한 충돌 해석을 수행하였다. 해석은 Fig. 2와 같이 차체 앞부분의 s-레일 등의 골격 구조만을 유한요소 모델화 하였으며, 재료는 SPCEN으로 하였다. Fig. 3은 충돌 후 변형 형상을 해석에 사용된 구성방정식에 따라 도시한 것이다. 충돌 후 객실부의 변형은 거의 일어나지 않았으며, 대부분의 변형은 엔진실 부근의 프레임 구조와 하단 부의 사이드레일에서 발생한 것으로 나타났다.

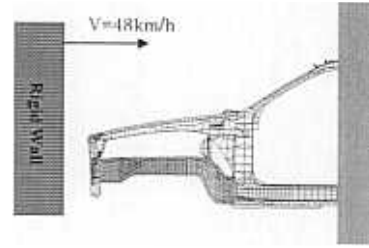


Fig. 2 Finite element model of the frontal frame of an automobile.

Fig. 3은 충돌 후 변형 형상을 해석에 사용된 구성방정식에 따라 도시한 것이다. 충돌 후 객실부의 변형은 거의 일어나지 않았으며, 대부분의 변형은 엔진실 부근의 프레임 구조와 하단 부의 사이드레일에서 발생한 것으로 나타났다. 변형률 속도 효과를 고려한 경우와 준 정적인 물성치를 사용한 경우에 변형 형상에 있어서는 큰 차이가 나지 않았다. 이것은 충돌에너지를 차체의 소성변형으로 흡수하고 또한 객실부의 변형을 최대한 억제하기 위하여 차체구조에 부분적 결함을 만들어 변형을 유도하기 때문이다. 그러나 Fig. 4에 나타난 바와 같이 충격에너지 흡수는 변형률 속도 효과를 고려한 경우 보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 에너지 흡수율을 바탕으로 차체 경량화를 위한 자동차용 강판의 재질 및 두께를 결정하는데 있어서 변형률 속도 효과의 고려가 필요하다고 할 수 있다.

차체의 측면 충돌은 정면 충돌에 비하여 더욱 복잡한 양상을 띄고 있다. 이것은 차체 측면 충돌 해석에는 사이드 실(side seal), 센터 필라(center pillar) 등의 프레임 구조와 도어(door)의 접촉을 고려하여야 하며, 도어 자체도 내판, 외판 및 임팩트 빔(impact beam) 등으로 구성된 복잡한 양상을 띄기 때문이다. Fig. 5에는 측면 충돌 해석에 사용된 유한 요소 모델과 경계조건을 나타내고 있다. 본 해석에서는 강판의 종류를 모두 SPCEN으로 하고 두께를 1.2mm로 하여 단순화된 모델에 대한 해석을 수행하였으며 대차도 강체와 같은 특성을 갖도록 하여 해석을 수행하여 대차의 변형이 거의 발생하지 않았다.

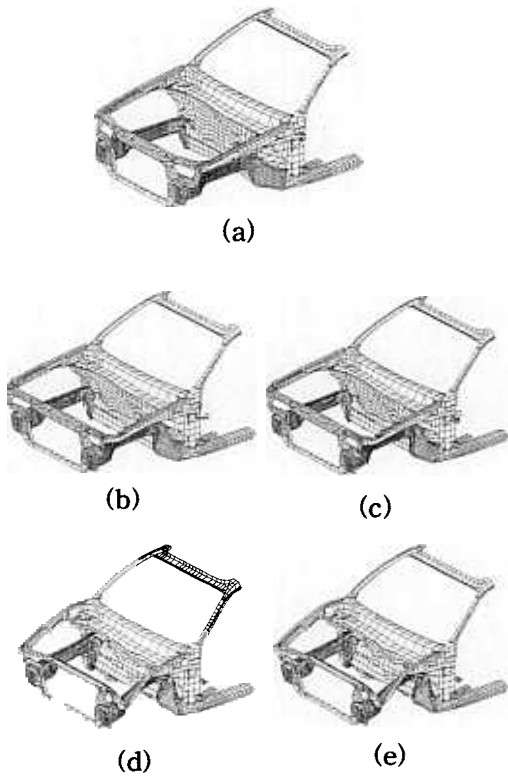


Fig. 3 Initial and deformed shapes of frontal frames of an automobile: (a) initial shape; (b) displacement of 100 mm with J-C model; (c) displacement of 100 mm with quasi-static model; (d) displacement of 300 mm with J-C model; (e) displacement of 300mm with quasi-static model.

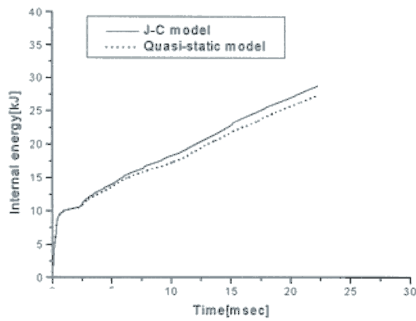


Fig. 4 Time-deformation energy curves with respect to strain rate effect.

해석에 사용된 유한요소는 쉘 요소가 23717개, 대차에 사용된 연속체 요소가 980개 총 절점의 수는 26776개이다. Fig. 5에는 시간에 따른 변형 형상을 나타내고 있다. 대차의 구조는 차체 앞 구조의 형상을 하고 있기 때문에 범퍼의 위치에 해당하는 부분이 먼저 측면 구조에 충돌하게 되며, 이 부분이 먼저 변형을 시작하게 된다. 또한 이때 임팩트 빔과의 접촉이 이루어지게 된다. 보다 해석 시간이 증가하게 되면 대차의 전면이 충돌하기 시작하여 도어의 전체적인 변형이 발생하게 된다. 최종 변형시 도어의 변형은 상당히 크게 발생하였지만 루프 (roof)구조의 변형은 거의 이루어지지 않은 것을 볼 수 있다.

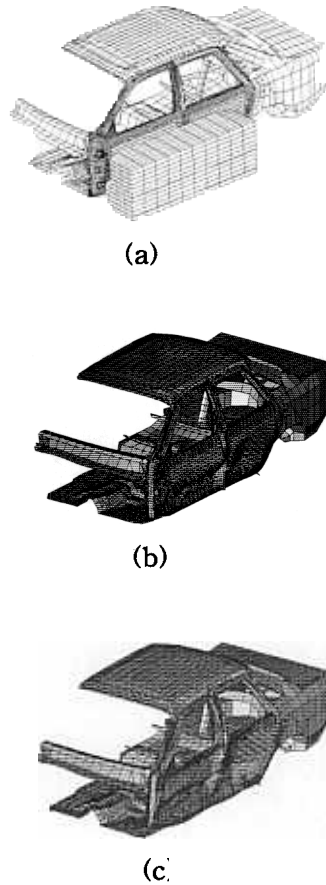


Fig. 5 Initial and deformed shapes of side impact model: (a) initial shape; (b) deformed shapes at 4msec; (c) deformed shapes at 9msec.

5. 결 론

측면 구조에 충돌하게 자동차 차체의 충돌 해석을 수행하였으며, 자동차용 냉연강판의 동적 구성방정식을 적용하여 해석하였다. 인장형 흡킨슨 바 시험기를 이용하여 자동차용 냉연강판의 동적 구성방정식을 구하였으며 이를 유한요소 해석에 적용하였다. 에너지 흡수를 향상을 위하여 구조물에 결합이 존재하는 경우 변형 형상에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았지만, 충격 반력 및 충돌에너지 흡수에서는 큰 차이를 보임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구비(과제번호 98-0200-01-01-5)에 의하여 연구한 결과 중 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Harding, J., Wood, E. O. and Campbell, J. D., "Tensile Testing of Materials at Impact Rates of Strain," *Journal of Mechanical Engineering and Science*, Vol. 2, pp. 88-96, 1960.
2. Staab, G. H. and Gilat, A., "A Direct-tension Split Hopkinson Bar for High Strain-rate Testing," *Experimental Mechanics*, Vol. 31, pp. 232-235, 1988.
3. Li, M., Wang, R. and Han, M. B., "A kolsky Bar: Tension, Tension-tension," *Experimental Mechanics*, March, pp. 7-14, 1993.
4. Kang, W. J., Cho, S. S., Huh, H. and Chung, D. T., "Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation," *Int. J. Vehicle Design*, 21, 4/5, pp. 424-435, 1999.
5. Kang, W. J., Cho, S. S., Huh, H. and Chung, D. T., "Identification of Dynamic Behavior of Sheet Metals for an Auto-body with Tension Split Hopkinson Bar," SAE Int. Congress, Detroit, U.S.A., 1998.
6. Belytschko, T., Wong, B. L. and Chiang, H. Y., "Advances in one-point quadrature shell element," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 96, pp. 93-107, 1992.
7. Belytschko, T. and Leviathan, I., "Physical stabilization of the 4-node shell element with one point quadrature," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 113, pp. 321-350, 1994.
8. Ambrosio, J. A. C., Seabra Pereira, M. F. O. and da Silva, F. P., "Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant protection," Kluner Academic Press, 1997.
9. Abramowicz, W. and Jones, N., "Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes," *Int. J. Impact Engng*, Vol. 4, No. 4, pp. 243-270, 1986.