

알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 축소모형을 이용한 충격 해석 기법 연구

Collapse Characteristics of Aluminum Extruded Sections and Crash Analysis Using Half Scale Model

김범진*
Kim, Bum-Jin

허승진**
Heo, Seung-Jin

구정서***
Koo, Jeong-Seo

송달호***
Song, Dal-Ho

ABSTRACT

The aluminum extruded sections are used to the light construction of the high speed rail vehicle structures. However, the research works on the crashworthy design of aluminum extruded sections are not published sufficiently.

In this paper, the collapse characteristics of aluminum extruded sections are investigated by crush test and simulation. The scale model studies are also performed to predict the impact energy absorption characteristics of full scale model through axial crush test and simulation.

1. 서 론

철도 차량의 경량화를 위해서 오늘날 알루미늄 압출재를 이용한 철도 차량의 차체 제작이 일반화되고 있다. 그러나, 경량화와 함께 고려되어야 하는 충돌안전도 설계 측면에서 알루미늄 압출재에 대한 해석 방법 및 시험 자료가 크게 미비한 상태이다. 또한, 철도 차량과 같은 대형 구조물의 전체 충돌 성능을 예측하기 위하여 컴퓨터를 이용한 전산구조해석이 선호되고 있으나 충돌 시험이 실제적으로는 까다로우므로 모형 시험을 통한 실제 대형 구조물의 충돌 특성을 예측, 평가하는 부분이 제시되어야 할 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 충격에너지 흡수 특성에 대한 분석을 위하여 압괴 해석 및 시험을 수행하고자 하며 이러한 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 연구를 근거로 하여 전체 차량의 충돌 특성을 예측 할 수 있는 상사 이론을 적용한 축소 모델 정립 기법을 연구하고자 한다. 더 나아가서 이상화된 에너지 흡수 부재의 압괴 해석 및 시험을 통하여 축소 모형 응용 개념의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험 및 해석 기법 연구

2.1 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험

철도 차량의 차체 제작 시, 고 강성, 고 강도 및 경량 재질로 각광 받고 있는 알루미늄 압출재를 대상으로 차체 안전도 설계 시, 중요시되는 알루미늄 압출재의 붕괴 특성을 시험적으로 규명하

* 국민대학교 자동차공학전문대학원, 비회원

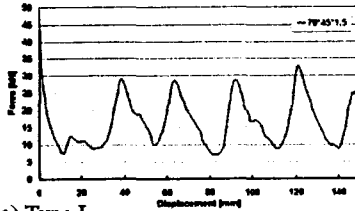
** 국민대학교 기계자동차공학부, 정회원

*** 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

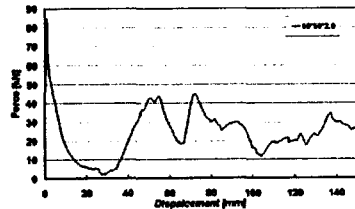
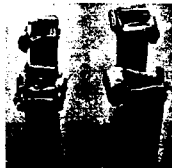
기 위하여 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험(quasi-static crush test)을 수행하였다. 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 규명을 위해 사용된 부재들은 Table 1에 제시하였다. 알루미늄 압출재의 시험재질은 Al6061-T6이고 준정적 압괴 시험은 30 ton U.T.M을 사용하였으며 압괴 속도는 0.08mm/sec를 유지하였다. 압괴 시험 결과, 알루미늄 압출재의 붕괴 모드(collapse mode)는 단면 형상비와 두께에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있었다. 먼저 Fig. 1(a)와 같이 규칙적인 접힘이 계속해서 일어나는 접힘좌굴모드(folding collapse mode, Type I), Fig. 1(b)와 같이 접힘과 균열이 동시에 발생하는 혼합좌굴모드(folding and fracture mixed collapse mode, Type II), 그리고 Fig. 1(c)와 같이 접힘 없이 균열만 진전되는 균열좌굴모드(fracture collapse mode, Type III)로 분류할 수 있었다. 자세한 단면 형상 및 두께에 따른 붕괴 모드 분류는 Table 1에 정리해 두었다. Fig. 1에서 Type I의 경우는 초기 좌굴이 발생한 후, 모서리 부위에서 균열이 발생하지 않고 이후에 일정 하중이 계속 유지되는 경향을 나타내었지만 Type II와 Type III는 초기 좌굴 발생시, 모서리 부위에서 균열이 발생하고 압괴 길이가 증가할수록 이 균열이 급속히 진전되면서 하중곡선은 거의 0 근처까지 떨어졌다. 그리고 그 이후에는 균열과 접힘을 반복하거나 혹은 완전한 재료의 파괴로 진행됨을 고찰하였다.

Table 1 Classification of collapse modes about aluminum extruded sections

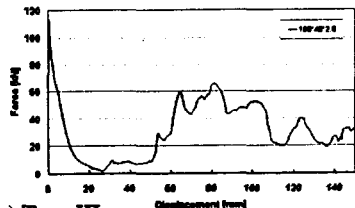
	Folding Mode (Type I)	Folding & Fracture Mode (Type II)	Fracture Mode (Type III)
Section Size	30°20*1.0	45°35*2.0	50°50*3.0
	40°50*2.0	50°50*2.0	56°53*3.0
	70°45*1.5	80°30*1.1	100°40*2.2
	80°40*1.5	80°30*1.5	105°64*3.0
			120°50*3.0
			150°50*3.0
			100°45*2.5



(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III

Fig. 1 Typical collapse modes of aluminum extruded sections

2.2 알루미늄 압출재의 준정적 압괴 해석

알루미늄 압출재의 준정적 압괴 시험에 대한 적절한 해석 기법을 연구하기 위하여 알루미늄 재질의 파단(fracture) 특성을 고려한 파단 함수(damage function) 곡선 응용 해석을 수행하였다. FE-Model의 해석은 Explicit Dynamic Code인 PAM-CRASH를 사용하여 준정적 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 파단 함수 곡선 및 실제 재료의 특성 시험을 통하여 얻어진 재료 특성 곡선을 Fig. 2에 제시하였다.

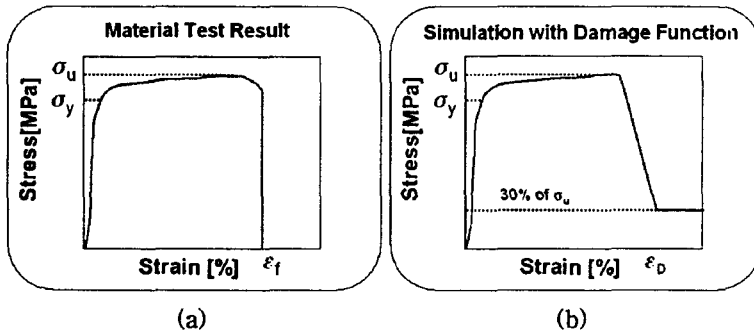


Fig. 2 Material characteristic curves : (a) $\sigma - \epsilon$ curve of test result
(b) $\sigma - \epsilon$ damage function curve for simulation

Fig. 2에서 정의한 파단 함수를 적용하여 준정적 압괴 해석을 수행하였다. Fig. 3에서는 $100 \times 45 \times 2.5$ 의 사각 단면 형상을 갖는 알루미늄 압출재의 압괴 변형 양상에 대하여 시험과 해석 결과를 비교하였다. Fig. 3을 보면 압괴 시험과 해석에서의 변형 양상이 유사함을 알 수 있다.

Fig. 4는 $100 \times 45 \times 2.5$ 의 사각 단면 형상을 갖는 알루미늄 압출재의 압괴 시험 및 해석 결과를 하중-변위 선도(force-displacement curve)로 나타내었으며 Fig. 5는 Fig. 1에서 제시한 알루미늄 압출재에 대하여 시험 및 해석 결과를 평균 붕괴 하중(mean crush load)의 크기로 나타내어 비교한 것이다. 해석 시, 파단 함수를 적용함으로써 보다 실제에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

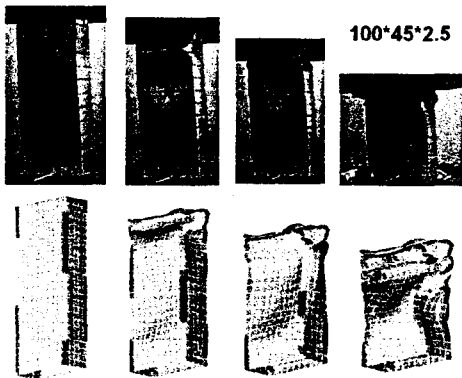


Fig. 3 Typical deformed shapes of aluminum extruded sections

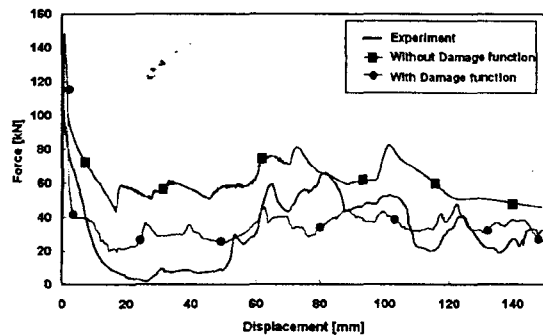


Fig. 4 Comparison of force-displacement curves between test and simulations

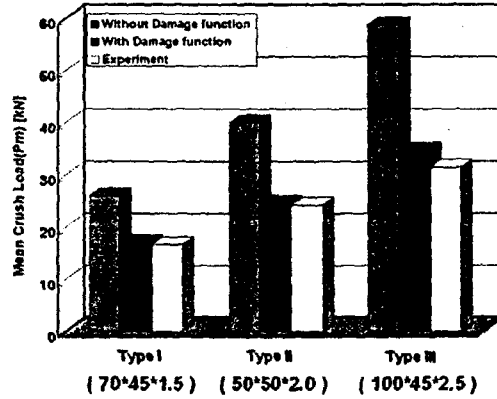


Fig. 5 Comparison of mean crush load for test and simulation w.r.t 3 types of collapse modes

3. 상사 이론을 이용한 에너지 흡수 부재의 축소 모형 정립 기법 연구

3.1 에너지 흡수 부재의 상사 법칙

상사 이론을 이용한 충돌에너지 흡수 부재의 축소 모형을 통하여 실제 대형 구조물의 충돌 성능을 예측할 수 있다. 따라서 부피가 크고 고가인 철도 차량과 같은 경우, 이러한 축소 모형을 이용한 충돌 시험 평가가 보조적으로 필요하다. 본 절에서는 이상화된 알루미늄 에너지 흡수 부재를 연구대상으로 하여 상사 이론의 적용 가능성을 고찰해 보았다. 축소 모델은 재료의 성질, 기하형상, 하중에 대한 상사비로부터 결정된다. 본 절에서 고려한 충돌 에너지 흡수 부재의 상사법칙은 이상화된 사각 단면 에너지 흡수 부재의 기하 형상으로부터 유도하였으며 축소 모델은 동일한 재질을 사용하고 기하학적으로 1:2의 상사비를 갖도록 설정하였다. 1/2 축소 모델(1/2 scale model)은 동일 재질이며 1:2의 상사비를 가지므로 길이는 $L = 2 \cdot L_m$, 밀도는 $\rho = \rho_m$, 탄성계수는 $E = E_m$, 변형률은 $\epsilon = \epsilon_m$ 이다. 여기서 밑 첨자 'm'은 축소 모델을 의미한다. 상기의 결과로부터 하중, F , 에너지, W , 질량, m , 가속도, a , 속도, v , 그리고 시간, t 에 대한 상사비를 정리해보면 다음과 같다.

$$F = F_m(L^2/L_m^2)(E/E_m)(\epsilon/\epsilon_m) = F_m(2^2)(1)(1) = 4F_m \quad (1)$$

$$W = W_m(F/F_m)(L/L_m) = W_m(4)(2) = 8W_m \quad (2)$$

$$m = m_m(\rho/\rho_m)(L^3/L_m^3) = m_m(1)(2^3) = 8m_m \quad (3)$$

$$a = a_m(F/F_m)(m_m/m) = a_m(4)(1/8) = a_m/2 \quad (4)$$

$$v^2 = v_m^2(F/F_m)(s/s_m)(m_m/m) = v_m^2(4)(2)(1/8) = v_m^2 \quad (5)$$

$$t = t_m(v/v_m)(a_m/a) = t_m(1)(2) = 2t_m \quad (6)$$

3.2 압괴 시험을 통한 축소 모형 응용 개념의 타당성 분석

충돌안전도 측면에서 축소 모델 응용 개념의 타당성을 검증하기 위하여 압괴 시험용 시편으로

Fig. 6과 같이 사각, 원형 단면을 갖는 기준 모델인 전체 모델(full scale model)과 1/2 축소 모델을 각각 준비하였다. 시편 재질은 Al6063이며 준정적 압괴 시험(quasi-static crush test)은 30ton U.T.M을 사용하였고 압괴 속도는 0.08mm/sec를 유지하였다.

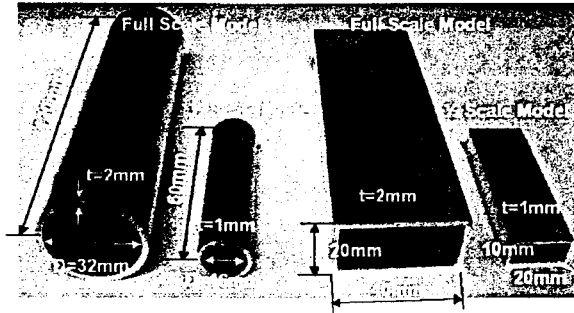


Fig. 6 Test specimens for quasi-static crush test

사각 단면 부재와 원형 단면 부재의 준정적 압괴 시험 결과는 Fig. 7 ~ Fig. 10에 나타내었으며 압괴 시, 변형 양상은 Fig. 7, Fig. 8에 각각 나타내었고, 하중-변위 선도의 결과는 Fig. 9, Fig. 10에 각각 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10에 대하여 축소 모델의 하중 곡선 및 변형량에 앞 절에서 유도한 1/2 축소 모델에 대한 상사비 4, 2를 각각 곱하면 기준 모델과 유사한 하중 곡선 경향을 얻을 수 있었으며, 평균 붕괴 하중의 오차는 약 10%~15%를 나타내었다. 또한, 압괴 시험 결과, 기준 모델의 경우는 모서리 부위에서 파단(fracture)이 발생하는 것을 확인하였지만 1/2 축소 모델에서는 파단이 발생하지 않았다. 따라서, 알루미늄 부재의 압괴 시, 파단 특성은 상사비와는 무관하게 발생하며 알루미늄 재질 두께에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 이는 축소 모델을 고려할 때, 알루미늄 압출재의 파단 특성으로 인한 오차 발생 가능성을 제시하고 있음을 알 수 있다.

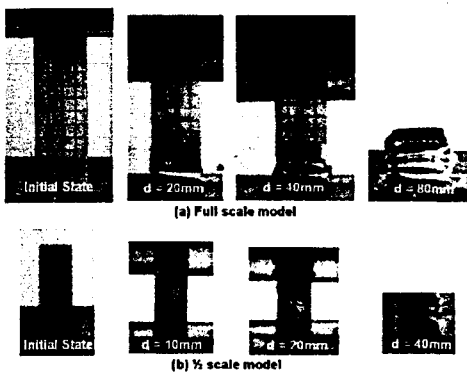


Fig. 7 Typical deformed shapes of full and 1/2 scale square box beams

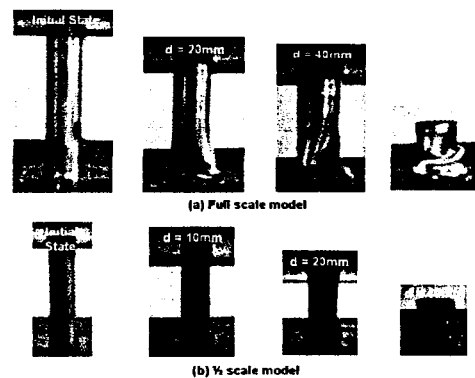


Fig. 8 Typical deformed shapes of full and 1/2 scale cylindrical shape beams

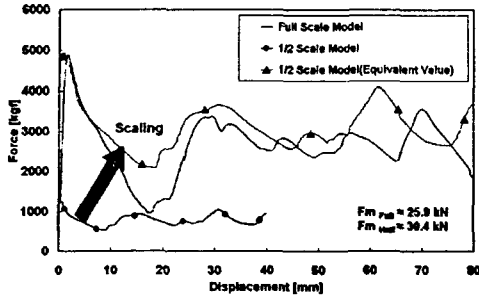


Fig. 9 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale square box beams

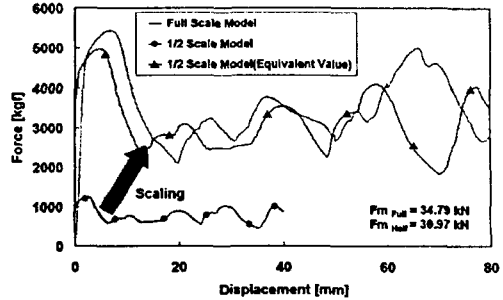


Fig. 10 Force-displacement diagram of full and 1/2 scale cylindrical shape beams

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 및 충격에너지 흡수 특성에 대한 분석을 위하여 압괴 해석 및 시험을 수행하였으며 이러한 알루미늄 압출재의 붕괴 특성 연구를 근거로 하여 전체 차량의 충돌 특성을 예측 할 수 있는 상사 이론을 적용한 축소 모델 정립 기법을 연구하였다. 더 나아가서 이상화된 에너지 흡수 부재의 압괴 해석 및 시험을 통하여 축소 모형 응용 개념의 타당성을 검증, 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 알루미늄 압출재의 압괴 시, 알루미늄 압출재의 파단 특성 및 접합 현상을 고려하여 세 가지 압괴 모우드를 제시하였다.
- 알루미늄 압출재의 압괴 해석 시, 재질의 파단 특성을 고려한 파단 함수의 적용으로 실제 시험에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있었다.
- 축소 모형의 압괴 시험 및 해석을 통하여 실제 모형의 충격에너지 흡수 성능을 약 80%~90%의 정확도로 예측 가능하였다. 이를 근거로 철도 차량과 같은 대형 구조물의 충돌 성능 예측을 위하여 축소 모형의 적용 가능성을 확인하였다.
- 알루미늄의 파단 특성은 상사비와는 무관하며 재질 두께에 의해 결정됨을 확인하였다.

참고문헌

1. B. Samuel Holmes and George Sliter (1974), "Scale Modeling of Vehicle Crashes - Techniques, Applicability, and Accuracy; Cost Effectiveness" SAE 740586
2. T.X. Yu and L.C. Zhang (1995), "Plastic Bending Theory and Applications" World Scientific
3. Willem Witteman (1999), "Improved Vehicle Crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situation", Geboren te Geldrop
4. Maurice L. Sharp (1992), "Behavior and Design of Aluminum Structure", McGraw-HILL Inc.
5. 윤병동, "알루미늄 압출 부재의 압괴 특성 및 대변형 해석에 관한 연구", 국민대학교 자동차공학대학원, 석사학위논문, 2000