

철도차량 알루미늄 압출재의 충격에너지 흡수 특성

Impact Energy Absorption Characteristics of the Extruded Aluminum Sections for Rail Vehicles

허승진* 정영섭** 양승국** 구정서*** 송달호***
Heo, Seung-Jin Chung, Yeong-Seop Yang, Seung-Kook Koo, Jeong-Seo Song, Dal-Ho

ABSTRACT

Extruded aluminum sections are used to the light construction of the rail vehicles structures. However, the research works on the crashworthy design of the extruded aluminum sections are not published sufficiently.

In this paper, the impact energy absorption characteristics of extruded aluminum sections are investigated by crash simulation and test. The optimized energy absorbing studies are also performed based on the selected design parameter variations of the sectional shapes and the dimensional ratios.

1. 서 론

고속전철의 경량화를 위해서 오늘날 알루미늄 압출재를 이용한 철도차량의 차체 제작이 일반화 되고 있다. 그러나, 경량화 설계와 함께 고려되어야 하는 충돌안전도 설계 측면에서 알루미늄 압출재에 대한 해석방법 및 실험 자료가 크게 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 압출재의 충격에너지 흡수 특성에 대한 분석을 위하여 충돌해석 및 실험을 수행하고자 하며, 나아가서 경량화 측면에서 효과적인 충돌에너지 흡수 성능을 갖는 알루미늄 압출부재의 설계 자료를 구축하고자 한다.

2. 알루미늄 압출재의 충돌해석

2.1 충돌해석 모델링

전동차 객차의 Under Frame용 알루미늄 압출재의 경우 Fig. 1과 같이 압출재 하나의 단면이 8개의 삼각형 요소와 부가적 Flange로 이루어져 총 너비 542 mm로 되어있다. 이를 효과적으로 해석 및 시험하기 위하여 Flange를 제거한 3개의 삼각형 요소 단면에 길이 1,000 mm의 압출재로 기준 모델 형상을 설정하였다. 충돌에너지 흡수 특성을 파악하기 위한 FE-modelling은 설정된 기준 모델 형상을 이용하여 Fig. 2와 같이 50 km/h의 속도로 고정벽 충돌상황을 가정하였다.

* 국민대학교 기계자동차공학부, 정회원

** 국민대학교 자동차공학대학원

*** 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

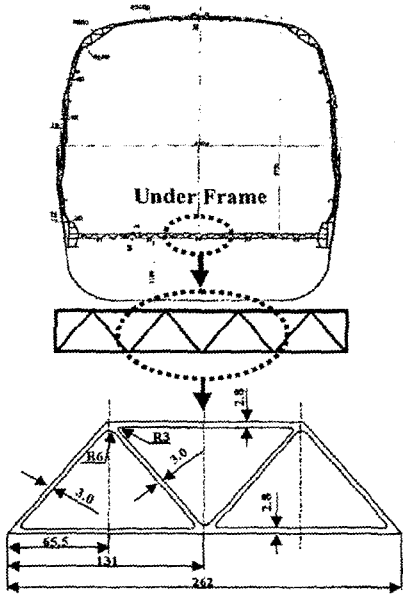


Fig. 1 Typical aluminum extruded section for under frame of the subway vehicle body

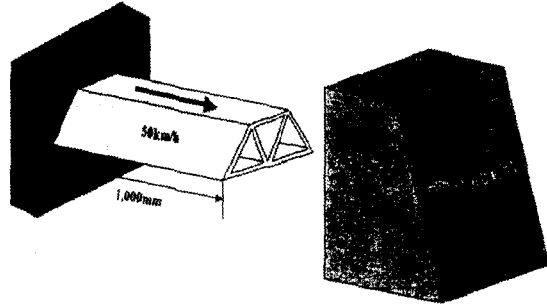


Fig. 2 FE-modelling of selected aluminum extruded section for crash simulations

2.2 충돌해석 및 결과

전동차용 Under Frame의 알루미늄 압출재 충돌특성에 관하여 고찰해 보았다. Fig. 3은 기준 모델로 설정된 알루미늄 압출재의 충돌 해석 결과로서 힘-변위 선도(force-displacement diagram)를 나타내고 있다. Fig. 3에서와 같이 충돌 초기의 최대 붕괴 하중(maximum collapse load, P_{max})은 약 420 kN을 나타내고 있으며 전체적인 충돌에너지 흡수 능력을 나타내는 평균 붕괴 하중(mean crash load, P_m)은 약 105 kN을 나타내고 있다. Fig. 4는 알루미늄 압출재의 붕괴 모우드를 나타내고 있다. 알루미늄 압출재를 구성하는 삼각형 기본 단면에 대한 좌굴 모우드가 전체적인 접힘 붕괴 모우드 발생의 기반이 되고 있음을 알 수 있으며, 붕괴가 진행하면서 상하 Plate의 좌굴 모우드의 비대칭성에 의하여 한쪽으로 치우쳐 지는 것을 확인할 수 있다.

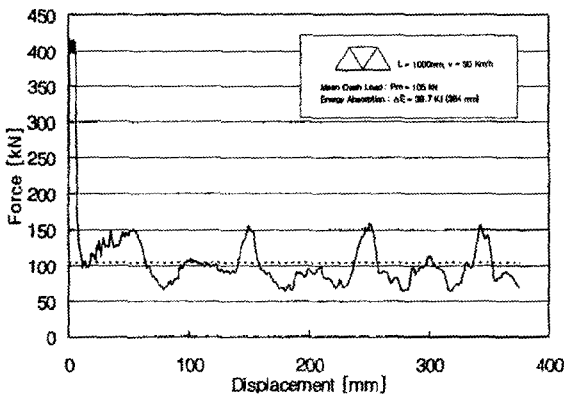


Fig. 3 Force-displacement diagram of aluminum extruded beam

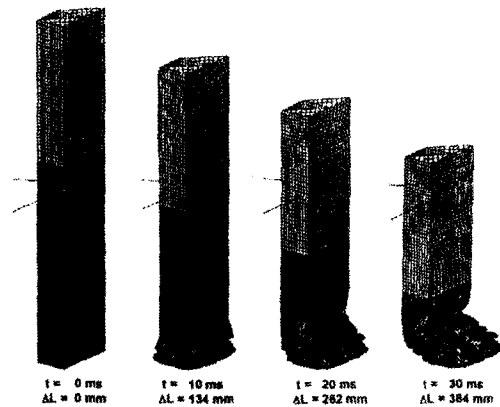


Fig. 4 Typical deformed shapes of aluminum extruded beam

3. 알루미늄 압출재의 준정적 압괴시험

3.1 재료특성 시험

알루미늄 압출재의 압괴 시험에 앞서 재료의 특성을 알아보려고 Fig. 5와 같이 압출재의 각 부분에서 압출방향(vertical direction)과 압출의 직각 방향(horizontal direction)으로 Half Size의 시편을 추출하여 인장 시험을 수행하였다. Fig. 6에서는 각 방향으로의 인장시험의 결과를 평균하여 나타내고 있는데 압출방향에 따른 재질의 항복응력(yield stress)과 극한응력(ultimate tensile stress)값에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 파단 변형률(fracture strain)의 경우에는 압출의 직각 방향에 비하여 압출방향의 경우가 약간 크게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 알루미늄의 파단 변형률은 철재에 비하여 매우 작은 약 10%의 값을 보이고 있다.

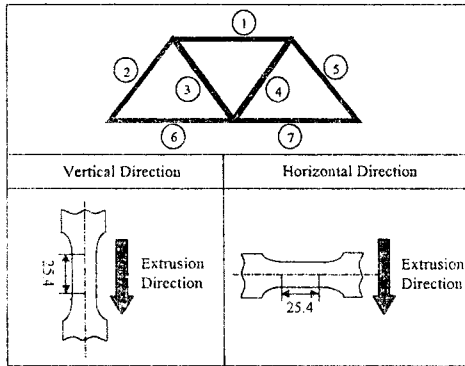


Fig. 5 Schematic diagram of tensile test specimens

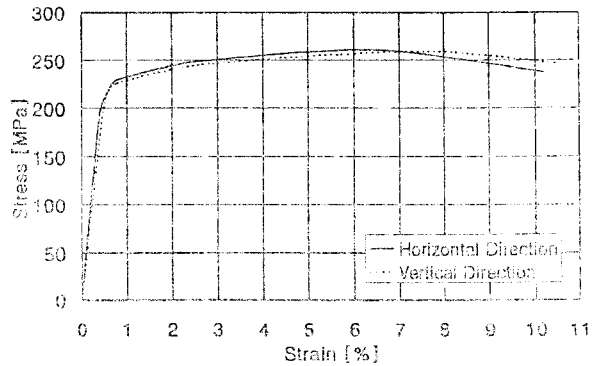


Fig. 6 Al6005A material characteristic curve($\sigma-\epsilon$ diagram according to extrusion directions)

3.2 준정적 압괴시험 및 특성 평가

알루미늄 압출재의 충돌에너지 흡수특성을 실험적으로 확인하기 위하여 Under Frame용 압출재를 Fig. 7과 같이 3개의 삼각빔을 갖는 길이 500 mm의 시편으로 제작하였다. 압출재의 준정적 압괴 시험은 Fig. 8과 같은 50ton Material Tester를 이용하였으며 압괴 속도는 2 mm/min를 유지하였다. 압괴 시험의 결과는 Fig. 9와 같이 힘-변위 선도로 나타내었으며, Fig. 10에는 압괴시험의 결과와 준정적 압괴해석을 통한 해석 결과를 비교하였다. 또한, Fig. 11에는 대표적인 붕괴 모우의를 나타내었다.

Fig. 9에서 충돌 초기의 최대 붕괴 하중(maximum collapse load, P_{max})은 약 380 kN이며 평균 붕괴 하중은 약 160.2 kN이다. 두 시편의 시험 결과를 비교하여 볼 때, 최대 붕괴 하중은 같은 값을 보이고 있으나, 국부적인 굽힘 좌굴 모우드의 발생차이에 의하여 절첩 곡선중의 압괴하중 값에서는 차이가 나타나고 있다. 그러나, 전체적인 평균 붕괴 하중을 계산하여 보면 두 시편의 경우 거의 유사한 시험 결과를 보인다.

Fig. 10에서 해석결과와 비교하여 볼 때, 충돌초기의 최대 붕괴 하중은 예상대로 국부좌굴(local buckling) 발생 이후에는 해석결과가 약간 높게 나옴을 알 수 있다. 해석의 경우 하중이 급격히 저하되나 실제 실험결과에서는 완만한 곡선을 갖는 하중 감소 특성을 알 수 있다. 이는 해석 모델에서는 일정한 두께의 Shell 요소로 모델링한 반면에, 실제 알루미늄 압출재의 경우 모서리 부위의 Round 처리에 의한 두께가 증대됨에 따라 압출재의 압괴 강도가 증가하고 있음을 예측할 수 있

다. 그러나 해석 모델에 Round 처리에 의한 두께 증대효과를 고려하기 위한 별도의 유한요소 선정은 용이하지 않으므로, 궁극적으로 해석결과에 압출재의 모서리 효과 계수(edge effect coefficient) 등에 의한 보정 방법이 고려될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 실험결과는 붕괴가 진행할수록 하중곡선이 전체적으로 약간씩 증가하는 추세이나 해석시에는 하중의 양이 접힘현상을 따라 일정한 수준에서 증감하는 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄 압출재의 압괴 시험시 모서리 주위의 두께가 두꺼운 부위에서 파단(fracture)이 발생됨에 따라 압괴 길이의 증가에 비례하여 파단에너지(fracture energy)가 부가적으로 더해지는 결과로 판단된다. 따라서 해석 모델에서 알루미늄 재질의 파단현상의 재현에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

Fig. 11의 붕괴 모우드로 분석하여 볼 때, 좌굴의 반파장 길이(half wave length)는 약 120mm로서 압출재 폭(262mm)의 약 45%에 해당되었으며, 이에 따라서 첫째 좌굴은 받침판재(crushing plate)의 하단 약 120mm 지점에서 발생되기 시작하였다. 변형길이 40mm와 150mm에서의 사진은 각각 첫째 및 두 번째의 축방향 접힘 결과를 보여주고 있다. 또한, 앞절의 알루미늄 재질 특성에서와 같이 약 10%의 작은 파손 변형률로 인하여, 사진에서 볼 수 있듯이 압출재 모서리 부위는 최대 파손 변형률에 도달되어 압괴가 진행됨에 따라서 균열 조각으로 시편에서 분리되었다. 균열 조각으로 분리된 부위는 압괴시 접촉 발생을 용이하게 한다. 이는 결과적으로 1차 접힘에 의한 하중 감소가 상대적으로 작은 상태에서 2차 접힘을 유도하는 접촉효과를 갖게 할 것이다.

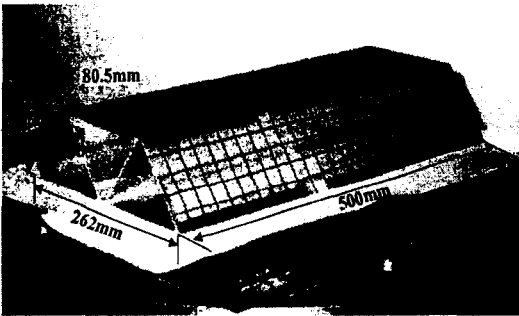


Fig. 7 Test specimen for quasi-static crush test

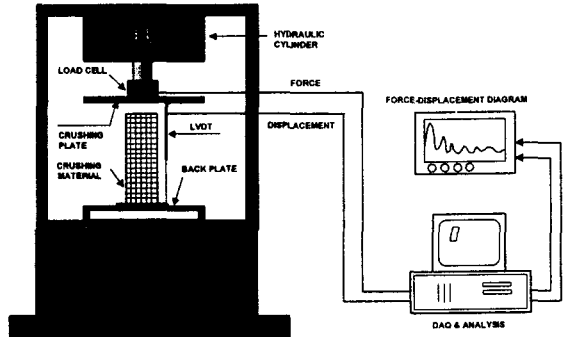


Fig. 8 Testing stand for quasi-static crush test

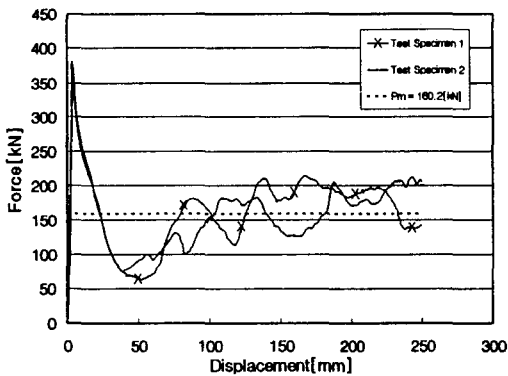


Fig. 9 Quasi-static crush test results

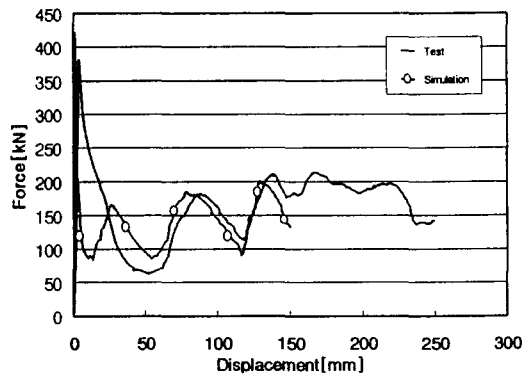
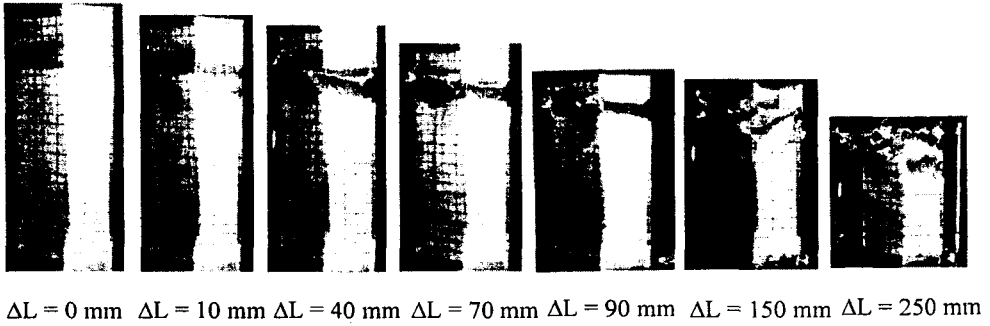
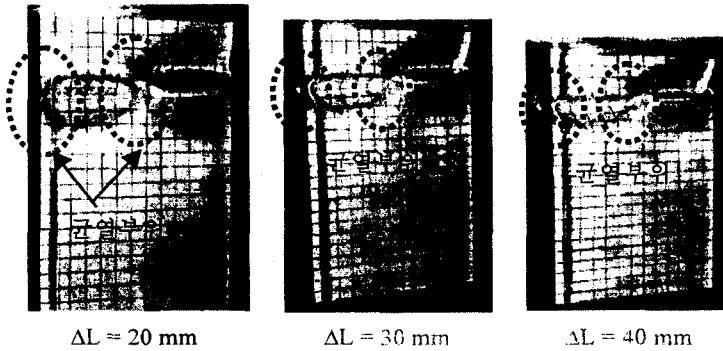


Fig. 10 Comparison of quasi-static crush test results with simulation



(a) Side view



(b) Back view

Fig. 11 Typical collapse modes of aluminum extruded sections with 3 triangular beams

4. 충돌에너지 흡수특성을 고려한 알루미늄 압출재의 형상 최적화

고속전철 객차의 단면은 Fig. 12와 같이 각기 상이한 치수를 갖는 삼각형 단면의 알루미늄 압출재로 구성되어 있다. 객차의 전·후방 충돌상황시 대부분의 충돌에너지를 흡수하는 Under Frame에 대하여 충돌에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 단면형상에 관하여 알아보았다. 또한, 삼각형 단면의 압출재를 기준으로 단위무게 또는 면적당 최대의 충돌에너지 흡수효율을 가질 수 있는 단면 폭비에 관하여 고찰해 보았다. 나아가서 객차의 전복사고시(roll over) 안전도 향상을 위해서는 Body Roof Shell 부재가 최대의 굽힘모멘트를 유지하는 것이 중요하므로, Body Roof Shell의 단면 폭비 변화에 따른 굽힘 붕괴 에너지의 변화에 관하여 고찰해 보았다.

4.1 Under Frame용 압출재의 단면형상 변화

전술한 바와 같이 객차의 충돌안전성을 효과적으로 확보하기 위하여 Under Frame용 압출재에 대하여 Fig. 13과 같이 단면형상 변화에 따른 충돌 해석 모델을 설정하였다. 설정된 모델은 기준 모델인 삼각단면의 압출재와 비슷한 단면적과 높이를 갖도록 하여 전체무게와 객차의 공간상의 구조적 문제를 맞출 수 있도록 고려하였다. 충돌해석 결과는 Fig. 14와 같이 대표적인 단면형상에 대하여 힘-변위 선도로 나타내었으며 Fig. 15에는 전체 단면형상에 대하여 평균 붕괴 하중과 붕괴 응력을 나타내었다.

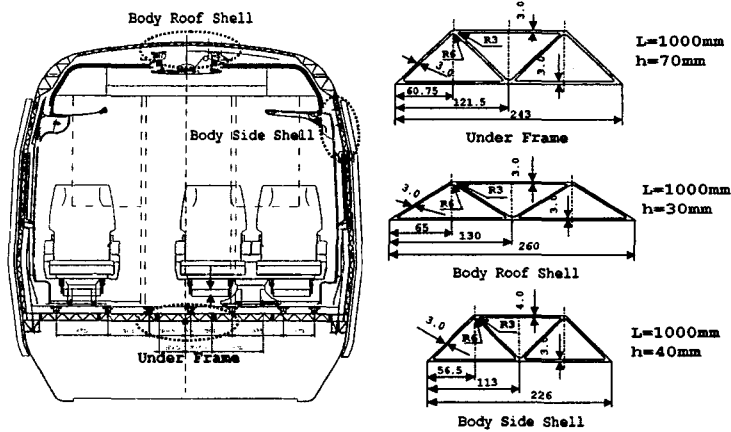


Fig. 12 Typical aluminum extruded section for body shell and under frame structures of high speed railway vehicles

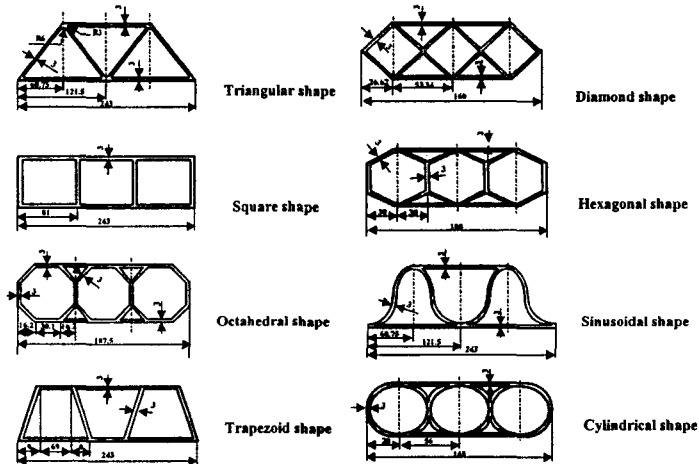


Fig. 13 Various types of aluminum extruded sections

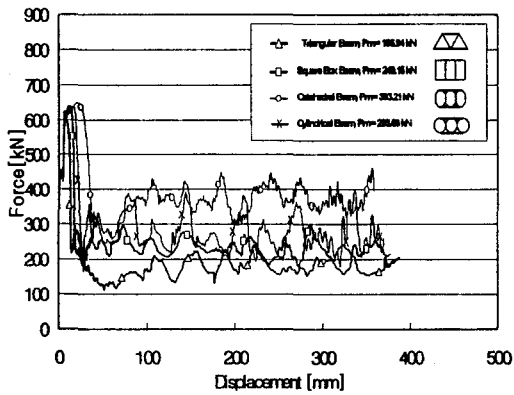


Fig. 14 Force-displacement diagram

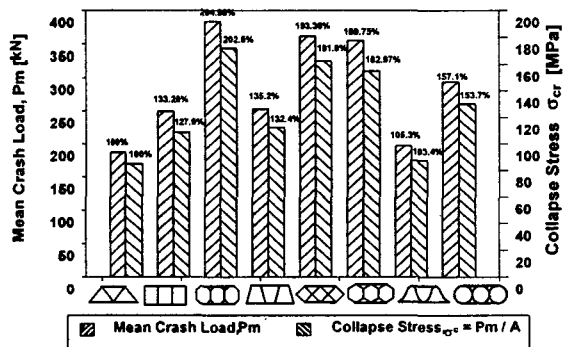


Fig. 15 Summary of crash analysis results according to cross-sectional shape variations

Fig. 14에서 보면 충돌초기의 최대 붕괴 하중은 단면형상이 바뀌어도 비슷하게 유지됨을 알 수 있으나, 기준 삼각단면의 부재와 비교하여 팔각단면부재(octahedral beam) 또는 벌집부재(honeycomb beam)로 갈수록 충돌초기의 최대 붕괴 하중이 넓은 변위에 걸쳐 유지되고 평균 붕괴 하중도 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 기준 삼각단면의 부재와 비교하여 팔각단면 부재가 높은 충돌에너지 흡수량을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 15의 평균 붕괴 하중과 붕괴 응력을 보면, 팔각(octahedral) - 마름모(diamond) - 육각(hexagonal) - 원형(cylindrical) - 사다리꼴(trapezoid) - 사각(square) - 정현파형(sinusoidal) - 삼각(triangular) 단면부재의 순서로 우수한 충돌안전성을 나타내고 있다. 특히, 팔각, 마름모, 육각 단면 부재의 경우 기준 삼각단면 부재에 비하여 높은 붕괴 응력을 나타내고 있어, 실제 고속전철의 Under Frame에 대한 경량설계시 효과적인 충돌안전성 측면의 설계안으로 제시될 수 있을 것이다.

4.2 Under Frame용 압출재의 단면폭비 변화

삼각단면의 Under Frame용 알루미늄 압출재에 대하여 부재 단면의 단면폭비 변화에 따른 충돌에너지 흡수특성에 대하여 알아보았다. 충돌해석 모델은 기준 삼각단면 부재($h/b=0.5$)를 기준으로 약 0.15씩 증감하여 모델을 설정하였다. Fig. 16과 같이 기준모델($h=0.58b$)에 대하여 정규화(normalized)한 평균 붕괴 하중과 붕괴응력으로 나타내면 단위면적당 충돌에너지 흡수량인 붕괴에너지 기준모델에서 가장 높음을 알 수 있다. 이는 현재의 기준모델($h=0.58b$)이 차체 중량을 고려한 측면에서 삼각형 빔의 알루미늄 압출재에 대한 효과적인 설계안으로 제시되고 있음을 나타내고 있다.

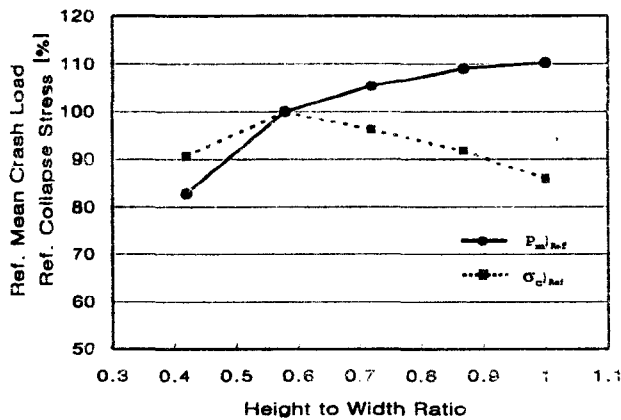


Fig. 16 Normalized mean crash load and collapse stress diagram

4.3 Body Roof Shell용 압출재의 단면폭비 변화

앞부분에서 전술한 바와 같이 Body Roof Shell 압출재의 경우, 중요한 설계 조건은 전복(roll over)에 대한 충돌안전성의 확보라 할 수 있다. 이를 위하여 기존의 Body Roof 면을 기준으로 준정적 굽힘 붕괴 해석을 통하여 최대의 굽힘 붕괴 모멘트를 하여 고찰해 보았다. 굽힘 붕괴 해석을 위한 모델링은 Fig. 16과 같으며 기준모로 단면폭비를 약 0.2씩 증가하며 해석하였다. 해석 결과는 Fig. 17와 같으며 굽힘 붕괴 모멘트와 에너지가 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 단면폭비 사이의 굽힘 붕괴 모멘트와 에너지 값이 비선형적으로 크게 증가되고 있음을 결과로 볼 때, 결과값의 비선형적 증가 구간에 대한 추가적인 고찰이 요구된다. Shell의 전복(roll over)에 대한 효과적인 충돌안전성 확보를 위해서는 현재 기준 단면폭비를 증가시키는 것이 알루미늄 압출재 단면형상에 대한 유용한 설계안임-

조건은 전복(roll over)에 대한 충돌안전성의 확보라 할 수 있다. 이를 위하여 기존의 Body Roof 면을 기준으로 준정적 굽힘 붕괴 해석을 통하여 최대의 굽힘 붕괴 모멘트를 하여 고찰해 보았다. 굽힘 붕괴 해석을 위한 모델링은 Fig. 16과 같으며 기준모로 단면폭비를 약 0.2씩 증가하며 해석하였다. 해석 결과는 Fig. 17와 같으며 굽힘 붕괴 모멘트와 에너지가 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 단면폭비 사이의 굽힘 붕괴 모멘트와 에너지 값이 비선형적으로 크게 증가되고 있음을 결과로 볼 때, 결과값의 비선형적 증가 구간에 대한 추가적인 고찰이 요구된다. Shell의 전복(roll over)에 대한 효과적인 충돌안전성 확보를 위해서는 현재 기준 단면폭비를 증가시키는 것이 알루미늄 압출재 단면형상에 대한 유용한 설계안임-

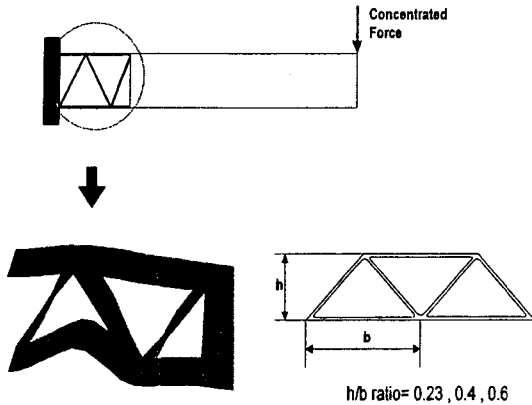


Fig. 17 Bending collapse characteristic simulation of body roof shell with aluminum extruded sections

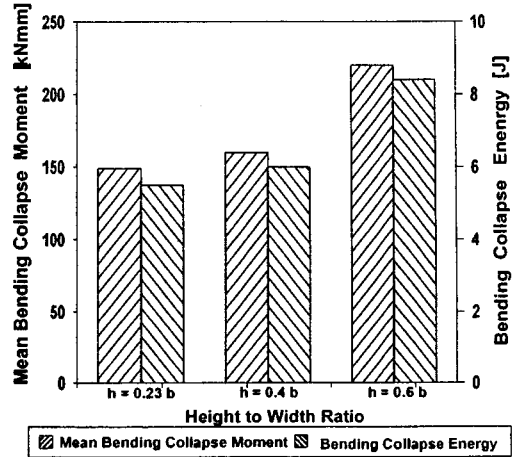


Fig. 18 Mean bending collapse moment and absorbed energy diagram

5. 결론

본 연구에서는 철도 차량의 경량화를 위해 사용되고 있는 알루미늄 압출재에 대한 기본적인 특성 분석을 위하여 정적 압괴 시험 및 해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 고속전철용 알루미늄 압출재의 충돌에너지 흡수 최적화 설계안 제시를 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하여 보면 다음과 같다.

- 알루미늄 압출재는 강재에 비하여 일반적으로 두께가 두꺼우며, 특히 모서리 부위에서는 더욱 두껍게 되어 최대 붕괴하중에 도달 후, 완만한 하중 감소과정을 보였다. 따라서, 알루미늄 압출재의 충돌해석시 모서리 효과 계수(edge effect coefficient)등에 의한 해석 결과의 보정 작업이 필요함을 알 수 있었다.

- 알루미늄 재질의 파단 변형률(fracture strain)은 약 10%이었으며, 이로 인하여 붕괴 과정중에 두께가 두꺼운 부위인 모서리 등에서 균열 조각이 발생하였다. 이때 발생하는 파단 에너지(fracture energy)는 궁극적으로 붕괴 과정이 진전됨에 따라서 전체적인 붕괴 하중의 크기를 점차적으로 약간씩 증대시킬 수 있었다. 이와 관련되어 충돌해석 과정에서 주요요소의 Node 분리법 또는 알루미늄 재질의 최대 파단 변형률 특성을 고려한 Modified 재질특성 입력법 등에 대한 고찰이 추가적으로 요구되고 있다.

- 고속전철용 알루미늄 압출재의 설계자료를 위하여 단면형상 및 단면폭비에 대한 변화해석을 수행하였다. 차체 경량화 및 안전도 설계를 동시에 고려하기 위하여 상기 두 가지 설계 변수는 매우 중요한 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 허승진(1991), "차량구조물의 충돌해석에 관한 연구", 생산기술연구원
2. 구정서, 송달호, 허승진 외 (1998), "고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 2차년도 연차보고서", 한국기계연구원
3. 김승보, 우형진, 이재용(1997), "전기 자동차용 알루미늄 스페이스 프레임", Technical review
4. 조성도성(1997), "차량 구조물의 충돌에너지 흡수 부재의 설계 및 해석", 석사학위논문, 국민대학교
5. ESI(1996), "PAM-System Manual"
6. P.H. Thornton. "Energy Absorption in Composite Structure", J. Comp. Mat., Vol.13 pp.247-262