[논문] 한국소성가공학회지, 제 17 권 제 3 호, 2008
Transactions of Materials Processing, Vol.17, No.3, 2008

고충돌에너지 흡수용 알루미늄 크래쉬박스 개발

유정수[1]· 김석봉[2]· 이문용[#]· 허 훈[2]

Development of Al Crash Box for High Crashworthiness Enhancement

J. S. Yoo, S. B. Kim, M. Y. Lee, H. Huh

(Received November 28, 2007)

Abstract

Crash box is one of the most important automotive parts for crash energy absorption and is equipped at the front end of the front side member. The specific characteristics of aluminum alloys offer the possibility to design cost-effective lightweight structures with high stiffness and excellent crash energy absorption potential. This study deals with crashworthiness of aluminum crash box for an auto-body with the various types of cross section. For aluminum alloys, Al7003-T7 and Al7003-T5, the dynamic tensile test was carried out to apply for crash analysis at the range of strain from 0.003/sec to 200/sec. The crash analysis and the crash test were carried out for three cross sections of rectangle, hexagon and octagon. The analysis results show that the octagon cross section shape with Al7003-T5 has higher crashworthiness than other cross section shapes. The effect of rib shapes in the cross section is important factor in crash analysis. Finally, new configuration of crash box with high crash energy absorption was suggested.

Key Words : Crash Box, Crashworthiness, Energy Absorption, Dynamic Tensile Test, Aluminum Alloy

1. 서 론

자동차 제조 기술의 비약적 발전으로 1세기가 넘는 기술 집약적 차량들은 현대인들의 일상생활에 운송 및 이동 수단의 개념을 뛰어넘는 필수 생활 수단으로 자리매김 하고 있다. 이러한 추세로 인하여 운송수단의 양적 성장뿐만 아니라 운전자에 대한 보호 및 유지비 부담 경감 등의 요구수준도 높아졌으며 이는 차량의 성능 및 가치를 평가하는 형태로 자리 잡고 있다. 특히 자동차 구조의 충돌성능과 운전자 안전향상 및 차량의 경량화는 현재 자동차산업에서 가장 중요한 이슈이다[1].

자동차 업계는 최근 저속충돌에서 차체 손상과 충돌성능 강화를 위하여 크래쉬 영역(crash zone)의 개념을 설계개념에 도입하였으며 범퍼 이후의 부품에서 충돌에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 크래쉬박스(crash box)의 개발을 통하여 차량안전성을 향상, 저속충돌시 차량의 피해를 최소화하고 있다. 최근에는 충돌성능 향상 및 경량화 실현을 위하여 주요 충돌흡수부재에 알루미늄 합금을 적용하여 차체의 고급화, 대형화 경향에 대응하는 추세이다[2]. 알루미늄 차체는 기존 철강재 대비 동일한 차체강성을 만족시킬 때 약 30%의 경량화를 이룰 수 있다고 알려져 있으며 동일한 차체강성을 보상하기 위해 소재 두께를 증가함에 따라 차체강도 및 내구 수명적인 측면에서 우수할 뿐

1. ㈜성우하이텍 기술연구소
2. KAIST 기계항공시스템학부
교신저자: ㈜성우하이텍 기술연구소,
E-mail:mylee@swhitech.co.kr

만 아니라 경량화에 따른 차체 굽힘 및 외적 고유진동수의 증가로 인해 소음, 진동특성의 향상도 기대할 수 있다. 알루미늄 압출재는 철강재에 비하여 고가이지만 가공공정을 차별화하여 가격 상승효과를 억제할 수 있으며 부품을 일체 성형 할 수 있어 중간 가공공정을 줄일 수 있다. 또한 압출형상의 자유도가 있어 구조적인 강성 보강이 가능하며 균일한 품질의 제품을 연속적으로 생산할 수 있는 장점이 있어 선진 업체에서는 많은 자동차용 구조재로 알루미늄 압출재를 적용하고 있는 추세이다[3].

구조부재의 충돌에너지 흡수 특성은 재질과 다양한 단면형상에 따라 달라진다. 지금까지 재료특성 및 형상을 고려하여 박판구조물의 충돌 에너지 흡수능을 분석한 연구가 많이 수행되었으며[4-6] 알루미늄관에 대하여 원형 및 다각형 단면을 고려한 연구가 수행되었다[7]. 그러나 단순한 단면형상이 아닌 실제적인 차체용 구조부재를 대상으로 하여 단면의 형상 및 내부격막의 영향을 고려한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 논문에서는 자동차의 경량화에 대응하기 위한 소재인 알루미늄 압출재를 적용한 크래쉬박스의 충돌성능 향상을 위한 형상인자를 연구하며 시편을 제작하여 크래쉬박스의 충돌성능을 평가한다. 고강도 알루미늄 합금의 정적 및 고속 인장시험을 수행하여 동적 인장특성을 해석에 적용하였으며 충돌성능이 우수한 크래쉬박스의 단면형상을 도출하기 위해 사각, 육각, 팔각의 단면형상을 고려하여 정면충돌해석을 수행한다. 크래쉬박스의 충돌에너지 흡수능 향상을 위하여 내부에 격막을 고려하여 격막의 형상변화에 따른 충돌성능을 비교 평가한다.

2. 알루미늄 압출재의 인장특성

본 연구에서는 Al7003-T7 알루미늄 합금 압출소재에 대하여 정적 및 동적 인장시험을 수행하였다. 자연시효가 발생되지 않도록 Al7003-T7 에 인공시효 열처리를 적용하였으며 항복과 인장강도 수준을 낮게 유지하는 대신 연신율을 극대화시켜 충격시 파괴 인성값을 향상시켰다. 이를 통하여 충돌시 발생하는 초기 변형저항(초기 peak 값) 값을 줄일 수 있으며 결국 구조재 손상방지 및 승객의 안전을 향상시킬 수 있다. 0.003/sec 의 준정적 변형률속도에서는 정적시험기(Instron 5583

Table 1 Material property from the static tensile test

Material	Thickness (mm)	YS (MPa)	El (%)	UTS (MPa)
Al7003-T7	2.9	246.6	17.0	291

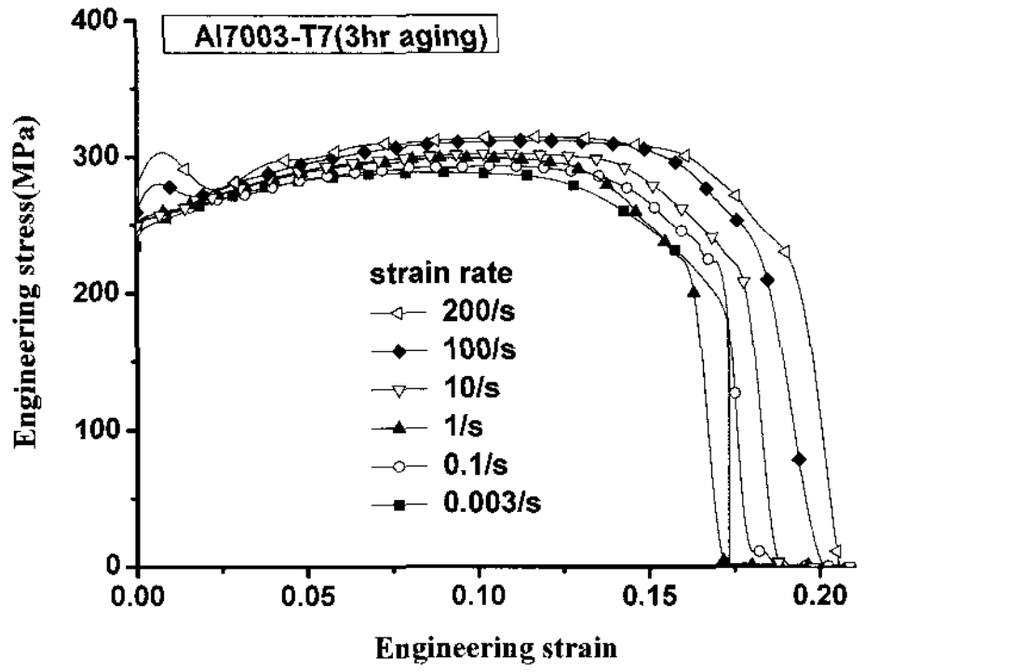

Fig. 1 Engineering stress-strain curves of Al7003-T7 at various strain rates

로 시험이 수행되었으며 물성은 Table 1과 같다. 동적 인장시험은 KAIST에서 제작된 고속재료시험기를 사용하여 0.1~200/sec의 중변형률속도에서 동적 인장특성을 파악하였다[8]. 정적 및 동적 시험에서 얻은 공칭응력-변형률 선도는 Fig. 1와 같으며 변형률속도의 증가에 따라 유동응력이 증가하나 동일 강도의 강재에 비하여 변형률속도 민감정도가 작은 특징을 보인다. 일반적으로 알루미늄 소재를 해석에 적용할 경우 정적과 동적 실험에서의 유동응력의 차이가 거의 없으므로 변형률속도의 영향을 무시한 정적결과를 이용하여 해석을 수행한다. 그러나 본 연구에서 사용된 Al7003-T7의 경우 변형률속도에 따른 유동응력의 증가가 작다고는 하나 무시할 수준이 아니므로 변형률속도에 따른 구분선형(piecewise linear)데이터로 유한요소해석에 적용하여 충돌특성을 파악하였다.

3. 크래쉬박스의 충돌해석

3.1 유한요소모델

크래쉬박스는 형상은 Fig. 2 와 같으며 사각, 육각, 팔각 단면 및 단면 내부의 격막(rib) 유무를 고려하여 6 가지 종류로 설계하였다. 크래쉬박스는 범퍼와의 연결을 위한 프런트 브라켓(front bracket), 프런트 사이드 멤버와 연결되는 리어 브라켓(rear bracket)과 충돌에너지를 흡수하는 크래쉬박스 멤버(member) 및 각 브라켓과 멤버를 연결하

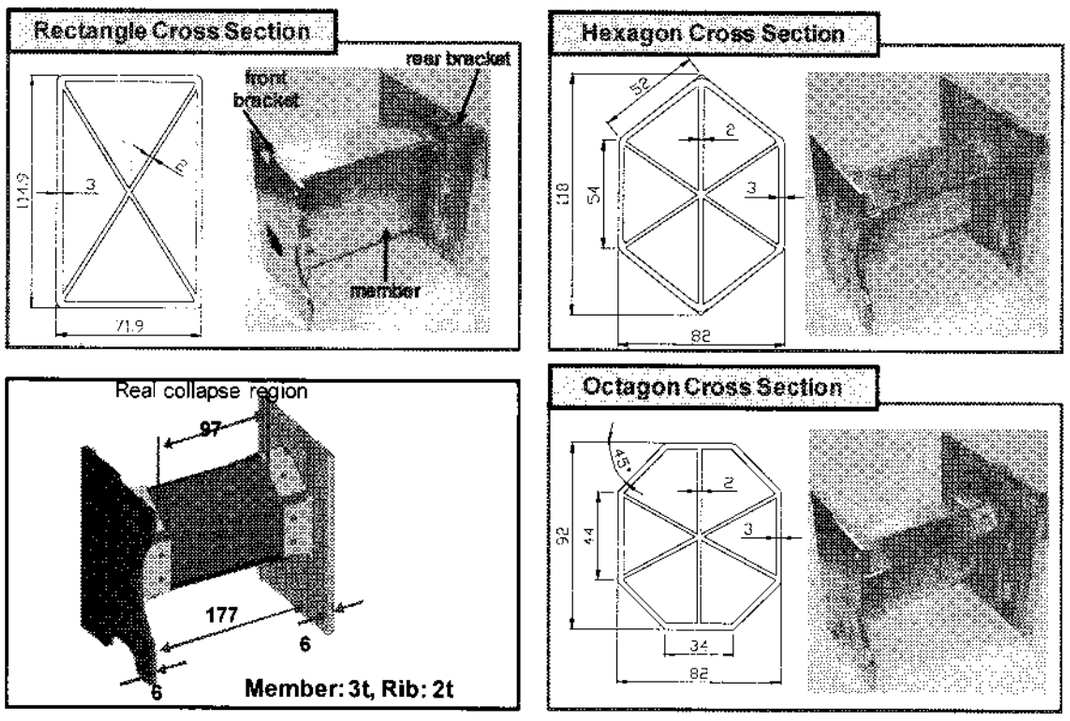

Fig. 2 Shape of aluminum crash boxes

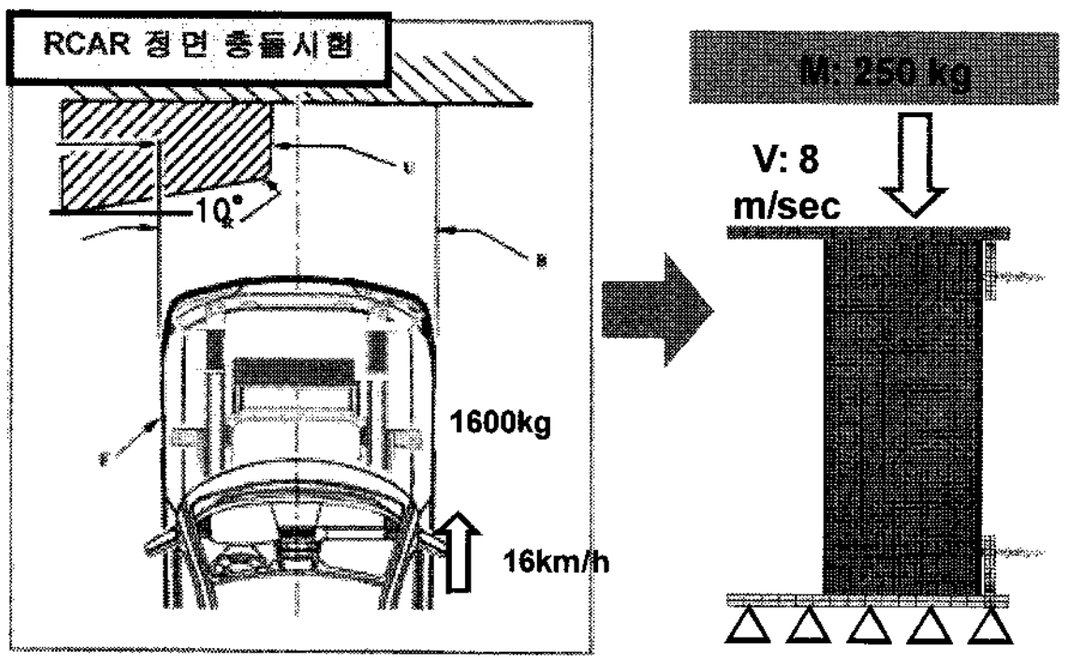

Fig. 3 Boundary conditions of crash box

는 부품(connecting plate)으로 구성되어있다. 각 단면의 크래쉬박스는 전체길이 189mm, 멤버의 두께는 3mm, 격막의 두께는 2mm 로 동일하다. 변형이 거의 없는 프런트 브라켓 및 리어 브라켓은 입방(solid)요소를 사용하였으며 주요 에너지 흡수 부분인 멤버 및 격막은 쉘(shell) 요소로 모델링 하였다. 실제 RCAR 정면충돌시험은 Fig. 3 과 같이 차량이 충돌벽으로 진행하여 충돌하게 된다[9]. 본 연구에서는 크래쉬박스 단품에 강체가 충돌하는 조건으로 RCAR 충돌시험과 유사한 충돌조건을 부여하고자 하였다. 이를 위하여 ULSAB-PNGV[10] 모델(전체질량 1600kg)을 선정하여 RCAR 저속 정면충돌규정에 의하여 최대 16km/h(4.44m/sec)의 속도로 충돌벽에 오프셋(offset)으로 충돌하는 해석을 수행하였다. 이때 차량은 약 15800J 의 충돌에너지를 흡수하며 범퍼와 크래쉬 박스가 각각 7800J 과 8000J 의 에너지를 흡수한다. 본 연구에서는 이상의 해석 결과를 참조하여 8000J 의 충돌에너지를 크래쉬박스 단품에 부과하였다. 향후 충돌시험에 사용할 KAIST 의 고속 충돌시험기는 250kg 의 대차를 최대 17m/sec 의 속도로 충돌시킬 수 있는 시험기이다. 따라서 시험기 사양을 고려하여 Fig. 3 과 같이 250kg 의 강벽(rigid wall)에 8m/sec 의 초기속도를 부과하여 8000J 의 충돌에너지를 부과하였다. RCAR 규정에 의한 4.44m/sec 보다 높은 속도인 8m/sec 을 적용하므로 알루미늄 합금의 변형률속도 경화 차이로 인한 충돌흡수능의 차이가 발생할 수 있으나 알루미늄의 경우 강판과 달리 변형률속도에 영향을 크게 받지 않으며 충돌시험과의 비교를 위하여 이상의 조건을 적용하기로 하였다. 강벽은 충돌 방향의 자유도를 제외한 모든 자유도를 구속하였고, 강벽과 크래쉬박스의 전단부 평판 사이에 동적 마찰계수 0.2 를 부과하였다. 해석은 외연적 유한요소프로그램 LS-DYNA3D v970 을 사용하였다.

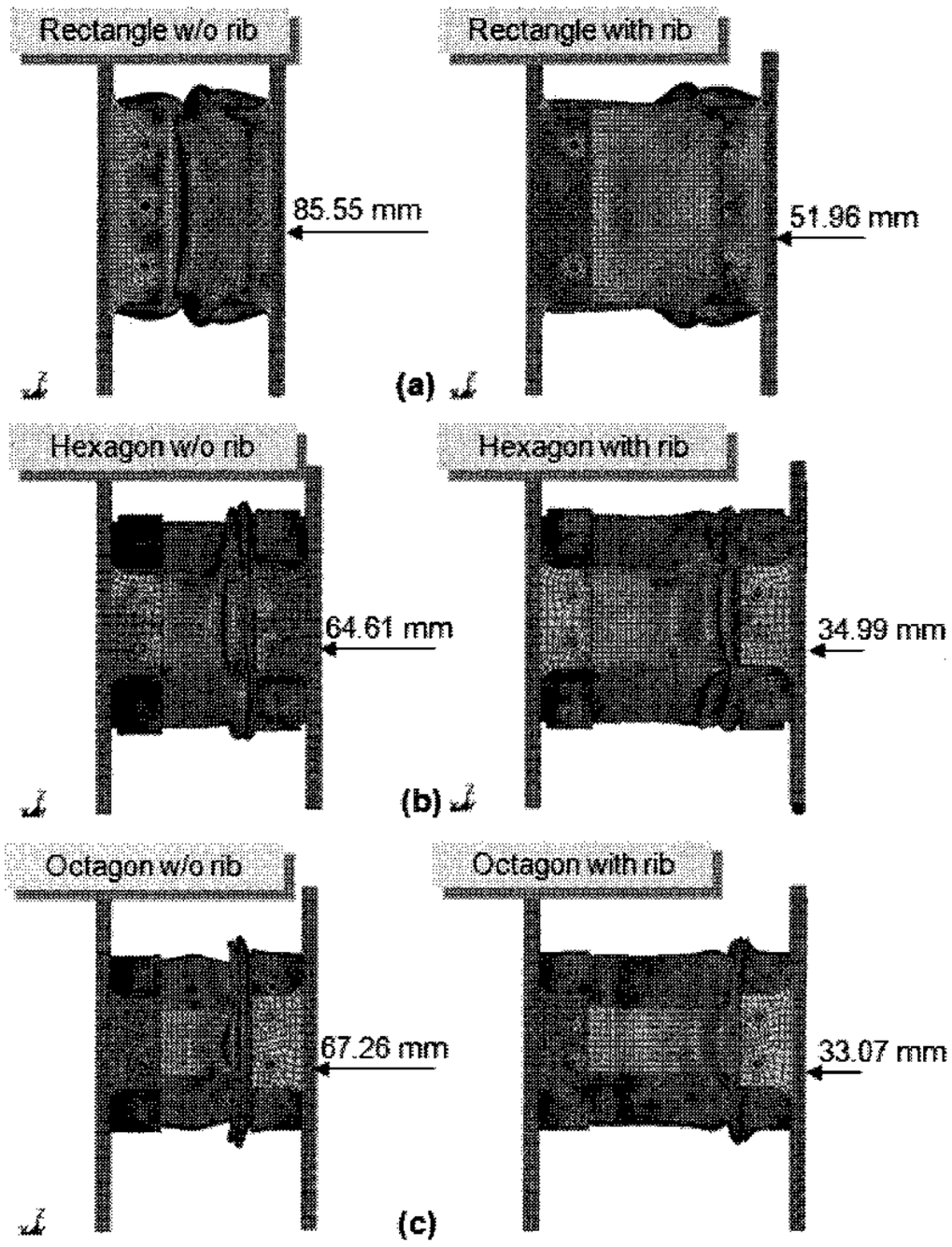

Fig. 4 F. E. analysis result of crash box: (a) rectangle; (b) hexagon; (c)octagon

3.2 충돌 해석 결과

유한요소해석 결과 Fig. 4(a)의 사각단면은 격막의 너비가 달라 충돌시 힘이 균일하게 분산되지 못하고 좌굴되는 경향을 보였다. Fig. 4(b), (c)의 육각단면과 팔각단면은 멤버와 브라켓이 대칭으로

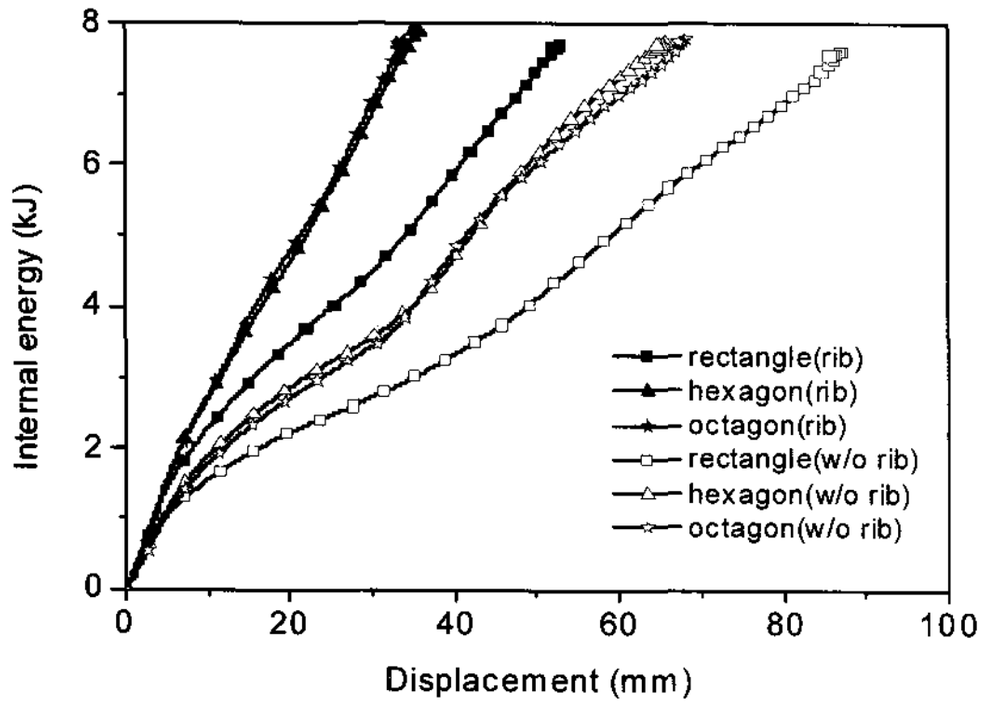

Fig. 5 Internal energy vs. displacement of crash box

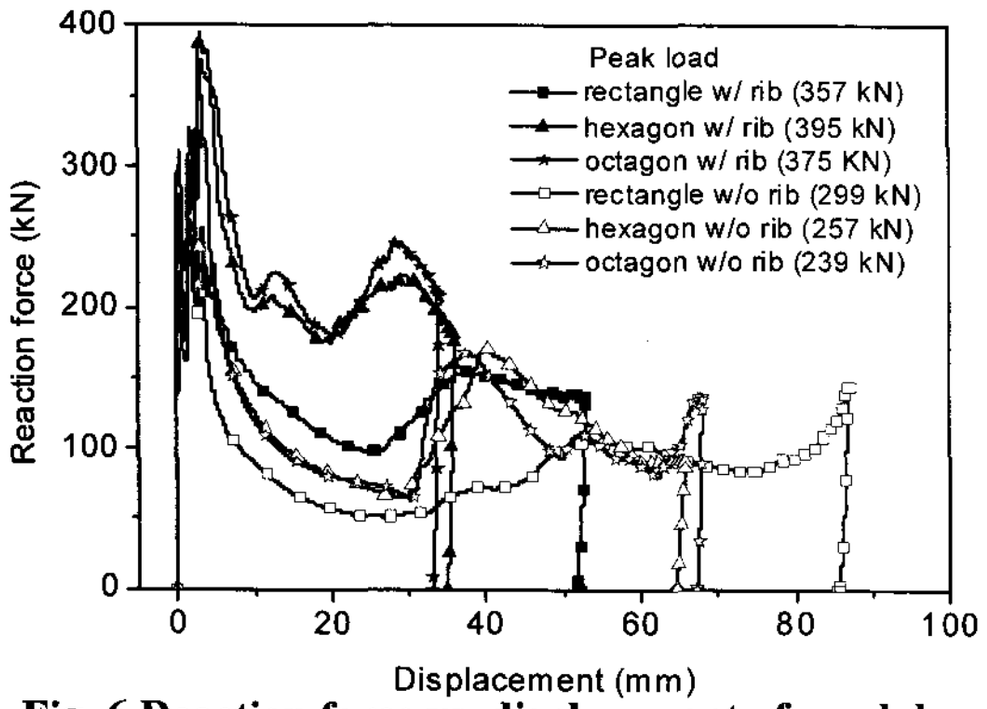

Fig. 6 Reaction force vs. displacement of crash box

연결되어 있어 좌굴없이 압궤되었다. 특히 팔각단면은 브라켓과 멤버의 연결부에서 접촉으로 인하여 굽힘이 발생하였다. 각 단면형상에 대한 내부에너지 흡수량은 Fig. 5과 같다. 동일한 압궤거리에 대하여 격막이 있는 단면이 더 큰 내부에너지를 흡수하며 육각 및 팔각단면이 사각단면에 비하여 큰 에너지 흡수율을 보인다. Fig. 6는 SAE600 필터링을 통하여 얻어진 각 단면의 압궤거리에 대한 충돌하중을 나타낸다. 격막을 가진 단면은 격막이 없는 단면보다 압궤거리에 대한 충돌에너지가 큰 반면 충돌하중이 큰 특징을 보인다. 격막이 있는 육각단면의 경우 팔각단면과 유사한 에너지흡수능을 보이나 최대하중이 20kN 크게 측정된다. 따라서 우수한 에너지 흡수능을 보이는 격막이 있는 육각과 팔각단면의 크래쉬 박스를 비교해보면 팔각단면이 더 우수한 충돌성능을 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 현재의 경계조건에서 얻어진 각 단면의 충돌성능 평가결과를 통하여 어느 단면이 가장 우수하다고 결론 내릴 수 없다. 에너지 흡수능을 비교한다면 격막이 있는 팔각단

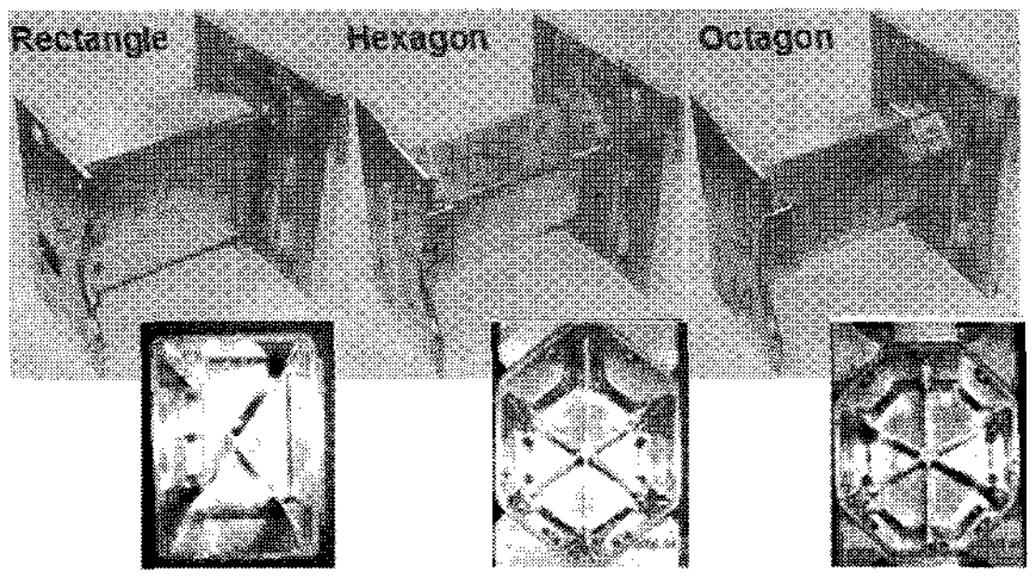

Fig. 7 Aluminum crash boxes for crash test

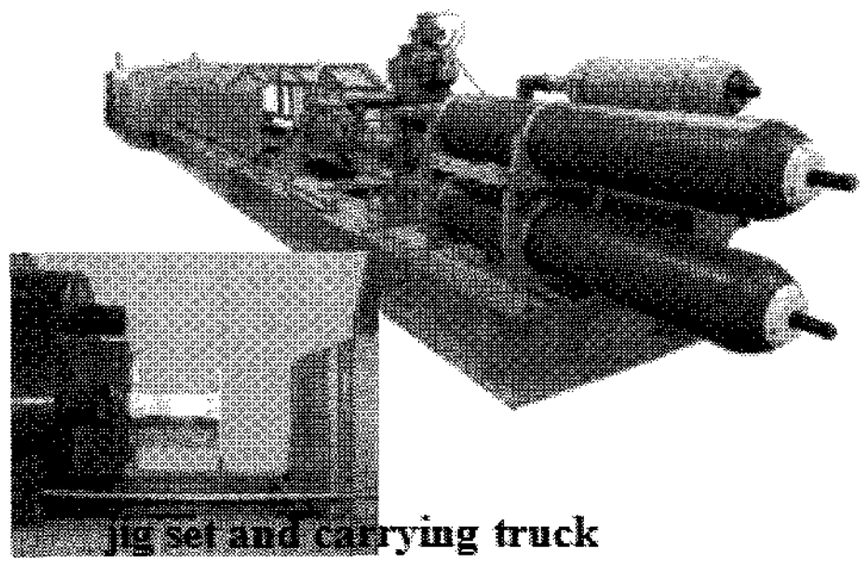

Fig. 8 High speed crash testing machine

면이 우수하나 실제 다른 부재와의 결합 시 높은 충돌하중으로 인하여 프런트사이드멤버가 변형을 일으킬 수 있으며 균일한 접힘이 발생하지 않을 수도 있다. 본 연구에서는 동일한 경계조건에 대하여 알루미늄 크래쉬박스의 단면형태에 따른 영향을 고찰하였으므로 다른 차체 부재와의 결합을 고려한 분석이 향후에 수행되어야 한다.

4. 크래쉬박스의 충돌실험

4.1 시편 제작

Al7003-T7 압출재를 적용한 크래쉬박스는 Fig. 7와 같이 사각, 육각, 팔각 단면을 중심으로 각 브라켓 및 연결 부품들이 셀프-피어싱(self-piecing)과 리벳(rivet) 공정을 통하여 결합되었다. 추가적으로 기계적 접합을 보강하고 소음, 진동성능을 향상시키기 위하여 에폭시(epoxy) 계열의 상온 경화형 본드를 각 결합부에 사용하였다.

4.2 충돌실험 조건

본 연구에서는 고속 충돌시 알루미늄 크래쉬박스의 변형모드 및 에너지 흡수능을 평가하고자 Fig. 8의 고속충돌시험기(high speed crash testing machine)를 사용하였다. 서보 유압 시스템(servo-

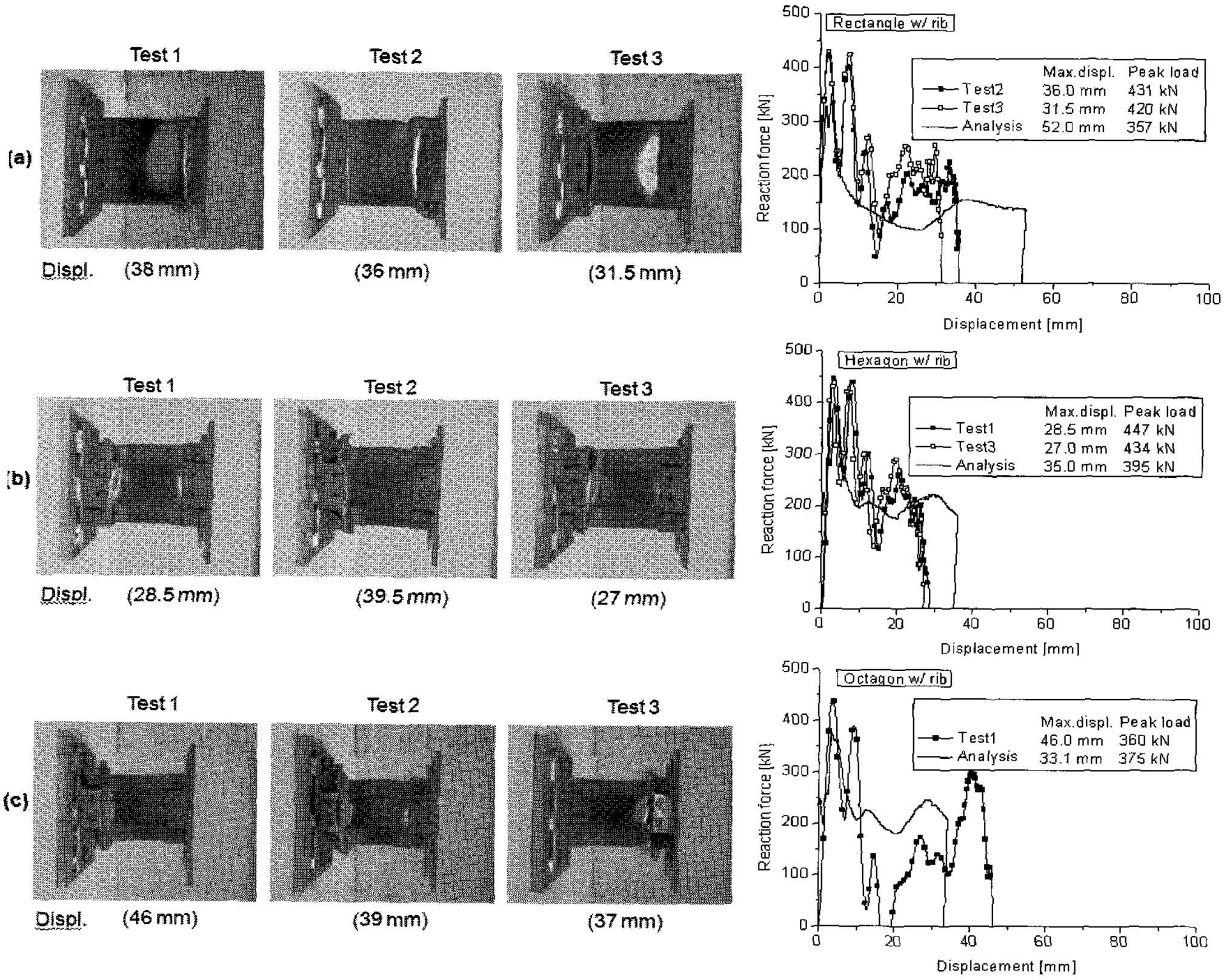

Fig. 9 Experimental result of crash box with rib: (a) rectangle; (b) hexagon; (c) octagon

hydraulic system)을 적용하여 순간적으로 1000mm 스트로크의 피스톤이 고속으로 발사되어 250kg의 대차를 가속시킨다. 시험 시 대차의 최대속도는 17m/sec 이다. 4개의 압전소자(piezo-electric) 로드셀이 충돌하중을 분배하여 측정하며 변위계로 시편의 변위를 측정한다. 시험에 사용된 부재는 사각, 육각, 팔각단면에 격막을 추가한 크래쉬박스이며 8m/sec의 속도로 대차를 충돌시켜 각 부재별 반력, 압궤모드 및 충돌흡수능을 평가하였다.

4.3 충돌실험 결과

Fig. 9은 충돌 후 크래쉬박스의 최종형상과 하중-변위 결과를 나타낸다. 각 단면에서 3개씩 시험을 수행하였으나 하중이 측정 되지 않은 시험결과는 제시하지 않았다. 시편이 장착된 지그 및 로드셀의 진동으로 인한 측정 하중의 진동이 관찰되며 해석결과에 비하여 대체로 큰 초기하중이 관찰된다. 이는 하중의 진동으로 인하여 측정값이 왜곡되어 나타난 결과로 보이며 이를 위하여 하중측정부의 형상 개선을 통한 하중진동 저감이 필요하다. 시험결과 사각튜브 내부에 적용된 격막의 작용으로 주어진 충돌에너지는 모두 흡수하나 최종 변형량 및 형상이 해석값과 차이가 발생하였다. 해석결과에서는 Fig. 4와 같이 파단 없이 접힘이 발생하여 최종적으로 52mm 변형하나 실험에서는 크래쉬박스의 프런트 브라켓이 멤버에 침투하여 파단을 일으켜 변형을 방해한다. 따라서 순차적인 점힘이 아닌 침투 및 파단으로 인하여 최종변형량이 해석결과와 큰 차이를 보인다. 육각 및 팔각단면의 경우 실험 결과 리어 브라켓이 멤버를 충분히 지지하지 못하여 해석결과와 달리 파단 및 터짐 현상이 발생한다. 이로 인하여 육각 튜브에서는 굽힘변형이 발생하지 않아 변형이 지연되며 팔각단면에서는 터짐 현상이 극심하여 해

석에 비하여 변형량이 크게 측정되었다. 충돌해석에서는 Fig. 4와 같이 프런트 및 리어 브라켓과 멤버의 결합부분에서 브라켓의 변형이 발생하지 않으며 이로 인하여 주요 멤버 및 격막에서 접힘으로 인하여 대부분의 에너지를 흡수한다. 결국 실험에 사용된 크래쉬박스는 단면형상에 관계없이 멤버부의 두께가 3mm로 두껍고 Al7003-T7의 연신율이 17%로 작아 굽힘변형에 취약하며 브라켓부에서 충분히 하중을 지지하지 못하는 문제가 있음을 알 수 있다.

5. 크래쉬박스의 개선

5.1 형상 및 소재 개선

1 차 충돌시험 결과에서 확인하였듯이 충돌 최초 최대 하중값이 평균 반력값과 충돌과 동시에 튜브의 변형모드가 아코디언처럼 완전히 변형되지 못하고 터짐현상이 발생하는 문제점이 생겼다. 이러한 문제점을 최소한으로 완화하기 위하여 알루미늄 압출재의 기계적 물성을 완화시켰으며 멤버의 두께를 감소시켰다. 기존의 사각, 육각, 팔각의 멤버 두께를 3mm 에서 2mm 로 수정 압출하여 변형 시 접힘 부분의 두께에 의한 변형량을 최소화 하였고, 압출재의 인장강도를 291MPa (Al7003-T7) 에서 215MPa (Al7003-T5)수준으로 하향시키고 연신율 또한 16%에서 23%로 상향시켰다. Al7003-T5의 공칭응력-변형률 곡선은 Fig. 10 과 같으며 유동응력이 변형률속도에 거의 영향을 받지 않는 물성을 보인다. 충돌시 터짐현상의 원인을 파괴인성의 부족으로 접근하여 압출재의 합금 성분 중에서 구리함량을 조정하여 파괴인성을 향상시켰다.

5.2 충돌시험 결과

육각 튜브의 경우 Fig. 11(a)과 같이 초기 최대 하중값이 130kN, 평균 반력값이 100~110kN 으로 반력이 지속적이고 규칙적으로 상승하다 소멸되었다. 이는 후방의 사이드 멤버에 변형저항, 즉 충돌시 사이드 멤버 변형을 적극적으로 해소하고 있음을 의미한다. 또한 1 차 충돌시험에서 발생된 가장 큰 문제인 압출재의 터짐현상은 완전히 개선되었고, 초기 하중값이 낮으며, 평균 반력 또한 강재 사양과 대등한 경향을 나타내었다. 경량화 측면과 성능적인 측면을 고려하였을 때 강재보다 기능적인 측면에서 우위에 있다고 예상된다.

팔각 튜브의 경우 Fig. 11(b)와 같이 초기 하중값이 120kN, 평균 반력값이 90~100kN, 충돌에너지 완전 흡수 지점인 변형량 80mm 구간을 제외한 평균 반력 구간이

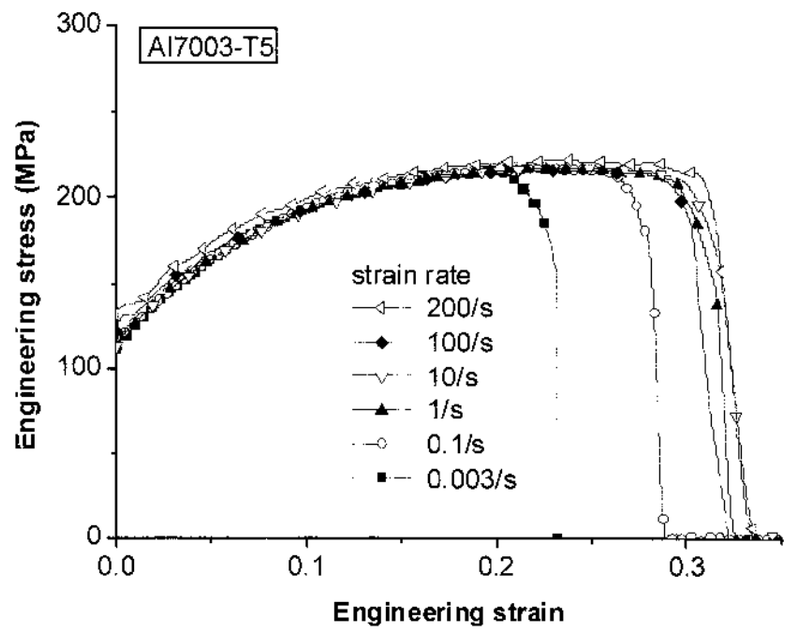

Fig.10 Engineering stress-strain curves of Al7003-T5 at various strain rates

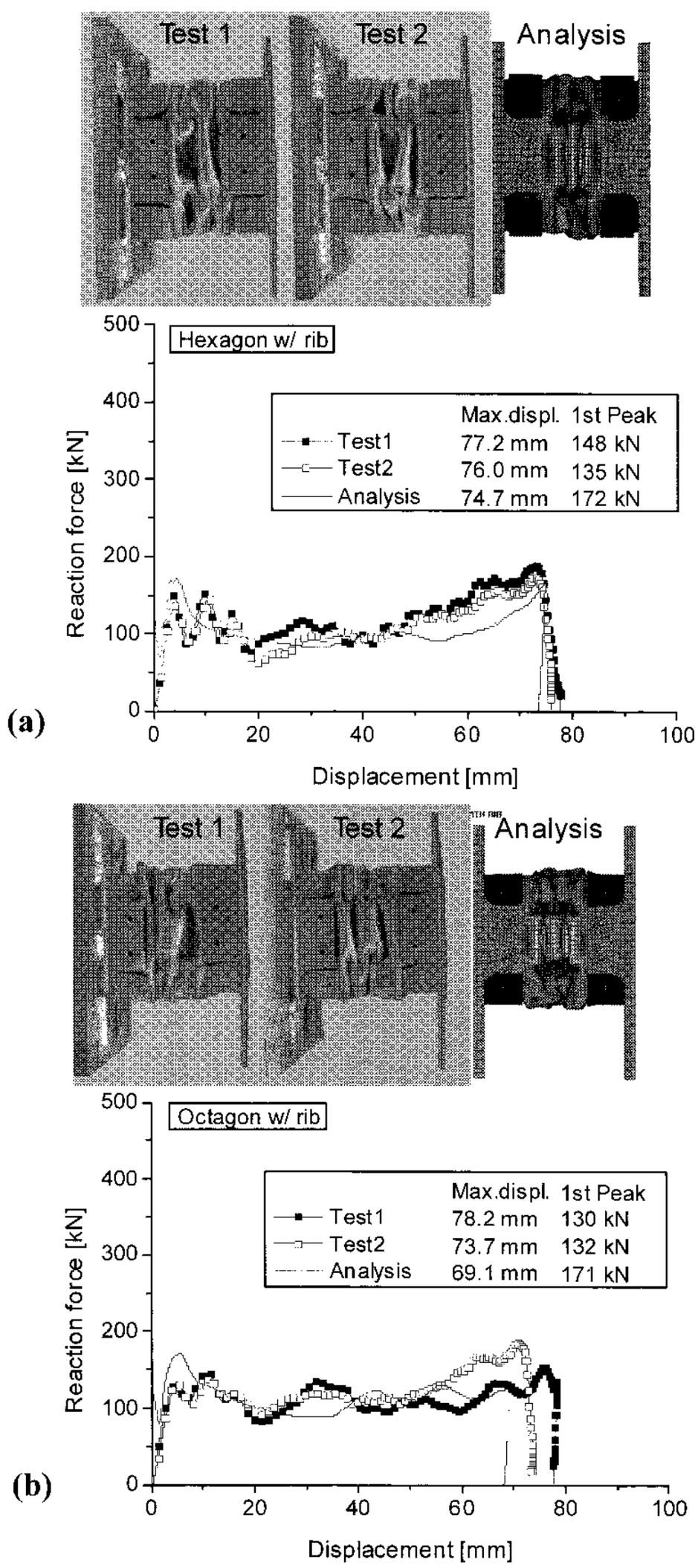

Fig.11 Experimental result of modified crash box with rib: (a) hexagon; (b) octagon

증가 추세가 아닌 일정한 수치를 나타냄으로써 가장 이상적인 결과를 나타낸다고 판단된다. 초기 하중값이 낮아 충격에 대한 크래쉬박스 초기 변형 발생시 후방의 사이드 멤버의 변형저항 부담을 최소화 하고 지속적인 평균 반력값은 불균일한 충격파 보다는 사이드 멤버 부재가 적극적으로 흡수할 수 있다고 판단된다. 또한 팔각 격막형도 앞에서 언급된 터짐현상은 완전히 개선되었다. 향후 사이드 멤버 개발시 팔각형의 부재가 더 효율적이라 할 수 있겠다.

6. 결 론

(1) 알루미늄 7003 소재를 열처리 한 후 정적 및 동적 인장시험을 실시하였고, 초기 및 개선된 크래쉬박스 형상에 각각 Al7003-T7, Al7003-T5 을 적용하였다.

(2) 충돌에너지 8000 J 부과 시 격막을 추가한 단면의 충돌 에너지 흡수능이 우수하였으나 초기 하중값이 크게 측정되어 주위의 다른 연결부재와의 상관관계를 고려할 필요가 있다.

(3) 해당 압출재를 제작하여 가공한 뒤 조립함으로써 크래쉬박스 시제품을 제작하였다. 개선 전 크래쉬박스의 경우 주어진 8000J 의 충돌에너지를 모두 흡수하나 육각과 팔각 부재의 경우 변형에 대한 응력 집중으로 터짐현상과 대체로 높은 최대 하중과 평균 반력을 가져 후방의 사이드 멤버에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 개선 후 크래쉬박스의 경우는 8000J 의 충돌에너지를 모두 흡수하면서 터짐현상이 개선되었고 초기 하중과 평균 반력이 상대적으로 낮아 후방의 사이드 멤버를 충격으로부터 변형을 방지하고 RCAR 의 법규를 만족시킬 수 있는 결과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 자동차기반기술사업 “Al 압출재를 이용한 고충돌에너지 흡수용 Crash box 개발”사업의 지원에 의해 가능하였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] W. J. Kang, H. Huh, 2000, Crash Analysis of Auto-body Structures Considering the Strain-rate Hardening Effect, Int. J. Automotive Technology, 1(1), pp. 35~41.

[2] P. Furrer, R. Jones, 2004, Aluminum Crash Management Systems, SAE Int, 1, p. 1612.

[3] M. Langsety, O. S. Hopperstad, 1997, Local Buckling of Square Thin-walled Aluminum Extrusions, Thin-walled structures, 27(1), pp. 117~126.

[4] T. Wierzbicki, W. Abramowicz, 1983, On the Crushing Mechanics of Thin-walled structures, J. Applied Mechanics, 50, pp. 727~734.

[5] W. Abramowicz, T. Wierzbicki, 1989, Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns, J. Applied Mechanics, 56(1), pp. 113~120.

[6] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, P. K. Kostazos, C. Dimitriou, 2003, Finite Element Simulation of the Axial Collapse of Metallic Thin-walled Tubes with Octagonal Cross-section, Thin-Walled Structures, 41, pp. 891~900.

[7] M. Yamashita, M. Gotoh, Y. Sawairi, 2003, Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-sections Numerical Simulation and Experiment, J. Materials Technology, 140, pp. 59~64.

[8] H. J. Lee, J. H. Song, S. S. Cho, H. Huh, S. H. Park, 2006, A Study on the Strain-Rate Sensitivity According to the Temperature for Steel Sheet of an Auto-Body, Transactions of KSTP, 15(2), pp. 132~137.

[9] RCAR, 1992, Evaluation manual of damageability and reparability for low speed 15 km/h 40% offset crash test.

[10] Porsche Engineering Services, ULSAB-AVC Engineering Reports, 2001.