



공학석사 학위 논문

Al6060S-T6의 크래쉬 박스 적용성에 관한 연구



기계공학학연융합학과

이 영 득

공학석사 학위 논문

Al6060S-T6의 크래쉬 박스 적용성에 관한 연구

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함.

2021년 2월

부경대학교 대학원

기계공학학연융합학과

이 영 득

이영득의 공학석사 학위 논문을 인준함.

2021년 2월 19일



위 원 공학박사 남 기 우 (인)

Abstract
1. 서론 ···································
2. 재료 및 실험 방법 3
2.1 재료
2.2 인장시험
2.3 압축시험
2.3.1 크래쉬 박스 7
2.3.2 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔 9
2.4 층돌시험
3. 결과 및 고찰
3.1 표준 규격 시험편의 인장 특성
3.2 크래쉬 박스의 압축 특성
3.3 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 압축 특성
3.4 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 충돌 특성
4. 결론
참고문헌
발표논문 목록
감사의 글

A Study on the Applicability of Al6060S-T6 to Crash Box

Young-Deuk Lee

Department of UR Mechanical Convergence Engineering Graduate School, Pukyong National University

Abstract

This study examined the possibility of replacing Al6082S-T6 with high rigidity with Al6060S-T6 with relatively low rigidity. Tensile properties were evaluated by making a tensile specimen in a crash box. The compression test was evaluated with a crash box, and the compression and crash tests were evaluated with a bumper beam assembled with a crash box. The characteristics of the compression test of the Al6082S-T6 crash box, the compression test and collision test of the bumper beam with the crash box were higher than those of the Al6060S-T6, but the impact energy absorption efficiency was low. It is judged that the damage range of the Al6060S-T6 crash box is smaller than that of the Al6082S-T6, and the collision performance is superior.

1. 서론

최근 전기자동차, 수소자동차 등 친환경 자동차의 개발이 가속화됨에 따라 자동차의 연료탱크를 대체한 배터리 또는 수소탱크가 탑재되면서 자동차의 중량이 증가하였다. 이에 따라 자동차 경량화가 중요한 화두 가 되고 있다.[1-4] 근래 자동차 한 대에 필요한 알루미늄의 양은 매년 증가하는 추세이다. 자동차 중량이 증가할수록 온실가스의 배출량은 선 형적으로 증가하고 있다. EU는 강력한 온실가스규제로 차량 무게 감소 에 노력하고 있다. 특히 EU는 2016년 이산화탄소 배출량 118.1 g CO₂/km을 2021년 규제 목표인 95g CO₂/km로 줄이기 위한 정책을 시행 중이다.[5] 2021년 EU 환경 목표를 달성하기 위해서는 매년 차량 1대당 45kg 이상, 5년간 약 230kg 이상의 경량화가 필요할 것으로 전망하고 있다. 이에 따라 완성차 업체는 동력 전기화와 차량 경량화를 추진하고 있다.

경량화 소재 중 알루미늄 합금도 압출 및 다이캐스팅으로 제조하여 여러 산업 분야에 사용되고 있다. 자동차 산업은 자동차 충돌 완충 부 재인 범퍼 빔과 크래쉬 박스를 알루미늄 합금으로 압출하여 다양한 형 상과 재질로 적용하고 있다.[6] 자동차 충돌 완충 부재인 알루미늄 압출 범퍼에 조립되는 크래쉬 박스의 소재 강도(항복강도, 인장강도)는 크래 쉬 박스의 충돌성능 및 역할과 밀접한 관계가 있다. 크래쉬 박스의 역 할은 물리적인 충돌이 발생했을 때, 강도을 유지하면서 규칙적인 접힘 이 계속 일어나는 접힘 접힘 모드(folding collapse mode Type)로 변형 을 유도해야 하고, 충돌에 의한 충격을 완충하면서 크래쉬 박스와 연결 된 차체 프런트 사이드 멤버의 변형을 최소화하는 것이 역할이다.[7-9] 자동차의 충돌 완충 부재인 범퍼는 범퍼 범과 크래쉬 박스로 구성된 다. 크래쉬 박스는 충돌성능 향상과 개선을 위해 많이 연구되었다. 대부 분 디자인 형상에 따른 성능 향상이었다. 오늘날 좀 더 가볍고 안전한 차량 개발을 위해 완성차 업체는 소재에 대한 경량화를 지속해서 추진 하고 있으며, 크래쉬 박스 또한 이러한 추세에 맞추어 알루미늄의 적용 과 소재에 대한 분석이 필요하다.[10-12] 또한, 크래쉬 박스는 승객의 안전 확보를 위해 충돌에너지 대부분을 충분히 흡수할 수 있도록 충돌 에너지 흡수 부재의 특성이 규명되어야 한다.[13,14] 이러한 추세에 따 라서 자동차 제작회사는 알루미늄 압출공법으로 제작되는 크래쉬 박스 의 경우, 강도가 높은 Al6082S-T6에서 강도가 상대적으로 낮은 A6060S-T6로 변경되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Al6082S-T6 및 Al6060S-T6는 표준 인장 시험편 으로 인장시험을 실시하였고, 물리적인 외력에 의한 영향을 분석하기 위하여 압출 사각재로 압축시험하였다. 또한, 크래쉬 박스가 조립된 범 퍼 빔은 압축과 충돌시험을 실시하여, Al6060S-T6의 적용성을 검토하였 다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료

본 연구에 사용한 재료는 기존 크래쉬 박스에 적용하던 Al6082S-T6와 대체용으로 검토하기 위한 Al6060S-T6를 사용하였다. Al6082S-T6와 Al6060S-T6의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 2에 나타내 었다. Al6082와 Al6060은 Si, Fe, Mn, Mg, Zn의 함량에서 차이를 보인다. Si와 Mg의 함량 증가는 열처리 때문에, Mg₂Si가 석출되어 강도가 향상 할 수 있다. Fe는 Al₃Fe로 결정되어 강도가 향상할 수 있으나, 과도할 경우 강도 저하가 될 수 있는 문제를 Mn을 통해 Fe의 악영향을 개선할 수 있다.

	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
A16082-T6	0.163	0.075	0.208	1.048	0.606	1.205	0.024	0.044	Bal.
A16060-T6	0.009	0.018	0.200	0.413	0.040	0.511	0.027	0.019	Bal.

Table 1. Chemical compositions of applied aluminum alloys. (wt.%)

Table 2. Mechanical properties of applied aluminum alloys.

6	Tensile strength	Yield strength	Elongation
12/	(MPa)	(MPa)	(%)
A16082-T6	335.1	314.2	13.5
A16060-T6	232.5	218.3	12.3
10 L		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	/
X	a H	ot in	

2.2 인장시험

인장 시험편은 원재료의 두께로 제작된 크래쉬 박스에서 ASTM E8(Sub size) 규격에 의하여 만들었다. 인장 시험편은 Al6082S-T6 36개 및 Al6060S-T6 72개를 사용하였다. Al6060S-T6 인장 시험편은 동급 재 료이지만, 다른 압출 업체의 크래쉬 박스의 특성을 비교하기 위하여, L 및 K 업체가 제작한 크래쉬 박스에서 각각 36개 채취하였다. 이들 시험 편은 각각 Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02로 부른다. Al6082S-T6, Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02 인장 시험편은 각각의 크래쉬 박스 에서 만들었으며, 채취 위치는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 ①과 ③ 은 두께가 2mm이고, ②는 두께가 3mm이다. Fig. 2는 인장 시험편 형상 과 치수를 나타낸 것이다. 인장시험은 만능 인장 시험기(250 kN, Zwick, Z250SN.A4K, 독일)를 사용하여, 크로스헤드 속도 5mm/min으로 실시하 였다.



Fig. 1. Cutting position of specimen in crash box.



Fig. 2. Shape and dimensions of tensile specimen obtained from crash box. (unit : mm)

2.3 압축시험

2.3.1 크래쉬 박스

크래쉬 박스의 압축 성능은 사각 단면 형상에 따라 차이가 있으므 로,[13] 같은 조건에서 재료에 따른 비교를 위하여 제작하였다. Fig. 3은 압축시험에 사용한 크래쉬 박스를 나타낸다. Al6082S-T6, Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02 크래쉬 박스 시험편은 각각 6개 사 용하였다. 압축시험은 800t 서보 프레스(THP-8000, 한국)를 이용하여, 크로스헤드 속도는 5mm/sec로 수행하였다.





Fig. 3. Shape and dimensions of crash box. (unit : mm)



2.3.2 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔

크래쉬 박스가 조립된 범퍼는 Al7H01S-T7 범퍼 빔에 크래쉬 박스 재 료인 Al6082S-T6 및 Al6060S-T6_#02를 조립하여, 각각 1개를 압축시험 하였다. Al6060S-T6 크래쉬 박스는 압축시험에서 균열이 발생한 Al6060S-T6_#02만 시험하였다. Fig. 4는 크래쉬 박스가 조립된 범퍼를 나타낸다. 압축시험은 800t 서보 프레스(THP-8000, 한국)를 이용하여, 크로스헤드 속도는 5mm/sec로 수행하였다. 압축시험은 RCAR 40% OFFSET 충돌시험을 모사하여 실시하였으며, 크래쉬 박스의 축방향으로 압축시험을 수행하였다.

압축시험은 충돌시험과 비교하기 위해 RCAR(Research Council for Automobile Repairs)에서 규정하는 시험방식을 모사하여 적용하였다.[15] RCAR는 세계 각국의 보험연구원에서 1975년 결성한 국제조직으로서 차량의 수리성(repairability), 손상성(damageability), 안전성(safety)의 개 선으로 보험 비용을 줄이는 것을 주목적으로 한다.

23



Fig. 4. Shape and dimensions of bumper with crash box. (unit : mm)

2.4 충돌시험

크래쉬 박스가 조립된 범퍼는 2.3.2와 같은 것을 사용하였다. Al7H01S-T7 범퍼 빔에 크래쉬 박스 재료인 Al6082S-T6 및 Al6060S-T6_#02를 조립하여, 각각 1개를 충돌시험하였다. 충돌시험방법 의 외관을 Fig. 5에 나타낸다. 이때 충돌은 좌우 어느 쪽이라도 상관없 으나,[15] 좌측 크래쉬 박스가 충돌하도록 시험하였다. 또한, 가장 큰 충 돌 하중이 작용하도록 정면충돌을 가정하였다.

충돌시험은 RCAR(Research Council for Automobile Repairs, 세계자동 차 수리기술연구위원회)에서 신차 보험료 산정을 위해 시행하는 시험 중의 하나인 RCAR 40% OFFSET을 기준으로 실시하였다. 2.3.2에서 사 용된 시험 항목과 같지만 시험방식은 2.3.2는 정적인 정하중으로 압축하 는 방식이고, 2.4의 충돌시험은 동적인 시험으로 순간적인 충격에 의한 시험방식이다. 충돌 벽면은 10° 경사면이며, 충돌속도는 15.5 km/h이다. 충돌에너지 흡수효율은 차량을 모사한 대차를 이용하여 충돌 시 크래쉬 박스에 가해지는 최대 하중 및 압축 거리에 따른 평균 하중을 이용하여 계산하였다.



01 11

H

Fig. 5 Appearance of collision test method.

NN A

3. 결과 및 고찰

3.1 표준 규격 시험편의 인장 특성

Fig. 6은 Al6082S-T6, Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02의 인장 시 험편에서 얻어진 대표적인 응력 - 변형률 선도이다. 인장시험은 3종류 재료에서 각각 36개씩 사용하였다. Fig. 6과 같은 응력 -변형률 선도에 서 얻어진 인장시험 결과를 Table 3에 나타내었다.

Fig. 7은 Table 3의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Al6082S-T6의 인 장강도(σ_t)는 평균 337.9±4.8 MPa, 항복강도(σ_y)는 318.8±5.8 MPa, 연신 율(ε)은 15.8±1.2%로 얻어졌다. Al6060S-T6-#01의 인장강도는 252.4±6.6 MPa, 항복강도는 235.9±6.7 MPa, 연신율은 13.4±1.0%로 얻 어졌다. Al6060S-T6-#02의 인장강도는 230.0±4.3 MPa, 항복강도는 211.2±5.6 MPa, 연신율은 13.4±1.3%로 얻어졌다. 각 시험편의 인장시 험 결과는 Fig. 1에서 ①-③의 두께에 의한 차이는 나타나지 않았다. Al6060S-T6는 동급 재료이지만, 크래쉬 박스 제작업체가 달라서 기계적 특성이 약간 다르게 나타났다. 이것은 알루미늄 압출 원소재인 빌렛의 제조과정에서 화학 성분의 미세한 차이와 제조공법의 차이 때문이다. Al6060S-T6-#01 및 #02의 인장강도는 각각 Al6082S-T6의 74.7% 및 68.1%를 나타내었으며, 항복강도는 74.0% 및 66.2%를 나타내었다. 그리 고 Al6060S-T6-#01 및 #02의 연신율은 비슷하게 나타났으며, Al6082S-T6의 84.8%를 나타내었다.

Al6082S-T6의 인장강도와 항복강도는 Al6060S-T6보다 높으며, 연신율

도 약간 크다. 그러나 강도은 Al6082S-T6가 더 큰 것으로 판단된다. 강 도은 구조물이 외력을 받았을 때, 변형에 대한 저항력을 나타내는 것으 로, Al6060S-T6의 강도이 작은 것으로 판단된다. 자동차 범퍼가 외력을 받았을 때, 크래쉬 박스는 접힘 모드(folding mode)로 변형하여, 충돌에 의한 충격을 완화하면서 크래쉬 박스와 연결된 차체의 변형을 최소화해 야 한다. 일반적으로 강도이 높은 재료는 구매단가가 높고, 내충격성 및 충돌에너지 완화 기능이 낮으며, 크래쉬 박스와 연결된 차체에 많은 변 형을 가져온다. Al6082S-T6는 Al6060S-T6-#01 및 #02보다 크래쉬 박스 의 접힘 거동에 취약하리라 예측된다.





Fig. 6. Typical tensile stress – strain diagram obtained from tensile specimen.

Specimen		σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ε (%)	
	Mean	337.9	318.8	15.8	
	Std	4.8	5.8	1.2	
A100825-10	Max	347.0	329.4	18.0	
	Min	331.7	312.8	11.6	
	Mean	252.4	235.9	13.4	
A16060S T6 #01	Std	6.6	6.7	1.0	
A100003-10-#01	Max	264.8	248.1	15.9	
.0	Min	237.6	223.5	11.6	
N	Mean	230.0	211.2	13.4	
A16060S T6 #02	Std	4.3	5.6	1.3	
A100005-10-#02	Max	236.8	220.0	15.8	
5	Min	218.2	196.2	9.4	

Table 3. Results obtained from three kinds of tensile specimen.



Fig. 7. Comparison of tensile properties obtained from three kinds of specimen.

3.2 크래쉬 박스의 압축 특성

Fig. 8은 Al6082S-T6, Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02로 제작한 크래쉬 박스의 압축시험에서 얻어진 대표적인 압축 하중 - 시간 선도를 나타낸다. 3종류 크래쉬 박스 시험편은 각각 6개씩 압축시험에 사용하 였다. 3종류의 크래쉬 박스의 압축 하중은 초기에 급격하게 증가하지만, 접힘이 발생하면서 감소와 증가를 반복하면서 파손하였다. 기존 소재인 Al6082S-T6는 2초 정도에서 최초 접힘이 발생하였고, 5번의 접힘을 반 복하였다. 이 중 3번은 비슷한 압축 하중을 나타내었다. Al6060S-T6-#01은 초기에 접힘이 약간 발생하면서 최대 압축 하중을 나타내었고, 5번의 접힘을 반복하였다. 그러나 5번의 압축 하중은 최초 보다 낮은 하중을 나타내었다. Al6060S-T6-#02는 초기에 Al6060S-T6-#01보다 접힘이 크게 발생하면서 최대 압축 하중을 나타내 었고, 그 후 수차례 접힘이 발생하면서 파손하였다. Table 4는 Fig. 8과 같은 선도에서 얻어진 결과를 나타낸다.

Fig. 9는 Table 4의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Al6082S-T6의 최 대 하중은 161.4 kN으로 Al6060S-T6-#01의 132.8 kN 및 Al6060S-T6-#02의 131.0 kN보다 각각 21.5% 및 23.2% 높으며, 평균 압 축 하중은 각각 8% 및 16.7% 높다. 그러나 압축에너지 흡수효율은 Al6082S-T6는 68.8%, Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02는 각각 77.5% 및 72.7%로 각각 약 12.6% 및 약 5.7% 높게 나타났다. 여기서 압축에너 지 흡수효율은 평균 하중/최대 하중으로 산출하였다. 따라서 Al6060S-T6-#01 및 Al6060S-T6-#02는 Al6082S-T6보다 압축에너지 흡수 효율이 높아서, 외력에 대한 충격흡수력이 우수한 것으로 판단된다.



Table 4. Results obtained from the compression test of three kinds of crash box.

Specimen	Max load (kN)	Mean load (kN)	Absorption efficiency (%)
A16082S-T6	161.4	111.1	68.8
Al6060S-T6-#01	132.8	102.9	77.5
A16060S-T6-#02	131.0	95.2	72.7



Fig. 9. Comparison of compression load and absorption efficiency obtained from three kinds of crash box.

Fig. 10은 3종류의 크래쉬 박스 압축시험에서 나타난 균열 발생 외관 을 나타낸다. (a)는 Al6082S-T6, (b)는 Al6060S-T6-#01, (c)는 Al6060S-T6-#02에서 얻어진 것이다. (a)와 (c)는 균열이 발생하였으나, (b)는 6개의 시험편에서 균열이 발생하지 않았다. (a)는 6개의 시험편에 서 균열 길이 177-218mm (평균 199mm)로 나타났으며, 균열공간은 넓 은 형상을 나타내었다. (c)는 6개의 시험편에서 균열 길이 136-219mm (평균 168.5mm)로 나타났으며, (a)보다 균열의 크기가 분산되었으나, 균 열공간은 좁은 형상을 나타내었다. 이후는 균열이 발생한 Al6082S-T6와 Al6060S-T6-#02에 대하여 압축 및 충돌시험하였다. 한편, Fig. 10(a~c)의 접힘 현상은 Fig. 8에 나타낸 각 선도의 하중 피크와 거의 일치한다. 이 같이 피크는 압축 하중에 저항하는 에너지가 축적되지만, 감소는 크래쉬 박스에 접힘이 발생하므로서 압축에너지가 해방되는 것을 의미한다.

Al6082S-T6 인장시험의 인장강도 및 항복강도는 Al6060S-T6-#01 및 #02보다 높은 결과를 나타내었다. 크래쉬 박스의 압축시험 결과도 인장 시험과 유사한 결과가 나타났다. 인장강도가 큰 Al6082S-T6 크래쉬 박 스의 평균 균열 길이는 Al6060S-T6-#01 및 #02보다 30.5-199.0 mm 크 고, 평균 최대 하중은 28.6-30.4 kN 높고, 평균 하중도 8.2-15.9 kN 높 다. 이같이 강도는 높으나, 충돌에너지 흡수효율은 3.9-8.7% 낮게 나타 났다.

이것은 Al6082S-T6가 상대적으로 높은 강도를 가짐으로써, 자동차 충 돌 시 범퍼의 크래쉬 박스가 접힘보다는 크랙 발생이 더 쉽다는 것을 의미한다. 따라서 크래쉬 박스의 파손뿐만 아니라, 크래쉬 박스와 연결 된 차체에 충격이 전달되어 차량의 손상 범위가 더욱 확대될 수 있다.







(a)





(b)









(c)

Fig. 10. Appearance after compression test of three kinds of crash box. (a) Al6082S-T6, (b) Al6060S-T6-#01, (c) Al6060S-T6-#02

3.3 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 압축 특성

3.2절의 크래쉬 박스 압축시험에서 Al6060S-T6-#01은 균열이 발생하 지 않았으므로, Al6082S-T6와 Al6060S-T6-#02에 대하여 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔을 압축시험하였다.

Fig. 11은 Al6082S-T6 및 Al6060S-T6-#02로 제작한 크래쉬 박스가 조 립된 범퍼 빔의 압축시험에서 얻어진 압축 하중-시간 선도를 나타낸다. 2종류의 크래쉬 박스는 초기 압축 하중이 급격하게 증가하였으나, 그 후 약간의 감소와 증가를 반복하면서 파손하였다. 이것은 뒤에 나타내 는 Fig. 13의 접힘 형상과 잘 일치하고 있다. Table 5는 Fig. 11의 선도 에서 얻어진 결과를 나타낸다.

Fig. 12는 Table 5의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Al6082S-T6의 최대 하중은 155.3 kN, 평균 하중은 80.5 kN으로, 충돌에너지 흡수효율 은 51.8%이다. 한편, Al6060S-T6-#02의 최대 하중은 123.5 kN, 평균 하 중은 70.5 kN으로, 충돌에너지 흡수효율은 57.1%이다. 여기서 압축에너 지 흡수효율은 평균 하중/최대 하중으로 구한다. Al6082S-T6의 압축 하 중이 크지만, Al6060S-T6-#02의 압축에너지 흡수효율이 크게 나타나, 외력에 대한 저항력이 우수한 것으로 판단된다.



Fig. 11. compression load - time diagram obtained from compression test of bumper beam with crash box.

Table 5. Results obtained from the compression test of bumper beam with crash box.

Specimen	Max load (kN)	Mean load (kN)	Absorption efficiency (%)
A16082S-T6	155.3	80.5	51.8
Al6060S-T6-#02	123.5	70.5	57.1



Fig. 12. Comparison of compression load and absorption efficiency obtained from compression test of bumper beam with crash box.

Fig. 13은 크래쉬 박스가 조립된 범퍼의 압축시험 전후의 외관과 압축 후의 크래쉬 박스 형상을 나타낸다. (a)는 Al6082S-T6, (b)는 Al6060S-T6-#02의 결과이다. (a)의 균열 형상은 공간이 넓고, 길이가 길 게 나타났다. 이것은 재료의 큰 강도 때문에, 압축 하중에 의하여 취성 적인 파괴 양상을 나타낸다. (b)의 균열 형상은 공간이 좁으며 길이가 짧게 나타났다. 이것은 (a)보다 큰 연성으로 인하여, 압축 하중의 에너 지를 충분하게 흡수하여 접힘 거동은 나타내었다.

이같이 압축 거동은 Fig. 10과 다르게 나타났다. Fig. 10은 압축 하중 이 크래쉬 박스에 직접 작용하였지만, Fig. 13은 Fig. 5에 나타낸 충돌 벽면이 고강도인 범퍼 빔을 압축하여, 크래쉬 박스에 압축 하중이 작용 하므로 다른 거동을 나타내었다. 즉, Fig. 10은 연속적인 접힘 거동을 나타내었다. 그러나, Fig. 13은 고강도인 Al6082S-T6에서 접힘보다는 파 괴가 발생하였고, Al6060S-T6-#02에서 약간의 파괴를 동반하는 접힘 거 동을 나타내었다. H of M

A M



Fig. 13. Appearance after compression test of bumper beam with crash box. (a) Al6082S-T6, (b) Al6060S-T6-#02

3.4 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 충돌 특성

Fig. 14는 Al6082S-T6 및 Al6060S-T6-#02로 제작한 크래쉬 박스가 조 립된 범퍼 빔의 충돌시험에서 얻어진 충돌 하중-시간 선도를 나타낸다. 초기 충돌 하중은 급격하게 증가한 후, 감소와 증가를 반복하면서 파손 하였다. Fig. 5에 나타낸 10° 기울어진 충돌 벽면은 만곡된 범퍼 빔에 수직하게 접촉될 수 있다. 충돌 벽면과 범퍼 빔은 고정되어 있으므로 충돌과 동시에 크래쉬 박스에 압축 하중이 작용한다. 이같이 충돌 하중 에 의하여 감소하는 부분은 크래쉬 박스에 접힘이 발생하는 시간이다. Table 6은 크래쉬 박스가 조립된 2종류 범퍼 빔의 충돌시험에서 얻어진 결과를 나타낸다.

Fig. 15는 Table 6의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Al6082S-T6의 최대 하중은 173.0 kN, 평균 하중은 88.2 kN으로, 충돌에너지 흡수효율 은 50.9%이다. 한편, Al6060S-T6-#02의 최대 하중은 138.7 kN, 평균 하 중은 74.9 kN으로, 충돌에너지 흡수효율은 54.0%이다. 여기서 압축에너 지 흡수효율은 평균 하중/최대 하중으로 구한다. Al6082S-T6의 충돌 하 중이 크지만, Al6060S-T6-#02의 충돌에너지 흡수효율이 크게 나타나, 외력에 대한 저항력이 우수한 것으로 판단된다.

이같이 크래쉬 박스 압축시험의 흡수효율은 Al6082S-T6에서 68.8%, Al6060S-T6-#02에서 72.7% 나타났다. 이것은 압축 하중을 크래쉬 박스 가 모두 흡수하였기 때문이라 판단된다. 그러나 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 압축 및 충돌시험은 각각 Al6082S-T6에서 51.8%와 50.9%, Al6060S-T6-#02에서 57.1%와 54.0%로 나타났다. 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔은 압축 또는 충돌하중의 에너지를 고강도인 범퍼 빔이 약 20% 정도 흡수하였기 때문이라 판단된다.



Fig. 14. Collision load - time diagram obtained from collision test of bumper beam with crash box.

Table 6. Results obtained from the collision test of bumper beam with two types of crash box.

Specimen	Max load (kN)	Mean load (kN)	Absorption efficiency (%)
A16082S-T6	173.0	88.2	50.9
A16060S-T6-#02	138.7	74.9	54.0



Fig. 15. Comparison of collision load and absorption efficiency obtained from collision test of bumper beam with crash box.

Fig. 16은 크래쉬 박스가 조립된 범퍼의 충돌시험 전후의 외관과 충돌 후의 크래쉬 박스 형상을 나타낸다. (a)는 Al6082S-T6, (b)는 Al6060S-T6-#02의 결과이다. 충돌시험의 결과는 인장 및 압축시험의 결 과와 유사한 경향을 나타내었다. (a)는 균열의 공간이 넓고, 길게 나타 났으며, (b)는 균열의 공간 좁으며 짧게 나타났다. 이것은 큰 연성으로 인하여, 충격 하중의 에너지를 충분하게 흡수하여 접힘 거동은 나타내 었다.

크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 압축과 충돌 거동은 비슷하게 나타 났다. 충돌시험에서 얻어진 Fig. 16은 압축시험에서 얻어진 Fig. 13과 같 이 Al6082S-T6는 파괴가 발생하였고, Al6060S-T6-#02는 파괴를 동반하 는 접힘 거동을 나타내었다.



Fig. 16. Appearance after collision test of bumper beam with two types of crash box. (a) Al6082S-T6, (b) Al6060S-T6-#02

4. 결론

본 연구는 강도이 높은 Al6082S-T6에서 강도이 상대적으로 낮은 Al6060S-T6로 대체하기 위한 가능성을 검토하였다. 인장 특성은 크래쉬 박스에서 인장 시험편을 제작하여 평가하였다. 압축시험은 크래쉬 박스 로 평가하였고, 압축과 충돌시험은 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔으로 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 인장 특성에서 Al6082S-T6가 Al6060S-T6보다 인장강도는
 25.3-31.9%, 항복강도는 24-34% 높게 나타났다. 연신율은 약 18% 크 게 나타났다.
- (2) 크래쉬 박스 압축시험에서 인장강도가 높은 Al6082S-T6는 Al6060S-T6보다 균열량 15.3%-100%, 최대 하중 17.1-18.3%, 평균 하 중 7.1-14.2% 높았으나, 충돌에너지 흡수효율은 5.1-12.0% 낮게 나타 났다.
- (3) 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 범의 압축시험에서 인장강도가 높은 Al6082S-T6는 Al6060S-T6보다 최대 하중 20.5%, 평균 하중 12.7% 높 았으나, 충돌에너지 흡수효율은 10.2% 낮게 나타났다.
- (4) 크래쉬 박스가 조립된 범퍼 빔의 충돌시험에서 강도가 높은 Al6082S-T6는 Al6060S-T6보다 최대 하중 19.8%, 평균 하중 15.1% 높 았으나, 충돌에너지 흡수효율은 6.1% 낮게 나타났다.
- (5) 이상에서 Al6082S-T6보다 Al6060S-T6 크래쉬 박스의 파손 범위가 작고, 충돌성능이 우수하다고 판단된다.

참고문헌

- Cole, G. S., Sherman, A. M., 1995, "Light Weight Materials for Automotive Applications", *Materials Characterization*, Vol. 35, No. 1, pp. 3–9.
- (2) S. Y. Sung, 2016, "Trend and Prospects for Lightweighted Vehicle Body", *KAMA Web Journal*, Vol. 330.
- (3) Jung, Y. S., Shin, H. S., Rhim, S., Choi, J. H., 2013, "Lightweight Suspension Module Development for Electric Vehicle", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 1015–1019.
- (4) Kim, J. G., Yoon, M. S., 2010, "Optimal Design of Lightweight Frame for Heavy Flat-Bed Trailer by Using Taguchi Method", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 3, pp. 353–359.
- (5) EU Action, "Reducing CO₂ emissions from vehicles" https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en#tab-0-0
- (6) Yusof, N.S.B., Sapuan, S.M., Sultan, M.T.H., Jawaid, M., Maleque, M. A., 2017, "Design and Materials Development of Automotive Crash Box: A Review", *Ciencia & Tecnologia Dos Materiais*, Vol. 29, No. 3, pp. 129-144.
- (7) Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y.V.D., 2017, "Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading", *Procedia Engineering*. Vol. 173, pp. 1390–1398.
- (8) Dimas, A., Dirgantara, T., Gunawan, L., Jusuf, A., Putra, I. S., 2014, "The Effects of Spot Weld Pitch to the Axial Crushing Characteristics of Top-Hat Crash Box", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 660, pp. 578–582.

- (9) Wang, J., Zhang, Y., He, N., Wang, C. H., 2014, "Crashworthiness Behavior of Koch Fractal Structures", *Materials & Design*, Vol. 144, pp. 229–244.
- (10) Sun, G., Deng, M., Zheng, G., Li, Q., 2019 "Design for Cost Performance of Crashworthy Structures made of High Strength Steel", *Thin-Walled Structures*, Vol. 138, pp. 458–472.
- (11) Saenz-Dominguez, I., Tena, I., Esnaola, A., Sarrionandia, M., Torre, J., Aurrekoetxea, J., 2019, "Design and Characterisation of Cellular Composite Structures for Automotive Crash-Boxes Manufactured by out of Die Ultraviolet Cured Pultrusion", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 160, pp. 217-224.
- (12) Lu, R., Gao, W., Hu, X., Liu, W., Li, Y., Liu, X., 2018, "Crushing Analysis and Crashworthiness Optimization of Tailor Rolled Tubes with Variation of Thickness and Material Properties", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 136, pp. 67–84.
- (13) Wierzbicki, T., Abramowicz, W., 1983, "On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structures", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, No. 4a, pp. 727–734.
- (14) Abramowicz, W., 1983, "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-Walled Metal Columns", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 309–317.
- (15) RCAR, 2017, "RCAR Low Speed Structural Crash Test Protocol", Issue 2.3. pp. 1–18.

http://rcar.org/Papers/Procedures/RCAR%20Structure%20Test%20procedure%20Ver sion%202_3.pdf#zoom=80%

발표논문 목록

- 이영득, 남기우, 박상현, 박한주, 20**, "Al6060S-T6 알루미늄 합금 의 크래쉬 박스 적용에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A, 제**권, 제**호, pp. **-**. (수정후 재심 중) Young-Deuk Lee, Ki-Woo Nam, Sang-Hyun Park and Han-Ju Park, 20**, "A Study on the Application for Crash Box of Al6060S-T6 Aluminum Alloy", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. **, No. **, pp. **-**.
- 2. 박상현, 이영득, 이동윤, 박병학, 박인덕, 김민헌, 남기우, 2020, "전 기차 차체 구조 강도 확보를 위한 알루미늄 소재 특성 연구", 대한 기계학회 재료 및 파괴부문 2020년 춘계학술대회 논문집, pp. 92.
 S. H. Park, Y. D. Lee, D. Y. Lee, B. H. Park, I. D. Park, M. H. Kim, K. W. Nam, 2020, "Study on the characteristics of aluminum material to secure the body-structural rigidity of the electric vehicle", Proceeding of The KSME 2020 Annual Meeting, pp. 92.
- 이영득, 박상현, 박병학, 박한주, 박인덕, 김민헌, 남기우, 2020, "알 루미늄 범퍼 빔 소재 강도시험 결과에 따른 정하중 및 충돌 상관성 연구", 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2020년 춘계학술대회 논문 집, pp. 107.

Y. D. Lee, S. H. Park, B. H. Park, H. J. Park, I. D. Park, M. H. Kim, K W. Nam, 2020, "A study on the correlation of static load and crash by the result of aluminum bumper beam material strength test", Proceeding of The KSME 2020 Annual Meeting, pp. 107.

감사의 글

늦은 나이임에도 불구하고 학업의 연을 끊지 않기 위해 오래전부터 대학원 진학을 고민해 왔었습니다. 이 열망과 마음가짐이 흐트러지기 전에 시작하는 것이 좋을 것이라는 결론을 내렸고, 대학원에 진학하게 되었습니다.

회사업무와 학업의 병행이 결코 쉽지 않았습니다. 해외출장 및 장기 프로젝 트 책임을 맡아 진행하면서 대학원 수업을 이어가지 못해 2년 동안 휴학 했지 만, 회사와 교수님께서 물심양면으로 배려와 지원해 주신 덕분에 석사학위까 지 바라볼 수 있었습니다. 대학원 입학 후 시간이 흘러 한 권의 논문으로 석 사과정에 마침표를 찍으려니 시원섭섭한 마음이 가득합니다. 회사에서 배우지 못했던 학문 분야를 대학원에서 다양한 수업을 통해 여러 각도에서 생각하며 사고 할 수 있는 경험을 할 수 있었고, 편협한 사고를 확장하여 사고의 폭을 넓힐 수 있는 좋은 기회였습니다.

시대의 흐름에 적응하고, 변화에 적절히 대처할 수 있도록 통찰력을 키워주 시고 더 나아가서는 대학원에서 배운 학문을 학업의 연장선으로 회사업무에 접목할 수 있는 창의적인 관점으로 미래를 대비할 수 있도록 지혜를 아낌없이 주신 지도교수님이신 남기우 교수님께 진심으로 감사드립니다. 진정한 연구자 로서 가르침을 주시고 학업과 업무 그리고 대인관계에서의 인생에 대한 즐거 움을 교수님을 통해 배울 수 있는 더없이 소중한 시간이었습니다.

제 인생에서 둘도 없이 사랑스럽고 고마운 후원자이자 영원한 동반자인 아내 이정임, 자랑스럽고 배울점이 많은 똑똑한 아들 이준서, 저를 항상 웃게 만드 는 귀엽고 이쁜 딸 이소윤에게 이 기쁨을 함께 나누며 사랑과 감사를 전합니 다. 그리고 항상 응원과 희망을 주시는 아버지, 어머니, 장모님, 그리고 하늘에 서 묵묵히 저의 앞길을 지켜주시는 장인어른께 무한한 사랑과 깊은 감사를 드 립니다.

초심을 잃지 않고 항상 최선을 다해 부단히 노력하고 사회에 공헌할 수 있는 사람이 될 수 있도록 계속해서 성장하고 발전하도록 하겠습니다.

저와 함께 오랜 시간 함께 해주신 모든 분에게 감사드립니다.