

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.1.13>

차량 측면도어 임팩트 빔의 최적설계 및 측면도어 충돌실험에 관한 연구

김재열¹ · 최순호^{2*}

¹조선대학교 기계시스템공학과, ²조선대학교 일반대학원 첨단부품소재공학과

Study on the Optimization Design and Impact Experiment of Side Door for Impact Beam in the Vehicle Side Door

Jae Yeol Kim¹ and Soon Ho Choi^{2*}

¹Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun University, Gwangju, 501-759, Korea

²Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received November 3, 2014; Revised January 22, 2015; Accepted January 27, 2015)

Abstract – The impact beam, a beam-shaped reinforcement installed horizontally between the inside and outside panels of car doors, is gaining importance as a solution to meet the regulations on side collision of vehicles. In order to minimize pelvis injury which is the biggest injury happening to the driver and passengers when a vehicle is subject to side collision, energy absorption at the door impact beam should be maximized. For the inner panel, the thrust into the inside of the vehicle must be minimized. The impact beam should be as light as possible so that the extent of pelvis injury to the driver and passenger during side collision of the vehicle is minimal. To achieve this, the weight of the impact beam, has to be optimized. In this study, we perform a design analysis with a goal to reduce the weight of the current impact design by 30% while ensuring stability, reliability, and comparison data of the impact beam for mass production. We conduct three-point bending stress experiments on conventional impact beams and analyze the results. In addition, we use a side-door collision test apparatus to test the performance of beams made of three (different materials: steel, aluminum, and composite beams).

Keywords – impact beam(임팩트 빔), vehicle side door(차량 측면 도어), optimization design(최적설계), three-point bending test(3점 굽힘 실험), side door impact test(측면도어 충돌시험)

Nomenclature

M : Mass (kg)
E : Flexible Module (MPa) (탄성체 모듈)
 δ : Displacement (mmp) (변위량)
P : Impact Force (kg) (충돌하중)
 ω : Rotational speed (rpm) (회전속도)

1. 서 론

임팩트 빔은 자동차 도어의 인사이드 패널과 아웃사이드 패널 사이에 가로로 설치되는 빔 형태의 보강재로써, 점차적으로 강화되고 있는 차량의 측면 충돌 법규 규제에 대한 대응책으로서 중요성이 커지고 있는 실정이다[1].

차량의 측면 충돌 시 운전자 및 승객의 상해치가 과다한 골반부 상해치 값을 최소화하기 위해서는 도어 임팩트 빔에서 에너지 흡수율을 최대화하면서 인너 패널은 실내로의 밀림량이 최소화되어야 한다. 그러나 상기

*Corresponding author : sunhost@hanmail.net
Tel: +82-62-570-1393, Fax: +82-62-570-1393

도어 임팩트 빔의 경우 단순 중공빔으로 구성되어 있는 관계로, 차량의 측면 충돌 시 초기 변형이 미비한 상태에서 실내로 밀린다. 이로 인하여 인너 패널에 부착된 마운팅 브라켓과 함께 운전자의 골반부를 직접 가격하면서 그 상해치가 과다해지는 문제점을 가지고 있다[2].

따라서 임팩트 빔의 중량을 줄이면서 차량의 측면 충돌 시 운전자 및 승객의 골반부 상해치 값을 최소화하기 위한 임팩트 빔의 최적설계 및 측면충돌 실험에 대한 연구가 필요함에 따라 본 논문에서는 이에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 임팩트 빔의 최적설계를 위한 설계/해석과 현재 임팩트 빔에 기준하여 중량대비 30% 감소 목표로 설계를 수행하였으며, 제품 양산을 위한 임팩트 빔의 안정성, 신뢰성, 비교데이터 확보를 위한 기존 임팩트 빔에 대한 3점 굽힘응력 실험을 수행하였다.

또한, 차량 측면 도어부의 충돌실험 장치를 제작하여 기존 임팩트 빔이 장착되어 있는 차량 도어와 경량화 및 최적설계 된 3가지 타입의 도어 임팩트(Steel재질, Al 프로파일, 복합체 빔)에 대한 측면도어 충돌실험을 수행하였다.

2. 임팩트 빔 최적설계

2-1. 기존 임팩트 빔 분석 및 최적설계

임팩트 빔을 기존 Steel 소재가 아닌 경량화 소재를 적용하여 최적화 구조 설계/해석을 진행하고 제작공법을 도출하여 기존 대비 중량 30%까지 감소시킨 경량화 측면 임팩트 빔의 최적형상을 도출하고자 한다. 최적설계를 위한 3D 모델링은 CATIA V5 R20을 사용하였으며, 동하중 해석은 LS-DYNA 상용코드를 사용하였다.

기존 자동차 메이커(HMC 등) 데이터를 이용한 개념 설계를 통하여 임팩트 빔의 레이아웃 구성에 따른 최종 형상 결정을 진행하였다. Fig. 1은 기존 임팩트 빔의 형상과 재질에 관한 내용을 나타낸 것으로 경량

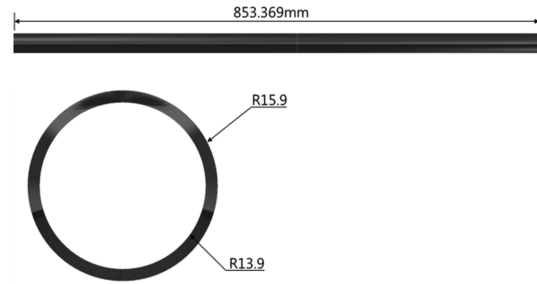


Fig. 1. Composition of existing impact beam.

화 임팩트 빔의 개념설계 및 최적화를 위한 기준모델로 정하여 연구를 진행하였다.

기존 임팩트 빔의 재질은 Steel 소재의 STDE 1407이며, 외경 31.8[mm], 내경 27.8[mm]으로 중공형태의 원형관으로 구성되어 있다.

기존 임팩트 빔의 중량은 1,256[g]으로, 본 연구에서는 Steel 재질에서 AL, Mg, CFRP재질을 적용한 후 신규로 설계된 임팩트 빔의 내부 최적형상을 설계하였다. Fig. 2(a)~(g)는 최적 설계된 임팩트 빔의 형상과 FEM 해석결과를 나타내고 있다. 기존 임팩트 빔보다 30% 중량이 감소된 968[g] 이내의 임팩트 빔의 중량 확보와 3점 굽힘 구조해석을 통하여 임팩트 빔의 중심부의 변위량 $3.01^{+0.1}$ [mm] 이하 값을 목표로 설계를 수행하였다.

임팩트 빔의 개념 설계 진행 후 형상의 안정성, 변위량 등의 구조검토를 위해 3점벤딩 구조해석을 수행하여 중심부 변위량을 분석하였다. Fig. 2(a)~(g)의 임팩트 빔 설계는 내부에 프로파일 형상을 설계하여 각각의 프로파일 형상에 따른 3점 굽힘 구조해석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 2(a)는 중심부 최대처침량 4.08[mm], Fig. 2(b)는 4.69[mm], Fig. 2(c)는 4.08[mm], Fig. 2(d)는 3.3[mm], Fig. 2(e)는 3.11[mm], Fig. 2(f)는 3.08[mm], Fig. 2(g)는 3.02[mm] 로 분석되었다. 따라서 임팩트 빔의 설계 목표치인 $3.01^{+0.1}$ [mm]에 만족하는 Fig. 2(f)~(g) 임팩트 빔에 대한 제작검토를 진

Table 1. Comparison of mechanical properties

	Steel(STDE)	Al 7021	Mg(AZ63)	CFRP
Young's modulus (GPa)	205	71.7	45	-
Poisson's ratio	0.29	0.33	-	0.08
Yield strength (MPa)	487	503	148	699
Flexible Module (MPa)	638	572	248	-

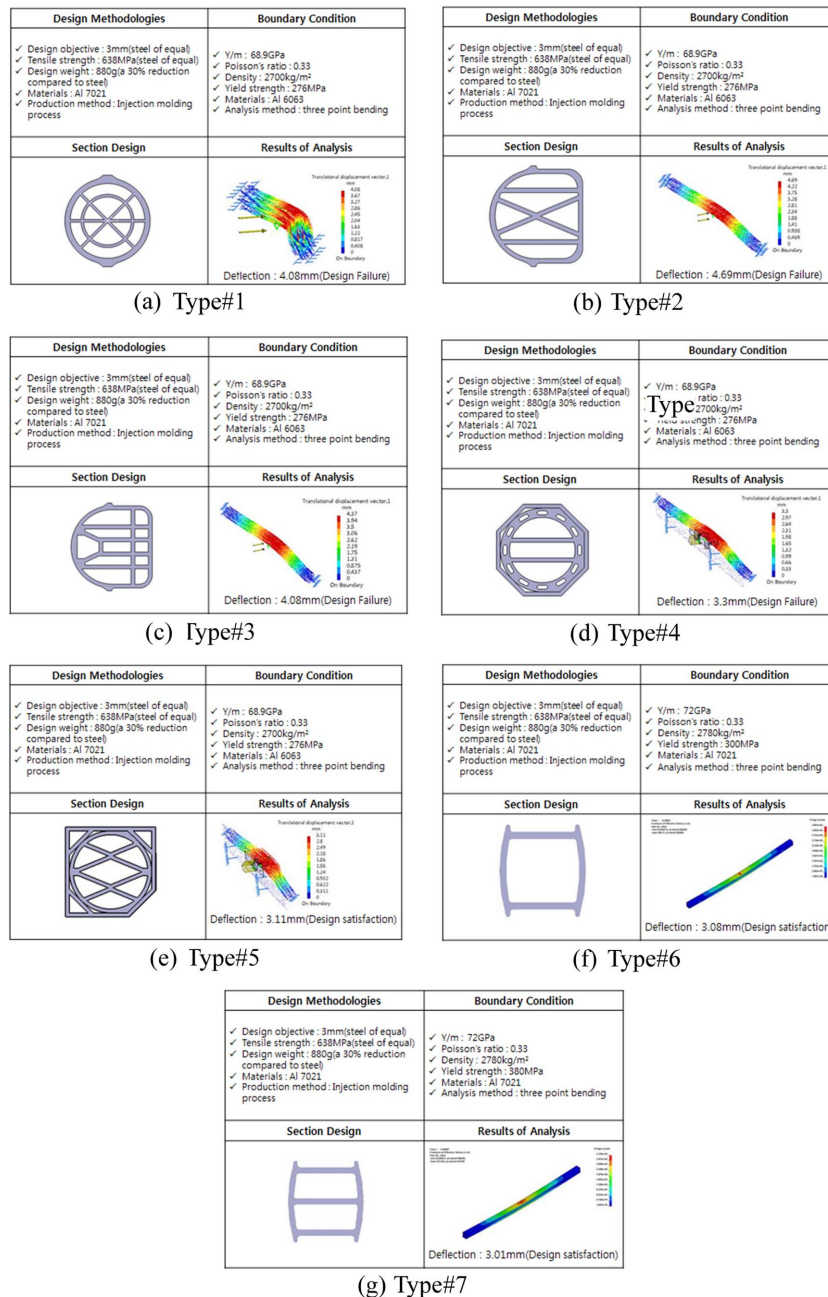


Fig.2. Results of optimization design and FEM analysis for impact beam.

행 한 후, Fig. 2(g)의 임팩트 빔을 최종적으로 선정하여 시편 제작을 수행하였다.

2.2. 임팩트 빔의 동하중 해석 및 3점 굽힘 실험

2-2-1 기존 임팩트 빔의 동하중 해석

임팩트 빔의 최적형상 설계를 통한 경량화 소재

적용부품 시험 및 설계사양 검증과 설계된 임팩트 빔의 형상과의 기준데이터 확보 및 비교를 위하여 기존의 임팩트 빔에 대한 3점 굽힘 응력 구조해석을 수행하였다. 해석 방법은 도어 임팩트 빔 단품에 대한 성능평가(굽힘 저항력)에 대한 실험을 진행하였다.

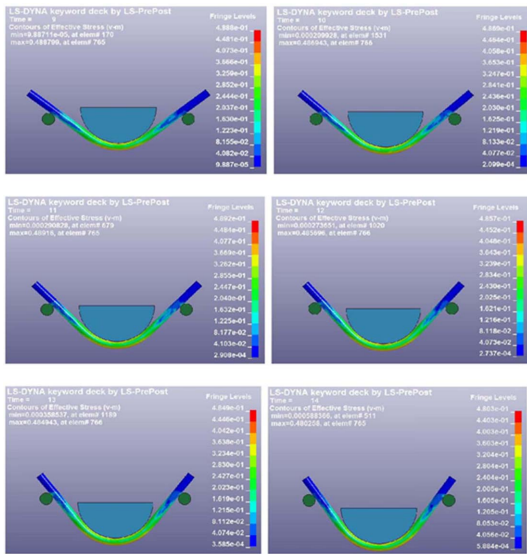


Fig. 3. Results of 3-point bending FEM analysis.

Von-Mises 응력은 11초에 최대값은 489[MPa]을 보이며, 그 후 Stress 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 11초 때의 최대 변위량 196[mm]로 확인되었다. 따라서 기존 임팩트 빔의 최대 변위량 분석을 완료하였

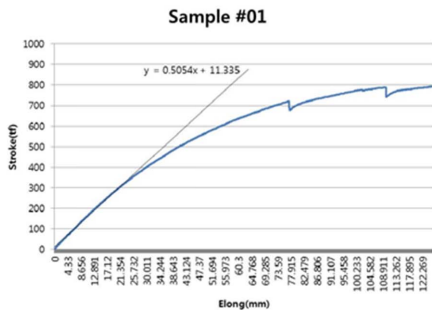
Table 2. Condition of 3-point bending test

No.	Testing condition	Load [kgf]	Gauge length [mm]
#1	Materials : STDE 1407	360	653
#2	Test Type : 3-Point Bending Specimen Length : 853[mm]	353	
#3	External Diameter : 31.8[mm]	472	583
#4	Inner Diameter : 27.8[mm]	481	

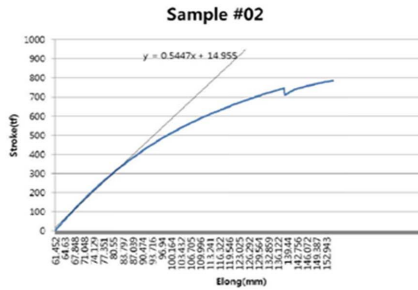
으며[3]의 참고문헌의 정적 성능해석과 동적 성능 해석을 참고하여 본 논문에서 분석된 기존 임팩트 빔의 최대 변위량 데이터를 기준으로 최적 설계된 임팩트의 최대 변위량 분석값과 비교할 수 있기 때문에 향후 최적 설계된 임팩트 빔의 최대 변위량 분석 데이터 비교를 위한 동하중 해석의 기준이 될 것이다.

2-2-2. 기존 임팩트 빔의 3점 굽힘하중 실험

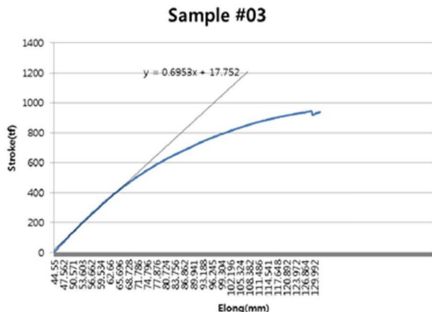
기존 임팩트 빔의 3점 강도평가 및 경량화 임팩트 빔과 비교 데이터 산출을 위해 기존 임팩트 빔 테스트 용 시편을 4개를 제작하여 3점 굽힘하중 실험을 수행하였다. 실험조건은 아래의 표와 같다.



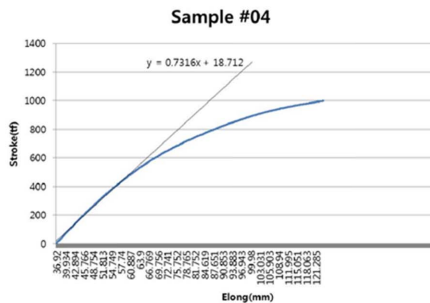
(a) Results of 3-point bending test(sample #01)



(b) Results of 3-point bending test(sample #02)



(c) Results of 3-point bending test(sample #03)



(d) Results of 3-point bending test(sample #04)

Fig. 4. Results of 3-point bending test.

3점 굽힘 응력 실험은 ASTM C365/C365M-05 기준에 의거하여 실험을 수행하였으며, 재료시험이나 구조물의 하중 시험 때 탄성한도 내에서는 하중과 속도를 일정하여 유지해야 하므로, 하중의 크기가 시간에 대한 변화의 비율인 하중재하속도(Loading Rate)는 4개의 시편에 동일하게 200[mm/s]로 적용하여 굽힘하중 실험을 수행하였다[4].

3점 굽힘응력 실험을 통하여 각 샘플시편의 표점거리에 따른 최대하중과 최대 처짐량을 분석하였다. Sample #3와 Sample #4의 경우, 표점거리가 11%감소하였을 때, 최대 하중값이 33.6%증가하였으며, 최대 처짐량은 2% 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

또한, 임팩트 빔에서 가장 중요한 인자인 E(Flexible Module)값을 분석해 본 결과, 표점거리가 583 mm일 때 E=645 MPa로 분석되었으며, 임팩트 빔의 소재인 STDE 1407(Mill Sheet기준)의 E=638 MPa와 비교했을 때 약 1%의 오차가 있으므로, 본 실험의 결과는 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 임팩트 빔의 충돌시험 장치 설계 및 충돌 실험

3-1. 임팩트 빔의 충돌시험 장치 설계 및 제작

본 시스템은 수직 배치된 Pole을 중심으로 양방향에 LM 가이드 시스템을 장착하고 Impact Beam이 장착된 실차 Door를 Loading 할 수 있는 Door Supporter와 충돌 직전까지 구동 및 이송의 기능을 하는 서보 시스템으로 구성하고자 하였으나, 다운스케일한 예비 테스터 제작 결과 이송부 및 서보 시스템에 극한의 충돌하

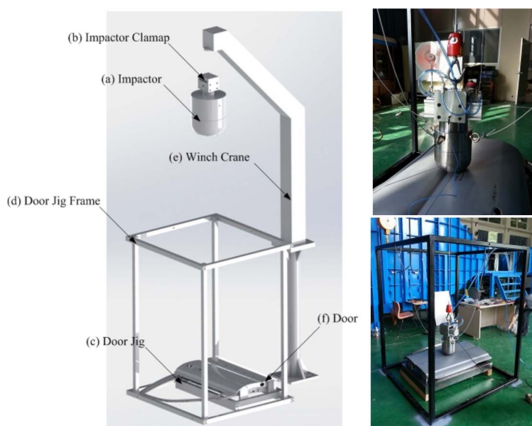


Fig. 5. Composition of impact tester.

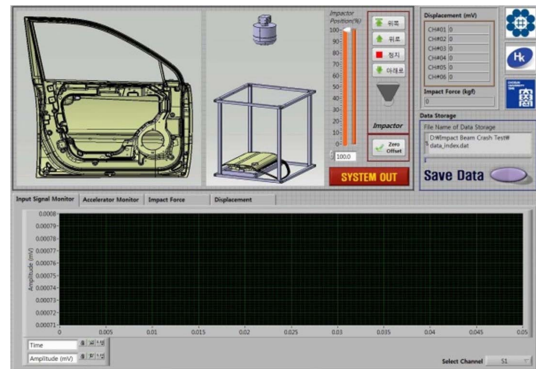


Fig. 6. GUI of control program.

중 발생과 기구부의 다소 복잡한 메커니즘 설계가 이루어져야 하므로, 본 시스템의 Basic Design(BD)은 자유낙하 방식의 수직충돌 타입으로 변경하여 시스템을 제작하였다[5]. Fig. 5~6은 중력가속도에 의한 질량체(임팩터)의 수직 자유낙하 방식으로 설계를 변경하여 임팩트 빔의 충돌시험장치의 3D 모델링과 제작품 최종 형태를 나타내고 있다.

본 실험에 사용된 로드셀은 B사의 피에조 타입의 CBES-200을 사용하였으며, 정격용량(R.C)은 200[kg]이며, 정격출력(R.O)은 2.0[mV/V]±0.25[%]이고, 히스테리시스 0.1[%] R.O 성능을 가지는 로드셀이다. 인디케이터는 고정밀 20bit sigma-delta A/D 컨버터 방식의 BS-205를 사용하였으며, 실하중 또는 등가입력 캘리브레이션 및 Analog out(0~10[v]) 가능한 인디케이터이다. 데이터 저장을 위하여 NI Compact DAQ 모듈(NI 9215, NI 9263)을 사용하여 데이터를 수집하였다.

LabVIEW를 이용한 제어 프로그램은 로드셀로부터 임팩터의 충격력을 측정하며, 동시에 도어 임팩트 빔에 부착한 스트레인게이지의 변형량을 실시간 모니터링 및 저장이 가능하도록 설계하였다. 또한 임팩터 조작부(실린더)와 도어부에 각각 가속도센서를 부착하여 동일 시간에 따른 충격량 변화를 확인할 수 있다. 각 센서로부터 측정된 데이터는 최초 입력신호와 캘리브레이션을 통해 변환한 값을 동시에 획득하여 데이터 분석을 다양하게 구성하였다. 예비 실험에서는 스트레인 게이지를 부착하지 않는 상태에서 충돌시간 및 충돌에너지 분석을 위한 데이터 수집이 목적이며, 제작된 시스템의 구동 성능을 확인하고자 한다[6].

Fig. 6은 LabVIEW로 설계된 충돌시험용 제어 프로그램의 GUI를 나타내고 있다.

3-2. 임팩트 빔의 측면 예비 충돌실험

기준 도어를 이용한 예비실험에서는 1,400 mm의 낙하시점에서 임팩터를 수직 자유낙하 시켜 충돌 시 로드셀 및 가속계 시그널을 실시간으로 획득하여 수집된 데이터를 분석하였다.

실험결과에서 볼 수 있듯이 충돌 시 도어측면 부와 충돌 후 2차 충돌이 발생하였으나, 2차 충돌 시 로드셀의 히스테리시스 현상발생으로 획득되는 데이터가 증폭되어 2차 하중 데이터가 수집되지만 이는 임팩터와 도어지그에 각각 부착된 가속도계 시그널로 통하여 초기 낙하시간과 충돌시간(dt)를 분석해본 결과, 2차 로드셀 하중 데이터는 무시하여도 무관한 것으로 판단된다. Fig. 8의 로드셀 측정 분석결과에서 볼 수 있듯이 테스트 시작시간은 0[sec]에서 임팩터 낙하시간 4.369727[sec]이며, 충돌 후 시간은 4.421094[sec]으로 확인할 수 있었으며, 이에 따라 충돌시간(dt)는 0.051367[sec]로 분석되었다.

Fig. 8의 충돌테스트 그래프에서 확인 할 수 있듯이 로드셀 하중 데이터가 획득되는 타임은 임팩터 충돌 시간 이후 정상적으로 획득되고 있음에 따라 스트레인



Fig. 7. Impact beam after collision experiment test.

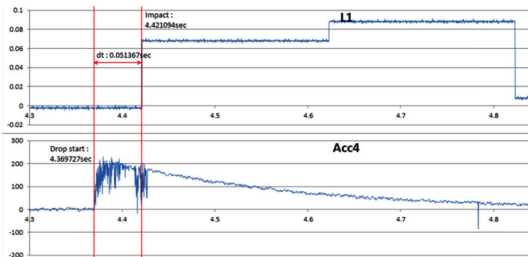


Fig. 8. Results of load cell data.

게이지를 부착한 최종 충돌실험에서 임팩트 빔의 변형량 분석 및 충돌에너지 데이터를 분석할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 임팩트 빔의 충돌실험 결과

4-1. 임팩트 빔 충돌실험

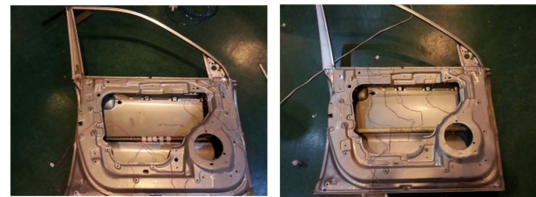
본 실험은 3가지 타입의 도어 임팩트(Steel재질, AI프로파일, 복합체 빔)에 대해 실험을 수행하였으며, 수직 자유 낙하거리는 2,000±4[mm]에서 임팩터를 낙하시켜 실험을 진행하였다. Steel재질 빔과 복합체 빔은 중공관 구조의 빔이며, AI프로파일빔은 Fig. 2의 (g) 최적 설계된 내부 구조물이 추가된 형상으로 압출성형을 하여 제작한 빔이다(AI7021). 빔의 변형량 측정을 위하여 6개 포인트를 선정하여 스트레인 게이지를 부착하였다. 부착위치 선정은 빔의 중심 포인트에서 변형량이 심하게 발생할 수 있는 중점 부분을 30[mm] 간격으로 총 6개의 스트레인 게이지를 횡방향과 종방향으로 부착하였다.

스트레인 게이지의 저항값은 119.6±0.4[Ω]이며, 휘스톤 풀 브릿지를 사용하여 신호를 검출하였다.

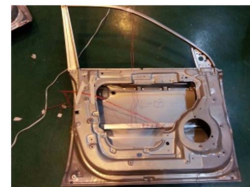
4-2. 임팩트 빔 충돌실험 결과

4-2-1. 임팩트 빔과 스트립 관찰

임팩터를 수직 자유 낙하 한 후, 차량용 임팩트 빔과 스트립의 변형상태를 육안으로 관찰한 후 임팩트 빔 중심위치의 기준에서의 충돌위치에 대한 오차 범위 10±2[mm]이내에 충돌이 이루어 지고 있음을 확인 할



(a) Steel beam (b) Composite materials beam



(c) AI profile beam

Fig. 9. Strain gauges attached impact beam.

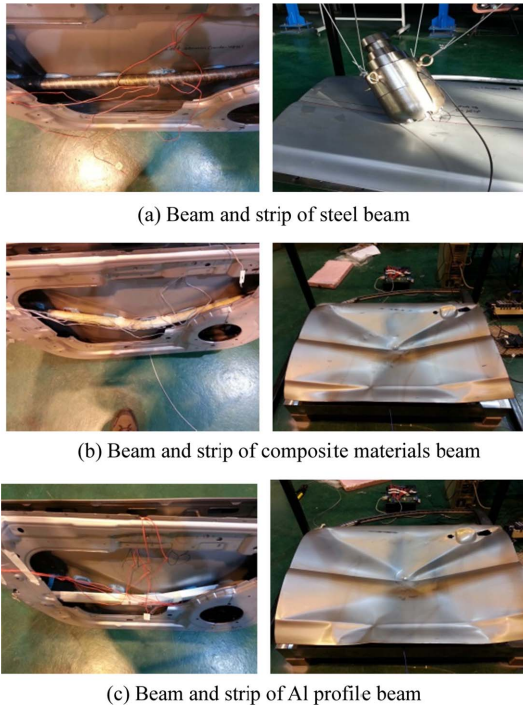


Fig. 10. Results of collision experiment.

수 있었다.

4-2-2. 로드셀 측정 데이터 분석

Steel 빔, 복합체 빔, Al 프로파일 빔의 임팩터 충돌 시 임팩터에 장착된 로드셀을 통하여 측정된 전압신호 (mV)값을 Calibration하여 충돌하중(kgf)으로 환산하여 데이터를 분석하였다.

각 재질별 충돌하중값을 분석해 보면, 실험결과에서 볼 수 있듯이 Steel 재질의 경우, 112.3054[kgf]이며, Al 프로파일 빔은 95.43569[kgf], 복합체 빔은 73.10939[kgf] 분석되었으며, Steel 재질에서 최대 충돌하중이 발생됨을 확인 할 수 있었다. 따라서, 기존 Steel 빔에 비해 Al 프로파일 빔과 복합체 빔의 충돌하중 값에 대비하

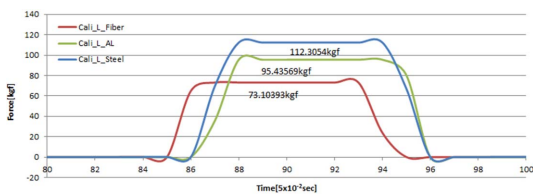


Fig. 11. Each material by load-cell data analysis.

여 충돌하중이 각각 23.4%, 34.8% 정도로 감소된 것으로 판단할 수 있었다.

4-2-3. 스트레인 측정 데이터 분석

스트레인 게이지를 이용한 변형을 분석결과, 스트레인 데이터 분석값은 Steel beam이 스트레인 최소값을 나타내는 것으로 확인되었으며, Al 프로파일 Beam은 중간값, Composite materials beam최고값을 나타내는 것으로 분석되었다. 이 분석결과 재질별 충돌하중 비교 분석결과에서 볼 수 있듯이 충격에너지가 변형에너지로 변환되면서 이 변형에너지가 각 재질별 임팩트 빔의 변형을 차이를 발생시킨 것으로 판단된다.

Fig. 12의 임팩트 빔의 재질별 스트레인 값을 분석한 결과이다. 각 재질별 임팩트 빔의 충돌시 발생한 최대 Strain 측정값은 다음과 같다.

Steel beam은 522.29[%], Al profile beam은 1028.94[%], Composite materials beam은 1907.4[%]로 분석되었다. 향후 재질별 변형을 관계에 대한 결과를 도출하고 임팩트 빔의 중심부위 기준으로 충돌 시 발생한 변위량 분석이 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다.

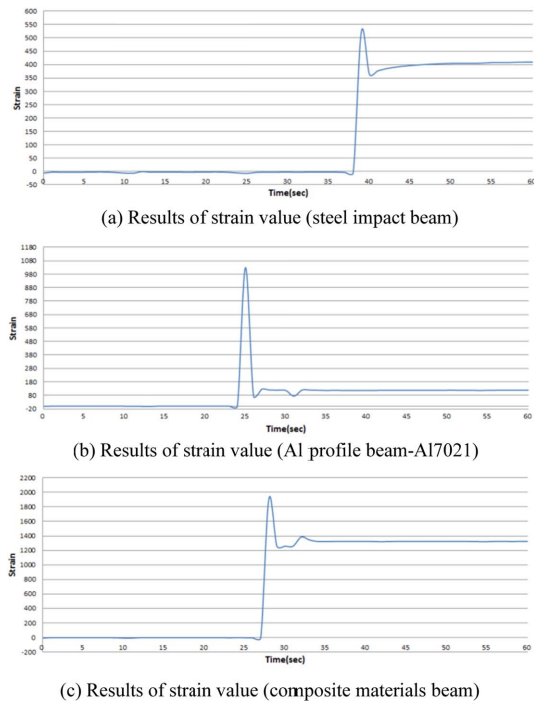


Fig. 12. Comparative results on the strain of impact beam materials.

Table 3. Comparative results on the strain of impact beam materials

Signal no.	Steel beam [mV]	Composite materials Beam [mV]	Al profile beam [mV]
1	0.002320	0.006599	0.004152
2	0.002310	0.007723	0.004512
3	0.005940	0.007205	0.003524
4	0.001539	0.006654	0.003105
5	0.001257	0.005472	0.002957
6	0.000812	0.004241	0.001524

그리고 Strain 측정값 분석을 통하여 Composite materials beam과 Al 프로파일 beam은 충격 에너지를 흡수하여 이를 변형에너지로 변환시킨 량과 비례하고 있음을 의미하고 Table 3에서 확인할 수 있듯이 Steel beam의 스트레인 값과 비교하여 중간값과 최대값을 갖는 원인으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존 임팩트 빔에 대한 기준자료 및 비교데이터 확보와 경량화 임팩트 빔의 최적설계 및 FEM 해석과 실차적용을 위한 충돌실험을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

기존 임팩트 빔의 중량은 1,256[g]으로, 본 연구에서는 Steel 재질에서 Al, Mg, CFRP재질을 적용한 후 기존 임팩트 빔보다 30% 중량이 감소된 968[g] 이내의 임팩트 빔의 중량확보와 증공형태의 임팩트 빔과 내부형상을 가지는 프로파일 빔에 대한 다양한 형상설계를 수행하였으며, 동하중해석을 통하여 설계 목표치 기준으로 임팩트 빔의 중심부의 변위량 3.01^{+0.1}[mm] 이하의 최적설계를 수행하였다. 향후 변위량 측정 실험을 통하여 임팩트 빔의 중심부의 변위량 측정을 수행하여 실험값과 이론값을 비교 분석을 수행하도록 하겠다.

1. 3점굽힘 실험을 통하여 각 샘플시편의 표면거리 따른 최대하중과 최대 처짐량을 분석한 결과, Sample #3와 Sample #4의 경우에 표점거리가 11%감소하였을 때, 최대 하중값이 33.6%증가하였으며, 최대 처짐량은 2%감소하는 것을 확인할 수 있었다.

2. 기존 Steel beam에 비해 Al 프로파일 beam과

복합체 빔의 최대 충돌하중값은 각각 23.4%, 34.8% 정도로 감소되었다. 따라서 기존 Steel beam에 비해 Al프로파일 beam과 복합체 beam의 항복강도 측면에서 향상된 강도특성을 가지고 있을 것이라 사료된다.

3. 스트레인 측정결과, 복합체 beam과 Al프로파일 beam은 충격에너지를 흡수하고 이를 변형에너지로 변환시킨 량과 비례하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Al프로파일 beam은 차량 충돌 시 충격량을 흡수하고 흡수된 충격에너지는 임팩트 beam 변형을 유도하므로 차량 측면도어 내에서 임팩트 beam 변형이 충분히 진행되어 인너패널이 차량 내부로 밀려드는 현상을 감소시켜 운전자의 골반 상해치량을 최소화 시킬 수 있을 것이라 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 조선대학교 2013년도 교내학술연구지원비로 수행된 결과임.

References

- [1] TP-214S-05, "National highway traffic safety administration laboratory test procedure for FMVSS 214S (static) side impact protection" *U.S. department of transportation*, 1992.
- [2] Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Kim, J. H. J., Byun, K. J., "Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 18, No. 5, pp. 461~490, 2009.
- [3] Lee, J. S., Kim, T. H., "Analysis of Three-Pad Gas Foil Journal Bearing for Increasing Mechanical Preloads" *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-8, 2014.
- [4] Consolazio, G. R., Cowan, D. R., "Numerically Efficient Dynamic Analysis of Barge Collisions with Bridge Piers," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 8, pp. 1256-1266, 2005.
- [5] Kim, J. H., Yi, N. H., Phan, D. H., "Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, pp. 535-546, 2010.
- [6] Choi, H. J., "A Study of Development and Application for Side Impact Sled Test" *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 1, pp.138-144, 2004.