

보행자보호 Lower Legform 충격의 해석 대 시험 상관성 개선에 관한 연구

박동규^{1*}
¹대덕대학 기계자동차학부

A Study on the Correlation Improvement between FEA and Test for a Pedestrian Lower Legform Impact

Dong-Kyou Park^{1*}

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Daeduk University

요 약 본 논문은 자동차 보행자보호 안전 항목 중 범퍼부에 해당하는 Lower Legform Impactor 충격에 대한 비선형 유한요소해석 결과와 보행자보호 충격 시험 결과와의 비교 및 정도 향상을 위한 해석적인 기법을 제시하였다. 유럽에서는 현재 법규로 평가되고 있는 범퍼부 보행자보호는 국내에서도 2013년부터 법규로 적용되어진다. 본 연구는 범퍼부 Lower Legform Impactor 충격을 위한 해석 시험의 상관성 확보를 위하여 굽힘각 저감용 스티프너의 단품 압축 시험을 통해 얻어진 힘 대 변위 커브의 분석을 통하여 해석 정도 확보를 위한 최적 모델링 방법을 찾아내고, 변위 측정 센서를 부착한 실차 시험과 해석 결과와의 변위값 및 거동간의 편차를 비교 분석하여 범퍼 보행자보호 해석의 정도성 확보를 위한 해석 기법을 제시하였다.

Abstract This paper proposed the finite element analysis technique for improving the correlation accuracy between FEA and test on a pedestrian lower legform impact. Europe has been evaluating the bumper pedestrian impact by Euro-NCAP, and it will also be applied in a domestic area by K-NCAP in 2013. By using the compression test result of bending resisting stiffener, a pedestrian bumper modeling guide was presented by analyzing the force-displacement curve of stiffener. And by using the sensor measurement results in car pedestrian test, pedestrian impact behavior was analyzed between test and finite element analysis result. Finally, the finite element analysis guide for a pedestrian bumper impact was presented to improve the correlation accuracy.

Key Words : Lower legform impactor, Bending resisting stiffener, Euro-NCAP, K-NCAP, Correlation accuracy between FEA and test

1. 서론

국내 및 유럽은 각각 K-NCAP[1]과 Euro-NCAP[2]에서 다리부 Lower legform 충격의 상품성을 평가하여 발표하고 있다. 현재 국내에서는 상품성 개념으로 평가되고 있는 보행자보호 충격 성능을 2013년부터는 법규로 적용되어 평가되어질 예정이다.

이러한 보행자보호 범퍼 충격 성능의 평가는 현재 주로 비선형 유한요소해석에 의한 방법[3]이 사용되어지고

있다. 보행자보호 범퍼 충격 해석과 시험간의 정도 향상을 위한 연구들로서 해석 모델 범위의 다양한 변경에 따른 결과의 정도를 비교하여 해석 정도성의 확보를 위한 최적 해석 모델 범위에 대한 제안[4]과 해석에서 고려되지 못한 시험 조건들을 비교 분석하여 해석 모델에 반영해야 하는 항목들에 대한 연구[5]들이 있었다. 본 연구에서는 보행자보호 범퍼 충격의 비선형 유한요소해석인 LS-DYNA[6] 결과와 시험 결과와의 상관성 정도를 높이기 위하여 보행자보호 충격 성능에 주요한 영향을 미치

*교신저자 : 박동규(pdongkyou@ddu.ac.kr)

접수일 11년 01월 10일

수정일 (1차 11년 02월 10일, 2차 11년 03월 10일)

게재확정일 11년 04월 07일

는 굽힘각 방지 스티프너[7]의 압축 시편 시험을 수행하였고, 스티프너의 압축력과 변위 결과 그래프를 분석하여 스티프너에 대한 해석 모델링 방법을 제안하였다. 또한 변위 측정 센서를 부착한 실차 보행자보호 충격 시험을 실시하여 스티프너의 변위와 거동을 계측하여 해석과 시험간의 차이 원인을 비교 분석하여 범퍼 보행자보호 해석 정도를 향상시킬 수 있는 해석 기법을 제안하였다.

보행자보호 범퍼 충격은 그림 1과 같이 Lower legform impactor가 40kph 속도로 충격한 후 Impactor에 작용하는 감가속도, 굽힘각 및 전단변위가 표 1과 같은 규제 조건을 만족해야 한다.



[그림 1] 보행자보호 범퍼 충격

[표 1] 보행자보호 범퍼 성능 규제치

항 목	유럽 (현재 적용)	국내 (2013년 적용)
감가속도	200G이하	170G이하
굽힘각	21°이하	19°이하
전단변위	6mm이하	6mm이하

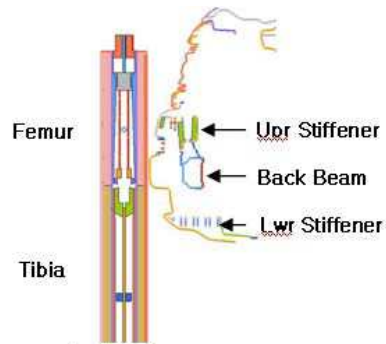
2. 보행자보호 해석 대 시험 비교 분석

2.1 해석 대 시험 상관성 분석 개요

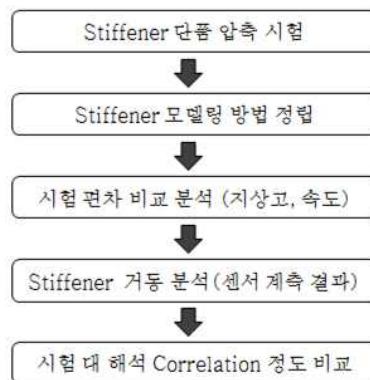
일반적으로 범퍼 보행자보호 대응 구조는 그림 2와 같이 굽힘각 저감용 상단 Stiffener와 하단 Stiffener가 각각 Lower legform의 상단 Femur부와 하단 Tibia 부를 지지하는 구조이다.

굽힘 방지용 상단 Stiffener와 하단 Stiffener의 재질은 일반적으로 PP(100%) 또는 TPO(PP+EPDM)를 사용하는 데 PP(100%) 재질은 취성이 강해서 충격 부위에 균열이 생겨 굽힘 방지 효과를 제대로 발휘하기 어려운 경우들이 생긴다. 본 연구에서는 Stiffener의 재질로 TPO(PP+EPDM)를 사용하여 크랙 발생을 방지하였다. 굽힘 방지용 stiffener의 압축 시험 결과 분석을 통한 Stiffener 모델링 방법 정립 내용을 포함한 보행자보호 해석 정도 향상을 위한 해석 대 시험 상관성 확보를 위한 분석 순서의

개요는 그림 3과 같다.



[그림 2] 보행자보호 범퍼 충격대응 구조



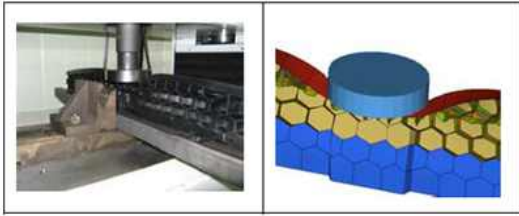
[그림 3] 보행자보호 해석 대 시험 상관성 분석 개요

먼저 Stiffener 단품 압축 시험의 힘 대 변위 그래프 결과와 유한요소해석 결과를 비교 분석하여 Stiffener의 유한요소 모델링 방법을 정립하고 Impactor 충격 시 지상고와 충격 속도에 따른 시험과 해석간의 차이를 비교한 후 범퍼 Stiffener와 차체에 부착된 변위 측정 센서결과를 해석 결과와 비교 분석한다.

이상의 분석 결과들을 반영한 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 시험과 비교하여 상관성 정도 향상을 위해 제시한 해석 기법들의 신뢰성을 확인한다.

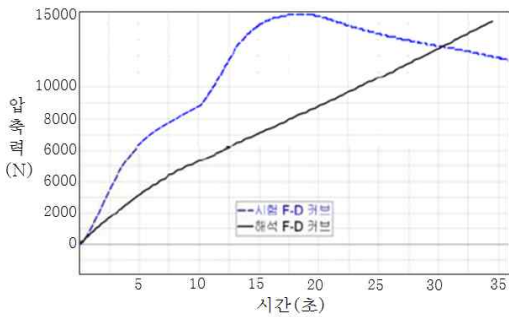
2.2 Stiffener 단품 압축 시험

굽힘각 저감용 Stiffener의 단품 압축 시험을 통해 시험과 해석의 결과를 비교 평가하여 단품 간의 상관성을 확보한다. 단품 시험 경계 조건은 Stiffener 뒷면을 모두 고정하고 하중 작동 시간은 30초간 준정적 하중을 가하여 시험하였다. 시험과 해석 조건 및 진행 방법은 다음 그림 4와 같다.



[그림 4] Stiffener 단품 압축 시험 모델

상기 그림 4와 같은 Shell 요소로만 구성된 스티프너 해석 모델을 이용한 해석과 시험과의 압축력 대 변위 결과와의 비교 그래프는 그림 5와 같다. 그래프를 비교하면 해석의 힘 대 변위 그래프 값이 시험대비 낮은 결과를 보여줌을 통해 현재 Shell 요소로 모델링한 Stiffener의 강성을 높여줄 수 있는 모델링 방법의 분석 개발이 필요함을 알 수 있다.



[그림 5] 시험과 해석의 압축력 대 변위 비교

2.3 Stiffener 해석 모델링 방법 분석

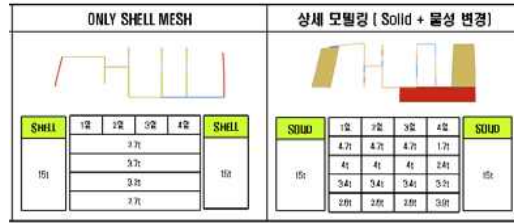
힘 대 변위 그래프 분석을 통해 해석 모델의 강성 증대를 위해 상세 모델링을 진행 하였다. 아래 그림 6은 Stiffener 실물 단면의 형상과 두께를 보여주고 있다.



[그림 6] Stiffener 실물 단면 형상 및 두께

Shell 요소만을 사용하여 구성한 모델과 10t 이상의 두께는 Solid 요소로 모델링 한 모델의 비교가 그림 7에 나

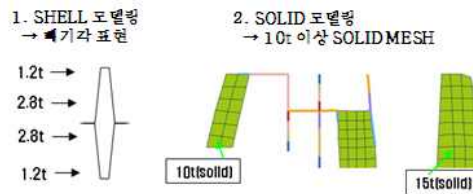
타나 있다. 두 경우 모두 빼기각을 구현하였다.



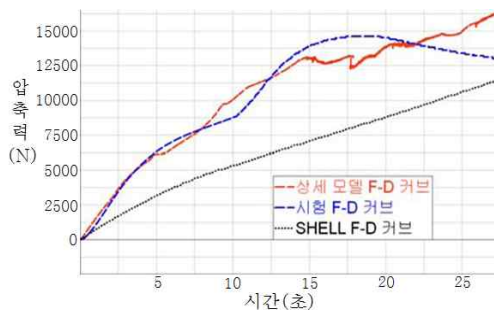
[그림 7] Stiffener 모델링 방법 비교

빼기각의 두께 입력 시 적용 방법과 Solid 요소 적용 부위는 다음 그림 8에 나타나 있다.

상기 모델링 차이에 따른 결과 비교는 그림 9의 힘 대 변위 그래프를 보면 Shell 요소로 구성한 모델은 초기 강성이 약하여 전체적인 그래프가 시험보다 낮은 결과를 보여주고 있고 Solid 요소를 포함하여 모델링한 결과는 초기 강성부터 실물과 강성이 유사하여 전체적인 그래프가 상당히 유사함을 알 수 있다.



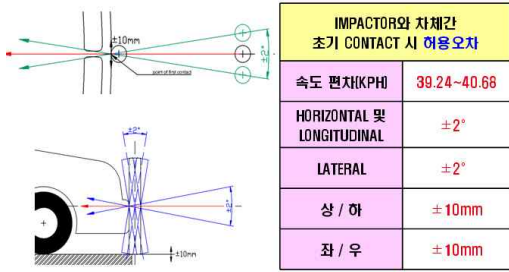
[그림 8] 빼기각 표현 및 Solid 요소 고려 부위



[그림 9] 모델링 방법에 따른 힘 대 변위 결과 비교

2.4 보행자보호 시험 편차 비교 분석

보행자보호 시험 편차의 비교 분석 항목으로는 Impactor의 상하 및 좌우 충격 위치 편차, Impactor의 충격 속도 및 시험 시 Ground Line과 Impactor간의 높이 편차 등이 있다. 다음 그림 10은 Euro-NCAP에서 허용하는 시험 오차 범위에 대한 내용이다.



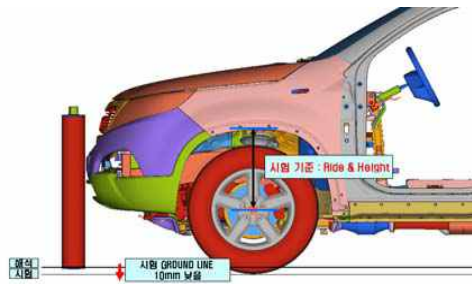
[그림 10] Euro-NCAP의 허용 시험 오차 범위

Euro-NCAP 허용 오차 기준은 만약 시험에서 허용 오차를 벗어나서 평가된 시험 결과에 대해서는 재 시험을 하여야 한다. 실제 보행자보호 충격 시험 결과의 각 항목별 허용 시험 오차 범위의 만족 여부가 표 2와 같다.

[표 2] 실차 시험 오차 결과

위치	TEST 속도	편차	허용오차 만족여부
0L	40.34kph	10Upr/3Lwr	만족
150L	40.5kph	0Upr/5Lwr	만족
300L	39.31kph	4Upr/8Lwr	만족
490L	40.04kph	4Upr/13Lwr	불만족

보행자보호 Impactor가 범퍼 커버와 충격되는 순간의 지상고 오차를 측정해본 결과 시험이 해석 대비 10mm 지상고 오차가 발생하였다. 이 지상고 차이로 인하여 상단 Stiffener와 Femur와의 타격 위치가 낮아짐으로 Impactor의 리바운드력을 약화시키고, 이로 인해 굽힘각이 커진 것이 해석과 시험간 차이의 주된 요인이었다. 해석과 시험간의 지상고 차이는 그림 11과 같다.



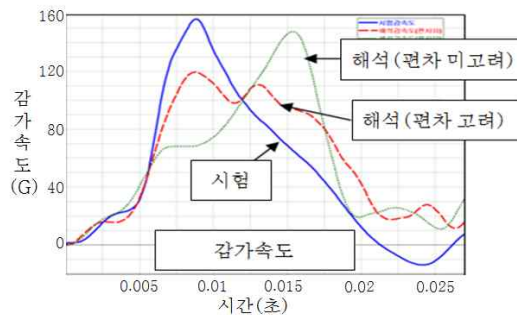
[그림 11] 해석과 시험의 지상고 차이

다음 표 3은 편차가 고려된 해석과 편차가 고려되지 않은 해석 결과와 시험과의 상관 관계를 나타낸 표이다.

[표 3] 충격 위치 편차 고려 여부에 따른 결과 비교

구분	감속도 (G)	굽힘각 (°)	전단변위 (mm)	
0L	시험	156	20.9	6.6
	해석(편차고려)	119	17.9	5.7
	해석(편차미고려)	134	12.5	5.6
150L	시험	168	25.8	6.5
	해석(편차고려)	136	19.9	6.4
	해석(편차미고려)	121	11.3	5.3
300L	시험	181	29.2	6.7
	해석(편차고려)	133	24.8	6.6
	해석(편차미고려)	110	10.5	5.4
490L	시험	212	19.3	2.2
	해석(편차고려)	239	21.8	4.8
	해석(편차미고려)	206	17.2	4.2

앞의 표 3에서 알 수 있듯이 충격 위치 편차가 고려될 경우 굽힘각 성능이 나빠지면서 시험값에는 가까워 짐을 알 수 있다. 또한 아래 그림 12와 같이 0L 충격 위치에서의 감가속도 파형을 비교해 볼 경우 편차가 미고려된 감가속도의 경우 초기 피크치가 후반부에 발생하는 반면 시험과 편차를 고려한 해석의 경우는 초기에 발생하는 유사성을 보였고 굽힘각과 전단 변위 역시 편차가 고려된 해석일수록 시험 파형과 가까워짐을 알 수 있다.

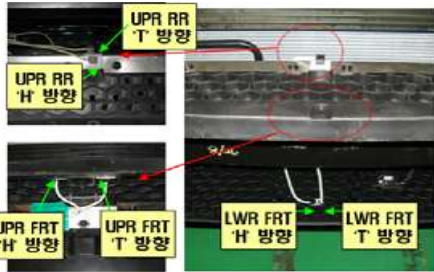


[그림 12] 위치 편차 고려 여부에 따른 결과 비교

2.5 센서 계측을 통한 Stiffener 거동 분석

보행자보호 Impactor 충격 위치에 가속도 측정 센서를 부착하여 해석 결과와 비교하여 거동 분석을 하였다. 보행자보호 타격 구간 별 센서 부착 위치는 L1영역, L2영역 및 L3 영역을 고려하여 0L, 150L, 300L, 490L의 4개 영역으로 선정하였다. 센서 갯수는 총 8개로 'T'방향 가속도 측정용으로 4개, 'H'방향 가속도 측정용으로 4개를 설치하였다. 설치 위치는 상단 Stiffener에 4개소, 하단

Stiffener에 2개소, Side member에 2개소 설치하였고 충격 위치 별로 4회 이동 부착하였다. Stiffener에의 센서 부착 위치는 다음 그림 13과 같고 차체 움직임 변위를 측정하기 위한 Side member에의 센서 부착 위치는 그림 14와 같다.

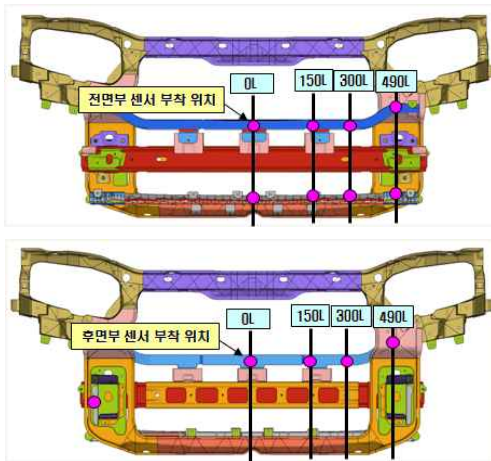


[그림 13] Stiffener에의 가속도 센서 부착 위치



[그림 14] Side member에의 가속도 센서 부착 위치

Stiffener 전면부와 후면부에의 전체적인 센서 부착 상태를 정리하면 그림 15와 같다.

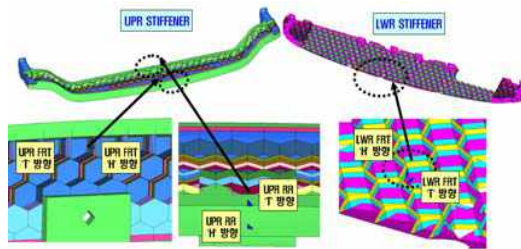


[그림 15] Stiffener의 센서 부착 위치 요약

센서 부착 위치는 OL은 상단 Stiffener 전면부와 후면

부에 'T' 및 'H' 방향 센서를 설치, 하단 Stiffener 전면부에는 'T' 및 'H' 방향 센서를 설치하였고 Side member에 부착한 센서는 'T' 및 'H' 방향의 가속도 측정을 위하여 설치 하였다. 가속도 센서를 이용하여 나온 결과는 두번 적분하여 변위값을 구하였다. 절대 변위 측정은 Stiffener에서 측정된 변위에서 Side member에서 측정된 변위를 제하여서 구하였다.

해석 모델의 경우에는 시험과 동일 위치에 가속도 센서 요소를 이용하여 Local 측에 대한 변위를 계산하여 시험값과 비교하였다. 설치 위치도 시험과 동일한 위치이며 설치 갯수도 시험과 동일하게 사용하였다. 해석 모델에서 구현한 가속도 센서의 위치는 그림 16과 같다.



[그림 16] 해석 모델에의 가속도 센서 부착 위치

시험과 해석 모델상의 변위 측정 결과는 표 4와 같이 정리할 수 있다. 변위 측정값은 전 타격 영역의 변위값을 측정하였고, x와 z 변위값을 구하여 비교하였다. 이때 시험 측정값은 Local 측에 대한 측정값이기 때문에 해석값도 Local 측에 대한 값으로 구하여 비교하였다. 이와 같이 변위 측정 결과의 비교를 통해서 상단 Stiffener와 하단 Stiffener의 거동을 분석할 수 있었고 실제 비교 결과 거동이 유사함을 알 수 있었다. 여기의 해석값은 Stiffener의 Solid 요소 반영을 한 해석 모델의 사용, 지상고 차이 반영, Impactor의 상하 및 좌우 편차 반영 그리고 속도 편차 등이 해석 모델에 적용되어 구해진 해석 결과이다.

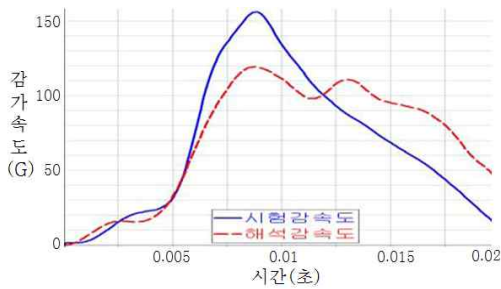
[표 4] 해석과 시험의 변위 측정 결과 비교

구분	기준 측	변위 측정(mm)						
		상단Stiff. Front		상단Stiff. Rear		하단Stiff. Front		
		X	Z	X	Z	X	Z	
OL	시험	Local	37	1	30	0	9	18
	해석	Global	45	19	34	-8	26	18
		Local	46	12	34	-1	9	22
150L	시험	Local	42	15	36	0	19	26
	해석	Global	38	12	37	-8	27	22
		Local	35	21	38	-1	21	28

300L	시험	Local	39	-2	33	0	3	3.5
	해석	Global	35	-3	33	-3	24	10
		Local	34	-4	33	-2	23	14
490L	시험	Local	27	8	25	0	9	33
	해석	Global	31	6	28	-5	34	12
		Local	31	5	29	-2	25	21

3. 실차 시험 대 해석 결과 비교 분석

이상의 보행자보호 해석 모델링 방법을 변경하고 시험 편차를 해석에 적용하여 실차 시험 결과와 해석 결과를 0L 위치에서 비교하면 그림 17과 같다.



[그림 17] 실차 시험과 해석과의 가속도 비교

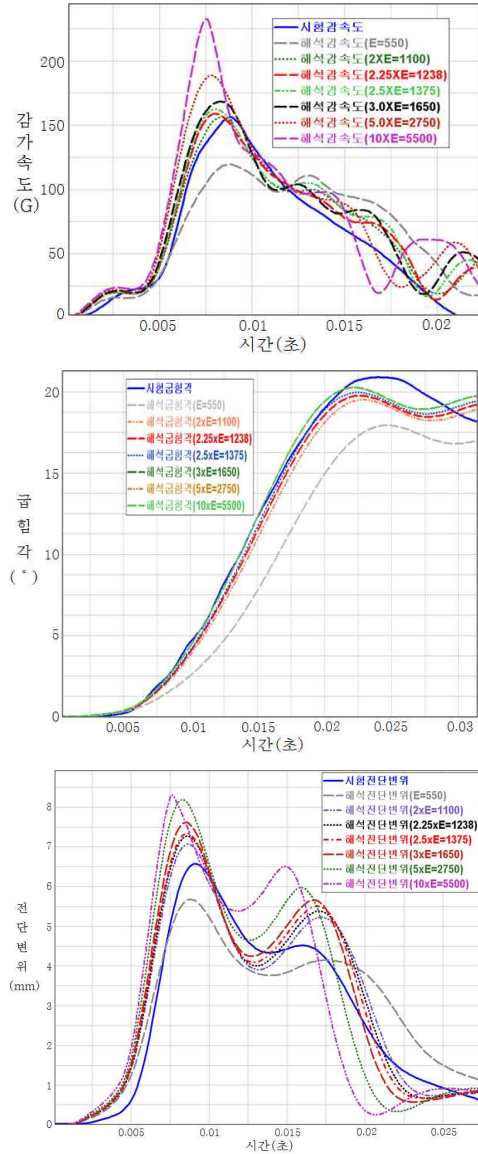
가속도 파형을 비교하면 파형간의 형상은 상당히 유사하게 근접하고 있으나 초기 피크치에는 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 해석 Stiffener 물성의 강성이 실제 시험 시편 Stiffener의 강성에 비해 약하기 때문에 초기 피크치가 차이가 있음을 알 수 있었다.

따라서 Stiffener의 정확한 해석적 보정 물성을 구하기 위해서 탄성계수 E값을 2배에서 10배까지 조절하면서 해석과 시험간의 가속도, 굽힘각 및 전단변위의 각 파형을 0L 위치에서 비교하면 결과가 표 5와 같이 정리할 수 있다.

[표 5] Stiffener 탄성계수 변화에 따른 결과 비교

구분		가속도 (G)	굽힘각 (°)	전단변위 (mm)
0L	E=550 (N/mm ²)	시험 156	20.9	6.6
	해석 119	17.9	5.7	
	E=1100(N/mm ²)	150	19.5	6.9
	E=1238(N/mm ²)	159	19.8	7.3
	E=1375(N/mm ²)	162	20.0	7.3
	E=1650(N/mm ²)	168	20.2	7.6
	E=2750(N/mm ²)	189	21.3	8.2
E=5500(N/mm ²)	232	22.3	8.3	

상기 표와 같이 탄성계수 E값이 1238에서 가장 시험과 유사함을 알 수 있었다. 각 E 값의 변화에 따른 가속도, 굽힘각 및 전단변위의 파형들의 비교는 그림 18과 같다.



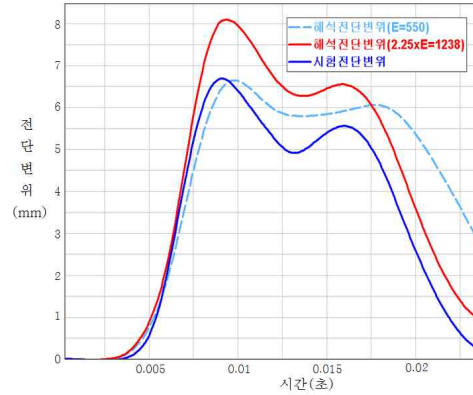
[그림 18] E값에 따른 가속도, 굽힘각 및 전단변위

이상의 Stiffener 탄성계수 보정값 E=1238을 타 충격 위치에 적용한 결과 아래 표 6과 같은 결과를 얻었다. 보정값을 적용한 보정해석 결과와 시험과의 비교 결과는 가속도가 7% 오차, 굽힘각은 5% 오차, 전단 변위는 17.5%의 오차 결과를 보여주었다.

[표 6] 보정 해석 결과와 시험과의 비교

구분		가속도 (G)	굽힘각 (°)	전단변위 (mm)
150L	시험	168	25.8	6.5
	해석(보정전)	136	19.9	6.4
	해석(보정후)	175	25.9	7.9
300L	시험	181	29.2	6.7
	해석(보정전)	133	24.8	6.6
	해석(보정후)	185	28.3	8.1
490L	시험	212	19.3	2.2
	해석(보정전)	239	21.8	4.8
	해석(보정후)	194	19.1	2.1
평균 오차율		7%	5%	17.5%

보행자보호 범퍼 성능에서 중요한 항목인 가속도와 굽힘각 성능값이 해석 대 시험과의 상관성이 10% 이내로 확보되었다. 그림 19는 300L에서의 해석과 시험의 파형 결과 비교이다. 이와 같은 파형의 유사성은 해석 모델링 기법의 개발과, 해석과 시험의 Impactor 위치의 보정 그리고 Stiffener의 해석과 시험간의 거동 유사성의 분석을 통하여 해석과 시험간의 신뢰도가 증명이 되었다.



[그림 19] 보정 해석 결과와 시험 결과와의 비교

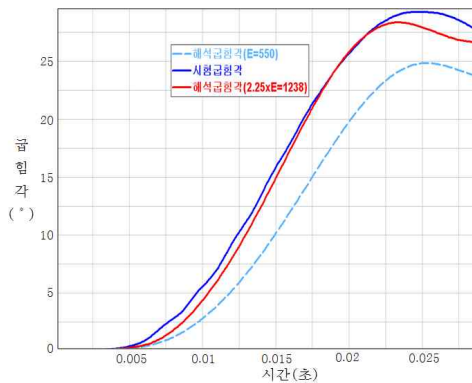
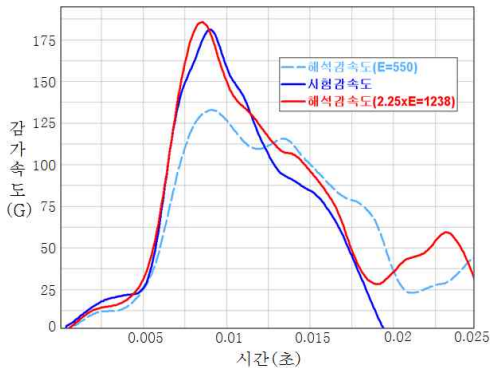
4. 결론

이상의 보행자보호 범퍼 충격 해석과 시험과의 상관성 정도 향상을 위한 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 실물의 굽힘각 저감용 Stiffener의 힘 대 변위 그래프 시험 대 해석 비교를 통하여 파형 및 강성 유사성을 확보하였고 이에 따른 해석 모델링 기법을 제시하였다.
- 2) 센서를 계측한 실차 시험을 통하여 동일 위치에서의 해석과 시험의 Stiffener 거동을 비교 분석하여 해석과 시험의 유사성을 확인하였다.
- 3) 지상고 차이가 보행자보호 성능에 중요한 인자임을 확인하였고 보행자보호 범퍼 충격 해석 시 고려되어야 할 중요한 요소임을 확인하였다.
- 4) 본 보행자보호 범퍼 충격에 대한 해석 대 시험 상관성 향상을 위한 해석 기법을 적용하여 오차 10% 이내의 해석 결과를 얻을 수 있었고 이는 향후 차량 개발 시 시험 횟수 축소를 통한 시험비 절감에 기여할 것이다.

참고문헌

- [1] 국토해양부, “자동차 안전기준에 관한 규칙”, 2008.
- [2] European New Car Assessment Program, "Pedestrian Testing Protocol", Version4.2, May, 2008.
- [3] 박동규, 김준희, 정은미, “SUV 차량 보행자보호 대응 범퍼 시스템 구조 최적화”, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 1521-1526, 2008.
- [4] 정은미, 박동규, 나원균, ”유럽 보행자보호 해석 대 시험 Correlation 기법에 관한 연구”, 한국자동차공학



회 추계학술대회논문집, pp. 1730-1735, 2005.

- [5] 김현경, 양태걸, 박석재, 나원균, “유립 보행자보호 다리 부분 대응 범퍼 시스템 분석 및 개발”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1332-1338, 2006.
- [6] LS-DYNA, "User's Keyword Manual", Version971, 2007.
- [7] Y. H. Han, Y. W. Lee, "Opimization of Bumper Structure for Pedestrian Lower Leg Impact", SAE Paper No. 2002-01-0023, 2002.
-

박 동 규(Dong-Kyou Park)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공과대학원 조선공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 서울대학교 공과대학원 산업·조선공학부 (공학박사 수료)
- 1995년 12월 ~ 2010년 3월 : 현대기아자동차연구소 책임연구원
- 2010년 4월 ~ 현재 : 대덕대학 기계자동차학부 교수

<관심분야>

충돌해석, 구조강도해석, 최적화해석