

거셋일체형 센터필러 어퍼 루프레일 연결구조 개발

이해훈* · 정필상* · 강종구*

Connection Structure Between Center Pillar and Roof Center Rail

Hae Hoon Lee*, Pil Sang Chung**, Chong Ku Kang***

Key Words: Roof Crush(천정강도), Roof Rail(루프레일), Center Pillar(센터필러), Ring Structure(환형구조)

ABSTRACT

This study is intended to augment the Roof strength test being evaluated by IIHS (Insurance Institute for Highway Safety). In order to find solutions for increasing Roof Crashworthiness Evaluation SWR (Strength-to-weight ratio). This study introduces that Integrated Connection Structure Between Center Pillar and Roof Center Rail is proposed as a critical solution.

1. 서론

최근 친환경차(EV, HEV, PHEV, FCEV 등) 개발이 확대됨에 따라, 차량에 대용량 및 고중량의 배터리가 장착되고, 이에 따라 차량의 공차중량 역시 함께 증대되고 있다. 이러한 친환경차 개발에 따른 증가된 공차중량에 비례하여, 차체가 확보 해야 하는 충돌안전성능 역시 증대가 필요하다.

특히, 여러가지 충돌안전성능 가운데에서 북미 IIHS에서 실시하고 있는 천정강도(Roof Strength Test) 성능은 차량 공차중량이 기준이 되어 평가하는 항목으로, 차량 중량 증대 시 직접적으로 목표성능이 상향되는 평가이다.

천정강도 성능확보를 위해서 차량의 센터필러는 단면 내부에 1470MPa이상의 인장강도를 확보할 수 있는 핫스탬핑 보강재를 추가하고 있다. 또한, 보강재의 효과를 극대화 하기 위해서, 추가로 센터필러의 내부의 보강재를 차량의 상부에 있는 센터루프레일과 연결시켜서 환형구조를 적용하고 있다.

2. 본론

2.1. 친환경차 중량 증가에 따른 반력 분석

친환경차(EV, HEV, PHEV, FCEV)의 경우 내연기관 차량 대비하여 대용량 및 고중량의 배터리가 장착됨에 따라, 차량의 총 중량이 증가 한다. 따라서, 개발중인 MQ4차량의 기본차(가솔린, 디젤)와 환경차(PHEV)의 차중에 대한 차량 중량의 변화와 목표반력에 대해 비교해보았다. 비교 결과 Table 1과 같이 환경차(PHEV) 차량 중량의 경우 2,150kg으로 가솔린 차량 대비 296kg이 증대되었다. 천정강도 목표 반력의 경우 당사 천정강도 목표성능인 SWR 4.2기준으로 환경차(PHEV)의 목표 반력은 9,030kgf로 기본차(가솔린)대비 하여 1,243kgf이 증대되었다. 결론적으로 환경차(PHEV)의 경우 기본차(가솔린) 대비 약 15.9%의 목표 반력 증대가 필요한 것을 확인하였다.

Table 1. 파워트레인 사양에 따른 중량/목표반력

구 분	차량중량[kg]	목표반력[kgf]
가솔린	1854(-)	7787(-)
디 젤	2047(+193)	8598(+811)
환경차(PHEV)	2150(+296)	9030(+1243)

* 현대자동차, 책임연구원

E-mail: gohooni@hyundai.com

따라서 목표 반력 증대에 따른 차체 구조 보강 및 개선이 필요하다.

2.2. 천정강도 그래프 분석 통한 설계인자설정

선행 차종인 TM차종의 실차 평가의 SWR-변위 그래프와 평가 동영상을 통해, Fig. 1에서 처럼 천정강도 평가 구간에서 세번의 피크 포인트가 발생됨을 확인하였다.

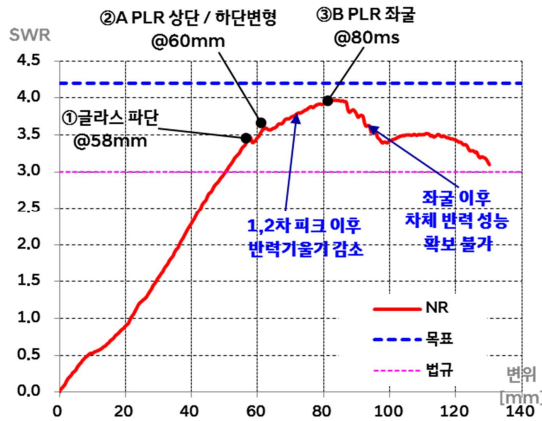


Fig. 1 천정강도 SWR-변위 그래프(TM차종)

이를 분석해 보면, 첫번째 피크점인 변위 약58mm에서 윈드셴드 글라스가 파단되었으며, 이와 동시에 두번째 피크점인 변위 60mm에서 A PLR 상/하단의 차체 변형이 발생하였다.

첫번째와 두번째 피크점 이후로, 즉 윈드셴드 글라스 파단과 A PLR의 변형이 간 이후에도 차체 반력은 기울기가 피크점 전의 초반 기울기 대비 낮아졌으나, SWR(차체 반력)은 계속 증대 하였다.

하지만, 세번째 피크점인 변위 80mm에서 센터필터가 좌굴되면서 더 이상의 SWR을 상승시킬 수 없었다.

따라서, SWR 증대를 하기 위해서는, 초기 기울기를 높이는 방법과 센터필터 좌굴 시점을 늦춰서, SWR측정 구간인 120mm내에서 반력을 최대화 시키는 두가지 방법이 있다.

첫번째 방법에 대한 인자는 차체의 여러부분이 복합적으로 연관되어 있으므로, 단순 그래프 분석으로는 인자를 지정하기가 어렵다.

하지만, 두번째 방법에 대한 인자는 윈드셴드 글라스 파단, A PLR 상/하단 변형 이후에 발생한 현상이므로, 타 인자에 대한 간섭효과가 적은 센터필터의 좌굴로 개선 설

계 인자를 지정할 수 있다.

따라서, 센터필터의 강도를 증대시키면, 좌굴 시점을 늦출 수 있으며, 좌굴 이후에도 SWR이 증대시킬 수 있는 개선효과를 기대할 수 있다. 또한 센터필터 강도 개선은 첫번째 방법인 초기 기울기 증대의 효과도 기대할 수 있으므로, 천정강도 증대를 위한 설계인자로 센터필터 강도 개선을 목표로 설정 하였다.

2.3. 기존(분리형)구조 와 개선(일체형)구조

기존 센터필터의 구조를 분석하여, 단점을 보완하고, 강도를 증대시킬 수 있는 개선 구조를 개념설계를 하였다.

2.3.1. 기존(분리형)구조

DM, UM, TM차종의 경우 천정강도 성능을 확보하기 위해서 센터필터 내부에 상단으로부터 힌지 부근까지 상하방향으로 980MPa급 이상의 보강재를 추가한 것이 가장 특징이다. 특히 TM의 경우 환경차를 대응하기 위해서 재질과 두께를 증대 하였다.

Table 2. 선행차종의 센터필터 보강재 재질/두께

구분	DM	UM	TM
재질	SPFC980Y	SPFC980Y	SABC1470
두께[mm]	1.2	1.2	1.4

보강된 보강재는 센터필터의 메인 부재인 센터필터 인너와, 센터필터 레인프를 연결하여, 좌굴을 최대한 지연시키는 역할을 한다.

Fig. 2에서 처럼 상기 기술한 보강재는 환형구조를 구성하는 루프레일과 직접 연결할 수 없으므로, 연결 부품(센터필터 거셋)을 추가하여 보강재와 루프레일을 간접적으로 연결하여 강도 확보를 하였다.

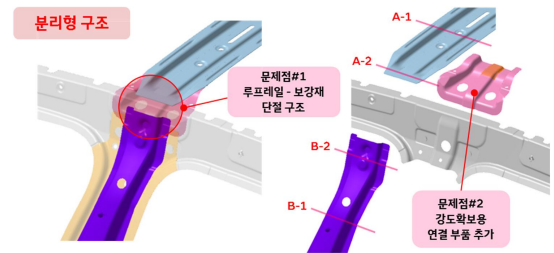


Fig. 2 기존(분리형) 센터필터 보강구조

또한 Fig. 3에서 보이는 단면과 같이 보강재와 연결부품을 용접으로 연결하기 위해서 보강재는 SECTION B-2에서 처럼 상단의 단면을 낮춰야 하므로, 단면 손실이 발생하며, 루프레이의 경우 SECTION A-2 처럼 단면 손실뿐만 아니라, 단면이 완전히 소실되어, 단순 면매칭 결합이 되는 단점을 가진다.

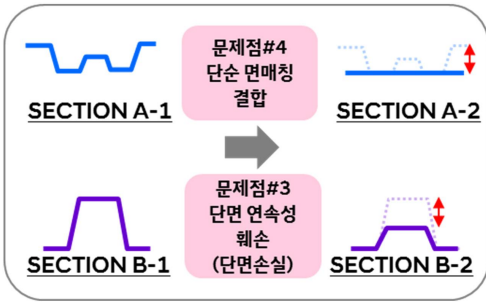


Fig. 3 단면 손실 구조(분리형 구조)

2.3.2. 개선(일체형)구조

기존(분리형) 구조의 성능을 보완하기 위하여, 상기 기술한 문제점을 보완하는 개념설계를 진행 하였다. 기존 구조의 단점은 결국 보강재와 루프레이를 연결하지 못하여 발생하는 문제점이므로, 개선 구조에는 보강재와 루프레이를 직접 결합시키는 구조를 반영하는 것을 최우선 개선 방향으로 선정하였다.

보강재와 루프레이를 연결시키기 위해서, Fig. 4와 같이 기존의 보강재와 루프레이를 막고 있던 루프사이드 인너의 격벽을 일부 제거하여, 연결공간을 형성하였다. 이와 동시에 보강재와 루프레이를 연결하기 위한 강도확보용 부품을 루프 사이드 인너에 일체화 하였다.

보강재와 루프레이 직접연결을 통해서, 기존구조의 단점이었던, 루프레이의 단순 면매칭 결합을 Fig. 4의 SECTION A-2에서 처럼, 일체 결합으로 개선할 수 있었고, 기존구

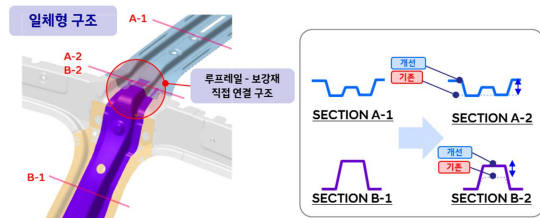


Fig. 4 개선(일체형) 센터필러 보강구조

조의 보강재의 단면 연속성이 훼손되어, 발생하였던 단면 손실을 Fig. 4의 SECTION B-2에서 처럼, 단면 연속성을 유지하여 단면 손실을 최소화 하여 개선하였다.

2.3.3. 기존(분리형)구조와 개선(일체형)구조의 부품 변경사항

개선(일체형)구조의 개선사항은 Fig. 5와 같다. 루프레이는 기존 단순 면매칭 결합에서 단면 유지 방사형 구조로 변경하였다. 센터필러 보강재는 상단 까지 단면이 유지되면서 루프레이와 직접 연결되는 구조로 변경하였다. 마지막으로 루프사이드 인너의 경우 기존의 별도 부품이었던 거셋을 일체성형 하였으며, 이를 통해 부품수를 축소할 수 있었다.



Fig. 5 기존(분리형)구조와 개선(일체형)구조의 부품 변경사항

2.4. 개선(일체형)구조의 성능 검증 및 최적화

개선(일체형)구조의 개선 효과를 검증하기 위해서, 기존 구조(분리형)인 TM차중에 개선구조를 적용하여, 기존(분리형)구조와 개선(일체형)구조의 성능 비교 해석을 하였다. 해석결과 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 SWR수치가 기존 4.27에서 4.54로 약 6.3%증대 되었으며, 반력값으로는 544.5kgf의 증대가 되었다(기존중량: 2,017kg).

Table 3 기존(분리형)/ 개선(일체형)구조의 SWR

US	Normal Roof IIHS ROOF	Target 4.2	SWR	반력[kgf] 8612.59
			기존 4.27	
			개선	9157.18
			4.54	

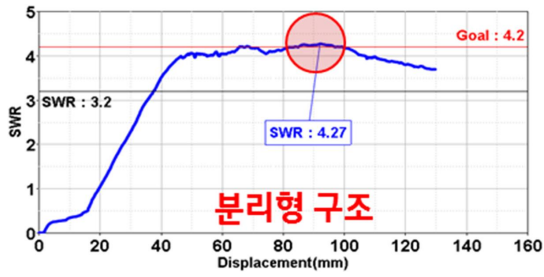


Fig. 6 TM 차종의 천정강도 그래프

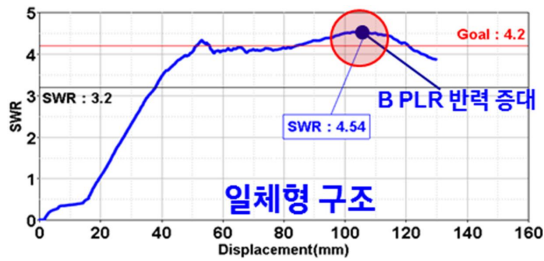


Fig. 7 TM 차종+개선(일체형)구조 천정강도 그래프

2.4.1. SWR 성능 민감도 검증 및 부품 별 재질 / 두께 선정

기존(분리형) 구조와 재질 / 두께가 동일한 조건에서 개선(일체형)구조의 성능이 향상됨을 확인하였다. 따라서, Fig. 8에서 처럼 성능 향상에 따른 중량/원가 경쟁력을 우선적으로 확보하기 위해 기존 구조의 센터필러 보강재 내측의 추가된 보강재와 상단의 보강재를 삭제를 하였다.

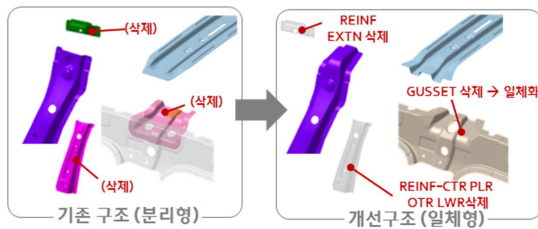


Fig. 8 개선 구조 성능향상에 따른 부품 삭제

또한, 기존(분리형)구조 대비하여 부품의 재질 강도를 낮추거나, 두께를 감소 시켜서 성능을 확보할 수 있다면, 중량/원가 경쟁력을 추가로 향상 시킬 수 있으므로, 개선 구조의 부품의 재질 / 두께에 따른 성능 민감도를 확인 확인하기 위해, Table 4와 같이 부품의 재질/두께의 관한 영

Table 4 민감도 영향 인자 선정

부품명	재질	두께
센터필러보강재	SABC1470	1.2t, 1.4t, 1.6t
루프레일	SPFC1180RA	0.8t, 0.9t, 1.0t
센터필러인너	SPFC980	1.0t, 1.1t, 1.2t
루프사이드인너	SPFC590/980	1.0t

향인자를 선정하였다.

영향인자별로 직교표를 작성하고, 이에 따른 SWR해석 값을 Table 5와 같이 확인하였다.

이를 통해서, 메타함수를 적용하여, 중량변형률에 따른 SWR 그래프를 도출하였다. 다만, 루프사이드 인너의 경우 전방 충돌 성능 확보를 위해서 980급 재질로 고정하였다.

Table 5 부품의 재질/두께에 따른 SWR 해석값

	보강재두께	루프레일 두께	인너 두께	루프사이드 인너 재질	SWR
BASE	2 (1.4t)	3 (1.0t)	1 (1.0t)	1 (980)	4.36
1	1 (1.2t)	1 (0.8t)	1 (1.0t)	1 (980)	4.11
2	1 (1.2t)	2 (0.9t)	2 (1.1t)	2 (590)	4.19
3	1 (1.2t)	3 (1.0t)	3 (1.2t)	3(1') (980)	4.38
4	2 (1.4t)	1 (0.8t)	2 (1.1t)	3(1') (980)	4.34
5	2 (1.4t)	2 (0.9t)	3 (1.2t)	1 (980)	4.53
6	2 (1.4t)	3 (1.0t)	1 (1.0t)	2 (590)	4.39
7	3 (1.6t)	1 (0.8t)	3 (1.2t)	2 (590)	4.42
8	3 (1.6t)	2 (0.9t)	1 (1.0t)	3(1') (980)	4.46
9	3 (1.6t)	3 (1.0t)	2 (1.1t)	1 (980)	4.59

Fig. 9에서 처럼 중량변화에 따른 SWR 변화량을 확인해 보면, 센터필러 보강재의 기울기가 가장 높은 것을 확인할 수 있다.

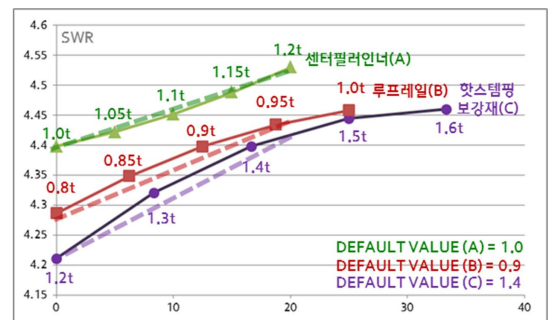


Fig. 9 중량 변형률에 따른 SWR 그래프 I

Fig. 10에서의 핫스템핑 보강재의 기울기를 보면, SWR 4.4이하에서의 중량변화에 따른 SWR의 변화량이 가장 높은 것을 알 수 있다.

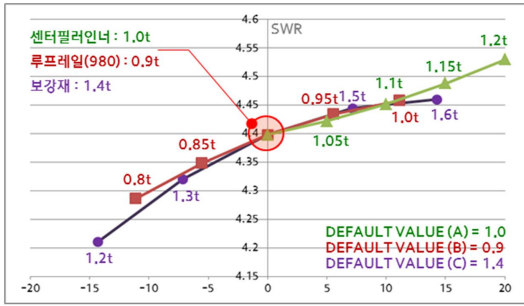


Fig. 10 중량 변형률에 따른 SWR 그래프 II

따라서, 목표성능 SWR 4.2이하에서는 개선 구조의 센터필러 보강재의 민감도가 가장 높은 것을 확인 하였다.

또한 메타함수의 적합성이 보증되지 않은 것을 감안하여, 안전율을 적용하여 SWR 목표성능을 4.2에서 4.4로 추가 상향하였다. 이를 통해 개선구조의 부품별 두께를 도출한 결과, Fig. 9와 같이 센터필러인너 1.0t, 루프레이일 0.9t, 센터필러 보강재 1.4t를 선정하였고, TM 대비 루프레이일의 두께를 0.1t 감소시킬 수 있었다.

2.4.2. 차체 비틀림 강성 비교

개선(일체형)구조의 경우 센터필러 보강재와 루프레이일이 입체 단면 결합이 되어 기존대비 부품 간 결합성이 증대됨에 따라 차체의 환형구조의 강건성을 향상 시킬 것이라 예상된다.

이를 검증하기 위해, 차체 비틀림 강성 해석을 통하여 수치화 하였고, Fig. 11과 같이 기존 구조 대비 36.2Hz에서 38.9Hz로 차체 글로벌 강성이 증대된 것을 확인하였다.

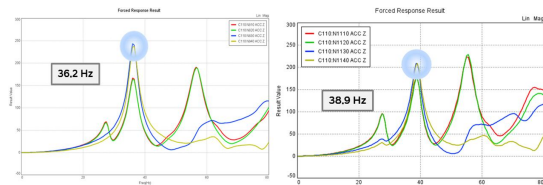


Fig. 11 차체 비틀림강성(기존구조/개선구조)

또한, Fig. 12와 같이 참고문헌의 차체(로컬)강성 비교자료를 참조하면, Table 6에서 처럼 개선구조(CASE4)의 조인트 강성이 기존대비 6.5% 증대된 것을 확인할 수 있다.

이를 통해 개선구조가 차체 로컬 강성을 증대 하였음을 확인하였고, 로컬 강성 증대를 통해 글로벌 강성 증대에 기여한 것을 확인하였다.

Table 6 센터필러 조인트 CASE별 로컬 강성

구분	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
Local강성	30.3	31.5	33.5	34.3

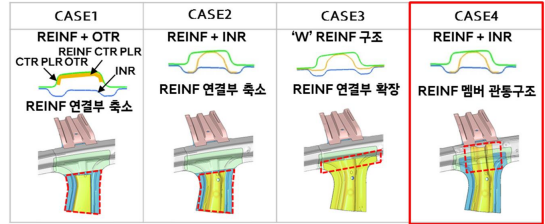


Fig. 12 센터필러 조인트 CASE 선정

2.5. MQ4 해석(선행검토도) / 실차(PROTO) 평가 결과 검증

개발중인 MQ4차량 시작차에 개선(일체형)구조의 원가/중량 경쟁력 확보를 위해, 루프사이드 인너의 두께를 해석값보다, 0.1t 추가 절감하여 Table 7과 같이 적용하여 진행하였다.

Table 7 개선구조MQ4(시작) 적용 재질 / 두께

부품명	재질/두께(해석)	재질/두께(MQ4)
센터필러보강재	SABC1470 / 1.4t	
루프레이일	SPFC1180RA / 0.9t	
센터필러인너	SPFC980 / 1.0t	
루프사이드인너	SPFC980 / 1.0t	SPFC980 / 0.9t

2.5.1. MQ4 해석(선행검토도) 평가 결과 분석

MQ4 선행검토도 해석결과 Fig. 13과 같이 두께를 축소 하였던 루프사이드 인너 쪽 A plr부에 60mm시점에서 좌

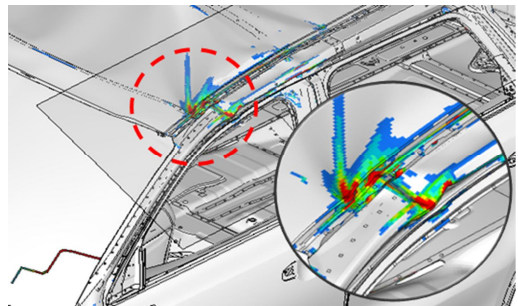


Fig. 13 MQ4 해석(선행검토도) 좌골발생 @60mm

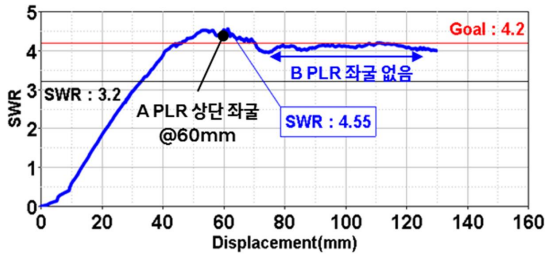


Fig. 14 MQ4 해석(선헨검토도) 천정강도 그래프(차량중량: 1,886 kg, 기본차 기준)

굴이 발생하였다.

하지만, 차량중량 1,886kg 기준으로 목표만족 수준의 SWR 4.55(반력: 8,581.3kgf) 값을 얻었다.

2.5.2. MQ4 실차 평가 결과 분석

MQ4 실차 평가 결과 루프사이드의 두께 절감으로 인해서 Fig. 15와 같이 선헨검토도의 해석값보다 루프 사이드 인너의 과대 변형 및 파단으로 인해, 차체 변형량이 과다하여, 초기 기율기가 Fig. 16과 같이 감소하였다.



Fig. 15 MQ4 실차 평가 후 변형 사진

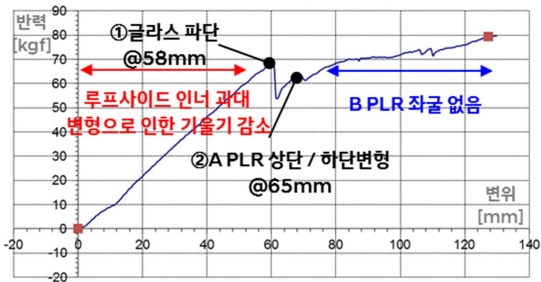


Fig. 16 MQ4 실차 평가 천정강도 그래프(차량중량: 2,270kg, 환경차 기준)

이후, 해석과 같이 센터필터가 좌굴이 되지 않았고, 변위 구간 120mm이후에도 반력을 증대시킬 수 있었으나, 초기 기율기로 감소로 인한 변위 손실로 인해, SWR 3.84

(반력: 8,105kgf)값을 얻었다. 이는 해석값(8,581.3kgf) 대비 약 480kgf 감소하였다. 이에 따라, 루프사이드 인너의 보강을 추가하여 Pilot단계에서 추가 검증 예정이다.

3. 결론

본 연구를 통해 천정강도를 증대할 수 있는 거셋일체형 센터필터 어퍼 루프레일 구조를 개발하였다.

최종적으로 MQ4 차종에 적용하여, 현재 Proto 평가까지 진행되었으며, 일부 개선이 필요하나, 추가 절감했던 루프사이드 인너의 보강을 한다면 목표 만족을 예상한다. 선형차종인 TM차종과 대비하여, 천정강도는 동등수준을 확보가 예상되며, Fig. 17과 같이 중량 800g/대, 원가 5,000 원/대, 부품수 6EA/대를 개선하여 경쟁력을 확보하였다.

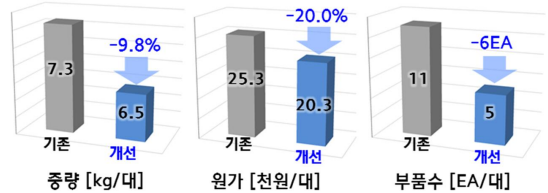


Fig. 17 거셋 일체형 센터필터 어퍼 루프레일 구조 개발효과(중량, 원가, 부품수)

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 천정강도 SWR 향상을 위해서는 초기 기율기를 높여야 함에 따라, 루프사이드 인너의 두께를 충분히 확보하는 등 천정강도 평가 시 차체 실내 방향으로의 변형량을 최소화 하는 구조가 효과적이다.
- 2) 천정강도 평가 시 일반적으로 2~3번의 피크점이 발생하고, 이는 첫번째 글라스 파단, 두번째 A PLR 상/하단 변형 후 시점이며, 이후에는 센터필터의 구조만으로 전체의 전복 하중을 지지하므로, SWR 반력 증대를 위해서는 센터필터 구조 강건성을 확보해야 한다.
- 3) 구조해석 및 실차평가가 확인을 통해서, 센터필터의 보강재의 기여도가 가장 높았음을 확인하였으며, 센터필터의 구조가 핵심 설계인자임을 확인하였다.
- 4) 따라서, 센터필터의 구조를 강건하게 하기 위하여, 센터필터 내부의 보강재의 단면계수를 높이고, 단면계수의 연속성을 유지해야 함과 동시에, 차량의 횡방향의 루프레일과 교차되는 조인트부를 일체형

으로 직접연결하여, 환형구조를 형성하는 것이 효과적이다.

- 4) 상기 기술한 센터필러 조인트 부의 일체형 입체결합구조를 통해 환형구조의 효율성이 증대되며, 천정강도의 향상과 함께, 차체 글로벌 비틀림 강성 증대도 기대할 수 있다.

참고문헌

- (1) BIW 연결구조 및 형상에 따른 조인트강성 최적화 연구(현대기아학술대회, 2019).
- (2) National Highway Traffic SafetyAdministration (2006, Laboratory test procedure for FMVSS 216: Roof crush resistance).
- (3) Fundamental of Automobile Body Structure Design (Dr Don Malen).
- (4) Future Steel Vehicle (Steel Market Development Institute, 2018).