◎ 논 문

안전벨트 충돌하중특성 최적화

서보필* · 최성철* · 김범중* · 한성준*

Optimization of Seat belt Load Limiter for Crashworthiness

Seo bo pil*, Choi sung chul*, Kim beom jung*, Han sung jun*

Key Words : Seatbelt LoadLimiter(안전벨트 로드리미터), Optimization(최적화), Chest Deflection(가슴 변위)

ABSTRACT

Under the full frontal crash event, seatbelt system is the most typical and primary restraint device that prevents the second impact between an occupant and vehicle interior parts by limiting the forward motion of an occupant in the vehicle occupant packaging space. Today's restraint systems typically include the three-point seat belt with the pretensioner and the load limiter. A pretensioner preemptively tightens the seat belts removing any slack between a passenger and belt webbing which leads to early restraint of a passenger. After that a load limiter controls level of belt load by releasing the belt webbing to reduce occupant injurys.

In this study, load characteristics of load limiters are optimized by the computer simulation with a MADYMO model for a frontal impact against the rigid wall at 56kph and then we suggest performance requirements. We derived optimum load characteristic from the results using four vehicle simulation models represented by the vehicle. Based on the results, we suggest the performance from the results of the second optimization using the simulation considering the design and the standardization. Finally, the performance requirements is verified by the sled tests including the load limiter device for the full vehicle condition.

1. 서 론

차량 충돌 발생시 안전벨트 시스템은 주어진 승객실 내부에서 승객의 거동을 제어함으로써 승객과 차체 내부와의 2차 충돌을 효과적으로 방지하는 기본적이고, 중요한 구속장치이다. 안전벨트 시스템의 리트렉터(Retractor)는 웨빙(Webbing)의 인입 및 인출 기능을 수행하는 스풀(Spool)과 충돌 초기에 벨트를 역으로 되감아 벨트 착용상태에서 승객과 벨트간의 슬랙을 제거하고, 조기 구속을 유도하는 프리텐셔너(Pretensioner) 및 프리텐셔너 작동후 벨트에 일정 하중 이상이 작용하면 벨트를 풀어줌으로써 승객 구속 하중을 제어하고 상해를 감소시켜주는 로드리미터(Load Limiter)로 구성되어 있다.

본 연구는 이러한 안전벨트 시스템에서 승객 상해에 직접적인 영향을 주는 로드리미터의 하중 특성을 56kph 정면 NCAP 운전석 충돌 조건에서 승객거동 해석을 수행하여 최적화하고, 그에 따른 성능기준을 제시하고자 한다.

차체의 다양한 충돌 특성을 대변할 수 있도록 충돌 펄스 가혹도 및 플랫폼 별로 대표차종을 선정하고, 각 차종들에 대한 1단계 최적화 해석을 통하여 차종별 로드리미터의 충돌하중 최적 특성을 산출한다. 다음으로 그 결과를 토대로 동시 최적화를 고려한 2단계 최적화 해석을 통하여 로드리미터의 충돌하중 특성에 대한 성능기준을 제시한다. 마지막으로 제시된 로드리미터의

* 현대자동차 안전시스템설계팀
E-mail : sbpil@hyundai.com

성능기준을 만족하는 단품 제작 및 슬레드 시험으로 차량 장착 조건에서의 성능을 검증한다.

2. 본 론

2.1 최적화 해석

2.1.1 최적화 방법

안전벨트 로드리미터의 충돌하중특성 최적화는 차체의 충돌 특성을 대변하는 충돌 가혹도별 대표차종 4대를 대상으로 56kph 정면 NCAP 충돌 조건에서의 승객거동해석 (MADYMO Simulation)을 포함하는 최적화 프로세스를 이용하여 진행하였다.

승객거동해석 모델은 각 차종별 차체 감속도, 승객실 변형, 차체거동, 구속장치 조건 등을 반영하여 구성하였으며, Time Step 10^{-2}~10^{-3} ms 기준으로 각 차량 모델의 해석시간은 10분 수준이다.

최적화 프로세스는 상용 소프트웨어를 이용하여 Fig.1의 과정으로 구성하였으며, 제어인자는 각 최적화 단계별로 로드리미터 충돌하중 특성을 대변하는 함수 그래프(Force-Webbing out)의 변수 범위를 제한하여 수행하였다. 목적함수는 제어인자의 영향도가 크다고 판단되는 가슴상해 및 목상해 발생 가능성 조합을 최소화하도록 구성하였으며, 제한조건으로는 승객 상체(머리/가슴)와 스티어링 휠의 접촉이 발생하지 않는 조건으로 가슴 최대 전방 이동량을 규제하였다.

2.1.2 1단계 최적화 (차종별 최적화)

1단계 최적화 해석은 일반적으로 해석시간이 짧은 비선형 문제에 적합성이 알려진 SA기법[5]을 상용 소프트웨어내에서 수정 제공하는 ASA(Adaptive Simulated Annealing) 알고리즘을 이용하여 각 차종별 200번의 해석을 수행하면서 최적화를 진행하였다.

제어인자는 로드리미터 충돌하중 특성을 대변하는 함수 그래프의 형태를 결정짓는 6개 좌표의 변수 범위를 선정하고, 각 차종별로 상해를 최소화하는 방향으로 결정된 로드리미터 충돌하중 최적 특성 및 상해 결과와 특성 변동에 따른 영향도를 검토하였다

1단계 최적화 해석결과, 로드리미터 충돌하중특성 변동에 따른 승객 상해는 가슴상해(변위) 및 목상해에

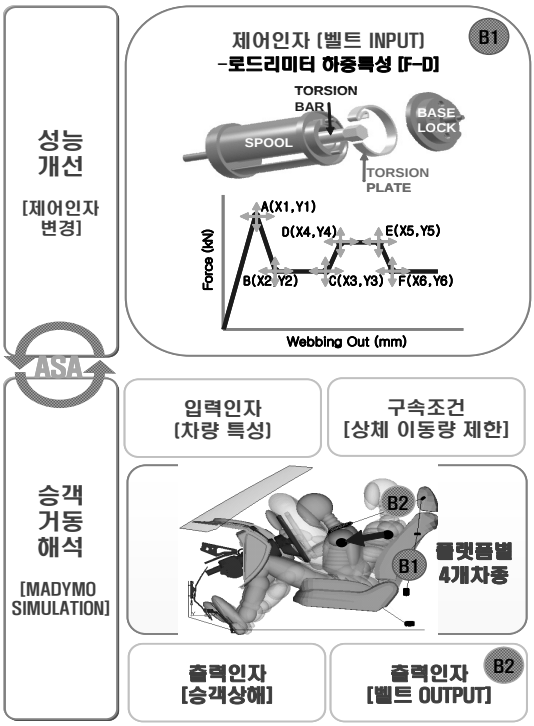

Fig. 1 Optimization process

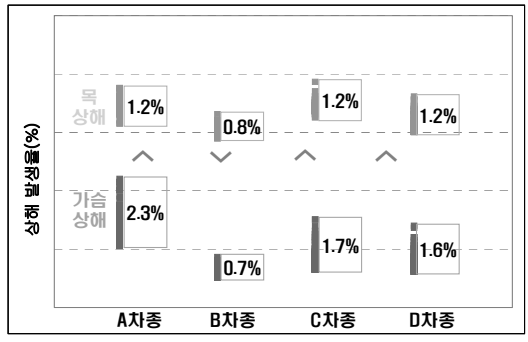

Fig. 2 Probability of AIS-3

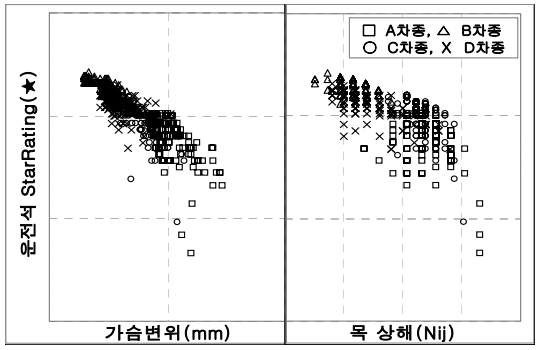

Fig. 3 The relationship of Injury and NCAP star rating

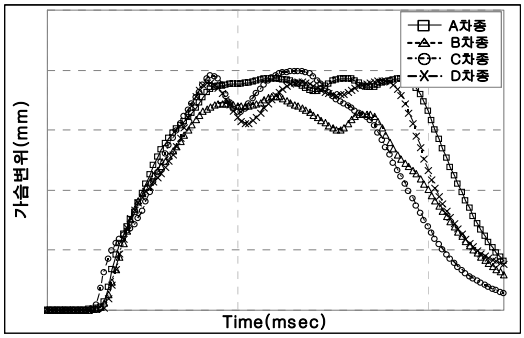

Fig. 4 1st Optimization result : Chest deflection

그 영향도가 크다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2는 AIS3+ (Abbreviated Injury Scale)기준 차종별 가슴 및 목 상해 발생율 분포를 보여주며, 이는 로드리미터 특성이 상대적으로 목상해 대비 가슴상해(변위)에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인시켜 준다.

또한 Fig. 3과 Fig. 4에서 로드리미터 충돌하중특성 변화에 따라 발생하는 목상해 및 가슴상해 분포와 US NCAP 운전석 StarRating의 관계 측면에서도 가슴상해(변위)가 보다 선형적인 경향을 보여줌을 확인할 수 있다.

로드리미터의 충돌하중 최적특성에 대한 각 차종별 상해 결과를 살펴보면 Fig. 4와 같이 영향도가 큰 가슴변위 값이 충돌이 진행되는 시간 동안 전반적으로 일정하게 유지되는 양상을 볼 수 있었다. 이는 가슴변위가 최대로 발생하는 시점에서의 값을 가슴상해로 판단하는 기준으로 볼 때, 본 연구에서 수행한 최적화 전략 및 결과의 타당성을 확인할 수 있게 해준다.

Fig. 5는 각 차종별 승객의 상해를 최소화하는 로드리미터 충돌하중의 최적 특성을 도시하였으며, 다음과 같은 일반적인 경향을 도출할 수 있다.

① 에어백 영향이전(~50ms) : 하중높음

② 에어백 영향구간(50ms~) : 일정한 낮은 하중

③ 충돌 후반부 : 하중 높음 (차종별 변동폭 큼)

위와 같이 충돌 가혹도 및 플랫폼 별로 선정하여 진행한 4차종의 1단계 개별 최적화 결과로 유사한 형태의 일반적인 개형 및 하중 수준을 얻을 수 있었으며, 이를 바탕으로 제어인자의 범위를 선정하여 2단계 동시 최적화를 검토하였다.

2.1.3 2단계 최적화 (동시 최적화)

2단계 최적화는 앞 절에서 진행한 각 차종별 1단계 최적화 결과를 통하여 얻은 로드리미터 충돌하중 최적특성을 제어인자를 2단계 형태로 단순화하고, 그 범위를 축소 하여 진행하였다. 제어인자의 범위는 2개 좌표를 결정하는 웨빙인출의 2수준 및 하중 조건의 3수준으로 조합별 9가지 경우에 대하여 각 차종별 해석을 진행한 후, 결과분석을 통하여4차종 동시 최적화 가능성을 검토하였다.

각 차종별 2단계 최적화 결과를 살펴보면 Fig.6과 같이 승객상해의 관점에서 1단계 최적화 결과와 유사한 수준에서 가슴변위가 충돌이 진행되는 동안 전반적으로 일정 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 제어인자 범위 선정 및 최적 결과의 타당성을 확인하였으며, 다음과 같이 다양한 충돌 가혹도 조건을 포괄하는 로드리미터의 일반적인 특성을 도출할 수 있다.

① 에어백 영향이전(~50ms) : 하중높음

② 에어백 영향구간(50ms~) : 일정한 낮은 하중

마지막으로, 1,2단계 최적화 결과로부터 충돌 가혹도별로 선정한 4차종의 56kph 정면 NCAP 시험 조건에서 동시에 충돌성능을 최적화 할 수 있는 Fig. 7과 같

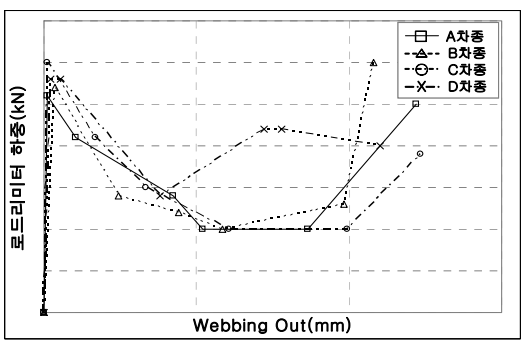

Fig. 5 1st Optimization result : Load limiter performance

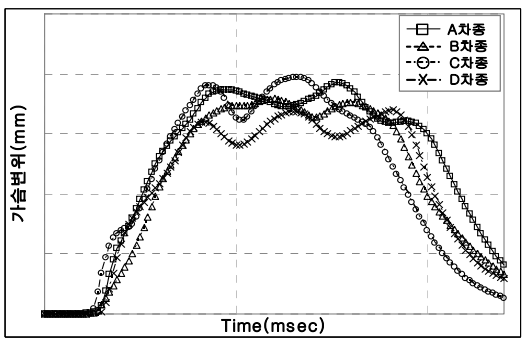

Fig. 6 2nd Optimization result : Chest deflection

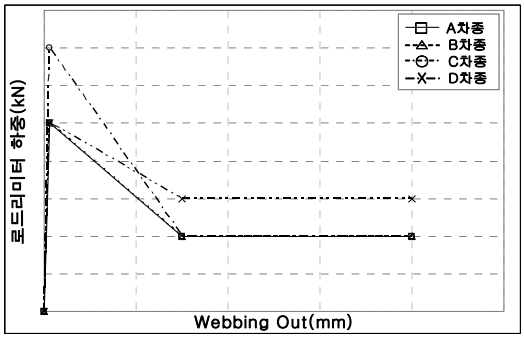

Fig. 7 2nd Optimization result : load limiter performance

은 로드리미터 충돌하중특성의 성능기준을 도출 할 수 있다.

2.2 시험 및 검증

2.2.1 단품 검증

최적화 해석을 통하여 도출한 로드리미터 최적 성능기준에 대한 검증은 단품 제작/시험 결과를 이용한 승객거동해석 확인, 슬레드 시험을 통한 차량 장착 조건에서의 시스템 성능 및 상해 확인의 과정으로 진행하였다.

단품에 대한 검증은 성능 기준에 따라 단품의 샘플을 제작하고, Fig. 8과 같은 조건에서 단품에 대한 정하중 인장시험을 수행하였다. 그리고, 단품시험 결과의 성능기준 부합여부 확인 및 단품시험 데이터를 이용한

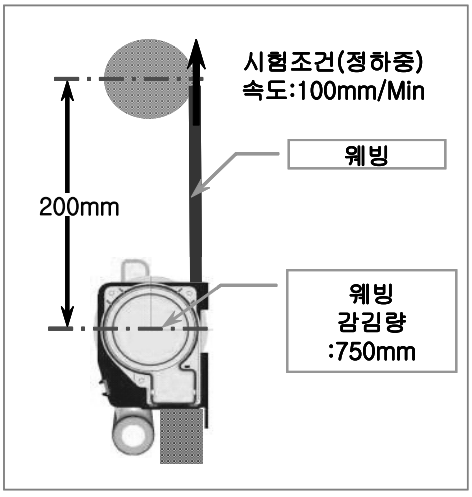

Fig. 8 Load limiter unit test method

승객거동해석을 통하여 시스템 상에서의 승객 상해를 확인하였다. 승객거동해석 대상 차종은 추가 검증의 관점에서 1,2차 최적화에 이용된 차종과 다른 차종을 선정하여 진행하였다.

단품 성능기준으로 제작된 1차 제작품의 경우 단품 시험 결과 로드리미터 최적 성능기준대비 웨빙 인출량의 2차 관리 포인트 이전 충돌 전반부 하중이 다소 낮게 나타났다. 이는 승객거동 해석결과 최적사양대비 가슴-에어백 접촉이전(~50ms) 구속력 부족 현상을 초래하여 충돌 중/후반부 에어백 영향의 증대로 가슴변위가 상대적으로 상승함을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 문제가 된 시점에서의 단품성능의 추가 개선을 진행하였다.

추가 개선된 2차 제작품의 경우 로드리미터 최적 성능 기준 웨빙 인출량의 2차 관리 포인트 이후 충돌 중/후반부 러닝 하중이 다소 초과하는 것을 확인할 수 있었으며, 승객거동 해석결과 최적사양대비 가슴-에어백 접촉이후(50ms~) 안전벨트에 의한 구속력 증대로 이 구간에서 가슴변위가 상대적으로 상승함을 확인할 수 있었다.

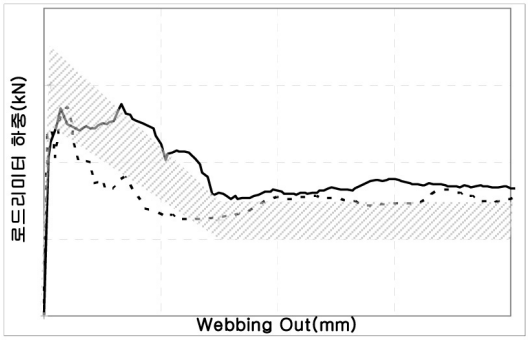

Fig. 9 Unit test result : Load limiter performance

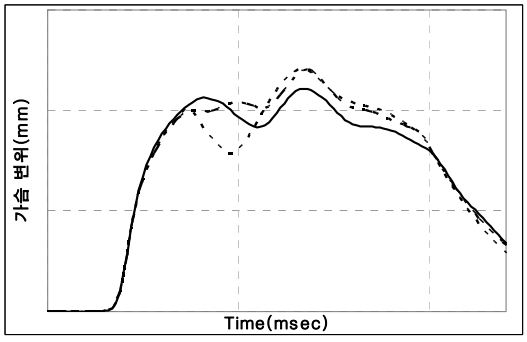

Fig. 10 CAE result using unit test result : Chest deflection

2.2.2 시스템 검증

차량 장착 조건에서 안전벨트 시스템의 성능 및 상해에 대한 검증은 로드리미터 최적 성능기준으로 제작된 2차 제작품을 56kph 정면 NCAP 운전석 슬레드 시험 (Sled test)조건에 적용하여 진행하였다. 1차 제작품 대비 2차 제작품의 경우 초기 구속력 증가로 동일 상해 발생관점에서 승객 가슴 최대 전방 이동량이 유리한 조건으로 판단되어 선정하였다. 성능 기준 대비 특정부분에서 다소 미흡한 구간이 있지만 현재 사양 대비 상해 개선 효과를 확인할 수 있었고, 해석에서와 동일한 경향을 확인하기 위해 슬레드 시험을 진행하였다. 슬레드 시험 대상 차종은 최적화 해석 및 단품성능 확인해석에서 포함되지 않은 차종을 선정하여 진행하였다.

시스템 검증을 위한 슬레드 시험 결과, 대상 차량의 현재 사양 대비 개선 사양의 가슴상해(변위)가 개선됨을 확인하였다. 제품의 단품 시험 대비 시스템상에서의 벨트 하중 또한 승객거동 해석에서 예측한 수준으로 나타나는 것을 확인하였고, 앞 절에서 분석한 로드리미터 최적 성능 기준 대비 2차 제작품의 하중특성이 50ms 이후 벨트하중이 다소 초과되는 현상을 확인할 수 있었으며, 성능조건 만족시 이 구간에서의 가슴상해(변위) 추가 개선 가능성을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 56kph 정면 NCAP 운전석 충돌조건에서 승객상해에 직접적으로 영향을 주는 안전벨트의 로드리미터에 대한 하중 특성 최적화 해석을 실시 하였다.

차량의 충돌특성을 대변하는 가혹도별 4차종에 대

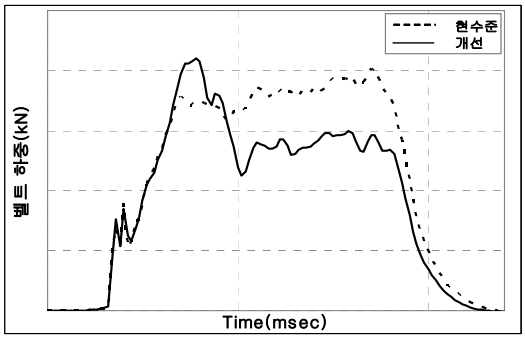

Fig. 11 Sled Test Result : Shoulder Belt Force

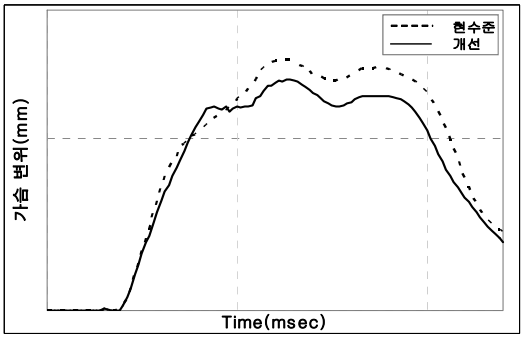

Fig. 12 Sled Test Result : Chest Deflection

한 1,2차 최적화 해석을 통하여 로드리미터의 충돌하중 특성에 대한 요구기준을 도출하고, 기준에 부합하는 단품 제작 및 검증, 슬레드 시험을 통하여 차량 장착조건에서의 성능을 확인함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로드리미터 하중특성 변화에 따른 상해는 가슴변위, 목상해(Nij), 머리상해(HIC15), 무릎상해(압축하중) 순으로 영향도가 크다.
2) 최적 로드리미터 단품 하중의 일반적인 경향은 다음과 같다. (2단계 하중, 성능기준 도출)
① 에어백 영향이전 : 하중높음(특정하중 영역)
② 에어백 영향 : 일정한 낮은 하중(특정하중 영역)
3) 승객구속장치 단품특성 최적화 프로세스를 구축하였다.
① 최적화 알고리즘 ASA : 승객거동해석 이용시 효율성 확인 (해석시간 : 10분 수준, Time Step 10^{-2}~10^{-3} ms)
② 구속장치 단품 특성 개발시 동일 방법론 적용 및 활용 가능

참고문헌

(1) J-Y. Foret-Bruno, X. Trosseille, J-Y. Le Coz, F. Bendjellal, C. Steyer, T. Phalempin, D. Villeforce-ix, P. Dandres, C. Got, “Thoracic Injury Risk in Frontal Car Crashes with Occupant Restrained with Belt Load Limiter”, SAE 983166, 1998
(2) Huizhen Lu, Margaret Andreen, Daniel Faust, Lisa Furton, Sven Holcombe, Carla Kohoyda-Inglis, Brian Putala, Jack Yee, Stewart Wang,

"Safety Belt and Occupant Factors Influencing Thoracic & Upper Abdominal Injuries in Frontal Crashes", SAE 2011-01-1129, 2011

(3) B.P. Seo, S.J. Han, W.C. Kim, S.Y. Kim "Performance Analysis Methodology Based on Crash Pulse Severity and Vehicle Occupant Packaging for Full Frontal Crash Event", ESV Paper 09-0173

(4) MADYMO Theory Manual Ver.7.0, TNO, Dec. 2008.

(5) iSIGHT 4.0 Manual, Dassault Systemes.