보행자 보호를 위한 크럼플 존 설계 및 상부 다리모형 충격해석

전 영 은¹⁾ · 문 형 일¹⁾ · 김 용 수²⁾ · 김 현 영^{*1)}

강원대학교 기계의공학과의¹⁾ · 에스엘 제품개발팀²⁾

Crumple Zone Design and Upper Legform Impactor Analysis for Pedestrian Protection

Young-eun Jeon¹⁾ · Hyung-il Moon¹⁾ · Yong Soo Kim²⁾ · Heon Young Kim^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

²⁾Product Development Team, SL Corporation, 1208-6 Sinsang-ri, Jillyang-eup, Gyeongsan-si,
Gyeongbuk 712-838, Korea

(Received 24 August 2011 / Revised 7 November 2011 / Accepted 23 November 2011)

Abstract : Recently, pedestrian protection related research topics have been actively studied by automotive designers and engineers due to the enhanced pedestrian protecting regulations. It is required to design an energy absorbing structure, such as crumple zone that can sufficiently absorb the impact energy to reduce the leg injury when accident happens. The structure is designed by reducing the height of front end module, considering the mounting location, and investigating impact characteristics. In this paper, the concept of the crumple zone was introduced and the role of the crumple zone was investigated by analyzing the performance of upper legform impact to a bonnet leading edge test, and the design process was suggested.

Key words : Pedestrian protection(보행자 보호), Upper legform(상부 다리모형), Bonnet leading edge test(후드 선단부 시험), Crumple zone(크럼플 존), Impact analysis(충격 해석), Front end module(프론트 엔드 모듈)

1. 서 론

자동차의 안전 법규가 전 세계적으로 강화됨에 따라 충돌안전성이 개선되어 교통사고로 인한 탑승자의 피해는 전반적으로 줄어들고 있다. 하지만 보행자 상해는 좀처럼 개선되지 못하고 있어 보행자 보호에 대한 관심이 강화되고 있다. 이러한 움직임은 차량 성능 평가 시험에 보행자 보호에 관한 시험을 추가시켰고 신차 안전도 평가의 경우 평가 결과가 공개되므로 차량 설계 시 필수적으로 고려되어야만 하는 요소기술로 자리 잡게 되었다.¹⁻⁸⁾

일반적으로 차대 보행자 간 충돌 사고는 차량 전

방에서 주로 발생되며, 보행자의 머리와 다리가 주요 상해 부위에 해당된다. 보행자의 충격을 효과적으로 흡수할 수 있도록 하는 기술 중 차량의 프론트 엔드 모듈(front end module, FEM)의 설계를 개선하는 기술이 최근 연구 개발되고 있다.

본 논문은 FEM이 적용되는 보행자 보호용 크럼플 존의 설계와 충돌 성능 평가에 관하여 기술하였다. 1차원 스프링 요소를 사용하여 크럼플 존의 기초 설계를 수행하였고 EURO-NCAP(유럽신차안전도평가)의 보행자 보호 성능 평가 시험들 중 하나인 상부 다리모형 후드 선단부 시험(upper legform to bonnet leading edge test)을 해석적으로 구현하여 크럼플 존의 상세 설계 및 성능을 예측하여 보았다.

*Corresponding author, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

2. 상부 다리모형 후드 선단부 시험

유럽 자동차 충돌·충격 분과 위원회(UN/ECE/W29/GRSP)에서 제시한 세계기술기준(GTR)은 국제기준조화활동(IHRA)의 보행자 연구결과 및 EEC Directive(2003/102/EC)를 기초로 하여 제정한 것으로 한국의 경우 GTR 기준을 바탕으로 자동차 안전 기준을 제정하여 승용(신차) 자동차를 기준으로 2013년부터 시행할 예정이다.

EURO-NCAP 보행자 충돌 안전 범규는 5가지로 분류되고 시험방법은 Fig. 1과 같이 상부 및 하부 다리모형 범퍼 충격 시험, 상부 다리모형 후드 선단부 충격 시험, 성인 및 어린이 머리 모형 충격 시험이 있다. 본 논문에서 사용한 상부 다리모형 후드 선단부 충격시험은 보행자의 골반부의 상해치를 평가하는 시험으로써 Fig. 2와 같은 상부 다리모형(upper legform impactor)을 차량 후드 선단부에 충격하여, 측정된 충격(합성) 하중과 굽힘 모멘트로부터 상해치를 유추하는 시험이다.⁹⁻¹⁴⁾

Fig. 1 EURO-NCAP test method for pedestrian protection

Fig. 2 Shape of the commercial upper legform and measurement points (made by ESI corporation)

3. 1차원 스프링 요소를 사용한 크럼플 존의 초기 설계

크럼플 존의 설계는 1차원 스프링 요소를 사용한 초기 설계, EURO-NCAP 시험 조건을 모사한 충격 해석 결과를 이용한 상세설계 순으로 진행하였다.

Fig. 3 The 1D spring element model to select concept of the crumple zone

1차원 스프링 요소를 사용한 모델은 EURO-NCAP의 충격하중 조건을 만족할 수 있는 크럼플 존의 기본적인 형상 및 재료를 선택하기 위해 사용하였다. Fig. 3과 같이 평행한 두 평면(크기) 사이에 1차원 스프링 요소를 연결한 구조이며 해석 시 스프링의 배치에 관계없이 안정적인 결과를 가져야 하므로 가로 및 세로 방향에 대하여 각각 1~19개, 1~4개의 스프링을 일정한 간격으로 배치한 모델들에 대하여 충격하중의 변화를 확인하였다. 해석 조건은 하단부 평면을 고정하고 상단부 평면에 수직한 방향으로 상부다리 모형이 충격하도록 하였다. 다리 모형의 충격 속도는 후드와 FEM 상부가 접촉하는 순간 다리 모형의 속도를 적용하였고, PAM-CRASH를 사용하여 해석하였다.¹⁵⁾ 해석 결과 Fig. 3과 같이 가로 방향은 17개, 세로 방향은 3개의 스프링을 사용할 때 안정적인 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다(Fig. 4). 검증된 모델을 사용하여 스프링 강성에 따른 다리 모형의 하중 및 상단면의 처짐량(deflection)을 확인하였다. 충격 하중을 만족하기 위해서는 크럼플 존이 0.5kN/mm 이하의 강성을 가지도록 설계되어야 함을 확인할 수 있었다. 해석 결과와 제품의 생산성을 고려하여 플라스틱 재료를 사용한 립 구조물을 기본 설계 방향으로 결정하였다.

(a) Horizontal direction

(b) Vertical direction

Fig. 4 Change of impact force as configuration of the spring model

4. 상부 다리모형 충격해석

4.1 충격시험 조건

본 논문에서 적용한 상부 다리모형 후드 선단부 시험 조건은 다음과 같다. 후드 선단부는 지면과 40도를 이루면서 차량 종단 센터 라인과 평행한 막대가 후드와 이루는 접선에 대하여 충격 시험이 실시된다. 자동차의 종류와 형상에 따라 선단부의 위치가 달라지므로 상해치를 유발할 만하거나 임의의 5지점 이상을 지정하여 수행되며 충격 지점 간 거리

Fig. 5 Target points in bonnet leading edge line

Fig. 6 The finite element model for impact analysis

는 150mm 이상 떨어진 지점들에 대하여 시험이 실시된다. 각각의 측정 지점에서 임팩터가 받는 충격하중이 5kN 이하, 프론트 멤버의 3지점(UPR, CTR, LWR)에서 측정되는 굽힘 모멘트가 300Nm 이하가 되어야 한다(Fig. 2).

본 논문에서는 Fig. 5와 같이 5개의 타격지점에 대한 시험을 수행하였다. 이 지점들에서의 시험 조건은 EURO-NCAP에 명시된 산출 공식에 따라 각 지점 별 상부 다리모형 임팩터의 속도, 각도 및 에너지를 결정하였다. 시험 결과는 CFC180으로 필터링하여 충격하중과 굽힘 모멘트를 산출하였다.^{11,12)}

4.2 충격 해석 및 신뢰성 검증

충격해석의 신뢰성을 검증하기 위해 크럼플 존을 사용하지 않는 기존의 양산 차량의 시험 결과와 충격해석 결과를 비교하였다. 해석 모델은 Fig. 6과 같이 구성하였다. 임팩터의 충격에 따라 변형이 많이 발생하는 가니쉬(garnish), 그릴(grill), 후드 부의 앞부분은 5~7mm로 세밀하게 모델링하였고 나머지 부분은 10~15mm의 크기로 대략적으로 모델링하였다. 모든 부품의 체결은 강체(rigid body) 조건을 사

Fig. 7 Impact force comparison test with analysis (existing model)

Fig. 8 Bending moment comparison test with analysis (existing model, CTR)

용하여 표현하였다. 플라스틱 재질로 구성된 가니쉬, 그릴, 범퍼, 에어 덕트(air duct)의 경우 탄소성 영역의 데이터를 적용하였고, 특히 후드와 캐리어의 경우 변형률 속도를 고려한 데이터를 적용하였다.

충격 해석을 통해 얻어진 결과는 세 차례의 시험값과 비교하여 신뢰성을 평가하였다. 충격 하중의 경우 Fig. 7과 같이 5개 지점 모두 시험 결과의 평균값과 해석 결과 값이 유사함을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 8과 같이 굽힘 모멘트의 경우 측정 지점 및 위치에 따라 시험 평균값 대비 최대 25%의 오차를

확인할 수 있었다. 그러나 해석 결과의 신뢰도가 떨어지는 지점들의 경우 시험 결과 값의 산포가 크게 나타났으며, 해석 결과가 시험 결과의 오차 범위에 속해 있기 때문에 해석을 통해 예측된 굽힘 모멘트는 신뢰할 만한 수준으로 판단할 수 있었다.

5. 크럼플 존 설계

본 연구의 크럼플 존은 프론트 엔드 모듈의 상단부 프레임과 후드 사이에 장착하게 된다. 따라서 내열성 및 내유성이 우수한 플라스틱을 사용해야 한다. 또한 가격경쟁력 확보를 위해서 PP 소재를 선택하여 설계하였다.

5.1 Case study를 통한 설계 변수 연구

크럼플 존의 기본적인 구조 설계를 위해 Table 1과 같이 림의 간격 및 각도에 따른 9개의 case를 선정한 후 A 지점에 대한 충격 해석을 수행하였다. 이때, 생산성을 고려하여 림의 두께는 2mm로 고정하였고 림 패턴에 따른 영향성만 확인하였다. 해석을 위해 사용한 체결 지점은 장착되는 프레임의 형상과 조립성을 고려한 6개 지점을 고정하여 사용하였다. 크럼플 존에 적용된 시험 데이터는 450mm/min의 속도에서 수행한 인장 시험 결과를 사용하였다.

본 논문에서 적용된 실차 시험 조건을 사용한 해석 결과, case 2와 같이 설계된 크럼플 존이 충격 하중 및 굽힘 모멘트를 가장 효과적으로 감소하는 것

Table 1 Case study about interval and angle of rib

Case	Interval of rib	Angle of rib
1	10mm	30°
2	20mm	30°
3	30mm	30°
4	10mm	60°
5	20mm	60°
6	30mm	60°
7	10mm	90°
8	20mm	90°
9	30mm	90°

을 확인 할 수 있었다. 특히 굽힘 모멘트의 경우 최대 67%의 감소효과를 기대할 수 있을 것으로 예측되었다. 하지만 충격 하중의 경우 크럼플 존을 사용하지 않는 모델의 결과 값에 비해 크게 발생하는 것이 확인 되었다. 이는 크럼플 존의 공간 및 체결 위치가 적절하지 못함에 의해 발생되었다고 판단되었다.

5.2 크럼플 존의 상세 설계

case study 결과를 바탕으로 크럼플 존의 크기를 Fig. 9와 같이 확대하고 체결 위치를 변경하였다. 변

Fig. 9 Modified design of initial crumple zone

Fig. 10 Comparison test with analysis including initial crumple zone

경된 크럼플 존 모델(modified crumple zone model)의 충격시험 및 해석 결과는 Fig. 10, 11과 같다. 충격 하중 값의 경우, 해석 결과와 원형(prototype)을 사용한 충격 시험 결과의 평균 값과 비교하였을 때 약 90% 이상 유사한 결과를 예측할 수 있었다. 굽힘 모멘트의 경우 시험 결과의 산포를 고려하여 오차 범위 내에 해석 결과가 포함되는지 확인하였다. 그 결과, 기존 양산 차종의 오차 범위(35.0~194.3Nm)와 유사하였다.

Fig. 12, 13은 크럼플 존의 유무에 따른 해석 결과

Fig. 11 Comparison test with analysis of the bending moments at the CTR (CTR position has the worst results among other positions)

Fig. 12 Comparison of impact force according to crumple zone

Fig. 13 Comparison of bending moment at the CTR point according to crumple zone

Fig. 15 Predicted impact force of the development FEM with the final modified crumple zone

Fig. 14 Shape of the final modified crumple zone

Fig. 16 Predicted bending moment(CTR) of the development FEM with the final modified crumple zone

들을 나타낸 그래프이다. 5개의 충격 지점 중 3개 지점인 B, C, D에서 크럼플 존을 사용함으로써 충격 하중 및 굽힘 모멘트가 감소하는 결과가 예측되었다. 하지만 양 끝단 지점인 A, E는 크럼플 존의 영향으로 부정적인 하중의 경로가 발생하여 충격하중 및 굽힘 모멘트가 오히려 증가할 것으로 예측되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 Fig. 14와 같이 A, E 지점들의 구조물을 제거한 크럼플 존을 최종적으로 설계하였다. 제안된 크럼플 존을 사용할 경우 Fig. 15, 16과 같이 충격 하중은 B, C, D 지점에서, 굽힘 모멘

트는 A, B, C, D에서 평균 16% 이상 감소할 것으로 예상된다. 그러나 A, E 지점은 후드(hood)의 형상 문제 및 하중 전달 경로 및 변형 형상을 해석적으로 확인하였을 경우 에어 덕트(air duct)가 크럼플 존에 체결이 됨에 따라 하중 및 굽힘 모멘트가 크게 나타나는 것으로 예측된다. 따라서 A, E 지점의 결과를 향상시키기 위한 크럼플 존의 재설계가 요구된다.

6. 결론

본 연구에서는 EURO-NCAP의 상부 다리모형 후

드 선단부 시험 조건을 바탕으로 프론트 엔드 모듈의 충격해석을 수행하였다. 또한 이를 바탕으로 크럼플 존의 설계안을 제시하였으며, 기존 모델에 비해 충격하중은 20% 이상, 굽힘 모멘트는 36% 이상의 감소효과가 기대된다.

- 1) 1차원 스프링 모델을 사용하여 크럼플 존의 초기 설계를 수행하였다. 이를 통해 크럼플 존의 강성 범위를 결정하였다. (0.05~0.5kN)
- 2) 충격 시험 결과와 비교하여 해석결과는 높은 수준의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 3) Case study를 통해 크럼플 존의 효과적인 립 형상을 제시하였다.
- 4) 체결위치의 변화, 주변 부품간의 간섭 등을 모두 포함한 크럼플 존 설계 형상을 제시하였고 성능을 예측하여 보았다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천 기술개발 사업 중 ‘보행자 보호용 통합 경량 Active 프론트 엔드 모듈 개발’에 대한 연구 성과임을 알립니다.

References

- 1) H.-I. Moon, D. S. Kim, Y. S. Kim and H. Y. Kim, Impact analysis of Upper Legform Impactor and Crumple Zone Design for Reduced Injury, Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.249-254, 2010.
- 2) H.-I. Moon, Y.-E. Jeon, H. Y. Kim, Y. S. Kim and H. M. Gil, “Crumple Zone Design for Pedestrian Protection,” Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.2214-2219, 2010.
- 3) Y. Kim, H. M. Gil, S. Son and Y. Seo, “Study of Front End Module(FEM) for Pedestrian UPPER LEG Protecting,” Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.1564-1571, 2011.
- 4) J. H. Jung, S. C. Kim, H. C. Kim and J. P. Won, “A Study on Performance Analysis of Down-sized Cooling Module for Pedestrian Protect,” Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.1608-1613, 2011.
- 5) H. Kim, J. G. Kim and Y. Park, “European Automotive Law and Collision Analysis of Front End Module for Pedestrian Safety,” Autumn Conference Proceedings of KSME, pp.13-18, 2003.
- 6) D. H. Shin, K. H. Kim and K. Son, “Analysis of Car-Pedestrian Collisions Using Scaled Korean Dummy Models,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.24, No.5, pp.110-117, 2007.
- 7) H.-W. Shin, “Finite Element Analysis on the Energy Absorption Characteristics of Hybrid Structure,” Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, pp.101-107, 2004.
- 8) T.-L. Teng, V.-L. Ngo and T.-H. Nguyen, “Design of Pedestrian Friendly Vehicle Bumper,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24, No.10, pp.2067-2073, 2010.
- 9) T.-L. Teng and T.-H. Nguyen, “Assessment of the Pedestrian Friendliness of a Vehicle Assessment of the Pedestrian Friendliness of a Vehicle,” Int. J. Automotive Technology, No.11, Vol.1, p.67-73, 2010.
- 10) T.-L. Teng and T.-H. Nguyen, “Assessment of the Pedestrian Friendliness of a Vehicle Assessment of a Vehicle Using Subsystem Impact Test,” Int. J. Automotive Technology, Vol.11, No.1, pp.67-73, 2010.
- 11) EEVC Working Group 17 Report: Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars, 1998 updated 2002.
- 12) European New Car Assessment Program, Pedestrian Testing Protocol, Ver.4.2, 2008.
- 13) S. Park, K. Park, H. K. Beom and O. S. Kwon, “Numerical Analysis for Headform-to-Bonnet Impact of Europe and Japan Pedestrian Protection Regulation and EuroNCAP,” Autumn Conference Proceedings of KSME, pp.1660-1665, 2005.
- 14) T.-L. Teng and T.-H. Nguyen, “Development and Validation of FE Models of Impactor for Pedestrian Testing,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.22, pp.1660-1667, 2008.
- 15) PAM-CRASH Theory Manual, 2008.