굽힘 붕괴 성능 향상을 위한 센터 필라 설계

강 성 종^{*1)} · 박 명 재²⁾

대구가톨릭대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 대구가톨릭대학교 대학원 자동차공학과²⁾

Center Pillar Design for High Bending Collapse Performance

Sungjong Kang^{*1)} · Myeongjae Park²⁾

¹⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Daegu 712-702, Korea

²⁾Graduate school of Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Daegu 712-702, Korea

(Received 25 September 2012 / Revised 7 November 2012 / Accepted 15 January 2013)

Abstract : High bending collapse performance (maximum resistance force and mean resistance force) of body center pillar is an important design target for vehicle safety against side impact. In this study, effect of the upper section shape and the thickness of outer reinforcement on bending collapse performance was investigated for the center pillar of a large passenger car. First, through bending collapse analyses using simple models with uniform section, an optimized center pillar upper section was chosen. Next, bending collapse performance for various models of the actual center pillar with changing the thickness of outer reinforcement were analyzed. The finally designed model showed distinctive enhancement in bending collapse performance nearly without weight increase.

Key words : Center pillar(센터 필라), Bending collapse performance(굽힘 붕괴 성능), Thick outer reinforcement(후판 아우터 보강재), Maximum resistance force(최대 저항력), Mean resistance force(평균 저항력), TWB(재단 용접 강판)

1. 서 론

강화되고 있는 환경규제와 충돌안전성 요구에 대응하기 위해서는 자동차의 경량화 설계기술 확보가 중요하다.

충돌 시 차체에는 굽힘 모멘트에 의한 국부 좌굴이 발생하고 급격한 단면 변화(높이 축소)와 함께 소성 힌지가 발생되어 굽힘 붕괴에 의해 쉽게 충돌 저항력을 상실한다.¹⁾ 경량화 목표를 달성하면서 충돌 안전성을 확보하고자 고장력 강판의 적용과 알루미늄 차체 프레임에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으며,²⁾ 또한 단면의 찌그러짐을 막아 저항력을 증가시킬 목적으로 부재 내부를 구조 폼(structural foam)으로 채우는 설계 기술이 연구되었다.³⁻⁵⁾ 그리

나 고안전 경량 차체 개발을 위해서는 중요 차체 골격 부재의 최적화 형상에 대해 충분한 연구가 계속 요구된다.

센터 필라(center pillar)는 승용차 측면 중앙에 상하 방향으로 위치한 부재로 측면 충돌 시 충격력이 집중적으로 가해지므로 측면 충돌 안전성 확보를 위해서 높은 충돌 강도와 에너지 흡수 능력이 요구된다.⁶⁾

본 연구에서는 대형 승용차의 센터 필라를 대상으로 굽힘 붕괴 성능(bending collapse performance) 향상을 위한 형상 설계 방안을 연구하였다. 먼저 붕괴 강도 확보에 가장 중요한 센터 필라 상부의 후판 아우터 보강재(이하 TOR: Thick Outer Reinforcement)의 형상 변화 영향을 검토하기 위해 균일 단면의 직선 단순 모델에 대해 램(ram)에 의한 정적 굽힘

*Corresponding author, E-mail: sjkang@cu.ac.kr

No	Part name	Thickness (mm,t)
1	Inner	1.0
2	Reinf 1	1.4
3	Reinf 2	2.0
4	Reinf 3	2.0
5	Reinf 4	2.0
6	Outer_Reinf_UPR/LWR	1.2/0.8
7	TOR	2.0
8	OTR_Reinf_MID	2.0
9	Outer	0.7

Fig. 1 Parts of center pillar

Fig. 2 Center pillar assembly without outer panel

붕괴 해석을 수행하였다. 다음으로 실차 센터 필라를 대상으로 선행 해석으로부터 도출된 단면을 적용하고 보강재 추가와 두께 최적화에 의한 성능 향상 방안을 연구하였다. 붕괴 성능은 최대 저항력(maximum resistance force) P_{max} 와 각각 램 변위 60mm, 100mm까지의 변형 에너지 정도를 나타내는 평균 저항력(mean resistance force) P_{mean_60} , P_{mean_100} 으로 검토하였다. 해석에는 비선형 프로그램인 LS/DYNA를 사용하였다.⁷⁾

Fig. 1은 현 사양 센터 필라 구성 부품을 나타내고, Fig. 2는 아우터 패널을 제외한 어셈블리를 나타낸다. 소재는 등방 n 층 경화 탄소성체로 정의되었다.

2. 균일 단면 단순 부재 해석

굽힘 붕괴 시 최대 저항력 확보에 중요한 센터 필라 상부 형상의 영향을 검토하기 위해 연구 대상 차량의 센터 필라 상부 단면을 일정 단면으로 하는 단순 부재에 대해 3점 굽힘 붕괴 해석을 수행하였다. 현 사양 단면을 적용한 기본 모델(모델 TBase)과 TOR 형상을 변화시킨 모델들에 대해 붕괴 성능을 비교 검토하였다.

점용접은 패널 간 용접 지점을 한 개의 강체 빔으로 연결하여 모델링하였으며 해석모델과 경계 및 하중조건은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 Analysis model and conditions: simple member

2.1 기본 모델 및 단면 형상 변경

기본 모델 해석 후 TOR과 내부의 아우터 보강재 사이 폐단면을 최대한 확대하고 중간에 용접점을 추가한 모델(모델 TOR 2, Fig. 4)에 대해 해석하였다. 그 결과 기본 모델 대비 P_{max} 가 크게 증가(20.0%)하

Fig. 4 Section of model TOR 2: simple member

며, Pmean 역시 크게 증가(Pmean_60 32.0%, Pmean_100 39.9%)하는 것으로 나타났다(Fig. 6, Fig. 7).

2.2 상부 폐단면의 영향

모델 TOR 2 단면에 대해 상부 폐단면이 붕괴 성능에 미치는 영향을 분석하고자 Fig. 5의 모델 TOR

Fig. 5 Change of upper closed section of simple member

Fig. 6 Analysis results: change of upper closed section of simple member

Fig. 7 Load carrying capability: change of upper closed section of simple member

2A, TOR 2B, TOR 2C와 같이 상부 폐단면 크기를 변화시켜 해석을 수행하였다. 모델링 상 편의를 위해 TOR의 코너 반경은 모델에 고려하지 않았다.

해석 결과(Fig. 6, Fig. 7) 상부 폐단면 단면적 증가에 따라 Pmax, Pmean이 증가하나 그 영향에는 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 충분한 붕괴 성능을 나타내고 내부 아우터 보강재의 형상 변경이 불필요한 모델 TOR 2가 가장 적합한 것으로 판단되었다.

2.3 하부 폐단면의 영향

하부 폐단면이 붕괴 성능에 미치는 영향을 분석하고자 모델 TOR 2 단면에 대해 Fig. 8의 모델 TOR 2D, TOR 2E, TOR 2F와 같이 하부 형상을 변화시키면서 해석을 수행하였다.

해석 결과(Fig. 9, Fig. 10) TOR 하부를 없앤 모델 TOR 2D의 경우 붕괴 성능이 심각하게 저하되었으며, TOR 하부를 연장시킨 모델 TOR 2E와 모델 TOR

Fig. 8 Sections of models: change of lower closed section of simple member

Fig. 9 Analysis results: change of lower closed section of simple member

Fig. 10 Load carrying capacity: change of lower closed section of simple member

2E의 하부 폐단면을 크기를 확대한 모델 TOR 2F의 경우 붕괴 성능이 비슷하게 향상되었다. 중량 증가 등을 고려하여 모델 TOR 2E를 TOR의 최종 단면 형상으로 결정하였으며, 모델 TOR 2E의 경우 기본 모델 대비하여 P_{max} 가 31.4%, P_{mean_60} 이 45.6%, P_{mean_100} 이 56.6% 각각 증가하였다.

3. 실차 센터 필라 보강재 형상 변경 및 두께 최적화

실차 센터 필라를 대상으로 굽힘 붕괴 해석을 통해 최적화 설계안을 연구하였다. 현 사양인 기본 모델(모델 Base)에 대해 해석을 수행한 후 2장 해석결과에서 우수하게 판단된 TOR 형상을 상부에 적용하고 아우터 보강재 추가와 두께를 변화시킨 모델들에 대해 해석을 수행하여 기본 모델 대비하여 중량과 굽힘 붕괴 성능 변화를 검토하였다. Fig. 11에 해석 모델과 해석 조건을 나타냈으며 해석 조건은 부품업체 시험 조건을 적용하여 상단부는 완전 고정하고 하부는 단순지지 하였다.

3.1 보강재 단면 형상 변경 및 보강재 추가

우선, 단순 부재에 대한 선행 해석에서 최적 단면으로 판단된 TOR 형상을 필라 상부에 최대한 적용하고 중량감소를 위해 TOR 두께를 2.0t에서 1.6t로 변경한 모델(모델 Model 1, Fig. 12)에 대해 해석을 수행하였다.

Fig. 11 Analysis model and conditions

Fig. 12 Model 1

해석 결과 기본 모델 대비 중량이 0.07kg 감소된 반면 P_{max} (3.8%)와 P_{mean} (P_{mean_60} 1.6%, P_{mean_100} 1.8%)이 모두 소폭 증가에 그치는 것으로 나타났다(Fig. 15, Fig. 16). 원인은 선행 해석 모델과 달리 실차 센터 필라에서는 TOR이 중간정도까지만 위치하고 또한, TOR 하부 형상은 아우터 폐단과 아우터 보강재 사이 공간이 협소하여 단면 변경이 거의 불가능하였기 때문이다(Fig. 13).

하중 전달 성능을 개선하고자 모델 Model 1에 현

Fig. 13 Middle section of center pillar: TOR lower

Fig. 14 Model 2

Fig. 15 Analysis results: Model 1, Model 2

Fig. 16 Load carrying capacity: Model 1, Model 2

재 보강재가 적용되지 않은 부위(Fig. 2, ○ 표시부)에 1.6t의 보강재(OTR_Reinf_ADDED)를 추가하여(모델 Model 2, Fig. 14)해석을 수행하였다. 동일 두께(1.6t)인 아우터 중간 보강재(OTR_Reinf_MID)와 아우터 추가 보강재(OTR_Reinf_ADDED)는 한개 패널로 성형 제작됨을 가정하여 일체로 모델링하였다.

해석 결과(Fig. 15, Fig. 16) 기본 모델 대비 중량이 0.24kg 증가하나 Pmax(36.9%)와 Pmean (Pmean_60 40.0%, Pmean_100 71.3%)이 모두 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 보강재 두께 최적화

모델 Model 2를 대상으로 보강재들의 두께를 변화시켜 붕괴 성능 향상 정도와 중량 변화를 검토하였다. 해석 모델들은 Fig. 17에 나타냈으며 해석 결과는 Fig. 19, Fig. 20에 나타났다.

먼저, Pmax를 유지하면서 중앙부 보강재 두께를 감소한 모델을 구성하였다. 모델 Model 2의 TOR을 분리(상부: TOR_U 2.4t, 하부: TOR_L 1.6t)하여 두께가 1.6t로 동일한 TOR_L, OTR_Reinf_MID 그리고 OTR_Reinf_ADDED를 일체로 모델링하여(모델 Model 3) 해석을 수행하였다. TOR_U의 두께 증가로 필라 상부의 좌굴 저항력이 상승하여 기본 모델 대비 Pmax가 49.5% 그리고 Pmean_60과 Pmean_100이 각각 57.8%, 83.1% 크게 증가하였다. 반면 모델 Model 2보다 중량이 0.13kg 추가 증가 하였다.

다음으로 모델 Model 3에 대해 중량감소를 목적으로 일체화된 TOR_L과 아우터 보강재 두께를 1.6t에서 1.4t로 감소시킨 모델(모델 Model 4)에 대해 해석을 수행하였다. 기본 모델 대비하여 중량은 0.17kg

Model 3

Model 4

Model 5

Model 6

Fig. 17 Models: change of reinforcement thickness

Fig. 18 Large local deformation around hole in inner lower

Fig. 19 Analysis results: change of reinforcement thickness

Fig. 20 Load carrying capacity: change of reinforcement thickness

(모델 Base 중량 7.81kg의 2.18%에 해당) 증가에 그친 반면 Pmax가 43.4% 증가하였으며, Pmean_60과 Pmean_100도 각각 52.7%, 75.8% 증가하는 것으로 나타났다.

추가로 중량 증가를 없애고자 중간 일체형 보강재 두께를 1.2t로 감소시킨 모델의 경우 Pmax와 Pmean_60이 미소하게 증가되나 후반부 급격한 저항력 저하로 모델 Model 4 대비해서 후반부 붕괴 성능

Fig. 21 Pillar deformations: ram displacement 100mm

이 현저하게 저하되었다. 이는 아우터 추가 보강재의 두께 감소로 인너 로워 구멍 부위에서 국부적 좌굴이 크게 발생하기 때문으로 분석되었다(Fig. 18).

마지막으로 모델 Model 4에서 TOR_U, TOR_L의 보강재 두께를 각각 2.2t, 1.2t로 감소시킨 두 개 모델(모델 Model 5, Model 6)에 대해 해석을 수행하였다. 모델 Model 5는 TOR의 두께 감소에 따라 두께가 상이한 TOR_L과 OTR_Reinf_MID를 분리시킨 모델이며 모델 Model 6은 TWB 적용을 전제로 두께가 다른 두 보강재를 일체로 모델링 한 모델이다. 모델 Model 4와 비교하여 중량은 0.15kg 감소하여 기본 모델과 동등하게 나타났으며, 모델 Model 5의 경우 붕괴 성능이 현격하게 떨어진 반면 모델 Model 6은 Pmax, Pmean의 감소가 작게 나타났다. 따라서 센터 필라의 굽힘 붕괴 성능 확보를 위해서는 우선 TOR_U에 의해 상부 폐단면과 하부 길이를 충분히 확보하고 TOR_U 두께를 크게 하여 Pmax를 증대하며, 다음으로 중앙부에 전체 보강과 보강재 두께 균일화 혹은 TWB 제작에 의한 일체화를 통해 Pmean을 크게 증대하는 것이 중요한 설계요소임을 알 수 있다.

Fig. 21은 램 이동변위 100mm에서의 기본 모델(현 사양)과 최적화 모델 Model 4, Model 6의 변형 형상을 보이고 있다. 초기 좌굴이 심하게 나타나는(◎ 표시부) 기본 모델과 다르게 모델 Model 6의 경우 초기 좌굴이 지연되면서 구조 전체가 거의 동시에 붕괴되고(○ 표시부) 충돌 에너지 흡수량이 증대됨을 알 수 있다.

4. 결론

단순 모델에 대해 TOR 형상 변화가 굽힘 붕괴 성능에 미치는 영향을 검토한 결과 TOR 상부 폐단면

크기 증가에 따라 굽힘 붕괴 성능이 증가하나 그 영향에는 한계가 있다. 또한, TOR를 하부까지 최대한 확장하는 것이 붕괴 성능 확보에 중요하다.

실차 센터 필라에 대해 굽힘 붕괴 성능 향상을 위한 최적화 설계안을 검토한 결과 아우터 보강재가 없는 부위에 보강재를 추가하고 TOR를 이원화하여 TOR 두께를 충분히 확보하고 아우터 보강재를 일체화함에 의해 최대 저항력이 40%, 평균 저항력이 50%~75% 크게 증가하는 설계 변경안을 도출하였으며 필라 하부의 초기 좌굴이 억제되어 붕괴가 거의 동시에 발생함을 알 수 있었다.

따라서 센터 필라의 굽힘 붕괴 성능 확보를 위해서는 TOR에 최대한의 상부 폐단면과 충분한 두께를 적용하여 최대 저항력을 증대시키고, 전체 영역에 균일한 두께의 보강재를 적용하거나 혹은 TWB 적용을 통해 보강재를 일체화하는 것이 중요하다.

후 기

이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

References

- 1) S. J. Kang, "Roof Crush Analysis Technique Using Simple Model with Plastic Hinge Concepts," Transactions of KSAE, Vol.4, No.6, pp.216-222, 1996.
- 2) H. Y. Kim, J. K. Kim, S. J. Heo and H. Kang, "Design of the Impact Energy Absorbing Member and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.216-233, 2002.
- 3) K. Ishida, M. Fukahori, K. Hanakawa, H. Tanaka and K. Matsuda, "Development of a Technique to Strengthen Body Frame with Structural Foam," SAE 2001-01-0313, 2001.
- 4) B. J. Kim and S. J. Heo, "Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.3, pp.141-147, 2003.
- 5) I. S. Lee and S. J. Kang, "Foam Filling Effect on Bending Collapse Characteristics for Member Section Type," Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.41-49, 2007.
- 6) H. Huh, J. H. Lim, J. H. Song, K. S. Lee, Y. W. Lee and S. S. Han, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-body with 60Trib Steel for Side Members," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.3, pp.149-156, 2003.
- 7) LS-DYNA User's manual, Nonlinear Dynamic Analysis of Structures, Ver.971, LSTC, 2006.