단면 형상 및 국부 보강에 따른 직선 부재의 충돌 성능

이 헌 봉¹⁾ · 강 성 종^{*2)}

대구가톨릭대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부²⁾

Crash Performance of a Straight Member for Various Section Shapes and Local Reinforcement

Hunbong Lee¹⁾ · Sungjong Kang^{*2)}

¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

(Received 28 September 2012 / Revised 11 January 2013 / Accepted 5 February 2013)

Abstract : Crash performance of the straight member was studied by FE analysis. One end of model was fixed and the other end was impacted by 1,000kg rigid mass with velocity of 16.0m/sec. The maximum and mean load were discussed to compare crash performance. The members with various section shapes were analyzed and the flange location was changed. Also, spot weld points were added in the initial buckling region to investigate its effect. Final rectangular section model which has flanges at the center and reinforcement in initial buckling region showed high enhancement in crash performance.

Key words : Crash performance(충돌 성능), Front side member(프론트 사이드 멤버), Straight member(직선 부재), Section shape(단면 형상), Flange location(플랜지 위치), Initial buckling region(초기 좌굴부)

1. 서 론

차체의 충돌 성능(crash performance)은 최대 하중과 충돌 에너지 흡수량을 변형거리로 나눈 평균 하중으로 나타내며 차량 엔진룸 내 대표적인 골격 부재인 프론트 사이드 멤버(front side member)는 적절한 최대 하중과 함께 제한된 변형가능 공간에서 소성 변형에 의해 최대한의 충돌 에너지를 흡수하도록 설계되어야 한다.¹⁾ 최근 충돌 성능 확보와 경량화를 위해 고강도 강판이 적용되고 있으며 설계 공간 내에서 충돌에너지 흡수를 극대화할 수 있는 부재 형상의 최적화 설계기술에 대해서 지속적으로 연구가 수행 중이다.²⁾ 특히 향후 연료전지 자동차 및 전기 자동차의 차체는 프론트 사이드 멤버가 화석연료 자동차 대비하여 많은 설계자유도를 갖게

되므로 구조 최적화에 의한 충돌 성능 연구가 보다 활발히 이루어지고 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 차량의 프론트 사이드 멤버 전방 직선부를 모사한 모자 단면 직선부재(straight member) 모델을 대상으로 중량 증가 없이 충돌 성능을 향상시키기 위한 단면 형상(section shape)과 보강 방안에 대해 연구를 수행하였다. 사각형 형태의 모자 단면들과 육각형, 팔각형 단면에 대해 충돌성능을 살펴 보았다. 또한 단면의 플랜지를 기존의 위치가 아닌 중앙에 위치시키거나 서로 어긋나게 위치시키는 경우 그에 따른 성능을 살펴 보았다. 또한 중량 증가를 최소화하면서 충돌 성능을 향상시키기 위한 방안으로 부재에 점용접을 추가하여 충돌 성능 향상 정도를 검토하였으며, 마지막으로 플랜지가 중앙부에 위치한 모자 단면 부재에 대해 좌굴부 두께 보강을 통한 최대 하중 확보 방안을 연구하였다.

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

2. 본 론

2.1 기본 모델

2.1.1 해석 모델 구성 및 해석 조건

Fig. 1은 양산차 프론트 사이드 멤버의 전방 직선부를 모사한 직선 부재 모델(기본 모델, Base)로 가로 70mm, 세로 100mm, 인너(inner) 코너 반경 8mm, 아우터(outer) 코너 반경 5mm, 플랜지 길이 18mm를 적용하였으며, 부재 길이는 470mm로 하였다. 모델은 30,000여개의 4 절점 쉘 요소로 구성하였다.

인너는 두께 2.0mm의 SGARC 440을, 아우터는 두께 1.6mm의 SGAF 590 DP를 각각 적용하였으며 점용접 피치는 30mm를 기본으로 실차 상태와 근접시켜 구현하였다. 점용접은 실제 용접 지름을 고려하여 4개 절점에서 인너, 아우터를 강체 보요소로 연결하였다.⁵⁾ (Fig. 2)

Fig. 3은 하중 및 경계 조건을 나타낸다. 후방 끝단부를 완전 고정하고 1,000kg의 강체 펀치(rigid punch)에 북미 NCAP 전방 충돌 시험속도인 16.0m/s를 가하였다. 해석에는 비선형 해석 프로그램인 LS-

Fig. 3 Loading and boundary conditions

DYNA를 사용하였으며⁶⁾ 충돌 성능은 최대 하중 P_{max} 와 100mm까지의 평균 하중 P_{mean} 으로 분석하였다.

2.1.2 해석 결과

부재 전방부에서 1차 좌굴이 발생 한 후 후방부에서 2차 좌굴이 발생하였으며 Fig. 4는 변형 형상을 나타낸다.

Fig. 4 Deformed shape in top view: model base

Fig. 5는 하중-변위 선도를 나타내며 Table 1은 P_{max} 와 P_{mean} 을 나타낸다.

Fig. 1 Analysis model: model base

Fig. 2 Location and modeling of spot weld

Fig. 5 Load carrying capacity: model base

Table 1 Crash performance: model base

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	Weight (kg)
Base	300.0	74.5	2.74

2.2 단면 형상 변경 1

기본 모델 단면과 공간상 면적이 동일한 단면 형상들을 적용하여 충돌 성능을 비교 검토하였다.

2.2.1 해석 모델

Fig. 6은 단면 형상 변경 모델들의 단면들을 나타낸다. 기본 모델과 같은 사각형 형태로 정사각형 모델(Square)과 가로와 세로를 바꾼 직사각형 모델(Rectangle)을 구성하였으며 기본 모델과 동일한 코너 반경 적용하였다. 또한, 육각형 모델(Hexagon)과 팔각형 모델(Octagon)을 구성하였다. 팔각형 단면 모델의 플랜지는 중앙에 위치시켰으며 모델링 편의를 위해 육각형과 팔각형 모델의 코너 반경은 고려하지 않았다.

Fig. 6 Model sections: section change 1

2.2.2 해석 결과

Fig. 7은 단면 형상 변경 1 모델들의 하중-변위 선도를 나타내며 Table 2와 Fig. 8은 충돌 성능을 나타낸다. 사각형 형상 모델들의 P_{max} 와 P_{mean} 의 변화는 미미하였다. 반면, 육각형과 팔각형 형상 모델의 경우 모두 P_{mean} 이 대폭 상승하였으며, 육각형 모델은 P_{max} 변화가 없었으나 팔각형 모델은 P_{max} 가 다소 감소하였다. 이러한 결과로부터 일정 한도 내에서 변개수 증가에 따라 P_{mean} 이 증가하고 플랜지와 측면 코너가 일치하는 경우 P_{max} 가 증가하는 것으로 판단된다.⁷⁾ Fig. 9의 모델 Octagon 변형 형상을 Fig. 4의 기본 모델 변형 형상과 비교하면 부재 전체적으로 변형이 발생하면서 부재의 굽힘 붕괴 거동이 감소되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 Load carrying capacity: section change 1

Table 2 Crash performance: section change 1

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	Weight (kg)
Base	300.0	74.5	2.74
Square	300.1 (+0.0%)	74.5 (-)	2.77 (+1.1%)
Rectangle	299.3 (-0.2%)	71.7 (-3.8%)	2.79 (+1.8%)
Hexagon	299.0 (-0.3%)	98.1 (+31.7%)	2.74 (-)
Octagon	284.6 (-5.1%)	114.8 (+54.1%)	2.52 (-8.0%)

Fig. 8 Crash performance: section change 1

Fig. 9 Deformed shape in top view: model octagon

2.3 단면 형상 변경 2

단면 형상 변경 1 모델들은 인너와 아우터의 소재와 두께가 상이하므로 순수한 단면 형상의 영향을 파악하는데 제한이 있다. 순수 단면 형상에 따른 충

돌 성능을 비교하기 위하여 인너와 아우터에 동일한 소재 및 두께(SGARC 440, 2.0mm)를 적용하여 충돌 성능 변화를 검토하였다.

2.3.1 해석 모델

상하 플랜지 위치에 따른 충돌 성능 변화를 파악하기 위하여, 기본 모델과 같은 단면의 모델(Base_FL1)과 플랜지의 위치가 중앙에 위치한 모델(Base_FL2), 플랜지가 서로 어긋나 있는 모델(Base_FL3)을 구성하였으며, 아울러 앞서의 단면 형상변경 1에서 P_{mean} 의 상승이 컸던 육각형, 팔각형 모델(Hexagon_ALL, Octagon_ALL)을 구성하였다. Fig. 10은 단면 형상들을 나타낸다.

Fig. 10 Model sections: section change 2

2.3.2 해석 결과

Fig. 11은 단면 형상 변경 2 모델들의 하중-변위 선도를 나타내며 육각형, 팔각형 단면의 경우 최대 하중 이후 상대적으로 높은 하중을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 12의 변형 형상에서 초기 좌굴 후에도 부재 전체가 전체적으로 압축에 저항을 유지하고 있기 때문이라 판단된다.

Table 3과 Fig. 13은 단면 형상 변경 2 모델들의 충돌 성능을 나타낸다. P_{max} 의 경우 모델 Base_FL1, Base_FL2 그리고, 모델 Hexagon_ALL이 다른 모델들에 비해 상대적으로 높게 나타났으며 플랜지가 단면 측면 코너에 위치하기 때문이라 판단된다. P_{mean} 의 경우 모델 Base_FL2, Hexagon_ALL이 상대

Fig. 11 Load carrying capability: section change 2

Punch displacement 50mm Punch displacement 100mm

Fig. 12 Deformed shape in top view: section change 2

Table 3 Crash performance: section change 2

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	Weight (kg)
Base_FL1	308.2	80.2	2.94
Base_FL2	292.9 (-5.0%)	106.9 (+33.3%)	2.85 (-3.1%)
Base_FL3	314.3 (+2.0%)	89.3 (+11.4%)	2.94 (-)
Hexagon_ALL	308.4 (+0.1%)	104.7 (+30.6%)	2.94 (-)
Octagon_ALL	287.7 (-6.7%)	139.2 (+73.6%)	2.80 (-4.8%)

※ (%): change rate

적으로 높게 나타났으며, 특히 모델 Octagon_ALL이 가장 높게 나타났다. 이는 단면의 변 개수 많아 질수록 P_{mean} 이 증가하는 것으로 판단된다. 단면의

Fig. 13 Crash performance: section change 2

변 개수는 Base_FL1과 Base_FL3는 4개, Base_FL2와 Hexagon_ALL은 6개이며 Octagon_ALL은 10개이다.

2.4 플랜지 위치 변화

2.4.1 해석 모델

Base_FL1 모델에 대해 플랜지를 이동시킨 모델(Base_FL4, Base_FL5)을 추가하여 앞서의 모델 Base_FL1($\alpha=0$)과 모델 Base_FL2($\alpha=1$)와 함께 플랜지 위치(flange location) 변화에 따른 충돌 성능 변화를 분석하였다(Fig. 14).

Fig. 14 Model sections: change of flange location

2.4.2 해석 결과

Fig. 15는 플랜지 위치변화 모델들의 하중-변위 선도를 나타내며 Table 4와 Fig. 16은 충돌 성능을 나타낸다. 플랜지가 측면으로부터 중앙으로 이동함에 따라 P_{max} 는 소폭 감소하나 P_{mean} 이 효과적으로 증가하였다. P_{mean} 증가를 목적으로 하는 경우 플랜지를 중앙으로 이동시키면 효과적이며, 플랜지 이동으로 인해 P_{max} 가 다소 감소되더라도 초기 좌굴부 국부보강을 통해 P_{max} 향상을 유도하면 P_{max} 와 P_{mean} 이 모두 향상된 부재 설계가 가능 할 것으로 판단된다. 다만 실차 적용 시에는 다른 부재와의 체결성 등을 고려하여 플랜지 이동이 설계되어야 한다.

Fig. 15 Load carrying capability: change of flange location

Table 4 Crash performance: change of flange location

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	Weight (kg)
Base_FL1 $\alpha = 0$	308.2	80.2	2.94
Base_FL4 $\alpha = 0.25$	294.6 (-4.4%)	93.7 (+16.8%)	2.87 (-2.4%)
Base_FL5 $\alpha = 0.5$	292.9 (-5.0%)	88.9 (+10.9%)	2.85 (-3.1%)
Base_FL2 $\alpha = 1$	292.9 (-5.0%)	106.9 (+33.3%)	2.85 (-3.1%)

※ (%): change rate

Fig. 16 Crash performance: change of flange location

2.5 점용접 추가

기본 모델을 대상으로 기존 점용접 사이에 점용접들을 추가하여 소수의 점용접 추가만으로 충돌하중을 향상시킬 수 있는 방법을 검토하였다.

Fig. 17은 기본 모델의 초기 좌굴부(initial buckling region)(전방 82.5mm)를 나타낸다. 기본 모델의 초기 좌굴부에 만 점용접을 4개 추가한 모델(Base_FRT-SP_AD)과 부재 전체에 점용접을 추가한 모델(Base_ALL-SP_ADD)에 대해 검토하였다.

두 모델 모두 P_{max} 변화는 미미하였으며, 전체 부

Fig. 17 Initial buckling region in model base

Table 5 Crash performance: addition of spot welds

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)
Base	300.0	74.5
Base_FRT	300.3	77.7
-SP_ADD	(+0.10%)	(+4.3%)
Base_ALL	302.1	81.2
-SP_ADD	(+0.70%)	(+9.0%)

※ (%): change rate

재 점용접 추가 시 P_{mean} 이 9.0% 증가하였고 초기 좌굴부에 점용접 추가만으로도 P_{mean} 이 4.3% 증가하는 결과를 산출하였다(Table 5). 초기 좌굴부 점용접 추가만으로도 충돌 에너지 흡수 능력을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.6 중앙 플랜지 단면의 초기 좌굴부 보강

앞의 단면 형상 변경 2 해석에서 플랜지가 중앙에 위치한 모델 Base_FL2의 경우 모델 Base_FL1 대비 P_{mean} 은 매우 우수(+33.29%)하였으나, P_{max} 가 열세(-4.96%)로 나타났다. 모델 Base_FL2에 대해 초기 좌굴부인 전방부의 아우터와 인너의 두께를 증가시켜 P_{max} 를 향상시키는 방안을 검토하였다. Table 6은 3개 모델의 보강재 적용 길이와 두께 특성을 나타내고 있으며 Table 7은 해석결과를 나타낸다.

해석결과 전방 100mm 아우터 두께를 0.4mm 증가시킨 모델(Base_FL2- FRT-0.4t-UP2)의 경우 모델

Table 6 Members with center flange and local reinforcement

Model	Thickness Increase (mm)	Length (mm)
Base_FL2-FRT-0.4t-UP	+0.4	145
Base_FL2-FRT-0.4t-UP2	+0.4	100
Base_FL2-FRT-0.2t-UP	+0.2	145

Table 7 Crash performance: members with center flange and local reinforcement

Model	P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	Weight (kg)	Section
Base_FL1	308.2	80.2	2.94	Base
Base_FL2	292.9 (-5.0%)	106.9 (+33.3%)	2.85 (-3.1%)	Base_FL2
Base_FL2-FRT-0.4t-UP	344.7 (+11.8%)	105.7 (+31.8%)	3.02 (+2.7%)	
Base_FL2-FRT-0.4t-UP2	339.4 (+10.1%)	109.8 (+36.9%)	2.97 (+1.0%)	
Base_FL2-FRT-0.2t-UP	317.1 (+2.9%)	103.4 (+28.9%)	2.94 (-)	

※ (%): change rate

Base_FL1 대비 1.0%의 중량증가로 P_{max} 가 10.1%, P_{mean} 이 36.9% 크게 향상되었다. 따라서 플랜지 위치를 중앙으로 이동시키고 초기 좌굴부 보강을 통해 P_{max} 와 P_{mean} 이 모두 향상된 부재 설계가 가능하다.

3. 결 론

플랜지 위치와 측면 코너가 일치하는 단면의 최대 하중이 높게 나타나며, 단면의 변 개수 많아질수록 평균 하중이 증가한다. 현재의 사각형 단면 대비 육각형 단면과 팔각형 단면의 평균 하중이 우수하게 나타났으나, 팔각형 단면의 경우 최대 하중이 약간 열세로 나타났다.

사각 단면의 경우 플랜지를 중앙부로 위치를 이동시키면 평균 하중 증가에 매우 효과적이다.

초기 좌굴부 점용접 추가 시 최대 하중 변화 없이 평균 하중을 효과적으로 향상시킬 수 있다.

실차 적용 시 다른 부재와의 체결성 등을 고려하여 플랜지를 가능한 중앙으로 이동시키고 초기 좌굴부를 국부 보강함에 의해 충돌 성능이 향상된 부재 설계가 가능하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 “승용연료전지 차량설계 및 시스템 인터그레이션 개발” (주관: 현대자동차)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) Y. W. Kim and J. H. Kim, "Crash FE Analysis of Front Side Assembly of Passenger Cars for Management of Collapse Shape Via Variation of Thickness with Reverse Engineering," Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.106-113, 2008.
- 2) B. L. Choi and S. J. Kang, "Stiffness and Fatigue Strength Analysis of Fuel Cell Vehicle Body Frame," Transactions of KSAE, Vol.19, No.4, pp.47-53, 2011.
- 3) K. T. Kim and S. J. Kang, "Design Process of Light-weighted Fuel Cell Vehicle Body Frame," Transactions of KSAE, Vol.18, No.6, pp.114-121, 2010.
- 4) J. S. Yoo, S. B. Kim, M. Y. Lee and H. Huh, "Development of Al Crash Box for High Crash Worthiness Enhancement," Transactions of Materials Processing, KSTP, Vol.17, No.3, pp.182-188, 2008.
- 5) J. H. Song, H. Huh, H. G. Kim and S. H. Park, "Evaluation of the Finite Element Modeling of a Spot Welded Region for Crash Analysis," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.3, pp.329-336, 2006.
- 6) LSTC, LS-DYNA User's Manual, Nonlinear Dynamic Analysis of Structure, Ver. 971, 2006.
- 7) B. W. Ye, S. Oh, Y. B. Cho and H. C. Sin, "Numerical Simulation of Convex and Concave Tubes with Consideration of Strain Rate Sensitivity," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.2, pp.193-201, 2007.