

## Topology Optimization을 이용한 B-Pillar의 점 용접 배치 최적화(초안)

김기훈

한양대학교 미래자동차공학과

### Optimizing Spot Welding Point of B-Pillar in Various Situation of an Accident Using Topology Optimization

Gihoon Kim

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791 Korea

**Abstract** : In side impact accident, B-Pillar is the most important part to protect driver from being damaged. To increase stiffness of B-Pillar, changing layout of spot weld is one of the methods. However, almost every study optimized it only for a 90° side impact. In this paper, B-Pillar is optimized for three accident case : 90° side impact, 63° side impact and Roll-over. To do this, spread Spot weld with same distance and remove half of them through Topology Optimization. In this step, design variables are density of each spot weld element and objective function is minimizing deflection of B-Pillar. Also, to compare with standard model number of spot weld are chosen as constraints. After this, 2 optimized model are selected. Finally, I compare it with original model through crush test using Radioss.

**Key words** : Topology Optimization(위상 최적설계), Linearization(선형화), Spot Weld(점 용접)

#### 1. 서론

국내 자동차의 등록 대수가 2100만대까지 비약적으로 증가함에 따라 차량 간 충돌 사고의 비율 역시 급증하고 있다. 도로교통공단의 통계<sup>1)</sup>에 따르면 차 대 차 충돌 사고에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 측면 충돌 사고이다. 그리고 측면 충돌 시 차량의 찌그러짐을 방지해 운전자의 안전에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 B-Pillar이다. 뿐만 아니라 사고가 발생했을 때, 탑승자의 사망률이 가장 높은 전복사고의 경우에도 B-Pillar가 영향을 미친다. B-Pillar는 여러 개의 강관이 점 용접(Spot Weld)으로 결합 되어 있는 형태를 띄고 있으며, 위쪽으로는 Roof Rail에 아래쪽으로는 Rocker Panel에 연결되어 있다. 충돌 시 외부 충격에 대해 B-Pillar의 강성을 증가시키는 방법에는 강관의 재질을 바꾸는 방법과 강관 구조를 바꾸는 방법, 그리고 용접 점의 배치를 바꾸는 방법 등이 있는데, 그 중 용접 점의 배치를 바꾸는 방법은 다른 방법에 비해 비교적 수정이 쉽다. 실제로

점 용접의 배치를 바꿔가면서 강성을 증가시키는 것에 대한 연구는 많이 진행되고 있다. 그러나 B-Pillar의 경우 대부분 90° 충돌에 대해서만 점 용접 배치 최적화가 진행되고 있으며 다른 충돌 상황에 대해서는 최적화가 잘 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 위상 최적 설계(Topology Optimization)를 이용하여 90° 측면 충돌, 63° 측면 충돌, 전복 상황 세 가지 충돌 상황에서 B-Pillar의 점 용접 배치를 최적화 할 것이다. 이 과정에서 선형 해석을 통한 최적화를 위하여 Altair HyperMesh의 Optistruct 기능을 사용하였다. 그리고 최적화된 모델에 대해서는 검증 을 위하여 비선형 해석 프로그램인 Radioss 14.0 을 사용해 실제 충돌 상황을 시뮬레이션 해보았다.

실제 충돌 시 B-Pillar를 구성하고 있는 강관의 강성이 바뀌므로 비선형 해석을 해야 한다. 하지만 Topology Optimization의 경우 임의의 하

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

중 조건 하에서 각 요소가 받는 응력의 크기를 분석하여 응력이 적게 걸리는 부분부터 제거하는 것이기 때문에, 상대적인 응력의 차이만 있으면 사용할 수 있다. 박홍익 외 2명의 연구에서<sup>2)</sup> 선형 해석과 비선형 해석 모두에서 응력의 상대적인 크기는 같은 경향성을 보임을 알 수 있었고, 충돌에 대한 최적화에 선형을 사용할 수 있었다.

## 2. 해석 대상 모델

점용접 배치를 최적화하기 위해서는 2가지 모델이 필요하였다. 하나는 형태나 점용접의 개수 등 최적화를 위한 기준이 될 모델이고 다른 하나는 최적화의 대상이 될 모델이다.

### 2.1 기준 모델

본 논문에서는 NCAC(National Crash Analysis Center)에서 제공하는 2010 Toyota Yaris 모델을 기준 모델로 해석을 진행하였다. Fig. 1.1에 나타난 것과 같이 전 차량 모델 중 B-Pillar 전체와 Roof Rail, Rocker Panel 일부만을 포함하는 모델을 추출해서 해석에 사용하였으며, 이 모델에서 B-Pillar 파트 간 연결을 위하여 쓰인 점용접의 수는 103개이고 점용접의 위치는 Fig. 1.2에 나타난 것과 같다. 해석을 하기 위해 LS-DYNA에서 Optistruct로 converting 하는 과정에서 점용접의 성질이 사라졌는데, 파단이 일어나지 않는다는 가정 하에 rigid 성분으로 재구성하였다. 또한 B-Pillar 파트의 mesh는 점용접 배치 간격을 고려하여 10mm로 구성하였다.

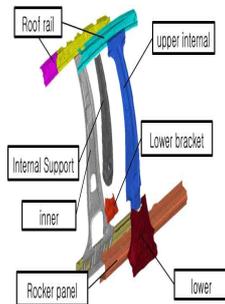


Fig. 1.1 B-Pillar component

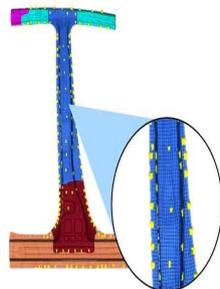


Fig. 1.2 Yaris Spot Weld

### 2.1 최적화 대상 모델

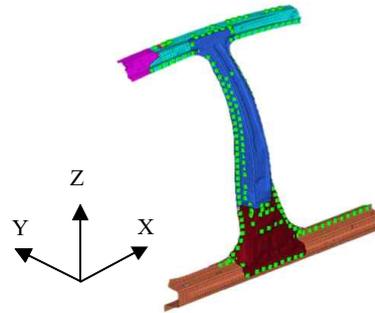


Fig. 2 Test model

기준이 되는 Yaris Model의 점용접 수는 103개이다. 따라서 최적화를 위해 기준 모델의 약 2배인 190개의 점용접을 B-Pillar 위에 배치시켰다. 이 과정에서는 HyperMesh의 Autopitch 기능을 사용하여 32mm 간격으로 Fig. 3과 같이 점용접을 배치하였다. 기준 모델과 같이 점 용접의 파단은 고려하지 않는다는 가정 하에 점용접 요소를 Rigid로 생성하고 mesh 역시 10mm로 동일하게 구성 해주었다.

## 3. 사고 유형별 모델 선정

### 3.1 사고 상황 선정

차량의 충돌 사고는 다양한 상황에서 일어난다. 그러므로 한 가지 충돌 상황에 대해서만 최적화를 진행 할 경우 다른 충돌 상황에 대해서는 기대하는 효과를 발휘하지 못할 수 있다. 따라서 점용접 배치 역시 여러 충돌 상황에 대해서 최적화되어야 한다. 최적화에 앞서 세 가지 충돌 모델을 선정하였는데, 발생 빈도가 가장 높은 측면 충돌 사고와 사망률이 높은 전복 사고를 사고 상황으로 선정하였다. 측면 충돌 사고의 경우에 90° 측면 충돌 뿐만 아니라 다른 각도에서의 충돌이 일어날 수 있기 때문에 63도 측면 충돌을 추가하였다.

그리고 각 상황에 대한 모델링 과정에서는 NCAP(New Car Assessment Program)의 충돌테스트 기준<sup>3)4)</sup>을 참고하였다.

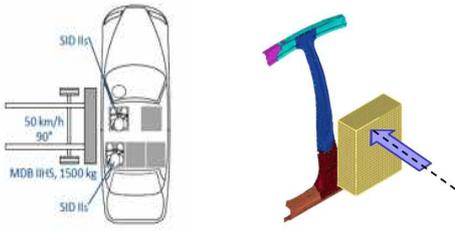


Fig. 3.1 90° side impact

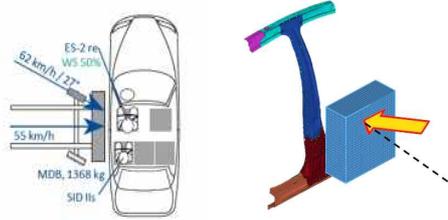


Fig. 3.2 63° side impact

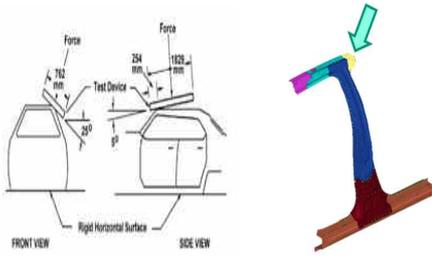


Fig. 3.3 Roll-over

NCAP 충돌 테스트를 기준으로 최적화 대상이 된 모델에 어떻게 하중조건을 부여할지는 Fig. 3.1 - 3.3 에 나타냈다.

### 3.2 하중 조건 및 경계조건

최적화를 진행하기 위하여 하중 조건을 부여하였다. 앞에서 언급했듯이 선형과 비선형 해석에서 모두 상대적인 응력은 같은 경향성을 보였기 때문에 정적 하중을 이용하여 선형 해석에 대해 최적화를 진행 할 수 있었다. Topology Optimization 이 하중 내에서 상대적으로 걸리는 응력의 차이를 이용하는 것이기 때문에 최적화 단계에서는 하중을 가하는 영역과 하중의 방향을 제외하고 하중의 크기에 대해서는 테스트 기준과 정확하게 일치하는 값을 줄 필요가 없었다.

먼저 90° side impact 와 63° side impact 모델에 대해서는 실제 테스트 시 충돌하는 대차를 기준으로 하중 영역을 정의하였다. 충돌 대차로는

IIHS 대차 기준 중 SUV를 형상화한 대차를 기준으로 하였다. 따라서 하중을 가해주는 영역은 대차의 충돌부 높이와 같은 380mm 에서 1140mm 로 하였고, 폭은 B-Pillar 전체로 주었다.

Roll-over 경우에는 측면 충돌과는 다르게 B-Pillar에 직접적으로 하중이 가해지지 않기 때문에 B-Pillar에 간접적으로 가해지는 하중을 찾아내야했다. Roll-over 상황에서 B-Pillar에 가해지는 하중을 확인하기 위하여, Fig. 5.1과 같은 전 차량의 일부에서 Node를 추출하여 Fig. 5.2과 같은 Bar Model을 구성하였다. Fig.5.2의 (a)에 합력이 100이 되는 힘을 Roof crush test 기준에 맞춰 가해주었다. 그리고 Fig 5.2의 (b) 부분에서 받는 힘을 확인하였다. (a)에 가해준 힘과 (b) 부분이 받는 힘을 Table 1에 표시하였다. 그리고 최적화를 위한 하중은 (b)에 표시된 하중을 기준으로 가해주었다.

경계 조건에 대해서는 박승연 외 4명의 연구<sup>5)</sup>를 참고하여 Rocker Panel에 X축 방향 회전만 구속을 해제해주었다. 위의 연구에서는 Roof Rail 부분에 대해 Y방향의 구속을 해제해주었지만, 정적 하중의 경우에는 순간적으로 충격을 받는 것이 아니기 때문에 정적 하중에 비례해서 Y축 이동이 일어나서 B-Pillar의 변형이 잘 일어나지 않아 제대로 된 결과를 얻기가 어려웠다. 따라서 Z축의 구속만 해제해 줌으로써 실제 충돌 결과와 비슷한 형태를 얻어낼 수 있었다.



Fig. 5.1 Roof model

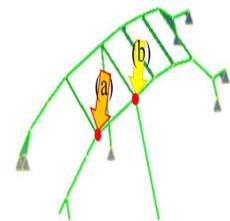


Fig. 5.2 Roof bar-model

Table 1 Roll-over force

Force	(a)	(b)
F <sub>x</sub>	3	6.54
F <sub>y</sub>	38.2	1.26
F <sub>z</sub>	92.1	29.3
Total Force	100	30.0

#### 4. 사고 유형별 모델 선정

##### 4.1 설계 문제 정식화

최적화를 진행하기에 앞서 문제 정식화를 하였다. 어떤 점을 제거할지 결정하기 위하여 각 점용접 요소의 밀도를 설계변수로 하였고, 이 때, B-Pillar의 변형을 최소화하는 것을 목적으로 하였다. 또한, 기준이 되는 Yaris Model과 같은 점용접 개수를 남기기 위하여 점 용접의 개수를 제한 조건으로 하였다.

##### 4.2 최적화 결과

각 충돌 모델별 최적화 결과는 Table 1에 나타냈다. 32mm 간격으로 분포된 190개의 점용접 요소 각각에 대하여 밀도를 정리한 후 범위에 따라 분류하였다. 최적화 후 밀도가 높다고 나온 점은 응력이 많이 걸리는 부분이므로 남겨야 하고, 밀도가 적게 걸리는 부분은 상대적으로 걸리는 응력이 작다고 판단하여 제거 할 수 있다.

최적화 결과를 바탕으로 두 가지 최적화 모델을 선정하였다. 하나는 90° 충돌에 대해서만 최적화된 모델(Opt1) 인데, 기준으로 사용했던 Yaris Model이 90° 충돌에 대해서 최적화되어 있다는 가설을 세우고 이를 입증하기 위하여 사용되었다. 다른 하나는 세 가지 상황에 모두 최적화된 모델(Opt2)이다. 90° 충돌에 대해 최적화된 모델의 점용접 은 90° 충돌에 대한 점용접 요소의 밀도만을 고려하여 밀도가 낮은 순으로 제거하여 103개의 점용접을 남겼다. 세 가지 상황에 대하여 최적화된 모델의 점용접은 다음과 같은 기준에 의해 선정하였다. 먼저 각 점용접에 대해 세 가지 사고 상황에 해당하는 밀도 값을 더해주었다. 그리고 그 합이 작은 순서대로 점용접 요소를 제거 하였다. 그 결과 평균 밀도가 1.000 E+00 에서 6.570 E-01 점용접까지가 최적화 결과 남게 되었다. 또한 이 과정에서 점용접 사이의 거리가 100mm 이상이 되는 경우가 있었는데, 이 경우 기준이 되는 모델에서 점용접 사이의 최대 거리를 넘기 때문에 밀도의 합이 낮더라도 점용접을 제거 하지 않고 남겼다. 최적화된 모델은 Fig. 6. 1 과 Fig. 6. 2에 나타냈다.

Table 2 Optimization result (단위 : 개)

Density	Range	90° impact	63° impact	Roll Over
1.000E+00	8.901E-01	83	95	50
8.901E-01	7.802E-01	19	11	7
7.802E-01	6.702E-01	6	7	7
6.702E-01	5.603E-01	5	5	11
5.603E-01	4.504E-01	0	2	3
4.504E-01	3.405E-01	10	7	7
3.405E-01	2.305E-01	3	3	1
2.305E-01	1.206E-01	1	9	11
1.206E-01	1.069E-01	63	51	93

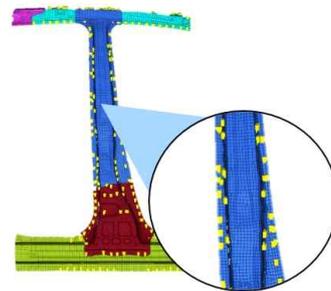


Fig. 6. 1 Opt1

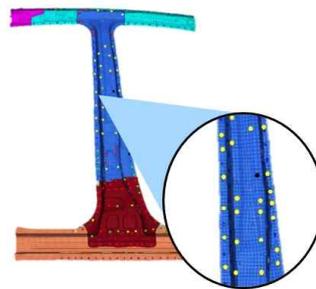


Fig. 6. 2 Opt2

#### 5. 최적화 모델 검증

점용접의 배치가 선형 해석을 통해 최적화되었기 때문에 실제 충돌 상황에서도 효과가 있는지를 확인하기 위하여 Radioss를 이용하여 충돌 해석을 진행하였다. 충돌 해석에 비교를 위하여 사용된 모델로는 기존의 Yaris Model과 90° 충돌, 세 가지 충돌 상황에 대해 최적화된 모델을 선정하였다. 이 중 90° 충돌에 대해 최적화된 모델(Opt1)과 Yaris 모델의 경향을 비교하여 Yaris 모델의 최적화 조건을 찾아내고, 마지막으로 세 가지 충돌에 대해 최적화된 모델

(Opt2)와 비교해보았다. 충돌 테스트 시 가해지는 하중은 B-Pillar의 최대 변형량이 150mm가 되는 하중을 기준으로 진행하였다.

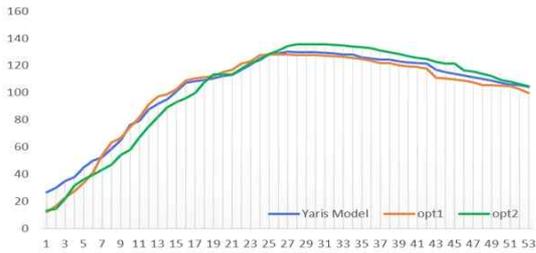


Fig. 7.1 90° side impact



Fig. 7.2 63° side impact

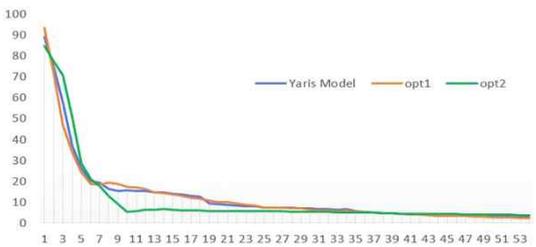


Fig. 7.3 Roll-over

Table 3.1 90° side impact

	Max displacement	Average displacement
Yaris	130.02	102.78
Opt1	128.15	100.86
Opt2	135.83	101.86

Table 3.2 63° side impact

	Max displacement	Average displacement
Yaris	120.90	91.06
Opt1	123.79	92.54
Opt2	118.68	93.29

Table 3.3 Roll-over

	Max displacement	Average displacement
Yaris	88.96	12.95
Opt1	93.26	12.70
Opt2	84.65	11.37

## 6. 결론

Fig 7.1 - 7.3의 그래프에서 x 축은 B-Pillar의 중심을 지나는 점 53개를 Roof Rail부터 Rocker Panel까지 일정한 간격으로 뽑은 것이다. 그리고 y축은 각 점의 displacement를 나타낸 것이다. 그리고 파란색 선은 기준이 된 Yaris Model의 변형이고, 갈색과 초록색은 각각 90° 충돌에 대해 최적화된 Opt1 모델과 세 가지 사고에 대해 최적화된 Opt2 모델의 변형이다.

먼저 기준이 된 Yaris Model과 Opt1 모델을 비교해 보았을 때, 세 가지 사고 유형에서 모두 유사한 경향을 나타냄을 볼 수 있었다. 따라서 Yaris Model의 점용접 배치 역시 90° 충돌을 기준으로 최적화되었음을 추측해볼 수 있다. 또한, Table 3.1~3.3을 보면, 90° 충돌에 대해서는 Yaris 모델과 Opt1모델의 변형이 더 작았지만 다른 충돌에 대해서는 Opt2의 경우가 다른 두 모델보다 최대 변형이 더 적음을 확인할 수 있었다. 그러나 평균 변형을 봤을 때는, 최대 변형과는 다른 결과를 볼 수 있었다. 이는 응력이 가장 많이 걸리는 부분에 점용접이 많이 배치되면서 상대적으로 다른 곳의 점용접 배치가 줄어들어 나타나는 현상이라고 생각한다.

## 후 기

Topology optimization을 통해서 점용접 최적화를 진행하며 몇 가지 아쉬운 점이 있었다. 먼저 Auto pitch 기능을 이용하여 점용접을 분포하는데 한계가 있었고, 분포된 점용접에 대해서도 파단 조건을 주지 않았다. 마지막으로 충돌 테스트를 진행할 때, B-Pillar에만 충돌을 시켰기 때문에 옆문과 같은 다른 부분과 충돌하면서 감소되는 하중을 고려하지 못하였다.

본 연구를 통해 이론적으로 생각했던 것을 실제로 시뮬레이션 해보는 값진 경험을 쌓을 수 있었다. 뿐만 아니라, 실제 사고 상황을 간접적으로 확인하면서 차량 제작 과정에서 시뮬레이션 테스트의 효과를 확인할 수 있었다.

## References

- 1) 도로교통공단, 사고유형별교통사고(2005~), [http://taas.koroad.or.kr/sta/acs/exs/typical.do?menuId=WEB\\_KMP\\_STA\\_UAS\\_TAT](http://taas.koroad.or.kr/sta/acs/exs/typical.do?menuId=WEB_KMP_STA_UAS_TAT),

2016

- 2) 박홍익, 김규학, 임홍재, "A study on Optimal Spot-weld Layout Design for Improving Side Impact Performance Using Topology Optimization", KSME Annual Conference Proceedings, 658-663, 2011.
- 3) Carsh, NCAP-Tests in Europe & America", Satety Companion, 2016, 32, 2016.
- 4) Carsh, "Roof crush", Satety Companion, 2016, 63, 2016.
- 5) 박승연, 송중호, 김민근, 엄원익, 추태진, "A study on Relationship of Crash Characteristics between The sid Module and The center-Pillar of Vehicle Body", KSAE Annual Conference Proceedings, 728-728, 2015.