

# 계산 방법론에 따른 용접부 응력 평가 및 비교 (FE 상세 모델 vs 수 계산)

## Stress Comparison on Welded Connection between Detail FE Model and Classical Calculation

송문성†

정상웅\*

Moon-Sung, Song

Sang-Woong, Jeong

---

### ABSTRACT

According to development of method and device of Finite Element Analysis, the strength of welded joint is demonstrated by Finite Element Analysis not classical calculations. On the FEA, all of the joints for carbody are assumed to be ideal connections and the yield stress of welded joint is assumed to be the same to base metal. On these assumption, FEA is appropriate to evaluate the overall stability and strength of whole carbody. The classical calculation is appropriate to evaluate strength of specific welded joint and to determine the weld method and properties. Some project request strength calculation of the specific welded joints in addition to FEA, because of the demonstration of stability. The objective of this paper is the check of the consistency of the FEA result for the welded joints by the stress comparison between Detailed FE Model and classical calculation and the evaluation of the reliability of FEA result.

---

### 1. 서론

용접부의 강도를 계산하는 방법은 유한 요소 해석을 통한 방법과 수 계산을 통한 방법이 있다. 이전에는 수 계산을 통한 방법과 유한 요소 해석을 통한 방법이 병행되었으나 요즘에는 유한 요소 해석 방법과 장비들의 발달로 인하여 유한 요소 해석 방법이 수 계산을 대체하고 있다. 유한 요소 해석의 경우 용접부의 허용 응력과 모재부의 허용응력이 동일하다는 전제로 차체의 전반적인 안정성과 강도를 평가하는데 적절하지만 국부적인 용접부의 응력만을 필요로 할 때에는 많은 시간이 소요되는 단점이 존재한다. 또한 용접부의 응력을 계산하기 위하여 따로 모델링을 필요로 하는 경우도 있다. 용접부의 수 계산의 경우 어느 부재에 하중이 정해지면 그 하중에 대하여 특정 용접 부위의 강도 계산과 용접부의 허용 응력을 엔지니어가 변경을 할 수 있기 때문에 국부적인 안정성을 평가하는데 적당하다. 실제로 일부 프로젝트에서는 중요한 용접부에 대하여 유한 요소 해석에 추가하여 수 계산으로 용접부 강도를 입증하기를 요구한다. 본 논문에서는 용접부에 대한 응력을 유한 요소 해석과 수 계산을 이용하여 결정하고, 두 방법의 차이를 비교하는 것을 목적으로 한다.

---

† 책임저자 : 비회원, 현대로템 주식회사, 차체개발팀, 연구원  
E-mail : moonswork@hyundai-rottem.co.kr  
TEL : (031)596-9316 FAX : (031)596-9757

\* 비회원, 현대로템 주식회사, 차체개발팀, 주임 연구원

## 2. 본론

### 2.1 Line Method

용접부의 응력을 계산하는 방법은 AISI에서 사용하는 Elastic Method와 Line Method<sup>1)</sup>가 있다. 두 가지 방법 모두 평면에서만 용접 부의 응력과 안정성을 계산할 수 있다는 한계를 가지고 있다. Line Method는 용접부의 각장(throat)이 용접부의 길이(Length)보다 무시할 만큼 작다면, 용접 부를 면이 아닌 선으로 가정하여 용접부에 가해지는 응력을 계산한다. 그리고 그 결과에 따라 용접부의 각장을 계산하는 것을 목적으로 한다. 면이 아닌 선으로 계산을 진행하기 때문에 계산이 용이하고, 응력에 따른 최소 각장을 계산할 수 있다. 하지만 각각의 응력부에 적당한 각장의 크기를 결정하지 못하고 하나의 용접 군(Weld Group)에서는 하나의 각장만 계산이 되는 단점이 있다.

### 2.2 계산 방법

본 논문에서는 Line Method의 개념을 확장하여 3차원에서 계산을 수행하였다. 수 계산을 위하여 다음과 같은 가정을 하고 계산을 진행하였다.

- 1) 용접 부는 이상적으로 용접이 되었다고 가정한다.
- 2) 용접 부는 평면으로 작용한다.
- 2) 용접 군에 작용하는 힘은 각각의 용접부에 모두 균등하다고 가정한다.

본 방법으로는 용접부의 각장이 정해지기 때문에 각장을 계산할 수는 없으나 각장에 대한 정보를 계산 과정에 입력함으로써 각장이 결정된 용접이 유효한지 평가하는 데는 유용하다. 계산을 위한 순서도는 아래 그림 1과 같다.

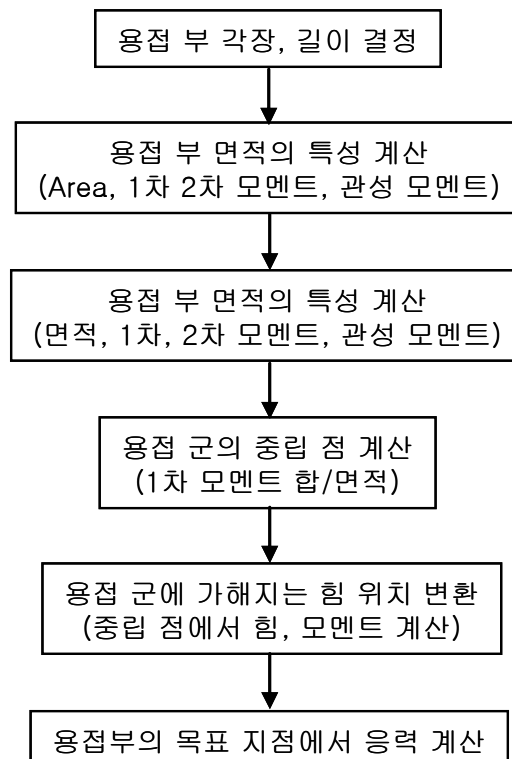


그림 1 용접 부 계산을 위한 순서도

## 2.3 용접부 강도 계산

### 2.3.1 모델링

용접부 강도 계산을 위한 모델은 그림 2와 같다.

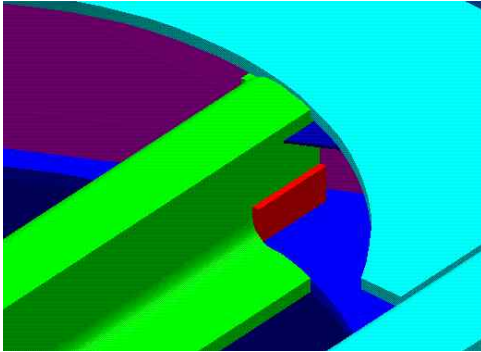


그림 2 모델

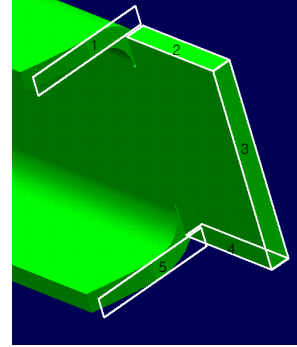


그림 3 용접부 형상

모델은 차체 언더 프레임의 Cross beam이다. 용접 부는 상기 모델과 Side Sill, 상부와 하부 판을 연결하기 위함이다, 용접부의 형상은 그림 3과 같고, 곡면으로 되어 있는 용접 부는 계산의 편의를 위하여 직선으로 가정하였다.

부재에 걸리는 하중은 유한 요소 해석을 통하여 얻었으며 하중 결정 부위는 그림 4와 같다.

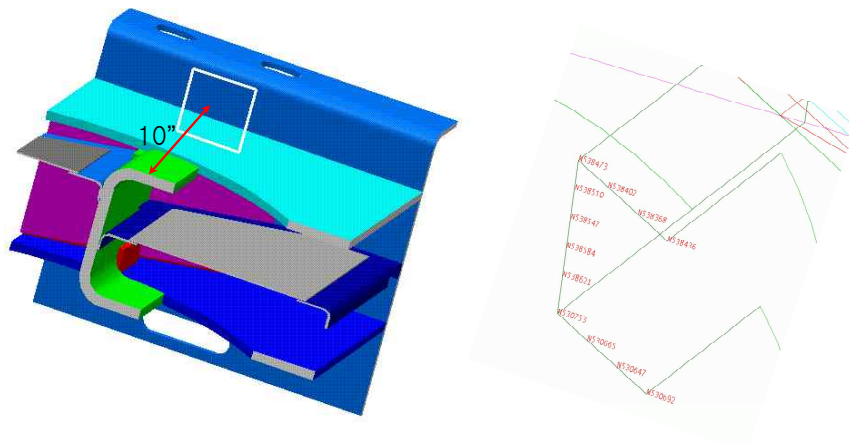


그림 4 유한 요소 해석을 통한 하중 계산 Cutting line

모든 용접은 개선 용접이고, 용접의 속성은 아래 도표 1과 같다.

도표 1 용접부 속성

No.	Length(x)	Length(y)	Length(z)	Type	Area
1	2.953		0.394	Groove	1.163
2		2.854	0.470	Groove	1.124
3	0.394		5.051	Groove	1.989
4		2.854	0.470	Groove	1.124
5	2.953		0.394	Groove	1.163

### 2.3.2 강도 계산

2.3.2 장에서 결정된 모델의 유한 요소 해석은 다음 도표 2와 같다. 노드 번호는 그림 4에 표기되어 있다.

도표 2 Cutting Line에서 구해진 하중

Node	Elemen-X	Elemen-Y	Elemen-Z
530647	-2,350.000	113.000	-2.128
530665	-7.174	201.900	0.212
530692	-1,982.000	32.600	-11.640
530753	2,887.000	64.730	-15.310
538368	-1,865.000	429.000	-11.330
538402	2,374.000	702.900	-4.866
538436	-2,375.000	113.300	-10.810
538473	6,531.000	358.700	296.200
538510	7,242.000	24.930	402.200
538547	6,120.000	16.980	216.400
538584	5,073.000	13.410	142.700
538621	4,633.000	3.846	37.600

용접 부 평면들의 중립 점과 그 점에서 힘과 모멘트는 도표 3과 같다.

도표 3 중립점 좌표, 힘, 모멘트

	X	Y	Z
중립점	-52.04	-324.81	46.85
힘	26,280.83	2,075.30	1,039.23
모멘트	-4384.87	-25,848.18	36703.04

최고 응력지점을 찾기 위하여 최고 응력 부로 보이는 두 개의 지점(1번 용접 부 좌측 상단, 3번 용접부 우측 상단)을 정하고 그에 대한 좌표는 아래 도표 4와 같다.

도표 4 최고 응력 예상 지점 좌표

Check Point	x	y	z
1	-50.690	-322.520	49.870
2	-53.54	-325.47	49.39

도표 4의 1번 지점에서 압축이나 인장으로 작용하는 응력을 계산하면 수식 1과 같다.

$$\sigma_x = \frac{F_x}{WeldedArea} = \frac{26.28}{6.51} = 3.75ksi$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{WeldedArea} = \frac{2.07}{6.51} = 0.30ksi$$

$$\sigma_z = \frac{F_z}{WeldedArea} = \frac{1.04}{6.51} = 0.15ksi$$

수식 1 1번 지점 응력 계산

같은 지점에서 전단 응력으로 작용하는 응력의 계산은 수식 2와 같다.

$$\tau_x = \frac{M_z r_y}{I_{yz}(z)} + \frac{M_y r_z}{I_{yz}(y)} + \frac{M_x r_y}{J_{xy}} = 25.23ksi$$

$$\tau_y = \frac{M_x r_z}{J_{yz}} + \frac{M_z r_x}{J_{xy}} = 4.10ksi$$

$$\tau_z = \frac{M_x r_y}{J_{yz}} = -0.25ksi$$

수식 2 1번 지점 전단 응력 계산

위에서 계산한 인장응력과 전단응력을 계산하여 resultant 응력을 von-mises 방법으로 구하면 아래 식 3과 같다.<sup>2)</sup>

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2)}{2}}$$

수식 3 Resultant Stress

같은 방법으로 2번 지점의 응력을 계산하여 정리하면 도표 5와 같다.

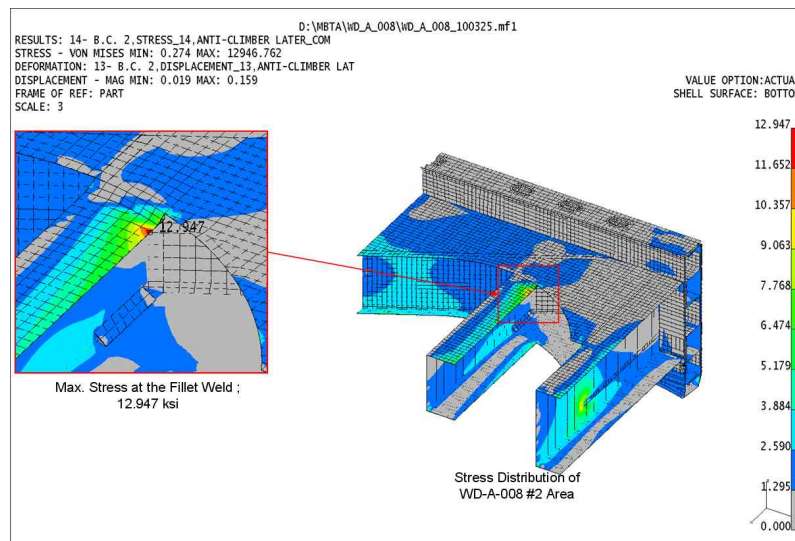
도표 5 1번 지점과 2번 지점에서의 응력

	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_x$	$\tau_y$	$\tau_z$	Resultant Stress
1	3,756.24	296.62	148.53	25,234.71	4,103.27	-253.44	44424.97
2	3,756.24	296.62	148.53	-9,385.81	-5,176.24	69.75	18899.17

### 2.3.3 유한 요소 해석 결과<sup>3)</sup>

위 모델에 대한 유한 요소 해석 결과는 아래 그림 5와 같다. 해석 결과에서 확인해 보면 1번 부위에서 12.947 ksi의 응력이 존재하고 있다. 이는 수 계산으로 계산된 결과의 1/2에 해당하는 결과이다. 이러한 결과가 나온 원인으로는 2.3.1의 가정에서 찾을 수 있다. 2.3.1의 가정에 따르면 모든 용접 부는 평면이다. 반면에 현재의 모델링은 곡면으로 되어 있기 때문에 응력의 분산이 발생한다. 그 결과 수 계산의 응력 값이 더욱 높게 나온 것이다.

그림 5 유한요소 해석 결과



### 3. 결론

본 논문은 수 계산을 통하여 용접부의 강도를 계산하고 그 결과를 유한 요소 해석 방법과 비교하였다. 수 계산은 Line Method를 응용하여 3차원 상에서 적용하였고, 응력 값을 도출 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 수 계산으로 얻어진 결과와 수치 해석 값을 비교해보니 같은 지점에서 높은 응력이 나오는 확인하였으나 그 값에 있어서는 약 2배의 차이를 볼 수 있었다. 하지만 계산의 용이함을 위하여 용접 부를 평면으로 가정했던 수 계산에 비하여 곡면으로 정의된 모델링에서 낮은 값을 얻어 낸은 당연한 결과로 보인다. 이후에 수 계산 방법을 검증하기 위하여 계산되었던 또 다른 지점의 유한 요소 해석을 확인하고 또 다른 모델링을 통한 검증이 있다면 본 논문에서 사용한 방법은 용접부의 응력 집중 지점과 그 대략의 값을 확인하는데 유용할 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. C. L. Jenney and A. O'Brien, "Welding HandBook Welding Science and Technology", AWS, 9th ed, Vol. 5, pp. 209-216, 2000
2. A. H. Burr and J. B. Cheatham, "Mechanical Analysis And Design", Prentice Hall, 2nd ed, pp. 272-274, 1995
3. **현대 로템**, "MBTA Bi-Level Coaches Welding Joint Analysis (WD-A-008)", 2010