수계산을 통한 철도차량의 차체 용접이음부 강도 평가

The introduction of the evaluation method for welded joints in car body structure by the manual analysis

정 상 웅[1)] 김 재 웅[2)] 장 길 수[3)]

Jeong, Sang-Wung Kim, Jae-Woong Jang, Gil-Soo

ABSTRACT

The objective of the review is to introduce the evaluation method of welding joint designs by using forces extracted from FE models. This evaluation method is currently being used for the Southeastern Pennsylvania Transportation Authority (SEPTA) project in the United States by request of the customer Engineer. The evaluation method was applied to critical joints connected by Fillet or Partial Joint Penetration (PJP) welds in car body structure for SEPTA project. The additional manual analysis is required based on the fact that Technical Specification in the United States requires the Contractor to apply Complete Joint Penetration (CJP) welds to all structural connections in Car body. However, in the car body design for Septa project there are some areas where CJP welds are not applied due to structural and manufacturing problems.

1. 서 론

최근 미국시장으로의 철도 차량 수출이 본격화되면서, 보다 엄격하고 까다로운 사양 및 규격을 만족하는 철도 차량 차체의 제작이 요구되어지고 있다. 특히 미국시장은 차량의 차체 안정성과 신뢰성을 강조하고 있으며, American Welding Society (AWS) 규정을 만족하는 차체의 설계 및 제작을 요구하고 있다. 대부분의 미국 철도 차량의 사양은 주요 용접 부위 (Critical welding joints)는 완전 용입 용접 (Complete Joint Penetration weld)을 요구하고 있으며, 차체 구조 및 제작상의 문제로 필렛 용접 (Fillet weld) 및 부분 용입 용접 (PJP weld)을 적용 시, 추가적인 강도 해석을 통해 용접부의 안정성을 입증토록 요구하고 있다. 기존의 국내 및 해외 철도 차량은 모재부 및 용접부에 관계없이 특정 하중에 조건하에서 유한요소해석 통해서 얻은 응력 값으로 용접부의 강도를 평가하였으나, 미국시장의 경우, 완전 용입 용접을 제외한 용접은 용접부의 허용응력 (Allowable stress) 및 유효면적 (Effective Area)이 모재부에 비해 상당히 줄어들기 때문에 추가적인 수계산을 통해서 용접부의 강도 평가를 요구하고 있다. 본 고찰은 실제 미국 SEPTA 프로젝트의 실례를 통해 FE Model로부터 추출된 힘(Forces)을 이용하여, 용접부의 강도를 계산하는 방법을 소개 하고자 한다.

1) 책임저자 : (주)로템 기술연구소 주임연구원, 비회원
E-mail : bluemir@hyundai-rotem.co.kr TEL : (031) 460-1064 FAX : (031) 460-1789
2) (주)로템 기술연구소 책임연구원
3) (주)로템 기술연구소 책임연구원

2. 본 문

2.1 개요

기존 철도 차량의 스테인리스 차체는 모재부 (Base metals) 및 용접부 (Welded connections)에 관계없이 유한요소 해석 프로그램을 통해 얻은 응력값을 통해 차체의 정적 강도를 평가해 왔다. 이 경우 차체의 모든 연결부위는 이상적으로 연결되어 있다고 가정되었으며, 용접부 허용응력 또한 모재부와 동일하다는 전제하에서 차체의 전반적인 안정성과 강도를 평가하게 된다. 미국 프로젝트의 경우, AWS 규정(AWS D1.1 또는 AWS D1.15)을 만족하는 용접 설계 및 제작이 이루어져야 하며, AWS에서는 완전용입용접을 제외한 용접은 유효면적 및 허용응력이 모재부에 비해, 상당히 감소됨을 용접방법별로 규정하고 있으며, 이를 만족하는 용접 설계 및 평가를 요구하고 있다.

2.2 용접부 허용응력

(1) 용접부 허용응력 (AWS D1.1:2006, Table 2.3)

Type of Applied Stress	Allowable Stress (허용 응력)	Required filler Metal Strength Level
PJP Groove Welds (부분 용입 용접)		
Tension normal to the effective area	0.30 x classification tensile strength of filler metal	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used.
Compression normal to effective area of weld in joints designed to bear	0.90 x classification tensile strength of filler metal, but not more than 0.90 x yield strength of the connected base metal.	
Compression normal to effective area of weld in joints not designed to bear	0.75 x classification tensile strength of filler metal	
Shear parallel to axis of effective area	0.30 x classification tensile strength of filler metal except stress on base metal shall not exceed 0.4 x yield stress of base metal.	
Fillet Welds (필렛 용접)		
Shear on effective area or weld	0.30 x classification tensile strength of filler metal except that the base metal net section shear area stress shall not exceed 0.4 x yield strength of basemetal.	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used.

- 필렛 용접의 경우, 하중의 방향에 관계없이 유효면적에 걸리는 모든 응력은 전단(shear)으로 가정한다.

2.3 언더프레임의 일반 구조

일반적인 차체는 언더프레임, 측 구조, 지붕 및 단부 구조로 구성되어 있으며, 본 계산을 위해 선택된 부위는 언더프레임 내의 센타 실(Center Sill)과 크로스 부재(Cross bearer)의 연결부이다.

(1) 언더 프레임 : 고장력강(Low Alloy, High Tensile steel) 및 스테인리스 강재(ANSI 301 L)로 제작되어 있으며, 수직하중 (승객하중 및 각종 기기 하중), 연결기를 통해 전달되는 수평하중 및 대차를 통해 전달되는 하중을 견딜 수 있어야 하며, 차체의 기본 하부구조를 이루며, 차체에서 가장 중요한 부위하고 할 수 있다.

(2) 센타 실(Center Sill) : 고강성을 지닌 스테인리스 강재인 , ANSI 301L-1/2H & 1/4H로 제작되어 있다. 볼스타와 볼스타 연결하는 구조물로, 카플러로부터 전달된 하중 및 승객하중을 언더 프레임 전에 전달하는 역할을 하고 있다.

(3) 크로스 부재 (Cross Bearer) : 센타 실(Center Sill)과 사이드 실(Side Sill)을 연결해 주는 언더 프레임의 한 부재이며, 때론 차량 가운데 위치한 센타 실을 감사는 구조를 하고 있다. 승객하중, 기기하중 및 실내 설비품 하중과 같은 수직하중(Vertical Load)을 분산시키며, 사이드 실에서 가해지는 측 하중(Lateral Load)을 견디도록 설계되어 진다.

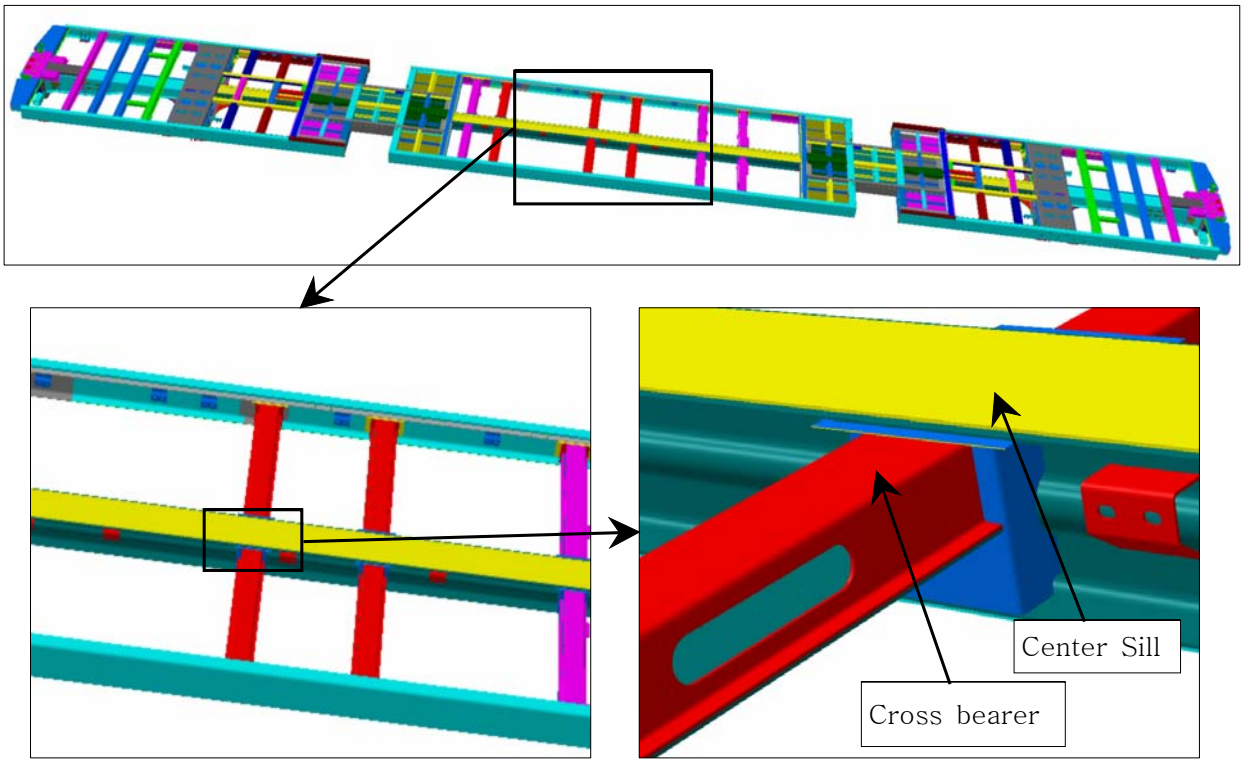


그림1. 언더프레임 (Cross bearer + Center Sill Connection)

2.4 용접이음부 응력 계산

(1) 선택된 용접 이음부 : Cross bearer + Center Sill

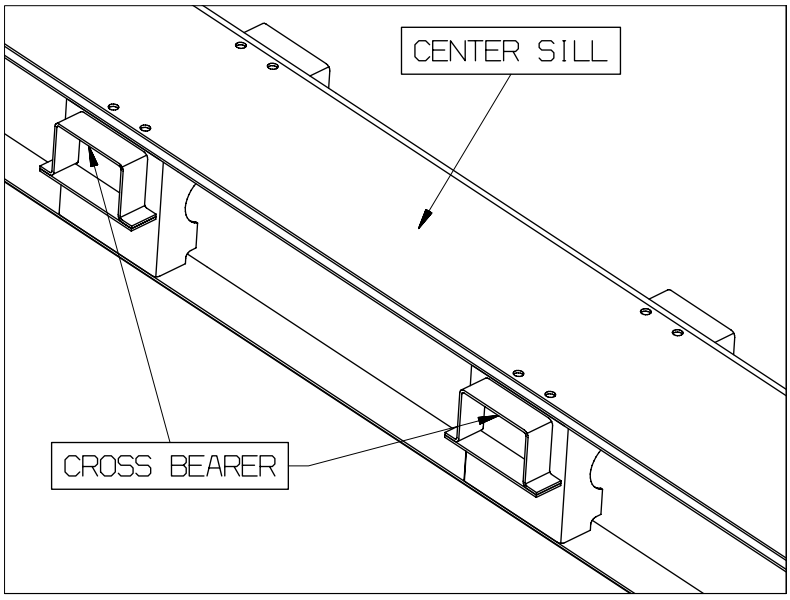


그림2. Cross bearer + Center Sill Connection

(2) 용접부 형상 (Welding configuration)

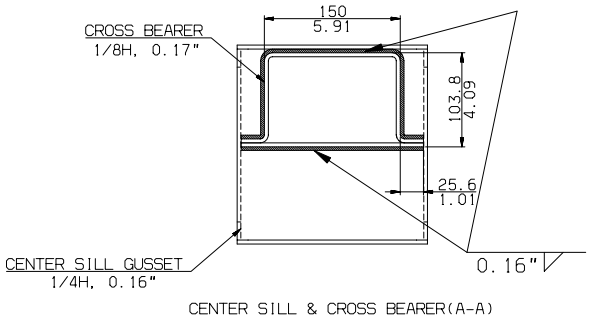
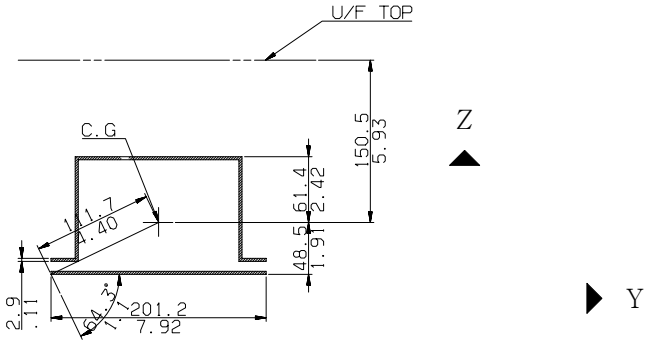


그림3. Welding Configuration

(3) 용가재 및 용접이음부 허용응력

- 용접 방법(Welding Type) : 필렛 용접
- 용가재 (Filler metal) : ER308LSi(AWS A5.9)
- 용가재 인장강도 (Tensile Strength of filler metal) : 93 ksi
- 모재 : Cross bearer (ANSI 301L-1/8H) + Center Sill Gusset (ANSI 301L-1/4H)
- 이음부 허용응력(Allowable Stress on Welded area) : 0.3 x 용가재 인장강도(93 ksi) = 28 ksi (AWS D1.1,Table 2.3)

(4) 용접부 물성치(Properties of weld group)



- Welding properties (Calculated by CATIA V4)

  i) Weld Leg Size = 0.16", ii) Weld Throat Size = 0.11",

  iii) Weld Area = Weld throat size x weld length = 2.6 in^2

  iv) I_{GY}= 8.3 in^4 , v) I_{GZ}= 17.0 in^4 , vi) J = 25.3 in^4

  vii) 용접부 중심 (Center of Gravity) :C_{bottom}=1.91", C_{top}=2.42"

(5) 힘 추출 라인 및 노드 번호 (유한요소해석모델)

(Cutting Line From FE Model and Node numbers at Cutting line)

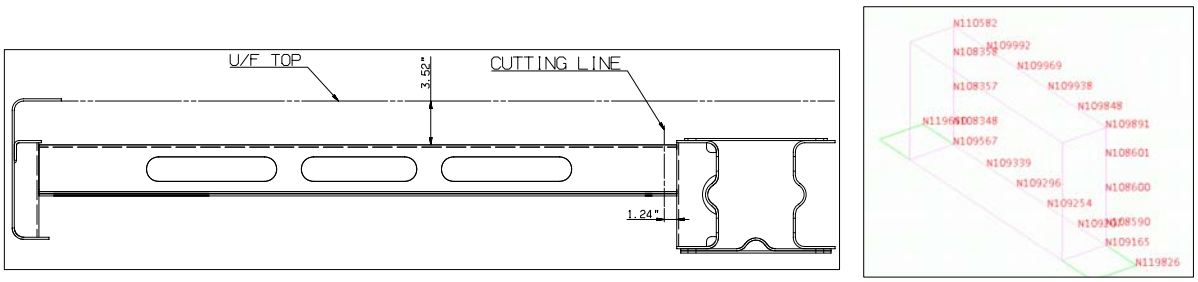


그림4. Cutting line(좌) 및 Node numbers at Cutting line (우)

도표 1. 추출 힘과 모멘트의 합계

	Fx Lateral (lbf)	Fy Longitudinal (lbf)	Fz Vertical (lbf)	Fx		Fy	Fz
				M_{Z1}	M_{Y1}	M_{X1}	M_{X2}
Compression Load (압축하중)	8295	(1814)	429	(38632)	(18801)	(849)	910

: 그림4의 질점들(Nodes)로부터 추출된 힘과 모멘트의 합

(5) 유한 요소 해석 모델로부터 추출한 힘과 모멘트를 이용한 용접부 응력 계산

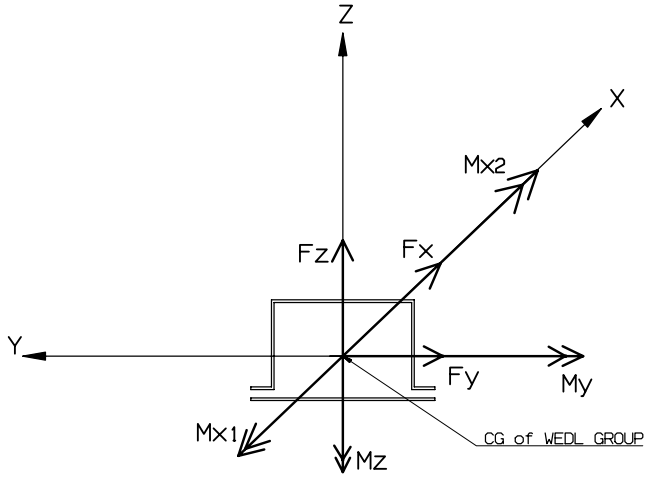


그림5. Forces and Moments diagram on CG of Weld Group(도표1 참조)

가) Stress from Fx, Fy, Fz (compression and shear)

$$\sigma_X = \frac{Fx}{WeldedArea} = \frac{8295}{2.6} = 3190\,psi = 3.2ksi$$

$$\sigma_Y = \frac{Fy}{WeldedArea} = \frac{1814}{2.6} = 698\,psi = 0.7ksi$$

$$\sigma_Z = \frac{Fz}{WeldedArea} = \frac{429}{2.6} = 165\,psi = 0.2ksi$$

나) Stress from M_Y (acting as a bending)

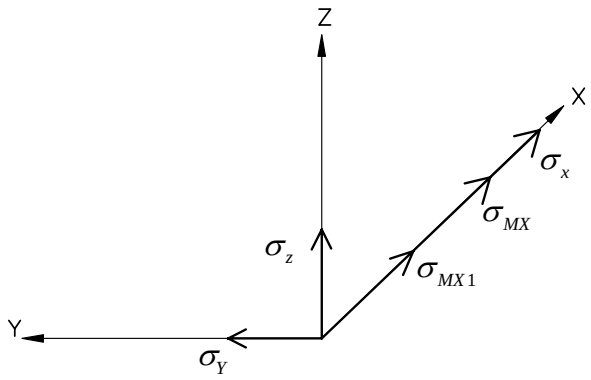
$$\sigma_{MX} = \frac{M_Y C}{I_{GY}} = \frac{18801 \times 2.42}{8.3} = 5.5ksi$$

다) Stress from M_Z (acting as a bending)

$$\sigma_{MX1} = \frac{M_Z C}{I_{GZ}} = \frac{38632 \times (7.92/2)}{17} = 9.0ksi$$

- M_{X1}(+)과 M_{X2}(-)는 상쇄됨으로 계산에서 제외함.
- Welded Area, I_{GY}와 I_{GZ} 는 2.3.(4) 용접부 물성치 참조할 것.

(6) 용접부 합응력 계산 (Resultant Stress on Welded area)



$$\sigma_{cr} = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{MX} + \sigma_{MX1})^2 + \sigma_y{}^2 + \sigma_z{}^2}$$

$$= \sqrt{(3.2 + 5.5 + 9.0)^2 + 0.7^2 + 0.2^2}$$

$$= 17.7$$

(7) 안전계수 (Safety Factor of Welded Area)

$$s_s = \frac{AllowableStressOfFillerMetal}{resultanStress(\sigma_R)} = \frac{28}{17.7} = 1.58$$

3. 결 론

유한 요소 해석 프로그램의 발전과 20년이 넘는 동안의 축적된 철도차량 해석 기술 덕분에 전통적으로 수행해 오던 수계산이 필요 없어졌을 뿐만 아니라, 보다 정확하고 안전한 차체 정적 해석이 가능해 졌다. 하지만, 모든 계산을 유한 요소 해석 프로그램에 의지할 수 없을 뿐만 아니라, 유한 요소 해석 이전에 사전 확인 차원에서 간단한 수계산을 통해 용접부위를 검증하는 것은 유효할 뿐만 아니라 필수적인 것이라고 할 수 있다.

사양에 명시된 모든 하중 조건하에서, 모든 차체의 용접부에 대해서 위와 같은 추가적인 용접부 응력 계산을 하는 것은 너무 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라, 때때로 무의미하다고 할 수 있다. 하지만, 보다 보수적인 설계 측면에서 보았을 때, 설계자가 생각하는 중요 부위(Critical joints)이며, 구조상 완전 용입 용접을 이룰 수 없는 곳에는 위와 같은 계산을 통해서 용접 방법(Weld method) 및 용접 치수(Weld size)를 정하는 것이 합리적이며, 보수적이며 안전한 용접 조인트 설계 방법이라고 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 현대로템 : Welding Joint Calculations and Stress Analysis Report for SEPTA
2. AWS D1.1:2006, Table 2.3
3. Section 7.4 "Determining Weld Size" in Design of Welded Structures Structure published by THE JAMES F.LINCOLN ARC WELDING FOUNDATION.