

전로 지지장치 접합부 강도설계에 관한 연구

A Study of the Link Strength Design of Converter Suspension System

이 만 승* · 김 현 배**

Lee, Man-Seung · Kim, Hyun-Bae

요 약

철강 플랜트 주요 설비인 전로를 지지하는 장치의 접합부 강도설계를 위해 작용하중은 해석적인 방법으로 신뢰성 있게 계산하였고, 정적하중에 의한 응력은 ASME 규정에 따른 허용응력으로 평가하였다. 한편 피로설계 측면에서는 전로와 같은 대형 용접구조물은 강도상 취약부인 용접부에서 다양한 용접비드 형상에 따라 국부응력이 크게 달라지므로 설계단계에서 피로수명 평가에 어려움이 있었다. 따라서 전로 지지장치 접합부 피로설계는 설계단계에서 피로수명을 평가하는 실용적이고 안전측 방법으로 알려진 Hot Spot 응력을 사용하고 공신력을 갖는 설계규정인 ASME와 영국 PD 5500 절차에 의해 평가하였다. 평가결과 두 규정 모두 안전측에서 평가되는 것을 확인할 수 있었고 이 방법은 피로하중이 지배적인 대형구조물의 설계단계에서 유용한 방법으로 활용할 수 있으리라 판단된다.

keywords : *fatigue design*, 전로, PD 5500, hot spot

1. 서 론

전로(Converter)는 철(iron)을 강(steel)로 변화시키는 철강 플랜트의 주요 설비로서 전로 본체(Vessel)는 수평둘레에서 원환형 Trunnion Ring에 의해 지지된다. 본체와 Trunnion Ring을 연결하는 구조를 지지장치(Suspension System)라고 한다. 지지장치의 기능은 철강조업 과정에서 발생하는 전로의 열팽창을 허용하면서 모든 운전상태에서 전로 본체를 안전하게 지지하는 것이다. 지지장치에는 현재까지 여러 종류가 개발되어 있고 1970년대 후반까지 북미에서는 가장 보편적인 지지방법이 Bracket Support System 이었으나 현재는 오스트리아 VAI사에서 개발된 CON-link 방식이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 CON-link 방식에 대해 지지장치에 작용하는 하중을 해석적인 방법을 사용한 전산화를 통해 계산하고 강도측면에서 취약한 접합부(link)의 허용응력에 의한 안전성 평가와 국제적 공신력이 있는 규정인 ASME 및 영국 PD 5500 Code에 의해 피로수명 평가를 수행하고 결과를 비교하였다.

2. 전로 본체와 Trunnion Ring 접합부 하중계산

2.1. 접합부에 작용하는 하중의 종류

전로 지지장치 CON-link는 그림 1과 같이 수직방향 힌지링크 3개와 수평방향 힌지링크 2개 및 흔들림 방

* 정회원 · 포스코건설 R&D Center 차장 mans@poscoenc.com

** 포스코건설 R&D Center 상무 kimhb@poscoenc.com

지용 Stabilizer bracket 1개를 가진다. 이들 힌지링크들은 pin joint와 spherical plain bearing의 조합에 의해 전로의 거동을 공간상에서 6 자유도를 구속하고 있기 때문에 이론적으로 명확하고 또한 전로의 반경방향과 길이방향 열변형을 힌지방식으로 구속을 최소화함으로써 부가적인 2차 응력이 발생하지 않는 방식이라고 할 수 있다.

LV1, LV2, LV3 : 수직 Link에 작용하는 하중
 LH1, LH2 : 수평 Link에 작용하는 하중
 LVx, LVz : 회전중심에서 수직 link까지 반경/수직방향 거리
 LHx, LHy, LHx : 회전중심에서 수평 link까지 x,y,z방향 거리
 α : 수직 link 의 수직방향에 대한 경사각
 β : 평면도에서 수직 link의 수평에 대한 경사각
 γ : 평면도에서 수평 link의 수평에 대한 경사각

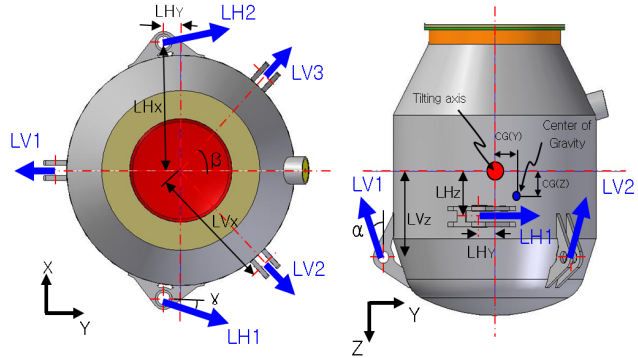


그림 1 전로 지지장치(CON-link)에 작용하는 하중과 기호 설명

2.2. 접합부에 작용하는 하중 계산

전로 지지장치에 작용하는 하중과 거리 및 경사각도를 기호로 나타내면 그림 1과 같고 이 힘들의 평형조건을 이용하면 다음 벡터 평형방정식을 구할 수 있다.

$$\sum F = 0, \quad LV1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LV2 \cdot \begin{bmatrix} -\sin \alpha \times \sin \beta \\ \sin \alpha \times \cos \beta \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LV3 \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha \times \sin \beta \\ \sin \alpha \times \cos \beta \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LH1 \cdot \begin{bmatrix} -\sin \gamma \\ \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + LH2 \cdot \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\sum M = 0, \quad LV1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -LVx \\ LVz \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LV2 \cdot \begin{bmatrix} -LVx \times \sin \beta \\ LVx \times \cos \beta \\ LVz \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin \alpha \times \sin \beta \\ \sin \alpha \times \cos \beta \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LV3 \cdot \begin{bmatrix} LVx \times \sin \beta \\ LVx \times \cos \beta \\ LVz \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin \alpha \times \sin \beta \\ \sin \alpha \times \cos \beta \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} + LH1 \cdot \begin{bmatrix} -LHx \\ -LHy \\ LHx \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin \gamma \\ \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + LH2 \cdot \begin{bmatrix} LHx \\ -LHy \\ LHx \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ CG(y) \\ CG(z) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 평형방정식을 계산하여 링크하중에 대해 나타내면 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있고 그림 2와 같이 경동 및 조업조건에 따른 각 링크하중을 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 & -0.2185 & 0.2185 & -0.0958 & 0.0958 \\ -0.3090 & 0.2185 & 0.2185 & 0.9954 & 0.9954 \\ -0.9511 & -0.9511 & -0.9511 & 0 & 0 \\ 5617 & -3972 & -3972 & -1812 & -1812 \\ 0 & -3972 & 3972 & -174.4 & 174.4 \\ 0 & 0 & 0 & -5012 & 5012 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} LV1 \\ LV2 \\ LV3 \\ LH1 \\ LH2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -FY \\ -FZ \\ 561FY + FZ \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

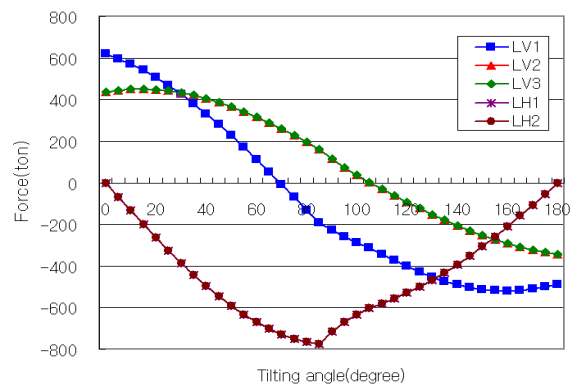


그림 2 전로 경동에 따른 링크부 작용하중 예

3. 전로 지지장치 접합부 응력해석 및 허용응력 평가

전로 지지장치 접합부 응력해석을 위해 전로 조업조건에서 발생하는 하중을 전로를 지지하는 Trunnion Ring에 입력하고(전로 직립시와 90° 경동시 그림 3 참조), Trunnion Ring shaft의 구동측과 자유측은 자동조심형 베어링을 사용하므로 회전구속을 받지 않는 경계조건을 입력한다. 이 Trunnion Ring 모델을 구조해석 SW인 ANSYS에 의해 유한요소 탄성해석을 수행한 결과 수평 Link 접합부에서 최대응력이 발생하였다(그림 4 참조). 이 응력은 국부적인 용접부 peak 응력으로 간주할 수 있다.

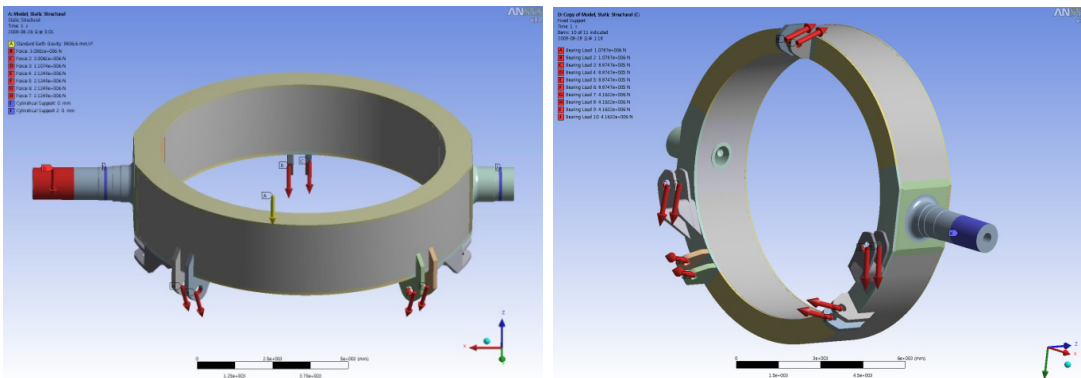


그림 3 전로 직립시와 90° 경동시 지지장치 접합부의 하중조건

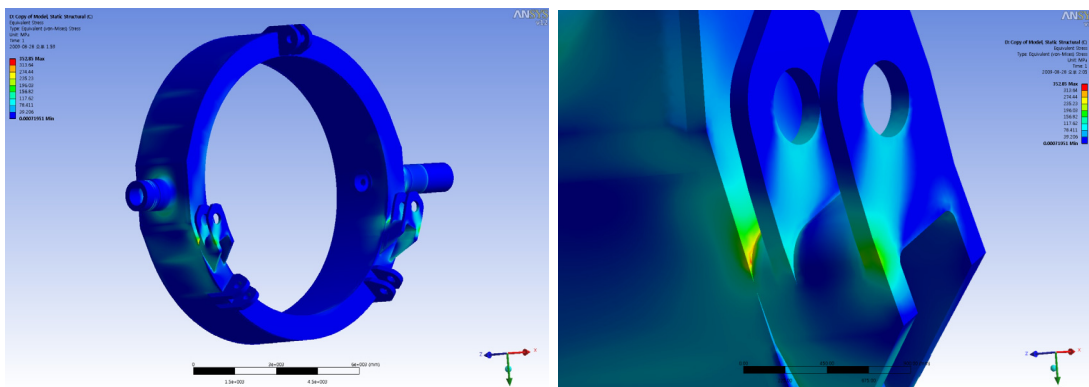


그림 4 전로 90° 경동시 지지장치 접합부의 최대 등가응력(Equivalent stress)

접합부 강도설계를 위한 발생응력의 ASME VIII Division 2 를 이용한 허용응력 평가는 다음과 같다.

$$\text{최대응력 허용기준} : \sigma_{\max} < k \cdot S_m \quad (4)$$

여기서, S_m = 설계 응력세기(stress intensity) = $\min \left\{ \frac{R_m}{3}, \frac{R_p}{1.5} \right\}$ (R_m : ultimate strength, R_p : yield strength)
 k = 하중조합에 따른 응력세기의 할증계수

$R_p = 160\text{MPa}$, $R_m = 360\text{MPa}$ (P275NH in 250°C, thickness = 130mm)

Minimum $S_m = 107\text{MPa}$, $k=1.5$ at local membrane stress

허용응력($k S_m$)은 160MPa이고 접합부 막응력은 140MPa로 허용응력 이내에 있다고 평가할 수 있다.

4. 전로 지지장치 접합부 피로설계

전로 지지장치 접합부의 최대응력발생 부위는 용접된 기하학적 불연속부이다. 실제적으로 용접비드 형상에 따라서 유한요소해석 결과는 국부적으로 매우 심한 응력변화가 나타난다. 따라서 설계단계에서 대형 용접구조물의 경우 용접형상 모델링이 어려우므로 실용적으로 피로수명을 평가하는 방법으로써 Hot-spot 응력을 사용할 수 있다. 이는 용접비드 형상을 배제한 구조적 응력이며 특히 Solid요소를 이용한 유한요소해석을 적용하면 매우 높은 정도로 구할 수 있는 것으로 보고되어 있다. 본 연구에서는 전로 운전조건 중 응력이 가장 큰 +90° 경동시점을 기준으로 Hot-spot 응력을 구하고 ASME 규정과 BS 규정에 의한 피로수명을 비교하였다. 구조해석 결과 전로 지지장치 접합부 용접선단에서 0.5t(는 판두께) 와 1.5t 떨어진 거리에서 기하학적 주응력 성분은 190MPa, 2.5MPa, -5.0MPa 로 나타났다. 시편 실험결과는 4,500회 정도가 되었다.

4.1. ASME 규정에 의한 피로수명 평가

ASME VIII Division 2, Appendix 5 규정에 따른 응력진폭, S_a 은 다음과 같다.

$S_a = (1/2)(190 - (-5))$ 여기에 -90° 경동을 고려하고, ASME에서는 피크응력을 요구하므로 응력집중계수(2.5)를 곱하면 $S_a = 488\text{MPa}$ 로서 피로수명은 2,000회 정도를 나타낸다.

4.2. PD 5500 규정에 의한 피로수명 평가

PD 5500:2009 Annex C에서 최대 주응력이 190MPa, -90° 경동을 고려한 경우, Trunnion shaft 하부 균열에 적용되는 Curve W를 채택하면 피로수명은 2,879회를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 전로 지지장치에 작용하는 하중은 해석적 방법을 이용하여 신뢰성 있게 계산하였고, 접합부의 응력은 ASME 규정에 따른 허용응력으로 평가하였다. 피로설계 측면에서는 전로와 같은 대형 용접구조물의 설계단계에서 피로수명을 평가하는 실용적이고 안전측의 방법인 Hot Spot응력이 계산되었고 ASME 규정과 영국 PD 5500 규정에 의한 지지장치 접합부의 피로평가는 모두 안전측에서 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 방법은 피로하중이 지배적인 대형구조물의 설계단계에서 유용한 방법이라고 판단된다.

참고문헌

- 이만승 (2008) 전로 구조 설계에 관한 연구, 공학박사, 부산대학교
- 신병천 등 (2001) 대형용접구조물의 피로수명 예측기술 개발, 2000-N-NL-01-C-065, 한국기계연구원, 대전.
- Mayer *et al.*, (2000) Review of fatigue design procedures for pressure vessels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77, pp.775~781.
- ASME BPV-VIII-2 (1995) *Boiler and pressure vessel code : section VIII - Rules for construction of pressure vessel : division 2-alternative design rules. Appendix 5*, The American Society for Mechanical Engineers, New York
- PD 5500(formerly BS 5500) (2009) *British standard specification for unfired fusion welded pressure vessels. Annex C*, British Standards Institution, UK