

등가구조응력법을 이용한 철도차량 용접대차프레임의 피로해석

Fatigue Analysis of Welding Bogie Frames for Rolling Stocks Using The equilibrium-equivalent structural stress method

김철수†, 안승호*, 정광우*, 전영석*, 박춘수**, 김상수**, 장천수 ***
Chul-Su Kim, Seung-Ho Ahn, Kwang-Woo Chung, Young Suk Cheon,
Choon-Soo Park, Sangsu Kim and Cheon-Su Jang

ABSTRACT

Fatigue design and evaluation of welded joints are typically carried out by weld classification approach in which a family (theoretically infinite) of parallel nominal stress based S-N curves are used according to joint types and loading modes as well as extrapolation-based hot spot stress. Traditional finite element methods are not capable of consistently capturing the stress concentration effects on fatigue behavior due to their mesh-sensitivity in stress determination at welds resulted from notch stress singularity. The extrapolated hot spot stresses tend vary, depending on the element sizes, types, joint types, and loading mode. however, the equilibrium-equivalent structural stress method(E2S2) has been recently developed through several joint industry projects as a robust method to analyze welded components using finite element analysis. This method has been proven effective in correlating a large amount of published fatigue test results in the literature such as master S-N curve and has used for evaluating the fatigue life of welding components. In this study, fatigue analysis of the welding bogie frame is examined using E2S2 method with master S-N curve.

1. 서론

철도차량 대차프레임의 설계 승인에 관한 EN 13749규격[1]은 다양한 하중조건하에 응력해석결과로부터 'Goodman diagram' 또는 'Wöhler daigram'을 이용한 안전성을 검토하고, 이후에는 실물 피로시험을 3 단계 조합하중(combined fatigue load)에 걸쳐 진행하면서 피로파손 여부를 검토한다. 그러나 이 규격에서 피로해석은 용접부로 제작된 대차프레임에도 불구하고, 다양한 하중모드 및 품질특성을 고려한 용접부 수명평가를 수행하지 못하고 있다.[2] 따라서 설계에 대한 검증단계에서 피로시험 이전에 시간 및 비용을 줄이면서 대차프레임의 안전성 검토를 위해서는 용접부를 고려한 대차프레임의 피로수명을 평가하는 것이 중요하다.

최근까지 용접구조물의 피로설계는 용접품질 수준에 따라 공칭응력법(nominal stress method)[3] 또는 핫스팟 응력법(hot-spot stress method)[4-5]에 의한 S-N선도로부터 수행하였다. 이러한 기존방법들은 다양한 하중모드, 요소망 크기, 결합형태, 품질등급에 따라 분류하여 피로해석에 적용하므로 매우 어렵고 시간과 비용이 많이 소요된다. 그러나 최근 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안으로서, 최근 'Volvo 자동차와 Chalmers대학'은 연속용접부 해석기법을 제시하였으며[6], Battelle 연구소는 등가구조응력(the equilibrium-equivalent structural stress method, E2S2 method)접근법을 제안하였다[7-9]. 특히 후자는 요소망 크기(mesh size)에 덜 민감하면서 기존의 하중모드형식(loading type), 두께효과(thickness effect) 및 용접결합 형식(welded joint type)에 상관없이 Master S-N선도로부터 부품의 수명을 평가한다고 보고[7-9]되고 있다.

† 정회원, 한국철도대학 차량기계과 교수
E-mail : chalskim@paran.com
TEL : (070)8855-1649 FAX : (031)462-2944
* 정회원, 한국철도대학, 운전기전과 교수
** 정회원, 철도기술연구원, 책임연구원
*** Dassault System Simulia Korea, 부장

본 연구에서는 합리적인 철도차량 용접대차프레임의 피로해석 연구일환으로서, E2S2접근법을 이용하여 EN규격의 피로시험조건하에 이의 피로수명을 평가하고자 한다.

2. 이론해석 - 등가구조응력법에 의한 피로해석

용접부를 갖는 후판의 응력분포는 용접접합부(weld toe)와 같은 노치선단에서 비선형 거동을 나타낸다. 이러한 거동을 단순화하기 위하여 Dong 등[7-9]은 구조응력(structural stress)을 제시하였으며, 이는 멤브레인응력과 굽힘응력성분의 선형결합형태로 정의함으로써 관두께상에 증립축까지 선형분포로 가정하여 얻어진다. 용접 접합부의 각 노드지점에서 용접선의 수직성분 구조응력은 가상노드방법(virtual node method)[7]에 의하여 단순화하면, 식 (1)과 같다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{y'}}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (\text{Normal to weld line}) \quad (1)$$

여기서 σ_s 은 구조응력, σ_m 은 멤브레인응력, σ_b 는 굽힘응력이며, $f_{y'}$ 및 m_x 는 각각 line force 및 line moment이다. Fig. 1은 용접부 열영향부에서 구조응력접근법과 핫-스팟접근법을 이용한 응력해석결과를 두께 및 요소형태에 따라 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일지점에서 기존 핫-스팟 응력접근법의 경우 용접 연결부의 요소망 크기는 두께 및 요소형태에 따라 응력의 변동성을 보이지만, 구조응력접근법은 이들에 대하여 민감하지 않음을 알 수 있다[7-9].

반복하중하에서 등가구조 응력범위(equilibrium-equivalent structural stress range)는 식 (1)를 두께효과(t)와 굽힘비효과(r)로 나누어 표현한 식 (2)와 같다.

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{2-m} \cdot I(r)^m} \quad (2)$$

이 식의 등가구조응력범위(ΔS_s)는 구조응력의 응력집중효과($\Delta \sigma_s$), 두께효과(t), 하중모드효과(r)를 동시에 고려하여 등가할 수 있는 피로거동 파라미터이다[7-9].

Fig. 2는 E2S2에 의한 ΔS_s 을 이용한 용접부의 피로수명 평가 절차를 나타낸 것이다[7,8]. 그림에서 왼쪽 상단박스는 유한요소해석을 이용하여 용접부의 E2S2를 구한 값을 구한 절차이며, 우측 상단박스는 공칭응력-수명선도 자료로부터 E2S2-피로수명을 변환하는 절차이다. 용접부의 피로수명은 이들 두 절차를 수행한 후에 하단의 점선박스처럼 식 (2)의 ΔS_s 로부터 Fig. 3의 'master S-N'선도[8,9]을 이용하여 평가한다.

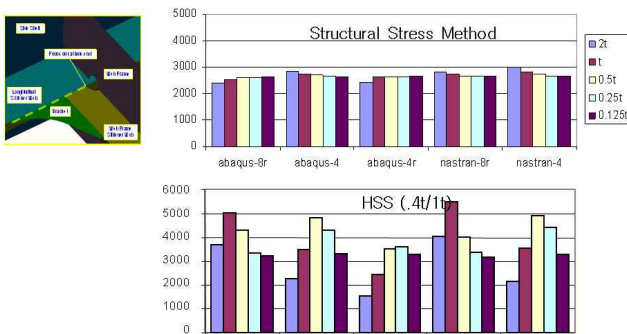


Fig. 1 A recent comparison between HSS and structural stress methods[7]

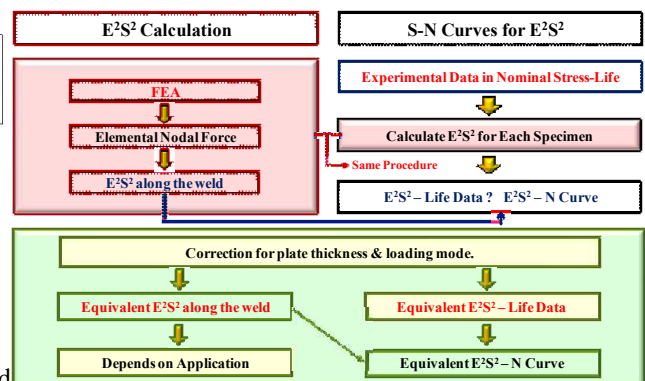


Fig.2 Schematic analysis flow with the equilibrium-equivalent structural stress method[7-8]

이 선도는 그림에서 보는 바와 같이 두께, 하중모드, 요소망 민감도 및 응력집중에 의한 효과를 하나의 상관식으로서 표현할 수 있으므로 용접부의 피로수명을 효과적으로 예측한다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 용접부 요소망 생성 및 경계조건

Fig.4은 응력해석을 위한 대차프레임의 유한요소망 생성(finite element mesh generation)을 나타낸 것이다. 용접부의 요소망 생성(mesh generation)은 MSC.PATRAN의 PCL을 이용하여 효율적으로 모델링하였다.

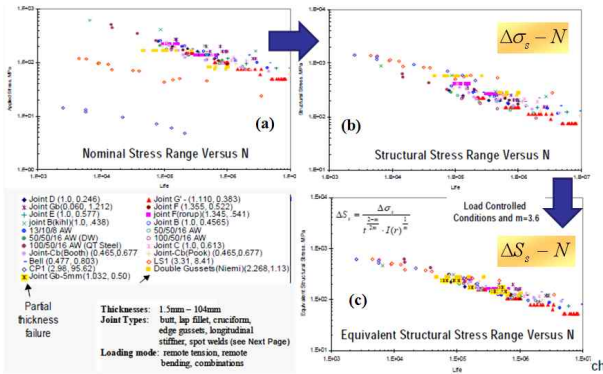


Fig. 3 Correlation of existing S-N data for various joint types, loading modes, and plate thicknesses: (a) nominal stress range versus life; (b) structural stress range versus life. (c) equivalent structural stress range versus life[7-9]

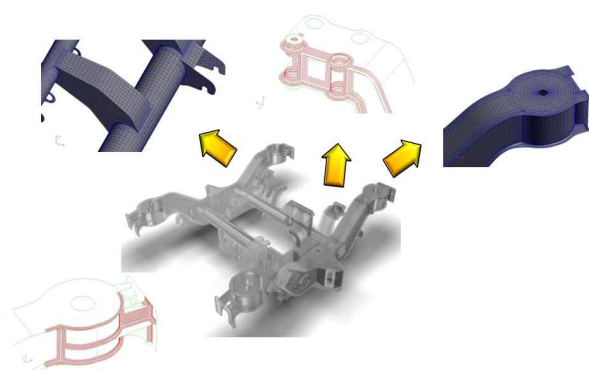
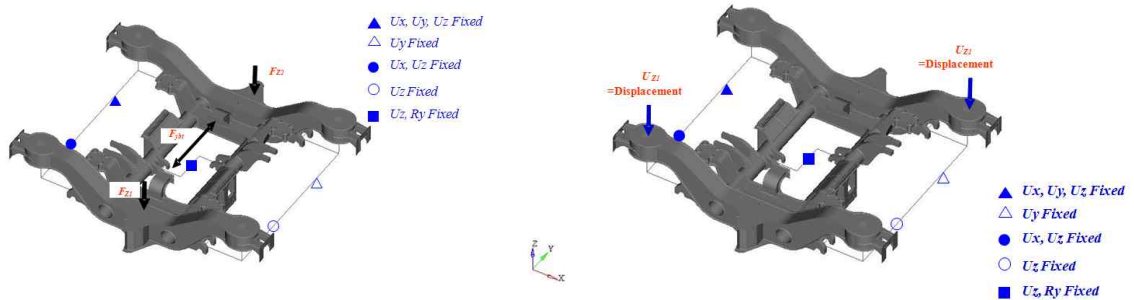


Fig. 4 Mesh generation of welding bogie frame

Fig. 5는 EN13749규격의 피로시험조건하에 용접대차프레임의 경계/하중조건의 일례를 나타낸 것이다. 이는 EN규격의 실물 피로시험조건을 고려하여 부여한 것이다. 수직, 좌우하중 및 비틀림모멘트에 의한 피로하중은 EN규격에 준하여 승객질량, 공차질량, 대차질량 및 차량당 대수로부터 세단계를 거쳐 각각 부여하였다.



(a) 수직/좌우하중

(b) 비틀림효과

Fig. 5 EN규격에 준한 용접대차프레임의 경계조건 일례

3.2 정규모드 해석

3.1절에서 용접대차프레임의 유한 요소망에 대한 검증을 위한 연구일환으로서, 정규모드해석(Normal modal analysis)을 이용하여 모재부와 용접대차프레임의 고유진동수를 검토하는 것이 필요하다.

Fig. 6은 1차 및 3차 모드변화와 고유진동수를 나타낸 것이며, 표 1은 모재부와 용접 대차프레임에 대하여 4차 모드까지 고유진동수를 비교하여 정리한 것이다. 해석에 입력자료로서 사용되는 재료의 탄성계수(elastic modulus)는 207GPa이고, 프아송비(poisson's ratio)는 0.29이며, 정규모드해석은 MSC.NASTRAN을 사용하였다. Fig. 7에서 대차프레임의 최대변위는 각 사이트프레임의 액슬부에서 크게 나타났다. 표1

에서 보는 바와 같이 1차모드에서 용접요소망생성 이전의 고유진동수는 30.85Hz이며, 생성후 고유진동수는 매우 유사하다. 이로부터 대차프레임의 용접 연결부의 요소망 생성에 대한 합리성을 검증한 것이다.

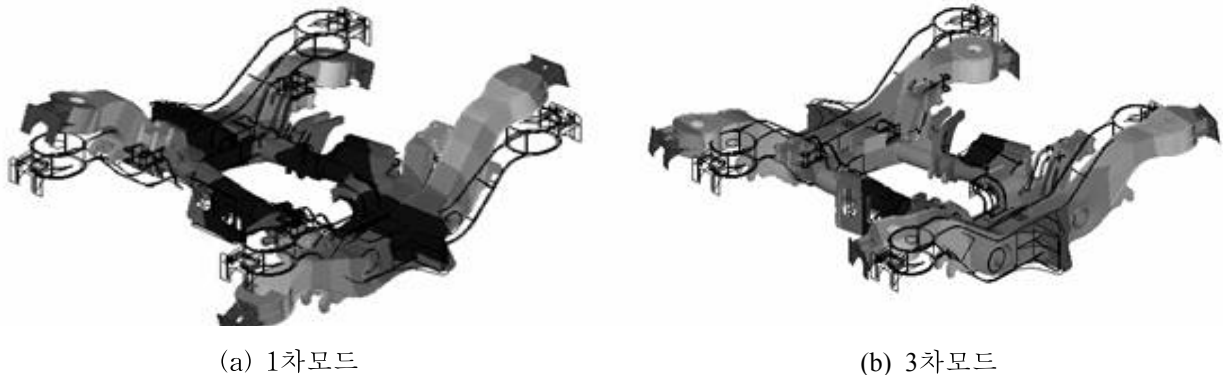


Fig. 6 정규모드해석일례

표 1 모재부와 용접 대차프레임에 대하여 5차 모드까지 고유진동수의 비교

Natural Frequency (Hz)		
Mode	Before Welding element mesh generation	After Welding element mesh generation
1차	30.12	30.85
3차	60.46	60.89
5차	88.87	88.77

3.3 피로해석

3.3.1 응력해석

용접대차프레임의 피로해석을 수행하기 위해서는 정하중하에서 유한요소해석(finite element analysis) 결과가 필요하다. Fig. 7은 EN규격 예외하중조건하에 각각의 주응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 수직 및 좌우방향(횡방향) 하중, 비틀림변위하에 얻어진 것으로 이의 최대주응력은 293MPa이고, Fig. 7(b)는 수직 및 길이방향(종방향) 하중하에 얻어진 것으로 이의 최대주응력은 187MPa이다. 이들은 모재의 허용응력 365MPa 보다 작은 값으로 안전하다.

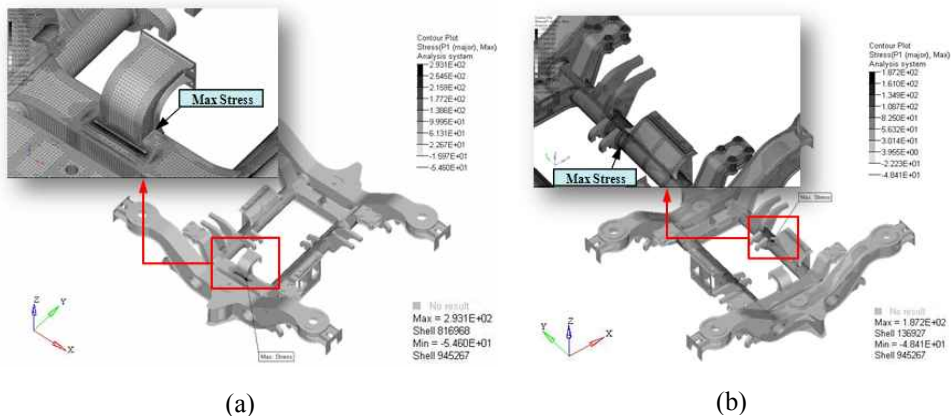
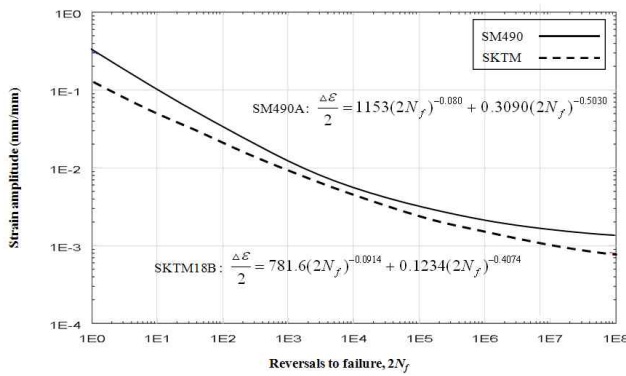


Fig. 7 max. principal stress contour under EN standard

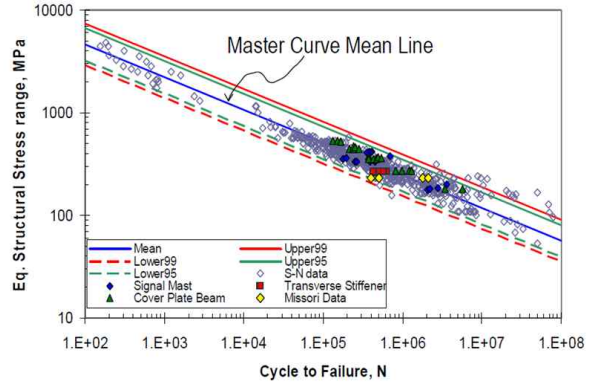
3.3.2 피로특성 및 입력자료

내구성 해석의 필수입력자료는 응력텐서량, 소재의 피로특성 및 하중이력이다. 모재의 피로특성은 Fig. 8(a)과 같이 SM490A(KS D 3515, 저온강성 보완)강과 STKM 18B(KS D 3517)강이며, 이의 피로특성은 그림에 제시한 바와 같다. 그리고 용접부의 피로특성은 두께, 하중모드, 연결형상에 무관하게 사용할 수 있

는 Fig. 8(b)의 Master S-N 선도를 사용하였다. 따라서 이 방법은 기존의 방법과 달리 다양한 용접연결부에 따른 각각의 피로특성을 평가하지 않고, E2S2에 의한 피로수명을 평가하므로 매우 유용한 방법이다.



(a)



(b) Master S-N curve

Fig. 8 Fatigue properties of base metals and welded part

3.3.3 피로누적손상 평가

Fig. 9는 용접대차프레임에 대한 내구성해석결과를 나타낸 것이다. 모재만으로 구성된 대차프레임은 무한수명으로 안전하다고 평가되지만, 용접부를 고려한 대차프레임은 유한수명으로 평가되었다. 이는 다양한 용접 연결부에서 응력 형태별 응력집중효과로 기인한 것이다.

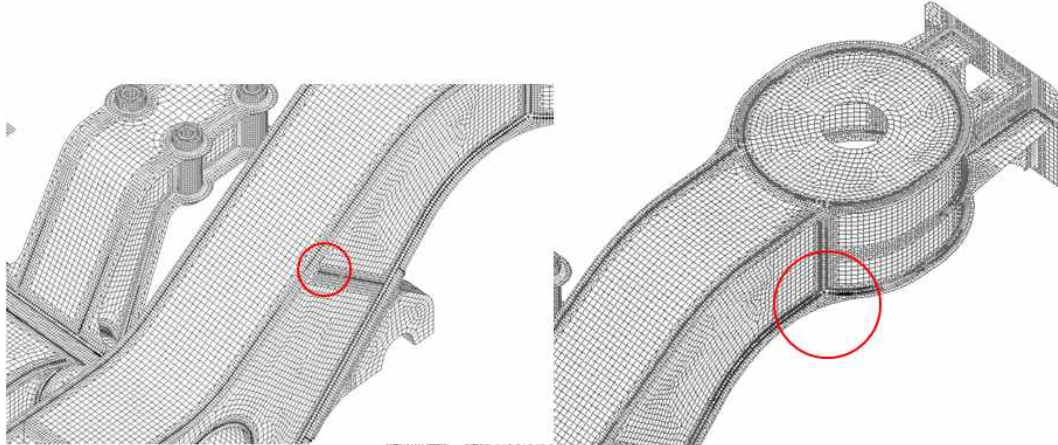


Fig. 9 fatigue damage distribution of bogie frame

4. 결론

본 연구에서는 합리적인 철도차량 용접대차프레임의 피로해석 연구일환으로서, E2S2접근법을 이용하여 EN규격의 피로시험조건하에 이의 피로수명을 평가하였다. 또한 모드해석결과로부터 대차프레임의 용접 연결부의 요소망 생성에 대한 합리성을 검증하였다. 모드별 용접대차프레임의 고유진동수 해석결과는 실주행 하중이력의 가진주파수 평가결과로부터 향후에 공진여부를 판단하는 기준으로 사용할 수 있다. 재만으로 구성된 대차프레임은 무한수명으로 안전하다고 평가되지만, 용접부를 고려한 대차프레임은 유한수명으로 평가되었다. 이는 다양한 용접 연결부에서 응력 형태별 응력집중효과로 기인한 것이다. 따라서 향후 대차프레임설계승인의 최종단계인 궤도주행시험단계에서 취약부위 및 허용응력계산 시 이러한 점들을 체계적으로 고려해야 될 것으로 사료된다.

감사의글

본 연구는 분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발의 일환으로 국토해양부의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1]EN Code 13749, Railway Applications - Methods of Specifying Structural Requirements of Bogie Frames, European Standard, 2005
- [2] A. Cera, G. Mancini, V. Leonardi and L. Berti (2008) "Analysis of Methodologies for Fatigue Calculation for Railway Bogie Frames", WCRR 2008.
- [3] Hobbacher, A., "Basic Philosophy of the New IIW Recommendations on Fatigue Design of Welded Joints and Components," Welding in the World, vol. 39, No. 5, 1997, pp. 272-278.
- [4] Fricke W., "Recommended Hot-Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSO's and Ships Based on Round-Robin FE Analysis, ISOPE Proceedings, Stavanger, Norway, June 2001.
- [5] Niemi, E and Tanskanen, P., "Hot-Spot Stress Determination for Welded Edge Gussets," IIW XIII-1781-99. 1999.
- [6] M. Fermer, M. Anderson and B. Frodin, 1998, "Fatigue Life Prediction of MAG-Welded Thin-Sheet Structures", SAE Tech. Paper 982311, pp. 1-7.
- [7] Healy, B.E., "A Case Study Comparison of Surface Extrapolation and Battelle Structural Stress Methodologies," to appear in Proceedings of the 23rd International conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 20-25, 2004, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [8] Dong, P., Hong, J.K., Osage, D., and Prager, M., "Master S-N curve approach for welded components," Welding Research Council Bulletin, No. 474, December, 2002, New York, New York, 10016.
- [9] Dong, P., "A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Characterizing Fatigue Behavior of Welded Joints," International Journal of Fatigue, Vol. 23, No. 10, pp. 865-876, 2001.