

EN규격에 준한 철도차량 용접대차프레임 내구성 해석

김철수*, 안승호**, 정광우**, 박춘수***, 김상수***, 장천수****

*한국철도대학 철도차량기계과

**한국철도대학 철도운전기전과

***한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단

****Dassault System Simulia Korea

e-mail : chalskim@paran.com

Durability Analysis of Welding Bogie Frames for Rolling Stocks According to EN Standard

C.S. Kim*, S.H. Ahn**, K.W.Chung**, C.S. Park***, S.S. Kim*** and C.S. Jang****

*Dept. of Rolling Stock Mech. Eng., KNRC

**Dept. of Railroad Train Operation & Mechatronics, KNRC

***HSR R&D Center., KRRRI

****Dassault System Simulia Korea.

요 약

최근까지 용접구조물의 피로설계는 용접품질 수준에 따라 공칭응력 또는 핫스팟 응력에 의한 S-N선도로부터 수행하였다. 본 연구에서는 유한요소망의 크기에 덜 민감하면서 기존의 하중모드형식, 두께 효과 및 용접결합형식에 상관없는 등가구조응력(E2S2) 접근법을 이용한 Master S-N선도로부터 철도차량 대차프레임의 피로수명을 평가하고자 한다. 또한 합리적인 철도차량 용접대차프레임의 피로해석 연구 일환으로서, 다축피로조건인 EN규격의 피로시험조건하에 이의 피로수명을 평가하고자 한다.

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 다축피로하중(Multiaxial Fatigue Load)조건하에 3단계 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.[2,3] 따라서 설계에 대한 검증단계에서 피로시험 이전에 시간 및 비용을 줄이면서 대차프레임의 안전성 검토를 위해서는 다축피로하중조건하에 용접부를 고려한 대차프레임의 피로수명을 평가하는 것이 중요하다.

최근까지 용접구조물의 피로설계는 용접품질 수준에 따라 공칭응력법(nominal stress method) 또는 핫스팟 응력법(hot-spot stress method)에 의한 S-N선도로부터 수행하였다. 이러한 기존방법들은 다양한 하중모드, 요소망 크기, 결합형태, 품질등급

에 따라 분류하여 피로해석에 적용하므로 매우 어렵고 시간과 비용이 많이 소요된다. 그러나 최근 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안으로서, 최근 산업계에서 ‘Volvo 자동차와 Chalmers대학’에 개발한 연속용접부 피로해석 기법[3]과 ‘Battelle’연구소의 등가구조응력(equilibrium-equivalent structural stress method, E2S2) 접근법을 제안하고 있다[5-7]. 연속용접부 피로해석 기법은 열영향부(Heat affected zone)의 응력상태에 따라 피로특성의 변화를 고려한다. 이로 인하여 동일한 응력수준을 가지는 영역에서도 축방향 응력(axial stress)이 지배적이면 ‘Stiff S-N Curve’를 사용하고, 굽힘응력(bending Stress)가 지배적이면 ‘Flexible S-N Curve’에 준하여 피로수명을 예측한다. 그리고 등가구조응력 접근법은 요소망 크기에 덜 민감하면서 기존의 하중모드형식, 두께효과 및 용접결합형식에 상관없이 Master S-N선도로부터 부품의 수명을 평가할 수 있다.

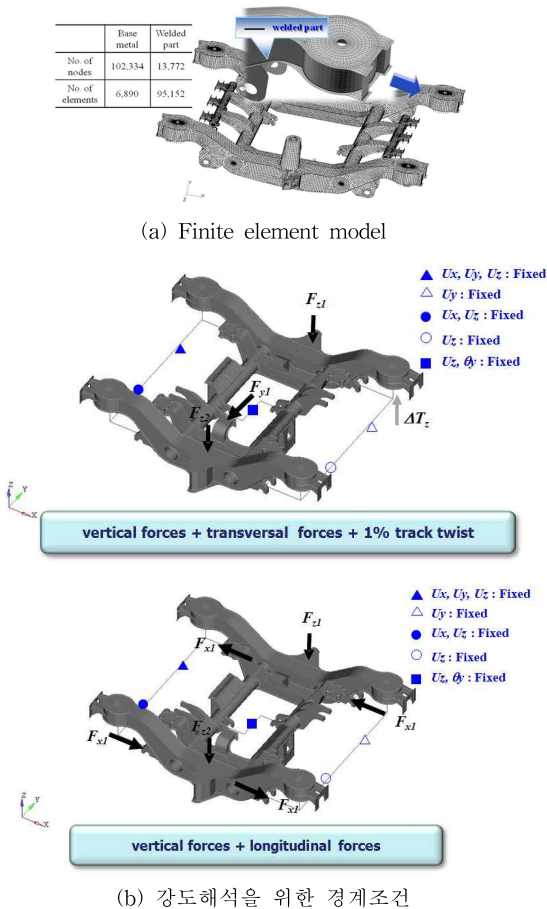
본 연구에서는 합리적인 용접대차프레임의 내구해석기법을 확립하기 위하여, 다축피로해석관점에서 ‘Battelle’연구소의 등가구조응력 접근법에 의하여 누적손상을 평가함으로써, 단축피로해석결과(불보자동

차의 연속용접부의 피로해석기법)와 각각 비교 및 검토하고자 한다.

2. 해석결과 및 고찰

2.1 유한요소모델 구축 및 모드해석

그림1은 응력해석을 위한 유한요소망 생성(finite element mesh generation) 및 경계조건을 나타낸 것이다. 그림에서 용접요소망은 효율적인 생성을 위하여 MSC.PATRAN의 PCL을 이용하여 수행하였다. 해석모델에서 모재부 및 용접부의 요소수는 각각 6,890 및 95,152개이다. 경계조건은 EN 13479규격에 준하여 수직, 좌우 및 종방향 하중 그리고 비틀림변위를 부여한 것이다. 참고로 용접대차프레임의 유한 요소망에 대한 검증은 정규모드해석(normal modal analysis)을 이용하여 모재부와 용접대차프레임의 고유진동수의 동일여부를 통하여 검토하였다.

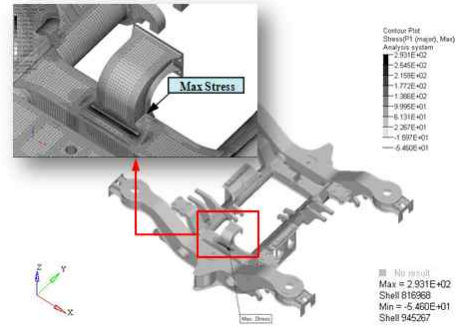


[그림 1] Boundary condition and finite element mesh generation of bogie frame

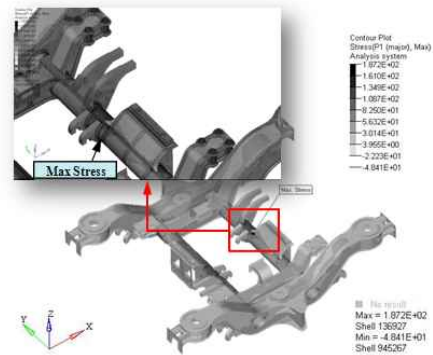
2.2 강도해석

용접대차프레임의 피로해석을 수행하기 위해서는 정하중하에서 유한요소해석(finite element analysis) 결과가 필요하다. 그림 2는 EN규격 예외하중조건하에 각

각의 주응력분포 일례를 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 수직 및 좌우방향(횡방향) 하중하에 얻어진 것으로 이의 최대주응력은 293MPa이고, Fig. 2(b)는 수직 및 길이방향(종방향) 하중하에 얻어진 것으로 이의 최대주응력은 187MPa이다. 이들은 모재의 허용응력 365MPa보다 작은 값으로 안전하다.



(a) 수직 및 좌우방향(횡방향) 하중, 비틀림변위



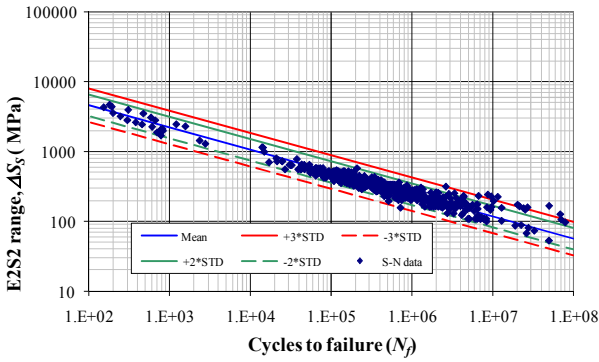
(b) 수직 및 길이방향(종방향) 하중

[그림 2] Max. principal stress contour under EN standard

2.3 다축피로해석

2.3.1 피로특성 및 하중이력

내구성 해석의 필수입력자료는 응력텐서량, 소재의 피로특성 및 하중이력이다. 모재는 SM490A(KS D 3515, 저온강성 보완)강과 STKM 18B(KS D 3517)강이다. 그리고 용접부의 피로특성은 그림 3과 같이 두께, 하중모드, 연결형상에 무관하게 사용할 수 있는 E2S2범위(equilibrium-equivalent structural stress range)의 Master S-N 선도를 사용하였다[5-7]. 그림에서 각각의 밴드는 파손확률에 따른 S-N 선도이다. 따라서 이 방법은 기존의 방법과 달리 다양한 용접연결부에 따른 각각의 피로특성을 평가하지 않고, E2S2에 의한 피로수명을 평가하므로 매우 유용한 방법이다.

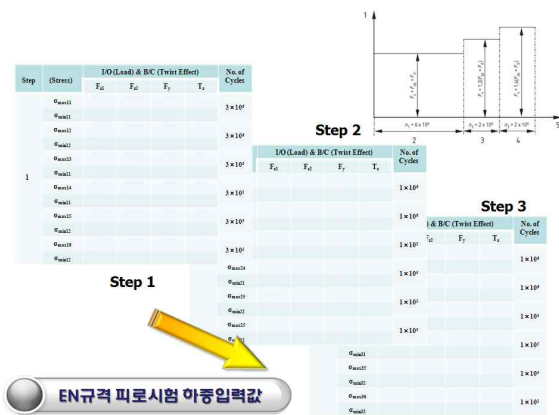


[그림 3] Master S-N curve

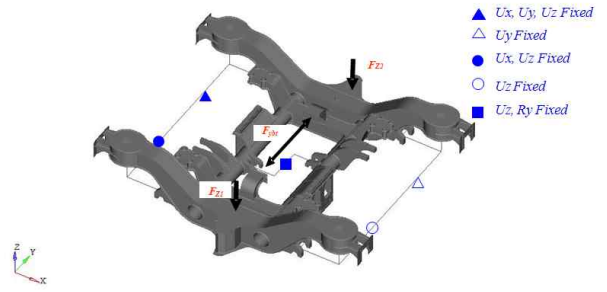
그림 4는 EN13749에 제시한 철도차량 대차프레임 리그시험을 위한 하중이력이다. 다양한 조건의 피로 수명을 비교하기 위하여 하중이력은 EN규격에서 제시한 설계하중에 하중계수를 곱하여 다소 과도하게 부여하였다. 전체 리그시험 블록하중은 총 3단계로 나누며, 2단계 및 3단계하중이력은 1단계 하중이력의 각각 120% 및 140%를 곱한 것이다. 그림 5는 EN13749규격의 리그 피로시험조건하에 용접대차프레임의 경계/하중조건의 일례를 나타낸 것이다.

2.3.2 해석결과

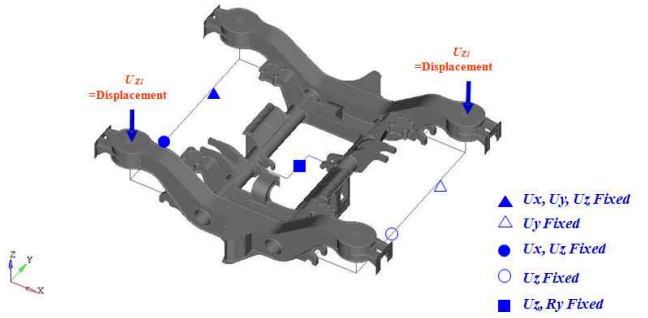
그림6은 EN규격 피로하중하에서 ‘Volvo 자동차와 Chalmers대학’에 개발한 연속용접부기법에 준한 단축피로해석결과를 나타낸 것이다. 피로 해석의 상용소프트웨어는 MSC.FATIGUE 2005이다. 그림 7은 E2S2범위(ΔSs)에 따른 다축피로해석 결과를 나타낸 것이다. 피로해석의 상용소프트웨어는 FE-Safe이다. 며, 피로해석은 ‘Battelle’에서 개발한 등가구조응력 해석접근법의 피로해석 기법에 따라 수행하였다.



[그림 4] EN 규격의 리그시험 블록하중



(b) 수직/좌우하중



(b) 비틀림효과

[그림 5] EN규격의 리그피로시험 조건

모재부의 다축피로해석에 사용된 관계식은 ‘Brown-Miller combined strain criterion’이며, 추가로 Principal strain criterion에 의한 결과는 표 1에 제시하였다. 여기서 용접부를 고려한 대차프레임의 취약부 위치는 좌우 사이드프레임(side frame)이다.

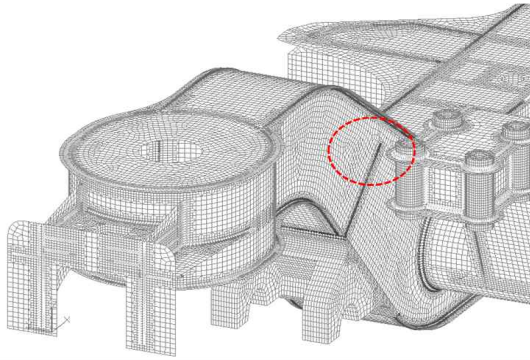
용접부의 피로수명은 단축피로해석(Volvo사의 연속용접피로해석기법)과 다축피로해석(Battle 연구소의 E2S2범위접근법)에 상관없이 모재부보다 짧다. 이의 원인은 전자의 경우 용접부의 두께(모재)영향 및 요소망크기(또는 응력집중)효과를 충분히 고려하지 못하는 데 반하여, 후자는 E2S2응력에 의한 다양한 효과들을 고려하기 때문이다.

단축과 다축피로해석결과를 각각 비교하면, 단축 피로이론에 의한 용접부 피로수명(6.49×10⁶cycles)은 다축피로의 피로수명(5.96×10⁶cycles)보다 약 10%정도 이내에서 유사하게 평가되었다. 이의 원인은 피로 시험 하중조건이 다축피로하중(multiple axial load)이지만, 시간에 변화에 따른 주응력선도의 변화가 작기 때문이다.

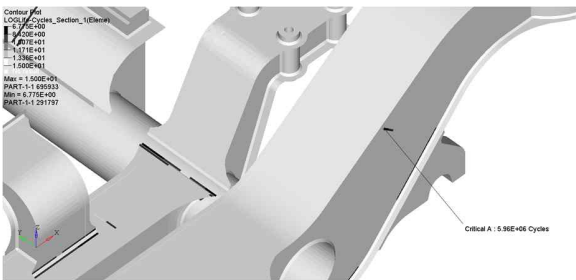
3. 결론

본 연구에서는 합리적인 용접대차프레임의 내구해석기법을 확립하기 위하여, 다축피로해석관점에서 ‘Battelle’연구소의 등가구조응력 접근법에 의하여 누

적손상을 평가함으로써, 단축피로해석결과(볼보자동차의 연속용접부의 피로해석기법)를 검토하였다.



[그림 6] 연속용접부기법에 준한 단축피로해석결과



[그림 7] 용접부를 고려한 E2S2범위(ΔS_s)에 따른 다축피로해석 결과

[표 1] 대차프레임의 피로해석결과
단위: cycles(목표수명: 1×10^7 cycles)

	단축 피로해석		다축 피로해석		
	모재부	용접부*	모재부	용접부**	과손확률
			Max. Principal	Brown-Miller	$P_f = 50\%$
Life	Pass	6.49E+06	Pass	Pass	5.96E6

*: 연속용접부 기법

** : 등가구조응력(E2S2)기법

용접부의 경우, 단축피로해석(Volvo사의 연속용접 피로해석기법)과 다축피로해석(Battle 연구소의 E2S2범위접근법)에 상관없이 모재부보다 짧은 수명을 나타내었다. 이의 원인은 전자의 경우 용접부의 두께(모재)영향 및 요소망크기(또는 응력집중)효과를 충분히 고려하지 못하는 데 반하여, 후자는 E2S2응력에 의한 다양한 효과들을 고려하기 때문이다.

단축과 다축피로해석결과를 각각 비교하면, 단축 피로이론에 의한 용접부 피로수명(6.49×10^6 cycles)은 다축피로의 피로수명(5.96×10^6 cycles)보다 약 10%정

도이내에서유사하게 평가되었다. 이의 원인은 피로 시험 하중조건이 다축피로하중(multiple axial load)이지만 시간에 변화에 따른 주응력선도의 변화가 작기 때문이다. 그러나 실제 하중이력은 주응력 크기와 방향이 시간에 따라 변화하는 다축변동하중(non-proportional multiaxial loading)이므로 이러한 평가결과는 상이할 수 있다.

참고문헌

- [1] European Norm (2005) Railway Applications - Methods of Specifying Structural Requirements of Bogie Frames, EN 13749
- [2] G. Mancini, A. Cera (2006) Design of Railway Bogies in Compliance with New EN 13749 European Standards, *WCRR2006*.
- [3] A. Cera, G. Mancini, V. Leonardi, L. Berti (2008) Analysis of Methodologies for Fatigue Calculation for Railway Bogie Frames, *WCRR2008(CD)*.
- [4] M. Fermer, M. Anderson and B. Frodin, 1998, "Fatigue Life Prediction of MAG-Welded Thin-Sheet Structures", SAE Tech. Paper 982311, pp. 1-7.
- [5] B. E. Healy (2004) A Case Study Comparison of Surface Extrapolation and Battelle Structural Stress Methodologies, *Proceedings of the 23rd International conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [6] P. Dong, J. K. Hong, D. Osage, M. Prager (2002) Equilibrium-equivalent structural stress approach to fatigue analysis of a rectangular hollow section joint, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. pp.85-94.
- [7] Dong, P. and Hong, J.K. (2003) The Master S-N Curve Approach to Fatigue of Vessel and Piping Welds, *Welding in the World*, Vol.48, No. 1/2, pp.28-36.