

EN 규격에 준한 용접대차프레임의 내구성 평가

Durability Evaluation of Welding Bogie Frame in Compliance with EN Standard

김철수*, 강주석*, 안승호**, 정광우**, 전영석**, 박춘수***, 김재홍****

Kim, Chul-Su Kang, Ju-Seok Ahn Seung-Ho Chung, Kwang-Woo, Jung, Kwang-Woo
Cheon, Young Suk Park, Choon-Soo Kim, Jae-Hong

ABSTRACT

As a consequence of the standardization process developing in Europe, on April 2005 the new European standard EN 13749 was issued by the European standardization body CEN. The norm EN 13749 standardizes and develops the requirements already present in UIC leaflets for test verifications and define all technical requirements for the acceptance process in order to achieve a complete satisfactory design of the bogie. The aim of the norm is to define the complete design process of new railway bogies. It includes design procedures, assessment methods, verification and manufacturing quality requirements. In this study, fatigue analysis of the bogie frame is investigated comparing different approaches between conventional methodology and simulation results based on the VPD(Virtual Product Development).

1. 서론

현재까지 철도 대차프레임의 설계는 주로 UIC 615-4의 동력대차, UIC 515-4의 객차대차, UIC-510-3의 화차대차의 실물시험으로 진행되었으며, 국내에서는 KS R 9210과 일본의 JIS E 4207에 준하여 수행되고 있다. 최근 유럽 표준화 과정의 결과로서, 2005년 4월에 대차에 대한 새로운 기준인 EN 13749[1]가 유럽 표준화 센터 CEN으로부터 제정되었다. 이 표준의 목적은 새로운 철도차량 대차의 완벽한 설계과정을 정의하는 것이다. EN 13749 표준은 디자인 절차들과 평가 방법, 검증 및 제조 품질 요구 조건 등을 포함한다. 이 표준은 시험 검증을 위해 이미 UIC에서 존재하는 요구조건들을 표준화하고 발전시키고, 대차에 대한 만족할만한 설계를 얻기 위해 승인 작업에 대한 모든 기술적 요구조건을 정의한다. 그러므로 향후 국내의 유럽 철도산업 시장진출을 대비하여 현재 개발 혹은 완성중인 철도차량의 대차설계과정에서 EN규격에 대한 심도 있는 검토가 중요하다.

대차프레임 설계 승인에 관한 EN규격은 차량 주행의 다양한 주행조건을 고려한 응력해석결과로부터 'Goodman diagram' 또는 'Wöhler daigram'을 이용한 안전성을 검토하고, 이후에는 피로시험을 3단계에 걸쳐 진행하면서 피로파손 여부를 검토한다. 그러나 이 규격은 대부분 용접부로 구성된 대차의 특성을 별도로 고려하지 않으며, 피로시험 이전의 안전도 평가는 단순한 내구한도(endurance limits)에 따른 수치계산에 의한 안전성 검토에 머무는 수준이다. 따라서 설계단계에서 피로시험 이전에 시간 및 비용을 줄이면서 시스템 안전성 검토를 위해서는 피로시험조건하에 용접대차프레임(welded bogie frame)에 대한 내구성 해석시뮬레이션(durability analysis simulation)을 이용한 피로수명 평가가 필요하다.

대차프레임에 대한 기존 국내연구는 높은 신뢰성의 대차를 설계하기 위한 피로강도 평가[2] 및 피로내구해석[3-6]을 중심으로 진행하고 있다. 특히 용접대차프레임에 대한 피로내구해석법은 용접부의 불규

* 한국철도대학 차량기계과

** 한국철도대학 운전기전과

*** 철도기술연구원 책임연구원

**** (주) 현대로템 기술연구소장

칙 특성과 적용방법에 대한 다양성으로 아직 확립되어 있지 못한 실정이다. 이에 대한 대표적인 연구는 KIMM-Fatigue[2,3]와 Model Center를 이용한 형상변경에 따른 피로내구해석의 자동화 개발[4]을 중심으로 수행되었다. 그러나 이들 연구는 용접연결부 형상에 따른 'Hot-Spot' 응력에 준한 피로특성을 선택하므로 이를 얻기 위한 용접연결부 형상별 많은 피로시험이 소요된다.

본 연구에서는 합리적인 용접대차프레임의 내구해석기법을 확립하기 위하여, EN13749규격의 피로시험 조건하에 용접연결부 형상에 관계없이 작용하중 형태에 따른 연속용접부의 내구성해석기법[7]을 제시하고자 한다. 또한 모재부와 용접대차프레임의 피로수명을 정규모드해석(normal modal analysis)을 통하여 비교 및 검토하고자 한다.

제 2 장 이론 해석

2.1 내구성해석 시뮬레이션 알고리즘

Fig. 1은 용접대차프레임의 내구해석에 관한 절차를 간략화하여 나타낸 것이다. 차량부품의 피로수명 평가에 있어서 가장 먼저 고려해야 될 항목은 하중이력(load history)과 재료 특성(material properties)이다. 여기서 하중이력은 해석하고자 하는 구조물이 시간영역(time domain) 혹은 주파수 영역(frequency domain)에서 반복 혹은 변동되는 일련의 하중데이터를 의미하며, 하중은 힘, 온도, 압력 및 속도 등과 같은 물리량이다. 또한 재료 특성은 기계 구조물에 적용된 재료의 기계적 특성을 의미하며, 이는 내구성 해석의 기법에 따라 상이하다.

기계구조물에 조합하중이 작용할 경우 기계부품의 내구성 해석과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 각 요소 및 절점에 작용하는 시간에 따른 작용 응력 이력 텐서(applied stress history tensor)는 정적해석의 응력텐서값과 하중계수에 의하여 무차원화된 각각의 하중이력들을 곱하여 얻어진다. 이로부터 산출된 텐서량은 중첩법(superposition method)에 의하여 응력 이력 텐서량으로 표현되고, 이 텐서량은 파손이론의 주응력값에 의하여 스칼라(scalar)성분의 등가응력이력텐서(equivalent stress history tensor)로 전환된다. 이는 실질적인 손상을 주는 응력이력값만을 얻기 위하여 사이클 카운팅기법(cycle counting method)에 의하여 필터링(filtering)된다. 이후 과정을 살펴보면, 기계부품의 피로수명은 등가응력이력텐서의 횡수와 각각의 재료에 따른 피로특성곡선으로부터 마이너 손상법칙(Miner's Damage Rule)[8]에 의한 누적 피로손상량(cumulative fatigue damage)을 산출하여 평가한다.

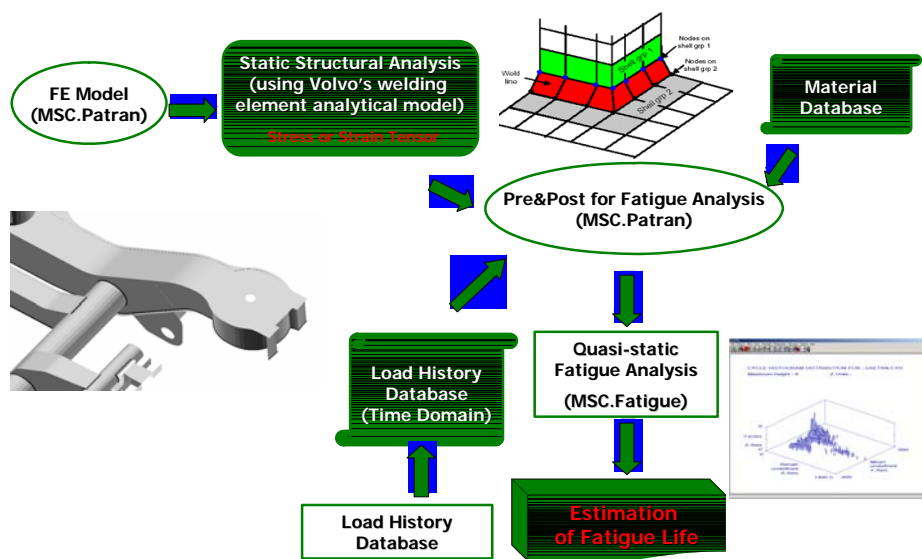
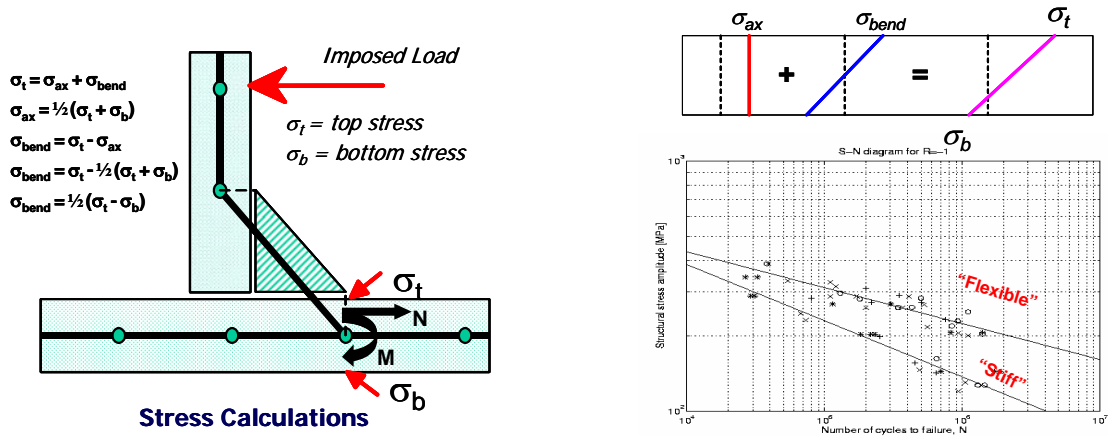


Fig. 1 용접대차프레임의 내구해석 절차

2.2 용접요소를 이용한 내구해석

본 연구에서 사용하는 연속용접부 내구성해석 기법은 'Volvo 자동차와 Chalmers대학'에 개발한 것[7]으로서, Fig. 2는 이에 대한 개념도를 정리한 것이다. 그림에서 열영향부(Heat affected zone)의 응력상태에 따라 피로특성이 상이하므로 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.



(a) 응력 산출

(b) 응력상태에 따른 S-N 선도

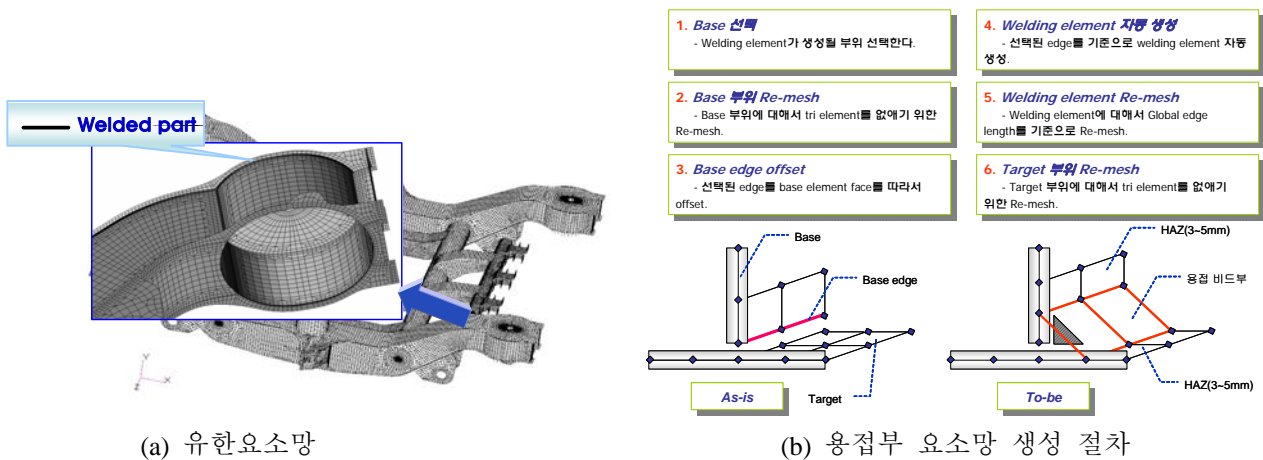
Fig. 2 Volvo 자동차와 Chalmers대학에 개발한 연속용접부 내구성해석기법

3. 해석결과 및 고찰

3.1 용접부 요소망 생성 및 경계조건

EN규격의 피로시험조건하에 용접대차프레임의 합리적인 내구성해석 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 2.2 절의 연속용접해석기법을 고려한 정하중하에서 유한요소해석(finite element analysis) 결과가 필요하다.

Fig.3은 응력해석을 위한 유한요소망 생성(finite element mesh generation)을 나타낸 것이다. 그림에서 용접요소망은 Fig. 3(b)의 절차에 따라 생성되었으며, 본 연구에서는 효율적인 요소망 생성을 위하여 MSC.PATRAN의 PCL을 이용하여 개발하였다.



(a) 유한요소망

(b) 용접부 요소망 생성 절차

Fig. 3 용접요소를 부여한 대차프레임의 유한요소망

Fig. 4는 EN13749규격의 피로시험조건하에 용접대차프레임의 경계/하중조건의 일례를 나타낸 것이다. 이는 EN 규격의 구조해석단계에서 부여하는 경계/하중조건과 다소 상이하며, 실제 실험 피로시험조건을

고려하여 부여한 것이다. 그리고 Fig. 5는 EN 규격의 피로시험에서 피로하중의 일례로서 단위반복하중(cyclic unit load)형태로 표현한 것이다. 내구성 해석에서 수직 및 좌우하중조건은 Fig. 5의 단위하중에 승객질량, 공차질량, 대차질량 및 차량당 대수를 고려하여 Fig. 4와 같이 부여하는 것이다.

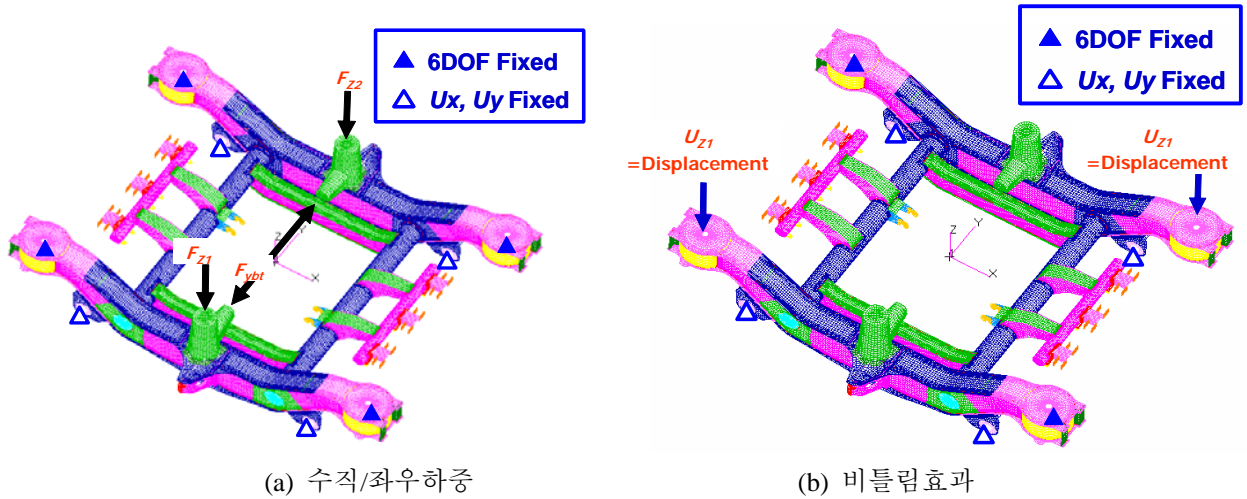


Fig. 4 용접대차프레임의 경계조건 일례

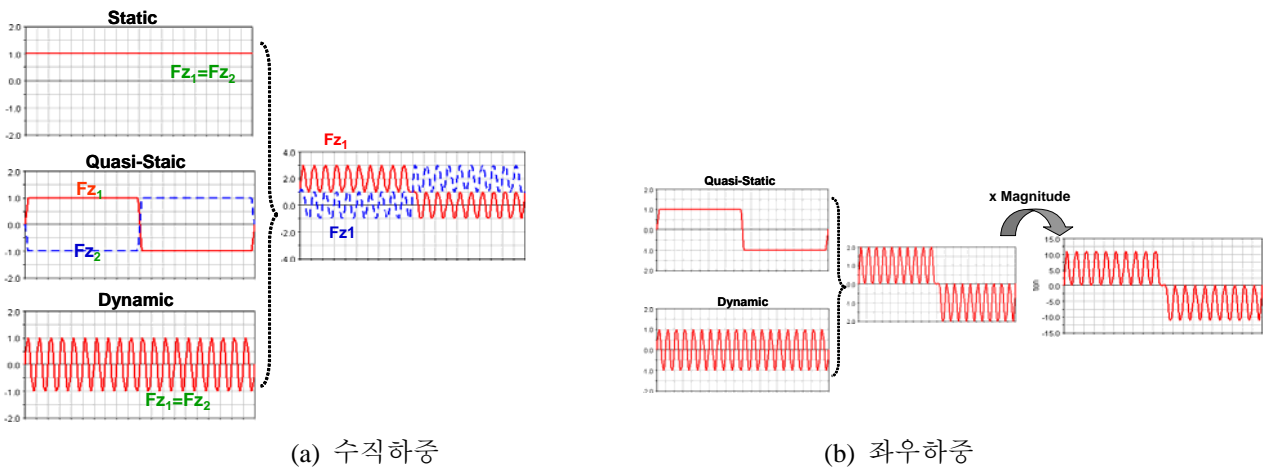


Fig. 5 EN 규격의 피로시험에서 피로하중의 일례

3.2 정규모드 해석

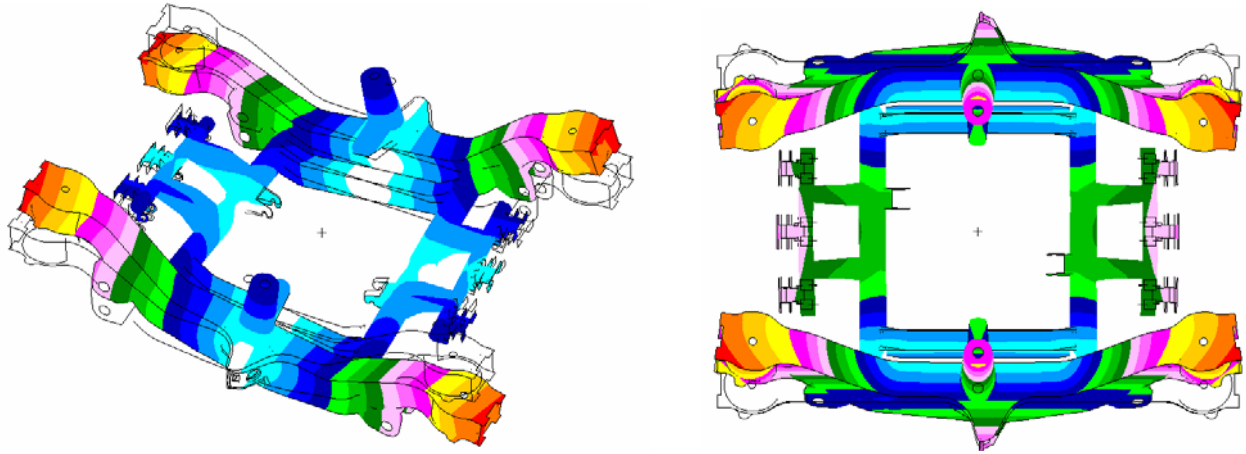
3.1절에서 용접대차프레임의 유한 요소망에 대한 검증을 위한 연구일환으로서, 정규모드해석(Normal modal analysis)을 이용하여 모재부와 용접대차프레임의 고유진동수를 검토하는 것이 필요하다.

Fig. 6은 1차 및 3차 모드변화와 고유진동수를 나타낸 것이며, 표 1은 모재부와 용접 대차프레임에 대하여 4차 모드까지 고유진동수를 비교하여 정리한 것이다. 해석에 입력자료로서 사용되는 재질의 탄성계수(elastic modulus)는 207GPa이고, 프아송비(poisson's ratio)는 0.29이다. 요소망 모델링 및 전후처리과정은 요소망 생성 전용소프트웨어인 MSC.PATRAN을 사용하였으며, 정규모드해석은 MSC.NASTRAN을 사용하였다. Fig. 6에서 대차프레임의 최대변위는 각 사이트프레임의 액슬부에서 크게 나타났다. 표1에서 보는 바와 같이 1차모드에서 용접요소망생성 이전의 고유진동수는 29.95Hz이며, 생성후 고유진동수는 매우 유사하다. 이로부터 대차프레임의 용접 연결부의 요소망 생성에 대한 합리성을 검증한 것이다.

3.3 피로해석

3.3.1 피로특성 및 입력자료

내구성 해석의 입력자료는 Fig. 1에서 같이 응력텐서량, 소재(용접부 포함)의 피로특성, 하중이력이다. 기존 연구[?]에서 용접대차프레임에 대한 이의 피로특성은 대부분 BS 952자료와 Hot-spot 응력에 따른 피로특성자료를 활용하였다. 그러나 이들 자료를 얻기 위한 피로시험은 용접연결부의 형상에 따라 다수



(a) 1차 Mode Shape : 29.85 Hz

(b) 3차 Mode : 59.89 Hz

Fig. 6 1차 및 3차 모드변화와 고유진동수

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	29.95	29.85
3차	60.22	59.89
5차	91.92	91.77

의 시험을 수행해야 되므로 이에 대한 합리적인 개선기법이 필요하다. 본 연구에 선택한 용접부 피로특성은 Volvo 자동차-Chalmers 대학에 제시한 용접부 S-N선도로서, Fig. 7과 같다. 이의 평가방법은 그림에서 유한요소 해석결과로부터 동일한 응력수준에서 축방향 응력(axial stress)이 지배적이면 'Stiff S-N Curve'를 사용하고, 굽힘응력(bending Stress)가 지배적이면 'Flexible S-N Curve'에 준하여 피로수명을 평가한다. 따라서 이 방법은 다양한 용접연결부에 따른 각각의 피로특성을 평가하지 않고, 두가지 대표적인 피로특성으로부터 응력텐서의 특성을 고려하여 평가하므로 매우 유용한 방법이다.

3.3.2 피로누적손상 평가

Fig. 8은 용접대차프레임에 대한 내구성해석결과를 나타낸 것이다. 내구성 해석시물레이션은 상용소프트웨어인 MSC.FATIGUE 2005이며, 재질은 AISI 1020강으로서 피로특성은 MSC.FATIGUE에서 제공하는 변형률-수명선도(strain-life curve or e-N curve)로부터 얻어진 것이다. 그리고 작용하중이력은 EN규격 Fig. 5의 단위하중이력에 다양한 하중계수를 곱한 것이다. 용접대차프레임과 모재만으로 구성된 대차프레임과의 누적손상량을 비교하면, 기존 대차프레임의 누적손상량은 용접부를 고려함으로써 약 28% 증가하였다. 이는 다양한 용접 연결부에서 응력 형태별 응력집중효과로 기인한 것이다.

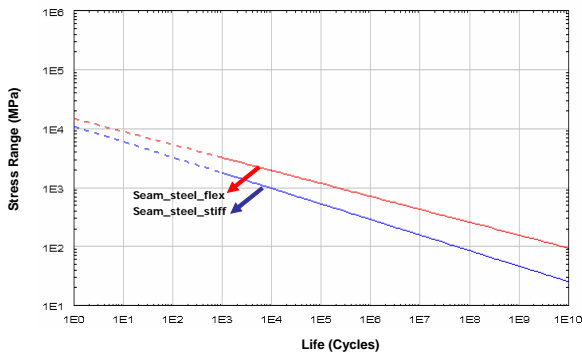


Fig. 7 하중형태 별 용접 S-N 선도 일례

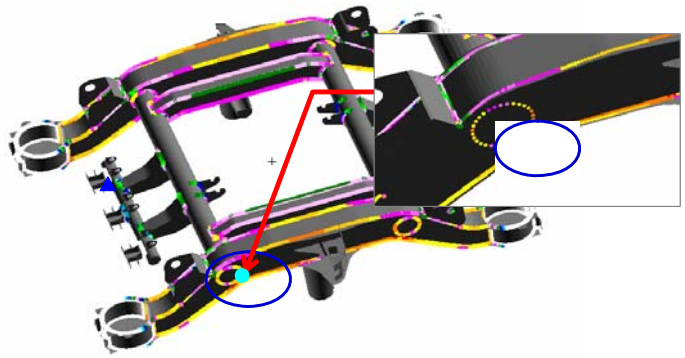


Fig. 8 최소 피로수명 위치의 일례

4. 결론

합리적인 용접대차프레임의 내구성해석기법을 확립하기 위하여, EN규격의 피로시험 조건하에 용접연결부 형상에 관계없이 작용하중 형태에 따른 연속용접부의 내구성해석기법을 제시하였다. 이로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

본 연구에서 사용하는 용접대차프레임의 내구성해석 기법은 다양한 용접연결부에 따른 각각의 피로 특성을 평가하지 않고, 축방향 및 굽힘모드의 피로특성으로부터 피로수명을 평가하는 것이다. 이의 일례로서 용접대차프레임에 검토한 결과, 1차모드에서 용접요소망생성 이전의 고유진동수는 29.95Hz이며, 생성 후 고유진동수는 매우 유사하다. 이로부터 대차프레임의 용접 연결부의 요소망 생성에 대한 합리성을 검증한 것이다.

용접대차프레임과 모재만으로 구성된 대차프레임과의 누적손상량을 비교하면, 기존 대차프레임의 누적손상량은 용접부를 고려함으로써 약 28% 증가하였다. 이는 다양한 용접 연결부에서 응력 형태별 응력집중효과로 기인한 것이다.

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] 이상록, 이학주, 한승우, 김경식, 1998, “다축하중을 받는 대차프레임의 피로해석에 관한 연구”, 한국철도학회 1998년도 춘계학술대회논문집, pp.330-337.
- [3] 이상록, 이학주, 한승우, 강재운, 1999, “고속전철용 대차프레임의 다축피로해석에 관한 연구”, 한국철도학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp.344-351.
- [4] 이상록, 이학주, 한승우, 김정엽, 차정환, 강재운, 박찬경, 2000, “대차프레임의 피로설계 및 피로강도 평가”, 한국철도학회 00년도 춘계학술대회논문집, pp.234-241.
- [5] 최중호, 송시엽, 천홍정, 전형용, 박형순, 2002, “UIC code에 따른 대차 프레임 구조해석 및 시험에 관한 연구”, 한국철도학회 02 추계학술대회논문집(2), pp.884-891.
- [6] 방제성, 한승호, 임채환, 이광기, 이광순, 송시엽, 2005, “프로세스 통합도구를 활용한 용접대차프레임 피로내구성해석의 자동화”, 한국철도학회논문집, 제8권5호, pp.425-433.
- [7] M. Fermer, M. Anderson and B. Frodin, 1998, "Fatigue Life Prediction of MAG-Welded Thin-Sheet Structures", SAE Tech. Paper 982311, pp. 1-7.
- [8] N. E. Dowling, 1999, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 401~404.