

# 변동하중하에 용접대차프레임의 정적 피로해석

## Static Fatigue Analysis of Welding Bogie Frame Under Variable Amplitude Loading

김철수†, 강주석\*, 안승호\*\*, 정광우\*\*, 전영석\*\*, 박춘수\*\*\*, 김상수\*\*\*  
Chul-Su Kim, Ju-Seok Kang, Seung-Ho Ahn, Kwang-Woo Chung, Young Suk Cheon  
and Choon-Soo Park

### ABSTRACT

Recently, the design process for a railway bogie frame in Europe has been carried out according to the norm EN 13749. The activities in the norm EN shall demonstrate that the design of the bogie frame fulfills the acceptances of 4 steps of the program such as structural calculation, static tests, fatigue test and on-tracks tests. At the end of the acceptance program, the on-tracks tests have the aim to measure the real stress history generated in operation and to verify that they are reasonably next to those calculated and measured on the test rig. Therefore, in order to assure the safety of the railway vehicle, it is important to examine the durability of that under load histories measured from on-tracks tests. In this study, under variable amplitude loading based on the actual acceleration history, fatigue analysis of the welding bogie frame is investigated by using durability software. Moreover, the fatigue life of the frame under the loading in the norm EN fatigue test condition is evaluated and compared with the life under variable amplitude loading.

### 1. 서론

최근 유럽의 철도차량 대차프레임에 대한 완전한 설계과정 승인은 EN 13749에 준하여 규정된 승인 절차에 따라 공급자에 의해 수행한다. 이 절차에서 구체적인 활동은 대차의 설계가 기술적 스펙에 정의된 조건을 만족하고, 대차 프레임의 거동이 파손, 영구 변형 및 피로 균열과 같은 결함의 발생이 주행동안 없음을 증명하는 것이다. 이 규격에서 대차의 승인 프로그램은 크게 4가지 승인단계로서, 정적/피로 구조해석, 정적시험, 피로시험 및 주행시험을 만족하도록 명시하였다. 이 규격은 4가지의 승인절차이중에서도 최종단계인 주행시험은 기존 대차의 다른 적용에 대한 증명에 이용되기 보다는 새로운 대차 설계시 활용한다. 이는 운용시 실제 응력이력을 측정할 뿐만아니라 이로부터 그 전에 수행된 리그 시험시 측정하고 계산된 값에 대한 타당성 증명하도록 제시되었다. 따라서 철도차량의 안전성을 확보하기 위해서는 실주행시 측정된 하중이력하에 내구성을 검토하는 것이 매우 중요하다.

최근 대차프레임의 정확한 피로강도를 예측하고 높은 신뢰성의 대차를 설계하기 위하여 구조해석을 통한 다양한 연구가 진행되어 왔다[2-7]. 또한 대차프레임에 대한 기존 국내연구는 높은 신뢰성의 대차를 설계하기 위한 피로강도 평가[2] 및 피로/내구성 해석[3-6]을 중심으로 진행하고 있다. 그러나 이들 연구들은 대부분 UIC규칙 및 관련규격에 준한 시험조건하의 단순한 정적피로해석연구에 머물러있는 실정이다. 본 논문에서는 실제 가속도계로 측정된 이력에 준한 변동하중하에서 용접대차 프레임의 피로해

† 정희원, 한국철도대학 차량기계과 교수  
E-mail : chalskim@paran.com  
TEL : (031)460-4215 FAX : (031)462-2944  
\* 한국철도대학 차량기계과 교수  
\*\* 한국철도대학 운전기전과 교수  
\*\*\* 철도기술연구원 책임연구원

석을 전용 소프트웨어를 이용하여 수행하고자 한다. 또한 EN규격의 피로시험조건하에 이의 피로수명을 평가하고 이로부터 변동하중하에 피로수명을 비교/검토하고자 한다.

## 2. 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.

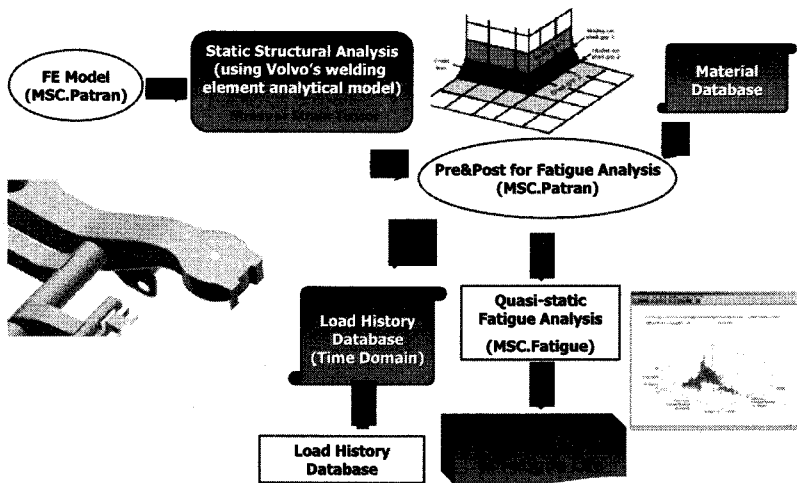


Fig. 1 용접대차프레임의 내구해석 절차

### 2.2 EN 13749규격[1,8]

신규 철도 대차프레임의 설계 절차는 대부분 UIC의 벤치테스트(UIC 515-4의 객차 대차, UIC 615-4의 동력대차 및 UIC 510-3의 화차용 대차)로 진행되어 왔다. 또한 기존에는 검증된 계산도구의 부재로 인해 프레임의 구조학적 거동을 상세적으로 수행하기가 힘들었으므로, 제조자의 경험들과 UIC 기준의 정적/피로 시험으로 대차프레임의 구조 안전성을 승인받았다. 그러나 최근에 개선된 새로운 수치계산 프로그램(유한요소해석)으로 대차프레임의 설계 과정의 모든 면에 대한 규격화가 가능해졌다.

EN 13749 규격은 시험 검증을 위해 이미 UIC에서 존재하는 요구조건들을 통합하여 액슬박스 하우징과 프레임의 볼스터를 포함하여 대차에 대한 만족할만한 설계를 얻기 위해 승인 작업에 대한 모든 기술적 요구조건을 정의하였다. 또한 이 규격은 전체 프로젝트를 검증하는 절차와 함께 기하학적 특징(초기 도면의

전달)의 체크로부터 검증 절차까지의 모든 단계에 대한 기술적 승인까지 요구한다. 이 새로운 규격의 목적은 신규 대차 프레임의 제조자에 의해 행해지는 설계의 검증을 확신하고자 하는 것이다.

대차 프레임의 설계는 규격에 정의된 승인 절차에 따라 공급자에 의해 수행한다. 절차 내용은 대차 설계가 기술적 스펙에 정의된 조건의 만족, 운행중 대차 프레임 거동의 파괴, 영구 변형 및 피로 균열과 같은 결함의 발생이 없음을 증명하는 것이다. EN규격에 정의된 하중 조합은 일반 운행 및 예외적 운행조건하에 대차의 규정범위안에서 정의된 하중 조건들에 해당한다.

대차의 완전한 설계과정을 확인하는 승인 프로그램의 단계는 정적 평가를 위한 구조적 계산, 피로 평가를 위한 구조적 계산, 정적시험, 피로시험 및 주행 시험으로 이루어진다. 여기서 UIC규칙과 상이한 점은 최종단계인 주행시험 단계가 추가된 것이다. 일반적으로 EN규격의 주행 시험(track test)은 상당 부분 혁신적인 방법으로 수행되며, 규격에서 제시된 최소 포함할 내용은 아래와 같다.

- 사용되는 차량
- 운행의 기술(시험구간, 트랙타입, 커브, 스피드)
- 차량하중조건
- 측정위치 및 타입(변위, 스트레인, 가속도 변환기 사양)
- 응력의 평가 및 해석 방법
- 허용 한계 응력 등

EN규격의 주행시험의 목적은 차량주행시 실응력 값을 측정하고, 계산값 및 리그시험 측정한 값이 합리적인가를 확인하고자 하는 것이다. 다만, EN규격에서 감소한 시험프로그램(reduced test program)은 새로운 적용을 위한 기존 대차프레임이거나 기존 설계의 수정인 경우에 한하여 승인할 수 있다. 이는 다른 용도로 사용할 목적의 기존 대차설계에 관한 간단한 승인절차를 따르는 것을 의미한다. 그러나 EN 규격에 준한 새로운 대차프레임설계의 승인은 UIC규칙과 다르게 최종단계인 주행시험절차를 거쳐서 이루어져야 할 것이다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 EN규격하의 정적 피로해석

대차설계과정에서 피로시험 이전에 시간 및 비용을 줄이면서 시스템 안전성 검토를 위해서는 피로시험조건하에 용접대차프레임(welded bogie frame)에 대한 피로해석시뮬레이션(fatigue analysis simulation)을 이용한 수명 평가가 필요하다. 그러나 용접대차프레임에 대한 피로내구해석법은 용접부의 불규칙 특성과 적용방법에 대한 다양성으로 아직 확립되어 있지 못한 실정이며, 이를 얻기 위한 용접연결부 형상별 많은 피로시험이 소요된다. 이러한 비합리적인 용접대차프레임의 내구해석기법을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 EN규격의 시험조건하에 용접연결부 형상에 관계없이 적용 가능한 연속용접부의 피로해석기법[9]에 따라 피로해석을 수행하고자 한다.

##### 3.1.1 재료의 피로특성 및 경계조건

Fig.2는 본 연구에서 사용된 재료의 피로특성을 나타낸 것이다. 모재는 MSC.FATIGUE에서 제공하는 변형률-수명선도(strain-life curve)로부터 가정된 것이다. 용접연결부의 피로특성은 Fig. 2과 같이 각각 굽힘하중조건과 축하중조건하에서 응력-수명선도(stress-life curve)이다. Fig.2에서 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.

한편, EN규격의 피로시험조건하에 용접대차프레임의 합리적인 내구성해석 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 연속용접해석기법[9]를 고려한 정하중하에서 유한요소해석(finite element analysis) 결과가 필요하다. Fig.3은 응력해석을 위한 유한요소망 생성(finite element mesh generation)을 나타낸 것이다. 그림에서 용접요소망은 기존연구[9,10]의 절차에 따라 생성되었으며, 본 연구에서는 효율적인 요소망 생성을 위하여 MSC.PATRAN의 PCL을 이용하여 개발하였다. 참고로 본 연구의 유한요소모델은 실제 대차프레임과 유사하게 구성한 것으로서, 연구목적으로 가정된 모델이다

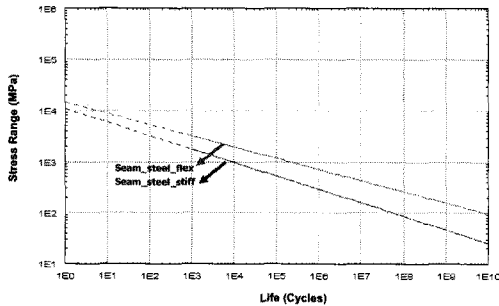


Fig. 2 하중형태 별 용접 S-N 선도 일례

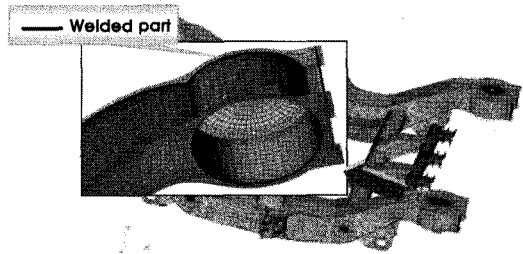


Fig.3 용접요소를 부여한 대차프레임의 유한요소망

용접대차프레임의 경계/하중조건은 기존연구[10]에서와 같이 EN13749규격의 실제 실물 피로시험조건을 고려하여 부여한 것이다. 여기서 수직 및 좌우하중조건은 단위하중에 승객질량, 공차질량, 대차질량 및 차량당 대수를 고려하여 부여하는 것이다.

### 3.1.2 피로해석 결과

Fig. 3은 Fig. 2 및 Fig. 3의 EN규격에 준하여 수행한 용접대차프레임에 대한 피로해석결과를 나타낸 것이다. 피로 해석프로그램은 상용소프트웨어인 MSC.FATIGUE 2005이다. ‘사이클(cycles)’ 개념의 EN 피로해석결과로부터 ‘주행거리(km)’ 개념의 실제 계측 하중이력과 수명을 상대적으로 비교하기 위해서는 Fig. 3의 해석결과를 주행거리로 변환하는 것이 필요하다. 표 1은 목표수명에 따른 용접대차프레임의 예측보충거리를 가정한 후 산출된 것이다. 여기서 목표수명은 연간 600,000 km 및 차량 내구연한 30년 보증으로 가정하고, 이로부터 예측된 목표거리는  $600,000 \text{ km/year} \times 30 \text{ years} = 18,000,000 \text{ km}$ 이다. 여기서 예측 목표거리(18,000,000 km)는 EN규격의 3 단계 피로시험 사이클(총  $10^7$  cycle)로서 등가되는 보증수명을 의미한다. 표 1에서 보는 바와 같이 용접대차프레임의 예측된 보증거리는  $1.05 \times 10^6 \text{ km}$ 이다.

표 1 EN 규격에서 제시한 실물 피로시험으로 가정된 예측 목표거리

	1 <sup>st</sup> STEP	2 <sup>nd</sup> STEP	3 <sup>rd</sup> STEP
목표수명	$6 \times 10^6$ cycle ( $6.174 \times 10^6$ km)	$2 \times 10^6$ cycle ( $4.176 \times 10^6$ km)	$2 \times 10^6$ cycle ( $7.65 \times 10^6$ km)
STEP 별 % (Damage x 목표수명)	34.3	23.2	42.5
예측된 보증 거리	$1.7 \times 10^6$ cycles	-	-
	$0.343 \times \{(1.7 \times 10^6) / (1 \times 10^7)\} \times (1.8 \times 10^7)$ $= 1.05 \times 10^6 \text{ km}$	-	-

### 3.2 변동하중하에 정적 피로해석

본 절에서는 용접대차프레임을 대상으로 기존 국제규격 EN규격하의 실물피로시험의 피로하중조건과 실제 주행시 계측으로부터 얻어진 가속도계에 준한 하중이력하에서 피로수명을 상호 비교/검토하고자 한다. Fig. 4는 실제 궤도주행시 실측된 가속도이력의 일례이며, Fig. 5는 가속도이력으로부터 변환된 수직방향 하중이력의 일례를 나타낸 것이다. 여기서 수직하중은 가속도이력으로부터 ‘차량 중량에 의해 받는 힘 + 계측된 가속도이력 x 대차질량’에 의하여 계산된 하중이력이다. 그리고 횡방향하중은 가속도이력으로부터 ‘계측된 가속도이력 x 대차질량’에 의하여 계산된 하중이력이다. 그러나 이러한 하중이력은 누적손상에 영향을 미치지 않는 잔파형 및 노이즈가 포함되어 있으므로 피로해석 시물레이션 입

력자료로써 사용하기에는 시간적, 경제적으로 비합리적이다. 따라서 본 연구에서는 해석시간 단축하고자 하중과형을 필터링 'peak-Valley extraction' 기법을 이용하여 누적손상에 영향이 작은신호(Maximum load range의 10%)를 제거하였다.

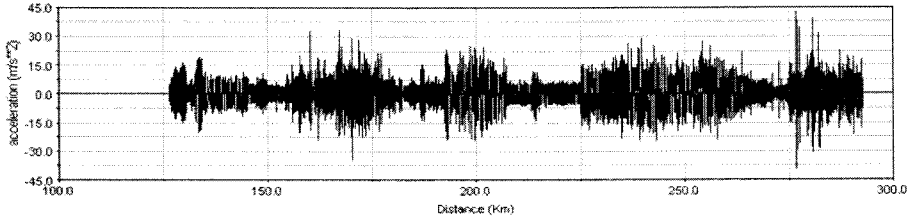


Fig. 4 실주행시 수직방향 가속도계 이력

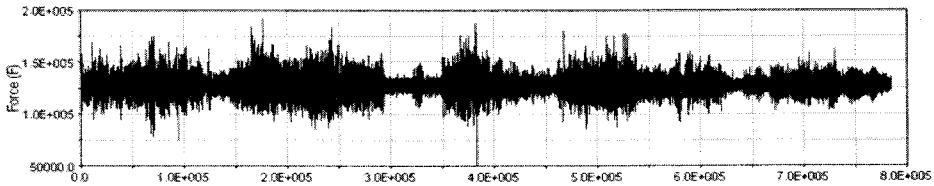


Fig. 5 실주행시 가속도계로부터 변환된 수직방향 하중이력

Fig. 6은 실주행시 변환된 하중이력하에서 용접대차프레임의 피로해석 결과를 나타낸 것이다. 최소수명은  $103.74 \times 166\text{km}$ (총 주행거리) =  $9.12 \times 10^5 \text{ km}$ 이다. 그리고 우측의 표는 표 1의 EN규격 피로하중조건과 실제 하중이력하에서 정적 피로해석 결과를 비교하여 정리한 것이다. 이로부터 EN규격에 준한 피로해석결과와 비교하면, EN규격에 의한 예측보증거리는 가속도이력으로부터 변환된 실하중이력하의 경우보다 약 13%크다. 이의 원인은 실제 가속도이력에서 하중이력변환시 현가장치의 감쇄효과를 무시하였기 때문이다. 이와같이 계측된 가속도이력으로부터 관성질량에 의한 단순한 하중이력의 변환은 과대평가할 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 대차프레임설계승인의 최종단계인 궤도주행시험단계에서 취약부위 및 허용응력계산 시 이러한 점들을 체계적으로 고려해야 될 것으로 사료된다.

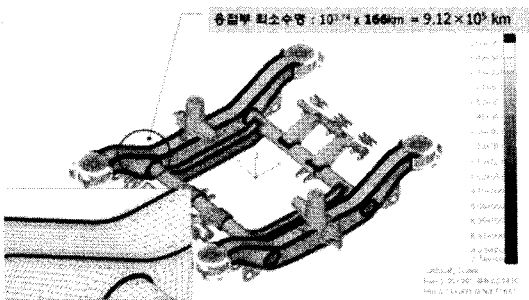


Fig. 6 EN규격 피로하중조건과 실제 하중이력하에서 정적 피로해석 결과의 비교

		목표수명	예측된 보증 거리
EN규격 시험조건	1st STEP	$6 \times 10^6 \text{ cycle}$ ( $6.174 \times 10^6 \text{ km}$ )	$1.7 \times 10^6 \text{ cycle}$ = $1.05 \times 10^6 \text{ Km}$
	2nd STEP	$2 \times 10^6 \text{ cycle}$ ( $4.176 \times 10^6 \text{ km}$ )	
	3rd STEP	$2 \times 10^6 \text{ cycle}$ ( $7.650 \times 10^6 \text{ km}$ )	-
실제하중이력		$1.8 \times 10^7 \text{ km}$	$0.912 \times 10^6 \text{ km}$

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 하중이력하에 대차프레임의 피로수명을 평가하기 위하여 실주행시 계측된 가속도 이력으로부터 변환된 좌, 우측 사이드프레임의 수직하중이력을 변환하였다. 여기서 수직하중은 가속도이력으로부터 '차량 중량에 의해 받는 힘 + 계측된 가속도이력 x 대차질량'에 의하여 계산된 하중이력이다. 그리고 횡방향하중은 가속도이력으로부터 '계측된 가속도이력 x 대차질량'에 의하여 계산된 하중이력이다. 실주행시 변환된 하중이력하에서 용접대차프레임의 최소수명은  $10^{3.74} \times 166\text{km}$ (총 주

행거리) =  $9.12 \times 10^5$  km이다.

‘사이클(cycles)’ 개념의 EN 규격 피로해석결과로부터 ‘주행거리(km)’ 개념의 실제 계측 하중이력과 수명을 상대적으로 비교하면 다음과 같다. 대차프레임의 목표수명은 연간 600,000 km 및 차량 내구연한 30년 보증으로 가정하고, 이로부터 예측된 목표거리는  $600,000 \text{ km/year} \times 30 \text{ years} = 18,000,000 \text{ km}$ 이다. 이로부터 예측된 목표거리(18,000,000 km)는 EN규격의 세 가지 단계 피로시험 사이클(총  $10^7$  cycle)로서 증가되는 예측 보증수명을 의미한다. EN규격의 실물 피로시험조건하에 용접대차프레임의 예측된 보증거리는  $1.05 \times 10^6$  km이다. 이로부터, EN규격에 의한 예측보증거리는 가속도이력으로부터 변환된 실 하중이력하의 경우보다 약 13% 길다. 이의 원인은 실제 가속도이력에서 하중이력변환시 보정없이 현가 장치의 감쇄효과를 무시하였기 때문이다. 이는 측정된 가속도이력으로부터 환산된 하중이력을 수명평가에 적용하는 것은 부정확하다는 것을 의미한다. 따라서 향후 대차프레임설계승인의 최종단계인 레도주행시험단계에서 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] 이상록, 이학주, 한승우, 김정식, 1998, “다축하중을 받는 대차프레임의 피로해석에 관한 연구”, 한국철도학회 1998년도 춘계학술대회논문집, pp.330-337.
- [3] 이상록, 이학주, 한승우, 강재윤, 1999, “고속전철용 대차프레임의 다축피로해석에 관한 연구”, 한국철도학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp.344-351.
- [4] 이상록, 이학주, 한승우, 김정엽, 차정환, 강재윤, 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 피로내구해석의 자동화”, 한국철도학회논문집, 제8권5호, pp.425-433.
- [7] A. Cera, G. Mancini, V. Leonardi and L. Berti (2008) "Analysis of Methodologies for Fatigue Calculation for Railway Bogie Frames", WCRR 2008.
- [8] G. Mancini and A. Cera, (2006) "Design of Railway Bogies in Compliance with New EN 13749 European Standard", WCRR 2006.
- [9] M. Fermer, M. Anderson and B. Frodin (1998) "Fatigue Life Prediction of MAG-Welded Thin-Sheet Structures", SAE Tech. Paper 982311, pp. 1-7.
- [10] 김철수, 강주식, 안승호, 정광우, 전영석, 박춘수, 김제홍 (2008) “EN 규격에 준한 용접대차프레임의 내구성 평가”, 한국철도학회 08 춘계학술대회논문집, CD
- [11] N. E. Dowling, 1999, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 401~404.
- [12] UIC 518, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior - Safety - Track fatigue - Ride quality".