

# 전동차용 대차틀의 잔여수명 평가

## The Residual Life Cycle Evaluation of the Bogie Frames of EMU Vehicles

이찬우\*                      허현무\*\*  
Lee, Chan-Woo              Hur, Hyun-Moo

### ABSTRACT

This paper reports in the investigation results about residual life cycle evaluation of the bogie frames. The investigations consist of following two items. The residual life cycle evaluation and wholesome state developed in the bogie frames. The statistical data of analysis about crack occurrences checked at each part of the bogie frames in preliminary and precision inspections. These results support the possibility of extending the life cycle by 5 years.

### 1. 서론

대차장치는 철도차량의 주행성능, 안전성을 좌우하는 중요장치로써 윤축장치, 대차틀, 구동장치, 견인장치, 제동장치 등과 같은 다양한 구성품으로 이루어져 있다. 이 가운데 대차틀은 윤축장치 등에 의해 차체하중 및 주행시 발생하는 실동하중을 부담하는 중요 장치이다. 이러한 중요 기능을 담당하는 대차틀에 장시간 운행에 따른 피로손상이 발생한다면 차량 운행시 대형사고로 진전될 수가 있다. 또한 현재 국내에서 제작되어 운행되고 있는 도시철도형 전동차 대차틀의 수명은 운행한 날을 기점으로 25년임을 도시철도법상에 명시되어 있으며, 만일 25년 이상을 사용하기 위해서는 정밀진단을 통하여 5년 범위 내에서 대차 수명을 연장할 수 있음을 명시하고 있다. 따라서 국내에서 운행되고 있는 도시철도형 전동차 대차 수명을 연장하기 위해서는 잔여수명 평가가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 전동차용 대차틀 수명 연장 뿐만 아니라 기존 운행되는 대차틀에 대한 잔여수명 평가를 위한 절차와 기준을 제시하고자 한다.

### 2. 대차틀의 잔여수명 평가 방법 및 절차

#### 2.1 내구한도 선도에 의한 판정

철도차량 대차틀의 피로수명 산출법에 주로 사용되는 차량의 차체 평균하중과 변동하중의 관계를 나타내는 modified goodman diagram은 JIS E 4207에서 제시하고 있는 기준을 적용하였고, 국내 전동차 대차틀의 주요부재 재질은 SWS 490A이다. 이에 대한 기계적 성질은 표1과 같고, modified goodman diagram은 그림 1과 같다.[1]

\* 한국철도기술연구원 차량연구부 선임연구원, 정희원  
\*\* 한국철도기술연구원 차량연구부 선임연구원, 정희원

표 1 SWS 490A의 기계적 성질

단위 : kgf/mm<sup>2</sup> (N/mm<sup>2</sup>)

재질	인장강도 ( $\sigma_B$ )	항복강도 ( $\sigma_s$ )	항복점에 대한 허용응력 ( $\sigma_o$ )	피로한도			비고
				모재부 ( $\sigma_{w1}$ )	용접부사상부 ( $\sigma_{w2}$ )	용접부 ( $\sigma_{w3}$ )	
SWS490A	50 (490)	36 (355)	31 (305)	16 (155)	11 (110)	7 (70)	탄소함유량 0.18%

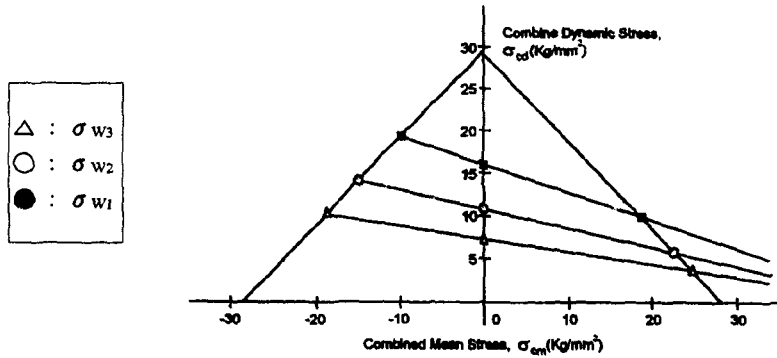


그림 1 SWS 490A의 modified goodman diagram 선도

그림1에서 보는 바와 같이 전동차 대차들은 전형적인 용접 구조물이므로 피로내구 한도를 결정해주는 조건으로 모재부, 용접부, 용접부 사상부로 나누어 피로강도 한도값을 설정해 주고 있다. 이는 대차를 설계시 설계 운용조건하에서 사용 내구연한을 보장하기 위한 기준으로 주로 사용되고 있다.

## 2.2 사용중인 대차들의 잔존수명 평가 방법

사용 중인 용접 대차들의 잔존 수명 평가를 위해서는 대차들에 대한 기초 이력조사가 필요하다. 대차들에 대한 기초 이력조사 항목은 최소한 다음과 같은 것이 있어야 한다. 조사 대차들의 제작사, 제작연월일, 누적 주행키로, 주 운행노선, 운행 최고속도, 운행시 하중조건, 정기 검사시 대차를 주 손상부위, 보수이력 등이다. 이를 통하여 누적 주행거리 대비 누적 손상 개소 또는 대차를 사용 경과년수 대비 누적 손상 개소에 대한 기초조사자료를 수집해야 한다. 이 기초조사를 하게 되면 사용중인 대차들의 일반적인 건전성을 확인할 수 있다. [2] 그러나 사용 중인 대차들의 잔존수명 평가를 위해서는 일반 기초검사를 실시한 대차들 가운데 건전성이 일천 기준치에 도달하지 못하는 대차에 대하여 잔존수명 정밀 계산을 위한 실동응력 측정 시험을 실시해야 한다. 실동응력 측정시험은 차량 주행 중에 실제 대차들에 작용하는 실동하중을 측정하여, 신뢰성이 높은 실동하중 빈도수를 주행선로 및 주행속도별로 산출하여 대차들의 피로손상에 영향을 끼치는 실동응력 크기를 대차들 용접형상별 용접구조 조합형태별로 구분하여 AWS 피로수명 평가법을 적용하여 잔여수명을 평가한다.

### 2.3 사용중인 대차들의 잔존수명 평가 절차

사용중인 대차들의 잔존수명은 우선 대차들에 대한 건전성을 파악해야 한다. 이를 위해 대차들에 대한 예비검사를 실시해야 하는데 예비검사에는 다음과 같은 것을 실시해야 한다.

- 겉모양 검사
- 구조형태 및 치수검사
- 용접부 검사

이때 겉모양 검사를 위해서는 대차들을 깨끗하게 청소한 후 실시하는데, 대차들의 겉모양에 대한 변형이나 균열 유무를 파악하는 것이다. 다음으로는 대차들에 대한 구조형태 및 치수검사를 실시하여 장시간 해야 한다. 이는 대차 구조 및 기능상 차체를 항상 탑재하고 장시간 운행 하면서 장시간 크리이프력과 반복 실동 응력을 받고 있고, 사계절이 뚜렷한 국내 기후 환경에 의한 변형 유무, 그리고 습동부에서의 마모와 장시간 차량 운행시에 발생할 수 있는 부식등을 파악하기 위한 것이다. 마지막으로 용접구조물인 대차들 주요 용접부에 대한 비파괴 검사를 실시하여 용접부 자체에 대한 건전성을 파악해야 한다. 용접부에 대한 검사방법 및 검사기준은 차량 제작시 용접부 검사 기준에 의거하여 실시하는데, 대차들에 대한 비파괴검사 종류는 자분탐상검사, 초음파탐상검사, 그리고 방사선투과검사를 실시한다. 이때 용접부 검사기준은 자분탐상검사는 KS D 0213에 의거 검사부위에 균열이 없어야 한다. 또한 방사선투과검사는 KS B 0845에 의거하여 검사를 실시하고 판정 기준은 2급이상으로 하고, 마찬가지로 초음파탐상검사는 KS B 0896에 의거하여 실시하고 판정기준은 2급이상으로 한다. 만일 자기탐상검사에 의한 균열이 발견되면 미소균열은 연마라든가 균열부 사상을 통하여 균열을 제거해주면 되고, 그러치 못한 경우에는 용접 균열형상, 크기 등을 고려하여 용접부 재작업 여부를 판정해야 한다. [3] 또한 방사선투과검사나 초음파탐상검사는 용접부 내부 결함 크기 및 진전상태를 파악하기 위한 것으로 용접부 부재 형태, 용접부 특성 등을 통하여 대차들의 건전성을 파악하는데 매우 중요한 파라미터이다. 예비검사가 종료되어 대차들 건전성이 양호하다고 판정이 되면 향후 5년에 대한 수명을 연장할 수 있는 대차들에 대하여는 잔여수명 평가를 종료한다. 그러나 예비검사 만으로 대차들에 대한 잔여수명을 평가할 수 없는 경우에는 정밀검사를 실시해야 하는데, 정밀검사방법으로는 실차 실동응력 측정시험을 통하여 잔여수명을 평가토록 한다. 실차 실동응력 측정시험 방법 및 분석은 다음과 같은 사항을 포함하여 실시한다.

#### ○ 측정대상 위치의 선정

측정대상 대차의 최대 모멘트 발생부위나 용접 연결부, 접합부 등의 피로손상 발생부위 및 피로 손상 가능부위 등 피로하중을 대표할 수 있는 부위를 선정한다.

#### ○ 현장측정 및 실동응력파의 획득

현장측정을 통하여 피로하중을 대표할 수 있는 부위에 변형계이치를 부착하고 측정 시스템을 구성한 후, 실속도에 대한 변형을 이력곡선을 획득한다.

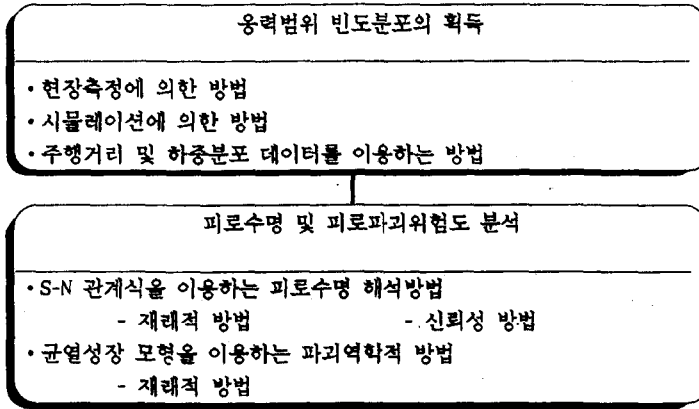
#### ○ 측정파의 빈도해석 및 응력범위 빈도분포 히스토그램 작성

현장측정에서 획득한 변형을 이력곡선으로부터 빈도해석을 실시하는 방법은 여러 가지가 있으나, 일반적으로 rainflow counting method를 사용한다. rainflow counting method를 사용하여 측정된 모든 변형을 이력곡선에 대해 빈도해석을 실시한 후, 응력범위의 항을 최대응력범위의 비( $\sigma_r / \sigma_{r,max}$ )로 무차원화한 응력범위 빈도분포 히스토그램을 작성한다. 이때 낮은 응력 범위는 피로한계 이하로 피로거동에 미치는 영향이 미약하므로 일반적으로 삭제된다.

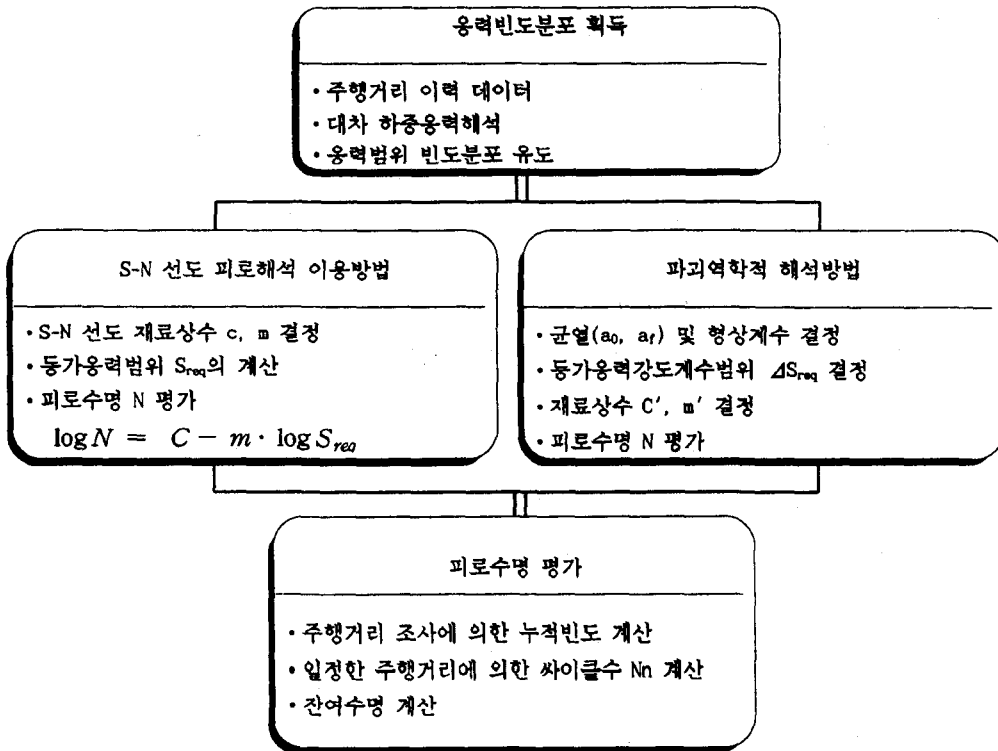
#### ○ 피로안전도 분석 및 평가

현장측정을 통해 응력범위 빈도분포를 구하여 피로 안전도 분석 및 평가의 기본자료를 획득하

는 과정은 그림 2에 나타나 있다. 또한 본 연구에서 적용하는 판정기준인 미국용접학회 규격(AWS)에서 제시하는 판정 기준이 표 2 ~ 표 4 및 그림 3에 제시되어 있다.



a) 피로수명 및 피로파괴 위험도 분석 절차



b) 피로수명평가 흐름도

그림 2 피로수명 평가 및 피로파괴 위험도 분석 절차

표2 응력의 종류 및 범주(1)

조건	개요	응력의 종류	상세범주	비고
단순부재	압연면 또는 매끈한 표면을 갖는 모재	T 또는 Rev <sup>1)</sup>	A	
조립부재	응력방향에 평행한 연속완전용입흡용접(받침봉을 제거 시킴) 또는 연속필렛용접으로 만들어진 용접부의 모재와 용접금속(부착물이 없는 연결부)	T 또는 Rev	B	
	응력방향에 평행하면서 받침봉을 제거시키지 않은 연속완전용입흡용접 또는 연속부분용입 흡용접한 용접부의 모재와 용접금속(부착물이 없는 연결부)	T 또는 Rev	B	
	들보의 복부판이나 플랜지의 수직보강재 용접끝에서 계산한 휨응력 끝부분의 돌림용접 여부에 관계없이 덮개판 폭이 플랜지보다 좁은 경우, 또는 끝부분을 돌림용접한 덮개판 폭이 플랜지보다 넓은 경우 용접한 덮개판 끝에서의 모재	T 또는 Rev	C	
	(a) 플랜지 두께 ≤ 2.0cm (b) 플랜지 두께 > 2.0cm 끝부분을 돌림용접하지 않고 덮개판 폭이 플랜지보다 넓은 부분용접한 덮개판 끝에서의 모재	T 또는 Rev	E E E	
흡용접 연결	용접부를 응력방향을 연마하고 비파괴시험을 실시한 완전용입 흡용접한 이음부나 그 인접부의 모재와 용접금속	T 또는 Rev	B	
	용접부를 응력방향으로 연마하고 비파괴시험을 실시하였을 때 부재의 폭 방향으로 변화부 반경이 60cm인 완전용입흡용접한 이음부 또는 인접부의 모재와 용접금속	T 또는 Rev	B	
	응력방향으로 연마하고 비파괴시험을 실시하고 폭이나 두께 방향 변화부의 경사가 1:2.5이하가 되도록 갈아낸 후 완전용입흡용접한 이음부 또는 인접부의 모재와 용접금속	T 또는 Rev	B	
	용접머릿살을 제거하지 않고 비파괴시험을 실시한 경우, 완전용입흡용접한 이음부나 인접부의 모재와 용접금속(1:2.5 이상 되지 않는 변화부 경사의 유무에 관계없음)	T 또는 Rev	B	

표 3 응력의 종류 및 범주(2)

조건	개요	응력의 종류	상세범주	비고	
흡용제한 부착물이 종방향으로 재하되는 경우	응력방향으로의 이음부 길이 L이 5cm이하인 경우 완전 또는 부분흡용흡용점으로 연결된 부재에 인접한 모재	T 또는 Rev	C		
	응력방향으로의 이음부 길이 L이 5cm와 판두께의 12배 (단, 10cm이하)사이 에 있는 경우 완전 또는 부분흡용흡용점으로 연결된 부재에 인접한 모재	T 또는 Rev	D		
	(a) 연결 부재의 두께 < 2.5cm	T 또는 Rev	E		
	(b) 연결 부재의 두께 ≥ 2.5cm	T 또는 Rev	E		
	응력방향으로의 이음부 길이 L이 판두께의 12배 또는 10cm 이상인 경우 완전 또는 부분흡용흡용점으로 연결된 부재에 인접한 모재	T 또는 Rev			
흡용제한 부착물이 횡방향으로 재하되는 경우	이음부 길이에 관계없이 변화부 반경 R을 갖으며, 완전 또는 부분흡용흡용점으로 연결된 부재에 인접한 모재				
	-용접 끝을 매끈하게 연마한 경우	T 또는 Rev	B		
	(a) 변화부 반경 ≥ 60cm		C		
	(b) 60cm > 변화부 반경 ≥ 15cm		D		
	(c) 15cm > 변화부 반경 ≥ 5cm		E		
	(d) 5cm > 변화부 반경 ≥ 0cm				
	-용접 끝을 매끈하게 연마하지 않은 모든 변화부 반경에 대하여	T 또는 Rev	E		
	변화부 반경 R을 갖고 응력방향에 수직인 방향으로 연마한 후 비파괴 시험을 실시한 경우에 완전흡용흡용점으로 연결된 부재의 모재				
	-동일한 판두께와 용접덧살이 없는 경우	T 또는 Rev	B		
	(a) 변화부 반경 ≥ 60cm		C		
(b) 60cm > 변화부 반경 ≥ 15cm		D			
(c) 15cm > 변화부 반경 ≥ 5cm		E			
(d) 5cm > 변화부 반경 ≥ 0cm					
-동일한 판두께와 용접덧살이 있는 경우	T 또는 Rev	C			
(a) 변화부 반경 ≥ 15cm		D			
(b) 15cm > 변화부 반경 ≥ 5cm		E			
(c) 5cm > 변화부 반경 ≥ 0cm					
-다른 판두께와 용접덧살이 없는 경우	T 또는 Rev	D			
(a) 변화부 반경 ≥ 5cm		E			
(b) 5cm > 변화부 반경 ≥ 0cm					
-다른 판두께와 용접덧살이 제거되지 않은 경우 모든 변화부 반경에 대하여	T 또는 Rev	E			

표 4 용력의 종류 및 범주(3)

조건	개요	용력의 종류	상세범주	비고
필렛용접 연결	용력방향에 수직으로 용접한 연결부재의 모재 (a) 연결부재의 두께 $\leq 1.25\text{cm}$ (b) 연결부재의 두께 $> 1.25\text{cm}$	T 또는 Rev	C  E F	
	부분적으로 끊어진 필렛용접의 모재 필렛용접 목에 작용하는 전단용력	T 또는 Rev		
필렛용접 한 부착물 이 종방향 으로 재하 되는 경우	용력방향으로 용접길이 L이 5cm 인 L형강 또는 스티드 형태의 전단연결재가 필렛용접부에 인접한 모재	T 또는 Rev	C	
	용력방향으로의 용접길이 L이 5cm와 판두께의 12배 (단, 10cm 이하) 사이인 경우 필렛용접부에 인접한 모재.	T 또는 Rev	D	
	용력방향으로의 길이 L이 판두께의 12배보다 크거나, 또는 10cm보다 큰 경우 필렛용접부에 인접한 모재 (a) 연결부재의 두께 $< 2.5\text{cm}$ (b) 연결부재의 두께 $\geq 2.5\text{cm}$	T 또는 Rev	E E	
	연결부의 길이에 관계없이 변화부 반경 R이 있는 필렛용접부에 인접한 모재 -용접부 끝을 매끈하게 연마한 경우 (a) 변화부 반경 $\geq 5\text{cm}$ (b) $5\text{cm} > \text{변화부 반경} \geq 0\text{cm}$	T 또는 Rev	D E	
필렛 용접부 착물이 주 용력방향 으로 용접 되고 횡방 향으로 재 하된 경우	연결부의 길이에 관계없이 변화부 반경 R을 갖는 필렛용접(범주 F로 필렛용접 목에 작용하는 전단용력)으로 연결된 부재의 모재	T 또는 Rev		
	-용접부 끝을 매끈하게 연마한 경우 (a) 변화부 반경 $\geq 5\text{cm}$ (b) $5\text{cm} > \text{변화부 반경} \geq 0\text{cm}$		D E	
	-용접부 끝을 연마하지 않은 모든 변화부 반경에 대하여	T 또는 Rev	E	

주 : 1) "T"는 인장용력범위만을 나타내고, "Rev"는 인장과 압축이 동시에 발생하는 용력범위만을 나타낸다.

- 2) 용력방향이 용접종축과 수직인 경우에는 부분용입용접을 피해야 한다.
- 3) 용력방향이 필렛용접 목두께에 대한 허용피로용력범위는 유효목두께와 판두께의 함수이다
- 4) 플랜지에 바깥면에 연결시킨 연결판은 횡방향 필렛용접만으로 부착시키지 않는다.

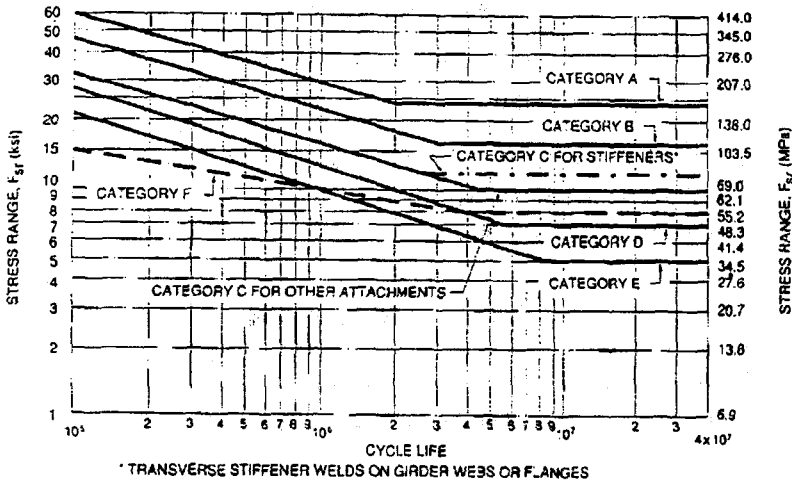


그림 3 중부 용접구조물에서의 범주별 설계 응력 범위

### 3. 결론

본 연구에서는 철도차량의 주행성능과 안전운행에 직결되는 대차장치 중의 하나인 대차틀의 잔여수명 평가를 위한 절차와 방법에 대하여 논하였다. 현재 국내에서의 대차틀 수명은 차량운용처에 따라 약간씩 상이하지만, 도시철도법상 운행한 날을 기점으로 25년임이 명시되어 있다. 따라서 대차틀을 25년 이상 사용하기 위해서는 도시철도법상에서 규정하고 있는 정밀진단을 통하여 5년 범위 내에서 대차 수명을 연장할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전동차용 대차틀 수명 연장 뿐만 아니라 기존 운행되는 대차틀에 대한 잔여수명 평가를 위한 절차와 기준을 제시하였다. 향후 본 연구결과를 토대로 철도차량용 대차틀의 내구수명 평가를 실시하여 대차틀 내구사용한도 연장을 위한 기준으로 활용될 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 1998년도 건설교통부 SOC 사업인 “도시철도 표준화 사업”의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부이다.

### 참고문헌

1. JIS E 4207-1992, Truck frames for railway rolling stock - General rules for design
2. Genki MIYAISHI, Yasutomo ODA and Katsue ARIYIMA, The endurance of the bogie frames of Shinkansen vehicles, RTRI Report Vol. 4, No. 10, 1990, October, pp. 2~9
3. 홍용기, 이찬우 외, 디젤기관차 용접대차의 안전성 평가에 관한 연구, 1997, pp. 52~ 53, 한국철도기술연구원