

# 누적손상법(Miner's rule)을 이용한 철도차량 차체 용접부의 피로평가 The fatigue analysis using cumulative damage rule (Miner's rule) for the welding areas of carbody structure

김광우\* 박근수\*\* 박형순\*\*  
Kim, Kwang-Woo Park, Geun-Soo Park, Hyung-Soon

### **Abstract**

Structural integrity of railway vehicles should last for a long period against various and continuous fatigue loadings, and the carbody structures of railway vehicle are manufactured by applying multiform welding types for each material.

Since the most of cracks are occurred and proceeded at the vicinity of welding area during the lifetime of carbody structure, the fatigue strength evaluation for welding area of carbody structure should have been carried out.

Rotem Company has evaluated lifetime and fatigue strength of carbody structure according to the fatigue analysis based on the international standard and/or inner-official regulation.

This study introduces the fatigue analysis method that we have evaluated and calculated the damages for the welding areas of carbody structure under various fatigue loading conditions using cumulative fatigue damage rule (Miner's rule) to verify whether the cumulative damage does exceed unity.

This study contains the fatigue test of specimens to derive stress-life relations(S-N curve), sub-modeling analysis and the calculation of cumulative damages under fatigue loading.

The fatigue analysis verifies the welding area shall be capable of withstanding under fatigue loading, identifies how critical area shall be selected and presents the principles to be used for design verification.

**Keywords:** Fatigue analysis (피로해석), Cumulative damage rule or Miner's rule (누적손상법),

Carbony (차체), Stress-life relations or S-N curve (S-N선도), Sub-model (부분상세모델)

## 1. 서론

철도차량의 차체는 연속적인 피로하중을 부담하는 구조물로서 약 20~30년의 긴 수명이 요구되며, 이러한 차체 구조물을 제작하기 위해서 다양하고 많은 종류의 용접방식이 적용되어 제작되고 있다.

그러나 철도차량 차체의 피로하중에 의한 파손은 대부분 용접부를 기준으로 발생되고 있는 실정이며, 이로 인하여 여러 재질에 따른 다양한 용접방식의 피로강도 평가가 이루어지고 있지만 국내외의 철도차량 시장에서 따르고 있는 피로 기준이나 규격은 그 재질이나 용접방식의 다양성에 대해 한계를 가지고 있는 것이 현실이다.

따라서 이러한 철도차량 차체구조물에 적용된 각 재질에 대한 여러 용접부의 자체적인 피로 평가가 이루어져야 하며, 이러한 관점에서 주로템은 철도차량의 설계 시 차체의 피로강도를 확보하기 위하여 자체적인 시편시험과 해석을 통해 피로 평가를 수행하고 있으며, 이로 인하여 차체의 피로강도와 수명을 평가하고 있다. 본 연구에서는 주로템 기술연구소에서 수행하는 누적손상법(Miner's Rule)을 이용한 철도차량 구조 용접부의 피로 평가방법을 소개하고, 철도차량 제작 시 사용되는 주 재질인 스테인리스 강(SUS301L-LT, DLT, ST, HT 등) 및 마일드 스텀 강(SMA490B)으로 구성된 차체구조의 주요 용접부(Spot, Fillet, Plug 용접부 등)에 적용하여 피로하중에서의 차체의 피로손상을 평가하였다.

\* (주)로템 기술연구소, 응용기술연구팀, 정회원  
E-mail : [kk2w@rotем.co.kr](mailto:kk2w@rotем.co.kr) Tel: (031) 460-1301 Fax: (031) 460-1780

\*\* (주)로템 기술연구소, 응용기술연구팀, 정회원

## 2. 피로 해석

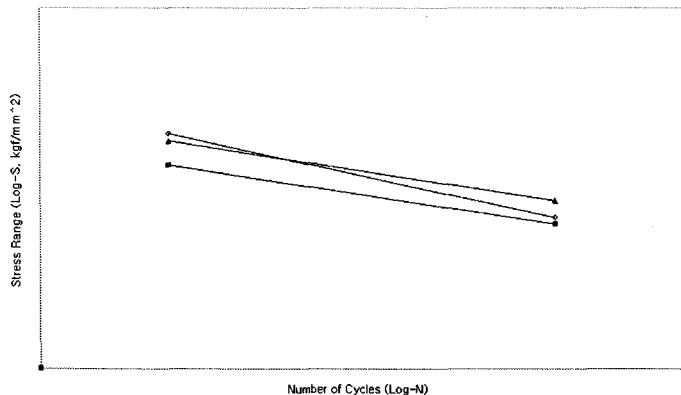
### 2.1. S-N 선도

본 연구에서 사용된 재료는 철도차량 차체 제작을 위해 주로 이용된 SUS301L강 및 SMA490B강의 주요 용접부인 Spot용접, Fillet용접, Plug용접부위에 대하여 각 접합방식을 적용한 시편을 제작하여 피로시험을 실시하였으며, 시편 시험을 통하여 최대응력진폭  $S$ 와 피로수명  $N$ 과의 관계를 통하여 S-N 선도를 얻을 수 있었다. 이들 결과를 실선으로 근사화하여 수식으로 나타낸 S-N 선도 방정식은 다음과 같다.

$$S^m N = C_2 \quad \text{for } 10^7 \geq N \quad \text{또는}$$

$$\log_{10} N = \log_{10} C_2 - m \log_{10} S \quad \text{for } 10^7 \geq N \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은  $\log_{10} S - \log_{10} N$  선도의 역기울기이며,  $C_2$ 는 생존율 97.5%의 표준편차를 갖는 2-시그마상수이다. 각 재질별 Spot용접, Fillet용접, Plug용접부위에 대한 S-N 선도를 그림과 같이 구한다.



**Fig 1 S-N Curves of Spot, Plug and Fillet Welded Joints  
(2-Sigma Band, 97.5% probability of survival)**

위의 S-N 선도를 통하여 수식(1)에 적용하여 누적손상평가에 필요한 상수값( $m, C_2$ )을 찾을 수 있다.

### 2.1. Sub-Modeling

차체 전체 구조에서 하중에 의하여 취약한 영역을 구분하기 위하여 피로하중 하에서의 정적응력상태를 평가하고 응력집중이 발생하는 영역을 선정한다. 본 연구에서는 유럽규격 EN12663에서 규정하는 피로하중조건인 공차상태의 수직하중  $\pm 15\%$  및 측방향하중  $\pm 15\%$ 의 피로하중을 받는다는 가정하에 각 조건에서의 하중을 중첩하여 유한요소해석을 통한 차체 구조의 응력선도를 평가함으로써 차체의 취약한 영역을 구분하였다. 이와 같은 피로하중조건 중첩을 통한 차체 구조의 응력분포도를 Fig 3에 도시하였다.

이와 같이 차체 구조의 취약 부위를 평가하고, 피로하중 하에서의 취약한 영역에 적용된 용접방식을 실제 설계와 제작 방식에 근거하여 피로평가를 위한 부분상세모델(Sub-Model)을 구성한다.

Fig 3에 도시된 바와 같이 차체의 좌우 대칭성을 고려하여 차체 구조의 취약부위인 도어 및 창문 개구부를 중심으로 4영역의 부분상세모델(Sub-Model)을 구성한다.

각 사용재질에 따른 적용용접방식도 모델에 구현되었다. 이 때 구성된 부분상세모델(Sub-Model)은 피봇(pivot), 플러그(plug), 필렛(fillet) 용접 방식에 따라 각각 리지드요소(rigid element)와 솔리드요소(solid element), 구속요소(constraint element)로 구성된다.

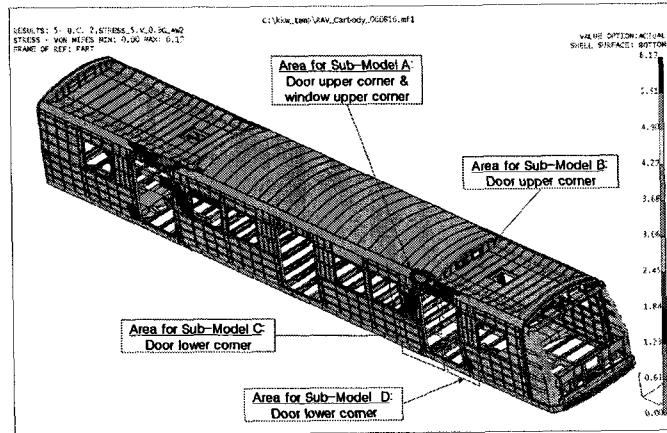


Fig 2 S-N Stress Distribution of Global FE Model in Vertical & Transverse Load

## 2.1. 누적손상법

누적손상법을 적용하여 피로하중 하에서의 누적손상량( $D$ )과 하중반복수( $n/N$ )와의 관계를 나타낸 식은 다음과 같으며, 이를 통하여 평가된 누적손상량( $D$ )이 단위 값(1.0)에 동등 이상이면 파손(failure)가 발생한다는 가정을 근거로 하였다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad \text{then failure} \quad (2)$$

Miner 법칙에 의한 피로하중 하의 파손조건은 S-N 곡선  $S^m N = C_2$ 의 관계로부터 다음과 같이 나타나 어진다.

$$D = \sum \frac{n_i \cdot S_i^m}{C_2} \geq 1 \quad \text{then failure} \quad (3)$$

## 3. 해석 결과

누적손상법을 이용하여 피로하중 하에서의 4종의 부분상세모델(Sub-Model)의 각 용접방식에 따른 누적손상량( $D$ ) 계산 결과를 부분상세모델에 적용하면 누적손상분포도를 찾을 수 있으며, 피로하중에 의해 취약한 용접부위의 위치 및 누적손상량( $D$ )을 평가할 수 있다.

이와 같이 용접방식에 따른 누적손상분포도를 Fig 3~4에 도시하였고, 그 때의 최대 누적손상량 (Maximum Cumulative Damage)을 각각 Table 3에 정리하였다.

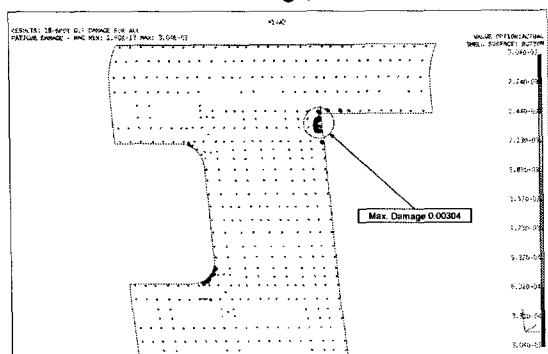


Fig 3 Fatigue damage at side panel of Sub-Model A -Spot Weld (SUS301L-DLT)

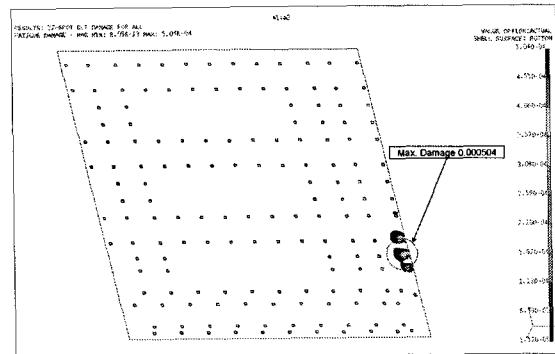


Fig 4 Fatigue damage at side panel of Sub-Model C -Spot Weld (SUS301L-DLT)

Table 1 Fatigue Analysis Results

Sub-Model	Joint Type		Max. Damage	Figs No.
<u>Sub-Model A:</u> Door Upper Corner & Window Corner	Spot W/D	SUS301L – DLT	0.00304	Fig 8
		SUS301L – ST	0.0290	Fig 9
	Fillet W/D	ST + ST	<b>0.157</b>	Fig 10
	Plug W/D	ST + ST	0.0796	Fig 11
<u>Sub-Model B:</u> Door Upper Corner	Spot W/D	SUS301L – DLT	0.00143	Fig 12
		SUS301L – ST	0.0189	Fig 13
	Fillet W/D	ST + ST	0.0462	Fig 14
	Plug W/D	ST + ST	0.0210	Fig 15
<u>Sub-Model C:</u> Door Lower Corner	Spot W/D	SUS301L – LT	0.0134	Fig 16
		SUS301L – DLT	0.000504	Fig 17
		SUS301L – ST	0.00849	Fig 18
		SUS301L – HT	0.0485	Fig 19
	Fillet W/D	ST + ST	0.00207	Fig 20
		ST + HT	0.00384	Fig 21
	Plug W/D	ST + ST	0.0125	Fig 22
		LT + HT	0.0636	Fig 23
<u>Sub-Model D:</u> Door Lower Corner	Spot W/D	SUS301L – LT	0.00158	Fig 24
		SUS301L – DLT	0.000953	Fig 25
		SUS301L – ST	0.00672	Fig 26
		SUS301L – HT	0.0146	Fig 27
	Fillet W/D	ST + ST	0.00376	Fig 28
		ST + HT	0.00926	Fig 29
	Plug W/D	ST + ST	0.0485	Fig 30
		LT + HT	0.00763	Fig 31

위의 결과와 같이 용접방식에 따른 최대 누적손상량(Maximum Cumulative Damage)은 도어 및 창문 개구부 주변인 Sub-Model A의 SUS301L-ST와 SUS301L-ST의 필렛(fillet) 용접부위에서 발생하였으며, 그 값은 0.157이다. 이 값을 기준으로 운행 중 발생하는 피로하중 발생량을 가정하여 역산하면 최대 손상량이 발생한 용접부위의 피로수명을 결정할 수 있다. 그러나 최대 누적손상량이 발생한 용접부위는 이론상의 무한수명으로 가정되는  $10^7$  cycles에서의 손상량이 평가되었으므로, 유럽규격 EN12663에서 규정하는 피로하중조건인 공차상태의 수직하중  $\pm 15\%$  및 측방향하중  $\pm 15\%$ 의 피로하중 조건에 대하여 이론상 무한 수명을 갖는다고 평가할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철도차량 제작 시 사용되는 주 재질인 스테인리스 강(SUS301L-LT, DLT, ST, HT 등) 및 마일드 스틸 강(SMA490B)으로 구성된 차체구조의 주요 용접부(Spot, Fillet, Plug 용접부 등)에 대하여 응력집중이 발생하는 취약부위를 선정하여 누적손상법(Miner's Rule)을 이용한 피로하중에서의 차체의 피로손상을 평가하였다.

유럽규격 EN12663에서 규정하는 피로하중조건에서 각 용접방식에 따른 최대 누적손상량(Maximum Cumulative Damage)을 평가하였으며, 각 용접부위의 누적손상량이 과손에 이르는 단위 값(1.0)이하임을

알 수 있다. 또한 이러한 누적손상 값을 통하여 규정된 피로하중조건에서의 피로수명을 평가할 수 있다.

이와 같은 피로 평가가 향후 더 향상된 해석과 시험을 통하여 검증되고 발전된다면 여러 형태로 발생되는 다양한 피로하중 조건에 대하여 용접부위의 피로 수명을 평가하는데 기준을 제시하리라 믿는다.

#### 참고 문헌

1. BRITISH STANDARD BS EN 12663:2000 “Railway applications-Structural requirements of railway vehicle bodies”.
2. Prof. Bae, Dongho, 1999, “Evaluation of Fatigue Strength and Reliability on SUS301L Spot-welded Joint for the Train Body”, SAFE R&D Center and Material Joining and Reliability Evaluation Lab. of Sungkyunkwan University.
3. Fatigue Analysis Report of Carbody Structure (REDJ100006--) issued by Rotem.
4. GURNEY. TIMOTHY RUSSELL, 1979, “Fatigue of welded structure, Second Edition”, Cambridge University press.
5. Do-Sik Kim and Jung-Kyu Kim, 1995, “The Fatigue Damage Accumulation Behavior and the Fatigue Life Prediction under 2-Level Block Loading in Plain Woven GFRP Composites”, 대한기계학회논문집 제19권 제12호, pp. 3299~3307.
6. Jung-Kyu Kim and Dong-Suk Shim, 1996, “The Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of GFRP under Random Loading”, 대한기계학회논문집(A) 제20권 제12호, pp. 3892~3898.
7. J.H.Kim, 2006, “A Study on the Low Temperature Mechanical Characteristics of SMA490A for the Railroad Vehicle Structure”, 한국철도학회논문집 제9권 제6호 pp. 695-700.
8. Jaehoon Kim, 2006, “A Study on the Effects of the Fatigue Life due to the Processing of the Butt Weld Specimens and the Fatigue Life Estimation due to the Weld Zone Profiles”, 한국철도학회논문집 제9권 제4호 pp. 371-378.