

## 전동차 선로 이음매 판의 파손 해석

### Damage Analysis of Train Rail Fishplate

윤서현<sup>1</sup>, 최병철<sup>2</sup>, 신기항<sup>3</sup>, 남기우<sup>4\*</sup>

Seo-Hyun Yun<sup>1</sup>, Byoung-Chul Choi<sup>2</sup>, Ki-Hang Shin<sup>3</sup>, Ki-Woo Nam<sup>4\*</sup>

#### 〈Abstract〉

The subway is one of the most common and important means of transportation in modern society. In order to use the subway safely, tracks are necessary, but trains are prone to derailment and collisions. In order for the train to run safely on the track, the fishplate that connects the line connection is used. The damaged railway was a fishplate for connecting subway lines used for 11 years, and damage analysis and countermeasures were presented. Beach marks were observed on both fracture surfaces, and striations appeared at the range of crack propagation. The damaged part is Cr carbide, which has a higher hardness than the base metal, and is judged to be embrittled and destroyed by fatigue. The SM50C fishplate was subjected to a cyclic stress of about 59% of the upper limit of tensile-compression fatigue limit, but inclusions were the cause of failure. In order to prevent fatigue failure of the SM50C steel fishplate, the occurrence of inclusions should be minimized and processed to have a homogeneous structure when manufacturing the fishplate. In addition, compressive residual stress is given through surface modification such as peening to control crack generation. It is necessary to minimize the change in shape that can become a stress concentration part along with accurate fastening of the bolt, and to design the stress distribution to be as uniform as possible.

*Keywords : Damage Analysis, Fishplate, Inclusions, Safety, Surface Modification*

1 한국폴리텍대학 창원캠퍼스, 금형시스템과 교수

1 Professor, Dept. of Die Mold System, Changwon Campus of Korea Polytechnics

2 한국폴리텍대학 직업교육연구소 교수

2 Professor, Vocational Education Research Institute, Korea Polytechnic University

3 부경대학교 재료공, 대학원생

3 Graduate Student, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

4\* 부경대학교 재료공&마린융합디자인공, 교수

4\* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering & Marine

E-mail: namkw@pknu.ac.kr

Design Convergence Engineering, Pukyong National University

## 1. 서론

지하철은 현대사회에 가장 보편적이고도 중요한 운송수단 중 하나이다. 지하철을 안전하게 이용하기 위해서는 선로가 필요하지만, 전동차는 탈선, 충돌 및 추돌이 많이 발생한다. 전동차가 안전하게 선로를 주행하기 위해서는 선로 연결부를 이어주는 이음매 판이 사용된다. 이음매 판은 전동차의 큰 하중이 반복적으로 작용하므로 피로 파괴가 우려된다[1]. 이음매 판이 파손된다면, 탈선의 위험이 존재하고[2-4], 이음매 판의 교체 시간 동안 선로는 일시적으로 사용 불가능하므로 경제적인 손실이 우려된다.

피로 파괴는 자동차, 항공기, 터빈엔진 및 금형 등 반복되는 하중이나 진동을 받는 장치에서 많이 발생한다. 성수대교 붕괴는 불완전한 용접부의 피로 파괴 현상으로 파괴한 대표적 사례이다[5]. 최근의 사례로는, 2018년 2월 발생한 서울 9호선 김포공항역 구내 레일연마차 탈선사고가 있다[6]. 원인은 연마차 각도 실린더 회전축이 피로 균열로 절단되면서 연마차가 탈선되었다. 따라서 이음매 판의 피로 파괴의 해석은 인적 및 물적 손실을 방지하기 위하여 매우 중요하다[7-9].

본 연구의 손상재는 11년 사용한 지하철 선로 연결용 이음매 판으로 파손 해석과 대책을 제시하였다.

## 2. 손상재 및 해석 방법

본 연구에서 사용한 손상재는 Fig. 1에 나타내는 SM50C 이음매 판이다. 이음매 판은 KS D 3752에 따라 제작된 것이며, SM50C의 표준 화학 조성표와 열처리 후의 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 각각 나타낸다. 이것은 담금질 및 템퍼

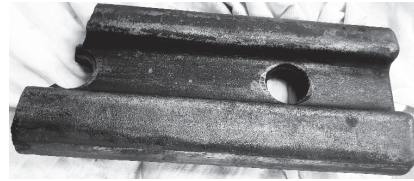


Fig. 1 Fishplate of damaged railway

Table 1. Chemical compositions of SM50C steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.47~0.53	0.15~0.35	0.6~0.9	<0.03	<0.035	<0.2

Table 2. Mechanical properties after heat treatment according to KS D 3752 standard

$\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)
> 75	> 55	> 15

링을 시행한 후, 방청처리(기름칠)를 한 것이다. 이음매 판은 SM50C를 810~860°C에서 수냉, 550~650°C에서 템퍼링하여, 매끈하게 압연 또는 단조하여 제작한다.

파단면의 육안 관찰 및 금속현미경(JP/GX51, Japan) 관찰, 마이크로비커스경도(402MVD, Wilson wolpertt, USA) 측정, 주사식 전자현미경(TESCAN (VEGA II LSU)) 및 에너지 분산 X선 분광학(Horiba) 분석하고, 이음매 판에 작용하는 응력을 구하고, S-N 선도와 비교하여 피로 파괴 거동을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 파단면 관찰

Fig. 2는 실제 사용 중인 레일 고정 이음매 판의 체결 모습을 나타낸다. 이음매 판은 4개의 구

명으로 레일과 볼트로 체결되어 고정된다. 이음매 판은 선로의 이탈을 방지하고, 지지하는 역할을 하므로, 지하철 차체가 지나갈 때, 선로의 옆면을 지지하는 이음매 판에는 차체의 하중에 의한 굽힘 응력이 작용한다.

Fig. 3은 파괴된 이음매 판의 단면을 나타낸다. 그림에서 굽은 화살표는 균열 진전 방향을 나타낸다. A 및 B 부분에서 균열 진전부는 매끄러운 파면을 나타내고, 최종 파단부는 취성적인 파괴로

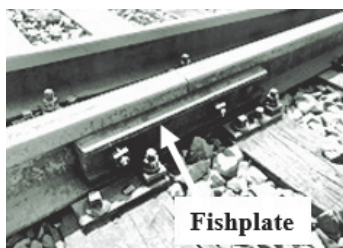


Fig. 2 Appearance of fastened fishplate

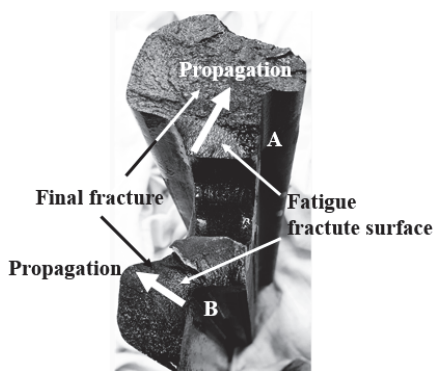


Fig. 3 Cross section of damaged fishplate

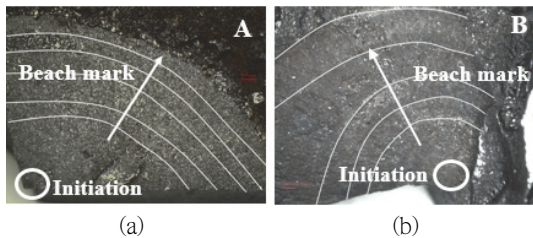


Fig. 4 Magnification of (a) A and (b) B portions

골짜기를 나타낸다.

Fig. 4는 Fig. 3의 A 및 B 부분의 균열 진전부를 확대하여 나타낸다. 균열 진전부는 변동 하중에 의한 비치 마크가 관찰되었다.

Fig. 5는 A 부분의 균열 발생 기점을 SEM으로 관찰한 것이다. ㉠는 균열 발생 기점이다. ㉡는 ㉠의 사각 부분을 확대한 것으로 발생 기점은 검고 오목한 형상을 나타낸다. ㉢는 ㉡의 사각 부분을 확대한 것으로 의사 벽개 파면을 나타내면서

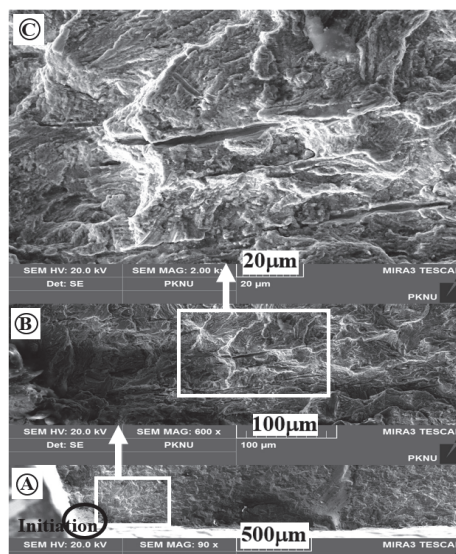


Fig. 5 SEM observation of crack initiation point of A portion in Fig. 3

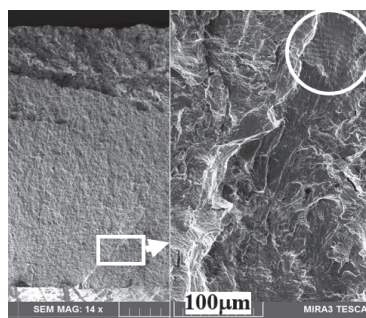


Fig. 6 Striation of crack initiation part of A portion in Fig. 3

곳곳에 찌김이 관찰된다. 이것은 균열의 진전으로 에너지의 급격한 발산으로 나타나는 현상이다.

Fig. 6은 A 부분의 균열 진전부를 확대한 것이다. 이 부분은 의사 벽개 파면과 피로 파괴의 미시적인 파면인 슬라이에이션(그림의 원 부분)이 관찰되었다.

### 3.2 작용 응력

이음매 판은 레일의 좌, 우에 체결되어 있고, 전동차의 바퀴로 굽힘하중이 가해지므로, 굽힘 응력은  $\sigma = My/I$ 로 계산하였다.

( $y = h/2$ ,  $h$  : 높이,  $I$  : 단면 2차 모멘트)

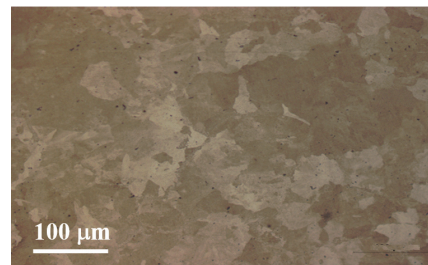
이음매 판의 단면 2차 모멘트는  $31.66\text{cm}^4$ 이다. 운행된 전동차의 중량은 구형 31.9ton, 신형 31.4ton이다.

구형과 신형의 전동차에 따라서 이음매 판이 받은 하중과 사이클 수가 모두 다르므로 사용응력을 구분하여 계산하였다. 구형과 신형 모두 이음매 판의 체결부 사이 거리는 16cm이다.

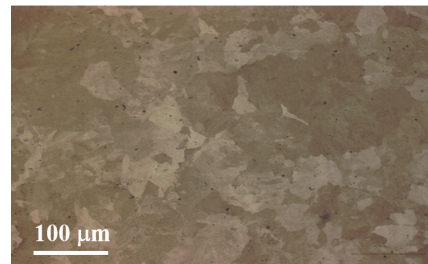
구형 및 신형의 전동차 운행 시 이음매 판의 작용 응력은 각각  $30.2\text{ kg/mm}^2$  및  $29.8\text{ kg/mm}^2$  이고, 운행 횟수는 각각 139,168 및 52,164회이다. 작용 응력의 평균값은  $30\text{kg/mm}^2$ 고, 191,332회 작용하였다. 담금질 및 템퍼링 한 SM50C의 인장-압축 피로한도는  $30.1\sim 51\text{kg/mm}^2$ 이다[10]. 본 연구에서 파괴한 이음매 판은 피로한도의 하한치( $30.1\text{ kg/mm}^2$ )의 100%, 상한치( $51\text{kg/mm}^2$ )의 59% 응력이 작용하였다. 만약 작용 응력이 피로한도의 하한치가 작용했다면, 즉시 파괴했을 것이다. 그러나 사용 도중에 파괴하였으므로, 하한치보다는 높은 피로한도의 물성을 가졌을 것으로 추측된다. 그러나 사용 도중에 파괴하였으므로, 이음매 판은 작용 응력 및 재료의 개재물 등에 의하여 파괴하였을 것으로 판단된다.

### 3.3 조직 관찰

Fig. 7은 (a) 모재 및 (b) 손상재를 금속현미경으로 관찰한 것이다. (a)는 결정립계가 명확하고, 결정립을 확인할 수 있다. 결정립의 밝은 부분은 페라이트이고, 어두운 부분은 펄라이트이다. (b)는 손상재의 균열진전부를 관찰한 것이다. 결정립계가 비교적 명확하고 모재와 같이 밝은 부분은 페라이트, 어두운 부분은 펄라이트로 구분된다. 손상재의 결정립의 내부는 모재에서 관찰되지 않던 검은색으로 보이는 부분과 결정립계가 넓어진 것을 알 수 있다. 검은색으로 보이는 부분은 추후 EDS 분석에서 검출된 Cr으로 생각된다. Cr은 담금질성의 관점에서 첨가한다. SM50C는 약 0.47~0.53%의 C를 함유하며, 일반적으로 크롬, 바나듐, 텅스텐, 몰리브덴 등을 첨가한다. 이러한 합금원소는 C와 결합하여 매우 강하고 내오염성이 좋은 탄소화합물을 형성한다.



(a)



(b)

Fig. 7 Structure observation of (a) base metal and (b) damaged metal

### 3.4 EDS 분석

Fig. 8은 파괴 부분을 EDS로 분석한 것이다. Table 3은 화학성분을 나타내며, 다양한 원소가 검출되었다. Mn의 경우는 0.55 wt.%로 화학조성 (0.6~0.9 wt.%)보다 작지만, Si, S 및 Cr은 많이 함유하였다. 특히 Cr은 0.39 wt.%로 모재 0.12 wt.%보다 약 3.25배 높게 검출되었다. 더구나 Cr 외에도 O, Al, Ca, Zn과 같은 원소들과 복합적인 탄화물이 형성된 것이라 판단된다. Cr 탄화물은 경도가 상승하고 재료가 취화되어, 반복응력을 받으면 파괴하기 쉽다. 따라서 전체적인 EDS 결과를 분석하였을 때, 파괴기점 근방의 Cr 복합탄화물이 취약한 부분으로 작용하여, 균열이 발생한 것이라 판단된다.

### 3.5 비커스경도

Fig. 9는 모재와 손상재의 마이크로비커스경도를

Table 3. Chemical compositions of inclusion (wt.%)

C	Si	Mn	S	Cr	O	Al	Ca	Zn	Fe
5.18	0.40	0.55	0.17	0.39	18.26	2.89	0.33	1.04	70.79

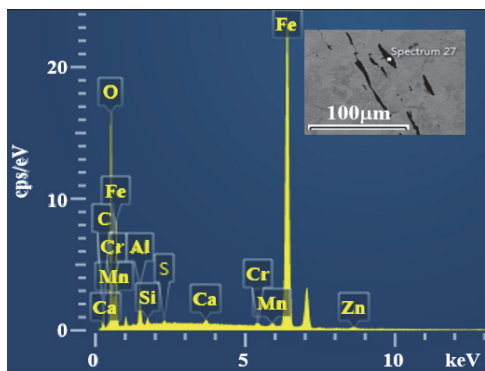


Fig. 8 EDS analysis results of inclusions at the origin of fracture

나타낸다. 압입 하중 및 시간은 각각 200g 및 10초이며, 총 22회 측정하여, 최대 및 최소를 제외한 20회를 사용하였다. 모재는 약 260~278HV, 파괴기점 부분은 약 288~308HV로 모재의 경도보다 크게 나타났다. 손상재의 경도는 EDS 분석에서 Cr 탄화물의 형성으로 높은 것이다.

### 4. 파괴 원인 및 대책

손상재는 모재보다 높은 경도를 나타내었으며, 균열 발생부는 EDS 분석에서 발견된 Cr, Al, Ca 등 개재물들이 존재함을 알 수 있었다. Cr 함량이 모재보다 3배 많은 것으로 보아 파괴 원인이 Cr 탄화물인 것으로 판단된다. 이음매 판은 약 30kg/mm<sup>2</sup>의 반복응력이 작용하였고, 이것은 인장-압축 피로한도 상한치의 59%이지만, 취성적인 성질인 Cr 탄화물이 피로 파괴의 원인이라 판단된다. 파단면은 비치 마크가 관찰되어, 피로 응력에 의하여 최종적으로 파괴하였다.

이와 같은 균열의 발생을 제어하기 위해서는 이음매 판 제조 시 개재물의 발생을 최소화하고, 균질한 조직을 가지도록 가공해야 한다. 또한, 균

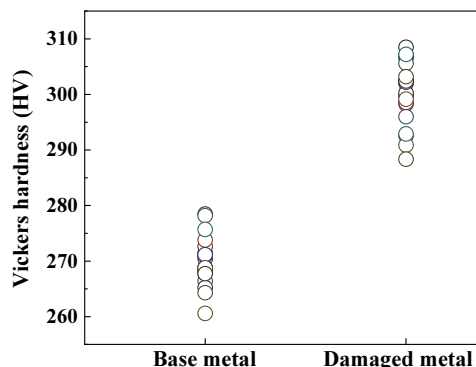


Fig. 9 Vickers hardness of base metal and damaged metal

열기점은 표면부이고, 표면의 작은 요철이 기점이 되어 균열로 성장하게 된다는 점에서 피닝[11,12], 유도가열 및 침탄과 같은 표면 가공으로 압축 잔류응력을 발생하게 하고, 경면 처리[13]로 개선할 수 있다. 한쪽이 파괴되어 다른 쪽으로 응력이 집중되는 것을 막기 위해 볼트의 정확한 체결과 함께 응력집중부가 될 수 있는 이음매 판 두께의 변화부를 줄이거나, 볼트 체결부의 직경이나 위치를 개선하여 응력분포를 최대한 균일하도록 설계하는 등의 방법이 유효할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 지하철 선로를 고정하는 SM50C 이음매 판의 파손을 해석하고, 대책을 제시하였다.

- (1) 두 곳의 파단면은 모두 비치 마크가 관찰되었으며, 균열 진전부는 스트라이에이션이 나타났다.
- (2) 손상 부분은 Cr 탄화물로 경도가 모재보다 높으며, 취화되어 피로 파괴한 것으로 판단된다.
- (3) SM50C 이음매 판은 약  $30\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 반복응력이 작용하였고, 인장-압축 피로한도 상한치의 50%이지만, 개재물이 파괴의 원인이다.
- (4) SM50C강 이음매판의 피로 파괴를 예방하기 위하여, 이음매 판 제조 시 개재물의 발생을 최소화하고, 균질한 조직을 가지도록 가공하여야 한다.
- (5) 피닝 등의 표면 개질을 통하여 압축 잔류응력을 부여하여 균열 발생을 제어하도록 한다.
- (6) 볼트의 정확한 체결과 함께 응력집중부가 될 수 있는 형상의 변화를 최소화하고, 응력분포를 최대한 균일하도록 설계할 필요가 있다.

## 참고문헌

- [1] H. K. Jun, J. W. Seo, D. H. Lee, H. J. Kim, "A Study on the Fatigue Crack Evaluation Method of Railway Bogie Frame," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 12, pp. 16-24, (2009).
- [2] Busan Transportation Corporation Line 2 Gungyeong Station Test Driving Train Derailment Accident, Railroad Accident Investigation Report-ARAIB/R 2022-6, Air Rail Accident Investigation Committee, (2022).
- [3] KTX Train Derailment Accident between Daejeon-Gimcheon-Gumi Station on the Gyeongbu High Speed Line, Railroad Accident Investigation Report-ARAIB/R 2022-5, Air Rail Accident Investigation Committee, (2022).
- [4] Busan Transportation Corporation Busan Line 1 Sinpyeong Station Equipment Train Derailment Investigation Report, Railroad Accident Investigation Report-ARAIB/R 2022-3, Air Rail Accident Investigation Committee, (2022).
- [5] Seongsu Bridge Collapse Accident Cause Investigation Team Activity White Paper, Seoul District Prosecutor's Office, (1995).
- [6] Rail grinding car derailment accident in Gimpo Airport Station on Seoul Line 9, 2019, Rail Accident Investigation Report 2019-2, Air Rail Accident Investigation Committee, (2019).
- [7] S. H. Yun, M. H. Kim, K. W. Nam, "Failure Analysis of SCM435 High Strength Bolt of Forging Die," Journal of The Korean Society of Industry Convergence, vol. 22, pp. 649-655, (2020).
- [8] S. H. Yun, M. H. Kim, K. W. Nam, "Failure Analysis of SCM435 Bolt for Fixing Automotive Air Brake Spring," Journal of The Korean Society of Industry Convergence, vol. 23, pp. 73-81, (2020).
- [9] T. S. Kim, S. H. Kang, Y. K. Kwon, S. H. Yun, K. W. Nam, "Damage Analysis of Leaf Spring for Transport Utility Vehicles," Journal

- of The Korean Society of Industry Convergence, vol. 25, pp. 1047-1053, (2022).
- [10] Fatigue strength of carbon steel, mechanical system design manual by JIS (Part 1), Mechanical System Design Manual Committee, Japan Standards Association), p. 87, (1986).
- [11] J. H. Kim, "A Study on Fatigue Strength Improvement of SS400 Steel Welded Parts by Shot Peening for EMU," Seoul National University of Technology, Master Thesis, (2008).
- [12] G. H. Lee, K. H. Gu, J. H. Kim, S. H. Yun, Y. K. Kwon, K. W. Nam, "Improving Reliability of SKD61 using Nondamaging Technology," The Korean Society of Industry Convergence, vol. 25, pp. 791-797, (2022).
- [13] D. S. Bae, J. S. Kawk, J. K. Lee, "Effect on Surface Treatment and Fatigue of STS 410 Materials," The Korean Society of Industry Convergence, vol. 25, pp. 987-992, (2022).

---

(접수: 2023.03.15. 수정: 2023.03.21. 게재확장: 2023.03.27.)