

현장측정을 통한 분기기 망간 크로싱의 피로수명 평가

Fatigue Life Evaluation for Railway Turnout Crossing using the Field Test

박용길* · 엄주환* · 최정열**

Yong-Gul Park · Ju-Hwan Um · Jung-Youl Choi

Abstract

The major objective of this study is to investigate the fatigue life evaluation of immovability crossing for railway turnout by the field test. In railway engineering, an appliance is necessary to allow a vehicle to move from one track to another. This appliance came to be known technically as turnout. So, turnout is required very complex railway technologies such as rolling stock, track. Due to the plan under the application of high speed train, turnout are needed more stable for fatigue behaviors. It analyzed the mechanical behaviors of turnout crossing with propose its advanced technical type on the field test and fatigue evaluation for the dynamic fatigue characteristics. As a result, the advanced type crossing are obviously effective for the fatigue damage ratio and dynamic response which is non-modified type. The analytical and experimental study are carried out to investigate the passing path of contact surface and fatigue damage trend decrease dynamic stresses and deflections on advanced crossing type. And the advanced type reduce dynamic fatigue damage ratio and increase fatigue life(about each 38%) more than non-modified type. From the field test results of the servicing turnout crossing, it is evaluated that the modification of contact angle, weight, material and sectional properties is very effective for ensure against fatigue risks.

Keywords : turnout crossing(분기기 망간 크로싱), dynamic fatigue behavior(동적피로거동), fatigue life evaluation(피로수명 평가)

1. 서론

내 망간 크로싱 유지관리 지침에는 크로싱부의 마모한계에 따른 교체 및 보수가 주를 이루고 있으며 철도하중과 같이 반복되는 피로하중에 대한 균열, 치짐 등의 검토키가 간과되어온 실정이다.

이에 열차 주행에 의한 망간 크로싱의 활하중 변동응력을 측정하여 레인플로우법을 이용한 응력빈도 해석을 수행함으로써 피로 손상도를 추정하고 대상부재에 대한 피로수명을 평가하였다.

망간 크로싱은 주단조 부재로서 일반적인 레일 단면보다도 그 형상이 매우 복잡하고 구조해석이 난해하여 정량적인

상태평가가 어려운 분기기 구조 부재이다. 또한 망간 크로싱에 존재하는 결선부로 인해 반복적인 충격 피로하중이 작용하는 구조적 특성상 단순한 마모량에 따른 유지보수 및 상태평가로는 이에 대한 안전성 확보에 어려움이 따른다.

분기부 크로싱과 같이 공용기간 중 계속되는 반복하중을 받는 구조는 사용조건에 따라 균열 및 마모와 같은 손상을 입게 되고 이는 크로싱 구조의 강성을 감소시키는 결과를 가져오게 된다[1,2,3,5]. 이러한 크로싱부의 피로강도 저하는 사용성, 내구성 및 안전성에 심각한 문제가 될 수 있으므로 본 연구에서는 공용중인 망간 크로싱에 대한 현장측정을 통해 피로손상도 및 피로수명 평가를 수행하여 피로강도 개념을 도입한 망간 크로싱의 상태평가기법에 대한 기초 데이터를 확보하고자 한다.

2. 피로손상도 추정 및 피로수명 평가 이론

현장 측정을 통해 측정된 활하중 변동응력 이력파형을 이용하여 레인플로우법에 의해 응력빈도 히스토그램을 작성

* 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사
E-mail : ygpark@snu.ac.kr

TEL : (02)970-6575 FAX : (02)978-6575

* 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 선임연구원

** 정회원, (주)대한콘서트 철도부, 공학석사

함으로써 다음 식 (1)과 같이 대상부재에 대한 피로 손상도를 추정할 수 있다.

$$D_f = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{eq}}{N_o} \quad (1)$$

여기서, N_i 는 응력 범위 σ_{r_i} 에 대한 피로수명이며 σ_{f_0} 는 기본 허용응력 범위를 나타낸다.

$N_o = 2 \times 10^6$ 회 피로 강도에 해당하는 응력범위의 경우 등가반복횟수 N_{eq} 와 피로수명 Y_r 은 다음 식 (2)와 같다.

$$N_{eq/day} = \sum_{i=1}^k n_i \left(\frac{\Delta \sigma_{r_i}}{\Delta \sigma_{f_0}} \right)^m$$

$$Y_r = \frac{N_o}{N_{eq} \times 365} \text{ (년)} \quad (2)$$

본 연구에서는 실제 부재가 변동응력하에서 피로한계 이하의 응력범위에 의해 피로손상이 발생하는 특성을 감안하여 피로한계 이하의 응력범위의 영향을 고려하여 피로수명을 무한대로 간주하지 않고 피로한계 이하까지 동일한 기울기를 연장해서 피로수명을 구하는 방법인 수정 Miner법칙 (Modified Miner's rule)을 피로수명 산출시 적용하였다.

국내의 철도 설계기준에는 크로싱부에 대한 S-N선도의 기울기(m)값이 기술되어 있지 않으나 $m=3$ 의 값을 갖을 것으로 가정하여 피로평가를 수행하였다[2].

또한 망간 크로싱이 주조품이며 국내 철도 설계기준에 크로싱부가 피로 범주에 분류되어 있지 않은 실정이다.

반면 일본의 경우 JIS E 1303(철도용 분기기류) 부속서 2에 명시되어 있는 인장강도의 하한치 784MPa에서 크로싱 단면의 형상을 고려하여 137MPa을 피로한도의 목표치로 설정하고 있다[1,2].

Table 1. Allowable stress of casting materials(MPa)

응력의 종류	휨응력		지압응력			
	인장	압축	미끄러지는 평면접촉	헬츠공식으로 계산한 경우의 지압		
				지압 응력	필요경도 (HB)	
단조품	SF490A	137	137	103	588	125 이상
	SF540A	167	167	123	686	145 이상
주강품	SC450	137	137	103	588	125 이상
	SCW410	137	137	103	588	125 이상
	SCW480	167	167	123	686	145 이상
	LMnSC1A	167	167	123	686	143 이상
	LMnSC2A	186	186	137	765	163 이상

이에 본 연구에서는 크로싱 부재의 접촉 및 마찰에 따른 피로강도를 감안하고자 다음 Table 1과 같은 주단조품의 허용응력을 고려하여 응력해석을 수행하였으며 망간 크로싱의 구조적 특성상 주행 열차의 차륜과 반복 접촉 피로하중을 받고 있으므로 미끄러지는 평면접촉상태의 지압응력(123MPa)을 고려하여 피로손상도 추정식에 적용하였다.

3. 대상크로싱 제원 및 특성

현장측정 대상 망간 크로싱으로는 50kg 망간 크로싱과 60kg 개량형 망간 크로싱을 선정하였으며 측정대상 크로싱의 단면 및 재료적 특성을 비롯한 일반적인 제원은 Table 3

Table 2. Section and material properties

구분	크로싱 A	크로싱 B
형식	#10 망간 크로싱	#10 망간 크로싱
중량	50kg	60kg
이론 교점	1:25	1:75
단면 치수 (mm)		
준공 연도	1980년	2004년

Table 3. Counts of passing by trains

구분	크로싱 A	크로싱 B
새마을	19	20
무궁화	17	21
화물	16	12
합계	52	53

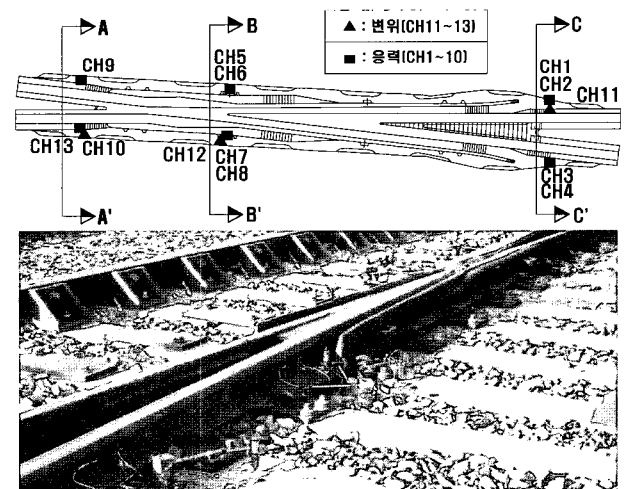


Fig. 1. Attachment of strain gauges

과 같으며 측정센서의 부착위치는 Fig. 1과 같다.

계측 수행방법은 동적계측장비(MGC-Plus)로 변형율을 50Hz 또는 100Hz의 샘플링주기로 계측하였고 실제 운행중인 3가지 종류의 철도차량에 대한 크로싱 각부의 동적응답을 측정하였다.

Table 3은 대상 크로싱의 열차별 통행 횟수를 나타낸다.

3.2 현장측정

측정센서는 크로싱 진입부, 결선부 및 통과부에 대하여 1축 변형을 게이지를 크로싱 하부 플랜지 및 복부에 각각 2개씩 총 10개를 부착하였으며 변위계를 이용하여 위치별 수직 처짐(3개소)을 측정하였다.

측정내용 중 특이사항은 크로싱 A의 경우 레일이음매판에 의한 레일연결 방식으로 되어 있었으며 크로싱 B는 용접연결 방식으로 되어 있었다.

Fig. 2는 ‘진입부-결선부-통과부’ 각각의 단면과 측정센서 설치 전경을 나타내며 각 측정 위치별 동적 변동응력 및 변위 파형은 Fig. 3~4와 같다.

4. 측정결과 및 분석

대상크로싱 A, B는 모두 정거장 진출입부에 위치한 분기기(#10)로써 정거장 통과선측으로 총 52~53대의 열차가 통과하였으며 크로싱 단면의 통과열차에 따른 응답특성을 파악하기 위한 계측이었으므로 분기선측 주행열차에 대한 측정은 실시하지 않았다.

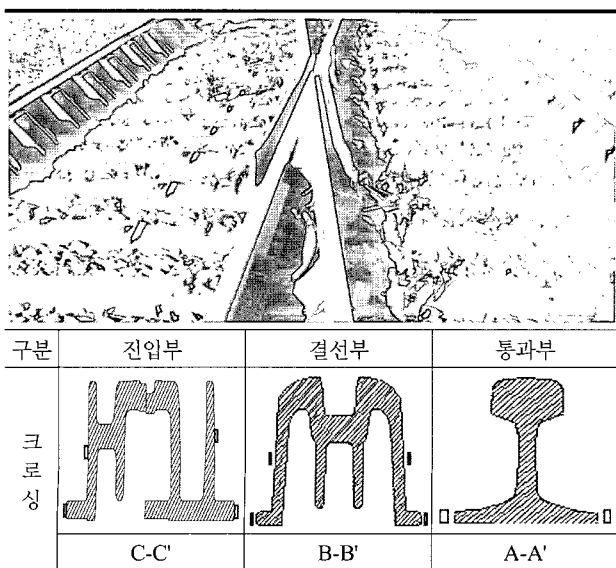


Fig. 2. Measured sections(see Fig. 1)

측정당일 통과한 열차에 대하여 각각의 응력 파형에 대한 응력빈도 히스토그램을 작성한 후, 모든 열차에 대하여 합산한 결과를 다음 Fig. 5에 나타내었으며 응력빈도 해석은 라인플로우법을 이용하였다.

측정대상 망간 크로싱 A, B에 대해 수정 Miner법칙을 적용하여 피로수명평가를 수행한 결과를 다음 Table 5에 나타내었다.

크로싱 단면위치별 피로손상도 분석결과, 크로싱 A, B 모두 ‘진입부-결선부-통과부’에서의 발생 응력의 경향은 동일

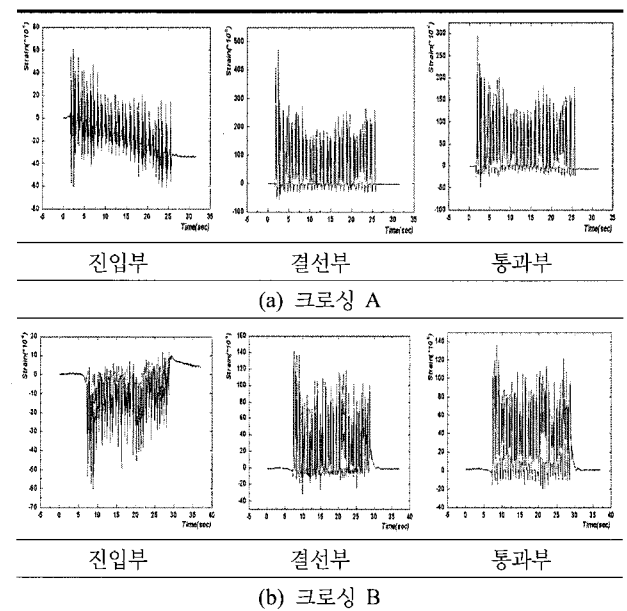


Fig. 3. Test results of dynamic stresses(strain)

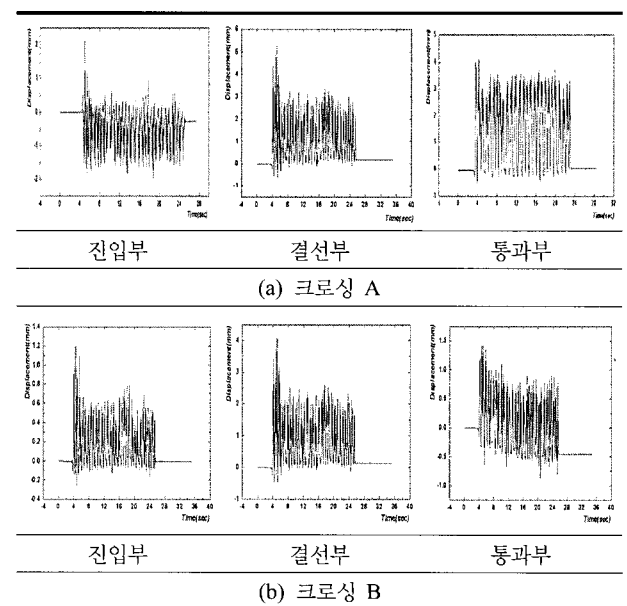


Fig. 4. Test results of dynamic displacements

하였으나 크로싱 B의 응력 변동폭이 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 크로싱 B의 경우 크로싱의 중량화 및 노즈부 접촉각 변화 등의 단면개량에 따라 노즈부 통과시 발생하는

충격의 영향이 저감 되어 발생응력 변동폭이 작게 나타난 것으로 판단된다. 이에 따라 크로싱 B의 피로손상도가 크로싱 A보다 38% 낮게 나타났으며 피로수명은 38% 높게 분석되었다.

또한 크로싱 단면특성 및 통과 열차의 주행특성에 따라 '진입부-결선부-통과부'의 피로손상도는 크로싱 A의 경우 결선부의 피로손상도가 가장 높은 것으로 나타나 결선부 통과에 의해 동적 피로하중이 증폭되어 단면의 피로손상도를 가중시키는 것으로 분석되었다. 이와 같은 현상은 향후 해당부위의 접촉 피로 마모 및 균열 등과 같은 손상을 유발할 가능성이 클 것으로 판단되며 측정 및 분석결과가 통상적인 크로싱부 손상 유형과 동일한 결과로 도출됨으로써 이를 뒷받침하고 있다.

한편 크로싱 A의 경우 진입부 및 통과부의 발생응력에 따른 피로손상도가 크로싱 B의 결선부에서의 피로손상도와 거의 흡사하게 나타나는 것으로 분석되었는데, 이는 크로싱

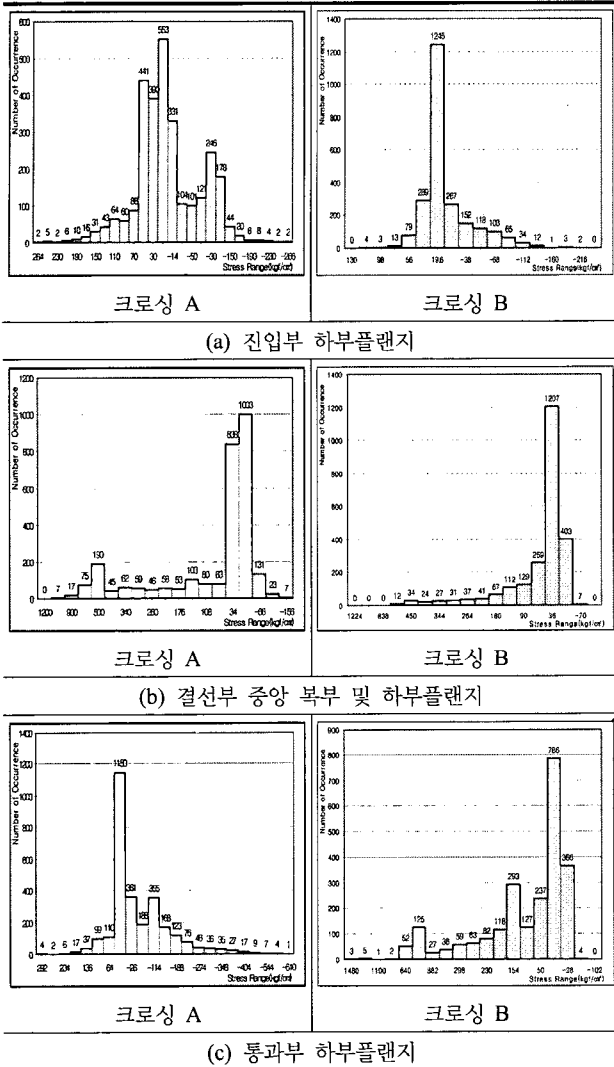


Fig. 5. Stress frequency histograms

Table 5. Results of fatigue evaluation

구 분	피로손상도 (Di)	허용피로강도 (MPa)	잔존 피로수명 (년)
크로싱 A	진입부	0.00452	221
	결선부	0.00912	109
	통과부	0.00481	207
	총 합	0.00615	162
크로싱 B	진입부	0.00327	305
	결선부	0.00512	195
	통과부	0.00318	314
	총 합	0.00385	259

구 분	진입부	결선부	통과부
크로싱 A	통과전		
	통과후		
피로손상도	0.00452	0.00912	0.00481
구 분	진입부	결선부	통과부
크로싱 B	통과전		
	통과후		
피로손상도	0.00327	0.00512	0.00318

Fig. 6. Test results of crossing contact surface

A의 경우 레일 이음매판 연결형식으로써 동절기 레일 연결부에서 유간 및 단차가 발생하게 되며 이러한 개소에서 주행열차하중에 따른 충격의 영향이 동적응력발생에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한 크로싱 B의 경우, 열차의 크로싱부 주행 경로에 따른 피로손상도 편차가 크지 않았으며 이는 크로싱 노즈부 접촉각의 변화에 의해 결선부 통과시 발생하는 동하중에 따른 응력증폭현상이 저감되어 비교적 낮은 응력범위의 피로하중을 받고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 대상 크로싱의 주행열차에 의한 접촉면 시험결과를 나타낸 것이다. 접촉면 시험은 크로싱 상면에 유색 페인트를 도포한 후 열차 주행시 크로싱과 열차 차륜과의 접촉면을 살펴보고자 수행한 시험으로써 동적응답측정과 동시에 대상 크로싱별로 각각 10회씩 실시하여 경향을 파악하였다.

접촉면 시험결과, 크로싱 A의 경우 노즈부에서 뚜렷한 차륜과의 접촉현상을 관찰할 수 있었으며 결선부 통과 이후에도 다소 많은 접촉면이 발생하는 것으로 나타났다.

반면 크로싱 B의 경우에는 노즈부 및 결선부 통과이후에도 별다른 접촉면 발생개소가 조사되지 않았다.

이러한 접촉면 시험결과가 응력이력파형을 이용한 피로손상도 평가 결과와 동일한 경향을 나타냄으로써 향후 개선된 크로싱 설계 및 유지관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

분기기 망간 크로싱의 활하중 변동응력을 이용한 피로손상도 및 피로수명을 평가하고자 현장측정 및 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 크로싱 단면위치별 피로손상도 분석결과, 크로싱 A, B 모두 ‘진입부-결선부-통과부’에서의 발생 응력의 경향(주행경로에 따른 증폭현상)은 동일하였으나 크로싱 B의 동적 응력 변동폭이 작게 나타남을 알 수 있었다.
- (2) 크로싱의 중량화 및 노즈부의 접촉각 변화 등 단면개량은 크로싱의 피로손상도 저감(38%)에 효과가 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 크로싱의 단면위치별 피로손상도는 결선부 통과시 발생하는 동적 피로하중에 따른 응력증폭현상이 가장 큰 것으로 나타나 해당부위의 접촉 피로 마모 및 균열 등과 같은 손상이 유발될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건교부와 한국철도기술연구원의 지원에 의해 수행되었으며, 관련자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, “분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구”, 한국철도기술연구원, 2003. 7.
2. 정우진, 양신추, 강운석, “새로운 레일규격 제정을 위한 기초검토”, 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp.467-474, 2001.
3. 김기환, 박춘수, 정경렬, “Wheel/Rail 접촉점의 Parameter에 관한 연구”, 춘계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp.155-160, 1999.
4. Coenraad Esveld, “Modern Railway Track”, MRT-Productions, 2001.
5. 한국철도기술연구원, “노스가동분기기 조정”, 한국철도기술연구원, 2001.
6. 서사범, “선로공학”, 삼과꿈, 1999.
7. 이종득, “철도공학”, 노해출판사, 1993.