

현장측정을 통한 노후 레일의 피로수명 평가에 관한 연구
A Study on Estimation of Fatigue Life of Aged Continuous Welded Rail
using the Field Test

공선용*
Kong, Sun-Yong

성덕룡**
Sung, Deok-Yong

김준형***
Kim, Jun-Hyung

박용걸****
Park, Yong-Gul

ABSTRACT

It is essential to reduce track maintenance costs and to extend the periodic replacements of continuous welded rails based on accumulated passing tonnage. As recently train load decrease and rail joints wear down less, the periodic replacements of continuous welded rails can be extended. There are many kinds of rail damage like squat, head-check and corrugation. These can be taken nondestructive or naked eye test. So the periodic replacements of continuous welded rails based on accumulated passing tonnage were examine with focusing on a crack of rail bottom of continuous welded rail.

Therefore, this study measure dynamic response of track by metro train load, it compute impact coefficient and track spring coefficient for estimating a condition of actual track system. Also, it is converted the measured stress waveform into stress frequency histogram by the rain-flow counting methods, and then the equivalence of stress is calculated. As apply s-n curve of a new welded rail, accumulated fatigue damage ratio of laid rail and remaining service lives is estimated. This study suggest a plan of the periodic replacements of continuous welded rails based on accumulated passing tonnage classified by the types of track system.

key words : laid rail(노후레일), fatigue life(피로수명), periodic replacement(교체주기), field test(현장측정)

1. 서 론

철도교통의 발전과 더불어 승차감을 향상시키고 궤도유지관리비용을 감소시키기 위해서는 시공 및 유지관리 기술의 발달과 함께 유지관리 기준의 정립이 요구된다. 특히, 열차를 직접 지지하고 열차의 운행을 유도하는 매개체인 레일은 온도변화에 따른 신축 및 반복적인 변동하중에 의한 피로와 레일과 차륜의 상호작용에 의한 Corrugation, Shelling, Head Check, Burning 등 각종 결함들이 발생한다. 이러한 레일손상부위를 열차가 운행할 경우 큰 충격량이 발생하여 궤도의 손상을 초래하고 이는 유지관리비용의 증가를 가져온다. 또한, 갑작스런 레일절손은 열차의 탈선으로 이어져 대형사고를 초래할 수 있으며 절손사실을 사전에 감지하고 보수를 시도하더라도 복구시간 확보를 위한 열차운행 중단 등으로 막대한 손실을 가져올 수 있다.

이와 같이 열차의 원활한 운영을 위해 중요한 역할을 하는 레일을 유지관리하기 위해 국내·외 철도 운영기관들에서는 누적통과톤수 및 마모량에 따른 레일교체기준을 정하여 사용하고 있다. 그러나 레일관리를 위한 기준은 건설당시 국내의 궤도유지관리 기준의 부재로 국외(일본)의 기준을 그대로 적용하게 되었고 현재까지 사용하고 있다. 이 중 국내에서 적용하고 있는 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은

* 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 서울메트로 철도토목팀 팀장

** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정

*** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

**** 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

과거 일본에서 화물혼용선의 50kg N 레일이음매부에 대한 피로수명으로 산정되었으며, 장대레일화에 따른 이음매부의 제거, 궤도생력화, 경량의 열차운행, 철강생산기술 및 레일용접기술의 발달과 레일연마에 의한 레일 수명연장 효과 등 현재의 궤도 및 유지관리조건들에 대해서는 반영되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 궤도형식별로 지하철 열차하중에 의한 레일의 동적발생응답을 측정하여 현 궤도의 상태평가를 위한 충격계수 및 궤도스프링계수를 산정하였다. 또한, 측정된 응력파형을 Rain-Flow Count 기법을 이용하여 응력히스토그램을 작성하고 등가응력을 산정하여 기존 연구결과 도출된 신규 레일용접부의 S-N선도에 적용함으로써 노후 레일의 피로손상도와 피로수명을 산출하였으며, 궤도형식별 노후 레일의 적정 교체방안을 제안하고자하였다.

2. 피로손상도 및 피로수명 평가 이론⁽⁸⁾

2.1 Miner의 선형피해가설

Miner가 제창한 선형피로손상 법칙에 따르면 피로손상은 선형으로 누적된다는 가정하에서 어떤 하중 반복횟수 n_i 에 의해 야기된 손상은 같은 응력 범위에서 구조부재를 파괴시키는데 필요한 전체 하중반복횟수 N_i 에 대한 n_i 의 비로 표현할 수 있다.

즉, [그림 1]에서와 같이 응력수준 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 피로수명을 N_1, N_2, N_3 라 하고, σ_1 인 응력수준이 n_1 , σ_2 인 응력수준이 n_2 및 σ_3 인 응력수준이 n_3 회 반복되어 피로파괴가 일어났다면 이 경우의 조건은 식 (1)과 같다.

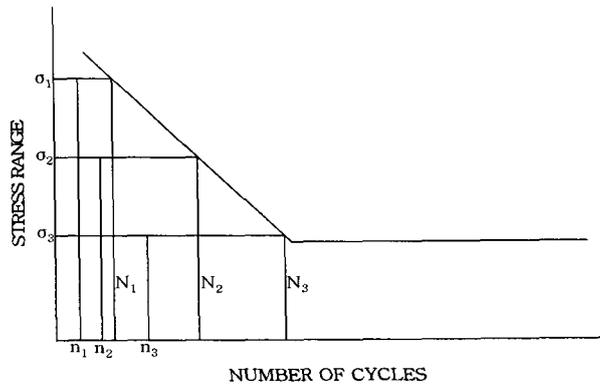


그림 1. Miner의 선형피로손상 법칙

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1.0 \quad (1)$$

식 (1)을 일반화하면 식 (2)와 같이 된다.

$$\sum_k \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (2)$$

2.2 등가응력범위

등가응력범위의 개념은 변동응력과 같은 피로수명을 주는 일정응력 범위로서 Barsom과 Yamada에 의해 이론적으로 정립되었다.

[그림 2]와 같이 피로시험 데이터에 의한 S-N 곡선을 직선으로 가정하고, Miner - Palmgren 법칙을 이용하면 [그림 3]에서와 같은 응력범위분포를 [그림 4]와 같은 등가응력분포로 변환할 수 있다.

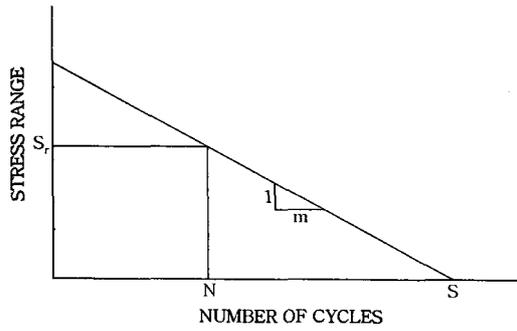


그림 2. S-N 곡선

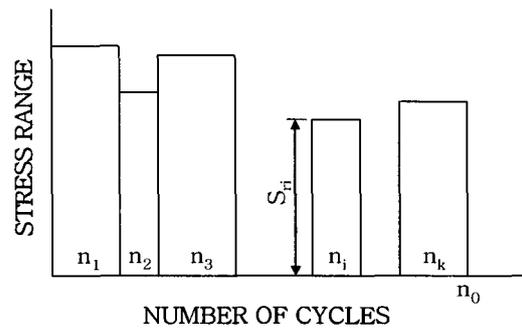


그림 3. 변동응력범위 분포

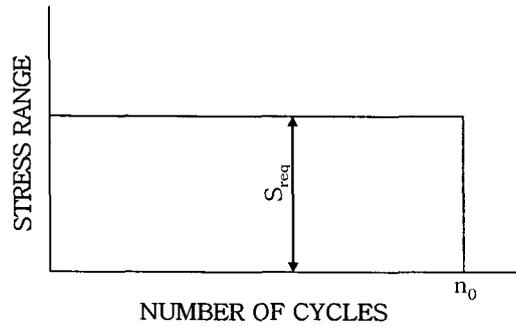


그림 4. 등가응력범위 분포

실동하중을 받고 있는 강구조 부재의 피로특성인 응력범위 S_{ri} 와 피로수명 N_i 의 관계는 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$\ln N_i = \ln C - m \ln S_{ri} \quad (3)$$

$$N_i (S_{ri})^m = C \quad (4)$$

한편, 응력범위분포에 대한 손상비(Damage Ratio) D_f 는 식 (5)와 같다.

$$D_f = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i S_{ri}^m}{C} \quad (5)$$

식 (5)에 [그림 4]와 같은 등가응력범위 S_{req} 를 적용하면

$$D_f = \sum_{i=1}^k \frac{n_i S_{req}^m}{C} = \frac{S_{req}^m}{C} \sum_{i=1}^k n_i = \frac{S_{req}^m}{C} N \quad (6)$$

결과적으로 식 (5)와 식 (6)은 같은 손상정도를 나타내므로 이로부터 등가응력범위 S_{req} 는 식 (8)과 같다.

$$\frac{\sum n_i S_{ri}^m}{C} = \frac{S_{req}^m}{C} N \quad (7)$$

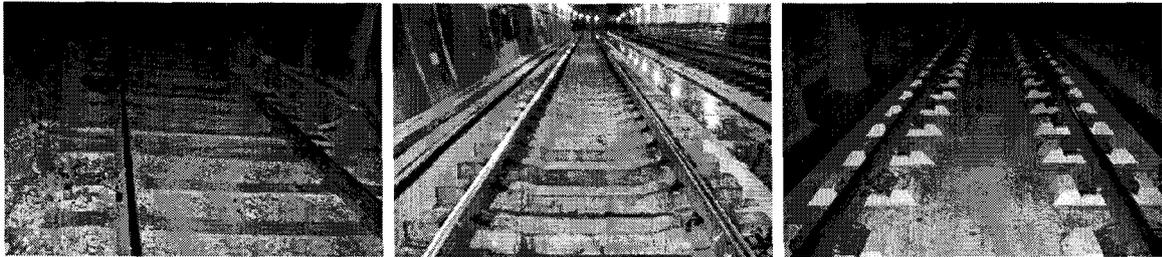
$$S_{req} = \left(\frac{\sum n_i S_{ri}^m}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

여기서, $m = 2$ 일때 RMS(Root Mean Square)값이고 $m = 3$ 일때 RMC(Root Mean Cube)값이다. 기존 연구결과 복잡한 실동응력파를 받는 강구조부재의 피로거동 해석을 위한 등가응력범위 산정에는 RMC모델이 적합한 것으로 나타남에 따라 본 연구에서는 $m = 3$ 을 적용하였다.⁽¹⁾

3. 현장측정

3.1 현장측정방법

측정대상구간은 서울지하철의 본선 중 78.5%를 차지하고 온도변화에 대한 영향이 적으며 열차하중에 대한 통과톤수를 직접적으로 받을 수 있는 지하 직선구간을 선정하였다. 또한, [그림 5]와 같이 서울지하철의 대표적인 궤도시스템인 자갈도상, 방진상궤도(PPT), B2S(Ballasted track to Slab track)시스템으로 선정하였으며, 누적통과톤수에 의한 레일교체시기에 도래한 구간을 선정하였다. [표 1]은 현장측정 개소 현황을 정리한 표이며, 모든 측정대상구간에서 용접부와 용접부로부터 10m 이격된 모재부에 대해 현장측정을 실시하였다.



(a) 자갈도상

(b) 콘크리트도상(PPT)

(c) 콘크리트도상(B2S)

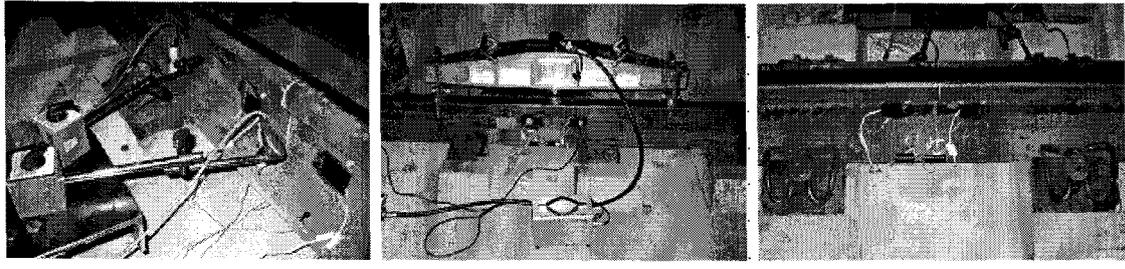
그림 5. 측정대상개소

표 1. 현장측정개소 현황

구분	자갈도상						
	A	B	C	D	E	F	G
부설일자	98.03.03		96.08.05	97.03.01		00.11.16	
레일중량	50kg/m					60kg/m	
침목종류	PC침목					PC침목	
용접방법	가스압접	모재	가스압접	모재	테르미트	가스압접	모재
누적통과톤수 (억톤)	5		7.5		6.6	3.5	
레일연마	4회		8회		8회	7회	
적마모(mm)	2.5		1.7		1.4	1.8	

구분	콘크리트도상(PTT)		콘크리트도상(B2S)		
	H	I	J	K	L
부설일자	01.10.10		06.11.22		
레일중량	60kg/m		60kg/m		
침목종류	-		-		
용접방법	가스압접	모재	가스압접	모재	테르미트
누적통과톤수 (억톤)	3.1		0.3		0.3
레일연마	9회		0회		0회
적마모(mm)	1.7		1.5		1.4

레일중량 및 궤도형식에 따른 노후레일의 발생응력수준을 평가하고자 7개 구간(총 12개소)에서 열차 통과에 따른 궤도의 동적응답을 측정하였으며 측정항목은 [그림 6]과 같다. 변위는 자갈도상의 경우 레일 및 침목의 변위를 측정하였으며, 콘크리트도상의 경우에는 레일변위와 베이스플레이트 상부에 변위계를 설치하여 패드의 변위를 측정하였다. 윤중은 용접부의 위치에 상관없이 침목과 침목사이 중앙부로부터 100mm 이격하여 전단변형률게이지를 부착하였으며, 윤중검정기를 통하여 검정(calibration) 후 동적윤중을 측정하였다. 또한, 궤도형식 및 상태별 레일의 피로수명을 산정하기 위해 스트레인게이지를 윤중과 마찬가지로 중앙부와 중앙부에서 50mm 이격하여 개소별 총 2개씩 설치하였다.



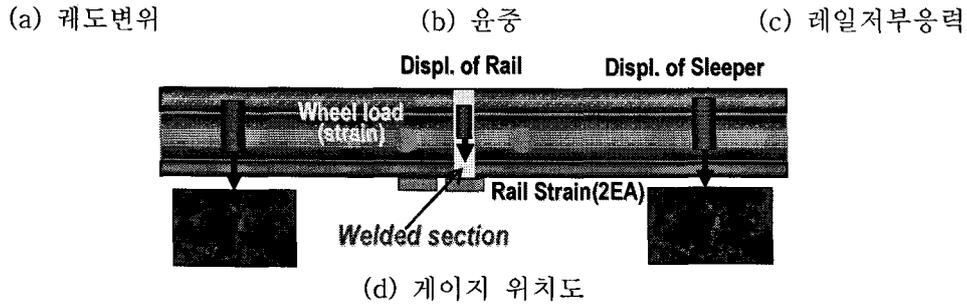


그림 6. 현장측정 항목

레일중량 및 도상형식별 노후 레일에 대한 변위, 운중 및 저부응력은 변위계와 스트레인게이지를 이용하여 측정하고 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다.

측정항목별 센서 배치는 그 목적에 따라 상이하며, 측정위치를 표준화하여 레일용접부 및 모재부에 대해 동일한 위치에서 측정하였다. 또한, 단일시간대중 승객수 및 운행빈도가 가장 많아 궤도부담력이 가장 클 것으로 판단되는 출근시간대(오전 06:00~08:30)를 선정하여 현장측정을 실시하였다.

3.2 열차제원

현장측정개소에서 운행되는 차량은 4, 6, 10량 편성으로 구성되어 있으며, 본 현장측정에서는 10량 편성의 차량에 대해서만 측정하였다. [그림 7]은 운행차량구성을 보여주며, 현재 운행되고 있는 열차의 길이 및 대차중심간 거리, 고정축간 거리와 같은 차량의 제원은 [표 2]와 같다.

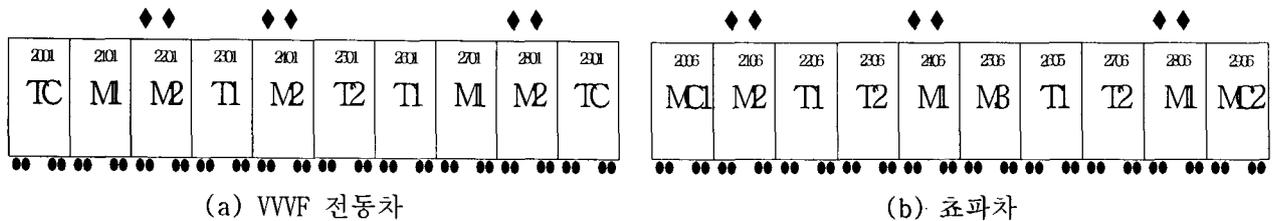


그림 7. 현장측정대상구간의 운행차량구성

표 2. 차량제원

구 분	A		B
제어방식	초과제어	VVVF제어	초과제어
전동차편성	4, 6, 10량	4, 10량	10량
승객정원	160명 제어차:48명 기 타:54명	160명 제어차:48명 기 타:54명	160명 제어차:48명 기 타:54명
자중(톤)	MC1 : 41.5 MC2 : 41.5 M1 : 41.5 M2 : 41.5 T1, T2 : 32.0 M3 : 41.5	TC : 34.42 M1 : 34.78 M2 : 36.43 T1 : 29.15 T2 : 33.02	TC : 33.0 M1 : 42.2 M2 : 41.8 T : 31.7
최대운전속도	100km/h	100km/h	100km/h
차체길이	19,500mm	19,500mm	19,500mm
고정축간거리	2,100mm	2,100mm	2,100mm

3.3 궤도형식별 충격계수 산정

윤중의 측정은 승객 탑승으로 인한 자중증가를 고려하기 위하여 열차 운행시간에 실시되었으므로 정확한 승객의 중량에 따른 각 열차의 정적하중을 산정하기에는 현실적으로 어렵다.

따라서, 열차제원을 통해 파악 가능한 열차의 자중과 승객이 승차한 상태에서의 승객하중을 고려하였으며, 승객하중은 서울메트로에서 통과톤수 산정시 적용하는 기준인 1인당 55kgf으로 정적하중을 산정하였다.

주행하는 열차에 의해 궤도에 작용하는 윤중은 열차 자중에 의한 정적하중 이외에 열차속도의 증감에 따라 발생하는 동적하중에 의한 충격력의 영향까지 포함되어 발생된다. 따라서 윤중의 측정값은 열차주행에 따른 동적하중이며, 열차의 정적하중과 비교함으로써 열차속도에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 동적하중에 의한 충격계수는 국내의 경우 미국 AREA의 충격계수 산정방법을 적용하고 있다. [표 3]은 윤중변동률 표준편차에 2σ를 취하여 충격계수의 값을 나타낸 것이며, 지하철의 최대운행속도 80km/h를 기준으로 제시하였다.

표 3. 궤도형식별 충격계수 산정결과

구 분	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	비 고
충격계수 (i)	1.94	2.02	1.70	1.64	1.60	1.71	1.73	1.36	1.29	1.42	1.40	1.54	
궤도상태	Bad	Bad	Well	Well	Well	Well	Well	Good	Good	Good	Good	Well	Spec(i)=1.41 (V=80km/h)

충격계수 평가결과 자갈도상의 경우(A, B, C, D, E, F, G)에는 자갈도상의 노후화 및 궤도조건의 차이에 따라 상이한 결과가 나타났지만, 콘크리트도상의 경우에는 설계충격계수와 비슷한 수준을 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 레일중량 및 용접방법별 충격계수의 뚜렷한 차이는 없는 것으로 분석되었다.

3.4 궤도형식별 궤도탄성계수 산정

현장측정대상 궤도의 상태평가를 위하여 측정데이터와 궤도구조해석을 통하여 측정대상궤도의 궤도탄성계수를 추정하였다. 궤도구조의 성능을 평가하기 위해 [그림 8]과 같이 선형 스프링 모델로서 궤도구조를 구성하였고, 레일은 측정개소별로 50kg/m과 60kg/m 레일을 사용하였으며 침목은 강체로 거동한다고 가정하고 검토를 수행하였다.

궤도의 선형스프링 모델에서 탄성지지력을 계산하기 위한 궤도탄성계수는 식 (9)와 같이 계산하였다.⁽²⁾

$$D_v = \frac{1}{\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_b} + \frac{1}{D_s}} \quad (9)$$

여기서, D_p : 레일패드 탄성계수, D_b : 도상 탄성계수, D_s : 노반 탄성계수

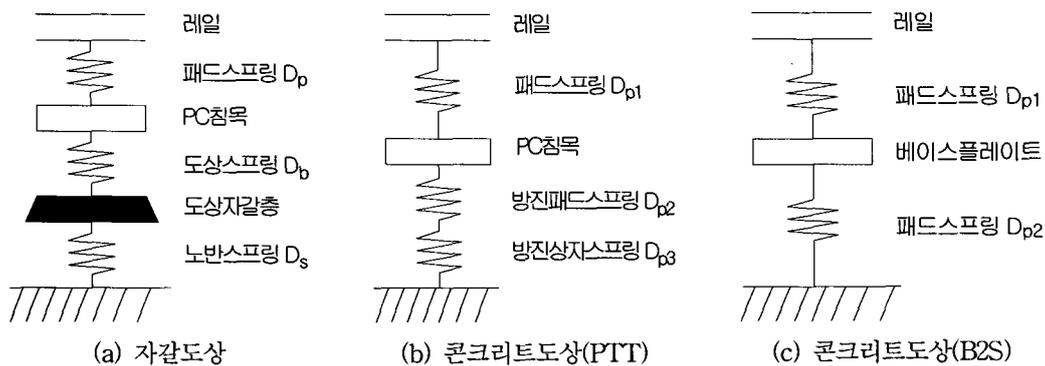


그림 8. 궤도구조별 궤도탄성계수의 구성

1997년 3월 일본에서 출간된 “철도구조물 등 설계기준·동해설, 궤도구조[유도상궤도](안)”에 따르면 궤도구조해석 시 자갈도상의 탄성계수를 도상 두께에 관계없이 일률적으로 200kN/mm으로 정하고 있으며 이를 건전한 자갈도상의 탄성계수값으로 추정하였다. 또한, 콘크리트도상의 경우에는 궤도시스템에 따라 적용되는 패드가 상이하므로 설계시 적용하는 탄성재료의 스프링정수값과 해석치를 비교하여 궤도의 상태를 추정하였다. [그림 9]는 측정한 윤중과 레일변위를 통해 궤도구조해석을 실시하여 얻은 값과 궤도설계시 고려되는 궤도탄성계수 값의 결과(예)이며, [표 4]는 궤도탄성계수평가 결과표이다.

자갈도상(A, B, C, D, E, F, G)의 경우 궤도 상태에 따라 궤도탄성계수의 차이가 크게 나타났으며 설계 시 고려되는 궤도탄성계수와는 큰 차이를 나타냈다. 그러나 콘크리트궤도(H, I, J, K, L)의 경우에는 설계 궤도탄성계수와 측정 궤도탄성계수의 차이가 비교적 적게 나타났으며, 궤도형식과 무관하게 용접 방법별 궤도탄성계수차이는 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었다.

탄성패드의 스프링정수값을 작게 하면 하중분산이 크고 윤중변동량을 작게 하여 충격하중을 저감시킬 수 있으므로 지지체를 보호할 수 있다. 또한, 진동감쇠를 크게 하여 도상의 열화를 막고 구조물의 소음/진동을 억제하는 효과가 있다.⁽²⁾ 따라서 자갈상태 변화(노후화 진전)에 민감하게 반응하는 자갈도상의 경우보다 궤도탄성을 탄성패드의 사용으로 적절히 조정가능한 콘크리트도상이 궤도의 동적거동측면에서 유리할 것으로 판단된다.

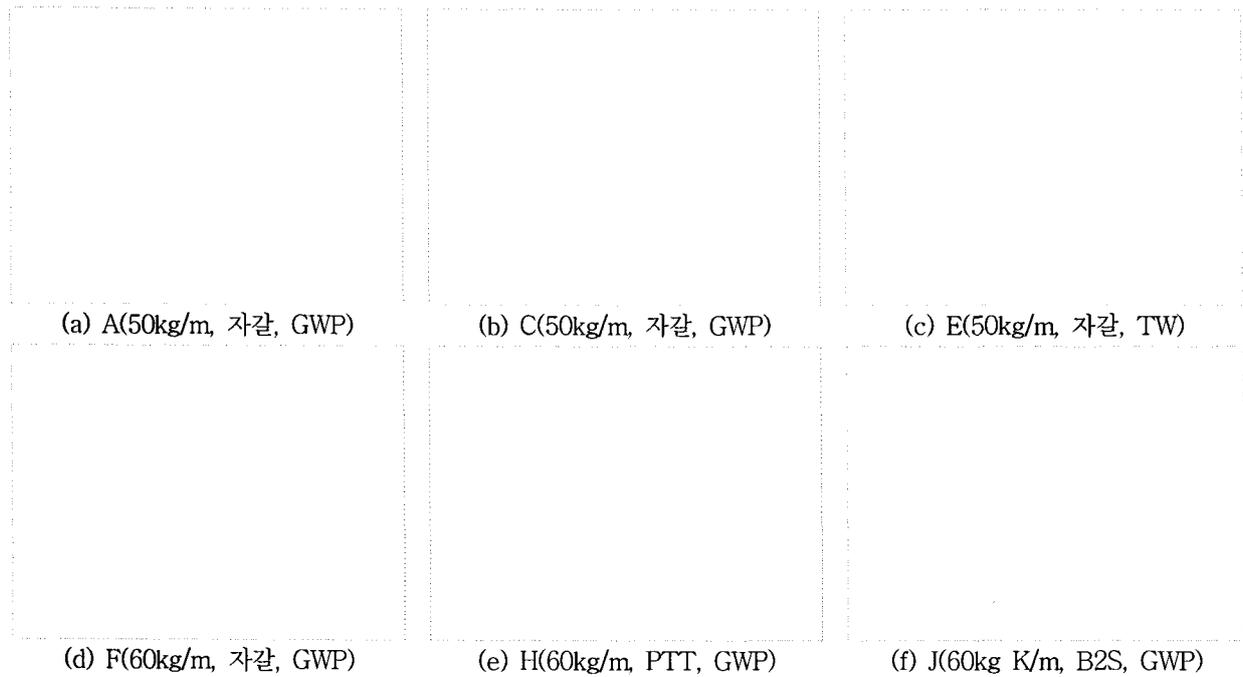


그림 9. 측정개소별 궤도탄성계수(예)

표 4. 궤도탄성계수평가 결과표

구 분	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	비 고
동적궤도 탄성계수 (kN/mm)	372 ~432	358 ~444	172 ~297	183 ~305	156 ~285	275 ~314	214 ~286	41 ~58	38 ~45	31 ~82	28 ~68	35 ~60	측정치
	397.6	402.1	222.5	230.4	210.1	282.8	235.6	50.0	43.4	48.0	40.4	47.2	평균치
	Spec : 200 / Cal : 133.3							21.2		25.1			계산치
궤도상태	Bad	Bad	Well	Well	Well	Well	Well	Well	Well	Well	Well	Well	

3.5 궤도형식별 레일저부응력 측정결과

[그림 10]은 측정개소별 레일저부응력의 발생 범위이다. 레일저부에 스트레인게이지를 부착하여 열차 주행 시 레일의 휨변형에 의해 측정된 변형율에 레일강의 탄성계수($E=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)를 곱하여 응력(MPa)으로 환산하였다. [그림 10]은 측정대상구간의 발생 최대응력값들의 범위를 나타내고 그 값들의 평균을 선으로 연결하여 같은 구간의 용접방법별 저부응력값의 차이를 비교하였다.

측정결과 실열차하중에 의한 최대발생응력의 범위는 도상상태가 불량한 개소의 경우에 가장 크게 발생하였으며, 자갈도상이 콘크리트도상에 비해 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 도상상태가 불량한 개소의 경우 도상침하에 비해 레일변위가 크게 발생하여 레일이 받는 부담력이 국부적으로 커졌기 때문이며, 콘크리트도상의 경우에는 시공후 4개월~6년정도 경과하였고 궤도의 탄성거동 확보 및 성능 유지측면에서 유리하기 때문에 발생응력이 다소 적게 나타난 것으로 판단된다. 자갈도상과 달리 콘크리트도상에서는 동적열차하중을 지지하기 위한 매개체가 탄성패드뿐이기 때문에 패드 스프링정수값의 범위 및 상태에 따라 레일저부응력에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다.

또한, 모재부와 용접부에서의 발생응력차이는 크게 없는 것으로 분석되었으며, 측정대상구간 중 요철량이 가장 큰 A, B구간에서 저부응력이 가장 크게 발생하였다. 그 이유는 측정대상구간의 대부분이 레일연마에 의해 레일표면의 요철이 제거된 상태이고 모재부와 용접부가 근접하여 레일연마가 동시에 수행되어졌기 때문인 것으로 판단된다.

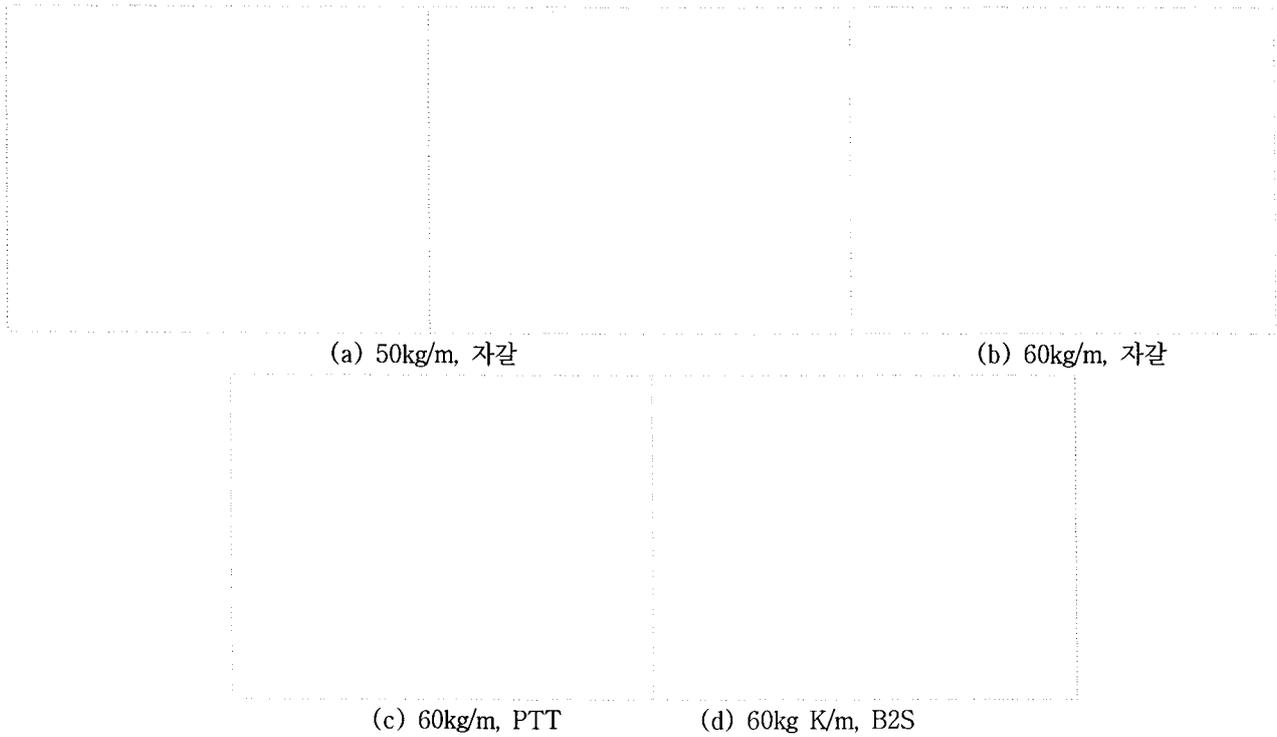


그림 10. 측정개소별 레일저부응력 비교

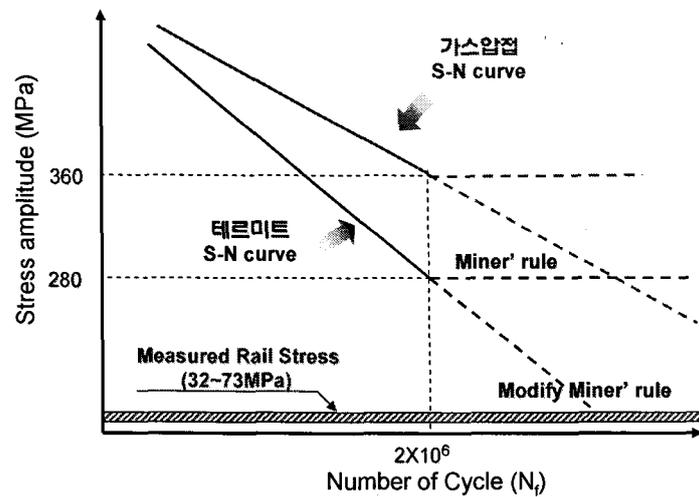


그림 11. 신규 레일용접부 S-N선도⁽⁸⁾와 측정데이터의 비교

[그림 11]에서와 같이 실운영 열차하중에 의한 발생응력의 범위(32~73MPa)가 선로정비규정상에 제시된 레일교체기준인 5억톤, 6억톤을 산정한 응력범위와는 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 신규 레일용접부 피로시험 시 적용하는 임계 피로하중은 실제로 발생하지 않기 때문에 이러한 하중하에서의 파괴유발 반복횟수를 바탕으로 누적통과톤수에 의한 레일교체기준을 산정하는 것은 불합리한 것으로 판단된다.

4. 노후 레일의 피로손상도 평가

4.1 궤도형식별 변동응력 특성

본 연구의 피로손상도 평가 시 사용한 응력의 범위는 레일의 주된 발생응력범위가 인장응력인 점을 감안하여 최대발생 응력의 범위 및 응력빈도해석 시 레일저부 인장응력만을 해석에 적용하였다. 또한,

피로수명에 영향을 미치지 않는 응력을 제거하기 위해 cut-off ratio를 25%로 설정하여 응력빈도해석을 실시하였다.⁽⁹⁾

응력빈도해석 시 발생응력의 빈도수집에 사용한 Bar width는 1MPa 수준으로 하여 가급적 발생응력의 수준 중 대상레일의 피로거동에 취약한 응력범위만을 총 카운트수에 포함시키고자 하였으며, 발생응력에 대한 카운트 방법은 Rainflow Count Method를 사용하였다.

[그림 12]는 도상형식별로 측정된 응력파형과 이를 보정하여 응력빈도해석을 실시한 응력빈도히스토그램을 나타낸다. 작성된 응력빈도히스토그램을 보면 콘크리트도상에서 발생한 응력범위가 가장 작은 것을 알 수 있으며, 이는 콘크리트도상화를 통한 동적궤도안정성 확보를 통해 운중변동을 감소에 의한 것으로 판단된다.

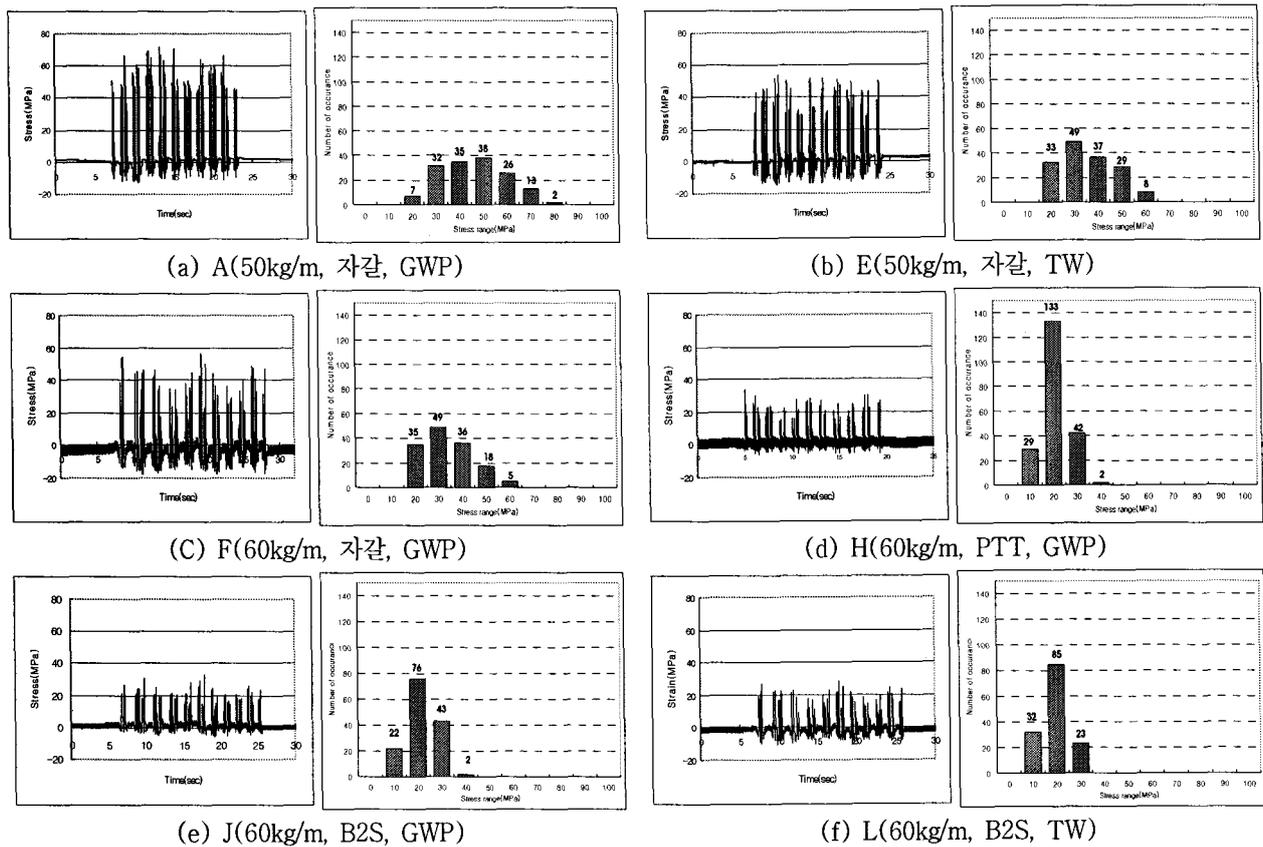


그림 12. 실동응력파형 및 응력빈도히스토그램(예)

4.2 연간 통과톤수 산정

현장측정대상구간의 연간 통과톤수 산정방법은 자갈도상구간과 콘크리트도상구간의 운행열차가 상이하고 하루평균 이용승객량이 달라 혼잡율을 다르게 적용하여 통과톤수를 산정하였다. [표5]는 혼잡율을 고려한 연간통과톤수를 나타낸다.

표 5. 연간 통과톤수

구분	1일 열차통과횟수	편성량수	열차 1량당 톤수			1일통과톤수 (톤)	연간통과톤수 (톤)	혼잡율 (%)
			계	전동차	승객 (승객수)			
A, B, C, D, E, F, G	271	10	55.3	41	14.3 (260)	149,863	54,699,995	232
H, I, J, K, L	216	10	51	41	10.0 (181)	110,415	40,301,475	162

4.3 궤도형식별 노후 레일의 피로손상도 및 피로수명 평가

본 연구에서는 레일용접부에 대한 피로수명을 산정하기 위해 앞에서 언급한 기존 연구결과에서 도출한 신규 레일용접부의 S-N 선도를 적용하였다.⁽⁸⁾

도상형식 및 레일중량에 따른 테르미트 용접부와 가스압접부에 대해 Modify Miner's rule을 이용하여 피로수명을 예측하였으며 그 결과를 [표 6]에 정리하였다.

표 6. 피로수명 예측결과

	용접 방법	궤도 형식	레일 중량	누적 통과톤수 (억톤)	궤도 상태	누적 피로손상도 (Df)	피로수명 (Yr)	잔존수명 (Yr)	교체기준
A	GWP	자갈	50kg/m	5	Bad	0.011215	89	84	5억톤 (약10년 소요)
B	B.M			5	Bad	0.010782	92	87	
C	GWP			7.5	Well	0.010075	99	84	
D	B.M			7.5	Well	0.009328	107	96	
E	TW			5.6	Well	0.010485	95	82	
F	GWP	PTT	60kg/m	3.5	Well	0.004359	229	222	6억톤 (약12년 소요)
G	B.M			3.5	Well	0.003105	322	315	
H	GWP			3.1	Well	0.001418	705	697	
I	B.M			3.1	Well	0.001024	976	964	
J	GWP			1.5	Well	0.001155	865	864	
K	B.M	B2S	60kg/m	1.5	Well	0.000826	1210	1209	
L	TW			1.5	Well	0.001706	586	585	

레일중량별 누적피로손상도는 50kg/m 레일에 비해 60kg/m 레일이 약 50%이상 작았으며, 궤도형식별 피로손상도는 콘크리트도상의 경우가 자갈도상에 비해 약 45%이상 작게 나타났다. 용접방법별 피로손상도를 비교해보면 모재부가 용접부보다 피로손상도가 작았으며, 자갈도상에서는 가스압접이 테르미트 용접에 비해 약 4% 작고 콘크리트도상에서는 약 32% 작은 것으로 분석되었다. 따라서 50kg레일, 테르미트 용접, 자갈도상보다 60kg레일, 가스압접, 콘크리트도상이 실열차하중에 의한 피로손상에 다소 안정적인 것으로 분석되었다.

또한, 노후레일의 잔존피로수명의 경우 누적통과톤수에 의한 레일교체기준(10~12년)을 모두 상회하는 것으로 분석되어 운행선 열차하중이 레일용접부의 피로손상에 미치는 영향은 매우 미약하며, 운행선에서는 발생하지 않는 임계 피로하중 상태에서 산출된 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은 비합리적인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 도시철도 노후 레일의 피로수명 평가를 실시하고자 궤도형식별 레일의 동적응답을 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 측정된 궤도의 동적응답을 통해 자갈도상 및 콘크리트도상의 충격계수와 궤도탄성계수를 산정하였으며, 자갈도상의 경우에는 자갈도상의 노후화 및 궤도조건의 차이에 따라 상이한 결과가 나타났지만, 콘크리트도상의 경우에는 설계치와 비슷한 수준을 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 레일중량 및 용접방법별 충격계수 및 궤도탄성계수의 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었다.

(2) 운행선 레일의 피로거동은 누적통과톤수 산정을 위한 실내 피로시험조건과 같이 극한의 피로하중이 발생하는 상태가 아니며, 궤도조건 및 유지관리수준에 따라 분명한 레일피로거동의 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 레일교체주기 산정을 신규 레일용접부 피로시험시 적용하는 임계 피로하중하에서의 파괴유발 반복횟수를 바탕으로 하는 것은 불합리한 것으로 판단된다.

(3) 레일중량이 클수록, 용접부보다 모재부가 누적피로손상도는 작았으며, 용접방법에 따른 노후 레일의 피로수명 차이는 미소한 것으로 분석되었다. 또한, 자갈도상에 비해 콘크리트도상의 경우가 누적피로손상도가 작게 분석되었으며, 노후 레일의 잔존피로수명이 누적통과톤수에 의한 레일교체기준(10~12년)을 모두 상회하는 것으로 분석되어 도시철도 열차하중이 레일의 피로손상에 미치는 영향은 미약한 것으로 분석되었다.

(4) 따라서 도시철도에서 적용하고 있는 선로점검지침 상의 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은 궤도조건 및 유지관리수준을 고려하여 연장이 가능할 것으로 판단되며, 그 값의 적용도 기준수치가 아닌 궤도정비를 위한 참고수치(목표치)로 재정립하여야 할 것으로 판단된다. 그러나 선로정비규정의 개정을 위한 누적통과톤수에 따른 정확한 레일교체기준은 추후 다양한 선로조건과 운행조건을 고려한 노후 레일의 피로 및 마모시험을 통해서 제시되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 서울메트로의 학술연구지원에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박용걸, "실동하중을 받는 강구조부재의 피로해석을 위한 RMC모델에 관한 연구", 1988.8
2. 박용걸 외 1인, "현장측정을 통한 자갈도상궤도의 동적 거동 분석", 한국철도학회 논문집, 제 9권 제 6호, 2006.8. pp401~411
3. 양신추 외 2인, "레일용접부의 피로수명 예측", 대한토목학회 논문집, 제20권 제1-D호, 2000.1. pp97~105
4. "레일수명 연장에 관해", 일본철도시설협회지, 2002. 3
5. 이종득, "철도공학", 노해출판사
6. 서사범, "선로공학", 얼과 알
7. 이용복, 김호경, 정진성, "피로해석의 기초", 청문각
8. 양신추, "레일용접부의 특성에 관한 연구", 철도청, 1998
9. 한국철도기술연구원, "강철도교 잔존수명평가 및 유지관리기법 개발"연구보고서, 2004. 7
10. 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소, "부산지하철 1호선 궤도구조개량 타당성조사 연구보고서", 2005.6.
11. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track," MRT-Productions, 2001
12. Tadashi DESHIMARU, Hiroo KATAOKA, "Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail", QR of RTRI, Vol. 47, No. 4, Nov. 2006
13. Hideki SHITARA, Yoshihira TERASHITA, Mitumasa TATSUMI, Yasuto FUKADA, "Nondestructive Testing and Evaluation Methods for Rail Welds in Japan", QR of RTRI, Vol. 44, No. 2, May. 2003, pp 53~58
14. 일본 JR, "궤도정비규칙"
15. 서울메트로, 부산지하철공사, 대구지하철공사, 인천지하철공사, 대전지하철공사, "선로정비규정"
16. 서울메트로, "선로검사내규", "궤도유지관리이력"