

## 현장측정을 통한 노후레일의 휨 피로수명 평가

### Bending Fatigue Life Assessment of Aged CWR using the Field Test

박용길<sup>†</sup> · 성덕룡\* · 박홍기\* · 공선용\*\*

Yong-Gul Park · Deok-Yong Sung · Hong-Kee Park · Sun-Yong Kong

**Abstract** As a result of recent research, it is reported that the periodic replacements criterion of rails is able to extend as grinding rail surface and using the continuous welded rail (CWR). This study evaluated correlation between conditions of track and load capacity of rail by analysing the dynamic response of track while the metro train is running. Also, it was converted the measured stress waveform into stress frequency histogram by the rain-flow counting methods, and then accumulated fatigue damage ratio and remaining service life of laid rail were calculated so as to apply the equivalence of stress to S-N curve of a new welded rail. Finally, this study suggests a revision of the periodic replacements criterion of CWR, which was based on accumulated passing tonnage, classified by the types and conditions of track system.

**Keywords** : Laid rail, Bending fatigue life, Periodic replacement, Accumulated passing tonnage, Field test

**요 지** 최근 연구결과 레일연마 및 장대레일화로 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 연장이 가능한 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 현재 도시철도에서 사용 중인 대표 궤도구조에 대해 실운영 열차하중에 의한 궤도의 동적응답을 분석하여 현 궤도의 상태평가를 하였으며 궤도의 상태 변화에 따른 레일의 부담력을 검토하였다. 또한, 측정된 응력파형을 Rainflow Count Method를 이용하여 응력히스토그램을 작성하고 등가응력을 산정하여 신규 레일 용접부의 S-N선도에 적용함으로써 노후레일의 누적피로손상도 및 휨 피로수명을 산정하였다. 최종적으로 본 연구에서는 궤도구조 및 상태를 고려한 레일교체기준의 개정을 제안하고자 하였다.

**주요어** : 노후레일, 휨 피로수명, 교체주기, 누적통과톤수, 현장측정

## 1. 서론

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 파상마모(Corrugation), 표면박리(Shelling), 두부미세균열(Head Check), 화손

(Burning) 등 각종 결함들이 발생한다. 이러한 레일손상부위를 열차가 운행할 경우 큰 충격량이 발생하여 궤도의 손상을 초래하고 이는 유지관리비용의 증가를 가져온다. 또한, 갑작스런 레일 절손은 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 운행을 위해 중요한 역할을 맡고 있는 레일을 관리하기 위해 국내외 철도운영기관들에서는 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.

이중 국내에서 적용하고 있는 누적통과톤수에 의한 레일 교체기준은 과거 일본의 기준이며 현재 일본에서는 장대레

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

E-mail : ygpark@snut.ac.kr

TEL : (02)978-6575 FAX : (02)971-6575

\* 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 박사과정

\*\* 정희원, 서울메트로 철도토목팀 팀장

일화 및 레일연마에 의한 레일수명연장효과를 고려하여 당초의 누적통과톤수에 의한 레일교체기준을 연장하여 사용하고 있고 기준치가 아닌 정비목표치로서 이를 사용하고 있는 것으로 보고되고 있다[6,18]. 하지만 국내 도시철도에서는 장대레일화, 궤도생력화, 경량의 열차운행, 철강생산기술 및 레일용접기술의 발달과 레일연마 등을 실시하고 있음에도 불구하고 근거가 불확실한 과거의 기준을 그대로 적용하여 사용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 현장측정을 통해 궤도구조별 지하철 열차하중 및 궤도상태를 고려한 노후레일의 피로수명을 평가하고자 한다.

## 2. 피로손상도 및 피로수명 평가 이론

### 2.1 Miner의 선형피해기설

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

즉, Fig. 1에서와 같이 응력수준  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 피로수명을  $N_1, N_2, N_3$ 라 하고,  $\sigma_1$ 인 응력수준이  $n_1$ ,  $\sigma_2$ 인 응력수준이  $n_2$  및  $\sigma_3$ 인 응력수준이  $n_3$ 회 반복되어 피로파괴가 일어났다면 이 경우의 조건은 식 (1)과 같으며, 이를 일반화하면 식 (2)와 같다.

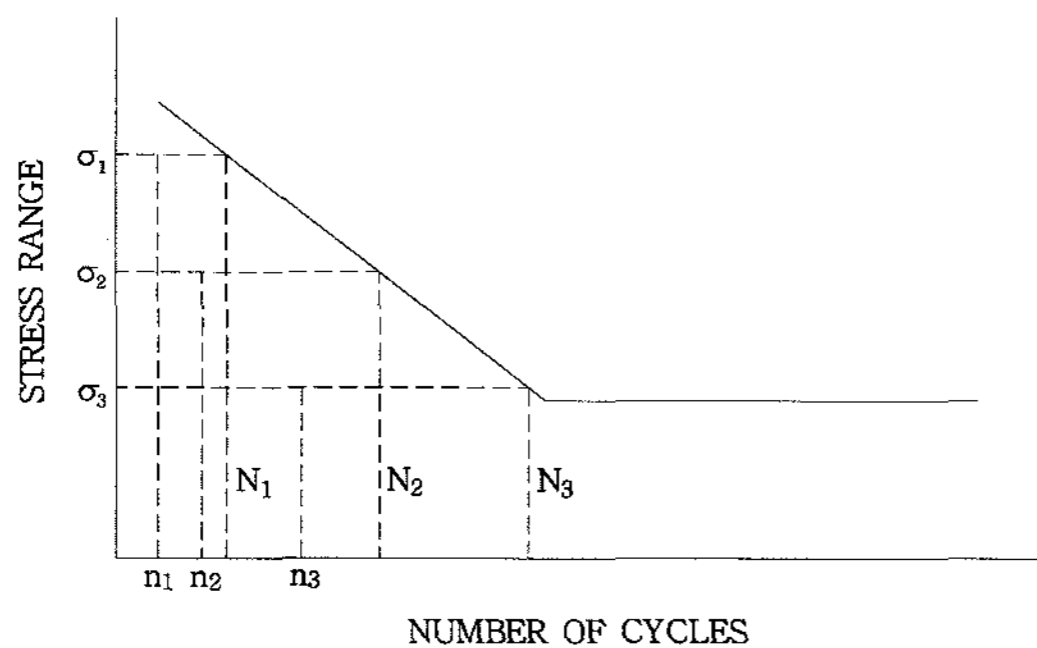


Fig. 1. Miner's rule

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

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

### 2.2 등가응력범위

등가응력범위의 개념은 변동응력과 같은 피로수명을 주는

일정응력 범위로서 Barsom과 Yamada에 의해 이론적으로 정립되었다.

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

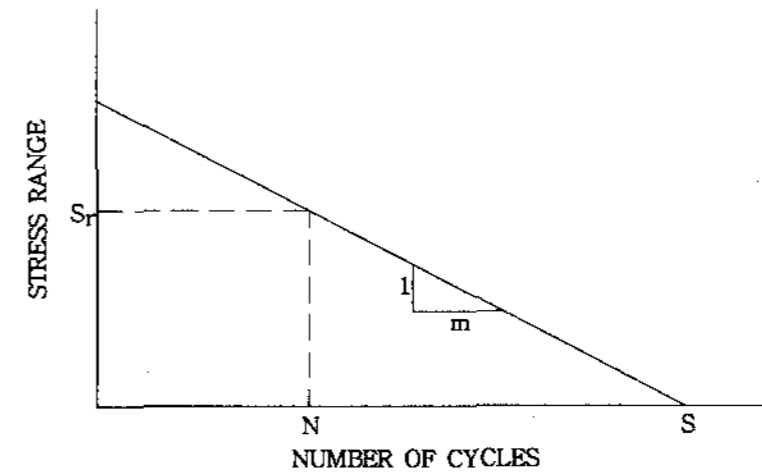


Fig. 2. S-N curve

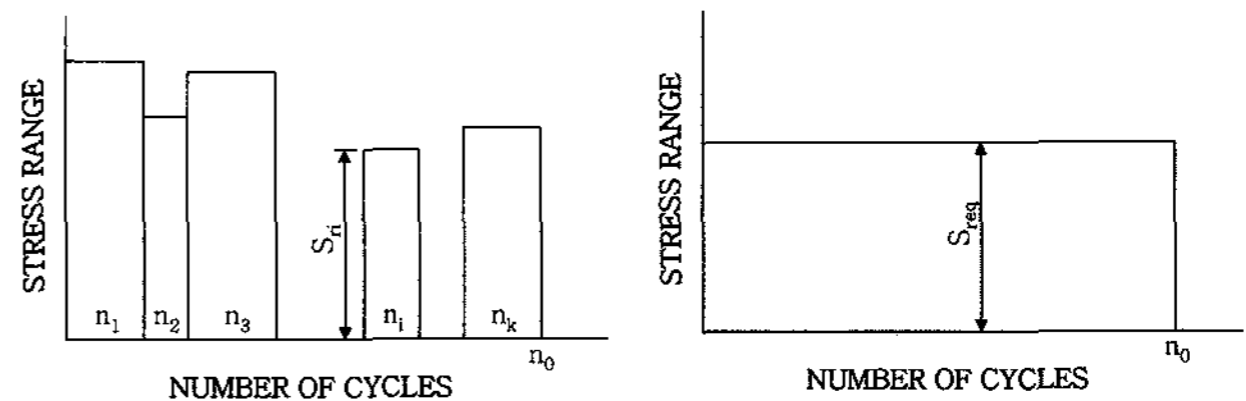


Fig. 3. Stress frequency histogram

Fig. 4. Equivalence of stress

범위  $S_{req}$ 를 적용하면

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

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

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

식 (5)에 Fig. 4와 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.

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

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

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

현장측정 대상구간은 서울메트로(1~4호선)의 본선 중 78.5%를 차지하고 온도변화에 대한 영향이 적으며, 열차하중에 대한 통과톤수를 직접적으로 받을 수 있는 지하 직선 구간을 선정하였다. 또한, Fig. 5와 같이 서울메트로의 대표적인 궤도시스템인 자갈도상, 방진상궤도(PTT), B2S(Ballasted track to Slab track)시스템으로 선정하였으며, 누적통과톤수 교체기준에 의한 레일교체시기에 도래한 구간을 선정하였다.

레일중량 및 궤도구조에 따른 노후레일의 발생응력수준을 평가하고자 6개 구간(총 10개소)에서 열차 통과에 따른 궤도의 동적응답을 측정하였다. 분류 기호의 정의는 Table 1와 같이 첫 번째 기호는 궤도구조를, 두 번째 기호는 용접 및 모재를, 세 번째 기호는 레일중량을 표기하는 것으로 하여 각 구간을 Table 2와 같이 구분하였다. Table 2는 현장 측정개소 현황을 정리한 표이며, 모든 측정대상구간에서 용접부로부터 10m 이격된 모재부에 대해서도 현장측정을 실시하였다.

측정항목은 Fig. 6과 같으며 변위는 자갈궤도의 경우 레일 및 침목의 변위를 측정하였고, 콘크리트궤도의 경우에는 침목사이 중앙부 레일변위와 베이스플레이트 상부의 레일저부에 변위계를 설치하여 동적운중에 대한 패드의 변위를 측정하였다. 윤중은 용접부의 위치에 상관없이 침목과 침목사이 중앙부로부터 100mm 이격하여 전단변형률게이지를 부

착하였으며, 윤중검정기를 통하여 검정(calibration) 후 동적 윤중으로 환산하였다. 또한, 레일저부응력을 통한 궤도구조 및 궤도상태별 노후레일의 피로수명을 산정하기 위해 스트레인게이지를 침목사이 레일중앙부와 레일중앙부에서 50mm 이격하여 측정개소별로 2개씩 설치하여 현장측정 시 발생할 수 있는 오차 및 용접부의 재료적인 차이에 따른 오차를 최소화하고자 하였다.

레일중량 및 궤도구조별 노후레일에 대한 변위, 윤중 및 저부응력은 변위계와 스트레인게이지를 이용하여 측정하고 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다. 또한, 현장측정 시 sampling rate는 50~600Hz로 설정하였으며, 10mm 변위계를 사용하여 측정을 실시하였다.

Table 1. Definition of symbols

궤도구조	용접방법	레일중량
Ballast	Gas pressure weld	50kg/m
PTT	Base material	60kg/m
B2S	Thermit weld	

Table 2. Properties of test site

구분	자갈궤도(Ballast)				
	B-G-5	B-B-5	B-T-5	B-G-6	B-B-6
부설일자	98. 3. 3		97. 3. 1	00.11.16	
레일중량	50kg/m			60kg/m	
침목종류	PC침목				
용접방법	GPW	BM	TW	GPW	BM
누적통과톤수 (억톤)	5		6.6	3.5	
레일연마	4회		8회	7회	
구분	콘크리트궤도(PTT)		콘크리트궤도(B2S)		
	P-G-6	P-B-6	S-G-6	S-B-6	S-T-6
부설일자	01.10.10		06.11.22		
레일중량	60kg/m			60kg/m	
침목종류	-				
용접방법	GPW	BM	GPW	BM	TW
누적통과톤수 (억톤)	3.1		0.3		
레일연마	9회		0회		

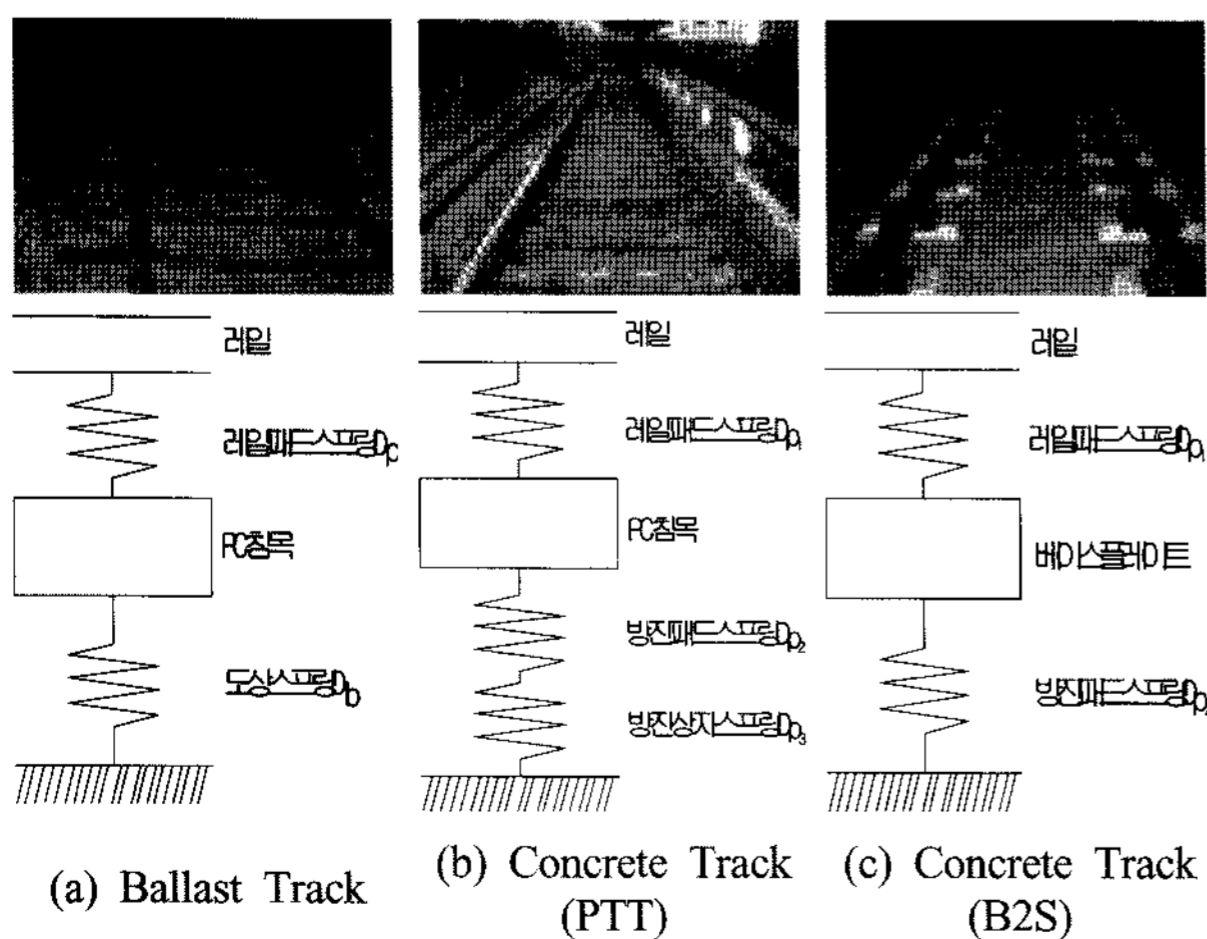


Fig. 5. View of test site

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 판단

되는 출근시간대(06:00~08:30)를 선정하여 현장측정을 실시하였다.

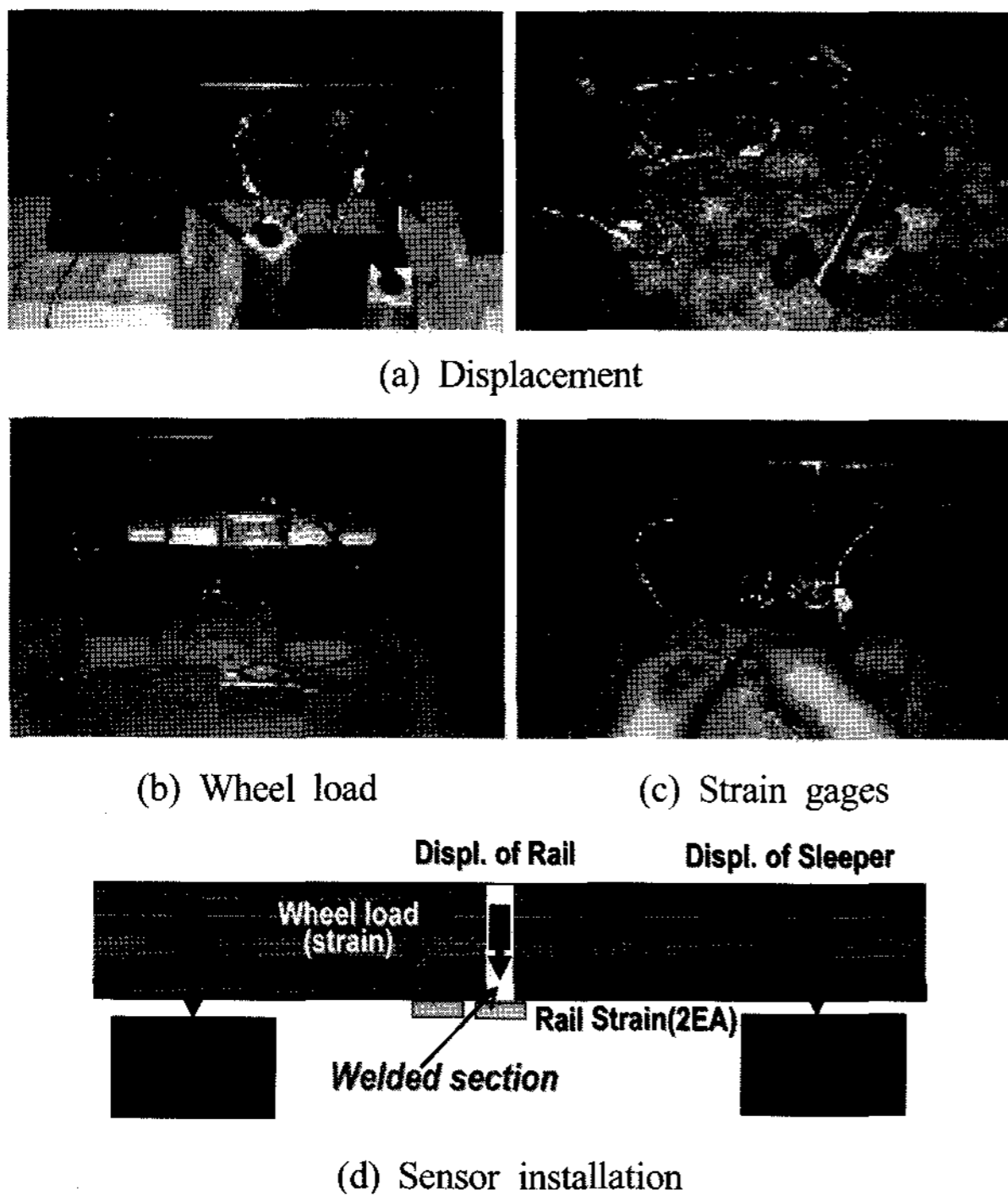


Fig. 6. View of sensor installation

3.2 차량제원

현장측정개소에서 운행되는 차량은 4, 6, 10량 편성으로 구성되어 있으며, 본 현장측정에서는 10량 편성의 차량에 대해서만 측정하였다. 현장측정개소에서 운행중인 차량은 Fig. 7과 같으며, 승객정원 160명, 열차 1량의 길이 19.5m, 고정축간거리 2.1m인 차량이다. 차량의 제원은 Table 3과 같다. 여기서 승객정원 및 자중은 궤도충격계수 산정 시 정적운중값으로 사용하였으며, 피로수명 산정을 위한 연간누적통과톤수를 계산할 때도 이용하였다.

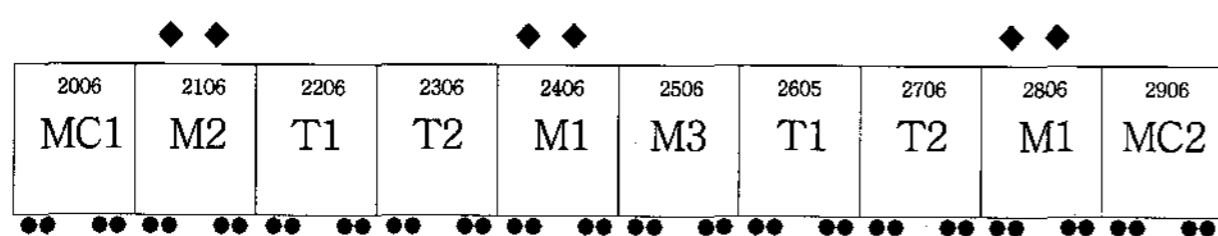


Fig. 7. Properties of measured vehicles

Table 3. Properties of measured vehicles

구분	2호선	3호선
자중(톤)	MC1, MC2 : 41.5 M1, M2, M3 : 41.5 T1, T2 : 32.0	MC1, MC2 : 33.0 M1 : 42.2 M2, M3 : 41.8 T1, T2 : 31.7

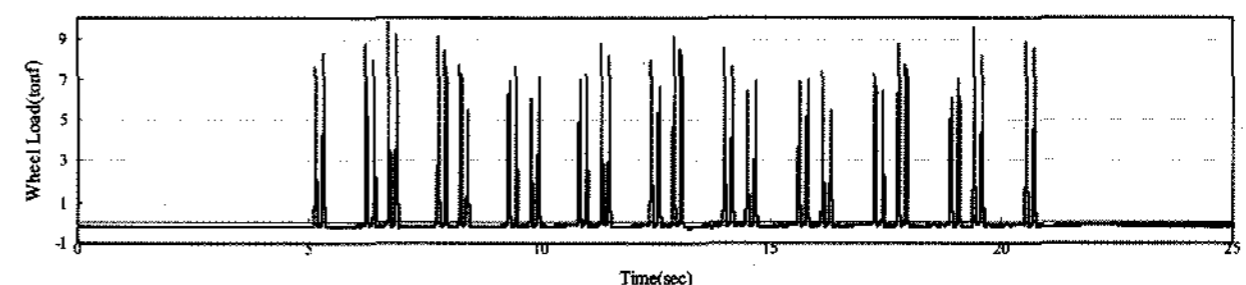
4. 궤도상태평가

4.1 궤도구조별 충격계수 산정

운중의 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 산정 시 적용하는 기준인 1인당 55kgf으로 정적하중을 산정하였다.

주행하는 열차에 의해 궤도에 작용하는 운중은 열차 자중에 의한 정적하중 이외에 열차속도의 증감에 따라 발생하는 동적하중에 의한 충격력의 영향까지 포함되어 발생된다. 따라서 운중의 측정값은 열차주행에 따른 동적운중( $P_{dyn}$ )이며, 열차의 정적운중( $P_{sta}$ )과 비교함으로써 열차속도에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다. Fig. 8은 동적운중과 레일변위의 측정결과(예)를 나타내며, 동적운중에 의한 충격계수( $P_{dyn}/P_{sta}$ )는 미국 AREA의 충격계수 산정방법에 따라 각 운중에 대한 동적운중변동률을 구하고 동적운중변동률 평균값의 표준편차에서  $2\sigma$ 를 취하여 Fig. 9와 같이 측정개소의 충격계수를 산정하였다. 여기서 기준치(설계치)로 설정한 값은 지하철의 최대운행속도 80km/h(최고운행속도 90km/h)일 때를 기준으로 하였다.

산정된 궤도충격계수(i)를 기준치(설계치) 0.41과 비교한 결과 자갈궤도의 경우에는 자갈의 노후화 및 궤도조건의 차이에 따라 편차가 약 3.54~43.26%로 크게 나타났지만, 콘크리트궤도의 경우에는 약 0.71~9.22%로 기준치와의 편차가 작은 것으로 분석되었다. 또한, 레일중량 및 용접방법에 따른 충격계수의 변화는 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었다.



(a) wheel load



(b) rail deflection

Fig. 8. Example of measured wheel load & rail deflection

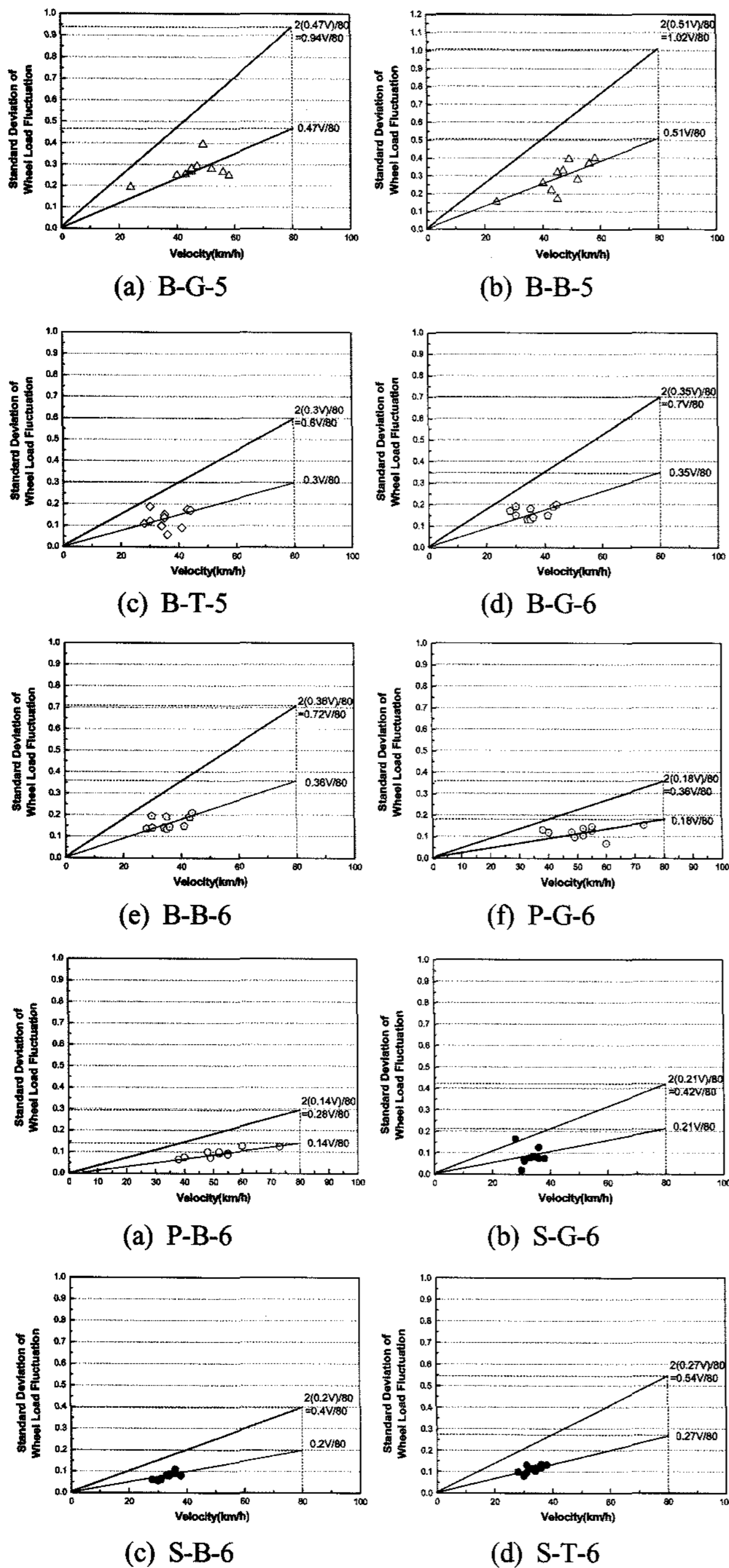


Fig. 9. Result of dynamic track impact factor for 2σ

#### 4.2 궤도구조별 동적 궤도스프링계수 선정

현장측정대상 궤도의 상태평가를 위하여 측정데이터를 이용한 동적 궤도스프링계수를 추정하였다. Fig. 5와 같이 선형스프링모델로서 궤도구조를 구성하였고, 레일은 측정개소별로 50kg/m과 60kg/m 레일을 사용하였으며 침목은 강재로 거동한다고 가정하고 검토를 수행하였다.

궤도의 선형스프링 모델에서 탄성지지력을 계산하기 위한 궤도스프링계수는 식 (9)와 같이 계산하였으며, 적용 특성

치는 Table 4와 같다.

$$D_v = \frac{1}{\frac{1}{D_{p_1}} + \frac{1}{D_{p_2}} + \frac{1}{D_{p_3}}} \quad (9)$$

여기서,  $D_v$  : 궤도스프링계수

$D_{p_1}$  : 레일패드 스프링계수

$D_{p_2}$  : 도상(or 방진패드) 스프링계수

$D_{p_3}$  : 노반(or 방진상자) 스프링계수

Table 4. Properties of track spring coefficient(unit : kN/mm)

구분	자갈궤도	콘크리트궤도		비고
		PTT	B2S	
$D_{p_1}$	400	450	600	패드의 동적스프링계수는 정적스프링계수의 150%적용(서울메트로 시방기준 참조)
$D_{p_2}$	200	15	17.5	
$D_{p_3}$	∞	2000	-	
$D_v$	133.3	21.2	25.1	

일본에서 출간된 “철도구조물 등 설계기준동해설, 궤도구조[유도상궤도](안)”에 따르면 궤도구조해석 시 자갈도상의 스프링계수를 도상 두께에 관계없이 일률적으로 200kN/mm로 정하고 있으며 이를 건전한 자갈도상의 스프링계수값으로 추정하였다. 또한, 콘크리트궤도의 경우에는 궤도시스템에 따라 적용되는 패드가 상이하므로 설계 시 적용하는 탄성재료의 스프링계수값과 계산치를 비교하여 궤도의 상태를 추정하였다. Fig. 10은 측정한 윤중과 레일변위를 통해 궤도구조해석을 실시하여 얻은 값과 궤도설계 시 고려되는 궤도스프링계수 값의 결과(예)이다.

자갈궤도의 경우 궤도상태에 따라 궤도스프링계수의 차이가 크게 나타났으며 설계 시 고려되는 궤도스프링계수와는 큰 차이가 나타났다. 그러나 콘크리트궤도의 경우에는 설계 궤도스프링계수와 측정 궤도스프링계수의 차이가 비교적 적게 나타났으며, 실 열차하중에 의한 충격계수(동적증폭계수)가 궤도상태가 불량한 자갈궤도에 비해 약 24~35% 작은 것으로 분석되었다. 또한, 궤도구조와 무관하게 용접방법별 궤도스프링계수 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었다.

#### 4.3 궤도구조별 레일저부 최대응력

Fig. 11은 측정개소별 레일저부 최대응력 범위를 나타낸다. 레일저부에 스트레인게이지를 부착하여 열차주행 시 레일의 휨변형에 의해 측정된 변형률( $\epsilon$ )에 레일강의 탄성계수( $E=2.1 \times 10^5$ MPa)를 곱하여 응력(MPa)으로 환산하였다.

측정결과 실 열차하중에 의한 최대발생응력의 범위는 궤도상태가 불량한 개소(B-G-5, B-B-5)에서 가장 크게 발생

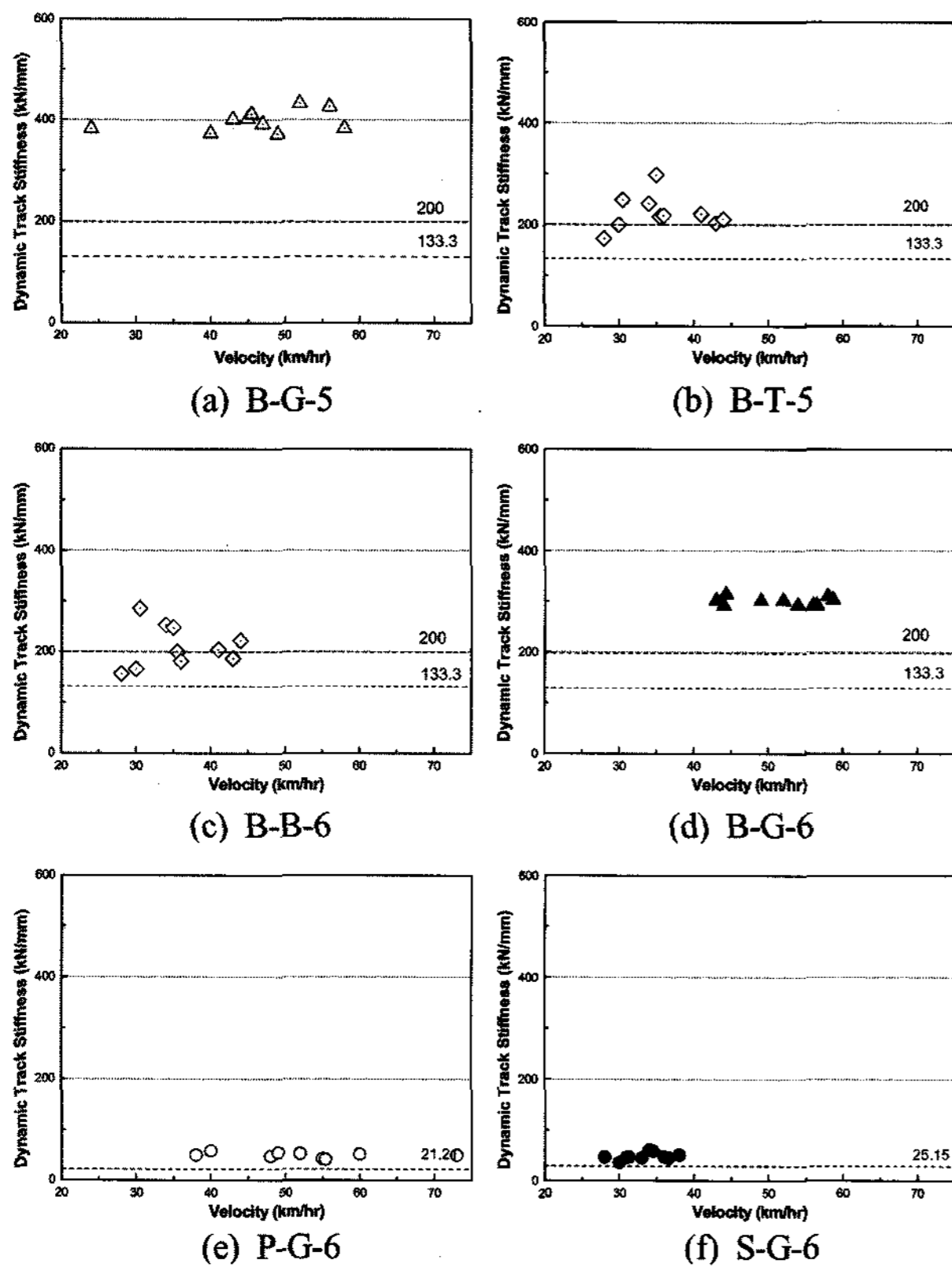


Fig. 10. Example of dynamic track spring coefficient result

하였으며, 자갈궤도가 콘크리트궤도에 비해 약 2배정도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 궤도상태가 불량한 개소의 경우 충격하중의 증가로 레일응력이 커졌기 때문이며, 콘크리트궤도의 경우에는 궤도의 탄성거동 확보 및 성능유지 측면에서 유리하여 발생응력이 다소 적게 나타난 것으로 판단된다. Table 5는 현장측정을 통해 종합한 궤도상태평가 결과표이다.

Table 5. Result of track condition assessment

구분	B-G-5	B-B-5	B-T-5	B-G-6	B-B-6	P-G-6
충격계수(i)	1.94	2.02	1.60	1.70	1.72	1.36
편차(%)	37.59	43.26	13.48	21.28	22.70	3.54
동적궤도 스프링 계수(kN/mm)	측정	372~432	358~444	156~285	275~314	214~286
	평균	397.6	402.1	210.1	282.8	235.6
Max. stress (MPa)	70.4	71.3	52.8	56.5	58.7	30.6

구분	P-B-6	S-G-6	S-B-6	S-T-6	
충격계수(i)	1.28	1.42	1.40	1.54	
편차(%)	8.51	0.71	0.71	9.22	
동적궤도 스프링 계수(kN/mm)	측정	38~45	31~82	28~68	35~60
	평균	43.4	48.0	40.4	47.2
Max. stress (MPa)	33.2	37.3	35.0	36.6	

\* 충격계수 기준치  
Spec(i)=1.41 (V=80km/h)  
\* 도상스프링계수 기준치[17]  
- Ballast : 200kN/mm  
\* 궤도스프링계수 계산치  
- Ballast:133.3kN/mm  
- PTT: 21.2kN/mm  
- B2S: 25.1kN/mm

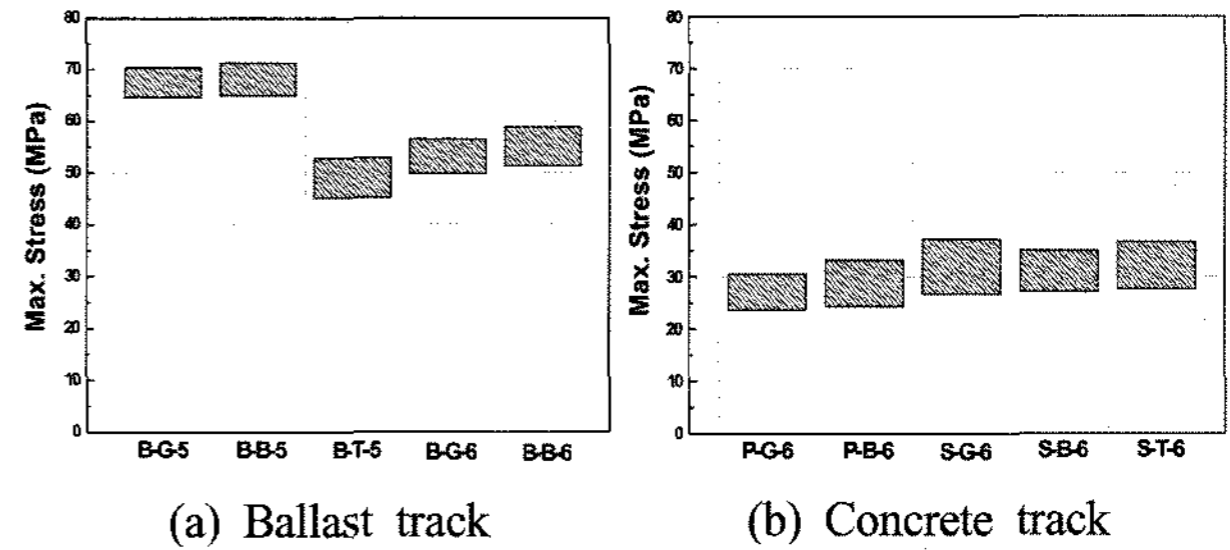


Fig. 11. Result of measured max. stress range

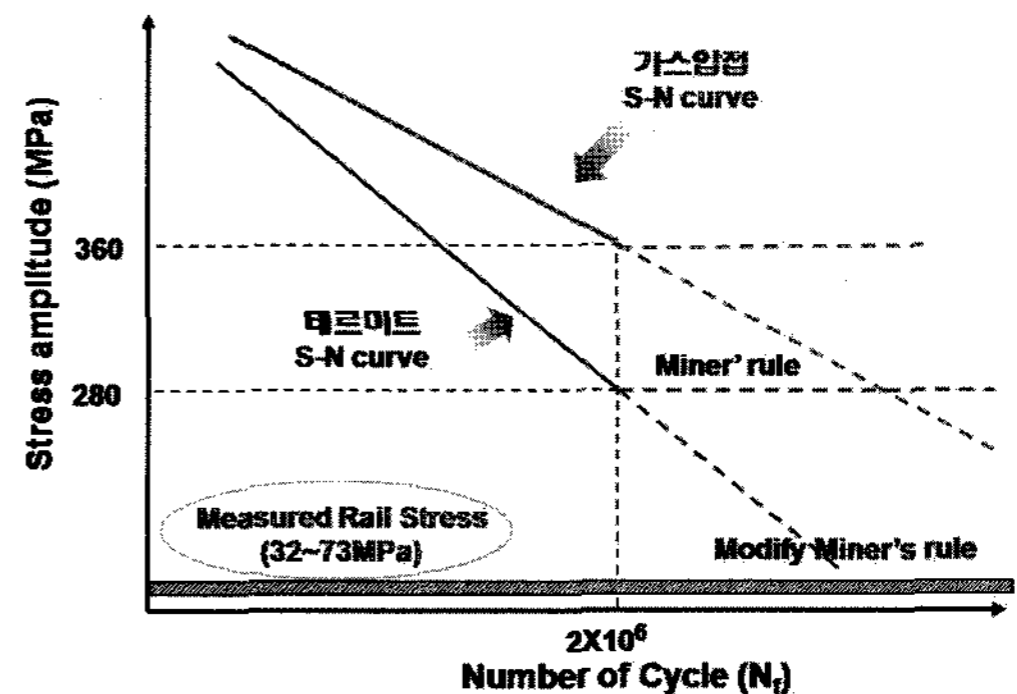


Fig. 12. Compare measured stress range with lab test result

## 5. 힘 피로수명평가

### 5.1 S-N선도

Table 6은 기존연구결과[10]에서 제시된 50kg/m 신규레일용접부에 대한 S-N선도의 선형회귀식을 Modified Miner's rule을 적용하여 파괴확률에 따라 나타낸 것이다.

### 5.2 궤도구조별 변동응력 특성

본 연구의 피로손상도 평가 시 사용한 응력의 범위는 레

Table 6. Linear regression equation of S-N curve [10]

파괴확률	테르밋용접(TW)	가스압접(GPW)
50%	$S=1151.28-151.4\text{Log } N$	$S=743.70-60.50\text{Log } N$
5%	$S=1123.13-151.4\text{Log } N$	$S=715.09-60.50\text{Log } N$
1%	$S=1111.55-151.4\text{Log } N$	$S=695.33-60.50\text{Log } N$

일의 주된 발생응력범위가 인장응력인 점을 감안하여 최대 발생 응력의 범위 및 응력빈도해석 시 레일저부 인장응력만을 해석에 적용하였으며, 피로수명에 영향을 미치지 않는 응력을 제거하기 위해 cut-off ratio를 25%로 설정하여 응력빈도해석을 실시하였다[15]. 또한, 응력빈도해석 시 발생응

력의 빈도수집에 사용한 Bar width는 2MPa 수준으로 하여 가급적 발생응력의 수준 중 대상레일의 피로거동에 취약한 응력범위만을 총 카운트수에 포함시키고자 하였고, 발생응력에 대한 카운트 방법은 Rainflow Count Method를 사용하였다.

Fig. 13와 Fig. 14는 궤도구조별로 측정된 응력파형과 이를 보정하여 응력빈도해석을 실시한 응력빈도히스토그램을 나타낸다. 작성된 응력빈도히스토그램을 보면 콘크리트궤도에서 발생한 레일저부 응력이 낮은 응력범위 대역에서 비교적 고르게 분포하고 있었다.

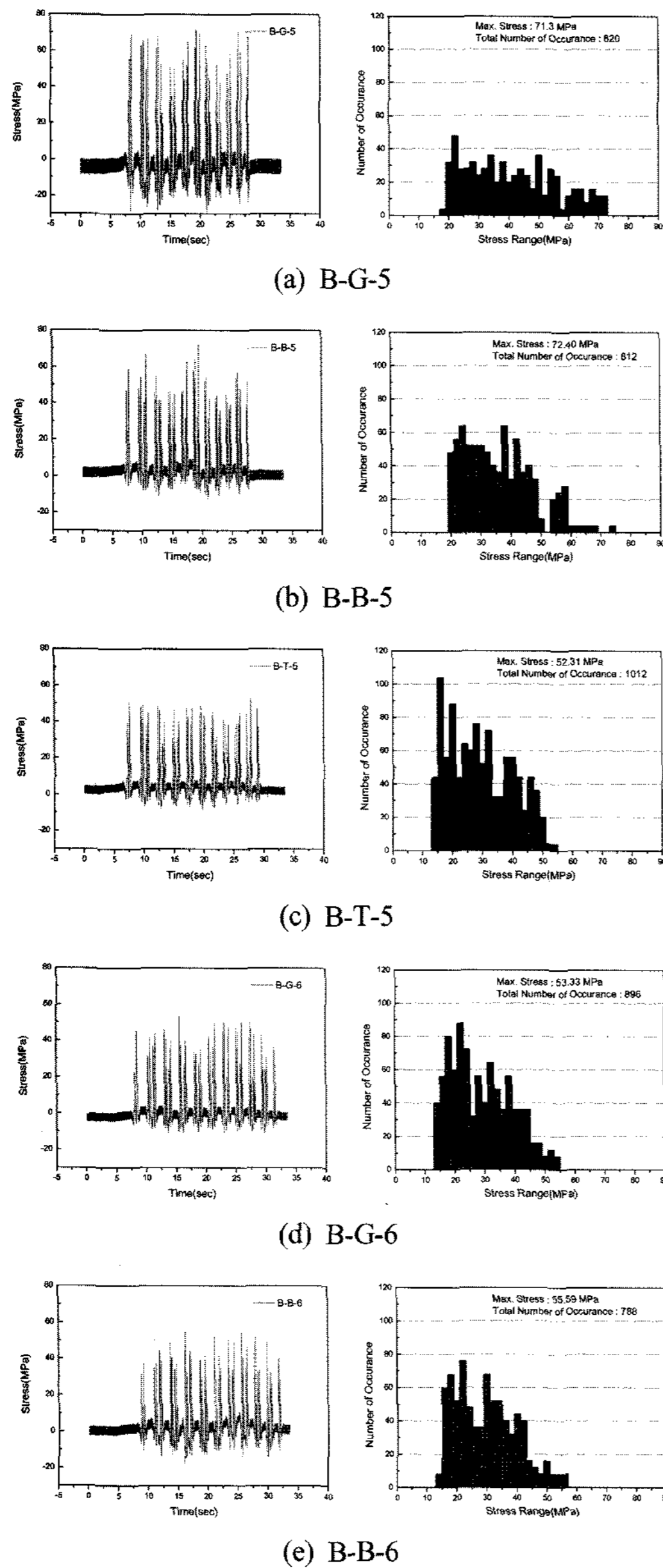


Fig. 13. Measured stress & stress frequency histogram (ballast track)

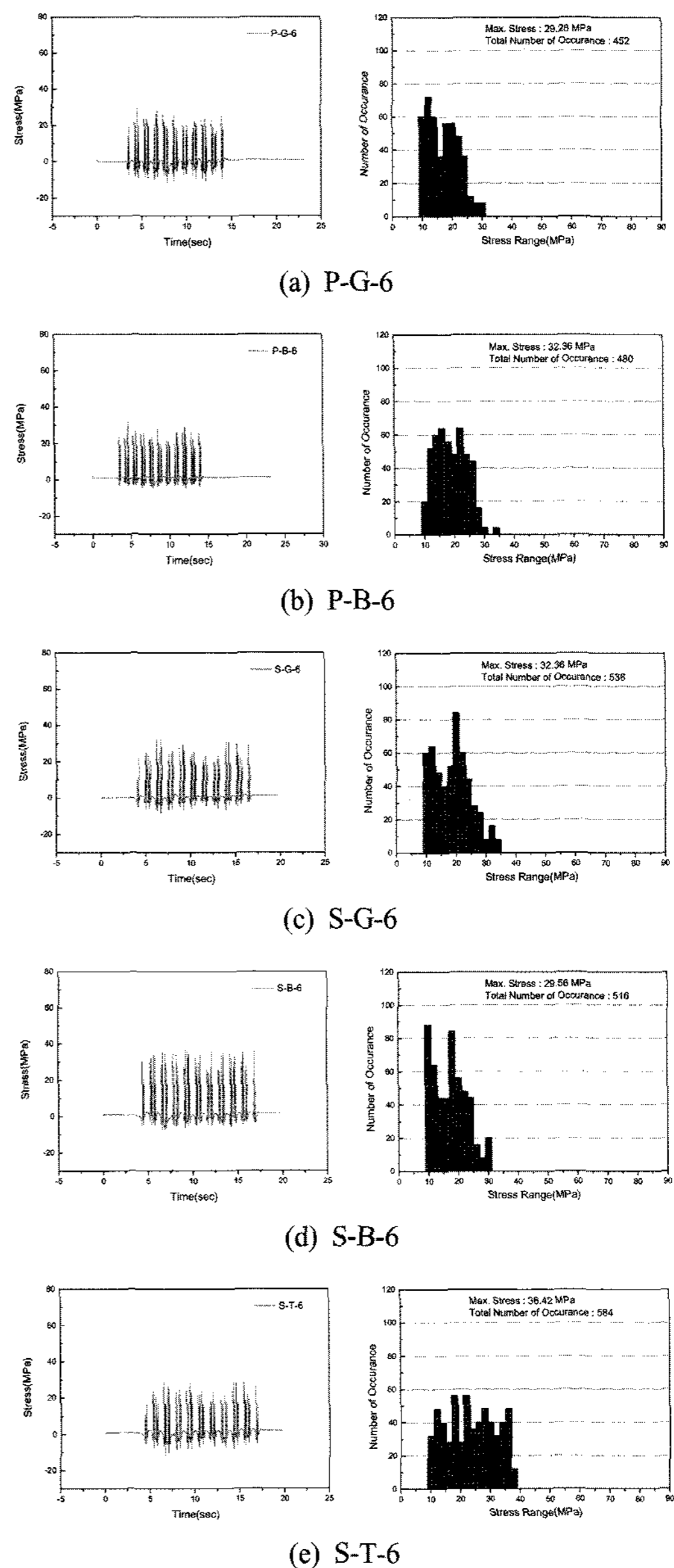


Fig. 14. Measured stress & stress frequency histogram (concrete track)

### 5.3 연간통과톤수 산정

현장측정 대상구간의 연간통과톤수 산정방법은 호선별 운행열차가 상이하고 하루 평균 이용승객량이 호선별로 다르기 때문에 서울메트로에서 적용하고 있는 호선별 08:00~09:00시 평균 혼잡율을 고려하여 식 (10)을 통해 통과톤수를 산정하였다. Table 7은 호선별 연간통과톤수를 나타낸다. 여기서 방진상궤도(P-G-6, P-B-6) 구간을 제외하고 모두 서울메트로 2호선 구간에서 현장측정이 수행되었다.

$$\begin{aligned}
 &1\text{량당 승객} = \text{정원}(160\text{명}) \times \text{혼잡율} \times 0.7 \\
 &\text{승객 1인 몸무게} = 55\text{kgf} \\
 &1\text{일 통과톤수} = (1\text{일 열차횟수} \times \text{편성량수} \times 1\text{량톤수})/2 \\
 &\text{연간통과톤수} = 1\text{일 통과톤수} \times 365\text{일} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Table 7. Accumulated passing tonnage for a year

구분	1일 열차 통과 횟수	편성량수	열차 1량당 톤수			1일 통과 톤수 (톤)	연간 통과톤수 (톤)	혼잡률 (%)
			계	전동차	승객 (승객수)			
2호선	271	10	55.3	41	14.3(260)	149,863	54,699,995	232
3호선	216	10	51	41	10.0(181)	110,415	40,301,475	162

### 5.4 궤도구조별 노후레일의 휨 피로수명 예측

본 연구에서는 레일용접부에 대한 휨 피로수명을 예측하기 위해 기존 연구결과에서 도출된 신규 레일용접부(50kg/m)의 S-N 선도를 적용하여 궤도구조 및 레일중량에 따른 노후레일의 누적피로손상도 및 휨 피로수명을 예측하였으며, 그 결과를 Table 8에 정리하였다. 레일중량별 휨 피로수명은 50kg/m에 비해 60kg/m 레일이 약 16% 이상 길게 나

타났으며, 모재부와 용접부에 대한 휨 피로수명의 차이는 크게 없는 것으로 분석되었다. 이는 60kg/m 모재부 및 용접부의 발생응력을 50kg/m 레일용접부의 S-N선도에 적용한 결과로 60kg/m 모재부 및 용접부의 S-N선도에 이를 적

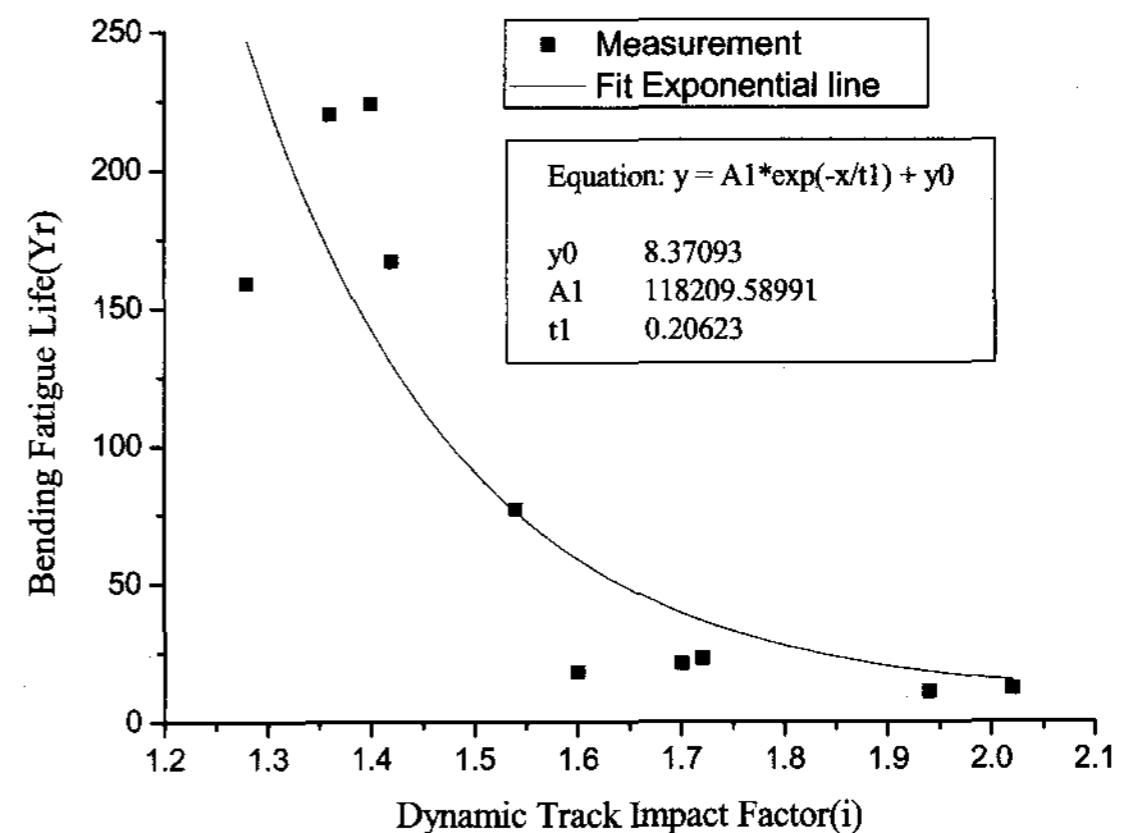


Fig. 15. Result of bending fatigue life according to dynamic track impact factor

용 시 분명한 차이가 있을 것으로 판단된다.

또한, 궤도구조별 휨 피로수명은 콘크리트궤도의 경우가 자갈궤도에 비해 약 3배이상 길게 나타났으며, 궤도스프링 계수와 충격계수가 큰 경우에 누적피로손상도가 크게 나타났고 휨 피로수명이 짧은 것으로 분석되었다. 이는 궤도상태에 따라 레일저부에서 받는 부담력에 차이가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 15는 현장측정을 통해 산정된 동적 궤도충격계수와 레일의 휨 피로수명(파괴확률 1%)에 대해 회귀식을 지수함수로 도출한 그래프이다.

Table 8. Result of bending fatigue life assessment for laid rail

구분	누적통과 톤수(억톤)	궤도상태평가			누적피로손상도(D <sub>F</sub> )			휨피로수명(Yr)			교체 기준
		충격 계수	동적 궤도 스프링계수	Max. stress (MPa)	50%	5%	1%	50%	5%	1%	
B-G-5	5	1.94	397.6	70.4	0.063	0.078	0.094	15	13	11	5억톤 (약10년 소요)
B-B-5	5	2.02	402.1	71.3	0.054	0.067	0.080	18	15	12	
B-T-5	6.6	1.60	210.1	52.8	0.038	0.047	0.056	26	21	18	
B-G-6	3.5	1.70	282.8	56.5	0.031	0.039	0.047	31	25	21	6억톤 (약12년 소요)
B-B-6	3.5	1.72	235.6	58.7	0.029	0.037	0.044	33	27	23	
P-G-6	3.1	1.36	50.0	30.6	0.003	0.003	0.004	327	264	220	
P-B-6	3.1	1.28	43.4	33.2	0.004	0.005	0.006	236	191	159	
S-G-6	0.3	1.42	48.0	37.3	0.004	0.004	0.005	248	201	167	
S-B-6	0.3	1.40	40.4	35.0	0.003	0.003	0.004	333	269	224	
S-T-6	0.3	1.54	47.2	36.6	0.008	0.010	0.012	114	92	77	



## 6. 결론

본 연구는 현장측정을 통해 궤도구조별 궤도의 동적응답을 측정하고 이를 통해 궤도상태평가를 수행함으로써 궤도구조 및 궤도상태를 고려한 노후레일 저부의 휨 피로수명을 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 궤도구조별 충격계수 및 스프링계수 산정 결과, 레일중량 및 용접방법에 따른 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났으며, 자갈궤도는 자갈의 노후화 및 궤도상태에 따라 측정값의 차이가 큰 것으로 분석되었다.
- (2) 궤도상태가 불량한 개소에서 레일저부 최대발생응력의 범위가 다른 개소에 비해 가장 컸으며 콘크리트궤도에 비해 자갈궤도에서 약 2배 크게 나타났다. 또한, 실제 도시철도 열차하중에 의한 레일저부 발생응력의 범위가 누적통과톤수에 의한 레일교체주기 산정을 위한 실내피로시험조건과 같이 극한의 피로하중에 의한 발생응력에는 크게 미치지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 궤도구조별 노후레일 저부의 휨 피로수명 산정 결과, 용접방법 및 레일중량에 따른 차이는 미소하였으나 이는 모재부 및 60kg/m 레일용접부에 대한 S-N선도를 도출하여 적용할 경우 뚜렷한 차이가 발생할 것으로 판단된다. 또한, 궤도상태에 따른 노후레일 저부의 휨 피로수명의 차이가 큰 것으로 분석되었고 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도의 휨 피로수명이 약 3배 이상 긴 것으로 분석되었다.
- (4) 현장측정을 통해 산정한 동적 궤도충격계수(동적증폭효과)와 레일의 휨 피로수명에 대한 상관관계를 지수함수식으로 도출하였다.
- (5) 따라서 주기적인 궤도유지관리(레일연마, MTT, 패드교체 등)를 통해 궤도상태를 건전하게 유지한다면 더욱 안전한 상태로 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 연장이 가능할 것으로 판단되며, 도시철도에서 적용하고 있는 선로점검지침상의 누적통과톤수에 의한 레일교체기준을 선로조건 및 궤도유지관리수준을 고려하여 재산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 7. 향후 연구과제

현행 선로점검지침상의 레일교체기준의 재산정을 위해서는 궤도구조 및 궤도상태에 따른 레일피로수명의 변화를 레

일의 휨피로시험(Bending Fatigue) 및 구름접촉피로시험(Rolling Contact Fatigue), 레일두부조직시험, 마이크로 비커스 경도시험 등을 통해 정량적으로 제시되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 “차세대고속철도기술개발사업”에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박용걸(1988), “실동하중을 받는 강구조부재의 피로해석을 위한 RMC모델에 관한 연구”.
2. 박용걸(1995), “철도레일의 파괴 및 피로에 대한 안전도평가 및 잔류수명계산”, 한국산업안전학회지, Vol.10 No.2.
3. 박용걸 외 1인(2006), “현장측정을 통한 자갈도상궤도의 동적 거동 분석”, 한국철도학회 논문집, 제 9권 제 6호, pp.401~411.
4. 김만철 외 2인(2001), “슬래브궤도상의 레일 용접부 피로수명 예측”, 한국철도학회 논문집, Vol.4 No.4.
5. 양신추 외 2인(2000), “레일용접부의 피로수명 예측”, 대한토목학회 논문집, 제20권 제1-D호, pp. 97~105.
6. Ska Kouzi, Kusuda Masayuki, Maeda Hiroaki(2002), “레일 수명 연장에 관해”, 일본철도시설협회지.
7. 이종득(2006), “철도공학”, 노해출판사.
8. 서사범(2006), “선로공학(개정2판)”, 열과 알.
9. 이용복, 김호경, 정진성(1999), “피로해석의 기초”, 청문각.
10. 양신추(1998), “레일용접부의 특성에 관한 연구”, 철도청.
11. 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소(2005), “부산지하철 1호 선 궤도구조개량 타당성조사 연구보고서”.
12. Coenraad Esveld (2001), “Modern Railway Track,” MRT-Productions.
13. Tadashi Deshimaru, Hiroo Kataoka (2006), “Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail”, QR of RTRI, Vol. 47, No. 4.
14. Hideki Shitara, Yoshihira Terashita, Mitumasa Tatsumi, Yasuto Fukada (2003), “Nondestructive Testing and Evaluation Methods for Rail Welds in Japan”, QR of RTRI, Vol. 44, No. 2, pp. 53~58.
15. J.W. Fisher (1994), “Fatigue and Fracture in Steel Bridges”, Prentice Hall.
16. 일본 철도종합기술연구소(1997), 철도구조물등설계표준·동해설 궤도구조(유도상궤도)(안).
17. 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소(2007), “노후레일의 교체주기 산정을 위한 연구보고서”.
18. 일본JR, “궤도정비규칙”.

접수일(2008년 1월 21일), 수정일(2008년 6월 23일), 게재확정일(2008년 6월 23일)