

누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 타당성 분석  
A Study on Logicality for the Periodic Replacements of  
Continuous Welded Rail based on Accumulated Passing Tonnage

성덕룡\*      공선용\*\*      김박진\*\*\*      신호정\*\*\*\*      박용걸\*\*\*\*\*  
Sung, Deok-Yong      Kong, Sun-Yong      Kim, Park-Jin      Shin, Hyo-Jung      Park, Yong-Gul

ABSTRACT

Internal and external railway management corporations are using the periodic replacement criteria of rail by accumulated passing tonnage and wear to maintain rails for servicing. However, internal the periodic replacement criteria of continuous welded rail(CWR) by accumulated passing tonnage is the one(50kg/m-5 million gross tonnage, 60kg/m-6 million gross tonnage) presented in Japan before. It was estimated with the fatigue life about 50kg N rail joints applied diesel train load but it wasn't applied to current conditions of track; elimination of rail joint, using the concrete slab track and operation of light train load and effect of welding, manufacturing technique, grinding of rail.

Therefore, in this study, it was investigated the types of damage and cause in welded rails and examined standards and information resources. Also, this study presents preliminary data to revise the periodic replacement criteria of CWR by current accumulated passing tonnage in bending test of laid welded rail and a survey of track maintenance history of Seoul metro.

key words : laid welded rail(노후레일), fatigue life(피로수명), periodic replacement(교체주기), bending test(굴곡시험), track maintenance history(궤도유지관리이력)

1. 서론

철도교통의 발전과 더불어 승차감을 향상시키고 궤도유지관리비용을 감소시키기 위해서는 시공기술 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 유지관리 비용의 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 운행을 위해 중요한 역할을 수행하는 레일을 유지관리하기 위해 국내·외 철도운영기관에서는 누적통과톤수 및 마모량에 따른 레일교체기준을 정하여 관리하고 있다. 그러나 레일관리를 위한 기준은 건설당시 국내의 시공 및 궤도유지관리 기술 수준의 미흡으로 국내실정을 고려하지 못한 채 국외(일본)의 기준을 여과없이 적용하였고 현재까지 사용하고 있는 실정이다.

\* 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정

\*\* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 서울메트로 철도토목팀 팀장

\*\*\* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 서울메트로 철도토목팀 차장

\*\*\*\* 비회원, 서울메트로 철도토목팀 사원

\*\*\*\*\* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

과거 일본에서 제시된 누적통과톤수에 의한 레일교체주기 기준(50kg N-5억톤)은 50kg N 레일이음매부에 대한 피로수명으로 산정되었으며, 현재 일본에서는 장대레일화에 따른 레일이음매부 제거로 누적통과톤수에 의한 교체주기 기준을 모재부보다 요철량이 크게 발생하여 피로수명이 짧은 레일용접부(테르미트용접)의 피로수명에 의해 재산정(50kg N-7억톤, 60kg-8억톤)하였다.<sup>(2)(9)</sup>

하지만 국내에서는 과거 레일이음매에 대한 교체기준을 적용하고 있으며, 이 기준의 산정방법은 화물 혼용선의 디젤열차하중 조건을 적용하였고 장대레일화에 따른 레일이음매부의 제거, 궤도 생력화, 경량의 열차운행, 철강생산기술 및 레일탐상기술의 발달과 레일연마에 의한 레일 수명연장 효과 등 현재의 궤도조건들에 대해서는 반영하지 않고 있다. 이와같이 과거 제시된 레일의 누적통과톤수에 의한 교체기준(50kg/m-5억톤)은 열차종류 및 레일장대화, 도상형식별로 레일이 받는 하중부담을 및 손상메커니즘이 상이함에도 불구하고 현재까지 그대로 적용함에 따라 건전한 레일마저 누적통과톤수에 의한 레일교체기준에 의해 일괄적으로 불용자재로 처리하게 되어 철도운영기관들에서는 비경제적인 궤도유지관리를 하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내·외 레일교체주기 산정에 관한 기준 및 근거자료 검토, 레일용접부 손상유형 및 원인조사, 서울메트로의 궤도유지관리이력조사 및 교체시기에 도래한 노후 레일용접부에 대한 굴곡시험을 통해 현 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 개정을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 국내·외 레일교체기준

### 2.1 일본<sup>(10)</sup>

[표 1]은 일본의 궤도정비규칙에 제시된 레일마모량에 의한 레일교체기준이며, [표 2]는 누적통과톤수에 의한 레일교체주기 목표치이다. 일본은 레일이음매가 있는 경우와 레일이음매가 없는 경우로 구분하여 누적통과톤수를 산정하였고, 레일을 반드시 교체해야하는 기준치와 주기적인 관리를 요구하는 목표치로 구분하여 관리하고 있다.

표 1. 레일마모량에 따른 레일교체기준

기준치/목표치	30kg/m	40kg/m	50kg/m	60kg/m
본선 및 중요측선	- / -	- / -	14 / 12	15 / 13
측선	11 / 10	15 / 14	16 / 15	17 / 16

표 2. 누적통과톤수에 의한 레일교체기준

정비 목표치	레일이음매가 있는 경우		레일이음매가 없는 경우	
	50kg/m	60kg/m	50kg/m	60kg/m
누적통과톤수	6억톤	7억톤	7억톤	8억톤

### 2.2 유럽

[표 3]은 유럽의 국가들에서 사용하고 있는 누적통과톤수에 의한 레일종류별 교체기준이다.<sup>(3)</sup>

여기서 레일교체를 위한 누적통과톤수가 일본 및 국내의 규정치보다 수치가 작은 이유는 식(1)과 같이 승객하중, 열차속도, 화물열차하중, 차륜직경에 대한 함수식을 이용해 통과톤수를 산정하는 방식을 사용하기 때문이다.<sup>(6)</sup>

$$T_f = T_p \frac{V}{100} + T_g \frac{P_c}{18D} \quad (1)$$

여가서,

$T_p$  : 일일 승객열차의 실하중,  $T_g$  : 일일 화물열차의 실하중,

$V$  : 최대가능속도[km/h],  $D$  : 최소차륜직경[m]

$P_c$  : 차륜직경별 최대 축하중[tonf]

표 3. 유럽의 누적통과톤수에 의한 레일종류별 교체기준

국가	레일종류	누적통과톤수
프랑스	UIC60	5.0~6.0억톤
독일	S49	1.5~2.0억톤
	S54	2.5~3.5억톤
	UIC60	4.5억톤
러시아	P50	3.5억톤
	P65	5.5억톤
	P75	6.0억톤

또한, 누적통과톤수에 의한 레일관리기준의 목적은 레일의 교체를 위한 것이 아니고 유럽의 특성상 다양한 열차종류가 운행하는 것에 따른 국가별 철도운영기관의 선로사용료 징수문제 및 책임소재 문제를 해결하기 위한 것이다.

### 2.3 국내<sup>(11)</sup>

[표 4]는 국내 철도운영기관들에서 적용하고 있는 레일교체기준이다. 레일의 마모기준은 차륜의 탈선을 방지하기 위한 최소한의 수치이므로 기준치의 마모 발생 시 반드시 교체해야하는 수치이다. 반면에 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은 철도운영기관별로 운행하는 열차종류가 상이하고 궤도조건 및 운행조건이 상이함에도 불구하고 60kg/m 레일은 6억톤, 50kg/m 레일은 5억톤으로 획일적인 것으로 조사되었다.

표 4. 국내 철도운영기관별 레일교체기준

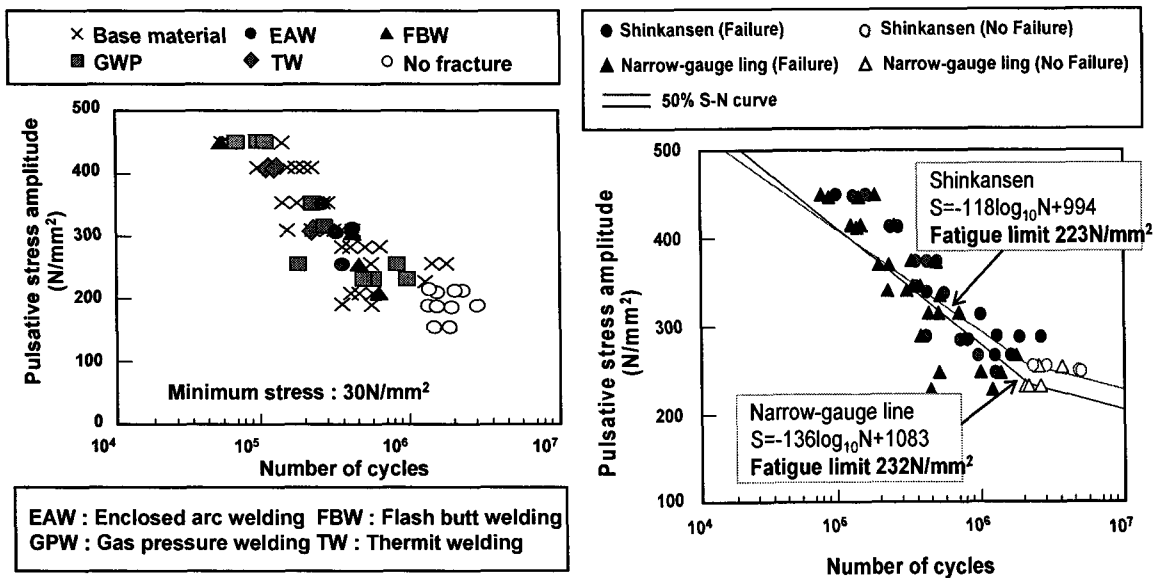
운영기관	레일종류 (kg/m)	최대마모높이(mm)		단면적 감소(%)		누적통과톤수 (억톤)
		일반	편마모	본선	측선	
한국철도공사	60	13	15	24	24	6
	50	12	13	18	22	5
고속철도	60	13	15	-	-	6
	50	12	13	-	-	5
서울메트로	60	13	15	24	-	6
	50	12	13	18	22	5
부산교통공단	60	13	15	24	-	6
	50	12	13	18	22	5
대구지하철공사	60	13	15	-	-	6
	50	13	18	-	-	5
인천공항철도	60	13	15	24	-	6
	50	12	13	22	-	5
대전도시 철도공사	60	13	15	24	-	6
	50	15	18	22	-	5
기 타	균열, 열차과상마모 등으로 열차운전상에 위험이 있을 때 레일교체					

### 3. 국내·외 연구동향

#### 3.1 일본<sup>(2)(7)</sup>

일본에서는 장대레일의 사용수명을 평가하여 레일의 교체주기를 연장하고자 노후레일용접부에 대한 휨 피로시험을 수행하였고, 레일용접부의 동적해석 모델을 사용하여 레일저부응력을 산정하였다. 휨 피로시험을 위한 노후 레일용접부 시편은 궤간: 1,435mm, 누적통과톤수: 3억 8천만톤의 신칸센레일과 궤간: 1,067mm, 누적통과톤수: 5억 4천만톤의 협궤레일을 발채하여 피로시험을 수행하였다.

파괴확률 50%에 대한 노후 레일용접부의 S-N선도를 적은 시편개수에 대한 가중치 확률 해석기법을 통해 [그림 1]과 같이 얻었다. 여기서 용접방법에 따른 파단 반복횟수의 차이는 뚜렷하지 않았으며, 레일용접부의 파괴는 모두 레일저부에서부터 발생하였다.



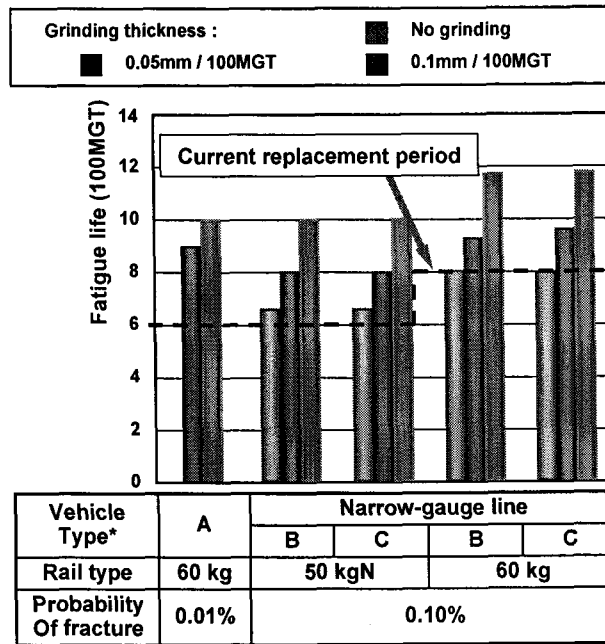
(a) 용접방법별 피로시험 결과

(b) 노후 레일용접부의 S-N선도(50%파괴확률)

그림 1. 노후 레일용접부의 피로시험 결과

레일연마시 요철량 제거로 인한 효과를 알아보기 위해 동적해석모델을 개발하여 레일저부응력을 산정하였으며, 피로시험결과 도출한 S-N선도에 이를 적용하여 피로수명을 산정하였다. 평가결과 [그림 2]와 같이 신칸센에서 60kg 레일(6억톤)의 교체주기는 누적통과톤수 1억톤당 0.1mm 레일연마로 3억톤을 연장할 수 있으며, 협궤에서는 파괴확률 0.1%에서 평가된 사용수명으로부터 60kg(8억톤)과 50kg N(6억톤) 레일의 교체주기는 3억톤을 연장할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 실제적으로는 1~2억톤의 교체주기 연장은 가능할 수 있음을 제시하였다. 이 결과 값들은 기존의 연구들에 기초하여 레일연마를 통해 레일표면 요철을 제거할 수 있으며 레일저부에서 발생하는 응력을 감소시켜 레일교체주기를 연장시킬 수 있음을 입증하였다.<sup>(7)</sup>

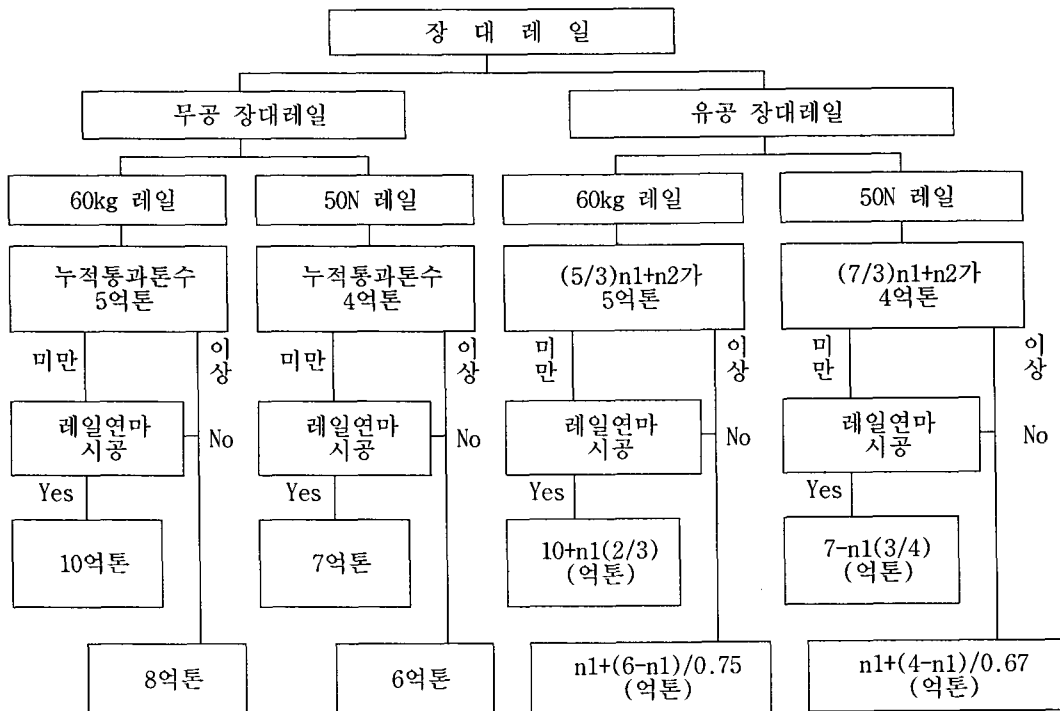
또한, 2002. 3. 일본철도시설협회지에 수록된 “레일수명연장에 관해”란 논문에서 다음과 같이 서술하고 있다. 레일용접부는 시공 당시의 열영향에 의해 연화부(軟化部)가 존재하고 이를 중심으로 움푹 패임 현상이 발생하게 된다. 이것은 반복적인 열차하중에 의해 점점 커지게 되고 레일저부응력을 증가시킨다. 이 패임을 제거하기 위해 레일연마를 실시할 것을 제안하였으며 궤도동적 시뮬레이션을 통해 레일저부응력을 추정하고 신규 레일용접부의 S-N선도에 이를 적용하여 피로수명을 산정하였다. 해석결과 신규 50kg N레일에서 7억톤, 60kg레일에서 10억톤까지 교체주기의 연장이 가능한 것으로 나타났으며, 재하이력이 50kg N레일에서 4억톤미만, 60kg레일에서 5억톤미만일 경우 레일연마를 통해 설정한 교체기준을 만족하지만 그 이상의 재하이력일 경우 종래의 교체기준을 그대로 적용할 것을 제안하였다.



\*A: Shinkansen, B : Locomotive, C: Limited express

그림 2. 연마효과를 고려한 누적통과톤수 산정 결과

이와같은 연구결과들을 통해 JR 서일본에서는 보유하고 있는 레일연마차의 운용효율과 선로의 중요성을 고려하여 [그림 3]과 같은 장대레일의 교체주기 기준을 제시하였으며, 기존의 정기적인 레일교체 방식에서 결함 발생 수선 방식으로 변경하기 위한 합리적인 보수대책을 제시하였다.<sup>(2)</sup>



※ n1: 접합시 누적통과톤수

※ n2: 접합후 누적통과톤수

※ 채용레일 사용시 통과톤수에 가산치 적용기준

그림 3. 장대레일의 교체주기 산정기준(일본 JR 서일본)

### 3.2 국내<sup>(1)(5)</sup>

1998. “레일용접부의 특성에 관한 연구”보고서에서는 신규 레일용접부의 S-N선도를 도출하였고, 요철량 증가에 따른 레일저부응력의 산정으로 레일용접부의 요철깊이와 레일저부에서 발생하는 휨응력과 는 일정한 상관관계가 있음을 제시하였으며 초기요철량이 있는 경우 피로수명이 매우 단축되므로 피로 수명을 향상시키기 위해서는 초기표면처리가 매우 중요함을 강조하였다. 따라서 레일 요철을 자주 연마 할 경우 피로수명을 크게 증가시킬 수 있음을 강조하였다.

### 4. 레일용접부 손상 사례조사

1985~2001년까지 일본 JR에서 조사된 레일용접부의 손상유형은 [그림 4]와 같다. 손상된 레일용접 부의 형태는 대개 횡방향 균열과 종방향 균열 2가지로 나눌 수 있으며, 횡방향 균열은 균열의 시작 위 치에 따라 레일두부, 복부, 저부 3가지로 나누어진다. 하지만 종방향 균열은 오직 레일의 복부에서만 발 생하였고, 횡방향 균열은 전체 레일손상의 약 90%를 차지하였다. 또한, 손상된 레일용접부의 55%가 레 일저부에서 시작된 횡방향 균열로 조사되었다.

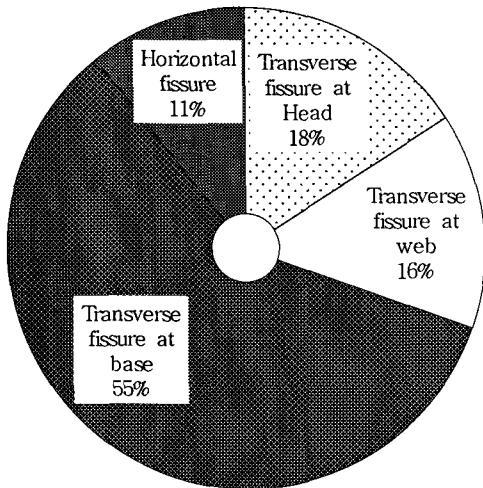


그림 4. 레일용접부의 손상유형

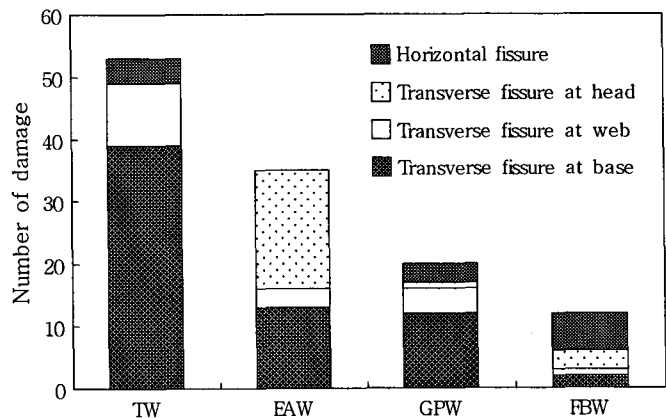


그림 5. 레일용접방법에 따른 손상유형별 손상수

[그림 5]는 각 용접방법별 손상유형에 따른 손상수이다. 손상유형 및 손상수는 용접방법에 따라 다르 게 나타나며, 테르미트 용접부(TW)와 가스압접부(GPW)에서는 레일저부에서 시작된 횡방향 균열의 비 율이 가장 높았다. 후레쉬 버트 용접부(FBW)의 손상수 절반은 레일복부에서 시작된 종방향 균열이 대 부분이며, 테르미트 용접부의 레일두부에서의 횡방향 균열과 엔크로드드 아크 용접부(EAW)의 레일복부 에서의 종방향 균열은 1건도 발생하지 않은 것으로 나타났다.

누적통과톤수에 의한 장대레일교체기준의 산정 근거인 테르미트 용접부의 손상원인을 조사해본 결과, [그림 6]과 같이 테르미트 용접부의 경우 “lack of fusion(용접금속과 레일 사이의 융합불량)”과 “centerline shrinkage(응고동안 레일 움직임에 의해 발생한 균열)”에 의해 주로 발생하였고 다른 원인 으로는 “porosity(불순물에 의해 레일내부에 생성된 다수의 큰 기포)”와 “stress concentration(테르미 트 용접부에서 레일저부의 응력집중)” 등에 의해 레일저부 횡방향 균열이 나타났다. 또한, 가스압접의 경우에는 레일저부의 횡방향 균열 손상은 90%이상이 “trimming cracks”와 “Repair”에 의해 형성되었 다. “trimming cracks”은 발열 균열의 한 종류로 용접부의 접촉면에서 발생하며, 만약 금속부착 강도가 낮다면 접촉면은 용접 직후 trimming과정에서 소성변형에 의해 형성된 응력을 견딜 수 없게 된다. “Repair”는 손상 복구를 위해 용접을 실행하였음에도 불구하고 남아있는 결함을 의미한다. 여기서 레일 복부의 종방향 균열은 과도한 열, 잔류 인장응력과 망치질에 의한 충격에 의해 형성되는 반면, 레일복부 에서의 횡방향 균열은 높은 잔류 인장응력과 용접부위의 부식에 의해 형성되는 것으로 조사되었다.

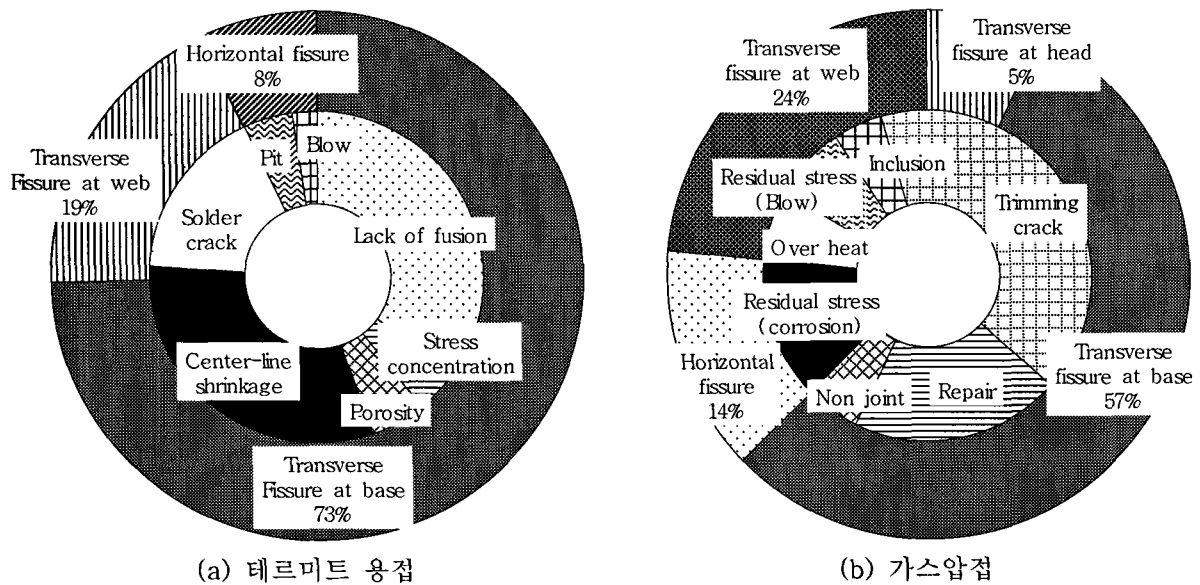


그림 6. 레일용접방법별 손상원인

[표 5]는 일본 JR에서 조사된 용접방법별 레일용접부의 손상수를 나타낸다. 총 121개의 손상된 레일 용접부 중에서 테르미트 용접부의 손상이 용접방법 중 가장 높게 나타났다. 그 이유는 테르미트 용접은 여러가지 제반장비가 필요하고 현장용접 시 불순물이 함유될 수 있으며 용접공의 숙련도에 따라 용접품질이 달라질 수 있기 때문이다.

표 5. 레일용접방법별 손상수

용접 방법	손상수
테르미트 용접(TW)	53
엔크로즈 아크 용접(EAW)	35
가스압접(GPW)	21
후레쉬 버트 용접(FBW)	12
합 계	121

## 5. 궤도유지관리이력조사

### 5.1 레일용접부 손상현황

장대레일화에 따른 레일의 사용수명 산정은 피로균열이 쉽게 발생하는 레일용접부(TW)의 피로수명으로 산정되었다. 따라서 본 연구에서는 1998~2006년까지 서울지하철의 궤도유지관리이력을 조사하여 레일용접부에서 발생하는 손상현황을 알아보았다.

[그림 7]은 연도별 시공한 용접수와 발생한 손상수를 보여준다. 전체 용접수 중 가스압접이 약 80%, 테르미트 용접이 약 19%를 차지하고 있었으며, 손상수는 테르미트 용접이 약 61%, 가스압접이 약 39%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 앞에서 조사된 일본의 레일손상빈도와 비슷한 양상을 보이며, 테르미트 용접은 적은 시공수에도 불구하고 손상수가 높은 것으로 나타났다.

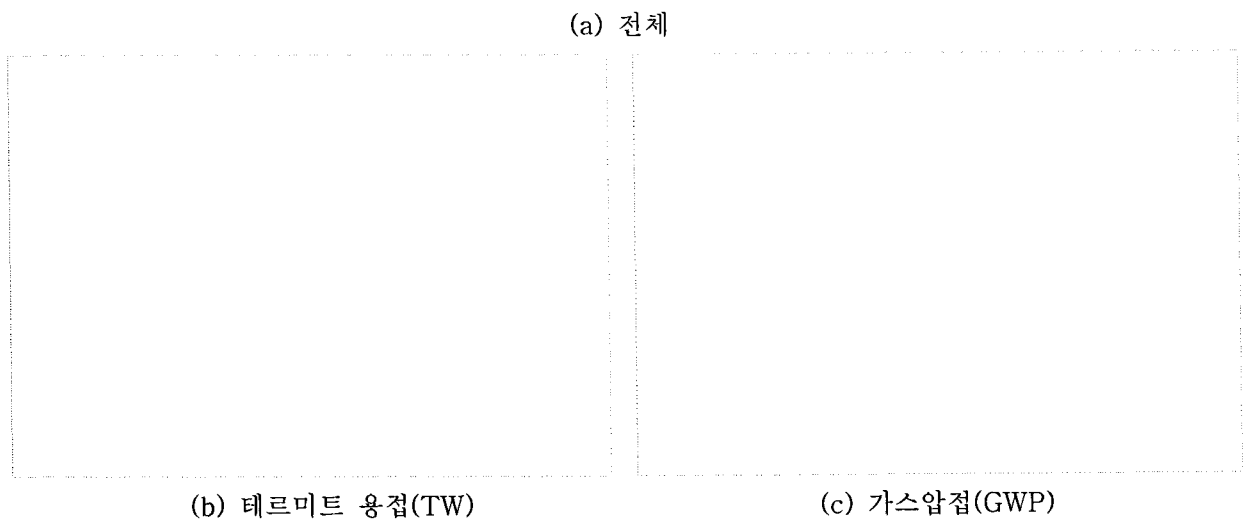


그림 7. 연도별 용접수와 손상수 비교

레일장대화에 따라 2003년도와 2006년도에 용접수가 증가하였으며, 2001년 이후 레일손상수의 감소는 [그림 8]에서와 같이 레일연마량의 증가에 따른 레일두부의 요철제거로 레일수명연장효과에 의한 것으로 판단된다.



그림 8. 연간 연마실적과 레일용접부 손상수 비교



## 5.2 레일손상부위 및 손상발견 형태

손상부위별 현황을 조사해본 결과 [그림 9]와 같이 접촉절연이음매, 일반이음매, 분기기, 신호본드용접부, 모재부, 용접부의 순으로 전체 손상부위별 현황 중 용접부가 차지하는 비율은 5.18%로 나타나 경미한 것으로 조사되었다. 따라서 모재부 및 용접부와 같은 일반레일의 경우 연마에 의한 꾸준한 관리로 손상을 줄일 수 있어 손상발생빈도가 적은 것으로 판단되며, 이음매부 및 분기기와 같이 구조적으로 취약한 개소는 상대적으로 손상수가 높게 나타났다.

[그림 9] (b)와 같이 레일손상 발견형태는 순회점검과 탐상차에 의한 발견이 전체의 93.1%를 차지하고 있어 일상적인 순회점검과 주기적인 탐상차 운행에 의한 레일관리의 중요성 및 실효성을 보여준다.

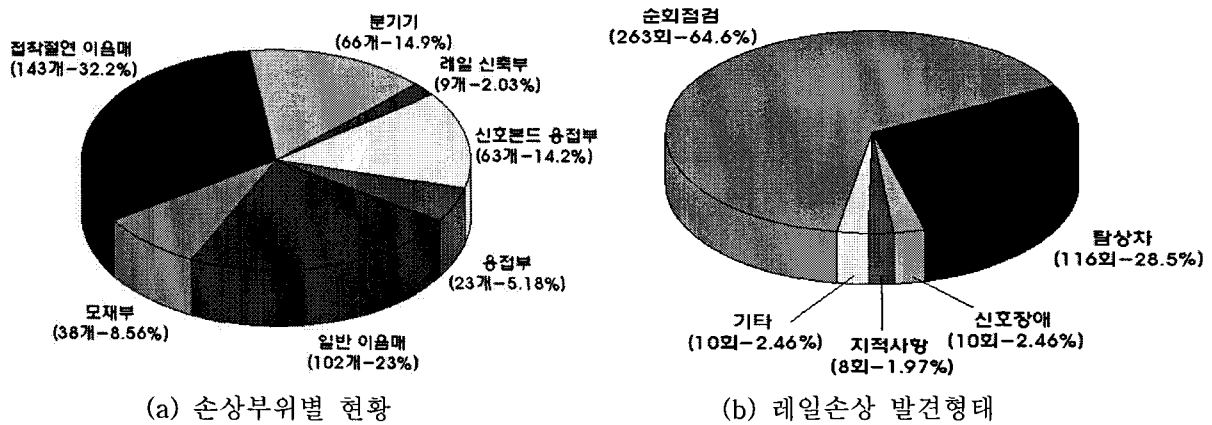


그림 9. 손상부위 및 발견유형

## 6. 실내시험

### 6.1 실내시험 방법

노후 레일용접부와 신규 레일용접부에 대한 휨강도를 비교하여 노후 레일용접부에 대한 내구성을 비교·평가하고자 누적통과톤수에 의한 레일교체기준에 도래한 10개의 50kg 용접레일시편(테르미트 5개, 가스압접 5개)에 대하여 굴곡시험을 수행하였으며 시편에 대한 기본사항은 [표 6]에 나타내었다. 레일 굴곡시험기를 위해 정격하중 300tonf인 UTM을 사용하였다.

표 6. 노후 레일용접부 시편의 제원

번호	제작연도	부설연도	도상형식	누적통과톤수	용접방법
1	98.10	99.09	자갈	4억톤	GWP
2	98.10	99.09	자갈	4억톤	GWP
3	98.10	99.09	자갈	4억톤	GWP
4	98.10	99.09	자갈	4억톤	GWP
5	98.10	99.09	자갈	4억톤	GWP
6	98.10	99.09	자갈	4억톤	TW
7	98.10	99.09	자갈	4억톤	TW
8	98.10	99.09	자갈	4억톤	TW
9	98.10	99.09	자갈	4억톤	TW
10	96.08	96.11	자갈	4.1억톤	TW

또한, 일본 철도총련에서 시행한 용접강도시험 결과를 본 연구에서 수행한 시험결과와 비교·분석하고자 하였으며, 일본 철도총련에서 사용한 시험레일은 JIS에서 정한 50kg N레일로 하중은 두부에서 하중을 가하는 방법을 사용했다. 한편, JR 동일본에서 제시한 레일용접부의 굴곡시험 기준표는 [표 7]과 같다.

표 7. 굴곡시험 기준표(일본)<sup>(4)</sup>

구 분	레일중량	가압방법	하중/변위	GWP	TW
신품레일	50kg/m	H.U	P(tonf)	100	85
			$\delta$ (mm)	25	10
사용레일	50kg/m	H.U	P(tonf)	75	70
			$\delta$ (mm)	25	10

시험방법은 [그림 10]에서와 같이 교체시기에 도래한 노후 레일을 현장에서 채취하여 용접부가 중앙에 위치하도록 길이 1.2m로 절단하였으며, 용접부를 중심으로 지점간의 거리를 1.0m로 하여 용접부를 가압하되 레일두부를 상면으로 놓고 정적재하시험을 하였다. 굴곡시험 시 하중은 레일두부에 재하하였으며 이때 충격하중이 작용하지 않도록(정하중시험을 만족하도록) KS 시험방법을 따랐다.

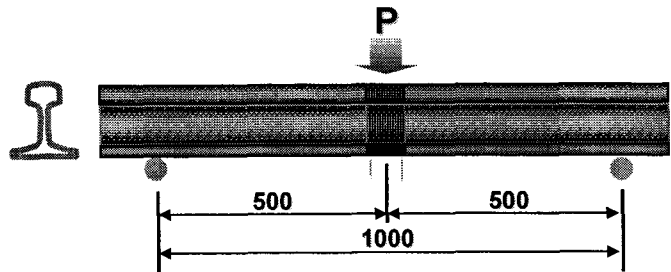


그림 10. 레일용접부 굴곡시험전경

## 6.2 실내시험 결과 및 분석

[그림 11] (a)는 노후된 50kg/m 레일의 테르미트 용접부에 대한 결과를 최대처짐량과 파단하중의 관계로 나타낸 것이며, 신규 테르미트 용접부에 대한 데이터는 기존 연구결과<sup>(5)</sup>를 인용하였다.

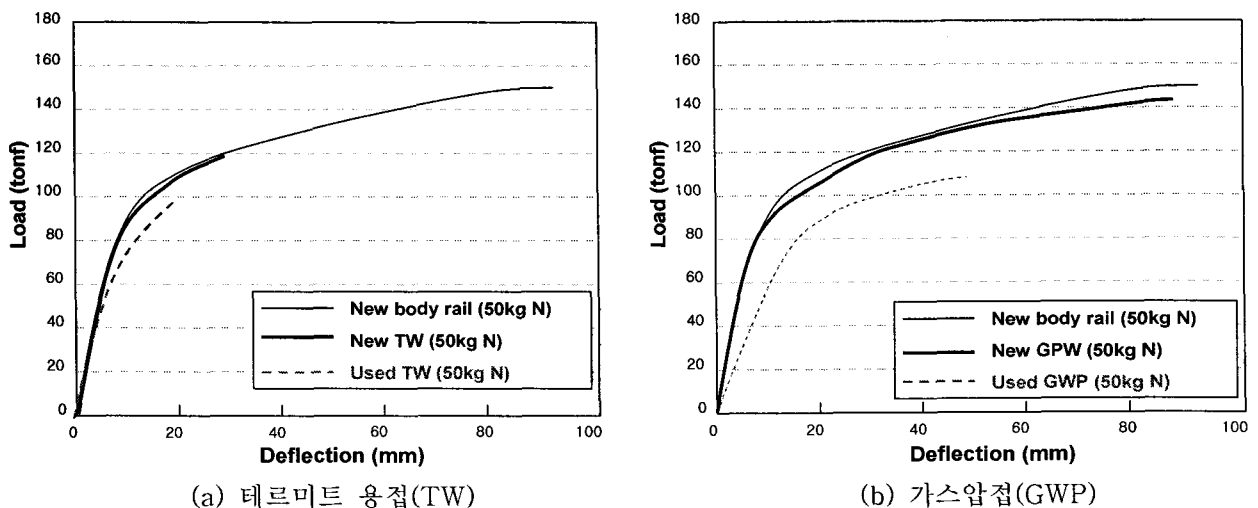


그림 11. 노후레일용접부의 굴곡시험결과(예)

신규 레일용접부(TW)의 경우는 하중 80tonf, 변위량 8.0mm까지 탄성적인 경향을 보이다가 하중 116tonf, 변위량 22mm에서 파단되었으며, 노후 레일용접부(TW)는 하중 73tonf, 변위량 7.6mm까지 탄성거동을 하다가 하중 98tonf, 변위량 23mm에서 파단되었다. 여기서 노후 레일용접부(TW)의 파괴강도는 신규 레일용접부(TW)의 파괴강도보다 약 18% 낮게 나타났다.

[그림 11] (b)는 가스압접부에 대한 굴곡시험결과이다. 여기서 신규 레일용접부(GWP)의 경우는 하중 81tonf, 변위량 8.2mm까지 탄성적인 경향을 보이다가 하중 153tonf, 변위량 86mm에서 파단되지 않았으며, 노후 레일용접부(GWP)는 하중 80tonf, 변위량 16.6mm까지 탄성거동을 하다가 하중 104tonf, 변위량 32.0mm에서 파단되었다.

[그림 12]와 [그림 13]은 테르미트 용접부와 가스압접부 시편에 대한 시험결과이며, 이를 일본에서 제시한 기준치 및 신규 레일용접부(TW)에 대한 평균치와 비교하였다. 시험결과 테르미트와 가스압접은 각각 1개의 시편만이 기준을 만족하지 못하였고, 4개의 시편은 모두 기준치를 만족하였다. 기준치를 만족하지 못한 1개의 시편은 용접 시 발생할 수 있는 결함에 의한 것으로 판단된다. [표 8]은 본 연구에서 수행한 시험결과를 국내 및 일본에서 수행한 시험결과와 비교한 내용을 정리한 표이다.

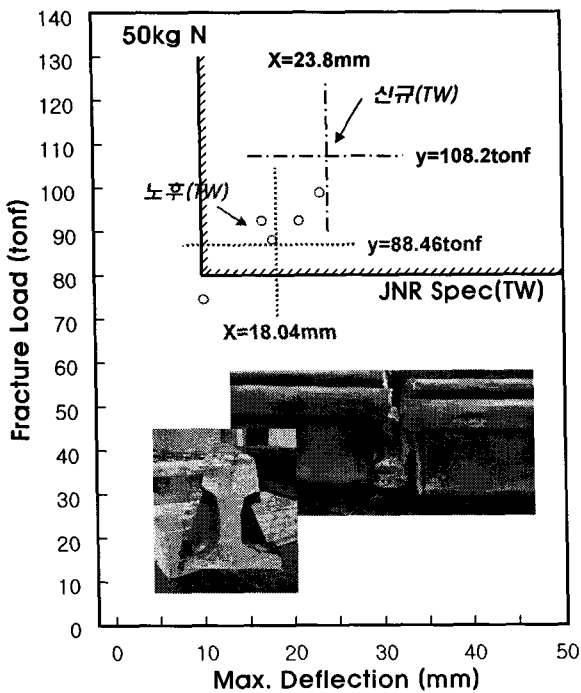


그림 12. 노후 레일용접부 굴곡시험결과(TW)

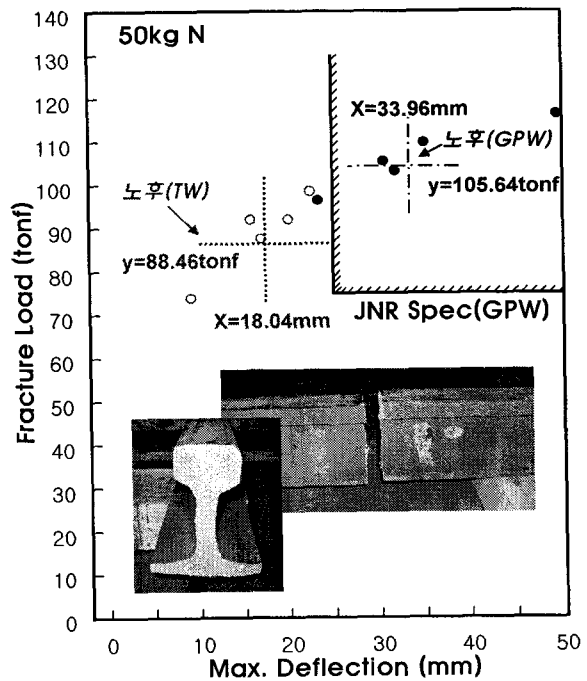


그림 13. 노후 레일용접부 굴곡시험결과(종합)

표 7. 레일용접부 굴곡시험결과 비교(종합)

	본 연구-노후		국내-신규 <sup>(5)</sup>		일본-신규 <sup>(5)</sup>	
	TW	GWP	TW	GWP	TW	GWP
P(tonf)	88.46	105.6	100.1	120.8	108.2	127
$\delta$ (mm)	18.04	33.96	12.80	27.9	23.8	55
%	81.75	83.15	92.51	95.12	100	100

본 연구에서 수행한 노후 레일용접부와 국내 기존 연구결과 분석된 신규 레일용접부의 시험결과가 일본의 시험결과와 차이가 있는 이유는 국내 레일강과 일본의 레일강의 재료적 차이 및 용접 품질의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 노후 레일용접부의 굴곡시험결과 최대 파괴하중은 신

규레일에 비해 약 17~18% 저하되었으나 시험기준을 만족하였으며, 가스압접의 경우가 테르미트 용접부의 평균 파괴강도보다 약 19% 높게 나타나 가스압접이 테르미트 용접보다 내구성이 우수한 것으로 분석되었다. 또한, 교체시기에 도달한 레일임에도 불구하고 탄성영역 및 소성영역에 도달하는 하중과 변위의 최대치가 높은 수준을 유지하고 있는 것으로 분석되었으며, 선로정비규정에 제시된 누적통과톤수에 의한 레일교체기준에 도래한 노후 레일용접부는 사용성 측면에서 충분한 내구성(load carrying capacity)을 확보하고 있는 것으로 분석되었다.

## 7. 결 론

본 연구는 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 타당성을 분석하기 위한 기초연구로써 국내·외 레일교체기준 조사, 국내·외 연구동향, 궤도유지관리이력조사 및 실내시험을 실시하였다. 이에 대한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 현재 국내에서 적용하고 있는 선로점검지침 상의 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은 과거 일본에서 화물혼용선의 레일이음매부에 대한 피로수명으로 산정된 것으로 현재 일본에서는 장대레일화 및 유지보수여건(레일연마)에 따라 레일용접부(테르미트)의 피로수명 산정을 통해 기준을 재산정(50kg-7억톤, 60kg-8억톤)하였으며, 이는 반드시 레일교체를 해야하는 기준치가 아니고 궤도정비를 위한 참고수치(목표치)로 적용하여 레일을 관리하고 있는 것으로 조사되었다.

(2) 국내·외 연구결과 레일연마를 통한 레일두부 요철제거로 레일의 사용수명 연장이 가능한 것으로 분석되었으며, 현재 국내 철도운영기관들에서는 레일연마를 실시하고 있음에도 불구하고 누적통과톤수에 의한 레일교체주기를 그대로 적용하고 있어 비합리적인 레일교체가 이루어지고 있는 것으로 분석되었다.

(3) 레일의 절손 및 손상 원인은 반복적인 피로하중에 의해서만 발생하는 것이 아니고 다양한 원인에 의해서 발생되며, 레일용접부의 경우에는 용접불량에 의한 절손 및 손상빈도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 장대레일 용접부를 기준으로 산정한 누적통과톤수에 의한 레일교체기준 산정은 비합리적인 것으로 판단되며, 레일절손 및 손상을 관리하기 위해서는 손상의 유형을 파악하여 평가등급을 구분하고 유형에 따른 적정 유지보수 방법을 선정하여 관리하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

(4) 교체시기에 도래한 노후레일의 사용성 평가를 위한 힘파괴강도시험은 일본의 신규 레일용접부와 비교하여 약 17~18% 저하된 것으로 나타났으나 일본에서 제시하는 레일굴곡시험기준치를 만족함에 따라 노후 레일용접부의 내구성은 사용성 측면에서 안전한 것으로 분석되었다.

## 후 기

본 연구는 서울메트로의 학술연구지원에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 양신추 외 2인, “레일용접부의 피로수명 예측”, 대한토목학회 논문집, 제20권 제1-D호, 2000.1. pp97~105
2. “레일수명 연장에 관해”, 일본철도시설협회지, 2002. 3
3. 이종득, “철도공학”, 노해출판사
4. 서사범, “선로공학”, 열과 알
5. 양신추, “레일용접부의 특성에 관한 연구”, 철도청, 1998

6. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track," MRT-Productions, 2001
7. Tadashi DESHIMARU, Hiroo KATAOKA, "Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail", QR of RTRI, Vol. 47, No. 4, Nov. 2006
8. 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
9. Yoshihiro TERASHITA, Mitsumasa TATSUMI, "Analysis of Damaged Rail Weld", QR of RTRI, Vol. 44, No. 2, May. 2003, pp 59~64
10. 일본 JR, "궤도정비규칙"
11. 서울메트로, 부산지하철공사, 대구지하철공사, 인천지하철공사, 대전지하철공사, "선로정비규정"
12. 서울메트로, "선로검사내규", "궤도유지관리이력"