



서사범  
한국고속철도건설공단 궤도처장/  
공학박사·철도기술사

## 레일 용접의 현상과 과제

### 1. 서론

레일의 이음매부는 상시 차륜에 의한 충격·진동이 크기 때문에 이음매판·볼트의 이완, 레일 단부의 변형·손상, 도상 자갈의 파괴·세립화의 발생 등 궤도 관리상의 취약점 개소로 되어 있다.

지금까지 이와 같은 이음매부를 줄이기 위하여 수송 밀도가 높은 주요 간선에 대하여 용접에 의한 레일의 장대화가 진행되고 있으며, 또한 구조물 주변의 보수가 곤란한 개소 및 도시 구간에서의 소음·진동 대책 뿐만 아니라 궤도 보수 작업의 경감과 열차의 고속화·승차감의 개선 등에 레일 용접이 크게 공헌하고 있다.

이와 같이 현재 철도에서는 소음·진동 및 보수비저감의 관점에서 레일 장대화가 추진되고 있으며, 레일 용접 방법으로서 4 유형의 공법이 적용되어 왔다. 구체적으로 경부 고속 철도에서는 중앙 궤도 기지의 용접 공장에서 25m 길이의 레일을 플래시 버트 용접

에 의하여 300m 길이로 만들고, 이것을 부설 현장으로 수송하여 현장에서 테르밋 용접을 한다.

이 글에서는 현재 적용되고 있는 각 용접 방법의 개요, 새로운 적용, 대표적인 용접 결합 및 이들의 결합을 검출하여 절손 사고를 방지하기 위하여 적용되고 있는 용접부의 검사 방법, 용접부 휨 피로 수명의 추정, 그리고 마지막으로 용접 작업에 있어서 앞으로의 과제에 대하여 논의한다.

### 2. 현재 적용되고 있는 레일 용접 방법

상술한 것처럼 레일의 용접에 4 유형의 용접 방법이 적용되고 있지만, 이들은 접합 원리의 차이에서 압접 방법(플래시 버트 용접, 가스 압접)과 용융 용접 방법(테르밋 용접, 엔크로즈드드 아크 용접)으로 대별할 수 있다. 압접 방법은 용접부에 다른 재료가 개입되지 않기 때문에 신뢰성이 높은 용접을 실현할 수 있으며, 반면에 용융 압접 방법은 용접 시공에 있어서 레일 이동

을 필요로 하지 않기 때문에 부설 상태에서의 용접이 가능하다. 실제, 각 용접 방법은 각각의 특성을 살리는 형으로 적용되고 있다. 이하에 각 용접 방법의 개요에 대하여 기술한다.

## 2.1 플래시 버트 용접

맞대기부에 대전류를 통전(通電)하는 것에 의하여 부재를 가열하여 단부가 용융한 시점에서 가압력을 가하여 접합하는 방법이다. 이 접합법은 용접부의 신뢰성 및 작업 효율이 높기 때문에 공장 내 용접에 최적의 용접 방법이다. 그 한편으로 용접기가 크고 대용량의 전원이 필요하기 때문에 기동성이 떨어진다.

## 2.2 가스 압접

접합하려는 레일을 맞대어서 축 방향으로 가압하고 접합부의 주위를 산소 아세틸렌 불꽃으로 가열하여 접합하는 방법이다. 플래시 버트 용접 방법에 비하여 작업 효율은 떨어지지만 기기류가 작아 기동성이 뛰어나다.

## 2.3 엔크로즈드 아크 용접

아크 용접 방법의 일종이며, 레일 복부 및 두부의 용접 시에 용접부를 수냉 동(銅) 피복 기구로 둘러싸는 것에서 이와 같이 부르고 있다. 이 방법은 용접에 있어 레일을 이동시킬 필요가 없기 때문에 장척 레일을 부설 후 접합하는 2차·용접에 적용되고 있다.

## 2.4 테르밋 용접

테르밋 용접은 접합하려는 레일 사이에 간격을 둔 후에 그 주위에 몰드(鑄型)를 조립하고 최종적으로 산화철에 대한 알루미늄의 환원 반응에 의하여 얻어지는 용

동(溶銅)을 그 안으로 흘러 보내는 것에 의하여 접합을 한다. 이 용접 방법은 사용 기구가 경량이기 때문에 기동성이 좋고 더욱이 용접 시간도 짧으므로 현지에서의 2차·3차 용접에 적용되고 있다. 그러나, 용접부가 주물인 점, 레일 저부의 덧살(余盛)이 큰 점 때문에 다른 용접 방법에 비하여 강도적으로 약간 떨어지고 있다.

## 3. 새로운 적용

### 3.1 간이 엔크로즈드 아크 용접

지방선에 대한 궤도 보수의 경감 및 소음·진동 대책에 주로 이용되는 간이한 엔크로즈드 아크 용접이 외국에서 고안되어 실시되고 있다.

엔크로즈드 아크 용접은 인력 용접이기 때문에 작업 시간이 길게 되고 후열 처리 및 마무리를 포함하여 약 180분을 필요로 한다. 이 작업 시간을 단축한 용접 방법이 간이 엔크로즈드 아크 용접이다.

이 방법은 저부 1층만을 육성하며(플랜지 부분의 육성은 생략) 레일 복부 시점부터 채움재(捨金)를 설치하고 동 블록을 설치하여 복부 및 두부는 통상의 엔크로즈드 아크 용접과 같이 용접을 하여 두부 상면 아래 15mm에서 두부까지는 용접봉 HV 320 - 4 $\phi$ 경화 육성 봉)으로 다층 용접을 하며, 후열 처리를 생략하는 방법이다.

효과는 용접 시간이 30~45분, 후열 처리의 생략과 합하면 대강 1시간을 단축할 수 있다.

그러나, 저부 1층만의 용접이기 때문에 안전을 고려하여 이음매판을 체결하면 레일 단부 및 이음매부 볼트 주변의 정성들인 탐상이 필요하다.

## 3.2 레일 용접부 육성 용접

### 3.2.1 엔크로즈드 아크 용접부의 패임 보수

열차 속도의 향상이나 열차 횟수의 증기 등에 따라 레일 용접부에는 부담이 증대하고, 용접부의 국부적 패임에 의한 소음·진동의 발생이나 레일 용접부가 파단하여 벌어짐(開口)에 이르는 예도 있다. 특히, 25년 이상 경과한 엔크로즈드 아크 용접부에는 패임이 보여지기 때문에 용접부를 아크 용접으로 시행(試行)하여 경과를 감시하고 있다.

시험 시공의 개요는 먼저 용접부를 초음파 탐상기로 내부 결함의 유무를 검사한 다음에 그라인더로 용접부를 연마하여 표면의 요철 및 표면상을 제거하고 계속하여 용접부를 500℃까지 여분의 열을 주고 동 피복 기구를 대어 패임부를 하이 카본 용접봉 H 370R - 4φ로 육성한 뒤에 마지막으로 초음파 탐상기 및 컬러 체크로 검사하여 이상의 유무를 확인한다.

이 육성 용접의 특징은 아크 용접에 의하는 점, 용접봉에 H 370R을 사용하는 점이다. H 370R - 4φ는 DHH 레일의 용접용으로서 개발한 것으로 모재와 같은 펄라이트 조직이 얻어지는 점 때문에 엔크로즈드 아크 용접부에 사용하여 양호한 경과를 얻고 있다.

### 3.2.2 레일 단부의 손상부 보수

레일 용접부의 패임 보수의 결과에 입각하여 정칙 레일 단부의 박리(spall)나 배터(rail end batter)의 보수를 레일 용접부의 패임 보수와 같은 모양의 방법으로 시행하여 양호한 경과를 얻고 있다.

### 3.2.3 공전상 육성 용접

공전상(空轉傷)의 육성도 기본적으로는 같은 방법으

로서의 육성 용접이지만, 공전상의 특징은 발생 시에 레일면 위에서 차륜이 공전하여 그 마찰열로 레일 두부 상면이 상당히 가열되어 레일을 깎아 공전상이 남아 있다고 추측되며, 그 결과 레일 두부 상면에 딱딱한(硬) 조직(마르텐사이트)이 발생하고 있다고 생각되므로 마르텐사이트의 완전한 제거와 그 하부에는 가열에서 냉각 시에 상당한 인장의 잔류 응력이 발생한 가능성도 부정하지 못하므로 그 부분에 대하여도 세심하게 주의하여 연마·제거한다.

## 3.3 레일 용접을 활용한 레일 재생 대책

지방선에서는 연속적으로 이음매부의 박리나 배터가 발생하고 있는 개소가 있고, 지방선에서는 레일 갱환도 뜻대로 되지 않는 것이 실정이다. 그래서, 지방선의 궤도 보수의 경감과 레일 갱환의 억제를 목적으로 레일 용접을 활용한 레일 재생 대책을 실시하고 있다.

하급선에서 이음매부의 박리 또는 배터는 그 대부분이 레일 단부보다 130 mm 이내에서 발생하고 있어 레일 단부보다 130 mm(한 토막 자름) 절단하면, 재생 레일로 거의 손색이 없다.

작업 구간을 궤도 연장 200m~300m 정도로 설정하여 부설 레일의 한 토막 절단 및 구멍을 뚫어 레일 절단·구멍 뚫기가 끝난 이음매부터 순차로 동력식 유간 정정기로 레일을 중 이동시켜 이음매부를 체결한다. 작업의 진행 방향은 이동량을 고려하면 작업 구간의 양단에서 중앙으로 향하여 시행한다.

당연하지만, 레일을 절단한 길이의 레일이 부족하다. 최종의 레일 이동이 끝나면 작업 구간의 중앙 이음매에 5~6m의 레일을 삽입하여 이음매부의 레일을 용접하므로 중앙부의 레일은 50m 정도의 레일로 된다.

이음매부 좌우 2개소 4개의 레일 용접과 레일의 중 이동에 의하여 작업 구간 전체 레일 갱환의 효과가 얻어지고, 더욱이 종래의 이음매부는 배터 및 박리에 의

하여 열차 통과 시의 충격이나 진동에 의한 도상의 분리나 고결이 발생하였지만, 이 작업에 의하여 이음매부의 위치가 변하여 비교적 양호한 도상 상태의 이음매로 되어 이음매부의 보수 주기가 연신된다.

이 작업법을 레일 갱환과 비교하면 작업량이 압도적으로 적고 좌우 레일의 작업을 분할 시공하면 적은 사람수로 작업이 가능하다.

이 작업에 사용하는 동력식 유간 정정기는 종래의 유압식 유간 정정기(수동식)에 비하여 스트로크가 약 850 mm로 긴 것이 특징이다. 유압 유니트와 유압 실린더를 각각 다른 대차에 탑재하여 이동이 간단한 구조로 하고 있다. 조작은 유압 유니트의 핸들 1개로 한다.

### 3.4 자동 용접 방법

용접 기술은 철강 재료에 대하여 필요 불가결한 기술이며, 철강 메이커로서도 득의(得意)로 하는 분야이다.

현장 용접에 대하여는 숙련을 요하는 부분이 많고 금후의 기술 담보의 곤란 때문에 그 자동화가 요청되고 있지만, 외국에서는 자동 용접 장치를 개발하여 궤도에서 평가하고 있다. 이 장치의 용접 원리는 현행의 4 용접 방법과는 전혀 달리, 일렉트로 슬래그(electro-slag) 용접 방법을 주체로 한 용접 방식을 채용하고 있으며, 대단히 클린(clean)한 접합이 가능하다고 하는 특징을 가지고 있다. 이 용접 장치에 중심 맞추기, 후처리 등 레일 용접 특유의 장치를 컴바인드시켜 현지 용접에 대응할 수 있는 용접 장치로서 개발되었다.

## 4. 용접 결함

용접부에 결함이라도 각 용접 방법마다 유형이 다르며 그 종류도 다종 다양하다. 그러나, 결함 형태로서는 압접 방법(플래시 버트 용접, 가스 압접)에 특유한 것,

용융 용접 방법(테르밋 용접, 엔크로즈드 아크 용접)에 특유한 것으로 대별할 수 있다.

압접 방법에서의 용접부 결함은 그 대부분이 접합 계면에 잔존하는 산화 개재물에 기인하여 생기는 일종의 접합 불량이다. 한편, 용융 용접 방법에서 용접 결함의 대표적인 것으로서는 용접 금속과 모재와의 융합이 불안정하기 때문에 생기는 융합 불량, 냉각 도중의 모재 및 모재 및 용접 금속의 연성이 낮은 때에 수축 압력에 의하여 발생하는 고온 균열(응고 균열, 액화 균열)이 열거된다.

용접 방법별의 절손 수에 대하여는 지금까지의 절손 사례를 보아도 역시 용접 특성상 테르밋 용접이 가장 많고 엔크로즈드 아크 용접이 이 뒤를 잇고 있다.

레일 본드에 기인하는 절손 사고가 발생하고 있으며, 용접 작업에 있어 레일 본드의 악영향에 대하여도 인식되고 있지만, 레일 본드 부착 레일의 관리 관리의 철저 및 용접 시공전의 보다 신중한 체크가 요망된다.

## 5. 용접부의 검사 방법

용접 시공 직후 용접부의 검사 방법으로서의 압접 방법에 의한 용접부에 대하여는 자분 탐상 검사법이, 용융 용접 방법에 대하여는 침투 탐상 검사 및 초음파 탐상 검사에 의하고 있다. 여기에서는 대표적인 검사법인 자분 탐상 검사법과 초음파 탐상 검사법의 개요를 설명한다.

### 5.1 자분 탐상 검사

압접 방법에 의한 접합부에 있어 절손을 일으키는 결함의 대부분은 레일 표면에 선 모양의 흠(傷)으로서 존재하고 있다. 따라서, 종래부터 표면 근방의 선 모양의 흠 결함 검출에 효과적인 자분 탐상 검사가 플래시

버트 용접부 및 가스 압접 방법의 마무리 검사법으로서 적용되어 왔다. 자분 탐상 검사의 결함 검출 원리는 다음과 같다.

표면 또는 표면 근방에 결함이 있는 시험체를 자화하면 이 결함 부위에서 자속이 누설한다. 그리고, 자속이 누설한 부위에는 N극과 S극이 생겨 국부적인 자석이 형성되고 자분을 살포하면 이 결함 부위에 흡착된다. 최종적으로 이것을 관찰하는 것으로 결함의 검출이 가능하게 된다.

## 5.2 초음파 탐상 검사

용융 용접부는 특성상 결함의 발생률이 높고 또한 절손 사고의 요인으로 되는 결함은 그 대부분이 내부 결함으로서 존재하고 있다. 그래서 용접 시공 후의 마무리 검사로 이들의 결함을 검출하여 절손 사고를 미연에 방지하기 위하여 초음파 탐상 검사를 한다.

절손된 테르밋 용접부의 경우에 그 대부분이 레일 저부 영역에 존재한 조대한 용접 결함에서 급속 파단에 이르는 것에서 저부 측면에서의 2 탐촉자법을 신중히 할 필요가 있다. 한편, 엔크로즈드 아크 용접부의 경우에 절손된 용접부는 그 대부분이 피로 절손이며 그 중에서도 레일 두부 상면에서의 피로 절손이 전체의 약 70%를 점하고 있다. 따라서, 레일 두부 영역은 특히 유의하여 탐상할 필요가 있다.

## 6. 용접부 휨 피로 수명의 추정

### 6.1 레일 갱환 원인

사용중인 레일 갱환의 주된 손상 형태를 후천적 원인으로 분류하면 표에 나타난 것과 같으며, 웨어링 등의 전동 접촉 피로에 의한 레일 두부 상면 손상, 곡선 구

간에서의 마모 외에 레일 이음매부의 파단이나, 용접부의 횡열 등의 피로 손상을 방지하기 위하여 통과 톤수에 기초한 갱환의 기준도 정해져 있다.

〈표 1〉 주된 레일 손상 형태

| 부위   | 원인 | 손상 형태                       |
|------|----|-----------------------------|
| 두부   | 피로 | 횡열, 웨어링, 두부 체크(head checks) |
|      | 마모 | 곡선부의 측면 마모, 파상 마모, 공전상      |
| 이음매부 | 피로 | 파단                          |
|      | 마모 | 배터                          |
| 용접부  | 피로 | 휨 피로 손상, 횡열, 두부 상면 손상       |
|      | 부식 | 터널 내의 부식, 직류 구간에서의 전식       |
|      | 기타 | 초기 손상, 개재물                  |

## 6.2 레일 용접부 요철

레일 용접 방법에는 상기에 설명한 것처럼 4가지 용접이 있다. 골트 사미트는 테르밋 용접이지만 종래법과 구별하기 위하여 상표로 부르는 경우도 있다. 주된 용접 방법에 의한 레일 두부 상면의 패임 형상은 플래시 버트 용접부와 가스 압접부가 W형이며, 엔크로즈드 아크 용접부가 V형이다. 패임의 성장하는 속도는 용접 방법에 따라 다르지만 플래시 버트 용접이 가장 적고, 다음에 가스압접, 엔크로즈드 아크 용접, 골드 사미트 용접의 순이다.

이들 용접부 근방의 패임은 용접 시의 열의 영향에 따라 레일 연화부의 생성 및 용접 금속이 레일 모재부보다 경도가 낮은 등의 원인으로 누적 통과 톤수와 함께 발생한 것이다.

## 6.3 궤도의 동적 응답 시뮬레이션 방법

레일 용접부의 수명은 레일 저부에서 발생하는 휨 응력과 통과 열차의 축수에 의한 반복 횟수를 용접부의 S-N 곡선과 조합하여 구한다. 그 때문에 레일 용접부의 요철에 기인하는 운중 및 레일 휨 응력의 크기는 가장 중요한 인자이며 이들의 관계를 밝히는 것이 중

요하다. 여기서 S - N 곡선은 실험 레일 용접부에 대하여 반복 시험을 실시한 경우에 발생하는 응력과 파괴까지의 반복 횟수를 주는 그래프이다.

레일 용접부의 요철과 윤중 변동의 관계는 현지 측정과 시뮬레이션에 의하여 밝혀지고 있다. 지금까지 윤중 변동 시뮬레이션 모델로서 레일의 유효 질량을 이용한 질점계 모델을 고려하여 왔다. 연속 보로 한 모델을 이용하여 레일 용접부 요철에 기인하는 고주파 영역의 윤중 변동 해석의 정밀도를 향상시키고 있다.

#### 6.4 용접부 수명 해석

레일 용접부의 수명은 각 용접 방법의 S - N 곡선과 현지에서의 레일 휨 응력의 발생 빈도 분포에서 누적 손상 법칙인 수정 마이너 법칙을 이용하여 다음 식을 만족하는 m을 구하는 것으로 된다.

$$t = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n K_{ij} \int_{\sigma_{ij}}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{n_{ij}(s)} ds + \sum_{i=p+1}^p \sum_{j=1}^n K_{ij} \int_{\sigma_{ij}}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{n_{ij}(s)} ds \quad (1)$$

- 여기서,  $f_{ij}(s)$  : 레일 응력의 분포 함수
- $n_{ij}(s)$  : S - N선 위에서 반복 수를 주는 함수
- $K_{ij}$  : 각  $f_{ij}(s)$ 의 횟수
- $j$  : 레일 휨 응력을 주는 차종 수
- $i$  : 누적 통과 톤수를 주는 계산 기간
- $p$  : 계산 시점까지의 기간

이다.

레일 용접부의 수명을 예측하는 경우에 레일의 평균 응력으로서 작용하는 레일 축력의 응력을 부가하기에는 실험 값으로 구한 S - N 곡선을 레일 축력에 의하여 발생하는 응력에 대응한 S - N 곡선으로 보정할 필요가 있다. 여기서, 편진의 최소 응력을  $\sigma_{\min}$ 으로서 실시한 실험에 의하여 얻어진 S - N 곡선을 (2)식으로 하고, 축력에 의한 응력을  $\sigma_i$  및 파괴에 이르는 횟수를 N으

로서 (2)식을 내구 한도 선도에 의하여 보정하여 보정 후의 응력 전진폭을 S'로 하여 (3)식으로 구한다.

$$S = a - b \log_{10} N \quad (2)$$

$$S' = \frac{\sigma_i - \sigma_{\min}}{\sigma_i - \sigma_{\min}} (a - b \log_{10} N) \quad (3)$$

여기서, a, b는 정수이며,  $\sigma_i$ 는 진파단 강도이다.

#### 7. 레일 용접 작업에 대한 앞으로의 과제

레일 용접 시공 시스템 전체를 통한 문제점을 고려하면, 용접 시공 및 마무리 작업의 자동화 문제가 부상하고 있다. 용접 시공의 자동화에 대하여는 플래시 버트 용접 이외 대부분 실용화되어 있지 않은 것이 실상이지만, 이것은 용접부 품질의 균질화의 관점에서 보아 좋은 것이 아니다. 특히, 용융 용접 방법에 의한 용접부는 그 특성상 인적 요소가 개입하기 쉬우므로 시공 미스가 결함 발생에 연결될 가능성이 높다. 따라서, 용융 용접 방법의 기계화·자동화, 혹은 인적 요소가 개입되지 않는 용접 방법의 개발·실용화가 앞으로의 과제의 하나이다.

한편, 마무리 작업에 대하여는 작업자의 고령화 및 과대한 부담이기 때문에 자동 기계로의 전환이 요망되고 있지만, 현지 작업이기 때문에 장치 중량 및 작업 시간에 제약이 있어 아직도 실용화되지 않고 있다. 따라서, 열차의 속도 향상이 이루어지고 있는 오늘날에는 용접 형상의 마무리 기준에의 요구도 점점 엄격해지게 되어 그 요구를 만족하기에는 현재의 인력에 의한 연삭으로는 대응할 수 없는 레벨로 되어 가는 중이다. 이와 같은 관점에서 보면 마무리 작업의 자동화를 가장 중요한 과제로서 내세울 날도 멀지 않다고 생각된다.

## 8. 맺는 말

근년에 레일 용접 기술이 진보하고 있다. 근래에는 용접 시공 후의 용접부 검사를 확실히 행하여 절손 사고의 발생률을 저감시키려고 하는 고려 방법이 관리 측·시공 측 쌍방에 침투되어 왔다.

레일 용접 작업은 고속 철도의 경우에 전문직의 궤도 기지 용접 공장 직원, 또는 전문의 업자에 의하여 시공되어 왔지만, 전문가이기 때문에 선로의 보수에 대한 지식이 충분하지 않다고 하는 면이 있고, 한편 선로관리사무소에서는 용접의 지식이 충분하지 않은 면이 있으며, 용접 방법의 선택이나 용접 시의 유의 점 등등에 대하여 고심하는 개소도 있다. 앞으로는 의견 교환 회의 등에 의하여 서로 이해를 깊게 하고, 더욱 많은 새로운 작업 방법 등을 고안하는 일이 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] 서사범 : 철도공학의 이해(Railway Engineering), 도서 출판 (주) 열과 알, 2000. 4.
- [2] 서사범 : 선로공학(線路工學) 개정판, 도서 출판 (주) 열과 알, 2002. 2.
- [3] 서사범 : 궤도 장비와 선로 관리(Mechanized Track Maintenance), 도서 출판 (주) 열과 알, 2000. 12.
- [4] 徐士範 : 軌道施工學 개정판, 도서 출판 (주) 열과 알, 2001. 3.
- [5] 徐士範, “플래시 버트 鎔接의 原理와 技術의 發達”, 鐵道施設 No. 67, 68, 1998. 3, 6.