

## ERW Simulator를 이용한 고주파 전기저항 용접부의 품질 특성

김충명 · 김용석

## Characteristics of Weld Quality Produced by the High Frequency Electric Resistance Welding Simulator

Choong-Myeong Kim and Yong-Seok Kim

## 1. 서 론

고주파 전기 저항 용접법(High Frequency Electric Resistance Welding)은 통전점에 고주파 교류를 직접 통전 시키거나, 유도 코일(induction coil)에 의해 발생한 고주파 유도 교류를 원형으로 성형된 대강(skelp)에 인가하여 대강 에지(edge) 표면만을 가열, 용융시킨 후 용접점에 존재하는 압착롤(squeeze roll)의 압착력으로 양 대강을 접합시키는 용접법이다. 이를 모식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

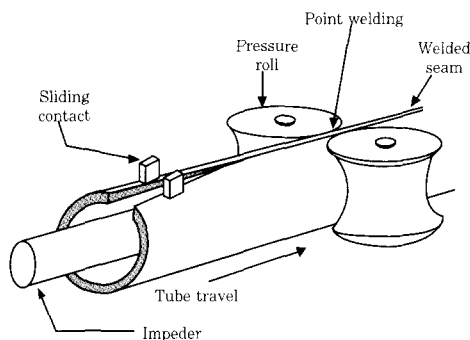


Fig.1 Schematics of HF ERW process used in producing steel pipes.

이 용접법은 대강 에지 표면에 흐른 고주파 전류의 표피 효과(skin effect)와 두 도체 사이에 반대 방향으로 흐르는 전류사이에 작용하는 인력으로 인해 발생하는 근접 효과(proximity effect)로 인해 대강 단면만을 효율적으로 용융 시키는 것이 가능하기 때문에 대략 10~200 m/min의 빠른 용접 속도로 용접이 가능하다. 그리고 용융 대강에 작용하는 전자기적 척력(electromagnetic repulsive force)과 압착 롤의 압착력에 의

해 용융 금속이 대강 에지 단면으로부터 대강 에지 표면으로 배출되기 때문에 고상 상태 접합(solid state welding)과 유사한 용접부의 조직을 갖게 되며 별도의 차폐 가스(shielding gas) 없이도 용접부의 자체 청정(self cleaning) 효과를 얻을 수 있어 용접부의 결함 발생 빈도가 상대적으로 작은 용접법이다.

이와 같은 용접법은 직경이 1/2~26인치 범위의 용접 강관을 제조하는데 주로 사용되고 있는데, 일반 배관용 강관을 비롯하여, 우수한 품질이 요구되는 기계 구조용, 유정용, 라인 파이프용 강관 등을 제조하는데 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 강관의 품질은 대부분 용접부의 특성에 의하여 주로 좌우되는 데에 비하여, 이에 대한 체계적인 연구는 다른 용접 방법에 비하여 상당히 미흡한 상태이다. 고주파 전기 저항 용접부의 품질에 영향을 미치는 주요 변수로는 용접 입열 속도, 대강의 비금속 개재물, 화학 성분 및 두께, 압착 롤에서는 압착력, 용접 분위기, Vee 각도 등이 있다. 실제 강관을 제조하는데 있어서 이러한 각종 용접 변수는 현재 산업 현장에서 작업자의 경험에 의하여 설정되고 있는 상황이다. 즉 용접부 불빛의 밝기, 비드 형상등을 관찰하여 작업자 개인의 판단에 의존하여 용접 조건이 설정되기 때문에, 고주파 전기 저항 용접법이 우수한 용접부의 품질을 획득할 수 있는 용접법임에도 불구하고 불량률이 상대적으로 높아지고 생산성을 저하시키는 요인으로 작용하고 있다.

고주파 전기 저항 용접법이 강관 제조 산업에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하고 있음에도 불구하고, 이 기술에 대한 연구가 미흡했던 이유를 들면 아래의 몇 가지가 있다. 첫째, 강관 제조 라인에서 본 용접의 기본 현상에 대한 연구가 실질적으로 매우 곤란하다는 것이다. 즉 강관 제조 라인은 제조되는 강관 특성에 따라서 변경 시킬 수 있는 용접 변수의 범위가 매우 제한적이

기 때문에, 용접 현상에 대한 기초적인 연구가 곤란하다. 둘째로는 현장 제조 라인에서 시험을 실시할 경우, 용접 시험에 요구되는 재료 비용이 매우 크다는 점이다. 예를 들면 20인치 외경을 제조하는 강관 제조 라인에서 실험을 실시할 경우, 폭이 160cm인 대강 코일을 이용하여 시험을 실시하여야 하기 때문에 원재료의 소모량이 매우 커서 실험 비용이 증대된다. 마지막으로 고주파 전기 저항 용접법의 용접 속도가 20~200m/min 정도로 매우 빠르다는 점이다. 용접 속도가 매우 빠르기 때문에, 용접 현상을 연구하기 위해서는 용접 조건이 제어된 시험 조건에서 시험이 이루어져야 하는데, 현장 제조 라인에서는 이러한 조건을 일정하게 유지하기 곤란한 단점이 있다. 이와 같은 원인들 이외에도, 성형 조건의 불균일, 각종 계측기의 설치가 곤란한 점 등 생산 라인에서 시험이 곤란한 여러 이유들이 있다. 따라서 이러한 근본적인 문제점을 해결하기 위해서 포항종합제철주식회사에서는 고주파 전기 저항 현상을 모사할 수 있는 모사 용접 장치(ERW simulator)를 설치하여, 고주파 전기 저항 용접 현상에 대한 과학적인 이해를 증진시키고, 이를 기반으로 용접부 품질이 우수한 용접 강관을 제조하기 위한 기초 지식을 확보하고자 하였다. 따라서 본 논문에서는 이러한 고주파 모사 장치의 특성과 이를 이용하여 얻어진 몇 가지의 연구 결과를 소개하여, 향후 이 장치가 강관의 용접 품질을 향상시키는데 적극 활용되도록 하고자 한다.

## 2. ERW simulator의 제원

포항종합제철주식회사에 설치되어 있는 ERW Simulator는 Fig. 2와 같은데, 이 장치는 폭이 100mm인 대강 코일을 맞대기 용접 방법으로 고주파 전기 저항 용접을 실시하도록 설계되어 있다. 이 장치는 왼쪽으로부터, 대강을 공급하는 장치인 언코일러(uncoiler) 부분, 대강의 예지 요철 및 산화물을 제거하는 예지 트리머(edge trimmer) 부분, 대강 용접시 Vee 각도, tilting 각도를 조절하는 심가이드(seam guide) 부분, 용접 전류가 인가되고, 압접이 이루어지는 스퀴즈롤 스탠드 부분, 용접부를 수냉시키는 냉각대 및 시편 절단기로 구성되어 있다. 본 장치의 총 길이는 42m이다.

이중에서 실험 장치의 가장 중요한 부분인 심가이드 부분과 스퀴즈롤 스탠드 부분을 모식적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 평행하게 진입하는 두개의 대강을 심가이드롤과 핀롤을 이용하여 대강의 예지들이 이루는 각도인 Vee 각도를 조절하고, 이동되고 있는 대강의

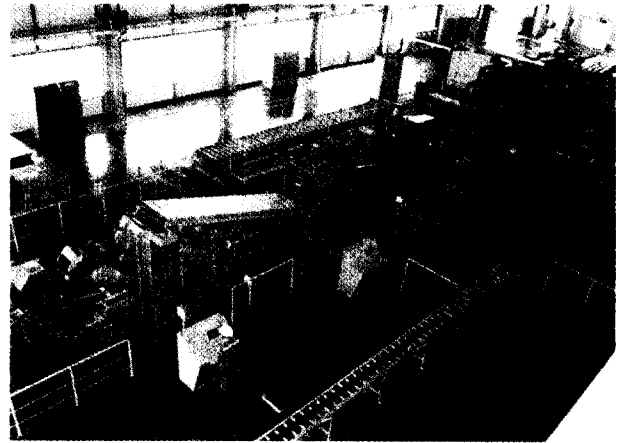


Fig. 2 ERW simulator at POSCO

표면에 슬라이딩(sliding)되는 콘택트 팁(contact tip)을 통하여 용접 전류를 대강에 인가하게 된다. 인가된 용접 전류에 의하여 전기 저항 열이 발생하여 대강 예지가 적절하게 용융되면, 스퀴즈롤 스탠드에서 가압력을 인가하여 압접이 이루어지는 과정이다.

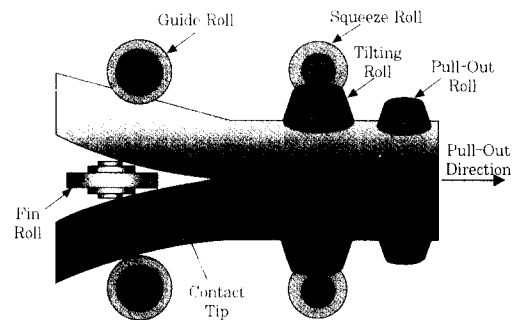


Fig. 3 Schematic illustration of seam guide and squeeze roll stands of ERW Simulator.

ERW Simulator에서 변화시킬 수 있는 공정 변수의 범위를 Table 1에 나타내었다. 대강 두께는 1.5mm에서 16mm까지 변화시킬 수 있도록 설계하여, 현재 제조되고 있는 용접 강관의 두께를 거의 모두 실험할 수 있도록 하였다. 이중 두께가 10mm 이상인 후판재는 코일 형태로 슬리팅(slitting)하는 것이 곤란하기 때문에, 길이가 10m인 판재로 절단하여 사용하여 용접을 실시하도록 하였다. 고주파 전류의 용접 주파수가 용접부의 품질 특성에 영향을 미치는 요인을 연구할 수 있도록 하기 위해서 용접 주파수는 150에서 350kHz까지 가변토록 설계된 고주파 용접기를 구비하였으며, 최대 용접 출력은 475 kW이다. 용접 속도는 최대 40m/min까지 가능하나, 두께가 10mm이상인 대강은 최대 속도가 20m/min이다.

이와 같은 기초 장비 이외에 고주파 전기 저항 용접

현상을 관찰하기 위한 기본 실험 장치들도 설치되어 있다. 먼저 대강 용접부의 용융 현상을 관찰할 수 있는 최대 촬영 속도가 2,000pps(picture per second)인 고속도 비디오 카메라가 스퀘즈를 스탠드 상단에 장착되어 있어, 용접 현상을 온라인에서 관찰하고, 이를 전송이 가능한 컴퓨터 파일로 변환시킬 수 있는 소프트웨어가 구비되어 있어 용접 현상을 컴퓨터상에서 정량적으로 분석하는 것이 가능하도록 하였다. 한편 고주파 전기 저항 용접법에서 발진 주파수의 변화는 용접 현상에 중요한 정보를 제공하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 ERW simulator에는 발진 주파수를 측정하고, 실시간으로 분석할 수 있는 장치 및 소프트웨어가 설치되어 있어, 용접 현상을 실시간으로 분석할 수 있도록 하였다. 이외에도 각종 용접 변수 예를 들면 용접 입열 속도, 용접 속도, 용접 온도, 용접 압착력 등을 실시간으로 모니터링하고 이를 컴퓨터 파일로 저장할 수 있는 computer data acquisition system이 설치되어 있다.

Table 1 Specifications of ERW simulator.

변수	범위	비고
대강 두께 (mm)	coil type : 1.5~10 bar type : 10 ~ 16	10mm 이상의 대강은 코일대신 판재 사용
대강 폭 (mm)	80, 90, 100	폭별 사용률 변경
Vee 각도	2~8°	
Tilting 각도	- 5~10°	강관 직경변화의 원주 접촉각 재현
용접 주파수(kHz)	150~350	
최대 용접 파워(kW)	475	Nominal power
용접 속도(m/min)	4~40	대강 두께 10mm 이상은 최대 속도 20m/min

### 3. ERW simulator의 용접 특성

ERW Simulator를 이용하여 고주파 전기 저항 용접에 대한 연구를 수행할 수 있기 위해서는 이 장치가 강관 제조 라인의 고주파 전기 저항 용접의 특징적인 용접 현상을 동일하게 재현할 수 있어야 할 것이다. 이러한 특징적인 용접 현상으로는 먼저 고주파 전기 저항 용접의 특징적인 용접부 용융 현상이 재현되어야 할 것이다. 둘째 고주파 전기 저항 용접시 대강 예지간에 발생하는 플래쉬(flashing)가 용접 결합의 발생 원인으로 주목되고 있다. 이러한 플래쉬 발생은 대강 예지간에 용융 금속에 의한 가교를 발생시키는 것으로 보고되고 있는데, 이와 같은 특징적인 용접 현상이 관찰되어

야 할 것이다. 셋째로는 고주파 전기 저항 용접시 용접부의 특징적인 마크로 조직인 메탈 플로우라인(metal flow line)이 형성되어야 할 것이다. 이러한 메탈 플로우라인은 압접시 용접부에 게재되어 있는 산화물을 용접부 밖으로 배출시키기 때문에 매우 중요한 현상이다.

#### 3.1 ERW simulator에 있어서 용융 현상

Fig. 4는 실제 강관 제조라인에서 고주파 전기 저항 용접시 용접 입열을 변화시킴에 따라서 나타나는 용접점 부근의 대강 용융 현상(Fig. 4-(a))과 ERW simulator를 이용하여 용접시 대강의 용융 현상(Fig. 4-(b))을 비교하여 나타낸 그림이다. 본 사진은 Fig. 3에 모식적으로 나타낸 대강의 상부에서 관찰한 것으로서, 용융된 금속이 용접점 이전에 대강 예지 밖으로 배출되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 산화물과 불순물을 포함하고 있는 용융 금속이 대강이 접촉하는 용접점 이전에 대강 예지밖으로 배출되는 현상은 고주파 전기 저항 용접법의 매우 중요한 현상이다. 즉 대강 예지가 용융되고, 이들 사이에 작용하는 전자기력에 의하여 용융된 금속이 외부로 배출되기 때문에, 대강 예지의 가공 상태나 청결 상태가 좋지 못한 경우에도 우수한 용접 품질을 얻을 수 있는 기초 조건을 제공하는 것이다. 고주파 전기 저항 용접은 대기 분위기에서 실시되는 것이 일반적인데, 이와 같은 용융 금속의 배출 현상은 가열할 때 발생하는 산화물을 용접부로부터 제거하기 때문에, 우수한 용접 특성을 얻을 수 있는 원인이 된다.

Fig. 4-(a)에서 보면 용접 입열량이 증가함에 따라, 용융되는 길이가 증가하고, 용융되어 대강 예지 외부로 배출된 용융 금속의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 중간 입열 속도 범위에서 보면 용접점에 도달하기 전에 양 대강의 간격이 거의 일정하게 유지되는 부분이 형성되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이를 narrow gap이라고 부르며, 이는 고주파 전기 저항 용접 특성에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 narrow gap의 형성은 대강이 근접시에 발생하는 근접 효과 및 전자기력의 척력에 의하여 발생하는 것인데, 용접 입열 속도가 증가함에 따라서 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 용접 현상들을 고속 카메라를 이용하여 1,000 pps로 촬영한 사진이다.

ERW simulator를 이용하여 용접 되는 부분의 용접 현상도 실제 조관라인에서 얻어진 용융 현상과 유사하게 나타나는 것을 Fig. 4-(b)에서 볼 수 있다. 그림에서 보면, 용접 입열이 증가함에 따라서 대강이 용융 정도가 증가하고, 고주파 전기 저항 용접의 가장 중요한 현상중의 하나인 narrow gap이 형성되는 것을 볼 수

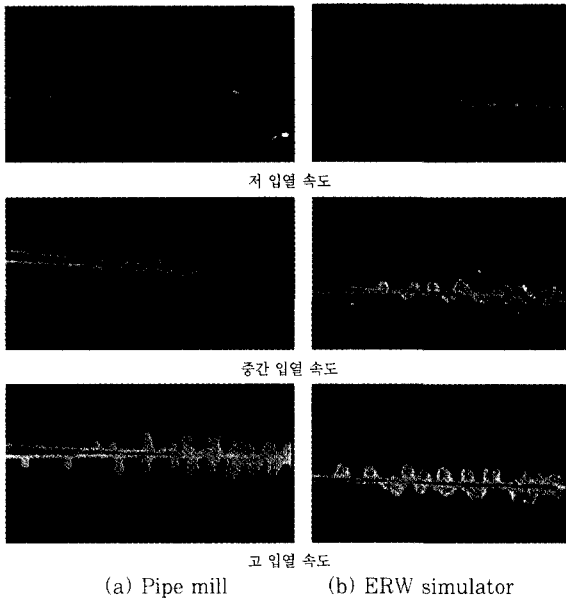


Fig. 4 High speed cinematography of welding phenomena of HF ERW process. (a) welding on pipe mill and (b) welding on ERW simulator.

있다. 따라서 이러한 현상으로부터 판재를 이용하여 고주파 전기 저항 용접을 실시하는 ERW simulator의 용융 현상이 실제 조관 라인의 용융 현상과 유사한 것을 알 수 있다.

### 3.2 용접부의 마크로 조직

고주파 전기 저항 용접은 근본적으로 고주파 전류에 의한 전기 저항 가열, 전자기력에 의한 용융 금속의 배출에 따른 스퀴즈롤 스탠드에서의 압접 (forge welding)을 통하여 이루어 진다. 압접이 적절하게 이루어지기 위해서는 스퀴즈롤 스탠드에서 압력이 적절하게 대강에 인가되어야 하고, 고주파 전류에 의하여 가열된 금속이 가압력으로 변형되어, 외부로 배출되는 현상을 나타내어야 한다. 이러한 특징적인 조직이 Fig. 5(a)에 나타낸 조직이다. 이 사진은 실제 조관라인에서 용접된 튜브를 절단하여 피크린 산으로 에칭하여 관찰한 마크로 조직이다. 그림에서 볼 수 있듯이 용접선 (bond line) 주위로 가열된 부분이 모래 시계 (hour glass)의 외관 형태로 가열된 것을 볼 수 있고, 가압력에 의하여 대강 단면의 상하 방향으로 금속 유동 라인이 발생한 것을 볼 수 있다. 이와 같이 형성된 비드의 상면 및 하면 부위에는 용융된 금속이 가압력에 의하여 배출되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5-(b)는 ERW Simulator에서 용접된 시편의 단면 마크로 사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모래 시계 형태의 가열 부위가 존재하는 것을 볼 수 있고, 가열

된 금속이 가압력에 의하여 유동 패턴이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이때 형성된 유동 패턴의 각도는 가압력의 크기에 의하여 결정되는데, 대개의 경우 일반 강관 제조라인에서 작업 조건으로 적용하고 있는 적정 각도는 60도 정도인데, 본 ERW simulator에서 형성된 각도는 60도 정도로 측정되었다. 한편 이들 두 시편의 메탈 플로우 라인이 실제 조관라인의 경우에는 상하가 비 대칭인데 비하여 ERW simulator의 경우는 상하 대칭인 것을 알 수 있다. 이것은 실제 조관라인의 경우에는 튜브 형태로 성형된 강대를 용접시키는 데에 비하여, ERW simulator는 강대를 용접하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

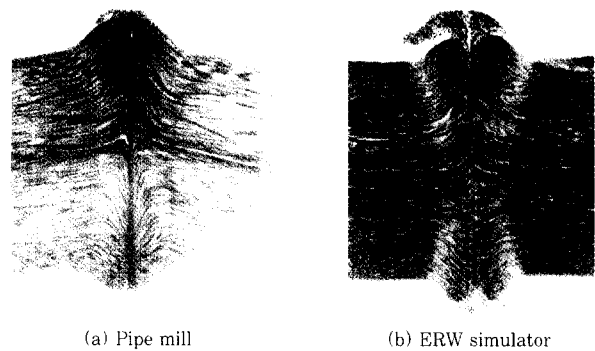


Fig. 5 Macrostructure of weldment of HF ERW process on (a) pipe mill and (b) ERW simulator.

### 3.3 고주파 전기 저항 용접시 flashing 현상

고주파 전기 저항 용접에서 용접 결함의 발생은 대강에지 단면의 용융 금속의 배출 현상, apex point에서 발생하는 flashing현상과 가교(bridge)의 이동 현상 등에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 현상이 ERW simulator에서도 재현되는 것이 매우 중요하다. 이와 같이 flashing이 발생하는 것은 apex point에서 양 대강이 기하학적으로 가장 가까운 부분이기 때문이며, 양 대강에는 큰 고주파 교류가 흐르고 대강 사이의 간격이 대략 1mm 내외로 매우 가까운 거리이기 때문에 양 대강 사이가 순간적으로 방전되어 flashing이 발생하는 것이다. 이러한 flashing 현상은 용접부에 흐르는 전류의 경로를 변화시킴과 동시에 양 대강의 용융 금속을 배출시키던 전자기적 척력을 순간적으로 감소시키기 때문에 이 부분에 용융 금속의 가교를 형성시키게 된다.

Fig. 6(a)는 실제 조관 라인에서 관찰되는 flashing 현상을 1,000pps의 고속 카메라를 이용하여 관찰된 것이다. 이러한 flashing 현상은 용접 입열 속도에 따

라서 일정 주기를 가지고 발생하는 것이 관찰되었다. Fig. 6(b)는 ERW simulator에서 관찰된 flashing 현상으로, 실제 조관라인의 flashing현상과 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있고, 용접 입열에 따라서 실제 조관라인과 유사한 거동을 하는 것이 관찰되었다. 한편 ERW simulator의 경우에는 사진의 촬영 속도가 1,000pps로서 느리기 때문에, flashing이 fuzzy하게 나타난다.

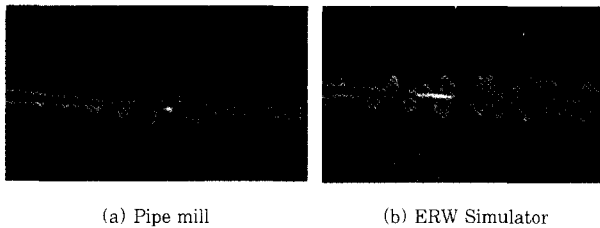


Fig. 6 Flashing near apex point (a) on pipe mill and (b) on ERW simulator.

Fig. 6(b)에서 보면, flashing이 발생한 오른쪽 부분을 살펴보면, 양 대강 에지 사이에 용융된 금속 가교가 형성되어 용접점 쪽으로 이동하는 현상이 조관 라인에서와 마찬가지로 관찰되었다. 이들 가교의 이동 속도는 용접 입열량이 증가함에 따라 대략 350m/min 정도까지 증가하였다가 160m/min 정도까지 감소하는 거동을 나타내었다.

이와 같은 용접 현상을 관찰하여 ERW simulator에서 관찰하여 본 결과, 본 장치가 고주파 전기 저항 현상을 모사하는데 적절하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. ERW simulator를 이용한 고주파 용접 실험

##### 4.1 방사선 투과 시험에 의한 고주파 전기 저항 용접부의 관찰

고주파 전기 저항 용접부는 용융 접합 선(bond line)이 수백 마이크로론으로 매우 얇기 때문에, 용접 결함의 발생 빈도를 비파괴적인 수단에 의하여 통계적으로 의미 있는 데이터로 얻기가 매우 곤란한 문제점이 있다. 본 연구에 있어서는 용접 결함을 검출하기 위한 방법으로 방사선 투과 시험법에 의하여 고주파 전기 저항 용접부의 용접 결함을 검출하기 위한 실험을 실시하였다. 즉 용접된 시편을 Fig. 7과 같이 가공하여 용접면에 수직인 측면 방향(1)과 용접면상의 위 방향(2)으로 시편을 두 방향으로 관찰하였다. 용접면의 측면 방향에서 시편을 검사할 경우, 용접 결함이 2차원적인 형상을 하고 있기 때문에, 그의 면적을 관찰할 수 있다는 장점이

있다. 그러나, 방사선 투과 시험법으로는 용접 결함이 검출되지 않았는데, 이것은 결함의 두께가 대부분 수십에서 수백 마이크로론 정도로 얇기 때문으로 판단된다. 방사선 투과 시험의 용접 결함 분해능이 0.1mm 정도로 알려져 있으나, 실제로는 1mm정도이기 때문에 발생하는 현상으로 생각된다.

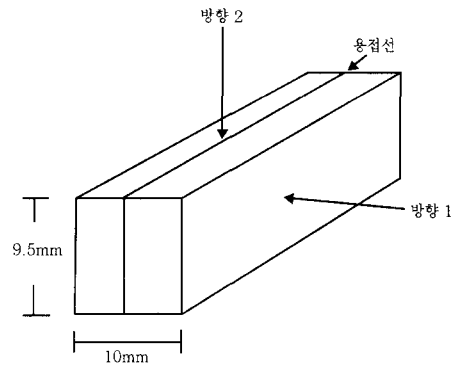


Fig. 7 Schematics of sample prepared for X-ray transmission test.

이에 비하여 용접부를 용접 선에 수직인 방향(2)로 관찰한 결과, Fig. 8과 같이 용접 결함이 검출되는 것이 확인되었다. 즉 침입 결함의 대부분이 두께 방향으로 수mm 이상으로 두껍기 때문에, 방사선 투과 시험에 의하여 검출되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 시편의 상하면에 발생된 비드를 기계적으로 절삭하여 제거하고, 이를 연마한 후, 용접부 결함을 방사선 투과 방법으로 (2)번 방향에서 관찰하여 용접 결함의 발생 빈도를 측정하였다.



Fig. 8 Weld defect detected during the X-ray transmission test.

##### 4.2 용접 입열 속도가 용접 결함의 발생 빈도에 미치는 영향

고주파 전기 저항 용접법으로 제조된 강관의 용접부의 용접 결함에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 용접 입열 속도로 알려져 있다. 기존의 연구 결과에 의하면 용접 결함의 발생 빈도는 용접 입열량에 대하여 U자형 커브를 나타내어 용접 결함의 발생 빈도가 가장 낮은 용접 입열량이 존재하는 것으로 알려져 왔다. 그러나

본 ERW simulator를 이용하여 실험을 실시한 결과, 실험 조건(대강의 성분, Vee angle, 압하 압력, 용접 속도)에 따라 상이한 결과를 나타내는 것이 관찰되었다. 즉 일정 실험 조건에서는 기존에 발표된 U자형 결함 커브를 나타내는 경우가 대부분 관찰되었으나, 일부 용접 조건에서는 기존의 용접 결함의 발생 거동과는 상이하게 용접 결함의 발생 빈도가 용접 입열량에 대하여 W자형 커브를 나타내는 경우가 관찰되었다.

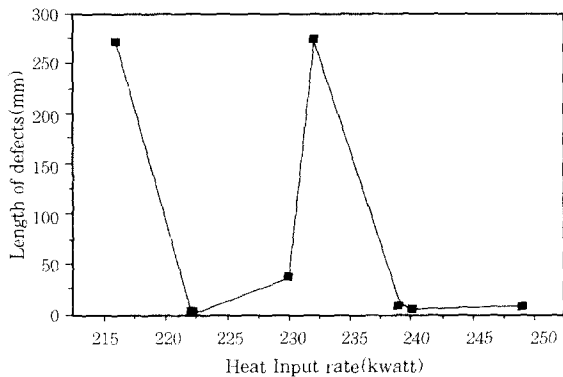


Fig. 9 Effect of heat input rate on the defect density on weld.

Fig. 9는 용접 속도 16 m/min 인 조건에서 용접 입열량을 215에서 250kW까지 약 15%가량 변화시켰을 때, 용접 결함의 발생빈도에 대하여 나타낸 그림이다. 용접 입열량이 216kW인 경우는 결함의 발생 빈도가 매우 높은 것으로 나타났는데, 이들 시편의 인장 시험 후 파단면을 관찰한 결과, 용접이 거의 발생하지 않은 냉접(cold weld) 결함이 발생하였기 때문이었다. 용접 입열 속도를 215kW에서 222kW까지 증가시키기에 따라서 용접 결함의 발생 빈도가 감소하는 것이 관찰되었으나, 입열 속도를 230kW로 다시 증가시키기에 따라서 용접 결함의 발생 빈도가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 인장 파단이 발생한 부분을 주사 전자 현미경으로 관찰하여 Fig. 10과 11에 나타내었다. Fig. 10에서 보면 연성 파단이 발생한 부분과 용접 결함이 파단면 표면의 상당 분율을 차지하고 있는 것을 볼 수 있는데, Fig. 11에 나타낸 부분은 덩플 파단을 일으키는 저면에 수십 마이크로론 정도의 크기를 가진 산화물이 분포되어 있

다. 이들 산화물의 성분을 분석한 결과 이들 산화물은 Mn-rich한 Mn-Fe-Si계의 복합 산화물인 것으로 나타났다. 이것은 수백 마이크로론 정도 크기의 결함으로 용접면상에 균일하게 분포되어 있는 특징을 가지는 paste weld 결함으로 나타났다. 이러한 결함의 발생은 용접 조건 뿐만이 아니라, 원재료의 성분 특성에도 좌우되는 것이다.

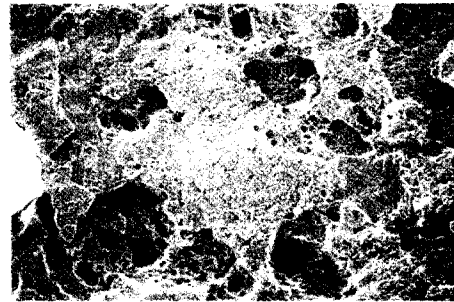


Fig. 10 Fractured surface of weld produced under heat input rate of 230kW (x500).

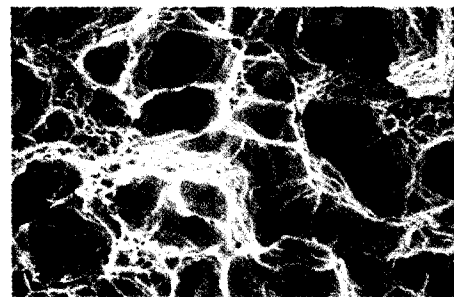


Fig. 11 Fractured surface of the weld in Fig. 10 at higher magnification (x2,000).

### 5. 맺음말

고주파 전기 저항 용접 현상에 대한 체계적이고 효율적인 연구를 수행하기 위해서 ERW simulator를 설치하여, 그의 특성을 평가한 결과, 이를 통하여 얻어진 용접 현상이 실제 조판 라인에서 얻어진 실험 결과와 유사한 것으로 관찰되었다. 따라서 이를 이용한 고주파 전기 저항 용접 현상에 대한 국내 관련 업체 및 연구자들의 활발한 연구 활동의 진전이 기대된다.



• 김충명 (金忠明)  
 • 1961년생  
 • 포항종합제철(주) 기술연구소  
 • 조선용, 강관용 강재의 용접성, 용접부 파괴  
 • e-mail : chmkim@posco.co.kr



• 김용석 (金容奭)  
 • 1957년생  
 • 홍익대학교 신소재공학과  
 • 솔더링, GMAW, HF ERW  
 • e-mail : yskim@wow.hong.ac.kr