

전기저항용접시 용접부 품질에 미치는 용접결함의 영향 (ii)

The effect of welding defects on weldment in ERW (ii)

김동환* 정영복 서정현
현대강관(주) 기술연구소

1. 서론

ERW(Electric resistance welding)는 생산성이 우수하여 강관제조에 널리 사용되고 있는 용접방법으로서 비파괴 검사기술의 발달과 더불어 용접부에 대한 신뢰성도 향상되어 SEAMLESS강관 대체품으로 점차 사용영역도 확대되고 있다. 최근에는 용접기술의 발달과 함께 고탄소강, 합금강, 후속강관의 제조 및 극한지용 고인성강관 및 내식성 강관의 제조도 가능해 졌다. 그러나 고강도강(C:0.2% 이상材) 강관의 경우 ERW 용접시 용접부에 크랙이 발견되는 경우가 종종 발생하였다. 이 간헐적인 크랙 발생의 원인을 조사하기 위해 용접부 단면에 대해 MACRO 조직검사를 행하였으며 이 조직 검사결과 크랙이 발견된 용접부에는 모재(Hot coil) 편석대가 함께 존재하고 있었음이 발견되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 편석대가 크랙발생원인으로 작용하는지에 대해 연구하였다.

2. ERW 용접 개요

1) Mechanism

고주파 전기저항(유도)용접 (HF-ERW)은 표피효과와 근접효과를 가지는 고주파 전류의 원리를 이용한 용접법으로 파이프 구경에 해당하는 skelp(강대)를 성형 roll을 통해 원형으로 성형하여 용접하게 된다. 용접부는 빠른 조관 속도(40M/min~100M/min)로 말미암아 급열, 급냉(용접부에서 냉각수를 뿌림)되며 용접직후 spring back 현상이 발생한다. 그림1은 HF-ERW 용접 과정을 나타내고 있다.

2) 용접Bond부 형성

ERW용접부에는 특유의 bond zone이 형성되고 이것을 탈탄층 또는 백색층이라고 부르기도 한다.

3. 시험방법

시험대상은 탄소량 및 망간량이 많이 포함되어 있는 고강도 강관으로 하였고 시험방법으로는 ERW 공정특성상 용접후에 크랙이 발생한 부위를 찾아 크랙부를 조사하는 방법으로 실시하였다. 시험대상 파이프의 규격 및 size는 다음과 같다.

파이프 규격 : API 5CT J55, 파이프 SIZE : 외경 2 $\frac{1}{8}$ " × 두께 4.72mm

원소재인 Hot coil의 화학성분 및 기계적 성질은 <표1>과 같다.

<표1> 기계적 성질 및 화학성분

구분	기계적 성질(kg/mm ² , %)			화학 성분 (wt %)					
	TS	YS	EL	C	Si	Mn	P	S	기 타
SPEC	52.7 ↑	38.7 ~ 56.3	18.5 ↑	-	-	-	0.03 ↓	0.03 ↓	
측정치	63~70	48.9 ~ 54.2	26 ~ 30	0.22 ~ 0.26	0.19 ~ 0.20	1.3 ~ 1.45	0.017 ~ 0.02	0.006 ~ 0.007	Ca:0.0014~0.0024 Nb:0.021~0.026

*Sol AL : 0.023%, Ni : 0.017%, Ceq=0.48

시편채취 위치를 그림2에 나타내었다. 크랙부(①)과 크랙이 발생하지 않는 부분(②)에서 시험편을 채취하여 용접상태를 확인하였다.

크랙부는 MACRO 및 MICRO 조직시험과 경도시험을 실시하였으며 편석대가 크랙에 미치는 영향 및 상관관계를 파악하기 위해 편석대 및 크랙부의 단면에 대해 SEM-EDX 분석을 실시했다.

4. 시험결과 및 고찰

1) 용접 Bond 형성 및 용접건전성 확인

용접 bond부는 ERW 용접입열의 적절성을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 그림3은 Fe-C 상태도의 일부를 나타내고 있으며 본 대상강재의 C 함유량이 0.22%인 점을 감안하면 용접 온도는 B점 직하가 될 것이다. ERW 용접부에서는 두 대강에 흐르는 전류가 같은 방향이므로 두 skelp 사이에는 전자반발력이 작용하게 되며 A에서 B점까지의 온도에서 edge 단면의 용강 발생은 이 전자 반발력에 의해 밖으로 밀려 올려지게 되며 또한 용강은 skelp 단면에 남아 있으려는 표면장력과 힘의 균형을 이루어 배출된 용강이 단면 모서리에 존재하게 된다. 그림4에서는 이러한 용강의 모식도를 나타내고 있다. 따라서 용강단면에는 액체와 고체의 2상 공존 영역을 나타내게 되며 이에 따라 성분 재분배가 나타나는데 squeeze roll에 의해 가압 되면 액상은 배출되어 비드를 형성하고 고상이 남게 된다. 즉, 0.22%의 강재가 1500℃ 근처에서 용접될 때 X (0.09%C)와 X' (0.42%C) 사이에 성분분배가 이루어지는데 지렛대 법칙에 의해

$$\text{고상의 양} = \frac{0.42-0.22}{0.42-0.09} \times 100 = 61\% \text{ (C농도 0.09\%)}$$

$$\text{액상의 양} = \frac{0.22-0.09}{0.42-0.09} \times 100 = 39\% \text{ (C농도 0.42\%)}$$

가 되고 SQ OUT시 농도가 높은 액상이 빠져 나가고 농도가 낮은 고상이 잔류되어 상온으로 pearlite변태를 이루게 되면 결국 모재(0.22%)에 비해 탄화물 농도가 적게 되어 보다 많은 ferrite형성으로 부식을 시킬 경우 상대적으로 하얗게 나타나게 된다. 이상과 같이 용접 bond부에 대해 설명한 것은 본 시험에서 용접작업의 문제가 없음을 나타내는 것이기도 하다.

2) 편석대의 존재와 크랙 발생

용접부에 대해 크랙부와 양호부등에 대해 시편을 채취하여 MACRO 조직시험을 실시하였으며 양호부의 위치는 크랙부에서 약 50mm지점에서 채취되었다. 사진1 및 사진2에서는 용접 crack부(㉔)와 양호한 용접부(㉕)를 각각 나타내고 있으며 metal flow의 경우 모두 50~70°의 각을 이루고 있고 양호부(㉕)의 경우 bond zone을 명확히 이루고 있으며 그 폭은 0.04~0.05mm 정도를 나타냈다. Metal flow도 1/2지점으로부터 형성되어 skelp 단면이 용접시 평행하게 형성되었음을 알 수 있다. 크랙부(㉔)는 MACRO 사진에서 (사진1-a, 1-c) 모재 편석대가 두껍게 형성되어 metal flow를 따라 bond부에 집적되고 있음을 알 수 있다.

3) 크랙부 파단면 관찰

크랙이 일부 나타나 있는 용접bond부를 사진3에서와 같이 강제로 파단(액체질소 이용)시켜 파단면을 관찰하였다. 파단면은 크랙이 나타났던 a부분 및 강제 파단전에 기형성 되어 있던 것으로 보이는 b 및 c부분 및 개재물로 보이는 d 그리고 강제 파단면 e등을 관찰하였다. 사진 3-a는 크랙형성부 파단면으로 산화물등으로 덮여 있는 것으로 보이는 이중 파단면이 관찰되었다. 사진 3-b 및 사진 3-c는 b 및 c부분의 기형성된 crack으로서 크랙형태는 IGC (Inter-Granular crack)형태로 볼 수 있다. 일반적인 IGC의 경우 입계는 보통 각을 이루고 있는데 본 시험재에서 발견된 IGC의 경우 완만한 각을 이루고 있거나 용융되어 있었던 흔적을 보인다. 질소에 의한 강제 파단면 정성분석결과(사진 3-d)에서는 통상 모재조성과 비슷한 성분값을 나타내나 IGC에서의 정성분석(3-e) 결과 Mn량 및 S등이 나타났다. 이러한 사실은 크랙부에 최종적으로 용융형태의 일부가 존재해 있다는 사실과 편석대에서 흔히 관찰되는 Mn량 및 S함량증대라는 것과 관계가 있음을 입증한다.

이러한 것은 편석대에서 C량 증대에 따른 용융온도의 저하와 편석대에 저융점 개재물등이 용접온도이하에서 용융상태였으며 최종적으로 압출되는 과정에서 잔류되었다고 보여진다. 또한 개재물로 보이는 d 분석결과 Ca 및 Al 및 Si등으로 이러한 성분들은 제강중 첨가되는 원소들로서 이들 개재물들의 존재는 크랙의 기점으로 저융점 산화물등의 source로서 역할을 한것으로 보인다.

4)편석대內 기공의 발견

사진4에서 편석대에 기공이 관찰되었다. 편석대內에서 발견된 이 기공은 50~100 μ m의 크기를 가지고 있었으며 일부는 연속적으로 연결되어 있었다. 이러한 기공은 하나의 크랙형태로 간주될수 있으며 용접 squeeze out(압출)시 용접bond부에 연속적으로 전달되어 노치형상을 이룰경우 크랙을 유발 시킬 가능성이 있다. ERW용접은(Skelp) 단면 또는 내부가 ERW 특유의 SQ OUT(압출) 특성에 의해 외부로 노출되게 되는데 이러한 이유로 판(Skelp)內 개재물 또는 기공등이 외부로 노치형상을 이루며 노출되는 과정에서 저융점막을 형성 잔존 최종 응고될 경우 주변응력에 의해 미세균열을 형성 균열 또는 파단을 유발하는 것이다(Metal flow를 따라 또는 bond부를 따라). 이러한 기공은 제강중 탈산제에 의해 충분히 제거되지 못한 산소들이 주조중 최종 응고부인 중심 편석대에 남아 기포형태로 존재 한것으로 볼수 있다.

5)크랙부 개재물 관찰

사진5에서는 크랙부위 파이프 외경쪽 면을 1mm 면삭하고 윗부분에서 관찰한 것이다. 크랙부에 개재물이 발견되었고 성분 분석(그림5) 결과 Si계 개재물이었다.

6)경도시험 결과

ERW에서는 용접이 거의 물(에말론 수용액)속에서 이루어지므로 용접온도인 1500 $^{\circ}$ C에서 용접과 동시에 급냉처리된다. 용접열영향부는 탄소당량 0.48% 전후에서 급냉조직(Martensite 또는 Bainite)이 된다. 양호한 용접부는 경화조직만을 가지는데 이는 용접후 용접부(Seam annealing) 열처리에 의해 조직이 개선된다. 그림6-a는 양호부 용접부의 경도를 나타내는데 모재부 경도는 대략 205-213 수준의 경도값을 나타내고 있으며 bond부를 포함한 열영향부의 경도도 대략 205-214의 수치를 보임으로서 열처리 상태가 양호했다는 것을 알수 있다. 그러나 그림6-b의 경우 편석대에서 238-260Hv값을 나타내고 있으며 크랙부에 근접된 부분에서도 248-260의 값을 나타내고 있는데 이러한 수치는 열처리된 후에 check된 것으로서 모재 경도에 비해 30~50Hv정도 높게 나타났고 이는 편석대에서 Ceq가 더 높음을 의미하며 열처리 직전에는 경화 조직 발생에 따른 경도증가가 현저했을 것임은 주지의 사실이다.

5. 결 론

탄소당량(0.48%)이 높은 강대(Skelp)에 대해 ERW PIPE제조시 크랙이 발견되었다. 이의 영향을 알아보기 위해 몇가지의 시험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. Metal flow각도, 입열폭 및 bond부 형성등을 관찰하여 본 결과 용접작업이 양호했다.
2. 크랙이 발견된 부분에서(본 시험 강재에 대해) 편석대가 존재하였다.
3. 편석대에서는 높은 Ceq 및 개재물등이 포함되어 있었고 이는 용접시 온도보다 낮은 용융온도를 가지고 최종적으로 용접bond에 영향을 준다.
4. 편석대에서 일부 기공이 발견되었고 용접시 압출에 의해 bond에 영향을 미친다.
5. Bond부 파단면 관찰결과 개재물 존재 및 용융흔적과 크랙등이 발견되었다.
6. 편석대의 경도는 모재에 비해 높았으며 이는 높은 Ceq의 증거이며 이의 영향을 받은 crack부의 경도도 높게 나타났다.
7. 편석대의 높은 Ceq 및 이에 포함된 개재물 그리고 기공등은 ERW의 용접과정(압출되는)에서 용접bond부로 밀려 올라와 배출되지 못한채 bond내 최종 잔류되면서 노치형상을 이룰경우 크랙의 기점으로서의 작용 및 전파가 용이하게 되어 조관 응력에 의해 쉽게 크랙으로 진전되었다.

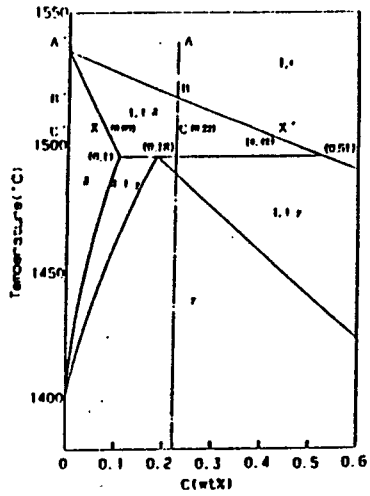


그림 3 Fe-C diagram 일부

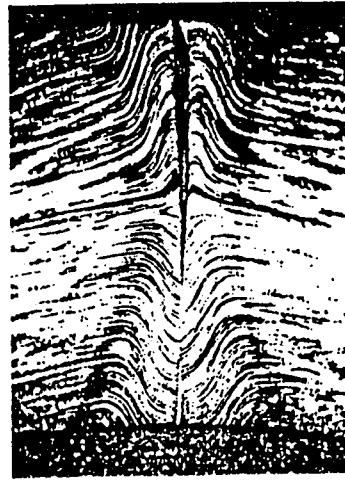


사진 1-c 크랙부(OMACRO (x20))

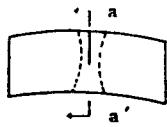


사진 3 크랙부 (BOND ZONE) 파단면

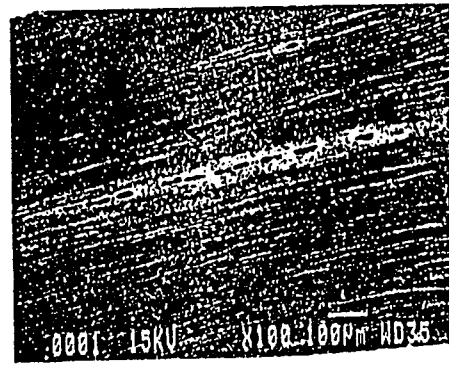


사진 4 편석대에 존재하는 기공 관찰

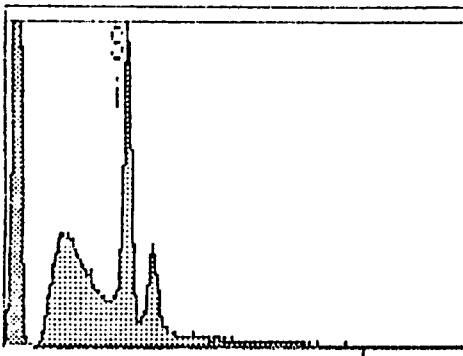


그림 5 개재물 성분 분석

경도 CHECK POINT (편석대 및 CRACK부)

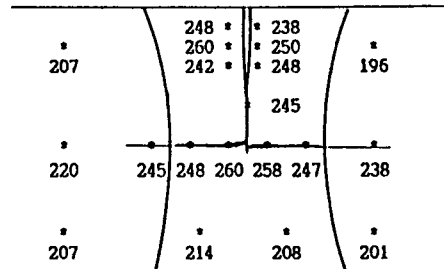


그림 6-b 크랙부 경도 분포도