

탄소강관의 ERW 용접부 흠부식 손상에 관한 연구

김 용* · 이 보 영**

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Study on Grooving Corrosion at the Weld of a Low Carbon Steel Pipe Made by Electrical Resistance Welding

Yong Kim* and Bo-Young Lee**

*Dept. of Aerospace and Mechanical Eng. Hankuk Aviation Univ., Koyang 412-791, Korea

**School of Aerospace and Mechanical Eng. Hankuk Aviation Univ., Koyang 412-791, Korea

Abstract

Although leakage at a low carbon steel pipe made by electrical resistance welding (ERW) was reported due to grooving corrosion, the cause for the corrosion has not yet been cleared. In order to clarify the main cause, failure analysis on the leaked pipe was carried out, followed by metallographic investigation and corrosion test for the various ERW pipe made with different welding heat input. The microstructure, particularly inclusion content, of the weldment is dependant on the welding heat input applied. For an improper low heat input, the amount of inclusion at the weld was high. High inclusion content accelerated grooving corrosion at the weld. It is therefore that welding heat input should be controlled based on the carbon content of the pipe in order to improve the corrosion resistance of the ERW pipe.

* Corresponding author ; welding@empal.com

(Received July 19, 2004)

Key Words : Grooving corrosion, Electric resistance welding, Metal flow, MnS inclusion, Cold weld, Sulfur content

1. 서 론

전기저항용접(ERW: Electric Resistance Welding)은 고주파 전류로 피용접재를 가열시킨 후 압축력을 가하여 접합하는 용접방법이다. ERW강관은 전기저항 용접 방법 중 고주파유도용접(High Frequency Induction Welding) 공정으로 만든 강관을 말한다¹⁾.

ERW 탄소강관을 해수, 공업용수, 음용수 등의 배관으로 사용할 때 용접선을 따라 깊은 "V"형의 흠 형상으로 국부적으로 심하게 부식되는 현상을 흠부식 또는 구상부식(Grooving Corrosion)이라고 한다. 이러한 흠부식은 ERW방법으로 제조된 강관에서 빈번히 발생하는 부식이다²⁾. 흠부식은 용접중 편석(Segregation)에 의한 청정도 약화, 입열량 부족에 따른 냉접이나 과도

입열에 따라 용융비드가 재유입되어 발생하는 침입결함 등 제작상에 발생하는 결함에 의한 영향³⁻⁴⁾, 수용액의 온도 증가에 따른 용액의 자연대류 증가나 수중용존산소의 농도차이에 따른 영향, 유속과 수용액의 pH 및 음 이온(Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 등)의 농도 등 환경인자의 영향⁵⁾을 받으며, 재료 인자로서는 탄소강에 함유된 황 함유량^{3,6-7)}에 의한 영향 등이 있다고 알려져 있다. 이에 따라 전기화학적 연구⁸⁾ 등 흠부식에 대한 많은 연구가 이루어졌으나, 이들은 부식에 관한 이론적 배경을 바탕위에서 얻어진 포괄적인 결론일 뿐, 아직까지 그 원인이 명확히 규명되어 있지 않은 상태이다.

문헌에 따르면 통상적으로 음용수 용도로 사용되는 수도 배관용 탄소강관이 흠부식에 의해 크랙이 관통되기까지는 14년에서 16년 정도의 기간이 소요된다고 알려져있다⁵⁾. 미국이나 유럽국가에서는 강관 시공 후 조

기에 누수현상이 발견되는 사례가 적으나, 일본 및 국내의 경우, 수도 배관으로 사용되는 ERW 탄소강관 용접부에서 5년 미만의 사용기간 내에 누수 현상이 발견되는 사례가 나타났다. 그 중, 동일한 아파트 단지에 강관 공급업체에 따라 누수현상이 일부만 발생한 사례가 있었는데 이는 사용 환경 및 시간의 차이가 없다는 점을 보아 흠부식의 주 원인이 재료인자 또는 ERW 탄소강관 제작상의 차이에 의해 발생된다는 것을 암시해 준다.

따라서, 본 연구에서는 누수에 의해 손상된 시편과 ERW 제작 공정에 대한 분석을 통하여, 흠부식 발생의 직접적인 원인을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 손상 시편의 분석

ERW방법으로 제작된 탄소강관의 흠부식에 미치는 화학 성분의 영향을 분석하기 위해 실제 사용된 외경 50mm, 두께 3mm인 배관의 일부를 50×50mm의 크기로 절단하였다. 그리고 시편 표면을 기계적으로 연마 후 EDS를 이용하여 분석하였으며, 3회 분석치의 평균값을 사용하였다.

손상시편의 미세조직을 관찰하기 위하여 실제 사용된 배관 Fig. 1의 "A" 위치를 길이방향에 수직하게 절단하여 용접부를 채취하였으며, 채취 용접부를 열간 마운팅하여 경면연마를 하였다. 이후 2%의 Nital 용액 및 Picral 용액으로 에칭하여 마크로 및 마이크로 조직을 관찰하였으며, 미세 조직에서의 이상 부위는 SEM을 통하여 재차 확인하였다. 이 모든 실험은 부식이 진행된 강관과 건전한 강관 두 가지에 대해서 실시하였다.

2.2 입열량 시편의 부식시험

ERW방법을 통한 강관제조 공정시 접합부에서의 건전

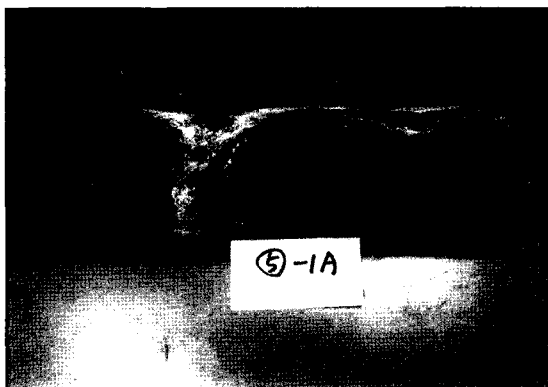


Fig. 1 Outside view of partially corroded pipe

성을 결정짓는 인자는 접합형태, 용접조건 및 재료소재 등 여러 가지가 있으나 그중에서도 용접 입열량은 가장 중요한 인자가 된다⁸⁻¹⁰⁾. 따라서 외경 50mm, 두께 3mm의 강관 6종을 Table 1과 같이 용접속도와 전류값을 고정하고 전압 값만 변화시켜 입열량을 변화시켜 모의 제조하였다.

우선 이들의 접합 건전성을 확인하기 위하여 KSD 3507에 따라 편평시험, X-선 검사(RT), 전류탐상검사(ECT) 및 침투탐상검사(PT)를 실시하였다.

이후 입열량에 따른 흠부식 시험을 위하여 강관 6종의 용접부를 각각 5×5mm 크기로 채취한 후, 강관 내면이 표면에 노출되도록 마운팅하고 용접부가 직선이 되도록 연삭하여 평면가공 하였다. 시편의 용접부만 부식시키기 위해 용접선을 중심으로 2mm의 폭을 제외한 나머지 부분은 에나멜 코팅 하였으며, 시험편을 염수부식액(NaCl 3.5% 수용액)에 넣고 상온에서 336시간동안 자연 부식시험을 실시하였다. 이후 감도 2 μ m의 표면조도 측정기를 통해 표면에서의 부식 진행깊이를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 손상시편의 금속학적 분석

Fig. 2는 Fig. 1의 "A" 위치를 채취하여 Picral 산으로 마크로 에칭한 모습을 보여주고 있다. Fig. 2에서는 용

Table 1 Simulation welding condition

Specimen No.	Voltage (KV)	Ampere (A)	Speed (m/min)
1	10.2	16	48
2	9.8		
3	9.5		
4	9.2		
5	9.0		
6	8.8		

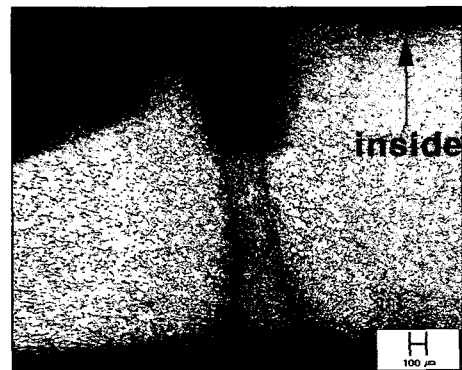


Fig. 2 Partially corroded pipe by grooving corrosion, Picral etched

접선과 열영향부를 잘 구분할 수 있으며, 내면으로부터 약 30% 깊이까지 부식이 진행되어 있음을 알 수 있다. 또한 용접부 좌측으로는 전면부식에 의해 두께방향으로 두께가 줄어있는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 동일위치에서 Nital 에칭된 용접부의 마크로 조직사진을 나타내고 있으며, 여기서 용접선을 따라 관 내부에서부터 홈부식이 진행되고 있는 것이 확인되었다. 이 중 'a' 표시부분에 용접선상을 따라서 크랙이 발생한 것처럼 날카로운 선이 관찰되었는데, 이것은 문헌에 의하면¹¹⁾, 용접선상에서 나타난 선은 강관제조에 사용한 재료의 탄소함량이 낮기 때문에 Bond부가 형성되지 않아 적정 용접온도에서 용접되지 않은 것이며, 용접부의 검은 선은 냉접으로 접합되었음을 의미한다.

따라서 이 선이 냉접에 의한 것인지를 알아보기 위해 동일시편을 재 연마한 후 부식없이 관찰하였으며 그 형상은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 용접선상에 홈부식 진행 방향으로 공극(void)으로 보이는 결합들이 관찰되었으며, 결합 형상을 재차 SEM 촬영하였다. Fig. 5는 공극으로 추정되는 검은 점들에 대한 SEM 사진을 보여주고 있는데, 그 형상은 대체적으로 구상 또는 타원형이며 크

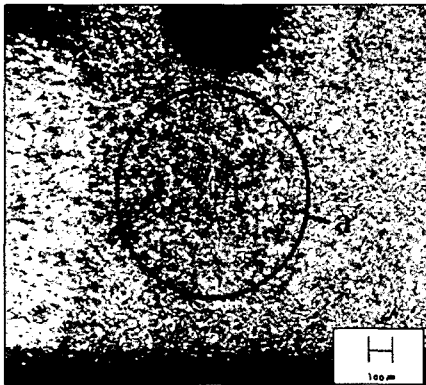


Fig. 3 Partially corroded pipe by grooving corrosion, Nital etched

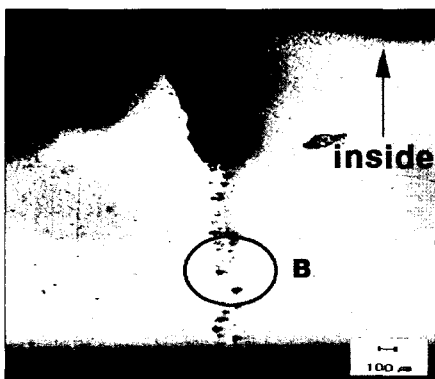


Fig. 4 Partially corroded pipe by grooving corrosion, un-etched



Fig. 5 SEM micrograph at position 'B'

기는 최대 30 μ m이었다. 이러한 공극 형태의 결합은 용접 시 입열량이 충분치 못해 용접비드(metal flow)쪽으로 빠져나오지 못한 개재물로서, MnS 형태로 존재한다고 알려져 있으며¹¹⁾, 정확한 분석을 위하여 EDS로 성분분석을 실시한 결과, Fig. 4의 'B' 부위에 나타난 검은 점들은 Fig. 6과 같이 같이 황화물(MnS) 개재물로 나타났다.

따라서 원재료의 황 함량이 홈부식의 주 원인인지 확인하기 위하여 실제 사용된 배관의 화학조성을 분석하였다. 용접부에 누수가 발생된 배관의 화학조성은 Table 2의 No.1과 같고 건전한 배관의 경우는 No.2와 같이 나타났으며, 이 둘 모두는 KS D 3507에서 규정된 사양을 만족하였다. 그러나 화학성분의 분석결과는 오히려 누수가 발생된 배관의 황 함량이 0.007wt.%인 반면에 건전한 시편의 황 함량인 0.013wt.%로 건전한 시편이 더 높게 나타났다. 이는 원재료에 포함된 황 함량의 고저가 재료의 전면부식에는 영향을 줄 수 있으나, 용접부에만 집중적으로 일어나는 홈부식의 주원인이 되지 않는다는 사

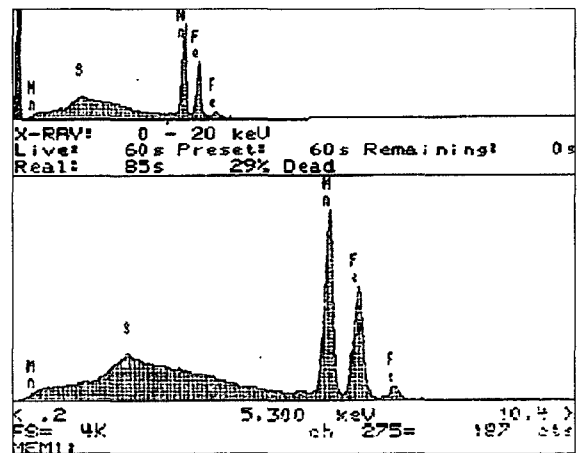


Fig. 6 EDS peak from inclusion in the corroded ERW pipe

Table 2 Results of chemical analysis

No.	Material	Condition	C	S	P
1	SSP	Leaked	0.027	0.007	0.012
2		sounded	0.046	0.013	0.021

실을 입증해 준다.

3.2 모의제조 시편의 부식시험 결과

실제로 사용된 배관의 용접선상에 개재물이 다량 존재하였고, 이것이 흠부식에 영향을 준다고 판단하였다. 이들 개재물의 발생원인을 확인하기 위하여 입열량 조건을 달리 변화시켜 6종의 강관을 모의제조한 후(Table 1 참조), 강관의 건전성을 확인하기 위하여 와전류검사(ECT), X-선 검사(RT), 액체침투탐상검사(PT) 및 편평시험(Flat test)을 실시하였다. X-선 검사 결과 모든 시편에서 특이점을 발견하지 못하였으나, 와전류탐상 결과 6번 시편에서 결함이 검출되었고, 액체침투탐상검사를 실시한 결과 또한 Fig. 7 (a)와 같이 최저입열조건으로 용접한 6번 강관에서는 길이방향으로 용접선을 따라 긴 결함이 비연속적으로 검출되었다. 편평시험을 실시한 결과 또한 Fig. 7 (b)와 같이 입열량이 적어 충분히 접합되지 못하고 외경 쪽에 미접합 부위가 존재하는 것을 발견할 수 있었으며 이들 시험결과를 Table 3에 나타내었다.

Fig. 8은 비교적 건전하게 용접된 Table 1의 3번 시편의 용접부, 열영향부 및 모재부의 미세조직을 나타내고 있는데 우선 Fig. 8의 (a)에서처럼 모재부는 탄소함량이 매우 낮은 연강이기 때문에 페라이트(ferrite)가 대부분이고 약간의 펄라이트(pearlite)가 페라이트 입자

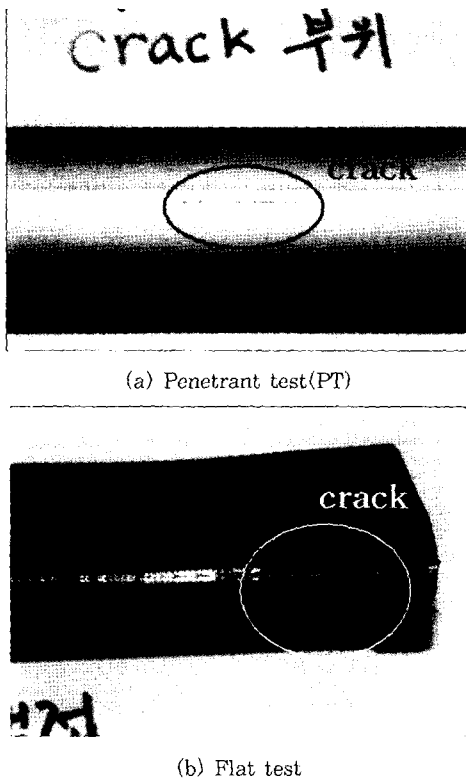


Fig. 7 Weldability test results of the pipes

Table 3 Results of Weldability testing

Specimen No.	Flat test	ECT	PT	RT
1	○	○	○	○
2	○	○	○	○
3	○	○	○	○
4	○	○	○	○
5	○	○	○	○
6	×	×	×	○

사이에 분포되어 있다. Fig. 8의 (b)와 (c)는 각각 열영향부 중심부와 용접부 경계선에서의 열영향부를 보여주고 있는데 이들은 미세한 침상 페라이트(acicular ferrite)의 형태로 존재하며, (d)에서 보듯이 용접부와 열영향부의 큰 조직적 차이는 없으나 결정립은 약간 조대한 형상을 띤다. 그러나 이러한 조직 형태는 모든 시편 용접부에서 결정립의 크기만 약간 다를 뿐, 그 경향이 동일하게 나타나며 미세조직 상에서의 특이점은 발견되지 않았다. 각 시편의 마크로 조직을 관찰한 결과 또한 사용된 용접 입열량의 변화로부터 HAZ 폭의 변화나 용접금속속에서의 결정입도 변화 또는 용접금속의 성분(예로서 ferrite, pearlite 등)의 차가 발생하지 않았다. Fig. 9는 입열량 차이에 따른 개재물 발생정도를 보여주는 그림으로 에칭없이 단면을 관찰한 결과를 나타내고 있는데 이러한 차이는 조직검사 결과, 일반적인 금속조직상의 변화로부터 발생된 것이라고 보기는 어려우며 이상의 조직

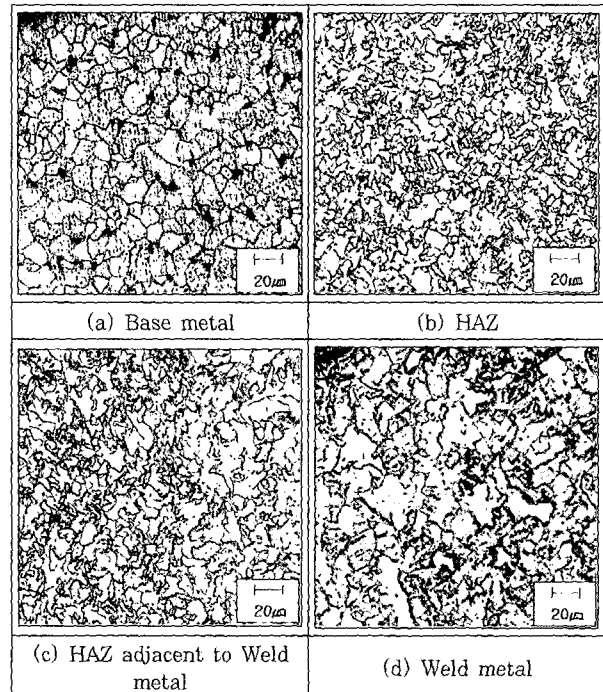


Fig. 8 Microstructures of ERW pipe for (a) base metal, (b) HAZ, (c) HAZ adjacent to weld metal and (d) weld metal

검사 결과를 통해 흠부식을 촉진할 주요인자를 발견할 수 없었다.

이후 손상된 시편에서 발견되었던 개재물이 부식에 의해 발생된 것인지 확인하기 위하여 에칭없이 단면 형상을 관찰한 결과, 부식 손상이 발생하지 않은 강관의 용접부에서도 동일한 형태의 개재물을 발견할 수 있었으며 모재에서도 소량이 분포되어 있는 것을 확인하였다. Fig. 9에서는 입열량이 적을수록 개재물의 양이 많이 존재하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 모의제조 시편 용접부에 분포된 개재물 또한 실제 사용된 시편에서 발견된 것과 동일한 개재물로서, 이를 통해 개재물의 발생이 부식으로 인한 것이 아니라 용접 과정에서 발생한 것으로 판단할 수 있다.

이렇게 용접선상에 발생하는 개재물의 차이가 흠부식 속도에 영향을 미치는 인자가 되는지를 확인하기 위해 자연부식시험을 실시하고 표면조도 측정기로 확인한 결과는 Fig. 10과 같다. 이 실험결과에서 입열량이 비교적 낮은 5번 시편의 경우, 동일한 시간동안 부식된 깊이가 1번 시편과 비교하여 약 3배 정도 빨리 진행되었음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 9와 Fig. 10을 종합하여 볼 때, 개재물은 저입열 조건일수록 많이 존재하며, 이러한 개재물은 부식속도를 증가시킨다고 할 수 있다.

3.3 흠부식의 발생기구와 입열 감수성

지금까지 발표된 흠부식 발생기구는 ERW 공정상 발생할 수 밖에 없는 강관 내면 용접 비드의 제거로 인해 비드속에 존재하던 MnS 개재물이 강관 표면에 노출되어 부식 환경과 직접 접촉하게 되기 때문이며, 또한 용접부는 용접시 급열, 급냉되므로 조직이 다른 부위와

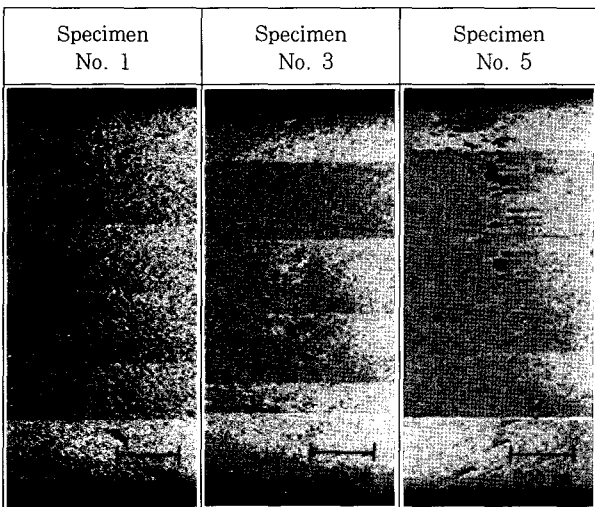


Fig. 9 Cross-section micrograph of simulated pipes without corrosion, un-etched

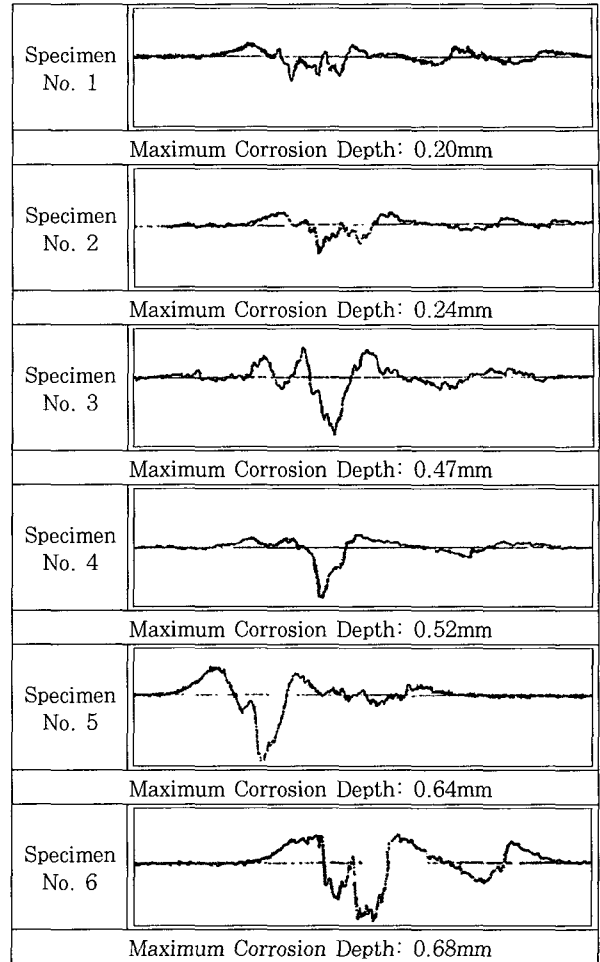


Fig. 10 Corrosion depth of simulated specimens

다르고 편석등이 일어나 전위차이가 약 50mV 생성되어 용접부와 비용접부 사이의 전위차가 갈바닉(galvanic)부식을 일으켜 용접부만 빠른 속도로 부식이 된다고 알려져 있다^{2-5,8)}. 그러나 지금까지 발표된 결과들은 조관 과정에서의 일반적인 사항만을 논하고 있을 뿐, 입열량에 따른 흠부식 감수성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

ERW 탄소강관의 직경이 15mm 이하에서는 관 내부 용접비드 제거가 어렵기 때문에 내면 비드를 제거하지 않고 외면 비드만 제거한 후 바로 사용되는 경우가 있으며, 그 예를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 실제 사용된 직경 15mm의 강관을 채취하여 에칭없이 관찰한 것이며 여기서도 용접선상에 개재물이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 Table 1의 5번 시편에서 Fig. 11과 같은 내면 용접비드를 제거하여 표면에 드러난 개재물의 형상을 Nital 에칭후에 관찰한 모습이며, 이렇게 표면에 노출된 개재물로 인해 부식이 가속화 된다는 것을 예상할 수 있다. 하지만 이렇게 발생한 MnS개재물은 적절한 입열량 조건으로 제조되지

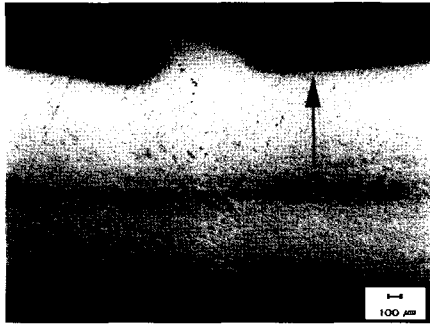


Fig. 11 Typical appearance of sounded pipe remained inside bead

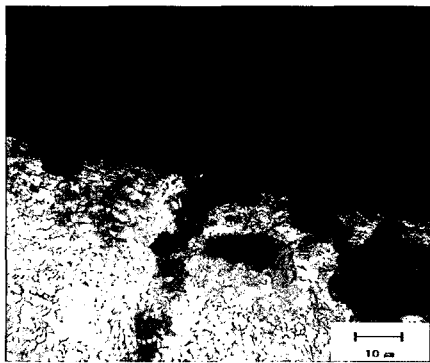


Fig. 12 MnS inclusion on the metal flow

않아 용접비드 쪽으로 빠져나오지 못한 결과이며 원재료의 황 함량이 최대 원인은 아니다. 강중의 S와 같은 비금속 원소는 대개 MnS 형태로 존재하게 되는데 원재료에 존재하던 MnS는 용접중에 용해되었다가 냉각되는 과정에서 재석출이 일어나게 된다¹²⁻¹³⁾. 원재료의 황 함량에 따른 영향도 존재할 수는 있으나 황 함량이 동일한 모재에서 용접 조건에 따라 개재물은 생성정도가 차이가 날 수 있으며 적정 용접조건에서는 용접부에 존재하는 MnS를 거의 발견할 수 없다는 사실이 이를 입증한다.

ERW 공정시 입열 조건의 중요성은 Fe-C 선도에서도 확인할 수 있는데, 재질에 따른 탄소량이 주어지면 적정 용접온도를 찾을 수 있으며 통상 $\delta+L$ 및 $\gamma+L$ 영역이 적정 용접온도가 된다¹¹⁾. 여기서 본 연구에 사용된 시편의 탄소 함량은 0.027%였으며 Fig. 13의 'A' 부분에 해당한다.

A 영역에서의 용접 허용범위는 약 10°C밖에 되지 않으며 B영역의 경우는 50°C 가량의 허용온도범위가 주어진다. 따라서 본 연구에서 흠부식이 일어난 강관의 직접적인 원인은 저탄소강을 원재료로 사용해 적정 입열 조건을 맞추지 못하여 발생한 다수의 개재물과 그에 따른 흠부식 가속화 때문이라 할 수 있다. 실제 대부분의 누수 사례가 저탄소강 ERW 용접부에서 발생하고

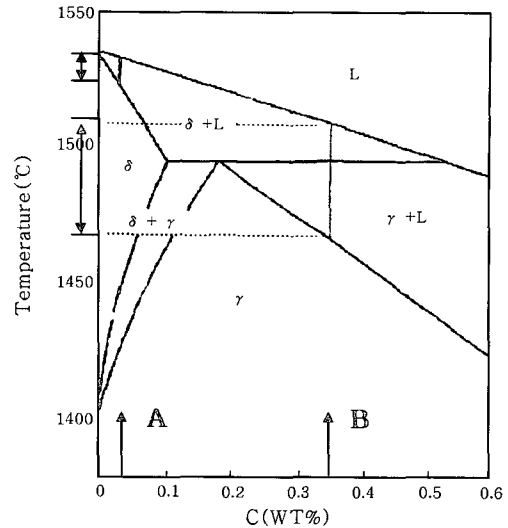


Fig. 13 A part of Fe-C phase diagram

있는 현상으로부터도 지금까지 알려진 황 함량의 차이 보다는 적정 입열조건을 맞추기 어려운 것이 그 원인인 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 흠부식 피해를 최소화 하기 위해서는 저탄소강의 경우 입열량을 중탄소강의 경우보다 상향 조정하여 용접함으로써 용접부 내에서의 개재물 발생을 최대로 억제해야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 ERW 제조 공정으로 제작된 탄소강관에서 실제 흠부식이 발생된 사례를 바탕으로 흠부식 발생원인 및 촉진 인자에 대한 연구를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 입열량에 따른 용접부 미세조직 및 마크로 조직 검사 결과 용접부와 열영향부의 미세조직 및 마크로 조직은 흠부식에 영향을 미칠 수 있는 특이점이 발견되지 않았다.
- 2) 실제 흠부식이 발생된 탄소강관 용접부의 주 원인은 적절한 입열 조건으로 제조하지 못해 발생한 다량의 개재물 때문이었으며, 저탄소강의 용접시 입열량을 별도로 조정해야 한다.
- 3) 입열량을 달리하여 모의시편을 제조하고 그에 따른 부식특성 및 금속학적 분석을 실시한 결과, 입열량이 적을수록 개재물이 많이 발생하였으며 그 이유는 용접부가 충분히 용융되지 못해 개재물이 미처 빠져나오지 못했기 때문이다.
- 4) 개재물의 양의 차이가 부식 진행 속도에 영향을 미치며 부식시험을 통해 이를 확인할 수 있었다.
- 5) 동일한 사용시간 및 환경에서 실제 누수가 발생된 탄소강관의 황 함량이 건전한 배관의 황 함량보다 낮았

으며 최적 용접조건에서는 용접부에 존재하는 MnS를 거의 발견할 수 없었던 결과로부터 저탄소강의 ERW 용접부에서 발생하는 흠부식의 주원인을 황 함량의 과다로 볼 수 없음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Howard B. Cary: Modern Welding Technology (5th Edition), Prentice Hall, 1998, 249-250, 622-631
2. Denny A. Jones, Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, 1992, 320-321
3. C. Kato, Y. Otaguro, S. Kado : Proceedings, 6th International Congr. Metallic Corrosion, Sydney, Austral, 1976, December 8, 1104-1106
4. T. Kurisu, T. Kyuno, S. Harada, T. Doi : Kawasaki Steel Tech. Reports, 11(3) (1979), 321-336
5. Hyun Dong Lee, Won Sik Jeong, Jung Hun Park, Chul Ho Bea, Pil Jea Kwak : Korea Society of Water Quility, 17-5 (2001), 627-635(in Korean)
6. C. Kato, Y. Otaguro, S. Kado and Y. Hisamatsu : Corrosion Science, 18 (1978), 62-72
7. C. Duran, E. Treiss, G. Herbsleb : The Resistance of High Frequency Inductive Welded Pipe to Grooving Corrosion in Salt Water, Mater. Perform., 25(3) (1986), 41-48
8. Hee Jun Sung, Heong Sik Kim, Byung Woo Lee, Young Bok Jeong, Kwang Hak Lee, Do Soo Seo : Corrosion Science Soc. of Korea, 27-2 (1998), 122-136 (in Korean)
9. AWS: Welding Handbook, 8th Edition, 2 (1991) 652-669
10. S. Sugimura, K. Okuyama, T. Fukuda, H. Nakasugi : Welding and Metal Fabrication, 11 (1980), 613-620
11. Jun Lee : Bul. Kor. Inst. Met. & Mater 12-4 (1999), 463-471
12. Mars. G. Fontana : Corrosion Engineering, 3rd Ed., (1998), McGraw Hill, p25, 70-71, 95-97, 485-487
13. Young Tai Kho : J. Corrosion science of Korea, 26-6, (1997), 524-526 (in Korean)