

## 해수분위기에서 스테인리스강 배관 소켓 용접부의 선택적 부식

부 명 환 · 이 장 욱 · 이 중 훈<sup>†</sup>

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70  
(2020년 6월 30일 접수, 2020년 8월 6일 수정, 2020년 8월 25일 채택)

# Selective Corrosion of Socket Welds of Stainless Steel Pipes Under Seawater Atmosphere

Myung-Hwan Boo, Jang-Wook Lee, and Jong-Hoon Lee<sup>†</sup>

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd,  
70, 1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received June 30, 2020; Revised August 06, 2020; Accepted August 25, 2020)

Stainless steel has excellent corrosion resistance. The drawback is that pitting occurs easily due to the concentration of chloride. In addition, corrosion of socket weld, which is structurally and chemically weaker than the other components of the pipe, occurs rapidly. Since these two phenomena overlap, pinhole leakage occurs frequently in the seawater pipe socket welds made of stainless steel at the power plants. To analyze this specific corrosion, a metallurgical analysis of the stainless steel socket welds, where the actual corrosion occurred during the power plant operation, was performed. The micro-structure and chemical composition of each socket weld were analyzed. In addition, selective corrosion of the specific micro-structure in a mixed dendrite structure comprising  $\gamma$ -austenite (gamma-phase iron) and  $\delta$ -ferrite (iron at high temperature) was investigated based on the characteristic micro-morphology and chemical composition of the corroded area. Finally, the different corrosion stages and characteristics of socket weld corrosion are summarized.

**Keywords:** Selective corrosion, Stainless pipe,  $\gamma$ -austenite,  $\delta$ -ferrite, Seawater

### 1. 서론

원자력 및 화력 발전설비의 주요기기 냉각원으로 해수를 사용하고 있으며 이러한 해수를 운반하는 배관 및 이음쇠(Fitting)로 스테인리스강 재료를 주로 사용한다. 이러한 스테인리스강은 부식 저항성을 향상시키기 위해서 철(Fe) 기저에 크롬(Cr), 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo) 등의 합금원소를 첨가하는데, 합금원소 함량 조절이나 열처리 방법에 따라 오스테나이트계, 마르텐사이트계, 페라이트계 등 다양한 미세조직을 얻을 수 있으며, 사용 목적에 따라 적합한 소재를 선택하여 적용할 수 있다. 다양한 스테인리스 강종 중에서 오스테나이트계 스테인리스강(STS 300 계열)은 연성과 내식성이 우수하여 부식성 환경에서 사용되는 배관의 재질

로 널리 사용되고 있으며, 특히 STS 316 계열의 재질은 공식(Pitting corrosion) 저항성을 향상시키기 위해 STS 304 계열의 재질에 몰리브덴을 2 ~ 3% 첨가한 스테인리스강으로 해수를 사용하는 배관에도 활용되고 있다. 하지만 이러한 스테인리스강도 제작 및 설치시 형성된 국부적 불연속부 또는 피막 손상부에 염분(Cl)이 집중되는 경우에 공식이 쉽게 발생하고, 공식이 발생한 이후에는 부식 속도가 증대되어 배관이 관통되어 누수가 발생하거나 염소에 의한 응력부식균열이 발생할 수 있다 [1]. 이러한 단점에도 불구하고 해수환경에서 내식성이 더 우수한 모넬(67Ni-30Cu) 합금이나 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강(25Cr-7Ni-4Mo-N) 등과 비교하였을 때 경제성이 월등하기 때문에 해수 계통 중에서 건전성이 중요하게 요구되지 않는 위치에는 STS 316 계열의 스테인리스강을 주로 사용하면서 배관을 주기적으로 교체하는 방법을 적용하고 있다. 원자력발전소의 해수계통에도 STS 316 계열의 배관이 다양한 위치에 적용되

<sup>†</sup>Corresponding author: jonghoon.lee@khnp.co.kr

부명환: 책임연구원, 이장욱: 선임연구원, 이중훈: 선임보연구원

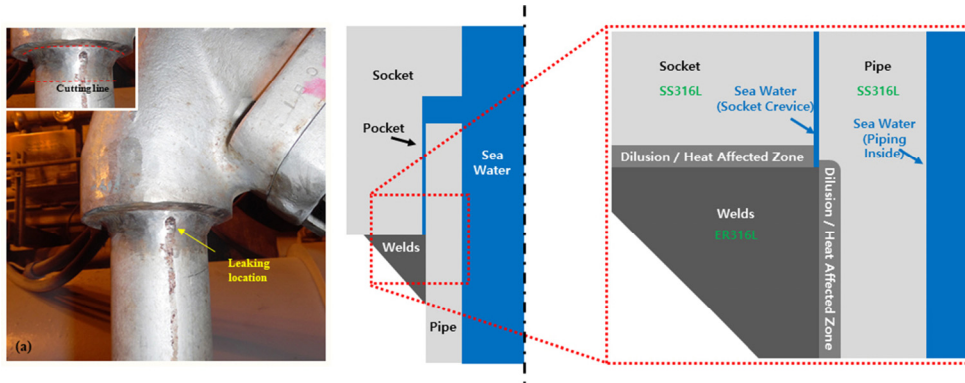


Fig. 1 Leakage location of pipe(a) and schematic of cross section(b).

어있는데, 최근 해수배관의 건전성과 관리 체계를 더욱 향상시키기 위해서 기존에 적용된 배관의 취약 부위를 도출하고 보완하기 위한 노력을 기울이고 있다 [2].

스테인리스강 재질의 해수배관은 주로 공식에 의해 손상되는데, 주요 손상 위치는 오리피스 후단이나 밸브 및 이음쇠 연결부 등이 있다. 주요 손상 위치 중에서 소켓용접부의 손상 사례가 빈번하게 보고되고 있으며, 부식 진행 속도가 빠르고 발생 예측이나 배관 수명 관리가 어려운 문제가 있다. 소켓 이음은 타 배관 이음방법에 비해 시공이 용이하다는 장점 때문에 2인치 이하의 소구경 배관을 연결하는 용도로 산업계 전반에서 널리 사용되고 있다 [3]. 하지만 소켓이음부는 맞대기 이음에 비해 접합강도가 낮고 잔류응력이 높게 형성되며, 소켓 루트부(Root)에 구조적 불연속부인 Pocket(Fig. 1b)이 존재하여 틈새부식에도 취약해지는 문제가 있다 [4]. 게다가 일반적인 오스테나이트계 스테인리스강의 용접봉은 용접시 발생하는 고온균열을 방지하기 위하여  $\delta$ -페라이트를 5~15% 정도 생성시키는데, 오스테나이트 기저에  $\delta$ -페라이트가 형성되면 전위 포텐셜이 감소하며 [5], 오스테나이트 기저와  $\delta$ -페라이트 간에 존재하는 전위차[6]에 의해 국부적인 갈바닉 부식이 발생하기 때문에 모재 부식보다

용접부의 부식은 더욱 가속화되는 문제가 있다.

본 연구는 원자력발전소에 사용되는 STS 316L 재질의 해수배관 소켓 용접부에서 발생한 편홀 사례를 대상으로 소켓 용접부의 구조적인 문제와 스테인리스강 용접부의 재료적인 문제를 중심으로 부식이 가속화된 원인을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 분석 대상 및 형상

분석은 Fig. 1과 같이 수직으로 설치된 2인치 해수배관 소켓 용접부의 편홀 발생부를 대상으로 하였다. 배관 및 소켓의 재질은 STS 316L이며 용접법은 GTAW, 용접재는 ER316L이 사용되었다. 배관의 사용 환경은 간헐적으로 해수가 흐르는 조건이지만 가동하지 않을 경우에도 수직으로 설치되어서 Fig. 1b와 같이 소켓과 배관 사이의 미세한 공간(Pocket)에 유체(해수)가 정체될 수 있는 구조이다. 원전에 적용되는 스테인리스강 재료의 화학성분 및 용접변수는 Table 1, 2와 같다.

Fig. 2에 편홀 발생부 단면을 절취한 사진을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition requirement of STS BM/WM (wt%) [7]

Materials		C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
Base metal	STS 316L	0.035	1.00	16.0 ~ 18.0	2.00	10.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0	Bal.
Welding metal	ER316L	0.03	0.30 ~ 0.65	18.0 ~ 20.0	1.0 ~ 2.5	11.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0	Bal.

Table 2 Welding parameters for STS 316L [8]

Process	Welding metal		Heat input (cm/min.)	Interpass temp. (°C)	$\delta$ -ferrite (FN)
	Spec.	Size			
GTAW	ER316L	Ø2.0 ~ Ø3.2	max. 23.6	max. 170	5 ~ 15

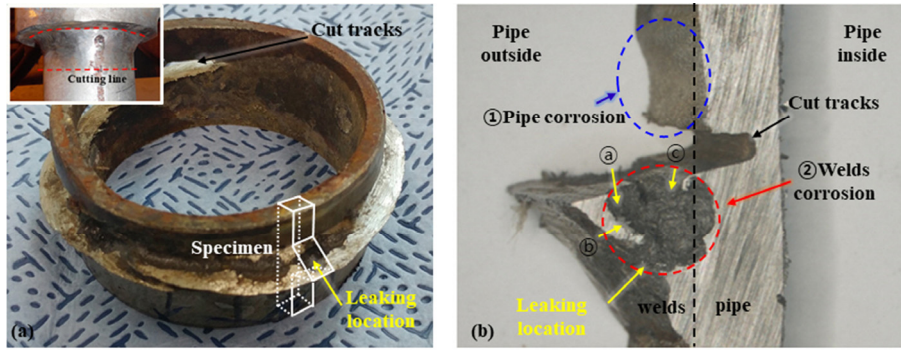


Fig. 2 Pipe cutting for cause analysis and cross section of specimen.

절취는 소켓부의 손상이 가지 않도록 용접부를 그라인더로 제거하는 방법을 사용하였는데, 이 과정에서 Fig. 2a와 같이 배관 원주방향으로 절단 흔적이 형성되었다. 용접부의 누설 위치에서 Fig. 2a처럼 시편을 절취하고 Fig. 2b의 단면을 육안 관찰하여 부식은 포켓에서 배관 모재 쪽에 360° 방향으로 발생한 형태(파란색 점선)와 용접부를 관통하는 형태(빨간색 점선) 두 가지인 것으로 확인하였다.

## 2.2 미세조직 분석

소켓 용접부에서 발생한 부식의 원인을 분석하기 위해서 미세조직을 분석하였다. 먼저 용접부 미세조직을 분석하기 위해 Fig. 2a의 절단된 배관에서 부식이 비교적 적게 발생한 위치를 선정하여 단면을 에칭하였다. 에칭액은 글리세롤과 염산, 질산을 각각 3:5:1 비율로 섞은 용액을 사용하였으며, 시편을 에칭액에 약 5분간 담가두는 방법을 사용하였다. 에칭된 시편을 관찰하여 용접부의 미세조직을 확인하고, 미세조직별 상분포를 확인하기 위해서 동일 시편을 폴리싱 한 후 후방산란전자 회절분석기(EBSD)를 활용하여 미세구조를 분석하였다. 그리고 소켓 용접부에서 발생한 부식의 형상을 관찰하고 미세조직 별 화학 조성의 차이점을 분석하기 위해서 부식 관찰용 시편(Fig. 2b)의 모재와 용접재, 부식 발생부를 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산형 분광분

석기(EDS)를 활용하여 화학성분을 분석하였다.

## 2.3 국부적 부식 원인 분석

소켓 용접부의 부식 형상과 미세조직 분석 결과를 근거로 소켓 용접부에서 국부적 부식이 발생한 원인을 제시하고 부식 단계별 현상을 도식화하였다. 이를 통해 스테인리스강 재질 해수배관 소켓 용접부의 부식과 관련된 종합적인 결론을 도출하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 분석 결과

에칭한 용접부 시편의 미시적 조직을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 기저(어두운 음영) 부분은  $\gamma$ -오스테나이트 조직이며 밝은 띠는  $\delta$ -페라이트 조직인데,  $\delta$ -페라이트 조직이  $\gamma$ -오스테나이트 조직 내에 길이 방향으로 규칙적으로 형성된 것을 확인할 수 있다. 용접 과정에서 응고 초기에는 오스테나이트 조직이 형성되고, 오스테나이트의 수지상정(Dendrite) 조직 사이에서 페라이트 조직이 형성되며 최종적으로 오스테나이트 기저에 페라이트 조직이 형성되는 형태로 응고되는데 [10,11], 합금원소는 액상에서 고상으로 응고될 경우 고상과 액상의 계면에서 액상 측에 높게

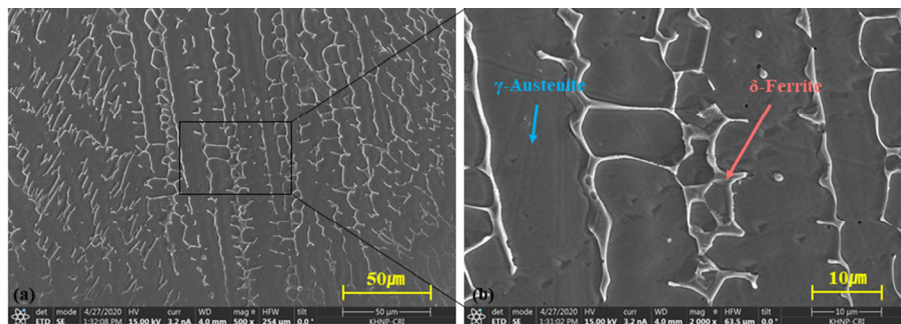


Fig. 3 Micro-structure of welds.

Table 3 Welds components of EDS (wt%)

Materials	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	Fe
$\gamma + \delta$	0.48	18.60	1.80	9.59	2.24	Bal.
$\gamma$ -austenite	0.41	18.29	1.99	12.06	1.38	Bal.
$\delta$ -ferrite	0.39	25.5	1.52	5.16	2.37	Bal.

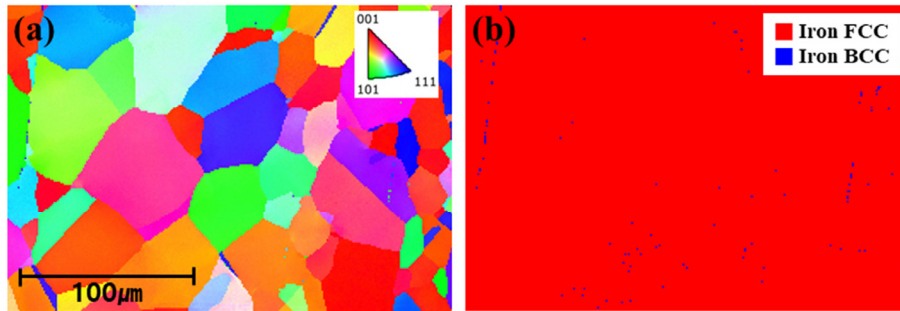


Fig. 4 IPF image of pipe (500×).

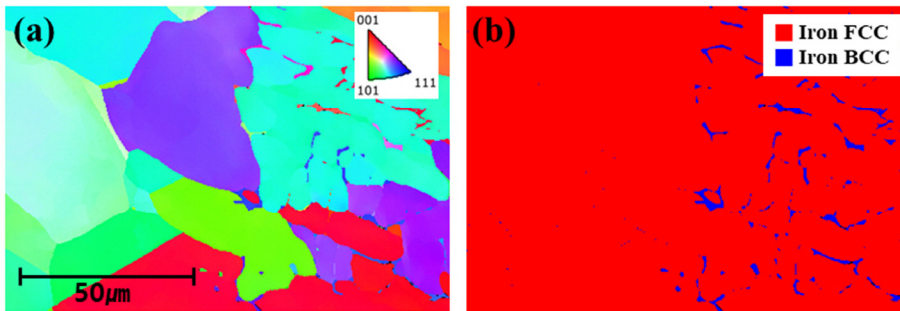


Fig. 5 IPF image of pipe and welds boundary (1,000×).

분배되기 때문에 응고 속도가 느린 덴드라이트 경계부에 높게 편석되면서 2상 사이에서 재분배된다 [12,13].

Table 3은  $\delta$ -페라이트와  $\gamma$ -오스테나이트 조직의 화학성분 분석 결과를 나타낸다. 일반적으로 용접부 응고과정에서 오스테나이트 형성물질인 망간, 니켈, 탄소, 질소 등은 오스테나이트상에 편석되고 페라이트 형성물질인 크롬, 몰리브덴, 규소 등은 페라이트상에 편석이 되는 것으로 알려져 있는데 [12], 본 소켓 용접부의 화학성분 분석 결과에서도 앞에서 설명한 현상과 동일하게 망간, 니켈 등의 원소는  $\delta$ -페라이트에 비해  $\gamma$ -오스테나이트에 많이 편석되고, 크롬, 몰리브덴 등은  $\delta$ -페라이트에 많이 편석된 것으로 확인되었다.  $\gamma$ -오스테나이트의 크롬 함량이 전체 용접부에 비해서 약 0.3% 낮게 측정되었지만, 상온에서 스테인리스강의 내식성은 크롬 함량이 약 12%를 넘으면 충분히 확보가 되기 때문에 부식 및 피팅 저항성이 크게 낮아지는 않았을 것으로 판단된다. 하지만  $\delta$ -페라이트와  $\gamma$ -오스

테나이트 간의전위차 때문에 부식환경에서 용접부내 2개의 미세조직간에 미세전류가 흐르게 되고, 그 결과 용접부내 활성이 큰 조직인  $\gamma$ -오스테나이트 영역에서 마이크로 갈바닉(Micro-galvanic) 현상의 영향으로 국부적 부식 속도가 가속화되었을 가능성은 높은 것으로 판단된다.

Fig. 4는 EBSD를 이용하여 배관 모재(STS 316L)에 대한 IPF (Inversed pole figure) 사진을 나타내었다. Fig. 4a에서 나타낸 것 같이 모재의 대부분은 오스테나이트 상으로 이루어져 있으며, Fig. 4b와 같이 일부 오스테나이트 상 경계 및 내부에  $\delta$ -페라이트 상이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 배관 모재(STS 316L)/용접부(ER316L) 경계에서의 IPF사진을 나타내었다. Fig. 5a와 b를 통해 모재와 용접부의 경계를 기준으로 용접부 영역에는  $\delta$ -페라이트 상의 분율이 높아진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 2b의 용접부 부식 영역(a),(b),(c)을 전자현



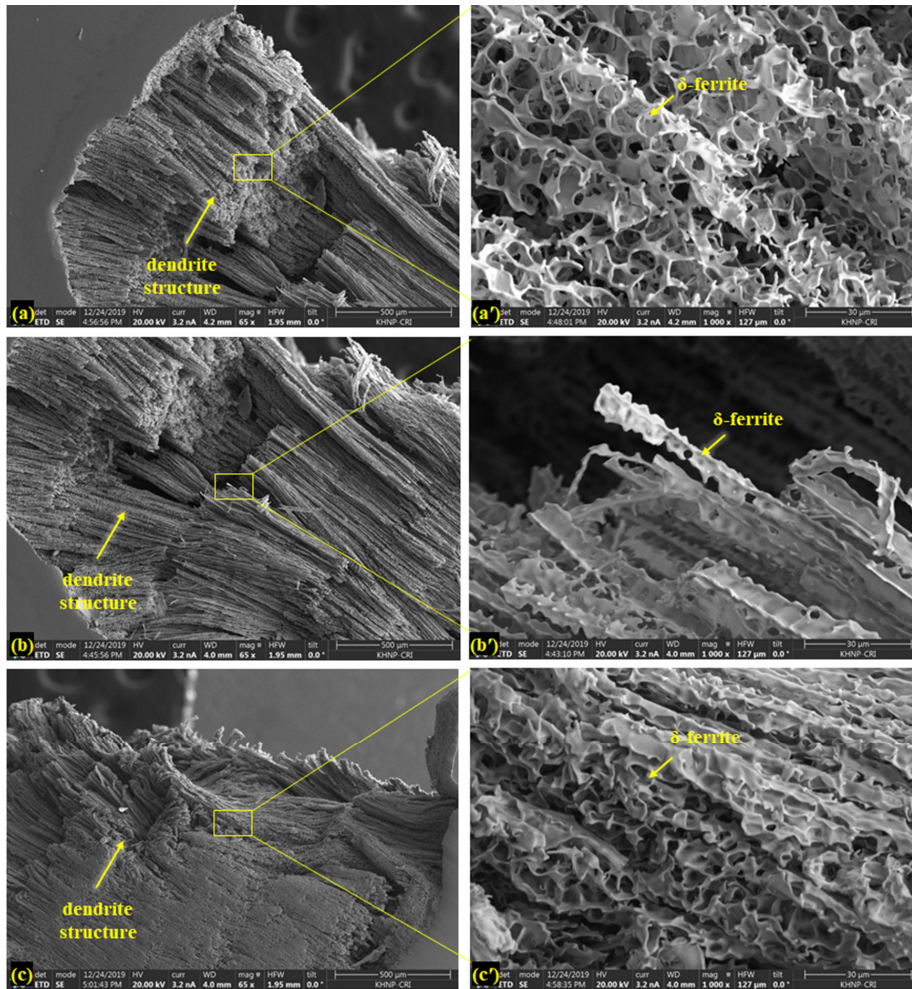
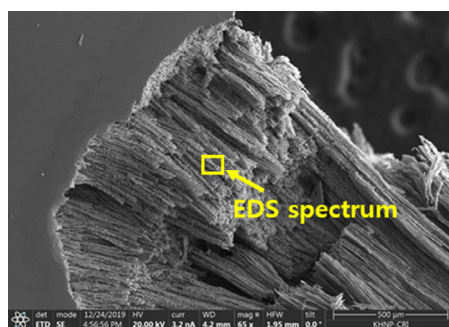


Fig. 6 SEM observation of corroded parts (a, b, c) of Fig. 2).



Element	wt%
Si	0.44
Cr	30.24
Mn	1.79
Fe	62.09
Ni	3.47
Mo	1.96
Total	100.00

Fig. 7 Chemical composition of corroded part using EDS.

미경으로 관찰한 사진이다. Fig. 3의 사진에서 공통적으로 섬유상 형태의 덴드라이트 구조가 확인되며 특히 섬유상 구조를 확대한 사진(Fig. 6a',b',c')에서는 스펀지 형태의 조직( $\delta$ -페라이트)만 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 부식된 영역의 화학성분을 분석한 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

앞서 미세조직별 화학성분 분석 결과와 마찬가지로 부식 영역은  $\delta$ -페라이트 조직으로 구성되어 있기 때문에 ER316L 용접부에 비해 크롬의 분율이 높고 니켈의 분율이 낮은 것으로 분석되었다.

부식영역 관찰 결과로부터 소켓 용접부 부식은  $\gamma$ -오스

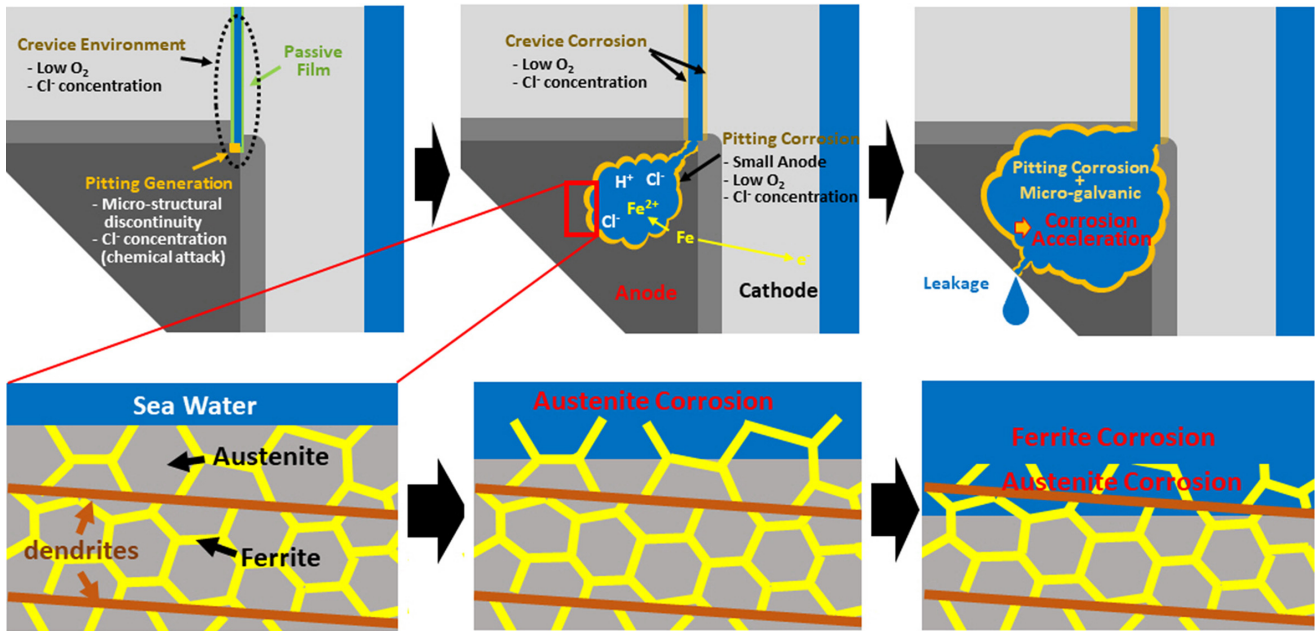


Fig. 8 Schematics of corrosion stages in socket weldment.

데나이트 조직이 선택적으로 부식이 되고, 이후  $\delta$ -페라이트 조직이 부식되는 과정으로 진행된 것을 알 수 있다.

### 3.2 국부적 부식 발생 원인 분석

소켓 용접부에서 발생한 부식을 단계적으로 도식화하여 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 소켓과 배관 사이에 존재하는 포켓 영역에 해수가 정체되면서 틈새 환경이 형성되고 산소 결핍과 염소이온( $\text{Cl}^-$ ) 농축 현상이 일어나게 되고, 이러한 현상은 시간이 경과함에 따라 틈부식과 공식의 발생을 야기시킨다. 이후 발생한 공식이 재료 내부로 진행되는데, 용접부의 전위 포텐셜이 모재에 비해 낮기 때문에 마이크로 갈바닉 현상에 의해 용접부의 부식이 가속화되어 용접부 내부 방향으로 부식이 빠르게 진행된다. 최종적으로 공식에 의해 용접부를 관통하는 핀홀(Pinhole)이 형성되면서 소켓용접부에 누설이 발생하게 된다. 즉, 스테인리스강으로 제작된 소켓용접부는 틈새환경과 Galvanic 부식에 의해 부식이 가속화되며, 해수환경에서 구조적 특성상 핀홀이 단기간에 형성될 수 있으므로, 높은 건전성이 요구되는 배관은 소켓 용접 적용을 지양해야 한다. 향후 스테인리스강 해수 배관에 소켓 용접을 적용하면서 수명 향상과 배관 건전성 확보를 위해서는 방식(Anticorrosion) 기법 개발이나 구조적인 형상 개선을 위한 추가 연구가 필요하다

### 4. 결론

해수분위기에 사용되는 스테인리스강 소켓용접부에서

발생한 핀홀을 대상으로 원인을 분석한 결과는 다음과 같다. 핀홀은 소켓 용접부가 가지는 구조적인 부식성 환경과 스테인리스강 용접부가 가지는 재료 미세조직적 불균형에 의한 갈바닉 부식 때문에 가속화 된 것으로 분석되었다.

### References

1. K. I. Byun, H. S. Jeong, and S. C. Seong, *J. KWS*, **17**, 89 (1999).  
<http://www.e-jwj.org/journal/view.php?number=347301>
2. T. Kim, *Proc. Korean Energy Society Conf.*, p. 21, Korean Energy Society, Busan, Korea (2019).
3. W. Kim, N. Kim, Y. Hyun, G. D. Kim, and Y. H. Son, *Proc. KWJS*, 131, (2013).
4. Y. Choi, S. Choi, and N. Huh, *Corros. Sci. Tech.*, **3**, 216 (2004).  
[http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf\\_viewer.htm?code=C00030500216](http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=C00030500216)
5. G. O. Subramanian, B. S. Kong, H. J. Lee, and C. H. Jang, *Sci. Rep.*, **8**, No. 15091 (2018).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-33422-x>
6. V. N. Rajakovic-Ognjanovic and B. N. Grgur, *J. Serb. Chem. Soc.*, **76**, 1027 (2011).  
<https://doi.org/10.2298/JSC100726090R>
7. ASME, BPVC Section II-Materials-Part A, Ferrous Material Specification (2019).

8. CP-P1 4K-2, Construction Package (1991).  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.2.29>
9. ASME, BPVC Section II-Materials- Part C, Specification for Welding Rod, Electrodes, and Filler Metals (2019).
10. N. Suutala, T. Takalo, and T. Moisio, *Metall. Trans.*, **11A**, 717 (1980).  
<https://doi.org/10.1007/BF02661201>
11. J.-W. Park and C.-k. Lee, *J. Weld. Join.*, **32**, 29 (2014).
12. J. C. Lippold, Ph. D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY (1978).
13. Y. Arata, F. Matsuda, and S. Katayama, *Trans. Jpn. Weld. Res. Inst.*, **5**, 135 (1976).  
<https://doi.org/10.1007/BF00167270>