

배관 실험장치를 이용한 배관 내면의 음극방식 효과에 관한 실험적 연구

정진아¹ · 이두형² · 김문수[†]

(Received March 4, 2019 ; Revised May 20, 2019 ; Accepted May 22, 2019)

Cathodic protection for inner surfaces of pipes using piping experiment equipment

Jin-A Jeong¹ · Du-Hyeong Lee² · Munsu Kim[†]

요약: 해수를 이용하여 시스템을 냉각하는 선박이나 에너지플랜트와 같은 설비들은 운항 및 시스템 가동을 위해서 기기들을 지속적으로 필요적으로 냉각시킬 수 있어야 하므로 대부분 설비들이 해수를 냉각수로 사용하고 있다. 하지만 해수에 포함된 부식성 인자들로 인해 해수 배관에서 부식으로 인한 누설사고가 빈번하게 발생한다. 이러한 해수환경에서 금속 부식을 방지하기 위한 방법으로 희생양극법과 외부전원법이 주로 이용되고 있는데, 배관 내면에서의 부식 방지를 위한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 해수배관 내면의 부식을 방지하기 위해 탄소강 시편을 이용하여 수조 내부에 외부전원법 음극방식을 적용하는 실험을 하였다. 실험결과, 방식전류밀도의 분포, 시편 표면의 부식과 방식상태 및 갈바닉 부식의 억제효과를 통하여 외부전원식 음극방식에 의한 배관내면의 방식효과를 확인할 수 있었다.

주제어: 음극방식, 해수배관, 갈바닉부식, 외부전원법, 정전위

Abstract: Marine facilities such as vessels often incorporate seawater as a coolant in their systems for performing continuous cooling. However, corrosion can occur owing to the presence of corrosive contents in seawater. Although methods such as sacrificial anode cathodic protection and impressed current cathodic protection (ICCP) are employed for addressing the issue of corrosion, there is marginal progress in research conducted on the corrosion of pipes' inner surfaces. Hence, in this study, a cathodic protection test was conducted by employing piping experiment equipment for carbon steel specimens and by applying the ICCP method. Effects on the pipes' inner surfaces were experimentally analyzed through application of the ICCP method by studying the deviation of cathodic protection current density. Furthermore, aspects such as corroded conditions of the specimens' surfaces and the effect of inhibition on galvanic corrosion were investigated.

Keywords: Cathodic protection, Seawater pipe, Galvanic corrosion, Impressed current cathodic protection (ICCP), Potentiostatic polarization

1. 서론

과학과 기술의 발달로 조선 및 해양 관련 산업은 급속하게 성장함에 따라 선박, 해양플랜트 및 발전소와 같은 해양 관련 구조물의 대형화와 함께 안전에 대한 중요성이 부각되고 있다[1]. 선박을 포함한 해양 관련 설비들의 경우, 운항 및 시스템 가동을 위해서 기기들을 지속적, 필요적으로 냉각시킬 수 있어야 하므로 대부분 설비들이 해수를 냉각수로 사용하고 있다. 해수를 사용하기 때문에 얻을 수 있는 경제성, 자원의 무한함과 같은 장점에 반하여 해수의 염분, 강한 부식성 인자들로 인해 배관 계통에서 부식 손상 및 파공이 발생하는 문제점이 수반된다.

선박, 화력발전소, 원자력 발전소 등 에너지 플랜트에서

부식으로 인한 문제가 발생하는 경우, 선박의 운항 불능 상태, 발전 중단, 플랜트 설비의 시스템 중단과 같은 사태가 발생하게 된다. 플랜트 설비의 시스템이 중단되면 보일러 증기 압력의 과도한 상승으로 인한 폭발, 발전 중단으로 인하여 전력공급에 차질이 발생하게 되고, 선박의 경우 악천후 상황에서는 추진력 상실로 인하여 침몰의 위험에 직면하게 된다. 또한 시스템 재가동을 위해 많은 시간과 노력이 요구되는 등 직·간접적으로 사회적 및 경제적 막대한 손실이 발생하게 된다[2][3].

부식에 의한 배관 손상으로 국내의 경우, 1998년 울진원전 1호기, 2012년 12월 한빛원전 1호기, 2013년 6월 월성원전 4호기에서 냉각 해수계통의 파공 및 누설사고 등 부식에

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9217-7211>): Research Assistant, Department of Ship Operation, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: anstn0127@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4206

¹ Professor, Department of Ship operation, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: jina@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4206

² Affiliated Professor, Department of Ship operation, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: dhlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4206

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의해 배관이 손상되는 사례가 있었다. 해외의 경우, 2004년 일본의 미하마 원전 3호기에서 해수 배관이 파단되어 4명이 사망하고 5명이 중경상을 입는 사고가 보고되고 있다[4].

해수배관에서 부식에 의한 파공이나 누설이 발생하였을 때 이를 클램핑(Clamping)이나 밴딩(Banding)과 같은 방법으로 임시조치를 하여 사용하고 배관을 교체하지만[5] 빈번하게 배관을 교체하는 것은 상당한 비용의 문제를 초래한다[6].

그럼에도 불구하고, 해수 배관 내면에서의 방식 기술 관련 연구 및 개발은 미비한 상태이며 배관 내면에서 발생하는 부식을 예방하기 위한 연구개발이 필요하다. 부식을 막는 기술로 방식대상보다 활성인 양극 금속을 연결하여 양극금속이 부식되면서 방식하는 희생양극법과 직류전원에 방식대상과 불용성 양극을 연결하여 전류를 공급하는 방법으로 방식하는 외부전원법이 있다[7].

본 연구에서는 직류전원장치에 의한 외부전원식 음극방식 시스템을 배관 내면에 적용하여 배관 내부에서 발생하는 배관 금속의 부식을 막기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 통해 배관 내면에서의 방식효과를 고찰하는 것이 연구의 목적이다.

2. 실험방법

2.1 시편

배관 내면 음극방식 실험에 사용된 시편은 Figure 1과 같다. 일반적으로 선박에서 사용되는 배관과 밸브의 재질이 탄소강과 구리합금으로 이루어져 금속 간에 접촉이 있을 시 갈바닉부식이 일어나는 경우가 많다. 따라서, 이러한 갈바닉 부식 상태의 조건 또한 고려하기 위하여 시편의 종류는 탄소강, 구리합금으로 2가지를 사용하였다. 시편의 크기는 100 mm × 100 mm × 5 mm 이며 시편의 한 면에 시편 간에 전기적으로 연결이 용이하도록 구멍을 가공하였다. 각 시편의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.

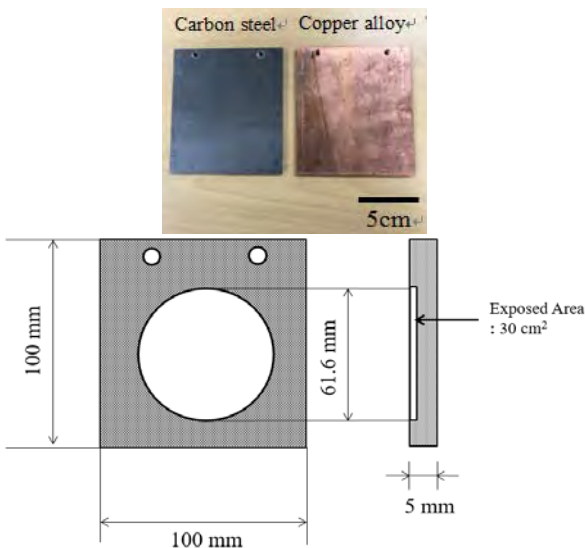


Figure 1: Specimen for cathodic protection test in the water tank

Table 1: Chemical composition of carbon steel and copper alloy

| Carbon Steel | C | Si | Mn | P | S | Fe |
|--------------|------|------|-----|-------|-------|------|
| KS D 3507 | 0.07 | 0.01 | 0.4 | 0.014 | 0.007 | Bal. |

| Copper alloy | Fe | Ni | Pb | Zn | Mn | Cu |
|--------------|---------|----------|-------|------|------|------|
| C70600 | 1.0~1.8 | 9.0~11.0 | ≤0.05 | ≤1.0 | ≤1.0 | Bal. |

2.2 실험장치

Figure 2는 배관 내면의 음극방식 효과 실험을 위해 제작된 배관실험장치의 모습이다. 수조에 청수 및 천연해수를 채우고 펌프를 이용해 배관실험장치에 물을 공급 및 순환하였다. 배관실험장치는 길이 1,550 mm, 폭 150 mm, 높이 160 mm의 단면이 직사각형이며, 시편의 일정한 면적(30 cm²)을 용액에 노출 시키기 위해 지름 61.6 mm인 5개의 구멍을 배관실험장치 상부에 가공하였다. 이 구멍에 시편을 배관실험장치 내부의 유체 흐름에 평행하게 설치하였고, 배관실험장치 2개를 가요성 호스(Flexible hose)로 연결하였다. 방식을 위한 장비로 두께 0.5 mm인 봉형(Rod type)의 혼합금속 산화물(MMO, Mixed Metal Oxide)양극을 배관실험장치 내부에 설치하였고, 방식전류 공급을 위해 다채널 멀티 전원장치를 사용하였다. 전위 측정에 쓰는 기준전극은 은-염화은(Silver-silver chloride) 전극을 사용하였다. 배관실험장치의 도면은 Figure 3에 나타나 있으며 시편과 양극의 설치위치는 Figure 4에 나타나 있다.



Figure 2: Overall appearance of test apparatus for cathodic protection in the piping experiment

배관 실험장치를 이용한 배관 내면의 음극방식 효과에 관한 실험적 연구

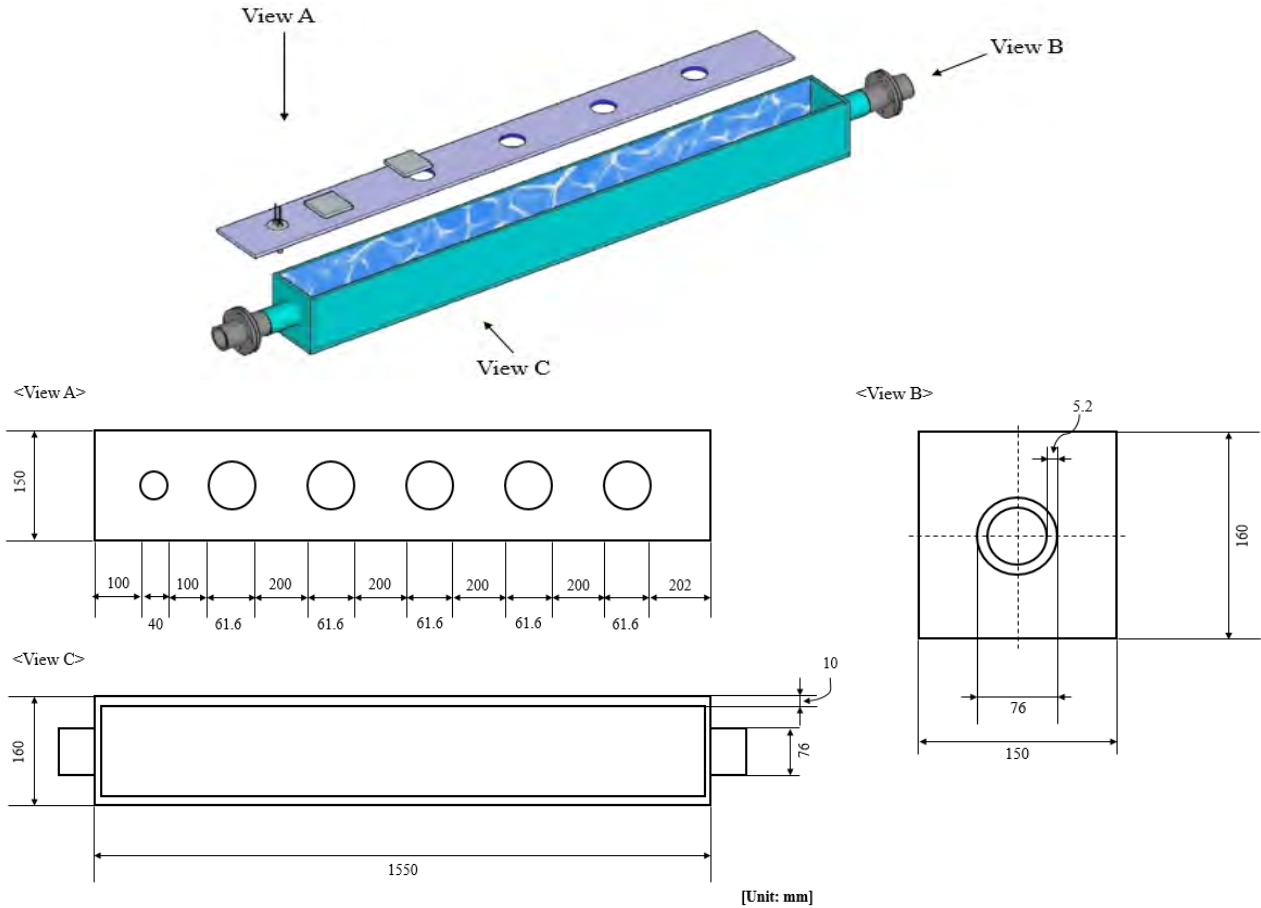


Figure 3: Drawing of the piping experiment equipment for cathodic protection test

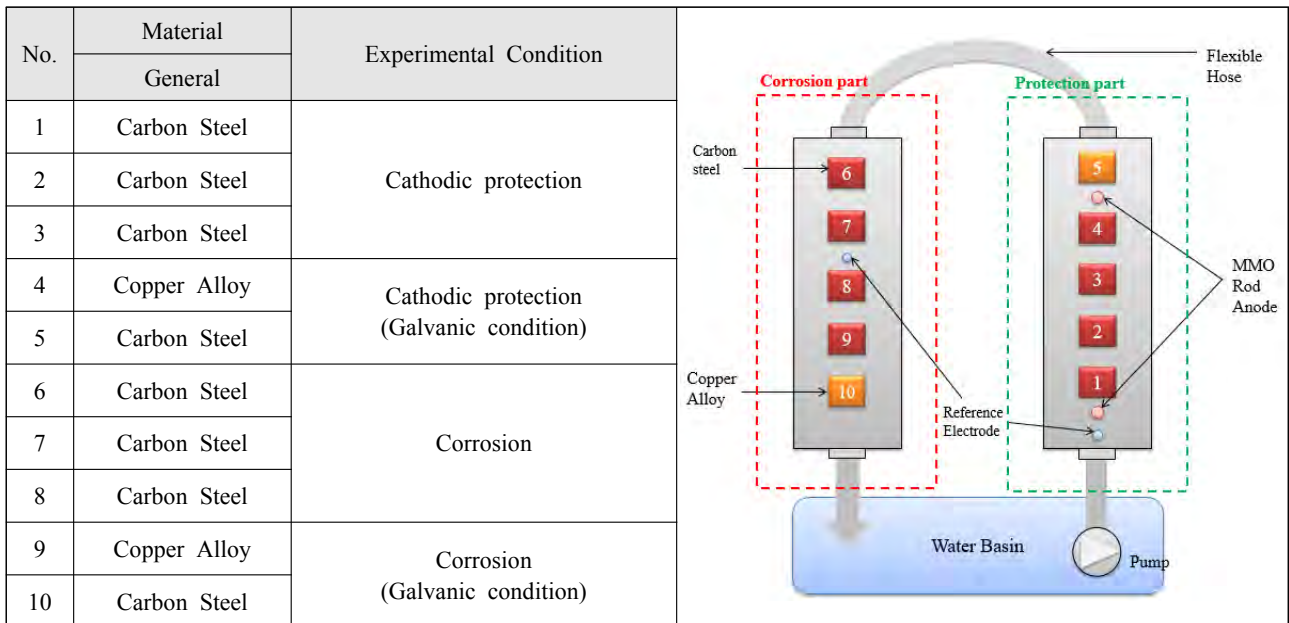


Figure 4: Arrangement of specimens and anodes

2.3 실험방법

No.1~5 시편은 음극방식을 적용하였고, No.6~10 시편은 음극방식을 적용하지 않은 상태에서 부식되도록 하였

다. 또한 구리 합금을 이용하여 탄소강 시편과 전기적으로 연결한 뒤 갈바닉 부식조건을 형성하였다. 음극방식을 적용하는 시편은 방식전위를 $-1,100 \text{ mV/SSCE}$ 로 유지하면서

방식하고, 음극방식을 적용하지 않은 시편은 자연적으로 부식이 일어나도록 하여 결과를 비교하였다. 실험환경은 청수환경 및 해수환경을 비교하기 위하여 청수 및 자연해수를 이용하였다. 또한, 유속에 대한 영향을 확인하기 위해 정지상태와 펌프(Pump)를 기동하여 유체를 순환시키면서 유속이 있는 상태의 환경을 조성하였으며 실험은 각 조건별 7일 동안 진행하였다. 실험 후 표면의 녹을 제거한 뒤 전체 면적 대비 부식손상된 면적비로 표면의 부식정도를 확인하였다. 실험조건들은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2: Experimental set up of cathodic protection test in the water tank

| Parameter | Value |
|--------------------|------------------------------|
| Specimen size (mm) | 100 (W) × 100 (H) × 5 (D) |
| Source of water | Tap water / Seawater |
| Temperature (°C) | 25 |
| Running time (day) | 7 |
| Kinds of specimens | Carbon steel Copper alloy |

3. 실험결과

Figure 5는 정지 중인 청수와 해수에서 탄소강 시편의 음극분극 실험결과를 나타낸 것이다. 청수에서 실험한 시편의 음극분극 곡선에는 활성화분극 및 용존산소의 환원반응에 의한 농도 분극 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 해수에서 실험한 시편의 음극분극 곡선에서는 활성화분극 및 농도분극 특성이 나타나다 약 -1,200 mV/SSCE 이하의 전위에서 전류밀도가 급격히 증가하였다. 이는 수소이온의 환원반응에 의해 수소가스가 발생하면서 전류밀도가 급격히 증가했기 때문이다. J. A. Jeong *et al.* [8]의 실험에 의하면 해수의 정지상태와 유속이 있는 상태에서 탄소강 시편의 음극분극 시 미방식으로 인한 손상이 발생하지 않기 위해서는 전위 -1,300 ~ -1,200 mV/SSCE로 설정해야 한다. 유속이 있는 경우 용존산소의 활동도가 증가함에 따라 한계환산전류밀도 값이 증가하여 활성화분극과 농도분극 구간에서 전류밀도의 차이가 발생하게 된다. 본 실험에서는 정지 중인 해수에서 음극분극 실험 하였을 때, 농도분극 구간에 해당하는 -1,150 ~ -1,100 mV/SSCE 전위 범위가 미방식 및 수소취화로 인한 손상을 막을 수 있는 구간임을 확인하였다. 따라서, 본 실험의 배관실험장치에서는 최소한의 전류를 공급하면서 효율적인 방식효과를 확인하기 위한 목적으로 방식전위의 설정을 -1,100 mV/SSCE로 하여 실험을 진행하였다.

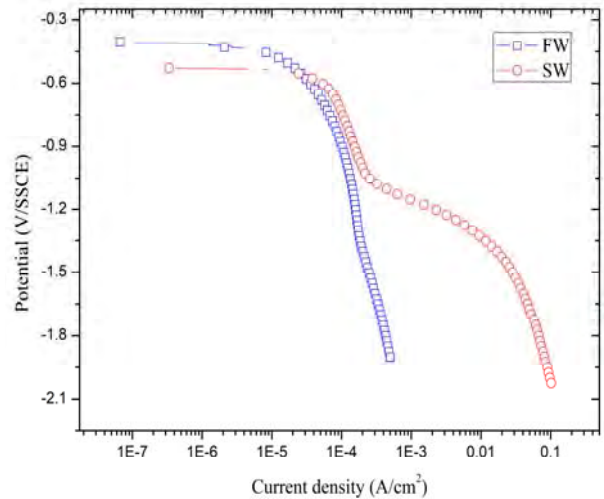


Figure 5: Cathodic polarization results of specimens in fresh water and seawater

Figure 6은 3개의 탄소강 시편을 전기적으로 연결한 상태에서 -1,100 mV/SSCE의 전위를 유지할 때 4개의 실험조건에서 시편에 공급된 전류밀도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 유속이 없는 청수 환경(FW-NF)에서는 초기에 0.04 mA/cm²가 공급되다가 7일차에는 0.02 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 있는 청수 환경(FW-F)에서는 초기에 0.12 mA/cm²가 공급되다가 7일 차에는 0.10 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 없는 해수 환경(SW-NF)에서는 초기에 0.47 mA/cm²가 공급되었고 7일차에는 0.43 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 있는 해수 환경(SW-F)에서는 초기에 0.58 mA/cm²가 공급되었고 7일차에는 0.56 mA/cm²까지 감소하였다. 청수에서는 유속이 없는 환경보다 유속이 있는 환경에서 약 5 배정도 높은 전류밀도가 측정되었고 해수에서는 유속이 없는 환경보다 유속이 있는 환경에서 1.3 배 높은 전류밀도가 측정되었다. 청수와 해수간의 비교 시 유속이 없는 환경에서는 약 22 배의 전류밀도 차이가 나타났으며 유속이 있는 환경에서는 약 6 배의 전류밀도 차이가 확인되었다. 가장 낮은 전류밀도량을 보인 유속이 없는 청수 환경(FW-NF)와 가장 높은 전류공급량을 보인 유속이 있는 해수환경(SW-F)은 약 29 배의 전류밀도 차가 확인되었다. 이를 통해 청수보다는 가혹한 부식성 환경인 해수에서 방식을 위한 일정 전위를 유지하기 위해서 공급되는 전류량이 크다는 것을 확인하였다. 또한 유속이 생김으로써 야기되는 금속과 전해질 사이의 상대운동의 증가는 금속표면과 접해있는 확산층 장벽의 두께를 감소시키고 반응물의 이동을 증가시키기 때문에[9] 유속이 증가하면 표면을 정해진 음극전위로 유지하기 위해서 공급되는 전류의 양이 증가하게 되는 것으로 판단된다.

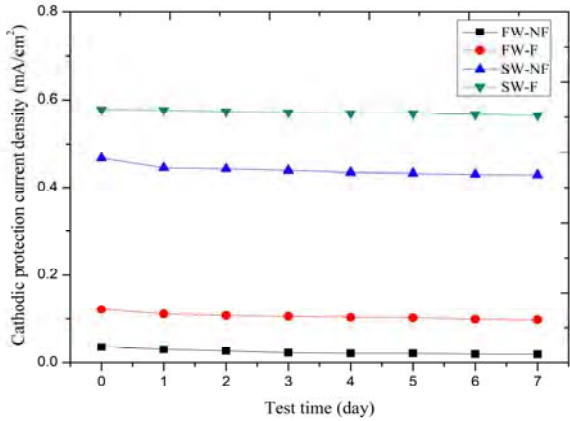


Figure 6: Cathodic protection current density maintaining -1,100 mV/SSCE for 7 days in general corrosion condition

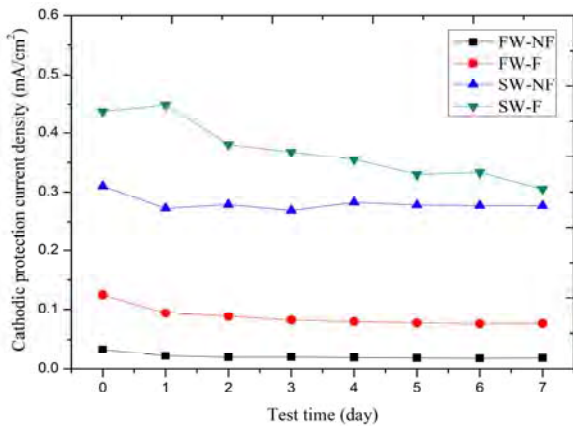


Figure 7: Cathodic protection current density maintaining -1,100 mV/SSCE for 7 days in galvanic corrosion condition

Figure 7은 탄소강 시편과 구리 시편을 2개를 연결하여 상대적으로 비(Active)한 금속인 탄소강 시편이 음극이 되고 귀(Noble)한 금속인 구리 시편이 양극이 되어 갈바닉 전류가 탄소강에서 구리로 흐르는 갈바닉 부식 조건 상태에서 -1,100 mV/SSCE의 전위를 유지할 때 4개의 실험조건에서 시편에 공급된 전류를 비교하여 나타낸 그래프이다. 유속이 없는 청수 환경(FW-NF)에서는 초기에 0.03 mA/cm²가 공급되다가 7일 차에는 0.02 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 있는 청수 환경(FW-F)에서는 초기에 0.13 mA/cm²가 공급되다가 7일 차에는 0.08 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 없는 해수 환경(SW-NF)에서는 초기에 0.31 mA/cm²가 공급되었고 7일차에는 0.28 mA/cm²까지 감소하였다. 유속이 있는 해수 환경(SW-F)에서는 초기에 0.44 mA/cm²가 공급되었고 7일차에는 0.31 mA/cm²까지 감소하였다. 청수에서는 유속이 없는 환경보다 유속이 있는 환경에서 약 4 배 높은 전류밀도가 측정되었고 해수에서는 유속이 없는 환경보다 유속이 있는 환경에서 1.1 배 높은 전류밀도가 측정되었다. 청수와 해수간의 비교 시 유속이 없는 환경에서는 약 14.8 배의 전류밀도 차가 나타났으며 유속이 있는 환경에서는 약 4 배의 전류밀도 차가 확인되었다. 가장 낮은 전류공급량을 보인 유속이 없는 청수환경(FW-NF)와 가장 높은 전류공급량을 보인 유속이 있는 해수환경(SW-F)은 약 16 배의 전류밀도 차가 확인되었다. 갈바닉 부식환경에서도 일반적인 부식환경과 유사한 방식전류밀도의 경향을 보였다.

Figure 8은 일반부식과 갈바닉 부식 두 조건 간의 방식전류밀도 값을 비교한 것이다. 청수에서 일반부식과 갈바닉 부식 환경의 시편에 공급된 전류밀도는 유속이 없는 경우

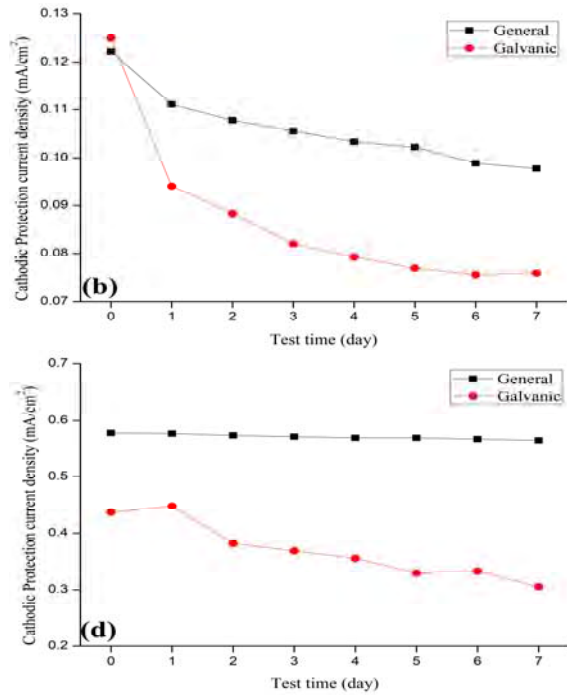
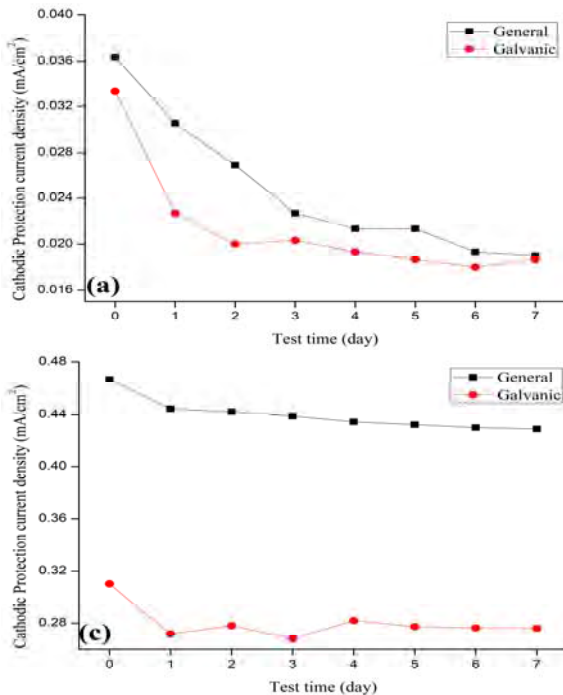


Figure 8: Comparison of cathodic protection current densities between general and galvanic corrosion conditions, (a): Fresh water without flow, (b): Fresh water with flow, (c):Seawater without flow, (d): Seawater with flow

와 존재하는 경우 모두 일반부식환경에 공급된 방식전류밀도가 갈바닉부식 환경보다 높게 측정되었다. 또한 해수에서도 일반부식환경에서 더 높은 방식전류밀도가 측정되었다. J. A. Jeong *et al.* [10]의 실험에 의하면 갈바닉 쌍에서 탄소강에서 구리합금과 스테인리스강으로 갈바닉 전류가 흐르는 것을 확인하였다. 이 때, 일정한 전위를 유지하여 음극방식 할 때 구리합금과 스테인리스 강에 공급되는 전류량은 탄소강보다 현저히 낮은 경향을 나타내었다. 해수

에서의 갈바닉계열(Galvanic series)에서는 구리가 탄소강보다 더 귀전위(noble potential)을 가진다. 따라서, 탄소강과 구리가 전기적으로 서로 연결되면 비(Active)방향의 전위를 가진 탄소강으로부터 귀(Noble)방향의 전위를 가진 구리로 전자들이 이동하게 된다. 갈바닉쌍으로부터 흐르는 전류는 외부 인가전류에서와 마찬가지로 금속 표면을 분극시키는데[3], 여기서는 구리 금속이 상대적으로 음극이 된다. 따라서, 방식을 위해서 설정된 전위를 유지하기 위해서 외부에

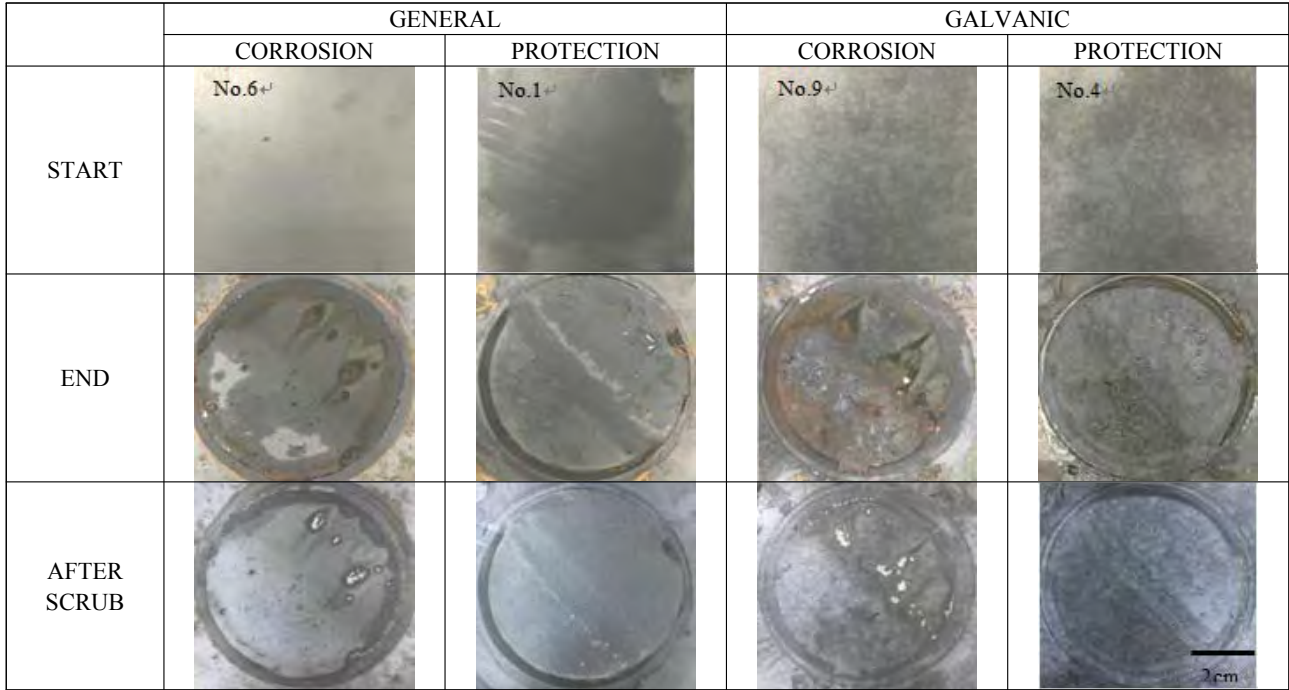


Figure 9: Comparison of photographs between corroded and protected specimens in fresh water without flow

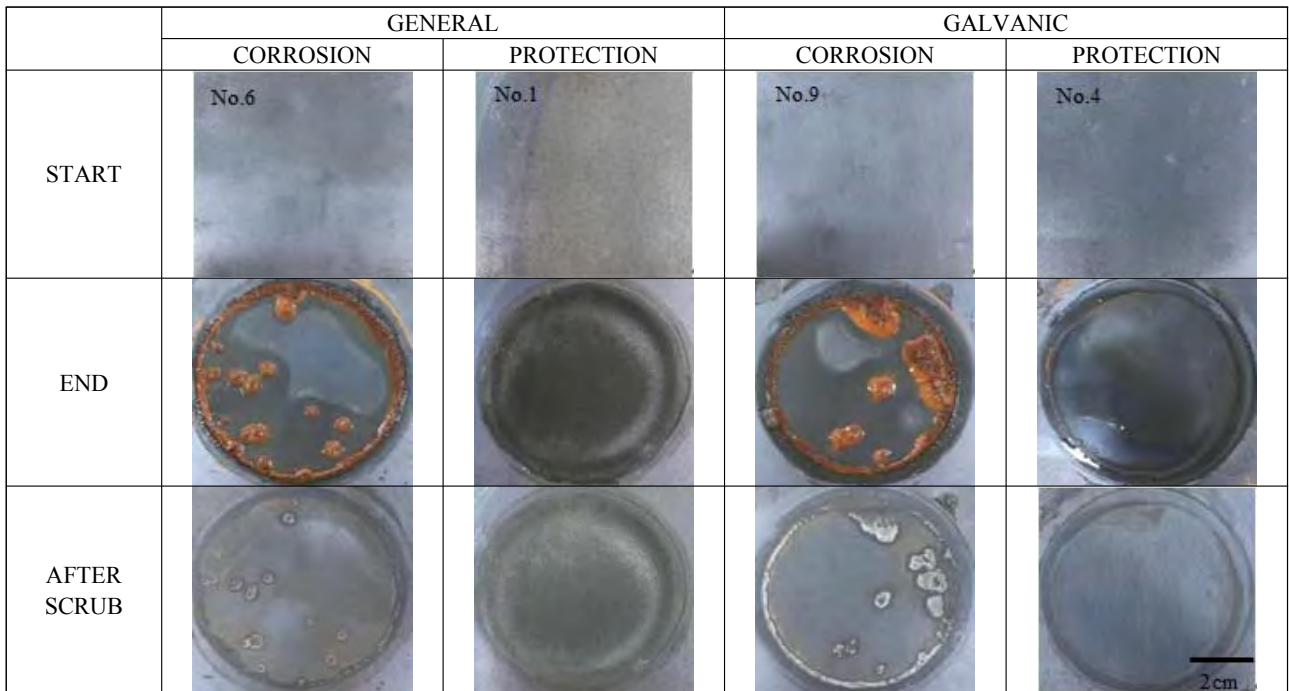


Figure 10: Comparison of photographs between corroded and protected specimens in fresh water with flow

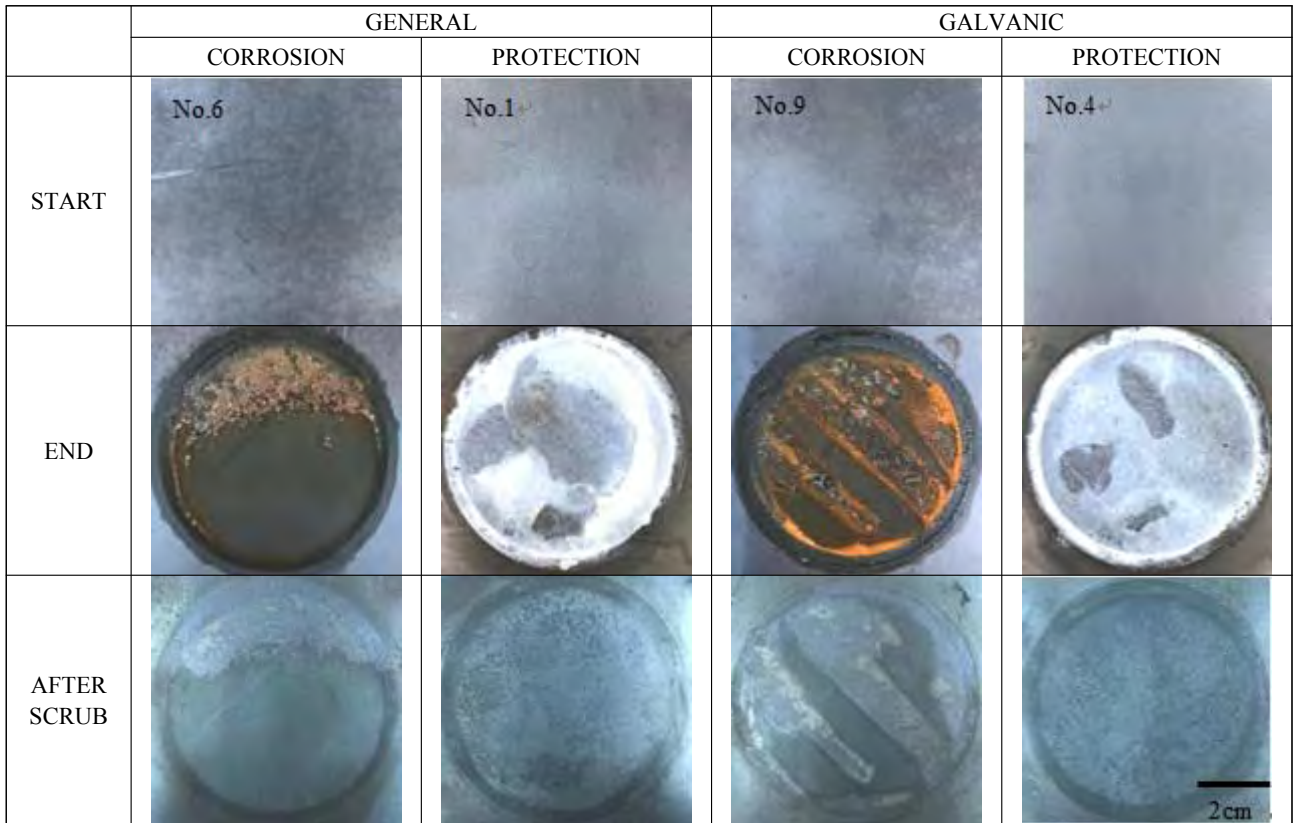


Figure 11: Comparison of photographs between corroded and protected specimens in seawater without flow

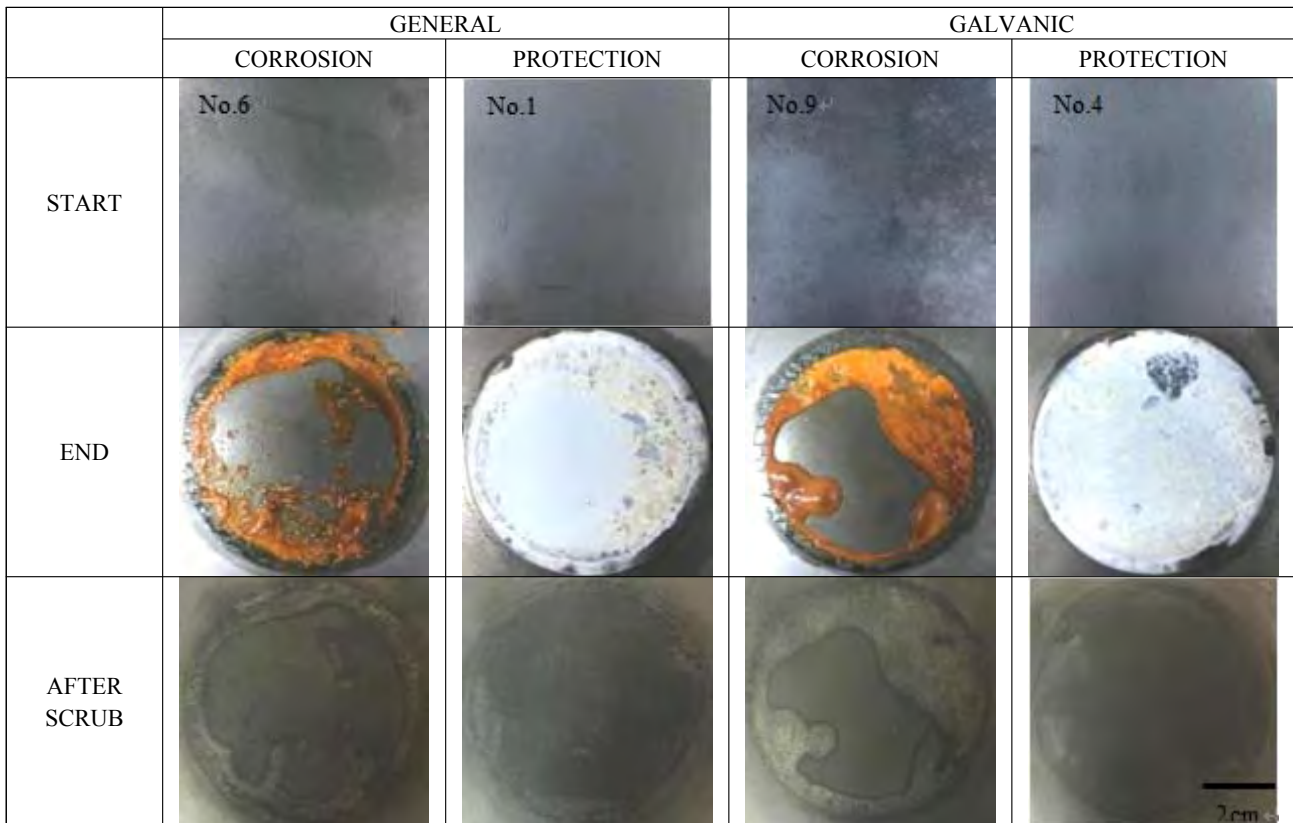


Figure 12: Comparison of photographs between corroded and protected specimens in seawater with flow

서 전류를 추가적으로 공급하였을 때, 지속적으로 탄소강에서 구리로 갈바니 전류가 흐르기 때문에 설정전위를 유지하기 위해서 탄소강에 더 많은 전류가 공급되고 갈바니 전류에 의해 상대적으로 음극분극 된 구리표면에서는 적은 전류가 흐르는 것으로 생각된다. 따라서, 전체적으로 방식전류를 공급해주어야 하는 일반부식조건에서보다 갈바니 부식 조건에서 상대적으로 공급된 전류량이 감소하여 일반 부식 조건과 비교하였을 때 전반적으로 낮은 전류밀도가 나타난 것으로 판단된다.

Figure 9는 유속이 없는 청수에서의 실험 전/후 시편 모습을 촬영한 것이다. 부식시킨 시편에서는 실험 종료 후 국소적인 영역에서 부식이 발생하였다. 방식한 시편에서는 실험 전과 후의 표면 모습에서 큰 차이가 없었다.

Figure 10은 유속이 있는 청수에서의 실험 전/후 시편 모습을 촬영한 것이다. 부식시킨 시편에서는 실험 종료 후 유속이 없는 환경에서 보다 좀 더 많은 영역에서 부식이 발생하여 표면이 손상된 것을 확인할 수 있었다. 부식 손상이 있는 영역이 유속이 없는 청수환경에서보다 넓었으며 방식한 시편과의 차이가 확연히 드러나는 모습을 보였다. 이는 유속이 증가함에 따라 표면에서의 물질전달 경계층의 두께 감소로 부식속도가 증가함과 동시에 물리적 침식이 작용하면서 국소적인 부분에서 손상이 꾸준히 증가한 것으로 판단된다[11]. 방식한 시편에서는 유속이 없는 청수 실험에서와 마찬가지로 실험 전과 후의 표면 모습에서 큰 차이가 없었다.

Figure 11은 유속이 없는 해수에서의 실험 전/후 시편 모습을 촬영한 것이다. 실험 종료 후 일반적인 부식을 진행한 시편에서는 표면의 약 35 % 정도가 부식됨을 확인하였다. 이종금속과 연결하여 갈바니 부식의 영향을 받은 시편에서는 80 % 이상의 표면에서 부식이 발생하여 표면이 손상된 것을 확인할 수 있었다. 구리와 탄소강의 갈바니 계열에서 구리가 더 귀금속이므로 탄소강에서 갈바니 전류가 구리로 공급되어 탄소강에서는 부식이 촉진되는 갈바니 부식이 일어나 더 많은 손상이 나타난 결과임을 알 수 있다[12][13]. 또한 부식된 시편에서는 손상이 있는 부분에서 유체의 노출된 부분과 그렇지 않은 부분의 경계가 부식손상으로 인해 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 금속과 비금속 사이의 틈에서 발생하는 침전부식(Deposit corrosion)의 영향이 있는 것으로 판단된다. 특히, 갈바니 전류의 영향을 받은 시편에서는 경계선이 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 방식한 시편에서는 실험 후의 표면에서는 음극방식을 통해 해수가 전기분해되어 생성되는 수산화 이온과 탄산이온이 바닷물 속 마그네슘, 칼슘 이온들과 결합하여 형성된 무기질의 석회질 피막 생성물이 표면에서 확인되었다[14]. 스크립(Scrub) 이후에 표면을 확인하였을 때, 표면의 손상은 확인되지 않았다.

Figure 12은 유속이 있는 해수에서의 실험 전/후 시험 모습을 촬영한 것이다. 부식시킨 시편에서는 실험 종료 후 유속이 없는 환경에서 보다 좀 더 넓은 지점에서 부식이 발

생하여 표면이 손상된 것을 확인할 수 있었다. 방식한 시편에서는 유속이 없는 해수 실험에서와 마찬가지로 실험 전과 후의 표면 모습에서 큰 차이가 없었다. 청수보다 가혹한 부식성 환경인 해수의 영향과 유속이 생기면서 물리적 침식의 시너지 효과로 손상이 증가하게 되었다. 또한 유속이 증가하면서 반응물의 이동을 증가시켰고 음극반응의 전착 피막이 아직 형성되지 않은 음극표면을 정해진 방식전위를 유지하기 위해 더 많은 방식전류가 공급되었다. 이 결과 해수의 전기분해가 활발하게 일어나 표면의 무기질 생성물의 양이 증가하였다[14]. 유속이 증가할수록 전착물의 두께는 감소하지만 전위를 유지하기 위한 전류공급 또한 증가하여 생성물의 양이 늘어난 것으로 생각된다.

4. 결 론

외부전원식 음극방식 시스템을 배관실험장치에 적용하여 배관 내면의 음극방식 효과에 관한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 청수와 해수에서 탄소강 시편의 음극분극 실험결과 미 방식에 따른 손상을 막기 위해서는 $-1,100 \sim -1,150$ mV/SSCE로 방식전위를 설정해야 할 것으로 판단된다.
- 나. 유속이 존재하지 않는 환경에서의 시편에 공급된 전류 밀도는 청수에서 0.02 mA/cm², 해수에서 0.43 mA/cm²로 해수에서 약 22 배의 높은 방식전류밀도가 공급되었다. 또한 청수에서 유속이 존재하는 환경에서 0.10 mA/cm², 유속이 존재하지 않는 환경에서 0.02 mA/cm²의 전류밀도가 공급되어 유속이 존재하는 환경에서 5 배 높은 방식전류밀도가 공급되었다. 해수에서 유속이 존재하는 환경은 0.56 mA/cm², 유속이 존재하지 않는 환경은 0.43 mA/cm²으로 유속이 존재하는 환경에서 1.3 배 높은 방식전류밀도가 공급되었다. 배관 내면의 경우 정적인 환경보다 주로 유체가 흐르는 환경이 형성되므로 배관 내면의 방식설계 시 이를 충분히 고려해야 한다.
- 다. 시편의 표면 확인 결과, 일반적인 부식환경보다 갈바니 부식환경에서 더 큰 부식손상이 확인되었으며, 외부전원식 음극방식을 적용하였을 때 모두 방식됨을 확인하였다. 외부전원식 음극방식을 배관 내면에 적용함으로써 배관과 밸브, 연결부에서 발생하는 갈바니 부식, 틈 부식을 효과적으로 제어 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 라. 배관 내면에 외부전원식 음극방식을 적용 할 때, 양극의 형상이나 설치 위치에 따라 방식효율 및 특성이 달라지기 때문에 그에 따른 추가적인 실험이 필요할 것으로 생각된다.

Author Contributions

Conceptualization, J. A. Jeong and M. Kim; Methodology, J. A. Jeong; Software, M. Kim; Validation, J. A. Jeong and M. Kim; Formal Analysis, M. Kim and D. H. Lee;

Investigation, M. Kim and D. H. Lee; Resources, M. Kim and D. H. Lee; Data Curation, J. A. Jeong and M. Kim; Writing-Original Draft Preparation, M. Kim; Writing-Review & Editing, J. A. Jeong and M. Kim; Visualization, M. Kim; Supervision, J. A. Jeong; Project Administration, J. A. Jeong.

References

- [1] Y. Huang and D. Ji “Experimental study on seawater-pipeline internal corrosion monitoring system,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 135, no. 1, pp. 375-390, 2008.
- [2] J. Bhandari, F. Khan, R. Abbassi, V. Garaniya, and R. Ojeda, “Modeling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures - A technical review,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 37, pp. 39-62, 2015.
- [3] D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall, Inc., pp. 19-132, 1996.
- [4] F. Cattant, D. Crusset, and D. Feron, “Corrosion issues in nuclear industry today,” *Materials today*, vol. 11, no. 10, pp. 32-37, 2008.
- [5] J. A. Jeong, Y. K. Choo, C. K. Jin, and K. W. Park, “Numerical analysis results of the cathodic protection for the underground steel pipe by anode installation method,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 10, pp. 1212-1216, 2014.
- [6] S. A. A. Buhri, D. K. Kaithari, and E. Rasu, “Development of corrosion resistance coatings for sea water pipeline,” *International Journal of Students’ Research In Technolgy & Management*, vol. 4, no. 2, pp. 24-29, 2016.
- [7] H. McArthur, S. D’Arch, and J. Barker, “Cathodic protection by impressed DC currents for construction maintenance and refurbishment in reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 7, pp. 85-93, 1993.
- [8] J. A. Jeong, M. S. Kim, S. D. Yang, C. H. Hong, N. K. Lee, and D. H. Lee, “Study of the electrochemical polarization test of carbon steel in natural seawater,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 274-279, 2018 (in Korean).
- [9] K. J. Kim, K. M. Moon, and M. H. Lee, “A study on corrosion characteristic of steel structures in seawater,” *Maritime Industry Research Institute, Korea Maritime & Ocean University*, p. 3, 1997 (in Korean).
- [10] J. A. Jeong, M. S. Kim, S. D. Yang, C. H. Hong, N. K. Lee, and D. H. Lee, “Cathodic protection using insoluble anodes by delivering protection currents to the inner surfaces of carbon steel seawater pipes,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 280-296, 2018 (in Korean).
- [11] S. J. Lee, M. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Kim, “Effect of flow velocity on corrosion rate and corrosion protection current of marine material,” *CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 14, no. 5, pp. 226-231, 2015 (in Korean).
- [12] W. T. Son, W. S. Hwang, Y. O. Ahn, and Y. S. Park, “A study on galvanic corrosion of Cu- 30Ni in sea water,” *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, vol. 11, no. 4, pp. 21-32, 1982 (in Korean).
- [13] F. Mansfeld, G. Liu, H. Xiao, C. H. Tsai, and B. J. Little, “The corrosion behavior of copper alloys, stainless steels and titanium in seawater,” *Corrosion Science*, vol. 36, no. 12, pp. 2063-2095, 1994.
- [14] C. S. Lee, J. Kang, and M. H. Lee, “Properties analysis of environment friendly calcareous deposit films electrodeposited at various temperature conditions in natural seawater,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 779-785, 2015 (in Korean).