

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.363>

JCCT 2024-1-42

아연(Zn)희생양극 등가전위에서 부식피로균열 진전특성에 관한 연구

Evaluation of Corrosion Fatigue Crack Propagation Characteristics at Equivalent Potential of Zinc Sacrificial Anode

김 원 범*

Won Beom Kim*

요약 선박, 해양구조물 또는 해상풍력 발전설비 하부구조와 같이 해양환경에서 사용되는 강구조물은 부식이 쉽게 발생한다. 본 연구에서는 실험을 통하여 희생전극으로 많이 사용되는 아연전극의 방식전위와 동등한 -1050mV vs. SCE 에서 환경하중에 기인하는 부식피로균열 진전특성에 대하여 고찰하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 -1050mV vs. SCE 의 음극방식이 해수환경중의 피로균열 진전에 미치는 영향에 대해 합성해수중에서 파랑주기를 고려하여 실험적 고찰을 실시하였다. 음극방식에 의한 방식법은 부식을 차단하지만 과도한 방식은 화학반응에 의하여 수소를 발생시키며, 또한 석회질퇴적물을 발생시킨다. 피로균열진전율은 실험초기에는 해수부식환경하에서의 진전율보다 빠른 구간이 나타났다. 그리고 균열길이가 증가하여 응력확대계수 K 가 커질수록 균열의 진전율은 해수중의 피로균열진전율보다 느려지는 현상이 나타났다. 그러나 대기중의 균열진전속도보다는 항상 빠른 진전속도를 나타내었다.

주요어 : 부식, 음극방식, 아연희생전극, 파괴역학, 균열

Abstract Steel structures used in marine environments, such as ships, offshore structures or sub-structures in wind power generation facilities are prone to corrosion. In this study, the corrosion fatigue crack propagation characteristics due to the environmental load are examined by experiment at -1050 mV vs. SCE , which is equivalent to the anti-corrosion potential of zinc anodes that are widely used as sacrificial anodes. In this study, for this purpose, an experimental study is conducted on the effect of cathodic protection on the propagation of fatigue cracks in the seawater environment under the condition of -1050 mV vs. SCE , considering the wave period in synthetic seawater. Cathodic protection prevents corrosion; however, excessive protection generates hydrogen through chemical reactions as well as calcareous deposits. The fatigue crack propagation rate appeared to be faster than the rate in a seawater corrosion environment at the early stages of the experiment. As the crack length and stress intensity factor K increased, the crack propagation rate became slower than the fatigue crack propagation rate in seawater. However, the crack growth rate was faster than that in the atmosphere.

Key words : Corrosion Fatigue, Cathodic Protection, Zn Sacrificial Anode, Fracture Mechanics, Crack

*정회원, 울산과학기술대학교 조선해양시스템공학과 교수 (제1저자) Received: October 15, 2023 / Revised: November 6, 2023

접수일: 2023년 10월 15일, 수정완료일: 2023년 11월 6일

Accepted: November 10, 2023

게재확정일: 2023년 11월 10일

*Corresponding Author: wbkim@uc.ac.kr

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering,

Ulsan College, Korea

I. 서론

선박과 해양구조물 뿐만 아니라 부유식 및 고정식 해상풍력 발전설비의 하부구조와 같은 해양 구조물은 해양환경에서 반복하중을 받으며 강재에 대해 가혹한 해양의 부식환경에서 사용된다.

따라서 이들 구조물을 해상에서 부식으로부터 보호하기 위해 도장이나 희생전극에 의한 방식 또는 ICCP에 의한 음극방식에 의해 방식처리를 한다.

한편, 도장의 경우 잘 관리될 경우에는 선박이나 해양구조물이 수명에 이를 때까지 방식기능을 발휘하지만 해상에 떠있는 각종 부유물들은 충돌에 의해 선박이나 해양구조물의 도장을 조기에 박리시키는 원인이 될 수 있다.

그리고 내부에 실시된 도장의 경우에도 밸러스트 탱크등과 같이 부식이 잘 발생하는 위치이거나 관리의 정도에 따라 부식의 상태는 달라진다. 따라서 도장만 실시하기보다는 음극방식이나 ICCP를 병용하여 실시하는 경우가 많다. 한편 희생전극에 의한 음극방식을 실시하는 경우 희생전극을 설치한 가까운 위치에서는 과도한 방식이 일어날 수 있다.

따라서 이와 같은 과도한 방식이 이미 발생한 균열의 해수중 균열진전에 미치는 영향에 대해 고찰할 필요성이 있다. 본 연구에서는 아연 희생양극에 의한 방식법을 상정하여 아연의 전위에 상당하는 -1050mV vs. SCE [1]에서 부식피로균열진전특성을 실험적인 방법으로 파악하였다.

II. 연구 배경

본 연구와 관련되는 해양에서의 부식, 방식 및 부식피로를 주제로 하는 연구결과들이 다수 보고되어 있다. 예를 들어, 3.5% NaCl 수용액중 방식전위 -1050mV 에서 잠수함 선체와 해양구조물이 해수중의 반복응력을 받는 상황에서 고장력강에 대한 일정 응력확대계수범위(ΔK)에서 하중 주파수의 영향에 관한 연구결과[1]가 있으며, 해상풍력 구조물의 부식피로와 관련하여 피로균열은 해상구조물의 생산, 수송 및 설치 도중에 구조물에 미리 존재했던 결함으로부터 성장할 수 있으며, 이와 관련하여 해양 환경에서 피로균열의 성장에 영향을 주는 요소

에 대하여 음극방식의 영향을 포함한 기계적, 금속학적 및 환경적 변수를 고찰한 연구결과[2]가 있다.

그리고 선체구조용 고장력 TMCP강판에 대해 대기중, 해수중, -800mV vs. SCE 및 -950mV vs. SCE 에서 부식피로균열 전과거동에 대하여 고찰한 연구결과[3]가 있다.

최근의 해상풍력터빈에서는 고정식으로 모노파일타입, 삼각대타입, 재킷타입의 하부구조가 사용되며 부유식에서는 바지타입, 반잠수식, Spar, TLP 타입의 유형이 있다.

Fig. 1은 고정식 해상풍력터빈 지지구조물의 종류를 나타낸 그림이며[4], Fig. 2는 해상풍력터빈 지지구조물에 부착된 희생양극에 의한 방식장치를 나타낸 그림이다[5]. 천연해수에서의 방식전위는 -0.77V vs. SCE 이하이며, -1.0V 이하까지 전위를 낮추면 분자성 수소나 원자성 수소의 영향으로 응력작용시 수소취화로 인하여 대단히 짧은 시기에 파손될 우려가 있다는 연구결과가 있다[6].

부식환경에서 균열의 진전속도는 대기중의 균열 진전속도보다 매우 빠른 진전속도를 나타낸다. 선박이나 해양구조물에서 희생양극으로 많이 사용하는 아연의 경우 아연희생양극 직하의 전위는 -1050mV vs. SCE 에 이르며 이는 과방식에 상당한다. 이 외에도 관련 연구결과들[7,8]이 있으나 균열 진전특성에 대한 연구중 특히 해수중에서 과방식상태의 균열진전에 대한 연구는 그다지 많지 않다.

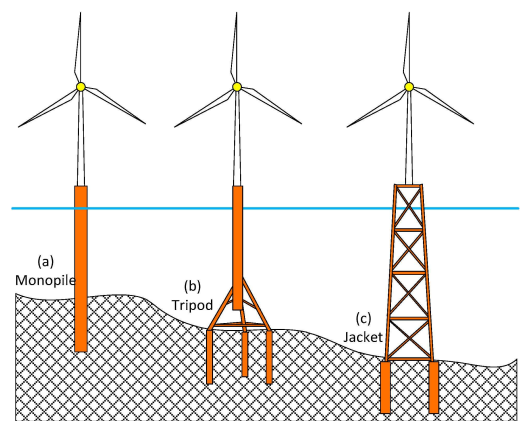


그림 1 고정식 해상풍력터빈 지지구조물의 종류 (a)모노파일, (b)삼각대, (c)재킷하부구조물 [4]
Figure 1. Types of support structures for fixed offshore wind turbines (a) Monopile, (b) Tripod, (c) Jacket Substructures [4]

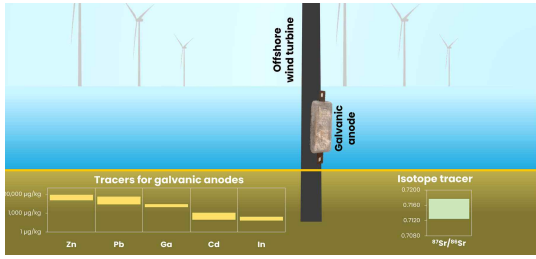


그림 2 해상풍력터빈 지지구조물의 희생양극 [5]
 Figure 2. Sacrificial anodes on monopiles [5]

따라서 본 연구에서는 이와 같은 관점에서 아연 희생양극의 전위에 상응하는 -1050mV vs. SCE 에서의 부식피로균열진전특성을 규명하는 것을 본 연구의 목적으로 하였다.

III. 실험 방법

1. 사용강재 및 시험편

본 연구에서는 조류나 파랑등의 환경하중하에서 선박이나 풍력터빈을 비롯한 해양구조물의 구조재료로 사용되는 고장력 TMCP 강에 대한 해수중에서의 환경강도를 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 해수중에서 사용하는 구조물의 방식을 위해 아연을 희생전극으로 사용하는 경우를 고려하여 아연의 방식전위인 -1050mV vs. SCE 와 동등한 등가 방식환경에서 해수중 피로균열진전실험을 실시하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용하는 공시강에 대한 기계적 성질을 나타낸 표이다. Table 2는 공시강의 화학성분을 나타낸 표이다.

표 1. 공시 TMCP 강판의 기계적 성질

Table 1. Mechanical properties of TMCP steel plate used

Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
390	496	29

표 2. 공시 TMCP강판의 화학성분

Table 2. Chemical composition of TMCP steel plate used

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.20	1.14	0.016	0.004

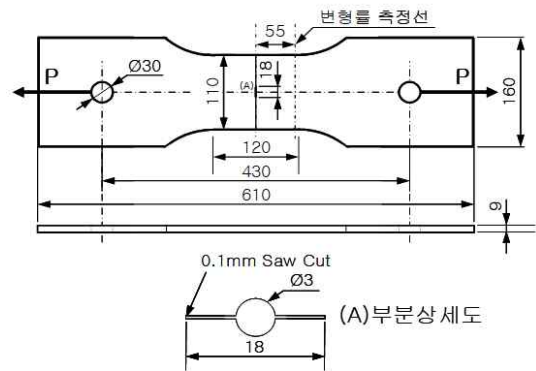


그림 3. 부식피로시험편[3]
 Figure 3. Corrosion fatigue test specimen used[3]

Fig. 3은 본 연구에서 방식중 파랑에 의한 환경 반복하중을 고려한 공시강의 부식피로균열 진전시험을 위한 시험편을 나타낸 그림이다. 시험편은 중앙에 관통형 슬릿을 삽입하여 슬릿으로부터 균열이 전파를 시작 할 수 있도록 가공하였다. 또한 시험편은 핀 하중을 부하할 수 있도록 홀을 가공하였다.

2. 실험장치 및 시험환경

Fig. 4는 방식전위 -1050mV vs. SCE 에서 반복하중에 의한 공시강의 부식피로균열 진전시험을 위한 실험장치를 나타낸 그림이다. 그림에서 왼쪽 부분은 오른쪽 시험장치중 부식피로실험수조를 확대하여 나타낸 그림이다. 수조안의 수용액은 ASTM D1141에서 제안하는 해수성분을 가지는 합성해수를 사용하였다. 시험조건으로는 합성해수에 공기를 불어넣어 공기포화상태에서 실시하였으며, pH는 0.1N의 수산화나트륨으로 8.2로 조절하여 사용하였다. 해수온도가 부식피로실험에 미치는 영향이 매우 크므로 수용액의 시험온도는 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 가 되도록 조절하였다. 이전에는 해수환경으로 3% NaCl 수용액을 많이 사용하였으나 3% NaCl 수용액에는 실제 해수에 존재하는 무기물질이 없어 실제 해수에서 강재와 반응하는 성분들이 나타내는 화학작용을 재현할 수 없어 합성해수를 사용하고 있다.

실제 해수를 사용하여 실험하는 경우도 있으나, 실제 해수는 지역에 따라 조성이 다르고 또한 근해에서 채취하는 해수는 특정 성분에 오염되어[9], 실험의 재현성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 부식전류밀도는 수용액에 침적한 후 8시간 경과한 뒤에 안정되므로 본 연구에서 시험편은 수조내의 합성해수중에 침적한 후 12시간 경

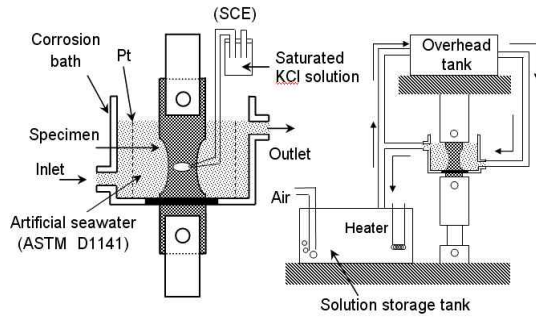


그림 4. 해수순환시스템 및 부식피로균열시험장치[3]
Figure 4. Synthetic seawater circulation system and corrosion fatigue crack propagation test facilities[3]

과한 뒤 실험을 개시하였다. 시험부하속도는 해수중에서 항해하는 선박이 조우하는 파랑의 주기를 고려하여 10cpm의 시험속도로 반복하중을 실시하였다. 최소 응력과 최대응력과의 비를 나타내는 응력비 R은 0.1로 실시하였다.

3. 아연방식전위의 해수중 피로균열진전 실험장치

해양환경에서 자주 사용하는 희생전극은 아연, 마그네슘, 알루미늄 등이 있다. 본 연구에서는 아연의 방식전위를 상정하여 -1050mV vs. SCE의 방식환경에서 해수환경중 피로균열진전거동에 대하여 실험적으로 파악하였다.

방식전위의 환경을 위하여 합성해수중에서 포텐시오스태트를 사용하여 시험편의 전위를 -1050mV vs. SCE로 제어하고, 시험수조 외부에 설치한 포화켈로멜 전극(Saturated Calomel Electrode, SCE)를 참조전극으로 사용하였고 포화 염화칼륨이 들어있는 염교(salt bridge)를 사용하여 연결하였다. 수조내의 시험편 둘레에 백금망을 설치하여 전기방식용 대극으로 사용하였다.

4. 부식피로환경에서 시험편 균열길이의 측정

피로시험에 의하여 진전하는 균열길이는 이동식현미경으로 측정하였으며 균열길이는 1/100mm의 정확도로 측정을 실시하였다. 균열은 시험편의 양면에서 측정하여 하중 이상에 따른 앞뒷면의 균열길이의 차이가 없는지 확인하며 양면의 평균치를 균열길이로 기록하였다.

5. 균열 길이에 대한 응력확대계수범위 ΔK의 평가

시험편으로부터 측정된 하중반복수와 균열길이로부터 다음의 과정으로 응력확대계수범위 ΔK를 구하였다. 본 연구의 -1050mV vs. SCE의 방식전위환경에서 측정된 균열길이로부터 단위반복수당의 균열길이(da/dN)와 ΔK의 관계를 나타내는 da/dN-ΔK의 관계를 구하기 위하여 본 시험편의 편 하중에 의한 응력범위로부터 응력확대계수범위 ΔK는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(\beta) \quad (1)$$

식 (1)은 무한판에서 균열 2a로 부터 충분히 떨어진 곳에 균일한 응력범위 Δσ가 작용하는 경우의 응력확대계수범위 ΔK에 유한판의 보정계수 f(β)를 곱한 식이다.

본 연구에서 사용하는 시험편은 하중의 부하를 편하중으로 부하하기 때문에 엄밀히는 균일한 응력이 작용하는 경우의 Ishida의 해[10]를 적용할 수 없으므로 유한판에 대한 보정계수를 FEM을 이용하여 J 적분계산으로 구하였다. J 적분은 다음식으로 구할 수 있다[11].

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x}) ds \quad (2)$$

여기에서 식 (2)로 부터 구한 J값은 평면응력상태일 때 식 (3)으로부터 K값을 구할 수 있으며, J 적분은 유한요소해석을 이용하여 구하였으며 FEM해석모델은 Fig. 5와 같다.

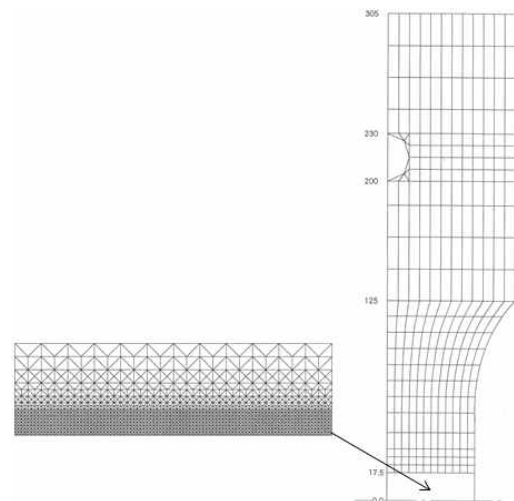


그림 5. J 적분을 계산하기 위한 FEM 모델[9]
Figure 5. FEM model for J integral calculation[9]

$$J = \frac{K_I^2}{E} \quad (3)$$

여기에서 시험편의 균열길이 2a를 변화시켜 K값을 구하고 이것으로부터 구한 형상계수 f(β)를 이용하여 응력확대계수범위 ΔK를 구하였다.

본 연구에서는 아연의 방식전위에 상당하는 음극방식 전위-1050mV vs. SCE에서 균열에 대한 과방식 환경에서의 부식피로균열진전시험을 실시하였으며, 그 결과는 다음의 Fig. 6과 같이 나타내었다.

그림에서 실선과 점선은 본 실험결과와의 비교를 위해 같이 나타내었으며 각각 대기중에서와 해수중에서의 균열진전거동을 나타낸다[9].

IV. 고찰

반복적인 하중을 받는 육상구조물[14,15]에서도 피로 현상은 빈번히 발생하며, 용접부[16]등의 응력집중부에서 균열이 쉽게 발생한다. 해수중에서는 이와 같이 발생한 균열이 해수환경과 융합 상승작용을 일으킨다. 앞선 논문[9]에서 -800mV vs. SCE의 적정한 방식하에서 피로균열의 진전속도는 해수중의 피로균열진전속도

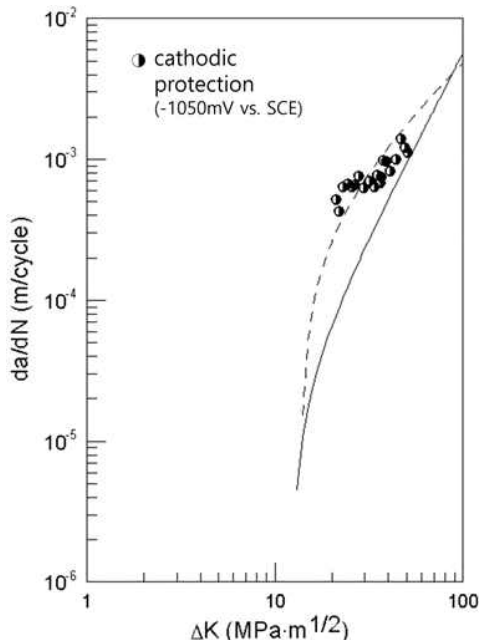


그림 6. 부식피로균열 진전거동 (-1050mV vs. SCE)
 Figure 6. Corrosion fatigue crack propagation behaviour under the condition of -1050mV vs. SCE

보다 더 빨리 진전하는 경우는 없었다. 그러나 과도한 방식이 되면 -950mV vs. SCE에서 피로균열진전속도는 해수중에서 보다 더 빨리 진전하는 영역이 발생되었다. 본 연구에서는 그보다 더 과잉한 아연 희생양극의 전위에 상당하는 -1050mV vs. SCE의 방식영역에서 부식피로균열진전시험을 실시하였으며, 음극방식을 실시한 상태에서 해수중에서 보다 더 빨리 균열이 진전하는 영역이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 영역에서 균열이 더 빨리 진전하는 주요 원인은 cathod측에서 발생한 수소(H₂) 기체의 침입 때문으로 판단된다.

금속내부에 침투한 수소기체는 금속을 취화시키는 작용이 있음은 잘 알려져 있다[5]. 방식환경에서 균열면에 생성되는 석회질 생성물은 -950mV vs. SCE 보다 -1050mV vs. SCE에서 더 두껍게 생성되어 있었다.

따라서 피로균열진전특성에서 -1050mV vs. SCE 환경에서 시험초기에는 해수중에서보다 더 빨리 진전하는 특성을 보이나, 균열이 커질수록 석회질 생성물이 많이 생성되어 썩기효과에 의해 균열진전속도가 느려짐을 Fig. 6의 부식피로균열진전에 대한 선도로부터 알 수 있었다. 충분히 방식의 효과가 나타난 이후의 균열진전속도는 해수중의 진전곡선과 대기중의 진전곡선의 사이의 균열진전속도로 진전하였다.

선박이나 해양환경에서 강재를 보호하기 위한 희생양극으로 사용할 때, 아연양극의 표면에서의 방식전위는 -1050mV vs. SCE이며, 알루미늄이나 마그네슘의 경우 그 낮은(-) 표면전위를 가지는 것을 고려하면 과잉방식하에서의 피로균열의 진전속도는 발생한 수소기체의 영향으로 피로균열 진전속도가 해수중의 균열진전속도 선도보다도 빨라질 수 있다는 것을 충분히 유의할 필요성이 있다고 판단된다.

또한 -1050mV vs. SCE에서의 부식피로균열 진전속도에 대해 본 연구에서의 결과는 -950mV vs. SCE에서의 부식피로균열진전속도[3]와 비교하여 포화하는 경향을 나타내었다.

V. 결론

본 연구에서는 아연희생양극 전위에 상당하는 인가전압 -1050mV vs. SCE에서 합성해수중 부식피로균열진전시험을 실시하고 그 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

인가전압 -1050mV vs. SCE 방식환경에서 부식피로균열진전속도는 해수중에서의 균열진전속도보다 가속하는 구간과 감속하는 구간이 나타났다.

두 구간 모두 대기중의 균열진전속도보다는 가속하여 진파하였다. 본 연구에서 -1050mV vs. SCE의 인가전압에서의 부식피로균열진전속도는 -950mV vs. SCE에서의 부식피로균열진전속도와 비교하여 포화하는 경향을 나타내었다.

본 연구결과는 보다 더 안전한 해양구조물을 설계, 제작하는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Knop, J. Heath, Z. Sterjovski and S.P. Lynch, "Effects of Cycle Frequency on Corrosion-Fatigue Crack Growth in Cathodically Protected High-Strength Steels," *Proceedia Engineering*, Vol. 2, pp. 1243-1252, 2010.
- [2] O. Adedipe, F. Brennan and A. Kolios, "Review of Corrosion Fatigue in Offshore Structures: Present Status and Challenges in the Offshore Wind Sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 61, pp. 141-154, 2016.
- [3] W.B. Kim, "Corrosion Fatigue Crack Propagation Behaviour of TMCP Steel Plate at Ballast Tank of Ship Structure under the Condition of Cathodic Overprotection," *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 2465-2471, 2012.
- [4] P. Plodpradit, V.N. Dinh and K.D. Kim, "Tripod-Supported Offshore Wind Turbines: Modal and Coupled Analysis and a Parametric Study Using X-SEA and FAST". *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 7, No. 181, pp. 1-20, 2019.
- [5] A. Ebeling, D. Wippermann, T. Zimmermann, O. Klein, T. Kirchgeorg, I. Weinberg, S. Hasenbein, A. Plass and D. Profrock, "Investigation of potential metal emissions from galvanic anodes in offshore wind farms into North Sea sediments", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 194, Part A, pp. 1-13, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115396>
- [6] S. Paul, "Hydrogen in Aluminium-Coated Steels Exposed to Synthetic Seawater", *Surfaces*, Vol. 3, pp. 282-300, 2020.
- [7] J.H. Lee, K.H. Jung, J.C. Park and S.J. Kim, "Determination of Optimum Protection Potential for Cathodic Protection of Offshore Wind-Turbine-Tower Steel Substructure by using Potentiostatic Method," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 3, pp. 230-237, 2007
- [8] S.J. Kim, J.I. Kim and J.S. Kim, "Investigation on Optimum Protection Potential Decision of Al Alloy (5083F) in Sea Water by Impressed Current Cathodic Protection," *Journal of Korean Society of Surface Science and Engineering*, Vol. 40, No. 6, pp. 262-270, 2007.
- [9] K.S. Jeong, M.H. Lee, K.J. Kim and K.M. Moon, "A Study on the Effect of Polarization Behaviors and Anode Generating Current, Consumption Rate due to Velocity & Contaminated Degree of Sea Water and Protected Structure Surface Condition," *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, Vol. 28, No. 6, pp. 454-463, 1999.
- [10] *Stress Intensity Factors Handbook*, Vol. 1, Pergamon Press, pp.68, 1987.
- [11] T.L. Anderson, "Fracture Mechanics," Taylor and Francis, pp.110, 2005.
- [12] J.Y. Choi, J.S. Lee, J.G. Bong, S.J. Kim and J.S. Chung, "Evaluation on Fatigue Behavior of Resilience Pad for Sleeper Floating Track System in Urban Transit," *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 3, pp. 347-352, Aug. 2020. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.347>
- [13] J.Y. Choi, H.S. Park and J.S. Chung, "Evaluation on Fatigue Behavior of EP(Engineering Plastic) Friction Pendulum Bearing System," *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 4, pp. 703-708, Nov. 2020. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.703>
- [14] N. Kaewsakui, R. Putrontaraj and K. Kimapong, "The Effect of GMAW Parameters on Penetration, Hardness and Microstructure of AS3678-A350 High Strength Steel," *International Journal of Advanced Culture Technology(IJACT)*, Vol. 3, Issue 1, pp. 169-178, 2015. <https://doi.org/10.17703/IJACT.2015.3.1.169>