Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 6 pp. 545-551, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.545
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

물분사 추진기 임펠러 부식에 대한 원인분석

이형신*, 정운화
국방기술품질원

The Cause Analysis of Pitting Corrosion on the Waterjet Impeller

Hyeong-Sin Lee*, Un-Hwa Jung
Defence Agency for Technology and Quality(DTaQ)

요 약 이 연구는 함정 건조 중 국외도입된 물분사 추진기 임펠러 전체에 표면 점식이 확인되어 이에 대한 원인규명을 위하여 수행하였다. 물분사 추진기 임펠러의 재질은 듀플렉스 2205로 일반적인 스테인리스강인 316l 및 317L보다 부식 및 공식에 대한 저항성이 우수하며 높은 기계적 강도를 가지고 있어 각종 해양 구조물 및 해수 담수화 설비에 사용되는 재질이다. 물분사 추진기 임펠러에 표면 점식에 대한 원인분석을 위해 주사전자현미경 관찰 및 분자생태학적 분석 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫 번째로 주사전자현미경을 통하여 표면 점식이 일어난 부위에서 "*S*" 성분을 발견할 수 있었고, 두 번째로 분자생태학적 연구결과 부식된 물분사 추진기 임펠러에서 채취한 샘플에 "*dsrAB*" 유전자가 검출되어, 임펠러 부식은 황산염 환원균에 의한 것으로 판단할 수 있었다. 향후 황산염 환원균에 의한 제품의 손상을 방지하기 위해선 함정 운항 전, 후에 황산염 환원균이 활동하기 어려운 환경인 65℃ 이상의 고온처리 실시, pH5이하 또는 pH9이상 유지, 선체와 추진기의 절연을 통한 과잉전자 생성 방지 등 예방적 관리가 필요하다.

Abstract Cause analysis of surface pitting crack on a waterjet impeller was conducted. The waterjet impeller was made from stainless steel duplex 2205, which is more resistant to corrosion and local corrosion than typical stainless steel 316L and 317L, and has high mechanical strength, making it a useful material in various marine structures and seawater desalination facilities. The measurements were taken by scanning electron microscopy (SEM) and molecular ecological detection. The chemical composition of S was examined by SEM in the area of pitting corrosion. The dsrAB gene was detected on the sample of the pitting corrosion of the impeller through molecular ecological detection. Therefore, pitting corrosion on the surface of a waterjet impeller was caused by sulphite-reducing bacteria (SRB). To prevent the spread of SRB, management is required through high temperature treatments (over 65℃), pH management, or the insulation of a hull and waterjet.

Keywords : Waterjet, Impeller, Pitting Corrosion, Sulphite-Reducing Bacterias, Molecular Ecological Detection

1. 서론

선박 운항을 위해서는 배를 밀어주는 힘 즉, 추진력을 발생하는 추진장치가 필요하다. 추진장치는 선박의 특성과 사용 목적에 따라 여러 가지 형태가 있으며, 그중에 프로펠러 추진기를 보편적으로 많이 사용하였으나, 이 추진기는 선체 외부에 돌출되어 설치되므로 수심이 낮은 강이나 해역에서 운항에 제한을 받으며 고속선의 경우 유체역학적으로 프로펠러 날개에 캐비테이션 현상이 발생하여 추진효율 감소, 선체진동 유발, 수중소음 발생 등

*Corresponding Author : Hyeong-Sin Lee(Defence Agency for Technology and Quality)
email: hslee2@dtaq.re.kr
Received April 22, 2020 Revised May 18, 2020
Accepted June 5, 2020 Published June 30, 2020

의 문제로 물분사 추진기에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다.

물분사 추진장치란 Fig. 1과 같이 선체 바닥에 있는 흡입구에서 물을 펌프로 흡입하여 선미부에 있는 노즐로 분사하는 추진시스템으로, 고속 회전하는 임펠러는 흡입구에서 노즐까지 연결된 유도관 속에 위치하여 선체 외부로 돌출부가 없기 때문에 환경의 영향을 적게 받으며, 부가물도 적어서 선체 저항성능과 조종성능 면에서도 우수하다. 이러한 장점 때문에 이미 외국에서는 수십 년간의 실험과 경험을 바탕으로 군사용, 상업용으로 널리 사용되고 있다.

국내의 경우 본격적으로 도입하게 된 것이 '98년 전후로 육군해안경비경, 항만경비정, 항만수송정 등에 소형의 물분사 추진기를 탑재하였으며, 중대형의 경우 '05년 PKX-A급에 설치하여 해안경비 등의 임무에 우수한 성능과 신뢰성을 보여주고 있다. 이들 중 PKX-A급의 선도함에는 네덜란드 Warsila Lips사에서 개발한 물분사 추진기(Model : LJ114E, LJ108E)을 탑재하였는데, 함정 건조 중 물분사 추진기 임펠러 전체에 표면 점식이 확인되어 이에 대한 원인규명 및 후속조치를 위한 연구가 필요하였다.

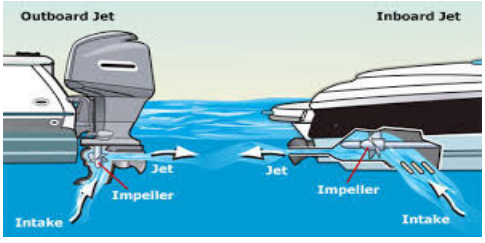

Fig. 1. Waterjet Driving method and propulsion

원제작사인 네덜란드 Warsila Lips사에서는 부식형태 검토 결과 황산염 환원균에 의한 박테리아 부식으로 판단하였으며, 조선소 정박중에 물분사 추진기 덕트 내에 있는 임펠러가 혐기성 환경에 노출되어 박테리아로부터 보호가 미흡하여 발생한 것으로 추정하였는데, 이러한 박테리아 부식은 토양이나 수중에서 박테리아가 번식하는 과정에서 발생하는 부식으로 이번 임펠러 표면 점식은 박테리아의 일종인 황산염 환원균이 혐기성 환경에 노출되어 번식하면서 황산염 환원균 대사작용에 의해 황산염을 황화물로 환원함으로써 금속에 부식성 환경을 만드는 것으로 알려져 있다.

손상 부위의 일부를 채취하여 주사전자현미경을 통하여 부식 전, 후 임펠러 원재료의 화학적 변화를 고찰하고자 하였고, 분자생태학적 검출을 통하여 황산염 환원균의 존재 여부를 확인하고자 하였다.

2. 물분사 추진기 임펠러 부식확인

물분사 추진기 임펠러는 Fig. 2와 같은 형상을 이루고 있으며, 재질은 Stainless Steel Duplex 2205로 우수한 가공성을 제공하는 오스테나이트상과 우수한 내식성을 제공하는 페라이트상이 약 50:50의 비율로 매우 미세하게 결합된 구조를 가지고 있으며[1], 일반적인 스테인리스강인 316L 및 317L보다 크롬, 몰리브덴 및 질소 함량이 높아 응력부식 균열에 대해 우수한 저항성과 높은 기계적 강도를 가지며 틈새 부식 및 공식에 대한 저항성이 우수한 특성을 가지고 있다. 최근 세계적으로 건설이 늘고 있는 원자력 발전소나 해수 담수화 설비, 각종 해양구조물을 비롯해 바이오 가스 설비 등 가혹한 사용 환경에 적합한 소재로 평가돼 그 활용영역이 점차 확대시켜 나가고 있는 재질이다.

Fig. 2. Shape of waterjet impeller

임펠러는 원제작사에서 제작 및 재질시험 후 국내 공급된 제품으로 조선소 함정 건조 중 정박시운전 상태에서 임펠러 날개 전부위에서 표면 점식을 확인하였으며, 그 표면 부위는 Fig. 3과 같았다.

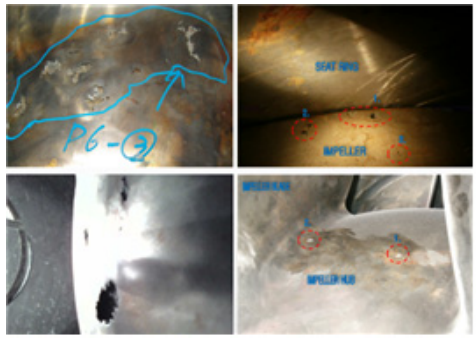

Fig. 3. Pitting corrosion on waterjet impeller

점식 상태는 표면을 따라 구멍 형태로 형성되었으며, 임펠러 구조상 후부면은 손상상태 확인이 곤란하여 손가락으로 후부면을 더듬어서 촉각으로 결함을 조사하고, 손이 닿지 않는 부분은 조사가 불가하였으며 추가적인 결함이 존재할 것으로 추정되었다. 임펠러 표면 점식 부식 개소는 약 30개소 발견되었으며 중앙 임펠러가 22개소로 가장 많이 분포해 있었다. 크기는 최고 직경 10 mm, 깊이는 최고 7 mm로 형성되어 있었으며 상호 연결되어 있는 상태는 아닌 것으로 판단되었고, 구멍의 크기를 분석한 결과 Table 1과 같았다.

Table 1. Visual inspection results of pitting corrosion on the surface of waterjet impeller

Waterjet position	Left	Mide	Right
Quantity	More than 8	More than 22	More than 1
Size	Dia.: 10 mm Depth: 5~7 mm	Dia.: 10 mm Depth: 5~7 mm	Dia.: 5 mm Depth: 5 mm
Point	Impeller boss & leading edge	Impeller boss & hurb	Impeller hurb

3. 주사전자현미경(SEM) 관찰

미생물 부식이란 미생물의 대사작용에 의한 생성물이 직·간접원인으로 되어 일어나는 부식을 말한다. 그 대사물이 양극반응이나 음극반응을 촉진해서 부식원인으로 되기도 하고 미생물의 번식에서 생긴 균체 자체가 산소나 이온의 농담전지를 형성해서 부식원인으로 되기도 한다. 즉 미생물이 전기화학반응의 촉매 역할을 하게 되어 부식이 촉진된다. 그리고 부착한 미생물의 대사반응에 의해서 과산화수소가 발생하여 이 과산화수소에 의한 스테인레스강 표면이 국부 부식된다고 한다.

부식 메커니즘을 살펴보면 철이 물속에서 부식하게 되면 양극과 음극 반응으로 인해 과잉 전자가 발생하고, 다음 과정을 통해 황산염 환원균에 의한 부식이 진행된다.

A. 양극반응

$$4Fe = 4Fe^{2+} + 8e \quad (2)$$

B. 음극반응

$$8H_2O = 8OH^- + 8H^+ \quad (3)$$

$$8H^+ + 8e = 8H_{ads\ on\ Fe} \quad (4)$$

$$SO_4^{-2} = S^{-2} + 4O \quad (5)$$

$$4O + 8H = 4H_2O \quad (6)$$

$$Fe^{2+} + S^{2-} = FeS \quad (7)$$

$$3Fe^{2+} + 6OH^{-1} = 3Fe(OH)_2 \quad (8)$$

C. 총괄반응

$$4Fe + 4H_2O + SO_4^{-2} = 3Fe(OH)_2 + FeS + 2OH^- \quad (9)$$

이 반응에서 수산화철($Fe(OH)_2$)은 3몰 황화철(FeS)은 1몰(Fig. 4) 생성된다. 황산염 환원균이 존재하고 있는 녹(rust)을 분석해 보면 산화물과 황화물의 비가 3:1로 구성되어 있음을 알 수 있다.[2]

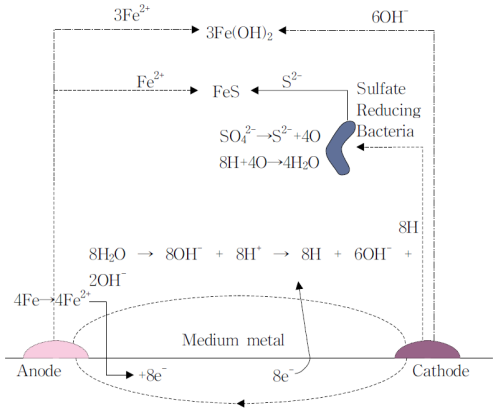

Fig. 4. A schematic diagram of MIC by sulfate reducing bacterias(SRB)

따라서, 이러한 부식 메커니즘에 의해 물분사 추진기 임펠러 표면 점식이 진행되었다면 황(S) 성분이 검출될 것으로 판단됨에 따라 주사전자현미경(SEM)을 통하여 부식 전, 후 임펠러 원재료의 화학적 변화를 고찰하고자 하였다.

3.1 시편제작

주사전자현미경 관찰시 사용된 시편제작은 원제작사에서 송부한 조치 방안대로 손상부 제거 및 육성용접을 하여 임펠러를 수리하였는데, 이 수리를 위해 제거되는

Fig. 5. Specimen point of impeller

손상부위에서 제일 큰 것을 시편으로 활용하였다. 시편의 크기는 0.4mm × 0.4mm × 0.3mm로 부식된 부위와 부식되지 않은 부위가 공존하는 상태로 채취할 수 있었다.

3.2 실험결과

화학성분 분석결과 Table 2와 같이 부식이 일어난 부위에서 S, P, K, Cu 화학성분을 발견할 수 있었는데, 이들 중 황(*S*)성분의 발견은 앞서 언급한 박테리아 부식 메커니즘에 따라 황산염 환원균에 의한 임펠러의 부식과정에서 발생한 것으로 볼 수 있다.

Table 2. Summary of SEM record from the 'corrosion' and 'non-corrosion'

Non-Corrosion		Corrosion	
Element	Weight(%)	Element	Weight(%)
Na	1.76	Na	4.86
Mg	0.30	Mg	1.87
Al	0.40	Al	1.78
Si	112	Si	4.13
Cl	0.60	Cl	4.25
Ca	0.41	Ca	5.49
Cr	21.77	Cr	20.85
Mn	1.20	Mn	0.91
Fe	63.52	Fe	48.38
Ni	4.73	Ni	3.01
Mo	4.18	Mo	1.37
Total	100.00	S	1.53
		P	0.26
		K	0.31
		Cu	1.02
		Total	100.00

4. 분자생물학적 관찰

분자생태학적 방법으로 샘플내의 미생물의 성분을 배양을 거치지 않고 분석하고자 하였다. 기존의 미생물배양법으로는 생태계의 약 99%의 미생물은 검출할 수 없지만, 배양에 의존하지 않고 환경에서 직접 DNA 또는 RNA를 추출하여 Polymerase Chain Re-action[1]이라는 분자생물학 기법을 사용하면 환경에 존재하는 거의 모든 세균을 검출할 수 있다.

부식된 임펠러의 미생물 조성을 배양에 의한 편견(Bias)을 제거하는 방법(분자생태학)을 통하여 분석하였다. 이를 통하여 존재하는 각각의 미생물의 특성(기능)을 유추할 수 있다. (병원성 세균, 암모니아 산화균, 혐기성 미생물, 고새균등의 존재 여부를 판단) 이를 근거로 각종 해양미생물의 분리 및 배양에 의존하지 않고 자연계로부터 지놈의 획득을 통해 그로부터 특정 기능을 지닌 유전자를 PCR 증폭하여 시료 내의 황산염 환원균의 존재 여부에 대한 기초자료로 활용하고자 하였다.

4.1 실험방법

실험방법으로는 Extraction buffer를 멸균된 면봉에 묻혀 부식된 임펠러의 표면 점식과 그 주변으로부터 시료를 확보하였다. 균체를 포함할 것으로 추정되는 면봉을 이용하여 유전물질을 추출·정제하였다. 정제한 유전물질로부터 PCR 기법을 이용하여 16S rRNA[2] 유전자에 대하여 PCR 증폭을 시도하여 시료로부터 확보된 DNA를 분자생태학적 연구에 대한 기초적 실험 결과로 활용하였다.

16S rRNA 유전자가 증폭된 DNA로부터 황산염 환원균의 기능 유전자인 *dsrAB* 유전자를 특이적으로 증폭하는 Primer를 이용하여 PCR 증폭하였다. 이를 통하여 증폭된 PCR 산물을 전기연동을 통하여 확인하였으며, 밴드의 유전자 염기서열 분석을 통하여 검출된 각 미생물의 Phylogenetic를 구축하는 순서로 진행하였다.

4.2 실험결과

첫 번째로 기준으로 사용되는 제한효소인 Lambda/Hind III Plus Maker[3]를 확인하여 23 kbp, 6 kbp등의 밴드를 확인하였고, 16S rRNA과 *dsrAB* 유전자를 PCR 법을 이용한 결과 Fig. 6과 같이 각각의 샘플별로 증폭을 시도하였다.

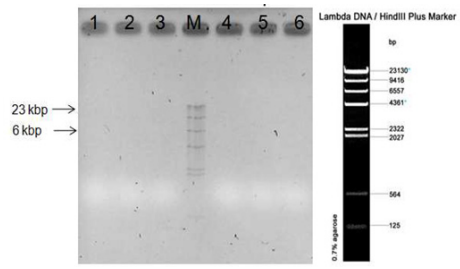

Fig. 6. Genomic DNA
1,2 : Middle impeller, 3,4,5 : right impeller,
6 : Around of right impeller, M : Lambda/Hind III

1) Polymerase Chain Re-action(PCR, 종합효소 연쇄반응): DNA 또는 RNA의 특정 영역을 대량으로 복제 및 증폭시키는 분자생물학적 기술

2) 16S rRNA: 박테리아에게 부여할 신분증이 될 수 있는 생체분자

3) Lambda/Hind III Plus Maker: 23130 bp, 9416 bp, 6557 bp, 4361 bp, 2322 bp, 2027 bp, 564 bp, 및 125 bp의 전기영동 밴드 마커로 사용하기 위한 것으로 알려지지 않은 DNA의 단편의 크기를 추정하기 위한 밴드를 제공한다.

미생물의 존재 흔적만 남아있을 것이라 예상한 바와 같이 지노믹 DNA가 전기영동 상에서 보이지 않았다. 그러나 미량의 DNA 시료를 이용하여 PCR을 통한 유전자 증폭이 가능함으로 16S rRNA 유전자를 각각 증폭하였다. 그 결과 모든 샘플에서 Fig. 7과 같이 원하는 크기의 밴드가 나타났다.

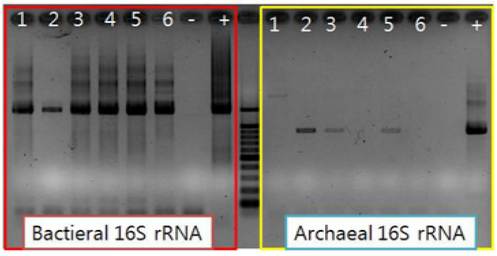

Fig. 7. 16S rRNA gene
1,2 : Middle impeller, 3,4,5 : Right impeller,
6 : Around of right impeller, + : Soil DNA extract

이를 바탕으로 황산염 환원균의 분자계통학적 마커 중 하나인 *dsrAB* 유전자를 특이적으로 증폭하는 primer를 이용하여 PCR 증폭을 시도하였다.

첫 번째(1st) PCR을 통해서는 16S rRNA 유전자와는 달리 3, 4, 5번 샘플에서만 *dsrAB* 유전자가 증폭되었다. 그러나 증폭된 양은 매우 적어 Nested PCR법을 이용하여 증폭한 결과 첫 번째 PCR을 통해 증폭을 확인한 3, 4, 5번 샘플에서 시컨싱에 충분한 PCR 산물을 얻었다.

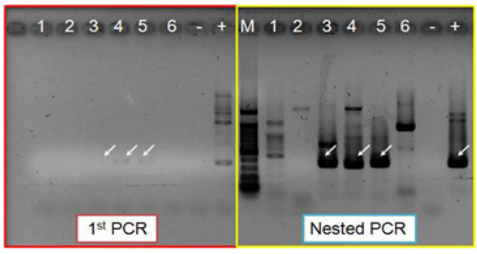

Fig. 8. Result of *dsrAB* to PCR
1,2 : Middle impeller, 3,4,5 : Right impeller,
6 : Around of right impeller, + : Soil DNA extract

얻어진 *dsrAB* 유전자 PCR 산물을 적정한 방법을 통하여 정제 후 시컨싱하였다. 시컨싱 된 서열은 NCBI (National Center for Biotechnology Information)의 Blast(Basic Local Alignment and Search Tool)을 이용하여 검색한 결과 Fig. 9과 같이 *dsrAB* 유전자가 확인되었다. 각 PCR 산물의 특징을 Table 3에 정리하였으며, 확보된 PCR을 통해 Phyligenetic tree를 그려본 결과 다음 Fig. 10과 같았다.

분자생태학적 연구결과 부식된 물분사 추진기의 임펠러에서 채취한 샘플에 *dsrAB* 유전자가 검출되어 황산염 환원균의 존재를 확인할 수 있었다.

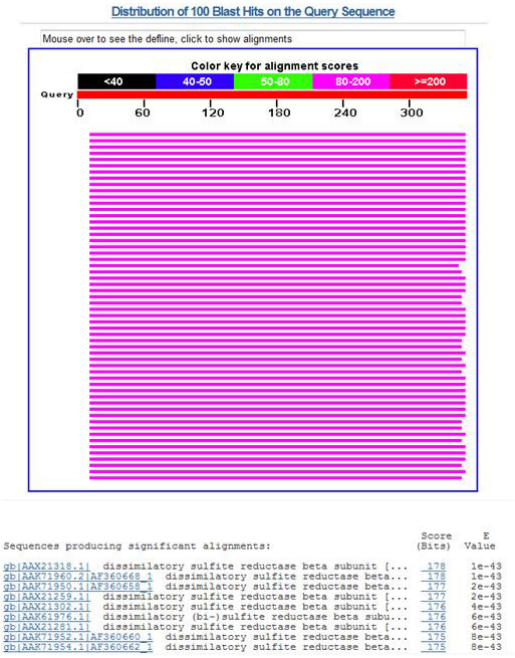

Fig. 9. Blast of *dsrAB*

Table 3. *dsrAB* of sequence analysis

Sample	Phylogenetic	Indentity	Source
R3-nest	uncultured sulfate-reducing bacterium	75	nonsulfidogenic deltaic mobile mud sediment
R2-nest	uncultured sulfate-reducing bacterium	86	mesophilic sulfide-rich spring
R1-nest	uncultured sulfate-reducing bacterium	79	harbor sediment

Table 4. Cause analysis result table for experimental results

No	Measurement method	Measurement result
1	Scanning electron microscope	Detection of chemical composition "S"
2	Molecular Ecological Detection	Detection of "*dsrAB*" gene
Conclusion	Sulphite-Reducing Bacterias	
Improvement proposal	◦ high temperature treatment(over 65℃) ◦ pH management ◦ Insulation of hull and waterjet	

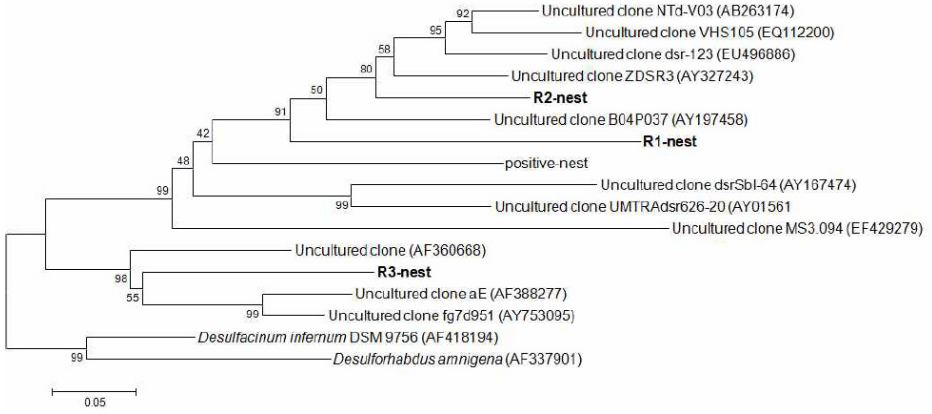

Fig. 10. A schematic diagram of MIC by sulfate reducing bacteria

5. 결론

본 연구는 물분사 추진기 임펠러에 표면 점식이 확인되어 원인분석을 위하여 수행하였으며, 주사전자현미경 분석 및 분자생태학적 분석 결과 Table 4와 같은 결론을 얻었다.

첫 번째로 주사전자현미경을 통하여 표면 점식이 일어난 부위에서 '*S* 성분을 발견할 수 있었는데, 이는 황산염 환원균에 의한 임펠러의 부식과정에서 발생한 것으로 볼 수 있었다.

두 번째로 분자생태학적 연구결과 부식된 물분사 추진기 임펠러에서 채취한 샘플에서 *dsrAB* 유전자가 검출되어 황산염 환원균 존재를 확인할 수 있었다.

따라서 임펠러 표면 점식은 황산염 환원균에 의한 것으로 판단할 수 있었다.

향후 해군에서는 황산염 환원균에 의한 표면 점식은 환경(온도, pH 농도, 혐기성 상태)에 영향을 많이 받으므로, 이러한 환경을 조성하지 않기 위하여 함정운행 전, 후에 황산염 환원균이 활동하기 어려운 65℃ 이상의 고온처리 실시, pH 5 이하 또는 pH 9 이상을 유지하거나 선체와 추진기의 절연을 통해서 과잉전자가 발생하지 않도록 관리해주는 것이 중요하다.

References

[1] Gi-Hyoun Kwon, *"Effects of the Forge ability and the Mechanical Properties on Heat treatment Condition of Duplex Stainless Steels"*, Ph.D dissertation, Pusan National University, Korea, pp.11-12, 2013.

[2] Geun-Hyun Park, *"Electrochemical Analysis of Microbiologically Influence Corrosion of Steels by Sulfate-Reducing Bacteria"*, Master's thesis, Korea Maritime and Ocean University, Korea, pp.27-29, 2002.

[3] P.J. Antony, R.K. Singh Raman, R. Mohanram, Pradeep Kumar & R. Raman, "Influence of Thermal Aging on Sulfate-Reducing Bacteria(SRB)-Influenced Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel", *Corrosion Science*, Vol.50, No.7, pp.1858-1864, July 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.03.009

[4] Bolwell R . "Understanding Royal Navy Gas Turbine Sea Water Lubricating Oil Cooler Failures When Caused by Microbial Induced Corrosion ("SRB")" *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol.128, No.1, pp.153-162, Jan. 2006. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1926315

이 형 신(Hyeong-Sin Lee) [정회원]

- 2010년 2월 : 홍익대학교 조선해양공학과 (공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

〈관심분야〉
조선공학, 정보통신

정 운 화(Un-Hwa Jung) [정회원]

- 2003년 8월 : 부경대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 1993년 4월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 책임연구원

〈관심분야〉
물분사추진기, 선박프로펠러