

주조용 알루미늄 합금의 천연해수 내 전기화학적 및 캐비테이션-침식 특성

박일초¹ · 황현규² · 신동호² · 김성종^{3†}

¹국립목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학로 91

²국립목포해양대학교 기관시스템공학과 대학원, 전남 목포시 해양대학로 91

³국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전남 목포시 해양대학로 91

(2024년 9월 27일 접수, 2024년 10월 06일 수정, 2024년 10월 06일 채택)

Electrochemical and Cavitation-Erosion Properties in Natural Seawater of Cast Aluminum Alloys

Il-Cho Park¹, Hyun-Kyu Hwang², Dong-Ho Shin², and Seong-Jong Kim^{3,*}

¹Division of Cadet Training, Mokpo National Maritime University, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

²Department of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo Maritime University, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

³Division of Marine Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received October 03, 2024; Revised October 15, 2024; Accepted October 15, 2024)

This study investigated electrochemical and cavitation-erosion characteristics of three types of cast aluminum alloys in natural seawater. Electrochemical properties were evaluated by calculating corrosion potential and corrosion current density through a potentiodynamic polarization experiment in a static marine environment. Cavitation-erosion characteristics were determined by measuring surface roughness, maximum damage depth, weight loss and surface damage shape with experiment time. Indentation experiments revealed that surface hardness values of domestic products were higher than those of foreign products due to high contents of zinc, magnesium and copper. This is because zinc, magnesium and copper dissolved in the aluminum crystal lattice could transform the lattice structure. Due to increased surface hardness, domestic products showed the best cavitation-erosion resistance. However, their corrosion resistance were found to be relatively poor. This is due to formation of galvanic couples within the alloy when zinc, magnesium and copper are present in relatively high concentrations, which can accelerate corrosion.

Keywords: Cast aluminum alloy, Hardness, Corrosion, Cavitation-erosion, Seawater

1. 서론

알루미늄 합금은 낮은 밀도, 높은 비강도, 우수한 주조 특성 및 설계 유연성 뿐만 아니라 Ni-Al 청동, 스테인리스강 및 티타늄 합금에 비해 저가이기 때문에 밸브, 피스톤 헤드, 실린더 블록, 프로펠러 블레이드 등의 대체 재료로 널리 사용되고 있다 [1,2]. 또한, 알루미늄 합금의 캐비테이션-침식 저항성은 양극산화 [3], 초음파 용융 처리(Ultrasonic Melt Treatment; UST) [4], 초음파 샷피닝(Ultrasonic Shot Peening; USP) [5], 어닐링/재결정 및/또는 템퍼링, 레이저 충격 가공 [6], 마이크로 아크 산화(Micro Arc Oxidation;

MAO) [2], 금속 적층 가공(Additive Manufacture; AM) [7] 등과 같은 처리 과정을 통해 개선할 수 있다. 그러나 해양환경에서 알루미늄 합금을 프로펠러 소재로 사용하는 경우에는 알루미늄 합금의 내식성 저하에 대한 고려가 필요하다. 따라서 캐비테이션 침식-부식 조건에서 알루미늄 합금의 캐비테이션-침식 저항성을 개선하기 위해서는 해수에서 알루미늄 합금의 캐비테이션-침식 메커니즘을 철저히 조사할 필요가 있다.

캐비테이션-침식 메커니즘은 기계적 침식 메커니즘, 화학적 부식 메커니즘, 기계적 침식과 화학적 부식의 시너지 효과로 요약할 수 있다. 기계적 침식 [8-11]은 마이크로 젯 (micro-jet) [12,13]이나 충격파(shock wave) [14]에 의해 유도된 재료의 탈리 손상이 캐비

[†]Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

박일초: 조교수, 황현규 & 신동호: 대학원생, 김성종: 교수

테이션-침식의 주요 구성 요소이다. 이에 연구자들은 미세조직 강화 [15], 표면 구조 설계 [16], 보호 코팅 [17,18] 등을 통해 기계적 요소의 캐비테이션-침식 저항성을 개선하려는 노력을 지속적으로 시도하고 있다. 금속의 부식 속도는 일반적으로 캐비테이션과 함께 발생하는 유체 흐름에 의해 가속화되지만 부식으로 인한 고장 [15,19-22]은 기계적 침식에 비해 상대적으로 그 영향이 적다. 그러나 기계적 침식과 화학적 부식의 시너지 효과는 캐비테이션-침식 손상을 가속화시킬 수 있으므로 주목할 필요가 있다 [23]. 화학적 부식은 주변 환경에 대한 의존성이 크며, 특히 염소이온이 존재하는 해양환경에서는 알루미늄 합금의 기계적 침식과 화학적 부식의 시너지 효과가 자주 유발할 수 있다. 이에 연구자들은 해양환경에서 316L 스테인리스강 [24] 및 니켈 알루미늄 청동(Nickel Aluminium Bronze; NAB) [25,26]과 같은 부동태 금속에 형성된 얇은 산화피막이 캐비테이션 침식-부식의 시너지 손상으로부터 보호하는데 상당한 효과가 있음을 발견했다.

또한 금속 재료의 표면 경도가 캐비테이션-침식 속도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이는 열처리 변화에 따른 마르텐사이트 STS630 스테인리스강의 표면 경도, 항복 응력 및 탄성 계수가 증가함에 따라 캐비테이션-침식 저항성이 향상되는 연구 결과로부터 확인되었다 [27]. 그리고 Hattori와 Kitagawa [28]는 주철, 탄소강 및 비철 금속의 캐비테이션-침식 저항성에 대한 광범위한 분석을 수행한 결과, 재료 경도와 캐비테이션-침식 저항성 사이에 다음과 같은 지수적 상관관계를 확인했다.

$$ER = a HV^n$$

여기에서, ER (Erosion Resistance)은 침식 저항성이

고 a 와 n 은 각 재료 분류마다 다른 상수이다. 탄소강의 경우 $a=5.8 \times 10^{-7}$, $n=2.4$ 이고, 알루미늄 합금의 경우 $a=0.75 \times 10^{-5}$, $n=1.6$ 이다. 즉, 알루미늄 합금의 표면 경도 값이 클수록 캐비테이션-침식 저항성도 개선될 수 있음을 의미한다. 이러한 알루미늄 합금의 표면 경도는 합금의 성분 조성에 영향을 받는다. Liu 등 [29,30]은 ηp 로 명명된 추가 강화 상(phase)을 식별했으며, 이는 주로 높은 (Zn+Cu)/Mg 비율을 갖는 고강도 합금이다.

본 연구에서는 Zn, Cu 및 Mg 함량이 높은 고강도 알루미늄 합금의 개발제품과 국외제품 2종에 대하여 천연해수 속에서 전기화학적 실험과 캐비테이션-침식 실험을 수행한 후 표면 경도, 표면거칠기, 표면손상 깊이 및 무게감소량 분석과 표면 손상부 관찰 등을 통해 캐비테이션-침식 저항성을 상호 비교하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

Table 1은 국내 A사에서 개발한 고강도 알루미늄 합금(개발제품) 및 외국제품 1과 2의 화학적 조성을 나타낸 것이다. 개발제품은 용탕 전자기 제어 및 저압 금형 주조공법으로 제작하였다. 시험편은 냉각수가 공급되는 미세절단기로 열변형을 최소화하여 가공하였다. 가공한 시험편은 에머리페이퍼 #2000까지 단계적으로 기계연마를 실시하였다. 연마한 시험편은 아세톤과 증류수로 초음파 세척하여 건조기에서 24시간 동안 완전 건조 후 무게를 측정하였다. 전기화학적 실험과 캐비테이션-침식 실험은 상온의 천연해수에서 실시하였으며, 실험 후 표면손상은 3D 공초점 레이저 현미경(OLYMPUS™, OLS5000LEXT)과 주사전자현미경(SEC, SNE-4500M Plus)으로 분석하였다. 천연해수의 주요 성분과 특성은 Table 2에 제시하였다.

Table 1. Chemical composition of the specimen

		Zn	Mg	Cu	Mn	Be	Si	Fe	Ti	Al
Development product		0.15	4	0.1	0.6	0.15	0.2	0.3	0.2	Bal
Foreign product	1	0.006	0.41	0.002	0.1	-	7	0.11	0.12	Bal
	2	0.006	0.7	0.002	0.1	0.05	7	0.11	0.12	Bal

Table 2. Main chemical compositions and properties of the natural seawater

Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
1746	15721	8401	344	1121	357	7.9	16.1	45.3

2.2 전기화학적 실험

전기화학적 실험은 포텐쇼/갈바스테트 장비(Interface 5000E, GAMRY instrument)로 수행하였으며, 3 전극 셀을 구성하였다. 기준전극과 대응전극은 각각 은/염화은(Ag/AgCl saturated 3.3 M KCl) 전극과 백금메쉬 전극을 사용하였다. 작동전극은 1 cm² 면적만 노출되는 전용 홀더를 사용하였다. 전기화학적 실험은 동전위분극실험을 실시하였으며, 1시간 동안 안정화시킨 후 개로전위 기준 -0.25 V에서 1.6 V까지 1 mV/sec의 주사속도로 실시하였다. 동전위분극실험 후 획득한 동전위분극곡선에 대하여 타펠외삽법으로 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였으며, ASTM G-102에 따라 부식속도를 산출하였다.

2.3 인덴테이션 실험

시험편의 기계적 특성은 마이크로 인덴테이션 장비(MCT3, Anton paar)를 사용하여 비교 분석하였다. 인덴테이션실험은 68° 비커스 인덴터를 사용하였다. 인덴테이션의 최대하중과 최대하중에서의 유지시간을 각각 100 mN과 10초로 설정하였으며, 침투속도는 100 mN/min으로 실시하였다. 비커스경도는 인덴테이션 실험에서 획득한 하중-변위 곡선으로 Oliver and Pharr 방법에 따라 산출하였다. 재현성 확보를 위해 동일한 조건에서 12회 이상 진행하였다. 인덴테이션 실험 결과는 최대 및 최소값을 제외한 중간값을 선정하였다.

2.4 캐비테이션-침식 실험

Fig. 1은 캐비테이션-침식실험의 모식도를 나타낸 것이다. 캐비테이션-침식실험은 ASTM-G32 규정에

준용하는 진동발생 장치로 압전효과(piezo electric)를 발생시켜 캐비테이션-침식 환경을 구현하였다. 사용된 장비는 60 Hz, 220 V 전원을 공급하여 원추형 혼을 축 방향으로 진동시켜 인위적으로 재료표면에 캐비테이션 충격을 가하도록 설계하였다. 이때 진동은 20 kHz로 유지하였으며, 캐비테이션 진폭은 정진폭 자동제어 방법을 이용하여 10 μm로 일정하게 유지하였다. 시험편과 혼 사이의 간극은 1 mm로 유지하였다. 실험 종료 후 시험편은 증류수로 초음파 세척하여 건조기에서 24시간 동안 완전 건조 후 무게를 측정하여 무게감소량을 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인덴테이션 거동

Fig. 2는 개발제품과 외국제품의 인덴테이션실험 후 변위-하중 곡선과 비커스 경도를 나타낸 것이다. Fig. 2a에서 개발제품은 최대하중 100 mN에서 최대변위 1877 nm를 나타냈으며, 외국제품 1과 2는 각각 2098 nm와 2042 nm로 측정되었다. 특히, 외국제품 1과 2는 개발제품과 달리 최대하중에서 10초 동안 유지 시 각각 32 nm와 35 nm 만큼 변형되는 크리프 거동을 나타냈다. 크리프 거동은 항복강도 이하의 응력이나 일정한 하중을 받을 때 시간 경과에 따라 재료가 천천히 변형되는 현상이다. 알루미늄 합금의 크리프 거동은 결정격자 내 전위 이동으로 발생한다. 이러한 거동은 장기간에 걸쳐 제품의 영구변형이나 손상으로 고장을 초래할 수 있다 [31]. 따라서 알루미늄 합금의 크리프 저항성을 향상시키기 위한 다양한 합금원소가 존재한다. 특히, 아연(Zn), 마그네슘(Mg),

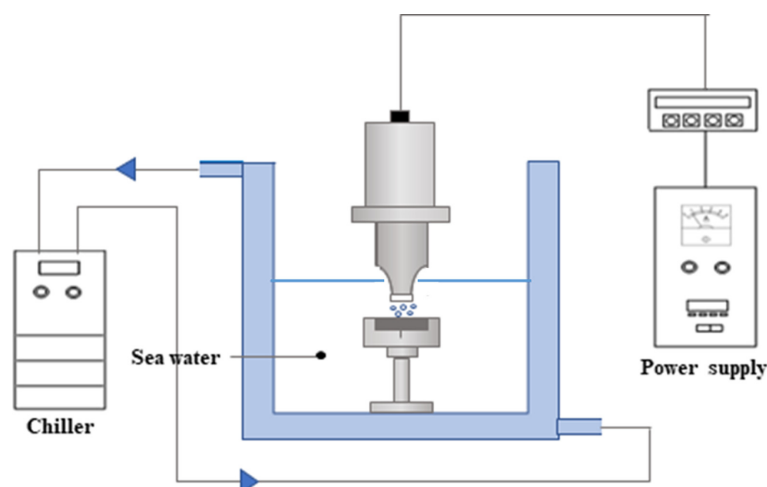


Fig. 1. Schematic diagram of cavitation-erosion experiment

구리(Cu)는 알루미늄 결정격자 내에 강화 석출물을 형성시켜 크리프 저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다 [32]. 그 중에서도 아연은 고용체 및/또는 2차 상(phase) 경화 메커니즘을 통해 알루미늄 기반 합금의 경도 및 강도를 크게 증가시키는 것으로 알려져 있다 [33]. 고용체 경화는 알루미늄에 용해된 아연 원자의 크기가 알루미늄 원자와 다르기 때문에 격자 구조가 변형되어 발생하며, 격자 구조의 변형은 전위의 이동을 어렵게 하여 재료의 강도를 증가시킨다. 또한 2차 상 경화 메커니즘에서는 알루미늄 기지 조직에서 새로운 상이 형성되어 발생하는 내부 응력으로 인해 경도와 강도가 증가하게 된다. Table 1과 같이 본 연구의 개발제품은 외국제품 대비 아연, 마그네슘, 구리의 함량이 높다. 이러한 합금 성분으로

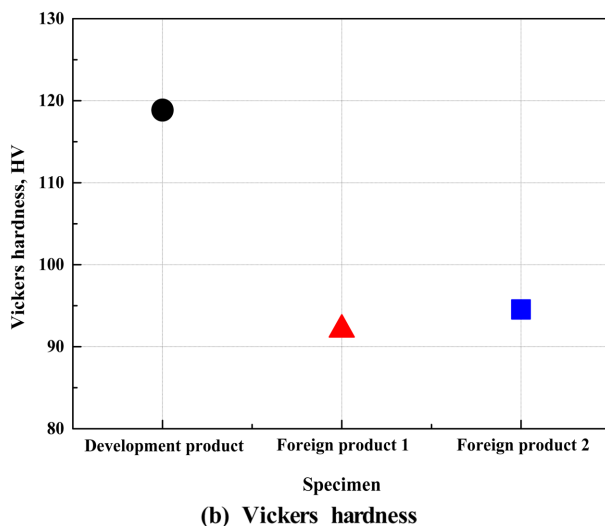
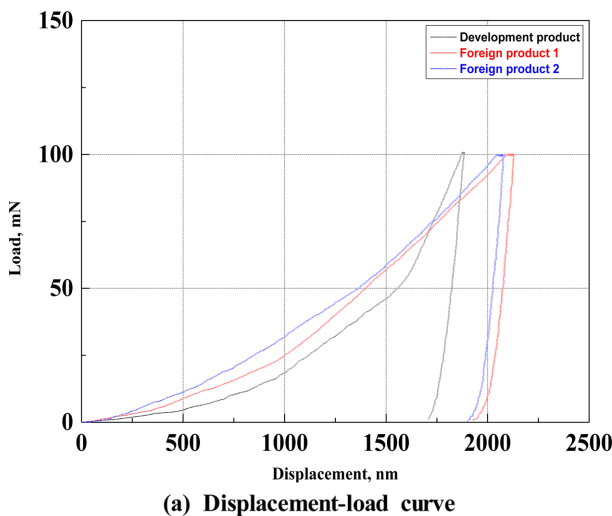


Fig. 2. Results of indentation experiments for various aluminum alloys

인해 크리프 저항성이 높은 것으로 사료된다. Fig. 2b에서 비커스 경도의 경우, 개발제품은 118.857 HV로 측정되었으며, 외국제품 1과 2는 각각 92.087 HV와 94.545 HV로 나타났다. 일반적으로 캐비테이션-침식 저항성은 표면경도와 비례한다 [34,35]. 결과적으로 비커스경도가 가장 높은 개발제품의 캐비테이션-침식 저항성이 가장 우수할 것으로 사료된다.

3.2 전기화학적 특성

Fig. 3은 천연해수 용액에서 개발제품과 외국제품에 대한 동전위 분극곡선을 나타낸 것이다. 모든 시험편에서 전위 증가에 따라 전류밀도가 증가하는 경향이 확인되었다. 특히, 개로전위부터 약 -0.5 V까지의 전위상승 구간에서 전류밀도가 약 5.958 mA/cm^2 까지 급격하게 증가하였다. 이후 전위상승 구간에서는 전류밀도 증가율이 상대적으로 작게 나타났다. 전위 0 V에서 0.5 V 사이의 전류밀도 비교 결과, 개발제품의 전류밀도가 가장 크게 나타났으며, 그 다음 외국제품 2와 1 순서로 나타났다.

Fig. 4는 동전위 분극곡선에서 부식전위, 부식전류밀도 및 부식속도를 산출한 결과이다. 타펠외삽법으로 부식전위와 부식전류밀도 산출 결과, 개발제품은 각각 -0.692 V와 $1.795 \mu\text{A/cm}^2$ 으로 가장 크게 나타났다. 반면 외국제품 1과 2의 부식전위와 부식전류밀도는 각각 -0.803 V, -0.759 V 및 $0.449 \mu\text{A/cm}^2$, $0.621 \mu\text{A/cm}^2$ 로 상대적으로 작게 나타났다. 또한, 부식속도 산출 결과, 개발제품 및 외국제품 1과 2는 각각 $20.44 \mu\text{m/year}$ (0.805 MPY), $5.11 \mu\text{m/year}$ (0.201 MPY), $7.07 \mu\text{m/year}$ (0.278 MPY)로 부식전류밀도와 유사한 경향을 나타

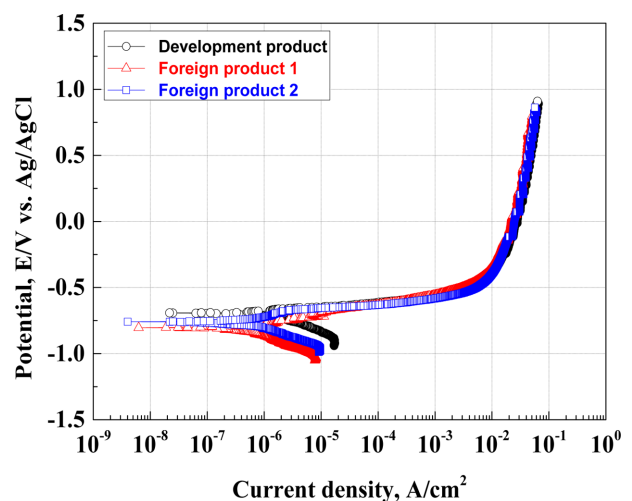


Fig. 3. Potentiodynamic polarization experimental curves of aluminum alloys in natural seawater

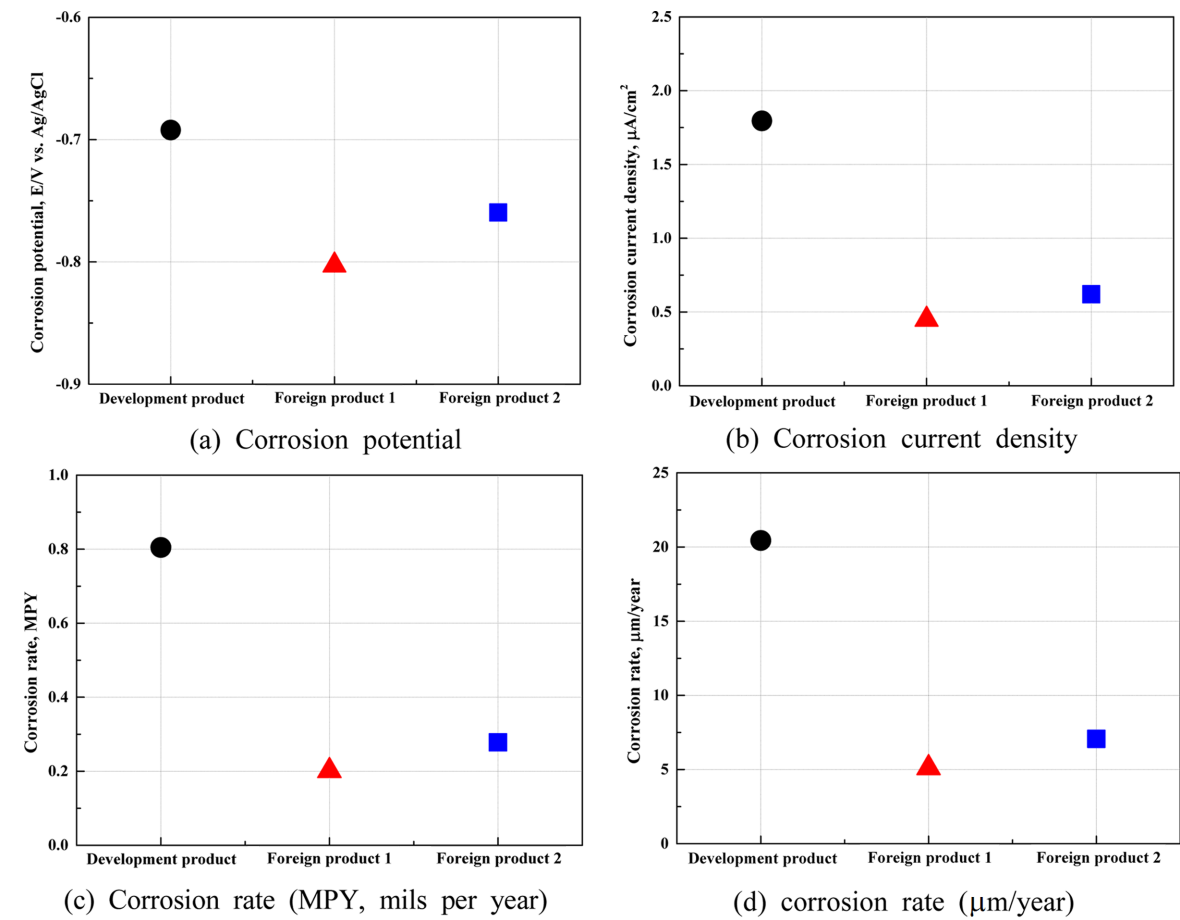


Fig. 4. Results of corrosion potential, corrosion current density and corrosion rate after potentiodynamic polarization experiment of aluminum alloy in natural seawater

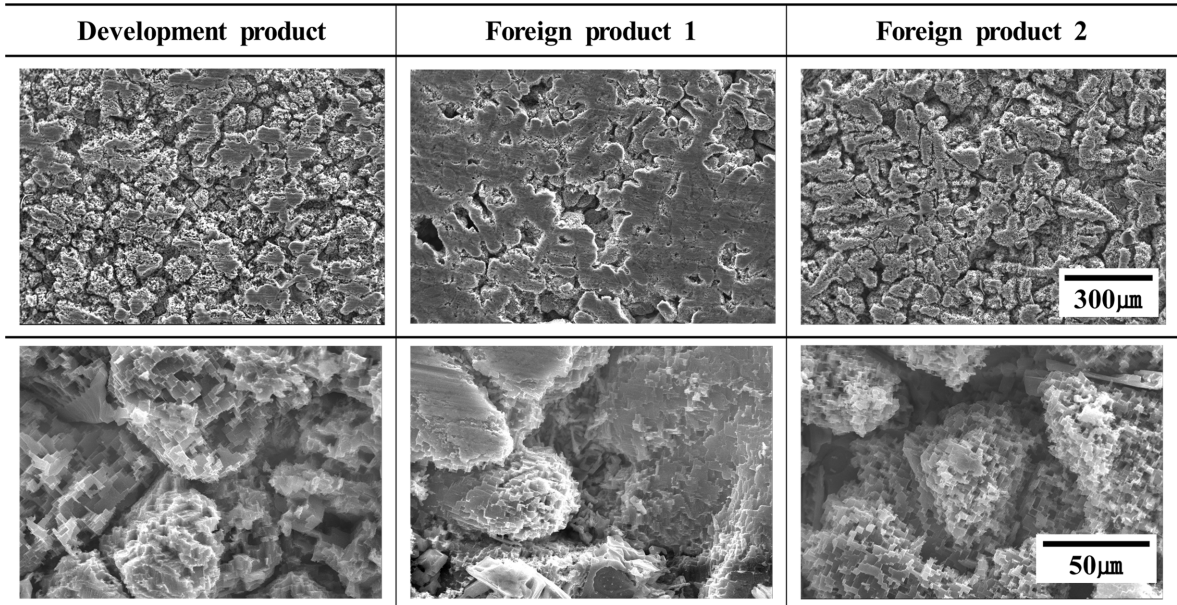
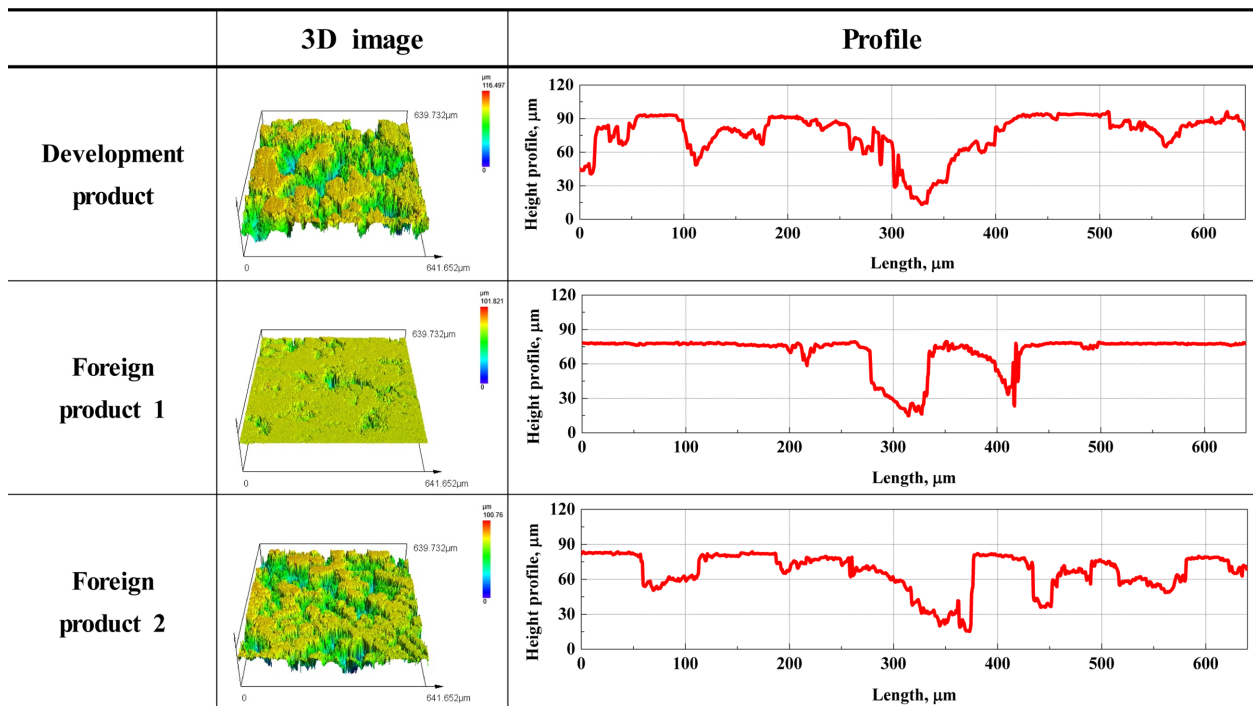


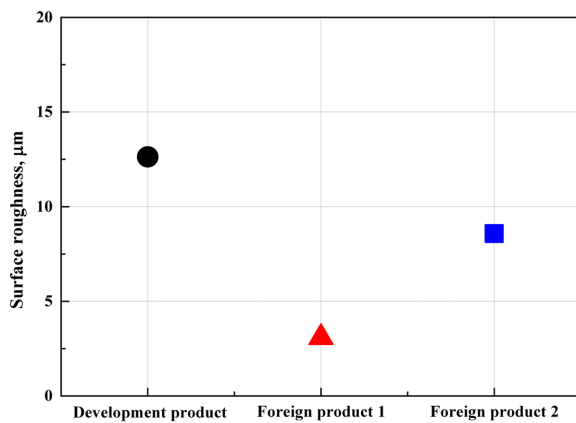
Fig. 5. Surface observation using scanning electron microscope after potentiodynamic polarization experiment of aluminum alloy in natural seawater

났다. 결과적으로 천연해수 내에서 부식 저항성은 개발제품이 가장 열악하게 나타났으며, 외국제품 1이 가장 우수하게 확인되었다. 이는 개발제품의 기계적 특성 향상을 위해 아연, 마그네슘, 구리의 함량을 증가시켰기 때문으로 사료된다. 일반적으로 알루미늄 합금은 대기 노출 시 표면에 수-수십 nm의 얇은 알루미늄 산화피막(Al_2O_3)을 자연적으로 형성시켜 우수한 내식성을 나타낸다 [36]. 또한, 아연, 마그네슘 및 구리는 기계적 특성 개선을 위해 첨가되며 내식성 향

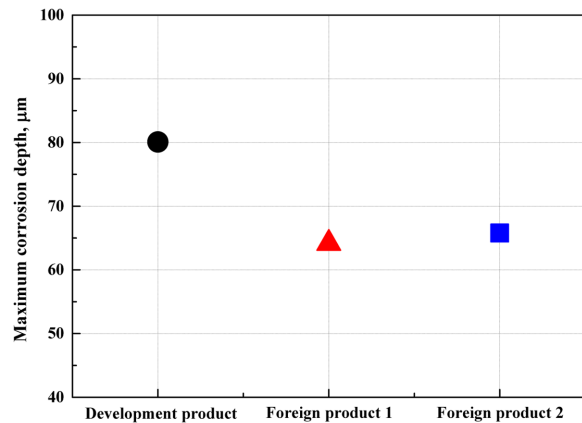
상에 기여할 수 있는 합금원소이다. 특히, 아연과 마그네슘은 표면에 산화아연(ZnO)과 산화마그네슘(MgO)으로 이루어진 산화피막 형성을 촉진시켜 부동태 특성을 개선시키는 합금원소로 알려져 있다 [37,38]. 그러나 자연적으로 형성된 산화피막은 두께가 매우 얇고 균일하게 형성되지 않기 때문에 해수환경과 같이 가혹한 부식환경에서는 쉽게 용해되어 우수한 내식성을 기대하기 힘들다. 또한, 아연, 마그네슘 및 구리 원소가 고농도로 존재하면 합금 내에 갈바닉 쌍을 형



(a) 3D images and profiles



(b) Surface roughness



(c) Maximum corrosion depth

Fig. 6. Surface analysis using 3D confocal laser microscopy after potentiodynamic polarization experiments on aluminum alloys in natural seawater

성하여 부식을 가속화시킬 수 있다. 특히, 마그네슘과 구리가 함께 존재하게 되면 두 금속 성분의 상호작용으로 인해 산화피막 형성을 방해할 수 있다 [39]. 결과적으로 아연, 마그네슘 및 구리의 높은 함량에 기인하여 개발제품의 내식성이 외국제품에 비해 상대적으로 열악한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 동전위 분극실험 후 부식 손상된 표면을 분석하기 위해 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 저배율 사진에서와 같이 모든 시험편 표면에서는 시험편 제작 단계에서 생성된 연마 흔적과 부식에 의한 표면 손상이 함께 관찰되었다. 그리고 부식 손상된 표면은 고배율 사진과 같이 결정학적 공식(crystallographic pitting)이 관찰되었다. 이러한 결정학적 공식은 일반적으로 천연해수와 같이 염화물이 존재하는 부식 환경에서 알루미늄 합금 표면의 특정 결정면을 따라 부식손상이 발생 및 성장하는 경향이 나타나며 [40], 본 연구에서도 모든 시험편에서 유사한 표면 부식손상이 관찰되었다. 개발제품과 외국제품 2의 경우 표면 전반에 부식손상이 관찰되었으며, 결정입계의 부식형상이 뚜렷하게 나타났으나 외국제품 1은 상대적으로 작은 표면 손상이 관찰되었다.

표면 손상의 형상 및 그 정도를 더 자세히 분석하기 위해 Fig. 6과 같이 3D 레이저 공초점 현미경을 활용하여 부식된 표면의 표면거칠기와 최대부식깊이를 측정하여 나타냈다. Fig. 6a에서 3D 이미지를 살펴보면, 앞선 Fig. 5의 분석 결과와 유사하게 개발제품과 외국제품 2는 표면 전반에 걸쳐 부식에 의한 표면 손상이 관찰된 반면, 외국제품 1은 상대적으로 부식손상 면적이 작게 관찰되었다. 그리고 Fig. 6a에서 프로파일 분석 결과, 개발제품의 부식손상 면적이 가장 크게 나타났으며, 그 다음 외국제품 2와 1 순서로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 6b와 c의 표면거칠기와 최대부식깊이 측정 결과에서도 유사하게 나타났다. 일반적으로 초기 기계연마 흔적이 존재하는 상황에서 부식손상이 증가함에 따라 표면거칠기도 증가하는데, 이는 부식손상 면적과 그 형상에 영향을 받기 때문이다. 측정된 표면거칠기는 개발제품이 $12.632\ \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 외국제품 1과 2는 $3.087\ \mu\text{m}$ 과 $8.574\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 최대부식깊이는 개발제품이 $80.083\ \mu\text{m}$ 로 가장 크게 나타났으며, 외국제품 1과 2는 $64.166\ \mu\text{m}$ 과 $65.779\ \mu\text{m}$ 로 상대적으로 작게 나타났다. 결과적으로 Fig. 4의 동전위 분극실험에서 산출된 부식속도가 클수록, 즉 내식성이 열악할수록 표면 부식손상이 증가하여 표면거칠기와 최대부식깊이가 증가하는 경향이 확인되었다.

3.3 캐비테이션-침식 특성

Fig. 7은 캐비테이션-침식실험 후 시험편의 무게감소량을 비교한 것이다. 모든 시험편의 무게감소량은 실험시간 경과에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 캐비테이션-침식 실험시간 5분까지 무게감소량이 거의 없는 잠복기(Incubation region)가 관찰되었다. 이러한 잠복기에는 무게감소량 없이 소성변형만 발생할 수 있다 [41,42]. 특히, 알루미늄 합금과 같이 탄성적인 거동을 나타내는 소재는 캐비테이션에 의한 소성변형 후 표면이 손상된다. 따라서 본 연구에서 실험 초기에는 알루미늄 합금이 캐비테이션 기포의 충격압을 소성변형 과정에서 에너지로 흡수하기 때문에 무게감소량이 나타나지 않은 것으로 사료된다 [43]. 개발제품은 실험시간 경과에 따라 무게감소량 그래프의 기울기가 비교적 완만하게 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 외국제품 1과 2는 실험시간 20 ~ 40분 구간에서 급격한 기울기 증가를 나타냈다. 결과적으로, 개발제품은 모든 실험시간 조건에서 외국제품 1과 2보다 무게감소량이 작게 측정되어 캐비테이션-침식 저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 8은 캐비테이션-침식 실험 후 주사전자현미경으로 손상된 표면을 관찰한 결과이다. 개발제품은 실험시간 5분과 10분에서 소성변형에 따른 표면손상과 기계연마 흔적이 함께 관찰되었다. 이후 실험시간 20분부터 실험 종료 시까지는 상대적으로 평탄한 표면 침식 손상과 미세한 피트(pit) 손상이 함께 관찰되었다. 반면 외국제품 1과 2는 실험시간 10분부터 캐비테이션-침식 손상으로 기계연마 흔적이 관찰되지 않

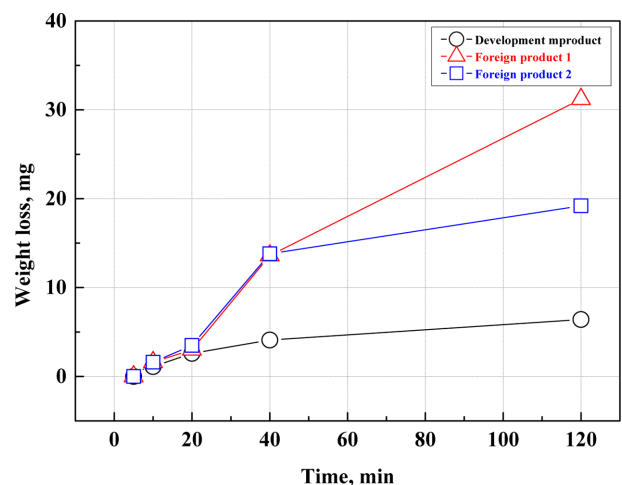


Fig. 7. Weight loss curves after cavitation-erosion experiments of aluminum alloys in natural seawater with experimental time

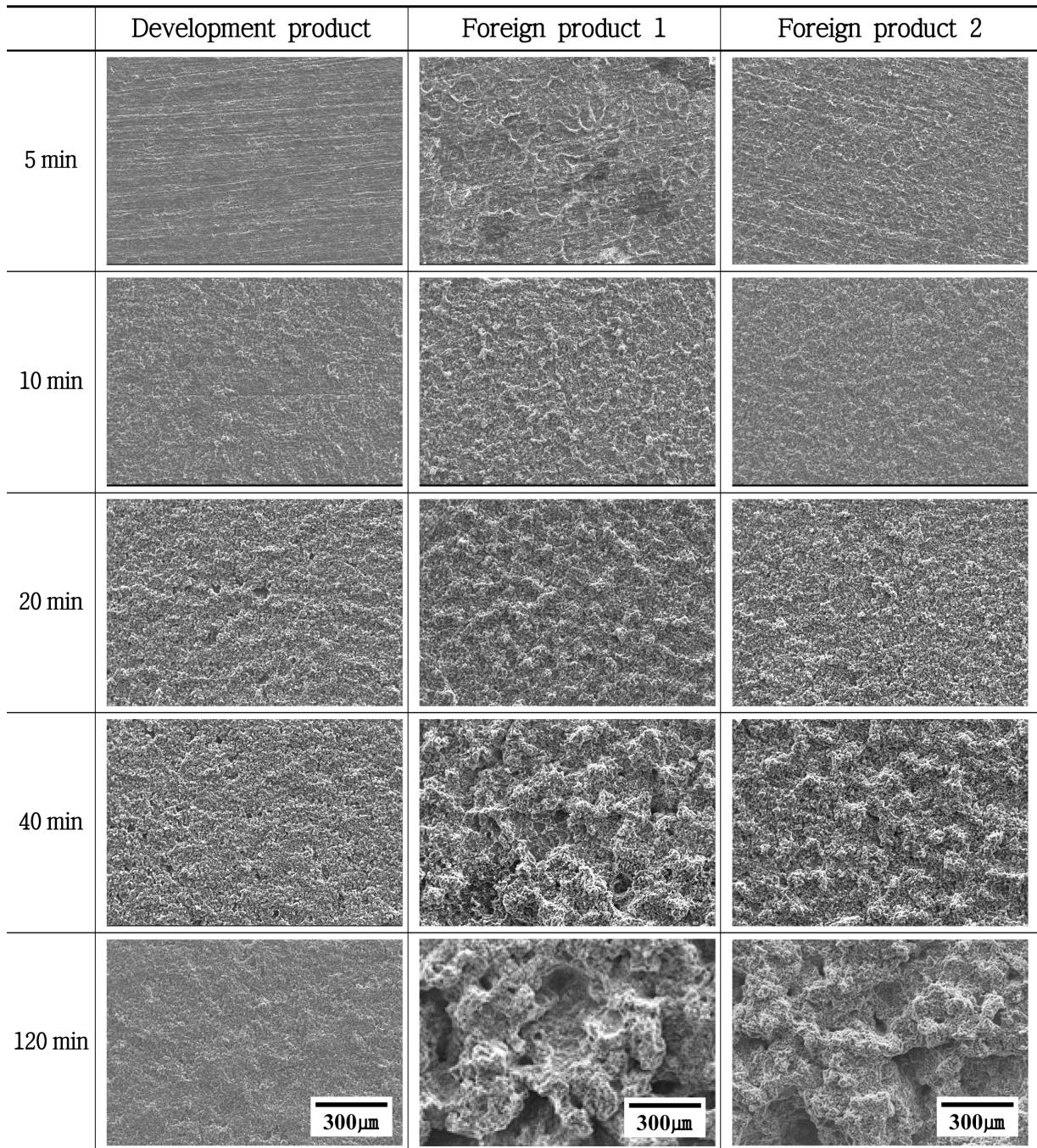


Fig. 8. Surface observation using scanning electron microscope after cavitation-erosion experiments of aluminum alloys in natural seawater with experimental time

았으며, 실험시간 40분 이상 경과 시에는 국부적인 침식손상이 가속화되어 벌크(bulk) 형태의 큰 탈리 손상이 발생하여 거친 표면 형상이 관찰되었다. 결과적으로 캐비테이션-침식 실험 후 표면손상은 개발제품이 가장 적게 나타났으며, 그 다음으로 외국제품 2와 외국제품 1의 순서로 크게 확인되었다.

Fig. 9는 캐비테이션-침식 실험 후 손상된 시험편 표면을 3D 공초점 레이저 현미경을 이용하여 3D 이미지로 관찰한 것이다. 모든 시험편은 실험시간 경과에 따라 표면손상 형상의 분포 및 그 크기가 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, 개발제품과 비교하여 외국제품 1과 2의 표면손상은 현저히 크게 관

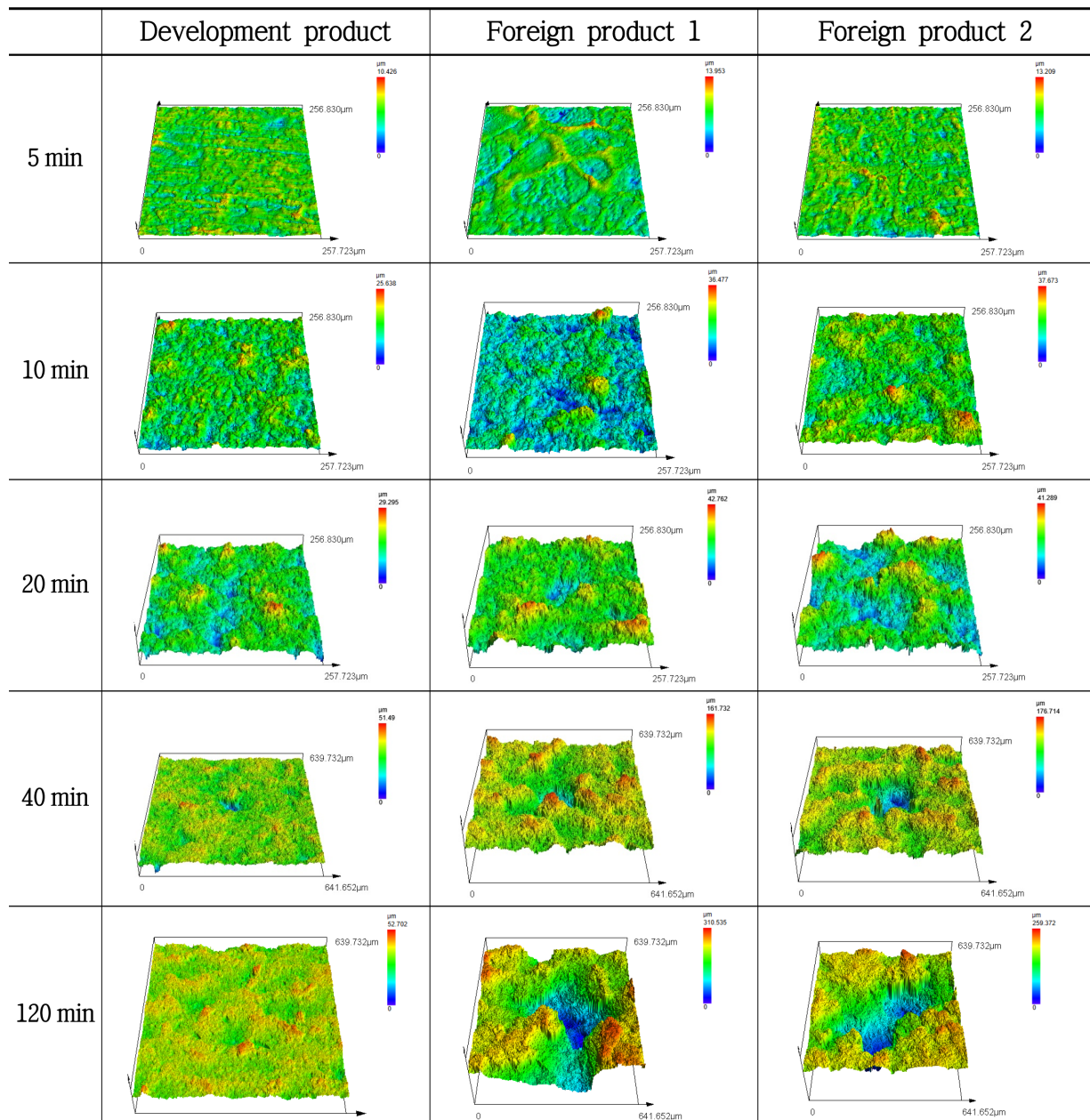


Fig. 9. Surface images using 3D confocal laser microscopy after cavitation-erosion experiments on aluminum alloys in natural seawater with experimental time

찰되었다. 개발제품은 실험시간 종료시점인 120분까지 뚜렷한 표면손상을 나타내지 않았으나, 외국제품 1과 2는 실험시간 40분부터 표면손상이 명확하게 확인되었으며, 이후 실험시간 120분에는 표면손상의 크기가 현저히 증가하였다.

Fig. 10a는 앞선 Fig. 9의 3D 이미지에서 분석한 표면거칠기를 나타낸 것이다. 개발제품의 표면거칠기는 실험시간 경과에 따라 각각 0.74 μm , 1.89 μm , 2.58 μm , 3.06 μm 및 5.12 μm 로 측정되었으며, 그래프

의 기울기는 상대적으로 완만하게 나타났다. 한편 외국제품 1은 실험시간 경과에 따라 각각 1.1 μm , 3.15 μm , 3.47 μm , 13.78 μm 및 46.92 μm 로 나타났으며, 실험시간 20분 이후부터 기울기는 크게 증가하는 경향을 보였다. 외국제품 2는 실험시간 증가에 따라 각각 0.95 μm , 3.14 μm , 4.768 μm , 15.618 μm 및 35.26 μm 로 측정되어 외국제품 1과 유사한 경향을 나타냈다. 결과적으로 모든 실험조건에서 개발제품의 표면거칠기가 외국제품 1과 2에 비해 현저히 작은 값을 나타냈다.

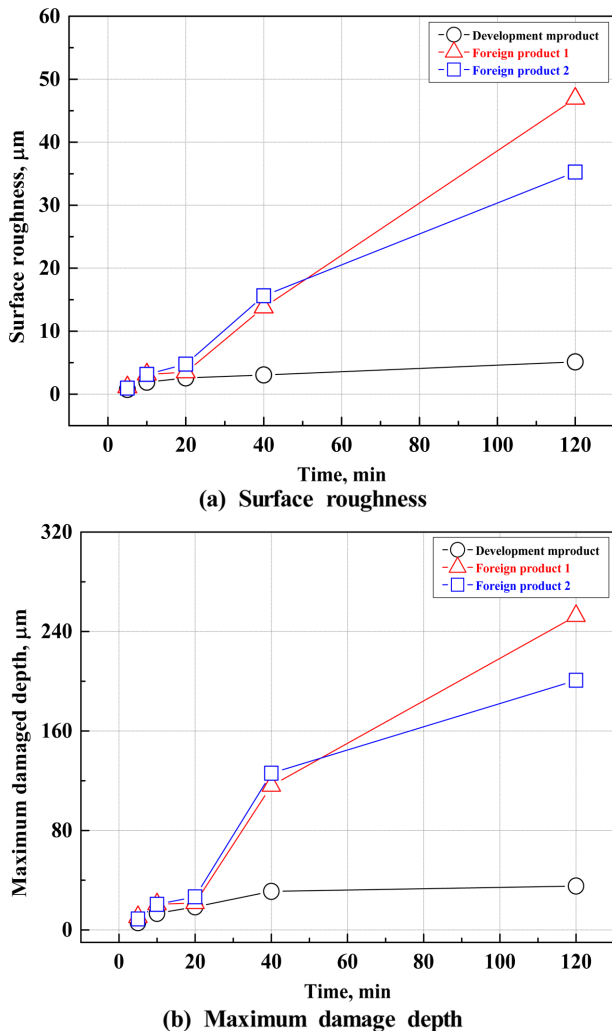


Fig. 10. Surface roughness and maximum damage depth curves using 3D confocal laser microscopy after cavitation-erosion experiments on aluminum alloys in natural seawater with experimental time

Fig. 10b는 캐비테이션-침식 실험시간 경과에 따른 최대손상깊이를 나타낸 것이다. 개발제품은 실험시간 경과에 따라 각각 $5.86\ \mu\text{m}$, $13.35\ \mu\text{m}$, $18.65\ \mu\text{m}$, $31.02\ \mu\text{m}$ 및 $35.32\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 외국제품 1은 각각 $10.5\ \mu\text{m}$, $20.69\ \mu\text{m}$, $21.634\ \mu\text{m}$, $115.964\ \mu\text{m}$ 및 $252.51\ \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 외국제품 2는 각각 $8.88\ \mu\text{m}$, $20.63\ \mu\text{m}$, $26.669\ \mu\text{m}$, $126.024\ \mu\text{m}$ 및 $200.76\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 결과적으로 Fig. 8과 9에서와 같이 표면손상이 커질수록 최대손상깊이와 표면거칠기 역시 증가하는 표면손상 경향이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 국내회사에 개발된 고강도 주조용

알루미늄 합금과 2종의 외국제품에 대하여 전기화학적 실험과 및 캐비테이션-침식 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 인텐테이션실험 결과, 외국제품에 비해 개발제품이 가장 높은 비커스 경도 값을 나타냈으며, 크리프 거동은 나타나지 않았다. 이는 개발제품에 다량 함유된 아연, 마그네슘 및 구리 성분에 기인하여 상대적으로 큰 표면 경도와 크리프 저항성을 나타낸 것으로 사료된다.
2. 정적인 천연해수 환경에서 전기화학적 실험 결과, 개발제품의 부식성이 가장 열악하게 나타났으며, 이는 마그네슘과 구리가 상대적으로 고농도로 함유되어 있어 알루미늄 산화피막 형성을 방해하기 때문으로 사료된다. 그에 따라 동전위 분극실험 후 개발제품의 표면거칠기와 최대부식깊이 역시 가장 크게 나타났다.
3. 캐비테이션-침식실험 결과, 개발제품이 가장 우수한 캐비테이션-침식 저항성을 나타냈는데, 이는 아연, 마그네슘 및 구리의 높은 합금 성분에 기인하여 표면 경도가 가장 크게 나타났기 때문으로 사료된다.

References

1. A. Priyadarshi, W. Krzemien, G. Salloum-Abou-Jaoude, J. Broughton, K. Pericleous, D. Eskin, and I. Tzanakis, Effect of water temperature and induced acoustic pressure on cavitation erosion behaviour of aluminium alloys, *Tribology International*, **189**, 108994 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108994>
2. M. Szkodo, A. Stanisławska, A. Komarov, and L. Bolewski, Effect of MAO coatings on cavitation erosion and tribological properties of 5056 and 7075 aluminum alloys, *Wear*, **203704**, 474 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203709>
3. J. Fahim, S. M. M. Hadavi, H. Ghayour, and S. A. Hossainzadeh Tabrizi, Cavitation erosion behavior of super-hydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy, *Wear*, **424-425**, 122 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.017>
4. A. Pola, L. Montesano, M. Tocci, and G. M. La Vecchia, Influence of ultrasound treatment on cavitation erosion resistance of AlSi7 alloy, *Materials*, **10**, 256 (2017). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma10030256>
5. C. Si, W. Sun, Y. Tian, and J. Cai, Cavitation erosion resistance enhancement of the surface modified

- 2024T351 Al alloy by ultrasonic shot peening, *Surface and Coatings Technology*, **452**, 129122 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129122>
6. Z. Tong, J. Jiao, W. Zhou, Y. Yang, L. Chen, H. Liu, Y. Sun, and X. Ren, Improvement in cavitation erosion resistance of AA5083 aluminium alloy by laser shock processing, *Surface and Coatings Technology*, **377**, 124799 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.023>
 7. L. Girelli, M. Tocci, L. Montesano, M. Gelfi, and A. Pola, Investigation of cavitation erosion resistance of AlSi10Mg alloy for additive manufacturing, *Wear*, **402-403**, 124–136 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.02.018>
 8. M. Hou, Z. Qin, D. Xia, and W. Hu, Cavitation erosion of metallic materials under multi-field and multi-phase action in marine environment, *Equipment Environmental Engineering*, **19**, 75 (2022).
 9. J. Du and F. Chen, Cavitation dynamics and flow aggressiveness in ultrasonic cavitation erosion, *International Journal of Mechanical Sciences*, **204**, 106545 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106545>
 10. A. K. Krella, Degradation and protection of materials from cavitation erosion: a review, *Materials*, **16**, 2058 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16052058>
 11. H. Soyama and Y. Iga, Laser Cavitation Peening: A Review, *Applied Sciences*, **13**, 6702 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/app13116702>
 12. A. Abouel-Kasem, O. O. Osman, S. A. Karrab, and S. M. Ahmed, The limited role of pit formed by microjet in evolution of cavitation erosion in the incubation period, *Journal of Tribology*, **144**, 041702 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4051653>
 13. M. Dular, T. Požar, J. Zevnik, and R. Petkovšek, High speed observation of damage created by a collapse of a single cavitation bubble, *Wear*, **418-419**, 13 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.004>
 14. O. O. Osman, A. Abouel-Kasem, and S. M. Ahmed, Shock waves as dominant mechanism for cavitation damage, *Journal of Tribology*, **144**, 062301 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4052141>
 15. S. L. Song, D. G. Li, D. R. Chen, and P. Liang, The role of Ti in cavitation erosion and corrosion behaviours of NAB alloy in 3.5% NaCl solution, *Journal of Alloys and Compounds*, **919**, 165728 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165728>
 16. S. R. Gonzalez-Avila, D. M. Nguyen, S. Arunachalam, E. M. Domingues, H. Mishra, and C. D. Ohl, Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS), *Science Advances*, **6**, eaax6192 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax6192>
 17. I. J. Jang, J. M. Jeon, K. T. Kim, Y. R. Yoo, and K. Y. Sik, Ultrasonic cavitation behavior and its degradation mechanism of epoxy coatings in 3.5% NaCl at 15 °C, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 26 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.1.26>
 18. R. J. K. Wood, Tribology of thermal sprayed WC-Co coatings, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **28**, 82 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.07.011>
 19. J. Basumatary and R. J. K. Wood, Synergistic effects of cavitation erosion and corrosion for nickel aluminium bronze with oxide film in 3.5% NaCl solution, *Wear*, **367-377**, 1286 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.047>
 20. Q. N. Song, Y. Tong, N. Xu, S. Y. Sun, H. L. Li, Y. F. Bao, Y. F. Jiang, Z. B. Wang, and Y. X. Qiao, Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5% NaCl solutions, *Wear*, **450**, 203258 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203258>
 21. Q. Luo, Q. Zhang, Z. B. Qin, Z. Wu, B. Shen, L. Liu, and W. B. Hu, The synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of nickel-aluminum copper surface layer on nickel-aluminum bronze alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, **747**, 861 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.103>
 22. Z. Qin, L. Cao, Y. Deng, C. Zhong, W. Hu, and Z. Wu, Effect of oxide film on the cavitation erosion-corrosion behavior of nickel-aluminum bronze alloy, *Corrosion*, **76**, 1136 (2020). Doi: <https://doi.org/10.5006/3348>
 23. K. T. Kim, H. Y. Chang, and Y. S. Kim, Electrochemical approach on the corrosion during the cavitation of additive manufactured commercially pure titanium, *Corrosion Science and Technology*, **17**, 310 (2018). Doi: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2018.17.6.310>
 24. L. Cao, Z. Qin, Y. Deng, C. Zhong, W. Hu, and Z. Wu, Effect of passive film on cavitation corrosion behavior of 316L stainless steel, *International Journal of Electrochemical Science*, **15**, 628 (2020). Doi: <https://doi.org/10.20964/2020.01.51>
 25. J. Ma, G. Hou, H. Cao, Y. An, H. Zhou, J. Chen, and W. Duan, Why does seawater corrosion significantly inhibit the cavitation erosion damage of nickel-aluminum bronze?, *Corrosion Science*, **209**, 110700 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110700>

- <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110700>
26. M. H. Im, Cavitation characteristics on impeller materials of centrifugal pump for ship in sea water and fresh water, *Corrosion Science and Technology*, **10**, 218 (2011). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2011.10.6.218>
 27. L. Wang, J. Mao, C. Xue, H. Ge, G. Dong, Q. Zhang, and J. Yao, Cavitation-Erosion behavior of laser cladded Low-Carbon Cobalt-Based alloys on 17-4PH stainless steel, *Optics & Laser Technology*, **158**, 108761 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108761>
 28. S. Hattori and T. Kitagawa, Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data, *Wear*, **269**, 443 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.031>
 29. J. Z. Liu, J. H. Chen, Z. R. Liu, and C. L. Wu, Fine precipitation scenarios of AlZnMg (Cu) alloys revealed by advanced atomic-resolution electron microscopy study Part I: Structure determination of the precipitates in AlZnMg (Cu) alloys, *Materials Characterization*, **99**, 277 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.11.028>
 30. J. Z. Liu, J. H. Chen, X. B. Yang, S. Ren, C. L. Wu, H. Y. Xu, and J. Zou, Revisiting the precipitation sequence in Al–Zn–Mg-based alloys by high-resolution transmission electron microscopy, *Scripta Materialia*, **63**, 1061 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.001>
 31. R. Arabi Jeshvaghani, H. R. Shahverdi, and S. M. M. Hadavi, Investigation of the age hardening and operative deformation mechanism of 7075 aluminum alloy under creep forming, *Materials Science and Engineering A*, **552**, 172 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.027>
 32. A. M. Cassell, J. D. Robson, X. Zhou, T. Hashimoto, and M. Besel, The direct observation of copper segregation at the broad faces of η' and η precipitates in AA7010 aluminum alloy, *Materials Characterization*, **163**, 110232 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110232>
 33. Ş. Bayraktar and A. P. Hekimoğlu, Effect of zinc content and cutting tool coating on the machinability of the Al–(5–35) Zn alloys, *Metals and Materials International*, **26**, 477 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00582-y>
 34. S. Hong, Y. Wu, J. Wu, Y. Zhang, Y. Zheng, J. Li, and J. Lin, Microstructure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed ceramic-metal composite coatings for application in hydro-turbines, *Renewable Energy*, **164**, 1089 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.099>
 35. Y. Wang, E. Hao, Y. An, J. Chen, and H. Zhou, Effects of microstructure and mechanical properties on cavitation erosion resistance of NiCrWMoCuCBFe coatings, *Applied Surface Science*, **547**, 149125 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149125>
 36. C. L. Ko, Y. L. Kuo, S. H. Chen, S. Y. Chen, J. Y. Guo, and Y. J. Wang, Formation of aluminum composite passive film on magnesium alloy by integrating sputtering and anodic aluminum oxidation processes, *Thin Solid Films*, **709**, 138151 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138151>
 37. T. H. Muster and I. S. Cole, The protective nature of passivation films on zinc: surface charge, *Corrosion Science*, **46**, 2319 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.01.002>
 38. F. Cao, G.-L. Song, and A. Atrens, Corrosion and passivation of magnesium alloys, *Corrosion Science*, **111**, 835 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.041>
 39. P. Hashemifard Dehkordi, H. Moshtaghi, and M. Abbasvali, Effects of magnesium oxide and copper oxide nanoparticles on biofilm formation of Escherichia coli and Listeria monocytogenes, *Nanotechnology*, **34**, 155102 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/acab6f>
 40. H. Jin, Y. Sui, X. Yu, J. Feng, Y. Jiang, Q. Wang, and W. Sun, The crystallographic orientation dependent anisotropic corrosion behavior of aluminum in 3.5 wt% NaCl solution, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **946**, 117746 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117746>
 41. S. Joshi, J. P. Franc, G. Ghigliotti, and M. Fivel, Bubble collapse induced cavitation erosion: Plastic strain and energy dissipation investigations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **134**, 103749 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.103749>
 42. D. S. Won, K.S. Jeon, Y.T. Kho, and J.H. Lee, Cavitation behavior of A5083 alloy by vibratory cavitation tester, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, **23**, 215 (1994). https://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00230400215
 43. W. Opare, C. Kang, X. Wei, H. Liu, and H. Wang, Comparative investigation of ultrasonic cavitation erosion for three materials in deionized water, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **234**, 1425 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1177/1350650119899547>