

## Al 6061-T6 합금의 해수 내 캐비테이션 진폭에 따른 캐비테이션-침식 조건하에서 전기화학적 특성

황현규<sup>1</sup> · 김성종<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>목포해양대학교 기관공학과 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91, 58628, 대한민국

<sup>2</sup>목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91, 58628, 대한민국

(2020년 12월 15일 접수, 2020년 12월 21일 수정, 2020년 12월 21일 채택)

## Electrochemical Characteristics with Cavitation Amplitude Under Cavitation Erosion of 6061-T6 in Seawater

Hyun-Kyu Hwang<sup>1</sup> and Seong-Jong Kim<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Division of marine engineering, Graduate school, Mokpo national maritime university,  
91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

<sup>2</sup>Division of marine engineering, Mokpo national maritime university,  
Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received December 15, 2020; Revised December 21, 2020; Accepted December 21, 2020)

Generally, Al alloys of 5000 and 6000 series show excellent weldability, workability, and specific strength, and are widely used in ship building. A combined experiment via cavitation erosion and corrosion damage involving 6061-T6 Al alloy was performed using potentiodynamic polarization under cavitation erosion (hybrid experiments) with amplitude (cavitation strength). The corrosion current density was approximately 52-fold higher at 30  $\mu\text{m}$  than under static conditions, suggesting that the amplitude greatly affected the damage. The degree of damage increased with increasing cavitation amplitude. After the hybrid experiment, the corrosion rate was compared according to the weight loss and damage depth, and the relationship between the two values was expressed as alpha value. The alpha ( $\alpha$ ) values at amplitudes of 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  and 30  $\mu\text{m}$  were 5.11, 12.81 and 8.74, respectively, suggesting that the  $\alpha$  value at 10  $\mu\text{m}$  was greater than at 5  $\mu\text{m}$ , and indicating local corrosion damage. However, the  $\alpha$  value at 30  $\mu\text{m}$  was smaller than that of 10  $\mu\text{m}$ , which is attributed to higher damage via uniform corrosion than damage induced by local corrosion.

**Keywords:** 6061-T6, Cavitation-erosion, Electrochemical damage, Amplitude, Hybrid experiment

### 1. 서론

6061-T6은 Al-Mg-Si 합금으로써 용체화 처리 후 인공시효처리 한 합금으로 기계적 강도와 가공성이 우수하며, 내식성과 내구성이 우수하여 선체 건조 시 사용된다. 그러나 이러한 Al 합금은 대기 중 산소와 접촉 시 얇은 산화피막을 형성하나, 해양 환경하의 염소이온( $\text{Cl}^-$ )에 의한 산화피막이 쉽게 파괴되어 공식과 틈부식 같은 손상이 발생하

기 쉬우며, 선박의 고속 운항으로 선체와 해수 간 상대적인 운동으로 유체에 의한 캐비테이션-침식 손상이 발생한다 [1-3]. 캐비테이션이란 유체 내 국부적인 압력 변화로 인해 기포가 발생 및 붕괴되며, 이러한 붕괴로 강력한 마이크로 제트를 형성하여 선체표면에 침식 손상을 유발한다 [4-6]. 선박의 고속운항 시 이와 같이 캐비테이션-침식에 의한 손상이 가중되고 있어 관련 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구를 통해 선체에 사용되는 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션에 대한 저항성과 캐비테이션 강도(진폭)에 따른 손상 거동을 평가하였다.

기존 연구에서 해수 내 선박용 재료인 5083-O, 5083-H321

<sup>†</sup>Corresponding author: ks@mmu.ac.kr

황현규: 석사과정, 김성종: 교수

및 6061-T6에 대하여 캐비테이션 진폭에 따른 캐비테이션-침식 손상을 연구한 결과, 실험 시간 경과에 따라 모든 재료 표면에서 다량 탈리되는 심각한 손상이 관찰되었으며, 5083-H321이 캐비테이션 침식에 대한 저항성이 가장 우수한 재료로 평가되었다 [7]. 또한 선체용 재료인 5052-O, 5456-H116 및 6061-T6을 선정하여 해수 환경하에서 캐비테이션 저항성 연구 결과, 5456-H116이 가장 우수한 재료로 평가되었다 [8]. 그리고 5052-O와 5083-O 알루미늄 합금의 다양한 진폭에 따른 캐비테이션 침식 특성 평가 결과, 시간과 진폭 증가에 따라 손상이 증가하는 경향을 나타내었고, 크레이터(Crater) 생성이 단시간 내에 빠르게 진행하였다 [9,10]. 그 동안 해양 환경하에서 전기화학적 부식과 캐비테이션-침식 손상에 대하여 각각 다양한 연구가 수행되었으나 캐비테이션-침식 환경하에서의 전기화학적 특성에 관한 연구는 매우 드물다. 그래서 해양 환경하에서 염소 이온에 의한 전기화학적 부식과 캐비테이션-침식 현상에 의한 물리적 손상이 동시에 작용한 경우, 시너지효과로 손상이 가속화되어 선체의 수명은 예상보다 단축되므로 복합적으로 연구할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 선체 건조 시 사용되는 6061-T6에 대하여 캐비테이션 진폭에 따라 캐비테이션-침식과 전기화학 실험을 복합적으로 실시한 후, 기존 연구한 캐비테이션-침식 실험 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법

본 연구는 천연해수 용액에서 Al 6061-T6에 대하여 하이브리드 실험(캐비테이션 환경하에서 전기화학적 실험)을 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 6061-T6 (Al-Mg-Si 합금)의 화학조성을 나타낸 것이다. 시편준비는 열 변형을 최소화하기 위해 냉각수가 공급되는 절단기를 사용하여 3 cm × 3 cm 크기로 가공 후 샌드페이퍼 #2000 번까지 단계적으로 연마하였다. 가공 과정에서 발생한 이물질을 제거하기 위해 1분간 초음파 세척을 실시한 후 아세톤과 증류수로 세척하였다. 또한 캐비테이션-침식 조건에서 전기화학적 부식에 의한 손상도 평가를 위하여 실험 전·후 진공 건조기에서 24시간 이상 건조하여 무게를 측정하였다.

Fig. 1은 해수 내 하이브리드 실험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 캐비테이션-침식 실험은 ASTM-G32 규정에 준용하는 진동발생 장치로, 압전 효과(Piezo electric)를 이용하여 진동을 발생시켜 캐비테이션 환경을 구현하였다.

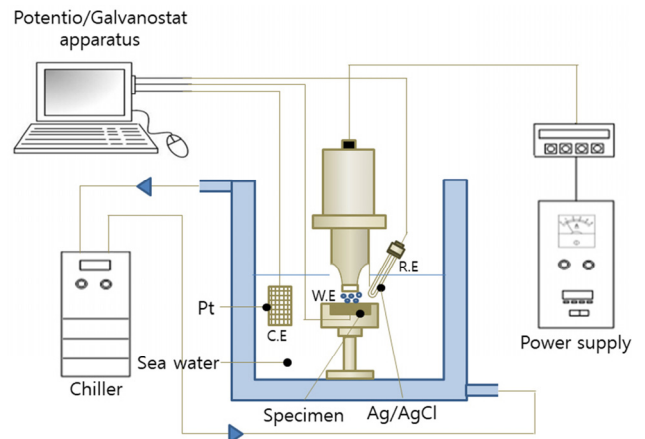


Fig. 1 Schematic diagram of hybrid experiment in seawater.

본 장비는 60 Hz, 220 V 전원을 공급하여 원추형 혼을 축 방향으로 진동시켜 인위적으로 재료표면에 캐비테이션 충격을 가하는 장치이다. 이때 진동은 20 kHz로 유지시켰으며, 캐비테이션 진폭의 크기는 캐비테이션 혼의 형상을 달리하여 각각 5 μm, 10 μm, 30 μm로 맞추었으며, 정진폭 자동 제어 방법으로 실험 중 일정하게 유지하였다. 시편은 혼에 대향하여 1 mm 간격을 유지하였으며, 진폭 변수에 따른 손상도 평가를 위해 실험 시간 30분으로 일정하게 하였다. 기존 연구에서 다양한 알루미늄 합금의 캐비테이션-침식 실험 결과를 발표하였다 [7]. 본 연구는 캐비테이션-침식 환경하에서 추가적으로 동전위 분극시험을 실시하기 위해 캐비테이션-침식장치와 전기화학 실험 장비인 GAMRY instrument사의 US/PCI/750을 동시에 사용하여 수행하였다.

전기화학 실험은 시편의 노출면적을 4.52 cm<sup>2</sup>으로 동일하게 노출되도록 전기화학적 셀을 구성하였으며, 기준전극은 은/염화은(Ag/AgCl) 전극으로, 상대전극은 백금전극으로 하여 천연해수에서 실시하였다. 천연해수는 이중 비커를 사용하여 냉각수를 공급함으로써 25 °C로 일정 온도를 유지시켰으며, 본 실험에 사용된 천연해수의 주요 성분 및 특성은 Table 2에 나타났다. 동전위분극 실험은 실험 전 안정화 시간으로 3,600 초간 침지 후 1 mV/s의 주사속도로 분극시켰으며, 그 결과에 대하여 타펠외삽법(Tafel's extrapolation method)을 이용하여 부식전위와 부식전류밀도를 산출하였다. 하이브리드 실험 후 손상 정도를 평가하기 위해 무게 감소량을 비교하였으며, 3D 분석 현미경 및

Table 1 Chemical compositions of 6061-T6 Al alloy (wt%)

Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Al
0.8252	0.3104	0.441	0.0069	0.1809	0.2086	Balanced

**Table 2 Chemical compositions and properties of seawater (wt%)**

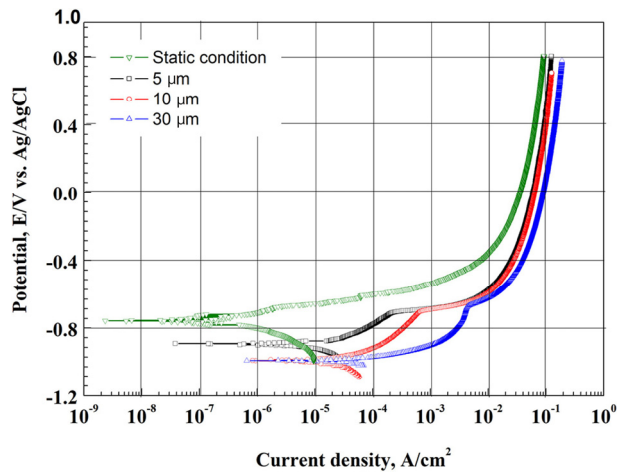
Main component (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>			
2,605	17,388	10,414	361	1,215	402	7.9	10.2	49.7

주사전자현미경 (Scanning electron microscope, SEM) 을 이용하여 표면을 관찰하였다.

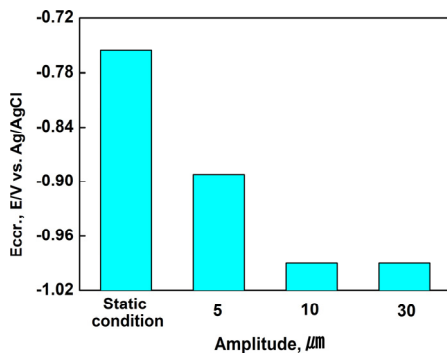
### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 하이브리드 실험 환경하에서의 동전위분극 곡선과 타펠(Tafel) 분석 결과를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 2a는 동전위 분극곡선이며, 전체적으로 음극분극 곡선에서 개로전위에서 비방향으로 이행함에 따라 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 정적인 조건(Static condition)에서의 양극분극곡선은 개로전위에서 전위가 상승함에 따라 꾸준한 전류밀도 상승이 관찰되었으며, 해수에 포함된 염소 이온에

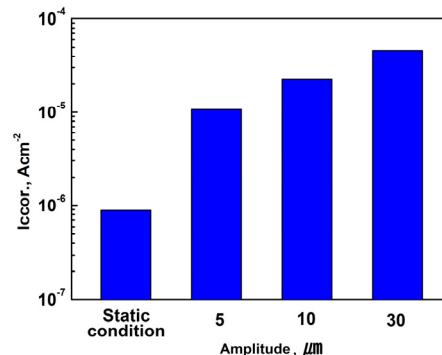
의해 산화 피막이 파괴되어 부동태 구간이 관찰되지 않았다 [11]. 반면 캐비테이션 조건에서는 양극분극이 진행됨에 따라 전류밀도가 증가하는 경향을 나타낸 후, 공식전위 이후 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었다. 그리고 진폭 증가에 따라 높은 전류밀도를 나타내는 경향이 관찰되었으며, 이후 전위 상승에 따라 꾸준히 전류밀도가 증가하는 활성화용해반응( $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ )이 관찰되었다 [12]. Fig. 2b와 c는 진폭변수에 따른 부식전위와 부식전류밀도 값을 나타낸 것이다. 먼저, 부식전위는 진폭이 증가함에 따라 다소 활성화방향으로 저하하는 경향을 나타내었다. 그러나 부식 전위는 서로 다른 금속 간의 갈바닉 셀이 형성된 경우 부식 속도에 큰 영향을 주는 인자이며, 해수 내 단일 금속의 부식



(a) Polarization curve for Tafel analysis



(b) Corrosion potential



(c) Corrosion current density

**Fig. 2 Results of Tafel analysis after hybrid experiment for 6061-T6 Al alloy in seawater.**

특성에 대한 유의한 의미를 갖지 않는다 [13]. 반면 부식전류밀도는 정적조건, 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  및 30  $\mu\text{m}$ 의 경우, 각각  $8.81 \times 10^{-7}$ ,  $1.07 \times 10^{-5}$ ,  $2.84 \times 10^{-5}$  및  $4.62 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 을 나타내어 특히, 30  $\mu\text{m}$ 조건에서 정적조건에 비해 약 52배 현저히 높은 값을 나타내어 진폭이 큰 영향을 미치는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 캐비테이션 조건에서 형성된 캐비티의 충격압에 의한 물리적인 표면손상과 염소이온에 의해 전기화학적 부식이 가속화 되어 손상이 가중되며, 진폭이 클수록 시편 표면에 가해지는 충격에너지가 손상 정도를 가중시킴으로써 부식손상이 증가한 것으로 사료된다 [14].

Fig. 3은 천연해수 용액에서 다양한 진폭 조건에서의 하이브리드 실험 후 표면관찰 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 캐비테이션 진폭에 비례하여 손상량이 증가하는 경향을 나타냈다. 정적 조건의 경우, 해수 환경하에서 발생할

수 있는 알루미늄 합금의 전형적인 부식 양상인 공식에 의한 손상이 관찰되었다 [12]. 5  $\mu\text{m}$  조건에서 하이브리드 실험을 실시한 조건의 경우, 약한 충격압에 의해 전체적으로 균일한 부식과 함께 시편 원주방향에 미비한 국부적인 공식이 관찰되었다. 10  $\mu\text{m}$  경우, 표면의 원주방향 미세 피트들의 결합에 의해 형성되어 침식피트가 보다 선명하게 관찰되었다. 그리고 30  $\mu\text{m}$  경우, 강한 캐비티에 의한 충격에너지가 격렬하게 작용하여 원주방향의 손상뿐만 아니라 중심부에도 현저히 많은 크레이터형의 손상이 관찰되었다. 캐비테이션 실험 시 보통 기포군(cavity cluster)이 혼 표면으로부터 형성되어 중앙부로 갈수록 유속이 증가되므로 시편 중앙에 손상이 집중된다 [15]. 그러나 원주방향으로도 손상이 발생하였는데, 이는 난류 강도(turbulence intensity)에 의해 해석되며, 유체의 기계적 에너지 값을 나타낸다 [16]. 진폭이 증가할수록 이 난류 강도 값이 상승된 것으로 사료된다. 캐비테이션-침식 실험 시 진폭에 따라 손상정도를 연구한 내용과 비교한 결과, 전체적으로 진폭크기의 상승에 따라 손상부 면적이 증가하는 경향은 동일하게 관찰되었다 [7]. 그러나, 캐비테이션-침식 실험의 경우, 5  $\mu\text{m}$  진폭 조건에서 전체적으로 균일한 부식만 관찰될 뿐 하이브리드 실험에서 관찰된 국부적 손상은 관찰되지 않았다. 10  $\mu\text{m}$  경우, 하이브리드 실험에 비해 원주방향의 침식피트 크기가 더 작게 관찰되었으며, 30  $\mu\text{m}$  경우에서는 표면 중앙부에서 손상 면적의 크기가 다소 적게 관찰되었으며, 전체적으로 국부적인 부식이 관찰되었다. 반면, 하이브리드 실험에서는 전체적으로 국부부식의 경향보다 균일 부식의 경향이 관찰되었다. 이는 캐비테이션-침식 손상에 양극분극 시 활성용해 반응에 의한 전기화학적 부식이 가해졌기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 천연해수 용액에서 다양한 진폭에서의 하이브리드 실험 후 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 다양한 진폭에서 모든 시편이 소성변형에 의한 파면무늬가 관찰되었다. 전반적으로 양극분극에 의한 활성용해 반응의 영향으로 인해 전면적으로 부식되는 경향이 관찰되었다. 손상형태는 알루미늄 양극 분극 시 일반적으로 관찰되는 각진형상 [17]과 달리, 캐비테이션-침식에 의한 부드러운 형상이 관찰되었다. 또한 전체적으로 캐비테이션 진폭 크기가 증가함에 따라 부식에 의한 손상 부위가 확산되었으며, 손상깊이도 증가되었다 [18]. 이는 진폭이 커지면서 충격에너지가 증가하여 다수의 균열이 발생함에 따라 결정이 탈리되면서 손상이 증가한 것으로 판단된다 [14]. 진폭에 따른 캐비테이션-침식 실험만 수행한 경우 [7], 캐비티로 인한 강제 순환으로 피트(pit) 내의 염소이온( $\text{Cl}^-$ ) 농도가 낮아지고, 워터 캐비테이션 피닝(water cavitation peening) 효과로 인해 표면의 압축잔류응력이 형성되었다 [19]. 이러한 환경적 요인보다 캐비테이션 진폭에 따른 충격에너지

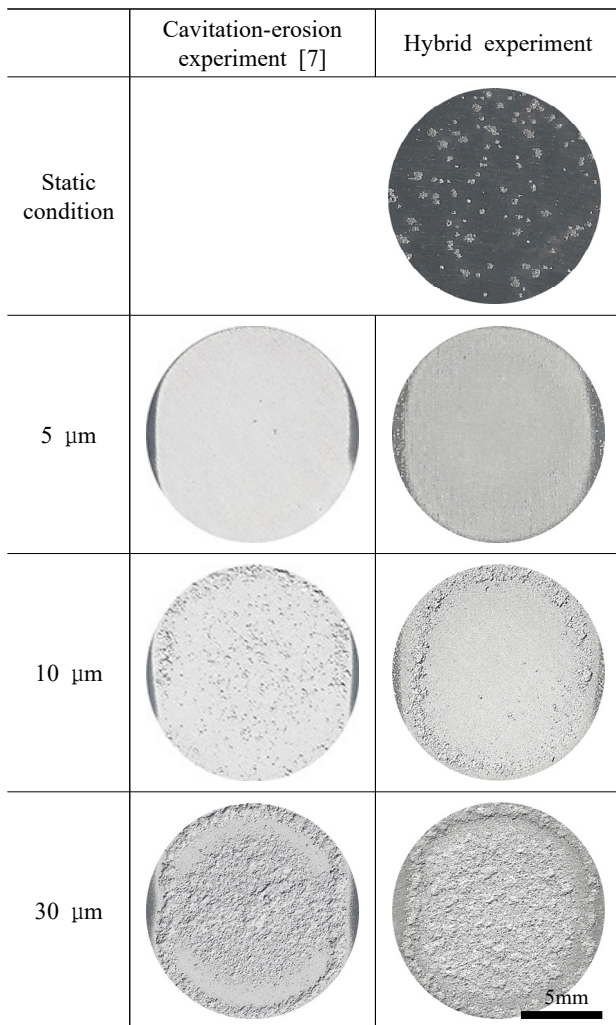


Fig. 3 Appearance after hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

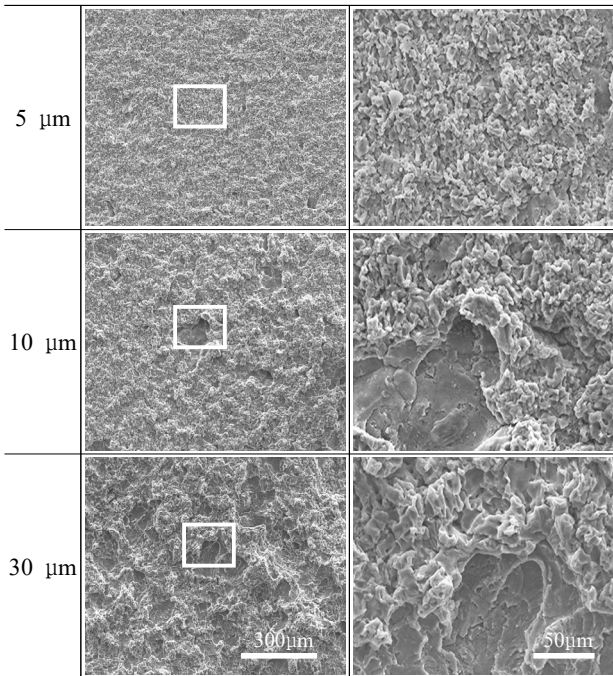


Fig. 4 Surface morphologies after cavitation-erosion and hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

에 의한 국부적인 손상이 발생하여 폭과 깊이가 증가한 것으로 사료된다. 반면 본 연구 결과는 전기화학적 부식으로 인한 활성용해 반응과 캐비티의 물리적 충격이 복합적으로 작용하여 캐비테이션-침식 실험에 비해 전체적으로는 균일하게 손상되었으나 부분적으로 국소적인 손상도 관찰되었다.

Fig. 5는 캐비테이션-침식 실험과 하이브리드 실험 후 시험편의 손상 모식도를 나타낸 것이다. 캐비테이션-침식 조건의 경우, 캐비티의 붕괴로 인하여 안정한 부동태 피막이 파괴되고, 캐비테이션 환경하에서 시편 표면의 분극저항이 크게 감소된 피막 형성으로 인해 재부동태와 탈부동태되는 속도가 매우 빠르게 되어 국부적인 손상이 발생하였으며 [20], 캐비테이션 진폭이 증가함에 따라 충격에너지가 커져서 손상의 크기와 깊이가 현저히 증가하는 경향을 나타냈다. 한편, 하이브리드 실험의 경우 캐비테이션-침식 환경에 활성용해 반응이 추가됨으로써 전체적으로 균일한 부식과 부분적으로 침식 손상이 관찰되었으며, 진폭 증가에 따라 침식 손상은 현저히 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 6은 천연해수 용액에서 다양한 진폭에서의 하이브리드 실험 후 표면을 3D 현미경 분석 결과와 최대 손상깊이를 나타낸 것이다. 3D 현미경 분석 결과, 전반적으로 모든 진폭에서 표면 조직이 탈리되며 진폭크기가 상승할수록 폭과 손상깊이 모두 증가하는 경향이 관찰되었다. 최대 손상깊이는 5 μm 진폭조건에서 55.32 μm이며, 10 μm, 30 μm의 경우는

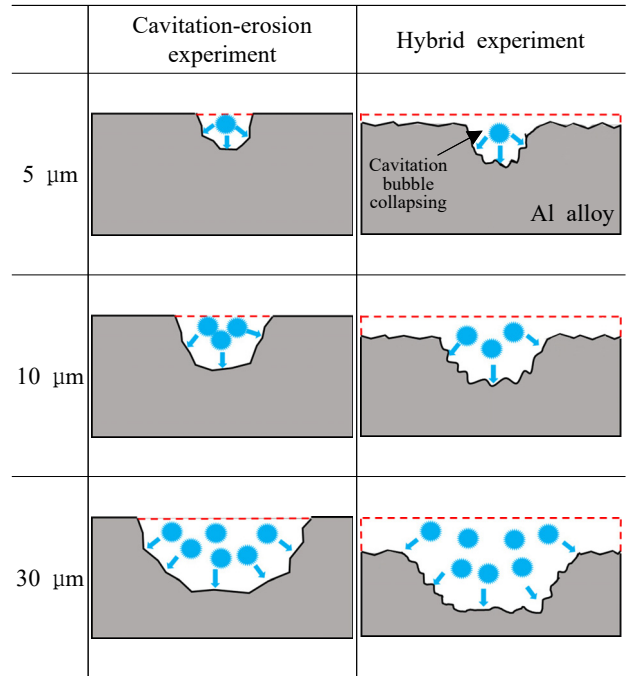


Fig. 5 Schematic diagram on damage after cavitation-erosion and hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

5 μm에 비해 각각 약 3배, 6배 이상 큰 값을 나타냈다. 다양한 알루미늄의 캐비테이션 진폭에 따른 기존 연구에서 손상 깊이는 본 연구의 경향과 부합하는 경향을 나타냈다 [7].

Fig. 7은 캐비테이션-침식 실험 [7]과 하이브리드 실험 결과에 대한 최대 손상깊이를 비교한 것이다. 전체적으로 하이브리드 실험 결과의 최대 손상깊이는 양극분극에 따라 부가적인 활성용해 반응이 발생하여 캐비테이션-침식 실험만 실시한 결과보다 큰 값을 나타냈다. 두 조건에서 증가된 폭을 비교해보면, 5 μm에서 10 μm의 구간의 경우, 현저히 상승하였으나, 10 μm에서 30 μm의 경우, 오히려 증가 폭은 감소하였다. 이는 5 μm에서 10 μm의 경우, 하이브리드 실험이 활성용해 반응에 의한 전기화학적 부식이 가속화되므로 진폭 증가에 따라 깊이 방향으로 상승하였지만, 30 μm의 경우, 두 조건에 따른 차이가 오히려 10 μm에 비해 감소하게 된 이유는 모두 큰 진폭에 의해 전기화학적 부식에 의한 영향보다 물리적 충격에너지가 현저히 큰 영향을 미치므로 깊이 방향보다 전체적으로 균일하게 평탄화되면서 큰 손상이 발생하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 캐비테이션-침식 실험 [7]과 하이브리드 실험 후 무게 감소량을 비교한 것이다. 각 진폭변수에서 두 조건의 무게 감량 차이 값(화살표의 크기)은 5 μm, 10 μm 및 30 μm에서 각각 11.9 mg, 12.7 mg, 및 17.5 mg으로 관찰되었다. 캐비테이션 진폭이 증가할수록 각 진폭에서 무게감

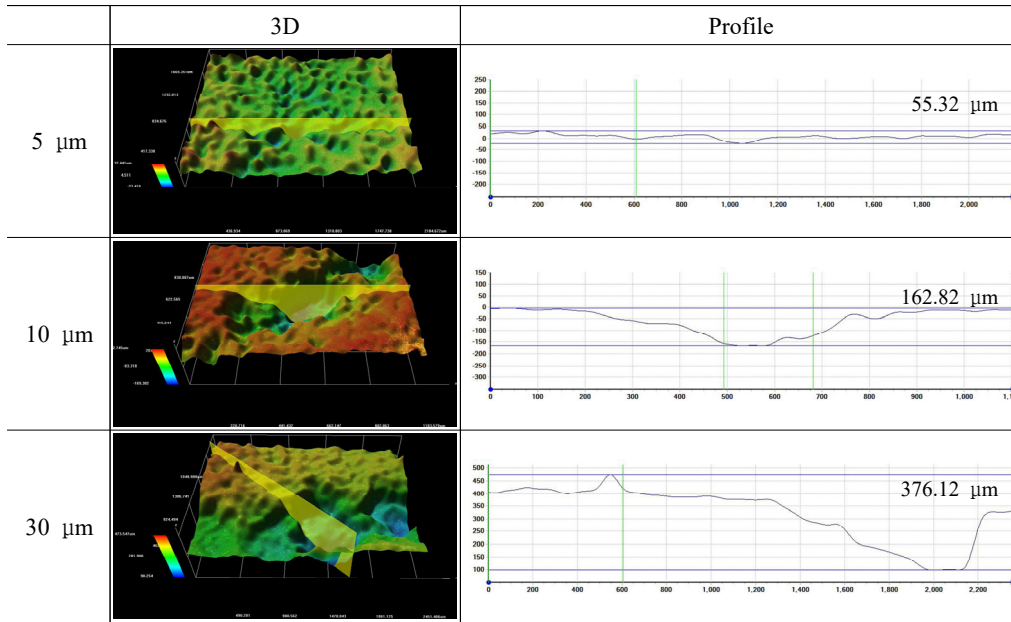


Fig. 6 3D microscopic image analysis after hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

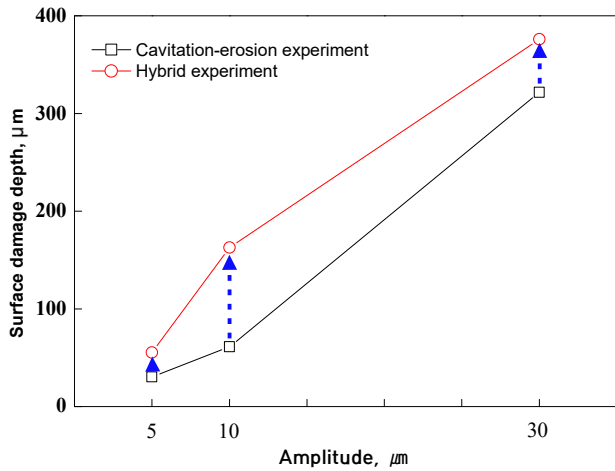


Fig. 7 Surface damage depth after cavitation-erosion and hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

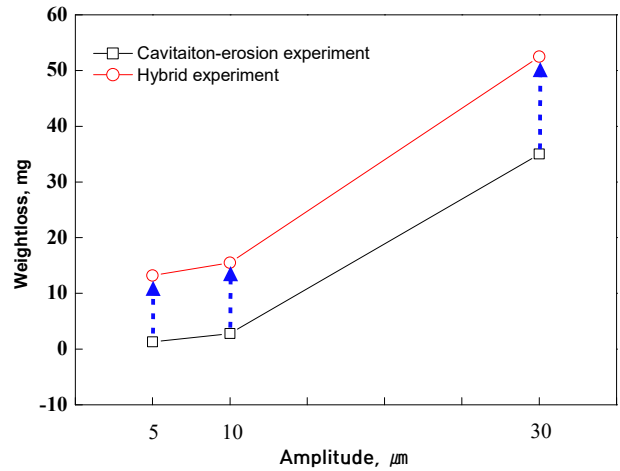


Fig. 8 Weight loss after cavitation-erosion and hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

량 차이 값의 폭도 상승하였다. 이는 전기화학적 부식보다 캐비테이션 특성에 따른 침식 손상 효과의 영향이 더 크기 때문으로 사료된다.

장 등은 3.5% NaCl 용액에서 탄소강의 캐비테이션-침식 조건에서 캐비테이션 진폭이 전기화학적 특성에 미치는 영향을 연구하였다 [18]. 이 연구에서 캐비테이션-침식 실험 후 무게 감소로 얻은 부식률과 깊이 손상으로 얻은 부식률을 비교하여 둘 사이의 관계를 나타내었다. 이 관계는 깊이손상(부식률, corrosion rate) =  $\alpha \times$  무게감소량(부식률, corrosion rate). 즉, 손상 깊이를 통해 얻은 부식률은

무게 감소량을 통해 얻은 부식률 보다  $\alpha$  배 만큼 높다는 의미이며, 이는 캐비테이션 손상에 의한 국부 부식 정도를 비교할 수 있다.

Table 3은 하이브리드 실험에 의한 깊이손상과 무게감소량을 측정 후 각각 부식률을 산출하였으며, 이 부식률을 이용하여  $\alpha$  값을 산출한 과정을 나타낸 것이다.  $\alpha$  값은 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  및 30  $\mu\text{m}$ 의 경우, 각각 5.12, 12.90 및 8.74를 나타냈다. 즉, 깊이 손상을 통해 얻은 부식률이 무게감소량 감소를 통해 얻은 부식률보다 각각 5.12 배, 12.90 배, 8.74 배 높다는 의미다. Fig. 9는 산출된  $\alpha$  값을 그래프로 나타낸

Table 3 Alpha( $\alpha$ ) value calculation process after hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater

	Corroded depth ( $\mu\text{m}$ )	Corrosion rate by Corroded depth ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Weight loss (mg)	Corrosion rate by Weight loss ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	$\alpha$
5 $\mu\text{m}$	55.32	1.844	13.2	0.36	5.12
10 $\mu\text{m}$	162.82	5.42	15.5	0.42	12.90
30 $\mu\text{m}$	376.12	12.53	52.5	1.433	8.74

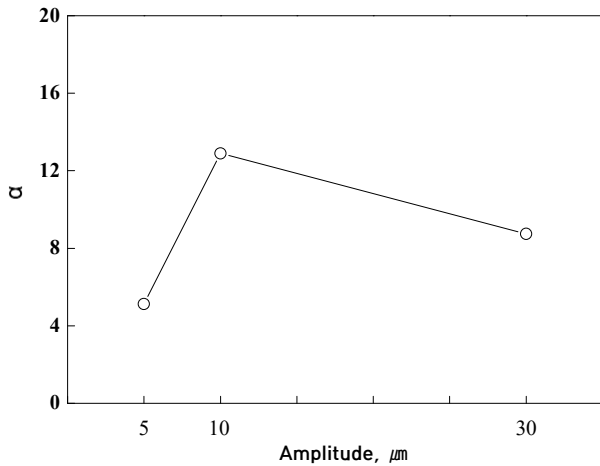


Fig. 9 Alpha( $\alpha$ ) value after hybrid experiment with amplitude for 6061-T6 Al alloy in seawater.

것이다.  $\alpha$  값이 5  $\mu\text{m}$ 보다 10  $\mu\text{m}$ 에서 더 크게 관찰되어 진폭이 상승할수록 국부적인 손상이 증가된 것으로 판단된다. 그러나, 30  $\mu\text{m}$ 의 경우는 10  $\mu\text{m}$ 보다 작아 균일부식에 의한 손상 증가에 기인한 것으로 사료된다. 5  $\mu\text{m}$ 에서 10  $\mu\text{m}$ 는 전기화학적 특성에 의해 국부 부식의 영향이 컸지만, 10  $\mu\text{m}$ 에서 30  $\mu\text{m}$ 는 캐비테이션-침식에 따른 물리적 충격에 의한 균일부식이 국부부식의 영향보다 크게 미친 것으로 사료된다. 따라서 진폭이 증가함에 따라 전기화학적 부식보다 물리적 충격에너지가 손상에 현저히 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

해양환경하에서 캐비테이션-침식 조건에서 전기화학적 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

캐비테이션-침식 환경하에서 진폭 변수에 따른 동전위 분극실험 후 타펠분석 결과, 부식전류밀도는 30  $\mu\text{m}$  조건에서 정적조건보다 약 52배 정도 현저히 높은 값을 나타내어 진폭이 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

캐비테이션-침식실험과 하이브리드 실험을 비교한 결과, 두 조건 모두 전체적으로 캐비테이션 진폭 크기가 증가

함에 따라 충격에너지 증가로 다수의 균열이 발생하여 결정이 탈리되면서 손상 부위와 손상깊이가 증가하였다. 하이브리드 실험이 캐비테이션-침식 실험보다 무게감소량과 손상깊이 모두 큰 값을 나타냈으며, 전기화학적 손상에 비해 캐비테이션 특성에 따른 침식 손상의 영향이 더 크기 때문으로 판단된다.

하이브리드 실험 후, 손상 깊이를 통해 얻은 부식률과 무게 감소량을 통해 얻은 부식률의 관계를 나타내어  $\alpha$  값을 산출하였다.  $\alpha$  값은 10  $\mu\text{m}$ 가 5  $\mu\text{m}$ 보다 큰 값을 나타내어 국부적인 손상이 더 발생한 것으로 판단되고, 30  $\mu\text{m}$ 는 10  $\mu\text{m}$ 보다 작게 나타났는데, 이는 국부적인 손상보다 전체적으로 균일부식 손상이 발생했기 때문으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 ‘차세대 한국형 어선 개발 및 실증화’ 사업의 지원을 받아 이루어졌음(알루미늄 합금 선체의 희생양극 방식 설계 연구용역, 중소조선연구원).

#### References

1. G. Okamoto, *Corros. Sci.*, **13**, 471 (1973).  
[https://doi.org/10.1016/0010-938X\(73\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0010-938X(73)90031-0)
2. H. Soyama, A. Lichtarowicz, and Momma, *Proc. of Fluid Eng. Division Summer Meeting, ASME FED*, **236**, 415 (1996).  
<https://tohoku.pure.elsevier.com/en/publications/vortex-cavitation-in-a-submerged-jet>
3. T. Momma and A. Lichtarowicz, *Wear*, **186**, 425 (1995).  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07144-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07144-X)
4. B. K. Sreedhar, S. K. Albert, and A. B. Pandit, *Wear*, **372**, 177 (372).  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>
5. F. Caupin and E. Herbert, *CR Phys*, **7**, 1000 (2006).  
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.015>
6. L. van Wijngaarden, *Sonochem*, **29**, 524 (2016).  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.04.006>

7. Y. J Yang and S. J Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **19**, 250 (2020).  
<http://doi.org/10.14773/cst.2020.19.5.250>
8. S. J Kim, K. H Kim, and S. J Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 136 (2011).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2011.10.4.136>
9. S. J Kim and S. J Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 205 (2012).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2012.11.5.205>
10. Y. J Yang and S. J Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **5**, 239 (2020).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.5.239>
11. G. Bregliozzi, A. DiSchino, S. I. -U. Ahmed, J. M. Kenny, and H. Haefke, *Wear*, **258**, 503 (2005).  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.024>
12. Denny A. Jones, *Principles and Prevention of CORROSION, 2nd ed.*, p. 129, 273, Prentice Hall, Inc (1995).
13. S. J, Lee, M. S Han, and S. J, Kim, *J. Kor. Sci. Mar. Eng*, **39**, 223 (2015).  
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.3.223>
14. I. C. Park, A thesis for a doctorate, pp. 124 - 127, Mokpo National Maritime University (2018).  
[http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=89c7497abc5179abffe0bdc3ef48d419](http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=89c7497abc5179abffe0bdc3ef48d419)
15. I. Hansson and K. A. Morch, *J. Appl. Phys.*, **51**, 4651 (1980).  
<https://doi.org/10.1063/1.328335>
16. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Kho, and J. H. Lee, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor.*, **23**, 215 (1994).  
[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:45022794](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:45022794)
17. Y. B. Kim and S. J. Kim, *J. Kor Inst. Surf. Eng*, **52**, 23 (2019).  
<https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.1.23>
18. I. J. Jang, K. T. Kim, Y. R. Yoo, and Y. S Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **19**, 163 (2020).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.163>
19. S. J Kim and K. Y. Hyun, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 151 (2012).  
<https://www.j-cst.org/data/issue/CST/C001104/C00110400151.pdf>
20. K. T. Kim, H. Y. Chang, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **17**, 310 (2018).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2018.17.6.310>