

## 선박용 5052-O 알루미늄 합금의 해수 내 진폭 변수에 따른 캐비테이션-침식 손상 특성

양 예 진<sup>1</sup> · 김 성 종<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 에너지시스템학과 대학원, 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206  
<sup>2</sup>목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91  
(2020년 9월 14일 접수, 2020년 9월 29일 수정, 2020년 9월 30일 채택)

## Characteristics of Cavitation-Erosion Damage with Amplitude in Seawater of 5052-O Al Alloy for Ship

Ye-Jin Yang<sup>1</sup> and Seong-Jong Kim<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Systems Research, Graduate School, Ajou University, 206 World Cup Road,  
Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

<sup>2</sup>Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro,  
Mokpo-si, Jeollanam-do, Korea

(Received September 14, 2020; Revised September 29, 2020; Accepted September 30, 2020)

The characteristics of cavitation-erosion damage with changes in the amplitude of 5052-O aluminum alloy for ships were investigated in a seawater environment. In the cavitation-erosion experiment, the cavitation environment was created using a vibration-generating device with a piezo-electric effect. The amplitudes of 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , and 30  $\mu\text{m}$  were created by changing the geometric shape of the cavitation horn. The resistance characteristics of cavitation-erosion damage were evaluated by weight loss and pitting area. The damaged surface was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and 3D optical microscopy. As the amplitude increased, the amount of damage and the area of the damaged surface increased, and the damage was concentrated at the center and edge of the specimen. The pit was created after the initial incubation period with increasing experimental time, and then the pits were merged to grow and propagate into craters, and eventually, the surface was detached and damaged. The cavitation-erosion damage after 30 minutes with amplitude of 10  $\mu\text{m}$  and 30  $\mu\text{m}$  was 1.48 and 2.21 times compared to 5  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Keywords:** Al ship, 5052-O Al alloy, Cavitation-erosion, Amplitude, Seawater

### 1. 서론

기존 소형선박용 선체재료의 대부분은 FRP (Fiber-reinforced plastic, 섬유강화 플라스틱)를 이용하여 건조되었다. 그 이유는 경제성, 경량성, 내식성 및 성형성이 뛰어나기 때문이다. 그러나 FRP선은 선박 건조 과정에서 유해성분이 발생하고, 폐선 시 산업폐기물로서 환경오염에 큰 영향을 미치고 있어 이에 대한 환경 규제가 강화되고 있다. 또한, 인화성이 크기 때문에 2004년 10월 해양수산부는 해양인명

안전협약(SOLAS)의 국제고속선기준(HSC Code)을 수용한 후 국내만을 항해하는 고속선(최고속력 25노트 이상) 건조 시 FRP의 사용이 금지되고 있으며, 2007년부터 국내에서 항해하는 여객선 건조 시 FRP의 사용이 금지되고 있다 [1]. 그래서 국내 조선 업계에서는 FRP를 대체하여 알루미늄 합금 선박 건조를 늘리고 있다. 선박용 알루미늄 합금은 재활용이 용이하고 친환경 재료이며, 비강도가 높고 경량화가 가능하여 에너지 절감 및 고속화가 가능하다 [2,3]. 또한, 화재에 강하기 때문에 FRP를 대체할 선박용 재료로 많은 장점을 가지고 있다 [4]. 알루미늄 합금은 대기 중의 산소와 결합하여 수 nm 두께의 산화 피막을 형성하기 때문에 우수한 내식성을 가진다. 그러나 산화 피막의 두께가 너무

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

양예진: 박사과정, 김성종: 교수

얇아 부식성이 강한 환경에서 충분한 내식성을 발휘하지 못한다 [5]. 특히 선박의 고속화로 인하여 선체 도장이 박리되어 해수 환경에 노출될 경우 염소이온(Cl<sup>-</sup>)에 의해 알루미늄 산화 피막이 파괴되어 국부 부식을 유발할 수 있으며 선박의 수명 단축을 야기시킨다 [6]. 또 선체와 해수의 상대 운동으로 유속이 상승하여 캐비테이션이 발생한다 [7]. 유속에 의해 기포가 붕괴될 때 수 GPa에 이르는 국소적인 충격압력 발생으로 캐비테이션-침식 현상을 발생시켜 알루미늄 합금 선박의 수명을 빠르게 단축시킨다 [8]. Im은 Cu-Al 합금의 해수 내에서 캐비테이션 손상거동에 관한 실험 결과 정적인 조건보다 캐비테이션 환경에 노출된 동적 조건에서 캐비테이션-침식으로 인한 알루미늄 합금 표면이 손상되어 높은 부식전류밀도를 나타냄을 규명하였다 [9]. 대체로 선박용 알루미늄 합금은 5000계열의 Al-Mg 합금과 6000계열의 Al-Mg-Si 합금이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 5000계열의 합금은 우수한 내식성과 용접성을 가지고 있으며, 6000계열은 적당한 내식성과 우수한 성형성 및 가공성을 가지고 있다. 이로 인하여 5000계열은 구조용, 6000계열은 의장용으로 주로 사용되어 왔으나 최근에는 6000계열의 새로운 합금이 개발되어 6082 합금의 경우 선체 재료로도 널리 이용되고 있다 [10-12]. 선박의 구조용으로 가장 많이 사용되는 5000계열 알루미늄 합금의 캐비테이션-침식 손상에 관한 연구가 진행된 바 있다. Kim 등은 5000계열 알루미늄 합금의 해수 내에서 실험 시간에 따른 캐비테이션-침식에 대한 저항성을 평가한 결과, 시간이 경과할수록 캐비테이션-침식에 의한 손상 정도가 점차 증가하였으며, 5000계열 알루미늄 합금 중 5052-O 알루미늄 합금이 가장 큰 손상을 나타냄을 규명하였다 [13]. 그러나 유속에 따라 선체에 발생하는 캐비테이션-침식의 강도가 다르므로 캐비테이션-침식 손상 정도가 달라지게 된다. 그러나 그동안 선박용 선체재료인 알루미늄 합금의 진폭 변수에 따른 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 소형 선박용 선체 재료로 많이 사용되는 5000계열의 알루미늄 합금 중 5052-O 알루미늄 합금에 대하여 해

수 내에서 실험 시간과 진폭 변수에 따른 캐비테이션-침식 손상 특성을 연구하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

Al-Mg 계열 알루미늄 합금은 해양환경에서 내식성이 우수하고 Mg에 의해 고용 강화되어 우수한 강도를 지닌다. 그 중 Mg 함량이 2.5%(JIS 내식 알루미늄 합금 제1종, 5052)와 4.5%(JIS 내식 알루미늄 합금 제7종, 5083)인 알루미늄 합금이 가공성 및 용접성이 양호하여 해양환경에서 구조용 재료로 널리 이용된다. 5000계열 알루미늄 합금은 Al-Mg 합금으로 적당한 강도를 유지하며 내식성, 성형 가공성이 우수하며, 특히 5052-O 알루미늄 합금은 Mg 함량이 중간 정도로 적당한 강도를 요구하는 선박, 차량, 건축 등의 구조재로 사용된다. 따라서 본 연구에서는 5052-O 재료를 선정하였으며 그 조성은 Table 1에 나타냈다.

### 2.2 실험방법

캐비테이션-침식 실험은 압전(Piezo electric) 효과를 이용한 진동발생 장치(Cavitation erosion tester)를 이용하여 캐비테이션 환경을 구현하여 수행하였다. 본 연구에 사용된 캐비테이션 장비는 60 Hz, 220 V 전원을 공급하여 압전소자에서 20 kHz의 축방향 정격진동을 유도시킨 뒤 혼(horn)에 전달하여 특정 진폭의 초음파를 발진시키는 장치이다. 진폭의 크기는 캐비테이션 혼의 기하학적 형상을 달리하여 각각 5 μm, 10 μm 그리고 30 μm로 하였으며 정진폭 자동제어 방식으로 실험 중 일정하게 유지하였다. 시험편은 진동자에 연결된 혼에 대하여 1 mm 간격을 두고 거치대에 고정하였다.

시험용액으로는 25 °C에서 Table 2와 같은 천연해수를 사용하였으며, 부식에 대한 영향을 최소화하기 위해 냉각기에 연결된 이중 비이커 내에 용액을 교반시키며 일정 온도를 유지하였다. 또한 정량적인 침식손상 분석을 위한 무게

Table 1 Chemical compositions of 5052-O Al alloy (wt%)

Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Al
2.31	0.0005	0.284	0.197	0.177	0.0005	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

감소량 측정을 위해 시험편을 실험시작 전과 종료 후 증류수(Distilled water)로 세척하고 건조기로 1일 동안 건조시킨 뒤 무게를 측정하였다. 실험 후 침식 손상 저항성을 평가하기 위해 무게 감소량 및 무게 감소율 {무게감소량(mg)/단위 시간(min)}을 비교하였으며, 손상된 표면을 주사전자현미경 및 3D 광학 현미경을 이용하여 관찰하였다. 그리고 실험 후 시험편의 침식 손상 정도를 평가하기 위해 손상된 표면을 Image J 프로그램을 이용하여 공식 손상 면적을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

해양환경하에서 5052-O 알루미늄 합금에 대하여 5, 10 그리고 30  $\mu\text{m}$ 의 진폭변수에 따른 캐비테이션-침식실험을 수행하였다.

#### 3.1 진폭 5 $\mu\text{m}$ 에 따른 캐비테이션 손상 특성

Fig. 1은 천연해수 용액에서 5  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험을 실시한 경우, 시간에 따른 시험편의 표면 형상을 디지털 카메라를 이용하여 촬영한 것이다. 전반적으로 실험시간 경과에 따라 표면손상이 증가하였으며, 손상면은 혼 팁(horn tip)의 형상과 유사하게 나타났다. 실험시간 5분 경과시점에서는 시험편 표면 전반에 시험편 준비과정에서 발생한 연마에 의한 스크래치(scratch)와 미세한 손상이 관찰되었고, 실험시간 경과에 따라 20분 경과시점에서는 연마 스크래치가 사라지고 작은 크기의 피트(pit)가 관찰되었다. 이후 캐비테이션 충격이 지속적으로 가해지며 피트가 점차 성장하여 60분 경과시점에서는 다수의 피트가 표면전

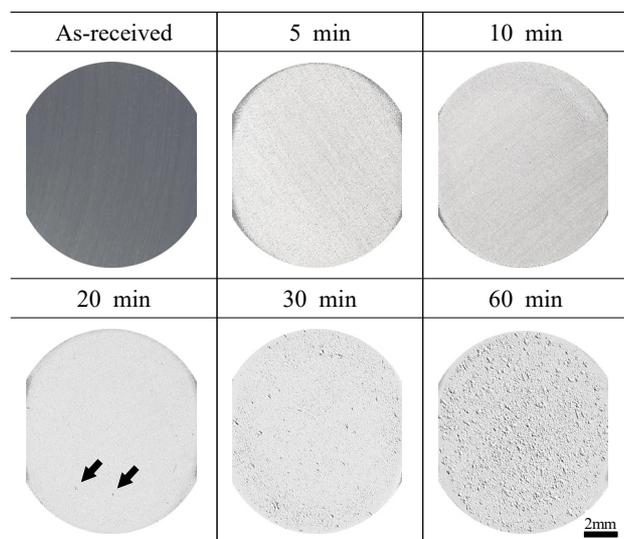
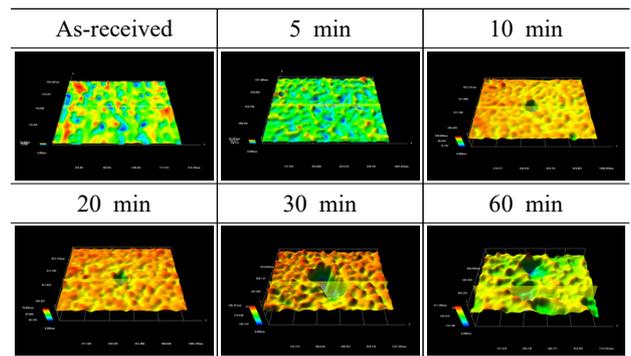


Fig. 1 Appearance after cavitation experiment at amplitude of 5  $\mu\text{m}$  in sea water.

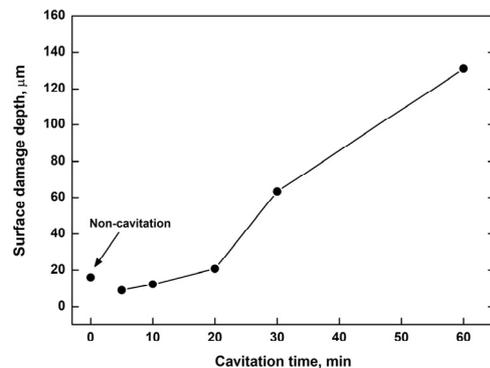
반에 걸쳐 관찰되었으며 표면이 매우 거친 형상을 나타냈다.

Fig. 2는 천연해수 용액에서 5  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험을 실시한 경우, 시간에 따른 시험편의 손상된 표면을 3D 현미경을 통해 관찰한 것이다. Fig. 2a의 3D 표면형상 분석결과 전반적으로 실험초기 5분 경과시점까지는 표면 요철이 줄어들어 손상깊이가 감소한 후 피트의 발생 및 성장으로 인해 손상깊이가 증가하였다. Fig. 2b의 손상깊이 관찰결과, 실험시간 5분까지는 고르지 못한 표면에 기포 붕괴에 의한 압축응력이 가해지며 평탄화 되기 때문에 실험 전 표면에 비해 손상깊이가 작게 측정되었다 [14]. 그리고 실험시간 10분에는 피트발생으로 인해 손상깊이가 증가하였으며, 실험시간이 경과하여 피트가 성장함에 따라 20분 이후에는 손상깊이가 급격히 증가하였다. 60분후의 손상깊이는 실험전에 비해 약 8배정도의 손상깊이가 관찰되었다.

Fig. 3은 천연해수 용액에서 5  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험을 실시한 경우, 시간에 따른 시험편의 손상된 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 일반적으로 캐비테이션에 의한 손상은 빠른 유속에 의해 정압이 저하되며 생성된 기포가 붕괴과정에서 발생한다. 기포 붕괴 시 고속의 마이크로 제트(micro-jet)와 수 GPa에 달하는 충격파



(a) 3D analysis



(b) Surface damage depth

Fig. 2 3D analysis and surface damage depth after cavitation experiment at amplitude of 5  $\mu\text{m}$  in sea water.

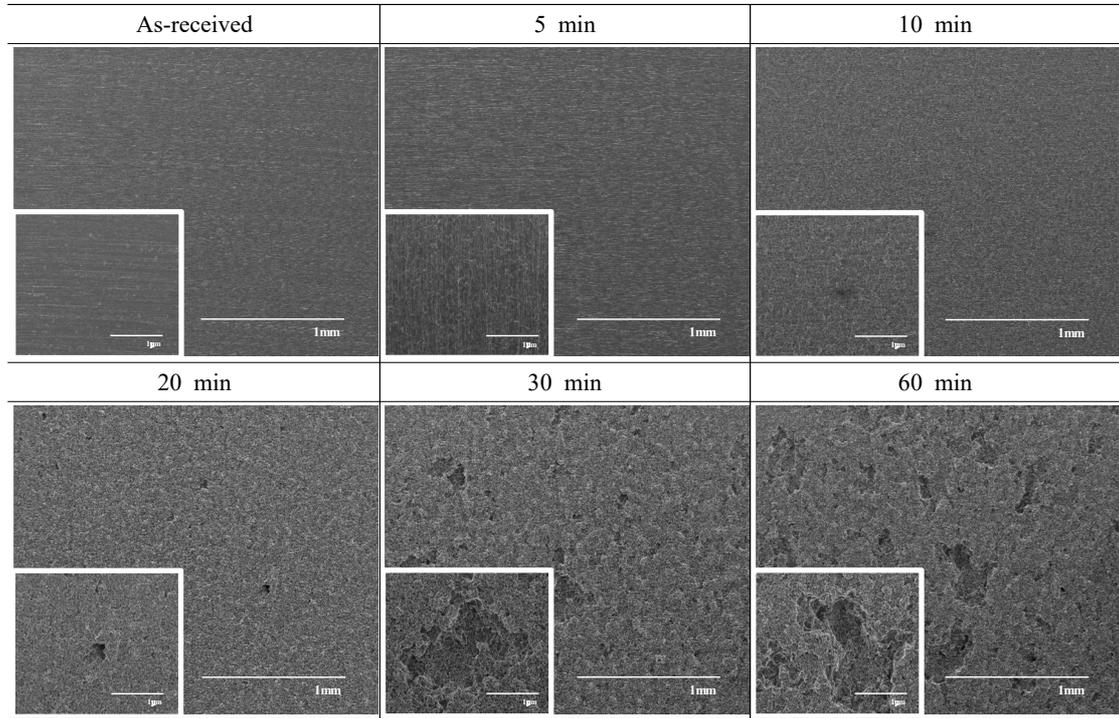


Fig. 3 Surface morphologies after cavitation experiment at amplitude of 5 µm in sea water.

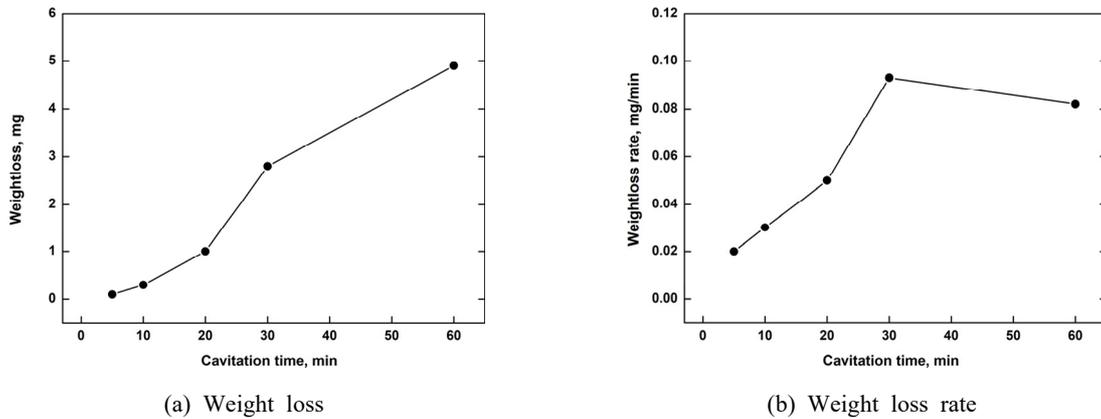


Fig. 4 Weight loss and Weight loss rate after cavitation experiment at amplitude of 5 µm in sea water.

(shock wave)가 발생하며 재료 표면에 지속적으로 충격을 가하게 된다 [15,16]. 이에 따라 재료 표면에 응력이 누적되며 누적된 응력이 한계치에 도달하면 표면 조직의 일부가 파괴되는 침식 손상이 발생한다 [17-19]. 캐비테이션 실험 전 표면관찰 결과, 연마에 의한 미세 스크래치가 관찰되었으며, 실험시간 5분 경과시점에서는 열어진 연마흔적과 함께 소성변형 시 발생하는 파면무늬(fracture pattern)가 관찰되었다. 이는 캐비테이션에 의해 발생된 기포가 시험편 표면 인근에서 붕괴되며 표면에 지속적인 압축응력을 가해 표면이 소성변형된 결과이다. 그리고 10분 경과시점에서는

파면무늬와 함께 중앙부에 어두운 점(spot) 형태의 손상이 관찰되었는데, 이는 실험시간 경과에 따라 피트 손상으로 진전될 것으로 여겨진다. 침식피트는 20분 경과시점에서 관찰되었으며, 이후 표면손상이 급격히 진행되었다. 그 이유는 피트가 기포생성의 핵으로 작용하여 더 많은 캐비테이션 기포가 영향을 미쳐서 큰 충격압이 가해졌기 때문이며, 이로 인해 피트의 깊이는 깊어지고 피트 주변부 역시 손상되어 표면 손상이 빠르게 진전된 것으로 판단된다 [19]. 그 결과 실험종료 시점에는 피트가 주변 피트와 결합하여 성장한 결과인 크레이터(crater)형 손상이 다수 관찰되었다.

Fig. 4는 천연해수 용액에서 5  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험을 실시한 경우, 시간에 따른 시험편의 무게 감소량과 무게 감소율을 나타낸 그래프이다. Fig. 4a의 캐비테이션 무게 감소량 관찰결과, 전반적으로 캐비테이션 실험시간 경과에 따라 무게 감소량이 전반적으로 증가하는 경향이 나타났다. Fig. 4b의 무게 감소율은 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량(mg)을 단위시간(분)으로 나눈 것으로 손상 속도를 의미한다. 전반적으로 캐비테이션 실험시간에 따라 손상 속도가 증가하는 경향을 나타냈으나, 30분 이후에는 감소하는 경향이 나타났다. 이는 Thiruvengadam의 캐비테이션 손상에 의한 무게 감소율이 잠복기  $\rightarrow$  증가기 (최대치)  $\rightarrow$  감소기를 따라 증가하다가 감소한 후 유지된다는 연구결과와도 부합한다 [20]. 실험시간 30분 이후 감소기가 나타난 이유는 Fig. 3의 30분 관찰결과와 같은 손상부내에 기포가 흡착되어 완충효과(cushion effect)가 발생하기 때문이다. 완충효과란 피트 또는 크레이터 등의 손상 내부에 기포가 흡착되어 이후 생성된 기포들과 상호 충돌하여 표면에 전달되는 충격에너지를 완화시키는 작용을 의미한다.

3.2 진폭 10  $\mu\text{m}$ 에 따른 캐비테이션 손상 특성

Fig. 5는 천연해수 용액에서 10  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따른 시험편 표면 형상을 나타낸 것이다. 전반적으로 캐비테이션 실험시간 경과에 따라 표면손상이 증가하여 거친 표면이 나타났으며, 손상은 시험편의 중앙과 가장자리 부분에 집중되었다. 실험시간 5분 경과시점에는 시험편 전반에 걸쳐 미세한 피트가 관찰되었으며, 10분 경과시점부터는 시험편 가장자리 부분에 피트손상이 집중되었다. 이후 실험시간이 경과함에 따라 표면에 충격에너지가

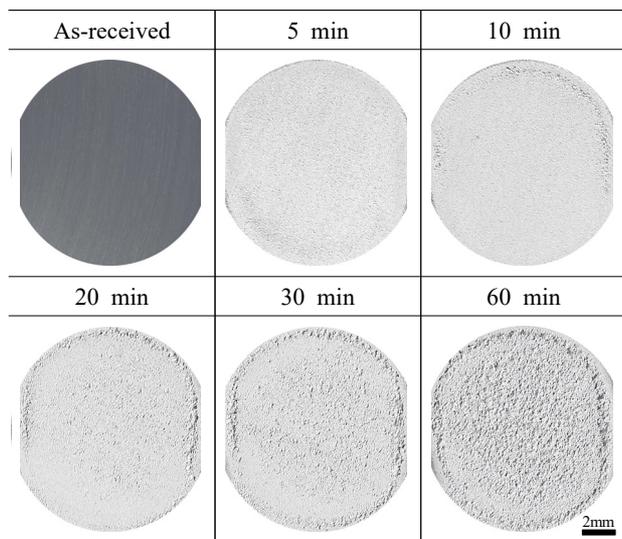
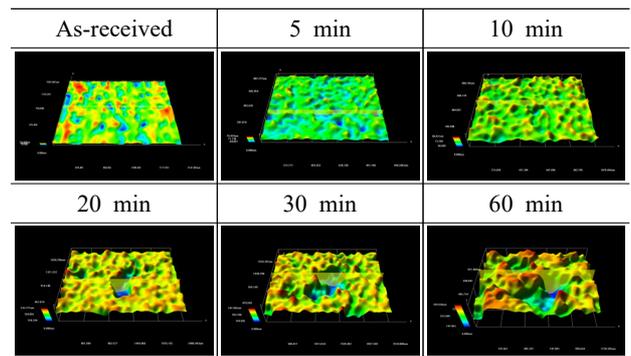


Fig. 5 Appearance after cavitation experiment at amplitude of 10  $\mu\text{m}$  in sea water.

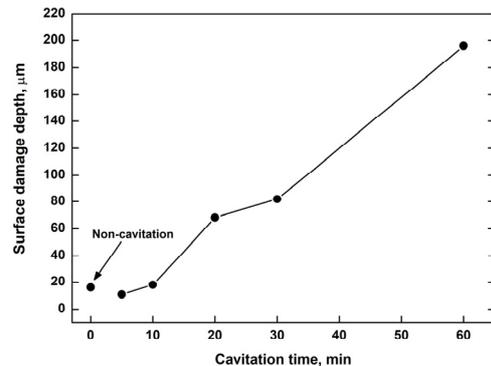
지속적으로 가해져 피트의 개수와 크기가 급격히 증가하였다. 손상은 주로 시편의 가장자리와 중심부에 집중되었으며 시간경과에 따라 점점 더 거친 표면이 관찰되었다.

Fig. 6은 천연해수 용액에서 10  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따른 시험편의 손상된 표면을 3D 현미경을 통해 관찰한 것이다. 실험시간 5분 경과시점에는 실험 전에 비해 작은 손상깊이가 측정되었으며, 이후 지속적으로 증가하였다. 실험 초기 손상깊이가 작게 측정된 이유는 표면의 요철부에 압축응력이 가해져 평탄해졌기 때문으로 판단되며, 10분 이후 급격히 증가하는 것은 피트의 발생에 기인한 것으로 사료된다. 실험 종료 60분 후에는 실험 전에 비해 11.9배정도의 손상깊이를 나타냈으며, 5 $\mu\text{m}$  진폭에 비해 1.5배 정도의 값을 나타냈다.

Fig. 7은 천연해수 용액에서 10  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따른 시험편의 손상된 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 일반적으로 캐비테이션에 의한 손상은 고속 유체 내에서 생성된 기포가 정지된 표면에 근접하여 붕괴하는 과정에서 생성되는 마이크로 제트와 충격파에 의해 발생한다. 이들은 재료 표면에 충격압을 지속적으로 가하여 재료 내에 응력을 누적시키며, 그 응력의 한계치가 초과



(a) 3D analysis



(b) Surface damage depth

Fig. 6 3D analysis and surface damage depth after cavitation experiment at amplitude of 10  $\mu\text{m}$  in sea water.

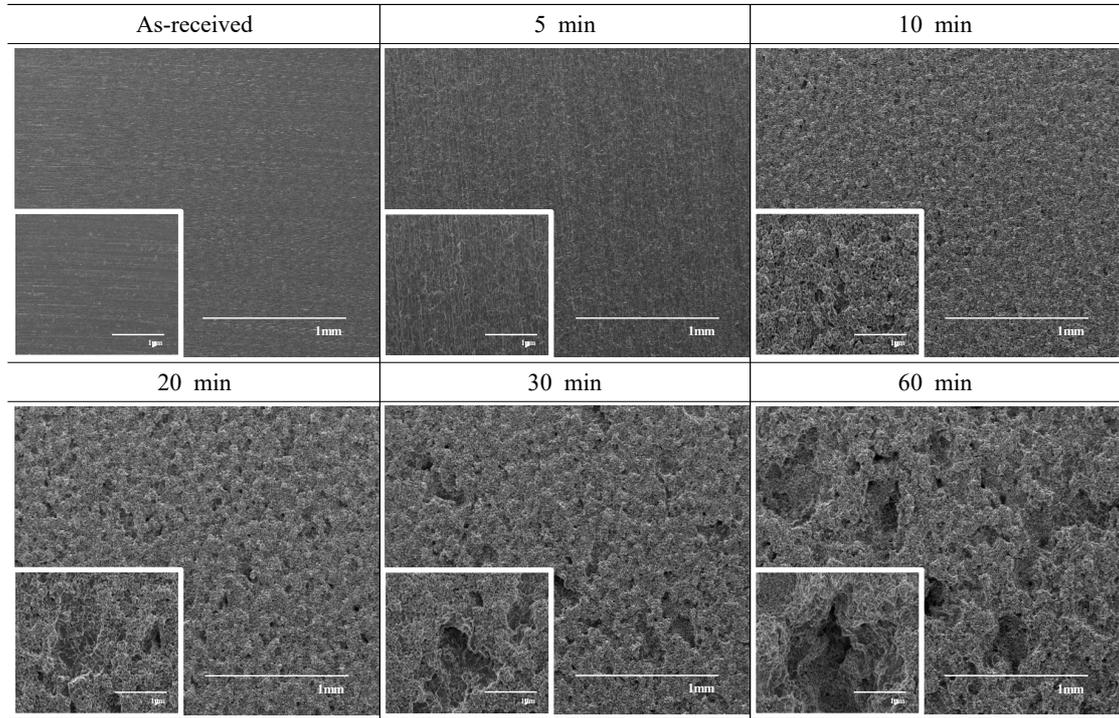


Fig. 7 Surface morphologies after cavitation experiment at amplitude of 10  $\mu\text{m}$  in sea water.

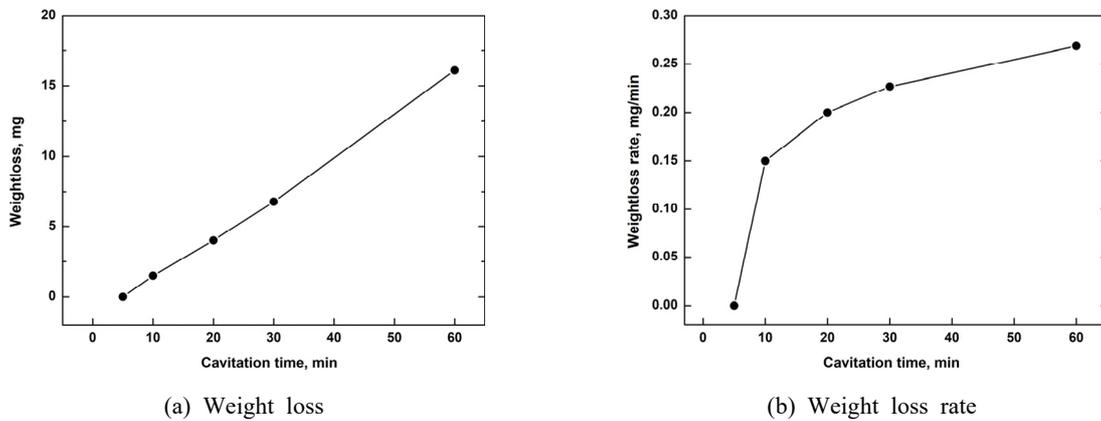


Fig. 8 Weight loss and Weight loss rate after cavitation experiment at amplitude of 10  $\mu\text{m}$  in sea water.

되면 손상이 발생한다. 실험시간 5분 경과시점에서는 5  $\mu\text{m}$ 의 진폭에서와 같이 소성변형에 의한 파면무늬만 관찰되었고, 10분 경과시점부터는 다수의 피트손상이 관찰되었다. 이후 실험시간 경과에 따라 캐비테이션 충격이 지속적으로 가해지며 실험시간 20분부터는 피트가 성장하여 보다 더 깊고 넓어졌다. 30분 경과시점에는 그 크기와 개수가 증가하였으며, 실험종료시점에서는 피트가 인접 피트들과 서로 합쳐지며 크레이터로 성장하였다.

Fig. 8은 천연해수 용액에서 10  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따른 시험편의 무게 감소량과 무게 감소율을

나타낸 그래프이다. Fig. 8a의 무게 감소량의 경우 실험시간 경과에 따라 거의 비례하여 증가하는 경향을 나타냈고 Fig. 8b의 무게 감소율은 그래프의 기울기가 10분까지 급격히 증가하였다가 이후 조금씩 증가하는 경향을 나타냈다. 해당 시험편의 경우 무게 감소량과 주사전자현미경 관찰 결과 등을 종합적으로 고려하였을 때, 잠복기는 10분 이내인 것으로 여겨지며, 60분까지도 증가기로 판단된다.

### 3.3 진폭 30 $\mu\text{m}$ 에 따른 캐비테이션 손상 특성

Fig. 9는 천연해수 용액에서 30  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션

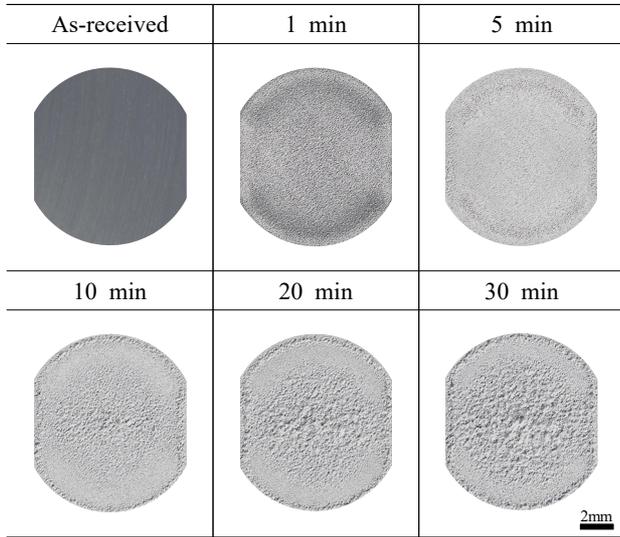
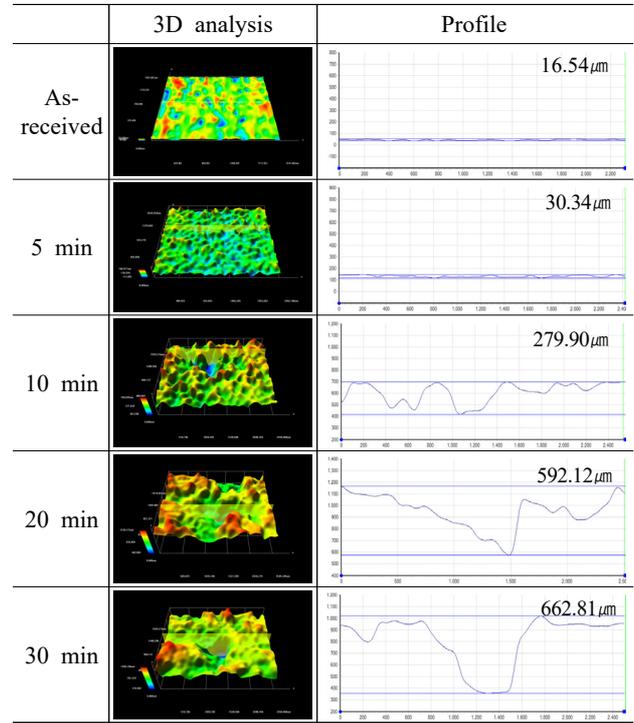


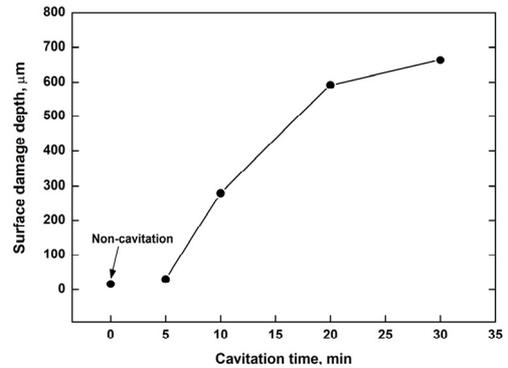
Fig. 9 Appearance after cavitation experiment at amplitude of 30 μm in sea water.

실험시간에 따른 표면 형상을 나타낸 것이다. 전반적으로 실험시간 경과에 따라 시험편 표면이 손상되어 거칠기가 증가하고 손상면적이 확대되었으며, 혼 팁 형상의 손상이 시험편의 중앙부와 가장자리에 집중되어 나타났다. 캐비테이션 손상은 고속의 기포가 정지된 시험편 표면에 근접하여 붕괴되는 과정에서 발생한다. 기포 붕괴 시 500 ~ 600 m/s에 달하는 고속의 마이크로 제트와 수 GPa에 달하는 충격파가 발생하여 시험편 표면에 충격에너지를 가한다. 이러한 과정에서 시험편 내에 압축응력이 누적되어 내부응력이 한계치에 도달하면 표면조직은 피로파괴에 이른다. 실험시간 1분 경과시점에는 미세한 손상이 관찰되었고, 5분 경과시점에는 작은 크기의 피트 손상이 나타났다. 이후 실험시간 경과에 따라 손상량이 급격히 증가하는 경향이 나타났는데, 피트와 같이 표면의 불연속적인 지점은 기포 발생이 용이하여 더 많은 기포가 생성 및 붕괴되어 큰 충격압이 가해지기 때문에 사료된다. 이로 인하여 피트손상은 실험시간 10분 경과시점에서 관찰되는 바와 같이 그 크기와 깊이가 증가하게 되고 실험시간이 더욱 경과하여 30분 경과시점부터는 표면 조직이 덩어리 형태로 탈리되는 심각한 침식손상이 관찰되었다.

Fig. 10은 천연해수 내 30 μm 진폭의 캐비테이션 실험시간에 따라 손상된 표면을 3D 현미경으로 관찰한 것이다. 실험시간 경과에 따라 손상 깊이가 꾸준히 증가하는 경향을 나타냈다. 3D 분석결과, 진폭 5 μm와 10 μm와는 달리 실험시간 5분부터 손상깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 실험시간 10분 경과시점까지는 표면의 요철이 증가하였고 이후에는 표면이 탈리되어 손상깊이가 급격히 증가하였다. 손상 깊이는 실험시간 경과에 따라 증가하였으나 그 증가 폭은



(a) 3D analysis



(b) Surface damage depth

Fig. 10 3D analysis and surface damage depth after cavitation experiment at amplitude of 30 μm in sea water.

20분 이후 점차 감소하였다. 그 이유는 실험시간 경과에 따라 표면 상부조직이 탈리되는 양이 증가하여 손상깊이가 실제보다 작게 측정되었기 때문으로 여겨진다. 실험시간 30분후의 손상깊이는 5 μm 진폭에 비해 10.5배, 10 μm에 비해 8.1배 정도의 현저히 큰 값을 나타내었다.

Fig. 11은 천연해수 용액에서 30 μm 진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따라 손상된 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 실험시간 5분 경과시점에서 다수의 현저한 피트 손상이 관찰되었으며 실험시간 경과에 따라 급격하게 손상이 증가하였다. 피트 손상이 발생하면 그 내부와 주변

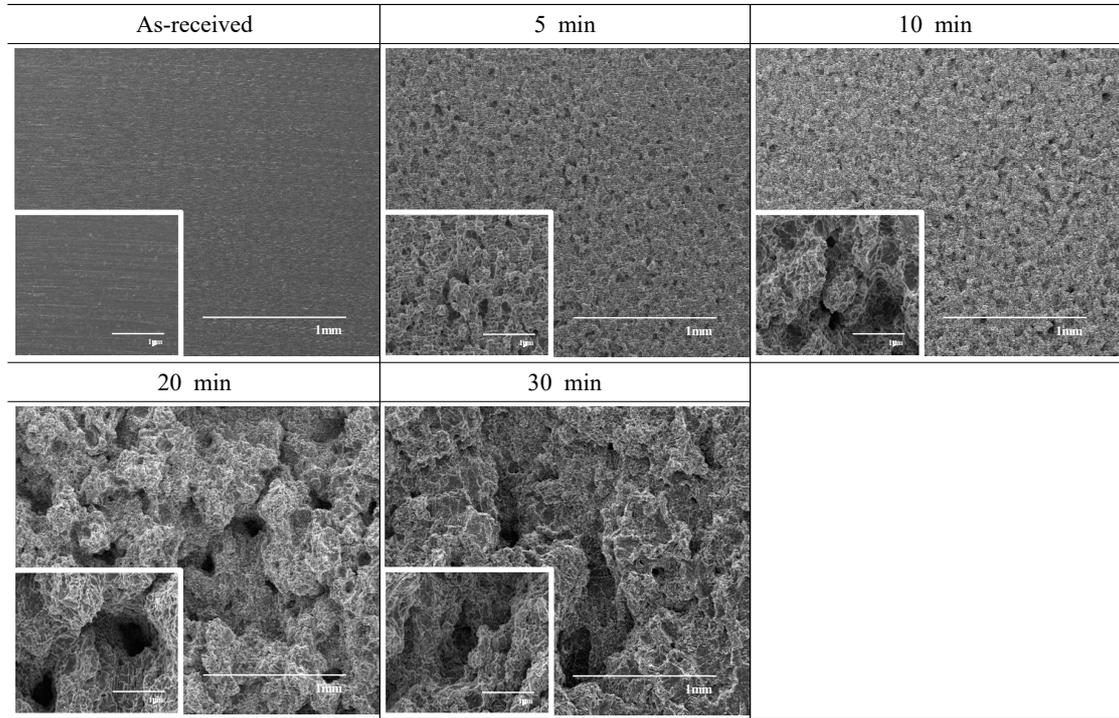


Fig. 11 Surface morphologies after cavitation experiment at amplitude of 30  $\mu\text{m}$  in sea water.

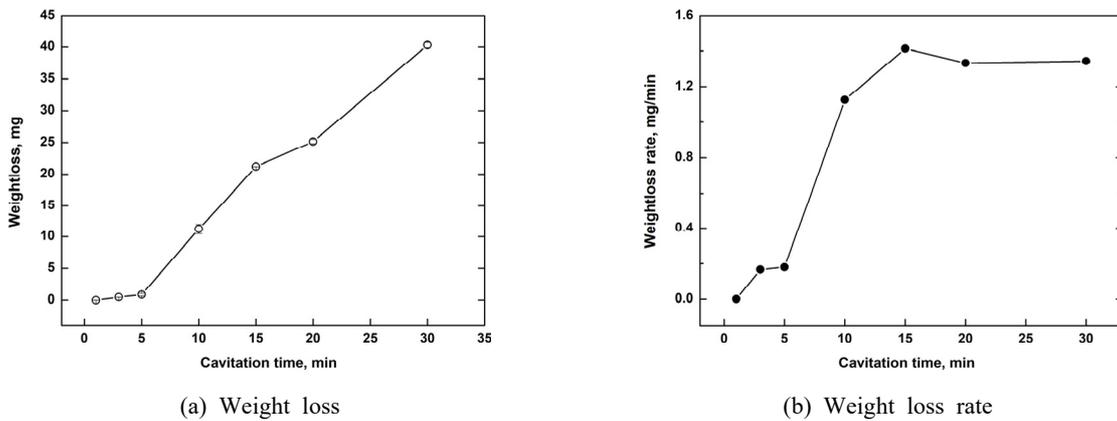


Fig. 12 Weight loss and Weight loss rate after cavitation experiment at amplitude of 30  $\mu\text{m}$  in sea water.

부에 더 많은 캐비테이션 기포가 영향을 미치며 손상이 격렬하게 발생한다. 그 결과 실험시간 10분에는 수많은 피트들이 성장과정에서 서로 합쳐져 크레이터 형 손상으로 진전된 것으로 판단된다. 이후 20분에는 거듭된 충격에 의해 조직의 일부가 덩어리 형태로 탈리된 흔적이 관찰되었으며, 30분 경과시점의 손상부는 매우 깊고 넓은 형태가 관찰되었다.

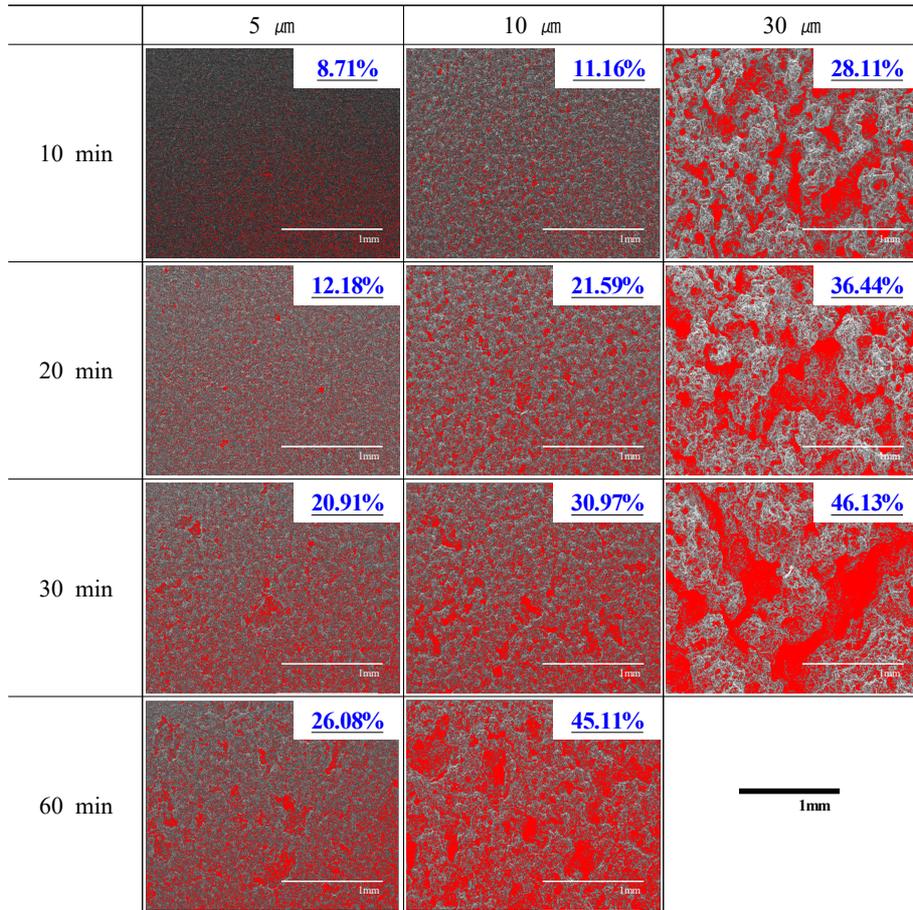
Fig. 12는 천연해수 용액에서 30  $\mu\text{m}$  진폭으로 캐비테이션 실험시간에 따라 무게 감소량과 무게 감소율을 나타낸 그래프이다. 무게감소량은 실험시간 경과에 따라 5분까지는 약간씩 증가한 후 현저히 증가하는 경향이 관찰되었다.

무게 감소율은 5분에서 15분까지 급격히 상승한 뒤 소폭 감소 후 일정하게 유지되는 경향이 나타났다. 이는 금속의 캐비테이션 손상이 크게 잠복기-증가기-감소기의 세 단계를 거쳐 진행된다는 선행연구 결과와 잘 부합하는 결과이다 [20]. 먼저 실험 시작 후 1분까지는 무게 감소량이 거의 나타나지 않는 잠복기에 해당하며 이후 5분에서 15분 경과 시점까지는 무게 감소율이 급격히 상승하는 증가가 나타났다. 그 이유는 피트가 발생되면 피트의 내부 및 주변부가 기포 발생의 핵으로 작용하여 기포의 생성 및 붕괴가 격렬하게 발생하여 큰 충격에너지가 가해지기 때문이다. 이후 15

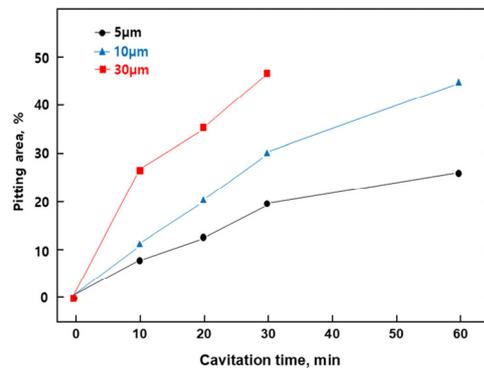
분 경과시점부터는 무게 감소율이 감소한 후 일정하게 유지 되는 감소기가 나타났다. 이는 피트와 크레이터 손상부에 기포가 흡착되어 이후 발생한 기포의 붕괴로 인한 충격을 완화시키는 완충효과가 발생했기 때문이다. 또한, 지속적인 표면조직 탈리로 인해 혼 팁과 표면 사이의 거리가 증가하여 표면에 도달하는 캐비테이션 기포의 충격에너지가 감소된

결과로 여겨진다 [21].

Fig. 13은 천연해수 용액에서 진폭 변수와 실험시간에 따라 손상된 표면을 Image J 프로그램으로 관찰된 사진과 진폭 변수와 실험시간에 따른 공식면적을 나타낸 그래프이다. 실험시간 경과에 따라 점차적으로 증가하였으며, 특히 실험시간 10분 이후 현저히 증가하는 경향이 관찰되었다.



(a) Pitting damage analysis



(b) Pitting area

Fig. 13 Analysis of pitting area after cavitation experiment with amplitude in sea water.

그리고 실험시간이 동일한 경우 진폭 크기가 클수록 큰 차이로 증가하는 경향을 나타냈다. 전체적인 경향은 산발적으로 공식이 발생한 후, 시간 경과에 따라 공식이 폭과 깊이 방향으로 증가하면서 서로 합체되어 공식 면적이 증가하는 경향을 나타냈다. 30분 경과한 시점에서는 10  $\mu\text{m}$ 와 30  $\mu\text{m}$ 의 진폭의 경우 5  $\mu\text{m}$ 에 비해 각각 1.48배와 2.21배를 나타냈다. 이는 진폭 크기가 증가할수록 캐비테이션 강도가 강해지기 때문에 침식 손상 속도가 증가한 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

해양환경 하에서 사용되는 5052-O 알루미늄 합금에 대하여 다양한 진폭으로 해수용액에서 캐비테이션 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 캐비테이션 손상 경향은 진폭 크기가 증가할수록 손상량 및 손상부의 면적이 증가하였고 손상이 시험편 중앙과 가장자리에 집중되는 것으로 나타났다.
- 2) 모든 시험편에서 실험시간 경과에 따라 초기에 잠복기가 나타난 후 피트가 생성되었으며, 이후 피트와 피트가 합체되며 크레이터(crater)로 성장, 발달하여 결국 표면이 탈리되는 단계를 거치며 손상되었고, 이러한 단계적 손상이 진폭 크기가 클수록 단시간 내에 빠르게 진전되었다.
- 3) 캐비테이션 손상 경향 관찰 결과, 피트와 그 인접부에 손상이 집중되었으나 표면 전반에 걸쳐 침식손상이 나타났다.
- 4) 진폭 변수에 따른 침식 손상은 30분 경과한 시점에서는 10  $\mu\text{m}$  와 30  $\mu\text{m}$ 의 진폭의 경우 5  $\mu\text{m}$ 에 비해 각각 1.48배와 2.21배를 나타냈다.

#### 감사의 글

본 논문은 18/19년도 현대중공업의 지원을 받아 수행된 연구임(Hot Dip Aluminized Steel 및 Carbon Steel의 유속 변화에 따른 침식 손상 실험).

#### References

1. J.-H. Lee, S.-Y. Hwang, and W.-C. Jeong, *J. Korea Ship Safety Technol. Authority*, **32**, 2 (2012).  
<http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201256648646168.pdf>
2. S. J. Kim, J. I. Kim, and J. S. Kim, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **40**, 262 (2007).  
<https://doi.org/10.5695/JKISE.2007.40.6.262>
3. L. Wanger, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, **263**, 210 (1999).  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01168-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01168-X)
4. S. J. Kim, S. K. Jang, and M. S. Han, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **13**, 223 (2007).  
<http://db.koreascholar.com/article.aspx?code=263183>
5. C. Vargel, *Corrosion of Aluminum*, pp. 88 - 109, Elsevier Science, San Diego (2004).  
<http://www.cementtechnology.ir/Library/Corrosion.of.Aluminium.pdf>
6. H. Ezuber, A. El-Houd, and F. El-Shawesh, *Mater. Design*, **29**, 801 (2008).  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>
7. I. R. Jones and D. H. Edward, *J. Fluid. Mech.*, **7**, 596 (1960).  
<https://doi.org/10.1017/S0022112060000311>
8. T. Momma and A. Lichtarowicz, *Wear*, **186-187**, 425 (1995).  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07144-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07144-X)
9. M. H. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 218 (2011).  
[http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf\\_viewer.htm?code=C00100600218](http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=C00100600218)
10. H. I. Lee, *Understanding and application of aluminum application technology*, pp. 14 - 38, Steel&MetalNews (2005).
11. J. H. Lee, B. H. Choe, *Aluminum - Understanding and application of aluminum*, pp. 1 - 31, Myungjin Publishing (2016).
12. S. J. Kim, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **30**, 540 (2006).  
<http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200633242469734.pdf>
13. S. J. Kim, K. H. Kim, and S. J. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **10**, 136 (2011).  
[http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf\\_viewer.htm?code=C00100400136](http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=C00100400136)
14. S. J. Kim and K. Y. Hyun, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, **18**, 481 (2012).  
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.5.481>
15. J. F. Santa, J. C. Baena, and A. Toro, *Wear*, **263**, 258 (2007).  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.061>
16. C. E. Corraea, G. L. Garcia, A. N. Garcia, W. Bejarano, A. A. Guzman, and A. Toro, *Wear*, **271**, 2274 (2011).  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.088>
17. K. J. Kim and D. S. Kim, *Korean J. Chem. Eng.*, **32**, 72 (1994).
18. L. A. Espitia and A. Toro, *Tribol. Int.*, **43**, 2037 (2010).  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.05.009>

19. P. Veerabhadra Rao, *Wear*, **122**, 77 (1988).  
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90008-7)
20. A. Thiruvengadam and H. S. Preiser, *J. Ship. Res.*, **8**, 39 (1964).
21. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Cho, and J. H. Lee, *J. Corros. Sci. Soc. Kor.*, **23**, 215 (1994).  
[http://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf\\_viewer.htm?code=J00230400215](http://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=J00230400215)