

# 해수배관 내부 에폭시 코팅재의 캐비테이션 및 침지 열화에 따른 압입인장특성

정민재 · 김수현 · 전종모 · 김영식 · 김영천<sup>†</sup>

국립안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터 36729 경북 안동시 경동로 1375  
(2023년 9월 16일 접수, 2023년 10월 12일 수정, 2023년 10월 14일 채택)

## Indentation Tensile Properties of Seawater Piping with Cavitation and Immersion Degradation

M. J. Jung, S. H. Kim, J. M. Jeon, Y. S. Kim, and Y. C. Kim<sup>†</sup>

Materials Research Centre for Energy and Clean Technology, School of Materials Science and Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyeongbuk, 36729, Korea

(Received September 16, 2023; Revised October 12, 2023; Accepted October 14, 2023)

Seawater has been used to cool devices in nuclear power plants. However, the pipes used to transport seawater are vulnerable to corrosion; hence, the inner side of pipelines is coated with an epoxy layer as prevention. Upon coating damage, the pipe becomes exposed, and corrosion progresses. The major cause is widely known as cavitation corrosion, causing the degradation of mechanical properties. In this study, corroded specimens were prepared using cavitation and immersion methods to clarify the degradation trend of mechanical properties with corrosion. Three different types of epoxy coatings were used, and accelerated cavitation procedures were composed of amplitudes of 15  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , and 85  $\mu\text{m}$  for 2 h, 4 h, and 6 h. The immersion periods were 3 and 6 weeks. We conducted instrumented indentation tests on all degradation samples to measure mechanical properties. The results showed that higher cavitation amplitudes and longer cavitation or immersion times led to more degradation in the samples, which, in turn, decreased the yield strength. Of the three samples, the C coating had the highest resistance to cavitation and immersion degradation.

**Keywords:** Cavitation, Epoxy coating, Degradation, Indentation, Stress analysis

### 1. 서론

발전 시설은 냉각을 연속적으로 하기 위해 냉각수로 이용하는 해수의 공급이 원활한 해안가에 분포되어 있다. 그러나 금속의 용접 부위나 배관 내면 결함에서는 이러한 해수의 염분으로 인해 부식이 촉진되어 누수 사고가 발생한다 [1-3]. 해수에는 염화물 할로겐족 이온인 Cl<sup>-</sup>를 포함하여 전기화학적 부식을 야기하는 다양한 원인이 존재하고, 이 외에도 온도, pH, 수중 오염물질, 유속 등으로 인하여 금속 및 합금들이 열화 되어 수명이 단축된다 [4,5]. 따라서 해수부식에 대한 적절한 방식 대책이 필요하며 이에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

금속 배관의 경우, 부식에 상대적으로 취약한 부분인 용접부의 전기화학적, 기계적 특성을 향상시키기 위해 용접 방법을 바꾸거나 환경에 적합한 용접 재료를 사용한다. 장시간 해양환경에 노출되어 있는 경우에는 외부 전원식 음극방식을 적용하고 이에 대한 최적 조건을 찾는 방법도 존재한다 [6]. 또한 해수담수화 시스템에서 양자에너지를 이용하여 부식을 방지하거나 자기 억제제를 이용하여 부식을 억제하는 최신 신기술이 연구되고 있다 [7]. 위와 같이 해수부식을 방지하기 위해 적절한 방식 대책이 필요하다 [8].

해수 배관의 부식을 억제하기 위해 도장, 도금, 내식성 재료의 사용, 음극방식법, 라이닝 등 여러가지 방법을 사용하고 있습니다. 그 중 에폭시 소재를 사용하여 해수 배관 내부에 코팅을 하는 피복방식이 널리 사용되고 있다. 에폭시 소재를 사용한 코팅은 가공성, 접착성, 화학적 특성 및 내식성이 우수하여 접착제나 전자공학,

<sup>†</sup>Corresponding author: kimyc@anu.ac.kr

정민재: 공학석사(현재 한국원자력연구원 인턴), 김수현: 석사과정, 전종모: 공학석사(현재 ㈜와이지원 연구원), 김영식: 교수, 김영천: 교수

항공 우주 및 해양 시설 시스템 등 많은 산업에서 널리 쓰이고 있지만 [9], 금속소재에 비해서는 많은 연구가 진행되고 있지는 않다 [10].

캐비테이션 현상은 기포의 발생과 소멸 현상이 매우 짧은 시간 동안 지속적으로 반복하면서 [11], 수천 배에 달하는 압력과 온도가 국부적으로 발생한 에너지를 충격과 형태로 주변에 전달되어 손상을 일으키는 것으로 알려져 있다 [12]. 에폭시 코팅의 손상은 탄소강의 노출로 이어져 빠른 부식이 유발되기 때문에 해양시설에 설치되어 있는 설비들은 이러한 코팅층의 손상이 치명적이다 [13]. 이 현상은 매우 심각한 문제로 받아들여지고 있으며 이로 인한 많은 연구가 진행되고 있으나 [14], 에폭시 코팅재에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았고 코팅재에 대한 기계적 물성을 평가하는 연구 또한 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 시편의 종류에 따라 캐비테이션 및 침지 실험을 진행하지 않은 정상시편과 인위적으로 열화를 일으킨 시편의 기계적 특성을 서로 비교하였다. 열화 시편은 용액의 온도 및 캐비테이션 초음파의 진폭과 캐비테이션 시간, 침지 시간을 변수로 하며, 각

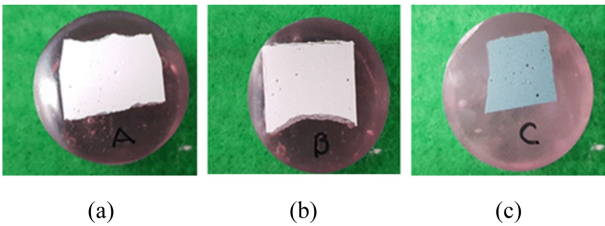


Fig. 1. Pre-test specimen (a) A Coating, (b) B Coating, (c) C Coating

각의 경우의 수에 따라 시편을 준비하였고, 연속압입시험법을 실시하여 기계적 특성을 분석하여 캐비테이션 열화가 에폭시 코팅의 물성에 미치는 영향을 규명하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 에폭시 코팅재 시편 제작

실험에 사용된 시편은 국내의 A, B, C사에서 제공하였으며, A Coating, B Coating, C Coating으로 명명하였다. 각 시편을 위와 아래가 평평하도록 콜드 마운팅을 실시하였으며 압입 시 시편의 표면 조도의 영향이 있을 수 있으므로, SiC Paper (# 2000)를 이용하여 연마를 실시하였다. Fig. 1과 같이 표면 조도를 균일하게 조정하여 열화 이전 정상 상태의 압입시험용 코팅재의 시편을 제작하였다.

### 2.2.1 캐비테이션 열화 에폭시 코팅재 시편 제작

캐비테이션 열화실험은 magneto strictive-driven 방식으로 제작된 장치(R&B-RB111-CE, Korea)를 사용하였으며, ASTM G32규격에 따른 캐비테이션 부식실험이 가능한 장치이다 [15]. 캐비테이션 장치의 최대 파워 출력은 1,000 W이고, Ultrasonic transducer는  $20 \pm 0.5$  kHz이다. Horn tip은 초내식성 2상 스테인리스강(Fe-25.8 Cr-2.3 Mo-0.2 W-0.5 Si-10.7 Ni-0.65 Mn-0.03 C-0.42 N)으로 만들어졌으며, 지름은 16 mm이다. Horn tip과 시편 사이의 거리는 0.5 mm으로 고정하였고, Horn tip은 매 실험을 진행할 때 마다 SiC paper (#2,000)을 이용하여 연마하여 표면을 균질하게 하였다. Fig. 2는 캐비테이션 방식을 이용한 캐비테이션 발생 장치의 개략도를 나타

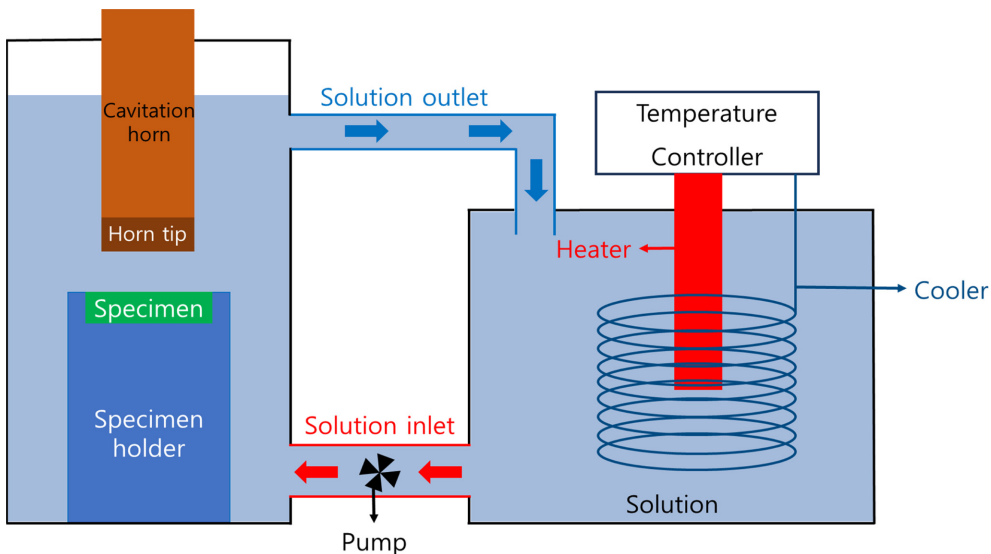


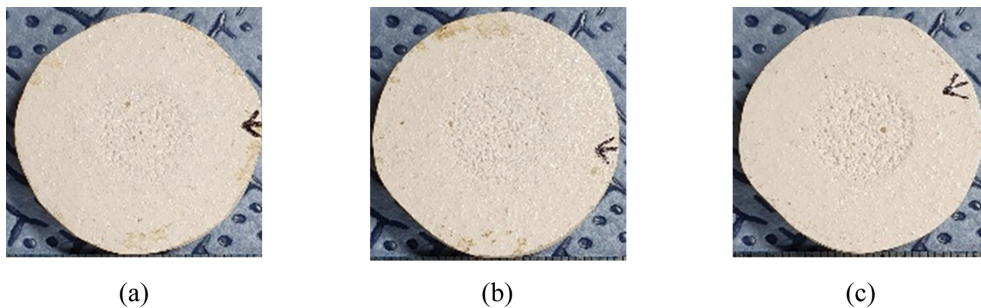
Fig. 2. Schematic of the cavitation erosion test equipment [15]

**Table 1. Cavitation degradation test condition**

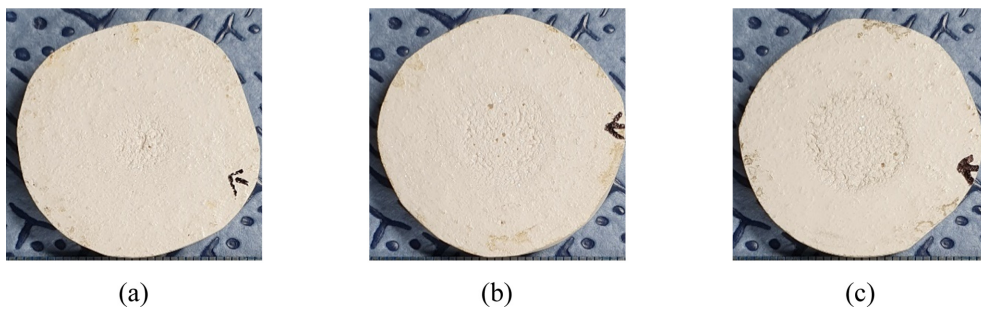
Condition	Ultrasonic amplitude (μm)	Cavitation time (h)	Remarks
A Coating	50	2	Fig. 3
A Coating	50	4	
A Coating	50	6	
A Coating	15	6	Fig. 4
A Coating	50	6	
A Coating	85	6	
A Coating	50	6	Fig. 5
B Coating	50	6	
C Coating	50	6	

낸 것이다. Fig. 1의 시편 제작에서 사용된 소재와 동일한 코팅재 소재인 A Coating, B Coating, C Coating의 시편을 제작하여 30°C, 3.5% NaCl 용액을 사용하여 캐비테이션 실험을 진행하였고, 각기 다른 코팅재 시편을 여러가지 조건을 Table 1과 같이 변경하며 캐비테이션 실험을 진행하였다.

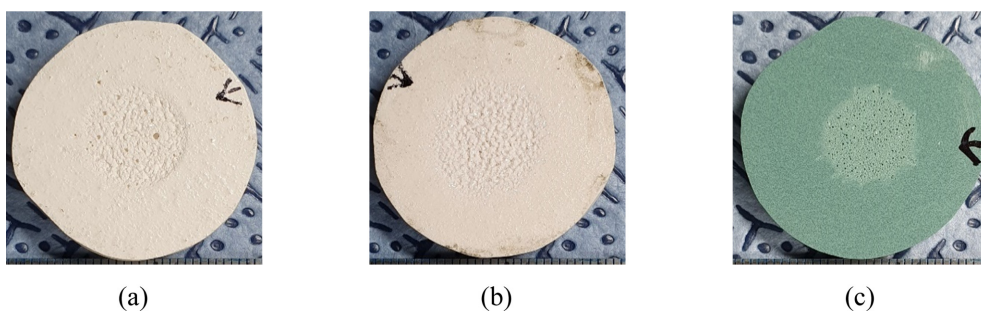
Fig. 3에서 Fig. 5는 에폭시 코팅재에 대하여 캐비테이션 열화를 시킨 후 외관을 보여주고 있다. Fig. 3은 A Coating을 이용하여 캐비테이션 진폭을 50 μm로 고정하여 시간을 각각 2시간, 4시간, 6시간으로 조절한 시편이고, Fig. 4는 캐비테이션 시간을 6시간으로 고정하고 진폭을 각각 15 μm, 50 μm, 85 μm으로 열화 시킨 시편이다. Fig. 5는 캐비테이션 시간과 진폭을 6시간, 50 μm으로 고정한 시편의 외관을 보여준다.



**Fig. 3. Effect of cavitation time on the surface appearance of epoxy A Coating in 3.5% NaCl at 30°C (ultrasonic amplitude 50 μm). (a) 2 h, (b) 4 h, (c) 6 h**



**Fig. 4. Effect of cavitation amplitude on the surface appearance of epoxy A Coating in 3.5% NaCl at 30°C (cavitation time 6 h). (a) 15 μm, (b) 50 μm, (c) 85 μm**



**Fig. 5. Epoxy coating specimens (a) A Coating, (b) B Coating, (c) C coating (ultrasonic amplitude 50 μm, cavitation time 6 h, 30°C)**

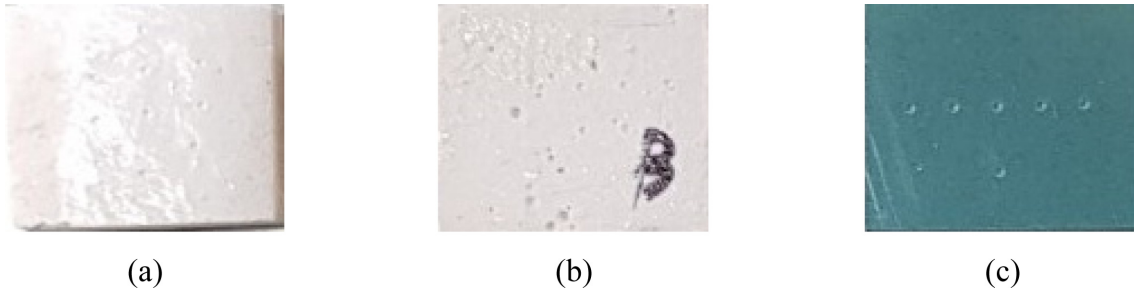


Fig. 6. Epoxy coating specimen after the immersion for 3 weeks in 3.5% NaCl; (a) A Coating, (b) B coating, (c) C Coating

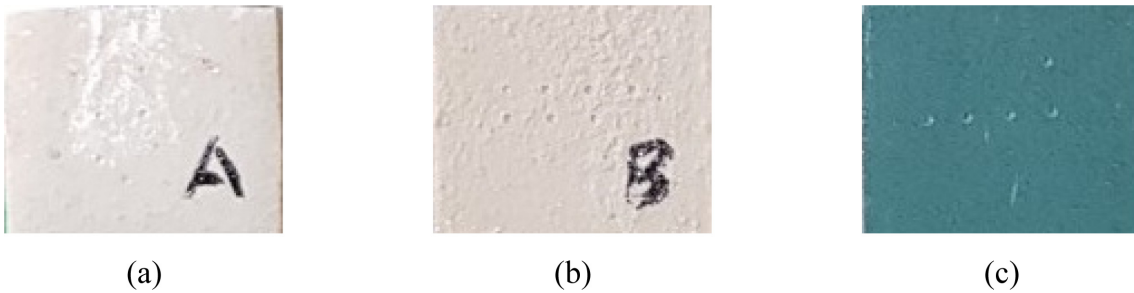


Fig. 7. Epoxy coating specimen after the immersion for 6 weeks in 3.5% NaCl; (a) A Coating, (b) B coating, (c) C Coating

### 2.2.2 침지 열화 에폭시 코팅재 시편 제작

Fig. 6은 30°C, 3.5% NaCl 용액을 사용하여 A Coating, B Coating, C Coating을 3주 동안 침지 열화를 진행한 시편이고, Fig. 7은 30°C, 3.5% NaCl 용액을 사용하여 A Coating, B Coating, C Coating을 6주 동안 침지 열화를 진행한 시편이다.

### 2.3 연속압입실험

연속압입실험은 일반적으로 Oliver-Pharr 방법이라고 알려진 분석법을 통해 박막의 탄성계수 및 경도를 구하는 실험법이다 [16]. 그러나 나노 단위에서 매크로 단위로 그 활용성이 확장됨 [17]에 따라 고급화된 물성을 측정하거나 예측하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [18].

연속압입실험은 ㈜프론틱스 사의 AIS-2100 모델로 진행하였다. 압입자의 끝이 구형으로 이루어져 있고, 첨단 반지름은 250 μm인 압입자를 이용하여 실험을 진행하였다. 압입 속도는 0.3 mm/min로 수행하였고, 최대 압입 깊이는 150 μm, 다중압입은 총 15회로 각 10 μm마다 하중제거율 50%로 실시하였다. 총 5회 이상 실험을 진행하였으며, 재현성이 있는 데이터를 3회이상 확보하였다.

### 2.4 연속압입실험과 수정된 Meyer관계를 이용한 항복강도의 예측

연속압입실험으로 항복강도를 평가하는 일반적인 방

법은 ISO/TR 29381에도 소개되어 있는 대표 응력-변형률 방법이다 [19]. 이는 구형압입자 하부에 발생하는 응력장을 대표하는 응력과 변형율을 정의하는 기법으로, 구성방정식을 통하여 모사한 인장곡선으로부터 항복강도, 인장강도와 같은 인장특성을 예측한다 [20]. 그러나 해당 연구는 일반적인 금속 소재에 대하여 주로 이루어져 왔고, 앞서 언급한 바와 같이 인장특성을 구하기 위해 구성방정식을 이용하여 인장곡선에서 항복 이후의 소성변형까지 정보를 요구하기 때문에, 항복과 동시에 파괴가 되는 에폭시 코팅재 시편에 적용하기는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Meyer가 제시한 경험적인 관계로부터 항복강도를 예측하였다 [21].

Meyer 관계는 압입 하중 L과 압입자 지름 D, 압흔 지름 d 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다는 것을 의미한다.

$$\frac{L}{d^2} = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{m-2} \quad (1)$$

위 식에 나타나는 C, m은 각각 소재 상수 및 Meyer 지수를 뜻하며, George에 의하면 위 관계식을 활용하여  $\sigma_y = \beta \cdot C$ 와 같이 실험적으로 증명된 바가 있다.  $\beta$ 는 상수이며, 소재에 따라 달라질 수 있다. 이를 통해 압입 하중-변위 곡선을 이용하여 항복강도를 측정할 수 있는 방법을 제시할 수 있다. Kang et al.은 이러한 실험식에 이론적 근거를 확장공극모델을 통하여 나타냈다 [21].

Table 2. Mechanical properties of epoxy coatings obtained from instrumented indentations and tensile tests

Specimen	Test method	Indentation test			Tensile test
		C (10 <sup>7</sup> MPa)	$\beta$ (10 <sup>-7</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
A Coating		390.5 (±6.3)	0.039 (±0.001)	15.3 (±0.2)	15.3
B Coating		435.4 (±15.0)	0.071 (±0.002)	30.9 (±1.1)	30.8
C Coating		350.1 (±6.2)	0.169 (±0.003)	59.5 (±1.1)	59.2

이를 통해 Meyer 관계를 정리하여  $P_m = \frac{4}{\pi} C \left(\frac{a}{R}\right)^{m-2}$  식을 나타낼 수 있다.  $P_m$ 은 평균 압력으로 정의한 압입 경도와 같은 물리 량이며,  $a$ 는 접촉 반경,  $R$ 은 압입자 반지름을 의미한다. Tabor관계 ( $\sigma = \frac{H}{\psi}$ )를 만족하며, 압흔 반경이 전체의 평균적인 변형률  $\epsilon = 0.25 \frac{a}{R}$ 로 가정한다면  $\sigma = \frac{4^{m-1} C}{\pi \psi} \epsilon^{m-2} = k \epsilon^n$  (단,  $k = \frac{4^{m-1} C}{\pi \psi}$ ,  $n = m - 2$ )와 같은 식으로 나타낸다.  $\psi$ 는 소성구속계수를 나타내며,  $\sigma$ 는 진응력,  $\epsilon$ 는 진변형률의 나타낸다. 이때 해당 소재가 Hollomon type의 가공경화 거동을 나타낸다면, 항복점에서는  $\sigma_y = k \epsilon_y^n = k \left(\frac{\sigma_y}{E}\right)^n$  식이 성립된다.

$\sigma_y = \beta \cdot C$ 을 소재 상수  $C$ 에 대하여 정리하면

$$\sigma_y = \left(\frac{4^{n-1}}{\pi E^n \psi}\right)^{\frac{1}{1-n}} C^{\frac{1}{1-n}}$$

와 같은 식으로 나타나게 된다.

따라서 George 등이 제시한 모델과 유사한 형태가 나타난다 [21].  $\beta$ 는 가공경화지수, 탄성계수, 소성구속계수의 함수이며, 소재 상수  $C$ 는 가공경화지수의 영향을 받는 인자라는 것을 알 수 있다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 실험 전 코팅재 시편의 압입 실험 결과 및 인장실험 결과 비교

Fig. 8은 연속압입실험을 진행하기 위해 만들어진 A Coating, B Coating, C Coating 시편의 압입 하중-변위 곡선을 그래프로 나타낸 것이다. 기존 연구 [20,21]에서 실시한 금속 시편의 압입 하중-변위 곡선과 비교하였을 때 비슷한 경향을 재현성 있게 보여, 압입실험 중에 발생하는 탄소성 변형이 크게 다르지 않고, 따라서 금속 시편에서의 연구결과를 적용 가능한 것으로 판단할 수

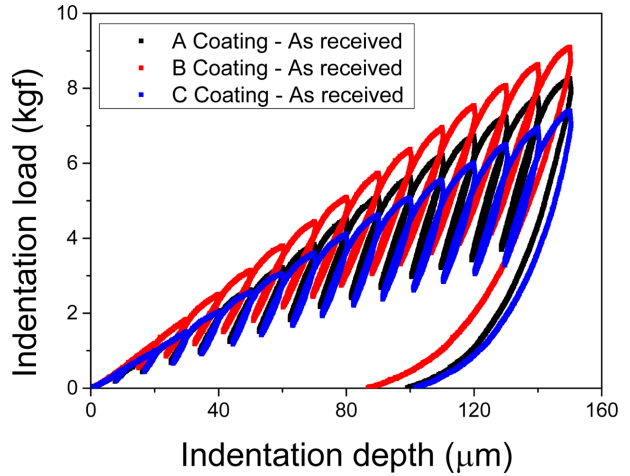


Fig. 8. Indentation load-depth curves for A Coating, B Coating, C Coating samples

있었다. 일반적인 금속 시편에 비하여 15회 다중 압입 이후의 탄성 회복이 많이 발생하였는데, 이는 에폭시(고분자) 계열 시편의 특성인 낮은 탄성계수의 영향으로 보인다. 그래프 상에서 비교 시 가장 높은 하중을 나타내는 것은 B Coating이 약 9 kgf이었으며, C Coating이 약 7 kgf로 가장 낮은 하중을 나타내고 있다.

Meyer 관계를 이용하여 압입 항복강도를 산출하기 위한 상수를 Table 2에 나타내었다. 식 1을 이용하여 상수  $C$ 를 결정하였고, 인장실험에 얻은 항복강도를 구하기 위한  $\beta$ 를 결정하였다.  $C$ 와  $\beta$ 를 이용하여 인장 항복강도를 계산하였을 때, A Coating, B Coating, C Coating에 대하여 각각 15.3(±0.2) MPa, 30.9(±1.1) MPa, 59.5(±1.1) MPa로 나타났으며, 인장실험에서 나타난 항복강도와 거의 유사한 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 인장실험 결과와 비교를 통해서 항복강도로부터 Meyer 관계식에서 증명된 George 모델의  $C, \beta$ 를 구할 수 있는 것을 확인하였다.

#### 3.2 에폭시 코팅재의 염수 중 캐비테이션 진폭 및 시간에 따른 열화도

캐비테이션 진폭 및 시간에 따른 열화도를 비교하기 위해 A Coating을 기준으로 캐비테이션 조건에 따른 압입 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 캐비테이션을

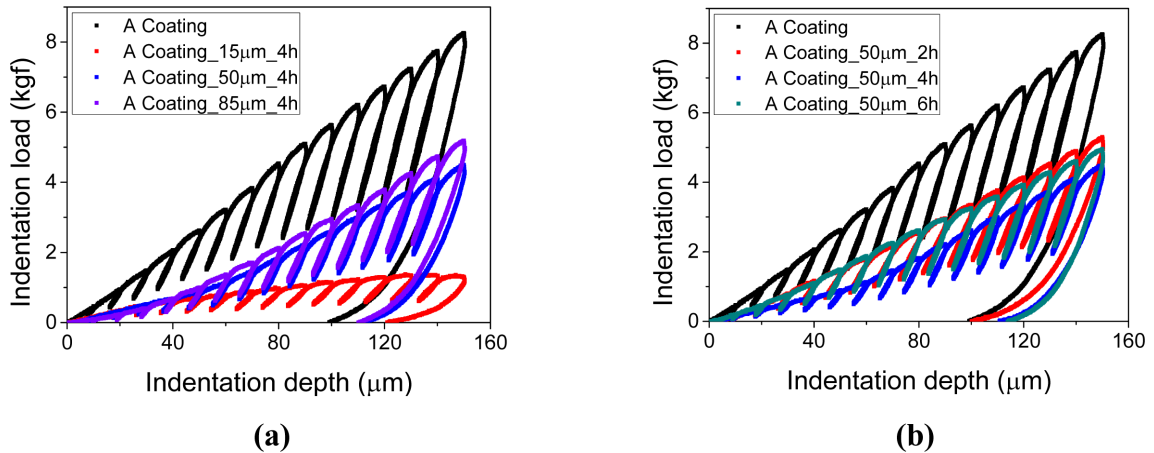


Fig. 9. Indentation load-depth curves of A Coating with different cavitation (a) amplitudes and (b) times

Table 3. Indentation yield strengths with different cavitation amplitudes and times of A Coating samples

Type of coating material	Ultrasonic amplitude	Cavitation time	Indentation $\sigma_y$	$\sigma_y$ decrease rate
A Coating	15 $\mu\text{m}$	4 h	1.82 MPa	88.1%
A Coating	50 $\mu\text{m}$	4 h	N/A	N/A
A Coating	85 $\mu\text{m}$	4 h	N/A	N/A
A Coating	50 $\mu\text{m}$	2 h	9.55 MPa	37.6%
A Coating	50 $\mu\text{m}$	6 h	8.86 MPa	42.1%

겪지 않은 정상 시편에 비해 열화 후 시편의 하중이 전체적으로 낮게 측정되었다.

Fig. 9a는 캐비테이션 진폭을 15, 50, 85  $\mu\text{m}$ 로 변화시켜가며 4 시간 동안 열화 후 압입실험을 실시한 결과이다. 진폭이 높아질수록 최대 하중이 높게 나타나, 가장 낮은 하중 값을 나타낸 그래프는 15  $\mu\text{m}$ 로 Table 3과 같이 실험 전 A Coating에 비해 항복강도 1.82 MPa (-88.1%)로 나타났다. 50, 85  $\mu\text{m}$  진폭 조건에서는 최대 하중이 15  $\mu\text{m}$ 에 비하여 상대적으로 높지만 항복강도 분석이 이루어지지 못하였는데, 이는 비정상적인 압입 하중-변위 곡선의 영향으로 보인다. Fig. 9a의 열화 된 실험결과 중에서 압입 깊이 40  $\mu\text{m}$ 까지는 압입 하중에 따른 변위의 변화율이 1에 근접하여 비례 관계를 보이며 증가하지만, 그 이후부터는 아래로 볼록한 특성, 즉, 압입이 이루어지기 위하여 점점 더 많은 하중이 요구된다. 이는 캐비테이션에 대한 열화가 진행 정도의 차이로 판단된다. J. M. Jeon 등에 따르면 코팅재의 경우, 열화가 진행되면 시편 표면에서 소재가 부분적으로 떨어져 나간다 [22]. 따라서 압입이 이루어지는 압입자 직하부에는 시편과 공극이 존재할 수 있어 압입 하중이 전체적으로 낮아지는 효과가 있다. 그러나 열화가 과도하게 진행되는 경우, 시편 표면에서 소재의 탈락이 광범위하게 발생하여 아래 소재들이 드러나거나, glass-flake 와 같

은 상대적으로 높은 경도의 첨가물에 응력장의 범위가 미치게 되면 하중이 많이 소모될 가능성이 존재한다. 따라서 15  $\mu\text{m}$  제외 한 나머지 조건에서는 열화가 과도하게 발생하여 상기와 같은 결과가 발생한 것으로 판단하였다.

Fig. 9b는 50  $\mu\text{m}$  진폭에서 캐비테이션 진행 시간에 따른 압입 하중-변위 곡선을 비교한 것이다. 4시간 열화 시편을 제외하고, 2, 6시간 열화 시편의 그래프는 구형 압입 하중-변위곡선은 정상적인 경향을 나타낸다. 열화시간이 길어 짐에 따라 전체적인 하중이 낮아져, 열화가 기계적인 특성을 저하시키고 있다는 것을 확인할 수 있다. 실제 항복강도를 산출하였을 때, Table 3에서 정리된 바와 같이 2, 6시간 열화 시편 각각 9.55 MPa, 8.86 MPa로 37.6%, 42.1% 저하된 결과를 보였다.

### 3.3 에폭시 코팅재의 종류에 따른 염수 중 캐비테이션 열화도

Fig. 10a-c는 A Coating, B Coating, C Coating 시편에서 정상 코팅재와 캐비테이션 실험 (50  $\mu\text{m}$ , 6 h) 을 진행한 코팅재 시편에 대한 연속압입실험 결과를 각각 비교하여 나타낸 것이다. A Coating, B Coating, C Coating의 정상 시편의 최대 하중은 각각 8, 9, 6 kgf로 나타났고, 캐비테이션 열화 후 최대 하중은 각각 4, 1, 6 kgf로

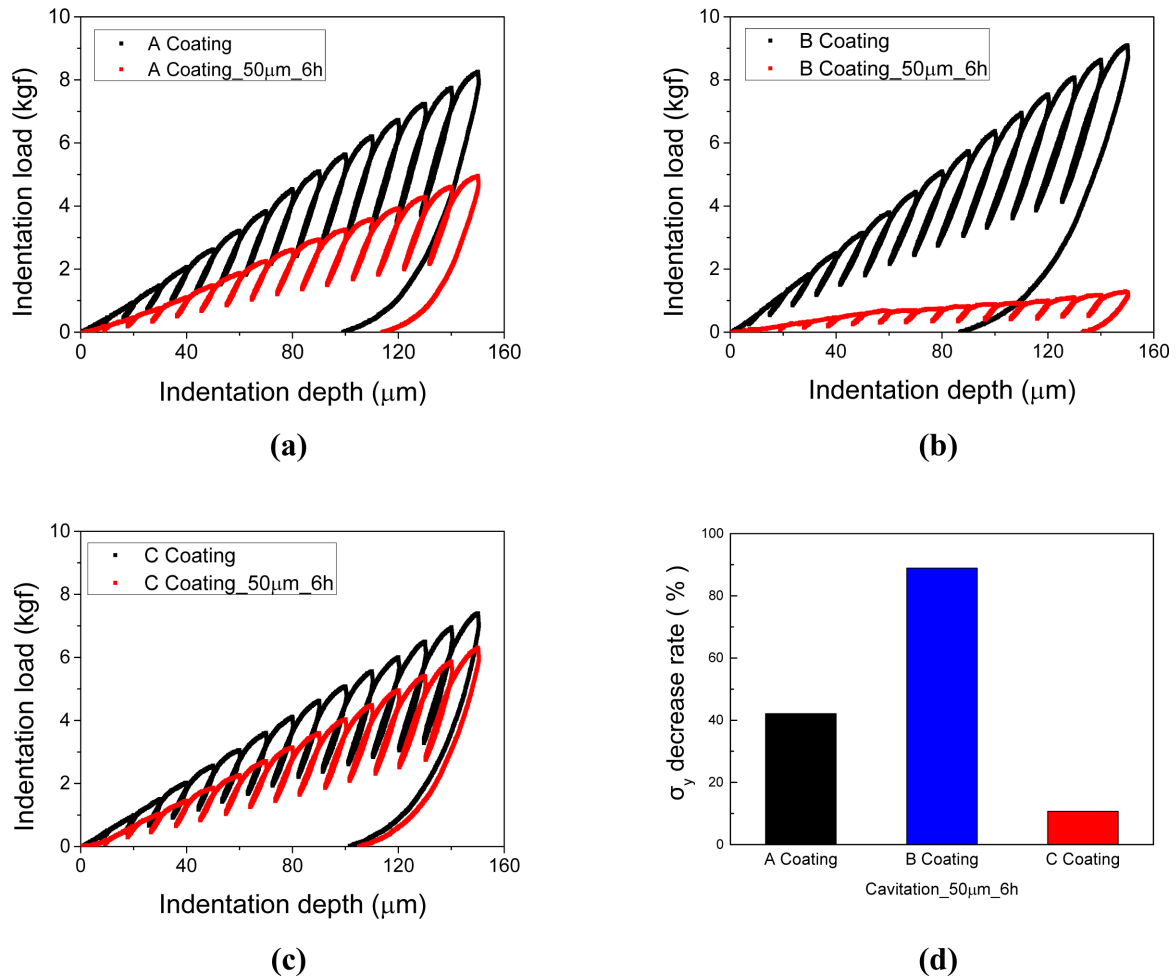


Fig. 10. Indentation load-depth curves of (a) A Coating, (b) B Coating, (c) C Coating and (d) reduction rates of yield strength with cavitation corrosion

Table 4. Indentation yield strengths with cavitation for Coated samples

Type of coating material	Ultrasonic amplitude (μm)	Cavitation time (hours)	Indentation $\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_y$ decrease rate (%)
A Coating	50	6	8.86	42.1
B Coating	50	6	3.43	88.9
C Coating	50	6	52.9	10.6

소재에 따른 최대 하중 감소 양상이 다른 것을 확인하였다. 압입 항복강도 분석에서도 최대 하중 감소양상과 비슷하게 A Coating, B Coating, C Coating이 각각 8.86 MPa, 3.43 MPa, 52.9 MPa 로, 감소폭이 42.1%, 88.9%, 10.6%로 극명한 차이를 보였고, Table 4에 결과를 정리하였다. J. M. Jeon 등 [22]은 각 코팅재 별로 열화의 양상이 다르다는 것을 보고하였다. A Coating, B Coating의 경우 규소 등이 포함된 glass-flake와 acrylic-glass-flake가 각각 많이 떨어져 나간 반면, C Coating의 경우 캐비테이션 후에도 여전히 구형의 규소화합물이

존재하였다. 이러한 구형 화합물이 전체적인 소재의 강도를 강화하는 기구로 작용하는 것으로 판단된다. 이러한 메커니즘으로 인해 C Coating이 캐비테이션 저항성이 가장 좋게 나타난 것으로 설명할 수 있다.

### 3.4 에폭시 코팅재의 종류에 따른 염수 중 침지 열화도

A Coating, B Coating, C Coating 시편의 침지 시간(3주, 6주)에 따른 연속압입실험 결과 후 하중-변위 곡선을 Fig. 11에 나타내었다. 정상 코팅재의 최대 하중은 각각 8, 9, 7 kgf 수준으로 나타났다. 세 시편 모두 침지

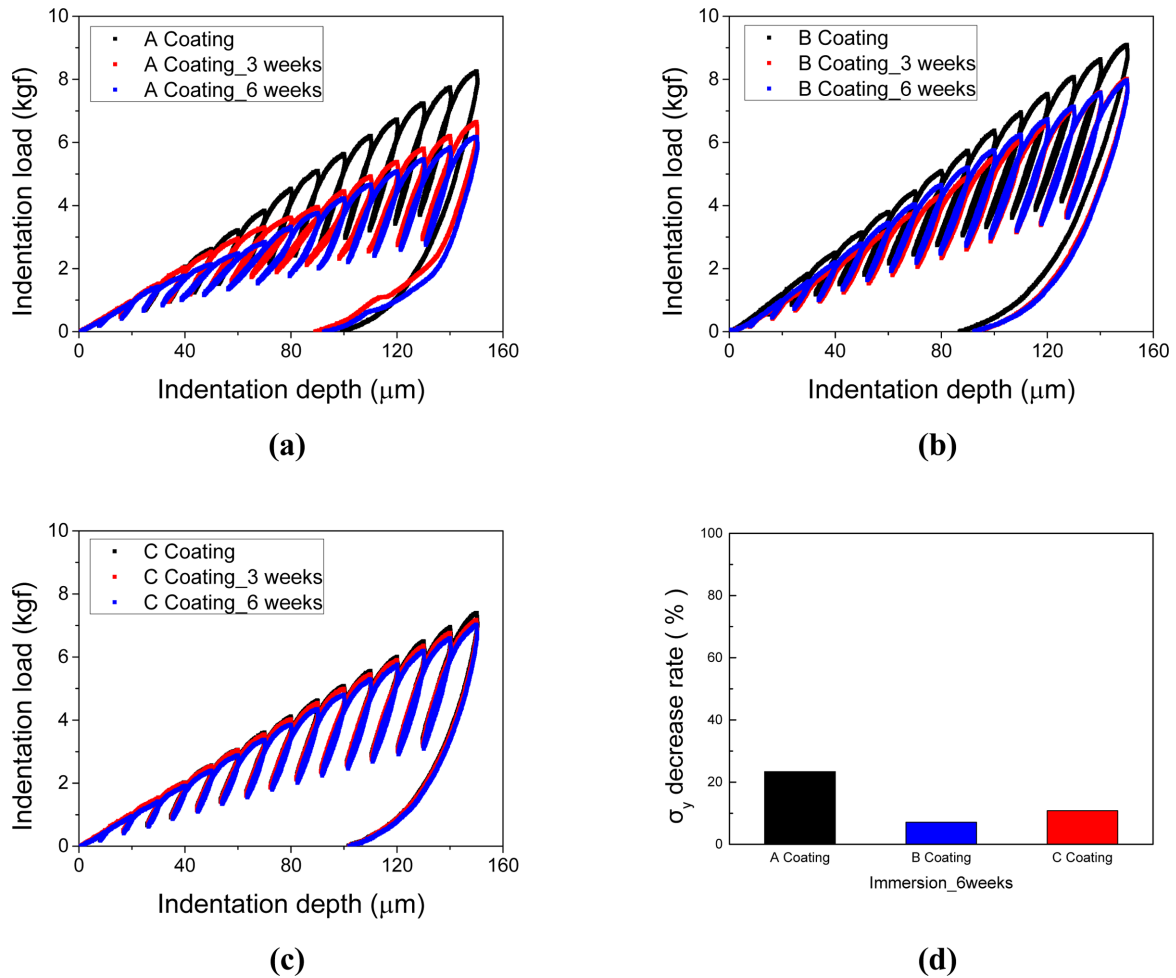


Fig. 11. Indentation load-depth curves of (a) A Coating, (b) B Coating, (c) C Coating and (d) reduction rates of yield strength with different immersion times

Table 5. Indentation yield strengths with different immersion times of coated samples

Type of coating material	Immersion time (weeks)	Indentation $\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_y$ decrease rate (%)
A Coating	3	12.4( $\pm$ 2.88)	19.0
A Coating	6	12.1( $\pm$ 0.71)	21.2
B Coating	3	27.2( $\pm$ 1.09)	11.8
B Coating	6	28.6( $\pm$ 1.89)	7.1
C Coating	3	54.2( $\pm$ 1.26)	8.4
C Coating	6	52.8( $\pm$ 1.59)	10.7

열화가 진행될수록 압입 하중-변위 곡선 상에서 최대 하중이 점차 낮아졌고, 상기 결과와 마찬가지로 시편에 따른 차이를 보였다. A Coating의 경우 Fig. 11a에서와 같이 압입 하중-변위 곡선의 형태가 일반적인 형태에서 많이 벗어나 시편 표면이 침지에 따른 열화로 인해 기계적 거동이 약화되어 있음을 확인할 수 있다. Table 5에 따른 항복강도 분석 결과 또한 3, 6주 별로 12.4 MPa

(-19.0%), 12.1 MPa (-21.2%)를 보여 평균적으로 20% 수준의 감소폭을 나타내었다. 3주 이후에 감소폭이 크지 않은 것으로 보아 침지 열화가 어느 정도 수렴하는 결과로 판단할 수 있었다. 이러한 경향은 Fig. 11b, 11c와 같이 B, C Coating에서도 유사하게 관찰되었다. A Coating과는 다르게 침지 열화가 발생한 시편에서도 정상적인 압입 하중-변위 곡선의 양상을 유지하여 침지



열화에 대한 저항성이 상대적으로 높다는 것을 미루어 짐작할 수 있었고, Table 5의 분석 결과에서도 두 시편 모두 평균적으로 10% 수준의 항복강도 감소율을 보였다. 다만, B Coating 시편의 경우, 6주차 항복강도가 오히려 3주차 보다 미세하게 높은 결과를 보였는데, 표준편차 이내의 증가이고 열화 전 대비 최대 하중의 감소가 확실하게 나타나는 점으로 보아 상기 언급한 소재의 탈락으로 인한 효과로 추정된다. 결론적으로, 침지 열화 환경에서는 A Coating을 제외한 B, C Coating 시편은 기계적 거동이 침지 열화에 대하여 상대적으로 저항성이 높고, 3~6주 구간에서는 항복강도의 감소율이 수렴하였다.

#### 4. 결론

해수배관 부식방지용으로 사용되는 에폭시 코팅제에 대하여 캐비테이션 및 침지 열화를 실시하였다. 연속압입실험으로부터 항복강도를 예측하기 위하여 Meyer 관계를 도입하였고, 각 열화된 시편에 대한 압입 하중-변위 곡선을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 압입실험과 인장실험 결과를 통해 Meyer 관계에 사용되는 재료상수인  $C$ 와  $\beta$ 를 도출하였다. 이를 통해 연속압입실험법을 이용하여 해수배관 코팅제의 항복강도를 평가하였을 때, 캐비테이션 열화에 따른 특성의 변화를 관찰할 수 있었다. 캐비테이션 진폭과 시간이 크고 길수록 전체적으로 열화가 심하게 발생하였고, 코팅제의 종류에 따라 그 정도는 다르게 나타났다. 캐비테이션 열화에 대해서는 C Coating 이 가장 저항성이 높은 것으로 판단할 수 있었다.

2) 3~6주 동안의 침지 열화 후 A, B, C Coating 시편의 항복강도 감소율 평균은 각각 20.1%, 9.5%, 9.6%로 분석되었다. 압입 하중-변위 곡선에서의 최대 하중 감소와 함께 비교하였을 때 A Coating을 제외한 B, C Coating 이 침지 열화에 대해 저항성이 비교적 높은 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

#### References

1. S. J. Lee, M. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Kim, Effect of flow velocity on corrosion rate and corrosion protection

current of marine material, *Corrosion Science and Technology*, **14**, 226, (2015). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.5.226>

2. M. H. Boo, J. W. Lee, J. H. Lee, Selective Corrosion of Socket Welds of Stainless Steel Pipes Under Seawater Atmosphere, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 224, (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.224>
3. J. M. Han, T. G. Gwon, S. H. Lee, A Study on Corrosion Behavior of Coated Steel Pipes for Seawater Service, *Corrosion Science and Technology*, **26**, 41 (1997), URL: [https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf\\_viewer.htm?code=J00260100041](https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=J00260100041)
4. H. J. Lee, H. B. Chae, J. M. Cho, W. C. Kim, J. C. Jeong, H. S. Kim, J. G. Kim, S. Y. Lee, Corrosion Failure Analysis of Air Vents Installed at Heat Transport Pipe in District Heating System, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 189 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.189>
5. C. Vargel, Corrosion of Aluminum Elsevier Science, Oxford, 81 (2004). <https://doi.org/10.1016/B978-008044495-6/50011-2>
6. S. Y. Lee, K. H. Lee, C. Won, S. Na, Y. G. Yoon, M. H. Lee, Y. H. Kim, K. M. Moon and J. G. Kim, Electrochemical Evaluation of Corrosion Property of Welded Zone of Seawater Pipe by DC Shielded Metal Arc Welding with Types of Electrodes, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, **27**, 79 (2013). Doi: <https://doi.org/10.5574/KSOE.2013.27.3.079>
7. X. Hou, L. Gao, Z. Cui and J. Yin, Corrosion and Protection of Metal in the Seawater Desalination, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **872**, 012052 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012052>
8. S. J. Kim, Apparatus on Corrosion Protection and Marine Corrosion of Ship, *Journal of The Korean Institute of Surface Engineering*, **44**, 105 (2011). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.3.105>
9. H. Gu, C. Ma, J. Gu, J. Guo, X. Yan, J. Huang, Q. Zhang, and Z. Guo, An overview of multifunctional epoxy nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry C*, **4**, 5890 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1039/C6TC01210H>
10. J. C. Capricho, B. Fox, N. Hameed, Multifunctionality in Epoxy Resins, *Polymer Reviews*, **60**, 1 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1650063>
11. J. Y. Yoon, S. J. Lee, E. S. Kim, Numerical Analysis of Flows in Butterfly Valves to Prevent Cavitation, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, **7**, 9 (2004). Doi: <https://doi.org/10.5293/KFMA.2004.7.1.009>
12. X. Sun, M. S. Shin, W. Y. Lee, A. S. Om, J. Y. Yoon, A

- Numerical Simulation Study on the Shape of the Rotor in Hydraulic Cavitation Heat Generator, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, **20**, 75 (2017). Doi: <https://www.doi.org/10.5293/kfma.2017.20.2.075>
13. S. H. Kim, E. C. Jeon, Y. Choi, J. S. Park, D. I. Kwon, Standardization of Residual Stress Evaluation Technique for Weldment of Metallic Materials Using Continuous Indentation Test, *The Korean Institute of GAS*, **2**, 497 (2017). <https://koreascience.kr/article/CFKO200502612993285.page>
  14. U. J. Lim, S. H. Kim, A Study on the Corrosion Control of Glass Flake Lining for Mild Steel in Marine Environment, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, **12**, 164 (2000). <https://koreascience.kr/article/JAKO200017451623033.page>
  15. ASTM G32-16, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA (2016). Doi: <https://doi.org/10.1520/G0032-16>
  16. J. H. Hahn, Nanoindentation experiments on some thin films on silicon, *Journal of the Korean Ceramics Society*, **37**, 596 (2000). [https://www.jkcs.or.kr/upload/pdf/SRMHB8\\_2000\\_v37n6\\_596.pdf](https://www.jkcs.or.kr/upload/pdf/SRMHB8_2000_v37n6_596.pdf)
  17. Y. C. Kim, S. K. Kang, H. J. Ahn, K. H. Kim, D. I. Kwon, Calibration of Contact Depth for Evaluating Residual Stress using Instrumented Indentation Testing, *Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, **7**, 41 (2011). URL: <http://hdl.handle.net/10203/224823>
  18. W. S. Song, S. G. Kim, H. J. Ahn, K. H. Kim, D. I. Kwon, A study on Utilizing Instrumented Indentation Technique for Evaluating In-field Integrity of Nuclear Structures, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **7**, 165 (2013). Doi: <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2013.33.2.165>
  19. ISO/TR29381: Metallic materials – Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test – indentation tensile properties (2008).
  20. J. Y. Kim, K. W. Lee, H. S. Lee, D. I. Kwon, Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 4278 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.054>
  21. S. K. Kang, Y. C. Kim, K.H. Kim, J. Y. Kim, D. I. Kwon, Extended expanding cavity model for measurement of flow properties using instrumented spherical indentation, *International journal of Plasticity*, **49**, 1 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.02.014>
  22. J. M. Jeon, Y. R. Yoo, M. J. Jeong, Y. C. Kim, and Y. S. Kim, Effect of Solution Temperature on the Cavitation Degradation Properties of Epoxy Coatings for Seawater Piping, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 335 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.335>