

무전해 니켈 도금된 선박 디젤엔진 실린더 라이너의 캐비테이션 침식 특성

박일초¹ · 전우석² · 한민수^{3,†}

¹국립목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학로 91

²국립목포해양대학교 해양경찰학부, 전남 목포시 해양대학로 91

³국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전남 목포시 해양대학로 91
(2026년 1월 29일 접수, 2026년 2월 20일 수정, 2026년 2월 24일 채택)

Cavitation Erosion Characteristics of Electroless Nickel-Plated Marine Diesel Engine Cylinder Liner

Il-Cho Park¹, WooSeok Jeon², and Min-Su Han^{3,†}

¹Division of Cadet Training, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Republic of Korea

²Division of Coast Guard, Mokpo National 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 January 29, 2026; Revised February 20, 2026; Accepted February 24, 2026)

This study assessed the enhancement of cavitation erosion resistance in gray cast iron, a common material used for marine diesel engine cylinder liners, through the application of electroless nickel plating (ENP). EDS and XRD analyses revealed that the ENP coating contained approximately 6.4 wt% phosphorus and displayed broadened Ni diffraction peaks, suggesting an amorphous or microcrystalline structure. Cavitation erosion tests were performed following ASTM G32 standards using an ultrasonic vibratory apparatus set to an amplitude of 50 μm . The gray cast iron substrate exhibited a rapid increase in cumulative weight loss with exposure time, reaching about 1.2 mg after 90 minutes, along with a significant rise in surface roughness and maximum damage depth. In contrast, the ENP-coated specimen showed a much slower rate of material loss, with cumulative weight loss limited to approximately 0.4 mg even after 240 minutes. Three-dimensional surface profiling further confirmed that the ENP coating effectively inhibited the growth and coalescence of erosion pits, resulting in lower surface roughness and shallower damage depth compared to the substrate. These findings indicate that ENP is an effective surface treatment for improving the cavitation erosion resistance and durability of marine diesel engine cylinder liners in coolant environments.

Keywords: Marine diesel engine, Electroless nickel plating, Cavitation erosion, Gray cast iron, Weight loss

1. 서론

최근 해운 산업은 선박의 대형화와 더불어 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)가 제시한 2023년 온실가스 감축 전략을 포함한 환경 규제 강화로 인해 중대한 전환기에 놓여 있다. 특히 에너지 효율지수(Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI)와 탄소집약도지수(Carbon Intensity Indicator, CII)의 도입은 선박 운항 전반에 걸쳐 에너지 효율 향상과 배출

저감을 동시에 요구하고 있으며, 이에 따라 선박용 디젤엔진의 고출력화 및 연료 소비 절감에 대한 기술적 요구가 지속적으로 증가하고 있다 [1,2]. 이러한 운전 조건의 고도화는 엔진 구성 부품에 가해지는 열적·기계적 하중을 증대시키며, 그중에서도 실린더 라이너는 혹독한 사용 환경에 노출되는 핵심 부품으로서 내구성 확보가 필수적이다 [3-5].

선박용 디젤엔진의 실린더 라이너는 연소 압력과 피스톤 운동에 의해 반복적인 동적 하중을 받으며, 특히 냉각수와 접촉하는 외벽에서는 캐비테이션 침식(cavitation erosion)이 빈번하게 발생한다. 연소 과정 중 발생하는 급격한 압력 변화는 피스톤의 2차 운동을 유발하고, 이

[†]Corresponding author: mp949@mmu.ac.kr

박일초: 교수, 전우석: 교수, 한민수: 교수

로 인해 실린더 라이너에는 횡방향 진동이 발생한다 [6,7]. 라이너가 순간적으로 수축할 경우, 외벽과 접촉 중이던 냉각수는 관성 효과로 인해 즉각적인 추종이 어려워지며, 그 결과 라이너 표면과 냉각수 사이에 국부적인 저압 영역이 형성된다. 이러한 압력 저하는 액체의 포화증기압 이하로 감소할 경우 다수의 미세 기포를 생성하게 된다 [8,9]. 이후 수축된 라이너가 탄성 복원에 의해 다시 팽창하면, 형성된 기포는 급격한 압력 상승과 함께 붕괴되며 고에너지 마이크로 제트와 충격파를 발생시킨다 [10-12]. 이러한 반복적인 기포 붕괴 과정은 금속 표면에 국부적인 고압 충격을 가하고, 장시간 누적될 경우 표면 피로 손상과 미세 균열의 발생을 초래하여 실린더 라이너의 수명을 단축시키는 주요 원인으로 작용한다.

현재 대형 선박 디젤엔진의 실린더 라이너 소재로는 우수한 주조성, 열전도성 및 진동 감쇠 특성을 갖는 회주철(gray cast iron)이 널리 사용되고 있다 [13]. 그러나 회주철 내부에 분포하는 편상 흑연은 기계적 강도가 낮고 기지 조직과의 결합력이 약해 캐비테이션 충격 하중 하에서 응력 집중 부위로 작용한다. 이로 인해 기포 붕괴 시 흑연이 우선적으로 탈락하면서 피트가 형성되고, 이러한 손상은 냉각수의 국부 유동을 교란시켜 침식 현상을 더욱 가속화하는 악순환을 유발한다 [14-16]. 한편, 실린더 라이너의 부식을 억제하기 위해 냉각수에 아질산염 계열의 부식 억제제를 첨가하여 부동태 피막을 형성하는 방법이 사용되고 있으나, 해당 피막은 두께가 얇고 기계적 강도가 낮아 캐비테이션 환경에서는 쉽게 파괴되는 한계를 가진다. 이로 인해 부식과 침식이 동시에 진행되는 복합 손상이 발생하며, 화학적 억제 기법만으로는 장기적인 내구성 확보에 한계가 있다 [17,18]. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 표면의 기계적 특성을 향상시키는 다양한 표면처리 기술이 연구되어 왔다. 전통적으로 경질 크롬 도금은 높은 경도와 우수한 내마모성으로 인해 적용되어 왔으나 [19], 전기도금 공정 특성상 복잡한 형상에서는 도금 두께의 불균일이 발생하며, 6가 크롬의 인체 유해성과 환경 규제로 인해 적용이 점차 제한되고 있다 [20,21]. 이에 대한 대안으로 무전해 니켈 도금(Electroless Nickel Plating, ENP) 기술이 주목받고 있다. 무전해 니켈 도금은 외부 전원을 사용하지 않고 환원제에 의한 자가촉매 반응을 통해 금속 이온을 석출시키는 공정으로, 전류 분포의 영향을 받지 않아 복잡한 형상에서도 균일한 도막 형성이 가능하다 [22-24]. 또한 도금층은 비정질 또는 미세 결정 구조를 가지며, 열처리를 통해 Ni_3P 등의 석출상이 형성됨에 따라 경도와 내마모성이 향상되는 장점을 지닌다 [25,26]. 그럼에도 불구하고 기존 연구는 주로 단순 부

식 환경이나 접촉 마모 실험조건에 초점을 맞추고 있으며, 실제 선박 디젤엔진 냉각수 환경에서 캐비테이션과 부식이 복합적으로 작용하는 조건하에서의 손상 거동에 대한 체계적인 분석은 충분히 이루어지지 않았다 [27-29].

따라서 본 연구에서는 선박 디젤엔진 실린더 라이너용 회주철 소재에 무전해 니켈 도금을 적용하고, 가속 캐비테이션 조건에서의 침식 거동을 정량적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 회주철 모재와 무전해 니켈 도금 시험편을 제작하여 초음파 진동을 이용한 캐비테이션 실험을 수행하였으며, 실험 시간에 따른 누적 질량 감소, 표면 거칠기 변화 및 최대 손상 깊이를 비교 분석하였다. 또한 주사전자현미경 관찰과 3차원 표면 형상 분석을 통해 도금층의 손상 억제 메커니즘을 규명함으로써, 무전해 니켈 도금의 실린더 라이너 적용 가능성과 내구성 향상 효과를 검증하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편 준비

시험편 재료인 회주철은 주물 공정작업 후 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 4시간 동안 열처리를 실시하여 응력을 제거하였다. 시험편 제작은 주물 공정 시 주형의 외부 냉각효과를 고려하여 초기 제작된 회주철의 바깥 면을 모두 1 cm 이상 밀링가공으로 제거한 후 내부 재료를 이용하여 $19.5\text{ mm} \times 19.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 의 크기로 제작하였다. 이때 제작된 회주철의 인장강도는 330 N/mm^2 이고, 그 성분 조성(wt%)은 3.23 C, 1.64 Si, 0.84 Mn, 0.016 P, 0.013 S 그리고 나머지는 Fe이다. 캐비테이션 실험을 위한 시험편은 SiC 페이퍼 grit #600까지 연마 후 증류수로 세척하고 열풍 건조하였다. 회주철의 미세조직 관찰을 위한 시험편은 SiC 페이퍼 grit #2000까지 연마 후 2% nital 용액에서 10초 동안 에칭하였다.

2.2 무전해 니켈 도금

무전해 니켈 도금 전 시험편 전처리는 초음파 세척, 알카리 탈지 및 산세 과정으로 수행하였다. 초음파 세척은 아세톤 용액에서 5분간 실시하였고, 알카리 탈지는 Na_2CO_3 20g/L과 규산나트륨 Na_2SiO_3 10 g/L 혼합 용액에서 3분 동안 진행하였다. 산세는 HNO_3 과 HF를 3:1의 혼합비율로 조성하여 10초 동안 수행하였다. 무전해 니켈 도금 전과 모든 과정마다 증류수로 시험편을 철저히 세척하였다. 전처리 후 무전해 니켈 도금은 Table 1과 같이 조성하였으며, 모든 도금욕의 pH는 초기에 NaOH 수용액을 이용하여 상온에서 조정하였다. 도금온도는 $90 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으며, 비커 내 온도 분포를 균일하게 하기 위해 magnetic stirrer bar (cross-

Table 1. Electroless bath composition and operating condition

Bath composition		Operating condition	
Nickel sulphate (g/L)	30	pH of solution	5.2
Sodium hypophosphite (g/L)	30	Deposition time (h)	1
Lactic acid (g/L)	9	Deposition temp. (°C)	90±1
Acetic acid (g/L)	30	Bath volume (mL)	500
Lead nitrate (mg/L)	2	Stirring rate (rpm)	200

type, Ø30 mm x h11.5 mm)를 이용하여 일정한 속도로 교반시켰다. 그리고 도금용액의 증발에 의한 손실을 최소화하기 위해 도금 시 도금 조는 커버로 밀폐시켰다. 도금조로 500 mL 비커를 사용하였으며, 모든 시험편은 1시간 동안 도금을 실시하였다. 도금 후 시험편은 별도의 열처리 없이 캐비테이션 실험에 사용하였다.

2.3 캐비테이션 실험

캐비테이션 침식 실험은 ASTM G32 규정에 따라 진동자(horn tip)의 진폭을 50 μ m로 유지하여 실시하였으며, 그 개략도는 Fig. 1에 제시하였다. 실험 용액은 상용화 제품으로 널리 사용되는 냉각수 첨가제 Glyscorr G93 (Maker: MEST)을 증류수에 제작사 제시조건인 10% 농도로 혼합하여 사용하였다. 사용된 냉각수 첨가제의 물리적 특성은 밀도(20 °C) 1.092-1.095 g/cm³, pH 9.3-9.7, 그리고 굴절률(20 °C) 1.397-1.401이다. 실험 시 냉각수 온도는 자동 온도 제어기에 의해 30±1 °C를 일정하게 유지하였다. 그리고 진동자가 냉각수에 잠기는 높이는 12 mm로 일정하게 유지하였다. 시험편은 진동자의 혼에 대향하도록 거치대에 고정하여 혼으로부터 발생한 캐비티(cavity)가 시편에 영향을 받도록 하는 이른바 “stationary specimen method”를 이용하였다. 그리고

진동자와 시험편 간의 거리는 0.5 mm로 일정하게 유지하였다. 캐비테이션 침식 실험 시간은 시험편 표면에 침식 손상이 명확하게 관찰되는 시점까지 수행하였다. 모든 실험은 각 조건에서 3회씩 반복 수행하였으며, 무게 감소량 변화는 그 평균값을 산출하여 분석하였다. 시험편 무게를 측정하기 위해 실험 전후 시험편은 증류수로 초음파 세척 후 60 °C의 건조기에서 24시간 동안 건조시켰다. 무게 측정은 시험편을 건조기에서 꺼내어 30분 동안 데시케이터 내에 보관하여 냉각시킨 후 상온에서 10⁻⁴ g 단위까지 측정하였다.

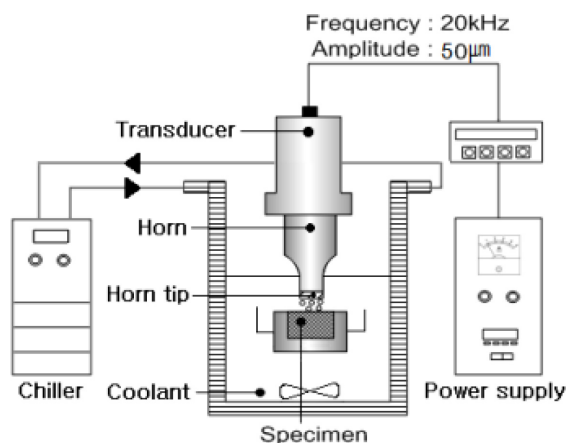
2.4 시험편 특성 분석

캐비테이션 실험 전후 시험편의 표면 형상은 주사전 자현미경(JEOL, JSM-7100F)으로 관찰하였다. 시험편의 표면 거칠기(R_a)와 최대 손상깊이는 3D 분석 현미경(Nextec, Nextop-3D)을 이용하여 1260 × 1260 μ m 크기 면적을 촬영하였고, 5개소 이상 계측하여 그 평균값을 사용하였다. 무전해 니켈 도금 층의 두께는 도금 두께 측정기(QN-5500C-F3, Qnix)를 사용하여 10회 이상 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 무전해 니켈 도금 층의 인(P) 함량을 측정하기 위해 전계방출주사전자현미경(JEOL, JSM-7100F)에 장착된 에너지 분산형 X선 분광계(energy dispersive X-ray spectrometer system, EDS)를 이용하여 3회씩 계측하여 그 평균값을 산출하였다. 무전해 니켈 도금 층의 구조는 Cu K α X-ray source ($\lambda = 1.54056$ Å)를 이용한 X-ray diffraction (XRD)를 통해 분석하였다(Rigaku Corporation, Smartlab).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 2는 회주철 모재와 무전해 니켈 도금(ENP) 적용 시험편의 표면 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 회주철 모재에서는 편상 흑연(flake graphite)이 기지조직 내에 불균일하게 분포하며, 이러한 흑연상은 외부 충격 하중 작용 시 응력 집중을 유발할 수 있는 취약부로 작용한다(Fig. 2a). 반면, ENP 도금층

**Fig. 1. Schematic diagram of cavitation erosion experiment**

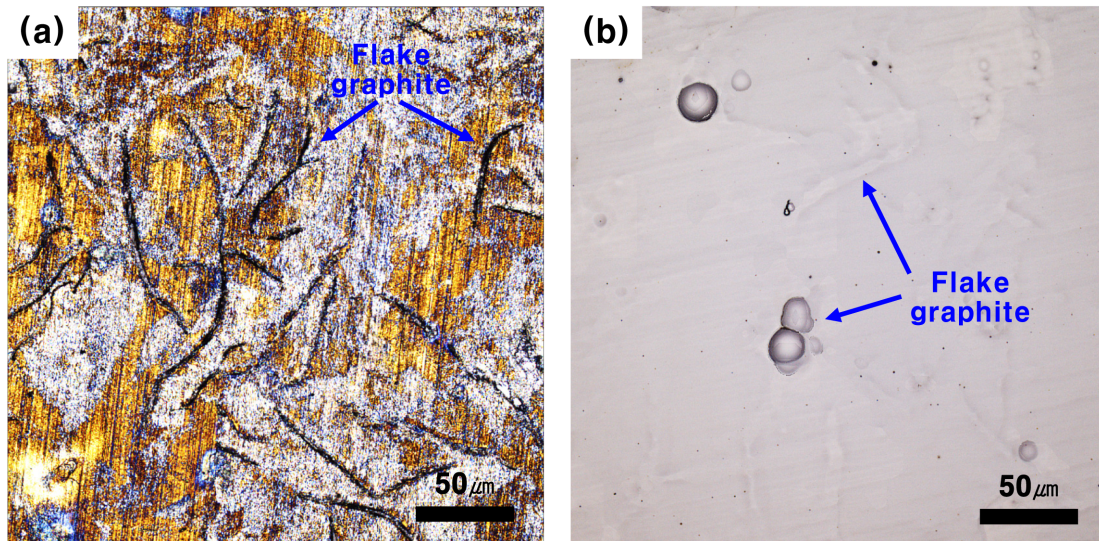


Fig. 2. Surface microstructure images by optical microscope; (a) gray cast iron and (b) ENP coating

표면은 모재에서 관찰되는 흑연 노출이 억제되고 비교적 균일한 피복 구조를 형성하는 것으로 확인되었다(Fig. 2b). 다만 ENP 도금 과정 중 모재에 노출된 편상 흑연의 영향으로 도금 층 표면 상에 부분적으로 편상 흑연과 유사한 형상 및 구상 형상의 미세조직이 형성된 것으로 판단된다. 선행 연구 결과에 따르면 편상흑연 주변부에서는 기지조직과의 갈바닉 셀(galvanic cell) 형성에 의해 ENP 도금의 증착 속도가 상대적으로 증가하여 돌출된 형상으로 관찰된다 [30]. 이는 기지조직에서 발생한 양극 용해 반응으로 생성된 전자가 편상흑연으로 이동하며 Ni 환원 및 초기 핵 생성이 경계부에서 우선적으로 진행되기 때문이다. 이후 Ni의 자기촉매 반응과 새로운 갈바닉 셀 형성에 의해 편상흑연 인근의 빠른 증착 거동이 지속되어 결국 편상흑연까지 완전히 도금되게 된다. 이렇게 생성된 도금 층의 평균 두께는 $16.5\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 또한 EDS 분석 결과, 도금 층의 인(P) 함량은 약 6.4 wt%로 측정되었으며, 이는 전형적인 Ni-P 기반 무전해 니켈 도금층 조성 범위에 해당한다.

Fig. 3은 ENP 도금층의 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 회절 패턴에서 Ni(111) 관련 피크가 넓은 형태로 나타나며, 이는 도금층이 비정질 또는 미세 결정질(amorphous/microcrystalline) 구조를 갖는 특성을 나타낸다 [31,32]. 일반적으로 Ni-P 도금층은 P 함량에 따라 결정성이 변화하는 것으로 보고되며, 본 연구에서 측정된 P 함량(6.4 wt%)과 Fig. 3의 확산된 피크 형상은 비교적 낮은 결정성을 갖는 도금층의 형성과 연관될 수 있다 [33]. ENP 도금 층은 P 함량 증가에 따라 결정립이 미세화되며, 본 연구에서와 같이 P 함량이 약 6% 정도인 경우 나노 결정질에서 비정질 구조로 전이하는 미

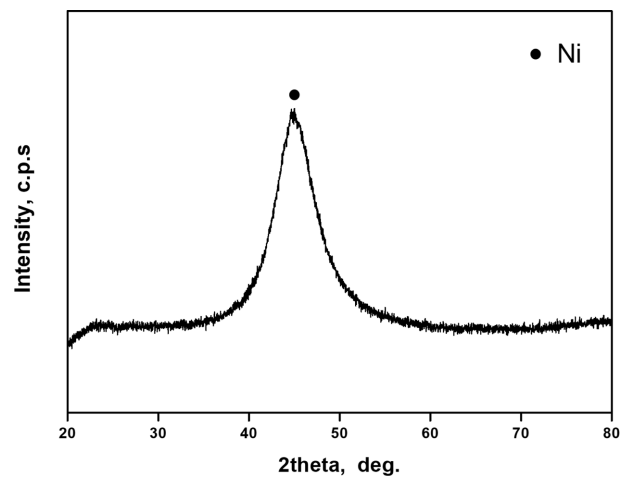


Fig. 3. XRD analysis of ENP coating

세조직 변화를 나타낸다 [34]. 이는 P와 Ni 간의 강한 화학적 친화성과 원자 크기 차이에 따른 격자 왜곡이 증가하여 최종적으로 비정질 상 형성을 유도하기 때문이다. 이러한 과정에서 표면 경도 역시 높아지는 것으로 보고되는데, 이는 결정립 미세화, 고용체 강화 및 분산 강화가 복합적으로 작용한 표면 강화기구에 따른 결과로 알려져 있다 [35]. 이러한 구조적 특성은 초기 표면 결함의 발생을 완화하고, 충격 에너지의 전달을 분산시키는 방향으로 캐비테이션 손상 거동에 영향을 미칠 가능성이 있다.

3.2 캐비테이션 침식 거동

Fig. 4는 캐비테이션 침식 실험 시간에 따른 누적 무게 감소량(weight loss)을 비교한 결과이다. 회주철 모재

(Substrate)의 경우 실험 시간이 증가함에 따라 무게 감소가 빠르게 증가하였으며, 90 min 구간에서 약 1.2 mg 수준의 손실이 관찰된다. 이는 초기 손상 이후 손상 면

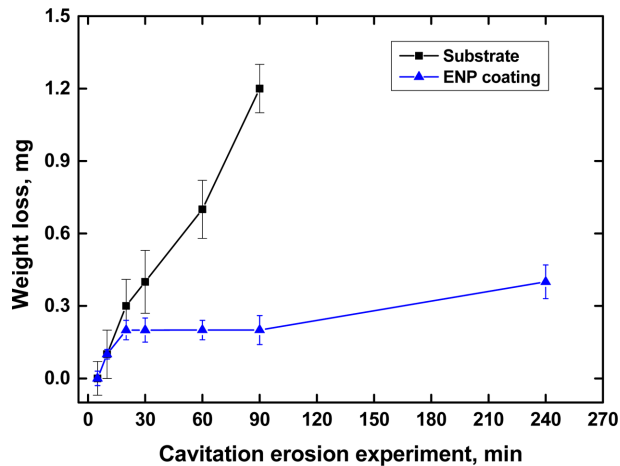


Fig. 4. Weight loss with cavitation erosion experiment time

적이 빠르게 확장되면서 침식률이 급격히 증가한 것으로 해석된다. 반면 ENP 도금 시편(ENP coating)은 동일 조건에서 질량 감소량 증가가 상대적으로 완만하게 나타났으며, 240 min 시점에서도 약 0.4 mg 정도 수준으로 크게 경감되었다. 즉, ENP 도금 적용 시 캐비테이션 조건에서 모재 대비 현저한 무게 손실 저감 효과가 확인되며, 도금층이 초기 손상 지연 및 침식 손상 진행 억제에 기여하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 캐비테이션 침식 실험 후 3D 표면 형상과 표면 프로파일 결과를 나타낸다. 회주철 모재(90 min)에서는 표면 전반에 거친 손상 흔적이 분포하고, 프로파일에서도 다수의 급격한 높이 변화 및 깊은 침식 손상이 확인된다. 이는 기포 붕괴 충격이 반복적으로 작용하면서 피트(pit)가 형성되고, 이후 피트의 합체 및 확장에 의해 손상이 급속히 진행된 결과로 볼 수 있다. 반면 ENP 도금 시편(240 min)의 경우 표면 손상은 국부적으로 제한되며, 프로파일에서도 손상 깊이 변화가 비교적 완만한 경향을 보인다. 이는 ENP 도금층이 캐비

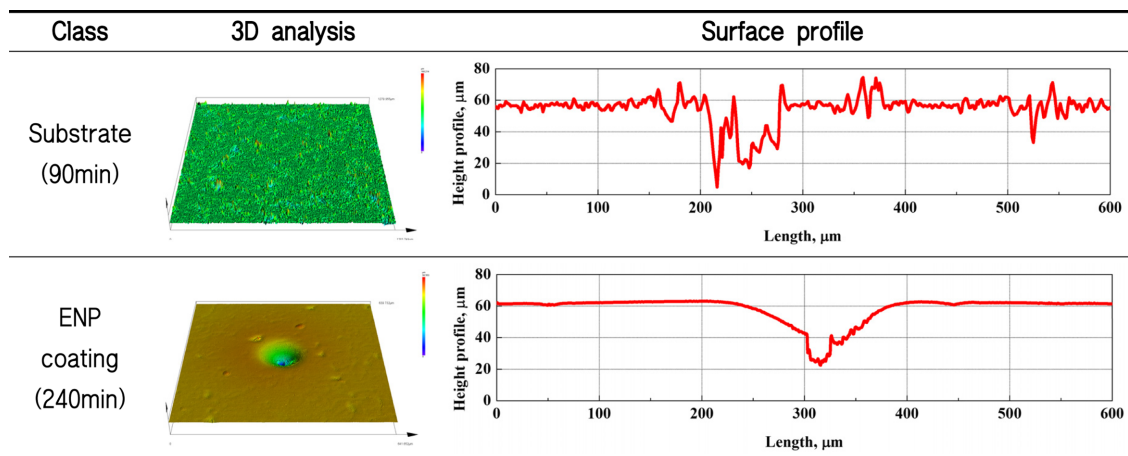


Fig. 5. 3D analysis and surface profile after the cavitation erosion experiment.

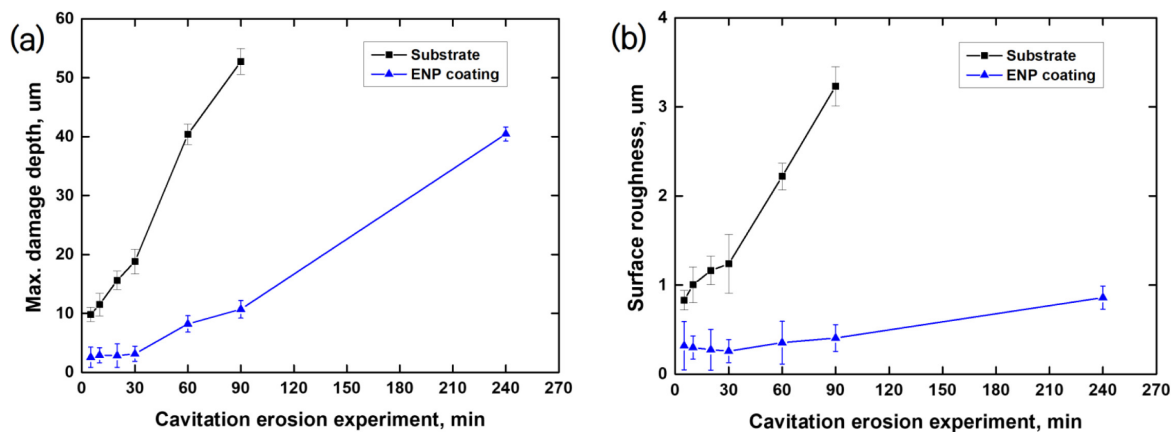


Fig. 6. 3D analysis results with cavitation erosion experiment time; (a) maximum damage depth and (b) surface roughness.

테이션 충격에 대해 단일 지점의 국부 손상 형태로 진행되도록 유도하며, 손상 확산 속도를 저감시키는 역할을 수행함을 의미한다.

Fig. 6은 캐비테이션 침식 실험 시간에 따른 (a) 최대 손상 깊이(maximum damage depth) 및 (b) 표면 거칠기(surface roughness) 변화를 정량적으로 나타낸 결과이다. 회주철 모재의 최대 손상 깊이는 90 min에서 약 50 μm 수준까지 급격히 증가하는 반면, ENP 도금층은 240 min 까지 실험을 진행하였음에도 최대 손상 깊이가 약 40 μm 수준에 머무르는 것으로 확인된다(Fig. 6a). 또한 표면 거칠기 역시 모재는 손상 시간 증가에 따라 빠르게 증가하여 90 min에서 약 3 μm 이상을 나타내지만, ENP 도금층은 실험 전반에서 상대적으로 낮은 증가율을 보이며 240 min에서도 1 μm 수준으로 유지된다(Fig. 6b).

이러한 결과는 ENP 도금층이 캐비테이션 손상 과정에서 표면의 급격한 파괴 진전을 억제하고, 손상이 진행되더라도 손상 크기와 확산 정도를 제한함으로써 표면 손상 지표(질량 감소, 최대 깊이, 거칠기)를 유의하게 감소시키는 것으로 해석할 수 있다.

3.3 캐비테이션 침식 손상 기구 손상 형태 및 파괴 기구 고찰

Fig. 7은 캐비테이션 침식 후 시편 표면을 SEM으로 관찰한 결과이다. 회주철 모재(Fig. 7a)에서는 표면에 다수의 균열과 박리 흔적이 관찰되며, 손상이 불연속적으로 확장되는 형태를 보인다. 이는 회주철 내부의 편상 흑연이 캐비테이션 충격 하중 작용 시 응력 집중원으로 기능하여 미세 균열의 발생 및 전파를 촉진하는 특성과 연관된다. 특히 흑연 탈락에 의해 형성된 피트는 유체 유동의 국부 교란을 유발하고, 해당 지점에 캐비테이션 붕괴가 집중되는 방식으로 침식이 가속될 수 있다. 반면, ENP 도금 시편(Fig. 7b)에서는 상대적으로 매끈한

표면이 유지되는 영역이 넓게 관찰되며, 손상은 국부적으로 발생한 결함 중심으로 제한되는 경향을 나타낸다. 확대 이미지에서는 도금층에서 균열 또는 박리 형태의 손상이 일부 관찰되나, 모재와 비교할 때 손상 면적 확장 속도는 상대적으로 억제된 양상을 보인다. 이는 ENP 도금층이 회주철의 흑연 노출을 차단하고, 캐비테이션 충격이 직접적으로 취약부(흑연/기지 계면)에 도달하는 것을 감소시켜 균열 기점 형성을 지연시키는 효과로 해석된다. 이는 선행 연구 결과에서도 유사한 캐비테이션 침식 손상 양상이 확인된 바 있다 [36]. 선행 연구에서 ENP 도금 층의 P 함량이 5.37 wt%이고, 비정질-나노결정질 복합 조직을 가질 때 결정크기 미세화의 강화기구에 의해 표면 경도가 높게 나타나 캐비테이션 침식 저항성이 크게 향상되었다. 이때 ENP 도금 층의 캐비테이션 침식 손상은 결정립의 경계 영역에서 피트 발생, 성장, 크랙 발생, 결정립의 탈리 순으로 진행되면서 표면 손상이 급격히 증가하는 손상기구로 분석되었다.

더불어, 회주철의 캐비테이션 침식 손상 기구를 명확하게 조사하기 위해 캐비테이션 침식 실험시간 경과에 따른 표면 상태를 SEM으로 관찰하여 Fig. 8에 제시하였다. 캐비테이션 침식 실험 초기에는 모재 표면에 노출된 편상 흑연이 부분적으로 관찰되었으며(Fig. 8a), 실험시간이 경과함에 따라 캐비테이션 공격에 의해 노출된 편상 흑연이 부분적으로 제거되고 동시에 편상 흑연 끝단에서는 크랙(crack) 손상이 개시 및 진전되는 양상을 보였다(Fig. 8b-c). 이후 노출된 편상 흑연은 완전히 제거되어 V자형 홈(groove)을 형성하였으며, 크랙 손상은 더욱 성장하여 가까운 거리에 인접한 크랙들과 서로 연결되어 침식 손상이 발전되는 양상이 확인되었다(Fig. 8d). 여기에서 V자형 홈은 응력이 집중되는 노치(notch)로 작용하여 캐비테이션 침식손상을 집중 및 가속화시키는 주요 요인 중 하나이며, 그 결과 Fig. 7a와 같이

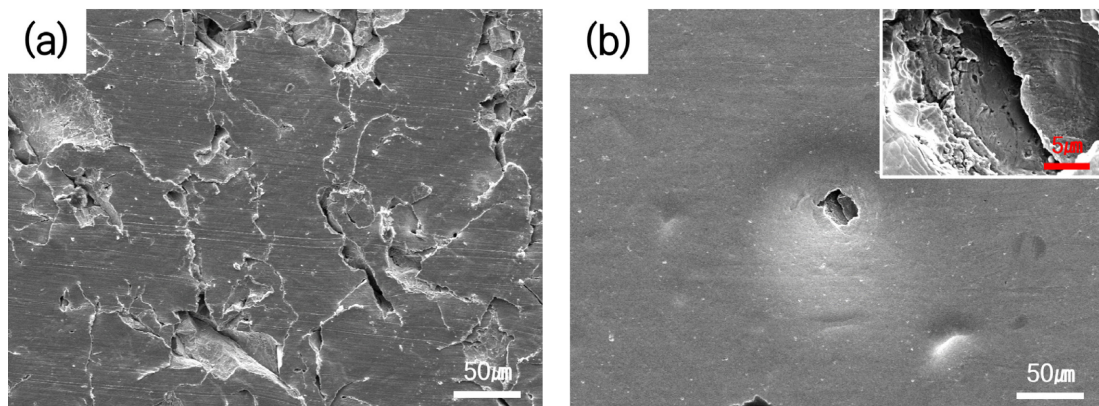


Fig. 7. Surface damage observation images after cavitation erosion experiment using SEM; (a) Substrate and (b) ENP coating.

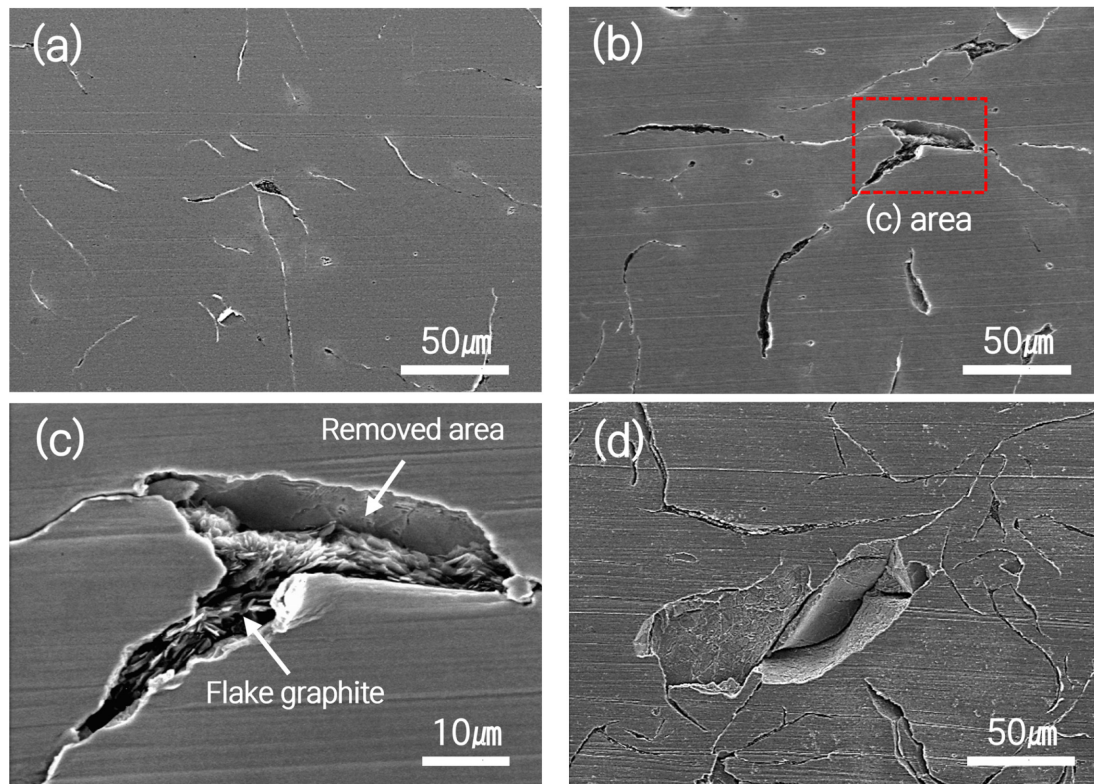


Fig. 8. Cavitation erosion mechanism on the surface of the gray cast iron; (a) cavitation erosion experiment during 5 sec, (b)-(c) cavitation erosion experiment during 1 min, and (d) cavitation erosion experiment during 5 min

표면 전반에 걸친 깊이방향의 국부적인 캐비테이션 침식 손상이 관찰되었다. Hattori와 Kitagawa의 연구에 따르면 노치효과로 인해 회주철의 캐비테이션 침식 저항성은 탄소강(carbon steel)에 비해 약 1/5~1/3 수준으로 현저히 열악한 것으로 보고하여 본 연구와 같은 경향의 결과를 나타냈다 [37].

종합하면, 회주철 소재의 캐비테이션 침식은 “흑연 탈락 → 피트 형성 → 유동 교란에 따른 충격 집중 → 균열/박리 확산”의 경로로 빠르게 진행되는 반면, ENP 도금층은 표면을 연속적으로 피복하여 초기 손상 개시를 지연시키고, 손상 발생 이후에도 손상 확산을 제한함으로써 캐비테이션 침식 저항성을 향상시키는 것으로 판단된다. 따라서 ENP 도금은 선박 디젤엔진 실린더 라이너 외벽과 같이 냉각수 환경에서 장기간 반복 충격이 발생하는 조건에서 유효한 표면 개질 기술로서 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 선박 디젤엔진 실린더 라이너용 회주철에 무전해 니켈 도금(ENP)을 적용하고, 냉각수 조건에서의 캐비테이션 침식 저항성을 평가하여 다음과 같

은 결론을 도출하였다.

1. ENP 도금층의 EDS 분석 결과 인(P) 함량은 약 6.4 wt%로 확인되었으며, XRD 회절 패턴에서는 넓은 Ni 피크가 관찰되어 도금층이 비정질 또는 미세 결정질 구조 특성을 갖는 것으로 판단된다.
2. 캐비테이션 침식 실험 결과, 회주철 소재는 침식 시간이 증가함에 따라 누적 무게 감소량이 급격히 증가하여 90 min에서 약 1.2 mg 수준의 손실을 나타낸 반면, ENP 도금 시편은 240 min까지 약 0.4 mg 수준으로 억제되어 소재 대비 뚜렷한 침식 저감 효과를 나타냈다.
3. 3D 표면 분석 결과, 회주철 소재는 깊은 피트 형성과 손상 확산으로 인해 최대 손상깊이 및 표면 거칠기가 빠르게 증가한 반면, ENP 도금층은 손상이 국부적으로 제한되며 최대 손상깊이와 표면 거칠기 증가가 상대적으로 완만하게 나타났다.
4. SEM 관찰 결과, 회주철 소재에서는 편상 흑연의 우선 탈락과 피트 형성 이후 균열 및 박리 형태로 손상이 확장되는 경향이 확인되었다. 반면 ENP 도금층은 흑연 노출을 차단하여 균열 기점 형성을 지연시키고, 손상 확산을 제한함으로써 캐비테이션 침식 저항성을 향상시키는 것으로 해석된다.

따라서 무전해 니켈 도금은 선박 디젤엔진 실린더 라

이너의 냉각수 접촉부에서 발생하는 캐비테이션 침식 손상을 완화하고 내구수명 향상에 기여할 수 있는 유효한 표면처리 기술로 판단된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역 혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-14-002)

References

1. IMO, 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC.377(80), International Maritime Organization, London (2023).
2. D. Polemis, M. Boviatsis, and S. Chatzinikolaou, Assessing the Sustainability of the Most Prominent Type of Marine Diesel Engines under the Implementation of the EEXI and CII Regulations, *Clean Technologies*, **5**, 1044 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030053>
3. D. Liu, G. Li, N. Sun, G. Zhu, H. Cao, T. Wang, and F. Gu, Vibration-induced cavitation in cylinder liners caused by piston slaps, *International Journal of Mechanical Sciences*, **267**, 109025 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109025>
4. X. Wang, H. Wang, J. Zhao, S. Zhou, Z. Luo, and Z. Han, Evaluation of Liner Cavitation Potential through Piston Slap and BEM Acoustics Coupled Analysis, *Mathematics*, **10**, 853 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/math10060853>
5. Y. Liu, G. Jing, H. Liu, W. Zhang, M. Han, S. Xiao, and Z. Zhang, Failure analysis and design improvements of steel piston for a high-power marine diesel engine, *Engineering Failure Analysis*, **142**, 106825 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106825>
6. C. Fang, X. Meng, X. Kong, B. Zhao, and H. Huang, Transient tribo-dynamics analysis and friction loss evaluation of piston during cold-and warm-start of a SI engine, *International Journal of Mechanical Sciences*, **133**, 767 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.043>
7. J. Guo, R. B. Randall, P. Borghesani, W. A. Smith, M. D. Haneef, and Z. Peng, A study on the effects of piston secondary motion in conjunction with clearance joints, *Mechanism and Machine Theory*, **149**, 103824 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103824>
8. Y. Xu, L. Yao, B. Zhang, K. Tang, B. Li, and X. Hu, Cavitation erosion and wear behaviour of a boron cast iron cylinder liner under bio-fuel conditions, *RSC Advances*, **6**, 79968 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1039/C6RA16595H>
9. X. Wang, Z. Zhang, Y. Chen, and Y. Li, Theoretical analysis of engine coolant cavitation with different additives based on ultrasonic induced bubble dynamics, *Results in Physics*, **15**, 102528 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102528>
10. I. C. Park, H. K. Lee, and S. J. Kim, Microstructure and cavitation damage characteristics of surface treated gray cast iron by plasma ion nitriding, *Applied Surface Science*, **477**, 147 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.112>
11. M. Khavari, A. Priyadarshi, J. Morton, K. Porfyrakis, K. Pericleous, D. Eskin, and I. Tzanakis, Cavitation-induced shock wave behaviour in different liquids, *Ultrasonics Sonochemistry*, **94**, 106328 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106328>
12. T. Ouyang, X. Mo, J. Wang, and L. Cheong, Numerical investigation of vibration-induced cavitation for gears considering thermal effect, *International Journal of Mechanical Sciences*, **233**, 107679 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107679>
13. Y. Li, Q. Wang, R. Chen, X. Wang, Y. Xia, G. Zhou, Y. Qu, and G. Li, Influence of V Content on Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron for Super-Large Cylinder Liner, *International Journal of Metalcasting*, **17**, 1806 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00894-7>
14. M. Abreu, S. Jonsson, and J. Elfberg, Morphology and mechanisms of cavitation damage on lamellar gray iron surfaces, *Wear*, **450**, 203264 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203264>
15. E. Riemschneider, I. Mitelea, I. Bordeasu, C. M. Craciunescu, and D. Utu, The Effects of Certain Processing Technologies on the Cavitation Erosion of Lamellar Graphite Pearlitic Grey Cast Iron, *Materials*, **18**, 1358 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma18061358>
16. C. Luo and J. Gu, Surface Properties and Cavitation Erosion Resistance of Cast Iron Subjected to Laser Cavitation Treatment, *Metals*, **13**, 1793 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/met13101793>
17. W. S. Jeon and I. C. Park, Effect of Marine Coolant Additives on Cavitation Erosion–Corrosion of Diesel Engine Cylinder Liner, *Applied Sciences*, **15**, 6353 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/app15116353>
18. S. Han, J. H. Lin, J. J. Kuo, J. L. He, and H. C. Shih, The

- cavitation-erosion phenomenon of chromium nitride coatings deposited using cathodic arc plasma deposition on steel, *Surface and Coatings Technology*, **161**, 20 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00392-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00392-4)
19. S. Y. Kang, J. J. Lee, S. G. Yang, and W. S. Hwang, Effect of Electrolysis Condition on Mechanical Property of Ni Electrodeposits, *Journal of Surface Science and Engineering*, **48**, 62 (2015). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2015.48.2.62>
 20. L. Vernhes, M. Azzi, and J. E. Klemberg-Sapieha, Alternatives for hard chromium plating: Nanostructured coatings for severe-service valves, *Materials Chemistry and Physics*, **140**, 522 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.03.065>
 21. A. Picu, I. C. Petre, A. Negrea, E. V. Stoian, and C. M. Enescu, Hard Chromium Plating: Technological Challenges, Engineering Approaches, Automation and Innovative Solutions for Optimized Industrial Processes, *Scientific Bulletin of Valahia University-Materials and Mechanics*, **21**, 32 (2025). Doi: <https://doi.org/10.2478/bsmm-2025-0016>
 22. K. Cheng and Z. Wu, Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of electroless nickel-phosphorus coatings, *Journal of Physics: Conference Series*, **1520**, 012002 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1520/1/012002>
 23. I. A. Shozib, A. Ahmad, A. M. Abdul-Rani, M. Beheshti, and A. A. Ilyu, A review on the corrosion resistance of electroless Ni-P based composite coatings and electrochemical corrosion testing methods, *Corrosion Reviews*, **40**, 1 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0091>
 24. D. Seifzadeh, Z. Rajabalizadeh, B. Dikici, K. D. Kiran-san, and E. Erçankçı, A review of pretreatment techniques for electroless nickel-phosphorus plating on magnesium alloys with enhanced corrosion resistance and mechanical properties, *Materials Today Communications*, **44**, 112171 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112171>
 25. M. Buchtik, M. Krystýnová, J. Másilko, and J. Wasserbauer, The Effect of Heat Treatment on Properties of Ni-P Coatings Deposited on a AZ91 Magnesium Alloy, *Coatings*, **9**, 461 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings9070461>
 26. R. Taheri, I. N. A. Oguocha, and S. Yannacopoulos, The tribological characteristics of electroless Ni-P coatings, *Wear*, **249**, 389 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00539-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00539-7)
 27. R. Jensen, Z. Farhat, M. A. Islam, and G. Jarjoura, Erosion–Corrosion of Novel Electroless Ni-P-NiTi Composite Coating, *Corrosion Materials Degradation*, **4**, 120 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/cmd4010008>
 28. J. S. Lee, J. H. Lee, J. S. Oh, and J. E. Lee, General Corrosion Behavior of High Chromium Cast Iron in an Acid Solution, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 367 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2021.20.6.367>
 29. J. S. Lee, O. Baasanjav, J. S. Oh, and J. E. Lee, Time-Dependent Corrosion Behavior of High Chromium White Cast Iron in an Acidic Solution, *Corrosion Science Technology*, **23**, 310 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/CST.2024.23.4.310>
 30. I. C. Park and S. J. Kim, Effect of lead nitrate concentration on electroless nickel plating characteristics of gray cast iron, *Surface and Coatings Technology*, **376**, 2 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.084>
 31. M. Ahmad, M. F. Al-Ajmi, M. A. Hossain, M. A. Hossain, A. A. Alghamdi, and M. S. Alharthi, Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of electroless Ni-P based coatings: a comprehensive study, *Scientific Reports*, **15**, (2025).
 32. R. C. Hsu, C. H. Lin, and Y. C. Chen, Microstructure evolution and performance characteristics of electroless Ni-P coatings analyzed by XRD and surface characterization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **128** (2025).
 33. J. Huh and J. H. Lee, The Effects of Electroless Nickel Plating Bath Conditions on Stability of Solution and Properties of Deposit, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, **29**, 46 (2000). https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=J00290100046
 34. H. C. Huang, S. T. Chung, S. J. Pan, W. T. Tsai, and C. S. Lin, Microstructure evolution and hardening mechanisms of Ni-P electrodeposits, *Surface and Coatings Technology*, **205**, 2097 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.115>
 35. D. H. Jeong, U. Erb, K. T. Aust, and G. Palumbo, The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-P coatings, *Scripta Materialia*, **48**, 1067 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00633-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00633-4)
 36. I. C. Park and S. J. Kim, Cavitation erosion behavior in seawater of electroless Ni-P coating and process optimization using Taguchi method, *Applied Surface Science*, **477**,

- 37 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.033>
37. 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>