

쇼트피닝이 회주철의 캐비테이션 침식 저항성에 미치는 영향

박일초[†]

목포해양대학교 승선실습과정부, 전남 목포시 해양대학로 91
(2021년 6월 15일 접수, 2021년 6월 17일 수정, 2021년 6월 17일 채택)

Influence of Shot Peening on Cavitation Erosion Resistance of Gray Cast Iron

Il-Cho Park[†]

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

(Received June 15, 2021; Revised June 17, 2021; Accepted June 17, 2021)

In this study, optimal shot peening process conditions were investigated for improving the cavitation erosion resistance of gray cast iron under a marine environment. Shot peening was performed with variables of injection pressure and injection time. The durability was then evaluated through cavitation erosion test which was conducted according to the modified ASTM G-32 standard. The tendency of cavitation erosion damage according to shot peening process condition was investigated through weight loss rate, surface and cross-sectional analysis of the specimen before and after the test. As a result, the shot peening process condition that could minimize cavitation erosion was when the injection pressure was the lowest and when the injection time was the shortest. This was because the flake graphite exposed on the gray cast iron surface could be easily removed under such condition. Therefore, the notch effect can be prevented by surface modification. In addition, the cavitation erosion damage mechanism of gray cast iron was discussed in detail.

Keywords: Gray cast iron, Cavitation erosion, Flake graphite, Shot peening, Marine environment

1. 서론

회주철은 구상 흑연 주철에 비해 경도 및 인장강도는 작으나 상대적으로 값이 싸고, 주조성, 열 전도도 및 감쇠능(damping capacity)이 우수하여 산업 전반에서 널리 사용되고 있다. 특히 해양환경에서는 펌프 케이싱, 밸브, 파이프 및 그 부속품 등 기계설비 계통의 기자재로 다양하게 활용되고 있다. 그러나 펌프나 배관 계통 등과 같은 유체역학 시스템에서는 급격한 압력 변화에 의해 캐비테이션 침식 현상이 발생할 수 있고, 그에 따라 해당 설비의 성능 저하 및 고장에 따른 유지보수 작업이 요구되는 실정이다 [1]. 이러한 캐비테이션 침식은 재료 표면의 피로 현상으로 간주된다 [2]. 캐비테이션 기포가 붕괴 시 발생하는 충격파(wave impact)와 마이크로 제트(micro-jet)의 반복적인 충격에 의해 재료 손상이 발생하기 때문이다. 따라서 회주철의 캐비테이션 침식 손상을 방지하기 위해 피로강도를 향상시키기 위한 기존 연구

들이 다양하게 선행되었다. 특히 레이저 용융 표면처리 기술은 주철의 캐비테이션 침식 저항성을 약 7배 정도나 개선시킬 수 있는 우수한 성과를 나타내기도 했다 [3]. 그러나 이 기술은 경제성과 생산성 측면을 고려한다면 넓은 면적의 설비 및 제품에 적용하는데 기술적 한계가 있다. 그에 반해 쇼트피닝 기술은 다른 표면처리 기술에 비해 상대적으로 단순한 공정으로 피로강도를 향상시킬 수 있고, 다양한 재료 및 금속 부품에 폭넓게 활용할 수 있기 때문에 산업 전반에 광범위하게 적용되고 있다. 금속 재료의 쇼트피닝 기술 적용 시 쇼트볼(shot ball)의 연속적인 표면 충돌 공정으로 표면에 압축 잔류 응력을 생성하고, 거의 동일한 두께의 표면 개질 층을 형성시킬 수 있다. 그 일례로 Han 등은 쇼트 피닝 기술로 동합금에 표면개질 층을 형성하여 해수 내 캐비테이션 침식 저항성과 내식성을 개선시킬 수 있었다 [4,5]. 이러한 표면개질 층은 주철에도 효과적으로 생성 가능하며, 피로(fatigue), 프렛팅(fretting) 및 응력 부식 균열(stress corrosion cracking) 등과 같은 가혹한 부하 조건에서 부품의 고장을 완전히 예방하거나 크게 지연시키는 데 상당히 유용한 것으로 보고되고 있다 [6-8].

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

박일초: 교수

따라서 본 연구에서는 해양환경 분위기에서 회주철의 캐비테이션 침식 저항성을 향상시키기 위한 최적의 쇼트피닝 공정 조건을 규명하고, 캐비테이션 침식의 손상 메커니즘을 고찰하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

모재 회주철은 주물공정 과정을 거쳐서 제작되었으며, 600 °C에서 4시간 동안 열처리 작업을 통해 응력을 제거하였다. 모든 시험편 제작은 주물공정 시 주형의 외부 냉각효과를 고려하여 초기 제작된 회주철의 바깥 면을 모두 1 cm 이상 밀링가공으로 제거한 후 내부 재료를 이용하여 19.5 mm × 19.5 mm × 5 mm의 크기로 제작하였다. 이때 제작된 회주철의 인장강도는 330 N/mm² 이고, 그 성분 조성(wt%)은 3.23 C, 1.64 Si, 0.84 Mn, 0.016 P, 0.013 S 그리고 나머지는 Fe 이다. 시험편은 SiC 연마지로 #1200까지 연마하였으며, 시험편의 표면 거칠기(centre line average, R_a)는 약 1.6~2.1 μm 범위 내로 제작하였다. 연마된 시험편은 증류수로 세척하고 열풍 건조한 후 쇼트피닝 처리 및 캐비테이션 침식 실험에 사용하였다.

2.2 쇼트피닝

쇼트피닝 처리는 상부에 수직방향으로 설치된 내부 직경 7.9 mm인 분사노즐을 통해 고압의 압축공기로 쇼트볼을 분사시켜 하부에 수평방향으로 고정된 시험편 표면을 가공하였다. 실험에 사용된 쇼트볼(conditioned stainless steel cut wire shot, STS304, SCCW16)은 직경이 0.4 mm 이고, 경도는 50.6~54.5 H_{RC} 이다. 쇼트피닝 조건은 분사각도 90°와 분사거리 10 cm를 일정하게 유지한 상태에서 분사압력(1, 2, 3 bar)과 분사시간(5~60초)을 변수로 실시하였다.

2.3 캐비테이션 침식 실험

캐비테이션 침식 실험은 쇼트피닝 처리 전후 시험편에 대하여 천연 해수 내에서 modified ASTM G32 규정에 준하여 실시하였다. 캐비테이션 침식 장비는 압전(piezo electric) 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였으며, 대향형 진동법으로 실험을 실시하였다. 실험 시 진폭은 20 kHz의 정격진동 출력 방식으로 50 μm로 일정하게 유지하였으며, 축 방향으로 진동을 발생시켜 캐비티(cavity)를 생성하였다. 시험편은 진동자의 혼(horn)에 대향하도록 거치대에 고정하고 1 mm의 간격으로 일정하게 유지하였다. 온도에 따른 부식손상 영향을 최소화하기 위해 캐비테이션 실험 중 1 L 용량의 천연해수 온도를 30 °C로 일정하게 유지하였다.

2.4 분석방법

시험편의 실험 전후 표면 형상 및 횡단면 분석 시 주사전자현미경(Hitachi, S-2150)과 3D 광학 현미경(Nextec, Nextop-3D)을 활용하였다. 무게 감소량은 시험편을 실험 전후 초음파 세척기로 세척하여 건조기에서 24시간 동안 완전 건조시킨 후 무게를 측정하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 회주철의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경을 활용하여 관찰한 것이다. 회주철의 미세조직은 편상 흑연(flake graphite)을 포함한 펄라이트(perlite) 기지조직(matrix)으로 구성된다. Fig. 1a에서 약 50~150 μm 크기의 편상 흑연이 표면 전반에 걸쳐 확인되었으며, Fig. 1b에서는 에칭에 의해 펄라이트 기지조직이 라멜라(lamellar) 구조로 관찰되었다. 회주철의 편상 흑연은 캐비테이션 침식 저항성을 열악하게 만드는 역할로 작용하는 것으로 알려져 있다. 캐비테이션 침식 공격 시 취성의 편상 흑연이 우선적

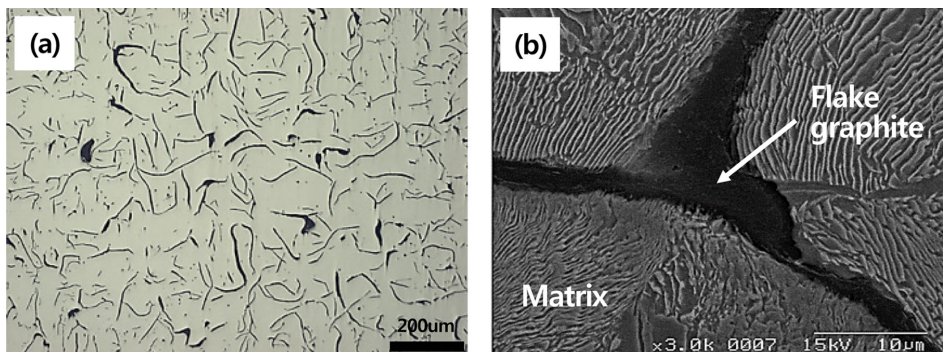


Fig. 1. Microstructure observations of the gray cast iron; (a) non-etched specimen by optical microscope and (b) etched specimen with 2% nital by scanning electron microscope (SEM)

으로 제거되어 노치효과(notch effect)를 유발함으로써 표면 손상을 가속화시키기 때문이다. 그 결과 Hattori와 Kitagawa의 연구에 따르면 캐비테이션 침식 저항성은 탄소강(carbon steel)에 비해 구상 흑연 주철은 1/3~2/3 수준이고, 편상 흑연의 회주철은 1/5~1/3 수준으로 현저히 열악한 것으로 보고된 바 있다 [9]. 따라서 회주철의 미세조직이 캐비테이션

침식 저항성에 크게 영향을 미치며, 구체적으로 표면에 노출된 편상 흑연의 분포와 면적 그리고 그 형상에 따라 캐비테이션 침식 손상이 가속화될 수 있다 [10,11].

3.2 쇼트피닝 처리

Fig. 2와 3은 쇼트피닝 공정 조건 중 분사압력과 분사

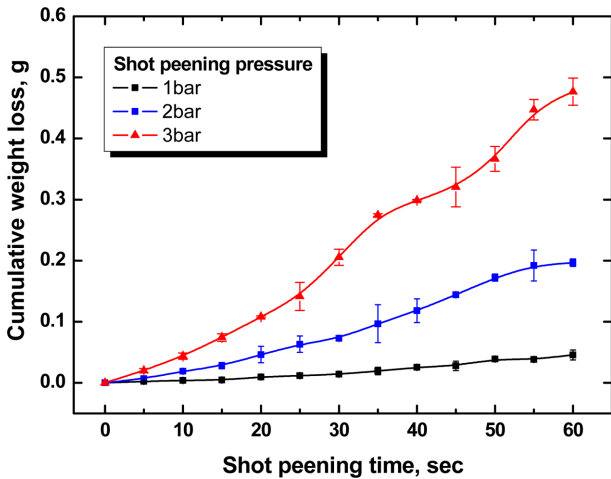


Fig. 2. Cumulative weight loss of the gray cast iron with shot peening time

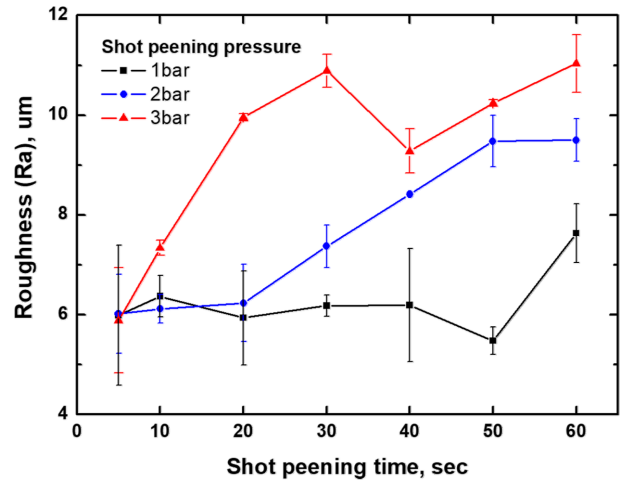


Fig. 3. Surface roughness (R_a) of the gray cast iron with shot peening time

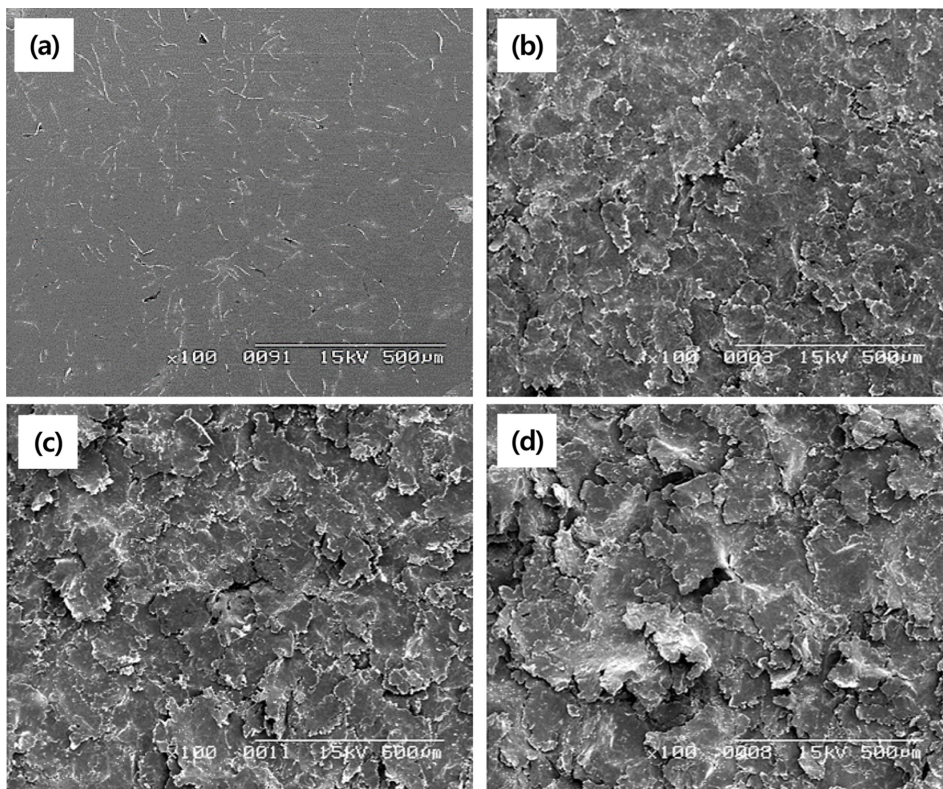


Fig. 4. Surface morphologies of the gray cast iron after shot peening treatment; (a) non-shot peening, (b) shot peening pressure at 1 bar during 5 sec, (c) shot peening pressure at 2 bar during 10 sec, and (d) shot peening pressure at 3 bar during 10 sec

시간 경과에 따른 회주철의 무게 감소량과 표면 거칠기를 각각 나타낸 것이다. 분사압력과 분사시간이 경과함에 따라 회주철의 무게 감소량과 표면 거칠기가 모두 전반적으로 증가하는 경향이 확인되었다. 일반적으로 쇼트피닝 분사압력이 증가할수록 쇼트볼이 표면에 전달하는 운동에너지가 증가하기 때문에 상대적으로 표면 거칠기는 크게 형성되는 반면, 표면개질 층은 두껍게 형성

된다. 본 연구 결과에서도 동일한 경향이 확인되었다. Fig. 3과 4에서와 같이 쇼트피닝 분사압력이 증가함에 따라 쇼트볼의 충돌 에너지도 크게 전달되어 표면이 크게 소성 변형됨으로써 거친 요철이 생성되고 표면 거칠기가 증가하였다. 이러한 요철은 생성 과정에서 구조적 결함을 포함할 뿐만 아니라 표면 거칠기의 증가는 캐비테이션 기포 핵의 발생을 유도할 수 있기 때문에 캐비

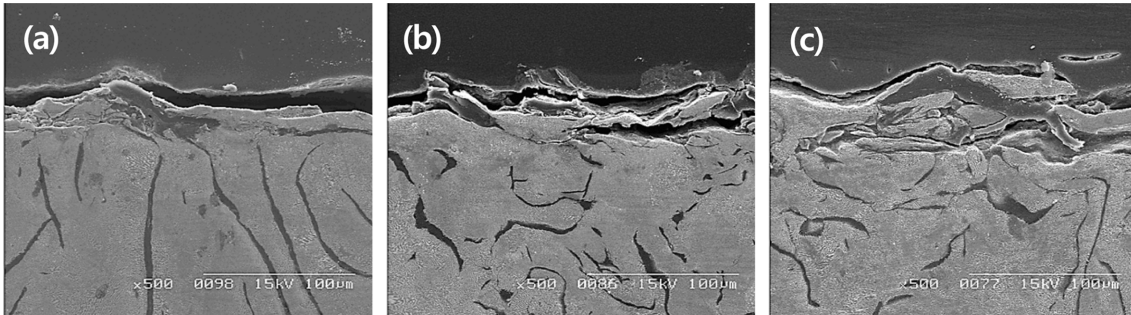


Fig. 5. Cross-sections of the gray cast iron after shot peening treatment; (a) shot peening pressure at 1 bar during 5 sec, (b) shot peening pressure at 2 bar during 10 sec, and (c) shot peening pressure at 3 bar during 10 sec

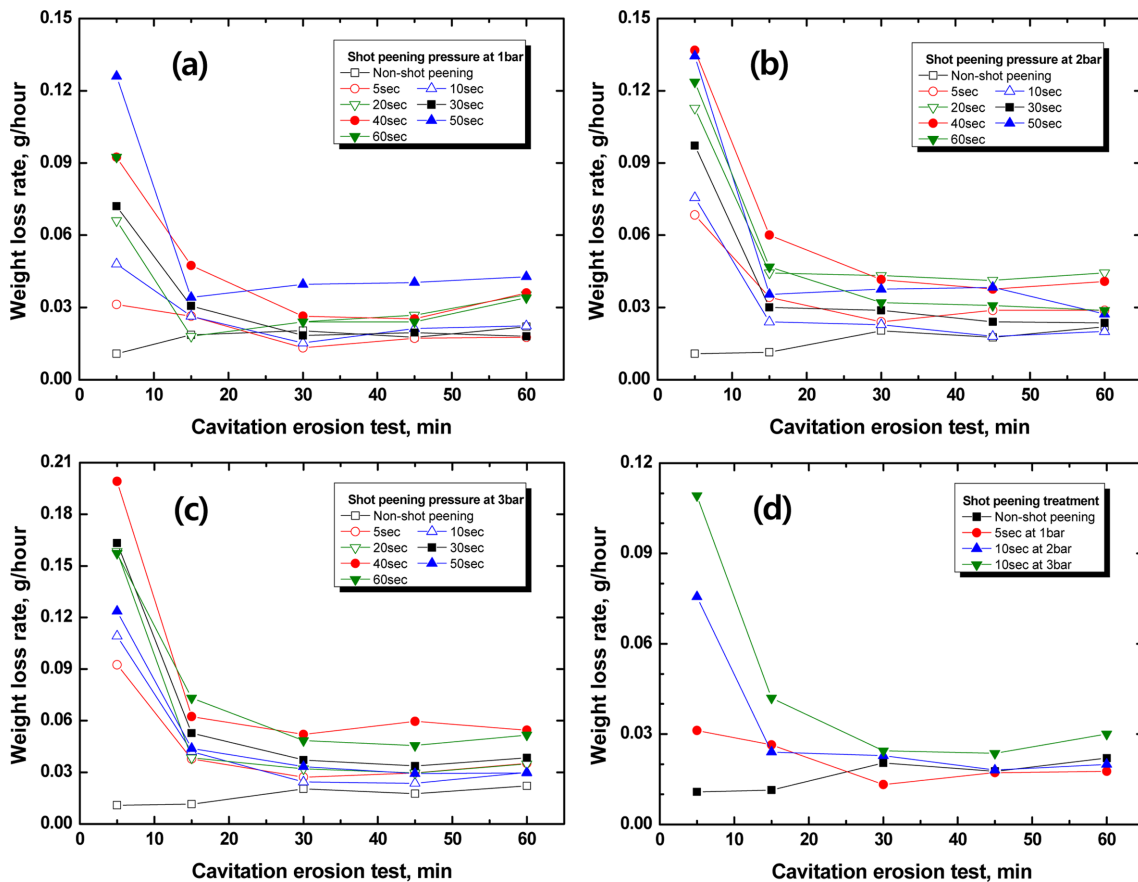


Fig. 6. Weight loss rate the gray cast iron in sea water after cavitation erosion test with shot peening condition; (a) shot peening pressure at 1 bar, (b) shot peening pressure at 2 bar, (c) shot peening pressure at 3 bar, and (d) optimal condition with shot peening pressure

테이션 침식 저항성에 부정적인 영향을 미칠 것으로 여겨진다. 또한 Fig. 5의 횡단면 분석 시 표면개질 층의 두께도 분사압력 증가에 따라 현저히 두꺼워지는 경향이 확인되었다. 일부 기존 연구 결과에 따르면 높은 쇼트피닝 분사압력이 표면의 큰 소성변형을 유도하여 나노(nano) 크기의 표면개질 층을 형성함으로써 가공경화와 결정 미세화의 강화기구에 의해 표면 경도까지 크게 향상시켜 피로강도 개선에 긍정적인 효과를 나타낼 수 있다고 보고하였다 [12,13]. 그러나 본 연구에서 분사압력 3 bar의 경우 분사시간 경과에 따른 무게 감소량이 급격하게 증가하므로 오히려 과도한 모재 손실을 초래할 수도 있다. 따라서 모재 손실을 최소화하면서 캐비테이션 침식 저항성을 개선할 수 있는 최적의 쇼트피닝 공정조건 규명이 필요하다.

3.3 캐비테이션 침식

Fig. 6은 쇼트피닝 처리된 시험편에 대하여 캐비테이션 침식 실험 경과에 따른 무게 감소율을 나타낸 것이며, Fig. 6d는 각 분사압력별 무게 감소율이 가장 작게 나타난 최적 조건들을 비교한 그래프이다. 쇼트피닝을 처리하지 않은 시험편을 제외하고 모든 조건에서 캐비

테이션 실험 초기 가장 큰 무게 감소율이 확인되었다. 이는 앞선 Fig. 4에서와 같이 쇼트피닝 처리에 따른 거친 표면 거칠기와 밀접한 관계를 가지는 것으로 거칠게 형성된 요철 부분이 우선적으로 용이하게 제거되었기 때문이다. 그에 따라 캐비테이션 침식 실험 후 시험편 표면은 Fig. 7과 같이 쇼트피닝에 의해 형성된 요철이 모두 제거되고 이후에 생성된 캐비테이션 침식 손상 형상만 관찰되었다. 한편, Fig. 6d에서 캐비테이션 침식 실험시간 경과에 따른 무게 감소율은 쇼트피닝 분사압력이 커질수록 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 분사압력 1 bar 조건만이 쇼트피닝 처리하지 않은 시험편에 비해 우수한 캐비테이션 침식 저항성을 나타냈다. 이는 분사압력이 클수록 높은 경도, 우수한 피로강도 및 두꺼운 표면개질 층을 형성할 수 있다는 기존 연구 결과 상반된 경향으로 판단된다. 실제로 Fig. 8에서와 같이 캐비테이션 침식 실험 후 횡단면 분석 결과 쇼트피닝 분사압력 1 bar의 경우가 상대적으로 표면 손상이 작게 나타났다. 이는 Fig. 5에서 쇼트피닝에 의해 생성된 표면개질 층의 횡단면을 관찰해보면 쇼트피닝 분사압력이 증가함에 따라 표면개질 층의 두께는 두껍게 생성되었으나 기존 문헌들에서 보고되었던 결정 미세화는 관찰

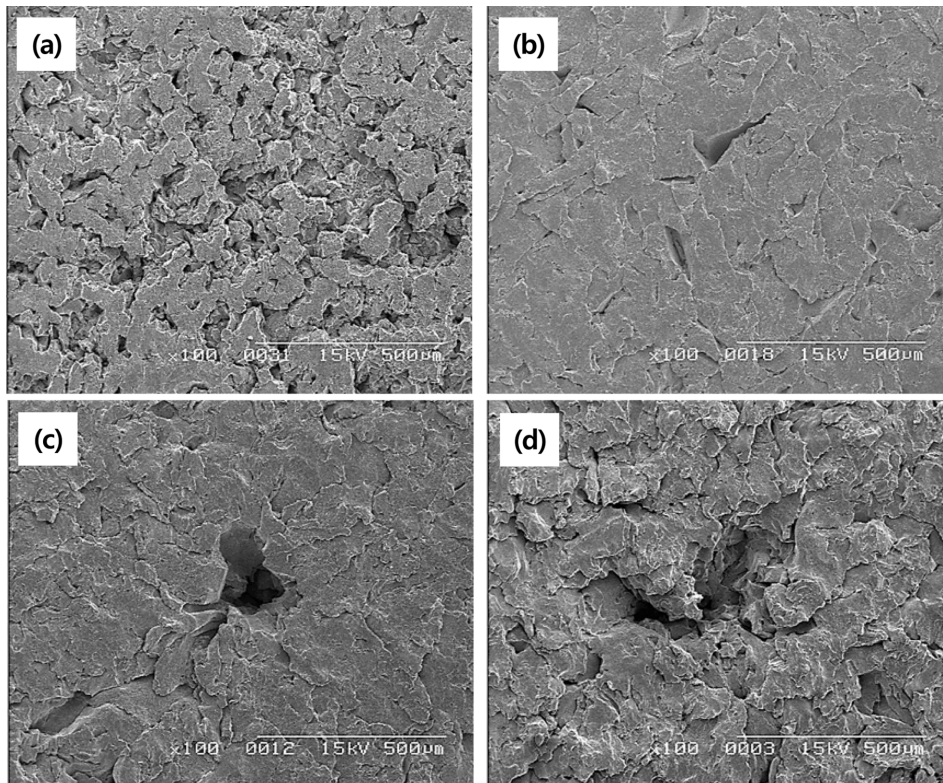


Fig. 7. Surface morphologies of the gray cast iron after cavitation erosion test during 60 min; (a) non-shot peening, (b) shot peening pressure at 1 bar during 5 sec, (c) shot peening pressure at 2 bar during 10 sec, and (d) shot peening pressure at 3 bar during 10 sec

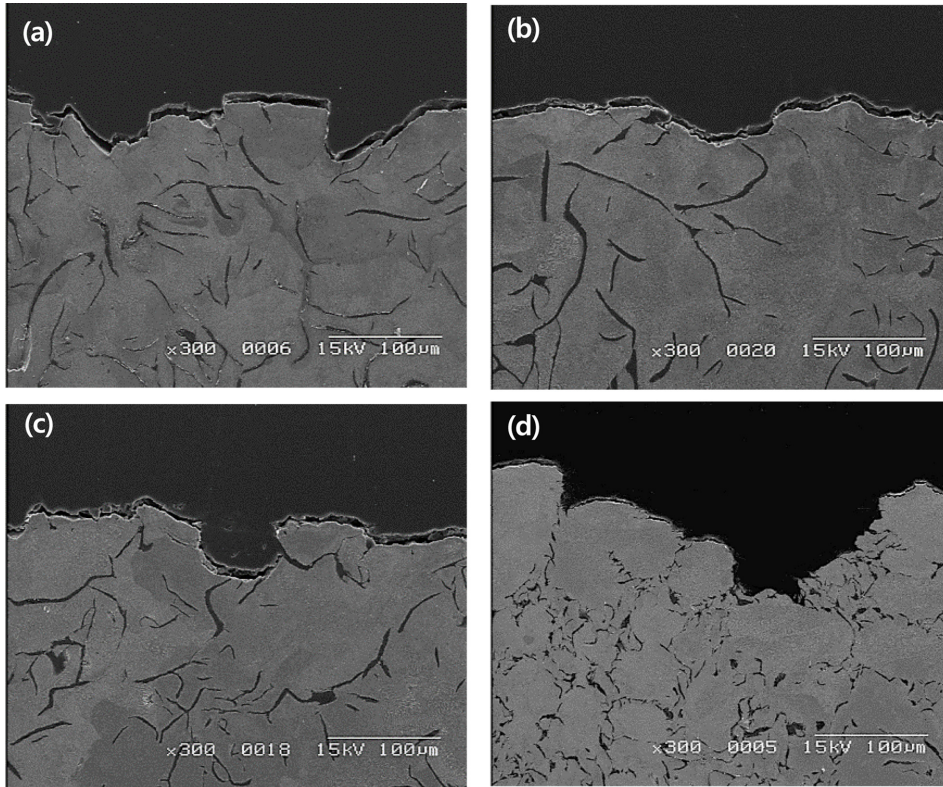


Fig. 8. Cross-sections of the gray cast iron after cavitation erosion test; (a) non-shot peening, (b) shot peening pressure at 1 bar during 5 sec, (c) shot peening pressure at 2 bar during 10 sec, and (d) shot peening pressure at 3 bar during 10 sec

되지 않았다. 게다가 생성된 표면개질 층은 회주철의 기지조직과 편상 흑연이 수평방향으로 재배열되어 적층되었으나 치밀하지 못하고 오히려 틈과 같은 결함이 존재하여 결합력을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 캐비테이션 침식 저항성이 열악하게 나타난 것으로 판단된다.

3.4 캐비테이션 침식 메카니즘

쇼트피닝 처리 여부에 따른 회주철의 캐비테이션 침식 저항성을 명확하게 규명하기 위해 쇼트피닝을 처리하지 않은 모재와 최적의 쇼트피닝 조건의 시험편에 대하여 캐비테이션 침식 손상 메카니즘을 고찰하였다. 먼저 Fig. 9는 쇼트피닝을 처리하지 않은 모재에 대하여 캐비테이션 침식 실험시간 경과에 따른 표면 손상을 관찰한 것이다. 캐비테이션 침식 실험 전 모재는 표면에 노출된 편상 흑연이 부분적으로 관찰되었으며(Fig. 9a), 실험시간이 경과함에 따라 캐비테이션 공격에 의해 노출된 편상 흑연이 부분적으로 제거되고 동시에 편상 흑연 끝단에서는 크랙(crack) 손상이 개시 및 진전되는 양상을 보였다(Fig. 9b-c). 이후 노출된 편상 흑연은 완전히 제거되어 V자형 홈(groove)을 형성하였으며, 크랙 손상은 더욱 성장하여 가까운 거리에 이웃한 크랙들과 연

결되는 양상이 확인되었다. 여기에서 V자형 홈은 응력이 집중되는 노치(notch)로 작용하여 캐비테이션 침식 손상을 가속화시키는 주요 요인 중 하나이며, 그 결과 Fig. 7a와 같이 표면 전반에 걸친 캐비테이션 침식 손상이 관찰되었다. 한편 Fig. 10에서와 같이 쇼트피닝 처리된 시험편의 캐비테이션 침식 실험 후 횡단면을 분석한 결과, 표면 직하부에 편상 흑연이 위치한 경우 캐비테이션 충격과의 영향으로 편상 흑연 끝단에서 표면 상부 방향으로 크랙 손상이 개시 및 성장하여 표면 손상을 유발하는 것으로 판단된다(Fig. 10a). 더불어 모재에 내부에 위치한 편상 흑연 역시 장기간 지속된 캐비테이션 충격과의 영향으로 그 끝단에서 크랙이 개시된 후 성장하여 이웃한 편상 흑연과 연결되어 별크 형태의 큰 침식 손상을 유발하는 것으로 판단된다(Fig. 10b-c). 한편 편상 흑연의 영향을 받지 않는 기지조직 부분에서는 캐비테이션 기포의 붕괴 충격압과 마이크로 제트 공격에 의해 크랙 손상이 발생하여 진전되는 양상이 관찰되었다(Fig. 10d). 결과적으로 회주철의 캐비테이션 침식 저항성은 표면에 노출되거나 표면 직하부에 위치한 편상 흑연의 분포에 따라 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 마지막으로 Fig. 11은 쇼트피닝 전후 표면 직하부에 위치한 편상 흑연을 관찰한 사진이다. 이는 쇼트피닝 처

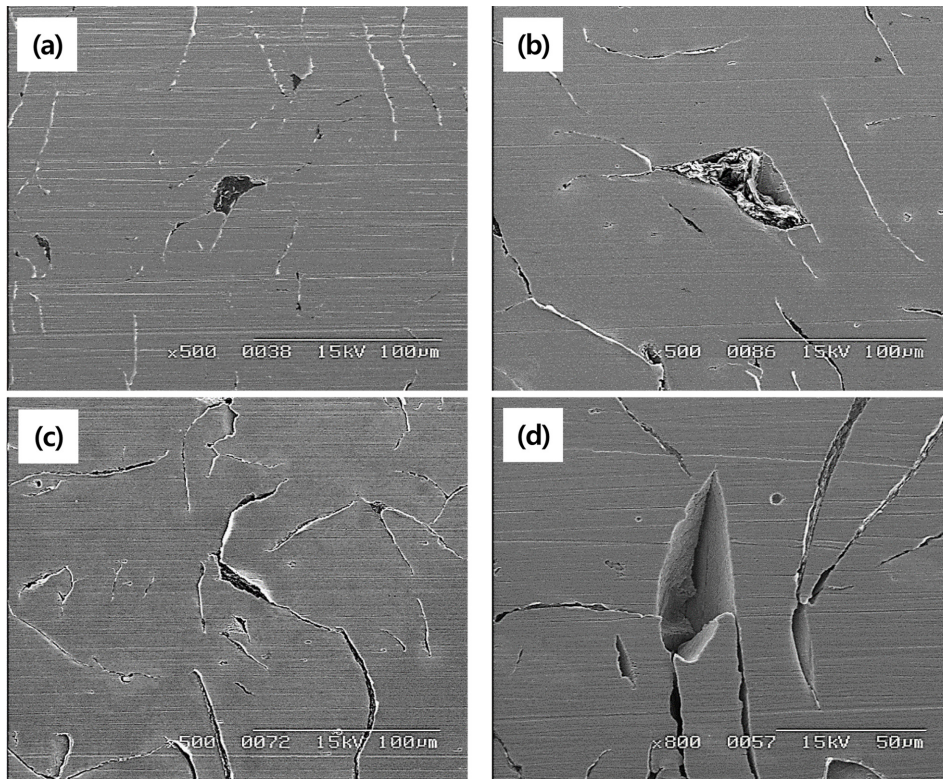


Fig. 9. Cavitation erosion mechanism on the surface of the gray cast iron; (a) as-received, (b) cavitation erosion test during 5 sec, (c) cavitation erosion test during 1 min, and (d) cavitation erosion test during 3 min

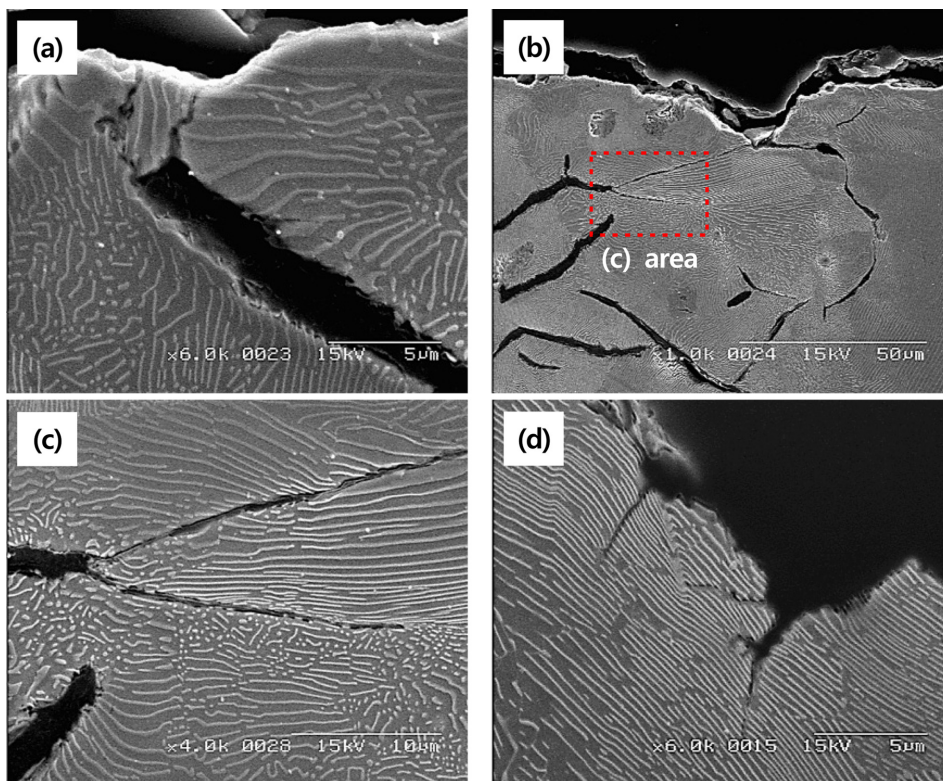


Fig. 10. Cross-sections of the shot peened gray cast iron at pressure 1bar during 10 sec after cavitation erosion test during 60 min; (a) below the surface, (b)-(c) crack growth, and (d) damage to the matrix

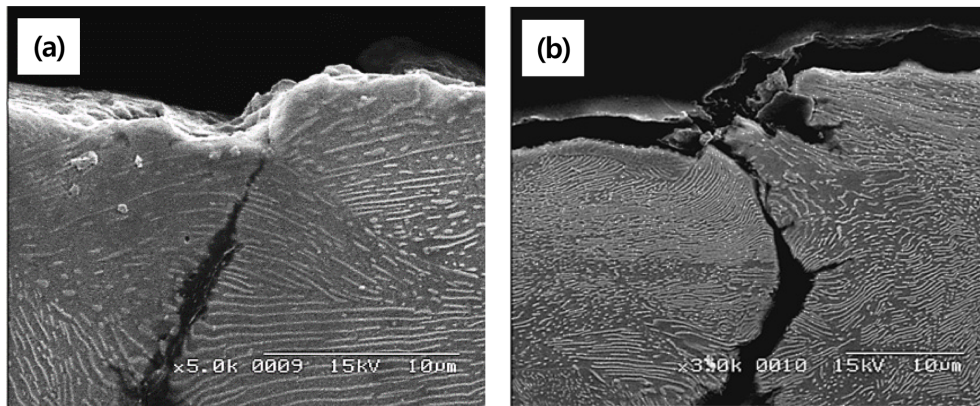


Fig. 11. Cross-sections of the gray cast iron; (a) non-shot peening and (b) shot peening pressure at 3 bar during 10 sec

리 공정 시 과도한 분사압력은 캐비테이션 침식 손상과 동일하게 편상 흑연 끝단의 크랙 손상을 유발할 수 있음을 의미한다. 종합적으로 캐비테이션 침식 메카니즘은 회주철의 미세조직에 영향을 크게 받으며, 특히 편상 흑연의 분포에 따라 침식 손상 경향이 결정된다. 캐비테이션 침식 공격 시 회주철 표면에 노출된 편상 흑연은 우선적으로 제거되며, 이후 발생한 크랙 손상은 표면 직하부에 위치한 편상 흑연에서 개시되어 성장된 크랙과 연결되어 결국 벌크 형태의 큰 침식 손상을 유발하여 손상 속도를 가속화하는 것으로 판단된다. 한편 쇼트피닝 처리된 시험편은 쇼트피닝 공정 조건이 적합하지 않은 경우 표면개질 층의 결합력 저하 및 표면 직하부에 위치한 편상 흑연의 크랙 형성 유발로 인해 오히려 모재 대비 큰 침식 손상이 발생하는 것으로 판단된다. 반면, 본 연구에서 규명된 최적의 쇼트피닝 공정 조건은 실험 변수 중 분사압력(1 bar)과 분사시간(5초)이 가장 작은 조건으로, 표면개질 층 형성에 의한 내구성 향상 효과 보다는 표면에 노출된 편상 흑연을 제거하고 표면을 평탄화함으로써 캐비테이션 침식 공격 시 응력이 집중되는 노치효과를 방지하여 모재 대비 캐비테이션 침식 저항성이 향상된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 천연 해수 내 회주철의 캐비테이션 침식 저항성을 개선하기 위해 다양한 공정조건으로 쇼트피닝 적용 후 캐비테이션 침식 실험을 통해 내구성 평가 및 침식 손상 메카니즘을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회주철의 캐비테이션 침식 손상을 최소화하는 쇼트피닝 공정조건은 분사압력과 분사시간이 가장 작은 조건으로 확인되었으며, 이는 쇼트피닝의 표면개질 효

과보다 표면에 노출된 편상 흑연의 효과적인 제거에 기인한다.

2. 부적절한 쇼트피닝 분사압력과 분사시간은 내부 결합을 포함하는 표면개질 층의 형성과 표면 직하부에 위치한 편상 흑연의 크랙 손상을 유발 및 성장시켜 캐비테이션 침식 손상을 가속화하는 요인으로 작용하였다.

3. 캐비테이션 기포 붕괴 시 회주철 표면에 노출된 편상 흑연은 용이하게 제거되어 응력 집중을 유도하는 V자형 홈(groove)을 생성하였으며, 동시에 표면과 표면 직하부에 위치한 편상 흑연의 끝단에서는 크랙이 생성 및 성장하여 이웃한 크랙들과 연결되어 벌크 형태의 큰 표면 손상을 유발하였다.

감사의 글

본 논문은 2020년도 목포해양대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구결과임.

References

1. T. Okada and Y. Iwai, Cavitation Erosion, *JSME International Journal. Ser. 1, Solid Mechanics, Strength of Materials*, **33**, 128 (1990). Doi: https://doi.org/10.1299/jsmea1988.33.2_128
2. F. G. Hammitt, *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, McGraw-Hill Book Company (1980).
3. S. P. Gadag and M. N. Srinivasan, Cavitation Erosion of Laser-Melted Ductile Iron, *Journal of Materials Processing Technology*, **51**, 150 (1995). Doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01601-V](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01601-V)
4. M. S. Han, S. K. Jang, J. S. Kim, and S. J. Kim, Evaluation on Cavitation Damage in Sea Water with Shot

- Peening Stand-Off Distance for ALBC3 Alloy, *Corrosion Science and Technology*, **12**, 239 (2013). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2013.12.5.239>
5. M. S. Han, K. Y. Hyun, and S. J. Kim, Effects of Shot Peening Stand-Off Distance on Electrochemical Properties for Surface Modification of ALBC3 Alloy, *Corrosion Science and Technology*, **12**, 233 (2013). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2013.12.5.233>
 6. S. Bagherifard, I. Fernandez-Pariente, R. Ghelichi, and M. Guagliano, Effect of Severe Shot Peening on Microstructure and Fatigue Strength of Cast Iron, *International Journal of Fatigue*, **65**, 64 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.022>
 7. Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, and T. Sekino, Effect of Shot-Peening Treatment on High Cycle Fatigue Property of Ductile Cast Iron, *International Journal of Fatigue*, **23**, 441 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00110-9)
 8. A. Zammit, M. Mhaede, M. Grech, S. Abela, and L. Wagner, Influence of Shot Peening on the Fatigue Life of Cu–Ni Austempered Ductile Iron, *Materials Science and Engineering: A*, **545**, 78 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.092>
 9. 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>
 10. K. P. Balan, A. V. Reddy, V. Joshi, and G. Sundararajan, The Influence of Microstructure on the Erosion Behaviour of Cast Irons, *Wear*, **145**, 283 (1991). Doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90136-I](https://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90136-I)
 11. C. T. Kwok, F. T. Cheng, and H. C. Man, Synergistic Effect of Cavitation Erosion and Corrosion of Various Engineering Alloys in 3.5% NaCl Solution, *Materials Science and Engineering: A*, **290**, 145 (2000). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00899-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00899-6)
 12. A. Belyakov, T. Sakai, H. Miura, and K. Tsuzaki, Grain Refinement in Copper under Large Strain Deformation, *Philosophical Magazine A*, **81**, 2629 (2001). Doi: <https://doi.org/10.1080/01418610108216659>
 13. M. Sato, N. Tsuji, Y. Minamino, and Y. Koizumi, Formation of Nanocrystalline Surface Layers in Various Metallic Materials by Near Surface Severe Plastic Deformation, *Science and Technology of Advanced Materials*, **5**, 145 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.015>