

부동액에 따른 회주철 라이너의 캐비테이션 부식에 대한 연구

김병호*, 김병현*[#], 구영호** 서재현*

*국방기술품질원 기동화력센터, **한화지상방산(주)

A Study on the Cavitation Corrosion of Gray Cast Iron Liner by Antifreeze

Byeong-Ho Kim*, Byung-Hyun Kim*[#], Young-Ho Koo**, Jae-Hyun Seo*

*Defence Agency for Technology and Quality Land Systems Center, **Hanhwa Land Systems Co., Ltd.

(Received 27 March 2017; received in revised form 28 May 2017; accepted 10 July 2017)

ABSTRACT

The cylinder liner of a diesel engine is commonly made of gray cast iron. However, this cylinder liner can be damaged by the cavitation phenomenon in wet conditions. This cavitation has remained an unsolved problem until now. In this study, the cause of cavitation corrosion due to antifreeze solution was examined using a scanning electron microscope (SEM) and a 3D microscope. The necessary data to prevent the damage caused by cavitation erosion and the corrosion of gray cast iron cylinder liner was obtained. Analysis determined that the gray iron structure consists of an α -matrix, flake graphite, and steadite. Cavitation erosion was initiated in the coarse flake graphite and propagated into the steadite with pitting. Under repetitive reaction conditions, the α -matrix was partially separated from the gray cast iron. This study is expected to be used as the basic data for the prevention of gray cast iron cavitation erosion and corrosion by controlling the graphite and steadite phases.

Key Words : Cavitation(캐비테이션), Antifreeze(부동액), Gray Cast Iron(회주철), Pitting Corrosion(공식)

1. 서 론

주철은 광범위하게 다양한 성질을 가진 철합금의 일종으로 2wt% 미만을 함유하는 강과는 달리, 보통 약 2~4wt% C와 2~3wt% Si의 조성을 갖는 합금이다. 또한, 주철은 현미경조직에서 탄소의 분포상태에 따라서 기본적으로 4종류로 분류된다. 그 중에서 회주철은 철 중의 탄소가 응고 도중 흑연화되어

편상 상태의 분포 조직을 가지며, 주철 중에서도 우수한 내마멸성과 절삭성 및 진동감쇠능을 가지고 있다. 따라서 회주철은 내 마멸성이 요구되는 기어 및 실린더 라이너와 같은 기계부품으로 널리 사용되는데, 이 내마멸성은 주로 기지조직과 흑연조직 및 공정세포조직에 의존한다.

케도장비에 적용되는 디젤 엔진의 실린더 라이너는 내 마멸성이 우수한 회주철로 제작되고 있다. 그러나 일반 자동차와는 다르게 케도장비의 엔진은 점점 고출력 및 고속화되고 있으며, 이들이 사용되어지는 환경은 더 가혹한 운전 환경에 놓여있다. 이에 따라 회주철은 습식환경 하에서 일명 ‘실린더

Corresponding Author : tkdkim16@dtqa.re.kr

Tel: +82-55-279-4035, Fax: +82-55-279-4780

라이너 캐비테이션'으로 알려진 손상유형은 심각한 디젤엔진 손상을 야기하며 지금까지 미해결의 문제점으로 남아있다.

캐비테이션 현상은 유체의 흐름이 있을 때 정압이 그 유체의 포화 수증기압 이하로 감소할 때 기포가 발생하며, 형성된 기포가 붕괴되면서 금속표면을 손상시키는 현상이다. 특히, 고출력 디젤엔진에서 폭발 압력에 의해 피스톤이 하강할 때 피스톤 충격에 의해 라이너 측면부에 작용하는 Piston slap이 발생하거나 피스톤과 라이너 사이의 간극 및 라이너와 실린더 블록의 간극에 의해 피스톤 라이너가 충격을 받아 라이너 캐비테이션 현상이 발생한다고 보고되고 있다¹⁻⁵.

한편, 이러한 캐비테이션 침식 및 부식에 의한 라이너 손상으로 디젤엔진의 성능 및 수명에 치명적인 영향을 미치고 있으므로 캐비테이션 침식손상 방지대책이 요구되고 있다. 라이너 캐비테이션 방지를 위해서는 니켈 및 크롬도금과 같은 표면처리 방법과 부동액 및 첨가제를 이용하여 방지하는 방법 등이 일부 연구되고 있으나 미미하며, 회주철 실린더 라이너의 캐비테이션 부식에 대한 원인 규명 및 방지에 대한 보고는 전무한 실정이다.

그래서 본 논문에서는 회주철 실린더 라이너의 캐비테이션 침식에 의한 손상현상을 규명하기 위해 시험편을 시험액 중에서 상하로 고주파진동을 시켜 캐비테이션을 발생시키는 가속캐비테이션 침식법(ASTM G32)을 이용하여 부동액에 따른 캐비테이션 부식에 대한 원인을 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)과 3D 분석 현미경을 이용하여 규명하고자 한다.

2. 캐비테이션 이론

2.1 캐비테이션 현상

캐비테이션 현상은 고속으로 운동하는 기기 표면 주위의 압력이 증기압 이하로 저하하면 액체가 수증기로 바뀌는 현상으로, 기계장치의 부재에는 유체 충격과 정압 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 캐비테이션 침식이 발생할 수 있으며, 또한 액체 중에서 기계 구조물에 고주파 진동이 발생하면 그

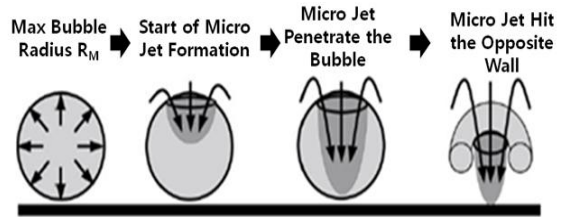


Fig. 1 A schematic design of cavitation

진폭이 작아도 극심한 캐비테이션 침식을 유발할 수 있다. 이러한 진동 캐비테이션은 액체 내에서 물체가 빠른 속도로 진동할 때 진동하는 물체와 액체 사이의 경계면에 유체의 관성 때문에 간극이 생기고 여기서 정압 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 발생한다. 이 때 발생한 기포는 저압(발생부)에서 고압(소실부)으로 이동하여 반복적인 생성과 소멸 과정을 일으킨다⁶⁻⁷. Fig. 1은 실린더 라이너 벽면에서 발생하는 캐비테이션 모식도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 기포의 반경(R)의 성장이 최대(\$R_M\$)로 되었을 때 기포 주위에서 생성된 마이크로 제트가 기포를 관통하게 되어, 최종적으로 기포의 비대칭 붕괴(micro-jet collapse)로 실린더 벽면과 충돌하여 라이너의 침식 및 부식이 발생하게 된다.

2.2 베르누이 방정식

일반적으로 캐비테이션 현상을 표현하는 가장 기본적인 수식은 무차원 형태의 캐비테이션 수(cavitation number)이다. 캐비테이션 수는 아래의 식(1)과 같이 기본적으로 유체흐름(flow fluids)을 정의하는 베르누이 방정식을 근간으로 하고 있다.

$$p_d = p_{tot} - p_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

베르누이 방정식은 흐르는 유체의 어느 지점에서 동압(dynamic pressure)이 증가하는 동안 정압(static pressure)이 감소한다는 것을 포함하고 있다. 이론적으로 캐비테이션의 발생은 유체의 흐름이 있을 때 정압이 그 유체의 포화 수증기압(vapor pressure) 이하로 감소할 때 가능하다. 따라서 캐비테이션 현상을 표현하기 위한 산술식은 기본적으로 유체 흐름의 동압에 의해 나누어지는 정압과 포화수증기압의 차이에 의해 아래 식(2)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{p_{st} - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (2)$$

σ = cavitation number
 p_{st} = static pressure
 p_v = vapor pressure
 ρ = density of the fluid
 v = velocity of the fluid

결과적으로 상기 캐비테이션 수(σ)의 값이 음(-)의 값을 갖는다면 캐비테이션 현상이 발생하게 된다. 즉, 특정한 값을 가질 때 캐비테이션은 발생하지 않는다. 이론적으로 냉각수 유로의 형상에 따른 유체의 질량보존 법칙에 따라 각 구간에서의 속도가 다르며, 베르누이 방정식에 따라서 속도가 높은 구간에서는 상대적으로 압력이 낮아지게 된다. 그래서 본 실험에서는 “일정 압력 이하로 떨어질 경우 캐비테이션이 발생한다.”라는 가정 하에 실험을 진행 하였다.

3. 실험방법

본 연구에서는 부동액에 따른 회주철 라이너 캐비테이션 침식 부식 현상을 관찰하기 위해 가속화 캐비테이션 침식 실험을 실시하였다. Fig. 2에서는 캐비테이션 가속화 실험에 대한 모식도를 나타내고 있다. 캐비테이션 실험장비는 수정된 ASTM G32-10 규정에 의거하여 압전효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였다. 실험장비의 작동원리는 60Hz, 220V의 전력을 전자회로를 거쳐 20kHz의 정격 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 진폭은 일정하게 정진폭 자동제어 방식으로 50 μ m를 유지한다. 실험은 부동액 국내산 A, 수입산 B를 사용하여 각 2회 실시 하였고, 부동액 온도는 자동 온도 제어기에 의해 일정하게 유지하였다. 이 때, 온도조건은 캐비테이션 발생이 가속화 되는 동계 무부하 조건과 유사한 25 \pm 1 $^{\circ}$ C으로 설정하였다. 시험편은 진동자의 혼에 대향하도록 거치대에 고정하여 혼으로부터 발생한 캐비티가 시험편에 영향을 받도록 하는 이른바 ‘stationary specimen method’를 이용하였다.

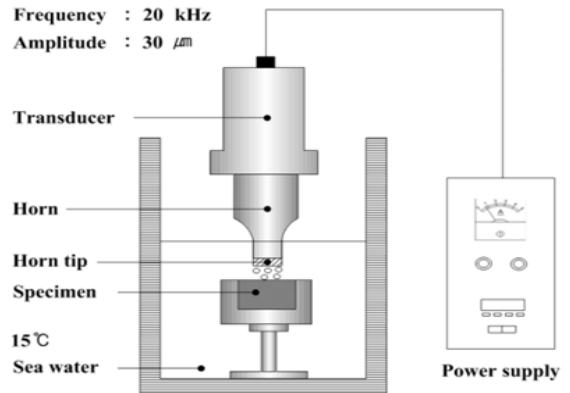


Fig. 2 A schematic design for cavitation accelerated life test equipment

그리고 혼팁과 시험편 간의 거리는 1mm로 일정하게 유지하였다. 부동액에 따른 캐비테이션 실험 후에는 부식거동을 평가하기 위해 실험시간에 따른 표면 손상 관찰 및 무게 감소량을 분석하였다. 그리고 표면 손상을 비교분석하기 위해 주사전자현미경(SEM)과 3D 분석 현미경을 이용하여 표면을 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 회주철 라이너 광학현미경 사진을 보여 주고 있다. 그림에서 보듯이 모재는 α -Fe상과 검은

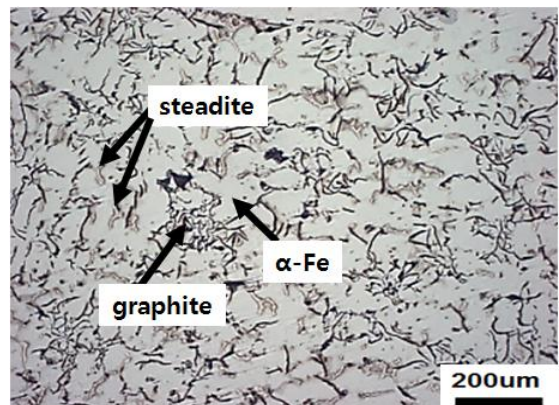


Fig. 3 A picture of gray cast iron by using an optical microscope

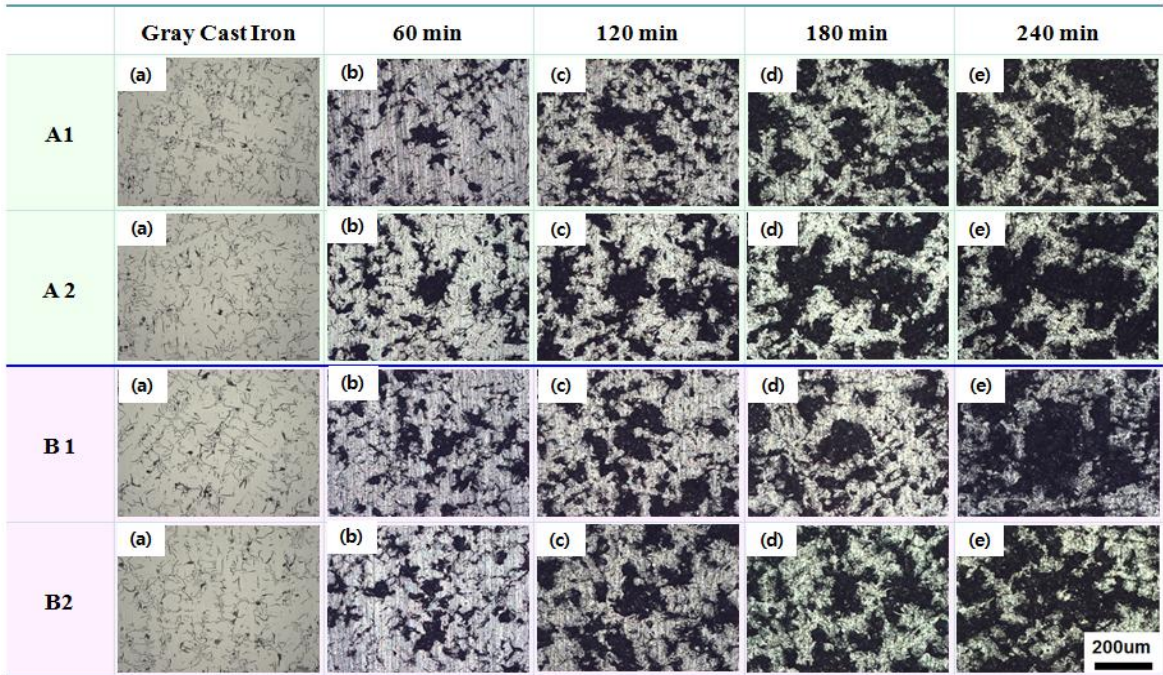


Fig. 4 Cavitation corrosion according to test time taken with optical microscope

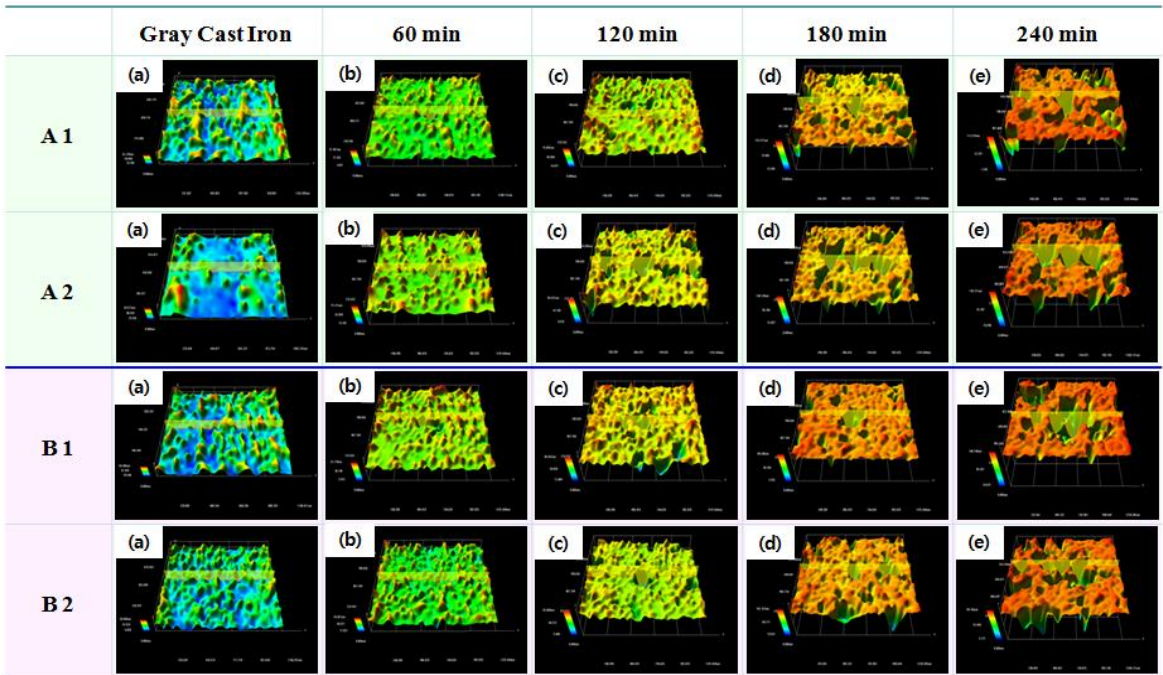


Fig. 5 Cavitation corrosion according to test time taken with 3D micro scope

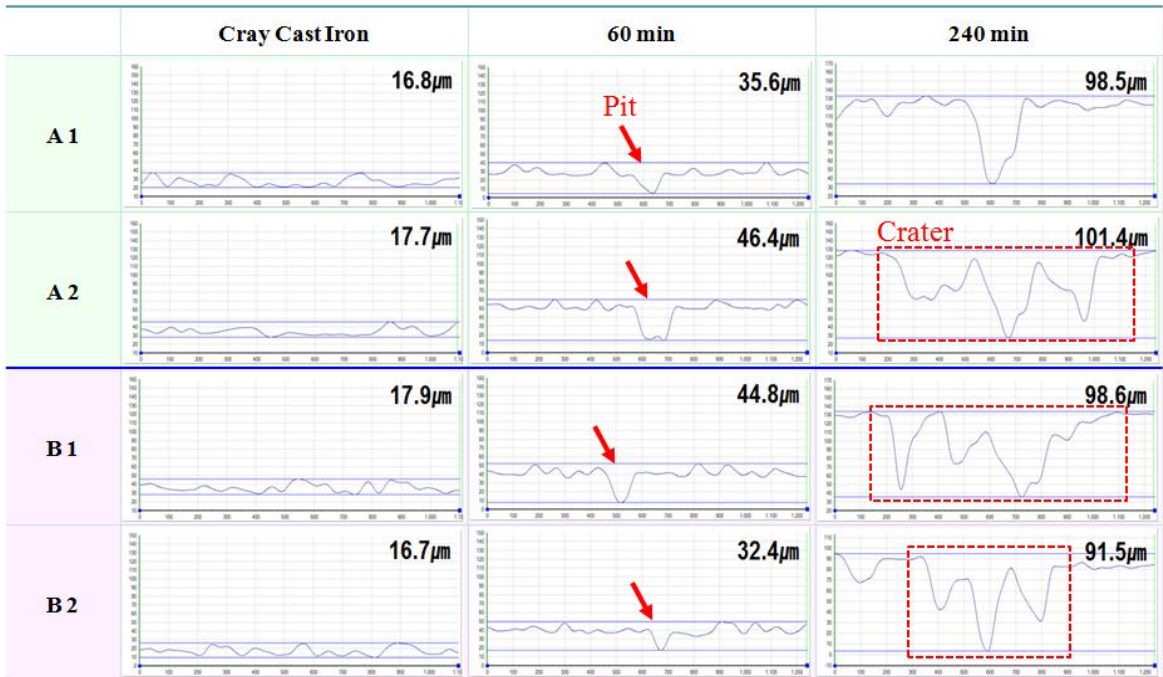


Fig. 6 Depth of corrosion damage according to test time

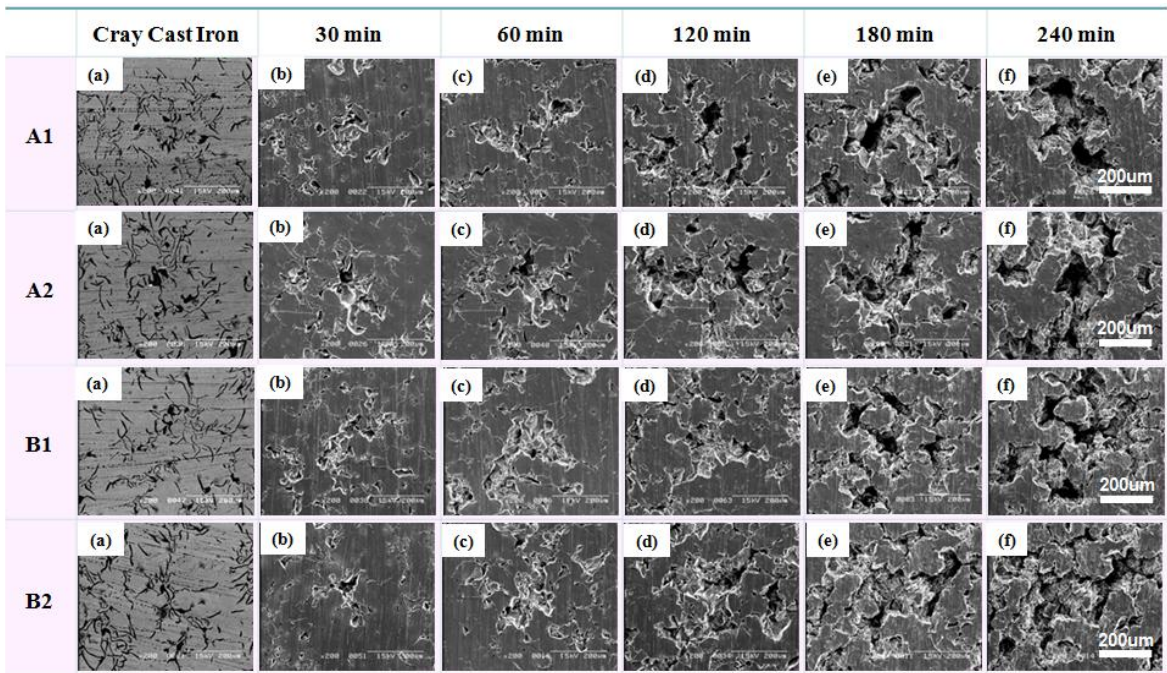


Fig. 7 Cavitation corrosion according to test time taken with SEM

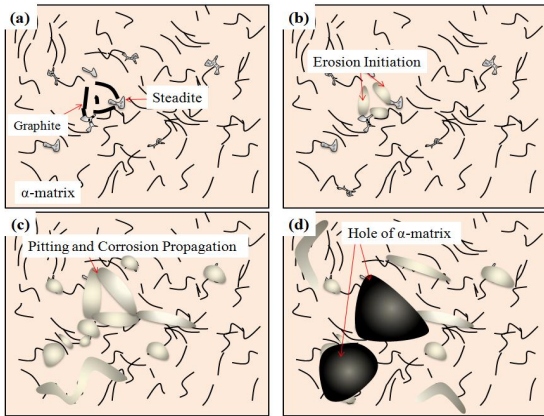


Fig. 8 Cavitation erosion pattern and corrosion pattern diagram of gray cast iron cylinder liners

막대상의 흑연(graphite) 그리고 응고셀 경계부에 비평형 응고상인 스테다이트(steadite)로 구성되어 있다. 여기서 스테다이트 조직은 P의 함유로 형성된 Fe_3P 의 3원 공정($Fe-Fe_3C-Fe_3P$)으로서 정출된 조직이다. 그리고 Fig. 4는 시간에 따른 캐비테이션 부식 양상을 광학현미경으로 촬영한 조직사진이다. 60분, 120분, 180분, 240분 시간이 경과함에 따라 캐비테이션 부식이 진행되었고, 그림에서 나타나듯이 주로 흑연상을 따라 부식이 진행되었다. 240분이 되었을 때는 흑연상은 대부분 부식 되었지만 $\alpha-Fe$ 상은 잔존하고 있는 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 5는 시간에 따른 캐비테이션 부식 양상을 3D 현미경으로 촬영한 사진이다. 사진에서 보듯이 60min 후 회주철 시편의 표면의 거칠기가 증가하는 양상을 보이고 있으며, 부동액에 따라 표면 거칠기 변화 양상은 비슷한 거동을 보이고 있다. 180min에서 240min 사이에는 공식(pitting corrosion)으로 생긴 손상부위가 crater로 급격하게 성장하는 것을 관찰 할 수 있다. Fig. 6은 3D 현미경으로 촬영한 캐비테이션 손상 부위를 탐침으로 프로파일링하여 손상 깊이를 측정 한 사진이다. 시험전의 시편의 표면 거칠기는 $16.7\mu m \sim 17.9\mu m$ 로 측정되었다. 그리고 60min 후에는 캐비테이션 침식으로 공식이 발생 하였으며 이때 부동액 A로 실험한 시험편의 손상 깊이는 $35.6 \sim 46.4\mu m$ 이었고 부동액 B로 실험한 시험편의 손상 깊이는 $32.4 \sim 44.8\mu m$ 로 측정되었

다. 240min 후는 손상면적 및 손상깊이가 증가하는 crater 손상이 발생되었고 이 때 손상깊이는 부동액 A는 $98.5 \sim 101.4\mu m$ 이고, 부동액 B는 $91.5 \sim 98.6\mu m$ 로 측정 되었다. 즉, 부동액 A와 B에 대한 손상깊이 비교 해보면 부동액 A와 B는 오차범위 내에서 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 7에서는 시간에 따른 캐비테이션 침식에 대한 SEM 사진을 나타내고 있다. 부동액 A와 B에서 모두 처음에는 캐비테이션 침식에 의해 기지에 분포하고 있는 편상의 graphite 상이 소멸되고 순차적으로 최종 응고부에 분포하고 있는 스테다이트가 부식되어 떨어져 나가게 된다. 그 후 시간이 증가함에 따라 공식으로 인해 α -기지가 급격하게 부식되었다. 해수에서의 캐비테이션 침식 및 부식반응에서는 깊이 방향으로 공식이 진전되면서 손상깊이가 증가하고 주변부가 평탄화 되고 다시 생성된 공식에 손상깊이가 증가하는 양상을 나타내는 보고가 있다^[8]. 그러나 본 실험에서는 캐비테이션 가속화에 대한 실험으로 공식 후 주변부 평탄화 없이 깊이 방향으로 침식 및 부식이 발생하게 되고, 결국 실린더 라이너에 미세한 hole을 조래 하는 것으로 판단된다. 또한, 타 연구 결과에서도 캐비테이션 손상은 일반적으로 가장 취약한 부분인 기지상과 단단한 석출물간의 경계에서 먼저 크랙이 발생하여 손상이 시작된다고 알려져 있다^[9]. Fig. 8은 본 실험결과를 정리한 회주철 캐비테이션 침식 및 부식에 대한 메커니즘을 도식화 한 그림이다. 습식 환경에서 회주철 실린더 라이너는 60Hz의 고속 상하 왕복운동에서 국부적인 micro jet이 발생하고 라이너 벽에 캐비테이션이 발생한다. 이때, 초기에는 캐비테이션 침식에 의해 기지에 불규칙적으로 분포된 기지상과 인접한 편상의 graphite가 마멸되고, 침식작용과 더불어 전해질(electrolyte) 내의 전기화학적 반응으로 인해 부식이 반복적으로 발생한다. 그 후에는 공식 발생과 더불어 편상 graphite 근방의 삼원계 상인 스테다이트가 부식된다. 최종적으로 이러한 반복적인 침식 및 부식발생 부위가 network를 형성하게 되어 α -기지가 자연스럽게 이탈 된다. 결국 이러한 과정으로 캐비테이션 침식 및 부식에 의해 회주철 실린더 라이너에 천공이 발생하게 되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

부동액에 따른 회주철 라이너의 캐비테이션 침식 및 부식 연구를 통해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피스톤 고속 상하 왕복운동에 의해 발생된 micro jet은 회주철 라이너 벽에 캐비테이션 침식을 유발하여, 반복되는 침식과 전기화학적 부식반응으로 실린더 라이너에 천공이 발생한다.
2. 조직사진 분석결과 회주철 라이너 캐비테이션 침식은 α -기지와 근접한 편상형태의 조대한 graphite에서부터 시작 되었고 순차적으로 삼원 계상인 스테다이트 및 기지조직이 부식되어 소멸되었다.
3. 회주철 캐비테이션 침식 및 부식 특성은 A, B 부동액에 관계없이 공식 발생 후 깊이 방향으로 급격하게 균열이 발생하여 crater가 생성되는 유사한 결과를 나타냈다.

향 후 회주철의 실린더 라이더 캐비테이션 침식 및 부식 방지를 위한 연구로는 편상 흑연 및 최종 응고부의 스테다이트 상 제어를 통한 초기 캐비테이션 침식량 감소 등의 조직제어의 연구가 진행되어야 할 것이며, 이 연구는 향 후 회주철 캐비테이션 침식 및 부식방지 연구의 기초자료로 쓰일 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 한화지상방산(주)의 지원을 받아 작성 하였습니다. 청렴은 선택이 아니라 필수입니다.”

REFERENCES

1. Kim, D. J., "An Experimental Study for The Preventing Cavitated Erosion in The Track Vehicle Engine", A Master's Thesis, Kyung-Nam University, 2013.
2. Bae, M. W., Park, B. H., Jung, H. "A Study on Improvement of Durability for Run-out Table

Roller with Hot Rolling by Porous Self-fluxing Alloy Coating", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 2, pp. 276-285, 2012.

3. Steck, B., "Avoiding Cavitation on Wet Cylinder Liners of Heavy Duty Diesel Engines by Parameter Changes", No. 2008-36-0073, SAE Technical Paper, 2008.
4. Park, D. H., Kwon, H. H., "Study on the Manufacturing Technology of 2-Cavity Fine Blanking Seat Recliner Die with Minute Module of Accurate Gear", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 22~30, 2016.
5. Kim, J. H., "Structural Analysis of the Valve Block of a Swash Plate-Type Axial Piston Pump", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 52~57, 2016.
6. Chong, S. O. and Kim, S. J., "Electrochemical Characteristics under Cavitation-Erosion Environment of STS 304 and Hot-Dip Aluminized STS 304 in Sea Water Solution", Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, Vol. 49, No. 1, pp. 26-31, 2016.
7. Sim, H. S. and Jun, J. O., "A Design for Water Cooling of a Marine Diesel Engine with Verification of Improvement", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 58-63, 2016.
8. Kim, S. J. and Lee, S. J., "Investigation on Electrochemical and Cavitation Characteristics of Rudder Materials for Ship in Sea Water", Corrosion Science and Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 101-107, 2011.
9. Feller, H. G. and Kharrazi, Y., "Cavitation Erosion of Metals and Alloys" Wear, Vol. 93, No. 3, pp. 249-260, 1984.