

디젤기관 실린더라이너의 진동캐비테이션 손상 억제에 관한 연구

정기철 · 황재호* · 임우조**

(동명대학 가스냉동과 · *도립 강원전문대학 동력기계시스템과 · **부경대학교 기계·자동차공학부)

1. 서 론

최근 공업 발달과 고 유가 시대를 맞아 디젤기관은 개발이 가속되어 고속화, 소형화, 경량화 되는 추세에 있고, 산업분야에 사용되고 있는 동력용 원동기로는 회전수 1800rpm 이상의 고속 디젤엔진이 그 주류를 이루고 있다. 냉각 방식이 수냉식인 디젤엔진에 있어서 냉각 계통의 주된 사고 중의 하나는 실린더 라이너의 수축 부에서 발생하는 캐비테이션 침식-부식 손상이다. 이러한 손상이 심할 경우에는 실린더라이너를 관통하여 중대한 엔진 사고로 연결될 수 가 있다.

실린더라이너에서의 캐비테이션은 여러 형태의 캐비테이션 중에서 액체 내의 물체 운동이 원인으로, 재료 표면에서 발생되며 가장 극심한 손상을 유발시킨다. 이를 진동 캐비테이션이라 한다. 디젤엔진에서의 진동 캐비테이션은 연소 폭발 압력, 피스톤 슬립(slip) 및 고속 주행 등으로 인한 진동에 의해서 발생한다. 실린더라이너 수축부의 캐비테이션 손상은 지금도 커다란 문제로 남아 있다. 이의 방지법으로 ①설계 개선에 의한 캐비테이션의 발생 감소, ②내 캐비테이션 침식-부식성이 뛰어난 재료 선정, ③인히비터(inhibitor) 첨가, ④음극방식(cathode protection), ⑤공기 주입(air injection) 등이 있다.^{1) 8)}

이들 캐비테이션 침식-부식 손상 억제법 중에서 내 침식성 재료 선택은 기계 장치의 제작비가 높게 되고, 일반적으로 가장 널리 사용되는 방법인 인히비터 첨가의 경우, 일정 시간마다 보충해야 하는 등 사용자의 인식이 낮아 억제효과를 제대로 발휘하지 못하고 있다. 이를 보완하기 위해 설계 개선에 의한 캐비테이션 손상 억제법을 착안하였다.

따라서 본 논문에서는 설계 개선에 의한 캐비테이션 손상 억제에 관한 연구를 위해 진동캐비테이션 발생 장치를 제작하였으며, 여기서 얻은 진동캐비테이션 시험편과 실제 실린더라이너의 손상 형태를 비교 관찰하였다. 그리고 부식 환경하에서 캐비테이션 손상에 미치는 침식, 부식의 영향 및 상호가속하는 상승효과를 분석하였고, 진동 캐비테이션 발생부의 측면에 유속을 가하여 진동 캐비테이션 손상 억제 효과 및 그 과정을 고찰하였다.

II. 실험 장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 진동 캐비테이션 발생장치의 전체 계통도는 Fig. 1과 같다.

본 실험장치는 현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 캐비테이션 침식 시험법 중의 하나인 압전(piezoelectric) 효과를 이용한 진동발생장치이다.

진동발생장치의 공진주파수 및 진폭(정 진폭 자동제어방식)은 ASTM 규정(G32-85)⁹⁾에서 정하고 있는 20kHz와 24 μ m이며, 진동발생원리는 압전소자를 통해 가해진 전기에너지를 진동에너지로 변환시키는 것이다. 이렇게 발생된 진동에너지는 지수형 원추혼(exponential horn)에서 증폭되어, 혼의 끝 부분에 설치된 시험편에서 축 방향으로 진동을 일으켜 최적의 진동을 얻는다.

시험 탱크는 전기화학적인 영향을 없애기 위해서 아크릴로 제작하였으며, 순환수 펌프도 플라스틱 펌프를 이용하였다. 그리고 진동 발생부에 가해지는 측면 유속을 측정하고, 진동 캐비테이션의 발생 양상을 관찰하기 위해 유량계와 관찰창을 설치하였다.

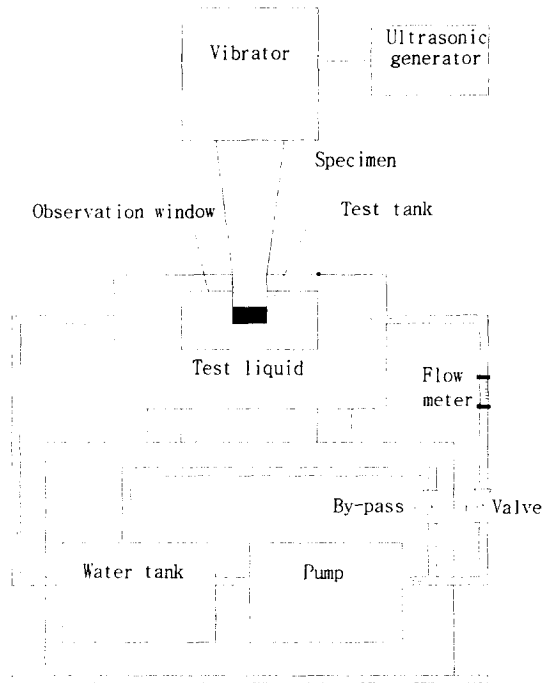


Fig. 1 Schematic diagram of cavitation erosion-corrosion test apparatus

2. 실험방법

청수냉각방식의 선박용 고속 디젤엔진(약 4,000hr 사용)의 실린더라이너의 손상 양상과 진동 캐비테이션 시험편의 손상 양상을 비교하였다. 진동 캐비테이션 발생 양상은 고속 카메라(Photec IV, 16 mm 로타리 프리즘식)를 사용하여 500 fps(500장/초)의 속도로 촬영하였고, 이 때 발생한 기포를 현미경을 이용하여 관측하였다.

부식 환경하에서 진동 캐비테이션 손상에 미치는 침식, 부식 그리고 상호 작용을 규명하기 위하여 ① 순수 캐비테이션 침식시험 (비저항이 15,000Ω·cm인 증류수의 경우 전기 화학적인 부식이 발생하지 않는 것으로 가정하고 10시간 동안 진동 캐비테이션시험), ② 순수 부식시험 (비저항이 25Ω·cm인 천연 해수 중에 침지하여 10시간 동안 부식시험), ③ 진동 캐비테이션 침식-부식 시험 (비저항 25Ω·cm인 천연 해수 중에서 10시간 동안 진동 캐비테이션 침식-부식 시험)의 3가지 시험을 실시하였다.

진동 캐비테이션 손상억제시험은 고속 디젤엔진의 냉각수로 사용되고 있는 청수를 이용하여, 발생 장치의 진동부에 디젤기관의 순환 냉각수 유속 범위를 전후 한 $V = 0 \%$, $V = 0.5 \%$, $V = 1 \%$, $V = 1.5 \%$, $V = 2.0 \%$ 그리고 $V = 2.5 \%$ 를 가했다. 그리고 수온은 $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고, 시험편의 재료는 SS41를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 실린더라이너와 진동 캐비테이션 시험편의 손상 비교

Fig. 2의 (a)는 약 4,000hr 동안 사용한 선박용 고속 디젤엔진 실린더라이너를 나타낸 것이고, Fig. 2의 (a-1)은 Fig. 2의 (a)의 화살표 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 2의 (b)는 본 실험 장치로써 600min 동안 시험한 진동 캐비테이션 시험편의 손상 표면을 나타낸 것이다.

Fig. 2의 (a) 디젤기관 실린더라이너 벽면에는 축 방향으로 극심한 피팅(pitting)형태의 손상이 발생하였다. 그리고 Fig. 2의 (b) 진동 캐비테이션 시험편 표면에도 극심한 피팅(pitting) 형태의 손상이 발생하였다. 두 경우 모두가 별집 모양의 손상 형태를 나타내고 있다. 이는 실린더라이너에서 발생하는 손상이 진동 캐비테이션에 의해서 발생함을 입증하는 것이다.

실린더라이너의 경우 피스톤 슬립이나 폭발 행정 시에 발생하는 진동에 의하여 캐비테이션이 일어나며, 진동 캐비테이션 시험편의 손상은 시험편 표면에서의 초음파 진동에 의해 캐비테이션이 일어나는 것으로 사료된다.

따라서 이러한 결과에 근거하여 본 실험장치를 이용한 디젤엔진 실린더라이너의 진동 캐비테이션 손상억제에 관한 연구를 수행하였다.

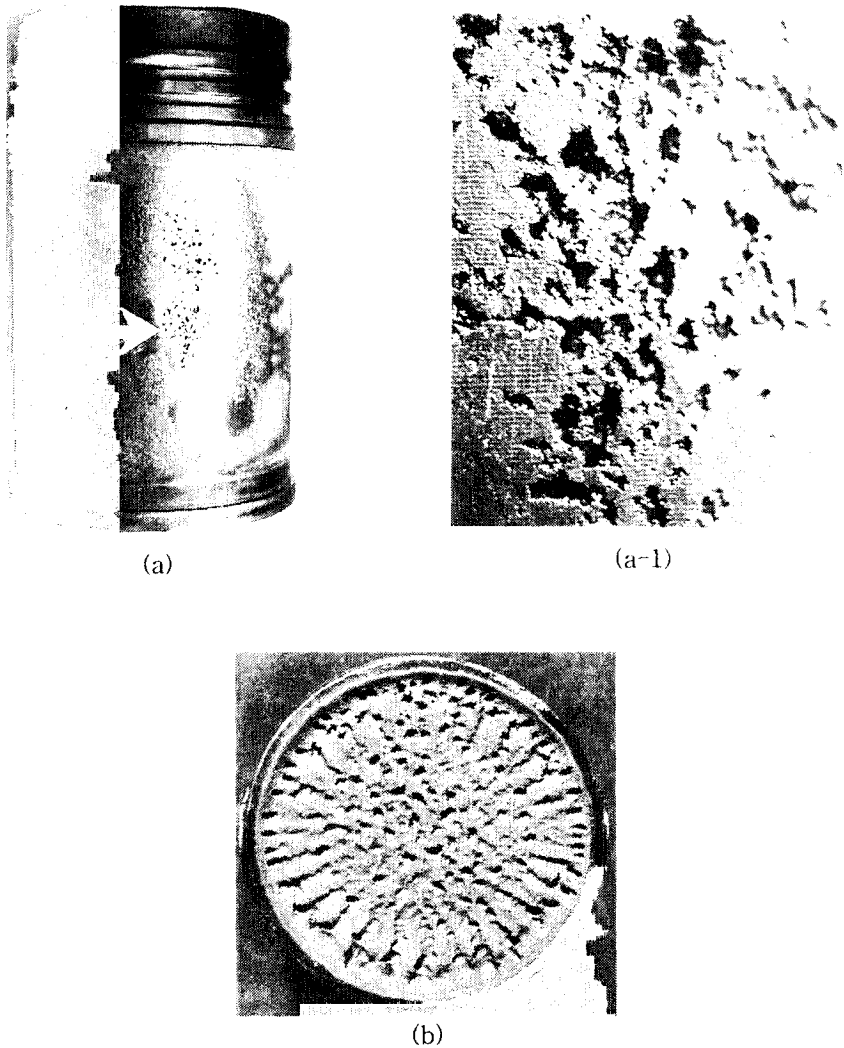


Fig. 2 Comparison of cavitation damage on the liner of diesel engine and cavitation test specimen

2. 진동 캐비테이션 손상에 있어서 침식과 부식의 상호 작용

Fig. 3의 (a)는 고속 카메라를 이용하여, 500 fps(초당 500장)의 고속카메라를 이용하여 본 실험장치에서 발생한 진동 캐비테이션 기포군을 촬영한 것이다.

진동 캐비테이션은 초음파 진동이 시작된 후 90 ms가 지나면서 일정한 형태의 나팔 모양의 분무형 기포군을 형성하였고, 이 과정에서 기포군을 형성한 각 기포들은 성장과 파괴를 반복하고 기포의 파괴 시에 압력파가 발생하는 것으로 추정된다.

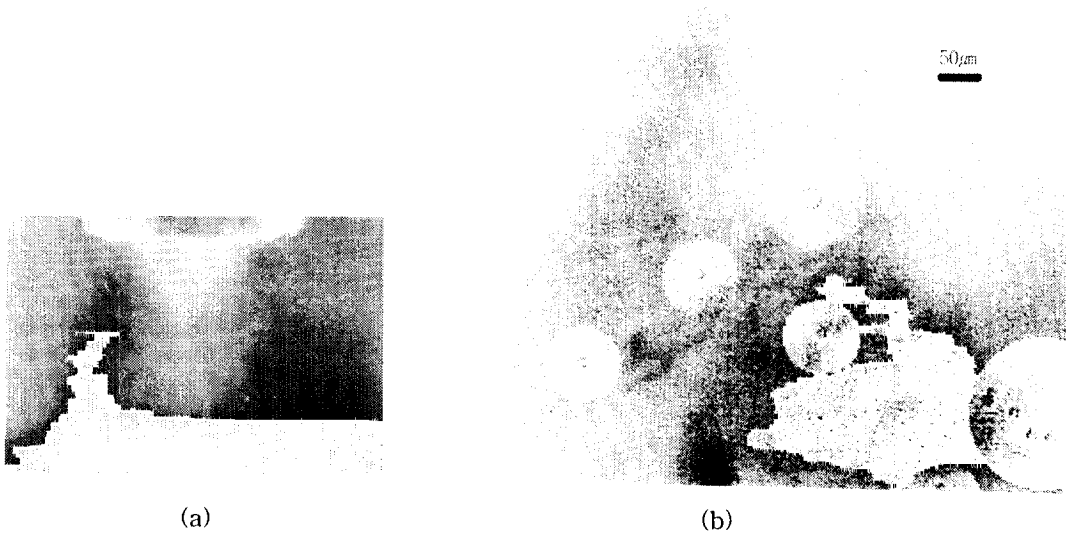


Fig. 3 Appearance of cavitation generation and bubbles

Fig. 3의 (b)는 Fig. 2의 (a)에서 나타난 기포군을 광학현미경으로 촬영한 것이다. 기포의 크기는 직경이 약 $6\ \mu\text{m}$ ~ $23\ \mu\text{m}$ 정도로 다양하게 나타나고 있다.

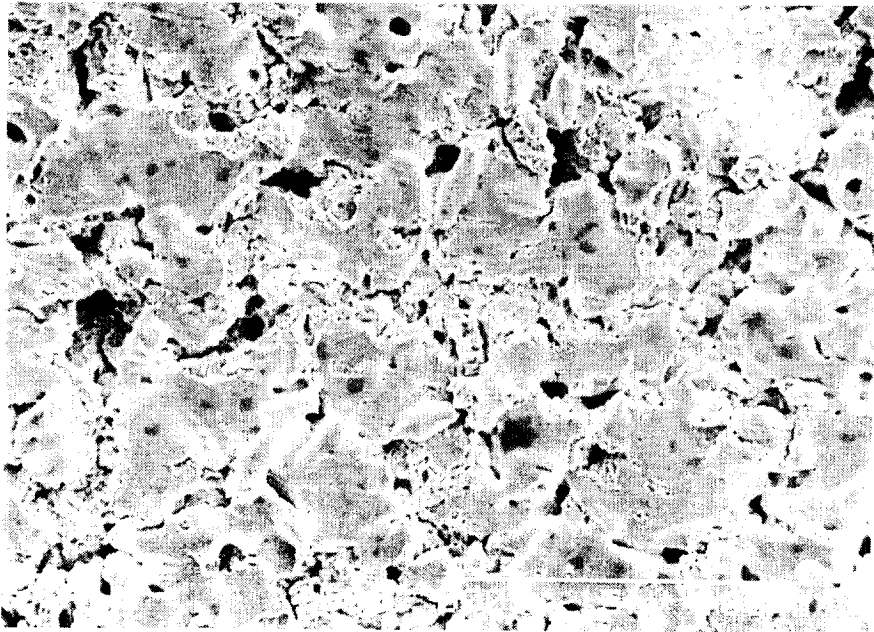


Fig. 4 SEM photograph of cavitation damage on specimen surface

Fig. 4는 수도수에서 30분간 진동 캐비테이션 손상 시험을 실시한 시험편 표면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 것을 나타낸 것이다.

약간 검은 색을 띤 소성 변형부와 흰색을 띤 탈리부(脫離部)가 동시에 존재하며 소성 변형부인 미탈리부에는 소성변형 파문(plastic deformation ripple)이 남아 있다. 이러한 소성변형과 탈리는 Fig. 3에서 나타낸 기포가 성장과 붕괴를 반복할 때 발생한 압력파에 의해 발생된 것으로 추정된다.

Fig. 5의 (a)는 캐비테이션 손상의 발생 원인으로 판단되는 기포의 붕괴기구를 Fig. 3, Fig. 4를 기초로 하여, 캐비테이션 기포의 형성과 파괴 과정을 모델링한 것이다. 캐비테이션 발생 과정에서 저압부에서 발생한 기포가 주위의 압력이 더욱 떨어지면서 계속 성장하다가 주위의 압력이 다시 고압부로 들어가면 기포가 작아지고 결국에는 파괴되어 한 순간에 매우 커다란 충격파가 발생하면서 시험편 표면에 손상을 일으킨다.¹⁰⁾

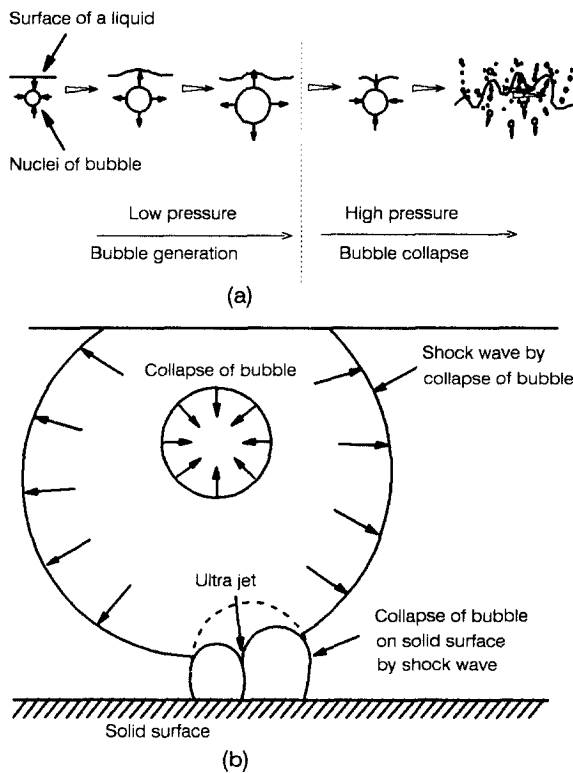


Fig. 5 Mechanism of cavitation damage by collapse of bubble and ultrajet

Fig. 5의 (b)는 기포붕괴기구를 Tulin¹¹⁾등이 제안한 울트라 제트(Ultra jet)의 발생기구를 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)의 과정에서 발생한 충격파(shock wave)가 시험편 표면에 가까이 있는 기포에 충격을 가해 기포가 두 개로 쪼개어지고 이 때에 두 기포사이에서 새로운 충격파가 생성되는 데 이것을 울트라 제트(ultra jet)라고 한다. 이 때 발생한 울트라 제트의 속도는 음속의 두 배 정도인 것으로 보고 되어 있으며, 이러한 충격압에 의한 재료의 파괴는 2가지 형태이다.

첫째는 기포의 붕괴에 의한 공격이 고체면에 닿을 때 단 1회의 공격에 의한 표면 파괴이고, 둘째는 여러번 반복된 공격으로 인한 표면 파괴이다.

본 연구와 같은 진동 캐비테이션에 의한 기계적 침식 손상 원인은 울트라 제트, 기포의 붕괴에 따른 충격파 등이 동시에 작용하기 때문에 일어나는 것으로 사료된다.

Fig. 6의 막대그래프는 순수 진동 캐비테이션 침식 (비저항 15,000Ω·cm의 중류수), 순수 부식 (비저항 25Ω·cm의 천연 해수 중에 침지) 및 진동 캐비테이션 침식-부식 (비저항 25Ω·cm의 천연 해수) 시험을 10시간 동안 실시 한 후 무게 감소량을 나타낸 것이다. 순수 진동 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량 (W_e)은 약 293mg, 순수 부식에 의한 무게 감소량 (W_c)은 약 2mg 그리고 진동 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량 (W_t)은 약 393mg로 나타났다.

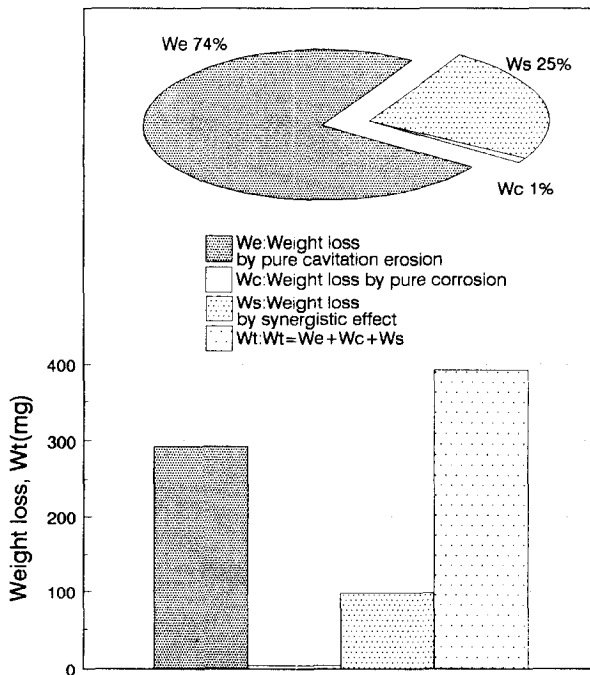


Fig. 6 Relationship of W_e , W_c , W_s and W_t on cavitation damage

Fig. 6은 진동 캐비테이션 침식과 부식이 동시에 발생하는 천연 해수에서 10h 동안 진동 캐비

테이션 침식-부식 시험을 한 후의 무게 감소량 (W_t)을 100으로 두고 W_e , W_c 그리고 상승 효과에 의한 무게 감소량 (W_s)을 100분율로 나타낸 것이다.

순수 진동 캐비테이션 침식에 의한 무게 감소량은 약 74%, 순수 부식에 의한 무게감소량은 약 1% 그리고 진동 캐비테이션 침식과 부식의 상호 가속하는 상승 효과에 의한 무게 감소량은 25%로 나타났다.

진동 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량 (W_t)은 다음 식(1)으로 나타내어진다.

$$W_t = W_e + W_c + W_s \quad (1)$$

여기서, W_s 는 진동 캐비테이션 침식과 부식의 상호 가속하는 상승 효과에 의한 무게 감소량이다.

이상의 결과 순수 진동 캐비테이션 침식에 의한 감소량이 지배적인 침식 지배형의 손상이 나타나고 있다. 따라서 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 억제를 위해서는 침식 발생을 감소시킬 수 있는 방법을 선택해야 할 것으로 사료된다.

3. 유속에 따른 손상 억제 특성

Fig. 7은 청수 중에서 진동 캐비테이션 침식-부식 손상 억제를 위하여 진동 캐비테이션 발생부의 측면에 유속을 가하여 측면 유속에 따른 무게감소량을 나타낸 것이다.

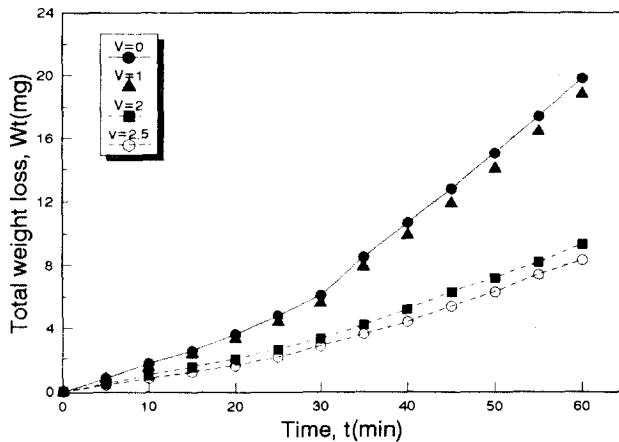


Fig. 7 Total weight loss of specimen with various velocities(m/s) in fresh water

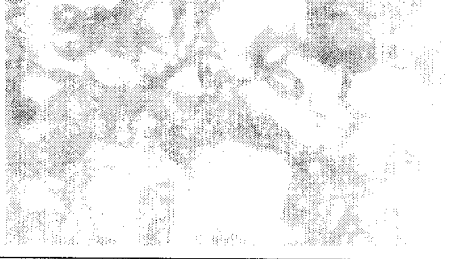

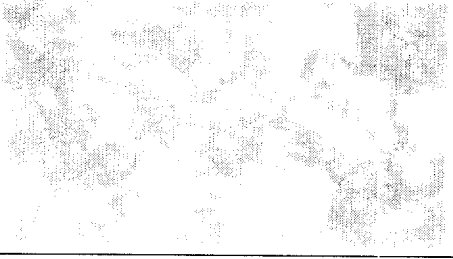

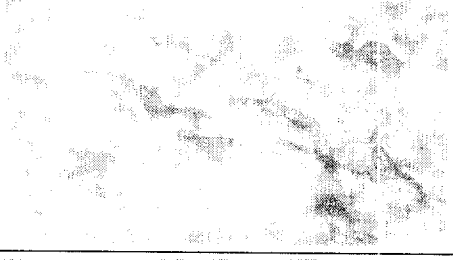



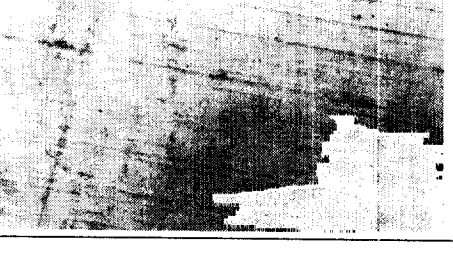
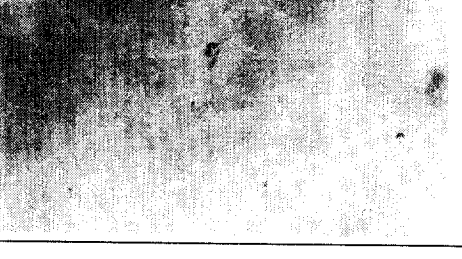
0min		
10min		
20min		
30min		
35min		
Time Velocity	V = 0m/s <u>24 μm</u>	V = 2.0m/s

Fig. 8 Optical photographs of the cavitation erosion-corrosion damage with various jet velocities in fresh water

진동캐비테이션 발생부의 측면 유속이 빠를수록 시험시간 경과에 따른 무게감소량의 증가폭이 완만하게 나타나고 있다. 특히 측면 유속이 $V=2.0$ %이상으로 되면 측면 유속에 의한 진동 캐비테이션 손상 억제 효과가 커져서 시간의 경과에 따른 손상량의 증가가 완만히 나타나고 있다.

Fig. 8은 청수 중에서 진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속을 $V=0$ 및 $V=2.0$ %으로 캐비테이션 침식-부식 시험을 실시한 후 시험편의 일정한 부분을 지정하여, 시험시간의 경과에 따른 표면 상태 변화를 광학현미경으로 관찰한 것이다.

측면 유속이 $V=0$ %인 청수 중에서 시험편 표면 중의 한 부분을 지정하여 찍은 사진으로 시험시작 10분이 지나면서 시험편 표면에 소성 변형이 일어나 뚜렷한 파문 형상을 나타내며 그리고 파문의 끝이 집중되는 곳을 중심으로 검은색을 띠면서 가공 경화의 초기 상태를 나타내며 잠복기 단계이다. 시험시간 20분이 지나면서 소성 변형 파문들이 형태는 변하지 않고 파문의 길이가 줄어들며 파문의 폭은 시험시간 10분에서와 비슷하나 소성 파문들의 테두리 부에서는 가공경화현상이 일어난다. 이러한 검은 색을 띤 소성 변형의 가공경화부가 여러개 마주치는 곳 그리고 여러개의 단독 피트(isolated pit)들과 가공 경화부가 합쳐지는 곳을 중심으로 국부적인 탈리가 시작되면서 잠복기가 끝나고 탈리기에 들어간다.

측면 유속이 $V = 2.0$ %인 청수 중에서의 시험편 표면 사진으로 시험시간 20분이 지나면서 시험편 표면에 소성 변형 파문이 형성된다. 파문의 길이가 측면 유속 $V = 0$ %에서 보다는 짧고 파문의 폭 약 $2\sim6 \mu\text{m}$, 피트들의 직경 약 $2\sim6 \mu\text{m}$ 로서 잠복기 단계이다. 30분이 지나면서 $V=0$ %에서와 같이 소성 변형 파문 테두리의 가공 경화부가 여러개 마주치는 곳 그리고 여러개의 단독 피트들과 가공 경화부가 합쳐지는 곳을 중심으로 국부적인 탈리가 시작되면서 잠복기는 끝나고 탈리기에 들어간다.

시험편 표면의 탈리가 발생하기 전인 잠복기에서는 매우 짧은 시간에 시험편 표면에 커다란 힘이 걸리기 때문에 소성변형을 일으켜 커다란 충격압이 걸린 중앙부는 피트가 생기고 주위는 부풀어 오르는 것으로 추정된다.

이와 같이 진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속이 빠를수록 무게감소량이 둔화되는 이유는 Fig. 3의 (a)에서와 같이 발생한 진동 캐비테이션에 Fig. 1과 같은 측면 유속이 가해져 기포가 제거됨으로써 기포의 붕괴에 따른 충격력이 감소하기 때문에 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게감소량이 둔화되는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 청수에서 진동 캐비테이션 발생부의 측면 유속이 진동 캐비테이션 침식-부식 손상을 억제하는 효과를 좀 더 정량적으로 검토하기 위하여, 유속의 증가에 따른 총 무게감소량과 손상억제효율을 나타냈다. 손상억제효율은 측면 유속을 가하지 않았을 때의 무게감소량을 기준으로 해서 각 측면 유속에서의 무게 감소량을 나눈 값으로 나타냈으며, 손상억제효율(Pe)은 다음 식(2)과 같다.

$$Pe(\%) = (1 - W_v / W_{(v=0)}) \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_t 는 각 측면 유속에서의 무게 감소량(mg), $W_{(v=0)}$ 는 측면 유속 $V = 0$ % 일 때의 무게 감소량(mg)이다.

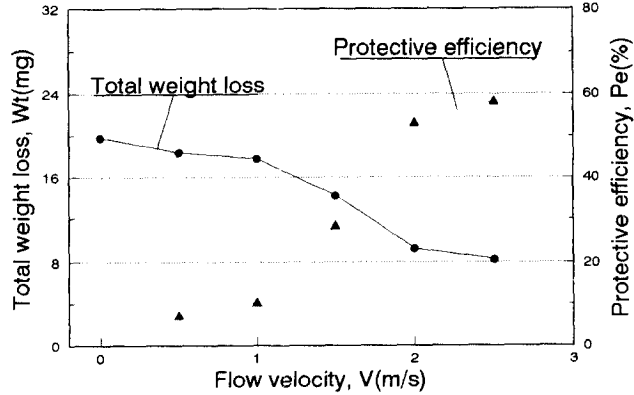


Fig. 9 Flow velocity vs total weight loss or protective efficiency for 60min in fresh water

유속의 증가에 따른 총 무게감소량은 유속이 빨라질수록 감소하는 경향을 보이고, $V = 2.5$ %에서 가장 적게 나타나고 있다.

진동 캐비테이션 손상억제효율은 측면 유속 $V = 1.0$ %에서 약 10%를 보이고 있다. 그러나 유속이 $V = 2.5$ %에서의 진동 캐비테이션 손상억제효율은 약 58%로 나타나고 있다. 이것은 측면 유속이 빨라질수록 진동 캐비테이션 기포가 더 많이 제거되므로 침식에 의한 손상량과 침식과 부식이 상호 가속하는 상승효과에 의한 손상량이 큰 폭으로 감소하여 손상억제효율이 증가하는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 습식 고속 디젤엔진의 실린더 라이너 수축부의 캐비테이션 손상을 억제하기 위한 한가지 방법으로 캐비테이션 발생부에 유속을 가해서 기포를 제거시켜 캐비테이션 손상을 억제하는 방식을 제안하였다. 그리고 본 억제법의 유효성을 검증하기 위해서 진동 캐비테이션 발생 장치를 제작하여 실험을 행하였다.

진동 캐비테이션 시험편의 손상 양상과 실제 라이너의 손상 양상이 거의 일치하며, 이 손상의 주원인이 기포의 붕괴에 의해서 발생됨을 밝혔다. 진동 캐비테이션 손상은 진동부의 측면에 유속을 가해 발생된 기포를 제거함으로써 억제시킬 수 있고, 측면 유속이 빠를수록 더 많이 억제됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안된 캐비테이션 손상 억제법이 고속 디젤엔진 설계시에 적용될 경우 보수비를 절감, 장치 수명의 연장 그리고 안전성 제고에 기여할 것으로

기대된다.

V. 후 기

“이 논문은 1997년 학술진흥재단의 공모과제(1997-004-E00079)연구비에 의하여 연구되었음”
에 관계자 여러분께 감사드립니다.

VI. 참고문헌

- 1) T. Yonezawa and H. Kanda, Study of Cavitation Erosion on Cylinder Liner and Cylinder Block, Journal of the JSME 19(5), 1984, pp. 384-390.
- 2) J. A. Joyner, Reduction of Cavitation Pitting of Diesel-Engine Cylinder Liners, SAE Transactions Vol. 65, 1956, pp. 337-348.
- 3) M. Matsumura, A. Yabuki and S. Sanui, Effects of Inhibitor in Cavitation Erosion of Commercially Pure Iron, Zairyo-to-Kankyo, 40, 1991, pp. 814-820.
- 4) D. Kim, K. Tsuda and H. Hojo, Cavitation Erosion Mechanism of Epoxy Resin in a Corrosive Environment, Zairyo-to-Kankyo. 40, 1991. pp. 330-335.
- 5) T. Okada and Y. Iwai, Effects of Plating on Cavitation Erosion, Wear, 124, 1988. pp. 21-31.
- 6) A. Sakamoto, Y. Isomoto and M. Matsumura, Index of the Cavitation Damage to Metallic Materials, Zairyo-to-Kankyo, 43, 1994. pp. 76-81.
- 7) Ailor, W.H.: Engine Coolants Testing, State of the Art, ASTM STP 705, 1980, pp. 81-101.
- 8) Plesset, M.S., On Cathodic Protection in Cavitation Damage, ASTM STP, Vol. 82-4, 1960. pp. 802-820.
- 9) Annual Book of ASTM Standards: 03.02 Wear and Erosion; Metal Corrosion, G32-85, 1986. pp. 188-195.
- 10) Kling, C.L., A High Speed Photographic Study of Cavitation Bubble Collapse, Univ. Michigan, Report No. 03371-2-T, 08466-7-T., 1970.
- 11) Tulin, M.P., On the Creation of Ultra-Jets. L.I. Sedov 60th Anniversary Volume, Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics, Moscow., 1969.
- 12) Y. K. Zhou, J. G. He and F. G. Hammitt, Cavitation Erosion of Diesel Engine Wet Cylinder Liners, Wear, 76, 1982., pp. 321-328.

A Study on the Damage Suppression of Diesel Engine Cylinder Liners under Vibratory Cavitation

Gi-Choel JEONG · Jae-Ho HWANG* · Uh-Joe LIM**

Dongmyong College · *Kangwon Junior College · **Pukyong National University

Abstract

With the advent of high speed and high output diesel engines, cavitation erosion-corrosion of wet cylinder liners is one of the most prevalent types of failure. The cavitation erosion-corrosion at cylinder liners in water cooled diesel engines is considered to be to the collapse of cavitation bubbles attributed to the cylinder liner vibration. To suppress cavitation damage in cylinder liner, the addition of an inhibitor would be more general method and innovations such as the improvement in the geometric design of the equipment or the selection of suitably resistant construction materials are necessary.

In this study, photomicrographs from vibratory facility cavitation specimens and from an eroded liner of a field diesel engine are compared. The behavior of cavitation bubbles grown in fluid is observed under vibration conditions by taking direct photographs with high speed camera. In order to determine the contributions of pure cavitation erosion and of pure corrosion to the total cavitation damage are be studied by following an experimental programme which includes three types of test: ①pure cavitation erosion test, ②pure corrosion test, and ③cavitation erosion-corrosion test. Also cavitation damage under vibratory cavitation is reduced by using flow in tap water.