

## 선박 슬러지유 환경에서 초음파 캐비테이션이 일반강에 미치는 영향

한 원 희†

목포해양대학교 기관시스템공학부

### The Effect of Ultrasonic Cavitation on the SS400 in Marine Sludge Oil

Won-Hui Han†

Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University

**Abstract** – The sludge oils were produced necessarily in the ships operation, so that it will be the best way to manage the sludge oils inside ship itself from a viewpoint of the prevention of marine oil pollution. The ultrasonic breaking system which recycle the sludge oil from ship into usable oil to be burnt is recognized as a most possible recycling device. In this regards, the purpose of this study is to examine erosion damage on the SS400 specimen by cavitation and the effect of impact pressure generated from the demolition of the cavity of ultrasonic vibration in the marine sludge oil environment.. The erosion damage of specimen was investigated mainly on weight loss, weight loss rate and maximum erosion rate with variation of the oil temperature as well as the change of space between transducer horn and specimen. The experimental results showed that as the space between ultrasonic vibrator horn and specimen disk increased, the weight loss and weight loss rate decreased and the values were larger in SFO than in SLO. The experimental results can be useful to the development of sludge oil disposing systems and to consider a countermeasure for the prevention of erosion damages by cavitation.

**Key words** – marine sludge oil, ultrasonic breaking system, cavitation damage, weight loss rate.

#### 1. 서 론

선박의 기관실에서 발생하는 폐유에는 기관실의 누설부에서 흘러나온 기름이 청수나 해수 등과 혼합되어 발생하는 빌지유(bilge oil)와[1] 연료유나 윤활유를 청정할 때, 또는 기관구역에서 기름의 누출 등에 의하여 생기는 유성잔유물인 슬러지(sludge)가 있다[2]. 이러한 폐유류를 선내에서 처리하기 위한 장치는 유수분리기(oily water separator) 및 폐유소각기(waste oil incinerator)가 있는데, 유수분리기를 통하여 회수된 기름이라도 기름의 유화, 산화 작용에 의한 고형물, 콜로이드(colloid)상의 교착상태와 같은 문제점이 있기 때문에 소각기를 통한 소각에 있어서 여러 가지 어려움이 있다. 더욱이

선박 운항비용의 절감 등으로 저질중유를 사용함에 따라 연료유가 고비중, 고점도화 되고 있는 추세[3]이기 때문에 실질적인 선내 처리는 한계가 있는 실정이다. 따라서 선내에서 미처 처리하지 못한 슬러지를 비롯한 유성혼합물들은 탱크에 따로 모아서 육상으로 이송하는 경우가 많다[4]. 그러나 이러한 경우에 경제적 및 시간적 소모 또한 많으며, 슬러지유가 해양에 유출될 위험이 있기 때문에 해양유류오염방제 차원에서 보았을 때 근본적인 대책은 선박 내에서 자체 처리하는 방법이 가장 좋은 대안이 될 수 있다. 슬러지유를 선내에서 처리하는 방법중의 하나인 초음파 진동장치는 초음파 진동에 의해 발생된 캐비티의 유동을 통해 유입자를 분쇄하여 슬러지유를 소각기에서의 소각이나 보일러 등의 연소 연료유로 재사용 할 수 있는 방법으로, 그에 관련된 여러 가지 연구도 진행되고 있다[5,6].

†주저자 · 책임저자 : winhan@mmu.ac.kr

한편, 각종 유체 기계 및 기기에서 유속 및 회전속도 등이 증가하면 유체충격과 정압의 저하에 의한 캐비테이션(cavitation)이 발생하는데, 이러한 유체내에서 발생한 캐비테이션은 소음과 진동을 조래하고 기포 붕괴에 따른 충격압에 의해 재료가 심한 침식을 일으킨다[7,8]. 이러한 재료는 기능 저하, 효율 감퇴, 수명 단축 및 파괴에 이르기까지 장치 전반의 작동에 치명적인 영향을 줄 수 있는데, 이와 관련하여 여러 가지 작동 환경에서 사용되는 금속재료의 침식손상에 대한 연구[9,10]가 다각적으로 행해지고 있다. 그렇지만 슬러지유를 포함한 선박 유류 환경 중에서 진동에 의해 발생하는 캐비테이션 침식에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 선박으로부터의 유류오염을 방지하기 위한 일환으로 선박의 운용상 필연적으로 발생하는 슬러지유, 발지유 등의 폐유를 선박내에서 처리할 수 있는 초음파 진동 분쇄 시스템을 제안하고, 여러 가지 동작 환경내에서 슬러지유의 균질화에 미치는 캐비테이션의 영향과 캐비테이션에 의한 금속재료의 침식특성을 규명하고자 진동 캐비티(cavity) 붕괴에 따른 충격압에 의해 발생하는 시험편의 침식양상을 고찰하였다. 이러한 연구 결과는 선박 폐유를 재활용 할 수 있는 시스템을 연구·개발함으로써 해양유류오염을 방지하기 위한 근본적인 대책이 될 수 있고, 선박 운용 효율을 제고하는 데 있어서 유용한 자료가 될 수 있을 것이다. 또한 각종 유체 기기의 사용 환경과 재료의 성질이 다르지만, 캐비테이션 침식-부식 및 회전체 자체에 의해 캐비티를 발생시키면서 자신이 침식손상을 입는 기기의 캐비테이션 침식 발생에 대한 자료로 활용이 가능하고, 대향적으로 캐비테이션을 받는 재료나

캐비티의 붕괴에 따라 충격압을 받는 재료의 침식손상을 규명하는 자료로도 활용될 수 있으리라고 기대한다.

## 2. 실험방법 및 장치

### 2-1. 시료유 및 시험편

시료유는 선박의 기관실 연료유 청정기 및 윤활유 청정기 슬러지 탱크에서 채취한 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO)를 채택하였고 이들의 특성을 Table 1에 나타내고 있다. 단 실험장치의 특성상 시료유의 성상이 실험 중에 순환수 펌프의 용량이나 유속, 드레인 탱크의 용량, 순환시스템의 구조, 캐비티의 양상 등에 따라 약간 변화될 수 있다. 따라서 시료유의 변화 특성은 고려하지 않았으며, 환경조는 증발을 방지하고자 밀봉하였다. 시험편은 일반강인 SS400으로 직경 19 mm, 두께 6 mm이고, 진동자 혼 디스크는 비교적 내침식성재로 알려진 18-8스테인리스 강재이다. 시험편은 표면을 정밀 사포 1200번까지 연마하고 오일랩핑(oil lapping)한 후 아세톤으로 탈지하여 무게감 소량을 측정하였다. Table 2는 SS400의 기계적 특성 및 화학적 조성을 나타낸 표이다.

### 2-2. 실험장치 및 방법

실험장치는 주파수 20 kHz, 진폭 50 μm인 초음파 진동자 혼의 진동가속시험기로 Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 캐비티 발생시험기는 대향 이면 방식의 실험에 적합하도록 제작된 것으로 진동자 혼 디스크에 대향하도록 시험편을 아크릴 판에 고정하고 일정한 간격을 유지하면서 캐비티를 발생시켰다. 실험에 사용한 대향 이면 방식 시험방식은 침식량과 실

Table 1. Properties of sludge oil to be used in experiments.

Specification of oil	Kinematic viscosity (cSt @40°C)	Specific gravity (15/4°C)	Flash point (°C)	Residual carbon (wt%)	TBN (mgKOH/g)	Viscosity Index
SFO	75.5	0.965	123	1.74	-	-
SLO	152.7	0.922	240	4.50	1.80	96

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of SS400 specimen.

Chemical composition	C	Si	Mn	P	S	Fe
	0.12	0.29	0.59	0.01	0.01	Balance
Mechanical properties	Tensile strength (N/m <sup>2</sup> )		Yield strength (N/m <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
	415		253		32	

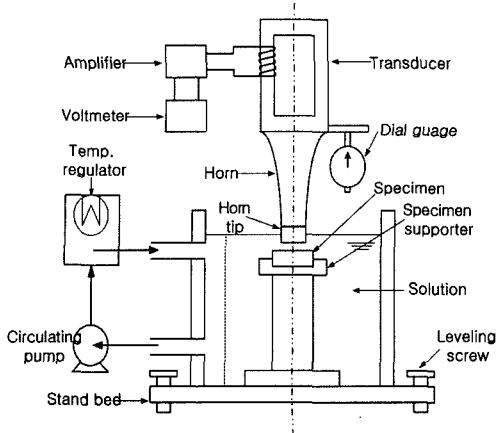


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic vibrator (unit : mm).

험시간과의 관계, 단위시간당의 침식을 및 최고중량감소율 등에 따라 기포의 거동을 알 수 있다. 실험장치의 주요 구성요소는 주파수 및 진폭을 조정하는 진동자와 혼, 전원의 증폭과 제어상자, 시료유 드레인탱크, 진동자 혼 침지탱크(실험용기), 항온조, 진동자 혼의 냉각시스템, 실험용기의 냉각장치, 순환수 펌프, 장치의 스탠드, 시험편 지지대, 순환호스와 연결기기, 측정기기 등이다. 간격측정은 필러게이지(feeler gage)와 다이얼 게이지(dial gage), 시험편 무게 측정에는 디지털 저울(digital balance : LIBROR AEX-200B)을 사용하였다.

실험은 시료유의 온도변화 환경(30~90°C)에 있어서 캐비테이션 작용에 의한 진동자 혼 디스크(18-8 스테인리스 강재)와 대향한 시험편(SS41 탄소강재)의 무게감소량 및 감소율을 실험시간 경과 및 진동자 혼 디스크와 시험편과의 간격(2~8 mm)에 따라 측정, 관찰하였다. 또한 실험시간에 따른 무게감소량 및 감소율의 결과에 의해서 도출된 최고침식율을 구하고, 유온과 혼 디스크와의 간격에 따른 침식특성을 고찰하였다. 총 실험시간은 20시간이며 2시간마다 시험편의 무게감소량과 감소율을 측정하였고, 시료에 잠기는 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 3~6 mm 사이에서 캐비티의 발생이 가장 우수한 간격으로 조정하여 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 유온 30°C에서 간격에 따른 시험편의 침식손상 특성

Fig. 2는 30°C인 윤활유 슬러지(SLO)에서의 진동자 혼

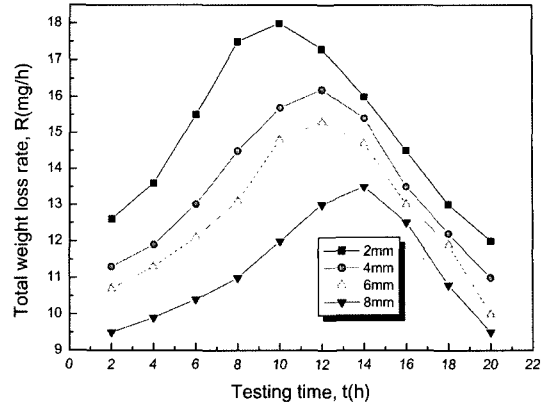


Fig. 2. Total weight loss rate in 30°C SLO.

혼 디스크(진폭 50  $\mu$ m, 주파수 20 kHz)와 대향된 시험편 사이의 간격(2, 4, 6 및 8 mm)에서 실험시간(t) 24시간 동안의 무게감소율(R)을 측정하여 정리한 것이다. 이때 진동자 혼 디스크의 시료유에 대한 침지깊이는 약 3 mm로 하였다. 이에 의하면 실험시간의 경과에 따른 시험편의 무게감소량은 간격 2 mm > 4 mm > 6 mm > 8 mm의 순으로 나타나고 실험시간 12시간부터 무게감소율의 증가폭이 둔화되고 있다. 최고침식율의 크기도 간격 2 mm > 4 mm > 6 mm > 8 mm의 순으로 나타나고, 실험시간이 경과하면서 최고침식율을 보인 후 감소하는 형태를 보인다. 이와 같은 현상은 진동자 혼의 디스크와 시험편사이의 간격에서 발생하는 캐비티의 성장, 붕괴에 따른 메카니즘에 상당히 복잡하게 작용할 것으로 판단된다. 즉, 간격이 작으면 캐비티의 강한 붕괴압에 의해서 시험편의 침식소공이 크게 증가하면서 무게감소율이 증가하지만 간격이 크게 되면 캐비티의 붕괴압이 보다 약하여 침식소공에 의한 무게감소율이 보다 작게 나타날 것이다. 하지만 빠르게 최고침식율이 나타나면 상대적으로 캐비티의 침식소공에 기포가 흡착되어 다음에 접촉되는 기포의 붕괴압을 완화시키는 완충작용(cushion effect)이 빠르게 형성되어 무게감소율이 감소하는 모습을 보이고 있다. 또한 최고침식율이 나타난 후, 즉 침식소공에 기포의 흡착에 의한 완충작용이 나타난 후부터는 기포의 충격에 의한 무게감소율은 간격에 크게 관계없이 오로지 기포의 충격 완화에 의해서 무게감소율이 감소하므로 간격에 따른 무게감소율의 감소폭이 작은 것으로 사료된다.

Fig. 3은 30°C인 연료유 슬러지(SFO)에서의 무게감소율(R)을 측정하여 정리한 것이다. 이 때 진동자 혼

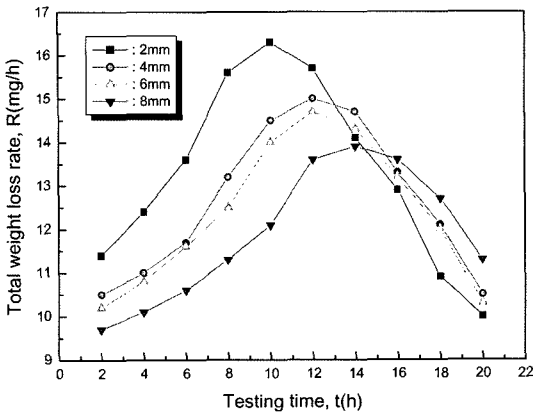


Fig. 3. Total weight loss rate in 30°C SFO.

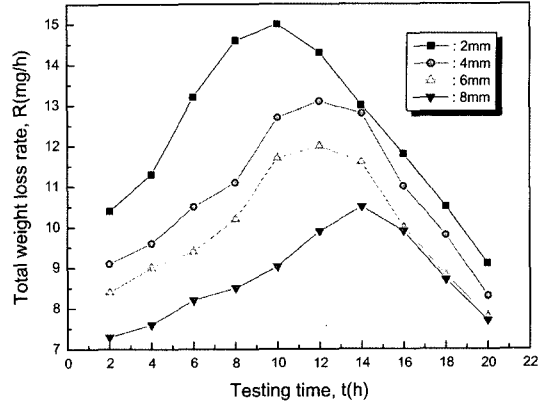


Fig. 4. Total weight loss rate in 50°C SLO.

디스크의 침지깊이는 약 3 mm로 하였다. 그래프를 살펴보면 실험시간 12시간까지는 간격 2 mm > 4 mm > 6 mm > 8 mm의 순으로 나타나지만 그 이후의 실험시간부터는 서로 겹치면서 간격 8 mm > 4 mm > 6 mm > 2 mm의 순으로 간격 8 mm에서 무게감소량이 제일 크게 나타나고 간격 2 mm에서 크게 감소하는 형태를 보인다. 또한 간격이 작은 2 mm에서 최고침식율이 크면서 빠른 실험시간에 나타나고, 그 이후 급격하게 무게감소율이 감소하는 모습을 보인다. 이에 비하여 간격이 큰 8 mm에서는 최고침식율이 늦게 나타나고 그 이후의 무게감소율의 감소도 다소 완만하게 감소하고 있다. 이와 같은 현상은 실험시간 12시간정도까지는 진동자 혼과 시험편과의 간격이 작을수록 캐비티의 충격압의 크고 분산작용이 양호하므로 간격이 작은 2 mm에서 크게 침식손상(또는 무게감소량)이 증가하며, 간격이 큰 8 mm에서 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 실험시간 12시간 후부터 간격 8 mm에서 무게감소량이 크게 나타나고 간격 2 mm에서 작게 나타나는 현상은 침식소공에 기포가 흡착될 정도로 캐비티에 의한 침식소공이 간격 2 mm에서는 충분히 발생하지만, 간격 8 mm에서는 아직 기포가 흡착될 정도의 침식소공이 발생하지 못하였기 때문인 것으로 사료된다.

3-2. 유온 50°C에서 간격에 따른 시험편의 침식손상 특성

Fig. 4는 유온 50°C인 윤활유 슬러지(SLO)에서의 무게감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 진동자 혼의 침지깊이는 약 3~5 mm로 하였다. 이에 의하면 간격 2 mm > 4 mm > 6 mm > 8 mm 순서에 의해 무게감

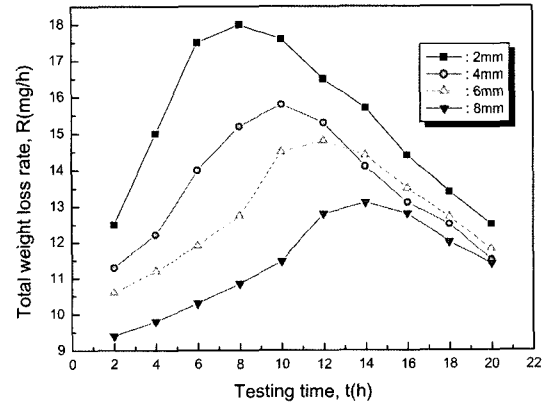


Fig. 5. Total weight loss rate in 50°C SFO.

소량이 실험시간 14시간도까지 나타나지만 실험시간 14시간 후부터는 무게감소량의 증가가 둔화되면서 오히려 감소하는 경향을 보인다. 또한 최고침식율의 크기와 발생하는 실험시간도 간격이 작을수록 크고 빠르게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그 만큼 SLO 환경에서는 윤활유의 특성에 잘 맞는 성질을 많이 보유하고 있는 환경이므로 간격 외의 다른 인자들이 캐비티의 작용에 별다른 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 유온 50°C인 연료유 슬러지(SFO)에서의 무게감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 진동자 혼의 침지깊이는 약 3~5 mm로 하였다. 이에 의하면 실험시간 12시간정도까지는 간격이 작을수록 무게감소량이 크게 나타나지만 실험시간 12시간 후부터는 간격 6 mm에서가 간격 4 mm에서 보다 무게감소량이 크게 나타나고 있다. 최고침식율을 보인 실험시간 12시간 후부터 시험편에서 발생하는 침식소공에 의한

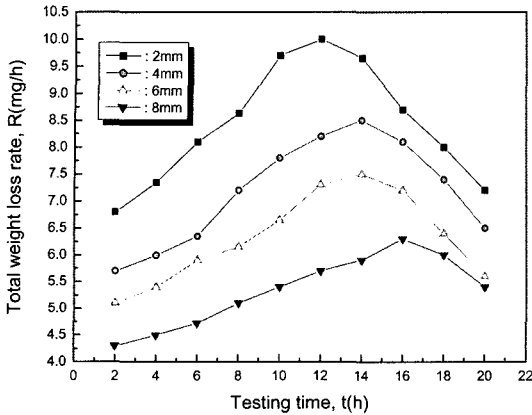


Fig. 6. Total weight loss rate in 70°C SLO.

무게감소량이 간격 크기 감소에 비례하지 않고 오히려 간격 6 mm에서가 간격 4 mm에서 보다 무게감소량이 크게 나타나는 것은 연료유 슬러지의 유온 증가에 따른 점도의 저하 및 캐비티의 반복작용에 의한 유환경의 점도저하 등이 중복되기 때문인 것으로 판단된다.

3-3. 유온 70°C에서 간격에 따른 시험편의 침식손상 특성

Fig. 6은 유온 70°C인 윤활유 슬러지에서의 무게감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 4~7 mm 정도이다. 이에 의하면 진동자 혼과 시험편의 간격이 작아짐에 따라 무게감소량은 실험시간 경과에 따라 증가하는데 그 증가하는 폭은 간격에 따라 거의 일정한 비율을 유지하는 경향이다. 또한 최고침식율도 간격이 작을수록 커지며, 최고침식율을 나타낸 후에는 무게감소율이 감소되는 전형적인 곡선을 보이고 있다.

Fig. 7은 유온 70°C인 연료유 슬러지에서의 무게감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 4~7 mm 정도이다. 이에 의하면 실험시간 10시간 정도부터는 간격 4 mm에서의 무게감소량이 간격 6 mm에서보다 작아지며, 실험시간 18시간부터는 간격 4 mm에서의 무게감소량이 간격 8 mm에서보다도 작게 나타나는 경향을 보인다. 이와 같은 현상을 보이는 것은 간격 4 mm에서의 최고침식율을 보인 후 캐비티의 소공 흡착에 의한 완충작용으로 침식손상이 크게 억제되기 때문이다. 또한 최고침식율의 크기는 간격이 작을수록 크고, 또한 최고침식율이 나타나는 실험시간도 간격이 작으면 짧아지는 경향을 보

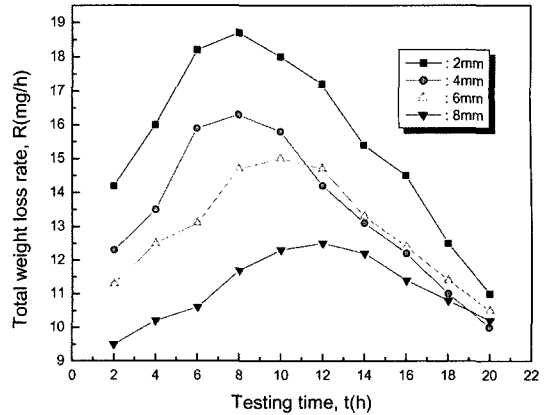


Fig. 7. Total weight loss rate in 70°C SFO.

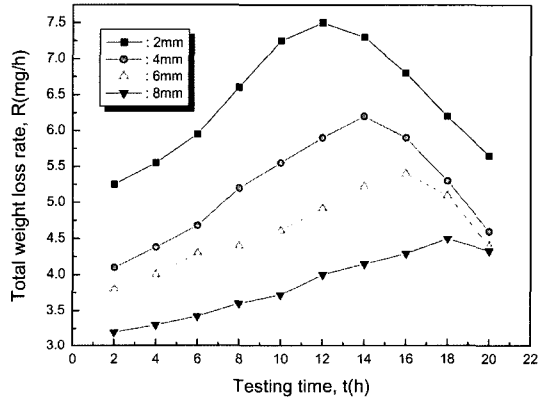


Fig. 8. Total weight loss rate in 90°C SLO.

인다. 따라서 특히 간격 4 mm에서의 최고침식율을 나타낸 후 무게감소율이 기포의 완충작용에 의해 크게 억제되는 반면에 간격 6 mm와 8 mm에서는 무게감소율의 억제효과는 다소 미약하므로 간격 4 mm에서의 감소가 크게 나타나 보이는 것으로 사료된다.

3-4. 유온 90°C에서 간격에 따른 시험편의 침식손상 특성

Fig. 8은 유온 90°C인 윤활유 슬러지에서의 무게감소율(R)을 정리한 것으로 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 5~9 mm이다.

이에 의하면 간격 2 mm > 4 mm > 6 mm > 8 mm의 경향으로 무게감소율이 나타나고 최고침식율도 크게 발생한다. 이와 같은 상황은 유온 90°C인 윤활유 슬러지 환경에서는 점도가 다소 저하하면서 작은 간격에서의 캐비티에 의한 충격압이 크게 증가하고, 간격의 증

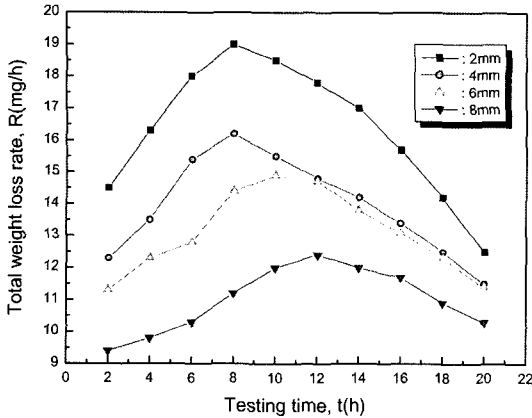


Fig. 9. Total weight loss rate in 90°C SFO.

가에 따라 캐비티의 충격압도 작으면서 최고침식율도 작고, 실험시간이 장시간 경과한 후에 최고침식율을 보이기 때문인 것이다. 즉, 간격 2 mm에서는 실험시간 12시간에서 최고침식율이 나타나고, 간격 8 mm에서는 실험시간 18시간에서 최고침식율이 나타나는 곡선을 보여주고 있다.

Fig. 9는 유온 90°C인 연료유 슬러지에서 무게감소율(R)을 정리한 그래프이다. 이에 의하면 간격이 작을 수록 무게감소량의 증가는 크게되고, 간격 4 mm와 6 mm에서의 증가폭은 상당히 좁은 범위를 보여주고 있다. 4 mm와 6 mm에서의 무게감소량의 증가폭이 거의 비슷하게 증가하는 것은 간격 내에서의 캐비티에 의한 액체의 작용이 간격에 의한 영향보다는 액체의 특성에 지배되기 때문이다. 또한 윤활유 슬러지에서의 최고침식율과 비교하여 연료유 슬러지에서의 최고침식율은 상당히 짧은 실험시간에서 발생하며 감소기로 접어드는 것을 알 수 있다. 즉, 간격이 큰 만큼 캐비티의 크기도 작고 침식소공의 크기도 작기 때문에 캐비티에 의한 침식손상율도 천천히 발생하며 캐비티의 완충작용도 약하므로 감소기에서의 기울기도 완만하다고 사료된다.

3-5. 유온변화 및 흔과의 간격에 따른 최고침식율 비교

Fig. 10은 연료유 슬러지에서 진폭 50 μm인 진동자 흔의 캐비티 작용에 의한 최고침식율( $R_{max}$ )을 간격(h)에 따라 정리한 그래프이다.

그래프를 살펴보면 간격 2 mm와 4 mm에서의 최고 침식율은 온도가 30°C에서 90°C로 증가하면서 증가하는 경향을 보이고, 간격 6 mm에서의 최고침식율은 온

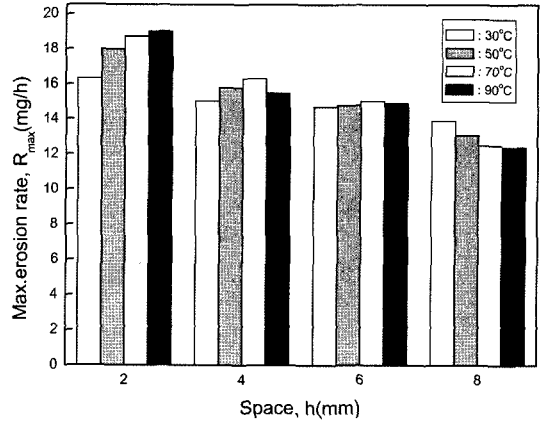


Fig. 10. Max. erosion rate vs testing time in SFO.

도의 증가에 따라서도 거의 일정한 값을 보인다. 그리고 간격 8 mm에서는 온도가 30°C에서 90°C로 증가하는 데 비하여 최고침식율은 오히려 작아지는 경향을 보인다. 또한 유온도의 변화에 관계없이 간격이 2 mm에서 8 mm로 커짐에 따라서 최고침식율의 값은 작아진다. 이와 같이 간격 2 mm에서 8 mm로 증가함에 있어서 유온도증가에 따른 최고침식율이 증가하다가 간격 8 mm에서의 최고침식율이 오히려 작아지는 원인은 간격이 작은 2 mm에서는 유온의 증가에 의한 유점도의 강하에 따라서 캐비티의 수가 증가하여 침식손상이 증가하지만, 간격이 큰 8 mm에서 유온이 증가하여 점도가 낮아지면 캐비티의 형성수에 비하여 크기가 너무 작으므로 캐비티의 충격압이 약화되기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11은 윤활유 슬러지에서 진폭 50 μm인 진동자

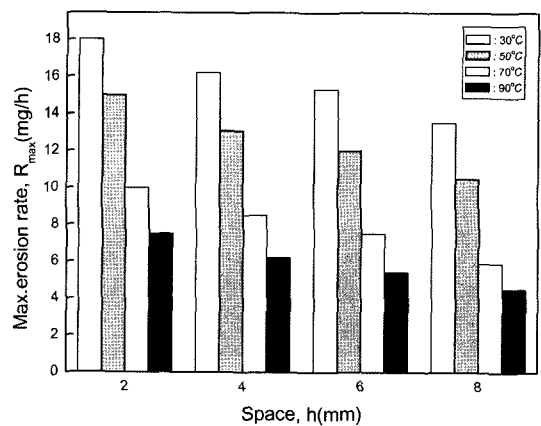


Fig. 11. Max. erosion rate vs testing time in SLO.

혼의 캐비티 작용에 의한 최고침식율( $R_{max}$ )을 간격(h)에 따라 정리한 막대 그래프이다. 이에 의하면 유온이 30°C에서 90°C로 증가하는 조건에서의 최고침식율은 각각의 간격에 있어서 감소하는 모습을 보이고, 각 유온에서의 간격에 따른 최고침식율은 간격이 증가함에 따라 감소하고 있다. 이와 같이 유온이 30°C에서 90°C로 증가하면 최고침식율이 작아지는 원인은 유온의 증가에 의해 밀도가 변화된 상태에서 캐비티의 작용을 받기 때문이고, 간격의 증가에 따라 최고침식율이 작아지는 것은 캐비티의 충격력이 약하고 침식손상면적이 작아서 전체적으로 감소율이 낮은 것이다.

#### 4. 결 론

유온을 변화시킨 슬러지유 환경에서 진폭 50  $\mu\text{m}$ 인 진동자의 혼과 시험편(SS400)과의 간격 2, 4, 6 및 8 mm에 따른 시험편의 무게감소량, 감소율 및 최고침식율을 조사하여, 대향적으로 캐비티의 붕괴압을 받는 재료의 침식특성을 알아보고, 캐비티 붕괴압의 세기를 고찰하여 슬러지유의 균질 효과를 제고할 수 있는 최적 조건을 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진동자 혼과 시험편과의 간격에 따른 침식손상은, 연료유 슬러지(SFO) 환경에서는 간격 2 mm에서가 간격 8 mm에 비해 온도에 따라 약 15~35% 정도 컸고, 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서는 간격 2mm에서가 간격 8 mm에 비해 약 25~40% 정도 크게 나타났다. 즉, 간격이 가까울수록 캐비티의 붕괴압이 더 큰 경향을 보인다.

2. 유온도 및 초음파 진동자 혼과 시험편의 간격이 동일하고, 초음파 조사시간이 같은 경우에, 시험편에 나타나는 침식손상은 연료유 슬러지 환경에서가 윤활

유 슬러지 환경에서 보다 컸다. 즉, 초음파 조사에 의한 캐비테이션의 영향은 연료유 슬러지 환경에서 더 크게 작용한다.

3. 진동자 혼과 시험편과의 간격이 동일한 경우에, 연료유 슬러지 환경에서는 유온이 증가함에 따라 시험편의 침식율이 크게 변하지 않는 경향이지만, 윤활유 슬러지 환경에서는 유온이 증가함에 따라 캐비티의 붕괴압은 저하한다.

#### 참고 문헌

1. 田大熙, “燃料와 燃燒의 管理,” 일증사, pp.266-305, 1985.
2. 李鎭烈, “油類工學,” 曉星出版社, pp.69-89, pp.344-353, 1998.
3. 今村弘人, “舶用ディーゼル機關(燃燒・潤滑・損傷),” 山海堂, pp.38-43, 1995.
4. J. Crawford and F.I. Mar.E.E, “Marine and Offshore Pumping and Piping System,” Butterworths, London, pp.91-99, 1981.
5. 村田德治, “リサイクル技術の實際,” 오ム社, pp.179-182, 1993.
6. 韓元熙, “캐비티 流體流動의 應用에 의한 船舶 廢油 處理에 關한 研究,” 韓國海洋大學校 博士學位論文, 2002.
7. Manabumi Masuko and Kazumi Okada, “Tribology of O/W Emulsion,” *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.36, No.5, pp.369-374, 1991.
8. 李鎭烈, “腐蝕・浸蝕・防蝕,” 曉星出版社, pp.189-190, 2001.
9. S.M. Ahmed, K. Hokkirgawa, Y. Ito, R. Oba, and Y. Matsudaira, “SEM Observation of the Intial Stage of the Incubation Period of Vibratory Cavitation Erosion,” *JSME(B)*, Vol.55, No.520, pp.3630-3635, 1989.
10. 林祐助, 李鎭烈, “베어링 合金材에 대한 캐비테이션 浸蝕舉動에 미치는 潤滑油 環境의 影響,” 韓國潤滑學會誌, pp.57-60, 1993.