

論 文

선박 슬러지유 환경에서의 초음파진동자 선단의 침식손상(1)  
- 유온도의 변화에 대해서 -

이진열\* · 정지선\*\* · 하만식\*\* · 한원희\*\*

Erosion Damage of Ultrasonic Vibrator Tip in Marine  
Sludge Oil Environment

- as for oil temp. change -

*Jin-Yeol Lee\* · Ji-Sun Jung\*\* · Man-Sik Ha\*\* · Won-Hui Han\*\**

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서론

2. 실험방법 및 장치

3. 결과 및 고찰

4. 결론

참고문헌

Abstract

Many investments and works being continued to preserve green ocean in each countries of the world. Especially, the researches on the prevention of marine oil pollution being strengthened.

It is not easy to dispose sludge oils that were produced necessarily in the ships operation, so that they are transferred to shore treating facility after collected inside the ship's sludge tank mostly. However, this shore transferring method is not only costly and time consuming but also entails risk of oil pollution. In this regard, it will be the best way to manage the sludge oils inside ship itself.

The purpose of this study is to devise an ultrasonic breaking systems which recycle the sludge oil from ships into usable oil to be burnt. In this paper, the first place, matrix structures of sludge fuel

\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\* 한국해양대학교 대학원 기관공학과

oil(SFO) and sludge lubricating oil(SLO) with the irradiation time for ultrasonic vibrator were interpreted. And, erosion damage for vibrator horn tip which is one of important part of ultrasonic breaking systems was examined under such an environment of the sludge oils.

The material for horn tip is being made of SS41 steel and its erosion phase was investigated with variation of the vibration amplitude of  $50\mu\text{m}$  and  $24\mu\text{m}$  as well as the change of temperature in the oil environments.

It is suggested that the experimental results can be helpful to the development of sludge oil disposing systems for the vessel.

## 1. 서론

현재 각 나라에서는 청정 해양을 유지하고 보호하기 위하여 많은 물적·인적인 투자와 연구를 계속하고 있다. 이에 부응하여 우리나라에서도 해양오염을 일으키는 많은 인자들에 대한 대책을 강구하고 있으며[1], 특히 해양오염중 심각한 문제인 유류오염 및 방지에 대한 연구를 강화하고 있다. 그 중 선박에서 발생하는 유류오염원중의 하나인 슬러지유 처리에 대한 연구도 많이 진행되고 있는 실정이다[2].

이러한 선박내의 슬러지유(Sludge oil), 빌지(Bilge), 오페유(Dirty oil)등은 가능하면 유수분리기(Oily water separator)를 거쳐서 선외로 배출하거나, 선내의 탱크에 모아서 육상으로 이송하는 경우가 대부분이다[3]. 그러나 육상 이송의 경우에 경제적 측면에서의 비용 발생과 더불어 시간적인 소모도 많을 뿐만 아니라, 해양오염의 위험성도 많기 때문에 근본적인 선박내의 처리가 가장 중요하다고 하겠다.

이들 슬러지유를 선내에서 처리하는 방법중의 하나인 초음파 진동장치는 초음파 진동에 의한 유입자의 분쇄작용을 응용하여 소각기(Incinerator)에서의 소각이나 보일러(Oil fired boiler) 등의 연소 연료유로 재사용할 수 있는 방법으로서 그에 관련된 여러 가지 연구도 진행되고 있다[4,5]. 한편, 초음파 진동장치의 경우 그 중요 부품중의 하나인 진동자가 여러 가지 작동환경에서 침식이 되어 손상을 받는 문제가 종종 발생되고 있다. 따라서 이 연구에서는 초음파 진동장치 중 중요부품인 진동자에 발생하는 침식양상을 조사하여 이에 대한 대책을 제시함으로써 선박슬러지 처리 장치의 개발 자료로 활용하고자 한다.

우선 이 논문에서는 연료유 슬러지(Sludge Fuel Oil : SFO)와 윤활유 슬러지(Sludge Lub. Oil : SLO)의 초음파 진동의 조사시간에 따른 조직(Matrix)변화 등에 대해서 조사하였다. 또한 이들 슬러지유 환경에서 진동자 팁(Tip)의 침식손상을 규명하기 위하여 일반강으로 가장 많이 활용되는 SS41을 팁의 재료로 활용하였다[6]. 이 SS41강에서의 침식양상을 규명하기 위하여 침식세기의 기본이 되는 진폭의 변화( $50\mu\text{m}$ 과  $24\mu\text{m}$ 등)에 따른 침식손상을 조사하였으며, 아울러 유향경의 온도변화에 따른 침식손상특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법 및 장치

### 2.1 시료유의 특성

시료유는 선박의 슬러지 탱크에서 채취한 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO)로 하였다. 유입자의 분포와 조직상태를 알아보기 위한 시료유의 스폿테스트(spot test)는 거름종이(ashless filter paper:100 circles 11.0cm, No.93)를 사용하였고, 스폿테스트 결과를 전자현미경(DW-THN/1011)을 이용하여 100배로 확대한 후 Color CCD Camera(SAC-410ND)로 촬영한 것을 모니터에 의해 관찰하였다.

또한 점도 및 비중은 점도계(Viscometer LVT)와 비중계(Specific gravity meter : range 0.7~1.85)를 이용하였고, 그 외 특성조사는 전문기관에 의뢰하여 조사하였다. 이들 시료유에 대한 기본적인 특성은 Table 1에 보이고 있다.

Table 1 Properties of marine sludge oil(SFO and SLO)

Oil	Properties	Kinematic viscosity (cSt/40°C)	Specific gravity 15/4°C	Flash point (°C)	Pour point (°C)	Residual carbon (Wt %)	Total acid number (mgKOH/g)	Viscosity index (VI)
SLO (Sludge Lub. Oil)		152.7	0.922	240.0	-15	4.50	1.80	96
SFO (Sludge Fuel Oil)		75.5	0.965	123.0	-	1.74	-	-

2.2 시험편 및 실험장치

시험편은 일반구조용 탄소강재로 그의 화학적인 조성 및 기계적인 특성은 Table 2에 나타내고 있다. 이 시험편 표면은 사포 1200번까지의 연마 및 오일랩핑(Oil lapping)한 후 아세톤으로 탈지하였으며, 표면이 경화되지 않도록 저속가공하였다. 시험편 표면 거칠기는  $0.8\mu\text{m rms}$ 이고 진동자 혼에 직각으로 위치 할 수 있도록 평면 절삭하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직경  $15.9\text{mm}(\pm 0.5\text{mm})$ , 두께  $6\text{mm}$  ( $4\sim 9\text{mm}$  범위내가 표준)이고, 진동자의 팁 선단에 고정하는 나사부 길이는  $10\text{mm}(\pm 0.5\text{mm})$ 으로 하였다 [7]. 시험편의 무게감소량은 저울(Digital balance)을 이용하여 측정하였고, 온도의 영향을 고려하여 충분히 냉각하였다.

Fig. 2는 실험장치에 포함된 주요요소의 개략도를 보여주고 있으며, 실험장치는 1992년도에 개정된 ASTM-G32 시험규격[8,9]에 맞게 제작하였다. 초음파 진동장치는 압전소자의 압력변환기에 의해 발생한 종진동을 지수관계상의 혼(Horn, 진폭혼)에서 증폭시켜서 진동자 선단에 취부한 시험편을 용액중에서 진동시켰으며, 시험편 단면에 캐비테이션(또는 캐비티)을 발생시켜서 침식시켰다. 따라서 시험편 단면에서 진폭이 극대화될 수 있도록 진폭혼의 길이를 설계함과 동시에 시험편의 중량도 진동자의 무게를 포함시켜서 설계하였다. 진동자 혼의 공진주파수는  $20\text{kHz}(\pm 0.5\text{kHz})$ 이고, 진폭은  $50\mu\text{m} \pm 5\%$  및  $24\mu\text{m} \pm 5\%$ 의 진동자를 사용하였다.

유환경 온도는 가열기(Oil bath : OB-200 type)를 이용하여 각 실험의 경우에 적합하도록 조정하여 규정 온도범위( $\pm 3^\circ\text{C}$ )를 유지하였으며, 가열기 내부에 비이

커(Beaker 2000ml)를 삽입하여 유환경용액량을 조정하였다. 또한 비커의 밑바닥에서 시험편 상부 침지용액 깊이는  $100\text{mm}$ 이상이 되도록 하여서 캐비티의 분사가 충분하도록 하였다. 그리고 진동자 혼에서 발생하는 열을 식히기 위하여 냉각팬을 취부하여 사용하였고, 또한 용액의 분포가 원활히 유지되도록 교반하며 실험하였다.

2.3 실험방법

선박내에서 사용 또는 발생하는 유류 중 점도와 비중이 너무 커서 그 상태로는 재사용이 불가능한 슬러지유에 대해서 온도의 변화를 주고 그에 따른 조직의

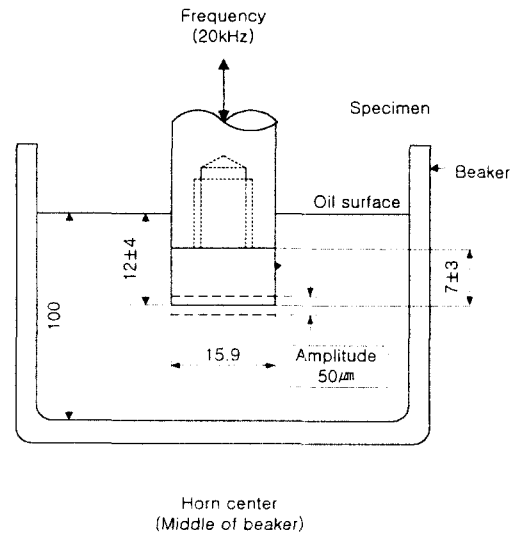


Fig. 1 Schematic dimension of test specimen

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of SS41 specimen

Chemical composition	C	Si	Mn	P	S	Fe
	0.12	0.29	0.59	0.01	0.01	Balance
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
	42.4		25.8		32	

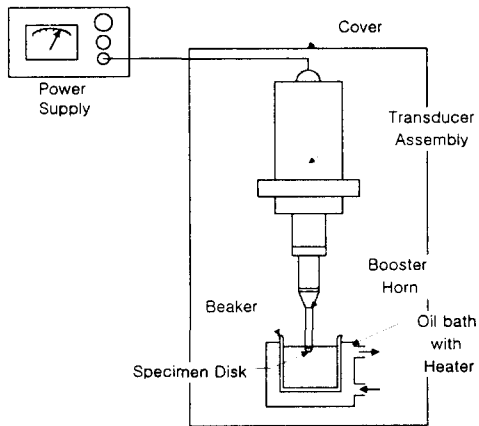


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic vibrator test apparatus

변화를 일차적으로 연고자 실험을 수행하였다. 이러한 온도변화 환경에서 초음파 진동자를 시료유에 직각으로 조사하였고, 그 진동 발생으로 인한 캐비테이션(또는 캐비티)에 의한 유입자의 분쇄작용으로 슬러지유의 조직변화를 관찰하였다.

또한 이 온도를 변화시킨 각 용액에서 시험편 표면의 침식손상을 고찰하기 위해 무게감소량(Weight loss)을 측정하였고, 아울러 실험시간에 따른 무게감소율(Weight loss rate)도 측정하였다. 이 때 무게 감소량은 시험편을 혼으로부터 분리하여서 아세톤으로 탈지하고, 드라이로(Dryer)로 건조시킨 후 정밀전자저울(LIBROR AEX-200B)로 측정하였다.

그리고 진폭의 크기에 따른 침식양상을 관찰함으로써 침식손상에 미치는 캐비티의 효과를 어느 정도 조

사할 수 있으므로 이에 대한 실험도 동시에 실행하였다. 이들에 미치는 간단한 식을 정리하면 다음과 같다.

진폭, 진동수를 가미한 인자로서 단위시간, 단위면적당의 방사한 에너지플럭스(Energy flux)

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho c A^2 \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$$

로 표시 될 수 있고, 또한 압력분포는

$$P_{\max} = 2\pi f \rho c A$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $f$ : 진동수,  $\rho$ : 액밀도,  $c$ : 액중의 음속 및  $A$ : 진진폭을 나타낸다.

이 때 손상속도( $R$ )는 손상부 면적( $S$ )에 방사되는 에너지( $E$ )에 비례한다고 가정하면 다음의 식을 얻을 수 있다. 즉,

$$E = I \times S = \frac{1}{2} \pi^3 f^2 \rho c A^2 d^2$$

그러므로,

$$R \propto f^2 A^2 d^2$$

여기서  $d$ 는 손상부의 직경을 나타낸다. 따라서, 손상속도에 미치는 진폭의 영향을 고려하여 진동수( $f$ ) 및 직경( $d$ )을 고정하고 진폭( $A$ )을 변화시켜서 실험을 수행하였다[10].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초음파 진동에 의한 슬러지유의 조직변화특성

Fig. 3은 초음파 진동자의 슬러지유 환경에 조사된 캐비티의 형성 및 붕괴에 의한 슬러지유 조직변화를 촬영한 사진을 실험시간에 따라 정리하였으며, 사진의 배율은 25배로 한 것이다.

즉 유효유 슬러지(SLO) 및 연료유 슬러지(SFO)의 바탕조직(①), 2시간(②) 및 4시간(③) 침식실험 후의 변화를 나타내고 있다.

이에 의하면 SLO의 ①에서는 흰바탕으로 보이는 유화액상의 덩어리가 많이 보이고, 엉켜있는 망상조직상을 볼 수 있다. ①에 비하여 2시간 실험후의 조직바탕 ②에서는 전반적으로 조직바탕의 덩어리가 미립화되어 있고, 수지상의 조직이 다소 구형화되어 있다. ③에서는 전반적으로 조직이 작고 섬세하며 전체적으로 미립자로 분포되어 있다. 즉 실험시간이 경과하면서 초음파 진동자에 의한 분쇄작용으로 유립자의 덩어리가 판상형태로 미립화되고 균일하게 분산·분포된 것을 볼 수 있다.

또한 SFO의 ④ 바탕은 유화 덩어리가 크게 형성되어 묻쳐 있는 모습을 볼 수 있고, ⑤에서는 유화 덩어리가 분쇄되면서 침상의 유미립자로 변화하고, 더욱 실험시간이 경과된 ⑥ 바탕은 거의 완전한 침상조직의 폴리머를 형성하고 있다. 여기에서 알 수 있는 것은, 실험시간이 경과되면서 SFO 바탕조직이 침상그물 형태의 망상조직으로 변화되며 전 바탕에 고르게 분포하게 된다는 것이다. 따라서 SLO 및 SFO은 초음파 진동에 의한 분쇄작용으로 인하여 유효유(LO) 및 연료유(FO)의 본 바탕에 가까운 형태로 변화된다는 것을 알 수 있다. 이것은 슬러지유의 재연소 가능성을 보여주고 있는 현상이라고 사료된다.

#### 3.2 SLO에서의 진폭 50 $\mu$ m인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig. 4는 진동수 20kHz, 진폭 50 $\mu$ m인 진동자의 SLO 환경에서 캐비티의 조사시간에 따른 진동자 혼 선단에서의 시험편 무게감소량 Wt(mg)을 보여주고 있다. 이

에 의하면 30 $^{\circ}$ C 유허경에서의 무게감소량이 가장 크게 나타나고, 온도가 증가함에 따라서 무게감소량이 적은 것을 알 수 있다.

이와 같이 온도가 증가할수록 무게감소량(또는 침식손상량)이 적어지는 이유는 온도의 증가에 따라 유점도와 밀도가 낮아지면서 캐비티의 수는 증가하지만 크기(또는 직경)가 작아지기 때문이다. 또한 저점도에서는 캐비티의 방사시간이 짧아지고, 기포붕괴에 의한 충격압이 적으며, 액체의 표면장력도 감소하기 때문으로 생각된다[11].

실험시간이 증가할수록 무게 감소량이 증가하는 것은 초기에는 진동자 혼의 선단의 시험편이 연성파괴이지만 실험시간이 지남에 따라 취성파괴로 천이되고, 침식소공의 벽면에는 벽개파면이 발생된다고 보고하는 내용[12]과 유사한 결과로 생각된다.

따라서 유허경의 조직변화나 물성의 변화에 따라 침식손상도 다르지만, 시험편 자체의 성질변화에도 침식손상이 민감하게 작용하는 것으로 생각된다.

실험시간의 경과에 따라 시험편의 침식손상이 어떻게 진전되는 가를 분명히 정리하기 위하여 Fig.5에 실험시간에 따른 무게감소율 R(mg/h)을 나타내고 있다. 이에 의하면 실험초기에서 실험시간이 경과함에 따라서 침식손상율(또는 무게감소율)이 증가하다가 다시 감소하는 추세이고, 실험시간 10~20시간 정도에서 최고 침식손상율을 보이는데 온도가 높을수록 최고 침식율의 발생시간이 길어지는 경향을 나타낸다.

즉 진동자 혼 선단으로부터 방사되는 캐비티에 의한 침식소공은 실험초기에는 적으면서 얇게 발생하고, 계속된 방사에 의해 최대 침식소공이 형성되어 최고 침식손상율을 보이는데, 더욱더 실험시간이 경과하면 침식소공이 증가하고 깊게 되면서 캐비티가 소공내에 부착되고 방사작용이 둔화됨과 동시에 완충작용(Cushion effect)을 받아서 침식손상율이 감소됨을 알 수 있다[13].

또한 온도가 증가된 유허경에서 최고 침식손상율이 늦게 나타나는 것은 온도의 증가에 의한 점도저하는 캐비티의 수는 증가시키지만 캐비티가 작기 때문에 침식소공에 의한 침식손상이 저온도의 유허경에 비하여 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

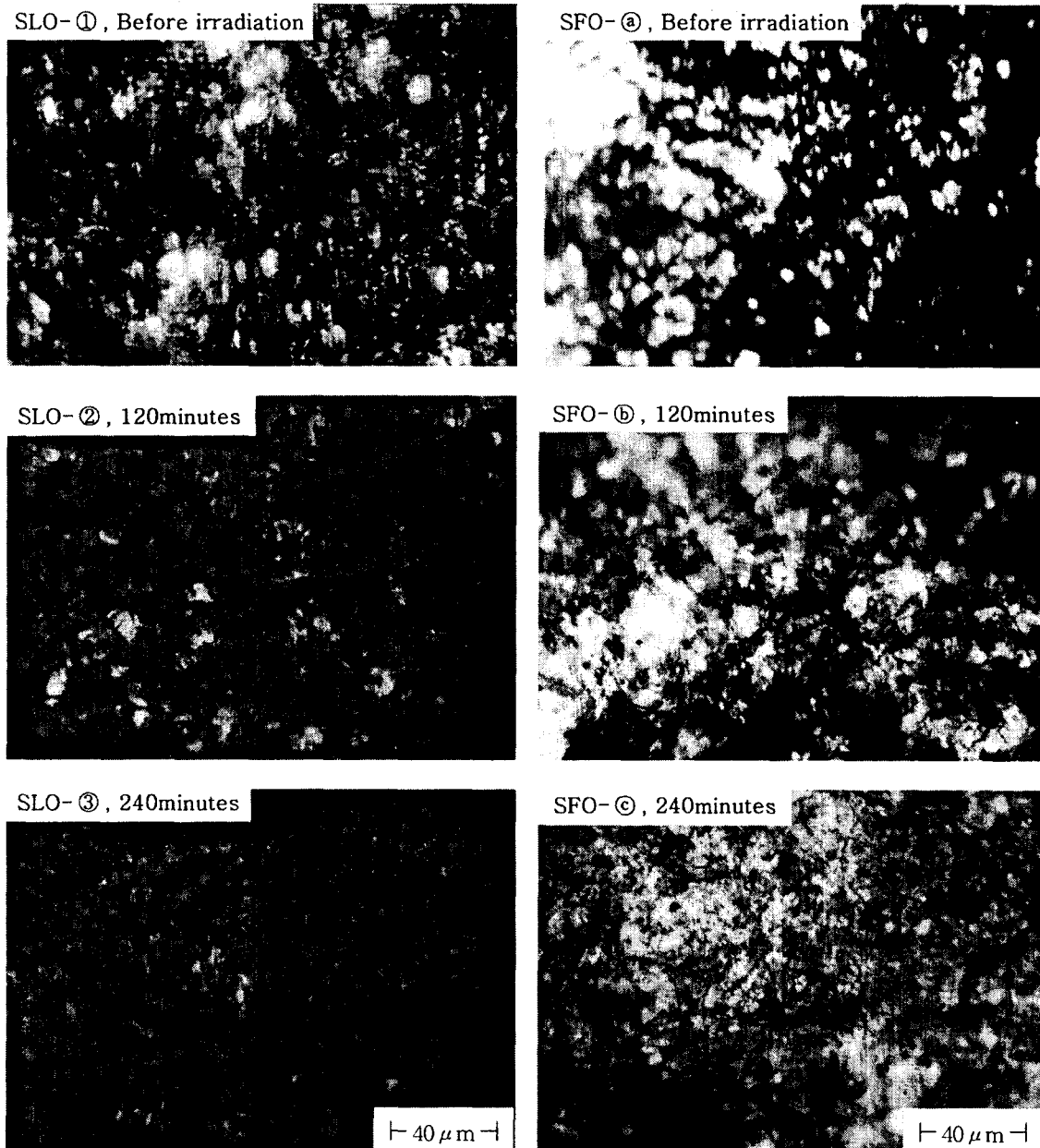


Fig. 3 Comparison of Matrix Structure of SLO and SFO in Testing time by Ultrasonic Irradiation (Frequency : 20kHz, Amplitude :  $50\mu\text{m} \pm 5\%$ )

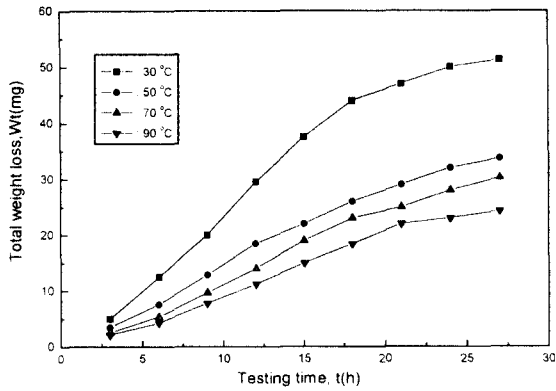


Fig. 4 Weight loss vs testing time in various temp. environment of SLO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 50 $\mu$ m)

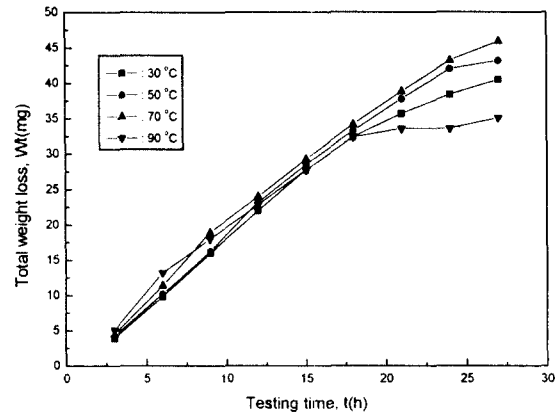


Fig. 6 Weight loss vs testing time in various temp. environments of SFO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 50 $\mu$ m)

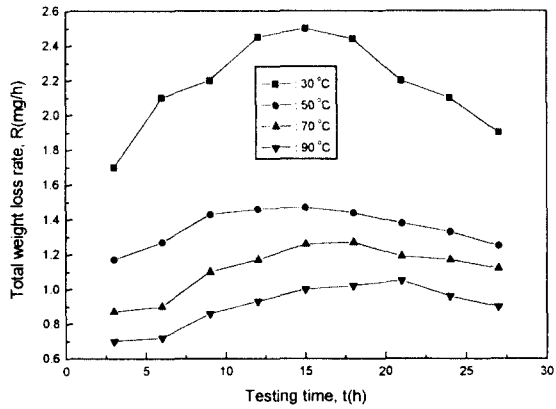


Fig. 5 Weight loss rate vs testing time in various temp. environments of SLO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 50 $\mu$ m)

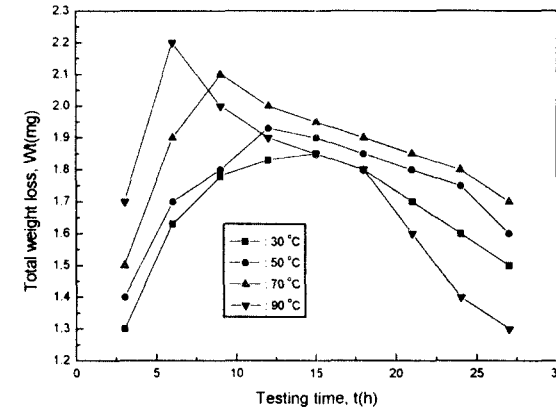


Fig. 7 Weight loss rate vs testing time in various temp. environments of SFO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 50 $\mu$ m)

### 3.3 SFO에서의 진폭 50 $\mu$ m인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig. 6은 연료유 슬러지에 대한 온도변화 환경에서의 실험시간에 따른 무게 감소량을 정리한 것이다.

이 그림에 의하면 18시간 실험시간까지는 거의 유사한 침식손상량을 보이다가 24시간 실험이후에는 70 $^{\circ}$ C > 50 $^{\circ}$ C > 30 $^{\circ}$ C > 90 $^{\circ}$ C로 무게감소량이 증가된다.

이와 같이 거의 비슷한 침식손상량을 보이는 것은

온도의 변화에 의한 점도의 변화가 민감한연료유로서 유점도가 떨어지면 표면장력도 동시에 감소하는데, 이 경우 유환경의 증기압이 낮아 캐비티의 형성은 용이하지만 캐비티의 방사압이 약하게 된다. 즉 유점도의 강하에 의해 캐비티의 수는 증가하는 반면에 캐비티의 크기가 작아지므로 서로 상충된 효과를 보이기 때문인 것으로 생각된다.

또한 24시간이후의 실험경과에서 70 $^{\circ}$ C > 50 $^{\circ}$ C > 30 $^{\circ}$ C

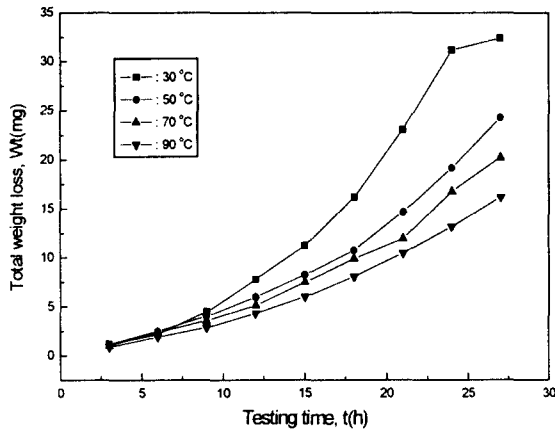


Fig. 8 Weight loss vs testing time in various temp. environments of SLO(Frequency : 20kHz, Amplitude :  $24\mu\text{m}$ )

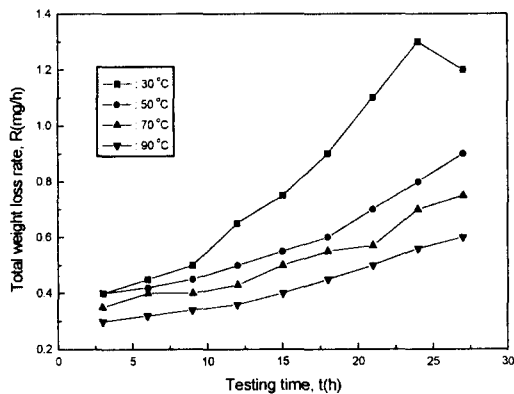


Fig. 9 Weight loss rate vs testing time in various temp. environments of SLO(Frequency : 20kHz, Amplitude :  $24\mu\text{m}$ )

추세로 무게감소량이 나타나는 것은 온도증가에 의한 점도의 저하에 따른 캐비티의 증가보다는 저온도에서의 캐비티의 크기에 더 영향을 받기 때문이고, 특히 90°C 유환경에서 무게감소량이 감소하는 것은 과도한 점도저하에 의한 미세한 캐비티가 침식소공에 잘 흡착되어 캐비티의 방사능력이 약화된 것으로 추정된다.

이러한 경우들을 좀더 면밀히 관찰하기 위하여 Fig.

7에 실험시간 경과에 따른 무게감소율을 나타내 보이고 있다. 이에 의하면 최고 침식손상율이 90°C > 70°C > 50°C > 30°C의 순으로 크게, 그리고 빠르게 나타나는 것은 연료유 슬러지의 온도증가에 의한 저점도에서의 증기압의 상승때문에 캐비티의 침식소공 즉 침식손상율이 증가한 것으로 보인다. 따라서 침식소공에 캐비티의 흡착에 의한 완충작용도 점도의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

#### 3.4 SLO에서의 진폭 $24\mu\text{m}$ 인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

앞서 수행한 실험방법과 동일한 방법이지만, 무게감소량(Wt)이나 무게감소율(R)에 큰 영향을 미치는 진동수는 변화시키지 않고, 진폭만을  $50\mu\text{m}$ 에서  $24\mu\text{m}$ 로 변화시켜서 캐비티의 에너지의 방사영향에 대해서 조사하였다. Fig.8은 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 실험시간 경과에 따른 무게감소량(Wt)을 정리한 것이다. 이에 의하면 실험시간이 경과함에 따라서 무게감소량이 30°C > 50°C > 70°C > 90°C의 순으로 나타난다.

이러한 상황은 윤활유에서의 점도지수(Viscosity index)가 높기 때문에 온도증가에 따른 점도의 강하작용이 둔감하여 점도의 영향을 적게 받기 때문이고[14], 또한 Fig.4의 무게감소량에 비하여 상당히 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 8에 대한 무게감소율을 분석하기 위하여 Fig.9에 그 결과를 정리하여 보았다. 여기에서는 유온도 환경이 30°C에서만 최고 침식손상율을 보이고 있다. 나머지 유온도 환경에서는 27시간 동안 침식손상 실험을 한 결과로서는 알 수가 없었다.

이러한 현상을 고찰해 보면 진폭의 영향이 침식손상율에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉 진폭을  $50\mu\text{m}$ 에서  $24\mu\text{m}$ 로 낮추면 침식손상율은 거의 제곱 정도로 감소한다는 보고는 앞에서 설명하였지만, 여러 조건의 변수가 많이 존재하므로 반드시 일치한다고는 볼 수 없다고 사료된다.

#### 3.5 SFO에서의 진폭 $24\mu\text{m}$ 인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig. 10은 연료유 슬러지(SFO) 환경에서 진폭  $24\mu\text{m}$



인 경우에 실험시간 경과에 따른 SS41의 무게감소량을 정리한 것이다. 이 결과에 의하면 실험경과시간이 18시간정도까지는 무게감소량이 90℃ > 70℃ > 50℃ > 30℃의 경향을 나타내고, 그 이후 실험시간에서는 90℃에서의 무게감소량이 다른 실험 온도 유환경에 비하여 크게 감소되어 있다.

이와 같이 온도 증가에 의하여 무게감소량이 증가하는 것은 점도가 감소하므로 캐비티의 형성이 용이하고 캐비티의 수가 증가하며, 또한 재료의 온도에 의한 열화작용도 어느 정도 가미된 것으로 사료된다.

특히 실험시간이 18시간 경과 후에 90℃ 유환경에서 무게감소량이 현저히 감소하는 것은 저점도에서의 미세한 캐비티가 침식소공에 흡착되어 더욱 캐비티의 방사억제작용이 억제되기 때문으로 생각된다.

이러한 과정을 좀더 정밀히 관찰하기 위하여 Fig. 11에 Fig. 10의 무게감소량을 무게감소율로 정리하여 나타내었다.

정리된 결과를 살펴보면 시험편의 최고 무게감소율은 유환경 온도가 90℃인 경우에서가 다른 온도의 유환경에 비하여 비교적 짧은 실험시간 내에 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 나타내는 것은 연료유는 온도변화에 민감하게 반응하여 점도가 강하하므로 저점도의 영향과 재료의 열화작용이 서로 상승되었기 때문에 무게감소율이 증가한 것이고, 그 침식소공

에서의 캐비티의 흡착이 큰 영향을 미쳐 실험시간 18시간이 경과하면서는 급격히 무게감소율이 저하한 것으로 사료된다.

3.6 SLO 및 SFO에서의 진폭의 크기에 따른 무게감소량의 비교

Fig. 12는 30℃ 유환경에서 진폭 50μm 및 24μm일 때

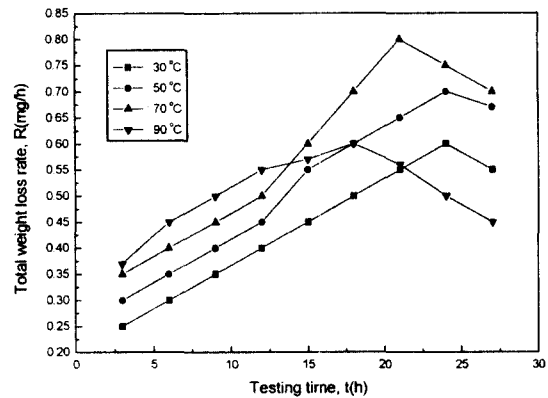


Fig. 11 Weight loss rate vs testing time in various temp. environments of SFO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 24μm)

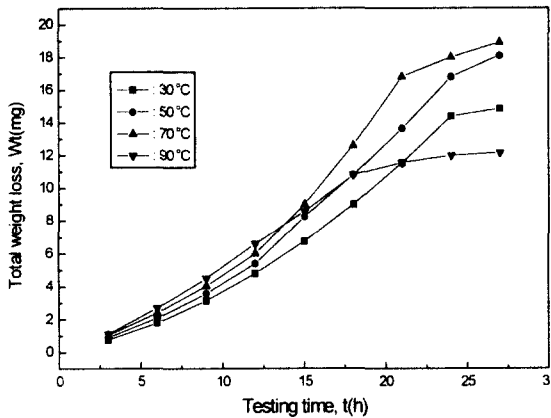


Fig. 10 Weight loss vs testing time in various temp. environments of SFO(Frequency : 20kHz, Amplitude : 24μm)

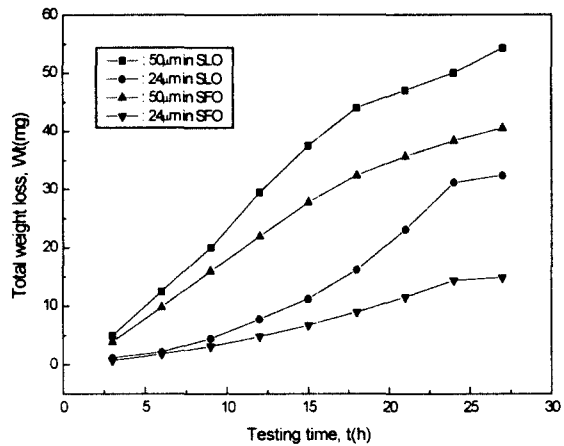


Fig. 12 Comparison of weight loss vs testing time between 50μm and 24μm amplitude in 30℃ SLO and SFO environment.

의 SLO 및 SFO에 대한 각각 무게감소량을 실험시간에 따라 정리한 것이다. 이에 의하면 진폭의 차에 의한 무게감소량의 차이의 범위는 실험시간이 경과함에 따라 감소하고 있으며, SLO의 경우가 SFO보다 감소폭이 적다.

이와 같이 진동자의 진폭크기에 따른 무게감소량의 차이가 실험초기 보다 실험시간이 경과함에 따라 서로 좁아지며, 둔화되는 것은 침식소공에 흡착된 캐비티의 량이 침식소공의 성장과 더불어 증가하므로 진폭의 크기에 의한 캐비티의 방사능력이 둔화되기 때문으로 생각된다.

또 저진폭인 24 $\mu$ m에서의 침식소공은 고진폭인 50 $\mu$ m에서 보다 크기는 적지만 수는 증가되는 것으로 사료되기 때문이다.

그리고 SLO의 경우보다 SFO에서 진폭의 차이에 의한 무게감소량의 감소폭이 적은 것은 SLO 점도지수가 SFO보다 크게 높기 때문에 캐비티의 형성에 큰 차이가 없기 때문으로 사료된다.

또한 SLO의 경우가 SFO의 경우보다 진폭에 관계없이 진동자의 무게 감소량이 큰 것은 앞서 설명한 바와 같이 점도지수와 밀도가 높은 SLO에서 캐비티의 발생량은 작지만 캐비티의 크기가 크기 때문에 캐비티에 의한 기포 붕괴압이 크기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

SLO 및 SFO 환경에서의 온도변화 및 초음파 진동자의 진폭 변화에 따라 SS41강에 대한 캐비테이션 침식실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SLO 및 SFO 환경의 슬러지 덩어리 바탕조직이 초음파 진동에 의한 캐비테이션 실험이 경과되면서 미세한 판상이나 구상의 망상조직으로 변화되고, 슬러지 덩어리도 전면에 골고루 분산·분포된다.
- 2) SLO 환경에서 초음파 진동자 선단의 무게감소량과 감소율은 온도변화 30 $^{\circ}$ C > 50 $^{\circ}$ C > 70 $^{\circ}$ C > 90 $^{\circ}$ C의 순으로 나타나며, 온도변화에 의한 점도의 영향을 적게 받는다.
- 3) SFO 환경에서 초음파 진동자 선단의 무게감소량과

감소율은 SLO 환경에서와는 반대로 고온의 환경에서 크게 나타나는 경향을 보이지만, 90 $^{\circ}$ C인 고온의 유환경에서는 저점도에서의 미세한 캐비티가 침식소공에 흡착되어 캐비티의 방사역제작용이 억제되기 때문에 실험시간이 경과함에 따라서 현저히 감소하는 추세이다.

- 4) SLO 환경에서 초음파 진동자 선단의 무게감소량은 진폭의 크기(50 $\mu$ m와 24 $\mu$ m)에 민감하게 작용하는 반면, SLO에 비해 점도지수가 크게 낮은 SFO 환경에서의 진폭에 의한 무게감소량의 변화는 캐비티의 형성이 진폭에 영향을 덜 받기 때문에 SLO 환경에 비하여 현저히 둔감하다.

#### 참고문헌

- [1] Dr.Kang Chang-Gu, "Technology Support System for Maritime Safety and Pollution Management", Proceeding of the Korea-Canada Symposium on Marine Environment, Korea National Maritime Police Agency, Inchon Korea, pp245-254, 1996.
- [2] 이진열 · 하만식 · 한원희, "선박유류 입자의 균질 효과에 미치는 초음파 분쇄작용", 해양환경 · 안전학회, 제5권 제2호, pp68, 1999.
- [3] J.Crawford · F.I.Mar.E.E, "Marine and Offshore Pumping and Piping System", Butterworths, London, pp91-99, 1981.
- [4] 村田徳治, "リサイクル技術の 實際", オーム社, pp179-182, 1993.
- [5] S.Vigneswaran · C.Visvanathan, "Water Treatment Process", CRC Press, New York, pp90-95, 1995.
- [6] 황재호, "진동 캐비테이션에 의한 연강의 침식-부식 특성 및 억제에 관한 연구", 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp13-15, 1997
- [7] 岡田庸敬 · 服部修次, "キャビテーション壊食(2)", 機械の研究, pp1080, 1997.
- [8] Annual Book of ASTM Standard, "03:02 Wear and Erosion : Metal Erosion, G-32-85", ASTM,

- pp115-119, 1989.
- [9] 이진열·정지선, “선박 시스템유중 베어링 합금재의 침식거동에 미치는 각종 인자의 영향(2)”, 한국해양대학교 부식방식공학연구소 논문집 제2권, pp97, 1999
- [10] 腐食防食協會, “エロジョンの コロジョン” 裳華房, pp107-109, 1987.
- [11] 李鎮烈, “腐蝕·浸蝕·防蝕”, 曉星出版社, pp203, 2001
- [12] 前掲書[10], pp194-199.
- [13] 이진열·정지선, “선박시스템유중 베어링 합금재의 침식거동에 미치는 각종 인자의 영향(1)”, 한국해양대학교 해양안전환경연구소 논문집 제 1집, pp91-92, 1999.
- [14] 李鎮烈, “油類工學”, 曉星出版社, pp284-285, 1999