

초음파 진동자의 반복진동에 의한 슬러지유의 균질효과 및 디스크의 침식양상

한 원 회 · 이 진 열*

한국해양대학교 대학원 기관공학과, 한국해양대학교 기관시스템공학부*

The Homogenizing Effect of Sludge Oil and an Erosion Aspect of Horn Disc by Repeated Vibration of Ultrasonic Transducer

Won-Hui Han and *Jin-Yeol Lee

Dept. of Marine Engineering, School Graduate, Korea Maritime University

*Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University

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 from ship.

The present study deal with the ultrasonic breaking systems which recycle the sludge oil from ships into usable oil to be burnt. The first place, experimental studies were carried out to investigate the homogenizing effect of the marine oils and the erosion aspect of horn disc by repeated vibration of ultrasonic transducer. Variation of the properties(viscosity, specific gravity and pH) and the matrix structures for the environment of various marine oils were interpreted to analyse the breaking, dispersion effects by cavity. The erosion damages for horn disc SS41 steel with weight loss rate and the irradiation time to max. erosion rate were simultaneously examined according to the variation of the transducer amplitude, the oil temperature and the immersing depth of horn disc.

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.

Keywords : transducer amplitude, viscosity, specific gravity, weight loss rate, max. erosion rate, sludge oil, horn disc

1. 서 론

각국은 청정한 해양, 해역을 위하여 많은 노력을 하고 있으며 해양오염을 일으키는 많은 인자들에 대한 규제도 강화하고 있는데, 특히 해양오염중 심각한 문제인 유류오염 발생과 방지 대책에 대해서

많은 노력을 기울이고 있다.¹⁾ 따라서 선박에서 발생하는 유류오염원 중 하나인 선박유류의 선내처리 에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.²⁾

선박은 국제간 경쟁력을 확보하기 위하여 고속화, 대형화와 더불어 운항경비절감의 일부분인 유류비 절감에 많은 시간을 분담하는 데, 이러한 측면에 따

라 선박 연료유 비중(S.G)이 1.00(15/4°C)이상이고, 점도(viscosity)가 3,500(cSt/40°C) 정도인 저질 중유를 사용하고 있다.^{3,4)} 이러한 연료유가 주기관이나 발전기의 연료유로 사용되는 경우에 불완전 분무상태, 퇴적물 생성, 카아본 생성등 많은 연소상의 문제점이 있을 수 있으며, 특히 이러한 연료유가 누출하여 기관실의 빌지(bilge), 청정기에서의 슬러지(sludge) 형성 등의 폐유를 유발시키며, 선박내에서 처리하기가 곤란한 경우도 발생한다.⁵⁾ 이러한 폐유처리를 위하여 빌지의 성분인 유분과 수분을 분리할 수 있는 유수분리기(oily water separator)가 IMO결의 MEPC.60(33)에서 정한 시험기준에 따른 배출 유분농도 15ppm에 만족하도록 구성되어 있으며,⁶⁻⁹⁾ 더욱 분리효과를 높이기 위하여 적층판형(laminated disc type)인 전처리 장치가 유수분리기에 연계되어 설치되어 있는 경우도 있다.^{10,11)} 또한 회수된 폐유를 선박내에서 자체 처리하기 위한 폐유소각기(waste oil incinerator)가 기관실에 설치되어 운용되고 있다.^{12,13)} 그러나 전처리장치가 부착된 유수분리기를 통하여 분리·회수된 기름이라도 소각용 기름 또는 다른 용도의 선박연료로 재 활용하는 데에는 유화, 산화작용에 의한 고형물, 콜로이드(colloid)상의 교착상태와 같은 문제점을 가지고 있기 때문에 그대로는 사용이 불가능 실정이다.¹⁴⁾

이 연구에서는 초음파 진동장치를 이용하여 선박에서 생성되는 폐유를 초음파 진동에 의한 분쇄작용을 응용하여 소각기에서의 소각이나 보일러(oil fired boiler) 등의 연소 연료유로 재사용 할 수 있는 방법에 관해 검토하고자 하였다. 현재 선박 폐유를 보일러의 연료유로 재사용하고자 하는 연구가 진행되어 여러 가지 장치들도 개발되고 있고, 또 조악한 선박연료유의 개질을 위하여 초음파 분쇄기를 사용한 예가 있으나, 폐유를 분쇄하여 보일러 등의 연료유로 사용할 수 있는 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 초음파 진동자 디스크를 선박유류내에서 반복진동시켜서 유류의 조직구조, 분쇄효과 및 미립자의 분포상태를 규명하고,¹⁵⁾ 또 슬러지유에서의 진동자 디스크(disc)의 침식손상을 규명하고자 하였다.¹⁶⁾ 실험에 사용된 진동자는 재질이 일반강으로 가장 많이 활용되는 SS41강을

사용하였으며, 이러한 SS41에서의 침식양상을 침식 세기의 기본이 되는 진폭의 변화에 따른 침식손상, 유온변화에 따른 침식손상특성에 따라 규명하였고, 진동자 혼 디스크의 침지깊이에 따른 캐비테이션 침식손상도 관찰, 조사하였다.

이러한 실험의 결과는 환경과 시험편의 성질이 다르지만, 해수환경에서의 원심펌프 임펠러(impeller)에서의 캐비테이션 침식손상, 선박 추진기인 프로펠러(propeller)에서의 침식손상, 그 외에 회전체 자신에 의해 캐비티(cavity)를 발생시키면서 자신이 침식손상을 입는 기기의 캐비테이션 침식(cavitation erosion) 발생에 대한 자료로 활용할 수 있다. 또한 초음파 진동자의 분쇄작용에 따른 선박 슬러지유를 처리하여 보일러 연료유로 재사용되는 연구개발에 초석이 되리라 기대한다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험에 응용된 배경 자료

2.1.1 슬러지유의 발생과 정의

선박유류(marine oil)는 선박추진용 내연기관 연료유, 증기터빈용 보일러 연료유, 발전용 연료유 및 선박내의 각종 기계류에 사용되는 윤활유를 총칭하고 있다. 이러한 연료유는 경유(MDO)에서 저질중유에 이르기까지 다양하고 기관특성에 맞는 점도, 비중 및 인화점 등을 갖고 있다. 또한 선박 윤활유(액체윤활유 및 반고체윤활제 포함)는 윤활작용, 냉각작용, 밀봉작용, 응력분산작용 및 방청작용 등의 특성에 맞도록 시스템유, 실린더유, 엔진유, 기어유, 냉동기유, 공기압축기유, 청정기유, 작동유, 절삭유 및 그리스 등 다양하지만 각 기기의 기능에 맞는 점도, 점도지수 및 유동점 등을 가지고 있다. 이러한 유류는 저장, 이송 및 교환 시에 발생하는 누설과 복잡·다양한 기계의 습동부, 운동부 및 고정부에서의 누설 등이 기관실의 청수나 해수 등과 혼합된 빌지유(bilge oil)로 남는 경우가 많다. 이러한 빌지유는 유수분리기에 의해 분리되며 분리된 기름은 슬러지 탱크나 폐유탱크로 이송, 저장된다. 이들의 기름을 주로 폐유(waste oil)라고 하는데 슬러지유에 포함시키고 있다.

또한 슬러지유에서 연료유 청정기의 청정 후에 발생하는 슬러지를 특히 연료유 슬러지(SFO)라 하고, 윤활유 청정기에서 발생한 슬러지를 윤활유 슬러지(SLO)라고 하지만, 폐유와 슬러지유를 구분하는 경우보다는 혼용하여 사용하는 경우가 많다.

2.1.2 초음파 진동에 의한 캐비테이션의 발생이론

ASTM^{17,18)}에서 1977년에 제정하고, 1992년에 개정한 시험규격 G32에 따른 자외진동 방식은 자외진동자 또는 피조(piezo) 압전소자의 압력변환기에 의해 발생된 종진동을 지수관계상의 혼(horn, 일면 증폭혼이라 한다.)으로 증폭시킨다. 이 혼 선단에 취부된 시험편의 단면을 액중에서 진동시키면 단면에 캐비티(cavity, 또는 캐비테이션)이 발생하며 단면이 침식된다. 따라서 시험편 단면에서의 종진동의 진폭이 극대화되도록 증폭 혼의 길이를 설계함과 동시에 시험편의 중량도 소정의 무게가 있도록 하여야 한다.

유체기구나 수냉식 디젤기관 등에서 유체가 가속 혹은 고진동을 받게 되어 액체의 정압이 어떤 한계 값보다 낮아지면 기포(cavity)가 발생하는데, 기포의 발생조건으로 액체의 유동이나 와류 상태에는 다음 식으로 정리할 수 있다.¹⁹⁾

$$P_V \geq P_{ST} - \Delta P_W$$

여기서, P_V : 액체의 포화증기압(KPa), P_{ST} : 액체의 정압(KPa), ΔP_W : 액압변동(KPa)

또한 캐비테이션 현상에 대한 주요 인자로서는 물체의 형상, 표면조도, 액체의 압력과 속도 등이 있고, 또 액체의 증기압, 밀도, 표면장력, 액체에 함유된 기체량 등이 고려되어야 하지만, 캐비테이션 발생은 위의 몇 개의 인자들을 고려하여 기본적인 무차원수인 캐비테이션 수(cavitation number) K 로 나타낼 수 있다.¹⁹⁾

$$K = \frac{P_0 - P_V}{\rho V_0^2 / 2}$$

여기서, P_0, V_0 : 무한원에서의 정압과 유속, ρ , P_V : 액체의 밀도와 증기압

캐비테이션 수가 충분히 크면 캐비티는 발생되지만, 대단히 적게 되면 기포는 물체표면으로부터 이탈하여 붕괴함으로써 손상량은 미미하게 된다. 일반적으로 증기압을 기준으로 캐비테이션 수가 정의되지만 이외에도 여러 가지 원인이 있을 수 있으므로 단순한 척도로서 전체를 취급하기는 곤란하다. 그리고 공진주파수는 장치 각각의 고유 수치로서 공진주파수가 낮은 만큼 혼 선단의 진폭을 크게 하는 것이 가능하다. 시험규격에서는 시험편의 형상과 혼에 취부하는 나사의 규격도 정하고 있으며, 시험편의 침식면의 상태는 시험재료에 따라 다르게 나타난다.

2.1.3 초음파 진동자 혼의 진폭과 진동수의 관계

초음파 진동자 혼의 진동수와 진폭의 관련에서 진동수는 일정히 유지하고 진폭의 크기에 따른 침식양상을 관찰하는 연구가 많이 행하여 지고 있다. 이에 따라 침식손상에 미치는 캐비티의 효과를 진폭의 크기(또는 침식의 세기)로 정하여 실험하는 경우도 있다. 이들에 미치는 간단한 식을 정리하면 다음과 같다.

진폭, 진동수를 고려한 인자로서 단위시간, 단위면적당의 방사한 에너지플럭스(Energy flux: I)는

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

로 표시 될 수 있고, 또한 압력분포(P_{max})는

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

로 나타낼 수 있다. 여기서 f : 진동수, ρ : 액밀도, c : 액중의 음속 및 A : 전진폭을 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.²⁰⁾

Table 1. Properties of each oil environment to be used in experiments.

| Specification of oils | Kinematic viscosity (cSt @40°C) | Specific gravity (15/4°C) | Flash point (°C) | Residual carbon (Wt%) | TBN (mgKOH/g) | Viscosity index |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------|
| NFO | 43.7 | 0.923 | 93.8 | 0.05 | - | - |
| NLO | 111.4 | 0.889 | 252 | 0.36 | 0.60 | 98 |
| SFO | 75.5 | 0.965 | 123 | 1.74 | - | - |
| SLO | 152.7 | 0.922 | 240 | 4.50 | 1.80 | 96 |

2.2 실험재료의 특성

2.2.1 시료유의 특성

시료유는 선박용 신연료유(new fuel oil : NFO), 신윤활유(new lubricating oil : NLO 단, 300시간 사용한 윤활유), 선박의 청정기 슬러지 탱크에서 수거한 연료유 슬러지(fuel oil sludge : SFO) 그리고 윤활유 슬러지(lub. oil sludge : SLO) 로 하였으며, 특성은 Table 1과 같다. 여기서 동점도는 Spindle형 점도계(viscometer LVT : cSt@40°C)를 이용하였고, 비중은 비중계(s.g meter : 0.7~1.85 @15/4°C)를 이용하여 측정하였다. 그 외 나머지 특성조사는 전문기관에 의뢰하여 조사하였다.

2.2.2 시험편의 특성

시험편의 형상은 Fig. 1에서와 같이 직경 15.9mm, 두께 6mm이고, 진동자의 팁 선단에 고정하는 나사부 길이는 10mm로 하였다. 시험편(또는 혼 디스크)은 일반구조용 탄소강제인 SS41로 그의 화학적인 조성과 기계적인 특성은 Table 2에 보이고 있다. 시험편 표면은 사포 #1200로 연마 및 오일랩핑(oil lapping)한 후 이세튼으로 탈지하였으며, 표면이 경화되지 않도록 저속가공 하였다. 시험편의

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of SS41

| 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 ²) | | Yield strength (kgf/mm ²) | Elongation (%) | | |
| | 42.4 | | 25.8 | 32 | | |

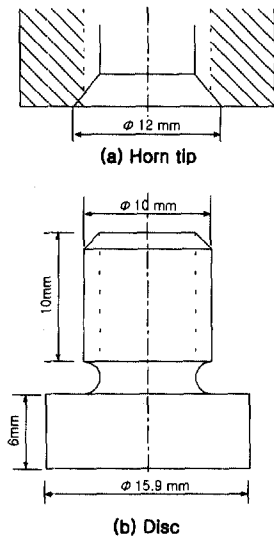


Fig. 1. Schematic dimension of test specimen (unit : mm)

무게감소량은 디지털 저울(digital balance : LIBROR AEX-200B)을 이용하여 측정하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 시료유의 조직변화 및 성상시험

실험에 사용한 시료유는 드레인 탱크에 있는 일정량(6 l)을 속도 10 ml/min으로 계속 순환시키면서 초음파 진동자 혼에 의해 직각으로 조사되도록 하였다. 진동자 혼 선단의 디스크는 정기적으로 마모상태를 점검하였고, 디스크 표면을 매번 사포 #800~#1200으로 연마하였으며, 필요시에는 교환하였다.

또한 유온은 표준온도(25±2)로 거의 일정하게 유지되도록 냉각 팬 장치 및 항온 가열기를 설치·

사용하였고, 유온을 85°C까지 변화시켜서 실험을 수행하였으며, 증발을 방지하기 위하여 완전히 밀폐하여 온도를 유지하였다. 순환수 펌프는 소형잠수펌프로 전기화학적 영향이 거의 없는 플라스틱 재료이며, 유량은 바이패스 밸브(by-pass valve)로 조정하였고, 실험시간의 간격은 자동정지 타이머에 의해 조정하였다.

진동자 혼 디스크의 시료유에 대한 표준 침지 깊이를 3mm로 하였고, 유온에 따라 약 +2mm의 오차를 두어서 실험하였고, 실험시간은 30분마다 시료유 및 혼 디스크를 점검 하면서 연속적으로 120분까지 실험하였다. 시험한 시료유의 채취는 초음파 방사관의 출구측에서 실시하였고, 유입자의 분쇄, 분포 및 분산상태 등을 알아보기 거름종이(ashless filter paper : 100 circles 110mm, #93)를 사용한 스팟테스트(spot test)를 수행하였다. 또한 시료유의 잔류탄소 입자분포나 분산상태는 전자현미경(DW-THN/1011)에 의해 관찰한 후 CCD Camera(SAC-410ND) 및 PC를 이용하여 촬영, 조사하였으며, 필요시에는 접안렌즈 부착용 카메라 등을 사용하였다. 또한 같은 조건에서 시료유의 동점도, 비중 및 pH 등의 성상변화를 조사하였다.

2.3.2 디스크의 침식손상 시험

시료유의 온도변화 환경 및 시료에 대한 디스크의 침지깊이 조건에 따라 시험편(또는 디스크) 표면의 침식손상은 무게감소량(weight loss)을 중심으로 측정하였고, 아울러 실험시간에 따른 무게감소율(weight loss rate) 및 최고침식율(max. erosion rate)을 측정하였다. 이 때 무게 감소량은 시험편을 혼으로부터 분리하여서 아세톤으로 탈지하고, 드라이(dryer)로 건조시킨 후 정밀저울로 측정하였다. 그리고 진폭의 크기(진동자 혼의 진폭크기 : 50 μ m 및 24 μ m)에 따른 디스크의 침식양상을 관찰함으로써 침식손상에 미치는 캐비티의 세기, 수 및 크기 등을 어느 정도 조사할 수 있으므로 이에 대한 실험도 동시에 행하였다.

2.4 실험장치

Fig. 2는 초음파 진동장치의 개략도로서 1992년도에 개정된 ASTM-G32 시험규격에 맞게 하였고,

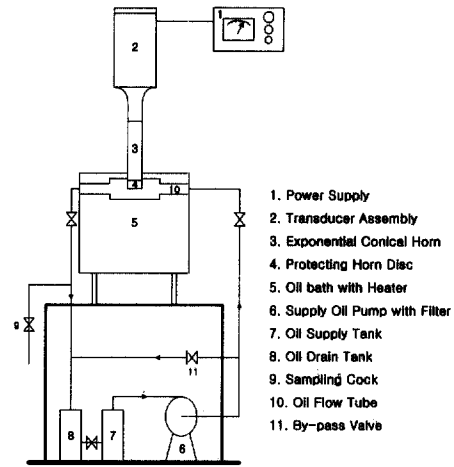


Fig. 2. Schematic diagram of ultrasonic vibrator test apparatus

압전소자(piezoelectric)의 압력변환기에 의해 발생한 종진동을 지수관계상의 혼(Exponential horn, 진폭혼)에서 증폭시켜서 진동자 선단에 취부한 시험편의 단면을 용액중에서 진동시켰다. 초음파 진동장치는 직접 이송배관에 조사하여 흐르는 시료유를 분쇄·유화시켜서 균질화하는 기기로서 초음파 진동자 혼의 바로 밑에 유액체가 운반되어 캐비티 생성과 소멸에 따른 강한 충격압에 의해 미립화 및 균질화가 이루어진다.

공진주파수는 20kHz이고, 진폭은 정진폭제어 방법을 사용하여 24 μ m 및 50 μ m로 유지하였다. 실험장치의 주요구성은 제어장치, 진동자, 증폭기 혼(booster horn), 자동정지 타이머 등이다.

환경조 및 배관은 전기 화학적인 부식작용과 시료유와의 계면장력을 고려하여 아크릴재료를 사용하였고, 초음파 조사용 시료유 흐름 관경은 20mm이고 관출구 측에는 압력조정밸브를 부착하였다. 나머지 관은 직경 10mm의 특수 고무재료로 연결, 사용하였으며 유속은 펌프의 바이패스 밸브에 의해 조정하였다. 그리고 각 연결 플랜지(flange), 조인트(joint) 및 실(seal)부에는 실리콘 고무(silicone rubber) 접착재로 봉합하였다.

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

부에 비이커(Beaker 2000ml)를 삽입하여 유환경용 액양을 조정하였다. 또한 비커의 밑바닥에서 시험편 상부 침지용액 깊이는 100mm 이상이 되도록 하여서 캐비티의 분사가 충분하도록 하였다. 그리고 진동자 혼에서 발생하는 열을 식히기 위하여 냉각팬을 취부하여 사용하였고, 또한 용액의 분포가 원활히 유지되도록 교반하며 실험하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 초음파 진동자의 반복진동에 의한 선박유류의 성상변화

Fig. 3은 각종의 선박유류를 진폭 24 μ m, 진동수 20kHz인 초음파 진동자 혼의 진동에 의해 조사시킨 후 용액의 pH 값을 정리한 것이다. 이때 실험시간(t)은 누적 300분이고, 유온(oil temp.)은 25 $^{\circ}$ C로 하였다.

이에 의하면 연료유 성분인 NFO 및 SFO 환경에서는 실험시간이 경과하면서 pH값이 크게 낮아지는 것을 보이는 반면에 윤활유 성분인 NLO 및 SLO 환경에서의 pH값은 실험시간이 경과하여도 감소 폭이 다소 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 작용은 캐비티의 반복작용에 의해서 유입자의 분쇄와 산화작용이 연료유 성분인 환경에서는 민감하지만 윤활유 성분인 많은 환경에서는 산화작용이 적게 발생하기 때문으로 생각된다. 또한 신유류 환경보다는 슬러지 환경에서 더 pH값이 실험시간의 경과에 따라 감소하는 것은 고형물의 분쇄, 분산에 의한 유류의 산화가 촉진되기 때문이다.

Fig. 4는 각종 선박유류를 진폭 24 μ m인 초음파 진동자 혼의 진동에 의한 캐비티의 반복작용을 받게 한 것으로 실험시간(t)에 따른 동점도(cSt@40 $^{\circ}$ C)의 변화값을 정리하여 그래프로 나타낸 것이다.

이에 의하면 실험전의 점도값의 크기는 SLO > NLO > SFO > NFO의 순으로 나타나지만, 실험시간의 경과에 따라 거의 일정한 값으로 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 초음파 진동자 혼의 진동에 의해서 발생한 캐비티가 유환경에 대해서 반복적으로 작용하므로써 유입자의 미세화, 균질화에 유동성이 증가하고 유입자에 결합할 수 있는 표면적이 증가하므로 계면장력이 감소하면서 표면장

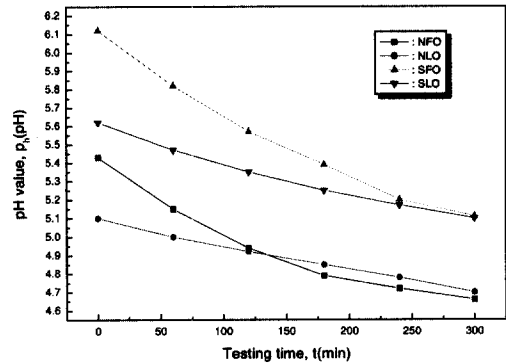


Fig. 3. Comparison of pH value vs testing time in marine oil environment.(oil temp. : 25 $^{\circ}$ C, amplitude : 24 μ m)

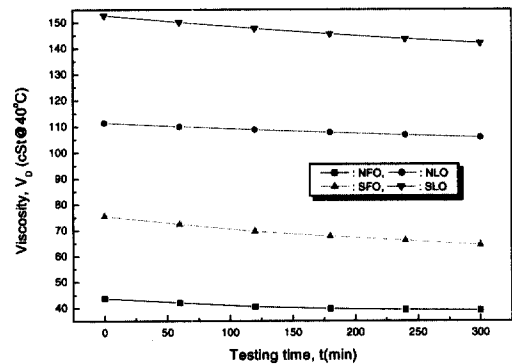


Fig. 4. Comparison of viscosity vs testing time in marine oil environment.(oil temp. : 25 $^{\circ}$ C, amplitude : 24 μ m)

력이 증가하는 것으로 사료된다. 또한 점도값을 실험시간 경과에 따라서 감소하지만 계속적으로 실험을 진행시키면 그 감소폭은 둔화되면서 어느 실험 시간에서는 포화되는 것은 한정된 용액에서 유동성이 한정되고 유입자의 파괴에 따른 수분의 증발작용도 동시에 발생하기 때문이다.

Fig. 5는 선박유류에 있어서 실험시간(t)에 따른 비중(S.G@15/4 $^{\circ}$ C)의 변화값을 정리한 것으로 초음파 진동자의 혼의 진폭은 24 μ m이고 유온은 25 $^{\circ}$ C로 하였다. 이에 의하면 SFO 및 NFO 환경에서는 실험시간의 경과에 따라 크게 감소하는 경향을 보이고, SLO 및 NLO 환경에서는 완만하게 감소하고 있다.

이와 같은 현상은 초음파 진동자 혼의 진동에 의한 캐비티의 충격력에 의해서 기름입자의 분쇄와

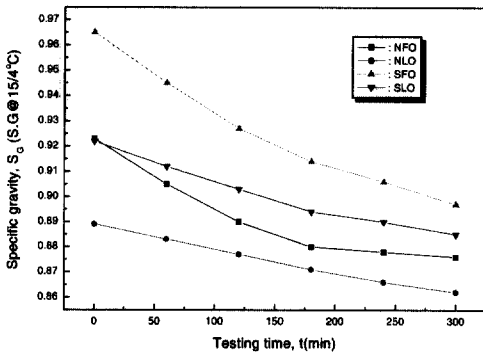


Fig. 5. Comparison of specific gravity vs testing time in marine oil environment. (oil temp.: 25°C, amplitude: 24 μ m)

분산효과가 연료유 성분인 NFO 및 SFO 환경에서 우수한 반면 윤활유 성분인 NLO 및 SLO 환경에서 미약하기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 초음파 진동자 혼의 분쇄작용에 따른 선박유류의 조직변화

Photo. 1은 신연료유(NFO) 및 신윤활유(NLO) 환경에서의 초음파 진동자 혼 디스크의 침지깊이 3mm에서 진동에 의한 캐비티의 생성, 파괴에 따른 충격압으로 인하여 균질·유화된 시료유를 실험시간 60분, 120분에 따라 스팟테스트 한 상태를 정리한 것으로 유온은 25°C 정도이고, 진동자의 주파수 20kHz, 진폭 24 μ m이며 유속은 10 ml/min이며, 확대배율은 5배이다.

이에 의하면 실험전의 신연료유와 60분, 120분 실험후의 모습을 비교하여 볼 때 고형분의 크기 및 분포상태가 상이하다는 것을 알 수 있다. 즉 120분 실험시간후의 초음파 진동자 혼의 균질작용에 의한 시료유는 신연료유나 60분 실험후의 것보다 미소입자가 많고 캐비티의 충격압에 의한 유화, 분산 및 분포효과가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 초음파의 진동 및 캐비티에 의한 분쇄효과와 유적간의 마찰과 분쇄에 의한 유화작용이 증가된 것으로 생각된다.²¹⁾ 그리고 신윤활유의 경우에는 실험시간이 증가하여도 다소 분쇄효과가 적으며 유화작용도 미소하다는 것을 알 수 있다. 이러한 작용을 보이는 것은 신윤활유가 신연료유에 비하여 점도지수가 크고 항유화성이 강하기 때문에 초음파에 의한 균질

화 효과를 적게 받기 때문으로 사료된다.

신연료유(NFO)와 윤활유(NLO)의 초음파 진동자 혼의 진동에 의해서 유입자의 분쇄, 파괴, 및 분산 효과를 좀더 명확히 관찰, 조사하고자 Photo. 1의 스팟테스트한 시료유를 전자현미경에 의해 35배로 확대하여 컴퓨터 화상으로 정리한 것을 Photo. 2에 보여주고 있다.

이에 의하면 신연료유(NFO)의 실험하기전의 바탕조직, 캐비테이션 실험시간 60분 및 120분에서의 바탕조직 분포를 보인 것으로 실험시간이 경과함에 따라 탄소의 유입자가 미세하게 넓게 분포되어 실험시간 120분에서는 거의 볼 수 없을 정도로 분산되어 있고, 조밀한 망상조직이 넓고 크게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 진동자 혼에 의한 캐비티의 충격력에 의해서 연료유 자체의 망상 바탕조직과 탄소의 분포나 크기가 파괴되면서 유입자간의 결합력이 약화되어 바탕전체에 미세하게 분포되는 것으로 사료된다. 또한 신윤활유(NLO)의 경우에도 실험전에 검은 탄소 바탕이 유입계에 따라 분포된 것이 실험시간이 경과되면서 전바탕에 고르게 분포된 것을 볼 수 있다 이와 같은 현상은 다소 큰 탄소 입자가 실험시간이 경과됨에 따라서 캐비티의 진동에 의한 충격력에 의해서 미세하게 분해되면서 시료유 전체에 고르게 분포되기 때문이며, 유입계 경계도 상당히 조밀하게 파괴된 것을 알 수 있다.

Photo. 3은 초음파 진동자의 진동에 의한 균질작용에 의해서 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO)의 유입자의 파괴, 분산, 분포 및 균질효과를 실험시간 60분, 120분에 따라 정리한 것으로 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 3mm이고, 유속은 10 ml/min이고 진동자의 진폭은 24 μ m이며 유온은 약 25°C이고 5배로 확대하였다.

이에 의하면 실험전의 슬러지유에 비교하여 실험시간이 60분, 120분이 경과됨에 따라 현저히 분쇄·유화효과가 크게 상승하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 점도나 비중이 클수록 고형물질의 밀도가 증가하기 때문에 캐비티에 의한 유입자의 파괴작용이 강하고 유입자간의 충돌도 심하므로 고형물의 분쇄효과가 증대하고, 아울러 유입자간의 계면작용이 파괴되어 약화되면서 유입자의 분산이나

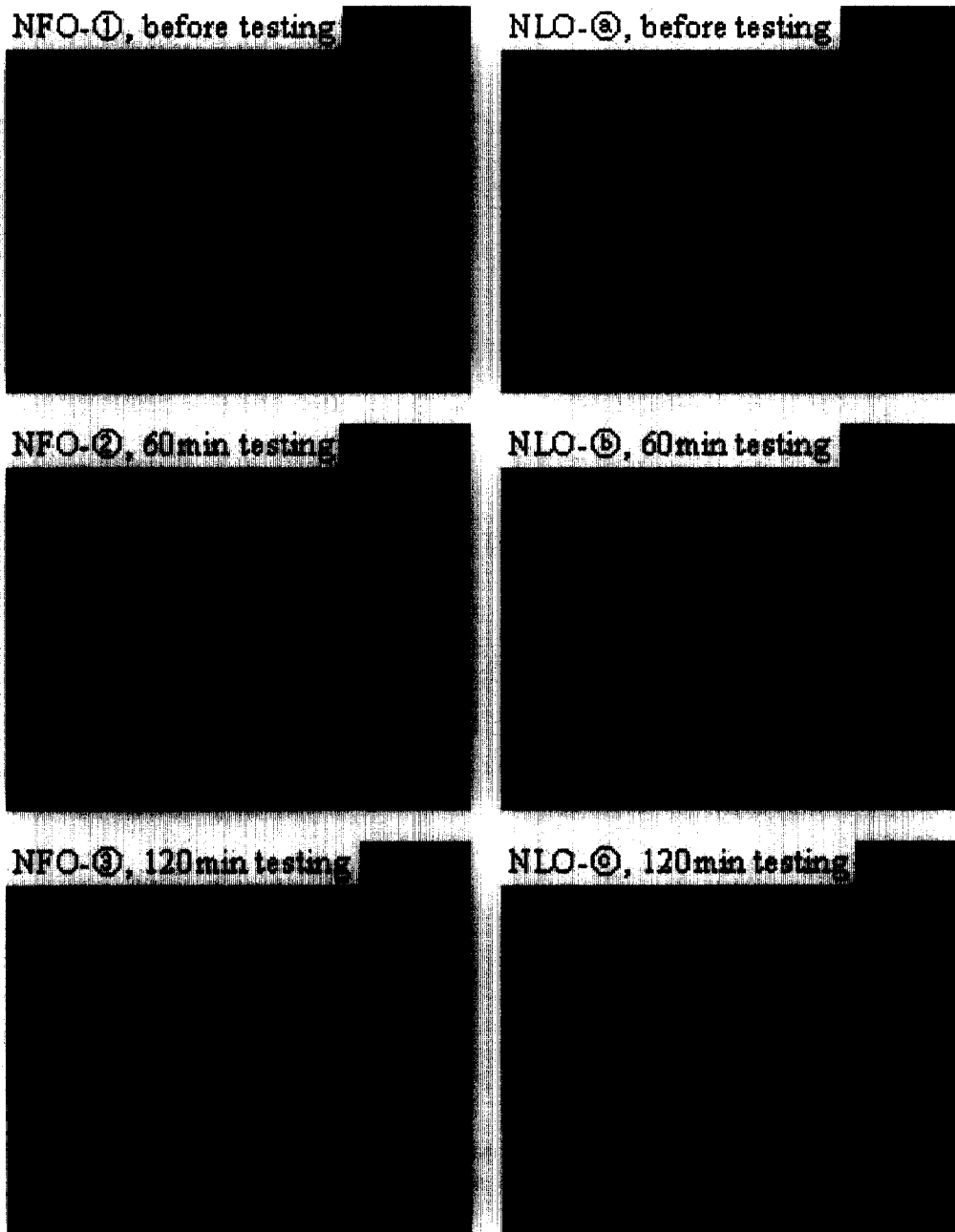


Photo. 1. Appearance of macroscopic homogenizing matrix vs testing time in NFO and NLO environment. (x 5 times) (amplitude : 24 μ m, depth of horn disc : 3mm, flow velocity : 10ml/min)

분포효과도 크게 증가하기 때문이라고 생각된다.²³⁾ 또한 윤활유 슬러지(SLO)에서 보다는 연료유 슬러지(SFO)에서가 캐비티의 충격력에 의한 바탕조직

에 큰 변화가 있는 것을 알 수 있다.

이러한 현상 등을 면밀히 관찰하고자 전자 현미경에 의해 Photo. 3의 조직바탕을 35배로 확대하여

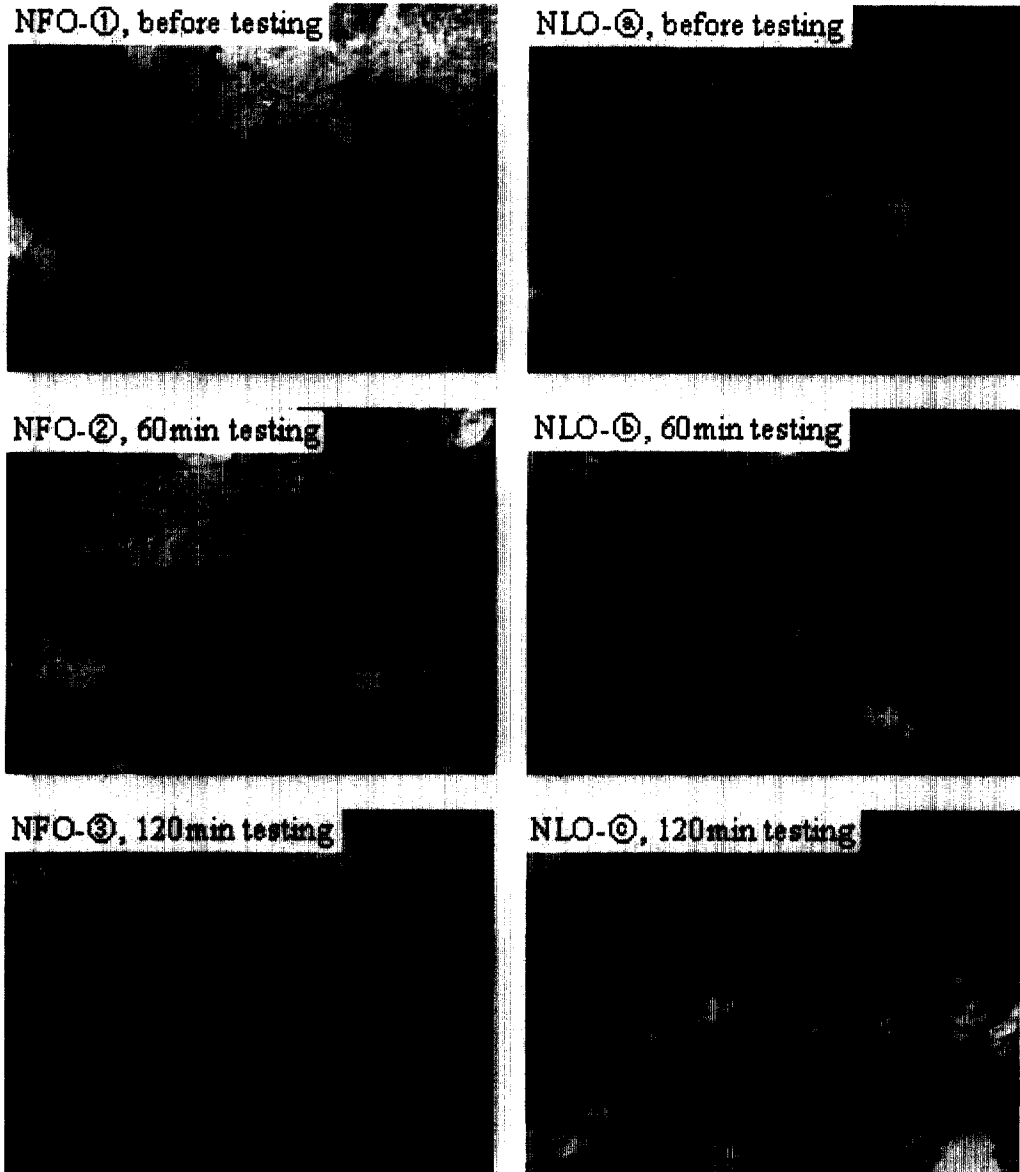


Photo. 2. Appearance of microscopic homogenizing matrix vs testing time in NFO and NLO environment. (x 35 times) (amplitude : $24\mu\text{m}$, depth of horn disc : 3mm , flow velocity : 10ml/min)

Photo. 4에 사진으로 정리하였다. 이에 의하면 실험 전의 연료유 슬러지(SFO)의 바탕조직은 파상형의 고행 덩어리가 산존하여 있고, 반면에 윤활유 슬러지(SLO)에서는 바탕의 대부분에 탄소의 고행 덩어리가 퍼져 있고 입계에는 수지상의 결합상태를 보이고 있다.

이러한 바탕 조직을 가진 연료유 슬러지(SFO)가 캐비테이션 작용에 따른 실험시간 60분, 120분이 경과하면서 캐비티의 충격압에 의해 고행 탄소의 미세한 입자로의 파괴되어 조직바탕에 촘촘히 분산된 상태이다. 또한 윤활유 슬러지(SLO)의 경우에는 수지상의 입계로 탄소의 고행물들이 실험시간이

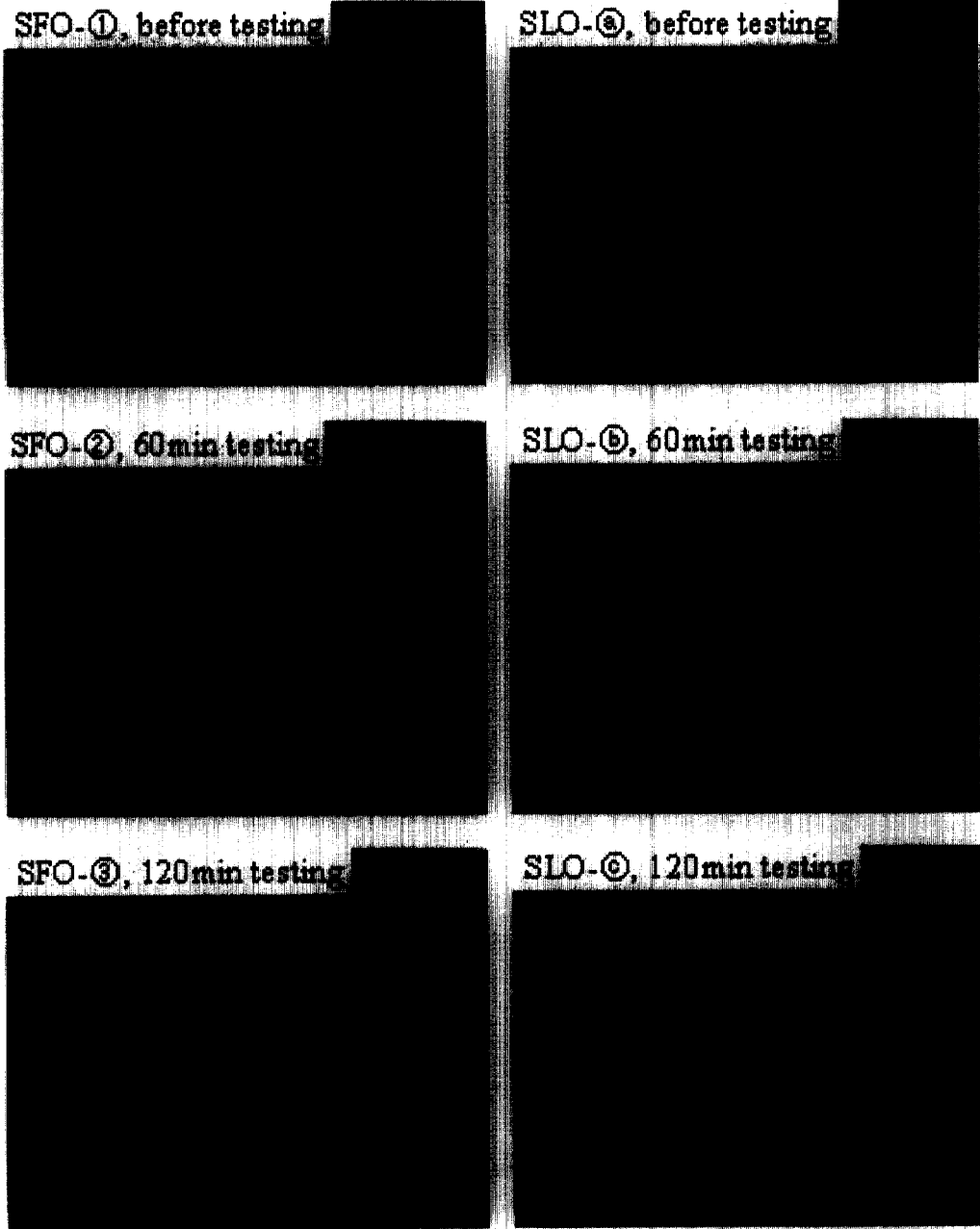


Photo. 3. Appearance of macroscopic homogenizing matrix vs testing time in SFO and SLO environment. (x 5 times) (amplitude : 24 μ m, depth of horn disc : 3mm, flow velocity : 10ml/min)

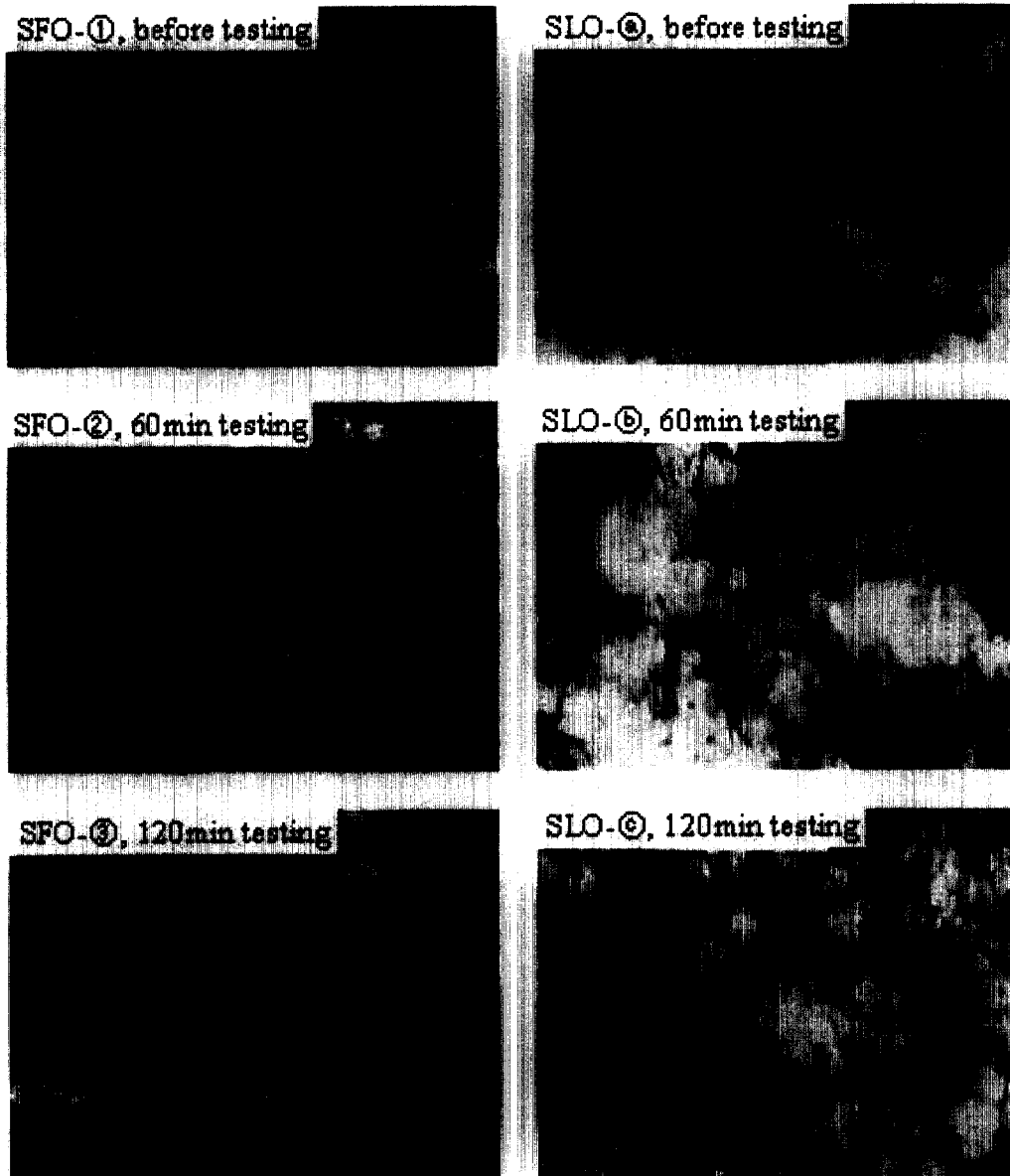


Photo. 4. Appearance of microscopic homogenizing matrix vs testing time in SFO and SLO environment. (x 35 times) (amplitude : 24 μ m, depth of horn disc : 3mm, flow velocity : 10ml/min)

경과되면서 잘 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

3.4 슬러지유의 유온변화에서 진폭 24 μ m 및 50 μ m 인 혼 디스크의 침식특성

Fig. 6은 연료유 슬러지(SFO)의 유온변화(25, 45, 65 및 85 $^{\circ}$ C) 환경에서 진폭 24 μ m에 대한 50 μ m

에서의 무게감소율 R(mg/h)의 비율(ϕ)을 아래 식과 같이 실험시간(t)에 따라 구한 값을 정리한 것으로 이때 침지깊이는 3mm로 하였다.

$$\phi(\%) = \frac{R_{50\mu m} - R_{24\mu m}}{R_{50\mu m}} \times 100$$

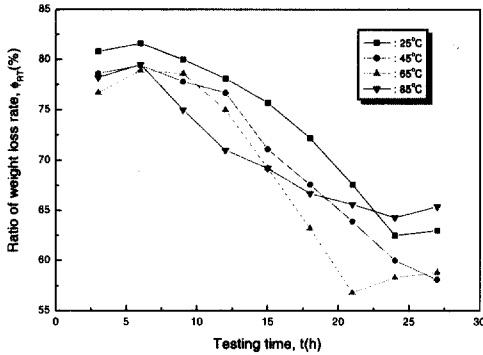


Fig. 6. Ratio of weight loss rate vs testing time between 50µm against 24µm amplitude in oil temp. environment of SFO. (horn depth : 3mm)

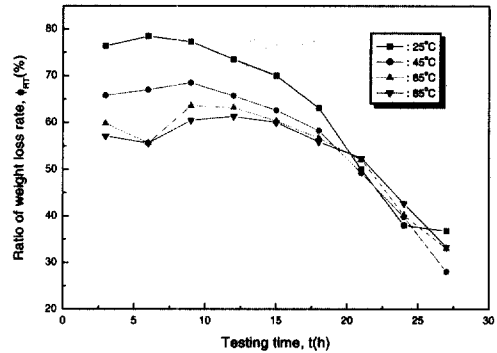


Fig. 7. Ratio of weight loss rate vs testing time between 50µm against 24µm amplitude in oil temp. environment of SLO. (horn depth : 3mm)

여기서, $R_{50\mu m}$, $R_{24\mu m}$: 진폭 50µm 및 진폭 24µm 에서의 진동자 혼 디스크에서의 무게감소율

이에 의하면 실험시간이 경과하면서 무게 감소율의 비율은 감소하는 경향을 보이는 데 특히 85°C에서는 무게 감소율의 비율이 감소하는 경향이 상당히 둔화되는 추세이다. 그리고 실험시간 21시간부터 오히려 증가하는 경향을 보이기도 한다. 이와 같이 연료유 슬러지(SFO)에서는 무게감소율의 비율이 온도변화에 따라 크게 차이가 없는 이유는 점도의 저하에 따른 캐비티 수 증가와 캐비티의 크기 감소율이 거의 비슷하게 진폭에 따른 무게감소율에 영향을 미치기 때문이고, 특히 고유온인 85°C 환경에서는 진폭 24µm에서의 무게 감소율이 크게 나타나는 실험시간이기 때문이다. 그리고 실험시간 21시간부터 오히려 무게감소율의 비율이 증가하는 것은 진폭 50µm에서보다 진폭 24µm에서 오히려 무게감소율이 최고침식율을 거친 안정기(steady period)로서 무게감소율이 둔화되는 단계이기 때문이다.

Fig. 7은 윤활유 슬러지(SLO)의 유온변화(25, 45, 65 및 85°C) 환경에서 진폭 24µm에 대한 50µm에서의 무게감소율 R(mg/h)의 비율(%)을 실험시간(t)에 따라 구한 값을 정리한 것으로 침식깊이는 3mm로 하였다.

이에 의하면 진폭에 따른 무게감소율의 비율이 실험초기에는 유온 25°C > 45°C > 65°C > 85°C 의 순으로 나타나지만 실험시간 19시간부터는 오히려 유온 65°C, 85°C 환경에서가 증가하는 경향을 보인다.

특히 85°C에서는 실험시간 24시간부터는 감소가 상당히 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 무게 감소율 비율이 실험초기에 크다가 실험시간이 경과하면서 둔화되는 것은 실험시간이 경과하면서 진동자 혼의 디스크의 침식소공에 의한 무게감소율이 둔화되기 때문이고, 유온의 증가에 따라 무게감소율 비율이 적어지는 것은 윤활유 환경에서의 캐비티의 크기가 작아지기 때문이며, 특히 실험시간 19시간부터는 고유온인 65°C, 85°C에서의 무게감소량의 비율이 25°C, 45°C에 실험초기와 반대로 증가하는 것은 진폭 24µm에서의 무게감소율이 증가하는 단계의 실험시간이기 때문이다.

Fig. 8은 진폭 50µm와 24µm에서의 슬러지유(SLO 및 SFO) 환경에서의 “온도변화에 따른 실험시간에 따른 무게감소율 자료에서 최고 무게감소율을 나타내는” 즉 최고침식율[R_{max}(mg/h)]을 정리한 것이다.

이에 의하면 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서는 유온 25°C에서 최고침식율이 크게 보이다가 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고, SFO 환경에서는 유온이 증가함에 따라 최고침식율이 증가하는 추세이지만 진폭 24µm에서는 85°C에서 다소 감소하고 있다. 그리고 진폭 50µm은 진폭 24µm에서의 최고침식율을 비교할 때 SFO 환경에서가 SLO환경에 비하여 큰 폭의 차이를 보이고 있다.

이와 같이 SLO환경에서는 캐비티의 크기와 수증가는 점도와 밀도에 밀접한 관계로서 점도가 낮

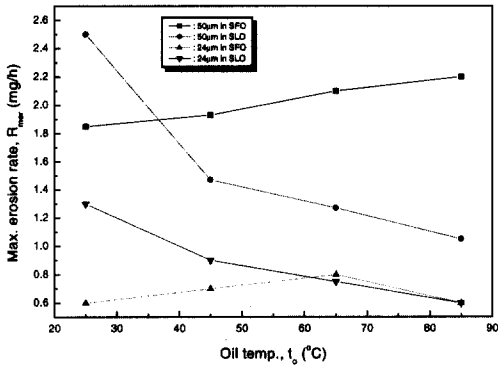


Fig. 8. Max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil

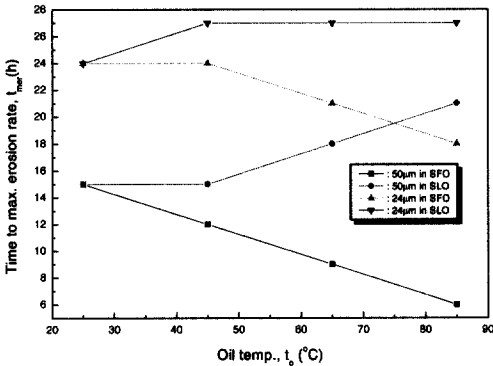


Fig. 9. Time to max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil.

아지면 캐비티의 크기는 작아지고 반면에 캐비티의 수는 증가하므로 이들의 균형있는 조화에 따라 최고침식율이 다르게 나타난다. 따라서 SLO 환경에서는 온도증가에 따른 침식소공의 수는 증가하나 침식소공의 면적이 적으므로 전체적으로 무게감소량과 감소율이 적어진다. 반면에 SFO 환경에서는 SLO 환경에 비하여 반대의 경향을 보이고, 특히 85°C SFO 환경에서 최고침식율이 다소 적어지는 것은 고온에 의한 저점도에서의 캐비티의 약한 흡입, 충격 및 붕괴로 인하여 많으면서 작은 침식소공에 의한 캐비티의 흡착에 의해서 무게감소율이 감소하기 때문이다.

그리고 진폭에 따라 최고침식율이 SLO 환경에서 보다 SFO에서 큰 차이폭을 보이는 것은 저점도 환경일수록 진폭에 의한 캐비티의 방사에너지

($I = 2\pi^2 f^2 \rho C A^2$ 참조)가 전진폭의 제곱에 비례하고 또한 상승작용도 발생하기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 최고침식율(R_{max})이 발생하는데 걸리는 실험시간(t)을 정리한 것이다. 이에 의하면 SFO 환경에서는 유온증가에 따라 짧아지며 진폭 50µm에서가 24µm에 비하여 크게 짧아지고 있다. 반면에 SLO 환경에서는 유온증가에 따라 진폭 50µm에서는 길어지는데 진폭 24µm에서는 유온 45°C에서 유온 85°C에 이르기까지 일정한 시간을 유지하고 있다.

이와 같이 SFO 환경에서 유온증가에 따라 최고침식율이 나타나는 실험시간이 짧아지는 것은 온도증가에 따른 점도저하와 밀도저하에 의해 캐비티에 의한 무게감소율이 증가하고, 또 진폭50µm에서 최고침식율이 진폭24µm에 비하여 크게 나타나는 것은 진폭증가에 따른 캐비티의 방사에너지의 세기가 강하기 때문이다.

그리고 진폭 50µm인 SLO 환경에서 최고침식율에 이르는 시간이 길어지는 것은 저점도에 의한 캐비티의 크기 감소로 최고침식율이 늦게 발생하기 때문이다. 또한 진폭 24µm인 SLO 환경에서는 유온증가에 따라 최고침식율이 나타나는 시간이 같은 것은 실험시간 27시간동안 실제로 최고침식율이라고 단정하기 어렵고 단지 그때 실험시간에서 최고 무게감소량을 최고침식율로 가정하여 구한 것으로 더 많은 실험시간을 경과하여야만 최고침식율과 그에 따른 최고침식율에 이르는 시간을 구할 수가 있다. 하지만 더 계속하여 실험하지 않은 것은 서로 침식손상에 대한 상대적인 비교로서 충분히 검토할 수 있기 때문에 실험시간은 27시간까지만 하였다.

3.5 슬러지유에서의 침지깊이에 따른 진폭 50µm 인 혼 디스크의 침식특성

Fig. 10은 연료유 슬러지(SFO) 환경에서 침지깊이(d_p) 3, 6, 9 및 12mm에 대한 최고침식율(R_{max})을 정리한 것으로 유온은 25, 45, 65 및 85°C이고 진동자 혼의 진폭은 50µm에서 실험한 결과를 나타낸 것이다.

이에 의하면 침지깊이에 따른 최고침식율은 유온 85°C > 65°C > 45°C > 25°C의 순으로 나타나고, 특히 유온 85°C에서는 3mm에서보다 6mm, 9mm 및

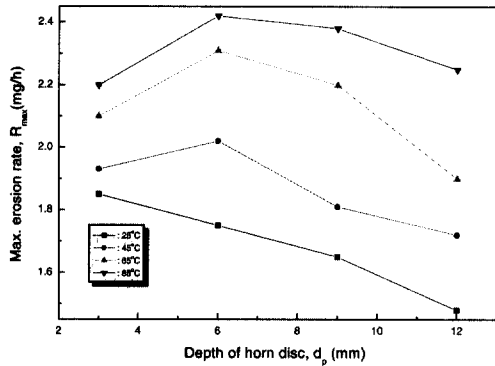


Fig. 10. Max. erosion rate vs depth of horn disc in SFO environment.(amplitude : $50\mu\text{m}$, oil temp : $25\sim 85^\circ\text{C}$)

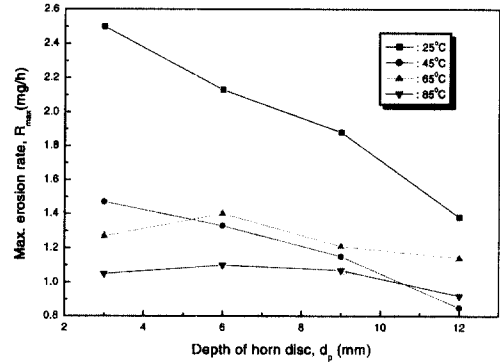


Fig. 11. Max. erosion rate vs depth of horn disc in SLO environment.(amplitude : $50\mu\text{m}$, oil temp : $25\sim 85^\circ\text{C}$)

12mm에서 최고침식율이 크게 나타나고, 65°C에서의 최고침식율은 침지깊이 3mm에서보다는 6mm, 9mm에서 크게 나타난다. 또한 유온 45°C에서는 3mm에서보다 6mm에서 최고침식율이 크게 나타나고, 유온 25°C에서는 침지깊이 3mm에서 최고침식율을 보이고 있다. 이와 같은 현상의 요인들은 유온이 증가하면 연료유의 양상 변화 가운데, 점도의 저하, 액체의 유동성 저하, 밀도의 감소 및 표면장력의 저하 등이 특히 변화하는데 이들은 캐비티 형성, 분산, 분포, 붕괴의 작용에 큰 영향을 미치므로 연료유 슬러지(SFO)에서의 진동자 혼의 디스크의 침식손상에 의한 무게 감소율에는 온도의 영향에 지배를 받는다. 또한 시험편인 혼 디스크의 SS41 탄소강재는 계속하여 고온에 침지하게 되면 재료의 열화에 의한 변형이 생길 수 있고, 특히 침식소공이 많이 형성된 경우에는 금속입자의 박리나 탈리현상이 발생한다. 따라서 환경용액에 의해서 화학적으로 시험편이 손상을 받는 조건과 시험편 자체의 물리적인 손상을 받는 조건과의 중첩에 의한 상승작용으로 진동자 혼의 디스크의 침식손상은 더욱 증가하게 된다.

Fig. 11은 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서 침지깊이(d_p) 3, 6, 9 및 12mm에 대한 최고침식율(R_{max})을 정리한 것으로 유온은 25, 45, 65 및 85°C이고 진폭은 $50\mu\text{m}$ 에서 실험을 실시하였다.

이에 의하면 유온 25°C와 45°C에서는 최고침식율은 침지깊이에 따라 거의 일정하게 감소하고 유온 25°C에서는 유온 45°C에 비하여 큰 폭의 차이를 보

이고 있다. 그러나 유온 65°C에서의 최고침식율은 침지깊이 6mm부터 유온 45°C에서 보다 크게 나타나고, 유온 85°C에서는 침지깊이 9mm이후부터 유온 45°C보다 크게 나타나는 경향을 보인다. 이와 같은 경향을 보이는 것은 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 최고침식율은 낮은 유온에서는 캐비티의 크기가 크므로 침식손상이 크게 발생하기 때문이고, 온도의 증가에 따른 점도의 변화나 시험편의 열화에 의한 탈리작용의 발생에 따라 유온 65°C에서 최고침식율이 유온 45°C에서 보다 크게 나타난다. 하지만 85°C 유온에서는 캐비티에 의한 침식손상보다는 시험편의 열화작용도 있기 때문에 침지깊이 12mm에서 최고침식율이 유온 45°C에서 보다 크게 나타난다고 사료된다.

Fig. 12는 연료유 슬러지(SFO) 환경에서의 침지깊이(3, 6, 9 및 12mm)에 따른 최고침식율에 이르는 시간(t_{mer})을 정리한 것으로 진동자 혼의 진폭은 $50\mu\text{m}$ 이고, 유온은 25, 45, 65 및 85°C로 변화시켰다.

이에 의하면 침지깊이 각각 3, 6, 9 및 12mm마다 유온 25, 45, 65 및 85°C의 변화에 따라 최고침식율에 이르는 시간(t_{mer})은 유온이 증가하면 짧아진다. 또한 같은 조건과 환경에서 최고침식율이 클수록 최고침식율에 이르는 시간은 짧아지는 경향을 나타낸다. 이와 같은 현상은 연료유 특성에 의하면 유온이 증가할수록 점도는 떨어지고, 비중도 감소하며, 또한 유동점도 크게 떨어진다. 따라서 85°C인 연료유 슬러지(SFO) 환경에서는 최고침식율도 크게 나타나지만 최고침식율에 이르는 실험시간도 6시간

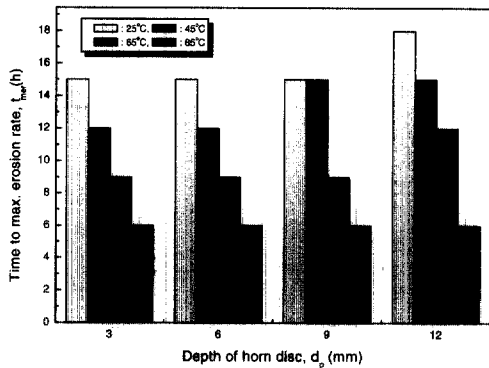


Fig. 12. Time to max. erosion rate vs depth of horn disc in oil temp. environment for SFO. (amplitude : $50\mu\text{m}$, oil temp. : $25\sim 85^\circ\text{C}$)

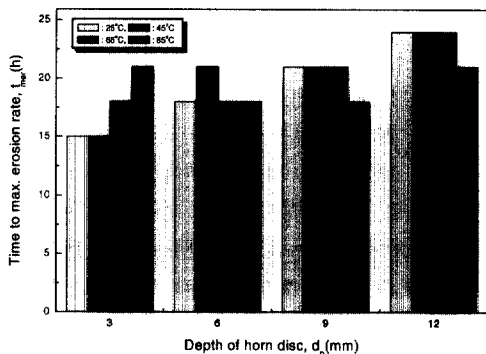


Fig. 13. Time to max. erosion rate vs depth of horn disc in oil temp. environment for SLO. (amplitude : $50\mu\text{m}$, oil temp. : $25\sim 85^\circ\text{C}$)

이므로 상당히 짧은 실험시간을 보여 주고 있는데, 무려 25°C 유온에 비하여 2배이상 짧아지는 것을 알 수 있다. 물론 같은 침지깊이라도 유온이 증가하면 할수록 최고침식율도 증가하지만 그에 이르는 실험시간도 짧아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 13은 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 침지깊이(3, 6, 9 및 12mm)에 따른 최고침식율에 이르는 시간(t_{mer})을 정리한 것으로 진동자 혼의 진폭은 $50\mu\text{m}$ 이고, 유온은 $25, 45, 65$ 및 85°C 로 변화시켰다.

이에 의하면 유온 $25^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}$ 및 65°C 인 SLO 환경에서는 침지깊이가 3mm에서 12mm로 깊어짐에 따라 최고침식율을 발생하는데 소요되는 실험시간이 길어지는 경향이다. 또한 유온 85°C 환경에서는 침지깊이 3mm, 12mm에서는 길어지고 반면에 침

지깊이 6mm, 9mm에서는 짧아지는 모습을 보인다. 이와 같은 현상은 윤활유의 온도에 의한 특성을 먼저 파악하는 것이 중요한데, 윤활유는 점도지수가 큰 것을 요구한다["온도변화에 따른 점도값의 변화가 적은 경우를 점도지수가 높다고 한다"]. 따라서 유온에 의한 점도값의 변화만을 고려한다면 유온이 증가하더라도 점도에 의한 캐비티의 작용에 큰 영향을 미치지 못할 것 같은데, 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서 진동자의 혼의 디스크를 침지한 상태로 진동자의 진동에 의해 캐비티의 발생과 파괴에 의한 윤활유 슬러지(SLO)의 성장변화, 유온 증가에 따른 시험편의 열화작용, 유온에 따른 캐비테이션의 발생, 붕괴조건 변화 등 변수가 많이 작용하게 되므로 일률적으로 해석하기는 어렵다고 하겠다. 하지만 가능하면 유온에 따른 윤활유 슬러지의 성장변화 추이 및 시험편의 열화에 의한 탈리, 박리 현상에 기인한 조건에서 진동자 혼의 디스크의 침식손상을 규명하고자 한다. 따라서 윤활유 슬러지(SLO)에서는 유온 85°C 인 고온에서는 시험편의 열화 및 환경성장변화에 심한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4. 결 론

선박유류에 있어서 초음파 진동자의 진동에 의한 조직의 변화상태, 성장변화를 조사하고, 아울러 진동자 혼 디스크의 침식손상을 유온변화환경 및 디스크의 침지깊이에 따라 조사, 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 구하였다.

1) 선박유류는 초음파 진동자의 반복진동에 의해 pH값, 동점도 및 비중값이 감소하고, 연료유 성분인 NFO 및 SFO에서가 NLO 및 SLO에서보다 감소량이 크다.

2) 선박유류 환경에서의 초음파 진동자의 실험시간이 경과함에 따라 유입자의 분쇄, 분산 및 분포효과는 우수하고, SFO에서가 SLO에 비하여 분쇄효과가 더 양호하다.

3) 슬러지유에서의 실험시간이 경과함에 따라 최고침식율은 감소하고 SFO에서 유온 85°C 에서는 감소폭이 다른 유온환경에 비하여 다소 둔화되고, SLO 환경에서는 실험시간이 경과함에 따라 유온의

영향을 적게 받는다. 또한 최고침식율이 발생하는 시간은 유온이 증가할수록 SFO환경에서는 길어지지만, 역으로 SLO환경에서는 짧아지는 경향이다.

4) 침지깊이에 따른 최고침식율은 SFO환경에서는 유온이 25°C에서는 침지깊이의 증가에 따라 감소하지만 그의 유온에서는 6mm에서 최고값을 보인 후 감소하는 경향이다. SLO환경에서는 유온 85°C 을 제외하고는 침지깊이의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다.

5) 최고침식율을 보이는 실험시간은 SFO환경에서는 각 침지깊이에 있어서 유온이 증가하면 할수록 감소하지만 SLO환경에서는 유온이 증가하면 길어지는 경향을 보인다.

References

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, 245-254, (1996).
2. 이진열 · 하만식 · 한원희, "선박유류 입자의 균질효과에 미치는 초음파 분쇄작용", 해양환경 · 안전학회, 제5권 제2호, 68, (1999).
3. 今村弘人, "舶用 ディーゼル機関(燃焼 · 潤滑 · 損傷)", 山海堂, 38-43, (1995).
4. 明星四郎 · 富田正久, "燃料油と潤滑油の實務", 三和印刷, 84-94, (1983).
5. 西山善忠, "燃料油 · 潤滑油", 海文堂, 71-80, (1996).
6. Instruction Manual, "Oily Water Separator (KOMEX OWS-IOB I)", (1990).
7. Operating Instructions, "DVZ-Oily Water Separator(IMO-Res. A393/X)",(1988).
8. SASAKURA, "Oily Water Separator(Model SMT-5A)", Osaka, Japan, (1996).

9. Manual, "TURBULO Separator(TCS 10 HD)", Hyundai Heavy Industries, (1994).
10. Operating Manual, "Oily Water Separator (OWPS-5.0)", M&C Engineering Co., Ltd., (1996).
11. Instruction Manual, "Oily Filtering Equipment (UST)", Georim Engineering.
12. TEAMTEC-GOLAR Marine Incinerator, TeamTec AS.
13. Waste Oil Incinerator, Under License of SUNFLAME Co., Ltd, Japan(KangRim).
14. Manabumi Masuko and Kazumi Okada, "Tribology of O/W Emulsion", Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.36, No.5, 369-374, (1991).
15. 李鎮烈, "油類工學", 曉星出版社, 115-116, (1999).
16. 황재호, "진동 캐비테이션에 의한 연강의 침식-부식 특성 및 억제에 관한 연구", 부경대학교 대학원 박사학위논문, 13-15, (1997).
17. Annual Book of ASTM Standard, "03:02 Wear and Erosion : Metal Erosion G-32-85", ASTM, 115-119, (1989).
18. 이진열 · 정지선, "선박 시스템유중 베어링 합금재의 침식거동에 미치는 각종 인자의 영향(2)", 한국해양대학교 부식방식공학연구소 논문집 제2권, 97, (1999).
19. 李鎮烈, "腐蝕 · 浸蝕 · 防蝕", 曉星出版社, 189-190, (2001).
20. 腐食防食協會, "エロジョンの コロジョン" 裳華房, 107-109, (1987).
21. 林祐助, 李鎮烈, "베어링 합금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, 57-60, (1993).
22. 林祐助, 李鎮烈, "舶用 베어링 合金材의 浸蝕-腐蝕抑制에 미치는 陰極防蝕의 效果", 韓國潤滑學會誌, 58-64, (1995).