

초음파 캐비테이션에 의한 선박 폐유 처리에 관한 연구

한원희[†] · 이진열*

목포해양대학교 기관시스템공학부, *한국해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Treatment of Shipborne Waste Oils by Ultrasonic Cavitation

Won-Hui Han[†] and Jin-Yeol Lee*

Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University

*Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University

Abstract – Ultrasonic vibrator is an equipment which atomizes and homogenization the oils by breaking the oil particles with ultrasonic cavitation, and would improve the properties. The present study deal with the ultrasonic breaking systems which recycle the shipborne waste oil into usable oil to be burnt. The first place, experimental studies were carried out to investigate the homogenizing effect of the waste oils by ultrasonic cavitation. Variation of the properties(viscosity, specific gravity and pH) and the matrix structures for the various shipborne waste oils were interpreted to analyse the breaking, dispersion effects by ultrasonic cavitation. The experimental results can be useful to the development of waste oil disposing systems.

Key words – shipborne waste oils, ultrasonic breaking system, homogenizing effect, oil properties, matrix structures.

1. 서 론

선박에서 사용되는 유류(marine oil)는 선박추진용 내연기관 연료유, 증기터빈용 보일러 연료유, 발전용 연료유 및 선박내의 각종 기계류에 사용되는 윤활유를 총칭한다. 연료유는 경유(MDO)에서 저질중유에 이르기 까지 다양하고 기관특성에 맞는 점도, 비중 및 인화점 등을 갖고 있다. 또한 선박 윤활유(액체윤활유 및 반고체윤활제 포함)는 사용상 특성에 맞도록 시스템유, 실린더유, 엔진유, 기어유, 냉동기유, 공기압축기유, 청정기유, 작동유, 절삭유 및 그리스 등 다양하고 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)[1]라고 하는데 슬러지유에 포함시키고 있다.

최근 해양유류오염을 방지하기 위한 노력의 일환으로 선박의 운용상 필연적으로 발생하는 폐유 및 슬러지유의 처리에 대한 연구가 다각적으로 진행되고 있다 [2,3]. 선박내의 폐유처리를 위하여 빌지의 성분인 유분과 수분을 분리할 수 있는 유수분리기(oily water separator)가 구성되어 있으며, 회수된 폐유를 연소시켜 처리하기 위한 폐유소각기(waste oil incinerator)가 기관실에 설치되어 운용되고 있다. 그러나 유수분리기를 통하여 분리·회수된 기름이라도 소각용 기름 또는 다른 용도의 선박연료로 재활용하는 데에는 유화, 산화작용에 의한 고형물, 콜로이드(colloid)상의 교착상태와 같은 문제점을 가지고 있기 때문에 그대로는 사용이 불가능한 실정이다[4].

이 연구에서는 초음파 캐비테이션을 응용한 분쇄 장치를 이용, 선박에서 생성되는 각종 폐유를 처리하여 소각기에서의 소각이나 보일러(oil fired boiler) 등의 연소 연료유로 재사용 할 수 있는 방법에 관해 검토하고

[†]주저자 · 책임저자 : winhan@mmu.ac.kr

자 하였다. 현재 선박 폐유를 보일러의 연료유로 재사용하고자 하는 연구[5]가 진행되어 여러 가지 장치들 [6,7]도 개발되고 있고, 또 조악한 선박연료유의 개질을 위하여 초음파 분쇄기를 사용한 예[8]가 있으나, 폐유를 분쇄하여 보일러 등의 연료유로 사용할 수 있는 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로 이 연구는 초음파 캐비테이션 작용을 이용하여 유류의 조직구조, 분쇄효과 및 미립자의 분포상태를 규명하고 선박 폐유의 재사용 가능성을 알아보기 위한 기초연구자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험방법 및 장치

2-1. 시료유의 특성

시료유는 선박의 청정기 슬러지 탱크에서 수거한 연료유 슬러지(fuel oil sludge : SFO), 윤활유 슬러지(lub. oil sludge : SLO), 3,000시간 사용한 윤활유(lubricating oil used : ULO) 및 전처리 장치가 부착된 유수 분리기에서 분리한 분리빌지유(bilge oil separated : SBO)등이다. 분리유는 연료유와 윤활유계통의 성분이 혼합된 유성혼합물이며, 각각의 특성은 Table 1과 같다.

2-2. 실험방법

실험에 사용한 시료유는 드레인 탱크에 있는 일정량 (6 l)을 속도 10 ml/min으로 계속 순환시키면서 초음파 진동자 혼에 의해 직각으로 조사되도록 하였다. 유온은 표준온도(25±2)로 거의 일정하게 유지되도록 냉각 팬 장치 및 항온 가열기(Oil bath : OB-200 type)를 설치·사용하였고, 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 간격을 자동정지 타이머에 의해 조정하였다.

진동자 혼 디스크의 시료유에 대한 표준 침지 깊이를 3 mm로 하였고, 유온에 따라 약 +2 mm의 오차를

두어서 실험하였다. 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 위해 거름종이(filter paper : 100 circles 110 mm, #93)를 사용한 스팟테스트(spot test)를 수행하였다. 시료유의 잔류탄소 입자분포나 분산상태는 현미경(DW-THN/1011)에 의해 관찰한 후 CCD Camera (SAC-410ND) 및 PC를 이용하여 촬영, 조사하였으며, 필요시에는 접안렌즈 부착용 카메라 등을 사용하였다. 조직변화 관찰과 동시에 동일한 조건에서 시료유의 동점도, 비중 및 pH 등의 정상변화를 조사하였다. 이때 동점도는 Spindle형 점도계(BROOKFIELD LVTDV-D), 비중은 비중계(S.G meter : 0.7~1.85 @15/4°C), pH는 pH meter(CONSORT C832)로 측정하였다.

2-3. 실험장치

Fig. 1은 초음파 진동장치의 개략도로서 초음파의 진

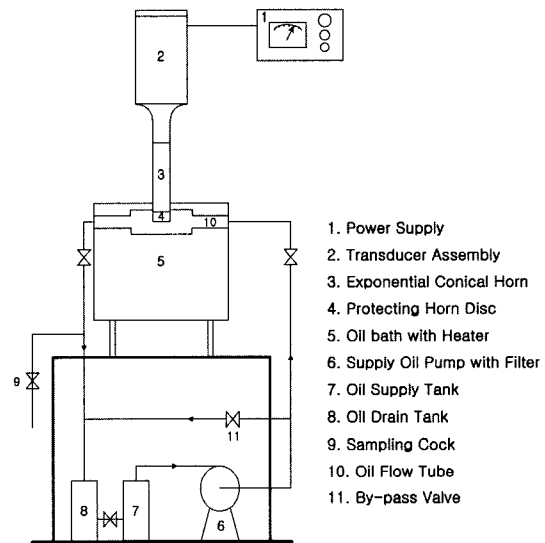


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic vibrator test apparatus.

Table 1. Properties of each oil 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
SFO	75.5	0.965	123	1.74	-	-
SLO	152.7	0.922	240	4.50	1.80	96
ULO	138.5	0.909	205	1.33	3.34	-
SBO	53.1	0.945	270	2.10	-	-

동에너지를 이용하여 폐유중의 고형분 슬러지를 파괴함으로써 폐유를 재활용하기 위한 실험장치이다. 이 장치는 유중에 초음파를 직각으로 조사하여 진동으로 액체를 크게 팽창시켜 공동(cavity)이 발생하도록 하며, 압축시에는 공동이 압력파로 되어 액중의 이물(고형입자 등)을 파괴할 수 있는 장치인데, 이러한 현상을 캐비테이션에 의한 균질화라고 한다. 이러한 효과를 내는 초음파 균질장치는 초음파를 직접 이송배관에 조사하여 흐르는 시료유를 분쇄·유화시켜서 균질화하는 기기로서, 초음파 진동자 혼의 바로 밑에 유액체가 운반되어 초음파 캐비테이션에 의해 미립화 및 균질화된다. 초음파 진동자는 압전소자(Piezoelectric)를 통해 가해진 전기에너지를 진동에너지로 변환시키는 것으로, 발생된 진동에너지는 지수형 원추혼(exponential conical horn)에서 증폭되어 액체에 수직방향으로 진동시킨다. 초음파 진동자는 ASTM 규격[9]에 의거 공진주파수를 20 kHz로 하였고, 진폭은 정진폭제어 방법을 사용하여 24 μm 로 유지하였다. 실험장치의 주요구성은 제어장치, 진동자, 증폭기 혼(booster horn), 자동정지 타이머 등이다. 환경조 및 배관은 전기 화학적인 부식작용과 시료유와의 계면장력을 고려하여 아크릴재료를 사용하였다. 초음파 조사용 시료유 흐름 관경은 20 mm이고 관출구 측에는 압력조정밸브를 부착하였으며, 유속은 펌프의 바이패스 밸브에 의해 조정하였다.

Fig. 2는 초음파 캐비테이션을 이용한 유류 분쇄 후 스팟 테스트의 결과를 알아보기 위한 영상처리 장치 배치를 나타낸 그림이다. 스팟 테스트 후 유류의 미립

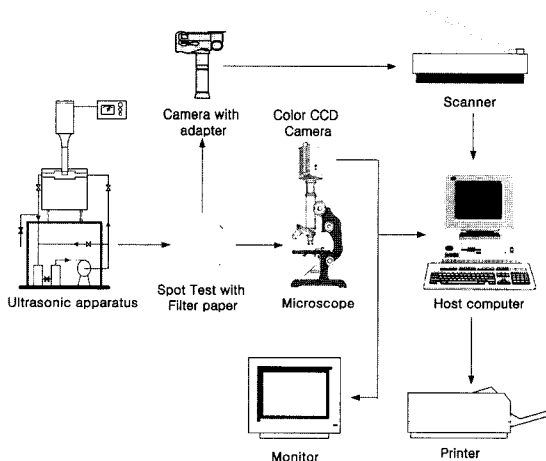


Fig. 2. Schematic arrangement of image processing for spot test.

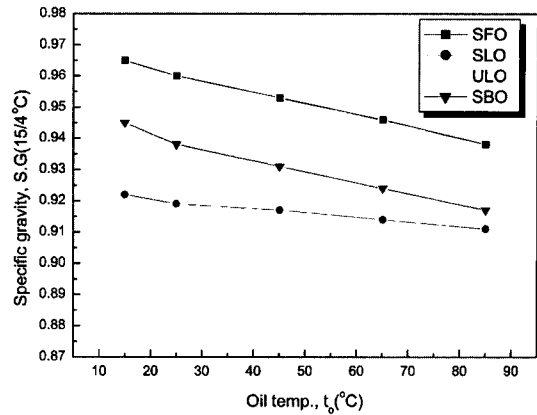


Fig. 3. Variation of specific gravity with oil temp. in shipborne waste oils.

화 및 균질화 상태를 알아보기 위해 현미경(microscope DW-THN/1011) 및 확대 사진기(Nikon AF 52 mm with Adapter)를 이용하여 촬영하였고, 촬영된 사진은 다시 CCD 카메라(Color CCD Camera SAC-410 ND)에 의해 전송되어, 모니터로 보다 크게 확대되어 관찰되고, 컴퓨터로 입력된다. 이 때 컴퓨터의 영상처리 장치(Conexant BT878 chip)를 통하여 직접 사진을 관찰하며 출력이 가능하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 초음파 캐비테이션에 의한 폐유의 성상변화

Fig. 3은 선박폐유인 연료유 슬러지(SFO), 윤활유 슬러지(SLO), 사용윤활유(ULO) 및 분리빌지유(SBO)를 온도변화 25°C, 45°C, 65°C 및 85°C에 따른 비중(S.G. @15/4°C)의 변화값을 환산하여 그래프로 나타낸 것이다. 이에 의하면 연료유가 주성분인 SFO에서는 유온의 증가에 따라 크게 감소하는 경향을 보이고, 윤활유가 주성분인 SLO 및 ULO 환경에서는 유온의 증가에 따라 다소 둔감한 것을 알 수 있다. 이와 같이 온도증가에 따라 비중이 감소하는 것은 유온의 증가에 따라서 단위체적이 증가하고, 그에 따라 밀도가 감소하기 때문이다. 또한 유온의 증가에 따라 탄화수소 결합상태의 변화, 침전물의 침강이나 부유물의 부상에 따른 유입자의 분포, 분산상태에도 변화가 있기 때문에 사료된다.

Fig. 4는 시료유를 진폭 24 μm , 진동수 20 kHz인 초음파 진동자 혼의 진동에 의해 조사시킨 후 용액의 pH 변화값을 정리한 것이다. 이때 실험시간(t)은 누적

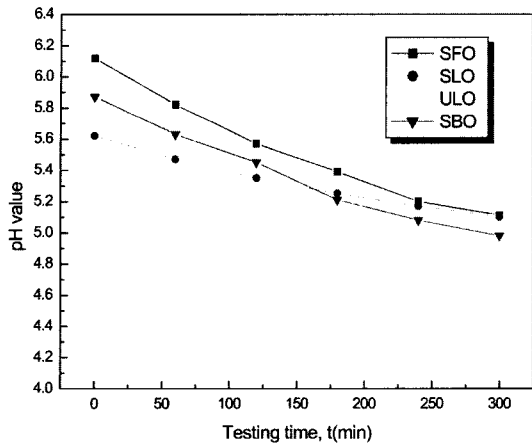


Fig. 4. Variation of pH value.

300분이고, 유온은 25°C로 하였으며 용액을 계속 순환 하였고 용기를 밀폐하여 증발을 방지하였다. 그래프에서 살펴보면 연료유 성분이 많은 SFO 및 SBO 환경에서는 실험시간이 경과하면서 pH값이 크게 낮아지는 것을 보이는 반면에 윤활유 성분이 더 많은 SLO 및 ULO 환경에서의 pH 변화값은 실험시간이 경과하여도 감소 폭이 다소 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이것은 캐비티의 반복작용에 의해서 유입자의 분쇄와 산화작용이 연료유 성분인 환경에서는 민감하지만 윤활유 성분인 많은 환경에서는 산화작용이 작게 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 초음파 캐비테이션에 의해서 고형물의 분쇄, 분산에 의한 유류의 산화가 촉진되기 때문이다.

Fig. 5는 초음파 조사시간(t)에 따른 동점도(cSt @ 40°C)의 변화값을 정리하여 그래프로 나타낸 것이다. 이에 의하면 실험전의 점도값의 크기는 SLO > ULO >

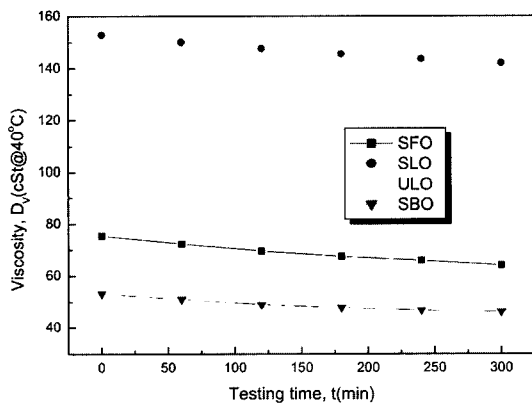


Fig. 5. Variation of viscosity.

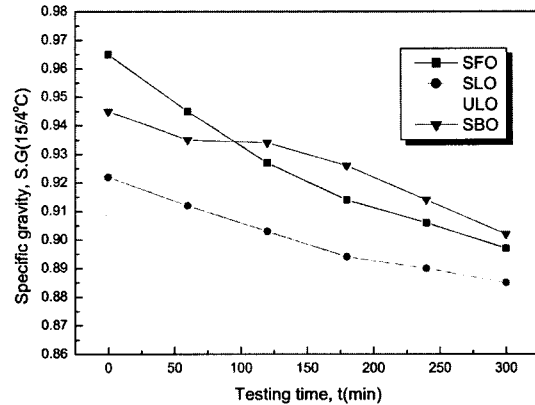


Fig. 6. Variation of specific gravity.

SFO > SBO의 순으로 나타나는데, 실험시간의 경과에 따라 거의 일정한 값으로 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 초음파 진동자 혼의 진동에 의해서 발생한 캐비티가 유환경에 대해서 반복적으로 작용함으로써 유입자의 미세화, 균질화에 유동성이 증가하고 유입자에 결합할 수 있는 표면적이 증가하므로 계면장력과 표면장력이 감소하는 것으로 사료된다. 또한 점도 값이 실험시간이 경과하면서 감소하지만 실험을 계속 진행시키면 감소폭이 둔화되면서 어느 실험시간에서 포화되는 것은 한정된 용액에서 유동성이 한정되고 유입자의 파괴에 따른 수분의 증발작용도 동시에 발생하기 때문이다.

Fig. 6은 초음파 조사시간(t)에 따른 비중(S.G. @ 15/4°C)의 변화값을 정리한 것으로 유온은 25°C로 하였다. 이에 의하면 SFO 환경에서는 실험시간의 경과에 따라 크게 감소하는 경향을 보이고, ULO 환경에서는 완만하게 감소하고 있다. 또한 SBO 환경에서는 실험시간 60분에서는 크게 감소하다가 그 이후의 실험시간에서는 감소폭이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 초음파 진동자 혼의 진동에 의한 캐비티의 충격력에 의해서 기름입자의 분쇄와 분산효과가 연료유 성분인 SFO 환경에서 우수한 반면 윤활유 성분이 많이 함유된 SLO 환경에서 미약하기 때문이고, SBO 환경에서는 연료유 성분과 윤활유 성분이 혼합되어 캐비티의 반복작용에 의한 기름의 유화효과가 연료유 성분에 지배되는 실험초기에 우수하기 때문인 것으로 사료된다.

3-2. 선박 폐유의 조직변화

Photo 1은 초음파 진동자의 진동에 의한 균질작용에 의해서 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO)의

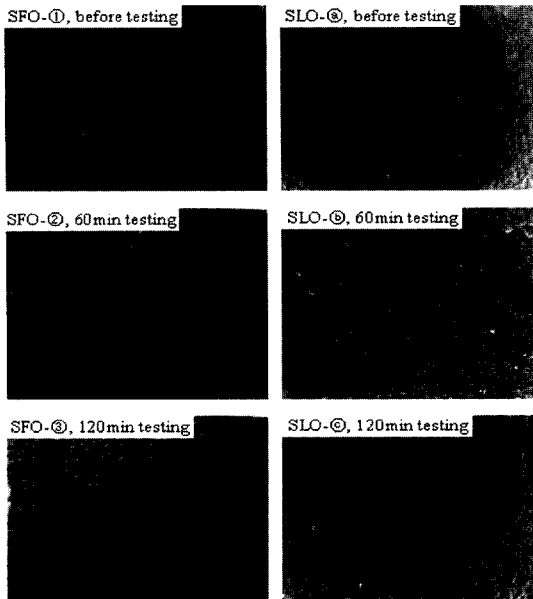


Photo 1. Appearance of microscopic homogenizing matrix for SFO and SLO (×5 times).

유입자의 파괴, 분산, 분포 및 균질효과를 실험시간 60분, 120분에 따라 촬영한 사진으로 진동자 혼 디스크의 침지깊이는 3 mm, 유속은 10 ml/min이고 진동자의 진폭은 24 μm 이며 유온은 약 25°C이다. 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 캐비테이션에 의한 유입자의 파괴작용이 강하고 유입자간의 충돌도 심하므로 고형물의 분쇄효과가 증대하고, 아울러 유입자간의 계면작용이 파괴되어 약화되면서 유입자의 분산이나 분포효과도 크게 증가하기 때문이라고 생각된다. 또한 윤활유 슬러지보다는 연료유 슬러지에서가 캐비테이션의 충격력에 의한 바탕조직에 큰 변화가 있는 것을 알 수 있다.

Photo 2는 Photo 1의 조직바탕을 35배로 확대하여 사진으로 정리한 것이다. 이에 의하면 실험전의 연료유 슬러지의 바탕조직은 파상형의 고행 덩어리가 산재하여 있고, 반면에 윤활유 슬러지에서는 바탕의 대부분에 탄소의 고행 덩어리가 퍼져 있으며 입계에는 수지상의 결합상태를 보이고 있다. 이러한 바탕 조직을 가진 연료유 슬러지가 실험시간이 경과하면서 캐비테이션의 충격압에 의해 고행 탄소의 미세한 입자로의 파괴되어 조직바탕에 촘촘히 분산된 상태이다. 또한 윤활

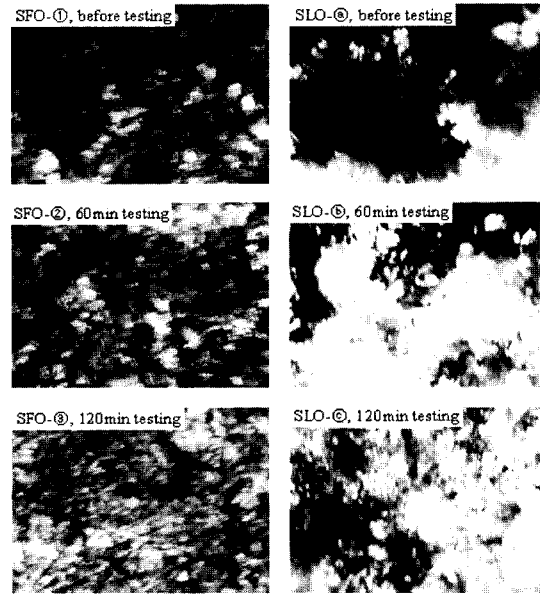


Photo 2. Appearance of microscopic homogenizing matrix for SFO and SLO (×35 times).

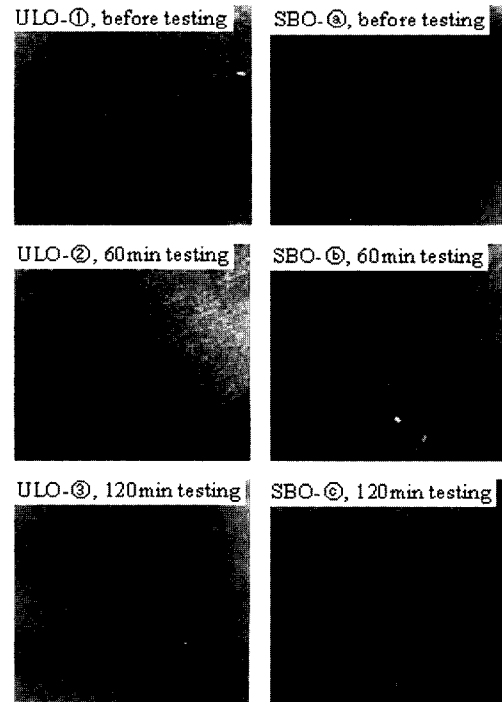


Photo 3. Appearance of microscopic homogenizing matrix for ULO and SBO (×5 times).

유 슬러지의 경우에는 수지상의 입계로 탄소의 고행물들이 실험시간이 경과되면서 잘 분포되어 있는 것을

알 수 있다.

Photo 3은 윤활유, 연료유, 수분 및 기타 유분 등이 함유된 유성혼합물을 유수분리기에서 분리된 분리유(SBO)와 3,000시간 사용한 윤활유(ULO)를 60분, 120분간 진폭 24 μm 인 초음파 진동자 혼의 캐비티의 충격압에 의해 분쇄·유화한 시료유를 촬영하여 정리한 것이다. 사진에서 나타난바와 같이 분리유는 여러 특성을 가진 혼합유에서 수분만을 분리시킨 기름으로 고품입자의 크기나 분포형태가 다소 균질하지 못한 형태를 보이고 있는 반면, 3,000시간 사용한 윤활유는 부분적으로 산화와 탄화된 모습이지만 실험시간이 경과함에 따라 고품입자가 미립화되어 잘 분포된 것을 알 수 있다. 이러한 분리유에서의 특성은 성상이 다른 연료유, 윤활유가 장기간 청수, 해수와 유화된 상태 후에 유수분리기에서 수분이 제거는 것이지만 아직 유화작용에 의한 기름의 콜로이드상이 다수 존재하기 때문에 캐비티에 의한 이들의 분쇄, 균질효과가 우수한 것 같지는 않다. 또한 사용 윤활유는 신유에 비하여 점도가 증가하고 고품입자가 많이 존재하나 탄화수소의 결합력이 미약하여 초음파에 의한 분쇄효과가 우수함을 알 수 있다.

Photo 4는 Photo 3을 35배 확대하여 정리한 사진이다. 검은 고품입자의 밀집된 분포상태가 실험시간이 60분에서 120분으로 길어짐에 따라 더욱 미세하게 분

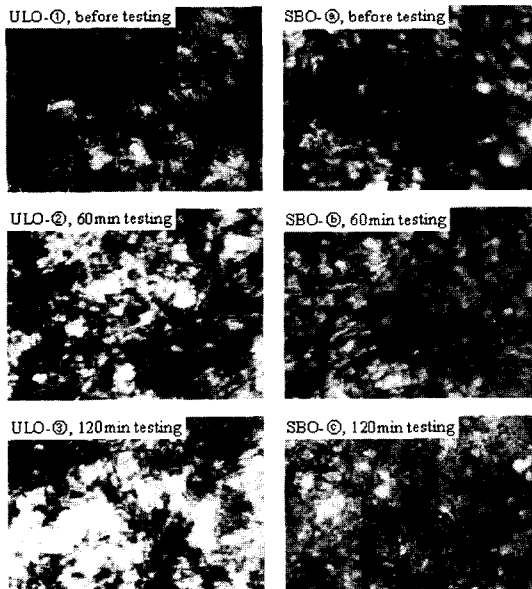


Photo 4. Appearance of microscopic homogenizing matrix for ULO and SBO (x35 times).

포되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 시료유에서 기포의 생성, 붕괴 작용으로 인하여 발생하는 충격압에 의한 고품입자가 파괴되고 교반되면서 시료유 전체에 분포되기 때문인 것으로 생각된다. 바탕조직의 분포상태를 볼 때에는 SBO에서가 ULO에서 보다는 폴리머의 조직이 잘 조화되어 있는데 이것은 SBO에서 연료유 및 윤활유의 성분들이 혼합되어 있고 수분에 예민한 상태가 미세하게 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

선박 폐유를 처리하여 재사용하기 위한 기초연구로서 연료유 슬러지(SFO), 윤활유 슬러지(SLO), 사용윤활유(ULO) 및 분리유(SBO)를 초음파 캐비테이션을 응용하여 분쇄·균질화 시키고, 스팟 테스트를 통하여 조직변화 양상을 조사하였으며, 성상변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

선박 폐유는 초음파 캐비테이션 작용에 의해 pH값, 동점도 및 비중값이 감소하는데, 연료유 성분이 많은 유류에서 윤활유 성분이 많은 유류에 비해 감소폭이 컸다. 따라서 초음파 캐비테이션에 의한 균질화 영향은 연료유 성분이 많은 유류에서가 점도지수가 높고 항유화성이 강한 윤활유성 유류에 비해 더 크게 작용함을 알 수 있었다.

선박 폐유의 분쇄효과는 초음파 진동에 의한 캐비테이션 작용시간이 경과할수록 그 효과는 크고, 미립자의 분포상태도 양호하였다. 또한 조직변화 양상도 성상변화의 결과와 마찬가지로 연료유성 유류가 윤활유성 유류에 비해 균질화 효과가 높았다.

참고 문헌

1. 李鎭烈, “油類工學,” 曉星出版社, pp. 344-353, 1999.
2. 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, pp. 245-254, 1996.
3. 이진열 · 하만식 · 한원희, “선박유류 입자의 균질효과에 미치는 초음파 분쇄작용,” 해양환경 · 안전학회, 제5권 제2호, pp. 67-78, 1999.
4. Manabumi Masuko and Kazumi Okada, “Tribology of O/W Emulsion,” Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 36, No. 5, pp. 369-374, 1991.

5. 배종욱, “船底廢油·슬러지의 보일러내 消却을 위한 燃料 前處理裝置의 開發에 관한 研究-슬러지 분쇄 유화 장치를 중심으로-,” 海事業業研究所 論文集 제 2권, pp. 217~224, 1992.
6. Operation Manual for 1333/2 Type Waste Oil Grinding Pump, DANSK FYRINGS TEKNIK.
7. Operation Manual for Dynamic Homogenizer Fuel Mil FM-100, Ashland Specialty Chemical Company, 2000.
8. Instruction Manual for MARISAVE U1-100, The Ssako Marine Co., Ltd, 1982.
9. Annual Book of ASTM Standards 1993 G 32, pp. 730~733, Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test, 1993.