공학석사 학위논문

슬러지유 환경에서 초음파 진동자 혼 선단의 침식특성에 관한 연구

A Study on the Erosion Characteristics of Ultrasonic Transducer Horn Tip in Sludge Oil Environment

지도교수 이 진 열

2002年 2月

한국해양대학교 대학원

운 항 시 스 템 공 학 과

정 지 선

目 次

List of Tables

List of Photographs

List of Figures

Chapter 2

Chapter 3

Chapter 4

A study on the Erosion Characteristics of Ultrasonic Transducer Horn Tip in Sludge Oil Environment

Ji-Sun Chung

Department of Ship Operation System Engineering, Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

Sludge oils were unavoidably produced in ship's operations, therefore it is necessary to manage the sludge oils inside the ship itself with the view to prevent marine oil pollution from ship. The present study deals with the ultrasonic breaking systems that recycle the sludge oil from ships into usable oil to be burnt. 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. The matrix structures of the environment of various marine oils were interpreted to analyze the breaking and dispersion effects by cavity. The erosion damages the horn disc SS41 with weight loss rate and the irradiation time to maximum. Erosion rate were simultaneously

examined according to the variation of the transducer amplitude, as well as the oil temperature and the immersing depth of horn disc.

The important findings from this study are as follows.

1) According to the depth of horn disk is deep, the variation of organization by cavity is less while the breaking effect of the particles are vitalized according to the increment of oil temperature. In addition, the effects of breaking and dispersion are prominent in proportion as period of experiment increases.

2) The cavitation by the horn of the ultrasonic vibrator is insensitive according as its depth increases in the oil, and the size of the bubble is larger in the high density condition of SLO(sludge lub. oil) than the condition of SFO(sludge fuel oil). Accordingly, the amount and rate of weight loss rate decrease according to the depth of horn, and the degree of loss at SLO condition is bigger than SFO condition.

3) The amount and rate of weight loss rate by the erosion of horn disk inclined to increase at the SFO condition in proportion as a temperature of oil sludge increases while it decreases at the SLO condition.

4) The difference of the maximum erosion rate of the horn disk which has 50㎛ of the amplitude of vibration decreases in proportion as the depth of horn disk gets deep at the both SLO and SFO condition.

5) When the temperature of sludge is going up, the maximum erosion rate of the horn disk which has 50㎛ of the amplitude of vibration inclined to decrease at the SFO condition while it increases at the SLO

condition. In addition, the period of the maximum erosion rate at the SLO condition is shorter than the SFO condition

6) With a point of view of the maximum erosion rate according to the amplitude of horn disk, the maximum erosion rate at 50㎛ of the amplitude is more than double compare to the condition of 24㎛.

In view of the results so far achieved we could certificate developmental possibility of the ultrasonic breaking systems to manage the sludge oils inside the ship itself, and the experimental results can be useful to consider a countermeasure for the prevention of erosion damages.

제 1 장 서 론

현재 각국에서는 자국의 해양을 청정해역으로 유지하고 보호하고자 많은 물적·인적자원을 투입하고 있으며 해양환경을 보호하려는 관심이 고조되면서 해양유류오염을 방지하기 위한 여러 가지 대책 및 연구가 강화되고 있다. 또한 새로운 장비에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 추세이다. 이에 부응하여 우리나라에서도 해양을 보호하기 위하여 많은 연구와 투자를 하고 있다.

해양오염을 일으키는 원인은 많이 있으나 그 중 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 선박에서 배출되는 유류로 인한 해양오염을 방지하기 위하여 그에 따른 법규 및 관리가 강화되고 장기적인 대책이 준비되고 있는 실정이다.[1]

그래서 이러한 유류오염의 발생 원인을 사전에 차단하고 방지하기 위해 해양경찰에서는 방제 전문분야를 설치 가동하고 방제협회 등과 협조하여 선박에서의 해양오염 방제를 위한 적극적인 대책을 수립하고 있다.

만약 선박에서 발생하는 고점도이고 침전물이 많이 함유된 슬러지유가 해양에 유출될 경우에는 해양생태계 파괴 등의 직접적인 피해가 발생하고 그 처리문제도 대단히 복잡해지며 어려워지기 때문에 근본적으로 슬러지유를 선박내에서 자체 처리한다면 가장 완벽한 방법이 될 것이다. 따라서 이에 대한 끊임없는 연구에 더 많은 투자와 노력이 계속되어야 한다.[2]

선박은 대량의 국제 간 물류수송의 수단으로서 가장 편리하고 이상적이기 때문에, 각 국가들은 항상 경쟁 속에서 선박을 운용하고 있다. 따라서 많은 선박회사들은 경쟁에서 우위를 차지하기 위해 여러 가지 비용 절감의 방법인 선박의 고속화, 대형화, 화물운송체계의 자동화, 화물의 전용화, 기

관의 자동화, 유류비의 절감 및 선박 승무원의 인건비 절감 등의 다양한 분야에서 효과적인 운항과 함께 경제적인 절약을 위한 노력을 꾸준히 하고 있다. 이에 지속적으로 개발, 연구되어야 할 부분이 유류비 절감에 의한 선박운항의 경쟁력을 확보하는 것으로 판단하여 저렴한 저질중유를 선박기관에 사용할 수 있도록 연구하고 있다.

이러한 선박기관에 사용하는 연료유는 비중이 0.99에 가까우며, 점도가 380cSt/50℃인 저질중유가 사용되고 있는 추세이나[3,4] 근래에는 주기에 사용되는 연료유를 발전기 등에 직접 사용하는 노력의 일환으로서, 초음파 진동을 이용하여 폐유를 재활용하는 방법이 개발되고 있다.

선박에서 사용하는 연료유가 누출되어 기관실의 빌지(bilge), 청정기에서의 슬러지(sludge)를 형성하는데, 이러한 유성혼합물인 폐유를 보편적으로 선박에서는 유수분리기(oily water separator) 및 폐유소각기(waste oil incinerator)를 이용하여 처리한다.[5]

폐유의 효과적인 처리문제를 해결하고자 선박에서는 빌지의 성분인 유분과 수분을 분리할 수 있는 유수분리기(oily water separator)가 IMO결의 MEPC.60(33)에서 정한 시험기준에 따른 배출 유분 농도 15ppm에 만족하도록 설치되어 있으며,[6 9] 더욱 분리효과를 높이기 위하여 적층판형(laminated disc type)인 전처리 장치[10,11]가 유수분리기에 사용되기도 한다. 그러나 전처리장치(pre-treatment)가 부착된 유수분리기를 통하여 분리된 기름이라도 선박연료로 재활용하는 데에는 유화, 산화작용에 의한 고형물, 콜로이드(colloid)상의 교착상태와 같은 문제점을 가지고 있다.[12] 또한 폐유소각기(waste oil incinerator)를 기관실에 설치하여 폐유을 소각 처리하고 있으며,[13,14] 최근에는 폐유를 보일러의 연료유로 재 사용하고자 하는 연구가 진행되면서 이에 적합한 장치들이 개발되고 있다. 그러나 조악

한 선박 연료유를 발전기의 연료유로 사용하기 위하여 초음파를 응용한 분쇄기를 사용한 예는 있으나 여러 면에서 만족할 만한 효과는 없는 실정이다.

따라서 실질적인 선내 처리의 한계로 인해 선내에서 미처 처리하지 못한 선박내의 슬러지유(sludge oil), 빌지(bilge), 오폐유(dirty oil)등을 처리하기 위하여 가능한 한 유수분리기(oily water separator)를 거쳐서 슬러지유 탱크에 모아 대부분 육상으로 이송하여야 한다.[15] 이러한 경우에는 슬러지 탱크(sludge tank)의 저장용량도 문제가 될 뿐만 아니라 경제적, 시간적인 소모도 많고, 해양에 유출될 위험성이 있기 때문에 해양유류 오염방지 차원에서 근본적으로 선박내에서의 처리가 가장 절실하다고 하겠다.[16]

이 논문에서는 연료유 슬러지(sludge fuel oil)와 윤활유 슬러지(sludge lub. oil)의 성상 및 조직구조(탄화수소의 결합상태)를 조사하고, 이 시료유에 초음파 진동을 조사하여 발생되는 캐비테이션을 이용하여 미립화 및 균질화한 조직(matrix)을 온도 및 초음파 조사시간 등에 따라 비교, 검토하였다.[17] 이 결과를 선박내의 폐연료유를 연소용 연료유로 재사용 하기 위한 연구와, 나아가 해양오염방지 대책 등의 자료로 활용하고자 한다.

또한 유체내에서 초음파 진동에 의해 발생한 캐비테이션은 기포 붕괴에 따른 충격압으로 재료가 침식을 일으키는데 이것은 초음파 장치의 기능 저하 및 효율 감소 등으로 기기의 작동에 영향을 줄 수 있다. 그러한 이유로 본 논문에서는 초음파 진동자의 혼 디스크(horn disc)에서의 캐비테이션에 의한 침식손상 특성을 규명하고자 하였으며, 실험에 사용된 디스크(또는 시험편)는 일반강으로서 가장 많이 활용되는 탄소강인 SS41(steel strength 41)을 사용하였다.[18] 이 SS41에서의 침식양상을 침식세기의 기본이 되는 진폭의 변화(50㎛와 24㎛)에 따른 침식손상을 정립하고, 유환경의 온도변화 및 혼의 침지깊이에 따른 침식손상 특성을 알아보았다.

아울러 이러한 실험자료와 연구결과가 슬러지유의 선내처리를 위한 방법으로써 연구되고 있는 초음파 진동에 의한 유입자의 분쇄작용을 응용하는 소각기(incinerator)에서나 보일러(oil fired boiler) 등의 연소용 연료유로 재사용하는 방식 등의 연구에 활용되기를 바라고,[19,20] 또한 해양유류오염을 근본적으로 방지하기 위한 대책의 일환으로 개발되어 사용되는 기기의 초음파 진동장치 중에서 중요부품인 진동자 혼 디스크에서의 침식손상양상과 특성을 초음파 진동을 응용하여 사용하는 많은 기기나 장치의 침식발생과 억제방법에 도움되는 자료로 활용하고자 한다.

제 2 장 실험의 이론적 배경

2.1 슬러지

2.1.1 선박유류 및 슬러지

선박유류(marine oil)는 선박추진용 내연기관 연료유, 증기터빈용 보일러 연료유, 발전용 연료유와 선박내의 각종 기계류에 사용되는 윤활유를 총칭하고 있다.[21] 이러한 연료유는 경유(MDO-marine diesel oil)에서 저질중유(점도 380 cSt/50℃, 비중 1.02 @15/4℃)에 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 유동점을 가지고 있다.

이러한 유류는 저장, 이송 및 교환시에 발생하는 누설과 복잡·다양한 기계의 습동부, 운동부 및 고정부에서의 누설 등이 기관실의 청수나 해수 등과 혼합되어 유성혼합물을 발생시키는데 이러한 것들을 일반적으로 빌지유(bilge oil)이라고 한다.[21],[22]

슬러지[21],[22]란 연료유 또는 윤활유를 청정할 때 생기거나 기관구역에서 기름의 누출 등에 의하여 생기는 유성잔유물로 연료유 또는 윤활유로 재사용할 수 없는 것을 말한다.

또한 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 유수분

리기에 의해 분리되며 분리된 기름은 슬러지 탱크나 폐유탱크로 이송, 저장된다. 이들의 기름을 주로 폐유(waste oil)라고 하는데 슬러지유에 포함시키고 있다.

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 연료유 슬러지 발생

연료유 슬러지는 연료유 드레인(drain)을 포함한 기름 협잡물 및 유성혼합물을 총칭하며, 그 발생원은 연료중에 함유되었던 수분을 연료 탱크로부터 침전 분리시켜 드레인 시키거나, 연료유 청정기를 통하여 배출되는 슬러지, 수분 및 협잡물 등이 된다. 배출된 대부분의 슬러지는 슬러지저장 탱크로 모아지고, 수분은 빌지탱크나 기관실의 빌지 웰(bilge well)로 들어가게 된다.

슬러지 발생량에 대한 조사를 살펴보면 국제석유운송협회(International Tanker Cooperation : INTERTANCO)에서는 총 연료 소모량의 0.5%가 연료 슬러지로 발생된다고 하였으며, 사사무라(ささむら)[23]는 디젤연료의 0.3%가 슬러지로 생성되어 배출될 수 있다고 하였다. 일반적으로 슬러지는 사용연료유의 양이 많고, 그 성상이 조악한 것일수록 발생량이 증가하지만, 그 양을 정확하게 측정하기는 곤란하다.

선박 연료유에 의해 발생하는 슬러지 량은 정확하게 측정할 수는 없으나 李[23]는 사용하는 연료유 종류에 따라서 슬러지 발생량을 다음과 같은 식으로도 구할 수가 있다고 보고하고 있다. 단 이 식은 선박연료유 슬러지의

저장탱크 설계시에 사용할 수 있고 연료유 탱크에 발라스트(ballast)를 적재하지 않는 경우에 적용할 수 있다.

연료유 슬러지 발생량

$$(M/T) = K_i CD$$

여기서, K_i : 0.015 - 주기에 중질중유를 청정하여 사용하는 선박

C : 연료소모량(Ton/day)

D : 슬러지가 육상에 배출될 수 있는 항구간 최대항해시간(day), 상세한 자료부족시에는 30일로 계산한다.

또한, 권[24]은 선박 기관 구역에서 발생되는 슬러지의 총량(ℓ/Hour)을 [$8.759 \times 10^{-4} \times BHP(PS) + 0.691$]식으로 계산하였다.

Table 2-1[25]은 선박톤수에 따른 빌지 및 슬러지 생성 추정량을 나타낸 것으로 선박톤수가 클수록 연료유 사용량 증가에 따라 빌지 및 슬러지 생성량도 증가됨을 보여주고 있다.

Table 2-2는 국내의 대형선사인 H해운에서 최근 2년간 발생한 슬러지의 양을 조사한 자료[26]이다. Table 2-1의 자료와 비교하여 볼 때 슬러지 발생 추정량과 실제 발생량과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 2-1. Estimated volume of bilge and sludge generation with gross tonnage. [25]

(unit : m^3/year)

Gross Tonnage	Mean Gross Tonnage	Fuel Oil Consu-mption	Lub. Oil Consu-mption	Engin Room Bilge	Oil Volume in Bilge	Fuel Sluge	Oil Volume in Sludge
Under 5 ton	1.8	7	0.05	0.17	0.018	0.0035	0.0007
5 20	11.9	30	0.17	0.8	0.06	0.015	0.005
20 100	55	105	0.6	3	0.18	0.053	0.011
200 1,000	405	500	2.5	17	0.70	0.25	0.05
1,000 4,000	2,718	2,500	9.8	69	2.3	1.25	0.05
4,000 10,000	8,015	8,000	32	200	4.8	4.0	0.8
10,000 20,000	14,159	10,000	39	320	8.0	5.0	1.0
20,000 50,000	27,651	14,000	68	550	11.0	7.0	1.4
Over 50,000 ton	119,730	45,000	200	1,400	28.0	22.5	4.5

Table 2-2. Average volume of annual sludge generation.[26]

(Unit : m^3/year)

Ship Type	Year	
	1999	2000
5302TEU (7 Vessels)	739.33	588.0
4024TEU (13 Vessels)	388.4	354.0
P-MAX (3 Vessels)	182.57	169.00
BULK (10 Vessels)	351.93	339.27
27K BULK (8 Vessels)	64.2	61.1
400TEU	40.0	37.9
LNGC	20.0	19.2

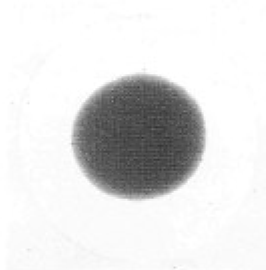
2.1.3 Spot test

스팟 테스트[21],[22]는 간이시험법으로 현장의 연료유 관리 및 윤활유 관리에 주로 사용되어 왔으며 스팟테스트의 원리는 여지(濾紙 : filter paper)와 지시약(指示藥)으로 구성되고, 여지는 중성여지를 지시약은 혼합지시약이 사용되고 있지만, 시료유와의 반응을 촉진하고 색상을 안정화시키기 위해서 이온기가 아닌 계면활성제를 소량 첨가하고 있다.

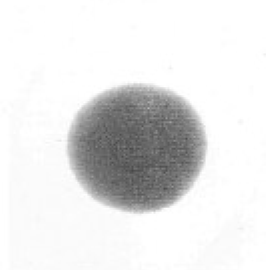
테스트의 순서는 우선 여지상에 지시약을 적하하고 다음에 이 스팟트의 중심에 시료유를 한방울 적하하여 이 때의 색상을 파악하는 것이다. 그러나 사용하고 있는 지시약의 종류에 의해 결과가 다르기 때문에 스팟트의 시험용기는 발매되고 있는 석유회사의 규정에 따르는 것이 바람직하다.

Fig 2-1[27]은 Nippon Yuka Kogyo社의 Oil tester YT-10을 이용한 스팟테스트의 기준을 각 평가 단계별로 예시한 것이다. 1단계에서는 유류의 입자가 골고루 퍼져있으며, 고형분, 슬러지 등의 뭉침 현상이 보이지 않고 균질한 형태를 이루고 있다. 하지만, 단계가 높아질수록 고형분 및 슬러지분 등의 뭉침 현상이 증가되고 6단계에 이르러서는 중간의 뭉침 현상이 뚜렷해져서 거의 검은 색의 형태를 보이고 있다. 이런 현상은 저질 중유 중에서도 매우 조악한 성상을 지닌 연료유에서 나타나는 현상이므로, 사용할 경우 여러 가지 문제점을 일으킬 수가 있다.

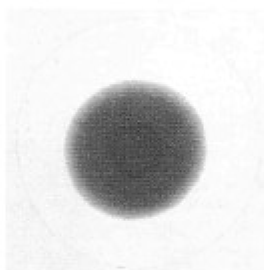
Standard Sheet



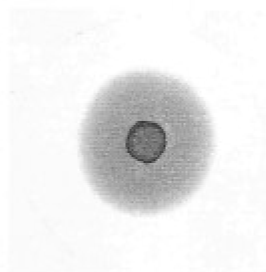
EVALUATION 1



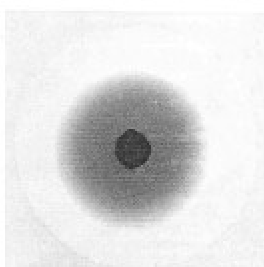
EVALUATION 2



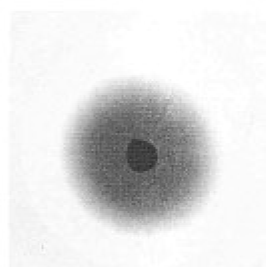
EVALUATION 3



EVALUATION 4



EVALUATION 5



EVALUATION 6

2.2 초음파

2.2.1 초음파의 정의 및 응용

음(音)은 물체의 기계적 진동에 의해 발생하고, 전자파와 같은 파의 형태로 유체, 고체와 같은 매질을 통하여 먼 거리까지 전달된다. 음파(音波)는 인간의 청각에 의해 감지 식별되는 진동수 대역의 아래위로 대단히 넓은 범위에 펼쳐져 있다. 음파에는 인간의 귀로 포착할 수 있는 가청음파(f=25㎐ 15㎑)와 인간의 각 기관에서는 포착할 수 없는 불가청음파가 있다. 보통 초음파는 주파수가 낮은 저초음파(f<25㎑)와 주파수가 고초음파(f>25㎑)로 나눈다. 그리고 초음파 중 f>1,000㎒의 초음파를 과초음파라 부른다.[28-30] 따라서 초음파란 인간의 귀로 감지되지 않는 높은 주파수의 음이며, 이것은 매질이 일부를 초음파의 주파수와 동일한 주파수로 진동케하여 발생시킬 수 있고 그 발생방법은 매질의 상(기체, 액체, 고체)에 따라 여러 가지가 있다.

초음파의 발생에 의해 정지 물체(매질)가 진동을 시작하면 그것에는 운동에너지와 분자력에 의해 위치에너지가 존재한다. 또 이 에너지는 매질이 같으면 그 파워가 클수록 멀리 전파할 수가 있다. 일반적으로 이 에너지가 큰 파를 강력 초음파라고 하고, 이것은 파의 진행방향에 대해 수직인 단위면적을 단위 시간이 통과하는 에너지량으로 나타낸다. 이러한 초음파 에너지는 진동수와 진폭이 클수록 크게 된다. 또한 주파수가 높은 초음파는 지향성(指向性), 집속성(集束性)이 강하고 전달, 투과 반사 등에 있어서 특수한 성질을 가지고 있다. 이러한 특수한 성질을 다양한 기술목적에 따라서 여러 가지 분야에 응용하고 있다.

초음파의 응용분야[31]는 초음파를 측정대상물에 발사하고 되돌아온 음파를 이용하여 대상물의 구조, 현상 등의 정보를 감지하는 분야와 통신분

야 및 물건을 움직이거나 물건의 구조 또는 육성 등에 영향을 주는 동력, 가공력으로 응용하는 분야가 있다. 계측분야는 어업용 또는 레져용 어군탐지기가 이용되고 있으며, 최근 컬러 표시장치 및 어군의 구조를 3차원으로 표시하는 장치[32]들이 개발되어 있다. 액체 등의 유량계, 고도계, 필름 등의 두께측정계, 바이오 장치의 배양 중에 미생물의 균체수를 측정하는 장치, 강관 및 열교환기 챔버등의 침식계, 초음파 수중무선, 수중 토목공사용의 발파 기폭시스템등 다양하며[33] 의료분야[34]에서도 다양한 제품들이 초음파 기술을 응용하여 개발되고 있다. 동력적 응용분야[35]에서는 제어성이 좋은 초음파 모터나 자동초점 카메라의 교환렌즈 구동 등에 초음파가 이용되고, 고성능 자동차 엔진의 연료분사 밸브, 알루미늄이나 스테인리스 등 용접하기 어려운 재료의 용접, 반도체나 정밀기기 부품 등의 정밀 세척장치 등 하이테크 분야에서 응용되고 있다.

2.2.2 초음파 발생 장치

2.2.2.1 초음파 진동자

초음파는 자연계에 널리 발생되고 있으나 이것을 바로 이용하기에는 어려움이 있다. 따라서 필요한 주파수와 강도를 갖는 초음파는 인공적으로 발생시켜야 한다. 이런 장치가 초음파 발생기이고 매질이 기체, 액체 및 고체이냐에 따라서, 또 주파수에 따라서 여러 가지 발생 방법이 있으나 크게 나누어 기계식 방법과 전기식 방법[36]이 있다. 전기식은 기계식에 비해 매우 높은 주파수의 초음파를 만들어 내는 것이 가능하고, 소형이며 회전 부분이 없고, 기체나 액체의 흐름이 필요치 않고 취급이 용이하다. 전기식 진동자의 종류 및 특징[28]-[30]을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

(a) 수정진동자 : 300㎑ 이상으로 사용되고, 임피던스가 높아서 가해야 할 고주파 전압도 높아져서 취급하기 어렵고 가격도 비싸다. 따라서 2㎒이상의 주파수 또는 200 500℃의 고온인 경우에만 사용하는 것이 좋다.

(b) 티탄산-바륨계 자기 진동자 : 수 백㎑에서 2㎒ 정도까지는 이것이 가장 널리 사용되고 있다. 임피던스가 낮아서 취급도 간단하고, 형상도 다양하다. 단지, 고온에서 사용할 수 없는 단점이 있다.

(c) 볼트고정 랑지방진동자(BLT) : 손실이 적고 비교적 고온까지 사용이 가능하며, 견고하고, 접합이 용이하며 금속 가공 등의 응용에 적합하다. 고가이고 임피던스가 높은 단점이 있다.

(d) 바이모르트형 진동자 : PZT 진동자 2매를 마주 붙여 사용하고, 박형이며 금속 진동판에 붙여서 사용한다.

(e) 페라이트 진동자 : 최근에 급속히 발전한 진동자로 여자용 전류 전원이 필요 없다. 에폭시 수지를 이용하여 접합하고, 온도가 너무 오르는 것에 유의하여야 한다.

2.2.2.2 진폭 확대자

진동자를 진동시킬 수 있는 진폭에는 진동자의 강도한계가 있고 20㎑ 부근의 진동자에서는 수 ㎛이하로 억제해야 한다. 따라서 초음파 진동자의 진동을 이용하기 위해서는 진폭의 확대가 필요하다.

진폭확대자의 형상으로는 단면이 지수 함수적으로 변화하는 지수함수 혼, 원뿔형인 원뿔 혼, 진동의 마디부에서 불연속적으로 가늘게 한 단붙이 혼 및 이것들의 조합이 있으며, 어느 것이나 진동자의 공진주파수로 반파장의 정수배인 공진을 하도록 설계한다.[37]

2.3 캐비테이션

유체를 사용하는 모든 공학 분야에 있어서 액체의 압력이 어떠한 원인에 의해 떨어지고 이 압력이 액체의 증기압까지 내려가면 기화가 발생한다. 압력 저하의 주요한 원인으로는 액체의 운동 혹은 액체가 정지해 있는 곳을 물체가 운동하는 것의 두가지 원인으로 분류할 수 있다. 이러한 운동에 의해 압력이 정압 이하로 까지 낮아져서 그 온도에 있어서 액체의 증기압 정도까지 내려가면 비등이 일어나게 되는데 공학에서는 이러한 비등현상을 캐비테이션이라 하며 비등과 캐비테이션은 물리적으로는 동일한 현상이다. 그러나 비교적 높은 온도에서의 액체의 기화를 비등이라 하고 상온부근에서의 기화를 캐비테이션이라 구분해서 사용하고 있다. 특히 유체기계는 액체 중에서 물체의 운동으로 인한 진동을 동반하는 기계이므로 필연적으로 진동 캐비테이션이 일어날 확률이 높다. 이러한 점에서 비등과 분리하여 진동 캐비테이션을 특수한 현상으로서 중요하게 다루고 있다.[37],[38]

캐비테이션 현상이 최초로 공학상의 문제로 대두된 것은 1894년 영국 구축함 "다아링"(Daring)호의 시운전 시 설계된 최고속도가 나오지 않아 추진기 날개를 크게하여 설계상의 최고속도를 나오게 했으며 이 원인은 추진기 뒷면의 압력이 추진기 날개 회전에 의해 저하하여 물이 날개면을 따라 흐르지 않으면서 공동이 형성되었기 때문이라는 결론을 얻었고 이러한 현상을 캐비테이션이라 이름붙였다.[39] 이러한 캐비테이션은 어떠한 유체에 있어서도 발생할 가능성이 있으며 펌프, 박용, 프로펠러와 같은 유체기계를 기초로 해서 열교환기, 배관, 밸브, 기어 그리고 엔진의 냉각수 자켓 등에서 발생하며 액체 수소나 고온의 용융 금속에서도 발생한다. 또한 캐비테이션 침식은 금속 뿐만 아니라 콘크리트나 유리 등과 같은 모든 고체에서

도 발생한다. 그리고 사용액체 중에 부식인자 및 고체입자 등이 포화되는 경우 기계장치의 부재에는 기계적인 침식과 동시에 전기화학적인 부식이 일어나며, 침식과 부식이 중첩하여 발생하는 경우는 상호간에 가속하는 상승효과로 인해 캐비테이션 손상이 더욱 심하게 일어남으로써 기계장치의 성능 저하 및 수명에 치명적인 영향을 미치기 때문에 캐비테이션 침식-부식에 관한 연구가 요구되고 있다.[40-49]

캐비테이션이 일어나기 쉬운 것은 다음과 같은 조건에 따라서도 변한다.[34]

(a) 기체의 포화도…한 번 가열해서 냉각하는 방법으로 탈기한 물을 사용하면 캐비테이션은 일어나기 어려워진다. 또 일어난 캐비테이션도 증기를 포함한 공동이라는 느낌의 이른바 증기성 캐비테이션이 된다.

(b) 캐비테이션에 대한 『중독』증 …한번 캐비테이션이 일어나면 잠시간은 캐비테이션이 일어나기 쉬운 상태로 되어 있다.

(c) 펄스의 지속 시간…초음파를 짧은 펄스로 내면 캐비테이션은 일어나기 어려워진다.

(d) 한번 가압하면…액체에 한번 고압을 건 후 감압해서 즉시 실험하면 캐비테이션이 일어나기 시작하는 음압이 커진다.

(e) 주파수에 의한 변화…주파수가 낮은 쪽이 캐비테이션이 일어나기 쉽다는 것이 일반적이다.

(f) 음압…일반적으로 음압이 클수록 캐비테이션의 발생도 크지만 너무 강해지면 오히려 효과가 적어진다고도 한다.

(g) 주위압력…주위 압력과 같은 크기의 음압이 피었을 때 캐비테이션이 일어나기 시작한다는 설도 있다.

이 밖에도 주위 온도, 용존 가스의 종류, 액체의 종류에 따라서도 캐비테이션 발생은 달라질 수 있다.

2.4 초음파와 캐비테이션

초음파 캐비테이션(ultrasonic cavitation)은 초음파에 의해 매질 입자에 매우 큰 가속도를 줌으로써 액중에 용존하고 있는 공기 분자의 집합, 성장 및 발달에서 압괴까지 일으키는 현상이다.[29]

액체 중에서의 강력 초음파의 작용에는 캐비테이션(공동현상)이라는 특이한 현상이 관여하는 일이 많다. 이 캐비테이션이란 그 이름이 가리키는 대로 초음파의 감압측 반주기에 음의 압력이 생기기 때문에 액체중에 공동이 생기는 현상인데 이것이 다음 측압측 반주기에 눌러 찌부러져 이때 발생하는 충격적인 큰 압력에 의해서 보통의 초음파에서는 일어날 수 없는 큰 작용이 일어난다. 이 현상은 초음파에 의해서만 일어나는 것이 아니고 선박의 스크루를 고속으로 회전할때도 날개의 뒷측에 공동이 생겨 그것 때문에 스크루의 부식이 심해져서 이 방면도 옛날부터 연구가 되고 있다.

액체는 일반적으로 복합적인 공동현상을 보인다. 즉 한번 공동현상이 일어나면 잠시간은 공동현상이 일어나기 쉬운 상태가 되고 공동현상이 일어나기 어려운 상태에서는 강한 초음파에 의해서도 공동현상이 발생이 어려워진다.

이와 같은 현상을 캐비테이션의 중첩 또는 간섭의 복합현상이라 한다. 초음파를 이용한 공동현상은 유화, 분무, 세정, 화산 속도나 반응속도 등의 촉진이나 고분자의 핵중합, 술의 숙성, 의학용의 치료나 수술 등에 이용되고 있다.

2.4.1 초음파 진동에 의한 캐비테이션 발생이론

유체기기나 수냉식 디젤기관 등에서 유체가 가속 혹은 고진동을 받게 되어 액체의 정압이 어떤 한계값보다 낮아지면 기포(cavity)가 발생한다. 이 현상을 캐비테이션(cavitation)이라 하고, 선박의 프로펠러에서 발생하는 경우에는 공동현상이라고도 한다.

이 기포의 생성과 붕괴는 일시에 발생하며 이들이 반복할 때에 생기는 충격압에 의해 기기에 큰 손상이 발생한다. 이것을 캐비테이션 침식(cavitation erosion)이라 부르며, 부식이 관여된 경우에는 캐비테이션 침식·부식(cavitation erosion·corrosion)이라 한다. 캐비테이션의 현상은 19세기말 고속선박 프로펠러(propeller)에서 발견한 이래 고속유체기기 등의 성능저하에도 큰 요인이 된다는 것을 알게 되었다.

2.4.1.1 기포의 발생조건

액체의 유동이나 와류 상태에서 기포의 발생조건은 다음의 식[50]과 같이 정리할 수 있다.

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

여기서, P_V : 액체의 포화증기압(㎪)

P_{ST} : 액체의 정압(㎪)

ΔP_W : 액압변동(㎪)

단, 선박 라이너의 경우처럼 진동속도가 액체변동으로 주어지는 경우의

ΔP_W은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P_W = \alpha\rho C V_1$$

여기서, α : 압력파의 전파에 관계되는 감쇠계수

ρ : 액체의 밀도

C : 액체내의 음속

V_1 : 라이너의 진동속도

즉 미택(米澤) 등의 시험용 디젤기관에서 액체로 공기포화 냉각청수에서 기포가 발생하는 라이너의 진동속도 $V_1 = 0.118$ ㎧로도 입증한바 있다.

2.4.1.2 캐비테이션 수

캐비테이션 현상에 대한 주요 인자로서는 물체의 형상, 표면조도, 액체의 압력과 속도 등이 있고, 또 액체의 증기압, 밀도, 표면장력, 액체에 함유된 기체량 등이 고려되어야 한다. 캐비테이션 발생을 위의 몇 개의 인자들을 고려하여 기본적인 무차원수인 캐비테이션 수(cavitation number) K를 구할 수 있다.[50]

$$K = \frac{P_O - P_V}{\rho V_O^2/2}$$

여기서, P_O, V_O : 무한원에서의 정압과 유속

ρ, P_V : 액체의 밀도와 증기압

캐비테이션 수가 충분히 크면 캐비티는 발생되지만, 대단히 적게 되면 기포는 물체표면으로부터 이탈하여 붕괴함으로 손상량은 미비하다. 일반적으로 증기압을 기준으로 캐비테이션 수가 정의되지만 이외에도 여러 가지 원인이 있을 수 있으므로 단순한 척도로서 전부를 취급하지 말아야 한다.

2.4.2 초음파 진동의 응용

액체가 흐르는 운동상태나 정지상태인 액중으로 고주파에 의해 미소진동되는 물체(또는 진동자)가 있다면 액체표면에 캐비테이션(cavitation){ 또는 캐비티(cavity)라고도 한다.}이 발생한다. 또한 액체로 충만되어 있는 용기내에 초음파 진동을 주어도 캐비테이션은 물론 발생한다.

물체의 표면이 액체와 반대방향으로 고속으로 이동할 때, 액체는 관성을 가지게 되므로 빠른 물체의 운동에 추종하지 못하는 경우에 물체와 액체의 경계면에 공극이 발생하여 캐비테이션이 발생한다. 물체의 표면이 액체방향으로 이동하면 압력이 회복되고 기포는 물체표면상에서 붕괴하든지 액체중에 압괴되면서 흐르게 된다.

따라서 캐비테이션은 흐르면 진동수와 진폭에 큰 영향을 받지만 이 외에 표면의 조도나 곡면 등에도 영향을 받는다. 진동 캐비테이션은 기포의 발생과 붕괴가 단시간의 주기로 교반되기 때문에 괴식성이 대단히 높다. 이 때문에 각종 재료의 침식시험이 단시간에 가능한 가속시험법으로서 폭 넓게 이용되지만, 다른 침식시험과는 다르게 시험편(또는 디스크라고도 함.)을 진동시키므로 시험편에 큰 가속도가 과해지는 차이점이 있다.

자왜진동시험장치는 대별하면 오픈비커(open beaker)방식 및 대향 2면방식 등 2가지 방식이 있는데, 이들에 대한 설명은 다음과 같다.

2.4.2.1 오픈 비커 방식

오래 전부터 행하여진 방식으로 ASTM(American society of testing materials)에서는 1977년에 시험규격 G32를 제정하고, 1992년에 개정판을 출시하였다. 이 방식은 자왜진동자 또는 피에조(piezo) 압전소자의 압력변환기에 의해 발생된 종진동을 지수관계상의 혼(일면 증폭혼이라 한다.)으로

증폭시키면 이 선단에 취부된 시험편의 단면을 액중에서 진동시키면 단면에 캐비테이션이 발생하며 단면이 침식된다. 따라서 시험편 단면에서의 종진동의 진폭이 극대화되도록 증폭 혼(horn)의 길이를 설계함과 동시에 시험편의 중량도 소정의 무게가 있도록 하여야 한다.

이 장치의 주요 변수에서 ASTM의 시험규격으로는 공진주파수를 20±0.5kHz로 정하고 있지만, 실제로 각국에서 이용되고 있는 장치의 공진주파수는 6 21kHz의 범위이다. 공진주파수는 장치 각각의 고유 수치로서 공진주파수가 낮은 만큼 혼 선단의 진폭을 크게 하는 것이 가능하다. 시험편의 형상과 혼에 취부하는 나사의 규격도 정하고 있으며, 시험편의 침식면의 상태는 시험재료에 따라 다르게 나타난다. 시험편의 침식면의 양상은 중심부가 강하게 침식(또는 괘식)되는 경우, 또는 주변부에 깊은 침식부가 발생되는 경우 및 방사상으로 침식이 진행되는 경우 등 여러 형태가 있지만 어느 것도 침식에 의한 시험편의 무게 감소량을 시험면적당으로 정리함의해 시험면에 일률적인 침식이 발생되는 것으로 취급할 수 있다.

공진주파수와 침식량과의 관계는 한 개의 장치로서 주파수를 변화되는 시험이 불가능하므로 복수기의 시험기에 의한 결과를 종합하여 보면 단위면적당의 침식량은 16kHz 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 진폭과 침식량과의 관계인 MDPR(Mean depth penetration rate) $\propto A^{\alpha}$에서 A는 전진폭 ㎛을 나타내고, 일본의 복정대학(福正大學)의 연구실에서의 실험결과에 의하면 지수α는 탄소강에서 1.74, 스테인레스강에서 1.85, 씰러밴가뎀(Thirvengadam)의 1.8, 홉스(Hobbs)의 1.5 등으로 서로 유사한 결과를 보이고 있다.

이 시험법은 주로 선박의 프로펠러 침식, 펌프 임펠러 침식 등 캐비테이션을 직접발생시키는 물체에서 침식이 발생하는 경우에 사용되고 있다.

2.4.2.2 대향 2면 방식

이 시험법은 주로 진동하는 베어링의 유막에서 발생하는 캐비테이션 거동과 베어링메탈에서 발생하는 침식을 연구하는 경우에 사용된다. 하지만 최근에는 난가공재의 세라믹, 고무와 같은 고분자재료, 표면피막재료 등의 시험으로 확대되어 이용된다.

이 장치는 오픈 비커 방식에서와 같이 액중에서 진동자 선단과 일정한 간격을 두고 서로 대향하게 시험편을 설치하여 침식을 발생시키는 것이다.

오픈 비커 방식에 비하여 간격이 변수로서 작용하는 경우, 간격 내에서의 액온이 올라가는 경우, 침식량이 크게 되는 경우 등 적지 않은 문제점이 있지만 시험편은 평행도가 적당한 크기의 평판이면 되므로 시험편의 가공에 대단히 곤란한 재료로도 용이하게 실험이 가능한 장점이 있다.

그 외 시험방법은 거의 오픈 비커방식과 유사하고, 본 실험에서는 오픈 비커 방식을 채택하였고 이에 대한 설명은 실험장치에서 상세히 설명하고자 한다.

제 3 장 실험방법 및 장치

3.1 시료유의 특성

시료유는 일반 상선의 선박의 기관실 슬러지 탱크에서 채취한 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO)로 채택하였다. 슬러지유의 조직바탕(matrix)과 캐비테이션 실험후의 각 실험조건에 따른 유입자의 분포나 조직상태는 접안렌즈용 카메라와 현미경(DW-THN/1011)을 이용하여 컴퓨터에서 관찰, 조사하였다. 또한 실험 전·후의 점도, 비중 및 pH값은 점도계(viscometer LVT), 비중계(specific gravity meter : range 0.7 1.85) 및 pH meter(CONSORT C832)를 이용하였고, 나머지 특성조사는 전문기관에 의뢰하여 검사하였다. 이들의 기본적인 특성은 Table 3-1에 보이고 있다. 또한, 시료유의 스팟테스트를 위하여 거름종이(filter paper, #93)를 사용하였고, 잔류탄소의 입자분포나 유화상태는 전자현미경(DW-THN/1011)에 의해 관찰, 조사하였다. 시료유의 표준온도는 30℃이고 항온가열기에 의해 거의 일정온도(±3℃)를 유지하였으며, 초음파 진동자 혼의 침지깊이는 3㎜로 하여 실험을 수행하였다.

Table 3-1. Properties of each oil environment to be used in experiments.

Specification of oils	Kinematic viscosity (cSt @40℃)	Specific gravity (15/4℃)	Flash point (℃)	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

3.2 시험편 및 실험장치

3.2.1 시험편

시편은 일반 구조용으로 가장 많이 사용되는 탄소강재 SS41로 하였으며 그의 화학적인 조성과 기계적인 특성은 Table 3-2에 보이고 있다. 시험편은 초음파 진동자의 혼 선단에 나사로 가공한 후 취부하게 하였고 시료유에 직각으로 침지되는 표면은 사포 1200번으로 저속에서 표면이 가공열에 의해 경화되지 않도록 연하게 연마하였으며 오일랩핑(oil lapping)한 후 아세톤(acetone)으로 탈지하였다. 시험편 표면 거칠기는 0.8㎛(rms)이고 진동자 혼에 단단히 고정할 수 있도록 스패너(spanner)의 취부 부분으로 가공하였다. 또한 시험편이 고온의 시료유에 의해 팽창되지 않도록 계속하여 공냉을 하였으며, 일정시간 실험 후 시편을 혼으로부터 분리 후 침식상태를 관찰, 촬영하였다.

시험편의 형상은 Fig.3-1에서 보는 바와 같이 직경 15.9㎜, 두께 6㎜ 정도로 가공하였고, 진동자의 혼 선단에 고정하는 나사부 길이는 10㎜로 가공하여 취부하게 하였다.[51] 시험편의 무게감소량은 시편을 혼으로부터 분리한 후 시편을 깨끗이 청소하고 유분을 아세톤으로 탈지하여, 드라이(dryer)로 건조시킨 후 디지털 저울(digital balance : LIBROR AEX-200B)을 이용하여 측정하였다.

Table 3-2. 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/㎟)	Yield strength (kgf/㎟)	Elongation (%)			
	42.4	25.8	32			

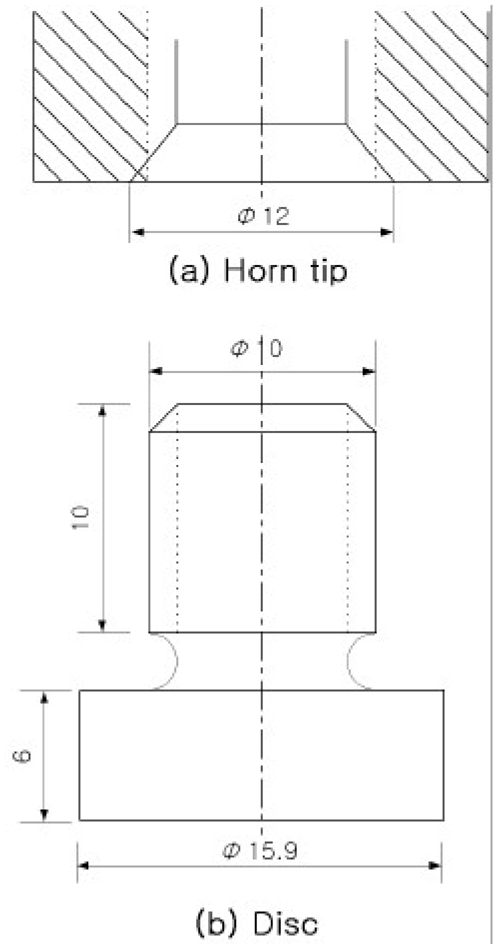


Fig.3-1. Schematic dimension of test specimen(unit : ㎜).

3.2.2 실험장치

Fig.3-2의 실험장치는 1992년도에 개정한 ASTM-G32 시험규격[52,53]에 맞게 제작하였고, 압전소자(piezoelectric element)의 압력변환기에 의해 발생한 종진동을 지수관계상의 진동자 혼(transducer horn, 진폭혼)에서 증폭하여 진동자 선단에 취부한 시험편(디스크라 명함)의 단면을 용액중에서 진동시켜 단면에 캐비테이션(또는 캐비티)을 방사하는 장치이다. 따라서 시험편 단면에서 진폭이 극대화하도록 진폭혼의 길이를 설계함과 동시에 시험편의 중량도 진동자의 무게에 포함시켜서 설계하였다.

진동자 혼의 공진주파수는 20kHz 정도이고, 진폭은 정진폭제어(constant amplitude regulation)방식으로 50㎛ 및 24㎛인 양 진동자를 사용하였다.

그리고 슬러지유 환경 온도는 가열기(oil bath : OB-200 type)를 이용하여 각 실험의 유온도(30℃ 90℃)에 적합하도록 조정하였으며, 가열기 내부에 비커(3000㎖)를 삽입하여 슬러지유 환경용액을 조정하였고 비커 주위에는 별도의 냉각조를 설치하여 냉각수를 순환시켜 유온을 정격온도로 유지하였다. 또한 비커(beaker)의 밑바닥에서 시험편 상부 침지용액 깊이는 100㎜ 이상이 되도록 하여서 캐비티의 방사가 충분하도록 하였다.

또한 진동자 혼의 발열 방지를 위해 냉각팬을 취부하고 규정온도범위(±3℃)를 유지하도록 하였으며, 또한 용액의 분포를 원활히 하도록 교반하여 사용하였다. 특히 이 실험장치의 진동자는 초음파의 진동에너지를 이용하여 슬러지유의 유입자를 파괴하는 목적과 진동자 혼의 디스크의 침식양상을 관찰, 조사하는 것이다. 즉, 유중에 초음파를 조사시키면 진동으로 액체가 크게 팽창하여 기포(cavity)가 발생하며, 압축시에는 기포가 압력파로 되어 액중의 이물(고형입자등)을 파괴하는데 이러한 현상은 캐비테이션(cavitation)에 의한 유화 균질화라고 한다.

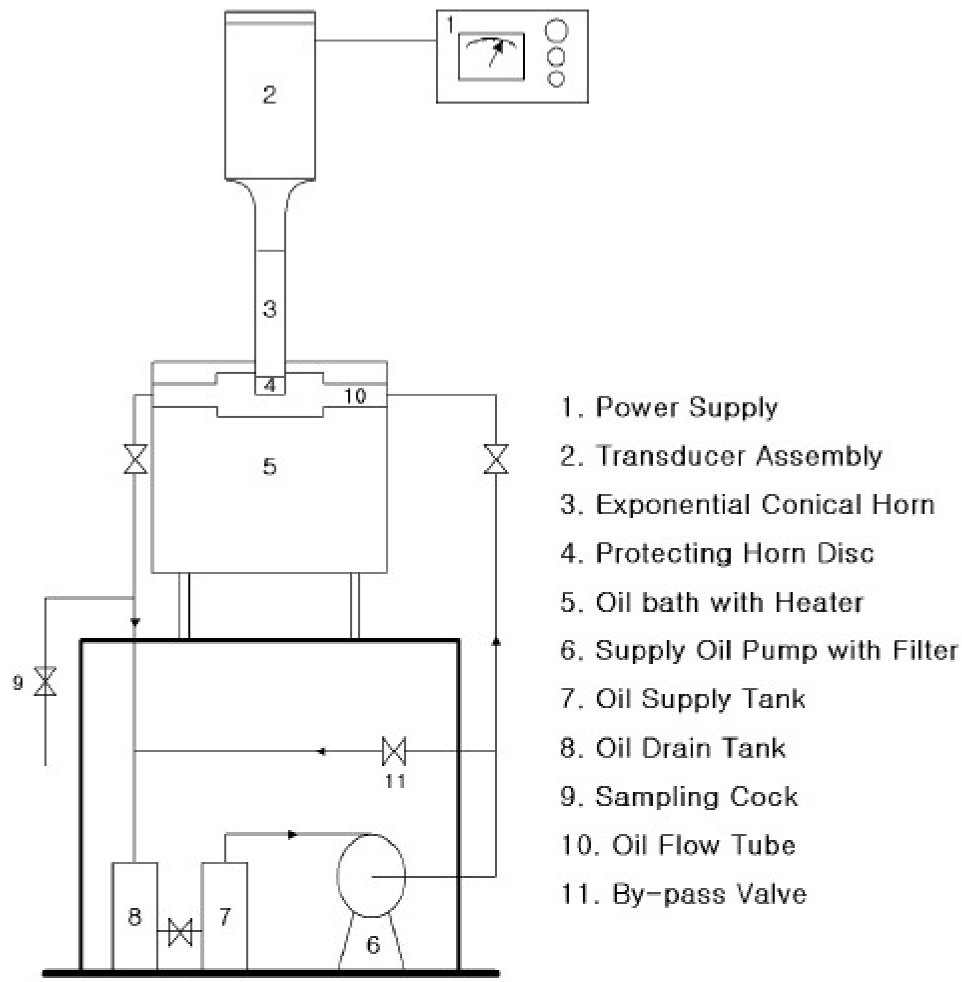


Fig.3-2. Schematic diagram of ultrasonic vibrator test apparatus.

3.3 실험방법

3.3.1 슬러지유의 캐비테이션 작용에 의한 조직변화

비커 내에 있는 일정량(3000㎖) 시료유를 초음파 진동자 혼과 디스크에 의해 직각으로 조사되도록 하였고, 진동자의 혼의 디스크는 일정한 실험시간마다 침식 및 마모상태를 점검하였으며 필요시에는 진동자 표면을 사포로 연마하거나 교환하여 사용하였다. 또한 유온은 유온변화에 의한 시료유의 조직변화를 실험하는 것 외에는 표준실험온도(30℃)로 거의 일정하게 유지하도록 냉각팬 장치나 가열기를 설치·사용하였으며, 유온변화에 의한 실험에서는 유온의 최고온도를 90℃까지 변화시켜서 수행하였다. 비커의 냉각용 순환수는 압력이 주어진 수도수를 계속, 순환하여 사용하였고 입구밸브의 가감에 의해 냉각량을 조정하였다.

실험은 진동자 혼의 냉각관계로 인하여 연속하여 실행할 수 없으므로 자동정지 타이머에 의해 일정시간 정지한 후 기동하는 반복된 실험으로 진행하였다. 이때 표준 침지깊이 3㎜, 표준 유온도 30℃에서 실험시간 1시간, 2시간마다 시료유인 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO)에서의 조직변화 및 캐비테이션에 의한 유입자의 분쇄양상에 따른 변화양상을 조사하기 위하여 스팟 테스트(spot test)를 실시하고 입자의 크기, 분쇄효과, 유화상태 등을 현미경 및 확대 카메라 등에 의해 촬영·조사하였다. 또한 진동자 혼의 침지깊이에 따른 슬러지유의 균질효과를 관찰하기 위하여, 혼의 침지깊이를 6mm와 9mm로 변화시켜 초음파를 조사하였다.

3.3.2 진동자 혼의 침지 깊이에 따른 침식특성 조사

진동자 혼의 액체 내에 수직으로 침지하는 깊이에 따라 캐비티의 형성, 분산, 충격 및 반작용의 발생과 소멸에 대한 기구(mechanism)가 현저하게 상이하기 때문에 캐비테이션 침식실험을 하기 전에 반드시 액체의 성상과 특성에 일치하는 침지 깊이를 정하는 것이 바람직하다.

이 실험에서는 30℃ 시료유에서의 침지깊이에 따른 진동자 혼 디스크의 침식양상을 관찰, 조사하기 위하여 시료유에 잠기는 진동자 혼의 깊이를 3, 6 및 9㎜로 변화시켜 실험을 수행하였고, 각각의 경우에 따라 혼 디스크의 무게감소량, 무게감소율 및 최고침식율을 실험시간이 경과함에 따라 정리하였다.

3.3.3 슬러지유의 온도 변화에 따른 진동자 혼 디스크 침식특성 조사

액체의 유온에 따라 캐비티의 발생과 소멸이 현격하게 차이가 있으므로 캐비테이션 침식실험을 행할 때에는 액온에 유의하여 실험결과를 정리하고 대책을 강구하여야 한다. 따라서 본 실험에서도 우선 유온 50, 70 및 90℃에 따라 시료유의 조직변화에 대한 추이를 검토, 조사하고자 정밀 접안렌즈 부착용 카메라 및 전자현미경에 의해 컴퓨터에서 촬영한 사진을 채취하고자 한다.

그리고 시료유의 온도변화를 30℃, 50℃, 70℃ 및 90℃의 4단계로 구분하였고, 각 유온에서의 진동자 혼 디스크의 침식양상을 무게 감소량, 무게감소율을 기본으로 조사하고, 이에 따른 침식특성을 규명하고자 한다.

3.3.4 진동자 혼 진폭의 변화에 따른 디스크의 침식특성 조사

초음파 진동자 혼의 진동수와 진폭과 관련해서 진동수는 일정히 유지하고 진폭의 크기에 따른 침식양상을 관찰하는 연구가 많이 행하여지고 있다. 이에 따라 침식손상에 미치는 캐비티의 효과를 진폭의 크기(또는 침식의 세기)로 정하여 실험하는 경우도 있다.[54] 이들에 미치는 간단한 식을 정리하면 다음과 같다. 진폭, 진동수를 가미한 인자로서 단위시간, 단위면적당의 방사한 에너지프락스(Energy flux : I)는

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho c A^2 \ \text{erg/㎠} \cdot \text{s}$$

로 표시 될 수 있고, 또한 압력분포(P_{max})는

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

여기서, f : 진동수, ρ : 액밀도, c : 액중의 음속, A : 전진폭

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

$$E = I \times S = ½\pi^3 f^2 \rho c A^2 d^2$$

그러므로, $R \propto f^2 A^2 d^2$ 여기서, d : 손상부의 직경

따라서, 손상속도에 미치는 진폭의 영향을 고려하여 진동수(f) 및 직경(d)을 고정하고 진폭(A)을 변화시켜서 실험을 수행하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1. 초음파 진동에 의한 슬러지유의 조직변화

4.1.1. 초음파 분쇄작용 시간 경과에 따른 유입자의 상태

Photo 4-1은 초음파 진동에 의한 분쇄작용에 의한 슬러지의 유입자 변화상태를 나타낸 것으로 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO)의 균질·유화작용을 실험시간 1시간, 2시간 동안에 시료유의 조직변화 상태를 스팟 테스트를 통하여 사진으로 정리한 것이며, 이때 유환경의 온도는 30℃, 진폭은 50㎛이고, 진동자 혼의 침지 깊이는 3㎜로 하였다.

이에 의하면 실험전의 슬러지유에 비하여 실험시간이 1시간, 2시간이 경과됨에 따라 시료유에는 캐비티에 의해 현저히 유입자의 분쇄, 분포, 분산에 의한 조직의 미세화 효과가 크게 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 초음파의 진동 및 캐비티에 의한 분쇄효과와 유적간의 마찰과 분쇄에 의한 유화작용이 증가된 것으로 생각된다.[55] 또한 점도나 비중이 클수록 고형물질의 밀도가 증가하기 때문에 유입자간의 충돌이 심하여 분쇄작용 효과가 증대하고, 아울러 유입자간의 계면작용이 증가하여 유화작용이 쉽게 발생[56]하기 때문이라 사료된다.

그러나 윤활유 슬러지의 경우에는 실험시간이 증가하여도 다소 분쇄효과가 적으며 유화작용도 미소하다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 윤활유 슬러지가 연료유 슬러지에 비하여 점도지수가 크고 항유화성이 강하기 때문에 초음파에 의한 균질화 현상이 적은 것으로 사료된다. 따라서 연료유 슬러지에서 윤활유 슬러지보다 초음파 진동에 의한 캐비티의 방사 작용에 의한 분쇄효과는 적은 시간에 큰 영향을 받는다고 생각된다.

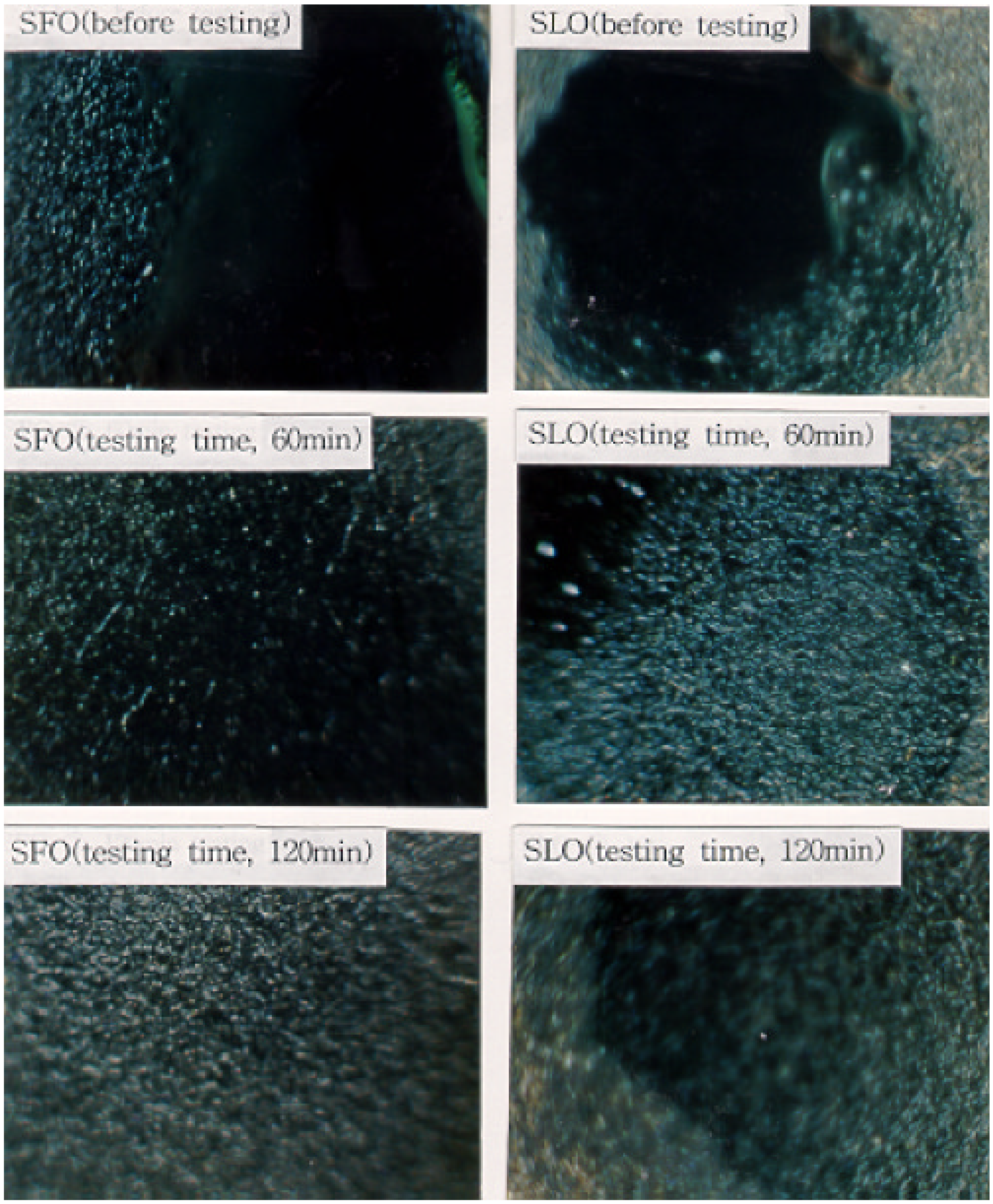


Photo 4-1. Appearance of SFO and SLO homogenizing matrix according to testing time in sludge oil.

(Oil Temp : 30℃, Depth of Horn DISC : 3㎜, Amplitude : 50㎛)

4.1.2 슬러지유 환경에서 진동자 혼의 침지 깊이에 따른 유입자의 균질화 효과

Photo 4-2는 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO)를 실험시간 2시간 동안, 30℃, 진폭 50㎛, 진동자 혼 침지깊이를 6㎜ 및 9㎜로 고정하여 실험한 결과를 정리한 사진이다.

이에 의하면 진동자의 혼 디스크를 시료유의 비커내에 수직으로 6, 9㎜로 각각 침지하여 실험한 경우에 전반적으로 캐비티에 의한 시료유 유입자의 분쇄, 분산효과가 미약하였는데, 9㎜의 경우는 초음파 진동자에 의한 분쇄효과가 더 작아 보인다. 또한 연료유 슬러지(SFO)에서가 윤활유 슬러지 환경에 비하여 캐비티에 의한 유입자의 분쇄작용에 더 큰 영향을 받는다.

이와 같은 작용은 혼 디스크의 침지가 깊게 되면 점성이 강한 유액체에서의 캐비티의 분산이 어렵고, 기포의 붕괴압이 감소하기 때문에 균질화가 어렵다. 또한 시료유의 점성이 강하면 캐비티는 크게 발생하나 캐비티의 수가 적고 분산과 분포가 어려우며 액체간의 유입자의 충돌이 약하게 된다. 따라서 윤활유 슬러지에서 보다는 연료유 슬러지에서가 침지 깊이에 따른 캐비티의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다.

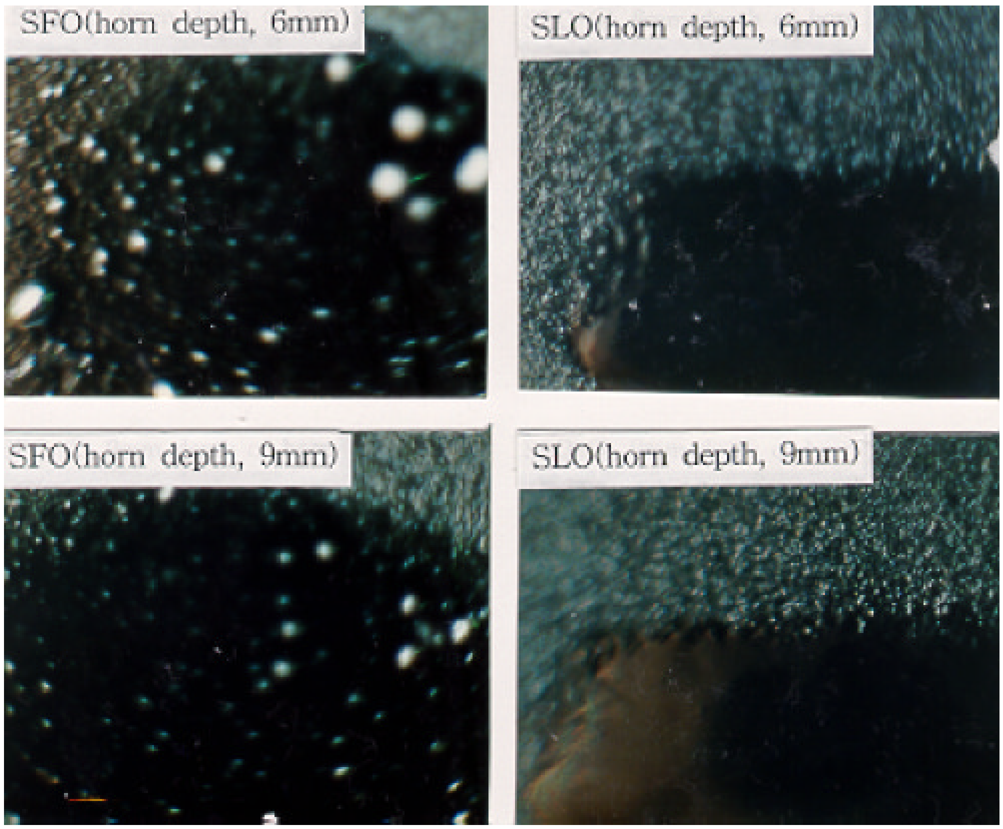


Photo 4-2. Appearance of SFO and SLO homogenizing matrix according to depth of horn disc in sludge oil.

(Oil Temp 30℃, Amplitude 50㎛, Testing Time :2 hours)

4.1.3 슬러지유의 온도 변화 환경에서 유입자의 균질화 특성

Photo 4-3은 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO)를 실험시간 2시간, 진동자 혼 디스크의 침지 깊이 3㎜로 조건하에서의 시료유 가열온도 50℃, 70℃ 및 90℃에 따른 시료유의 조직변화를 사진으로 보인 것이다.

이에 의하면 시료유의 환경온도가 높을수록 유입자의 분쇄, 분산, 분포효과는 크게 작용하고, 기포의 소포작용이 많이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 연료유 슬러지에서의 유입자의 분쇄작용은 유온이 50℃, 70℃로 증가함에 따라 증가하나 오히려 90℃에서는 다소 둔화되는 현상을 보이고, 윤활유 슬러지는 유온의 증가에 따라 분쇄, 분산작용이 민감함을 알 수 있다.

이와 같이 온도의 증가에 의한 분쇄, 분산작용은 점도저하가 원인이고, 소포작용이 강한 것은 기름내의 수분이 온도증가에 의해 쉽게 증발하여 분산이 보다 더 쉽게 이루어지기 때문으로 생각된다. 그러나 연료유 슬러지의 90℃ 환경에서는 유입자의 분쇄작용이 둔화되는데 이것은 유온이 점도저하의 영향을 받기는 하지만 이에 못지 않게 열원에 의한 기포의 발생이 쉬워 기포의 붕괴에 의한 충격압이 크게 저하하고 유입자간의 충돌도 약화되기 때문으로 사료된다.

또한 윤활유 슬러지에서는 유온이 증가함에 따라 유온에 의한 점도의 저하가 적은 고점도지수의 영향을 크게 받기 때문이다.[57]

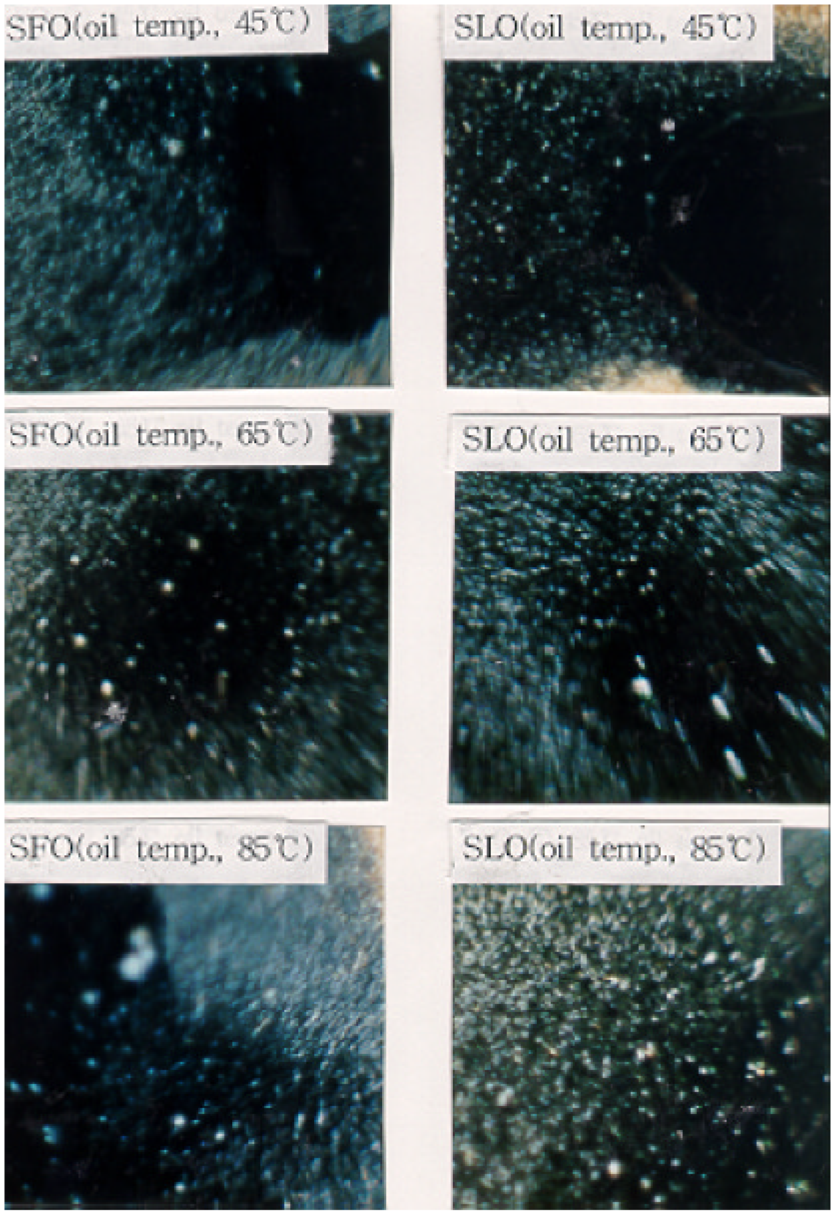


Photo 4-3. Appearance of SFO and SLO homogenizing matrix according to temp. environment in sludge oil.

(Amplitude : 50㎛, Depth of Horn DISC : 3㎜, Testing Time :2 hours)

4.2 진동자 혼의 침지 깊이에 따른 혼 디스크의 침식양상

4.2.1 진폭 50㎛인 진동자 혼 디스크의 SFO에서의 침식특성

Fig.4-1은 진폭 50㎛, 유온 30℃인 연료유 슬러지(SFO) 환경에서의 초음파 진동자 혼 디스크의 침지 깊이 3㎜, 6㎜ 및 9㎜에 따른 각각의 디스크의 무게 감소량(Wt)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것이다.

이에 의하면 실험시간이 경과함에 따라서 침지 깊이에 따른 무게감소량의 폭은 더욱 커지지만 실험시간 20시간 후부터는 무게감소량의 증가가 다소 둔화되는 양상을 보이고 있다. 이러한 현상은 진동자의 혼의 침지 깊이가 증가하면 캐비티의 분산이 어려워지면서 방사에너지가 약화되고 실험시간이 경과하면서 연료유 슬러지의 고형입자가 미세화하게 분쇄되기 때문에 나타나는데 이에 따라 점도가 저하되어 침지 깊이에 의한 캐비티의 분산작용의 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다.

Fig.4-1의 침지 깊이에 따른 무게감소량의 곡선을 좀더 구체적으로 분석하기 위하여 Fig.4-2에서처럼 무게감소율($R = \Delta Wt/\Delta t$)로 정리하였다. 이에 의하면 무게감소율은 15시간 정도의 침식시간에서 최고침식율을 보이고 그 이후에 감소하는 현상을 나타내고 있다. 또한 무게감소율은 침지 깊이가 3㎜에서 9㎜로 깊어짐에 따라 감소하는 추세이다.

이와 같이 무게 감소율이 어느 시간의 침식시간까지는 증가하다가 최고침식율을 나타내고 그 이후에 다시 감소하는 것은 캐비티의 방사에 의해 침식소공이 증가하다가 침식소공의 깊이와 크기가 크게 됨에 따라 침식소공에 캐비티가 흡착되므로 캐비티의 완충작용에 의해 캐비티의 발생이 저하되고 방사작용이 둔화되기 때문이다.

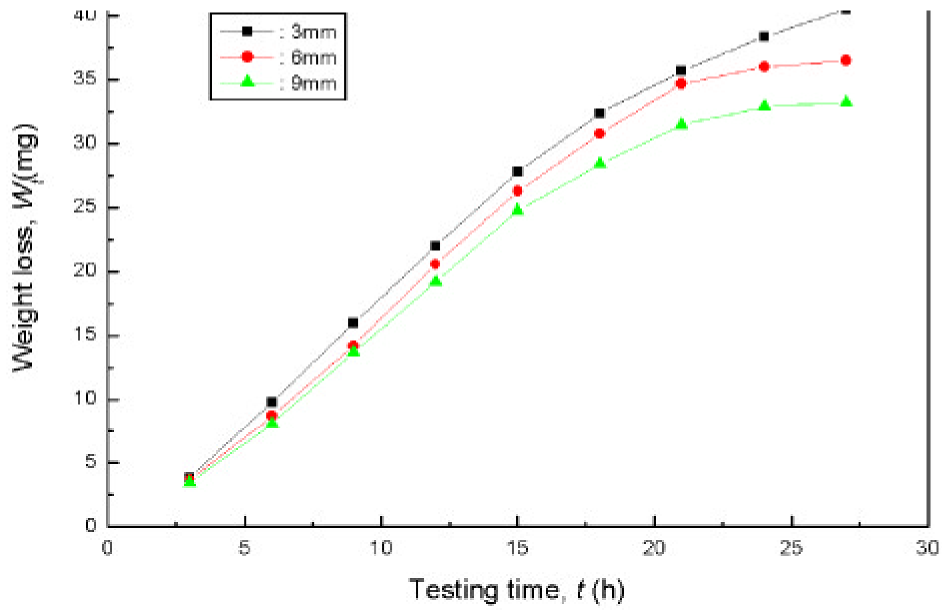


Fig.2-1 Weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(50μm amplitude).

Fig.4-1. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(30℃. 50㎛±5%).

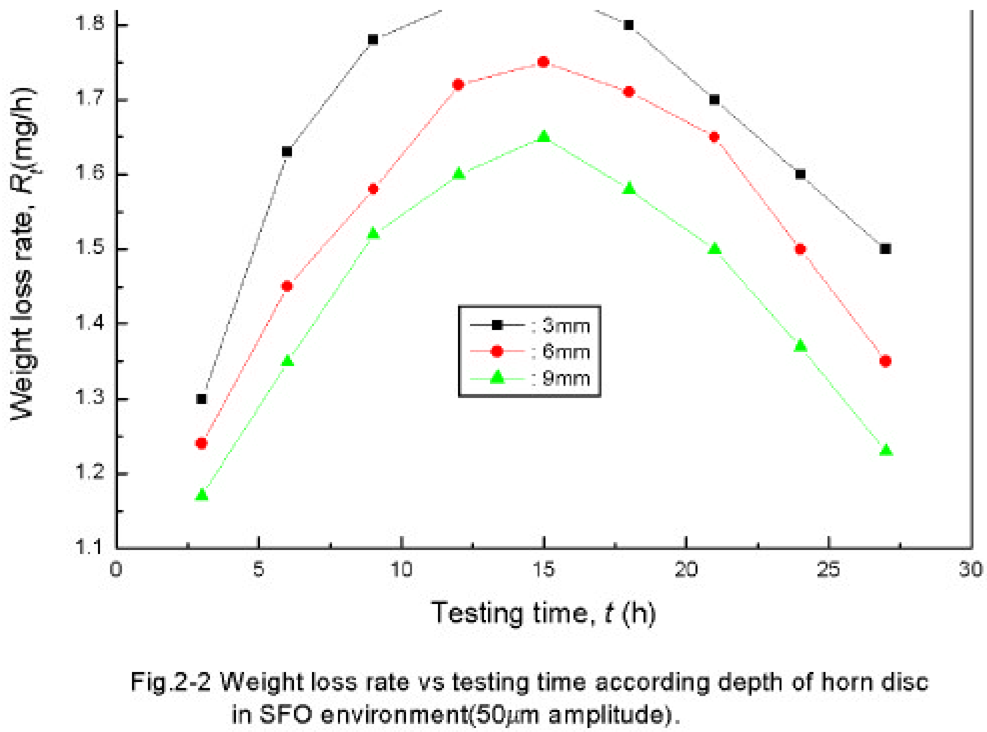


Fig.4-2. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(30℃, 50μm±5%).

4.2.2 진폭 50㎛인 진동자 혼 디스크의 SLO에서의 침식특성

Fig.4-3은 30℃인 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 침지 깊이에 따른 진폭50㎛인 진동자의 혼 디스크의 침식작용에 의한 무게감소량을 실험시간에 따라 정리한 것이다. 이에 의하면 침식시간이 10 20시간에서는 상당히 일정한 폭으로 무게감소량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 20시간 침식실험 후부터는 다소 무게감소량이 둔화되는 모습을 보이고 있다.

이것은 SLO의 점도지수가 높고 폴리머 조직변화가 조밀하게 형성되어 있으므로 침지 깊이에 따라 기포의 생성, 분산 및 붕괴작용에 큰 영향을 받아서 무게 감소율이 침지 깊이에 따라 일정한 폭으로 유지되고, 캐비티의 방사작용도 침지깊이에 비례하여 작용하기 때문이다.

이러한 현상을 실험시간의 경과에 따라 어떻게 변화되는 가를 좀더 구체적으로 관찰, 파악하기 위하여 Fig.4-4에 무게감소율을 나타내고 있다. 이에 의하면 최고침식율은 침지 깊이가 깊어짐에 따라 작아지고 최고침식율을 나타내는 실험시간은 길어지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 실험시간이 21시간이 경과한 후에는 무게감소율이 크게 감소하는 모습을 보이고 있다.

이와 같은 작용은 혼의 디스크에서 방사되는 캐비티의 영향이 침지 깊이에 민감하여 침식소공이 증가하면서 캐비티의 분산압력이 약화되지만 이것은 침지 깊이에 따를 뿐 유점성에는 큰 영향을 받지 않기 때문으로 이해된다. 즉 윤활유 유분의 바탕조직이 캐비테이션에 의한 분쇄작용을 적게 받는 특성에 기인하기 때문이다.

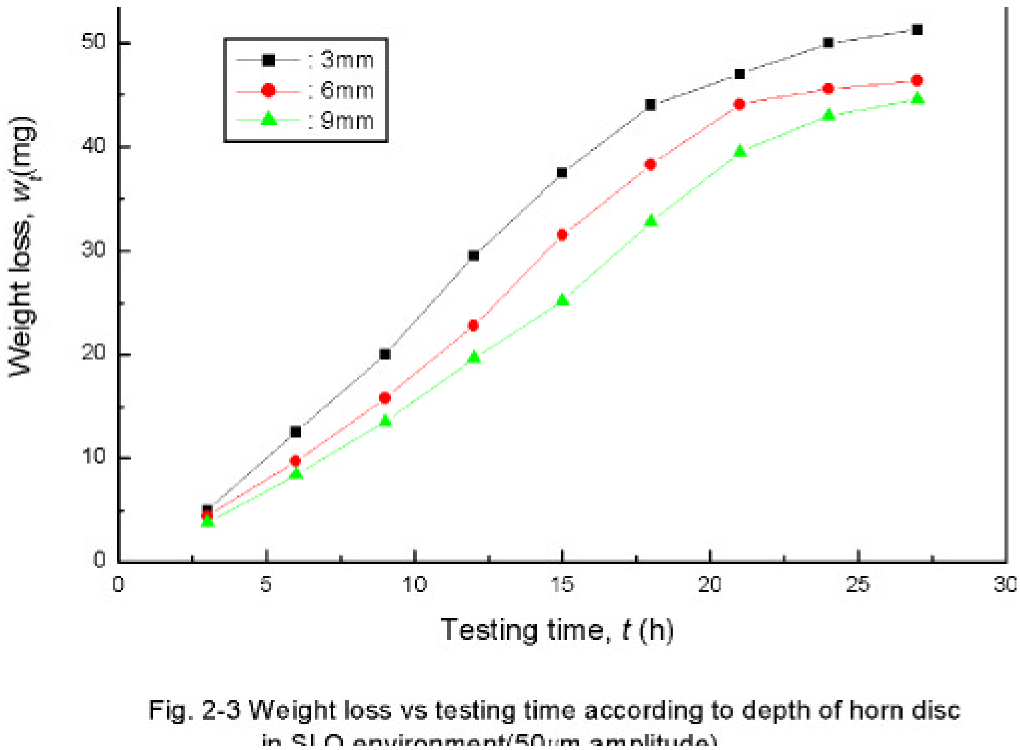


Fig.4-3. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(30℃, 50μm±5%).

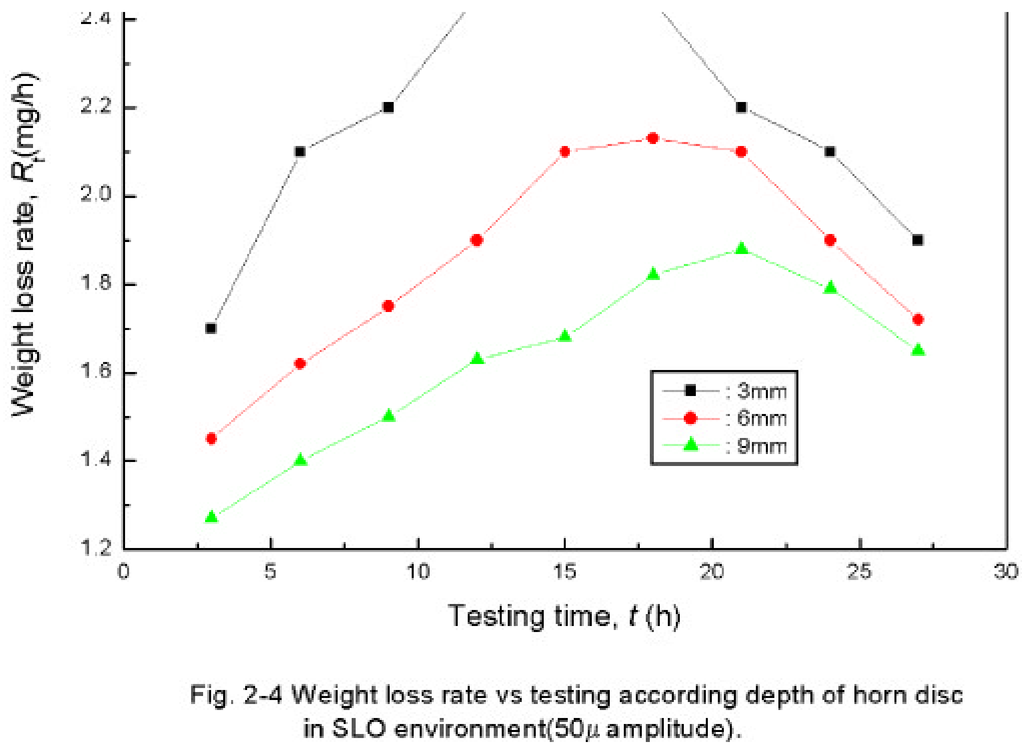


Fig.4-4. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(30℃, 50㎛±5%).

4.2.3 진폭 24㎛인 진동자 혼 디스크의 SFO에서의 침식양상

Fig.4-5는 유온 30℃에서의 연료유 슬러지(SFO)에 대한 진폭 24㎛인 진동자 혼 디스크의 침식에 의한 무게감소량(W_t)을 실험시간(t)에 따라 정리한 그림이다.

이에 의하면 실험시간 12시간 정도까지는 침지 깊이 3㎜, 6㎜에서 큰 영향을 받지 않고 무게 감소량이 거의 유사하게 증가하는 양상을 보이고, 그 이후에는 침지 깊이에 따라 다소 무게감소량의 증가에 큰 차이를 보이다가 27시간 실험시간에서는 서로 3㎜, 6㎜에서의 무게감소량의 증가폭이 다소 둔화되는 모습을 보인다.

실험시간 12시간 정도에서까지 3㎜나 6㎜에서 무게감소량이 거의 같은 것은 3㎜와 6㎜사이의 어느 침지 깊이에서 기포의 방사와 분산작용에 가장 적합한 상태가 존재하기 때문이고, 침식실험이 계속됨에 따라 침지 깊이에 따라 무게 감소량의 차이가 발생하는 것은 SFO의 캐비티에 의한 점도, 비중의 저하 및 조직변화가 발생하였기 때문에 캐비티의 방사작용에 침지깊이가 큰 영향을 받기 때문이다.

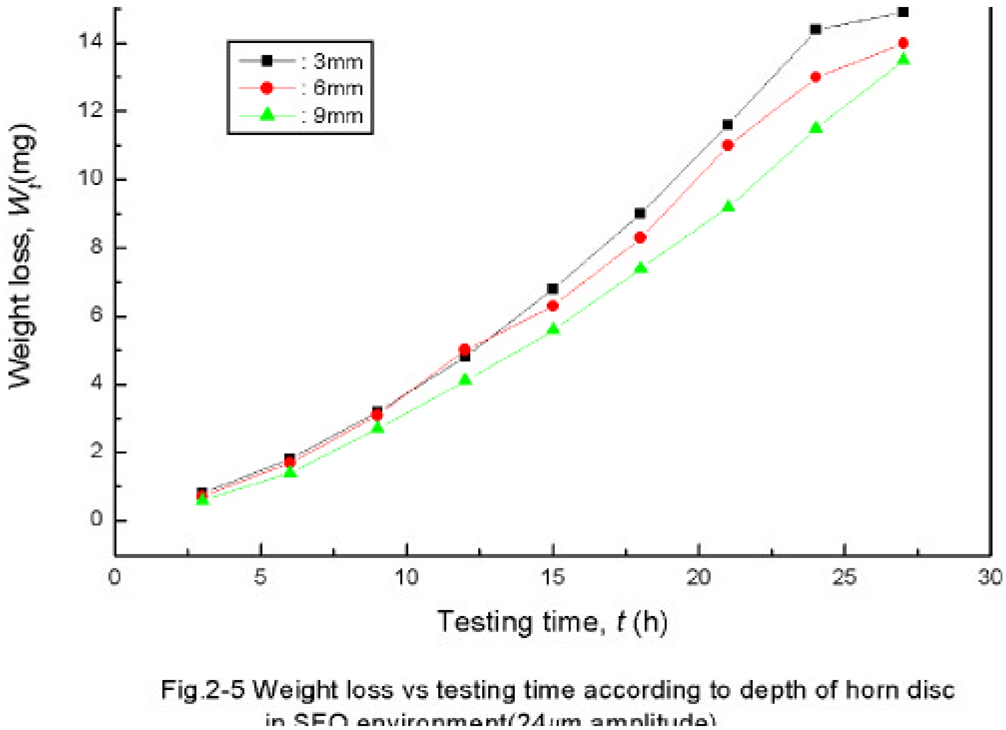


Fig.4-5. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(30℃, 24μm±5%).

또한 실험시간 27시간에서는 침지 깊이에 따른 무게 감소량이 다소 둔화되는데 그 원인은 증가된 무게감소량에 의한 침식소공이 디스크에 크게 형성되어 캐비티의 흡착에 의한 혼의 디스크에 흡입되는 기포의 완충작용 때문으로 생각되어, 이들에 대한 좀더 자세한 내용을 알기 위해서 Fig.4-6에 Fig.4-5와 같은 조건에서의 무게감소율(R)을 정리하여 보았다. 이에 의하면 침지 깊이 3㎜ 및 6㎜에서 무게 감소율은 실험시간에 거의 비례하여 증가하다가 24시간 실험시간에서 최고침식율을 보이고 그 이후 실험시간 후부터 감소하는 추세를 보이고 있다. 또한 9㎜ 침지 깊이에서는 실험시간 27시간까지 계속하여 무게 감소량이 증가하는 것을 Fig.4-5에서는 알 수 없지만 계속하여 실험을 하게 되면 어느 실험시간동안에 최고침식율이 나타나고 그 기점을 중심으로 하여 감소하는 추세를 보이는 무게감소율이 발생할 것이다.

이와 같이 어느 실험시간에서 최고침식율을 보이고 그 이후 반복되는 실험기간에는 오히려 무게감소율이 감소하는 현상은 진동자의 혼 선단인 디스크에서 방사되는 진동에 의한 액체의 캐비티가 디스크에 발생한 침식소공에 흡착된 기포에 의해 방해되기도 하고 진동자의 압축시 흡입되는 액체와의 완충작용에 의해 기포의 생성과 분산이 소멸되기 때문이다.

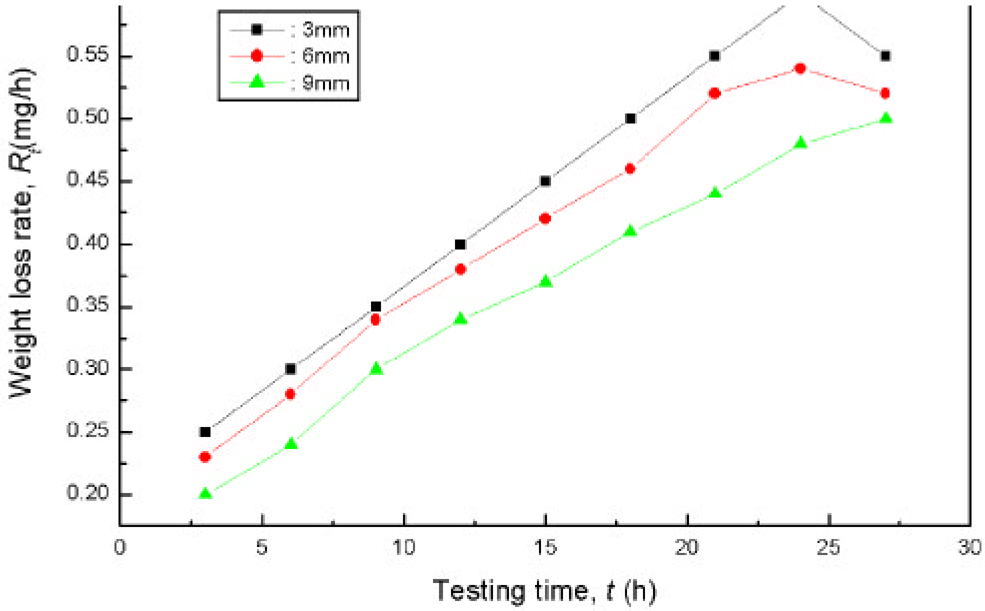


Fig.2-6 Weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(24μm amplitude).

Fig.4-6. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment(30℃, 24μm±5%).

4.2.4 진폭 24㎛인 진동자 혼 디스크의 SLO에서의 침식양상

Fig.4-7은 30℃ 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 실험시간(t)에 따른 무게감소량(W_t)을 정리한 것으로 전진폭은 24㎛이고 시료유에 대한 침지 깊이는 3, 6 및 9㎜로 하였다.

이에 의하면 실험시간이 경과함에 따라 무게 감소량은 증가하다가 실험시간 24시간 정도에서 3㎜, 6㎜ 침지 깊이에서 최고침식량이 나타나고 그 후의 실험시간에서는 다소 둔화되는 양상을 보이고 있으며, 침지깊이에 따른 무게감소량의 증가는 상당히 완만한 곡선을 이루고 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 실험시간 24시간 정도까지는 침식깊이에 따라 완만한 곡선을 이루면서 무게 감소량이 증가하는데 이 현상은 진폭 50㎛에 비해서는 24㎛에서의 캐비티의 크기가 작고 방사에너지도 약하며 진동자 혼의 디스크에 형성되는 침식소공이 미세하므로, 침지 깊이에 따른 진동자의 진동에 의한 액체의 흡입과 압축작용에 의해 형성되는 캐비티가 이루는 진동파가 파형이 형성되기 때문에 일어난다. 그리고 진폭 24㎛에서의 윤활유 슬러지 환경에서는 캐비티에 의한 영향이 침지 깊이와 조화를 잘 이룬다고 하겠다. 그리고 24시간 침식실험후에 3㎜, 6㎜에서 무게감소량이 다소 둔화되고 9㎜에서는 계속하여 무게감소량이 증가하는 이유를 좀더 명확히 규명하기 위해서 Fig.2-8에 무게감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 나타내고 있다.

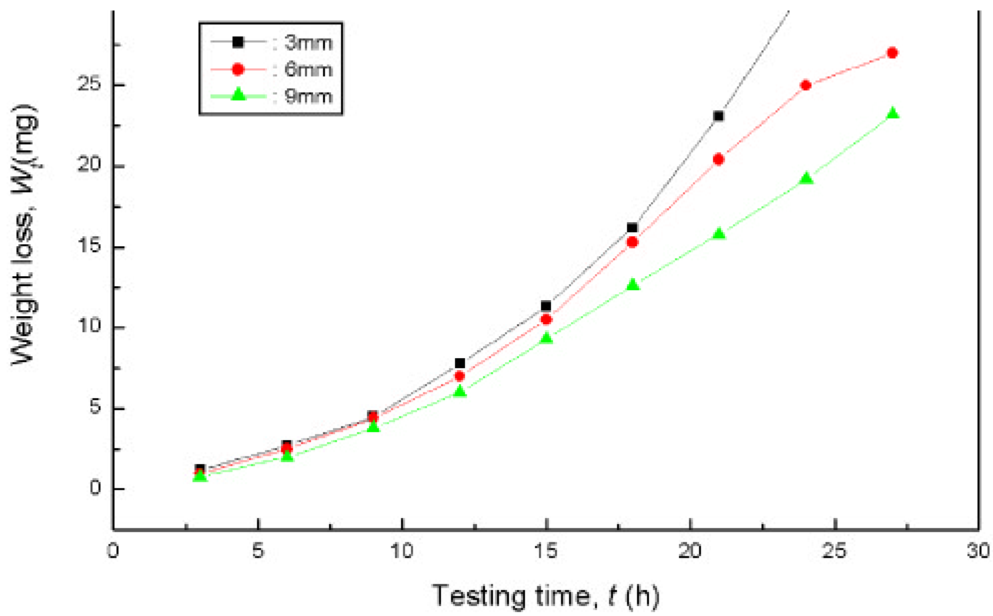


Fig.2-7 Weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(24μm amplitude).

Fig.4-7. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(30℃, 24μm±5%).

이에 의하면 3㎜, 6㎜ 침지 깊이에서의 무기감소율은 실험시간 24시간 정도까지는 증가하다가 실험시간 24시간 정도에서 최고침식율(R_{max})을 나타내고, 그 이후 실험시간 후에는 감소하는 경향을 보인다. 이 때에 9㎜ 침지 깊이에서의 무게 감소율을 증가하는 모습을 보이고 있다.

이러한 현상은 윤활유 슬러지(SLO)에서의 특성상 실험시간이 경과하여도 전진폭인 24㎛에서는 침지 깊이에 따른 진동자 혼의 캐비티의 방사 능력에 큰 차이는 없지만, 캐비티의 분산이나 붕괴에는 침지 깊이가 크게 영향을 미친다. 따라서 윤활유 슬러지 환경에서의 진폭 24㎛인 진동자 혼 디스크에 의한 무게감소율은 캐비티의 형성보다는 분산이나 붕괴에 밀접한 관계가 있으며 캐비티의 시료유에 대해서 계속된 조사(또는 방사)에 의해서 시료유의 점도나 유동에 영향을 받기 때문이다.

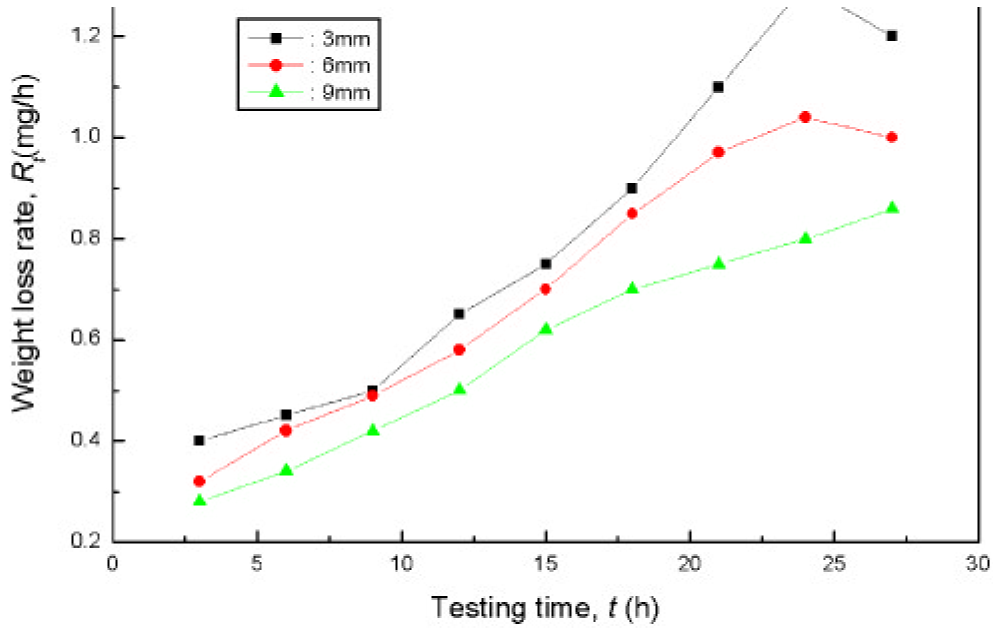


Fig.2-8 Weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(24μm amplitude).

Fig.4-8. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment(30℃, 24μm±5%).

4.2.5 슬러지유 환경에서의 최고침식율 및 이에 이르는 시간의 변화양상

Fig.4-9의 막대 그래프는 간 3㎜, 6㎜ 및 9㎜에서의 최고침식율(R_{max})을 시료유인 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO)에 따라 정리한 것으로 전진폭은 50㎛이다. 이 때의 실험시간은 서로 다르지만 진동자 혼 디스크(또는 시험편)에서의 최고침식율만을 비교, 검토하고자 한다.

이에 의하면 SFO와 SLO에서의 최고침식율은 침지 깊이가 3㎜에서 9㎜로 깊어짐에 따라 감소하는데, 특히 SLO에서는 침지 깊이의 증가에 따라 최고침식율이 감소하고 그 폭이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 침지 깊이가 증가함에 따라서 캐비티의 발생, 분산 및 붕괴가 약화되고 이에 따른 진동자 혼의 디스크에서의 침식작용도 약화되기 때문이다. 그리고 SLO에서의 최고침식율이 SFO에서보다 큰 이유는 SLO에서 고점도에 의한 캐비티로 침식소공이 크게 형성되기 때문이고, 침지 깊이가 증가함에 따라 SLO에서 최고침식율이 큰 폭으로 감소하는 것은 실험시간이 경과하면서 시료유의 성상인 점도에 큰 변화가 있기 때문이다. 즉 SLO는 단지 침지 깊이에 따른 캐비티의 특성에 관계되지만, SFO는 캐비티의 방사에 의한 캐비테이션 작용에 의해서 점도의 저하나 유동의 강하 등이 침지 깊이에 따라 혼의 디스크 침식에 큰 영향을 미치기 때문이다.

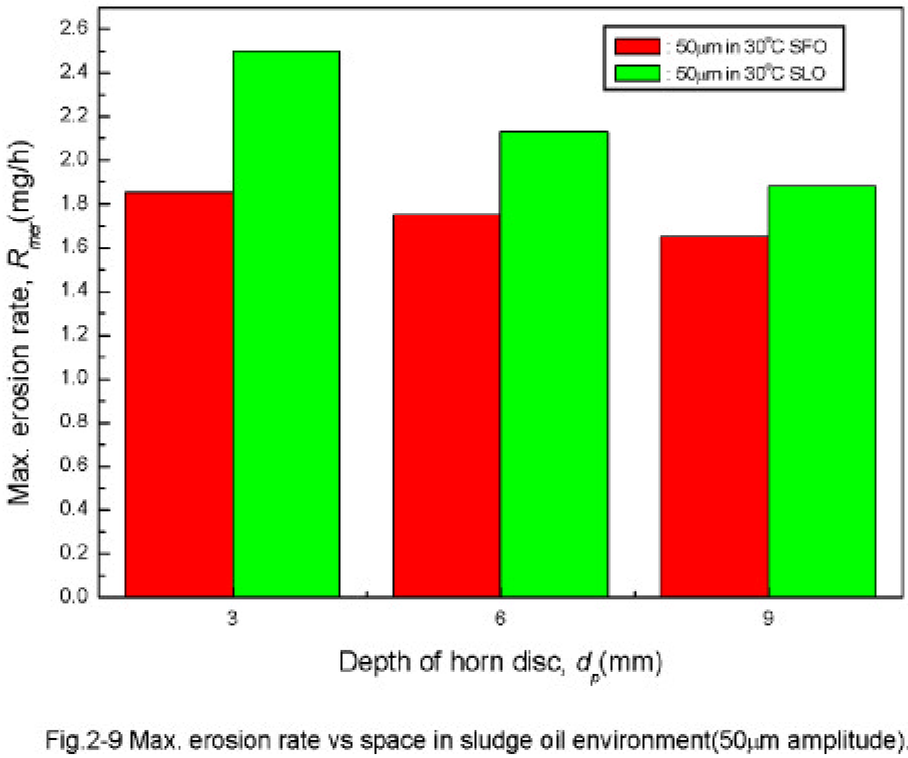


Fig.4-9. Max. erosion rate vs depth of horn disc in sludge oil environment(50㎛ amplitude).

Fig.4-10은 연료유 슬러지(SFO)와 윤활유 슬러지(SLO) 환경에 대한 진폭 50㎛인 진동자 혼 디스크에서의 무게감소율곡선에서 구한 최고침식율(R_{max})에 이르는 시간(t_{mer})을 침지 깊이 3, 6 및 9㎜에 따라 막대 그래프로 나타낸 것이다. 이에 의하면 SFO 환경에서의 최고침식율에 이르는 시간은 침지 깊이에 관계없이 거의 일치하지만, SLO 환경에서의 최고침식율에 이르는 시간은 침지 깊이 3㎜에서 같이 시작하여 침지 깊이가 깊어짐에 따라 크게 길어지는 것을 알 수 있다.

이와 같이 SFO 환경에서는 침지 깊이에 의한 캐비티의 성상에 미치는 영향이 캐비테이션에 의한 시료유의 특성과 서로 상쇄되는 효과 때문으로 생각되지만, SLO 환경에서는 캐비테이션에 의한 시료유의 성상변화가 적기 때문에 침지 깊이가 최고침식율의 발생시간과 밀접하게 관계된다. 그러나, 진동자 혼의 디스크의 침식에 의한 무게 감소량을 3시간 실험 후에 측정, 관찰 및 조사한 것이므로 정확한 시간과 최고침식율이 정량적으로 평가된 것은 아니다. 따라서 이 그래프는 최고침식율이 시험편 SS41에서의 발생과 발생하는 시간을 시료유의 종류에 따라 구분, 비교하기 위한 일반적인 자료이다.

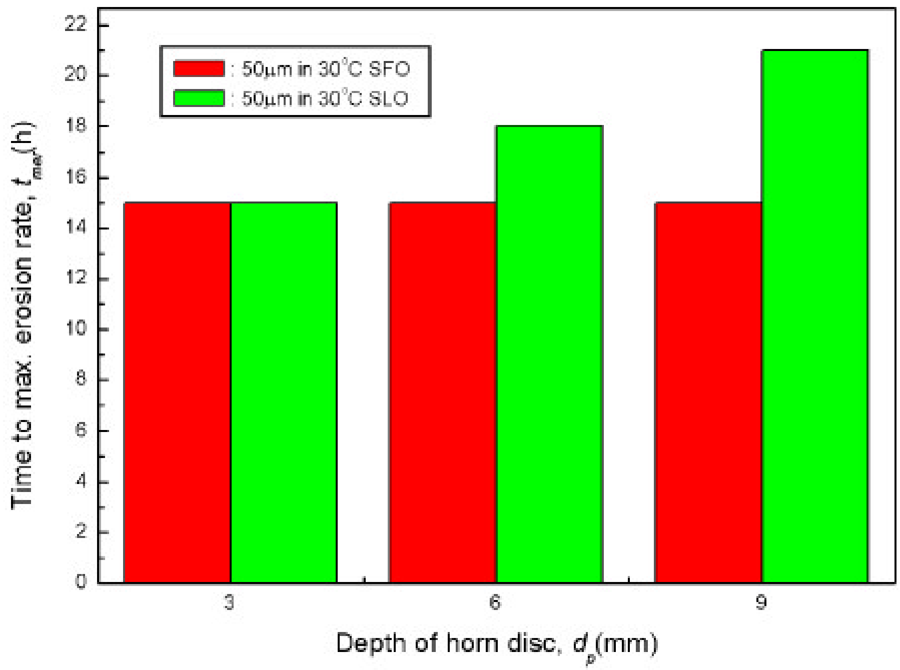


Fig.2-10 Time to max. erosion rate vs soace in sludge oil(50μm amplitude).

Fig.4-10. Time to max. erosion rate vs depth of horn disc in sludge oil environment(50㎛ amplitude).

4.3 슬러지유의 온도 변화 환경에서 혼 디스크의 침식특성

4.3.1 SFO에서의 진폭 50㎛인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig. 4-11은 연료유 슬러지에 대한 온도변화 환경에서의 실험시간에 따른 무게 감소량(또는 침식 손상량)을 정리한 것이다. 이 그림에 의하면 18시간 실험시간까지는 거의 유사한 침식 손상량을 보이다가 24시간 실험이후에는 70℃> 50℃> 30℃> 90℃로 무게감소량이 증가된다. 이와 같이 거의 비슷한 침식 손상량을 보이는 것은 온도의 변화에 의한 점도의 변화가 민감한 연료유로서 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 때문으로 생각된다.

또한 24시간이후의 실험경과에서 70℃> 50℃> 30℃ 추세로 무게감소량이 나타나는 것은 온도증가에 의한 점도의 저하에 따른 캐비티의 증가보다는 저온도에서의 캐비티의 크기에 더 영향을 받기 때문이고, 특히 90℃ 유환경에서 무게감소량이 감소하는 것은 과도한 점도저하에 의한 미세한 캐비티가 침식소공에 잘 흡착되어 캐비티의 방사능력이 약화된 것으로 추정된다.

이러한 경우들을 좀더 면밀히 관찰하기 위하여 Fig.4-12에 실험시간 경과에 따른 무게감소율을 나타내 보이고 있다. 이에 의하면 최고침식율이 90℃> 70℃> 50℃> 30℃의 순으로 크게, 그리고 빠르게 나타나는데 이것은 연료유 슬러지의 온도증가에 의한 저점도에서의 증기압의 저하때문에 캐비티의 침식소공 즉 무게 감소율(또는 침식손상율)이 증가한 것으로 보인다. 따라서 침식소공에 캐비티의 흡착에 의한 완충작용도 점도의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

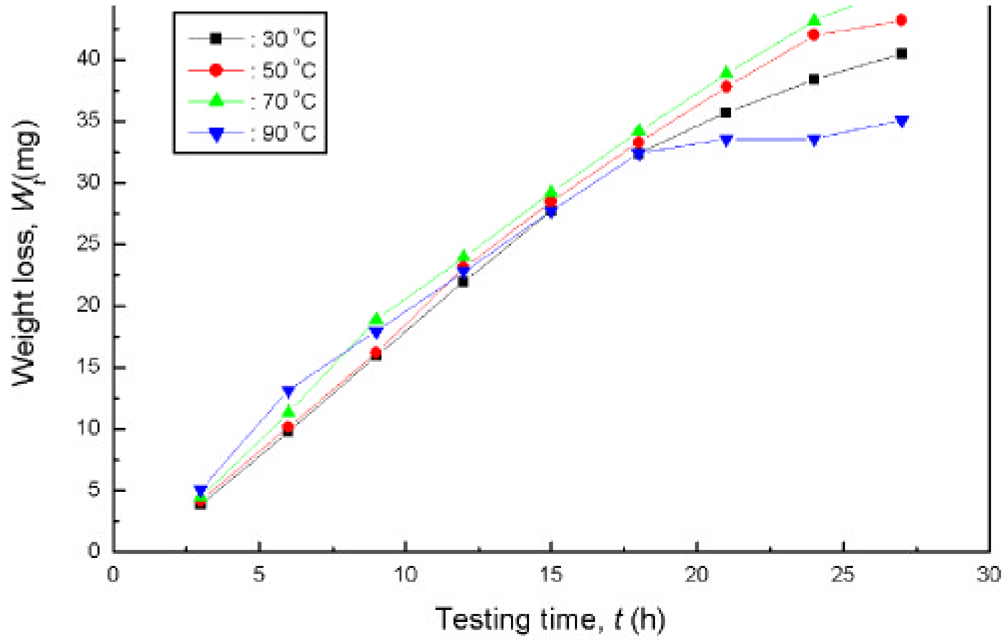


Fig.3-1 Weight loss vs testing time according to temp. environment for SFO(50μm amplitude).

Fig.4-11. Total weight loss vs testing time in various temp. of SFO(50㎛±5%).

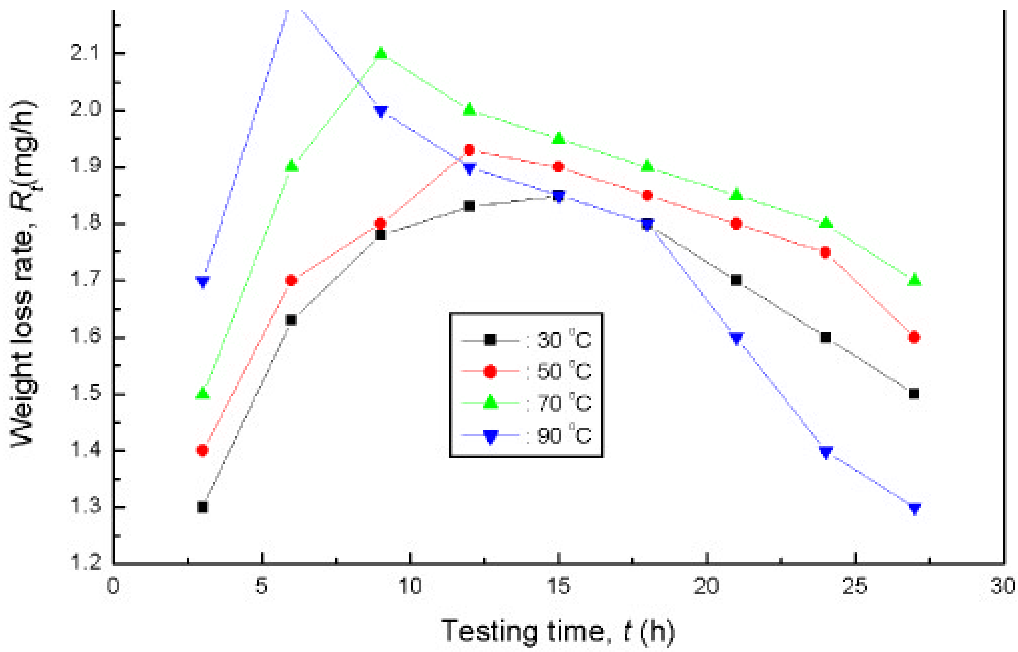


Fig.3-2 Weight loss rate vs testing time according temp. environment
for SFO(50μm amplitude)

Fig.4-12. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SFO(50㎛±5%).

4.3.2 SLO에서의 진폭 50㎛인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig.4-13은 진동수 20kHz, 진폭 50㎛인 진동자의 SLO 환경에 캐비티의 조사시간에 따른 진동자 혼 선단에서의 시험편의 무게감소량 W_t(mg)을 보여주고 있다. 이에 의하면 30℃ 유환경에서의 무게감소량이 가장 크게 나타나고, 온도가 증가함에 따라서 무게감소량이 적은 것을 알 수 있다.

이와 같이 온도가 증가하면서 무게감소량(또는 침식손상량)이 적어지는 이유는 유점도와 밀도가 낮아지면서, 캐비티의 수는 증가하지만 크기(또는 직경)가 작아지기 때문이다. 또한 저점도에서는 캐비티의 방사시간이 짧아지고, 기포붕괴에 의한 완충작용이 적으며, 액체의 표면장력도 감소한다.[58]

실험시간이 증가할수록 무게 감소량이 증가하는 것은 초기에는 진동자 혼의 선단의 시험편이 연성파괴이지만 실험시간이 지남에 따라 취성파괴로 천이되고, 침식소공의 벽면에는 벽개파면이 발생된다고 보고하고 있다[34].

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

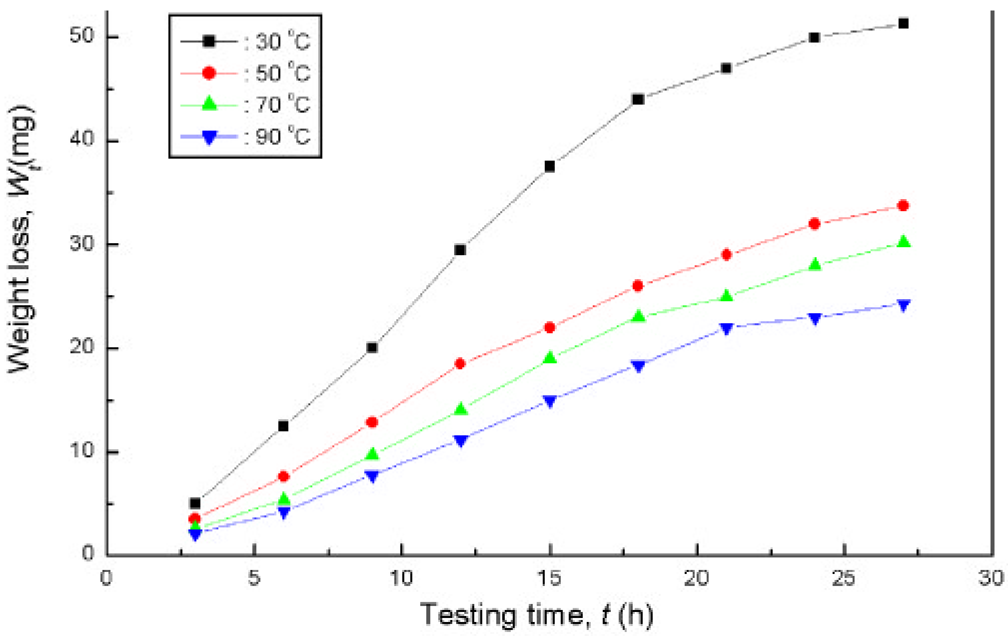


Fig.3-3 Weight loss vs testing time according to temp. environment for SLO(50μm amplitude).

Fig.4-13. Total weight loss vs testing time in various temp. of SLO(50μm±5%).

실험시간의 경과에 따라 시험편의 침식손상이 어떻게 진전되는가를 분명히 정리하기 위하여 Fig.4-14에 실험시간에 따른 무게감소율 R(mg/h)을 나타내고 있다. 이에 의하면 초기에는 실험시간이 경과함에 따라서 침식손상율(또는 무게감소율)이 증가하다가 다시 감소하는 추세이고, 실험시간 10 20시간 정도에서 최고 침식손상율을 보이는 데 온도가 높을수록 최고침식율의 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 경과하여 침식소공이 증가하고 깊게 되면서 캐비티가 소공내에 부착되면서 방사작용이 둔화됨과 동시에 완충작용(cushion effect)을 받아서 침식손상율이 감소됨을 알 수 있다.[59] 또한 온도가 증가된 유환경에서는 최고 침식손상율이 늦게 나타나는데 이것은 온도의 증가에 의한 점도저하로 캐비티의 수는 증가되지만 캐비티가 작기 때문에 침식소공에 의한 침식손상이 저온도의 유환경에 비하여 감소하기 때문이다.

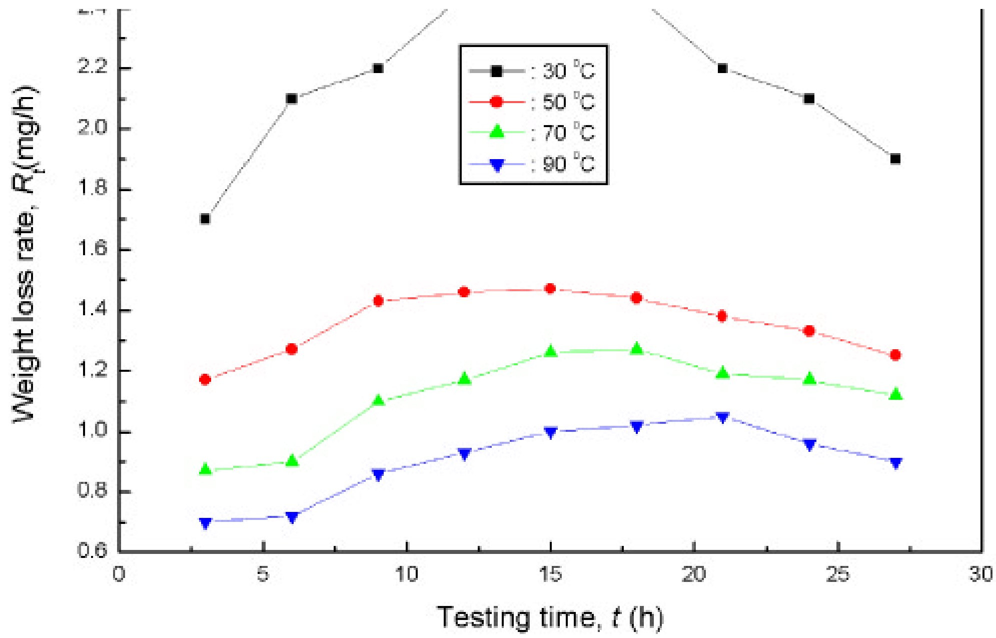


Fig.3-4 Weight loss rate vs testing time according to temp. environment for SLO(50μm amplitude).

Fig.4-14. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SLO(50μm±5%).

4.3.3 SFO에서의 진폭 24㎛인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

Fig.4-15는 연료유 슬러지(SFO) 환경에서의 진폭 24㎛에서의 실험시간 경과에 따른 SS41의 무게감소량을 정리한 것이다. 이에 의하면 무게감소량은 90℃> 70℃> 50℃> 30℃의 경향으로 실험경과 18시간정도까지 보이고, 그 이후 실험시간에서는 90℃에서의 무게감소량이 다른 실험온도 유환경에 비하여 크게 감소되어 있다.

이와 같이 온도가 증가하면서 무게감소량이 증가하는 것은 점도가 감소되면서 캐비티의 형성이 용이하여 캐비티의 수가 증가하고, 재료의 온도에 의한 열화작용도 어느 정도 가미된 것으로 사료된다.[59] 특히 18시간 실험경과 후의 90℃ 유환경에서 무게감소량이 현저히 감소하는 것은 저점도에서의 미세한 캐비티가 침식소공에 흡착되어 캐비티의 방사억제작용이 더욱더 억제되기 때문으로 생각된다.

이러한 과정을 좀더 정밀히 관찰하기 위하여 Fig.4-16에 Fig.4-15의 무게감소량을 무게감소율로 정리하였다. 이에 의하면 최고 무게감소율은 90℃ 유환경에서가 다른 유 환경에 비하여 적은 실험시간 내에 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 연료유는 온도변화에 민감하여 점도가 강하하므로 저점도의 영향과 재료의 열화작용이 서로 상승되어 무게감소율이 증가한 것이고, 그 침식소공에서의 캐비티의 흡착이 큰 영향을 미쳐서 실험시간 18시간이 경과하면서 급격히 무게감소율이 저하한 것으로 사료된다.

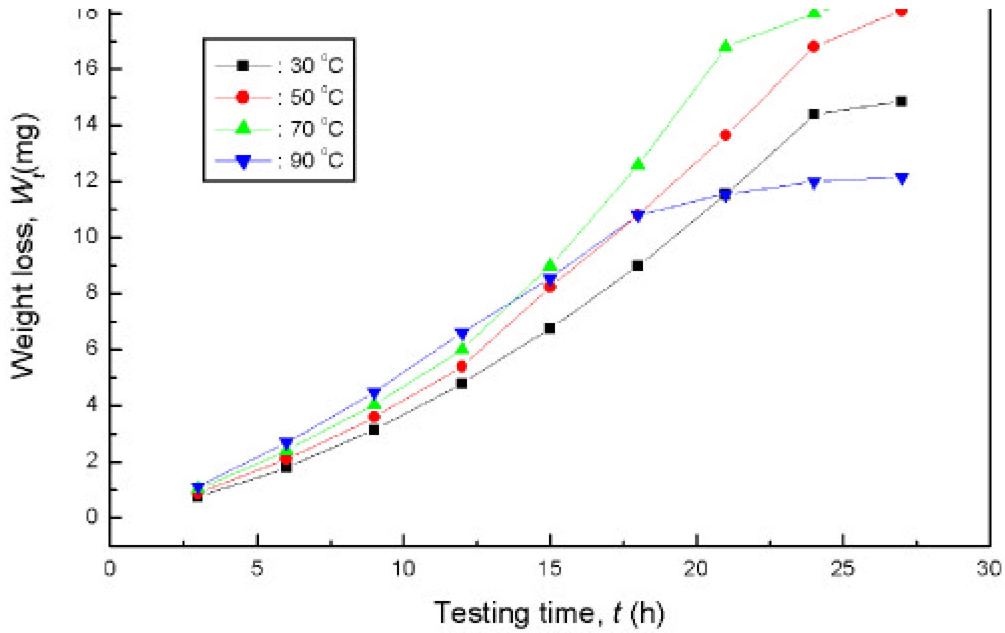


Fig.3-5 Weight loss vs testing time according to temp. environmrnt for SFO(24μm amplitude).

Fig.4-15. Total weight loss vs testing time in various temp. of SFO(24μm±5%).

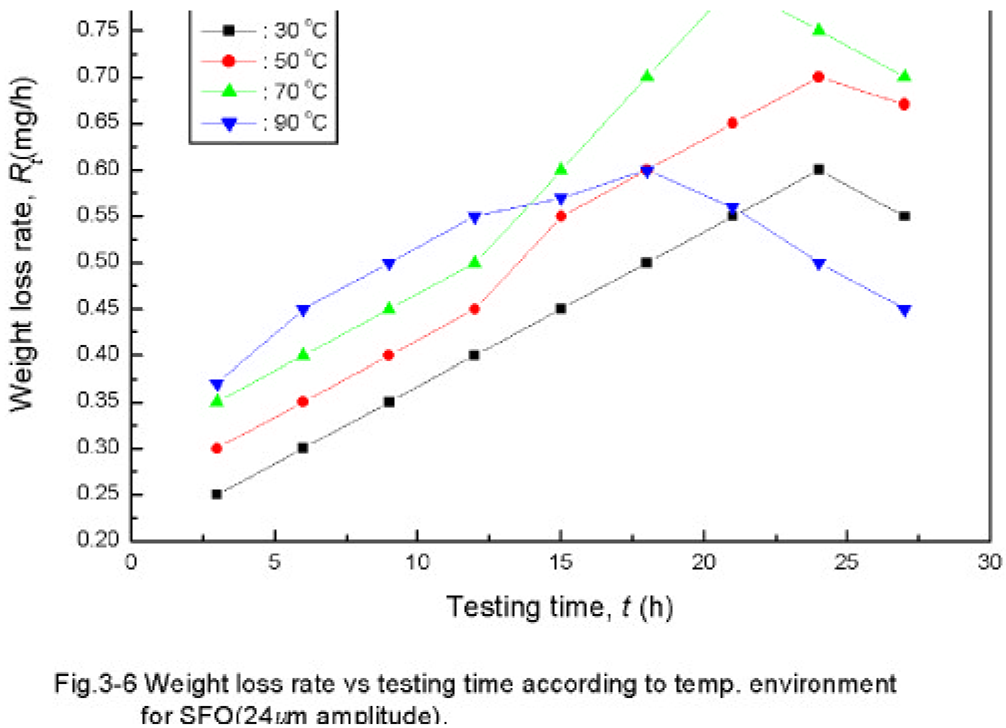


Fig.4-16. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SFO(24μm±5%).

4.3.4 SLO에서의 진폭 24㎛인 SS41 진동자 혼 선단의 침식양상

앞의 실험방법과 동일하게 무게 감소량(W_t)이나 무게감소율(R)에 큰 영향을 미치는 진동수는 변화시키지 않고, 진폭만을 50㎛에서 24㎛로 변화시켜서 캐비티의 에너지의 방사영향에 대해서 조사하고자 한다. Fig.4-17은 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 실험시간 경과에 따른 무게감소량(W_t)을 정리한 것이다. 이에 의하면 실험시간이 경과함에 따라서 무게 감소량이 30℃> 50℃> 70℃> 90℃의 순으로 나타난다.

이러한 상황은 윤활유에서의 점도지수(viscosity index)가 높기 때문에 온도증가에 따른 점도의 강하작용이 둔감하여 점도의 영향을 적게 받기 때문이고,[60] Fig.4-13의 무게 감소량에 비하여 상당히 감소한 것을 알 수 있다.

Fig.4-17에 대한 무게감소율을 측정하기 위하여 Fig.4-18에 그 결과를 정리하여 보았다. 여기에서는 환경온도가 30℃에서만 최고 침식손상율을 보이고, 나머지의 유온도 환경에서는 27시간 동안 침식손상 실험을 한 결과로서는 알 수가 없었다.

이러한 현상은 진폭의 영향이 침식손상율에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉 진폭이 50㎛에서 24㎛로 낮추면 침식손상율은 거의 제곱 정도로 감소한다는 보고는 앞에서 설명하였지만, 여러 조건의 변수가 많이 존재하므로 일치한다고는 볼 수 없다.

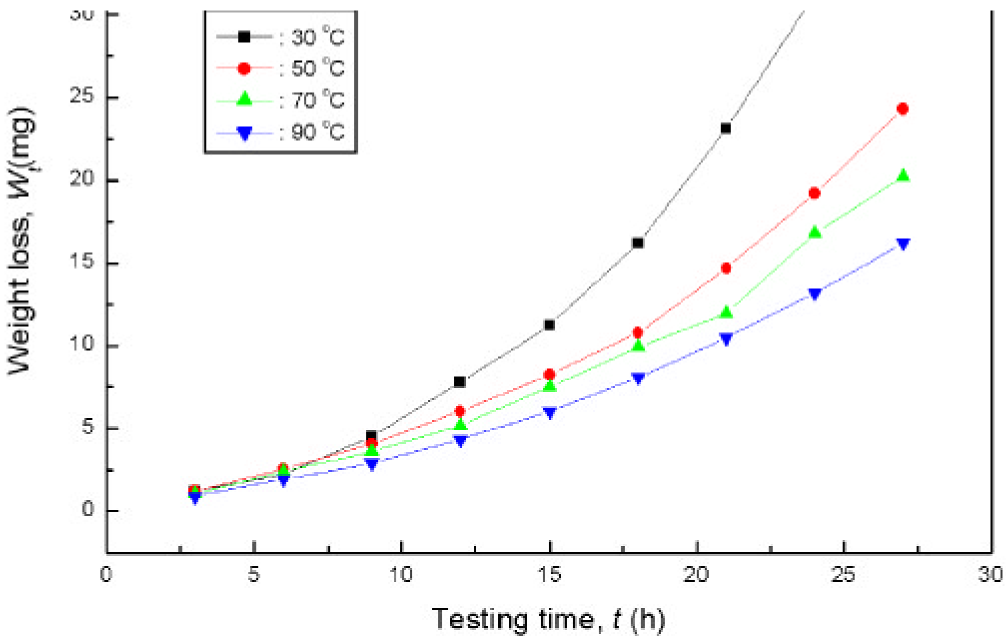


Fig.3-7 Weight loss vs testing time according temp. environment for SLO(24μm amplitude).

Fig.4-17. Total weight loss vs testing time in various temp. of SLO(24㎛±5%).

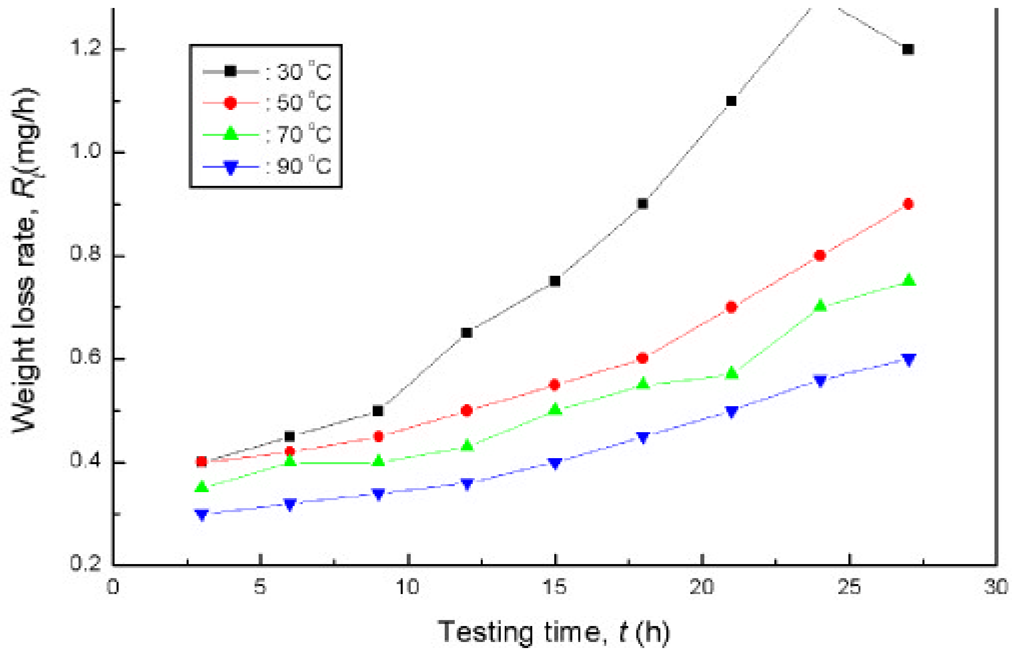


Fig.3-8 Weight loss rate vs testing time according to temp. environment for SLO(24μm amplitude).

Fig.4-18. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SLO(24μm±5%).

4.3.5 슬러지유 환경에서의 최고침식율에 미치는 온도의 영향

Fig.4-19는 진폭 50㎛에서의 SFO 및 SLO 유환경에서의 누적 최고 무게 감소량(W_t)을 누적 실험시간(t)으로 나눈 최고침식율(max. erosion rate, R_{mer} =ΔWt/Δt) 값을 나타낸 것이다. 특히 유환경의 온도변화에 따른 최고침식율을 비교검토한 자료로서 실험시간의 범위를 2시간 간격으로 측정하였으므로 최고침식율과 최고침식율에 이르는 시간을 정량적으로 평가될 수 없다는 것을 고려한 것이다.

이 그림에서 SFO(50㎛진폭의 경우)에서의 최고침식율은 유온도가 증가함에 따라 커지고, SLO(50㎛의 경우)에는 최고침식율이 유온도의 증가에 더불어 감소하는 추세인데, 특히 실험시간이 경과함에 따라 SLO 환경에서는 최고침식율이 크게 감소하고 있다.

이와 같이 SFO와 SLO 환경에서 유온도가 증가함에 따라 최고침식율이 증감하는 것은 SFO 환경의 경우에는 온도증가에 따라 점도저하에 의한 캐비티의 발생수와 방사에너지가 증가되기 때문이고, SLO 환경에서 유온도의 증가에 따라 감소하는 것은 점도의 변화보다는 유환경의 열애너지의 영향에 의한 캐비티의 형성이 감소하기 때문으로 추정된다.

그리고 SLO 환경에서 실험시간의 경과와 더불어 크게 감소하는 경향을 보이는 것은 윤활유의 경우에는 점도지수가 크므로 점도의 영향은 크게 받지 않지만 온도의 증가에 의하여 캐비티의 수가 적고 캐비티가 작게 형성되기 때문으로 사료된다.

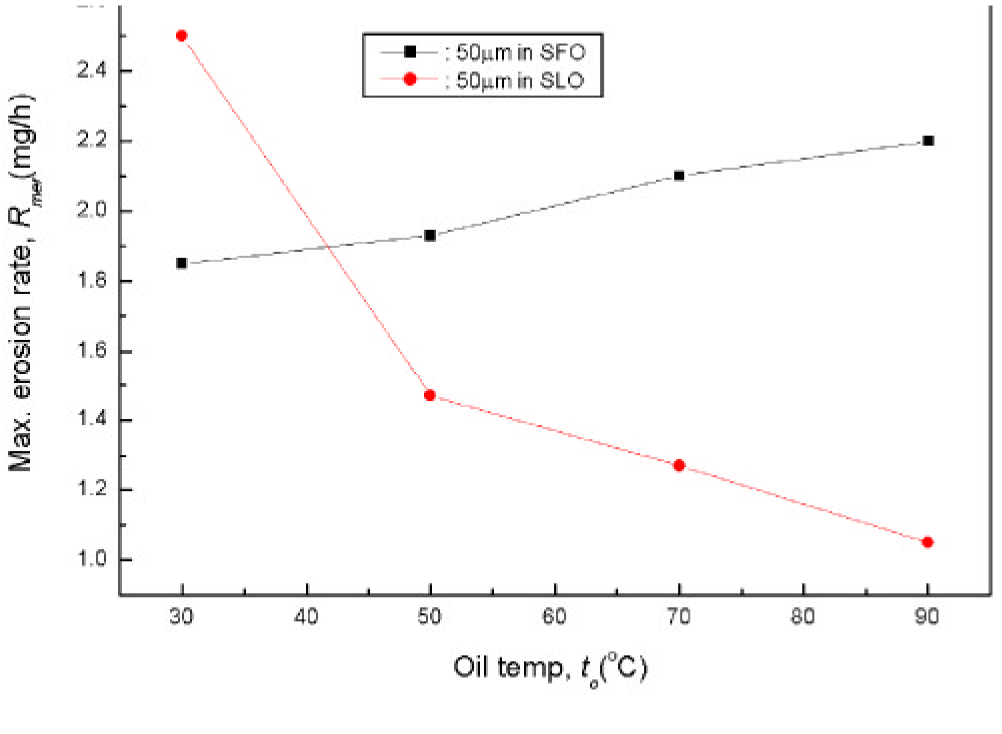


Fig.4-19. Max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil(50㎛ amplitude).

4.3.6 슬러지유 환경에서의 최고침식율에 이르는 시간과 온도의 연관성

Fig.4-20은 최고침식율(R_{mer})에 이르는 시간(h)과 유온도와의 관계를 나타낸 것이다. 이에 의하면 SFO 환경에서는 유온이 증가함에 따라 시간은 짧아지지만 반대로 SFO의 경우에는 유온이 증가함에 따라 길어지는 경향을 보이고 있다.

이러한 현상은 Fig.4-19의 최고침식율과도 밀접한 관계가 있다. 즉 최고침식율이 증가하면 시간이 짧아지고 역으로 최고침식율이 감소하면 길어지는 관계를 보인다. 이와 같은 원인은 최고침식율이 크면 캐비티의 방사능력이 우수하고 침식소공이 크고 많다는 것을 의미하므로 소공에 케비티의 충만에 의한 완충작용 즉 캐비티의 방사에너지의 감소효과가 크게 나타나기 때문으로 추정된다.

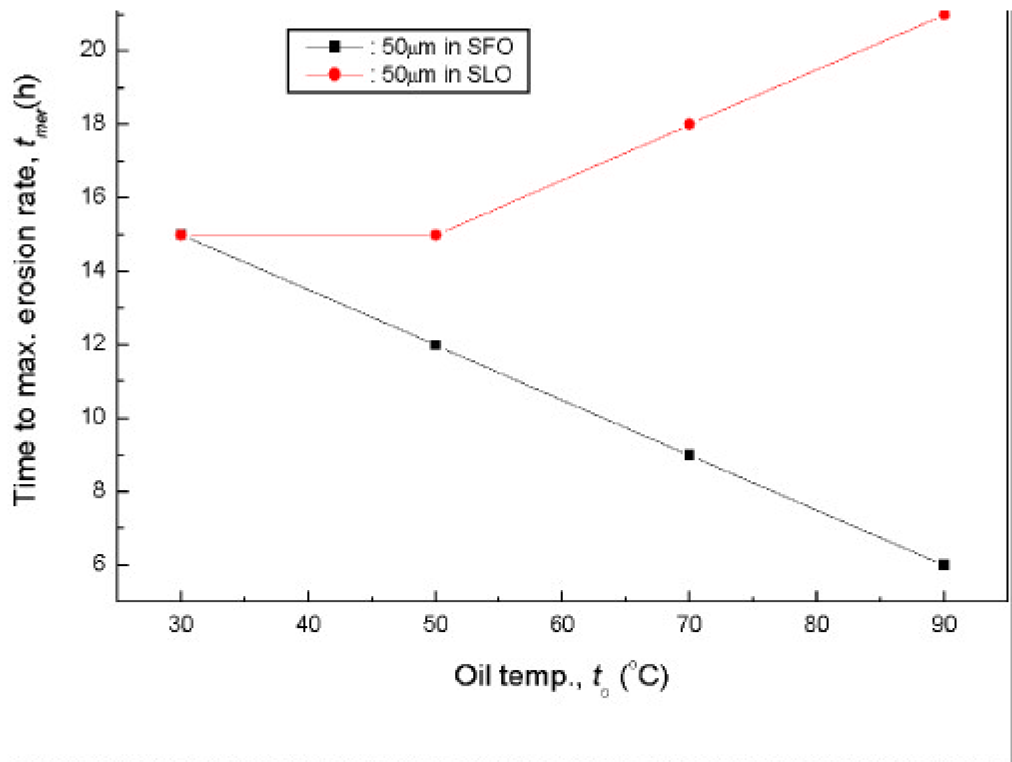


Fig.4-20. Time to max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil(50㎛ amplitude).

제 5 장 결 론

본 논문에서는 선박으로부터의 유류오염을 근본적으로 방지하기 위한 일환으로 선박에서 필연적으로 발생되는 슬러지 및 폐유를 자체 처리하기 위한 초음파 진동 장치에 대해서 연구하였다. 초음파 진동에 의해 발생된 캐비티의 붕괴압을 이용하여 선박에서 발생되는 슬러지유를 균질화 시키고 , 그 조직구조의 변화를 시각적으로 확인하였다. 또한 초음파 진동장치의 중요부품인 진동자 혼의 선단에서 발생하는 침식양상을 조사하고자 일반강인 SS41을 재료로 사용하여 연료유 슬러지(SFO) 및 윤활유 슬러지(SLO) 환경에서의 캐비테이션 침식손상을 고찰하였다. 캐비테이션 손상에 영향을 미치는 인자 중 진동자의 진폭과 진동자의 혼 디스크의 침지깊이, 그리고 유온을 변화시키면서 실험을 수행하였고, 각 경우에서 시험편의 무게감소량과 무게감소율을 중심으로 침식손상을 규명하였다. 실험결과 얻어진 주요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 연료유 슬러지 및 윤활유 슬러지는 초음파 진동에 의한 캐비테이션 실험에서 유입자의 분쇄, 균질화가 이루어졌으며 그 효과는 진동자 혼 디스크의 침지깊이가 깊을수록 캐비티에 의한 분쇄, 분산효과가 미약하며, 유온이 증가할수록 유입자의 분쇄효과가 우수하여지고, 초음파 조사시간이 길어짐에 따라서 유입자의 분쇄 및 분산효과가 좋아짐을 알 수 있었다.

2) 초음파 진동에 의한 캐비테이션 발생은 진동자 혼이 유액체에 잠기는 깊이가 깊을수록 적어지는데, SLO에서의 감소폭이 SFO에서보다 더 커짐을 확인할 수 있었다.

3) 슬러지유의 유온이 증가할수록 진동자 혼 디스크의 침식에 의한 무게감소량과 감소율은 SFO 환경에서는 증가하나 SLO 환경에서는 감소하는

경향을 보인다.

4) SLO와 SFO환경에서 침지 깊이에 따른 진동자 혼 디스크의 최고침식율은 침지 깊이가 깊어짐에 따라 작아진다. 그러나, SLO에서는 최고침식율이 SFO에서보다 침지깊이에 관계없이 크게 나타난다.

5) 슬러지 유온 증가에 따른 침식손상은 SLO에서는 감소하지만, SFO에서는 증가하여 서로 상반된 양상을 보이고, 최고침식율이 발생하는 시간도 SLO 환경에서는 길어지나 SFO 환경에서는 짧아진다.

6) 진동자 혼 디스크의 진폭에 따른 최고침식율을 비교하여 보면 50㎛에서의 최고침식율이 24㎛에서 보다 2배이상 크게 나타난다.

이러한 연구 결과로부터 선박에서 발생하는 폐유 및 슬러지유를 선박 자체내에서 처리하기 위한 장치로서 초음파 진동 분쇄장치의 개발가능성을 확인하였다. 또한 실험결과는 초음파 진동장치의 중요부품인 진동자 혼 팁의 침식손상을 조사하고 그에 따른 대책을 마련하는 자료로 활용이 가능하다고 판단된다.

차후의 연구 과제로서 균질화된 슬러지유의 연소실험을 통하여 연소유로서의 재활용 가능성을 입증하고 초음파 조사시간과 시료유의 volume등의 관계에 대한 정량적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] Dr.Kang Chang-Gu, "Technology Support System for Maritime Safety and Pollution Management", Proceeding of the Korea-Canada Syposium on Marine Environment, Korea National Maritime Police Agency, Inchon Korea, pp245-254, 1996.

[2] **이진열 · 하만식 · 한원희**, "**선박유류 입자의 균질효과에 미치는 초음파 분쇄작용**", **해양환경 · 안전학회**, **제5권 제2호**, pp68, 1999.

[3] **今村弘人**(1995), "**舶用 ディーゼル機關(燃燒 · 潤滑 · 損傷)**", **山海堂**, pp 38-43.

[4] **明星四郎 · 富田正久**(1983), "**燃料油と 潤滑油の 實務**", **三和印刷**, pp 84-94.

[5] **西山善忠**(1996), "**燃料油 · 潤滑油**", **海文堂**, pp 71-80.

[6] Instruction Manual(1990), "Oily Water Separator(Type KOMEX OWS-1OBⅠ)".

[7] Operating Instruction(1988), "DVZ-Oily Water Separator(IMO- Res. A393/X)".

[8] SASAKURA(1996), "Oily Water Separator(Model SMT-5A)", Osaka, Japan.

[9] Manual(1994), "TURBULO Separator(TCS 10 HD)", Hyundai Heavy Industries.

[10] Manual(1996), "Oily Water Separator(OWPS-5.0)", M&C Engineering Co., Ltd.

[11] Instruction Manual for Oily Filtering Equipment(USTtype), Georim

Engineering.

[12] Manabumi Masuko and Kazumi Okada(1991), “Tribology of O/W Emulsion”, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.36, No.5, pp 369-374.

[13] TEAMTEC-GOLAR Marine Incinerator, TeamTec AS.

[14] Waste Oil Incinerator, Under License of SUNFLAME Co., Ltd, Japan(KangRim).

[15] J.Crawford・F.I.Mar.E.E, “Marine and Offshore Pumping and Piping System”, Butterworths, London, pp91-99, 1981.

[16] J.Crawford・F.I.Mar.E.E, “Marine and Offshore Pumping and Piping System”, Butterworths, London, pp.91 99, 1981

[17] 李鎭烈(1998), “油類工學”, 曉星出版社, pp 115-116.

[18] 황재호, “진동 캐비테이션에 의한 연강의 침식-부식 특성 및 억제에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp13-15, 1997

[19] 村田德治, “リサイクル技術の 實際”, オーム社, pp179-182, 1993.

[20] S.Vigneswaran・C.Visvanathan, “Water Treatment Process”, CRC Press, New York, pp90-95, 1995.

[21] 李鎭烈, “油類工學”, 曉星出版社, pp 69-89, pp 174-188, pp.298-299, 1998

[22] 田大熙, “船舶油類管理”, 一中社,pp.41-47, pp.348-379, 1990

[23] 海洋警察隊, “海洋汚染防除”, 해양경찰대편찬, 1987, pp.13-77

[24] 李鎭烈, “船舶油類의 機械的인 海洋汚染防止 處理시스템 및 效果的인 汚染防止機器의 性能開發에 關한 硏究”, 삼양무선용역(주) 부설 선박자동화연구소, 해사산업연구소, pp91 92, 1998.

[25] 권기생, "全國港口의 船舶 廢油 및 油性混合物 發生量에 關한 研究", 부경대 대학원 환경공학과 석사학위논문, 1992

[26] 韓進海運 自體報告書,"2000年度 環境經營 SYSTEM 運營實積", 韓進海運(株), 2001

[27] Nippon Yuka Kogyo Co.,Ltd "Photomicrograph album" for Oil Tester YT-10 No.5

[28] 千葉 近, "超音波 噴霧", 山海堂, 1991

[29] 島川 正憲, "超音波 工學", 工業調査會, 1975

[30] Dale Ensminger, "Ultrasonics,2nd Edition", MARCEL DEKKER, INC, 1998

[31] 김재우, "초음파 응용기술의 동향", 산업기술정보원,1999, pp.1-2

[32] "計測技術", Vol.27, No.2, 1999, pp.30-33

[33] "金屬", Vol.68, No.8, 1998, pp.26-32

[34] "超音波TECHNO", Vol.9, No.5, 1997, pp.1-4

[35] "月刊 新技術", Vol.8, No.10, 1994, pp.13-26

[36] 超音波研究會, "쉬운超音波의應用", 機電研究社, pp.33-50, pp.76-82, 1992

[37] 윤면근, "초음파처리 연료가 SI기관의 분무·연소 및 배기가스에 미치는 영향", 충남대학교 박사학위논문, pp.14-21, 1999

[38] 加藤洋治, "キャビテ―ション", 日本振書店, pp.4-8, 1979

[39] 鬼頭史城, "キャビテ―ションの話", お―む社, pp.21-31, 1977

[40] S.H Frederick and H. Capper, Materials for Marine Machinery, Marine Media Management Ltd, pp.211-212, 1981

[41] F.L La Que, Marine Corrosion, Wieley-Interscience Publication,

pp.11-12, 1983

[42] Y.Iwai, Q. G. Yuan, J. Ohmura and T. Okada, Cavitation Erosion in Water Containing Solid Partieles, JSME(B), pp.58(551),1239-1244, 1992

[43] J.A. Joyner, Reduction of Cavitation Pitting of Diesel-Engine Cylinder Liners,SAE Transactions Vo1. 65, pp.337-348, 1956

[44] F.Inoue, E.Outa,K.Tajima and T. Machiyama, An Experimental Study on Control Valve Cavitation, JSME(B) pp.53(485),127-137, 1986

[45] Y. K. Zhou, J. G. He and F. G.Hammitt, Cavitation Erosion of Diesel Engine Wet Cylinder Liners.Wear, pp.76,321-328, 1982

[46] D. D. Macdonald,Discussion on " Electochemical Potential Measurements Under Simulated BWR Water Chemistry Conditions", Corrosion Vo1.49,No.2, pp.90-93, 1993

[47] Y. Oka and I.M. Hutchings, Dependence of Material Hardness on Erosion by Solid Partic Impact, Boshoku Gijutsu, pp.39,610-616, 1990

[48] R. Araki, M. Kishimoto and K. Yoshida, Behavior of Titanium Blade to Erosion Penomena Caused by Water Droplets in Wet steam, JSTM(B), pp.56(527),2085-2092, 1990

[49] M.Abdulsalam and J. T. Stanley, Steady-State model for erosion-corrosion of Feedwater piping, Corrosion Vo1. 48, No. 7, pp.587-593, 1992

[50] **李鎭烈**, “**腐蝕・浸蝕・防蝕**”, **曉星出版社**, pp.189-190, 2001

[51] 岡田庸敬・服部修次,“キャビテ―ジョン壞食(2)”, 機械の 研究, pp1080, 1997.

[52] Annual Book of ASTM Standard, “03:02 Wear and Erosion : Metal Erosion, G-32-85”, ASTM, pp115-119, 1989.

[53] 이진열・정지선, “선박 시스템유중 베어링 합금재의 침식거동에 미치는 각종 인자의 영향(2)”, 한국해양대학교 부식방식공학연구소 논문집 제2권, pp97, 1999

[54] 腐食防食協會,“エロジョンの コロジョン” 裳華房, pp107-109, 1987.

[55] 林祐助, 李鎭烈(1993),“베어링 合金材에 대한 캐비테이션 浸蝕擧動에 미치는 潤滑油環境의 影響”, 韓國潤滑學會誌, pp 57-60.

[56] 임우조, 이진열(1995),“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, pp 58-64.

[57] 이진열, 황재호(1998), “미끄럼 베어링의 캐비테이션 침식에 미치는 시스템유 운전시간의 영향”, 한국해양대학교 부식방식공학연구소, pp 109-113

[58] 李鎭烈, “腐蝕・浸蝕・防蝕”, 曉星出版社, pp203, pp194-199 2001

[59] 이진열・정지선, “선박시스템유중 베어링 합금재의 침식거동에 미치는 각종 인자의 영향(1)”, 한국해양대학교 해양안전환경연구소 논문집 제1집, pp91-92, 1999.

[60] 李鎭烈, “油類工學”, 曉星出版社, pp284-285, 1999

Appendix

A-1. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment (30℃. 50㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	3.9	9.8	16	22.0	27.8	32.4	35.7	38.4	40.5
6	3.7	8.7	14.2	20.6	26.3	30.8	34.7	36.0	36.5
9	3.5	8.1	13.7	19.2	24.8	28.4	31.5	32.9	33.2

A-2. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment (30℃, 50㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	1.30	1.63	1.78	1.83	1.85	1.80	1.70	1.60	1.50
6	1.24	1.45	1.58	1.72	1.75	1.71	1.65	1.50	1.35
9	1.17	1.35	1.52	1.60	1.65	1.58	1.50	1.37	1.23

A-3. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment (30℃, 50㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	5	12.5	20	29.5	37.5	44	47	50	51.3
6	4.4	9.7	15.8	22.8	31.5	38.3	44.1	45.6	46.4
9	3.8	8.4	13.5	19.6	25.2	32.8	39.5	43.0	44.6

A-4. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment (30℃, 50㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	1.70	2.10	2.20	2.45	2.50	2.44	2.20	2.10	1.90
6	1.45	1.62	1.75	1.90	2.10	2.13	2.10	1.90	1.72
9	1.27	1.40	1.50	1.63	1.68	1.82	1.88	1.79	1.65

A-5. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment (30℃, 24㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	0.8	1.8	3.2	4.8	6.8	9.0	11.6	14.4	14.9
6	0.7	1.7	3.1	5.0	6.3	8.3	11.0	13.0	14.0
9	0.6	1.4	2.7	4.1	5.6	7.4	9.2	11.5	13.5

A-6. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SFO environment (30℃, 24㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.55
6	0.23	0.28	0.34	0.38	0.42	0.46	0.52	0.54	0.52
9	0.20	0.24	0.30	0.34	0.37	0.41	0.44	0.48	0.50

A-7. Total weight loss vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment (30℃, 24㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	1.2	2.7	4.5	7.8	11.3	16.2	23.1	31.2	32.4
6	1.0	2.5	4.4	7.0	10.5	15.3	20.4	25.0	27.0
9	0.8	2.0	3.8	6.0	9.3	12.6	15.8	19.2	23.2

A-8. Total weight loss rate vs testing time according to depth of horn disc in SLO environment (30℃, 24㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Depth.(mm)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
3	0.40	0.45	0.50	0.65	0.75	0.90	1.10	1.30	1.20
6	0.32	0.42	0.49	0.58	0.70	0.85	0.97	1.04	1.00
9	0.28	0.34	0.42	0.50	0.62	0.70	0.75	0.80	0.86

A-9. Max. erosion rate vs depth of horn disc in sludge oil environment (50㎛ amplitude).

Oil / Depth.(mm)	50㎛ of SFO	50㎛ of SLO
3	1.85	2.5
6	1.75	2.13
9	1.65	1.88

A-10. Time to max. erosion rate vs depth of horn disc in sludge oil environment (50㎛ amplitude).

Oil / Depth.(mm)	50㎛ of SFO	50㎛ of SLO
3	15	15
6	15	18
9	15	21

A-11. Total weight loss vs testing time in various temp. of SFO (50㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	3.9	9.8	16	21.96	27.75	32.4	35.7	38.4	40.5
50	4.2	10.2	16.2	23.16	28.5	33.3	37.8	42	43.2
70	4.5	11.4	18.9	24	29.25	34.2	38.85	43.2	45.9
90	5.1	13.2	18	22.8	27.75	32.4	33.6	33.6	35.1

A-12. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SFO (50㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	1.3	1.63	1.78	1.83	1.85	1.8	1.7	1.6	1.5
50	1.4	1.7	1.8	1.93	1.9	1.85	1.8	1.75	1.6
70	1.5	1.9	2.1	2.0	1.95	1.9	1.85	1.8	1.7
90	1.7	2.2	2.0	1.9	1.85	1.8	1.6	1.4	1.3

A-13. Total weight loss vs testing time in various temp. of SLO (50㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	5	12.5	20	29.5	37.5	44	47	50	51.3
50	3.5	7.6	12.85	18.5	22	26	29	32	33.75
70	2.6	5.4	9.7	14	19	23	25	28	30.24
90	2.1	4.3	7.77	11.2	15	18.4	22	23	24.3

A-14. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SLO (50㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	1.7	2.1	2.2	2.45	2.5	2.44	2.2	2.1	1.9
50	1.17	1.27	1.43	1.46	1.47	1.44	1.38	1.33	1.25
70	0.87	0.9	1.1	1.17	1.26	1.27	1.19	1.17	1.12
90	0.7	0.72	0.86	0.93	1.0	1.02	1.05	0.96	0.9

A-15. Total weight loss vs testing time in various temp. of SFO (24㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	0.75	1.8	3.15	4.8	6.75	9.0	11.55	14.4	14.85
50	0.9	2.1	3.6	5.4	8.25	10.8	13.65	16.8	18.09
70	1.05	2.4	4.05	6.0	9.0	12.6	16.8	18.0	18.9
90	1.11	2.7	4.5	6.6	8.55	10.8	11.55	12.0	12.15

A-16. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SFO (24㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.55
50	0.3	0.35	0.4	0.45	0.55	0.6	0.65	0.7	0.67
70	0.35	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7	0.8	0.75	0.7
90	0.37	0.45	0.5	0.55	0.57	0.6	0.55	0.5	0.45

A-17. Total weight loss vs testing time in various temp. of SLO (24㎛±5%) (Unit : mg).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	1.2	2.7	4.5	7.8	11.25	16.2	23.1	31.2	32.4
50	1.2	2.52	4.05	6.0	8.25	10.8	14.7	19.2	24.3
70	1.05	2.4	3.6	5.16	7.5	9.9	11.97	16.8	20.25
90	0.9	1.92	2.88	4.32	6.0	8.1	10.5	13.2	16.2

A-18. Total weight loss rate vs testing time in various temp. of SLO (24㎛±5%) (Unit : mg/h).

Time(h) / Temp.(℃)	3	6	9	12	15	18	21	24	27
30	0.4	0.45	0.50	0.65	0.75	0.9	1.1	1.3	1.2
50	0.4	0.42	0.45	0.5	0.55	0.6	0.7	0.8	0.9
70	0.35	0.4	0.4	0.43	0.5	0.55	0.57	0.7	0.75
90	0.3	0.32	0.34	0.36	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6

A-19. Max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil (50㎛ amplitude).

Oil / Temp.(℃)	SFO(50㎛)	SLO(50㎛)	SFO(24㎛)	SLO(24㎛)
30℃	1.85	2.5	0.6	1.3
50℃	1.93	1.47	0.7	0.9
70℃	2.1	1.27	0.8	0.75
90℃	2.2	1.05	0.6	0.6

A-20. Time to max. erosion rate vs oil temp. environment in sludge oil (50㎛ amplitude).

Oil / Temp.(℃)	SFO(50㎛)	SLO(50㎛)	SFO(24㎛)	SLO(24㎛)
30℃	15	15	24	24
50℃	12	15	24	27
70℃	9	18	21	27
90℃	6	21	18	27

감사의 글

항상 기뻐하고 감사하는 마음으로 최선을 다하며 결과에 겸손할 수 있는 사람이 되도록 노력하겠습니다. 오늘의 자그마한 결과를 얻기까지 저에게 아낌없는 배려와 은혜를 주신 분들게 감사드립니다.

먼저 항상 따뜻한 마음으로 부족한 저를 배움의 길로 인도하여 주신 이 진열 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 충고와 격려를 아끼지 않고 지도하여 주신 윤 종휘 교수님과 2년동안의 부족함을 항상 깨우쳐 주신 오 인호 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 아울러 많은 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 정 태권 교수님과 따뜻한 격려를 해주신 해사대학의 여러 교수님들께도 감사드립니다. 대학원 생활동안에 꼼꼼하고 자상하게 격려와 지도를 해주신 한 원희 선배님, 멀리서 관심보여주신 하만식 선배님,성심으로 도움을 준 실험실 후배인 이 종철, 이 은수 후배께도 감사드립니다.

해양대학교 입학에서 지금까지 언제나 옆에서 기쁘고 즐거울 때 편안한 안식처가 되어준 영원한 벗 김 미금, 정 윤아, 강 자영과 힘들고 고민 있을 때 다정하게 들어주고 감싸 주었던 유 미숙 언니에게도 고마움을 전합니다. 또한 직장 생활과 학업을 병행 할 수 있도록 많은 배려를 해주신 부산세관 해상감시관실 과장님 이하 동료 여러분들께도 감사드립니다.

항상 같은 곳에서 말 없이 도와주고 믿어준 김종수와 부모님께도 감사드립니다.

지금의 제가 이 세상에 존재하게 해 주셨고 언제나 저의 선택과 요구에 믿음으로 후원자가 되어주신 아버님과 안스러운 마음으로 지켜봐 주시며 이 세상에서 가장 따뜻한 보금자리가 되어준 어머님께 고개숙여 감사드리며 이 작은 결실을 두분께 올립니다. 그리고 힘들 때 넉넉한 웃음으로 응원단이 되어준 사랑하는 동생 수연이, 수환이와 기쁨을 같이 하고 싶습니다.

모든일에 최선을 다하고자 노력하지만 아쉬움이 남습니다. 하지만 그 아쉬움을 떨쳐버리고자 앞으로도 최선을 다하는 삶을 살겠습니다. 모든 분들게 감사드립니다.