

벨트식 유회수기의 접촉각이 회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

송동업* · 윤경환**
(1998년 3월 30일 접수)

An Experimental Study on the Effect of Contact Angle for Recovery Rate of a Belt Skimmer

Dong-Eub Song and Kyunghwan Yoon

Key Words: Oil Spill(누유), Recovery of Oil Spill(누유회수), Skimmer(유회수기), Belt Skimmer
(벨트식 유회수기)

Abstract

Removal of spilled oil over the sea and the river has become one of the urgent problems in these days. Removing oil using mechanical devices was recommended because chemical dispersion could cause the secondary contamination in the environment. In the present study a series of experiments were carried out to study the effect of operating conditions, especially, the angle between the belt and the fluid surface on the rate of recovery for the spilled oil using a belt skimmer. Three different types of operation, namely, upward pickup, downward pickup and up-and-downward pickup situations have been investigated for various contact angles, belt speeds and oil thicknesses to find the effects on the recovery rate. The highest rate of oil recovery was found in the case of a contact angle of 45° and downward pickup. Furthermore, an optimal belt speed was found to reach the saturated recovery rate for a given oil thickness.

1. 서론

수질오염의 대부분(92%)은 기름의 유출에 의한 사고로 산업의 발달에 따라 유류의 사용이 증대되고, 유류수송의 대부분이 해상을 통해 이루어지므로서 해양에서의 누유 빈도수와 누유량은 더욱 확대되고 있으며, 현재 생산되고 있는 원유의 0.17%가 해양 또는 하천에 누유되고 있는 것으로 조사되고 있다.⁽¹⁾ 누유사고는 선박에 의한

사고에서 주로(89.5%) 발생되며, 이와 같은 누유에 의한 오염 사고의 피해는 많은 해안선을 오염시키는 등 경제적으로 엄청난 손실을 초래하며, 그 회복에 상당한 시간을 요구하게 되므로 그 심각성은 더욱 크게 된다. 국내에서도 이러한 누유에 의한 오염사고는 계속 증가하여 93년 이후 연 300건 이상의 선박에 의한 사고가 발생하고 있으며,⁽²⁾ 이러한 선박에 의한 오염방지를 위하여 MAPOL 73/78 등의 국제협약에서 이를 방지하려는 노력을 경주하고 있으나 해양 누유사고의 대부분이 선박의 좌초 등에 의한 파손에서 비롯되고 있어 누유사고의 근본적인 방지대책에는 한계가 있을 수밖에 없으며, 따라서 누유시 효과적인 방제대책이 필요하게 된다.

* 회원, 단국대학교 대학원 기계공학과
(현 충주대학교 기계공학과)

** 회원, 단국대학교 기계공학과

Oebius⁽³⁾의 연구결과에 의하면 유출된 기름은 0.3 m/s 이상의 속도로 빠르게 확산되며 일부는 증발하게 되지만 유막두께 0.1~0.01 mm까지 계속 확산이 이루어진다고 하였으며, 이와 같이 누유는 빠르게 확산되므로 누유 발생시에는 신속한 방제가 이루어져야 한다.

누유방제 방법에는 크게 분산 처리제를 이용한 분산처리 방법과 유회수기를 이용한 기계, 물리적인 방법이 있지만, 분산처리방법은 분산처리제에 의한 2차 오염의 우려가 있어 각국에서는 유회수기에 의한 방법을 권장하고 있다.

유회수기는 작동원리에 따라 위어식, 흡입식, 흡착식, 부착식 등 여러종류의 유회수기가 개발되어 사용되고 있으나, 일반적으로 유회수기에서 발생되고 있는 중요한 문제점은 고점도인 기름에서 유회수율이 저하되며, 또한 유막 두께가 얇고, 파랑 등의 회수조건에 악화에 따라 유회수율이 크게 저하되거나 회수유중 물의 함량이 증가하게 되는 단점을 가지고 있다.

Leibovich⁽⁴⁾는 풍속이 12 m/s 이상인 경우, 누유된 기름의 50 % 이하만이 수심 1 m 이내의 구간에 브유되어 있게 되어 유회수기의 사용이 불가능하다고 하였고, Meyers⁽⁵⁾는 위어식 유회수기의 사용에 효과적인 기름층의 최소두께는 25 mm이며 유막두께의 감소에 따라 물의 함량은 크게 증가하고, 유막두께 1~8 mm에서 물의 함량은 90 %까지 증가한다고 하였다. Fraser와 Clark⁽⁶⁾는 고점도인 기름에서 위어식 유회수기는 회수율의 감소로 운용이 어렵다고 하였고, Wilson⁽⁷⁾은 흡착식 유회수기인 rope mop식의 경우, 고점도 기름에서는 유회수율이 저하되며 회수유중 물의 함량이 크게 증가한다고 하였으며, Christodoulou와 Turner⁽⁸⁾는 디스크식 유회수기에서 유회수율은 점성의 1/2 제곱에 비례하며 300 cSt까지는 증가하지만 이후 감소한다고 하였다. 또한 Ueda등⁽⁹⁾은 벨트식 유회수기를 사용한 실험을 통하여 최적작업조건을 제시하였으나 유회수기는 많은 요인에 의하여 영향을 받기 때문에 제한된 결과를 보이고 있다.

유회수기에서의 유회수율은 여러 가지 운전조건 및 외부조건의 변화에 의하여 영향을 받게 되며, 이들 각각의 조건이 최종 유회수율에 미치는 영향에 관한 체계적인 결과는 아직도 명확히 밝

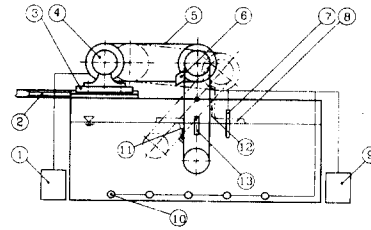
혀지지 않고 있다. 그러나 회수율에 영향을 미치는 기본적인 원리를 파악함으로써 효율적인 유회수 조건을 구할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 일반적으로 회수에 어려움이 있는 고점도 기름의 회수와 얇은 유막두께에서 물의 함량을 줄임으로서 효과적인 유회수율을 갖는 조건을 구하기 위하여, 고점도 증질유인 병커 C유를 사용하여 고점도인 기름의 회수에서 비교적 양호한 결과를 보이고, 구조가 비교적 간단한 부착식으로서 무한궤도를 사용한 벨트식 유회수기를 채택하여 벨트의 회전방향 및 유면과의 접촉각이 유회수율에 미치는 영향을 벨트의 선속도 및 유막두께 변화에 따라 고찰하여 효과적인 유회수 조건을 구하였다. 또한 벨트와 유막층에서의 유동특성이 유회수율에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 순수한 물만인 경우, 순수한 병커 C유만인 경우에 관하여 체계적인 실험을 통하여 비교 고찰하였다. 본 논문은 본 저자들이 벨트의 회전방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 논문⁽¹⁰⁾의 후속 결과이므로 서론이나 실험장치의 설명은 최소한으로 줄였음을 밝힌다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 벨트식 누유제거 실험장치의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.



1. Voltage regulator 2. Lead screw 3. Bed 4. Drive belt 5. Drive belt 6. Rubber wiper (stripper) 7. Thermocouple 8. Slick 9. Electric heater 10. Heating element 11. Downward pick-up 12. Upward pick-up 13. Divider

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus.

벨트가 무한궤도를 이루며 유체층을 통과할 경우 부착에 의해 이송되어진 기름과 물의 혼합물을 rubber wiper로 회수하였다. 이때 이송유량의 회수방법은 흡입에 의한 방법, wiper에 압력을 주어 회수하는 방법 등이 있으나 예비실험을 시행한 결과 일정한 압력을 가하는 회수방법이 신뢰성있는 결과를 보여 이를 채택하였다. 기름과 물의 혼합물은 rubber wiper에 의해 회수되어 흡을 따라 집유조에 모이게 하였다. 사용된 벨트는 양 가장자리의 효과(edge effect)를 줄이고 실험실내에서 수행하는 실험에 적당한 크기인 폭 50 mm의 친유성 고무로 만들어진 평벨트 형태를 선택하였으며 한쪽면에 부착되어 수거되는 유량을 구하였다. 부착유체는 벨트의 재질과 유체의 종류에 따라 영향을 받게되나 연속 이송시에는 고점도 유체가 벨트면에 얇은 막을 형성하게 되므로 디스크식 유회수기를 사용한 실험결과 재질에 의한 영향은 거의 없다고 알려져 있어⁽¹¹⁾ 본 실험에서는 재질의 특성에 관한 고려는 특별히 하지 않았다.

지름 147 mm, 축간 거리 455 mm인 폴리를 사용하였으며 벨트의 구동에 사용된 전동기는 0.5 hp의 직류전동기이고 전압조정기에 의해 회전수를 조정하여 벨트의 이송속도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 이때 사용전동기는 낮은 전압의 저속에서 이송하중이 작용할 경우에도 균일한 속도를 얻을 수 있도록 필요한 용량보다 다소 큰 용량을 사용하였다. 이송나사에 의하여 베드면을 따라 이동되므로 벨트의 작업면과 작업유체와의 접촉각에 변화를 줄 수 있도록 하였고 접촉각의 가변범위는 30°에서 150°로 하였다.

원유나 벙커 C유 등은 낮은 수온에 유출되어도 복사열을 쉽게 흡수하여 40°C의 온도까지 도달한⁽¹²⁾ 따라서 본 실험에서는 실용적인 온도의

범위로서 실험온도를 30°C로 유지하였고, 사용된 온도조절기(HY72D, PT100Q)의 오차범위는 1°C를 유지하였다. 본 실험에 사용한 벙커 C유와 순수한 물의 점도, 밀도 및 표면장력계수를 Table 1에 각각 나타내었다.

사용된 수조의 규격은 120(L)×50(W)×45(H) cm³이었으며, 유량은 단위시간당 질량유량(kg/hr)으로 표시하였고 수거된 기름과 물의 질량을 측정하기 위한 중량계는 load cell 방식으로 오차범위는 ±1 gr이었으며, 실험값에 대한 오차범위는 1% 이내이었다. 벨트의 선속도를 알기 위한 폴리의 회전수 측정은 반사식 회전수 측정기(TM3011)로 측정하였고 오차범위는 0.01%이었다.

2.2 실험방법

본 실험에서 채택한 벙커 C유는 수면 위에 누출되었을 경우 emulsion 현상을 발생하게 되고 이와 같은 emulsion은 시간이 지남에 따라 물의 함량이 증대되어 70~80%에서 안정되며 점도를 다소 증가시키게 되고,⁽¹²⁾ 이후 기름의 산화를 촉진시켜 점도를 크게 증가시키며 타르(tar)화 되게 된다. 이러한 emulsion의 안정화는 여러 요인에 의하여 영향을 받으며 시간의 경과 및 실험의 빈도수나 실험조건에 따라 달라지게 된다. 본 실험에서는 실험조건에 따른 정성적인 값을 구하기 위하여 실험의 빈도수에 따라 2 - 3일 정도 마다 실험에 사용된 벙커 C유를 교환하여 사용하였다.

또한, 효과적인 유회수 조건을 구하기 위하여 Fig. 2(a)에서 보인 바와 같이 수면 위에 부유된 기름이 벨트가 상향으로 이송되는 경우 기름이 부착되어 이송되어지는 상향이송(upward pickup), Fig. 2(b)와 같이 벨트가 하향으로 이송될 경우

Table 1 Properties of experimental bunker C oil and water.

Material	Dynamic Viscosity (Pa.sec)	Kinematic Viscosity (m ² /sec)	Density (kg/m ³)	Surface Tension (N/m)
Bunker C* (30°C)	1.556	1.648 × 10 ⁻³	944	3.67 × 10 ⁻²
Water** (30°C)	7.97 × 10 ⁻¹	8.00 × 10 ⁻¹	996	7.30 × 10 ⁻²

* Tested by Korea Machinery - Meter and Petrochemical Testing & Research Institute.

** Bolt, R.E. and Tuve, G.L., 1973, "Handbook of Tables for Applied Engineering Science", CRC Press, Inc., Cleveland

기름이 부착되어 이송되는 하향이송(downward pickup), Fig. 2(c)의 상향이송되는 접촉면과 하향이송되는 접촉면에서 동시에 기름이 부착되어 이송되어지는 상하향이송(upward pickup)의 세가지 실험형태로 구분하였다. 또 Fig. 2에서와 같이 부유된 기름의 표면과 벨트의 작업면이 이루는 각을 접촉각(contact angle, θ_c)로 정의하였으며 독자들의 주의를 요한다.

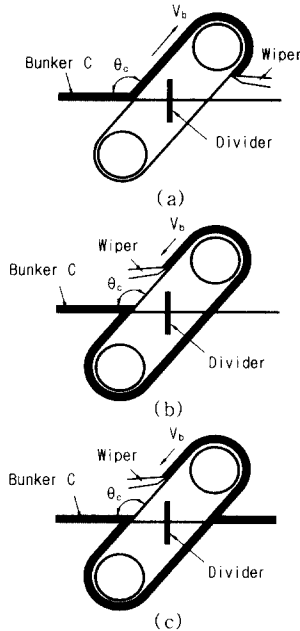


Fig. 2 Three different types of oil pickup configuration using a belt skimmer; upward(a), downward(b) and up and downward pickup(c) (contact angle; θ_c).

본 실험에서는 이와 같은 이송방법의 변화에 따른 상향이송, 하향이송, 상하향이송에 관하여 각각 유체와의 접촉각을 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 105° , 120° , 135° , 150° 로 변화하였을 경우 접촉각에 따른 이송양정유량을 구하였다. 또한 각각의 이송방법에 따른 이송속도의 영향을 구하기 위하여 이송속도를 변화시켜 이송속도에 따른 물과 기름의 제거량을 측정하였다. 또 유막 두께에 의한 영향을 고찰하기 위하여 벙커 C유의 유막두께를 5, 10, 15 mm로 변화시키며 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

고체의 표면이 유체 중에서 운동할 경우 유체는 접촉조건(no slip condition)에 의하여 고체표면에 부착되어 이동하게 되므로 이때 부착된 유체를 수거함으로써 누유된 기름과 물의 혼합물을 수거할 수 있다. 벨트에 선부착된 유체 유동은 후에 부착되는 유체의 유동에 영향을 미치게 되어 벨트의 회전방향이 유회수율에 크게 영향을 미친다는 사실은 이미 본 연구자들이 밝힌 바 있다.⁽¹³⁾ 이에 효과적인 회수율에 관한 조건을 구하기 위하여 상향이송, 하향이송 및 상하향이송에 의한 이송유량을 접촉각, 유막두께 및 이송속도 변화에 따라 구하였으며 그 영향에 관해 고찰하였다. 또 순수한 물만인 경우와 순수한 벙커 C유만인 경우에 접촉각과 이송속도 변화에 따른 질량유량을 구하여 벙커 C유가 부유된 상태에서와 비교하였다.

3.1 순수한 물에서의 접촉각에 따른 이송양정유량

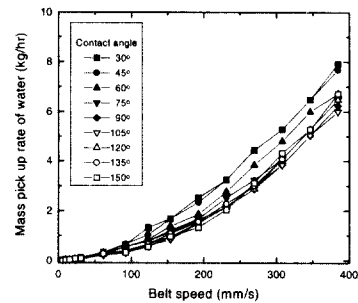


Fig. 3 Mass pickup rate of pure water vs belt speed for various contact angles; water only.

Fig. 3은 순수한 물인 경우에 벨트의 접촉각을 변화하였을 경우 이송속도에 따른 양정유량의 변화량을 단위시간당 질량유량(kg/hr)으로 나타낸 것이다. 이 때 순수한 단일 유체인 경우 접촉각의 정의는 Fig. 2(c)에 보인 상하향이송 시의 정의를 따른다. 이송에 의한 양정유량은 접촉각에 따라 변하며 이송속도의 증가에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이송양정유량의 증가는 이송속도에 의한 단위시간당 이송유량의

증가와 벨트 작업면에 부착된 유량의 일부가 이송 중에 다시 유면으로 흘러내려 이송유량에 손실을 가져오게 되는데 이송속도의 증가와 더불어 흘러내린 손실유량이 상대적으로 감소하고 있기 때문이다. Fig. 4는 이때 접촉각의 변화에 따른 이송양정유량을 이송속도별로 나타낸 것이다.

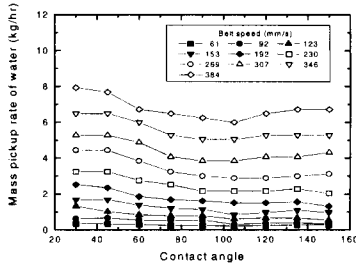


Fig. 4 Mass pickup rate of pure water vs contact angle for various belt speeds; water only.

일반적으로 작은 이송속도에서는 양정유량에 큰 변화가 없으나 이송속도의 증가에 따라 점차 접촉각에 따른 양정유량의 변화가 크게 나타남을 보이고 있으며, 양정유량은 접촉각이 90° 보다 작아지거나 커질수록 양정유량이 증대되고 있으며, 접촉각 30°, 45° 에서 비슷한 정도로 최대유량을 보이고 있다.

양정유량은 벨트에 부착되는 부착유량과 이송도중에 발생하는 손실유량에 의하여 주로 영향을 받으며, 따라서 접촉각의 변화에 의해 양정유량이 영향을 받는 주요인은 접촉각의 변화에 의한 부착유량의 변화이거나, 손실유량의 변화로 볼 수 있다. Fig. 5는 이와 같은 관계를 확인하기 위하여 벨트가 작업유체에 잠겨있는 잠수깊이에 따라 유체와의 접촉길이가 다르게 되고, 접촉길이에 따라 부착유량이 다를 수 있으므로, 접촉각 90° 에서 벨트가 유체에 잠겨있는 잠수깊이를 70, 135, 200, 265 mm로 변화하여 이송속도에 따른 양정유량을 구한 것이다. 여기서 작은 이송속도에서는 깊이 변화에 따라 유량이 약간 변화하고 있으나 일정한 속도 이상에서는 깊이 변화에 따른 양정유량의 변화가 없음을 알 수 있다.

벨트가 유체중을 통과할 때, 벨트작업면에 부착된 유체는 벨트가 수면 위로 이동할 경우 벨트에 부착되어 이송되면서 이송 일부는 자중에 의

해 수면 위로 다시 흘러내리게 된다. Fig. 5에서 일정한 속도(230 mm/s) 이하에서는 잠수깊이가 감소함에 따라 약간 양정유량이 감소하고 있는 것을 보이고 있는데 이는 벨트의 축간거리가 일정하므로 잠수깊이가 감소할 경우 상대적으로 이송되어지는 양정이 증가하여 수면으로 흘러내리는 손실유량은 증가하게 되며 양정유량의 감소를 가져오게 된다.

벨트의 이송속도가 증가함에 따라 이와 같은 흘러내리는 속도는 상대적으로 감소하게 되며, Fig. 5에서 230 mm/s 이상의 이송속도에서는 잠수깊이에 따른 양정유량의 변화가 없는 것에서 이와 같은 현상을 확인할 수 있다.

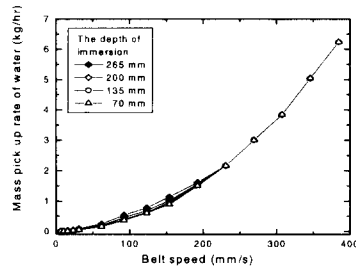


Fig. 5 Influence of depth of immersion on mass pickup rate; water only.

따라서 이상의 결과 Fig. 4에서 고찰된 접촉각에 따른 이송유량의 변화는 접촉각의 변화에 따른 부착유량의 변화보다는 주로 손실유량에 의한 것임을 확인할 수 있다.

순수한 물인 경우 이송에 의한 양정유량은 이송속도의 증가에 따라 증가하며 접촉각 30° ~ 45° 에서 최대 유량을 보이다 접촉각이 커질수록 양정유량은 감소하며 접촉각 90° ~ 105° 이상에서 다소 증가하는 경향을 보인다. 또 잠수깊이의 변화에 따라 저속에서는 양정유량이 약간 변화하나 이송속도가 증가할수록 변화량은 줄어들게 되고 230 mm/s 이상의 속도에서는 접촉길이에 의한 영향이 없음을 알 수 있다.

3.2 순수한 벙커 C유에서 접촉각에 따른 이송 양정유량

Fig. 6은 순수한 벙커 C유만인 경우, 접촉각별 양정유량을 이송속도에 따라 나타낸 것이다.

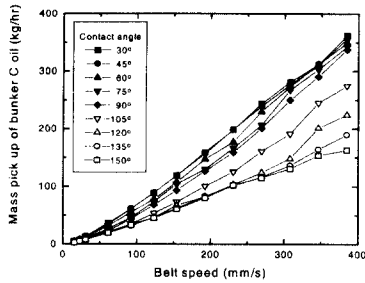


Fig. 6 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for various contact angles; bunker C oil only.

여기서 접촉각에 따라 다소 차이가 있으나 전체적으로 순수한 물만인 경우에서와 마찬가지로 이송속도의 증가에 따라 양정유량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이때 각 이송속도에서의 접촉각에 따른 양정유량의 변화량은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 작은 이송속도에서는 접촉각에 의한 영향이 거의 나타나고 있지 않으나 이송속도의 증가에 따라 접촉각이 감소할수록 양정유량이 증가되고 있음을 알 수 있다.

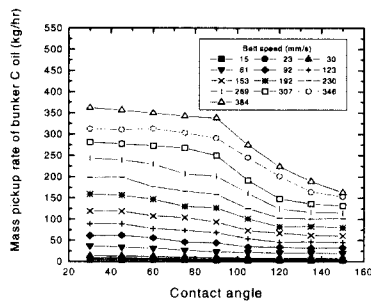


Fig. 7 Mass pickup rate of bunker C oil vs contact angle for various belt speeds; bunker C oil only.

Fig. 3에서의 순수한 물만인 경우와 비교하면 순수한 물인 경우에는 큰 이송속도에서 접촉각의 증가에 따라 유량이 감소하여 90°에서 가장 적고 다시 접촉각이 증가할수록 양정유량이 증가하였으나 벙커 C유인 경우 접촉각 90° 이상에서 접촉각이 증가할수록 양정유량이 계속 감소되고 있는 현상을 보이고 있다. 특히, 이송속도가 클수록 급격히 감소되고 있다.

이와 같은 현상은 벙커 C유가 접촉각이 클 경

우 Fig. 8에서 보이고 있는 바와 같이 부착유체의 일부가 점성과 중력의 작용에 의하여 벨트면을 타고 흘러내리지 못하고 수면으로 직접 선형의 끈을 이루며 흘러내리게 되면서 특히, 벨트 상부의 폴리 원형 부위에 규칙적인 파형의 홈을 이루는 것을 알 수 있는데, 이와 같이 파형을 이루며 흘러내린 유량의 증가로 인하여 양정유량이 감소하고 있음을 실험중 가시적인 관찰을 통하여 확인할 수 있었다.

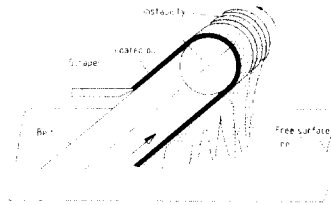


Fig. 8 Definition sketch of wave.

그러나 Fig. 3에서 보인 순수한 물인 경우 이와 같은 파형은 거의 발생되지 않는다. 이는 부착유량이 작고, 물의 점성이 작으므로 유체가 벨트의 벽면을 타고 흘러내리기 때문이며, Fig. 7에서의 경우에는 점성의 증가로 부착유량이 증가하여 이러한 현상이 발생한다. 따라서 이와 같은 파형은 점도, 회전속도, 경사각 등에 영향을 받으며 양정유량을 감소시키는 요인이 되고 Fig. 7에서 접촉각이 증가할 경우 상대적으로 큰 이송속도에서 양정유량을 감소하게 하는 것으로 확인된다.

순수한 벙커 C유만을 사용한 경우 부착에 의한 양정유량은 이송속도의 증가에 따라 증가하며 접촉각이 작을 경우(30° ~ 45°)에서 최대 양정유량을 갖으며 접촉각이 클수록 감소되고 있음을 알 수 있다.

3.3 벙커 C유가 물위에 부유된 경우 접촉각에 따른 이송 양정유량

수면 위에 누출된 기름의 회수에 따른 유체유동은 2종 유체유동으로 볼 수 있으며 이때 두 유체의 유동은 유체의 밀도, 점성, 표면장력 등에 의하여 영향을 받으며 수면 위에 누출된 기름은 계면에 표면장력을 유발시키고, 벨트의 운동에

의해 유동되는 물이 계면에 부딪치며 발생하는 2차 유동이 이송유량에 영향을 미치게 된다.

유출된 기름의 벨트 이송에 의한 유동은 선부착되는 유체유동이 후에 부착되는 유체유동에 영향을 미치게 되므로 효과적인 회수율을 구하기 위하여 상향이송에 의한 이송유량과 하향이송에 의한 이송유량을 접촉각의 변화에 따라 구하여 고찰하였다. 이 경우 Fig. 2에 이미 나타난 바와 같이 상향이송시에는 물이 선부착되고 하향이송시에는 기름이 선부착된다. 또 상하향측 모두 병커 C유층이 있는 경우의 상하향이송에서의 접촉각의 변화에 따른 이송양정유량을 구하여 위의 경우와 비교 검토하였다.

3.3.1 상향이송에 의한 양정유량

Fig. 9는 상향이송에서 접촉각에 변화를 주었을 경우 이송에 의해 양정된 유량을 이송속도에 따라 나타낸 것이다. 이때 유막두께는 10 mm이고 양정유량은 병커 C유와 물의 양을 합한 전체량(그림에서 total)과 함유된 물의 양을 각각 표시한 것이다.

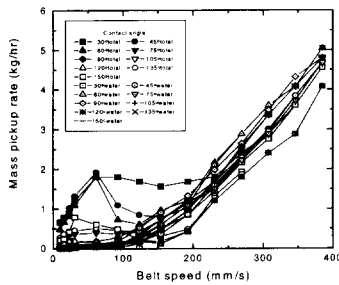


Fig. 9 Mass pickup rate of bunker C oil and water mixture vs belt speed for various contact angles; upward pickup (slick thickness: 10 mm).

여기에서 이송유량은 이송속도 61 mm/s 부분에서 부분적으로 급속한 증가를 보이다 이송속도의 증가에 따라 감소하게 되며, 이후 이송속도의 증가에 따라 다시 증가하게 된다. 이때 이송속도 61 mm/s 부분에서의 부분적인 증가는 병커 C유의 이송양정에 의한 결과이며 Fig. 10은 이때 양정된 병커 C유의 접촉각 변화에 따른 이송유량을 정확히 보이기 위하여 접촉각의 변화량을 확대한 값 즉, 접촉각 45°, 90°, 135°에서 이송

속도 400 mm/s 이하의 구간만을 나타낸 것이다.

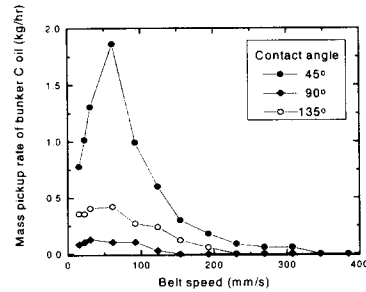


Fig. 10 Mass pick up rate of bunker C oil vs belt speed for various contact angles; upward pickup (slick thickness: 10 mm).

병커 C유의 양정유량은 처음에는 이송속도의 증가에 따라 증가하다 약 이송속도 61 mm/s에서 최대 유량을 보이고 있으며, 이후 다시 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또 접촉각의 변화에 따른 병커 C유의 이송속도별 양정유량을 Fig. 11에 나타내었다.

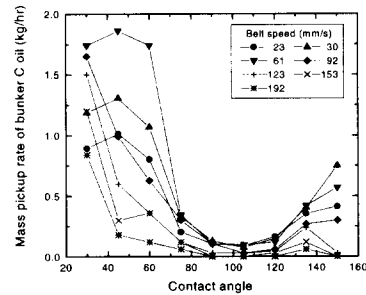


Fig. 11 Mass pickup rate of bunker C oil vs contact angle for various belt speeds; upward pickup (slick thickness: 10 mm).

상향이송에서 양정유량은 105° 부분에서 최소 유량을 보이고 있으며 접촉각이 105° 보다 클 경우 다소 이송유량이 증가하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 3에서의 순수한 물에서의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 대체로 접촉각 30° ~ 45°에서 최대 유량을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 접촉각에 따라 양정된 전체유량의 이송속도별 RE(Recovery Efficiency)를 나타낸 것이다.

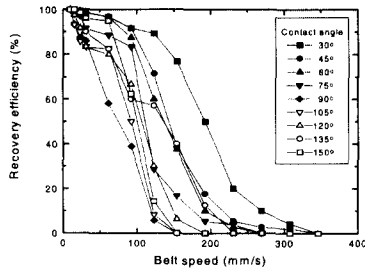


Fig. 12 Recovery efficiency vs belt speed for various contact angles; upward pickup (slick thickness: 10 mm).

여기서 RE는 전체 양정된 유량 중 함유된 벙커 C유의 질량비를 나타낸다. 최대 양정유량을 갖는 이송속도 61 mm/s에서의 RE는 80 % 이상을 나타내고 있으나 이송속도의 증가에 따라 급속히 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 이송속도의 증가에 따라 거의 물만이 양정되고 있음을 나타낸다.

이상의 결과에서 보면 상향이송에 의한 양정유량은 매우 작은 이송속도에서는 벙커 C유만이 양정되다가 이송속도가 증가함에 따라 벙커 C유의 양정유량이 증가하여 이송속도 61 mm/s에서 최대유량을 보이며 전체유량중 물의 비율은 이후 이송속도의 증가에 따라 증가하게 되고 벙커 C유의 양정유량은 감소하게 되며, 일정속도 이상에서는 물만이 양정됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 작은 이송속도에서는 벙커 C유의 점성이 크므로 벨트의 전체 접촉면에서 벙커 C유가 부착되어 양정되게 되나 이송속도가 증가하게 되면 점차적으로 선부착유체인 물의 유동에 의하여 벨트 중심부에서 부터 물 위에 부유된 벙커 C유층이 벨트 주위에 water hole을 형성하게 되어 작업유가 벨트에 잘 부착되지 못하게 되는 starvation을 발생시켜 벨트 양옆 부분에서만 벙커 C유가 부착되어 양정되다 이송속도가 계속 증가함에 따라 벨트 전체의 접촉면에서 starvation이 발생되어 물만이 양정되게 된다. 이때 starvation의 이송속도에 따른 발생시기는 접촉각에 따라 달라지게 되며 접촉각이 작을수록 starvation은 보다 큰 이송속도에서 발생되게 되고, 이에 따라 작은 접촉각에서 벙커 C유의 양정

유량은 증가하게 된다.

3.3.2 하향이송에 의한 양정유량

Fig. 13은 하향이송시 유막두께가 10 mm일 때 접촉각도별 이송속도에 따른 벙커 C유의 양정유량을 나타낸 것이다. 여기서 양정된 벙커 C유의 양은 이송속도의 증가에 따라 일반적으로 증가하고 있으나 접촉각의 증가에 따라 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 접촉각이 클수록 양정유량은 상대적으로 작은 양이며 이송속도의 증가에 따라 불규칙한 증가를 보이고 있고, 접촉각이 감소할수록 이송속도에 따른 양정유량은 상대적으로 크게 증가한다. 또 이송양정유량은 전체적으로 접촉각이 작고 이송속도가 증가할수록 증가하다가 이송속도가 계속 증가할 경우 다시 감소하게 됨을 보인다. 이때 최대 양정유량은 접촉각 45°, 이송속도 269 mm/s에서 나타나고 있으며 Fig. 9에서 보인 상향이송의 경우와 비교하면 벙커 C유의 양정유량은 하향이송에서 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

하향이송에서는 선부착유체가 벙커 C유이므로 큰 점성으로 인하여 부착유량이 상향이송에 비하여 크게 증가하게 되어 벙커 C유의 양정유량을 크게 증가시키게 된다. 또 이와 같은 부착과정에서 부착된 유체는 유체의 점성, 표면장력 등에 의하여 벨트가 이동함에 따라 주위의 유체를 잡아당기게 되며 계면에서 물과 상대적인 운동을 하게 된다. 따라서 벨트와 접촉점에서 벨트에 유입되는 기름의 유입속도에 의하여 벙커 C유는 장력을 받게 되고, 이송속도가 증가할수록 유막의 장력은 증가되며 일정한 이송속도 이상에서는 계면에서의 상대적인 유동속도보다 유입속도가 증가하게 되고, 유선이 단절되게 되어 starvation을 일으켜 벨트면에 부착되는 벙커 C유는 벨트에 부착되지 못하게 된다. 이후 벙커 C유의 확산에 의하여 벙커 C유는 다시 벨트면에 부착되어 이송되어 지게 되고 다시 단절되는 단속적인 이송이 이루어지게 된다. 따라서, 이 경우에 이송유량은 급격히 감소하게 되며 매우 불규칙한 이송유량을 나타내게 되고 물의 함유량이 급속히 증가하게 된다. 또 Fig. 13에서 접촉각이 클수록 보다 작은 이송속도에서 유량이 감소하기 시작하는데, 이는 이와 같은 starvation에 의한 영향이다.

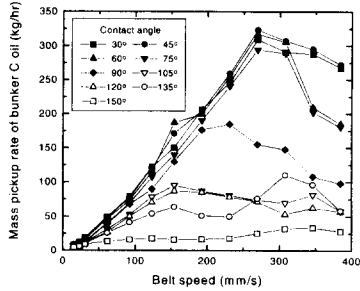


Fig. 13 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for various contact angles; downward pickup (slick thickness: 10 mm).

유량이 감소되기 시작하는 점 즉, starvation이 발생하는 점 이후에서의 유량은 매우 불규칙한 측정결과를 보였으며, Fig. 13에 표시되고 있는 결과는 5회 이상 반복측정에 의한 평균값이다. 따라서 이송유량의 변화량은 접촉각의 변화에 따라 부착유량이 다소 차이가 나게 되지만 보다 중요한 요인은 starvation의 발생에 의한다. 이와 같은 starvation은 유체의 점성, 표면장력, 중력, 이송속도 이외에도 접촉각에 의한 영향을 크게 받으며, 접촉각이 클수록 작은 이송속도에서 발생되어 양정유량을 감소시키게 된다.

Fig. 14는 하향이송에서 이송양정된 유량중 함유된 물의 량을 나타내고 있다.

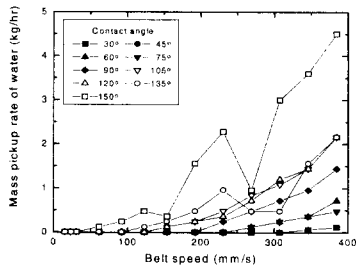


Fig.14 Mass pickup rate of water vs belt speed for various contact angles; downward pickup (slick thickness: 10 mm).

접촉각이 클수록 물의 함유량이 증가하며 접촉각이 클 경우에 접촉각이 작은 경우 보다 상대적

으로 작은 이송속도에서 회수유량에 물이 함유되고 있으며 이 때 나타나는 물의 유량은 불규칙한 형태를 보이고 있다. 이는 starvation에 의하여 기름이 단속적으로 부착되게 되고, 기름이 부착되지 않는 경우에만 물이 부착되어 이송되기 때문이며, starvation이 발생된 이후에서만 이송유량중 물이 포함되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 13에서 최대 양정유량을 보일 때 벙커 C유의 RE는 99 % 이상으로서 물의 함량은 미소한 양이다.

Fig. 15는 유막두께를 10 mm로 하였을 경우 하향이송에서 이송속도별 접촉각에 따른 벙커 C유의 양정유량을 나타낸 것이다.

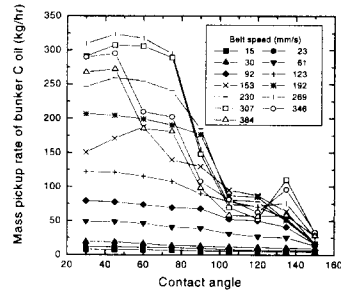


Fig. 15 Mass pickup rate of bunker C oil vs contact angle for various belt speeds; downward pickup (slick thickness:10 mm).

벙커 C유의 양정유량은 접촉각 45°, 이송속도 269 mm/s에서 최대 유량을 보이고 있으며, 접촉각이 증가함에 따라 감소하고 있다. 특히, 접촉각 90° 부근에서 부터 이송속도가 클 경우 급속한 감소를 보이고 있는데 이는 위에서 설명한 바와 같은 starvation에 의한 영향이다.

벨트 이송에 의한 벙커 C유의 양정유량은 위에서 논한 바와 같이 부착유량과 이송도중 흘러내린 손실유량에 의해 영향을 받게 된다. Fig. 16은 유막두께 10 mm인 경우에 접촉각 45°, 90°, 135° 에서 이송중 벨트작업면에 부착된 유량과 수면으로 다시 흘러내린 손실유량의 비 (shed rate)를 이송속도별로 나타낸 것이다. 여기서 접촉각이 클수록 손실유량은 증가하며, 또 이송속도가 증가함에 따라 손실유량은 감소되고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 3.2 절의 순수한 벙커 C유만의 결과인 Fig. 7에서의 고찰결과와 일

치하는 경향을 보인다. 그러나 순수한 벙커 C유만인 경우에는 폴리 상부의 원형부위에 규칙적인 파형을 보이며 손실유량이 증대하고 있지만, 하향이송에서는 Fig. 8에서와 같은 파형을 보이고 있으나 파형이 매우 불규칙하고 불안정한 경향을 보이는 instability가 발생하며 손실유량이 증대되고, 이와 같은 instability는 접촉각이 클수록 크게 발생되어 손실유량을 증가 시킨다.

이러한 instability의 형성 원인은 하향이송시 순수한 벙커 C유만인 경우에 비해 starvation 발생 이전의 이송속도에서 표면장력 등의 영향으로 부착두께가 증가하게 되는데, 이와 같은 부착두께의 증가와 점성 및 유면유통의 영향으로 생각되나 이에 대한 원인은 더 연구되어야할 과제로 생각된다. 또, Fig. 16에서 접촉각이 135° 인 경우,

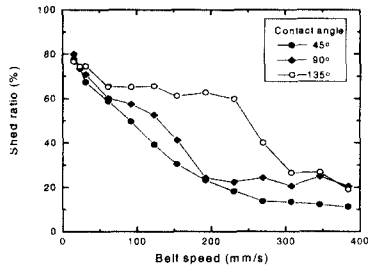


Fig. 16 Shed ratio vs belt speed for various contact angles; downward pickup; (slick thickness: 10 mm).

이송속도 61~307 mm/s의 구간에서, 접촉각 45°, 90°에 비하여 손실유량의 비가 크게 증가하고 있음을 보이는 것은 접촉각이 클수록 instability에 의한 손실유량이 증가하게 되기 때문이며, 이송속도의 증가에 따라 전체적으로 흘러내린 손실유량의 비율이 감소하는 것은 이송속도의 증가에 따라 흘러내리는 속도가 상대적으로 감소하기 때문이다.

이상에서와 같이 하향이송에서의 양정유량은 starvation에 의한 부착유량과 instability에 의한 손실유량에 의하여 주로 영향을 받으며 접촉각이 작은 경우 starvation은 보다 큰 이송속도에서 발생하게 되고, instability에 의한 손실유량이 작게 되어 양정유량은 증가하며, 접촉각이 클 경우 starvation은 보다 작은 이송속도에서 발생하게 되어 부착유량을 감소시키며, instability에 의한 손실유량이 크게 되어 양정유량은 감소하게 된

다. 또한 순수한 벙커 C유만인 경우에는 발생되지 않는 starvation의 영향으로 접촉각이 클수록 하향이송에서의 양정유량은 순수한 벙커 C유만인 경우보다 큰 이송속도에서 급격히 감소하게 된다.

3.3.3 상하향이송에 의한 양정유량

Fig. 17은 상하향이송에서 유막두께가 10 mm 일 때 접촉각에 따른 벙커 C유의 양정유량을 나타낸 것이며, Fig. 18은 이때 벙커 C유의 양정유량에 함유된 물의 양을 나타낸 것이다. 상, 하향이송이 동시에 이루어질 경우의 결과는 하향이송에서의 결과와 거의 같은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

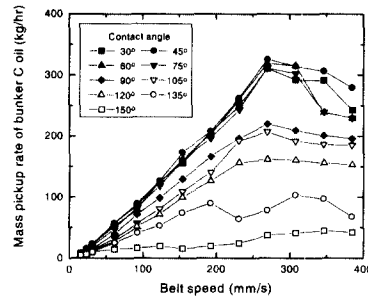


Fig. 17 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for the contact angle; up and downward pickup (slick thickness: 10 mm).

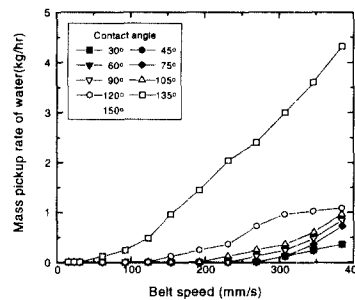


Fig. 18 Mass pickup rate of water vs belt speed for various contact angles (slick thickness: 10 mm).

따라서 상향이송에서는 벙커 C유의 양정유량이 극히 저속에서만 이루어지며 하향이송에 비하여 매우 작게 나타나고 있음을 볼 때, 상향이송은 양정유량에 별다른 영향을 미치지 못하고 있

음을 알 수 있다. 다만, 상하향이송에서의 양정유량을 나타낸 Fig. 19와 하향이송에서의 경우인 Fig. 15에서 비교되듯이 접촉각의 증가에 따른 양정유량의 감소가 상하향이송인 경우에 다소 완만하게 나타나는데, 이는 상하향이송에서는 큰 이송속도에서 병커 C유의 양정유량이 존재하지 않으므로 상하향이송이 동시에 이루어지므로 나타나는 것이 아니라 부유된 유막층의 확대에 의하여 계면에서의 유동이 보다 원활하게 되어 starvation에 의한 양정유량의 감소를 작게 만들기 때문이다.

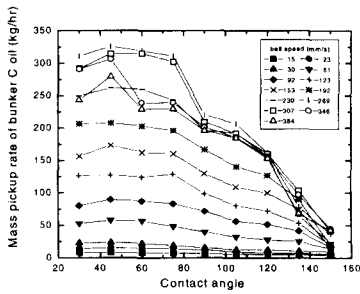


Fig. 19 Mass pickup rate of bunker C oil vs contact angle for various belt speeds; up and downward pickup (slick thickness: 10 mm).

Fig. 20은 유막두께 10 mm에서 접촉각이 45°, 90°, 135°이었을 경우 이송속도에 따른 병커 C유의 양정유량을 하향이송(D)에서의 경우와 상하향이송(D&U)이 동시에 이루어졌을 경우를 비교한 것이다.

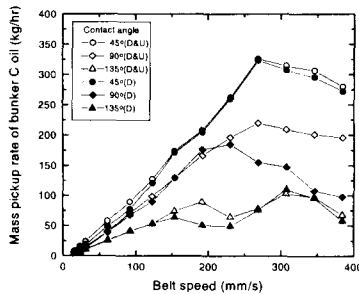


Fig. 20 Comparison of mass pickup rate of downward pickup(D) and up and downward pickup(U&D) for various contact angles (slick thickness: 10mm).

여기서 최대 양정유량을 보이게 되는, 즉, starvation이 발생되는 임계이송속도 이전에서의 양정유량은 하향이송과 상하향이송에서 거의 같은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 다만, 임계이송속도 이후에 상하향이송에서의 양정유량이 다소 증가하고 있음을 보이고 있고, 또 접촉각 90°에서 접촉각 45°인 경우보다 임계이송속도 이후에 하향이송과 상하향이송에서의 양정유량의 차가 증가하고 있는데, 이는 접촉각이 클수록 starvation에 의한 영향이 증가하기 때문이다. 다만, 접촉각 135°에서는 작은 양정유량으로 인하여 양정유량이 큰 차를 보이지 않고 있다.

Fig. 21은 이상의 고찰결과 starvation이 가장 작게 발생되고, instability의 발생이 작으므로 최대 양정유량을 보이는 접촉각 45°에서 유막층의 두께를 5, 10, 15 mm로 변화하였을 경우 유막층의 두께변화에 의한 양정유량의 변화량을 나타낸 것이다. 여기서 유막두께 5 mm인 경우에 비해 유막두께가 10 mm인 경우에는 양정유량이 증가되고 있으나, 유막두께가 10 mm인 경우와 15 mm인 경우에는 거의 같은 양정유량을 보이고 있다. 이는 유막두께의 증가가 부착유량을 증가시키고 있으나 일정한 부착두께 이상의 유량은 모두 흘러내려 유막두께 10 mm 이상에서는 양정유량이 유

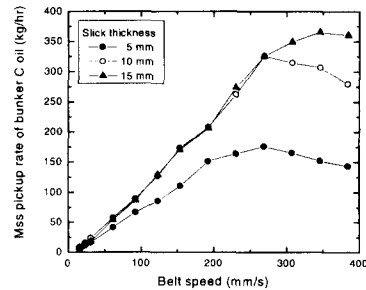


Fig. 21 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for the various slick thicknesses; up and downward pickup (contact angle: 45°).

막두께에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또 유막두께가 15 mm인 경우에는 10 mm인 경우에 비해 최대 양정유량이 다소 증가하고 있는데, 이는 유막층의 확산에 의한 결과 starvation이 다소 늦게 발생되기 때문이다. 즉, 유막두께가 10 mm 이상인 경우 유막두께는 양정유량에 크

게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 기름의 수거를 위하여 벨트식 유회수기는 하향이송이 주도적인 역할을 하도록 하여야 하고 starvation 및 instability의 발생을 방지하여야 한다. 따라서, 접촉각을 작게(45°)하고 유체의 물성치에 따라 적절한 이송속도를 유지하는 것이 필요하다.

3. 결 론

수면 위에 누유된 벵커 C유 등 고점도 기름의 효과적인 회수를 위하여 이송방법, 접촉각 이송속도 및 유막 두께가 벨트식 유회수기에서 회수율에 미치는 영향에 관하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 유체의 이송양정유량은 접촉각에 의한 부착유량의 차 및 손실유량에 의하여 접촉각이 작을수록 양정유량은 증가하며, 이송속도의 증가에 따라 증가한다.

(2) 누유된 기름의 이송방법 및 접촉각에 의한 양정유량은 starvation에 의한 부착유량과 instability에 의한 손실유량에 의하여 주로 영향을 받으며 이에 따른 적정 임계이송속도를 갖는다. 따라서 하향이송, 접촉각 45° 에서 가장 효과적인 유회수율을 보이며 임계 이송속도 이내에서의 RE값은 99% 이상으로 물의 함량은 매우 작다. 또한, 상하향이송에서 상향이송은 양정유량에 거의 영향을 미치지 않는다.

(3) 유회수율은 유막두께의 증가에 따라 증가하지만, 벵커 C유의 유회수율은 유막두께 10 mm 이상에서는 유막두께에 의한 영향을 거의 받지 않는다.

이상의 결과를 종합하면 벨트식 유회수기를 사용하여 벵커 C유 등 고점도의 누유를 회수하기 위한 경우, 누유된 기름이 선부착되는 하향이송과 starvation 및 instability의 영향이 작은 접촉각 45° 에서 가장 양호한 회수율을 보이며, RE의 값 또한 크다. 또 이 경우 유막층의 두께에 따라 starvation 발생직전의 임계이송속도인 270~300 mm/s에서 운전하는 것이 최적조건이며 이 결과는 유회수에 어려움이 있는 고점도, 중질유(重質油)의 회수에 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 단국대학교 대학연구비의 지원으로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 현범수 외 10인, 1993, 해양오염 방제 기술 개발 (I), 한국기계연구원 연구 보고서, 과학기술처.
- (2) 이봉길, 1995, 유류오염 현황과 대책, 해양오염 방제 기술에 관한 세미나, 해양경찰청, pp. 6~7.
- (3) Oebious, H. U., 1985, "Physical Requirements of Oil Combating Equipment," *Marine Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 9~15.
- (4) Leibovich, S., 1977, "Hydrodynamic Problems in Oil Spill Control and Removal," *Journal of Petroleum Technology*, March, pp. 311~324.
- (5) Meyers, R. J., 1989, Oil Response Guide, Research Planning Institute, Inc., Noyes Data Corporation, Library of Congress Catalog Card Number 89~38445.
- (6) Fraser, J. P. and Clark, L. M. C., 1984, "SOCK Skimmer Performance and Field Tests," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 451~456.
- (7) Wilson, S. D. R., 1982, "The Dragout Problem in Film Coating Theory," *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 16, pp. 209~221.
- (8) Cristodoulou, M. S. and Turner, J. T., 1987, "Experimental Study and Improvement of the Rotating Disc Skimmer," *Oil Spill Conference*, Baltimore, pp. 101~108.
- (9) Ueda, K., Yamanouchi, H. and Ueta, Y., 1987, "Removal of Spilled Oil by Adherence," Ship Research Institute Report, Vol. 24, No. 5, Japan (in Japanese)
- (10) 송동업, 윤경환, 1997, "벨트식 유회수기의 회전방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제 21 권,

제 5 호., pp. 679~690.

(11) Atlantic Research Systems Division Marine Systems, A Division of the Susquehanna Cooperation Costa Mesa, California 92626, 1976, Recovery of Floating Oil: Rotating Disk Type Skimmer, Water Quality Office Environmental Protection Agency, Project #1508FWN, pp. 25~97.

(12) Bocard, C. and Gatellier, C., 1981, "Breaking of Fresh and Weathered Emulsions by Chemicals," *Proc. Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Washington, D. C., pp. 601~607.

(13) 송동업, 윤경환, 1997, "벨트식 유회수기를 사용한 디젤유 회수에 관한 실험적 연구," 한국해양공학회지, 제 11 권, 제 3 호, pp. 132~143.