

< 논 문 >

## 벨트식 유회수기의 회전방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

송 동 업\* · 윤 경 환\*\*

(1996년 10월 4일 접수)

### An Experimental Study for the Effect of Rotational Direction on the Recovery Rate of Spilled Oil Using a Belt Skimmer

Dong-Eub Song and Kyunghwan Yoon

**Key Words :** Oil Spill(누유), Recovery of Oil Spill(누유 회수), Belt Skimmer(벨트식 유회수기), Skimmer(유회수기), Two-Fluid Problem(이종 유체문제)

#### Abstract

Oil spill over the sea and the river become a serious problem in these days. Two different approaches are used to clean up the spilled oil by means of chemical dispersion and mechanical devices. If it is possible, removing spilled oil using mechanical devices are highly desirable in order not to worry about the secondary contamination from chemical treatment. One of the major unsolved problems using mechanical devices has been the recovery of highly viscous oil spill. So, the systematic experimental data for treating very viscous oil are still wanting. In the present study a series of experiments were carried out to study the effect of the rotational direction of the belt skimmer on the rate of oil recovery using Bunker C oil. Three different situations, namely, upward, downward and up-and-downward pickup rate have been investigated for variable belt speed. The results showed that the rate of oil recovery for downward pickup was much higher than that for upward pickup. The major mechanism to recover the oil using a belt skimmer has been confirmed that oil sticks to the belt surface while moving to the water rather than moving upward. For the removal of spilled oil the optimal belt speed under the present experimental conditions was found to be about 200 ~ 270 mm/s just before the starvation started. The present experimental results would provide the basis for understanding the performance characteristics and physics of various types of skimmers.

#### 1. 서 론

산업의 급속한 발달과 더불어 유류의 사용이 증대되면서 기름에 의한 하천 또는 해양의 오염에 관

한 문제는 크게 증대되고 있으며, 현재 생산되고 있는 원유 생산량의 약 0.17%가 하천이나 해상에 유출되고 있는 것으로 조사되고 있다.<sup>(1)</sup>

특히, 유류의 수송이 대부분 해상을 통하여 이루어지므로 해상에서의 대형 누유사고에 대한 우려는 크게 증가하고 있다. 실례로 잘 알려진 89년 3월 알래스카 해안에서의 엑슨 발데즈호 4만 2천톤 유

\*회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 단국대학교 기계공학과

출사고 및 95년 3월 전남 여천에서의 씨프린스호 버커 C유 700톤 유출사고에서 보듯이 유출사고는 계속 발생되고 있으며 유출된 기름은 해상과 해안 선을 오염시키며 막대한 피해를 가져온다.<sup>(2)</sup>

국제적으로 이와 같은 선박의 누유사고에 의한 오염방지를 위하여 MARPOL 73/78 국제협약에서 이중선박구조 등에 대한 규정 등<sup>(3,4)</sup> 이에 관하여 노력하고 있으나 해양 누유사고의 대부분이 선박의 좌초 등 파손에 의해 비롯되고 있어 누유사고의 근본적인 방지 대책에는 한계가 있을 수 밖에 없다.

누유된 기름은 누유 발생 초기에 중력, 관성력, 기름과 해수의 표면장력 등에 영향을 받으며 급격히 확산되고 그 후 바람, 해류에 의하여 이동확산 되게 되며 증발, 용해, 유화(emulsification), 산화가 이루어지게 되고 오랜 시간 후 생물학적 풍화 과정을 거쳐 분해, 침전되게 된다. 그러나 이와 같은 자연적인 정화과정에 의한 회복은 오랜 시간을 필요로 하게 되고 해상 및 해안을 오염시키며 막대한 피해를 가져오게 된다. 따라서 누유사고 발생시에는 신속한 누유의 방제대책이 필요하게 되고 이를 위하여는 누유확산에 관한 예측 및 효과적인 방제 방법에 관한 연구가 요구된다.

우선 누유확산의 예측에 관한 연구 분야에는 국외에서는 상당히 활발히 진행되고 있으며<sup>(5)</sup> 이러한 연구에 필요한 기상 및 해류에 관한 자료들을 체계적으로 비축하고 있지만 국내에서는 이에 대한 연구가 아직 초기 단계이다.

누유의 방제방법으로는 유화제 등을 이용한 화학적 분산처리에 의한 방법과 기계적인 방법인 유회수기(skimmer)에 의한 회수가 있으며 화학적 처리에 의한 방법은 2차 오염이 문제가 우려되고 있으며, 따라서 기계적인 방법에 의한 누유회수가 2차오염의 방지 및 유출유의 재활용 등 효과적인 방법이 된다.

유출된 기름은 해상에서 빠르게 확산, 이동되게 되므로 해상에서의 유회수기의 활용은 신속하게 이루어져야 하며 유회수기는 이동 및 조립 시간, 해상 상태, 기름의 점도 등에 제약을 받게 된다.

따라서 이와 같은 기계적인 회수를 위하여 여러 형태의 유회수기가 개발되어 사용되고 있으며 유회수기는 그 작동원리에 따라 흡입식, 흡착식, 부착식, 댐(weir)식 등이 있으며 그 특성이 각기 다르다.

일반적인 유회수기의 특성을 보면 흡입식은

slurp skimmer에서와 같이 흡입펌프에 의한 흡입 압력을 이용한 것으로서 중질유(重質油)의 수거에 적합하나 주로 소형으로 물의 함량이 크며 파도에서의 효율이 저하된다.

흡착식의 경우 polyethylene,<sup>(6)</sup> polyurethane<sup>(7)</sup> 등의 다공질 물질을 사용하여 흡착에 의하여 회수하게 되며 중질유(中質油)의 회수에 적합하다고 알려져 있고, 누유의 깨끗한 제거가 어려우며 물의 함량이 비교적 크다.

부착식으로는 주로 디스크식 유회수기(disk skimmer)가 사용되며, 중질유(中質油) 및 중질유(重質油)의 회수에 효과적인 회수율을 보이며 회수 유 중 물의 함량이 적은 장점이 있으나 주로 소형으로서 0.15 m 이상의 비교적 약한 파도에서도 효율이 저하되는 단점이 있다.

비교적 대형으로서 선박일체식에 주로 사용되고 있는 댐(weir)식은 회수용량은 크지만 회수유에 포함된 물의 함량이 크고 유수분리기를 별도로 설치해야 하며 분리된 물에 의한 2차 오염의 문제, 파도에 약한 단점이 알려져 있다.

일반적으로 누유의 대부분은 원유 및 버커 C유 등 고점도인 중질유(重質油)가 대부분을 차지하고 있으며, 다른 기름에 비하여 중질유(重質油)에 의한 오염이 크므로 유회수기는 이와 같은 중질유(重質油)의 회수에 적합하여야 하고 또 물의 함량이 적어야 하나, 각종 유회수기의 특성에서 보듯이 일반적인 유회수기에서는 중질유의 회수에 어려움이 있다.

Cristodoulou<sup>(7)</sup> 등은 중질유(重質油)에서 비교적 양호한 유회수율을 보이는 부착식의 일종인 디스크식 유회수기에서 유회수율은 기름의 점성에 의하여 크게 영향을 받으며 같은 조건하에서 동점성계수 300 cSt 까지는 유회수율이 증가하나 그 이상에서는 유회수율이 감소한다고 하였으며, Mackay<sup>(8)</sup> 등은 여러 종류의 유회수기에 관한 실험결과에서 누출유가 고점도인 경우 누유 회수율이 크게 저하되거나 회수가 어려운 것으로 확인하고 있다.

본 연구에서는 부착식의 일종인 무한궤도를 사용한 벨트식 유회수기(belt skimmer)를 채택하여 벨트의 회전 방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 고찰을 통하여 고점도인 중질유(重質油)의 효과적인 회수를 위한 기초 실험을 하고자 하였다. 이때 유회수율은 대단히 많은 요인에 의하여 영향을 받게 되며 이들 요인의 체계적인 관계는 아직 밝혀지

지 않고 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 회수율에 영향을 미치는 기본적인 원리를 파악함으로써 효율적인 유회수 조건을 구할 수 있을 것이며, 이러한 기본원리를 파악하는 첫 단계로 벨트의 회전방향과 선속도가 누유회수율에 미치는 영향을 순수한 물만인 경우, 순수한 벙커 C유만인 경우 및 누유되어 있는 경우에 관한 실험결과를 비교, 고찰하였다. 또한, 기름막이 물위에 떠있는 경우 유막두께가 벙커 C유의 누유회수율에 미치는 영향도 조직적인 실험을 통해 고찰하였다. 본 실험의 결과는 비교적 간단한 경계 조건하에서 실행된 것으로 다른 부착식 유회수기인 디스크나 드럼형태의 유회수기의 작동 원리나 최적 작동 조건의 연구에도 크게 도움이 되리라 본다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

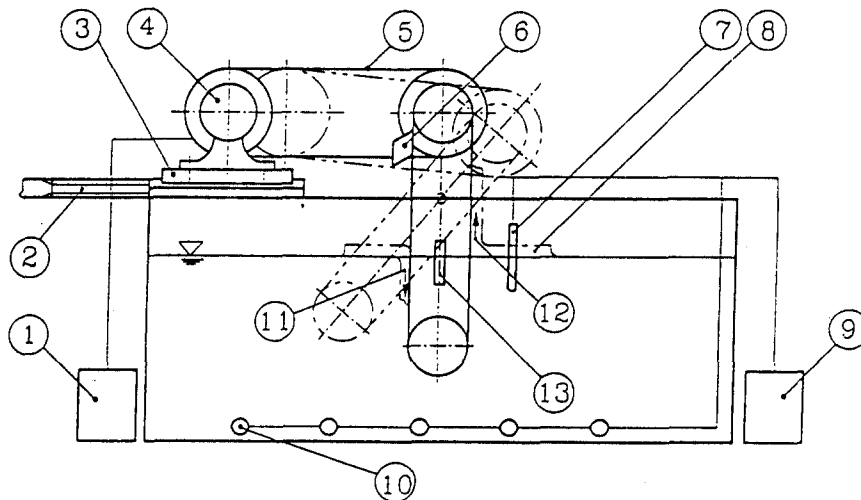
### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 벨트식 누유제거 실험장치의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 벨트가 무한궤도를 이루며 유체층을 통과할 경우 부착에 의해 이송되어진 기름과 물의 혼합물을 고무로 만든 압착식 와

이퍼를 사용하여 회수하였다. 이때 이송유량의 회수방법은 진공을 이용한 흡입에 의한 방법, 와이퍼를 사용한 압착식 회수법 등이 있으나 예비실험을 시행한 결과 와이퍼에 일정한 압력을 가하며 회수하는 압착식이 정확하고 반복이 가능한 회수율을 보여 이를 채택하였다.

기름과 물의 혼합물은 와이퍼에 의해 회수되어 흡을 따라 집유조에 모이게 하였다. 이때 흡의 벽면에 측정유체가 부착되어 측정치에 오차를 만드는 원인이 될 수 있으므로 흡의 길이를 최소화(50 mm)하고, 경사각을 수평으로부터 75°로 크게 한 결과 측정치는 반복성이 있음을 알 수 있었다.

한편, 사용된 벨트는 양 가장자리의 효과를 줄이고 실험실 내에서 수행하는 실험에 적당한 크기인 폭 50 mm의 친유성 고무로 만들어진 평벨트 형태를 선택하였으며 한 쪽 면에 부착되어 수거되는 유량을 측정하였다. 부착유체는 벨트의 재질과 유체의 종류에 따라 영향을 받게 되나 연속이송시에는 고점도의 유체가 벨트면에 얇은막을 형성하게 되므로 디스크식 누유제거기를 사용한 실험의 결과 재질에 의한 영향은 거의 없게 된다고 알려져 있어<sup>(6)</sup>



- |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| 1. Voltage regulator | 2. Lead screw              |
| 3. Bed               | 4. Drive motor             |
| 5. Drive belt        | 6. Rubber wiper (stripper) |
| 7. Thermocouple      | 8. Slick (Bunker C oil)    |
| 9. Electric heater   | 10. Heating Element        |
| 11. Downward pickup  | 12. Upward pickup          |
| 13. Divider          |                            |

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Properties of experimental Bunker C oil

Material	Dynamic Viscosity (Pa sec)	Kinematic Viscosity (m <sup>2</sup> /sec)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Surface Tension (N/m)
Bunker C* (20°C)	4.600	$3.746 \times 10^{-3}$	1228	$5.06 \times 10^{-2}$
Bunker C* (30°C)	1.556	$1.648 \times 10^{-3}$	944	$3.67 \times 10^{-2}$
Water** (20°C)	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-6}$	998	$7.30 \times 10^{-2}$
Water** (30°C)	$7.97 \times 10^{-4}$	$8.00 \times 10^{-7}$	996	$7.30 \times 10^{-2}$

\* 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

본 실험에서는 재질의 특성에 관한 고려는 특별히 하지 않았다.

지름 147 mm, 축간거리 455 mm인 폴리를 사용하였으며 벨트의 구동에 사용된 전동기는 0.5 hp의 직류전동기를 사용하였고 전압조정기에 의해 회전수를 조정함으로써 벨트의 이송속도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 이때 사용 전동기는 낮은 전압의 저속에서 이송하중이 작용할 경우에도 균일한 속도를 얻을 수 있도록 필요한 용량보다 다소 큰 용량을 사용하였다.

한편, 벨트의 회전방향과 선속도의 변화가 유회수량에 미치는 영향을 집중적으로 연구하기 위하여 벨트는 수면과 90°를 이루는 상태로 고정하였으며 추후 실험을 위해 경사각을 줄 수 있도록 설계하였다.

또한, 유체의 물성치는 온도에 따라 민감하게 변하므로 실험유체의 온도를 벙커 C유가 고형화되어 뭉치는 현상이 실온에서 발생하므로 이를 방지하기 위하여 대기온도보다 다소 높은 30°C로 하였다. 수조의 밀면에 작은 용량의 가열기(100watt)를 등거리로 다수(10개) 설치함으로써 균일한 온도분포를 갖도록 하였으며 사용된 온도조절기(HY72D, PT100)의 오차범위는 약 1°C를 유지하였다.

본 실험에 사용한 벙커 C유와 참고로 순수한 물의 점도, 밀도 및 표면장력계수를 함께 Table 1에 20°C와 30°C의 경우를 각각 나타내었다.

사용된 수조의 규격은 1200(L)×500(W)×450(H)mm<sup>3</sup>이었으며, 유량은 단위시간 당 질량유량(kg/hr)으로 표시하였고 수거된 기름과 물의 질량을 측정하기 위한 중량계는 load cell 방식으로

오차범위는 2 gr이었다. 벨트의 선속도를 알기 위한 폴리의 회전수의 측정은 반사식 회전수 측정기(TM3011)로 측정하였고 오차범위는 0.01 %이었다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서 채택한 벙커 C유는 수면 위에 노출되었을 경우 즉시 증발, 산화, 유화(emulsion)되어 타르(tar)화되므로 시간이 지나면서 점성과 체적의 변화를 가져온다. 이와 같은 타르화 현상은 시간과 실험의 빈도수에 따라 변화<sup>(8)</sup>하게 되며 따라서 실험조건에 따른 정성적인 값을 구하기가 매우 어렵다. 본 실험에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 실험의 빈도수에 따라 2-3일 정도마다 실험에 사용된 벙커 C유의 교체를 통하여 비교적 양호한 반복이 가능한 결과를 얻을 수 있었다.

또, Fig. 2(a)에서 보인 바와 같이 수면 위에 부유된 기름이 벨트가 상향으로 이송되는 경우에 부착되어 이송되어지는 상향이송(upward pickup)과 Fig. 2(b)와 같이 벨트가 하향으로 누유혼합물이 부착이송되면서 기름이 없는 반대면을 통과하는 하향이송(downward pickup) 및 Fig. 2(c)의 상향이송되는 접촉면과 하향이송되는 접촉면에서 동시에 부착되어 이송되어지는 상향이송(upward & downward pickup)으로 세 가지 실험 형태를 구분하였다.

본 실험에서는 이와 같은 세 가지 이송방법에 대하여 벨트의 이송속도를 15, 23, 30, 61, 92, 123, 153, 192, 230, 269, 307, 346, 384 mm/s로 변화시켜 이송

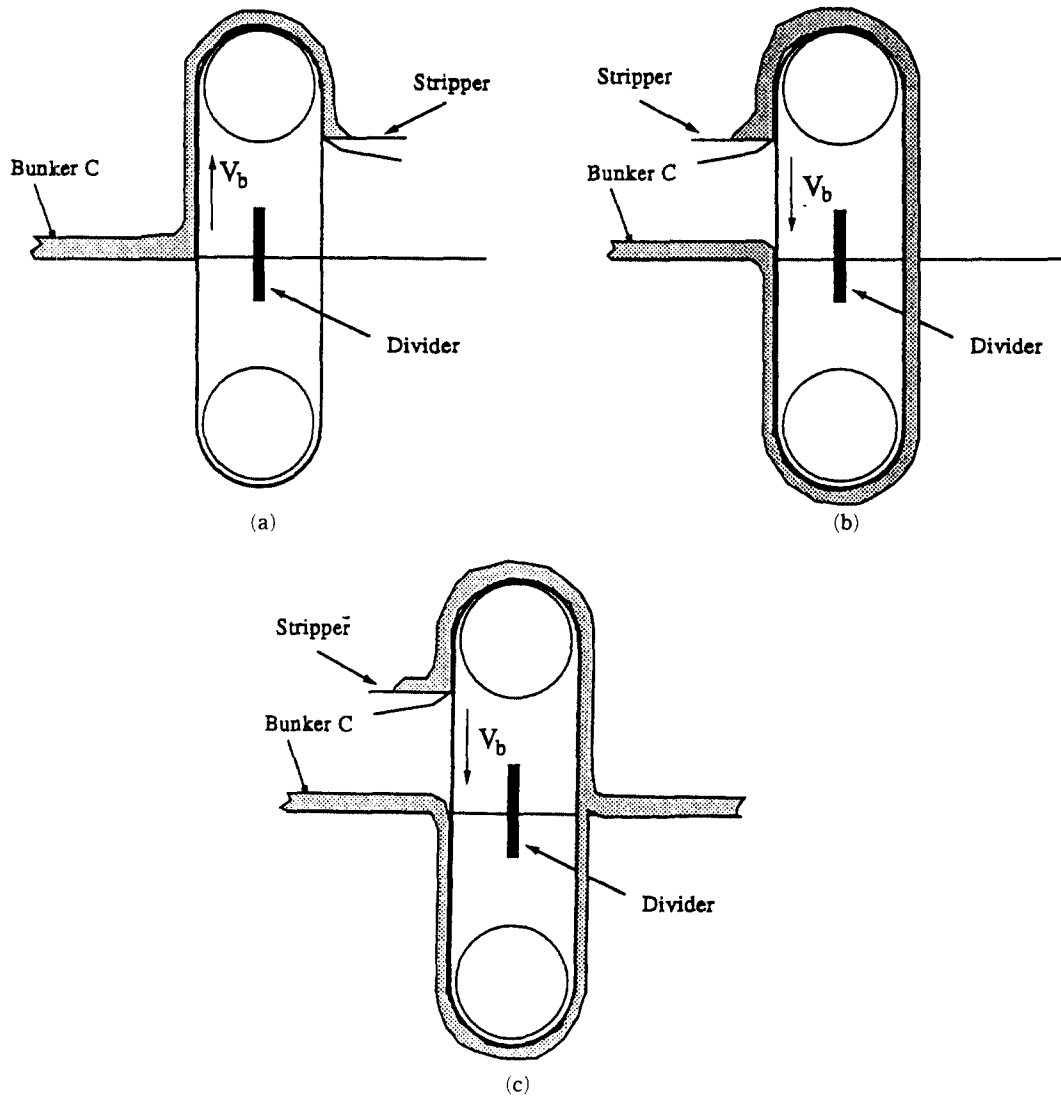


Fig. 2 Three different types of oil pickup configurations using a belt skimmer; upward pickup (a), downward pickup(b) and up and down ward pickup(c)

속도에 따른 유수의 제거량을 측정하였다. 참고로 각 실험조건에서의 유량 측정 시간은 속도에 따라 2분에서 20분 사이가 소요되었다.

또한, 유막두께에 의한 영향을 고찰하기 위하여 유막두께를 5, 10, 15 mm로 하여 이송방향 및 속도별 이송유량을 측정, 비교하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

고체표면이 유체 중에서 운동할 경우 유체는 점

착조건(no-slip condition)에 의해 표면에서는 고체면과 같은 속도로 움직이며 이에 부착된 유체를 수거하면 기름과 물의 혼합물을 수거할 수 있다. 이때 이송된 유량은 특히, 섞이지 않는 두 가지 유체를 제거하는 문제에서는 각 유체의 밀도, 점도, 표면장력등의 물성치와 유막의 두께, 벨트의 선속도 등의 조건에 따라 다르게 된다. Buckingham Pi Theorem을 이용하여 무차원화하여도 무차원 변수가 너무 많아져 특별한 이점을 보이지 못하므로 본 실험의 결과를 나타내는데 차원을 가진 값을 그대로

로 사용하였다.

본 실험에서는 이와 같이 부착이송에 의해 수면 위에 누출된 벙커 C유를 회수할 경우 부착에 따른 회수방법을 앞에서 보인 바와 같이 상향이송, 하향이송 및 상하향이송에 대해 각 조건별로 벨트의 선속도에 따른 회수율과의 관계를 실험적으로 구하였다. 먼저, 벙커 C유가 부유한 상태와 비교할 수 있는 자료를 얻기 위하여 순수한 물만의 경우의 질량유량을 구하였으며 또 하나의 비교 데이터로 사용하기 위하여 순수한 벙커 C유만을 사용한 경우 벨트의 선속도에 관한 질량유량의 변화를 실험적으로 구하였다.

### 3.1 순수한 물의 경우

Fig. 3에는 순수한 물만을 사용한 경우 벨트의 이송속도에 따른 양정유량의 변화량을 단위시간당 질량유량(kg/hr)으로 나타낸 것이다. 양정된 질량유량은 이송속도의 증가에 따라 포물선적인 이차함수의 형태로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이를 이차 근사함수로 구한 적합 곡선을 Fig. 3에 같이 표시하였으며 다음의 상수들이 사용되었다.

$$\dot{m}_w = C_0 + C_1 V_b + C_2 V_b^2 \quad (1)$$

여기에서  $\dot{m}_w$ 는 단위시간 당 질량유량(kg/hr)으로 벨트의 선속도  $V_b$ 의 단위는 mm/s이며  $C_0 = 3.10 \times 10^{-2}$ (kg/hr),  $C_1 = 5.40 \times 10^{-4}$ (kg-sec/hr-mm),  $C_2 = 3.99 \times 10^{-5}$ (kg-sec<sup>2</sup>/hr-mm<sup>2</sup>)이다.

Fig. 4에는 풀리가 작업유체에 잠겨 있는 깊이에 따라 벨트의 직선부분이 액체와 접촉하는 길이가 다르게 되므로 이의 양정유량에 대한 영향을 알아보기 위해 벨트가 액체에 잠겨 있는 잠수깊이를 70, 135, 200, 265 mm로 각각 변화하였을 경우 이송속도에 따른 단위시간 당 양정유량의 변화량을 나타낸 것이다. 여기서 저속에서는 깊이 변화에 따라 유량이 약간 변화하고 있으나 일정속도 이상에서는 접촉깊이의 변화에 대한 유량 변화가 없음을 알 수 있다. 앞에서 보인 Fig. 3의 실험결과와 앞으로 보일 결과들은 모두 잠수깊이 265mm인 경우의 결과임을 밝힌다.

### 3.2 순수한 벙커 C유의 경우

Fig. 5(a)는 벙커 C유만을 사용한 경우 이송속도의 변화에 따른 양정유량에 대한 실험 데이터를 나타낸 것이다. 전체적으로 순수한 물의 경우와 마찬

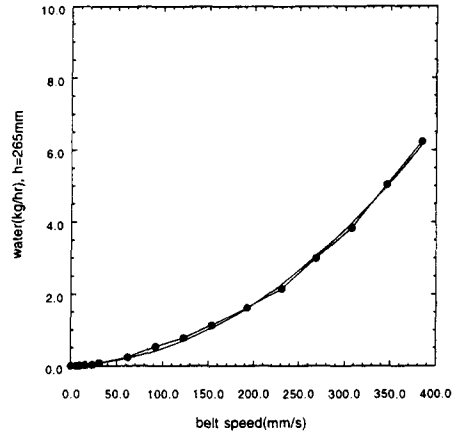


Fig. 3 Mass pickup rate of pure water vs belt speed (temperature 30°C, a fitted curve is from Eq. 1, belt width; 50mm)

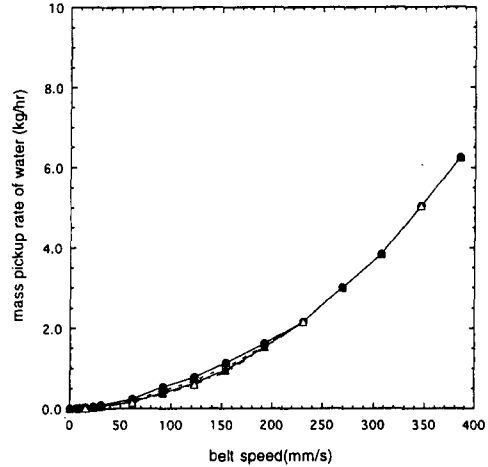


Fig. 4 Mass pickup rate of pure water vs belt speed for the depth of immersion of 265 mm (●), 200 mm (○), 135 mm (▲) and 70 mm (△)

가지로 이송속도의 증가에 따라 양정유량이 포물선적으로 증가하며 물에 대한 벙커 C유의 양정 유량의 비를 Fig. 5(b)에 보이는 바와 같이 물에 비해 같은 벨트속도에서 약 50-120배까지의 큰 유량을 보이며 낮은 속도에서 더 큰 비를 보이고 있다. 벙커 C유만을 사용한 양정유량을 이차근사함수로 구한 곡선을 Fig. 5(a)에 같이 표시하였으며 다음의 상수들이 사용되었다.

$$\dot{m}_B = C_0 + C_1 V_b + C_2 V_b^2 \quad (2)$$

여기에서  $\dot{m}_B$ 는 단위시간 당 벙커 C유의 질량유량

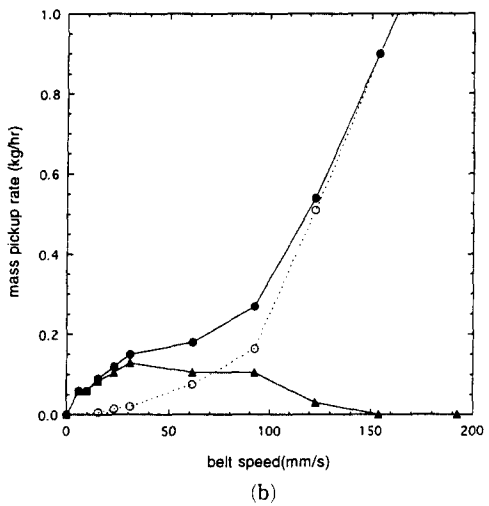
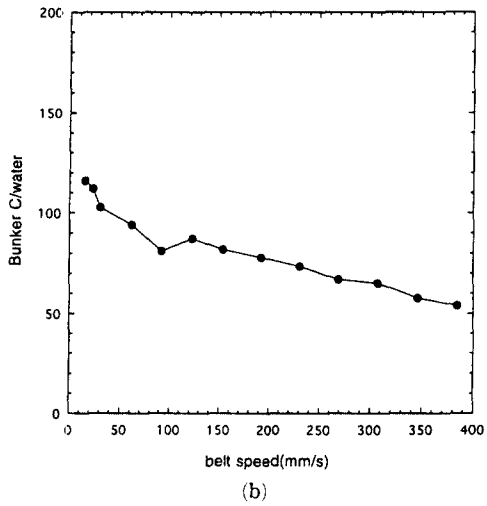
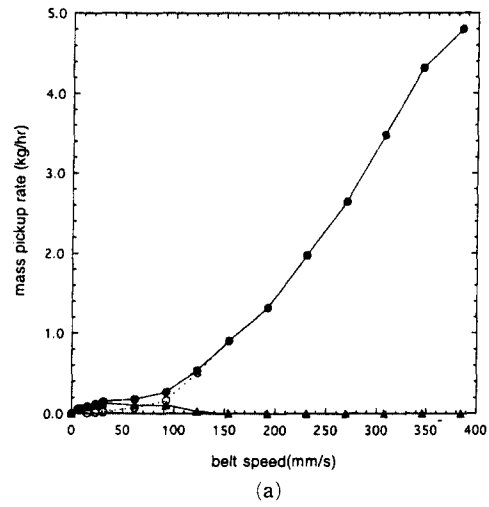
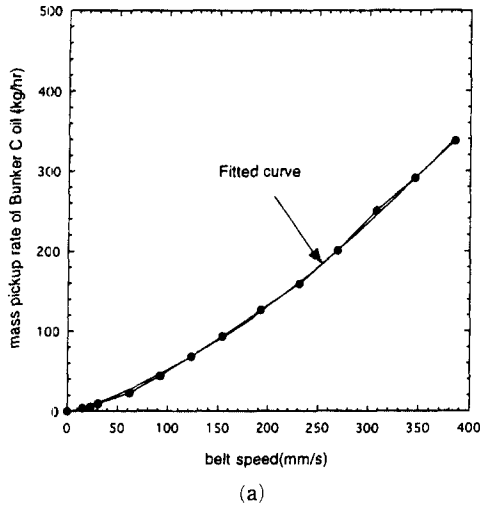


Fig. 5 Mass pickup rate of pure bunker C oil vs belt speed (a) (temperature 30°C, a fitted curve is from Eq. 2) and the ratio of the mass pickup rate of pure bunker C oil to pure water (b)

Fig. 6 Mass pickup rate of oil and water mixture (●), bunker C oil (○) and water (▲) vs belt speed for the case of upward pickup (a) and magnified view (b)

으로 단위는 식 (1)과 같으며  $C_0 = -4.75$ ,  $C_1 = 4.47 \times 10^{-1}$ ,  $C_2 = 1.18 \times 10^{-3}$ 이다.

한편, 이 벙커 C유만을 사용한 경우의 양정유량의 데이터는 기름이 물 위에 떠있는 상태에서의 양정유량과의 비교시 유용하게 사용될 수 있다.

### 3.3 벙커 C유가 물위에 떠있는 경우

수면 위에 누출된 기름의 회수에 따른 유체유동은 2종유체 유동으로 볼 수 있으며 이때 두 유체의 유동은 두 유체의 밀도차, 점성차, 표면장력등에

의해 영향을 받게 된다.

한편, 유출된 기름의 벨트 이동에 의한 유동은 선부착 유체유동이 추후에 부착되는 유체유동에 영향을 미치게 되므로 효과적인 회수율을 구하기 위하여 칸막이(divider)를 사용하여 벨트가 상향으로 이송하는 측에만 벙커 C유층이 떠있을 경우, 즉, 상향이송(upward pickup)에 의한 이송유량과 하향이송되는 측에만 벙커 C유가 있을 경우의 하향이송(downward pickup)에 의한 이송유량을 구하여 고찰하였다. 이들 두 경우 Fig. 2에 이미 나타낸

바와 같이 상향이송시는 벨트에 물이 선부착되고 하향이송시에는 벙커 C유가 선부착된다는 점을 강조해 둔다. 마지막으로 상하향측 모두에 기름이 떠 있는 경우 질량유량을 구하여 앞의 두 경우의 실험치들과 비교한 결과를 보이기로 한다.

### 3.3.1 상향이송에 의한 양정유량

Fig. 6(a)는 상향이송에서 양정된 유량을 이송속도에 따라 나타낸 것이며, 유막의 두께는 10 mm 이고, 유량은 양정된 벙커 C유의 양과 물의 양을 합한 전체량과 함유된 물의 양을 각각 표시한 것이다. 한편, Fig. 6(b)에는 벨트의 속도가 작은 구간에서의 변화를 확연히 보이기 위해 200 mm/s 이하의 구간만을 확대하여 나타내었다. 속도가 75 mm/s 이하에서는 벙커 C유가 더 많이 양정되며 그보다 높은 속도에서는 물이 더 많이 양정되는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 7은 양정된 전체 유량의 속도별 RE (Recovery Efficiency)를 나타낸 것이다. 여기서 RE는 전체 양정된 물과 기름의 혼합물의 질량중 함유된 벙커 C유의 질량비(%)를 나타낸다. RE는 속도의 증가에 따라 급속히 감소하고 있는 것을 볼 수 있으며 이는 이송속도가 증가함에 따라 거의 물만이 양정되고 있음을 나타낸다.

이상의 결과에서 보면 상향이송에 의한 양정유량은 매우 작은 이송속도에서는 벙커 C유만이 양정되다가 속도의 증가에 따라 벙커 C유의 양정유량은 약간 증가하여 일정하게 유지하다가 계속 이송

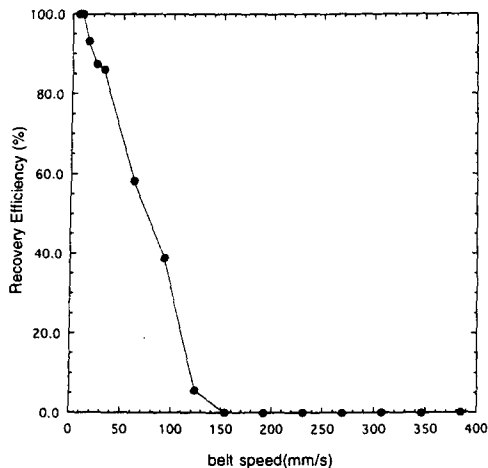


Fig. 7 Recovery efficiency vs belt speed for the case of upward pickup (slick thickness 10 mm)

속도를 증가시키면 벙커 C유만의 양정유량은 급격하게 감소하며 벨트의 선속도가 약 150 mm/s 이상에서는 물만이 양정되는 현상을 발견할 수 있었다. 이와 같은 현상은 아주 낮은 이송속도에서는 벙커 C유의 점성이 크고 표면장력의 효과에 의하여 벨트의 전체 접촉면에 벙커 C유가 부착되어 양정되게 되나 속도가 증가하게 되면 점차적으로 선부착 유체인 물의 유동에 의하여 벨트의 표면 중심부에서부터 물 위에 부유된 벙커 C유층이 밀려나며 벨트의 표면 주위에 반타원형의 water hole을 형성하게 된다. 같은 현상이 디스크형 유회수기에서도 발생하며 이 현상을 starvation<sup>(10)</sup>이라 부른다. 벨트의 선속도를 증가시키며 실험을 해보면 starvation이 발생하기 시작하면 벨트 양 옆 부분에만 벙커 C유가 부착되어 양정되다가 이송속도를 더욱 증가시키면 벨트 전체의 접촉면에서 starvation이 발생되므로 물만이 양정되는 현상을 관찰할 수 있었다.

또한, Fig. 3에서의 순수한 물만인 경우의 양정유량과 Fig. 6에서 높은 이송속도에서의 양정유량을 비교하였을 경우 Fig. 6에서의 경우에 동일한 조건에서 양정된 물의 양이 현저히 감소되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 벙커 C유가 부유되어 있는 경우의 상향이송에서 이송속도가 클 경우에 water hole의 형성으로 물만이 벨트면에 직접 접촉되고 있으나 벨트의 연속된 운동으로 벙커 C유 회수도 중 벨트 표면에 얇은 기름막을 형성하게 된다. 이와같이 벨트 표면에 기름층이 남아있게 되면 water hole내의 물이 기름층이 없는 깨끗한 벨트면에 직접 접촉할 때보다 접촉각(contact angle)이 작아져 belt의 표면에 원뿔 형태의 수막을 형성하며 부착되는 물의 두께를 감소시키게 되고 따라서 흘러내리는 유량이 증가되어 양정되는 물의 양이 감소하는 것을 실험 중 확인할 수 있었다. 또한, 원뿔 형태의 수막 cone의 형성은 이송속도의 증가에 따라 성장하게 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 상향이송시 부유된 벙커 C유의 유막두께를 5, 10, 15 mm로 변화시켰을 경우 양정유량을 나타내고 있으며 유막두께가 클수록 벙커 C유의 양정유량은 증가되고 보다 큰 이송속도에서도 벙커 C유의 양정유량이 나타남을 확인할 수 있는데 이는 유막두께가 클수록 starvation이 높은 이송속도에서 발생하기 시작한다는 것을 보이고 있다. 또한, 유막두께 15 mm, 이송속도 192 mm/s에서 부분적인 양정유량의 증가를 보이는 것은 유막두께의



증가로 인하여 water hole이 동일 이송속도에서 유막두께가 작을 경우보다 작게 발생되게 되고 벨트의 이송속도 증가에 의한 주기적인 진동이 발생하여 기름층이 벨트의 작업면에 순간 접촉이 되었다가 떨어지는 단속적인 양정유량이 부가적으로 발생되기 때문이었음을 밝힌다.

3.3.2 하향이송에 의한 양정유량

Fig. 9에는 하향이송시 유막의 두께가 10 mm일

때 이송속도에 따른 벙커 C유의 단위시간 당 양정유량을 벙커 C유만을 사용한 경우의 양정유량과 함께 나타내고 있다. 여기서 특이한 점은 양정된 벙커 C유의 양은 이송속도의 증가에 따라 일반적으로 증가하고 있으나 벨트의 선속도가 약 200 mm/s 이상에서는 다시 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다는 것이다. 한편, 선속도가 약 250 mm/s까지 증가할 시는 점선으로 표시한 벙커 C유만으로 실험한 양정유량보다 오히려 커지는 것을

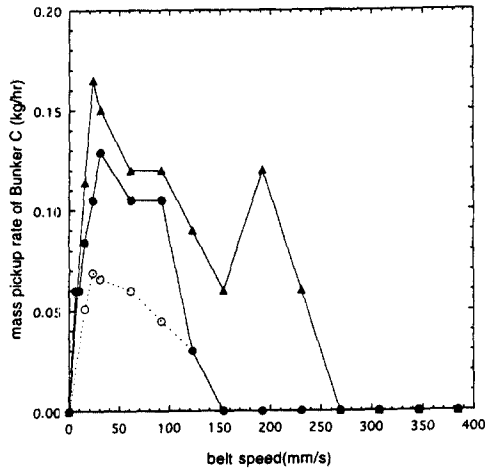
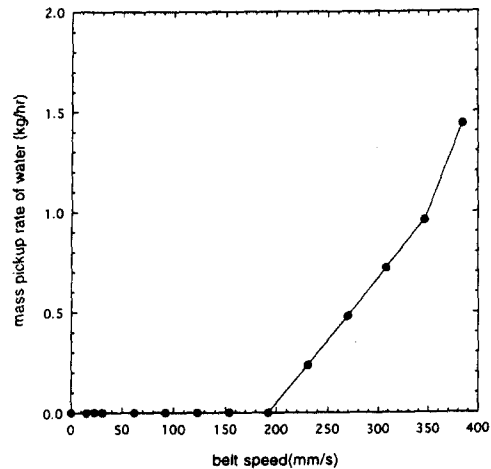


Fig. 8 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for the slick thickness of 10 mm (●), 5 mm (○) and 15 mm (▲); upward pickup



(a)

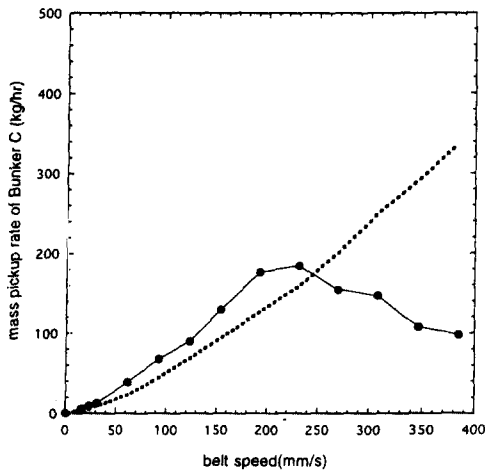
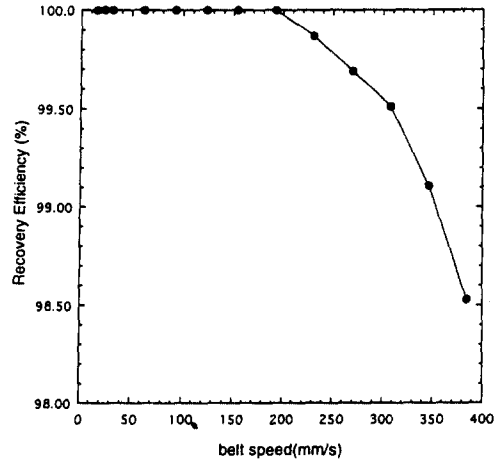


Fig. 9 Mass pickup rate of bunker C oil (●) in the oil water mixture vs belt speed for the case of downward pickup (slick thickness 10 mm); dotted line is from the case of pure bunker C oil experiment shown in Fig. 5



(b)

Fig. 10 Mass pickup rate of water (●) in the mixture (a) and recovery efficiency vs belt speed for the case of downward pickup (slick thickness 10 mm)

알 수 있으며 이는 실험 전에 예상치 못한 결과로 하향이송시 벨트에 부착된 벙커 C유가 벨트의 하단부를 통과하여 수면위로 이동하는 동안 벙커 C유보다 훨씬 점도가 낮은 물과 접촉하며 감속되는 양이 적어지며 생기는 현상으로 설명될 수 있다.

한편, 앞절인 3.3.1에서 보인 상향이송시에는 이송속도의 증가에 따라 부착된 물의 속도수두가 벙커 C유의 부착력보다 커지면 벨트의 표면으로부터 벙커 C유층을 밀어내게 되어 water hole을 형성하며 벙커 C유의 부착유량을 급격히 감소시키게 되나 하향이송에서는 선부착 유체가 벙커 C유이므로 상향이송에서의 경우와는 상당히 다른 현상을 나타낸다. 하향이송시 선부착된 벙커 C유층은 점성, 표면장력등에 의하여 벨트의 하향이송과 함께 sink의 역할을 하며 벨트 주위의 유체를 벨트 쪽으로 모이게하는 2차유동을 발생시키며(entrainment) 벨트의 선속도가 증가하면 2차유동에 의한 유막의 유입속도도 증가하게 된다. 하지만, 벨트와의 접촉점에서는 벨트의 선속도가 약 200 mm/s 이상에서는 유막의 유입속도가 주위 유체의 유입속도보다 커지며 유선이 단절되는 현상이 발생된다. 이는 상향이송시 발생하는 것과는 다른 종류의 starvation을 일으키는 현상을 확인할 수 있었으며 벨트면에 부착되는 벙커 C유의 양은 급격히 감소하게 된다. 이후 벙커 C유의 확산에 의하여 벙커 C유는 다시 벨트면에 부착되어 이송되어지게 되고 다시 단절되

는 단속적인 이송이 이루어지게 된다. 따라서 이경우에서의 이송유량은 급격한 감소 및 매우 불규칙한 이송유량을 나타내게 되고 물의 함유량이 급속히 증가하게 된다.

Fig. 10(a)는 하향이송에서의 이송양정된 유량중 함유된 물의 유량을 나타내고 있다. Starvation이 발생된 이후에서부터만 이송유량 중에 아주 소량의 물이 포함되고 있음을 알 수 있으며 벙커 C유의 양에 비해 상당히 적어 하향이송시는 Fig. 10(b)에 보인 바와 같이 recovery efficiency를 계산해 보면 98.5% 이상임을 알 수 있었다.

Fig. 11은 유막두께를 각각 5, 10, 15 mm로 변화시켰을 경우 이송속도에 따른 단위시간 당 벙커 C유의 양정유량을 나타낸다. 유막두께 변화에 따른 양정유량은 유막두께 5 mm에서 보다 10 mm에서 전체적으로 증가되고 있는 경향을 보이고 있으나 10 mm 이상에서는 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이는 유막두께가 부착유량을 증가시키고 있으나 부착된 벙커 C유가 일정두께 이상에서는 모두 흘러내려 양정된 유량은 세가지 경우 거의 일정한 양을 유지하고 있음을 확인할 수 있으며 이 또한 예상치 못했던 결과이다.

### 3.3.3 상, 하향이송에 따른 이송유량

Fig. 12는 상하향이송에서 유막의 두께가 10mm

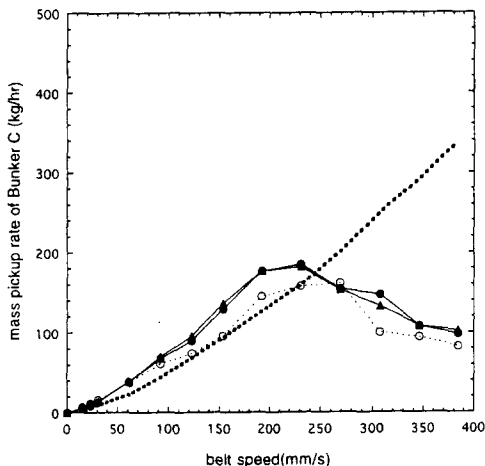


Fig. 11 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for the slick thickness of 10 mm (●), 5 mm (○) and 15 mm (▲); downward pickup, the dotted line is the same as in Fig. 9

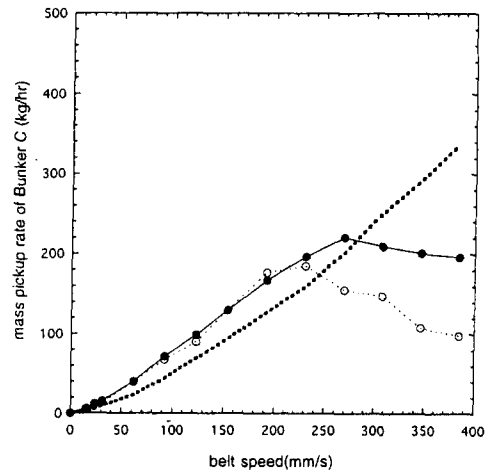


Fig. 12 Mass pickup rate of bunker C oil in the oil water mixture vs belt speed for the case of up- and downward pickup (●) and downward pickup (○) (slick thickness 10 mm); the dotted line is the same as in Fig. 9

일 때 벙커 C유의 단위시간 당 양정유량을 나타낸 것이며 Fig. 13은 이때 벙커 C유의 양정유량에 함유된 물의 양을 나타낸 것이다. 상, 하향이송이 동시에 이루어질 경우의 실험결과는 하향이송에서 경우와 거의 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 주로 부착유량 및 이송에 의한 벙커 C유의 양정유량이 상향이송에서는 극히 저속에서만 이루어지게 되며 하향이송에 비하여 매우 작게 나타나고 있음을 볼 때 벨트가 상향이송시 벙커 C의 양정유량에 별다른 영향을 미치지 못하고 있음을

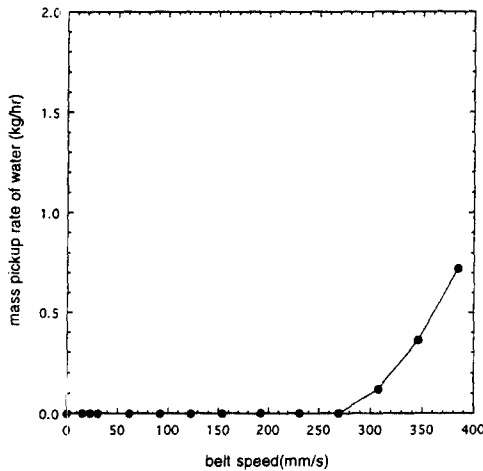


Fig. 13 Mass pickup rate of water (●) in the mixture vs belt speed for the case of up-and-downward pickup (slick thickness 10 mm)

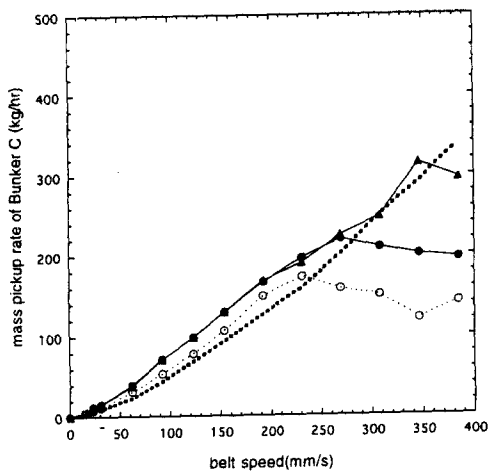


Fig. 14 Mass pickup rate of bunker C oil vs belt speed for the slick thickness of 10 mm (●), 5 mm (○) and 15 mm (▲); up-and-downward pickup, the dotted line is the same as in Fig. 9

알 수 있다.

또, Fig. 14는 상하향이송에서 유막두께를 5, 10, 15 mm로 하였을 경우 단위시간 당 이송유량을 이송속도에 따라 나타낸 것이다. 이는 하향이송에서의 경우와 같이 유막두께가 10 mm 이상일 경우 벨트의 속도가 약 270 mm/s까지의 구간에서는 양정유량에 거의 영향을 미치지 않고 있으나 유막두께가 10 mm 인 경우에 비해 15 mm인 경우 더 높은 이송속도에서 최대 유량을 보이고 있는데 이는 위에서 설명된 바와 같이 유막층의 확산에 의한 결과 starvation이 다소 늦게 발생되기 때문이라 설명할 수 있다.

이상의 결과를 보면 효과적인 기름의 수거를 위하여는 starvation의 발생을 방지하여야 하며 유체의 물성치에 따라 적절한 이송속도를 유지하는 것이 필요하며 유막두께를 크게하여 주기 위하여 기름막의 확산을 방지할 수 있는 오일봄 등의 설치를 통해 집유한 후 유회수기를 이용한 작업하는 것이 효과적이나 주어진 유막 두께 이상은 필요 없으며 유회수기의 위치는 하향이송이 주도적인 역할을 하도록 설치하여야 높은 효율의 누유회수가 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

수면 위에 누유된 벙커 C유등 고점도 유체의 효과적인 회수를 위한 이송방법, 이송속도 및 유막층 두께가 벨트식 유회수기에서 미치는 영향에 관하여 고찰한 결과 본 연구에 채택된 실험 조건하에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째로, 단일 유체의 부착에 의한 이송양정유량은 본 실험의 범위내에서 이송속도의 증가에 따라 증가하며 고점도 유체인 벙커 C유의 경우 순수한 물의 경우에 비해 거의 직선적인 증가를 보이며 순수한 물의 경우 2차원적인 증가를 보인다. 벙커 C유의 경우 플리의 잠수깊이의 변화에 따른 이송량은 작은 이송속도에서는 미소한 차이를 보이나 일정속도 이상에서는 거의 영향을 받지 않는다.

둘째로, 이송방법에 따른 누유회수율은 상향이송에서는 water hole의 형성에 의한 starvation의 영향으로 작은 속도에서만 벙커 C유의 양정유량이 이루어지며 이송속도의 증가에 따라 급격히 감소하여 물만이 양정되게 된다. 하향이송에서는 고점도인 벙커 C유가 선부착되게 되어 누유의 양정유량

은 상향이송에 비해 비교할 수 없을 정도로 크게 증가하게 되며 이송속도의 증가에 따라 증가하다 약 200 mm/s 이상에서는 starvation의 영향으로 양정유량 및 recovery efficiency가 감소하게 되며 상하향이송에서는 상향이송에 의한 양정유량이 큰 영향을 미치지 못하므로 하향이송에서와 거의 같은 값을 가지나 starvation이 발생하기 시작하는 벨트의 이송속도는 약간 증가하는 경향을 보인다.

셋째로, 상향이송에서 유막두께의 증가에 따라 벙커 C유의 양정유량이 증가하며 보다 큰 이송속도에서도 양정유량이 발생되게 되고 하향이송과 상하향이송일 경우 유막두께의 증가에 따라 양정유량이 증가하며 이송시 벨트에 부착된 유량이 일정한 두께 이상에서는 모두 흘러내려 유막두께 10 mm 이상에서는 양정유량이 유막두께의 영향을 거의 받지 않는다. 다만, 유막확산의 영향으로 starvation이 발생하는 이송속도가 증가하게 된다.

이상의 결과들을 종합해 보면 벨트식 유회수기를 사용하여 벙커 C유등 고점도의 누유를 회수하려면 벨트의 하향 운동에 의한 오일의 선부착이 중요하며 벨트의 속도를 무조건 증가시키기보다 오일막의 두께에 따른 starvation이 발생되기 직전의 이송속도로 운전하는 것이 최적이라는 일반적으로 적용될 수 있는 실험 결과를 얻었으며 본 연구에서 채택된 실험 조건하에서 벨트의 최적 이송속도는 약 200-270 mm/s 임을 알 수 있다.

본 실험의 결과는 고점도 중질유의 기초 실험으로 앞으로 벨트의 각도 변화가 누유회수율에 미치는 영향에 관한 연구나 좀 더 복잡한 형상인 디스크나 드럼형태의 누유회수기의 물리적 현상 연구에 도움이 되리라 믿는다.

### 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) 현범수 외 10인, 1994, "해양오염 방제 기술 개발 (II)," 한국기계연구원 연구 보고서, 환경처, 과학기술처.
- (4) Christopher, C. D. and Mooers, N. K., 1995, "NMOTSM: A National Marine Oil Transport Modd," Second International Oil Spill Research and Development Forum, Forstering International Cooperative Research 23-26, Vol. 2, pp. 627~636.
- (5) Athantic Research Systems Division Marine Systems, A Division of the Susquehanna Corporation Costa Mesa, California 92626, 1976, "Recovery of Floating Oil; Rotating Disk Type Skimmer," *Water Quality Office Environmental Protection Agency*, Project #1508FWN, p. 25.
- (6) Norton, R. W. and Lerch, D. W., 1977, "An Oil Recovery System for Sanfrancisco Bay Area," *Preceedings of the 1977 Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Washing D. C., p. 321.
- (7) Cristodoulou, M. S. and Turner, J. T., 1987, "Experimental Study and Improvement of the Rotating Disc Skimmer," *Oil Spill Conference*, Baltimore, pp. 101~108.
- (8) Mackay, D., Berger, D., Charles, M. E. and Van Ooijen, H., 1993, "Rheolo-gical Characterization of Waxy Crude Oils for Enviromental Purposes," *Sixteenth Artic and Marine Oilspill Program Technical Seminar*, Vol. 1, pp. 85~87.
- (9) Mansfield, B., Lorenzo, T. and Whttaker, H., 1995, "Effects of Oil Viscosity and Emulsification on Skimmer Performance," *Second International Cooperative Reaserch* 23-26, Vol. 1, pp. 145~152.
- (10) Athantic Research Systems Division Marine Systems, A Division of the Susquehanna Corporation Costa Mesa, California 92626, 1976, "Recovery of Floating Oil Rotating Disk Type Skimmer," *Water Quality Office Environmental Protection Agency*, Project #1508FWN, p. 97.