

## 벨트식 유회수기를 사용한 디젤유 회수에 관한 실험적 연구

송 동 업\* · 윤 경 환\*\*

(97년 4월 14일 접수)

### An Experimental Study on the Recovery of Diesel Oil Using a Belt Type Skimmer

Dong-Eub Song\* · Kyung-Hwan Yoon\*\*

**Key Words** : Skimmer(유회수기), Belt Type Skimmer(벨트식 유회수기), Oil Spill(누유), Oil Recovery(누유 회수)

#### 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 are recommended because chemical dispersion can cause the secondary contamination in the environment.

In the present study a series of experiments were carried out to study the effect of working conditions of a belt type skimmer on the rate of recovery for the spilled oil. The oil chosen for the present experiment was diesel oil. Three different situations, namely, upward, downward, up-and-downward pickup have been investigated for various contact angles, belt speeds and oil thicknesses.

The results show that the rate of oil recovery for the case of downward pickup with a contact angle of  $45^\circ$  shows the highest among all the conditions. For the removal of spilled diesel oil the optimal belt speed can be found as the critical value to reach the saturated pickup rate for a given oil thickness. The recovery rate of bunker C oil shows 4 ~ 6 times higher than that for diesel oil. And the optimal belt speed for bunker C oil can be found less than that for diesel oil for the same slick thickness.

#### 1. 서 론

하천이나 해상에서의 누유에 의한 환경오염은 유류사용의 증가와 더불어 더욱 심각한 문제로 대

두되고 있으며 현재 생산되고 있는 원유의 약 0.17%가 하천 또는 해상에 누유되고 있는 것으로 알려지고 있다<sup>1)</sup>. 한편, 이와 같은 누유에 의한 해상 오염은 점차 대형화되고 있고 빈도수 또한 증가

\* 정회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

\*\* 단국대학교 기계공학과

되고 있으며 해상 또는 연안에 막대한 피해를 가져오게 된다<sup>2)</sup>.

유출된 기름의 자연적인 정화과정은 오랜 시간을 필요로 하게 되고 이에 따른 막대한 피해를 가져오게 되므로 신속한 누유의 방제 대책이 필요하다.

이와 같은 누유에 대한 방제 방법으로는 유화제를 이용한 화학적 분산처리에 의한 방법과 기계적인 방법에 의한 회수로 크게 나눌 수 있다. 화학적인 분산처리 방법은 2차 오염의 우려가 있어 2차 오염의 문제가 없는 기계적인 방법에 의한 누유 수거가 가능하다면 바람직한 방법이 된다.

기계적인 유회수 방법은 일반적으로 내륙이나 항구등에서 한정적으로 사용되었으며 최근에는 오일 붐의 설치로 유막두께를 크게하여 외해에서의 사용도 증가되고 있다. 하지만, 이러한 유회수기는 이동 및 조립시간, 해상상태, 기름막의 두께, 기름의 점도등에 의해 제약을 받게 되므로 효과적인 유회수를 위하여 누유확산에 관한 예측<sup>3)</sup>과 함께 유회수기의 성능에 대한 체계적인 연구가 필요하게 되었다.

유회수기에는 여러 형태가 개발되어 사용되고 있으며 유회수기는 그 작동 원리에 따라 흡착식, 부착식, 흡입식, 위어(weir)식 등으로 그 특성이 다르다<sup>4,5)</sup>.

흡착식은 중질유(中質油)의 회수가 용이하나 중질유(重質油)의 회수에는 어려움이 있으며, 부착식은 중질유(中質油)의 회수 및 중질유(重質油)의 회수 모두에 사용이 가능하나 중질유(中質油)에 비하여 중질유(重質油)의 회수능력이 저하되며, 흡입식은 중질유(中質油)의 회수에 적당하나 물의 함량이 크고 소형에 적합하다. 마지막으로 위어식의 경우 대형이나 물의 함량이 커 별도의 유수분리기를 필요로 하며 이에 의한 2차 오염의 문제가 있다.

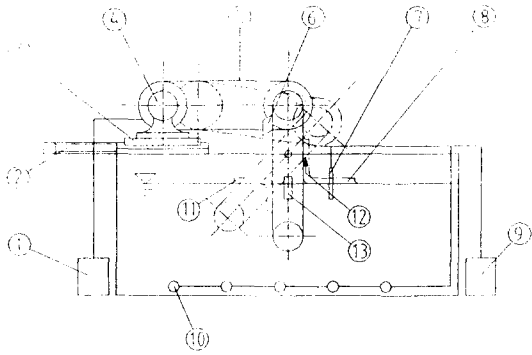
일반적으로 누유에 의한 해양오염은 중질유(中質油)보다는 중질유(重質油)에 의한 오염이 크며 해상 누유는 주로 원유 및 벙커 C유등 중질유(重質油)의 누유가 대부분을 차지하고 있다. 이에 따라 벙커 C유의 수거에 대한 실험 결과<sup>6)</sup>와 비교하

기 위하여 부착식의 일종인 무한궤도를 사용한 벨트식 유회수기(belt skimmer)를 채택하여 중질유(中質油)인 디젤유를 누유 재료로 사용하여 벨트의 회전방향 및 접촉각, 유막두께, 선속도등의 유회수 조건의 변화가 유회수율에 미치는 영향을 실험을 통해 알아보았다.

## 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 와이퍼에 의해 회수하였다. 이때 이송유량의 회수는 와이퍼에 압력을 주어 회수하여 흠을 따라 집유조에 모이게 하였다. 이때 흠의 벽면에 측정 유체가 부착되어 측정치에 오차를 만드는 원인이 될 수 있으므로 흠의 길이를 최소화(50 mm)하고, 경사각을 수평으로부터 75°로 크게 한 결과 측정치는 반복성이 있음을 알 수 있었다. 한편, 벨트는 양 가장자리에서의 효과를 줄여 단위 폭당 유량을 구하기 위한 실험실내에서의 실험에 적당한 크기인 폭 50 mm의 친유성 고무로 만들어진 평벨트를 선택하였으며 한쪽 면에 부착된 유량을 구하였다. 벨트의 재질은 디스크식 누유제거기를 사용한 실험 결과 재질에 의한 영향은 거의 없다고 알려져 있어<sup>4)</sup> 본 실험에서는 재질에 관한 고려는 하지 않았다. 지름 147 mm, 축간거리 455 mm인 풀리를 사용하였으며 벨트의 구동에 사용된 전동기는 0.5 hp의 직류전동기를 사용하였고 전압조정기에 의해 회전수를 조정하며 벨트의 이송속도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 이때 사용 전동기는 낮은 전압의 저속에서 이송하중이 작용할 경우에도 균일한 속도를 얻을 수 있도록 다소 큰 용량을 사용하였으며 리드 스크루에 의하여 베드면의 각도를 조절함으로써 벨트의 작업면과 작업유체와의 접촉각에 변화를 줄 수 있도록 하였으며 접촉각의 가변범위는 30°에서 150°로 하였다.



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

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

또한, 유체의 물성치는 온도에 따라 민감하게 변하며 고점도인 중질유인 경우 낮은 온도에서는 고형화하는 경향이 있어 벙커 C유의 실험을<sup>6)</sup> 30°C에서 하였으므로 본 실험의 결과들과 비교하기 위하여 디젤유의 실험온도도 30°C로 하였으며 균일한 온도를 유지하기 위하여 수조의 밑면에 작은 용량의 가열기(100watt)를 등거리로 다수(10개) 설치하여 균일한 온도 분포를 갖도록 하였으며 사용된 온도조절기(HY72D, PT100M)의 오차 범위는 1°C를 유지하였다. 낮은 수온에 유출되어도 복사열의 흡수율이 매우 커 기름의 온도는 쉽게 40°C 까지 상승하게 되므로<sup>7)</sup> 실험 온도는 실용 범위 안에 든다. 한편, 본 실험에 사용한 디젤유와 참고로 벙커 C유와 순수한 물의 점도, 밀도 및 표면장력계수를 함께 Table 1에 각각 나타내었다.

또, 사용된 수조의 규격은 120(L)×50(W)×45(H) cm<sup>3</sup> 이었으며, 유량은 단위 시간당 질량유량(kg/hr)으로 표시하였고 수거된 기름과 물의 질량을 측정하기 위한 중량계는 로드 셀 방식으로 오차 범위는 2gr 이었다. 벨트의 선속도를 알기 위한 폴리의 회전수 측정은 반사식 회전계(TM3011)로 측정하였고 오차 범위는 0.01%이었다.

Table 1 Property data of diesel and bunker C oil used

Material	Dynamic Viscosity (Pa.sec)	Kinematic Viscosity (m <sup>2</sup> /sec)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Surface Tension (N/m)
diesel oil* (30°C)	1.975×10 <sup>-3</sup>	2.466×10 <sup>-6</sup>	801	2.84×10 <sup>-2</sup>
bunker C* (30°C)	1.556	1.648×10 <sup>-3</sup>	944	3.67×10 <sup>-2</sup>
water** (30°C)	7.97×10 <sup>-4</sup>	8.00×10 <sup>-7</sup>	996	7.30×10 <sup>-2</sup>

\* 한국기유화시험원에 의뢰한 데이터임

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

## 2.2 실험방법

벨트의 이송 방향에 따라 다음의 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 부착 이송되면서 기름이 없는 반대 면을 통과하는 하향이송(downward pickup) 및 Fig. 2(c)의 상향이송되는 접촉면과 하향이송되는 접촉면에서 동시에 부착되어 이송되어지는 상하향이송(up and downward pick up)으로 세 가지 실험 형태를 구분하였다.

또, Fig. 2에서와 같이 부유된 기름의 표면과 벨트의 작업면이 이루는 각을 접촉각(contact angle, θ<sub>c</sub>)로 나타내었고, 상하향이송에서는 하향이송시의 접촉각으로 나타내었다.

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 이송유량을 구하였으며, 이때 각각의 이송방법에 따른 이송속도의 영향을 구하기 위하여 이송속도를 변화시켜 이송속도에 따른 물과 기름의 제거량을 측정하였다. 참고로 각 조건에서의 실험 시간은 조건에 따라 약 2분에서 20분까지 소요되었다.

또, 유막두께에 의한 영향을 고찰하기 위하여 유막두께를 1 mm, 2.5 mm, 5 mm 및 10 mm로 변화하여 이송방법 및 속도별 이송유량을 측정하였다.

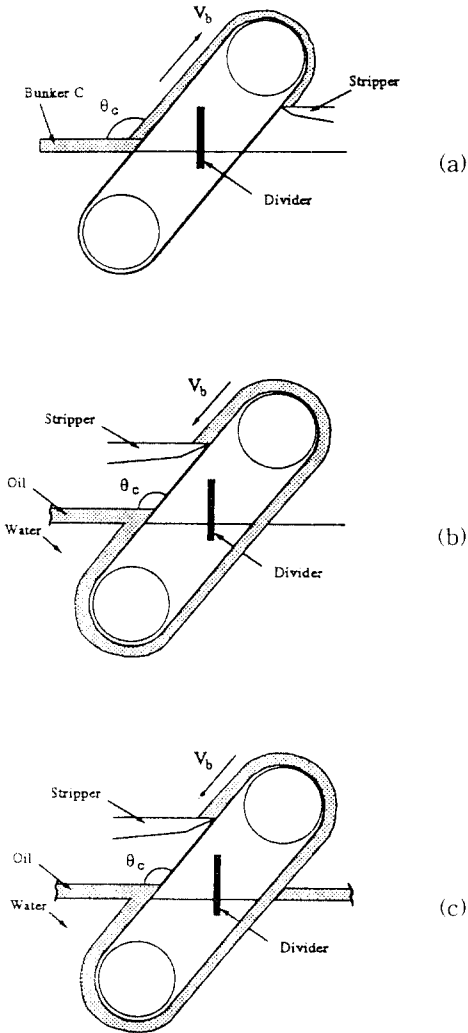


Fig. 2 Three different types of oil pickup configuration using a belt skimmer ; upward pickup(a), downward pickup(b) and up and downward pickup(c). (contact angle:  $\theta_c$ .)

### 3. 실험결과 및 고찰

수면위에 누출된 기름의 회수에 따른 유동은 두 유체의 유동으로 볼 수 있으며 이때 두 유체의 유동은 두 유체의 밀도차, 점성차, 표면장력등에 의

해 영향을 받으며 이송유량에 영향을 미치게 된다.

이와 같은 누유회수에서의 유체유동은 매우 많은 요인에 의하여 영향을 받고 있으며 이에 관한 체계적인 연관성은 아직 밝혀져 있지 않아 본 실험의 결과는 차원을 가진 값을 그대로 사용하였으며 누유수거에 미치는 영향을 정량적인 회수율을 구하여 누유 회수율에 미치는 주요 요인을 파악하여 효과적인 유회수 조건을 구하는 것을 목표로 하였다.

고체가 유체 중에서 운동할 경우 유체는 접촉조건(no slip condition)에 의해 고체의 표면에 부착되어 이동하게 되므로 이때 부착된 유체를 수거한다면 누유된 기름과 물의 혼합물을 수거할 수 있다. 벨트에 의한 두 유체의 유동은 선부착 유체의 유동이 후에 부착되는 유체의 유동에 영향을 미치게 되므로 벨트의 회전 방향이 유회수율에 크게 영향을 미친다는 사실을 벙커 C유를 통해 이미 밝힌 바 있다.<sup>6)</sup> 이에 효과적인 회수율에 관한 조건을 구하기 위하여 상향이송, 하향이송 및 상하향이송에 의한 이송유량을 접촉각, 유막의 두께 및 이송속도 변화에 따라 구하여 그 영향에 관해 고찰하였다. Fig. 2에서 이미 보인 바와 같이 상향이송시는 벨트에 물이 선부착되고 하향이송시는 기름이 선부착되게 된다. 또 상하향시의 이송양정을 구하여 비교 검토하였으며 각각의 경우 유막두께의 변화에 관하여 고찰하였다. 이때 사용된 작업유체는 일반적인 유회수기에서 회수가 비교적 용이하다고 알려져 있는 디젤유를 사용하였고, 후에 벙커 C유를 사용한 결과와 비교, 검토하였다.

#### 3.1 디젤유의 유회수율

##### 3.1.1 상향이송에 의한 양정유량

Fig. 3에는 디젤유의 유막 두께가 1 mm인 경우 상향이송에서 폭 50 mm인 벨트의 작업면과 유면과의 접촉각의 변화에 따른 양정되는 물과 기름의 총유량을 이송속도에 따라 단위시간당 질량유량(kg/hr)으로 나타냈으며 앞으로 보일 유량 데이터의 차원도 이와 동일하다. 여기서 총유량은 이송속도의 증가에 따라 전체적으로 증가하고 있으며 접촉각의 증가에 따라 증가폭이 커지고 있음을 알 수 있다.

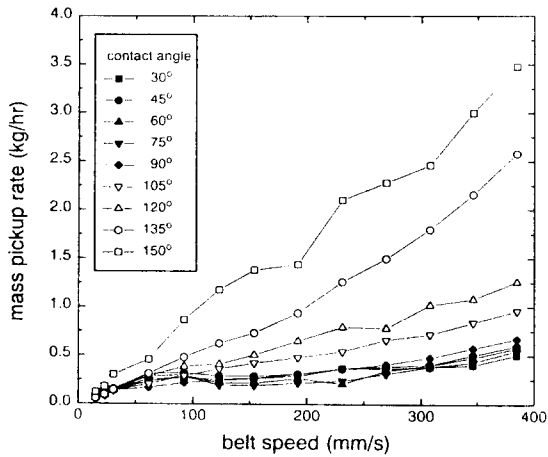


Fig. 3 Mass pickup rate of oil and water mixture vs belt speed for the case of upward pickup (slick thickness 1 mm, temperature 30°C)

Fig. 4는 이때 전유량중 양정된 디젤유만의 양정유량을 접촉각의 변화와 이송속도의 변화에 따라 나타낸 것이다. 여기서 디젤유의 양정유량은 이송속도 60 mm/s까지 급격한 증가를 보이며 60 - 90 mm/s의 이송속도에서 최대 양정유량을 보이다 이송속도의 증가에 따라 다시 감소하는 경향을 보이고 있고 접촉각이 작을수록 양정유량이 커지는 경향을 보이고 있다.

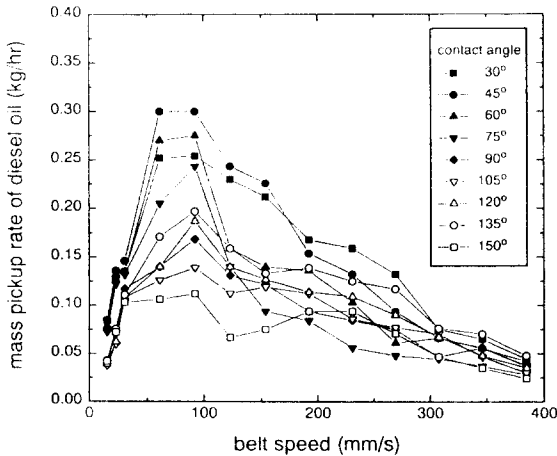


Fig. 4 Mass pickup rate of diesel oil vs belt speed for the case of upward pickup (slick thickness 1 mm, temperature 30°C)

이와 같은 양정유량의 변화는 벨트 접촉면에서의 기름의 유동 특성에 의하여 이루어지게 되며 이 경우 기름의 이송양정유량은 작은 이송속도에서 물보다 기름의 점성이 크므로 선부착된 물이 밀려나 기름이 벨트면에 부착되어 이송되어지게 되고 이송속도가 증가하면 이송유량이 증가하다 이송속도가 더욱 증가하게 되면 선부착된 물의 관성력에 의한 유동으로 부유된 기름이 벨트면 주위에서 밀려나게 되는 소위 스타베이션(starvation)<sup>7)</sup> 현상을 발생하게 된다. 또, 이때 밀려난 기름은 기름의 유동에 의하여 다시 확산되게 되며 결국 벨트 주위에 얇은 기름막을 형성하게 되는데 이와 같은 기름막은 벨트의 이송속도의 증가에 따라 더욱 얇아지게 되고 이송속도의 증가에 따라 양정유량은 감소되게 된다.

이와 같은 스타베이션 현상이 발생하기 시작하는 벨트의 선속도는 접촉각에 따라 차이가 나며 일반적인 경향은 벙커 C유를 사용한 경우 상항이송의 결과<sup>6)</sup>와 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

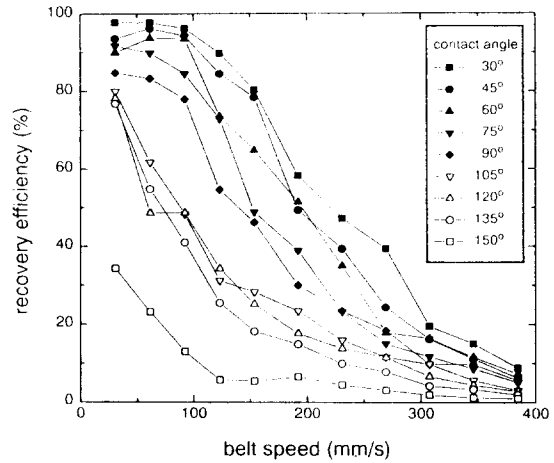


Fig. 5 Recovery efficiency vs belt speed for the case of upward pickup (slick thickness 1 mm, temperature 30°C)

또, Fig. 3에서의 전양정유량과 Fig. 4에서의 디젤유만의 양정유량을 비교하였을 경우 디젤유의 양정유량은 일반적으로 작은 접촉각에서 크게 증가하고 있으나 전양정유량은 접촉각이 증가함에 따라 단순 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는

접촉각이 작을 경우 기름의 양정유량의 증가에 의해 물이 잘 부착되지 못하기 때문이며 접촉각의 증가에 따라 스타베이션 현상으로 인해 기름의 부착유량이 감소하므로써 물의 부착유량이 오히려 증가하여 물의 양정유량이 증가함에 따른 것이다.

Fig. 5는 이때 전체 유량중 기름의 질량비 즉, R.E.(recovery efficiency)라고 알려진 값을 나타낸 것이다. 여기서 접촉각이 클수록 R.E. 값은 작아지고 이송속도의 증가에 따라 이후 급격히 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 3에서 접촉각 105° 이후의 경우에 유량은 급격히 증대되고 있고 곡선이 파형을 이루며 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 이와 같은 파형은 이송속도 90 mm/s 이상에서 확인될 수 있는데 이는 부착유량의 증대에 따라 부착 두께가 증대하게 되고 벨트의 이송중 이송유량의 일부가 벨트면을 타고 다시 유면으로 흘러내리게 되는데 이때 흘러내린 유체가 유면에 닿으며 벨트면에 접촉하고 있는 기름의 유막층을 밀어내게 되어 기름은 부착되지 않게 되고 이후 다시 밀려난 기름이 부착유량의 감소로 인하여 흘러내리는 유량이 없어지게 되므로 다시 밀려들어와 벨트와 접촉하게 되며 단속적인 접촉이 이루어지게 되며 따라서 Fig. 3에서와 같이 파형을 이루며 증가하게 된다. 또 계속 이송속도를 증가시킬 경우 이송속도 300 mm/s 이상에서는 이와 같은 흘러내림에 의한 파형은 발생되지 않게 되며 유량은 직선적인 증가를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 이송속도 90 - 300 mm/s의 구간에서의 흘러내림에 의한 벨트 접촉면에서의 유면의 유동은 규칙적인 유동을 보이며 이송속도가 클수록 빈도수가 증가하게 되고 벨트 주위로 부터 유면을 밀어내는 거리가 증가되어 이송속도 150 mm/s 이상에서는 기름의 양정유량을 급격히 감소 시키며 Fig. 4에서의 이송속도 120 - 150 mm/s에서의 기름의 급격한 양정유량 감소 및 큰 접촉각에서의 불규칙한 양정유량은 이와같은 현상에 의해 이루어진 결과이다.

또 접촉각이 작은 경우 상대적인 완만한 이송유량의 감소는 이와 같은 흘러내림에 의한 벨트 주위에서의 유면 유동이 작은 접촉각에서는 발생되지

않게 되기 때문이며 이는 벨트면에 부착된 유체가 벨트면을 타고 흘러내리지 못하고 직접유면에 떨어지게 되기 때문이다.

Fig. 6은 Fig. 4의 경우에서 디젤유만의 접촉각별 양정유량을 이송속도에 따라 나타낸 것이다. 여기서 작은 이송속도에서는 접촉각이 작을수록 이송양정유량이 크며 접촉각의 증가에 따라 이송양정유량이 감소하고 있음을 볼 수 있다.

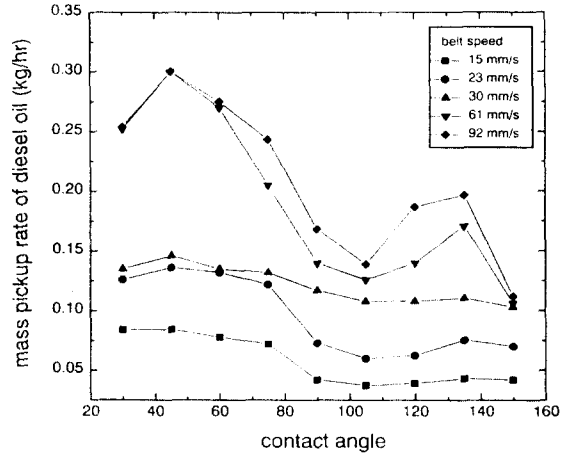


Fig. 6 Mass pickup rate of diesel oil vs contact angle for the case of upward pickup (slick thickness 1 mm, temperature 30°C)

이는 이송속도가 작을 경우에는 부착두께의 감소로 흘러내림에 의한 유량손실은 없게 되는데, 따라서 이와 같은 작은 이송속도에서의 이송양정유량의 차는 접촉각에 따른 부착유량이 작은 접촉각에서 크게 됨을 나타내고 있다. 또한 이송속도가 클수록 접촉각 45°에서 최대 유량을 보이고 있으며 접촉각의 증가에 따라 이송양정유량은 감소하다가 접촉각 105°에서 최소 유량을 보이고 있으며 이후 135°까지 증가하다 다시 감소되고 있음을 볼 수 있다. 이는 이송속도의 증가에 따른 유막두께의 증가에 의해 발생하는 흘러내림에 의한 유량손실이 접촉각이 90°일 경우 가장 크게 되고, 접촉각의 증대에 따라 위에서 보인 바와 같이 스타베이션 현상의 영향으로 인하여 부착유량이 감소하게 되는데 유량손실 및 부착유량의 영향으로 접촉각 105°에서 가장 작은 디젤유의 양정유량을

보이게 된다. 따라서 이상의 결과 상향이송에서의 디젤유의 이송양정유량은 접촉각 45°에서 가장 크게 되며 R.E.의 값 또한 가장 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 이와 같이 상향이송에서 가장 큰 회수유의 양정유량을 보이는 접촉각 45°에서 유막두께를 변화시켰을 경우 유막두께별 이송속도에 따른 디젤유의 양정유량을 나타낸 것이다. 전체적으로 유막두께의 증가에 따라 디젤유의 최대 양정유량은 증가하고 있으며 이때의 이송속도도 증가하고 있다. 이는 유막두께의 증가에 따라 유면과 벨트 접촉점에서의 스타베이션 현상에 의한 유막층의 변화량이 큰 유막두께에서 상대적으로 작아지게 되어 부착유량이 증대하므로 유막두께가 클 경우 유량은 증가하게 된다.

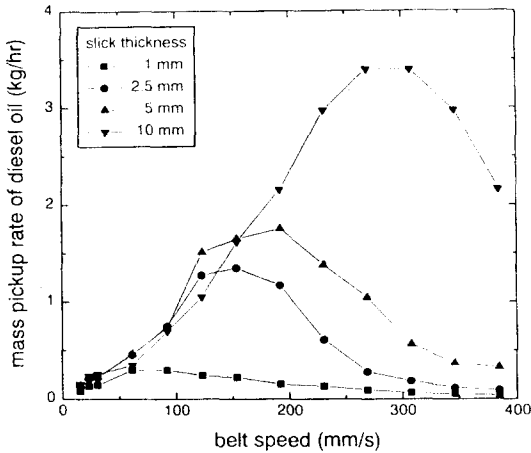


Fig. 7 Mass pickup rate of diesel oil vs belt speed for various slick thickness; upward pickup (temperature 30°C)

또, 접촉각 45°에서 유막두께 증가에 따른 전양정유량의 R.E.의 값을 Fig. 8에 나타내었으며 유막두께의 증가에 따라 R.E.의 값이 크게 증가하고 있으며 이는 유막두께가 큰 경우 확산의 증대로 스타베이션 현상이 작게 발생되어 기름의 부착유량이 증대되므로 이송유량중 물의 함량이 작게 된다. 즉, 유막층이 클수록 스타베이션 현상에 의한 유량 감소는 작아지게 되고 디젤유의 양정유량은 증대되게 된다.

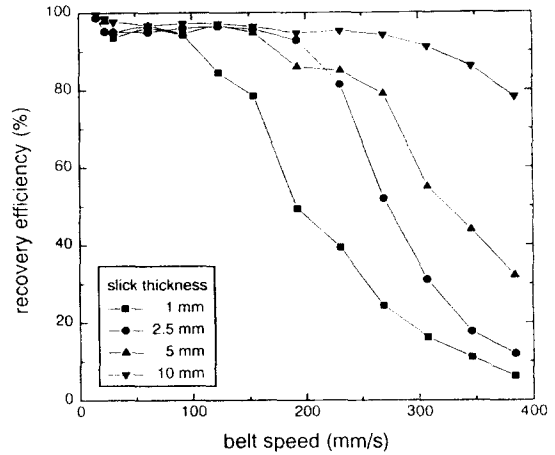


Fig. 8 Recovery efficiency vs belt speed for various slick thickness; upward pickup (temperature 30°C)

### 3.1.2 하향이송에 의한 양정유량

벨트에 기름이 먼저 부착되는 하향이송에서는 물이 선부착되는 상향이송의 경우와는 유동 특성이 다르게 된다.

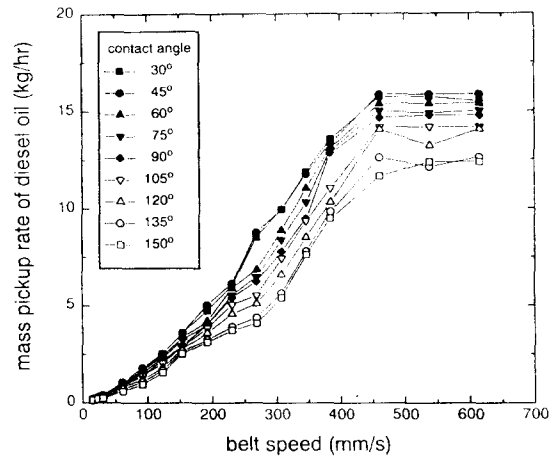


Fig. 9 Mass pickup rate of diesel oil vs belt speed for various contact angle; downward pickup (slick thickness 1mm, temperature 30°C)

Fig. 9는 하향이송에서 접촉각을 변화시켰을 경우 이송속도에 따른 접촉각별 이송양정유량을 나

타내었으며 이때 유막두께는 1 mm의 경우를 나타낸 것이다. 이 때 벨트의 최대 선속도가 상당히 높은 곳까지 실험 결과를 보였으며 상향 이송시는 400 mm/s 이상의 범위는 별 의미가 없어 보였음을 밝힌다. 하향이송에서의 양정유량중 물의 함량은 매우 미소하여 거의 나타나지 않았으며 R.E.의 값은 99 % 이상이었다. 여기서 이송양정유량은 이송속도의 증가에 따라 증가하고 상향이송에서와 같이 대체로 접촉각이 작을수록 양정유량은 증가하고 있으며 다만 접촉각 45°에서 접촉각 30°인 경우보다 모든 이송속도에서 약간 많은 양정유량 값으로 최대유량을 보였다. Fig. 10은 이 경우의 이송속도별 이송양정유량을 접촉각에 따라 나타낸 것이며 상향이송에 의한 경우와는 달리 총 유량에 대한 각도의 영향은 적으며 최대 양정유량은 접촉각 45° 근처에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

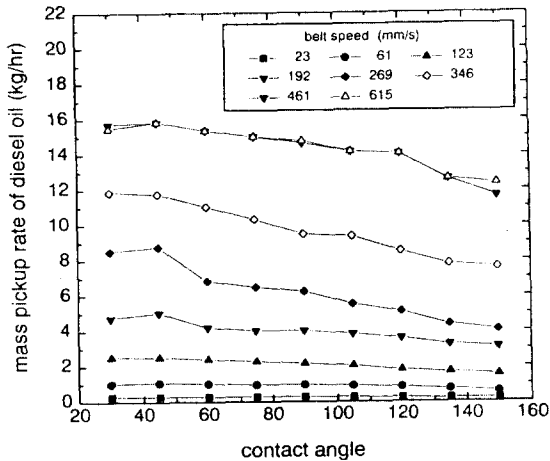


Fig. 10 Mass pickup rate of diesel oil vs contact angle for various belt speed; downward pickup (slick thickness 1mm, temperature 30°C)

이와 같은 접촉각에 따른 이송양정유량의 변화량은 접촉각에 따른 기름의 초기 부착량의 차에 의한 것이며 이송속도의 증가에 따라 상향이송에서와 같은 흘러내림에 의해 유막층이 밀려나 발생되는 스타베이션 현상은 하향이송에서는 기름이 선부착되게 되어 하향이송되게 되므로 거의 발생하지 않았다. 따라서 이와 같은 접촉각의 변화에 따

른 양정유량의 변화량은 접촉각에 따른 초기 부착유량의 영향이 가장 크다는 것을 확인할 수 있다.

또, Fig. 9에서 이송속도 270 - 380 mm/s에서 접촉각별 이송유량이 급격히 큰 차이를 보이며, 특히 접촉각 30° - 45°에 비해 접촉각이 클수록 이송양정유량이 상대적으로 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있는데 이는 부착이송유량이 상향이송에 비하여 하향이송에서 크게 증가되어 부착두께가 증가하게 되고 이로 인하여 이송중 벨트면을 타고 흘러내리게 되는 기름이 벨트 회전부에 분명한 홈을 이루는 불안정한 상태를<sup>8)</sup> 형성하게 되며 이와 같은 불안정한 상태는 접촉각이 클수록 크게 발생함을 가지적인 관찰을 통하여 확인할 수 있었으며 접촉각이 작을 경우에는 거의 발생되지 않는다. 따라서 이송속도 270 - 380 mm/s에서의 접촉각별 이송유량의 급격한 차는 이와 같은 유동의 불안정한 상태에 의한 영향이며 380 mm/s 이상의 이송속도에서는 나타나지 않았으며 이 속도가 흘러내리는 유량 발생의 임계속도로 유추된다. 여기서 상향이송시 흘러내림에 의한 유면의 파형이 120 - 150 mm/s의 이송속도에서 나타났으나 하향이송에서는 270 - 380 mm/s의 이송속도에서 흘러내림에 의한 불안정 상태가 발생되고 있는 것은 상향이송시에는 물이 선부착되게 되어 이송속도의 증가에 따라 물과 기름의 혼합물이 양정되고 있으나 하향이송시에는 거의 기름만이 양정되게 되므로 기름의 큰 점성에 의하여 벨트면에 부착되는 유량이 증가되어 양정유량은 증가되게 되지만 부착두께를 증가시켜 부착두께 외부 경계면에서의 중력에 의해 흘러내리게 되는 유속을 증가시켜 이에 의한 손실유량이 더 큰 이송속도에서 나타나게 된다.

또, Fig. 9에서 이송속도의 증가에 따라 증가된 이송유량은 모든 접촉각에서 이송속도가 약 460 mm/s 이상일 때 이송속도의 증가에 관계없이 일정한 양정유량을 보이고 있다. 일정 속도 이상에서 이러한 일정한 양정유량을 보이고 있는 것은 선부착되어 이송되고 있는 기름이 수증을 통과할 경우 물과의 상대속도에 의한 마찰저항이 이송속도의 증가에 따라 증가하게 되며, 특히, 회전부에서 원심력에 의하여 벨트 부착면으로 부터 기름이 작은 알갱이의 형태로 무화되어 이탈되므로 유량손실을



가져오게 되고 이송속도의 증가에 따라 유량손실도 증가하게 된다. 따라서 이송속도의 증가에 따라 단위 시간당 벨트에 부착되는 부착유량은 증가하게 되지만 유량손실이 증가하게 되어 일정한 양정유량을 나타내게 되며 흥미로운 결과이다.

Fig. 11은 하향이송에서 가장 큰 이송양정유량을 갖는 접촉각 45°에서 유막두께의 변화에 따른 이송양정유량을 이송속도별로 나타낸 것이다. 여기서 동일한 이송속도에서는 최대 이송양정유량을 나타내기 전까지는 유막두께의 변화에 관계없이 일정한 유량을 보이고 있다. 하지만 최대 이송양정유량을 갖는 이송속도는 유막두께가 증가함에 따라 증가하고 있으며 최대 양정유량 역시 증가하였다. 이후 최대 양정유량에 도달하게 되면 앞에서 설명한 바와 같이 이송속도가 증가하여도 양정유량은 일정하게 나타나고 있다.

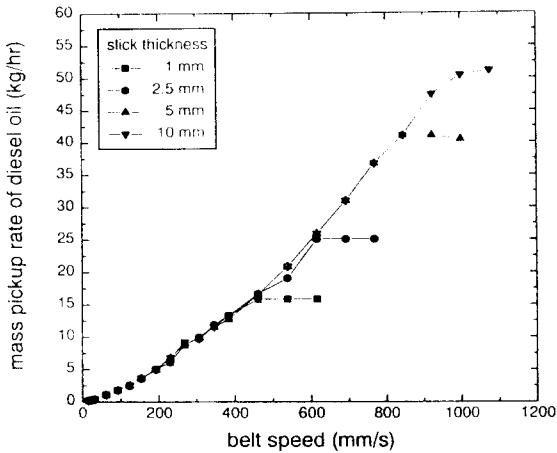


Fig. 11 Mass pickup rate of diesel oil vs belt speed for various slick thickness; downward pickup (contact angle 45°, temperature 30°C)

Fig. 12는 접촉각을 45°, 90°, 135°로 변화시켰을 경우 유막두께에 따른 이송양정유량을 이송속도별로 나타낸 것이며 접촉각의 증가에 따라 전체적인 양정유량은 감소하고 있지만 접촉각 45°인 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다. 다만 접촉각이 클수록 이송속도 270 - 380 mm/s에서 양정유량이 특히 더 저하되고 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 9에

서 고찰한 바와 같은 불안정한 상태에 의한 영향이 유막두께의 변화에 관계없이 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

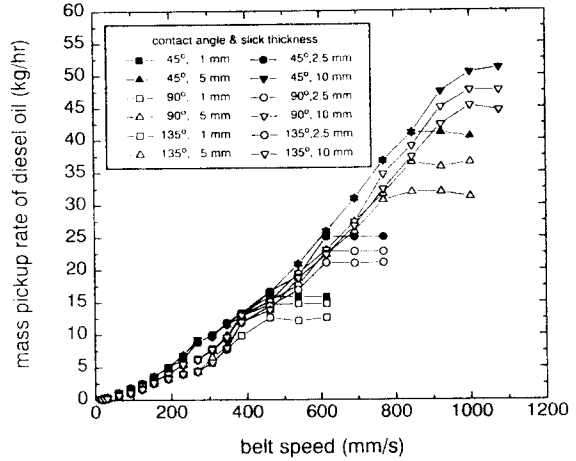


Fig. 12 Mass pickup rate of diesel oil vs belt speed for various contact angle and slick thickness; downward pickup (temperature 30°C)

### 3.1.3 상하향이송에 의한 양정유량

Fig. 13은 상하향이송에서 접촉각이 45°인 경우 유막두께 변화에 따른 이송속도별 양정유량을 감

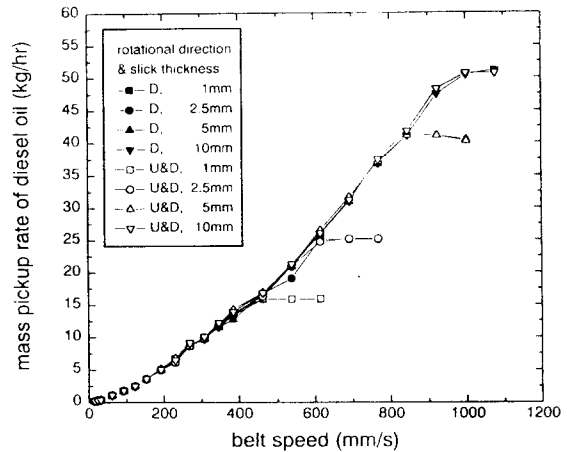


Fig. 13 Comparison of mass pickup rate of downward pickup(D) and up and downward pickup(U&D) for various slick thickness. (contact angle 45°, temperature 30°C)

은 조건하의 하향이송의 경우와 비교한 것이다. 하향이송(D)과 상하향이송(U&D)에서의 양정유량은 상하향이송에서 이송속도가 큰 경우 하향이송에 비해 미소한 증가를 보이고 있으나 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 하향이송에 비하여 상향이송에 의한 양정유량이 매우 적으며 상하향이송에서는 하향이송에 의해 양정 과정의 거의 대부분이 결정되고 있으며 상향이송은 양정에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

상하향이송시 접촉각 45°, 90°, 135°에서 유막두께 변화에 따른 이송양정유량을 이송속도에 따라 나타내 보면, 이 결과 역시 Fig. 12에서의 하향이송에서와 같은 결과를 보이고 있어 다시 보이지 않았다.

### 3.2 벙커 C유의 유회수율과의 비교

이상에서 벨트식 유회수기의 유회수 조건에 따른 디젤유의 유회수율에 관하여 고찰하였으며, 또 유회수율은 유회수기의 유회수 조건뿐아니라 작업 유체의 물리적 성질, 특히 기름의 점성에 의해 크게 좌우된다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 벙커 C유를 사용한 실험 결과는 다른 논문<sup>10)</sup>에서 발표하였으므로 여기서는 간단한 비교만을 보이기로 하겠다.

Fig. 14는 유막두께가 5, 10 mm인 경우 디젤유와 벙커 C유의 이송속도별 양정유량을 비교한 것이다. 디젤유인 경우에는 유막두께의 변화에 관계없이 Fig. 12에서 보인 바와 같이 최대 양정유량을 갖는 값보다 작은 이송속도에서 모두 일정한 양정유량을 보이고 있으나 벙커 C유에서는 유막두께 변화에 따라 모든 이송속도에서 양정유량의 차이를 보이고 있다. 또, 디젤유에서는 최대 양정유량이 이송속도가 증가하여도 일정한 양정유량을 나타내고 있으나 벙커 C유에서는 최대 양정유량을 갖는 점 이후 이송속도의 증가에 따라 급격히 감소하고 있는데 이는 디젤유에서는 물과의 상대속도에 따른 마찰저항과 회전부에서의 원심력에 의해 부착유체가 이탈되지므로 양정유량의 손실을 가져오게 되어 최대 양정유량을 보이나 벙커 C유에서는 스타베이션 현상에 의하여 부착유량이 급격히 감소하므로 최대 양정유량 이후 급격한 양정유량의 감소를 가져기 때문이다.

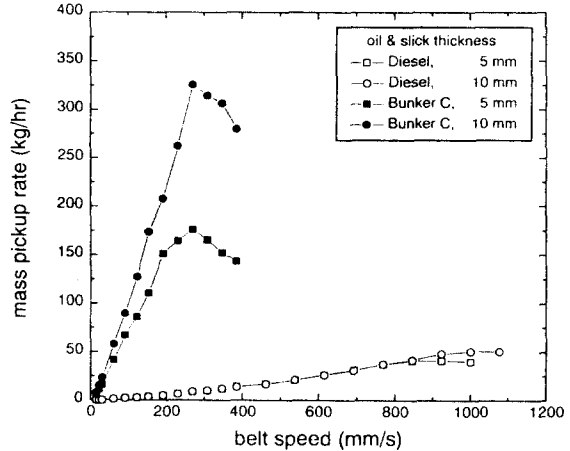


Fig. 14 Comparison of mass pickup rate of diesel oil and bunker C oil for the case of downward pickup (contact angle 45°, slick thickness 5 mm and 10 mm, temperature 30°C)

이상의 결과 벨트식 유회수기는 중질유(中質油) 및 중질유(重質油)에 효과적인 회수율을 보였으며 특히, 중질유(重質油)의 회수에서 높은 회수율을 보였고 하향이송 접촉각 45°에서 가장 양호한 회수율을 보였다.

또한 이상의 결과로부터 유막두께 5 mm 또는 10 mm인 경우 최대 양정유량을 갖는 적정 이송속도는 디젤유의 경우 850 - 1000 mm/s에서 적정 이송속도가 발견되며, 벙커 C유인 경우 270 - 300 mm/s에서 적정 이송속도를 발견할 수 있다. 따라서 적정 이송속도는 고점도 유체인 경우 점도의 증가에 따른 스타베이션 현상의 영향으로 감소되게 됨을 알 수 있다.

## 4. 결 론

벨트식 유회수기의 이송방법, 접촉각, 이송속도, 유막두께 등의 유회수 조건에 따른 유회수율과 이에 미치는 영향을 디젤유를 사용한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 디젤유의 경우 상하이송에서는 벨트에 부착 이송되고 있는 유체의 자중에 의한 흘러내

림에 의해 유막층이 밀려났다 다시 확산되어지는 반복적인 파형이 발생되어지며 벙커 C유의 경우와 마찬가지로 이로 인한 스타베이션 현상의 발생으로 이송속도가 커질수록 디젤유의 양정유량은 감소하게 되고 최대 양정유량은 작은 이송속도에서 이루어지게 되며 이송속도가 증가할수록 R.E.의 값은 감소한다. 이와 같은 파형에 의한 스타베이션 현상은 접촉각이 클수록 증가하게 되며 총 양정유량은 접촉각 45°에서 가장 크게 되고, 105°에서 가장 작은 이송양정유량을 갖게 되며 접촉각의 증가에 따라 양정유량은 증가하다 135° 이상에서는 스타베이션 현상의 영향의 증대로 다시 감소하게 된다.

- (2) 디젤유인 경우 디젤유가 선부착되게 되는 하향이송 및 상향이송에서는 양정유량이 같은 조건에서 상향이송에 비해 약 5 - 20배의 큰 총양정유량을 보이며 R.E.의 값은 99 % 이상으로서 상향이송은 양정유량에 거의 영향을 미치지 않는다. 이때 하향이송에서의 양정유량은 접촉각에 따른 부착유량으로 인해 접촉각 45°에서 최대 양정유량을 보이며 수중에서 벨트이송시 물과의 상대속도에 의한 마찰저항과 벨트 회전부에서의 원심력에 의한 부착유체의 이탈에 따른 유량손실에 의해 일정이송속도 이상에서 일정한 양정유량을 보이는 벙커 C유의 경우와는 다른 현상을 보였으며 이러한 임계 이송속도는 유막두께의 증가에 따라 최대 양정유량 및 임계 이송속도는 증가하게 된다.

또, 하향이송시 디젤유의 경우 스타베이션 현상은 거의 발생하지 않았으며 유동의 불안정한 상태는 270 - 380 mm/s의 한정된 이송속도 구간에서만 발생하였다.

- (3) 벙커 C유인 경우 양정유량은 스타베이션 현상에 의한 부착유량과 불안정한 상태에 의한 유량손실에 의하여 주로 영향을 받으며 스타베이션 현상은 접촉각이 클수록 작은 이송속도에서 발생되어지게 되며 유동의 불안정한 상태는 접촉각 및 점성이 클수록 크게 발생되어지게 되고, 따라서 접촉각이 이

송양정유량에 미치는 영향이 디젤유의 경우보다 크게 되며 최대 양정유량은 디젤유에서와 같이 접촉각 45°에서 나타난다. 이때 최대 양정유량을 갖는 이송속도는 스타베이션 현상이 발생되기 직전의 이송속도로서 이러한 임계 이송속도는 디젤유의 경우보다 작은 이송속도에서 나타난다.

이상의 결과를 종합하면 벨트식 유회수기를 사용할 경우 작업유에 관계없이 하향이송, 접촉각 45°에서 가장 효과적인 유회수율을 가지며 작업유의 종류 및 유막두께에 따라 최대 양정유량을 갖는 임계 이송속도가 존재하며 이에 맞추어 적정 운전속도로 정하는 것이 중요하다.

### 참고문헌

- 1) 현범수의 10인, 해양오염 방제 기술 개발(I), 한국기계연구원 연구보고서, 환경부, 과학기술처, 1993
- 2) 이봉길, 유류오염 현황과 대책, 해양오염 방제 기술에 관한 세미나, 해양경찰청, pp. 6-7, 1995
- 3) Meyer, R. J. and Associates, Research Planning Institute, Inc., "Oil Spill Response Guide," Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., pp. 97-123, 1989
- 4) Athantic Research Systems Division Marine Systems, A Division of the Susquehanna Corporation Costa Mesa, California 92626, "Recovery of Floating Oil Rotating Disk Type Skimmer," Water Quality Office Environmental Protection Agency, Project #1508FWN, p. 25, July 1976
- 5) Norton, R. W. and Lerch, D. W., "An Oil Recovery System for Sanfrancisco Bay Area," Preceedings of the 1977 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washing D. C., p. 321, 1977
- 6) 송동업, 윤경환, "벨트식 유회수기의 회전방향이 유회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집(B), 제 21권, 제 5호,

p.2237, 1997

- 7) Athantic Research Systems Division Marine Systems, A Division of the Susquehanna Corporation Costa Mesa, California 92626, "Recovery of Floating Oil Rotating Disk Type Skimmer," Water Quality Office Environmental Protection Agency, Project #1508 FWN, p. 97, July 1976
- 8) Joseph, D. D. and Renardy, Y. Y., "Fundamentals of Two-Fluid Dynamics", IAM 3, Springer-Verlag, p. 87, 1992
- 9) Mansfield, B., Lorenzo, T. and Whittaker, H., "Effects of Oil Viscosity and Emulsification on Skimmer Performance," Second International Cooperative Reaserch 23-26, Vol. 1, pp. 145-152, May 1995
- 10) 송동업, 윤경환, "벨트식 유회수기의 각도가 벙커 C유의 회수율에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 투고중, 1997