

## 벨트식 유회수기의 유회수율 데이터의 무차원화 과정에 관한 연구

윤경환<sup>(1)</sup>

### A Study on the Nondimensional Analysis for the Recovery Rate of Oil Using a Belt Type Skimmer

by

Kyunghwan Yoon<sup>(1)</sup>

#### 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 by adhesion method is known to be closely related with the problem of estimating the thickness of film remaining on the surface of solid withdrawn from a quiescent liquid. In the present study a series of experimental results are compared with the analytic estimation for the thickness of film remaining on the solid surface using non-dimensional analysis. For the case of pure water both results show the remarkable agreement. However, discrepancy has been found for the case of Bunker C oil and diesel oil. The analytic estimation over-predicts the experimental value for the case of Bunker C oil and under-predicts it for the case of diesel oil. Further study is required to investigate the real situation including a contact angle and the property difference between oil and water.

Keywords : belt type skimmer(벨트식 유회수기), oil spill(누유), Buckingham Pi Theorem

#### 1. 서론

하천이나 해상에서의 누유에 대한 방제 방법으로 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 방법이라고 판단된다. 기계적인 유회수 방법은 일반적으로 내륙이나 항구 등에서 한정적으로 사용되었으며 최근에는 오일 붐의 설치로 유막 두께를 크게 하여 외해에서의 사용도 증가되고 있다. 하지만, 이러한 유회수기는 이동 및 조립시간, 해상상태, 기름막의 두께, 기름의 점도 등에 의해 제약을 받게 되므로 효과적인 유회수를 위하여 누유 확산에 관한 예측(Meyer[1989])과 함께 유회수기의 성능에

(1) 정회원, 단국대학교 기계공학과

대한 체계적인 연구가 필요하게 되었다.

유회수기에는 여러 형태가 개발되어 사용되고 있으며 유회수기는 그 작동 원리에 따라 흡착식, 부착식, 흡입식, 웨어(weir)식 등으로 그 특성이 다르다(Atlantic[1976]),(Norton[1977]),(현범수[1997]).

본 논문에서는 부착식의 일종인 무한궤도를 사용한 벨트식 유회수기(belt skimmer)를 채택하여 벨트의 회전방향 및 접촉각, 유막 두께, 선속도 등의 유회수 조건의 변화가 유회수율에 미치는 영향을 실험을 통해 얻은 결과(송동업[1997])들을 해석하기 위한 기본적인 과정으로 차원 해석과 수치적 해석을 통한 회수율의 예측에 관한 연구 내용을 포함시켰다.

## 2. 무차원 파라미터의 해석

### 2.1 Buckingham Pi Theorem의 적용

무차원 파라미터를 찾는 가장 기본적인 연구를 작동 유체가 하나인 경우 벨트가 수면에 수직인 경우에서 시작해 본다. 우선 벨트면에 형성되어진 유막의 두께  $h_0$ 를 벨트의 선속도  $v_0$ , 중력의 영향을 고려한 비중량  $\rho g$ , 점성력을 고려한 기름의 점성계수  $\mu$ , 표면장력을 고려한 표면장력계수  $\sigma$ 의 함수로 가정하여 Buckingham Pi Theorem을 적용시켜 보면 다음과 같은 무차원 파라미터의 함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\pi_1 = f(\pi_2) \quad \text{또는} \quad h_0 \left( \frac{\rho g}{\mu v_0} \right)^{1/2} = f \left( \frac{\mu v_0}{\sigma} \right) \quad (1)$$

이 결과는 아주 간단한 형태로 벨트 면에 형성되어진 유막의 두께  $h_0$ 가 어떠한 무차원 함수로 표시될 수 있는가를 나타내는 첫 출발점으로 알려져 있다.

### 2.2 표면장력을 고려한 단일유체의 유막 두께의 계산

벨트가 90°의 각도를 이루며 수직 상향으로 움직일 때 유막의 두께를 이론적으로 계산하는 문제는 Jeffreys(Jeffreys[1930])가 중력과 점성력만을 고려하여 시도하였으나 실패하였고 이후 Levich

(Levich[1962])가 표면장력을 포함시켜 다음과 같은 과정을 거쳐 상당히 실험치와 근사한 관계를 구하였으므로 그 과정을 따랐으며 과정 중 오류가 있는 부분들은 수정을 가하였다.

수직 상향으로 움직이는 평판 주위의 유체는 다음의 세 가지의 원인에 의해 움직이게 된다.

- 1) 평판의 운동으로 그 선 운동량이 주위의 점성 유체에 전달되어지는 현상.
- 2) 중력에 의해 흘러내리는 현상.
- 3) 유체 표면에 작용되는 capillary 압력에 의해 평판 주위에 meniscus를 형성하는 현상.

Fig. 1에 보이는 바와 같이 수평 유면에서의 수직 상방향으로의 거리를  $x$ 라 하고 그 때의 평판에서의 유면의 두께를  $h$ 라 하면 위의 절에서 가정한 바와 같이  $h$ 는 다음의 함수 형태로 표시될 수 있으며  $h = f(v_0, \mu, \rho g, \sigma)$  또한  $h = h(x)$  이다.

한편, 해석을 위해 두 개의 구간으로 나누어 평판으로부터 거리가 상당히 떨어진 곳에서는 meniscus가 거의 변하지 않은 채 남아 있게 되는 구간(편의 상 구간 1이라 명명)과 유체의 자유표면으로부터 충분히 높은 곳에서는 필름의 두께는 충분히 얇으며 유체의 운동이 직선적인 구간 2로 나눌 수 있다. 구간 1에서는 다음의 식 (2)에 의한 평형방정식이 성립한다.

$$\frac{\frac{d^2 h}{dx^2}}{\left[ 1 + \left( \frac{dh}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{\rho g x}{\sigma} \quad (2)$$

위의 식을 적분하면

$$\frac{\frac{dh}{dx}}{\left[ 1 + \left( \frac{dh}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\rho g x^2}{2\sigma} + c \quad (3)$$

$x$ 가 0에 가까워질 때  $c$ 가 -1 이 됨을 알 수 있으며 이로부터  $x$ 가 아주 크며  $h$ 가 작아지는 구간에서는  $\frac{dh}{dx}$  가 0에 근접하는  $x$ 의 값을 구할 수 있으며 이는  $\sqrt{2} \left( \frac{\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}}$  가 됨을 구할 수 있다.

한편,

$$\frac{d^2 h}{dx^2} \rightarrow \frac{\rho g x_t}{\sigma} = \frac{\rho g}{\sigma} \cdot \sqrt{2} \left( \frac{\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} \left( \frac{\rho g}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

가 되며 이 1 구간의 해는 다음의 조건을 만족시킬 때 구간 2의 해에 근접하게 됨을 알 수 있다.

$$h \rightarrow 0, \quad \frac{dh}{dx} \rightarrow 0, \quad x \rightarrow \sqrt{2} \left( \frac{\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{d^2 h}{dx^2} \rightarrow \sqrt{2} \left( \frac{\rho g}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

한편, 구간 2에서는  $v_x \gg v_y$  인 경계층 내의 유동과 같으며 정상 상태에서 표면장력을 포함한 다음의 식으로 나타낼 수 있으며

$$\frac{\sigma}{\rho} \frac{d^3 h}{dx^3} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - g = 0 \quad (5)$$

경계조건으로는 다음의 두 조건을 쓸 수 있다.

$$v_x = v_0 \quad \text{at} \quad y=0 \quad (6)$$

$$\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \quad \text{at} \quad y=h(x) \quad (7)$$

(5)식을 풀면 다음과 같은 속도 분포를 구할 수 있으며

$$\therefore v_x = v_0 - \left( -\frac{\rho g}{\mu} + \frac{\sigma}{\mu} \frac{d^3 h}{dx^3} \right) \left( \frac{y^2}{2} - hy \right) \quad (8)$$

단위 폭 당 유량을 다음과 같이 놓고 (8)식을 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{Q}{w} &= Q_1 = \int_0^{h(x)} v_x dy = \text{const} \\ Q_1 &= v_0 h + \left( -\rho g + \sigma \frac{d^3 h}{dx^3} \right) \frac{h^3}{3\mu} \end{aligned} \quad (9)$$

을 구할 수 있으며  $Q_1 = f(v_0, \rho g, \sigma, \mu)$  이라 놓고 다음의 두 개의 무차원 변수를 이용하여 (5)식을 간단히 고쳐보면

$$\lambda \equiv \left( \frac{3\mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{v_0^{\frac{4}{3}}}{Q_1} x, \quad L \equiv \frac{v_0 h(\lambda)}{Q_1} \quad (10)$$

다음의 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^3 L}{d\lambda^3} - \frac{1}{L^3} + \frac{1}{L^2} - \frac{\rho g Q_1^2}{3\mu v_0^3} = 0 \quad (11)$$

한편, 다음의 네 조건 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} L \rightarrow 1, \quad \frac{dL}{d\lambda} \rightarrow 0, \quad \frac{d^2 L}{d\lambda^2} \rightarrow 0 \quad \text{as} \quad \lambda \rightarrow \infty \quad \text{and} \\ \left( \frac{d^2 L}{d\lambda^2} \right)_{L \rightarrow 0}^{\text{구간 1}} = \left( \frac{d^2 L}{d\lambda^2} \right)_{L \rightarrow \infty}^{\text{구간 2}} = \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

식 (2)를 만족시키는 조건을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\left( \frac{d^2 L}{d\lambda^2} \right)_{L \rightarrow 0}^{\text{구간 1}} \rightarrow \sqrt{2} \left( \frac{\rho g}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{Q_1}{v_0^{\frac{5}{3}}} \left( \frac{\sigma}{3\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

식 (11)의 마지막 항이 작아 무시할 수 있는 조건에서의 값을 구하면  $\alpha = 0.63$ 이 되어 최종적으로

$$Q_1 = \frac{0.63}{\sqrt{2}} 3^{\frac{2}{3}} \frac{v_0^{\frac{5}{3}} \mu^{\frac{2}{3}}}{\sigma^{\frac{1}{6}} (\rho g)^{\frac{1}{2}}} = 0.93 \frac{v_0^{\frac{5}{3}} \mu^{\frac{2}{3}}}{\sigma^{\frac{1}{6}} (\rho g)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

으로 구할 수 있으며 유막의 두께  $h_0$ 에 대해 정리하면 다음의 최종 식으로 정리할 수 있다.

$$h_0 = \frac{Q_1}{v_0} = 0.93 \frac{v_0^{\frac{2}{3}} \mu^{\frac{2}{3}}}{\sigma^{\frac{1}{6}} (\rho g)^{\frac{1}{2}}} = \left( \frac{\mu v_0}{\rho g} \right)^{1/2} 0.93 \left( \frac{\mu v_0}{\sigma} \right)^{1/6} \quad (15)$$

이 해는 단일유체로 실험하는 경우 수직평판 위에 남아있는 유막의 두께를 추정할 수 있는 식으로 많은 가정을 수반하지만 실험의 결과들과의 비교, 분석에 크게 도움을 줄 수 있으며 특히, 유막 두께의 상한선을 알 수 있는 중요한 자료로 사용될 수 있다.

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

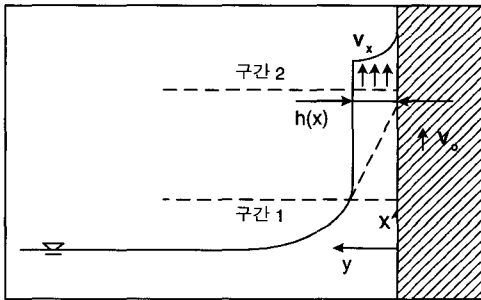


Fig. 1 Schematics & coordinate system

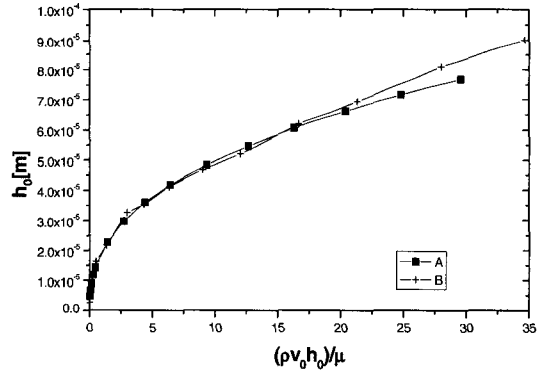


Fig. 3  $h_0$  vs Re # (water only)

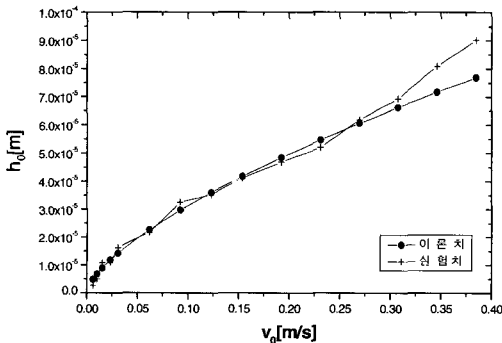


Fig. 2  $h_0$  vs  $v_0$  (water only)

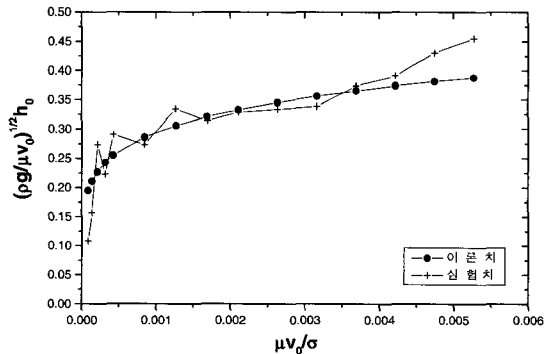


Fig. 4  $\pi_1$  vs  $\pi_2$  (water only)

### 3. 해석 결과 및 고찰

아직 이론적인 해석의 수준이 기름이 물 위에 부유하는 경우의 해를 알 수 없으므로 단일 유체의 결과식인 (15)를 이용하여 물만의 경우, 벙커 C유의 경우 및 디젤유가 부유한 경우의 실험 결과들과 비교해 보는 순서로 진행해 본다.

#### 3.1 순수한 물을 사용한 경우와의 비교 결과

Figure 2에는 순수한 물만을 사용한 실험 결과를 Table 1에 제시한 물성치를 식 (15)에 대입한 결과와 함께 그래프로 실험에서 사용한 범위의 선속도의 함수로 나타내었다.  $v_o$ 가 약 0.27 m/s까지의 구간에서는 놀랍게도 거의 실험의 오차 범위내로 일치함을 볼 수 있다.  $v_o$ 가 0.27 m/s 이상인 구간에서는 실험 결과가 예상치보다 커지는 경향을 보이고 있으며 이는 수직 평판을 흘러내리는 유체 필름의 유동의 결과로 얻어지는 Re 수( $\equiv v_o h_o / \nu$ )가 약 20~30 이상이 되면 capillary wave의 현상을 나타내며 laminar flow에서 벗어나는 것으로 설명할 수 있다. 실제로  $h_o$ 를 Re 수의 함수로 Fig. 3에 나타내 본 결과 약 20에서부터 예측 결과와 벗어나는 것을 알 수 있다. 2절에서 구한 무차원 파라미터들을 이용한 결과는 Fig. 4에 보이고 있으며 물의 경우에는 위에서 보인 해석 결과들이 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 3.2 벙커 C유를 사용한 경우와의 비교 결과

Figure 5에는 순수한 벙커 C유만을 사용한 실험 결과를 역시 Table 1에 제시한 물성치를 식 (15)에 대입한 결과와 함께 나타내었다. 모든 구간에서 실험 결과가 예상치의 약 반으로 나타났으며 이에 대한 설명은 모든 실험을 30°C에서 수행했는데 그에 상응하는 조건에서의 물성치의 측정을 측정기관에 부탁하여 수행하였으므로 정확한 shear strain rate의 정보가 없어 그대로 2절의 예측 결과식에 대입할 수 있는지 의문이다. 한편, 2절의 해석은 유막의 두께가 아주 작다는데 근거하지만 실제 벙커 C유의 실험 결과에 적용할 수 있는가 또한 의문이다. Fig. 5에 벙커 C유가 부유하는 경

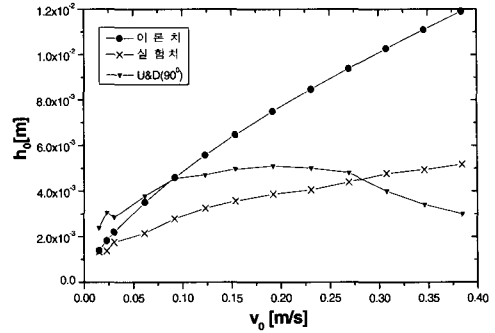


Fig. 5  $h_o$  vs  $v_o$  (Bunker C only)

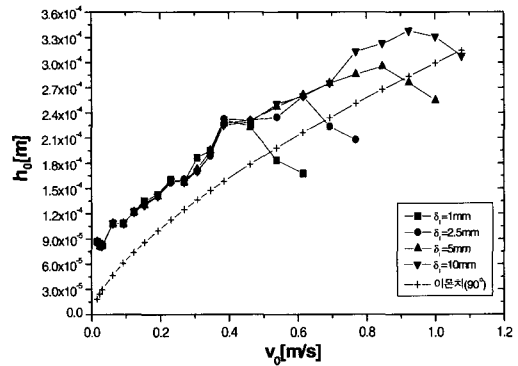


Fig. 6  $h_o$  vs  $v_o$  (Diesel oil)

우의 실험 결과도 함께 표시하였으며  $v_o$ 가 약 0.10 m/s 이상에서는 유막의 두께가 거의 일정하다 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 벙커 C유가 부유하는 경우 Re 수가 아주 낮은 상태에서도 이러한 현상이 발생한다는 사실도 연구의 대상이라고 생각된다.

#### 3.3 디젤유를 사용한 경우와의 비교 결과

Figure 6에는 순수한 디젤유만을 사용한 실험 결과가 없어 기름의 두께가 각기 다르게 부유한 경우의 실험 결과를 역시 Table 1에 제시한 물성치를 식 (15)에 대입한 결과와 함께 나타내었다. 모든 구간에서 실험 결과가 식 (15)의 예상치보다 약간 크게 나타났으며 벙커 C유가 부유하는 경우와 마찬가지로 어느 임계 속도 이상에서부터는 벨트의 속도를 증가시켜도 유막의 두께가 서서히 감소하는 경향을 보인다.

#### 4. 결론

벨트식 유회수기를 사용한 실험 결과를 해석하는 첫 단계로 단일 유체를 사용한 평판이 수직 상향으로 움직이는 경우 유막의 두께를 해석한 결과와의 비교를 통해 유용한 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

순수한 물 만의 경우에는 예측치와 실험치가 놀랍게도 잘 일치하나 벙커 C유나 디젤유의 경우에는 아직도 물성치에 대한 조사나 측정을 추가하여 연구해야 함을 알 수 있었다

한편, 2절에서 보인 무차원화 과정에 유막의 두께를 함수 형태로 나타낸 식에 기름이 물에 부유한 경우와 벨트가 각을 이루는 경우에는 dependent parameter로 점축각, 점성계수의 비, 밀도비와 처음 부유한 기름의 두께등을 포함한 연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 송동업, 윤경환, “벨트식 유회수기의 운전조건과 유회수율의 관계에 관한 연구”, 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 1997, pp. 169-178
- [2] 현범수, “유회수기의 유체역학적 특성”, 한국해양환경공학회지 제1권 1호, 1997, pp. 66-82.
- [3] Atlantic Research Systems Division Marine Systems, “Recovery of Floating Oil Rotating Disk Type Skimmer”, A Division of the Susquehanna Corporation Costa Mesa, California 92626, Water Quality Office Environmental Protection Agency, Project #1508FWN, July, 1976, p. 25.
- [4] Jeffreys, H., Proc. Cambr. Phil. Soc., Vol. 26, 1930, p. 204
- [5] Levich, V. G., “Physiochemical Hydraulodynamics”, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A., 1962, Chap. 7.
- [6] Meyer, R. J. and Associates, “Oil Spill Response Guide,” Research Planning Institute, Inc., Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1989, pp. 97-123.
- [7] Norton, R. W. and Lerch, D. W., “An Oil Recovery System for Sanfrancisco Bay Area,” In Proceedings of the 1977 Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washing D. C., 1977, p. 321.