

論 文

흡착식 유회수기 표면에 부착된 유막의 안정성 해석

현 범 수* · 김 장 환**

A stability analysis of oil film on an adhesion-type oil skimmer

B. S. Hyun · J. W. Kim

〈 목 차 〉

Abstract

- 1. 서 론
- 2. 정상해석

- 3. 평행부 유동의 안정성 해석
- 4. 결 론
- 참고문헌

Abstract

To determine an operational condition of an adhesion-type oil skimmer, it is important to estimate the withdrawal rate for a given driving velocity of the skimmer and material properties of the oil. As a theoretical model for this problem the formation of an oil film on a vertically driven flat plate is investigated. The previous steady-state analysis made in the field of coating industry are reviewed. These studies have been made under the assumptions of small Reynolds and capillary number, which is adequate for coating process but not for oil skimming. An alternative analysis based on the linear stability theory is made. Comparisons with the experimental results reveal that the stability analysis gives a correct estimation of the withdrawal rate for high capillary number at which the previous theory loses its validity.

1. 서 론

산업경제의 발달과 함께 석유에너지 사용의 증가에 따른 부작용으로 유류에 의한 해양오염이 증가하고 있다. 누출된 유류는 방치시 수산자원은 물론 인체 건강에도 영향을 미치게 되어 신속한

방제 및 처리가 요구되고 있다. 사고에 의해 유출된 기름을 처리하는 방법으로는 유화제와 같은 화학제를 이용하여 기름을 분산시키는 방법과 물리. 기계적인 수거방법으로 기름의 분산을 막고 제거하는 방법이 있으나, 화학제에 의한 처리 방법은 근해에서 사용될 경우 이차적인 오염을 초래하는

* 해양대학교 조선해양공학부
 ** 미국 버클리대 방문연구원

부작용이 있으므로 최근에는 물리, 기계적인 처리 방법에 대한 관심이 높아지고 있다.

물리, 기계적인 처리 방법에서는 오일 펜스를 이용하여 기름의 분산을 막고 유회수기를 이용하여 기름을 수거한다. 유회수기의 종류는 수거 방식에 따라 흡입식과 흡착식으로 분류할 수 있다. 흡입식 유회수기는 펌프에 의해 기름을 직접 흡입하는 방법으로서 기름 층이 두꺼운 경우 흡입관을 통해 직접 흡입하거나, 기름 층이 얇은 경우 부월장치(Weir)나 와류장치를 이용하여 기름/물의 회수율을 증가시키는 방법을 사용한다. 이 경우 기름과 함께 물도 회수되므로 중력 혹은 원심력을 이용한 유수 분리가 이차적인 회수기로 이용된다. 흡착식 회수기는 기름과 접촉면을 연속적으로 구동시켜 물에 비해 점도가 수십~수백 배 높은 기름의 부착력을 이용하여 기름을 선별적으로 회수하는 방법이다. 흡착식 회수기는 구동면의 형태에 따라 벨트형, 롤러형, 원판형 등의 종류가 있다 (현 범 수, 1993)

그간의 유회수기는 주로 기업에서 경험, 실험적인 방법으로 개발되어 왔다. 몇몇 실험적인 해석은 1970년대에 미국 연안경비대와 1980년대 일본에서 일부 수행되어 졌으나 본격적인 이론적 해석 결과는 아직까지 거의 전무한 실정이다. 보다 체계적인 개발을 위하여는 이론적인 뒷받침이 필수 불가결한 요건인 바 본 연구에서는 간단한 부착식 유회수기에 대하여 그동안 필름코팅분야에서 개발한 이론모델을 발전시켜서 유회수기 문제로의 확장을 시도하였다.

일반적인 해양에서 작동되는 부착식 유회수기의 성능은 파고, 조류 속도 등의 해상 상태와 기름의 두께 및 물리적 특성 그리고 회수기의 형태와 구동 속도에 의해 결정된다. 본 논문에서는 유회수기 개발의 첫 단계로서 물러 형태 흡착식 회수기에 대한 이론적 해석에 대한 결과를 기술한다. 해석의 첫 단계로서 정수 중에 충분히 두꺼운 기름 층에서 구동되는 회수기의 성능을 해석하였다. 이론적 모델로는 정지 상태의 단일 유체에서 수직으로 구동되는 평판에 대하여 정상유동 및 안정성해석을 수행하여 주어진 기름의 밀도 ρ , 점성 μ , 표면

장력 σ 과 구동 속도 U 에 대한 회수 유량 q 을 계산하였다. 해석결과는 기존의 이론 및 실험치와 비교하였는데 그중에서 특히 안정성해석 결과는 종래의 방법을 잘 보완해 줌을 확인할 수 있었다.

2. 정상해석(Steady analysis)

부착식 유회수기의 성능해석을 위한 일차적 연구로서 단일 유체에 정지 유면과 수직으로 구동되는 평판 문제를 해석하였다. 이 해석에서는 회수기의 작동 조건중 유체의 밀도, 점성, 표면 장력과 회수기의 구동 속도만을 고려한 회수 성능을 추정한다. 해석방법으로는 먼저 정상해 해석으로부터 구동 속도가 작은 경우의 회수 성능을 추정하고, 평판상의 유층의 안정성 해석으로부터 고속에서의 회수율을 추정한다.

먼저 정상해해석 문제는 필름 코팅이나 금속판도금정도를 분석하기 위하여 화공분야에서 많은 연구가 있어왔다. 코팅 분야에서는 평판상에서의 유막의 두께 h 가 매우 얇고 구동 속도가 크지 않으므로

$$Re = \frac{Uh}{\nu}, \quad Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 정의되는 Reynolds수 (Re)와 Capillary수 (Ca)가 충분히 작다는 가정하에 정상 해의 해석이 행해져 왔다. 그 예로서 Landau & Levich(1942), White & Tallmidge(1965), 그리고 Spiers et al (1974) 등의 연구를 들 수 있다. 이들 해석의 결과들은 $Ca=1$ 부근 까지는 실험 결과와 잘 일치하지만 그 이후의 결과에서는 차이를 보이고 있다. 그러나, 유회수기의 작동은 코팅 작업에서보다 높은 구동 속도에서 행해지므로, 회수기의 성능 추정을 위해서는 이전의 해석에서 무시된 유막 내에서의 관성력과 도입부에서의 관성력, 점성력의 고려가 필요하다. 이들을 모두 고려할 경우, 문제의 복잡성으로 인해 이론적 추정이 현재로서는 불가능하며 자유 표면을 고려한 Navier-Stokes 풀개에 의한 수치모사가 불가피하므로 여기서는 보다 단순화한 모델을 사용하였다.

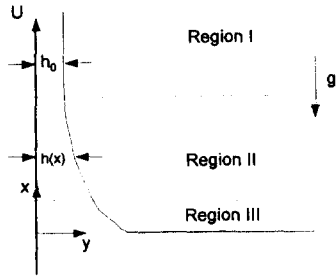


Fig. 1 Profile of a liquid film adhering to a vertically driven surface

Fig.1과 같이 속도 U로 구동되는 평판 상에 액체가 중력 방향을 거슬러 달려와서 유막을 형성하는 문제를 다룬다. 유체의 유동은 층류이며 안정하다고 가정한다. 이 문제의 엄밀한 해석을 위해서는 관성력, 중력, 점성력 그리고 표면 장력을 고려해야한다. 그러나 이 문제를 주로 다루는 코팅 분야에서는 구동 속도가 크지 않으므로 관성력을 무시한다. 유층의 해석은 다음과 같은 세가지 영역으로 나누어 해석할 수 있다.

1. 평행부 (Region I) : 정지 유면으로부터 멀리 떨어진 이 구역에서는 유층의 두께 $h(x)$ 가 일정한 값 h_0 가 된다. 일차원 유동이며 점성과 중력만이 고려된다.
2. 도입부 (Region II) : 유층의 두께가 x 의 함수이며, 점성, 중력, 표면장력이 모두 고려된다.
3. 정지면 (Region III) : 유체의 유동이 거의 없으므로 중력과 표면장력만이 고려된다.

먼저 평행부에서의 유동을 살펴보면, 유체의 밀도를 ρ , 점성을 μ 라 하면 일차원 유동의 지배 방정식과 경계 조건은 다음과 같다.

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} = -\rho g, \quad 0 < y < h_0 \quad \dots\dots\dots(2.a,b)$$

$$u(0) = U, u'(h_0) = 0$$

이를 풀면

$$u(y) = U - \frac{\rho g h_0^2}{2\mu} \left\{ \left(\frac{y}{h_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{y}{h_0} \right) \right\} \quad (3)$$

을 얻고 유체의 유량 q 는

$$q = U h_0 \left(1 - \frac{\rho g h_0^2}{3\mu U} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

와 같이 주어진다. 유체의 최대 유량과 이때의 두께는

$$q_{\max} = \frac{2}{3} U \sqrt{\frac{\mu U}{\rho g}}, \quad h_{\max} = \sqrt{\frac{\mu U}{\rho g}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

이다. 이상과 같은 평행부의 해석에서는 모든 값의 두께에 대한 해가 존재해서 주어진 구동 속도에 대한 회수량을 결정할 수 없다.

Region III에서의 유면은 중력과 표면 장력의 평형식

$$\frac{\sigma \frac{d^2 h}{dx^2}}{\left\{ 1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 \right\}^{2/3}} = -\rho g x \quad \dots\dots\dots(6)$$

으로 주어진다. 이 식을 적분하면 $\frac{dh}{dx} = 0, x=0$ 의 조건으로부터

$$\frac{\sigma \frac{dh}{dx}}{\left\{ 1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 \right\}^{1/2}} + \frac{1}{2} \rho g x^2 = \sigma \quad \dots\dots\dots(7)$$

을 얻고 이로부터 Region II 방향으로의 곡률의 값이

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = \sqrt{2 \frac{\rho g}{\sigma}}, \quad \frac{dh}{dx} = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

으로 수렴함을 알 수 있다.

이상과 같이 얻어지는 Region I과 Region III에서의 해석해를 정합하기 위해서는 중간 영역인 Region II에서의 해석이 필요하다. 이 영역에서의 해석은 점성, 중력, 표면 장력이 모두 고려된 자유 표면 문제이므로 엄밀한 해석이 불가능하므로 적절한 가정하에 근사적인 해법이 필요하다. Landau & Levich(1942)는 이 문제에 대한 이론적 해석을 처음으로 수행하였다. 이들은 Region II에서의 유동을 점성력과 표면장력만을 고려하여 근사해를 구한 후, 곡률의 Region III방향으로의 극한 값을

식 (8)에 주어진 Region II의 해의 극한 값과 정합하여 유막의 두께를 결정하였다. 이 후의 해석에서는 Landau & Levich의 정합조건을 그대로 사용하여 유막에서의 유동에 중력 (White & Tallmadge, 1965)과 유면에서의 점성응력 (Spiers et al, 1974)을 추가로 고려한 해석이 수행 되었다. 이들의 해석 결과는 Capillary수 Ca와 두께비 T_0 와의 관계식으로 주어진다. 여기서 T_0 는 식 (5)에 주어진 최대 유량에 대한 두께 h_{max} 와 실제 두께 h_0 의 비로써, 다음과 같이 정의된다.

$$T_0 = \frac{h_0}{h_{max}} = h_0 \sqrt{\frac{\rho g}{\mu U}} \dots\dots\dots (9)$$

이들 관계식의 형태와 실험과의 비교에서 얻어진 적용 범위는 다음과 같다.

Landau-Levich:

$$T_0 = 0.944 Ca^{1/6}, \quad 0 < Ca < 0.1 \dots\dots\dots (10)$$

White-Tallmadge:

$$\frac{T_0}{(1 - T_0^2)^{2/3}} = 0.944 Ca^{1/6}, \quad 0 < Ca < 0.1 \dots\dots\dots (11)$$

Spiers:

$$\frac{T_0}{(1 - T_0^2)^{2/3}} = \alpha(T_0, Ca) Ca^{1/6}, \quad 0 < Ca < 2 \dots\dots\dots (12)$$

Spiers의 결과에서 $\alpha(T_0, Ca)$ 은 수치계산으로부터 얻어지는 값이다. 이들의 자세한 유도과정은 Spiers et al(1974)에 잘 종합되어 있다.

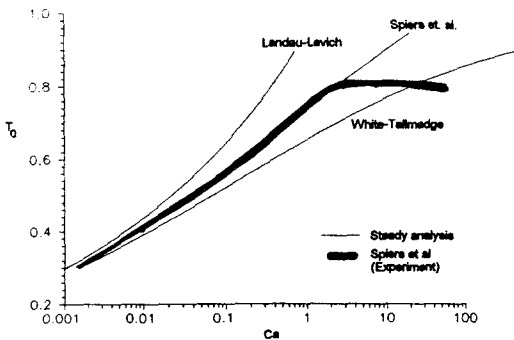


Fig.2 Comparison of steady results with experiments

Fig.2 에 이들 해석의 결과를 실험치와 비교하였다. 세가지 이론치 중 실험과 가장 잘 일치하는 Spiers의 결과는 Ca=1부근 까지는 실험 결과와 잘 일치하지만 그 이후의 결과에서는 차이를 보이고 있다.

Ca가 1이상의 값일 때 이론적 해석치가 실험치와 차이가 나는 이유는 다음과 같이 추정된다. 먼저 이들 해석에서 공통적으로 사용되는 곡률 정합의 타당성을 들 수 있다. 곡률 정합이 가능하기 위해서는 Region I, II에서의 유층 두께가 Region III에서 얻어지는 곡률 반경 $\sqrt{\frac{\sigma}{2\rho g}}$ 에 버금갈 만큼 작아야한다 (Ruschak, 1985). 그러나 구동 속도가 일정치 이상 증가하면 유층두께는 속도에 무관한 곡률 반경보다 커질 수 밖에 없다. 즉 유층의 두께와 곡률 반경과의 비는

$$h_0 / \sqrt{\frac{\sigma}{2\rho g}} = T_0 \sqrt{\frac{Ca}{2}} \dots\dots\dots (13)$$

와 같이 주어지므로 Ca와 T_0 가 커짐에 따라 곡률 정합은 타당성을 잃게된다. 또 다른 이유로는 구동속도의 증가에 따른 관성력의 영향을 들 수 있다. 정상해석에서 관성력을 고려할 경우 Region II에서의 해석은 자유표면을 고려한 Navier-Stokes 방정식의 수치해법이 불가피하다. 관성력의 증가에 따라 고려되어야할 또다른 요인은 유동의 안정성 문제이다. 안정성 해석을 위해서는 정상유동의 해석이 선행되어야 하므로 Region II에서의 해석은 이 경우에 있어서도 수치해법의 도입이 불가피하다. 그러나 Region I에서는 앞서 주어진 정상해가 관성력과 무관하게 주어지므로 안정성 해석이 용이하다. 여기서는 Region II에서의 관성력의 영향을 고려하지 않고 Region I에서의 관성력의 영향을 안정성 해석을 통해 고려한다.

3. 평행부 유동의 안정성 해석

상기한 바와 같이 고속구동시에는 유동의 안정성 문제를 고려할 필요가 있다. 특히 관성력의 영향이 커지는 Re, Ca \gg 1의 영역에서는 유동의 안정성 여부가 유층의 두께를 결정하는 데 더 중

요한 요소가 될 수 있다. 유동의 안정성 해석을 위해서는 먼저 정상 유동의 해가 필요하다. 도입부에서 충분히 떨어진 유층에서의 정상해는 해석해가 존재하므로 이 영역에서의 안정성 해석을 수행하였다. 해석 방법으로는 정지된 평판위를 흘러내리는 유층의 안정성을 근사적으로 해석한 Alekseenko et al(1985)의 결과를 회수기 문제에 알맞게 변환하여 이용하였다. 즉 구동면 상의 안정성을 위해서는 구동 속도가 정지면에서 전파되는 불안정파들의 최대 군속도(group velocity)보다 높아야 한다는 조건을 사용하였다.

Region I에서의 정상유동은 x-방향으로의 변화가 없으므로 구동속도만큼의 좌표변환을 통해 정지된 평판상을 흘러내리는 자유낙하 문제로 변환할 수 있다.

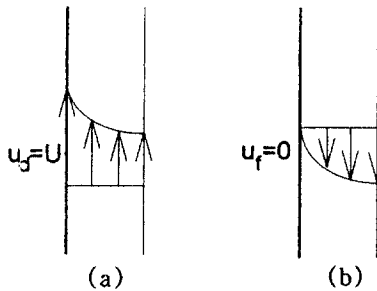


Fig.3 Transformation between driven and free-falling problem

즉 Fig.3와 같이 구동 평판상의 유동을 u_d 로, 같은 두께의 정지평판상의 유동을 u_f 로 정의하면 두 속도 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$u_d = U + u_f \quad \dots\dots\dots (14)$$

자유 낙하 문제는 기계 분야에서 열 응축기의 표면에서 포화 상태의 수증기가 응축된 후 흘러내리면서 생기는 열전달 해석에 응용되어 왔다. 이 문제에 있어서는 유면의 불안정성에 의해 형성되는 표면파에 주된 관심이 있어 왔다. 실험에 의하면, 상류 도입부에서 외부 교란과 불안정성에 의해 형성된 선형파는 Fig.4에서 보는 바와 같이 하류로 전파되면서 증폭되다가 비선형성의 영향으로 에너지가 포화되면서 일차원 고립파로 발달하고,

이후 횡방향 불안정성에 의해 규칙성을 상실한 이차원 비정상 파로 귀결되는 복잡한 유동이 관측된다 (Chang et al, 1993).

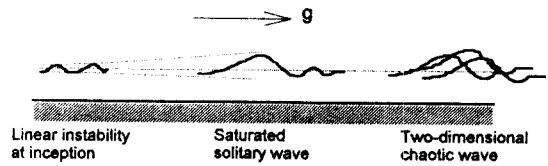


Fig.4 Wave formation on a vertically falling liquid film

실험에 의한 관측과 이론적 해석에 의하면, 도입부에서 발생된 불안정 파는 Wave packet의 형태를 가지고 군속도로 전파하는 이동 불안정성(Convective instability)의 성격을 띤다(Chang et al, 1993). 따라서 부분적이고 일시적인 교란이 가해지는 경우 고정된 위치에서의 유동은 일정 시간 경과 후 안정성을 회복하게 된다. 그러나 평판이 구동되는 경우 불안정파의 군속도는 구동 속도만큼 감소하므로 구동 속도가 자유낙하 문제에서의 군속도와 일치하는 경우 불안정파는 제자리에서 증폭되는 절대 불안정성 (Absolute instability)을 갖게된다. 결국 구동문제에서의 유동이 안정하기 위해서는 구동속도가 자유낙하문제에서의 불안정파의 군속도 범위보다 크거나 작아야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

자유낙하 문제에서의 선형 안정성 문제의 해석은 Navier-Stokes방정식을 선형화한 Orr-Sommerfeld 방정식의 해석으로 귀결된다. 이 방정식의 엄밀한 해석은 Pierson & Whitaker (1974), Chin et al (1986)등에 의해 수치적인 방법으로 수행되었다. 불안정 파들은 중력과 표면장력에 의해 발생하는 표면파와 내부유동의 불안정성에 의해 발생하는 전단파(Shear wave)로 나눌 수 있다. 여기서 다루고 있는 유동은 Reynolds수가 내부유동에 난류를 발생시킬 만큼 크지 않으므로, 표면파에 의한 불안정성만을 다루기로 한다. 표면파에 의한 불안정성 문제는 장파 근사법에 의해 효과적으로 해석될 수 있다. 여기서는 실험과의 비교로부터 타당성이

입증된 Alekseenko et al(1985)의 근사법을 이용한다. Alekseenko의 근사방정식과 이로부터 얻어지는 불안정파의 특성은 다음과 같다.

먼저 자유낙하 문제에서는 구동속도 U 의 의미가 없으므로 유층내의 평균속도

$$\bar{u} = \frac{1}{h_0} \int_0^{h_0} u_x dy = \frac{gh_0^2}{3\nu} \quad \dots\dots\dots (15)$$

를 이용하여 새로운 Reynolds수 Re^* 와 Weber수 We 를 다음과 같이 정의한다.

$$Re^* = \frac{\bar{u}h_0}{\nu} = \frac{gh_0^2}{3\nu^2}, \quad We = \frac{\sigma}{\rho gh_0^2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

표면파의 특성 길이를 L 이라 하면 장파근사는 다음과 같은 가정내에서 이루어진다.

$$\varepsilon = \frac{h_0}{L} \ll 1, \quad Re^* = O\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

모든 물리량들을 h_0 , ρ , \bar{u} 로 무차원화 하고

$$H(x, t) = \frac{H(x, t) - h_0}{h_0} \quad \dots\dots\dots (18)$$

와 같이 무차원화된 파고 $H(x, t)$ 를 정의하면 파고의 방정식은

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial t} + 3 \frac{\partial}{\partial x} \right) H + 6H \frac{\partial H}{\partial x} \\ & - \frac{2}{15} Re^* \frac{\partial}{\partial t} \left(h \frac{\partial H}{\partial t} \right) \\ & + \frac{Re^*}{3} \left(\frac{\partial}{\partial t} + 1.69 \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} + 0.71 \frac{\partial}{\partial x} \right) H \\ & + We \frac{\partial^4 H}{\partial x^4} = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

와 같이 주어진다(Alekseenko et al, 1985). 이 방정식을 선형화하고 파형을

$$H = \exp[ik(x - ct)] \exp \beta t \quad \dots\dots\dots (20)$$

의 형태로 대입하면 파수 k , 전파속도 c , 증폭계수 b 사이의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Re^* \beta &= -\frac{3}{2} \frac{c-3}{c-1.2}, \\ (Re^* k)^2 &= \frac{Re^{*3}}{6We} (c-c_1)(c-c_2) \\ &\times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{27We(c-3)(c+0.6)}{Re^{*3}(c-1.2)^2(c-c_1)^2(c-c_2)^2}} \right] \\ c_1 &= 1.69, \quad c_2 = 0.71 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (21)$$

윗식의 거동을 조사하면 불안정한 파들의 파수 k 와 위상속도 c 는 다음과 같은 범위의 값을 가진다.

$$0 < k < k_{crit}, \quad c < c_{crit}$$

$$k_{crit} = \sqrt{\frac{Re}{We}}, \quad c_{crit} = 3 \quad \dots\dots\dots (22)$$

임계파수 k_{crit} 에서의 군 $C_g = C + k \frac{dC}{dk}$ 의 관계식으로부터 속도는

$$(C_g)_{crit} = 3 + \frac{2Re^3}{1.2Re^3 - 0.83361We} \quad \dots\dots\dots (23)$$

와 같이 얻어진다.

이상의 결과를 종합하면 구동문제에서의 안정성을 위해서는 구동속도가 식 (23)에 주어진 임계치 이상이 되어야한다는 결론을 얻을 수 있다. 구동속도가 임계속도와 같을 때의 자유낙하문제와 구동문제에서 정의된 무차원화수들 간의 관계식은

$$Re^* = \frac{T_0^2}{3} Re, \quad We = \frac{1}{CaT_0^2}$$

$$(T_0)_{crit} = \sqrt{\frac{3}{(C_g)_{crit}}}$$

과 같이 주어진다. 이들을 식 (23)에 대입하면 Reynolds수가 충분히 큰 경우 다음과 같은 식을 얻는다.

$$(T_0)_{crit} = \sqrt{0.643 + \frac{0.934}{CaRe^3} + O\left(\frac{1}{Ca^2Re^6}\right)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

윗식은 주어진 Reynolds수에 대한 (Ca , T_0) 평면에서의 중립 안정성 곡선의 방정식이며 안정된 유층 두께의 상한치를 의미한다.

안정성 해석으로부터 얻은 위의 관계식을 정상 유동의 해석으로부터 얻은 관계식 (10),(11),(12)와 비교하면 무차원화된 유층의 두께 T_0 가 Capillary 수 뿐만아니라 Reynolds수에 의해서도 영향을 받는다는 점과, 두 무차원수가 커질경우 일정한 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 즉

$$T_0 \rightarrow 0.802 \text{ as } CaRe \rightarrow \infty \dots\dots\dots (26)$$

의 거동을 가진다. 앞서의 정상해석 결과와 안정성 해석 결과 식(25)를 Fig.5 에 도시하였다.

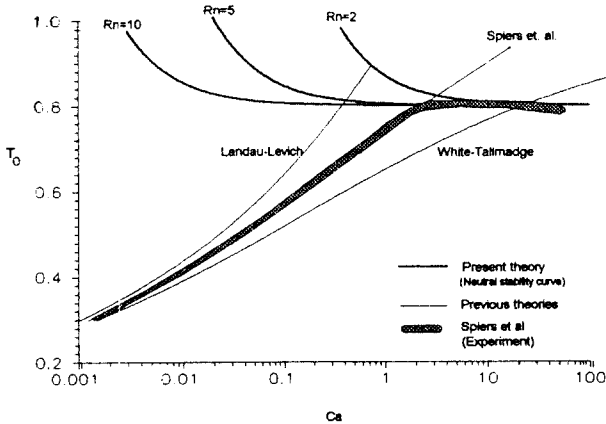


Fig.5 Comparison of theoretical results with experiments

해석된 결과를 기존의 이론과 실험치와 비교할 때, 정상 해석이 실험치와 차이를 보이는 $Ca > 1$ 의 영역에서 안정성 해석에 의한 유층의 두께가 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있었다. 즉, 안정성 해석은 Ca 의 값이 1이상일때 정상해석 결과가 실험치와 불일치하는 단점을 보완할 수 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 구동면 상의 평행 유층에서의 안정성 해석은 회수기의 성능 추정에 관성력을 고려하는 한가지 방법으로 이용될 수 있음을 알 수 있다.

그러나 보다 엄밀한 해석을 위해서는 관성력을 고려한 도입부에서의 유동해석과 이 영역에서의 안정성 해석이 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

흡착식 유회수기의 성능해석을 위한 기초연구로서 수직으로 구동되는 평판의 회수율을 이론적으로 해석하였다. 평판상에 형성되는 유막의 안정성 해석을 통해, 주어진 구동 속도에 대한 유층 두께의 상한치를 추정하였다. 회수기의 구동속도가 낮은 경우 종래의 필름코팅 분야에서 사용해온 정상해의 결과가 사용될 수 있을 것이나, 대부분의 경우 롤러식 유회수기는 비교적 큰 Reynolds 수 범위에서 작동되기 때문에 유막의 안정성 해석에 의한 결과가 유회수기의 회수성능 추정에 보다 좋은 지표가 될 수 있을 것으로 여겨진다. 즉, 본 연구에서 수행한 안정성 해석은 정상해석 결과를 잘 보완해 줌을 확인하였으며, 최대 회수가능 유층의 두께는 거의 대부분의 경우 T_0 가 0.8 정도 이상으로는 커질 수 없음을 알 수 있었다.

이상의 연구에서는 단일 액체에 대한 회수율을 해석 하였으나 실제 유회수기의 작동조건은 물위에 기름층이 떠있는 경우이므로, 본 연구결과는 기름층의 두께가 충분히 두꺼운 경우에만 적용될 수 있다. 불행히도 실제 유회수성능은 여기에서 해석한 상한치보다 훨씬 낮아질 것이다. 이는 해수의 표면장력과 밀도가 기름과는 큰 차이를 보여서 해수가 기름층이 롤러의 표면에 부착되는 것을 방해하는 작용을 하기 때문이다. 따라서 보다 본 문제의 보다 실제적인 적용을 위해서는 물과 기름의 유동을 함께 고려한 해석이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 현범수, 1993, "해양오염 방지기술개발 (I)", 최종 보고서, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터
- 2) Alekseenko, S.V., Nakoryakov, V.Ye. and Pokusaev, B.G., 1985, "Wave formation on a vertical falling liquid film," AIChE J. vol. 31,

- No.9, pp. 1446-1460
- 3) Chang, H.C., Demekhin, E.A. and Kopellevich, D.E., 1993, "Nonlinear evolution of waves on a vertically falling film," J. Fluid Mech., vol. 250, pp. 433-480
 - 4) Chin, R.W., Abernathy, F.H. and Bertschy, J.R., 1986, "Gravity and shear wave stability of free surface flows. Part 1. Numerical calculations," J. Fluid Mech. vol. 168, pp. 501-513
 - 5) Landau, L. and Levich, B., 1942, "Dragging of a liquid by a moving plate," Acta Physico-chim., vol. 17, pp. 42-54
 - 6) Pierson, R.W. and Whitaker, S., 1974, "Some theoretical and experimental observation of the wave structure of falling liquid films," I & EC Fundamentals, vol. 16, 401-408.
 - 7) Ruschak, K.J. 1985, "Coating flows," Ann. Rev. Fluid Mech. vol. 17, pp. 65-89
 - 8) Spiers, R.P., Subbaraman, C.V. and Wilkinson, W.L., 1974, "Free coating of a Newtonian liquid onto a vertical surface," Chem. Eng. Sci., vol. 29, pp.389-396
 - 9) White, D.A. and Tallmadge, J.A., 1965, "Theory of drag out of liquids on flat plates," Chem. Eng. Sci., vol.20, pp.33-37

후 기

본 연구에 조언과 관심을 아끼지 않으신 서울대학교의 배광준 교수님께 감사드립니다.