

論 文

중력-점성력에 의한 유출유 퍼짐에 관한 연구

김 창 제* · 채 양 범*

A study on the spreading of an oil slick
under the influence of gravitational and viscous forces

Chang-Je Kim · Yang-Bum Chae

< 목 차 >	
1. 서 론	3.1 포텐셜에너지와 그 변화율
2. 2차원퍼짐	3.2 저면마찰에 의한 소산일률
2.1 포텐셜에너지와 그 변화율	4. 고찰 및 논의
2.2 저면마찰에 의한 소산일률	5. 결 론
3. 1차원퍼짐	

Abstract

In this study, some approximate theoretical solutions about oil spreading under the influence of gravitational and viscous forces have been derived from the viewpoint of energy conservation. The theoretical model which derived newly is in agreement with Toi's one derived from a different hypothesis, and shown to predict well the spreading distance of oil front at an initial step of outflow, but further study is necessary to evaluate the spreading distance after longer time.

1. 서 론

선박, 특히 탱커의 충돌, 좌초사고 또는 해저 파이프라인의 절단에 의해 해양상에 기름 등의 오염 물질이 유출되었을때, 그 물질이 퍼져가는 속도 및

퍼짐범위 등을 예측할 수 있으면 오염확대 방지대책을 수립할 때 큰 도움이 될 것이다. 원유의 유출 등과 같이, 어떤 경계면상에 액체덩어리가 놓여졌을 때 액체는 중력불안정에 의해 사방으로 퍼져 간다. 액체는 자신이 가진 중력의 포텐셜에너지가 감

* 한국해양대학교 해사대학 교수

소하도록 운동하므로 이런 경우에는 중력이 지배적인 구동력이 된다. 액체가 퍼질 때, 그 층은 점점 얇아지면서 포텐셜에너지가 감소하는 반면 액체층은 운동에너지를 얻는다.

그러나 약간의 시간이 경과하면 액체층이 매우 얇아져, 운동에너지는 점성소산에너지와 비교하여 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 또한, 유출유의 퍼짐에 있어서, 표면장력은 물의 표면에너지가 기름의 표면에너지보다 크기 때문에 기름면적을 크게 함으로써 물이 기름에 그 에너지차 만큼 운동에너지를 제공하는 구동력의 역할을 한다. 기타, 조파 저항에너지, 바람이나 파 등에 의한 외부에너지가 유출유의 퍼짐에 중요한 역할을 하는 요소가 된다.

이 논문은 원유의 유출 등과 같이 어떤 경계면(정수면)상에 액체(기름)덩어리가 유출되어 중력에 의한 퍼짐의 구동력과 경계면에서의 점성항력에 의한 반력이 평형을 이루면서 퍼질 때, 유출유전단에서의 유출유의 퍼짐현상을 예측할 수 있는 간단한 근사 이론(2차원 및 1차원)을 전개하고 실험결과(2차원)¹⁾와 비교하여 고찰한 것이다.

2. 2차원 퍼짐모델

원주형태의 퍼짐을 가정하고, 축대칭모델을 고려하면 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2차원문제는 반경 $R(t)$ 에 관한 1차원문제로 귀착된다. Fig. 1에서, r 은 유출유의 중심을 원점으로하는 유출유의 반경방향으로의 좌표축, z 은 정수면을 원점으로하고 위방향이 양(+)인 좌표축, $Z(t)$ 은 시각 t 에 있어서의 유층의 두께, R_0 및 Z_0 는 각각 초기값인 $R(0)$ 및 $Z(0)$, $v_r(r, t)$ 및 $v_z(z, t)$ 은 각각 r 및 z 방향으로의 유출유의 유속이다.

유출유의 질량보존칙과 그 시간미분은 식(1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \pi R(t)^2 Z(t) = \pi R_0^2 Z_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = -2 \frac{Z}{R} \frac{dR}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

식(1)의 V 는 유출유의 수면상체적이며, 유출유의 밀도를 ρ_c , 해수의 밀도를 ρ_u , 유출유량을 V_0 로 할 때, $V = V_0(\rho_w - \rho_u)/\rho_u$ 가 된다.

유층내부의 속도분포를, 과거의 연구결과²⁾³⁾를 참고하여 다음과 같이 가정한다.

$$v_r(r, t) = a \frac{r}{t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$v_z(z, t) = -2a \frac{z}{t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기에서, a 는 임의상수이다. 식(3)과 (4)의 유속분포는 연속방정식(식(5))을 만족시킨다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

2.1 포텐셜에너지와 그 변화율

포텐셜에너지 U 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \rho_o g V Z \quad \dots\dots\dots (6)$$

식(6)의 g 는 중력가속도이다.

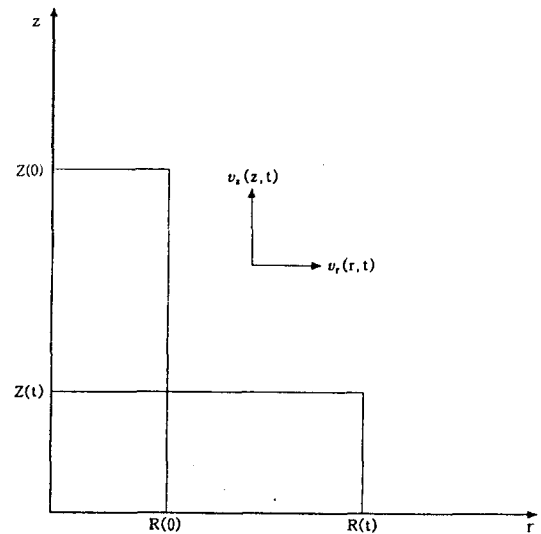


Fig. 1 Coordinate system for axisymmetric model

포텐셜에너지의 시간변화율은 식(6)과 식(2)를 이용하여 식(7)과 같이 된다.

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{\rho g V^2}{\pi R^3} \frac{dR}{dt} \dots\dots\dots(7)$$

2.2 저면마찰에 의한 소산일률

저면마찰에 의한 소산일률 W_B 는 난류상태를 가정할 때, 식(3)을 이용하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} W_B &= -\int_0^R \tau_B \cdot v_r \cdot 2\pi r dr \\ &= -\int_0^R \rho_s f v_r^2 \cdot v_r \cdot 2\pi r dr \dots\dots\dots(8) \\ &= -\frac{2\pi \alpha^3}{5t^3} \rho_s f R^5 \end{aligned}$$

여기에서, f 는 마찰계수이다.

식(3)에서 유출유전단에서의 유속은 $v_r(R, t) = \alpha R/t = dR/dt$ 이며, 이것을 이용하여 식(8)의 임의상수 α 를 소거하고, 에너지보존방정식(식(9))을 풀면 유출유의 퍼짐거리 R (식(10))을 알 수 있다.

$$\frac{dU}{dt} - W_B = 0 \dots\dots\dots(9)$$

$$R = \left\{ \frac{7}{2\pi} \sqrt{\frac{5g}{2f}} Vt + R_0^{7/2} \right\}^{2/7} \dots\dots\dots(10)$$

식(10)까지의 산정과정은 매우 간단하며, 식(10)은 유층의 내부속도를 유출유전단의 거리변화율과 관련시킨 결과¹⁾와 일치한다.

3. 1차원 퍼짐모델

오일펜스 일부가 파손되어 빠져나간 물질, 오일펜스를 넘어간 물질 또는 선체파손부에서 나온 선체주변의 물질 등의 퍼짐은 축대칭문제로서 취급하기에는 무리가 있다. 구형상태의 퍼짐을 가정하고, x 는 유출이 시작되는 원점으로부터 유출유의

퍼짐방향으로의 좌표축, z 은 정수면을 원점으로 하고 위방향인 양(+)인 좌표축, $X(t)$ 및 $Z(t)$ 은 각각 시각 t 에 있어서의 유층의 길이 및 두께, X_0 및 Z_0 는 각각 초기값인 $X(0)$ 및 $Z(0)$, $u(x, t)$ 및 $w(z, t)$ 은 각각 x 및 z 방향으로의 유출유의 유속이라 할 때, 유출유의 질량보존칙 및 그 시간미분은 각각 식(11) 및 식(12)와 같다.

$$V = X(t)Z(t) = X_0Z_0 \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{Z}{X} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots(12)$$

식(1)과 마찬가지로 V 는 유출유의 수면상체적이다. $V = V_0(\rho_w - \rho_u)/\rho_u$ 가 된다.

유층내부의 속도분포 역시 식(3)과 비슷하게 다음과 같이 가정한다.

$$u(x, t) = \alpha \frac{x}{t} \dots\dots\dots(13)$$

$$w(z, t) = -\alpha \dots\dots\dots(14)$$

앞에서와 마찬가지로 이 유속분포는 연속방정식을 만족시킨다.

3.1 포텐셜에너지와 그 변화율

식(6)의 포텐셜에너지의 시간변화율은 식(15)와 같이 된다.

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{2} \rho g \frac{V^2}{X^2} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots(15)$$

3.2 저면마찰에 의한 소산일률

식(8)과 마찬가지로 저면마찰에 의한 소산일률 W_B 는 다음식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 W_B &= - \int_0^X \tau_B \cdot u dx \\
 &= - \int_0^X \rho_o f u^2 \cdot u dx \dots\dots\dots (16) \\
 &= - \frac{\alpha^3}{4f^3} \rho_o f X^4
 \end{aligned}$$

유출유전단에서의 유속을 이용하여 α 를 소거하고, 에너지보존방정식(식(9))을 풀면 유출유의 1차원 퍼짐거리 X 는 다음 식과 같이 된다.

$$X = \left\{ \frac{5}{2} \sqrt{\frac{2g}{f}} Vt + X_0^{5/2} \right\}^{2/5} \dots\dots\dots (17)$$

축대칭의 경우(식(10))와 마찬가지로 식(17)의 산정과정은 매우 간단하며 유층의 내부속도를 유출유전단의 거리변화율과 관련시킨 결과⁴⁾와 일치한다.

4. 고찰 및 논의

실험¹⁾은, 정수중일 때, 수조안에 상단이 개방된 직경 40 cm원통을 설치하고 그 속에 유량 V_0 를 10, 20 및 50 l의 3종류, 동점성계수 ν 를 30, 50, 100, 500 및 1,000 cSt의 5종류일 경우의 유희유를 각각 적당히 조합시켜 넣고, 실험개시와 동시에 원통을 수조속에 떨어뜨려 기름을 수면상에 방출시킨 후, 기름이 퍼져가는 속도나 형상을 사진 촬영하였다. 또한, 파랑에 의한 퍼짐실험($V_0=50$ l, $\nu=100$ cSt)을 동시에 실행하였다.

Fig. 2 및 3은 유출유량 V_0 의 차이에 따른 유출유전단의 퍼짐거리를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 시간, 종축은 유출유전단의 퍼짐거리, 실선은 유출유량 V_0 가 10 l 일 때의 이론곡선(식(10), 일점쇄선은 V_0 가 50 l일 때의 이론곡선(식(10), +는 V_0 가 10 l일 때의 실험값, ○는 V_0 가 50 l일 때의

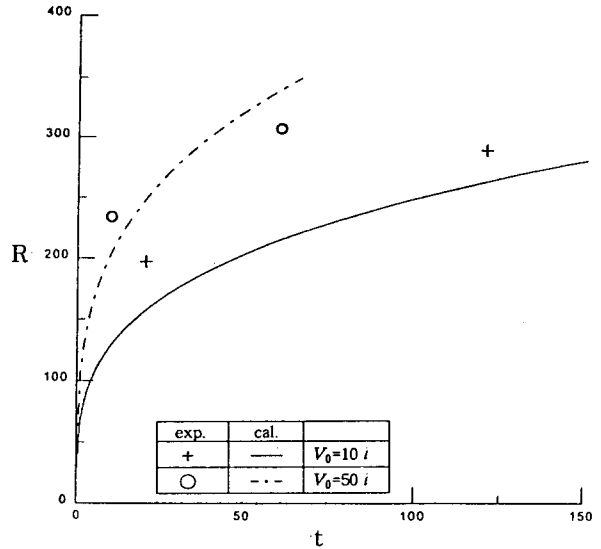


Fig. 2 Spreading distances of oil front at different outflow volumes ($\nu=30$ cSt, $f=0.001$)

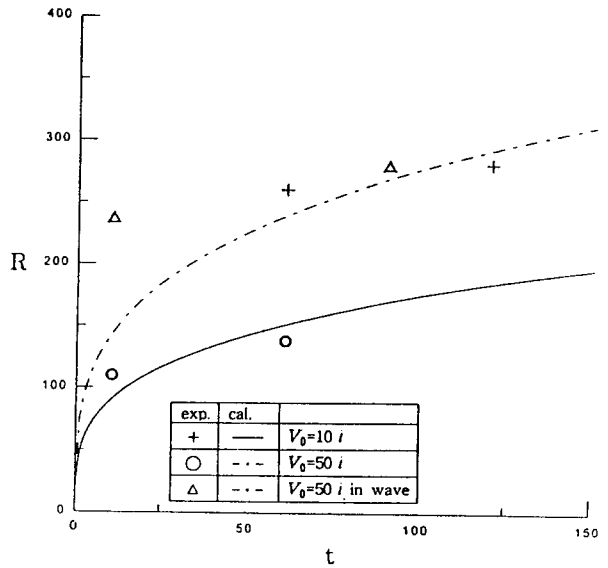


Fig. 3 Spreading distances of oil front at different outflow volumes ($\nu=100$ cSt, $f=0.01$)

실험값, Δ는 파랑(파장 9cm, 파고 0.2cm)이 존재할 때의 실험값을 나타낸다. 식(10)에서 알 수 있듯이, 유출유량 V_0 가 크면 퍼짐거리 R 도 크며,

시간의 2/7제곱에 비례한다. 또한, 유출초기에 있어서 실험값과 이론값의 경향은 거의 일치함을 알 수 있다. 제한된 실험조건이지만, 파랑이 존재할 때 (Fig. 3의 Δ), 유출유는 처음에 급속히 퍼진 후 그 상태를 유지하면서 정수중에서의 퍼짐과 거의 동일한 패턴을 취할 것으로 추측된다.

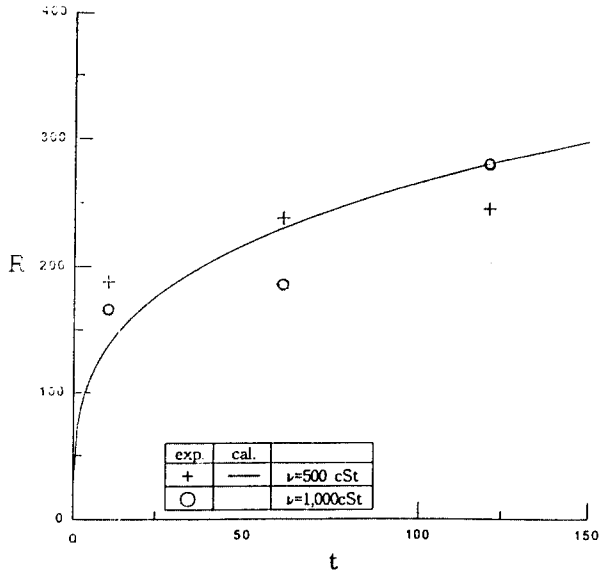


Fig. 4 Spreading distances of oil front at different kinematic viscosities ($V_0 = 50$ l, $f=0.01$)

Fig. 4는 동점성계수 ν 의 차이에 따른 유출유전단의 퍼짐거리를 나타낸 것이다. Fig. 2, 3과 마찬가지로 횡축은 시간, 종축은 유출유전단의 퍼짐거리이다. 실선은 동점성계수 $\nu=500$ cSt일 경우의 이론곡선(식(10)), +는 $\nu=500$ cSt일 때의 실험값, O는 $\nu=1000$ cSt일 때의 실험값을 나타낸다. 앞에서와 마찬가지로 실험값과 이론값은 잘 일치하며, 유

출의 초기단계에 있어서는 이 연구에서 제안한 식 (10)을 이용하여 유출유의 퍼짐거리를 예측할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 포텐셜에너지와 점성소산에너지가 평형을 이룰 때, 유출유 전단에서의 유출유의 수평 퍼짐 현상을 예측할 수 있는 간단한 근사 이론을 제안하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 또한, 수평 퍼짐 현상과 동일한 수법으로 1차원 퍼짐에 관한 근사식을 제안하였다.

유출의 초기단계에 있어서, 이 연구에서 제안한 근사식의 계산결과는 실험결과와 거의 동일한 경향을 나타낸다. 앞으로, 에너지 방정식에 표면장력 에너지 등을 추가하여 유출후 상당한 시간이 경과하였을 때의 유출유 퍼짐을 예측할 수 있는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) 日本造船研究協會, 해상에 있어서의 시뮬레이션 방법의 확립에 관한 연구(확산시험), 제10기준연구부회조사연구보고서, 1979
- 2) 渡邊健次, 중력불안정에 의한 액체의 확산, 수면 상으로의 기름유출의 연구, 선박기술연구소보고 제5권제6호, 1968, pp43-53
- 3) Buckmaster J., Viscous-gravity spreading of an oil slick, J. of Fluid Mech., Vol. 59, 1973, pp481-491
- 4) 都井裕, 해면상에 있어서의 유출유확산과정의 해석, 일본조선학회논문집, 제147호, 1980, pp128-135