

# 수면에 덮힌 油膜의 鎮波效果에 關하여

俞 洪 善

## A study on the calming effect of oil films on water waves

Yu Hong Sun

### Abstract

The calming effect of oil films on the small-amplitude waves was investigated. It was related with surface tension, viscosity and density difference of oil film by some approximate formulae.

As a result it was concluded that animal fats and vegetable oils of greater surface tension, greater viscosity and less density differences with water are more effective on calming down the small-amplitude water waves.

### 目 次

- |             |               |
|-------------|---------------|
| 一. 緒 論      | 四. 密度差에 依한 效果 |
| 二. 表面張力의 效果 | 五. 結 論        |
| 三. 粘性의 效果   |               |

### 一. 緒 論

수면에 덮힌 기름(혹은 다른 有機物)등의 얇은 막이 수면파에 대해 진정작용을 갖는다는 사실은 오래전에 발견되었다. 이 현상을 설명하는 이론이 H. Lamb의 저서 Hydrodynamics등<sup>1)</sup>에 수록되어 있다. 그 내용을 요약 소개하면 다음과 같다.

油膜등이 수면에 덮여 있을 때 그 表面張力이 수면의 표면장력보다 작으므로 점점 얇게 퍼진다. 그래서 그 두께가 충분히 얇게 퍼졌을 때에는 (一分子 層의 두께로) 유막의 표면장력은 균일하지 않고 표면적이 파동에 의해서 늘어나는 곳에서는 더욱 강해지는 현상이 생겨 장력의 분포가 불균일하게 된다. 이 불균일 분포로 말미암아 수면의 탄성이 저하되고 그래서 energy소모율이 커지게 된다. 이것이 파동의 진폭감소, 즉 진파효과를 가져오는 원인이라고 설명하고 있다. 이 이론을 뒷받침하는 數式的인 表現으로 粘性에 의한 진폭감소의 時定數(원래의 진폭  $a$ 의  $e^{-1}$ 배로 감쇠하는데 걸리는 시간)을 비교하고 있는 바 不均一장력 경우의 시정수가 均一장력 경우의 시정수보다 작다는 사실로써 energy소모율의 증가를 설명하고 있다.

本著者は 위의 이론이 좀 다른 각도에서 補足되어야 할 필요가 있다고 생각한다. 유막의 진파작용의 실용에로서 船舶運用에서의 예를 보면 波浪의 鎮靜에 광물성기름 보다는 植物성기름이, 그보다 동물성 기름, 魚油, 肝油등이 더 效果가 좋다는 사실이 밝혀져 있다.<sup>2)</sup> 植物性油, 動物性油들은 대체로 表面張力이 큰 편이고 이 油膜과 공기의 접촉 면에서의 張力(表面張力)과 유막과 물의 경계면에서의 張力(界面張力)의 合(Vector合)이 물의 表面張力과 평형을 이루어 앞서의 설명처럼 一分子層의 두께 정도로 얇게 퍼지지 않고 어느 정도의 두께로 응집되어 있을 수 있다. (물위에 떠있는 식물성기름 방울처럼), 이런 경우의 진파효과는 앞의 이론과 다른 설명이 필요할 것 같다.

그래서 本論文에서는 異密度的 流體層 界面에서의 内部波理論, 粘性 및 表面張力등을 진파효과와 관련시켜 설명하려는 시도를 해보았다. 여기서는 微小振幅波의 경우 (파고/파장 << 1)로 논의를 한정시키기로 한다. 그 이유는 방정식이 선형화되어 이론전개에 필요한 수식들을 쉽게 얻을 수 있기 때문이다.

진파 작용에 미치는 표면장력에 의한 효과, 점성에 의한 효과, 밀도차에 의한 효과등을 차례로 논의해 보려고 한다.

## 二. 表面張力の 效果

表面張力の 作用하에서 微小振幅波의 表面波에 적용되는 基礎方程式은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} &= 0 && \text{(連續方程式)} \\ \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=-h} &= 0 && \text{(底面の 境界條件)} \\ \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=0} &= \frac{\partial \eta}{\partial t} && \text{(自由表面의 境界條件)} \\ \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{y=0} + g\eta - \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} &= 0 && \text{(Bernoulli의 方程式)} \end{aligned} \right\} (1)$$

여기서  $\eta (\equiv a \sin(kx - \sigma t))$ 는 自由表面을  $x$ 方向으로  $c = \sigma/k$ 의 속도로 진파되는 正弦波의 水面上昇을 나타내는 量,  $x, y$ 는 파가 진행하는 쪽의 수평방향 및 그에 수직인 연직방향을 축으로 잡은 좌표,  $\phi$ 는 속도potential,  $h$ 는 水深,  $T$ 는 표면장력,  $\rho$ 는 밀도,  $k$ 는 波數,  $\sigma$ 는 角振動數이다.

이 방정식의 해는

$$\phi = -\frac{a}{\sigma} \left( g + \frac{Tk^2}{\rho} \right) e^{ky} \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

이 된다. 이것을 이용해서 표면파  $\eta = a \sin(kx - \sigma t)$ 의 峰線방향(Wave front방향)의 단위길이 및 傳播方向의 단위길이당, 파동 energy를 구해보면 다음과 같다.<sup>4)</sup>

첫째 위치 energy는

$$V = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \int_0^{\eta} \rho g y dy dx = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (3)$$

다음 운동 energy는<sup>5)</sup>

$$\begin{aligned} K &= \frac{\rho}{2\lambda} \int_0^\lambda \int_{-h}^{\eta} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \\ &= \frac{\rho}{2\lambda} \oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \end{aligned}$$

여기 線積分의 적분로는 底面과, 자유표면 및  $\lambda$ 만큼 떨어진 두 연직면을 따라 도는 一周路이고  $n$ 은 적분로상에서의 외향법선변위이다. 따라서 두 연직면상 적분로에서의 적분값의 합은 空間週期性 및 법선방향이 반대이기 때문에 상쇄되어 없너지고 底面에서는  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = - \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=-h} = 0$  이므로 결국 자유표면에서의 積分만 남는다. 미소진폭이므로 자유 표면에서는 근사적으로  $dn = dy$ 로 생각해도 좋으므로 적분을  $y=0$ 에서 계산하되 (2)식을 대입해서 계산하면

$$K = \frac{1}{4} (\rho g + Tk^2) a^2 \quad (4)$$

이 된다.

끝으로 표면장력의 작용하에서 파면이 진동할 때 표면의 면적증가로 말미암은 표면 energy는 역시 미소 진폭파에 대해서 다음과 같이 계산된다.<sup>6)</sup>

$$\begin{aligned} S &\doteq \frac{T}{\lambda} \int_0^\lambda \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 dx \\ &= \frac{1}{4} Tk^2 a^2 \end{aligned} \quad (5)$$

이상의 결과에서 파동 energy 밀도는

$$E = V + K + S = \frac{1}{2} (\rho g + Tk^2) a^2 \quad (6)$$

이 된다.

(6)식에서 표면장력이 波高( $2a$ )에 미치는 영향을 고려해 보면 다음과 같다.

1.  $\rho g \gg Tk^2$  혹은  $\lambda \gg 2\pi \sqrt{\frac{T}{\rho g}} = \lambda_m$  일 경우

((1)식을 만족하는 표면파에는 波速의 下限이 있고 그 최소 파속을 갖는 파의 파장은

$$\lambda_m = 2\pi \sqrt{\frac{T}{\rho g}} \text{로 계산된다.})^{7)}$$

이 경우에는

$$E \approx \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (7)$$

으로 되어 표면장력의 영향은 무시되고 중력의 영향이 현저하다. (重力波)

2.  $\rho g \simeq Tk^2$  혹은  $\lambda \simeq \lambda_m$  일 경우

이 경우에는 표면장력의 영향이 중력의 영향과 비등해진다. 따라서 어떤 일정 energy로 수면

(4)

1976年 4月 韓國海洋大學 論文集 第11輯

에 파동을 발생시킬 때 표면장력이 큰 표면에서 보다는 작은 표면에서 더 큰 파고를 이르게 된다.

3.  $\rho g \ll Tk^2$  혹은  $\lambda \ll \lambda_m$  일 경우

이 경우에는 중력의 영향이 무시될 수 있으며 표면장력의 영향만이 현저한 경우이다. (표면장력파)

그래서 energy는

$$E \simeq \frac{1}{2} Tk^2 a^2 \quad (8)$$

이 되고 따라서 일정 energy의 파동에 대해서 파고의 자승은 표면장력의 크기에 반비례 관계를 갖게 된다.

이상의 논의에서 얻어진 결론을 정리하면 파장이 큰 파는 표면장력의 영향이 무시되어서 진파작용에 대한 표면장력의 역할은 생각할 필요가 없으며 파장이 작은 파에 대해서는 표면장력이 큰 표면일수록 진파효과가 좋다는 것이다. 그러나 실제로는 유막에서의 표면장력이 물의 표면장력에 비해서 작으므로 일정 energy로 발생하는 유막에서의 파동은 수면에서 발생하는 파보다 그 파고가 더 커진다.

### 三. 粘性의 效果

粘性이 있는 流體表面에서의 微小振幅表面波가 감쇠하는데 있어서 원래의 振幅  $a$ 에서  $ae^{-1}$ 로 줄어들는데 걸리는 시간  $\tau$ 를 계산하면 粘性이 지나치게 크지 않는 한

$$\tau = \frac{1}{2\nu k^2} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2\nu} \quad (9)$$

이 된다. 여기서  $\nu$ 는 動粘性으로  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 로 계산되며  $\mu$ 는 粘度이다. (9)式은 점성이 큰 유체일수록 감쇠가 빠르고 또 파장이 짧은 파일수록 감쇠가 빠르다는 것을 보여주고 있다. 그러므로 표면장력과 영역의 파는 감쇠가 빠르지만 중력과 영역일수록 점성에 의한 감쇠는 느리다는 것을 알 수 있다. 대체로 수면의 점도보다 훨씬 큰 점도를 가진 유막이 덮여 있는 영역은 일종의 low-pass filter의 역할을 해서 표면장력파의 발생 및 통과를 억제하게 된다. 따라서 여러가지 파장의 spectrum을 갖는 수면파가 이 영역에 발생되거나 통과할 때 짧은 파장의 spectrum은 속히 진파되고 긴 파장의 spectrum만 남게 되며 장파도 다소간 감쇠에 의하여 진폭이 줄어들므로 파장에 대한 파고의 비가 줄어들게 된다. 파장에 대한 파고의 비가 작다고 하는 것은 파동에 의한 수면곡율이 작다는 것을 뜻하고 이것은 파고의 감소와는 다른 의미에서 상대적인 진파효과를 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 점성에 의한 진파효과는 두가지 면에서 이루어진다. 첫째는 빠른 점성감쇠에 의한 것이고 둘째는 해면곡율의 감소에 의한 것이다.

## 四. 密度差에 의한 效果

油膜이 덮인 수면은 밀도가 다른 두 층의 流體로 이루어진 系가 된다. 이런 영역에서의 파동은 상층 표면에서의 표면파와 兩層境界面에서의 파동 즉 内部波등 두 종류의 파동으로 갈리게 된다. 여기서도 미소진폭의 가정하에서 두 파동의 식은 다음과 같다.<sup>9)</sup>(표면장력은 무시)

$$\left. \begin{aligned} \eta' &= \frac{\beta}{\beta-1} a \sin(kx - \sigma t) \\ \eta &= a \sin(kx - \sigma t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기서  $\beta = c^2/g h'$ ,  $c = \left(\frac{\sigma}{k}\right)$ 는 내부파의 전파속도,  $h$ 는 層의 두께이고 上層에 대한 量들을 區別하기 위해서 '표시를 했다.

그리고  $h'(\rho - \rho') \ll \rho h$ 의 조건이 성립할 경우 표면파와 내부파의 속도는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} c'^2 &= g(h + h') \\ c^2 &= \frac{g h h'}{h + h'} \frac{\rho - \rho'}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(10)식 및 (11)식을 이용해서 내부파에 대한 표면파의 진폭비 즉 파고비를 구하면

$$\left| \frac{\frac{\beta}{\beta-1} a}{a} \right| = \left| \frac{h(\rho - \rho')}{-(h\rho' - h'\rho)} \right| \approx \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \quad (12)$$

이 된다. 마지막 近似는  $h\rho' \gg \rho h'$  (혹  $\rho$ 와  $\rho'$ 의 큰 차이가 나지 않는다고 볼 때  $h \gg h'$ 이라고 바꿔 놓아도 좋다)에 대한 것이다.

(12)식은 兩層의 밀도차가 작으면 작을수록 상층표면파의 진폭은 작아진다는 것을 나타내고 있다. 보통 유막이 덮여 있는 영역에 미소진폭의 표면파가 진행해 들어 갈 때 영역의 경계에서 유막은 대체로 작은 접촉 각으로 尖銳하게 되어 있고 그리고 유막의 넓이에 비해 경계영역은 무시할 수 있다고 하면 이 경계에서의 표면층에 대한 energy 전달은 별로 크지 않을 것이다. 그리고 이 짧은 경계영역을 지나면서 水表面은 界面으로 연속되고 표면파는 내부파로 전파되어 들어가며 표면층에 상기와 같은 영향  $\left(\eta' = -\frac{\rho - \rho'}{\rho} a \sin(kx - \sigma t)\right)$ 을 주게 된다.

그러므로 유막이 덮인 영역은 다른 부분에서 전달되어 오는 파동에 대하여 좋은 전파 효과를 갖는다. 다만 유막이 너무 얇으면 (미세진폭의 가정과 비교해서) 내부파와 표면파의 구별은 무의미하게 된다.

## 五. 結 論

이상의 논의들을 종합해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 유막은 해수보다 비교적 큰 점도를 갖는다. 참고로. 해수 및 몇가지 유류의 점도를 제시하면 다음과 같다.

鹽度 35‰의 해수<sup>10)</sup> : 15. 6°C에서 1. 22 centipoise

피마자유<sup>11)</sup> : 15. 6°C에서 85. 8~87. 6 cp.

아마인유<sup>11)</sup> : 15. 6°C에서 55 cp.

돌고래기름 : 37. 8°C에서  $\nu=30. 74$  centistoke

鯨 油<sup>11)</sup> : 37. 8°C에서  $\nu=29. 50$  cs

위의 data를 三절의 9식에 적용하면 유막은 파장이 짧은 파에 대해서 좋은 감쇠효과를 이룰 뿐 아니라 파장이 긴 파에 대해서도 수면에서 보다는 수십배의 감쇠효과를 기대할 수 있다. 그리고 장파장만 남은 해면은 곡윤의 감소를 통한 상대적 진파효과도 얻게 된다.

2. 유막의 표면장력은 해수의 표면장력보다 훨씬 작다.

해수의 표면장력<sup>12)</sup> : 19. 5°C에서 73 dyne/cm

피마자유<sup>13)</sup> : 18°C에서 36. 40 dyne/cm

肝 油<sup>13)</sup> : 17°C에서 35. 9 mg/cm

鯨 油<sup>13)</sup> : 60°C에서 36. 15 dyne/cm

비교적 표면장력이 큰 편인 이들 동, 식물기름들은 수면과의 界面張力 (data를 얻는데 실패했지만)도 큰 편일 것이 짐작된다. (간접적인 data로 octane의 경우<sup>13)</sup> 표면 장력이 20°C에서 21. 7 dyne/cm인데 같은 온도에서 물과의 계면장력은 50. 98dyne/cm이다.) 그래서 이들 유막은 얇기는 하지만 單分子層의 정도로 얇지는 않은 두께로 해면에 떠있을 수 있다. 그러므로 유막이 덮인 영역에 들어오는 파에 대해 四절에서 논한 진파효과를 기대할 수 있게 된다.

3. 한계파장,  $\lambda_m$ 보다 큰 파장의 파에 대해서는 표면장력의 영향은 무시되며 그 이하의 단파에 대해서는 표면장력은 震波에 방해작용을 한다. 그러나 피마자기름을 예로 하여 한계파장을 구해보면

$$\lambda_m = 2\pi \sqrt{T/\rho g} \quad \left( \begin{array}{l} T=36.40 \text{ dyne/cm} \\ \rho=0.96 \text{ g/cc} \end{array} \right)$$

$$\approx 0.62 \text{ cm}$$

이 된다. 그러므로 파장이 0.62cm 정도나 그 보다 작은 파장의 경우에만 표면장력의 영향이 문제될 뿐 그 이상에서는 표면장력으로 인한 진파방해는 문제가 안된다. 그리고 파장이 0.62cm 정도인 파가 역시 피마자 유막에서 감쇠되는 시정수를 구해보면

$$\tau = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 \nu} = \frac{\rho \lambda^2}{8\pi^2 \mu} \quad \left( \begin{array}{l} \lambda=0.62 \text{ cm} \\ \rho=0.96 \text{ g/cc} \\ \mu=0.86 \text{ p.} \end{array} \right)$$

$$\approx 0.0057 \text{ sec}$$

이 되며 따라서 中短波는 쉽게 감쇠되므로 표면장력에 의한 진파방해는 문제되지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 동식물성 기름은 밀도가 큰 편이다.

해 수 : 鹽度 35‰ 20°C 일 때 1.0248 g/cc

피마자유 : 4°C ~ 100°C 에서 0.955 ~ 0.967 g/cc

(12)식에 의한 표면파의 진폭 감소는 피마자유외의 경우

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho} = 0.065 \quad \left( \begin{array}{l} \rho = 1.025 \text{g/cc} \\ \rho' = 0.962 \text{g/cc} \end{array} \right)$$

가 되며 내부파진폭의 6.5%로 파고가 감소된다.

이상을 종합하면 유막에 의해서 표면파를 진파하는데 있어서는 밀도가 크고 점도가 크며 표면 장력이 큰 유류가 더 좋다는 결론을 얻게된다. 그리고 동식물성 유류가 그에 해당된다는 경험사실과 일치함을 확인할 수 있다.

끝으로 微小振幅이라고 하는 제약밑에서 이론을 전개했다는 것이 불만이지만 有限振幅波에 대한 이론 확장의 출발점이 될 수 있다는 점에서 의미가 있다고 자위하는 바이다.

### 參 考 文 獻

- ① H. Lamb : Hydrodynamics(1932), Cambridge University Press p. 631~632.  
Willard Bascom : Wavees and Beaches; the dynamics of the ocean surface (1964), Doubleday & Co. p. 60~62
- ② 尹点東 : 船舶運用的 理論과 實務(1973), 韓國海洋大學 海事圖書出版部 p. 169
- ③ 東海大學出版會 : 海洋科學基礎講座 3卷(1971), p. 6~22.
- ④ H. Lamb : ibid. p. 369~370.
- ⑤ " : p. 66.
- ⑥ " : p. 457.
- ⑦ B. Kinsman : Wind Wave(日語版上卷)(1965), 築地書館 p. 228
- ⑧ " : " " ( " 下卷), " " p. 255
- ⑨ 東海大學出版會 : ibid. 3卷, p. 227~228
- ⑩ " : " 1卷, p. 21
- ⑪ 水山書房編 : 油脂化學 ハントブック, p. 166~167
- ⑫ 東海大學出版會 : ibid 1卷, p. 22
- ⑬ 水山書房編 : ibid. p. 172~185

