

오일 펜스의 정적해석을 위한 기초 연구

양 찬 수*

A basic study on the static analysis of an oil fence

Chan-Su Yang

〈 目 次 〉

요약문

1. 서 론

2. 외력 계산

3. 오일펜스에 걸리는 장력 계산

4. 결 론

참고문헌

요 약 문

본 논문에서는 오일펜스를 설계하기 위한 기초단계로서 정적해석을 수행하였으며 임의의 오일펜스에 적용하였다. 오일펜스 설계시 고려해야 하는 여러 가지 해양 환경하중, 즉 풍하중, 해류하중 그리고 파하중을 구하였다. 또한 환경하중으로 인해 오일펜스에 걸리는 장력을 계산하였다.

1. 서 론

오일펜스는 기름의 회수 및 넓은 범위로 확산되는 것을 방지하고 특정수역을 보호하기 위하여 가장 우선적으로 선택되고 있는 방재장비이다. 일반적으로 오일펜스는 물과 기름이 튀어 넘어 가는 것을 막거나 또는 감소하기 위한 전현 부분(freeboard), 오일펜스 아래로 기름이 빠져

* 한국해양대학교 대학원

나가는 것을 막거나 감소시키기 위한 수면하 스커트 부분(skirt), 공기 또는 어떤 부력 물질에 의해 부력을 얻기 위한 부분(floatation), 바람, 파도 그리고 해류의 영향에 견딜 수 있는 종방향 장력 부재 부분(tension component)등의 기본적 요소를 갖고 있다.

시간, 비용 그리고 효율을 고려해 볼 때, 내해용은 일반적으로 스티로폼(styrofoam) 타입인 고행식 붐(Solid or Internal Foam Flotation Boom)이 권장되고 있기 때문에 개발의 필요성이 거의 없다고 할 수 있다. 고행식 타입은 가격면에서 싸고 취급이 용이하여 일반적으로 많이 사용되는 오일펜스 형태로, 손상을 입은 경우에도 전원이 현저하게 감소되지 않는다는 장점이 있으나, 많은 저장공간이 필요하고 외해에서 기름 보유 성능이 취약한 단점이 있다(Fig. 1 참조). 따라서 Fig. 2에서 보여지는 것처럼 이동, 저장 그리고 취급이 용이한 팽창식 붐(Inflatable Boom) 타입이 외해에서는 주로 이용되고 있다.

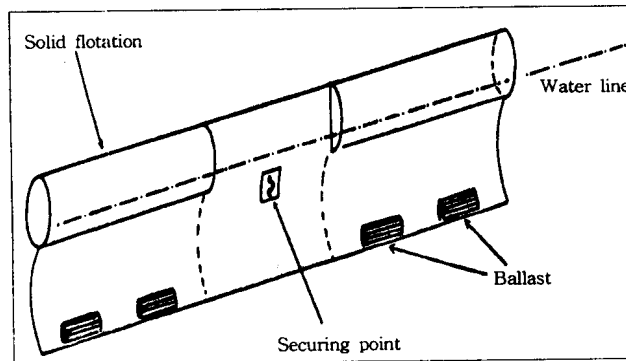


Fig. 1 Solid Flotation Boom

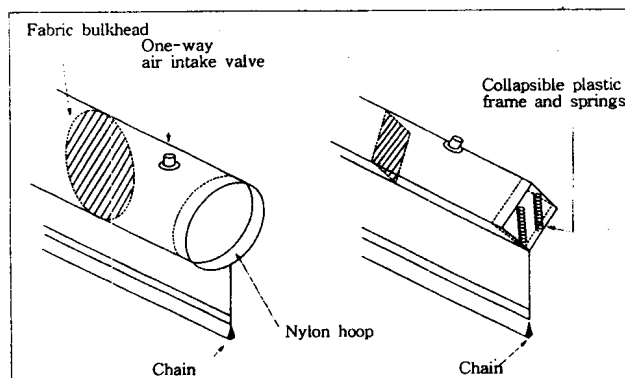


Fig. 2 Self-Inflatable Booms

오일펜스의 특성상 환경 조건에 따라 다른 종류의 오일펜스가 사용될 수 밖에 없다. 그래서 우리 나라의 경우 앞으로 해양 선진국들처럼 특성이 다양한 오일펜스를 개발해 나가야 한다.

따라서 본 연구에서는 오일펜스를 개발하는데 있어 기초 설계 단계가 되는 정적해석에 대해여 논하고자 한다. 여기에서는 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같은 자체 팽창식의 오일펜스 모델을 사용하였다. 이와 같은 오일펜스에 작용하는 여러 환경하중을 산정하고 이러한 하중으로 인해 오일펜스에 걸리는 장력을 계산하였다.

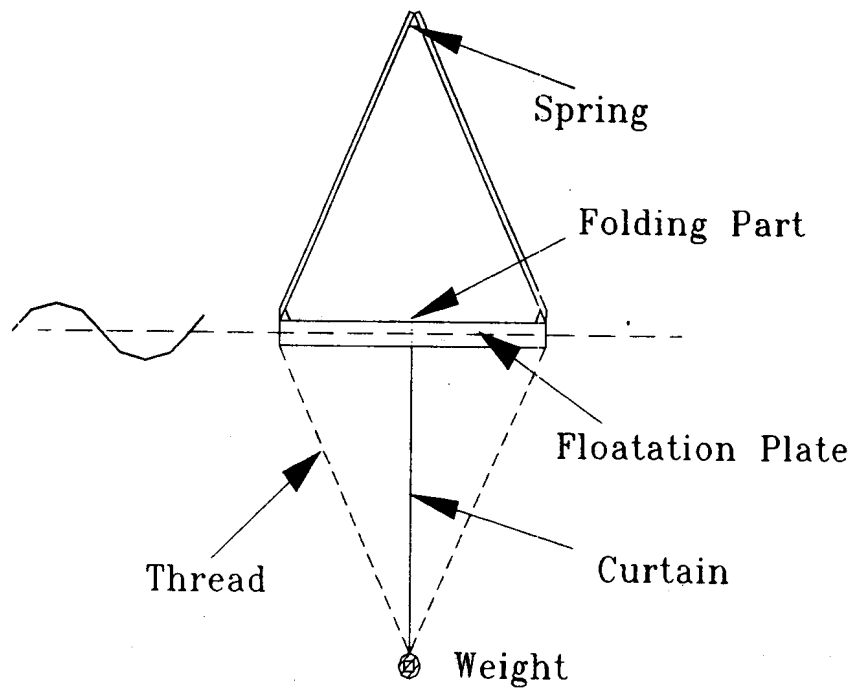


Fig. 3 Section view of oil fence model

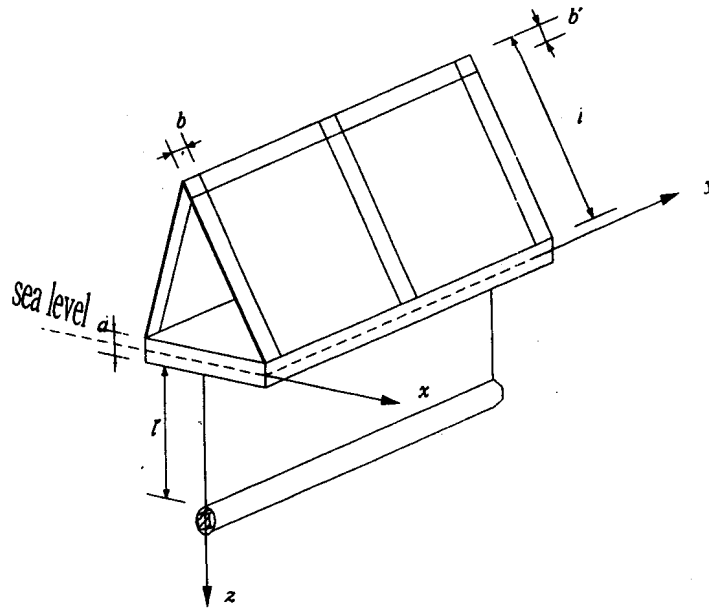


Fig. 4 Bird's-eye view of an oil fence model

2. 외력 계산

풍하중과 해류하중 계산에 있어서는 바람과 해류의 속도변화가 없다고 가정하며, 파력 계산에서는 양력은 무시한다. 파고가 파장 및 수심에 비해 작다고 가정하고 Airy 파이론을 사용한다.

2.1 풍하중(wind force)

오일펜스에 작용하는 풍하중은 총힘의 약 15%이다. 여기에서 사용되는 오일펜스의 경우, 바람의 방향과 수직하지 않고 비스듬히 기울어져 있다. 바람에 의해 작용하는 하중은 구조물부재의 형상과 치수 그리고 마찰 저항 계수에 따라 달라지며 단위 길이당 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a U_w^2 S' C_D \cos \alpha \dots\dots\dots (1)$$

여기서, U_w : 풍속

ρ_a : 공기 밀도

S' : 경사부재의 단면적

C_D : 항력계수

α : 오일펜스의 수면상부 경사 부재와 바람 방향과의 각도

항력계수 C_D 는 레이놀드 수와 표면 거칠기에 따라 다르며, 대부분 1 - 1.5로 취한다.

다른 방법으로, 국제해사기구(IMO)에서 권하는 식을 사용하면 다음과 같다.

$$F_w = K \times S \times \left(\frac{U_w}{40}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 U_w 는 knots단위이다. IMO에서는 K 값을 통상 26으로 둔다.

또한 Cormack(1983)은 오일펜스에 대한 풍하중 계산식을 다음과 같이 간단하게 제안하였다.

$$F_w = \left(\frac{U_w}{4}\right)^2 S \dots\dots\dots (3)$$

위의 식들을 이용하여 오일펜스에 작용하는 풍하중을 계산하고자 하며 이 때 사용된 입력자료는 다음과 같다.

Table 1 Input data for wind force

| | |
|------------------|------------------------|
| U_w (풍속) | 7.9 m/s (wind scale 4) |
| ρ_a (공기 밀도) | 1.29 kg/m ³ |
| S' (경사부재의 단면적) | 0.7 |
| K (비례상수) | 26 |
| α | 30 ° |
| C_D (항력계수) | 1.5 |

이와 같은 조건에 대한 각 계산식의 결과, (1)식은 3.7 kg, (2)식은 2.5 kg 그리고 (3)식은 2.4 kg이었다. 여기에서는 ABS선급에서 정한 wind scale 4 상황에서 단위 길이 1m당 작용하는 하중으로 Cormack(1983)이 오일펜스에 대해 제안한 계산식인 (3)식의 값을 이용했다.

2.2 해류하중(current force)

해류하중을 구하는 공식은 풍하중 공식과 같고 단지 밀도가 공기가 아닌 물의 밀도가 된다. 또한 풍속대신 해류속도를 사용해야 한다. 여기서는 해류속도(current velocity)를 최대값으로 2.5 m/s를 넘지 않는다고 보고 입력치로 사용한다.

다른 방법으로는, Cormack(1983)과 IMO에서 권하는 방법으로 계수 K 는 역시 26으로 하면,

$$F_c = 26 \times S \times U_w^2 \dots\dots\dots (4)$$

여기서, U_w : 해류속도(4.9 knots).

해류에 의한 하중은 위의 두 가지 식을 이용하여 구했고 그 결과, (1)식은 286.5kg이고 (4)식은 365.2kg이었다. 그래서 해류속도가 2.5 m/s(4.9 knots)일 때, 단위 길이당 작용하는 해류하중으로 365.2kg을 이용했다.

2.3 파하중(wave loads)

물 입자의 속도와 가속도는 입사파의 파고와 주기, 수심, 위상의 함수이다. 사용되는 파이론에 따라 다른 값을 주는데, 여기서는 Airy 파이론을 이용해서 물 입자의 속도와 가속도를 얻고자 한다.

파수(k)와 파분산식은 다음과 같다.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega^2 = gk \tanh kd \dots\dots\dots (5)$$

여기서, g : 중력가속도

kd 가 무한대로 가면, $\omega^2 = gk$ 가 된다. 위 식에 따라 파수 k 를 구하는데 이 때, 반복 방법(iteration method)을 사용해서 구한다.

x, y 평면과 시간 t 에서 물 입자의 수평속도(horizontal velocity) u 는,

$$u = \frac{\omega h}{2} \frac{\cosh ky}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (6)$$

x, y 평면 시간 t 에서 물 입자(water particles)의 수평가속도(horizontal acceleration) a_x 는 속도방정식 (6)을 시간에 대해 미분하므로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$a_x = \omega^2 \frac{h}{2} \frac{\cosh ky}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \dots\dots\dots (7)$$

파장에 비해 부체의 크기가 상대적으로 작은 경우 일반적으로 Morison 공식을 이용하여 파하중을 구할 수 있다. Morison 공식은 속도에 의한 항력(F_D)과 가속도에 의한 관성력(F_I)의 합으로 표현되며 오일펜스의 단위 길이당 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$F_{WAVE} = F_I + F_D = C_I \rho_w V a_x + \frac{1}{2} C_D \rho_w S |u| u \dots\dots\dots (8)$$

여기서, C_I : 관성계수

V : 단위길이당 체적

본 연구에서는 다음과 같은 조건을 파랑 하중 계산에서 사용하였다.

Table 2 Wave input data

| | |
|----------------|------------------------|
| d (수심) | 30 m |
| h (파고) | 2.4 m |
| T (주기) | 6 sec |
| C_I (관성계수) | 2.5 |
| u (수평 속도) | 1.22 m/s |
| a_x (수평 가속도) | 0.034 m/s ² |
| y | 29.71 m |

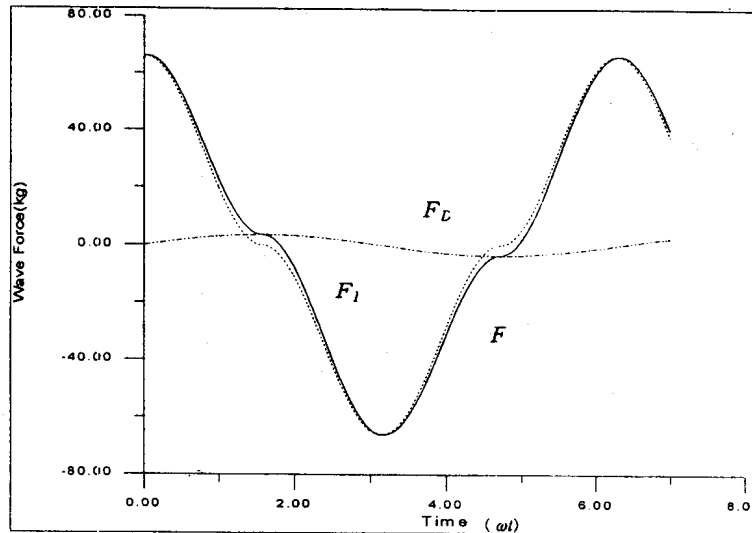


Fig. 5 Determination of maximum wave force

Fig. 5에서는 F_b , F_D 및 두힘의 합력의 시간 변화를 보여주고 있다. 합력의 최대값은 위상각이 362° 일 때 발생하며 이 위상각을 이용하여 최대 파하중을 계산하고자 하며 다음과 같다.

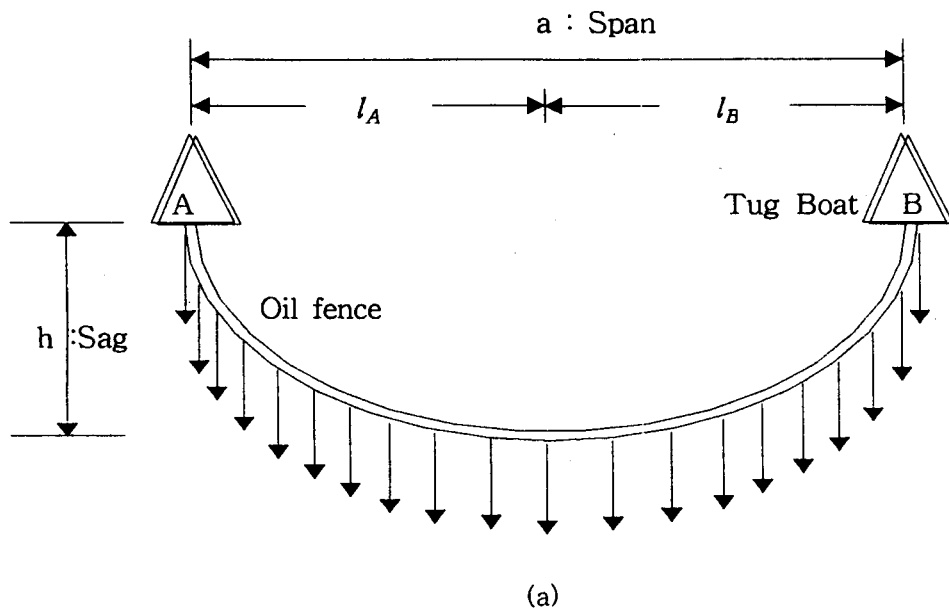
$$F_{WAVE} = 66.13 \text{ kg} \dots\dots\dots (9)$$

F_w , F_C 그리고 F_{WAVE} 가 동일 방향일 경우, 하중은 최대가 된다. 오일펜스에 작용하는 전체 환경 하중은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_T &= F_w + F_C + F_{WAVE} \dots\dots\dots (10) \\ &= 433.7 \text{ kg} \\ &= 4254.9 \text{ N} \end{aligned}$$

3. 오일펜스에 걸리는 장력 계산

펜스가 터그보트 A, B점에 매달려 있을 때 오일펜스의 형상 및 미소요소의 자유 물체도는 Fig. 6과 같다. 오일펜스의 최하위점 O을 xy좌표계의 원점으로 두었다.



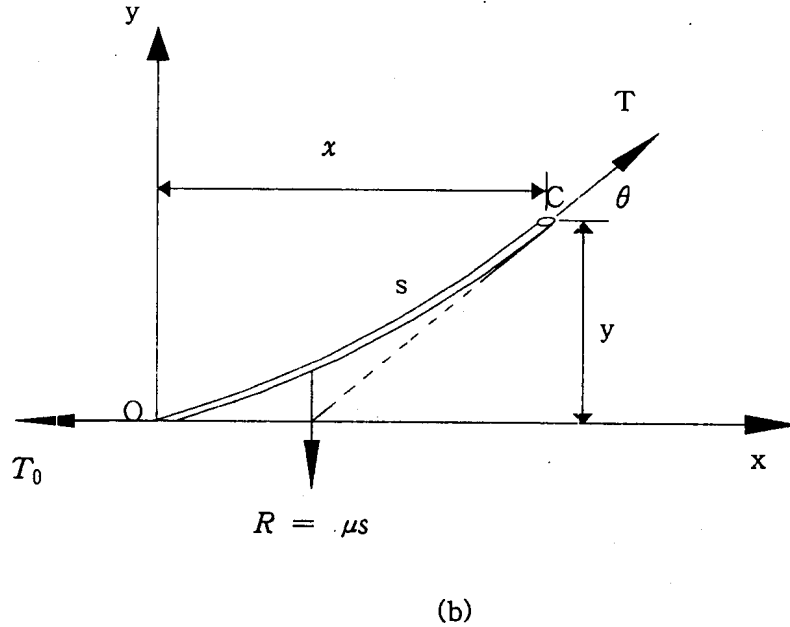


Fig. 6 (a) An oil fence in tow by two tug boats and
(b) Free-body diagram of an element

점O에서 펜스의 장력 T_0 , 원점 O에서 거리 s 만큼 떨어진 점 C에서 펜스의 장력 T , 요소 길이 s 에 작용하는 R 이 평형을 이루고 있으므로 다음의 평형식을 적용하면 다음과 같다.

$$+\rightarrow \sum F_x = T \cos \theta - T_0 = 0 \dots\dots\dots (11)$$

$$T_x = T \cos \theta = T_0$$

$$+\uparrow \sum F_y = T \sin \theta - R = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$T_y = T \sin \theta = R = \mu s$$

식 (11)로부터 펜스의 임의의 점에서 장력 T 의 수평성분 T_x 는 항상 일정하고 최하위점의 장력 T_0 와 같음을 알 수 있다. 그리고,

$$T = \sqrt{T_0^2 + \mu^2 s^2} \dots\dots\dots (13)$$

이 성립한다. 펜스의 최하위점($s=0$ 인점)의 장력이 최소가 되고, 지지점(s 가 최대인 점)에서 장력

이 최대가 됨을 알 수 있다. 펜스가 이루는 곡선 모양은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{\mu s}{T_0} \dots\dots\dots (14)$$

거리 s 는 다음과 같은 조건 식으로부터 구해야 될 변수이다.

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 \dots\dots\dots (15)$$

따라서,

$$dx = \frac{(T_0/\mu)ds}{\sqrt{(T_0/\mu)^2 + s^2}} \dots\dots\dots (16)$$

위 식을 적분하면,

$$x = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) \ln \frac{s + \left[\left(\frac{T_0}{\mu}\right)^2 + s^2\right]^{1/2}}{\left(\frac{T_0}{\mu}\right)} \dots\dots\dots (17)$$

이식을 지수 함수 형태로 바꾸면,

$$s = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) \left[\frac{e^{\mu x/T_0} - e^{-\mu x/T_0}}{2} \right] = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) \sinh\left(\frac{\mu x}{T_0}\right) \dots\dots\dots (18)$$

$$T = T_0 [1 + \sinh^2(\mu x/T_0)]^{1/2} = T_0 \cosh(\mu x/T_0) \dots\dots\dots (19)$$

유사한 방법으로 식(18)을 식(14)에 대입하여 적분하면

$$y = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) [\cosh(\frac{\mu x}{T_0}) - 1] \dots\dots\dots (20)$$

위 식은 직교좌표계에서 단지 매달려 있는 펜스가 이룬 곡선(현수선) 방정식(equation of the curve)이다.

펜스를 따라 임의의 점의 장력 T 는 T_0 와 그 점의 y 좌표 값으로 표현할 수 있다. 이는 식 (20)에서 $\cosh(\mu x/T_0)$ 에 대해 풀어 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$T = T_0 + \mu y \dots\dots\dots (21)$$

가장 낮은 지점으로부터의 펜스 장력의 증가는 단지 μy 에 좌우된다.

만약, Fig. 6에서 각 값이 주어진다면 T_0 는 식(20)을 이용하여 구할 수 있다. 예를 들어, 펜스의 두 지점의 높이가 같고 스패인 a 이고 처짐이 h 인 경우, 한 지점의 좌표는 $x = a/2, y = h$ 이다.

따라서, 펜스의 중심에서 장력은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$h = \left(\frac{T_0}{\mu}\right) \left[\cosh\left(\frac{\mu a}{2T_0}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (22)$$

식(22)는 T_0 에 대해 직접 풀이할 수 없어서 반복법을 이용하여 계산을 해야 한다. 반복법의 첫 번째 해는 포물선에 대한 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$T_0 = \frac{\mu a^2}{8h} \dots\dots\dots (23)$$

여기서 펜스의 형상을 원으로 해서 처짐비는 0.32이므로 스패 $a=12.8 \text{ m}$ 와 높이 $h=6.4 \text{ m}$ 를 대입해서 초기 값을 결정한 후, 식(22)에 대입하여 에러가 가장 작은 값을 T_0 로 취했다.

단, μ 는 단위길이당 전체하중으로 앞에서 계산한 4254.9 N 을 이용했다.

여기서 지지점에서 펜스의 장력은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} T &= T_{\max} = T_0 + \mu y \dots\dots\dots (24) \\ &= 44031.36 \text{ N} \\ &= 4.4 \text{ kN} \end{aligned}$$

4. 결 론

본 논문에서는 오일펜스 설계의 초기 단계로서 정적 해석을 수행하고자 하였다. 오일펜스 모델 설계시 고려하는 여러 가지 해양 환경 하중, 즉 풍하중, 해류하중 그리고 파하중을 구하였다. 파하중의 산정은 실제 사용가능 조건에서 Airy 파 이론에 의한 Morison 방정식을 이용하였다. 여기서 얻어진 전체 하중에 의해 오일펜스 설치의 기본 단위인 20m에 대해 오일펜스에 걸리는 전체 장력을 계산하였다.

참 고 문 헌

- 1) Bernard, H. and Jakobson, K., "Effectiveness of Devices for the Control And Cleanup of Oil Spills", The Fourth Annual Offshore Technology Conference, pp.171-177, May 1972.
- 2) Canadian Coast Guard, Oil Spill Response Field Guide, 1995.
- 3) Cormack, D., Response to oil and chemical marine pollution, Applied Science Publishers,

1983.

- 4) IMO, Manual on Oil Pollution(Section IV; Combating Oil Spills), IMO, 1988.
- 5) Kang, K.H., "Theoretical and Experimental Investigations of Motion and Containment of Contaminated Free surface Layer", Pohang University of Science and Technology, 1996.
- 6) Kang, K.H. and Lee, C.M., "Oil-slick drift due to waves and threshold escape velocity beneath a rowed oil fence", Workshop on tidal and oil-spill modeling, Pohang, Korea, pp.37-56, 1993.
- 7) Sung, H.G., Lee, D.Y. and Choi, H.S., "Hydrodynamic forces acting on a 2-D oil boom model", Workshop on tidal and oil-spill modeling, Pohang, Korea, pp.19-35, 1993.