

## 조류와 파랑중에서의 유벽의 보유성능 해석

이 정목<sup>(1)</sup>, 강 관형<sup>(2)</sup>

### Analysis of Containment Capability of Oil Fence in Currents and Waves

by

Choung Mook Lee<sup>(1)</sup> and Kwan Hyoung Kang<sup>(2)</sup>

#### 요약

본 논문은 조류와 파랑중에서의 유벽의 성능에 관하여 저자들이 지난 수년간 수행한 연구 결과를 요약하여 수록하고 있다. 유벽의 성능 파악을 위해서 조류중 유벽의 누출개시 속도 예측, 파랑중 운동, 조류중 스킵트의 변형에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 해상 조건에서 유벽이 효과적인 보유 장비로서 활용되기 위해서는 그 보유 성능의 향상이 절대적으로 필요하다는 결론을 얻었다. 유벽의 보유 성능을 향상시키기 위한 한 방편으로 유벽을 이중으로 설치하는 방식의 효용성을 검토하였다. 연구를 통하여 동일한 형상의 유벽을 이중으로 적절히 설치함으로써 유벽의 보유 성능을 현격히 증대시킬 수 있다는 것을 입증하였다.

#### Abstract

This paper summarizes the results of the investigations performed by the authors for a number of years on the performance of oil fences in currents and waves. The leakage inception velocity of currents, the wave-exciting motion of fences and the deformation of the fence skirt due to currents are investigated. The results show that improvement of the fence performance is necessary in order to utilize the oil fences as an effective containing device for spilt oils in ocean environments. As an approach toward improving the fence effectiveness, tandem fences in currents are investigated. It was found that an appropriate deployment of tandem fences of identical configuration could significantly improve the oil containment capability.

Keywords: 유벽(Oil Fence, Oil Boom), 유적 누출(Entrainment Failure), 파랑(Water Wave), 변형(Deformation), 이중 유벽(Tandem), 기름 유출(Oil Spill)

---

(1) 정회원, 포항공과대학교, 기계공학과

(2) 정회원, 첨단유체공학 연구센터

## 1. 서론

해상에 누출된 기름의 확산 방지와 수거 작업을 위해 한정된 장소에 기름을 가두어 두기 위하여 흔히 유벽(oil fence)을 사용한다. 이러한 유벽은 유화제에 비하여 이차 오염을 염려할 필요가 없다는 측면에서 그 유용성이 크다. 그러나 유벽의 보유 성능은 조류와 파랑에 의하여 크게 저하된다. 일반적으로 유벽은 1knot 이상의 조류나 1m 이상의 파고에서는 그 효용성이 급격히 떨어지는 것으로 알려져 있다(Cormack [1983]). 기름은 풍량이 심한 해상 상태에서는 유벽 위로 누출되기도 하나 크게 문제가 되는 것은 유벽 아래로 누출되는 것이며 누출 형태는 크게 두 가지로 나뉜다. 즉, 기름이 방울로 누출되는 것과 연속된 유체로서 누출되는 두 가지 유형을 말한다.

첫 번째 유형은 기름과 물의 계면에 작용하는 강한 전단 응력의 작용으로 계면의 부분적인 파괴로 인해 생성된 유적(oil droplet)이 조류 유동으로 이송되어 유벽 밑으로 누출되는 경우이다. 이러한 형태의 누출을 유적 누출(entrainment failure)이라 부른다. 두 번째 유형은 조류나 바람에 의한 누적의 결과로 기름층의 두께가 유벽의 흡수(draft) 보다 두꺼워져서 발생하는 누출을 말하는데 이를 배수 누출(drainage failure)이라 부른다. 유적 누출의 경우는 기름 누출의 초기 단계의 상태이고 배수 누출은 대량 누출이 시작되는 후기 단계의 상태를 의미한다. 한편, 유벽은 파랑에 의해 여기 되어 운동을 하게 되고 유벽의 재질이 유연성의 물질인 경우는 조류에 의하여 변형을 하게 되는데 이로 인한 기름층에 대한 상대 운동과 유효 흡수의 감소 역시 유벽의 보유 성능의 저하를 초래한다.

유벽의 보유 성능을 개선하기 위해서나 한정된 장비를 적시적소에 사용하기 위해서는 조류와 파랑중에서의 유벽의 성능을 예측할 수가 있어야 한다. 유벽의 조류와 파랑중에서의 거동 예측은 조류와 파랑을 동시에 고려하여 해석하는 것이 보다 현실에 적합하겠으나 아직 이러한 문제를 효과적으로 해석할 만한 방법이 없다. 따라서 그간의 대부분의 유벽 관련 연구는 조류와 파랑의 영향을 분리하여 수행되었다. 연구 내용은 조류 중 유벽의 누출 개시 속도 예측, 조류에 의한 유벽의 변형 예측, 파랑중 유벽의 운동 해석 등이다.

이러한 연구를 토대로 유벽이 효과적으로 사용될 수 있는 해상 조건이 매우 제한적이라는 사실이 입증되었다. 유벽의 유용성의 향상을 위한 방법중의 하나가 이중유벽이다. 이중으로 설치된 유벽의 보유 성능의 해석을 실험과 수치해석으로 수행하였다. 전방 유벽 후방의 적절한 위치에 또 하나의 유벽을 설치하면 단일 유벽으로는 보유가 불가능한 고속의 조류하에서도 전방 유벽 아래로 누출된 기름을 두 유벽 사이에 효과적으로 가둘 수 있다는 결과를 얻었다.

현재까지 다루어진 유벽과 관련된 문제들은 총괄적인 것보다는 부분적인 조건하에서 해석되었다. 유벽의 성능 개선이나 새로운 방제 장비의 개발을 위하여 보다 심층적인 연구가 필요할 것이다.

## 2. 본론

### 2.1 유벽의 기름 누출 개시 속도

유벽의 사용 한계를 밝히기 위해서는 유벽에 의해 가두어진 기름이 파랑과 조류의 영향하에서 누출이 시작되는 한계 조건들(예로 조류속도, 입사 파고 등)을 예측할 수 있어야 한다. 그런데 대부분의 경우 유적 누출이 배수 누출 보다 먼저 일어난다. 따라서 누출이 개시되는 조류 속도는 곧 유적 누출이 일어나는 속도라고 볼 수 있다. 유적 누출이 일어나는 유속을 예측하기 위해서는 유적이 생성되는 유속의 예측이 선행되어야 한다. 이를 위해 차원해석을 통하여 기름층과 물의 계면에서의 유적 생성의 임계속도( $U_c$ ) 예측식을 구하였다.

유적이 생성되는 순간의 무차원 인자들 간의 관계는 계면에 형성된 돌출부(protrusion)에 작용하는 힘들, 즉, 표면장력, 부력, 유체의 동압력, 전단응력의 평형 조건을 적용하여 얻어졌다. 점성은 단지 돌출부의 형상에만 영향을 주는 것으로 간주하였다. 자세한 무차원 해석 과정은 Kang[1996]을 참조하기 바란다. 결과적인 예측식은 다음과 같다.

$$\frac{U_c^2}{\sqrt{g' \sigma / \rho}} = C \left( 1 + \frac{\rho_c}{\rho_o} \right) + f(On) \quad (1)$$

위에서  $g' = g(1 - \rho_o / \rho)$ ,  $\rho$ ,  $\rho_o$ 는 각각 물과

기름의 밀도,  $\sigma$ 는 물과 기름 계면의 계면 장력 상수,  $C$ 는 실험적으로 결정되는 상수,  $f(On)$ 는 점성의 영향을 나타내는 함수이며 역시 실험적으로 결정된다.  $On$  수( $= \mu_o/\sqrt{\rho_o \sigma a}$ , Ohnesorge number)는 기름의 점도에 의한 영향을 대표하는 무차원 인자이다(Tarnogrodzki [1993]). 여기서  $\mu_o$ 는 기름의 점도,  $a$ 는 기름 액적의 대표적인 크기를 나타낸다. 위 식은 Kelvin-Helmholtz 불안정 이론에 의해서도 유사한 형태로 유도되어 진다(Leibovich[1976]).

실험을 통하여 경험 상수  $C$ 는 대략 8.0으로 결정되었다. 이를 위하여 예인 수조에서 kerosene 을 모형 유벽 앞에 두고 유벽을 예인하며 기름층의 거동을 CCD 카메라를 사용하여 관찰하였다. 현존하는 실험 데이터의 부족으로 점성의 영향을 대표하는 무차원 인자  $On$  수와 누출 개시 속도의 함수 관계는 결정할 수 없었다. 그러나 Agrawal[1983]의 디젤유 및 엔진유에 대한 실험 결과에 의하면 점성을  $3.9 \times 10^3 \text{kg/m/s} \sim 1.867 \text{kg/m/s}$  까지 크게 변화시켰을 때 유적이 생성되는 속도는  $0.33 \text{cm/s} \sim 0.38 \text{cm/s}$ 로 그다지 크게 변하지 않았다. 이를 통하여 볼 때 점성이 유적 생성 속도에 미치는 영향은 밀도의 영향에 비해 그리 크지는 않을 것으로 추정된다.

누출 개시 속도를 유적 누출이 시작되는 속도로 간주하고 유적이 누출되는 속도를 Froude 수( $V_c/\sqrt{g'L_c}$ )의 척도에 바탕을 둔 실험을 통하여 구하였다. 유적이 생성되는 속도와 누출이 일어나는 속도의 차이는 유벽에서 직각방향으로 자유 수면상의 기름층 끝단까지의 길이( $l_s$ , slick length)와 유벽의 홀수( $D$ )가 증가하면서 증가한다. 따라서 특성속도( $V_c$ )는  $U_l - U_c$ 로 특성길이( $L_c$ )는 홀수와 기름층의 두께의 선형적 합의 형태인  $D + c_1 l_s$ 로 나타내었다. 따라서 결과적인 누출 개시 속도 ( $U_l$ , threshold leakage velocity) 예측식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$U_l = U_c + Fr_c \sqrt{g'(D + c_1 l_s)} \quad (2)$$

위에서  $Fr_c$ 는 실험적으로 결정되는 누출이 일어날 때의 Froude 수이고  $c_1$ 은 경험 상수이다.

실험은 유층의 두께와 관계된 수용된 기름의 양, 유벽 홀수 및 유속을 변화시키면서 수행하였고 실험결과를 바탕으로  $Fr_c=0.06$ ,  $c_1=0.25$ 로 결

정되었다. 실험 결과 유적의 누출 개시 속도는 유벽의 홀수나 기름층의 길이 보다는 유속에 지배받는다라는 사실을 알 수 있었다. 식 (1)과 식 (2)를 종합한 누출 개시 속도 예측식은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$U_l = 2.8 \sqrt{\left(1 + \frac{\rho}{\rho_o}\right) \sqrt{\frac{g'\sigma}{\rho}}} + 0.06 \sqrt{g'(D + 0.25 l_s)} \quad (3)$$

별도로 파랑이 누출 속도에 미치는 영향을 파경사를 변화시키면서 실험적으로 고찰하여 보았다. 실험 결과 파랑이 계면에서 유적이 생성되는 속도와 누출 속도에 상당히 영향을 준다는 것을 관찰할 수 있었으나 파고와 파장의 변화에 따른 경향성은 워낙 여러 인자가 동시에 관련되어 있는 이유로 규명하기가 어려웠다.

한편 파랑에 의해 그 전파 방향으로 소위 Stokes 표류 속도를 갖는 조류가 발생된다. 따라서 파랑의 진행방향이 조류의 방향과 같을 때는 원래의 조류속도에 Stokes 표류 속도 성분이 추가되므로 초기 누출이 앞당겨질 것이며, 반대로 파랑의 전파 방향이 조류의 방향과 반대이면 누출을 지연시키게 될 것이다.

## 2.2 조류중 유벽의 변형

유적 누출과는 달리 기름층의 두께가 유벽의 홀수보다 커서 발생하는 배수 누출은 유벽의 홀수와 직결되어 있다. 즉, 배수 누출은 계면에서 작용하는 응력에 의한 압축 작용에 의하여 기름층의 길이( $l_s$ )가 감소되어 발생된다. 이때 기름층의 길이는 조류 속도( $U$ )에 대하여 대략  $1/U^m$ 으로 줄어든다(Cross et al.[1972]). 여기서  $m$ 은 양수이다. 따라서 기름층의 두께와 유벽의 홀수가 같아지는 유속이 존재하며 이 이상의 조류속도에서는 방제가 불가능하다고 볼 수 있다. 따라서 가능한 한 기름의 누출을 늦추기 위해서는 유벽의 홀수가 충분히 커야 한다.

유벽의 홀수는 조류의 동압에 의한 유벽 스킨트 변형이나 회전 등에 의하여 크게 감소할 수 있다(Tsukino et al.[1981]; Sloan et al. [1995]). 뿐만 아니라 유벽에 작용하는 수직 방향의 힘에 의하여 유벽이 물 속으로 잠겨 버리거나 또는 수면에 누워 버릴 수도 있다. 이러한 경우 기름이 유벽의 위나 아래로 완전히 누출되어 방제가 전혀

불가능해져 버린다. 이러한 현상이 일어나는 원인을 규명하고 대처하기 위하여 그리고 변형에 의한 보유 성능의 감소를 예측하기 위하여 유벽의 변형을 해석하였다.

유벽의 변형은 다음과 같은 박막의 변형 방정식을 해석하여 구하였다.

$$\Delta p = \frac{T\xi''}{(1 + \xi'^2)^{3/2}} \quad (4)$$

위에서  $\Delta p$ 는 유벽의 전면과 후면사이의 압력 차이이고  $T$ 는 유벽의 단위 길이당의 추의 무게,  $\xi(z)$ 는 조류 방향( $x$ )으로의 변위,  $\xi$ 과  $\xi'$ 은 각각  $\xi$ 의 수직 방향의 일차, 이차 도함수를 나타낸다. 차원 해석을 통하여 유벽의 형상이 압력과 장력의 비를 나타내는 무차원 인자인  $\alpha = \rho U^2 D / (2T)$ 에 의해 지배된다는 것을 알 수 있었다. 여기서  $U$ 는 조류속도,  $D$ 는 원래의 흘수이다.

유벽 주위의 압력은 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 대신 유벽과 같이 뭉툭한 물체(bluff body) 주위의 압력 분포의 특성을 응용해 계산을 단순화함으로써 실용성을 높였다. 즉, 유벽 후류를 제외하고는 포텐셜 유동(potential flow)이 지배적이므로 유벽 전면의 압력은 유벽 최하단부터 시작되는 분리유선(separation streamline)이 자유표면과 만나는 부분까지를 강제로 대체한 후 자유표면상의 영상(image)까지 포함한 물체가 균일한 흐름 속에 있을 때의 포텐셜 유동을 해석하여 구하였다. 계산 결과 유벽 전면의 압력은 실험치와 거의 일치함을 알 수 있었다. 유벽 후면의 압력은 뭉툭한 물체의 후면의 동압력 계수가 거의 균일하고 Reynolds 수와는 무관하다는 기존의 실험결과(Suzuki[1975]; Fage *et al.*[1927])를 바탕으로 결정하였다. 유벽의 변형과 유동장이 상호연계되어 있어 식 (4)와 유동장의 해석은 순차 접근법을 사용하여 해석하였다.

회류수조에서 유속과 추(ballast)의 무게를 변화시키면서 비닐의 변형된 형상과 유효흘수의 감소를 구하여 이론 해석 결과의 신빙성을 검증하였다(Kang *et al.*[1997]). Fig. 1은 여러  $\alpha$  값에 대하여 이론치와 실험치를 비교한 것인데 매우 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2는 예인점이 수면에 위치된 경우에 대해  $\alpha$ 에 따른 유효흘수의 변화를 이론치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 이론이 실제의 흘수의

감소를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한  $\alpha$ 가 1.5이상이면 유효흘수는 변형되지 않은 상태의 흘수의 절반 이하가 됨을 알 수 있다. 예인점이 스커트의 끝에 설치된 경우에 대해서도 마찬가지로 방법으로 변형된 형상과 유효흘수의 감소를 구할 수 있었다.

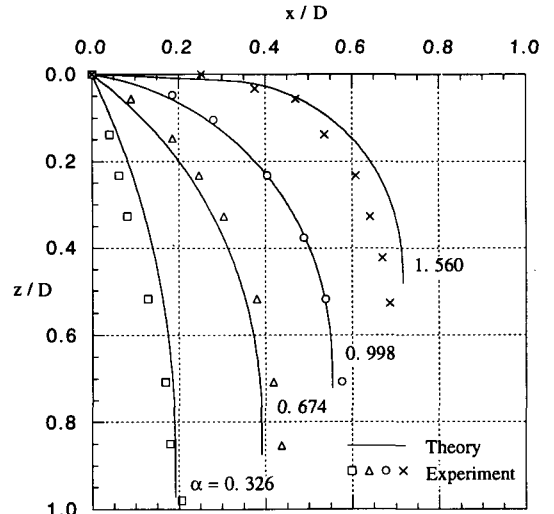


Fig. 1 Deformed shapes of oil fences for several  $\alpha$ 's

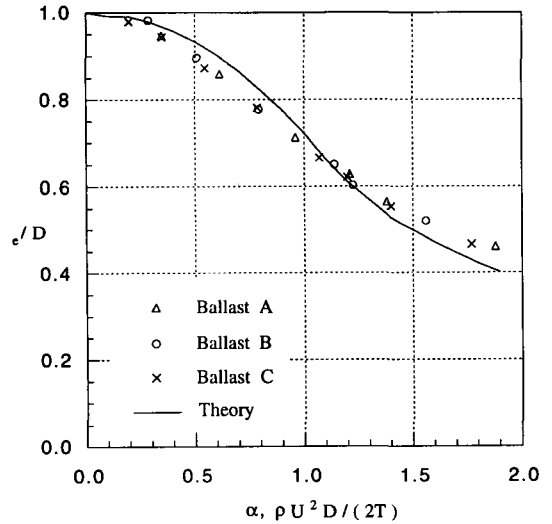


Fig. 2 Variation of effective draft with  $\alpha$

실제 해상에서의 방제 작업시의 통상적인  $\alpha$  값이 2 정도인 점을 고려하면 일상적인 조류하에서도 스커트의 변형에 의해 유벽의 홀수의 감소가 매우 클 수 있다는 것을 알 수 있다.

기존의 실험적인 연구 결과에 의한 배수 누출 속도의 여러 예측식이 존재하나 대표적인 것으로서 아래와 같은 식을 들 수가 있다.

$$U_d = \begin{cases} \sqrt{g'D}, & \text{Miller et al. [1972]} \\ \sqrt{\frac{2\rho}{\rho_o} g'D}, & \text{Lau et al. [1979]} \end{cases} \quad (5)$$

그런데 이와 같은 기존의 연구에서는 조류중에서의 유벽의 변형에 의한 홀수의 감소를 고려한 경우는 없다. 따라서 배수 누출은 위 식들에 의해 예측된 속도 보다 훨씬 낮은 속도에서 일어날 수가 있다. 뿐만 아니라 앞서 언급한 바와 같이 유적 누출속도는 미소하나마 유벽의 홀수에 영향을 받는다. 따라서 유적 누출속도 역시 감소될 것으로 예상할 수 있다.

그리고 유벽의 평형상태에 대한 힘의 균형 관계를 적용하면 부체를 통하여 유벽에 제공되어야 할 단위 길이당의 부력은 다음과 같이 구해진다.

$$f_b = \begin{cases} T(1 - C_L a), & \text{towing point at free surface,} \\ T(1 + C_L a), & \text{towing point at skirt end} \end{cases}$$

위에서  $C_L$ 은 유동에 의해 유벽에 가해지는 양력 계수를 나타내며 유벽의 변형된 형상과 함께  $\alpha$ 의 함수로 구해진다.

예인점이 수면에 있을 경우  $\alpha > 1.2$ 이면 유벽에 가해져야 할 부력이 음의 값을 갖는다. 이것은 유동에 의해 가해지는 양력이 추의 무게보다 커짐을 의미한다. 결국  $\alpha > 1.2$  이후부터는 유벽에 가해지는 수직 방향의 힘을 줄여 힘의 균형을 만족시키기 위해 유벽이 수면에 놓는 현상이 발생된다(Kang et al.[1997]; Sloan et al.[1994]).

### 2.3 파랑중 유벽의 운동

수파의 여기력(excitation)으로 유발된 유벽의 수면 및 기름층과의 수직 방향의 상대 운동과 수평 방향의 상대 속도는 유벽의 유효홀수 감소나 누출 개시 속도의 감소를 유발하여 기름층의 누출을 촉진할 수 있는 원인이 된다.

유연한 유벽의 파랑중 거동을 부체와 스커트가 힌지로 연결되어 있는 것으로 가정하여 해석하였다. 상호 연계된 부체와 스커트의 운동 방정식은 각각의 물체에 대하여 힘과 모멘트의 균형 조건을 적용하고 연결점에 적절한 연결 조건을 부과하여 얻어졌다. 운동 방정식의 해석을 위하여 필요한 부가질량 계수와 감쇠 계수 등은 유동을 포텐셜 유동이라고 가정하여 Frank[1967]의 특이점 분포법을 사용하여 해석하여 구하였다.

수치해석 방법의 신뢰도를 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 운동의 측정은 위치 계측기(potentiometer)와 CCD 카메라를 병용하여 수행되었다. 실험 조건을 가능한 한 계산 조건과 유사하게 조성하기 위하여 모형은 강체로 만들고 부체와 스커트의 연결 역시 힌지 조건이 만족되도록 제작하였다.

Fig. 3은 모형에 대하여 수치적으로 해석한 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서  $A$ 는 파의 진폭,  $\lambda$ 는 파장,  $\xi$ 는 유벽 운동의 진폭,  $b$ 는 부체가 수면과 만나는 선분의 반폭(half beam)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 횡동요 운동을 제외하고는 이론 해석과 실험 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 횡동요 운동의 차이는 계산의 오류보다는 실험의 오차에 의한 것으로 여겨진다. 상하 운동의 위치 계측기에 의한 실험치는 이 계기의 마찰에 의한 오차가 잠재했던 것으로 판단된다.

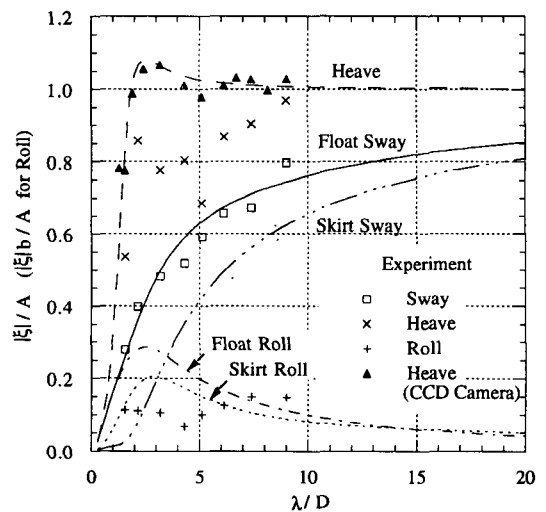


Fig. 3 Amplitude of absolute motion of the oil fence model

이와 같이 해석 방법의 신뢰성을 검토한 뒤 Fig. 4와 같은 두 가지 형태의 유벽의 수면에 대한 상대 운동으로 인한 홀수의 감소를 수치 해석적으로 비교하였다(Fig. 5). 계산은 파경사가 매우 급한 경우에 대하여 수행하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 잠수 면적이 같은 경우 원형 단면을 갖는 유벽이 사각 단면을 갖는 유벽에 비하여 상대 운동이 적다. 그러나 파랑에 의해 유발된 상대 운동에 의한 홀수의 감소는 파경사가 매우 급함에도 불구하고 원래의 홀수에 비하여 그 정도가 심각한 수준은 아니다. 우려했던 것과는 달리 유벽은 그 접촉 면적이 크고 무게는 가벼워서 수파를 잘 따라서 운동하며 결과적으로 수면에 대한 상대 운동이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

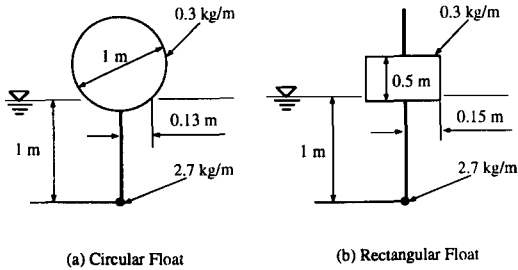


Fig. 4. Cross sectional view of conventional oil fences

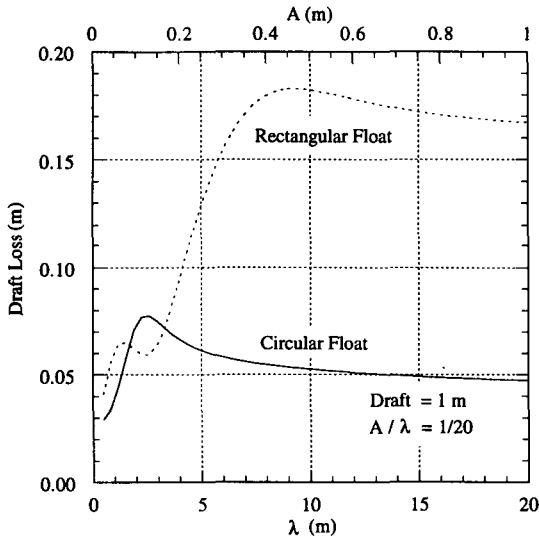


Fig. 5 Comparison of draft loss for the oil fences with a circular and a rectangular float

반면, 파랑에 의해 유발된 유벽의 수평 방향의 운동에 의하여 기름층과의 상대속도가 유발되며 이로 인하여 조류와 파랑이 동시에 존재하는 경우에 있어서는 유적 누출의 시작 속도가 감소가 될 것이다. 예를 들어 앞서의 식 (3)에 따르면 홀수가 1m인 유벽의 누출 속도( $V_e$ )는 0.46m/s이다. Fig. 6에는 홀수가 0.5m, 1m, 2m인 유벽에 대하여 유체 입자의 스커트의 끝단에 대한 상대속도를 나타낸 것이다. 비록 상대 속도가 0.46m/s 보다는 적으나 여기에 조류가 존재하게 되면 파랑에 의해 야기된 상대 운동에 의하여 누출 한계속도가 감소될 것이다.

본 연구에서는 쇠파(wave breaking) 현상과 같은 비선형 현상은 고려되지 않았고 선형 응답에 근거하여 해석을 하였다. 이러한 전제하에서 유벽은 삼각파와 같이 파경사가 매우 크거나, 조류가 존재하거나, 또는 예인되는 경우가 아닌 한 파랑에 의해 유발된 상대운동은 작으며 결과적으로 기름을 효과적으로 방제할 수 있는 것으로 나타났다.

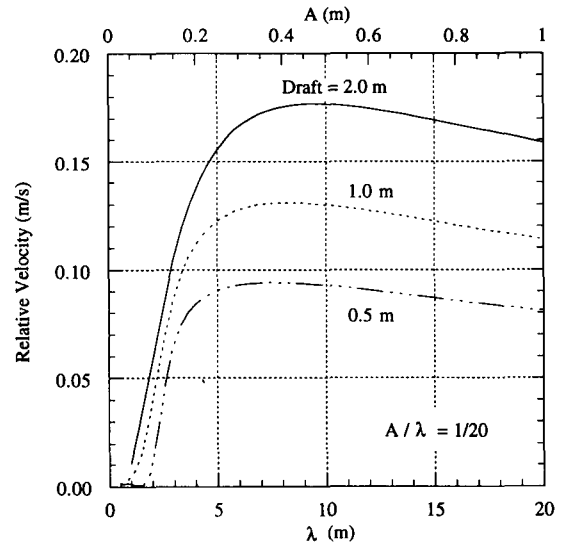


Fig. 6 Relative horizontal velocity of oil fence with respect to surrounding fluid at skirt end

#### 2.4 이중 유벽을 사용한 보유 성능의 증대

앞서의 결과에서 볼 수 있듯이 유벽의 성능은 조류나 파랑에 의해 매우 저하된다. 특히 홀수가 증가함에 따라 유벽이 변형되지 않은 상태에서의

홀수에 대한 변형된 상태의 유효홀수의 비가 현저히 감소하게 된다. 이것은 유벽의 홀수를 증가시켜도 실제로 얻어지는 유벽의 홀수의 증가는 그다지 크지 않다는 것을 의미한다. 그뿐만이 아니라 유벽의 홀수가 커지면서 스킵트 막에 작용하는 응력이 증대되어 더욱 강한 재질의 천과 튼튼한 계류 장치가 요구된다. 따라서 단일 유벽의 보유 성능을 증대시키는 것에는 한계가 있다.

이러한 유벽의 보유성능의 한계를 극복하기 위한 한 방법으로 유벽을 이중으로 설치하는 방법이 제기되어 왔다. 이 방법의 장점은 기름을 두 유벽 사이에 가두게 되면 전방 유벽에 의한 차폐 효과로 단일 유벽으로는 방제가 불가능한 유속에서도 보유가 가능해진다는 것이다. Lo[1996]나 Delvigne[1987]은 축소된 모형 유벽에 대하여 유벽간의 간격을 홀수의 16배 정도로 유지하면 전방 유벽 아래로 유출된 기름을 두 유벽 사이에 다시 가둘 수 있음을 실험적으로 입증한 바 있다.

Lee *et al.*[1998]은 실제 크기의 유벽 및 조류 조건하에서 이러한 방식이 유효한지 검토하고, 두 유벽 사이에 가두어진 기름의 재 유출을 최소화할 수 있는 유벽간의 간격을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 전방 유벽에서 누출된 기름이 두 유벽 사이에 원만히 재포획되는지의 여부를 검사하기 위하여 누출된 기름의 궤적을 수치 해석적으로 예측하였다. 유적의 궤적은 Lagrangian 입자 추적 방법에 의하여 구하였다. 즉, 주어진 유동장에서의 액적의 운동은 다음과 같은 운동 방정식을 만족한다.

$$\rho_o \frac{d \mathbf{u}_d}{dt} = -\frac{3\rho C_D}{4d_e} |\mathbf{u}_r| \mathbf{u}_r + (\rho_o - \rho) \mathbf{g} - \rho C_A \frac{d\mathbf{u}_r}{dt} + \rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (10)$$

위에서  $\mathbf{u}_d$ 는 유적의 이동 속도 벡터,  $\mathbf{u}$ 는 유속 벡터,  $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_d - \mathbf{u}$ ,  $\mathbf{g} = (0, -g)$ 는 중력가속도 벡터,  $d_e$ 는 유적의 직경,  $t$ 는 시간, 그리고  $C_D$ ,  $C_A$ 는 각각 저항계수와 부가 질량 계수를 나타내며 기존의 경험식을 사용하였다. 유동은 CFD5-FLOW3D라는 상용 점성 코드를 사용하여 해석하였다.

수치 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 회류수조에서 실험을 수행하였다. 유벽 형태의 물체를 지나는 균질류에 대하여 수조 밑바닥에서

파라핀으로 제작한 강체의 구와 kerosene 액적을 출발시켜 그 궤적을 CCD 카메라를 통하여 구하였다. Fig. 7은 액적의 궤적에 대한 계산 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 수치해석 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이와 같은 결과를 통하여 유적의 궤적을 수치 해석적으로 잘 예측할 수 있다는 것을 확인한 후 이 계산 방법을 실제의 조건에 대해 전방 유벽 아래로 누출된 유적의 거동 예측에 적용하였다.

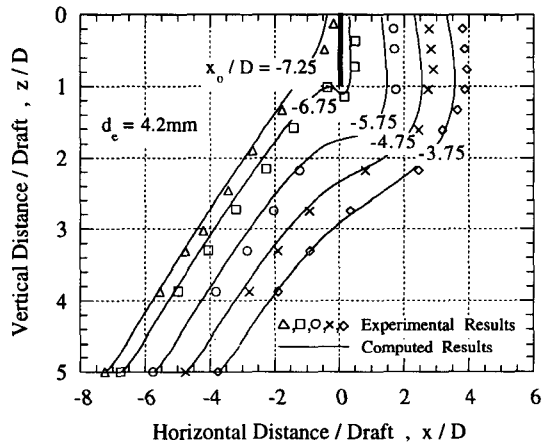
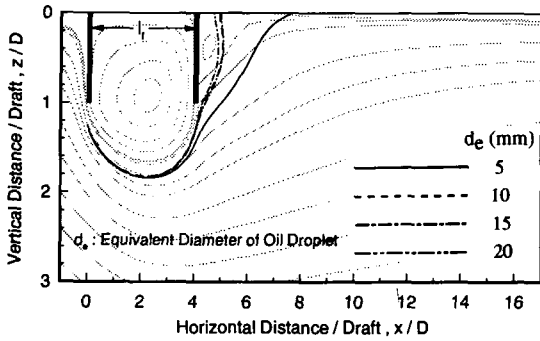


Fig. 7 Trajectory of spherical oil droplets

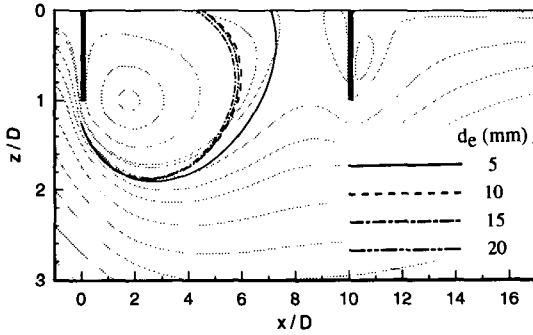
Fig. 8은 홀수가 0.5m인 동일한 유벽에 대하여 유속이 1.5m/s의 비교적 고속인 조건에서 유벽간의 간격을 변화시키면서 유적의 궤적을 계산한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 매우 빠른 조류 속도에서도 전방 유벽 아래로 누출된 기름이 다시 두 유벽 사이에 가두어 진다는 것을 볼 수 있다. 이 결과를 통해서 유벽간의 거리가 대략 유벽 홀수의 10배 정도이면 전방 유벽 아래로 누출된 기름을 다시 두 유벽 사이에 가둘 수 있다는 결론을 얻었다.

유벽을 이중으로 설치하더라도 조류 속도가 매우 커지면 누출을 피할 수가 없다. 이때 누출량은 두 유벽간의 거리에 따라 달라진다. 유벽간의 간격을 변화시키면서 최적의 유벽간의 거리를 결정해 보고자 실험을 수행하였다(Lee *et al.* [1997]). 실험은 회류수조에서 홀수 40mm, 두께 3mm의 두 개의 아크릴 유벽 모형간의 간격을 홀수의 6, 8, 10, 16배로 변화시키면서 수행하였다. 기름의 초기 두께는 실험을 누출이 일어나는

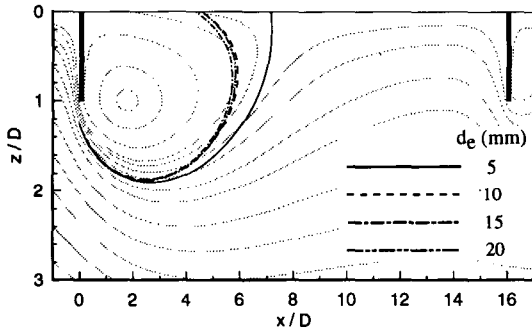
조건에서 수행하기 위하여 모든 경우에 대하여 2D/5로 비교적 두꺼운 값으로 두었다.



(a)  $l_j = 4D$



(b)  $l_j = 10D$



(c)  $l_j = 16D$

Fig. 8 Trajectory of oil droplets with tandem fences of various separation distance at  $U=1.5\text{m/s}$  for the droplet release point at  $z=1.25D$

두 유벽 사이에 가두어진 기름은 단일 유벽의 경우와 마찬가지로 유적 누출과 배수 누출의 두 가지 형태로 누출되는데 대부분의 누출은 배수 누출에 의하여 일어났다. 이러한 배수 누출은 두 유벽 사이에 발생하는 전진하는 기름 덩치 (travelling oil lump)가 후방의 유벽에 충돌할 때 발생된다. 이러한 전진하는 기름 덩치는 유벽의 끝단에서 떨어져 나오는 보텍스가 기름과 물과의 경계면에 부딪히면서 생성되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 시간에 따른 유층 두께의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 유벽간의 간격이 6D, 8D인 경우가 10D, 16D 경우보다 누출이 현저히 적다는 것을 알 수가 있다. 이러한 결과를 바탕으로 누출이 가장 적은 유벽간의 거리는 6D ~ 8D 정도일 것으로 추정되기는 하나 보다 다양한 기름의 종류 및 유속 조건에서의 추가적인 실험이 필요하다.

현재까지의 결과만을 바탕으로 하면 유벽간의 최적 거리는 재보유, 보유 용량, 수거 작업을 위한 기름층의 두께 등을 고려하여 약 8D로 추정된다.

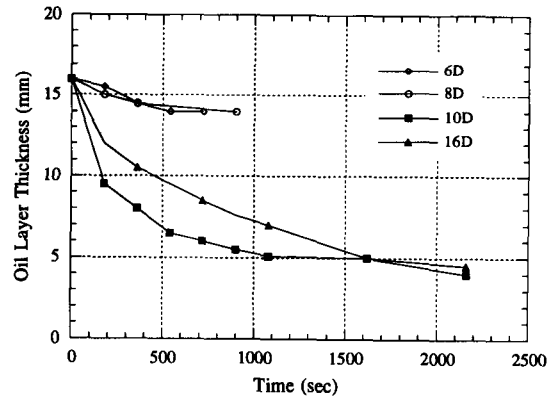


Fig. 9 Variation of mean thickness of the oil layer with respect to time for different separation distance between the two fences

### 3. 추후 연구에 대한 제언

앞으로 본 연구에서 다루지 못한 이론 및 실험 해석의 개선을 위한 연구가 필요하다고 본다. 먼저 속도 차가 큰 두 유체층의 경계면에서 발생하는 여러 현상의 이해를 위한 기초적인 연구가 필요하다. 즉 계면에서의 유적의 생성은 계면에 작



용하는 전단응력에 의해 야기된다. 본 논문에서와 같이 차원해석을 통하여 예측식을 유도할 수도 있겠으나 물성이 다른 두 유체층의 경계면에서의 점성이 고려된 안정성 해석을 통하여서도 유도가 가능할 것이다. 그리고 일단 생성된 유적의 누출 조건을 보다 정확히 예측하기 위해서는 Lagrangian 입자 추적 방법을 사용하여 유적의 거동을 보다 정확히 예측하는 것이 필요하다.

그리고 배수 누출은 계면에 작용하는 여러 응력에 의한 누적 효과라 볼 수 있다. 따라서 계면에 작용하는 전단응력과 속도차, 그리고 기름의 물성과의 관계가 연구되어야 한다. 한편 배수 누출이 일어나는 유속의 예측은 유벽의 변형에 의한 유효홀수의 감소도 함께 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서는 유벽의 횡방향의 변형 문제만이 다루어 졌으나 유벽은 종방향으로도 변형을 하게 된다. 유벽의 종방향으로의 변형은 유벽의 천에 가해지는 장력의 계산과 연계되어 있다. 과거에 몇몇 연구자들에 의하여 조류중 유벽의 가해지는 장력과 종방향 변형에 관하여 연구를 수행한 바 있으나(예, Swift *et. al.*[1992]), 이들의 연구에서는 변형을 구하기 위해 필요한 유벽 단면의 저항계수는 일정한 것으로 가정하였다. 그러나 Kang [1996]에서 입증된 바와 같이 실제로는 변형에 의하여 저항계수는 크게 달라진다. 따라서 본 논문에서 소개된 방법을 적용하면 유벽에 가해지는 장력과 종방향 변형을 보다 정확히 추정할 수 있다.

파랑이 유벽 및 기름층의 거동에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 매우 미흡한 실정인 것으로 파악된다. 우선 계면의 안정성에 대한 파랑의 영향에 대해 보다 심층적인 연구가 필요하다. 그리고 파랑에 의한 유벽의 변형과 운동으로 인한 성능 저하는 조류중 변형을 고려하여 이루어지는 것이 바람직 할 것으로 보인다. 선형 응답에 기초한 연구에서는 유벽의 성능은 파랑에 별로 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 조류에 의해 변형된 유벽의 파랑중 거동은 매우 달라질 수가 있으므로 조류중 변형을 고려하여 이 문제를 재검토할 필요가 있다. 이러한 시도는 Fujino *et al.*[1995]에 의하여 조류 속도가 매우 낮은 경우에 대하여 수행된 바가 있으며 실제로 유벽의 운동이 크게 달라진다는 것이 입증되었다.

이중 유벽의 성능에 관해서는 우선 모형 실험

에서 얻어진 결과가 실제 현장에서도 재현될 지의 여부를 판별할 수가 있어야 하겠다. 이를 위해서는 실험역 실험이 가장 적절하겠으나 이것이 여의치 않을 경우에는 보다 큰 모형과 유속에 대하여 실험을 수행하여 그 경향을 분석해서 간접적으로나마 추정이 가능하리라 여겨진다. 또한 점성의 영향에 대해서도 실험적인 연구가 수행되어야 하겠다. 그리고 학술적인 측면에서는 두 유체층의 계면에서 발생하는 진진하는 기름 뭉치의 발생 원리에 대해서도 연구해 볼 만한 가치가 있다고 판단된다.

본 연구 결과를 포함하여 유벽과 관련된 대부분의 연구는 2차원 유벽의 경우에 대하여 수행되었다. 조류 및 파랑중 기름층의 유벽 주위에서의 거동의 3차원 해석은 학술적인 면에서나 실용적인 면에서 연구를 해볼 만한 가치가 있는 과제라 생각한다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 산하 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 지원으로 이루어 졌으며 이에 사의를 표한다.

## 참고문헌

- [1] Agrawal, R. K., and Hale, L. A., 1983, "A new criterion for predicting headwave instability of an oil slick retained by a barrier," *Proc. of the Offshore Technology Conference*, Dallas, Texas, 461-466.
- [2] Cormack, D., 1983, *Response to Oil and Chemical Marine Pollution*, Applied Science Publishers, New York.
- [3] Cross, R. H. and Hault, D. P., 1972, "Oil booms in tidal currents," *J. Waterways, Harbors and Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 98, WW1, 25-34.
- [4] Delvigne, G. A. L., 1987, "Laboratory experiments on oil spill protection of a water intake," In: *Oil in Fresh Water: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology*, (Eds. Vandermeulen, J. H., and Hruday, S. E.), Pergamon Press,

- 446-458.
- [5] Fage, A. and Johansen, F. C., 1927, "On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span," *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 116, 170-197.
- [6] Frank, W., 1967, "Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids," *Naval Ship Research and Development Center*, Report 2375.
- [7] Fujino, M., Tasaki, R., Kagemoto, H., Manabe, N. and Nakamura, K., 1995, "Behaviors of a boom in waves and currents," *Proc. of International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 332-338.
- [8] Kang, K. H., 1996, *Theoretical and Experimental Investigations of Motion and Containment of Contaminated Free Surface Layer*, Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., Pohang Univ. of Sci. and Tech., 170p.
- [9] Kang, K. H., Lee, C. M., and Han, D. G., 1997, "Degradation of containment capability of oil fences due to deflection in currents," *Autumn's Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, 357-360.
- [10] Lau, Y. L. and Moir, J., 1979, "Booms used for oil slick control," *J. Environmental Eng. Div.*, ASCE, Vol. 105, No. EE2, 369-382.
- [11] Lee, C. M., Kang, K. H., and Cho, N. S., 1997, "Containment capability of tandem oil fences," *Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center*, AFR-96-C, 3-48.
- [12] Lee, C. M., Kang, K. H., and Cho, N. S., 1998, "Trapping of leaked oil with tandem oil-fences with Lagrangian analysis of oil droplet motion," *J. Offshore Mech. and Arctic Eng.*, *Trans. of the ASME*, Vol. 120.
- [13] Leibovich, S., 1976, "Oil slick instability and the entrainment failure of oil containment booms," *Trans. ASME*, Vol. 98, 98-105.
- [14] Lo Jen-Men, 1996, "Laboratory investigation of single floating booms and series of booms in the prevention of oil slick and jellyfish movement," *Ocean Engineering*, Vol. 23, 519-531.
- [15] Miller, E.R., Lindenmuth, W. T., Lehr, W. E. and Abrahams, R. N., 1972, "Experimental procedures used in the development of oil retention boom designs," *Marine Technology*, SNAME, Vol. 9, 317-332.
- [16] Sloan, S. L., Bitting, K. R., and Nordvik, A. B., 1994, Phase 1: Oil Containment Booms at Sea Performance Tests, *Marine Spill Response Corporation, Technical Report Series 94-007*.
- [17] Sloan, S. L., Pol, D. F. and Nordvik, A. B., 1995, Phase 2: At Sea Towing Tests of Fire Resistant Oil Containment Booms, *Marine Spill Response Corporation, Technical Report Series 95-001*.
- [18] Suzuki, K., 1975, "On the drag of two-dimensional bluff bodies semi-submerged in a surface flow," *J. Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 137, 22-35. (in Japanese)
- [19] Swift, M. R., Celikkol, B., LeCompagnon, G., and Goodwin, C. E., 1992, "Diversion oil booms in current," *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, Vol. 118, No. 6, 587-598.
- [20] Tarnogrodzki, A., 1993, "Theoretical prediction of the critical Weber number," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19. No. 2, 329-336.
- [21] Tsukino, Y., Sugawara, K. and Tsuchida, F., 1981, "Oil containment performance of oil booms of type A and B," *Technical Report of Institute of Ocean Environmental Technology*, Vol. 1, 35-55. (in Japanese)