

## 파랑과 속도전단에 의한 유출유의 분산 특성

설동관<sup>(1)</sup>, 류청로<sup>(2)</sup>, 김종규<sup>(3)</sup>

### Dispersion Characteristics of Spilled Oil by Waves and Velocity Shear

by

Dong-Guan Seol<sup>(1)</sup>, Cheong-Ro Ryu<sup>(2)</sup> and Jong-Kyu Kim<sup>(3)</sup>

#### 요 약

본 논문은 쇄파와 속도 전단에 의해 발생하는 난류에 의해 해상에 유출된 기름이 유적으로 분해되어 해수면 하로 분산되어 가는 과정을 논하였다. 유막 분산의 역학적 메커니즘을 파악하기 위하여 두 가지 수리실험, 즉 전단발생장치와 조파수조를 이용하여 난류를 발생시켰다. 이러한 실험으로부터 혼합시간이 증가함에 따라 수면에 형성된 유막은 수십 마이크로미터에서 수백 마이크로미터의 입경을 가진 유적으로 분산되었다. 뿐만 아니라 유출된 기름의 풍화정도에 따라서 상이한 분산 메커니즘을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

The major interest of this paper is how the spilled oil over the sea is dispersed into water column especially under the shear and turbulence such as breaking wave. Two hydraulic experiments were conducted to investigate the oil slick break-up characteristics into small and large droplets under the variation of velocity shear and breaking waves. From the experiments in the shear generator and the wave flume, small droplets which have diameters of tens to hundreds of micrometers were uniformly distributed throughout the whole control volume as time goes by. In addition, it can be seen that the weathered spilled oil has a different break-up mechanism from fresh spilled oil.

Keywords: 속도 전단, 쇄파, 유막 분산, oil break-up, oil droplet

---

(1) 학생회원, 부경대학교 해양공학과

(2) 정회원, 부경대학교 해양공학과

(3) 정회원, 부경대학교 해양산업개발연구소

## 1. 서론

해양에 유출된 기름의 변성 및 이류·확산과정은 유출된 기름의 성질, 해역의 유동특성뿐만 아니라 여러 환경적 요인에 의존하며, 이러한 상태는 상호관련된 복잡한 기름의 물리적-화학적 과정에 의해 지배된다(Mackay & McAuliffe [1988]). 특히 해상에 유출된 기름은 초기에 중력적 퍼짐(spreading)에 의해 그 유막의 두께가 얇아지게 되어 해수면에 존재하는 파랑(특히 쇄파)이나 해수 상층부의 난류에 의해 파괴되어 작은 유적(droplet)을 형성하게 된다(Bouwmeester & Wallace [1986]; Fingas *et al.* [1993]). 이렇게 작은 유적으로 분해된 유출유는 수면하로 분산되어 해수와 상호작용에 의하여 에멀전을 형성하기도 하고 수면하에 존재하는 순환류 혹은 입자 상호간의 충돌로 응집되어 재부상하기도 한다(Kolluru *et al.* [1994]).

수면 하에서의 유적의 거동과 재부상은 현장에서 방제작업 시 유류의 이동경로를 추적하고 제거하는 작업을 매우 어렵게 만들 뿐만 아니라 유화된 기름막의 재형성에 의한 2차 오염의 피해도 초래한다(Farmer & Li [1994]). 기존의 기름막의 작은 유적으로의 분해에 관한 연구에는 Aravamudan *et al.* [1982], Bouwmeester & Wallace [1985], Johansen & Audunson [1982], 그리고 Raj [1977] 등의 연구가 있었다. 그리고 이미 개발된 일반적인 유류의 이류-분산모델에서는 유막으로 부터 분리되어 나온 안정된 상태의 유적을 가정하여 이 유적이 이동하는 궤적을 추적함으로써 그 확산범위를 예측하여 왔다(Johansen & Audunson [1982]; Elliot [1986]).

유막으로부터 파괴되어 유적으로 형성된 기름은 원래의 상태에 있을 때와는 다른 물리적 변성 과정 및 수송과정을 겪게 된다. 뿐만아니라 분산된 유적이 시간이 지남에 따라 풍화과정을 거쳐 해수덩어리와 결합하여 에멀전을 형성하게 됨으로써 기름의 점성을 포함한 물리적 성질을 변화시켜 방제작업의 효율을 저하시키게 된다(Nordvik *et al.* [1996]). 본 연구에서는 시간 경과에 따라 수면하에서 이루어지는 유적의 분산특성과 그 주요 원인인 해상에 존재하는 난류에너지와의 관계를 실험을 통해 파악하고자 한다. 이러한 관계로부터 주어진 역학적 해상 조건과 파

랑에 의한 유출유의 분산을 산정할 수 있는 수학적 모델링과 이로부터 얻어진 결과를 이용하여 유출유 확산모델에의 적용이 가능할 것이다.

## 2. 수리실험을 통한 유적 분산의 특성파악

본 연구의 목적은 해상에 유출된 기름이 난류나 쇄파 등에 의해 작은 입자로 분산되어 수송되는 과정에서 발생하는 기름 입자간의 응집과정에 대한 영향인자를 규명하는 것이다. 해상에 유출된 기름막의 분산과정은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 그 크기에 따라 두 종류의 유적으로 분해된다. 즉, 입경이 큰 유적은 빠른 부상속도를 가짐으로써 해면상의 유막에 다시 응집되고, 어떤 특정 크기 이하의 유적은 미소한 부상속도를 가지므로 연직적 혹은 수평적으로 확산될 수 있다(Mackay *et al.* [1980]). 특히, 이러한 유막의 분산은 쇄파나 전단류와 같이 해상에 존재하는 난류에 의한 영향이 지배적이라고 할 수 있다. 이러한 유막의 분산에 미치는 쇄파와 속도 전단의 영향을 수리 실험을 통해 규명해보고자 한다.

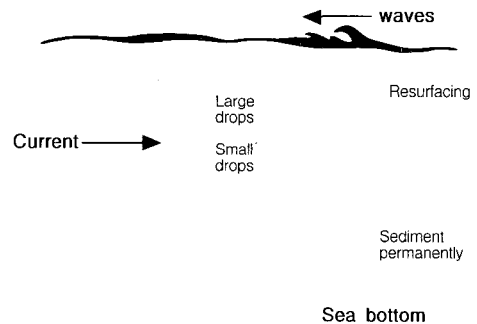


Fig. 1 A schematic diagram of dispersion process (after Mackay *et al.* [1980])

### 2.1 전단발생장치에 의한 기름의 분산 실험

본 실험에서는 Fig. 2와 같은 표준시험용기와 전단발생장치(shear generator)를 사용하여 용기내에 난류를 발생하도록 하였다. 모터의 속도에 따라 그 용기내에 주어지는 전단율( $G$ )을 조절할 수 있으므로 현장의 다양한 조건과 근사한 난류 에너지( $\epsilon$ )의 발생이 가능하다. 그리고 실험에서

사용한 기름은 Arabian 원유로서 그 풍화상태에 따른 분산특성을 파악하기 위하여 1일정도 태양광선 아래(일평균기온 20℃)에서 풍화시킨 기름과 새로운 기름 두 종류를 사용하였다. 그 물리적 성질은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

또한 실험에서는 유막의 두께에 따른 분산의 변화를 알아보기 위하여 유막을 0.6, 1.2, 1.5 mm로 수면에 투입하였다. 그리고 시간에 따른 유적의 입경변화를 파악하기 위하여 유막이 완전히 파괴된 후로부터 5분에 걸쳐 1분 간격으로 1/1,000초로 고속촬영하여 그 결과를 분석하였다. 각 실험조건에 대한 자료는 Table 2와 같다.

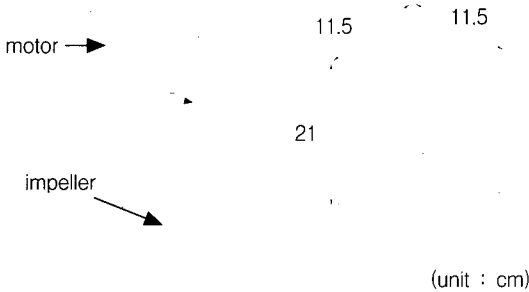


Fig. 2 Layout of equipment for shear test

Table 1 Physical properties of oil used in the experiments

Oil type, weathering state		Density $\rho_o$ (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity $\nu_o$ (cSt)
Arabian heavy crude oil	not weathered	0.888	12.3
	weathered	0.900	17.89

## 2.2 조파수조에서의 유막분산 실험

유막의 유적으로의 분해에 미치는 파랑의 효과 및 유적의 입경분포에 따른 분산특성을 파악하기

위하여 조파수조에서 수리실험을 행하였다.

이러한 목적을 위해서 기름막의 분산에 영향을 주는 제 영향요소를 차원해석을 통해 고찰함으로써 합리적인 해석과 실험조건이 되도록 하였다. 이 기름막의 분산에 영향을 미치는 각종 물리량은 다음과 같이 생각할 수 있다. ① 파랑의 특성에 대한 물리량: 환산심해파고( $H$ ), 주기( $T$ ), 쇄파파고( $H_b$ ), 에너지소산량( $\epsilon$ ), ② 기름막의 특성에 관한 물리량: 기름막의 두께( $h_o$ ), 유적의 평균 입경( $d_o$ ), 밀도( $\rho_o$ ), 점성계수( $\nu_o$ ), 표면장력( $\sigma$ ) 등을 고려할 수 있다. 즉,

$$\phi_1(H, T, H_b, \epsilon, h_o, d_o, \rho_o, \nu_o, \sigma) = 0 \quad (1)$$

여기서 유적의 평균입경( $d_o$ )를 종속변수로 하고,  $H, T, \rho_o$ 를 반복변수로 하여 Buckingham  $\Pi$  정리를 이용하여 차원해석하여 각 무차원량을 물리적 해석이 용이하도록 조정하면 유적의 평균입경에 대한 영향인자를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d_o}{H} = \phi_2\left(\frac{H}{L}, \frac{H_b}{L}, \frac{h_o}{H}, \frac{T^3 \epsilon}{H^2 \rho_o}, \frac{T^3 \nu_o}{H^2}, \frac{T^2 \sigma}{H^3 \rho_o}\right) \quad (2)$$

파랑에 있어서 증력에 비하여 점성 및 표면장력에 대한 영향은 무시할 만하고, 동일한 유종에 대해서는 밀도와 점도가 같으므로, 유막의 분산은  $H/L, H_b/L, h_o/H, T^3 \epsilon/H^2 \rho_o$ 와 매우 밀접한 관계에 있음을 알 수 있다. 특히 본 실험에서는 파랑의 성질 중에서 가장 큰 난류에너지를 가진 쇄파 조건에서 유막 분산의 실험을 행하였다. 따라서 전술한 물리적 파라미터 중 쇄파파형( $H_b/L$ )을 독립변수로 하여 그에 따른 유막의 분산에 대하여 실험을 행하였다. 실험에서 측정된 파랑의 조건은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

본 실험에서 사용된 조파수조는 2차원 조파수조로서 그 제원은 Fig. 3과 같다. 즉, 수조 전체의 길이는 5 m, 폭 0.2 m이고 수심 0.45 m이다.

파랑과 속도전단에 의한 유출유의 분산 특성

Table 2 Experimental conditions for shearing test

Exp. No.	Oil condition	Oil thickness $h_o$ (mm)	Impeller speed (rpm)	Velocity gradient $G$ ( $s^{-1}$ )	Energy dissipation rate $\epsilon$ ( $J m^{-3} s$ )
G111	not weathered	0.6	169	241.02	56.1
G121		1.2	184	262.48	66.5
G131		1.5	184	262.48	66.5
G211		0.6	219	312.56	95.0
G311		0.6	260	371.21	133.0
G321		1.2	267	381.23	140.3
G331		1.5	264	376.94	137.1
G411		0.6	280	399.82	154.3
G511		0.6	310	442.74	189.2
G521		1.2	310	442.74	189.2
G112	weathered (during 24 hrs, 20°C under sun light)	0.6	193	275.36	66.5
G122		1.2	195	278.22	74.7
G132		1.5	188	268.21	69.5
G212		0.6	222	316.85	96.9
G312		0.6	270	385.52	143.4
G322		1.2	265	378.37	138.2
G332		1.5	262	374.08	135.0
G412		0.6	280	399.82	154.27
G512		0.6	310	442.74	189.1
G522		1.2	310	442.74	189.1

Table 3 Measured wave characteristics

Wave No.	$H$ (cm)	$T$ (s)	$H_b$ (cm)
1	7.66	0.76	8.32
2	7.10	0.75	7.23
3	6.41	0.82	7.30
4	5.45	0.87	6.11
5	4.87	0.91	6.98
6	4.67	1.25	5.81
7	2.94	1.46	3.70

과 쇠파대에 용량식 파고계를 설치하여 그 파고를 측정하였다. 분산된 유적의 입자크기와 분산 특성을 파악하기 위하여 비디오카메라를 쇠파대 부근에 설치하여 1/30초로 촬영하여 화상해석장치(Image Analysis System PIAS KIT-500)를 이용하여 해석하였다. 이 장치를 이용함으로써 짧은 시간에 발생하는 쇠파에 의한 유류의 분산을 해석할 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 난류에너지에 의한 유막의 파괴

전단실험에서는 전절에서 제시한 바와 같은 조건 하에서 유적의 분산실험을 행하였다. 각 실험조건에 대한 결과를 보면 대체로 유막의 두께가 증가할 수록 유막의 파괴에 소요되는 시간은 증가하고 더 많은 난류에너지가 필요함을 알 수 있다.

이들 결과 중 특히 유막이 파괴되기 위한 혼합강도와 유막의 두께와의 관계를 살펴보았다. Fig. 4와 Fig. 5에 혼합강도와 유막의 파괴시간과의 관계, 그리고 유막의 두께에 따른 유막파괴시간의

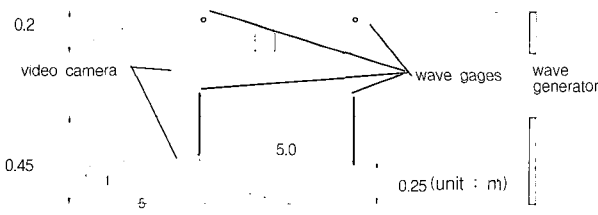


Fig. 3 Dimensions of experimental wave flume

쇠파대 부근에 기름의 양을 일정하게 투여하는 장치를 설치하여 각 실험조건에 대해 일정한 기름이 유출될 수 있도록 하였다.

그리고 Fig. 3에서 보여진 것처럼 조파판 전면

관계를 나타내었다. 결과를 보면 유막을 0.6 mm 로 하였을 경우 혼합강도가 증가할수록 유막의 파괴시간은 감소하였으며 풍화된 기름을 사용하여 실험하였을 경우가 유출된 후 상대적으로 풍화가 덜 된 기름보다는 더 많은 파괴시간이 소요됨을 알 수 있다.

그리고 유막두께에 따른 유막파괴시간의 관계를 살펴보면 실험조건인 0.6, 1.2, 1.5 mm의 유막 두께에 대해 두께가 증가할수록 유막파괴에 더 많은 시간이 걸림을 알 수 있었다. 즉, 0.6 mm 유막의 파괴시간은 약 23초 정도가 걸렸으며 1.5 mm 유막의 파괴시간은 30초 이상이 소요되는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 실험으로부터 기름의 풍화정도에 따라 풍화된 기름은 풍화과정 중 여러 휘발성분이 기체 중으로 휘발됨에 따라 점도의 증가로 유막 파괴에 더 많은 시간이 필요로 한다.

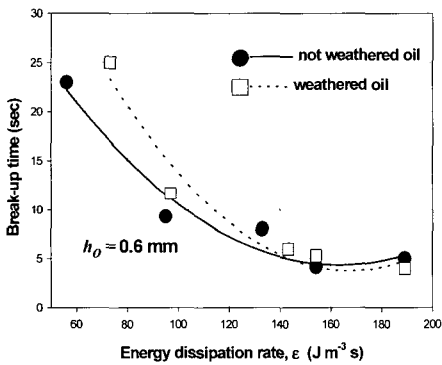


Fig. 4 Oil slick break-up time for various energy dissipation rate

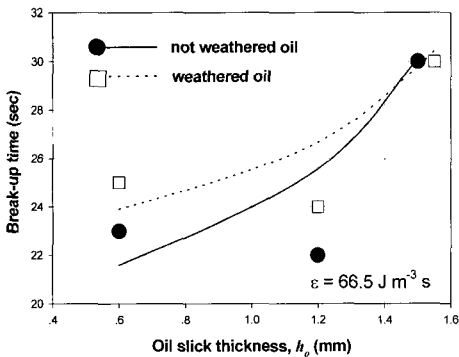


Fig. 5 Oil slick break-up time for various slick thickness

### 3.2 유적의 입경분포와 난류에너지의 지속시간

해상의 난류에너지에 의해 파괴된 유막은 유적의 상태로 수면하로 분산된다. 이러한 현상은 기름의 표면장력에 의해 수면하에서 droplet 혹은 particle의 형태로 분산된다. 이러한 유적의 입경은 난류에너지와 매우 깊은 관련이 있음이 Delvigne & Sweeney [1988]에 의해 실험적으로 증명된 바 있다. 또한 이러한 입경은 난류가 지속적으로 가해짐에 따라 더 미세한 입자로 쪼개지는 것이 관찰되었다. 즉, 혼합시간이 늘어남에 따라 수면하로 분산된 유적은 더 미세한 입자상태로 분해되어진다.

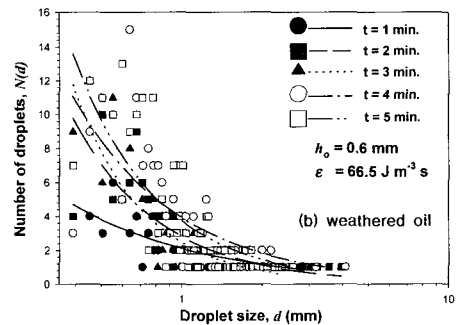
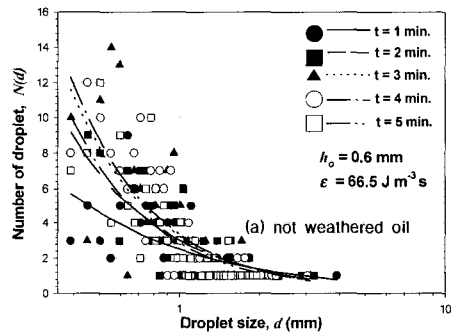


Fig. 6 Oil droplet size distribution with time

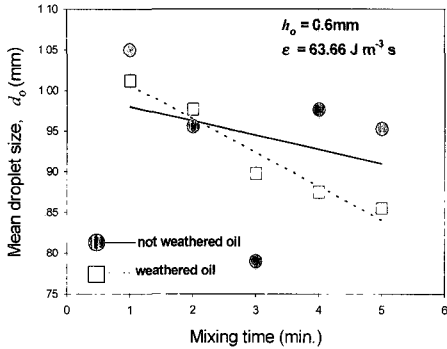


Fig. 7 Variations of mean oil droplet size with time and oil condition

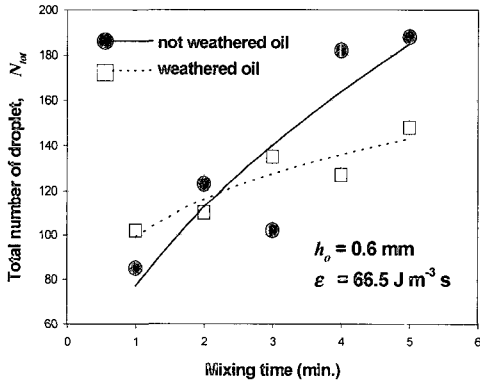


Fig. 8 Total droplet number per given unit area in various time

Fig. 6의 결과는 혼합용기내의 임의단면(5 cm×5 cm)에서의 입경분포를 해석한 결과로서 시간에 따른 입경분포의 회귀곡선의 기울기가 점점 급해짐을 알 수 있다. 그리고 평균입경을 통해 풍화된 기름과 풍화되지 않은 기름의 유적형성의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 비교하였다. 유적의 평균입경은 최대 1.05 mm에서 최소 0.79 mm까지의 범위에 분포되어 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 혼합시간이 지속됨에 따라 그에 따른 입경도 축소됨을 알 수 있다. 그리고 풍화된 기름의 유적입경이 풍화되지 않은 기름의 유적 입경분포보다 분산정도가 훨씬 적은 것으로 나타났는데, 이것은 풍화로 인해 기름 분자가 안정화되기 때문인 것으로 사료된다.

또한 이러한 유적의 파괴로 인해 임의 단면적 내의 유적의 갯수는 증가된다. 즉, Fig. 8에서 보여진 바와 같이 풍화되지 않은 기름의 경우에는 초기 1분째에 85개의 유적이 존재하던 것이 5분째에는 188개로 약 2배이상의 증가율을 보였다. 이와는 달리 풍화된 유적의 경우에는 그 갯수가 어느 정도 증가하다가 시간이 지속될수록 증가율이 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 Nordvik *et al.* [1996]의 연구에서 제시된 바와 같이 풍화로 인해 기름의 밀도와 점도 등의 변화로 인해 분리효율이 저하되었기 때문이다.

### 3.3 난류에너지의 강도와 유적 입경분포

전술한 바와 같이 해상에 유출된 기름막의 파괴에는 여러가지 종류의 난류에너지가 필요로 한다. 그러한 난류에너지와 유막의 분산과는 매우 밀접한 관계가 있으며 그 입자 크기와도 연관성이 있다. 이러한 난류에너지의 강도와 유적의 입경의 관계를 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9는 혼합실험에서 각기 다른 에너지 소산량에 따른 0.6 mm의 유막두께에 대해서 2분동안 난류에너지를 작용시킨 결과이다. 결과에서 난류에너지가 커질수록 평균입경은 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 높은 난류에너지일수록 그 유적의 파괴율은 더욱 높다고 할 수 있다. 그리고 같은 조건에서 1일을 풍화시킨 기름의 경우와 비교하였다. 풍화된 기름의 물리적 특성상 풍화되지 않은 기름보다는 입경이 더 큰 유적을 형성하는 것으로 나타났다.

Delvigne & Sweeney [1988]는 난류에너지와 유적 입경의 상관관계에서 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$d_o, d_{max} \propto \epsilon^{-0.50(+0.1)} \quad (3)$$

여기서,  $d_o$  : mean droplet size

$d_{max}$  : maximum droplet size

$\epsilon$  : energy dissipation rate

즉, 유적의 입경분포는 난류에너지에 따라 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 관계식에서 기름의 풍화상태에 대해서는 고려되지 않았다.

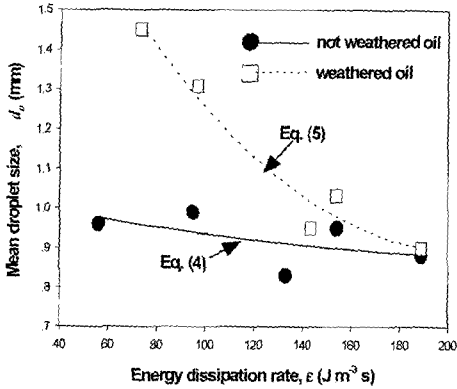


Fig. 9 Mean droplet size for various energy dissipation rates

따라서 본 연구에서는 기름의 풍화정도 따라 Fig. 9로부터 다음과 같은 관계를 얻었다.

$$d_o = 1.34393\epsilon^{-0.0797677} \quad : \text{not waethered oil} \quad (4)$$

$$d_o = 14.1331\epsilon^{-0.527733} \quad : \text{weathered oil} \quad (5)$$

그리고 이상에서 제시한 관계식들에 대한 비교는 Fig. 10에 나타내었다. 결과를 보면 본 연구에서 제안한 식에 의한 유적의 입경분포는 0.85 mm에서 1 mm 정도의 범위 걸쳐 있고, Delvigne & Sweeney가 제안한 식에 따르면 최대 1.35 mm에서 최소 0.72 mm의 범위에 걸쳐 있어 그 변화폭이 다소 넓은 것으로 나타났다. 그리고 에너지 소산량이  $120 \text{ J m}^{-3} \text{ s}$  부근에서는 그 입경분포가 비슷한 경향을 나타내고 있다.

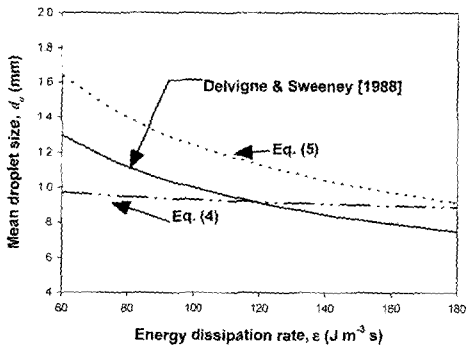


Fig. 10 Comparisons of relationships between mean droplet size and energy dissipation rates

실제 해상에서 발생하는 파랑에 의한 기름의 분산 특성을 파악하기 위하여 전절에서 설명한 소규모 조파수조에서 유막 분산의 실험을 하였다. 실험 결과에 따르면 유적의 크기는 쇄파파고의 크기에 반비례하는 것으로 나타났다. 그리고 실험조건에서 주어진 입력파랑조건 중에서 쇄파대내 파고가 3.70 cm일때는 쇄파가 없이 파의 초오름만이 발생하여 기름이 분산되지 않고 자연적인 퍼짐현상에 의하여 연안에 접안하였다. 즉, 쇄파파형경사의 값이 0.01이하에서는 거의 유막의 분산은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

쇄파에 의한 난류에너지는 쇄파파고에 비례하며, 이러한 쇄파파고  $H_b$ 와 유적의 입경을 각각 무차원 파라미터화한 상대쇄파파형  $H_b/L$ 과 상대유적입경  $d_o/H$ 에 대해 정리하였다. 그 결과를 Fig. 11과 같이 도시하였다.

이러한 결과로부터 앞서 제시한 지수감소함수로 회귀식을 구해보면

$$\frac{d_o}{H} = 0.00464 \left( \frac{H_b}{L} \right)^{-0.589665} \quad : \text{not weathered oil} \quad (6)$$

$$\frac{d_o}{H} = 0.00600 \left( \frac{H_b}{L} \right)^{-0.455668} \quad : \text{weathered oil} \quad (7)$$

와 같다.

이러한 관계식들로 부터 현장조건에서의 난류 에너지의 크기에 따른 유적의 입경분포의 파악이 가능하며, 입경에 따라 유적의 분산 메커니즘의 추정이 가능할 것이다.

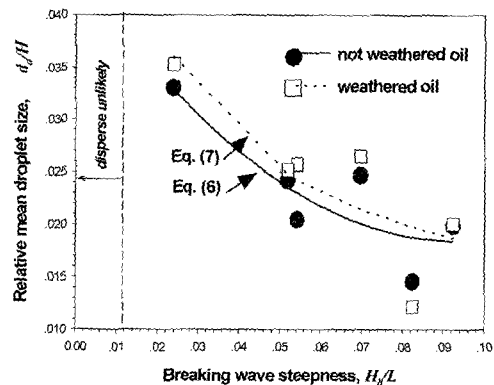


Fig. 11 Mean droplet size for various breaking wave steepness

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 해상에 유출된 기름이 수면하로 분산되어 가는 메커니즘에 관하여 연구하였다. 특히 이러한 기름 분산의 원인이 되는 해상의 난류조건을 실험실에서 재현하여 그 상관관계를 실험을 통해 검증하였다. 유출유는 유적의 상대로 해수면 하로 분산되어가며, 그 입경크기가 분산 정도를 나타내는 중요한 파라미터로 고려되었다. 이러한 일련의 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험으로부터 유막의 파괴시간을 측정할 결과 난류전단의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 24시간을 풍화시킨 기름막은 약 10% 정도 더 긴 파괴시간이 소요되는 것으로 나타났다.
- 2) 화상해석장치를 이용한 전단실험장치에서의 입경분포 분석 결과에서는  $h_o = 0.6 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 66.5 \text{ Jm}^{-3}\text{s}$ 에 대해서 최소 0.4 mm에서 최대 4 mm 정도의 분포를 나타내었다. 그리고 혼합지속시간에 따라 입경분포선의 기울기가 더욱 급해지는 것이 발견되었다. 즉, 이것은 혼합에너지에 의해 지속적인 유적의 파괴(break-up)를 의미하는 것이다.
- 3) 시간이 지남에 따라 계내에 존재하는 입자수는 유적의 break-up에 의해 증가하였다. 또한 표면 누유의 droplet화에 의해 강화되었다.
- 4) 난류에너지 소산량에 따른 유적의 평균입경의 변화로부터 분산된 유적의 입경은 난류에너지량에 대해 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고, 조파수조에서의 쇄파에 의한 유막 분산의 실험으로부터 주어진 파랑조건과 유적의 입경과의 관계식을 지수감소함수로 표현할 수 있었다.

이상의 연구 결과로부터 자연상태에서의 기름의 분산은 해상의 상태와 기름의 변성과정에 미치는 외부환경적 인자들을 파악하여 고려되어야 하겠다. 그리고 이러한 유출유의 분산에 있어서 환경조건과 입자간 상호작용을 정식화하여 기

름입자의 형성과 재결합과정을 고려할 수 있는 모델링이 필요하다고 하겠다.

#### 후 기

본 논문은 정부에서 시행한 환경공학선도기술사업(G-7 과제)의 연구결과의 일부임을 밝혀둔다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Aravamudan, K., P. Ray, J. Ostland, E. Newman, & W. Tucker, 1982, "Break-up of oil on rough seas - simplified models and step-by-step calculations", Report CG-D-28-82, US Coast Guard, Washington, DC, USA.
- [2] Bobra, M., 1992, "A study of water-in-oil emulsification", Report EE-132, Environment Canada, Environment Protection Directorate, Ottawa, Canada.
- [3] Bouwmeester, R. J. B. & R. B. Wallace, 1986, "Dispersion of oil on a water surface due to wind and wave action", Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.
- [4] Delvigne, G. A. L. & C. E. Sweeney, 1988, "Natural dispersion of oil", *Oil & Chemical Pollution*, 4, 281-310.
- [5] Delvigne, G. A. L., 1991, "On scale modelling of oil droplet formation from spilled oil", *Proc. 1991 Oil Spill Conf.*, Am. Petr. Inst., Washington, DC, 501-506.
- [6] Elliot, A. J., 1986, "Shear diffusion and the spreading of oil in the surface layers of the North Sea", *Dt. Hydrogr. Zeit.*, 36(3), 506-510.
- [7] Farmer, D. & M. Li, 1994, "Oil dispersion by turbulence and coherent circulations", *Ocean Engng.*, 21 (6), 575-586.
- [8] Fingas, M. F., B. Fieldhouse, M. A. Bobra, & E. J. Tennyson, 1993, "The physics and chemistry of emulsions", *Proc. Workshop on Emulsions*, Marine Spill Response Corp., Washington, DC, 1-11.
- [9] Johansen, O. & T. Audunson, 1982, "Drift of submerged oil at sea", *Rep. P319/1*, Continental Shelf Institute, Trondheim, Norway.
- [10] Kolluru, V. S., M. L. Spaulding, & E. L. Anderson, 1994, "A three dimensional oil



dispersion model using a particle based approach”,  
*17th Arctic & Marine Oil Spill Program*, Tech.  
Seminar, Environment Canada, Ottawa, Canada,  
867-894.

[11] Mackay, D. & C. D. McAuliffe, 1980,  
“Fate of hydrocarbons discharged at sea”, *Oil  
and Chemical Pollution*, 5, 1-20.

[12] Mackay, D., S. Paterson, & K. Trudel, 1980,  
“A mathematical model of oil spill behaviour”,  
*Economic and Technical Review Report*,  
Environmental Protection Service, Canada.

[13] Nordvik, A. B., J. L. Simmons, & K. R.  
Bitting, 1996, “Oil and water separation in marine  
oil spill clean-up operations”, *Spill science &  
Technology Bulletin*, 3(3), 107-122.

[14] Raj, P. K., 1977, “Theoretical study to  
determine the sea state limit for the survival of oil  
slicks on the ocean”, Report DOT-CG-D-90-77,  
prepared for the US Coast Guard, Washington, DC,  
USA.