韓國海岸・海洋工學會誌
第4卷 第1號, pp. 26~33, 1992年 3月

파-흐름의 共存場에서 실트질 粘土의 浮上特性
Suspension Properties of Silty Mud in Combined Wave-Current Flow

金次謙* · 李宗燮*
Cha Kyum Kim* and Jong Sup Lee*

要 旨: 파-흐름의 共存場에서 실트질 粘土의 浮上特性을 연구하기 위해 造波水槽에 흐름발생장치를 설치하여 波浪만 존재하는 경우, 順流 및 逆流가 존재하는 경우에 대해서 堆積物의 浮上實驗을 하였다. 逆流가 작용할 때가 順流가 작용할 때보다 浮上量이 훨씬 많았는데 이는 逆流가 작용할 때는 底面에 亂流成分이 발달하지만, 順流가 작용할 때는 振動流 效果가 감소하기 때문이다. 파-흐름의 共存場에서 실트질 점토의 浮上限界底面剪斷應力은 $\tau_c \simeq 0.045$ N/m²인 것으로 추정되었다. 初期浮上率과 底面剪斷應力과의 關係式 및 初期浮上率과 측정된 有義波高와의 關係式이 道出되었는데, 初期浮上率과 底面剪斷應力과의 관계는 상당히 分散되어 나타났으나, 初期浮上率과 測定된 有義波高와의 관계는 상관성이 양호하게 나타났다. 波動下에서 堆積物의 농도가 거의 平衡狀態에 도달했을 때에 濃度의 鉛直傾斜로부터 算定된 堆積物의 鉛直擴散係數는 底面에서 水深의 1/2 지점까지는 指數形態로 增加하는 樣相을 나타냈으나, 그 이상부터는 水深에 관계없이 거의 一定하게 나타났다.

Abstract □ Physical experiments were conducted to investigate the suspension properties of silty mud in combined wave-current flow. Suspension mass when there was opposing current was much higher than that when there was following current. It is due to the fact which strong turbulent flow in the bottom is developed in the opposing current but oscillatory flow effect decreases in the following current. Critical bed shear stress for suspension of silty mud in combined wave-current flow was deduced to be $\tau_c \simeq 0.045$ N/m². Formulas expressing the relation with initial suspension rate with bed shear stress, and the relation between the former and measured significant wave height were deduced. The relationship of initial suspension rate with bed shear stress was significantly scattered, but the relationship with measured significant wave height was reasonably good. When there is wave only, vertical diffusion coefficients of sediment were calculated from the vertical concentration gradients of suspended sediment when the concentration of suspended sediment approached to nearly equilibrium state. The diffusion coefficient increased exponentially with height from the bottom in the lower half of the flow depth but were nearly constant in the upper half of the flow depth.

1. 緖 論

최근에 와서 海洋空間의 利用 및 開發과 관련해서 河口域이나 沿岸海域의 開發이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 海域의 底質은 粘土나 실트와 같은 微細한 粒子로 형성되어 있는 경우가 많다. 이들 미세입자로 형성되어 있는 海域에서 海洋構造物을 설계하는 경우나 環境問題를 고려하는 경우는 波浪이나 흐름에 의한 底泥의 擧動을 파악해야 한다.

일반적으로, 底泥는 含水比가 높고 연약하기 때문에 적은 剪斷應力下에서도 파랑이나 흐름에 의해 쉽게 再浮上하여 흐름에 의해 移流輸送하게 된다. 폐쇄성 內灣이나 內海와 같이 정온한 海域으로 유입된 浮遊泥는 침강하여 港灣이나 航路埋沒을 일으키고, 또한 水質 및 底質을 汚染시킨다. 그래서, 粘土와 실트를 많이 함유하는 底泥나 浮遊泥의 移動現象은 漂砂移動 및 海洋環境 兩面에서 주요 관심 대상이 되고 있다. 특히, 우리나라 黃海岸에서는 沿岸養殖場으로 浮遊泥의 流入 및 發電所 冷却器로 浮遊泥의 流入이 큰 문제로 대두되고 있다.

*釜山水產大學校 海洋工學科(Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea)

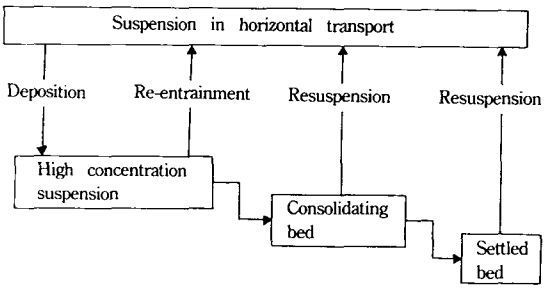

Fig. 1. Physical states and processes governing estuarial cohesive sediment transport(after Mehta *et al.*, 1982).

따라서, 이와 같은 問題點들을 豫測하고 制御하기 위해서는 堆積物의 浮上機構를 解明해야 한다. 堆積物의 輸送現象은 浮上·凝集·沈降·堆積·壓密·泥層中에서 質量輸送 등의 單位課程으로 성립되어 있다 (Fig. 1).

波와 底泥의 相互作用에 관해서는 Gade(1958), Dalrymple and Liu(1978), Hsiao and Shemdin(1980), 中野 等(1988), Maa and Mehta(1990) 등의 연구가 있고, 波에 의한 底泥의 浮上特性에 대해서는 Thimakorn(1980), Maa(1986), 柴山 等(1987), 楠田 等(1988, 1989), 三村 等(1989)의 연구가 있다.

Thimakorn(1980)은 粘土의 浮上特性에 대한 연구를 하였고, 柴山 等(1987)은 kaolinite에 대해서 Hsiao and Shemdin(1980)의 點彈性體模型에 의해 底面剪斷應力을 산정하여 底泥의 浮上率과의 관계를 구했다. 楠田 等(1988)은 底泥의 浮上에 미치는 含水比 및 주기의 영향에 대한 연구를 하였으며, 또한 楠田 等(1989)은 攪亂·不攪亂底泥를 사용하여 파동 하에서와 흐름 하에서 底泥의 浮上特性에 대한 實驗을 하여 각각의 경우에 대한 浮上限界剪斷應力을 제시하였다. 三村 等(1989)은 파동 하에서 含水比의 크기에 따른 底面剪斷應力과 浮上率과의 관계를 검토하였다. 이와 같이 堆積物의 浮上特性에 대한 연구는 주로 파랑만 존재하는 경우, 또는 흐름만 존재하는 경우에 대해서만 진행돼 왔다. 그러나, 실제 海洋에는 파랑과 흐름이 共存하기 때문에 파-흐름이 共存할 때 堆積物의 浮上特性에 대한 연구가 필요하다. 파-흐름이 공존할 때 底泥의 浮上特性에 대해서는 中野와 鶴谷(1988)의 연구가 있다.

따라서, 本 硏究에서는 파-흐름의 共存場에서 底泥의 浮上特性에 대한 實驗을 하여 浮上限界底面剪斷應力, 浮上率과 底面剪斷應力 및 有義波高와의 관계, 堆積物의 鉛直擴散係數를 평가하고자 한다.

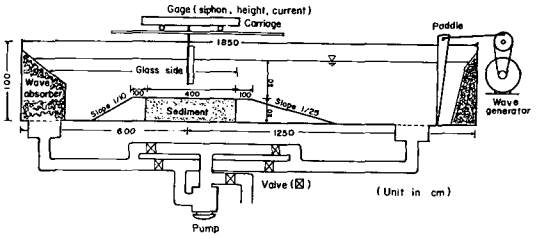

Fig. 2. Schematic diagram of experimental equipment.

2. 浮上實驗

2.1 實驗方法 및 條件

파-흐름 하에서 底泥의 浮上特性에 대한 實驗을 하기 위해 길이 18.5 m, 폭 0.6 m, 높이 1.0 m의 造波水槽에 循環式 흐름발생장치를 설치하였다(Fig. 2). Fig. 2에 나타나 있듯이 水槽 內에 길이 4.0 m, 높이 0.2 m에 걸쳐 堆積物을 설치하여 約 5~12時間 壓密시켰다. 堆積物은 金과 李(1991)가 沈降實驗에서 사용한 試料(全南 靈光 堆積物)로서 시료의 粒徑分布는 1.5~128 μm이고, d_{50}은 20 μm이다. AASHTO 분류법에 의하면 2%가 粘土, 94%가 실트, 약 4%가 粗粒成分으로 나타났으나, Wentworth 분류법에 의하면 10%가 粘土, 84%가 실트, 약 6%가 粗粒成分인 것으로 나타났다. 堆積物이 설치된 中央部 鉛直 4個點(저면으로부터 2, 5, 12, 22 cm)에서 濃度, 流速 및 波高를 소정시간(실험개시 후 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120 분)마다 측정하였다. 波高는 容量式 波高計, 流速은 프로펠러형 전자유속계로 측정하였다. 파만 존재할 때와 파-흐름이 공존할 때 順流(following current) 및 逆流(opposing current)에 의한 浮上特性을 연구하기 위해 波高를 6, 9, 10 cm, 波의 週期를 1.2, 1.5 s, 流速을 0, ±10, ±20 cm/s로 각각 변화시켰다. 本實驗에 사용된 實驗條件 및 計算된 底面剪斷應力 값은 Table 1과 같으며, Table 1에서 +流速은 順流, -流速은 逆流를 나타낸다.

2.2 底面剪斷應力 算定

파와 흐름이 共存할 때 底面의 단위면적당 작용하는

Table 1. Experimental conditions and calculated bed shear stresses in combined wave-current flow

Run number	Wave period (s)	Wave height (cm)	Current velocity (cm/s)	Water content (%)	Shear stress (N/m^2)
1-1	1.2	6	0	98	0.266
1-2	1.2	6	+10	114	0.276
1-3	1.2	6	+25	104	0.361
1-4	1.2	6	−10	113	0.302
1-5	1.2	6	−25	102	0.419
2-1	1.2	10	0	106	0.739
2-2	1.2	10	+10	118	0.729
2-3	1.2	10	+25	110	0.781
2-4	1.2	10	−10	106	0.800
2-5	1.2	10	−25	102	0.940
3-1	1.5	6	0	107	0.352
3-2	1.5	6	+10	118	0.343
3-3	1.5	6	+25	100	0.415
3-4	1.5	6	−10	105	0.402
3-5	1.5	6	−25	98	0.567
4-1	1.5	9	0	94	0.793
4-2	1.5	9	+10	98	0.746
4-3	1.5	9	+25	104	0.777
4-4	1.5	9	−10	111	0.878
4-5	1.5	9	−25	100	1.115

剪斷應力 τ_b는 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_b=\frac{\rho}{2}f_{cw}\hat{U}_w^2=\rho\hat{U}_{cw}^2 \tag{1}$$

여기서∏ ρ=물의 밀도, f_{cw}=파-흐름의 共存場에서 마찰계수, $\hat{U}_{cw}$=파-흐름의 共存場에서 底面摩擦速度의 最大値, $\hat{U}_w$=境界層 外側에서 水平速度振幅이다. $\hat{U}_w$는 potential 理論에 의해 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\hat{U}_w=\frac{\pi H/L(L/T-U_c\cos\phi)}{\sinh(2\pi h/L)} \tag{2}$$

여기서, H=波高, T=波의 週期, L=波長, h=水深, U_c=흐름의 平均流速, k=波數(=2π/L), φ=파와 흐름이 이루는 각이다. 波長은 파-흐름의 干涉效果를 考慮한 分散關係式으로부터 계산하였으며, 波高는 energy flux가 일정하다는 가정하에서 다음 식으로부터 계산하였다.

$$E_r(C_g+U_c)\ (1+\frac{U_c}{C_r})=E_{ro}C_{go}=\text{const.} \tag{3}$$

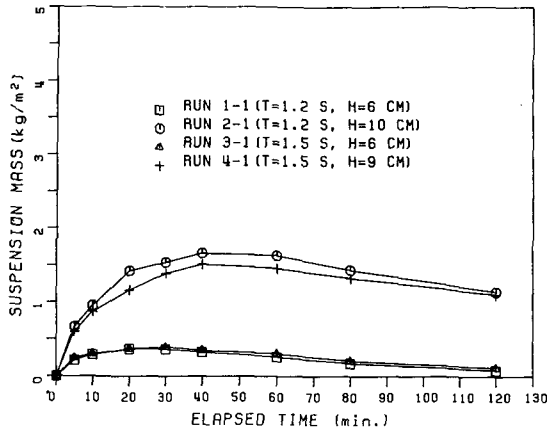

Fig. 3. Suspension mass of silty mud with time under waves.

여기서, C_r=波速, C_g=群速度, E_r=에너지 密度, 添字 o는 흐름이 존재하지 않을 때 深海에서의 값이다.

摩擦係數 f_{cw}는 式 (4)에 나타낸 Tanaka and Shuto (1981)의 방법으로 계산하였다.

$$\frac{f_{cw}}{2}=F^2\left(\frac{U_c}{\hat{U}_w}\right)^2+2FG\frac{U_c}{\hat{U}_w}\cos\phi+G^2 \tag{4}$$

$$F=\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{h}{z_o}\right)-1} \tag{5}$$

$$G=\frac{\kappa}{\pi}\left(0.25+0.101(\ln\frac{\sigma z_o}{\hat{U}_w}-\frac{1}{2}\right.$$
$$\left.\ln f_{cw}+2.42)^2\right)^{-1/2} \tag{6}$$

여기서, κ=Kármán constant(=0.4), z_o=zero-velocity level(=$\frac{1}{30}k_s$), k_s=roughness height(=$3d_{90}$)이다.

3. 實驗結果

3.1 波動 下에서 浮上量

底泥의 浮上量, M을 算定하는 식은 다음과 같다.

$$M=C\frac{Q}{A} \tag{7}$$

여기서, C=浮上濃度, Q=전수량, A=底泥의 表面積이다. 波浪만 존재할 때 底泥의 浮上實驗結果는 Fig. 3과 같다. 實驗開始 初에 浮上量이 급격히 증가하다가,

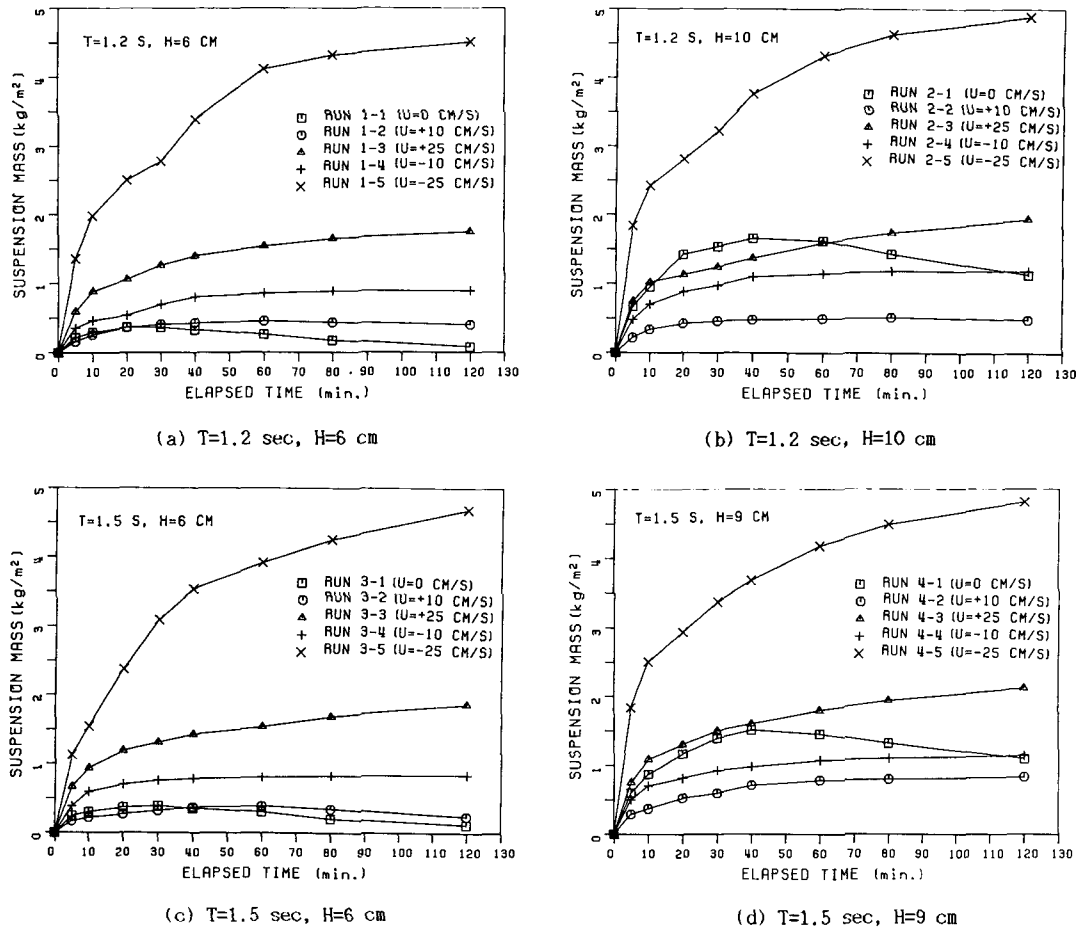

Fig. 4. Suspension mass of silty mud with time in combined wave-current flow.

파고가 큰 경우(Run 2-1, Run 4-1)에는 약 40분 후, 파고가 작은 경우(Run 1-1, Run 3-1)에는 약 30분 후에 거의 定常狀態에 도달한다. 定常狀態에 달한 후 약 10분 후부터는 점차 減少하는 양상을 보여주고 있다. 이와 같은 현상이 일어나는 원인은 다음에 설명하는 2가지 원인으로 볼 수 있다. 첫번째로, 시간이 경과함에 따라 底泥表層이 波浪에 의한 剪斷應力을 받아 鉛直方向으로 壓密되어 浮上이 일어나기 힘들기 때문이다. 두번째로, 저층에서 浮上濃度가 增加함에 따라 底泥表層과 上層水의 連成振動에 의해 境界面에서 剪斷應力이 減少되어 浮上率이 減少하기 때문인 것으로 생각된다.

3.2 파-흐름 하에서 浮上量

파-흐름이 共存할 때 浮上實驗結果를 Fig. 4에 나타냈다. 波浪만 존재할 때와 유사하게 實驗開始 初에 浮上量이 급격히 증가하다가 시간의 경과와 함께 浮上量이 거의 일정한 상태에 도달하고 있다. 그러나, 流速이 −25 cm/s 작용할 때는 浮上量이 시간의 경과와 함께 계속 증가하는 양상을 보여주고 있다. 이것은 逆流(−25 cm/s)가 작용할 때는 底面에 강한 亂流成分이 발달하지만, 順流가 작용할 때는 振動流效果를 減少시켜 底泥表面의 硬化現象이 빨리 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 最終浮上量은 모든 實驗에서 유속이 −25 cm/s 작용할 때가 가장 크고, 그 다음이 +25 cm/s 작용할 때이다.

4. 浮上率 및 鉛直擴散係數 算定

4.1 浮上率 算定

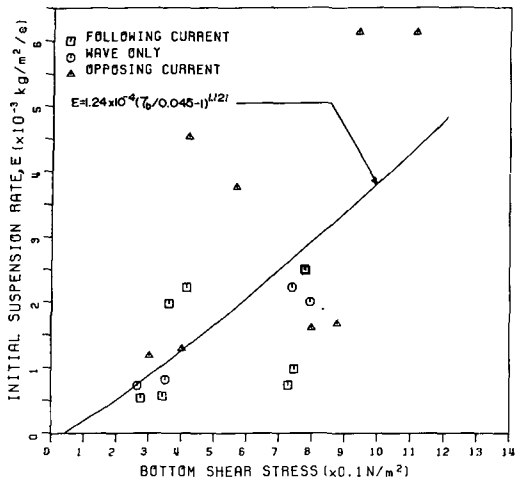

Fig. 5. Initial suspension rate of silty mud versus bottom shear stress in combined wave-current flow.

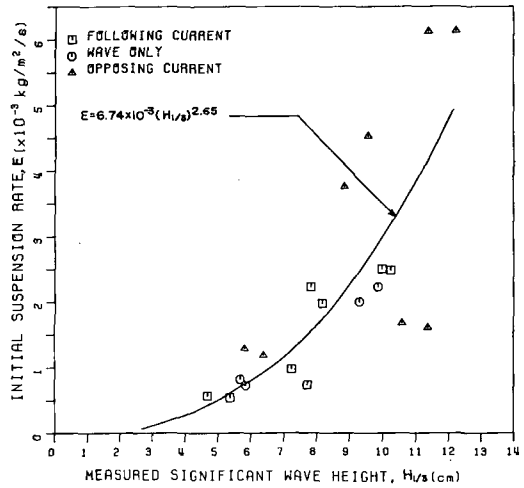

Fig. 6. Initial suspension rate of silty mud versus measured significant wave height in combined wave-current flow.

底泥의 평균 浮上率, E를 평가하는 식은 다음과 같다.

$$E=\frac{dC}{dt}\frac{Q}{A} \tag{8}$$

여기서, t=時間이다. 식 (8)에 의해 계산된 初期浮上率(실험개시 후 5분)과 底面剪斷應力과의 관계를 Fig. 5에, 初期浮上率과 측정한 有義波高와의 관계를 Fig. 6에 나타냈다.

初期浮上率과 底面剪斷應力과의 관계는 상당히 分散되어 나타나고 있으며, 특히 逆流가 작용할 때 分散度가 심하다. 그러나, 初期浮上率과 측정된 有義波高와의 관계는 분산성이 훨씬 적게 나타났다. 이와 같이 初期浮上率과 측정된 有義波高와는 상관성이 좋고, 初期浮上率과 底面剪斷應力과는 分散性이 큰 이유는 다음의 2가지 이유 때문인 것으로 생각된다. 1) 파-흐름 상호작용에 의해 逆流가 작용할 때가 順流가 작용할 때보다 水平 및 鉛直方向의 난류강도(Reynold stress)가 훨씬 강하기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 逆流가 작용할 때는 底面에 亂流가 발달하고, 順流가 작용할 때는 흐름에 의해 振動流 效果가 감소되기 때문이다. 따라서, 파-흐름이 共存할 때 底泥의 浮上率을 평가할 때는 底面剪斷應力 뿐만 아니라 Reynold stress도 고려하여 평가하여야 한다. 2) 底面剪斷應力을 산정하는데 있어서 약간의 문제가 있는 것으로 생각된다. 底面이 粘性土이고 파-흐름이 공존하는 경우에 대한 底面剪斷應力을 계산하기 위해 본 연구에서는 Tanaka와 Shuto(1981)의 방법을 사용하였다. Tanaka와 Shuto는 파-흐름이 共存할 때 底面剪斷應力의 산정방법을 이론적으로 해석하였으나, 이 解析結果는 實驗結果와 충분하게 比較・檢證이 되지 않았기 때문에 파-흐름의 共存場에서 底面剪斷應力 산정치에는 약간의 오차가 있을 수 있다.

本 硏究에서는 堆積物의 初期浮上率을 海田 等(1988)이 제안한 式 (9)를 사용하여 계산하였다.

$$E=\alpha(\tau_b/\tau_c-1)^{\beta} \tag{9}$$

여기서, α, β=經驗的 常數, τ_c=浮上限界底面剪斷應力(N/m^2), τ_b=底面에 작용하는 剪斷應力(N/m^2)이다. α, β는 토질의 力學指標인 Atterberg 限界値와 관계될 뿐만 아니라, 粒子間의 結合力을 나타내는 CEC(Cation Exchange Capacity)와 같은 物理-化學的인 變數等에 좌우된다. Fig. 5에 나타낸 최적적합곡선(best fitting curve)으로부터 파-흐름의 共存場에서 浮上限界底面剪斷應力은 τ_c≒0.045 N/m^2인 것으로 유추되며, 初期浮上率과 底面剪斷應力과의 관계는 式 (10)과 같이 평가되었다.

$$E=1.24\times10^{-4}(\tau_b/\tau_c-1)^{1.121}\ (kg/m^2/s) \tag{10}$$

Fig. 6에 나타낸 初期浮上率과 有義波高와의 관계는 $\tau_b\geq\tau_c$인 범위에서 式 (11)과 같은 관계를 갖는 것으로

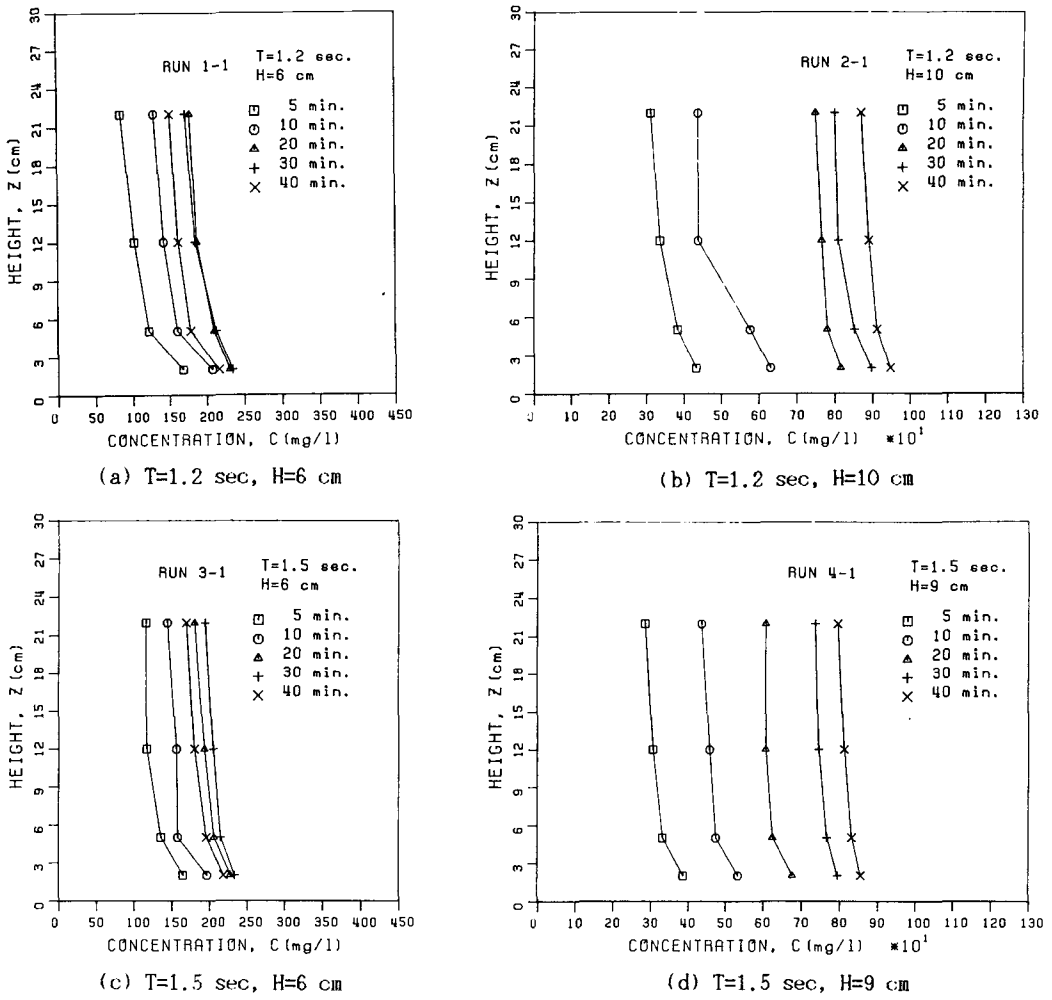

Fig. 7. Concentration profiles of silty mud with time under waves.

나타났다.

$$E = 6.74 \times 10^{-3} (H_{1/3})^{2.65} \ (kg/m^2/s), \ \tau_b \geq \tau_c \qquad (11)$$

4.2 擴散係數 算定

波動 下에서 鉛直方向의 擴散係數를 산정하기 위해서 흐름은 等流, 定常流이고, 沈降速度는 濃度에 따라 변하지 않고 일정한 것으로 가정한다. 이상의 가정에 기초하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + W_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \qquad (12)$$

여기서, K_z=堆積物의 鉛直擴散係數, z=底面에서 鉛直上方으로 距離, W_s=堆積物의 沈降速度이다. 식 (12)를 鉛直方向으로 積分하면 積分常數 K_1을 갖는 다음 식이 얻어진다.

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} + W_s C = K_1 \qquad (13)$$

어느 순간에 堆積物의 浮上率과 平衡狀態를 이룬다면 積分常數 K_1은 0가 되기 때문에 式 (13)은 式 (14)로 된다.

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} + W_s C = 0 \qquad (14)$$

W_s는 d_{50}=20 μm인 粒徑에 대해서 Stokes의 沈降法則을 사용하여 계산하였으며(W_s=0.036 cm/s), $\partial C/\partial z$는 Fig. 7에 나타낸 濃度가 거의 平衡狀態에 도달

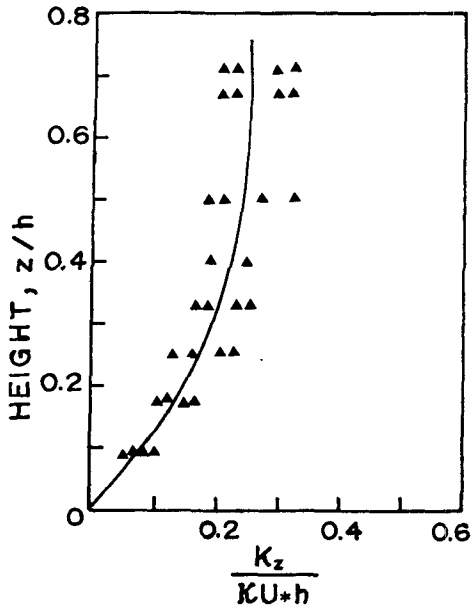

Fig. 8. Nondimensional sediment diffusion coefficient.

했을 때 濃度의 鉛直傾斜로부터 계산하였다. Run 1-1(T=1.2s, H=6 cm)과 Run 3-1(T=1.5s, H=6 cm)은 약 30분 후, Run 2-1(T=1.2s, H=10 cm)과 Run 4-1(T=1.5s, H=9 cm)은 약 40분 후에 거의 平衡狀態에 도달하였다.

式 (14)를 사용하여 계산한 堆積物의 鉛直擴散係數, K_z를 無次元化하여 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에 나타낸 最適適合曲線을 정식화하면 K_z는 저면에서 수심의 1/2지점까지는 식 (15)와 같고, 그 이상부터는 식 (16)과 같다.

$$K_z=\kappa U_* z e^{1.6z/h}, \qquad z/h\leq 0.5 \qquad (15)$$

$$K_z=0.24\kappa U_* h, \qquad z/h>0.5 \qquad (16)$$

여기서, U_*=摩擦速度이다. Fig. 8에 나타나 있듯이 堆積物의 鉛直擴散係數는 底面에서 水深의 1/2지점까지는 指數形態로 증가하다가, 그 이상부터는 일정하게 나타났다.

5. 要約 및 結論

파-흐름의 共存場에서 실트질 粘土를 약 5~12時間 壓密시킨 후 波浪만 존재하는 경우, 順流 및 逆流가 존재하는 경우에 대해서 堆積物의 浮上實驗을 하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 逆流가 작용할 때가 順流가 작용할 때보다 浮上量이 훨씬 많았다. 이것은 逆流가 작용할 때는 底面에 강한 亂流成分이 발달하지만, 順流가 작용할 때는 振動流 效果를 減少시켜 泥層의 硬化現象이 빨리 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

(2) 파-흐름의 共存場에서 실트질 점토의 浮上限界 底面剪斷應力은 τ_c=0.045 N/m^{2}인 것으로 유추되었다. 初期浮上率과 底面剪斷應力과의 관계는 상당히 分散되어 나타났으나, 初期浮上率과 측정된 有義波高와의 관계는 相關性이 양호하게 나타났다.

(3) 波動 下에서 堆積物의 濃度가 거의 平衡狀態에 도달했을 때에 濃度의 鉛直傾斜로부터 계산된 堆積物의 鉛直擴散係數는 底面에서 水深의 1/2 지점까지는 指數形態로 증가하는 양상을 나타냈으나, 그 이상부터는 水深에 관계없이 거의 일정하였다.

(4) 底泥의 浮上은 주로 堆積物의 形態, 壓密時間 및 鹽分에 의해 좌우되며, 鹽分濃度가 10 ppt 이하에서는 浸蝕率에 미치는 염분효과가 크다. 본 연구에서는 淡水를 사용하였고, 또한 壓密時間이 비교적 짧기 때문에 自然條件 하에서의 浮上率보다 多少 過大評價된 것으로 생각된다.

參考文獻

Dalrymple, A.R. and Liu, P.L.-F., 1978. Waves over soft muds: A two-layer fluid model. *Jour. Phys. Ocean.*, **8**, 1121-1131.

Gade, H.G., 1958. Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water. *Jour. Marine Res.*, **16**(2), 62-82.

Hsiao, O.V. and Shemdin, O.H., 1980. Interaction of ocean waves with a soft bottom. *Jour. Phys. Oceano.*, **10**(4), 605-610.

Maa, P.-Y., 1986. Erosion of soft muds by waves. Ph.D. thesis, University of Florida, Gainesville, Florida.

Maa, P.-Y. and Mehta, A.J., 1990. Soft mud response to water waves. *Jour. Water-way, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **116**(5), 635-650.

Mehta, A.J., Parchure, T.M., Dixit, J.G. and Ariathurai, R., 1982. Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds. in *Estuarine Comparisons*. Ed. Kennedy, V.S., Academic Press, New York, 591-609.

Tanaka, H. and Shuto, N., *1981*. Friction coefficient for a wave-current coexistent system. *Coastal Engrg. in Japan*, **24**, 105-128.

Thimakorn, P., 1980. An experiment on clay suspension under water waves. *Proc. 17th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, **3**, 2894-2906.

中野 晉, 鶴谷廣一, 1988. 底泥床上の底面せん斷應力と底泥運動, 第35回 海岸工學講演會 論文集, 342-346.
紫山知, 中西雅明, 石原 肇, 佐藤塡司, 1987. 波による底泥の浮游機構に關する研究, 第34回 海岸工學講演會 論文集, 271-275.
三村信男, 田口 智, 加藤 始, 1989. 波による底泥の巻き上げね沈降スラクツス, 第34回 海岸工學講演會 論文集, 309-313.
楠田哲也, 山西博幸, 川添正壽, 二渡 了, 1988. 波による底泥の浮游及び擧動に關する研究, 第35回 海岸工學講演會 論文集, 352-356.
楠田哲也, 山西博幸, 吉見博之, 二渡 了, 1989. 攪亂・不攪亂底泥の巻き上げ特性に關する 實驗的研究, 第36回 海岸工學講演會 論文集, 314-318.
鶴谷廣一, 江口秀二, 濱 潤, 1988. 流れと波による底泥の巻き上げに關する實驗的 研究, 第35回 海岸工學講演會 論文集, 357-361.
海田輝文, 楠田哲也, 二渡 了, 栗谷陽 一, 1988. 柔らかい底泥の巻き上げ過程に關する研究, 日本土木學會論文集, 393/II-9, 33-42.
金次謙, 李宗燮, 1991. 실트질 점토의 沈降特性에 관한 연구, 大韓土木學會論文集, **11**(3), 85-93.