BSPE 00338-643-2

波浪에 의한 海底 泥質堆積物의 浮遊에 관한 實驗研究

Experimental study on resuspension of bottom mud due to waves

1993. 12.

韓 國 海 洋 研 究 所

提 出 文

韓國海洋研究所長　貴下

本 報告書를 "波浪에 의한 海底 泥質堆積物의 浮遊에 관한 實驗研究" 事業의 最終報告書로 提出합니다.

1993. 12

研 究 員 : 박 광 순

김 종 완

要 約 文

1. 題目 : 波浪에 의한 海底 泥質堆積物의 浮遊에 관한 實驗研究

2. 研究의 必要性

波에 의한 연약한 底泥의 輸送機構는 아직 충분히 해명되고 있지 않다. 과거의 연안에서의 漂砂現象의 해석은 주로 非粘着性 底質을 대상으로 연구되어 왔고, 粘着性 底質을 대상으로 研究된 것은 비교적 적은 실정이다. 또 底質이 粘土나 실트인 微細粘着性 堆積物인 경우 浸蝕, 堆積, 압밀, 擴散 등 개개의 現象에 관한 기초적인 研究가 있지만 堆積物 輸送과 堆積量 豫測 등의 응용적인 研究는 충분하지 않은 실정이다. 한편 최근에는 底泥의 거동은 環境問題와 연관되어 중요한 문제로 되고 있다.

底泥의 부유는 底泥에 作用하는 外力과 이것에 대한 底泥의 抵抗力의 力學的關係에 의해 결정된다. 여기서 外力은 흐름에 의한 剪斷力, 波의 경우는 波動運動에 의한 剪斷力과 壓力이다. 微細堆積物에 관련된 工學的 問題의 解決을 위한 研究方法으로는 現場觀測, 實驗室 實驗, 流體力學과 堆積物 移動의 數値 모델링 그리고 流體力學의 physical modelling 등이 있다. 海底에 堆積한 底質 粘土가 波浪의 作用에 의해 다시 海水中에 浮遊하는 과정을 해석해서 浮遊量의 評價方法을 開發하기 위해서는 위와 같이 現場觀測 등의 方法이 있으나 현재 微細堆積物에 대해서는 測定 裝置가 거의 없으므로 흐름에 의한 底質粘土의 輸送現象의 경우 특히 粘土 表面層으로 부터 水層으로의 浮遊現象 및 흐름과 底泥의 相互作用을 糾明하기 위해서는 實驗的 解析을 할 필요가 있다. 또한 우리나라 沿岸海域에 널리 分布되어 있는 微細堆積物에 대한 site-specific한 移動豫測 모델의 開發 및 適用을 위해서는 먼저 그

基礎研究로서 微細堆積物의 波浪에 의한 輸送過程에 관한 연구가 實驗的으로 解明되어야 할 必要가 있다.

3. 研究目標

○ 波浪作用下에서 剪斷應力의 作用形態 차이에 의한 浮遊의 特性 및 底面剪斷應力과 浮遊率과의 關係에 대한 實驗的 調査

4. 研究內容 및 範圍

○ 波 作用下에서 底面의 限界剪斷應力과 底泥의 再浮遊率과의 關係 推定

Summary

There have been numerous studies on sediment transport in the water where waves and currents coexist. However when we deal with fine-grain sediment of mud-type, the transport processes are very complicate due to the lack of understanding of erosion, resuspension and deposition rates, particularly in the wave-current coexisting environments. One way to make the problem simple is to assume based on the field and/or flume experiments that the resuspension is controlled mainly by the wave action while the advection is due to the currents. So it has been widely assumed that the shear stress due to wave motion at the bottom during the passage typhoon or storm play an important role in the resuspension of mud. But until now, a quantitative approach to estimate the resuspension rate of mud under the wave action has not been accepted.

In the present study, the resuspension experiments for mud was carried out in a wave flume 5.5m x 0.3m x 0.2m wide in which a flap-type wave generator is installed. The main scope of the research carried out in this year(second year) are examination of the resuspensional process and resuspension rate of soft mud under wave action. It was found that the erosional flux depends on bed shear stress by wave action and on the water content of mud.

On the basis of these experimental results, an empirical relationship between the erosion rate of mud and the bottom shear stress under wave action was obtained, which can be readily applied to the sediment transport model.

目 次

要約文 ····· 3

第 1 章 序 論 ····· 15

第 2 章 底面 剪斷應力 ····· 17

1. 波-흐름 共存場에서의 底面剪斷應力 ····· 17

2. 波浪作用下에서의 底面剪斷應力 ····· 24

第 3 章 波浪에 의한 底泥의 浮遊實驗 ····· 29

1. 槪要 ····· 29

2. 實驗裝置 및 方法 ····· 29

3. 結果 및 分析 ····· 33

第 4 章 結論 및 提言 ····· 43

參考文獻 ····· 45

Contents

Summary ····· 5

Chapter 1. Introduction ····· 15

Chapter 2. Bottom shear stress ····· 17

1. Bottom shear stress for a wave-currnet coexistent system ····· 17

2. Bottom shear stress under wave action ····· 24

Chapter 3. An experiment of mud resuspension under water wave ····· 29

1. Introduction ····· 29

2. Expermental facilities and methods ····· 29

3. Results and discussions ····· 33

Chapter 4. Conclusion ····· 43

Reference ····· 45

List of Figures

Fig.2.1 Friction coefficient f_{cw} for ln (z_h/z_0) = 6.0) and ϕ = 0 ····· 21

Fig.2.2 Friction coefficient f_{cw} for ln (z_h/z_0) = 8.0) and ϕ = 0 ····· 22

Fig.2.3 Friction coefficient f_{cw} for ln (z_h/z_0) = 10.0) and ϕ = 0 ····· 22

Fig.2.4 Comparision of friction coefficients f_{cw} for wave motion alone ···· 23

Fig.2.5 Bottom velocity for monochromatic waves ($U_m T_n$ / $2H$ versus T_n / T) where T_n = $(h / g)^{\frac{1}{2}}$ ····· 27

Fig.3.1 Wave flume and experimental set-up ····· 30

Fig.3.2 Particle size distribution of mud ····· 32

Fig.3.3 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=2.2cm) ····· 34

Fig.3.4 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=4.0cm) ····· 34

Fig.3.5 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=7.5cm) ····· 35

Fig.3.6 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=2.2cm)····· 35

Fig.3.7 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=4.0cm) ····· 36

Fig.3.8 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=7.5cm) ····· 36

Fig.3.9 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=307%, H=2.2cm) ····· 37

Fig.3.10 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=307%, H=4.0cm) ····· 37

Fig.3.11 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=307%, H=7.5cm) ····· 38

Fig.3.12 Estimation of critical shear stress (τ_c) ····· 38

Fig.3.13 Relationship of the initial rate of erosion and shear stress ····· 39

List of Tables

Table 3.1 Conditions of experiment ····· 31

第 1 章 序 論

실트나 粘土라고하는 微細한 粒子가 두껍게 堆積해서 底泥를 형성하고 있는 沿岸域에서는 波作用에 의해서 底泥는 여러가지 擧動을 나타낸다. 예를들면 浮遊된 底泥 粒子가 移動, 堆積을 반복해서 沿岸域의 港灣 構造物이나 航路의 埋沒이라고 하는 現象을 일으키고 있다. 이들의 현상에 관련한 埋沒의 定量的 評價는 流體運動條件 예를들면 한 方向流 또는 振動流인가에 따라 크게 다르다. 한 方向流의 경우 埋沒에 관해서는 그 機構나 定量的 評價는 底泥의 物理的 性質이 알려진 경우에 있어서 거의 설명 가능한 수준에 도달해 있다(Kusuda et al., 1982, 1984). 그러나 振動流하에서 硏究는 그다지 많지 않은 실정이다.

波作用下에서의 粘着性 底質의 擧動에 관한 硏究는 Gade(1958) 이래 몇가지 연구가 있지만, 波에 의한 연약한 底泥의 輸送機構는 아직 충분히 해명되고 있지 않다. 과거의 沿岸에서의 漂砂現象의 解析은 주로 非粘着性 底質을 대상으로 연구되어 왔고, 粘着性 底質을 대상으로 硏究된 것은 비교적 적은 실정이다. 또 底質이 粘土나 실트인 微細粘着性 堆積物인 경우 浸蝕, 堆積, 압밀, 擴散 등 개개의 現象에 관한 기초적인 硏究가 있지만 堆積物 輸送과 堆積量 豫測 등의 응용적인 硏究는 충분하지 않은 실정이다. 한편 최근에는 底泥의 擧動은 環境問題와 연관되어 중요한 問題로 되고 있다.

海底에 堆積한 底質 粘土가 表面波의 작용에 의해 다시 海水中에 浮遊하는 과정을 해석해서 浮遊量의 評價方法을 開發하기 위해서는 現場觀測 등의 方法이 있으나, 현재 微細堆積物에 대해서는 測定 裝置가 거의 없으므로 波에 의한 底質粘土의 輸送現象의 경우 특히 粘土 表面層으로 부터 水層으로의 浮遊現象 및 波浪과 mud의 相互作用을 糾明하기 위해서는 實驗的 解析을 할 필요가 있다. 또한 우리나라 沿岸海域에 널리 分布되어 있는 微細堆積物에 대한 site-specific한 移動豫測

모델의 開發 및 適用을 위해서는 먼저 그 基礎研究로서 微細堆積物의 波浪에 의한 輸送過程에 대한 메카니즘이 實驗的으로 解明되어야 할 필요가 있다.

本 研究의 目的은 波에의한 底泥의 輸送現象 특히 浮遊現象에 着眼해서 波와 흐름이 共存하는 場에서의 底面剪斷應力의 評價에 대한 考察과 1차년도 研究에 이어 2次元 造波水路에서의 波浪에 의한 底泥의 浮遊實驗을 통하여 波 作用下에서 底泥의 浮遊 메카니즘의 特性을 把握하고 波 作用에 의한 底面剪斷應力과 底泥의 浮遊率과의 關係를 導出하고자 하였다.

第 2 章 底面剪斷應力

2.1 波-흐름 共存場에서의 底面剪斷應力

沿岸에서의 주요 環境要素는 外海와는 달리 潮流, 波浪 등의 沿岸力學 조건에 따라 크게 좌우되어 시간적, 공간적 變化를 크게 나타내고 있으며, 內灣에서는 주로 潮流의 크기 變化에 따라 變動되고 있다.

海底底質이 底泥에 의해 형성되고 있는 沿岸域에서 底泥는 潮流나 波浪에 의해 浮遊 輸送되고 沈降 堆積된다. 沿岸域에서 이러한 底泥의 輸送問題 있어서 지배적인 요인은 흐름보다는 波浪條件과 底泥의 物理的 특성 예를들면 堆積物의 剪斷强度, 含水比가 보다 지배적인 요인이라는 사실이 알려져 있고 含水比의 變化는 底泥의 粘度의 變化를 수반하여 底泥의 輸送量에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 堆積, 沈降, 압밀作用에 의한 堆積物의 堆積學的 特性 變化가 推定되어야 한다. 이것은 波가 作用한 경우의 波動運動에 의한 剪斷應力의 變動이나 壓力의 變動이 底泥의 浮遊에 크게 관여하고 있기 때문이라고 생각된다. 파에 의한 저니의 이동형태로서 파에 의해 부상한 후 흐름에 의해 운반되는 경우, 파에 의해서 움직이기 쉽게 된 저니가 사면을 따라서 흘러 내리는 경우, 질량수송에 의해서 이동하는 경우 등이 고려될 수 있다. 이러한 사실은 영광沿岸에서 堆積物 浮遊濃度와 관련 環境要素들의 觀測實驗에서 나타난 바와 같이 潮流-波浪이 複合된 地域에서 現場觀測 結果 트인 海域에서는 異常波浪의 來襲時 이로 인한 海底 底面剪斷應力의 增加로 潮流에 의한 것보더 약 10배 정도의 濃度 增加를 보였고, 外海로 부터 波浪의 영향을 받는 沿岸域에서 堆積物 移動은 보통시 潮流에 의한 것 보다는 暴風時 異常波浪에 의한 水粒子 運動과 潮流가 복합적으로 작용 할 때 크게 일어남을 확인되었고, 海底底質이 底泥에 의해 形成되는 沿岸域에서 微細堆積物의 輸送問題 있

어서 支配的인 要因은 흐름보다는 波浪條件임을 확인되었다(박, 1993). 이렇게 波浪 영향이 있는 지역에서는 浮遊濃度는 거의 波浪에 의해 좌우 되고 이렇게 浮遊된 堆積物의 수평적 移動은 潮流에 의해 일어남을 알 수 있고, 堆積物 浮遊濃度는 해상상태(波浪) 條件에 크게 좌우됨을 알 수 있다(박, 1993). 따라서 沿岸에서 主要 環境要素는 外海와는 달리 潮流, 波浪의 沿岸力學 條件에 의해 크게 좌우되어 時間的, 地域的 變化를 크게 나타내고 있으며, 內灣에서는 주로 潮流의 變動과 함께 變動되고 있다는 것이다. 이와 같이 底泥를 浮遊시키는 外力으로서는 底面 附近의 振動流가 중요한 역할을 하고 있는 것이 알려져 있고, 따라서 波浪과 흐름이 공존하는 條件에서 堆積物의 移動을 推定할 때 海底面에서 유체가 堆積物에 주는 海底摩擦 剪斷力을 먼저 정확히 推定하는 모델이 수립되어야 한다.

한편 우리나라에서 微細堆積物의 浸蝕, 堆積을 좌우하는 해상상태의 變化는 주로 冬季의 경우 약 일주일간의 주기를 가지고 내습하는 異狀波浪에 의하며 온대성 暴風 또는 颱風에 의한 해상상태 變化도 수일의 time scale을 갖는다(박, 1993). 堆積, 浸蝕 그리고 堆積된 층의 압밀 및 다음 來襲하는 異狀 해상상태에 의한 再浮遊 등의 過程을 數値 시뮬레이션하기 위해서는 적어도 그 過程 期間에 대한 潮汐, 潮流 및 波浪의 條件이 시뮬레이션 되어야 하며, 이에 따른 海底摩擦 剪斷力의 推算으로 堆積 혹은 浸蝕量이 推定이 되고 그 이후 흐름에 따른 水平移動을 계산할 수 있어야 한다.

우리나라에서 각종 沿岸環境評價 등에 사용되는 浮遊砂 推定 數値모델도 지금까지는 대부분의 경우에 波浪作用을 무시하고 주로 潮流의 영향만을 고려해 왔는데, 실제 波浪作用이 있는 沿岸에서는 浮遊堆積物의 堆積, 浸蝕過程에 波浪의 作用이 우세하며 潮流의 영향이 보완 되어 堆積, 浸蝕현상을 모델하여야 할 것이다. 微細堆積物 移動 모델을 위해서는 淺海波浪 변환모델과 潮汐.潮流모델이 선행되어야 하고, 이의 合成流에 의한 海底摩擦力에 의한 浸蝕, 堆積作用의 定量化가 이루어

져야 한다.

底面에서 剪斷應力은 堆積物의 移動과 밀접한 관계를 가지고 있고, 흐름과 波가 共存하는 場에서 底面單位面積당에 작용하는 剪斷應力은 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_{om} = \frac{\rho}{2} f_{cw} U_w^2 \tag{2.1}$$

$$U_w = \frac{\pi H/L(L/T - \overline{U_c}\cos\alpha)}{\sinh(2\pi H/L)} \tag{2.2}$$

여기서, H : 波高

T : 周期

L : 波長

h : 水深

ρ : 海水의 密度

f_{cw} : 波-흐름 共存場에서의 摩擦係數

U_w : 振動流의 振幅

α : 흐름의 進行方向과 진동류의 방향이 이루는 角

$\overline{U_c}$: 흐름의 鉛直平均速度

여기서 摩擦係數 f_{cw}는 다음의 각 경우로 구분하여 구할 수 있다(Tanaka, 1980).

1) $\phi=0$, $\overline{U_c}/U_w \geq 50$, $U_w/\sigma y_o \geq 50$ 인 경우

$$f_{cw} = \frac{2\kappa^2}{[\ln(y_h/y_o)-1]^2} \left(\frac{\overline{U_c}}{U_w}\right)^2 \tag{2.3}$$

여기서, y_h : 水深(total water depth)

y_o : 粗度길이

2) $\phi=0$ 또는 180, $\overline{U_c}/U_w>0$ 또는 $\overline{U_c}\neq 0$, $U_w/\sigma y_o \geq 50$ 인 경우

$$\sqrt{\frac{f_{cw}}{2}} = \frac{\kappa}{\ln(y_h/y_o)-1}\frac{\overline{U_c}}{U_w}+\frac{\kappa}{\pi}\left[0.25+0.101\left(\ln\frac{\sigma y_o}{U_w}-\frac{1}{2}\ln f_{cw}+2.42\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{2.4}$$

3) $\overline{U_c}=0$, $U_w/\sigma y_o \geq 50$ 인 경우

$$\ln\frac{1}{4\sqrt{f_w}}+\frac{1}{1.77}\sqrt{\frac{1}{f_w}-7.72}=\ln\frac{U_w}{\sigma y_o}-3.80 \tag{2.5}$$

4) $\overline{U_c}=0$, $\overline{U_c}/U_w=0$, $U_w/\sigma y_o \leq 50$ 인 경우

$$f_w = 1.06(U_w/\sigma y_o)^{-0.547} \tag{2.6}$$

5) $\phi=0$, $\overline{U_c}\neq 0$, $\overline{U_c}/U_w>0$, $U_w/\sigma y_o \leq 50$ 인 경우

$$\sqrt{\frac{f_{cw}}{2}} = \frac{\kappa}{\ln(y_h/y_o)-1}\frac{\overline{U_c}}{U_w}+0.728\, f_{cw}^{-0.25}\left(\frac{U_w}{\sigma y_o}\right)^{-0.408} \tag{2.7}$$

6) 波向線과 흐름이 각도 ϕ를 가지고 교차하는 때($\phi\neq 0$), $\overline{U_c}/U_w$:0~∞,

$U_w/\sigma y_o \geq 50$ 인 경우

$$\frac{f_{cw}}{2} = B^2\left(\frac{\overline{U_c}}{U_w}\right)^2+2BC\frac{\overline{U_c}}{U_w}\cos\phi+C^2 \tag{2.8}$$

여기서, $B = \dfrac{\kappa}{\ln(y_h/y_o)-1}$ (2.9)

$$C = \frac{\kappa}{\pi}\left[0.25+0.101\left(\ln\frac{\sigma y_o}{U_w}-\frac{1}{2}\ln f_{cw}+2.42\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad (2.10)$$

이 식은 $\phi=0$인 때는 식 (2.4)와 일치한다.

한편 Fig.2.1 및 Fig.2.2의 점선은 식(2.3)을 나타내고, Fig.2.1, Fig.2.2 그리고 Fig.2.3의 ● 표시는 식(2.4)를 이용해서 계산한 f_{cw} 의 값을 나타내고 있다. 그리고 Fig.2.4는 식(2.5)에 의한 계산치를 나타내고 있다.

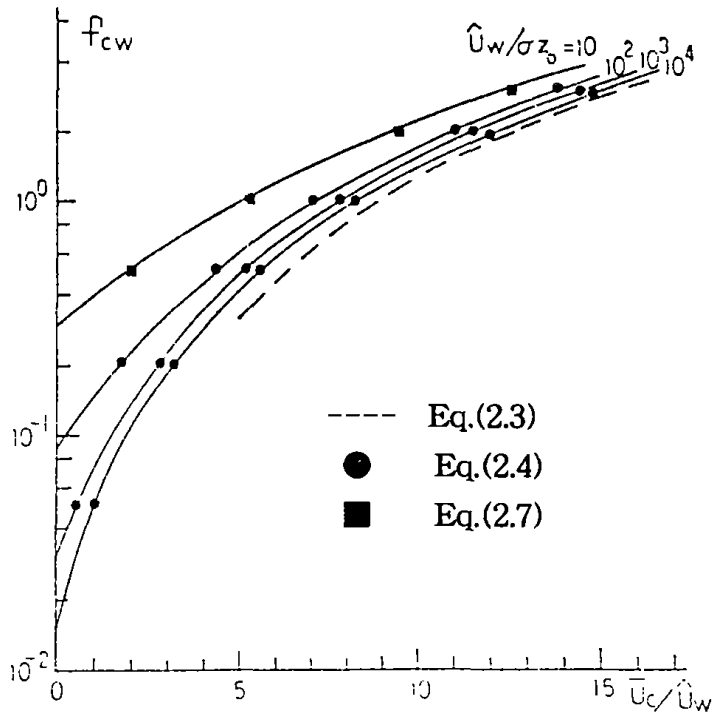

Fig.2.1 Friction coefficient f_{cw} for $\ln(z_h/z_0)$ = 6.0 and ϕ = 0
(from Tanaka and Shuto, 1981)

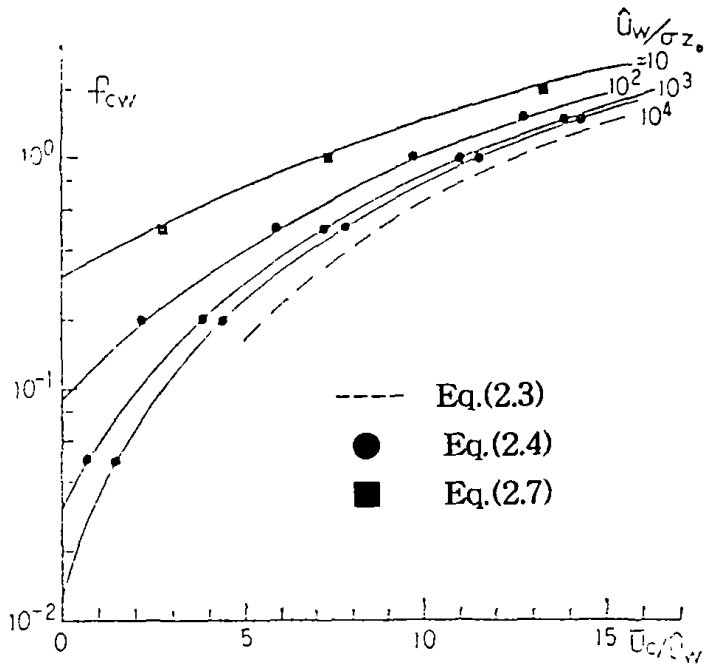

Fig.2.2 Friction coefficient f_{cw} for $\ln(z_h/z_0)$ = 8.0 and ϕ = 0 (from Tanaka and Shuto, 1981)

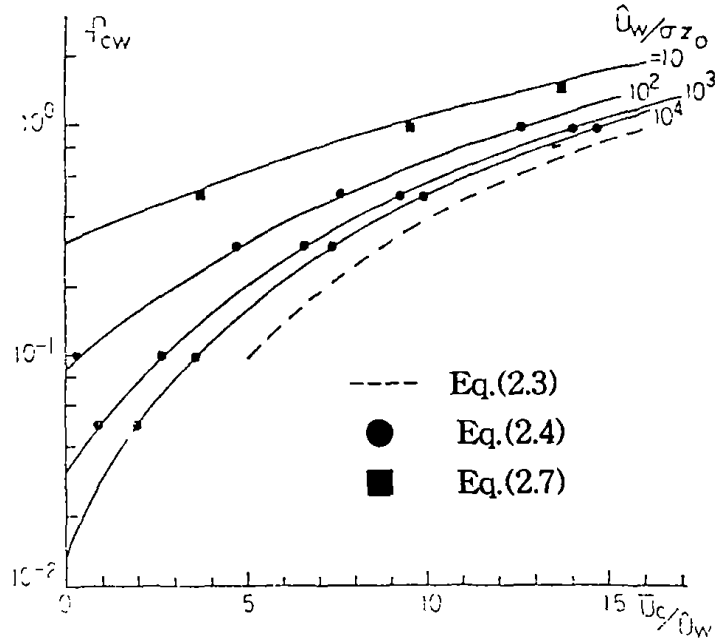

Fig.2.3 Friction coefficient f_{cw} for $\ln(z_h/z_0)$ = 10.0 and ϕ = 0 (from Tanaka and Shuto, 1981)

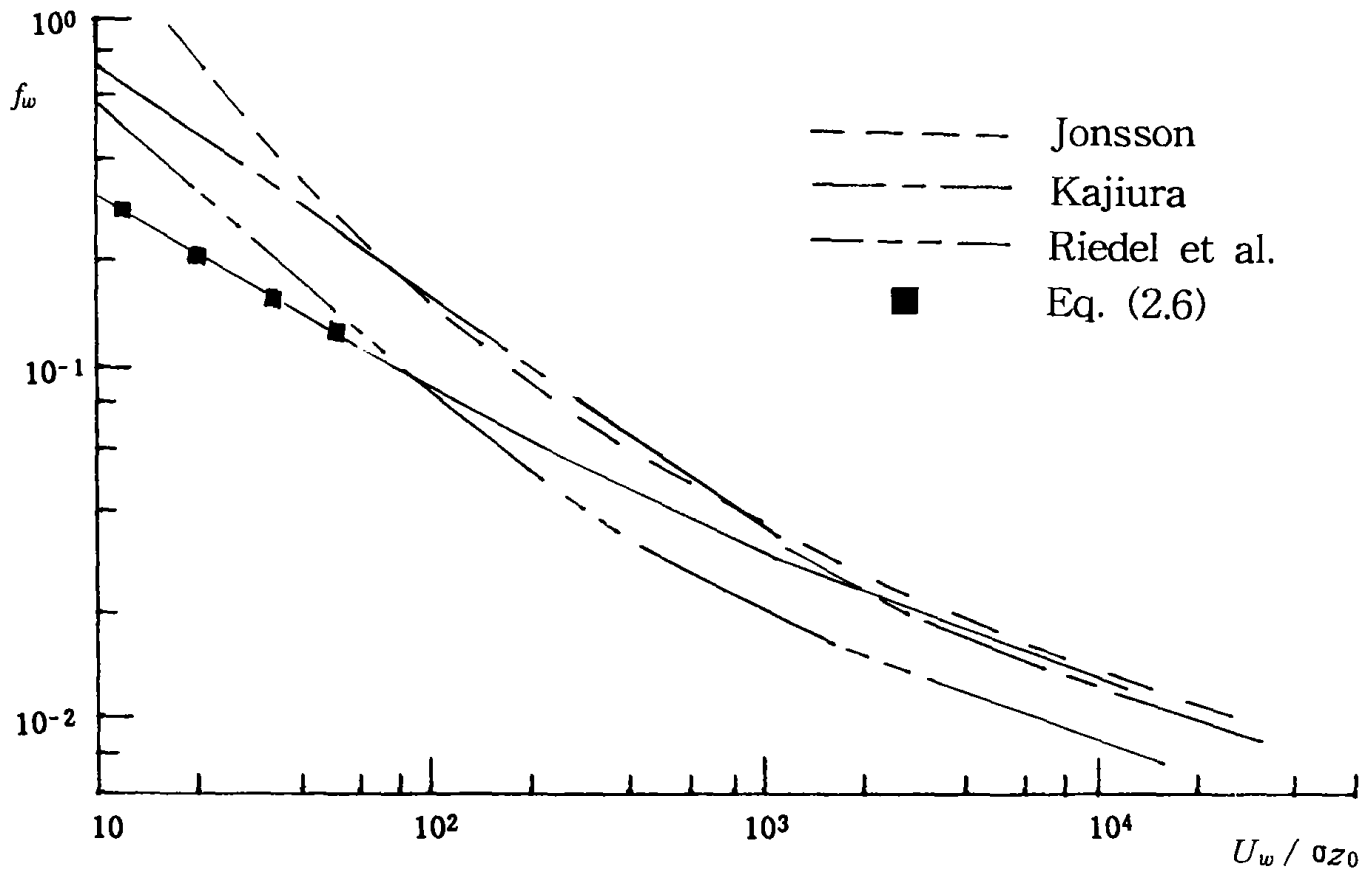

Fig.2.4 Comparison of friction coefficients f_{aw} for wave motion alone (from Tanaka and Shuto, 1981)

2.2 波浪 作用下에서 底面剪斷應力

表面波에 의한 水粒子의 水平方向의 速度는 微小振幅波 理論에 의하면

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[2\pi(z+h)/L]}{\sinh(2\pi h/L)} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \qquad (2.11)$$

여기서 U는 水粒子의 水平方向 速度이고 z軸은 水面에 원점을 취해 鉛直上方을 正으로 한다. 따라서 底面에 있어서 파에 의한 流速振幅(水粒子의 水平方向 速度의 最大値)는 $z = -h$로 부터

$$U_b = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)} \qquad (2.12)$$

여기서,

U_b : 水粒子의 水平方向 速度의 最大値 (m/s)

H : 波高 (m)

T : 周期 (s)

h : 水深 (m)

L : 波長 (m)

波長은 다음으로부터 반복적으로 계산된다.

$$\omega^2 = g\kappa \tanh(\kappa d) \qquad (2.13)$$

여기서

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (s^{-1})$$

g : 중력가속도

$$\kappa = \frac{2\pi}{L} \quad (m^{-1})$$

따라서 最大底面粒子速度는 식(2.12), (2.13)을 사용해서 계산될 수 있고, 波만이 존재하는 場에서 波高, 周期, 水深, 最大底面 粒子速度의 값이 주어진 경우에 底面 單位面積당에 작용하는 剪斷力은 다음의 관계로 부터 계산될 수 있다.

$$\tau_{om} = \frac{\rho}{2} f_w U_b^2 \tag{2.14}$$

여기서, τ_{om} : 最大底面剪斷應力 (Nm^{-2})

ρ : 流體密度 (kgm^{-3})

f_w : wave friction factor

U_b : 最大底面粒子速度(maximum bottom orbital velocity)

底面摩擦係數 f_w는 식(2.5), (2.6)으로부터 구할 수 있는데, 다른 방법을 검토하면 다음과 같다.

底面摩擦係數는 wave Reynolds number와 상대조도(relative roughness)에 의존한다.

$$R_w = \frac{U_m A}{\nu} \tag{2.15}$$

여기서,

R_w : wave Reynolds number

U_m : maximum bottom orbital velocity (ms^{-1})

A : semi-orbital excursion length($= \frac{U_m T}{2\pi}$) (m)

ν : 동점성계수 ($m^2 s^{-1}$)

그리고, $r = \frac{A}{k_s}$ (2.16)

여기서, r : 상대조도 (relative roughness)

A : semi-orbital excursion length(= $\frac{U_m T}{2\pi}$) (m)

k_s : Nikuradse equivalent sane grain roughness (m)

최대 저면입자속도는 식(2.12)와 식(2.13)을 사용해 계산할 수 있고, 또는 Fig.2.5에서 주어진 곡선으로부터 구할 수 있다(Delo 등, 1988).

한편 bed friction factor는 smooth한 저면에 대해

$$f_{ws} = B\, R_w^{-N} \qquad (2.17)$$

여기서, f_{ws} : smooth bed friction factor

R_w : wave Reynolds number

그리고 $R_w \leq 5.10^5$ (laminar)에 대해

B = 2

N = 0.5

또는 $R_w \geq 5.10^5$ (smooth turbulent)에 대해

B = 0.0521

N = 0.187

rough한 저면에 대해 bed friction factor는 다음으로부터 계산될 수 있다.

$$f_{wr} = 0.3 \qquad \left(\frac{A}{k_s} \leq 1.57 \text{ 인 경우}\right) \qquad (2.18)$$

$$f_{wr} = 0.00251 \exp\left[5.21 \left(\frac{A}{k_s}\right)^{0.19}\right] \qquad \left(\frac{A}{k_s} \geq 1.57 \text{ 인 경우}\right)$$

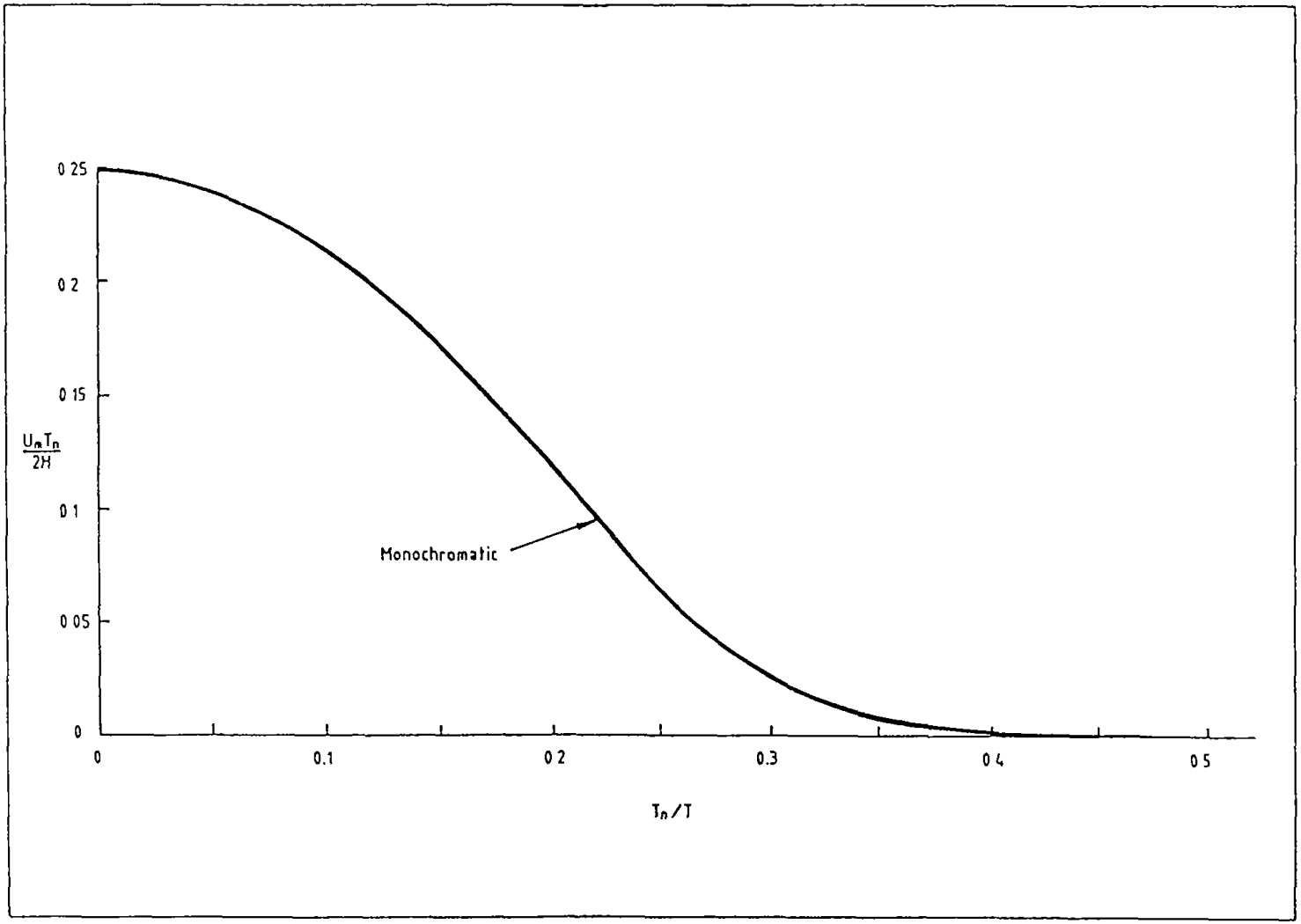

Fig.2.5 Bottom velocity for monochromatic waves ($U_m T_n$ / $2H$ versus T_n / T)

where T_n = $(h / g)^{\frac{1}{2}}$ (from Delo et al., 1988)

여기서, f_{wr} : rough bed friction factor

A : semi-orbital excursion length(= $\frac{U_m T}{2\pi}$) (m)

k_s : Nikuradse equivalent sand grain roughness (m)

第3章 波浪에 의한 底泥의 浮遊實驗

1. 概要

波에 의한 연약한 底泥의 輸送機構는 충분히 해명되고 있지 않다. 과거의 연안에서의 표사 現象의 해석은 주로 非粘着性 底質을 대상으로 연구되어 왔고, 粘着性 底質을 대상으로 연구된 것은 비교적 적은 실정이다. 또 底質이 粘土나 실트인 微細粘着性 堆積物인 경우 浸蝕, 堆積, 압밀, 擴散 등 개개의 現象에 관한 기초적인 研究가 있지만 堆積物 輸送과 堆積量 豫測 등의 응용적인 研究는 충분하지 않은 실정이다. 한편 최근에는 底泥의 거동은 環境問題와 연관되어 중요한 문제로 되고 있다.

本 研究의 目的은 波에의한 底泥의 輸送現象 특히 浮遊現象에 着眼해서 1차년도 研究에 이어 2次元 造波水路에서의 波浪에 의한 底泥의 浮遊實驗을 통하여 波 作用下에서 泥質 堆積物의 浮遊에 관한 特性을 把握하고 波 作用에 의한 底面剪斷應力과 底泥의 浮遊率과의 關係를 調査하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

實驗은 1차년도와 마찬가지로 **Fig.3.1**에 나타난 바와 같이 길이 5.5m, 폭 0.2m, 높이 0.3m의 유리製 造波水路를 제작하여 사용하였고, 여기에 모터를 이용한 造波裝置를 제작하여 수조에서 規則波를 발생시켰다. 이 수조에는 중앙부에 길이 1.5m, 두께 5cm의 오목部를 만들어 소정의 含水比로 조정한 底泥를 넣어 泥層을 만들고, 海水를 사용하여 水深을 16cm로 유지시키고, **Table 3.1**과 같이 여러가지 波高의 비쇄파 規則波를 작용시켜 길이 1.5m의 底泥層의 중앙에서 振動流에 의해 浮遊되는 底泥의 濃度를 測定하였다. 實驗에 이용한 底泥는 남양만에서 채취한 底泥를 사용하였으며, 이 試料의 粒度分析 結果는 **Fig.3.2**와 같다. 한편 底泥의 含水比는

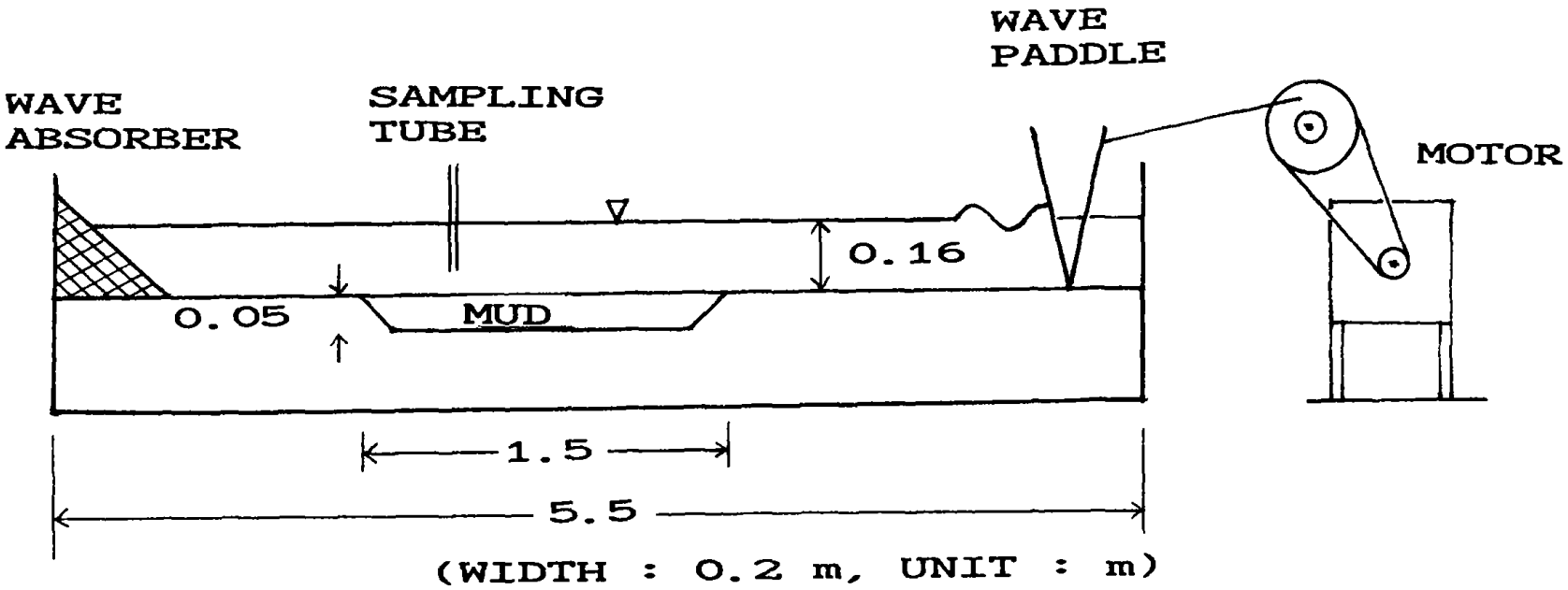

Fig.3.1 Wave flume and experimental set-up

Table 3.1 Conditions of experiment

Case	Water content(%)	Wave height(cm)	Period (sec)	Water depth(cm)	Shear stress(N/m^2)
1-1	97	2.2	1.0	16.0	0.050
1-2	97	4.0	1.0	16.0	0.119
1-3	97	7.5	1.0	16.0	0.297
2-1	212	2.2	1.0	16.0	0.050
2-2	212	4.0	1.0	16.0	0.119
2-3	212	7.5	1.0	16.0	0.297
3-1	307	2.2	1.0	16.0	0.050
3-2	307	4.0	1.0	16.0	0.119
3-3	307	7.5	1.0	16.0	0.297

1차년도와 달리 初期 含水比를 증가시켜 97%, 212%, 307%의 3가지 범위에서 波高를 변화시켜 합계 9 케이스의 實驗을 실시하였다. 實驗의 내용은 波 作用下에서 底泥의 擧動을 관찰해서 浮遊 flux를 測定하고 波에 의한 底面에서의 剪斷應力과 浮遊率과의 관계를 調査하였다.

濃度의 測定은 각 case 별로 波高를 증가시킴으로써 底面에 가해지는 底面剪斷應力을 증가시켜 suspension을 샘플링해서 濃度를 測定하였다. 샘플링은 정해진 시간마다 shepon을 이용해서 鉛直方向으로 3점 (底泥層 中央의 底面으로부터 1cm, 5cm, 10cm 지점)에서 샘플링하여 濃度를 測定하였다. 이번 實驗에서 이용한 試料의 鉛直方向의 含水比는 海水와 試料를 충분히 혼합함에 의해 鉛直方向으로 일정하게 하였다.

本 實驗에서 底泥에 作用하는 힘은 波에 의해 底面에 作用하는 底泥表面의 剪斷應力뿐이다. 底泥床의 前後에서 波를 測定함과 동시에 造波 시작후 1, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 45, 60분 마다 浮遊된 底泥의 量을 測定해서 이것에 기초해서 各 期間에 있어서 平均 浮遊 flux를 算定하였다.

3951 stnd lm10164x

High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	High Size	Under %	Span 2.33
180	100	64.4	83.8	23.0	38.5	8.25	19.0	2.95	8.4	1.06	1.9	D[4,3] 37.59μm
164	99.5	58.7	79.9	21.0	35.9	7.51	17.8	2.69	7.6	0.96	1.6	
149	99.0	53.4	75.5	19.1	33.5	6.84	16.7	2.45	6.9	0.88	1.3	
136	98.3	48.7	70.8	17.4	31.4	6.23	15.6	2.23	6.2	0.80	1.1	D[3,2] 8.65μm
124	97.6	44.3	66.0	15.9	29.4	5.67	14.5	2.03	5.5	0.73	0.9	
113	96.6	40.4	61.2	14.4	27.6	5.17	13.5	1.85	4.9	0.66	0.7	
103	95.5	36.8	56.6	13.2	25.9	4.71	12.6	1.68	4.3	0.60	0.6	D[v,0.9] 77.73μm
93.6	94.1	33.5	52.2	12.0	24.3	4.29	11.7	1.53	3.7	0.55	0.4	
85.2	92.3	30.5	48.2	10.9	22.9	3.91	10.8	1.40	3.2	0.50	0.3	
77.6	90.0	27.8	44.6	9.94	21.5	3.56	10.0	1.27	2.7			D[v,0.1] 3.57μm
70.7	87.1	25.3	41.4	9.05	20.2	3.24	9.2	1.16	2.3			

Source = :Sample	Beam length = 2.2 mm	Model indp	D[v,0.5] 31.86μm
	Residual = 0.359 %		
Focal length = 100 mm	Obscuration = 0.1440	Volume Conc. = 0.0208%	
Presentation = stnd	Volume distribution	Sp.S.A 0.6936 m²/cc.	

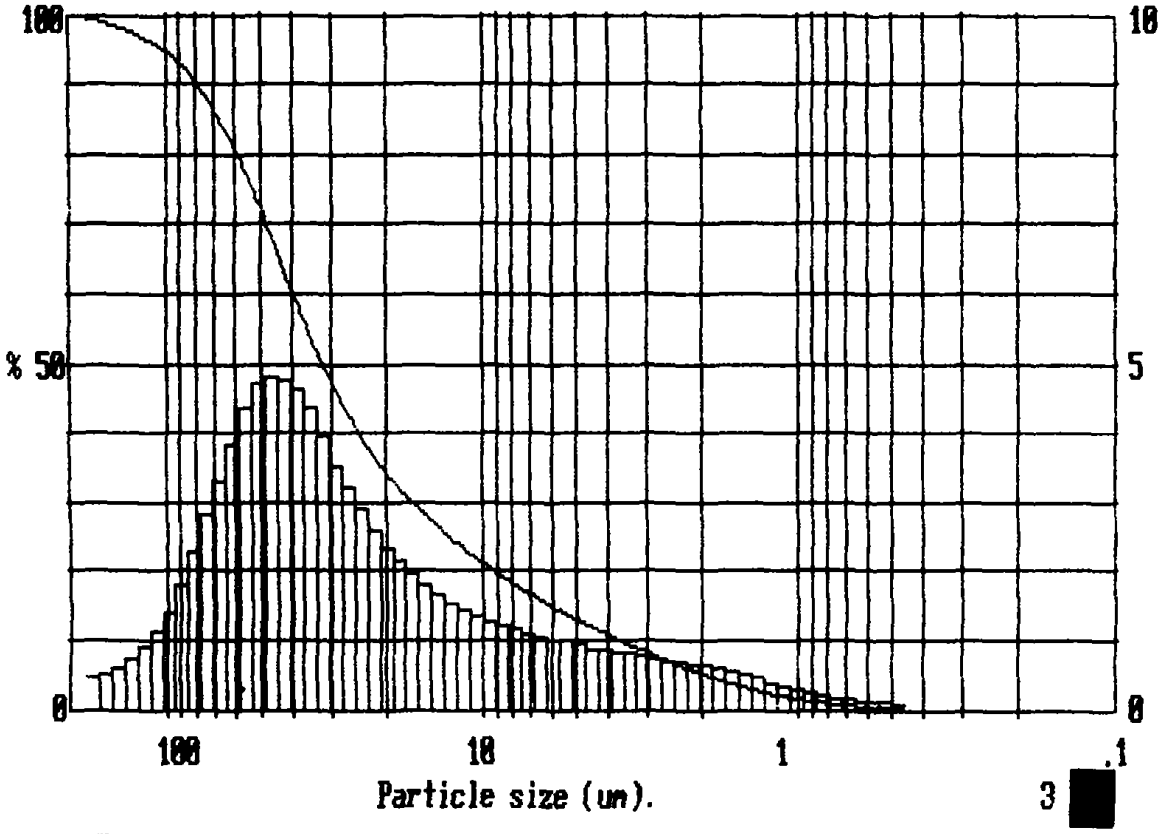

Fig.3.2 Particle size distribution of mud

3. 實驗結果 및 分析

底泥는 入射波가 커짐에 따라 여러가지 擧動을 나타내는데, 1次年度의 實驗과 같이 입사파가 커짐에 따라 ripple이 발생하고 底泥의 浮遊가 보여지며, 그 후 底泥層 表層部分에서 振動, 波狀運動을 나타내었다.

Fig.3.3-Fig.3.11은 각 실험 case에 있어서 底泥 浮遊量의 경시변화를 보여 주고 있다. 實驗시작 初期에 있어서 浮遊量이 급격히 증가하고, 그 후 어떤 일정한 값에 가깝게 되거나 감소해 가는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 底泥가 부드러운만큼 浮遊되기 쉽고, 底泥가 부드러우면 上層水와 연계된 振動을 일으켜 境界面에서의 剪斷應力이 작게 되고, 또 底泥의 表層部에 있어서 粒子間 構造의 變化에 수반한 底泥의 硬化現象에 원인이 있는 것으로 생각할 수 있다. 最終 浮遊量으로의 도달시간은 底泥로부터 上層水中으로의 浮遊의 供給源인 底泥表層部의 硬化를 가져오는 경과시간으로 생각할 수 있다.

底泥는 2.2cm의 波高에서부터 波動運動을 시작해서 동시에 底泥표면에 균열이 생긴다. 浮遊의 初期段階에서는 底泥는 조금씩 浮遊해 底泥表面 부근에 안개모양의 浮遊層이 형성되고 시간이 경과함에 따라 위방향으로 浮遊 擴散되며, 波高가 크게 되면 底泥의 波動運動이 크게 되고 底泥表面의 粘土는 周期的으로 위방향으로 격하게 浮遊되었다. 한편 실험 시작후 初期濃度는 含水率이 증가함에 따라 증가함을 보이고 있다.

限界剪斷應力 τ_c 는 Fig. 3.12와 같이 底泥의 浮遊가 급격한 領域의 回歸直線이 τ_b 軸과 교차하는 점에서의 剪斷力의 값으로 정의하는 방법이 있다. Fig.3.13은 각 실험 case에 있어서의 初期 浮遊量과 剪斷應力과의 관계를 보여 주고 있다.

限界剪斷應力 τ_c 는 底泥內의 剪斷應力이 底泥內에 파괴가 일어나는 剪斷應力이 될 때 底泥表面에 작용하고 있는 剪斷應力으로 정의할 수 있다. 본 실험과 같이

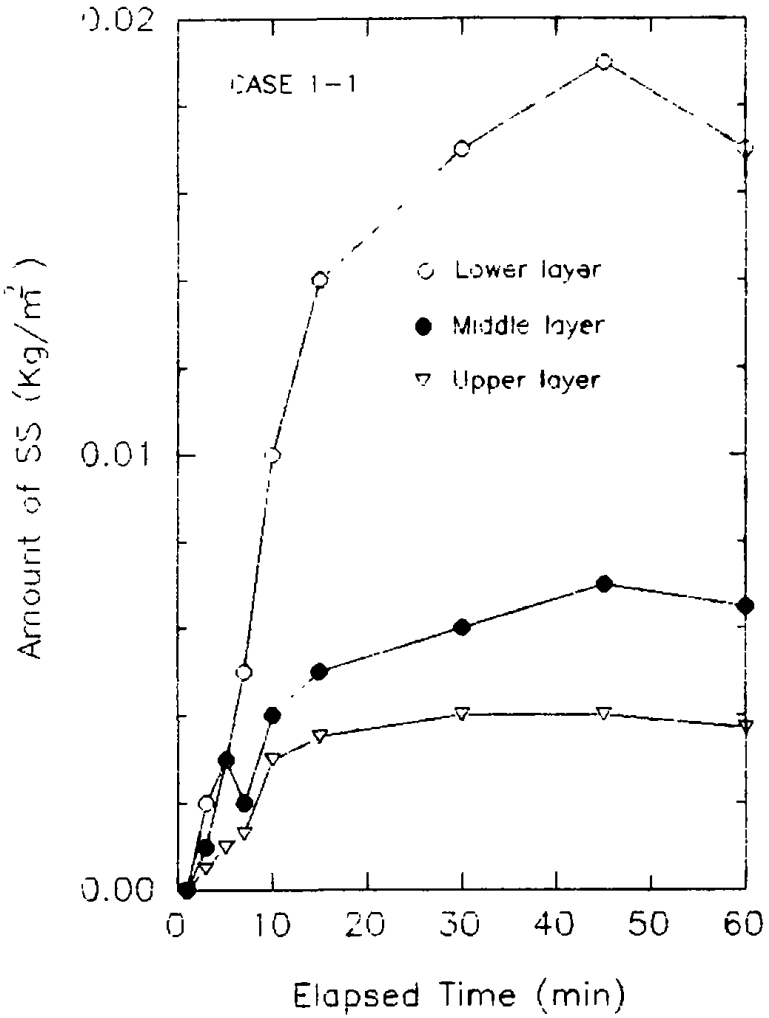

Fig.3.3 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=2.2cm)

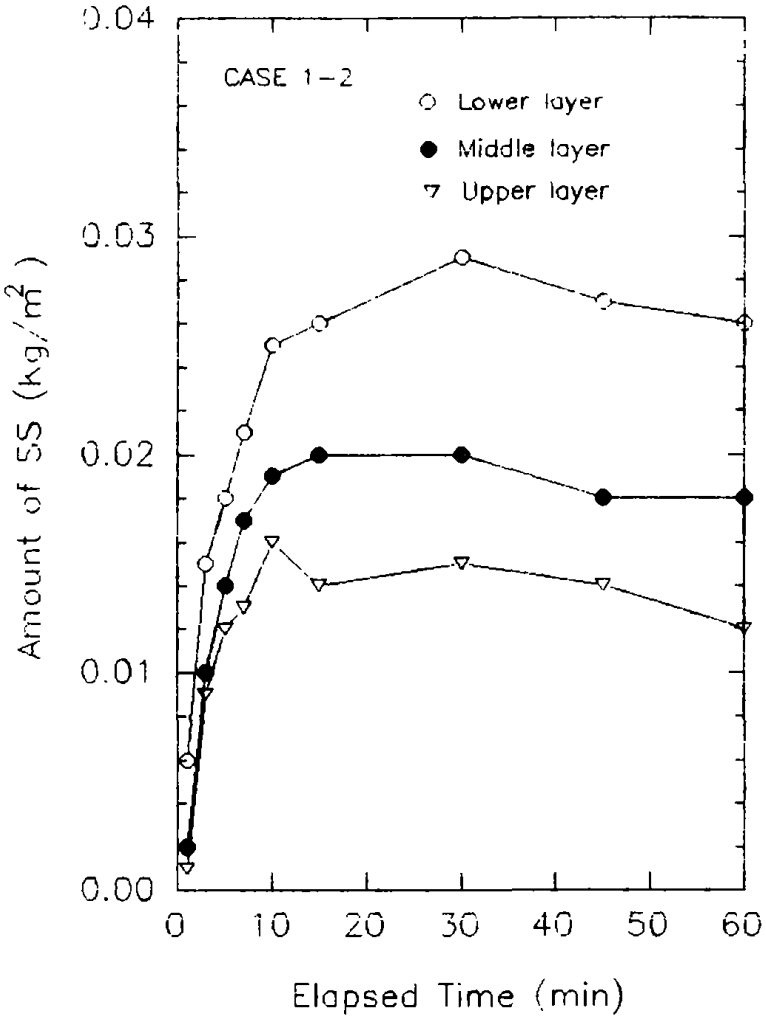

Fig.3.4 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=4.0cm)

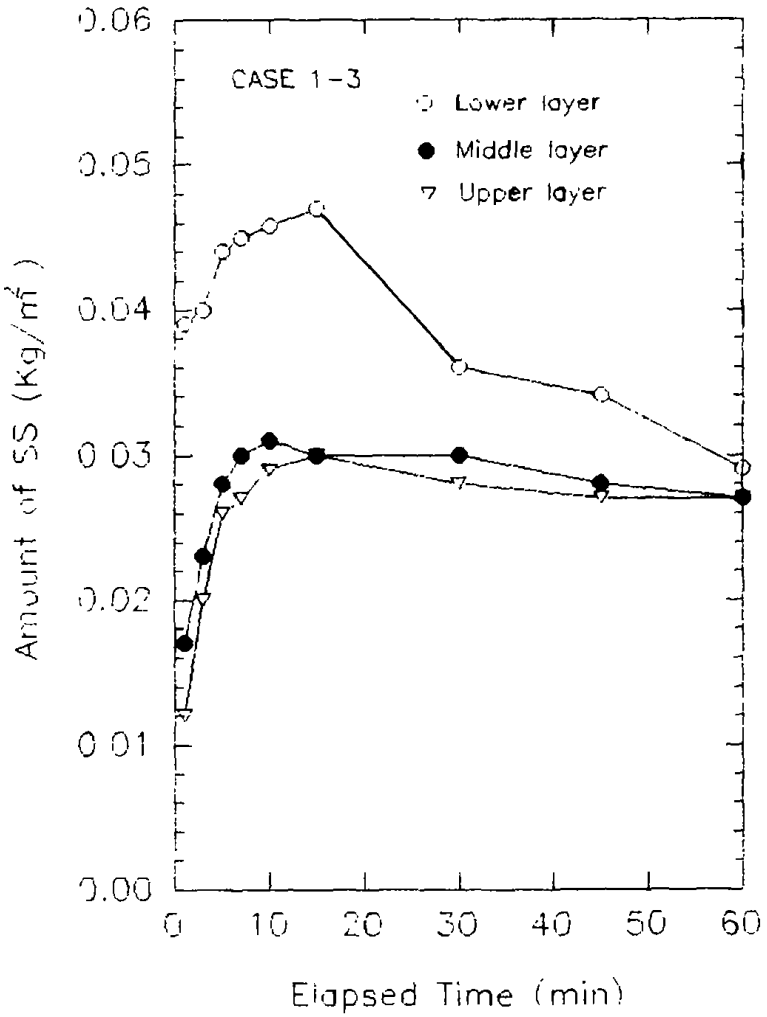

Fig.3.5 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=97%, H=7.5cm)

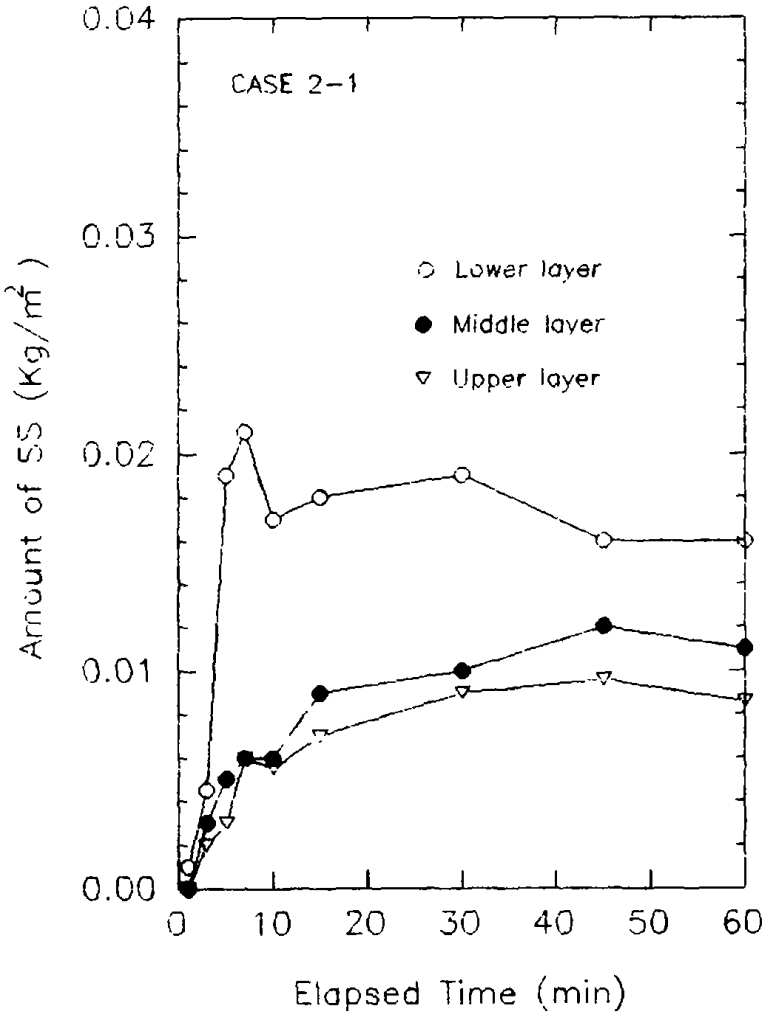

Fig.3.6 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=2.2cm)

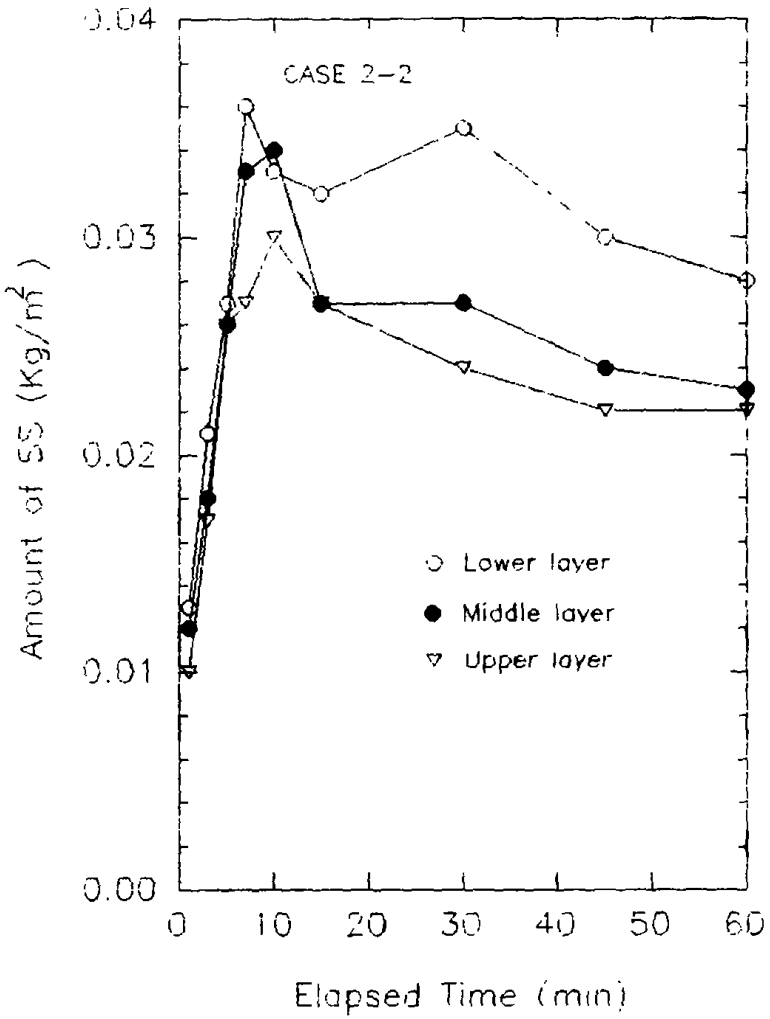

Fig.3.7 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=4.0cm)

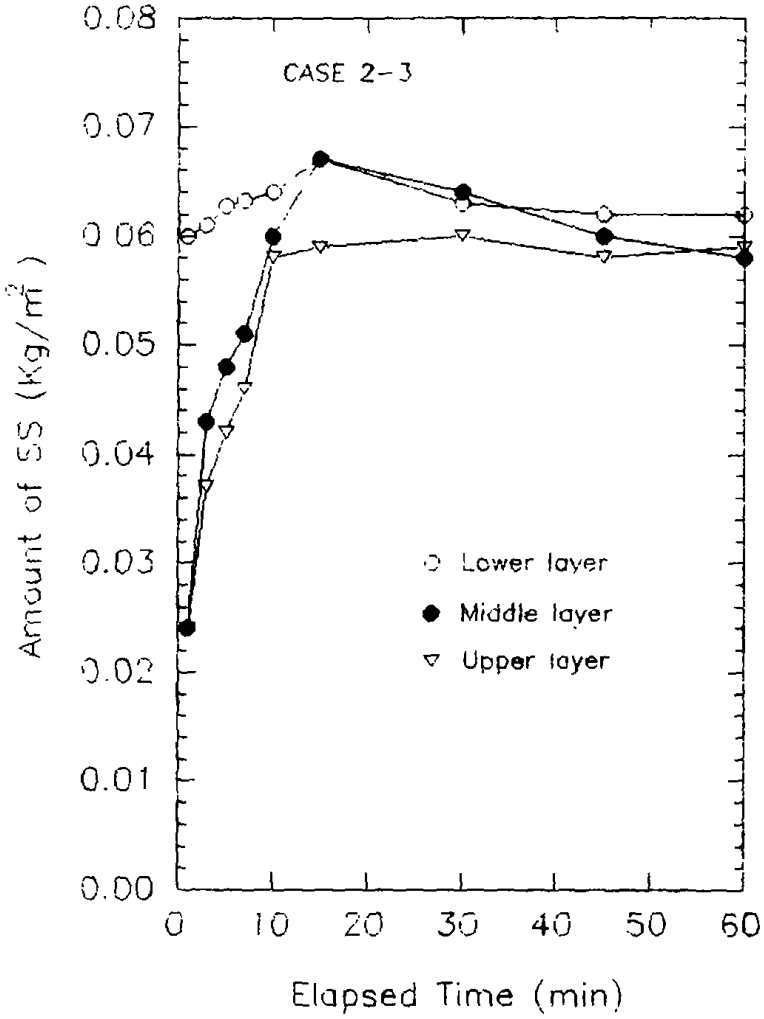

Fig.3.8 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=212%, H=7.5cm)

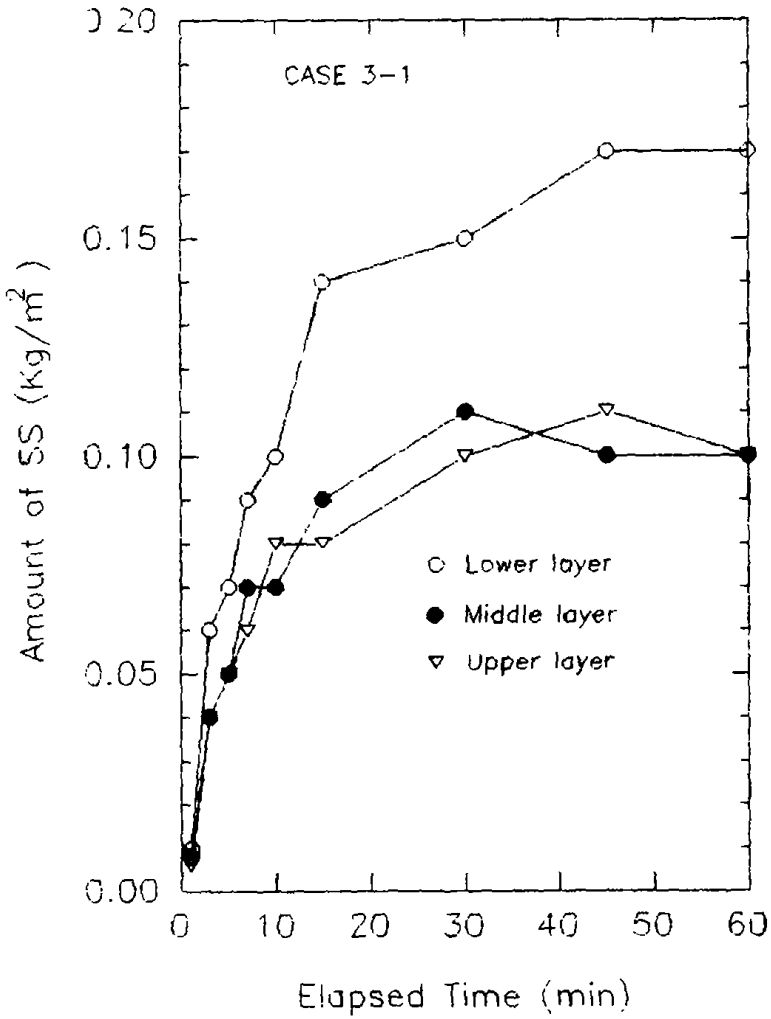

Fig.3.9 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=307%, H=2.2cm)

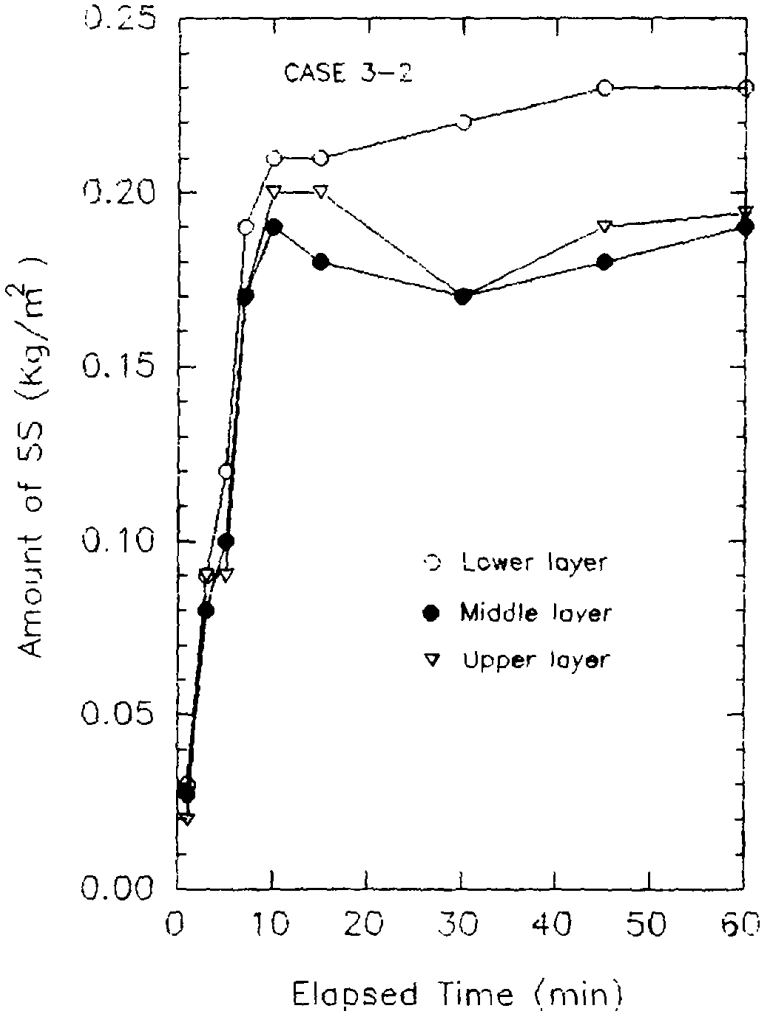

Fig.3.10 Variation of amount of suspended solids with elapsed time (W=307%, H=4.0cm)

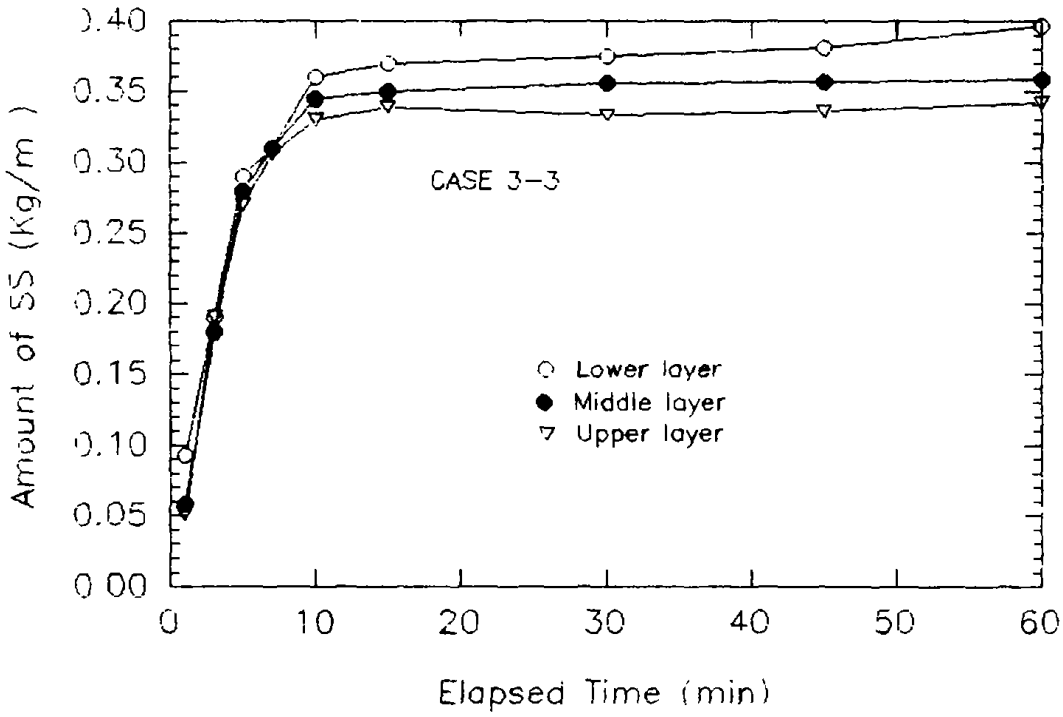

Fig.3.11 Variation of amount of suspendedd solids with elapsed time (W=307%, H=7.5cm)

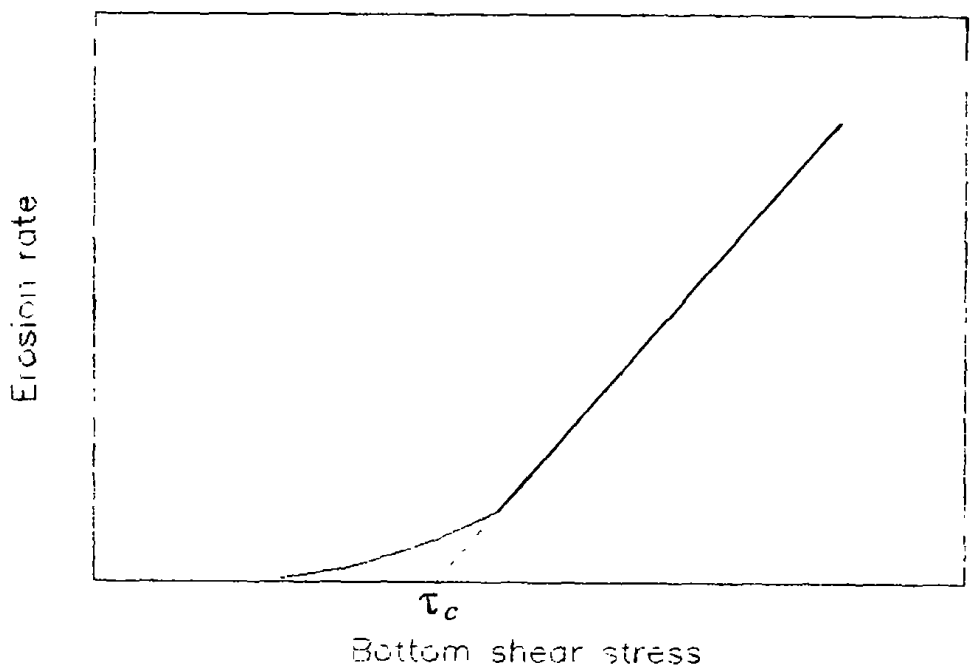

Fig.3.12 Estimation of critical shear stress (τ_c)

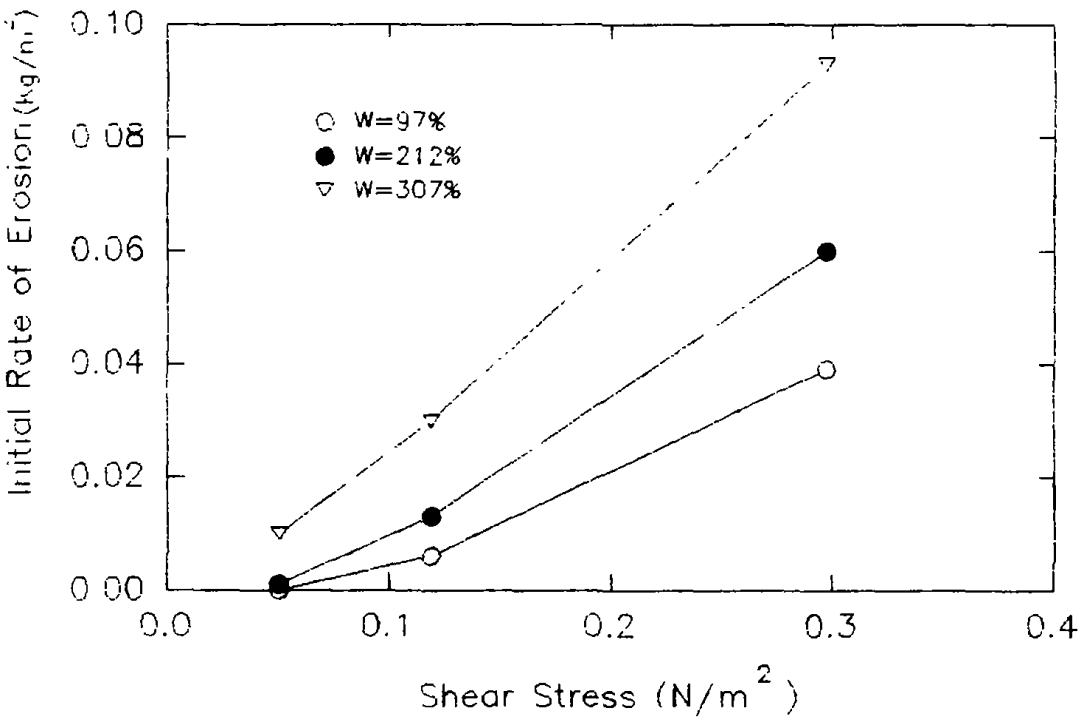

Fig.3.13 Relationship of the initial rate of erosion and shear stress

底泥層이 어느정도의 두께를 가진 경우 底泥는 波動運動을 한다. 이 波動運動은 底泥에 파가 작용한 때에 생기는 水平方向 및 鉛直方向의 壓力기울기 $\partial P/\partial x$, $\partial P/\partial z$에 의해서 생기는 것으로 볼 수 있다. 壓力기울기가 底泥의 流動에 대한 抵抗力, 결국 항복치(yield stress)보다도 크게되면 底泥는 波動運動을 시작하는 것으로 생각된다. 여기서 波動場의 限界剪斷應力 τ_c는 底泥가 운동을 시작한 때에 底泥表面에 작용하고 있는 剪斷應力이 된다. 본 實驗의 結果에서 부유가 급격히 일어나는 때를 기준으로하면 약 1.2 N/m^2이나, Fig.3.12와 같은 방법으로 구하면 0.02 - 0.06 N/m^2가 된다.

한편 波에 의한 τ_c와 흐름에 의한 τ_c는 크게 다른 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 底泥내의 剪斷應力이 항복치(yield stress)에 달하면 底泥는 파괴되고 부유상

태로 된다(鶴谷廣一 등, 1990). 흐름의 場에서는 底泥表面에 作用하는 剪斷應力에 의해서 底泥는 파괴되지만, 波의 場에서는 底泥表面에 作用하는 剪斷應力이 작아도 압력기울기에 의해서 底泥는 파괴되고 浮遊狀態로 된다고 볼 수 있다. 따라서 波에 의한 剪斷應力은 흐름의 경우와 비교해서 상당히 작게 될 수도 있다.

底泥의 浮遊率은 剪斷應力에 의존한다. 波의 場에서 底面剪斷應力이 작은 때에 浮遊狀態로 되기때문에 갑자기 급격한 浮遊는 없고 Fig. 3.13과 같이 원점에 가까운 직선 또는 포물선이 된다.

鶴谷廣一 등(1990)의 흐름과 파의 共存場에서의 浮遊實驗에 의하면 흐름만에서는 부유가 일어나지 않아도 波를 작용시키면 浮遊가 일어나는 것으로 나타났다. 이것은 흐름만으로는 底泥의 剪斷力은 항복치(yield stress)에 달하지 않지만, 波를 작용시킴으로써 底泥 내부의 剪斷應力이 항복치(yield stress) 이상이 되어 浮遊가 생기는 것으로 볼 수 있다.

限界剪斷應力과 含水比와의 관계를 보면, 含水比의 증가에 따라 剪斷應力은 급속히 작아짐을 알 수 있고 이를 통해 底泥의 粘着力에는 水分의 영향이 대단히 큰 것을 알 수 있다. 그러나 限界剪斷應力 τ_c 와 含水比의 定量的인 관계는 底泥의 종류에 따라 경향이 변할 것으로 생각된다.

波에 의한 底泥의 輸送形態 및 量은 波高, 周期, 水深 등의 波에 관한 성질과 底泥의 物理的 성질에 따라 결정되는 것으로 보고되고 있다. 또 그 輸送形態는 底泥層으로 부터 水層으로 浮遊한 底泥의 輸送에 의한 것과 底泥層內의 波動運動에 의한 質量輸送의 2가지로 區分된다. 浮遊濃度에 대해서는 底面에서 浮遊率을 境界條件으로 해서 水層안으로의 擴散方程式을 풀어 浮遊濃度의 分布를 구할 필요가 있다.

지금까지 한 방향으로의 흐름에 대해서 浮遊 flux는 여러가지 형태로 저면 전단응력과 관련지어 왔지만, 실험적으로 얻어진 대표적인 형태는 다음의 2가지 이다.

$$E = \alpha_1 \left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)^m \tag{3.1}$$

$$E = \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1\right)^n \tag{3.2}$$

이들 식중에서 τ_c는 浮遊限界底面剪斷應力이다. 그리고 α는 比例常數로 底泥의 含水比, 底泥의 種類 등에 의해 변화하는 값이다. 底泥의 浮遊에 대한 抵抗力은 粒子間의 相互作用(粘着力)에서 기인되지만, 그것이 τ_c의 형태로 浮遊 flux의 표현가운데 들어가 있다. τ/τ_c는 浸蝕의 限界應力으로부터의 超過應力으로 浸蝕에 관련된 有效剪斷應力으로 생각할 수 있다. τ_c의 정의방법은 研究者에 따라 여러가지이나, 實驗的으로 τ_c를 구하는 경우 목측에 의한 底泥表層의 粒子가 이동하기 시작할 때의 剪斷應力으로 하는 方法이 있으나, 浮遊實驗에 있어서 浮遊의 시작을 분명하게 판단하는 것은 실제로 어렵다.

1次年度 實驗에서는 τ_c, n, α의 값은 각각 τ_c = 0.12 N/m^2, n = 0.64, α = 0.0067 kg/m^{2}s 이었고, 금번 실험의 경우도 τ_c = 0.12 N/m^2, n = 0.67, α = 0.0071 kg/m^{2}s 을 나타내 1차년도의 實驗結果와 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 여기서 계수 α의 값이 비슷한 것은 底泥의 種類가 동일 지역의 것으로 거의 일정한 값을 나타내고 있으나, 底泥의 種類가 변하면 변할 것으로 판단된다. 한편 限界剪斷應力의 경우 浮遊가 급격히 일어나는 때를 기준으로 하면 위와 같이 τ_c = 0.12 N/m^{2}의 값을 얻지만, Fig.3.12와 같은 방법으로 구하면 τ_c = 0.02-0.06 N/m^2으로 상당히 작은 값을 보이고 있는데, 이는 限界剪斷應力과 含水比와의 관계로 부터 보면, 含水比의 증가에 따라 底泥의 粘着力에는 水分의 영향이 크고 따라서 浮遊를 위한 限界剪斷應力은 급속히 작아짐에 기인한다고 볼 수 있다. 한편 파가 작용하는 경우 위에서도 언급한 바와 같이, 底泥에 波가 作用한 때에 생기는 水平方向 및 鉛直方向

의 壓力기울기 $\partial P/\partial x$, $\partial P/\partial z$에 의해서 생기는 波動運動에 의해 含水率이 큰 底泥에 대해 壓力기울기가 底泥의 流動에 대한 抵抗力, 결국 항복치(yield stress) 보다도 크게되어 底泥內에 파괴가 일어나 浮遊하기 시작하는 것으로 판단된다.

第4章 結論 및 提言

本 研究에서는 波에의한 底泥의 輸送現象 특히 浮遊現象에 着眼해서 波와 흐름이 共存하는 場에서의 底面剪斷應力의 評價에 대한 考察과 1차년도 研究에 이어 2次元 造波水路에서의 波浪에 의한 底泥의 浮遊實驗을 통하여 波 作用下에서 底泥의 浮遊에 관한 特性을 把握하고, 波 作用에 의한 底面剪斷應力과 底泥의 浮遊率과의 關係를 導出하고자 하였다. 實驗으러 부터 조사된 중요한 結果를 要約하면 다음과 같다.

實驗시작 初期에 있어서 浮遊量이 급격히 증가하고, 그 후 어떤 일정한 값에 가깝게 되거나 감소해 감을 나타내었는데, 이것은 底泥가 부드러운만큼 浮遊되기 쉽고, 底泥가 부드러우면 上層水와 연계된 振動을 일으켜 境界面에서의 剪斷應力이 작게 되고, 또 底泥의 表層部에 있어서 粒子間 構造의 變化에 수반한 底泥의 硬化現象에 원인이 있는 것으로 생각할 수 있다.

底泥는 2.2cm의 波高에서부터 波動運動을 시작해서 동시에 底泥表面에 균열이 생긴다. 浮遊의 初期段階에서는 底泥는 조금씩 浮遊해 底泥表面 부근에 안개모양의 浮遊層이 형성되고 시간이 경과함에 따라 위방향으로 浮遊 擴散되며, 波高가 크게 되면 底泥의 波動運動이 크게 되고 底泥表面의 粘土는 周期的으로 위방향으로 격하게 浮遊되었다. 한편 實驗 시작후 初期濃度는 含水率이 증가함에 따라 증가함을 보이고 있다.

本 實驗에서 底泥의 浮遊率은 剪斷應力에 의존함을 보였고, 波의 場에서 底面剪斷應力이 작은 때에 浮遊狀態로 되기때문에 갑자기 급격한 浮遊는 없고 Fig. 3.13과 같이 原點에 가까운 直線 또는 拋物線이 된다. 限界剪斷應力과 含水比와의 관계를 보면, 含水比의 증가에 따라 剪斷應力은 급속히 작아짐을 알 수 있고 이를 통해 底泥의 粘着力에는 水分의 영향이 대단히 큰 것을 알 수 있다. 그러나 限界剪

斷應力 τ_c 와 含水比의 定量的인 관계는 底泥의 종류에 따라 경향이 변할 것으로 생각된다.

금번 실험의 경우 浮遊率 算定式에서 τ_c, n, α가 각각 τ_c = 0.12 N/m^2, n = 0.67, α = 0.0071 kg/m^{2}s 을 나타내 1차년도의 實驗結果와 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

埋沒이 問題가 되는 地域에서는 波浪뿐만아니라 潮流 등의 흐름의 영향이 큰 경우가 많고, 波와 底泥의 相互作用을 조사함과 동시에 흐름의 영향을 고려하는 것이 중요하다. 한편 연약한 底泥場의 흐름에 의한 地形變化 豫測이나 汚染擴散 시뮬레이션에서 이용되는 浮遊 flux의 豫測式은 통상 실제로 現場으로부터 채취한 底泥를 실험수조에 깔아 흐름을 주어서 經驗的으로 구하고 있다. 이것은 砂質 堆積物에 비해서 外力에 대한 力學的 擧動이 복잡한 底泥의 경우 이들의 推定式中의 파라메타와 底泥의 物理的 성질과의 관계가 반드시 명확하지 않아 底泥의 種類나 含水比가 변할 때마다 實驗을 해야할 필요가 있게된다. 그러나 여기서 만약 간단한 經驗方法으로 浮遊 flux에 대한 파라메타를 측정할 수 있으면 浮遊量 豫測이 아주 간략화 될 것이다. 따라서 海底에 堆積한 底質 粘土가 表面波의 작용에 의해 다시 海水中에 浮遊하는 과정을 해석해서 定量的인 浮遊量 推定方法을 開發하고 상기의 관계를 확정하기 위해서는 向後 광범위한 조건에서 實驗結果를 蓄積할 필요가 있다. 또한 우리나라 沿岸海域에 널리 分布되어 있는 微細堆積物에 대한 site-specific한 移動豫測 모델의 開發 및 適用을 위해서는 먼저 그 基礎硏究로서 微細堆積物의 波浪에 의한 輸送過程에 대한 메카니즘이 現場實驗과 實驗을 통해서 해명되어야 할 必要가 있다.

參 考 文 獻

楠田哲也 등. 1989. 攪亂.不攪亂 底泥の巻き上げ特性に關する實驗的研究. 海岸工學論文集 第36巻,pp 314-318.

朴光淳. 1993. 沿岸海域 微細堆積物의 沈降 特性. 釜山水産大學校 博士學位論文.

朴光淳. 1992. 波浪에 의한 底泥의 浮遊 메카니즘에 관한 研究. 韓國海洋研究所 BSPE 00267-461-2.

李東永 등. 1992. 西海沿岸 微細堆積物 移動研究 (III). 韓國海洋研究所 BSPG 00154-494-2.

鶴谷廣一 등. 1990. 流れおよび 波による 底泥の 巻き上げ 限界値の檢討. 海岸工學論文集 第37巻,pp 235-239.

Delo, E.A. 1988. Estuarine muds manual. Hydraulics research Report No SR 164

Fukuda, M. K. and W. Lick. 1980. The entrainment of cohesive sediments in fresh water, J. Gepphys. Res., Vol. 83(C5), pp 2813-2824.

Gade, H.G. 1958. Effects of a nonrigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water, Jour. of Marine Research, Vol. 16, No.2, pp. 61-82.

Josson, I. G. 1966. Wave boundary layers and friction factor, Proc. 10th Conf. on Coastal Engng., pp. 127-148.

Kajiura, K. 1964. On the bottom friction in an oscillatory current, Bull, Earthquake Res. Inst., Vol. 42, pp. 147-174.

Kusuda, T. et al. 1984. Erosional process of cohesive sediments, Wat. sci. tech., Vol. 17, pp. 891-901.

Kusuda, T. et al. 1982. Depositional process of fine sediments, Wat. sci. tech Vol. 14, pp. 175-184.

Mehta A. J. 1981. Review of function for cohesive sediment beds, Proc. First Indian Conf. on Engrg., Indian Inst. of Technology, Madras, India, pp. 122-130.

Riedel, H. P., J. W. Kamphuis and A. Brebner. 1972. Measurement of bed shear under waves. Proc. 13th Conf. on Coastal Engng., pp. 587-603.

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