

鹽水投下에 따른 鹽水塊 舉動에 관한 研究

A Study on the Behavior of Brine Lumps Caused by Dropping Brine

申文燮* · 中辻啓二** · 李種南***

Moon Seup Shin*, K. Nakatsuji** and Chong Nam Lee***

要旨: 本研究는 傾斜面에서 濁質混入에 의한 濁水塊 舉動을 密度差가 적은 鹽水를 이용하여 實驗과 理論을 통하여 알아 보았다. 鹽水塊의 形狀特性, 길이 變化, 높이 變化, 移動速度 變化를 알아 보았다. 그리고 鹽水塊의 舉動을 Baines and Hofinger(1984)의 亂流 Thermal 理論과 比較하여 보았다. 그 결과 實驗値와 理論値는 거의 일치하고 있었다. 따라서 密度差에 의한 濁水塊의 舉動特性은 亂流 Thermal 理論으로 再現할 수 있다는 것을 알았다.

Abstract□ In this paper, two-dimensional behaviors of the brine lumps moving along the inclined boundaries are investigated experimentally and theoretically. It was investigated these factors in the brine lumps which are behaviors, shape, length change, height change, and moving velocity change. The results were compared the above factors with thermal theory. The shape of the brine lumps is well approximated by a half-ellipse. The shape of the brine lumps was similar with the slope thermal and the moving characteristics were found to reappear with the turbulent thermal theory.

1. 序 論

國土擴張事業의 一環으로 大規模의인 海面干拓事業과 産業이 發達하므로써 要求되는 港灣建設 等, 크고 작은 海上工事を 하므로써 發生되는 懸濁物質은 環境變化에 크게 영향을 미친다. 특히, 水中照度の 低下와 植物플랑크톤, 水生植物의 光合成障害, 海水-底泥사이의 物質循環의 不均衡化 等に 크게 영향을 미친다. 특히, 懸濁粒子는 魚類의 呼吸과 卵, 稚仔의 卵孵率, 成長率에 영향을 주고 魚貝類와 底生生物의 生産을 低下시킨다. 또한, 水中의 有機物, 榮養鹽類에 吸·脱着하면서 水質과 低質을 變化시켜 海底에 堆積되면서 底生生物을 매몰 시키므로써 低質 有機物의 濃度を 上昇시키기도 한다. 그리고 海上工事後 새로운 構造物이 築造되므로써 일어나는 흐름 變化에 의해서 發生된 懸濁物質이 擴散, 沈降, 再浮遊하는 과정에서

擴域化되고, 溶存酸素를 消費하기 때문에 赤潮, 靑潮의 發生을 促進시킨다. 이상과 같이 海上工事を 하므로써 發生하는 懸濁物質은 工事의 周邊環境變化에 크게 영향을 미친다. 그러므로 海域에서 土砂를 投下할 때 일어나는 懸濁物質의 舉動을 명확히 하는 것은 대단히 重要하다고 생각된다. 따라서 土砂가 自由落下할 때 誘起된 流動과 함께 濁水塊을 形成하면서 海底面을 移動할 때 濁水塊의 舉動特性은 周圍水와의 密度差에 의해서 크게 좌우된다고 생각하였고, 또한 投下量이 土粒子의 粒徑에 비하여 아주 많은 경우에는 부력이 있는 流体塊을 순간적으로 방출할 때 형성되는 亂流 熱流體塊과 類似한 舉動을 할 수 있다는 것에 착안하여 濁水塊의 舉動을 密度流로 보아 해석할 수 있다고 보았다. 따라서 濁水塊의 舉動을 알아 보기 위하여 密度差가 적은 鹽水塊을 경사면에 投下하여 鹽水塊의 舉動特性을 알아 보았다.

* 群山水産專門大學 海洋土木科(Department of Ocean Civil Engineering, Kunsan National Fisheries Junior College, Kunsan, Korea)

** 大阪大學 土木工學科(Department of Civil Engineering, Osaka University, Osaka, Japan)

*** 慶熙大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea)

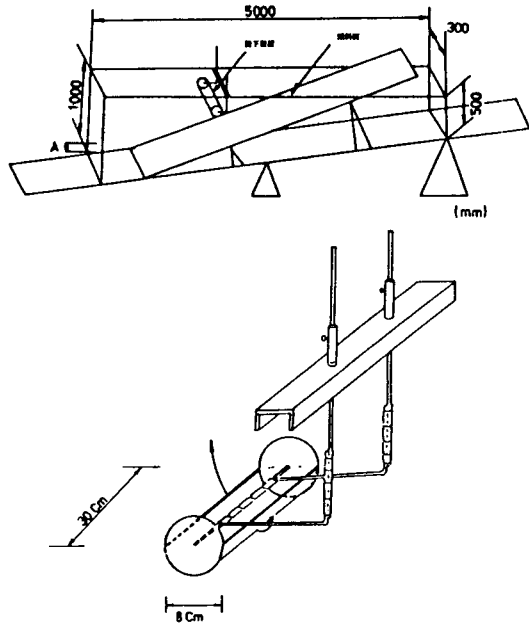


Fig. 1. Apparatus of dropping the brine.

2. 鹽水塊의 舉動實驗

2.1 實驗方法 및 實驗條件

實驗에 이용한 實驗裝置는 Fig. 1과 같으며 實驗方法是 實驗裝置內에 淡水를 注入한 다음 백색 포스타 잉크로 착색된 鹽水를 鹽水投下裝置內에 注入시킨다. 그리고 實驗裝置內의 淡水의 水位와 鹽水 投下裝置內의 水位와 落差가 있을 경우 投下할 때 鹽水塊의 攪亂을 피하기 위해서 淡水와 鹽水의 水位를 일치시킨다. 다음 實驗裝置內에 注入된 淡水의 流動을 멈추게 하기 위하여 30분 정도 지난 다음 반원통형 投下裝置 옆에 달린 끈을 순간적으로 잡아당겨 鹽水를 投下하였다. 그리고 鹽水塊의 舉動을 비디오 카메라로 촬영하였다.

實驗條件은 鹽水密度 1.04, 1.06 g/cm³인 鹽水를 投下量 150, 300, 600(cm³)으로 變化시키면서 實驗하였고, 또한 投下量에 대하여 기울기를 1:3, 1:4, 投下높이를 20, 40 cm로 變化시켜 總 24境遇에 대해서 Table 1과 같이 實驗하였다.

2.2 分析

分析은 촬영된 비디오 테이프를 재현하여 시간에

Table 1. Experimental condition

Model No.	Slope	h(cm)	ρ_o (g/cm ³)	Q_o (cm ³)	No. of dropping	
S3S4-D	1:3	40	1.04	150	3	
S3M4-D				300	3	
S3L4-D				600	3	
S3S6-D				1.06	150	3
S3M6-D					300	3
S3L6-D					600	3
S3S4-d		20	1.04	150	3	
S3M4-d				300	3	
S3L4-d				600	3	
S3S4-d				1.06	150	3
S3M6-d					300	3
S3L6-d					600	3
S4S4-D	1:4	40	1.04	150	3	
S4M4-D				300	3	
S4L4-D				600	3	
S4S6-D				1.06	150	3
S4M6-D					300	3
S4L6-D					600	3
S4S4-d		20	1.04	150	3	
S4M4-d				300	3	
S4L4-d				600	3	
S4S6-d				1.06	150	3
S4M6-d					300	3
S4L6-d					600	3

따른 鹽水塊의 形상을 비닐 아세테이트에 0.2~0.5 sec 간격으로 鹽水塊의 形상을 그려서 Model 別로 비교 分析하였다.

2.2.1 下流側 鹽水塊의 길이 변화

鹽水塊의 길이는 鹽水塊 앞부분에서 뒷부분까지 거리로 하였으며, 傾斜面에 衝突直後에는 鹽水塊의 뒷부분의 境界가 명확하지 않았기 때문에 이 領域에서 鹽水塊의 길이는 鹽水塊 앞부분에서 投下地點의 직각 아래 부분까지 距離로 하였다. Fig. 2의 縱軸과 橫軸은 각각 鹽水塊의 길이와 이동거리이며, 鹽水塊의 落下 距離가 같은 距離를 自由落下한 鹽水塊擴散幅(W)으로 無次元 하였다. 密度差別, 投下水深別, 投下量別의 分析結果 공통으로 나타나는 것은 $X/W \approx 1.5$ 의 衝突地點 부근에서 鹽水塊 길이의 증가율 dL/dX 는 1로 선형으로 增加하고 있었다. 이것은 鹽水塊의 길이를 鹽水塊의 先端部에서 投下地點 직각 아래를 길이로 하였기 때문이다. 또한 定性的을 보면 鹽水塊 内部에는 傾斜面에 충돌하기 전에 형성된 循環이 존재하고

있는 것을 알았고 이 循環은 周圍 淡水를 강하게 連行하고 급속히 成長하는 過程에서 亂流抵抗을 增大시켜 鹽水塊의 運動을 減速시키는 것을 알 수 있었다. 그리고 dL/dX 의 절대값은 거의 0.5이었으며 Begin과 Hopfinger(1981)의 기울기 1 : 4의 傾斜面 熱流體塊

에서 0.3보다는 약간 크나 室田 等(1988)의 수평면에서 鹽水塊 長이의 增加率 0.9보다는 작았다. 그리고 鹽水塊의 前부분에서는 突出部를 형성하면서 성장하는 傾斜 熱流體塊와 類似한 것을 알 수 있었다. 또한 鹽水塊 長이의 증가율은 投下水深에 따라 약간의 差

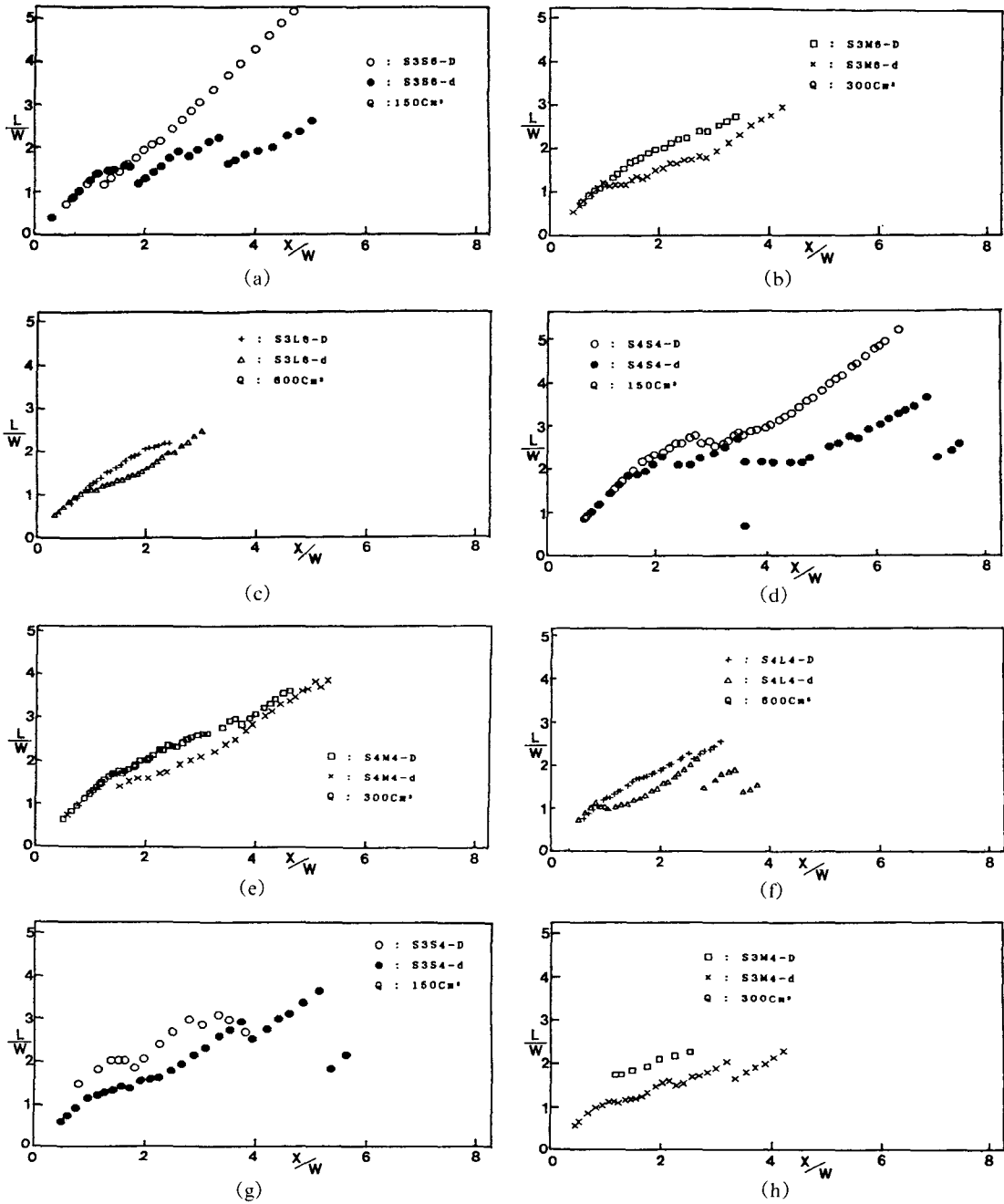


Fig. 2. Change of length in the brine lumps to the downstream.

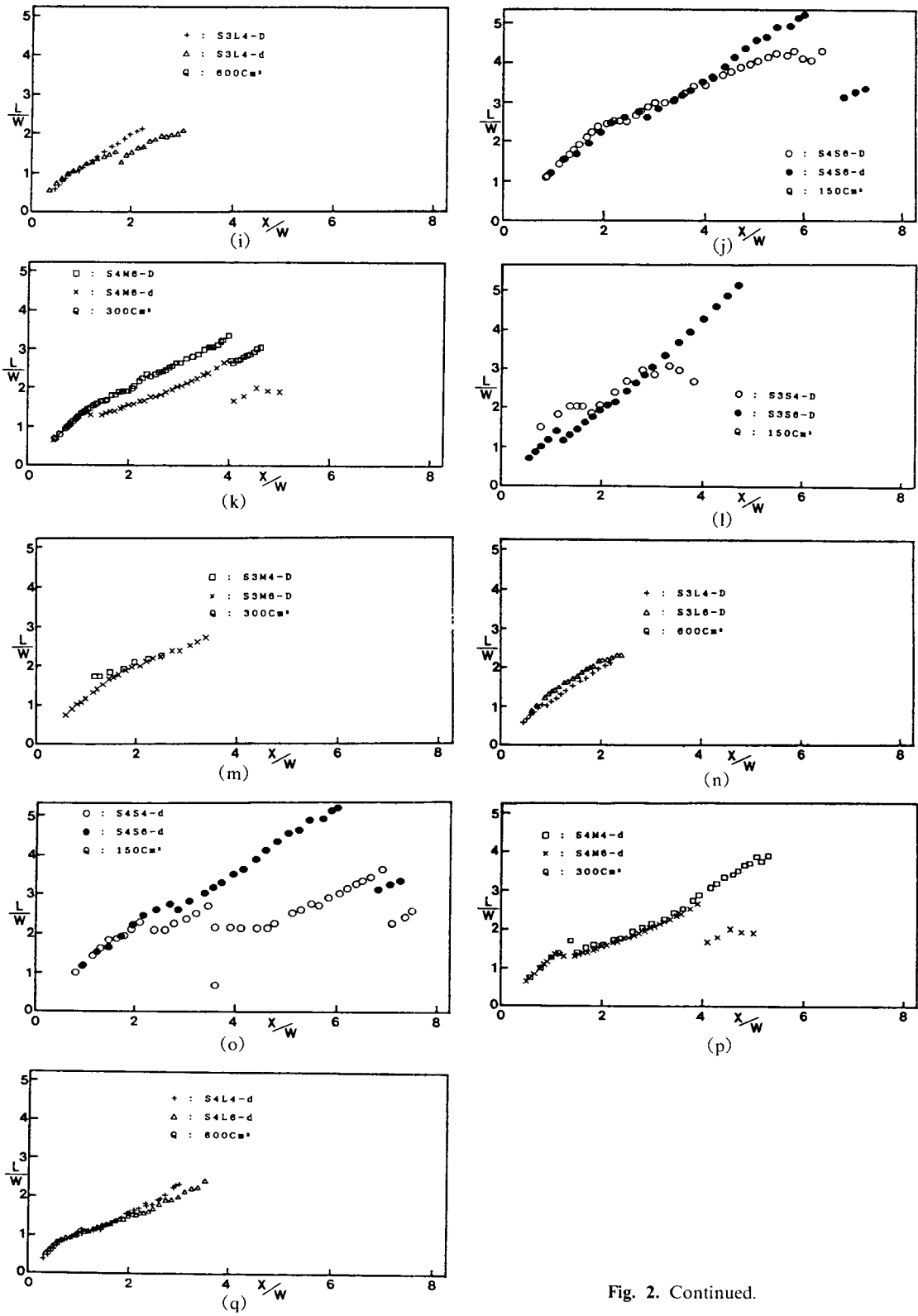


Fig. 2. Continued.

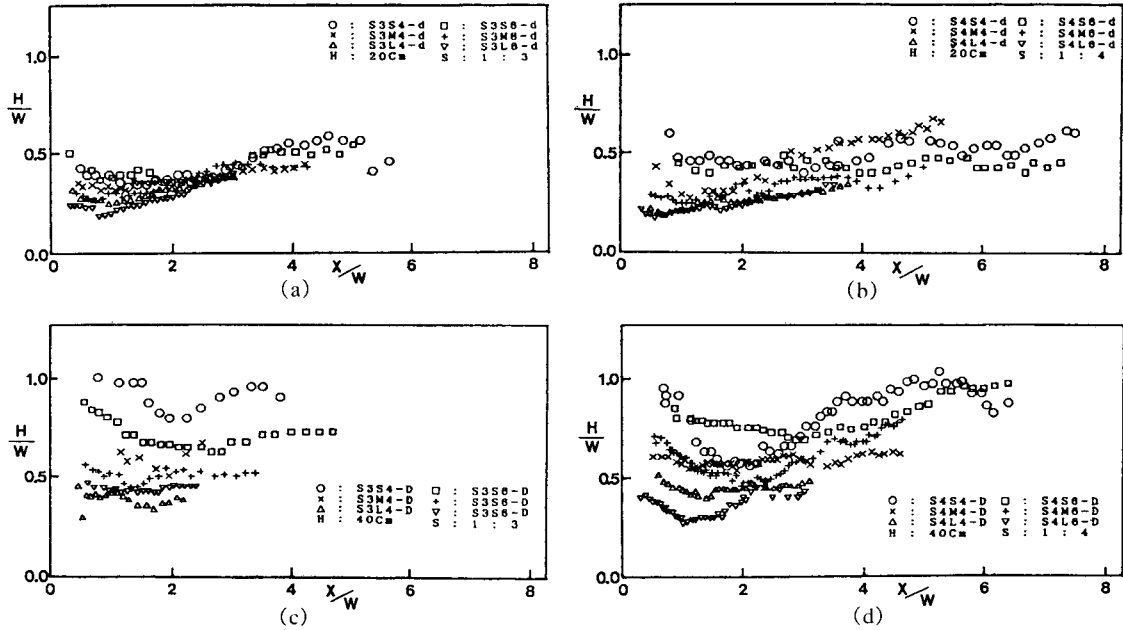


Fig. 3. Change of the height in the brine lumps to the downstream.

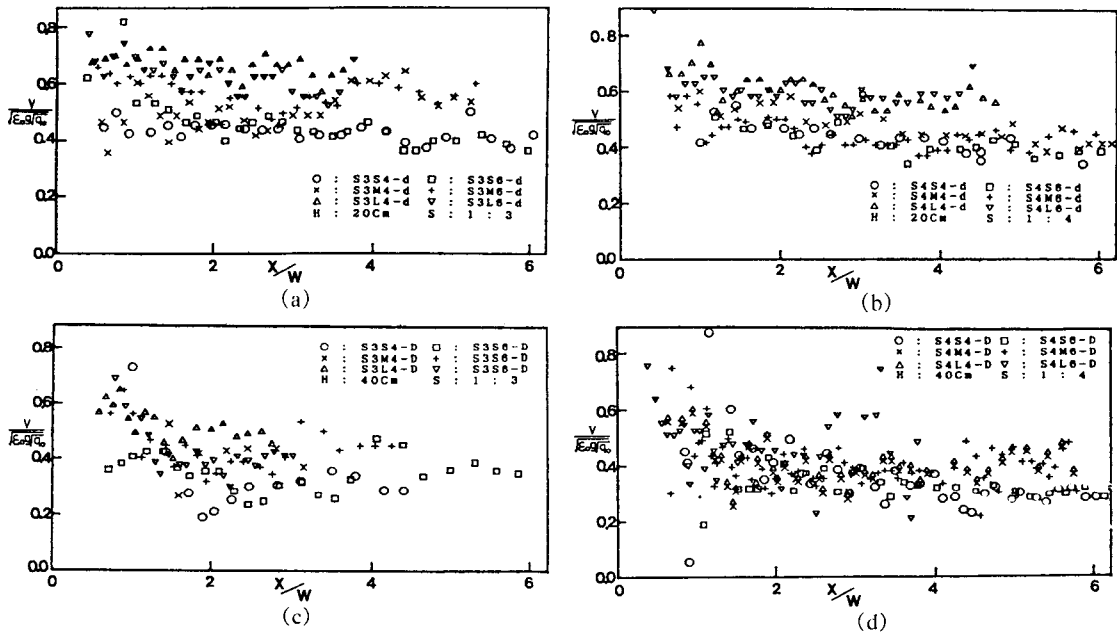


Fig. 4. Change of moving velocity at the head of brine lumps.

異를 보였으나 密度差에 따른 差는 거의 없었다. 그러므로 鹽水塊 長이의 증가율은 鹽水塊의 密度差보다 投下水深이 더 큰 영향을 미친다고 본다.

2.2.2 下流面 鹽水塊의 높이 변화

鹽水塊의 높이는 傾斜面의 法線方向을 鹽水塊 높이로 하였으며, 거리는 鹽水投下點에서 흐름방향으로 하였다. Fig.3의 縱軸과 橫軸은 鹽水塊을 自由落下시켰을 때 實驗에 대응하는 水深에서 鹽水塊의 擴散幅

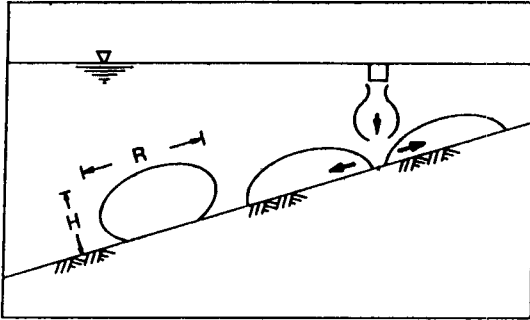


Fig. 5. Moving pattern of the muddy water lumps.

(W)으로 무次元化하였다. 分布는 縱軸 方向으로 分散하고 있었으며, $X/W \approx 1.5 \sim 2.0$ 의 부근에서 충돌현상이 진행되므로 鹽水塊의 높이는 最小치를 나타낸 후 增加하였다. 그리고 기울기가 25° 일 때 dL/dX 는 $0.05 \sim 0.08$ 이었으며, Begin and Hopfinger(1981)의 $0.06 \sim 0.09$ 보다는 약간 작았다. 그리고 室田 等(1988)의 平面實驗에서의 實驗值 0.44 보다는 아주 작았다. 이러한 것을 참고하여 보면 높이의 增加領域에서 密度差에 의한 重力効果는 鹽水塊의 舉動特性에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

2.2.3 흐름 方向의 鹽水塊이 移動特性

Fig. 4의 縱軸과 橫軸은 鹽水塊의 移動速度(V)와 移動距離이며, $(\epsilon \cdot g \sqrt{q_0})^{1/2}$ 과 鹽水塊의 擴散幅(W)으로 각각 무次元化 하였다. 鹽水塊의 移動速度는 傾斜面에 충돌할 때 最大가 되며, 전체적인 移動速度의 減少特性은 난류 열유체외와 거의 일치하였다.

3. 熱流體塊 理論

傾斜面 衝突後에 형성되는 鹽水塊의 移動特性은 傾斜面 衝突影響과 初期運動量을 제외한 力學的인 均衡關係는 亂流 熱流體塊과 같다. 그러므로 鹽水塊의 舉動을 Baines and Hopfinger(1984)의 亂流 熱流體塊 理論으로 재현하여 보고저 한다. 理論에 適用된 假定은 1) 熱流體塊(Thermal)의 形狀은 半橢圓이고 그 形狀은 相似的으로 變化한다. 2) 熱流體塊 内部의 總浮力는 保存된다. 3) 流速과 密度分布 形狀은 相似形狀을 維持한다. 4) 熱流體塊과 周圍水 流體는 混和한다. 5) 熱流體塊 質量의 變化率는 熱流體塊의 전체적인 特性量에 의해서만 지배된다. 이러한 假定에 의한 質量保存式은 다음과 같다.

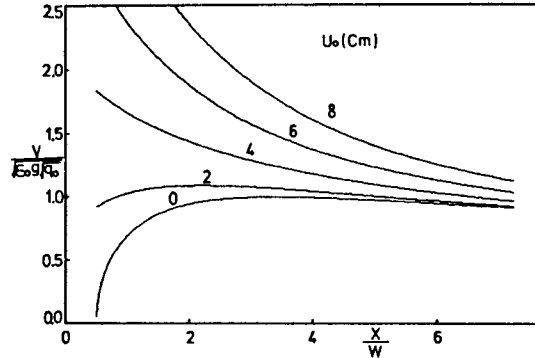


Fig. 6. Influence of colliding velocity as behavior of brine lumps.

$$dm/dt = f(M, M_v, m, \rho_a) \tag{1}$$

여기서

M : 熱流體塊의 運動量

M_v : 附加質量部分의 運動量

m : 熱流體塊의 質量

ρ_a : 周圍水의 密度

그리고 質量變化가 附加質量部分과 관계없다고 가정하여 次元解析하면 다음과 같이 된다.

$$dm/dt = \alpha \cdot M (\rho_a/m)^{1/2} \tag{2}$$

여기서 α 는 비례정수이다. 熱流體塊의 密度를 ρ 로 하고 Fig. 5를 참조하여 熱流體塊의 質量과 運動量式으로 나타내면 다음과 같다.

$$m = \rho \cdot \pi \cdot R^2 / 4K, \quad M = \rho \pi R^2 U / 4K \tag{3}$$

(3)式을 (2)式에 代入하면

$$\frac{d(\rho R^2)}{dt} = 2 (K/\pi)^{1/2} \alpha \rho R (\rho_a/\rho)^{1/2} U \tag{4}$$

된다. (4)式을 $U = dx/dt$ 를 고려하여 적분하면

$$\left(\frac{\rho}{\rho_a}\right)^{1/2} R = \frac{2}{(\pi)^{1/2}} \alpha X (K)^{1/2} + C \tag{5}$$

여기서 $\rho/\rho_a = 1$ 로 하고 $X = 0$ 에서 初期條件 $R = R_0, \rho = \rho_0$ 를 代入하면

$$(\rho_0/\rho_a)^{1/2} \cdot R_0 = C \tag{6}$$

되며 (6)式을 (5)式에 代入 정리하면

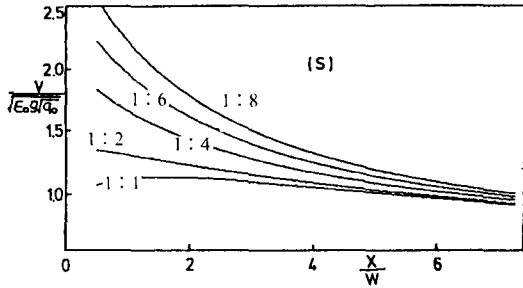


Fig. 7. Influence of the slope as a behavior of brine lumps.

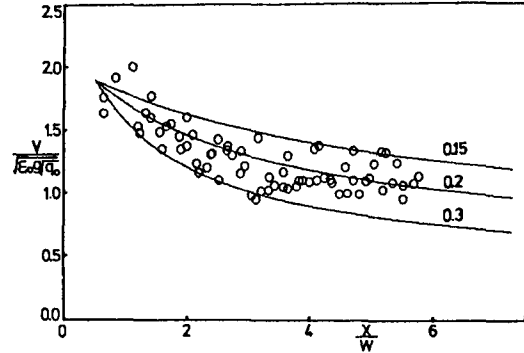


Fig. 8. Comparison of the theoretical value with the experimental value.

$$R = \frac{2\alpha}{(\pi)^{1/2}} (K)^{1/2} \left(\frac{\rho_a}{\rho}\right)^{1/2} \left\{ X + \frac{1}{(K)^{1/2}} \frac{(\pi)^{1/2} \rho_o}{2\alpha} \right\}^{1/2} R_o \quad (7)$$

가 된다. 그리고 熱流體塊 内部의 總浮力이 一定하다면

$$R = 2 \left(\frac{K}{\pi}\right)^{1/2} \alpha \left\{ 1 - \frac{\pi \Delta\rho_o R_o^2}{4K\alpha^2 \rho_a \bar{X}^2} \right\}^{1/2} \bar{X} \quad (8)$$

여기서 $\bar{X} = X + \frac{1}{(K)^{1/2}} \frac{(\pi)^{1/2} \rho_o}{2\alpha} R_o$ 이다.

熱流體塊 内部의 浮力은 壓力이 周圍流體까지 作用하므로 $(M + M_v)$ 가 보존되어야 한다. 그러므로 運動量保存式은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} (M + M_v) = \frac{\pi}{4} \frac{1}{K} R_o^2 \Delta\rho_o g \quad (9)$$

그리고 式(9)에 式(3)을 代入 적분하고 $\bar{X}=0$ 일 때 $U=U_o$ 로 놓으면 다음식을 얻는다.

$$U^2 = U_o^2 + \frac{2B}{3} \left(\frac{\bar{X}^2 - 3A}{(\bar{X} - A)^2} - X_o \frac{X_o^2 - 3A}{(\bar{X} - A)^2} \right) \quad (10)$$

여기서 $A = \frac{K_v}{(1+K_v)\alpha^2 K} \varepsilon_o Q_o$, $B = \frac{\varepsilon_o Q_o g}{(1+K_v)\alpha^2 K}$

K_v : 附加質量係數

理論解의 특징에 대해서 검토하기 위하여 入力條件을 鹽水塊의 平均密度差, 擴散幅, 落下速度로 하였으며, S4S4의 實驗條件에 맞추었다. Fig. 6은 連行係數를 一定하게 하고 傾斜面에 衝突하는 速度를 變化

시킨 것인데, 衝突速度가 크면 鹽水塊의 移動速度는 급속히 減少하고 반대로 衝突流速이 느린 경우에는 重力效果가 卓越하여 鹽水塊의 移動速度는 加速된다. Fig. 7은 鹽水塊의 移動速度에 미치는 斜面勾配의 영향에 관한 것을 나타내고 있으며 기울기가 작을수록 鹽水塊의 移動速度는 급속히 減少하였다. 그러나 기울기가 1:1이되면 重力效果가 卓越하기 때문에 약간 증가하는 傾向이 있었다. Fig. 8은 實驗條件 S4S4와 理論式에서 連行係數(α)를 0.15, 0.20, 0.30로 하였을 때이며, 連行係數가 0.2~0.3에서 實驗値와 거의 일치하고 있었다.

4. 結 論

傾斜面에서 鹽水投下實驗을 하여 傾斜面 衝突後에 形成되는 鹽水塊의 舉動特性에 대하여 정리하여 보면 다음과 같다.

- 1) 鹽水塊는 衝突直後 自由落下할 때 形成된 循環이 남아 있으며 이것은 周圍水를 連行하고 鹽水塊를 成長시킨다.
- 2) 鹽水塊는 높이가 增加함에 따라 移動速度는 급격히 減少하였다.
- 3) 鹽水塊의 形狀은 傾斜熱流體塊와 비슷하며, 移動特性은 亂流熱流體塊 理論으로 재현할 수 있다는 것을 알았다.

參考文獻

高英俊, 近藤基, 小岩苔生, 1976. 捨石의 水中落下速度について, 港灣技術研究所報告, No. 249 : 3-36.

- 福嶋祐介, 1986. 粉雪雪崩の流動機構の解析, 日本雪氷學會誌, **48**(4) : 189-197.
- 桑野定美, 大場和彦, 1973. 土捨船投下土砂の分散滞積実験例, 第47回, 農業土木學會論文集, : 51-61.
- 室田明, 中辻啓二, 玉井昌宏, 町田博紀, 1988. 海域で土砂投下における密度流現象, 海岸工學會論文集, 第35回 : 777-181.
- 奥出律, 山容弘辛, 松本茂, 1982. 底開式 バジによる捨石マウソトの造成に関する実験, 港灣技術研究報告, **21**(4) : 131-171.
- Baines, W.D. and Hofinger, E.J., 1984. Thermal with large density difference. *Atmospheric Environment*, **18** (16) : 1051-1057.
- Begin, P. and Hopfinger, E.J., 1981. Gravitational convection form in instantaneous sources on inclined boundaries. *J. Fluid Mech.*, **100** : 407-422.
- Britter, R.E. and Linden, P.F., 1980. The motion of the front of a gravity current travelling down an incline. *J. Fluid Mech.*, **3** : 531-543.
- Britter, R.E. and Simpson, J.E., 1978. Experiments on the dynamics of a gravity current head. *J. Fluid Mech.*, **88**(22) : 223-240.
- Escudier, M.P. and Max Worthy, 1973. On the motion of turbulent thermals. *J. Fluid Mech.*, **61**(3) : 541-552.
- Huppert, H.E. and Simpson, J.E., 1980. The slumping of gravity currents. *J. Fluid Mech.*, **99**(4) : 785-799.
- Richards, J.M., 1963. Experiments on the motions of isolated cylindrical thermals through unstratified surroundings. *Int. J. Air. Wat. Poll., pergamon Press*, **7** : 17-34.
- Shlien, D.J. and Thompson, D.W., 1975. Some experiments on the motion of an isolated laminar thermal. *J. Fluid Mech.*, **72**(1) : 35-47.
- Sparrow, E.M., Husar, R.B. and Goldstein, R.J., 1970. Observations and other characteristics of thermals. *J. Fluid Mech.*, **41**(4) : 793-800.
- Turner, J.S., 1959. A comparison between buoyant vortex rings and vortex pairs. *J. Fluid Mech.*, **7**(3) : 419-432.
- Turner, J.S., 1982. The motion of buoyant element in turbulent surroundings. *J. Fluid Mech.*, **16**, 1-16.