

## 波浪에 의한 水表面 浮遊速度에 관한 研究 A Study on Surface Drift Velocity in Water Waves

金泰麟\* · 崔漢圭\*\* · 權赫宰\*\*

Tae In Kim\*, Han Gyu Choi\*\* and Hyuk Jae Kwon\*\*

**要 旨**: 파 운동에 의한 수표면 부유속도를 규명하기 위하여 Stokes 2차 파이론, Stokes 5차 파이론 및 Longuet-Higgins(1953)의 전도해 등에 의한 이론치를 2차원 조파수조에서 실측한 실험치와 비교 분석하였다. 실험한 상대수심의 범위는  $0.04 < H/Lo < 0.42$ , 상대파고의 범위는  $0.008 < H/Lo < 0.065$ 였다. 연구결과, 수표면 부유속도에 있어서는 무한 수로조건과 폐수로 조건 모두에서 Stokes 2차파 이론이 Stokes 5차 파이론보다 더 실측치와 일치하며 Longuet-Higgins(1953)의 전도해는 실측치에 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 무한수로조건의 경우, Stokes 2차 파이론에서  $H/Lo = 0.13$ 을 경계로 천해역으로 갈수록 이론치가 실측치보다 크며 심해역으로 갈수록 이론치보다 실측치가 작아진다. 폐수로 조건의 경우는 이론치가 실측치보다 작으며 그 차이는 상대수심 및 상대파고가 커짐에 따라 대체로 증가한다. 수표면 부유속도의 실측치를 근거로 반송류의 수정 포물선 연속분포식이 제안되었으며 제안된 수정식은 Longuet-Higgins(1953)의 전도해나 Stokes 파이론 보다도 폐수로조건에서의 기존의 실험결과에 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

**Abstract**: To clarify the surface drift velocity in gravity waves, experimental data measured in a two-dimensional wave flume were compared with theoretical values predicted by the Stokes 2nd- and 5th- order theories as well as by the conduction solution of Longuet-Higgins (1953). Relative water depth and wave height ranged  $0.04 < H/Lo < 0.42$  and  $0.008 < H/Lo < 0.065$ , respectively, in the experiment. It has been found that, as long as surface drift velocity is concerned, the Stokes 2nd-order theory shows better agreements with measured values than the Stokes 5th-order theory does, while the conduction solution shows the poorest agreement. For an open flume condition, Stokes 2nd-order theory gives higher values of surface drift velocity than the measured values for relative water depth  $H/Lo < 0.13$ , while the opposite is found for  $H/Lo > 0.13$ . For a closed flume condition, Stokes 2nd-order theory gives lower values than the experimental data, and the differences increase as both relative water depth and wave height increase. Based on the observed data of the surface drift velocities, a modified parabolic model of the return current velocity profile has been suggested, which is proved to fit better to the existing experimental data of mass transport velocity profiles in a closed wave flume than the models of Longuet-Higgins (1953) and Stokes wave theories do.

### 1. 서 론

파랑의 운동에 의해서 유체의 질량이 파의 진행방향으로 이동된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 파랑에 의한 질량 이동은 해안에서의 연안류의 형성, 해양 오염원 및 운배수의 확산, 표사의 이동에 중요한 영향을 미친다. 특히 수표면에서의 질량이동속도는 유조선 해양오염 사고와 같은 부유 오염원의 확산이나

부이 등의 이동을 예측하는데 중요하다. 실험실 조파수로와 같은 폐수로에서는 압력차에 의해 해안방향으로 이동된 유체의 질량은 미세한 수심의 증가를 일으키고 이에 의한 압력차에 의해 조파기쪽으로 반송류(return current)를 형성한다. 따라서 상당한 시간이 경과하면 해안쪽으로 이동하는 수량과 반송류에 의해 돌아오는 수량이 같아져서 정상상태(steady state)에 이르게 된다. 실험실 조파수로에서의 파는

\*陸軍士官學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul 713-799, Korea)

\*\*江原大學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

이 반송류에 의해서 파장과 주기에 약간의 변동을 일으키게 된다.

파랑에 의한 질량이동은 파랑운동의 비선형효과와 하나로서 선형 파이론으로는 해석할수 없으며 2차 이상의 비선형 파이론이 필요하다. 본 연구는 파랑에 의한 질량이동에 의해 수표면에서의 수립자의 이동 속도(수표면 부유속도)를 실험에 의해 구하고 이를 Stokes 고차 파이론에서 얻어진 값과 비교하기 위해 수행하였다. 실험조건은 조파기의 작동후 반송류가 형성되기 전의 무한수로(open flume)의 경우와 반송류가 형성된 후의 폐수로(closed flume)의 경우로 하였다.

폐수로의 경우 실험치와 이론치의 비교는 반송류의 연직분포(return current velocity profile)에 대한 이론치로서 전수심 균일(uniform) 분포와 Longuet-Higgins(1953)의 conduction solution, 그리고 본 연구에서 제안된 수정 포물선(modified parabolic)형분포와 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연구동향

일반적으로, 유체입자의 질량이동 속도는 평균 Eulerian 흐름(Mean Eulerian streaming)과 Stokes 흐름(Stokes drift)으로 알려진 두개의 양의 합이다(Mei, 1983; Craik, 1982). Stokes 흐름은 유체의 비회전운동의 일반적인 결과인 반면에 평균 Eulerian 흐름은 자유표면과 수로바닥에 의한 유체의 점성효과에 의해 발생한다. 파랑운동에 의한 질량이동을 관측하는 두개의 다른 좌표축은 고정축점에서 질량의 평균수송량을 관측하는 Eulerian 좌표축과 각각의 수립자와 함께 이동하는 Lagrangian 좌표축이다. 지속적으로 진행되는 파에서 질량이동을 위한 이론적 해는 두 범주로 나눌 수 있다. 첫번째 범주는 이상유체의 가정하에 유한진폭과 이론으로부터 얻어지고 두번째는 자유수면과 바닥경계에서 점성효과를 고려함으로써 얻어진다. 첫번째 범주에 있어서 Stokes(1847)는 무점성, 비회전성의 진행되는 파에서 유체입자들은 궤적운동과 함께 파랑의 진행방향으로  $O(ak)^2$ 의 정상부유속도를 갖는다는 것을 처음 인식하였다. 이 흐름의 양은 파속의 첫번째, 두번째 정의에 의하면 Eulerian 좌표계에서 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{U}_{LO} = \frac{H^2 \sigma k}{8 \sinh^2 kh} \cdot \cosh 2ks \quad (1)$$

그리고

$$\bar{U}_{LC} = \frac{H^2 \sigma k}{8 \sinh^2 kh} \left[ \cosh 2ks - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right] \quad (2)$$

여기서  $\bar{U}_{LO}$  및  $\bar{U}_{LC}$ 는 각각 무한수로(open flume)와 폐수로(closed flume 조건)에서의 Lagrangian 질량 이동속도이고, H는 파고,  $\sigma$ 는 주파수, k는 파수이며 h는 수심이다. 수직거리 s는 수로 바닥으로부터 상향으로의 연직거리이다. 미소진폭파에 존재하는 이런 흐름은 무한히 깊은 흐름에서 Rayleigh(1876)에 의해, 그리고 유한 깊이에서 Ursell(1953)에 의해 이론적으로 증명되어졌다. Skjelbreia(1959)는 Stokes 3차 파랑에서 수립자의 Lagrangian 운동을 연구했다. 3차로 올라가면 Lagrangian 질량 이동속도는 식 (1), (2)와 동일하나  $H^2$ 은  $4a^2$ ( $a=1$ 차파 성분의 진폭)으로 대체된다. Dalrymple(1976)은 Dean(1974)에 의해 제시된 흐름 함수이론(Stream-function wave theory)을 사용하여 Eulerian 좌표축에서 질량 이동속도를 수치적으로 계산하였다. Kim과 Hudspeth(1988), 김과 황(1992)은 Taylor 급수전개법을 이용하여 기존의 질량 이동속도에 대한 식을 Stokes 5차파에까지 확장하였다. 그들은 3차파 이상에서의 질량 이동속도가 수립자의 초기위치에 따라 달라진다는 것을 밝혔으며 질량 이동 속도 식에 2차파 성분의 영향을 포함시켰다. 질량 이동에서의 이러한 이상유체 이론들은 점성효과를 무시할 수 있는 심해조건 또는 파랑운동이 시작한 후 길지 않은 시간동안 적용되어질 수 있다. 그러나 시간이 경과할수록 수면과 수로바닥의 경계층에서 생성된 와류(vorticity)는 점차 수심내부로 확산되어 평균 Eulerian 흐름을 생성하게 된다.

Longuet-Higgins(1953)는 점성효과에 주목하여 파에서의 점성을 고려한 질량 이동의 이론인 전도해(conduction solution)를 유도하였다. Chang(1969), Unluata와 Mei(1983)는 Lagrangian 좌표계에서 Longuet-Higgins의 해를 증명하였다. Longuet-Higgins(1953)의 전도해는 시간적으로 감쇠하는 파랑에서는 Liu와 Davis(1977)가, 공간적으로 감쇠하는 파랑에서는 Craik(1982)에 의해 수정되었으며 Dore(1978)는 자유표면에서 공기의 저항효과를 추가하였다. Iskan-

darani와 Liu(1991, 1993)는 실험수조에서 측면벽의 영향에 대해 해석하였으며 파랑진행방향의 좌측벽면 가까이에서 질량이동 속도가 중앙부와는 달라짐을 보였다.

수심 전체에 걸친 Lagrangian 질량이동속도는 파동속에서 물의 비중과 같은 부유물의 움직임을 추적함으로써 실측되어진다. 그 실험치는 일정수심에서 Caligny(1878), U. S. Beach Erosion Board(1941), Russell과 Osorio(1958), Mei 등(1972), Tsuchiya 등(1980)에 의해, 그리고 경사를 가진 수로에서 Wang 등(1981)에 의해 실측되어졌다. Nath(1978), Bullock과 Short(1982, 1985)는 실험(폐)수로에서 파의 질량이동에 의해 생성되는 Eulerian반송류의 양을 제시하였는데 그것은 수로의 고정점에서 계측된 유체속도를 파의 한 주기동안 평균함으로써 얻었다. 바닥경계층에서의 질량이동속도는 Bagnold(1947), Allen과 Gibson(1959), Brebner 등(1966), 그리고 Carter 등(1973)에 의해 계측되어졌다. 그 결과 바닥경계층에서의 질량이동속도가 Longuet-Higgins(1953)의 해와 잘 일치함을 보였다. 바닥경계층을 제외하고는 수심에 따른 질량이동속도의 관측치들은 천해에서는 Longuet-Higgins(1953)의 전도해와, 그리고 심해에서는 Stokes(1847)의 비점성해와 비슷한 연직분포를 갖기는 하지만 그 값이 상당히 넓은 범위에 흩어져 있다. 어떤 특정 조파수로에서의 실측치라도 조파판으로부터의 거리에 따라 차이를 보여준다(Mei 등, 1972). 이것은 조파수로에서의 질량이동이 Stokes(1847)나 Longuet-Higgins(1953)의 단순한 모형으로는 설명할 수 없는 매우 복잡한 인자들에 의해 영향을 받는다는 것을 시사한다.

2.2 Stokes 파에서의 질량이동속도

Kim과 Hudspeth(1988)가 Taylor급수전개법을 이용하여 구한 Stokes파에서의 질량이동속도는 Stokes 2차 파이론에서는 Stokes(1847)에 의해 처음 제시된 식 (1)과 같고 이를 심해파속  $C_0 = g/\sigma$ 로 무차원화 하면 다음과 같다.

$$U_L/C_0 = \frac{(Hk)^2}{4\sinh 2kh} \cosh 2ks \tag{3}$$

자유수면에서의 수표면 부유속도는 식 (3)에서  $s=h$ 로 놓음으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{U}_{Lo}/C_0 = \frac{(Hk)^2}{4\tanh 2kh} \tag{4}$$

Stokes 5차 파이론에서의 무차원 질량이동속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_L/C_0 = & [1 + (ka)^2 C_1 + (ka)^4 C_2] \tanh kh \\ & \left\{ \frac{1}{32} [F_1^2(3F_1^2 - F_2) - F_1(5F_1^3 + 10F_1 F_2 \right. \\ & \left. - 32F_{13} - 16F_1) \cosh 2ks + (4F_1^4 + 31F_1^2 F_2 \right. \\ & \left. + 16F_2^2) \cosh 4ks] \right\} \tag{5} \end{aligned}$$

식 (5)에서 계수들은 Skjelbreia와 Hendrickson(1960)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F_1 &= ka \cdot \frac{1}{s} \\ F_2 &= (ka)^2 \cdot \frac{3}{4s^4} \\ F_{13} &= -(ka)^3 \cdot \frac{c^2(5c^2 + 1)}{8s^5} \\ C_1 &= \frac{(8c^4 - 8c^2 - 9)}{8s^4} \\ & \quad (3840c^{12} - 4096c^{10} - 2592c^8 - 1008c^6 - 5944c^4 \\ & \quad - 1830c^2 + 147) \\ C_2 &= \frac{512s^{10}(6c^2 - 1)}{8s^4} \end{aligned}$$

여기서,  $c = \cosh kh$  그리고  $s = \sinh kh$ 이다. 자유수면에서의 수표면부유속도는 식 (5)에서  $s=h$ 로 놓음으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_L/C_0 = & [1 + (ka)^2 C_1 + (ka)^4 C_2] \tanh kh \\ & \left\{ \frac{1}{32} [F_1^2(3F_1^2 - F_2) - F_1(5F_1^3 + 10F_1 F_2 \right. \\ & \left. - 32F_{13} - 16F_1) \cosh 2kh + (4F_1^4 + 31F_1^2 F_2 \right. \\ & \left. + 16F_2^2) \cosh 4kh] \right\} \tag{7} \end{aligned}$$

2.3 폐수로에서의 반송류

실험실 수조에서와 같은 폐수로에서 해안으로 향하는 물입자는 질량수송에 의해 발생하는 압력경사 때문에 조파기쪽으로 되돌아온다. 정상상태에 도달했을 때, 파에 의해 수송되어진 Mass flux는 조파수조의 어느 부분에서의 반송류에 의해 생긴 Mass flux와 평형을 이루어야 한다. 이 반송류의 연직분포는 폐수로에서의 질량이동속도의 연직분포 형태를 결정하

는 중요한 요소이다.

### 2.3.1 균일연직 분포

무점성 유체에서 반송류는 수심에 걸쳐 균일하다고 가정할 수 있으므로 균일연직분포의 반송류  $R_{cu}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{cu} = -\frac{1}{h} \int_0^h \bar{U}_L(s) ds \quad (8)$$

여기서  $\bar{U}_L(s)$ 는 수심에 따른 Lagrangian 질량 이동 속도이다.

Stokes 파 이론은 이상유체의 가정에 근거를 두고 있다. 이상유체의 경우 경계면에서의 마찰이 없기 때문에 반송류의 연직분포는 균일직선분포가 된다.

Stokes 2차 파 이론에서 식 (8)에 따른 반송류의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{cu}/C_0 = \frac{-H^2 k^2}{4 \sinh 2kh} \cdot \frac{\sinh 2kh}{2kh} \quad (9)$$

따라서 식 (3)에 의해 주어진 질량수송속도는 폐수로에서 아래와 같이 수정된다.

$$\bar{U}_{LC}/C_0 = \frac{H^2 k^2}{4 \sinh 2kh} \left[ \cosh 2ks - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right] \quad (10)$$

수표면에서의 부유속도는 식 (10)에  $s=h$ 를 대입하면 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{U}_{LC}/C_0 = \frac{H^2 k^2}{4 \sinh 2kh} \left[ \cosh 2kh - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right] \quad (11)$$

Stokes 5차파 이론에서 식 (5)를 식 (8)에 대입하면 반송류는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_{cu}/C_0 = & -[1 + (ka)^2 C_1 + (ka)^4 C_2] \tanh kh \\ & \left\{ \left[ \frac{1}{32} F_1^2 (3F_1^2 - F_2) - \frac{1}{32} F_1 (5F_1^3 + 10F_1 F_2) \right. \right. \\ & \left. \left. - 32F_{13} - 16F_1 \right] \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right. \\ & \left. + \frac{1}{32} (4F_1^4 + 31F_1^2 F_2 + 16F_2^2) \frac{\sinh 4kh}{4kh} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

따라서 폐수로에서 질량수송속도는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{LC}/C_0 = & \frac{1}{32} [1 + (ka)^2 C_1 + (ka)^4 C_2] \tanh kh \\ & \left\{ \left[ F_1^2 (3F_1^2 - F_2) - F_1 (5F_1^3 + 10F_1 F_2) \right. \right. \\ & \left. \left. - 32F_{13} - 16F_1 \right] \cdot \left[ \cosh 2ks - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right] \right. \\ & \left. + (4F_1^4 + 31F_1^2 F_2 + 16F_2^2) \left[ \cosh 4ks \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{\sinh 4kh}{4kh} \right] \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

따라서, 수표면에서의 부유속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{LC}/C_0 = & \frac{1}{32} [1 + (ka)^2 C_1 + (ka)^4 C_2] \tanh kh \\ & \left\{ \left[ F_1^2 (3F_1^2 - F_2) - F_1 (5F_1^3 + 10F_1 F_2) \right. \right. \\ & \left. \left. - 32F_{13} - 16F_1 \right] \cdot \left[ \cosh 2kh - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right] \right. \\ & \left. + (4F_1^4 + 31F_1^2 F_2 + 16F_2^2) \right. \\ & \left. \left[ \cosh 4kh - \frac{\sinh 4kh}{4kh} \right] \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

### 2.3.2 전도해

Longuet-Higgins(1953)는 점성을 고려한 실제유체의 파랑운동에서의 질량 이동에 대한 해석으로부터 파랑에 의한 질량 이동이 온도의 전도현상에 대한 편미분방정식의 해로 주어짐을 보였다. 이 해는 폐수로와 같이 임의의 연직단면에서의 질량수송이 0일 때 유일해로 얻어지며 이를 전도해(conduction solution)라고 명명하였다. Longuet-Higgins(1953)의 전도해는 파랑의 운동이 미소진폭이며 수표면과 수조바닥 경계면으로부터 점성효과가 유체내부로 전파되기까지 적어도 수시간 이상의 시간이 경과했을 때 적용할 수 있다는 한계를 가지며 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{LC}/C_0 = & \frac{H^2 k^2}{8 \sinh 2kh} \left[ 2 \cosh 2ks + 3 + k s \sinh 2kh \right. \\ & \left. \left( 3 \frac{s^2}{h^2} - 2 \frac{s}{h} \right) + 3 \left( \frac{\sinh 2kh}{2kh} + \frac{3}{2} \right) \left( \frac{s^2}{h^2} - 2 \frac{s}{h} \right) \right] \quad (15) \end{aligned}$$

따라서, 수표면에서의 부유속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{U}_{LC}/C_0 = \frac{H^2 k^2}{8 \sinh 2kh} \left( 22 \cosh 2kh + kh \sinh 2kh - \frac{3 \sinh 2kh}{2kh} - \frac{3}{2} \right) \quad (16)$$

식 (15)를 살펴보면 우항의 중괄호안의 첫 항은 식 (1)로 주어진 Stokes drift와 같으므로 두 번째 항부터를 점성 유체에서의 반송류 성분과 같이 볼 수 있다. 따라서 전도해에서의 반송류의 연직분포  $R_{CL}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{CL}/C_0 = -\frac{H^2 k^2}{8 \sinh 2kh} \left[ 3 + kh \sinh 2kh \left( 3 \frac{s^2}{h^2} - 2 \frac{s}{h} \right) + 3 \left( \frac{\sinh 2kh}{2kh} + \frac{3}{2} \right) \cdot \left( \frac{s^2}{h^2} - 2 \frac{s}{h} \right) \right] \quad (17)$$

식 (17)은 전도해에서의 반송류의 연직분포가 포물선형임을 말해준다. 이를 포물선 방정식의 표준형으로 정리해 보면

$$R_{CL}/C_0 = -\frac{H^2 k^2}{8 \sinh 2kh} \left\{ \frac{(6k^2 h^2 + 3) \sinh 2kh + 9kh}{2kh} \left[ \frac{s}{h} - F(kh) \right]^2 - \frac{[(2k^2 h^2 + 3) \sinh 2kh + 9kh]^2}{6(2k^2 h^2 + 1) \sinh 2kh + 18kh} + 3 \right\} \quad (18)$$

여기서

$$F(kh) = \frac{(2k^2 h^2 + 3) \sinh 2kh + 9kh}{(6k^2 h^2 + 3) \sinh 2kh + 9kh} \quad (19)$$

식 (18)에서  $h \cdot F(kh)$ 의 값이 곧 꼭지점의  $s$ 값을 의미하며 상대수심에 따라 반송류의 연직분포 모양은

결정한다는 것을 알 수 있다.

### 2.3.3 수정 포물선 연직분포

조파수로에서 폐수로조건에서 측정된 질량 이동속도의 분포는 이상유체의 균일 연직 반송류 분포나 충분한 점성효과의 발달을 고려한 전도해의 반송류 분포와 잘 맞지 않는다.

따라서 본 연구에서는 제 3의 반송류 분포로서 다음과 같은 수정 포물선 연직 분포식  $R_{cp}$ 를 제안하기로 한다.

$$R_{cp}/C_0 = R_{cu}/C_0 \cdot \left\{ A \left[ \frac{s}{h} - M(kh) \right]^2 - A \left[ M^2(kh) - M(kh) + \frac{1}{3} \right] + 1 \right\} \quad (20)$$

여기서

$$M(kh) = \frac{(2k^2 h^2 + 3) \sinh 2kh + 9kh}{(Bk^2 h^2 + C) \sinh 2kh + 9kh} \quad (21)$$

로서  $F(kh)$ 의 분모를 수정한 식이다. A, B, C는 실험결과 이론치와 실측치간의 최소자승오차를 최소화 하는 값들로 결정된다.

식 (20)은 이론적 해석으로부터 얻어진 식이 아니고 반송류의 연직분포를 전도해와 같이 포물선으로 가정하되 그 꼭지점의 위치와 곡율은 폐수로조건에서 질량 이동속도의 실측자료로부터 결정하는 하나의 실험식이라고 할 수 있다.

따라서 수정 포물선 연직분포의 반송류를 포함한 폐수로에서의 질량 이동속도는 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{U}_{LC}/C_0 = \frac{H^2 k^2}{4 \sinh 2kh} \left\{ \cosh 2ks - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right\} \quad (22)$$

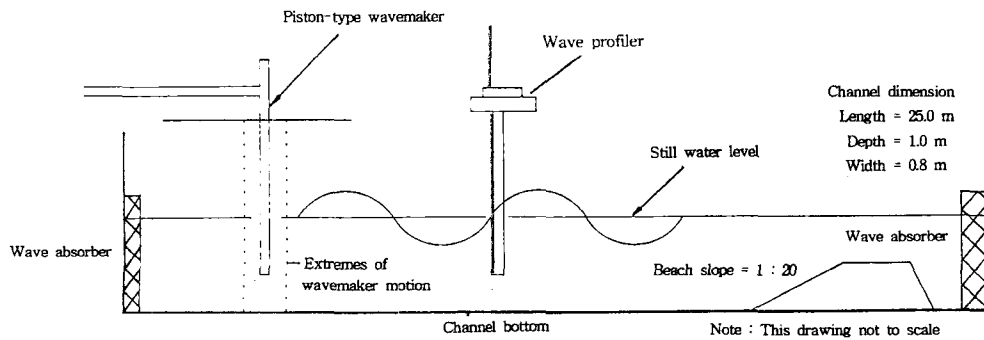


Fig. 1. Experimental set-up in a wave flume.

$$\left\{ A \left[ \frac{s}{h} - M(kh) \right]^2 - A \left[ M^2(kh) - M(kh) + \frac{1}{3} \right] + 1 \right\}$$

따라서, 수표면에서의 부유속도는 다음과 같다.

$$\bar{U}_{LC}/C_0 = \frac{H^2 k^2}{4 \sinh 2kh} \left\{ \cosh 2kh - \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right. \\ \left. \left\{ A [1 - M(kh)]^2 - A [M^2(kh) - M(kh) + \frac{1}{3}] + 1 \right\} \right\} \quad (23)$$

### 3. 실험장치 및 방법

실험은 Fig. 1에 보인 강원대학교 수리실험실에 있는 조파수로 시스템을 이용하였으며 수로의 주요제원은 다음과 같다.

- 규격: 폭 0.8m × 깊이 1.0m × 길이 20m
- 조파기: 피스톤형 전기유압식
- 특성: 조파주기 0.5 sec ~ 10 sec, 최고파고 30 cm (수심 65 cm에서)

실험을 시작하기 전에 반사파의 영향을 검증하였다. 실험중 반사파의 영향은 5%이내가 되도록 하였다. 이를 위하여 해안의 경사는 1/20로 하였고 해안에는 소파재료를 설치하여 반사를 최소화시켰다.

실험은 가능한 광범위한 상대수심(h/L<sub>0</sub>)과 상대파고(H/L<sub>0</sub>)의 조건을 얻을 수 있도록 수행하였다. 그러나 조파기의 실제성능의 제한상 파의 주기는 0.5 초 ~ 2.5초간에서 수행하였으며 이 제한을 보완하기 위하여 수심을 40 cm, 50 cm, 60 cm, 65 cm로 변화시켜 가며 실험을 반복 수행하였다. 실험파고는 5 cm ~ 30 cm의 범위였다. 수표면 부유속도는 수로의 중횡축 중간지점에 부유물(원형종이조각, 직경 6 mm)을 띄우고 일정시간 경과후 부유물의 이동거리를 측정하여 이동거리를 경과시간으로 나눔으로서 얻었다. 이를 위하여 수로측면의 Fiber glass상에 측정자를 부착하여 육안으로 이동거리를 읽을 수 있게 하였다. 이 실험방법에서 수표면에서의 공기흐름의 영향이 크기 때문에 실내 실험수조에서 출입문과 창문을 닫은 상태에서 실험을 수행하였고 실험수조내의 수온은 18℃를 유지하였다. 매 실험 CASE에 대하여 무한수로

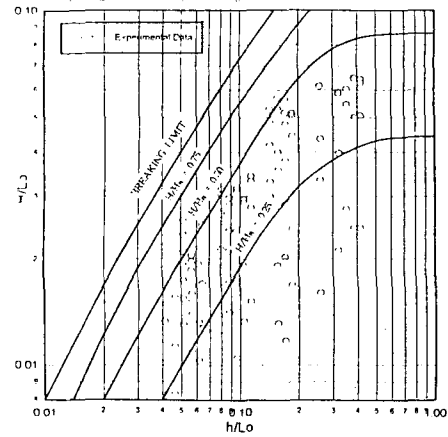


Fig. 2. Experimental wave condition.

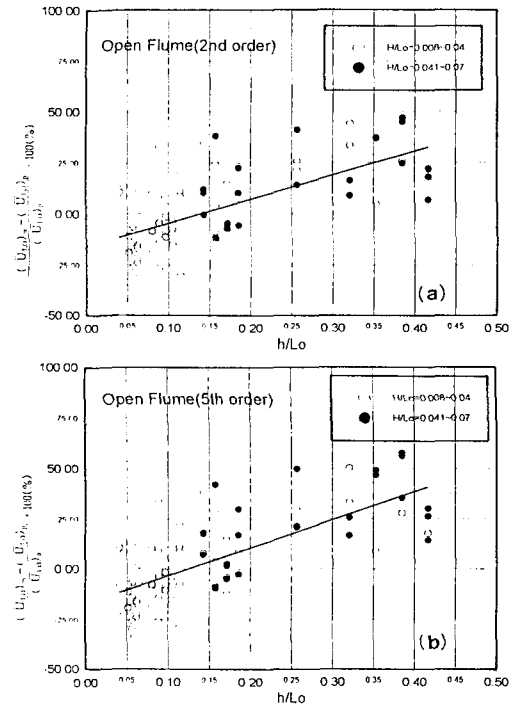


Fig. 3. Percent difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative water depth in open flume condition (Stokes wave theory).

에서의 수표면 부유속도  $\bar{U}_{L0}$ 는 조파기의 작동후 5~6 개 파가 수로의 중간지점을 통과한 후 안정된 규칙 파가 형성되었을 때부터 측정을 시작하여 10~20개 파가 통과하는 시간동안 부유물의 이동을 관측하였다. 폐수로 조건에서의 수표면부유속도  $\bar{U}_{LC}$ 는 수로중간

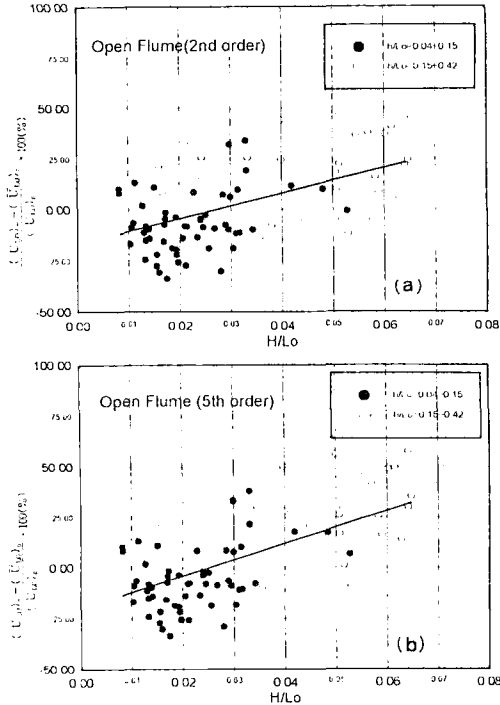


Fig. 4. Percent difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative water wave height in open flume condition (Stokes wave theory).

지점에 반송류가 충분히 형성되기까지 조파기가 10여분간 작동하도록 기다린 후에 무한수로의 경우와 동일한 관측을 반복하였다. 이렇게 하여 상대수심  $0.04 < h/L_0 < 0.42$  그리고 상대파고  $0.008 < H/L_0 < 0.065$ 에 이르는 비교적 광범위한 파랑조건에 걸쳐 94개의 실험 CASE들을 얻을 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 실험파랑의 상대수심( $h/L_0$ ) 및 상대파고( $H/L_0$ )의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 실선은 Dean(1974)에 의해 제시된 쇄파한계와 쇄파고( $H_B$ )에 대한 파고비( $H/H_B$ )가 0.25, 0.5, 0.75인 경계를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보여주듯이 실험파랑은 천해( $h/L_0 < 0.015$ )와 심해( $h/L_0 > 0.5$ )조건외 경계 사이에 넓게 분포되어 있으며 파고는 대체로 쇄파고의 25%~50%의 범위에 있고 최대파고는 쇄파고의 70%에 이르기까지 분포되어 있다.

4.1 무한수로조건에서의 수표면 부유속도( $\bar{U}_{L0}$ )

Fig. 3은 무한수로에서의 수표면부유속도의 Stokes 파 이론치 ( $\bar{U}_{L0}^p$ )와 측정치( $\bar{U}_{L0}^m$ )간의 차이를 이론치를 기준으로 한 백분율(%)로서 상대수심( $h/L_0$ )의 함수로 나타낸 것이다. 상대파고의 범위를  $H/L_0=0.04$ 를 경계로 구분하여 표시하였다. 이론치와 측정치의 차이는 상당한 편차를 보이나 대체적으로 상대수심의 증가에 따라 직선적으로 증가하며, 큰 상대파고의 값에서 그 차이도 큰 것을 알 수 있다. 그림에서 직선은 최소자승법에 의하여 구한 차이값들 분포의 회귀선을 나타낸다. 회귀선은  $h/L_0=0.13, 0.14$ 를 경계로 하여 천해역으로 갈수록 측정치가 이론치보다 작고 심해역으로 갈수록 측정치가 이론치보다 커짐을 보여준다. 실험에서의 상대수심의 범위  $0.04 < h/L_0 < 0.42$ 에서 회귀선에 따른 이론치와 실측치의 차이의 범위는 (a) 2차파 이론에서 -13%~35%이고 (b) 5차파 이론에서 -13%~45%이다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 보인 수표면 부유속도의 이론치와 측정치간의 차이를 상대파고( $H/L_0$ )의 함수로 다시 나타낸 것이다. 차이의 백분율치와 상대파고와의 상관관계는 Fig. 3에서 보인 상대수심과의 상관관계 보다는 약하나 대체적으로 상대파고의 증가에 따라 직선적인 증가를 보여주고 있다. 그림에서의 회귀선은  $H/L_0=0.028, 0.026$ 을 경계로 하여 그보다 상대파고가 작을수록 측정치가 이론치보다 작고 그보다 상대파고가 커질수록 측정치가 이론치보다 커진다. 실험에서의 상대파고의 범위  $0.008 < H/L_0 < 0.07$ 에서 회귀선에 따른 이론치와 실측치간의 차이의 범위는 (a) 2차파 이론에서 -13%~26%이고 (b) 5차파 이론에서 -15%~34%이다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 천해조건에 갈수록 측정치가 이론치보다 작고 심해조건으로 갈수록 측정치가 이론치보다 커지는 이유는 분명하지 않다. 이는 실험수조에서의 질량이동기구가 Stokes파 이론의 완전유체 가정에서 고려되지 않는 여러가지 요인에 의해 영향을 받는다는 것을 말해준다. 이러한 주요 요인들은 반사파의 영향과 조파판에 의한 2차파의 영향(김, 1992) 때문일 것으로 생각된다. 또한 상대파고의 값이 클수록 측정치가 이론치보다 커지는 것은 대체적으로 심해조건에 갈수록 상대파고의 값도 크기 때문이다. 조파수조에서 해안으로부터의 반사파

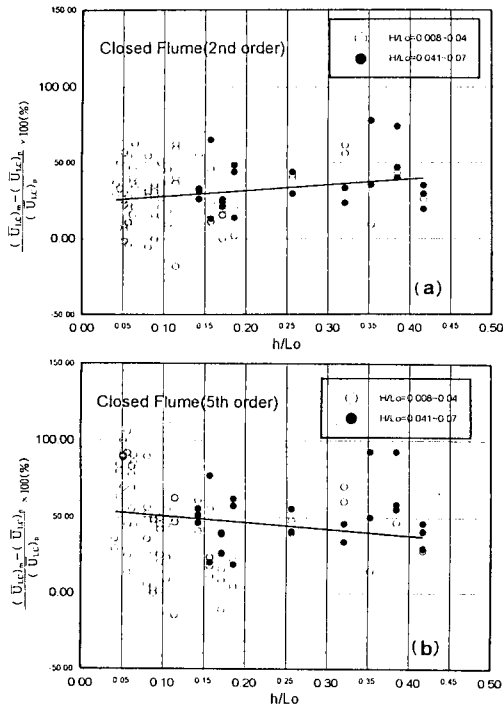


Fig. 5. Percent difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative water depth in closed flume condition (Stokes wave theory).

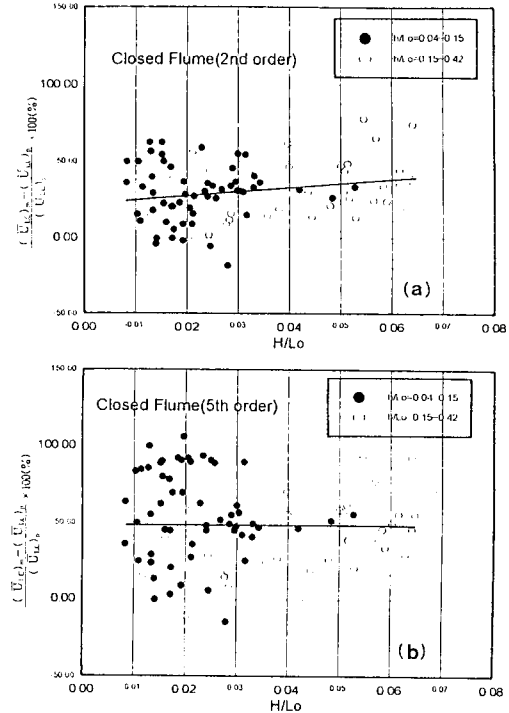


Fig. 6. Percentage difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative wave height in closed flume condition (Stokes wave theory).

는 파 운동에 의한 질량수송을 감소시키며, 2차파의 존재는 질량수송을 증가시킨다. Miche(1951)에 의하면 해안으로부터의 반사파는 상대파고(상대파고)가 작을수록 크다. 또한 김(1992)에 의하면 피스톤형 조파기를 장착한 조파수로에서 Stokes파와 다른 파속으로 진행하는 2차 자유진행파(secondary free wave)는 상대파고가 클수록 커지고 중간수심과 심해에서 크다 [김(1992)의 Fig. 6과 Fig. 7참조]. 이를 종합해 보면 천해역으로 갈수록 수표면 부유속도의 관측치가 이론치보다 작아지는 것은 증가하는 반사파의 영향으로 보이며, 심해역으로 갈수록 관측치가 이론치보다 커지는 것은 증가하는 2차파의 영향때문인 것으로 판단된다. 실험결과 Stokes 2차 파이론이 Stokes 5차 파이론 보다는 이론적으로는 더 열등하지만 조파수로에서의 수표면부유속도의 관측치에 더 근접하는 값을 보여주고 있다.

4.2 폐수로 조건에서의 수표면 부유속도( $\bar{U}_{LC}$ )

Fig. 5는 Stokes파 이론치 ( $\bar{U}_{LC}$ )<sub>p</sub>와 측정치( $\bar{U}_{LC}$ )<sub>m</sub>간

의 차이를 이론치를 기준으로 한 백분율(%)로서 상대수심(h/L<sub>0</sub>)의 함수로 나타낸 것이다. 무한수심의 경우에서와 같이 이론치와 관측치간의 차이는 상당한 편차를 보이며 대체적으로 상대수심의 증가에 따라 직선적으로 증가하나 그 크기는 무한수심의 경우[Fig. 3]보다 크다. 회귀선의 경사는 완만하나 5차 파이론의 경우는 상대수심의 증가에 따라 차이는 감소한다. 상대수심의 범위 0.04 < h/L<sub>0</sub> < 0.42에서 회귀선에 따른 이론치와 실측치의 차이의 범위는 (a) 2차 파이론에서 27%~36%이고 (b) 5차 파이론에서 45%~53%이다.

Fig. 6은 Fig. 5에 보인 수표면 부유속도의 이론치와 측정치간의 차이를 상대파고(H/L<sub>0</sub>)의 함수로 다시 나타낸 것이다. 무한수심의 경우에서도 나타난 바와 같이 Fig. 6에서 차이의 백분율치와 상대파고와의 상관관계는 Fig. 5에서 보인 상대수심과의 상관관계보다는 약하나 대체적으로 상대파고의 증가에 따라 완만한 증가를 보인다. 실험에서의 상대파고의 범위 0.008 < H/L<sub>0</sub> < 0.07에서 회귀선에 따른 이론치와 실측치간의 차이의 범위는 (a) 2차 파이론에서 26% 36



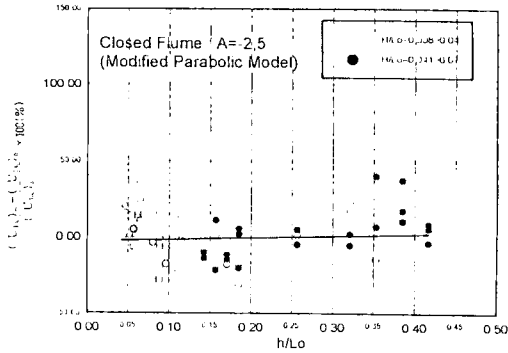


Fig. 7. Percent difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative water depth in closed flume condition (Modified parabolic model).

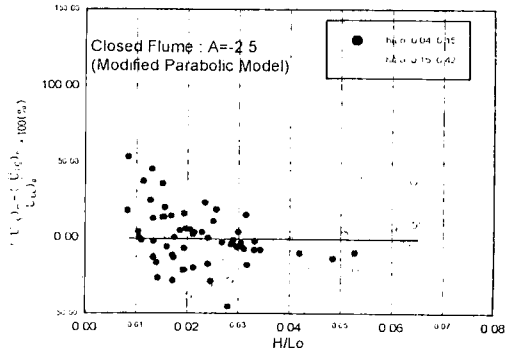


Fig. 8. Percent difference between theoretical and measured surface drift velocity vs. relative wave height in closed flume condition (Modified parabolic model).

%이고 (b) 5차 파이론에서 48%~52%이다. Fig. 6은 Fig. 5에 폐수로에 있어서도 무한수로의 경우와 같이 Stokes 2차 파이론이 Stokes 5차 파이론보다도 더 실측치에 근접하는 이론값을 제공해 준다는 것을 보여준다.

수정 Parabolic 모델[식 (20)]에서의 상수 A, B, C는 폐수로조건에서의 수표면 부유속도의 실측치와 이론치간의 RMS오차를 최소로 하는 조합으로 결정하였으며 그 값은 A=-2.5, B=10, C=4였다. 폐수로 조건에서의 수표면 부유속도의 실측치와 이론치간의 무차원 RMS오차는 Longuet-Higgins(1953)의 전도해(0.0105), Stokes 5차 파이론(0.0065), Stokes 2차 파이론(0.0052), 수정 Parabolic모델(0.0030)순으로 감소하였다.

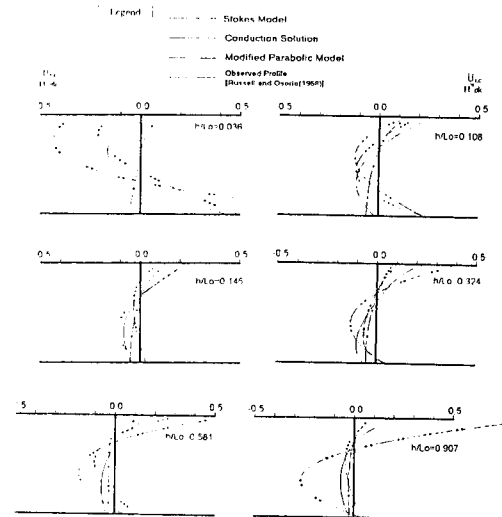


Fig. 9. Comparison of mass transport velocity profile between proposed models and observed data of Russell and Osorio(1958).

Fig. 7 및 Fig. 8은 수정 Parabolic 모델에서의 이론치와 실측치간의 차이를 각각 상대수심(h/L0), 그리고 상대파고(H/L0)의 함수로 나타낸 것이다. 실측치와 이론치와의 차이는 현저히 감소하여 회귀선은 상대수심과 상대파고의 크기에 관계없이 거의 0%에 근접하고 있다.

#### 4.4 폐수로 조건에서의 질량 이동속도 모델들과 기존관측치와의 비교

본 연구에서 제안된 반송류의 수정포물선 연직분포 모델의 적합성을 검토하기 위하여 수정포물선 연직분포모델을 포함하여 Longuet-Higgins(1953)의 전도해와 Stokes의 균일연직분포모델 등 세 모델들을 Russell과 Osorio(1958)가 전수심에 걸쳐 조파실험 수조에서 관측한 질량 이동속도 연직분포의 관측치와 비교하였다. Sussell과 Osorio(1958)는 기존의 실험관측 자료중 가장 광범위한 상대수심과 상대파고의 조건에서 전 수심에 걸친 질량 이동속도분포를 제시하고 있다.

Fig. 9는 천해로부터 심해조건에 이르는 여섯경우에 대하여 모델들과 관측에 의한 폐수로조건에서의 질량 이동속도 연직분포를 보여주고 있다. 예상대로 관측치는 천해조건에서 Longuet-Higgins(1953)의 전도해에 가깝고 심해조건에서 Stokes의 모델에 가까우나

일반적으로 전도해는  $h/L_0=0.107$ 의 경우를 제외하고는 관측치와 현저한 차이를 보이며, Stokes 모델은 중간수심에서 대체로 관측치에 근접하고 있다. 본 연구에서 제안된 수정 포물선 모델은  $0.10 \leq h/L_0 \leq 0.32$ 인 중간수심을 제외하고는 모든 수심에서 전도해나 Stokes 모델보다 관측치에 더 일치하고 있다. 특히, 수표면 부유속도에 있어서도 중간수심을 제외하고는 모든 수심에서 가장 관측치에 근접한 값을 제공하고 있다.

## 5. 결 론

파운동에 의한 수표면 부유속도를 규명하기 위하여 Stokes 2차 파이론, Stokes 5차 파이론 및 Longuet-Higgins(1953)의 전도해 등에 의한 이론치를 2차원 조파수로에서 실측한 실험치와 비교분석하였다. 실험 조건은 조파후 규칙파가 생성될 때의 무한수로(Open flume)조건과 10~20분이 경과한 후 충분히 반송류가 형성된 후의 폐수로(Closed flume)조건으로 구분하였으며 실험간 상대수심의 범위는  $0.04 < h/L_0 < 0.42$ , 상대파고의 범위는  $0.008 < H/L_0 < 0.065$ 였다.

연구결과, 수표면 부유속도에 있어서는 무한수로 조건과 폐수로 조건 모두에서 Stokes 2차 파이론이 Stokes 5차 파이론보다도 그 이론적 열등에도 불구하고 실측치에 더 잘 일치하며 Longuet-Higgins(1953)의 전도해는 실측치에 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 무한수로 조건의 경우, Stokes 2차 파이론에서  $h/L_0=0.13$ 을 경계로 천해역으로 갈수록 이론치가 실측치보다 크며 심해역으로 갈수록 이론치가 실측치보다 작아진다. 상대파고  $H/L_0=0.026$ 을 경계로 그 보다 작은 값에서는 이론치가 실측치보다 크고 그보다 큰 값에서는 이론치가 실측치보다 작아진다. 이론치와 측정치의 차이는 Stokes 2차파 이론에서  $-13\% \sim 35\%$ 이다. 폐수로의 경우, 이론치가 실측치보다 작으며 그 차이는 상대수심 및 상대파고가 커짐에 따라 대체로 증가한다. 그 차이는 Stokes 2차 파이론에서  $26\% \sim 36\%$ 이다. 조파수로에서 이론치와 실측치와의 이러한 차이의 주요 원인은 반사파와 평면조파판에 의해 생성되는 2차파의 영향때문으로 판단된다.

수표면 부유속도의 실측치를 근거로하여 반송류의 수정포물선 연직 분포식이 제안되었으며, 제안된 수정식에 의한 질량이동속도의 연직분포는 Longuet-Hi-

gins(1953)의 전도해나 Stokes 파이론보다도 폐수로 조건에서의 기존 실험결과에 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 1995년도 육군사관학교 부설 화랑대연 구소의 학술연구 지원으로 이루어졌으며 이에 대해 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김태인, 1992. 비선형 조파이론, 대한토목학회논문집, 12(4-1): 137-151.
- 김태인, 황임규, 1992. 스토우크스波에서 水粒子 運動, 한국해양·해양공학회지, 4(4): 187-200.
- Allen, J. and Gibson, D.H., 1959. Experiments on the displacement of water waves of various heights and frequencies. *Journal of Institution of Civil Engineers*, London, England, 13: 363-386.
- Bagnold, R.A., 1947. Sand movement by waves: Some small scale experiments with sand of very low density. *Journal of Institution of Civil Engineers*, London, England, 27(4): 447-469.
- Brebner, A., Askew, J.A. and Law, S.W., 1966. The effect of roughness on the mass-transport of progressive gravity waves. *Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Tokyo, Japan, September, 12: 175-184.
- Brebner, A. and Collins, J.I., 1961. The effect on mass transport of the onset of turbulence at the bed under periodic gravity waves, American Society of Mechanical Engineers-Engineering Institute of Canada Hydraulics Conference, Paper No. 61-EIC-8, Montreal, Canada.
- Bullock, G.N. and Short, I., 1982. Characteristics of laboratory generated regular waves, *Report No. 82/167*, Department of Civil Engineering, University of Salford, Salford, England, March.
- Bullock, G.N. and Short, I., 1985. Water particle velocities in regular waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 111(2): 189-200.
- Caligny, A.F.H. de C.R., 1878. Experiences sur les mouvements des molecules liquides des ondes courantes, considerees dans leur mode d'action sur la marche des navires. *C.R. Acad. de Sci.*, Paris, 87: 1019-1023.
- Carter, T.G., Liu, P.L-F. and Mei, C.C., 1973. Mass transport by wave and offshore sand bedforms. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, 99(WW2): 165-184.
- Chang, M.S., 1969. Mass transport in deep-water long-crested random gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(6): 1515-1536.
- Craik, A.D.D., 1982. The drift velocity of water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 116: 187-205.

- Dalrymple, R.A., 1976. Wave-induced mass transport in water waves, *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, **102**(WW2): 255-264.
- Dean, R.G., 1974. Evaluation and development of water wave theories for engineering application. Volume 1, *Special Report No. 1*, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A.
- Dore, B.D., 1978. Some effects of the air-water interface of gravity wave, *Geophysics, Astrophysics Fluid Dynamics*, **10**: 215-230.
- Iskandarani, M. and Liu, P.L-F., 1991. Mass transport in three-dimensional water waves, *Journal of Fluid Mechanics*, **231**: 417-437.
- Iskandarani, M. and Liu, P. L-F., 1993. Mass transport in wave tank, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, **119**(1): 88-104.
- Kim, T-I. and Hudspeth, R.T., 1988. Mass Transport in finite amplitude waves, *Proceeding of the 6th Congress Asian and Pacific Resional Division*, International Association for Hydraulic Research, Kyoto, Japan, July 20-22, 17-24.
- Liu, A-K. and Davis, S.H., 1977. Viscous attenuation of mean drift in water waves, *Journal of Fluid Mechanics*, **81**(1): 63-84.
- Longuet-Higgins, M.S., 1953. Mass transport in water waves, *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, A **245**(903): 535-581.
- Mei, C.C., Liu, P.L-F. and Carter, T.G., 1972. Mass transport in water waves, *Report 146*, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, U.S.A.
- Miche, M., 1951. The reflecting power of maritime works exposed to action of the waves, *Annales des Ponts et Chaussees*, June.
- Nath, J.H., 1978. Drift speed of buoys in waves, *Proceedings of the 16th Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, Germany, August 27-September 3, 859-873.
- Rayleigh, L., 1876. On waves, *Philosophical Magazine*, London, Dublin & Edinburgh, U.K., **5**(1): 257-279.
- Russell, R.C.H. and Osorio, J.D.C., 1958. An experimental investigation of drift profiles in a closed channel, *Proceedings of the 6th Conference on Coastal Engineering*, Council on Wave Research, ASCE, University of California, Berkeley, California, U.S.A., 171-193.
- Skjelbreia, L. and Hendrickson, J.H., 1960. Fifth-order gravity wave theory, *Proceedings of the 7th Conference on Coastal Engineering*, Hague, The Netherlands, 184-196.
- Skjelbreia, L., 1959. *Gravity Waves: Stokes' Third-order Approximation, Tables of Functions*, The Engineering Foundation Council on Wave Research, Berkeley, CA, U.S.A., 231-251.
- Stokes, G.G., 1847. On the theory of oscillatory waves, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, London, England, **8**: 441-455.
- Tsuchiya, Y., Yasuda, T. and Yamashida, T., 1980. Mass transport in progressive waves of permanent type, *Proceedings of the 17th Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Sidney, Australia, March, 70-81.
- U.S. Beach Erosion Board, 1941. A study of progressive oscillatory waves in water, *Technical Report No. 1*, Government Printing Office, Washington D.C., U.S.A.
- Ursell, F., 1953. Mass Transport in gravity waves, *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society*, London, England, October, **49**: 145-150.
- Wang, H., Sunamura, T. and Huang, P.A., 1982. Drift velocity of the wave breaking point, *Coastal Engineering*, The Netherlands, **6**: 121-150.