

重複波壓에 의한水路의透水性

Water Transmissibility of the Flow Conduit
Located Under Standing Waves

全仁權*

Chun, In Sik

Abstract

For a vertical wall with standing waves on its front face, the unsteady flow in a flow conduit installed through the wall is analyzed. A nonlinear standing wave theory making use of Fourier expansion is applied, and the results are verified by a hydraulic experiment. It is found that the nonlinear theory better predicts the behavior of the flow compared to its linear counterpart. The investigation of the water transmissibility through the conduit shows that the variation of the flow rate becomes larger as the standing wave height and period increase and as the length of conduit decreases. The relationship is presented by a nondimensional equation. The net flow gain per one wave period, which is directly related to water exchanging capability of the conduit, appears to be negative in both theory and experiment when the conduit is located near the bottom. The maximal flow gain occurs in the conduit whose mouth is located at the still water level. In addition, it is shown that the longer wave period and the shorter conduit length are more effective in the water exchanging performance.

要 旨

直立壁 前面에 重複波가 작용할 때 직립벽에 설치된水路에 발생하는 非定常流 흐름을 Fourier 전개법의 非線形 중복파 이론을 적용하여 해석하였으며 그 결과를 水理實驗을 통하여 검증하였다. 전반적으로 비선형이론은 線形理論과 비교하여 水路내의 유량변화를 더 잘 예측함을 확인하였다. 透水性의 분석결과 수로내 유량변화의 폭은 波高, 週期가 클수록, 水路延長이 짧을수록 커짐을 확인하였으며 이들간의 상관관계를 명확히 파악하기 위한 無次元 관계식을 제시하였다. 수로의 海水交換機能과 직접 관련이 있는 一週期當 平均水量은 수로가 水面下 바닥 근처에서는 陰方向의 값이 나타날 수 있음을 이론과 실험을 통하여 확인하였고, 最大水量은 入口가 靜水面에 위치하는 수로에서 발생함을 보였다. 아울러, 중복파의 주기가 길수록 그리고 수로의 연장이 짧을수록 해수교환 효과면에서 유리함을 확인하였다.

* 정회원 한국해양연구소 해양공학부, 책임연구원

1. 緒 論

港灣의 外廓施設의 하나인 방파제는 주로 外海波浪을 차단시키기 위한 역할을 담당한다. 그러나, 방파제중에서 일반적으로 많이 사용되는 着底 重力式 방파제는 外海와의 海水交換을 차단함으로써 港內 水의 停滯를 초래하여 결과적으로 水質을 악화시키는 문제점이 지적되고 있다. 즉, 해수의 정체로 인하여 水中 溶存酸素의 양이 枯竭되어 수중 오염물질의 代謝가 원만히 이루어지고 있지 못하고 있다.

항만의 海水交換은 항입구를 통한 潮汐流의 이동에 의해서도 어느 정도 가능하지만 동해안 같이 潮差가 비교적 적은 해역에서는 기대하기 힘들다. 따라서, 방파제에 外海와의 해수교환 기능을 가능케 하는 透水性을 부여하는 것이 港灣水質을 개선하기 위한 방편의 하나로 고려될 수 있다. 이미 방파제 兩面이 有孔으로 처리되어 있어 해수교환이 가능한 有孔式 방파제가 설치된 例⁽¹⁾가 있고, 또한 堤體下部로 해수이동이 가능한 浮消波堤가 漁場 등의 수질보존을 위한 유망한 방파제 형태로 거론되고 있다.⁽²⁾ 그러나, 한편으로 방파제의 透過性은 방파제 後面에서 다소의 水面攪亂을 초래할 가능성이 있다. 따라서, 투과성 방파제는 해수교환 기능을 가지면서도 本然의 방파기능을 수행해야 하는 특수성을 가지기 때문에 설계에 앞서 그 기본성능 및 水理特性이 충분히 파악되어야 한다.

透過性 방파제의 특수성을 잘 반영할 수 있는 가장 단순한 형태로서 방파제 堤體에 일정한 간격으로 水路를 설치할 수 있다. 방파제의 構造設計는 確率年度 개념에서의 最大波를 사용하지만 水路의 해수교환 기능은 주로 平常波 조건에서 이루어 지기 때문에 수로의 透水性도 평상파조건에서 파악하는 것이 바람직하다. 평상파에 相應하는 堤體 前面壁에서의 波는 거의가 단순 重複波 형태로 간주해도 무방하며 수로내의 흐름의 특성을 시간적으로 변화하는 중복파에 의해서 지배되는 흐름으로 규정할 수 있다.

無限領域에 설치된 직립판에서 板의 두께가 매우 작을 경우 有孔을 통한 接近波浪의 回折現象에 대해서는 Tuck⁽³⁾가 이론적으로 규명한 바가 있으며 이를 이용하여 有限水深에 설치된 有孔防波堤의 수리특성을 파악하려고 하는 시도가 있었다.⁽⁴⁾ 그러나,

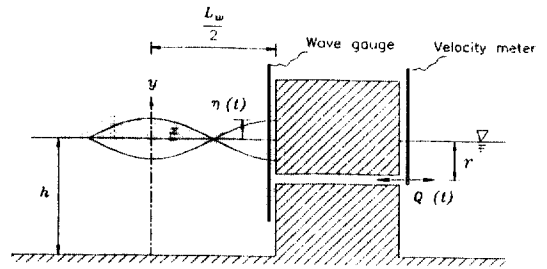


Fig. 1. Definition of coordinate system and experimental configuration

본 연구에서 고려되는 水路는 최소한 일반적으로 사용하는 방파제 堤體 幅에 해당하는 길이를 갖는 것을 전제로 하기 때문에 수로내 흐름의 특성을 상회 回折現象으로 파악하기는 매우 어렵다. 방파제 후면에서의 靜穩度를 고려하여 수로의 단면크기를 水深에 비해 매우 작게 취하게 되면 重複波의 형성과 수로내 흐름사이의 相互作用을 무시할 수 있다. 따라서, 수로내 흐름특성을 규명하기 위한 하나의 근사적인 방법으로서 수로내 흐름을 重複波에 의해 被動的으로 발생하는 非定常流 흐름으로 파악할 수 있다.

本 稿에서는 水路의 透水性을 파악하기 위하여 방파제 前面壁에 형성되는 重複波의 특성과 이에 따른 수로의 흐름특성을 數值解析을 통하여 분석하며 아울러 水理實驗을 수행하여 이들의 결과를 상호 비교한다. 透水性은 定性的인 분석에 국한하며 분석의 편이를 위해 방파제는 마운드가 없는 直立壁 형태로 가정하였다.

2. 非線形 重複波의 해석

Fig. 1은 본 연구에 이용된 座標系를 보여준다. 직립벽 前面에 波長 L_w 인 중복파가 형성되며 전면벽에 $\eta(t)$ 의 波形을 나타낸다. $\eta(t)$ 의 변화에 따라 수로 入口에서의 動壓力 $P(t)$ 가 변하며 수로에서의 非定常 흐름 $Q(t)$ 을 발생시킨다. 座標系의 原點은 직립벽에서 半 波長 떨어진 波의 腹(Antinode)에 설정한다.

重複波는 파고, 주기와 수심조건에 따라 非線形性이 달라지며 비선형성이 강한 경우에는 線形理論에 의해 계산된 $P(t)$ 가 상당한 정도의 誤差를 수반할 수가 있다. 따라서, $Q(t)$ 를 정확히 예측하기 위해서는

비선형이론에 근거한 $P(t)$ 를 이용해야 한다. 진행파와 마찬가지로 非線形 重複波의 해석에도 파형경사를 微小値로 한 攝動技法이 제시된 바 있으며,⁽⁶⁻⁷⁾ 이 중에서 Goda는 4차까지 전개하여 混成防波堤의 설계에 많이 사용되는 파압공식을 도출하기 위한 基本式으로 이용하였다. 그러나, 移動座標系를 설정하여 波形을 공간의 함수로만 고정시키는 進行波에서의 이론전개와는 달리 重複파에서는 파형이 공간과 시간의 함수로 나타나 攝動技法의 전개가 매우 복잡해지는 문제점이 있어 현재의 4차까지가 전부이다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 파형과 속도포텐셜을 임의의 級數로 전개하여 解를 구하는 Fourier 展開技法이 제시된 바 있다.^(8,9)

본 연구에서는 Fourier 展開技法을 이용하여 重複파압을 계산한다. Fig. 1의 座標系에서 파고 H , 주기 T 인 重複波의 속도 포텐셜 ϕ 과 波形 η 를 결정하기 위한 支配方程式 및 경계조건들은 다음과 같다.

$$\nabla^2\phi=0 \text{ in } 0\leq x\leq\frac{LW}{2}, -h\leq y\leq\eta(x,t) \quad (1)$$

$$g\eta+\phi_t+\frac{1}{2}(\phi_x^2+\phi_y^2)=0 \text{ on } y=\eta(x,t) \quad (2)$$

$$\phi_y-\eta_t-\phi_x\eta_x=0 \text{ on } y=\eta(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}=0 \text{ on } x=0, x=\frac{Lw}{2}, y=-h \quad (4)$$

$$\int_0^L\eta(x,t)dx=0 \quad (5)$$

$$\eta(0,0)-\eta\left(\frac{Lw}{2},0\right)=H=2a \quad (6)$$

여기에서, g , \hat{n} 그리고 a 는 각각 重力加速度, 바닥과 측면에서의 法線벡터 그리고 重複파의 振幅을 의미한다. 式 (1)은 지배방정식인 Laplace 방정식이며, 式 (2)와 (3)은 水面境界條件, 式 (4)는 바닥과 側面경계조건이며 式 (5)와 (6)은 靜水面과 파고조건을 나타낸다.

波數 k 를 $2\pi/L_w$ 로, 周波數 σ 를 $2\pi/T$ 로 정의하고 Fig. 1의 좌표계를 $x^*=kx$, $y^*=ky$, $t^*=\sigma t$, 그리고 法線벡터 \hat{n} 를 $\hat{n}^*=\hat{n}/a$ 와 같이 無次元化한다. 波形 傾斜와 相對水深을 각각 $\varepsilon=ka$, $h^*=kh$ 로 정의하면 무차원 파형 $\eta^*=\eta/a$ 과 무차원 속도포텐셜 $\phi^*=$

$\sigma\phi/(ag)$ 은 다음의 無次元 지배방정식과 경계조건들을 풀어 결정할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\nabla^2\phi^*=0 \text{ in } 0\leq x^*\leq\pi, -h^*\leq y^*\leq\varepsilon\eta^*(x^*,t^*) \quad (7)$$

$$\eta^*+\omega^*\phi^*_t+\frac{1}{2}\varepsilon[(\phi^*_{x^*})^2+(\phi^*_{y^*})^2]-0$$

$$\text{on } y^*=\varepsilon\eta^*(x^*,t^*) \quad (8)$$

$$\phi^*_{y^*}-\omega^*\eta^*_t-\varepsilon\phi^*_{x^*}\eta^*_{x^*}=0$$

$$\text{on } y^*=\varepsilon\eta^*(x^*,t^*) \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi^*}{\partial\hat{n}^*}=0 \text{ on } x^*=0, x^*=\pi, y^*=-h^* \quad (10)$$

$$\int_0^\pi\eta^*(x^*,t^*)dx^*=0 \quad (11)$$

$$\eta^*(0,0)-\eta^*(\pi,0)=2 \quad (12)$$

여기서, ω^* 는 무차원 角周波數 $\omega^*=\sigma/\sqrt{gk}$ 이다. 式 (8)와 (9)에서 $\varepsilon=0$ 이면 단순히 線形 重複波를 나타내며 그 解는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\eta^*=\cos(t^*)\cos(x^*) \quad (13)$$

$$\phi^*=-\frac{\omega^*}{\sinh h^*}\sin(t^*)\cos(x^*)\cosh(y^*+h^*) \quad (14)$$

$$(\omega^*)^2=\tanh h^* \quad (15)$$

비선형 重複파의 解를 구하기 위한 Fourier 전개 기법은 미지수인 波形과 속도포텐셜을 다음과 같이 Fourier 급수형태로 나타낸다.

$$\eta^*(x^*,t^*)=\sum_{n=1}^{N-1}\sum_{m=1}^N b_{n,m}\cos nx^*\cos(m-1)t^* \quad (16)$$

$$\phi^*(x^*,y^*,t^*)=a_0t^*+\sum_{n=1}^N\sum_{m=1}^{N-1}[a_{n,m}\sin mt^*\cos(n-1)x^* \cdot \frac{\cosh\{(n-1)(y^*+h^*)\}}{\cosh\{(n-1)h^*\}}] \quad (17)$$

식 (16)과 (17)은 式 (7), (10)과 (11)을 이미 만족 시킴을 알 수 있다. 미지수는 식 (16)과 (17)의 계수 a_0 , $a_{n,m}$, $b_{n,m}$ 과 무차원 角周波數 ω^* 이며 이들은 (x^*, t^*) 평면상에 格子點을 설정하고 각 격자점마다 式 (8), (9)와 (12)를 적용하여 얻어지는 비선형 연립방정식을 풀어 결정할 수 있다. 이 식의 해법과 결과의 분석은 이미 全仁植 등⁽⁸⁾에 소개되어 있으므로 여

기에서 자세한 설명은 생략하기로 한다.

非線形 중폭파의 動壓力 水頭는 이미 결정된 무차원 속도포텐셜과 角周波數를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$P(t) = \frac{1}{k} \left[\varepsilon \omega^* \phi^*_{x^*} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \{ (\phi^*_{x^*})^2 + (\phi^*_{y^*})^2 \} \right] \quad (18)$$

線形 중폭파에서는 식 (18)의 괄호안의 ε 의 2次項이 무시된다. 중폭파의 非線形性은 波形傾斜 ε 과 相對水深 h^* 에 따라 달라지며 진행파의 경우와 마찬가지로 ε 이 클수록, h^* 가 작을수록 非線形性이 강하게 나타난다. 비선형성이 강한 중폭파의 특징은 동압력의 시간변화곡선의 波峯部에서 雙峰形의 돌출부가 나타나는 점이며 이의 존재는 이미 실험적으로 입증한 바 있다.^(5,8)

3. 水路의 非定常流 해석

수로를 직경 D 인 圓形管으로 할 때 (x, t) 평면의 임의점에서 수로의 非定常流에 대한 연속방정식과 운동방정식은 각각 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$v_x = 0 \quad (19)$$

$$\bar{g} \bar{p}_x + v_t + vv_x + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (20)$$

여기서, v , \bar{P} 그리고 f 는 각각 水路內에서의 流速, 動壓力水頭와 Darcy-Weisbach 공식에서의 마찰손실계수를 나타낸다. 수심에 비해 D 가 매우 작다고 가정하고 수로 流出에 의한 後面에서의 波浪攪亂을 무시하면 경계조건은

$$\bar{P}(x = \frac{L_w}{2}, t) = P(t) \quad (21)$$

$$\bar{P}(x = L + \frac{L_w}{2}, t) = 0 \quad (22)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, L 은 수로의 延長을 의미한다.

식 (19)를 (20)에 대입하여 x 에 대해 적분한 다음 경계조건 (21), (22)를 적용하고 수로의 입·출구에서의 水頭損失係數 K_m 을 반영하면 다음과 같은 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{D} + \frac{K_m}{L} \right) v|v| = \frac{g}{L} P(t) \quad (23)$$

水路內 유속 $v(t)$ 는 식 (18)에 의하여 주어지는 重復波壓 $P(t)$ 에 대하여 식 (23)을 풀어 결정한다. 여기에서는 時間增分 Δt 에 대해 Runge-Kutta 방법을 적용하였다. 초기치는 $v(t=0)=0$ 이며 식 (23)의 粘性減衰項으로 인하여 $v(t)$ 는 平衡상태에 도달하게 되며 충분한 平衡상태를 확인한 후 解를 취하는 방식으로 하였다. 마찰손실계수 f 는 사실상 水路內 유속의 함수이므로 每 時間增分마다 프로그램에 既 입력된 Moody-diagram의 해당곡선을 讀取하여 사용하였다.

4. 水理實驗

수치해석에 의하여 계산된 水路內 流速의 유효성을 확인하기 위하여 水理實驗을 실시하였다. 실험 장치로서는 규모가 53 mL×1.25 mH×1.0 mW인 韓國海洋研究所의 波浪-흐름 複合水槽⁽¹¹⁾를 이용하였으며 모형구조물은 造波機에서 36 m의 거리에 설치하였다. 水深은 50 cm로 유지하였으며 水路는 靜水面下 20 cm에 수평으로 위치시켰다. 수로는 육안 관측의 편이를 위하여 직경 $D=3$ cm의 투명한 폴리에틸렌 튜브를 이용하였다. 수로길이의 영향을 파악하기 위하여 수로의 길이 L 은 0.3 m, 0.7 m와 1.0 m의 세가지로 변화시켰다.

計測은 Fig. 1에 보인 바와 같이 중폭파형을 측정하기 위해서 前面壁에 抵抗式 波高計를, 수로유속을 측정하기 위하여 後面壁 수로출구에 兩方向 유속을 측정할 수 있는 직경 1.5 cm의 프로펠러 流速計를 거치하였다. 실험자료 讀取는 컴퓨터 독취 방식으로 데이터 독취간격은 波形, 流速 공히 20 Hz로 하였다. 實驗波는 주기가 1.0~2.0초이고 진행파 파고가 10 cm인 規則波를 6개, 주기가 1.77초이고 進行波 파고가 5~18 cm인 規則波를 6개를 각각 만들어 사용하였다. 前者는 세개의 수로길이에 각각 적용하였으며 後者는 길이 0.7 m에만 적용하였다. Table 1은 實驗波로 형성된 重復波의 제원과 이들의 波形傾斜와 相對水深을 보여준다.

5. 結果分析 및 檢討

Table 1. Input parameters of standing waves used in the hydraulic experiment

T (sec)	H (com)	h* (m/m)	ϵ (m/m)
1.00	17.0	2.08	0.35
1.20	18.6	1.53	0.28
1.40	18.0	1.22	0.22
1.60	18.0	1.02	0.18
1.80	19.0	0.88	0.16
2.00	20.0	0.77	0.14
1.77	9.2	0.90	0.08
1.77	19.6	0.90	0.18
1.77	24.6	0.90	0.22
1.77	30.0	0.90	0.27
1.77	37.0	0.90	0.33

Table 1에 열거한 실험파와 동일한 波形傾斜와 相對水深을 이용하여 수치해석을 하여 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 수치해석에서 時間增分 Δt 를 실험데이터 독취간격인 0.05초로 하여 중복파형과 수로위치에서의 動壓力 水頭를 계산하여 수로 유속의 계산에 이용하였다. 이론적 중복파형은 線形重複波와 式 (16)과 (17)에서의 調和級數의 갯수를 $N=6$ 으로 한 비선형 중복파를 각각 계산하여 실험치와 비교하였다.

Fig. 2는 波 週期가 1.0초, 1.4초, 2.0초인 波를 既設된 三가지 水路 길이의 각각에 대하여 적용했을 때의 결과이다. 비교목적상 각 경우에 대해서 同一 時間帶의 波形, 파압, 유량변화를 제시하였다. 流量은 이론과 실험에서 구한 流速을 환산하여 구하였다. 線形波 파형이 시간축을 중심으로 대칭성을 보이는 반면 비선형파 파형은 波峯이 波谷에 비해 더 뾰족함을 보여주고 있다. 실험에 의해서 計測된 중복파형은 波形傾斜가 커질수록 ($T=1.0$ 초) 전반적으로 非線形波에 잘 일치하며 本 重複波 수치해석의 타당성을 입증해주고 있다.

波壓의 변화에 대해서는 직접 파압계측을 하지 않았기 때문에 이론적 파형만을 비교하였는데 전반적으로 선형파에 의한 파압이 비선형파의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 비선형파에 의한 波壓 曲線을 보면 $T=1.0$ 초의 파봉에서 雙峰形의 돌출부가 잘 형성되어 있는데 이로 인하여 壓力低下가 초래되어 오히려 波谷部에서의 압력 절대치보다도

작게 나타난다. 그러나 주기가 증가하며 波形傾斜가 작아질 수록 쌍봉형의 파압형태는 점차 鈍化되어 $T=2.0$ 초에서는 파봉부분이 파곡보다 더 큰 압력을 보여주고 있다. 파압의 位相은 波形의 位相과 동일하게 나타나 있다.

流量曲線을 보면 선형과 이론치는 시간축에 대하여 대칭이며, 전반적으로 실험치가 非線形波 이론치에 잘 일치함을 알 수 있다. 특이한 점은 $T=1.0$ 초에서 $L=0.7$ m, 1.0 m의 두 유량곡선에서 실험치와 비선형 이론치 공히 陰方向의 유량을 보인다. 이는 前面壁 압력변화에서 陰方向의 압력이 탁월한데 기인하며 물을 계속 吸引하는 작용을 한다. 波形 $\eta(t)$ 와 비교할 때 상당한 정도의 位相差를 발견할 수 있으며 이것은 이론적으로 당연히 기대되는 결과이다. 즉, 式 (23)에서 粘性減衰項을 무시하면 $P(t)$ 와 $v(t)$ 는 90° 의 위상차를 보이게 되며 점성감쇠항에 의해서 경우에 따라 다소 수정된다. Table 2는 각 경우별로 이론과 실험에 의해서 결정한 $\eta(t)$ 와 $Q(t)$ 의 位相差를 보여주고 있다. 전반적으로 실험치가 선형파보다 비선형파의 값에 잘 일치하나 상당한 차이를 보이는 경우도 있다. Table 2에서의 위상차는 波峯部에서의 값만을 비교하여 프로그램상에서 기계적으로 결정한 것으로 波形이 파봉부에서 다소나마 歪曲되어 있을 때에는 位相差의 계산에 상당한 誤差를 주게 된다. 그러나, Fig. 2의 유량곡선을 보면 파봉부를 제외하곤 실험치의 전반적인 형태가 理論值, 특히 非線形波에 의한 값에 잘 일치함을 알 수 있으며, 따라서 이론치에 의한 위상차 계산이 정확한 것으로 판단된다.

유량곡선에서의 유량변화의 幅은 중복파의 파고, 주기와 수로길이등에 의해서 달라지며 이와 같은 경향은 Fig. 3에서 확연히 알 수 있다. 즉, 주기 T , 파고 H 가 클수록, 그리고 수로길이 L 이 작아질수록 유량의 變化幅 Q_c 는 증가한다. 파고가 클수록 Q_c 가 커지는 현상은 중복파의 압력변화의 폭이 커지면서 생기는 당연한 현상이다. 주기와 수로길이에 의한 영향은 非定常流 흐름에서 管内水塊의 慣性에 관련된 현상으로 설명될 수 있다. 즉, 水塊의 이동량은 힘의 작용시간에 비례하며 水塊의 重量에 반비례한다. 水塊의 중량 또는 수로길이의 이동량에 대한 효과는 式 (23)의 우측 項에 이미 반영되어 있다. 각 실험 케이스별로 Q_c 의 이론치와 실험치를 구하여 圖示하면 Fig. 4와 같다. T 와 H 의 증가에 따른 Q_c 의

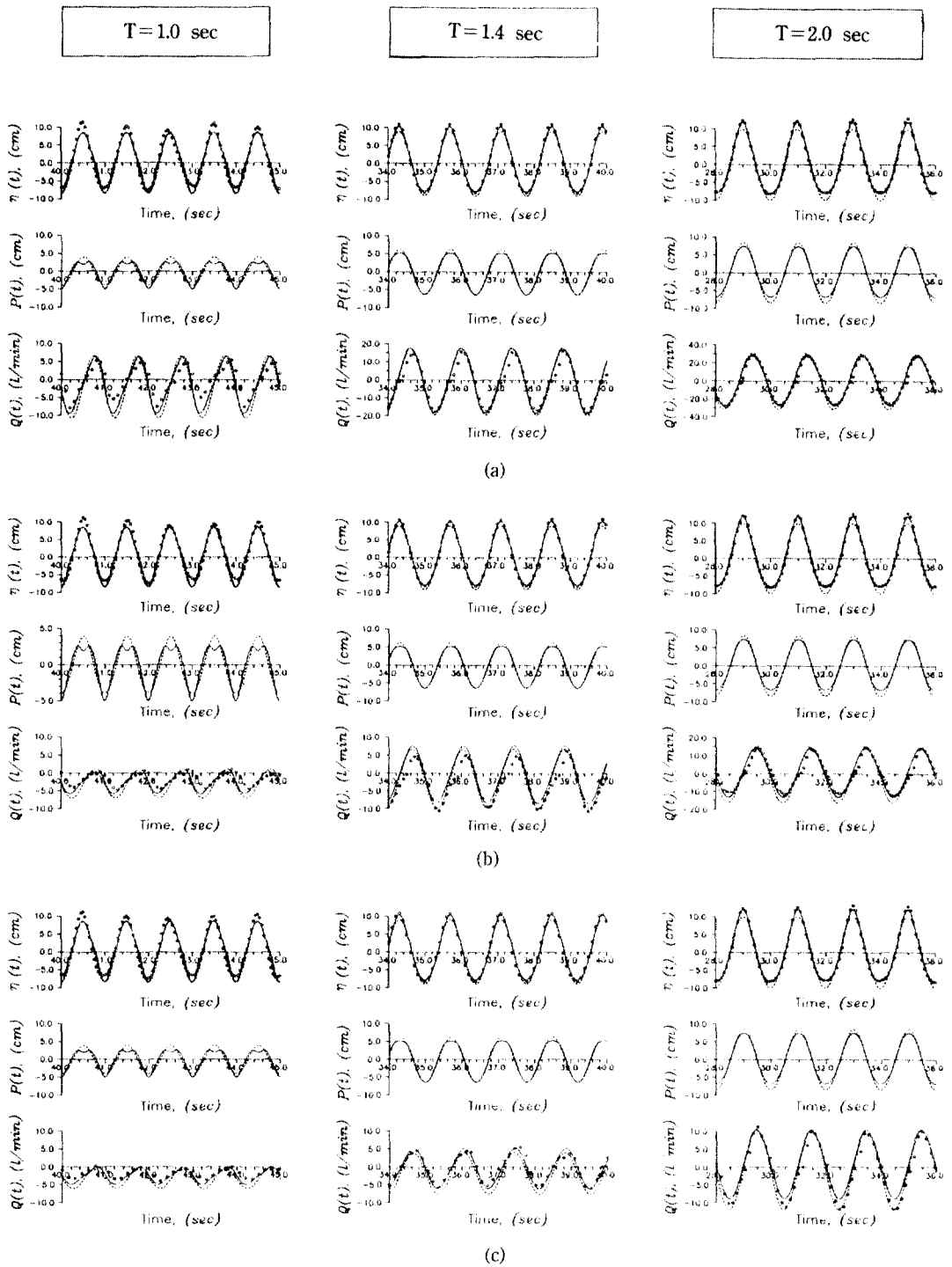


Fig. 2. Comparison of the profiles of wave $\eta(t)$, pressure $P(t)$ and flow rate $Q(t)$ (—: Nonlinear theory, ---: linear theory, ···: experimental data): (a) $L=0.3$ m, (b) $L=0.7$ m, (c) $L=1.0$ m

Table 2. Phase difference (radian) between wave and flow rate profiles (NON: nonlinear theory, LIN: linear theory, EXP: experiment)

H (cm)	T (sec)	區分	L(m)		
			0.3	0.7	1.0
17.0	1.0	NON	1.76	1.82	1.82
		LIN	1.45	1.51	1.51
		EXP	2.20	2.95	2.45
18.6	1.2	NON	1.57	1.68	1.68
		LIN	1.36	1.52	1.52
		EXP	1.83	2.36	2.09
18.0	1.4	NON	1.39	1.57	1.62
		LIN	1.26	1.48	1.53
		EXP	1.35	1.79	2.24
18.0	1.6	NON	1.26	1.49	1.53
		LIN	1.18	1.45	1.49
		EXP	1.18	1.57	1.73
19.0	1.8	NON	1.12	1.43	1.50
		LIN	1.05	1.43	1.47
		EXP	1.22	1.92	1.71
20.0	2.0	NON	1.01	1.38	1.45
		LIN	0.94	1.38	1.45
		EXP	1.10	1.41	1.88
9.2	1.77	NON		1.52	
		LIN		1.51	
		EXP		2.13	
13.6	1.77	NON		1.49	
		LIN		1.48	
		EXP		1.95	
19.6	1.77	NON		1.44	
		LIN		1.45	
		EXP		1.77	
24.6	1.77	NON		1.41	
		LIN		1.39	
		EXP		1.77	
30.0	1.77	NON		1.41	
		LIN		1.36	
		EXP		1.42	
37.0	1.77	NON		1.40	
		LIN		1.34	
		EXP		1.60	

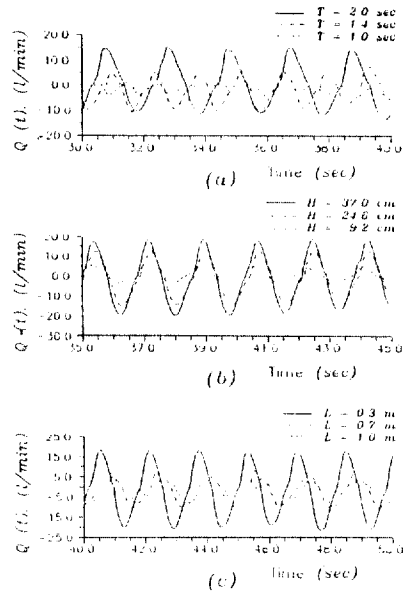


Fig. 3. Comparison of the flow rates for different experimental conditions: (a) $L=0.7$ m, $H=10$ cm, (b) $T=1.77$ sec, $L=0.7$ m, (c) $T=1.6$ sec, $H=10$ cm

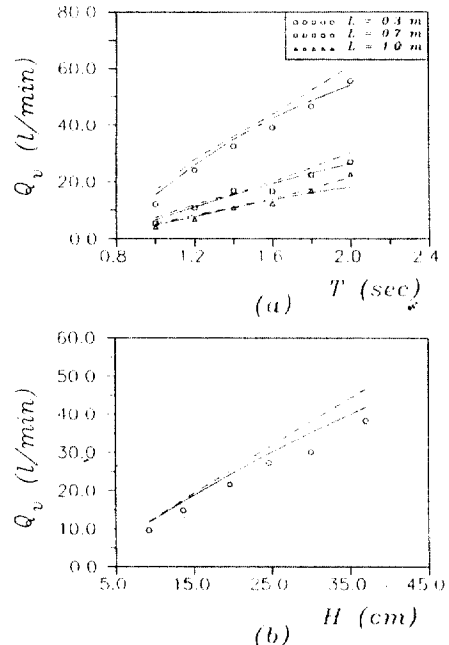


Fig. 4. Magnitudes of the flow variation for different experimental conditions (—: Nonlinear theory, ---: linear theory, symbols: experimental data): (a) H fixed at about 20 cm, T varied, (b) T fixed at 1.77 sec, H varied ($L=0.7$ m)

증가는 거의 線形으로 변화하나 L의 영향은 길이가 길어질수록 감소한다. 이는 상기한 대로 Q_v 가 L에 반비례하며 따라서 $\partial Q_v / \partial L$ 이 L^2 에 반비례하게 되는 현상에 기인한다. 한편, 실험치는 전반적으로 선형 이론치보다 비선형 이론치에 좀더 근사함을 알 수 있다.

Q_v 와 T, H, L의 상관관계는 식 (23)을 無次元化하여 설명할 수 있다. 고정된 水路徑 D 및 수로단면적 A에 대해서 식 (23)의 변수 $v(t)$ 또는 $Q(t)$, t , $P(t)$, $P(t)$ 를 각각 $Q^* = Q(t)/(A\sqrt{gH})$, $t^* = t/T$, $P^* = P(t)/H$ 로 無次元化하여 式을 다시 쓰면,

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \frac{1}{2} \left(-\frac{K_m}{L} + \frac{f}{D} \right) T\sqrt{gH} Q^* |Q^*| = \frac{T}{L} \sqrt{gH} P^* \quad (24)$$

와 같다. 式 (24)에서 Q^* 는

$$Q^* = \psi \left\{ \alpha, \left(\frac{K_m}{L} + \frac{f}{D} \right) \alpha L, P^* \right\} \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{T\sqrt{gH}}{L} \quad (26)$$

의 함수형태로 나타낼 수 있다. 이론적으로 $Q(t)$ 를 결정하는데 있어서 점성감쇠력항은 주로 初期値의 임의 선택에 따른 解의 發散을 방지하는 역할을 하며 Q_v 에 미치는 영향은 P^* 에 비해 相對的으로 미미하다. 全 실험케이스별로 P^* 는 거의 同等하므로 식 (25)에서 점성감쇠력을 무시하면 거의 일정한 P^* 에 대해서 무차원 유량변화의 幅 Q_v^* 은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$Q_v^* = \frac{Q_v}{A\sqrt{gH}} = \Phi(\alpha) \quad (27)$$

각 실험케이스 별로 식 (27)을 圖示하면 Fig. 5와 같다. 대체로 일관성 있는 성향을 보이며 다소의 分散은 식 (25)의 괄호안의 두번째, 세번째항의 영향에 기인한다. 특히, 약간의 離脫이 발견되는 그림의 우측부분은 T를 고정시킨채 단지 H만 변화시키는 실험케이스에 해당하며, 따라서 식 (25)에서 粘性減衰項의 영향이 직접적으로 반영된 것에 기인하는 것으로 판단된다.

上記 Q_v 는 수로유량의 陽方向과 陰方向의 최대 유량의 차이이다. 그러나, 실제 수로에 海水交換 기능

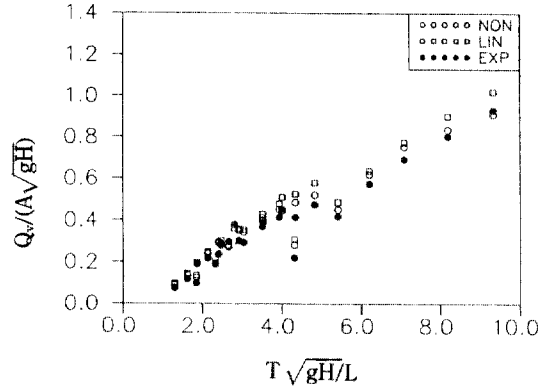


Fig. 5. Nondimensional relationship among the magnitude of flow variation and the input variables in experimental conditions

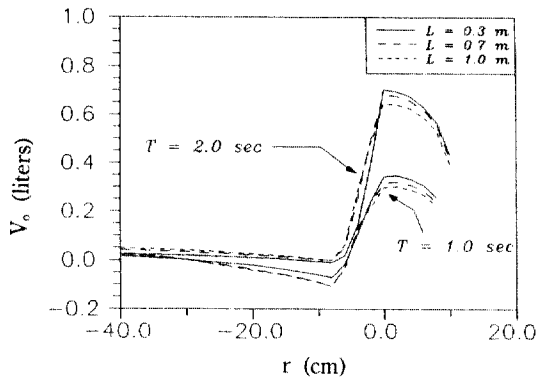


Fig. 6. Vertical distribution of the net flow gain per a wave period for different input conditions ($H=20$ cm)

를 부여하는 것은 일정시간동안 한 방향으로 流入 또는 流出된 平均水量이다. 水路의 入 出口가 항상 水中에 있을 경우에는 선형과 이론에 의하면 波壓의 대칭성으로 말미암아 平均수량이 항상 零으로 나타나지만 비선형과 이론에 의하면 陽 또는 陰方向의 平均수량이 존재한다. 이미 Fig. 1의 $T=1.0$ 초에서 陰方向의 유량이 탁월함을 관찰한 바 있다. Fig. 6은 靜水面으로부터 水路入口의 연직위치 r 을 변화시키고 중복과를 $H=10$ cm, $T=1.0$ 초 또는 2.0 초로 할 때 非線形波 이론을 적용하여 一週期當 平均수량 V_v 의 鉛直分布를 계산한 결과이다. 단, 수로 出口의 위치는 靜水面下에 있는 것으로 하였다. 여기서 두 주기 공히 靜水面 8 cm 이하에서는 陰方向의 平均水量이 존재하며 이 현상은 $T=1.0$ 초에서 더 탁월하게 나타나며 延長間 차이는 크게 두드러지지 않

는다. 靜水面 근처에서 수로의 입구가 중복과의 波谷에서 간헐적으로 露出되는 경우는 당연히 陽方向의 평균수량이 발생하게 되며 주기가 길수록, 수로의 延長이 짧을수록 평균수량이 크게 나타난다. 靜水面 위에서 평균수량이 감소하는 것은 靜水面 위로 갈수록 중복과의 波峯이 수로의 입구에 작용하는 시간이 짧아지는데 기인한다. 따라서, 최대 海水交換 효과를 달성하기 위해서는 수로의 입구를 靜水面에 위치시키고 수로의 길이를 가급적이면 짧게 유지하는 것이 요구된다. 출구의 위치는 靜水面 아래에 위치시키되 後面에서의 水面攪亂을 방지하기 위해 가급적이면 깊은 위치에 놓는 것이 바람직하다.

6. 結 論

本 研究의 主目的은 非線形 중복과에서 水路 흐름을 豫測하기 위한 技法의 개발에 있으며 수리특성의 파악은 定性的인 것에 치중하였다. 直立壁 前面에 중복과가 작용할 때 직립벽에 설치된 水路에 발생하는 非定常流 흐름을 Fourier 展開技法의 非線形 중복과 이론을 적용하여 해석하였으며 그 결과를 수리실험을 통하여 검증하였다. 전반적으로 비선형이론은 선형이론과 비교하여 水路内の 流量變化를 더 잘 예측함을 확인하였다. 透水性의 분석 결과 수로내 유량변화의 幅은 波高, 週期가 클수록, 水路延長이 짧을수록 커짐을 확인하였으며 이들간의 상관관계를 명확히 파악하기 위한 無次元 관계식을 제시하였다. 수로의 海水交換 기능과 직접 관련이 있는 一週期當 平均水量은 수로가 靜水面 아래에 위치할 경우에는 陰方向의 값이 나타날 수 있음을 이론과 실험을 통하여 확인하였고, 最大 水量은 入口가 靜水面에 위치하는 수로에서 발생함을 보였다. 아울러, 긴 주기의 중복과와 수로의 짧은 延長이 海水交換 효과면에서 유리함을 확인하였다. 수로내 流量變化와 平均水量의 定量的인 평가를 위해서는 本 研究에서 제시한 수치해석 기법을 이용함과 동시에 보다 多樣한 波 조건을 사용하는 水理實驗을 수행하여야 될 것으로 사료된다.

感謝의 말

本 論文은 韓國海洋研究所에서 수행한 특정연구

사업인 “港灣水質 改善을 위한 防波施設의 開發研究 (III)”의 결과중 일부를 정리한 것이며 實驗에 협조 해준 張世喆 君에게 謝意를 表합니다.

記 號

D	= 圓形 水路의 직경(m)
f	= 수로의 마찰손실계수
H	= 重複波高(m)
h*	= 無次元 水深
K _m	= 附隨損失係數
k	= 波數(rad/m)
L	= 水路의 延長(m)
L _w	= 重複波의 波長(m)
N	= Fourier 級數의 갯수
\hat{n}	= 單位 法線벡터
P(t)	= 水路 入口에서의 重複波壓 水頭(m)
\bar{P}	= 수로내의 動壓力 水頭(m)
Q(t)	= 수로내의 流量(l/min)
Q _v	= 流量變化的 幅(l/min)
r	= 靜水面으로부터 水路入口의 연직 위치
T	= 重複과 週期(sec)
V _w	= 重複과의 一週期當 水路流出水量(l)
v	= 수로내의 流速(m/sec)
Δt	= 時間増分(sec)
ϵ	= 波形傾斜
σ	= 重複과 角周波數(rad/sec)
ω^*	= 重複과의 무차원 角周波數

參考文獻

1. 港灣技術研究所, 防波堤構造集覽, 日本 運輸省, 1986.
2. 韓國海洋研究所, 海岸構造물의 波力吸收를 위한 新素材 開發 研究(I), BSPG 00077-224-2, 1989.
3. Tuck, E.O., "Transmission of Water Waves Through Small Apertures", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 49, Part 1, 1971, pp. 65-74.
4. 角野昇八 等, 縦スリット直立消波工の水理機能の境界値問題解析, 第31回 海岸工學 講演會 論文集, 1984, pp. 507-511.
5. Goda, Y., "The Fourth Order Approximation to the Pressure of Standing Waves", *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 10, 1967, pp. 1-11.

6. Tadjbakhsh, I. and Keller, J.B., "Standing Surface Waves of Finite Amplitude", *J. of Fluid Mech.*, Vol. 8, 1960, pp. 442-451.
7. Penny, W.G. and Fenton, J.D., "Finite Periodic Stationary Gravity Waves in a Perfect Fluid", *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A.*, Vol. 244, 1952, pp. 254-284.
8. 全仁植, 安熙道, 非線形 定常波의 Fourier級數 解析, *韓國海岸·海洋工學會誌*, 第4卷, 第4號, 1992, pp. 219-224.
9. Vanden-Broeck, J. and Schwartz, L.W., "Numerical Calculation of Standing Waves in Water of Arbitrary Uniform Depth", *Phys. Fluids*, Vol. 24, No. 5, 1981, pp. 812-815.
10. Wylie, E.B. and Streeter, V.L., *FLUID TRANSPORT*, FEB Press, Ann Arbor, Michigan, 1983, pp. 17-21.
11. 韓國海洋研究所, 波浪-호수 複合水槽 및 計測器機의 性能試驗, BSPE 00199-376-2, 1991.
(接受: 1994. 7. 26)