

## 시간의존 환경사방정식을 이용한 월파량 산정 방법 Computational Method for Rate of Overtopping Using Time Dependent Mild-Slope Equation

곽문수\* · 이홍규\*\* · 박성윤\*\*\* · 편종근\*\*\*\*

Moonsu Kwak\*, Honggyu Lee\*\*, Sungyoon Park\*\*\* and Chongkun Pyun\*\*\*\*

**요 지 :** 기존 방파제의 대부분은 항내의 흐름을 차단시키는 불투과성 방파제로서 항내의 수질오염을 심화시키고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에 여러 형식의 해수교환방파제가 제안되고 있다. 해수 교환 방파제의 형식에는 흐름을 이용한 조류제, 파랑을 이용한 월류제 등이 있다. 이 중에서 파랑에너지에 의한 해수 교환 형식은 항내로 월파되는 월파량의 계산시 적절한 유량계수의 산정을 필요로 한다. 본 연구는 적절한 유량계수의 도입을 통해서 정량적인 월파량을 계산하고, 월류식 해수교환방파제의 해수교환 효과를 검토한 것이다. 월파량의 계산은 정상상태의 하천에서 월류제를 넘어가는 월류량을 산정하는데 사용되고 있는 Forchheimer의 식을 시간의존 환경사방정식에 적용하여 가능하도록 하였다. 이 때 가장 중요한 매개변수인 유량계수는 수리모형 실험으로 추정하였다. 이와 같은 방법을 제주외항 서방파제의 해수교환 구간에 적용하고 해수교환 성능을 검토해 보았다. 평상 파랑 조건이 파고 3.7 m, 주기 8.5 s, NNW방향일 때, 항내로 공급되는 월파량은 27.5 m<sup>3</sup>/s로 산정되었다.

**핵심용어 :** 해수교환방파제, 월파량, Forchheimer의 식, 유량계수

**Abstract :** Most of the conventional breakwaters impermeable breakwaters which block seawater exchange between the outside and inside of the harbors. The blocking of seawater exchange may cause pollution of water in harbors. To solve the water pollution problem, various kinds of seawater exchange breakwaters have been proposed. Their types can be classified into the current type which uses tidal current, and the overtopping type which uses the wave energy. The overtopping type breakwaters require a discharge coefficient to calculate the rate of overtopping into the harbor. The present study is to compute the rate of overtopping with introduction of a correct discharge coefficient and to evaluate the effect of the overtopping type breakwater on the water quality inside a harbor. The rate of overtopping was computed by using Forchheimer formula with time dependent mild-slope equation for various wave conditions. The formula has been generally used to calculate the overflow discharge in steady state river flows. The discharge coefficient, which is the key parameter of the calculation, was determined by a series of hydraulic model tests. The present scheme was applied to the seawater exchange section of the western breakwater of Jeju New Harbor's and the efficiency of that section was examined. The calculated results showed that the rate of overtopping into the harbor reached about 27.5 m<sup>3</sup>/s in the wave condition (wave height 3.7 m, wave period 8.5s, and wave direction NNW).

**Keywords :** seawater exchange breakwater, rate of overtopping, Forchheimer formula, discharge coefficient

\*명지전문대학 토목과(Dept. of Civil Engineering, Myongji College, Seoul 120-776, Korea, moonsu@mjc.ac.kr)

\*\*한아엔지니어링 항만부 (Division of Harbor Engineering, Hanah Engineering Co.)

\*\*\*대림산업(주) (Daelim Industrial Co., Ltd., Seoul 110-732, Korea, sypark@dic.co.kr)

\*\*\*\*명지대학교 토목환경공학과(Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Kyunggi 449-728, Korea, ckpyun@mju.ac.kr)

### 1. 서 론

기존의 방파제는 선박의 안전한 출입 및 원활한 하역작업을 위하여 항내에 정온수역이 확보되도록 불투과제로 건설되었다. 불투과성 방파제는 항외의 해수공급을 차단하여 항내에 정체 수역을 형성시켰고, 항내 수질이 점점 악화되는 부작용을 초래하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최근에는 항외수를 항내로 공급시켜주는 해수교환방파제가 건설되고 있다. 해수교환방파제는 흐름을 이용한 조류제 형식과 파랑을 이용한 월류제 형식으로 나눌 수 있으며, 항외측으로부터의 흐름의 영향이 거의 없는 경우에는 파랑에 의한 해수교환 효과를 고려할 수 있다. 파랑에너지를 이용하는 월류제 형식은 월류제에서 월파된 유량이 순간적으로 수위상승을 유발하고 이에 따른 항내·외의 수위차를 이용하여 유수실을 통해서 항내로 흐름을 발생시키는 구조이다. 이와 같은 구조형식은 유수지 내장형 월류식 해수교환방파제라 불리고 있으며, 구조형식이 복잡해서 해수교환의 기능검토는 주로 수리모형실험에 의존하고 있다. 만일 월류식 해수교환방파제의 전면에서 월파되는 유량을 수치계산을 이용하여 간편하게 산정할 수만 있다면 설계단계에서 해수교환 기능 검토에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

한편, 해수교환방파제의 월파에 대한 연구로는 이달수 등(2001, 2002, 2003)은 월류제 부설 경사식 해수교환방파제를 제안하여 수리실험으로 해수유입, 반사, 월파 등을 평가하고, 유입유량을 추정하기 위한 경험식을 제시하였다. 오병철 등(2003)은 항만의 개구부에 월류제를 설치하고 수리실험을 실시하여 조위와 파랑조건에 따른 월류량을 검토하였다. 그리고 유대성 등(2002)은 월류제 전후에서의 입사파고, 전달파고, 월파량, 월파 전후의 유속 등을 측정하여 월류제 설치에 따른 해수교환정도를 수리실험으로 검토하였다. 또한 塩崎 등(1996)은 직립 소파케이스 내에 연직 월파판을 설치하고 수리실험을 통해 해수가 항내로의 유입하는 양상을 검토하였다.

본 연구에서는 해수교환방파제의 해수교환 성능평가에 필요한 항내 유입유량을 결정하는데 중요한 요소인 체제전면의 월파량을 산정하기 위하여 하천에서 월류량 산정에 쓰이는 Forchheimer의 식을 시간의존환경사 방정식에 적용하고 파동장에서 월파량을 산정할 수 있는 수치계산법을 제시하였다. 특히 기존의 월파량 산정에 사용된 경험식이나 수치계산방법은 단면 2차원에 대한 월파량을 평가하는 반면에 본 방법은 평면 2차원 파랑 해석에 기초한 방법이므로 방파제 설계시에 체제 길이 방향의 격자점에 대한 평

면적인 월파량 산정이 가능하다는 장점이 있다. 여기서는 직접제로 이루어진 반투한 방파제의 모델을 상정하여 월파와 비월파 조건에 대하여 항내측의 파랑장을 비교하여 보았고, 미공병단의 ACES 프로그램을 이용하여 수치계산에서 구한 월파량과 비교 검증하였다. 그리고 실제해역인 제주외항의 해수교환방파제에 본 방법을 적용하여 유수실 전면의 월파량을 산정해 보았다. 본 월파량 산정방법은 방파제 형식과 파랑조건에 따른 유량계수의 추정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 직립제 형식과 체제 전면에 마운드를 갖는 경사식방파제에 대하여 단면수리모형 실험을 실시하여 다양한 파랑조건에 대한 유량계수를 추정하고 수치계산에 적용하였다.

### 2. 월파량 산정 방법

#### 2.1 월파량 계산

본 월파량 산정방법은 하천에서 정류흐름시의 체제 월류량을 산정하는데 사용되고 있는 Forchheimer의 식 (1)을 파랑에 의한 월파량 산정에 적용한 것이다(森田 등, 2002; 尹晟鎭, 2004).

$$Q_w = C_w L_w \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right)^{3/2} \tag{1}$$

여기서,  $Q_w$ 는 월류량( $m^3/s$ ),  $C_w$ 는 유량계수,  $L_w$ 는 월류장,  $h_1, h_2$ 는 체제의 상하류에 있어서의 월류수심이다. 이 식은 정상상태를 가정한 것이므로 파랑에 의한 월파에는 그대로 적용할 수 없다. 따라서 파랑에 의한 월파량 산정에서는 파랑의 수면변위와 구조물의 천단고에 따른 한 주기 동안의 월파량을 Fig. 1과 같이 정의 한다.

Fig. 1과 같은 시간파형을 생각할 경우 한 주기 동안의 월파량  $Q'_w$ 은 그림의 빗금친 부분의 면적이 되고, 이것을

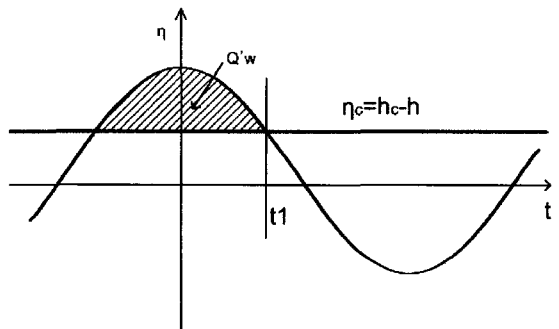


Fig. 1. Sketch of the wave overtopping in a wave period.

식으로 표시하면 식 (2)와 같이 된다.

$$Q'_w = \frac{1}{2\omega} \{H\sin\omega t_1 - 2(h_c - h)\omega t_1\} \quad (2)$$

여기서,  $h_c$ 는 해저면에서 방파제 천단까지의 높이,  $h$ 는 수심,  $\omega$ 는 각진동수,  $t_1$ 은 월파되는 시간의 반,  $H$ 는 파고이다. Forchheimer의 식 (1)의 오른쪽 월류수심의 항은 평균수심  $h_w$ 로 나타내고, 이  $h_w$ 을 한 주기동안의 월파량  $Q'_w$ 와 월파되는 시간  $2t_1$ 의 관계로부터 다음식과 같이 정의된다.

$$h_w = \frac{Q'_w}{2t_1} \quad (3)$$

그리고 방파제 연장 길이  $L_w$ 에 대한 월파량은 식 (1)과 (3)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$Q_w = C_w L_w \left( \frac{Q'_w}{2t_1} \right)^{3/2} \quad (4)$$

여기서 유량계수  $C_w$ 는 수리모형실험으로 결정한다.

## 2.2 파랑장 해석 모형

본 월파량 산정방법에서는 방파제 전면의 파랑장을 해석하기 위하여 2차원 평면 파랑장 해석모형인 시간의존 완경사방정식 모형을 사용하였다. 사용모형은 西村 등(1983)의 시간의존완경사방정식에 쇄파 감쇠항을 추가하여 천수, 굴절, 회절, 반사, 쇄파를 동시에 고려할 수 있는 모형이다. 다음의 식 (5)와 (6)은 연속방정식과 운동방정식에 해당하는 모형의 기본방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \eta + F_D \vec{Q} = 0 \quad (6)$$

여기서,

$\vec{Q}$  = 선유량 벡터

$C$  = 파속

$\eta$  = 수면변위

$F_D$  = 쇄파감쇠계수

$$n = \frac{C_g}{C}$$

이 모형은 공간상의 계산점에 대해서는 엇물림격자(staggered grid system), 시간에 대해서는 Leap-Frog방법을 이용한 양

해적 유한차분법(explicit finite difference method)을 써서 수치모형화 하였다. 식 (5), (6)은  $\vec{Q}$ 에 대해서 비선형인 방정식이지만  $\vec{Q}$ 의 값을 일주기전의 값을 사용함으로써 선형화한 차분기법을 이용하였다. 계산영역내의 경계조건은 각각 외해측 입사경계조건, 측방 입사경계조건, 투과경계조건, 장애물에 대해서는 임의반사율 경계조건을 설정하였으며, 임의 반사율 경계에 필요한 구조물에 대한 입사각은 선유량 타원과 수면변위의 관계로부터 결정하였다.

월파 발생시 방파제 전면의 투과경계조건은 Forchheimer의 식을 이용하여 계산된 월파량을 선유량으로 표시하여 투과경계의 선유량으로 바꾸어 준다. 이때, 투과경계의 선유량은 월파 할 때만 한정하여 투과경계 조건으로 부여하고, 정상상태가 될 때까지 계산을 반복한다. 시간의존 완경사방정식에서 투과경계조건의 선유량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_i = C_w (\eta - \eta_c) \Delta s dt \quad (7)$$

여기서,  $Q_i$ 는  $i$ 방향 성분의 선유량,  $\eta$ 는 수면변위,  $\eta_c$ 는 방파제 천단에서 수면까지의 높이,  $\Delta s$ 는 공간 차분간격,  $dt$ 는 시간 차분간격이다.

## 3. 모형의 검증

### 3.1 계산조건

본 연구에서는 월파량 산정 모형의 검증을 위하여 Fig. 2와 같이 계산에제를 설정하고 본 방법과 미공병단의 ACES프로그램에 의한 월파량을 비교해 보았다. 검증 예제는 해안선 방향으로 500 m, 외해방향으로 700 m의 계산영역을 설정하고, 해안선에서 300 m떨어진 지점에 길이 250 m, 폭 10 m의 반무한 방파제를 배치하였다. 방파제는 높이 10.5 m의 직립제이고, 수심은 9.7 m의 일정수심이며, 정수면에서 방파제 천단까지의 높이는 0.8 m로 하였다. 파랑조건은 규칙파로서 파고 2.0 m, 주기 5.0s의 Case1파, 파고 2.0 m, 주기 8.0s의 Case 2로 설정하였다. 그리고 계산시간간격은 0.1s, 계산격자간격은 10 m로 하였고, 반사율은 방파제 전면면 모두 0.9를 적용하였다. 수치계산에서 사용한 유량계수는 尹晟鎭(2004)의 실험에서 얻어진 0.4를 사용하였다.

### 3.2 계산결과

계산 결과는 월파량 산정 결과의 비교에 앞서 투과경계조건을 적용시킨 월파시의 파랑장 계산 결과와 비월파시의 파랑장 계산 결과를 비교하였다. Fig. 3과 4는 입사파고

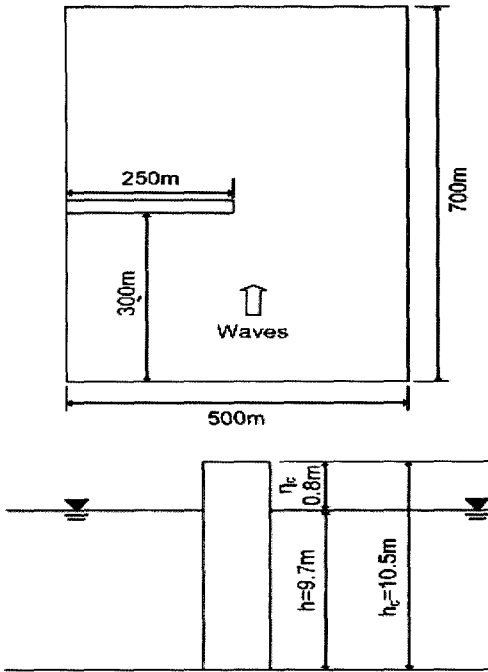


Fig. 2. Sketch of plane view and section view in the test case.

2 m, 주기 5s 일 때(Case 1)의 비월파와 월파 조건에 대한 파랑장 계산 결과를 등파고비선도로 나타낸 것이다. 두 그림의 비교에서 알 수 있듯이 방파제 전면에서는 두 경우 모두 파고분포가 동일하게 나타나지만 방파제 후면에서는 월파시의 파고가 약간 크게 나타나고 있다. Fig. 5와 6은 입사파고 2 m, 주기 8s 일 때(Case 2)의 파랑장 계산 결과이다. Case 1의 결과와 마찬가지로 월파시의 파고분포는 방파제 후면에서 비월파시의 파고보다 약간 증가함을 알 수 있다.

월파량 산정 결과는 본 방법과 ACES의 방법을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 두 결과는 Case 1의 조건에서는 매우 비슷한 결과를 보여주고 있지만, Case 2에서는 본 방법이 다소 작게 산출 되었다. 이것은 동일 파고 조건에서 파의 주기가 길어짐에 따라 월파 시간도 길어져 평균월류 수심  $h_w$ 가 작게 산출되기 때문으로 생각된다.

#### 4. 유량계수 추정을 위한 월파량 산정 실험

본 방법을 이용하여 정확한 월파량을 산정하기 위해서는 유량계수  $C_w$ 의 추정이 매우 중요하다. 여기서는 수리모

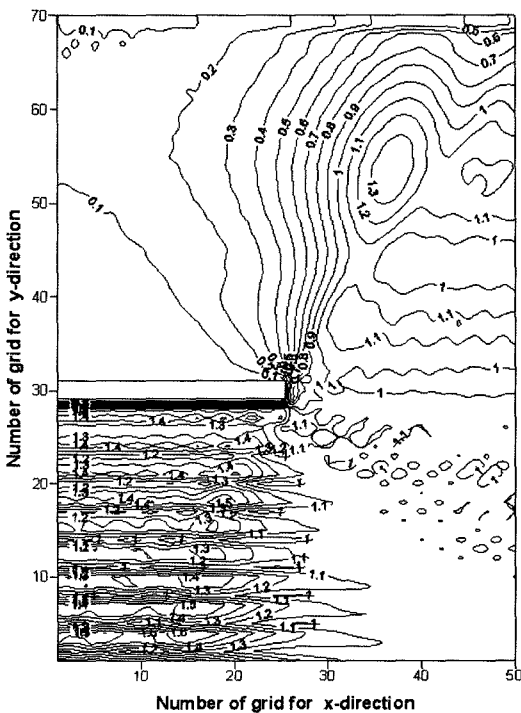


Fig. 3. Distribution of relative wave height (Case 1, non-overtopping).

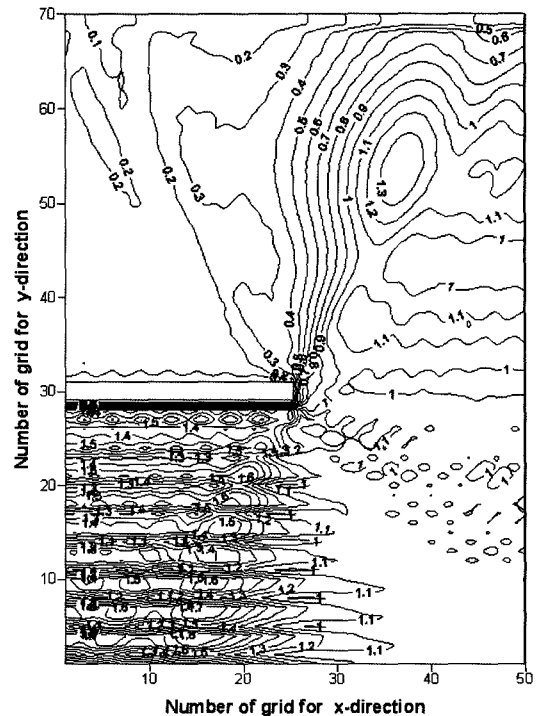


Fig. 4. Distribution of relative wave height (Case 1, overtopping).

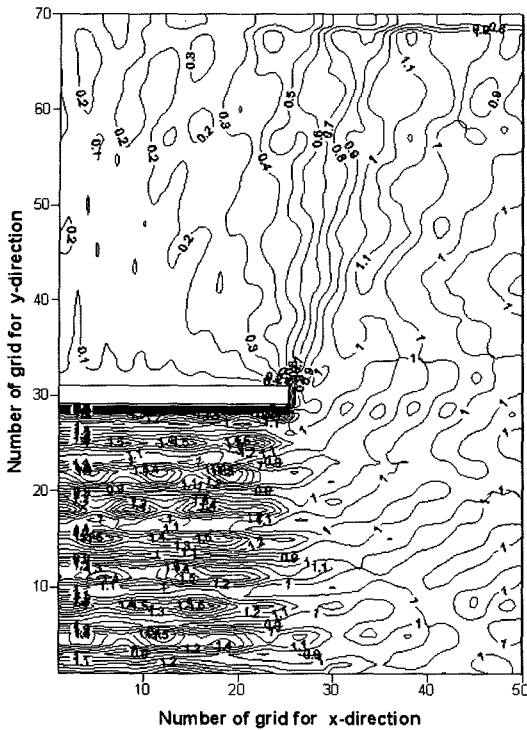


Fig. 5. Distribution of relative wave height (Case 2, non-overlapping).

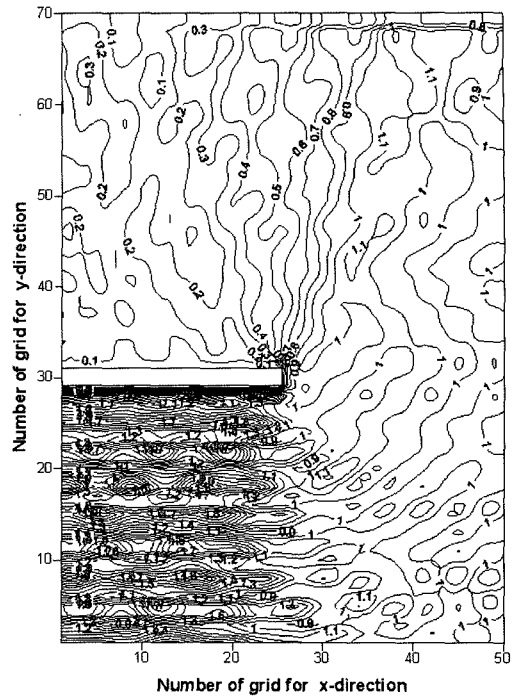


Fig. 6. Distribution of relative wave height (Case 2, overtopping).

형실험으로 유량계수를 추정하였다.

유량계수의 추정 방법은 월파랑 산정 대상 방파제의 전면 해역에서 관측된 기존의 파랑자료를 이용하여 몇 가지의 평상파 조건을 산정하고 수리모형실험으로 월파랑을 측정한다. 그리고 본 수치모형에서 유량계수를 1.0으로 가정하여 월파랑을 계산한 후, 실험과 계산결과를 주기별로 파고와 월파랑의 관계로 나타낸다. 유량계수는 주기별로 파고에 따른 측정값과 계산값의 월파랑 비율을 산정하고, 주기별로 파고와 유량계수의 관계 또는 파형경사와 유량계수의 관계 그래프를 그려서 대상 방파제의 유량계수를 주기와 파고별로 구한다. 이러한 유량계수 추정 절차를 순서대로 나타내면 Fig. 7과 같다.

유량계수 추정 실험에 사용된 단면수조는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 폭 0.7 m, 높이 1.4 m, 길이 30 m의 피스톤 타입의 조파수조이다. 모형은 Fig. 9와 같은 직립제와 Fig. 10과 같은 제주의향 서방파제의 해수교환방파제인 경사제를 제작하였다. 모형설치는 Fig. 8과 같이 직립제의 경우 외해 수심은 67 cm, 방파제 전면의 수심은 27 cm, 정수면에서 방파제 천단까지의 높이는 2 cm로 하였다. 그

Table 1. Comparison this method with ACES

	this method		ACES	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
입사파제원	H=2.0 m T=5.0s	H=2.0m T=8.0s	H=2.0 m T=5.0s	H=2.0 m T=8.0s
월파랑 $Q_w(m^3/s)$	103.85	89.8	107.5	107.1

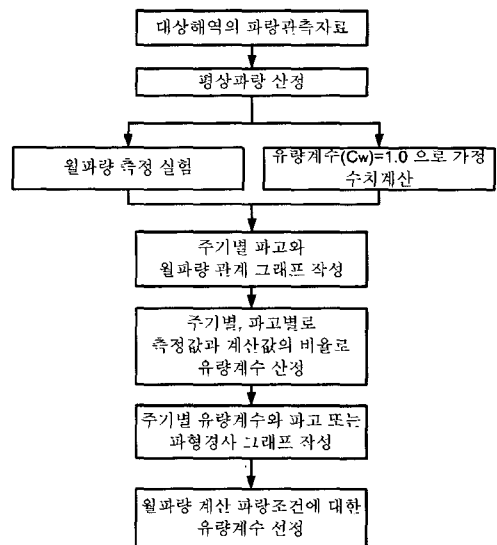


Fig. 7. Flow chart for estimation of discharge coefficient.

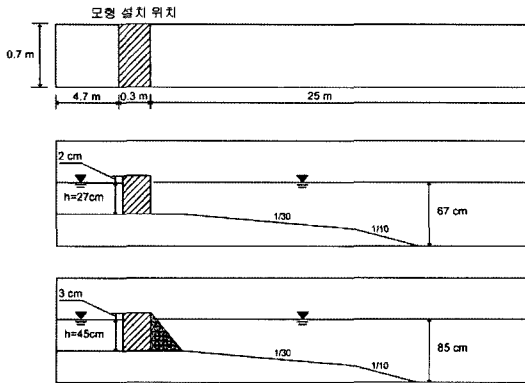


Fig. 8. Sketch of the wave flume size and experimental section.

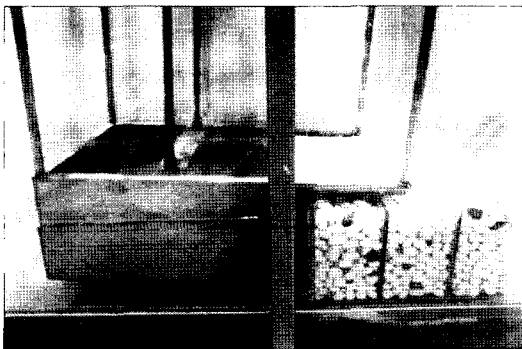


Fig. 9. Equipment for measurement of wave overtopping.



Fig. 10. Experimental section of the Jeju harbor.

리고 경사제의 경우는 외해의 수심은 85 cm, 방파제 전면의 수심은 45 cm, 정수면에서 방파제 천단까지의 높이는 3 cm로 하였다.

월파랑 측정장치는 방파제를 넘어 월파된 유량을 담을 수 있게 제작이 되었으며(Fig. 9), 월파랑 측정은 조파를 개시하여 월파되는 시각부터 25.6s 동안 조파를 하고, 측정

Table 2. Experimental wave condition of a wall type breakwater

수 심	원형		모형		축척
	주기(s)	파고(m)	주기(s)	파고(cm)	
6.0		2.0		5.6	1/36
		3.0		8.3	
		4.0	1.0	11.1	
		5.0		13.9	
		6.0		16.5	
7.0		2.0		5.6	1/36
		3.0		8.3	
		4.0	1.17	11.1	
		5.0		13.9	
		6.0		16.5	
8.0		2.0		5.6	1/36
		3.0		8.3	
		4.0	1.33	11.1	
		5.0		13.9	
		6.0		16.5	

Table 3. Experimental wave condition of the Jeju harbor

수 심 (cm)	원형		모형		축척
	주기(s)	파고(m)	주기(s)	파고(cm)	
7.5		2.0		4.1	1/49
		3.0	1.1	6.1	
		4.0		8.2	
		5.0		10.2	
8.5		2.0		4.1	1/49
		3.0	1.2	6.1	
		4.0		8.2	
		5.0		10.2	
9.5		2.0		4.1	1/49
		3.0	1.4	6.1	
		4.0		8.2	
		5.0		10.2	

장치에 담긴 유량을 가로 50 cm×세로 50 cm의 직사각형 용기에 옮겨 담아 부피를 측정한 후, 측정시간으로 나누어 단위시간당 유량으로 환산하였다.

실험파의 조건은 Table 2과 3에 정리하였다. Table 2는 축척 1/36의 직립제에 대한 실험파 조건으로서 주기는 6.0s, 7.0s, 8.0s의 3종류이고 파고는 각 주기별로 2.0~6.0 m까지 1 m씩 증가시켜 5종류로 구성하였다. 그리고 Table 3은 축척 1/49의 경사제에 대한 실험파로서 제주외항의 평상시 파랑조건과 동일하게 선정하였다. 주기는 7.5s, 8.5s, 9.5s의 3종류이고 파고는 각 2 m, 3 m, 4 m, 5 m로 하였다.

### 5. 월파량 산정 결과

#### 5.1 직립제

직립제 방파제에 대한 월파량 산정 결과는 본 방법에 의한 수치계산과 ACES에 의한 계산, 그리고 수리모형실험 결과를 각 주기에 대해서 입사파고와 월파량의 관계로 표시하여 Fig. 11~Fig. 13에 정리하였다. 그림에서 가로축은 입사파고이고 세로축은 단위폭당 월파량을 나타낸다. 그리고 사각형은 실험결과, 원형은 본 방법의 결과, 삼각형은

ACES의 결과를 나타낸다. 본 방법에 의한 수치계산 결과는 유량계수  $C_w$ 를 1.0으로 놓고 계산한 것으로서 수리모형실험의 결과를 이용하여 유량계수를 주기별로 산정하였다.

먼저 동일 주기에서 각 방법에 의한 월파량 산정 결과를 보면, 파고가 작을 때는 각 방법이 비슷한 월파량을 나타내지만 파고가 커질수록 수치계산과 ACES 결과는 수리모형실험 결과와 차이가 벌어짐을 알 수 있다. 이것은 수치계산이나 ACES의 경우는 월파량이 월파고에 의존하기 때문에 생각된다. 그리고 동일 파고에서는 주기가 변하

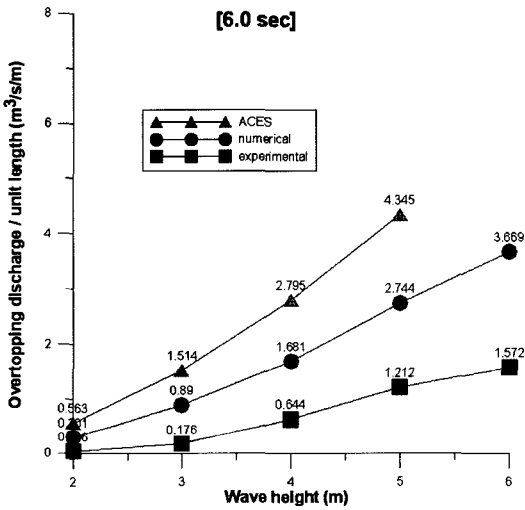


Fig. 11. Relation between wave height and wave overtopping rate (Wall,  $T = 6.0s$ ).

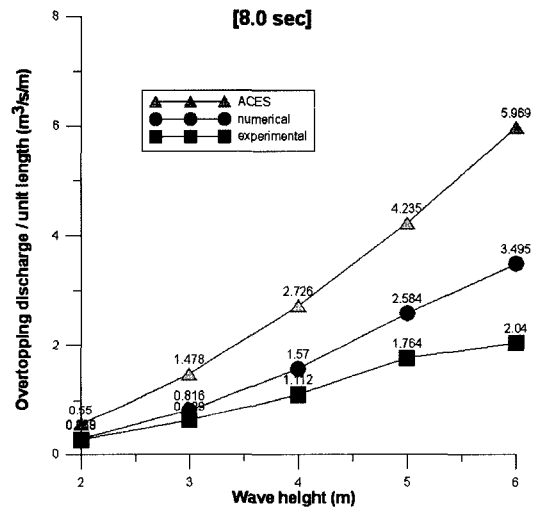


Fig. 13. Relation between wave height and wave overtopping rate (Wall,  $T = 8.0s$ ).

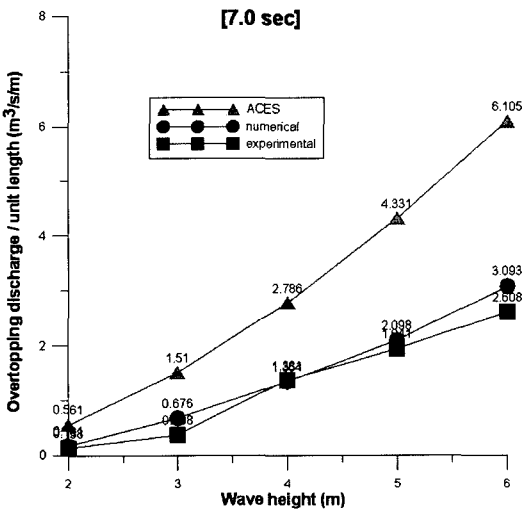


Fig. 12. Relation between wave height and wave overtopping rate (Wall,  $T = 7.0s$ ).

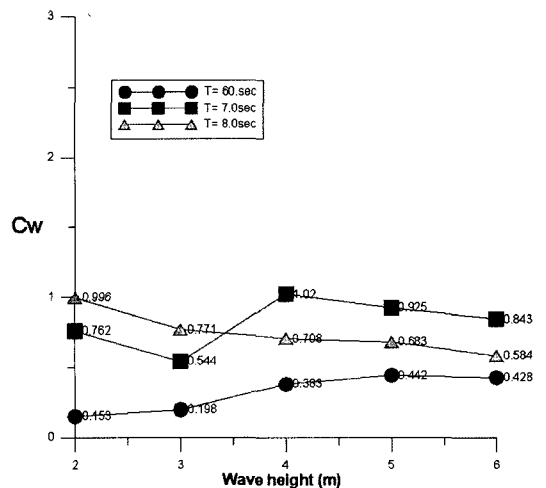


Fig. 14. Relation between wave height and discharge coefficient (Wall).

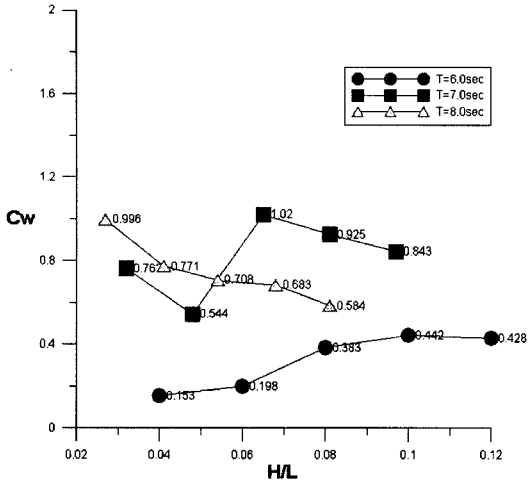


Fig. 15. Relation between wave steepness and discharge coefficient (Wall).

여도 월파랑은 각 방법 모두 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

직립제에 대한 파고와 유량계수의 관계를 정리하면 Fig. 14와 같이 된다. 유량계수는 대체적으로 동일 주기에서는 파고에 따른 변화가 작지만, 동일파고에서는 주기에 따라 증가하는 경향을 알 수 있다. 특히, 주기 7s의 경우는 파고 4m이후에서는 주기 8s의 유량계수보다 큰 값을 나타내는데 이것은 수리모형실험의 측정 오차 때문으로 생각되어진다. 한편, 유량계수를 무차원인 파형경사로 표시하여 나타내면 Fig. 15와 같다. 직립제의 유량계수는 파형경사 0.05 이하에서는 주기에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 파형경사가 0.05이상에서는 주기 7s의 측정오차 관계로 경향을 파악하기가 곤란하다.

### 5.2 경사제

경사제에 대한 월파랑 산정 계산은 실제 항만인 제주외항 서방파제의 해수교환 구간에 대하여 적용하였고 수리모형실험과 비교하여 보았다.

월파랑 산정을 위한 파랑장 해석은 시간의존 환경사방정식에 월파 경계조건을 적용한 모형을 사용하였고, 파랑 조건은 NNW방향의 평상파 조건으로서 파고는 2 m, 3 m, 4 m, 5 m이고, 주기는 7.5s, 8.5s, 9.5s로 설정하였다. 그리고 계산시간간격  $\Delta t$ 는 C.F.L 안정조건을 만족하도록 0.1s로 하였고, 계산격자 간격은  $\Delta x = \Delta y = 10.0$  m로 하였다. 또한 구조물의 반사율은 소파블록 0.3, 직립벽 0.9로 적용하였다. Fig. 16은 계산영역의 수심도를 나타낸 것으로서

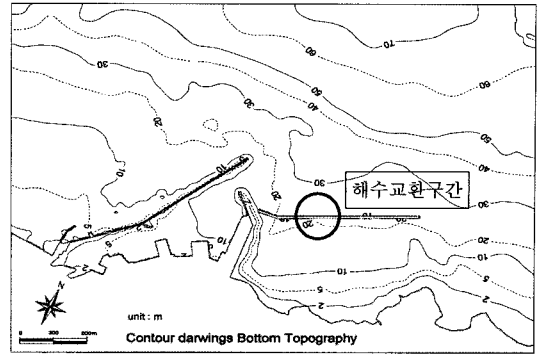


Fig. 16. Distribution of water depth around Jeju harbor.

해수교환구간 설치 지점의 수심은 약 20 m 정도로서 쇄파대에 속하지 않는 지역이다.

본 모형은 파랑이 규칙파인 정현파형을 이룰 때를 가정하여 식을 수립한 것으로서 실험역의 불규칙파를 해석하기 위해서는 여러 개의 규칙파를 각각 계산하여 중첩하는 방법을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 수립된 수치모형으로 수리모형 실험에서 얻어진 월파랑을 정량적으로 재현할 수 있는지를 검토하는 것이 주목적이므로, 월파랑의 비교를 보다 정확히 하기 위해서 규칙파를 대상으로 검토하였다.

본 연구에서는 평상파 조건인 NNW방향, 입사파고 3.7m, 주기 8.5s일 때에 제주외항 서방파제의 해수교환구간에 대한 월파랑을 산정하였다. Fig. 17과 18은 시간의존 환경사방정식으로 파랑장을 해석하고 그 결과를 파향벡터도와 파고분포도로 나타낸 것이다. 서방파제의 전면에서 파향 변화를 살펴보면 외해에서 전파된 파랑이 서방파제의 시점부근에서는 남서쪽으로 굴절되는 모습을 볼 수 있고 그 이외의 서방파제에서는 굴절변형이 없이 방파제에 입사하는 양상이다.

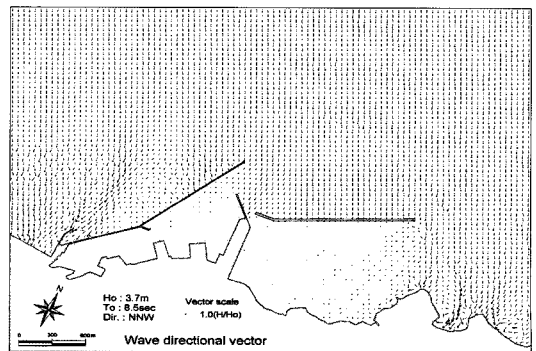


Fig. 17. Distribution of wave directional vector around Jeju harbor.



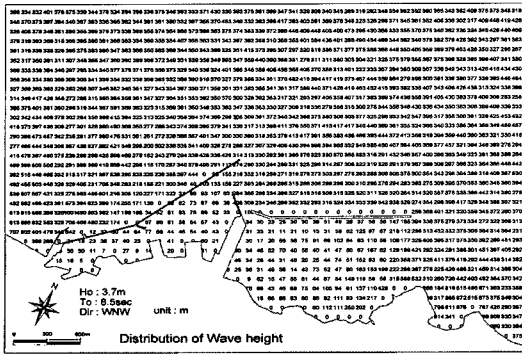


Fig. 18. Distribution of wave height around Jeju harbor.

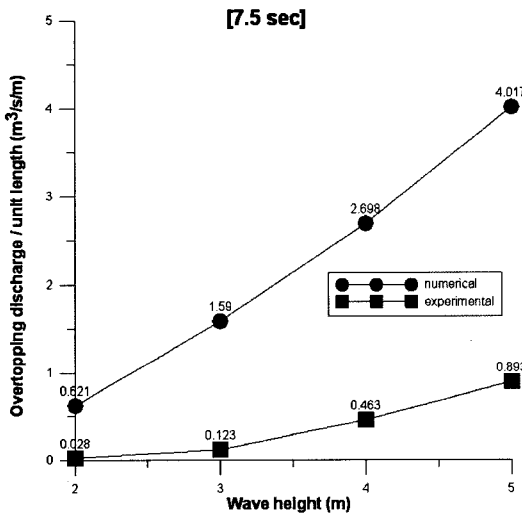


Fig. 19. Relation between wave height and wave overtopping rate (Jeju, T = 7.5s).

파고분포는 서방파제의 굴곡부분 전면에서 굴절변형의 영향으로 2.3 m~2.8 m의 파고를 나타내고 있으며 그 이외의 서방파제 전면에서는 3.2~3.5 m의 파고를 보이고 있다.

월파량 산정 결과는 주기별로 입사파고와 월파량의 관계로 표시하여 Fig. 19~21에 나타내었다. 그림에서 가로축은 입사파고이고 세로축은 단위폭당 월파량을 나타낸다. 그리고 사각형은 실험결과, 원형은 본 방법의 결과를 나타낸다. 본 방법에 의한 수치계산 결과는 유량계수  $C_w$ 를 1.0으로 놓고 계산한 값이다.

경사제의 월파량을 살펴보면, 동일주기에서는 파고의 증가에 따라 월파량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 두 결과는 파고가 증가함에 따라 월파량의 차이가 벌어짐을 확인할 수 있다. 이것은 직립제의 경우와 마찬가지로 수치

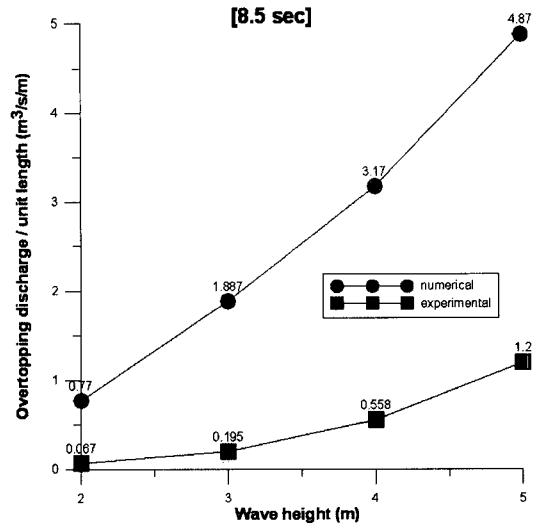


Fig. 20. Relation between wave height and wave overtopping rate (Jeju, T = 8.5s).

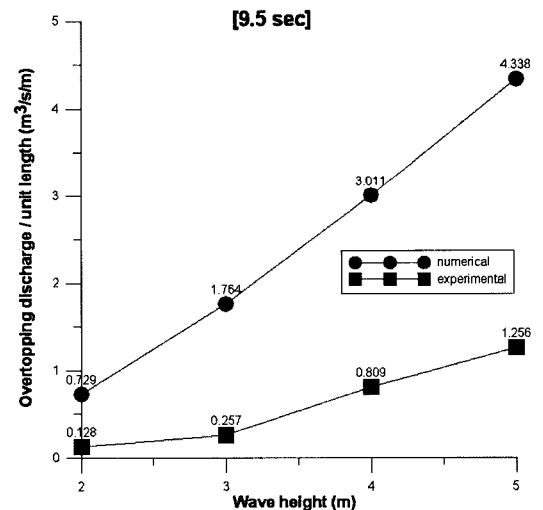


Fig. 21. Relation between wave height and wave overtopping rate (Jeju, T = 9.5s).

계산의 방법이 월류수심에 크게 의존하기 때문으로 생각한다. 그리고 동일 파고에서는 주기에 따라 월파량이 조금씩 증가함을 알 수 있다. 한편, 제주외항 서방파제의 해수교환 구간은 평상파고 3.7 m, 주기 8.5s일 때, 유량계수는 Fig. 22로부터 0.17로 산정됨을 알 수 있고, 이때의 단위폭당 월파량은  $0.458 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 산정된다. 제주외항 서방파제의 해수교환 구간은 60 m 이므로 총 월파량은  $27.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산정됨을 알 수 있다.

수리모형실험과 수치계산 결과를 이용하여 각 주기별로

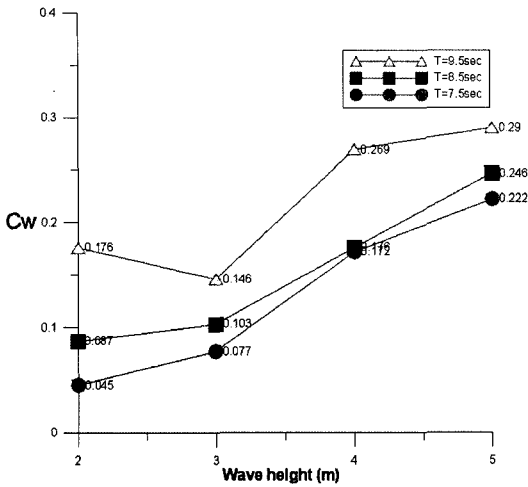


Fig. 22. Relation between wave height and discharge coefficient (Jeju).

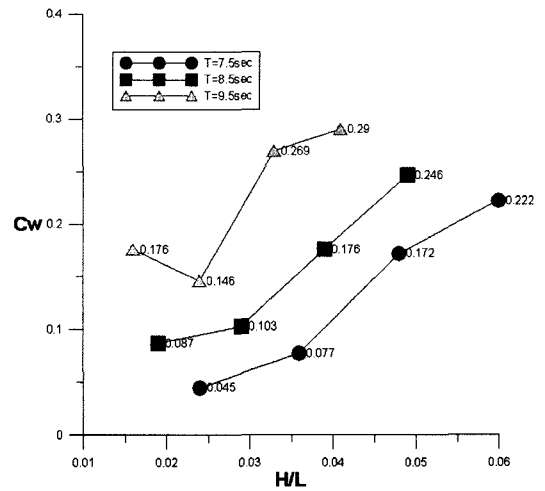


Fig. 23. Relation between wave steepness and discharge coefficient (Jeju).

유량계수를 산정하여 파고와의 관계로 표시하면 Fig. 22과 같이 된다. 경사제의 월파랑 측정은 방파제 전면이 경사제로 이루어져 있어서 직립제 보다 쇄파에 의한 산란이 적으므로 월파랑 측정이 보다 정확히 이루어졌다. 경사제의 유량계수는 세 주기 모두 파고와 주기에 따라 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한, 유량계수를 무차원인 파형경사로 표시하여 나타내면 Fig. 23과 같다. 유량계수는 동일 주기에서는 파형경사가 커짐에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 동일파고에서는 주기가 증가할 수록 크게 증가함을 뚜렷이 나타내고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 Forchheimer의 식을 시간의존 환경사방정식에 적용하여 방파제의 월파랑을 정량적으로 산정하는 방법을 제시하였다. 반무한 방파제의 예제 계산에서는 월파랑계조건을 적용시킨 본 모형으로 월파 허용시 방파제 배후의 파고분포를 재현할 수 있었으며, 월파랑 산정결과는 ACES의 결과와 근접한 결과를 나타내었다. 또한 여기서는 직립제와 제주의항 서방파제의 해수교환방파제인 경사제를 대상으로 다양한 파랑조건하에서 월파랑 산정 수리모형실험을 실시하고, 본 수치모형에 적용할 유량계수를 추정하였다. 그 결과 직립제에서는 주기 6~8s, 파고 2~6 m일 때 0.4~0.7의 값이 추정되었고, 제주의항의 해수교환방파제는 주기 7.5~9.5s, 파고 2~5 m일 때 0.15~0.25의 값이 추정되었다.

월파랑 산정결과는 동일주기에서는 파고의 증가에 따라 선형적으로 크게 증가함을 알 수 있었고, 동일파고에서는 주기에 따라 조금씩 증가함을 알 수 있었다. 특히 본 방법으로 산정한 제주의항 해수교환방파제 구간의 월파랑은 NNW방향의 평상파 조건인 파고 3.7 m, 주기 8.5s일 때 단위폭당 0.458 m<sup>3</sup>/s/m로 추정되었고, 해수교환 구간 60m의 총 월파랑은 27.5 m<sup>3</sup>/s로 산정되었다.

본 월파랑 산정방법은 다양한 구조물 형식과 파랑조건에 대한 유량계수가 수리모형실험으로 정확히 산정된다면 항만구조물의 월파랑 추정에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 오병철, 전인식, 정태성, 이달수 (2003). 파랑에너지를 이용한 해수순환 증진에 관한 연구, 한국해양·해양공학학회지, 제 14권 3호, 209-221.
- 유대성, 강신중, 신문섭 (2002). 월류제를 이용한 항내의 해수교환에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표 논문집, 58-61.
- 이달수, 오영민, 김창일 (2001). 유수실 내장형 경사식 해수교환방파제의 개발 및 기본 유입특성, 대한토목학회 학술발표 논문집, 1-4.
- 이달수, 오영민, 김창일 (2002). 주문진항 해수교환시설의 수리모형실험. 한국수자원학회 학술발표 논문집, 1051-1057.
- 이달수, 오영민, 전인식, 김창일 (2003). 유수실 내장 경사식 해수교환방파제의 수리특성, 한국해양·해양공학학회 논문집, 제 14권, 110-117.
- 西村仁嗣, 丸山康樹, 平口丸 (1983). 直接數値積分による波の

- 場の解析, 第30回 海洋工學講演會論文集, 土木學會, 126-127.
- 塩崎禎一・中村 滋・堀 博 (1996). 海水交換機能を有する直立消波 ケソンの開, 海洋開論文集, 79-84.
- 森田修二, 尹晟鎮, 出口一郎 (2002). 通水路型防波堤の波動による海水交換機能に関する研究, 海洋開發論文集, 第18卷, 521-526.

尹晟鎮 (2004). 通水路型防波堤による港内の海水交換と堆砂制御に関する研究, 大阪大 學大學院工學研究科博士學位論文.

---

Received October 25, 2006

Accepted December 15, 2006