

# 중간수심역 조건에서 직립식 구조물의 전달파고계수 산정에 관한 수리실험 Hydraulic Experiments on Transmission Coefficients for Vertical Structure under Intermediate Water Depth Condition

김영택\* · 이종인\*\*  
 Young-Taek Kim\* and Jong-In Lee\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 직립식 구조물의 전달파고계수 산정을 위한 2차원 수리실험을 실시하였다. 불규칙파를 입사파로 적용하였으며 직립식 구조물에 대한 전달파고계수 산정식을 제안하고, Goda(1969) 등의 결과와 비교하였다. Goda(1969)의 결과는 입사파로 규칙파를 적용한 결과로서 불규칙파를 적용한 본 실험의 결과와 차이를 보였다. Goda의 결과가 본 연구에 비하여 크게 전달파고계수를 제시하는 것을 알 수 있었다. 또한 Goda는 직립벽에 대하여 평균, 상한 및 하한에 대한 계수값을 제시하였으나( $d = h$  조건), 본 연구에서는 각각의 설계요소(구조물 폭, 수심, 파장 등)가 전달파고계수에 주는 영향을 계수를 통하여 정량적으로 제시하였다. 또한 여유고가 0인 조건에 대한 에너지보존 및 전달파고 특성을 제시하였다.

**핵심용어 :** 직립식 구조물, 전달파고계수, 2차원 수리실험, 불규칙파

**Abstract :** Two-dimensional hydraulic model experiments on vertical structures were conducted to investigate wave transmission characteristics under irregular wave condition. The formula about transmission coefficient for the vertical structure was suggested and the results were compared with Goda(1969). Since Goda(1969)'s tests were conducted based on regular waves, the results showed the discrepancy with this study. The Goda's results were relatively higher than the results from the present study. An influence parameter was quantitatively suggested in this study to consider the effect of structural design factors such as the width of structures, the water depth, and the wave length on the wave transmission, while Goda(1969) suggested the mean, upper and lower limits of parameters for the vertical wall( $d = h$ ). The transmission coefficients and energy conservation for zero-freeboard conditions were analyzed.

**Keywords :** vertical structure, transmission coefficient, two-dimensional hydraulic experiments, irregular waves

## 1. 서 론

항만구조물을 설계함에 있어 마루높이의 산정은 기능 확보 및 경제성 확보측면에서 중요한 설계인자이며, 마루높이는 허용 월파량 및 전달파고 관점에서 산정되는 것이 일반적이다.

월파량 산정방법에 대한 연구는 기존에 여러 가지 결과가 제시되어 있다. 대표적인 월파량 산정기법을 살펴보면, 우리나라의 항만 및 어항 설계기준·해설(MOF, 2014)에서 적용하고 있는 Goda의 월파량 산정도표(Goda, 1985)가 있으며, 미국의 설계지침인 Coastal Engineering Manual(CEM)(USACE, 2006)과 유럽의 여러 연구기관에서 제시한 EurOtop(2007)을 들 수 있다. CEM에서는 직립제와 경사제를 대상으로 여러 가지 월파량 산정식을 제시하고 있으며, 사용자가 선택할 수 있도록 하고 있다. 상대적으로 최근에 제

시된 EurOtop에서는 직립제, 경사제 및 완만한 경사면에 대한 월파량 산정식을 제시하고 있다.

입사파고에 대한 전달파고의 비로 정의되는 전달파고계수 산정방법에 대한 연구는 Goda et al.(1967)과 Goda(1969)가 규칙파를 이용하여 산정식을 제시한 이후, Goda의 결과에 상치콘크리트 형상변화에 따른 실험결과를 일부 추가한 Takahashi(2002)의 기법이 CEM에 수록되어 있다. 또한 Heijn(1997)은 직립제를 대상으로 지수함수 형태로 전달파고계수 산정식을 제시하였다. Kim and Lee(2014)은 불규칙파를 이용한 전달파고계수 산정실험을 수행하였으나, 다양한 구조물 폭 등을 고려하지 않은 결과이다. 전달파고계수와 관련된 최근 연구동향을 살펴보면 전달파고계수 산정과 관련된 대부분 연구사례는 잠제와 같은 저천단 구조물(low crested structures)에 관련된 내용이 주를 이루고 있다(Hamer and

\*한국건설기술연구원 하천해양연구실(River and Coastal Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)  
 \*\*전남대학교 공학대학 해양토목공학과(Corresponding author: Jong-In Lee, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam, 59626, Korea, Tel: +82-61-659-7321, Fax: +82-61-659-7329, jilee@chonnam.ac.kr)

Hamer, 1982; Kramer et al., 2005; van der Meer et al., 2005; Wang et al., 2007).

전달파고계수 산정에 대한 연구성과는 월파량 산정기법 연구에 비해 상대적으로 많지 않으며, 우리나라 및 미국에서도 여전히 Goda의 연구결과를 설계지침에 적용하고 있는 상황이다. Goda의 실험결과는 규칙파를 적용하였기 때문에 불규칙파를 설계조건으로 적용하는 현재 설계상황에서는 다소 차이가 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 비교를 실시하고자 한다.

본 연구에서는 직립제를 대상으로 불규칙파를 적용하여 2차원 수리실험을 실시하였다. 입사파고, 주기, 수심 및 구조물 제원(폭, 높이) 등을 변화시키면서 전달파고계수 산정을 위한 파고계측을 실시하였다. Goda의 전달파고계수 산정식에서는 평균, 상한 및 하한의 전달파고계수를 제시하고 있으나, 본 연구에서는 수행된 수리실험결과를 이용하여 평균 전달파고계수 산정식을 제안하고, 각 설계요소(구조물 제원 및 파랑조건)의 영향을 고려할 수 있는 영향계수를 제시하고자 한다. 또한 정수면과 여유고가 동일한 조건에서의 전달파고계수 및 반사계수 등에 대하여 검토하고자 한다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험시설

단면 수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.2 m, 높이 1.5 m, 길이 50 m의 수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 그리고 수로 내에서 구조물 설치로 인한 반사와 조파판에서 발생하는 재반사를 효과적으로 제어하기 위해 수로 폭 1.2 m를 폭 0.8 m(광폭수로)와 폭 0.4 m(협수로)로 분할하였다. 분할된 수로에서 실험모형은 폭 0.8 m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 또한 흡수식 조파를 실시하여 구조물로부터 반사되어온 파가 조파기에서 재반사 되는 현상을 최소화하였다. 수로 전면 30 m

구간을 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어 있으며, 수로 양쪽 끝 부분에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다. 또한 전달과 발생시 해수 퇴적으로 구조물 전후면의 수위차가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 수로 끝단의 다공성 소파시설은 광폭수로와 협수로가 연결되어 있으며, 또한 수로 양끝단은 직경 0.3 m의 관으로 연결되어 있어 수위차의 발생이 최소화 될 수 있도록 하였다. 그리고 자유수면계측은 용량식 파고계를 사용하였다.

### 2.2 실험모형 및 실험조건

본 단면 수리실험에 적용된 실험단면은 무공 직립식 단면으로서 실험단면 형상은 Fig. 2와 같다. 구조물 설치수심( $h$ )은  $h = 0.4$  m,  $0.5$  m이며, 여유고는  $R = 0.0$  m,  $0.05$  m,  $0.10$  m,  $0.15$  m,  $0.20$  m이고, 케이슨 폭( $B$ )은  $B = 0.02$  m,  $0.3$  m,  $0.4$  m 및  $0.5$  m이다. 그리고 구조물 전면에는 1:40의 경사면이 설치되어 있다.

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용한 불규칙파 조건을 적용하였으며, 실험에 적용된 목표 유의파고( $H_{1/3}$ )는  $H_{1/3} = 0.05$  m,  $0.075$  m,  $0.10$  m,  $0.125$  m 및  $0.15$  m이고, 유의주기( $T_{1/3}$ )는 각각의 수심별로 유의파장이 2.0 m, 2.5 m, 3.0 m 및 3.5 m가 되도록 설정하였다. 전달파고 계측을 위해 구조물 내측 선단으로부터 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 3.0 m, 3.5 m, 4.0 m 및 5.0 m 지점에 파고계를 설치하였고(Fig. 1의 6번~13번 파고계), 입사파는 Fig. 1의 협수로내 구조물 설치 위치에 파고계를 설치하고 2점법(Goda and Suzuki, 1976)을 적용하여 분석하였다(Fig. 1의 4번과 5번 파고계). 그리고 반사계수는 구조물 전면의 경사시작 지점에서 2점법을 이용하여 분석하였다(Fig. 1의 2번과 3번 파고계). Fig. 1의 1번 파고계는 흡수식 조파를 위하여 조파기에 설치된 파고계이다.

월파 발생시 구조물 후면의 수위가 순간적으로 상승할 수 있으므로, 전달파고는 평균수위 상승량을 제거하고 분석하였으며, Fig. 2와 Table 1은 각각 본 실험에서 적용한 실험모형

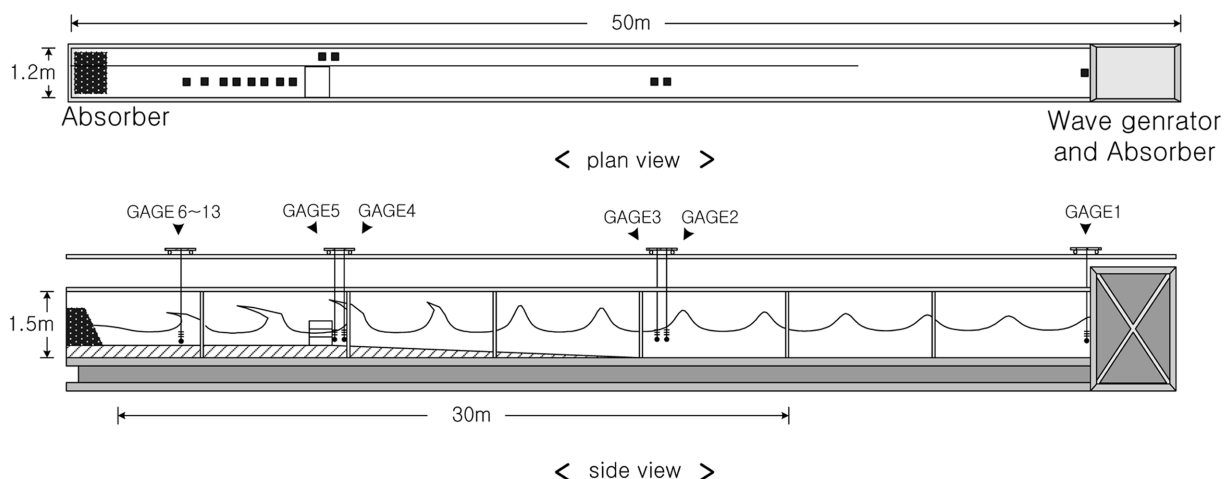


Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

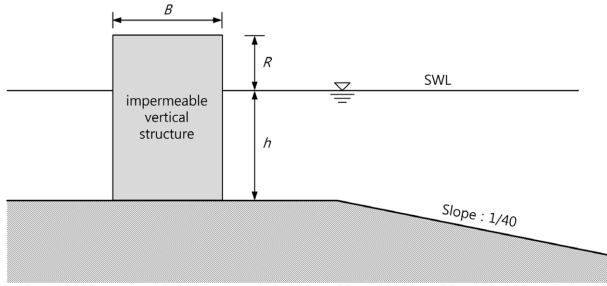


Fig. 2. Schematic sketch of model setup.

Table 1. Summary of test conditions

test conditions	properties
free board ( $R$ )	0.0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 (m)
target incident wave height ( $H_{1/3}$ )	0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15 (m)
water depth at toe ( $h$ )	0.4, 0.5 (m)
width of vertical wall ( $B$ )	0.02, 0.30, 0.40, 0.50 (m)
target wave length for each wave period ( $L_{1/3}$ )	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 (m)

및 실험조건이다. Table 1에서 목표 파고( $H_{1/3}$ )와 주기( $L_{1/3}$ )는 구조물 설치 위치에서의 값이다.

### 3. 전달파고계수 분석 방법

전달파고계수는 월파로 인해 발생하는 전달파고계수( $K_{T_o}$ )와 체체를 투과해서 발생하는 투과파로 인한 전달파고계수( $K_{T_i}$ )로 구분할 수 있다. 그리고 이들 두 가지 요소에 의한 전달파고계수( $K_T$ )는 식(1)과 같이 정의된다(Goda, 1969; Heijn, 1997; Takahashi, 2002).

$$K_T = \sqrt{K_{T_o}^2 + K_{T_i}^2} \quad (1)$$

Goda et al.(1967)과 Goda(1969)는 직립체를 대상으로 규칙파를 적용하여 수리실험을 수행한 후 전달파고계수 산정식을 제시하였다. Goda의 실험에 적용된 직립식 구조물의 폭은 0.4 m이고, 실험수심은 0.35 m와 0.50 m이며, 구조물의 마

루높이는 수로바닥면으로부터 0.25 m~0.80 m 범위로서 구조물 마루높이가 정수면보다 낮은 조건과 높은 조건을 포함한다. 그리고 입사파고( $H$ )는 0.03 m~0.30 m 범위, 주기( $T$ )는 0.8 sec~2.8 sec 범위이다. 단, 입사파 주기는 수심( $h$ )이 0.50 m인 경우에  $h/L = 0.14, 0.2, 0.3, 0.5$ 를 만족하는 4가지 조건, 수심( $h$ )이 0.35 m인 경우에는  $h/L = 0.07, 0.1, 0.14$ 를 만족하는 3가지 조건을 대상으로 하였다. Goda et al.(1967)은 전달파고에 영향을 미치는 변수로 입사파고( $H$ ), 여유고( $R$ ), 수심( $h$ ), 파장(주기)( $L$ ) 등을 적용하였으며, 이를 식(2)와 같이 무차원화하여 제시하였다. 그러나 이들 무차원 변수 중 전달파고에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수는  $R/H$ 이며, 실험결과를 이용하여 무차원 여유고( $R/H$ )에 대한 전달파고계수 산정식을 제시하였다. 식(2)에서  $H$ 는 구조물 배후에서 측정한 전달파고이다.

$$K_T = H_i/H = \psi \left( \frac{R}{H}, \frac{B}{h}, \frac{h}{L}, \frac{H}{h}, \frac{d}{h} \right) \quad (2)$$

Goda(1969)는 규칙파 실험결과를 이용하여 식(3)과 같은 전달파고계수 산정식을 제안하였고, 이 식은 CEM(2006)에도 인용되고 있다. 식(3)에서  $h$ 는 해저면상 수심이며,  $d$ 는 직립체 전면 마운드상의 수심이다.

$$K_T = \sqrt{0.25 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{R}{H} + \beta \right) \right) \right]^2 + 0.01 \left( 1 - \frac{d}{h} \right)^2} \quad (3)$$

식(3)에서 우변 제곱근 내의 첫 번째 항은 월파에 의한 전달파고계수이고, 두 번째 항은 직립체 하부 사석체체의 투과파에 의해 생성되는 전달파고계수를 의미하며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험 결과로부터 얻어지는 계수이다.

Goda(1969)가 제안한 식(3)에서  $\alpha = 2.2$ 이고,  $\beta$ 는  $d/h$  값에 따라 서로 다른 값을 가진다.  $d/h = 1.0$ 인 경우에  $\beta$ 는 실험결과 상한값, 평균값, 하한값으로  $\beta = 0$ (상한),  $\beta = 0.4$ (평균),  $\beta = 0.8$ (하한)로 제시되어 있다(Fig. 3 참조). 그리고  $d/h = 0.7$ 인 경우에  $\beta = 0.35$ ,  $d/h = 0.5$ 인 경우에  $\beta = 0.25$ ,  $d/h = 0.3$ 인 경우에  $\beta = 0.1$ ,  $d/h = 0$ 인 경우에  $\beta = -0.2$ 로 주어진다(Fig. 4 참조). 국내 항만 및 어항 설계기준·해설(MOF, 2014)에는 Fig. 4만 제시되어 있고, 식(3)은 제시되어

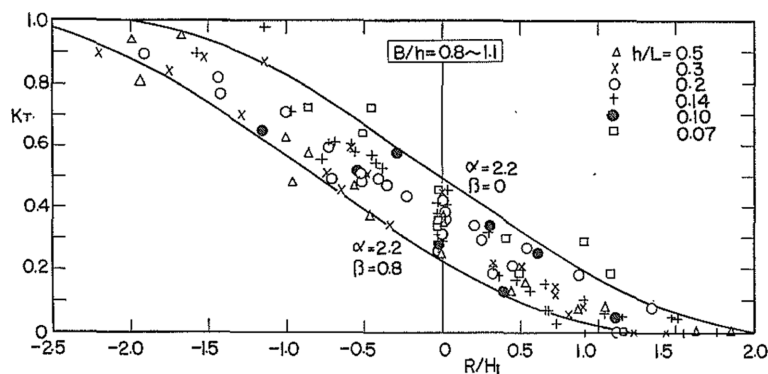


Fig. 3. Transmission coefficients of vertical breakwater for  $d=h$  (Goda, 1969).

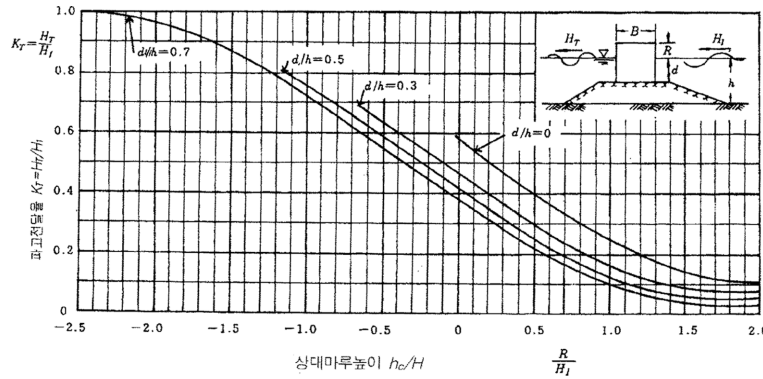


Fig. 4. Transmission coefficients of composite type breakwater for  $d \neq h$  (Goda, 1969).

있지 않다. 따라서 Fig. 4를 대체하여 식(3)을 사용하기 위해서는 전술한 계수값을 입력하면 되며, 계수값은  $B/h=0.8\sim 1.1$  조건에 대한 실험결과로부터 얻어진 것이다.

Heijn(1997)은 지수함수의 형태로 전달파고계수를 제시하였다. 전달파고계수 산정식의 형태는 식(1)과 같으며, 전달파고계수는 식(4)와 같이 제시하였다.

$$K_T = \sqrt{\left[ \alpha \exp\left(-\frac{1}{kH}\right) \right]^2 + \beta \left(1 - \frac{d}{h}\right)^2} \quad (4)$$

식(4)에서 우변의 제곱근 내 첫 번째 항은 월파에 의한 전달파고계수이며, 두 번째 항은 Goda(1969)와 동일한 제체사석의 투과파에 의한 전달파고계수이다. 식(4)에서 직립식 구조물의 경우에  $n=2$ ,  $\beta=0.35$ 이며,  $k$ 는 마루폭에 따라 변경되는 계수로 제시하고 있다.  $d=h$ 이고  $R=0$ 인 경우에  $\alpha$ 는 zero-freeboard에서의 전달파고계수가 되며,  $K_T=\alpha=0.35$ 가 된다. 그러나 Goda의 실험결과(Goda et al., 1967)인 Fig. 3에서 동일한 마루높이이지만 파랑조건에 따라 전달파고계수가 다양하게 나타나며, zero-freeboard에서도 다양한 변화가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 식(4)와 같은 형태로 전달파고계수를 나타내기 위해서는 각각의 구조물 형상별로  $\alpha$ 와  $k$ 에 대한 계수의 산정이 필요할 것으로 판단되며, 일반화된 산정식으로 제시하는데 한계가 있을 것으로 생각된다.

이에 본 연구에서는 Goda(1969) 및 Takahashi(2002)가 제시한 sine 함수 형태로 전달파고계수를 제안하고자 하며, 입사파랑 및 구조물 제원이 전달파고계수에 미치는 영향을 불규칙파를 입사파로 적용하여 영향계수를 제시하고자 한다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 평균 전달파고계수

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 직립식 구조물( $d=h$ )을 대상으로 구조물의 폭, 마루높이 및 설치수심의 변화에 따른 전달파고계수 실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 전체 실험결과( $B=0.3\text{ m}$ ,  $0.4\text{ m}$ ,  $0.5\text{ m}$  조건)에 대한 평균 전달파고계수와 Goda(1969) 및 Heijn(1997)의 결과를 비교하여 Fig.

5에 도시하였다.

본 연구에서 수행한 실험조건은 사석마운드가 없는 조건이기 때문에 식(3)은 식(5)와 같이 표시할 수 있다. 그리고 본 연구에서 수행한 실험은 불규칙파를 대상으로 하였기 때문에 식(3)의 파고( $H$ ) 대신 식(5)에 유의파고( $H_{1/3}$ )를 사용하였다.

$$K_T = 0.5 \left[ 1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} \left( \frac{R}{H_{1/3}} + \beta \right) \right) \right] \quad (5)$$

본 실험결과로부터 직립식 구조물을 대상으로  $d=h$  조건에 대한 평균 전달파고계수 산정식인 식(5)의 계수값은  $\alpha=2.15$ ,  $\beta=0.47$  ( $B/h=0.6\sim 1.25$  조건)로서 Goda의 평균 전달파고계수에 해당하는 계수값( $\alpha=2.2$ ,  $\beta=0.4$ )과 다소 차이가 있는 것으로 분석되었다. 즉, 규칙파를 대상으로 수행된 Goda의 실험결과가 불규칙파를 적용한 본 연구결과보다 전달파고계수가 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 Heijn(1997)의 결과에서도 확인할 수 있다. 불규칙파를 적용한 본 실험의 전달파고계수는 대부분 Goda(1969)의 상한값과 하한값 범위에 포함되지만, 평균 전달파고계수는 다소 작게 나타났다. 항만 및 어항 설계기준·해설에는 규칙파 결과를 불규칙파 조건에서도 적용할 수 있는 것으로 기술되어 있으나 개선이 필요한 것으로 판단된다. Fig. 5는 본 연구에서 검토한 구조물 폭 중  $B=0.3\text{ m}$ ,  $0.4\text{ m}$ 와  $0.5\text{ m}$ 에 대한 전달파고계수를 도시한 것이다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 구조물 폭에 따라 전달계수가 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, 구조물 폭이 증가할수록 전달파고계수는 감소하는 경향을 보이며, 이는 다음 절에서 검토하고자 한다. 또한 실험결과 중  $R/H_{1/3}=0$ 인 경우, 즉 zero-freeboard에서 전달파고계수가 넓은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 동일 여유고 조건(zero-freeboard)이라도 구조물 폭 및 파랑조건 등에 따라 달라짐을 의미하여 이에 대해서는 4.3절을 참조한다.

### 4.2 설계요소가 전달파고계수에 미치는 영향 분석

본 연구를 통해 제시된 평균 전달파고계수 산정식은 식(5)와 같다. 그러나 Fig. 5에 나타난 바와 같이 구조물 폭 등에 따라 전달파고계수가 상이한 것을 알 수 있다. 또한 기존 연

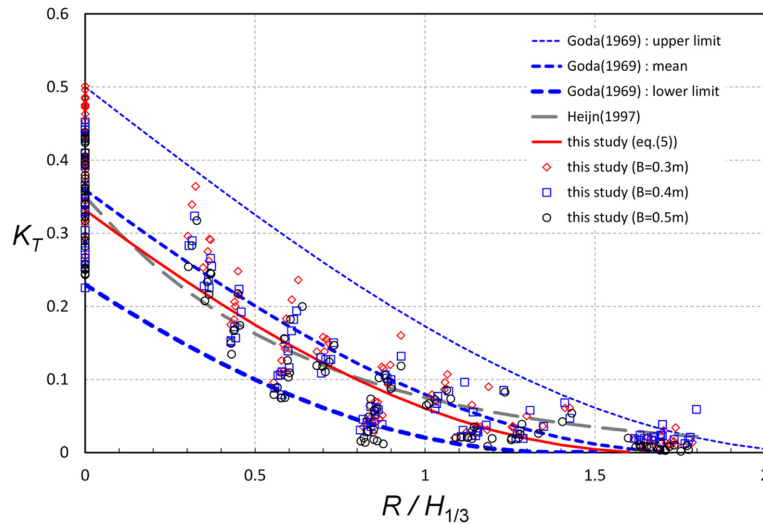


Fig. 5. Transmission coefficients for all experimental conditions.

Table 2. Influence coefficients on transmission coefficient for each design properties in eq. (6)

design properties	influence factor ( $\gamma$ )	$R^2$	remarks
$h/L_{1/3}$	$\gamma = 62.87(h/L_{1/3})^2 - 28.51(h/L_{1/3}) + 3.90$	0.984	$0.11 \leq h/L_{1/3} \leq 0.25$
$H_{1/3}/h$	$\gamma = 15.47(H_{1/3}/h)^2 - 2.76(H_{1/3}/h) + 0.82$	0.999	$0.11 \leq H_{1/3}/h \leq 0.40$
$H_{1/3}/L_{1/3}$	$\gamma = 544.82(H_{1/3}/L_{1/3})^2 - 14.02(H_{1/3}/L_{1/3}) + 0.77$	0.992	$0.02 \leq H_{1/3}/L_{1/3} \leq 0.05$
$B/L_{1/3}$	$\gamma = 53.22(B/L_{1/3})^2 - 24.49(B/L_{1/3}) + 3.43$	0.978	$0.10 \leq B/L_{1/3} \leq 0.22$

구(Goda, 1969)에서는 단순형상에 대한 평균값과 상한 및 하한 경계의 계수만 제시하였을 뿐 설계요소(design properties)에 대한 영향계수(influence coefficients)는 제시하지 않고 있다. 본 절에서는 설계요소(수심, 파장, 구조물 폭 등)에 따른 전달파고계수의 영향계수를 분석하고자 한다. Goda(1969)와 Takahashi(2002) 등이 제안한 기본형태의 전달파고계수 산정식인 식(5)에서 식(6)과 같이 영향계수( $\gamma$ )를 도입하여 설계요소의 영향을 검토하고자 한다. 식(6)에서 평균값을 나타내는  $\gamma$ 는 본 연구의 실험에서 검토된 식(5)의 값을 사용한다. 특정 조건에 대한 전달파고계수를 식(7)과 같이 산정할 경우, 평균값에 대한 영향계수는 식(8)과 같이 계산된다. 전달파고계수의 산정에 검토된 실험조건은  $B = 0.3 \text{ m}$ ,  $0.4 \text{ m}$ ,  $0.5 \text{ m}$ 이며, 이는  $B/h = 0.6 \sim 1.25$ 에 해당한다.

$$K_T = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{R}{H_{1/3}} + \frac{\beta}{\gamma} \right) \right) \right] \quad (6)$$

$$K_T = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{R}{H_{1/3}} + \beta' \right) \right) \right] \quad (7)$$

$$\gamma = \beta/\beta' \quad (8)$$

식(6)과 식(7)의 관계를 이용하여, 식(2)에서 제시한 설계요소에 대한 영향계수를 분석하고자 한다. 본 절에서는 상대수심( $h/L_{1/3}$ ), 상대파고( $H_{1/3}/h$ ), 파형경사( $H_{1/3}/L_{1/3}$ ) 및 상대마루폭( $B/L_{1/3}$ )에 따른 영향계수를 분석하였다.

Fig. 6(a)는 구조물 설치수심( $h$ )과 입사파장( $L_{1/3}$ )의 비인 상대수심( $h/L_{1/3}$ )에 따른 전달파고계수를 도시한 것으로서 동일 수심 조건에서 파장이 상대적으로 길 경우에 전달파고계수가 크게 산정되는 것을 알 수 있다. 그러나  $h/L_{1/3} \geq 0.17$ 의 조건에서는 상대수심이 커지더라도 전달파고계수의 증가는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 입사파고( $H_{1/3}$ )와 구조물 설치수심( $h$ )과 비인 상대파고( $H_{1/3}/h$ )에 따른 전달파고계수를 도시한 것으로서 동일 상대여유고 조건에서 상대파고가 클수록 전달파고계수는 증가함을 확인할 수 있으며, 상대파고가 증가함에 따라 거의 선형적으로 전달파고계수가 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6(c)는 입사파고( $H_{1/3}$ )와 입사파장( $L_{1/3}$ )의 비인 파형경사( $H_{1/3}/L_{1/3}$ )에 따른 전달파고계수를 도시한 것으로서 파형경사가 클수록 전달파고계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 상대수심, 상대파고 및 파형경사에 따라 전달파고계수는 차이가 나타났지만, 상대여유고( $R/H_{1/3}$ )가 1.4보다 클 경우에는 설계요소별 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 6(d)는 구조물 폭( $B$ )과 입사파장( $L_{1/3}$ )의 비인 상대 마루폭( $B/L_{1/3}$ )에 따른 전달파고계수를 도시한 것으로서 동일 상대여유고 조건에서 구조물의 마루폭이 넓을수록 전달파고계수는 작게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6에 도시된 실험결과와 식(6)~식(8)의 관계를 이용하여 각각의 설계요소에 따른 영향계수( $\gamma$ )를 산정하여 도시한 것이다. 전체적으로 설계요소(상대수심, 상대파고, 파형경사, 상대 마루폭)에 따라 영향계수가 변함을 알 수 있으며, 각각

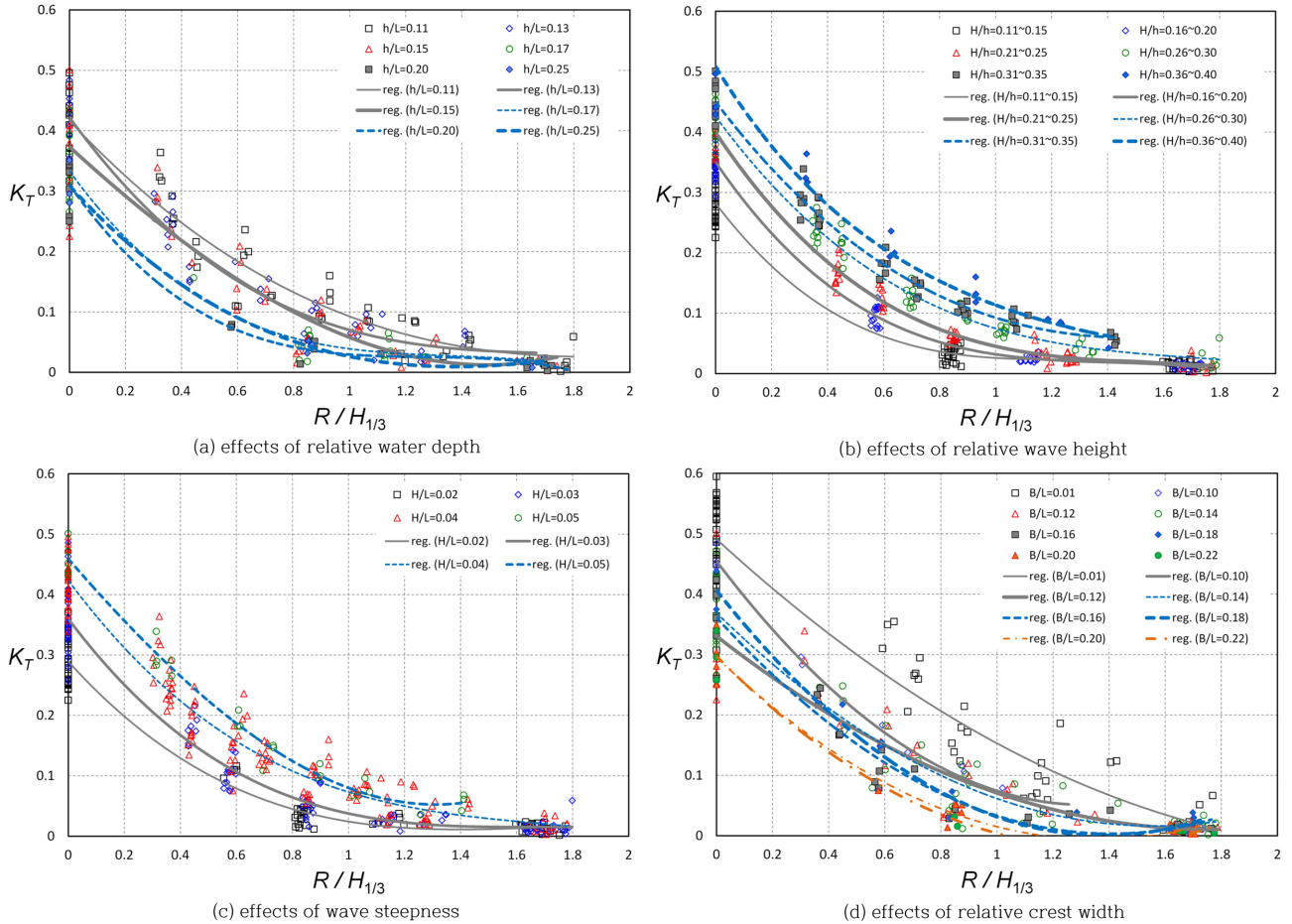


Fig. 6. Transmission coefficients for each design properties.

의 영향계수 산정식과 적용범위를 정리한 것이 Table 2이다.

직립식 구조물이 해저면에 놓여 있는 조건( $d = h$ )에 대한 상대여유고별 평균 전달파고계수는 식(6)에  $\alpha = 2.15$ ,  $\beta = 0.47$  및  $\gamma = 1$ 을 대입하면 산정할 수 있다. 그러나 Fig. 5의 평균 전달파고계수에서 볼 수 있듯이 동일 상대여유고 조건에서도 다양한 전달파고계수가 존재하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 상대수심, 상대파고, 파형경사 및 상대 마루폭에 따른 전달파고계수의 산정을 위해 영향계수  $\gamma$ 를 도입하였다. 즉, 식(6)에 Table 2에 주어진 각각의 설계 요소에 해당하는  $\gamma$ 값을 대입하면 상대여유고별 전달파고계수를 산정할 수 있으며, 보수적인 측면에서 각 설계요소별로 산정된 전달파고계수 중 가장 큰 전달파고계수를 설계에 적용할 것을 제안한다.

#### 4.3 zero-freeboard에서의 전달파고 특성

구조물의 여유고가 0(zero)인 경우, 즉 구조물 마루높이와 정수면이 동일한 조건에 대한 전달파고계수를 분석하였다. zero-freeboard에서의 전달파고계수를 분석해 보면, 구조물 폭이 상대적으로 좁은  $B = 0.02$  m 조건( $B/h = 0.04 \sim 0.05$ )의 경우에 최대 전달파고계수는  $K_T \approx 0.6$ 에 수렴하는 경향을 보이며,  $B = 0.3$  m,  $0.4$  m 및  $0.5$  m 조건에서는  $K_T = 0.4 \sim 0.5$

범위에 수렴하는 것으로 나타났다. 반사계수( $K_R$ )의 경우에는 구조물 폭에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다(Fig. 8 참조).

그리고 에너지보존( $K_E = K_T^2 + K_R^2$ )을 분석해보면 전달파고계수의 결과에서 유추할 수 있듯이 폭이 넓을수록  $K_E$ 는 작게 나타난다. 이는 구조물 폭이 넓을수록 구조물 마루 상단에서 쇄파 등에 의한 에너지소산이 발생함을 의미한다. 구조물 폭이 동일한 경우에 파형경사에 따른 에너지소산은 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 9 참조).

## 5. 결 론

전달파고계수 산정에 대한 연구는 월파랑 산정 연구에 비해 상대적으로 많지 않다. 전달파고계수 산정에 대한 대표적인 연구는 Goda(1969)와 Takahashi(2002)의 연구를 들 수 있으며, 국내 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2014)에는 Goda(1969)의 연구결과가 수록되어 있다. Goda(1969)의 연구는 규칙파를 대상으로 한 것으로서 설계시 불규칙파의 적용이 일반화된 점을 감안할 때 이에 대한 개선이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 불규칙파를 실험파로 적용하여 직립제에 대한 전달파고계수 산정식을 제안하였다. 그리고 동일한

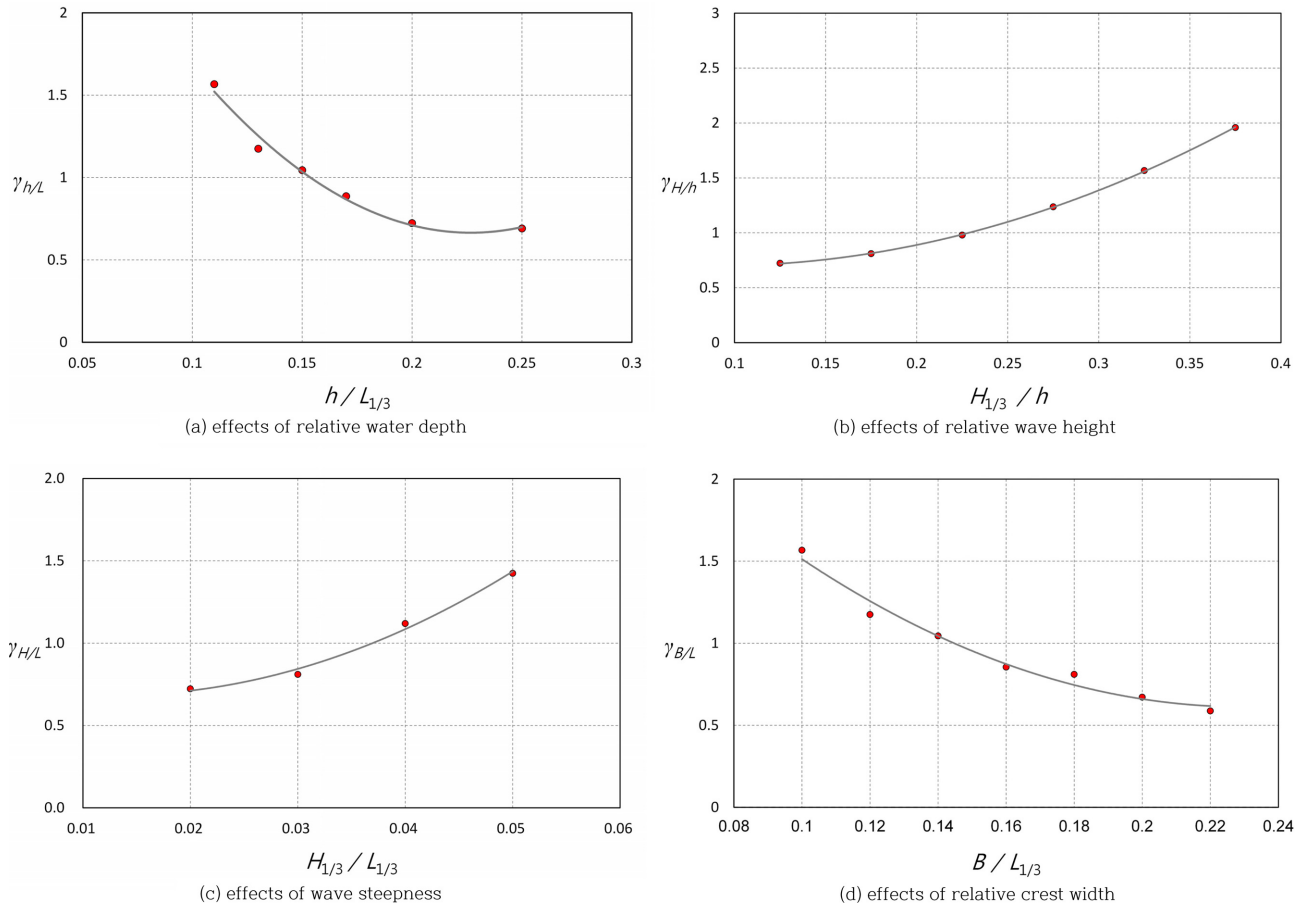


Fig. 7. Influence coefficients for each design properties.

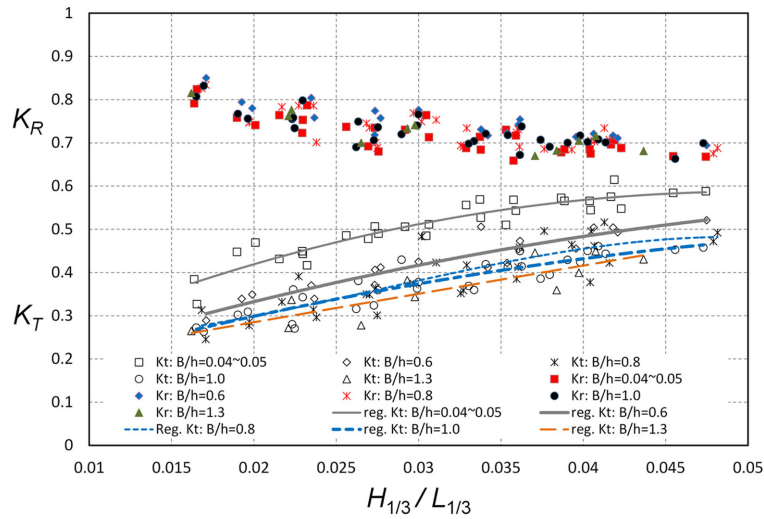


Fig. 8. Transmission and reflection coefficients for zero-freeboard condition.

상대여유고 조건에서도 각 설계요소(상대수심, 상대파고, 파형경사, 상대마루폭)에 따라 서로 다른 전달파고계수가 나타남에 따라 이를 고려할 수 있는 영향계수를 도입하고 그 계수값을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 수행한 불규칙파를 적용한 평균 전달파고계수는 규칙파를 적용한 Goda(1969)의 결과에 비해 약간 작게 분석되었다.

2. 본 연구에서는 직립식구조물이 해저면에 놓여 있는 조건에 대한 전달파고계수 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$K_T = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{R}{H_{1/3}} + \frac{\beta}{\gamma} \right) \right) \right]$$

상기 식에서  $\alpha = 2.15$ ,  $\beta = 0.47$ 이며, 설계요소별 영향계수인  $\gamma$ 는 실험을 통해 적정값을 제시하였다. 동일 상대여유

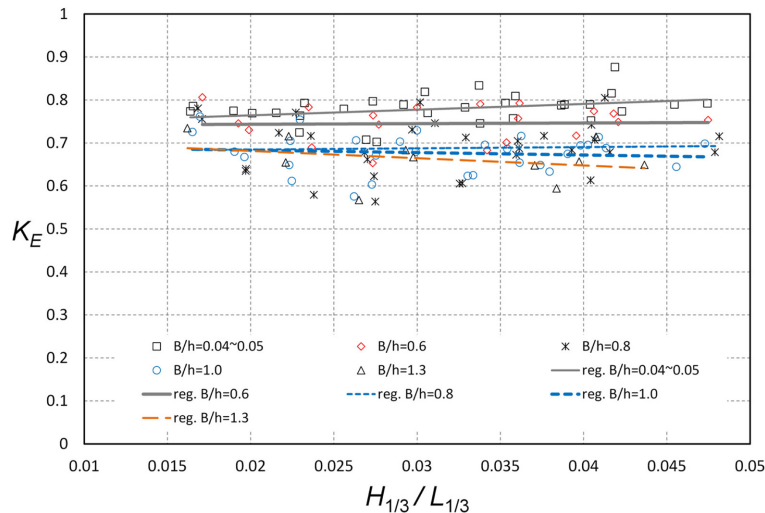


Fig. 9. Energy conservation for zero-freeboard condition.

고 조건이라 할지라도 설계요소별 영향계수  $\gamma$ 에 따라 전달 파고계수 값은 서로 다르게 산정될 수 있으며, 산정된 전달 파고계수 값 중 최대값을 설계에 적용할 것을 제한한다. 평균 전달파고계수를 산정하기 위해서는  $\gamma = 1$ 을 적용하면 된다.

3. 구조물의 여유고가 정수면 높이와 동일한 조건에 대하여 전달파고계수를 분석하였다. 일반적인 구조물 설계시 적용할 수 있는 구조물 마루폭의 경우, 파형경사가 증가하여도 전달계수는  $K_T = 0.4 \sim 0.5$  범위에서 수렴하는 것으로 나타났으며, 상대마루폭이  $B/h = 0.04 \sim 0.05$ 인 폭이 매우 좁은 경우에는 최대 전달파고계수는  $K_T \approx 0.6$ 에 수렴하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 직립식구조물이 해저면에 놓여 있는 조건에 대한 전달파고계수 산정식을 제한하였으며, 일반적인 혼성식 방파제와 같이 사석마운드가 존재하는 조건에 대한 추가적인 실험을 수행하여 사석마운드의 효과를 검토할 예정이다.

## 감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20110131) 및 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0030040)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

EurtOtop (2007). EurOtop-Wave overtopping of sea defences and related structures : Assessment Manual.  
 Goda, Y. (1969). Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters. Report of the Port and Harbor Research Institute, 8(3).  
 Goda, Y., Takeda, H., and Moriya, Y. (1967). Laboratory investigation on wave transmission over breakwaters, Report of the Port and Harbor Research Institute, No. 13.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments, Proceedings of 15th Coastal Engineering Conference, Chapter 48, 828-845.  
 Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. World Scientific Publishing.  
 Hamer, D.G. and Hamer, F.C. (1982). Laboratory experiments on wave transmission by overtopping, Coastal Engineering, 6, 209-215.  
 Heijn, K.M. (1997). Wave transmission at vertical breakwaters. Master's thesis, Delft University of Technology, Netherlands.  
 Jentsje van der Meer, Briganti, R., Zanuttigh, B., and Wang, B. (2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, Coastal Engineering, 52, 915-929.  
 Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2014). Experiments for transmitted wave over vertical wall, Proceedings of Korean Society of Hazard Mitigation, 13, 267(in Korean).  
 Kramer M., Zanuttigh B., Jentsje van der Meer, Vidal C., and Gironella F.X. (2005). Laboratory experiments on low-crested breakwaters, Coastal Engineering, 52, 867-885.  
 Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Design standard for harbor and fishery port (in Korean).  
 Takahashi, S. (2002). Design of vertical breakwaters. Report of the Port and Harbor Research Institute, No. 34.  
 US Army Corps of Engineers (USACE) (2006). Coastal Engineering Manual.  
 Wang, B., Otta, A.K., and Chadwick, A.J. (2007). Transmission of obliquely incident waves at low-crested breakwaters: Theoretical interpretations of experimental observations, Coastal Engineering, 54(4), 333-344.

Received 30 July, 2015

Revised 8 September, 2015

Accepted 6 October, 2015