

불규칙파 조건에서 혼성식 직립구조물의 전달계수 산정에 관한 2차원 수리실험 2D Hydraulic Experiment on Wave Transmission Coefficients for Composite Type Vertical Structure under Irregular Wave Condition

김영택* · 이종인**

Young-Taek Kim* and Jong-In Lee**

요 지 : 본 연구에서는 제체사석 위에 직립구조물이 설치된 혼성제를 대상으로 전달계수 산정을 위한 2차원 수리실험을 실시하였다. 실험에 적용된 혼성제의 경우 국내 항만시설 설계시 일반적으로 적용되는 조건을 적용하였다. 실험결과는 Goda(1969)의 결과와 비교하였으며, 약간의 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 최근의 월파량 예측식의 형태로 많이 적용되고 있는 지수함수 형태로 실험결과를 분석하였으며, 불규칙파의 유의파고, 유의파주기, 제체설치수심, 제체사석 높이 등을 고려할 수 있는 전달계수 산정식을 제시하였다.

핵심용어 : 혼성식 직립구조물, 전달계수, 2차원 수리실험, 불규칙파

Abstract : This study conducted two-dimensional hydraulic experiments to investigate the wave transmission coefficient for composite type vertical structure, in which a vertical caisson is placed on a rubble-mound foundation. The commonly used design configuration was applied to the tests. The experimental results were compared with Goda (1969) and it could be seen some discrepancies. The measured data were analyzed using an exponential form consistent with recent overtopping-discharge prediction researches and the experimental formula for wave transmission was proposed that accounts for significant wave height, significant wave period, water depth and mound height under irregular wave conditions.

Keywords : composite type vertical structure, transmission coefficient, two-dimensional hydraulic experiment, irregular wave

1. 서 론

항만구조물을 설계함에 있어 마루높이는 항만의 기능 확보 및 경제성 확보 측면에서 중요한 설계인자이며, 마루높이는 하용 월파량 및 전달과고 관점에서 산정되는 것이 일반적이다.

월파량 산정과 관련된 대표적인 성과로는 EurOtop(van der Meer et al., 2018)을 들 수 있고, 이외에도 국내·외에서 많은 연구가 진행된 반면, 전달계수 산정과 관련된 연구성과는 상대적으로 많지 않다. 입사파고에 대한 전달과고의 비로 정의되는 전달계수 산정에 대한 연구는 Johnson et al.(1951)이 잠제에 대한 수리실험을 수행한 후, Goda et al.(1967)과 Goda(1969)가 규칙파를 이용하여 직립제에 대한 전달계수 산정식을 제시하였다. Takahashi(2002)는 Goda의 성과에 상치 콘크리트의 형상변화에 따른 실험결과를 일부 추가하였으며, 제안식은 CEM(USACE, 2006)에 수록되어 있다. Goda와 Takahashi는 sine 함수를 이용하여 전달계수 산정식을 제시하

였고, Heijn(1997)은 직립제를 대상으로 지수함수 형태의 전달계수 산정식을 제시하였다. 국내에서는 Kim and Lee(2015)의 결과가 있으며, Kim and Lee는 Goda et al.(1967)과 동일한 구조물 형상을 대상으로 불규칙파를 적용한 전달계수 산정 실험을 수행하고, 전달계수의 변화에 영향을 미치는 여러 무차원 변수를 분석하였다. 전달계수 산정과 관련된 연구동향을 살펴보면, 인공리프(artificial reef) 등 잠제와 같은 저천단 구조물(low crested structure)과 관련된 내용이 주를 이루고 있다(Hamer and Hamer, 1982; Kramer et al., 2005; van der Meer et al., 2005; Wang et al., 2007; Hassanpour et al., 2023; van Gent et al., 2023; Díaz-Carrasco et al., 2025).

전술한 바와 같이 전달계수 산정에 대한 연구성과는 월파량 산정기법 연구에 비해 상대적으로 많지 않으며, 국내에서는 설계지침에 Goda의 연구결과를 사용하고 있는 실정이다. 그러나 불규칙파의 적용이 일반화된 상황에서 규칙파를 대상으로 한 Goda의 연구성과는 개선의 여지가 있다고 판단된다.

*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Corresponding author: Jong-In Lee, Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea, Tel: +82-62-530-5431, jilee@jnu.ac.kr)

본 연구에서는 혼성식 직립구조물의 전달계수 산정을 위해 불규칙파를 적용한 2차원 수리실험을 수행하였다. 실험에서는 파고, 주기, 수심, 마루높이, 제체사석의 높이 등을 변화시키면서 전달파고 계측을 실시하였다. 수행된 실험결과를 이용하여 혼성식 직립구조물의 전달계수를 산정할 수 있는 경험식을 제시하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

2차원 수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.2 m, 높이 1.5 m, 길이 50 m의 단면수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 실험에 사용된 실험시설의 제원 및 성능은 Kim and Lee(2015)를 참고할 수 있다.

2.2 실험모형 및 실험조건

본 실험에 적용된 실험단면은 제체사석 위에 무공 직립제가 설치된 혼성제 단면으로서 실험단면의 형상은 Fig. 2와 같다. 구조물 설치수심(h)은 $h = 0.4, 0.5$ m이며, 여유고(R)는 $R = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ m이고, 직립구조물의 폭(B)은 $B = 0.4$ m

이다. 직립제가 설치되는 제체사석의 높이(d')는 $d' = 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ m이고, 제체사석의 사면경사는 1:1.5이며, 20 g/ea의 피복석으로 경사면을 피복하였다. 따라서 제체사석 상단수심(d)은 $d = h - d'$ 이다. 직립제 설치 기준선에서 제체사석 마루 끝단까지의 거리인 근고부 상단폭(B')은 $B' = 0.08$ m이다.

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 이용한 불규칙파를 적용하였으며, 실험에 적용된 목표 유의파고(H_s)는 $H_s = 0.05, 0.075, 0.10, 0.125$ 및 0.15 m이고, 유의파주기(T_s)는 각각의 수심(h)별로 유의파장(L_s)이 $L_s = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 및 4.0 m가 되도록 설정하였다. 전달파고 계측을 위해 구조물 내측 선단으로부터 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 및 5.0 m 지점에 파고계를 설치하였고(Fig. 1의 6번~13번 파고계), 입사파는 Fig. 1의 흡수로내 구조물 설치 위치에 파고계를 설치하고 2점법(Goda and Suzuki, 1976)을 적용하여 분석하였다(Fig. 1의 4번과 5번 파고계). 그리고 반사계수는 경사시작 전의 위치, 즉 조파기 설치수심에서 분석하였다(Fig. 1의 2번과 3번 파고계). Fig. 1의 1번 파고계는 흡수식 조파를 위하여 조파관에 설치된 파고계이다.

Table 1은 본 실험에서 적용한 실험조건을 정리한 것으로서 목표 유의파고(H_s)와 유의파장(L_s)은 구조물 설치 위치에서의 값이다.

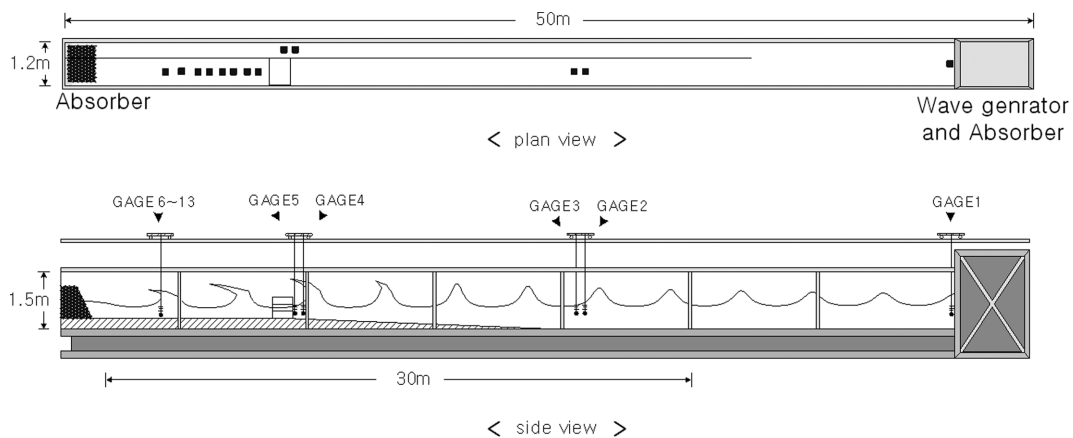


Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

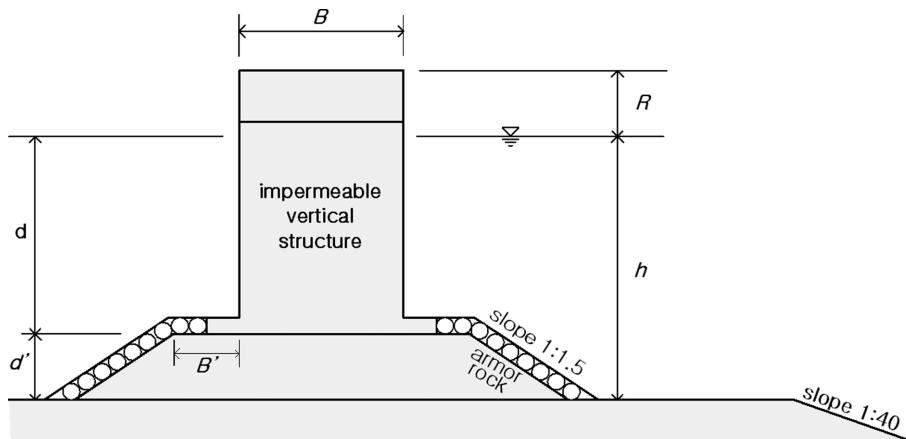


Fig. 2. Schematic sketch of model setup.

Table 1. Summary of test conditions

Test conditions	Properties
Water depth of structure (h)	0.4, 0.5 (m)
Free board (R)	0.05, 0.10, 0.15, 0.20 (m)
Target incident wave height (H_S)	0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15 (m)
Target wave length for each wave period (L_S)	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 (m)
Width of vertical wall (B)	0.40 (m)
Height of rubble mound (d')	0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 (m)
Toe length of vertical structure (B)	0.08 (m)
Weight of armor stone	20 g/ea
$D_{50\%}$ of rubble mound	10.5 (mm)

3. 전달계수 분석 방법 및 기존 연구성과

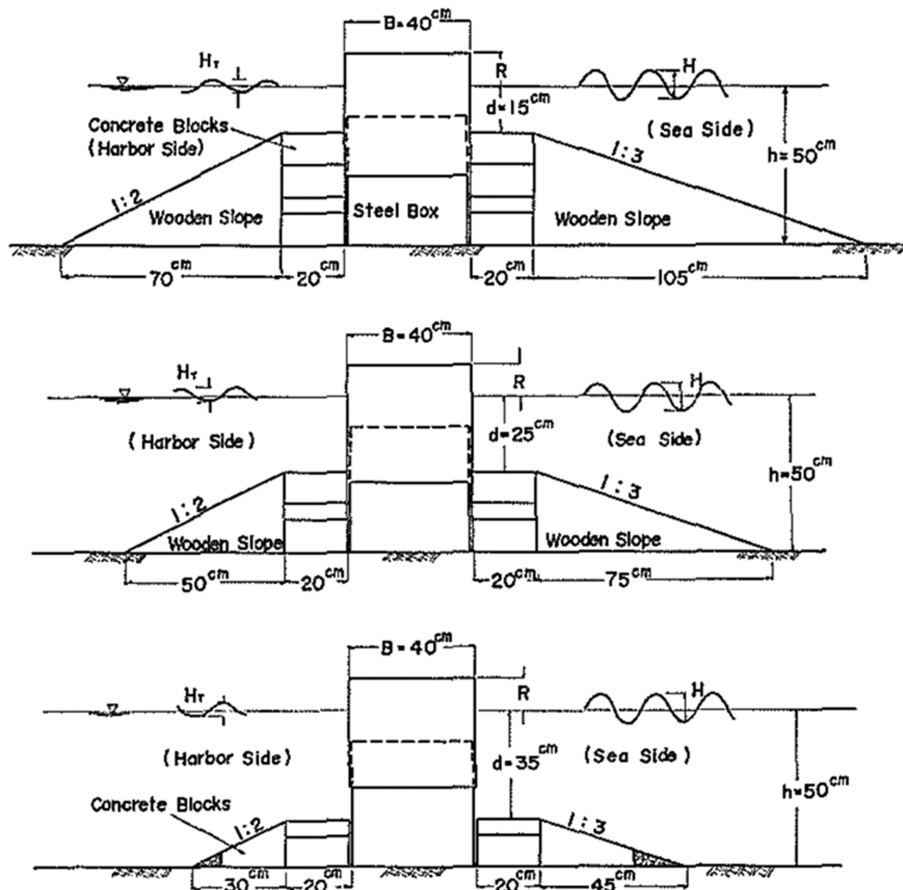
혼성식 직립구조물의 전달계수(K_T)는 월파로 인해 발생되는 전달계수(K_{To})와 제체사석의 투과파로 인한 전달계수(K_{Ti})로 구분할 수 있다. 그리고 이들 두 가지 요소에 의한 전달계수는 식(1)과 같이 정의된다(Goda, 1969; Heijn, 1997; Takahashi, 2002).

$$K_T = \sqrt{K_{To}^2 + K_{Ti}^2} \quad (1)$$

Goda(1969)는 Fig. 3과 같은 혼성방파제를 대상으로 규칙파를 적용하여 전달계수 산정식을 제시하였다. 구조물 설치 수심은 $h = 0.5$ m, 직립제 폭은 $B = 0.4$ m, 제체사석부의

높이는 $d' = 0.15, 0.25, 0.35$ m, 근교부 상단폭은 $B' = 0.2$ m이다. Goda(1969)는 직립제 하부의 기초사석부를 사면경사 1:3인 불투과성 경사면으로 구성하였다. 따라서 전달파고는 월파에 의해서만 발생하며, 제체사석부의 투과파에 의한 전달파는 Ito et al.(1966)의 성과를 활용하였다.

Goda et al.(1967)은 전달파고에 영향을 미치는 변수로 입사파고(H), 여유고(R), 수심(h), 파장(L), 제체사석 상단의 수심(d)을 적용하였으며, 이를 식(2)와 같이 무차원화하여 제시하였다. 식(2)에서 H_r 는 구조물 배후에서 계측된 전달파고이다. 식(2)에서 전달파고에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수는 상대여유고(R/H)이고, 파형경사(H/L)의 영향은 크지 않은 것으로 제시하였다. Goda(1969)는 규칙파를 이용하여 Fig. 3


Fig. 3. Sketch of composite breakwaters (Goda, 1969).

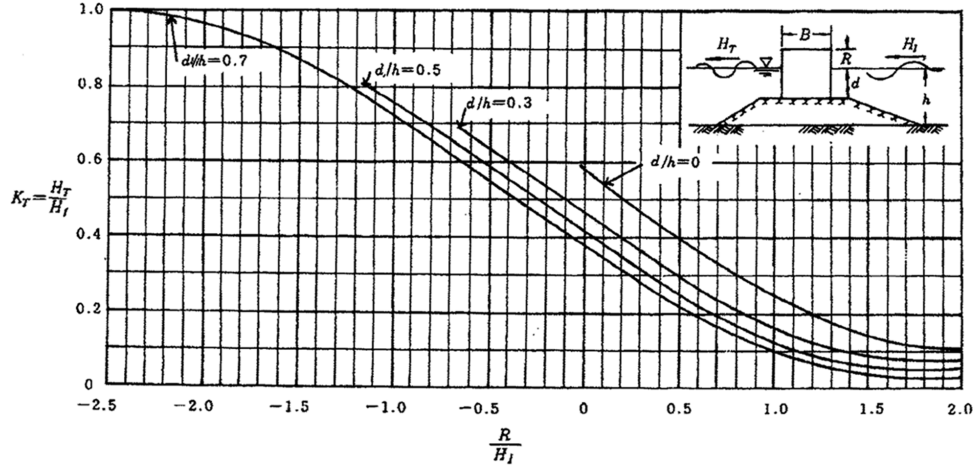


Fig. 4. Wave transmission coefficients of composite breakwater (Goda, 1969).

과 같은 혼성방파제에 대한 전달계수 산정식을 식(3)과 같이 제안하였으며, 이 식은 USACE(2006)에 인용되어 있다. Goda et al.(1967) 및 Goda(1969)는 sine 함수를 이용하여 전달계수를 분석할 경우에 실험결과와 추세선이 가장 잘 부합된다고 제시하였다.

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

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

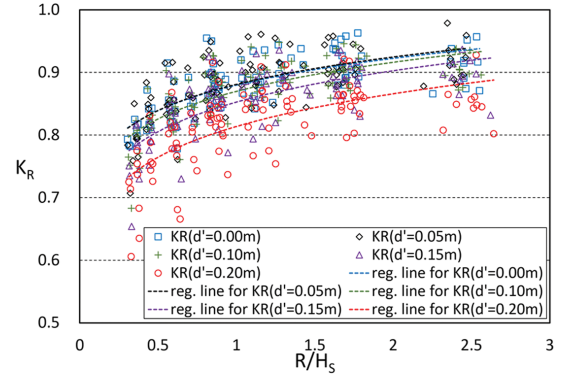
식(3)에서 우변 제곱근 내의 첫 번째 항은 월파에 의한 전달 계수이고, 두 번째 항은 직립제 하부 제체사석의 투과파에 의한 전달계수이다. 그리고 α 와 β 는 실험결과로부터 얻어지는 계수들로서 $\alpha = 2.2$ 이며, β 는 d/h 에 따라 달라진다. 참고로 국내 항만 및 어항 설계기준 해설(MOF, 2024)에는 Fig. 4만 제시되어 있고, 식(3)은 제시되어 있지 않다. 또한 Goda(1969)의 전달계수 산정식은 국내 설계경향과는 달리 제체사석의 높이가 상대적으로 높은 조건을 대상으로 하고 있기 때문에 개선의 여지가 있다.

Takahashi(2002)는 일본의 방파제는 대부분 상대여유고가 $R/H_S = 0.6$ 이며, 가장 일반적인 조건(typical condition)으로 $d/h = 0.6$ 을 적용하여 전달계수는 $K_T = 0.2$ 라고 제시하였다.

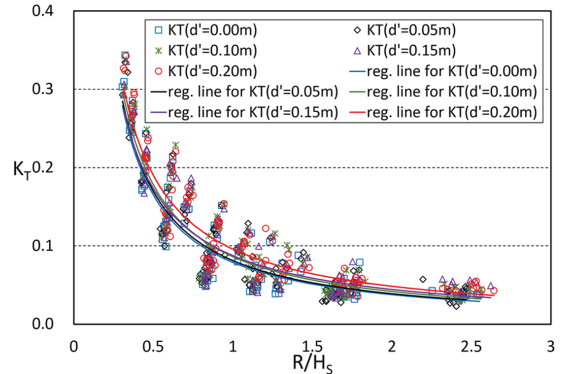
Heijn(1997)은 지수함수의 형태로 전달계수를 제시하였다. 전달계수 산정식의 형태는 식(1)과 같으며, 혼성식 직립구조물의 전달계수는 식(4)와 같이 제시하였다.

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

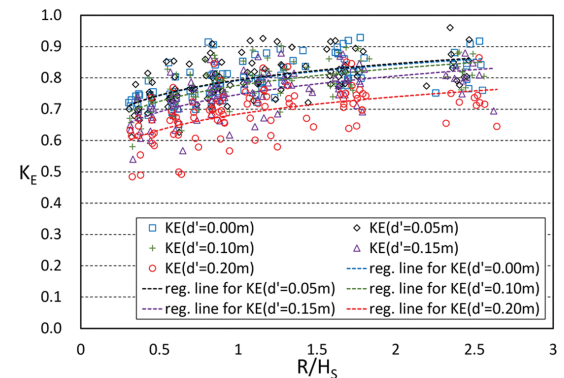
식(4)에서 우변의 제곱근 내 첫 번째 항은 월파에 의한 전달계수이며, 두 번째 항은 Goda(1969)와 동일한 제체사석의 투과파에 의한 전달계수이다. 식(4)에서 직립식구조물의 경우에 $n = 2$, $\alpha = 0.35$, $\beta = 0.15$ 이며, k 는 여유고(R)와 소단에서의 수심(d)에 따른 계수이다.



(a) reflection coefficients



(b) transmission coefficients



(c) energy conservation coefficients

Fig. 5. Experimental results for all test conditions.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 제체사석 상부에 무공 직립구조물이 설치되는 혼성제를 대상으로 월파와 제체투과파로 인한 전달계수를 분석하였다. 전달계수는 구조물에서 월파 등으로 인하여 발생된 전달파고의 크기가 안정화되는 3 m 위치에서의 파고값으로 산정하였다. 월파 발생시 구조물 후면에 수위가 상승할 수 있으므로, 실험분석 구간중 평균수위 상승량을 제외하고 전달파고를 분석하였다.

4.1 제체사석 높이의 영향

전체 제체사석 높이(d')에 따른 반사계수(K_R), 전달계수(K_T) 및 에너지보전계수(K_E , $K_E = K_R^2 + K_T^2$)를 Fig. 5에 도시하였다. 전체적으로 제체사석의 높이에 따라 반사계수, 전달계수

및 에너지보전계수의 변화가 있음을 확인할 수 있다. 제체사석의 높이가 증가함에 따라 반사계수는 감소하고, 전달계수는 증가하는 경향을 보인다. 그리고 에너지보전계수는 반사계수와 유사한 경향을 보였으며, 이는 반사계수가 전달계수에 비해 크기 때문이다. 또한 동일 상대여유고(R/H_S) 조건에서 제체사석의 높이가 높을수록 전달계수는 증가하고, 반사계수는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 에너지보전계수는 제체사석이 설치되지 않은 조건($d' = 0$, $d/h = 1$)의 경우가 다른 조건에 비해 상대적으로 가장 큰 값을 보였다. 이는 제체사석을 통해 투과되는 에너지가 없고, 대부분의 에너지가 구조물에서 반사되어 반사계수가 상대적으로 크기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 파형경사($s = H_S/L_S$)와 상대수심(h/L_S)이 전달계수에 미치는 영향을 제체사석의 높이(d')별로 비교한 것이다. Goda는 전달계수에 미치는 파형경사의 영향

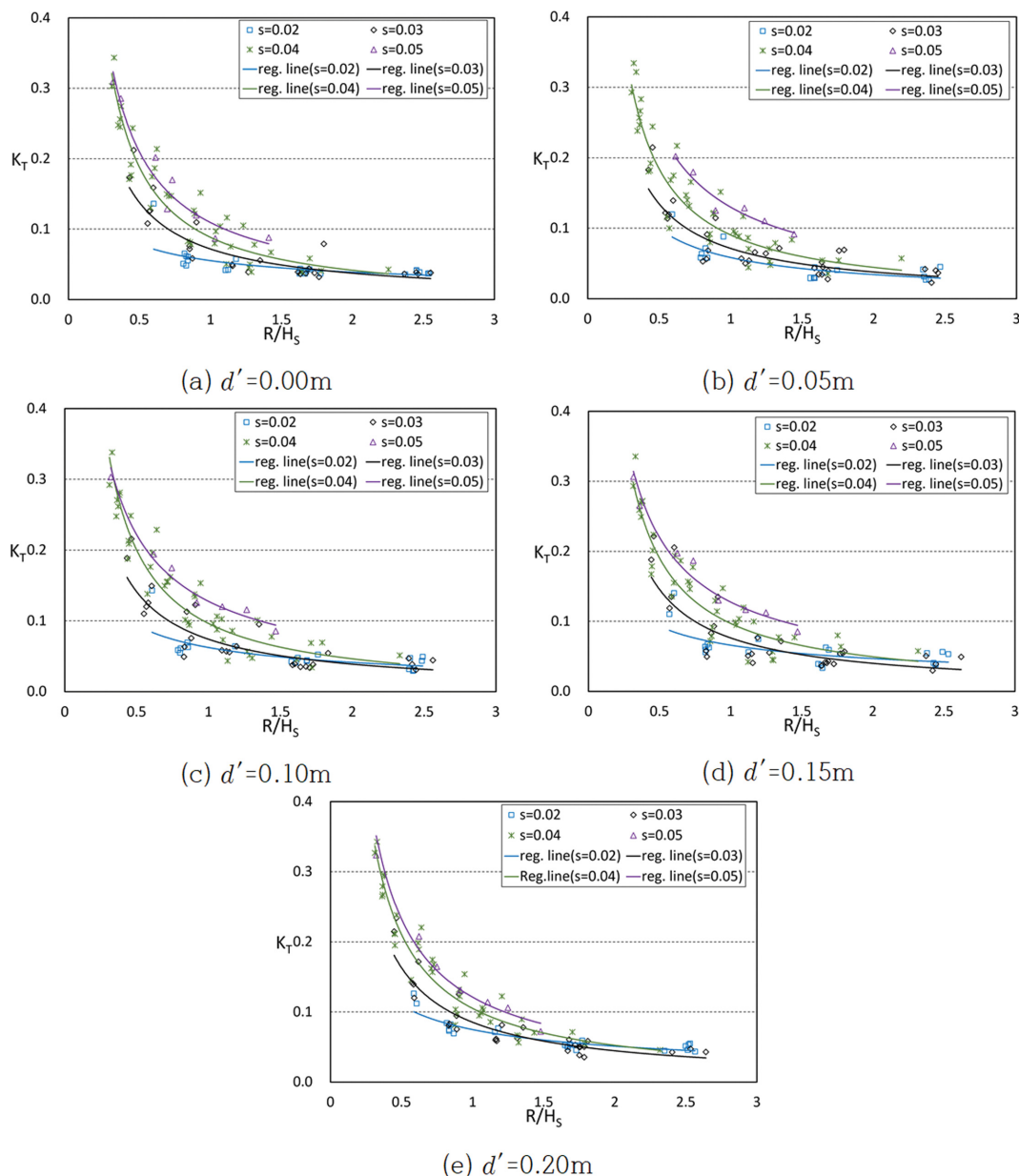


Fig. 6. Effects of wave steepness ($s = H_S/L_S$).

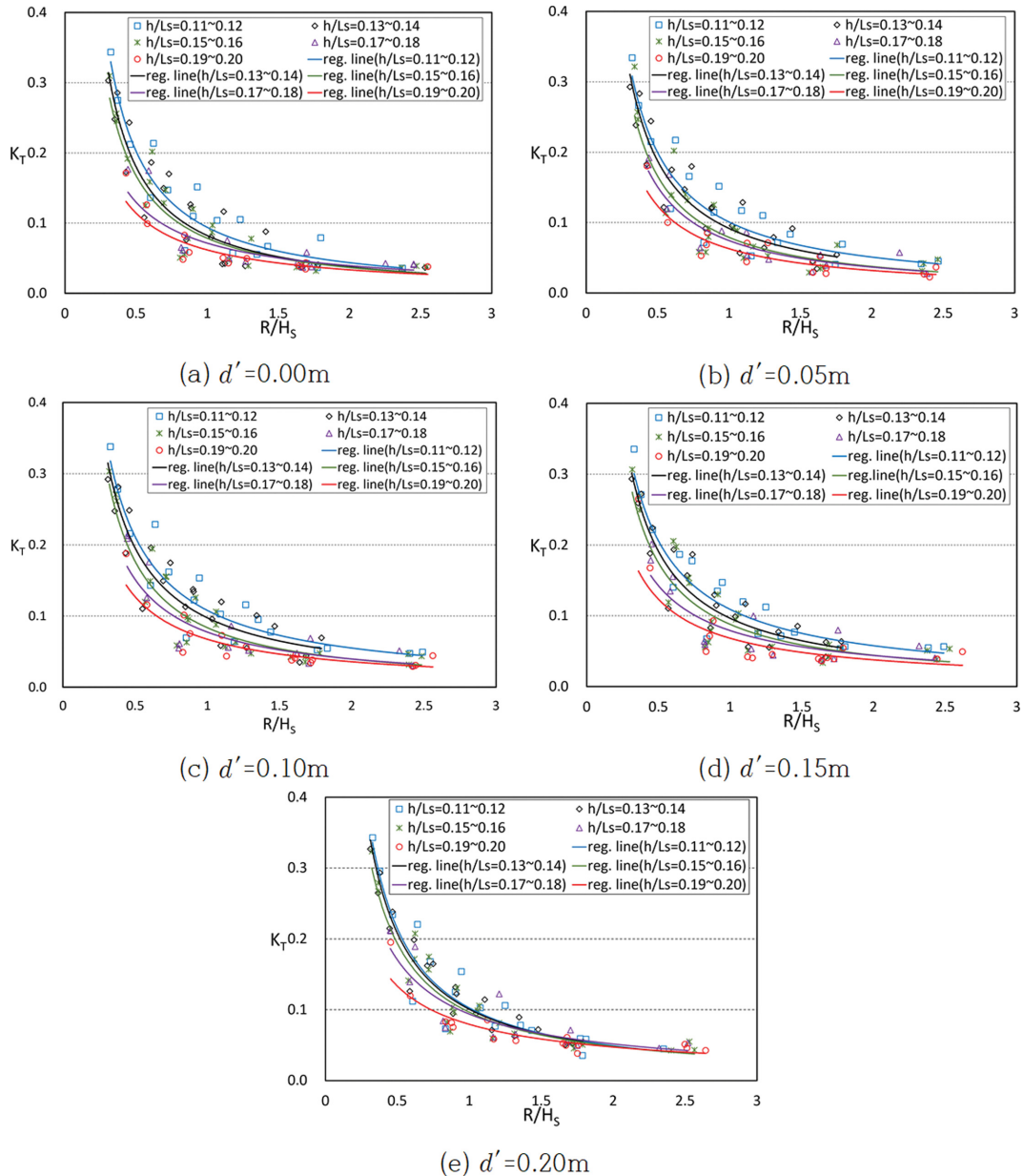


Fig. 7. Effects of relative water depth (h/L_s).

은 크지 않다고 하였으나, 본 실험에서는 파형경사와 상대수심이 전달계수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 동일 제체사석 높이 조건에서 파형경사가 클수록 전달계수는 크게 나타났다으며, 상대수심(h/L)이 작을수록 전달계수는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 파의 주기가 증가할수록 월파량이 증가하고, 제체사석부에서의 투과파가 증가하기 때문이다.

4.2 상대제체수심(d/h)에 따른 회귀분석

제체사석 높이에 따른 전달계수 결과인 Fig. 5(b)를 상대제체수심(d/h)으로 도시하면 Fig. 8과 같으며, 상대제체수심이 증가할수록 전달계수는 감소함을 알 수 있다. 예를 들어, $d/h = 1$ 인 경우는 제체사석이 없는 조건으로서 제체사석에 의한 투과파 영향이 없이 모두 월파로 인한 전달파고만 발생하는 조건이다. 따라서 동일 상대여유고 조건에서 제체사석에

의한 투과파가 포함된 조건($d/h < 1$)에 비해 전달계수가 작게 나타났다. 또한 Goda(1969)의 결과인 Fig. 4에서 $d/h = 0.7$ 과 0.5 에 해당하는 결과를 본 실험결과와 비교하였다. Goda의 결과는 규칙파를 대상으로 하고, 사면경사 1:3의 불투과성 제체사석부를 적용한 결과이기 때문에 본 실험결과와는 차이를 보인다.

Goda(1969)는 규칙파를 적용한 실험결과를 이용하여 sine 함수를 포함하는 전달계수 산정식을 제시하였다. 본 연구에서는 Heijn(1997)의 제안식과 같이 지수함수를 포함하는 경험식을 제시하기 위해 실험결과를 이용한 회귀분석을 실시하였다. 4.1절에서 주기의 영향을 고려할 수 있는 무차원 변수인 H_s/L_s 또는 h/L_s 가 전달계수에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이에 Goda(1969) 및 Heijn(1997)의 제안식에 포함된 무차원 변수인 R/H_s 와 d/h 이외에 주기의 영향을 고려할 수

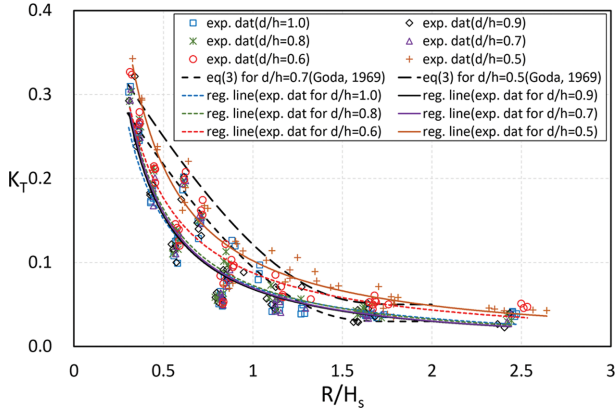
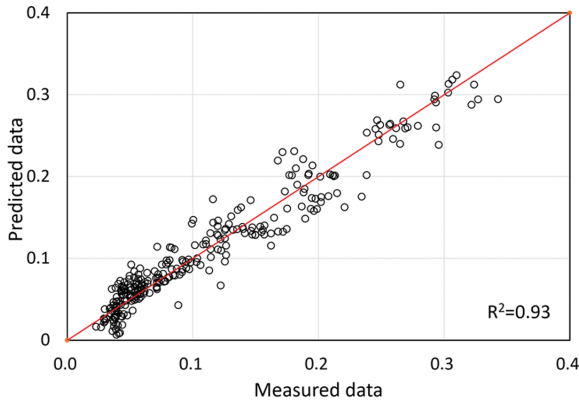


Fig. 8. Comparison of this study and Goda (1969)'s results.

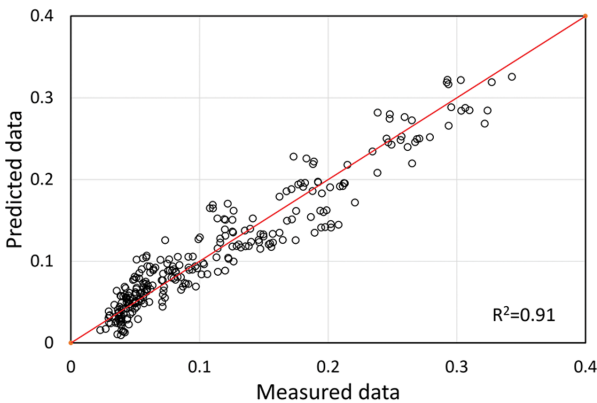
있는 무차원 변수인 H_s/L_s 또는 h/L_s 를 이용하여 비선형 회귀분석을 수행하였고, 각각의 결과는 식(5) 및 식(6)과 같다. 식(5)와 식(6)의 회귀분석시 적용된 무차원 변수들의 범위는 $R/H_s = 0.3 \sim 2.6$, $s(= H_s/L_s) = 0.02 \sim 0.05$, $d/h = 0.5 \sim 1.0$, $h/L_s = 0.11 \sim 0.20$ 이다.

(1) 무차원 변수로 R/H_s , d/h 및 $s(= H_s/L_s)$ 를 적용한 경우

$$K_T = \sqrt{\left\{ 3.17 \exp \left[-1.67 \left(\frac{R}{H_s} \right)^{0.36} s^{-0.24} \right] \right\}^2 + 0.014 \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2} \quad (5)$$



(a) measured data vs predicted data by Eq.(5)



(b) measured data vs predicted data by Eq.(6)

Fig. 9. Comparison of measured and predicted data.

(2) 무차원 변수로 R/H_s , d/h 및 h/L_s 를 적용한 경우

$$K_T = \sqrt{\left\{ 3.22 \exp \left[-5.53 \left(\frac{R}{H_s} \right)^{0.39} \left(\frac{h}{L_s} \right)^{-0.20} \right] \right\}^2 + 0.014 \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2} \quad (6)$$

실험결과와 식(5) 및 식(6)의 상관계수는 각각 $R^2 = 0.93$ 및 $R^2 = 0.91$ 로서 큰 차이를 보이지는 않는다. Fig. 9는 실험결과와 식(5) 및 식(6)으로 예측된 결과를 비교한 것으로서 전체적으로 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 본 실험에서 수행된 d/h 조건별 실험결과와 식(5) 및 식(6)으로 예측된 결과를 비교한 것으로서 전반적으로 실험결과와 예측식에 의한 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 전술한 바와 같이 d/h 가 증가함에 따라, 즉, 제체사석의 높이가 낮아짐에 따라 전달계수는 감소하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

혼성식구조물을 대상으로 한 전달계수 산정과 관련된 연구는 많지 않으며, 국내 항만 및 어항설계기준-해설(MOF, 2024)에는 Goda(1969)의 연구결과가 수록되어 있다. Goda(1969)의 연구결과는 규칙파를 대상으로 한 것으로서 설계시 불규칙파의 적용이 일반화된 점을 감안할 때 이에 대한 개선이 요구된다. 국내 연구로서 Kim and Lee(2015)는 제체사석이 없는($d = h$) 직립구조물을 대상으로 불규칙파를 적용하여 전달계수 산정식을 제안하였으나, 제체사석부에 의한 투과파를 고려하지 못하기 때문에 일반적인 혼성식구조물에 적용하는 데에는 한계가 있다.

본 연구에서는 제체사석 위에 무공 직립구조물이 설치된 혼성식구조물을 대상으로 불규칙파를 적용한 2차원 수리실험을 수행하고, 전달계수를 분석하였다. 본 실험결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구의 결과와 Goda(1969)의 결과를 비교하였으며, 적용 파랑(규칙파, 불규칙파)과 직립구조물 아래 근교부의 형상 및 높이에 따라 전달계수의 차이가 발생함을 확인하였다.
2. 본 실험에서 수행된 무공 직립구조물이 설치된 혼성제의 경우, 전달계수에 영향을 미치는 주요 인자는 상대여유고, 상대 제체상단 수심, 파형경사 및 상대수심인 것으로 나타났다.
3. 본 실험결과로부터 무공 직립식 혼성제의 전달계수를 산정할 수 있는 두 가지의 경험식을 도출하였으며, 두 경험식에 의한 예측결과는 거의 동일하다. 본 연구에서는 상대여유고(R/H_s), 파형경사($s(= H_s/L_s)$), 상대제체수심(d/h)을 변수로 하는 다음과 같은 경험식을 제안하고자 한다. 제안하는 경험식의 적용범위는 $R/H_s = 0.3 \sim 2.6$, $s(= H_s/L_s) = 0.02 \sim 0.05$, $d/h = 0.5 \sim 1.0$ 이다.

$$K_T = \sqrt{\left\{ 3.17 \exp \left[-1.67 \left(\frac{R}{H_s} \right)^{0.36} s^{-0.24} \right] \right\}^2 + 0.014 \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2}$$

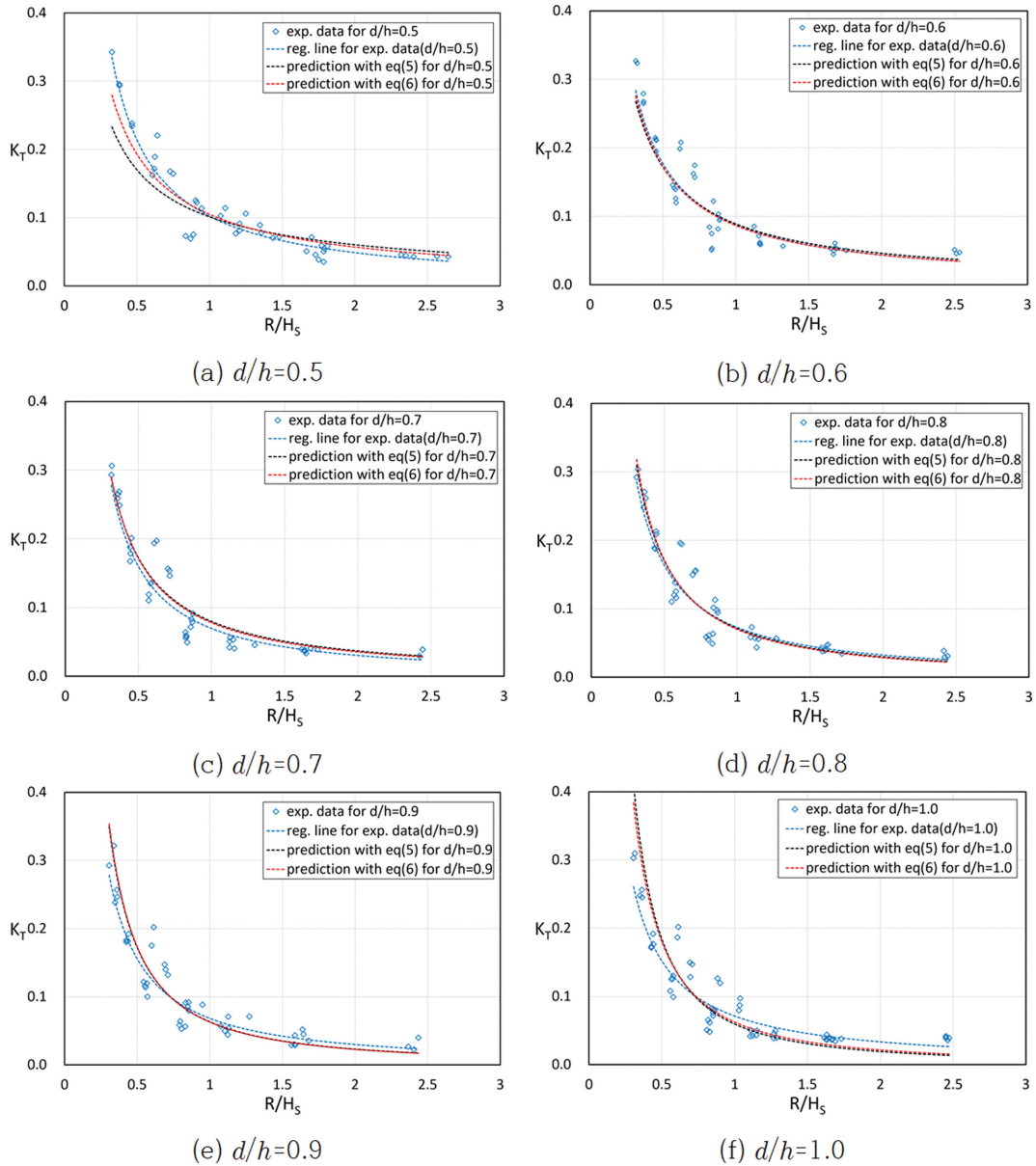


Fig. 10. Comparison of measured and predicted data by d/h .

본 연구에서는 무공 직립구조물 형태의 혼성식구조물에 적용할 수 있는 전달계수 산정식을 제안하였다. 혼성식구조물은 대수심, 고파랑 조건에 많이 사용되고 있으며, 다양한 제체형상이 적용되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서 대상으로 한 무공 직립식 혼성제와 형상이 다른 경우, 경험식의 적용 범위 외의 조건에 대해서는 별도의 실험 등을 통하여 전달계수를 산정할 필요가 있다. 또한 경사입사파 조건 및 다양한 형태의 직립구조물을 대상으로 전달계수 산정을 위한 경험식 도출이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원사업(과제번호: 20250223) 및 해양수산과학기술진흥

지원의 연구비(RS-2022-KS221567) 지원을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Díaz-Carrasco, P., Mares-Nasarre, P., Molines, J., Gómez-Martín, M.E. and Medina J.R. (2025). New design formula to estimate wave transmission on cubipod homogeneous low-crested structures. *Ocean Engineering*, 342, 122866.
- Goda, Y. (1969). Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters. Report of the Port and Harbor Research Institute, 8(3), 3-18.
- Goda, Y., Takeda, H. and Moriya, Y. (1967). Laboratory investigation on wave transmission over breakwaters. Report of the Port and Harbor Research Institute, 13.

- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of 15th Coastal Engineering Conference*, 48, 828-845.
- Hamer, D.G. and Hamer, F.C. (1982). Laboratory experiments on wave transmission by overtopping. *Coastal Engineering*, 6(3), 209-215.
- Hassanpour, N., Vicinanza, D. and Contestabile, P. (2023). Determining wave transmission over rubble-mound breakwaters: Assessment of existing formulae through benchmark testing. *Water*, 15(6), 1111.
- Heijn, K.M. (1997). Wave transmission at vertical breakwaters. MSc-thesis, Delft University of Technology.
- Ito, Y., Fujishima, M. and Kitatani, T. (1966). On the stability of breakwaters. Report of the Port and Harbour Research Institute, 5(14).
- Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R. (1951). The damping action of submerged breakwaters., *EoS, Transactions American Geophysical Union*, 32(5), 704-718.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2015). Hydraulic experiments on transmission coefficients for vertical structure under intermediate water depth condition. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 27(5), 345-352 (in Korean).
- Kramer, M., Zanuttigh, B., van der Meer, J.W., Vidal, C. and Giromella F.X. (2005). Laboratory experiments on low-crested breakwaters. *Coastal Engineering*, 52(10-11), 867-885.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2024). Design standard for harbor and fishery port (in Korean).
- Takahashi, S. (2002). Design of vertical breakwaters. Report of the Port and Harbor Research Institute, 34.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2006). *Coastal Engineering Manual*.
- Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2018). *EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*.
- Van der Meer, J.W., 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(10-11), 915-929.
- Van Gent, M.R., Buis, L., van den Bos, J.P. and Wüthrich, D. (2023). Wave transmission at submerged coastal structures and artificial reefs. *Coastal Engineering*, 184, 104344.
- 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 10 October, 2025

Revised 22 October, 2025

Accepted 23 October, 2025