

기능성블록을 이용한 잠제의 수리학적 특성

손병규*

*국립수산과학원 수산공학팀

The Hydraulic Characteristics of a Submerged Breakwater Covered with Multi-Function Blocks

BYUNG-KYU SOHN*

*Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan, Korea

KEY WORDS: Submerged breakwater 잠제, Wave control 파랑제어, Stability 안정성, Functional block 기능성블록, Wave transmission 파랑전달

ABSTRACT: This paper presents the design of a submerged breakwater, which functions as an eco-structure in a marine environment. Newly patented blocks were used in the submerged breakwater to both make it stable and provide an inhabitable space for fish. To investigate the wave transmission of the proposed submerged breakwater, parametric studies were conducted through two-dimensional hydraulic tests, which were carried out at the National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI) in South Korea. Those parameters are relative crest width (B/L), wave steepness (H/L), relative crest depth (h_B/H), and submerged breakwater configuration. The hydraulic experimental results can be used to predict the performance of the proposed submerged breakwater covered with the multi-function blocks.

1. 서 론

연안시설물 가운데 잠제의 역할은 파랑제어기능 뿐만 아니라, 잠제 배후에서 정온역 확보 및 침식제어로 이용되고 있다. 최근에는 이러한 잠제의 고유한 기능 외에 연안의 수산 자원 조성 및 관리를 위한 어초·어장으로서의 기능도 필요하다는 의견이 대두되고 있는 실정이다.

잠제는 자연 그대로의 해역 경관 유지, 천단상의 유수역을 통한 해수교환을 개선 및 향상시켜 항만 및 어항내 오염방지, 어초로서의 기능을 하는 해양생태의 환경개선 등 다양한 장점을 가지고 있다(김용우 등, 2003).

또한, 생태계 제어 및 조성을 통한 어장환경의 개선과 수산 생물자원의 증식을 위한 기술로는 착저식 및 부유식 어초, 해조초, 도류제, 인공용승구조물, 저질개량구조물 등에 관한 요소기술과 종합적 배치기술을 중심으로 생각할 수 있다(김현주 등, 1996).

현재까지 국내에서는 잠제를 이용한 파랑제어 및 어초기능을 복합적으로 해결할 수 있는 잠제의 구조형식에 대한 설계 및 시공사례가 없을 뿐만 아니라, 연구사례 또한 드물다. 따라서, 잠제의 피복블록으로 널리 이용되는 TPP 대신에 복합적인 기능을 유지할 수 있는 기능성블록을 이용하여 안정성과 파랑제어기능을 2차원 수리모형실험을 통해 기존의 TPP와 비교·검토하여 잠제의 수리학적 특성을 해석하고자 한다. 이를 통해 잠제의 설계·시공과정에서 간과되어온 연안역에서

수산자원 조성 및 관리를 위한 대안 및 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1 기본 수리량의 특성과 차원해석

새로 개발된 기능성블록으로 피복된 잠제의 안정성 및 파랑제어 기능을 검토하기 위한 주요 영향인자는 Fig. 1과 같이 정의할 수 있다. 잠제는 외해로부터 접근하는 파랑에 대해 천단수심, 사면경사 등의 영향으로 파랑에너지의 감쇄가 발생하며, 특히 강제쇄파현상을 일으키기도 한다. 또한, 잠제의 천단폭과 천단수심에 따라 전달율(입사파고에 대한 전달파고의 비)의 변화도 확인할 수 있으며, 식 (1)과 같이 입사파고(H_i), 주기(T), 설치수심(h_i), 천단폭(B), 천단높이(h_B), 공극율(e), 형상계수(S), 사면경사(θ), 점성계수(μ), 유체밀도(ρ), 중력가속도(g), 최대수립자속도(V_{max}) 등을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 점성항의 영향보다 관성항의 영향이 지배적인 중력식 수중방파제에 대한 수리실험이므로, Froude 상사법칙을 적용하였다(손병규와 류청로, 2001).

$$\phi_1(H_i, T, h_i, B, h_B, e, S, \mu, V_{max}, \rho, g) = 0 \quad (1)$$

잠제 배후에서 전달율 K_T 를 종속변수, H_i, g, μ 를 반복변수로 하여 Buckingham π 정리를 이용하여 차원해석하고, 각 무차원량을 물리적 해석이 용이하도록 조정하면 전달율에 대한 영향인자는 다음과 같이 정리될 수 있다.

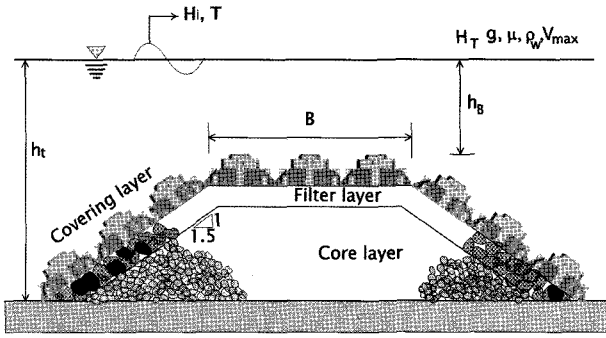


Fig. 1 Proposed submerged breakwater

$$\begin{aligned}
 K_T &= \phi_2 \left(\frac{h_t}{H_i}, \frac{h_b}{H_i}, \frac{B}{H_i}, \frac{gT}{H_i}, \frac{V_{max}}{\sqrt{gH_i}}, \frac{\sqrt{gH_i^3 \rho}}{\mu}, e, S, \theta \right) \\
 &= \phi_2' \left(\frac{h_t}{gT^2}, \frac{h_b}{H_i}, \frac{B}{gT^2}, \frac{H_i}{gT^2}, \frac{V_{max}}{\sqrt{gH_i}}, \frac{\sqrt{gH_i^3}}{\nu}, e, S, \theta \right) \\
 &= \phi_2'' \left(\frac{h_t}{L}, \frac{h_b}{H_i}, \frac{B}{L}, \frac{H_i}{L}, \frac{V_{max}}{\sqrt{gH_i}}, \frac{\sqrt{gH_i^3}}{\nu}, e, S, \theta \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

파랑과 관련된 문제에 대해서는 중력에 비해 점성의 영향은 무시할 만하고, 형상(S)과 공극율($e = 0.51$)이 일정한 기능성 블록을 이용하면, 전달율의 특성은 윗식과 같이 상대수심(h_t/L), 상대천단수심(h_b/H_i), 상대천단폭(B/L), 파형경사(H_i/L)와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다. 차원해석을 통해 얻어진 파라미터는 잠제의 안정성 및 파랑제어의 평가를 위한 평가지표로서 결정하였다.

2.2 실험방법 및 내용

수리실험은 국립수산과학원 2차원 불규칙파 조파수조($1m \times 1.2m \times 30m$, 플러저형)를 이용하였다. 모형의 축척은 Fig. 2와 같이 수조의 크기, 조파기 성능, 실험수위, 수심 및 잠제의 천단고 등을 종합적으로 검토하여 1/40의 정상모형을 사용하였으며, 기능성블록 모형은 비중 2.4를 유지하도록 제작하여 추가로 혼합된 성분이 모형의 한쪽 부분으로 치우쳐 무게중심이 이동하지 않도록 하였다. 또한, 실험수조 내에 잠제를 설치하여 현장조건과 유사하게 하고, 수심변화에 따른 파랑변형을 재현하였으며, 제한된 길이의 수조에 따라 구조물의 설치위치에서 설계파에 해당하는 파랑이 발생되도록 고정상의 일정경사로 조정하였다.

사석은 각각의 입경별로 분리된 쇄석을 사용하여 표면의 오염물질을 제거한 후 시설하였으며, 실험에 사용된 TIP, 기능성블록의 모형, 사석 등은 요구되는 중량에서 $\pm 5\%$ 오차범위 내의 것을 선별하여 사용하였다. 기본적으로 반복실험을 수행하여 실험에 의한 오차를 최소화하였으며, 약 240 Case의 실험을 수행하였다.

수리모형실험에 이용된 TIP의 경우, 소요중량은 다음의 식으로 산정하였으며, 정수면 아래의 블록에 대한 중량은 일반 경사제의 경우보다 작은 것을 사용할 수 있다. 또한 잠제에서

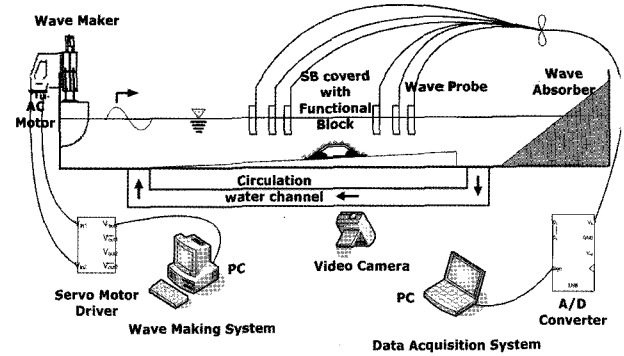


Fig. 2 Experiment layout

발생되는 파랑특성은 입사파 조건 외에 천단수심과 천단폭 등에 크게 영향을 받기 때문에 잠제의 안정성도 이에 따라 일반 경사제와 달리 복잡하므로 피복블록의 소요중량은 수리모형실험으로 검토할 필요가 있다(해양수산부, 1999).

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (3)$$

여기서, W 는 피복석 1개의 중량, γ_r 은 사석이나 블록의 공기중의 단위체적 중량, H 는 설계계산에 이용되는 파고, S_r 은 사석이나 블록의 해수에 대한 비중, θ 는 사면경사, K_D 는 피복석의 형상 및 피해율에 의해 정해지는 상수를 각각 나타낸다. 상술한 소요중량 산정식을 이용하여 설계파고 5m일 때, TIP의 소요중량은 7.1~8.8ton(실중량)이므로, 여기서는 8ton의 TIP를 축척비에 따라 제작·사용하였다.

피복블록의 안정성은 피해율(파괴율)로서 결정하였으며, 피해는 피복블록의 초기위치로부터 그 대표길이 이상의 거리를 이동한 블록을 파괴된 것으로 하며, Rocking 운동은 파괴개수에 포함시키지 않았다. 본 연구에서는 안정계수 N_s 와 Surf similarity parameter ξ 를 이용하여 방파제 사면상의 피해율을 검토한 자료(손병규와 류청로, 2001)와 관련, 피해율 5%이내의 경우에 대해서만 실험을 수행하고, 이때 얻어진 데이터를 이용하여 잠제의 수리학적 특성을 논의하였다.

잠제의 단면 안정성 검토는 사면 피복재의 안정, 피복블록인 기능성블록 모형의 안정 및 제체의 활동을 들 수 있으며, 반사계수는 잠제 설치전과 잠제 배후면에 각각 임의간격으로 설치된 3대의 파고계로부터 독취된 자료를 바탕으로 Goda and Suzuki(1976) 및 Kobayashi and Wurjanto(1993)의 방법으로 산출하였으며, 추출간격은 피크주파수에 따른 간격을 달리하여 Goda(1985)의 방법으로 유효주파수 범위내의 상한값과 하한값에 대응하는 파장으로 구분지어 산출하였다. 전달율은 잠제의 천단수심과 천단폭을 변화시켜 전달율과 관련된 각 파라미터를 검토하였다.

수리모형실험은 잠제의 천단을 통과하는 파랑의 불규칙성 및 쇄파와 같은 비선형성을 포함하였으며, 유의파 주기를 기준으로 1,000파 이상의 실험파를 조파하였으며, 반사계수와

Table 1 Experimental conditions

Terms	W_a (g)	W_f (g)	W_c (g)	Slope	h_t (cm)
Scale	187.5(FB)	18.8	0.6-0.9	1:1.5	37.5
(1:40)	118(TTP)	($W_a/100$)	($W_a/200, W_a/300$)		30.0
$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	$h_t/L_{1/3}$	$H_{1/3}/L_{1/3}$	$B/L_{1/3}$	h_B/H_t
7.17~17.23	1.01~2.35	0.09~0.26	0.02~0.07	0.04~0.27	0.16~1.92

Wave type : Regular, Irregular waves , Spectrum types : JONSWAP, Bottom slope : 1:40

Note: W_a , W_f and W_c are the weight of armour unit for revetment, filter layer, core layer respectively, h_t is the water depth at the toe of the structures, $T_{1/3}$ is the period of incident wave and $H_{1/3}$ is the incident wave height. FB means functional block. All models are scaled with Froude criterion of similitude.

전달과 측정은 조파 후 300파 이후부터 계측된 자료로부터 산정하였다. 1회의 실험이 완료되면 수조내의 흐름이 완전히 정지할 때까지 대기한 후 실험을 재개하였으며, 1회 실험 후 배수하여 단면의 초기화를 이룬 다음에 실험을 실시하고, 모형의 활동 여부는 목시 관측과 디지털 캠코더의 녹화자료를 활용해 분석하였다. 수리모형 실험조건은 Table 1과 같이 구성하였다.

2.3 기능성블록의 개발

TTP와 같은 피복용 블록은 표면이 부드러운 곡면으로 형성되어 어린조개나 해조류의 착생 및 그 생장이 다소 어려운 문제점이 있다. 이로 인해, 이형 소파블록에 의한 잠제의 피복용 구조물이 어류의 은신처 및 산란장을 일차적으로 조성시킨다 하더라도 치어나 치폐의 실질적인 은신 수단과 먹이가 되는 각종 해조류의 착생이 매우 더디게 이루어지고, 그 개체수 또한 빈약하게 되어 기존의 소파블록이 시공된 인근 해역의 어장화 측면에 크게 기여하지 못하는 문제점이 있으며, 특히 암초가 많고 해수가 깨끗하며 갈조류가 풍부한 곳에서 서식하는 전복이나 협소한 바위틈을 선호하는 고가의 해산물 증식이 거의 불가능하게 되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 수중생물의 은신을 위하여 요철 형상의 블록이 형성되도록 하였으며, 수중생물의 은폐와 식생을 위한 내부 공간을 제공토록 함으로서, 연안해역의 어장화 측면에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

특히, 기능성블록은 잠제의 피복블록 시공시 합리적이고 능률적으로 수행되도록 맞물리는 구조로 되어 있으며, 잠제의 표면적을 계산하여 단위면적당 사용 블록 수량을 쉽게 알 수 있을 뿐만 아니라, 1층으로 시공함으로써 시공성, 경제성 효과도 기대된다. 더불어, 규칙적인 요철면이 형성됨으로서 잠제의 고유기능인 파랑제어기능을 더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 기능성블록의 표면이 치폐나 해조류의 포자가 부착되어 식생할 수 있는 표면을 제공함과 동시에 작은 물고기의 은신처를 제공하는 효과 등도 기대된다.

Fig. 4와 같이 기능성블록으로 피복된 잠제 주변 해역이 수중생물의 서식장으로서의 역할을 도모할 수 있도록, 기능성블록은 개발되었으며, 또한, 연안역에서 수산자원의 조성 및 회

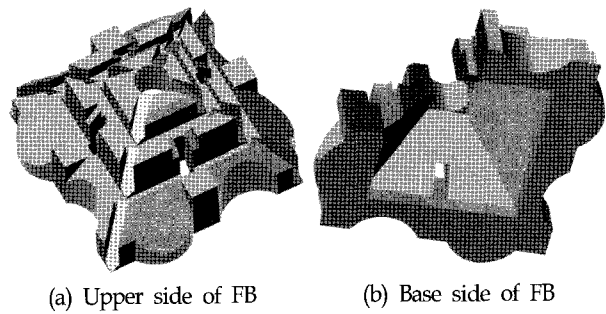


Fig. 3 Functional block for submerged breakwater

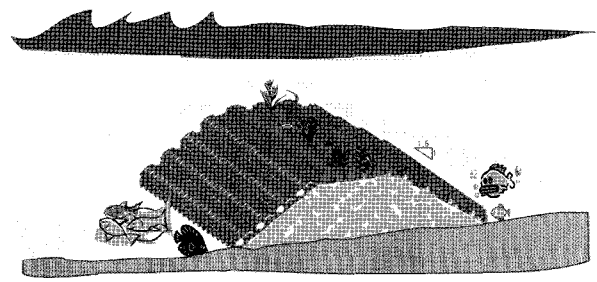


Fig. 4 Submerged breakwater layout for eco-structure

복과 아울러 어류 및 해조류의 서식환경을 위해 “수중방파제용 기능성블록”으로 특허출원하였다.

3. 잠제의 수리학적 특성

3.1 피복블록의 안정성

개발된 기능성블록은 어초와 같이 안정성을 확보할 수 있어야 하므로, 어초의 활동과 전도에 대한 안정성은 다음과 같은 Morison식으로 평가되며, 이 식은 이론적으로는 어느 정도 인정되고 있다(Horikawa, 1979).

$$F = \frac{C_D A w_0}{2g} u^2 + \frac{C_M V w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \tag{3}$$

여기서, 식 (3)의 우변 1항은 흐름의 항력이고, 제2항은 관성

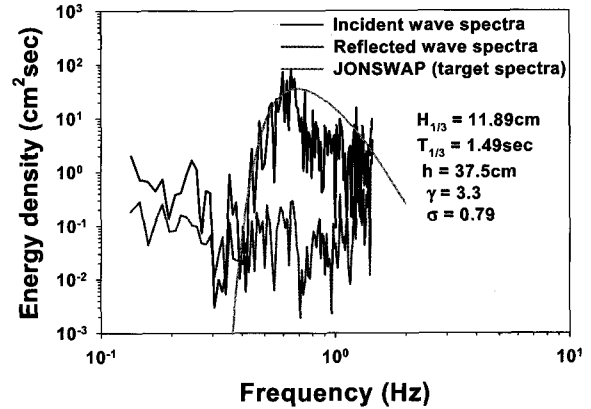
력을 각각 나타낸다. 이 식을 이용하여 각각의 영향인자 가운데 항력계수(C_D) 2.0, 관성력계수(C_M) 2.0, 마찰계수 0.5, 투영면적 $3.56m^2$, 설계파고 6.0m, 주기 12.0sec로 주었을 때, 활동에 대한 안전율은 1.4, 전도에 대한 안전율은 3.2로 각각 나타났다. 그러나, 이들 영향인자에 대해 이론적 검토는 형상계수(∇), 마찰계수, 항력계수, 관성력계수 등 각 계수값들의 정의에 대한 고찰이 필요하며, 어초에 적합한 각각의 계수값을 이론적 또는 실험 등을 통하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 전술한 실험조건 가운데 대표적인 Case에 해당되는 파랑스펙트럼 해석결과를 목표스펙트럼과 관측스펙트럼으로 각각 나타낸 것으로, 입사파주기의 피크치는 실험치와 목표값에는 큰 차이는 없는 것을 알 수 있다. 2차원 조파수조의 수조성능 및 실험파의 제원을 고려하여 수리모형실험을 수행한 결과, Fig. 6과 같이 잠제의 기능중에 한가지인 강제쇄파현상을 뚜렷이 볼 수 있으며, 주어진 실험조건과 설계파에 상당하는 파랑에 대해 안정하였으며, 특히 잠제의 설치지점에서 설계외력에 상당하는 입사파고 6.89m, 주기 12.59sec에서 파괴율은 5% 이내로 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 1999)을 만족하였다. 따라서, 본 연구를 통해 개발된 기능성블록은 설계파에 의한 기존의 TTP의 안정성과 크게 차이는 없는 것으로 판단된다.

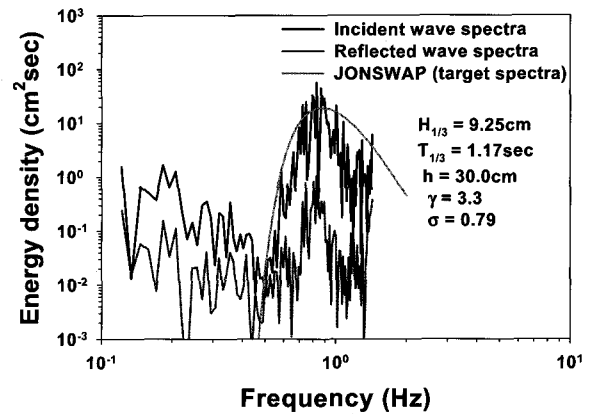
3.2 기능성 블록을 이용한 잠제의 수리특성

Fig. 7과 Fig. 8은 잠제의 천단폭(B)이 파고변화에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로서, 전달율(K_T)과 상대천단폭($B/L_{1/3}$)의 관계를 TTP와 기능성블록(FB)을 피복한 2가지 경우에 대해 상대천단수심($h_B/H_{1/3}$)을 파라메타로 하여 나타낸 것이다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 상대천단폭($B/L_{1/3}$)이 증가함에 따라 전달율(K_T)이 감소하는 전형적인 결과를 알 수 있으며, 상대천단폭($B/L_{1/3}$)이 점차 커질수록 전달율(K_T)의 감소폭은 점차 작아지는 것을 알 수 있고, 상대천단수심($h_B/H_{1/3}$)이 작아질수록 전달율(K_T)이 감소하는 것을 알 수

있다. 이들 그림 가운데 실선과 점선은 회귀분석을 통하여 전달율과 상대천단폭과의 관계를 상대천단수심에 따라 지수함수식으로 나타낸 것이다. 이들 회귀식은 주어진 실험조건에서 전달율의 추정식으로 생각할 수 있다.



(a) Case of $h = 37.5$ cm



(b) Case of $h = 30.0$ cm

Fig. 5 An example of wave spectrum

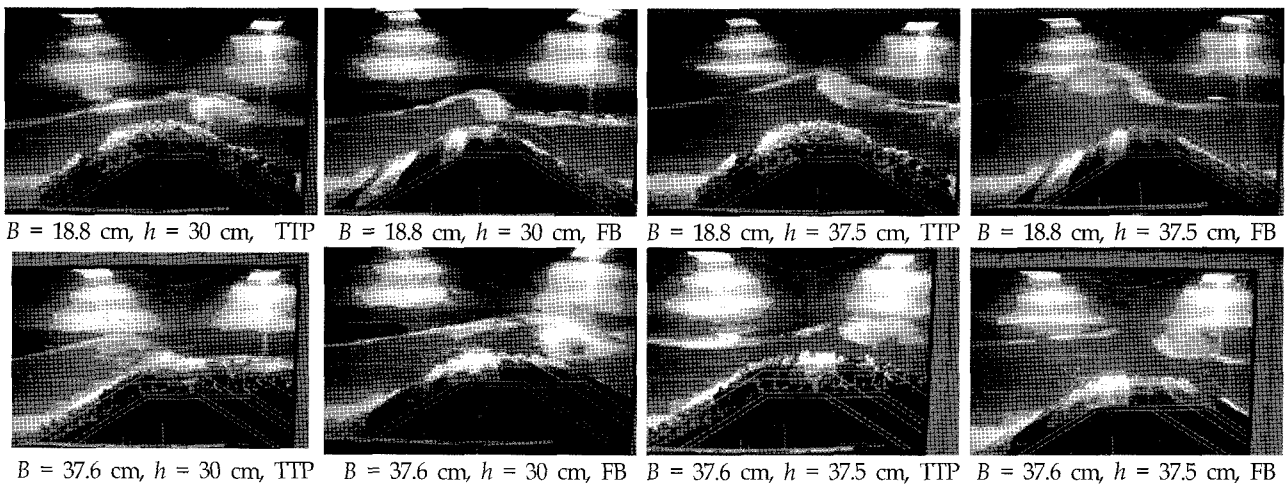


Fig. 6 Stability test with TTP and functional block

3.3 전달율의 추정식

본 연구에서는 TTP와 기능성블록으로 피복된 잠제의 전달율을 구조물의 형상과 수리특성에 대해서 검토하였으며, 전달율의 추정은 식(3)~식(6)과 같이 상대천단수심에 따라 각각 정리할 수 있다. 이들 식은 전달율에 대해 주 영향인자인 상대천단폭을 변수로 하는 지수함수로 나타낸 것이며, 이들 식은 회귀분석을 이용하여 추정하였다.

이들 이론식과 수리모형실험으로 얻어진 전달율과의 관계는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같으며, 상대천단수심에 따라 전달율의 이론치와 실험치를 TTP와 기능성블록에 따라 각각 나타내었다. 이들 그림 가운데 접선은 95% 신뢰구간 예측선을 나타낸 것이며, 또한, 이들 피복블록에 대한 실험치와 이론식에 의한 전달율은 거의 일치하고 있다. 즉, TTP로 피복된 잠제의 전달율과 차이가 없는 기능성블록으로 대체가 가능하며, 또한 실패역에 시공이 가능할 것으로 생각된다. 따라서, 기능성블록은 파랑제어 뿐만 아니라 어초어장의 역할과 더불어 연안

역에서 수산자원 조성의 역할 또한 기대할 수 있다고 판단된다.

$$K_T = 0.6379 + 0.3422 \cdot e^{-11.5988 \cdot B/L} \quad (3)$$

$(h_B/H_{1/3} = 0.58 \sim 1.39, TTP)$

$$K_T = 0.2028 + 0.6230 \cdot e^{-5.4152 \cdot B/L} \quad (4)$$

$(h_B/H_{1/3} = 0.16 \sim 0.33, TTP)$

$$K_T = 0.7596 + 0.2767 \cdot e^{-14.3089 \cdot B/L} \quad (5)$$

$(h_B/H_{1/3} = 0.80 \sim 1.92, FB)$

$$K_T = 0.3472 + 0.5752 \cdot e^{-5.9069 \cdot B/L} \quad (6)$$

$(h_B/H_{1/3} = 0.40 \sim 0.83, FB)$

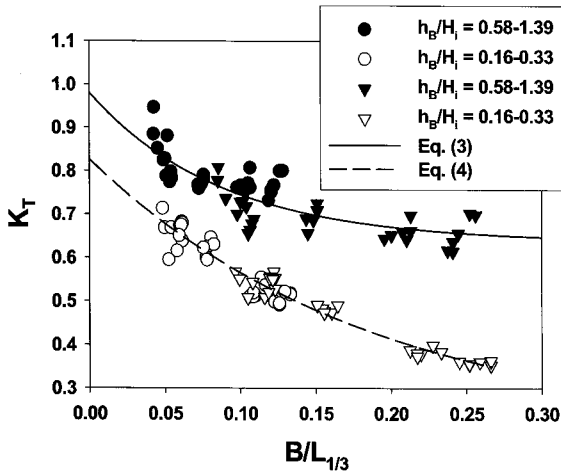


Fig. 7 Relationship between wave transmission and relative crest width (TTP)

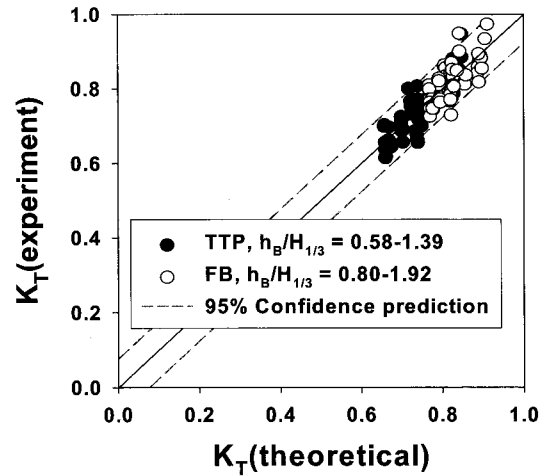


Fig. 9 Comparison between measured and estimated K_T (when relative crest depth is high)

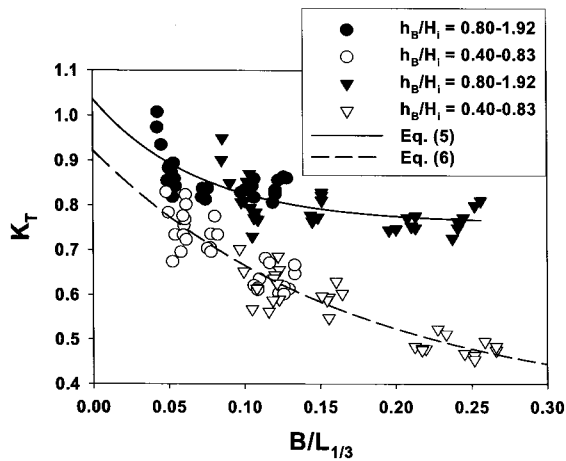


Fig. 8 Relationship between wave transmission and relative crest width (FB)

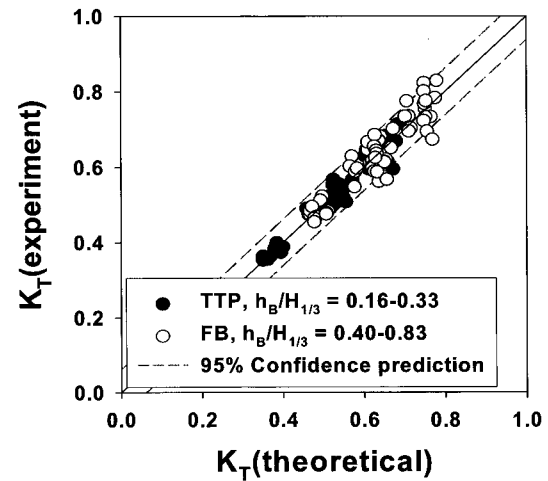


Fig. 10 Comparison between measured and estimated K_T (when relative crest depth is small)

4. 결 론

본 연구에서는 피복블록으로 널리 이용되는 TTP와 특허출원된 기능성블록으로 피복된 잠제의 전달율에 관한 수리특성을 2차원 수리모형실험으로 평가하였으며, 기능성블록은 수중생물의 서식환경에 적합하도록 개발되었다.

기능성블록은 Morison식에 의해 안전율을 검토한 결과, 활동에 대한 안전율 1.4, 전도에 대한 안전율 3.2로서 만족하였고, TTP와 기능성블록의 파괴율을 검토한 결과, 피해한계 5% 이내로 만족하였다. 이들 블록을 이용한 전달율은 상대천단폭이 증가함에 따라 전달율이 감소하는 전형적인 결과로 나타났으며, 쇄파에 의한 비선형성 등을 포함하여 이루어진 실험 결과임에도 불구하고 전달율의 추정식은 실험치와 계산치의 비교결과, 차이는 거의 없다. 이들 결과로부터 TTP와 기능성블록은 파랑제어기능과 피해율 등에서는 차이가 없을 것으로 판단되지만, 어초기능, 시공성과 경제성에서는 기능성블록이 우수할 것으로 판단된다.

따라서, 연안시설물 시공시, TTP를 피복하여 잠제배후의 정온역을 확보하는 것보다, 파랑제어 및 어초기능까지 겸비한 기능성블록으로 피복하여 연안역에서 수산자원 조성 및 관리를 위한 대안으로 적용 가능할 것이며, 또한 동해안의 침식방지 공법에도 적용성이 높을 것으로 판단된다. 즉, 기능성블록은 파랑제어 및 어초기능을 복합적으로 해결할 수 있는 잠제의 구조형식에 적합할 것으로 판단된다. 추후, 실험조건 범위를 넓혀 잠제의 전달율 추정식의 신뢰도를 보다 더 높이고자 한다.

참 고 문 헌

- 김용우, 윤한삼, 류청로, 손병규 (2003). "수중 잠제구조물의 파랑 전달율과 안정성 및 기능성 평가", 한국수산학회지, 제36권, 제5호, pp 528-534.
- 김현주, 류청로, 손원식 (1996). "생태계제어 구조물의 파랑제어 효과에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제10권, 제4호, pp 149-159.
- 손병규, 류청로 (2001). "입사파의 방향성효과에 의한 구조물 기초부의 국소세굴에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제21권, 제5-B호, pp 541-550.
- 손병규, 류청로 (2001). "사석방파제의 안정성에 미치는 방향성 효과에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 139-148.
- 해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준.
- Goda, Y. (1985). Random Sea and Design of Marine Structures, University of Tokyo Press, pp 323.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments", Proc. 15th Conf., Coastal Eng., Honolulu, pp 828-845.
- Horikawa, K. (1979). Coastal Engineering, University of Tokyo Press.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1993). "Irregular Wave Reflection and Run-up on Permeable Slopes", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Vol 119, No 5, pp 537-557.

2007년 11월 20일 원고 접수

2007년 12월 7일 최종 수정본 채택