

# 공진수로 내장형 유공방파제의 반사특성에 관한 수치해석 연구

김정석\* · 서지혜\*\* · 이종우\*\*\* · † 박우선

\*\*\* 한국해양대학교 해양과학기술융합학과

\*\*\* 한국해양대학교 건설공학과

† 한국해양과학기술원 연안개발에너지부

## Numerical Analysis of Reflection Characteristics of Perforated Breakwater with a Resonant Channel

Jeong-Seok Kim\* · Ji-Hye Seo\*\* · Joong-Woo Lee\*\*\* · † Woo-Sun Park

\*,\*\* Department of Convergence Study on Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*Division of Civil Engineering and SOST, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

† Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Seoul 426-744, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 공진을 유도하는 수로를 이용한 새로운 개념의 유공방파제를 제안하려 한다. 공진수로에는 유공판을 설치하여 흐름 분리현상에 의한 파랑에너지의 소산을 유도한다. 종래의 수실과 유공벽을 이용한 방파제에 비하여 공진수로 내장형 유공방파제는 두 가지의 장점을 들 수 있는데, 하나는 목표 차단파랑에 따라서 수로의 설계가 용이하며 보다 장주기 파랑에 대하여도 적용이 가능하다. 또 하나는 유공부가 쇄파력이 집중되는 수면부근보다 아래에 위치함으로써 구조적 안정성이 개선된다. 파랑에너지의 소산은 방파제 전면에서의 반사율로서 평가하였고, 수치해석은 선형 포텐셜 이론에 기초한 Galerkin의 유한요소모델을 이용하였다. 수로의 고유주기와 입사파의 주기가 일치하는 부근에서 적절한 에너지 손실을 확인할 수 있었으며 에너지 손실의 양은 수로의 형상, 위치 및 유공율의 영향을 받았다.

**핵심용어** : 파랑의 반사, 공진 수로, 유공방파제, 수치 해석, 유한요소법, 선형 포텐셜

**Abstract** : In this study, a new concept perforated breakwater is proposed, which is having resonant channels. In the channel, perforated plate is installed for dissipating wave energy induced by flow separations. The breakwater has two advantages compared with conventional perforated breakwater having wave chamber with slotted walls. One is easy to control the target wave condition for dissipating wave energy; and the other is having the high structural safety because the structural members are not exposed to impact waves, directly. To evaluate wave reflection characteristics of the proposed breakwater, numerical experiment was carried out by using Galerkin's finite element model based on the linear potential theory. The results indicated that considerable energy dissipation occurs near the resonant period of channel, and wave reflection characteristics are affected by channel shape, location and opening ratio.

**Key words** : wave reflection, resonant channel, perforated breakwater, numerical analysis, finite element method, linear potential

### 1. 서론

최근 국내에서는 제체의 전면에 발생하는 반사파를 감소시키고 작용하는 파력을 저감시키기 위하여 유공방파제의 설치가 증가하는 추세에 있다. 일반적으로 유공방파제에는 제체 전면에 유수실이 설치되며, 유수실 전면에는 파랑이 유수실내로 진출입할 때 흐름분리(flow separation)에 의한 에너지 소산을 유도하기 위한 유공벽이 설치된다. 따라서, 수평 유속이 크게 되는 중복파의 마디(node)가 유공벽에 위치할 때에 큰 소파효

과가 나타나며, 결국, 긴 주기 파랑을 효율적으로 제어하기 위해서는 유수실의 폭을, 즉, 제체의 폭을 넓게 설계해야 만 한다. 제체의 전면에 위치한 유공벽은 쇄파에 의한 충격적인 파압에 노출되어 있어 구조적으로 취약한 곳이기도 하다. 본 연구에서는 이러한 기존의 유공방파제가 안고 있는 문제점에서 자유로운 새로운 방식의 유공방파제에 대해서 연구하였다.

기존의 유공방파제에 대한 연구를 살펴보면 대부분 파랑에너지 소모 메카니즘의 규명과 이를 수학적으로 어떻게 적절히 모델화할 수 있는냐에 집중되어 있다. Kondo(1979)는 이중 유

† Corresponding author : wspark@kiost.ac 031)400-6325

\* 연회원, js\_kim@kmou.ac.kr 042)866-3972

\*\* 연회원, jjelaby@kiost.ac 031)400-6339

\*\*\* 종신회원, jwlee@kmou.ac.kr 051)410-4461

(주) 이 논문은 “Wave Reflection from Perforated Breakwaters Having Resonant Channels”란 제목으로 “2014 International Ocean and Polar Engineering Conference (Busan, 2014.6.15-20. pp. 890-896)”에 발표되었음.

공벽의 소파능력에 관하여 연구를 수행하였으며, Kakuno and Oda(1986), 그리고 Martin and Dalrymple(1988)은 파랑과 원통형 구조물과의 상호작용을 분석함으로써 반사파를 저감시키기 위한 형상에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Kakuno et al(1992)은 원통형 구조물의 배열과 그 후면에 벽체를 두어 지금의 일반적인 유공방파제의 형상과 유사한 구조물에 관한 연구를 수행하였다. Park et al(1993)은 해저마운드 상단에 위치한 수실과 유공벽을 갖는 직립식 유공방파제에 관하여 소파효율과 방파제의 형상에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, Suh and Park(1995)은 유공벽을 갖는 직립식 케이슨 방파제의 수치해석방법에 대해서 연구하였다. Fujita et al(2003)은 L-형상의 격벽을 적용한 유공방파제의 반사파 저감 효과에 관한 연구를 수행하였다. Suh et al(2006)은 기 연구된 Suh and Park(1995)의 유공방파제에 대하여 불규칙 파랑 하에서의 반사 특성에 관하여 연구하였다. Lee et al(2011)은 제체 후면으로 파랑의 투과를 허용하여 반사파를 저감하는 원통형 슬릿형 태의 방파제의 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 이러한 기존의 연구결과에 기초하여 새로이 제안된 유공방파제를 수치모델을 이용하여 반사특성을 평가하였다. Fig. 1에 새로이 제안된 공진수로 내장형 유공방파제 개념도를 나타내었다(Park et al., 2014). 이 방파제의 주 소파 메카니즘은 방파제 케이슨에 내장된 수로내 수주가 공진할 때 발생하는 유속강화를 이용하여 수로내에 설치된 유공판에서의 에너지 소모를 극대화하는 것이다. 공진수로 내장형 유공방파제의 반사특성을 평가하기 위하여 선형포텐셜에 기초한 Galerkin의 유한요소모델(Kim, 1998)을 이용하여 수치실험을 실시하였다. 수로의 폭, 수로 유입구의 위치 및 유공판의 유공율 등의 핵심 변수에 따른 수치실험을 실시하였으며, 다중 수로를 적용 효율성에 대한 평가도 수행하였다.

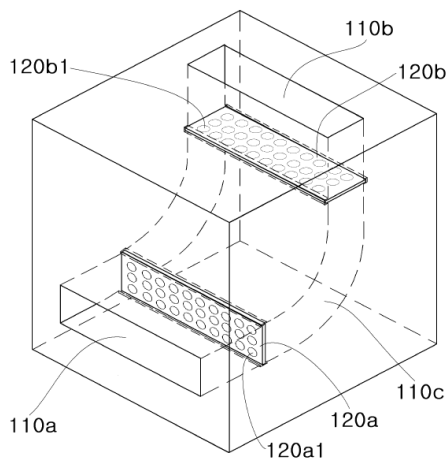


Fig. 1 Conceptual sketch for a perforated caisson with a resonant channel(Park et al., 2014)

## 2. 수학적 모델

### 2.1 파랑 운동

연직 2차원에서의 규칙파에 대한 파동장은 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고 비회전류를 가정하는 포텐셜 이론을 사용하여 나타내었다. 포텐셜이론에 의하면 전 파동장은 다음의 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜  $\Phi$ 로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

Fig. 2와 같이 정의한 각 경계면, 즉, 자유수면( $S_f$ ) 및 불투과 경계면( $S_b$ )에서는 다음과 같이 경계조건이 주어진다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad \text{on } S_f, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_b \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수,  $g$ 는 중력가속도이다.

속도포텐셜  $\Phi$ 가 시간에 따라 조화운동을 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \text{Re}[\phi e^{-i\omega t}] \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ 는 속도포텐셜의 복소수 진폭성분을 나타내며,  $\text{Re}[\cdot]$ 는  $[\ ]$ 안 복소수 성분의 실수 값을 의미한다.

방파제로부터 반사된 반사파는 무한 경계에서 다음의 방사 조건을 만족하여야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi_R = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\phi_R$ 은 반사파 속도포텐셜이며,  $k$ 는 파수를 나타낸다.

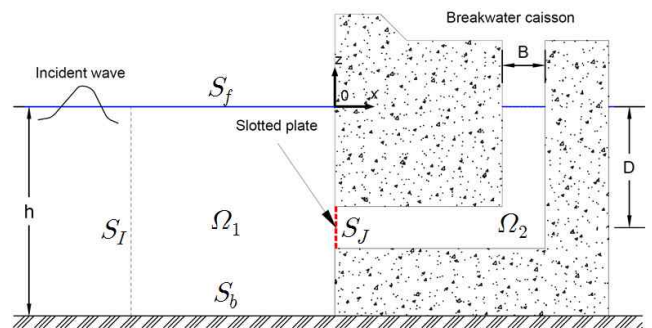


Fig. 2 Definition of sketch a perforated breakwater having a resonant channel(PBRC)

유공판에서의 흐름분리현상에 의한 에너지 손실은 Mei (1989)가 제안한 정합조건(Mei, 1989)을 이용하여 모델링할 수 있다. 즉,

$$u_1 = u_2 \quad \text{on } S_J \quad (5a)$$

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}\alpha u_2 |u_2| + \int_l \frac{\partial u_2}{\partial t} dl \quad \text{on } S_J \quad (5b)$$

여기서,  $u$ 는 유공판에서의 유체 속도;  $p$ 는 동압력;  $\rho$ 는 유체의 밀도;  $\alpha$ 는 단면의 변화에 따른 에너지 손실계수;  $l$ 은 유공판을 통과하는 제트류의 길이;  $t$ 는 시간을 나타내며, 하첨자 1과 2는 유공벽의 좌우측을 의미한다.

슬롯형태의 유공판에서 흐름분리 현상에 의하여 발생하는 에너지의 손실계수  $\alpha$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다(Hattori, 1979; Kondo, 1989; Meri, 1989).

$$\alpha = \left( \frac{1}{\gamma C_c} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

여기서,  $\gamma$ 는 유공부의 공극률;  $C_c$ 는 실험적 축소계수이다. Hattori(1979)는  $C_c = 0.4-0.75$ 로 제안하였고, Kim(1998)은 수리 실험과 수치해석 결과의 비교를 통하여  $C_c$ 는 사각형 기둥인 경우에는 0.7, 원형 기둥인 경우에는 0.95를 추천하였다.

제트류의 길이  $l$ 은 다음과 같이 차단계수  $C$ 의 2배로 표현되며(Kim, 1998),

$$l = 2C \quad (7)$$

직사각형 기둥의 경우, 차단계수  $C$ 는 다음과 같이 주어진다 (Taylor, 1973; Kakuno and Liu, 1993).

$$C = \frac{d}{2} \left( \frac{1}{\epsilon} - 1 \right) + \frac{2A}{\pi} \left[ 1 - \log(4\epsilon) + \frac{1}{3}\epsilon^2 + \frac{281}{180}\epsilon^4 \right] \quad (8)$$

여기서,  $d$ 는 통과하는 흐름과 나란한 방향에 대한 직사각형 기둥의 두께,  $A$ 는 파일의 폭,  $\epsilon$ 은 유공율을 나타내며 본 식은 유공율  $\epsilon$ 이 0.6보다 작은 경우에 유효하다.

## 2.2 정합조건의 선형화

해석의 효율성을 위하여, 식 (5b)에 주어진 비선형 정합조건을 선형화하였다. 세 번째 항은 유공판에서의 제트류의 가속도가 일정하다는 가정으로 선형화하였으며, 두 번째 항은 Lorentz 변화를 이용하여 다음과 같이 선형화하였다.

$$\frac{1}{2}\alpha u_2 |u_2| = \beta u_2 \quad (9a)$$

$$\beta = \frac{4}{3\pi} \overline{u_2} \quad (9b)$$

여기서,  $\beta$  = 선형화된 손실계수;  $\overline{u_2}$  = 유공판에서의 유속  $u_2$ 의 진폭을 나타낸다.

식 (9)를 식(5)에 대입하면 정합조건은 다음과 같이 단순화된다.

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{1}{l + \frac{i\beta}{\omega}} (\phi_2 - \phi_1) \quad (10)$$

## 2.3 수로 내부의 유체 운동

수로 내부의 유체 운동은 단자유도 시스템으로 구성하였고, 유체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_c \ddot{z}_c + k_c z_c = F_c \quad (11)$$

여기서,  $\ddot{z}_c$ ,  $z_c$ 는 수로 내부의 유체의 가속도와 변위;  $M_c = \rho B L_c$ ;  $k_c = \rho g B$ ;  $F_c = p_c B$ ;  $L_c$ 는 공진수로의 길이;  $p_c$ 는 공진수로의 입구에서의 입사파와 반사파에 의한 유체동압력이다. 수로 내부의 유체의 고유주파수  $\omega_n$ 은  $\sqrt{k_c/M_c}$ 이며, 이에 해당하는 수로의 고유주기  $T_n$ 는 다음과 같다.

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{L_c}{g}} \quad (12)$$

## 3. 유한요소모델

### 3.1 파동장의 이산화

식(1)의 지배방정식 및 식(2), (4)의 경계조건과 선형화된 유공판에서의 압력연속조건인 식(10)로 정의되는 경계치 문제를 이산화하기 위하여 Galerkin 기법을 이용하였다. 즉, 파동장을 유한요소로 분할하고 각 요소내의 속도포텐셜,  $\phi$ 을 다음과 같이 보간함수,  $N_\phi$ 와 절점 포텐셜,  $\phi^e$ 로 나타내면

$$\phi = N_\phi^T \phi^e \quad (13)$$

경계치문제는 다음과 같은 요소 잔차,  $R^e$ 의 합을 최소화하는 문제로 바뀌며,

$$R^e = \int_{\Omega^e} N_\phi [\nabla^2 \phi] d\Omega^e \quad (14)$$

결국, 다음과 같은 선형 행렬방정식으로 변하게 된다.

$$\sum_e K_{\phi\phi} \phi^e = \sum_e f_{\phi}^e \quad (15)$$

여기서, 식(15)은 다음의 식(16)과 (17)에 의하여 구성된다.

$$K_{\phi\phi} = \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial N_{\phi}}{\partial x} \frac{\partial N_{\phi}^T}{\partial x} + \frac{\partial N_{\phi}}{\partial z} \frac{\partial N_{\phi}^T}{\partial z} \right) d\Omega^e - \int_{S_f^e} \frac{\omega^2}{g} N_{\phi} N_{\phi}^T dS_f^e - \int_{S_f^e} \frac{1}{\left( l + \frac{i\beta}{\omega} \right)} N_{\phi} N_{\phi}^T dS_f^e \quad (16)$$

$$f_{\phi}^e = \int_{S_f^e} N_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial n} dS_f^e \quad (17)$$

여기서, 하첨자  $e$ 는 하나의 요소에 대하여 적분의 형태를 취함을 의미한다.

### 3.2 유한, 무한 및 접합 요소

해석영역의 내부영역은 8절점 등매개변수 유한요소로 이산화하였고, 외부영역은 효율적인 해석을 수행하기 위하여 무한요소로 분할하였다. 또한, 관심영역을 벗어나 전달파가 진행되는 영역도 무한요소로 처리하였다. Fig. 3에 개념적인 유한요소망을 제시하였으며, 영역분할에는 8절점 유한요소와 2절점 무한요소 그리고 유공판을 통과하는 유동장의 접합 경계는 6절점 접합요소를 사용하였다.

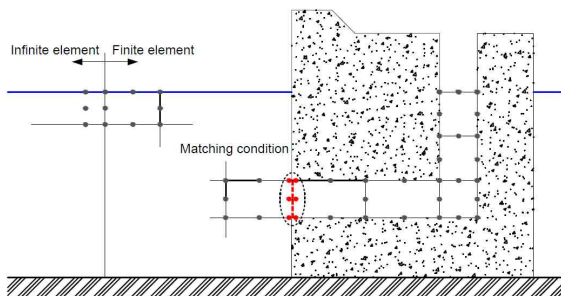


Fig. 3 Conceptual finite, infinite and joint element meshes

## 4. 수치시뮬레이션

공진수로 내장형 유공방파제의 반사특성을 살펴보기 위하여 다양한 설계변수의 변화에 따른 수치해석을 실시하였다. 반사율에 영향을 미칠 것으로 예상되는 수로의 형상에 관한 핵심 설계변수로 길이( $L_c$ ), 폭( $B$ ), 수로 입구의 깊이( $D$ ), 유공판의 공극률( $P$ ) 그리고 수로 개수 등을 고려하였다.

### 4.1 수치실험용 유공방파제 설계

수치실험을 위한 표준 공진수로 내장형 유공방파제를 Fig. 4와 같이 설계하여 적용하였다. 수심 15m 평탄 수심에 사석마운드 없이 유공케이슨을 직접 설치하는 것으로 하였으며, 케이

슨에 내장된 수로의 폭은 일정하고 입구는 수평, 출구는 연직 방향으로 향하는 것으로 설계하였다. 파랑에너지 소모를 위한 유공판은 수로의 입구쪽에 위치하도록 하였으며, 직사각형 단면의 기둥으로 구성된 연직 슬릿형 유공판을 적용하는 것으로 하였다.

주된 소파 대상주기는 7초, 파고는 2m로 설정하였다.

### 4.2 유한요소모델의 격자

방파제 전면 및 수로 내부의 유동장은 유한요소로 이산화하였고, 방사조건은 무한요소를 이용하여 모델링 하였다. Fig. 4에 공진수로 내장형 유공방파제에 대한 유한요소격자망을 제시하였다. 총 1152개의 유한요소와 36개의 무한요소로 유동장을 이산화 하였으며, 유한요소는 하나의 입사파 파장당 요소 6개 이상이 배치될 수 있도록 구성하였다.

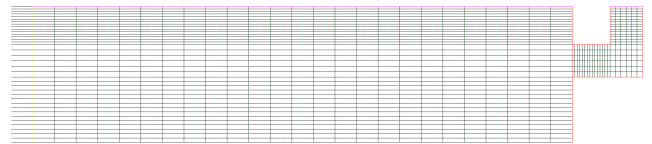


Fig. 4 Finite element meshes of perforated breakwater with a resonant channel

### 4.2 단 수로 내장형 유공방파제의 반사특성

단 수로 내장형 유공방파제의 반사파의 특성을 분석하기 위하여 일정 수심( $h$ ) 15m에서의 입사파와 수로 고유주기의 비 ( $T_w/T_{ch}$ )에 대하여 다음의 조건에 대한 수치해석을 수행하였다 ( $D/h=0.2-0.6$ ;  $B/L_c=0.1-0.3$ ;  $P=0.1-0.6$ ).

수치해석의 표준 모델의 형상은 Fig. 1에 도시한 모델을 바탕으로  $B/L_c=0.2$ ,  $D/h=0.4$ 이며, 유공판은 방파제 전면의 수실 입구에 위치시켰다. 본 모델의 입사파주기 변화에 따른 반사율을 유공율에 대하여 Fig. 5에 나타내었다.

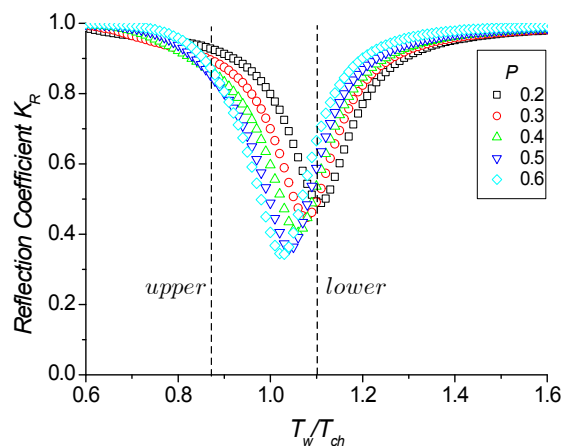


Fig. 5 Reflection coefficient of perforated breakwater with a resonant channel ( $D/h=0.4$ ,  $B/L_c=0.2$ )

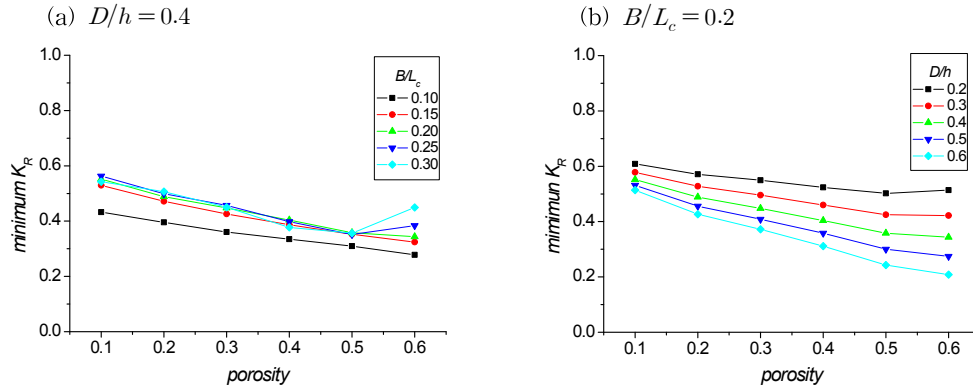


Fig. 6 Minimum reflection coefficient according to porosity at perforated breakwater with a resonant channel

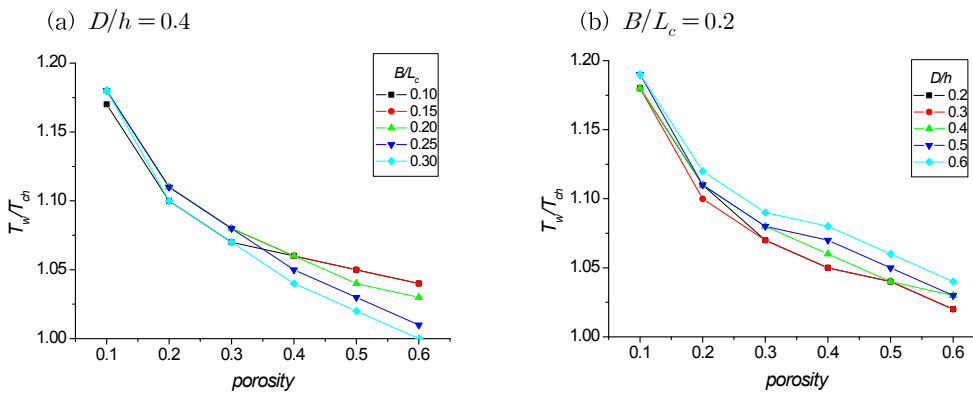


Fig. 7 Resonant period according to porosity at perforated breakwater with a resonant channel

수로 내부의 고유주기는 수로 단면의 중심부의 길이에 의해 결정된다(식(12)). 각 수로의 고유주기 특성에 대한 분석을 위하여 수로의 측면방향 단면의 상단부에 해당하는 길이와 하단부에 해당하는 길이 각각에 대해 고유주기를 산정하였고, Fig. 5에 점선으로 나타내었다. 입사파와 수로의 고유주기가 일치하는 공진조건( $T_w/T_{ch}=1$ )의 부근에서 최소 반사계수가 나타났고, 그 경향은 유공율( $P$ )의 영향을 받았다. 본 분석을 위하여 표준 모델을 기준으로 여러 형상을 고려하였다.

#### 4.3 최소 반사율 및 공진주기

각 형상에서의 유공율 별 최소 반사율을 Fig. 6에 나타내었다. 가장 낮은 반사율계수는 폭이 좁은 수실형상( $B/L_c=0.1$ )에서 나타났지만, 수실의 폭이 최소 반사율에 작용하는 영향은 작았다(Fig.6 (a)). 수실의 입구( $D/h=0.6$ )인 조건에서 가장 작은 반사율이 나타났으며, 유공율이 클수록 최소 반사율의 감소에 영향이 큰 것으로 나타났다(Fig. 6(b)).

최소 반사율이 나타나는 입사파의 주기와 수로의 고유주기의 비( $T_w/T_{ch}$ )를 Fig. 7에 나타내었다. 수실의 폭과 입구가 위치한 수심의 변화는 최소 반사율이 발생하는 공진이 발생하는 주기에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이에 지배적인 영향은 유공율로 나타났으며, 유공율이 작을수록 수로 내부로 유입되는 흐름이 원활하지 않기 때문에 더욱 긴 주기의 입사파랑에서 공진현상이 발생하며, 유공율이 클수록 수로

의 고유주기와 입사파의 주기가 일치하는 조건( $T_w/T_{ch}=1$ )에 근접한 주기에서 공진현상이 발생하였다. 또한 유공율의 변화에 따라 공진이 발생하는 주기대역은  $T_w/T_{ch}=1$ 을 기점으로 더욱 긴 주기에서도 발생하였지만, 그보다 짧은 주기에서는 최소 반사율이 나타나지 않았다.

본 결과로부터 차단하려는 파랑 중 반사파의 감소효과를 발휘할 수 있는 수로의 설계가 가능함을 확인하였다. 또한 작은 유공율을 적용함으로써 최소 반사율을 나타내는 주기 대역을 더욱 장주기로 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4.4 관심 주기대역에서의 반사특성 평가

반사율의 감소는 수로의 고유주기와 입사파주기가 일치할 때에 가장 크게 나타났고, 이를 중심으로 일정 주기대역에서도 고려할만한 반사율의 감소효과를 보였다(Fig. 5). 따라서 다양한 입사파의 주기에 따른 반사율 감소효과를 효과적으로 평가하기 위하여 입사파주기와 수로의 고유주기의 비( $T_w/T_{ch}=0.6-1.6$ )에서의 반사율 계수가 감소된 양을 비교하였다(Fig. 8). 이를 수로의 폭과 길이의 비( $B/L_c$ )와 유공율( $P$ )에 따라 분류하였다.

파랑에너지를 유도하는 수로의 입구가 수면부근에 위치할수록 반사율 감소량이 높았지만 큰 차이를 보이지 않았고, 입구의 위치에 의한 영향은 작았다.

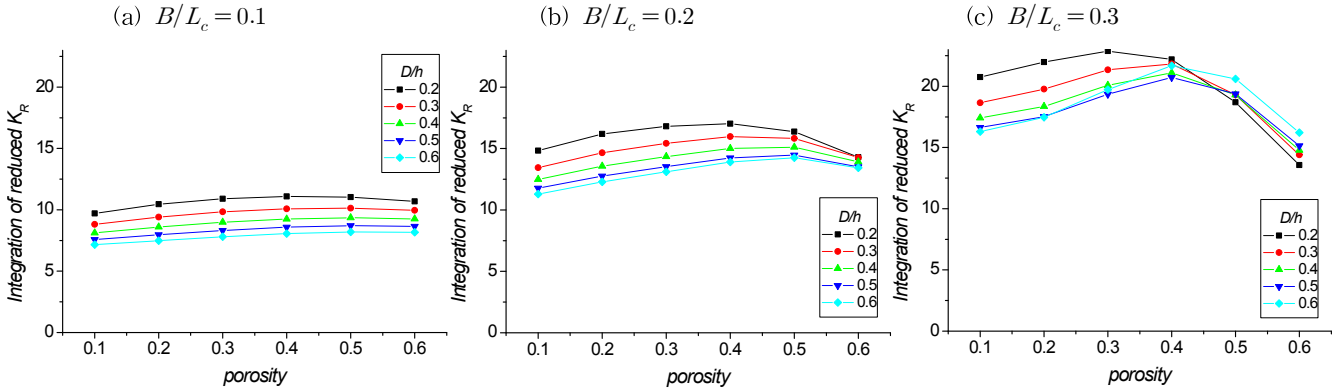


Fig. 8 Comparison of integration of reduced reflection coefficient for perforated breakwater with a resonant channel

현재 고려한 수심과 파장의 조건에 의하면 유동장은 천해 ( $0.05 < h/L < 0.5$ )로, 유체입자가 수심방향으로 납작한 타원형 궤도운동을 하고 있기 때문에 수심에 따라 유공관에 가해지는 유체동압력의 차이가 크지 않기 때문이다. 또한 이는 Fig. 6(b)에서 수실 입구가 깊은 곳에 위치할수록 최소 반사율이 작게 나타난 것과는 반대로 관심주기대역에서의 반사율 감소량은 작았다.

관심주기대역에서의 반사율 감소량은 수로 폭의 변화에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났으며, 폭이 넓을수록 반사율 감소량이 증가하였다. 그리고 넓은 수로의 폭( $B/L_c=0.3$ )에서 유공율( $P$ )가 0.5와 0.6인 경우 반사율 감소량이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 수로의 폭이 좁을 경우 관심주기대역의 반사율 감소량에 미치는 유공율의 영향은 작고, 수로의 폭이 넓어질수록 유공율이 반사율 감소효과에 미치는 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 수로의 폭이 넓어질 경우 최적 유공율이 도출되며, 위의 결과로부터  $B/L_c=0.3$ 인 경우 최적 유공율( $P_{optimal}$ )은 0.4이다.

수로 폭에 따른 반사율 감소량의 변화를 분석하기 위하여 표준 모델의 관심주기대역( $T_w/T_{ch}=0.6-1.6$ )에서의 유공율( $P=0.1-0.6$ )에 따라 반사율 감소량의 평균값을 취하였다(Fig. 9).

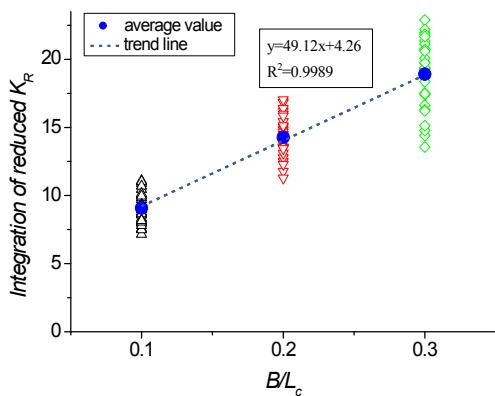


Fig. 9 Relation both integration of reduced reflection coefficient and channel width ( $D/h=0.4$ )

평균값은 수로의 폭이 같은 경우의 수실 입구부( $D/h=0.2-0.6$ )의 값을 취하였다. 수로의 폭의 변화와 반사율 감소량은 선형적인 양의 관계를 보였으며, 도시된 선형 추세선을 바탕으로 수로 폭의 변화와 반사율 감소량의 관계를 도출하였다.

$$\frac{\Delta \left( \sum_{T_w/T_{ch}=0.6}^{1.6} \text{reduced } K_R \right)}{\Delta(B/L_c)} = 49.12 \quad (18)$$

위의 방법으로 수로 입구의 깊이에 따른 수로 폭의 변화와 반사율 감소량의 상관관계를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Relations both integration of reduced reflection coefficient and channel width according to depth of channel inlet

$D/h$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$\frac{\Delta \left( \sum_{T_w/T_{ch}=0.6}^{1.6} \text{reduced } K_R \right)}{\Delta(B/L_c)}$	46.82	47.55	47.88	49.11	54.26

식(18)을 이용한 관심주기대역의 반사율 감소량의 추정이 가능하며, Fig. 8(c)의 유공율( $P=0.5, 0.6$ )에서와 같이 최적 유공율 이후에서의 관심주기대역에서의 반사율 감소량이 줄어들기 때문에 적절한 분석구간을 이용하여야 한다.

## 5. 결론

본 논문에서 공진수로 내장형 유공방파제를 제안하였다. 유한요소법을 이용하여 수로의 형상 및 유공변화에 따른 파랑의 반사특성을 분석하였다. 반사율의 감소정도를 반사율로서 평가하였으며, 반사율의 감소량이 클수록 반사율이 작게 발생하는 것을 의미한다. 평가 항목으로는 최소 반사율과 관심주기대역에서의 반사율 감소량이 있는데, 적용하고자하는 해역의 특성에 따라 관심주기대역의 범위를 적절히 선택하여야 한다.

수로가 넓을수록 공진조건에서의 반사율 감소는 상대적으로 작았지만, 반사율 곡선이 더 넓게 분포함으로써 의미있는

반사율 감소를 나타내는 파의 주기대역의 폭이 늘어났다. 실험해역에서 파랑은 여러 주기의 성분들이 함께 존재하기 때문에 넓은 수로를 적용하여 반사율 감소효과가 나타나는 구간을 넓혀 보다 많은 에너지 소산을 유도하는 것이 좋은 설계방향이 다. 수치해석 결과로부터 다음의 결과를 도출하였다.

- 공진수로 내장형 유공방파제의 형상이  $D/h=0.4$   $B/L_c=0.3$  인 경우 관심주기대역에서의 반사율 감소량의 평가로부터 최적 유공율( $P_{optimal}$ )은 0.4로 제안한다. 이는 일반적으로 알려진 수실을 갖는 유공방파제의 최적 유공율이 0.3인 것과 유사하게 나타났다.

- 수로의 형상에 의하여 차단율 목표로 하는 파랑의 주기대역에서의 반사율 감소효과가 뚜렷하게 나타났으며, 유공율이 작은 경우에 수로의 고유주기가 짧아지는 효과가 나타났다. 유공율  $P=0.1, 0.2$ 를 적용하는 경우 최소 반사율의 발생을 수로의 길이에 의해 산정된 고유주기보다 1.1-1.2배 긴 입사파의 주기에서 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

- 관심주기대역의 반사율 감소량과 수로 폭의 변화에 대한 상관관계를 도출하였다.

이상의 결과로부터 공진수로 내장형 유공방파제는 입사파장의 1/4의 길이가 수실의 폭과 같을 때 최적효율을 나타내는 수실을 갖는 유공방파제의 단점을 개선하여 더욱 장주기의 파랑도 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 유공부가 수면 근처의 쇄파력이 작용하지 않는 수중에 위치되어 부재의 안전성을 증대할 수 있다. 본 연구에서 제시한 소파효과와 더불어 수로 후면으로의 월파를 다소 허용한다면, 구조물에 가해지는 파랑 하중을 현저히 감소시킬 수 있을 것이며 이는 방파제의 건설비용의 저감을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 케이슨 결합에 의한 고파랑 대응 장대화 방파제의 성능 평가(PE99251) 사업의 지원을 받았습니다.

## References

- [1] Fugazza, M., and Natale, L.(1992), "Hydraulic Design of Perforated Breakwaters." Journal of Waterway Port Coastal Eng., Vol 118, pp 1-14.
- [2] Fujita, T., Matsushita, Y., and Kakuno, S.(2003), "Wave Reflection from a Slit-type Breakwater/Seawall Having L-shaped Bulkheads inside." Proceeding of the 13th Int Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, pp 664-670.
- [3] Kakuno, S. and Oda, K.(1986), "Boundary Value Analysis on the Interaction of Cylinder Arrays of Arbitrary Cross-Section with Train of Uniform Waves." Journal of Japanese Sec. Civil Eng., Vol 396, pp 213-222
- [4] Kakuno, S., Oda K., and Liu, P.L.-F.(1992), "Scattering of Water Waves by Vertical Cylinder with a Backwall." Proceeding of the 23rd Int Conference Coastal Engineering, Venice, Vol 2, pp 1258-1271.
- [5] Kim, B. H.(1998), "Interactions of Waves, Seabed and Structure." Doctorate thesis, Seoul National University, pp. 170-182.
- [6] Kim, J. S., Seo, J. H., Park, W. S. and Lee, J. W.(2014), "Wave Reflections from Perforated Breakwaters Having Resonant Channels." Proceeding of the 24th Int Offshore and Polar Engineering Conference, Busan, pp 890-896.
- [7] Kondo, H.(1979), "Analysis of Breakwaters having Two Porous Wall." Proceeding Coastal Structure, ASCE, Vol 2, pp 962-977.
- [8] KORDI(1997), Evaluation and Improvement of the Performance of Wave Control Structures. pp 29-40
- [9] Lee, J. W., Kim, K. K., Park, S. K., Kang, S. J., and Kim, J. S.(2011), "Response Analysis of the Slit Type Coastal Structures under Waves and Currents." Proceeding of the 21th Int Offshore and Polar Engineering Conference, Hawaii, pp 1116-1122
- [10] Martin, P. A. and Dalrymple, R. A.(1988), "Scattering of Long Waves by Cylinder Obstacles and Gratings using matched Asymptotic Expansions." Journal of Fluid Mechanics, Vol 188, pp 465-490.
- [11] Mei, C.C.(1989), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves." World-Scientific, Vol 1, pp 255-263.
- [12] Park, W. S., Lee, D. S., Oh, Y. M. and Jung, W. M. (1991), "Infinite Elements for Analysis of Diffraction and Radiation Problems in the Vertical Plane." Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng., Vol 3, No 4, pp 235-243.
- [13] Park, W. S., Chun, I. S. and Lee, D. S.(1993), "Hydraulic experiments for the reflection characteristics of perforated breakwaters." Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng., Vol 5, No 3, pp 198-203.
- [14] Park, W. S., Lee, J. W., Kim, J. S., Seo, J. H.(2014), Caisson Having Channels with Perforated Plates and Harbor Structure Thereof, K.R Patent, No. 10-2014-0006295.
- [15] Suh, K. D. and Park, W. S.(1995), "Wave Reflection from Perforated-Wall Caisson Breakwaters." Journal of Coastal Eng., Vol 26, pp 177-193.
- [16] Suh, K. D., Park, J. K. and Park, W. S.(2006), "Wave Reflection from Partially-Perforated-Wall Caisson Breakwaters." Journal of Ocean Eng., Vol 33, pp 264-280.
- [17] Taylor, P. J.(1973), "The Coefficient for Flow about an Arbitrary Body Immersed in a Channel." Journal of Ship Res., Vol 17, pp 97-105.

원고접수일 : 2014년 8월 25일

심사완료일 : 2014년 10월 7일

원고채택일 : 2014년 10월 10일