

# 사다리꼴형상 투과성 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사

## Bragg Reflection of Sinusoidal Waves due to Trapezoidal Submerged Porous Breakwaters

전 찬 후\* / 조 용 식\*\* / 이 종 인\*\*\*

Jeon, Chan Hoo / Cho, Yong Sik / Lee, Jong In

---

### Abstract

This study presents a combined experimental and numerical effort to investigate experimentally and numerically the Bragg reflection of sinusoidal waves due to trapezoidal submerged porous breakwaters. Numerical predictions of the study are verified by comparing to laboratory measurements. In the numerical model, the flow in porous structures is described by the spatially averaged Navier-Stokes equations and the volume of fluid method is employed to track the free surface displacements. Numerical solutions are agree well with laboratory measurements. The reflection coefficients of porous structures are smaller than those of non-porous structures and become stronger in proportion to the increase of number of submerged breakwaters.

**Keywords** : submerged breakwater, Bragg reflection, sinusoidal wave, porous structure, VOF method

---

### 요 지

본 연구에서는 사다리꼴형상 투과성 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사에 대해 수리모형실험과 수치모형실험을 수행하였으며, 두 실험결과를 비교하였다. 수치해석에 적용된 모형에서는 공간 평균된 Navier-Stokes 방정식을 투과체 내에서의 지배방정식으로 사용하였고, 자유수면변위를 추적하기 위해 VOF기법을 적용하였다. 수리실험 결과와 수치해석결과는 비교적 잘 일치하였으며, 투과성 수중방파제에 의한 반사계수는 불투과성에 비해 낮게 나타나고, 방파제의 배열이 증가함에 따라 반사계수는 증가함을 보였다.

**핵심용어** : 수중방파제, Bragg 반사, 정현파, 투과체, VOF법

---

\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.  
(E-mail : wjscksgn@ihanyang.ac.kr)

\*\* 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University  
(E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Engineering Dept., Korea Institute of Construction Technology  
(E-mail : jilee@kict.re.kr)

## 1. 서론

심해에서 발달한 파랑이 해안으로 전파하는 동안 해저지형 또는 구조물의 영향으로 인해 회절, 굴절, 반사, 천수 및 쇄파 등과 같은 변형을 겪게 되며, 파랑은 연안 침식 및 해안구조물의 안전과 설계에 영향을 미친다. 연안침식은 태풍과 같은 이상기후에서 발생하고 평상시에 다시 회복되는 양상을 가지며, 이안제, 돌제 및 수중방파제 등과 같은 구조물을 설치하여 연안침식을 최소화하려는 노력을 하고 있다. 수중방파제는 주변 환경과 조화를 이루면서 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 연안침식을 저감시킬 수 있는 공법 중의 하나이다.

수중방파제와 관련된 국외연구로서 Cooker 등(1990)과 Huang 등(2002)은 고립파와 수중방파제의 상호작용에 대해 연구하였고, Hwang 등(2002)은 수중방파제에 의한 파랑의 변형에 대해 실험적인 검토를 수행하였다. 그리고 Losada 등(1997)은 투과성 수중 계단지형을 통과하는 파랑에 대한 수리모형실험과 수치해석을 수행하였으며, Mase 등(2000)은 수중방파제에 의한 파랑의 Bragg 반사에 대한 실험을 실시하였다.

국내에서도 다양한 수치해석 기법을 통해 Bragg 반사와 수중방파제에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 조용식 등(1999)은 정현파형 지형을 통과하는 파랑의 Bragg 반사에 대해 연구하였고, 김영택 등(2000)은 경계요소법을 이용하여 다양한 지형에서의 Bragg 반사현상을 검토하였다. 그리고 김도삼(2001)은 입사 파랑각의 변화에 따른 반사율과 전달율의 차이가 크지 않으므로 2차원적인 접근으로도 큰 오차가 발생하지 않는다고 하였다. 또한, 사각형 형상 수중방파제의 Bragg 반사에 대한 수리모형실험과 고유함수전개법을 이용한 수치해석을 통한 연구가 이루어졌다(조용식 등, 2002). Cho 등(2001)은 여러 형상의 수중방파제의 반사율에 대한 연구에서 사다리꼴형상이 가장 큰 반사율을 나타낸다고 하였다.

본 연구에서는 수리모형실험과 VOF(volume of fluid) 기법을 이용한 수치모형(이하 'VOF모형')을 이용하여 입사파가 정현파인 조건에서 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg 반사특성을 투과체를 중심으로 검토하였다.

## 2. 지배방정식

본 연구에서 도입한 수치모형에서 투과체에서의 흐름

은 Navier-Stokes 방정식으로 지배되며, 식(1)과 식(2)로 표현된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성계수,  $u_i$ 는 투과체 내 순간 속도의  $i$ 번째 요소 성분,  $P_0$ 는 순간 유효 압력을 나타낸다.

투과체는 복잡한 구조이기 때문에 투과체 내에서 직접 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 것은 어렵다. 일반적으로, Navier-Stokes 방정식은 대표 공극 크기보다 크고 자연 현상에서의 대표 길이 단위보다는 작은 길이 단위  $l_p$ 에 대해서 평균된다. 게다가, 유체 변수들은 공간적으로 평균된 양과 변동되는 양으로 나뉘어 진다. 즉,  $u_i$ 는  $(\bar{u}_i + u_i'')/n$ 으로 나타내고  $P_0$ 는  $\bar{P}_0 + P_0''$ 으로 표현된다. 여기서,  $n$ 은 공극체의 유효 공극율이다. 식 (1)과 (2)를 공간 평균된 Navier-Stokes 방정식으로 나타내면 식 (3)과 (4)와 같다(Liu 등, 1999).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1+c_A}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_j}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i'' u_j''}{\partial x_j} \quad (4)$$

식 (4)의 우변항에서 두 번째 점성항은 세 번째 항에 비해 매우 작은 값을 나타낸다. 그러나, 이 항은 전단력을 나타내며, 미세 부분에서 공극체와 외부 흐름간 연결부근에서 점진적으로 중요한 역할을 하고 있다. 투과체 내에서 가속되는 유체에 의해 발생하는 질량 효과를 고려하기 위해서 시간에 대한 미분항을 식 (5)와 같이 표현한다(Liu 등, 1999).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \left( \frac{1+c_A}{n} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \quad (5)$$

식 (5)에서,  $c_A$ 는 추가된 질량 계수이고 Van Gent (1995)가 제안한  $\gamma_b(1-n)/n$  식을 사용하였다. 여기서,  $\gamma_b$ 는 경험상수로 0.34이다.

식(4)의 우변 마지막 항이 나타내는 공간 속도 변동의 상관관계는 식 (6)과 같은 선형 마찰력과 비선형 마찰력의 조합으로 구성하였다.

$$-\frac{1}{n^2} \frac{\partial \overline{u_i''} \overline{u_i''}}{\partial x_j} = -g a_p \overline{u_i} - g b_p u_c \overline{u_i} \quad (6)$$

식 (6)에서,  $a_p$ 와  $b_p$ 는 경험상수이고  $u_c$ 는  $\sqrt{u_i u_i}$ 이다. 또한, 우변의 첫 번째 항은 점성 효과에 의해 발생한 마찰력을 나타내고, 두 번째 항은 난류 효과에 의한 마찰력을 의미한다. 레이놀즈 수가 작을 때는 점성 효과가 중요하며, 반대인 경우에는 난류 효과가 큰 영향을 미치게 된다.  $a_p$ 와  $b_p$ 에 대한 경험식은 Van Gent(1995)가 식 (7)과 (8)과 같이 제안하였다.

$$a_p = a_p \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{g D_{50}^2} \quad (7)$$

$$b_p = \beta_p \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{g D_{50}} \quad (8)$$

여기서,  $a_p$ 와  $\beta_p$ 는 각각 1,000과 1.1이며,  $KC$ 는 Keulegan-Carpenter(1958) 수로서 유체 입자 운동과 투과체 내에서의 특성 길이 크기의 비를 나타내며, 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$KC = \frac{u_c T}{(n D_{50})} \quad (9)$$

식 (9)에서  $T$ 는 파랑의 주기를 나타내고,  $D_{50}$ 은 투과체 구성물질의 유효직경을 나타낸다. 투과체 구성물질의 모양, 위치, 표면 조도는 질량과 마찰 특성에 영향을 주는 요소이지만 본 연구에서는 고려하지 않았다.

불투과성 물체의 흐름에 대한 지배방정식, 수치기법과 경계조건은 본 논문에서는 지면 관계상 생략할 것이므로 조용식과 진찬후(2003)의 논문을 참고하면 될 것이다.

### 3. 경계조건

흐름과 투과체간의 상호 작용에서 가장 중요한 경계는 투과체와 외부 흐름간의 경계면이다. 엄밀히 말하면, 외부의 평균 흐름은 투과체 내에서의 평균 흐름과 동일하지 않다. 투과체 내의 평균 흐름은 원칙적으로 난류

변동을 포함하고 있다. 그러나 투과체에서 최대 난류의 길이 크기는 공극의 크기와 공간평균에 사용된 길이 크기  $l_p$ 에 제한을 받기 때문에 평균된 흐름은 난류 변동을 거의 포함하지 않아야 한다. 따라서, 외부의 평균 흐름과 투과체 내에서의 평균 흐름은 난류와 상관 없이 같은 흐름 체계를 갖는다고 가정하는 것이 타당하다. 그러므로, 평균 흐름의 속도와 투과체와 외부 흐름의 경계면에 평균된 속도와 압력의 연속성을 적용하는 것이 가능하다(Liu 등, 1999).

경계면에 평균된 속도와 압력의 연속성을 적용하기 때문에 투과체 외부 인접부분의 실제적인 값을 얻는 것은 사실상 불가능하다. 실제 현상에서는 투과체 외부 인접부분에서 공극 표면으로 인해 수많은 젤(jet)과 후류(wake)가 형성된다. 젤과 후류는 난류이고  $d_m \propto r_p$ 인 짧은 거리에서 빠르게 혼합된다. 여기서,  $d_m$ 은 혼합거리이고,  $r_p$ 는 유효공극 크기이다. 본 연구에서는 젤과 후류의 혼합에 대한 상세한 부분은 고려하지 않았고, 평균 운동량 흐름(flux)만 고려하였다. 본 연구의 관심 대상은 투과체 외부 인접부분의 평균 흐름장의 근사에 큰 영향을 받지 않는 투과체에 대한 파랑의 통과와 반사, 그리고 투과체에서의 에너지 소산이기 때문에 이와 같은 가정은 타당하다고 본다.

투과체 외부의 난류 운동에너지는 난류 모델이 투과체 내부에서는 해를 갖지 못하기 때문에 특별한 처리 방법을 적용해야 한다. Ilegbusi(1989)는 식 (10)과 같이 제안하였다.

$$\frac{\langle u_i \rangle - \overline{u_i}}{(\tau_w / \rho)^{1/2}} = \frac{1}{k} \ln \left\{ \frac{E y [(\tau_w + \tau_m) / \rho]^{1/2}}{\nu} \right\} \quad (10)$$

여기서,  $\langle u_i \rangle$ 는 난류 경계층의 외부 점선 속도,  $\overline{u_i}$ 는 투과체를 따라서 점선방향 평균 속도이고,  $k$ 는 von Karman 상수이며,  $E$ 는 조도계수이다.  $\tau_w$ 는 벽에서의 전단응력이고,  $\tau_m$ 은 투과체를 통해 흡입되거나 주입된 흐름에 의한 전단응력으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_m = \frac{c_n \overline{v_n} \langle u_i \rangle}{1 + (\tau_w / \rho)^{1/2} / (k \langle u_i \rangle)} \quad (11)$$

식 (11)에서  $\overline{v_n}$ 은 투과층에서 연직 평균 속도이고,

$c_n$ 은 경험상수이다.

본 연구에서는 Lin(1998)에 의해 소개된 약반사 (weakly reflected) 경계조건이 수치 조파기 부분에 적용되어 구조물에 의해 반사되어 오는 파가 재반사되지 않게 하였으며, 그 반대부분에는 방사경계조건을 적용하여 격자망 경계에서의 반사가 발생하지 않도록 하였다.

#### 4. 실험조건과 입사파

본 실험에서 사용한 장비는 그림 1과 같이 폭 1 m, 높이 2 m, 길이 56 m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성된 단면 조파장치로서 규칙파인 정현파를 입사파로 사용하였다. 실험수로는 조파관 전면에 부착된 파고계로부터 얻은 자료를 바탕으로 반사파 흡수식

제어가 가능하고, 수로 양쪽 끝 부분에 여러 겹의 다공성 구조로 된 소파장치가 설치되어 있다.

사다리꼴형상의 수중방파제는 그림 2에 도시한 것과 같이 하부폭( $W_b$ )이 1.6 m, 상부폭( $W_t$ )이 0.4 m, 높이( $h_s$ )가 0.4 m, 사면경사는 1:1.5이고, 수심( $h$ )은 0.8 m이다. 본 연구에서는 수중방파제가 불투과제인 경우와 투과제인 경우에 대해 수치모형실험과 수리모형실험을 각각 수행하였다. 투과제의 경우에는 유효직경이 7.6 cm인 모형 TTP를 이용하여 사다리꼴형상을 제작한 후 실험을 실시하였다.

그림 3은 본 연구에서 입사파로 사용한 정현파에 대해 해석해와 수치해를 비교한 것으로, 정현파의 파고는 0.04 m이다. 그림 3에서 실선은 해석해, 점선은 수치해로서 수치해가 정현파를 비교적 잘 재현하고 있음을

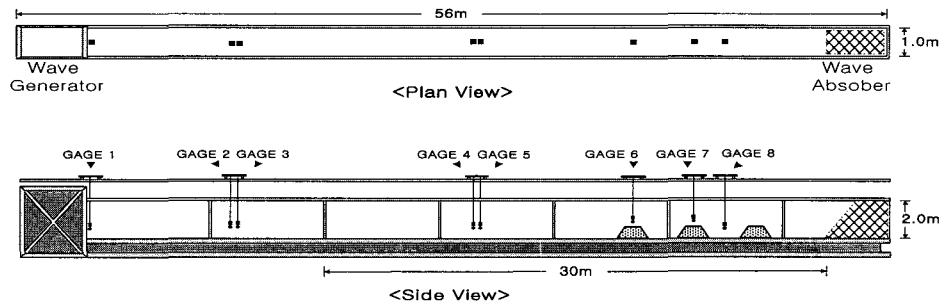


그림 1. 수리모형실험 수로

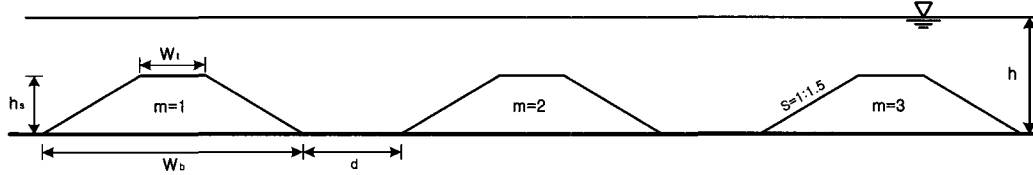


그림 2. 수리모형실험과 수치모형 단면 형상

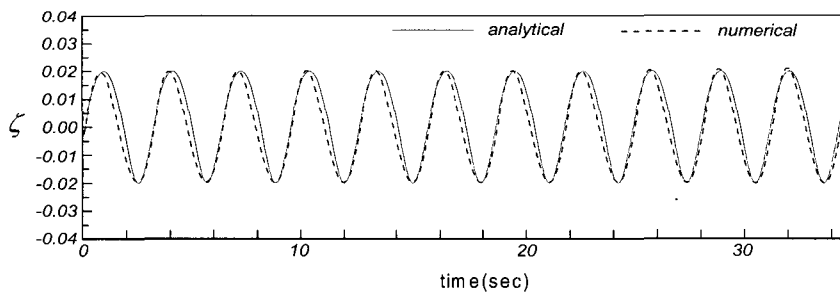


그림 3. 입사파인 정현파의 해석해와 수치해 비교

알 수 있다. 세로축의  $\zeta$ 는 자유수면변위이며, 단위는  $m$ 이다.

### 5. 결과분석

그림 4~그림 7은 불투과성과 투과성 사다리꼴형상 수중방파제에 대해 수중방파제의 배열 수( $m$ ) 변화에 따른 반사계수를 각각 도시한 것이다. 불투과성 수중방파제에 대해서는 VOF모형 및 고유함수전개법(EFEM)으로 해석한 결과와 수리실험결과를 비교 도시하였고, 투과성 수중방파제에 대해서는 VOF모형과 수리실험결과를 비교하였다. 이는 본 연구에서 도입한 고유함수전개법에 의한 수치모형이 제체의 투과성을 고려하지 못하기 때문이다. 고유함수전개법에 관한 내용은 조용식

등(2002)에 상세히 설명되어 있다.

그림 4는 사다리꼴형상의 불투과성 수중방파제가 2  $m$  간격으로 2개( $m=2$ )가 설치된 경우로서 수리실험결과와 VOF모형 및 고유함수전개법에 의한 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 입사파가 단주기일 경우( $kh > 2.0$ )에 고유함수전개법에 의한 결과는 수리실험결과와 다소 차이를 보이고 있으나, VOF모형의 해석결과는 실험결과와 매우 근사함을 알 수 있다. 이는 고유함수전개법은 선형파이론에 기초한 것이고, VOF모형에서는 파랑의 비선형성이 고려되었기 때문으로 판단된다. 제1 공진주기는  $kh \approx 0.6$ , 제2 공진주기는  $kh \approx 1.3$ 에서 발생하였으며, 최대 반사계수는 약 0.5 정도로 나타났다.

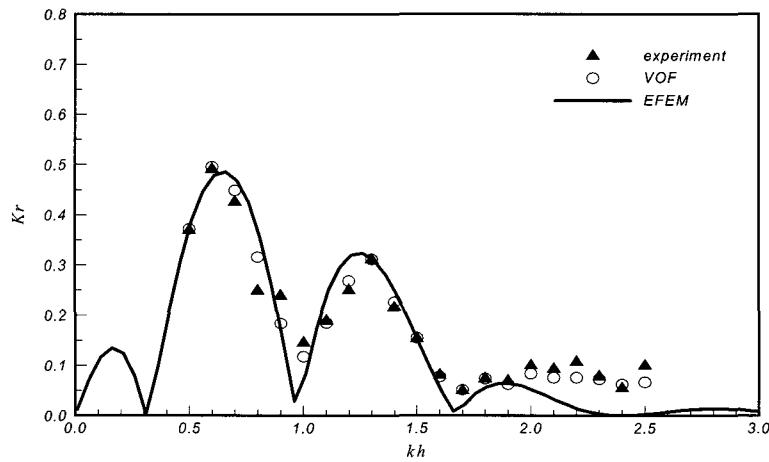


그림 4. 불투과성 수중방파제의 반사계수( $m=2$ 인 경우)

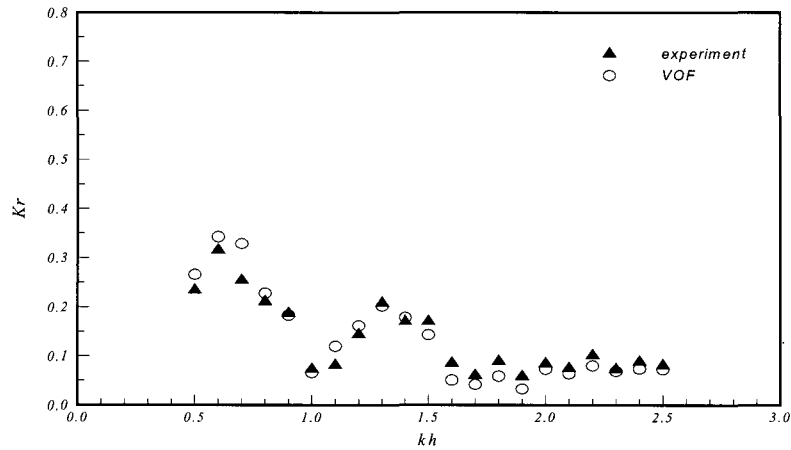


그림 5. 투과성 수중방파제의 반사계수( $m=2$ 인 경우)

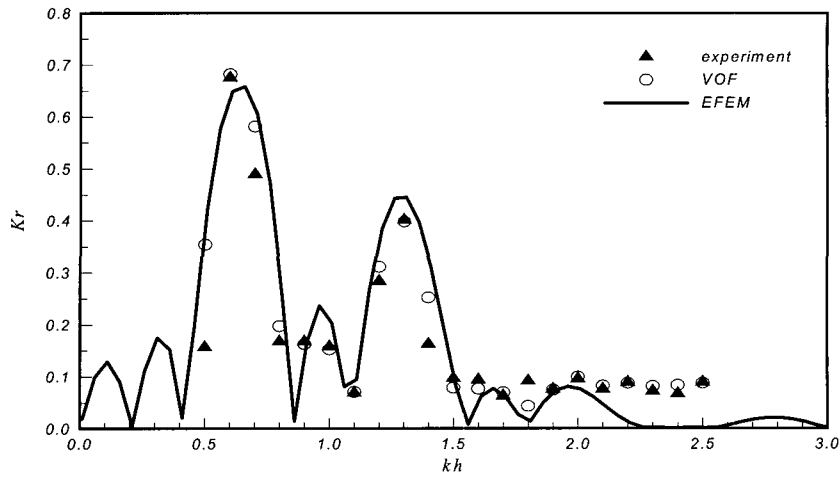


그림 6. 불투과성 수중방파제의 반사계수(m=3인 경우)

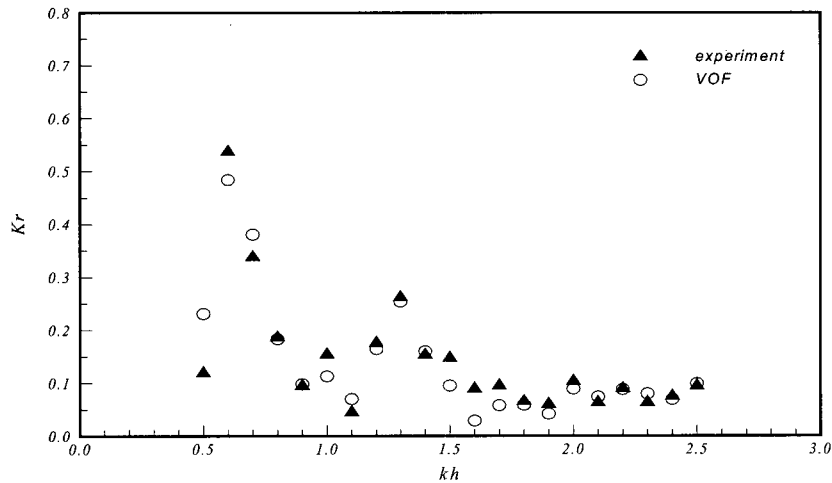


그림 7. 투과성 수중방파제의 반사계수(m=3인 경우)

그림 5는 모형 TTP로 구성된 사다리꼴형상의 투과성 수중방파제가 2  $m$  간격으로 2개( $m=2$ ) 설치된 경우에 대한 결과로서, 수리실험결과와 VOF모형에 의한 해석결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 투과성 방파제의 경우에 불투과성인 경우와 공진주기는 거의 동일하지만 반사계수가 낮게 나타나며, 이는 입사파 에너지가 투과성 구조물에 의해 감소되기 때문이다. 제1 공진주기에서 반사계수는 불투과성인 경우의 반사계수에 비해 약 64%로 나타났다.

그림 6은 사다리꼴형상의 불투과성 수중방파제가 2

$m$  간격으로 3개( $m=3$ ) 설치된 경우로서 그림 4의 경우와 마찬가지로 수리실험결과와 VOF모형의 결과가 전체적으로 잘 일치하고 있다. 고유함수전개법에 의한 결과는  $m=2$ 인 불투과성 수중방파제의 경우와 마찬가지로  $kh=0.5\sim 2$  범위에서는 수리실험결과와 비교적 잘 일치하고 있으나,  $kh>2$ 인 범위에서는 약간의 차이를 나타내고 있다. 최대반사는  $kh\approx 0.7$ , 제2 공진주기는  $kh\approx 1.3$ 에서 발생하였으며, 제1 공진주기에서의 반사계수는 수리실험상에서는 0.67, VOF모형의 해석결과에서는 0.68로 나타났다.

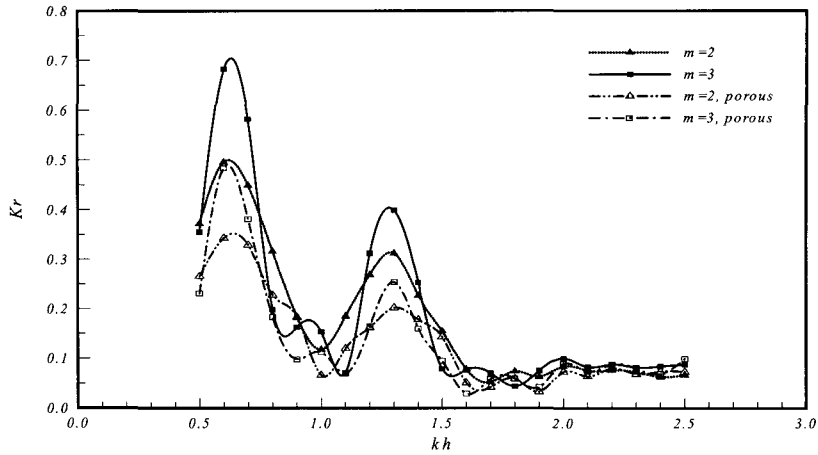


그림 8. 수중방파제 특성에 따른 수치해(VOF모형) 비교

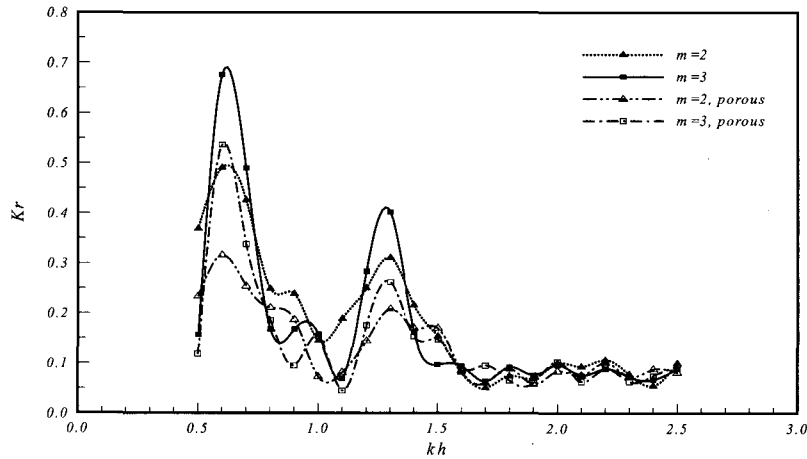


그림 9. 수중방파제 특성에 따른 실험결과 비교

그림 7은 모형 TTP로 구성된 사다리꼴형상의 투과성 수중방파제가 2 m 간격으로 3개( $m=3$ ) 설치된 경우의 결과로서 두 결과는 잘 일치함을 알 수 있다. 수중방파제가 투과성인 경우와 불투과성인 경우의 반사계수를 비교해 볼 경우, 입사파가 상대적으로 장주기인 경우에는 투과성 방파제에 의한 반사계수가 낮은 반면, 입사파가 상대적으로 단주기일 경우에는 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 입사파가 단주기일 경우에는 파장이 상대적으로 짧기 때문에 실험조건이 심해조건에 해당하여 수중방파제에 의한 영향이 크지 않기 때문으로 판단된다.

그림 4~그림 7을 살펴보면 VOF모형의 결과는 수중방파제가 불투과성일 경우에는 수치실험결과와 잘 일치하는 반면, 투과성일 경우에는 약간의 차이가 발생한다. 이는 VOF모형으로 불투과층을 해석할 때 사다리꼴형상의 사면은 부분 셀 취급법(partial cell treatment)을 이용하여 격자를 생성함으로써 실제 형상과 매우 유사하게 재현되지만, 투과층을 해석할 경우에는 수평경계와 수직경계에서 톱니모양(sawtooth shape)의 격자망을 구성한 것이 차이가 발생한 하나의 원인으로 생각된다.

그림 8과 그림 9는 각각 수중방파제의 배열 및 수중

방파제의 투과성 여부에 따른 반사특성을 VOF모형과 수리실험결과를 비교한 것이다. 해석결과 및 실험결과 모두 수중방파제의 배열 수 및 수중방파제의 투과성 여부와는 관계없이 공진이 발생하는 kh는 유사함을 알 수 있다. 전반적으로 제1 공진주기는 kh=0.6~0.7, 제2 공진주기는 kh=1.3~1.4에서 발생하였다. 수중방파제의 배열이 증가할수록 반사계수는 증가하였으며, 투과성 구조물이 불투과성에 비해 큰 반사계수를 보인다. 그러나 단주기파의 경우에는 제체의 투과성 여부가 반사계수에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있으며, 이는 단주기 파랑은 바다 지형의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 의미하는 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 사다리꼴형상의 투과성 수중방파제에 의한 Bragg 반사 특성을 검토하기 위해 수리모형실험과 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하고 밀도변화 방정식을 이용한 VOF기법을 적용한 모형을 사용하였으며, 제체가 불투과성일 경우에는 선형파이론에 기초한 고유함수전개법을 이용한 모형에 의한 해석결과를 비교하였다. VOF 모형에 의한 해석결과는 고유함수전개법에 의한 결과보다 수리실험결과에 더 근사하게 나타났으며, 이는 고유함수전개법이 선형파이론을 기초로 한 반면, VOF모형은 파랑의 비선형성이 고려되었기 때문으로 생각된다. 제체의 배열 수가 늘어날수록 높은 반사계수를 나타냈고, 공진주기는 투과성 여부 및 배열 수와는 관계없이 유사한 위치에서 발생하였으며, 투과성 제체에 의한 반사계수가 불투과성에 비해 작게 나타났다. 입사파가 단주기일 경우에는 제체의 투과성 여부에 관계없이 반사계수는 근사하게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제(중소기업청, 서울특별시, 대영엔지니어링)로 중소기업청으로부터 재정적인 보조를 받았기에 이에 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

김도삼 (2001). "2열투과성잠제에 의한 경사입사파랑의 반사율과 전달율에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 제21권, 3-B호, pp. 249-258.  
 김영택, 조용식, 이정규 (2000). "2차원 경계요소법을 이용한 Bragg 반사 해석." 한국수자원학회는

문집, 제33권, 제6호, pp. 805-814.  
 조용식, 김창완, 이종인 (1999). "정현파형 지형을 통과하는 파랑의 Bragg 반사." 대한토목학회 논문집, 제19권, 2-6호, pp. 705-710.  
 조용식, 이종인, 김영택 (2002). "사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험." 한국수자원학회 논문집, 제35권, 제5호, pp. 563-573.  
 조용식, 전찬후 (2003). "크노이드파의 발생과 최대 처오름높이." 한국해양해양공학회지, 제15권, 인쇄중  
 Cho, Y.-S., Yoon, S.B., Lee, J.-I and Yoon, T.-H. (2001). "A concept of beach protection with submerged breakwaters." *Journal of Coastal Research*, Vol. 34, pp. 671-678.  
 Cooker, M.J., Peregrine, D.H., Vidal, C. and Dold, J. W. (1990). "The interaction between a solitary wave and a submerged semicircular cylinder." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 215, pp. 1-22  
 Huang, C.-J., Chang, H.-H. and Hwung, H.-H. (2002). "The interaction of a solitary wave and a submerged porous breakwater." *Proceedings of the 5th International Conference on Hydrodynamics*, pp. 371-376, Tainan.  
 Hwung, H.-H., Tu, S.-Y. and Hwang, K.-S. (2002). "The interaction of a solitary wave and a submerged porous breakwater." *Proceedings of the 5th International Conference on Hydrodynamics*, pp. 365-370, Tainan.  
 Ilegbusi, O.J. (1989). "Turbulent boundary layer on a porous flat plate with severe injection at various angles to the surface." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, 4, pp. 761-765.  
 Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H. (1958). Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid." *J. Res. Nat. Bureau of Standards*, Vol. 60, No. 5, pp. 423-440.  
 Lin, P. (1998). "Numerical modeling of breaking wave." PhD thesis, Cornell University, Ithaca, N.Y.  
 Liu, P. L.-F., Lin, P., Chang, K.-A. and Saka-



- kiyama, T. (1999). "Numerical modeling of wave interaction with porous structures." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 6, pp. 322-330.
- Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada, M.A. (1997). "Harmonic generation past a submerged porous step." *Coastal Engineering*, Vol. 31, pp. 281-304.
- Mase, H., Oki, K., Kitano, T. and Mishima, T. (2000). "Experiments on Bragg scattering of waves due to submerged breakwaters." *Coastal Structures '99*, pp. 659-665.
- Van Gent, M.R.A. (1995). "Wave interaction with permeable coastal structures." Ph.D. thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.
- (논문번호:03-46/접수:2003.05.06/심사완료:2003.06.16)