

# 해석해를 통한 수중방파제와 다공성 소파장치에서의 파의 거동 해석 및 관계 분석

## Analysis of the wave motion and the relationship at the submerged breakwater with porous wave absorber using analytic solution

박진호\*, 유제선\*\*, 조용식\*\*\*

Jin Ho Park, Jeseon Yoo, Yong-Sik Cho

### 요 지

기후상승으로 해수면의 상승으로 인해 삼면이 바다로 둘러싸인 지형적 특성을 가진 우리나라 연안에 파도로부터 시설물의 보호가 중요한 요인으로 꼽히고 있다. 파의 에너지를 저감하여 연안에 위치한 시설물 보호에 많은 연구가 진행되고 있다. 여기서 다루게 될 수중방파제와 다공성 소파장치는 반사와 수심의 변화에 따른 분산효과로 입사파의 에너지 감소를 통해 연안에 위치한 구조물과 배후시설에 대한 피해를 줄이는데 주목적 있다. 사다리꼴 수중방파제의 전·후면의 기울기를 변화시키며 장주기파의 입사파와 투과파에 대한 연구가 Chang과 Liou(2004)에 의해 연구되었고, 수직 다공성 소파장치의 두께를 변화하며 반사계수와 상관계수에 대한 연구가 Madsen(1983)에 의해 진행되었다. 본 연구에서는 해석해를 통해 수중방파제와 다공성 소파장치가 있는 경우에 투과파와 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이의 변화에 대해 알아보고, 그에 따른 관계를 알아보고자 한다. 구간은 각각 수심이 일정한 지역과 변화하는 지역, 다공성 소파제가 있는 지역으로 설정하여 각 구간마다 해석해를 적용하여 파고를 측정하였다. 측정된 파고를 이용하여 투과율은 수중방파제를 통과한 입사파와 투과파의 관계를 통해 측정할 수 있다. 수중방파제를 통과한 파는 다공성 소파장치를 통과하면서 파고가 급감하는 현상을 다공성 소파장치 전·후면에서 측정되는 파고를 통해 알 수 있다.

핵심용어 : 수중방파제, 다공성 소파장치, 해석해

### 1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 특성으로 인해 연안 지역에 많은 국가기관 시설물과 인구가 밀집해 있는 지역들이 자리 잡고 있다. 최근 지구 온난화로 인한 해수면의 상승은 이와 같은 지역의 안전성을 위협하고 있으며 따라서, 이에 대한 적절한 대책이 필요하다. 수중 구조물을 설치하는 방법은 입사파의 에너지를 감소시켜 피해를 줄일 수 있는 대표적인 방법이다. Chang과 Liou(2004)는 사다리꼴형 수중방파제에 대하여 전면과 후면의 경사에 변화를 주면서 장주기파의 입사파와 투과파의 상관관계를 해석적인 연구를 통해 조사하였다. 그 외에도 대부분의 수중방파제에 관한 연구는 수중방파제를 통과한 입사파가 투과파와 어떠한 상관관계를 갖는지에 대한 것이었고, 실제 이러한 입사파 및 투과파의 변화가 연안구조물에 미치는 영향은 언급하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 소파블록으로 보호를 받고 있는 연직 구조물 전면에 사다리꼴 형태의 잠제가 있는 경우에 잠제에 의한 파의 투과 및 반사가 연직 구조물의 처오름 높이에 끼치는 영향을 살펴보았다.

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : lions@hanyang.ac.kr

\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사 후 과정 · E-mail : jeseon.yoo@hotmail.com

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 · E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

## 2. 지배방정식

본 연구에서는 그림 1과 같이 일정 수심 영역과 일정한 기울기를 가지는 영역으로 구성되어 있으며 일정 수심 영역은 다시 에너지 소산이 없는 지역인 Sec.1, Sec.3, Sec.5와 에너지가 소산되는 지역인 Sec.6으로 구분된다.

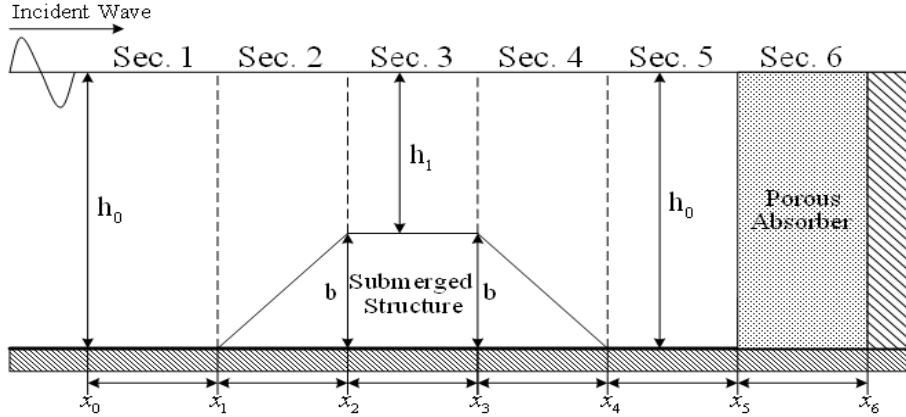


그림 1. 수치모의 지형 개념도

각각의 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = A_i e^{ik_i x} + B_i e^{-ik_i x} \quad (\text{Sec. 1, 3, 5}) \quad (1)$$

$$\eta = a_1 e^{-ik_i x} + a_2 e^{ik_i x} \quad (\text{Sec. 6}) \quad (2)$$

$$\eta = C_i J_0(2\sqrt{nX_i}) + D_i Y_0(2\sqrt{nX_i}) \quad (\text{Sec. 2, 4}) \quad (3)$$

$\eta$ 는 자유수면변위를 의미하고, 파수( $k$ )는 수심이 일정한 지역인 Sec.1, 3, 5 지점에서 각각  $k = \frac{\sigma}{\sqrt{gh}}$ 를 이용하여 구하였다.  $A_i$ ,  $a_1$  및  $C_i$ 는 각 지점에서의 입사파를 의미하고,  $B_i$ ,  $a_2$  및  $D_i$ 는 반사파를 의미한다. 소파장치의 마찰계수가 고려된 파수값인  $\kappa$ 는  $\kappa = \frac{\sigma}{\sqrt{gh}} \sqrt{1-if}$ 을 이용하여 구하였다. 경사면이 존재하는 Sec.2와 Sec.4

에서의 파의 거동을 나타내는 식 (3)의  $n$ 과  $X_i$ 는 각각  $n = \frac{\sigma^2}{g \tan^2 \beta}$ 와  $X_i = h - x \tan \beta$ 을 이용하여 그 값을 결정하였으며, 여기서  $\beta$ 는 경사면의 각을 의미한다. 식 (1)~식 (3)의 미지수를 구하기 위해서 각 지점별로 다음의 경계식을 사용하였다.

$$\eta_i = \eta_{i+1} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial x} = \frac{\partial \eta_{i+1}}{\partial x}, \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial x} = 0, \quad (i = 6) \quad (6)$$

여기서, 식 (4), (5) 및 (6)은 각각 자유수면에서의 지점간의 압력이 연속적인 것과, 유속의 연속 및 완전 반사를 의미한다.

## 3. 수치모의

수치모의의 시 위와 같은 지형을 설정한 후에 주기별로 수중방파제에 의한 투과율과 소파장치 전·후면에서 처오름 높이를 계산하여 그 영향력을 알아보았다. 수심은 0.6 m이고, 입사파에 대한 유의주기를 8 sec부터 0.5 sec 간격

으로 10.5 sec까지 변화시키면서 각각의 값들을 비교하였다. 여기서, 투과율은  $x_0 \sim x_1$ 과  $x_4 \sim x_5$ 를 지나는 파의 높이의 비로 구하였다. 수중구조물로부터 수면까지의 거리를 고정시킨 후  $x_1 \sim x_2$ 와  $x_3 \sim x_4$ 의 거리를 변화하거나  $x_1 \sim x_2$ 와  $x_3 \sim x_4$ 의 거리를 고정시킨 후 수중구조물로부터 수면까지의 거리에 변화를 주어 기울기의 변화가 투과율에 미치는 영향을 조사할 수 있다. 기울기는 0.02부터 0.08까지 0.02단계로 비교하였다. 다공성 소파장치는 마찰계수를 임의적으로 2로 고정하였다. 수중구조물을 통과한 투과파에 의한 영향력을 소파장치 전·후면에서의 자유수면 높이를 비교하여 그 효과를 비교하였고, 내부에서 파의 흐름에 대해서도 알 수 있다. 추가적으로 소파장치 전면에 2개의 수중방파제가 있을 경우에 2개의 수중방파제를 통과한 입사파는 소파장치에 이르러 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 2개의 수중방파제가 존재하는 경우 수심은 1 m로 모의하였고, 유의주기는 7.5 sec부터 1 sec씩 증가시켜 10.5 sec까지 투과율 및 소파제 전·후면에서의 처오름 높이를 구하였다. 2개의 수중구조물 변화는 1개의 수중구조물이 있을 때와 마찬가지로 수중구조물로부터 수면까지의 거리를 고정시키거나 수중구조물로부터 수면까지의 거리를 변화시켰고, 기울기의 크기를 0.04부터 0.16까지 0.04단계로 비교하였다.

#### 4. 결 과

유의주기가 증가할수록 각 기울기에서 나타나는 투과율 및 처오름의 높이는 그림 2와 같다. 기울기는  $x_1 \sim x_2$ 와  $x_3 \sim x_4$ 의 거리를 고정시킨 후 수중구조물로부터 수면까지의 거리에 변화를 주어 결정하였다. 그림 2-(a)에서 알 수 있듯이 유의주기가 증가할수록 투과율은 기울기가 0.02와 0.04에서 증가와 감소를 반복하지만, 0.06에서는 점차 증가를 0.08에서는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 수중구조물을 통과한 투과파의 소파장치 전·후면에서 처오름 높이를 비교해보면 그림 2-(b)와 그림 2-(c)와 같이 나타났다. 전체적으로 소파장치 전면에서보다 후면에서 처오름의 높이가 현저하게 감소하였음을 알 수 있다. 소파장치 전면에서는 기울기 0.04를 통과한 투과파의 처오름이 주기가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있으나 그 외의 기울기에서는 증가와 감소가 나타났다. 반면 후면에서는 전체적으로 소파 상승 후 감소하는 경향이 나타났다.

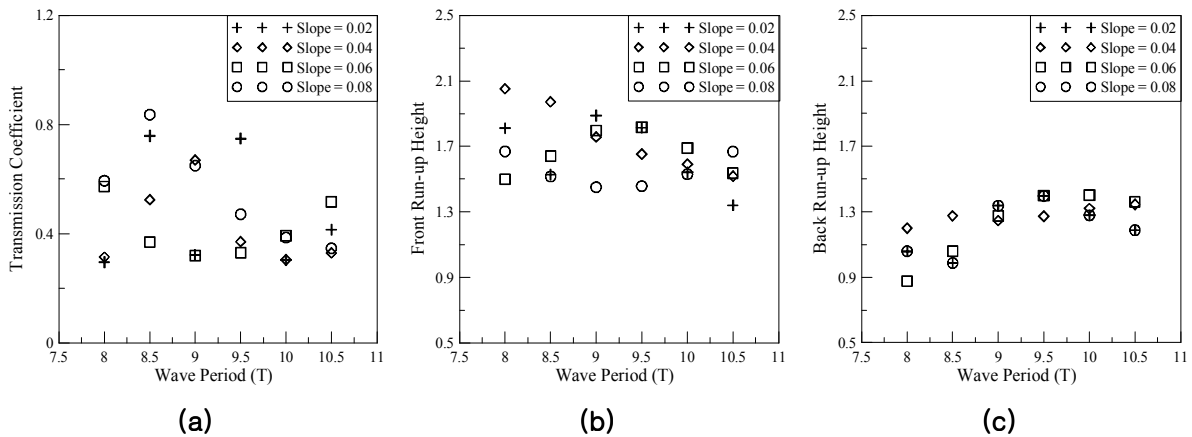


그림 2. 폭 고정 시 유의주기에 따른 투과율 및 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이

수중구조물로부터 수면까지의 거리를 고정시킨 후  $x_1 \sim x_2$ 와  $x_3 \sim x_4$ 의 거리를 변화하여 기울기에 따른 유의주기별 투과율 및 처오름을 비교한 결과 그림 3과 같이 나타났다. 그림 3-(a)에서 모든 기울기에서 투과율이 증가와 감소를 나타냈다. 가장 작은 기울기인 0.02에서 주기별 차이가 가장 심하게 나고 0.04에서 8.5 sec를 제외하면 변화폭이 가장 작게 나타났다. 그림 3-(b)와 그림 3-(c)는 수중구조물을 통과한 투과파에 의한 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이를 비교해본 결과를 나타낸다. 전체적으로 통과 전·후의 파고 높이가 크게 줄었음이 나타났다. 모든 주기에서 기울기가 증가함에 따라 증가와 감소를 나타냈으며, 경향은 비슷하게 나타났다. 유의주기가 증가함에 따라 소파장치 전면에서는 처오름 높이가 점차 감소함을 나타냈으나,

소파장치 후면에서는 점차 증가함을 나타냈다.

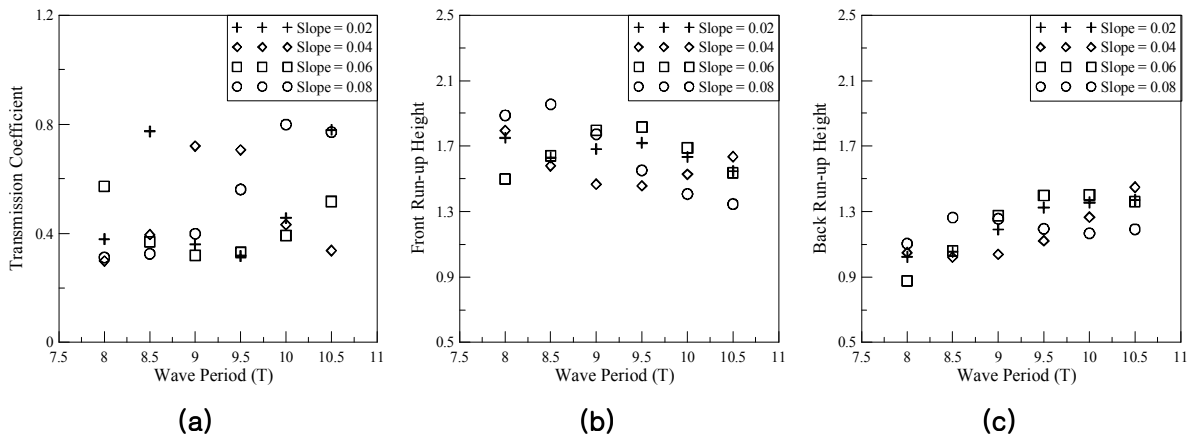


그림 3. 수면까지 높이 고정 시 유의주기에 따른 투과율 및 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이

소파장치 전면에서 2개의 수중구조물을 통과한 투과율이 배후에 미치는 영향을 알아본 결과 그림 4와 같이 나타났다. 수중구조물은 폭을 고정시킨 후, 수면까지의 높이에 변화를 주어 모의하였다. 투과율의 분포를 살펴보면 1개의 폭을 고정시킨 수중구조물이 있을 때 보다 최대값은 낮게 나타나지만 주기가 증가할수록 투과율은 증가와 감소가 반복적으로 나타났다. 소파장치 전면과 후면에서의 처오름 높이를 비교해본 결과 전면과 후면에서 그래프의 추세는 거의 유사하게 나타났고, 앞서 수행한 모의와 마찬가지로 전면에서보다 소파장치를 통과한 입사파의 처오름 높이가 확연히 줄어들음을 알 수 있다.

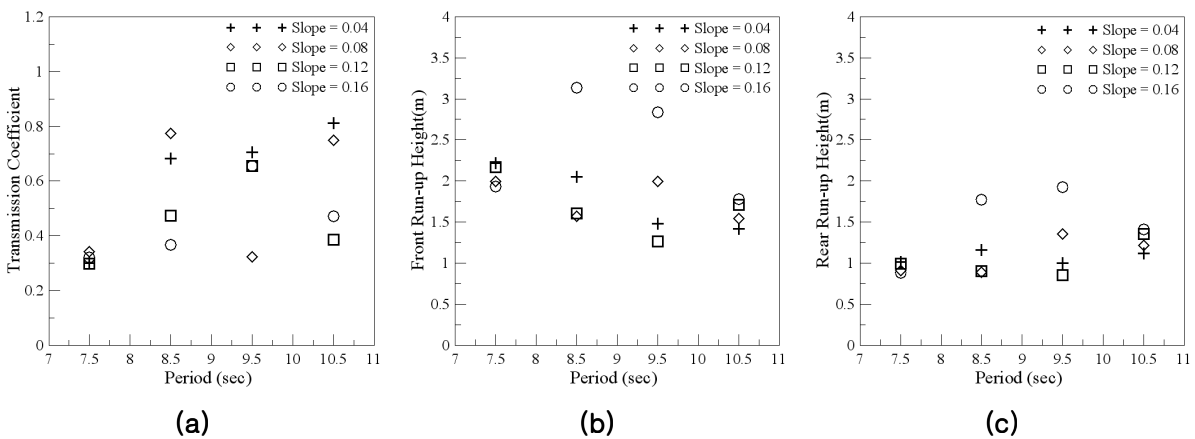


그림 4. 2개의 수중방파제의 폭 고정 시 유의주기에 따른 투과율 및 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이

2개의 수중구조물의 높이를 고정시킨 후 밀변의 길이를 변화시켜 파랑에 대한 거동을 알아본 결과 그림 5와 같이 나타났다. 5-(a)의 투과율 그래프를 보면 전체적으로 주기가 증가할수록 투과율이 증가하다가 감소하는 유사한 경향을 나타냈다. 투과율에 대한 값들도 제일 작은 수치를 나타냈다. 소파장치 전면과 후면에서의 처오름 높이를 비교한 결과 2개의 수중방파제의 폭을 고정했을 경우와 유사한 형태를 나타냈지만 그 수치는 작게 나타났다.

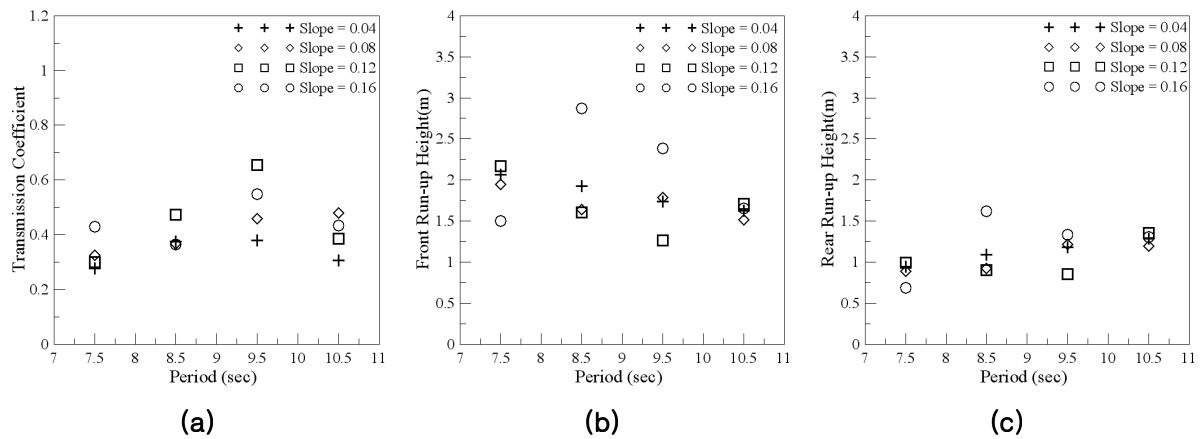


그림 5. 2개의 수중방파제의 수면까지 높이 고정 시 유의주기에 따른 투과율 및 소파장치 전·후면에서의 처오름 높이

## 5. 결론

유의주기와 수중구조물의 기울기를 다양하게 하여 투과율과 처오름 높이를 비교해본 결과 일부 유의주기에서 증가나 감소만을 나타냈으나, 증가와 감소가 반복적으로 나타난 경우도 있었다. 수중구조물의 수면까지의 높이를 고정하고 기울기를 결정했을 경우 각 기울기별 투과율이 폭을 고정했을 경우보다 큰 차이를 나타냈다. 전체적으로 수면까지의 높이를 고정한 경우가 투과율이 크게 나왔고, 기울기 0.06을 제외하고 나머지 기울기에서는 그 경향성마저 다르게 나타났다. 처오름 높이는 소파장치를 통과하면서 줄어들었음이 뚜렷이 나타났다. 수면의 높이를 고정한 후 수중구조물의 밀변을 증가하여 기울기를 결정하였을 때 기울기 0.02와 0.06은 수면의 높이를 변화하였을 때와 비슷한 경향을 보였으나 그 외의 기울기에서는 다르게 나타났다. 또한, 소파장치 후면에서의 처오름 높이는 비슷한 경향을 나타내고 있으나, 수중구조물의 밀변을 증가시켜 기울기의 변화를 준 경우가 조금 더 높게 나타났다. 2개의 수중구조물을 설치한 경우, 폭을 고정시킨 경우 주기가 증가할수록 투과율은 증가와 감소가 반복적으로 나타났지만, 높이를 고정시킨 경우 점차 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 소파장치에서의 처오름 높이를 비교하여본 결과, 소파장치 전면에서와 후면에서 처오름높이가 감소함이 나타났다. 폭을 고정시킨 경우와 높이를 고정시킨 경우 처오름높이에 대한 그래프의 경향은 비슷하게 나타났으나, 폭을 고정시킨 경우보다 높이를 고정시킨 경우가 처오름높이 수치가 더 낮게 나타났다. 향후 더 다양한 기울기의 변화와 소파장치의 폭 및 마찰계수를 다양하게 하여 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 과제는 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다 (과제번호: 2007-313-D00827).

## 참고 문헌

1. Madsen, P.A., (1983). Wave reflection from a vertical permeable wave absorber, Coastal Eng., 7: 381-396
2. Hsien-Kuo Chang and Jin-Cheng Liou, (2005), Long wave reflection from submerged trapezoidal breakwaters, Ocean Eng.