다양한 형상의 수중방파제를 지나는 고립파의 해석

Analysis of Solitary Wave through a Submerged Breakwater of Various Shape

이하우*, 조용식**

Ha Woo Lee, Yong-Sik Cho

요　　지

본 연구에서는 다양한 형상의 수중방파제를 이용하여 고립파(지진해일)에 대한 파랑의 제어기능을 검토하였다. 먼저, 연구를 수행하기 위하여 Navier-Stokes 방정식에 기초한 RANS 모형을 사용하였다. RANS 모형에서는 VOF기법을 이용하여 자유수면을 해석하였고, 또한 조밀한 격자간격을 사용하여 수치실험을 실시하였다. 수중방파제의 형상에는 삼각형, 반타원형, 직사각형 및 사다리꼴형을 사용하여 각각의 수중방파제 위를 통과하는 고립파를 해석하였다. 고립파의 파고와 여러 가지 형태를 갖는 각각의 수중방파제의 높이를 조절하면서 수중방파제를 지나는 고립파의 투과율을 해석하였다.

핵심용어 : 고립파, 수중방파제, Reynolds 방정식, VOF 기법

1. 서론

2011년 3월 11일에 발생한 규모 9.0의 일본 센다이 동쪽 135km지점의 지진으로 인한 지진해일은 엄청난 재산 및 인명 피해를 발생시켰다. 연안침식을 방지하는 구조물 중 수중방파제(submerged breakwater)는 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 연안침식을 방지할 뿐만 아니라 방파제를 수중에 건설함으로써 해역환경의 개선을 가능하게 한다.

국내에서 고립파와 수중방파제에 관한 연구로는 Hwang *et al.*(2003)은 투과성 수중방파제를 지나는 고립파의 유속장 및 난류강도를 연구하였으며, Lee (2008)는 고립파(지진해일) 작용하의 파랑 및 흐름특성과 파랑제어 대한 연구를 하였다. Lee *et al.*(2010)은 2열 불투과성 사각형 잠제를 이용한 단주기파랑 및 고립파를 제어하는 연구를 하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 입사파가 고립파인 조건에서 여러 가지 형상인 사각형, 삼각형, 사다리꼴 및 반타원형 형상의 불투수성방파제의 높이와 입사파의 조건을 달리하여 이에 투과된 파고값의 변화를 검토하였다.

2. 지배방정식

지형이 변화하는 해안에서의 유체의 자유수면의 흐름은 매우 복잡한 흐름을 갖는 난류의 흐름이다. 난류 흐름해석에서 속도는 평균속도〈 〉와 난류성분 u_i', 압력은 평균압력 〈 〉와 난류성분 P'으로 구분되며,

* 정회원・한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정・E-mail : how1986@hanyang.ac.kr

** 정회원・한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, 교신저자・E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$= \langle u_i \rangle + u_i{}', \qquad = \langle P \rangle + P' \tag{1}$$

식 (1)에서, = 1, 2, 3은 차례대로 축, 축 및 축을 나타낸다.

유체의 흐름이 비압축성이라고 가정하면 평균 흐름은 식 (2)와 식 (3)과 같은 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 의해 지배받는다(Lin과 Liu, 1998).

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i{}' u_j{}' \rangle}{\partial x_j} \tag{3}$$

식 (3)에서 ρ는 유체의 밀도를 나타내며, g_i는 중력가속도의 방향 성분을 의미한다. 또한, $\langle \tau_{ij} \rangle$는 평균 흐름의 점성 응력에 대한 텐서(tensor)이며, 뉴턴 유체(Newtonian fluid)에서는 분자 점성을 나타내는μ와 평균 흐름의 변형률 텐서 $\langle \sigma_{ij} \rangle$를 이용하여 $2\mu \langle \sigma_{ij} \rangle$로 나타낸다. 여기서, $\langle \sigma_{ij} \rangle$는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다(Liu과 Lin, 1997).

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

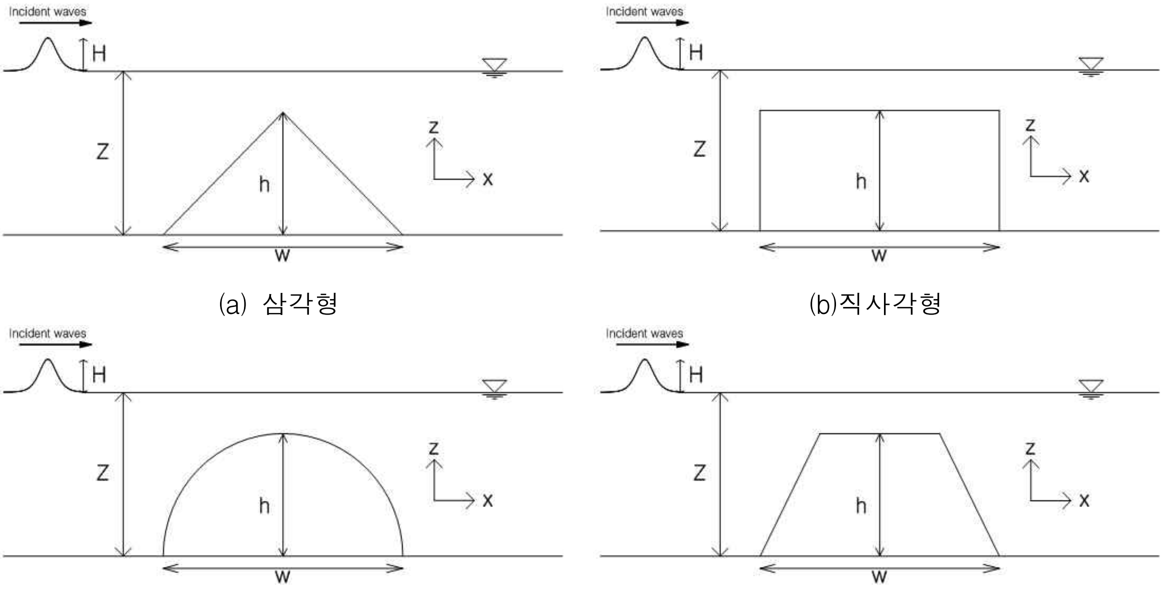
평균 흐름에서 난류 변동의 영향은 Reynolds 응력 텐서 $\rho \langle u_i{}' u_j{}' \rangle$를 이용하여 표현할 수 있다. Reynolds 응력 텐서가 비선형 Reynolds 응력 모델로부터 평균 흐름의 변형률과 상관 관계가 있다고 가정하면, $\rho \langle u_i{}' u_j{}' \rangle$는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다(Shih 등, 1996).

$$\begin{aligned}
\rho \langle u_i' u_j' \rangle &= \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} - C_d \rho \frac{k^2}{\epsilon}\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}\right) \\
&- \rho \frac{k^3}{\epsilon^2}\left[C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_l}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_l}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\delta_{ij} \right) \right. \\
&+ C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k}\frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\delta_{ij} \right) \\
&\left. + C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i}\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k}\delta_{ij} \right) \right]
\end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)에서 C_d, C_1, C_2 및 C_3는 경험상수이고 δ_{ij}는 Kronecker delta 함수를 의미한다.

3. 수치 실험조건

본 수치실험에는 높이 0.8m, 길이 50m의 격자망에서 실시하였다. x방향의 격자 간격은 0.05m, z방향의 격자간격은 0.01m으로 총격자의 개수는 x방향으로는 1,000개, z방향으로는 80개로 설정하였다. 수중방파제의 모양, 수중방파제의 높이(h) 및 파고값(H)을 1cm, 3cm, 5cm, 7cm, 9cm로 조정하여 수치실험을 하였다.



(a) 삼각형 (b)직사각형

(c) 반타원형 (d) 사다리꼴

그림 1. 다양한 형상의 수중방파제의 수치실험조건

표 1. 각각의 수중방파제 형상과 파고값에 따른 수치실험 조건

<table>
<tr><th colspan="6">삼각형, 직사각형, 반타원형 및 사다리꼴</th></tr>
<tr><th>Case</th><th>h/Z</th><th>h(cm)</th><th>Z(cm)</th><th>H(cm)</th><th>W(m)</th></tr>
<tr><td>1</td><td>0.3</td><td>15</td><td rowspan="7">50</td><td rowspan="7">1,
3,
5,
7,
9</td><td rowspan="7">2</td></tr>
<tr><td>2</td><td>0.4</td><td>20</td></tr>
<tr><td>3</td><td>0.5</td><td>25</td></tr>
<tr><td>4</td><td>0.6</td><td>30</td></tr>
<tr><td>5</td><td>0.7</td><td>35</td></tr>
<tr><td>6</td><td>0.8</td><td>40</td></tr>
<tr><td>7</td><td>0.9</td><td>45</td></tr>
</table>

4. 결과분석

결과 분석에 있어서 투과율은 고립파가 구조물을 통과 한 후 투과파고를 이용하여 해석하였다. 투과율은 입사파가 구조물을 지난 뒤 거의 일정해지기 시작하는 투과파의 최대파고를 입사파고로 나누어서 계산하였다.

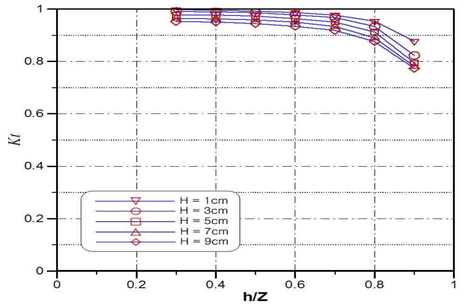


그림 2. 삼각형 수중방파제의 투과율

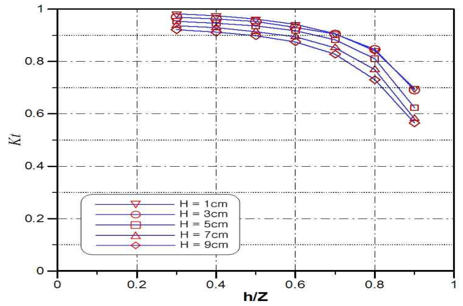


그림 3. 직사각형 수중방파제의 투과율

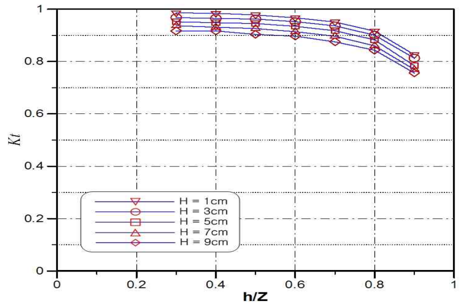


그림 4. 반타원형 수중방파제의 투과율

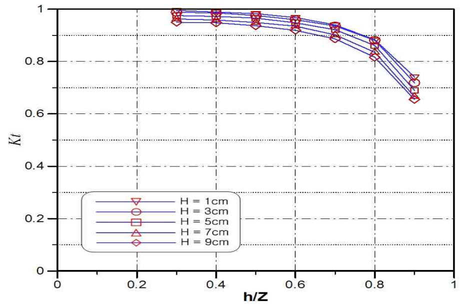


그림 5. 사다리꼴 수중방파제의 투과율

5. 결과

본 연구에서는 구조물의 형태에 따라서 그 위를 통과하는 고립파의 투과율에 대해서 해석하였다. 입사하는 파고와 수중구조물의 높이의 변화를 주면서 4개의 형태의 수중구조물에 대해서 수치실험을 하였다. 수치실험결과 여러 가지 형태의 수중구조물에서 가장 투과율이 작은 것은 직사각형 형태의 수중구조물이었으며, 입사하는 고립파의 파고가 높을수록 투과율이 낮게 나타났다. 본 연구를 통하여 지진해일과 같은 장주기 파랑의 영향을 고려하여 수중방파제의 형태를 설계할 때 도움이 될 것이라 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 지원 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 황종길, 전찬후, 조용식 (2003). “고립파에 의한 투과성 수중방파제에서의 유속장 및 난류강도 해석.” ‘03년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 5119-5123.

2. 이상덕 (2008). “고립파(지진해일) 작용하의 파랑 및 흐름특성과 파랑제어.” 석사학위논문, 한국해양대학교

3. 이광호, 정성호, 하선욱, 김도삼 (2010). “2열 불투과성 사각형 잠제를 이용한 단주기파랑 및 고립파의 제어.” 한국해안·해양공학회논문집, 한국해안해양공학회, pp. 203-214.