지진해일에 대한 원자력발전소의 안전성 검토
Safety Analysis of Nuclear Power Plant against Tsunami

김재홍*, 진소범**, 조용식***
Jae Hong Kim, So Byeom Jin, Yong Sik Cho

요 지

최근 4년간 한반도 근해에서는 53회 이상의 해저지진이 발생하고 있다. 지진해일은 천수효과로 인해 대규모 범람을 일으켜 많은 인명 및 재산피해를 초래할 수 있다. 그 중에서도 원자력발전소의 지진해일에 대한 안전성은 필수적으로 검증되어야한다. 본 연구에서는 Bousssinesq 방정성과 천수방정식을 이용하여 지진해일의 거동을 수치해석하며, 격자 간격과 계산 시간 간격의 세분화에 의한 누적오차를 줄이기 위해 다중격자 연결모형을 이용한다.

핵심용어 : 지진해일, Boussinesq 방정식, 천수방정식, 다중격자 연결모형

1. 서 론

지진해일은 해저지진으로 인해 발생하게 된다. 해저지진에 의한 해저지형의 융기 또는 침강은 순간적으로 수면변화를 일으켜 엄청난 양의 위치에너지로 생성된다. 이 에너지가 운동에너지로 변환되어 모든 방향으로 방파의 형태로 전파되는 것이 지진해일이다. 지진해일은 장파이기 때문에 진행속도가 매우 빠르고 파장이 길어 에너지를 보존한 상태로 먼 거리를 전파할 수 있다. 지진해일이 수심이 상대적으로 적은 해안 근처에 도달하게 되면 천수효과에 의해 파장과 이동속도는 감소하는 반면 파고는 급격하게 증가하여 많은 인명 및 재산 피해를 일으킬 수 있다. 우리나라에는 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일이 엄습해 동해안 지역에 많은 인명과 재산 피해를 입혔다.

본 연구에서는 지진해일에 대해 특히 안전성이 요구되는 원자력발전소에 대하여 검토하였다. 대상 지진해일은 우리나라 동해안에 큰 피해를 입힌 1983년 동해 중부 지진해일로 하여 안전성을 검토하였다.

2. 지배 방정식 및 수치해석

2.1 원해 지진해일

지진해일의 초기파장은 수 십 km에서 수 백 km에 이르기 때문에 비선형항과 바닥마찰항은 영향이 상대적으로 적어 무시할 수 있는 반면에 분산효과는 파장에 따라 중요성이 변하기 때문에 선형모형의 지배방정식에 포함한다.

좌표계 사용에 있어서는 만약 지진해일이 태평양과 같은 상대적으로 깊은 바다를 횡단하여 먼거리를 전파하는 경우에는 구면좌표계를 사용하지만, 상대적으로 작은 지역을 전파하는 경우에는 직교좌표계만을 사용할 수 있다.

Boussinesq 방정식으로부터 비션형항을 무시하면 Cartesian 좌표계에서 다음과 같은 선형 Boussinesq 방

* 한양대학교대학원 토목공학과 석사과정 · 02-2290-0318 (E-mail : sabjil98@ihanyang.ac.kr)
** 선임연구원, 한국원자력발안전기술원 · 042-868-0265 (k257jsb@kins.re.kr)
*** 교신저자, 한양대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 02-2290-0393 (ysc59@hanyang.ac.kr)

정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}=\frac{h^2}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)\right]-\frac{h^3}{6}\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial^2}{\partial t\partial x}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial^2}{\partial t\ \partial y}\left(\frac{Q}{h}\right)\right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}=\frac{h^2}{2}\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)\right]-\frac{h^3}{6}\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial^2}{\partial t\partial x}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial^2}{\partial t\ \partial y}\left(\frac{Q}{h}\right)\right] \tag{3}$$

식(1)-(3)에서 P와 Q는 각각 x와 y방향의 체적흐름율이다(volume flux). 즉, $P=u(h+\zeta)$, $Q=v(h+\zeta)$ 이며 h는 정수면(still water level)에서의 수심이다. 식 (1)은 연속방정식으로 절삭오차가 없는 정확한 식인 반면 식 (2)와 (3)은 운동량방정식으로 동수압의 일부를 고려한 근사식이다. 식 (2)와 (3)의 첫째 항은 국부가속도에 의한 관성효과, 둘째 항은 압력효과, 그리고 오른쪽항은 분산효과를 나타낸다. 여기서 운동량 방정식 (2)와 (3)에서는 지구자전에 의한 Coriolis 효과는 고려하지 않았다.

2.2 근해 지진해일

지진해일이 해안선으로 접근하면 비선형성이 매우 중요하기 때문에 선형 천수방정식을 쓸 수 없다. 특히, 지진해일이 해안지역으로 접근하면 파장은 짧아지고 파고가 증가할 뿐만 아니라 분산의 중요성이 감소하기 때문에 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다. 또한, 해안선 부근에서는 바닥마찰효과가 중요하기 때문에 바닥마찰항을 포함한다(Kajiura와 Shuto, 1990)

바닥마찰항을 포함하는 비선형 천수 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{H}\right)+gH\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\tau_x H=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{H}\right)+gH\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\tau_y H=0 \tag{6}$$

식 (4)-(6)에서 ζ는 자유수면변위, P와 Q는 각각 x와 y방향의 체적흐름율, $H=h+\zeta$ 는 전체수심, τ_x와 τ_y는 각각 x와 y방향의 바닥마찰항이다.

식 (5)와 (6)의 바닥마찰항은 Chezy 식이나 Manning 식과 같은 실험공식을 사용하며, 먼저 Chezy 식은 다음과 같다.

$$\tau_x=\frac{g}{C_f^2 H^3}P(P^2+Q^2)^{1/2},\quad \tau_y=\frac{g}{C_f^2 H^3}Q(P^2+Q^2)^{1/2} \tag{7}$$

식 (7)에서 C_f는 Chezy 마찰계수이며, Manning 식은 다음과 같다.

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{10/3}} P(P^2+Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{gn^2}{H^{10/3}} Q(P^2+Q^2)^{1/2} \tag{8}$$

식 (8)에서 n은 Manning 조도계수이다. 실험계수인 n과 C_f는 Reynolds와 해안의 조도 등과 같은 흐름과 현장조건에 따라 다른 값을 갖는다.

비선형 천수방정식은 유한차분기법의 하나인 leap-frog 기법을 사용하여 차분하며, 운동량방정식의 비선형항은 풍상차분기법(upwind scheme)으로 차분한다. 유한차분법을 이용하여 수치계산을 수행하기 위해서는 전체영역을 일정한 수로 차분화해야 하며, 초기에 모든 영역에서 자유수면변위와 체적흐름율이 0이 된다. 또한 초기의 해안선은 전체수심, 즉 수심과 자유수면변위의 합이 0이 되는 곳을 연결한 선으로 정의한다

3. 수치계산

본 연구에서는 동해에서의 지진해일의 거동을 조사하기 위하여 다중격자 연결모형을 사용하였다. 이는 계산시간 간격의 세분화에 의한 누적오차가 상대적으로 커지는 결과를 초래할 수 있기 때문이다.

일본의 서해안에 남북방향으로 분포하고 있는 진원역으로부터 대화퇴를 거쳐 동해안에 도달하는 지진해일의 크기를 정확히 산정하기 위해서 유한차분의 격자의 크기를 줄여야 한다. 본 연구에서는 큰 격자와 작은 격자의 격자간격을 1:3으로 하여 동해안의 지형을 세분화하였다. 수치 계산은 이 격자를 연결하여 수행하였으며, 계산 중 각 영역의 경계에서는 수위와 유량을 서로 교환한다. 물론 격자 간격과 각 영역 내의 최대파고가 다르기 때문에 사용되는 시간 간격도 차이가 있다.

격자는 가장 큰 영역부터 순서대로 격자크기를 1.11km부터 4.5m 까지 줄여나갔다. 시간 간격도 3.6초에서 0.1초로 격자크기에 맞게 조정하였다.

4. 적 용

1983년 동해 중부 지진해일은 일본 추전현 서쪽 외해에서 발생한 진도 규모 7.7의 해저지진으로 인하여 발생하였으며, 추전 해안, 북해도로부터 한반도까지 영향을 비친 비교적 단주기의 지진해일이었다. 지진해일 수심에 의해 결정되므로 파원 위치에서 상대적으로 수심이 깊은 동해안으로는 지진해일이 빠르게 전파되어

그림 1. 지진발생 120분 후의 파고분포

그림 1에서 알 수 있듯이 지진발생 120분 후에 지진해일이 우리나라 동해안에 도달하였다. 그러므로 지진해일의 영향을 고려하여 수치모의실험은 지진 발생 후 140분까지로 하였다.

울진 원자력발전소에서는 지진해일의 처오름높이에 대해 원자력발전소 부지가 안전한지, 냉각수의 벨마우스가 지진해일의 처내림에 대한 안전한지 평가하였다. 그림 2는 4.5m 격자상에서의 최대파고분포를 나타낸것이다. 방파제 전면에서는 3.1m, 방파제 배수구 부분에서는 3.4m, 취수구 부분에서는 4.8m로 나타났으며, 이는 취수구에서의 파고의 높이가 벽면에서의 재반사로 파고가 최고 4.8m까지 달하는 것으로 생각된다.

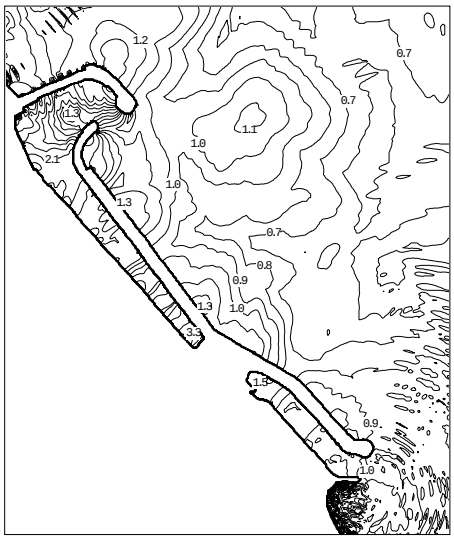

그림 2. 울진 원자력발전소 부근에서의 최대파고분포 (Δx=4.5m)

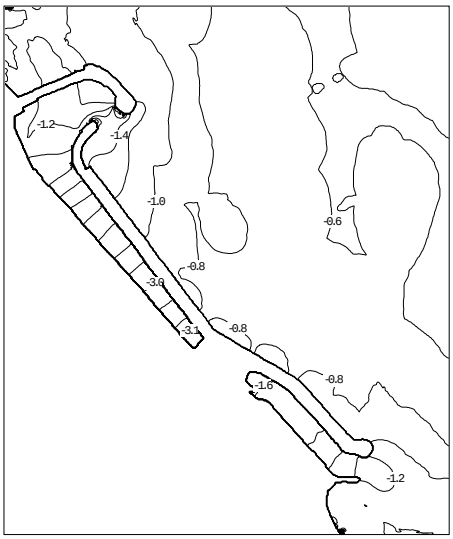

그림 3. 울진 원자력발전소 부근에서의 최저파고분포 (Δx=4.5m)

그리고 그림 3은 4.5m 격자상에서의 최저파고분포를 수치계산하여, 극한상태를 기분으로 필수 냉각수 펌프의 수위가 어느 정도의 여유수심을 확보하였는가를 검토하였다. 그림 3에서 보는 봐와 같이 울진 원자력발전소에서의 최저 처내림높이는 -3.10m로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 지진해일에 대한 울진 원자력발전소의 안전성을 평가하였다. 울진 원자력발전소의 방파제 높이는 정수면에서 10m이며, 냉각수 펌프의 수위는 정수면에서 -4.7m이다. 1983년 동해 중부 지진해일의 수치모의실험 결과 지진해일의 최대 처오름높이는 3.1m로 나타났으며, 최저 처내림높이는 -3.1m로 나타났다. 이는 울진 원자력발전소의 방파제 높이가 10m이고, 냉각수 펌프의 수위가 -4.7m인 점을 고려해 볼 때 여유가 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Cho, Y.-S., 1995. Numerical Simulaions of Tsumani Propagation and Run-up.
2. Kajiura, K. and Shuto, N., 1990. "Tsunami," in The Sea, edited by B. Le Mehaute, and D.M. Hanes, Vol. 9, Part B, pp. 395-420, John Wiley & Sons, Inc.