

# 1993년 지진해일에 대한 원자력발전소의 안전성 평가

## Safety Evaluation of Nuclear Power Plant against 1993 Tsunami

진소범\*, 이호준\*\*, 조용식\*\*\*, 今村文彦\*\*\*\*

So-Beom Jin, Ho-Jun Lee, Yong-Sik Cho, Fumihiko Imamura

### 요 지

동해의 일본쪽 해저 단층대에서 발생한 지진해일은 우리나라 동해안에 영향을 미쳐왔다. 또한 1983년 동해중부 지진해일과 1993년 홋카이도남서외해 지진해일은 우리나라 뿐만 아니라 러시아에도 인명피해와 재산피해를 발생시켰다. 우리나라 동해안에는 울진, 월성 및 고리 원자력발전소 부지가 있고, 앞으로도 수 개의 원전이 계획되어 있다. 따라서 지진해일의 영향 평가 및 원자력발전소의 안전성 확인에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

기존에 수행된 동해에서의 지진해일 평가연구는 원자력발전소의 설계와 관련하여 안전성을 확인하는 정량적인 평가와 지진해일에 의한 예상 범람지역을 평가하는 것으로 크게 분류할 수 있다. 또한 최근에는 보다 세밀한 격자에 의한 비교적 자세한 평가연구가 수행되었다.

본 연구에서는 기존의 지진해일범람 수치모형을 이용하여 1993년 지진해일에 대하여 울진 원자력발전소의 안전성 평가를 수행하였으며, 지진해일 평가결과를 이용하여 원자력발전소의 안전성을 확인하였다. 또한 현재까지의 원자력발전소에 대한 지진해일 안전성 평가연구에 대한 검토를 통하여 지진해일에 대하여 원자력발전소의 안전성 확인을 위한 평가에서 향후 고려하여야 할 몇몇 사항을 제안한다

**핵심용어 : 지진해일, 수치모형, 원자력발전소, 냉각수 취수능력**

### 1. 서 론

동해는 지진해일을 유발시키는 대규모 해저지진이 발생하는 지역으로서, 1983년 동해중부지진과 1993년 홋카이도남서외해지진에 의한 지진해일로 일본은 물론 우리나라와 러시아에서도 인명 및 재산피해가 발생하였다. 특히 동해안에는 많은 원자력발전소가 건설, 운전 및 계획중에 있어 지진해일에 의한 범람가능성 및 안전성평가와 관련하여 다양한 연구가 필요하다.

지진해일의 거동에 관한 수치실험은 20여년 이상 수행되었으며, 원자력발전소에 대해서도 여러 연구가 수행되었다. 원자력발전소와 관련하여 기존의 연구는 주로 지진해일의 정량적인 평가를 통하여 원자력발전소 설계의 안전성을 확인하는 노력이었다. 또한 최근에는 격자간격을 세밀화한 유한차분 수치모형을 이용하여 동해안의 지진해일 위험성 및 동해의 지진해일 거동을 비교적 자세히 파악한 연구가 수행되었다.

지진해일이 천해역에 접근하면 천수효과에 의해 높은 처오름과 처내림을 유발시킨다. 처오름은 범람을 유발시켜 인명 및 재산피해를 초래할 수 있으며, 처내림은 반대로 해수면을 하강시켜 해수를 이용하는 시설의 중단을 가져올 수 있다. 원자력발전소의 경우 냉각수 취수가 중단된다면 안전

\* 정회원, 원자력안전기술원 구조부지실 · E-mail: k257jsb@kins.re.kr

\*\* 정회원 · 국립방재연구소 연구관 · E-mail: leehojun@mogaha.go.kr

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

\*\*\*\* 도호쿠대학교 토목공학과 교수 · E-mail: imamura@tsunami2.tohoku.ac.jp

성에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 철저한 대비가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 지진해일 수치모형중에서 범람모형을 이용하여 1993년 지진해일에 의한 동해안 주요지점에서의 최대 처오름 높이를 계산하여 현장관측자료와 비교함으로써 모델의 적용성을 검증한다. 또한 울진원자력발전소에서의 최대 처오름높이와 수위강하량을 계산하여 범람가능성 및 냉각수 취수능력을 평가한다.

## 2. 지진해일 평가모형

### 2.1 선형 모형

지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단할 경우 분산과 Coriolis 효과는 중요한 역할을 할 수 있는 반면에 비선형 이송관성력은 중요하지 않다. 따라서, Coriolis 효과를 포함하는 선형 Boussinesq 방정식이 지진해일의 전파를 모의하기에 적당하다(Imamura 등, 1988; Liu 등, 1994). 반면, 상대적으로 작은 지역을 전파하는 경우에는 일반적으로 지진해일이 태평양과 같은 대양을 횡단할 경우에는 구면좌표계를 대신하여 직교좌표계만을 사용할 수 있다. 따라서 본 연구의 선형 모형에서는 선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용한다.

선형모형에서는 양해(explicit) leap-frog 기법을 이용하여 선형 천수방정식을 차분하며, leap-frog 기법에 의해 발생하는 수치분산을 조절하여 선형 Boussinesq 방정식의 물리적 분산을 대체한다.

### 2.2 비선형 모형

지진해일이 수심이 얇은 해안지역으로 전파되어 오면 천수효과에 의해 파고는 증가하고 파장은 감소하므로 비선형 이송관성력이 매우 중요해진다. 또한, 얇은 수심에서는 분산의 중요성이 감소하는 반면 바닥마찰효과는 매우 중요하다. 따라서, 바닥마찰력항을 포함하는 비선형 천수방정식이 지진해일의 범람을 모의하는 지배방정식으로 사용된다. 따라서 본 연구에서는 바닥마찰효과를 포함하는 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다.

비선형모형에서도 선형모형과 마찬가지로 양해 leap-frog 기법을 이용하여 선형항을 차분하며, 풍상(upwind)차분기법으로 운동량 방정식의 비선형 이송항을 차분한다. 바닥마찰항은 Chezy 공식과 Manning 공식을 사용하여 고려할 수 있도록 하였으며, 연속방정식으로부터 유도된 이동경계조건을 이용하여 해안선의 움직임을 추적한다. 아울러, 범람지역에 관한 정보를 얻기 위하여 지진해일의 거동에 따라 이동하게 되는 해안선의 위치를 추적하기 위한 이동경계조건이 필요하다.

### 2.3 다중격자 연결모형

서로 다른 격자크기를 가지고 있는 두 지역사이의 정보를 교환하기 위해 1:3의 비율로 큰 격자 안에 작은 격자들을 구성하여 동일한 시간단계일 때 두 격자계사이의 경계를 따라 작은 격자계에 대한 체적유입을 제외하고는 큰 격자와 작은 격자 안에서의 체적흐름율은 운동량방정식으로부터 결정된다. 이들 값은 큰 격자계로부터 인접한 체적흐름율을 보간하여 결정하며, 작은 격자계에서 다음 시간단계일 때 자유수면변위는 연속방정식으로부터 계산된다. 일반적으로 작은 격자계에서 시간단계의 크기는 유한차분법의 안정조건을 만족시키기 위해 큰 격자계에서 사용하는 값보다 작다. 따라서, 다음 시간단계에서 작은 격자계의 경계를 따라서 생기는 체적흐름율은 큰 시간간격에 대해 큰 격자계로부터 구한 인접 체적흐름율을 보간함으로써 구할 수 있다. 작은 격자계에서 자유수면변위는 큰 격자계의 다음 시간단계까지 계산된 후에 큰 격자계의 자유수면변위는 연속방정식을 해석하여 새로운 값을 얻게 된다.

### 3. 모형 검증

지진해일 처오름모형을 검증하기 위해 미국에서 수행된 수리모형실험을 이용한다. 실험은 미공병단 산하의 해안공학연구소(CERC, Coastal Engineering Research Center)에서 수행되었으며, 수조의 중앙에 높이 0.625m, 해저지름 7.2m, 경사 1V:4H의 원형섬이 위치한다. 입사파는 파고( $A$ )가 0.032m인 고립파이며, 비선형성의 크기를 나타내는 수심( $h$ )에 대한 입사파의 파고의 비, 즉  $\varepsilon (=A/h)$ 은 0.1이다.

검증결과, 수리실험관측 결과와 수치해가 다소 차이를 보이고 있기는 하나 전체적으로 매우 유사한 결과를 제공하였으며, 전체적으로 처오름 수치모형에 의한 결과는 수리모형실험 관측치와 잘 일치하고 있을 뿐만 아니라 이동경계조건 또한 매우 만족하게 작동함을 확인하였다(진 등, 2001).

### 4. 안전성 평가

1993년 7월 12일 밤 10시 17분 일본 홋카이도 남서 외해에서 발생한 지진해일은 일본 홋카이도 서북방향 약 70km를 진원으로 한 Richter 규모 7.8의 지진에 의해 야기되었다. 수치계산의 초기조건으로는 해저면 변위의 연직성분이 초기수면변위와 같다고 가정한 Mansinha와 Smylie(1971)의 이론을 이용한다. 또한 계산에 초기조건을 산정하기 위해 단층모형으로는 DCRC-17a 모형(Takahashi 등, 1984)을 사용한다. 초기파형 산정에 사용된 단층 매개변수는 표 1에 제시하였다.

표 1. 1993년 지진해일의 지진매개변수

$N(^{\circ}N)$	$E(^{\circ}E)$	$H(km)$	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$L(km)$	$W(km)$	$u(cm)$
42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	1200
42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	250
43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	571

본 연구에서는 울진 원자력발전소 부지에서의 지진해일 범람계산을 위해 4.5m의 격자를 사용한 수치모형을 수립하였다. 발전소부근 연안역에서의 상세한 지형조건을 부여하고 비선형계산을 실시하기 위하여 1.1km의 격자간격의 기본영역을 중심으로 각각 370m, 123.3m, 41.1m, 13.7m의 격자간격을 갖는 부영역을 포함한다.

지진발생후 2.5시간동안에 대해 계산한 지진해일에 의한 최대 처오름높이와 수위강하는 그림 1로 나타낸다. 발전소부지 전면에서의 최대 처오름높이 분포를 보면 방파제 정면에서는 0.60m, 취수구에서는 1.80m로 계산되었다. 또한 수위강하는 방파제 내부에서 최대 -2.60m로 나타났다.

1993년 지진해일에 대한 수치해석 결과, 울진 원자력발전소의 지진해일에 의한 최대 처오름높이와 수위강하는 1.80m와 -2.60m로 계산되었다. 울진 원자력발전소 부지의 정지표고는 평균해수면상 10.00m로서 1993년 지진해일과 같은 규모의 지진해일에 의한 울진 원자력발전소 부지의 범람가능성은 없는 것으로 판단된다. 또한 지진해일로 인한 최저 파고에 대해 필수냉각수펌프(Essential Service Water Pump)의 벨마우스수위(Bell Mouth Elevation)가 어느 정도의 여유수심을 검토해 보았다. 울진 원자력발전소에서의 최저 처내림높이는 -2.60m로 나타났고, 냉각수 펌프의 벨마우스 수

위는 -4.70m로 안전관련인 필수냉각수계통에는 약 2.10m의 여유가 있음을 알 수 있다.

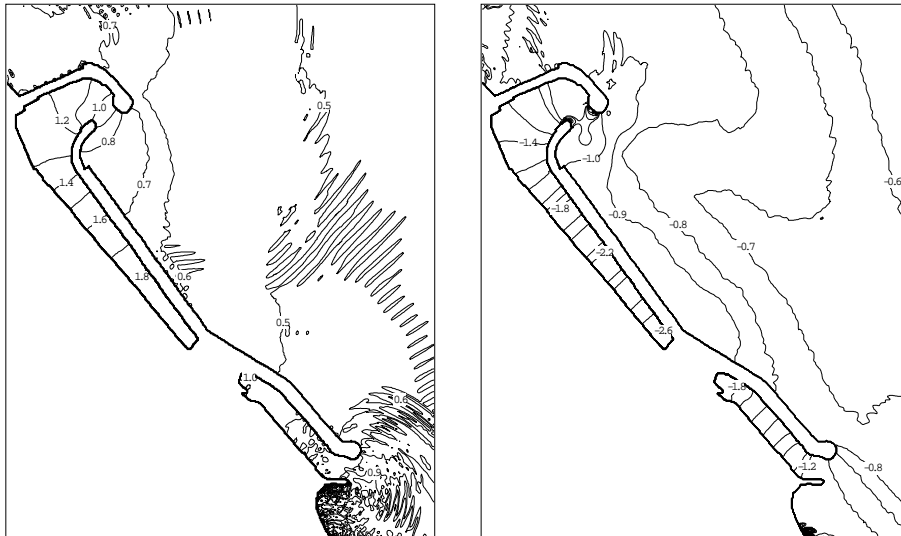


그림 2 발전소 부근에서의 최대 및 최저 파고 분포

## 5. 향후 안전성 평가 고려사항

지진해일에 대한 원자력발전소의 안전성평가연구는 여러 전문가들에 의해 다각적으로 수행되어 왔다. 이들 기존의 연구는 이미 발생한 지진해일에 대한 보다 정확한 수치해석 결과를 제시하고, 향후 발생가능한 규모의 지진해일에 대한 정량적인 예측을 수행하는 것이었다. 이를 위해 다양한 수치모형과 기법이 적용되어 정량적인 평가에 획기적인 개선이 이루어졌다.

그러나 지진해일의 초기파형 결정과 관련해서는 가정에 의존하고 있다. 일반적으로 이미 발생한 지진해일에 대해서는 다양한 지진원 매개변수(source parameters) 조합을 사용하여 수치해석 결과의 정확성을 높이고 있는 반면, 향후 발생가능한 지진해일에 대한 지진원 매개변수는 진원역의 면적자료로부터 단순계산으로 구한 것이므로 자료의 정확성에는 의문점이 많다. 따라서 기존에 제시된 지진공백역의 지진원 매개변수를 이용하면 가상 지진해일의 영향을 상대적으로 작게 제공했을 가능성이 있다. 또한 우리나라에 영향을 미치는 지진해일의 진원역이 동해의 일본쪽 해역이어서 많은 조사나 자료수집이 부족한 것이 현실이다.

더욱이, 지진공백역에서 향후 발생가능한 지진해일에 대한 초기파형을 결정하는 지진원 매개변수의 정확한 선정이 어려운 관계로 모든 지진공백역을 대표할 수는 없다. 따라서, 상대적으로 적은 처오름높이를 제공했을 가능성이 있으며, 지진 매개변수가 변경되면 매우 큰 처오름높이를 제공할 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

아울러, 해안선에서 지진해일의 거동에 관한 연구는 지진해일에 수반되는 쇠파(breaking), 난류생성(turbulence), 유사이송(sediment transport) 및 처오름(run-up)과 처내림(run-down) 등과 같은 여러 자연현상에 관한 물리적 특성을 규명하는 것은 물론이고 예기치 못한 지진해일의 급습으로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 방재작업의 수단으로도 매우 중요한 것이므로 국내에서도 보다 활발하고 다양한 연구가 진행되어야 할 것이다.

또한, 한반도 주변에는 작은 규모이지만 해저지진이 자주 발생하고 있으며, 아주 낮지만 근지 지진해일을 발생가능성도 무시할 수 없으므로 근지 지진해일에 대해서 충분히 대비를 해야 한다. 이와 같은 근해 지진해일은 원해 지진해일과는 달리 도달시간이 수 분 정도에 불과하므로 지진해일이 발생할 경우 엄청난 피해가 예상된다. 따라서 근지 지진해일 발생가능성에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

1993년 지진해일에 대하여 울진 원자력발전소의 안전성 여부를 검토하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과, 울진 원자력발전소의 최고 및 최저 지진해일과고는 1.80m와 -2.60m로 계산되었다. 울진 원자력발전소 부지의 정지표고는 평균해수면상 10.00m로서 1993년 지진해일과 같은 규모의 지진해일에 의한 울진 원자력발전소 부지의 범람가능성은 없는 것으로 판단된다. 또한 냉각수 펌프의 벨마우스 수위는 -4.70m로 안전관련인 필수냉각수계통에는 약 2.10m의 여유가 있음을 알 수 있다. 따라서 1993년 지진해일과 같은 규모의 지진해일에 대해 울진 원자력발전소는 안전한 것으로 판단된다.

그러나 향후 발생가능한 지진해일에 대해서는 초기파형의 결정하는 지진원 매개변수의 정확한 선정이 어려운 것이 현실이다. 따라서 원자력발전소의 안전성 평가와 관련하여 지진해일의 초기파형 결정과 관련한 연구가 필요하다. 또한 해안선에서 지진해일의 거동에 관한 연구는 지진해일에 수반되는 쇄파(breaking), 난류생성(turbulence), 유사이송(sediment transport) 및 처오름(run-up)과 처내림(run-down) 등과 같은 여러 자연현상에 관한 물리적 특성을 규명하는 것은 물론이고 예기치 못한 지진해일의 급습으로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 방재작업의 수단으로도 매우 중요한 것이므로 국내에서도 보다 활발하고 다양한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 진소범, 최강룡, 이상국, 조용식, 2001, “원자력발전소 지진해일 안전성 검증프로그램 개발”, *한국원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집*.
2. Cho, Y.-S. and Liu, P.L.-F., 1999. Crest length effects in nearshore tsunami run-up around islands, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 7907-7913.
3. Imamura, F. and Goto, C., 1988, “Truncation error in tsunami simulation by the finite difference method,” *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, pp. 245-263.
4. 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.*
5. Kowalik, Z., 1993. “Solution of the linear shallow water equations by the fourth-order leapfrog scheme,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, pp. 10205-10209.
6. Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Seo, S.N. and Yoon, S.B., 1994. Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Inundation with Application to Hilo, Hawaii, Technical Report, *Cornell University*.