

## 울진 원자력발전소 부지에 대한 지진해일 위험도 재평가 Revaluation of Tsunami Risk at the Site of Ulchin Nuclear Power Plant

이해균\* · 이대수\*

Haegyun Lee and Dae-Soo Lee

**要 旨** : 과거, 울진원전 부지의 지진해일에 대한 안전성 평가는 가상최대 지진규모와 그에 상응하는 단층 파라미터를 이용하여 수행되었으나, 최근 지진공백역 이론에 근거하여, 과거 평가 규모 이상의 지진발생 가능성이 지진학자들에 의하여 제기되고 있다. 본 연구에서는 선형·비선형천수방정식 기반의 유한차분법을 이용하여 지진해일 안전성을 재평가하였다. 먼저, '83년 지진해일을 모의하고 이를 동해안 임원항의 최고 범람 수위와 비교하였다. 다음으로 '83년, '93년 지진해일과 위험 단층으로 분류되고 있는 5개 지진공백역 단층에 대하여 울진원전부지 도수로에서의 수위 상승과 저하를 계산하여, 울진원전이 평가대상 단층으로 의한 지진해일 발생시에도 필요 냉각수의 취수가 가능함을 보였다.

**핵심용어** : 지진해일, 지진공백역, 냉각수, 원자력발전소

**Abstract** □ In the past, safety assessment on the site of Ulchin Nuclear Power Plants against tsunamis was carried out with probable maximum earthquake magnitude and related tsunamigenic fault parameters. Recently, however, based on the seismic gap theory, some seismologists warned about earthquakes of larger magnitudes than had been expected. In this study, we reevaluated tsunami risk with a finite difference model based on linear and nonlinear shallow water equations. Firstly, we simulated the '83 tsunami and compared the calculated water surface profile with the observed wave heights. Secondly, we evaluated the rise and drop of sea water level at the site of Ulchin Nuclear Power Plant with fault parameters of the past '83, '93 tsunamis and some dangerous faults. Finally, we showed that the cooling water intake facility of Ulchin Nuclear Power Plants would be safely operated in disastrous tsunamis.

**Keywords** : tsunami, seismic gap, cooling water, nuclear power plant

### 1. 서 론

우리나라의 원자력 및 화력발전소 부지는 필요한 냉각수의 확보를 위하여 해안지역에 위치하고 있으며, 이로 인하여 지진해일, 폭풍해일 등의 해안 발생 재해에 노출되어 있다. 동해안에 위치한 울진 원자력발전소 부지의 지진해일에 대한 안전성에 대해서는 1986년 7%의 최대 잠재지진규모와 이에 따른 단층매개변수를 입력자료로 평가하여 안전성 입증에 활용하였으나, 최근 일부 연구자료에

의하면 일본 아키타 지방 연근해의 지진공백역(seismic gap, 과거 대규모의 지진이 발생했던 지역 사이에 위치한 지역으로서, 향후 지질학적 운동을 위한 에너지의 축적이 진행되고 있는 것으로 의심이 되는 지역)에서 과거 예상했던 규모 이상의 큰 지진해일 발생가능성이 지진학자들에 의하여 제기되고 있다(e.g. 石川, 1994). 이러한 이유로 원자력 관련 규제기관으로부터 부지 안전성의 재검토 필요성이 수회에 걸쳐 제기되고 있다. 또한, 최근 국내에서 고조되고 있는 자연재해에 대한 사회적 관심과 더불어

\*한국전력 전력연구원 구조부지그룹(Corresponding author: Haegyun Lee, Structural Engineering and Site Technology Group, Korea Electric Power Research Institute, Munji-Dong, Yusong-Gu, Taejon 305-380, Korea. haegyun@kepri.re.kr)

어 국가 주요 시설물의 하나인 원자력발전소의 해안 재해에 대한 안전성 평가는 발전소의 운영 인·허가 및 안정적인 운전애 매우 중요한 요소라고 할 수 있다.

국내 원자력발전소 부지에 대한 지진해일 연구로는 한국전력기술주식회사(1986)에서 수행한 울진 1, 2호기 원전 부지를 대상으로 가상최대지진해일(PMT, Probable Maximum Tsunami)에 대한 부지고(敷地高) 안전성 검토와 1991년 고리, 월성 원전부지의 지진해일 안전성에 대한 한국전력공사(1991)의 연구가 있다. 1986년의 울진 부지에 대한 지진해일의 안전성 입증은 발전소 부지앞 수심 200 m 해상까지 선형천수방정식으로 수위를 계산한 후 Shuto의 처오름 공식(Shuto, 1972)을 이용하여 최고 해수위를 결정하고, 그와 같은 만큼의 최저해수위를 가정하는 방식으로 수행되었다(한국전력기술주식회사, 1986). 1991년의 고리, 월성 부지에 대한 연구에서는 발전소 부지 10 km 앞까지 선형천수방정식 기반의 유한요소법으로 해석하고, 그 이후 발전소 부지까지는 비선형천수방정식을 이용한 유한차분법으로 계산하는 방식으로 입증되었다. 두 연구 결과를 종합하면 Table 1과 같다. Table 1에 의하면, 울진 1, 2호기의 경우, 가상최대지진해일에 대하여 발전소의 안전운전에 필수적이며, 원자로 격납용기와 관련된 필수냉각수(ESW, Essential Service Water) 계통은 약 2 m의 여유수심을 확보하고 있으나, 비안전계통인 복수기(condenser)에 냉각수를 공급하는 순환수(CW, circulating water) 계통의 경우 가상최대지진해일 발생시 여유수심이 부족하여 발전소 운전정지를 초래할 위험성이 있다. 그러나, 과

거 울진원전부지에 대한 평가는 발전소 부지까지 수치모델을 적용하지 않고, 해안지형을 이상화하여 간략식(Shuto의 처오름 공식)을 적용하였으므로, 현재의 기준으로 볼 때, 합리적인 처오름 높이 및 수위 저하량을 산정하였다고 보기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 최근의 연구성과를 반영한 모델을 이용하여, 과거 우리나라 동해 연안에 영향을 미쳤던 1983년 동해중부 지진해일, 1993년 북해도 남서외해 지진해일에 의한 울진원전 부지에서의 수위 상승·저하를 재평가하고, 몇몇 지진학자들에 의하여 위험단층으로 제시되고 있는 지진공백역 단층에 의한 지진해일에 대하여 울진원전 취수시설의 취수 지속성 여부를 검토하였다.

## 2. 수치모델의 적용 및 검증

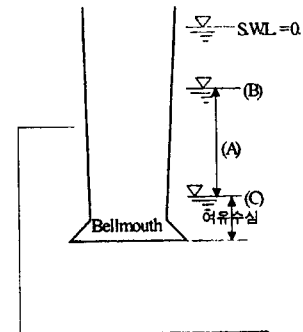
### 2.1 초기 파형 결정

지진해일은 해저에서 발생한 지진에 의하여 만들어지는 해저지반 변위가 해수면 변위를 만들고, 그것이 수면을 전파해 나가 육지로 범람하는 현상을 말한다. 따라서, 가장 먼저 해저지반 변위를 계산해야 한다. 지반변위 계산에는 단층 폭, 길이, 주향, 경사 등의 단층 파라미터를 입력변수로 정적인 변위를 계산하는 Mansinha and Smylie (1971)의 모델을 적용하였다. 현재 대부분의 연구에서와 같이, 대규모 지진해일에서는 발생해역의 수심에 비하여 단층면의 폭과 길이가 매우 크고, 단층운동의 지속시간이 짧기 때문에 해저지반 변위를 그대로 해수면 초기 변위

**Table 1.** Summarized result of past researches on nuclear power plants(한국전력공사, 1991, unit: m)

분류	가상최대 지진해일에 의한 수위저하량(A)	저극조위(B)	최저수위에 대한 취수 여유고		
			최저수위(C=A+B)	ESW Pump Bellmouth 위치	여유고
UNIT			CW Pump Bellmouth 위치		
월성 1,2호기	-0.800	-0.290	-1.090	-5.00	3.910
				-3.55	2.460
고리 1,2호기	-0.480	-0.497	-0.997	-2.82(1호기)	1.843(1호기)
				-3.67(2호기)	2.697(2호기)
고리 3,4호기	-0.310	-0.497	-0.807	-3.96	2.983
				-3.48	2.673
울진 1,2호기	-3.000	-0.300	-3.300	*-5.29	1.992
				** -1.65	-1.650

(\*, \*\*: 착오로 보이며, 각각 -4.70, -4.80으로 수정되어야 함).



로 적용하였다.

**2.2 유한차분 수치모델**

본 연구에서는 일본 동북(東北)대학에서 개발한 유한차분 수치모델 TUNAMI(UNESCO, 1997)를 적용하였다. 판구조론(plate tectonics)에 의하면 우리나라 동해안에 피해를 입힐 가능성이 있는 거대 지진해일의 발생지역은 판과 판 사이의 경계인 일본 연안이므로, 수치모델은 동해 전체를 계산 영역으로 포함해야 한다(Fig. 1). 그러나, 전체 영역을 모두 작은 격자로 구분하여 계산하는 것은 시간과 비용면에서 매우 비경제적이므로, 관심 대상영역을 중심으로 전체를 5개 영역(A, B, C, D, E)으로 구분하고, 격자접속법(grid nesting)을 적용하여(Table 2), 매 시간 단계에서 수위와 유량이 교환되도록 하였다. 지배방정식으로 영역 A, B, C에는 다음과 같은 선형천수방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

여기서,  $\eta$ 는 정수면 기준 수면변위,  $D$ 는 전수심( $\eta+h$ (수심)),  $M$ ,  $N$ 은 각각  $x$ ,  $y$  방향의 선유량이다. 작은 크기의 격자를 사용하는 상세역 D, E에는 식 (2), (3)의 선형운동량방정식 대신 식 (4), (5)의 비선형운동량방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{5}$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $n$ 은 Manning의 마찰계수이다.

또한, leap-frog 유한차분 격자체계에서 격자의 대각선 방향 파속을 과대평가하는 점을 바로 잡기 위하여, 분산 보정차분항을 포함한 Cho and Yoon(1998)의 차분법을 적용하였다. 임원항, 울진원전부지 등 가장 작은 격자가 사용되는 상세역에 대해서는 보다 실제에 가까운 해수범람을 모의하기 위하여 이동경계조건(wet/dry scheme)을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 수치모델 TUNAMI에 대한 세부 사항은 UNESCO(1997)에 기술되어 있다.

**2.3 임원항에 대한 모델 적용**

연구에 사용된 모델의 검증을 위하여 역사적으로 우리나라에 가장 큰 치오름 높이로 기록된 울진원전 북쪽 약 20 km 지점에 위치한 임원항의 1983년 동해중부 지진해일에 대한 해수범람을 재현하였다. 입력 단층 파라미터로는 널리 알려진 Aida Model-10(相田, 1984)을 적용하였다. Fig. 2는 단층 파라미터 Aida Model-10을 이용하여 지진해일의 초기파형을 계산한 것이다. 전체 모의시간은

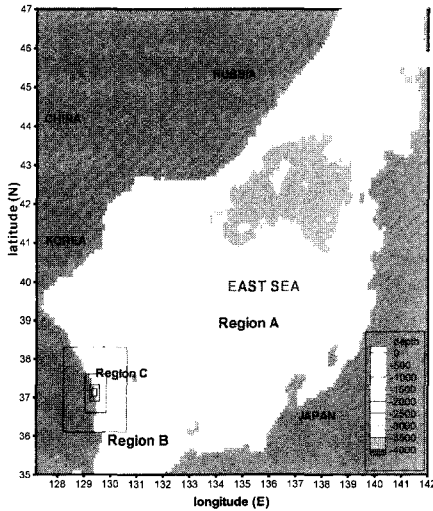


Fig. 1. Computational domain of tsunami simulation.

Table 2. Grid system and governing equations

구 분	격자 수	공간격자간격 $\Delta x$ (m)	시간간격 $\Delta t$ (sec)	Governing Equation
Region A	1068×1046	1100.000	3.000	선형천수방정식
Region B	578×827	366.667	1.000	선형천수방정식
Region C	506×557	122.222	0.333	선형천수방정식
Region D	347×323	40.741	0.333	비선형천수방정식
Region E	296×323	13.580	0.333	비선형천수방정식

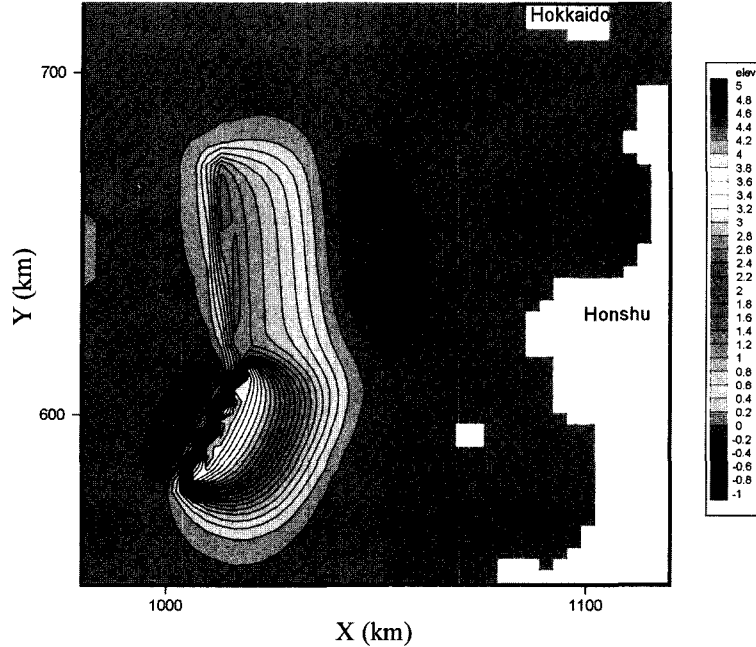


Fig. 2. Initial surface profile of 1983 East Sea Tsunami.

지진해일 발생후 3시간 동안이며, 저면마찰계수(Manning의 마찰계수  $n$ ) 값으로 0.025를 적용하였다. Fig. 3은 1983년 동해중부 지진해일이 전파할 때 지나게 되는 동해의 주요 지점을, Fig. 4는 Fig. 3의 각 지점에서의 수위변화를 보인 것이다. 지점 (a)~(d)는 파원역과 비교적 가까운 위치에 있어 파고가 높고 파장이 긴 제1파가 작은 파랑들을 앞서고 있으나, 지점 (e)~(i)는 긴 거리를 전파하여, 분산 등의 효과에 의하여 진폭이 다소 감소됨을 알 수 있다.

1983년 동해중부 지진해일에 의한 임원항의 최대 범람역과 임원항 중앙부의 해수위 변화는 다음 Fig. 5, 6과 같다. 당시 임원항에는 검조소가 운영되고 있지 않았기 때문에 상세한 수위이력기록은 남아 있지 않지만, 보고된 최고 초오름 높이(한국전력공사, 1991)가 약 4 m였던 것을 감안하면 계산된 최고수위 4.2 m는 타당한 것으로 보여진다.

### 3. 울진원전부지에 대한 적용

본 연구의 관심 대상인 울진원전부지(Fig. 7)의 지진해일에 의한 최고 수위상승과 최저 수위하강을 계산하였다. 평가 대상 단층으로 1983년 동해중부 지진해일 단층(Aida Model-10; 相田, 1984), 1993년 북해도 남서외해 지진해

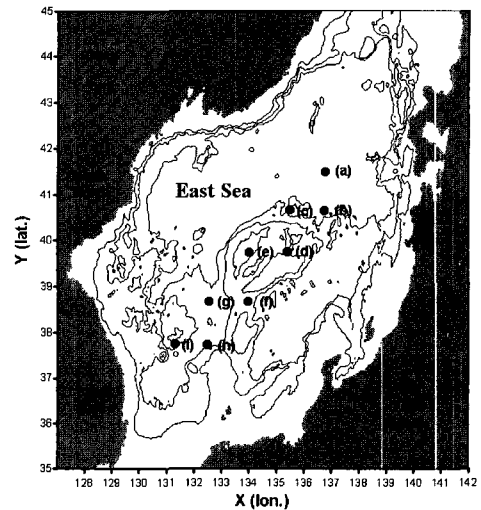


Fig. 3. Locations where water levels were displayed in Fig. 4.

일 단층(DCRC-17a; Takahashi *et al.*, 1995), 한국원자력안전기술원(1997)이 제안한 5개 지진공백역 위험 단층을 선정하였다. 지진공백역 위험 단층의 제원 및 위치는 다음 Table 3과 같다. 각각의 계산은 Table 2의 격자체계와 지배방정식을 이용하여 지진발생 후 3시간 동안의 지

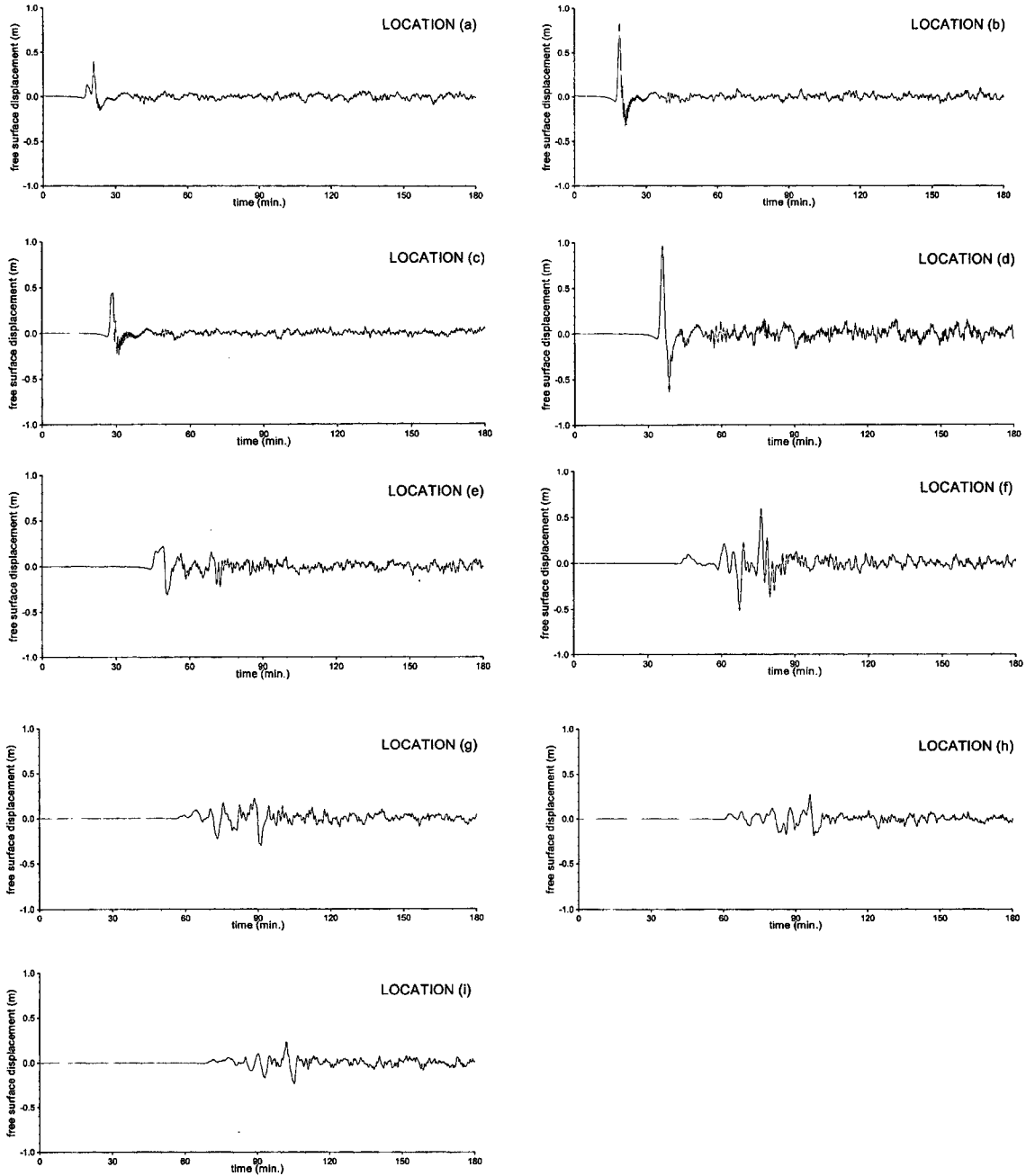


Fig. 4. Time histories of water level at locations (a)~(i).

진해일 전파를 모의하였다.

Table 4는 모두 7가지 경우(1983년 지진해일, 1993년 지진해일, Table 3의 5개 지진공백역 단층)에 대하여 울

진 원자력발전소 도수로(intake channel)에서의 모의결과 (수위 상승과 저하)를 정리한 것으로서, 최고 수위상승은 약 1.7 m, 수위저하는 약 -1.4 m로 계산되었다.

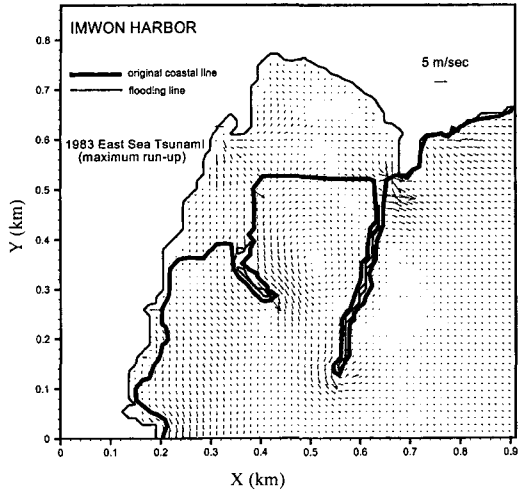


Fig. 5. Maximum inundation area at Imwon Harbor(1983 East Sea Tsunami).

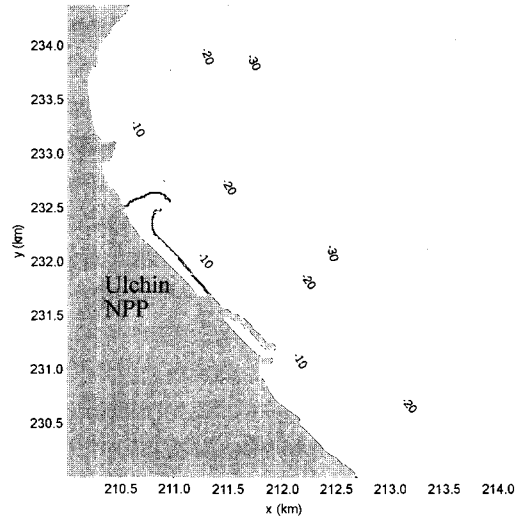


Fig. 7. Bathymetry of ulchin nuclear power plant site(Region-E).

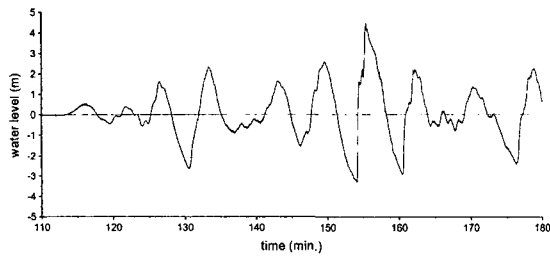


Fig. 6. Time history of water level at the center of Imwon Harbor(1983 East Sea Tsunami).

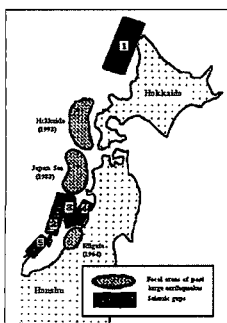
#### 4. 결론 및 향후 연구방향

유한차분법 모델을 이용하여 1983년 동해중부 지진해일, 1993년 북해도 남서외해 지진해일, 그 밖의 지진공백역의 위험 단층에 대하여 울진원전 부지의 안전성을 평가하였다. 일반적으로 원자력발전소 부지는 수위의 상승보다도 수위 저하에 따른 냉각수 취수기능의 상실이 우려되는 것으로 알려져 있다. 계산된 수위 저하량 -

Table 3. Parameters of seismic gap faults(한국원자력안전기술원, 1997)

지진공백역 단층	M (규모)	L (km)	W (km)	$\theta$ (주향)	U (m)	$M_0$ (모멘트)	$\mu$ (강성)	$\delta$ (경사)
KINS -1	8.3	195	75	N30° E	6	39.6	4.5	40° E
KINS -2	7.9	140	50	N20° E	5	13.1	3.7	35° E
KINS -3	7.8	100	50	N20° W	4.1	7.9	3.9	45° E
KINS -4	7.2	70	20	N27° E	2	1.2	4.3	45° E
KINS -5	7.5	70	40	N42° E	3.2	3.1	3.7	20° E

주)  $M_0$ :  $10^{27}$  dyne · cm  
 $\mu$ :  $10^{11}$  dyne · cm



**Table 4.** Water level rise and drop at the intake channel of Ulchin Nuclear Power Plant

	1983년 동해중부 지진해일	1993년 북해도 남서외해 지진해일	KINS-1 Fault	KINS-2 Fault	KINS-3 Fault	KINS-4 Fault	KINS-5 Fault
Rise(unit: m)	+1.7	+1.2	+0.5	+1.2	+0.7	+0.5	+0.6
Drop(unit: m)	-1.4	-1.4	-0.4	-1.4	-0.5	-0.4	-0.4

**Table 5.** Safety margin of pump intake(Ulchin NPP, unit: m)

UNIT	분류	지진해일로 인한 수위저하(A)	저극조위 (B)	최저수위에 대한 취수 여유고		
				최저수위 (C=A+B)	여유고 (E=C-D)	
울진 1,2호기		-1.40	-0.30	-1.70	ESW Pump Bellmouth 위치(D)	3.00
					CW Pump Bellmouth 위치(D)	3.10

1.4 m 에 저극조위 -0.3 m(한국전력공사, 1991)를 더하면 수위 저하는 정수면(Still Water Level)하 -1.7 m에 이를 것으로 추정된다. 따라서, 울진 1, 2 호기의 경우 순환수 취수계통(CW Pump)과 필수냉각수 취수계통(ESW pump) 모두, 설치수심(정수면하) -4.8 m, -4.7 m 를 고려할 때, 발전소 운전 정지 등의 사고를 일으키지 않을 것으로 보인다(Table 5). 다만, 향후 원자력발전소 취수구조물을 설계할 때, 부분적인 공기유입 등으로 인한 펌프의 구조물 진동과 효율 저하를 피하기 위하여 어느 정도의 여유 수심을 확보하여야 하는가에 대해서는 수리실험을 통한 면밀한 검토를 통하여 결정되어야 할 것이다.

향후 필요한 연구로는 무엇보다도 지진해일의 분산효과를 재현할 수 있는 Boussinesq 방정식 형태의 지배방정식을 적용하는 것이다. 본 연구에서 사용된 모델의 경우 파랑의 분산효과를 반영하지 못하기 때문에 실제 지진해일에 의한 수위 상승 및 저하량을 다소 과대 평가할 수 있다. 그 이외에 지속적인 지진해일 유발 위험 단층에 대한 연구, 지진해일의 전파 및 육지에의 범람 모델에서 중요한 변수인 바닥 저면마찰계수 산정에 대한 조사·연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구에 사용된 수치모델(TUNAMI)과 사용자 지침서를 제공해 주신 일본 동북(東北)대학의 今村文彦(Fumihiko IMAMURA)교수께 감사드린다.

### 참고문헌

- 한국원자력안전기술원, 1997. 울진부지에 영향을 미치는 가능 최대 쓰나미 유발 잠재지진 평가.
- 한국전력공사, 1991. 발전소 구조물에 미치는 지진해일의 영향연구.
- 한국전력기술주식회사, 1986. 원자력 9, 10호기 설계최대홍수위 조사검토-지진해일에 대한영향 검토.
- Cho, Y.-S. and Yoon, S.B., 1998. A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations, *Coastal Eng. J.*, **40**(2), pp. 191-205.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E., 1971. The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of Seismological Society of America*, **61**, pp. 1433-1440.
- Shuto, N., 1972. Standing waves in front of a sloping dike, *Coastal Eng. in Japan*, **15**, pp. 13-23.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Ortiz, M., 1995. Source models for the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, **144**, pp. 747-767.
- UNESCO, 1997. *IUGG/IOC Time Project*, IOC Manuals and Guide No. 35.
- 相田勇, 1984. 1983年日本海中部地震津波のモデル, 地震研究所彙報, 第59卷.
- 石川有三, 1994. 残された空白域, 月刊海洋, **7**: 102-107.

Received December 20, 2001

Accepted February 25, 2002