Journal of Radiation Industry 7 (2~3) : 201~207 (2013)

Technical Paper

지진해일에 의한 토사이동 해석을 위한 수리모형장치 제작 및 적용성 평가

염민교 · 이백근[1] · 민병일 · 이정렬[1] · 서경석*

한국원자력연구원 원자력환경안전연구부
[1]성균관대학교 사회환경시스템공학과

Construction and Application of the Hydraulic Scale Model for the Analysis of Sediment Transport by Tsumani

Min Kyo Youm, Baek Gun Lee[1], Byung Il Min, Jung Lyul Lee[1] and Kyung-Suk Suh*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea
[1]*Civil and Environmental Engineering, Sungkyungkwan University, Suwon 400-746, Korea*

Abstract - Soil liquefaction by tsunami or wave induced currents can cause serious damages to coastlines and coastal infrastructures. Although liquefaction caused by regular waves over sea beds has been extensively investigated, studies of tsunami-induced liquefaction near coastal area have been relatively rare. In this work, the hydraulic scale model has been designed and constructed to investigate the variations of wave height and sediment transport by tsunami. The distorted hydraulic scale model based on the Froude similarity was adopted to represent hydrodynamics and sediment transport in a coastal area. The scale model was composed of control box, screw axis, wave paddle and rotating coastal structure.

Key words : Soil liquefaction, Tsunami, Hydraulic scale model

서 론

2011년 3월 11일 일본 혼슈지방의 해저지진과 이에 따른 지진해일(tsunami)의 발생으로 후쿠시마 제1원자력발전소에 심각한 피해를 유발하여 대량의 방사성물질이 대기와 해양으로 누출되는 사고가 발생하였다. 우리나라는 원자력발전소가 해안가에 위치하고 있어, 지진해일과 같은 자연 재해를 대비한 발전소의 안전성 확보가 중요하다. 특히 울진, 월성 원전이 위치한 동해는 과거에 해저지진에 의한 지진해일 전파가 이루어졌던 기록이 있다(이 2005; 최 등 2006). 우리나라는 원전 건설시 지진해일에 대비한 방파제 건설과 후쿠시마 사고 후 방파제의 높이 보강 등을 통하여 지진해일 파고에 의한 월류를 대비하고 있다. 지진해일은 높은 파고 뿐 아니라 파압과 국지적 와류(vortex)에 의하여 연안 근방 해저지질의 액상화(liquefaction)가 발생하여 지반약화로 인한 연안시설의 피해나 토사의 연안 시설내 유입으로 피해를 유발할 수 있다(Jeng 1997). 특히 원전에서 파랑, 조석, 지진해일 등에 의해 부유된 토사가 취수구로 유입되어 취수구의 냉각기능을 저하시킬 수 있으므로 이에 대한 체계적인

* Corresponding author: Kyung Suk Suh, Tel. +82-42-868-4788, Fax. +82-42-868-8943, E-mail. kssuh@kaeri.re.kr

연구가 필요하다.

지진해일에 의한 액상화는 크게 유체하중에 의한 바닥 토사의 공극 축소로 인한 공극압의 저하와 파와 해저바닥간의 상호작용에 의한 공극압의 변화에 의해 발생한다 (Xiao *et al.* 2010). 최근에는 지진해일이나 파 하중에 의해 발생하는 액상화에 대한 연구를 실험적이나 수치적으로 연구하는 LIMAS (LIquefaction around MArine Structure)프로젝트를 결성하여 이에 대한 연구를 진행 중이다 (Sumer *et al.* 2006; Dunne *et al.* 2006; Kudella *et al.* 2006). 또한 Yoshii *et al.* (2010)은 지진해일에 의한 처오름과 연안 구조물 근방의 와류 재현을 위해 수리모형장치를 제작하여 이들의 현상을 실험실적 규모에서 잘 재현하였다.

본 연구에서는 연안구역에 유입되는 지진해일과 같은 고립파에 의해 연안 구조물과 토사이동 특성 해석을 위하여 수리모형장치를 설계 · 제작하였다. 수리모형 실험은 원형 (Prototype)에서 일어나는 각종 현상 등을 실험실 내에서 재현하고 그 현상을 관측하는 것으로 원형을 축소 또는 확대시켜 만든 모형에 실험을 실시하여 원형에서의 각종 현상을 관찰하는 것이다. 모형에 각종 변화를 가하여 각종 상황에 대한 실험을 수행하여 실물에서 일어나거나 일어날 수 있는 여러 가지 수리학적 현상을 분석하고 재현시켜 수공학적으로 가장 안전하고 경제적인 원형의 구조와 크기를 결정하는 방법이다. 또한 각종 상황을 비교 검토할 수 있고, 축척을 가능한 범위 안에서 여러 가지로 선택할 수 있으며, 시공의 낭비를 방지할 수 있다는 장점이 있지만, 모형제작을 위해 많은 비용과 시간이 소요되고 실험관련 기술과 경험이 필요하다 (Wang and Anderson 1982). 지진해일에 의한 실제 고립파 재현을 위한 파 발생 제어판, 회전식 스크류축, 파 전달 구동판, 연안 구조물 모형 등의 장치를 포함한 수리 모형장치를 제작하여 실험에 필요한 장치를 구축하였다.

지진해일의 고립파

지진해일은 해저지진이나 화산활동, 지반침하 등에 의해 발생하며 심해에서 지진해일은 파장이 길고 파고는 작지만 빠른 속도로 이동하여 연안에 접근하면 파장은 작아지고 파고는 커진다. 또한 지진해일은 연안으로 전파되면서 얕은 수심에 의해 파가 파쇄되면서 파고가 상승하고 해저바닥의 전단응력 증가로 액상화 (liquefaction)를 유발한다. 지진해일과 같이 파장이 길고 파속이 빠른 단일 고립파 (solitary wave)를 고려하면 연안으로 진행하는 고립파의 파형은 다음 식으로 표시된다 (Tadepalli and Synolakis 1994, 1996).

$$\zeta(x,0)=\frac{3\sqrt{3}}{2}Hsech^2[k(x-x_1)\tan\mathrm{h}(k(x-x_1)],$$

$$k=\frac{3}{2h}\sqrt{\frac{H}{h}\sqrt{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

식 (1)에서 H는 파고 (wav height), h는 수심 (water depth), k는 파수 (wave number), x_1은 고립파의 발생 초기 위치이다.

식 (1)은 지진해일에 의한 고립파가 연안으로 진행하면서 발생하는 파형을 나타내는 방정식으로 제작한 수리모형장치에서 지진해일에 의한 고립파를 재현하여 관측한 파형을 식 (1)의 해석해와 비교하여 실험에 의한 고립파 재현이 생성되는 지를 확인하는 데 필요하다. 이후 수리모형 장치의 바닥에 설치한 전단응력의 측정으로 바닥에 위치한 토사의 액상화 현상을 규명하는 데 기초자료로 활용된다.

수리모형장치 설계

연안구역의 지진해일에 의한 고립파 재현과 파고, 유속 및 전단응력 측정을 위하여 실내 수리모형장치를 설계하였다. 모형과 원형은 수리학적 거동의 유사성이 보장되어야 하고 모형실험은 이것을 근거로 하여야만 올바른 의미를 가질 수 있게 된다. 즉, 원형과 모형 간에 수리학적 상사가 이루어져야 모형실험에서 얻은 자료를 원형의 설계에 반영할 수 있다. 수리학적 상사를 얻기 위해서는 원형과 모형 간에 기하학적 상사, 운동학적 상사, 동력학적 상사가 성립하여야 한다. 기하학적 상사는 원형과 모형의 모양이 기하학적으로 유사한 것을 뜻한다. 즉, 서로 대응하는 모든 길이의 비가 일정한 값을 갖는 것으로 X, Y, Z를 일정한 비율의 크기로 축소한 것을 말한다 (천 등 2008). 수리 모형실험에서는 수평비와 수심비를 자연상태로 재현하는 것은 어려워 대부분 실내 수림모형실험의 경우 연직축척과 수평축척을 달리하는 왜곡도 (=수평축적/수직축척)를 도입하여 수평비와 수심비를 왜곡하게 된다 (Baranya and Jozsa 2007). 왜곡모형에서 축적을 위해 사용하는 Froude 상사법칙의 정의는 다음과 같다.

$$Fr=\frac{Vr}{\sqrt{gLr}} \quad (2)$$

여기서 $\sqrt{gLr}$은 중력을 Vr은 관성력을 나타낸다. 수리모형에서 수리학적 상사를 이루기 위하여 중력과 관성력의 비는 동일해야 한다. 왜곡모형은 정상모형에 비하

여 모형이 차지하는 공간과 운영비용을 줄일 수 있고 모형에서 Reynolds 수를 증가시킬 수 있으며 유속 및 수심 측정의 정확도를 향상시킬 수 있다. 하지만 이차류의 과대 발생과 와류의 왜곡, 경사의 증가로 인한 경사진 경계면에서 흐름 분리 발생, 유속의 횡단 분포 왜곡, 수리 구조물에서의 수두-유량 관계에 대한 변화-이차류(흐름축소, 확대, 만곡 등)의 과대 발생으로 수두 손실이 과대하게 발생할 수 있다(천 등 2008). Froude 상사법칙에 의한 축척비를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 X_r은 수평축적, Z_r은 수직축적, L_r은 길이축척을 의미한다.

해저지진에 의해 연안으로 진행하는 고립파 특성 해석과 전단응력에 의한 바닥층의 액상화현상에 의해 토사이동을 규명하기 위하여 수리모형장치를 Froude 상사법칙에 의해 설계하였다. 제작된 수리모형 실험장치는 국내 원전의 방파제 시설을 Froude 상사법칙을 적용하여 설계하였는데, 설계된 수리 모형장치는 실제 적용영역인 폭 1 km, 길이 1.6 km를 적용하여 수평축척 1/400, 수직축척 1/60의 폭 4 m, 길이 6 m 수심 0.33 m의 왜곡도 6.6으로 설계하였으며 장주기 및 너울성 파랑의 재현을 위한 파 발생장치도 포함되었다. 수리모형장치의 설계도를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 지진해일의 입사각도 별 미치는 영향을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 모형의 구조물 주변은 회전 가능하도록 설계 제작하였다.

Table 1. Froude law and distortion model

Parameter		Unit	Scale ratio	
			Froude law	Distortion model
Geometric properties	Length	m	L_r	X_r, Z_r
	Area	m^2	L_r^2	–
Kinematic	Velocity	$m\ s^{-1}$	$\sqrt{Lr}$	$\sqrt{Zr}$
	Discharge	$m^2\ s^{-1}$	$L_r^{5/2}$	$Z_r^{3/2} X_r$
	Time	s	$\sqrt{Lr}$	$\frac{Xr}{\sqrt{Zr}}$

수리모형장치 제작

동해에 위치한 월성 원자력발전소 연안에 지진해일 발생시 토사이동과 지진해일의 처오름 및 처내림으로 인한 영향을 평가하기 위하여 실제 영역과 동일한 조건에서 수리모형 실험을 할 수 있도록 Froude 상사법칙을 적용하여 수리모형장치를 제작하였다. 월성 원전의 방파제 위성사진 및 방파제 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 제작된 수리 모형장치는 실제 적용영역인 폭 1 km, 길이 1.6 km를 Froude 상사법칙을 적용하여 수평축척 1/400, 수직축척 1/60의 폭 4 m, 길이 6 m 수심 0.33 m의 왜곡도 6.6으로 설계・제작하였다. 또한 지진해일의 입사각도 별 미치는 영향을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 모형

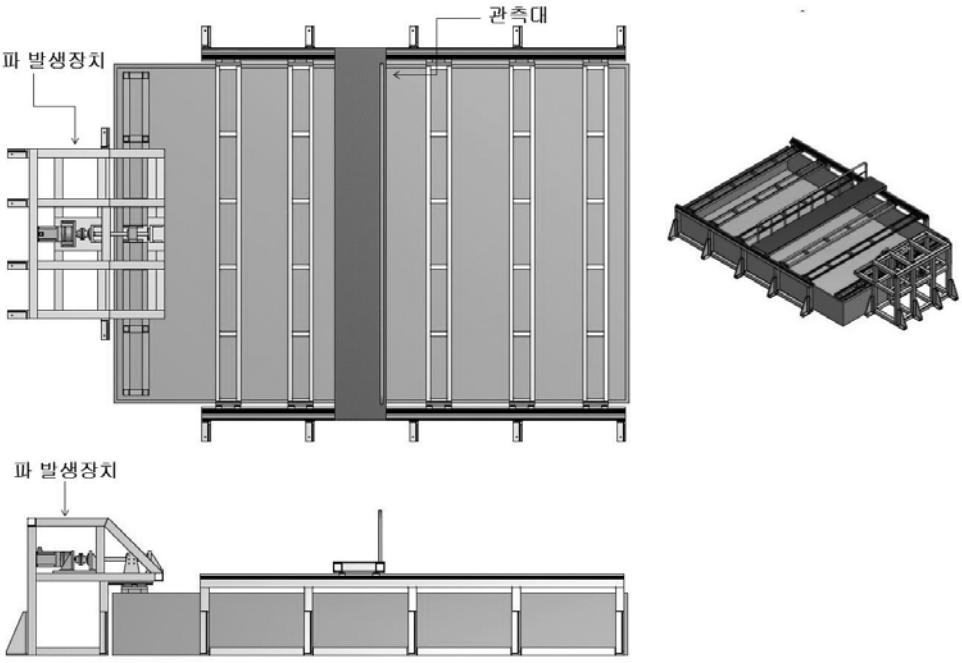

Fig. 1. Hydraulic scale model for generating tsunami.

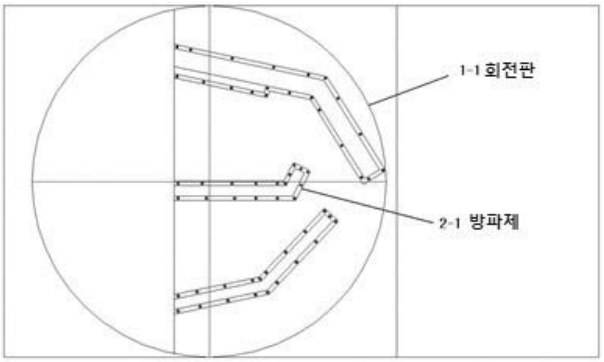

Fig. 2. Rotating type coastal structure.

의 취수구역 주변은 회전 가능하도록 설계 제작하였다. Foude 상사법칙에 의해 설계된 수리모형장치의 제원을 Table 2에 나타내었다.

수리모형장치는 크게 파 발생장치, 회전식 연안구조물, 대형수조, 유속 및 토압측정 장치로 구성되었다. 수리모형장치에서 고립파의 재현의 중요한 요소 중의 하나는 파의 발생이다. 일정한 주기를 갖는 고립파 발생을 위하여 파 발생장치를 제작하였는데, 장치는 크게 파발생, 크기를 조절해 주는 제어 소프트웨어, 회전식 스크류축, 파재현 구동판 등으로 구성되었다.

파 발생 제어판은 컴퓨터 소프트웨어로 구동되는데

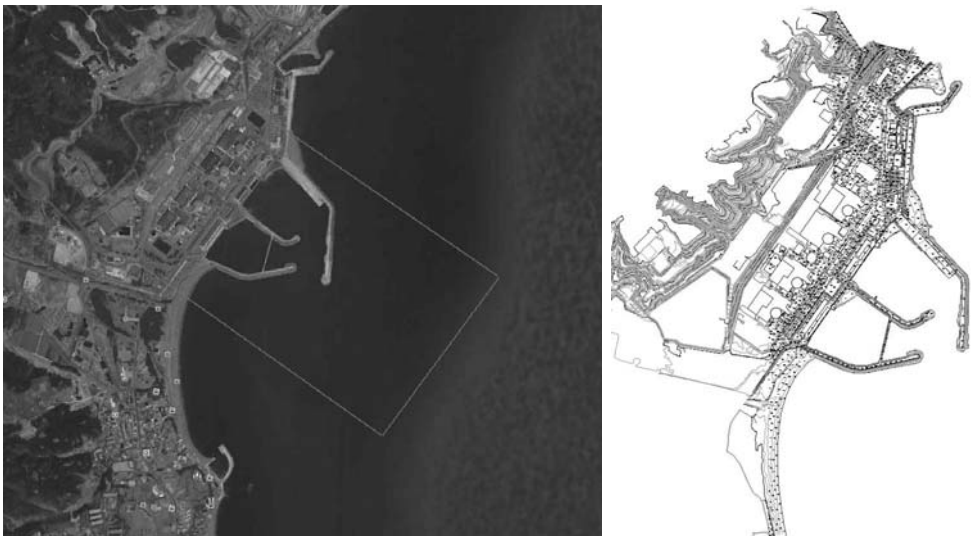

Fig. 3. Application area.

Table 2. Conversion parameters by Froude similarity theory

		Prototype	Scale ratio	Scale	Conversion parameter	Conversion method	Model
Basic variable	Length (x)	1,600 m	1/400	400	Lr	X/Lr 1,600/400=4	4 m
	Width (y)	1,000 m	1/400	400		Y/Lr 1,000/400=2.5	2.5 m
	Depth (h)	20 m	1/60	60	Zr	h/Zr 20/60=0.33	0.33 m
Hydraulic parameter	Velocity (v)	10 m s^{-1} (예)	1/60	60	$Zr^{1/2}$	$v/Zr^{1/2}$ $10/60^{1/2}=1.29$	1.29 m sec^{-1}
	Wave height (H)	10 m	1/60	60	Zr	H/Zr 10/60=0.16	0.16 m
	Period (S)	67 sec	1/400, 1/60	400,60	$Xr/Zr^{1/2}$	$\frac{S}{(Lr/Zr^{1/2})}$ $\frac{67}{(400/60^{1/2})}$ =1.3 sec	1.3 sec

Fig. 4. Control box and software to generate wave.

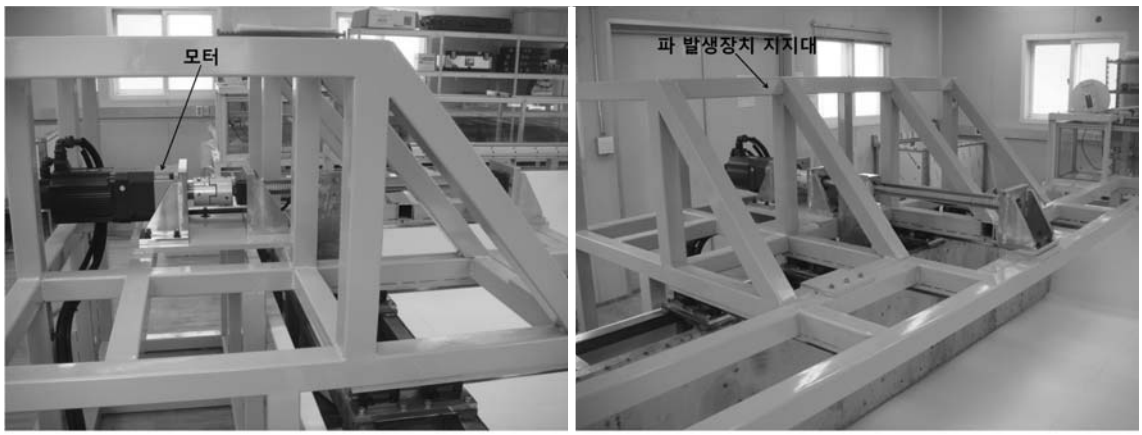

Fig. 5. Screw axis and wave paddle.

스크린 상에서 작동 버튼은 상단에 위치한 원점 off 버튼과 중간에 위치한 SV (Servo) 버튼으로 원점 off 버튼은 서보모터의 초기 원점을 잡아 주는 버튼이다. 이 버튼을 누르면 서보모터가 영점의 위치로 이동하게 되며 서보모터 구동 전 이나 다른 조건에서 실험할 때 또는 재부팅 시 항상 먼저 눌러주어 영점을 맞춘다. SV버튼은 입력된 조건에서 서보모터의 반복횟수를 나타낸다. 예를 들어 왕복운동을 5번하고 싶을 경우 SV를 5로 설정하면 왕복 5회 후 서보모터는 작동을 멈춘다. 이동속도 조절은 stroke의 속도를 조절하는 버튼으로 이동속도 숫자를 누르면 값을 입력할 수 있는 화면이 보이게 된다. 실험에서 500 mm sec^{-1}의 속도를 설정하고자 할 시 스크린 상의 이동속도 화면에서 500의 숫자를 입력하면 설정값이 입력된다. 파 발생을 위한 제어판을 Fig. 4에 나타내었다. 제어판에 의해 설정된 이동거리 및 속도에 의해 파 발생은 회전식 스크류 축에 전달되는데, 스크류 축에 연결된 모터에 의해 스크류를 회전하면서 앞으로 진행시켜 수조의 하단부에 위치한 파재현 판을 구동하게 된다. 연결된 스크류 축과 파재현 구동 판을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 파 발생 제어판, 스크류 축, 파 발생 구동판에 의해 수조 채워진 정지 상태의 물에 힘을 전달하여 고립파를 발생시킨다. 연안으로 진행하는 고립파에 의해 방파제와 주변 토사의 이동현상을 해석하기 위하여 회전식 연안 구조물을 제작하였다.

기존 지진해일, 파랑, 조석 등의 재현능 위하여 각종 수리모형 실험에서는 실험대상 모형에 다양한 방향의 입사파 재현을 위하여 파 발생장치의 이동이나 관측대상 모형의 이동 및 다채널 방식의 파 발생장치를 사용하였다. 그러나 이러한 기술의 문제점은 파 발생장치의 크기와 규모, 무게 때문에 이동에 많은 경제적 비용을 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는

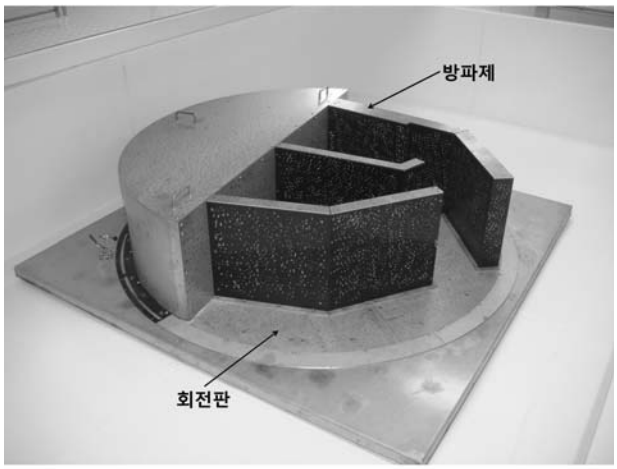

Fig. 6. Rotating type coastal structure.

Fig. 7. Constructed hydarulic prototype model.

파 발생장치는 고정하고, 실제 관측이 필요한 연안부근 구조물의 모형을 회전 가능하도록 회전식 연안 구조물 모형을 제작하여 관측대상 모형을 다양한 방향으로 이동하여 여러 입사파에 의해 연안구조물 외력변화와 토사이동 현상 규명을 위하여 회전식 연안구조물 수리모형장치를 제작하였다. 회전식 연안 구조물은 장치의 구성은 실험 대상 모형을 회전하는 회전 모형 지지부, 회전 모형 지지부 위에 실험 대상 지형 및 구조물을 설치하는 모형 설치부, 회전 모형 지지부가 회전함에 있어 중심이 되는 회전체 실린더, 모형의 지지부를 손쉽게 회전할 수 있도록 볼 트랜스퍼를 설치한 보조 회전 장치부, 회전하는 모형 지지부로 인한 움직임과 뒤틀림을 방지하기 위하여 프로파일로 설계된 안전 장치부, 실제 지형 및 실험 지역의 경사를 조절할 수 있도록 설계된 경사 조절부로 나뉘어져 있다. 제작한 회전식 연안 구조물 장치를 Fig. 6에 나타내었다.

연안으로 진행하는 지진해일과 같은 고립파에 의해 연안 구조물 근방의 파랑변화와 토사이동 특성을 해석하기 위한 수리모형장치를 제작하였다. 제작된 수리모형장치는 크게 파 발생장치, 회전식 연안구조물, 대형수조, 유속 및 토압측정 장치로 구성되었고, Fig. 7에 전체적인 수리모형장치를 나타내었다.

결 론

해저지진에 의해 발생하는 지진해일은 고립파의 형태로 연안에 진행한다. 연안에 진입한 고립파 파고 변화에 의해 연안 구조물과 토사이동 특성을 평가하기 위하여 수리모형장치를 제작하였다. 제작한 수리모형장치는 고립파 재현을 위한 파 발생 제어판, 스크류축, 구동판 및 회전식 연안안 구조물로 구성되었다. 수리모형 장치는 Froude 상사법칙에 근거하여 실제 연안의 제원을 실내 모형장치로 재현하였으며, 폭과 수심의 적절한 설계로 충분한 유속과 수심이 확보되는 조건으로 설계 · 제작하였다. 제작된 수리 모형실험 장치는 파고, 유속 및 전단응력을 측정할 수 있어, 고립파 진행에 대한 연안 구조물과 토사이동 현상을 규명하는 데 사용될 것이다. 향후 제작된 수리모형장치를 이용하여 고립파의 주기 및 파고 변화를 통하여 연안 구조물에 진입하는 파 형상 변화와 전단응력 변화에 따른 바닥층 지질의 액상화 현상 규명 연구에 활용될 예정이다. 또한 본 연구에서 설계 · 제작된 모형장치는 우리나라 동해에 위치한 원자력발전소 연안에 지진해일 발생시 토사이동과 지진해일의 처오름 및 처내림으로 인한 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하여, 실제 조건에서 이에 의한 영향 및 적용성 평가를 수행할 예정이다.

사 사

이 논문은 2013년도 미래창조과학부와 원자력안전위원회의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2012M2A8A4025912 및 2012M5A1A1029210).

참 고 문 헌

이호준. 2005. 동해의 지진해일, 그 위험과 대책. 한국방재학

회지. **5**(1):27-33.

최병호, 에핌 페리노스키, 홍성진. 2006. 병렬 FEM모형을 이용한 1983년 동해 중부 지진해일 시뮬레이션. 한국해안·해양공학회지 **18**(1):21-34.

천일용, 김기철, 이정렬, 서경석. 2008. 하천 현장실험 재현을 위한 수리모형 장치 제작. 방사선산업학회지. **2**(3):97-103.

Baranya S and Jozsa J. 2007. Numerical and laboratory investigation of the hydrodynamic complexity of a river confluence. *Civil Engineering* **51**(1):3-8.

Dunn SL, Vun PL, Chan AHC and Damgaard JS. 2006. Numerical modeling of wave-induced liquefaction around pipelines. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng*. **132**(4):276-288.

Jeng DS. 1997. Wave-induced seabed instability in front of a breakwater. *Ocean Eng*. **24**(10):887-917.

Kudella M, Oumeraci H, Groot D and Meijers P. 2006. Large-scale experiments on pore pressure generation underneath a caisson breakwater. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng*. **132**(4):310-324.

Sumer BM, Truelsen C and Fredsoe J. 2006. Liquefaction around pipelines under waves. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng*. **132**(4):266-275.

Tadepalli S and Synolakis CE. 1994. The run-up of N-waves on sloping beaches. *Proc. R. Soc. Lond. A.* **445**:99-112.

Tadepalli S and Synolakis CE. 1996. Model for the leading waves of tsunami. *Phys. Rev. Letts.* **77**:2141-2144.

Wang HF and Anderson MP. 1982. Introduction to groundwater modeling. 237pp. W.H. Freeman and Company, New York.

Xiao H, Young YL and Prevost JH. 2010. Parametric study of breaking solitary wave induced liquefaction of coastal sandy slopes. *Ocean Eng*. **27**:1546-1553.

Yoshii T, Ikeno M, Matsuyama M and Fujii N. 2010. Pick-up rate of suspended sand due to tsunami. *Proceeding of Coastal Eng.* 2010.

Manuscript Received: July 15, 2013
Revised: November 25, 2013
Revision Accepted: November 26, 2013