

## CFD를 활용한 폭풍해일 및 지진 해일 범람의 동수역학적 산정 및 방재대책 시설의 초기적 성능평가

### Hydrodynamic fields computed by CFD for storm surges and tsunami induced inundation and initial estimate efficiency of disaster prevention facilities.

강시환<sup>1</sup>, 고진석<sup>2</sup>, 조휴상<sup>3</sup>, 김동철<sup>4</sup>

See Whan Kang<sup>1</sup>, Jin Seok Ko<sup>2</sup>, Hyu Sang Cho<sup>3</sup> and Dong Chule Kim<sup>4</sup>

#### 1. 서 론

연안역에서의 해양 외력에 의한 해수면 상승에 기인하는 해수 범람의 요인은 주로 태풍 내습시 폭풍 해일에 의한 경우와 동해에서 발생한 대규모 지진에 의한 지진해일 내습시가 대표적이라 할 수 있다. 최근 한반도 주변 해역에서의 지구 온난화 영향 등에 따른 대형 태풍에 의한 피해와 대규모 재해의 발생 가능성이 증대되고 있으며, 우리나라 동해의 경우 진원이 일본 동해안에 위치하고 있는데 이 해역에서의 지진 발생 확률에 대해서는 보고된 바가 없으나 1983년 및 1993년에 10년 간격으로 큰 지진에 의한 지진해일이 발생한 바 있다.

우리나라 주변해역의 해일 유발환경을 연안별로 살펴보면 서해안은 조석전파 영향에 의한 조위증폭 작용과 함께 하계에는 태풍에 의한 해일, 동계에는 북서계절풍에 의한 고파랑과 해일 등의 현상이 빈번하게 발생하는 해역특성을 가지며, 남해안은 조석현상과 더불어 하계 태풍에 의한 해일발생이 유발되는 환경이다. 또한, 조차가 작은 동해안은 하계 태풍에 의한 해일과 동계 계절풍에 의한 해일, 지진해일 등이 유발되는 환경이며, 남서해안에서 나타나는 연안범람 등의 현상은 적은 것으로 요약할 수 있다(국립방재연구소, 2000).

해일의 종류 중 하나는 폭풍해일이며, 우리나라

에 발생한 폭풍해일은 1900년 이후 현재까지 약 70회 이상의 태풍이 내습과 해일피해가 발생하였으며 서해안과 남해안이 주요 피해지역으로서 특히, 남해안에 막대한 피해를 입힌 태풍을 열거하면 1959년 태풍 '사라', 1987년 태풍 '셀마', 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미' 등을 열거할 수 있다. 지진해일은 일반적으로 일본 서해안의 환단층대로부터 규모 7.0이상의 해저지진에 의해 유발하며 바람에 의해 형성되는 해일보다 파력과 피해규모가 매우 큰 것이 특징이며, 태풍 등 여타의 기상현상과 달리 전조현상이 없고, 발생 후 2시간 이내에 동해안에 도달한다. 조선왕조실록에 의하면 동해안의 근지 지진해일의 발생기록이 남아 있으며, 우리나라에 영향을 미친 지진해일은 1964년 니이가타 지진해일과 우리나라 동해안의 임원항의 범람을 초래한 1983년 5월 동해 중부 지진해일 및 1993년 북해도 남서외해 지진해일 등이 대표적이다. 따라서, 폭풍해일 및 지진해일에 의한 해안 시설물의 파괴 및 해일에 의한 육상 배후부지 및 시설물의 침수에 따른 인명·재산피해의 증가가 예측되고 있으며, 우리나라에 내습하는 태풍 및 해일과 같은 해양외력에 대해서 최근 호안 및 해안구조물의 설계 및 시설기준이 안정적인 설계 및 유지를 위해 적합한가에 대한 재검토가 요구된다. 또한 폭풍 해일 및 지진해일과 같은 해

1 (주) 해인이앤씨 부설 기술연구소 소장

2 (주) 해인이앤씨 대표이사

3 (주) 해인이앤씨 부설 기술연구소 이사

4 (주) 해인이앤씨 부설 기술연구소 부장

양성 자연재해에 의한 해일 대비 및 재해경감대책을 위해 해양 물리적 외력조건에 대한 검토가 요구된다.

본 연구에서는 폭풍해일과 지진해일에 의한 대표적인 범람 피해 사례라 할 수 있는 2003년 태풍 매미 내습시 마산의 범람과 1983년 동해 중부 지진에 의한 지진해일 내습시 임원항의 3차원 범람 시뮬레이션을 실시하였다. 태풍 매미호 내습 이후 마산의 범람을 대비하기 위한 대책 수립이 시행되고 있다. 대책으로는 선적 방어 및 면적 방어 대책(해상매립+인공둔덕, 해안도로 표고 증고) 등이 있으며, 본 연구에서는 선적 방어책으로써 현재 호안 부지 내에 해일 저지용 방벽을 1m, 1.7m의 높이로 전체구간에 설치하는 안과 일부 구간을 낮게 하여 호안 접근성을 높이는 안으로 실험을 실시하였다. 임원항은 1983년 및 1993년 지진해일 내습 이후 시점에 지진해일에 대한 대비는 고려하지 않은 채 외곽시설의 정비가 이루어져 현재는 1983년과 1993년의 현황과는 상이한 평면배치를 가지고 있다. 항내 매물 및 오염에 대한 문제가 반복적으로 제기되고 있고 심해설계과의 개정으로 인한 구조물의 안정성 재평가 필요와 지진해일로 인한 피해를 입은 대표적 항이므로 재해요소 파악 후 재해에 대한 피해저감방안 필요에 의해 현재 재정비를 위한 실시설계 단계에 있으며 설계시 지진해일 대비를 위한 2차원적, 3차원적 검토를 병행하고 있다.

## 2. FLOW3D 모형

본 연구에서는 Flow Science Inc.사가 개발한 범용 유동해석 프로그램인 FLOW3D를 사용하였다. 지금까지 사용되어온 MECCA나 ADCIRC 등 3차원 수치모형들은 자유수면을 가지는 흐름을 수치적으로 모의하기 위하여 정수압 분포를 가정하거나 수치방향의 유속을 무시하였다. 그러나 FLOW3D 모형은 x, y, z 방향의 유속을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 완전한 3차원 난류 모형이다. FLOW3D는 자체적으로 3차원 형상의 모델링을 위한 전처리 기능을 보유하고 있지만 구조물의 복잡한 형상을 표현하기 위해서는 3차원 CAD를 이용하는 것이 필요하다. 수치해석 프로그램에서 사용 가능한 좌표계는 직교좌표계(x, y, z)와 원통형좌표계(r,  $\theta$ , z)이지만 본 과업에서는 지형모델의 특성상 직교좌표계를 사용하였다.

FLOW3D에서는 복잡한 3차원 형상의 표현을

위하여 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method)기법을 사용한다. FAVOR 기법은 모든 방정식에 면적과 체적에 관련된 함수인 Porosity Function이 포함되어 있고 계산격자 내에 존재하는 고체와 유체를 이룬 함수 값을 통해 구분하기 때문에 자유표면을 계산하는 유동 해석에서는 계산격자의 수를 줄여 전체적인 계산 시간을 절감시킬 수 있다.

## 3. 마산 범람 시뮬레이션

### 3.1 입력 조건

시뮬레이션은 약 600만 cell( $x \times y \times z: 440 \times 390 \times 35: 880m \times 780m \times 50m$ )로서 수평격자 해상도는 2m, 수직적으로는 최소 cell 높이가 0.5m, 최대 높이는 3.5m로서 취하였다. 지반고, 해안선의 천단고 및 수심, 건물, 도로 등을 마산항 및 마산 해안 인근의 수치해도, 수치 지형도를 활용하여 작성하였다. 해수면은 최초에 E.L(+).2.7m(호안의 마루높이)로 하였고, 남측 경계에서의 해수 높이가 시뮬레이션의 시작시 E.L(+).2.7m로부터 E.L(+).4.39m로 60sec 동안 서서히 상승하도록 하여 이후 시뮬레이션 기간 동안 유지되도록 하였다. 당시의 관측 최고 높이로써 모형 계산 시간인 20분 내의 동안 지속되는 것으로 가정하였는데 당시의 조위 관측치의 시계열 자료에 의하면 최고조위에 도달한 시점의 전후 시간이 한 시간 정도임을 고려하여 상기와 같이 입력 하였다.

### 3.2 산정 결과

선적 방어책으로서의 해일저지용 방벽의 설치 이전 및 이후에 대한 실험을 실시하였다. Fig. 1(a)는 마산의 지형 및 시뮬레이션의 초기 상태로서 각 안 별로 동일하다. 입자의 거동을 파악하기 위하여 particle tracking을 실시하였는데 입자의 거동은 당시 마산항 야적장에 쌓여있던 목재의 이동 등 부유물의 이동을 유추할 수 있으며, 폭풍 해일방벽 설치 전후의 이동 경로를 예측 할 수 있다. 총 20분(1,200sec) 동안 실험을 실시하였는데 지진해일 방벽 설치 이전 Fig.1(b)의 경우 월류된 해수는 도로를 따라 전파되어 800sec 내외의 시간이 경과 후 해수가 북측경계에 도달하여 이후 도로와 건물 부지로 해수가 차오르는 양상을 보였다. 남측 호안의 전 구간에서 범람이 시작되어 유입되는 해수가 마산 해안 일대로 전파되면서 나타나는 전체적인 형상을 나타낸다. Fig.1(c)는 폭풍해일 방벽을 1m 높

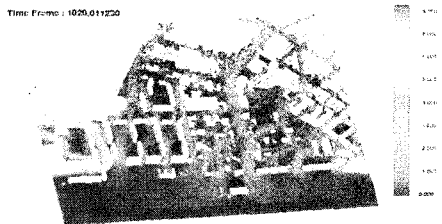
이로 하여 호안 전 구간에 설치하였을 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 범람 초기에는 방벽으로 인해 범람이 지체되는 효과로 900sec 이후 북측경계에 도달하였으며 이후 양상은 방벽 설치 이전과 유사하였다.



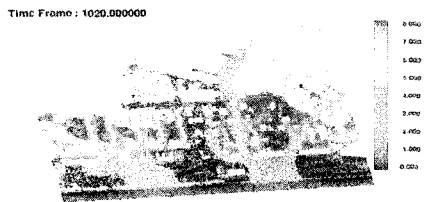
(a) initial state



(c) 1m barrier



(b) no barrier



(d) 1.7m barrier (partial)

Fig. 1. Snapshot of 3D inundation for each prevention barrier type(scalse bar: m/sec).

Fig.1(d)는 태풍 매미 내습시 최대 해수위를 상회하도록 폭풍해일 방벽을 1.7m 높이로 설치하고 일부 구간을 호안 접근성을 위하여 50cm의 저상의 개방 구간을 설치한 경우로서 방벽 설치이전과 비교하여 방벽으로 인해 범람이 지체되는 효과가 있었다. 범람시간의 지체는 인명 및 재산의 대피 시간을 확보하는 수단이 될 수 있다. 그러나 개방구간의 해수 집중으로 유속이 설치이전보다 증가하여

오히려 대피 이동시 피해가 있을 수 있으므로 범람 지체 효과가 반감된다고 할 수 있다. 보다 면밀한 시뮬레이션을 통하여 최대 해일유발 유속 산정결과를 통해 대피경로 설정과 이에 대한 표지설치 등 비구조적 방재대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 일본의 경우 이러한 개방구간에 기계 시스템이 포함된 갑문을 설치하는 경우가 있으므로 폭풍해일 방벽의 설치시에는 이를 참조하여 검토할 필요성이 있다.

## 4. 임원항 범람 시뮬레이션

### 4.1 입력조건

지반고, 해안선의 천단고 및 수심, 건물, 도로 등을 임원항 인근의 수치해도, 수치 지형도를 활용하여 작성하였다. 기존의 연구(Lee and Kim, 2000)에서와 같이 건물의 높이는 4m로 가정하여 해당 건물 위치의 표고상으로부터 배치시켜서 지형 및 지물을 작성하였다. 계산영역은  $x=600m$ ,  $y=800m$ ,  $z=50m$ 이고 600만cell( $300 \times 400 \times 50$ )이며, 모형에서 사용된 격자 크기는 수평격자는  $dx=dy=2.0m$ , 수직적으로는 최소 cell 높이가  $dz=0.5m$ , 최대 높이는  $dz=6.0m$ 이다. 경계조건으로써 시간 변화에 따른 수위로서 입력되어 파가 입사할 수 있도록 경계조건을 작성하였는데, 입력 자료는 2차원 지진해일모형(Lee and Kim, 2000)의 시계열 자료를 남측 경계부로부터 입력하였다(Choi et. al., 2008).

### 4.2 산정결과

Fig.2.는 1983년 지진해일 내습시 호안을 월류하여 임원항의 옥상부로 범람하는 과정을 나타내며, 월류시 3차원적으로 재현되어 수직적 유속분포가 잘 나타나있다. Fig.3.의 우측 상단의 사진은 범람 흔적 조사시 사진으로서 선박이 옥상으로 끌어들려져 건물 옥상에 부딪혀 남은 흔적이다. 이는 2차원적 실험에서 수직적 유속 영향이 무시되어지는 한계점을 나타내 주고 있다. Fig. 3.은 임원항내의 3차원 와동(vortex) 양상을 나타내며, 1983년 당시 와동으로 인한 선박 및 인명의 피해가 있었다.

Fig.4.(a)는 1990년대 후반 외곽시설이 보강되고 항 내측 평면이 변경된 현재의 현황이며, (b)는 임원항 재정비 실시설계에 따른 안으로서 현재 계획중에 있다. Fig.5은 현재상태 및 계획안에 의한 평면 배치시 1983년 지진해일 내습시와 동일한 해양외력이 가해질 때의 최고 범람고 분포로서 1983년과 비교하여 현재 상태는 범람역이 축소되고 범람고

역시 1.0m 정도 감소하였으며, 계획안에 따른 평면 배치시는 이보다 0.5m 정도 추가로 감소되며, 범람 역은 거의 유사하였다. 현재 상태의 평면 배치는 지진해일의 내습을 고려하지 않은 상태에서 계획 배치되었으나 다행히도 지진해일의 저감효과를 나타냈으며, 현재 재정비 계획에서는 계획안의 채택시 지진해일 내습의 영향을 사전에 검토하여 반영시켜 향후의 지진해일 내습시의 악영향을 최소화 하도록 하고 있다.



Fig. 2. Distribution of tsunami run-up at the sea wall and propagated into inland.

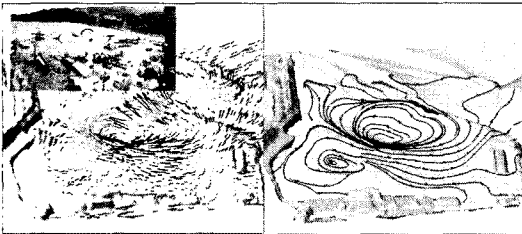


Fig. 3. Vortex represent by streamline in the Imwon port and velocity field.

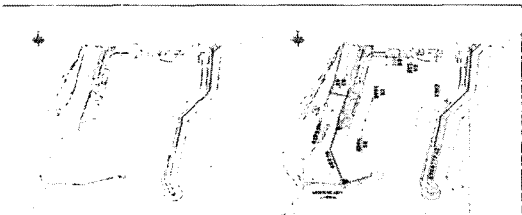


Fig. 4. Present state(left) and new placement and reinforcement plan(right) of Imwon port.

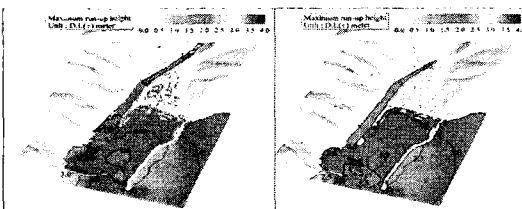


Fig. 5. Max. run-up for tsunami at Imwon port from 3D simulation(left : present state, right : new plan).

본 연구에서는 CFD 모형인 FLOW3D를 이용하여, 태풍 매미 내습시 마산 지역의 폭풍해일에 의한 범람에 대한 3차원 시뮬레이션과 1983년 동해 중부 지진해일에 의한 임원항의 3차원 범람 시뮬레이션을 실시하였다. 마산의 경우 폭풍해일 저지용 방벽 설치시의 효과를 초기적으로 검토하였으며, 방벽 설치시 범람시간의 지체를 가져오는 효과가 나타났으며 호안 접근성을 위한 일부 구간 개방시는 유속 증가로 악영향이 예측된다. 일본의 경우 기계 시스템으로써 감문을 설치하여 대비하고 있으므로 방벽 설치시 참조한 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 임원항은 1983년 및 1993년 지진해일 내습 이후 시점에 지진해일에 대한 대비는 고려하지 않은 채 외곽시설의 정비가 이루어졌으나 범람고의 감소가 나타났으며, 진행 중인 재정비 설계안에 대한 검토 결과 역시 이보다 감소하는 것으로 나타났다. 최종평면의 채택시 이를 감안하여 배치계획을 수립할 예정이다.

## 참고문헌

- 국립방재연구소. (1999). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구(I).
- 국립방재연구소. (2000). 동해안에서의 지진해일 재해저감을 위한 연구(II).
- Choi, B.H., Pelinovsky, E., Kim, D.C., Kim, K.O., and Kim, K.H. (2008). Three-dimensional simulation of the 1983 central East (Japan) sea earthquake tsunami at the Imwon Port (Korea). *Ocean Engineering*, doi:10.1016/j.oceaneng.208.07.002.
- Hirt, C.W. and Cook, J.L. (1972). Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain. *J. of Computational Physics*, 10, 324-340.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundarie. *J. Comput. Phys.*, 39, 201-225.
- Lee, H.J. and Kim, K.H. (2000). Numerical simulation of tsunami inundation at the Imwon Port. *Korea-China Conference on Port and Coastal Engineering*, Seoul, Korea, 277-286.

## 5. 결 론