유한요소 폭풍해일 모형을 이용한 직립안벽에 대한 범람모의 Inundation Simulation on a Vertical Dock Using Finite Element Storm Surge Model

서승원* · 이화영**

SeungWon Suh* and HwaYoung Lee**

요 지 : 연안방재계획 수립을 위한 기초자료 생성의 일환으로 태풍에 의한 해일 범람모의를 수행하였다. 통상적인 침수-노출 처리가 불가능한 직립안벽을 갖는 항만역의 특징이 반영되도록 가상의 내부제방 개념을 도입하여 해석하였다. Mokpo항에 대한 실제해역 적용에 앞서 단순해역에서 다수의 적용성 평가를 통해 내부제방의 폭은 1 m가 적절한 것으로 평가되었다. 해일범람으로 인한 침수면적과 침수심 산정에 민감하게 작용하는 육역의 침수-노출 처리기법에서의 최소침수심은 격자에 의존적이나 10 m 내외의 유한요소 상세격자에서는 0.01 m가 적절한 것으로 판단된다. 기존 태풍경로에 준거한 100년 빈도급 중심기압과 최대풍속을 가지며 비대칭 경도풍과 파랑효과가 고려된 가상태풍의 내습에 따른 Mokpo해역의 침수예상역이 모의되었다. 침수면적은 기존 연구결과와 유사성을 나타내지만 항만권역 일부에서 확대 가능성이 있는 것으로 평가된다.

핵심용어 : 유한요소, 내부제방, 해일범람, 가상태풍, 침수-노출

Abstract : Typhoon induced surge simulations are done to make an establishment of coastal disaster prevention plan. To apply efficient run-up and overtopping on vertical harbor docks, in which prevailing wet-dry scheme cannot be satisfied due to infinite steepness, an imaginary internal barrier concept introduced and analyzed. Before real application on the Mokpo harbor area, feasibility tests are done on an idealized simple geometry and as a result it is found that the moderate width of the barrier might be 1 m. The threshold value of the minimum wet depth H_{min} for land area, which behaves sensitive role in inundation area and depth, depends on grid size. However it is revealed that 0.01 m is adequate value in this fine finite element with 10 m spacing. A hypothetical typhoon of 100 years return period in central pressure and maximum velocity is generated based on historical tracks. Simulation of possible inundation on Mokpo area is performed with asymmetrical vortex of hypothetical typhoon and wave coupling. Model results show general agreement in pattern compared to other's prediction, however possibility of inundation enlargement is expected in harbor area.

Keywords : finite element, internal barrier, surge inundation, hypothetical typhoon, wet-dry

1. 서 론

3면이 바다인 우리나라는 연안역에 위치한 항만을 중심으로 주요 기반시설과 인구밀집도가 높으며 연안역의 의존도가 높은 만큼 폭풍해일 등의 연안재해 발생에 취약한 구조적 특징을 가진다. 최근 10년(2001~2010)간 자연재해로 인하여 연평균 인명피해는 68명, 재산피해는 1조 7,044억이었으며 이중 태풍으로 인한 피해는 60%에 해당된다(소방방재청, 2010). 지구온난화가 매년 가속화됨에 따라 자연재해로 인한 피해는 점차 증가될 것으로 예상되는데, 2005년 미국 뉴올리언스에 상륙하여 막대한 인명과 재산피해를 발생시킨 Katrina와 같은 슈퍼태풍 또는 이상기상에 의한 태풍의 이동경로 변경에

따라 우리나라가 막대한 피해를 입을 가능성도 있다.

미국에서는 열대성 저기압에 의한 피해로 연안역에서의 재산과 인명을 보호하기 위하여 수치모형의 예측결과를 토대로 재해정보도(Hazard map), 비상대처계획(EAP) 수립 등 피해를 예방하고 최소화 하려는 노력들이 진행되고 있다. 미국 연방재난관리청(FEMA, Federal Emergency Management Agency)의 재난대응 프로그램 HARZUS(Hazard U.S.)와 미국 남동부 대학들의 연구협회(SURA, Southeastern Universities Research Association)의 폭풍해일 예측을 위한 SCOOP(Southeastern Coastal Ocean Observing and Prediction) 프로그램(Bogden et. al., 2006) 등을 예로 들 수 있다. 태풍의 영향을 받는 일본에서는 지자체 별로 지진 및 폭풍 해일에 대비한 위험지도

* 군산대학교 해양건설공학과 교수(Corresponding author : SeungWon Suh, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Daehak-ro 1170, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea. suh@kunsan.ac.kr)

** 군산대학교 대학원 해양산업공학과 박사과정(Department of Ocean Science & Engineering, Kunsan National University)

매뉴얼이 작성되어 국토교통성 홈페이지(www.gis.go.jp)에 제공되고 있다(국토해양부 국립해양조사원, 2011). 우리나라에서도 폭풍해일에 의한 저지대 범람에 관한 침수역 산정연구(김 등 2007; 문 등, 2007; 천 등, 2008; 박 등, 2010; 정·김, 2011)가 근래에 활발히 진행되고 있으며 정부에서도 연안재해의 심각성을 인식하여 피해를 저감하고 대응책을 마련하기 위한 연구들(국토해양부 한국해양연구원, 2010; 국토해양부 국립해양조사원, 2011; 국토해양부 한국해양과학기술진흥원, 2011)이 다년도 사업으로 추진되고 있다.

본 논문은 폭풍해일에 의한 항만권역의 재해방지 대응책을 모색하는 연구과제의 일부분으로, 가상경로의 빈도 태풍에 대해 서남해안의 항만권역에서 해일범람 가능성을 평가하는데 있다. 황해 및 북서태평양까지 확장된 상세 유한요소격자에서 비대칭 경도풍-해수순환-파랑의 복합적 현상을 pADCIRC와 unSWAN 모형의 동적결합으로 우리나라 서해연안에 피해를 미치는 태풍해일에 대하여 모의한 연구성과(서·김, 2012)를 토대로 한다. 해일모의에서 조석과 해일을 따로 모의하여 선형 중첩시키면 본 연구의 비선형 모형에서 동시에 계산된 경우보다 해일고가 상대적으로 과대 산정된다. 이유는 창조시 경우에 폭풍이 해면에 가하는 응력과 조석 위상차의 영향으로 선형중첩된 경우보다 해일고가 낮아진다(Lin et al., 2012). 또한 고조시 상승된 해수면의 자체력에 의해 외해방향의 흐름이 발생되면서 실제적으로는 선형중첩한 경우에 비해 낮게 되어 저조시보다 고조시의 폭풍해일고가 상대적으로 낮아 82-95%에 미친다(Gonnert and Sossidi, 2011).

기존 해수순환 모의시 침수-노출 기법으로 재현되지 않는 직립안벽에 대한 거동을 적정 수치기법을 통해 모의하고, 과거 서해안으로 이동하면서 우리나라에 영향을 미쳤던 태풍경로에 준하며 중심기압 및 최대풍속 강도가 증가된 가상태풍 내습시 서해안의 대상 항만 중 일차적으로 목포항에서의 해일범람을 모의하는 과정을 다룬다. 이유는 직립안벽으로 이루어진 항만권역에서 폭풍해일 범람모의에 급경사 또는 수직 경사로 인해 유동함수의 불연속점이 발생되어 기존의 침수-노출(wet-dry)기법을 적용할 경우 하나의 격자 안에서 수심 경사가 매우 급해 안정적인 수치모의가 되지 않기 때문이다. 본 연구에서는 안벽의 선단 일부를 폭이 좁은 가상의 제방으로 처리하고, 해일이 이를 월류하는 경우 웨어공식을 적용하여 직립안벽에서의 범람과 내부 침수 모의를 다룬다. 이때 가상제방 폭에 따른 표면 마찰 영향으로 육역에서의 범람 전파와 수치적인 안정성과 물리적인 거동에 대한 검토를 단순해역에서 먼저 검토 평가하여 이들 영향이 최소화되는 적정 폭을 도출한 후 실제해역인 목포 항만권역에 적용한다.

2. 모형 수립

2.1 적용모형

폭풍해일 및 범람에 이용된 수치모델링의 주된 기법은 유한

차분 근사에 기초한 것이 대부분으로 정규격자를 이용하기 때문에 복잡한 연안경계를 표현하는데 상당한 제약이 따랐다. 따라서 관심이 집중되는 연안역에서 폭풍해일에 의한 범람을 모의하기 위해서는 등지형(nesting) 기법(문 등, 2006; 김 등, 2007; 천 등, 2008; 박 등, 2010)으로 전환된 연구가 근래에 활성화되고 있다. 다른 형태의 접근방법은 복잡한 경계를 용이하게 반영하고 하나의 격자체계에서 조격자 및 세격자를 수심변화에 따라 능동적으로 적용할 수 있으며, 천해역인 연안역을 매우 상세히 해상할 수 있는 장점이 있는 유한요소법을 사용하는 것이다(서·김, 2012). 본 연구에서는 이를 근거하여 우리나라 서해 연안과 같은 복잡한 경계를 충분히 반영할 수 있으며 관심 해역에 10 m 내외의 매우 상세화된 요소를 집중적으로 배치함으로써 폭풍해일에 따른 연안범람에서 정밀한 모의가 가능하도록 하였다.

적용한 수치모형은 ADCIRC로 정밀한 경계처리를 하여 광역의 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한요소 모형으로 미국 국립허리케인센터(NHC, National Hurricane Center)의 기본모형으로 다수의 허리케인과 폭풍해일 예정보 및 연구에 활용되어 모형의 신뢰성이 검증되었다. 국내에서는 본 연구의 전 단계로 서·이(2007), 서·김(2011), 서·김(2012)의 논문에서 우리나라 서해연안의 조석과 폭풍해일을 만족스럽게 재현하여 모형의 적용성과 신뢰성이 입증된 바 있다. 모형의 자세한 이론과 설명은 모형의 공식 웹페이지(www.adcirc.org)와 선행된 연구들에서 확인 할 수 있으므로 본고에서는 생략한다.

본 연구에서는 폭풍해일 범람모의시 해면에 직접적으로 작용하는 태풍 바람장의 drag force에 기인한 강한 해면응력과 함께 파랑의 효과를 동시에 고려하였는데, 이유는 그 크기의 정도가 상대적으로 작지만 무시할 수 없는 정도인 파랑의 radiation stress를 동시에 고려함으로써 복합적 작용에 의해 발생하는 연안범람과 침수를 모의하기 위함이다. 구체적인 방법은 3세대 파랑모형 SWAN을 비정규격자 순환모형 ADCIRC와 동일한 격자에서 수행되도록 변형한 unSWAN(Zijlema, 2010)을 순환모형과 동적으로 결합하여 병렬화한 pADCIRC 모형을 통해 계산되는 방법(Dietrich et al., 2011)을 이용하였다. 모의 영역의 공간적 범위는 태풍발원지인 북서태평양을 포함하는 광역 상세격자체계를 적용하여 태풍의 전체 이동경로가 모두 포함되고 심해에서 발생한 파랑의 영향이 전 영역에서 계산되도록 하였다. 수치계산시간을 최소화 하도록 64 core로 구성된 병렬클러스터에서 모의하여 모형 수행의 수월성과 결과의 신뢰성을 높이도록 하였다.

2.2 직립안벽의 가상제방처리

이상기후인 폭풍에 의한 해일은 주로 연안 저지대 또는 인공적으로 축조된 연안시설물을 범람하여 예기치 못한 매우 큰 재해를 끼치게 된다. 주요 기반시설이 포함된 항만권역 등에서는 안벽이 축조되어 선박의 정박과 하역기능을 담당하면서,

고파랑 내습시 항만 주요시설을 보호하는 역할을 한다. 직립 안벽으로 구성된 항만 및 연안에 해일이 발생하면, 완만한 해저경사를 갖는 연안지역에서 발생하는 범람에 의한 해일과의 차이점과 전혀 다른 형태로 반응하고, 월파 후 육역으로 전파될 때에도 특이한 거동을 한다. 대다수 해수유동모형이 완경사 지형의 연안역 모의에 침수-노출 기법을 응용하고 있지만, Fig. 1(a), (b)에 보이는 직립안벽으로 이루어진 항만권역에서 폭풍해일로 인한 범람모의에서는 급경사 또는 수직경사로 인해 유동함수의 불연속점이 발생되어 통상적인 침수-노출 기법을 적용하여도 하나의 수치계산 격자 안에서 수심경사가 매우 급해 안정적으로 모의가 되지 않는 제한사항이 있다. 따라서 직립안벽이 축조된 연안역 부분에 대한 해일 범람모의를 위해서는 이에 적합한 범람재현 및 월류 기능이 보완될 필요성이 있다.

현재 운용되는 대부분 해수유동모형에는 조간대의 침수-노출을 처리하는 기법이 적용된다. 이들 기법은 몇 가지로 나눌 수 있는데, 해안선을 따라 가상벽을 설정하고 흐름을 강제로 차단하거나 고정격자체계에서 침수-노출 알고리즘을 근간으로 한 이동경계기법 또는 격자체계가 침수조건에 따라 이동되는 것으로 구분되며, 이 중에서 이동경계기법이 가장 보편적으로 적용된다. 그러나 이 방법을 적용하여도 항만권역의 안벽 등 연안 인공구조물로 구성된 직립안벽의 범람모의시 수심 급변화로 불연속이 존재하게 되어 해를 구할 수 없게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 수리학적 개념을 도입한 새로운 접근방법이 필요한데, 해안구조물의 천단고를 넘어 월류가 발생하면 월류 전후의 수심에 따라 수중

월류(상류)와 완전월류(사류)로 구분하여 월류량을 계산하는 방법(김 등, 2007; 문 등, 2007; 천 등 2008; 정 · 김, 2011; Westerink et al., 2001; Dawson et al., 2011)이 적용된다. 문 등(2007)은 등지형 격자를 이용하고 침수-노출 및 직립제방의 천단을 월류하는 웨어 공식을 적용하였다. 천 등(2008)과 박 등(2010)도 서로 상이한 모형을 적용하였지만, 수치근사화에 유한차분화가 적용되어 불규칙 해안을 잘 표현하지 못하므로 광역으로부터 해일범람 대상지까지를 상세화하는 nesting 기법을 적용하였다. 천 등(2008)은 범람이 예견되는 해안경계의 격자를 계단식으로 처리하여 침수-노출 기법을 적용하면서 완전 또는 불완전 웨어공식을 적용하여 월류량이 운동량 방정식에 직접 포함되도록 하였다.

본 연구에 적용하는 ADCIRC 모형도 이동경계기법으로 조간대의 침수-노출을 모의할 수 있으며, 이외 직립벽의 경우 연안을 따라 축조된 제방 또는 해안도로로 범람하는 것을 모의하기 위해 앞서 언급한 연구진들이 발표하였던 것과 유사한 웨어 유량공식 또는 제방을 통한 침출수를 모의하기 위한 가상의 관거를 통한 유량을 계산하여 모의할 수 있다. 모형에서는 이를 내부제방경계(internal barrier boundary)로 취급하는데, 외부제방경계(external barrier boundary)와 구분하기 위함이다. 여기서 외부제방경계는 통상적인 외부경계 중 점선방향은 자유롭게 운동하지만 외향수직방향의 유출입을 정의하지 않는 Neuman 경계조건으로 해면이 경계 높이를 초과하게 되어도 경계 외부로 자유로운 범람을 허용하지 않는다. 즉, 외부제방경계 밖으로는 더 이상의 육역 관심지가 없는 반면, 내부제방경계는 이 경계 외부로도 범람 가능 육역이 존

Fig. 1. Typical upright harbor dock images(a, b) and schematic diagram of internal barrier boundary(c).

재하는 경우에 해당한다. 본 연구에서는 연안역에서의 항만 구조물인 직립안벽의 범람모의를 위해 내부제방경계 조건을 이용한다.

구체적인 계산방법은 연안역의 직립안벽에서 상류 및 하류를 모의하는 조건을 적용하고, 격자의 구성은 해역모의를 위한 격자망과 육역 범람을 재현하기 위한 보조 격자망(sub grid)으로 구성되는데, 이들 격자간 가상제방은 해역방향의 절점(front edge node)과 육역의 절점(back edge node)이 쌍으로 이루어진다(Fig. 1(c)). 안벽보다 수위가 낮은 경우 육지 경계조건(land boundary condition)은 $q \cdot n = 0$ 으로 표현되며, 수위가 안벽보다 높아 월류될 경우는 $\hat{q} = q_{weir}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이때 수위가 안벽보다 높을 경우에 범람 조건을 분류하면 크게 다음의 4가지 경우로 구분된다(Dawson et al., 2011).

Case 1: 해수면이 안벽 천단고 보다 낮은 경우, $q \cdot n = 0$

Case 2: 제방 천단고와 해수면 높이가 같으나 육상으로 월류가 발생하지 않는 경우, $q \cdot n = 0$

Case 3: 해수면이 안벽 천단고 보다 높으며 육상으로 월류가 발생하여 상류 또는 하류 흐름이 나타나는 경우, $\hat{q} = q_{weir}$

Case 4: Case 3의 경우와 같으나 외해 방향으로 흐름이 발생하는 경우, $\hat{q} = q_{weir}$

해일로 범람이 진행되면 월류량은 다음 식에 따라 계산이 수행된다. 안벽을 기준으로 육역 방향으로 흐름이 발생할 경우 수중월류 또는 완전월류로 구분되고, 해역 방향으로 흐름이 발생할 경우에는 흐름 방향만 반대로 계산된다.

수중월류(subcritical flow):

$$q = -\text{Ramp} C_f H_{ex} \sqrt{2g(H_{in} - H_{ex})}$$

완전월류(supercritical flow):

$$q = -\text{Ramp} C_f \frac{2}{3} H_{in} \sqrt{\frac{2}{3} g H_{in}}$$

여기서 q 는 유량, Ramp는 초기 유량계산시 모형의 안정화를 위한 함수, C_f 는 유량 계수, g 는 중력가속도, H_m 과 H_{ex} 는 각각 가상의 내부제방에서 해역과 육역에 해당되는 절점에서의 수위를 나타낸다. 여기에서는 유량계수의 일반적인 값($C_f = 1$)에 대하여 상류($C_f = 1$), 하류($C_f = 0.91$)조건에 따라 달리 취하였다.

3. 단순해역 범람모의

항만권역 범람모의에는 인공구조물의 급경사 또는 수직경사로 인해 유동함수의 불연속점이 발생하기 때문에 기존 침수-노출방법으로 수치모의가 되지 않는다. 범람 수치모의의 근사화로 유한차분화를 이용하는 경우는 격자가 계단식으로 설정된 것으로 가정된 이동경계법을 이용하며, 제방 천단고를 넘는 경우는 광정웨어에 의한 유량 산정식을 이용하여 단위 폭당 월류량을 계산하여 모의한 성과들(김 등, 2007; 문 등,

2007; 천 등, 2008; 박 등, 2008)이 있다. 이들 연구에서는 범람모의 지역을 상세화하는 등지형 격자를 적용하여 월류되는 격자간격을 5-50 m로 하였으나 웨어공식 적용에서 격자간격이 커질 때 제방 천단의 조도계수에 의한 표면마찰의 영향이 충분히 고려되지 못한 수치학적으로 불합리한 면이 없지 않다.

허리케인 피해가 빈번한 미국 멕시코만의 남부연안에 있는 해안도로 또는 연안제방으로 해일이 범람하는 것을 모의하기 위해 유한요소의 근사화를 이용하는 ADCIRC 모형에도 이를 내부제방으로 처리하는 기능이 고안되었다. 그러나 한정된 도로 폭 또는 제방 폭에 대한 월류를 단순 광정웨어로 취급하여 해수면이 제방 높이를 초과하는 경우 월류량을 전술한 공식에 따라 해당 절점에서 단위폭당 유량으로 계산하고 이를 육역의 대응 절점으로 그대로 전달하기 때문에 제방 폭에 따른 표면 마찰의 영향이 고려되지 않는 제한사항이 있다.

즉, 수치 근사화 방법과 상관없이 웨어공식으로 범람유량을 산정할 수 있는 경우는 월류 이후 범람하는 가상 또는 실제 제방부의 폭이 좁다면 문제가 없겠지만 폭이 넓은 경우에는 이 구간을 이동하면서 발생하는 표면마찰에 의한 영향이 반영되지 않기 때문에 이에 대한 적절한 처리 기법이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 가상의 내부제방의 폭이 최소가 되면서 전처리 과정에서 해상하는 유한요소 격자와 상호 유기적으로 결합되어 제방의 폭에 따른 표면마찰의 영향이 최소화될 수 있는 수치학적인 타당성을 갖도록 하였다.

설정된 조건은 직립안벽을 월류하여 육역으로 범람되는 해일전파 모의시 제방 폭에 따른 표면 마찰에 의한 영향을 평가 하기 위해 가상의 내부제방 폭을 1 m로 설정하고 실제 제방 폭이 1 m, 10 m, 30 m에 해당될 경우를 검토한다. Fig. 2와 같이 단순해역을 100 × 50 km 해역과 10 × 10 km 육역으로 설정된 영역을 최소 10 m 간격의 요소로 이산화하고 해역과 육역 경계에는 가상의 내부제방을 설정한다. 수치모의 실험에서 우리나라 서해 남부해역의 해저경사를 고려하여 외

Fig. 2. Ideal domain with internal barrier along the edge of coastal boundary.

해경계 근처는 수심 35 m부터 연안의 수심 3 m까지 선형적으로 증가되는 일정경사를 갖도록 하였다. 여기에 직립제방의 천단고는 E.L.(+) 3 m, 이후 육역의 지반고는 E.L.(+) 2 m로 설정하여, 이러한 이상적인 단순해역의 개방경계에서 3.1 m의 진폭을 갖는 M_2 조석파가 들어오는 경우 해안제방에서의 월류와 범람에 대한 민감성을 분석하였다. 조도계수는 Manning's n 값을 적용하는데 해역은 0.025를 일정한 값으로 부여하고 Dietrich(2010)와 국토해양부 해양과학기술진흥원(2011)에서 제시된 값을 참조하여 제방부는 0.035, 배후 육역은 0.12의 값을 적용한다.

월류된 유량이 육역 내부로 전파되는 경우, 초기 노출된 영역이 침수 되는데 이때의 물리적 기작은 수치적으로 표현된 유한요소 내에서의 최소 침수심 기준 값인 H_{min} 과 침수유속 기준 값 Vel_{min} 에 따라 크게 좌우된다. Dietrich et al.(2004)은 해석적으로 해를 구할 수 있는 단순 선형 또는 비선형적으로 해저경사가 변화되는 경우에 ADCIRC 모형의 침수-노출의 성능과 제반 변수들의 민감도를 분석하였는데, 이 결과에 따르면 침수 최소수심 H_{min} 은 이론적으로 10^{-10} m까지 가능하지만 10^{-2} m가 최적이며, 침수시 영향을 미치는 Vel_{min} 과 함께 고려되어야 함을 제시하였다. 이유는 Galerkin 근사화를 적용한 모형이 안고 있는 질량보존 오차를 최소화 시키기 때

문이라고 지적하였다. 본 연구진이 서해안 수치모의에서 경험한 바에 따르면 최소수심 H_{min} 은 0.1 m, 최소유속 Vel_{min} 은 0.01 m/s가 일반적인 완경사(mild slope)를 갖는 경우에 있어 안정적인 해를 얻을 수 있는 기준 값으로 적정한 것으로 판단된다(서·김, 2003). 이러한 값은 다른 모형을 적용한 경우에도 통상적으로 취해지는 값으로 발표되고 있다(김 등 2007; 천 등 2008; 박 등, 2010). 침수-노출 처리에서 최소수심 기준 값은 유한요소의 크기가 클수록 큰 값이 적용되는 것이 일반적이지만 과대 또는 과소한 값의 적용은 결과의 정확도를 감소시킬 수 있다. 따라서 침수-노출 처리로 미국연안에서 통상적인 해일범람을 모의한 연구(Westerink et al., 2008) 또는 본 연구진의 선행된 연구성과에 기초한 H_{min} 값 0.1 m를 그대로 적용하기 보다는 여러 상황을 고려한 적정 값의 산정이 중요하다. 특히 부적절한 값의 적용은 안정된 수치해가 도출되지 못하는 제한사항으로 작용하고, 초기 전파에 따라 범람역 규모가 달리 산정되면 이들 값에 따라 결과 양상이 달라 질 수 있으므로 세심한 주의가 필요하다.

본 연구에서 수행한 단순해역 수치모의 결과에 따르면 이들 값은 사용하는 격자 크기에 따라 민감한데, 요소 내에서 각 절점이 침수되는 것은 월파 파형의 유지와 관계되므로, 제방 인근의 격자크기가 10 m 범위인 경우 최소 침수심 기준

Fig. 3. Different spreading inundation areas depending on barrier width.

Fig. 4. Hydrographs of inundation heights at st. A.

값 $H_{\min}$ 은 0.01 m, 100 m 이상의 범위를 갖는 경우 0.1 m의 사용이 권장된다. $Vel_{\min}$ 은 민감성이 $H_{\min}$ 에 비해 떨어지는데 통상적으로 0.05 m/s가 적용된다. 여기에 부가하여 강조할 점은 제방을 월류한 이후 육역으로 전과되면서 $H_{\min}$ 값에 따라 침수심과 그 분포 양상이 다르게 나타난다는 것이다. 이유는 침수-노출 계산시에 $H_{\min}$ 값은 dry $\rightarrow$ wet으로 천이될 때 적정한계를 표현하고, $Vel_{\min}$ 은 이와 반대로 wet $\rightarrow$ dry 방향으로 흐름이 있는 것을 처리하는 역할을 하므로 제방 범람의 경우에는 $Vel_{\min}$ 의 민감성은 크지 않으나 $H_{\min}$ 은 매우 민감하게 반응하기 때문이다.

제방 폭에 따른 수치모의 결과가 Fig. 3과 Fig. 4에 제시되는데, 평면적인 양상을 비교한 Fig. 3을 분석하면, 제방 폭이 1 m 인 경우 해일은 제방을 범람하여 최대 3,000 m 전과되고 폭이 10 m일 경우 6,150 m, 폭이 30 m 인 경우 6,200 m 전과되는 것으로 나타난다. 이는 육역의 조도계수(0.12)에 비해 상대적으로 낮은 값(0.035)이 적용된 제방의 폭이 연장될수록 해일 범람시 표면 마찰에 의한 손실수두가 크게 발생하지 않은 결과로 분석된다. 시간에 따른 해일고 변화를 알아보기 위해 육역과 제방의 경계에 설정한 관측점(St. A)에서 시간에 따른 해일고의 변화를 도시한 Fig. 4를 분석해 보면, 일반적으로 제방 폭이 길수록 표면마찰의 영향을 크게 받는데, 본 연구에서는 제방에서의 조도계수를 상대적으로 낮게 설정한 관계로 제방 폭이 길수록 많은 유량이 월류되어 상대적으로 높은 침수고와 월류 이후 급격한 수면변화로 인해 약간의 수면진동이 나타난다. 이와 반대로 상대적으로 높은 조도계수가 적용될 경우, 마찰에 의한 손실수두가 반영되어 해일의 전과양상은 제방 폭에 반비례하여 나타나므로(Fig. 3(d)) 가상의 내부제방 폭은 가능한 최소한의 폭으로 설정되어야 한다. 즉, 제방 폭이 변화됨에 따라 표면 마찰 등의 영향으로 해일의 전과양상이 달라지므로 이 폭을 최소화 하고 나머지를 육역으로 해상하여 항만권역의 제방 및 배후지역에서 표면 마찰의 영향이 반영하도록 하는 것이 타당하다. 이상의 실험된 결과를 토대로 내부제방의 적정 폭은 1 m가 이상적인 폭으로 판단되는데, 이는 유한요소의 생성 및 수정 등 전·후처리 과정의 편의성을 함께 고려할 때 적절하다.

4. 목포해역 범람모의

4.1 대상지 선정 및 격자해상

연안재해 중 태풍으로 인한 예기치 못한 해일범람에 관한 현상 이해 및 대응체계를 마련하는 일련된 연구(국토해양부 한국해양과학기술진흥원, 2011)의 일부분인 본 논문에서는 1차적으로 서해남부에 위치한 목포항만권역에 대해 100년 빈도급 가상태풍이 내습하는 경우 직립안벽의 범람과 배후지의 침수 가능성을 평가한다. 목포는 지형특성상 지반이 낮아 폭풍해일에 의한 영향이 크지 않더라도 조위가 높을 경우 해안 저지대를 중심으로 침수피해가 종종 발생하기 때문에(박 등, 2011) 연안을 따라 제방 등의 시설물이 축조되어 육역을 보호하는 기능을 하고 있다. 이런 점들로 금번 연구에서 모의하고자 하는 목포항만권은 해안 구조물의 일부를 가상제방으로 설정하여 모의를 수행하는 타당성에 대한 평가와 함께 이를 월류하는 해일 범람을 모의할 수 있는 적합한 지역으로 판단된다.

앞서 이론적인 배경과 단순해역에서 검토한 결과에 따라 목포 내항을 중심으로 한 목포항 일대를 Fig. 6(a)에 보이는 것처럼 격자생성시 해안을 따라 폭 1 m의 가상 제방을 두어 해상하였다. 상세 해석을 위해 안벽을 포함한 육역을 10 m 간격으로 해상하고, 국토지리정보원에서 제공하는 1/1000 수치지형도를 이용하여 육역의 지형과 표고 데이터를 반영하였다. 그렇지만 목포 연안역을 포함한 항만권역은 다양한 공사로 인한 지형변화가 빈번히 발생하는 지역이므로 최신의 항공 및 위성사진을 참조하여 변화된 지형정보를 반영 할 수 있도록 노력을 기울였다. 이외 광역인 황해에 대해서는 서·김(2011)이 구축한 격자망과 전 지구 1분 수심인 ETOPO1(Amante and Eakins, 2009) 및 우리나라 연안의 30초 수심인 KorBathy30s(서, 2008)이 적용되었다. 북서태평양을 포함한 광역 개방경계 조건은 서·김(2012)의 연구에서 검증된 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출한 주요 8분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , P_1 , K_2 , Q_1)가 반영되었다. 폭풍해일 모의를 위한 격자체계는 총 128,749 개의 절점으로 구성되는데, Fig. 5에 제시된 격자망과 같이 태풍의 발생지와 이동경로가 포함된 북서태평양을 고

Fig. 5. Grid structure of NWP-G57K for storm surge inundation simulation and sub-domain partitioning for parallel computation.

Fig. 6. Map showing (a) very fine meshes for sub-domain and imaginary barriers settings along the coastal dock and (b) bathymetry and topography for the Mokpo harbor area.

려하는 56,617개로 구성된 격자망(NWP-G57K)을 기본으로 하며, 여기에 Fig. 6과 같이 대상지인 목포 인근해역이 일종의 sub-domain으로 초상세 격자로 해상되어 NWP-G57K 격자에 덧붙여져 구성된다. 이후 태풍 Kompasu가 서해연안을 통과하여 소멸하기 전까지 중조기에 해당되는 5일(2010년 8월 29일~9월 3일)간 설정한 태풍의 이동경로 별로 모의가 진행된다.

4.2 가상태풍

폭풍해일에 의한 연안 범람은 기본적으로 외력으로 작용하는 특이 기상인 태풍의 이동경로, 최대풍속 반경, 중심기압, 이동속도 등 태풍의 규모와 특징에 의해서 결정된다. 본 범람모의에 앞서 진행된 서·김(2012)의 연구결과에 따르면, 목포를 중심으로 우리나라 서남부에 영향을 미치는 태풍 이동경로는 발생시기와 밀접한 관련이 있으나 주된 내습풍향은 대체적으로 남남서(SSW)가 지배적이다. 과거 우리나라에 영향을 미쳤던 태풍 중 2010년 발생한 Kompasu는 서해를 따라 북상하다 경기만으로 상륙하였는데, 태풍 Kompasu 중심이 목포에 근접하였을 때 연안으로부터 130 km 정도 떨어졌으며

중심기압은 955 hPa 정도였다. 태풍 Kompasu의 이동경로는 Fig. 7(a)에서 확인 되듯이 박 등(2006)이 분석한 서해연안에 영향을 미친 대표적인 태풍의 이동경로 유형 중 Type 1과 유사하다.

본 연구에서는 목포해역에 대한 해일 범람모의를 위해 서·김(2012) 연구에서 비대칭 경도풍과 파랑이 고려되어 서해안의 폭풍해일 모의에서 검증한바 있는 성과를 토대로 100년 빈도급 중심기압을 갖는 태풍이 목포해역에 가장 크게 해일 범람을 발생시킬 수 있는 여러 경로에 대한 가상태풍을 고려하였다. 해일고에 민감하게 영향을 주는 인자는 중심기압의 변화 못지 않게 태풍의 이동경로가 매우 중요한데, 이들에 따르면 서해안에서 폭풍해일 특성상 관심지에서 최대해일이 발생하는 경우는 태풍이 관심지를 통과하는 것보다 북측에 상륙하는 경우이다. 따라서 여기에서는 목포해역에 크게 영향을 줄 수 있는 대표적인 태풍의 이동경로 4 가지를 Fig. 7(b)와 같이 설정하였다.

박 등(2006)의 연구에 따르면 우리나라 서해연안에 영향을 미치는 대표적인 태풍의 이동경로는 Fig. 7(a)와 같이 3가지(Type 1, 3, 6)로 분류되는데, 이를 참조하여 설정한 태풍의

이동경로가 Fig. 7(b)에 제시된다. 태풍경로 T0는 Kompasu의 실제 이동경로와 같으며, 가상 태풍경로 T1, T2는 서·김(2012)이 언급한 미해군연구소(Naval Research Laboratory, NRL)에서 66년간(1945~2010) 우리나라 목포에 영향을 미친 89개의 태풍을 분석한 결과(http://www.nrlmry.navy.mil/port_studies/thh-nc/korea/mokpo/text/index.htm)를 참조하여 태풍이 목포에 내습하는 풍향 SSW(57%)와 WSW(24%)에 따라 설정하였다. 경로 T3은 서해연안에 영향을 미치는 태풍의 대표적인 이동경로인 Type 1과 같게 설정하였으며, 경로 T4는 T3과 유사하나 서해연안에 근접하여 북상하도록 설정한 것으로 이는 박 등(2011)이 설정한 가상의 태풍경로와 유사하다.

범람모의를 재현하는 가상태풍은 최대풍속반경과 중심기압, 이동속도 등의 특성이 빈도개념에 입각하여 합성되어야 한다. 본 논문에서는 선행연구(국토해양부 국립해양조사원, 2011)의 성과에 근거하여 100년 빈도 태풍의 중심기압을 930 hPa으로 설정하였다. 여기서 태풍의 중심기압 변화는 Fig. 7(b)에 제시된 태풍 Kompasu와 같이 열대성 저기압 발생 이후 북상하면서 위도에 따라 중심기압이 낮아지다가 제주도 근방에 접근하면서 기압이 점차 높아지도록 설정하였다. 대체적으로

북위 30~32도 근방인 제주 남서쪽에서 중심기압이 최저를 보이다가 그 이후 북상 또는 북동진으로 경로를 바꾸면서 점차 중심기압이 높아지고 육지에 상륙 이후, 열대성 저기압으로 변화되는 분포를 따르도록 하였다.

최대풍속은 강 등(2002)의 연구에서 제시된 중심기압에 따른 최대풍속의 경험적 관계식에 100년 빈도 태풍의 중심기압 930 hPa을 대입하여 계산된 풍속 45 m/s로 설정하고 최대풍속의 반경은 우리나라에 영향을 주는 태풍의 최대풍속 반경의 평균값인 80 km(국토해양부 국립해양조사원, 2011)를 기준으로 비대칭이 고려되도록 태풍의 풍속반경을 중심으로 4분원에 대해 60~80 km 범위를 갖도록 하였다. 이는 국토해양부 한국해양연구원(2010)에서 최대풍속 반경과 중심기압 사이의 경험식을 이용하여 평가한 최대풍속 반경보다 크며 최대 1.6배에 해당된다. 즉, 가상태풍 규모 설정에서는 다수의 연구진(박 등, 2010; 박 등, 2011; 국토해양부 국립해양조사원, 2011)이 접근하였던 것처럼 태풍의 중심기압, 최대풍속을 100년 빈도 태풍급으로 설정하고, 최대풍속반경의 4분원에 대한 반경도 가상태풍의 중심 기압 비에 따른 반경 비로 설정하여 비대칭 정도풍의 특징이 고려되도록 하였다(Fig. 9).

Fig. 7. Typhoon tracks showing (a) typically affecting to the west coast, (b) Kompasu(1007) in solid line and hypothetical typhoon in dotted line for 100 years return period.

Fig. 8. (a) Surge elevations for hypothetical typhoon tracks and (b) maximum surge heights.

Fig. 9. Comparison of wind vortices by (a) symmetric and (b) asymmetric Holland(1980) gradient for hypothetical typhoon(100 years return period) track T2 shown in Fig. 7(b).

태풍 Kompasu의 실제 이동경로와 100년 빈도 규모로 설정된 가상 태풍의 이동경로 4가지에 대해 해일고를 산출하여 Fig. 8(a)에 제시하였으며, 최대치는 Fig. 8(b)에 제시된다. 모의한 바에 따르면 태풍 Kompasu가 목포해역을 통과할 때 최대 해일고는 0.49 m로 나타나지만, 가상의 태풍 이동경로 T1, T2인 경우에는 각각 1.51 m, 1.91 m로 T2일 때 가장 높은 해일고가 발생한다. 이러한 결과는 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 본 연구에서 고려된 비대칭 경도풍의 영향으로, 태풍 바람장 우반경 후미의 강한 해면응력이 목포해역 일대에 집중되기 때문에 나타나는 것으로 이해된다. 그러나 동일 가상태풍에 대해 대칭형 경도풍을 적용하면 이보다 0.60 m 낮게 산정되는데, 그 이유는 태풍 바람장의 특징이 관심대상지에 어떻게 어떤 방향으로 영향을 미치는가가 매우 중요한 인자로 작용하기 때문이다.

4.3 범람모의에 고려된 특성

해일 범람시 연안을 월류한 흐름은 직접적으로 육상에서 표고의 높낮이 및 여러 가지 지형 특성 등에 의해 전파되는 특성이 달라진다. 즉, 개활지나 초목지 또는 개발된 시가지 혹은 항만권역 등과 같이 육지의 개발된 피복상태에 따라 일반적인 수리학적 홍수파의 전파특성을 지닌다. 따라서 육역으로 전파되는 흐름을 재현하기 위해서는 육상 지형적인 특성이 충분히 반영되도록 LiDAR 등을 이용한 정밀한 육상 피복상태 파악과 동시에 그에 합당하는 바다 마찰계수가 설정되어야 한다. 그러나 아직까지 우리나라 항만권역에 대해 이와 같이 가용한 상세지리정보가 없는 관계로 본 연구에서는 국토지리정보원에서 제공하는 1/1000의 수치지형도의 표고에 근거하여 10 m 간격으로 구성된 각 육상역 절점에서 표고정보를 반영하였다.

수심과 표고 자료 이외에 모형 수행에 있어 직접적인 영향

을 미치는 인자는 바닥에서의 마찰계수이다. 해역에 대해서는 기왕의 연구인 서·이(2007), 서·김(2011)이 적용한 항해와 우리나라 연안해역에 대한 해저마찰계수를 적용한다. 그러나 육역범람지에 대한 적절 조도계수가 없는 관계로 토지 피복지도(환경부 공간정보서비스, <http://egis.me.go.kr>)를 참고하여 공간적인 변화를 주도록 설정하였다. 이를 자세히 기술하면, 해역 중 북서태평양 및 황해 중심부는 0.02, 연안으로 접근하면서 다소 증가되어 조간대 영역은 0.025로 수심에 따라 선형적으로 증가되도록 설정하였다. 직립안벽을 포함한 항만권역 대부분은 도심지역으로 0.15(Dietrich, 2010)를 대표치로 설정하여 표면 피복에 따른 특성이 반영되도록 설정하였다. 본 연구에서는 이와 같은 다양한 공간적인 표면 조도 특성을 pADCIRC 모형 구동시 별도의 입력파일인 유한요소 절점의 특성을 표현하는 fort.13에 공간적 특성을 고려하여 모의함으로써 이형적인 형상을 단일 상당조도계수로 전환하거나 또는 단일 계수로 적용할 때 수반되는 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

우리나라에 영향을 주는 태풍은 하계(7~9월)에 집중되어 발생하는 특징을 갖는데, 하계에는 수온 상승에 의한 해수면도 변화와 대기압 변화 등에 따라 평균해면(MSL)이 상승한다. 목포해역에서 하계 평균해면 상승효과에 대한 강 등(2008)의 연구에서는 관측 자료 분석을 통해 이들 중요성을 제시하고 있다. 이러한 영향을 반영하기 위해 태풍의 발생빈도가 가장 높은 8월의 목포해역 평균해면을 국립해양조사원(<http://info.khwa.go.kr>)에서 제공하는 해수면 성과표를 이용하여 50년(1961~2010)간 평균한 값인 19 cm가 평균해면에 더해져 고려된다.

4.4 해일고 및 침수역 산정

폭풍해일에 의한 범람은 고조시 해일과 중첩되어 발생하

Fig. 10. Map showing (a) spatial distribution of maximum surge elevation and (b) maximum inundation area for Mokpo harbor area by this study.

Fig. 11. Historical inundation marks area (a) for Typhoon Winnie (1997) and (b) simulated results by Park et al.(2011).

는데, 폭풍해일고는 태풍내습시의 천문조 조건에 따라 좌우된다. 박 등(2011)의 연구에 따르면 폭풍해일고는 천문조가 극대화되는 시점에서 중규모의 해일고가 겹치는 경우 또는 평균 정도의 천문조 조건에서 해일고가 극대화되는 경우에 대한 해석이 일반적이다.

앞서 평가된 5 가지의 태풍 이동경로를 포함하는 폭풍해일고 산정시 이러한 점에 근거하여 대조의 고조시 가상태풍이 목포해역 통과하는 경우로 설정하여 모의하였다. 최대 폭풍해일고는 1.91 m로 평가되며 목포 신항, 북항, 내항 등 일대의 해면고가 2.80 m 이상 상승한다(Fig. 10(a)). 모의된 결과를 토대로 최대 침수지역을 평가한 침수예상도가 Fig. 10(b)에 도시된다. 산정된 침수역은 실제 비교에 사용할 충분한 자료가 없는 관계로 본 연구에서는 1997년 태풍 Winnie로 인한 침수 당시 현장조사를 바탕으로 작성된 침수기록(행정자치부, 1998) 및 수치모의된 결과(박 등, 2011)와 상대적인 경향 및 월류 위치 등에 대한 정성적 비교가 이루어졌다(Fig. 11).

목포지역은 지형 특성상 지반고가 낮은 특징을 갖는데(박 등, 2011) 금번 모의된 결과(Fig. 10)에서도 확인 되듯이 내항을 포함한 저지대 일대가 침수되어 나타난다. 침수심은 내항 인근에서 E.L.(+) 0.5~1.0 m 내외로 분포되며 침수심이 E.L.(+) 2.0 m 이상 발생한 곳은 주변 지반고 보다 상대적으

로 낮은 지형 때문으로 분석된다. 1997년 8월 태풍 Winnie의 발생기간 동안에 목포항에서 백중사리와 태풍의 간접영향에 의한 침수기록에 따른 당시 침수흔적도가 Fig. 11(a)에 제시되는데, 정성적인 평가로써 월류 발생 위치를 비교해보면 본 논문에서 모의된 결과와 대체로 동일한 위치에서 발생하고 있는 것으로 분석된다.

5. 토의 및 결론

5.1 토의

태풍에 의한 해일범람 현상은 저기압의 이동에 따른 기상 영향과 해면에서의 바람에 의한 응력, 조석변화 그리고 태풍 이동에 따른 원근해역에서 파랑에 의한 응력이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 이들 영향이 동시에 고려되는 모의가 연안범람 재현에 절대적으로 필요하다. 본 논문에서는 복합적 현상인 해일범람이 항만 등의 연안 직립안벽에 작용하는 경우에 대한 수치모의를 효율적으로 처리하기 위해 연안 직립안벽을 가상제방으로 처리하여 목포항에 대한 범람모의를 수행하였다.

격자생성의 전처리 과정에서 가상의 제방 폭을 1 m로 설정하고, 범람이 예상되는 저지대의 육역을 10 m 내외의 격자

로 해상하여 해일범람 및 전파 거동을 분석하였다. 제방을 월류하여 육역으로 전파되는 해일의 거동시에는 표면 형상에 따른 조도 특성이 범람역의 공간적 분포에 영향을 미치며 본 연구에서는 해역 및 가상제방 그리고 육역의 공간적 분포가 다양하게 표현되는 표면조도를 고려하여 해석하였는데, 항만권역 또는 배후지의 상이한 표면조도는 향후 LiDAR 등의 상세자료에 근거한 정확한 입력이 구비되어야 할 것이다. 향후 연속되는 연구를 통해 육역의 정밀 조도계수 반영 등 침수역 산정의 정확도 개선과 신뢰성을 부여하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 기존의 침수-노출 기법 처리에서 일반적으로 권장 하는 최소수심과 최소유속보다는 직립안벽을 치오르는 해일의 순간적 월류를 효율적으로 모의하기 위한 해석에서 H_{min} 은 0.01 m, Vel_{min} 은 0.01 m/s 가 적정한 것으로 판단되었다. 그러나 이 값은 본 연구에서 설정한 최소격자간격 10 m에 대한 것이므로 이보다 조격자를 사용하는 경우에는 기존의 연구성과 등을 참조하여 0.01-0.1 m의 범위가 적절할 것으로 판단된다.

해일범람과 침수심 모의에서는 100년 빈도 급에 해당하는 가상태풍의 중심기압과 최대풍속반경 등이 고려되었다. 그러나 최근 지구온난화와 기상이변에 편승되어 태풍강도의 증가가 예견되며 항만권역의 저지대에 대한 침수가능성이 점차 높아지므로 다각적인 빈도해석을 통한 태풍강도에 대한 재평가 등으로 슈퍼태풍에 해당되는 가상태풍의 합성과 이동경로 별 추가 모의와 분석이 필요하다.

서해안의 경우 해일고는 태풍 상륙지점 이남에서 높게 나타나는데 이러한 사실은 태풍 바람장을 기존의 대칭형으로 모사하던 또는 금번 연구에서처럼 비대칭형으로 모사하던 경향은 같게 나타난다. 강 등(2008)은 MIKE21 모형에 단순 대칭형태로 바람장을 모사하여 목포해역을 근접하여 통과한 태풍 Rusa(0215)의 실제 경로를 변경한 가상경로 중 목포해역이 태풍진로의 우반경에 놓이게 되면 관측된 해일고 0.59 m보다 높은 1.30 m의 해일고가 예상됨을 제시한 바 있다. 이후 박 등(2011)은 직선화된 가상경로에 대해 해일모형으로 평가한 최대해일고는 1.33 m가 됨을 제시하였다. 금번 연구에서는 비대칭 경도풍 모사를 통해 과거 1945년부터 2010년까지 목포에 영향을 미친 태풍의 내습풍향과 가장 근사하도록 재현하였는데 선행연구(강 등, 2008; 박 등, 2011)의 예측 범위보다 높은 1.91 m의 해일고가 발생하는 것으로 예측되었다. 서·김(2012)에 따르면 비대칭 경도풍 적용시 대칭형 경도풍 모사에 비해 해일고가 상대적으로 높게 나타날 개연성이 있는데, 동일 경로 T2에 대칭형 경도풍을 적용하면 비대칭형 결과에 비해 0.60 m 낮은 1.31 m의 해일고가 나타난다. 이 결과는 적용모형이 상이하지만 선행된 연구(강 등, 2008; 박 등, 2011)에서 접근한 대칭형 경도풍을 고려한 해일고와 거의 일치한다.

가상태풍 경로는 매우 다양하게 접근할 수 있는데, 문 등(2007)과 국토해양부 국립해양조사원(2011)과 같이 침수도 작

성시 태풍의 가상 이동경로를 관심지역을 중심으로 좌우로 1도 또는 0.5도씩 평행 이동시켜 각각 10개 또는 19개의 경우로 설정하고 각 경로별 태풍의 크기를 달리 적용하여 최대 범람역을 산정하는 방법을 사용할 수도 있다. 그러나 본 연구에서 검토한 바와 같이 서해안의 경우 관심이 집중되는 대상해역에서 최대해일고가 발생하는 경우는 태풍 진행방향의 오른쪽에 위치하고 대상지역의 북측으로 상륙하는 경우에 한정되므로, 이를 고려하여 가상태풍의 이동경로를 설정한다면 태풍의 좌반경에 해당되는 불필요한 경우의 수를 없애고 수치모의시 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

5.2 결론

항만권역에서 폭풍해일로 인한 재해방지 대응책을 마련하기 위한 연구의 일환으로 비대칭 경도풍과 파랑의 상호작용을 동일 격자망에서 모의하고 연안역 인공구조물인 직립안벽에서 월류 특성을 고려하는 등 폭풍해일 범람모의에 대한 새로운 시도가 진행되었다. 연안 및 항만권역의 인공구조물에서의 월류 특성이 반영되도록 가상의 내부제방 경계조건을 적용하여 사실적인 범람모의가 가능하도록 노력하였다. 직립된 구조물에서 범람모의시 적절한 가상의 제방 폭을 판단하고 이에 따라 월류되는 해일의 전파특성을 알아보기 위해 단순해역에 적용하여 수치모의를 통한 평가를 실시하였다. 제방 폭과 조도계수 설정에 따라 침수면적과 침수고가 달라지는 등 유의할만한 변화가 확인되었으며 가상제방 폭은 1 m, 범람 모의시 육역의 침수고를 결정하는 최소수심 H_{min} 과 최소유속 Vel_{min} 의 설정값은 0.01 m, 0.01 m/s 가 적절한 것으로 평가되었다.

목포항만권역을 중심으로 가상의 태풍 이동경로를 설정하여 해일고와 침수역을 산정한 결과 태풍 이동시 우반경과 그 후미에서 최대해일고가 발생한다. 100년 빈도 규모의 가상 태풍이 T2의 이동경로를 통해 목포해역에 영향을 미칠 경우 최대해일고는 1.91 m로 예측되었다. 이와 같은 결론은 선행 연구들의 대칭형 경도풍 접근시 해일고 결과인 1.33 m와 달리 우리나라 서해 연안역에서 예측된 해일고 보다 증가될 가능성이 있음을 제시하는 것이다. 침수기록 및 선행 연구결과와 비교한 정성적인 평가에 따르면, 1997년 태풍 Winnie의 간접 영향에 의한 월류 발생 위치가 본 모의결과와 대체로 동일한 위치에서 확인되며 침수역의 평면적인 분포도 100년 빈도 태풍을 모의한 박 등(2011)의 결과와 유사하게 나타난다. 그러나 목포 신항 및 북항 등 일부 지역에서 차이가 나타나는데, 이는 본 연구에서 고려된 비대칭 경도풍의 특징과 직립안벽에서의 월류 특성이 고려된 복합적인 결과로 인식된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업(과제명: 항

만권역 태풍 및 지진해일 재해 대응체계 구축)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강시환, 전기천, 방경훈, 박광순 (2002). 동북아시아 해상에서의 태풍중심기압과 최대풍속의 경험적 관계식. 한국기상학회지, 38(5), 523-530.
- 강주환, 박선중, 박민원 (2008). 서남해안의 해수면 상승과 해일 고 증가 경향. 한국해양·해양공학회논문집, 20(4), 14-24.
- 국토해양부 국립해양조사원 (2011). 해안침수예상도 제작 및 보급 결과보고서.
- 국토해양부 한국해양과학기술진흥원 (2011). 항만권역 태풍 및 지진해일 재해대응체계 구축.
- 국토해양부 한국해양연구원 (2010). 해일피해 예측 정밀 격자 수치모델 구축 및 실제해면 추산 연구보고서.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대 (2007). 연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석. 한국해양·해양공학회지, 21(2), 35-41.
- 문승록, 강태순, 남수용, 황준 (2007). 폭풍해일에 의한 해안침수예상도 작성 시나리오 연구. 한국해양·해양공학회지, 19(5), 492-501.
- 문승록, 박선중, 강주환, 윤종태 (2006). MIKE 21 모델을 이용한 목포해역 해일범람모의. 한국해양·해양공학회지, 18(4), 348-359.
- 박선중, 강주환, 문승록, 김양선 (2011). 조석-해일 결합모형을 이용한 목포시 범람 모의. 한국해양·해양공학회논문집, 23(1), 93-100.
- 박선중, 강주환, 윤종태, 정태성 (2010). 조석해일 결합모형의 범람 적용성. 한국해양환경공학회지, 13(4), 270-278.
- 박종길, 김병수, 정우식, 김은별, 이대근 (2006). 한반도에 영향을 주는 태풍의 통계적 특성 변화. 한국기상학회지, 16(1), 1-17.
- 서승남 (2008). 한국 주변해역 30초 격자수심: KorBathy30s. 한국해양·해양공학회논문집, 20(1), 110-120.
- 서승원, 김정훈 (2003). 조석수동역학 모의에서 조간대 침수-노출 고려효과 비교연구. 한국해양·해양공학회지, 15(2), 97-107.
- 서승원, 김현정 (2011). 황해 및 북서태평양 확장해역 정밀조석 모의. 한국해양·해양공학회논문집, 23(3), 205-214.
- 서승원, 김현정 (2012). 상세유한요소격자에서 비대칭 경도풍과 파랑모형이 고려된 서해안의 태풍해일모의. 한국해양·해양공학회논문집, 24(3), 166-178.
- 서승원, 이화영 (2007). 병렬 클러스터 시스템 구축 및 유한요소모형을 이용한 황해 조석재현. 한국해양·해양공학회지, 19(1), 1-15.
- 소방방재청 (2010). 2010 재해연보.
- 정우찬, 김경환 (2011). 2차원 수치모형을 이용한 해안도시지역 내 범람모의에 관한 연구. 한국수자원학회지, 44(8), 601-617.
- 천재영, 이광호, 김지민, 김도삼 (2008). 태풍 매미(0314호)에 의한 마산만 주변 연안역에서의 범람해석. 한국해양·해양공학회논문집, 22(3), 8-17.
- 행정자치부 (1998). 서해안 해수범람 흔적조사 및 종합대책 수립보고서.
- 환경부 공간정보서비스, <http://egis.me.go.kr>
- Amante, C. and Eakins, B. W. (2009). ETOPO1 1 Arc-minute global relief model : procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, National Geophysical Data Center Marine Geology and Geophysics Division Boulder, Colorado.
- Bogden, P., Graber, H., Luettich, R., Perrie, W., Sheng, P. and Wang, H. (2006). The SURF coastal ocean observing and prediction program (SCOOP) service-oriented architecture. Proceedings of MTS/IEEE 06 Conference in Boston, Boston, MA, 18-21.
- Dawson, C., Kubatko E.J., Westerink, J.J., Trahan, C., Mirabito, C., Michoski, C. and Panda, N. (2011). Discontinuous Galerkin methods for modeling Hurricane storm surge. Advance in Water Resources, 34, 1165-1176.
- Dietrich, J.C. (2010). Development and application of coupled hurricane wave and surge models for southern Louisiana, Ph.D. dissertation, University of Notre Dame, Indiana, USA.
- Dietrich, J.C., Kolar, R.L. and Luettich, R.A. (2004). Assessment of ADCIRC's wetting and drying algorithm. Development in Water Science, 55, 1767-1778.
- Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luettich, Jr., R.A., Jensen, R.E., Smith, J.M., Stelling, G.S. and Stone, G.W. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. Coastal Engineering, 58, 45-65.
- Gonnert, G. and Sossidi, K. (2011). A new approach to calculate extreme storm surges. Irrigation and Drainage, 60(Suppl. 1), 91-98.
- Holland, G.J. (1980). An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Monthly Weather Review, 108, 1212-1218.
- Lin, N., Emanuel, K., Oppenheimer, M. and Vanmarcke, E. (2012). Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. Nature Climate Change, DOI: 10.1038/NCLIMATE1389.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O. (2006). Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004. Ocean Dynamics, 56, 394-415.
- Westerink, J.J., Luettich, R.A. and Militello, A. (2001). Leaky internal-barrier normal flow boundaries in the adcirc coastal hydrodynamics code. ERDC/CHL CHTEN-IV-32.
- Westerink, J.J., Luettich R.A., Feyen, J.C., Atkinson, J.H., Dawson, C., Roberts, H.J., Powell, M.D., Dunion, J.P., Kubatko, E.J. and Ppurtaheri, H. (2008). A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. Monthly Weather Review, 138, 833-864.
- Zijlema, M. (2010). Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. Coastal Engineering, 57, 267-277.

원고접수일: 2012년 5월 23일

수정본채택: 2012년 6월 20일

게재확정일: 2012년 6월 28일