

이동경계기법을 이용한 해수유동모형의 범람 적용성 Applicability on Inundation for Hydrodynamic Models adopting Moving Boundary Scheme

박선중* · 강주환* · 문승록** · 윤종태***

Seon Jung Park*, Ju Whan Kang*, Seung Rok Moon** and Jong Tae Yoon***

요 지 : 상용 해수유동 모형인 MIKE21 모형의 범람모의 적용성을 평가하기 위하여 월류량 산정기법이 적용된 해일범람모형과 함께 마산만에 적용하였다. 두 모형 모두 관측된 침수범위 및 침수고와 거의 일치하는 결과를 보여 정밀격자의 해일범람모형으로써의 적용성을 확인할 수 있었다. 특히 조건대 모의기법을 확장적용한 MIKE21 모형의 결과가 범람모형의 결과에 비해 뒤지지 않는 결과를 보여 범람모의의 적용성은 매우 높은 것으로 판단된다. 또한 선행연구에서 도출된 가상태풍을 모의한 결과, 침수범위는 MAEMI 내습시와 거의 유사한 반면 침수고가 증가하는 것으로 모의되었다.

핵심용어 : 범람, 이동경계기법, MIKE21 모형, 해일범람모형, MAEMI, 마산만

Abstract : MIKE21, a commercial hydrodynamic model, was applied at the Masan Bay to evaluate the model's applicability of simulating the inundation phenomena. A storm surge/inundation model which adopts overflow computation scheme was applied together for comparison. The results of both models show correspondence with not only observed inundation area but also inundation water depth to prove their ability as inundation models. Especially, the accuracy of the MIKE21 model, which just adopts wetting/drying scheme, does not seem to be behind the inundation model. Moreover, an inundation simulation of the virtual MAEMI which was generated at preceding study, was conducted. The inundation area of the virtual MAEMI is similar to that of the real MAEMI, but inundation water depth is deeper than the real MAEMI.

Keywords : inundation, moving boundary scheme, MIKE21 model, storm surge/inundation model, MAEMI, Masan Bay

1. 서 론

태풍내습시 조석, 폭풍해일 등 장주기 해수위 변동과 고파랑 등에 의한 수위상승으로 인해 정상적인 해수위의 범위를 초과한 해일과는 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 해안가 저지대 등의 제내지에 범람피해를 유발하게 된다. 이러한 범람현상을 재현하기 위해서는 비선형성이 강한 장주기파의 전파특성, 연안역의 얇은 수심에서의 바닥마찰의 영향, 그리고 계산영역이 지속적 또는 불규칙

적으로 변화하는 범람특성 등의 구현이 가능해야 한다.

최근에는 이러한 해안범람의 특성을 반영하기 위해 비선형 침수방정식을 지배방정식으로 하는 해수유동모형에 격자점의 침수(wetting)/노출(drying) 여부를 판단하여 계산영역을 결정하는 이동경계기법(moving boundary scheme)을 포함한 해안범람모의가 보편화되고 있다. 여기에 기압차 및 바람응력 등을 포함한 태풍모의까지 포함시킬 경우 해일과 범람을 동시에 모의할 수 있게 된다. 최근 널리 사용되고 있는 대부분의 상용 모형은 이 두 가지 조건을 충

*목포대학교 건설공학부 토목공학전공(Corresponding author : Ju Whan Kang, Major in Civil Engineering, Division of Construction Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam 534-729, Korea, jwkang@mokpo.ac.kr)

** (주)지오시스템리서치 연구기획부 (Planning & Projecting Department, GeoSystem Research Corporation)

***경성대학교 건설/환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungshung University)

족시키고 있으며, 하천범람을 모의하기 위해 개발되어 해안범람에까지 확장 적용된 모형(Bates and Roo, 2000; Hunter et al., 2005)과는 달리 이들 모형을 이용하면 조석, 해일, 범람 등을 한꺼번에 모의할 수 있게 되므로 조석과 해일 상호간의 비선형 효과가 감안됨은 물론이고 태풍의 경로, 강도, 규모 등 태풍조건에 따른 해일 및 범람영역을 동시에 계산할 수 있다.

이러한 모형의 해안범람모의 적용시 수면과 육지가 만나는 지점으로 정의되는 해안선은 시공간적인 변화의 구현이 가능해야 한다. 일반적으로 해안선 경계에서의 침수/노출을 모의하기 위한 방법은 다음 두 가지로 구분할 수 있다(Xie et al., 2004). 첫 번째는 초창기 폭풍해일모형에 널리 적용된 방법(Flather and Heaps, 1975; Falconer and Owens, 1987)으로 해안선을 따라 가상벽(imaginary wall)을 설정하고 해안선을 통한 흐름을 강제로 차단하는 방법이다. 수위상승에 따른 범람영역은 가상 벽에서의 수심과 인접한 육지 표고들을 비교함으로써 결정된다. 이 방법은 가상벽으로 인한 흐름 차단으로 육상부에서 수면변위에 따른 침수/노출의 직접적인 재현이 불가능하여 범람영역의 변화를 자연스럽게 모의할 수 없으며, 침수/노출시 feed back 효과가 무시되는 단점이 있다. 특히 저해상도일 경우 경계 부근에서 수치적 노이즈 및 불안정성이 야기된다(Falconer and Owens, 1987). 두 번째로 근래 대부분의 하천 및 해안범람모형에서 채용하고 있는 방법으로 해석결과에 따라 해안선에서의 침수 또는 노출 여부를 판단하여 계산영역의 경계를 결정하는 조건대 모의기법이란 용어로 일반화되고 있는 이동경계기법을 들 수 있다. 이 기법이 채용된 많은 수치모형들은 Leendertse(1967)의 침수/노출 알고리즘을 근간으로 하고 있으며(McCowan et al., 2001), 수치모형에 이동경계기법을 포함시키는 과정이 다소 복잡하지만 비교적 정확한 수치해를 제공한다. 또한 계산영역이 지속적 또는 불규칙적으로 변화하는 범람특성의 구현이 가능하며, 최근에는 바닥마찰, 압력구배, 비선형 이류항, 질량보존 등을 고려하여 사실적인 범람현상의 재현이 가능해지고 있다(조·서, 2001; Ip et al, 1998; Hubbert and McInnes, 1999; Xie et al, 2004).

해안범람모형에 적용된 일반적인 이동경계기법의 침수/노출 알고리즘은 침수격자(해안선 경계격자)에서 노출격자(육지격자)로 파의 전파가 발생하는지 또는 하지 않는지를 검토하고 경계의 이동과 유량을 산정하는 다음의 과정이 수치계산을 수행하는 동안 모든 격자에서 반복하게 된다. 연속방정식을 이용한 자유수면변위를 계산한 후, 침수

격자의 수위가 노출격자의 지반고보다 높은 경우 월류되어 경계가 이동하게 된다. 이 때 그 차를 실수심으로 하여 운동방정식을 이용한 유량이 계산되며, 계산된 유량은 연속방정식을 통해 새로운 자유수면변위가 계산되게 된다. 반대로 침수격자의 수위가 노출격자의 지반고보다 낮은 경우는 흐름이 차단되고 해당 노출격자의 수심과 유속은 0으로 설정되어 계산에서 제외하게 된다. 그러나 이러한 이동경계기법은 정성적인 범람양상을 표현하는 데는 큰 문제가 없으나 보다 정확한 유량 산정을 통한 범람모의를 위해서는 수리학적 연구 및 적용이 필요하다(조, 2000). 최근에는 이러한 점을 고려해 수위가 해안구조물의 천단고를 초과하는 경우, 즉 월류가 발생하면 월류 전후 격자의 수심 차이에 따라 수중월류와 완전월류로 구분하고 월류 전후 수심과 유량계수를 이용하여 월류량을 산정한 후 계산된 월류량을 운동방정식의 유량으로 대체하는 방법의 범람모의가 제안되고 있다(김 등, 2007; 문 등, 2007; 천 등, 2008; Shibaki et al, 2007).

본 연구에서는 MIKE21 모형에 결합된 해수유동(Hydrodynamic, HD) 모듈의 범람모형으로의 확장성 및 실제해역에 대한 적용성을 검토하기 위해 2003년 14호 태풍 MAEMI 내습 당시 마산만에서 발생한 해일범람을 재현하고 2차원 해일범람모형과 비교하였다. 또한 선행연구(강 등, 2009)에서 수립된 가상태풍경로 중 마산만에 가장 큰 해일이 발생할 수 있는 조건의 가상경로(T3_a1)에 대한 범람모의를 통해 MAEMI 강도의 태풍 내습시 마산만에서 발생 가능한 최대 해일범람을 모의하였다. 모의에 적용된 MIKE21 모형의 HD 모듈은 월류 전후 격자의 수심차를 실수심으로 하여 운동방정식의 유량을 계산하는 일반적인 이동경계기법(이후 조건대 모의기법)이 채용된 대표적 상용모형으로 해수유동모의에 대한 적용성이 검증된 모형이며, 2차원 해일범람모형의 경우 월류 전후 수심과 유량계수를 이용하여 월류량을 계산하고 운동방정식의 유량으로 대체하는 방식의 이동경계기법(이후 월류량 산정기법)이 적용된 폭풍해일에 의한 범람모의에 주로 적용되고 있는 모형이다.

2. 적용모형

2.1 MIKE 21 모형

MIKE21 모형의 HD(Hydrodynamic) 모듈은 등지형 격자체계(nested grid)의 운용이 가능하며 조건대 모의 및 Coriolis 효과, 바람과 저기압에 의한 수면상승을 고려하여

폭풍해일고 산정이 가능한 모형이다(DHI Water and Environment, 2007). 국내외적으로 수많은 적용사례가 있으나, 조간대 및 범람과 관련된 사례는 흔치 않다. 대표적인 사례로 Bengal 만에서 해일 및 범람 모의에 적용(Madsen and Jakobsen, 2004)된 바 있으며, 국내에서도 조간대 모의 및 범람과 관련된 연구에 활용된 바 있다(강 등, 2004; 강 등, 2005; 문 등, 2006). HD 모듈은 연속방정식과 운동방정식을 사용하며 연직방향으로는 균질하다는 가정하에 2차원 천수방정식을 2차원 정밀도를 가진 ADI 유한차분법을 이용하여 계산함으로써 해수유동 현상을 재현하게 된다. 각 방향과 개개의 격자 Line에 대한 방정식 행렬은 Double Sweep 연산에 의해 계산하여 대상지역에서의 유속과 수위 변화 등의 흐름 특성을 구한다.

폭풍해일추산에 이용되는 해상풍은 해수면 위 10 m 지점의 풍속이며, 바람 마찰계수는 Smith and Banke(1975)가 제안한 다음과 같은 식 (1)로 계산된다.

$$f = \begin{cases} f_0 & V < V_0 \\ f_0 + \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \cdot (f_1 - f_0) & V_0 \leq V \leq V_1 \\ f_1 & V > V_1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $f_0 = 0.00063$, $f_1 = 0.0026$, $V_0 = 0 \text{ m/s}$, $V_1 = 30 \text{ m/s}$ 이다.

MIKE21 모형의 조간대 모의기법은 대표적인 침수/노출(flooding and drying) 기법인 Leendertse(1967)의 방법을 기초로 Stelling et al.(1998)의 해석기법이 혼용된 방법을 사용하고 있다. 수치계산 초기에는 모든 영역에서 자유수면변위와 유속은 0이 되며, 초기의 해안선은 전체수심이 0이 되는 곳을 연결한 선으로 정의된다. 즉 노출격자와 침수격자의 경계로 형성되며, 연속방정식을 해석하여 전 영역에서 자유수면변위를 계산하게 된다. 이때 노출격자, 즉 전체 수심이 0보다 작은 격자의 자유수면변위는 계속 0을 유지하게 되며, 다음으로 연속방정식에서 새로이 계산한 자유수면변위를 이용하여 노출격자를 수정한다. 즉, 해안선 경계(침수격자)의 전체수심이 육지방향의 노출격자로 이동이 가능한지를 검사하며, 운동방정식을 이용하여 x, y 양 방향의 유량을 계산하게 된다. 이때 연속방정식은 노출된 지점의 수심이 저장되며 다시 침수되었을 때 재사용되어 침수/노출 과정동안 만족시키게 된다. 수치적인 오류로 인해 침수와 노출이 짧은 시간동안 반복되는 것을 피하기 위해 주변의 네개 격자 모두가 침수수심보다 크다면 해당 격자는 노출되지 않도록 한다. 수치적인 안정을 위한 또 한

가지 방안으로 노출수심과 침수수심을 사용자가 정의할 수 있으며, 노출전의 최소수심은 보통 0.1~0.2 m, 침수전의 최소수심은 0.2~0.4 m 범위로 하고, 노출수심을 침수수심의 절반으로 설정하는 방법(Balzano, 1998)이 추천되고 있다.

2.2 2차원 해일범람모형

본 모형은 저기압에 의한 수면상승과 바람에 의한 수면상승을 고려한 2차원 해일범람모형으로 광역격자로부터 여러 단계의 상세역 격자로 nesting이 가능하여 효율적으로 계산시간을 단축시킬 수 있고 상세역에서의 해일고 및 범람을 정도 높게 모의할 수 있다(천 등, 2008). 해면에서의 전단력 산정을 위한 항력계수 C_D 는 Weisberg and Zheng (2006)이 폭풍해일 모의시 적용한 Large and Pond(1981)의 제안식 (2)이 사용된다.

$$C_D \times 10^3 = \begin{cases} 1.2 & |\vec{V}_w| \leq 11 \text{ m/s} \\ 0.49 + 0.065|\vec{V}_w| & 11 \text{ m/s} \leq |\vec{V}_w| \leq 25 \text{ m/s} \\ 2.1 & |\vec{V}_w| \geq 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, V_w 는 해수면 위 10 m 지점의 풍속이다.

육상에서 해일에 의한 월류를 고려할 경우, Iwasaki and Mano(1979)의 방법이 사용된다. Fig. 1은 계단형태의 지형에서 범람모의 과정을 도시한 것으로, 진행과의 선단부에서 육측 격자점(i)의 지반고보다 해측 격자점(i+1)의 수위 η_{i+1} 가 더 높을 경우에, 그 차이를 실 수심을 D 로 하여 유량을 계산하게 된다. 이 때 수심 D 는 10^{-5} m 를 최소수심으로 하고, 이 값 이상의 격자점에 대해서만 계산을 수행하게 된다.

이 때 수위가 육측 격자로 넘는 경우에는 한계수심과 월류후의 수심의 관계에 따라 완전월류와 수중월류로 구분(Fig. 2)하고 다음의 식 (3), (4)와 같이 월류 전후의 수심과 유량계수를 이용하여 단위폭당 월류량 Q 가 계산되며, 운동방정식의 유량을 계산된 월류량으로 대체하게 된다.

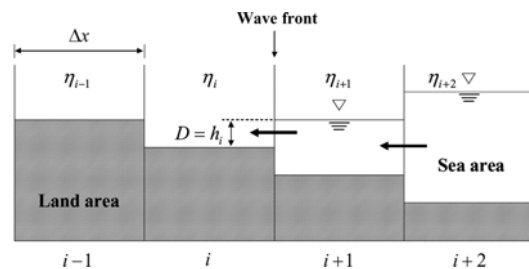


Fig. 1. Schematic method of inundation simulation.

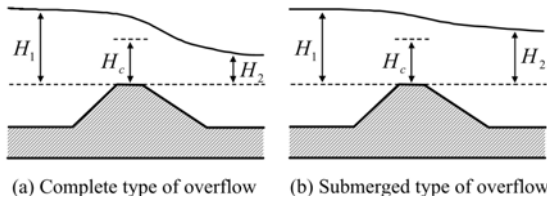


Fig. 2. Schematic calculation for overflow flux.

$$Q = C_1 H_1 \sqrt{2gH_1}, H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (3)$$

$$Q = C_2 H_2 \sqrt{2g(H_1 - H_2)}, H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (4)$$

3. 모형 수립 및 검증

수립된 모형을 검증하기 위해 2003년 14호 태풍 MAEMI 내습 당시 마산만에서 발생된 해일현상을 재현하였다. 해일범람모의를 위해서는 태풍의 생성 및 이동 등을 구현할 수 있도록 우리나라 및 주변해역의 광범위한 해역을 포함한 광역의 구축이 필요하며, 동시에 범람모의를 위해서는 수 m 격자간격의 상세역의 모의를 위한 정밀역이 구축되어야 한다. 본 연구에서는 MIKE21 모형의 등지형 격자망 구축시 공간상 해석능력의 도약이 $\Delta x_{Coarse} = 3\Delta x_{Fine}$ 인 것을 감안해 격자간격을 1/3씩 감소시켜 Table 1과 같이 최대 격자간격 21,870 m에서 최소 격자간격 10 m까지의 총 8

Table 1. Grid specifications

Computational area	Grid spacing(m) ($\Delta x = \Delta y$)	Grid numbers ($N_x \times N_y$)
Area_1	21,870	110×150
Area_2	7,290	106×115
Area_3	2,430	226×220
Area_4	810	262×256
Area_5	270	448×421
Area_6	90	298×325
Area_7	30	400×451
Area_8	10	700×799

단계 계산영역으로 설정하였으며, 2차원 해일범람모형도 동일하게 설정하였다. 특히 등지형 격자망 구축시 각 영역별 접합경계부근의 수심을 동일하게 보정하고, 수심 및 지형자료가 정확히 구현될 수 없는 큰 격자의 수심을 작은 격자의 상세수심으로 보정하는 과정을 전 영역에 대해 수행함으로써 보다 정도 높은 범람모의 결과를 기대할 수 있도록 하였다. 광역 격자망인 Area-1은 태풍의 발생 및 진행경로의 재현을 충분히 반영하기 위해 우리나라, 일본, 대만 등이 포함되도록 설정하였으며, Area-3은 제주도 및 우리나라 해안을 충분히 포함하여 향후 여러 대상해역에 대한 모의에 활용토록 구성하였다(Fig. 3(a)). 격자간격 90 m인 Area-6과 30 m인 Area-7, 10 m인 Area-8은 해일발생에 따른 범람모의를 위해 육지 지형까지 재현된 상세영역이다(Fig. 3(b)).

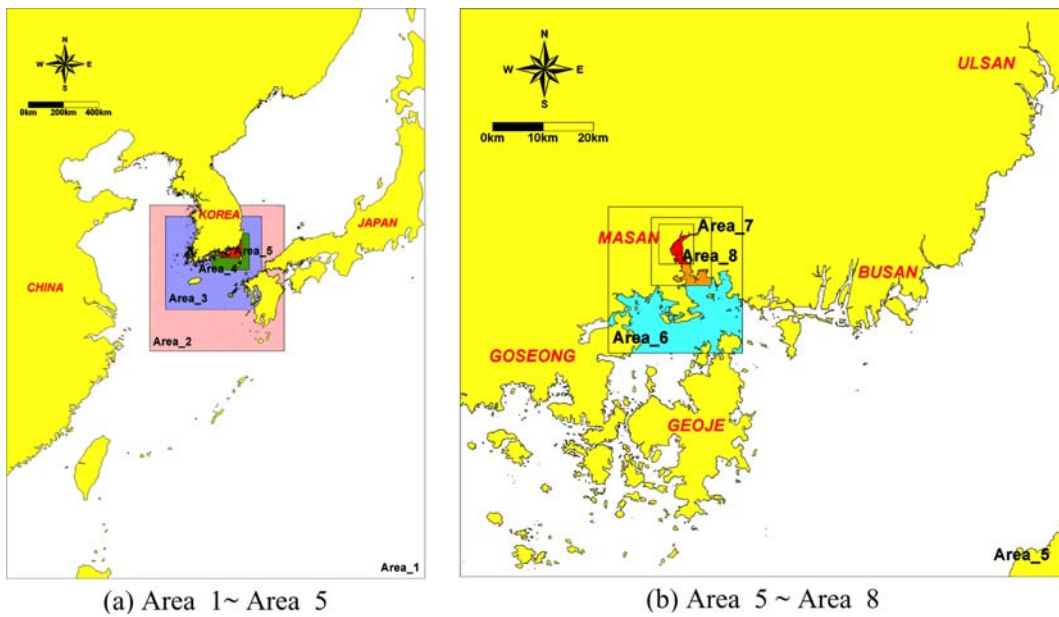


Fig. 3. Computational areas.

해일범람을 정도 높게 모의하기 위해서는 태풍의 내습 경로와 중심기압, 최대풍속 등 주요 인자의 정확한 자료획득을 통한 해상풍의 생성뿐만 아니라 육상 및 해상의 지형적인 특성을 충분히 반영할 수 있는 수심, 표고 및 해안선 정보의 정확한 수집 및 분석도 매우 중요한 사항이다. 본 연구의 주요 입력자료는 일본 기상청(www.jma.go.jp)에서 제공되는 태풍정보를 활용하여 모의 영역내 생성되는 바람과 기압변화를 재현하였으며, 지형자료 구축 및 수심도 생성을 위해 2008년도 기준 국토지리정보원(www.ngi.go.kr)의 1:1,000, 1:5,000의 수치지형도로부터 추출한 표고자료와 해양조사원(www.nori.go.kr)의 수치해도로부터 추출한 해안선 및 수심 자료를 활용하여 구축하였다.

적용된 두 모형의 모의조건은 후술된 계산 최소수심을 제외하고 다음과 같이 동일하게 설정하였다. 모의를 위한 초기조건으로 수면변위와 유속을 전 계산영역에서 '0'으로 하는 cold start로 설정하였으며, 모의가 진행되는 동안 외해 경계를 통한 유입량도 없는 것으로 설정하여 모의과정에서 태풍 영향에 의한 해일 및 범람만 고려될 수 있도록 하였다. 계산시간 간격(Δt)은 수치적 안정 등을 고려하여 2초로 하여 MAEMI 내습 당시의 약최고고조위 조건에서 36시간 동안 모의하였으며, 바닥 마찰계수는 수심에 따라 $40\sim 50 m^{1/3}/s$ 로 부여하였다. 2차원 해일범람모형의 침수/노출 계산시 최소 수심값은 $10^{-5} m$ 로 동일한 값을 부여하였으며, MIKE21 모형의 경우는 침수수심은 반드시 노출수심보다 커야 하는 제약조건에 따라 침수수심은 한계값인 0.005 m, 노출수심은 0.004 m로 설정하여 모의하였다.

수립된 두 모형의 검증을 위해 격자간격 10 m인 Area_8에서 산출된 1분 간격의 모의결과와 2003년 14호 태풍 MAEMI가 마산지역을 통과할 당시 마산조위관측소에서 관측된 해일고와 비교하였다(Fig. 4). 두 모형의 결과물을 구

분하기 위해 이후 모든 결과물에 대하여 MIKE21 모형의 경우 'MIKE21', 2차원 해일범람모형은 'IND-model'로 각각 표기하였다. 전체 모의기간 동안의 해일고 변화양상은 2차원 해일범람모형이 관측치와 좀 더 비슷한 양상을 보이고 있으나, 두 모형 모두 최대 해일 발생시 위상 및 최대 해일고에서 관측치와 거의 부합하는 결과를 보이고 있어 수립된 모형의 해일모의 적용성을 확인할 수 있다.

4. 범람 모의

4.1 범람모형의 적용성 검토 - 태풍 MAEMI(0314)

Fig. 5와 6은 두 모형의 태풍 MAEMI 통과시 마산시의 침수 발생에서부터 침수범위가 최대에 이르는 시간까지의 범람양상을 도시한 것으로, Area_8에서 산출된 30분 간격의 모의결과 중 비교가 용이하도록 주요 시간대를 선정하고 비교도시하였다. 각 모형의 모의에 소요된 CPU time은 MIKE21 모형의 경우 10.5 시간, 2차원 해일범람모형의 경우 36.0 시간이 소요되었다.

Fig. 4에 제시된 해일모의 시작과 동시에 범람모의도 시작된다. 19.5 hr가 경과된 후(Fig. 5(a), Fig. 6(a)) 지반고가 낮은 중앙동과 동서동 일부 해안가 저지대에서 침수가 발생되기 시작하며, 침수면적과 침수고는 두 모형이 거의 유사한 양상을 보이고 있다. $t=20.5$ hr(Fig. 5(b), Fig. 6(b)) 시점에 중앙동과 동서동 지역의 침수면적이 확대되며, 해운동과 오동동 일대에도 침수가 시작된다. 전체적인 침수고는 MIKE21 모형이 더 크게 모의되었으나, 침수면적은 해운동 일대의 경우 2차원 해일범람모형이, 중앙동과 동서동 지역의 경우는 MIKE21 모형이 더 넓게 나타나고 있다. $t=21.5$ hr(Fig. 5(c), Fig. 6(c)) 시점에 해안지역에 위치한 해운동~오동동 지역의 침수면적이 크게 확대되며, 산호동

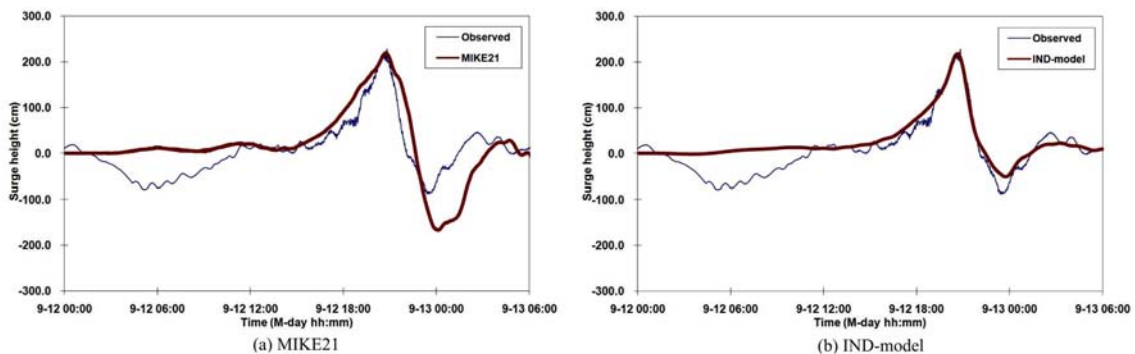


Fig. 4. Time variations of surge heights.

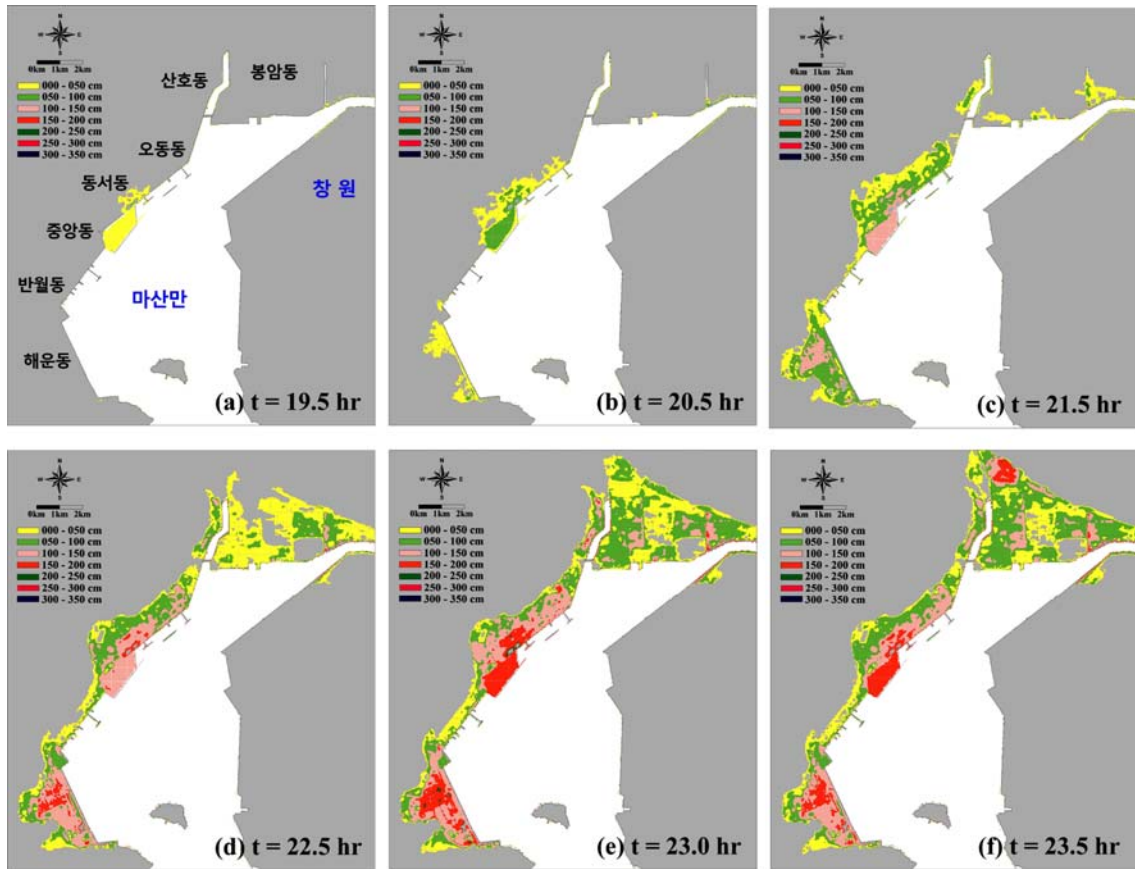


Fig. 5. Variations of inundation area (MIKE21).

과 봉암동 지역의 침수가 시작된다. MIKE21 모형은 2차원 해일범람모형에 비해 침수면적뿐만 아니라 침수고도도 더 크게 모의되고 있다.

t=22.5 hr(Fig. 5(d), Fig. 6(d)) 시점, 해운동~오동동 지역에서는 침수면적이 큰 변화 없이 침수심만 증가하며, 산호동과 봉암동 지역의 침수면적은 크게 확대된다. 태풍이 상륙함에 따라 해일고가 최대에 이르는 t=23.0 hr(Fig. 5(e), Fig. 6(e)) 시점에 전체적인 침수면적은 봉암동 일부를 제외하고 두 모형이 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며 해운동~오동동 지역에서는 침수면적이 최대에 이르고 있다. MIKE21 모형의 경우 해운동과 중앙동, 동서동의 해안지역을 중심으로 150~200 cm 이하의 침수고를 나타내는 지역이 크게 확대된 반면, 2차원 해일범람모형의 경우 일부지역을 제외하고 대부분 150 cm 이하의 침수고를 나타내고 있다. 태풍이 상륙하고 30분이 경과한 t=23.5 hr(Fig. 5(f), Fig. 6(f)) 시점에는 2차원 해일범람모형의 경우

침수면적 및 침수고가 큰 변화를 보이지 않는 반면, MIKE21 모형은 해일고가 하강함과 동시에 해운동~오동동 지역의 침수고는 유입된 해수가 유출됨에 따라 하강하게 되며, 산호동과 봉암동 지역에서는 최대 침수가 발생하게 된다.

태풍 MAEMI 내습시, 최초 범람 발생과 동시에 해안 저지대를 중심으로 침수가 발생되기 시작하여 침수범위가 최대에 이르는 시간은 두 모형이 3.5~4.0 시간 정도 소요되었으며, 최대 침수면적도 두 모형이 유사하게 모의되었다. 그러나 최초 범람에서 시간이 경과함에 따라 최대에 이르는 양상은 2차원 해일범람모형에 비해 MIKE21 모형 더 빠르게 침수면적이 확대되며, 침수고 또한 크게 모의되고 있다. 이는 2차원 해일범람모형의 경우 해일고 변화 양상(Fig. 4(b))이 실제 관측치와 거의 유사한 반면, MIKE 21 모형(Fig. 4(a))의 경우 관측치와 비교해 더 이른 시간대에서 수위상승이 발생함에 따라 침수면적의 확대가 빠르고 유입된 해수량이 많아짐에 따라 침수고 또한 더 크게 나

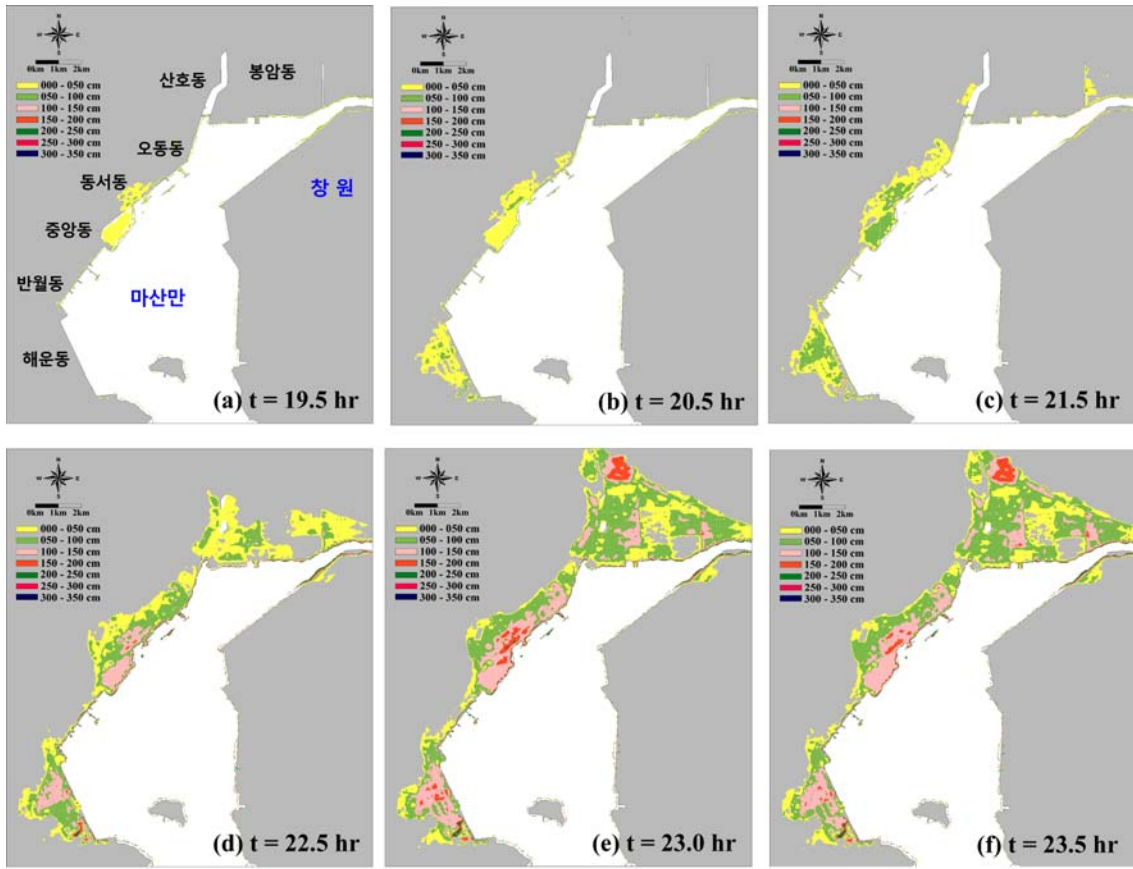


Fig. 6. Variations of Inundation area (IND-model).

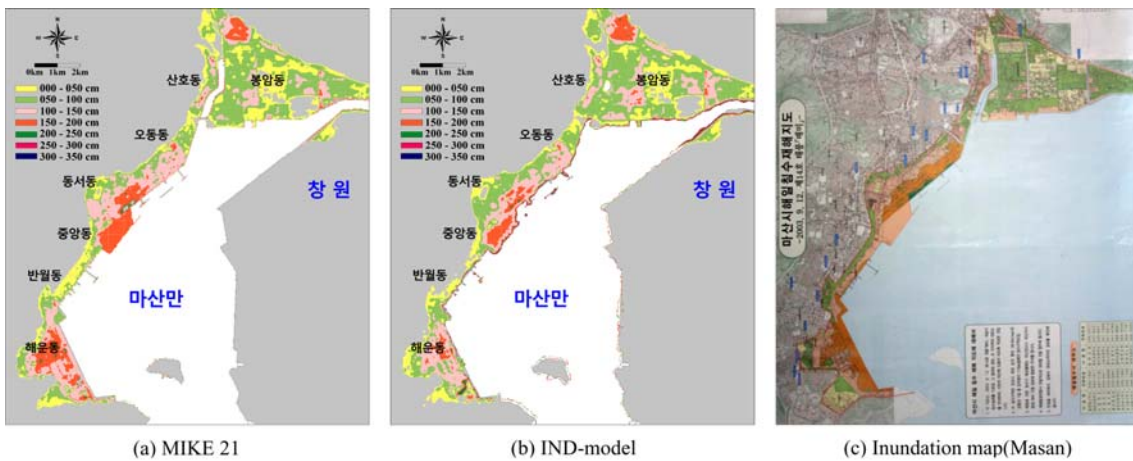


Fig. 7. Maximum inundation area for typhoon MAEMI around Masan bay.

타나는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 30분 간격의 범람모의 결과로부터 최대 침수 범위와 침수고를 계산하여 두 모형의 태풍 MAEMI 내습

시 발생된 최대 침수면적과 침수고 분포를 도시한 것이다. 여기서 침수고의 색상은 함께 제시한 MAEMI 내습 후 작성된 ‘마산시 해일침수재해지도’(Fig. 7(c))를 참고하여 동

일한 기준으로 표시하였다. 최대 침수범위는 두 모형 모두 ‘마산시 해일침수재해지도’와 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 침수고의 경우 MIKE21 모형이 중앙동과 동서동의 해안지역을 제외하고 대부분 지역이 ‘마산시 해일침수재해지도’와 유사한 모의 결과를 보이고 있는 반면, 2차원 해일범람모형의 경우 오히려 전체적으로 작게 모의되고 있음을 볼 수 있다.

상용모형인 MIKE21 모형의 경우 일반적인 해수유동모형에 적용되는 이동경계(침수/노출)기법인 조건대 모의기법을 범람모의에 확장적용한 결과임에도 관측치와 더 유사한 모의결과를 보임으로써 범람모형으로써의 적용성은 매우 만족스러운 결과를 얻을 수 있었으며, 향후 일부 지형자료를 보완할 경우 보다 정밀한 범람모의가 기대된다. 특히 2차원 해일범람모형에 비해 짧은 CPU time으로 11시간 이내에 해일과 범람모의에 대한 결과분석이 가능해 태풍 내습시 예측된 태풍 진로를 토대로 빠른 시간내에 다양한 범람예측이 가능하고 이에 대한 신속한 대응 판단 및 대책수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 가상태풍에 의한 범람모의

본 절에서는 선행연구(강 등, 2009)에서 수립된 가상태풍경로 중 마산만에 가장 큰 해일이 발생될 수 있는 조건의 가상경로에 대해 두 모형을 적용하고, 이를 통해 MAEMI 강도의 태풍 내습시 마산만에서 발생 가능한 최대 해일범람을 재현하였다. 모의에 적용된 가상태풍의 이동경로는 태풍 MAEMI의 실제경로보다 서측으로 0.5° 이동한 경로이며 정북방향에 가까운 내습각도로 진입하는 T3_a1 경로로, 이

때 마산만에서는 발생하는 최대 해일고는 실제경로의 해일모의 결과와 비교해 37 cm 상승한 250 cm이다.

Fig. 8은 두 모형의 가상태풍에 대한 전체 모의기간 중 최대 침수범위와 침수된 지역에서의 최대 침수고의 분포를 각각 도시한 것이다. 모의 결과, 두 모형의 침수면적 및 침수고는 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 침수면적은 MAEMI 내습시와 거의 유사하며, 침수고는 MAEMI 내습시와 비교해 다소 높아져 침수되는 대부분 지역에서 150 cm 이상의 침수고를 유발하는 것으로 나타났다. 특히 호안 주변 및 연안 저지대를 중심으로 150~250 cm의 높은 침수고 분포를 보이는 것으로 모의되었다. 이처럼 마산시의 경우 연안에 위치한 대부분 지역이 해일범람의 위험성에 노출되어 있을 뿐 아니라, 최근에 내습하는 태풍의 강도 및 빈도가 점차 증가하는 추세임을 감안할 경우 태풍 규모에 따른 침수범위 및 침수고 등 범람양상에 관한 지속적인 관심이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 MIKE21 모형에 결합된 해수유동 모듈의 범람모형으로의 확장성 및 실제해역에 대한 적용성을 검토하기 위해 2003년 14호 태풍 MAEMI 내습 당시 마산만에서 발생된 해일범람을 재현하고 2차원 해일범람모형과 비교하였으며, MAEMI 강도의 태풍 내습시 마산만에서 발생 가능한 최대 해일범람을 모의하였다.

태풍 MAEMI 내습 당시 범람모의결과, 적용된 두 모형 모두 관측치와 거의 일치하는 침수범위를 나타낸 반면, 침

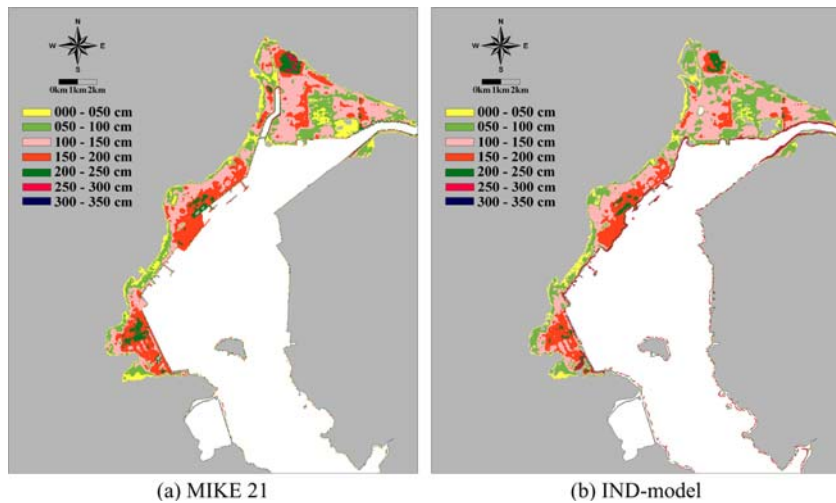


Fig. 8. Maximum inundation area for the virtual typhoon around Masan Bay.

수고의 경우에 있어서는 MIKE21모형이 해일범람모형에 비해 오히려 정확한 결과를 보이고 있다. 또한 MAEMI 강도의 가상태풍 모의결과 마산만에 발생될 수 있는 최대 범람은 MAEMI 내습시와 거의 유사하지만, 침수고는 대부분 지역에서 적지 않게 상승하는 것으로 모의되었다.

MIKE21 모형의 경우 일반적인 해수유동모형을 범람모의에 확장적용한 결과임에도 해일범람모형에 비해 관측치와 더 유사한 모의결과를 보임으로써 범람모형으로의 적용성은 매우 높은 것으로 판단된다. 특히 짧은 CPU time으로 태풍 내습시 예측된 태풍 진로를 토대로 빠른 시간 내에 다양한 범람예측이 가능해 이에 대한 신속한 대응 판단 및 대책수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 후속연구에서는 해일범람에 취약한 연안저지대를 선정하고 태풍 조건별 적용을 통해 최대 해일고, 침수고, 시간별 침수범위 등 재해발생시 필요한 정량적인 정보를 제공할 수 있는 침수예상도를 작성함으로써 본 연구를 통해 수립된 범람모의 기술의 구체적인 활용방안을 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역특성화연구개발사업의 연구비지원(C105E1020001-06E020200210)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강주환, 문승록, 박선중 (2004). 해수유동모형에서 조건대 모의의 필요성. 대한토목학회논문집, 24(3B), 259-265.
- 강주환, 문승록, 박선중 (2005). 조석확폭에 수반되는 조건대 영역 확대의 영향성. 한국해양해양공학회지, 17(1), 47-54.
- 강주환, 박선중, 문승록, 윤종태 (2009). 태풍의 특성변화에 따른 경남해역 해일양상 고찰. 한국해양해양공학회지, 21(1), 1-14.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대 (2007). 연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석. 한국해양공학회지, 21(2), 35-41.
- 문승록, 강태순, 남수용, 황준 (2007). 폭풍해일에 의한 해안침수예상도 작성 시나리오 연구. 한국해양해양공학회지, 19(5), 492-501.
- 문승록, 박선중, 강주환, 윤종태 (2006). MIKE21 모형을 이용한 목포해역 해일/범람모의. 한국해양해양공학회지, 18(4), 348-359.
- 조용식, 서승원 (2001). 이동경계를 이용한 지진해일의 최대범람구역 추산. 한국해양해양공학회지, 13(2), 100-108.
- 조지훈 (2000). 해안범람 수치모의. 석사학위논문, 한양대학교.
- 천재영, 이광호, 김지민, 김도삼 (2008). 태풍 매미(0314호)에 의한 마산만 주변연안역에서의 범람해석. 한국해양공학회지, 22(3), 8-17.
- Balzano, A. (1998). Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models. Coastal Engineering, 34, 83-107.
- Bates, P.D. and De Roo, A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. Journal of Hydrology, 236, 54-77.
- DHI Water and Environment (2007). User guide and reference manual, Hydrodynamic Module.
- Falconer, R.A. and Owens, P.H. (1987). Numerical simulation of flooding and drying in a depth-averaged tidal flow model. Proceedings Institution Civil Engineers, 83, 161-180.
- Flather, R.A. and Heaps, N.S. (1975). Tidal computations for Morecambe Bay. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 42, 489-517.
- Hubbert, G.D. and McInnes, K.L. (1999). A storm surge model for coastal planning and impact studies. J. of Coastal Research, 15(1), 168-185.
- Hunter, N.M., Horritt, M.S., Bates, P.D., Wilson, M.D. and Werner, G.F. (2005). An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. Advances in Water Resources, 28, 975-991.
- Ip, J.T.C., Lynch, D.R., and Friedrichs, C.T. (1998). Simulation of estuarine flooding and dewatering with application to Great Bay, New Hampshire. Estuarine Coastal & Shelf Science, 47, 119-141.
- Iwasaki, T. and Mano, A. (1979). Two dimensional numerical simulation of tsunami run-up in the eulerial description. Proceeding Japanese Coastal Engineering Conference, JSCE, 26, 70-74.
- Large, W. G. and Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. J. Phys. Oceanogr., 11, 324-336.
- Leendertse, J.J. (1967). Aspects of a computational model for long water wave propagation. Memorandum RH-5299-PR, Rand Corporation, Santa Monica.
- Madsen, H. and Jakobsen, F. (2004). Cyclone induced storm surge and flood forecasting in the northern Bay Bengal. Coastal Engineering, 51, 277-296.
- McCowan, A.D, Rasmussen, E.B. and Berg, P. (2001). Improving the performance of a two-dimensional hydraulic model for floodplain applications. Conference on Hydraulics in Civil

- Engineering, Hobart, Australia.
- Shibaki, H., Suzuyama, K., Kim, J.I., and Sun, L. (2007). Numerical simulation of storm surge inundation induced by overflow, overtopping and dike breach. Asian and Pacific Coasts 2007, Nanjing, China.
- Smith S.D., Banke E.G (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 665-673.
- Stelling, G.S., Kernkamp, H.W.J. and Laguzzi, M.M. (1998). Delft flooding system (FLS): A powerful tool for inundation assessment based upon a positive flow simulation.
- Weisberg, R.H. and Zheng, L. (2006). Hurricane storm surge simulations for Tampa Bay. Estuaries and Coasts, 29(6A), 899-913.
- Xie, L., Pietrafesa, L.J. and Peng, M. (2004). Incorporation of a mass-conserving inundation scheme into a three dimensional storm surge model. J. of Coastal Research, 20, 1209-1223.

Received April 7, 2009

Accepted April 16, 2009