

폭풍해일과 강우에 의한 해안 도시 범람 수치모의를 위한 우수관망 수치모형의 개발

Development of Storm Sewer Numerical Model for Simulation of Coastal Urban Inundation due to Storm Surge and Rainfall

윤성범* · 이재황** · 김건형** · 송지훈**

Sung Bum Yoon*, Jaehwang Lee**, Gun Hyeong Kim** and Ji Hoon Song**

요지 : 기존의 태풍에 의한 해안 범람 수치모의 연구의 대부분은 폭풍해일만을 고려하였으므로 강우에 의한 추가적인 침수는 배제되어 왔다. 일반적으로 태풍은 강우를 동반한 자연재해이므로 폭풍해일에 의한 해안 도시범람을 수치모의 하는 데 있어 반드시 강우의 영향이 고려되어야 한다. 또한 강우는 도시 우수 관망을 통해 바다로 배출되므로 강우를 동반하는 폭풍해일 수치모의 시 우수관망 시스템이 고려되어야 타당한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 기존의 폭풍해일 수치모형에 강우와 우수관망을 해석할 수 있는 알고리즘을 추가하여 수치모형을 개발하였다. 개발된 수치모형을 단순화된 지형에 적용하여 강우에 의한 범람과 우수의 배수, 해수의 역류현상, 우수의 배수에 따른 해수면 상승 등 기본적인 수치모형의 기능을 검사하였다. 그 결과 다양한 조건에서 수치모형이 정상적으로 작동되는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 폭풍해일, 강우, 우수관망 수치모형, 배수, 역류

Abstract: Since most of the researches on the coastal inundation due to typhoons have considered only storm surges, an additional inundation due to rainfall has been neglected. In general, typhoons are natural disasters being accompanied by the rainfall. Thus, it is essential to consider the effect of rainfall in the numerical simulation of coastal inundation due to storm surges. Because the rainwater is discharged to the sea through the storm sewer system, it should be included in the numerical simulation of storm surges to obtain reasonable results. In this study an algorithm that can deal with the effects of rainfall and sewer system is developed and combined with a conventional storm surge numerical model. To test the present numerical model various numerical simulations are conducted using the simplified topography for the cases including the inundation due to rainfall, the drainage of rainwater, the backflow of sea water, and the increase of sea water level due to drainage of rainwater. As a result, it is confirmed that the basic performance of the present model is satisfactory for various flow situations.

Keywords : storm surge, rainfall, storm sewer numerical model, drainage, back flow

1. 서 론

최근 지구온난화의 영향으로 태풍의 강도가 증가하여 폭풍해일에 의한 해안도시의 범람피해도 증가하고 있다. 태풍에 의해 폭풍해일이 발생하면 해수면이 상승하여 해안지역을 직접 범람시키는 것이 일반적이지만, 태풍에 동반된 강우에 의한 우수가 해수면 상승으로 바다로 원활하게 배제되지 못해 범람이 가중되기도 한다. 우리나라의 경우, 2003년 태풍 Maemi로 인해 132명의 인명피해, 약 5조원의 재산피해가 발생한 것으로 파악되었다 (Kim et al., 2010). 이로 인해 연안재해의 주요한 인자인 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 높

아짐과 동시에, 이에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다. 우리나라에 가장 큰 피해를 입힌 태풍 Maemi에 대한 연구로는 Kang(2004), Kang et al.(2004), Choi et al.(2004), Kawai et al. (2004, 2005), Hur et al.(2006a, 2006b), Kim et al.(2007), Chun et al.(2008)이 있다. 이러한 연구들은 태풍에 의한 폭풍해일만을 고려하여 범람을 수치모의 하였으므로 태풍에 동반되는 강우에 의한 침수피해 증가는 고려하지 않았다. 일반적으로 태풍은 강우를 동반하므로 폭풍해일에 의한 해안 도시범람을 수치모의 하는 데 있어 강우의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 또한 강우에 의한 우수 배제를 위해 우수관망이 설치되어 있는 것이 일반적이므로 우수관망 시스

*한양대학교 건설환경플랜트공학과(Corresponding author: Dept. of Civil, Env. and Plant Engrg, ERICA Campus, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 426-791, Korea, Tel: +82-31-400-5144, Fax: +82-31-436-8147, sbyoon@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 (Dept. of Civil & Env. Engrg, Graduate School, Hanyang University)

템이 수치모의에 고려되어야 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 강우를 고려한 폭풍해일의 국내 연구로는 Park et al.(2009)이 있다. 그러나 Park et al.(2009)은 폭풍해일을 먼저 계산하고, 그 결과를 순차적으로 해안과 지상부 범람 수치모의에 이용하여 해일-해안-우수관망의 동시 거동에 따른 영향을 배제한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 폭풍해일에 의한 해안 도시범람을 수치모의하는 데 있어 강우의 영향을 고려하기 위해 강우강도를 고려하여 우수관망 수치모형을 개발하고, 이를 폭풍해일 수치모형과 결합하였으며, 이를 단순화된 지형에 적용하여 누적강우량, 우수의 배수 및 해수의 상승에 따른 역류현상 등 결합수치모형의 기본적인 기능을 검토하였다.

2. 지배방정식

2.1 폭풍해일 수치모형

폭풍해일은 그 주기가 수 분으로부터 수 시간에 달하는 경우가 많기 때문에 장주기파에 속하며 해안 도시지역의 범람을 수치모의 하는 경우 비선형 효과와 바닥마찰은 물론 이동경계 기능이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 수치모의를 수행할 수 있는 2차원 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 하였다. 이는 다음 식(1)~(3)과 같이 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, r 는 강우강도(m/s), η 는 정수면으로부터의 수면변위(m), M , N 은 각각 x , y 방향의 수심평균 선유량(m^2/s), f 는 코리올리 계수, g 는 중력가속도(m/s^2), D 는 기본수심과 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심(m), ρ_w 는 해수의 밀도(kg/m^3), p_0 는 수면에서의 기압(Pa), A_h 는 수평와동점성계수(m^2/s), τ_{sx} , τ_{sy} 및 τ_{bx} , τ_{by} 는 해면 및 해저에서의 x , y 방향의 전단력을 나타낸다. 본 연구에서는 우수관망 수치모형 개발에 중점을 두어 태풍에 의한 침수는 배제하고 연속방정식에 강우강도 r 을 추가하여 강우에 의한 침수를 검토하였다. 폭풍해일에 의한 범람을 동시에 고려할 경우에는 태풍에 의한 바람장과 기압장을 입력하면 쉽게 해결된다.

2.2 우수관망 수치모형

우수관망 수치모형은 Yoon et al.(1997a, 1997b)이 개발한 관수로에서의 비압축성 부정류 해석 모형을 이용하였다. 이 수치모형은 관수로에 적용되는 모형이므로 유량이 작아 개수로로 흐르는 강우 초기에는 적용할 수 없으나, 강우가 어느 정도 진행되어 본격적으로 흐름이 발생되면 곧 관수로로 전환되므로 실용적인 문제에 적용하기에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 배수암거 부정류해석 연구는 비정상 흐름(unsteady flow)으로 Fig. 1과 같이 여러 개의 수조와 수조사이를 연결하는 관로로 구성된 배수계통에 대해 관로의 면적이 일정한 경우 다음의 비정상 에너지방정식 (4)와 연속방정식 (5)을 적용하여 해석할 수 있다 (Yoon et al., 1997a).

$$\frac{l}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \Delta H + \left(\sum k + f \frac{l}{d} \right) \frac{|v|v}{2g} = 0 \quad (4)$$

$$A_c \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \Delta Q = 0 \quad (5)$$

여기서, ζ 는 기준면으로부터 수면까지의 높이(m), v 는 관로의 단면평균유속(m/s), Q 는 관로의 유량(m^3/s)이며, A_c 는 수조의 단면적(m^2), A 는 관로의 단면적(m^2), l 은 인접수조간의 관로길이(m), d 는 관로의 직경(m), ΔQ 는 관정으로부터의 순유출유량(m^3/s), g 는 중력가속도(m/s^2), f 는 관로의 마찰계수, k 는 관로의 미소손실계수이다. ΔH 는 인접 관정간의 속도수두를 제외한 수두차로서 다음과 같다.

$$\Delta H = \frac{\Delta P_c}{\gamma_w} + \Delta \zeta \quad (6)$$

여기서, ΔP_c 는 인접 관정의 공기압 차(N/m^2), $\Delta \zeta$ 는 인접수조사이의 수위차(m), γ_w 는 물의 단위중량(N/m^3)이다. 모든 관정이 개방되어 있는 경우 관정 내부에서의 수면은 대기압의 영향에 있으므로 압력수두차 ΔP_c 는 사라진다. 식 (4)는 유속의 합수이므로 수치해석의 편의를 위해 연속방정식에서 요구하는 유량변수로 다시 나타내면 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gA}{l} (\Delta H + KQ|Q|) = 0 \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 사용된 계수 K 는 식 (4)를 이용하여 다음

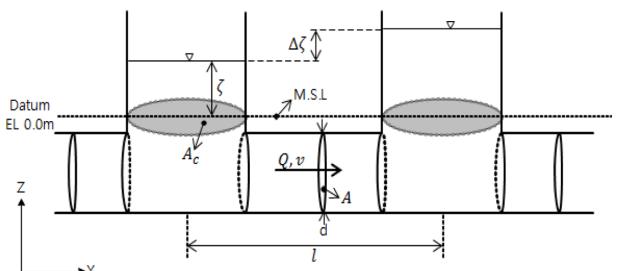


Fig. 1. Conceptual diagram of sewer and pipe conduit.

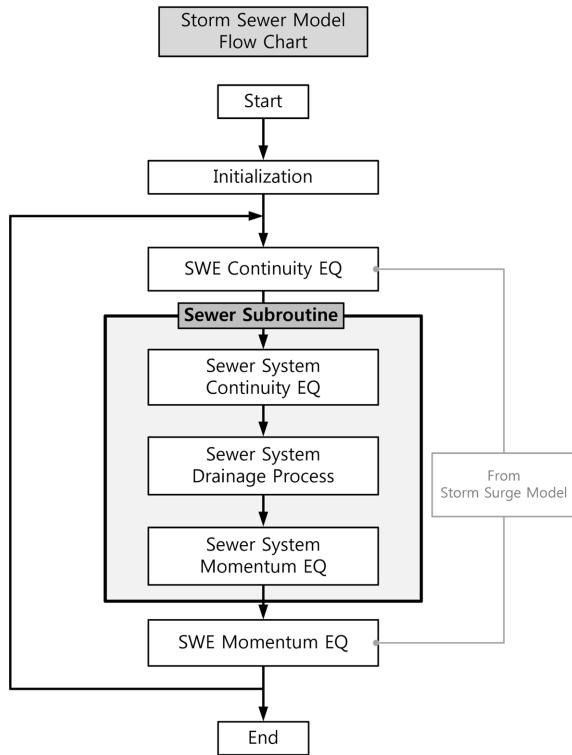


Fig. 2. Simulation flow chart of the coupled surge-rainfall-sewer numerical model.

과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \left(\sum k + f \frac{1}{d} \right) \frac{1}{2gA^2} \quad (8)$$

이를 통해 개발된 우수관망 수치모형은 Fig. 2와 같이 비선형천수방정식의 연속방정식과 운동방정식 사이에 적용하여 수치모의를 수행하도록 구성하였다.

3. 우수관망 수치모의

3.1 우수관망에서의 배수 및 역류현상 해석 알고리즘

지상과 우수관망에서의 수위는 각각 폭풍해일 모형과 우수관망 모형의 연속방정식을 통해 산정된다. 이후 Fig. 2의 ‘Sewer System Drainage Process’를 통해 지상과 우수관망의 수위차에 의해 지상으로부터 우수관망으로의 유입유량이 결정되고, 이에 따라 지상과 우수관망의 수위가 조정된다. 강우 또는 해일의 범람으로 인해 지상의 수위가 우수관망의 수위보다 높아진 경우 지상에 고인 물이 우수관망으로 유입되어 바다로 배수된다. 반면 해수면의 높이가 지상의 수위보다 높은 경우에는 해수가 우수관망을 통해 역류하게 된다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 우수의 배수 및 해수의 역류현상이 발생할 때 나타날 수 있는 경우들을 보여준다. Fig. 3은 우수의 배수현상에 따른 우수관망의 수위변화를 나타낸 것으로서, 지상의 우수 용기는 폭풍해일 모형의 한 격자에 해당하며, 그 격자 중앙 하부에는 관정이 연결되어 있다. 그러나 그림에서는 이

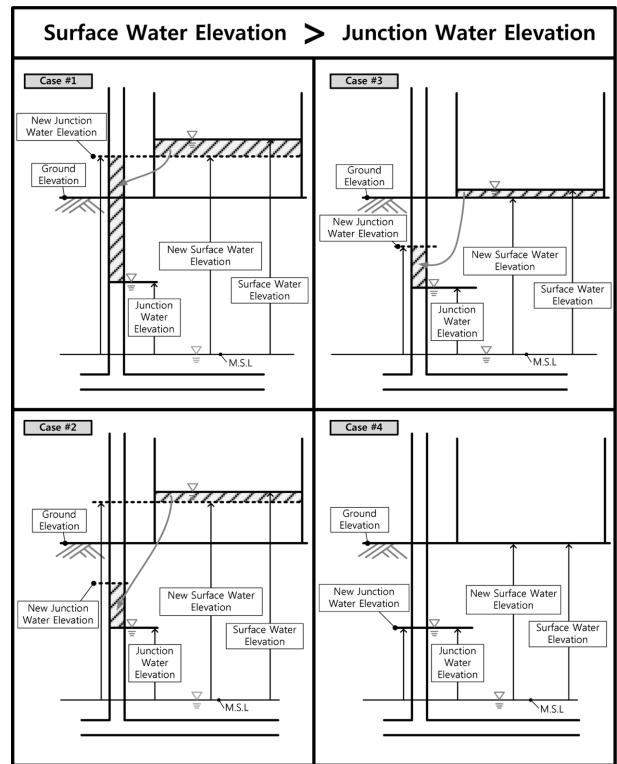


Fig. 3. Drainage process for storm sewer system in the cases of surface water elevation higher than junction water elevation.

해를 둡기 위해 지상의 격자와 관정을 분리하여 도시하였다. Fig. 3의 Case 1은 지상에 고인 우수의 수위가 우수관망의 수위보다 높은 경우로서 Δt 시간 동안 관정으로 유입되는 우수량(오리피스 공식으로 계산)이 관정을 충분히 채울 수 있을 정도로 많이 유입되어 지상의 수위와 관정의 수위가 같아지는 경우를 보여준다. Case 2는 Δt 시간 동안 유입되는 우수의 양이 작아 관정을 충분히 채울 수 없으며, 지상의 수위는 하강 후에도 바닥보다 높은 상태를 유지하는 경우를 나타낸 것이다. Case 3은 지상에 고인 우수량이 적어 지상에 고인 모든 우수가 우수관망으로 유입되어도 우수관망의 수위가 크게 상승하지 않는 경우이다. Case 1~Case 3의 경우 모두 우수관망으로 유입된 우수에 의해 우수관망의 수위가 조정되는 경우이다. 반면 Case 4는 지상에 우수가 존재하지 않는 경우이다. 이러한 경우 관정으로의 유입이 발생하지 않아 지상 및 우수관망 수위에 영향을 미치지 않으므로 폭풍해일 모형과 우수관망 모형에서 각각 산정된 수위를 그대로 유지하게 된다.

Fig. 4는 해수의 역류현상에 따른 우수관망의 수위변화를 나타낸 것이다. Case 5는 관정의 수위가 관정이 위치하는 지상의 수위보다 높아 해수의 역류가 발생하는 경우이다. 이러한 경우 우수관망과 지상의 수위가 다시 산정된다. 반면 Case 7의 경우 관정의 수위와 지상의 수위가 동일한 경우이다. 이러한 경우 지상과 우수관망에서 수위차가 존재하지 않기 때문에 기존에 산정된 수위를 그대로 유지하게 된다.

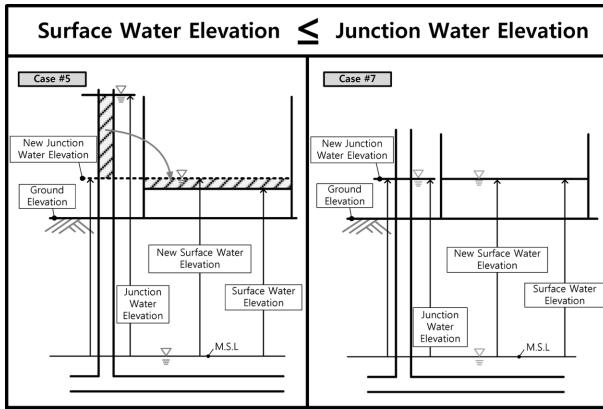


Fig. 4. Back flow process for storm sewer system in the cases of surface water elevation lower than junction water elevation.

3.2 수치모의 대상영역 및 우수관망 배치구조

본 연구에서 개발된 우수관망 수치모형의 강우에 의한 침수 과정이 잘 작동하는지를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 하나의 단순한 영역을 설정하였다. 격자간격 Δx 와 Δy 는 10 m로 동일하게 구성하였으며 Δt 는 0.1 s로 하였다. 그림에서 x 축과 y 축의 숫자는 격자번호를 나타내며, 2점간의 실제거리는 사각형 box내에 표시하였다. 지상영역과 바다 사이에 짙은 회색으로 표시된 부분은 방조제를 나타낸 것으로서 지상영역에 쌓인 우수가 우수관망 시스템을 통하지 않고 바다로 유출되는 것을 방지하기 위해 설정한 것이다. 또한 영역 안에 존재하는 물이 밖으로 새어나가지 않도록 외곽 경계에 벽

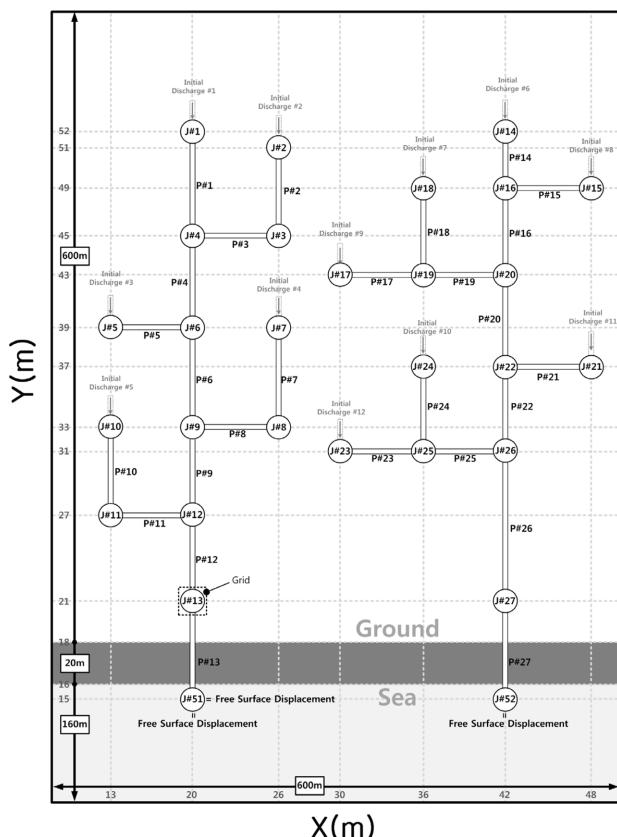


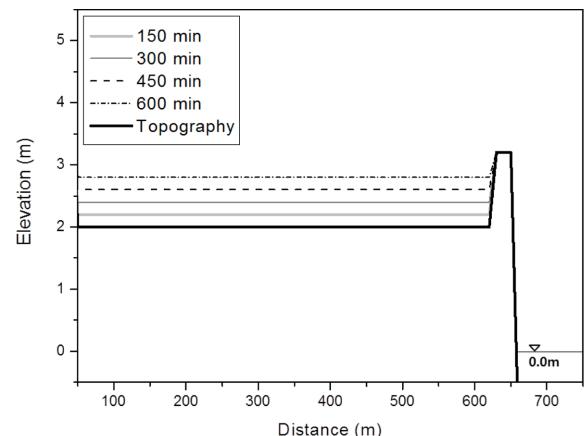
Fig. 5. Storm sewer system designed for numerical simulation test.

을 설치하였다.

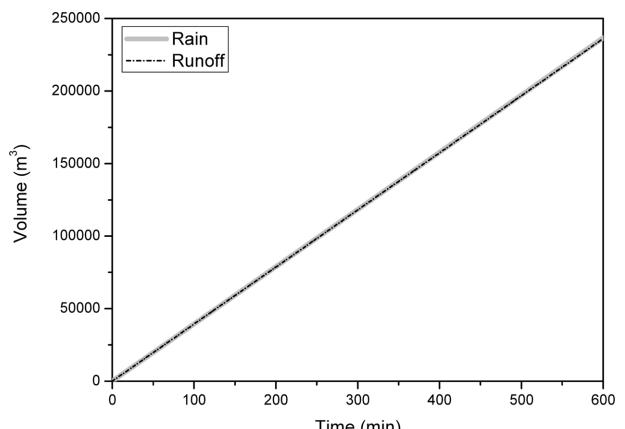
우수관망 시스템은 지상영역에서 강우가 관정을 통해 신속하게 배수될 수 있도록 우수관을 Fig. 5와 같이 배치하였다. 우수관정의 단면적은 모두 2.0 m^2 이며, 우수관로의 직경은 종방향의 주관로인 P1~P12와 P14~P26가 1.0 m, 바다에 접한 2개의 관로인 P13과 P27은 1.5 m, 나머지 지류 관로는 0.6 m이다. 그림에서 J는 우수관정(junction), P는 우수관(pipe)을 나타낸다. 각 알파벳 뒤에 부여된 숫자는 해당 관정이나 관로의 번호이다.

4. 수치모의 결과

본 연구에서 구축된 수치모형의 타당성을 확인하기 위해 Fig. 5에 보인 단순화된 지형을 이용하여 강우강도의 적용, 우수의 배수, 해수의 역류에 대한 수치모의를 수행하여 결과를 검토하였다. Fig. 6은 우수관망 시스템이 없는 경우에 대해 80 mm/hr의 강우강도를 적용하였을 때의 결과이다. 이때 강우는 지상영역에만 적용되었고, 지반, 해수면 및 방조제의 높이는 각각 2.0 m, 0.0 m, 3.2 m로 하였으며, 지상영역의 초기 침수 깊이는 0.0 m로서 건조상태이다. Fig. 6(a)는 강우강도

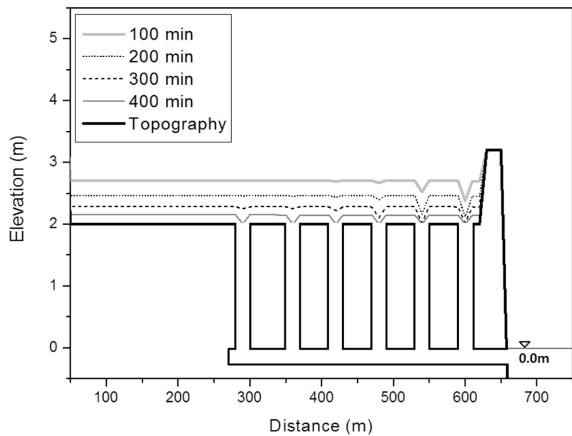


(a) Distribution of water elevation over the ground.

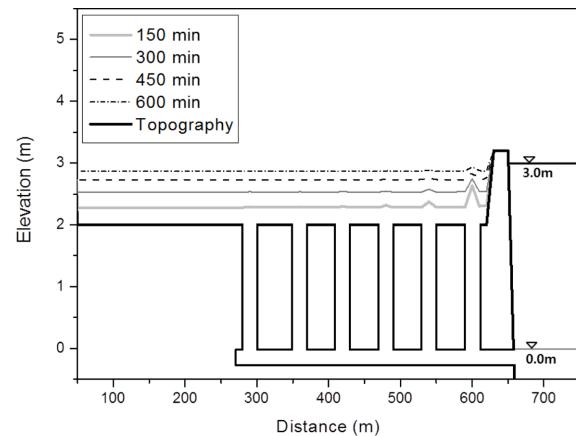


(b) Comparison of water volumes provided by rainfall and accumulated on the ground.

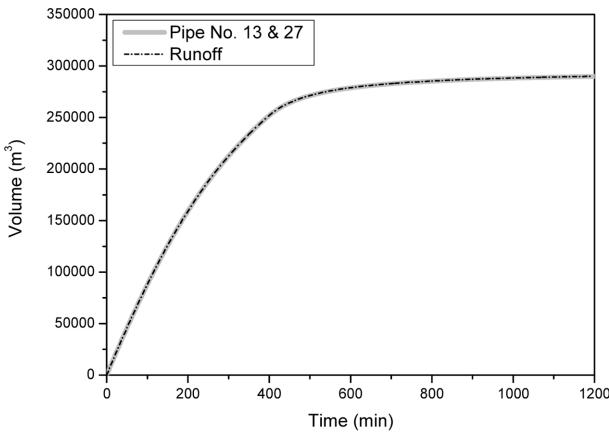
Fig. 6. Numerical simulation of rainfall without storm sewer system.



(a) Distribution of free surface at various time.



(a) Distribution of free surface at various time.

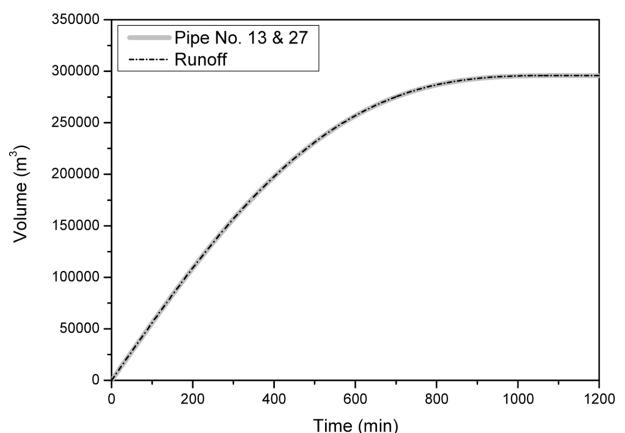


(b) Comparison of cumulative water volumes discharged to the sea through pipe and reduced in the basin.

Fig. 7. Numerical simulation of drainage process through storm sewer system for the case of an open sea.

80mm/hr를 적용하였을 때 지상영역의 수위 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 지상영역의 수위가 시간에 따라 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 적용된 누적강우량과 지상영역에 축적되는 우수량을 비교하기 위해 Fig. 6(b)와 같이 나타내었다. 그림을 통해 누적강우량과 지상영역에 고이는 누적우수량이 일치하는 것을 확인함으로써 강우강도가 정상적으로 적용되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 우수관망 시스템의 배수과정에 대한 검토 결과이다. 이때의 지반고, 해수면 및 방조제의 높이는 각각 2.0 m, 0.0 m, 3.2 m로 하였고, 강우는 없는 것으로 하였다. 지상영역의 초기 우수 깊이는 1.0 m로 하였으며, 각 관정의 초기 수위는 지상영역의 초기 수위와 동일한 3.0 m이다. 해수위는 매우 넓은 바다로 가정하여 0.0 m로 고정하였다. Fig. 7(a)는 우수가 바다로 배수될 때 시간에 따른 우수의 수위 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 지상영역의 우수가 시간에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 관정이 방조제에 가까울수록 관정 위의 지상부 수심이 주변보다 크게 하강하는 것은 바다에 가까운 관정일수록 배수 유량이 크기 때문이다. 또한 우수관망 시스템을 통해 배수되는 누적 우수량과 지상영역에서 감



(b) Comparison of cumulative water volumes supplied to the basin through pipe and accumulated in the basin.

Fig. 8. Numerical simulation of back flow from the sea for the case of an open sea.

소하는 누적 우수량을 비교하여 Fig. 7(b)와 같이 나타내었다. 관망을 통해 바다로 배수되는 누적 우수량은 Fig. 5에서 2개 관망의 바다 쪽 끝에 위치하는 관로인 P13과 P27의 통과수량을 누적한 것이다. 그림을 통해 우수의 누적 배수량과 지상영역에서 감소되는 누적 우수량이 일치하는 것을 확인함으로써 우수 배수가 정상적으로 수행되는 것을 알 수 있다. 또한 600분 이후 배수된 누적 우수량이 일정해지며, 이는 지상영역의 우수가 모두 배수되어 더 이상 배수가 이루어지지 않음을 뜻한다.

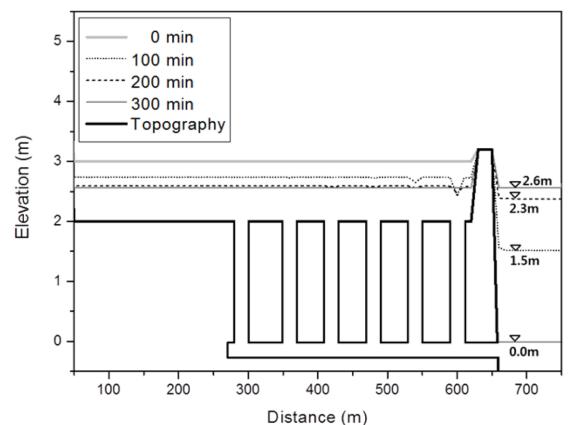
Fig. 8은 강우가 없을 때 해수면의 상승에 따른 해수의 역류현상을 수치모의 하였을 때의 결과이다. 이 경우 지반고와 방조제의 높이는 각각 2.0 m와 3.2 m로 배수과정 검토를 위한 수치모의 조건과 동일하게 하였고, 지상영역의 초기 침수 깊이는 0.0 m로서 초기에는 지상영역이 건조한 상태에서 시작하였다. 또한 지상영역에 위치하는 관정에서의 초기 수위는 평균해면고인 0.0 m로 하였으며, 해수면의 높이는 3.0로 고정하였다. Fig. 8(a)는 해수의 역류가 발생하였을 때 시간에 따라 지상영역에 쌓이는 해수의 수위 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 해수가 우수관망을 통해 유입됨으로써 지상

영역에서의 수위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 우수관망 시스템을 통해 역류한 해수의 양과 지상부에 쌓이는 해수의 증가량을 Fig. 8(b)와 같이 나타내었다. 그림을 통해 역류한 해수량과 지상영역에 쌓인 해수의 증가량이 일치하는 것을 확인함으로써 해수의 역류과정 또한 정상적으로 작동되는 것을 알 수 있다. 900분 이후 우수관망을 통해 역류하는 해수의 양이 일정해진 바, 이는 지상영역의 수위와 해수면의 높이가 동일해져 더 이상 해수가 역류하지 않아 이러한 결과가 나타난 것이라 판단된다.

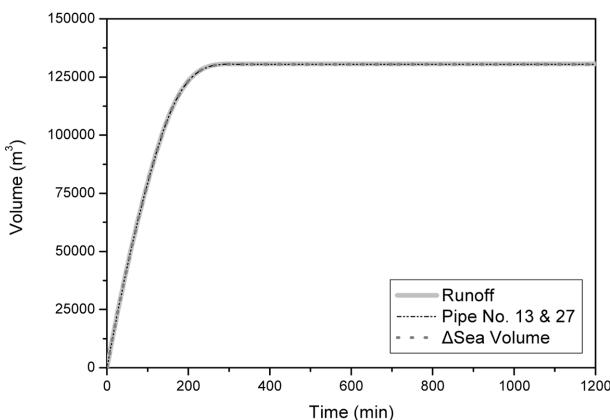
Fig. 9는 Fig. 7에서 검토한 우수의 배수과정에서 Fig. 5의 바다 경계를 따라 불투수벽을 설정하여 바다의 면적이 제한될 때 지상영역의 우수배수가 바다의 해수면을 상승시키는 경우에 대한 수치모의 결과를 보여준다. 이때의 지반고, 초기 해수면, 방조제의 높이 및 지상영역의 초기 수위는 우수의 배수과정을 수치모의 하였을 때의 조건과 동일하게 하였다. Fig. 9(a)는 우수의 배수가 진행함에 따른 지상영역 및 해수면의 수위변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 지상영역의 초기 우수량이 시간에 따라 감소함과 동시에 해수면의 높이가 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 지상영역의 우수의 감소량, 우

수관망시스템을 통해 배수되는 우수량 및 해수의 증가량을 비교하여 Fig. 9(b)와 같이 나타내었다. 그림을 통해 3가지 수량이 동일한 것으로 나타나 우수의 배수에 따른 해수면 상승 역시 정상적으로 수행되고 있음을 알 수 있다. 배수가 시작된 지 300분 이후에는 지상영역과 바다의 수위가 동일해져 더 이상의 배수가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

이상의 수치모의를 통해 지상부가 수평인 지형에 대해 우수관망 수치모형의 기본적인 수량보존 성능을 검토하였다. 그러나 실제로는 지형이 경사진 곳이 대부분이므로 경사진 지형에 대한 강우 시의 우수관망 성능을 검토하였다. 이를 위해 Fig. 10에 보인 바와 같은 경사지를 대상으로 지상영역에 80 mm/hr의 강우강도를 적용하였고, 개방된 바다의 해수면의 높이는 각각 0.5 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m로 적용하여 수치모의를 수행하였다. Fig. 10(a)는 해수면의 높이에 따른 지상영역의 최종 수위 즉 최대 침수위를 비교한 것이다. 그림을 보면 대부분의 경우 지상영역의 침수심은 해수위가 높을수록 우수관로의 배수능력이 저하되어 증가하는 것으로 나타나 예상되는 자연현상이 잘 재현되었다. 특히 해수위가 2.5 m로 대부분의 지면부보다 높은 경우, 강우 초기에는 강우에 의한 침

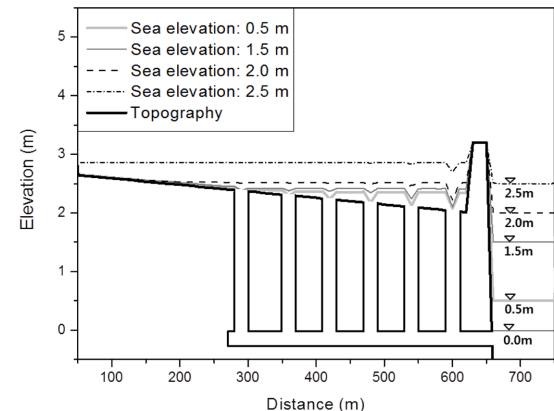


(a) Distribution of free surfaces on the ground and sea at various time.

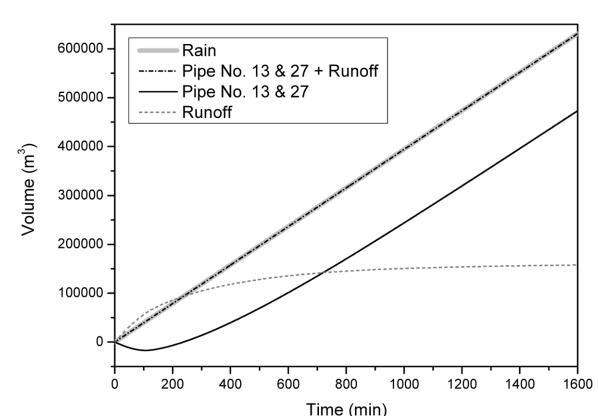


(b) Comparison of cumulative water volumes discharged through pipe, reduced in the basin and increased in the sea.

Fig. 9. Numerical simulation of drainage process through storm sewer system for the case of a closed sea.



(a) Distribution of steady state free surface elevations for the case of inundation due to rainfall over a sloping ground.



(b) Comparison of water volumes discharged through pipe and reduced in the basin (sea elevation: 2.5m).

Fig. 10. Numerical simulation of discharge process through storm sewer system for the case of rainfall over sloping ground.

수와 바다로부터의 해수 역류 영향이 겹쳐 침수심이 빠르게 증가하다가, 지상부 수위가 해수위보다 높아진 다음부터 우수가 바다로 배수되어 배수량이 강우량과 동일해지는 시점에서 침수심은 더 이상 증가하지 않고 평형상태를 이루었다. 이 때 지상부 수위는 해수위보다 0.35 m 정도 높은 상태를 유지하였다. 이러한 현상은 Fig. 10(b)에 제시한 바와 같이 누적강우량, 관로를 통한 배수-역류 수량과 지상영역에 쌓이는 물의 양을 비교함으로써 이해할 수 있다. 그림에서 강우에 의한 누적강우량이 우수의 배수-역류 수량과 지상영역에 쌓이는 물의 양을 합한 것과 일치하는 것으로 보아 강우와 우수 관망 수치모형이 동시에 적용되었을 때에도 수치모의가 정상적으로 수행되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림에서 우수 관망 시스템을 통해 배수-역류되는 물의 양을 보면 초기에는 음의 값을 나타내는 바, 이는 해수면의 높이가 지상부의 수위보다 높아 해수가 역류하는 현상이 잘 재현되고 있음을 알 수 있다. 우수관로 시스템이 작동한지 800분 이후 누적강우량과 누적배수량은 일정하게 증가하나, 지상부에 쌓인 물의 양은 더 이상 변화가 없어 평형상태에 이를 다음에는 강우로 인한 우수가 모두 우수관로 시스템을 통해 바다로 지속적으로 배수되고 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 폭풍해일 수치모형에 강우에 의한 침수 증대 효과를 고려하기 위한 해일-강우-우수관망 결합 수치모형을 개발하였다. 폭풍해일의 연속방정식에 강우효과를 고려하였고, 동시에 우수관망 수치모형을 개발하여 폭풍해일 수치모형과 결합하였다. 수치모형을 검증하기 위해 이를 단순화된 지형을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 먼저 우수관망 미작동시 강우에 의해 지상영역에 쌓이는 누적우수량이 총 강우량과 일치하는지를 검토하였다. 다음으로는 강우가 없을 때 우수관망 설치에 따른 우수의 배수, 해수의 역류 및 우수의 배수에 따른 해수면의 변화에 대한 수치모의를 수행하였다. 우수의 배수에서는 우수의 배수량과 지상영역에서의 우수의 감소량을 비교하였고, 해수의 역류에서는 해수면의 상승에 따른 해수의 역류량과 내륙지역 쌓이는 해수의 증가량을 비교하였다. 그 결과 각 조건에서 비교한 값이 일치하는 것을 확인하였다. 또한 우수의 배수로 인한 해수면의 높이가 변하는 경우에는 우수의 배수량, 내륙지역에 적용된 우수의 감소량 및 해수의 증가량을 비교한 결과 일치하는 것을 확인하였다. 이와 같이 모든 조건에서 비교한 값이 일치한 것을 확인함으로써 적용된 강우강도 및 우수관망 수치모형의 기본 성능을 검증하였다. 최종적으로 강우강도와 우수관망 시스템을 동시에 적용하였을 때에도 정상적으로 수치모의를 수행하는지 추가적으로 검토하였다. 이 때에는 누적강우량, 우수관망을 통해 배수 및 역류되는 물의 양과 내륙지역에 쌓이는 물의 양을 비교하였다. 그 결과 누적강우량, 우수관망을 통과하

는 우수 및 해수의 양과 내륙지역에 쌓이는 물의 양을 더한 것과 일치하는 것을 확인함으로써 본 연구에서 구축된 우수 관망 수치모형의 실효성을 검증할 수 있었다. 향후 이를 실제 지형에 적용하여 2차원 수치모의를 수행함으로써 기존의 폭풍해일에 의한 침수범람 결과보다 더욱 현실성 있는 수치모의 결과를 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술 진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(2단계 항만권역 태폭풍 및 지진해일 재해대응체계 구축(남해안))

References

- Choi, B.H., Eom, H.M., Kim, H.S., Jung, W.M. and Shim, J.S. (2004). Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi. Workshop on waves and storm surges around Korean peninsula, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 121-144 (in Korean).
- Chun, J.Y., Lee, K.H., Kim, J.M., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2008). Inundation Analysis on Coastal Zone around Masan Bay by Typhoon Maemi (No. 0314). Journal of Ocean Engineering and Technology, 22(3), 8-17 (in Korean).
- Hur, D.S., Yeom, G.S., Kim, J.M., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2006a). Estimation of Storm Surges on the Coast of Busan. Journal of Ocean Engineering and Technology, 20(3), 37-44 (in Korean).
- Hur, D.S., Yeom, G.S., Kim, J.M., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2006b). Storm Surge Characteristics According to the Local Peculiarity in Gyeongnam Coast. Journal of Ocean Engineering and Technology, 20(3), 45-53 (in Korean).
- Kang, Y.K., Tomita, T., Kim, D.S. and Ahn, S.M. (2004). Characteristics of Flood Damage by Storm Surge and High Waves in Southeast Coast Area during Typhoon Maemi Attack, Workshop on waves and storm surges around Korean peninsula, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 35-43 (in Korean).
- Kang, Y.Q. (2004). Storm Surge Resonance During the Passage of Typhoon 'Maemi' Waves and Storm Surges around Korean Peninsula, Workshop on waves and storm surges around Korean peninsula, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 57-62 (in Korean).
- Kawai, H., Tomita, T., Hiraishi, T., Kim, D.S. and Kang, Y.K. (2004). Hindcasting and Field Investigation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314. Annual Journal of Coastal Engineering, JSCE, 51, 1361-1365.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005). Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi. Journal of Ocean Engineering and Technology, 19(2), 12-18 (in Korean).

- Kim, C.K., Lee, J.T. and Jang, H.S. (2010). Inundation Numerical Simulation in Masan Coastal Area, Journal of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association, 43(11), 985-994 (in Korean).
- Kim, D.S., Kim, J.M., Lee, G.H. and Lee, S.D. (2007). Inundation Analysis Considering Water Waves and Storm Surge in the Coastal Zone, Journal of Korean Society of Ocean Engineers, Korean Society of Ocean Engineers, 21(2), 35-41 (in Korean).
- Park, N.J., Kim, M.K. and Yoon, J.S. (2009). Study of Inundation Flow Model Consider of Sewerage System in Masan, Proceedings of Coastal and Ocean Engineering in Korea, Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 18, 121-123 (in Korean).
- Yoon, S.B. and Lee, K.H. (1997a). Development of Numerical Model for Unsteady Flow Analysis in Discharge Culvert of Thermal Power Plant: I. Model Setup, Journal of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association, 30(6), 761-768 (in Korean).
- Yoon, S.B. and Lee, K.H. (1997b). Development of Numerical Model for Unsteady Flow Analysis in Discharge Culvert of Thermal Power Plant: II. Model Application, Journal of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association, 30(6), 769-776 (in Korean).
-

원고접수일: 2014년 10월 16일

게재확정일: 2014년 10월 24일