

폭풍해일과 강우에 의한 해안 도시 범람 수치모의 Numerical Simulation of Coastal Urban Inundation due to Storm Surge and Rainfall

김건형* · 표창규* · 윤성범**

Gun Hyeong Kim*, Chang Kyu Pyo* and Sung Bum Yoon**

요 지 : 본 연구에서는 태풍 매미에 의해 큰 피해를 입은 마산지역을 대상으로 폭풍해일과 강우에 의한 범람 수치모의를 수행하였다. 이를 위해 폭풍해일-강우-우수관망 결합 수치모형을 사용하였다. 그 결과, 기존의 폭풍해일만을 이용하였을 경우보다 강우와 우수관망 수치모형을 고려하였을 때의 침수면적 및 침수고가 크게 증가한 것을 확인하였다. 또한 마산시에서 추진 중인 방재언덕을 설치하였을 때의 침수범람결과를 추가적으로 수치모의 하여 방재언덕의 실효성을 검토하였다. 그 결과 방재언덕의 영향으로 폭풍해일에 의한 최대 침수심은 저감되었으나, 우수가 지상부에서 바다로 원활하게 배수되지 못해 침수지속기간이 증가하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 태풍 매미, 해일, 강우, 우수관망, 결합 수치모형

Abstract : In this study, numerical simulations are conducted for the inundations due to storm surge and rainfall at Masan City of Korea where severe damages occurred by the typhoon Maemi. A coupled numerical model which can deal with various flow patterns such as storm surge, rainfall and sewer flows is employed. The numerical results show that the inundation area and depth increase significantly when the combined effects of storm surge and rainfall are considered in comparison with those obtained without a rainfall effect. Further numerical simulations are conducted to evaluate the performance of the sea wall being constructed for the coastal defence. The results show that the maximum inundation depths decrease when the sea wall is constructed. However, the duration of inundation becomes longer, because the rainwater on the ground cannot be discharged easily to the sea due to the presence of the sea wall.

Keywords : typhoon Maemi, storm surge, rainfall, sewer system, coupled numerical model

1. 서 론

최근 태풍의 강도 및 발생빈도의 증가로 폭풍해일에 의한 해안도시의 범람 피해가 증가하고 있다. 따라서 태풍이 자주 통과하는 해안 지역에 대해 폭풍해일에 의한 범람을 미리 예측하고, 침수예상도를 작성하여 방재대책 수립에 활용하고 있다. 이러한 해일 범람 예측에 사용되는 폭풍해일 수치모형은 태풍에 의한 강풍과 기압으로 인한 해수면 상승만을 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 태풍에 의한 폭풍해일로 해수면이 상승되어 발생하는 직접적인 범람이 발생되지 않더라도 태풍에 동반된 강우에 의해 내륙지역에 축적된 우수가 바다로 원활하게 배수되지 못해 침수가 발생하기도 하며, 직접적인 폭풍해일에 강우효과가 가중되어 범람이 증대되기도 한다. 따라서 이러한 폭풍해일과 강우의 복합현상에 의한 해안 도시의 침수를 예측하기 위한 연구가 필요하다. 우리나라의 경우

2003년 태풍 매미에 의해 큰 피해가 발생한 이후 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 높아짐과 동시에 이에 관한 연구도 활발히 수행되고 있다. 태풍 매미에 관한 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. 그러나 대부분의 연구에서 폭풍해일에 의한 직접적인 해수 침수만을 고려하였으며, 태풍에 동반되는 강우에 의한 침수피해 증가와 해수면 상승에 의한 우수관망 배수능력 저하는 고려하지 않았다. 국내에서 이와 같은 강우를 고려한 폭풍해일 범람 연구는 Park et al.(2009)과 Kim et al.(2010)의 연구가 있다. 그러나 이들 연구에서는 태풍해일을 수치모의 하여 해수위를 미리 정하고, 이를 순차적으로 하천 및 지상부 우수관 수치모형의 경계 입력 자료로 사용함으로써 해수, 하천수 및 우수가 서로 영향을 미치는 동적 결합이 이루어지지 않은 것으로 보인다. 폭풍해일

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

**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)

자체에 대한 심도 있는 연구는 국내외에서 활발히 수행 중에 있다. 국내의 경우 최근 Suh and Kim (2012)과 Suh and Lee(2012)는 유한요소모형인 ADCIRC를 이용하여 비대칭 바람장 및 직립안벽 월류 등 현실적인 문제를 해결하는 방법을 제시하였다.

본 연구는 폭풍해일 자체에 대한 연구보다는 폭풍해일 시 동반되는 강우가 침수범람에 어떤 영향을 주며, 이를 수치 모형에서 구현할 수 있는지 파악하고자 하였다. 폭풍해일에 의한 해안 도시범람을 수치모의 하는 데 있어 강우에 의한 침수를 고려하기 위해 폭풍해일 수치모형에 강우를 고려하고 동시에 우수관망(sewer system) 수치모형을 동적으로 결합시킨 Yoon et al.(2014)이 개발한 수치모형을 적용하여 태풍 매미에 의해 가장 큰 피해가 발생한 마산지역을 대상으로 수치모의를 수행하고, 산정된 침수 결과를 기존의 폭풍해일만을 고려한 결과와 비교하였다. 또한 마산시에서 태풍에 의한 침수 피해를 경감시키기 위해 계획 중인 방재언덕의 효과를 미리 파악하거나, 개선 방안을 마련하는 데 있어서 본 연구에서 개발한 수치모형의 적용 가능성을 검토하기 위해 방재언덕을 설치하기 전과 후의 침수 양상을 추가적으로 비교하였다.

2. 지배방정식

2.1 폭풍해일 수치모형

폭풍해일은 장주기파에 속하며 해안 도시지역의 침수범람을 수치모의 하는 경우 비선형 효과와 바닥마찰이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 비선형 효과와 바닥마찰을 고려할 수 있는 2차원 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 하였다. 이는 다음 연속방정식 (1)과 운동방정식 (2), (3)으로 구성된다. 또한 강우에 의한 침수를 고려하기 위해 연속방정식 (1)의 우변 항에 강우강도 r_* (m/s)을 추가하였다. 강우강도는 시간과 장소에 따른 변화를 고려할 수 있다.

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

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

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

여기서, η 는 정수면으로부터의 수면변위(m), M , N 은 각각 x , y 방향의 선유량(m^2/s), f 는 코리올리 계수, g 는 중력가속도(m/s^2), D 는 수심 h 와 폭풍해일에 따른 해수면의 변위 η 를 합한

전수심(m), ρ_w 는 해수의 밀도(kg/m^3), p_0 는 수면에서의 기압(Pa), A_h 는 수평외동점성계수(m^2/s)를 나타낸다. τ_{sx} , τ_{sy} 및 τ_{bx} , τ_{by} 는 해면 및 해저에서의 x , y 방향 전단력으로 다음 식 (4)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (7)$$

여기서 ρ_a 는 대기의 밀도(kg/m^3), W_x , W_y 는 해면으로부터 10 m 상부에서 x , y 방향의 풍속(m/s), n 은 Manning의 조도 계수, C_D 는 항력계수이다. 항력계수의 경우 많은 경험 값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 Mitsuyasu and Kusaba (1984)의 제안식을 적용하였다. 또한 태풍의 영향범위에 있어서 기압분포는 Myers and Malkin(1961)의 식을 사용하였으며 이는 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 r 은 태풍중심으로부터의 거리, $P(r)$ 은 r 지점에서의 기압, P_c 는 태풍의 중심기압, ΔP 는 기압심도, r_0 는 태풍의 반경을 나타낸다.

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (8)$$

2.2 우수관망 수치모형

우수관망 수치모형은 Yoon et al. (1997a, 1997b)이 개발한 비압축성 부정류 해석 모형을 이용하였다. 비압축성 부정류 해석 모형은 열발전소 배수암거 부정류 해석연구에 활용된 바 있으며, 이는 비정상 흐름으로 Fig. 1과 같이 여러 개의 수조와 수조사이를 연결하는 관로로 구성된 배수계통에 대해 관로의 면적이 일정한 경우 비정상 에너지 방정식과 연속 방정식을 적용하여 해석이 가능하다.

이때의 비정상 에너지 방정식과 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

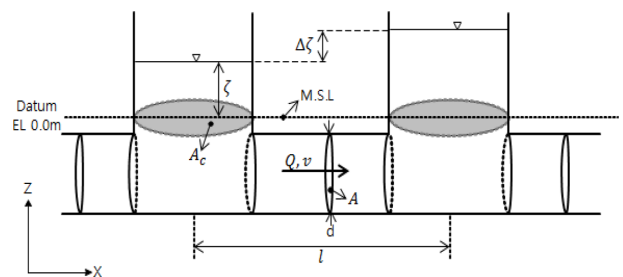


Fig. 1. Conceptual diagram of a sewer system including junction and pipe conduit.

$$\frac{l}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \Delta H + \left(\sum k + f_r \frac{l}{d} \right) \frac{|v|}{2g} v = 0 \quad (9)$$

$$A_c \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \Delta Q = 0 \quad (10)$$

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_r 는 관로의 마찰계수, k 는 관로의 미소손실계수이다. ΔH 는 인접 관정간의 속도수두를 제외한 수두차로서 다음과 같다.

$$\Delta H = \frac{\Delta P_c}{\gamma_w} + \Delta \zeta \quad (11)$$

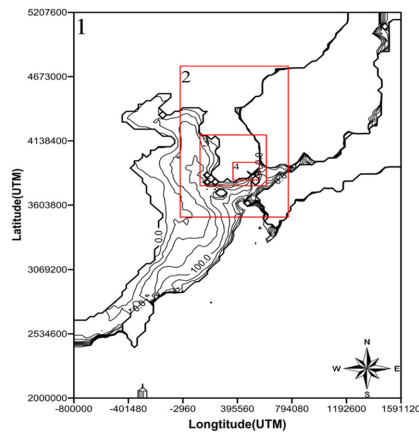
여기서, ΔP_c 는 인접 관정의 공기압 차(N/m^2), $\Delta \zeta$ 는 인접수조사이의 수위차(m), γ_w 는 물의 단위중량(N/m^3)이다. 모든 관정이 개방되어 있는 경우 관정 내부에서의 수면은 대기압의 영향에 있으므로 압력수두차 ΔP_c 는 사라진다. 식 (7)은 유속의 함수이므로 수치해석의 편의를 위해 연속방정식에서 요구하는 유량변수로 다시 나타내면 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gA}{l} (\Delta H + KQ|Q|) = 0 \quad (12)$$

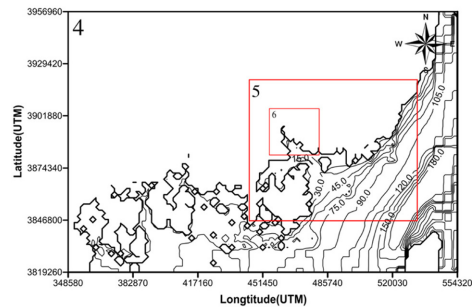
위의 식 (12)에서 사용된 계수 K 는 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \left(\sum k + f_r \frac{l}{d} \right) \frac{1}{2gA^2} \quad (13)$$

본 연구에서 사용한 우수관망 수치모형을 통해 발생하는 배수과정 및 해수의 역류과정에 따른 우수관정의 수위 산정 과정에 대해서는 Yoon et al.(2014)의 연구에 자세히 소개되어 있다.



(a) Regions No.1 ~ 4



(b) Regions No.4 ~ 6

Fig. 2. Computational regions (depth unit : m).

3. 수치모의

3.1 수치모의 대상영역

본 연구에서는 마산자유무역지역과 마산구항을 대상으로 2003년 발생한 태풍 매미에 의한 침수범람을 수치모의 하였다. 이때의 수치모의 영역은 광역으로부터 최상세역까지 총 12개의 영역으로 구성하였다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 광역인 제1영역~제6영역을 나타낸다. Fig. 3의 (a)는 제6영역~제10영역을 (b), (c)는 각각 침수범람 수치모의 대상영역인 마산 자유무역지역(제10-a영역)과 마산 구항 인근지역(제10-b영역)을 나타낸다. 그림에서 수심과 지반고는 태풍 내습시의 조위를 기준으로 평균해면 기준 수심과 지반고를 조정하여 입력하였으며, 수심은 양(+)의 값으로, 지반고는 음(-)의 값으로 하였다. 수치모의 영역의 격자구성은 다음 Table 1과 같다. 여기서 최상세역인 제10-a 및 제10-b영역은 5.0 m의 격자로 하였다. 수치모의 수행시간간격은 전영역이 0.1초로 동일하게 하였다.

3.2 태풍 이동경로

태풍 매미의 이동경로는 Fig. 4와 같이 2003년 9월 6일

Table 1. Computational information for sub-regions

| Region | No. of Grid | $\Delta x(\text{m})$ | $\Delta t(\text{s})$ |
|---------|-------------|----------------------|----------------------|
| No.1 | 82×110 | 29160.0 | 0.1 |
| No.2 | 82×124 | 9720.0 | 0.1 |
| No.3 | 102×102 | 4860.0 | 0.1 |
| No.4 | 127×85 | 1620.0 | 0.1 |
| No.5 | 166×130 | 540.0 | 0.1 |
| No.6 | 121×154 | 180.0 | 0.1 |
| No.7 | 252×319 | 60.0 | 0.1 |
| No.8 | 312×348 | 30.0 | 0.1 |
| No.9 | 781×421 | 10.0 | 0.1 |
| No.10-a | 990×380 | 5.0 | 0.1 |
| No.10-b | 348×334 | 5.0 | 0.1 |

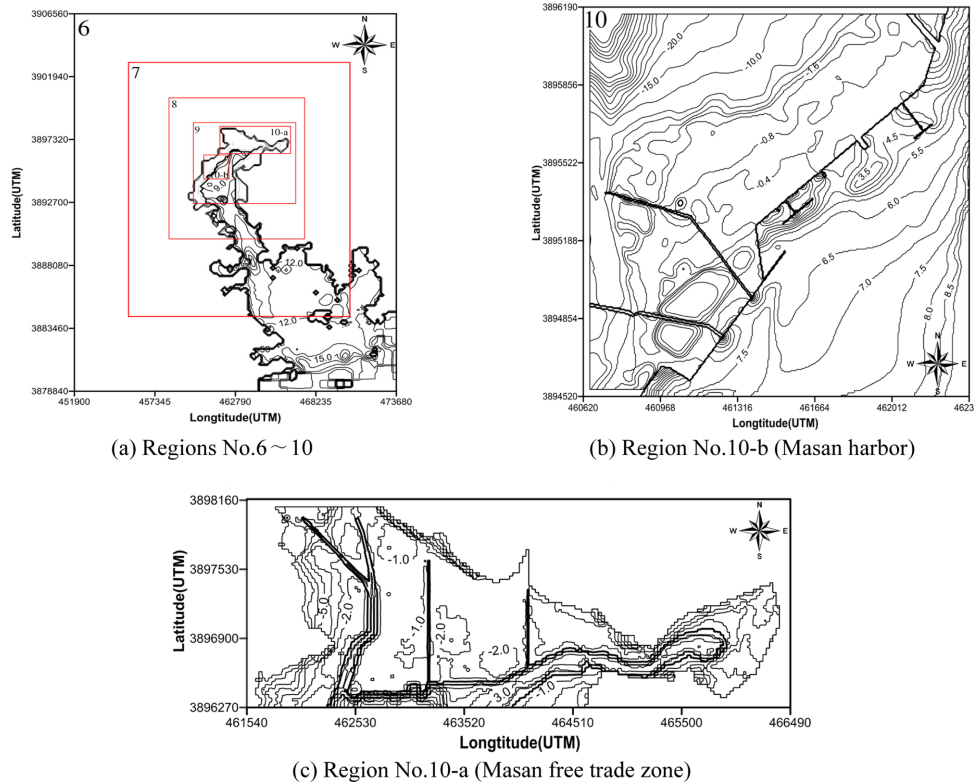


Fig. 3. Computational regions and sub-regions (depth unit : m).

15시경 괌 섬 북서쪽 400 km 부근 해상(16.0°N, 141.5°E)에서 발생하여 느리게 북서쪽으로 이동 후, 9월 9일 09시경에 태풍으로 발달하였다. 그 후 9월 11일 09시부터 전향하기 시작하여 9월 12일 6시부터 북북동으로 빠른 속도로 이동하였고, 9월 12일 18시 제주도 성산포 동쪽 부근 해상을 거쳐 12일 20시에 경상남도 사천시 부근 해안으로 상륙하였다. 우리나라 해안에 상륙한 태풍은 경남 함안을 거쳐 9월 13일에 울진 부근 해안을 통해 동해상으로 진출하였다(Choi et al., 2004). 본 연구에서는 수치모의에 적용된 광역격자의 범위와 태풍이 마산지역을 통과하였을 때의 시간을 고려하여 9월 11일 12시에서 9월 13일 00시까지 총 36시간을 재현하여 수치모의를 수행하였다. 폭풍해일의 경우 Table 2에 제시된 시간

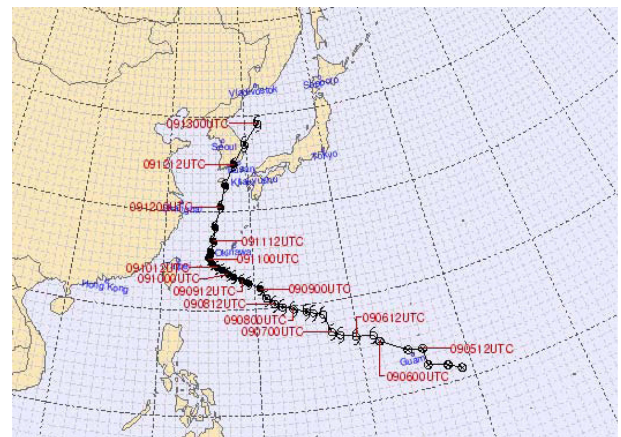


Fig. 4. Track of Typhoon Maemi (Choi et al., 2004).

Table 2. Meteorological information of Typhoon Maemi

| Time (YY/MM/DD/HH) | Long. (°E) | Lat. (°N) | Central pressure (hPa) | Typhoon radius (km) | Moving speed (km/hr) |
|-----------------------|---------------|--------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| 03/09/11/12 | 125.6 | 27.0 | 0.0 | 0.0 | 28.3 |
| 03/09/11/15 | 125.7 | 27.8 | 40.0 | 18.9 | 26.2 |
| 03/09/11/18 | 125.8 | 28.4 | 78.0 | 37.8 | 32.3 |
| 03/09/11/21 | 126.1 | 29.5 | 78.0 | 37.8 | 41.0 |
| 03/09/12/00 | 126.5 | 30.5 | 83.0 | 33.93 | 41.3 |
| 03/09/12/06 | 127.1 | 32.7 | 78.0 | 37.8 | 43.7 |
| 03/09/12/09 | 127.5 | 33.9 | 68.0 | 54.68 | 46.4 |
| 03/09/12/12 | 128.3 | 34.9 | 58.0 | 38.88 | 47.6 |
| 03/09/12/18 | 129.8 | 37.0 | 43.0 | 48.6 | 50.6 |
| 03/09/13/00 | 131.8 | 39.1 | 38.0 | 57.84 | 54.9 |

Table 3. Rainfall measured at Masan station during the period of Typhoon Maemi

| Time (MM/DD/HH) | Rain fall (mm) | Time (MM/DD/HH) | Rain fall (mm) | Time (MM/DD/HH) | Rain fall (mm) | Time (MM/DD/HH) | Rain fall (mm) |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 09/11/12 | 3.0 | 09/11/20 | 3.5 | 09/12/04 | 0.0 | 09/12/12 | 3.0 |
| 09/11/13 | 0.0 | 09/11/21 | 2.0 | 09/12/05 | 0.0 | 09/12/13 | 4.0 |
| 09/11/14 | 0.5 | 09/11/22 | 5.5 | 09/12/06 | 0.5 | 09/12/14 | 1.0 |
| 09/11/15 | 3.0 | 09/11/23 | 32.0 | 09/12/07 | 5.5 | 09/12/15 | 1.0 |
| 09/11/16 | 4.5 | 09/12/00 | 24.0 | 09/12/08 | 7.5 | 09/12/16~ | 0.0 |
| 09/11/17 | 11.0 | 09/12/01 | 2.5 | 09/12/09 | 6.5 | | |
| 09/11/18 | 9.5 | 09/12/02 | 0.0 | 09/12/10 | 9.5 | | |
| 09/11/19 | 6.5 | 09/12/03 | 0.0 | 09/12/11 | 16.0 | | |

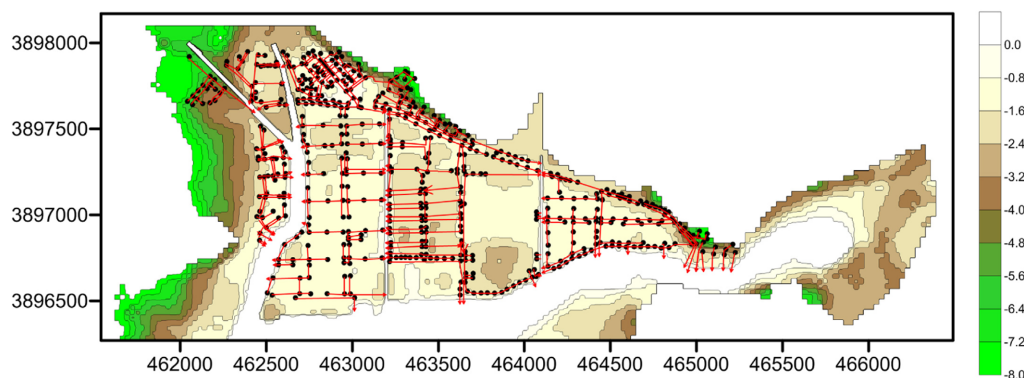


Fig. 5. Sewer networks for Masan free trade zone.

에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 태풍의 중심기압, 반경 및 이동속도를 이용하여 마산지역의 침수범람을 수치모의를 수행하였다. 또한 수치모의 수행시간 동안의 마산지역 강우량은 총 178 mm로서 이때의 시간에 따른 강우량은 기상청의 관측기록으로부터 얻었으며 Table 3에 제시한 바와 같다. 우수관망 수치모형의 경우 우수관망의 정확한 위치와 제원을 파악하기 위해 마산 지방자치 행정기관에서 우수관망 정보를 제공받아 적용하였다. 마산 자유무역지역이 속한 10-a영역의 관정은 총 875개, 우수관로는 총 780개이며, 마산 구항 인근지역의 10-b영역의 관정은 총 1103개, 우수관로는 총 1048개로서 각 관정 및 관로에 대한 자세한 위치 및 제원은 본 논문에는 수록하지 않았다. Fig. 5는 마산 자유무역지역의 우수관망 배치를 보여준다.

4. 수치모의 결과

4.1 마산 자유무역지역

Fig. 6는 마산자유무역지역의 최대 침수범람결과를 기존의 폭풍해일만 고려하였을 때의 결과와 강우와 우수관망 수치모형을 적용하였을 때의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 기존의 폭풍해일 침수범람결과보다 강우와 우수관망 수치모형이 적용되었을 때의 침수심과 침수면적이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 태풍이 내륙지역에 도달하면서 해수범람이 발생함과 동시에 강우에 의한 내륙지역의 침수 및 태풍에 의한 하천, 해수면의 상승으로 우수관망

수치모형을 통해 해수의 역류가 추가적으로 발생함으로써 이러한 결과가 발생한 것이라 판단된다. 이때의 침수범람결과를 더욱 자세히 검토하기 위해 Fig. 6에 표시된 3개 지점 A, B 및 C의 침수심의 시간적 변화를 Fig. 7에 제시하였다. 기존의 폭풍해일 수치모형에서의 침수고의 경우 태풍이 내륙지역에 도달하기 전까지는 아무런 변화가 발생하지 않고, 20시간 이후 태풍이 내륙지역에 도달하면서 침수가 발생하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 A지역의 경우 다른 지역 보다 침수가 늦게 발생하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 A지역이 해안에서 멀리 떨어져 있어 해수 범람도 늦게 발생한 것이라 판단된다.

반면 강우와 우수관망 수치모형을 고려한 폭풍해일 수치모형의 경우 강우의 영향으로 인해 태풍이 도달하기 이전부터 침수가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 태풍이 직접적으로 영향을 미친 시간의 침수심을 비교한 결과 기존의 침수심에 비해 강우와 우수관망 수치모형을 고려하였을 때의 침수심이 더욱 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 태풍에 의한 해수면의 상승으로 우수가 바다로 배수되지 못하고 내륙지역에 쌓이거나 해수의 역류에 따른 영향으로 이러한 결과가 나타난 것이라 판단된다. 또한 A지점의 경우 기존의 침수 결과와 비교하여 상대적으로 더 큰 침수심이 나타난 것으로 확인되었다. 이는 A지역의 지반고가 다른 지역에 비해 낮아 우수가 우수관망을 통해 배수되지 못하고 내륙지역에 쌓이게 되어 이와 같은 결과가 발생한 것이라 판단된다.

4.2 마산 구항 인근지역

Fig. 8은 마산 구항 인근지역의 최대 침수범람 수치모의의 결과를 비교한 것이다. 해안에 가까운 저지대에서는 폭풍해일만을 고려한 경우와 해일 및 강우를 동시에 고려한 경우에 있어서 강우로 인한 미세한 침수심 증가 이외에는 큰 차이가 없었다. 그러나 해안에서 이격된 고지대에서는 강우를 고려한 경우의 최대 침수심이 더 크게 나타났다. 이는 해안에 인접

한 저지대의 우수관거는 범람된 해수로 완전히 침수되어 기능을 상실하였으므로 강우로 인한 최대 침수심 증가효과가 거의 나타나지 않은 반면, 고지대는 강우로 인한 내수가 저지대의 침수로 인한 우수관거 기능저하로 원활하게 배수되지 못해 침수가 증가된 것으로 판단된다.

침수범람 양상을 좀 더 자세히 파악하기 위해 Fig. 8에서 가장 큰 침수피해가 발생한 3개 지점 A, B 및 C에서의 침

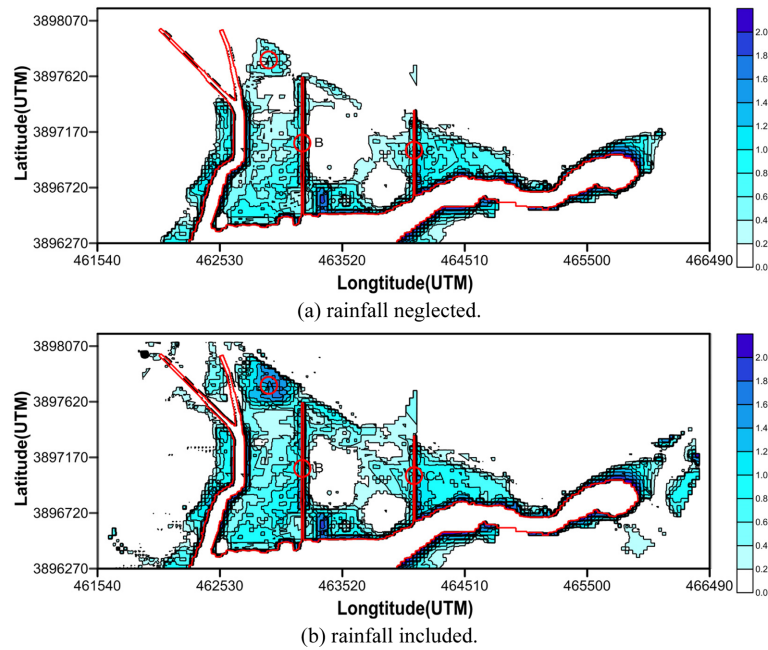


Fig. 6. Distribution of maximum inundation depth at Masan free trade zone.

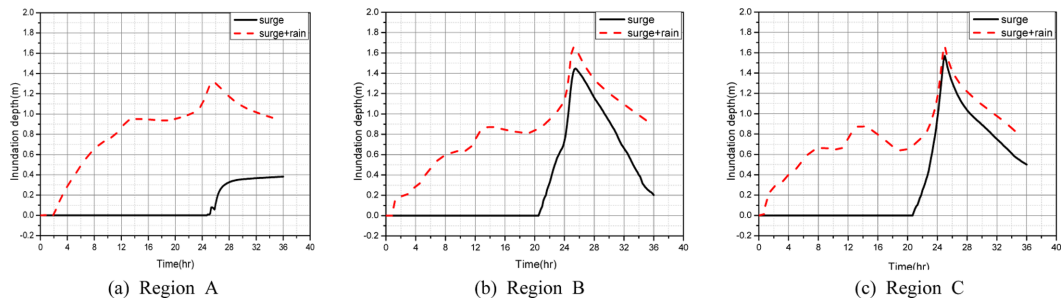


Fig. 7. Time history of inundation depths at Masan free trade zone.

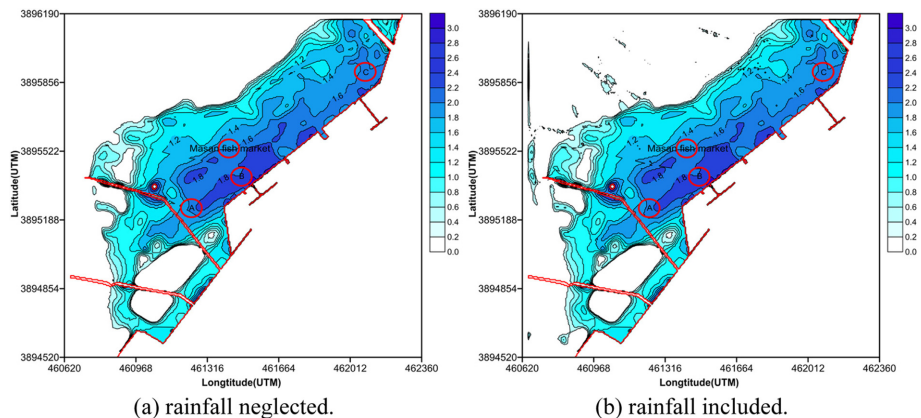


Fig. 8. Maximum inundation depth at city area near Masan harbor.

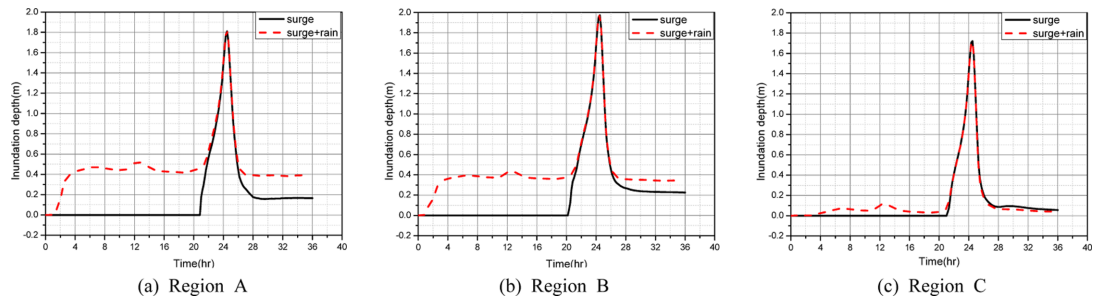


Fig. 9. Comparison of time histories of inundation depths at city area near Masan harbor for the cases of rainfall neglected and included.



Fig. 10. City area near Masan harbor after the construction of sea wall.

수심 시간 변화를 Fig. 9에 제시하였다. 강우를 무시한 기존의 수치모형의 경우 태풍이 마산구항에 도달하는 20시간 이후부터 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 강우와 우수관망 수치모형이 고려된 경우 태풍이 마산구항에 도달하기 전부터 강우로 인한 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 태풍이 마산구항에 도달하여 최대 침수가 발생하였을 때의 침수심을 비교한 결과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 대상지역의 지형적 특성에 따라 침수가 발생하여도 더 이상 침수심에 영향을 미치지 않고 주변으로 흘러나가게 되어 이러한 결과가 발생한 것이라 판단된다. 그리고 A와 B지점보다 상대적으로 지반고가 높은 C지역의 경우 해일 도달전의 침수심이 기존 모형에 의한 침수심과 비교하여 크게 차이가 없는 것으로 확인되었다. 이는 C지역의 지반고가 주변보다 상대적으로 높아 해일이 도달하기 전까지는 우수가 쌓이지 않고 주변으로 흘러 나가므로 이러한 결과가 나타난 것이라 판단된다.

2003년 태풍 매미 내습 시 마산 구항 인근 지역은 큰 침수 피해가 발생하였다. 이에 마산시는 마산 구항 앞바다에 길이 1250 m, 높이 4 m의 방재언덕 설치방안을 검토한 바 있다. 그러나 일부 지역환경단체에서는 방재언덕으로 인해 구항 인근 지역의 해일 침수피해는 경감시킬 수 있지만 인근 다른 지역의 해일 침수피해를 가중시킬 수 있다는 점을 지적하였다. 따라서 마산시가 추진하는 방재언덕이 태풍에 의한 침수범람에 미치는 영향을 검토하기 위해 Fig. 10에 보인 바와 같이 마산 구항 해안에 방재언덕을 설치하고 해일 및 강우 결합 수치모의를 추가적으로 수행하였다. 이번 검토 시에는 방재언덕과 함께 계획할 것으로 예상되는 우수펌프장 등의 추

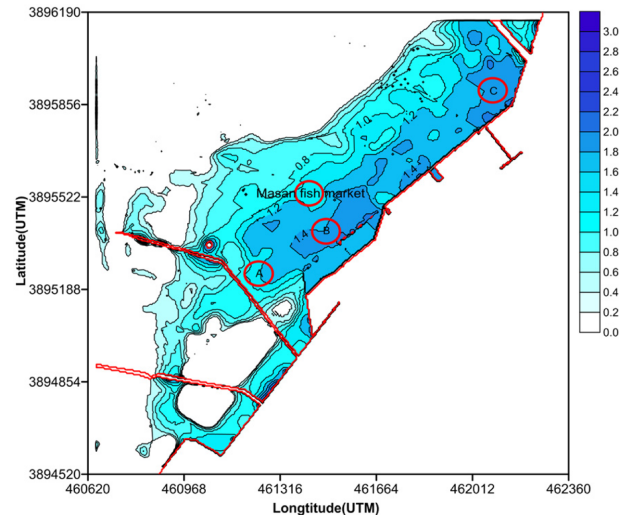


Fig. 11. Distribution of maximum inundation depths at city area near Masan harbor for the case of a sea wall constructed.

가 시설은 자세한 정보를 구할 수 없어 고려하지 않고 현재의 우수관거 시스템을 그대로 적용하였다.

Fig. 11은 마산구항에 방재언덕이 설치되었을 때의 최대 침수심 분포를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 방재언덕이 설치됨으로써 마산 구항 인근 지역 중 방재언덕 배후 지역의 최대 침수심이 전반적으로 감소되었음을 확인할 수 있다. 방재언덕의 유무가 침수심에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 Fig. 9과 동일한 3개 지점에서 침수심의 시간 변화를 구하여 방재언덕을 설치하지 않은 경우와 비교하여 Fig. 12에 제시하였다.

방재언덕으로 보호된 3개 지점에서 최대 침수심이 최소 0.3 m(C지점)에서 최대 0.45 m(A지점)까지 감소하는 것으로 나타났으나, 방재언덕으로 인한 우수의 배수 기능 저하로 해수범람이 시작되기 전까지 약 0.2 m 정도 침수심이 증가하였고, 해수범람 후에도 배수가 방재언덕 설치 전보다 천천히 진행되는 것으로 나타났다. 이는 방재언덕 계획 시 추가될 것으로 예상되는 신설 우수관망과 우수펌프장이 고려되지 않은 결과이므로 이를 반영한다면 최대 침수심과 침수지속시간은 상당 부분 감소될 것으로 예상된다. 따라서 방재언덕 및 우수배제시설을 설치 효과를 자세히 검토하기 위해서는 이러한 시설물들의 상세한 정보가 필요하다. 또한 본 연구에 적용한 해일-강우-우수관망 결합모형에 우수펌프장 기능 등을 추가

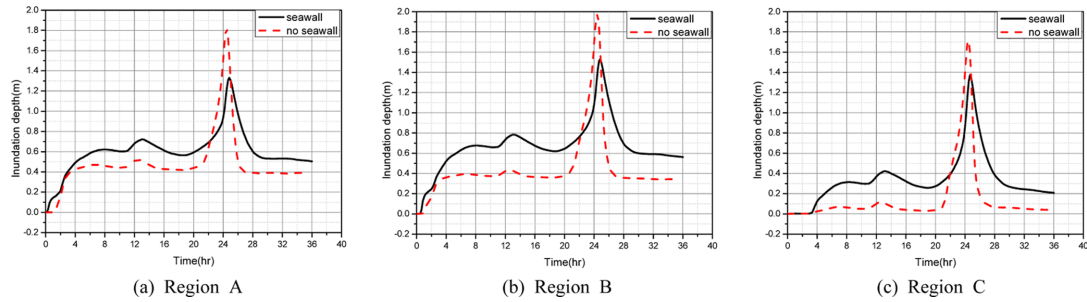


Fig. 12. Comparison of time histories of inundation depths for the cases of before and after the construction of sea wall.

하고, Kim et al.(2010)의 연구에서와 같이 하천 상류 지역에 대한 강우-유출 모형을 접속시켜 하천 상류 유입 유량을 경계조건으로 추가하는 노력이 필요하다. 본 연구의 이러한 한계점에도 불구하고 방재시설물 설치로 인해 예상되는 침수범람 양상이 잘 표현되고 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 2003년 마산지역에 재산 및 인명피해를 입힌 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일-강우-우수관망 결합 수치모형을 이용하여 침수범람 수치모의를 수행하였다. 그 결과, 폭풍해일만을 산정하여 해안도시의 침수범람 수치모의를 수행한 결과와는 달리 해수범람이 발생하기 전부터 강우의 영향으로 지상부 영역에서 침수가 발생하는 것으로 나타났으며, 해수범람 시에도 기존의 결과보다 더 큰 침수피해가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서 구축된 결합 수치모형을 이용하여 침수피해를 저감시키기 위해 설치하는 방재언덕의 효과를 확인하기 위한 수치모의를 추가적으로 수행하였다. 그 결과 방재언덕이 배후지역에 대해 해일에 의한 최대 침수심을 저감시키는 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 방재언덕으로 인한 우수의 배수 기능 저하로 해수범람이 시작되기 전부터 침수심이 증가하였고, 해수범람 후에도 방재언덕 설치 전보다 배수가 천천히 진행되는 것으로 나타났다. 이는 방재언덕 계획 시 추가될 것으로 예상되는 신설 우수관망과 우수펌프장이 고려되지 않은 결과이므로, 이러한 방재시설물들의 침수저감 효과를 정량적으로 검토하기 위해서는 시설물들의 상세한 정보와 함께 본 연구의 수치모형에 우수펌프장 기능 등을 추가하고, 하천 상류 지역에 대한 강우-유출 모형을 접속시켜 개선할 필요성이 있다. 본 연구의 이러한 한계점에도 불구하고 방재시설물 설치로 인해 예상되는 침수범람 양상이 잘 표현되고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(2단계 항만권역 태풍폭 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, 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).

- Kim, M.K., Kim, J.H. and Yoon, J.S. (2010) Study of Inundation Flow Model Consider of Sewerage System in Masan. Proceeding of 2010 Conference of Korea Association of Ocean Science and Technology, Jeju, Korea, 2297-2300 (in Korean).
- Mituyasu, H. and Kusaba, T. (1984). Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind. *Journal of Natural Disaster Science*, 6(2), 43-50.
- Myers, V. A. and Malkin, W. (1961). Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories. U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- 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).
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2012). Typhoon Surge Simulation on the West Coast Incorporating Asymmetric Vortex and Wave Model on a Fine Finite Element Grid. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 166-178 (in Korean).
- Suh, S.W. and Lee, H.Y. (2012). Inundation Simulation on a Vertical Dock Using Finite Element Storm Surge Model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(4), 235-246 (in Korean).
- Yoon, S.B., Lee, J., Kim, K.H. and Song, J.H. (2014) Development of storm sewer numerical model for simulation of coastal urban inundation due to storm surge and rainfall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(5), 292-299 (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).

Received 25 October, 2014

Revised 26 December, 2014

Accepted 29 December, 2014