

태풍 Maemi 내습시 녹산국가산업단지 인근에서 침수해석 Inundation Analysis by Typhoon Maemi around Noksan Industrial Complex

김도삼¹, 김지민², 천재영³, 이성대⁴
 Do Sam Kim¹, Ji Min Kim², Jae Yeong Chen³ and Sung Dae Lee⁴

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높으며, 국토가 좁고 인구가 많은 우리 나라와 같은 환경에서는 연안매립으로 대표되는 해안지역 개발이 필수적이고 대부분이 낮은 지반고와 천단고로 조성됨에 따라 폭풍시에 해안범람이 빈번하게 발생하고 이로 인한 피해도 엄청나다. 해안범람은 조석, 폭풍해일, 지진해일 등의 장주기 해수위 변동과 그로 인한 고파랑 등의 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이 중에서 조석과 같이 항상 존재하는 경우에는 설계에 충분히 반영될 수 있어 큰 문제를 야기시키지는 않지만, 폭풍해일의 경우에는 이상파랑시에 발생하고 특히, 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되는 경우는 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 제내지에서 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 줄 뿐 아니라 사회적 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서, 제내지내의 범람구역의 정확한 추정 및 이를 통한 적절한 경보나 대책방안의 확립이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 도로와 건물의 복잡한 배치에 따른 침수의 경향을 예측하고 제내지의 범람특성을 규명하고자 하였으며 이를 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지에 적용하였다. 이에 대상지역에 대하여 추산된 고파랑과 폭풍해일을 고려하여 월파랑을 산정하고 산업단지내의 범람을 천수방

정식으로 예측하였다.

2. 이론적 배경

2.1 파랑산정의 기본방정식

파랑산정에 사용한 SWAN모델(Hasselmann et al., 1973)의 기본식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial X} C_x N + \frac{\partial}{\partial Y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 국소적인 시간변화를 나타내며, 두 번째와 세 번째 항은 이류항을 나타낸다. 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는 상대주파수의 변화를 나타내고, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 나타낸다. 그리고, C_x, C_y 는 각각 X, Y 방향의 전파속도(군속도)를, C_σ 와 C_θ 는 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. 우변의 항 $S(=S(\sigma, \theta))$ 는 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지입출력을 나타낸 것으로, 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

2.2 월파랑산정의 기본방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면, 월파

1 한국해양대학교 건설환경공학부 교수
 2 발표자: 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정
 3 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정
 4 한라대학교 토목공학과 교수

량 추정에 관한 기초방정식은 연속방정식(2)와 Navier-Stokes 방정식을 확장한 운동방정식(3), (4) 및 이류방정식(5)로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x w u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g$$

$$\frac{\partial (\epsilon_v F)}{\partial t} + \frac{\partial (\epsilon_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial (\epsilon_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평, 연직좌표, u, w 는 x, z 방향의 유체입자 속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, v_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, g 는 중력가속도, γ_v 는 유체의 공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적투과율을 나타낸다. 또한, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 부가질량을 포함한 계수이다. 그리고, S_p, S_u, S_w 는 조파소스항, R_x, R_z 는 항력항이다.

2.3 범람예측의 기본방정식

평면 2차원 범람모델의 기본식은 연속방정식(6)과 운동방정식(7), (8)로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (7)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (8)$$

여기서, h 는 수심, M 과 N 은 x, y 방향의 선유량 ($M = uh, N = vh$)을 각각 나타내며, H 는 수위 ($H = h + z$, z 는 지반고)이다. 그리고, τ_{bx}, τ_{by} 는 x, y 방향의 저면전단응력으로 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (10)$$

여기서, n 는 Manning의 조도계수를 나타낸다. 수치계산의 이산화는 시간항에 대해서는 전진 차분근사를 이류항에 대해서는 Doner Cell법을 적용하며, 저면마찰항에 대해서는 중앙차분근사를 적용한다. 그리고, 전체 계산영역에 대해 선유량과 유속은 격자의 경계에, 수심은 격자의 중심에 위치시키는 엇갈린격자를 채용하며, Leap-Frog법을 사용하여 계산을 수행한다.

본 연구에서는 범람수의 선단부를 포함한 범람수의 불연속을 방지하기 위하여 인접한 지역에 비해 지반고가 높은 경우에 식(11)의 단락식을, 인접한 지역에 비해 지반고가 낮은 경우에 대해서는 식(12)의 월류식을 각각 적용하여 선유량을 산정한다.

$$M_o = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (11)$$

$$M_o = \mu' h \sqrt{2gh_l} \quad (12)$$

여기서, h_h 는 지반고가 높은 지역에서의 수심, h_l 은 월류시의 수심을 나타내며, $\mu = (2/3)^{3/2}$, $\mu' = 0.35$ 로 하였다.

그리고, 침수역과 지반역의 경계는 수심의 최소치 $\epsilon = 0.001m$ 에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 이 때 ϵ 이하의 지역에 대해서는 지반역, ϵ 이상의 지역에 대해서는 침수역으로 표현된다. 또한 침수역이 지반역으로 변하는 경우에 발생할 수 있는 (-)수심에 대해서는 수심을 영(零)으로 하였다.

3. 수치해석

3.1 대상영역 및 계산조건

본 연구에서는 태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 해역

Table 1. Design wave conditions in deepwater and water levels at Noksan industrial complex

Area	격자번호	Hs(m)	Ts(s)	Dir	Approx. H.H.W(m)	Storm Surge Height(m)	Total Level(m)
Noksan	6360(N34.50°,E128.55°)	12.4	15.0	S25°E	1.776	1.69	3.466
		12.8	15.0	S			

Table 2. Computation conditions

단면	지반	수심(m)	Hs(m)	Ts(s)	수치모형에 의한 월파량 ($m^3/s/m$)	수리모형에 의한 월파량 ($m^3/s/m$)
Type-A	점성토	E.L.(-)0.3m이하	1.46	15.0	0.0113	0.059
Type-B	사질토	E.L.(-)0.3m ~ E.L.(-)0.9m	1.58	15.0	0.0116	0.063
Type-C	사질토	E.L.(-)0.9m ~ E.L.(-)4.3m	1.49	15.0	0.0116	0.113

을 대상으로 SWAN모형을 사용하여 천해파랑을 추산하였다. 태풍 Maemi내습시 해당지역에 영향을 미친 심해파랑은 부산항만 동방파제 전면에서 실측되어진 파고값을 검증데이터로 사용하여 역추산된 심해파랑을 사용하였다(POSCO건설, 2004; 한국컨테이너부두공단, 2003). 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였으며, 협역에서 충분하지 않은 수심데이터에 대해서는 실제 측량데이터를 추가하여 사용하였고, 범람해석수행에 필요한 지반고데이터는 Land Desktop3를 이용하여 수치지형도에서 추출되었다. 바람에 의한 파고의 증감을 고려하기 위해서 태풍 Maemi내습시 최대폭풍해일고의 발생시간인 2003년 09월 12일 22시의 바람장데이터를 사용하였다. 또한, 계산에 사용된 심해설계파 제원과 폭풍해일고(허동수 등, 2006) 및 조위(해양수산부, 2000) 등을 Table 1.에 제시한다.

3.2 천해파랑 산정

Fig. 1.은 Table 1.에 제시된 조건으로부터 얻어진 녹산국가산업단지 전면에서 산정된 파고분포도의 일례(Hs=12.4m, Ts=15.0sec, Dir=S25°E)를 나타낸 것이다.

녹산국가산업단지 전면해역에 대해서 산정한 유의파고를 Fig. 1.에 나타내며, 이 때 본 계산에서는 녹산국가산업단지 전면해역에 발생될 수 있는 중북풍의 영향을 방지하기 위하여 녹산국가산업단지 전면호안에 설치된 피복석의 영향을 고려하지 않는 것으로 하였다.



Fig. 1. Wave height distribution of typhoon Maemi around Noksan industrial complex.



Fig. 2. Snapshot of overtopping(Type-B).

3.3 월파량 산정

Fig. 1.의 결과로부터 녹산국가산업단지 전면에서 얻어지는 최대유의파고와 유의주기를 입사파조건으로 하여 녹산국가산업단지 전면호안에 대한 월파량을 산정하였다. 여기서, 호안의 단면을 형상과 지반 그리고 수심 등의 조건을 고려하여 3개의 단면으로 나누어 계산을 수행하였으며, 각각의 제원은 Table 2.에 나타낸 것과 같다.

Fig. 2.는 본 계산으로부터 얻어진 월파현황의 일례를 나타내며, 산정된 월파량을 Table 2.에 나타낸다. 이러한 값은 배후에 민가, 배후시설 밀집

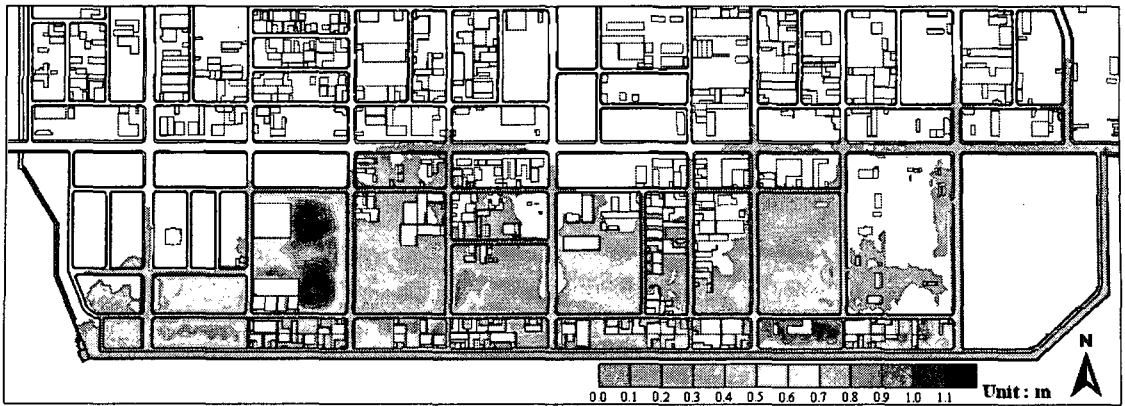


Fig. 3. Spatial distribution of inundation height.

으로 월파, 물보라 등의 유입으로 중대한 재해가 예상되는 지역에 대한 허용월파량 $0.01m^3/s/m$ (해양수산부, 2000)을 초과한다. 그리고, 수리모형실험결과(한국토지공사, 2005)에 비해 다소 과소평가되었음을 알 수 있다.

3.4 범람해석

전절에서 얻어진 월파량과 수리모형실험에서 얻어진 월파량으로 녹산국가산업단지내에서 범람을 예측하였다. 이 때 호안의 선단부에서 월파하는 것으로 하였으며, 녹산국가산업단지의 도로 및 건물 등을 세밀히 고려하기 위하여 격자는 x축으로 5m, y축으로 5m로 각각 설정하여 계산하였다. 또한, 계산시간은 3시간으로 하였으며, 조도계수로 도로는 0.04, 건물은 밀도비에 따라 0.03~0.8의 값을 적용하였다.

Fig. 3.은 본 계산에서 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 녹산국가산업단지내의 두 블럭 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블럭은 0.7m~1.2m정도 침수가, 두 번째 블럭에서 부분적으로 0.7m이상의 침수가 발생하나 호안전면에서 멀어질수록 0.3m이하로 감소함을 알 수 있다.

수리모형실험(한국토지공사, 2005)은 단면2차원으로 수행되었기 때문에 본 연구와 직접적인 비교는 어렵지만 단면에 대해서만 비교하면 단면 Type-A, B, C에 대해서 호안으로부터 내측거리 30m 지점의 침수고는 0.77m~0.91m, 80m지점의 침수고는 0.74m~0.89m, 130m지점은 0.20m~0.23m로 본 연구의 결과와 경향이 매우 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연안역의 범람을 예측하기 위해

여 고파랑-폭풍해일-월파-범람이라는 체계적인 해석이론을 제시함과 동시에 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 해역을 대상으로 태풍 Maemi 내습시에 범람을 해석하였다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 방법을 적용하면 연안역에서 범람을 추정할 수 있고, 이의 결과를 사용하여 연안재해의 예측, 방재계획의 수립, 위험도의 작성 등에 충분히 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 건물 등의 지하로 유입되는 침수량을 고려하여 보다 정도 높은 해석을 수행하고자 한다.

참고문헌

- 부산광역시 (2004). 녹산공단 해일피해 방재대책 수립용역 종합보고서.
- POSCO건설 (2004). 03-00부두 태풍피해복구 시설 공사 구조 및 수리계산서(제2권 폭풍해일 및 태풍 '매미' 시 심해파 추정).
- 한국토지공사 (2005). 녹산산단 태풍「매미」피해원인 분석용역 최종보고서.
- 한국컨테이너부두공단 (2003). 부산항 컨테이너 크레인 태풍피해 원인조사 용역보고서.
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성(2006). 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, 한국해양공학회지, 제20권, 제3호, pp 37~45.
- 해양수산부 (2000) 항만 및 어항설계기준.
- Hasselmann, K., and T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P.Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.