

지구온난화에 의한 해양환경변화와 해수면 상승이 연안방재시스템의 처오름과 월파에 미치는 영향

Effects of sea level rise and intensified sea state due to Global warming on the run-up and overtopping across the coastal defense system

조용준¹, 송태관², 김민균³

Young Jun Cho¹, Tae Kwan Song² and Min Kyun Kim³

1. 서 론

최근 급속히 진행되고 있는 지구온난화로 지난 10년간 우리나라 주변 해수온은 약 0.67°C 상승하였으며 이로 인한 해수면 상승이 진행되고 있다. 해수온도의 상승으로 인해 북태평양 남서부에서 발생하여 한반도를 향해 접근하는 과정에서 그 세력이 약해지던 열대성 저기압은 태풍에 공급될 수 있는 수증기 량의 증가로 그 세력을 유지할 수 있다. 이는 향후 우리가 일찍이 경험하지 못한 초대형 태풍과 폭풍해일이 서해안 일대를 강타 할 수 있음을 시사한다.

차세대 우리나라 성장동력이자 아이콘인 다양한 문화적 콘텐츠를 배후에 지니게 될 새만금 방조제 처럼 우리나라 연안방재시스템의 대부분은 준설토 매립으로 축조되어 침식에 대단히 취약하다. 또한 도파고 혹은 월파량을 줄이기 위해 과거 평균해수면 인근에 거치된 소단으로 인해 수면이 상승하는 경우 상당한 월파가 유발될 수 있어 방조제의 안전은 위협 받게 된다. 뿐만 아니라 황해 남동측에 존재하는 帶狀 泥土층 등에서 공급되는 세립토사의 퇴적이 진행되는 것으로 추정되므로 이러한 퇴적에 따른 수심 감소로 인해 천수효과는 극대화되어 새만금 방조제의 안전을 위협할 수 있다.

그동안 꾸준히 개선된 PC계산능력의 향상에 기초하면 최근 가장 강건한 파랑모형인 Navier-

Stokes을 정교한 수치기법인 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)을 활용하여 직접 해석하는 수치파랑모형이 최근 완성단계에 이른 것으로 보인다 (Dalrymple and Knio: 2000, Dalrymple and Rogers: 2006, 조용준과 이현: 2007, 조용준과 김민균: 2007, 조용준 등: 2008, 조용준과 김민균: 2008).

본 연구에서는 먼저 지구온난화로 인한 우리나라 서해 해수면 증가량을 산정하고 이어 새만금 방조제에 피해를 끼칠 수 있는 슈퍼 태풍의 세기와 접근 경로를 정의한다. 둘째 수치모의된 기상해일의 정량적 평가가 이루어진다. 기상해일의 정량적 평가에 기초하여 새만금 전면해역을 아우르는 광활한 해역을 대상으로 차세대 풍성과 모형인 SWAN에 기초하여 새만금 방조제의 전면해역에 대한 파황을 재분석하였다. 이어 수치모의된 결과를 토대로 해수위 증가가 기상해일과 파랑의 천수 거동에 미치는 영향을 평가한다. 이어 가장 강건한 파랑모형인 Navier-Stokes과 정밀수치해석 기법인 SPH와 LES 난류모형을 활용하여 최대 처오름 높이, 월파량을 산정한다.

2. 기본방정식

2.1 동수역학 모형

기본 방정식으로는 가장 강건한 파랑모형인 Navier-Stokes식과 질량보존식을 사용하였으며 이를 나열하면 다음과 같다.

1 서울시립대학교 토목공학과 교수

2 발표자: 한국농촌공사 농어촌연구원 수리시험연구실 팀장

3 서울시립대학교 토목공학과 박사 후 과정

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_\nu + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_t \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, p 는 압력, \mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{u} 는 유속, $\boldsymbol{\tau}_\nu$ 와 $\boldsymbol{\tau}_t$ 는 각각 점성에 의한 응력과 sub-particle scale에서의 난류응력 혹은 잔차응력을 나타내며 각각 다음과 같이 기술된다.

$$\boldsymbol{\tau}_{\nu_{ij}} = 2\rho\nu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right), \boldsymbol{\tau}_{t_{ij}} = 2\rho\nu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \nu_t = (C_s \Delta l)^2 |S| \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 S_{ij} 는 strain rate tensor, δ_{ij} 는 Dirac delta function, ν 는 dynamic viscosity, ν_t 는 eddy viscosity, Δl 은 입자간격을 나타내며 차용된 입자망에 용해되는 난류의 규모도로 해석될 수 있으며 C_s 는 Smagorinsky 상수를 각각 나타낸다 (Smagorinsky, 1963). 식 (2)에 기술된 압력은 밀도에 종속하며 압력에 대한 정보를 얻기 위해서는 추가적으로 시 영역의 매 구간별로 Poisson식을 해석하는 것이 고전적인 방법이나 본 연구에서는 이러한 번거로움을 피하기 위해 Monaghan(1994)에 기초하여 다음과 같이 정의되는 상태방정식을 차용하여 해석하였다(Batchelor, 1974).

$$p = K \left[(\rho/\rho_0)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

여기서, $\gamma=7$, $\rho_0 = 1000 \text{kg/m}^3$ 는 기준밀도로서 식 (5)는 밀도의 미세한 변화로 인해 압력에는 큰 변화가 진행된다는 것을 이야기 하며, 이러한 성질은 압축성 유체의 일반적 특성과 부합한다. 계수 K 는 유체가 실질적으로 비압축성 조건을 충족하도록 다음과 같이 조절된다.

$$K = \frac{200\rho g H}{\gamma} \quad (6)$$

2.2 저면 경계조건

저면을 구성하는 입자도 수체를 구성하는 입자와 더불어 식 (1), (2)에 기초하여 진화하나 시 영역에서 하나의 적분과정이 완료될 때마다 다시 $\mathbf{u}=0$ 의 유속을 부과하기 위하여 No slip 경계조건을 구현하였다. 이와 더불어 경우에 따라 유체 입자가 저면을 구성하는 입자층 사이에 투과하는 수치적 오류는 유체입자가 저면을 구성하는 입자층에 임계치 r_0 이하로 접근하는 경우 인위적인 반발력을 부과하여 해결하였다. 반발력 PB_{ij} 를 기술

하면 다음과 같다.

$$PB_{ij} = \begin{cases} D \left[\left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{n_1} - \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right)^{n_2} \right] \frac{\mathbf{x}_{ij}}{r_{ij}^2}, & \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right) > 1 \\ 0, & \left(\frac{r_0}{r_{ij}} \right) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $n_1=12$, $n_2=4$ 이고, r_{ij} 는 유체입자와 저면을 구성하는 입자 사이의 이격거리를 나타내며 D 는 유동계에 종속하는 계수로 보통 최대유속의 제곱 정도의 크기로 조절된다.

2.3 SPH정식화

SPH기법에서 유동계는 일련의 유체입자로 해석되며 이산적으로 거처되는 있는 각 입자에서의 물리량과 그 미분량은 가중함수(kernel function) W 를 활용하여 표현된다.

식(1), (2)는 유체입자를 중심으로 다음과 같이 정식화 된다(Dalrymple과 Rogers, 2006).

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (u_i - u_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} = & - \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \\ & + \sum_j m_j \left(\frac{\tau_{\nu_i}}{\rho_i^2} + \frac{\tau_{\nu_j}}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \\ & + \sum_j m_j \left(\frac{\tau_{t_i}}{\rho_i^2} + \frac{\tau_{t_j}}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + g \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\nabla_i W_{ij} \doteq \{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)/r_{ij}\} \{\partial W_{ij}/\partial r_{ij}\}$ 이며, \mathbf{x}_i 와 \mathbf{x}_j 는 입자 i , j 의 위치벡터, r_{ij} 는 유체입자간의 거리를 나타낸다.

3. 수치모의

수치해석한 새만금 방조제 전면해역 해양환경변화를 토대로 평균해수면은 현재 기준조위 E.L 12m 보다 각각 $\Delta h = 1.5\text{m}$ [RUN1], 2.5m [RUN2] 상향 조정하였으며 비교를 위해 E.L 12m[RUN3]인 경우도 포함하였다. 이러한 수치는 Super typhoon에 의한 기상해일고 1.0m, 지구온난화에 의한 해수면 상승 분 0.5m를 반영한 수치이나 월파를 허용하지 않는 방조제의 특성상 좀더 보수적 평가를 위해 $\Delta h = 2.5\text{m}$ 인 경우도 포함하였다. 단면실험을 위한 대표단면으로는 새만금 방조제 중 태풍 취약 구간으로 거론되는 A'-A' 구간(Fig.1 참조)을 선정하였다. 파고와 주기는 SWAN 수치모의결과를 토대로 각각 $H_{\max}=6\text{m}$, $T=10.4\text{s}$ 로 선정하여 Dean과 Dalrymple(1991)의 조파이론과 새만금 방조제 기반

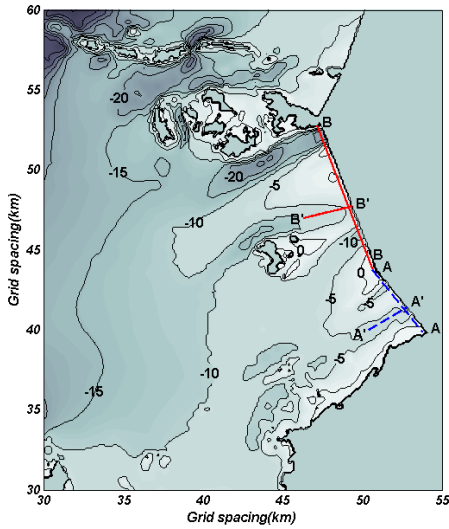


Fig. 1. Bathymetry around Saemangeum Sea dike

부($x=0$)로부터 300m 이격하여 거치한 wave paddle를 사용하여 조파하였다(Appendix A 참조). Fig.2에 도시된 계산영역은 0.5m씩 이격하여 거치한 유체입자를 사용하여 수치모의하였다. 각 경우에 대해 시간간격 $\Delta t=0.001s$, Smagorinsky계수 C_s 는 Moin과 Kim(1982)의 연구결과에 기초하여 기존에 선호되던 0.12보다 적은 0.06으로 동일하게 유지하였다.

Fig.3에는 RUN 1, 2, 3에서의 초기 plunger 생성시 수면형을 비교하여 도시하였다. 수치모의 결과 RUN 1, 2의 경우 목표한 파랑이 조파판에서 정확히 조파되어 정연하게 방조제를 향해 진행되는 것을 알 수 있었으나 RUN 3의 경우 $x=-190$ 전후에서 쇄파가 진행되었다. 이러한 현상은 RUN 3에서 비선형 정도를 나타내는 데 흔히 사용되는 수심 대비 진폭비($a/h=0.25$)가 상대적으로 크다는 사실에서 부분적으로 설명될 수 있으나 본 연구에서 저면에 적용된 no-slip 경계조건도 일정 부분 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

4. 결 론

지구온난화에 의한 해양환경변화와 해수면 상승이 연안방재시스템의 처오름과 월파에 미치는 영향을 가장 강건한 파랑모형인 Navier-Stokes방정식,

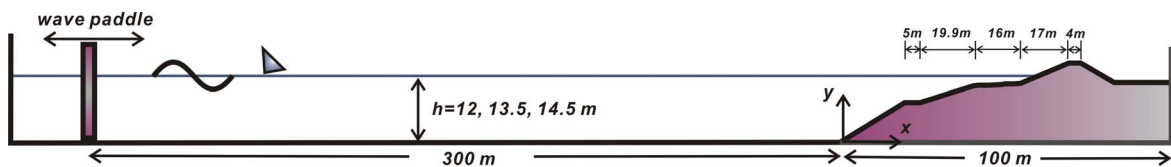


Fig. 2. Schematic sketch of numerical wave flume

SPH, LES기법을 활용하여 수치 해석하였다. 해수면 상승은 1992년 IPCC에 의해 설정된 시나리오 IS92a(Best Estimate), IS92e(High Estimate)에 의거 2100년까지 각각 50cm, 100cm 증가하는 것으로 추산하였다. 해수온도의 상승으로 더욱 강력해진 태풍을 Super typhoon이라 정의하고 과거 새만금 방조제를 위협했던 Irving(7910)과 Prapiroon (0012)의 이동경로를 토대로 총 10개의 Super typhoon의 경로를 선정하여 Maemi(0314)급의 위력을 부여하였다. 선정된 Super typhoon을 대상으로 수치모의를 수행한 결과, Super typhoon에 노출시 새만금 방조제 전면해역 수심은 최대 1m까지 상승하였다. 이와 더불어 최근 한국해양연구소를 중심으로 상향 조정된 설계파고와 주기를 토대로 새만금 방조제 인근 해역 파황을 차세대 풍성과 모형인 SWAN을 사용하여 수치모의 하였다.

우리의 예상대로 이러한 해양환경변화와 해수면 상승은 새만금 방조제 사면에서의 처오름과 월파에 상당한 영향을 미쳤으며 IS92a의 경우 plunging 형태의 쇄파가 이차소단 전면부에, IS92e의 경우 plunging 형태의 쇄파가 이차소단에서 발생하였다. 또한 쇄파로 인한 거친 전단류가 방조제 정점을 지나 상당량 월류하였다. 이러한 결과는 처오름을 저감하기 위해 EL 12m에 거치된 이차소단이 물에 잠김으로써 무력화되어 발생한 것으로 보이며 현재 운영중인 연안방재시스템의 전면적인 재검토가 필요함을 시사한다.

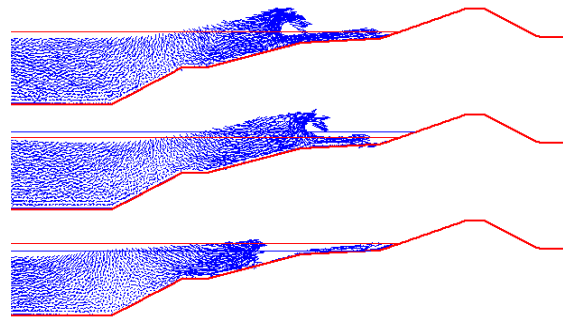


Fig. 3. Change in the incipient breaking point by varying depth(RUN1: Top, RUN2: Middle, RUN3: Bottom)

Appendix A

A.1 해수온도 상승에 의한 슈퍼태풍

미 합동태풍경보센터(JWTC)의 자료를 활용하여 1975~2004년 사이에 한반도에 상륙한 태풍을 분석하면 1970년대에 초속 20m안팎이던 태풍의 순간 최대풍속이 2000년대에 이르면 초속 40m로 급상승하였다. 이는 바람의 세기가 매년 초속 0.7m씩 빨라지고 있음을 의미하며 이러한 현상은 지구 온난화에 의한 해수면 온도 상승으로 태풍에 공급될 수 있는 수증기량의 증가로 발생된 것으로 판단된다. 최근 급속히 진행되고 있는 지구 온난화는 앞으로도 상당기간 지속될 것으로 보인다.

이러한 인식에 기초하여 본 연구에서는 Irving (7910)과 Prapiroon(0012)의 이동경로(Fig.A1 참조)를 토대로 Maemi(0314)급을 강도를 부여하여 Super typhoon을 재현하였다.

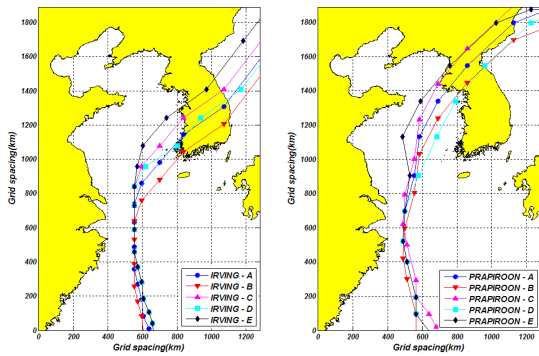


Fig. A1. Hypothetical tracks of super typhoon via the west sea

A.2 해수온도 상승에 의한 슈퍼태풍

해수면 용기가 기상해일에 미치는 영향을 평가하기 위해 새만금 전면해역을 아우르는 광활한 해역을 대상으로 전 절에서 선정된 슈퍼 태풍의 세기와 접근 경로를 대상으로 MIKE 21 HD 모듈을 사용하여 수치모의 하였다. Fig. A2(a)에는 정의한 Super typhoon으로 발생된 기상해일고의 분포를 도시하였다.

A.3 새만금 방조제 인근해역의 파황

해수면 상승과 보다 강력해진 태풍에 적절히 대처하기 위해 최근 한국해양연구소를 중심으로 상향 조정된 설계파고와 주기를 토대로 새만금 방조제 인근 해역 파황을 차세대 풍성과 모형인 SWAN을 사용하여 수치된 파고분포를 Fig. A2(b)에 도시하였다. 새만금 방조제 A'-A' 구간에서의 최대파고는 위도가 지니는 차폐효과로 W, NWN

방향에서 발생하며 최대 $H_s=3.0m$ 에 이르는 것으로 판단된다.

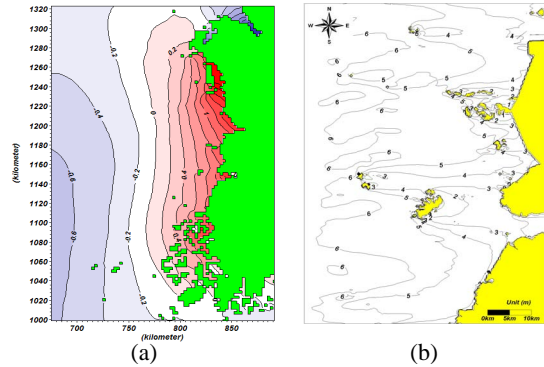


Fig. A2. Storm surge height due to Super typhoon and wave height distribution near Saemangeum Dike

참고문헌

- 조용준, 김민균, 2007, Immersed water channel과 water chamber로 구성된 환경친화적 직립방파제의 해수교환효과와 파에너지 축출체로서의 가능성에 대하여, 대한토목학회논문집, 27, 4B, pp. 441-453.
- 조용준, 이현, 2007, Lagrangian Dynamic Smagorinsky 난류모형과 SPH를 이용한 쇄파역에서의 비선형 천수거동에 관한 연구. 한국해안해양공학회, 제19권, 제1호, 81-96.
- 조용준, 김권수, 유하상, 2008, Swash 대역에서의 해빈표사 부유거동에 관한 연구. 대한토목학회 논문집, 제 28권, 제1호, 95-109.
- 조용준, 김권수, 2008, 체체의 갑작스런 붕괴로 인한 충격과 수치해석 - SPH를 중심으로, 대한토목학회 논문집, 제28권, 제3B호, 261-270.
- Batchelor, G. K., 1974, An Introduction to fluid dynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK
- Dalrymple, R. A., Dean, R. G., 1991, Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific
- Dalrymple, R. A. and Knio, O., 2000, SPH Modelling of water waves. Proc. Coastal Dynm., Lund 2000.
- Dalrymple, R.A. and Rogers, B.D., 2006, Numerial modeling of water waves with the SPH method, Coastal Engineering, Vol.53, 141-147.
- Mohaghan, J. J., 1994, Simulating free surface flow with SPH, Journal of Computational Physics, 110, pp. 399-406.
- Moin, P. and Kim, J., 1982, Numerical investigation of turbulent channel flow, J. Fluid Mech., 118, 341-377.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with primitive equations, I. the Basic Experiment, Monthly Weather Review, Vol. 91, 99-164.