

해수교환방파제가 설치된 주문진항에서의 파고분포 해석

김남형† · 윤현철* · 구본수**

†제주대학교 토목공학과/해양과환경연구소교수, *제주대학교 대학원 토목해양공학과, **(주)건화 항만부 이사

The Analysis of Wave Height Distribution in the Jumunjin Fishery Port with Seawater-Exchange Breakwater

Nam-Hyeong Kim† · Hyeon-Cheol Yun* · Bon-Soo Koo**

†Department of Civil Engineering/Marine & Environmental Research Institute, Jeju National University, Jeju, 690-756, Korea

*Department of Civil and Ocean Engineering, Graduated School, Jeju National University, Jeju, 690-756, Korea

**Harbor Division, Kunhwa Corporation, Seoul, 702-22, Korea

요 약 : 항내 정온도를 산정 할 때에는 불규칙파의 회절과 반사가 정확하게 계산되어지는 것이 중요하다. 본 연구에서 수치모형의 기본방정식은 환경사 방정식을 사용하였으며, 이는 파랑 거동에 큰 영향을 미치는 비선형성을 고려할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고, 삼각격자망은 유한요소법을 이용하여 생성되었다. 비선형성의 효과를 검증하기 위하여 본 연구에서 개발된 수치모형의 계산결과들은 다른 연구자들의 실험결과 및 수치결과와 비교되어졌다. 그 결과, 비선형성의 파랑을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 파랑해석에 더 정확하다는 것을 보여주었다. 본 모형을 적용하기 위하여 해수교환방파제가 설치되어 있는 주문진항에 파고분포가 계산되어졌다. 수치해석결과, 이상 파랑이 해수교환방파제를 통한 유입 시에 항내 파고분포의 결과들이 높게 나타났다. 그러므로, 항내 파고를 낮게 유지하기 위해서는 이상 파랑의 유입을 차단할 수 있는 시설이 필요되어질 것으로 사료된다.

핵심용어 : 환경사 방정식, 유한요소법, 비선형, 주문진항, 해수교환방파제

Abstract : When estimating the calmness in a harbor, it is important that diffraction and reflection of irregular waves should be exactly calculated. The basic equation of the numerical model in this study was used Mild-slope equation, which has the advantage of which non-linearity with great influence for the wave behavior can be considered, and a triangular mesh was generated by using finite element method. So as to verify the nonlinear effects, the results of the numerical model developed in this study are compared with the experimental and numerical results by other researchers. As a result, it is shown that the results in case of considering nonlinear wave are more exact for wave analysis than in case of not considering nonlinear wave. In order to apply this model, wave height distributions in Jumunjin fishery port installed a seawater-exchange breakwater are computed. From the results of this numerical analysis, when abnormal waves are intruded through the seawater-exchange breakwater, the results of the wave height distributions in the harbor are highly presented. Therefore, in order to get wave height low in the harbor, it is considered that the facility with the ability to protect the inflow of abnormal waves is needed.

Key words : Mild-slope equation, Finite element method, Nonlinear, Jumunjin fishery port, Seawater-exchange breakwater

1. 서 론

항만이나 어항에서 항내 정온도는 선박 입출항의 안정성·물양장에서의 하역 가동율의 관점에서 결정된다. 항내 정온도를 산정할 때에는 다방향 불규칙파의 회절과 반사를 정도 높게 계산할 수 있는 것이 매우 중요하다. 대부분의 입사파들은 다양한 주기, 방향, 그리고, 파고를 가지고 있는 불규칙파로서 연안형상 또는 해저지형의 급변에 의해 비선형성이 부각되기도 한다. 그러므로, 수치모형을 이용한 항만 및 어항의 정도 높은 파고해석을 위해서는 불규칙 파랑의 비선형성에 대한 영향을 포함한 해석을 수행해야 한다.

비선형파에 대한 기존의 연구들로서는 Berkhoff et al.(1982)의 해저 천퇴에 대한 실험 등이 있고, Demirebilek and Panchang (1998)의 CGWAVE를 이용한 수치해석 결과 등이 있다. 국내에서도 많은 연구자들이 수치모형을 이용한 항만 정온도 연구를 수행하였고 특히, 김과 허(2002) 및 Kim and Hur(2003a, b)는 수심변화에 따른 자동 요소 생성기법을 적용한 유한요소망을 이용하여 다양한 국내 항만을 대상으로 항내 정온도 해석 및 파고분포계산을 수행하였다.

본 연구에서는 환경사방정식을 기초방정식으로 하고 파랑의 비선형을 고려할 수 있도록 자체 개발된 수치모형을 이용하여 Berkhoff et al.(1982)의 비선형성 실험 및 Demirebilek and

† 교신저자 : 김남형(정회원), nhkim@jejunu.ac.kr 064) 754-3452

* 윤현철, jidan0529@hanmail.net 064) 754-3453

** 구본수, portkbs@kunhwaeng.co.kr 02) 528-6752

Panchang(1998)의 수치해석과 동일한 조건으로 비교해석을 수행하여 비선형을 고려한 해석이 선형성만을 고려한 해석에 비해 더 잘 일치함을 검증하였다.

실제 항만에 대한 적용성을 검토하기 위해 주문진항을 대상으로 수치모의를 수행하였다. 항내 정온이 확보되어 있는 주문진항은 최근 항내 정체 수역에 대해 해수 순환을 촉진시키기 위하여 해수교환방파제를 설치하였다. 그러나 이상 파랑 내습시 해수교환방파제를 통한 다량의 해수 유입이 발생함으로써 항내 정온도에 좋지 않은 영향이 발생할 가능성이 있다. 본 연구에서는 해수교환방파제 시설을 통해 내습하는 이상 파랑 유입시의 항내 정온도 변화에 대한 영향을 수치모형을 이용하여 검토하였다.

2. 기본방정식 및 경계조건

천해역에서 항만 정온도 해석의 기초방정식은 유체는 비압축, 비점성이고 비회전인 완전유체로 가정하고 수심변화의 영향을 고려한 다음의 환경사방정식을 이용한다(Berkhoff, 1972; Chen, 1986).

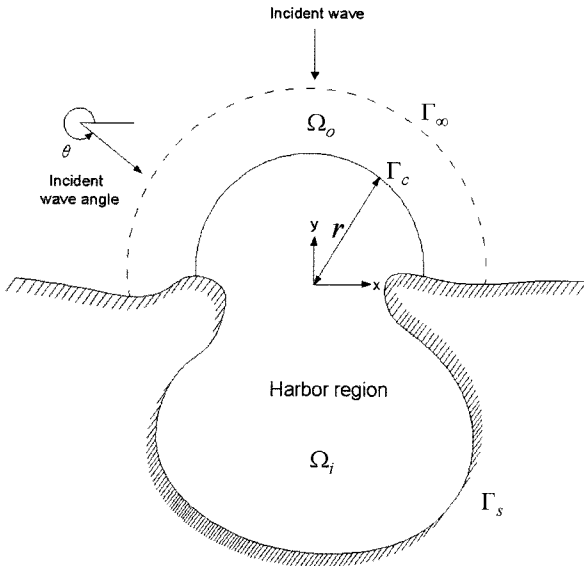


Fig. 1 Definition sketch

$$\frac{\partial}{\partial x} \lambda c c_g \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\omega^2 c_g}{c} \phi = 0 \text{ in } \Omega_i \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{i\beta a_0}{h \sinh kh} e^{ir}} \quad (2)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

여기서, C 는 파속, C_g 는 군속도, h 는 수심, ϕ 는 속도포텐셜, ω 는 각 진동수, g 는 중력가속도, Ω 는 해석영역을 나타낸다. 또,

β 는 저면마찰계수, a_0 는 입사파 진폭, k 는 파수, i 는 $\sqrt{-1}$, e 는 2.71828, $\gamma(=-\pi/4)$ 는 위상차이다.

방파제나 해안구조물과 같은 고체경계 Γ_s 는 음향학에서 사용된 임피던스조건과 비슷한 흡수경계조건을 사용하였고, 반사계수는 K_r 을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - \alpha \phi = 0 \text{ on } \Gamma_s \quad (4)$$

여기서, n 은 해석영역에서 외향인 단위수직벡터, $\alpha = ik \frac{1-K_r}{1+K_r}$ 이다. 유체의 연속성을 고려하여 경계 Γ_c 에서의 매칭조건(matching condition)은 다음과 같다.

$$\left(\lambda h \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{\Omega_i} = \left(\lambda h \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{\Omega_o}, \phi_{\Omega_i} = \phi_{\Omega_o} \text{ on } \Gamma_c \quad (5)$$

방사조건은 무한한 것으로 가정하였고, 먼바다 경계 Γ_∞ 에서의 방사조건은 다음과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) (\phi - \phi_0) = 0 \text{ on } \Gamma_\infty \quad (6)$$

여기서, (r, θ) 는 극좌표이다. 또, ϕ_0 는 입사파의 속도포텐셜이며, 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_0 = -\frac{iga_0}{\omega} \left\{ \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] + K_r \exp[ikr \cos(\theta + \theta_0)] \right\} \quad (7)$$

여기서, θ_0 는 입사각이다. 경계조건식(4), (5), (6)을 고려하여 기초방정식(1)을 풀면 대상영역의 파랑의 정보를 얻을 수 있다. 그리고, 비선형 파랑을 고려하기 위하여 비선형 분산관계(Kirby and Dalrymple, 1986)를 적용하여 수치모의를 할 수 있고, 식(3)을 대신하여 식(8)을 사용하였다.

$$\omega^2 = gk \left[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kh \right] \tanh \{ kh + ka F_2 \} \quad (8)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{\cosh(4kh) - 2 \tanh^2(kh)}{8 \sinh^4(kh)} \\ F_2 &= \left(\frac{kh}{\sinh(kh)} \right)^4 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

그리고, 해수교환방파제에 의해 유입되는 유속을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = AV \quad (10)$$

$$V = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (11)$$

$$u = \frac{\partial \phi_E}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi_E}{\partial y} \quad (12)$$

여기서, Q 는 유량, V 는 유속, u 는 x 방향 유속성분, v 는 y 방향 유속성분이고, ϕ_E 는 해수교환방파제를 통해 유입되는 유속에 따른 속도포텐셜을 나타낸다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 비선형모형에 대한 검증 해석

본 연구에서 비선형성을 고려한 수치모형을 검증하기 위하여 천퇴 위로 전달되는 파를 대상으로 Berkhoff et al.(1982)이 사용한 실험모형과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였다.

이 모형은 완만한 저면 경사와 중앙에 설치된 천퇴로 인해 파랑의 비선형성이 강하게 나타나는 현상을 보이게 된다. Fig. 2가 실험모형의 형상과 재원을 나타낸다. 입사파 주기와 진폭은 1sec와 0.0232m 이고 경계조건으로 양측면에 대해서는 완전 반사조건과 파의 전파방향 끝단에서는 완전흡수조건을 적용하였다. 저면 마찰계수는 0.0으로 전 구간에 대해 동일하게 적용하였다.

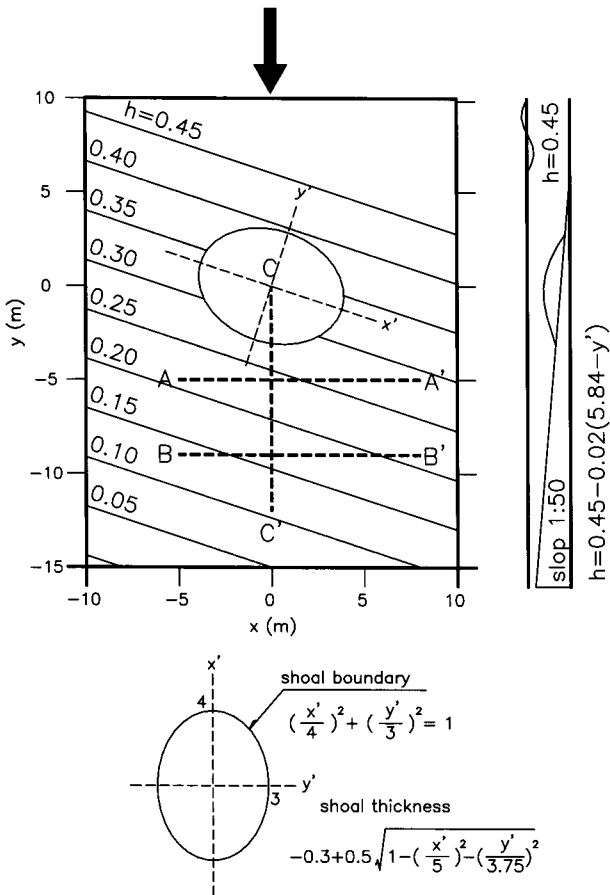


Fig. 2 Modeled domain of Berkhoff et al.(1982)

계산순서는 우선 선형모형을 이용하여 대상영역에 대한 파고 를 계산한 후에 비선형을 고려한 모형을 이용하여 계산된 파고 에 대해 비선형 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산한다. 유한 요소는 52,403개의 절점과 104,709개의 요소로 한 파장당 10 개 이상의 요소를 포함하도록 분할하였다.

Fig. 3에서 세로축은 증폭비이고, 횡축은 해석범위 내의 수평 단면의 거리이다. Fig. 2에서 나타내는 것과 같이 세 가지 비교 단면인 Line A-A', Line B-B', Line C-C' 단면에 대한 선형해석결과와 Berkhoff et al.(1982)의 실험결과에 비하여 재현성이 다소 낮게 나타나고 있지만, 비선형을 고려한 해석결과는 실험 결과 및 Demirbilek and Panchang(1998)에 의해 수행된 수치해석 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 비선형을 고려한 해석은 선형해석보다 더욱 정확한 파랑의 거동을 해석하는데 적합하다고 판단된다.

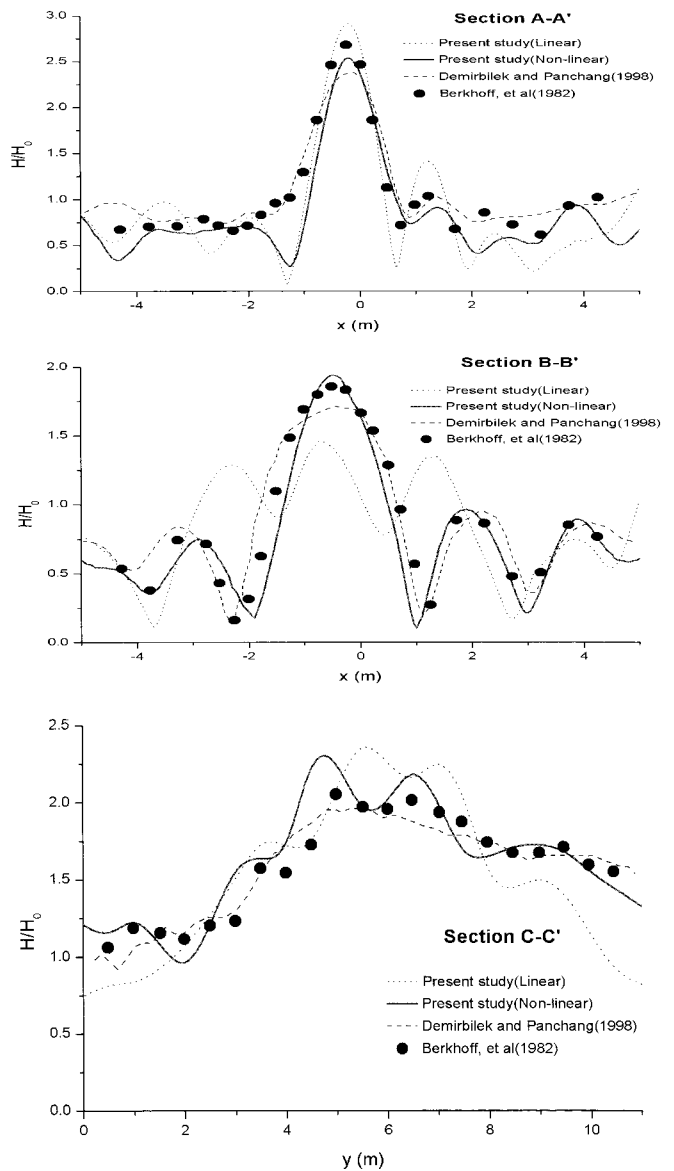


Fig. 3 Comparison of relative wave height distribution in shoal

3.2 해수교환방파제를 가진 주문진항의 항내 정온도 해석

방파제란 1차적으로 입사파의 직접 차단에 의한 항내의 정온성 확보에 중점을 두고 설계, 시공되기 때문에 방파제로 둘러싸인 수역은 정온성은 확보되지만, 폐쇄성으로 인해 항내수질이 악화되는 경향이 있다. 이와 같이 폐쇄성 수역의 수질개선을 목적으로 해수교환기능을 가지는 해수교환방파제에 관한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 해수교환방파제는 파랑을 차폐하는 방파기능에 항내외의 해수 순환기능이 부가된 것이다. 본 연구에서는 해수교환방파제가 설치되어 있는 주문진항을 대상으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 4는 주문진항의 해도이고, Fig. 5는 주문진항의 수심도이며, Fig. 6은 유한요소분할도로서 요소수는 26,239개, 절점수는 13,487개로 한 파장당 12개의 요소를 포함하도록 분할하였다. 해수교환시설을 통한 유입유량은 $3.5 \sim 5.8m^3/s$ 이다(동해지방해양수산청, 2005).

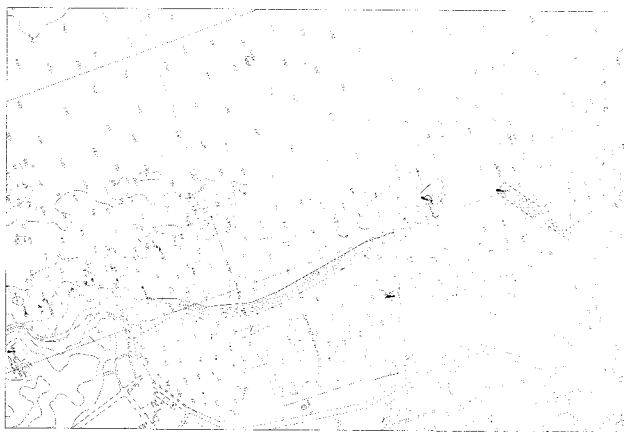


Fig. 4 Nautical chart of jumunjin fishery port(JFP)

반사계수는 직립제인 경우에 0.9, 자연 그대로인 경우에 0.2, 그리고 소파구조인 경우에 0.4로 하였고(김 등, 2004), 그리고, 저면마찰계수는 0.02(김, 2002)로 하였다. 수치계산은 Table 1에서 보여지는 바와 같이 3가지 경우에 대하여 수행되었다.

Table 1 Incident Wave Conditions

	Wave height(m)	Period (m)	Direction (θ)	Flux (m^3/s)
Case-1	8.1	14	NE	4.66
Case-2	8.1	14	NE	14.10
Case-3	8.1	14	NE	28.20

Table 1의 Case-1의 경우 평상시 해수교환방파제의 유입량의 중간 값인 $4.66m^3/s$ 을 사용하였으며, Case-2와 Case-3의 경우, 주문진항이 항내 정온이 악화될 때를 살펴보기 위하여 유입량을 점차 증가시켰다.

해수교환방파제가 없는 경우와 Table 1의 각 Case들에 대하여 수치해석을 하였고, 각각의 계산결과에 대한 항내파고분포를 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다.

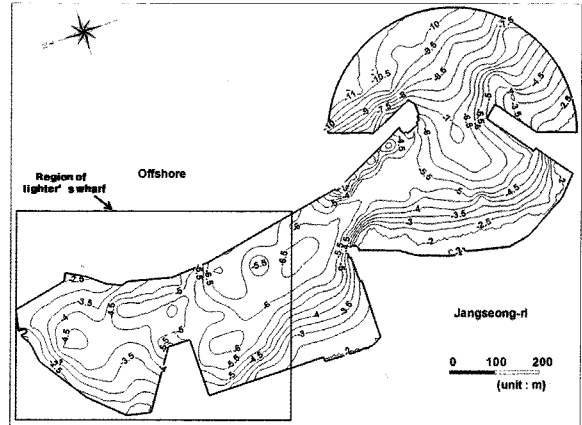


Fig. 5 Water depth diagram for JFP

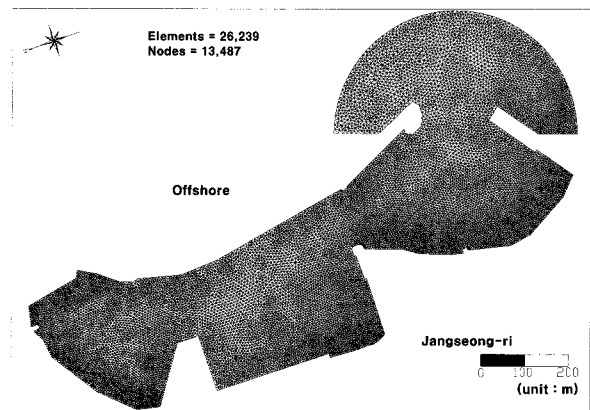


Fig. 6 Finite element mesh for JFP

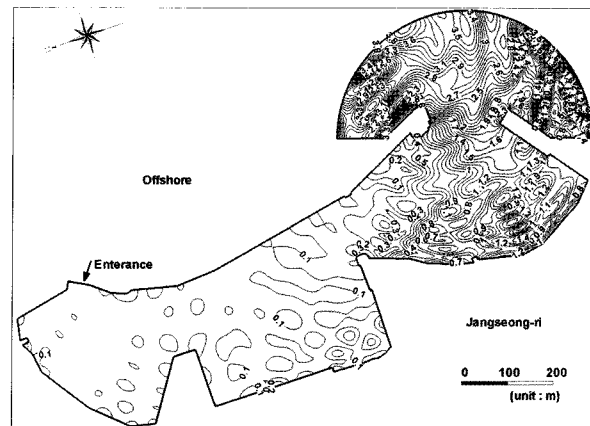


Fig. 7 Computed relative wave height for JFP without Seawater-Exchange breakwater

Fig. 7에 보여지는 바와 같이 해수교환방파제가 없는 경우 외해에서 침입한 파랑으로 인해 항내 안쪽 물양장 부근에서 0.1m 정도의 파고들이 존재하므로 항내의 정온이 잘 유지됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8에서는 해수교환방파제가 설치된 경우, 해수교환방파제를 통하여 유입되는 외해수의 영향으로 인해 해수교환방파제가 설치되지 않은 경우보다 항내 안쪽 물양장 부근에 다소 높은 파고들이 발생되고 파고분포의영역이 확장되는 것을 알 수 있다.

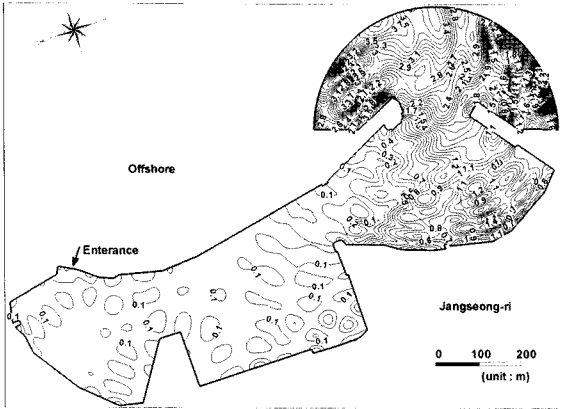


Fig. 8 Computed relative wave height (Case-1)

그리고, Fig. 9는 해수교환방파제를 통하여 유입되는 외해수가 증가하면, Case-1의 경우의 경우보다 0.2m ~ 0.4m 정도의 더 높은 파고분포로 인해 항내의 정온이 불안해지기 시작하는 것을 알 수 있고, Fig. 10의 Case-3 경우 계산 결과, 항내 여러 부근에 0.5m이상의 파고들이 발생하기 때문에 어항으로써의 기능 즉, 선박의 입·출항이나 정박에 영향을 미쳐 어항으로서의 기능을 상실하고 항내 정온이 다소 악화되는 것을 알 수 있다. 이는 이상 파랑 내습시 해수교환방파제를 통해 유입되는 유량이 증가하고 이로 인하여 항내의 유출구 주변의 유속이 증가하기 때문으로 판단된다.

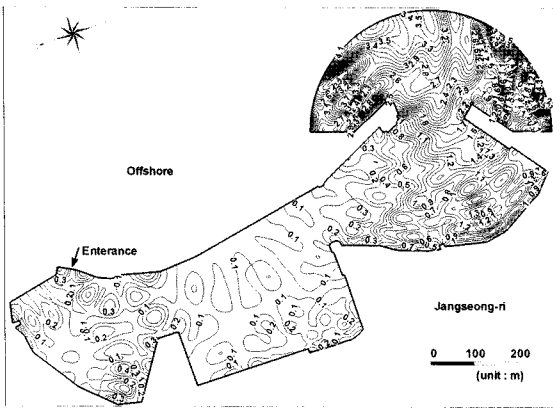


Fig. 9 Computed relative wave height (Case-2)

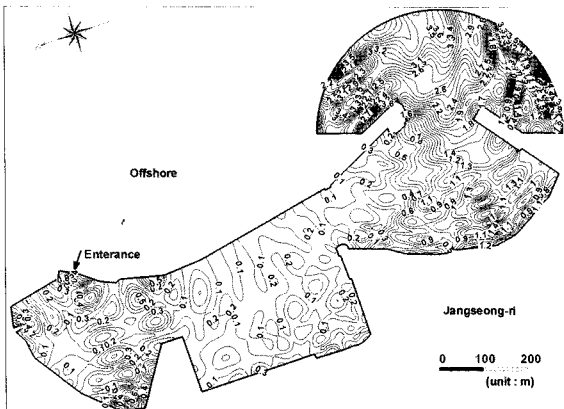


Fig. 10 Computed relative wave height (Case-3)

해수교환방파제가 없는 경우 계산된 3차원 파형을 Fig. 11에 나타내었으며, 해수교환방파제가 설치된 경우, Table 1의 각 Case에 대해 계산된 3차원 파형을 Fig. 12~14에 나타내었다. Fig. 11에 보여지는 바와 같이 항내에 침입한 파랑이 반사나 굴절에 의해 진행되는 것을 알 수 있고, Fig. 12~14에서는 해수교환방파제를 통한 유입되는 유량의 증가로 인해 항내의 파형이 눈에 띄게 변화하는 것을 알 수 있다.

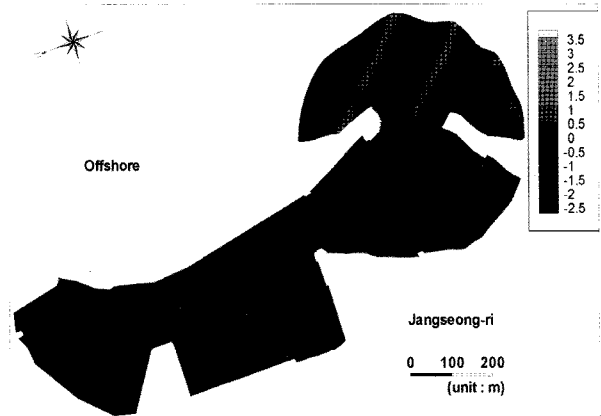


Fig. 11 Three-Dimensional wave profiles for JFP

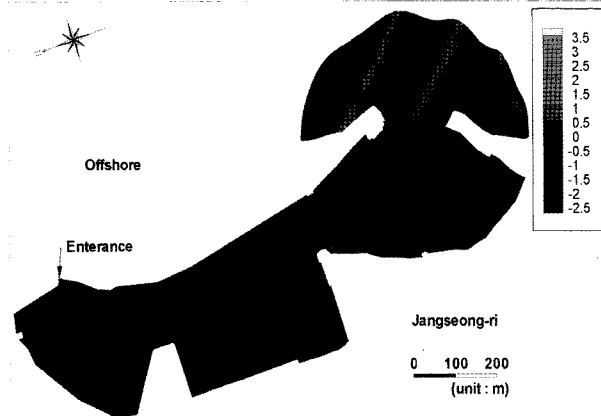


Fig. 12 Three-Dimensional wave profiles (Case-1)

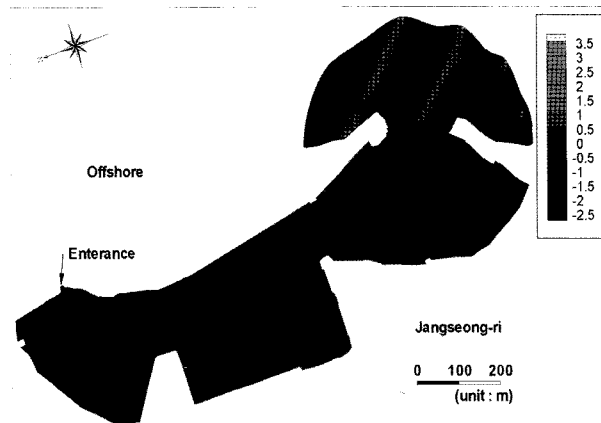


Fig. 13 Three-Dimensional wave profiles (Case-2)

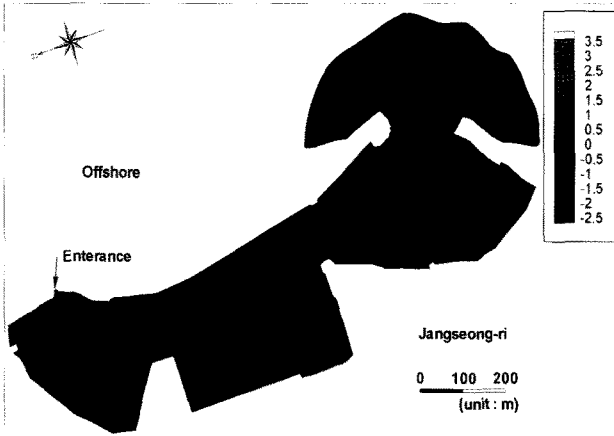


Fig. 14 Three-Dimensional wave profiles (Case-3)

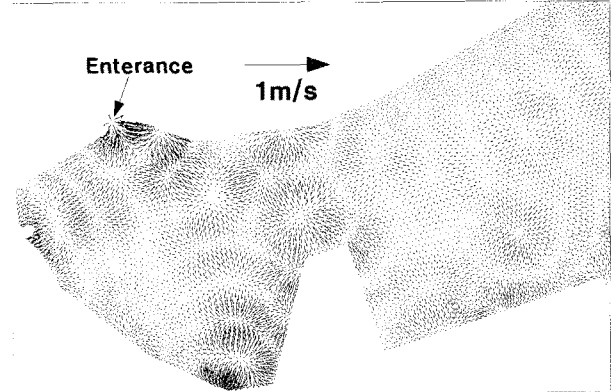


Fig. 17 Water particle velocity profiles for region of lighter's wharf (Case-2)

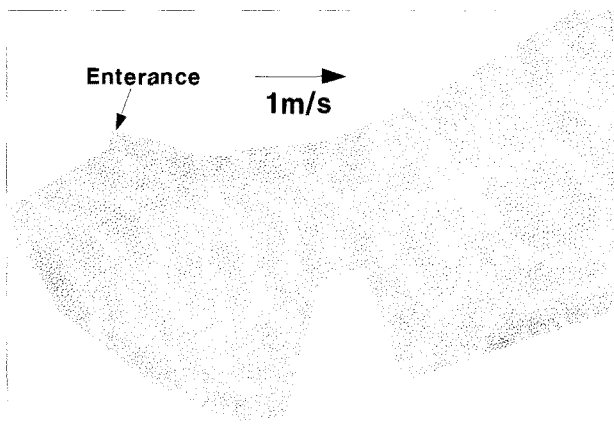


Fig. 15 Water particle velocity profiles for region of lighter's wharf (JFP)

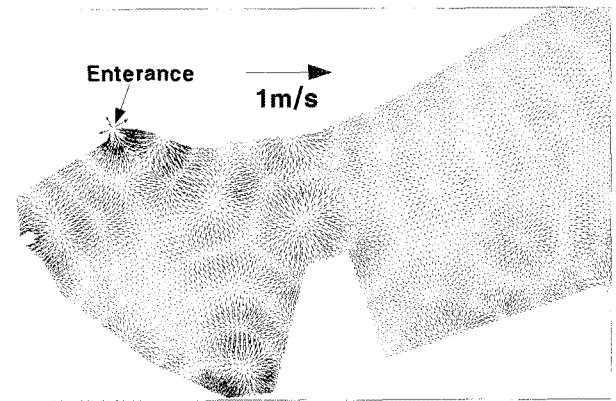


Fig. 18 Water particle velocity profiles for region of lighter's wharf (Case-3)

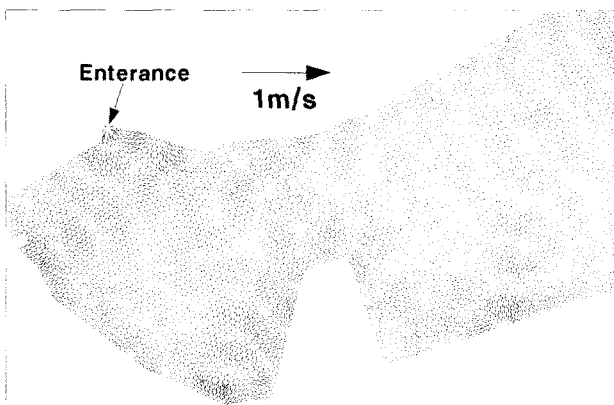


Fig. 16 Water particle velocity profiles for region of lighter's wharf (Case-1)

Fig. 5에서 보여지는 확대영역에 대해서 해수교환방파제가 없는 경우 물입자 유속분포도를 Fig. 15에 나타내었고, 해수교환방파제가 설치된 경우, Table 1 3개의 Cases에 대해 계산된 물입자 유속분포도를 각각 Fig. 16~18에 나타내었다.

Fig. 15~18에서 보여지는 바와 같이 해수교환방파제를 통하여 유입되는 해수가 증가함에 따라 항내의 파고분포가 높게 형성되어 물입자의 유속분포도 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 자체 개발한 비선형을 고려한 파랑해석모형을 검증하기 위하여 비선형 실험모형과 동일한 조건으로 수치모의를 수행하였고, 계산된 결과와 Berkhoff et al.(1982)의 실험결과 및 Demirbilek and Panchang(1998)의 수치해석결과를 비교하였다. 비교결과, 비선형해석의 경우가 선형해석의 경우보다 실험결과와 더 일치하는 것을 알 수 있다.

본 연구의 검토 결과, 해저지형이 복잡하고 수심이 급변하는 어항의 정온도, 또는 파고분포 해석은 파랑의 비선형성을 고려한 해석모형으로 수행하는 것이 보다 정확한 해석의 결과를 얻을 수 있는 것을 알았다.

해수교환방파제가 설치되어 있는 주문진항을 대상으로 적용한 결과, 높은 파랑에 의해 다량의 해수가 항내로 유입시에 외해수의 유입이 집중되기 때문에 항내 정온도가 악화될 우려가 있는 것으로 나타났고, 이와 같은 해수유입의 경우를 상정하여 해수교환방파제에 이상 파랑 유입시에 유입량을 제어하기 위하여 파랑을 차단하는 시설이 필요한 것으로 사료된다.

그러므로, 항만이나 어항에 해수교환방파제를 설치하기 이전에 항내 정온도 또는 파고분포변화의 예측 및 해석을 위해 널리 사용되어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김남형 역(2002), 해안공학, 청문각.
- [2] 김남형, 허영택(2002), "유한요소법에 의한 항만 정온도의 수치모의," 한국해양공학회, 제16권, 제1호, pp. 22-26.
- [3] 김남형, 박구용, 조일형 역(2004), 해안과동. 구미서관.
- [4] 동해지방해양수산청(2005), 주문진항 해수교환시설 준공후 모니터링조사용역 2차분 최종보고서, pp.375-376.
- [5] Berkhoff, J.C.W. (1972), "Computation of combined refraction-diffraction," Proc. of 13th Int. Conf on Coastal Engineering., ASCE, pp. 471-490.
- [6] Berkhoff, J.C.W., Booij, N., and Radder, R.C. (1982), "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves," Coastal Engineering, Vol. 6, pp. 225-279.
- [7] Chen, H.S. (1986), "Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering," Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.
- [8] Demirbilek, Z. and Panchang, V.G. (1998), CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation. Technical Report CHL-98-xx, U.S. Army Corps of Engineers.
- [9] Kim, N.H. and Hur, Y.T. (2003 a), "Calmness analysis of Jeju Harbor by Finite Element Technique," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 17, No. 1, pp. 16-20.
- [10] Kim, N.H. and Hur, Y.T. (2003 b), "Computation of Non-Linear Wave Height Distribution in the Seogwipo Harbor Using Finite Element Method," KCORE, Vol. 17, No. 6, pp. 32-37.
- [11] Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1986), "An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models," Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 545-561.

원고접수일 : 2009년 10월 19일

심사완료일 : 2010년 2월 12일

원고채택일 : 2010년 2월 17일