
해양구조물 설계를 위한 파랑변형 수치모형실험

장호식*

Numerical Model Experiments of Wave Transformation for the Marine Structure Design

Jang, Ho Sik*

요 약

천수변형, 굴절, 회절, 반사, 쇄파에 의한 에너지감쇠를 모두 고려한 시간의존완경사방정식을 이용하여 50년 빈도 설계파 내습시 매립과 방파제 설치에 따른 파랑변형 수치실험을 수행하였다. 항의 입구에서 입사되는 파랑은 만 내부로 진입하는 과정에서 바닥에 의한 에너지 감쇠와 쇄파 작용 등으로 인해 파고의 점진적 감소가 나타났다. 매립후 75 m의 방파제를 설치하였을 경우 방파제 배후에서 파고분포는 29~128 cm 범위로 일부 해역에서 항만 정온도가 확보되는 것으로 나타났다. 보다 넓은 해역에서 정온도를 확보하기 위해서는 방파제의 길이를 100 m 이상 확장하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그리고, 방파제를 설치하였을 경우 방파제 배후에서 파고는 80% 이상 감소하였다.

ABSTRACT

Numerical model experiments of wave transformation due to the reclamation and the construction of breakwater in case of 50 years design wave were performed using time dependent mild slope equation included shoaling, refraction, diffraction, reflection and wave breaking. As waves propagate to the shore, wave height gradually diminishes by the bottom friction and wave breaking etc.. After the reclamation and the construction of 75 m length breakwater, wave height distributions in the lee of breakwater have the range of 29~128 cm. To make better the harbor tranquility the length of breakwater needs to extend more than 100 m. After the construction of breakwater, wave height in the lee of the structure was deduced over 80%.

키워드

파랑변형모형, 방파제, 항만 정온도, 완경사 방정식

Key word

Wave transformation model, Breakwater, Harbor tranquility, Mild slope equation

* 정회원 : 경남도립남해대학 조신토목계열 초빙부교수(gpsjhs@hanmail.net)

접수일자 : 2011. 11. 03

심사완료일자 : 2011. 12. 02

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.3.440>

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

해양에서 파랑변형은 중요한 연구분야로서 해양공학자들이 다양한 문제를 연구해 왔다. 파랑변형 현상 중에서 천수, 굴절, 회절, 쇄파, 반사 등은 우리가 해안에서 쉽게 볼 수 있는 현상들이며 공학적으로도 대단히 중요하다. 파의 굴절-회절문제를 해석하기 위하여 여러 종류의 수치해석기법이 발전되어 왔다[1]. **Berkhoff**는 파의 회절과 굴절을 동시에 고려할 수 있는 시간독립 환경사 방정식을 제안하였다. 심해에서 천해로 전파하는 파랑변형을 지배하는 방정식으로는 환경사방정식과 **Boussinesq** 식[2-3]이 중요한 두개의 축을 이룬다. **Berkhoff**에 의해 제시된 환경사방정식은 해저경사와 해저곡률항들을 무시한 것이다[4]. 일련의 연안사주가 존재하는 경우에는 무시된 항들을 포함하는 수정된 환경사 방정식을 사용해야 올바른 파랑변형을 나타낼 수 있음을 보였다[5-6]. 환경사 파랑식은 3차원 지배방정식을 2차원 방정식으로 변환하기 위해 적정한 수심의존 함수를 이용하여 적분한 식으로 **Smith**와 **Sprinks**가 사용한 고유함수 전개법[7]으로 **Kirby**[8], **Chamberlain**과 **Porter**[6] 등이 사용한 변수분리법 등으로 유도할 수 있으며, 비록 유도방법은 달라도 그 결과의 식들은 동일하다. 쌍곡형 미분방정식 형태인 일종의 시간의존형 환경사 방정식은 **Ito**와 **Tanimoto**[9], **Copeland**[10], **Watanabe**와 **Maruyama**[11] 등에 의하여 제시된 바 있다. 이 기법은 경계조건 및 쇄파에너지 감쇠를 고려하는데 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 경계조건은 입사조건, 반사조건, 투과조건 등이 포함되며, 방파제에 대해서는 고정식 방파제에 대한 반사 경계조건이 주로 취급되어 왔다. 본 연구에서는 굴절-회절-반사-쇄파를 고려한 쌍곡선형 시간의존 환경사 방정식을 이용하여 매립 및 구조물 설치에 따른 파랑변형을 수행하여 구조물의 설치에 따른 파랑변형을 해석하고자 한다.

II. 수치실험 개요

연구대상해역은 그림 1과 같이 삼천포 향촌동 주변 해역이며, 구조물 설계에 필요한 천해설계파를 산출하

기 위하여 50년빈도 심해설계파와 50년빈도 풍속을 함께 사용하여 파랑변형 실험을 실시하였다. 천해역 설계 파랑장 계산결과를 토대로 하여 항내정온도 검토를 위한 수치모형실험의 영역을 결정하였으며, 입사경계의 수심이 비교적 일정하고 파랑의 조건도 비교적 비슷한 영역까지 확대하였다. 또한, 심해설계파의 내습파랑과 입사경계 영역의 축이 이루는 각은 가능하면 일치할 수 있도록 파향을 결정하여 영역을 설정하였으며, 격자간격은 반사파 및 연안역의 파랑제현 등을 높일 수 있도록 설정하였다.



그림 1. 계산영역의 수심도
Fig. 1 Model domain and bottom topography

항내 정온도 검토는 설계파랑장 계산결과를 근거로 하여 연구 대상해역에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 S계열 파랑에 대해서 수치모형실험을 실시하였다. 입사파 제원은 천해설계파 실험의 결과에서 추출하여 항내정온도 실험의 입사경계에 해당하는 영역의 파고 및 파향을 사용하였다. 지형 및 수심자료는 최근의 해도를 이용하여 입력하였으며, 방재공학적 측면을 고려하여 기준해면을 삭망평균고조위[DL.(+) 3.579m]로 수심을 보정하였다. 파랑변형 수치모형실험에 사용된 실험 조건 및 내용을 표 1에 나타냈다.

III. 수치해석 방법

3.1. 지배방정식

심해에서 발달된 파는 천해로 전파되면서 수심변화

에 의한 천수변형 및 굴절변형, 여러 가지 장애물에 의한 회절변형 및 반사, 그리고 쇄파에 의한 에너지감쇠 등의 변형을 겪게 되는데, 이러한 파랑변형특성 즉, 천수변형, 굴절, 회절, 반사, 쇄파에 의한 에너지감쇠를 모두 고려하여 계산할 수 있는 시간의존완경사방정식 (Time-dependent Mild Slope Equation)은 다음과 같다.

표 1. 파랑변형 수치실험 조건

Table. 1 Simulation conditions of wave transformation

구분	내용		
적용모델	TDMSE(쌍곡선형 완경사방정식)		
수심자료	국립해양조사원 발해해도		
격자체계	계산영역	1.46 km × 1.19 km	
	격자간격	10 m(등방격자)	
	격자수	146 × 119 = 17,374개	
입사파제원	파고(m)	주기(s)	파향
	3.5	16.79	S2°W
실험안	CASE 1 : 현재 상태, CASE 2 : 매립 CASE 3 : 매립+직선형 구조물(길이: 70m) CASE 4 : 매립+만곡형 구조물(길이: 75m)		
기준조위	삭파평균고조위(H.W.L)인 DL.(+)3.579m		

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_D Q_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_D Q_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left[-\frac{\partial}{\partial x} (nQ_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nQ_y) \right] = 0 \quad (3)$$

여기서, x, y 는 수평직각좌표, η 는 수면변위, C 는 파속, t 는 시간을 나타낸다. 또한 Q_x, Q_y 는 x, y 방향의 선유량, n 은 균속도와 파속의 비($= Cg/C$), f_D 는 에너지감쇠 계수이며, 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Q_x = \int_{-h}^0 u dz \quad (4)$$

$$Q_y = \int_{-h}^0 v dz \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (6)$$

$$f_D = a_D \tan \beta \sqrt{\left(\frac{g}{h} \right) \left(\frac{Q}{Q_r - 1} \right)} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{Q^2 + Q_x^2} \quad (8)$$

$$Q_r = \gamma \sqrt{gh^3} \quad (9)$$

여기서, u, v 는 속도의 x, y 성분, h 는 수심, k 는 파수 (wave number)이며, Q_x, Q_y 는 선유량의 진폭성분, $\tan \beta$ 는 쇄파점 부근의 평균저면경사, a_D 와 γ 는 상수로서 각각 2.5, 0.25를 사용하면, Watanabe 등(1986)의 실험결과와 거의 일치한다[11]. 식(1), (2)는 $Q < Q_r$ 일 때, $f_D = 0$ 으로 하면 파의 재생효과를 고려할 수 있다.

쇄파위치의 결정은 습田(1970)의 쇄파지표를 이용해서 판정하는 경우가 많으나[12], 이 지표에는 비선형성 (non-linearity)의 영향이 포함되어 있으므로, 미소진폭파를 가정한 파랑변형모형에서는 그대로 쓸 수 없다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 식(10)을 사용하였다.

$$H_b = 0.78 h_b \quad (10)$$

여기서, H_b 는 쇄파점에서의 파고, h_b 는 쇄파점에서의 수심이다.

3.2. 초기조건

각 변수의 초기조건으로는 파동운동이 전혀 없는 정수상태를 가정하여 계산영역내의 모든 점에서 다음 식 (11)과 같이 설정하였다.

$$\zeta_{ij}^m = Q_{xij}^m = Q_{yij}^m = 0 \quad (m = 0) \quad (11)$$

3.3. 경계조건

계산영역내의 경계조건은 각각 외해측 입사경계조건, 측방입사경계조건, 투과경계조건, 장애물에 대해서는 임의반사율 경계조건을 설정하였으며, 계산영역 주

변의 개방경계에 대해서는 3격자 정도의 가상영역을 접속시켜 경계조건의 취급 및 수치계산이 용이하도록 하였다. 각 경계조건은 기본적으로 다음 식(12)의 관계를 이용하여 설정하였다.

$$\vec{Q} = \vec{C} \zeta \quad (12)$$

이상의 방법을 사용하여 해안구조물 주변에서의 파의 천수, 굴절, 회절, 반사 및 쇄파에 의한 에너지감쇠 등을 모두 고려하여 계산할 수 있고, 또한 측방입사경계조건을 부가함으로써 실제해역에 적용할 때 문제가 되는 경사입사파에 대해서도 용이하게 사용할 수 있는 수치모형을 수립하였다. 차분계산의 시간간격 Δt 는 안정조건을 만족하도록 취하였다.

본 실험에서의 수치모형은 공간상의 계산점을 그림 2와 같이 정의하였기 때문에, 식(12)를 사용하여 경계조건을 선유량에 관한 식으로 주었다. 그리고 경계조건식들이 엄밀하게 성립하기 위해서는 해저경사와 수면변위의 영향이 적어야 하므로 여기서는 이 조건의 성립을 가정하였다. 계산영역내의 경계조건은 그림 3과 같이 설정하였다. 또한 Program에서는 Copeland[3]가 외해측 입사경계조건과 유사한 방법을 측방입사경계조건으로 사용한 것에 착안하여, 무반사성 입사경계조건과 유사한 방법을 측방입사경계의 처리에 이용하였다.

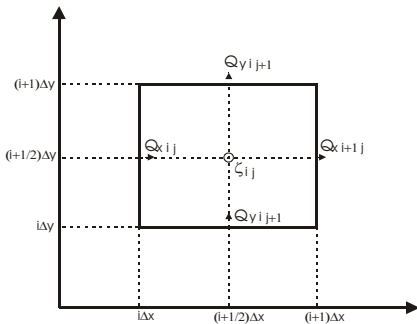


그림 2. 계산격자체계의 정의
Fig. 2 Definition of grid system

3.3.1. 임의반사율 경계조건

계산영역내에서의 장애물에 의한 반사경계조건은 Ito와 Tanimoto가 수치파동해석법에서 제안한 방법을

많이 사용하고 있으나[9], 본 실험에 사용된 임의반사율 경계조건은 간편식으로 많이 사용되고 있는 다음의 식들을 사용하였다. 우선 x 방향의 경계에 대해서는 식(13)과 (14)를 사용하였고, y 방향의 경계에 대해서는 식(15)와 (16)을 사용하였다.

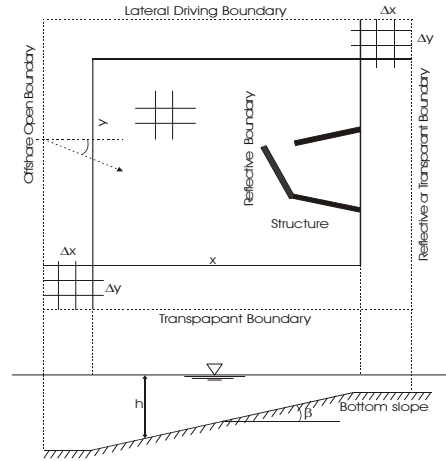


그림 3. 경계조건
Fig. 3 Boundary condition

$$Q_x^t(x_0, y_0) = (1-r) Q_x^{t-\Delta t}(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (13)$$

$$Q_x^t(x_0, y_0) = -(1-r) Q_x^{t-\Delta t}(x_0 + \Delta x, y_0) \quad (14)$$

$$Q_y^t(x_0, y_0) = (1-r) Q_y^{t-\Delta t}(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (15)$$

$$Q_y^t(x_0, y_0) = -(1-r) Q_y^{t-\Delta t}(x_0, y_0 + \Delta y) \quad (16)$$

3.3.2. 투과경계조건

계산영역내에서 경계로 향하는 파를 그대로 투과시키기 위해서는 임의반사율 경계조건을 나타낸 식에서 r 을 0으로 하면 된다. 즉, 식 (17)과 같다.

$$\begin{cases} Q_x^t(x_0, y_0) = Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0) \\ \tau = \frac{\cos \alpha_n \Delta x}{C} \end{cases} \quad (17)$$

3.3.3. 무반사 입사경계조건

천해 장파방정식 해석시 외해로 향하는 파를 방사시

키기 위하여 Sommerfeld의 방사조건(radiation condition)을 사용하나, 이 방사경계는 파랑장에서는 적합하지 않고 천해 장파방정식을 사용한 흐름장에 적용하는 것이 효과적이라고 제안하고 있으므로, 본 연구에서는 무반사성 투과경계를 이용하여 외해에서의 반사파를 그대로 투과시키는 것으로 하였다. 그림 4와 같이 입사파가 x축과 이루는 각을 θ , 계산영역내에서 입사경계로 향하는 파가 경계의 법선방향과 이루는 각을 α 이라 하였다.

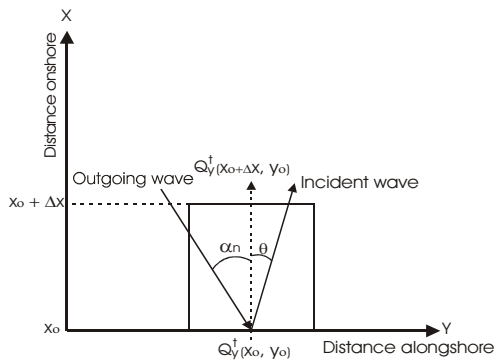


그림 4. 입사경계각의 정의
Fig. 4 Definition of incident wave angle and boundary

계산영역내에서 구조물 등에 의하여 생긴 반사파가 입사경계에서 재반사되지 않고, 그대로 투과되도록 하기 위하여 입사경계의 선유량을 무반사성 투과경계를 이용하여 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

$$\begin{cases} Q_x^t(x_0, y_0) = aC \cos \theta \sin \left(k \cos \theta x_0 + k \sin \theta y_0 - \sigma t \right) + Q_{xR}^{t-\tau}(x_0 + \Delta x, y_0) \\ \tau = \frac{\cos \alpha}{C} \Delta x \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & Q_{xR}^t(x_0 + \Delta x, y_0) \\ &= Q_x^t(x_0 + \Delta x, y_0) \\ &- aC \cos \theta \sin \left\{ k \cos \theta (x_0 + \Delta x) + k \sin \theta y_0 - \sigma t \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & Q_{xR}^{t-\Delta t}(x_0 + \Delta x, y_0) \\ &= Q_x^{t-\Delta t}(x_0 + \Delta x, y_0) \\ &- aC \cos \theta \sin \left\{ k \cos \theta (x_0 + \Delta x) + k \sin \theta y_0 - \sigma (t - \Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

$Q_{xR}^{t-\tau}(x_0 + \Delta x, y_0)$ 는 $Q_{xR}^t(x_0 + \Delta x, y_0)$ 로부터 시간적으로 내삽하여 구할 수 있다.

3.3.4. 측방입사경계조건

본 연구에서는 무반사성 입사경계조건과 같은 방법을 측방입사경계조건으로 사용하였다.

3.3.5. 차분계산의 안정조건

수치계산의 안정성을 위해 CFL (Courant Friedrichs Lewy) 안정조건을 만족하도록 시간간격 Δt 를 취하였다. $\Delta x = \Delta y$ 인 경우로 나타낼 수 있으며, 여기서 C_{max} 는 파속의 최대치로서, 일반적으로 수심이 가장 깊은 외해측 경계에서의 파속이다. 실제의 수치계산에서는 격자간격 Δx 를 $L/10 \sim L/20$ 의 범위에서 취하고, 시간간격 또한 식(21)에서 계산된 것보다 상당히 작게 하여 계산하는 것이 수치해의 안정을 위해 바람직하다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\sqrt{2} C_{max}} \quad (21)$$

3.4. 적용반사율

항내정온도 실험시 적용된 반사율은 표 2와 같이 적용하여 사용하였다.

표 2. 반사율의 개략치
Table. 2 Approximate values of reflection coefficient

구조 형식	반사 계수
직립벽(천단이 정수면 위)	0.7~1.0
직립벽(천단이 정수면 아래)	0.5~0.7
사석사면(1:2~3경사)	0.3~0.6
이형소파블럭사면	0.3~0.5
직립소파구조물	0.5~0.8
천연해빈	0.05~0.2

IV. 연구결과

천수변형, 굴절, 회절, 반사, 쇄파에 의한 에너지감쇠를 모두 고려하여 계산할 수 있는 시간의존완경사방정

식(Time-dependent Mild Slope Equation)을 이용하여 CASE 1~4에 대한 파랑변형 수치실험을 수행하였다. 그림 5~6은 현재 상태(CASE 1)에 대한 수치실험결과이다. 그림 5는 파향과 파고의 분포를 시각적으로 나타내는 파형도이고, 그림 6은 파고분포를 나타낸다. 항의 입구에서 입사되는 파랑은 만 내부로 진입하는 과정에서 바닥에 의한 에너지 감소와 쇄파 작용 등으로 인해 파고가 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 연구대상해역 내측에 위치한 현재 어항으로 사용하고 있는 방파제 배후에서 파고분포는 18~85 cm의 파고분포를 나타내고, 현 방파제 전면에서는 210~292 cm의 파고분포를 나타내고 있다. 방파제 설치 예상 주변해역에서 파고분포는 221~360 cm이다. 50년 빈도 설계파 내습시 매립공사 전인 현재 방파제 배후지역에서는 파고가 85 cm 이하로 정온이 확보되는 것으로 나타났다.

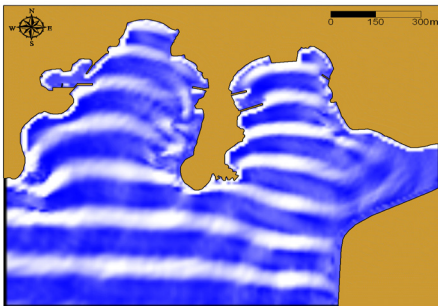


그림 5. CASE 1의 파형도
Fig. 5 Wave propagation of CASE 1

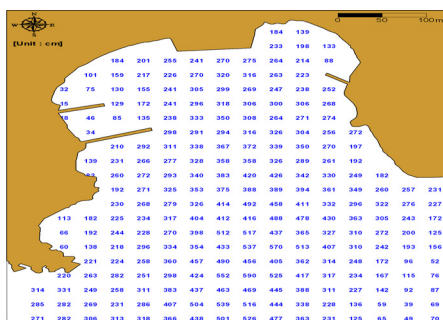


그림 6. CASE 1의 파고분포도
Fig. 6 Wave height distribution of CASE 1

그림 7~8은 매립만 하었을 경우(CASE 2)에 대한 실험결과이다. 그림 7은 매립 후 파형도이고, 그림 8은 파

고분포를 나타내는데, 매립지역 전면 해역에서 반사파에 의해 파고가 커지는 것을 알 수 있다. 매립지역 전면에서 203~408 cm의 파고분포를 나타내고 있어 50년 빈도 설계파 내습시 방파제가 없을 경우에는 선박이 피항해 있을 만한 지역이 없는 것으로 나타났다. 방파제 설치를 계획하고 있는 사업지역 주변해역에서 파고분포는 222~478 cm로 대단히 높게 나타났기 때문에 방파제를 설치하여 항내 파고를 감소시켜 선박이 안전하게 피항할 수 있도록 해야겠다.

그림 9~10은 매립하고 직선형 방파제를 건설하였을 경우(CASE 3)에 대한 실험결과이다. 그림 9는 파형도이고, 그림 10은 파고분포를 나타내며, 방파제 배후에서는 방파제에 의한 파랑의 차폐로 파고가 감소하며, 또한 파의 회절현상을 잘 보여주고 있다. 직선형 방파제를 설치할 경우 방파제 배후에서 29~118 cm의 파고분포를 나타내고 있어 50년 빈도 설계파 내습시 방파제 배후의 일부해역에서 정온이 확보되는 것으로 나타났다.

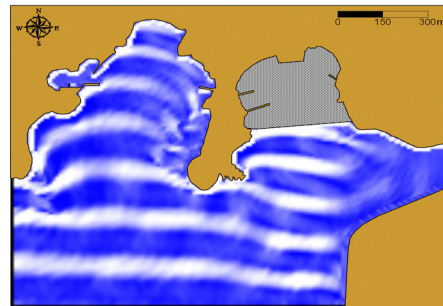


그림 7. CASE 2의 파형도
Fig. 7 Wave propagation of CASE 2

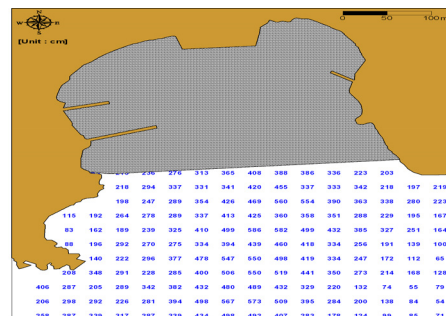


그림 8. CASE 2의 파고분포도
Fig. 8 Wave height distribution of CASE 2

이 경우 방파제 전면에서 파고분포가 167~255 cm이기 때문에 방파제 설치로 인한 파고감쇠 효과는 최대 80% 이상이다.

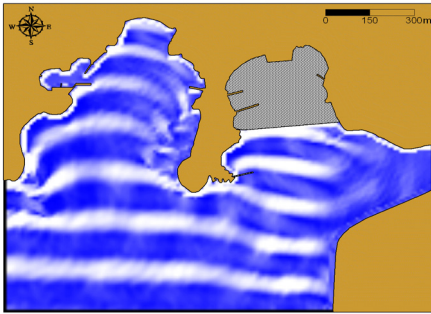


그림 9. CASE 3의 파형도
Fig. 9 Wave propagation of CASE 3

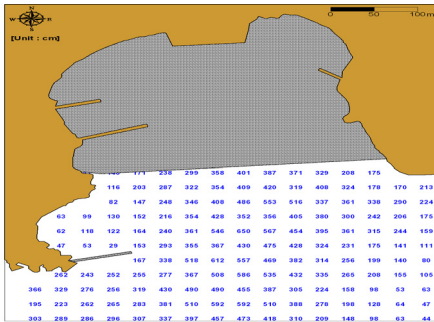


그림 10. CASE 3의 파고분포도
Fig. 10 Wave height distribution of CASE 3

그림 11~12은 매립하고 방파제를 만곡시켜 건설하였을 경우(CASE 4)에 대한 실험결과이다. 그림 11은 파형도이고, 그림 12는 파고분포를 나타낸다. 직선형 방파제를 설치하였을 경우와 유사하게 방파제 배후에서는 방파제에 의한 파랑의 차폐로 파고가 감소하며, 또한 파의 회절현상을 잘 보여주고 있다. 만곡형 방파제를 설치하였을 경우 방파제 배후에서 파고분포는 35~128 cm의 파고분포를 나타내고 있어 50년 빈도 설계파 내습시 방파제 배후의 일부해역에서 정온이 확보되는 것으로 나타났다. 이 경우에도 방파제 전면에서 파고분포가 182~288 cm이기 때문에 방파제 설치로 인한 파고감쇠 효과는 최대 80% 이상이다.

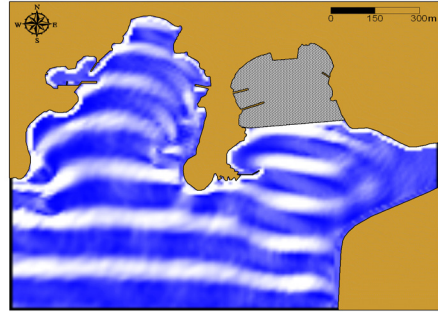


그림 11. CASE 4의 파형도
Fig. 11 Wave propagation of CASE 4

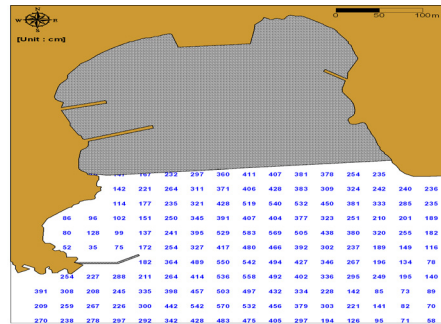


그림 12. CASE 4의 파고분포도
Fig. 12 Wave height distribution of CASE 4

V. 결 론

천수변형, 굴절, 회절, 반사, 쇄파에 의한 에너지감쇠를 모두 고려한 시간의존완경사방정식을 이용하여 50년 빈도 설계파 내습시 매립과 방파제 설치에 따른 파랑 변형 수치실험을 수행하였다.

- 1) 항의 입구에서 입사되는 파랑은 만 내부로 진입하는 과정에서 바닥에 의한 에너지 감쇠와 쇄파 작용 등으로 인해 파고가 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 현 상황에서 어항으로 사용하고 있는 방파제 배후에서 파고분포는 18~85 cm로서 항내정온을 유지하고 있다. 장래 방파제 설치 예상 주변해역에서 파고분포는 221~360 cm이다.
- 3) 매립만 하였을 경우, 매립지역 전면에서 203~408 cm의 파고분포를 나타내고 있어 50년 빈도 설계파 내습

시 방파제가 없을 경우에는 선박이 피항해 있을 만한 지역이 없는 것으로 나타났다.

- 4) 매립하고 직선형 방파제(방파제 길이 : 70m)를 건설하였을 경우 방파제 배후에서 29~118 cm의 파고분포를 나타내고 있어 방파제 배후의 일부해역에서 정온이 확보되는 것으로 나타났다. 이 경우 방파제 전면에서 파고분포가 167~255 cm이기 때문에 방파제 설치로 인한 파고감쇠 효과는 최대 80% 이상이다.
- 5) 매립하고 만곡형 방파제(방파제 길이 : 75m)를 건설하였을 경우 방파제 배후에서 파고분포는 35~128 cm의 파고분포를 나타내고 있어 방파제 배후의 일부해역에서 정온이 확보되는 것으로 나타났다. 이 경우에도 방파제 전면에서 파고분포가 182~288 cm이기 때문에 방파제 설치로 인한 파고감쇠 효과는 최대 80% 이상이다.

이와 같이 50년 빈도 설계파 내습시 방파제 배후의 일부해역에서 정온도가 확보되는 것으로 나타났으나, 보다 넓은 해역에서 정온도를 확보하기 위해서는 방파제의 길이를 100m 이상 확장하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Liu, P.L.-F., Boissevain, P.L., Ebersole, B.A. and Kraus, N.C., "Annotated bibliography on combined wave refraction and diffraction", miscellaneous CERC Rep. No. 86, 1986.
- [2] Nowgu, O., "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 119, 618-638, 1993.
- [3] Liu, P.L.-F., "Model equations for wave propagations from deep to shallow water", Advances in Coastal and Ocean Engineering Science, P.L.-F. Liu, ed., 1, World Scientific, pp.125-157, 1994.
- [4] Berkhoff, J.C.W., "Computation of combined refraction-diffraction", Proc. 13th Coastal Eng. Conf., 1, pp.471-490, 1972.
- [5] Massel, S.R., "Extended refraction-diffraction equation for surface waves", Coastal Engineering,

p.19, pp.97-126, 1993.

- [6] Chamberlain, P.G. and Porter, D., "The modified mild-slope equation", J. Fluid Mechanics, p.291, pp.393-407, 1995.
- [7] Smith, R. and Sprinks, T., "Scattering of surface waves by a conical island", J. Fluid Mechanics, p.72, pp.373-384, 1975.
- [8] Kirby, J.T., "A general wave equation for waves over riffle beds", J. Fluid Mechanics, p.162, pp.171-186, 1986.
- [9] Ito, Y. and Tanimoto, K., "A numerical wave analysis method and its application", Proc. 18th Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp. 67-70 (in Japanese), 1971.
- [10] Copeland, G.J.M., "A numerical model for the propagation of short gravity waves and the resulting circulation around nearshore structures", Doctoral thesis, University of Liverpool, 1985.
- [11] Watanabe, A. and Maruyama, K., "Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction", diffraction and breaking, Coastal Eng. in Japan, p.29, pp.19-39, 1986.
- [12] 合田良實, 碎波指標の整理について, 土木學會論文報告書集, 第180号, pp.39-49, 1970.

저자소개

장호식(Jang, Ho Sik)



2000년 2월 부경대학교 대학원
토목공학과(공학석사)
2004년 2월 부경대학교 대학원
토목공학과(공학박사)

2004년 8월~현재 경남도립남해대학 조선토목계열
초빙부교수

※ 관심분야: 사진측량, 물리탐사, 해양구조물 해석 및
변위계측