

굴절로 인한 파고변화계산

Computation of Wave Height Variations Due to Refraction

金		鐵*
Kim,		Cheol
片	宗	根**
Pyun,	Chong	Kun
安	守	漢***
Ahn,	Soo	Han

Abstract

A numerical model is presented that predicts directly the wave angle and height at every point on the grid.

The governing equations used are conservation of waves equation and conservation of energy equation which are derived from the basic linear potential equations by means of an asymptotic approximation.

Finite difference methods are used to solve the governing equations and the solution is obtained for a finite number of rectilinear grid cells that comprise the domain of interest.

Model results are compared with the results obtained from wave ray methods and it shows no significant differences between two results.

The model is especially efficient for modeling large areas of coastline with arbitrary bathymetry, and therefore it is anticipated to be used in many coastal engineering problems such as littoral drift problems.

要 旨

漸近近似法을 使用하여 誘導된 波數 保存方程式과 에너지 保存方程式을 使用하여 對象領域의 全格子點에 대한 波向과 波高를 직접 求하는 數值模型을 提示한다. 數值解法은 有限差分法을 使用하였으며 計算結果를 波向線法으로 求한 結果와 比較하였다. 沿岸漂砂의 연구 또는 海岸堤防의 설계시 등에 이 방법을 적용할 수 있을 것이다.

* 정희원 · 서울대학교 대학원 박사과정 수료

** 정희원 · 명지대학교 공과대학 부교수

*** 정희원 · 서울대학교 공과대학 교수

1. 서 론

심해에서 발달된 해양파는 천해쪽으로 진행하면서 파랑의 변형을 겪게 되는데 파랑의 변형을

일으키는 중요한 현상들을 열거해 보면 수심 변화에 의한 굴절(refraction), 조류(currents) 등에 의한 굴절, 회절(diffraction), 에너지 손실(해저의 마찰, 쇄파, percolation 등)을 들 수 있으며 이들은 서로 간에 상호작용을 통하여 매우 복잡한 양상으로 나타나기 때문에 이러한 모든 현상을 포함한 수학적 모델을 만드는 것은 불가능하다.

그러나 해안공학에서 파랑의 전파문제는 매우 중요한 분야이고 따라서 토목 및 해양기술자들은 이 문제의 해결이 당면 문제이므로 실제 현상을 단순화시켜 공학적인 판단을 하고 있다.

예로서 파랑과 구조물 사이의 상호 작용을 해결하기 위해서는 회절을 포함한 수학적 모델이 적용될 수 있을 것이며 대부분의 자연상태 해빈에서와 같이 수심변화가 완만한 경우는 회절의 영향은 무시하고 수심변화에 의한 굴절이 주대상이 될 것이다.

수심변화에 의한 굴절은 1947년 Munk 등⁽¹⁷⁾에 의해 파향선법(wave ray method)으로 소개되었으며 초기에는 이 방법을 이용하여 굴절도를 수작업으로 작성하였다.

1963년 Griswold⁽¹¹⁾는 파향선법에 의한 굴절을 수치계산하였으며 이후 이 방법과 유사한 연구가 많이 수행되었다. 이중 중요한 몇가지를 열거해 보면 Chao^(4,5), Collins⁽⁶⁾, Coudert 등⁽⁷⁾, Dobson⁽⁹⁾, Karlsson⁽¹²⁾, Orr 등^(21,22), Rabe⁽²⁴⁾, Smith 등⁽²⁵⁾ Skovgaard 등⁽²⁶⁾, Worthington 등⁽²⁹⁾을 들 수 있으며 이 중 Chao는 caustic에서의 굴절문제를 취급하였고, Karlsson은 천해지역에 대한 파랑 스펙트럼을 구하였으며 Collins와 Skovgaard 등은 해저의 마찰을 고려한 굴절계산을 시도하였고, Smith 등은 쇄파후 reforming을 포함하는 굴절 문제를 연구하였다.

한편 국내에서는 1976년 항만청⁽³¹⁾에서 Orr 등의 방법을 사용하여 우리나라 30개 항의 파랑 굴절도를 작성하였으며 강 관원등⁽³²⁾은 Skovgaard 등의 방법을 사용하여 우리나라 3개 항에서의 굴절에 의한 파고 변화를 계산하였다.

이와는 별도로 Keller⁽¹³⁾는 점근근사법(asymptotic approximation)을 도입하여 미소진폭파 이론으로부터 앞서의 직관적인 파향선법에 대한

이론적인 틀을 마련하였다.

이와같은 연구는 Battjes⁽²⁾와 Berkoff⁽³⁾ 등에 의해 연구되었으며 Meyer⁽¹⁶⁾는 Keller의 방법을 연구 발전시켜 굴절이론에 대한 중요한 업적을 이루었다.

파향선법에 의한 굴절계산은 하나의 파향선을 따라가면서 계산하므로 해가 비교적 간단한 방법으로 구해질 수 있는 장점이 있는 반면 파랑의 특성(파고, 주기, 파향 등)을 대상지역의 전 영역에 대해 구하고자 하는 경우에는 이 방법으로 구할 수가 없게 된다.

여기서는 대상지역의 전 영역에 대한 파랑의 특성을 계산할 목적으로 점근 근사법에 의한 이론을 사용하였으며, 대상지역을 차분화하고 차분화된 모든 격자점(grid)에 대한 파랑의 특성을 계산하였다.

계산시 사용한 수치 기법은 유한차분법을 사용하였으며 계산된 결과를 비교 검증하기 위해 Orr 등과 Smith 등이 연구한 파향선법에 의한 굴절 계산을 실시하고 그 결과를 서로 비교하였다 이들 파향선법의 해와 점근 근사법의 해는 서로 정확히 일치하지는 않고 있으나 거의 비슷한 값을 보여주고 있다.

파랑의 특성의 변화가 매우 큰 대규모의 해안지역을 모델화할 때 대상지역의 전 영역의 파랑의 특성을 계산할 필요가 종종 있는데 여기서는 해저지형이 완만한 해안지형에 모델을 적용하여 파랑의 굴절을 계산하고 이로 인한 파고의 변화를 계산하였는데 이 결과들을 이용하면 해안의 보호 작업과 안정작업에 필요한 계산과 설계를 하는데 도움이 될 것이며 연안표사 등을 연구하는데 있어서도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

2. 기본방정식

그림 1과 같이 원점이 정수면 상에 있고 연직 방향을 양의 Z 방향으로 하는 직각 좌표계를 X, Y, Z로 나타내고 각방향의 유속을 U, V, W로 나타낸다.

유체를 비압축성, 비점성의 완전유체라 가정하고 유체운동이 비회전성이라고 가정하면 유체는 속도 포텐셜 ϕ 을 갖는다.

시간 T 일 때의 수면을 $Z=\eta(X, Y, T)$, 수심 $=H$ 로 나타내고 미소진폭과 이론을 도입하면 다음과 같은 선형중력파 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \nabla^2\phi=0 & \text{for } -H(X, Y) < Z < 0 \\ \phi_{TT} + g\phi_Z = 0 & \text{for } Z=0 \\ \phi_X H_X + \phi_Y H_Y + \phi_Z = 0 & \text{for } Z=-H(X, Y) \end{cases} \quad (2.1)$$

윗식(2.1)을 초기조건, 경계조건, 방사조건(radiation condition)과 더불어 풀면 속도 포텐셜 ϕ 를 구할 수 있다.

그러나 대부분의 경우에 윗식에 대한 해석적 해를 구할 수가 없으므로 (2.1)식은 이후 서술할 근사해법 등에 대한 상대적인 의미로 정확한 선형방정식(exact linear equation)이라고 한다.

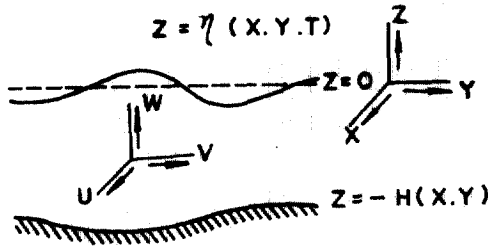


그림 1. 좌표계의 정의

3. 점근근사법에 의한 굴절방정식

굴절이론을 식 (2.1)을 사용하여 해석적 해를 구하는 것은 매우 어려운 문제이므로 근사계산이 필요하며 근사계산은 해저지형의 경사가 매우 완만하다는 가정하에 이러한 해저 경사를 나타내는 매우 작은 무차원 상수 ϵ 을 도입함으로써 수행할 수 있다.

실제로 해저경사는 매우 완만하므로 표면파의 특성을 나타내는 척척(scale)을 X, Y 로 표시하면 수심변화는 $\epsilon X, \epsilon Y$ 에 따라서 변화한다고 볼 수 있다.

이제 (2.1)식을 무차원화하기 위해 ϵ 과 길이의 차원을 가진 파장 L 을 도입하여 다음과 같이 무차원화한다.

$$\begin{aligned} X &= Lx \\ Y &= Ly \\ T &= \sqrt{L/g} \cdot t \end{aligned}$$

$$Z = \epsilon Lz$$

$$H(X, Y) = \epsilon Lh(x, y)$$

(2.1)식에 대한 해를 시간 t 에 관해 Fourier 변환을 하면

$$\phi(X, Y, Z, T) = (L^3 \cdot g)^{1/2} \cdot e^{-i\omega t} \phi(x, y, z)$$

와 같이 무차원 각주파수 ω 와 무차원속도포텐셜 ϕ 로 나타낼 수 있으며 수위 ζ 는

$$\zeta = iL\omega \cdot \phi(x, y, 0) e^{-i\omega t}$$

로 나타낼 수 있다.

이제 식 (2.1)을 무차원화한 결과는

$$\begin{cases} \phi_{xx} + \phi_{yy} + \epsilon^{-2} \phi_{zz} = 0 & \text{for } 0 < z < -h(x, y) \end{cases} \quad (3.1a)$$

$$\epsilon \omega^2 \phi - \phi_z = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (3.1b)$$

$$\begin{cases} \phi_x h_x + \phi_y h_y + \epsilon^{-2} \phi_z = 0 & \text{at } z=-h(x, y) \end{cases} \quad (3.1c)$$

로 나타낼 수 있다.

수심 $h(x, y)$ 는 그 변화가 매우 완만한 평활한 함수(smooth function)로 생각할 수 있고 수위와 유속의 연직변화는 파장과 같은 척척을 갖고 있다.

즉 수심변화가 매우 완만하다는 가정을 하면 수평면 상에서의 포텐셜의 변화는 연직방향의 포텐셜의 변화에 비해서 매우 작다고 할 수 있으므로

$$\phi(x, y, z) \sim \phi(x, y, 0) F_0(z) \quad (3.2)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 $F_0(z)$ 는 식 (2.1)에서 수심이 균일할 경우에 해당되는 함수이며

$$F_0(z) = \cosh[k(x+h)] / \cosh(kh) \quad (3.3)$$

$$k \cdot \tanh(kh) = \epsilon \omega^2 \quad (3.4)$$

으로 나타낼 수 있다.

식 (3.1a)에 F_0 를 곱하여 z 에 대해 $-h$ 부터 0까지 적분하면 다음 식을 얻는다.

$$\int_{-h}^0 F_0 \nabla^2 (\phi F_0) dz + \epsilon^{-2} k^2 G \phi = 0 \quad (3.5)$$

$$\text{여기서 } G(x, y) = \int_{-h}^0 F_0^2 dz = [\sinh(2kh) + 2kh]$$

$$/[4k \cdot \cosh^2(kh)]$$

$$\phi(x, y, 0) = \phi(x, y)$$

윗식을 정리하고 (3.1c)를 이용하면 다음식이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla(G \nabla \phi) + \epsilon^{-2} k^2 G \phi &= F_0^2|_{z=-h} \cdot (\nabla h) \nabla \phi \\ -\phi \int_{-h}^0 F_0 \nabla^2 F_0 dz & \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\nabla(G\nabla\psi) + \varepsilon^{-2}\psi\{k^2G + \varepsilon^2\int_{-h}^0 F_0\nabla^2F_0dx + \varepsilon^2F_0\nabla F_0|_{z=-h}\cdot\nabla h\} = 0 \quad (3.7)$$

(3.7)식에서 ε 이 0으로 접근하면 {}안의 마지막 2개항은 0이 되고 다음과 같은 식이 된다

$$\nabla(G\nabla\psi) + \varepsilon^{-2}\cdot k^2G\psi = 0 \quad (3.8)$$

(3.8)식은 Helmholtz 방정식이며 (3.4)식과 함께 일반적인 굴절 방정식을 이루고 있다.

이제 “phase function” S와 “amplitude function” A를 구하기 위해 Keller⁽⁶⁾가 접근근사법 (asymptotic approximation)을 사용하여 가정한 속도포텐셜 ϕ 를 나타내면

$$\phi \sim \cosh[k(h+z)]e^{i\sigma(x,y)/\varepsilon} \sum_{r=0}^{\infty} A_r(x,y,z) \cdot \varepsilon^r \quad (3.9)$$

와 같이 쓸 수 있다.

(3.9)식의 ϕ 를 (3.8)식에 대입하고 정리하면

$$0 = \varepsilon^{-2}(k^2 - |\nabla S|^2) + \frac{i}{\varepsilon G} \cdot \nabla G(G\nabla S) + \frac{2i}{\varepsilon} (\nabla S) \{A_0^{-1} \cdot \nabla A_0 + \tanh(kh) \cdot \nabla(kh)\} + \Sigma \quad (3.10)$$

식이 되며 위식에서 Σ 는 나머지 항들을 표시한다.

ε 이 0으로 접근하면 (3.10)식에서

$$|\nabla S|^2 = k^2 \quad (3.11)$$

$$\nabla(A_0^{-1} \cdot G\nabla S) = 0 \quad (3.12)$$

여기서 $A_0(x,y) = A_0 \cosh(kh)$

를 얻을 수 있는데 (3.11)식은 광학이론에서 eiconal equation이며 (3.12)식은 transport equation이다.

Wave phase function S(x,y)의 gradient에 kurl을 취하면 0이 된다.

$$\nabla \times (\nabla S) = 0 \quad (3.13)$$

(3.11)식을 사용하여 (3.13)식을 나타내면

$$\nabla \times k = 0 \quad (3.14)$$

로 나타낼 수 있다.

해안선을 따라서 x축을 잡고 offshore 방향으로 양의 y축, 그리고 연직방향으로 양의 z축을 잡고 (3.14)식을 x,y 성분으로 나타내면

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_y) - \frac{\partial}{\partial y}(k_x) = 0 \quad (3.15)$$

식으로 표시할 수 있다.

G를 파속 C와 군속도 C_g 로 나타내면 $G =$

$C \cdot C_g / g$ 로 나타낼 수 있고 $A_0 = a$ 로 표시하고 g를 양변에 곱해주면 (3.12)식은

$$(\nabla a^2 \cdot C C_g \nabla S) = 0 \quad (3.16)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

$H = 2a$ 로 하고 정리하면

$$(\nabla E \cdot C_g) = 0 \quad (3.17)$$

식과 같은 에너지 보존법칙이 된다.

(3.16)식을 x,y 성분으로 표시하면

$$\frac{\partial}{\partial x}(H^2 \cdot C C_g k \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(H^2 \cdot C C_g k \cos \theta) = 0 \quad (3.18)$$

식으로 표시할 수 있다.

이제 각 성분으로 표시한 식 (3.15)식과 (3.18)식을 풀면 각 지점의 파향과 파고분포를 계산할 수 있다.

4. 파향선법에 의한 굴절방정식

파향선을 따른 굴절 방정식은 다음과 같이 보통 Snell의 굴절 법칙과 파에너지 플럭스(wave energy flux)의 보존에 의해 유도된다. 그러나 이들 미분방정식들은 접근근사법에 의한 굴절방정식으로부터도 유도할 수 있으며 그 결과는 서로 똑같은 상미분 방정식이 된다.

이제 전통적인 파향선법에서 쓰이고 있는 첫 번째 방법을 이용하여 식을 유도하기 위해 그림 2에 시각 t와 t+dt일 때의 파봉선과 파향선을 각각 표시하였다.

그림에서 2개의 파향선을 O1, O2, 로 시간간격이 dt인 두 파봉선을 F1, F2로 나타내고 각 점을 P, Q, R, S로 표시하고 $\widehat{PS} = Df$, $\widehat{PQ} = Ds$ 로 나타내면

$$Ds = c \cdot dt \quad (4.1)$$

$c = \text{wave speed}$

으로 나타낼 수 있으며 파향선을 따라 파고를 계산하기 위해 Munk⁽¹³⁾ 등은 독립변수로 파향선을 따르는 거리 s를 취하고 파향선 분리계수(orthogonal separation factor) β 에 대한 방정식을 유도하였다.

$$\frac{D^2\beta}{Ds^2} + p_s \frac{D\beta}{Ds} + q_s \beta = 0 \quad (4.2)$$

여기서 $p_s = -\frac{1}{c} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial c}{\partial y} \sin \alpha \right)$ (4.3)

$$q_t = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \sin^2 \alpha + \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \sin 2\alpha + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (4.4)$$

$$\beta = \frac{Df}{Df_0} (> 0) \quad (4.5)$$

Df_0 = 심해에서의 Df

이제 (4.2)식을 (4.1)식을 사용하여 독립변수가 시간 t 인 식으로 고쳐서 나타내면

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + p_t \frac{d\beta}{dt} + q_t \beta = 0 \quad (4.6)$$

$$p_t = -2 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial c}{\partial y} \sin \alpha \right) \quad (4.7)$$

$$q_t = c \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \sin^2 \alpha - \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \sin 2\alpha + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (4.8)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 본 논문에서 계산한 Orr 등^(21,22)의 방법과 Smith 등⁽²⁵⁾의 방법은 모두 시간 t 을 독립변수로 취한 (4.6)식을 사용하고 있다.

위에서 유도한 상미분 방정식 (4.2) 또는 (4.6)식은 점근근사법으로 유도한 편미분 방정식 (3.11), (3.12)식으로부터 이 식들에 대한 characteristic equation 을 이용하여 구할 수 있으며 결과는 똑같은 식이 되며 이와같은 상미분 방정식은 초기치 문제로서 초기조건과 경계조건을 주고 적절한 방법에 의해 풀면 해를 구할 수 있다.

이식들에서 β 가 구해지면 이를 이용하여 파고를 구하는 식은 다음과 같다.

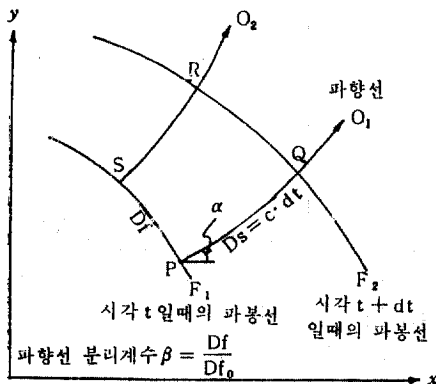


그림 2. 파향선과 파봉선에 대한 용어의 정의

$$H = Kr \cdot Ks \cdot H_0 \quad (4.9)$$

여기서 H_0 = 심해파고

Kr = 굴절계수 ($= \sqrt{\beta}$)

Ks = 천수계수 (shoaling coefficient)

5. 수치계산

5-1. 파향선법에 의한 계산

파향선법에 의한 굴절 방정식은 독립변수로 시간 t 를 취하는 식 (4.6)과 진행거리 s 를 취하는 식 (4.2)의 두가지로 나타낼 수 있다.

Lepetit의 이론에 의해 (4.6)과 같은 식에 대해 해를 구하는 연구결과를 발표한 Orr 등은 그 이론 전개과정에서 약간의 오류를 포함하고 있어서 여기서는 오류를 수정하여 사용하였다. Smith 등도 위와 같은 식을 사용하여 계산을 하였는데 이들은 쇄파점에서 쇄파된 후 reforming 현상까지를 고려한 model 을 연구하였다.

여기서는 위에서 언급한 두가지 방법을 이용하여 수치계산을 하였으며 그 방법들을 간단히 기술하면 첫째, Orr 등에 의한 방법으로 해를 구할 경우 우선 각 격자점에서의 파속과 차분식으로 나타낸 파속의 미분값들을 구하고 각 격자점의 중간에 위치한 임의의 점에 대한 수심, 파속 등은 선형보간법을 사용하여 계산한다.

이 계산된 값들을 사용하여 t 시간 후의 위치를 결정할 수 있으며 β 에 대한 상미분 방정식은 초기조건을 심해에서의 값으로 주면 수치적분 방법에 의해 계산할 수 있고 이 결과를 이용하여 임의의 점에 대한 파고의 변화를 계산할 수 있다.

다음은 Smith의 방법으로서 (4.6)식을 푸는데 2차 선형 미분방정식에 대한 Fox의 방법을 적용하여 t 시간 후의 값을 계산하는데 이때 p_t , q_t 의 값은 수심만의 함수로 주어지며 임의의 점에 대한 보간법으로는 최소자승법을 사용하여 2차식에 의한 평면보간을 실시하였다.

5-2. 점근근사법에 의한 수치계산

식 (3.15)를 풀어서 파향 θ 를 구하고, 여기서 구한 θ 를 이용하여 (3.18)식을 풀면 파고 H 의 분포를 계산할 수 있다.

(3.15)식은 θ 에 대한 1차 비선형 편미분 방정식이고 (3.18)식은 H^2 에 대한 1차 비선형

편미분 방정식이다. 이 식들은 hyperbolic 형의 1차 대류방정식(first order convection equation)의 형태를 취하고 있다.

여기서는 이 식들을 두가지 방법을 사용하여 계산하였는데 첫째, 양해법(explicit scheme)의 형태로 x 방향으로서는 2차 중앙차분방법(second order central-difference scheme), y 방향으로서는 Euler의 전방차분방법(forward-difference scheme)을 사용하여 차분화하였으며 대류방정식에 이와 같은 scheme을 적용할 때 안정조건을 만족시키기 위해서 y 방향의 전방차분 항에 dissipative interface⁽¹⁾를 사용하여 차분항을 수정하였다.

둘째로는 음해법(implicit scheme)의 형태인 Crank-Nicolson의 방법을 사용하였는데 이 방법은 안정하며 그 정확도가 첫번째 방법보다 좋다고 알려져 있다.

심해에서의 파랑조건, 즉 파고(H_0), 파향(θ_0), 주기(T)가 주어지면 offshore boundary에서부터 해안선쪽으로 Snell의 법칙을 사용하여 θ 에 대한 초기조건을 계산하였으며 offshore boundary에서의 경계조건은 심해조건과 일치시키고 측방 경계조건은 zero gradient boundary condition을 사용하였다.

천수계수 K_s 와 굴절계수 K_r 을 계산하여 $H=H_0K_sK_r$ 을 계산하고 계산된 값을 H 에 대한 초기조건으로 삼았으며 경계조건은 θ 를 계산할 때와 마찬가지로 방법을 사용하였다.

이제 초기조건과 경계조건이 주어졌으므로 이 값들을 사용하여 새로운 값을 계산한 다음 오차를 계산하고 이 오차가 허용오차 이내에 이를때까지 계산하는 반복법(iterative technique)을 사용하여 계산을 수행하였다.

6. 계산결과와 비교

점근근사법을 사용하여 계산한 값과 파향선법을 사용하여 계산한 값을 서로 비교하기 위해서는 실제지형에 대한 자료를 사용하는 것보다는 Noda⁽²⁰⁾에 의한 depth function을 사용하는 것이 실제 자료에 내재된 오차 등을 배제시킬 수 있는 장점이 있을 것이다.

Noda에 의해 제안된 depth function을 표시

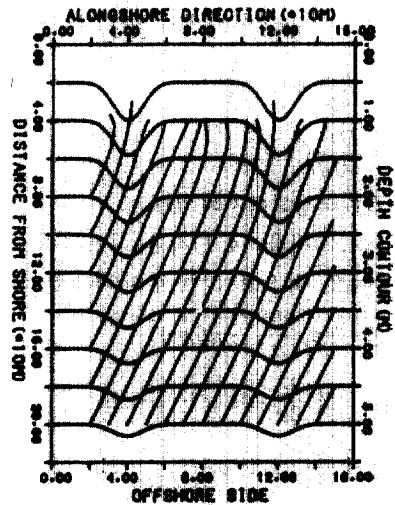


그림 3. Orr 등의 방법으로 계산한 파향선 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T = 4$ 초)

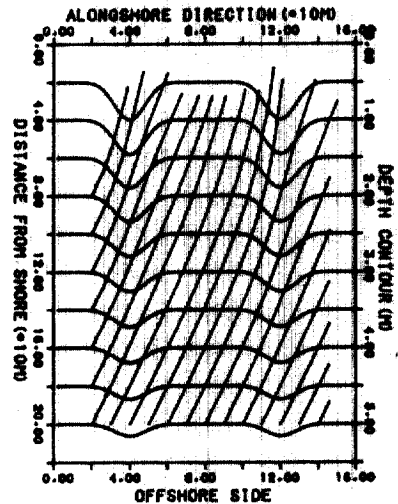


그림 4. Smith 등의 방법으로 계산한 파향선 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T = 4$ 초)

하면 다음과 같다.

$$h(x, y) = 0.025y[1 + 20\exp(-3(y/20)^{1/3})\sin^{10}(x/80)] \quad (6.1)$$

여기에서는 (6.1)식으로 나타낸 depth function을 사용하였으며 파랑조건은 다음과 같은 경우에 대해 계산하였다.

$$\theta_0 = -27^\circ, \quad T = 4\text{sec}$$

이와 같은 파랑조건에서 Orr 등의 방법과 Smith 등의 방법으로 계산한 파향선은 그림 3, 그림 4

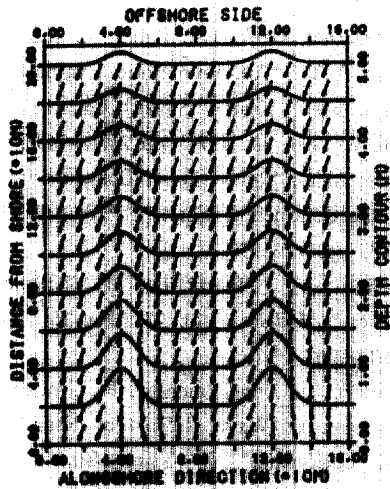


그림 5. 본연구 방법으로 계산한 각격자점에서의 파향분포 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T=4$ 초)

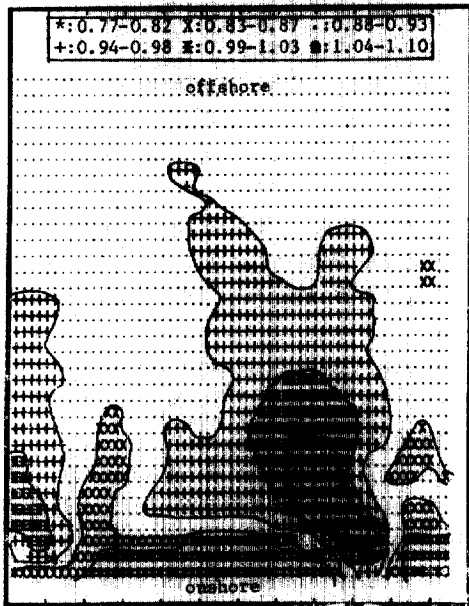


그림 6. Orr 등의 방법으로 계산한 파고분포 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T=4$ 초)

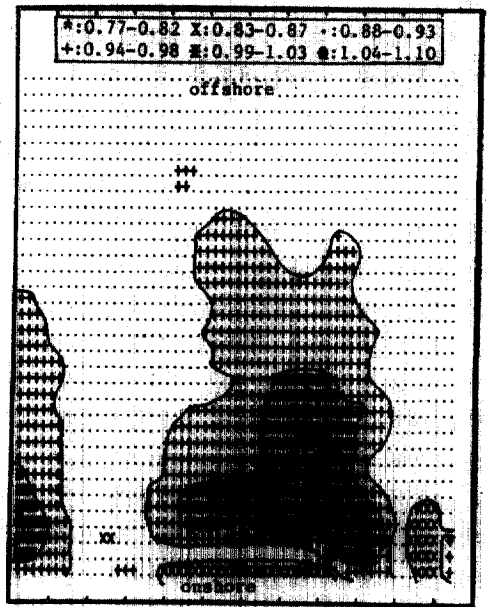


그림 7. Smith 등의 방법으로 계산한 파고분포 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T=4$ 초)

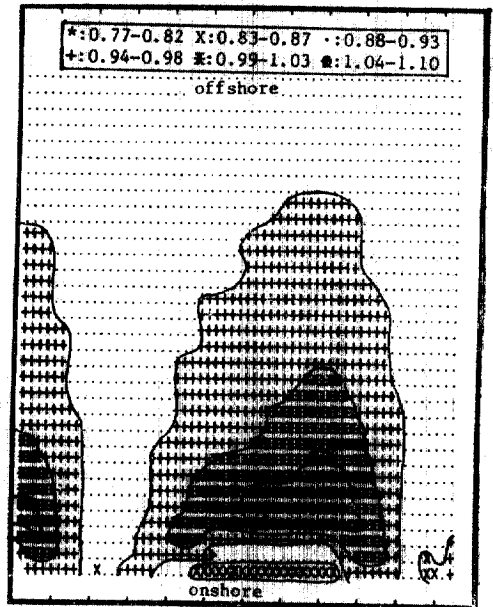


그림 8. 본연구 방법으로 계산한 각격자점에서의 파고분포 ($\theta_0 = -27^\circ$, $T=4$ 초)

에 나타 내었는데 그림에서 x 축을 해안선 방향으로 잡고 y 축은 해안선으로부터의 거리를 표시하였으며 수심을 등 수심선으로 표시하고 있다.

두 그림을 비교해 보면 쇄파점 이전까지는 파향선이 거의 같고 쇄파 이후의 형태는 계산과정이 다르므로 약간 상이하게 나타난다. 그림 5

는 점근근사법에 의한 계산결과로서 각격자점에서의 파향을 표시하였는데 파향선법에 의한 결과들과 비교해 파향이 서로 비슷함을 알 수 있

다.

진행파의 변형은 파향과 파고의 변화를 들 수 있으며 이제 파고의 변화를 계산한 결과는 같은 파랑 조건에 대해 그림 6, 그림 7, 그림 8에 각각 파고분포의 등치선도로 나타내었다. 그림 6, 그림 7 등의 결과는 각 격자점이 아닌 임의의 점에서 계산된 결과를 spline 보간법으로 각 격자점에 대해 환산한 것이며 그림 8의 결과는 각 격자점에서 직접 계산한 값을 나타낸다.

파랑조건이 같은 경우에 각각의 방법에 의한 결과를 서로 비교해 보면 거의 유사한 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 접근근사법에 대한 계산은 양해법과 Crank-Nicolson 방법으로 계산하였는데 두 결과가 나타내는 파향은 그림 5에 나타난 것과 거의 유사한 형태이며 파고 분포 형태는 비슷하고 절대치에서는 Crank-Nicolson 방법이 약간 큰 값을 나타내고 있다.

7. 결 론

지금까지의 굴절계산을 위한 수치모델들은 모두 파향선법을 이용하고 있어서 파향선 상의 임의의 점이 아닌 계산대상 전 영역의 각 격자점에서의 파향이나 파고를 구할 수 없는 단점이 있었다.

이제 접근근사법을 사용하여 파수보존 방정식 (conservation of waves equation)과 에너지 보존방정식(conservation of energy)을 동시에 풀어서 각 격자점에서 파향과 파고를 직접 구하는 방법을 연구하였다.

본 방법의 해와 파향선법의 해를 서로 비교한 결과 거의 유사하다는 결론을 얻을 수 있었다. 앞으로 연안표사의 연구시 또는 해안제방의 설계시 등에 이 방법이 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Abbott, M.B., Computational Hydraulics, Pitman Pub. Ltd., London, 1979.
- 2) Battjes, J.A., "Refraction of Water Waves," *J.W.H. Eng. Div., ASCE*, Vol. 94, No. WW4, 1968, pp. 437~451.
- 3) Berkoff, J.C.B., Mathematical models for Simple

Harmonic Linear Water Waves, Wave Refraction-Diffraction, Delft Hyd. Lab., No. 153, 1976.

- 4) Chao, Y.Y., "An Asymptotic Evaluation of the Wave Field Near a Smooth Caustic," *J.G.R.*, Vol. 76, No. 30, 1971, pp. 7401~7408.
- 5) Chao, Y.Y., "Refraction of Ocean Surface Waves on the Continental Shelf," *Proc., OTC*, 1616, 1972, pp. 965~976.
- 6) Collins, J.L., "Prediction of Shallow Water Waves," *J.G.R.*, Vol. 77, No. 15, 1972, pp. 2693~2707.
- 7) Coudert, J.F., and Raichlen, F., Grauzinis, V.J., discussion of "Wave Refraction Near San Pedro Bay, California," by Yuan Jen, *J.W.H.C.E. Div., ASCE*, Vol. 96, No. WW3, 1970, pp. 737~748.
- 8) Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Inc., 1984, 353p.
- 9) Dobson, R.S., "Some Application of a Digital Computer to Hydraulic Engineering Problems," *Technical Report No. 80*, Dep. of Civil Eng., Stanford Univ., 1967.
- 10) Ebersole, B.A., "Refraction-Diffraction Model for Linear Water Waves," *J.W.P.C.O. Eng. Div., ASCE*, Vol. 111, No. 6, 1985, pp. 939~953.
- 11) Griswold, G.M., "Numerical Calculation of Wave Refraction," *J.G.R.*, Vol. 68, No. 6, 1963, pp. 1715~1723.
- 12) Karlsson, T., "Refraction of Continuous Ocean Wave Spectra," *J.W.H.C.E. Div., ASCE*, Vol. 95, No. WW4, 1969, pp. 437~448.
- 13) Keller, J.B., "Surface Waves on Water of Non-Uniform Depth," *J.F.M.*, Vol. 4, 1958, pp. 607~614.
- 14) Madson, O.S., "Linear Periodic Waves in Water of Slowly Varying Depth," *M.I.T. Lecture Note*, pp. 1-92~1-170.
- 15) Mei, C.C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wiley & Sons Inc., 1983.
- 16) Meyer, R.E., "Theory of Water-Wave Refraction," *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 19, 1979, pp. 53~141.
- 17) Munk, W.H., and Traylor, M.A., "Refraction

- of Ocean Waves," *J.G.R.*, Vol. 55, 1947, pp. 1~26.
- 18) Munk, W.H., and Arthur, R.S., "Wave Intensity Along a Refracted Ray," *Gravity Waves*, National Beareau of Standards Circular 521, U.S. Government Printing Office, 1952, pp. 95~109.
 - 19) Niedzwechi, J.M., and Milburn, D.A., "Refraction of Gravity Waves Using Global Spline Collocation," *Proc., 4th Specialty Conference, Recent Adv. in Eng., Mec. & their Impact on Civil Eng. Practice*, Vol. II, 1983, pp. 1150~1153.
 - 20) Noda, E.K., "Wave Induced Nearshore Circulation," *J.G.R.*, Vol. 75, No. 27, 1974, pp. 4097~4106.
 - 21) Orr, T.E., and Herbich, J.B., Numerical Calculation of Wave Refraction by Digital Computer, *Sea Grant Publication* No. 209, 1969.
 - 22) Orr, T.E., and Herbich, J.B., "Numerical Calculation of Wave Refraction from Shorelines by Digital Computer," *Proc., OTC Paper* No. 1279, 1970, pp. 533~540
 - 23) Perlin, M., and Dean, R.G., A Numerical Model to Simulate Sediment Transport in the Vicinity of Coastal Structures, U.S. Army Corps of Engrs., *CERC, MR* 83-10, 1983, p. 119.
 - 24) Rabe, K., The Delaware-Dobson Wave Refraction Model, *EPRF Programming Note*, No. 21, 1975.
 - 25) Smith, B.S.L., and Camfield, F.E., A Refraction Study and Program for Periodic Waves Approaching a Shoreline and Extending Beyond the Breaking Point, Technical Report No. 16, College of Marine Studies, Univ. of Delaware.
 - 26) Skovgaard, O., Jonsson, I.V., and Bertelsen, J.A., "Computation of Wave Heights Due to Refraction and Friction," *J.W.H.C. Eng. Div., ASCE*, Vol. 101, No. WW1, 1975, pp. 15~32.
 - 27) Taunend, I.M., and Saville, I.A., "The Application of Ray Methods to Wave Refraction Studies," *Lecture Notes on Coastal & Estuarine Studies*, Edited by P.P.G. Dyke, A.O. Moscardini, and E.H. Robson, Vol. 12, Springer-Verlag, 1985.
 - 28) U.S. Army, *CERC, SPM*, 1977.
 - 29) Worthington, H.W., and Herbich, J.B., "Computer Prediction of Wave Heights in Coastal Areas," *Proc. OTC Paper* No. 1427, 1971.
 - 30) Yuan Jen, "Wave Refraction Near San Pedro Bay, California," *J.W.H. Div., ASCE*, Vol. 95, No. WW3, 1969, pp. 379~393.
 - 31) 향만청, 설계파 결정을 위한 조사연구 보고서, 1976.
 - 32) 강 관원, 함 경제, "마찰과 굴절이 파고변화에 미치는 영향." *한국수문학회지*, 제17권 제2호, 1984. 6, pp. 113~124.

(接受 : 1987. 6. 18)