

흐름과 淺海效果를 고려한 波浪推定模型 On the Wave Prediction Model with Currents and Shallow Water Effects

尹 鐘 台*
Jong Tac Yoon*

要 旨 : 임의의 水深 및 흐름상의 風波에 대한 成長, 傳播 및 減衰에 대한 離散形 스펙트럼 模型을 구성하였다. 變化되는 水深 및 흐름으로 인한 絶對周波數의 變化를 包含한 波浪과 흐름간의 相互作用을 고려하였고 成長 및 減衰過程은 Inoue의 方法을 사용했다. 傳播技法은 2차의 精度를 가지며 屈折과 水深 및 흐름으로 인한 周波數의 變位도 2차의 技法을 사용하여 固定 格子에서 계산하였다.

Abstract □ A discrete spectral model for generation, propagation and dissipation of wind waves for arbitrary depth and current is presented. This model incorporates wave current interaction, including changes of absolute frequencies due to unsteadiness of depth and currents. The numerical scheme for propagation is basically second-order accurate, and effects of refraction and frequency shifts due to unsteadiness of depth and current are calculated on a fixed grid, also using second-order scheme.

1. 緒 論

그 간 많은 종류의 波浪模型들이 개발되어 왔지만 대부분이 波浪과 흐름의 相互作用을 무시해왔다. 波浪과 흐름의 관계에 대해서는 라디에이션應力을 도입한 Longuet-Higgins(1960, 1961, 1962) 그리고 波浪作用保存(action conservation)의 概念을 사용한 Whitham(1965), Bretherton and Garrett(1968) 등에 의해 이어 理論的으로도 밝혀진 바 있다. 흐름상의 波浪에 대한 數值模型들이 발표된 바 있지만 대부분 비교적 小規模의 海域에 대한 것이었고(Radder, 1979; Sakai *et al.*, 1983; Holthuijsen *et al.*, 1989) 一部 模型들은 흐름에 미치는 風波의 영향을 다루기도 했지만(Skovgaard and Jonsson, 1976; Christoffersen, 1982) 이들은 一定水深 및 흐름에 대한 것들이었다. 또한 波浪의 成長 및 減衰가 대부분 고려되지 않았고 고려되어도 모두가 媒介變數化된 形態로 다루어졌다.

SWAMP(1985)에서 海波模型들의 比較分析이 있는 후 源泉函數(Source function)와 非線形 相互作用의 媒介變數化 程度에 따라 第1, 2 그리고 3세대 模型

으로 波浪模型들을 분류한 바 있는데 현재 가장 앞선 형태의 모형이 WAMDI 그룹의 WAM 모형이다(1988). 여러 면에서 物理的으로 앞선 構造와 計算過程을 包含하고 있지만 이 모형에서도 흐름과의 상호작용은 고려되고 있지 않다. 波浪이 그 發生 및 成長이 문제가 될 만큼 큰 규모의 非定常 흐름場을 전파해 나가는 경우는 흔히 생길 수 있는데 흐름과 波浪의 상호작용을 제대로 취급하자면 이러한 非定常性이 충분히 고려되어야 한다. 그래서 Tolman(1989)은 WAM模型의 物理的 構造 위에 흐름의 영향을 고려하여 새로운 3세대 模型 WAVEWATCH를 발표한 바 있다. 이 모형에서도 에너지 平衡方程式을 한 단계에 바로 적분하지는 못했지만 源泉函數를 제외한 傳播項들은 흐름을 고려하면서도 한 단계에 적분함으로써 數值的 진전을 보였다. 本 研究에서는 흐름과 淺海效果를 고려할 수 있는 經濟的 模型의 개발을 위해 Tolman의 傳播技法과 DWAM模型의 源泉函數들을 결합한 離散形 스펙트럼 模型을 구성해 보았다. 考慮된 物理的 現象은 에너지의 入力 및 送風으로 인한 減衰構造, 에너지의 傳播, 變化하는 水深 및 흐름의 영향, 그리고

*慶星大學校(Department of Civil Engineering, Kyungsung University, Pusan, Korea)

淺海效果로는 淺水 및 屈折현상과 바닥마찰로 인한 에너지의 減衰構造이다. 源泉函數의 構造 및 特性 그리고 計算法은 尹(1991)에 나타나 있으므로 여기서는 새롭게 도입되는 傳播技法에 한하여 그 特性을 糾明 確認하여 보았다. 實驗過程은 Tolman이 제시한 方法을 따르고 Gadd技法과의 比較 및 球型海底地形에 대한 屈折실험을 추가하였다.

2. 模型의 支配方程式

흐름이 없는 경우 傳播중의 波高變化는 에너지 保存方程式을 사용하여 결정할 수 있다. 하지만 흐름場에서의 傳播시에는 라디에이션應力으로 인한 波浪과 흐름간의 에너지 交換 때문에 에너지는 더 이상 保存되지 못하므로 波浪作用 保存式을 사용해야 한다 (Whitham, 1965). 이 경우의 波浪作用 平衡方程式은 파랑작용 스펙트럼 $N(\omega, \theta, \vec{x}, t)$ 에 대해

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial}{\partial \theta} [C_\theta N] + \frac{\partial}{\partial \omega} [C_\omega N] = J \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

여기서

- \vec{C}_g : x-y 水平空間에서의 에너지 傳播速度
- C_θ : 方向空間에서의 傳播速度
- C_ω : 周波數 空間에서의 傳播速度
- σ : 相對角周波數
- ω : 絕對角周波數
- \vec{U} : 흐름속도
- S: 源泉函數

그리고 J는 相對角 周波數에서 定義되는 源泉函數를 絕對周波數 空間에서 사용하기 위한 Jacobi變換으로서 다음과 같다.

$$J = \left[2\pi \left(1 + \frac{\vec{U} \cdot \vec{e}}{C_g} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

여기서 \vec{e} 는 방향 θ 로의 단위벡터이다.

式 (1) 좌변의 둘째항은 흐름速度 \vec{U} 와 전파속도 \vec{C}_g 로 인한 波浪作用의 x-y空間에서의 移送를 나타낸다. \vec{C}_g 의 方向은 θ 이고 그 크기는

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} \quad (3)$$

로 정의된다. 또한 이 항은 水深 및 흐름으로 인한 淺水現像을 포함하고 있다. 셋째항은 屈折을 나타낸다. 單純進行波의 경우 波向의 變化로 나타나는 것이 여기서는 波浪作用의 θ 空間으로의 傳播로 표현된다. 基本 線形波理論으로부터 周波數와 波數는 다음의 관계를 가진다.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad (5)$$

波數保存式은 (Whitham, 1974)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \quad (6)$$

式 (4), (5)를 미분한 후 (6)을 사용하면 θ 공간으로의 전파속도 C_θ 는

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서 m은 θ 에 수직인 방향의 좌표축이다.

셋째항은 수심과 흐름의 非定常性으로 인한 절대 주파수의 變化를 나타낸다. 단순진행파에서의 주파수의 變化가 여기서는 波浪作用의 ω 공간으로의 전파로 나타난다. 전파속도 C_ω 는 앞서처럼 유도하면

$$C_\omega = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \quad (8)$$

3. 模型의 數值積分

式 (1)의 적분은 좌변의 전파와 우변의 源泉函數에 대한 2단계의 分割技法(尹, 1991)을 사용하고 傳播式의 적분과정은 다음과 같다. 源泉函數를 무시하면 식 (1)은

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (C_x N) - \frac{\partial}{\partial y} (C_y N) - \frac{\partial}{\partial \omega} (C_\omega N) - \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) \quad (9)$$

여기서 $(C_x, C_y) = \vec{C}_g + \vec{U}$ 이다. 식 (9)를 적분하는 數值技法 ICN(Iterative Crank-Nicholson)은 Crank-Nicholson技法을 응용한 반복법으로서 predictor-corrector技法의 형식을 가진다. 이 技法은 數值的 分散이 적고 多次元 문제에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 지니고 있는 반면 線形問題에 대해 無條件 不安定한 舉動을 보여 解가 振動하므로 기본기법에 약간의 변형을 가해 이를 제거했다(Tolman, 1989). Predictor는 다음과 같이 주어진다.

$$\left[\frac{N^{n'} - N^n}{\Delta t} \right]_{i,j,k,l} = L_x^n + L_y^n + L_\omega^n + L_\theta^n \quad (10)$$

여기서 n, n' 는 각각 기존값과 predictor의 시간준위를 나타내고 Δt 는 시간간격, 그리고 i, j, k, l 은 x, y, ω, θ 의 준위를 나타낸다. 그리고 우변의 L 은 각 공간에서 전파를 행하는 연산자이다. Corrector는 構造的으로 predictor와 동일한데 n' 는 $n+1$ 로, n 은 n'' 로 대신하여 얻어지고 n'' 는 다음과 같다.

$$N^{n''} = 0.5(N^n + N^{n'}) \quad (11)$$

식 (1) 우변의 첫째항은 ICN 技法으로 표현하면

$$L_x^n = \left[\frac{[C_x N]_{i-1} - [C_x N]_{i+1}}{2\Delta x} \right]_{j,k,l}^n$$

여기서 安定性을 얻기위해 1차의 upstream 差分法을 응용하면

$$L_x^n = \frac{1}{2\Delta x} \{ (1+\alpha)[C_x N]_{i-1} - 2\alpha[C_x N]_i - (1-\alpha)[C_x N]_{i+1} \}_{j,k,l}^n \quad (12)$$

여기서 α 는 $0 \leq |\alpha| \leq 1$ 의 계수로서 그 부호는 C_x 의 부호와 일치한다. L_y 는 L_x 와 동일하게 취급되고 이들의 경계에서의 취급은 다음과 같이 각 방향의 upstream 差分을 취한다(Fig. 1).

$$L_x^n + L_y^n = \left[\frac{(C_{xs}N)_{int} - (C_{xs}N)_{ij}}{\Delta S} \right]_{k,l}^n \quad (13)$$

여기서 C_{xs} 는 s 방향으로의 傳播速度, 그리고 int 는 內插法으로 決定되는 점 5에서의 값을 의미한다.

셋째항은 周波數 空間에서의 傳播로서 한 시간 간격동안의 flux가 상류점의 전 파랑작용을 넘지 못하게 두 격자점 사이의 flux를 제한함으로써 安定性을 가

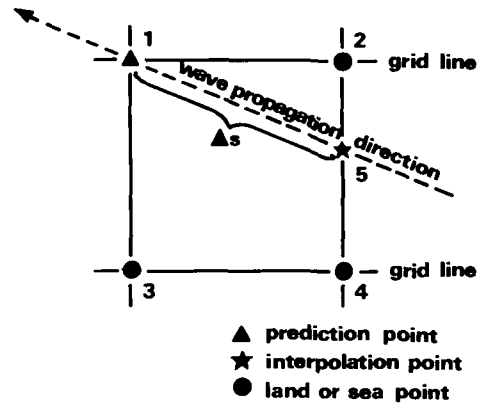


Fig. 1. Interpolation point in the angle derivative upstream scheme for boundary points in the x-y space.

지게 된다.

$$L_\omega^n = \left[\frac{M_{k-1,l} - M_{k,k+1}}{\Delta \omega} \right]_{i,j,l}^n \quad (14)$$

여기서 $M_{p-1,q} = 0.5[(C_\omega N)_p + (C_\omega N)_q]$ 이다. 두점간의 flux $|M|$ 은 $(N\Delta\omega)_u/\Delta t$ 보다 항상 작아야 한다. 여기서 u 는 ω 공간에서의 upstream 성분을 의미한다. 周波數 空間에서의 境界値는 零으로 假定한다. 이는 低周波 數帶는 C_ω 가 영으로 收斂하고 高周波數帶에서도 飽和段階에서는 스펙트럼이 ω^{-5} 혹은 ω^{-6} 에 비례하여 (Phillips, 1977) $C_\omega N$ 이 零으로 收斂하기 때문이다.

$$L_\theta^n = \left[\frac{[C_\theta N]^{l-1} - [C_\theta N]^{l+1}}{2\Delta \theta} \right]_{i,j,k}^n \quad (15)$$

방향공간에서는 conservative elimination algorithm을 도입하여 安定性을 구한다. 즉 전파하여 생긴 陰의 波浪作用을 모두 제거한 후 방향 성분들에 $N(\omega)$ 를 보존하도록 일정한 상수를 곱하는 것이다. 방향공간은 닫힌 공간이므로 특별한 경계에서의 취급법이 필요 없다.

4. 數值實驗 및 結果

4.1 1次元 深海傳播實驗

單一 成分波에 대해 1次元 深海 傳播實驗을 행했다. ICN技法은 큰 Courant 數(C_r)에서 陰의 값 또한 크게 發生하므로 $C_r = 0.94$ 일 때 upstream 分割係數 $\alpha = 0.0, 0.05, 0.1$ (Fig. 2; A, B, C)에 대해 계산해 보았다. 初

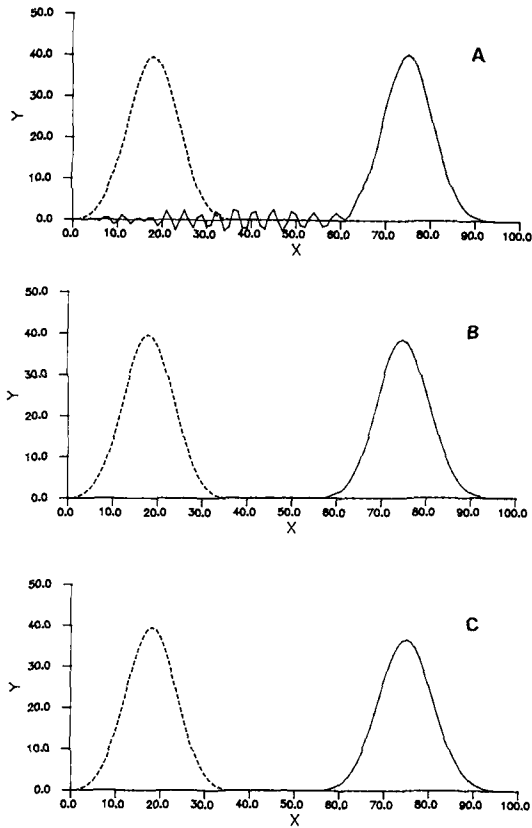


Fig. 2. One dimensional deep water propagation without currents(A: $\alpha=0.0$, B: $\alpha=0.05$, C: $\alpha=0.10$)

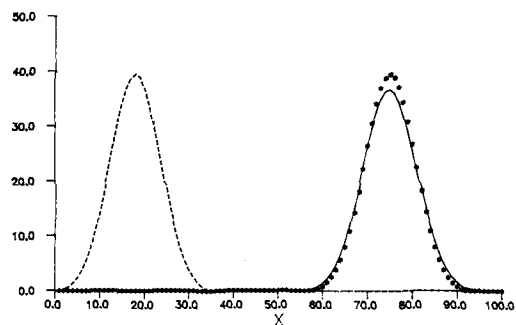


Fig. 3. One dimensional deep water propagation(ICN and Gadd scheme)

期形狀은 Gauss 分布형을 가지고 계산결과는 60시간간격 이후의 값이다. 초기값(점선)과 비교해 전체 에너지의 이동은 잘 보존되지만 $\alpha=0$ 일 때 상류부의 진동이 크게 나타나고 있다. α 가 증가함에 따라 數值的 分散效果로 이러한 진동이 감소되는데 $\alpha=0.10$

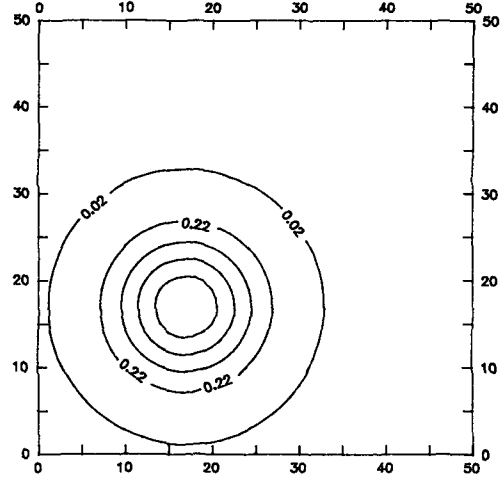


Fig. 4. Two dimensional deep water propagation without currents. Initial energy distribution

의 값으로 이 현상은 완전히 제거가 된다. 반면에 分散의 영향으로 振幅誤差가 증가함을 알 수 있다. 波浪模型에 성공적으로 적용되고 있는 數值技法 중의 하나인 Gadd(1978b)技法과 $\alpha=0.1$ 일 때의 현 技法과 비교한 것이 Fig. 3인데 *가 Gadd技法의 계산치이다. 位相誤差의 관점에서는 별 차이가 없지만 振幅誤差에 있어 Gadd技法이 보다 우수함을 알 수 있다. 하지만 Gadd技法은 多次元 문제에 확장하기가 매우 어려워 본 지배방정식을 푸는데 사용하자면 x-y공간 전파에만 적용가능해 적분의 分割 段階가 증가하는 단점이 있다. WAM모형에서도 이러한 어려움을 피하고자 傳播式의 積分에 단순한 upstream技法을 사용하였다. 전체 에너지는 거의 보존되고 약간의 分散性 외에는 작은 α 값으로 좋은 결과를 보여주는 것으로 판단된다.

4.2 2次元 深海傳播實驗

2차원 Gauss分布形의 初期函數를(Fig. 4) x축과 30° 의 方向으로 傳播시키는 경우이다. $C_r=0.79$ 에 $\alpha=0.1$ 을 사용해 보았다. 결과를 보면(Fig. 5) 상류부의 진동이 나타나지만 그 양은 미소하고 비대칭경계의 영향으로 進行方向 우변의 진동이 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 1차원 실험과 같이 전반적으로 양호한 전파기능을 나타내었다.

4.3 淺水現象實驗

먼저 水深으로 인한 淺水現象을 살펴보기 위해 —

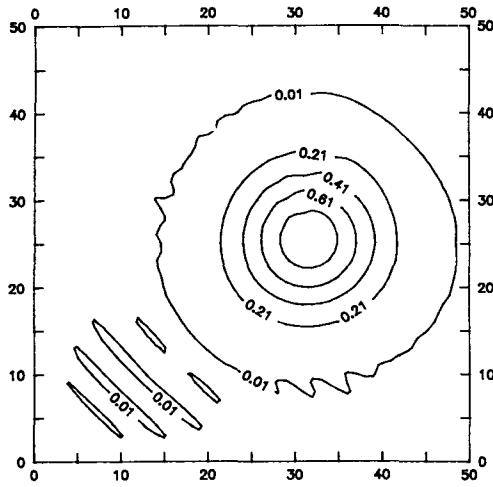


Fig. 5. Two dimensional deep water propagation without currents. Energy distribution after propagation

定한 海底傾斜를 가진 海域에 대해 상류 深海경계에서 單一成分波를 한 방향으로 계속 傳播시켜 定常狀態에 도달할 때까지 계산하였다. 入射波의 주기는 10초이고 하류단에서는 吸收境界를 사용한다. 水深間隔은 2m, $\Delta x = 15$ km를 사용하고 $C_r = 0.56$ 에 대해 계산하였다. 해석하는 다음과 같다(Phillips, 1977).

$$E = E_0 \cdot \frac{C_{g0}}{C_g} \quad (16)$$

E_0 , C_{g0} 는 深海에서의 에너지 및 群速度이다. 결과를 보면(Fig. 6) 해석해와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

定常흐름으로 인한 淺水實驗의 경우 에너지 保存 대신 波浪作用 保存 概念을 사용하는 것 외엔 數值的으로는 水深실험과 별 차이가 없다. 深海에서 定常흐름장을 주기 10초의 波浪이 x방향으로 전파해 나가는 경우이다. 흐름속도는 x방향으로 일정하게 변하고 파향과 흐름방향이 동일한 경우와 역인 경우 공히 입사경계에서 흐름속도는 영이다(Tolman, 1989). 이 경우 波 에너지의 해석하는(Phillips, 1977).

$$\frac{E}{E_0} = \frac{c_0^2}{c(c+2\pi)}, \quad \frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4U}{c_0} \right]^{1/2} \quad (17)$$

여기서 U는 흐름속도, 첨자 0은 $U=0$ 에서의 값이다. 결과를 보면 水深으로 인한 淺水實驗에서와 같이 解析解와 잘 일치함을 알 수 있다(Fig. 7). 水深 및 흐름의 空間變化로 인한 에너지의 變化는 본 技法으로

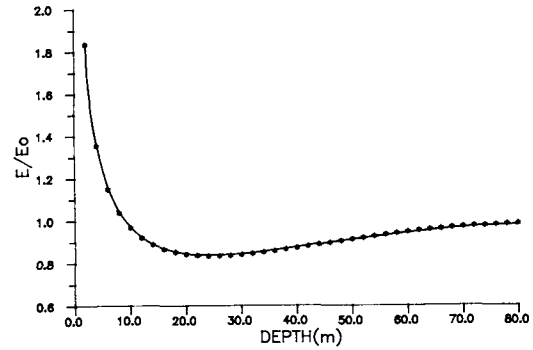


Fig. 6. Depth shoaling without currents(-: analytic solution, symbols: numerical model)

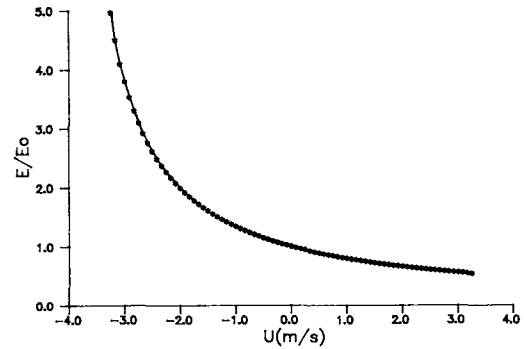


Fig. 7. Current shoaling(-: analytical solution, symbols: numerical model)

충분히 再現할 수 있다고 생각된다.

4.4 屈折實驗

屈折의 경우 두 가지 실험을 행하였다. 먼저 식 (10)에서 L_0 만 고려하여 이 부분의 傳播特性을 확인한 후 球形海底地形에 대한 實驗을 행하였다. L_0 만 고려할 경우 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \theta} [C_0 N] = 0 \quad (18)$$

즉, 空間傳播가 없이 어떤 평형方向을 향한 波浪場의 平均波向의 變化를 나타내고 있다. 흐름이 없고 x방향으로만 傾斜를 가진 海底地形에 대해 傳播速度 C_0 는

$$C_0 = -\frac{c(n-0.5)}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \sin\theta = C_1 \sin\theta = \frac{D\theta}{Dt} \quad (19)$$

이다. 여기서 n은 C_g/C_0 로 정의되고 식 (19)를 적분

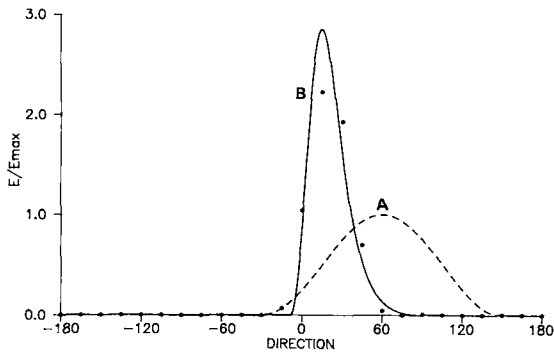


Fig. 8. Directional distribution for propagation in direction space only.(---: initial distribution, —: semi-analytic solution, symbols: numerical model)

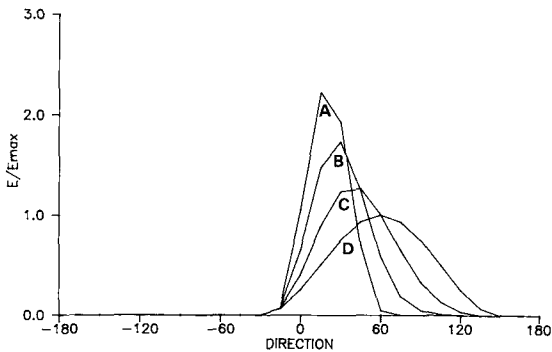


Fig. 9. Change of spectrum distribution in directional space(A: t=30 hr, B: t=20 hr, C: t=10 hr, D: t=0 hr)

하면

$$\theta(t) = C_0 \tan^{-1}(e^{C_1 t + C_2}) \quad (20)$$

$$C_0 = \begin{cases} -2 & -180^\circ < \theta < 0 \\ 2 & 0 < \theta < 180^\circ \end{cases}$$

$$C_2 = \ln(|\tan(0.5\theta)|)$$

이고 θ_0 는 $t=0$ 에서의 θ 값이다. 이상의 관계식으로부터 준 해석해를 얻을 수 있고 초기평균파향 60° 에 $\cos^2\theta$ 분포를 가진 함수에 대해 $\Delta\theta=15^\circ$ 로 계산한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 낮은 성분 분할도를 생각하면 대단히 양호한 결과로 생각된다. 시간에 따른 에너지 分布의 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

空間傳播와 屈折이 接合된 경우의 舉動을 살펴보기 위해 Fig. 10과 같은 海底地形에 대해 계산해 보았다 (Goda, 1985). 파랑은 $y=0$ 축에서 왼쪽으로 진행해 가는데 入射波의 조건은 $H_{1/3}=0.84m$, $T_{1/3}=5.1$ sec,

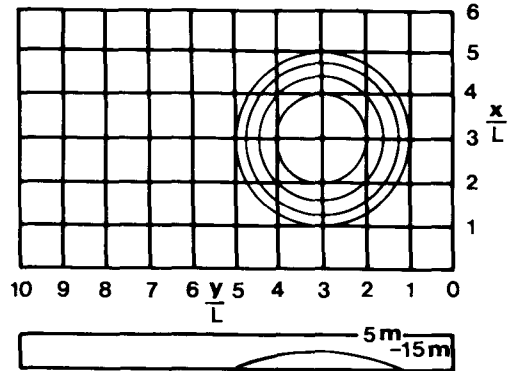


Fig. 10. Shape of spherical shoal(Goda, 1985)

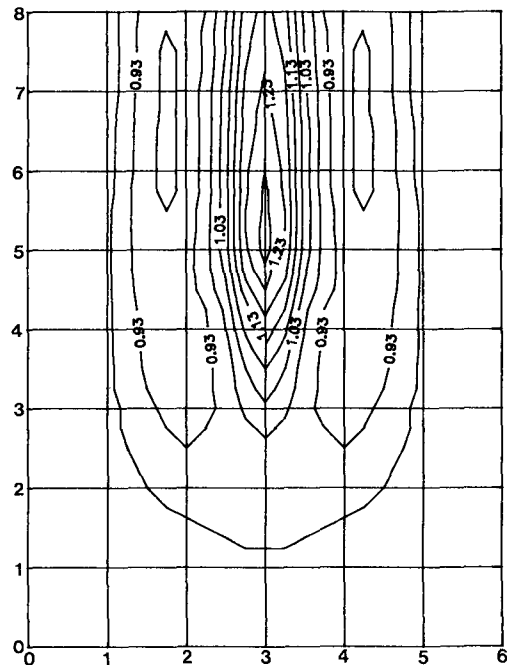


Fig. 11. Distribution of the ratios of heights

$L_{1/3}=40m$ 이다. 결과는 계산된 에너지를 $H_{1/3}$ 과 고로 환산한 후 입사파에 대한 波高比로 나타내었다(Fig. 11). 最大波高 부분이 Goda의 결과(Goda, 1985)에 비해 약간 後尾에 발생하는 외엔 매우 類似한 波高 分布를 보여주었다.

4.5 周波數 空間에서의 傳播實驗

공간적으로 균일한 非定常 흐름이 존재하는 일정 水深의 해역을 波浪이 傳播하는 경우이다. 波向은 單一方向만 고려하고 分散性을 배제하기 위해 淺海

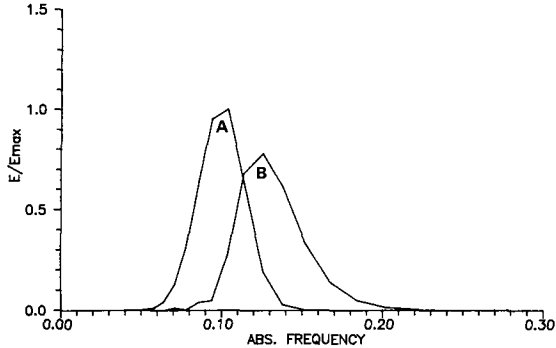


Fig. 12. Normalized absolute frequency spectrum(A: initial form, B: after propagation)

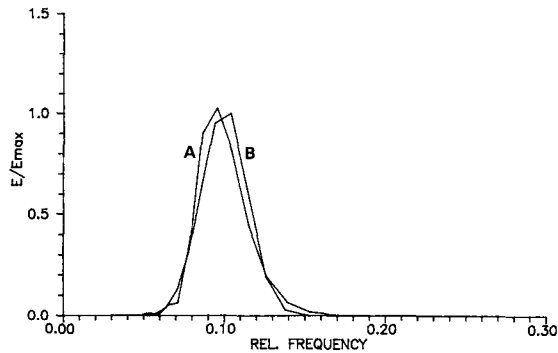


Fig. 13. Normalized relative frequency spectrum(A: after propagation, B: initial form)

水深을 가정해 모든 성분파들의 전파속도는 \sqrt{gh} 로 한다. 따라서 스펙트럼 형상의 변화는 공간으로의 분산에는 무관하고 오로지 非定常性으로 부터만 발생한다.水深은 1m이고 흐름은 $u=1-\cos(t/T)$ 이다. 여기서 T는 60시간이다. 30시간 후에 흐름은 일정하다고 가정한다. 초기의 波浪作用分布는 주파수공간에서 Gauss 分布形을 가지고 평균 주파수는 $f_m=0.1$, spread는 0.0004, $\Delta x=25$ km, $\Delta t=1.5$ hr를 사용한다. 주파수의 분할은 $f_i=1.1f_{i+1}$ 의 관계를 가지며 0.04에서 0.394 Hz의 값을 가진다. 30시간 후의 계산결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 공간전파를 가지는 동안 흐름이 시간에 따라 변화하여 이로 인한 절대주파수 공간에서의 스펙트럼의 이동과 변형이 잘 나타나 있다. Fig. 13은 상대주파수 스펙트럼으로 나타내어 비교한 것으로서 周波數 空間의 分割度를 생각하면 초기값(A)과 잘 일치하고 있다.

5. 結 論

흐름을 고려한 波浪推定模型을 구성하여 數値實驗을 행하였다. 源泉函數에 대해서는 그 特性을 尹等(1991)에서 논의한 바 있으므로 傳播技法에 대해서만 다루었다. 空間傳播 實驗結果 陰의 해는 upstream 分割係數를 도입함으로써 제거될 수 있었고 약간의 分散誤差를 보여주었다. Upstream 分割係數, conservative elimination algorithm 그리고 limited flux approach 등을 사용하여 安定性을 얻을 수 있었고 淺水 및 屈折에 대한 개별적 실험에서도 좋은 결과를 보여주었다. 非定常흐름으로 인한 周波數 空間에서의 傳播實驗에서도 초기의 주파수 스펙트럼의 형상이 전파후에도 상대 주파수 스펙트럼으로 잘 보존되었다. 傳播技法의 타당성이 충분히 인정되므로 차후 源泉 함수와 결합된 模型 전체의 數値積分이 검토된 후 현 장자료를 통한 模型檢證이 뒤따라야 할 것이다.

參考文獻

- Bretherton, F.P. and Garret, C.J.R., 1968. Wave trains in inhomogeneous moving media, Proc. Roy. Soc. London, A302, 529-554.
- Bretschneider, C.L., 1951. Revised wave forecasting curves and procedure, Tech. Report HE-155-47, Institute of Engr. Res., Univ. of California, p.28.
- Christoffersen, J.B., 1982. Current depth refraction of dissipative water waves, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical Univ. of Denmark Series Paper No.30.
- Gadd, A.J., 1978a. A split explicit integration scheme for numerical weather prediction, Quart. J.R. Met. Soc., **104**: 569-582.
- Gadd, A.J., 1978b. A numerical advection scheme with small phase speed errors, Quart. J.R. Met. Soc., **104**: 583-594.
- Golding, B.W., 1983. A wave prediction system for realtime sea state forecasting, Quart. J.R. Met. Soc., **109**: 393-416.
- Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthington, B.A., Hasselmann, K. and Ewing, J.A., 1979. A hybrid parametrical wave prediction model, J. Geophys. Res., **84**: 5727-5738.
- Hasselmann, K., 1962. On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I, J. Fluid Mech., **12**: 481-500.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller,

- P., Olbers, D.J., Richeter, K., Sell, W. and Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr. Z.*, A8(12).
- Holthuijsen, L.H., Booij, N. and Herbers, T.H.C., 1989. A prediction model for stationary, short crested waves in shallow water with ambient currents, *Coast. Eng.*, B, 23-54.
- Inoue, T., 1967. On the growth of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting, Rep. TR 67-5, Geophys. Sci. Lab., New York University.
- Janssen, P.A. E.M., Komen, G.J. and de Voogt, W.J.P., 1984. An operational coupled hybrid prediction model, *J. Geophys. Res.*, 89: 3635-3654.
- Karlsson, T., 1969. Refraction of continuous ocean wave spectra, *Proc. ASCE*, 95(WW4): 437-447.
- Longuet-Higgins, M.S., 1952. On the statistical distribution of the heights of sea waves, *J. Mar. Res.*, 11: 245-266.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., 1960. Changes in the form of short gravity waves and tidal currents, *J. Fluid Mech.*, 8, 565-583.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., 1961. The changes in amplitude of short gravity waves on steady nonuniform currents, *J. Fluid Mech.*, 13: 481-504.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W., 1962. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', *J. Fluid Mech.*, 10: 529-549.
- Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows, *J. Fluid Mech.*, 3: 185-204.
- Morton, K.W., 1971. Stability and Convergence in fluid flow problems. *Proc. Royal Soc.*, A323: 323-253.
- Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind, *J. Fluid Mech.*, 2: 417-445.
- Phillips, O.M., 1977. The dynamics of the upper ocean, Cambridge University Press.
- Pierson, W.J. and Moskowitz, L.L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitalgorodskii, *J. Geophys. Res.*, 69: 5181-5190.
- Pierson, W.J., Neuman, G. and James, R.W., 1955. Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, H.O. Pub 603, U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, D. C.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation, *J. Fluid. Mech.*, 95: 159-176.
- Sakai, T., Koseki, M. and Iwagaki, Y., 1983. Irregular wave refraction due to current, *J. Hydraulic Engr.*, 109: 1203-1215.
- Skovgaard, O. and Jonsson, I.G., 1976. Current depth refraction using finite elements, *Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 721-737.
- Snyder, R.L. and Cox, C.S., 1966. A field study on the wind generation of ocean, *J. Mar. Res.*, 24: 141-177.
- Sobey, R.J. and Young, I.R., 1986. Hurricane wind waves; A discrete spectral model, *J. Wtrway. Port. Coast. and Ocean. Engr.*, 112(2): 370-389.
- Sverdrup, H.U. and Munk, W.H. 1947. Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting, U.S. Hydro. Office, H.O. Pub. 601, p.44.
- SWAMP Group, 1985. Ocean wave modeling, Plenum Press.
- SWUN Group, 1985a. Shallow water intercomparison of wave models, Part 1, in *The Ocean Surface*, D. Reidel Pub. Co.: 201-205.
- SWIM Group, 1985b. Shallow water intercomparison of wave models, Part 2, in *The Ocean Surface*, D. Reidel Pub. Co.: 207-214.
- SWIM Group, 1985c. Shallow water intercomparison of wave models, Part 3, in *The Ocean Surface*, D. Reidel Pub. Co.: 215-220.
- Tolman, H.L., 1989. The Numerical model WAVEWATCH, a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas, *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Rep. 89-2, Delft Univ. Technology.
- WAMDI Group, 1988. The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18: 1775-1810.
- Whitham, G.B., 1965. a general approach to linear and nonlinear dispersive waves using a Lagrangian, *J. Fluid Mech.*, 33: 273-283.
- Whitham, G.B., 1974. *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York.
- Wilson, B.W., 1955. Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches, U.S. Army Corps. Engrs., Beach Erosion Board, Tech. Memo. No.73.
- 建設部, 1975. 韓國 沿岸의 設計波 決定을 위한 컴퓨터 프로그램개발 연구보고서.
- 김태인, 정형식, 1987. 韓國 西海岸에서의 設計波의 決定, 韓國水文學會誌, 20(2): 127-138.
- 水産廳, 1988. 海域別(東海, 南海) 深海波 推定 報告書.
- 安守漢, 1973. 不規則波의 統計의 特性에 관한 연구. 大韓土木學會誌, 21(1): 35-45.
- 尹鍾台, 安守漢, 1991. 深海波浪模型의 比較研究, 韓國海岸·海洋工學會誌, 3(3): 1-13.
- 李吉成, 1986. 계산수리학: 모형의 수치해석(I), 韓國水文學會誌, 19(3): 205-211.
- 海洋研究所, 1984. 韓國 近海域에서의 波浪모델 研究, BSPE 00050-81-7.
- 海運港灣廳, 1988. 海運港灣 設計波 推算報告書.