

〈論 文〉

## 摩擦과 屈折이 波高에 미치는 影響

The Effects of Bottom Friction and Refraction on the Wave Height

姜 琯 沅\*

Kwan-Won Kang

咸 慶 宰\*\*

Kyong-Jae Ham

### ABSTRACT

The equations for the wave orthogonal and wave heights are presented along the depth using time as the independent variable. The effect of wave height variation due to bottom friction and the wave refraction is included. In this paper, a numerical procedure is described for the calculation and two analytical solutions are presented in case of straight and parallel bottom contours and horizontal bottom in order to check the computed results. The computer outputs are in the form of automatically plotted wave orthogonal and wave heights along the wave path. In practical calculation of wave heights, Samchuck, Pohang, and Hanlim are selected as plane sloping bottoms.

### 要 旨

本 研究에서는 有限 水深에서의 進行波의 變形을 獨立變數인 時間에 대하여 알아 보았으며, 여기에는 바닥의 摩擦과 波의 屈折의 波高에 미치는 影響을 包含한다. 또한 數值計算의 順序와 數值解析의 檢査를 위하여 海底 等深線이 直線이면서 서로 平行한 境遇에 對하여 두 種類의 理論解를 提示하였다. 計算된 結果值인 進行波의 經路 및 波高變化는 컴퓨터로 圖示(plot)<sup>1)</sup>하였다. 實地形의 適用에 있어 浦項, 三陟 그리고 翰林港을 대상으로 水深에 따른 波高變化를 計算하였다.

Skovgaard<sup>2)</sup>에 의해 發表된 바 있다.

本 研究에서의 波高計算 方法은 일종의 스펙트럼法이며, 理論적으로 다른 方法의 波高計算보다 우수하지만 計算의 精度가 높아짐에 따른 計算時間의 增大와 바람의 影響을 고려할 경우 難點이 있다.

지금까지의 波高計算의 경우 格子網을 설치하는 경우가 많으나 이는 컴퓨터에서 커다란 기억용량을 要求하게 되며 따라서 그 適用에 制限을 받게 된다.

그러나 本 研究에서는 波의 進行點에서 直接 必要한 값을 計算하기 때문에 大容量의 컴퓨터가 必要하지는 않으나 바닥의 地形을 數式化할 必要가 있다. 實際 地形의 適用으로는, 바닥의 기울기를 海圖上의 水深을 利用하여 最小自乘法으로 求한 後에 波高 變化를 計算하였다.

### 1. 序 論

三面이 바다로 둘러싸인 우리나라는 國土面積에 비하여 海岸線이 긴 편이며, 이 때문에 많은 港灣이 開發되어 經濟活動의 中心이 되어 있다. 앞으로의 經濟發展에 따라 國內外의 貨物 수송량이 더욱 더 늘어날 것이며, 이로 인한 港灣의 增設 또는 擴張工事が 不可避한 것으로 思料된다. 따라서 各種 港灣構造物 設計에 있어 基本資料가 되는 각 水深에 따른 正確한 波高가 必要할 것이다.

1963년이래 지금까지 波의 屈折에 관한 數值計算을 주제로 한 많은 論文들이 발표되었으며, 海底 바닥의 摩擦力에 의한 波高減少影響에 대한 것은 Collins<sup>2)</sup> 및

\*仁荷大學校 教授

\*\*仁荷大學校 大學院

그리고 지금까지 大部分의 波高變化를 追跡하는 方法들의 計算은 深海로부터 시작되는 것이 普通이나 여기에서 提示한 方法은 어떠한 水深에서도 計算의 시작이 可能한 것이다.

本 研究에서는 波의 舉動을 檢討하기 위한 例로서 海底 等深線이 直線이면서 서로 平行한 경우 중, 海底 바닥이 수평일 경우와 기울기를 갖는 경우, 그리고 SINE曲線일 경우에 대하여 波의 進路와 이에 따른 波高의 變化를 計算한 後에 이 結果를 圖示(automatic plot) 하였는데 이는 單調로운 海底傾斜의 경우와 海底傾斜를 數式化할 수 있을 경우의 適用 可能함을 뜻한다. 그리고 本 研究에서는 潮流의 影響을 考慮하지 않았으며 實際 地形의 適用은 于滿의 差가 적은 東海岸의 浦項, 三陟 그리고 濟州島의 翰林港에 對하여 計算 檢討하였다.

## 2. 理 論

### 2.1 基本假定

本 研究는 微小振幅波를 다루었으며 다음과 같은 假定下에 研究를 進行하였다.

- i) 潮流와 바람 및 浸透에 의한 影響은 無視하며 바닥의 摩擦에 의한 影響은 考慮한다.
- ii) 屈折과 淺水에 의한 影響은 波의 初期 入射角과 數式化된 海底地形만을 考慮하여 計算한다.
- iii) 進行波가 서로 交叉할 경우, 交叉하기 前까지의 波의 舉動을 考慮한다.
- iv) 水面의 曲率은 無視한다.

### 2.2 理論式的 展開

여기에서는  $c$ 가 波速이고,  $k$ 가 波數,  $T$ 가 週期,  $g$ 는 動力加速度일 때 다음과 같이 나타내어지는 波를 이룬다.

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \text{ 또는 } c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{cT} \quad (1)$$

그림 1은 進行波  $O_1$ 과 이에 近接한  $O_2$ , 그리고 波峰線  $F_1$ 과 隣接 波峰線  $F_2$ 가 微小時間  $dt$ 에 의해 區分된 것을 나타낸 것이다.  $P$ 點에서 波의 進行方向 및 波峰線 方向의 微小距離를 각각  $D_s, D_f$ 라 할 때 波 進行速度  $c$ 와 波의 微小 進行距離  $D_s$ 의 關係는 式(2)와 같다.

$$D_s = c \cdot dt \quad (2)$$

그림 1에서와 같이 固定된 직교좌표  $x$ 와  $y$ 를 도입하고  $A$ 를 波 進行方向(波向線)과  $x$ 軸이 이루는 角이라 하면 다음과 같은 基本式이 成立하게 된다.<sup>4,5)</sup>

$$\frac{dx}{dt} = c \cdot \cos A \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = c \cdot \sin A \quad (4)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial c}{\partial x} \sin A - \frac{\partial c}{\partial y} \cos A \quad (5)$$

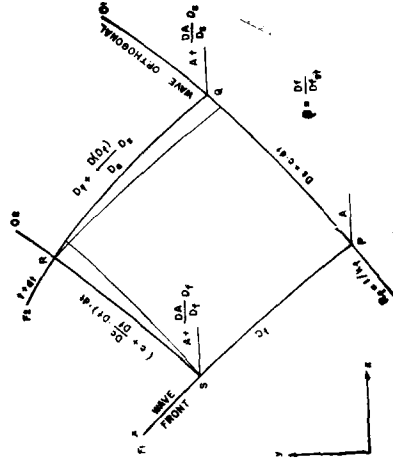


Fig. 1 Adjacent Wave Orthogonals and Fronts

또 Munk와 Arthur<sup>6)</sup>는 波峰線 距離比(Wave orthogonal separation factor)  $\beta$ 를 獨立變數인 波의 進行距離  $s$ 로 表示한 二階 常微分 方程式을 유도하였다.

$$\frac{D^2\beta}{D_s^2} + p_s \cdot \frac{D\beta}{D_s} + q_s \cdot \beta = 0 \quad (6)$$

$$p_s = -\frac{1}{c} \left( \frac{\partial c}{\partial x} \cos A + \frac{\partial c}{\partial y} \sin A \right) \quad (7)$$

$$q_s = \frac{1}{c} \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \sin^2 A - \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \cdot 2 \cdot \sin A \cdot \cos A + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \cos^2 A \right) \quad (8)$$

$$\beta = \frac{Df}{Df_s} \quad (9)$$

이 常微分 方程式을 時間에 따른 波의 움직임을 알 수 있도록 獨立變數  $s$  대신  $t$ 를 사용하는 式으로 바꾸어 주면 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + p_t \cdot \frac{d\beta}{dt} + q_t \cdot \beta = 0 \quad (6-a)$$

$$p_t = -2 \left( \frac{\partial c}{\partial x} \cos A + \frac{\partial c}{\partial y} \sin A \right) \quad (7-a)$$

$$q_t = c \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \sin^2 A - \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} \cdot 2 \cdot \sin A \cdot \cos A + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \cos^2 A \right) \quad (8-a)$$

그런데 式(1)에서  $c = \phi(c, h)$ 이므로 式(5), (7-a), (8-a)에서,  $c$ 의  $x$ 와  $y$ 에 대한 偏微分은  $c$ 의  $h$ 에 대한 全微分과  $h$ 의  $x$ 와  $y$ 에 대한 偏微分으로 나타내는 것이 편리하다. 특히 海底地形이 數式化 될 수 있는 경우  $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$ 은 數值計算이 아닌 理論式으로 計算되기 때문에 상당히 편리하다.

式 (1)로부터  $\frac{dc}{dh}$ ,  $\frac{d^2c}{dh^2}$ 을 求하면

$$\frac{dc}{dh} = \frac{c}{h} \frac{\frac{2kh}{\sinh 2kh}}{1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}} \quad (10)$$

$$\frac{d^2c}{dh^2} = -\frac{dc}{dh} \frac{2g}{c^2 \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)^2} \quad (11)$$

이때 式(5), (7-a), (8-a)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dc}{dh} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \sin A - \frac{\partial h}{\partial y} \cos A \right) \quad (5-b)$$

$$p_t = -2 \frac{dc}{dh} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \cos A + \frac{\partial h}{\partial y} \sin A \right) \quad (7-b)$$

$$q_t = c \frac{dc}{dh} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \sin^2 A - \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \cdot 2 \cdot \sin A \cdot \cos A + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cos^2 A + c \frac{d^2c}{dh^2} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \sin A - \frac{\partial h}{\partial y} \cos A \right)^2 \quad (8-b)$$

그리고 二階 常微分 方程式(6-a)를 두개의 一階 常微分 方程式으로 바꾸어 주기 위하여  $\beta = u$ ,  $\frac{d\beta}{dt} = v$ 라 놓으면<sup>7)</sup> 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = v \quad (12)$$

$$\frac{dv}{dt} = -p_t \cdot v - q_t \cdot u \quad (13)$$

波峰線의 단위 길이당 에너지 전달량은  $c_g$ 를 群速度 (group velocity)라 할 때  $c_g \cdot H^2$ 에 비례하며 隣接한 進行波 사이에서의 에너지 전달량  $P$ 는 반사를 무시할 경우 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{H^2}{8} \cdot \frac{c}{2} \cdot \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (14)$$

여기서 初期值에 대한 에너지 전달량의 비를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{PD_f}{P_{st}Df_{st}} = \frac{H^2}{H_{st}^2} \cdot \frac{c}{c_{st}} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)}{\left( 1 + \frac{2k_{st} \cdot h_{st}}{\sinh 2k_{st} \cdot h_{st}} \right)} \frac{Df}{Df_{st}} \quad (15)$$

또 波高比는 式(15)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\frac{H}{H_{st}} = \left[ \frac{c_{st} \left( 1 + \frac{2k_{st} \cdot h_{st}}{\sinh 2k_{st} \cdot h_{st}} \right)}{c \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)} \right]^{1/2} \cdot \left[ \frac{Df_{st}}{Df} \right]^{1/2} \cdot \left[ \frac{P Df}{P_{st} Df_{st}} \right]^{1/2} = K_s \cdot K_r \cdot K_f \quad (16)$$

위 식에서 보다시피  $K_s$ 와  $K_r$ 은 波의 特性과 海底地形에 의하여 變하고,  $K_f$ 는 바닥의 摩擦로 因하여 에너지 전달량이 變하는 것으로부터 求하여 지며  $K_s$ 는 淺

水係數(shoaling coefficient),  $K_r$ 은 屈折係數(refraction coefficient),  $K_f$ 는 摩擦係數(friction coefficient)라 부르고 있다.

波의 進行中에 消失되거나 發生되는 에너지가 없다면  $PD_f = P_{st}Df_{st}$ 이므로  $K_f = 1$ 이 되나 進行波가 20波長을 넘어서 進行할 경우 바닥의 摩擦力을 무시할 수 없다.<sup>9)</sup> 그러므로 실제의 波高計算에 있어서는  $K_f$ 를 무시할 수 없고 이를 定義하여 주는 式이 必要하게 된다.

바닥의 摩擦에 의한 單位時間당 單位水平面積에서의 平均 에너지 損失을  $E_f$ 라 하면 式(17)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{D}{D_t} (PD_f) = -E_f \cdot D_f \quad (17)$$

그리고 初期值인  $P_{st}Df_{st}$ 는 一定하다고 볼 수 있으므로

$$\frac{D}{D_t} \left( \frac{PD_f}{P_{st} Df_{st}} \right) = -\frac{E_f \cdot D_f}{P_{st} \cdot Df_{st}} \quad (18)$$

이것 따라서

$$\frac{D}{D_t} (K_f^2) = -\frac{E_f}{P_{st}} \cdot \beta \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} (K_f^2) = -c \cdot \frac{E_f}{P_{st}} \cdot \beta \quad (20)$$

式(20)을 정리하면

$$2 \cdot K_f \cdot \frac{d}{dt} (K_f) = -c \cdot \frac{E_f}{P_{st}} \cdot \beta$$

이므로 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (K_f) &= -\frac{c}{2 \cdot K_f} \cdot \frac{E_f}{P_{st}} \cdot \beta \\ &= -\frac{c}{2} \cdot E_f \cdot \frac{1}{P} \cdot \left( \frac{P Df}{R^{1/2} Df_{st}} \right)^{1/2} \\ &= -\frac{c}{2} \cdot E_f \cdot \frac{1}{P} \cdot K_f \end{aligned} \quad (21-a)$$

여기서 바닥의 摩擦에 의한 에너지 損失은

$$E_f = \frac{2}{3\pi} \cdot \rho \cdot f_s \cdot u_{bm}^3 \quad (22)$$

이때<sup>9)</sup>  $u_{bm}$ 은 바닥에서의 水粒子의 最大 水平 速度,  $f_s$ 는 에너지 損失係數이다. 微小振幅波 理論에 의하면  $u_{bm}$ 과 바닥에서의 水粒子의 最大振幅  $a_{bm}$ 은 다음과 같다.

$$u_{bm} = \frac{\pi H}{T \cdot \sinh kh} \quad (23)$$

$$a_{bm} = \frac{H}{2 \sinh kh} \quad (24)$$

따라서 式(23), (24)를 이용하면 式(22)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_f = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot f_s \cdot a_{bm} \cdot \frac{\pi^2 H^2}{T^3 \sinh^2 kh} \quad (25)$$

式(14)와 (25)를 이용하여 式(21-a)를 다시 정리하

면 다음과 같은 一階 非線形 微分 方程式이 된다.

$$\frac{d}{dt}(K_f) = -\frac{8}{3cT} \cdot f_e \cdot a_{bm} \cdot \frac{dc}{dh} \cdot K_f \quad (21-b)$$

### 2.3 에너지 損失係數와 바닥의 粗度

波 摩擦因子(wave friction factor)  $f_w$ 는 바닥의 最大 剪斷應力에 對한 다음과 같은 式으로부터 定義된다.

$$\tau_{wm} = f_w^{1/2} \cdot \rho \cdot U^2 b_m^{3/2} \quad (26-a)$$

$$\tau_{wm} = \frac{1}{2} \cdot f_w \cdot \rho \cdot U^2 b_m^{8/3} \quad (26-b)$$

波 摩擦因子  $f_w$ 에 대한 半經驗的인 公式으로서,  $k_N$ 을 Nikuradse의 粗度係數라 할 때, Swart<sup>7)</sup>는 다음과 같이 表示하고 있다.

$$L f_w = -5.977 + 5.213 \left( \frac{a_{bm}}{k_N} \right)^{-0.94} \quad (27)$$

式(27)에서  $a_{bm}/k_N < 1.57$ 일 때는  $f_w$ 는 0.3으로 一定하다. 그리고 Jonsson과 Carlsen<sup>10)</sup>의 亂流흐름에 對한 實驗에 의하면  $f_e$ 와  $f_w$ 는 거의 같으며, Jonsson<sup>11)</sup>은  $f_e$ 를 다음과 같은 關係式으로 나타내고 있다.

$$\frac{1}{4\sqrt{f_e}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_e}} = -0.08 + \log \frac{a_{bm}}{k_N} \quad (28)$$

여기서의 極限값은  $a_{bm}/k_N = 1.986757$ 이며 이 값보다 적을 때는  $f_e$ 가 0.24로 一定하다.

波 摩擦因子, 에너지 損失係數 그리고 流砂에 對하여 커다란 影響을 미치는 바닥의 粗度を 나타내는 理論式을 만들기는 힘들다. 따라서 海底의 粗度を 求하는 데는 지금까지의 實驗資料나 經驗式에 依存하고 있다.

海底 土粒子가 느슨한 경우, 土粒子의 粒徑이 작으면 浮遊하게 되어 摩擦力에 影響을 미치지 못하게 되는 반면 粒徑이 커서 浮遊하였다가 다시 바닥으로 가라앉는 경우에는 波 運動과 海底 土粒子간에 상호 간섭이 발생하게 된다. 따라서 波動으로 인한 海底 土粒子의 교란 때문에 波動 自體가 影響을 받게 되는 경우, 波動은 그들 固有의 粗度を 만들게 된다. 따라서 海底 土粒子의 粒徑은 粗도에 影響을 미치게 된다.

또 海底에서 單位垂直面積당 에너지 전달량은 式(14)에서 보면 水深에 비례하며, 바닥이 느슨한 海底地形에서의 에너지 전달량은 土粒子의 이동에 影響을 미친다. 따라서 水深도 粗도에 關係됨을 알 수 있다.

이와 같이 바닥의 粗度は 海底地形이나 土粒子의 特性에 影響을 받게 되므로 이에 대한 研究가 要求된다.

一般的으로 自然狀態의 海底地形에서는  $1\text{cm} < k_N < 20\text{cm}$ 이며<sup>8)</sup>, 여기에서는  $k_N = 0.5\text{cm} \sim 25\text{cm}$ 에 對해 檢討하였다.

## 3. 數值計算

### 3.1. 數值計算의 方法

數值計算은 TRS-80 Microcomputer를 사용하였다. 프로그램중 SUBROUTINE은 IBM SYSTEM/360 SCIENTIFIC SUBROUTINE PACKAGE<sup>12)</sup>의 DRTWI, DRTNI, DHPCG를 이용하였다.

深海에서의 波長을  $L_0$ 라 하면  $h/L_0 > 0.5$ 이며 이때의 波速을  $C_0$ 라 하면  $C_0 = \frac{g \cdot T}{2\pi} \tan h \left( \frac{2\pi h}{L_0} \right) \approx \frac{gT}{2\pi}$ 가 되므로  $L_0 = C_0 \cdot T = \frac{g \cdot T^2}{2\pi}$ 로 놓을 수 있다.

모든 數值計算은 無次元量으로 行하여져야 하는데 深海波의 波長  $L_0$ 와 波速  $C_0$ 를 이용하여 길이의 次元을 갖는  $x, y, h$ 는  $L_0$ 로 나누어 주고  $C$ 는  $C_0$ ,  $t$ 는  $T$ 로 나누어 줌으로서 無次元化 시키며 無次元 變數들은 그대로 사용한다.

波動의 計算은 단계별로 反復하여 行하게 되며 式(1)의 波速과 式(28)의 에너지 損失係數는 따로 Subroutine을 두어 計算하였다. 波速은 Wegstein 方法으로 에너지 損失係數는 Newton 方法으로 각각 計算하였는데 두 方法 모두 구하려는 根으로의 收斂速度가 빠르기 때문에 다른 方法에 比하여 計算時間이 적게 든다.

波動을 지배하는 式(3), (4), (5), (12), (13), (21-b)는 모두 一階 常微分方程式이며 式(21-b)는 非線形이다. 이 式들은 같은 조건하에서 同時에 計算 되어져야 하며<sup>13)</sup> 각 微分方程式의 計算은 Hamming의 예측정정 方法(Hammings modified predictor corrector method)<sup>16)</sup>을 이용하였다. 이 方法은 區간의 기울기를 計算할 때, 다른 方法들이 한 區간에 한번 計算하는데 反해 네번 計算하므로 正確도가 높다는 長점이 있으나 이 方法 自體로만은 計算을 시작할 수 없으므로 初期值 計算에는 Runge-Kutta 方法을 應用하고 있다.<sup>12)</sup> 이 方法은 區間사이의 絕對誤差가 要求되는 誤差限界보다 적을 경우 區間을 2倍로 하고 클 때는 半減하면서 微分方程式을 풀어 나간다.

計算은, 주어진 初期值를 가지고 시작하며 그 다음 단계부터는 바로 前 단계에서의 根을 사용하는 方法을 反復하면서 行하여지며 다음과 같은 條件을 만족하도록 하여야 한다.

(1) 波가 考慮하는 領域의 境界에 도달하였을 경우 計算을 停止한다.

(2) 波가 碎波領域에 도달하였을 경우 計算을 停止한다.

(3) 두개의 隣接 進行波가 交叉할 경우 交叉하기 직

전에 計算을 停止한다.

(4) 波가 淺海領域에 도달하였을 경우에도 計算을 停止한다.

3.2 數値解의 檢査

數值的 結果를 檢査하기 위한 가장 確實한 方法은 數值的으로 計算된 값을 다른 分析 可能한 方法으로 計算한 값과 比較하여 보는 것이다. 여기에서는 다음과 같은 理論解가 存在하게 된다.

3.2.1 海底 等深線이 平行인 경우

이 경우에는 波가 進行함에 따라 水深이 變함으로 인하여 進行波는 屈折하게 된다. 여기서는 바닥이 平坦할 경우 뿐만 아니라 屈曲이 있을 때에도 計算值的 檢査가 可能하다.

波가 屈折하게 되는 경우, 그림 2에서와 같이  $FG'$ 를 等深線이라 하고 波峰線  $GG'$ 와 等深線이 이루는 角을  $\alpha$ 라 하면, 다음과 같은 Snell의 法則<sup>(4)</sup>이 成立한다.

$$\frac{c}{\sin \alpha} = \text{const.}$$

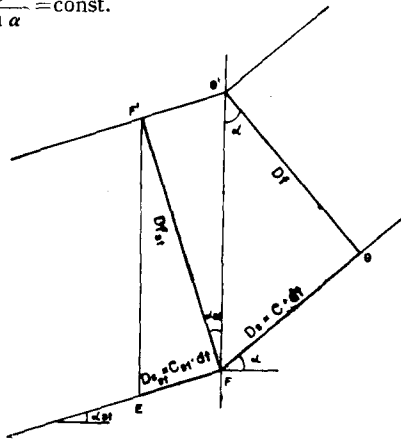


Fig. 2. Wave Refraction

그림 2에서  $Df_{st} = FF'$ ,  $Df = GG'$  이므로 式(30), (31)이 된다.

$$\beta = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_{st}} \quad (30)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha_{st}} \left( \frac{dh}{dx} \sin A - \frac{dh}{dy} \cos A \right) \frac{dc}{dh} \quad (31)$$

여기서 一般的으로  $\alpha \neq A$  이나  $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{dA}{dt}$  이다.

3.2.2 水深이 一定한 경우

水深이 一定하면  $a_{bm}$ 이 一定하게 되며,  $k_N$ 이 一定한 경우  $f_e$ 는 一定하게 된다. 그리고 波는 屈折하지 않으므로 波高는 바닥의 摩擦力的 影響에 의하여 變하게 된다. 式(16)에서 摩擦係數  $K_f$ 는  $\left( \frac{P}{P_{st}} \frac{Df}{Df_{st}} \right)^{1/2}$

이므로  $K_{f, st} = 1$  인것을 이용하여 直接 計算할 수 있다. 따라서 式(21-b)을 다시 定理하면

$$K_f \Big|_{t=0}^{t=t} = \int_0^t -\frac{8}{3cT} \cdot \frac{dc}{dh} \cdot a_{bm} \cdot f_e \cdot K_f \cdot dt$$

이므로 式(32)가 된다.

$$K_f = \frac{1}{1 + 3cT \cdot \frac{dc}{dh} \cdot a_{bm} \cdot f_e \cdot t} \quad (32)$$

4. 結果 및 分析

4.1 海底地形의 形態에 따른 波高變化

進行波의 舉動을 나타내는 基本式은 進行과의 經路를 計算하는 式과 파고를 計算하는 式으로 區分할 수 있는데, 式(3), (4), (5)로부터 파의 進行位置가 求하여지며, 이 進行點에서의 파고는 式(16)을 이용하여 計算한다. 그런데 式(16)에서의  $K_f$ ,  $K_r$ ,  $K$ 를 살펴보면,  $K_f$ 는 式(21-b)로부터 計算되며  $K_r$ 은 式(12)로부터 直接 計算되는 반면 淺水係數  $K$ 는 式(1)과 數式化된 海底地形의 表現式으로부터 計算되어지므로 海底地形의 數式化를 要하게 된다. 따라서 여기에서는 간단한 바닥 形態의 例로서 海底地形이 水平인 경우, 傾斜된 平面인 경우, SINE 曲線인 경우의 각각에 대하여 進行波의 經路 및 이에 따른 파고를 計算 檢討하였다.

표 1, 2, 3은 각 海底地形에 對하여 時間(t)에 따른 波의 進行 位置(x,y) 및 水深(h), 波速(c), 波高(H), 波峰線 距離(Df)를 計算한 것이며 그림 3, 4, 5는 표 1, 2, 3과 屈折角 및 波峰線 距離 Df의 變化를 이용하여 進行波의 舉動을 그림으로 나타낸 것이다.

그림 3, 4, 5에서 中央 部分은 進行波와 이에 隣接한 波( $Df_{st} = 100m$ )의 進行經路를 나타내며 下段 部分은 海底地形 形態를 나타낸다. 그리고 上段과 右側 部分은 x 및 y 方向에 따른 波高 變化를 나타내고 있는데 그림 4, 5에서의 點線은  $K_f$ 를 考慮하지 않았을 때의 波高 變化를 나타내며, 따라서 點線과의 差는 海底摩擦에 의한 에너지 損失이 된다. 그리고 그림 3의 경우 波高 變化는  $K_f$ 에 의하여 計算된 것이다.

여기에서, 세가지 海底地形에 대한 波動的 計算은 初期파고 1m, 週期 8秒, 粗度 0.1m 이고 波의 入射角이 60°일 때 求하여진 것이다.

海底地形이 水平인 경우의 波動은 표 1과 그림 3에 나타나 있다. 여기서는 海底地形이 水平이므로 波의 어떠한 進行點에서도 水深이 一定하므로 屈折이 일어나지 않으며, 또한 水深의 變化에 의하여 計算되는

Table 1. Wave Orthogonal Path and Wave Height Variation Due to Friction Over Horizontal Bottom.

$t(\text{sec.})$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$h(\text{m})$	$c(\text{m/sec.})$	$H(\text{m})$	$Df(\text{m})$
0	0.00	0.00	45.00000	12.4029	1.000000	100.000
10	62.01	107.41	45.00000	12.4029	0.999962	100.000
20	124.03	214.82	45.00000	12.4029	0.999924	100.000
30	186.04	322.24	45.00000	12.4029	0.999886	100.000
40	248.06	429.65	45.00000	12.4029	0.999848	100.000
50	310.07	537.06	45.00000	12.4029	0.999810	100.000
60	372.09	644.47	45.00000	12.4029	0.999772	100.000
70	434.10	751.88	45.00000	12.4029	0.999734	100.000
80	496.12	859.30	45.00000	12.4029	0.999697	100.000
90	558.13	966.71	45.00000	12.4029	0.999659	100.000
100	620.14	1074.12	45.00000	12.4029	0.999621	100.000
110	682.16	1181.53	45.00000	12.4029	0.999583	100.000
120	744.17	1288.94	45.00000	12.4029	0.999545	100.000
130	806.19	1396.36	45.00000	12.4029	0.999507	100.000
140	868.20	1503.77	45.00000	12.4029	0.999469	100.000
150	930.22	1611.18	45.00000	12.4029	0.999431	100.000
160	992.23	1718.59	45.00000	12.4029	0.999393	100.000
170	1054.24	1826.00	45.00000	12.4029	0.999355	100.000
180	1116.26	1933.41	45.00000	12.4029	0.999317	100.000
190	1178.27	2040.83	45.00000	12.4029	0.999279	100.000
200	1240.29	2148.24	45.00000	12.4029	0.999242	100.000
210	1302.30	2255.65	45.00000	12.4029	0.999204	100.000
220	1364.32	2363.06	45.00000	12.4029	0.999166	100.000
230	1426.33	2470.47	45.00000	12.4029	0.999128	100.000
240	1488.34	2577.89	45.00000	12.4029	0.999090	100.000
250	1550.36	2685.30	45.00000	12.4029	0.999052	100.000
260	1612.37	2792.71	45.00000	12.4029	0.999014	100.000
270	1674.39	2900.12	45.00000	12.4029	0.998976	100.000
280	1736.40	3007.53	45.00000	12.4029	0.998939	100.000
290	1798.42	3114.95	45.00000	12.4029	0.998901	100.000
300	1860.43	3222.36	45.00000	12.4029	0.998863	100.000
310	1922.44	3329.77	45.00000	12.4029	0.998825	100.000
320	1984.46	3437.18	45.00000	12.4029	0.998787	100.000

$K_f$ 가 水深이 變하지 않기 때문에 항상 一定하므로 波高에 影響을 미치지 못하게 된다. 그러나  $K_f$ 는 一定한 比率로 減少하게 되므로, (16)를 보면 波高減少가 直線的임을 알 수 있다.

海底地形이 傾斜진 平面인 경우의 波의 움직임은 표 2와 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서는 波가 進行함에 따라 水深은 一定하게 減少하며 波峰線 距離( $Df$ )는 점점 벌어진다. 또한 波高變化의 경우,  $K_f$ 를 考慮하지 않았을 때는 波가 進行함에 따라 波高가 減少하다가 增加하는 傾向을 보이며,  $K_f$ 를 考慮했을 때는 파고가 減少한 後에 一定하게 되는 傾向을 보인다.

여기서 波高變化의 경우  $K_f$ 를 考慮하지 않은 경우에는, 표 2에 나타난 바와 같이  $K_f$ 가 減少하였다가 다시 增加하였기 때문에, 結果적으로 波高가 다시 커지는 傾向을 나타냈으며,  $K_f$ 를 考慮한 경우  $K_f$ 의 계속적인 減少로 因하여 波高는 一定하게 되는 傾向을 보이는데, 이는  $K_f$ 를 考慮하지 않은 波高 計算의 경우, 進行波가  $K_f$ 를 考慮했을 때 보다 빨리 碎波 領域

에 가까워짐을 알 수 있다.

海底地形이 SINE 曲線形인 경우는 波가 進行하면서 水深이 減少하였다가 다시 원래의 水深으로 돌아오는 形態로서 이러한 경우에 對한 波의 舉動은 그림 5에 잘 나타나 있다. 波가 進行하면서 水深이 얇아짐에 따라 波峰線 距離( $Df$ )는 점점 커지나, 水深이 커짐에 따라  $Df$ 는 점차 減少하여 원래의 狀態로 됨을 알 수 있다. 그리고 波高의 경우 最小波高는  $K_f$ 를 考慮하지 않은 點線의 경우 最小水深을 지나서 생김을 알 수 있다.

여기서, 波가 最初의 水深에서 最小水深을 거쳐 다시 最初의 水深과 같은 지역에 도달하였을 경우, 파고는 初期波高와 같은 크기가 되어야 하는데, 그림 5의 實線에서와 같이 最初 波高와 最終 波高가 差異가 나는 것은 바닥의 摩擦로 因하여 에너지가 損失되었기 때문이다.

#### 4.2 海底地形에 따른 $K_f$ , $K_r$ 및 $K_s$ 의 變化

波가 進行할 때 摩擦係數, 屈折係數, 淺水係數의 時

**Table 2.** Wave Orthogonal Path and Wave Height Variation Due to Friction, Refraction and Shoaling Over Plane Sloping Bottom.

<i>t</i> (sec.)	<i>x</i> (m)	<i>y</i> (m)	<i>h</i> (m)	<i>c</i> (m/sec.)	<i>H</i> (m)	<i>Df</i> (m)
0	0.00	0.00	45.00000	12.4029	1.000000	100.000
10	62.08	107.30	43.75840	12.3893	0.996455	100.327
20	124.31	214.34	42.51390	12.3736	0.992460	100.705
30	186.70	321.10	41.26610	12.3554	0.988001	101.140
40	249.28	427.51	40.01450	12.3343	0.983008	101.641
50	312.07	533.53	38.75860	12.3098	0.977439	102.217
60	375.11	639.10	37.49770	12.2815	0.971266	102.879
70	438.43	744.15	36.23130	12.2488	0.964425	103.636
80	502.07	848.59	34.95860	12.2110	0.956879	104.503
90	566.06	952.35	33.67890	12.1674	0.948600	105.492
100	630.44	1055.30	32.39120	12.1169	0.939537	106.617
110	695.26	1157.34	31.09480	12.0588	0.929682	107.896
120	760.56	1258.32	29.78880	11.9917	0.919021	109.343
130	826.40	1358.10	28.47210	11.9145	0.907542	110.977
140	892.80	1456.50	27.14400	11.8256	0.895277	112.817
150	959.82	1553.32	25.80360	11.7233	0.882249	114.879
160	1027.49	1648.35	24.45020	11.6058	0.868532	117.184
170	1095.83	1741.34	23.08350	11.4708	0.854189	119.747
180	1164.85	1832.00	21.70300	11.3160	0.839346	122.586
190	1234.54	1920.05	20.30930	11.1387	0.824159	125.713
200	1304.86	2005.15	18.90290	10.9358	0.808875	129.140
210	1375.73	2086.94	17.48540	10.7041	0.793723	132.873
220	1447.04	2165.03	16.05930	10.4400	0.778965	136.910
230	1518.59	2239.01	14.62810	10.1396	0.764902	141.243
240	1590.16	2308.46	13.19690	9.7991	0.751886	145.855
250	1661.40	2372.96	11.77210	9.4143	0.740309	150.717
260	1731.89	2432.10	10.36220	8.9812	0.730600	155.787
270	1801.12	2485.49	8.97764	8.4960	0.723259	161.006
280	1868.45	2532.80	7.63093	7.9555	0.718817	166.304
290	1933.16	2573.81	6.33680	7.3572	0.717892	171.593
300	1994.40	2608.37	5.11193	6.6994	0.721109	176.769

間에 따른 變化를 計算한 것이 그림 6~10이며, 그림 11은 時間의 경과에 따른 波峰線 距離比의 變化를 나타낸 것이다. 여기서 경과 시간에 대한 波의 進行經路 및 水深, 波速 및 波峰線 距離 *D<sub>f</sub>*는 표 1, 2, 3에서 얻을 수 있다.

進行波의 擧動은 初期波高 1m, 週期 8秒, 波의 入射角 60°인 波를 다루었으며 海底地形이 傾斜진 平面인 경우와 SINE曲線形인 경우는 *kn*을 0.025m, 0.05m, 0.1m, 0.15m, 0.2m인 각각의 경우에 대하여 計算 檢討하였다.

4.2.1 粗度係數 *kn*이 摩擦係數 *K<sub>f</sub>*에 미치는 影響

波가 계속하여 進行하는 경우 摩擦係數는 式(21-b)로 주어지나 이는 바닥의 形態에 의한 水深과 波速의 變化에 따른 여러 因子의 결합으로 이루어지며 그림 6, 7, 8은 각각의 海底地形에 대한 *K<sub>f</sub>*의 變化를 얻은 것이다.

式 (21-b)에서 보면 波速은 海底의 粗度 *kn*의 影響을 받지 않으므로 *a<sub>0m</sub>*,  $\frac{dc}{dh}$ 는 *kn*의 變化에 따른 影響

을 받지 않지만, 에너지 損失係數 *f<sub>e</sub>*는 式 (28)에 의하면 *kn*의 직접적인 影響을 받게 되어있다. 그림 7, 8은 각각의 粗度係數에 대한 摩擦係數의 變化를 나타낸 것이다.

바닥이 水平인 경우 *h*는 一定하게 되며 따라서 波速 *c*도 一定하게 되므로 水深에 따른 波速의 變化와 式 (24)로 表示되는 바닥에서의 波의 最大振幅 *a<sub>0m</sub>*도 一定하게 된다. 그러므로 *K<sub>f</sub>*는 *f<sub>e</sub>*에 의해 影響을 받게 되는데, 本地形條件 에서는, 주어진 粗度係數에 關係없이 式 (28)의 *a<sub>0m</sub>/kn*이 極限값인 1.986757보다 작게 되므로 이미 說明한 바와 같이 *f<sub>e</sub>*는 0.24로 一定하게 된다. 따라서 그림 6에 나타난 바와같이 摩擦係數는 粗度係數의 變化에 影響을 받지않고 一定한 비율로 減少하게 된다.

또한 바닥이 傾斜진 平面인 경우와 SINE曲線形인 경우, *kn*이 커짐에 따라 *K<sub>f</sub>*는 이보다 적은 비율로 減少함을 알 수 있다. 이는 式 (28)에서 *a<sub>0m</sub>*이 一定한 경우 *kn*이 一定한 비율로 增加함에 따라 *f<sub>e</sub>*의 값은 이보다

**Table 3.** Wave Orthogonal Path and Wave Height Variation Due to Friction, Refraction, and Shoaling Over Sinusoidal Threshold.

$t(\text{sec.})$	$x(\text{m})$	$y(\text{m})$	$h(\text{m})$	$c(\text{m/sec.})$	$H(\text{m})$	$Df(\text{m})$
0	0.00	0.00	45.00000	12.4029	1.000000	100.000
10	62.03	107.39	44.66880	12.3994	0.999069	100.083
20	124.12	214.66	43.68630	12.3885	0.996191	100.347
30	186.37	321.66	42.08510	12.3676	0.990962	100.847
40	248.89	428.19	39.91740	12.3325	0.982631	101.683
50	311.84	533.93	37.25280	12.2756	0.970151	103.018
60	375.44	638.43	34.17460	12.1850	0.952311	105.094
70	440.01	740.99	30.77870	12.0434	0.928064	108.231
80	505.91	840.59	27.17500	11.8278	0.897302	112.772
90	573.48	935.85	23.49580	11.5134	0.861663	118.948
100	642.84	1025.14	19.90770	11.0834	0.824890	126.664
110	713.68	1106.94	16.61490	10.5468	0.792061	135.303
120	785.23	1180.36	13.83470	9.9562	0.767149	143.766
130	856.53	1245.72	11.74780	9.4073	0.751062	150.803
140	927.00	1304.73	10.45810	9.0125	0.741591	155.434
150	996.77	1360.22	10.00090	8.8607	0.735562	157.126
160	1066.50	1415.54	10.38050	8.9872	0.731755	155.719
170	1136.89	1474.09	11.59360	9.3625	0.732084	151.345
180	1208.13	1538.77	13.60960	9.9018	0.740050	144.497
190	1279.69	1611.40	16.33210	10.4931	0.757963	136.116
200	1350.64	1692.45	19.58640	11.0376	0.784941	127.441
210	1420.15	1781.11	23.15610	11.4785	0.817155	119.605
220	1487.89	1875.88	26.83440	11.8031	0.849664	113.274
230	1553.94	1975.14	30.45110	12.0269	0.878404	108.588
240	1618.61	2077.47	33.87120	12.1743	0.901413	105.335
250	1682.29	2181.83	36.98310	12.2688	0.918516	103.175
260	1745.29	2287.48	39.68990	12.3283	0.930552	101.783
270	1807.84	2393.95	41.90680	12.3651	0.938625	100.909
280	1870.11	2500.91	43.56310	12.3870	0.943717	100.383
290	1932.22	2608.16	44.60470	12.3988	0.946534	100.099
300	1994.24	2715.55	44.99720	12.4028	0.947517	100.001

작은 비율로 減少하기 때문으로 본다.

#### 4.2.2 海底地形의 形態에 따른 $K_r$ 및 $K_s$ 의 變化

屈折係數  $K_r$ 과 淺水係數  $K_s$ 는 式(16)과 같은 關係式으로 表示된다. 海底地形이 水平인 경우에는 波가 進行함에 따라 屈折 및 水深의 變化도 없게 되므로 과고 計算은 屈折係數 및 淺水係數에 의한 影響을 받지 않게 된다.

$K_r$ 는 波速과 水深의 函數이며, 또 式(1)에 의하면 波速은 水深의 函數이다. 따라서  $K_r$ 의 關係式은 水深의 複合的인 函數이므로 이 式으로는  $K_r$ 의 曲線形을 推測하기가 곤란하며 그림 9, 10은 바닥이 單調하게 傾斜된 平面 및 SINE曲線形 일때 關係式을 이용하여 구한 淺水係數 曲線을 나타낸다.

屈折係數는 式(16)으로 부터  $K_r = \beta^{-1/2}$ 인 指數式으로 表示된다. 따라서  $K_r$ 은 波峰線 距離比  $\beta$ 를 이용하여 직접 計算할 수 있다. 이때 式(1)로부터 計算되는 波速  $c$ 는 水深  $h$ 가 얇아짐에 따라 減少하며, 이 경우 Snell의 法則에서 알수 있는바와 같이 屈折角  $\alpha$ 가 入射

角  $\alpha_0$ 보다 작아지게 되므로 式(30)으로 表示되는  $\beta$ 는 增加하게 된다. 여기서 波 進行方向에 대한 水深의 變化率이 急한 경우  $\beta$ 의 變化率은 커지게 된다. 즉 水深이 減少하는 경우  $\beta$ 는 增加하며 海底傾斜가 急한 경우 波峰線距離比는 더 큰 比率로 增加하게 되며 水深이 增加할때는 이와 반대되는 傾向으로 되는데 海底地形이 傾斜된 平面 및 SINE曲線形인 경우, 波의 進行에 따른 摩擦係數 및 波峰線 距離比가 그림 9, 10, 13에 表示되어 있다.

進行波의 舉動을 計算할때 始點에서의 과고가  $H_0$ 를 波의 進行 經路上的의 과고는 式(16)에서와 같이  $H_n$ 에  $K_r, K_r, K_s$ 를 모두 곱하여 얻어진다. 따라서 어떤 海域에서 水平거리에 따른 水深의 變化 및 波의 屈折 計算에 있어서의 初期條件인 入射角과 關係되는 進行波의 入射方向을 알고있고 波의 摩擦에 直接的인 影響을 그리는 海底 粗度係數를 알고 있다면, 이러한 條件下에 計算되어진 摩擦係數와 屈折係數 및 淺水係數를 이용하여 波高變化曲線을 얻을 수 있을 것이다. 이런 경우 始點



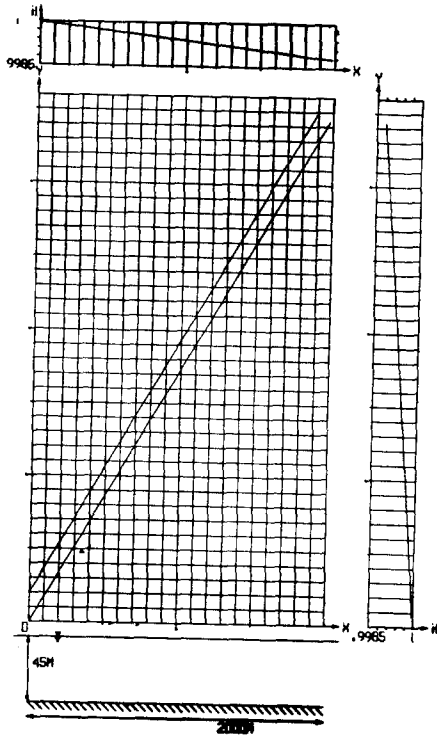


Fig. 3 Two Wave Orthogonals Over Horizontal Bottom

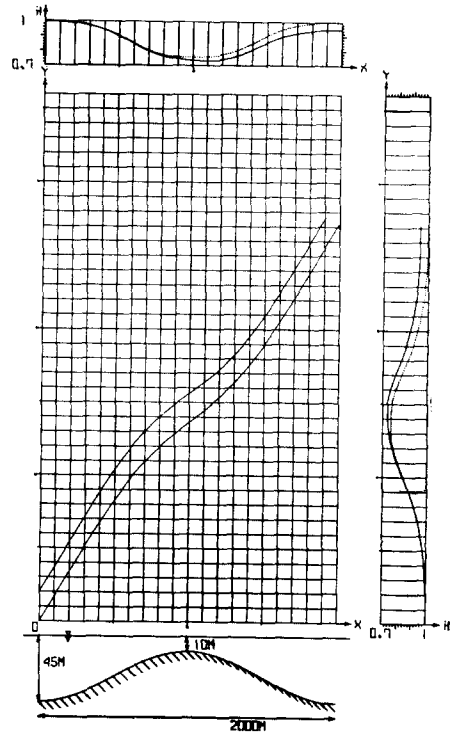


Fig. 5 Two Wave Orthogonals Over Sinusoidal Threshold

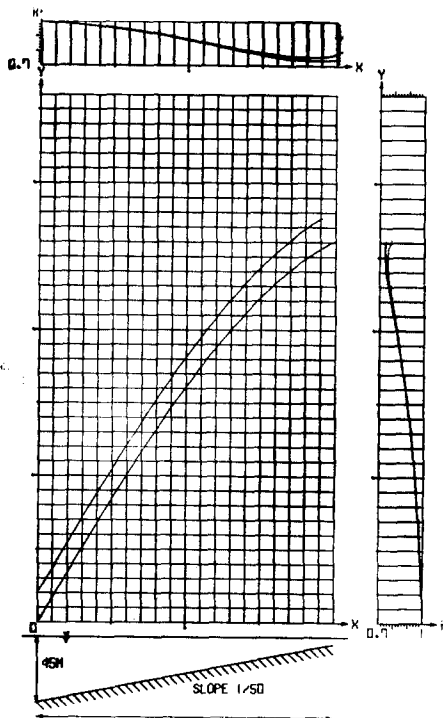


Fig. 4 Two Wave Orthogonals Over Plane Sloping Bottom

에서의 波高가 달라질 경우라도 任意 水深에서의 波高 計算이 可能하나 初期波高의 크기가 전반적인 波高變化에 미치는 影響에 대하여는 앞으로 좀더 研究하여야 할 問題이다.

간단한 海底地形의 形態로서 다루어 본 바닥의 形態中 傾斜진 平面과 SINE曲線形에서의 각각의 粗度係數에 대한 波高變化는 그림 11, 12에 나타나 있으며, 바닥이 水平인 경우에 있어서는 摩擦係數가 一定한 比率로 減少하는 반면 屈折과 淺水가 波高에 미치는 影響은 없게 되므로 波高는 摩擦係數의 變化와 같이 波가 進行함에 따라 直線의 으로 減少하게 된다.

#### 4.3 實際 地形에의 適用

實 地形에의 適用으로 東海岸의 浦項, 三陟 그리고 濟州島의 翰林港에 對하여 計算하여 보았다. 海底傾斜表示式은 이들 各港의 波浪屈折圖에서 屈折이 가장 적은 進行波의 經路를 選擇하여 各 進行距離에 對한 水深을 이용하여 最小自乘法으로 求하였다.

또 4, 5, 6은 深海波의 波高  $H_0$  및 週期  $T_0$ 를 사용하여 각 水深  $h$ 에 대한 追跡法 및 Wilson法에 의한 波高  $H_1$ 과 각 粗度條件에 대하여 本 研究에서 計算한 波高  $H_2, H_3, H_4$ 를 나타내고 있다. 그리고 \*가 表示된 것은

Table 4. Pohang

$H_0$ (m)	$T_0$ (sec.)	$h$ (m)	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$H_3(k_N=.02)$ (m)	$H_4(k_N=.2)$ (m)
7	12	6	3.941*	5.913*	4.367	3.388
		8	4.165	5.581	4.566	3.815
		10	4.288	5.354	4.671	4.110
		15	4.480	5.015	4.782	4.558
		20	4.830	4.830	4.830	4.830

Table 5. Samchuck

$H_0$ (m)	$T_0$ (sec.)	$h$ (m)	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$H_3(k_N=.02)$ (m)	$H_4(k_N=.2)$ (m)
8	14	6	8.104*	9.439*	8.780*	8.305*
		8	8.032*	8.876*	4.471*	8.161*
		10	7.920*	8.482*	8.222	8.014
		15	7.712	7.867	7.788	7.719
		20	7.520	7.520	7.520	7.520

Table 6. Hanlim

$H_0$ (m)	$T_0$ (sec.)	$h$ (m)	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$H_3(k_N=.02)$ (m)	$H_4(k_N=.2)$ (m)
6	12	6	4.464	5.256*	4.788	4.396
		8	4.326	4.961	4.671	4.408
		10	4.242	4.760	4.572	4.392
		15	4.236	4.459	4.399	4.338
		20	4.302	4.302	4.302	4.302

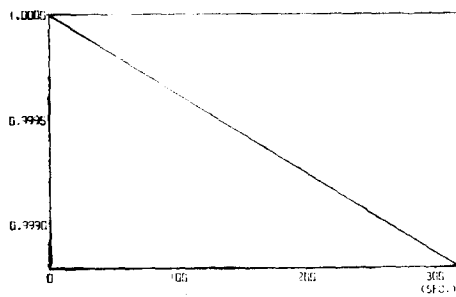


Fig. 6  $K_f$  For Horizontal Bottom

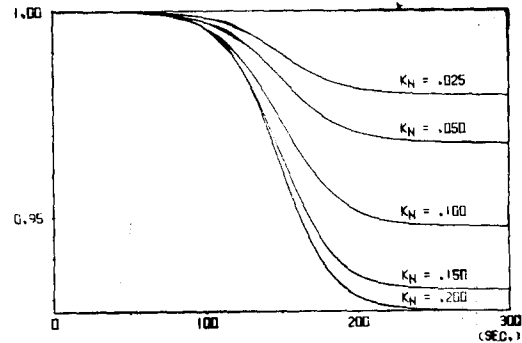


Fig. 8  $K_f$  For Sinusoidal Threshold

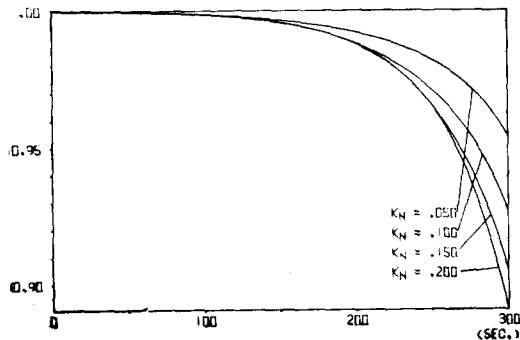


Fig. 7  $K_f$  For Plane Sloping Bottom

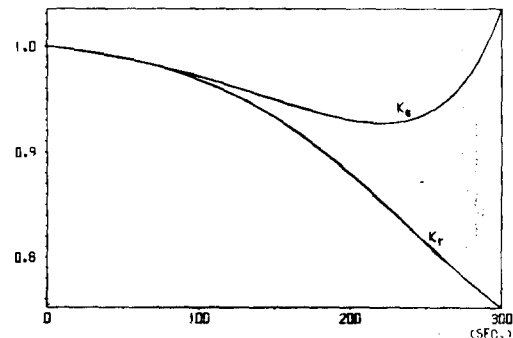


Fig. 9  $K_r$  and  $K_f$  for Plane Sloping Bottom

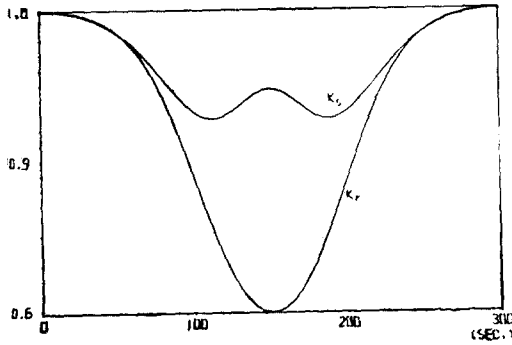


Fig. 10  $K_s$  and  $K_r$  for Sinusoidal Threshold

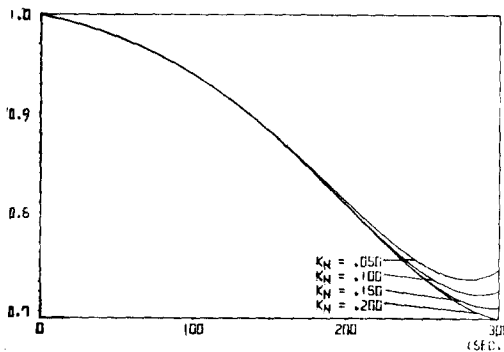


Fig. 11  $K_f, K, K$ , For Plane Sloping Bottom

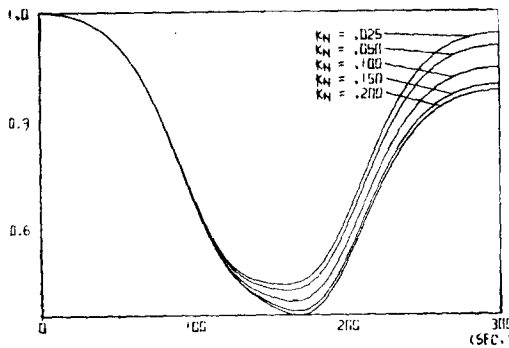


Fig. 12  $K_f, K, K$ , For Sinusoidal Threshold

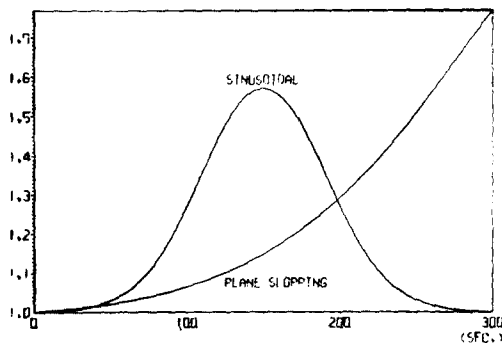


Fig. 13 Wave Orthogonal Separation Factor

碎波高임을 나타낸다.

표 4, 5, 6에서의 波高  $H_1$ 은 屈折의 影響이 고려된 推定值이며,  $H_2, H_3, H_4$ 의 計算은 가장 屈折이 적은 波의 經路를 選擇 하였으며,  $H_2$ 는 바닥의 摩擦을 考慮하지 않은 計算值인 반면  $H_3, H_4$ 의 計算은 摩擦力이 考慮되었다.

여기서 計算되어진 波高  $H_2, H_3$  및  $H_4$ 中에서 特히  $H_2$ 는 바닥의 摩擦力을 無視한 計算值라는 點에서  $H_1$ 과 비슷하여야 하는데 圖 4, 5, 6에서 보느냐와 같이 그 差가 큰 重要한 이유는 다음과 같다.

1)  $H_1$ 은 波의 屈折, 回折 및 바람의 影響을 考慮한 값인 반면  $H_3, H_4$ 는 바닥의 摩擦力을 考慮한 값이다.

2)  $H_1$ 은 波高를 여러 進行方向에 對하여 計算한 것의 統計值이고  $H_2$ 는 이中 하나의 經路를 選擇하여 計算한 값이다.

3)  $H_1$ 은 深海를 基點으로 計算한 값인 반면  $H_2$ 는 基本資料의 부족으로 인하여 水深이 20m인 곳 에서부터 計算을 시작하였다.

### 5. 結 論

여러 因子와의 複合的인 相關 關係로 因하여 이루어지는 波高의 變化를 正確하게 計算한다는 것은 어려운 問題이나 波高變化에 큰 影響을 미치는 바닥의 摩擦을 考慮하기 위하여 바닥 形態를 주는 式을 利用하였으며 實際로 適用시키는 方法을 檢討한 結果는 다음과 같다.

1) 바닥이 水平인 境遇를 除外하고는 水深이 얕아지면서 屈折이 波高에 미치는 影響은 커진다.

2) 海底地形에 따라 程度의 差異는 있으나 摩擦係數는 波가 進行함에 따라 繼續 減少한다. 그러므로 波가 進行함에 따라, 바닥 摩擦力을 考慮했을 境遇와 考慮하지 않았을 境遇와의 波高差는 漸次 增大된다.

3) 波가 進行하면서 水深이 繼續 減少 한다면, 屈折과 摩擦이 波高에 미치는 影響은 점점 커지게 된다. 特히 海底傾斜가 緩慢한 곳에서는 波의 進行 距離가 길어지므로 摩擦에 의한 影響이 커지게 되며 設計波 設定時 摩擦力에 의한 影響은 考慮되어야 한다.

4) 海底地形의 數式化는 等深線이 서로 平行인 경우를 取扱 하였으나 平行이 아닌 경우도 適用 可能하다. 이 경우 實際 地形에의 應用 範圍가 좀더 늘어날 수 있을 것으로 믿어지며 이 點에 對하여는 繼續 研究할 것이다.

## 參 考 文 獻

1. *Plotter Printer*, TRS-80 Micro Computer System, Catalog No.26-1190A.
2. Collins, J.I., "Prediction of shallow water spectra", *Journal of Geophysical Research*, Vol.77, 1972, pp.2693~2707.
3. Skovgaard, O., and Jonsson, I.G., and Bertelsen, J.A., "Computation of wave heights due to refraction and friction", *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, Vol.101, 1975, pp.15~32.
4. Jen, Y., "Wave refraction near San Pedro Bay, California", *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, Vol. 95, 1969, pp.379~393.
5. Coudert, J., and Raichlen, F., discussion of "Wave refraction near San Pedro Bay, California", by Yuan Jen, *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, Vol.96, 1970, pp.737~748.
6. Munk, W.H., and Arthur, R.S., "Wave intensity along a refracted ray", U.S. National Bureau of Standards Circular 521: Gravity Waves, 1952.
7. Carnahan, B., and Luther, H.A., and Wilkes, J.O., *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons, 1969, pp.393~396, pp.367~369.
8. Muir Wood, A.M., and Fleming, C.A., *Coastal Hydraulics*, The Macmillan Press Ltd., London, 1981, pp.76~78, pp.93~98.
9. Swart, D.H., "Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles", Delft Hydraulics Laboratory Publication, No.131, 1974.
10. Jonsson, I.G., and Carlsen, N.A., "Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.14, 1976, pp.45~60.
11. Jonsson, I.G., "The wave friction factor revisited", Technical University of Denmark, Institute of Hydrographics and Hydraulic Engineering Progress Report 37, 1975.
12. IBM, *System/360 Scientific Subroutine Package*, 5th ed., IBM Corporation, Technical Publication Department, 1970, pp.215~217, pp.220~221, pp.337~343.
13. Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, 4th ed., 1979, pp.805~806.
14. Richards, J.A., et al., *Modern University Physics*, Addison-Wesley Publishing Co., 7th printing, 1972, pp.614~625.
15. 설계과 결정을 위한 조사연구 보고서, 항만청, 1976년 12월.
16. Hamming, R.W., *Numerical methods for scientists and engineers*, McGraw Hill, 2nd ed., New York, 1973, pp.721.