

防波堤에서의 回折波에 關한 研究(第2報)

The Study on Diffraction of Waves About a Breakwater-Gap

姜	· 瑄	沅*
Kang,	Kwan	Won
徐	炳	夏**
Seo,	Byung	Ha

SYNOPSIS

The efficient breakwater design requires a knowledge of the behaviour of the waves passing the breakwater. Wave Diffraction is an important factor and phenomenon in this behaviour.

The diffraction ocean waves entering a gap in a breakwater normal to the incident wave direction in water of uniform depth has been investigated, applying a solution previously given in the author's paper, based on the theory of light diffraction by Sommerfeld.

The wave profiles and heights on both the leeward side of the breakwater and the gap side have been studied and summarized in the form of diagrams with diffraction coefficients in range of x/L , y/L 0~100, $b/L=0.5\sim 12$, with some extension of the diagrams made previously.

The results of the theoretical approaches have not been experimentally verified. The theory and computation methods with computer program in Fortran IV developed in this study make an efficient use for estimating the diffraction about a breakwater gap.

1. 序論

國土의 高度利用 및 經濟의 高度成長에 따른 國際交易의 活潑化는 海洋 및 港灣開發의 必要性을 要求하고 있으며 港灣開發은 港灣施設物의 擴張을 絶실히 요청하고 있다. 이 항만 시설물중에서 필수적인 것은 外海의 波浪으로부터 內灣을 보호할 目的으로 構築되는 防波堤라고 할 수 있다. 이러한 防波堤의 設計에 있어 고려해야 할 중요한 사항은 築造後에 일어나는 問題들의 分析이 포함 되는바 이 問題들중에서 防波堤에서의 回折現象의 分析은 필수적인 것이다. 그래서 본고에서는 좀더 실제적이고 機能的인 設計을 위하여 그 回折現象을 이전의 水理學者들의 理論에 기초를 두어 擴張分析하였다.

지금까지 이 問題에 關하여 많은 연구가 있었으나, Penney와 Price¹⁾는 半無限防波堤에 入射하는 境界值 問題가 Sommerfeld가 해석한 빛의 回折現象과 같다는 사실에 근거를 두고 그 理論式을 求하였으며, Putnam과 Arthur²⁾는 波長이 2.52ft와 2.96ft인 波를 실험실에서 造波하여 回折現象의 실험으로 Penney와 Price의 理論式이 실험결과와 근사함을 밝혀주었으며 또한 回折波의 生成은 入射波의 週期와는 無關함을 보여주었다. 또한 Blue와 Johnson³⁾은 開口部가 있는 防波堤先端에서의 回折을 半無限防波堤에서의 理論式을 적용하여 重合原理(Principle of Superposition)에 의해 理論展開를 하여서 실험치와 비교하여 근사함을 檢證하였다. Johnson⁴⁾은 波의 굴절과 회절현상을 함께 分析하여서 이들 현상이 港灣施設物의 설계, 시공 및 정비에 미치는 영향과 이때에 회절현상에서 고려해야 할 사항들을 분석하여 說明하여 주었다. 最近에 Wiegel⁵⁾은 이

*本會理事, 仁荷工大教授, 工學博士
**正會員, 仁荷工大講師

들 學者들의 理論을 綜合하여 半無限防波堤에 入射하는 波의 回折圖를 作成하여 發表하였으며 Morrow⁶⁾는 離岸堤(Detached Breakwater)에서의 回折現象을 波에너지가 完全히 分散된다는 가정하에서 통계학적인 観点에서 分析하였다.

第一報(第7卷1號)에서는 半無限防波堤의 경우의 回折現象을 論述하였으나 本稿에서는 이를 확장, 응용하여 防波堤先端에서의 波形을 결정하는 回折函數를 유도하고 開口部의 폭의 크기에 따른 방파제의 길이와 入射波의 波長의 100배에 달하는 거리까지의 回折圖를 作成하였다. 이를 위하여 계산에 필요한 전자계산 Programming을 作成하였으며 IBM 1130 전자계산기로 계산하였다.

2. 波의 回折現象의 概念

防波堤 주위에서 일어나는 水波의 變形인 回折現象은 防波堤의 構成形態 및 設置位置를 고려하여 解析할 수 있는데 어느 경우나 回折波의 生成은 光波에서의 Huyghens의 原理에 의하여 설명할 수 있다. 즉 防波堤 端部에 도달된 入射波의 波浪에너지가 에너지源이 되어 放射狀으로 進行하려고 하는데서 回折波가 形成된다고 할수있다⁷⁾.

第1報에이 本稿에서 論하고져 하는 開口部가 있는 防波堤先端에서의 回折波의 分布狀態를 Sommerfeld가 유도한 光波의 回折解析式에 기초를 두어 第1報에서와 같은 가정하에서 구명하고져 한다.

一定한 水深을 가지고 있는 水面에서의 表面波의 分布狀態및 임의의 點에서의 그의 波高와 位相은 波動函數 $F(x,y)$ 로 표시하는 것이 편리하다. 그래서 주어진 가정하에서 防波堤에 入射에는 入射波와 防波堤 뒷면에서 生成되는 回折波(Diffracted waves)를 나타내는 波動函數를 구하면 그 함수의 성질에서 파의 변형상태를 알수 있다. 光波에서의 回折理論을 적용하여 그 경우의 미분방정식과 경계조건에서 이 함수 $F(x,y)$ 를 구할 수 있다. 이로부터 半無限스크린(Semi-infinite screen)에서의 光波의 回折에 대한 解析式을⁸⁾ 사용함으로써 防波堤端部 주위에서 일어나는 海上波의 回折에 對한 波動函數는 결정된다. 波高는 波長에 比하여 적다고 하면(가정③) 波形은 正弦振動(Sinusoidal)을 한다고 할수 있으며 入射波의 경우는 防波堤의 設置位置가 淺海波(Shallow Water Waves) 領域임으로 진폭이 작은 進行波로 볼 수 있다. 그리고 만일 가정 ⑦의 조건과는 달리 水深이 일정하지 않다고 하면 波의 굴절 現象이 일어나게 된다. 실제의 防波堤의 경우에는 入射波는 일부는 反사되고 일부는 물의 亂流運動(Turbul-

ent Motion)때문에 쇠퇴되기도 하여 에너지의 減衰가 일어날 것이나 본 연구에서는 가정 ⑦을 만족하는, 波가 完全히 反사되는 理想的인 防波堤에 對하여 論하고 져 한다. 이에서 얻어진 결과는 실제의 경우에 그만큼 안전측이 된다.

3. 入射波에 關한 理論

그림-1과 같이 中等水面에 x,y 축을 취하고 水面에 直角으로 z 축을 취하여 임의시간 t 때의 水位變動을 ζ 라고 한다. y 方向으로 進行하는 波의 물의 運動을 速度 포텐셜 ϕ 로 표시할 때 이 ϕ 는 가정 ②의 다음 式을 만족한다. 즉

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

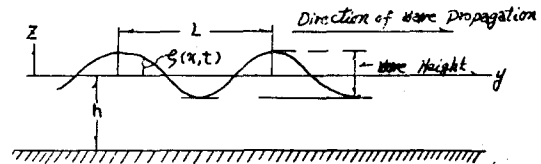


그림-1 Systematic Sketch for Wave Analysis

또한 水面에서의 壓力 p 는 Euler의 운동방정식에서

$$\frac{p}{\rho} = -gz + \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2)$$

로 쓸수 있다.⁹⁾ 그런데 波의 진폭이 작아서 波高가 그리 크지않으므로 (2)식의 3번째항은 他항에 比하여 無視할 程度이므로 압력 p 는 근사적으로

$$p = \rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - gz \right) \dots\dots\dots(3)$$

이 된다. 여기에서 ρ =물의 밀도. g =중력가속도이다 가정 ④에서 $z=\zeta$ 인 水面의 壓力은 一定하며 $p=0$ 이므로 수위변동 ζ 는 (3)式에서

$$\zeta = \frac{1}{g} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\}_{z=\zeta} \dots\dots\dots(4)$$

이 된다. 그런데 波高가 적으므로 $z=0$ 때와 $z=\zeta$ 때의 條件은 근사적으로 같다고 할수있다. 그러므로 (4) 식은

$$\zeta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots\dots\dots(5)$$

로 된다.

水表面에서 바닥까지의 깊이를 h 라고 하면 바닥에서의 연직방향의 流速은 0이 되므로

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

이며 水面에서 連직방향의 流速은 水面 자체의 連직방향의 速度와 같으므로(가정 ⑤)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \dots \dots \dots (7)$$

로 되고, (5)式을 (7)式에 代入하면

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

로 된다.

方程式 (1)의 解는 $\phi = f(x, y, z, t)$ 인 함수이며 시간 t 에 관한 주기함수라는 것과 (5), (6)의 條件에서 그 解를 部分積分法으로 풀면¹⁰⁾

$$\phi = Ae^{ikz} \cosh k(z+h) \cdot F(x, y) \dots \dots \dots (9)$$

로 된다. 또한 (9)式을 (5)式에 代입하면

$$\zeta = \frac{Aikc}{g} e^{ikz} \cosh kh \cdot F(x, y) \dots \dots \dots (10)$$

로 표시된다. 여기에서 $k = \frac{2\pi}{L}$, $L = \text{波長}$, $c = \text{波速}$, $h = \text{水深}$, $i = \sqrt{-1}$, $A = \text{波의 振幅이다}$.

(9), (10)式의 우편의 $F(x, y)$ 는 波動에 관한 Helmholtz의 方程式¹¹⁾

$$\frac{\partial^2 F(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F(x, y)}{\partial y^2} + k^2 F(x, y) = 0 \dots \dots \dots (11)$$

을 만족하며 表面波의 진폭과 위상은 이 $F(x, y)$ 의 절대값(Modulus)와 편각(Argument)으로서 결정된다.¹²⁾

防波堤에 入射하기전에 進行하는 進行波는 전술한 바와 같이 진폭이 적고 正弦振動波이므로 이에대한 (11)式의 解 $F(x, y)$ 는

$$F(x, y) = e^{-iky} \dots \dots \dots (12)$$

로 표시되고, 따라서 (12)式이 入射波를 나타내는 식으로 된다.

回折波는 (12)式으로 표시되는 入射波가 防波堤를 통과한 후에 發生되는 波의 變形이므로 (10), (11)式을 만족하는 回折波를 나타내는 $F(x, y)$ 를 결정하면 그의 波形과 波高다 推定할 수 있다.

4. 回折波에 관한 理論

防波堤의 回折現象은 그 種類에 따라 나누어 전개할 수 있는데 半無限防波堤에 對하여는 第1報¹³⁾에서 다루었으므로 여기에서는 매우 긴 防波堤의 폭이 b 인 開口部에 波가 入射할때의 回折波의 生成을 論하고자 한다. 이 경우에 만약 入射波의 波長 L 에 比하여 開口部の 폭 b 가 매우 적다면 그 開口部 자체가 한 點의 波에너지源이 되어서 그 점에서 발산하는 波峯線(Wave Front)이 半圓形인 波가 되어 波峯線상의 어느 지점에서나 波高(Wave Height)가 같은 波를 生成할 것이다. 그러나 그 폭 b 가 入射波의 波長(L)보다 크게 되면 그 開口部에 도달한 波에너지는 주로 원래의 入射波의 轉播方向으로 전파될 것이다. 그렇지만 개구부에서 먼 거리에 있는 점의 파고는 半圓形的 波形을 갖게 될 것

이며 그 波高는 이들 半圓上의 各점에서 자기 다른 값을 갖게 될 것이다. 이에서 本稿에서는 개구부의 폭이 入射波의 波長보다 같거나 큰 경우에 防波堤 뒷면에서 일어나는 回折波의 生成理論을 半無限防波堤에서의 解析式¹³⁾을 利用하여 Blue의 重合이론¹⁴⁾으로 求하였다.

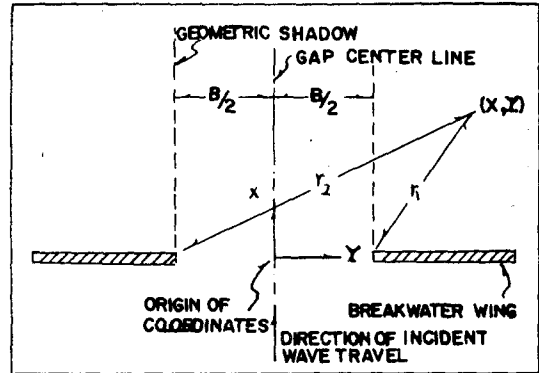


그림-2 Nomenclature for diffraction analysis about Breakwater-Gap

지금 그림-2와 같은 개구부의 中央點을 原點으로 취하고 防波堤에 沿하여 x 축, 入射波의 進行方向을 y 축으로 취한다. 그리고 半無限防波堤에서의 回折波를 나타내는 식을¹³⁾ 기초로 하여 그림-3과 같은 직교 좌표계에서 回折函數를 求하여 본다. 그 결과로서 回折波를 나타내는 함수 $F(x, y)$ 는¹⁵⁾

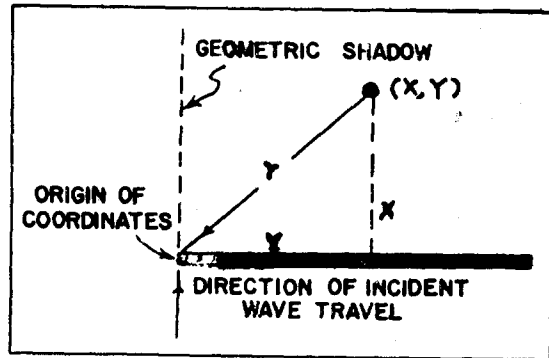


그림-3 Systematic Sketch for Diffraction Function

$$F(x, y) = e^{-iky} f(u_1) + e^{iky} f(u_2) \dots \dots \dots (13)$$

로 된다. 여기에서 u_1, u_2 는 $r^2 = x^2 + y^2$ 일때

$$u_1^2 = \frac{4}{L}(r-x) \dots \dots \dots (14)$$

$$u_2^2 = \frac{4}{L}(r+x) \dots \dots \dots (15)$$

로 표시되며 이들의 부호는

$x \geq 0, y \geq 0$ 일때 $u_1, u_2 < 0$ 이고 $x < 0, y \geq 0$ 일때 $u_1 > 0, u_2 < 0$ 을 취한다.

또한

$$f(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{ix/4} \int_{-\infty}^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv \dots (16)$$

$$f(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{ix/4} \int_{-\infty}^{u_2} e^{-ixv^2/2} dv \dots (17)$$

이다.

(13)식에서 $f(u_1), f(u_2)$ 는 回折波의 波形을 결정하는 직접적인 요소가 되므로 이것을 回折函數(Diffraction function)라 할 수 있다. (16), (17)식에서 積分式의 上限值 u_1, u_2 의 값이 각각 (+), (-) 일 두 경우로 나누어 $f(u_1), f(u_2)$ 와 $f(-u_1), f(-u_2)$ 로 표시하여 전개하면 (16)식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(u_1) &= \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv \\ &= \frac{1+i}{2} \left[\int_{-\infty}^0 e^{-ixv^2/2} dv + \int_0^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv \right] \\ &= \frac{1+i}{2} \left[\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ixv^2/2} dv + \int_0^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv \right] \end{aligned}$$

그런데

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ixv^2/2} dv = (1-i)$$

이며

$$\begin{aligned} \int_0^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv &= \int_0^{u_1} \cos \frac{1}{2} \pi v^2 dv - i \int_0^{u_1} \sin \frac{1}{2} \pi v^2 dv \\ &= \int_0^t \frac{e^{-it}}{\sqrt{2\pi t}} dt = c(u_1) - is(u_1) \end{aligned}$$

로 되며 여기에서 $t = \pi v^2/2$ 이고 $c(u_1)$ 과 $s(u_1)$ 은 Fresnel 積分式이다.¹⁶⁾ 이로부터 (16), (17)식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} f(u_1) &= \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{u_1} e^{-ixv^2/2} dv \\ &= \frac{1}{2} [(1+c(u_1)+s(u_1)) - i\{s(u_1)-c(u_1)\}] \dots (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(-u_1) &= \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{-u_1} e^{-ixv^2/2} dv \\ &= \frac{1}{2} [(1-c(u_1)-s(u_1)) + i\{s(u_1)-c(u_1)\}] = S_1 + iW_1 \dots (19) \end{aligned}$$

마찬가지로

$$f(u_2) = \frac{1}{2} [(1+c(u_2)+s(u_2)) - i\{s(u_2)-c(u_2)\}] \dots (20)$$

$$\begin{aligned} f(-u_2) &= \frac{1}{2} [(1-c(u_2)-s(u_2)) + i\{s(u_2)-c(u_2)\}] \\ &= S_2 + iW_2 \dots (21) \end{aligned}$$

로 된다. 여기에서

$$S_1 = \frac{1}{2} [1-c(u_1)-s(u_1)], W_1 = \frac{1}{2} [s(u_1)-c(u_1)] \dots (22)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} [1-c(u_2)-s(u_2)], W_2 = \frac{1}{2} [s(u_2)-c(u_2)] \dots (23)$$

이다.

(18)과 (19)식, (20)과 (21)식을 각각 더하면

$$\begin{aligned} f(-u_1) + f(u_1) &= 1 \\ f(-u_2) + f(u_2) &= 1 \end{aligned}$$

로 되어

$$\begin{aligned} f(u_1) &= 1 - f(-u_1) \\ f(u_2) &= 1 - f(-u_2) \end{aligned} \dots (24)$$

의 관계를 얻게되어 $f(-u_1), f(-u_2)$ 의 값만 구하면 $f(u_1), f(u_2)$ 의 값은 쉽게 얻어진다.

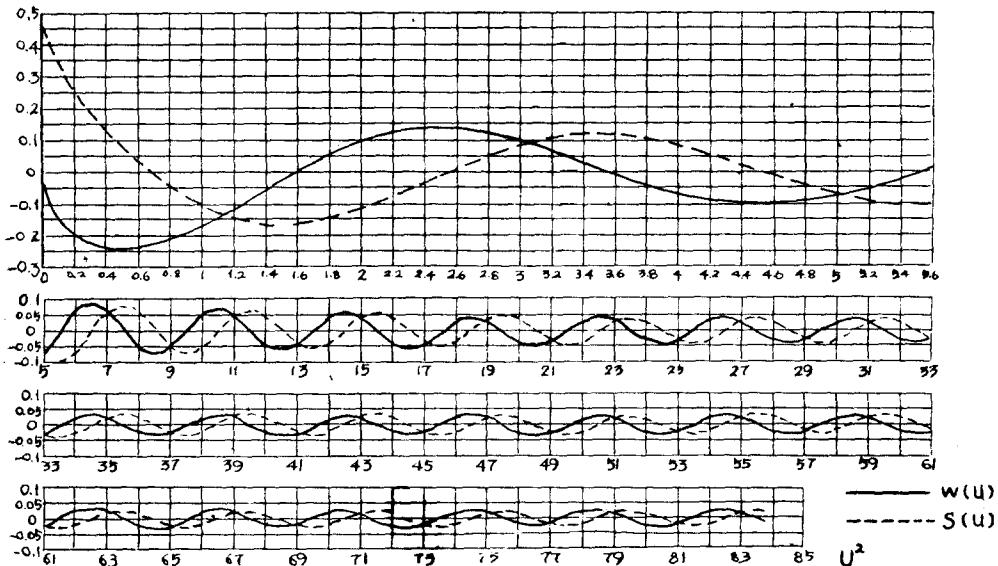


그림-4 Wave Diffraction Function

여기에서 u 에 따른 S, W 의 變化를 (22) 및 (23)식으 로 求해보면 그림-4와 같다. 이것으로부터 u 의 값이

커질수록 S, W 의 값이 적어진다는 것을 알 수 있다. 이것은 開口部の 中央點에서 먼거리의 지점의 波高가 적어진다는 것을 뜻하게 된다.

지금 開口部가 있는 防波堤에 入射波가 直角으로 入射할 경우의 回折波의 式을 半無限防波堤인 경우의 式을 利用하고 Blue의 重合原理를 적용하여 아래와 같이 결정할 수 있을 것이다. 勿論 이 경우도 波動關係式 $F(x, y)$ 는 (11)식을 만족하여야 하며 이때의 境界조건은 $\frac{\partial F(x, y)}{\partial y} = 0$ 이어야 하고 $|x| > \frac{b}{2}$ (b : 開口部の 幅)이며 $y=0$ 일때 $F(x, y)=0$ 이다.

지금 開口部の 左側(左側) 防波堤가 없다고 가정하면 半無限防波堤와 같은 경우가 된다. 따라서 이 가정하에서는 回折波領域 ($x > \frac{b}{2}$)과 回折 및 入射波領域

($0 \leq x \leq \frac{b}{2}$)의 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. (13)식을 근거로 하고 다른 右側(右側) 防波堤에서의 變形된 回折波의 式은 이 경우의 回折函數를 $f(-u_1)_1, f(-u_2)_1$ 라고 놓으면

$$0 \leq x \leq \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = e^{-iky} - f_1 + g_1 \dots (25)$$

$$x > \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = f_1 + g_1 \dots (26)$$

이 된다. 여기에서

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= e^{-iky} f(-u_1)_1 \\ g_1 &= e^{iky} f(-u_2)_1 \end{aligned} \right\} \dots (27)$$

이다. 마찬가지로 右側防波堤가 없다고 가정하면 회절 함수를 $f(-u_1)_2, f(-u_2)_2$ 라고 표시하였을 때 그 回折波의 式은

$$0 \leq x \leq \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = e^{-iky} - f_2 + g_2 \dots (28)$$

$$x > \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = -f_2 + g_2 \dots (29)$$

로 된다. 여기에서

$$\left. \begin{aligned} f_2 &= e^{-iky} f(-u_1)_2 \\ g_2 &= e^{iky} f(-u_2)_2 \end{aligned} \right\} \dots (30)$$

이다.

이상의 결과에서 양쪽에 防波堤가 있을 경우 즉 Breakwater Gap에서는 (25) 및 (28)식 그리고 (26) 및 (27)식을 重合하여 다음의 回折波의 式을 얻을 수 있다. 즉,

$$0 \leq x \leq \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = e^{-iky} - f_1 + g_1 - f_2 + g_2 \dots (31)$$

$$x > \frac{1}{2}b \text{ 일때 } F(x, y) = f_1 + g_1 - f_2 + g_2 \dots (32)$$

이들 식을 다시 쓰면 (31), (32)식은

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq x \leq \frac{1}{2}b \text{ 일때} \\ F(x, y) &= e^{-iky} - e^{iky} f(-u_1)_1 + e^{iky} f(-u_2)_1 \\ &\quad - e^{-iky} f(-u_1)_2 + e^{iky} f(-u_2)_2 \dots (33) \end{aligned} \right\}$$

$x > \frac{1}{2}b$ 일때

$$F(x, y) = e^{-iky} f(-u_1)_1 + e^{iky} f(-u_2)_1 - e^{-iky} f(-u_1)_2 + e^{iky} f(-u_2)_2 \dots (34)$$

가 된다. 그런데 (19), (21)식으로 부터 다음과 같이 표시되며

$$\left. \begin{aligned} f(-u_1)_1 &= S_{11} + iW_{11} \\ f(-u_2)_1 &= S_{21} + iW_{21} \\ f(-u_1)_2 &= S_{12} + iW_{12} \\ f(-u_2)_2 &= S_{22} + iW_{22} \end{aligned} \right\} \dots (35)$$

또

$$e^{-iky} = \cos ky - i \sin ky$$

라 놓고 (33), (34)식에 代入하여 정리하면

$0 \leq x \leq \frac{1}{2}b$ 인 경우

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \{(1 - S_{11} + S_{21} - S_{12} + S_{22}) \cos ky \\ &\quad + (-W_{11} - W_{21} - W_{12} - W_{22}) \sin ky\} \\ &\quad + i\{(-1 + S_{11} + S_{21} + S_{12} + S_{22}) \sin ky \\ &\quad + (-W_{11} + W_{21} - W_{12} + W_{22}) \cos ky\} \\ &= Q_1 + iR_1 \dots (36) \end{aligned}$$

으로 표시되고

$x > \frac{1}{2}b$ 이 경우

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \{(S_{11} + S_{21} - S_{12} + S_{22}) \cos ky \\ &\quad + (W_{11} - W_{21} - W_{12} - W_{22}) \sin ky\} \\ &\quad + i\{(-S_{11} + S_{21} + S_{12} + S_{22}) \sin ky \\ &\quad + (W_{11} + W_{21} - W_{12} + W_{22}) \cos ky\} \\ &= Q_2 + iR_2 \dots (37) \end{aligned}$$

로 표시된다. 式에서 進술한 바와 같이 $(u_1)_1, (u_2)_1$ 는 右側防波堤에 關한 것으로서 (그림-2 참조)

$$(u_1)_1^2 = \frac{4(r_1 - y)}{L} = 4 \left[\sqrt{\left(\frac{x - b/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} - \frac{y}{L} \right]$$

$$(u_2)_1^2 = \frac{4(r_1 + y)}{L} = 4 \left[\sqrt{\left(\frac{x - b/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} + \frac{y}{L} \right]$$

이며 여기서

$$r_1^2 = \left(x - \frac{b}{2}\right)^2 + y^2$$

또 左側防波堤에 關한 $(u_1)_2, (u_2)_2$ 는

$$(u_1)_2^2 = \frac{4(r_2 - y)}{L} = 4 \left[\sqrt{\left(\frac{x + b/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} - \frac{y}{L} \right]$$

$$(u_2)_2^2 = \frac{4(r_2 + y)}{L} = 4 \left[\sqrt{\left(\frac{x + b/2}{L}\right)^2 + \left(\frac{y}{L}\right)^2} + \frac{y}{L} \right]$$

이며 여기서

$$r_2^2 = \left(x + \frac{b}{2}\right)^2 + y^2$$

이다. (35)식으로부터

$$S_{11} = \frac{1}{2} \{1 - c(u_1)_1 - S(u_1)_1\}$$

$$S_{21} = \frac{1}{2} \{1 - c(u_2)_1 - S(u_2)_1\}$$

$$W_{11} = \frac{1}{2} \{S(u_1)_1 - c(u_1)_1\}$$

$$W_{21} = \frac{1}{2} \{S(u_2)_1 - c(u_2)_1\}$$

$$S_{12} = \frac{1}{2} \{1 - c(u_1)_2 - S(u_1)_2\}$$

$$S_{22} = \frac{1}{2} \{1 - c(u_2)_2 - S(u_2)_2\}$$

$$W_{12} = \frac{1}{2} \{S(u_1)_2 - c(u_1)_2\}$$

$$W_{22} = \frac{1}{2} \{S(u_2)_2 - c(u_2)_2\}$$

이다. 이들식에서 $c(u_1)_2$, $S(u_1)_2$ 등은 $(u_1)_2$ 가 上限值인 Fresnel의 積分式을 의미한다.

5. 回折波高의 算定方法

전술한 (10)식에서 $F(x, y)$ 는 복소수이므로 $F(x, y)$ 의 modulus를 $|F(x, y)|$ 로, argument를 $\arg F(x, y)$ 로 표시하면 (10)식은

$$\zeta = \frac{Aikc}{g} e^{iact} \cosh kh \cdot |F(x, y)| \cdot e^{i(\arg F(x, y))}, \dots \dots \dots (38)$$

로 나타낼 수 있다. 이식에서 水位變動 ζ 는 실수값이

B = 0.2 L

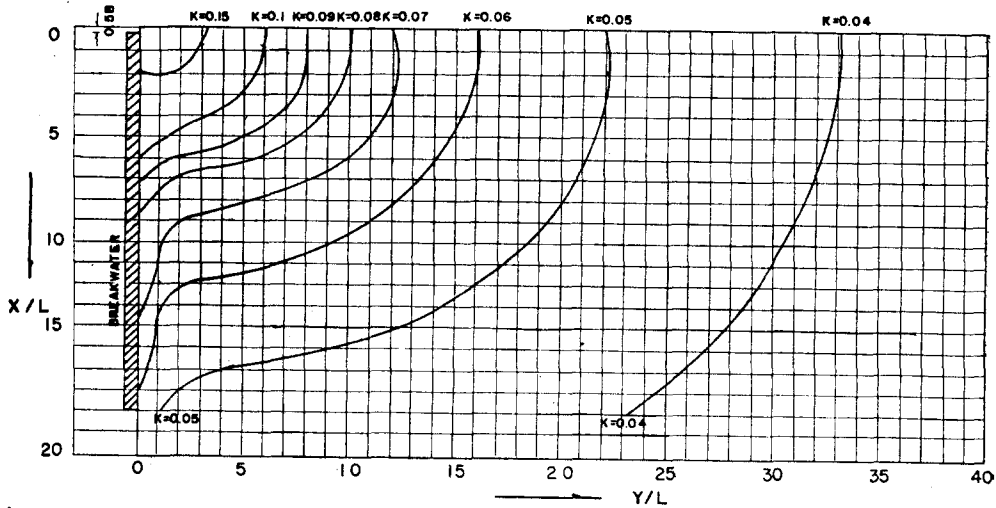


그림-5 Diffraction Diagram for Breakwater Gap ($b/L=0.2$)

B = 1.5 L

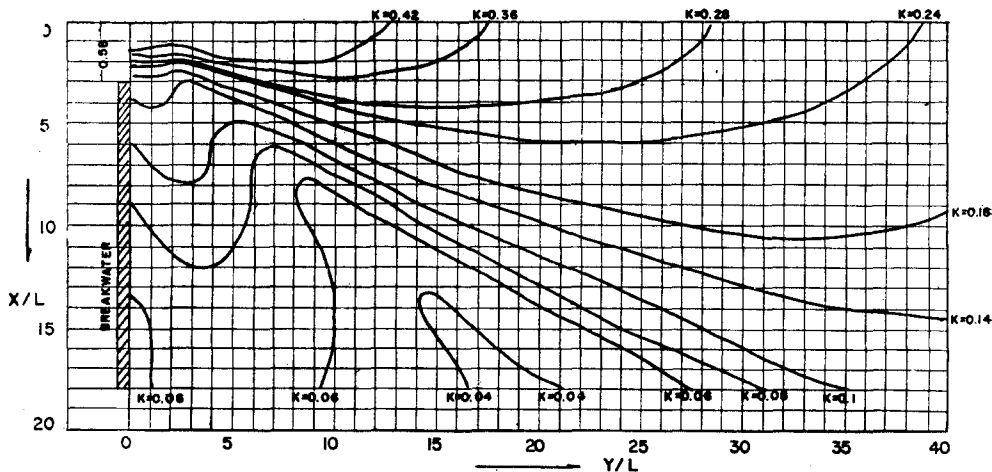


그림-6 Diffraction Diagram for Breakwater Gap ($b/L=1.5$)

므로

$$\zeta = \frac{Ack}{g} \cosh kh \cdot |F(x, y)| \cdot e^{i(\frac{\pi}{2} + kct + \arg F(x, y))} \dots\dots\dots (39)$$

로 된다. 防波堤에의 入射波의 波高(H_i)에 대한 回折波의 波高(H_D)의 比는 回折係數(Diffraction Coefficient)이며 入射波의 波高는 (12)식으로 표시되므로 波

의 진폭은

$$|F(x, y)| = |e^{-iky}| = 1$$

이 된다. 波高는 진폭의 2 배이므로

$$H_i = 2 \cdot \frac{Ack}{g} \cdot \cos kh$$

로 된다. 그런데 回折係數 K 는

B = 2.5 L

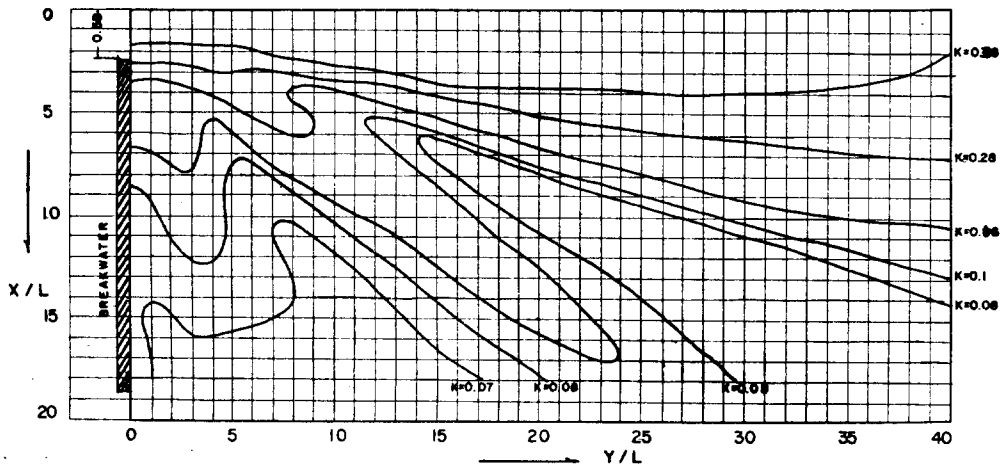


그림 -7 Diffraction Diagram for Breakwater Gap ($b/L=2.5$)

B = 3.0 L

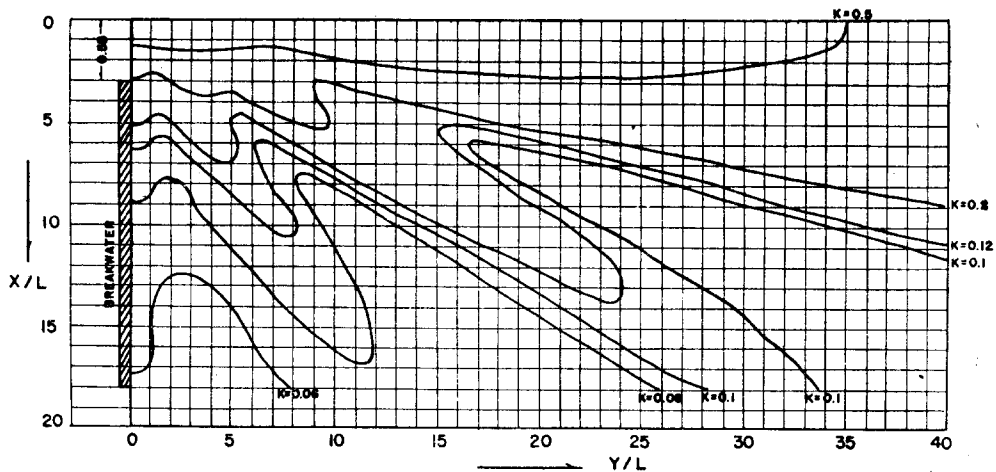


그림 -8 Diffraction Diagram for Breakwater Gap ($b/L=3.0$)

B = 5.0L

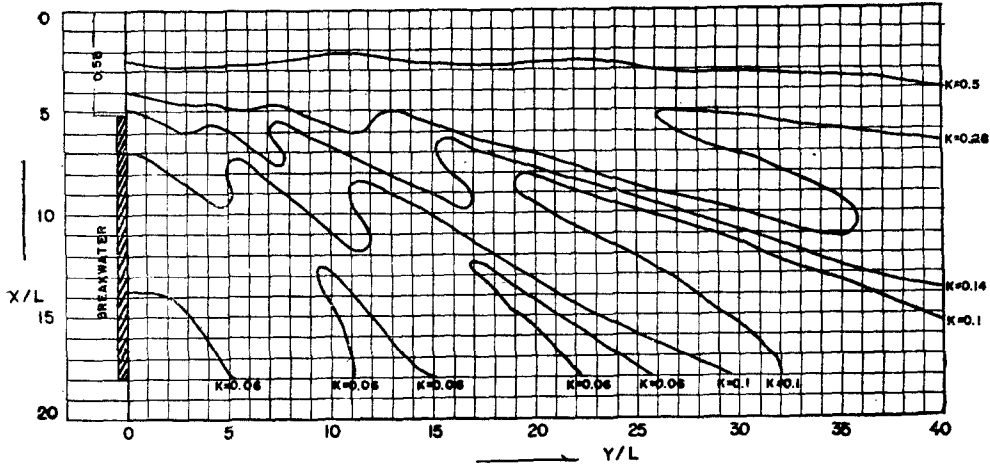


그림 -9 Diffraction Diagram for Breakwater Gap (b/L=5.0)

B = 10.0L

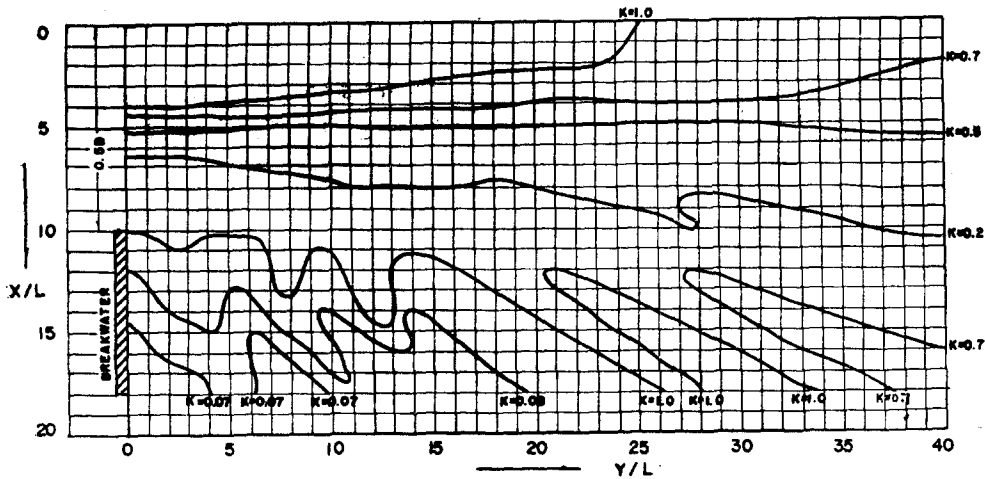


그림 -10 Diffraction Diagram for Breakwater Gap (b/L=10.0)

$$K = \frac{\text{回折波의 波高 } (H_D)}{\text{入射波의 波高 } (H_i)} = |F(x, y)|_D \dots \dots \dots (40)$$

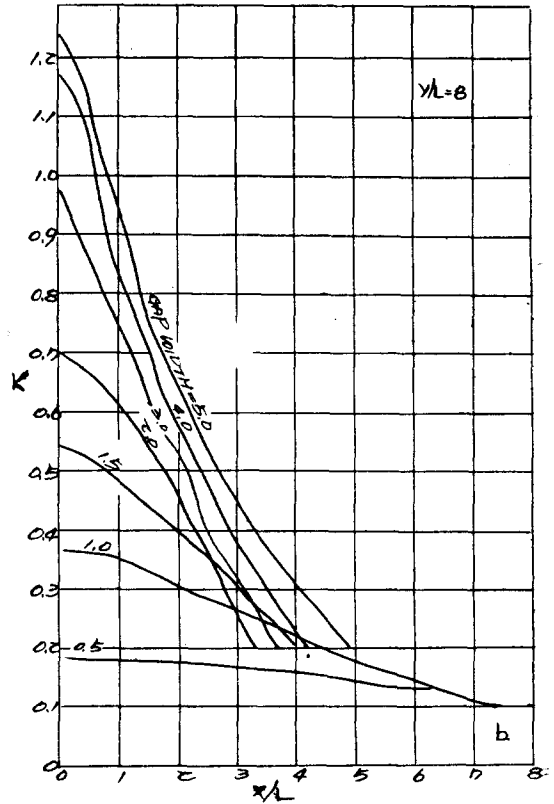
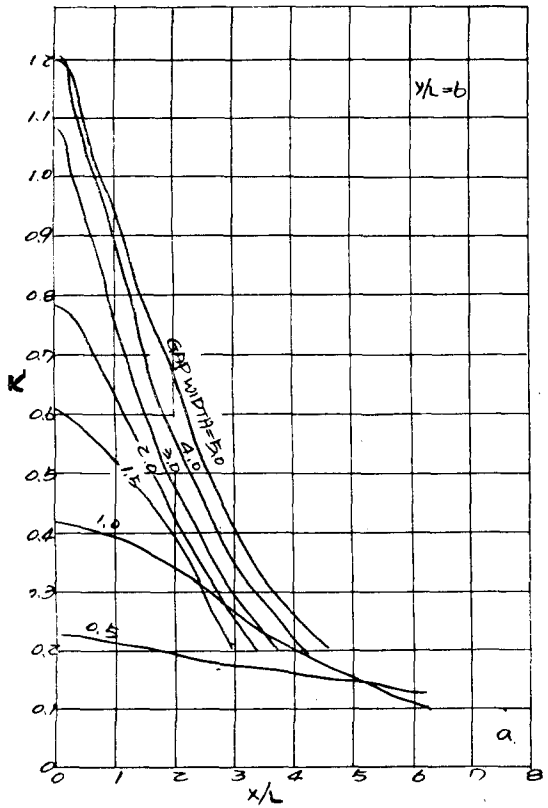
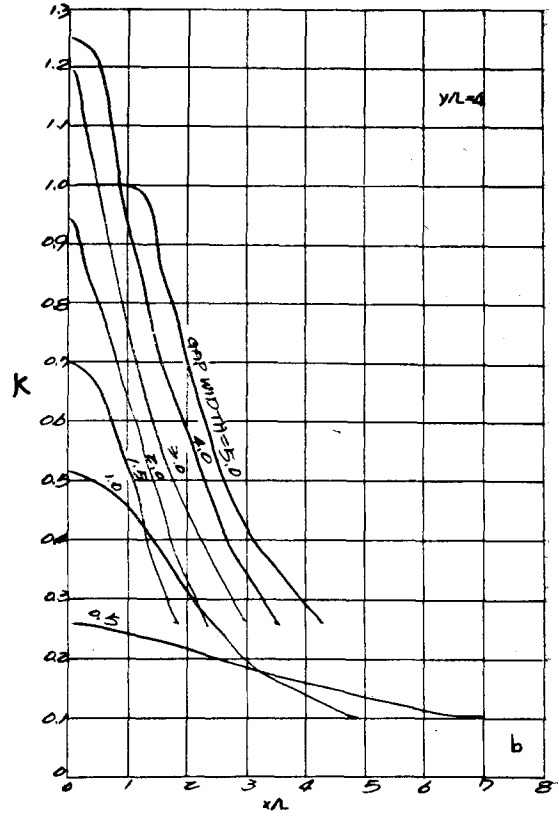
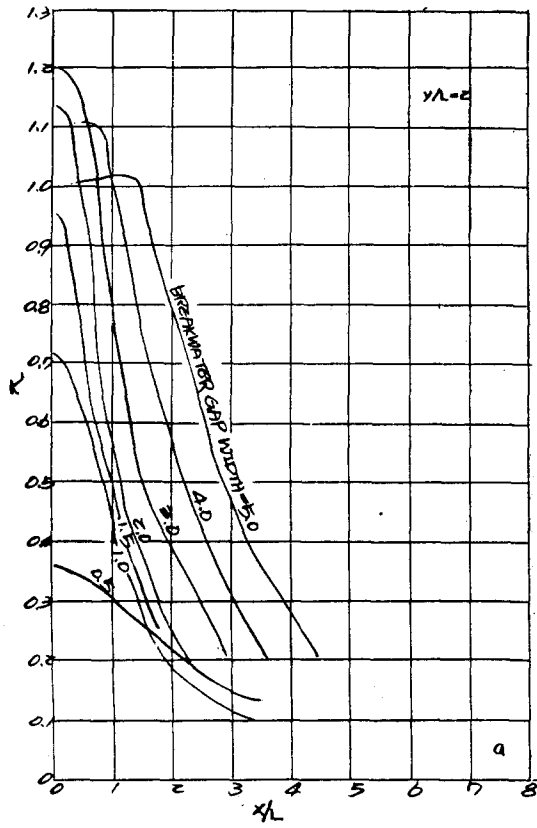
로 주어진다. 따라서 Breakwater Gap에서의 回折係數는 (36), (37)식의 modulus를 구하여 즉

$$K = \sqrt{Q^2 + R^2} \dots \dots \dots (41)$$

에 의하여 쉽게 산출되므로 防波堤에 入射하는 入射波의 波高와 波長만 알면 防波堤뒷면에서 임의점의 波高

는 결정된다. 이식에서 Q는 실수부, R은 허수부들의 미한다.

지금까지 유도된 계산식으로부터 回折係數 K를 (36) (37) 및 (41)식의 관계식으로부터 求할 수 있다. 전술한 回折函數 S와 W는 $\frac{b}{L}$, $\frac{x}{L}$ 와 $\frac{y}{L}$ 의 함수이므로 (36)과 (37)식도 이들의 함수가 된다. 그래서 (x, y) 좌표대신에 $(\frac{x}{L}, \frac{y}{L})$ 좌표로 표시하여 본고에서는 $\frac{x}{L}$



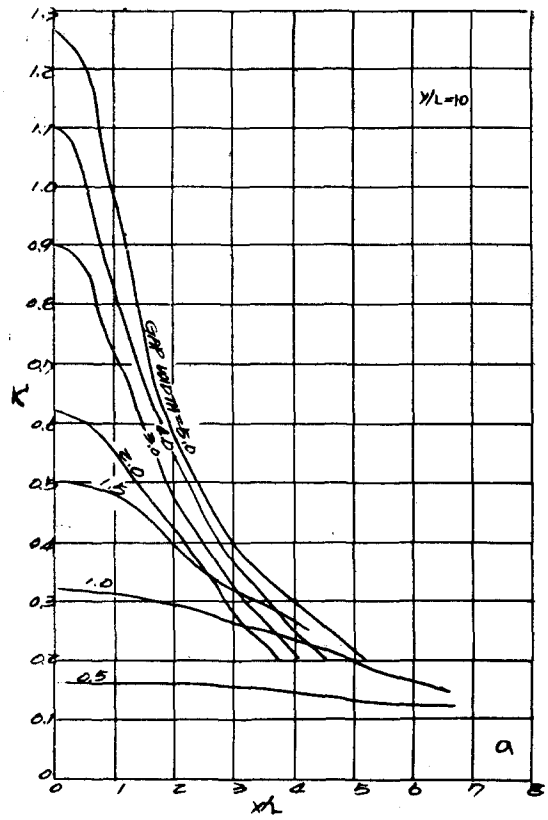
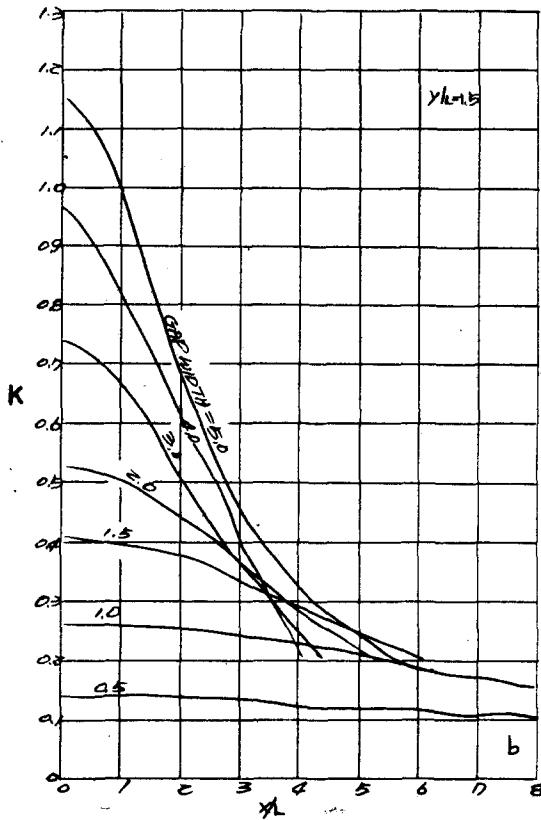


그림 -11 Diffraction Coefficients at various points according to Break water-Gap width

$\frac{y}{L} = 0.2 \sim 100.0$ 사이를 $\frac{b}{L}$ 가 $0.1 \sim 12.0$ 범위에 달하는 모든 경우의 계산을 IBM 1130 전자계산기를 이용하여 행하였다. 이 계산 결과에서 회절계수가 같은 점을 연결하여 그린 회折圖의 예는 그림 5~10과 같다 그리고 Breakwater Gap의 폭(b/L 의 값)에 따른 회折係數의 變化狀態를 보기 위하여 그림-11에 $\frac{y}{L}$ 가 일정할 때 $\frac{x}{L}$ 에 對한 회折係數 K 값을 $\frac{b}{L}$ 에 따라 그렸다. 이를 보면 전자의 회折圖보다 비교적 완만한 곡선으로 이어짐을 알 수 있다. 그림 5~11을 살펴보면 $x/L = 20$ 보다 클 경우에는 거의 대부분 회절계수가 0.05보다 적다는 것을 알 수 있어서 防波堤設計時 回折波는 $\frac{x}{L}$ 가 20 이하일 때에만 고려함이 바람직 하다고 하겠다.

이상은 入射波가 防波堤에 直角으로 入射할 경우였으나, 入射波가 경사져서 入射할 경우의 回折現象의 解析은 매우 복잡하므로 이때에는 그림 -12와 같이 開口部の 中央點을 지나고 入射波의 진행방향과 수직인 선을 그려서 防波堤가 이선을 따라서 설치되어 있는 것처럼 생각하여 회절계수를 구하므로써 비교적 잘 맞

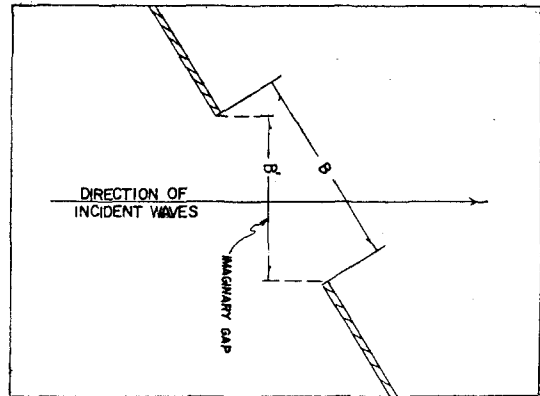


그림 -12 Wave Incidence oblique to Breakwater Gap

는 결과를 얻을 수 있음을 Johnson¹⁷⁾이 실험에 의하여 확인하였다.

6. 結 論

본고에서 作成된 回折圖와 계산을 위하여 作成한 전

자계산 Programming은 실제 現場기술자의 요구에 부응할 수 있도록 그 결과를 제시하였으며 지금까지 문헌에서 발췌된 回折圖에 의해 防波堤設計에 적용하던 부정확성을 배제할 수 있어서 좀 더 실제적이고 機能的인 設計를 할 수 있도록 하는데 도움이 되리라고 생각한다. 또한 본 연구의 결과 無視할 수 있으리라고 생각되던 開口部가 있는 防波堤에서의 回折波의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었으며, 入射波의 波長이 크면 클수록 開口部에서 먼 거리까지 回折에 의한 內港의 波高가 크게 되므로 港에서의 入射波인 淺海波를 정확한 기상자료와 파도에 대한 자료에서 推定하여 防波堤設計에 적용시켜야 된다는 것을 알 수 있었다. 끝으로 본 연구를 행하는데 물심양면으로 協助를 하여 준 仁荷大學校 産業科學技術研究所에 對하여 심심한 사의를 표하는 바이오며, 본고를 위한 자료처리 및 정리에 수고를 한 토목공학과 과원 여러분에게 감사드립니다.

<References>

1. Penney, W.G. & Price, A.T.
"The diffraction theory of sea waves by breakwaters and the shelter afforded by breakwaters", Phil., Trans., Royal Soc., London, Series; A, Vol. 244, 1952, pp.236-253
2. Putnam, J.A. & Arthur, R.S.
"Diffraction of water waves by breakwaters"
Trans., A.G.U., Vol. 29, No.4, 1958, pp.481-90
3. Blue, F.L. & Johnson, J.W.
"Diffraction of water waves passing through a breakwater gap", Trans., A.G.U., Vol.30, No.5, 1949, pp. 705-18.
4. Johnson, J.W.
"Engineering aspects of diffraction and diffraction and refraction", Trans., ASCE, Vol.118, 1953, pp. 617-48.
5. Wiegel, R.L.
"Diffraction of waves by semi-infinite breakwaters", Trans., ASCE, Vol.128, 1963, pp.1181-1202
6. Morrow, C.T.
"Diffraction of ocean waves about a breakwater"
Tnras., ASCE, Vol.92, WW3, 1966, pp.25-45
7. Ippen, A. T.
"Estuary and Coastline Hydrodynamics"
1st ed., New York, McGraw-Hill Co.1966, pp.38-41
8. Sommerfeld, A.
"Mathematische theorie der diffraction"
Math. Ann., Vol. 47, 1896, p.317 (in English)
9. Wiegel, R.L.
"Oceanographical engineering"
1st ed., N.J., Prentice Hall Inc., 1964, pp.11-21.
10. Sneddon, I.N.
"Elements of partial differential equations" 1st ed., N.Y., McGraw-Hill Book Co. Inc., 1957, pp. 227-232
11. Hildebrand, F.B.
"Advanced calculus for applications,"
N.J. Prentice-Hall Inc., 1962, p.394
12. Jonas, M.K. & Dake
"Essentials of Engineering hydraulics"
1st ed., Macmillan Book Co., 1972, pp.295-310
13. 姜培沅, 徐炳夏
"防波堤에서의 回折波에 關한 研究(第1報)"
한국수문학회지, 물의과학 Vol. 7, No.1, 1974, pp. 55-64
14. Blue, F.L. & Johnson, J.W.
"Diffraction of water waves passing through a breakwater gap", Trans. A.G.U., Vol. 30, No.5, 1949, pp.705-18.
15. Bateman, H.
"Partial Differential equations of mathematical physics," Dover Publ., 1944
16. 數學ハンドブック編輯委員會編
"理工學のための數學ハンドブック", 1960, pp. 489-490.
17. Johnson, J. W.
"Generalized wave diffraction diagrams", Proc. 2nd Conf. Coastal Eng., Berkeley, Calif.: The Engineering Foundation Council on Wave Research, 1952, pp.6-23.