

# 다방향 불규칙파를 이용한 천해설계파 계산법의 현지적용성 Applicability study of the calculation method for design wave height

전문구<sup>1</sup>·김규한<sup>2</sup>·정승진<sup>3</sup>·편종근<sup>4</sup>

Mun Gu Jeon<sup>1</sup>, Kyu Han Kim<sup>2</sup>, Seng Jin Jung<sup>3</sup>, and Chong Kun Pyun<sup>4</sup>

## 1. 서 론

연안역의 토지이용이 극대화됨에 따라 연안구조물이나 항만구조물의 축조가 활발히 진행되고 있다. 이를 설계하는데 있어서 무엇보다 중요한 것은 천해설계파 등과 같은 파랑변형계산을 얼마만큼 실현상과 근사시켜 재현할 수 있는지의 여부에 달려있다.

지금까지의 천해설계파 산정에 있어서는 주로 단일 주파수와 단일 방향에 대한 규칙파해석이 수행되어져 왔으나, 실제해역에서의 파랑은 수많은 주파수와 파향, 파고들이 합성되어 이루어진 다방향 불규칙파랑이므로 실제 해역의 자연현상이 잘 표현되었다고 보기는 어렵다. 최근들어 불규칙파를 해석할 수 있는 비정상완경사 불규칙파동방정식을 이용한 불규칙파랑의 모의가 활발히 진행되고 있다.

아울러, 小竹(1991) 등도 불규칙파의 시계열해석을 이용한 불규칙 파랑의 모의를 시도하고 있으며, Boussinesq 이론을 토대로한 불규칙파 해석과 실용성에는 문제가 있으나 Nadaoka(1997) 등도 broad-banded 스펙트럼의 불규칙 파랑에 적용가능한 수학모형을 제안하고 있다. 한편 에너지평형방정식모형의 경우는 Karlsson에 의해 제안된 에너지평형방정식을 기본방정식으로 하고 있으며, 이 방법은 각 성분파의 에너지스펙트럼이 시간적, 공간적으로 보존된다고 가정하고 수심변화에 따른 천수변형, 굴절등의 제 현상을 고

려하여, 입사경계에서의 방향스펙트럼을 부여하여 다방향 불규칙파랑을 계산하는 방법이다. 이처럼 실제해역에 좀더 근접하는 즉, 파랑의 불규칙성을 고려할 수 있는 파랑변형 계산방법에 대한 중요성이 점차 인식되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 보다 정도 높은 천해설계파 산정을 위하여, 쌍곡선방정식의 일종인 시간의존완경사방정식을 선형중첩법에 의해 주기분할 및 파향분할을 통하여 불규칙파 해석을 실시하고, 또한 해안역에서의 다방향 불규칙파 특성을

고려할 수 있는 에너지평형방정식에 의한 해석법을 사용하여 천해설계파 산정을 실시하고, 현지 대상지역에 적용하여 봄으로써, 두 모형간의 현지적용성을 비교검토 하였다.

## 2. 천해설계파 수치모형실험

### 2.1 에너지평형방정식

파랑의 불규칙성을 고려한 에너지평형방정식의 계산방법은 각 성분파의 에너지스펙트럼이 시간적, 공간적으로 보존된다고 가정하고, 천수변형에 따른 굴절, 쇠파 등의 제 현상을 고려하고 심해로부터 천해로의 파고변화를 순차적으로 계산해 나가는 방법이며, 기본방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \nabla \cdot (DV) - Q = 0 \quad (1)$$

<sup>1</sup> 관동대학교 건설환경시스템공학부 석사졸업

<sup>2</sup> 관동대학교 건설환경시스템공학부 부교수

<sup>3</sup> 명지대학교 SOC공학부 박사과정

<sup>4</sup> 명지대학교 SOC공학부 교수

여기서,  $D$ 는 방향 스펙트럼,  $Q$ 는 외부에너지의 수치,  $V$ 는 에너지전파 속도벡터이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial f}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right\} \quad (2)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_f \\ V_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_g \cos \theta \\ C_g \sin \theta \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{C_g}{C} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\} \quad (4)$$

여기서,  $x, y$ 는 좌표,  $\theta$ 는 파향,  $D$ 는 방향스펙트럼,  $C_g$ 는 군속도,  $C$ 는 파속,  $k$ 는 파수,  $h$ 는 수심이다.

## 2.2 시간의존 환경사방정식

평면 파랑장계산에 있어서는 파의 변형 즉, 천수, 굴절, 회절, 반사, 및 쇄파에 의한 에너지감쇠등을 고려할 수 있는 시간의존 환경사방정식이 폭 넓게 사용되고 있다. 이와같은 파랑변형을 고려하여 계산할 수 있는 Maruyama와 Kajima(1985)의 시간의존 환경사방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{\partial \vec{Q}}{C^2 \nabla \eta} + f_D \vec{Q} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n |Q|) = 0 \quad (6)$$

여기서,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  이고,  $\eta$ 는 수면변위,  $C$ 는 파속,  $t$ 는 시간,  $n$ 은 군속도와 파속의 비 ( $= C_g/C$ ),  $|Q| = (Q_x, Q_y)$ 는  $x, y$ 방향의 선유량,  $f_D$ 는 에너지 감쇠계수이다.

## 2.3 선형중첩법

실제 해역의 불규칙 파랑장은 무수히 많은 주파수와 파향을 가진 성분파가 중첩되어 있다고 볼 수 있다. (丸山, 1982) 이러한 실제 해역의 현상을 조금 더 정확히 재현하기 위하여 쌍곡선 방정식의 일종인 시간의존 환경사방정식에 의한 규칙

파를 주파수분할, 방향분할을 실시하여 불규칙파로서 해석하는 선형 중첩법은 다음과 같은 방법으로 수행되어진다.

본실험에서 사용하는 방향스펙트럼  $P(f, \theta)$ 는 Goda(1977)의 제안에 따라 다음식을 사용하기로 한다.

$$P(f; \theta) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-3} \times \exp[-0.103 (T_{1/3} f)^4] G(f; \theta) \quad (7)$$

여기에서  $f$ 는 주파수,  $H_{1/3}$ 은 유의파고,  $T_{1/3}$ 은 유의 주기이며,  $G(f; \theta)$ 는 주파수  $f$ 의 스펙트럼 성분 방향분포 함수이다. 이  $G(f; \theta)$ 는 방향함수의 집중도를 나타내는 파라메타  $S$ 를 사용하여 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (8)$$

이때,  $G_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2S-1} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma^2(2S+1)} \quad (9)$$

또한,  $S$ 는 최대치  $S_{\max}$ 를 사용하여, 다음과 같이 부여한다.

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_P)^3 & : f \leq f_P \\ S_{\max} \cdot (f/f_P)^{-2.5} & : f \geq f_P \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $\Gamma$ 는 감마함수이고  $f_P$ 는 주파수스펙트럼의 Peak 주파수로 유의파 주기와 다음과 같은 관계가 있다.

$$f_P = \frac{1}{1.05 T_{1/3}} \quad (11)$$

주파수의 분할방법은 주파수스펙트럼상에서 각 성분파의 파에너지가 동일하도록 등면적 분할하고 각 등분할 면적을 2등분하도록 하는 방법을 사용하였다. 이는 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$f_i = \frac{1.007}{T_{1/3}} [\ln\{2M/(2i-1)\}]^{1/4} \quad (12)$$

여기서,  $f_i$ 는 성분파의 주파수,  $M$ 은 주파수

분할총수,  $i$ 는 주파수분할 순번이다. 방향분할 방법은 주파수분할과 마찬가지로 에너지비율의 근사적인 식(13)을 사용하였다.

$$(\Delta E)_{ij} = \frac{1}{M} D_i \quad (13)$$

여기서,  $(\Delta E)_{ij}$ 는 각 성분파의 에너지비율,  $M$ 은 성분파의 갯수,  $D_i$ 는 전에너지에 대한 파향별 에너지비이다.

그리고, 각 성분파의 입사파고는 식(14)에 의해 결정할 수 있다.

$$H_i = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=1}^n H_i^2} \quad (14)$$

윗식에서  $H_i$ 는 각 성분파들의 합성된 결과치,  $n$ 은 성분파의 갯수,  $H_i$ 는 각 성분파의 결과치,  $i$ 는 성분파의 순번이다.

### 3. 평면 파랑장 계산모형의 현지 적용

#### 3.1 대상해역의 개요

설계파산정 대상지역은 수면하에 암초가 존재하는 지역으로서 자연적인 천퇴가 형성되어 있다. 이지역의 파랑출현율을 살펴보면 NNE파랑의 출현율이 12.7%를 차지하여 출현율에 있어서 제일 크고, NE방향의 파랑이 10.5%, S방향의 파랑이 7.2%등의 순으로 나타나고 있다. 대상지역의 상세도는 그림1에서 보여지는 바와 같다.

#### 3.2 수치실험 방법의 개요

천해설계파 수치모형실험에 있어서는 다방향 불규칙파를 계산하는 에너지평형방정식모형과 자연상태의 불규칙 파랑을 재현하기 위해 시간의존 환경사방정식모형을 파향과 주기를 에너지 비율에 따라 Goda방법으로 분할하고 각각의 계산결과를 선형 중첩하는 에너지 성분파중첩법을 사용하여 계산을 수행하였다. 계산결과를 비교를 위해 시간의존 환경사방정식에 대한 단일방향 규칙파 계산도 동시에 실시하였다. 결국 다방향 불규칙파를 재현 가능한 에너지평형방정식 모형, 시간의존 환경사방정식의 선형중첩법, 규칙파 모형의 3가지 경우에 대하여 계산을 실시하여 비교 검토를 수행하였다.

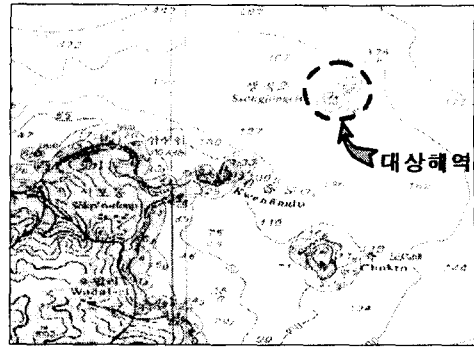


Fig. 1 Location map of field sites

수치계산에 사용된 입사파 제원으로는 해역별 심해파 추정보고서(1988, 해양수산부)에 제시된 50년 빈도의 설계파 제원을 사용하여 NNE방향에 대하여 계산하였으며, 이때의 파고는 8.6m 주기는 13초이다. 계산 격자간격  $\Delta x, \Delta y$ 는 5m로 두 모형 모두 동일한 격자체제로 구성하였다.

먼저 에너지평형방정식 모형의 불규칙파 계산에 있어서 파향은 34분할, 주기5분할로 하였으며, 파랑집중도를 표시하는  $S_{max}$  값은 풍파로 간주하여 Goda(1977)의 산정방법에 따라 25로 설정하여 계산을 수행하였다.

다음으로 시간의존 환경사방정식의 계산에 있어서는 불규칙파랑을 재현하기 위하여 선형중첩법을 사용하였다. 파향은 16방위분할이나 8방위분할을 사용하는 경우 전에너지에 대한 파향별에너지는 표1과 같이 나타낼 수 있다.

본 계산에 있어서는 16방위분할 중 천해역의 방향집중도  $S_{max} = 25$ 에 해당하는 파향별 에너지비를 사용하였고, 주기에 대해서는 4개로 주파수분할을 실시하였으며, 앞서 언급한 입사제원과 동일한 조건하에서 계산을 수행하였다.

일반적으로 주기의 분할수를 늘리면 늘릴수록 보다 상세하게 파에너지 주파수 분포특성이 재현

표.1 Ratio of wave energy in each direction to the total energy

성분파의 파향	16방위분할			8방위분할		
	$S_{max}$			$S_{max}$		
	10	25	75	10	25	75
67.5°	0.05	0.02	0	-	-	-
45.0°	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
22.5°	0.21	0.23	0.18	-	-	-
0°	0.26	0.38	0.60	0.48	0.66	0.88
-22.5°	0.21	0.23	0.18	-	-	-
-45.0°	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
-67.5°	0.05	0.02	0	-	-	-
계	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

될 수 있지만, 이때 그 정도의 향상에 비하여 역으로 계산기 용량과 계산시간이 증가되는 단점을 지니고 있다.

### 3.3 천해설계파 계산결과 및 비교검토

대상지역의 천해설계파를 산정함에 있어서 시간의존 환경사방정식모형과 에너지평형방정식 모형에 의해 계산을 수행하였으며, 동일한 조건하에서 규칙파와 불규칙파 계산을 실시하였다.

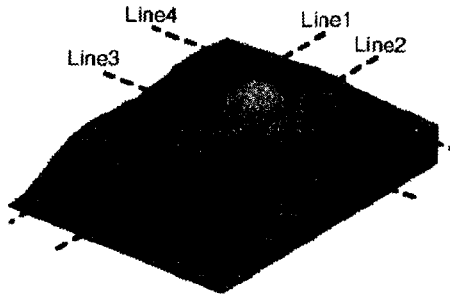


Fig. 2 Three-dimensional geographical diagram

그림 2에서는 대상해역의 해저지형을 나타낸 것이고, 파고분포의 변화를 비교 검토하기 위하여 Line1~Line4를 선정하여 비교를 수행하였다. 먼저 그림3과 그림4는 시간의존 환경사방정식의 규칙 및 불규칙파의 파고분포를 나타낸 것이며, 에너지평형방정식모형에 의한 다방향 불규칙파의 파고분포는 그림5에서 나타내고 있다.

또한 좀더 정확한 파고변화를 알아보기 위해 그림6 (a)~(d)까지 각 Line별에 따른 규칙 및 불규칙파의 파고변화를 도시하였다. 파고분포도에서 알 수 있듯이 에너지평형방정식의 경우 실현상의 파랑을 재현 할 수 있는 다방향 불규칙파를 계산상에서 재현하고 있으므로 그 결과 자체가 평면적으로 안정되어 있음을 알 수 있다. 그러나 천퇴가 형성되어 있는 배후면에서는 파고분포가 다소 작게 표현될 우려가 있음을 알 수 있었다.

한편, 시간의존 환경사방정식의 규칙 및 불규칙파의 계산결과를 살펴보면 단일방향 규칙파의 경우 파고분포는 에너지분산효과가 없으므로 천퇴 주변부위에서 다소 높은 파고분포의 형태가 나타나는 것을 알 수 있으며, 이에 반해 불규칙파의 파고분포는 천퇴 전면부와 배후면에서의 파고가 규칙파에 비해 현저히 감소된 경향을 보이고 있다.

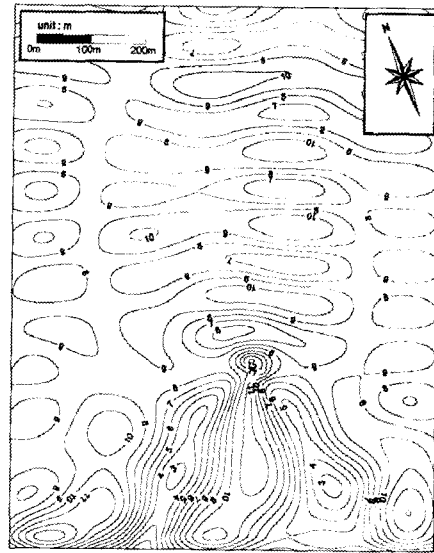


Fig 3. Wave height distribution by Time-dependent mild-slope equation (regular waves)

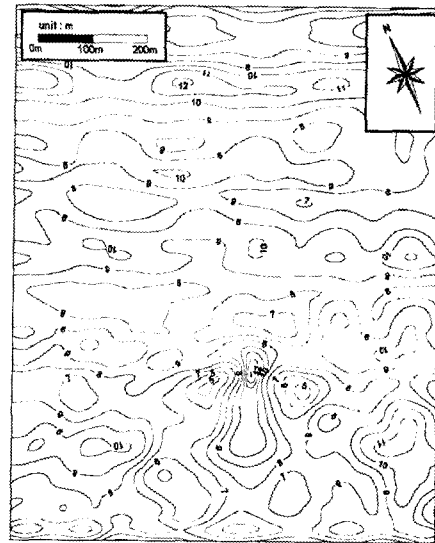


Fig 4. Wave height distribution by Time-dependent mild-slope equation (irregular waves)

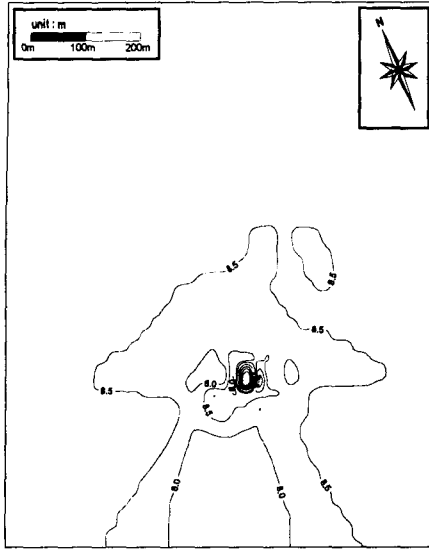
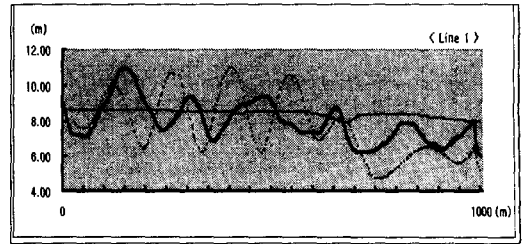


Fig 5. Wave height distribution by Energy method (irregular waves)

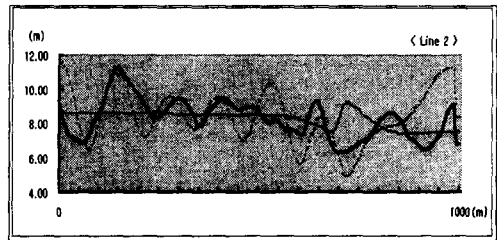
이는 규칙파의 계산결과와 비교해 볼 때 에너지 중첩법을 통한 주파수분할 및 방향분할로 인해 실제의 자연현상에 좀더 근접할 수 있는 불규칙파를 제한함으로써, 천퇴 주변부위에서의 에너지 분산효과가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 에너지평형방정식모형과 시간의존 환경사방정식에 의한 불규칙파 계산결과를 비교해 볼 때, 대체적으로 파고분포는 시간의존 환경사방정식모형이 다소 높게 평가된 것을 알 수 있었다. 이는 상정초를 중심으로 그 배후에서 파랑의 caustic 현상이 강하게 표현된 데에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 이러한 문제는 주파수와 파향분할을 증가시켜 계산한다면 이와같은 에너지 집중현상을 다소 감소시킬 수 있으리라 생각된다.

#### 4. 결론

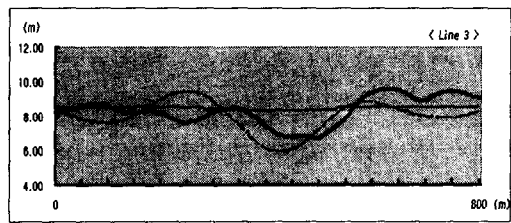
본 연구에서는 천해설계파를 계산함에 있어서 에너지평형방정식 모형과 다방향불규칙파를 제한하기 위하여 선형중첩법을 이용한 시간의존 환경사방정식모형에 대해 각각 수치계산을 수행하였다. 그 결과 시간의존 환경사방정식의 계산에 의한 파고분포가 다소 높게 평가된 것을 알 수 있었다. 그러나 이 경우 앞서 언급한 것처럼 규칙파 모형의 계산결과보다 불규칙성을 고려한 계산 결과가 현지 적용성에 있어서 타당성이 우수한 것을 알 수 있었으며, 아울러 천해설계파를 산정함에 있어서 불규칙파를 고려해야 하는 필요성을 확인할 수 있었다.



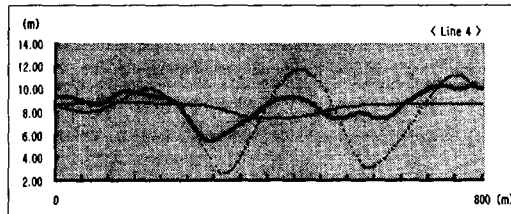
(a)



(b)



(c)



(d)

Time-dependent mild-slope equation (regular waves) .....  
 Time-dependent mild-slope equation (irregular waves) ———  
 Energy method (irregular waves) ———

Fig 6. Comparison of wave height distribution

한편, 에너지평형방정식 모형과 시간의존 환경사방정식 모형의 천해설계파계산에 있어서는 에너지평형방정식모형이 실현상에 좀더 적합하다는 것을 알 수 있었다. 이는 실현상의 파랑을 재현

할 수 있는 다방향 불규칙파를 계산상에서 구현하고 있으므로 그 결과 자체가 평면적으로 안정되어 있기 때문이라 판단되며, 구조물의 설계파는 진행파를 대상으로 설정하는 것을 원칙으로 하고 있으므로 실현상의 진행파를 잘 재현해 주고 있는 에너지평형방정식의 결과가 천해설계파산정에 있어서 좀더 타당성이 있는 것으로 사료된다.

아울러, 파랑의 비정상 상태를 구현해 보고자 할 때에는 불규칙파의 시계열스펙트럼을 고려한 비정상 파동방정식모형 등을 사용할 필요가 있으며, 규칙파를 재현하는 비정상 환경사방정식을 사용할 경우에는 선형중첩법을 이용하여 다방향 불규칙파 특성을 재현해 보는 것이 바람직하며, 실용상 타당성 있는 방법으로 사료된다.

## 5. 참고 문헌

- 全文球, 2000. 不規則波概念을 이용한 港内 靜穩度 解析方法. 關東大學校 碩士學位論文.
- 合田良實, 1975. 淺海域における波浪の碎波變形, 港灣技術研究報告書. 第14卷, 第3号, 59-106
- 丸山康樹·榑山 勉·鹿島遼一·原 隆幸, 1982. 位相折り返し法による港内波高計算手法. 海岸工學 講演會論文集, 第29卷, 120-123.
- 渡辺 晃·丸山康樹, 1984. 屈折·回折·碎波減衰を含む波浪場の數値解析法. 海岸工學講演會論文集, 第31卷, 103-107.
- 磯部雅彦, 1986. 放物形方程式を用いた不規則波の屈折·回折·碎波變形の計算法. 第33回海岸工學講演會論文集, 134-138.
- 小竹泰夫·磯部雅彦·渡辺 晃, 1991. 非定常緩句配不規則波動方程式について. 海岸工學講演會論文集, 第38卷, 46-50.
- Berkoff, J. C. W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. *Proc. 13th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 471-490.
- Gaillard, P., 1984. Combined refraction-diffraction calculations with directional wave spectra. *Proc. 19th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 1040-1056.
- Karlsson, T., 1969. Refraction of continuous ocean wave spectra, *J. Waterways and Harbors Division, Proc.* ASCE, Vol.95, 437-448.
- Mobarek, I. E. and Wiegand, R. I., 1966. Diffraction of wind generated water waves. *Proc. 10th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 185-206.