

淺海에서 不規則波의 變異 Transformation of Irregular Waves in Shallow Water

유 동 훈*
Dong Hoon Yoo*

要 旨 : 불규칙파를 스펙트럼으로 파악하여 천해에서 천수, 굴절, 회절, 마찰 및 쇄파 등에 의하여 변이하는 현상을 해석하였다. 지배방정식은 에너지보존식과 파수벡터보존식인데 파수벡터보존식에 회절효과를 고려하는 항을 포함하였다. 스펙트럼형상을 재현하기 위하여는 선형누적법을 사용하였으며, 스펙트럼에 대한 대표 마찰계수를 간단히 산정하는 약산식을 개발, 사용하여 마찰손실효과를 고려하였다. 또한 천해역에서의 쇄파를 고려하기 위하여 Kitaigorodskii의 평형조건식을 수정하여 적용하였다. 본 연구에서 개발된 모형을 실험조건에 적용하여 검증한 결과, 계산치가 실측치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Abstract □ A numerical model for the transformation of irregular waves in a coastal area is developed, which takes account of shoaling, refraction, diffraction, bottom friction and wave breaking. The governing equations are the usual energy conservation equation and kinematic conservation equations, but to consider the diffraction effects additional terms are included in the usual kinematic conservation or wave number equations. A linear superposition technique is used to represent the spectral formation, and an explicit formula is developed for the estimation of friction factor of irregular waves. A breaking criterion of component waves, which is the modified form of the Kitaigorodskii saturation relation, is employed to restrict the growth of shoaling waves in very shallow waters. The model was applied to a laboratory test, and satisfactory agreement was obtained between the computation and measurement.

1. 서 론

심해에서 풍파의 형성은 주로 바람에 의한 마찰력, 파와 파간의 교섭현상 그리고 white-capping 현상 등에 의한 1차 에너지손실에 의하여 이루어진다. 수심이 파장의 절반에 이르기 전에 파도는 해저면을 거의 느끼지 못하며 파의 변이는 주로 이상 세가지 물리현상에 좌우된다. 이러한 심해역에서의 파의 변이를 해석할 때 굴절, 회절 및 마찰손실 등에 의한 천해역현상은 무시할 수 있으며, 풍파의 형성은 주로 바람 조건에 좌우된다. 따라서 수치해석에 사용되는 격자 크기는 바람 조건의 변이 정도에 따르게 되어 격자 크기는 대개 10 km 내외이다. 그러나 파도가 일단 심해역에서 천해역으로 들어오게 되면 천수, 굴절, 회절 및 마찰손실 등에 의하여 급격하게 변이

한다. 따라서 수치모형의 격자는 해저 지형 및 파의 변이 정도에 따라 상당히 작은 크기를 사용하여야 하는데 대개 100m 내외가 되며 때로는 10m까지 상당히 작은 크기의 격자를 사용하여야 하는 경우도 있다.

지난 40여년간 이러한 제 물리특성을 정량적으로 분석 해석하여 해양표면파의 분포를 정확히 재현하고자 많은 수치모형들이 개발되어 왔는데, 크게 두 가지 군으로 분류할 수 있을 것이다. 즉 하나는 海洋波模型(ocean wave models)이라 일컬을 수 있으며 다른 하나는 海岸波模型(coastal wave models)이라 일컬을 수 있을 것이다. 해양파모형에서는 다른 현상들을 완전히 무시하는 것은 아니겠지만 주로 풍파의 생성과정을 고려하며, 해안파모형은 굴절, 회절, 마찰 등 주로 천해역에서의 파변이과정을 주 대상으로 한

*亞洲大學校 土木工學科 (Department of Civil Eng., Ajou University, Suwon 441-749, Korea)

다. 최근의 해양파모형중 일부는 해안파모형의 주 관심대상이 되는 천해역 변이과정을 고려하였으나, 아직 회절현상 등을 고려치 않았기 때문에 지형변화가 급격한 해역에의 적용에 문제점이 따를 것으로 예상되며, 마찰손실 등의 해석에 정량적인 분석이 미흡한 것으로 판단된다.

최근 파변이해석에 굴절, 천수뿐아니라 회절현상을 적절히 고려하여 중첩파(waves in caustics)의 발생이나 항내 정온도 문제 등을 성공적으로 다룬 해안파모형이 여러가지 개발되었다. 이러한 해안파모형도 확장하여 풍파의 생성과정을 고려하면 해양파모형을 보완 또는 연계하여 사용할 수 있을 것으로 예상되며, 실제로 Graber *et al.* (1990)은 전통적인 방법의 파선모형을 이용하여 천해역에서의 풍파를 예측하였다. 해양파모형은 실제로 나타나는 불규칙파를 스펙트럼으로 재현하는 반면에 해안파모형 개발자들은 단순파(monochromatic waves)의 변이에 우선적인 관심을 보여 왔다. 따라서 해안파모형을 풍파예측모형으로 개발하고자 하면 불규칙파의 재현을 먼저 실현하여야 할 것이다. Panchang *et al.* (1990)은 포물형모형(parabolic model)을 확장하여 불규칙파 변이를 해석한 바 있다. 본고는 Yoo와 O'Connor(1988)가 발표한 굴절-회절의 쌍곡형 평균파모형(period-averaged hyperbolic model)을 확장하여 불규칙파의 굴절과 회절을 해석하는 방법을 설명하며, 스펙트럼파의 쇄파조건은 Kitaigorodskii의 평형조건식을 개선하여 적용하고, 스펙트럼파의 마찰손실계수를 양해법으로 구하는 식을 제시한다.

2. 지배 방정식

아마도 계산효율의 이점때문에 전통적인 파선모형(ray tracing model)은 최근까지 연안에서 해안파의 변이를 해석하는데 많이 사용되어 왔으며, 파선모형의 개선책은 여타 모형의 개발과 함께 여러가지가 제시되어 왔다. Larsen(1978)은 방파제 배후지에서의 파고를 해석하는 방법을 제시하였으며, Bouws와 Battjes(1982)는 중첩파 발생지역에서 파고를 산정하는 방법을 개발하였다. 그러나 두 방법 모두 파의 전파 해석에 회절현상에 따른 영향을 유기적으로 고려치 않고 산정된 결과를 해석하기 때문에 적용범위가 매우 제한될 것이다.

파선모형의 계산신속성은 파의 대표치를 바로 구할 수 있다는 점과 격자 크기를 정하는데 있어 파형과 파장을 거의 고려치 않고 해저지형의 복잡성에만 의존한다는 점에 연유할 것이다. 파는 파고, 주기 및 방향으로 대표할 수 있는데 에너지보존식을 수직적 분함과 동시에 일주기 평균을 하면 파에너지밀도 또는 파고의 변이를 나타내는 지배방정식을 구할 수 있으며, 파수(wave number)와 주파수(wave frequency)의 정의로부터 도출되는 파수보존식(wave number conservation equation)을 사용하면 파의 방향을 결정할 수 있게 된다. 에너지보존식과 파수보존식은 천수, 굴절 등과 같은 기본 천해역 변이과정을 해석하는데 기초방정식으로 사용되어 왔으며, Yoo와 O'Connor(1988)는 Battjes(1968)의 浮影關係(eiconal relation)를 이용하여 단순파에 대한 회절현상을 고려한 파수보존식을 개발하였다.

파고의 2차 곡률(amplitude curvature)이 존재할 때, Battjes(1968)는 波數가 縱擴散關係(dispersion relation)로부터 구해지는 分離係數(separation factor)와 일치하지 않음을 발견하였다. 이는 Laplace 방정식으로부터 속도포텐셜을 추출하는 과정에서 얻어지는데 다음과 같다.

$$K^2 = k^2 + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

여기서 K는 파수, a는 파의 진폭이며, k는 분리계수로서 종확산관계

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (2)$$

로부터 구해진다. 여기서 σ 는 파주파수이며, g는 중력가속도, d는 수심이다. 식 (1)을 Battjes의 부영관계라 칭하며 파고의 변화가 있더라도 곡률이 존재치 않으면 파수 K는 분리계수 k와 일치하여 종확산관계 (2)로부터 바로 구할 수 있다.

파고의 곡률이 존재할 때 파수는 주파수, 수심뿐 아니라 파고곡률의 함수가 되어 파수와 주파수의 정의로부터 다음과 같은 파수보존식이 유도되었다(Yoo and O'Connor, 1988).

$$\frac{\partial K_i}{\partial t} + R_j \frac{\partial K_i}{\partial x_j} + S \frac{\partial d}{\partial x_i} = \frac{R}{2ka} \frac{\partial^3 a}{\partial x_i \partial x_j^2} \quad (3)$$

여기서 첨자 $i=1(x), 2(y), j=1(x), 2(y)$, R는 군속도

이며

$$S = \sigma G / 2d \quad (4)$$

$$G = 2kd / \sinh(2kd) \quad (5)$$

파수보존식 (3)의 마지막항이 회절효과를 나타내는 항으로서 product 항은 무시하였다.

Battjes 부영관계식 (1)은 단순파인 경우에만 적용되는데 각 주파수간의 간섭효과가 무시할 수 있을 정도로 작으면 불규칙파에 대하여 쉽게 확장할 수 있다. 스펙트럼파인 경우 각 주파수간의 파진폭은

$$a = (2E(f)df)^{1/2} \quad (6)$$

로 산정된다. 여기서 E(f)는 주파수 스펙트럼 에너지 밀도이며, df는 주파수간격이다. 본고에서는 주파수 스펙트럼에 대하여만 다루는데 방향 스펙트럼에 대하여도 각 파간의 간섭효과가 미약하다면 같은 방법으로 쉽게 확장할 수 있을 것이다. 식 (5)를 식 (1)에 대입하고 product 항들을 무시하면 다음과 같은 부영관계식이 구해진다.

$$K^2 = k^2 + \frac{1}{2E} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

여기서 단순화를 위하여 E(f)를 E로 표기하였다.

Yoo와 O'Connor(1988)가 제시한 과정을 반복하면, 굴절·회절에 영향을 받는 스펙트럼파의 파수보존식은 x와 y 방향을 분리하여:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + PM \frac{\partial P}{\partial x} + QM \frac{\partial P}{\partial y} + S \frac{\partial d}{\partial x} \\ = \frac{M}{4E} \left(\frac{\partial^3 E}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial xy^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + PM \frac{\partial Q}{\partial x} + QM \frac{\partial Q}{\partial y} + S \frac{\partial d}{\partial y} \\ = \frac{M}{4E} \left(\frac{\partial^3 E}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial yx^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현되며, 스펙트럼파의 에너지보존식은 에너지손실율을 포함하여

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} PME + \frac{\partial}{\partial y} QME + C_E E = 0 \quad (10)$$

여기서 C_E 는 손실계수이며, P와 Q는 각각 파수벡터의

x와 y성분이며, M은 단위군속도(unit number group velocity), 즉 군속도를 파수로 나눈 것으로서

$$M = (1+G)\sigma / 2K^2 \quad (11)$$

이다. 따라서 PM 과 QM 은 각각 군속도의 x와 y성분 R_x 와 R_y 가 된다.

3. 스펙트럼파의 쇄파

쇄파에 의한 에너지 감쇄는 수치모형에서 두가지 방법으로 처리된다. 하나는 에너지보존식 (10)에서 마지막항과 같이 쇄파손실계수를 도입하는 방법이고 (Battjes and Janssen, 1984), 다른 하나는 전 해석에 에너지보존식 (10)으로부터 매 시간 계산된 파고를 쇄파임계치와 비교하여 파고의 증가를 강제로 억제하는 방법이다(Yoo and O'Connor, 1986). 쇄파 발생에 따라 생성되는 난류운동은 파고의 변이에 2차적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 전자가 보다 올바른 접근 방법으로 여겨지나, 지형이 복잡한 해석에서 쇄파대 해석을 결정하는데 어려움이 따르며, 이 또한 결국에는 쇄파임계치의 정확도에 상당부분 의존한다. 후자는 똑같은 쇄파임계조건식으로 쇄파대 전 구간에 적용하는데 각 격자의 위치조건을 일일히 점검할 필요가 없기 때문에 수치모형의 구성에 편리하다. 본 수치모형에서는 후자의 방법에 따른다.

에너지보존식 (10)으로 계산된 파고는 매 계산시간 적절한 쇄파임계치와 비교하여 임계치를 초과할 때 임계치로 대체하는데, 단순파의 쇄파임계치에 대한 이해는 충분한 것으로 판단되나 불규칙파에 대한 이해는 아직 미흡한 것으로 사료된다. 본고에서 불규칙파의 쇄파임계치에 대한 논의는 Kitaigorodskii 등 (1975)의 평형조건식(saturation relation)으로부터 전개한다. 주파수 스펙트럼에 대한 Kitaigorodskii의 평형조건식은 다음과 같다.

$$E_b(f) = 4\pi\gamma_1\sigma^{-1} (1+G)^{-1} K^{-2} \quad (12)$$

이는 주파수 스펙트럼과 파수 스펙트럼과의 관계식

$$E(K) = (2\pi)^{-1} R E(f) \quad (13)$$

을 사용하면 파수 스펙트럼에 대한 평형조건식은 다음과 같이 된다.

$$E_b(K) = \gamma_1 K^{-3} \quad (14)$$

여기서 γ_1 는 상수이다. 평형조건식 (12) 또는 (13)은 주로 고주파에너지의 증가를 통제하는 반면에 저주파에너지는 계속적인 증가를 보인다. 이러한 문제점을 개선코자 Bouws 등(1986)은 천해역에서의 스펙트럼 형태가 심해역 스펙트럼 형태와 유사하다는 가정하에 Pierson-Moskowitz와 JONSWAP 스펙트럼 계수를 이용하여 TMA 스펙트럼을 개발하였다. 그러나 Bouws 등(1986)도 언급했듯이 비선형간섭효과 이외에 마찰력, 천해역 쇄파 등에 의한 에너지 손실이 클 때 이러한 유사성이 그대로 존재할 지는 의문이다.

Yoo(1993)는 불규칙파에 의한 연안류 연구에서 Kitaigorodskii의 평형조건식을 개선하여 다음과 같은 쇄파에너지 임계식을 제시하였다.

$$E_b(f) = 4\pi\gamma_2\sigma^{-1} (1+G)^{-1} K^{-2} \tanh^2(Kd) \quad (15)$$

여기서 γ_2 도 역시 상수이다. 식 (14)에 상수 γ_2 는 쇄파대에서 관측된 다섯가지 현장관측자료 모두 일정한 값($4\pi\gamma_2=0.21$)을 취하여 쇄파대내 파고분포를 상당히 정확하게 묘사하였다. 쇄파에너지 임계식 (15)는 다음과 같은 설명으로 이의 합리성을 밝힌다.

식 (15)는 식 (12)에 $\tanh^2(Kd)$ 를 곱하여 구해진다. 파운동의 종확산관계식 (2)를 사용하면 식 (15)는

$$E_b(f) = 4\pi\gamma_2 g^{-2} \sigma^{-1} (1+G)^{-1} C^4 \quad (16)$$

가 된다. 여기서 C는 파속 즉 $C=\sigma/K$. 또한 식 (13)을 사용하면 식 (15)는

$$E_b(K) = \gamma_2 K^3 \tanh^2 Kd = \gamma^2 g^{-2} K^{-1} C^4 \quad (17)$$

가 된다. 즉 식 (16)과 (17)은 최대 파에너지가 파속의 4제곱에 비례함을 말하여 준다.

단순파인 경우 Miche(1944)의 쇄파임계식은 다음과 같이 표기된다.

$$H_b = 2\pi\gamma_3 K^{-1} \tanh(Kd) \quad (18)$$

여기서 γ_3 는 상수이며 해저면경사가 없을 때 0.142이다. 마찬가지로 종확산관계식 (2)를 사용하면 식 (18)은

$$H_b = 2\pi\gamma_3 g^{-1} C^2 \quad (19)$$

이 되어, 단순파의 최대 파에너지도 파속의 4제곱에 비례함을 알 수 있다.

Miche의 쇄파임계식은 쇄파계수(surf similarity parameter)의 도입으로 해저면경사가 급한 지역에 대하여 정밀도를 높일 수 있는데(Yoo, 1990), 식 (16)과 (19)에 표기된 바와 같이 파속의 정확한 산정으로 정도를 높일 수도 있을 것이다. 만약 식 (9)로 산정된 각 스펙트럼대의 파에너지밀도가 식 (15)로 산정된 임계치 보다 클 때는 임계치로 대체한다. 현장자료에 적용하였을 때 $4\pi\gamma_2$ 는 0.21이었는데 본 연구에서 수조실험자료에 대하여도 0.21를 적용하여 대체적으로 만족할만한 결과를 얻었다.

4. 스펙트럼파의 마찰손실

Collins(1972)는 해저면마찰에 의한 스펙트럼파의 에너지손실율은 다음과 같이 산정할 수 있다고 가정하였다.

$$D = \delta\rho C_b U_{br} U_b^2 \quad (20)$$

여기서 D는 각 스펙트럼대(each spectrum band)의 평균에너지손실율, δ 는 유속 3제곱의 평균치로서 파운동을 상현곡선으로 가정할 때 $\delta=4/3\pi$ 가 되며 해류와 합성할 때 $4/3\pi$ 로부터 증가한다. U_b 는 각 스펙트럼대의 최대 해저면유속으로서 보통 포텐셜이론으로 산정되며, U_{br} 는 U_b 제곱의 평균의 근(root-mean-square)이며, C_b 는 파마찰계수이다.

식 (20)에서 파마찰계수 C_b 는 U_{br} 와 U_b 에 관련되는데, 선형파이론을 적용하면 해저면마찰에 의한 손실율은

$$\frac{\partial E(f)}{\partial t} = 2\delta g^{-1} C_b U_{br} (\sigma/\sinh Kd)^2 E(f) \quad (21)$$

가 되어, 식 (9)에 사용된 마찰에 의한 손실계수 C_E 는

$$C_E = 2\delta g^{-1} C_b U_{br} (\sigma/\sinh Kd)^2 \quad (22)$$

로 산정된다. 여기서 $(\gamma g^{-1} C_b U_{br})$ 는 전스펙트럼에 걸쳐 일정하나 $(\sigma/\sinh Kd)^2$ 는 각 스펙트럼대에서 주파수에 따라 상당히 변할 수 있다. 계수 C_b 이외의 모든 변수는 파조건에 따라 바로 구해진다.

파마찰계수 C_b 는 파조건과 해저면조건에 따라 결정되며, 여기서 파조건이라 하면 마찰력에 관하여 전스펙트럼의 특징을 대표하는 조건이다. 최근에 Ma-

dsen 등(1988)은 파마찰계수를 상대조도 A_{br}/k_s 의 함수로 산정하는 수식을 개발하였다. 여기서 A_{br} 은 파운동의 해저면 최대이동거리의 root-mean-square이며, k_s 는 Nikuradse 등가조도이다. 그들은 경계층에 대하여 운동량방정식을 적분하여 Jonsson(1967)의 파마찰계수 산정식과 유사한 수식을 유도하였는데 다음과 같다.

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = \log \frac{A_{br}}{k_s} - 0.17 \quad (23)$$

여기서 f_w 는 Jonsson이 정의한 파마찰계수이며 $f_w = 2C_b$ 이다. 상기식은 음해법으로 시산과정을 거쳐야 파마찰계수를 산정할 수 있는데 다음과 같은 약산식으로 표기되어 양해법으로 정확하게 산정될 수 있다. 즉,

$$C_b = \text{EXP}(5.213(k_s/A_{br})^{0.194} - 6.57) \quad (24)$$

식 (24)를 Swart(1974)의 단순파에 대한 파마찰계수 산정식과 비교하면 약 10% 가량 증가함을 알 수 있다.

5. 모형의 검증

식 (7), (8), (9)로 대표되는 지배방정식은 일정 간격의 격자에 upstream method에 의한 유한차분법으로 풀어 해를 구할 수 있으며(Yoo and O'Connor, 1986), 각 스펙트럼대에 대하여 독립적으로 풀어 최종 결과는 누적적분하여 구한다. 본 모형의 1차 검증을 위하여 Delft 수리시험소의 Berkhoff(1982)가 보고한 수조실험자료에 적용한다. Delft 수리시험소는 비스

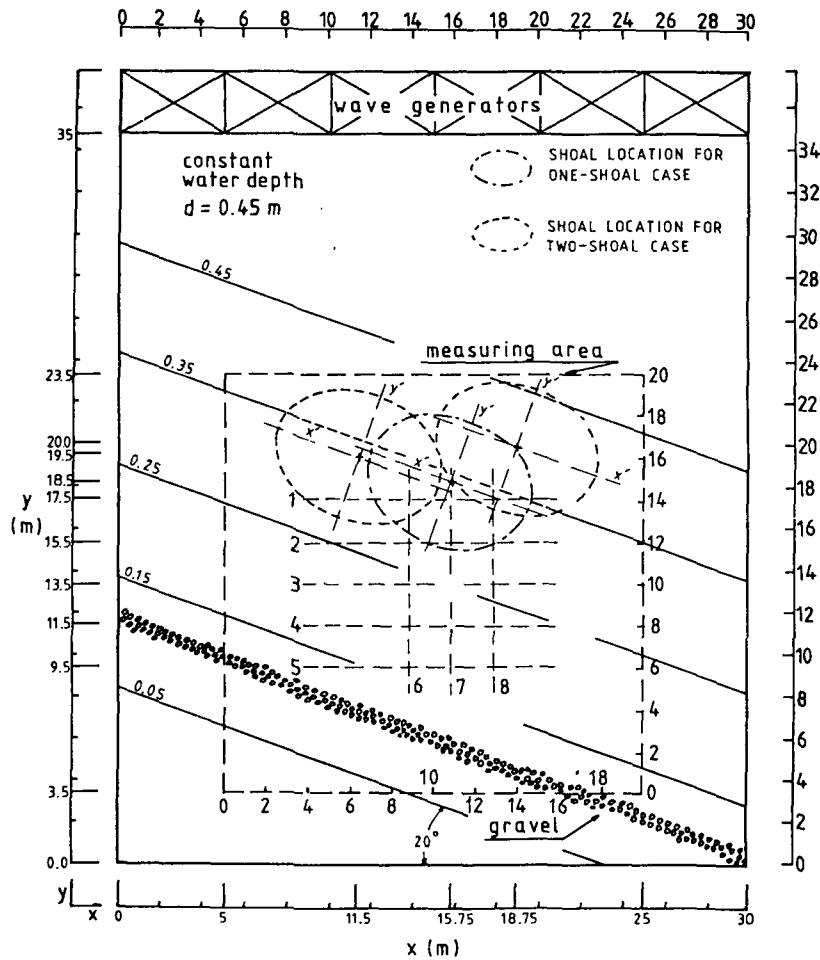


Fig. 1. Sketch of laboratory tank and submerged islands reported by Berkhoff (1982).

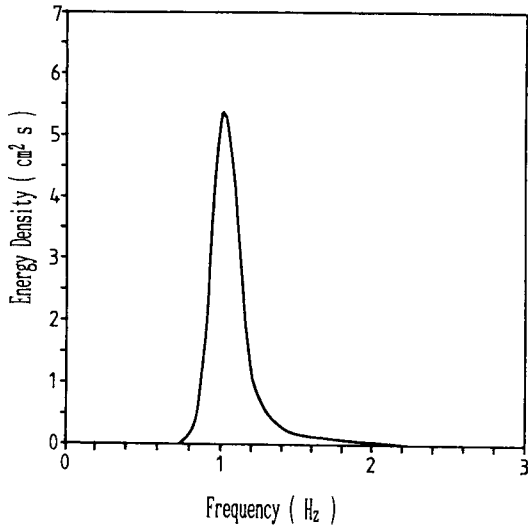


Fig. 2. Wave spectrum at inflow boundary for T3 case.

듬히 경사진 사면에 타원형 물체를 하나 또는 두개를 설치하여 굴절과 회절이 동시에 크게 나타나도록 조치하였으며, 단순파와 함께 불규칙파의 변이에 대하여도 실험하였다. Delft의 실험자료중 단순파에 대하여는 여러 연구자들이 적용한 바 있으나(Berkhoff, *et al.*, 1982; Kirby and Dalrymple, 1984; Yoo and O'Connor, 1988), 불규칙파에 대한 적용에는 보고되지 않았다. 실험수조의 배치상황에 대하여는 Fig. 1에 도시되어 있는데, 실험수조 전체를 포함하는 외부좌표계와 관측지역만 따로 독립된 내부좌표계가 명기되어 있다. 내부좌표계의 x 좌표 시작점은 외부좌표계의 5m에 놓이며, y좌표의 시작점은 외부좌표계의 3.5m에 놓인다. 외부좌표계를 기준으로 타원형 물체나 경사판의 위치 등에 대한 상세한 기술은 상기 문헌(Yoo and O'Connor, 1988)에 나와 있으며, 이후 본고에서는 내부좌표계를 기준하여 파고변이를 비교 검토하였다. Berkhoff의 보고서에 T3와 T6로 표기된 불규칙파 변이 수조실험에서 입사파의 스펙트럼형은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 JONSWAP 스펙트럼에 따랐으며 최대에너지파의 주기 T_p 는 공허 1초, 유의파고 H_s 는 T3 즉 타원형물체가 하나인 경우 0.0462m, T6 즉 타원형물체가 두개인 경우 0.0464m이다. Fig. 2는 T3에 대한 입사스펙트럼인데 T6도 거의 같은 크기 같은 형의 입사스펙트럼일 것으로 판단된다. T_p 를 기준으로 저주파역에 2개를 추가하고 고주파역에 11개를 추가

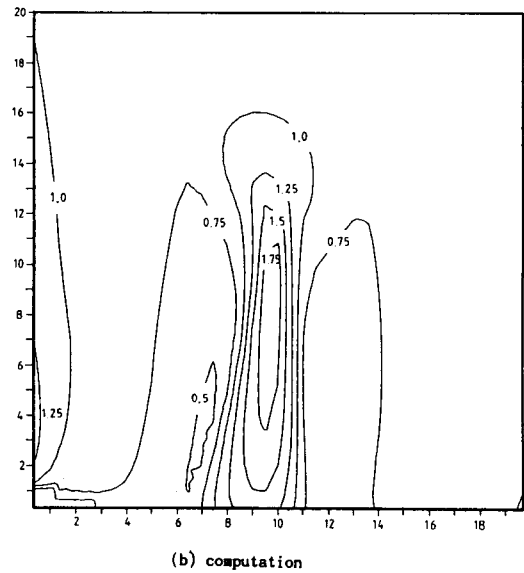
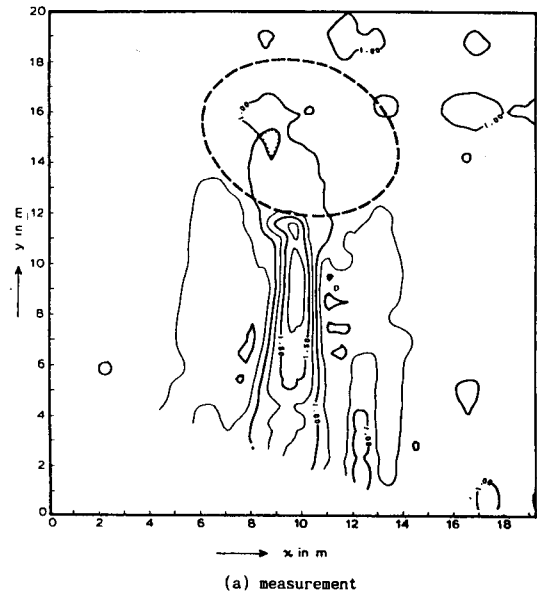


Fig. 3. Contour plots of significant wave heights for one-shoal case (a) measurement (b) computation.

하여 간격 0.1 Hz 모두 14개의 성분으로 스펙트럼파를 묘사하였다. 격자 간격은 단순파의 경우와 동일하게 (Yoo and O'Connor, 1988), 0.5m를 취하여 일파장당 3개를 넘지 않았다. 마찰손실 산정을 위하여 유효조고를 결정하여야 하는데 사면에 대한 기술이 명기되어 있지 않아 임의로 유출경계에 놓인 조약돌에 대하여는 5 mm, 그외는 0.1 mm로 가정하였다. 계산 시간간격은

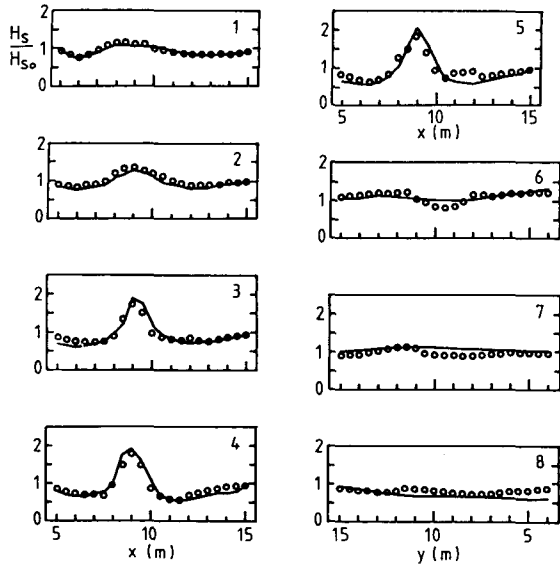


Fig. 4. Comparison of significant wave heights at several cross-sections for one-shoal case; measurement (circles) & computation (solid lines).

Courant 조건식으로 주어지는 임계치보다 약간 작은 0.1초를 취하였으며 계산시간 20초 즉 반복회수 200번 내에 정상상태에 도달하였다.

최종결과는 계산시간 27초 이후에 얻은 결과를 취하였으며, 이후 도시된 파고분포도는 입사파의 유의 파고에 대한 각 지점의 유의파고비를 나타낸다. Fig. 3 에는 T3에 대한 유의파고비의 평면분포가 도시되어 있고, Fig. 4에는 Fig. 2에 표시된 8개 단면에서의 파고비분포가 도시되어 있다. 타원형물체 배후지의 일부에서 7번 단면에서는 약간 과대 산정하는 경향이 있으며, 8번 단면에서는 약간 과소 산정하는 경향이 있으나 그외 대부분의 지역에서 계산결과는 관측결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다. Yoo와 O'Connor (1988)의 Fig. 5를 참조하면 3, 4, 5번 단면에서 파고가 최저점을 이루는 곳에서는 오히려 단순파의 경우보다 양호하게 나타나는데, 이는 불규칙파의 경우 파고분포가 더욱 확산되는 경향으로 나타나기 때문이다.

두개의 타원형 물체가 놓인 경우에도 저면고만 달리하고 기타 계산시간 간격이나 조고 등의 계산조건은 동일하게 적용하였다. 파고비 평면분포와 각 단면에서의 파고비분포에 대하여 각각 Fig. 5와 6에 도시된 바와 같이 두개의 타원형 물체가 놓인 경우에도 실험자료와 비교하여 대체적으로 양호한 결과를 보여

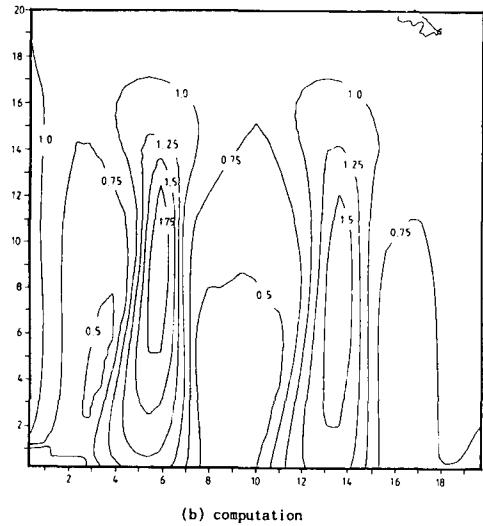
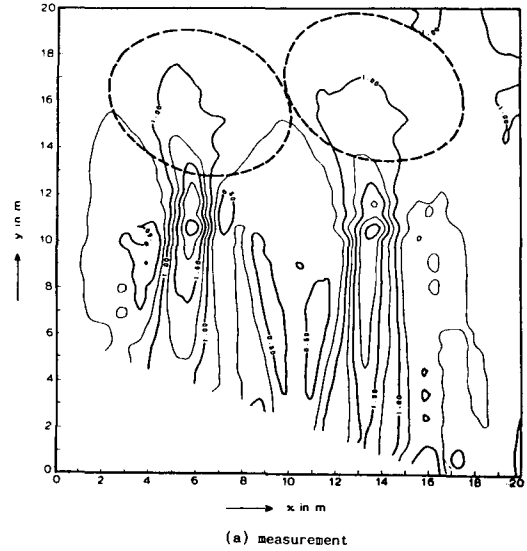


Fig. 5. Contour plots of significant wave heights for two-shoal case (a) measurement (b) computation.

주는데, 단지 단면 6에서 연안선 가까이 얕은 수심에서 뚜렷하게 과소 산정하는 것으로 나타난다. 이는 두 타원형물체의 배후지에 두 중첩파에 의하여 파에너지가 포획되는 현상(trapped wave mode)에 기인하는 것으로 판단되며, 이는 Yoo와 O'Connor(1988)의 Fig. 7에 예시된 바와 같이 단순파의 경우에도 뚜렷이 볼 수 있었다. 즉 포획지역에서 반사파의 중첩으로 파고가 이상증분하게 되는데 본 모형은 반사파의 영향을 무시하기 때문에 이러한 지역에서 파고를 작게 산정한다.

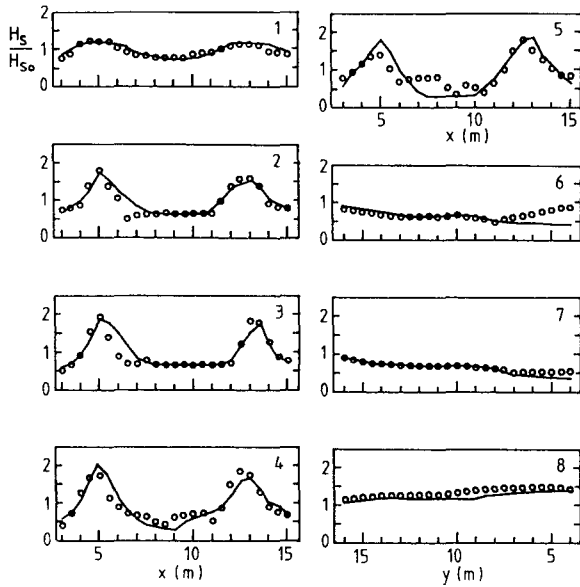


Fig. 6. Comparison of significant wave heights at several cross-sections for two-shoal case; measurement (circles) & computation (solid lines).

6. 결론 및 토의

본 연구에서 개발된 모형은 굴절, 회절, 해저면마찰, 쇄파손실 등 천해역에서의 파변이현상을 고려한 것으로 불규칙파를 스펙트럼파로 재현하여 해석하였다. 수조실험자료 적용을 통한 1차 검증으로 본 모형의 신뢰성을 어느 정도 확인하였으나, 수조실험에서 마찰손실효과는 그다지 크지 않은 관계로 마찰손실에 대한 검증은 충분치 않다고 판단된다. 이는 현장자료에의 적용으로 마찰손실효과를 뚜렷이 볼 수 있을 것으로 사료되는데, 현재 연흔의 형상을 고려하여 독일 Baltic해 연안에 적용하여 2차 검증을 시행중에 있다(Yoo와 Zielke, 1993).

두 중첩파(waves in caustics)가 인접하였을 때 파 에너지의 포획현상(trapped wave mode)이 나타나 파고가 이상증분하게 된다. 이러한 포획현상은 반사파의 영향으로 나타나는 것으로 판단되며, 본 모형과 같이 반사파의 영향을 무시하는 대부분의 수치모형은 포획현상을 잘 재현할 수 없으리라 판단된다. 반사파의 영향으로 나타나는 포획지역 이외의 굴절과 회절의 영향이 심한 대부분의 지역에서 본 모형은 대체적으로 양호한 계산결과를 준다.

사 사

본 연구의 일부는 한국과학재단의 지원에 의한 1992년도 박사후 연구과정중 이루어진 것이다.

參考文獻

Battjes, J.A., 1968. Refraction of water waves, *J. Waterways, Harbors, Coastal and Ocean Eng.*, **94**, WW4, pp. 437-451.

Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., 1984. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 569-587.

Berkhoff, J.C.W., 1982. Verification computations with linear wave propagation motion, Delft Hydraulics Laboratory, Report No. W 154-VIII, Delft Hyd. Lab.

Berkhoff, J.C.W., Booij, N. and Radder, A.C., 1982. Verification of Numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, *Coastal Eng.*, **6**, pp. 255-279.

Bouws, E. and Battjes, J.A., 1982. A Monte Carlo approach to the computation of refraction of water waves, *J. Geophys. Res.*, **87**(C8), pp. 5718-5722.

Bouws, E., Gunter, H., Rosenthal, W. and Vincent, C.L., 1986. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, *J. Geophysical Res.*, **90**, pp. 975-986.

Collins, J.I., 1972. Prediction of shallow water spectra, *J. Geophys. Res.*, **77**, pp. 2693-2707.

Graber, H.C., Byman, M.W. and Rosenthal, W., 1990. Numerical simulation of surface wave refraction in the North Sea, Part 1: Kinematics, *Dt. Hydrogr. Z.*, **43**, 1-17.

Jonsson, I.G., 1967. Wave boundary layers and friction factors, *Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, Tokyo, pp. 127-148.

Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1984. Verification of a parabolic equation for propagation of weakly nonlinear waves, *Coastal Eng.*, **8**, pp. 219-232.

Kitaigorodskii, S.A., Krasitskii, V.P. and Zaslavskii, M.M., 1975. On Phillips' equilibrium range in the spectra of wind generated gravity waves, *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, pp. 410-420.

Larsen, J., 1978. A harbour theory for wind-generated waves based on ray methods, *J. Fluid Mech.*, **87**, 143-158.

Madsen, O.S. and Poon, Y.-K. and Graber, H.C., 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, *Proc. 21st ICCE*, ASCE, pp. 492-504.

Miche, R., 1944. Mouvements ondulatoires des mers en propodeur constante ou décroissante, *Annales des Ponts et Chaussées*, pp. 25-78; 131-64; 270-92; 369-406.

Panchang, V.G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, **116**, 3, pp. 324-340.

Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equili-

- brium beach profiles, Delft Hydraulics Lab. Publ. 131.
- Yoo, D., 1990. Wave breaking in shallow waters, *J. Korean Society Coastal and Ocean Engineers*, **2**, 2, pp. 96-103.
- Yoo, D., 1993. Wave-induced longshore currents in the surf zone, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, (in press).
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1986. Ray model for caustic gravity waves, Proc. 5th Conf. Asian and Pacific Division of IAHR, **3**, pp. 1-13.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1988. Diffraction of waves in caustics, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, **114**, 6, pp. 715-731.
- Yoo, D. and Zielke, W., 1993. Irregular waves in a coastal region, (in preparation)