

불규칙한 수심단면에서 쇄파대 부근의 파고변형

최한규* · 강장수** · 이철응***

Wave Transformation near the Surfzone on the Arbitrary Beach Profile

Choi, Han-Kyu* · Gang, Jang-Su** · Lee, Cheol-Eung***

ABSTRACT

The objective of this paper is to develop two numerical model for predicting the wave height with set-up/down near the surfzone on a arbitrary beach profile. Two wave models, regular wave model and random wave model, are based on the energy flux equation with the energy dissipation effects. The developed numerical models are verified by comparison of numerical results with analytical solutions that are derived under the simple conditions. The characteristics of parameters included in each model are then investigated and decided to the range of behaviour by the sensitivity analysis. For sensitivity analysis, we carried out total 46 laboratory tests. Finally, the developed numerical models are applied to the field where the wave height near the surfzone has been measured. From the applications of numerical models, it is concluded that the developed numerical models may accurately predict the wave height with the set-up/down near the surfzone on a arbitrary beach profile.

1. 서론

심해에서 발달된 파랑은 천해역을 진행하면서 천수 및 쇄파등에 의하여 심하게 변형된다. 연안역에 구조물을 건설할 경우 이와 같이 변형된 파랑의 특성을 정확히 예측하는 것은 해안공학자들에게 있어 매우 중요하다. 연안역에서 파랑의 변형을 예측하기 위하여 일반적으로 사용되는 접근방법은 쇄파점을 기준으로 파랑이 쇄파되기 전과 쇄파된 후의 영역으로 나누어 해석하는 방법이다. 특히 쇄파점에서 해안선 사이의 쇄파대(surf-zone)는 상대적으로 수심이 얇고 제한된 영역이기 때문에 쇄파

후 해저면의 마찰에 의해 많은 파랑에너지의 손실이 집중적으로 발생되며, 다른 영역에서는 발생되지 않는 평균수면의 상승과 같은 복잡한 현상들이 존재한다. 따라서 이와 같은 현상들을 정확히 고려하여야만 쇄파대부근에서 파랑의 변형특성을 올바르게 해석할 수 있다.

현재 임의의 단면형상을 가지는 쇄파대내에서 파고의 변형특성을 예측할 수 있는 몇 개의 모형들이 제시되어 있다. 제시된 모형들은 쇄파대내에서 에너지손실을 어떻게 고려하느냐에 따라 구분될 수 있다. Dally와 Dean(1985)에 의하여 제시된 규칙파모형은 쇄파된 후의 파랑이 일정한 에너지를 유지한다는 관측자료의 결과를 이용하여 직관적으로 제시된 모형으로 현재 많은 연구자들에 의하여 널리 이용되고 있다. 규칙파모형은 쇄파점이 확연히 나타나기 때문에 쇄파된 지점을 찾기가 아

* 강원대학교 토목공학과 교수
** 강원대학교 대학원 토목공학과, 석사과정
*** 강원대학교 토목공학과 조교수

주 용이하다. 그리고 쇄파후 파고변형을 경험적인 계수를 이용하여 최적화시킬 수가 있다. 반면에 그 계수의 값이 실험자료나 현장자료를 이용하여 얻을 수 있는 경험적인 값이기 때문에 그 값을 정하기가 어렵다. Dally와 Dean(1986)은 규칙파모형을 불규칙파 모형으로 확장시키기 위하여 쇄파대내를 지나는 파랑의 확률밀도함수를 예측하려는 연구를 계속 수행하였다. Dally(1990)는 불규칙파를 개개의 규칙파가 모여서 이루어진다는 가정으로 일정경사로 수심이 증가하는 단면에서 파고가 천수변형과 쇄파에 의하여 변형되는 파고의 확률밀도함수를 해석적으로 유도하였다. 유도된 식은 너무 복잡하여 해안공학자들이 쉽게 이용할 수 없다. 최근에 Larson(1995)은 Dally와 Dean(1985)의 모형에 Rayleigh 확률밀도함수와 Monte-Carlo 추정법을 도입하여 연안사주가 존재하는 불규칙 단면에서 불규칙파랑의 변형특성을 해석적으로 연구하였다. 지금까지의 연구들은 Dally와 Dean(1985)의 모형을 근간으로 이루어진 것들이다. 따라서 쇄파대내에서 규칙파나 불규칙파의 파고변형을 예측하기 위해서는 경험상수가 올바르게 결정되어야 한다. 특히 불규칙파를 해석하기 위해서는 많은 규칙파를 중첩시켜야 하는 문제점을 내포하고 있다.

따라서 간편한 방법으로 불규칙파를 해석하려는 노력이 Thornton과 Guza(1983)에 이루어 졌다. 불규칙파랑의 쇄파확률분포함수와 파랑의 쇄파에 의하여 발생하는 에너지손실을 도수와 연결하여 해석하는 Periodic Bore이론을 이용하여 쇄파대내에서의 파랑변형을 예측하는 모형이다. Dally와 Dean(1985)의 모형과는 다르게 파랑이 어느 한 점에서 쇄파되는것이 아니라 수심과 파고의 함수로 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 즉, 해상에 존재하는 각기 다른 크기의 파고를 갖는 파랑은 각기 다른 위치에서 쇄파된다는 개념을 이용한 것이다. 현장관측을 실시하여 얻은 많은 자료, 특히 쇄파점 부근의 파고자료를 이용하여 쇄파의 확률 밀도함수가 심해에서 일반적으로 적용되는 Rayleigh분포와 어떤 연관성을 갖는다는 사실을 확인하였다. 이와 같은 결과를 기초로 쇄파시의 확률밀도함수를 수학적으로 유도하기 위하여 가중함수(Weighting Function)개념을 도입하였다. 이와 같이 유도된 쇄파의 확률밀도함수는 현재까지의 대부분의 연구에서는 유도된 쇄파의 확률밀도함수와는 다르게 비교적 간단한 식으로 표현되었다. 따라서 이와 같은 모형을 이용하게 되면 그 해석방법이 비교적 수월해지면서, 실제 불규칙파의 변형 특성을 올바르게 해석할 수 있다. Stive(1984) 등도 Periodic Bore 개념을 이용하여 파랑변형특성을 해

석하였다. 또한 이상의 해석방법과는 약간 다른 접근방법으로 Watanabe와 Dibajnia(1988)는 1차원 시간의존 환경사방정식에 쇄파에 의한 에너지손실항을 포함시켜 쇄파대내에서 파고의 변형을 해석하였다.

본 연구에서는 전술한 많은 파랑변형모형에서, 규칙파를 대상으로는 Dally와 Dean(1985)의 모형을, 불규칙파모형으로는 Thornton과 Guza(1983)의 모형을 선택하여 유한차분법을 이용하여 임의의 불규칙한 수심단면에 적용가능한 간편한 수치모형을 개발하고자 한다.

2. 파랑변형예측모형의 수립

2.1 규칙파 모형

규칙파모형은 쇄파된 후의 파랑이 일정한 에너지를 유지한다는 가정하에서 직관적으로 제시된 모형이다(Dally와 Dean, 1985). 규칙파 모형의 지배방정식은 해안선에 수직으로 입사하는 파랑에 대해서 에너지 보존 관계를 이용하면 다음식 (1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{d(EC_g)}{dx} = -\delta(x) \quad (1a)$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (1b)$$

$$C_g = nC \quad (1c)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (1d)$$

$$C = \frac{\sigma}{k} \quad (1e)$$

여기서 k 는 파수(wave number)이고, σ 는 각진동수(angular frequency)이다. 또한 h 는 수심, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, E 는 에너지 밀도, C_g 는 군속도, 그리고 $\delta(x)$ 는 쇄파에 의한 난류와 경계층 전단에 대한 단위면적당 에너지손실량이다. 식 (1)를 이용하여 파랑변형을 해석하기 위하여는 에너지손실량에 대한 정확한 정의가 필요하다.

Dally와 Dean(1985)은 에너지손실량 $\delta(x)$ 를 정의하기 위해 많은 관측자료를 근간으로 안정파고(stable wave height)개념을 도입하였다. 안정파고 개념이란 쇄파가 어느 지점에서 순간적으로 발생하는 현상이 아니라 파고가 안정되는 순간까지 계속해서 쇄파가 발생한다는 개념이다. (1)에서 사용된 단위면적당 에너지 손실량인 $\delta(x)$ 는 국부적인

에너지 전달량(local energy flux)과 안정파고하의 에너지 전달량(stable energy flux)의 차에 비례한다고 가정하여 다음 식 (2)와 같이 표현하였다.

$$\delta(x) = \frac{K}{h} [EC_g - (EC_g)_s] \quad (2)$$

K 는 무차원 감쇠계수로 0.15~0.21의 범위를 갖지만 관측치와의 비교에 의하여 결정되는 것이 바람직하다. EC_g 는 선형파이론에 의하여 시간 평균, 수심 적분으로 구할 수 있는 에너지 플럭스이고, $(EC_g)_s$ 는 파랑이 쇄파된 후 도달되려고 하는 안정 파고와 관련된 에너지 플럭스이다. Horikawa와 Kuo(1966)가 위와 동일한 바닥 형상을 가지고 실험한 관측자료를 이용하여 다음 식 (3)과 같은 안정 파고 기준을 제시하였다.

$$H_s = \Gamma h \quad (3)$$

여기서 Γ 는 안정파 계수(stable wave factor)로서 장소에 따라 0.35에서 0.4사이의 값을 나타내는 무차원 값으로 제시되었다.

천해에서의 군속도 $C_g = \sqrt{gh}$ 와 식 (2) 그리고 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{d[H^2 h^{1/2}]}{dx} = -\frac{K}{h} [H^2 h^{1/2} - \Gamma^2 h^{5/2}] \quad (4)$$

따라서 식 (4)를 이용하면 주어진 수심단면에 임의의 파랑이 입사할 때 해안선 횡방향의 위치에 따라 쇄파후의 파고를 예측할 수 있다.

식 (4)를 이용하여 일정경사 수심단면에 대하여 파랑변형을 예측할 수 있는 해석해를 다음과 같은 과정을 통하여 유도할 수 있다 (Dally와 Dean, 1985). 먼저 거리에 따른 수심을 정의하기 위하여 하상경사를 m 이라고 할 때, 일정경사 단면의 수심은 다음식 (5)와 같이 표시될 수 있다.

$$h = -mx \quad (5)$$

따라서, 식 (4)의 좌변을 전개하여 정리하고 식 (5)를 대입하면 다음 식 (6)과 같이 비교적 간단한 형태의 방정식으로 변환된다.

$$\frac{dH^2}{dx} + \left(K - \frac{m}{2}\right) \frac{H^2}{h} = K\Gamma^2 h \quad (6)$$

식 (6)은 수학적으로 1차 비선형 비제차 상미분방정식으로 임의의 상미분방정식 해법을 이용하면 쉽게 그 해를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 상미분방정식의 해법중 하나인 적분인자법(integrating factor method)을 이용하였다. 적분인자법은 비제차 상미분방정식의 해를 구하는데 유효하다고 알려진 비교적 간편한 방법이다. 따라서 식 (6)의 일반해(general solution)를 다음 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$H^2 = h^{(K/m-1/2)} \left(-\frac{K\Gamma^2}{m(5/2-K/m)} h^{(5/2-K/m)} + C \right) \quad (7)$$

마지막으로 식 (7)에 있는 적분상수 C 를 대상영역에서 주어지는 경계조건을 이용하여 결정하면 유일해(unique solution)를 얻을 수 있다. 본 경우에는 경계조건으로는 다음 식 (8)을 이용할 수 있다.

$$H_b = \gamma h_b \quad (8)$$

여기서 γ 는 쇄파상수이고, h_b 는 쇄파점의 수심이다. 식 (8)은 McCowan(1894)에 의하여 제안된 경험식으로 쇄파고를 수심의 함수로 표현한 것이다. 그러므로 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 쇄파대내에서 파고변형을 예측할 수 있는 다음 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$H = h_b \left[(\gamma^2 + \alpha_*) \left(\frac{h}{h_b} \right)^{(K/m-1/2)} - \alpha_* \left(\frac{h}{h_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9a)$$

$$\alpha_* = \frac{(K/m)\Gamma^2}{5/2-K/m} \quad (9b)$$

식 (9)는 쇄파대 내부에서만 적용할 수 있다. 그러므로 쇄파되기 이전의 파랑변형을 해석할 필요가 있다. 쇄파되기 이전의 영역에서는 파랑에너지의 손실이 발생하지 않는다는 에너지 보존 관계식을 이용하여 다음 식 (10)과 같은 해석해를 구할 수 있다.

$$H = H_o \left(\frac{C_{g_o}}{C_g} \right)^{1/2} \quad (10)$$

여기서 첨자 o 는 심해파의 특성을 의미한다. 즉, H_o 는 심해파고이고, C_{g_o} 는 심해파의 군속도(group velocity)이다. 식 (10)은 심해에서 발생된 파랑의 에너지가 쇄파되기 이전까지 보존된다는 관계식을 이용하여 유도된 것이다.

지금까지 해석된 규칙파 모형에서는 바닥마찰 효과를 고려하지 않고 해석하였다. 따라서 바닥마찰의 영향을 고려하기 위해서는 식 (1)의 우변에 다음 식 (11)로 표현된 바닥마찰의 효과가 첨가되어야 한다.

$$\delta_{BF} = -\rho \frac{fH^3}{12\pi} \left(\frac{g}{h}\right)^{3/2} \quad (11)$$

여기서 f 는 흐름과 바닥, 유사 특성에 의존하는 항력계수(drag coefficient)이다. 식 (11)은 천해에서 바닥마찰에 대한 단위면적당 에너지 손실의 평균비를 나타낸 것이다(Dally와 Dean, 1985). 바닥마찰의 영향을 살펴보기 위하여 바닥마찰을 고려한 모형의 결과와 고려하지 않은 모형의 결과를 Fig. 1에 비교하였다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 규칙파 모형에서는 Γ 와 K 가 적절히 선택되면 바닥마찰에 의한 영향이 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 규칙파 모형의 수립 단계에서 쉽게 예측할 수 있는 것으로 파랑이 쇄파후 안정파고에 도달될 때까지 발생하는 모든 에너지 손실량을 변수 Γ 와 K 에 포함시켰기 때문이다.

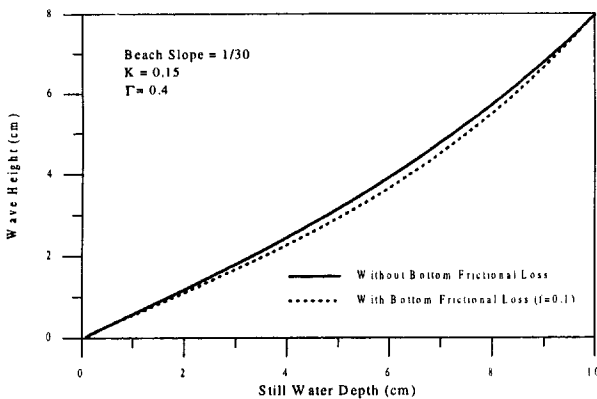


Fig. 1 Variation of wave height near surf-zone calculated by the regular wave model

2.2 불규칙파 모형

Thornton과 Guza(1983)에 의해서 제시된 불규칙파 모형에서는 쇄파확률밀도함수와 에너지 손실식(periodic bore)을 이용해서 쇄파대내에서의 파랑변형을 예측한다. 불규칙파 모형의 지배방정식도 규칙파 모형과 동일하게 식 (1)의 에너지 보존방정

식으로부터 유도할 수 있다. 식 (1)를 다르게 나타내면 다음 식 (12)와 같다

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial x} = \langle \epsilon \rangle \quad (12)$$

여기서 $\langle \epsilon \rangle$ 는 단위면적당 평균 에너지 손실을 나타내는 것으로, 식 (1)의 $\delta(x)$ 와 동일한 의미를 갖는다. 그러나 식 (12)는 불규칙파의 파랑변형을 해석하기 위한 지배방정식이므로 그에 따른 효과가 고려되어야 한다. 즉, 규칙파와 다르게 불규칙파는 같은 크기의 파랑이라도 위치에 따라 쇄파점이 각기 다른 지점에서 발생한다는 물리적인 현상이 식 (12)에 올바르게 반영되어야 한다. 식 (12)의 우변에 있는 에너지손실을 정의하기 위하여 Thornton과 Guza(1983)는 도수에 의한 에너지 손실 개념을 도입하였다. 도수(bore)에 의한 에너지 손실 개념은 LeMehauté(1962)에 의해서 제안되어졌고 도수손실함수(bore dissipation function)는 불규칙파에서 쇄파에 의한 에너지 손실을 설명하기 위하여 사용될 수 있다. 쇄파에 의한 에너지 손실량은 다음 식 (13)과 같이 표현될 수 있다(Stoker,1957).

$$\epsilon_b = \frac{1}{4} \rho g \frac{(h_2 - h_1)^3}{h_1 h_2} Q \approx \frac{1}{4} \rho g \frac{(BH)^3}{h_1 h_2} Q \quad (13)$$

아래첨자 b 는 도수(bore)에 의한 에너지 손실과 관련된 기호이다. H 는 쇄파파고이고, Q 는 도수가 가로지르는 단위면적당 유량이다. 그리고 B 는 쇄파계수이다. 계수 B 는 여러 가지 쇄파형태에 따라서 다른 값을 갖고, 쇄파크기에 비례하는 함수이다. 또한 계수 B 는 불규칙파 모형에서 유일하게 정의되지 않은 계수로 검정(calibration)단계에서 올바르게 정의된다.

식 (14)와 같이 도수 유량 Q 에 대하여 많은 공식이 제안되었는데, Hwang과 Divoky(1970)는 다음 식 (14)와 같이 아주 간단하게 도수유량을 설명하였다.

$$Q = \frac{Ch}{L} \quad (14)$$

여기서 C 는 파속이고, L 은 파장이다. 따라서 식 (14)를 식 (13)에 대입하면 쇄파에 의한 에너지 손실량 ϵ_b 는 다음 식 (15)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$\epsilon_b = \frac{\bar{f}}{4} \rho g \frac{(BH)^3}{h} \quad (15)$$

그러므로 전 단면에 걸친 평균 에너지 손실량은 식 (15)를 사용하여 다음 식(16)과 같이 계산될 수 있다.

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{\bar{f}}{4} \rho g \frac{B^3}{h} \int_0^\infty H^3 p_b(H) dH \quad (16)$$

여기서 $p_b(H)$ 는 쇄파확률밀도함수이다. 따라서 식 (16)은 쇄파확률밀도함수에 의존하게 된다. 그러므로 $\langle \varepsilon_b \rangle$ 를 구하기 위해서는 쇄파 확률밀도함수 $p_b(H)$ 를 정의하여야 하는데 불행히도 $p_b(H)$ 를 묘사할 수 있도록 정립된 이론이 없다. 그래서 Thornton과 Guza(1983)는 관측된 쇄파고 자료를 이용하여 다음 식 (17)과 같은 경험식을 제안하였다. 즉, Rayleigh 분포에 가중함수를 두어 쇄파확률밀도함수를 표현하는 방법이다.

$$p_b(H) = W(H) p(H) \quad (17a)$$

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left[-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right] \quad (17b)$$

여기서 가중함수 $W(H) \leq 1$ 로서, 쇄파확률밀도함수는 파고확률밀도함수의 부분집합이라는 것을 알 수 있다. 즉, $p_b(H) \leq p(H)$ 이다. 심해에서는 쇄파 확률밀도함수의 면적이 영(零)으로 수렴하여, 쇄파는 발생되지 않지만, 수심이 얇은 천해지역에서는 면적이 1로 수렴하여 모든파가 쇄파되는 현상을 잘 묘사할 수 있어야 한다.

한편, 가중함수를 정의하기 위해서 Thornton과 Guza(1983)는 두 가지 경험식을 제안하였다. 두 경험식 모두 현장관측자료를 이용하여 제안된 식이다. 먼저 식 (8)에서 사용된 바 있는 파고와 수심의 관계만을 이용한 식으로, 다음 식 (18)과 같이 제안하였다.

$$W(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^4 \quad (18)$$

식 (18)의 형태는 다음의 두 가지를 사항을 고려하여 제안하게 되었다. 첫째는 매개변수 $H_{rms}/\gamma h$ 는 천해에서 파랑이 쇄파되는 조건을 표시한 수심한계조건식이다. 둘째로, 식 (18)을 이용하여 일정경사를 가진 수심단면에서 H_{rms} 의 변형에 대한 해석해를 유도하는데 사용하기 위함이다. 그러나 관측을 통해서 보면 동일한 수심에서 파고가 큰 파랑이 더 쉽게 깨지는 것을 알 수 있다. 그래서 식 (18)에 정의된 가중함수에 큰 파고부분에 왜곡을

주어 식 (18)을 수정하여 제안된 가중함수가 다음 식 (19)이다.

$$W(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^2 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{H}{\gamma h}\right)^2\right)\right] \leq 1 \quad (19)$$

그러므로 식 (18)을 식 (17)에 대입하면 쇄파확률 밀도함수는 다음 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_b(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^4 \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-(H/H_{rms})^2} \quad (20)$$

동일하게, 식 (19)를 식 (17)에 대입하면 다음 식 (21)을 얻을 수 있다.

$$p_b(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^2 (1 - e^{-H^2/\gamma^2 h^2}) \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-(H/H_{rms})^2} \quad (21)$$

마지막으로 이상에서 설명된 두개의 쇄파확률밀도 함수 식 (20)과 (21)을 식 (16)에 대입하여, 적분을 수행하면 다음 식 (22)와 (23)을 각각 얻을 수 있다.

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 \bar{f}}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (22)$$

$$\langle \varepsilon_b \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \frac{\rho g B^3 \bar{f} H_{rms}^5}{\gamma^2 h^3} \left[1 - \frac{1}{(1 + (H_{rms}/\gamma h)^2)^{5/2}}\right] \quad (23)$$

식 (22)는 유도과정에서 알 수 있었듯이 간단한 개념을 도입하여 산출된 에너지 손실모형이지만 앞으로 불규칙파 모형을 검증하기 위해서 일정경사 수심단면을 갖는 경우의 해석해를 유도하는데 사용될 수 있다. 그리고 식 (23)은 3장의 수치모형 개발에서 사용될 것이다.

일정경사 단면에서 해안선에 직각으로 입사하는 파랑변형의 해석해는 식 (12)와 식 (22)를 이용하여 유도할 수 있다(Thornton과 Guza, 1983). 즉, 에너지 보존방정식 (12)에 식 (22)을 대입하면, h_0 보다 작은 수심에서 적용 가능한 해석해를 다음 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$H_{rms} = a^{1/5} h^{9/10} \left[1 - h^{23/4} \left(\frac{1}{h_0^{23/4}} - \frac{a}{y_d^{5/2}}\right)\right]^{-1/5} \quad (24) \\ (0 \leq h \leq h_0)$$

식 (24)를 사용할 때 주의할 점은 $h_o/L \leq 1/20$ 의 입사조건을 만족하여야 한다는 것이다.

지금까지 해석된 불규칙파모형에서는 도수에 의한 에너지 손실에 관해서만 해석하였다. 그러므로 바닥마찰에 의한 에너지 손실 $\langle \epsilon_f \rangle$ 의 영향을 살펴보아야 한다. 모든 파가 같은 평균 주기를 가진다고 가정하며, 선형이론이 적용된다고 가정했을 때, 파랑에 의한 마찰 에너지 손실은 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다(Thornton과 Guza, 1983).

$$\epsilon_f = \rho c_f \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi\bar{f}}{\sinh kh} \right)^3 H^3 \quad (25)$$

그러므로 모든 파에 대한 평균 마찰 에너지 손실도 Rayleigh 확률 분포를 이용하여 다음 식 (26)과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \epsilon_f \rangle &= \rho c_f \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi\bar{f}}{\sinh kh} \right)^3 \int_0^\infty H^3 \rho(H) dH \\ &= \rho c_f \frac{1}{8\sqrt{\pi}} \left[\frac{2\pi\bar{f}H_{rms}}{\sinh kh} \right]^3 \end{aligned} \quad (26)$$

Thornton과 Guza(1983)는 쇄파손실과 마찰손실을 비교해 본 결과 저파수를 갖는 파랑외에는 마찰 손실이 무시할 정도로 작다는 결론을 얻었다. 본 연구에서도 이와 같은 사실을 Fig. 2로부터 확인할 수 있었다. Fig. 2는 동일한 조건하에서 식 (26)을 이용하여 바닥마찰효과를 고려한 결과와 고려하지 않았을 경우에 일정경사 단면에서 쇄파대부근의 파고변화를 나타낸 것이다.

2.3 평균 수위의 상승과 저하

유체에 대한 어떤 순응력이 힘으로 감지되고, 만약 그 힘이 안정되고 충분히 길게 진행된다면 모멘트는 균형에 도달하여 평형상태가 될 것이다. 이와 같은 물리적 현상은 다음 식 (27)과 같이 수학적으로 표현될 수 있다.

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho g(\bar{\eta} + h) \frac{d\bar{\eta}}{dx} = 0 \quad (27a)$$

$$S_{xx} = E \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{1}{2} \right) \quad (27b)$$

여기서, $\bar{\eta}(x)$ 는 일정수심에서 평균수위 상승 또는 저하에 의한 평균수위 변동량이다. 식 (27b)는 파

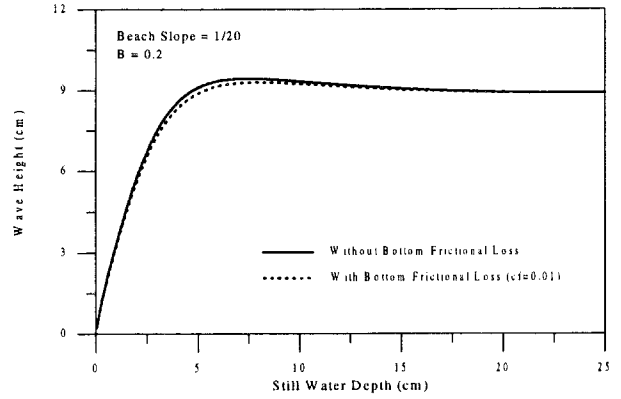


Fig. 2 Variation of wave height near surf-zone calculated by the random wave model

랑에 의하여 발생된 잉여응력(radiation stress)으로 해안의 횡방향을 x축으로 하고 해안선에서 바다쪽으로 향하는 방향을 양의방향으로 하였을 때의 x방향 전달량이다. 식 (27)은 평균수위 상승/저하의 지배방정식이 된다.

평균수위의 상승과 저하의 해석해는 다음과 같이 두 개의 지역으로 나누어 유도된다. 왜냐하면 잉여응력은 쇄파대밖의 지역에서는 천수변형에 지배적인 영향을 받으며, 쇄파대내의 지역에서는 쇄파와 밀접한 관계를 갖기 때문이다.

먼저, 천수변형에 영향을 받는 지역은 평균수위의 저하를 보이며 파고는 에너지 전달량이 유지되면서 변한다. Longuet-Higgins와 Stewart(1962)는 에너지 전달량이 일정하다는 개념을 이용하여 천수변형지역에서 평균수위 저하를 예측할 수 있는 해석해를 다음 식 (28)과 같이 유도했다.

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{8} \frac{H^2 k}{\sinh 2kh} \quad (28)$$

한편, 쇄파와 밀접한 관계를 갖는 지역은 평균수위의 상승을 보이는데 쇄파대내에서와 같이 비선형적인 지역에서는 파랑의 동역학적 분야에 대한 지식이 결핍되어 분석하기가 아주 어렵다. 그럼에도 불구하고 Bowen과 Simmons(1968)은 매우 일관성이 있는 실험자료와 현장자료를 이용하여 산출된 결과를 가지고 간편하게 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 파고의 감소는 간단한 수심제한방법으로 모형되어졌다.

따라서 천해지역에서의 잉여응력은 식 (27b)와 $H = \gamma(\bar{\eta} + h)$ 의 관계를 이용하면 다음 식 (29)와 같이 구할 수 있다.

$$S_{xx} = \frac{3}{16} \rho g \gamma^2 (\bar{\eta} + h)^2 \quad (29)$$

식 (29)를 모멘트 방정식 (27)에 대입하여 정리하면 평균수위 상승에 관한 방정식을 다음 식 (30)과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{\eta} = -Kh + C \quad (30)$$

여기서,
$$K = \frac{1}{1 + \frac{8}{3\gamma^2}}$$

식 (30)에 의하면 평균수위 상승의 기울기는 일정하며, γ 값에 의해서 기울기가 변한다는 사실을 알 수 있다.

3. 유한차분 수치모형의 개발

평균 수위의 상승과 저하(Set-up/down), 실제적인 바닥단면 또는 바닥마찰이 포함된 경우에는 해석적으로 풀 수 없는 경우가 대부분이다. 그러므로 수치적인 방법은 임의의 바닥형상위에서 바닥마찰, 파랑의 재생성(re-forming), 쇄파(breaking), 천수변형(shoaling)과 평균수위의 상승과 저하효과 등을 포함하는 파고의 일차원적 변형을 설명하는 것에서 발전되어왔다. 본 연구에서는 규칙파 모형과 불규칙파 모형이 연안사주가 존재하는 불규칙한 임의의 수심단면에 적용 가능한 수치모형을 개발하기 위하여 유한차분법을 이용하였다. 쇄파대 부근에서의 평균해수면의 변동을 고려하여 개발된 수치모형은 일정경사 수심단면하에서 유도된 해석해와 비교하여 수치모형을 검증하였다.

3.1 규칙파 모형

개발된 규칙파 모형은 에너지 손실이 없는 심해에서는 에너지 전달량이 일정하고, 쇄파후의 에너지 손실은 안정파고 개념을 도입하여 파랑변형을 예측하였다. 규칙파 모형은 해석해에서 알 수 있듯이 쇄파점을 기준으로 쇄파되기 이전의 영역과 쇄파된 후의 지역으로 나누어 이론을 수립하였다. 수치모형도 해석해와 동일하게 두 부분으로 나누어 개발하였다.

쇄파되기 이전의 지역에서는 에너지 손실이 존재하지 않는 에너지 보존관계식을 사용한다. 식(1)의 에너지 손실항을 영(零)으로 놓고 유한차분하면

다음 식 (31)과 같이 심해에서 쇄파되기 직전까지의 파고변형을 예측하는 유한차분식을 구할 수 있다.

$$H_{i+1} = \sqrt{\frac{H_i^2 C_{gi}}{C_{gi+1}}} \quad (31)$$

한편 쇄파 이후의 지역에서는 최초 쇄파가 발생한 후에 쇄파가 계속적으로 발생하여 안정파고에 도달될 때까지 에너지가 계속적으로 손실되는 안정파고 개념을 도입하여 수치모형을 개발하였다. 수치모형에 사용된 에너지 보존관계식은 식 (1)에 식 (2)를 이용하여 유한차분하면 식 (32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(H^2 C_g)_{i+1} = (H^2 C_g)_i - \frac{4xK}{h_i} (H_i^2 - \Gamma^2 h_i^2) C_{gi} \quad (32)$$

식(32)의 양변에 C_{gi+1} 로 나누고, 제곱근을 씌우면, 식(33)과 같은 쇄파대내에서 파고변형을 예측할 수 있는 유한차분식을 구할 수 있다.

$$H_{i+1} = \sqrt{\frac{(H^2 C_g)_i - \frac{4xK}{h_i} (H_i^2 - \Gamma^2 h_i^2) C_{gi}}{C_{gi+1}}} \quad (33)$$

감쇠계수 K 와 안정파 계수 Γ 는 실측자료를 통해 모형을 최적화 시키면서 결정할 수 있는 미지수이다.

식 (31)과 식 (33)은 경계조건인 식 (8)을 이용하여 쇄파대내·외 지역으로 나누어졌다. 즉, 식 (32)에서 예측되는 파고가 진행하다가 어느 지점에 와서 파고대 수심의 비(H/h)가 쇄파상수보다 커지는 순간을 쇄파점으로 보는 것이다. 불규칙한 임의의 수심단면에 수치모형을 적용하기 위해서는 몇 가지 알아야 할 사항이 있다. 첫째로는 알려진 근해지역에서의 일정수심과 파고, 둘째로는 최초 쇄파점에서 파고대 수심의 비, 셋째로는 바닥마찰 계수, 넷째로는 바닥형상이 필요하다. 일정경사에서 실험을 통해 얻어진 자료는 초기조건과 해상경사만 있으면 되지만 더욱 실제적인 해상단면에 모형을 적용하기 위해서는 위의 네 가지 항목이 필요하다. 식 (31)과 식 (33)을 이용하는 전체적인 순서도를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

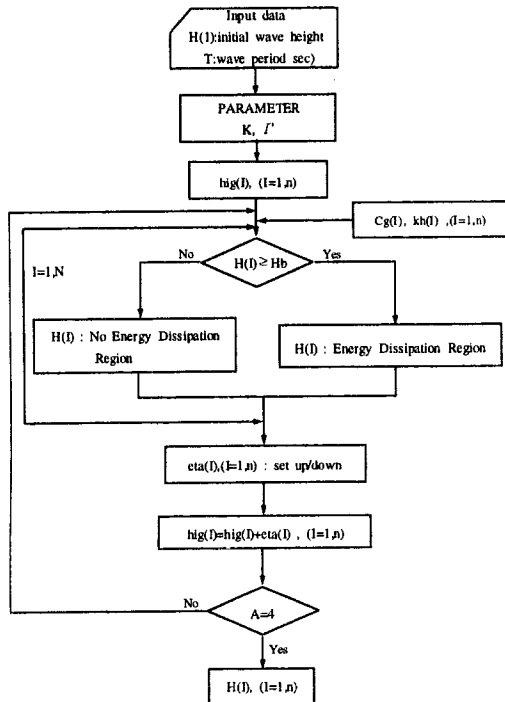


Fig. 3 Flowchart for regular wave model

3.2 불규칙파 모형

앞장에서 언급된 불규칙파 모형의 해석하는 식 (22)를 사용하여 계산한 간단한 경우이다. 더 정확한 해를 위해서 수치모형에서는 식 (21)을 사용하여 얻어진 에너지 손실함수인 식 (23)을 사용하였다. 그리고 에너지 보존방정식 (12)의 에너지 손실항에 도수(bore) 손실 함수와 마찰 손실 함수를 대입하여 심해에서 해안선까지 적분하면 불규칙파의 수치모형을 구할 수 있다. 불규칙파 모형도 유한차분법을 이용하여 정리하면 식 (12)은 다음 식 (34)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(EC_g)_{i+1} = (EC_g)_i + \langle \epsilon_b \rangle_i \Delta x + \langle \epsilon_f \rangle_i \Delta x \quad (34)$$

지점 1에서 주어진 $H_{rms,1}$ 과 \bar{f} 는 가장 심해에서 시작하는 측정값이고, 이것을 이용하여 적분하고 예측하는 값은 다음과 같이 얻어진다. $C_{g1,2}$ 와 E_1 은 h_1 과 h_2 그리고 $H_{rms,1}$ 을 알고 있는 상태에서 선형이론관계식 (1b)와 (1c)를 사용하여 계산되어진다. 도수에 의한 평균 에너지 손실량 $\langle \epsilon_b \rangle$ 과 마

찰에 의한 평균 에너지 손실량 $\langle \epsilon_f \rangle$ 은 지점 1에서 계산된 H_{rms} 로 식 (23)과 식 (26)을 이용하여 계산되어진다. $\langle \epsilon_b \rangle$ 와 $\langle \epsilon_f \rangle$ 는 에너지 손실량으로 음의 값을 갖는다. 그러므로 E_2 (즉, $H_{rms,2}$)는 이 수치해에서 남은 유일한 미지수가 되어서 계산으로 구할 수 있다. 식 (34)을 정리하여 파고에 관한 수치모형으로 다시 표현하면 식 (35)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{rms,i+1} = \sqrt{\frac{H_{rms,i}^2 C_{gi} + \frac{8}{\rho g} \Delta x (\langle \epsilon_b \rangle + \langle \epsilon_f \rangle)_i}{C_{gi+1}}} \quad (35)$$

변수 γ 는 데이터에서 결정되어지고, B 는 모형을 최적화시키면서 발견할 수 있는 유일하게 결정되지 않는 계수이다. 이 두 계수는 데이터에 의해 구할 수 있는 하나의 계수로 볼 수 있지만, 따로 생각하는 것이 더 유리하다. 불규칙파 모형의 계산 과정은 Fig. 4에 나타내었다.

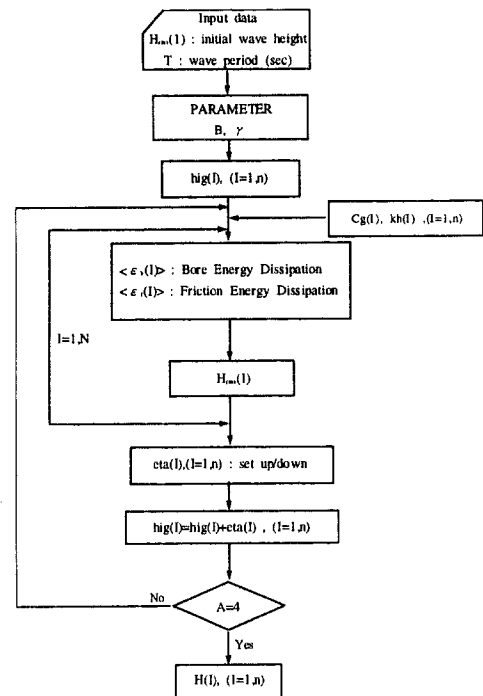


Fig. 4 Flowchart for random wave model

3.3 수치모형의 검증

수치모형이 해석해와 같은 수학적 이론을 배경

으로 개발되어 졌지만, 수학적으로 접근한 해석해를 수치적으로 접근하는 과정에서 오차가 생길 수 있기 때문에 수치모형의 검증이 필요하다. 그래서 해석해와 비교해 오차의 정도를 파악하고, 모형의 실용성의 여부를 판단한다. 본 절에서는 수치모형을 검증하기 위해서 일정경사 수심단면에서 해석해와 수치모형에 동일한 조건을 부여하여 각각에서 예측된 파고변형을 비교하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 일정경사 수심단면에서 동일한 조건($\Gamma = 0.5$, $H_b/h_b = 1.0$)을 규칙파 모형의 해석해와 수치모형에 부여하여 나타난 파고변형을 비교한 것이다.

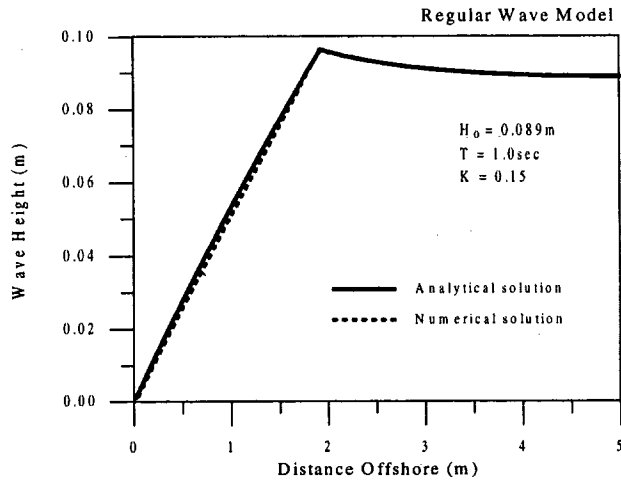


Fig. 5 Comparison of analytical solution with numerical solution (K=0.15)

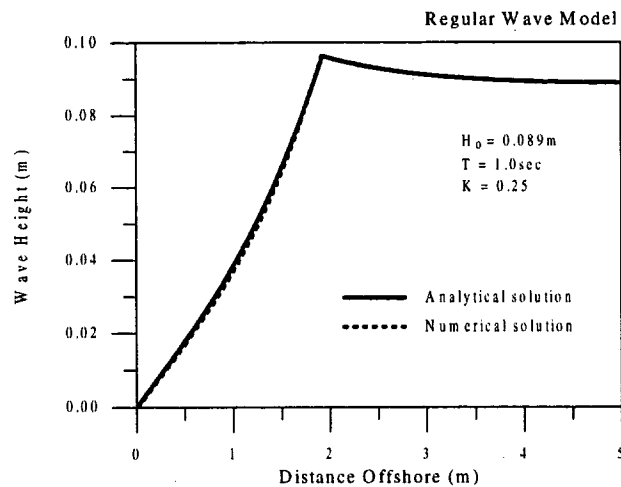


Fig. 6 Comparison of analytical solution with numerical solution (K=0.25)

각 그림에서 보는 바와 같이 해석해와 수치모형에서 예측된 파고의 변형이 쇄파 이전에는 오차가 거의 없지만, 쇄파 이후에는 약간의 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러나 규칙파 수치모형을 사용하는데는 전혀 문제가 없는 아주 작은 오차이다. 주목할 것은 파고의 감쇠형상이 K/m 에 따라 다른 형태를 보이고 있다는 것이다. 즉, 규칙파 모형은 감쇠계수 K 에 의존해서 쇄파후 파고의 감쇠형상이 변화를 일으킨다는 것을 단적으로 나타내고 있다.

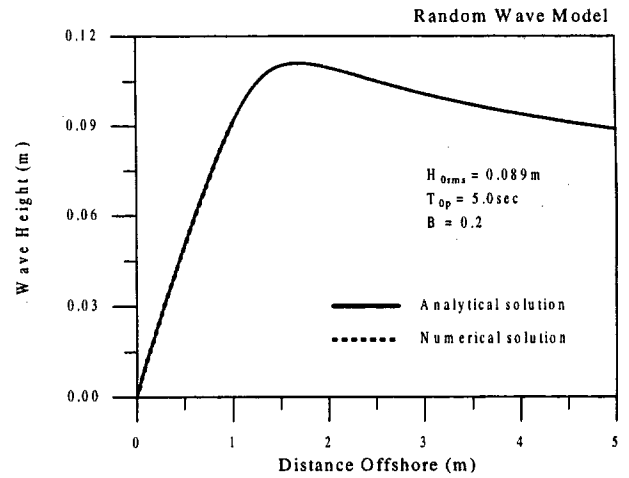


Fig. 7 Comparison of analytical solution with numerical solution (B=0.2)

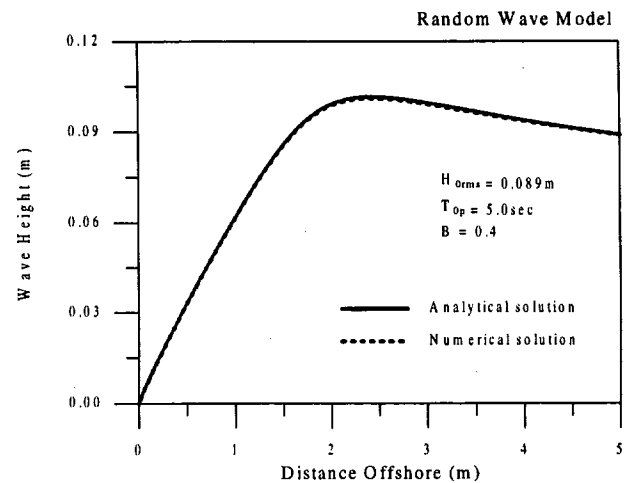


Fig. 8 Comparison of analytical solution with numerical solution (B=0.4)

불규칙파 모형의 검증을 위해 해석해와 수치모형에 동일한 조건($H_{0rms}=0.089m$, $T=5.0sec$)을 대입

하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 해석해와 수치모형에 의하여 쇄파대 부근에서 변형되는 파고를 나타내고 있다. 규칙파 모형에서는 쇄파 후의 지역에서 약간의 오차를 보이고 있으나, 불규칙파 모형은 보는바와 같이 오차가 거의 나타나지 않고 있다. 그림에서 불규칙파 모형의 정도가 규칙파 모형보다 더 좋다는 것을 직관적으로 알 수 있다. 주목할 것은 쇄파계수 B 의 변화에 대한 파고감쇠형상의 변화이다. 변화를 관찰해 보면 B 가 커짐에 따라 쇄파 지점이 점점 해안선에서 멀어지고, 천수변형도 감소하여 쇄파가 아주 부드럽게 이루어지는 것을 관찰할 수가 있다.

평균수위의 상승과 저하의 검증도 규칙파 모형이나 불규칙파 모형과 마찬가지로 동일한 조건 ($H_0=0.078$, $T=1.41\text{sec}$)에서 계산된 해석해와 수치모형의 결과를 Fig. 9와 같이 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 평균수위의 저하에서는 오차가 거의 나타나지 않지만, 평균수위의 상승에서는 약간의 오차를 보이고 있다. 이것은 평균수위 상승에 관한 해석해가 일정한 기울기를 갖는 1차 방정식 (식 (30))이기 때문이다.

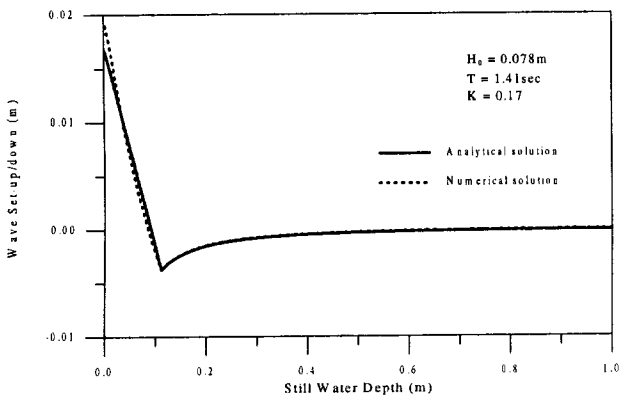


Fig. 9 Comparison of analytical solution with numerical solution for set-up/down

4. 파랑변형관측을 위한 수리실험

4.1 실험장치 및 방법

실험용 조파수로는 Fig. 10과 같이 길이 25m, 폭 0.8m, 높이 1.0m의 철제 2차원 수조이며, 측면에는 관측이 용이하도록 두께 12mm의 강화 유리가 부착되어 있다. 또한 수조 상부에는 rail을 장착하여 파고계 등 실험장비의 설치 및 이동이 편리하게 되어 있다. 조파장치는 규칙파를 생성시킬 수

있으며, 주기는 0.5~10sec 범위에서 0.01sec 간격으로 입력이 가능하며, 최대파고는 수조내 수심이 80cm일 때 최고 30cm까지 발생시킬 수 있다. 그리고 최대파랑 20cm까지 측정가능한 5개의 용량식 파고계에서 입력되는 파고자료가 기록기에 의해서 기록되어진다.

실험에 들어가기 전에 수조내에서 발생하는 파고와 기록지에 기록되는 파고를 일치시키기 위해서 파고계를 검증하였으며, 수조내의 일정수심에서 파고계를 상하로 이동시켰을 때, 기록지에 나타난 이동범위를 확인하여 파고계를 검증할 수 있었다. 각각 5개의 파고계는 이와 같은 방법으로 검증을 실시하였으며, 검증된 파고계를 통해 파고를 측정하였다.

연안사주가 존재하지 않는 경우는 Fig. 10과 같이 1 : 10의 일정경사를 갖는 수심단면을 선정하여 실험을 실시하였으며 콘크리트를 재료로 사용하여 단면을 설치하였다. 파고계의 위치는 쇄파가 일어나는 지점을 중심으로 파고계를 50cm간격으로 설치하였다. 심해지역에는 심해파고를 측정하기 위하여 1개의 파고계를 설치하였으며, 천해지역에는 나머지 4개의 파고계를 설치하여 쇄파대 부근의 파고변형을 측정하였다. 총 5개의 파고계로는 자료수집이 부족하여 쇄파대 내에서의 더 많은 파고관측자료를 확보하기 위해서 천해지역의 파고계를 25cm간격으로 이동시켜 추가로 측정하였다. 실험은 수심을 고정시키고 주기와 심해파고의 변화에 따라 쇄파대내의 파고의 변형을 관찰하였다.

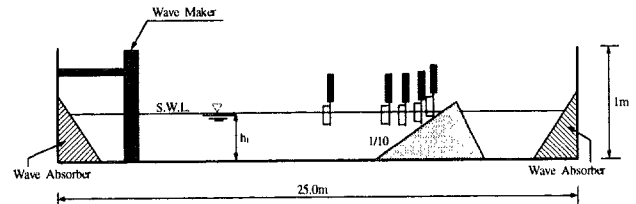


Fig. 10 Experiment profile of uniform slope and organization of experiment equipment

연안사주가 존재하는 경우는 일정경사 수심단면에 콘크리트를 사용하여 먼저 삼각형 연안사주를 설치하고, 다음에 사다리꼴 연안사주를 설치하여 실험을 실시하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 삼각형 연안사주가 존재하는 경우와 사다리꼴 연안사주가 존재하는 경우의 단면을 보여주고 있다. 연안사주가 존재하는 경우에 대한 실험도 일정경사 수심단면에서 수행한 절차와 동일한 방법으로 실험을 실시하였다. 다만 파고계의 위치는 연안사

주가 존재하는 지점을 중심으로 설치하였다. 그리고 파고계의 간격을 60cm로 하고 다소 부족한 부분은 파고계를 30cm간격으로 이동시켜 파고를 측정하였다.

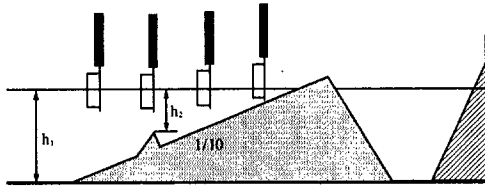


Fig. 11 A triangle bar profile and measurement point

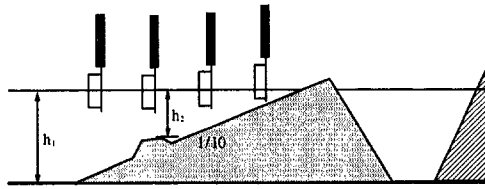


Fig. 12 A trapezoid bar profile and measurement point

4.2 수치모형과의 비교분석

수심단면 및 입사파고, 주기 및 일정수심 등 파랑조건을 변화시켜가면서 수행한 수치모형실험은 개발된 수치모형에 내포된 변수들의 민감도를 분석하기 위하여 규칙파를 대상으로 수행하였으며, 수치모형실험의 관측자료와 수치모형의 결과를 비교하여 각 변수들의 영향범위 및 거동특성을 해석할 수 있었다.

일정경사의 수심단면에서 수행한 수치모형실험의 측정자료와 불규칙파 모형에 의해 예측된 파랑변형, 그리고 규칙파 모형에 의해 예측된 파랑변형은 Fig. 13~Fig. 15에서 비교하였다. 그리고 삼각형 연안사주가 존재하는 수심단면, 사다리꼴 연안사주가 존재하는 수심단면에 대해서는 각각 Fig. 16~Fig. 18, Fig. 19~Fig. 21에 비교하였다.

그 결과에 의하면 실험 관측치와 규칙파 모형에 의해 예측된 파랑변형이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 규칙파를 대상으로 실험을 수행하였기 때문이다. 불규칙파 모형은 쇄파대내에서는 규칙파 모형과 비슷한 양상을 보이지만, 쇄파대내에서는 규칙파 모형과 다른 양상을 보이고 있다. 오

히려 쇄파대 부근에서 불연속 점을 나타내는 규칙파 모형보다 쇄파후 자연스럽게 파고변형이 감소하는 현상을 보이는 불규칙파 모형이 더 실제적이라고 할 수 있다.

비교·분석에 의해서 규칙파 모형의 감소계수 K 는 0.15~0.21의 범위에서 결정되었다. 그리고 안정파계수 Γ 는 대체적으로 0.35~0.4의 범위에서 값이 결정되었다. 불규칙파 모형의 쇄파계수 B 는 0.5~0.85의 범위에서 결정되었다.

불규칙파 모형에서 예측되는 파고변형은 B 에 민감하게 반응하고, 규칙파 모형에서는 쇄파후 K 에 의해 파고감소가 민감하게 반응하였지만, Γ 는 민감성이 크지 않았다. 계수들은 관측치를 통해 모형을 최적화 하는 과정에서 결정되는 경험상수이며, 계수들이 모형에 미치는 영향은 지배적이라고 할 수 있다.

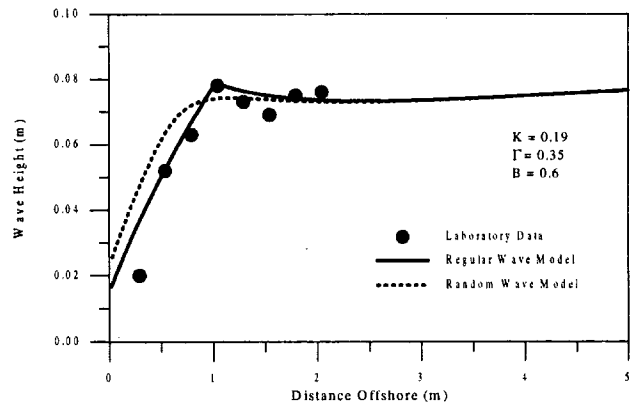


Fig. 13 Calculated and measured wave height on uniform slope ($H_0=0.08m$, $T=1.0s$)

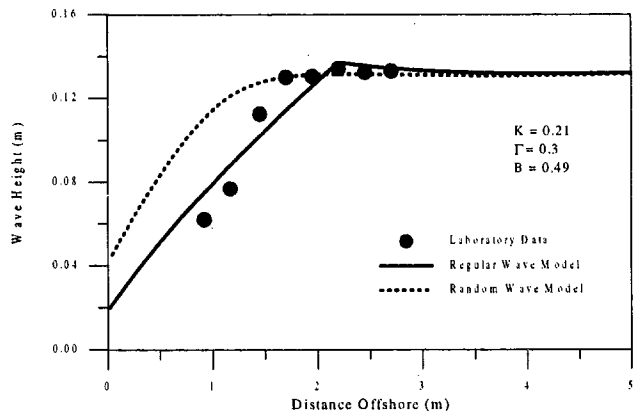


Fig. 14 Calculated and measured wave height on uniform slope ($H_0=0.14m$, $T=1.3s$)

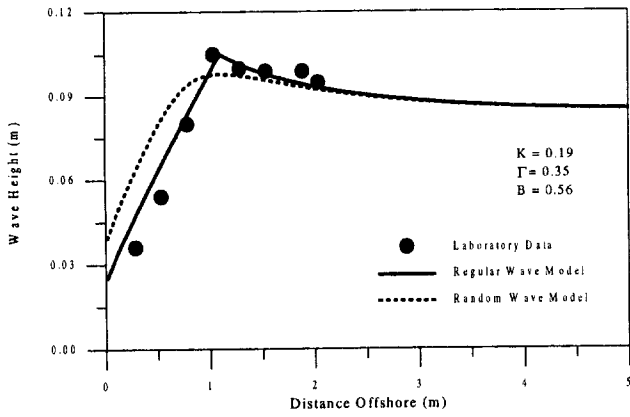


Fig. 15 Calculated and measured wave height on uniform slope ($H_0=0.088\text{m}$, $T=1.5\text{s}$)

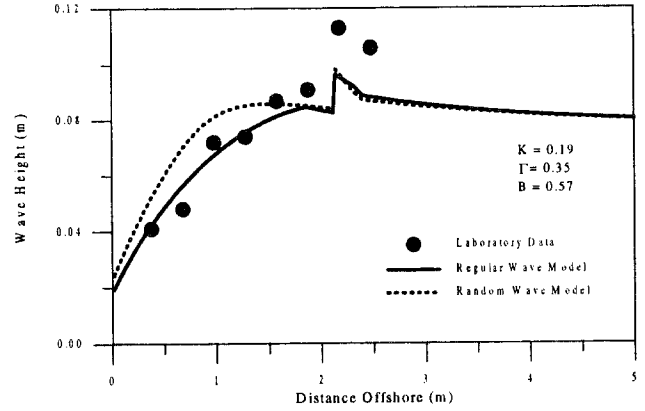


Fig. 18 Calculated and measured wave height on a triangle bar ($H_0=0.079\text{m}$, $T=1.8\text{s}$)

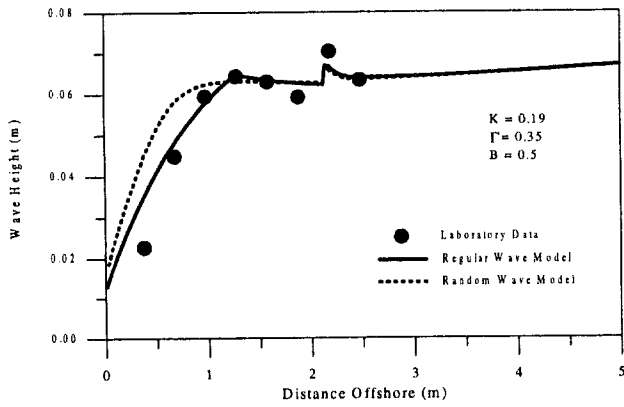


Fig. 16 Calculated and measured wave height on a triangle bar ($H_0=0.07\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

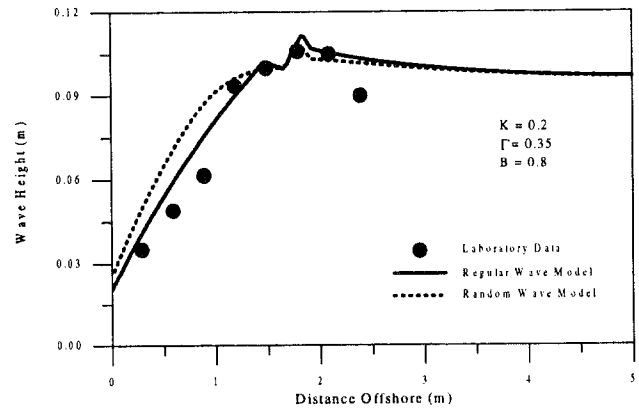


Fig. 19 Calculated and measured wave height on a trapezoid bar ($H_0=0.1\text{m}$, $T=1.5\text{s}$)

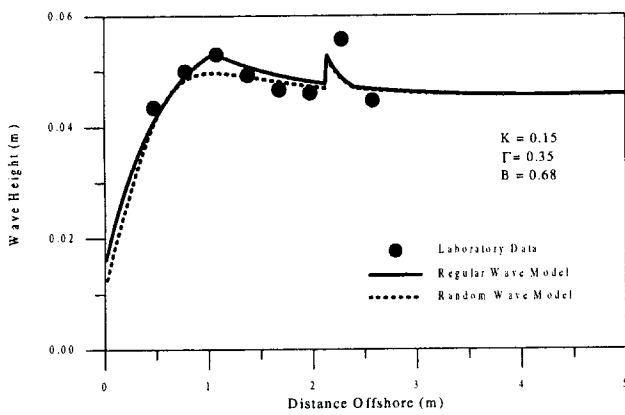


Fig. 17 Calculated and measured wave height on a triangle bar ($H_0=0.05\text{m}$, $T=1.3\text{s}$)

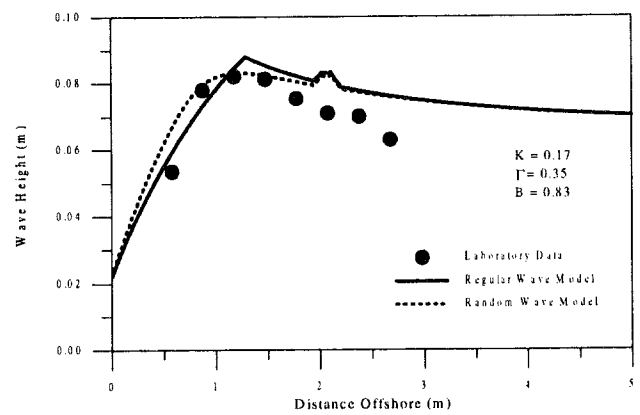


Fig. 20 Calculated and measured wave height on a trapezoid bar ($H_0=0.069\text{m}$, $T=1.8\text{s}$)

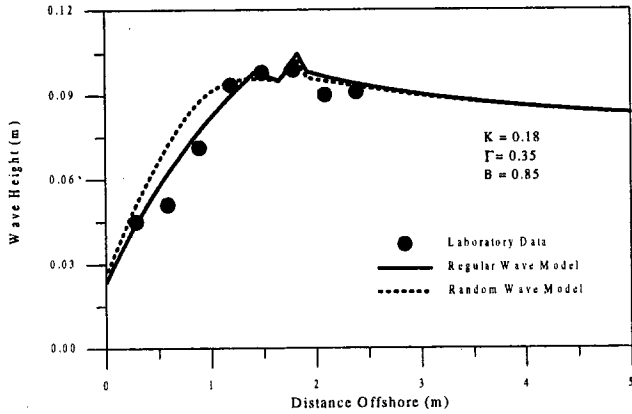


Fig. 21 Calculated and measured wave height on a trapezoid bar ($H_0=0.045\text{m}$, $T=2.0\text{s}$)

5. 관측자료와의 비교 · 분석

수치모형의 개발은 더욱 실제적이고 불규칙한 단면에 적용하기 위해서 발달되어 왔다. 본 장에서는 개발된 불규칙파 모형과 규칙파 모형을 연안사주가 존재하지 않는 완경사 단면에서의 현장자료와 연안사주가 존재하는 불규칙한 단면에서의 현장자료에 비교하였다. 비교결과에서 모형이 보이는 거동특성의 관찰로 모형의 적용성 여부를 판단하였다.

연안사주가 존재하지 않는 완경사 단면에 대하여 캘리포니아에 위치한 Torrey Pine 해안에서 Thornton과 Guza(1983)가 수집한 현장관측자료를 이용하였다. Torrey Pine 해변은 잘 발달된 사주도 없고, 연안방향으로 수심단면의 동질성을 유지하는 장소이다. Fig. 22에서는 RMS(Root Mean Square)파고자료와 불규칙파 모형, 규칙파 모형을 비교하였다. 현장자료의 분석을 통해서 쇄파계수 B 는 1.7의 값을 결정할 수 있었고, K 와 Γ 는 각각 0.15와 0.25의 값을 결정할 수 있었다. 결정된 계수들의 값이 실험을 통해서 결정된 계수의 범위를 크게 벗어난 것은 단면의 경사가 완만한 가운데 입사된 주기가 크기 때문에 실험에 의해서는 발생할 수 없는 경우로, 상당히 다른 조건 때문이라고 판단된다. 그리고 불규칙파 모형이 관측치와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

연안사주가 존재하는 불규칙 단면의 관측자료는 Kraus 등(1992)에 의해서 진행된 SUPERTANK자료 수집 계획에서 얻어진 RMS파고자료를 이용하였다. SUPERTANK는 큰 수조를 이용하여 해안을 가로지르는 단면에 대한 동수역학과 유사의 이송과정을 연구하기 위해서 만들어졌다.

Fig. 23와 Fig. 24에서 관측자료와 불규칙파 모형, 규칙파 모형을 비교하였다.

Fig. 23의 수심단면은 해안근처에 연안사주가 존재하는 경우로서 분석결과 B 는 0.8, K 는 0.15, Γ 는 0.35를 결정할 수 있었고, 불규칙파 모형이 규칙파 모형보다 관측치에 더 일치하고 있다. Fig. 24의 수심단면은 해안근처에 작은 사주가 존재하고 심해에 마루가 넓은 언덕이 형성된 불규칙 단면이 고려되었다. 비교에 의해 결정된 쇄파계수는 0.6을 결정할 수 있었고, 감쇠계수와 안정파계수는 각각 0.15와 0.35의 값을 결정할 수 있었다. SUPERTANK자료에 의해 결정되어진 계수들은 실험에서 얻어진 범위를 만족하고 있다는 것을 알 수 있었다. 그림에서 불규칙파 모형이 규칙파 모형보다 관측치와 잘 일치하고 있다. 또한 규칙파 모형은 불규칙파 모형보다 많은 경험상수를 결정하여야 한다는 불편함이 있다.

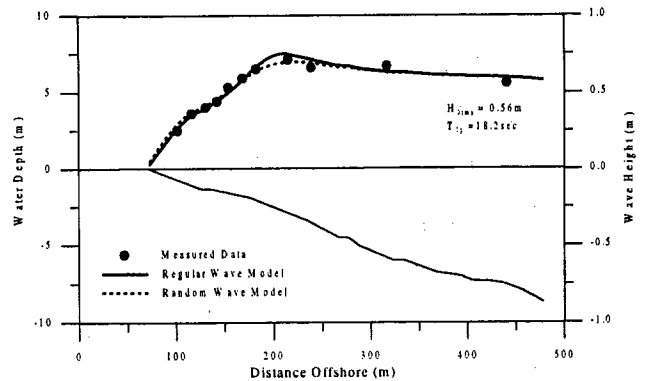


Fig. 22 Calculated and measured RMS wave height at Torrey Pine Beach, California

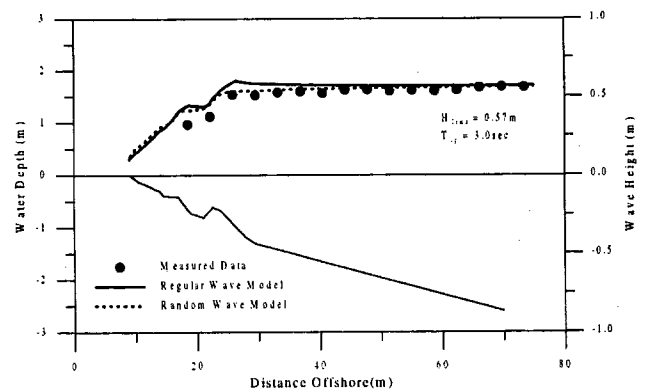


Fig. 23 Calculated and measured RMS wave height for SUPERTANK case A0517A

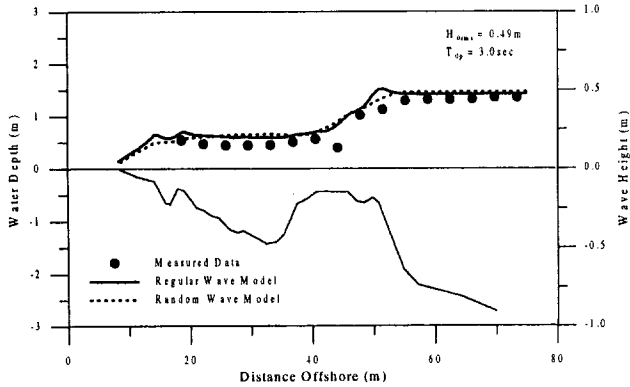


Fig. 24 Calculated and measured RMS wave height for SUPERTANK case S1208B

6. 결 론

본 연구에서는 불규칙한 수심단면에 적용할 수 있는 규칙파 수치모형과 불규칙파 수치모형을 개발하였다. 개발된 두 수치모형에 평균수위의 상승과 저하의 효과를 고려하여 보다 해안선 부근에서의 파고변형을 정확히 예측할 수 있었다.

수리모형실험을 통하여 해석된 민감도 분석에서 각 모형에 내포된 경험상수가 각각 쇄파계수 B 는 0.5~0.85, 감쇠계수 K 는 0.15~0.21, 안정파계수 Γ 는 0.35~0.4의 범위에서 결정될 수 있음을 알았다. 그리고 규칙파 모형이 불규칙파 모형보다 경험상수에 민감하게 의존하였고, 규칙파 모형이 쇄파대 부근에서 불연속 점을 갖는 제약성을 불규칙파 모형의 개발에 의하여 해결할 수 있었다.

평균수위 상승효과를 고려하여 개발된 불규칙파 수치모형의 정확도와 임의 수심단면에서의 적용성을 현장관측자료와의 비교·분석에서 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Bowen, A. J., Inman, D. L. and Simmons, V. P., "Waves set-down and wave set-up", *J. of Geophysical Research.*, Vol. 73, pp.2569-2577, 1968.

[2] Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., "A model for breaker decay on beaches", *Proceedings of 19th ICCE*, ASCE, pp.82-98, 1985.

[3] Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., "Wave height variation across beaches of arbitrary profile", *J. of Geophysical Research*, Vol. 90, pp.11917-11927, 1985.

[4] Dally, W. R. and Dean, R. G., "Transformation of random waves on surf beat", *Proceedings of 20th ICCE*, ASCE, pp.109-123, 1986.

[5] Dally, W. R. and Dean, R. G., "Closed-form solutions for the probability density of wave height in the surf zone", *Proceedings of 21st ICCE*, ASCE, pp.632-643, 1988.

[6] Dally, W. R., "Random breaking waves : a closed-form solution for planar beaches", *Coastal Engineering*, Vol. 14, pp.233-263, 1990.

[7] Horikawa, K. and Kuo, C. T., "A study of wave transformation inside surf zone", *Proceedings of 10th ICCE*, ASCE, pp.217-233, 1966.

[8] Hwang, L. S., and Divoky, D., "Breaking wave set-up and decay on gentle slopes", *Proceedings of 12th ICCE*, ASCE, pp.377-389, 1970.

[9] Holman, R. A. and Sallenger, Jr., A. H., "Set-up and swash on a natural beach", *J. of Geophysical Research.*, Vol. 90, No. C1, pp.945-953, 1985.

[10] Kraus, N. C., Smith, J. M., and Sollitt, C. K., "SUPERTANK laboratory data collection project", *Proceedings of 21st ICCE*, ASCE, pp.2191-2204, 1992.

[11] LeMehauté, B., "On non-saturated breakers and the wave run-up", *Proceedings of 8th ICCE*, ASCE, pp.77-92, 1962.

[12] Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., "Radiation stress and Mass transport in gravity waves with application to surf beats", *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp.481-504, 1962.

- [13] Larson, M., "Model for decay of random waves in surfzone", *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp.1-12, 1995.
- [14] McCowan, J., "On the highest wave of permanent type", *Philos. Mag. Edinburgh*, Vol. 32, pp.351-358, 1894.
- [15] Storker, J. J., *Water waves*, Interscience Publishers, New York, N. Y., p.567, 1957.
- [16] Stive, M., "Energy dissipation in waves breaking in gentle slope", *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp.99-127, 1984.
- [17] Svendsen, I. A., "Wave heights and set-up in a surf zone", *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp.303-329, 1984.
- [18] Smith, E. R., Kraus, N. C., "Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs", *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp.307-325, 1991.
- [19] Thornton, E. B. and Guza, R. T., "Transformation of wave height distribution", *J. of Geophysical Research*, Vol. 88, pp.5925-5938, 1983.
- [20] Watanabe, A. and Dibajnia, M., "A numerical model of wave deformation in surf zone", *Coastal Engineering*, Vol. 12, pp.578-587, 1988.