

Bar형 지형을 포함한 임의 해안단면에서 불규칙파의 쇄파 파고변형 예측모델 개발

A Development of Predictive Model for Irregular Wave Height Variation Across the Arbitrary Beach Profiles Including Bar

김태민¹, 황규남², 이재형³

Tae Min Kim¹, Kyu-Nam Hwang², and Jae-Hyoung Lee³

1. 서론

연안역에서의 파랑운동 모형개발에 있어 봉착하는 가장 중요한 문제는 쇄파대에서의 파고변형의 예측이라 할 수 있다. 쇄파대에서의 파고변형 예측 모형의 개발은 파동에너지 손실의 평가를 이용한 Le Mehaute(1962)의 해석적 방법 이후로 예측모형을 개발하기 위한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 규칙파의 쇄파파고 변형에 대해서는 Horikawa와 Kuo(1966)의 실험결과를 토대로 안정 파고의 개념을 도입한 Dally et al.(1985) 등등에 의해 그 예측능력에 있어 상당한 향상이 이루어졌다고 할 수 있다. 그러나, 불규칙파의 쇄파 변형에 대해서는 대표적으로 Battjes와 Janssen(1978), Thornton과 Guza(1983)등의 모델을 들 수 있으나, 쇄파와 파 자체의 복잡성으로 인하여 아직까지 불규칙파를 대상으로 하는 파랑 변형에 대한 해석과 예측은 충분하다고 할 수 없는 상태이다.

본 연구에서는 실용적이고 단순화된 접근방법으로 bar형 지형을 포함한 임의 해안단면에 있어서의 불규칙파의 파고변형 예측모형을 개발하고자 하였다. 이러한 목적을 위하여 차원해석 및 Rayleigh 확률분포를 이용한 불규칙파의 쇄파에너지 감쇄항의 해석적 평가가 이루어졌으며, 이를 적용한 해안선 연직방향에서의 1차원 수치모

형이 수립되었다. 개발된 예측모형의 검증은 미국 오레곤 주립대학의 초대형 SUPERTANK에서 수행된 총 13개의 실험자료를 이용하여 수행되었다.

2. 불규칙파의 쇄파에너지 감쇄항

Le Mehaute(1965)에 따르면 해안선 연직방향으로 진행되는 불규칙파랑의 파고변형은 다음 식 (1)의 에너지 평형방정식을 이용하여 해석될 수 있다.

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} = -D \quad (1)$$

여기서, F 는 파에너지 flux이고, x 는 전파경로의 거리를 나타내며, D 는 쇄파에 의한 난류와 경계층 전단에 대한 단위면적당 평균에너지 손실량(또는 감쇄항)이다. Thieke와 Sobey(1990)에 따르면 쇄파에너지 손실량 D 는 차원해석을 통하여 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$D = \omega E f_{bw} \quad (2)$$

여기서, E 는 국부(local)에너지 밀도이고, ω 는

¹ 전북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Division of Civil & Environmental Eng., Chonbuk National Univ., Chonju 560-756, Korea)

² 전북대학교 공과대학 토목·환경공학부 전임강사

³ 전북대학교 공과대학 토목·환경공학부 교수

스펙트럼의 피크주파수, f_{bw} 는 무차원 쇄파소산계수이다.

쇄파소산계수 f_{bw} 는 규칙파에 대한 주기적 난류 단파모델을 이용하여 불규칙파로 확장한 후, 제한파고의 통합적 정의와 함께 유도하면 다음과 같이 주어진다.

$$f_{bw} = \alpha \left(1 + \frac{H_m^2}{H_{rms}^2}\right) \exp\left(-\frac{H_m^2}{H_{rms}^2}\right) \quad (3)$$

식(3)의 유도과정에서 쇄파하는 파와 쇄파하지 않는 파의 결합된 파고 확률분포는 Rayleigh분포라는 가정이 도입되었다. 무차원 쇄파소산계수 f_{bw} 의 상세한 유도과정은 김(2000)에 주어진다. 식(3)에서 α 는 무차원 계수이며, $1/\pi$ 혹은 $H_b/\pi d$ 정도의 값을 갖는다(Thieke와 Sobey, 1990). 그리고, d 는 정지수심(h)와 평균수면 변화량($\bar{\eta}$)의 합인 국부수심을 나타내며, H_m 은 국소적인 제한 파고로서 $H_m = 0.83d$ 이다.

식(1)의 파에너지 플럭스 F 는 선형파 이론추정해를 이용하여 파에너지 E 와 군속도 C_g 의 곱으로 산정될 수 있으며, 식(2)와 (3)을 식(1)에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (H_{rms}^2 C_g) \\ &= -\alpha \left[1 + \frac{(0.83d)^2}{H_{rms}^2}\right] \times \\ & \exp\left[-\frac{(0.83d)^2}{H_{rms}^2}\right] \omega H_{rms}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $d=h+\bar{\eta}$ 이며, 식(4)에 근거를 둔 파고 예측 모델은 쇄파하는 파에너지 소산의 추정에 결정적으로 의존한다. 이것은 쇄파하는 파의 소산에 대한 예측방정식이 파변형에 대한 수동역학적 중요한 요소라는 것을 함축적으로 의미한다(Battjes et al, 1990). 또한 Thornton과 Guza(1983)의 현장실험을 통하여 밝혀진 바와 같이 쇄파하는 파와 쇄파하지 않는 파의 결합된 확률분포는 Rayleigh분포라는 가정과 국부적인 제한파고 H_m 을 기준으로 쇄파하는 파와 쇄파하지 않는 파는 엄격하게 구별된다는 가정 하에 수립되었다는 사실에 주시하여야 한다.

식(4)는 여러 형태의 변수를 포함하는 함축적인 방정식이며, 식(4)를 이용하여 해석적 해를 구하는 것은 불가능하며, 수치해석을 통해서만 그 해를 구할 수 있다. 그리고, 식(4)의 국부수심 d 의 산정은 그 위치에서의 평균수면 변화량

$\bar{\eta}$ 의 산정을 필요로 하며, 또한 파고 H 는 평균수면 변화량 $\bar{\eta}$ 의 함수가 되고, 평균수면 변화량 $\bar{\eta}$ 는 파고 H 의 함수가 되는 상관 관계로 인하여 평균수면 변화량 $\bar{\eta}$ 는 운동량 평형을 나타내는 다음의 지배방정식을 이용하여 산정되어진다.

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

여기서 ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도이며, S_{xx} 는 x 축에 수직한 면에 x 방향으로의 잉여응력(radiation stress)이다.

3. 일방향 불규칙 쇄파 변형 모델 수립

해안선에 연직한 방향에서 심해로부터 쇄파대 전구간에 걸친 파고변형을 예측하기 위하여 본 모델에서는 개개의 파의 전파는 묘사되지 않으며, 반면에 전체의 파랑에너지가 통계학적 측면에서 하나의 대표파랑으로(예로써 rms파고) 묘사될 수 있다고 가정된다. 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용한 수치계산은 식(3)에 주어진 불규칙 쇄파소산이론을 근거로 1차원으로 수립된 격자를 따라 심해에서 시작하여 해안방향으로 계속된다. 한 격자점에서 주어진(혹은 기산정된)값(예: 파고 및 평균해수면의 변화량)이 다음 격자점에서의 예측 값을 결정하기 위하여 사용된다.

쇄파대에서의 rms파고변형 예측방정식인 식(4)는 유한차분 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{i+1} = [A_1 H_i^2 - A_2 (H_i^2 + A_3^2)] \times \exp\left(-\frac{A_3^2}{H_i^2}\right)^{0.5} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{\frac{C_{g_i}}{C_{g_{i+1}}}} \\ A_2 &= \frac{2\pi\alpha\Delta x}{T\sqrt{C_{g_{i+1}}}} \\ A_3 &= 0.83d_i \end{aligned}$$

여기서 i 는 해안선 연직방향의 x 좌표상에서의 격자번호이다. 계산은 외해에서 해안선 방향으로

진행된다. 식 (6)에서 파의 군속도 C_g 는 파속과 파계수(wave factor) n 의 곱으로 주어지며 선형 파이론을 이용하여 산정된다. 국소 상대수심인 kd (혹은 $2\pi d/L$)는 Hunt(1979)가 제안한 식을 이용하여 산정된다.

쇄파대에서의 평균수면 변화량 $\bar{\eta}$ 는 유한차분 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{\eta}_{i+1} = \bar{\eta}_i + \frac{S_{xx_i} - S_{xx_{i+1}}}{\rho g d_{i+1}} \quad (7)$$

여기서 잉여응력 S_{xx} 는 선형파 이론을 적용하면 다음 식 (8)과 같이 주어진다.

$$S_{xx} = E(2n - 0.5) \quad (8)$$

식 (8)과 식 (7)을 이용하면, 쇄파대에서의 평균 수위변동량을 계산할 수 있다.

4. 모델의 검증

본 연구에서 개발된 쇄파파고 예측모델은 입력 값으로서 단지 수심자료, 심해파고, 스펙트럼 파주기 T_p 만을 필요로 한다. 개발된 모델의 검증은 SUPERTANK 실험자료를 이용하여 수행되었다.

SUPERTANK 실험자료는 1992년 미국 Oregon주립대의 SUPER TANK Laboratory Data Collection Project (Kraus et al., 1992)의 일환으로서 얻어진 실험자료로서, 실험은 모래 해안단면을 갖는 수로 길이 104m, 폭 3.7m, 깊이 4.6m인 미국에서 가장 큰 원형규모의 조파수조에서 수행되었다. 실험시에 사용된 조파수조의 단면과 파고측

표 1. List of Deepwater Wave Conditions

Test #	Co (m/sec)	Ho (m)	Lo (m)	Ho/Lo	T _p (sec)
1	4.89	0.46	15.3	0.0301	3.1
2	4.83	0.50	14.9	0.0332	3.1
3	7.13	0.49	32.6	0.0150	4.6
4	9.44	0.44	57.1	0.0077	6.1
5	6.95	0.52	30.9	0.0167	4.5
6	9.37	0.43	56.2	0.0076	6.0
7	10.89	0.28	75.9	0.0037	7.0
8	4.67	0.48	14.0	0.0343	3.0
9	4.78	0.48	14.6	0.0325	3.1
10	7.09	0.44	32.2	0.0136	4.5
11	7.18	0.43	33.0	0.0131	4.6
12	6.90	0.45	30.5	0.0147	4.4
13	9.52	0.30	58.1	0.0051	6.1

정을 위해 설치된 저항식 파고계의 위치는 그림 (1)에 주어진다.

모델의 검증을 위해 사용된 실험자료는 총 13개의 실험으로부터 얻어진 자료로서 모두 Bar형 지형을 가지고 있으며, 실험시에 재생된 파는 모두 불규칙파(irregular wave)이다. 관측된 파랑자료로부터 산정된 심해파 조건은 표(1)에 주어진다.

본 연구에서 개발된 쇄파파고 예측모델을 이용하여 표(1)의 심해파조건과 수심측량을 통하여 측정된 해안선 단면의 수심자료를 입력자료로 하여 전체 13개 실험에 대한 파고 및 평균해면 변동량의 예측이 수행되었다. 여기서는 단지 실험 1, 5, 9, 13의 결과만이 그림 2에 주어진다. 그림에서 점선은 식(3)의 무차원계수 α 의 값이 $1/\pi$ 인 경우이고, 실선은 α 의 값이 $1.5/\pi$ 인 경우이다. SUPERTANK 실험의 쇄파파고 관측결과와의 비

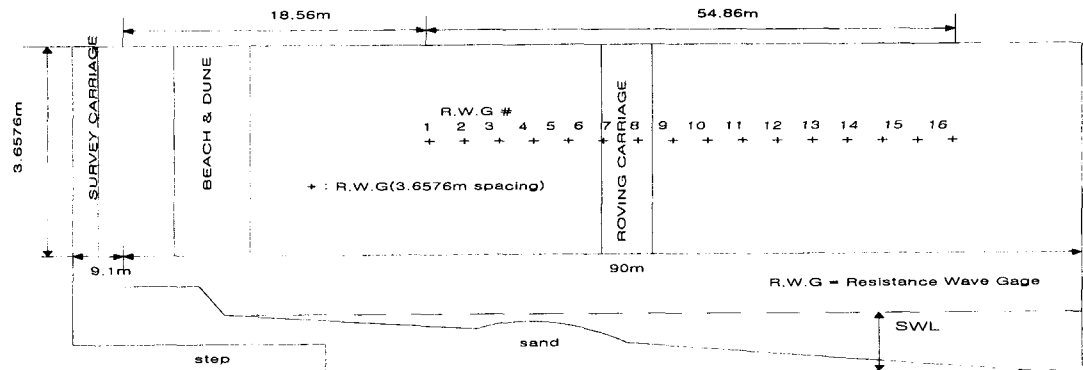


그림 1. Configuration of SUPERTANK Experimental Flume and Location of Wave Gage

교를 통해 무차원계수 a 의 값이 Thieke와 Sobey(1990)가 제안한 $1/\pi$ 인 경우보다 $1.5/\pi$ 일 때 최적의 예측이 이뤄짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 전체 13개의 실험에서 공통으로 나타났다.

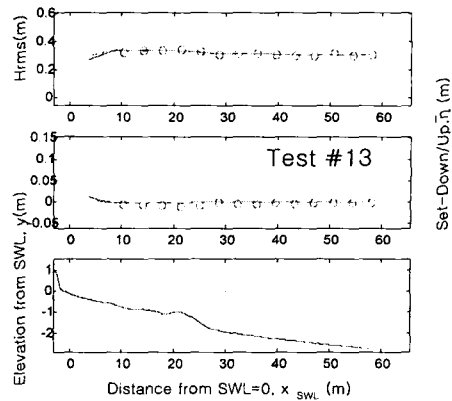
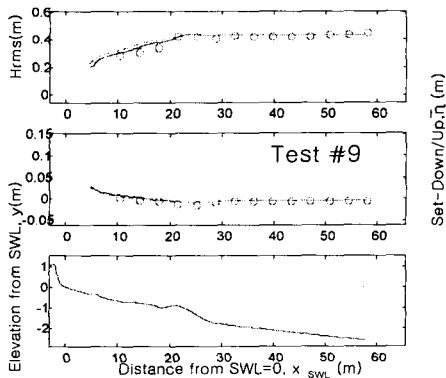
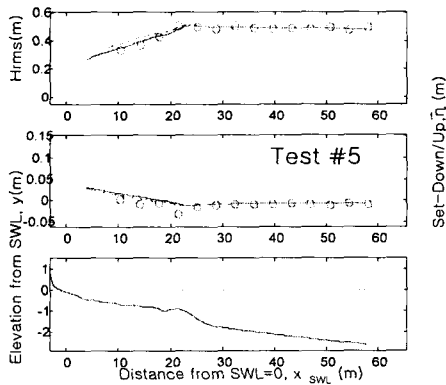
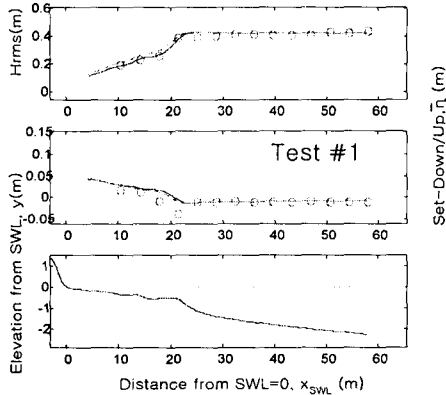


그림 2. Comparison of the model with SUPERTANK data

5. 결론

본 연구에서는 차원해석 및 Rayleigh 확률분포를 이용한 쇄파에너지 감쇄항의 해석적 평가를 통하여 bar를 포함한 임의의 해안선 단면에서 비쇄파대 및 쇄파대의 전체 천해역에서의 불규칙파에 대한 파고변형 예측모델이 개발되었다. 개발된 모형의 SUPERTANK 실험자료와의 비교·검증 결과는 쇄파파고의 예측이 상당히 신뢰할 만한 수준임을 보여주고 있으나, 평균수면변화량의 예측은 더욱 향상될 필요가 있음을 나타낸다. 평균수면변화량의 예측 향상을 위해서는 Kweon과 Goda(1996)가 적용한 예처럼 surf beat의 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 예측모형은 단순히 해안선 단면의 자료와 심해파조건 즉, rms파고와 주기 T_p 의 3가지 값만을 입력자료로써 필요로 하므로 매우 간편하고 실용성이 높은 장점을 갖는다.

참고문헌

- 김태민, (2000). "SUPERTANK 실험자료를 이용한 쇄파대에서의 파고변형 예측모델 개발", 전북대학교 석사학위논문, pp.99-102.
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M (1978). "Energy Loss and Set-up due to Breaking of Random Waves," *Proc. of 16th Conf. on Coastal Eng., ASCE, Vol.1*, pp.567-587.
- Battjes, J. A., Sobey, R.J., and Stive, M.J.F (1990). "Nearshore Circulation," In: Le

- Méhauté, B. and Hanes, D. M., eds. The Sea, Vol. 9: Ocean Engineering Science. Wiley, New York, pp. 467-493.
- Dally, W.R., Dean, R.G., and Dalrymple, R.A. (1985). "Wave Height Variation across Beaches of Arbitrary Profile", *J. of Geophysical Research*, Vol.90, No. C6, pp.11917-11927.
- Horikawa, K. and C.T. Kuo, (1966). "A study on wave transformation inside surf zone," *Proc. of 10th Conf. on Coast. Eng.*, Vol. 1, pp.217-233.
- Hunt, J. N (1979). "Direct Solution of Wave Dispersion Equation," *J. Waterways, Ports, Coastal Ocean Div.*, ASCE, Vol. 105, No. WW4, pp.457-459.
- Kraus, N. C., Smith, J. M. and Sollitt, C. K (1992). "SUPERTANK Laboratory Data Collection Project," *Proc. of 23rd Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp.2191-2204.
- Kweon, H.-M. and Goda, Y. (1996). "A Parametric Model for Random Wave Deformation by Breaking on Arbitrary Beach Profiles," *Proc. of 25th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp261-274.
- Le Mehaute, B. (1962). "On non-Saturated Breakers and the Wave Run-up," *Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp.77-92.
- Thieke, R. J. and Sobey, R. J (1990). "Cross-shore Wave Transformation and Mean Flow Circulation," *Coastal Engineering*, Vol. 14, pp.387-415.
- Thornton, E. B. and Guza, R. T (1983). "Transformation of Wave Height Distribution," *J. Geophysical Res.*, Vol. 88, No. C10, pp.5925-5938.