

## 碎波帶에서의 波浪變形 解析

李正圭\*, 金鍾綱\*, 李昌海\*

### 1. 서론

선형파 이론 자체로서는 쇄파대내에서의 파고를 직접 계산할 수 없으므로 쇄파가 발생하기 전까지만 계산할 수 있다. 그리고 쇄파대내에서의 파고는 수심에 대하여 일정한 비율로 감소시켜 해석해 왔다. 그러나 쇄파가 발생한 후의 파고는 선형적으로 감소하지 않고 해저경사에 따라서 그 감소경향이 다르게 나타남을 여러문헌에서 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기본방정식으로 완경사방정식을 실수부와 허수부로 분리한 파랑식을 이용하여, 에너지감쇠의 영향을 고려하여 해저경사와 입사각을 바꾸어 가면서, 쇄파파고를 예측하여 보았다. 쇄파파고는 해저경사에 따라서 감소경향이 다를 수 있었고 입사각이 증가할수록 더 큰 비율로 파고가 감소함을 알 수 있었다. 비교적 단순한 경우인 해안선이 직선이고 해저등심선이 해안선에 나란한 평면해안(plane beach)에 적용하였다.

### 2. 기본방정식

바닥마찰과 쇄파로 인한 에너지의 손실이 없고 수심의 변화가 완만하다는 가정하에서 비회전, 비압축성 선형단순조화파의 파랑방정식이 Berkhoff(1972)에 의해 유도되었다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0 \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 파속,  $C_g$ 는 군속도,  $\phi$ 는 속도포텐셜이며  $\omega$ 는 각진동수이다. 속도포텐셜( $\phi$ )은 아래와 같이 표현된다.

$$\phi(x, y) = a(x, y) e^{iS(x, y)} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 진폭이며  $S$ 는 위상함수이다. 식(2)을 식(1)에 대입하여 실수부와 허수부로 분리하고 진폭대신에 파고 $H(=2a)$ 를 사용하여 정리하면 다음과 같다. (Ebersole, 1985)

$$\text{실수부 } |\nabla S|^2 = \frac{1}{H} \left[ \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{1}{CC_g} \left( \nabla H \cdot \nabla (CC_g) \right) \right] + k^2 \quad (3)$$

$$\text{허수부 } \frac{\partial}{\partial x} \left[ H^2 CC_g |\nabla S| \cos \theta \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ H^2 CC_g |\nabla S| \sin \theta \right] = 0 \quad (4)$$

그리고 선형파이론은 위상함수 gradient의 비회전성을 가정하고 있다.

$$\nabla \cdot (\nabla S) = 0 \quad (5)$$

\* 한양대학교 공과대학 토목공학과 ( Department of Civil Engineering, Han-yang University, Seoul 133-791, Korea)

위상함수 gradient를 벡터표시법으로 표현하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} ( |VS| \sin\theta ) - \frac{\partial}{\partial y} ( |VS| \cos\theta ) = 0 \quad (6)$$

한편, 에너지의 급격한 손실이 발생하는 쇄파대내에서의 파고의 변화는 에너지플럭스보존식에 근거하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} ( EC_g ) = - \frac{K}{h} ( EC_g - (EC_g)_e ) \quad (7)$$

여기서  $K$ 는 에너지감쇠계수,  $h$ 는 수심,  $(EC_g)_e$ 는 쇄파대내에서의 에너지플럭스의 안정값을 나타낸다.

식(7)에 파랑에너지 관계식을 대입하면 다음과 같이 되며

$$\frac{\partial}{\partial x} ( H^2 C_g ) = - \frac{K}{h} ( H^2 C_g - (H^2 C_g)_e ) \quad (8)$$

윗식을 식(4)에 이용하여 변형시키면 다음과 같은 식이 된다.

$$\nabla \cdot ( H^2 C_g \nabla S ) = - \frac{K}{h} ( (H^2 C_g |VS|) - ((\gamma h)^2 C_g |VS|) ) \quad (9)$$

$\gamma$ 는 경험적인 상수로서 0.4, 에너지감쇠계수  $K$ 는 0.15를 사용하였다. (9)식은 쇄파대 안밖에서 모두 사용할 수 있는 식이며, 쇄파가 발생하기 전에는  $K=0$ 이며 식(4)가 된다.

계산된 쇄파파고를 비교검토하기 위한 것으로 Dally등(1984)이 제안한 해석해를 사용하는데, 이 해는 쇄파발생후 쇄파대에서의 에너지감쇠가 跳水(hydraulic jump)의 에너지 손실과 유사하다고 가정하고 set-up의 영향을 무시하여 에너지플럭스 보존식으로 부터 유도되었으며 다음과 같다.

$$\left( \frac{H}{H_b} \right)^2 = \left( \frac{h}{h_b} \right)^2 \left[ (1-\Delta) \left( \frac{h}{h_b} \right)^{\alpha-5/2} + \Delta \right] ; \alpha \neq \frac{5}{2}$$

$$\left( \frac{H}{H_b} \right)^2 = \left( \frac{h}{h_b} \right)^2 \left[ 1 - \frac{5}{2} \left( \frac{\gamma}{x} \right)^2 \ln \left( \frac{h}{h_b} \right) \right] ; \alpha = \frac{5}{2}$$

여기서,

$$\Delta = \frac{\alpha}{\alpha - 5/2}, \quad x = \frac{H_b}{h_b} \quad (\text{at breaking})$$

윗식에서  $\alpha=K/s$ 이며,  $s$ 는 해저경사이다.

모형에 적용한 입사파와 바닥조건은 파랑이 해안선에 수직하게 입사하는 Horikawa(1966)의 실험조건을 사용한다. 그리고 같은 바닥과 파랑조건하에서 입사각을 바꾸어 가면서 쇄파대 전후에서의 파고의 변화를 조사해 보았다. 쇄파가 발생하는 한계상태를 나타내는 쇄파공식은 바닥경사와 주기가 고려되어 있는 Weggel(1972)의 식을 사용한다.

### 3. 수치해석의 분석 및 고찰

그림 1.에서 알수 있듯이 실험자료와 비교한 수치해석의 결과는 쇄파발생파고는 차이를 보이거나 대체로 쇄파대에서의 파고를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 쇄파점에서 계산된 파고가 실험치 보다 작은 것은 기본방정식이 선형파이론에 근거하기 때문에 천수변형으로 인한 비선형효과를 제대로 재현하지 못하기 때문일 것으로 사료된다. 그림 2.는 쇄파발생후의 쇄파대에서의 파고비를 Dally의 해석해와 비교한 것인데 수치해와 해석해가 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며, 그림에서 대각선은 쇄파후의 파고를 선형적으로 감소시킨 모형의 결과이다.

그림 3.은 바닥경사에 따른 쇄파대내에서의 파고의 변화를 나타낸 것인데 해저의 경사가 작을수록 선형감소모형의 결과와는 큰 차이를 보이고 있는데 이때 더 많은 에너지의 감쇠가 발생한다.

그림 4.는 입사파의 입사각을 변화시키면서 파고를 계산한 결과인데 입사각이 증가할수록 쇄파점에서의 파고가 점점 작아지고 있는데 굴절에 의한 영향인 것으로 사료된다.

### 4. 결론

완경사방정식을 실수부와 허수부로 분리한 파랑방정식을 사용하여 쇄파대에서 파고의 변화를 수치해석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 본 해석에 사용된 모형은 쇄파대에서의 파고의 변화를 잘 예측하고 있음을 알 수 있으며 쇄파대에서의 파고는 비선형적으로 감소한다는 것을 확인하였다. 둘째, 해저경사가 쇄파발생후의 파고에 미치는 영향이 크며 해저경사가 완만할 수록 더 큰 에너지의 감쇠가 일어난다. 셋째, 쇄파발생 지점은 입사각과 관계가 적으며 거의 같은 수심에서 발생하며, 이때의 파고는 입사각이 증가할 수록 작아진다.

### 5. 참고문헌

1. Berkhoff, J. C. W., Computation of Combined Refraction-Diffraction, Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol.1, 1972, pp. 471-490.
2. Dean, R. G., and Dalrymple, R. A., Water Wave Mechanics for Engineering and Scientists, Prentice Hall, 1984.
3. Ebersole, B. A., Refraction-Diffraction Model for Linear Water Waves, J. of WPCOE, ASCE, Vol.111, NO.6, November, 1985, pp. 939-953.
4. Horikawa, K., Nearshore Dynamics and Coastal Processes, Univ. of Tokyo Press, 1988.
5. Kirby, J. T., and Dalrymple, R. A., Modeling Waves in Surfzones and Around Islands, J. of WPCOE, ASCE, Vol.112, No.1, January, 1986, pp. 78-93.
6. US Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, 1984.

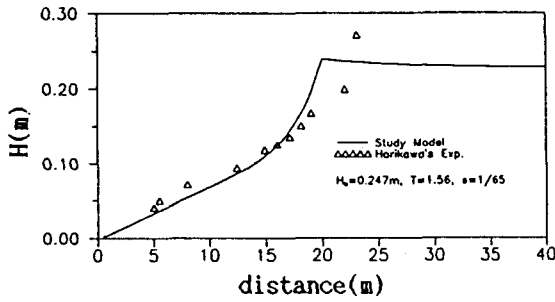
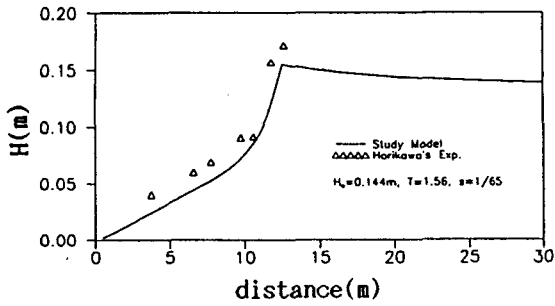


그림 1. 수치결과와 실험결과(Horikawa, 1966)와의 비교  
(a)  $H_o=0.144m$  (b)  $H_o=0.247m$

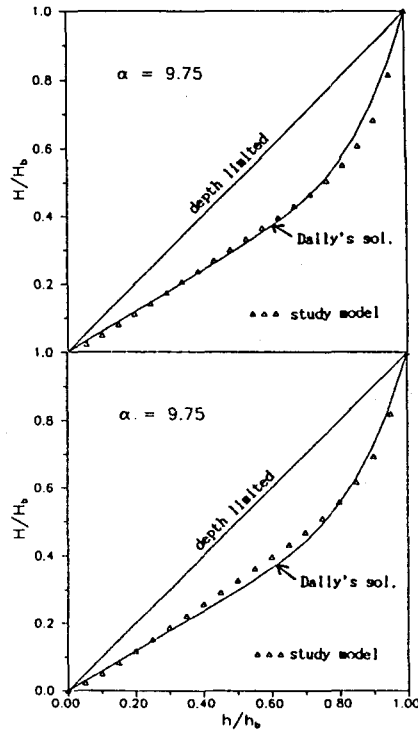


그림 2. 쇄파대내에서의 파고분포  
(a)  $H_o=0.144m$  (b)  $H_o=0.247m$

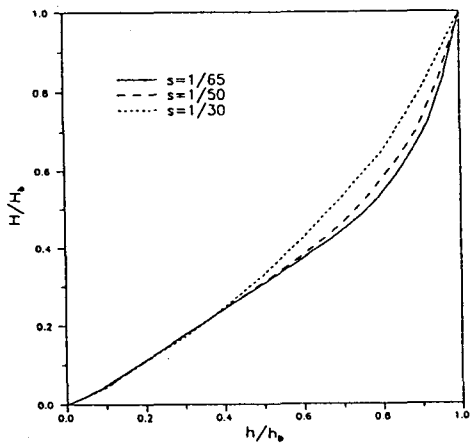


그림 3. 해저경사에 따른 쇄파파고

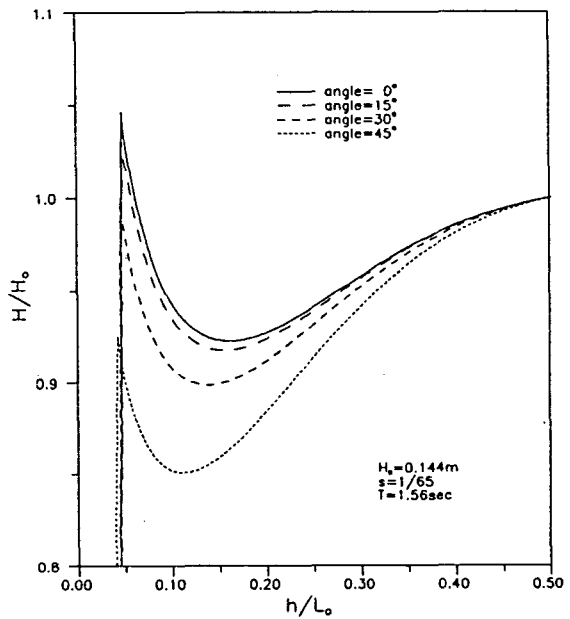


그림 4. 입사각에 따른 파고의 분포