

이동상에서의 파랑변형해석을 위한 고찰

*김규한, **육운수, ***홍성준, ****편종근

1. 서론

일반적으로 외해로부터 천해를 향해 전파되는 파랑은 천수변형(shoaling), 굴절, 회절, 반사등과 같은 에너지손실을 수반하지 않는 변형과 내부점성, 저면마찰, 쇄파처럼 에너지손실을 수반한 변형을 거쳐 비로소 해안선에 도달하게 된다. 더우기 실제의 해변처럼 저면이 모래등으로 덮혀진 이동상에서의 파랑변형일 경우, 파의 작용에 의해 저면형상이 끊임없이 변화하기 때문에 파와 저형과의 상호작용에 기인한 특수한 현상이 나타난다.

이같은 이동상에서의 파랑변형을 정확히 평가한다는 것은 해빈지형변동의 해석에 무엇보다도 기본적인 문제이지만 아직 이동상에서의 파랑변형을 정확히 재현시킬 수 있는 평가방법은 확립되어 있지 않은 실정이다. 이동상에서의 파랑변형을 정확히 평가하기 위해서는 우선 임의해저지형상에서의 파랑변형을 무엇보다도 잘 재현하는 계산방법을 선택할 필요가 있다. 따라서 본고에서는 여러 파랑변형모델 중에서 주로 Energy-flux 모델을 중심으로 임의지형상에서의 파고변화와 평균수위의 변동을 구하고, 이동상에서의 실험결과와 비교하여, 양자가 어떠한 대응을 하고 있는지를 고찰해 보았다.

2 쇄파변형

2.1 이차원쇄파변형의 기초식

쇄파대의 파랑변형을 기술하는 Energy 평형방정식 및 평균수위변동에 관한 운동량평형식을 살펴보면 다음과 같다.

2차원의 정상상태를 생각하면 유속의 평균류성분 (U , V)은 0으로 되고, 더욱이 시간항이 무시될 수 있으므로 에너지평형식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\frac{dF_x}{dx} = -D \quad (2.1)$$

여기에서 F_x 는 해안선 방향에의 Energy수송을 의미하고 있으며, 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$F_x = \rho \int_{-h}^{\eta} u_1' \left\{ \frac{1}{2} (u_1'^2 + w_1'^2) + gz + p/\rho \right\} dz \quad (2.2)$$

이 식은 Energy의 전달을 나타내는 식으로서, 미소진폭파이론을 적용하면 또 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$F_x = EC_g \quad (2.3)$$

$$E = 1/8 \rho g H^2$$

$$C_g = \text{군속도}$$

-
- * 김규한 관동대학교 토목공학과 조교수
** 육운수 관동대학교 토목공학과 교수
*** 홍성준 명지대학교 토목공학과 박사과정
**** 편종근 명지대학교 토목공학과 교수

식 (2.1)에서 우변은 저면마찰과 난류에 의해 발생하는 파동 Energy의 손실항이고 이차원의 정상 상태일 경우에는 다음처럼 표시된다.

$$D = - \overline{\int_{-h}^{\eta} (u_1' + u_1'') f_i dz} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ F_x' + \frac{1}{2} \rho \int_{-h}^{\eta} u_1' (3u_1''^2 + u_2''^2) dz + \int_{-h}^{\eta} \rho (u_1'' u_1' u_1'' + u_1'' u_2' u_2'' + u_1'' w' w'') dz \right\} \quad (2.4)$$

단 여기서 u' , w' 는 파동에 의한 수평연직방향의 유속성분이며, u'' , w'' 는 수평, 연직방향의 난류유속성분을 나타낸다. f_i 는 점성에 관한 식이고, F_x' 는 난류에 의한 파동에너지속으로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_i = \nabla \mu \cdot \nabla u_i$$

$$F_x' = \rho \int_{-h}^{\eta} u'' \left\{ \frac{1}{2} (u''^2 + w''^2) + gz + \frac{p}{\rho} \right\}$$

따라서 Energy손실항 D가 파의 조건에 의해 표시될 수 있다면 식 (2.1)과 식 (2.3)으로부터 쇄파 대내의 파고분포가 계산된다.

운동량평형식은 (2.5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = - \bar{\tau}_x \quad (2.5)$$

여기에서 $\bar{\tau}_x$ 는 x 축방향의 시간평균저면전단응력이고 S_{xx} 는 해안선방향에 작용하는 Radiation Stress 이다. S_{xx} 는 2nd Order의 항을 생략하면 다음처럼 표현된다.

$$S_{xx} = \overline{\int_{-h}^{\eta} \rho (u_1'^2 + P) dz} - \frac{1}{2} \rho g (h + \bar{\eta})^2 \quad (2.6)$$

위의 식에 대해 미소진폭파이론을 적용하면

$$\begin{aligned} S_{xx} &= E \left(\frac{1}{2} + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \\ &= E \left(2 \frac{Cg}{C} - \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2 기존의 연구

앞에서 논한 바와 같이 Energy평형식에서의 Energy flux는 임의의 파동이론이 주어지면 파의 조건에 따라 그 표현이 가능하지만 Energy 손실D는 쇄파대내의 난류와 파동과의 관계가 명확하게 되지 않는 한 계산이 불가능하다. 따라서 쇄파대내의 파고분포의 추정은 Energy 손실항D의 평가방법에 따라 크게 좌우된다고 할 수 있다. 이 손실항D에 대해서는 실험적, 이론적으로 여러 Model이 제안되어 있다.

Fuhrboter(1970)는 쇄파시, 공기혼입을 고려한 밀도를 이용하여

$$D = \rho g \frac{y^2}{2} \left(\frac{C^*}{1 - C^*} \right) \quad (2.8)$$

여기에서 y 는 단위면적당의 물의 높이

C^* 는 물에 공기가 혼입되었을때, 공기의 물에 대한 체적비를 제안하고 있지만, 이 Model은 계산결과와 실험결과가 잘 일치하지 않는 문제점이 지적되어 있다.

Battjes & Janssen(1978)은 쇄파후의 파의 전달을 단파(bore)에 유사시켜 전달응력항과 에너지 손실항을 표시하였다. 여기에서 a 는 상수이고 T 는 파의 주기를 나타낸다.

$$D = \frac{a}{4T} \rho g \frac{H^3}{d} \quad (2.9)$$

위의 식은 쇄파후의 파고변화에 대해 외해파형경사 및 사면경사의 영향이 쇄파대상사파라메타 (Surf similarity parameter)로서 도입될 수 있는 잇점을 지니고 있다.

Iwagaki, Mase(1981)는 Battjes의 Model을 수정하여 D 를 다음과 같이 표시하였다.

$$D = \frac{B}{4\gamma^3} \frac{\rho g}{T} H^2 \left(\frac{H}{d} \right)^4 \quad (2.10)$$

여기서, B 는 수심과 해저경사에 의한 상수이고, γ 는 파고와 수심의 비를 의미한다.

또한 Mizuguchi등(1978)은 쇄파시 발생하는 Energy손실을 주로 와점성에 의한 것으로 보고 다음식을 제안하고 있다.

$$D = \frac{1}{2} \rho g \nu (KH)^2 \quad \text{여기서 } K : \text{파수} \quad (2.11)$$

$$\nu = \nu_b \left((a - c'd) / \gamma d \right)^m \quad \nu : \text{와점성계수} \quad (2.12)$$

ν_b : 쇄파점에서의 와점성계수

a : 진폭

γ : 파고수심비

c' : 재성역에서의 파고수심비

m : 실험에 의해 결정되는 상수

Sawaragi등(1985)은 2次元 쇄파변형에 관한 실험결과에 기반하여 파랑 Energy 일산률 D 를 다음처럼 나타내고 있다.

$$D = CF \rho^{-1/2} d^{-3/2} E^{3/2} \quad C = 0.18 \quad (2.13)$$

$$E = \rho g H^2 / 8$$

윗식에서 F 는 파동에너지의 감쇠계수를 의미하며 다음식처럼 쓸 수 있다.

$$F = 5.3 - 3.30 \xi_0 - 0.07 S^{-1} \quad \xi_0 = S / \sqrt{H_0 / L_0}$$

여기서 ξ_0 는 쇄파대상사파라메타이며 S 는 바닥경사이다.

이외에도 Izumiya등(1983)의 난류이론을 이용한 에너지손실항의 표현방법등이 있다.

3. 파랑변형 해석방법

본고에서는 우선 Energy-flux방법중에서 Sawaragi등의 Model과 Iwagaki, Mase의 Model을 사용하여 임의지형에서의 파랑변형 및 수위변동을 계산하고자 한다. 해석방법을 간략히 요약하면 다음과 같다.

3.1 쇄파전의 파고변화

미소진폭파이론에 의하면 천수계수는 식 (3.1)로 주어진다.

$$K = \frac{H}{H_0} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \right]^{-1/2} \quad (3.1)$$

그러나 실제로는 파고는 어느 유한의 크기를 갖기 때문에 수심이 낮아지면 천수계수는 식 (3.1)과 다른 값으로 되어 급격히 증대한다. 이러한 유한진폭파이론에 의한 천수계수에 대해서는 Iwagaki 등의 Hyperbolic Wave, Shuto의 비선형장파이론에 의한 다음식 (3.2) 등의 연구가 있으나 여기서는 사용하기 쉬운 Shuto의 식을 그대로 준용하기로 한다.

$$\begin{aligned} \frac{gHT^2}{h^2} &\leq 30 && : && \text{식 3.1} \\ 30 < \frac{gHT^2}{h^2} &\leq 50 && : && Hh^{2/7} = \text{const} \\ 50 < \frac{gHT^2}{h^2} &&& : && Hh^{5/2} \left(\sqrt{\frac{gHT^2}{h^2}} - 2\sqrt{3} \right) = \text{const} \end{aligned} \quad (3.2)$$

또한 쇄파한계의 표시식으로서 고립파의 한계파고, Miche의 식, Goda의 식 등이 있으나 여기서는 Goda가 정리한 쇄파지표중에서 $H_b/h_b \sim h_b/L_0$ 의 곡선군을 수식화한 다음식을 수정하지 않고 그대로 사용하기로 한다.

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} g) \right\} \right] \quad (3.3)$$

3.2 쇄파후의 파고변화

쇄파후의 파고변화의 계산에는 앞서 기술한 바처럼 여러 방법이 있으나 여기서는 Sawaragi 등 (1985)의 모델과 Iwagaki, Mase의 모델을 둘다 사용하여 각각 계산하고자 한다.

3.3 평균수위의 변화

쇄파후의 파고변화는 동시에 수위변화에 관련하고 있다. Longuet-Higgins와 Stewart(1962)는 이 수위변화의 현상이 Radiation Stress에 의해 발생된 즉 파가 전달될 때에 파의 진행방향에 운동량의 수송을 수반함에 따라 생기는 응력이고 파고의 2승에 비례하는 것을 명확히 했다. 이 이론으로부터 다음식이 유도된다.

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = - \frac{1}{(h + \bar{\eta})} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{8} H^2 \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3.4)$$

위식으로부터 파고가 증대하는 영역에서는 평균수위가 하락, 역으로 파고가 감소하는 영역에서는 평균수위가 상승한다. 여기서는 위식으로부터 얻어진 평균수위변동량에 0.6배하여 계산했다.

4. 해석결과 및 고찰

앞서 논한 계산방법에서 구한 2개의 Model의 계산결과와 이동상실험결과와의 비교는 다음의 그림 1 ~ 그림 4 처럼 나타난다. 실험치는 이차원조파수조에서 실시된 이동상실험의 실험결과 중 조파후 1시간뒤의 파고분포와 평균수위의 측정치를 사용했다. 계산치는 임의지형(이동상실험에서의 1시간 후의 지형)에서 계산된 결과이다. 파형경사가 비교적 작은 그림 1과 그림 2의 결과를 우선 살펴보면 파고계산결과에 있어서 실험치와 계산치 모두 잘 일치하고 있으나, 수위변동에 있어서는 쇄파 후 거리에 따라 차이가 커짐을 알 수 있다. 그림3 과 그림 4는 비교적 파형경사가 클 경우의 결과로서 파형경사가 작을 때보다 서로의 차이가 약간 크게 나타나며 쇄파직후의 수위변동에 있어서는 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 계산에 적용한 두모델은 서로 경향이 거의 일치하고 있다. 이상의 계산결과는 실험된 얻어진 임의지형을 계산의 수심입력치로 설정하여 구한 값이다. 바꿔말하자면 이 또한 고정상에서의 파랑변형해석이라 할 수 있다. 이처럼 임의지

형을 입력치로한 계산결과와 이동상실험에서 얻어진 실험결과가 일치하지 않는 이유는 이동상에서의 소류사 또는 부류사의 운동이 계산에는 고려되지 않았다는 것이 주원인이라 사료된다. 특히 쇄파이후의 수위변동이 표사이동과 깊은 관계가 있음을 암시해 주는 결과라 할 수 있다. 이와 같은 차이는 이동상에서의 소류사와 부류사의 운동에 따른 파고감쇠효과를 계산에 고려함으로써 대폭 줄어 들 수 있으며, 그 이외에 저면의 공극, 마찰등의 효과도 차이를 줄여 줄 수 있는 요소로서 기대된다. 이후 이동상에서의 저부전단력의 표현방법과 쇄파한계에 관하여 보다 다각적인 검토를 통해 이동상에서의 파랑변형모형을 개량해 나가고자 한다.

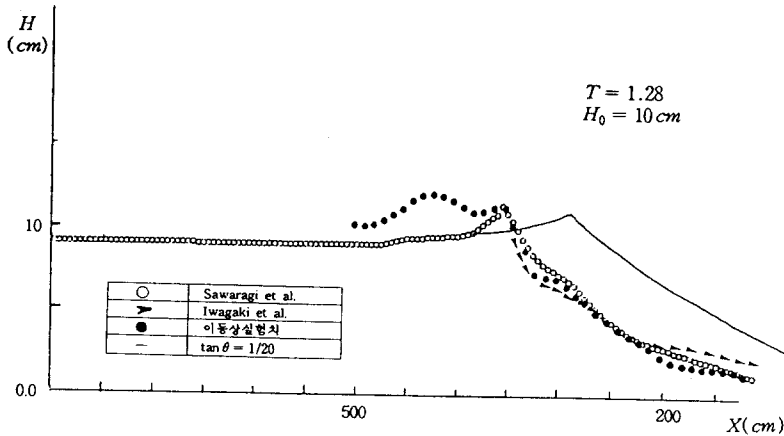


그림 1 파고계산결과

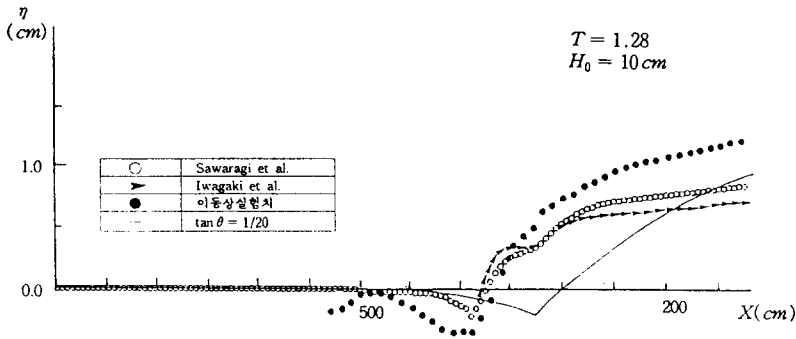


그림 2 수위계산결과

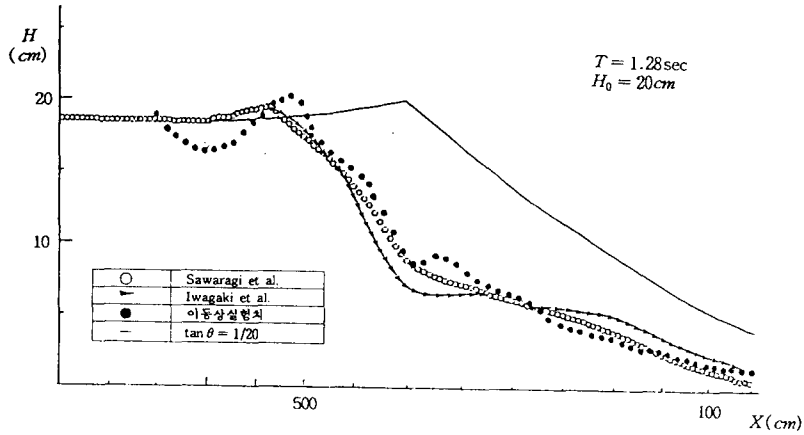


그림 3 파고계산결과

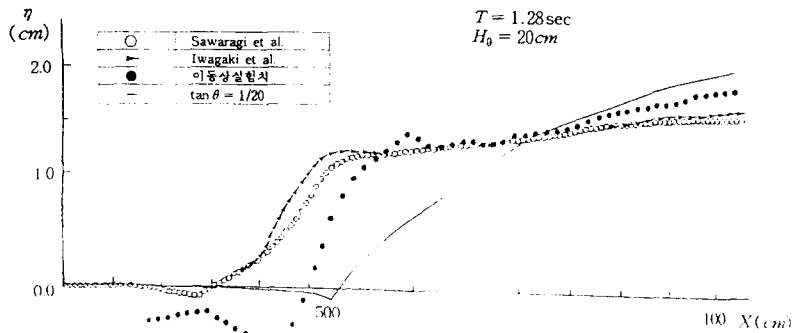


그림 4 수위계산결과

참고문헌

Fuhrboter, A., "Air Entertainment and Energy dissipation in Breaker", Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng., Vol. II, 1970

Battjes, J. A., and Janssen, J.P.F.M., "Energy Loss and Setup due to Breaking of Random Waves", Proc. of 16th Conf. on Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, 1978

Iwagaki and Mase, "不規則波の浅海變形モデル", 第28回 海岸工学 講演會 論文集, 1981

Mizuguchi, M., "An Heuristic Model of Wave Height Distribution in Surf Zone", Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1978

Sawaragi et al., "波および沿岸流共存場における水平混合係數および波向の推定法について", 第32回 海岸工学 講演會 論文集, 1985

Izumiya, T., and Horikawa, K., "Wave Energy Equation Applicable in and outside Surfzone", Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, 1984

Lonuet-Higgins, M. S. and Stewart R. W., "Radiation Stress in Water Waves, A Physical Distribution, with Application", Deep Sea Research, Vol. II, 1962