

잉여응력의 수평대류항이 평균수면변화에 미치는 영향

Effect of Advective Term in Radiation Stress on Set-Up/Set-Down in Surf Zone

李 正 烈*

1. 緒 論

기존의 잉여응력이 제시하던 쇄파후 수평변위의 갑작스런 상승은 실험결과와 비교하여 잘 맞지 않고 있어 그원인을 규명하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔으나 아직 그 뚜렷한 원인을 발견하지 못하고 있는 형편이다. Bowen (1968)은 쇄파대내에서 파고가 수심에 비례하다는 Miche's criterion을 이용하여 평균수면변위를 산정하였고 Svendsen (1984)은 실험결과를 토대로 잉여응력에 surface roller를 고려함으로써, 그리고 국내에서는 최근에 송등 (1993)에 의하여 Svendsen의 그 잉여응력의 표현식을 수정함으로써 실험치와의 접근을 피하였다.

Lee and Wang (1993b)은 그들이 제시한 파고의 이론식을 토대로 set-up/down의 이론적 접근을 피하였는데 쇄파선 후 평균수면은 급격한 상승보다는 점진적인 하강 후 상승을 보여 실험치와 유사한 결과를 제시한 바 있다. 그러나 운동량보존을 통한 그동안의 접근은 다음 두가지 오류를 범하고 있기 때문에 이론적 개선의 어려움을 겪고 있는 것으로 사료된다. 첫째, streaming velocity에 기인한 해안선 방향의 저면 마찰력의 영향을 무시하거나 또는 그에 대한 중요성의 인식 부족이고 둘째, 유도된 잉여응력에 물리적으로 중요한 항이 유도과정에서 고려되지 않고 무시된 데에 따른 것으로 보인다. Lee (1993)는 파랑-평균된 운동방정식으로부터 streaming velocity의 존재를 확인한 바 있으며 Lee and Wang (1993a)은 기존의 잉여응력에 수평대류항이 추가되어야 한다는 것을 에너지 식과의 비교를 통하여 확인 시킨 바 있다. 본 연구에서 그 새로 추가된 항이 그동안 실험치와 불일치한 결과를 낳은 분명한 원인임을 제시한다.

2. 摩 擦 力 的 推 定

Hwung and Lin (1990)은 해빈 傾斜가 波의 進行方向과 反對이고 亂流에 의한 外海쪽으로의 흐름이 存在함에도 海岸쪽으로 흐르는 매우 얇은 境界層이 存在한다는 것을 實驗으로 立證하였다. 따라서 本 研究에서는 그 얇은 境界層이 streaming velocity에 의한다고 假定하여 그에 의한 흐름도 摩 擦 力에 考慮한다.

底面 平均流速 u_b 는 streaming velocity와 return flow 두 成分으로 나뉜다고 假定하고 return flow의 垂直 分布가 一定하다면 저면에서의 流速은 그 두 成分의 합으로 海岸쪽으로 흐른다.

* 韓國海洋研究所 海洋工學研究部(Ocean Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

$$u_b = \frac{1}{16} C \left(\frac{H}{d} \right)^2 \quad (1)$$

파랑이 존재하는 영역에서 약한 유속에 의한 마찰력은 Longuet-Higgins (1970)에 의해서 제의된 다음 식으로부터 추정된다.

$$\tau_f = \rho F |u_{orb}| u_b \quad (2)$$

따라서 저면에 작용하는 전단력은 海岸쪽으로 작용하며 다음과 같이 근사적으로 추정될 수 있다.

$$\frac{\tau_b}{\rho g} \approx \frac{F}{32} H \left(\frac{H}{d} \right)^2 \quad (3)$$

3. 平均 水面變化의 새로운 理論式

다음 運動方程式으로부터 1) streaming velocity의 존재를 또한 확인하고 2) set-up에 대한 새로운 이론을 제시하고자 한다. 파가 횡방향으로 입사하고 이안류의 수직분포가 일정하다고 가정하여 정상상태에서 다음 근사식을 얻는다.

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} Q_x) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + gd \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\tau_b}{\rho} = 0 \quad (4)$$

위에 주어진 유량, Q_x 와 유속 \bar{u} 는 연속방정식으로부터 구해지며 진행파의 선형파 이론에 의하여 각각 $gH^2/8C$ 과 Q/d 이며 잉여응력은 천해영역에서 Lee (1993)와 Lee and Wang (1993a)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$S_{xx} = \left[\frac{3}{2} + 2 \frac{u_s}{C} \right] \rho g \frac{H^2}{8} \quad (5)$$

여기서 u_s 는 파의 쇄파 현상으로 발생된, 연안쪽으로 향하는 평균수면에서의 평균유속이다. 천해에서 $C = \sqrt{gd}$ 이라 가정하고 이들을 대입하고 $H = kd$ 로 가정하고 이를 대입하여 다음을 얻는다.

$$d \frac{\kappa^3 F + \kappa^4 \alpha + 12\kappa^2 \alpha}{32} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_s}{\sqrt{gd}} \frac{H^2}{4} \right) + d \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

여기서 α 은 $\partial d / \partial x$ 로서 음수이다. Lee (1993)에 의하면 $v_s H$ 는 쇄파대내에서 일정하므로 둘째 항은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_s}{\sqrt{gd}} \frac{H^2}{4} \right) = d \frac{u_s}{\sqrt{gd}} \frac{\kappa^2 \alpha}{8} \quad (7)$$

이 되고 따라서 식 (6)에 대입하여,

$$\frac{\kappa^3 F + \kappa^4 \alpha + 12\kappa^2 \alpha + 4u_s' \kappa^2 \alpha}{32} + \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

여기서 $u_s' = u_s / \sqrt{gd}$ 이다. 지금까지 set-up을 추정하는 데 저면마찰과 수평대류항 그리고 u_s 에 대한 항의 영향을 무시하였는데 그렇게 구한 set-up이 실제 실험치와 비교하여 잘 일치하지 않았다. 우선 그 불일치가 우세한 쇄파대 내 쇄파선에 가까운 천이 영역 (transition region)에서 식 (8)를 조사한다. 실험결과로부터 천이 영역에서 u_s/C 는 $O(10^{-1})$ 이고 둘째항의 평균수면의 변화가 거의 없으므로 무시할 수 있다. 그러므로 식 (8)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\kappa^3 F + \kappa^4 \alpha + 12\kappa^2 \alpha \cong 0 \quad (9)$$

여기서 $\kappa = O(1)$ 이고 α 은 음수이므로 streaming velocity 에 의한 저면마찰항이 없다면 식 (9)는 만족될 수 없다. 따라서 어떤 형태로든 연안쪽으로의 저면유속이 천이영역에서의 평균수면의 변화를 일으키지 않는 근본 원인인 것으로 지적될 수 있다. F 와 κ 가 쇄파대에 걸쳐 일정하다면 식 (6)에서 첫째항을 무시하고 set-up의 새로운 이론을 제공하는 다음식을 얻는다.

$$\frac{u_s H}{4\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H}{\sqrt{d}} \right) + d \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

지금까지 $H = kd$ 이라는 가정을 토대로 단지 식 (6)의 첫째항이 서로 상쇄될 수 있다는 것을 보였고 이 후 식 (10)에 주어진 set-up에 대한 지배방정식의 여러 가능한 이론적인 해를 제시하고자 한다.

첫번째 접근 방법은 지금까지 하였던듯이 $H = kd$ 라는 가정을 식 (14)에도 적용하여 set-up의 해를 구한다. 따라서 식 (10)은

$$\frac{\kappa u_s H}{8\sqrt{g}} d^{-3/2} + \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial d} = 0 \quad (11)$$

이 되고 $d \cong h$ 로 가정하여 다음과 같은 무차원 set-up의 분석적인 해를 제공한다.

$$\bar{\eta}'(h') = 2c_1(h'^{-1/2} - 1) + \bar{\eta}'(1) \quad (12)$$

여기서 $c_1 = \kappa u_s H / 8\sqrt{gh_b} H_b$ 으로 쇄파지점에서의 값으로 결정되는 무차원 상수이며 수심과 set-up은 각각 $h' = h/h_b$ 과 $\bar{\eta}' = \bar{\eta}/H_b$ 으로 무차원 된다.

수심 h 가 적은 지역에서 $d \cong h$ 라는 가정이 유효하지 않으므로 이러한 모순을 극복하기 위한 노력으로 식 (10)의 둘째항의 피미분치의 d 만에 $d \cong h$ 라는 가정을 적용하고 u_s 에 대해 李 및 王 (1993)이 제시한 표현 $u_s = \beta_0 \sqrt{gh_b} (\beta - \sqrt{h'})$ 을 이용한다.

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\kappa^2 u_s}{4\sqrt{g}} \frac{\partial \sqrt{d}}{\partial x} = 0$$

$$\Rightarrow \bar{\eta}(x) = -\frac{\kappa^2 \beta \sigma}{4} \int_x^{x_b} (\beta \sqrt{h_b} - \sqrt{h}) \frac{\partial \sqrt{h}}{\partial x} dx + \bar{\eta}(x_b)$$

$$\text{그러므로 } \bar{\eta}'(h') = c_2 [2\beta(1 - \sqrt{h'}) - (1 - h')] + \bar{\eta}'(1) \quad (13)$$

여기서 $c_2 = \frac{\kappa \beta \sigma}{8}$ 이다. Figure 1에 식 (12)과 (13)의 계산 결과가 실험자료와 비교 제시되었다. 수평대류항을 근거로 한 이론치는 천이영역에서 만족할 만한 결과를 제공하고 있는 것으로 보인다.

4. 結 論

쇄파대 내 쇄파선에 가까운 천이 영역 (transition region)에서 실험자료는 일정한 set-down을 유지함에도 지금까지의 이론치는 급격히 상승하는 모순을 보여 왔다. 본 연구에서는 이러한 모순을 Lee and Wang (1993a)이 제시한 잉여응력을 이용하여 개선하였다. 천이영역에서의 실험자료를 만족시켜주기 위하여는 기존의 잉여응력이 해안선으로 작용하는 streaming velocity에 의한 저면 마찰력과 균형을 이루어야 하며, 따라서 κ 와 F 가 쇄파대내에서 일정하다면 set-up/down은 평균수면 수평대류항에 의하여 오직 영향받을 수 있다. 제시되는 식 (12)와 (13)의 이론치는 실험치와 비교하여 천이영역에서 만족할 만하고 식 (13)은 쇄파대 전영역에서 대체로 만족할 만한 결과를 얻고 있다.

본 연구에서는 편의상 쇄파대내에서 κ 와 F 값이 일정하다 가정하였으나 앞으로 실험을 통하여 그 값들의 특성을 조사함으로써 좀 더 자세한 접근이 요구된다. 그리고 쇄파대내에서 파랑의 비선형성은 무시될 수 없으므로 잉여응력의 계산시 비선형성이 고려되어야 할 것이다. 본 연구 결과 천이 영역에서 비선형성이 큰 문제가 되는 않는다고 생각하나 천이영역 이후는 비선형성이 그 영향을 발휘할 수 있을 것이다.

參考文獻

- 金京鎬, 車基旭, 曹在熙, 尹永鎬, 1993. 라디에이션 응력의 평가방법에 따른 평균수위변화. 한국해안·해양공학회지, 5(4): 263-270.
- Bowen, A.J. 1969. "The generation of longshore currents on a plane beach," *J. Marine Res.*, 37:206-215.
- Hwung, H.H. and Lin, C. 1990. "The mass transport of waves propagating on a sloping bottom," *Proc. 22nd ICCE, ASCE*, pp.544-556.
- Lee, J.L., 1993. "Wave-current interaction and quasi-3D modelling in nearshore zone," Ph.D. Dissertation, Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida, Gainesville.
- Lee, J.L. and Wang, H. 1993a. "Mathematical model for 3-dimensional circulation in surf zone," *The Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 5(4):369-383.
- Lee, J.L. and Wang, H. 1993b. "New approach for surf zone dynamics," *The Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 5(4): 384-394.

Longuet-Higgins, M.S. 1970. "Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, I," *J. Geophys. Res.*, 75(33): 6778-6789.

Miche, M. 1951. "The reflecting power of maritime works exposed to action of the waves," *Annals of the Highway Dept.*, National Press, France.

Visser, P.J. 1991. "Laboratory measurements of uniform longshore currents," *Coastal Eng.*, 15: 563-593.

COMPARISON BETWEEN THEORIES AND EXPERIMENTS

