

- Svendsen, I.A., Qin, W. and Ebersole, B.A. (2003). Modelling Waves and Currents at the LSTF and Other Laboratory Facilities. *Coastal Engineering*, 50(1), 19-45.
- Xia, H., Xia, Z. and Zhun, L. (2004). Vertical Variation in Radiation Stress and Wave-Induced Current. *Coastal Engineering*, 51(4), 309-321.
- Xie, L., Liu, H. and Peng, M. (2008). The Effect of Wave-Current Interactions on the Storm Surge and Inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989. *Ocean Modelling*, 20(3), 252-269.
- Xie, M. (2011). Establishment, Validation and Discussions of a Three-Dimensional Wave-Induced Current Model. *Ocean Modelling*, 38(2), 230-243.
- Wikramanyake, P.N. and Madsen, O.S. (1994). Calculation of Moveable Bed Friction Factors. Technical Report DACW-39-88-K-0047, Coastal Engineering Research Center, UACE.

부록. Xia et al.(2004) 파랑응력 검토

Xia et al.(2004)은 Navier-Stokes 방정식을 파랑주기에 대해 평균화하는 방법으로 3차원 파랑응력을 구하였는데, 본 단원에서는 이의 특성을 검토하고자 한다. 국내에서는 Lee (2008)가 해빈류 계산에서 이를 이용한 바 있다. 그리고 Xie et al.(2008)은 폭풍해일 계산에 이를 이용하였고, 이를 따라 Chun et al.(2009)도 폭풍해일 계산에 이를 도입한 바 있다. 먼저, Xia et al.(2004)의 파랑응력에서 해안선 법선방향의 파랑응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{xx, x04}(\sigma) = \frac{Ek}{\sinh 2kD}(\cosh 2kD(1+\sigma) + 1)\cos^2\theta - \frac{Ek}{\sinh 2kD}(\cosh 2kD(1+\sigma) - 1) - E\frac{\sigma}{D} + \frac{Ek}{\cosh kD}((1+\sigma)\sinh kD(1+\sigma)) - E\left(1 - \frac{\cosh kD(1+\sigma)}{\cosh kD}\right) \quad (A.1)$$

이의 심해역 근사($kD \rightarrow \infty$)는 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$S_{xx, x04}(\sigma) = -Ek\exp(2kD\sigma)\sin^2\theta - \frac{E(1+\sigma)}{D} + Ek(1+\sigma)\exp(kD\sigma) + \frac{E}{D}\exp(kD\sigma) \quad (A.2)$$

파랑이 해안선에 대해 법선방향으로 접근할 때, 식 (A.2)의 바닥에서의 연직방향 경사는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial S_{xx, x04}}{\partial \sigma} = -\frac{E}{D} + Ek\exp(-kD) + Ek^2D(1+\sigma)\exp(-kD) + 2Ek\exp(-kD) \quad (A.3)$$

심해역 근사에서는 $kD \rightarrow \infty$ 이므로, 식 (A.3)는 다음과 같은 식으로 근사된다.

$$\frac{\partial S_{xx, x04}}{\partial \sigma} = -\frac{E}{D} \quad (A.4)$$

심해역 파랑은 수심 방향에 대해 파장의 1/2 되는 지점 아래부터는 거의 무시할 정도로 작아짐에도 불구하고(Dean and Dalrymple, 1991), 식 (A.4)에 의하면 파랑응력의 경사가 0이 아니기 때문에 물리적 현상과 잘 맞지 않는 부분이 있다. 하지만 심해역 폭풍해일 계산에서는 파랑에너지에 비해서 수심이 매우 깊기 때문에 파랑응력의 연직 경사는 결국 0이 된다. 이 외에 해빈류 현상이 보통 천해역에서 발생하기 때문에 위의 같은 현상이 크게 의미 없어 보인다. 그러나, 불규칙 파랑에 대한 해빈류를 계산할 때에는 고주파 성분의 파랑에 의한 파랑응력은 심해역 조건으로 계산되는 경우도 있어 이것이 문제되기도 한다.

한편, 천해역 파랑이 해안선에 대해 법선방향으로 입사할 경우, 식 (A.1)의 네 번째 항은 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{Ek}{\cosh kD}((1+\sigma)\sinh kD(1+\sigma)) \approx \frac{E(kD)^2}{D} \approx 0 \quad (A.5)$$

식 (A.5)의 관계를 고려하면, 천해역 파랑($kD \rightarrow 0$)에서의 $S_{xx, x04}$ 는 다음과 같이 근사된다.

$$S_{xx, x04}(\sigma) = \frac{E}{D}(1-\sigma) \quad (A.6)$$

식 (A.6)를 이용하여 천해역 파랑이 해안선에 법선방향으로 입사할 때에 대한 해향저류에 대한 운동방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial U_L D}{\partial t} + \frac{\partial U_L D}{\partial x} + \frac{\partial U_L \Omega_L}{\partial \sigma} = -gD \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{\partial D S_{xx, x04}}{\partial x} \quad (A.7)$$

여기서, U_L : 라그랑지형 해안선 방향의 유속, Ω_L : 라그랑지형 해빈류 모형의 가연직속도

식 (A.7)에 따르면, 천해역 파랑 조건에서 해향저류에 대한 파랑의 힘은 $-\partial E/\partial x(1-\sigma)$ 과 같다. 쇄파대내에서는 파랑에너지가 감소하므로, 파랑에 의한 힘은 해안선 방향으로 작용한다. 여기서 주목할 것은 이 힘은 평균 해수면보다 해저면에서 크게 되는데, 이는 해향저류의 연직 분포와 반대된다. 실제로 Xia et al.(2004)에 제시된 해향저류 계산은 실제 물리적 현상과 반대 방향으로 작용하고 있는데, 식 (A.6)의 수직 분포로 볼 때, Xia et al.(2004)의 실제 계산된 결과를 그대로 반영하고 있는 것으로 보인다. 즉, Xia et al.(2004)의 계산결과는 단순한 착오가 아닌 것으로 보이며 해빈류 계산에 사용하지 않는 것이 타당해 보인다.

Received 18 November, 2017

Revised 21 December, 2017

Accepted 22 December, 2017