

근해역에서의 파동계와 쇄파로 인한 연안유동계의 추계학적 특성
Statistical Properties of Nonlinear Random Waves and its Breaking Induced Currents within
the Nearshore of Uniform Slope

조용준*, 류하상**, 황규남***

서론

최근 근해역에서의 파랑 변형구조를 결정론적인 시각에서 설명하고자 하는 노력이 수행되어 큰 성과를 이룬 것으로 보여진다 (Yoon 1987, Cho 1995). 그러나 심해에서의 입사파랑이 비교적 협대역에 분포한다 하더라도 진행과정에서 성분파랑의 파랑수가 수심변화로 인해 Phillips (1977) 가 지정한 대로 resonance triad 에 포진할 경우 침두 주파수 인근의 파랑에너지가 양단으로 전이되는 현상이 발생하게 된다. 따라서 파랑에너지가 분포하는 주파수 대역은 증가되며 이러한 경우 추계학적인 기술방법이 불가피하다. 비교적 해석이 용이한 수심이 일정한 천해역의 경우 1980년에 Tayfun이 파랑 에너지가 비교적 협대역에 분포할 때 무작위 파열은 Stokes 파랑과 유사한 형태로 표현될 수 있다는 사실을 증명하여 비선형 무작위 파열 해석은 큰 전기를 맞이 하였다. 그 후 비선형 무작위 파열의 많은 추계학적 특성들이 규명된 바 있다. 그러나 대부분의 연구들은 협대역 분포라는 가정을 토대로 수행된 것으로 모두에서 지정한 대로 실제 자연계에서 관측되는 현상을 정확하게 설명할 수 없다. 수심변화가 존재하는 천해역의 경우 무작위 파열을 구성하는 성분 파랑간의 비선형 상호간섭에 의한 에너지 전이현상을 Peregrine 의 초기 Boussinesq equation 과 최근 적용범위가 심해쪽으로 확대된 비선형 파랑모형을 통해 해석하고자 하는 시도가 Kirby (1995, 1996) 등에 의해 이루어져 부분적인 성과를 거둔 것으로 보여진다. 이 연구에서 Kirby는 이러한 파랑모형 상의 해수위 변위를 Complex Fourier 급수로 전개하여 각 성분파랑에 대한 기본방정식을 제시하였다. 수심변화가 존재하는 천해역 내에서 무작위 파열의 spectrum 형태를 결정하는 역학구조는 쇄파로 인한 공진 형태의 비선형 상호간섭에 의한 성분 파랑간의 에너지 전이 현상인 것으로 인식되고 있다. 에너지 전이시 조화성분의 진폭은 완만히 변조하게 되는 데 同調 조화성분으로 에너지가 전이될 경우 파봉은 첨예해지며 파곡은 알아진다. 반면 不同調 조화성분으로 에너지가 전이될 경우 swash 역에서 흔히 보고되는 것처럼 해수위는 툽니의 치아 모양을 띄게 되며 파형 선단부와 후단 부의 비대칭성은 심화된다. Kirby는 급수전개식 중 Nyquist 주파수 할까지 포함할 경우 제측 치의 파봉이 첨예해지고 파곡이 알아지는 정도를 나타내는 왜곡도와 파형 선단부와 후단부의 비대칭을 재현할 수 있다고 보고한 바 있다. 그러나 Kirby가 적용한 Boussinesq형태의 파랑모형은 분산성과 비선형성간에 균형이 존재한다는 가정하에 제안되었으며 수치 해석시 급수 전개식 중 고차항의 절삭이 불가피하여 파랑에너지가 장 대역에 분포하는 경우 무작위 파열의 통계특성을 유지하기는 어려운 것으로 보인다. 연안류 해석은 Longuet-Higgins (1970)에 의해 시작되어 그후 Battjes (1975, 1983)와 Wind (1986) 등이 단색 파를 대상으로 Thornton과 Guza (1986) 그리고 Larson과 Kraus (1991) 등이 무작위 파열을 대상으로 상당한 진척을 이룬 것으로 보여진다. 국지적으로 발생된 쇄파로 인해 먼저 난류 유동계가 야기되며 순차적으로 연안류가 형성된다. 따라서 연안류의 수치 해석시 와점성계수의 유동계 내에서의 변화는 반드시 설명 되어야만 한다. 와점성계수의 유동계 내에서의 변화를 설명하기 위해서는 유동계의 특성 속도와 특성 길이의 산출을 위해 추가적으로 난류에너지, 손실률 혹은 특성길이에 대한 이송모형의 도입이 필요하다. 그러나 아직 정확한 이송모형 산출에는 많은 이견이 있어 이들 모형상의 제상수의 정확한 산출에 많은 연구가 수행되고 있다 (Yoo, 1994). Kolmogorov와 Prandtl 이 난류 유동계와 기체의 운동학적 특성과의 유사성에 준거하여 Boussinesq 와점성계수를 난류 유동계를 대표하는 특성속도와 특성길이에 의해 결정할 것을 제안한 이후 Boussinesq 와점성계수 모형은 가장 일반화된 난류모형인 것으로 보여진다. Corrsin (1957)과 Bradshaw (1969)는 Kolmogorov와 Prandtl이 제시한 특성길이는 유체분자가 분자간의 충돌로 과거 특성 치를 상실하게 되는데 이 때의 이동 거리 (free path) 를 의미하며 난류유동계에서는 이 이동거리가 기체와는 달리 상당한 규모로 난류유동계와

* 서울시립대 토목공학과 부교수 ** 서울시립대 토목공학과 대학원 *** (주) 대우 해운항만팀

기체의 운동학적 특성간의 상사성에 의문을 제시한 바 있으며 실제 하안과 하상에서의 조도가 서로 상이한 자연하천의 경우 국지적으로 유체내의 전단응력과 속도구배가 상이한 부호를 갖는 것으로 보고된 바 있다 (Rodi, 1984). 본 연구에서는 Oregon 주립대학 O. H. Hinsdale Wave Research Laboratory의 large wave tank (LWT)에서 연안수리 모형의 개발을 위해 수행된 SUPERTANK Laboratory Data Collection Project (Krauss et al., 1992)에서 축적된 실험자료를 사용하여 연안 유동계와 파동계의 추계학적 특성을 규명하여 연안수리분야의 가장 일반화된 난류모형인 $x-\varepsilon$ 모형의 타당성을 검토하고자 한다.

연안 유동계와 파동계의 기본이론

단조 해안의 경우 난류 특성 시간과 수심에 대해 평균된 운동량방정식은 해안선과 평행한 방향으로의 공간변화는 없으므로 정상 유동계의 경우 다음과 같다 (Mei, 1989).

$$0 = -g \frac{\partial E[\zeta]}{\partial x} - \frac{1}{\rho(E[\zeta] + h)} \frac{\partial}{\partial x} (E[S'_{xx}] + E[S'_{yy}]) \quad (1)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho(E[\zeta] + h)} \frac{\partial}{\partial x} (E[S'_{xy}] + E[S'_{yx}]) - \frac{1}{\rho(E[\zeta] + h)} E[\tau_B] \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 ρ , $E[\zeta]$, h , $E[S']$, $-E[S']$, $E[\tau_B]$ 는 각각 밀도, 평균 해수위, 수심, 파랑현상으로 인한 잉여 운동량 이송률 (radiation stress), 수심 평균된 Reynolds stress, 해저면 마찰력을 나타낸다. 쇄파대 내에서의 radiation stress에 대해서는 쇄파로 인해 야기되는 복잡한 난류 유동계로 인해 아직 뚜렷하게 밝혀진 바 없으나 Bowen (1969), Longuet-Higgins (1970a, b) 과 Thornton(1970)이 지적인 대로 선형이론을 원용하여 평가하면 다음과 같다.

$$S_{xx} = \frac{1}{2} \rho g A_b^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 A_b 는 무작위파열의 진폭이며 무작위변량의 변환기법 (Ochi 1992, Papoulis 1965)을 사용하면 radiation stress의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다

$$\begin{aligned} f_{S(s)} &= \left[f_{A_b}(\sqrt{\frac{2s}{\rho g}}) - f_{A_b}(-\sqrt{\frac{2s}{\rho g}}) \right] \left| \frac{dA_b}{dS} \right| \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\rho g s}} \left[f_{A_b}(\sqrt{\frac{2s}{\rho g}}) - f_{A_b}(-\sqrt{\frac{2s}{\rho g}}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 $f_{A_b}(A_b)$ 는 무작위 파열 진폭의 확률밀도함수이며 선형 무작위 파열의 경우 진폭은 Rayleigh 분포를 취하는 것으로 알려져 있다 (Ochi, 1992). 쇄파대 내에서의 radiation stress의 추계학적 특성을 규명하기 위해서는 식 (4)에서 알 수 있듯이 먼저 쇄파대에서 무작위 파열의 포락선이 측정된 해수면 변위로 부터 유도되어야 한다. 무작위 파열의 포락선에 대한 여러 모형 중 변환 과정에서 도입되는 왜곡이 적은 Rice와 Dugand의 모형을 사용하면 무작위파열의 포락선과 위상함수 (φ)는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta = A_B \cos \varphi \quad (5)$$

$$\widehat{\zeta} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta(t)}{t-\tau} dt$$

$$A_b = \sqrt{\zeta^2 + \widehat{\zeta}^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\hat{\zeta}/\zeta)$$

여기서 $\hat{\zeta}$ 는 해수면 변위에 대한 Hilbert 변환을 나타낸다. 식 (1)의 S' 항의 기인력인 쇄파로 인한 에너지 손실률 ε 은 와점성계수 ν 모형을 사용하면 다음과 같다.

$$\varepsilon = \rho h u \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[-\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \rho h u [-\nu u_x]_x \quad (6)$$

식 (6)에서 아래첨자는 미분 연산자를 의미하며 u 는 유속을 나타낸다. 쇄파 발생시 순 운동량 이송률은 음의 값을 갖게 되는 데 $-\nu u_x$ 는 순 운동량 이송률은 나타낸다. 와점성계수 ν 는 Zelt (1991) 등에 의하면 다음과 같다.

$$\nu = -l^2 u_x \quad (7)$$

$$l = B\gamma(h + \zeta) \quad (8)$$

식 (7)에서 혼합거리를 나타내는 데 사용되는 γ 는 2의 값을 갖을 경우 자연하천에서 도수폭을 정확히 재현하며 식 (8)의 B 는 다음과 같다.

$$B = \begin{cases} 1 & ; u_x \leq 2u_x^* \\ u_x/u_x^* - 1 & ; 2u_x^* < u_x \leq u_x^* \\ 0 & ; u_x > u_x^* \end{cases} \quad (9)$$

$$u_x^* = -0.3\sqrt{g/h} \quad (10)$$

식 (6), (7), (8), (9) 와 (10)은 수심 방향의 평균유속을 대표유속으로 한 질량 보존식에 근거하여 $u_x \approx -\zeta/h$ 로 근사하면 바로 파동계에 적용할 수 있으며 식 (7), (9)와 (10)은 다음과 같이 전환된다.

$$\nu = -B^2 \gamma^2 h^2 u_x \approx B^2 \gamma^2 h \zeta_t \quad (11)$$

$$B = \begin{cases} 1 & ; \zeta_t \geq 2\zeta_t^* \\ \zeta_t/\zeta_t^* - 1 & ; 2\zeta_t^* < \zeta_t \leq \zeta_t^* \\ 0 & ; \zeta_t < \zeta_t^* \end{cases} \quad (12)$$

$$\zeta_t^* = 0.3\sqrt{g/h} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \rho h u [-\nu u_x]_x = \rho \frac{\zeta}{h} (\nu \zeta_t)_t \quad (14)$$

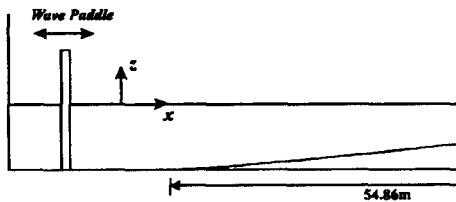


Fig. 1. Configuration of Flume and Location of Wave Gauges

실험자료의 분석

그림 (1)에 도시된 조파기에서 생성된 무작위 파열의 유의파고는 0.801 m , 첨두 파랑의 주기는

3 sec 이다. Gauge 1, 2, 3, 4 와 5 에서 16 Hz 간격으로 측정된 해수위 시계열 자료에 대해 Hanning window와 256 point에서의 Fast Fourier Transform algorithm을 이용해 spectral analysis를 수행하였다. Gauge 1 과 6 에서 측정된 해수위 시계열 자료와 측정된 해수위 자료로부터 산출된 wave envelope process 의 일부분을 그림 (2) 에 그림 (3)에는 Gauge 1 과 2 에서 산출한 wave envelope process의 일부분을 도시하였다. Gauge (1)과 (2)에서의 Ursell 수는 각각 2.56 과 25.97 이며 Ursell 수는 다음과 같이 주어진다.

$$U_r = (A/h)/(kh)^2 \quad (15)$$

식 (15)에서 k 는 파수를 나타내며 다음과 같은 분산관계식을 따른다.

$$k = \frac{\omega}{\sqrt{gh}} \left(1 + \frac{h\omega^2}{6g} \right) \quad (16)$$

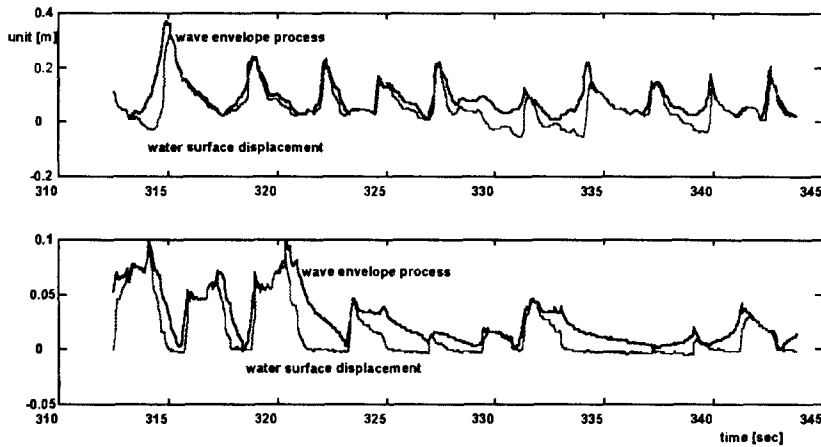


Fig. 2. Time Series of Water Surface Displacement and Corresponding Envelope Process at Gauge 1 and 6

식 (16)에서 ω 와 g 는 각각 주파수와 중력 가속도를 나타낸다. 일정한 수심의 경우 진폭변조는 Ursell 수의 증가 혹은 phase mismatch [=4/3U_r] 의 감소에 따라 심화되고 재현구간 (beat) 도 짧아지 나 본실험에서는 파랑에너지가 장대역 분포에 분포하고 그에 따라 주파수 분산성은 심화되어 명확한 결론을 도출하기 어려우나 Ursell수의 증가에 따라 진폭변조의 크기는 심화되었고 최대진폭 사이의 거리변화는 미약하였다. 그림 (4)에는 Gauge 1, 2, 3, 4 와 5 에서 산출한 스펙트럼을 도시하였다. 비선형 간섭에 의해 파랑에너지가 전이되는 양상을 보다 확연하게 나타내기 위해 Gauge 1, 2, 3, 4 와 5 에서 측정된 해수위 자료에서 평균 해수위의 증가량 즉 set up 되는 양을 소거한 후 스펙트럼을 산출하였으며 그 결과는 그림 (5)에 도시하였다.

결론

심해에서 생성된 무작위 파열이 천해역에 도달하면 수심의 변화와 공진성 비선형 간섭에 의해 많은 변화를 겪게 된다. 쇄파대 내에서 무작위 파열의 spectrum 형태를 결정하는 주된 역학구조는 공진 형태의 비선형 상호간섭에 의한 성분 파랑간의 에너지 전이현상인 것으로 인식되고 있다. 同調 조화성분으로 에너지가 전이된 경우 파곡은 알아지고 파봉은 첨예화 되어 쇄파대에서 파형의 선단부는 연직에 접근하며 종곡에는 파봉에서 쇄파현상이 발생된다. 이 때 연안방향으로의 잉여 운동량 이송은 상당량에 이르게 되어 종곡에는 연안류가 형성된다. 따라서 연안침식의 주 기인력으로 인식되고 있는 연안류의 정확한 모의를 위해서는 무작위 파열에서 발생하는 쇄파현상과 그에 따른 연안류의 난류특성 규명

이 선결과제라 하겠다. 본 연구에서는 보다 정확한 연안류 모형의 개발을 위해 자연계에서의 파랑현상에 보다 근접한 비선형 무작위 파열을 대상으로 쇄파대에서의 무작위파열의 통계특성을 수리모형실험

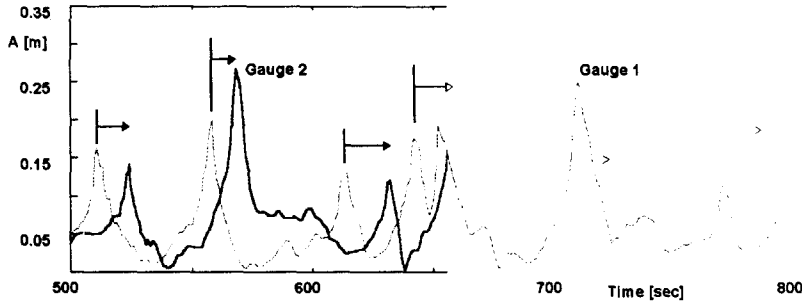


Fig. 3. Evolution of Wave Envelope Process at Gauge 1 and 2

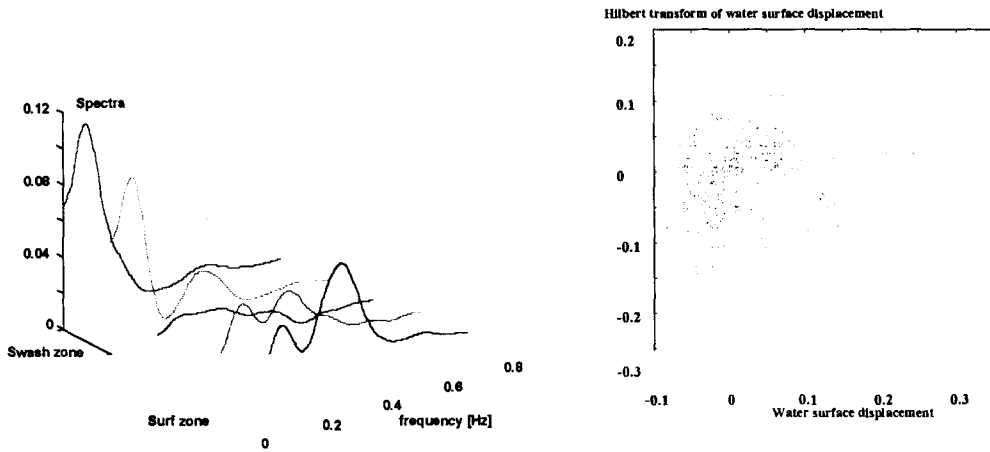


Fig. 4. (i) Spectra of Water Surface Displacement at Section 1, 2, 3, 4 and 5 without Set Up (ii) Trajectory of Water Surface Displacement in the Phase Space

을 통해 규명하였다. 연안역에서 평균 해수위는 쇄파대 이후 파의 진행방향으로 감소하는 radiation stress와 균형을 이루기 위해 증가하게 되는 데 이로 인해 위상은 선형과동계와는 달리 집중분포하게 된다. 쇄파대역에서 진폭의 표본공간은 천수현상과 그에 따라 심화되는 성분파광간의 공진성 상호작용으로 인해 보다 큰 값으로 구성되며 쇄파로 인해 진폭의 확률밀도함수에는 둔덕이 형성된다. 단발적으로 발생하는 쇄파의 특성상 쇄파로 인한 에너지 손실률 스펙트럼은 주파수에 따라 미약하게 변하며 쇄파로 인해 유발되는 큰 규모의 와동계는 수심에 의해 그 크기가 결정된다는 Battjes (1975)의 제언에 근거하여 쇄파로 인한 난류유동계의 유속 스펙트럼을 산출한 결과 저주파 대역과 고주파수 대역 사이에 inertial subrange가 존재하는 것이 관측되었다.

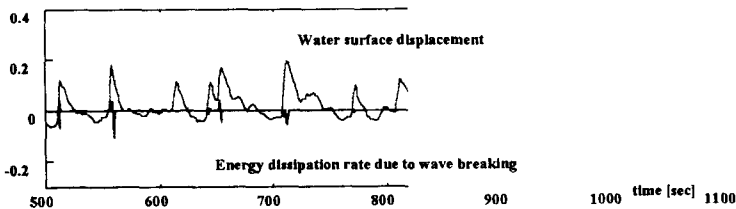


Fig. 5. Water Surface Displacement at Gauge 1 and its Computed Energy Dissipation Rate due to Wave Breaking ($\times 10^{-5}$)

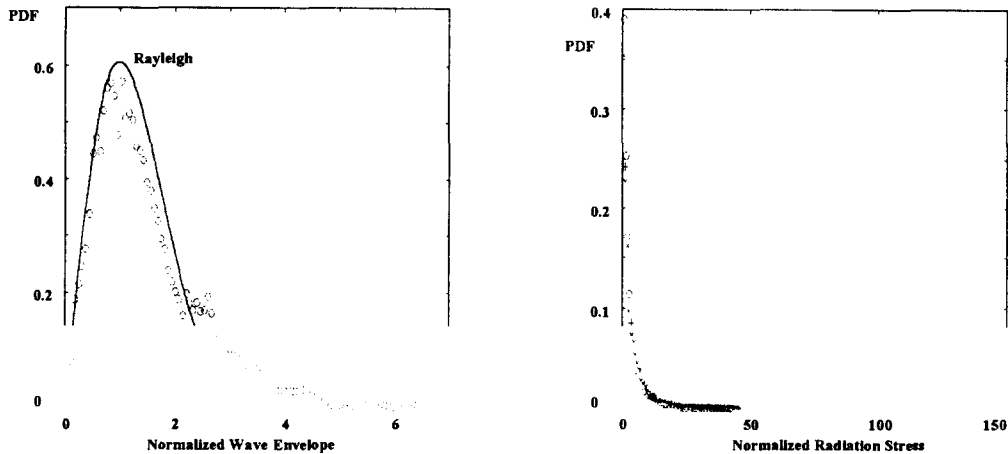


Fig. 6. (i) PDF of Wave Envelope Process at Gauge 1 with its Linear Counterpart (ii) PDF of Radiation Stress [\circ : gauge 1; \times : gauge 2; $+$: gauge 3]

참고문헌

- Battjes, J. A., 1975. Turbulence in the surf zone, Proc. Symp. Modeling Technique, ASCE, pp. 1050-1061.
- Battjes, J. A., 1983. Surf zone turbulence, Proc. Seminar on Hydrodynamicsof Waves in Coastal Areas, IAHR, Moscow, pp. 139-140.
- Cho, Y., 1996. Statistical properties of wave groups in nonlinear random waves of finite bandwidth, Stochastic Hydraulics' 96, edited by Kevin et al., A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Cho, Y., 1997. Threshold crossing rate, phase distribution and group properties of nonlinear random waves of finite bandwidth, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 30, No. 3, pp. 225-233.
- Cho, Y. S., 1995. Numerical simulations of tsunami propagation and run-up, Ph. D. thesis, Cornell University.
- Corrsin, S., 1957. Some current problems in turbulent shear flows, Chapter XV of Naval Hydrodynamics, Publication 515, National Academy of Sciences-National Research Council.
- Jonsson, I. G., 1974. Computation of longshore currents, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 699-714.
- Kaihatu, J. and Kirby, J., 1995. Nonlinear transformation of waves in finite water depth, Physics of fluids, Vol. 7, No. 8, pp. 1903-1914.
- Kirby, J. and Kaihatu, J., 1996. Structure of frequency domain models for random breaking wave breaking, Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, FL.
- Yoo, D., 1994. Wave induced longshore currents in the surf zone, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 120(6), pp. 557-575
- Yoon, S., 1987. Propagation of shallow water waves over slowly varying depth and currents, Ph. D. Thesis, Cornell University.
- Zelt, J. A., 1991. The runup of non breaking and breaking solitary waves, Coastal Engineering, 15, pp. 205-246.