

정상상태 스펙트럼 해파모형의 적용 Application of Steady-State Spectral Wave Model

최병호¹, 엄현민^{1,2}

Byung Ho Choi¹, and Hyun Min Eum¹

1. 서 론

원빈(offshore)과 20m 이내의 근빈(nearshore)에서의 해파 (파고, 주기, 파향과 스펙트럼형태) 변형을 정량적으로 산정하기 위한 노력이 지난 수십년간 기울여져 왔다. 원빈의 해파정보는 해파관측 및 광역, 지역적 해파예측에 의해 제공된다. 미 공병단의 STWAVE 2.0 (1999) 및 3.0 (2001)은 공개된 code로서 근빈에서의 수심변화에 의한 굴절 및 천수효과, 해류에 의해 유발되는 굴절 및 천수 효과, 파형경사에 따른 쇄파, 회절, 바람 입력에 의한 파의 성장, 해파-상호간의 상호작용 및 성장과정에서의 에너지 재분포 및 소산을 유발하는 백과과정을 다룬다. 따라서 이 모형은 부분적으로 SWAN 모형이 다루지 못하는 과정까지를 포함하므로 SWAN 모형과 더불어 현업에서도 활용될 수 있는 것으로 전망된다. 그러나 2.0 version (Smith, Resio, and Zundel, 1999)과 3.0 version (Smith, Sherlock, and Resio, 2001) 사이의 모형개선과 상응하는 코드의 이용성에는 명확하지 않은 부분이 많다. 상용의 SMS 패키지에는 2.0 version이 번들되며 website 에서는 3.0 version이 제공되고 있으나 source code가 제공되지 않으므로 차이점을 확인하기가 어렵다. 본 연구에서는 일부 source code를 확보하여 차이점들을 확인하여 현업적용에의 길라잡이가 될 수 있는 검토를 수행하였다.

2. STWAVE (STeady-state spectral WAVE model)

STWAVE는 직각좌표 격자로 공식된 유한격자 수 치모형이다. 격자는 정사각형이다($\Delta x = \Delta y$). 가변 격자해상도는 결합한 모형에서 얻을 수 있다. 이것은 조밀한 해상도의 모형을 수행하고 해안부근 지점의 스펙트럼을 저장함으로써 가능하다. 이 해안부근의 스펙트럼은 더 세밀한 해상도의 다른 격자에 경계값으로 사용될 수 있다. 격자의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

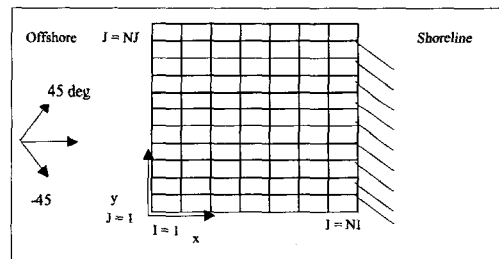


Fig. 1. Schematic of STWAVE grid

STWAVE는 Wave action balance equation에 기초한 정상상태 유한차분형 모형으로 다음과 같은 가정(제약)을 갖는다. 완경사 및 반사 영향의 무시, 동일한 원빈의 해파조건, 정상상태의 해파, 해류 및 해면풍, 선형적인 굴절, 천수효과, 수직적 변화가 없는 해류저건, 해저마찰의 무시, 선형파 이론에 근거한 방사능력의 산정 등이 된다. 기본방정식은 파선을 따른 정상상태의 스펙트럼 wave action 보존식으로 다음과 같다 (Jonsson, 1990).

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea)

² 한동대학교 건설환경연구소 (Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University, Pohang 791-708, Korea)

의 증가)와 높은 주파수로 전달된다. 모형에서는 스펙트럼의 침두 주파수는 범위 (또는 범위를 가로지르는 전파 시간)의 증가를 가져온다. f_p 의 변화비에 대한 식은 다음과 같다.

$$\left(f_p \right)_{i+1} = \left[\left(f_p \right)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left(\frac{u}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (9)$$

여기서, 아래첨자 i 와 $i+1$ 는 STWAVE에서 격자 열 번호를 나타내고 ζ 는 무차원 상수이다 (Resio와 Perrie, 1989). 스펙트럼으로부터 얻은 에너지는 스펙트럼의 모양을 유지하는 방법으로 스펙트럼의 전면의 주파수(침두 주파수보다 작은 주파수)로 분포된다. 해파 에너지는 에너지가 고 주파수로 전달되면서 소멸되고(실제적으로 성장하는 해파장에서 가장 뚜렷하다) 쇄파(백파)와 난류/점성 효과를 통해서도 소멸된다. 바람입력 때문에 해파장으로 들어오는 에너지와 더 높은 주파수로 전달되는 비선형 플릭스의 영향으로 해파장을 떠나는 에너지의 동적인 균형이 있다 (Resio, 1987, 1988a). 높은 고주파로의 에너지 플릭스는 STWAVE에서 다음과 같이 표현된다 (Resio, 1987).

$$\Gamma_E = \frac{\varepsilon g^{1/2} E_{wt}^3 k_p^{3/2}}{\tanh^{3/4}(k_p d)} \quad (10)$$

여기서, Γ_E 는 에너지 플릭스, ε 는 상수(30), E_{wt} 는 $(\rho_w g)$ 로 나눈 스펙트럼의 총에너지이고 k_p 는 스펙트럼의 침두와 관련된 파수이다. 방사능력의 경사는 근해의 해류와 해수위(해파 처오름)를 나타내기 위해서 외부의 순환 모형에 해파력을 대입하려고 STWAVE에서 계산되고 있다. 해파에 의해 생성된 해류는 일반적으로 해안에서 퇴적물의 이동에 주된 힘이다. 방사능력은 선형 해파 응력에 의해 계산된다.

3. 모형 실험

이 실험은 STWAVE의 시험운용을 위해 수행이 되었다. 모형 모양은 동서로 20 km, 남북으로 10km의 크기를 갖는 직사각형 해안이다. 수심은 이 영역의 서쪽에서부터 1.5:100의 경사를 가지면서 감소하고 영역의 중앙부근에는 섬을 정사각형 모양으로 첨가하였다. 이 영역은 간단화된 수심을 갖는 직사각형 모양으로 되었기 때문에 쉽게 모형의 입력과 출력에 대해 실험할 수 있었다.

모형의 수심과 해안선은 매우 간단하고 세밀한 해상도가 필요하지 않다. 격자 간격은 200 m로서 수직

남북방향으로 51개의 격자, 수평 동서방향으로 101개의 격자를 갖는다. 초기 입력 해파 스펙트럼도 매우 간단하게 처리하였다. 30개의 주파수는 초기 주파수를 0.04 Hz로 하고 주파수를 0.01 Hz씩 증가하여 설정하였다. 이 조밀한 주파수 해상도는 높은 풍속이라도 20 km 범위에는 대략 5~6 sec의 침두주기로 제한될 것이기 때문에 충분하다. 초기 파고는 5.03 m, 주기는 8.66 sec로 설정하였고 입력바람의 속도는 20 m/sec, 방향은 STWAVE 격자에 대해서 0도로 하였다(서쪽의 경우). 해류 정보는 이 실험에서는 적용되지 않았다.

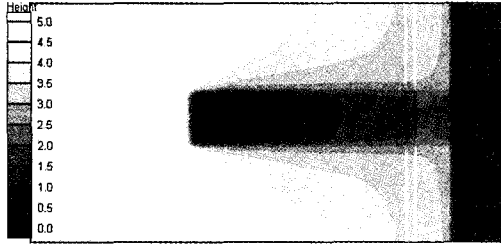
현재 모형 실험에서 적용한 code는 5가지로서 Code 3, 4 and 5는 source가 있으며 Code 1은 SMS 7.0과 bundle되는 실행code이며 Code 2는 website (<http://chl.wes.army.mil/research/wave/wavesprg/numeric/wtransformation/stwave.htm>)에서 download되는 실행code이다.

Table 1. Applied codes for experiments.

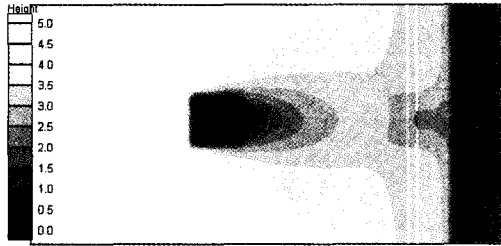
Code	
1	Stwave (version 2.0)
2	Stwave3 (version 3.0)
3	Stsource3
4	S6 7
5	S6 6cur3

결과에 의하면 SMS 7.0과 bundle되는 실행code는 S6_6cur3와 동일하며 code 2, 3, 4는 서로 다른 결과를 도출하고 있어 STWAVE의 현업 적용 시에는 주의 깊게 결과도출을 해야 할 것으로 생각되는데 중간평가는 다음과 같다.

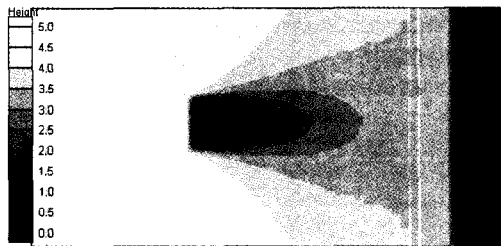
- 1) Code 1과 Code 5는 동일하며 STWAVE version 2.0 (1999)이다.
- 2) Code 3, 4는 version 2.0에서 version 3.0에로의 과도적 개발 단계의 code인데 Code 4는 Code 3에 수심 제약적인 쇄파조건, 파장 산정에 Pade approximation, 경사방향 입사풍에 대한 수정 등이 포함된다.
- 3) Code 2가 STWAVE version 3.0 (2001년 2월)에 부합되는데 학술적 연구를 위해서는 source code의 확보가 필요하나 잠정적으로 이용될 수 있다.



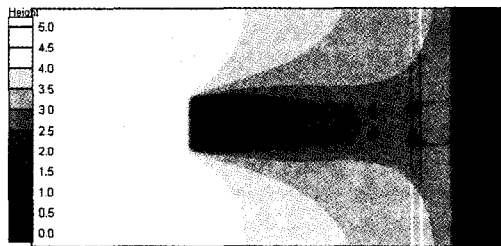
(a) Code 1



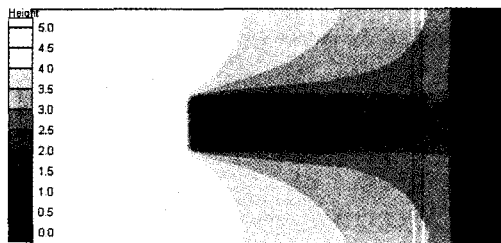
(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5

Fig. 3. Application of codes

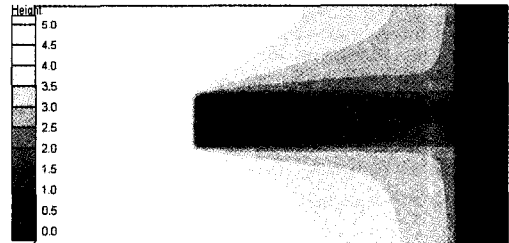
다음 단계로서는 바람의 경사방향 입력과 경계 해 파 스펙트럼의 접근 각도를 변화시켜 version 2.0과 version 3.0의 수치실험을 한 결과로서 다음에 제시된다.

Table 2. Numerical experiment cases.

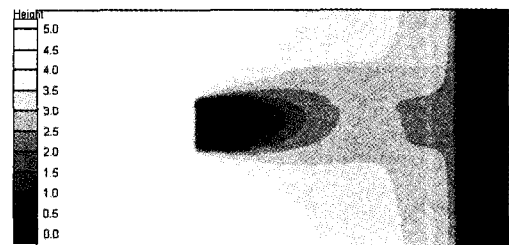
Spectrum approach angle	0		30	30	
	0	30	-30	30	-30
Version 2.0	o	o	o	o	o
Version 3.0	o	o	o	o	o

Unit in degree

스펙트럼의 접근 각도와 풍향을 모두 0 deg.로 하여 수행한 실험의 파고 분포도는 Fig. 3의 (a), (b)에 나타나 있다. 두 결과의 차이를 보면 입사되는 경계에서부터 영역 중간부분의 섬까지의 파고분포는 같지만 섬 뒤편에서부터 차이가 발생을 하게 된다. 이 이유로는 version 2.0에서는 적용되지 않았던 방사 응력이 version 3.0에는 적용이 되어 선형과 이론에 의해 계산이 되었기 때문으로 생각된다.

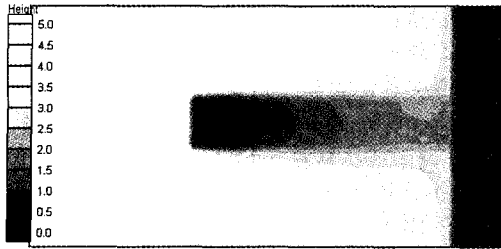


(a) Version 2.0

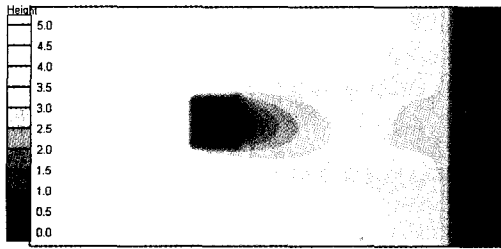


(b) Version 3.0

Fig. 4. Wave height (spectrum approach angle: 0 deg., wind direction: 30 deg.)

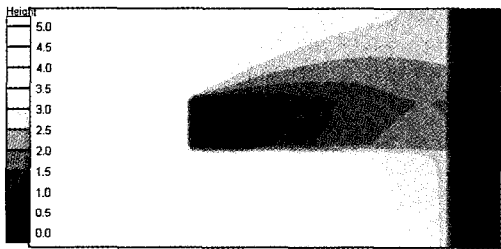


(a) Version 2.0

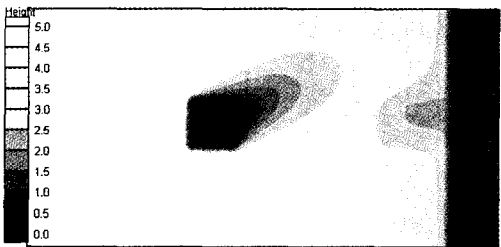


(b) Version 3.0

Fig. 5. As in Fig. 4 but wind direction: -30 deg.



(a) Version 2.0



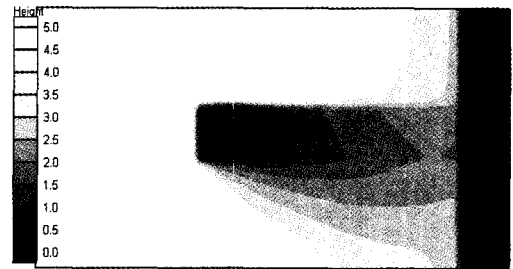
(b) Version 3.0

Fig. 6. As in Fig. 4 but spectrum approach angle: 30 deg., wind direction: 30 deg.

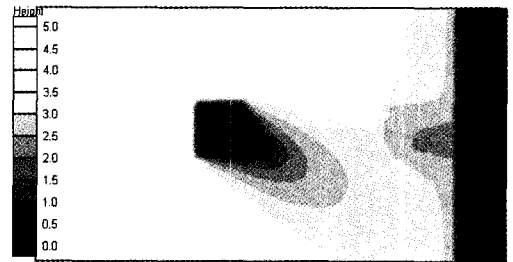
4. 결 론

해안역의 풍파의 성장(wind-wave growth)과 변형을 추정하는 과업은 해안공학에서 중요한 부분을 차지하며 근년에는 이 해파 변형 모형과 연안 수환 모형을 연계시키는 과업까지 진행되고 있다(해파 모형의 방사능력 경사는 순환모형에 입력되며 순환 모형의 연

안류 유속은 해파 모형에 입력시키는 아직은 일방향적인 접근). 미공병단의 연안 및 수리실험실(Coastal and Hydraulic Laboratory)이 제공하는 정상상태 스펙트럼 해파모형은 상용 SMS와 번들로 현업 적용을 위해 제공되기 시작하고 있으나 본 연구에서 지적인 바와 같이 개발의 단계에 따라 결과가 상이하여 상업적으로 제공되는 실행코드의 적요에는 많은 주의점이 요구된다는 것을 재확인시키고 있다. 한국근해의 해안역은 동계계절풍과 태풍에 기인(cyclogenesis)하는 해파에 큰 영향을 받음에도 불구하고 해안역의 풍파의 성장이 고려된 해파 변형모형의 개발 및 적용이 지연되고 있는데 향후 수년간 괄목할 만한 연구의 진전이 있어야 할 것으로 생각된다.



(a) Version 2.0



(b) Version 3.0

Fig. 7. As in Fig. 4 but spectrum approach angle: -30 deg., wind direction: -30 deg.

참고 문헌

- Jonsson, I.G., 1990. Wave-current interactions. *The sea*, 9, part A, B. LeMehaute and D. M. Hanes, ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Resio, D.T., 1987. Shallow-water waves. I: Theory. *J. Wtrway., Prt, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 113(3), 264-281.
- Resio, D.T., 1988a. Shallow-water waves. II: Data comparisons. *J. Wtrway., Prt, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 114(1), 50-65.
- Resio, D.T. and Perrie, W., 1989. Implications of an f^{-4}

- equilibrium range for wind-generated waves, *J. Phys. Oceanography*, 19, 193-204.
- Smith, J.M., Resio, D.T. and Zundel, A.K., 1999. STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model; Report 1: User's manual for STWAVE version 2.0, Instructional Report CHL-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Smith, J.M., Sherlock, A.R. and Resio, D.T., 2001. STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model: User's manual for STWAVE, version 3.0, ERDC/CHL-01-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.