

쇄파를 고려하는 파랑변형 모형의 비교

Comparison of wave transformation models incorporating wave breaking

오상호¹, 서경덕², 손상영³, 이동영⁴

Sang-Ho Oh¹, Kyung-Duck Suh², Sang Young Son³, and Dong Young Lee⁴

1. 서 론

해안 구조물을 설계하고 연안역의 해수 및 유사 이동을 예측하기 위해서는 수심의 변화에 따른 파랑 변형을 정확하게 모의하는 일이 매우 중요하다. 이를 위해서 지금까지 많은 연구가 수행되었고, 그 결과 몇몇 수치 모형은 연안역에서의 파랑 변형을 상당한 정확도로 예측한다. 그러나 어떠한 모형도 해안 근처에서 발생하는 물리적 현상을 모두 모의할 수는 없으며 지배방정식 및 경계조건의 처리 방법 또는 수치적 알고리즘 등의 차이에 따라 수치 모의의 결과가 달라지게 된다.

지금까지 개발된 수많은 수치모형 중에서 몇몇은 해안공학 분야에서 비교적 널리 사용되고 있다. 따라서 그러한 수치모형들의 성능을 좋은 실험 데이터를 이용하여 비교·검증하는 것은 수치 모형의 사용자들에게 많은 도움을 줄 것이다. 그런데 몇몇 연구를 제외하면(예: Maa et al., 2000; Lin and Demirbilek, 2005), 여러 가지 파랑변형 모형의 성능을 비교·검토한 연구는 그다지 많지 않다. 특별히 쇄파를 모의할 수 있는 모형들을 서로 비교한 연구는 없다.

이 연구에서는 국내의 해안공학 분야에서 비교적 자주 사용되는 수치모형 네 가지를 비교 대상으로 선정하였다. 선정된 모형은 REF/DIF S (Kirby and Özkan, 1994), MIKE 21 BW (DHI software, 2004), STWAVE (Smith et al., 2001), KWEON (Kweon et al., 1997)이며, 각각 완경사 방정식, 부시네스크 방정식,

파작용평형 방정식을 지배방정식으로 하여 개발되었다. 이 논문에서는 세 가지 실험 데이터 및 한 가지 현장 관측 데이터를 이용하여, 선정된 수치모형들의 성능을 비교·검증하고 모형별 특징을 검토하였다. 각 수치 모형에 대한 설명은 생략하였다.

2. 파랑변형 모형 비교

2.1 Mase & Kirby 실험 데이터와의 비교

Mase and Kirby(1992)는 수심 47 cm 수조에 1:20 경사면을 설치하고 일방향 스펙트럼을 조파하여 경사면에서의 파랑변형을 관측하였다. 수치테스트는 격자 간격이 0.05 m 이고, 크기는 $0 \leq x \leq 11.35$ m, $0 \leq y \leq 0.4$ m인 계산 영역에서 수행되었다. 입력 스펙트럼은 절단주파수 2.5 Hz 내에서 25개 주파수 성분 및 35개 방향 성분으로 표현되었다. 다만 MIKE 21 BW는 모형 자체에서 내부적으로 입력 스펙트럼이 결정되었다. 시간 의존 모형인 MIKE 21 BW에서의 시간 간격은 0.01 s였다.

Fig. 1은 유의파고의 관측값과 계산값을 비교한 것이다. REF/DIF-S는 천수를 다소 과대평가하지만 쇄파대 내에서의 파고는 비교적 잘 예측한다. MIKE 21 BW의 계산 결과는 쇄파대 바깥에서는 관측값과 비교적 잘 일치하지만, 쇄파대 내의 파고는 관측값보다 더 크다. MIKE 21 BW는 해안선에서의 파고가 0이 되지 않는데 이것은 이 모형이 파의 처움림등을 고려하여 계산을 수행하기 때문이다. KWEON 모형도 대체로 천수를 잘 예측하지만 MIKE 21 BW처럼 쇄파대

1 발표자: 한국해양연구원 연안개발연구본부 항만·연안공간연구사업단 연수연구원

2 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

3 현대건설주식회사 기술연구소 연구원

4 한국해양연구원 연안개발연구본부 연안방재연구사업단 책임연구원

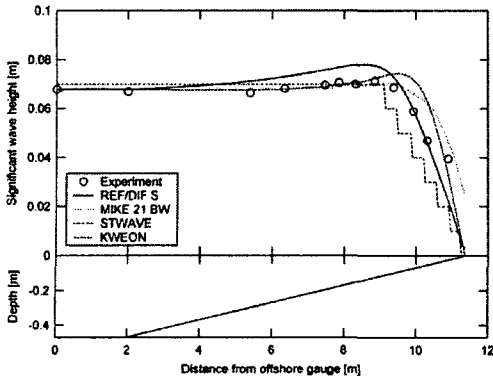


Fig. 1. Measured and calculated significant wave heights along the planar slope.

내의 파고를 다소 과대산정한다. 한편, STWAVE는 출력이 소수점 둘째 자리로 제한되어 있어서 계산 결과가 계단 형태로 변하기 때문에 천수 효과를 제대로 평가할 수 없다.

2.2 Vincent and Briggs 실험 데이터와의 비교

Vincent and Briggs(1989)는 폭 35 m, 길이 29 m, 수심 30.5 m인 평면 조파수조에서 파가 타원형 둔덕을 지날 때의 변화를 관측하였다. 여러 실험 조건 중에서 Table 1에 제시한 두 가지 경우에 대하여 수치테스트를 수행하였다. 계산 영역의 크기는 $0 \leq x \leq 25$ m, $0 \leq y \leq 27.4$ m이고 격자 간격은 0.1 m였다. 입력 스펙트럼은 절단주파수 2.5 Hz 내에서 25개 주파수 성분 및 35개 방향 성분으로 표현되었다. MIKE 21 BW에서는 조파선 및 계산 영역의 끝과 양 옆 경계면에 30개 격자로 구성된 스폰지층을 두어 파 에너지를 흡수하였고, 시간 간격은 0.02 s였다.

Table 1. Incident wave parameters of the selected test cases (Vincent and Briggs, 1989).

Case	H_s [m]	T_s [s]	α	γ	σ_m
N4	0.0254	1.3	0.00047	20	10
B5	0.1900	1.3	0.08650	2	30

Fig. 2는 네 가지 수치 모형에 의해서 계산된 Case N4의 파 벡터도를 나타낸 것이다. 그림에서 둔덕 뒤쪽의 직선은 Vincent and Briggs(1989)에 의해서 파고 관측이 이루어진 단면(Section 4)을 나타낸다. Fig. 2로부터 처음 세 가지 모형은 둔덕의 뒤쪽 사면에서 파가 집중되었다가 둔덕을 지나면서 퍼져나가는 현상을 잘 모의함을 알 수 있다. 반면에 KWEON 모형은 파 진행 방향이 서로 겹치는 곳에서 파향을 제대로 계산하지 못한다.

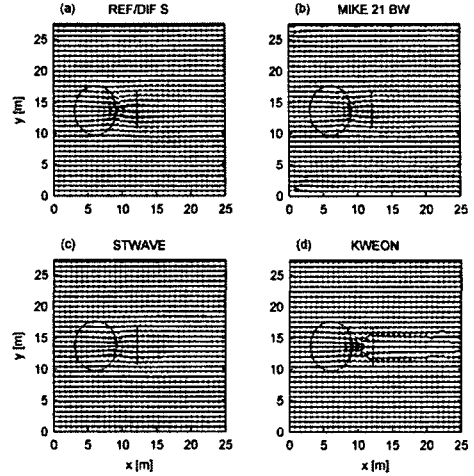


Fig. 2. Comparison of wave vector plots of Case N4.

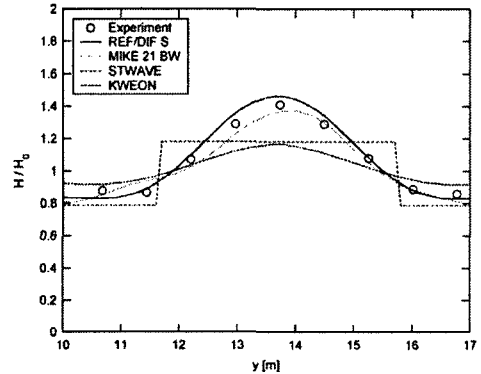


Fig. 3. Comparison of normalized wave heights of Case N4 along Section 4.

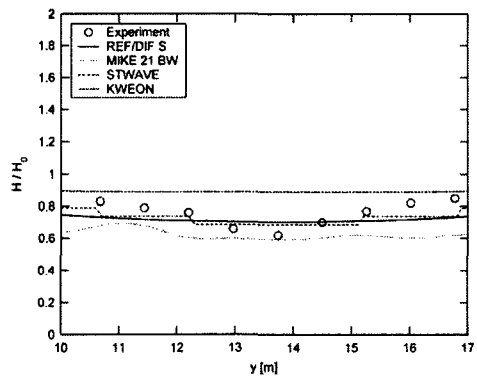


Fig. 4. Comparison of normalized wave heights of Case B5 along Section 4.

Fig. 3은 Section 4에서 관측된 파고를 각 수치 모형 결과와 비교한 것이다. REF/DIF S 및 MIKE 21 BW에 의해서 계산된 파고는 관측값과 매우 잘 일치한다. 반면에 KWEON 모형은 Fig. 2에서 보인 것처럼 둔덕 뒤

쪽에서 파향이 잘못 계산된 영향으로 인해 계산된 파고가 관측값에 비해 중앙에서는 더 작고 양 측면에서는 더 높다. 한편, STWAVE는 출력의 제약 사항때문에 계산 결과를 적절하게 평가할 수 없다.

마찬가지로, Case B5의 경우 Section 4에서의 무차원파고를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우 입사파고가 훨씬 크기 때문에 둔덕 위에서 강한 쇄파가 발생한다. 따라서 Fig. 3에서처럼 둔덕 뒤쪽에서 파가 발산하는 것이 아니라 입사파 파향과 거의 같은 방향으로 진행하게 된다. 즉, 회절 효과가 거의 나타나지 않는다. 따라서 둔덕 중앙에서 관측된 파고가 양 측면의 파고보다 더 낮다. 이러한 현상은 쇄파로 인해 둔덕 뒤쪽에서 강한 흐름이 발생하기 때문인데 이 연구에서 사용된 모형들은 이러한 효과를 고려하고 있지 않으므로 관측된 파고 분포를 적절하게 모의하지 못하였다.

2.3 Briggs et al. 실험 데이터와의 비교

Briggs et al.(1995)는 Vincent and Briggs(1989)와 같은 수조를 이용하여 반무한방파제 주변에서 파의 회절에 관한 실험을 수행하였다. 수심은 46 cm였고, 두께 10 cm, 길이 18.22 m인 방파제는 조파기로부터 8.38 m 떨어진 곳에 설치하였다. 여섯 가지 실험 조건 중에서 Table 2의 경우에 대한 수치테스트 결과를 제시하였다. 계산 영역의 크기는 $0 \leq x \leq 25$ m, $0 \leq y \leq 27.4$ m이고 격자 간격은 0.05 m였다. 입력 스펙트럼은 절단주파수 2.5 Hz 내에서 25개 주파수 성분 및 35개 방향 성분으로 표현되었다. MIKE 21 BW에서는 조파선 및 계산 영역의 끝과 양 옆 경계면에 50개 격자로 구성된 스펙트럼을 두어 파 에너지를 흡수하였고, 시간 간격은 0.01 s였다.

Fig. 5는 네 가지 수치 모형에 의해서 계산된 회절계수의 값을 각각 도시한 것이다. 그림에서 두꺼운 선은 방파제를 나타낸다. REF/DIF S와 MIKE 21 BW에 의한 회절계수의 분포는 관측 결과와 유사하다. 반면에 나머지 두 모형에서는 회절계수의 등고선도가 방파제 끝으로부터 방사형으로 분포하여 관측 결과와 크게 다르다. 앞의 두 모형 중에서는 REF/DIF S의 경우 방파제 끝 주변에서 수치적 불안정성이 나타나지만, MIKE 21 BW는 그러한 경향이 나타나지 않는다. 실제로 MIKE 21 BW가 관측값에 가장 일치한 계산 결과를 나타냈으며, REF/DIF S는 관측값에 비해 회절계수를 더 작게 평가하였다.

2.4 DELILAH 현장관측 데이터와의 비교

DELILAH 데이터는 미국 노스캐롤라이나의 Duck

Table 2. Incident wave parameters of the selected test cases (BRIGGS *et al.*, 1995).

H_s (m)	T_s (s)	α	γ	σ_m
0.0775	1.3	0.0044	20	10

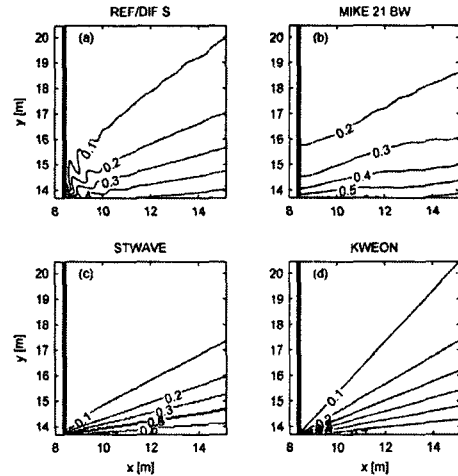


Fig. 5. Comparison of contour maps of wave diffraction coefficients.

해안가에서 바람, 파, 흐름, 조위 및 수심 변화 등을 종합적으로 관측하여 취득되었다. 특히 해안선에 수직 방향으로 9개 지점에서 파 관측이 수행되어 수치 모형을 검증하기에 매우 좋은 데이터를 제공하고 있다 (Birkemeier *et al.*, 1990). 여러 가지 실험 조건에 대해서 수치테스트를 수행하였으며, 이 논문에서는 Table 3의 경우에 대한 결과를 제시하였다. 계산 영역의 크기는 $50 \leq x \leq 914$ m, $148 \leq y \leq 1876$ m이고 격자 간격은 2 m였다. 입력 스펙트럼은 절단주파수 0.5 Hz 내에서 30개 주파수 성분 및 35개 방향 성분으로 표현되었다. MIKE 21 BW에서는 의해 조파선 뒤쪽에 50개 격자로 구성된 스펙트럼을 두어 파 에너지를 흡수하였고, 시간 간격은 0.2 s였다.

Fig. 6에서는 네 가지 수치 모형에 의해 계산된 파고를 관측값과 비교하였다. REF/DIF S 및 MIKE 21 BW의 경우 해안으로 파가 진행해 들어옴에 따라 파고가 매우 완만하게 감소한다. 반면에, STWAVE와 KWEON 모형에서는 천수 효과로 인해 파고가 약간 증가하였다가 감소한다. 분석 결과로부터 앞의 두 모형에서 파고가 감소하는 것은 바닥 마찰때문이 아니라 쇄파향이 활성화되기 때문임을 알 수 있었다. 즉, REF/DIF S 및 MIKE 21 BW는 나머지 두 모형에 비해서 더 작은 파고 또는 파형경사에서 쇄파 계산이 활성화되는 것으로 보인다. 쇄파대 내 언덕 지형에서 파고가 안정화되는 현상은 MIKE 21 BW를 제외한 나머지

Table 3. Test conditions of the selected cases of DELILAH experiment.

Tide(m)	d(m)	H_s (m)	T_s (s)	$\theta_0(^{\circ})$	σ_m	γ
-0.29	7.37	1.129	10.723	-34	16	4

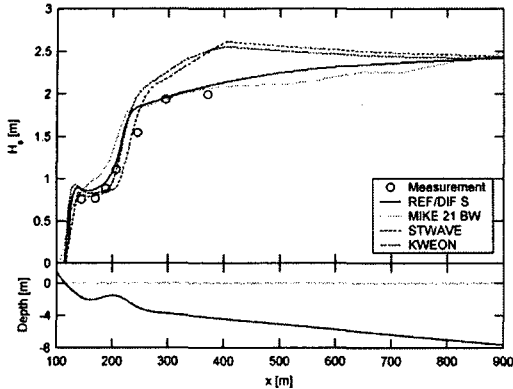


Fig. 6. Comparison of significant wave heights.

모형들에서는 비교적 잘 모의된다. MIKE 21 BW는 쇄파에 의한 에너지 소산을 다소 과소산정하는 것으로 보인다.

3. 토의 및 결론

이 연구에서는 수치모형을 블랙박스처럼 간주하여 수치테스트를 수행하였다. 즉, 각 수치 모형 프로그램을 수정하지 않고 그대로 사용하였으며 모형의 입력 파라미터들의 기본값 또는 권고값을 사용하였다. 이 연구에서 선정된 수치모형들의 성능은 평균적으로 비슷하며 대체로 쇄파대를 포함하는 연안역에서의 수치 모의에 사용하기 적합한 것으로 판단된다. 다만, 수치 모형에 따라서 특정 파랑변형 현상에 대한 모의 결과에 차이점 및 장·단점이 확연하게 나타나므로 사용자가 이러한 점을 고려하여 모형을 사용하는 것이 바람직하다.

REF/DIF S는 천수를 다소 과대평가하며 방파제 뒤에서의 회절을 과소평가하는 것으로 나타났다. MIKE 21 BW는 네 가지 모형 중에서 바닥 변화에 가장 둔감하였고, 이에 따라 쇄파대 내에서 파고가 가장 완만하게 감소하였다. 방파제 뒤에서의 회절은 관측값에 가장 근접한 계산 결과를 제공하였다. STWAVE는 쇄파대 내의 파고를 다소 과소산정하였으며, 회절을 잘 모의하지 못하였다. 또한 출력 형식의 제약으로 인해 실험실 규모의 수치 모의에 사용하기에는 적합하지 않았다. KWEON은 대체로 STWAVE와 비슷한 정도의 계산 결과를 제공하지만 파 진행 방향이 겹치는 영역에서는 파랑 계산 결과에 문제점이 나타났다.

이 모형은 다른 모형들에 비해 계산 시간이 월등히 빠르기 때문에 이러한 문제점들이 개선된다면 신뢰성 설계 등을 위한 몬테카를로 모의 계산 등에 매우 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국21 사업 및 한국해양연구원의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Birkemeier, W.A., Donoghue, C., Long, C.E. and Hathaway, K.K. and Baron, C.F. (1997). The 1990 DELILAH nearshore experiment: summary report, U.S. Army Corps Engrs.
- Briggs, M.J., Thomson, E.F. and Vincent, C.L. (1995). Wave diffraction around breakwater. *J. Wtrwy, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, 121(1), 23-35.
- DHI software (2004). MIKE 21 Boussinesq wave modules user guide, DHI Water & Environment.
- Kirby, J.T. and Özkan, H.T. (1994). Documentation and user's manual, combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S, Univ. Delaware.
- Kweon, H.-M., Sato, K. and Goda, Y. (1997). A 3-D random breaking model for directional spectral waves. *Proc. 3rd Int. Symp. Oc. Wave Meas. Anal.*, ASCE, 416-430.
- Lin, L. and Demirebilek, Z. (2005). Evaluation of two numerical wave models with inlet physical model. *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, 131(4), 149-161.
- Maa, J.P.-Y., Hsu, T.-W., Tsai, C.-H. and Juang, W.J. (2000). Comparison of wave refraction and diffraction models. *J. Coast. Res.*, 16(4), 1073-1082.
- Mase, H. and Kirby, J.T. (1992). Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation. *Proc. 23th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 474-487.
- Smith, J.M., Sherlock, A.R. and Resio, D.T. (2001). STWAVE: Steady-state spectral wave module User's manual for STWAVE, U.S. Army Corps Engrs.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989). Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, 115(2), 269-284.