

파랑-해류 상호작용에 의한 천해 설계파랑 변형 Design Wave Transformation in Finite Depth due to Wave-Current Interaction

강시환* · 안석진* · 엄현민* · 조휴상*

See Whan Kang*, Suk Jin Ahn*, Hyun Min Eom* and Hyu Sang Cho*

요 지 : 파랑이 흐름이 강한 해역으로 전파되면 파랑-흐름 상호작용에 의해 파고, 파형, 스펙트럼 등 파랑특성의 변형에 영향을 미친다. 본 연구에서는 가로림만해역을 대상으로 조류의 강한흐름과 조차로 인한 수심 변화가 큰 경우 입사 파랑의 천해파랑 변형을 SWAN 모형으로 수치모의 실험하였다. SWAN모형의 실 해역 적용에 앞서 강한 흐름에 의한 천해 파랑스펙트럼 변형에 대한 이론적 해석해(Suh et al. 1994)와 모의결과를 비교, 검증한 결과 잘 일치하였다. 가로림만 외해역의 설계파랑인 NNW방향의 주기 8초와 10초, 입사파고 3 m에 대한 모의실험 결과에 의하면 만 입구지점에서 최대 1.4 m/s의 낙조류와 파랑이 상호 역방향으로 만나 파고가 약 40%까지 증가되었고, 이와 반대로 최대 1.1 m/s의 순방향인 창조류의 경우에는 26%정도 감소하였다. 본 실험결과에 의하면 가로림 만입구의 협 수로에서는 항시 강한 조류의 흐름이 있기 때문에 설계파 산정에 있어 파랑-해류의 상호작용에 의한 파랑변형이 가장 중요한 결정요소인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 파랑-흐름 상호작용, 가로림만, 설계파랑, 파랑스펙트럼, SWAN모형

Abstract : Wave-current interaction due to strong ambient currents causes to alter wave properties such as wave height, wave profile and wave spectrum. In this study we first examined the SWAN model's applicability by comparing with an analytical solution of Suh et al. (1994) for wave-current interaction in finite water-depth. Numerical experiments using SWAN model have been conducted for Garolim Bay to estimate the design wave-heights influenced by strong tidal currents. For the design wave periods of 8~10 sec, the design wave height of 3 m in NNW direction was increased by up to 40% when the incident waves encounter the opposing currents of 1.4 m/s while the wave height was reduced by 26% due to the following currents of 1.1 m/s at the bay mouth. This result indicates that the effect of wave-current interaction must be included to determine the design wave height if there exists a strong current.

Keywords : Wave-current interaction, Garolim Bay, Design wave, Wave spectrum, SWAN

1. 서 론

파랑이 외해로부터 천해역의 연안수로, 내만으로 전파되어 들어올 경우 연안류의 강한 흐름과 만나게 되면 파랑-흐름 상호작용에 의한 파랑변형으로 파고가 증폭되어 선박의 통행에 큰 지장을 초래할 뿐만 아니라 수로 준설 등 해상작업 시 사고위험의 주요 원인이 된다(Smith, 1997). 특히 우리나라의 서해, 남해와 같이 수많은 도서와 내만이 산재해 있고, 만의 입구, 섬 과 섬 또는 육지 사이의 협 수

로에서는 조류 등 해류의 강한 흐름이 항시 있기 때문에 방파제, 호안 등 해안항만 구조물의 설계파랑 제원 산정 시에는 흐름에 의한 파랑 변형의 영향을 검토 할 필요가 있다. 그러나 현재까지 국내에서 이러한 파랑-해류 상호작용에 의한 파랑변형을 설계파랑 제원 산정에서 고려된 사례는 없었다.

일반적으로 파랑과 흐름이 공존하는 경우, 서로의 진행 방향이 역방향일 때 파고는 증가하고 파장은 짧아져 파형 경사도가 증가되며, 흐름과 동일한 순방향일 때는 파고는

*(주)헤인E&C 기술연구소 (Corresponding author: See Whan Kang, Technology R&D Institute, HYEIN E&C Co., Ltd. Woolim Blue9-Biz Center A-dong 24F Yeomchang-dong, Gangseo-gu, Seoul 157-186, Korea, swkang@kordi.re.kr)

감소하나 파장은 길어진다(Li,1999). 특히 내만의 협수로 해역에서는 강한 낙조류와 만나게 되면 상호작용에 의해 파랑의 경사도가 커질 뿐만 아니라 수심 변화에 따른 천수효과, 연안류에 의한 파랑 굴절로 인한 파랑 집중으로 쉽게 쇠파될 수 있다(Smith, 1999; Sorensen, 2006).

파랑과 흐름의 상호작용에 관한 많은 연구가 그동안 여러 연구자에 의해 수행된 바 있다(Perigrine, 1976). Longuet-Higgins et al.(1961)은 “radiation stress”에 의해 파랑과 흐름 간에 에너지가 쉽게 천이될 수 있음을 처음으로 제안하였다. 그 후 천해 수심(finite-depth water)에서의 파랑-흐름 상호작용에 대해서는 Chen et al.(1998)은 Yoon et al.(1989)의 Boussinesq식을 사용한 연구결과에 근거한 확장형 Boussinesq - type 이론식을 유도한바 있다. 한편 다 방향 불규칙 파의 경우 파랑변형의 양상이 매우 복잡해서 주로 “wave action” 평형이론에 근거하여 흐름에 의한 에너지 스펙트럼의 변형에 대한 연구가 수행되었다(Booij, 1981; Kirby, 1984; Hedges et al., 1985). 특히 Suh et al.(1994)은 Hedges et al.(1985)의 이론식을 근거로 천해 수심에서도 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형에 적용될 수 있는 이론적 해석해를 유도하였으며, 이를 수치실험을 통해 검증한 바 있다.

본 연구에서는 설계파랑 산정에 있어 파랑-해류 상호작용에 의한 파랑변형의 규모를 보다 정량적으로 산정하기 위해 SWAN(Simulation WAVes Nearshore)모형(SWAN, 2006)을 사용하여 수치모의 실험하였다. 먼저 모형의 적용성과 신뢰도를 검토하기 위하여 파랑 에너지 평형식(wave action balance equation)을 근간으로 한 Suh et al. (1994)의 이론적 해석해와 SWAN모형의 수치모의 계산결과를 상호 비교하였다. 또한 조석 간만의 차로 조위(수심)의 시간적 변화가 크고 조류의 유속이 강한 서해안의 가로림만과 인근 해역을 대상으로 해수유동모형을 수립하여 수치 계산된 조위와 조류의 유속을 관측치와 비교 검증하여 수심과 유속장의 시간적 변동을 보다 정확하게 재현하였다. 이러한 해수유동의 시간적 변동과 연계한 SWAN모형을 가로림만에 수립하여 파랑-흐름-조위(수심)변화에 따른 입사 설계파고의 변형규모를 보다 정량적으로 파악될 수 있도록 여러 경우를 가정하여 모의 실험하였다.

2. 파랑-흐름의 상호작용

2.1 이론적 해석해

파랑 에너지 평형 방정식을 사용하여 흐름이 없는 경우

의 주파수 스펙트럼 $S_0(w_r, d)$ 으로부터 흐름이 있는 경우의 스펙트럼 $S(w_a, d, U)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다(Hedges et al., 1985; Suh et al., 1994).

$$S(w_a, d, U) = S_0(w_r, d) \frac{w_r \left(1 + \frac{2k_0 d}{\sinh 2k_0 d}\right)}{2k_0 \left\{ U + \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \frac{w_r}{2k} \right\}} \quad (1)$$

여기서, 아래첨자 0은 흐름이 없는 경우이고, U 는 흐름의 유속, d 는 수심, k 는 파수이다. 절대주파수(w_a)와 상대주파수(w_r)의 관계는 식 (2)-(4)와 같다.

$$w_a = w_r + kU \quad (2)$$

$$w_a^2 = dk_0 \tanh k_0 d \quad (3)$$

$$w_r^2 = (w_a - kU)^2 = dk \tanh kd \quad (4)$$

고주파수 영역에서 파가 부서지는 평형영역(equilibrium range)에서의 주파수 스펙트럼을 흐름이 있는 해역에서도 얻을 수 있다. 즉, 흐름을 따라 움직이는 축에서의 상대주파수 스펙트럼 $S^e(w_r, d, U)$ 로부터 고정된 축에서의 절대주파수 스펙트럼 $S^e(w_a, d, U)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S^e(w_a, d, U) = \frac{1}{\frac{dw_a}{dw_r}} S^e(w_r, d, U) \quad (5)$$

여기서 dw_a/dw_r 는 Eckart(1951)의 근사치 분산관계식으로 부터 식(6)과 같이 구할 수 있다.

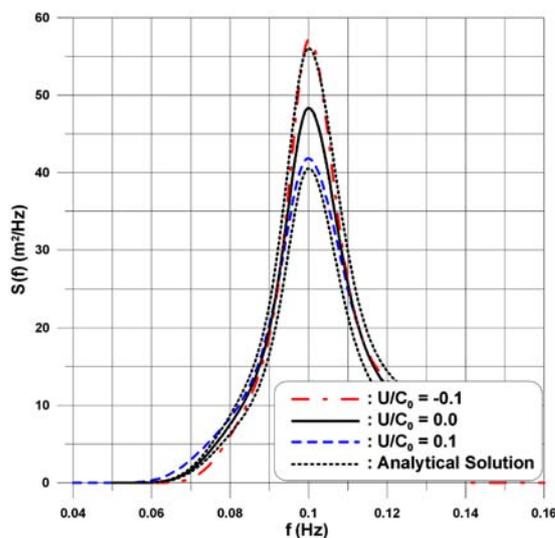
$$\frac{dw_a}{dw_r} = 1 + \frac{w_r U}{g} \left[\frac{2}{\sqrt{\tanh\left(\frac{w_r^2}{g}\right) \cosh^2\left(\frac{w_r^2}{g}\right) \left\{ \tanh\left(\frac{w_r^2}{g}\right) \right\}^{3/2}}} - \frac{\frac{w_r^2}{g} d}{g} \right] \quad (6)$$

2.2 SWAN모형과 이론적 해석해 비교

입사 파랑스펙트럼이 흐름에 의해 변형되는 정도를 파악하고 SWAN모형의 신뢰도를 검토하기 위하여 이창훈(1998)이 수행한 바와 같이 일방향의 불규칙파 수치실험을 수행하여 Suh et al.(1994)의 이론적 해석해와 비교하였다. 실험조건은 JONSWAP 스펙트럼을 입사파의 스펙트럼으로 사용하였으며, 실험영역은 450 m이고, 입사 파랑의 조건은 파고 $H=5$ m, 주기 $T_p=10$ sec, $d=35$ m의 일정수심, 그리고 흐름의 유속 U 와 파속 C_0 의 비율이 -0.1, 0.0, +0.1

Table 1. Description of numerical experiment on wave-current interaction

Experimental domain	450 m
Grid size	1 m
Water depth	35 m (flat bottom)
Spectrum	JONSWAP
Wave height	5 m
Wave period	10 sec
Spectrum range	0.05~0.15 Hz
Spectrum division	200
Current input	$U/C_0 = -0.1, U/C_0 = 0.1, U/C_0 = +0.1$

**Fig. 1.** Comparison of experimental results of SWAN model and analytical solution.

의 세 경우에 대해 모의하였다. 여기서(-) 유속은 파랑과 흐름이 역방향으로 만나는 경우이며 (+) 유속은 순방향으로 만나는 경우를 나타낸 것이다. 수치계산의 거리영역은 1D-mode의 1 m 격자간격으로 450 m이며, 주파수영역은 0.05~0.15 Hz의 범위를 200개로 세분하였다.

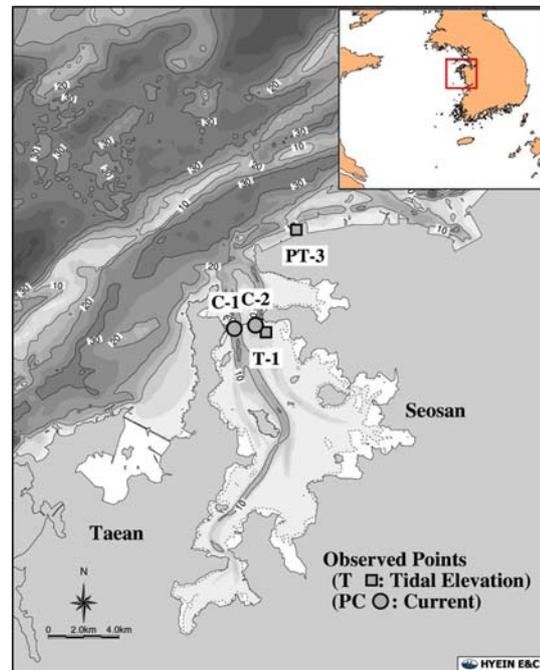
Fig. 1에서는 해석해와 SWAN모형의 수치모의 결과를 상호비교 하였다. 여기서 검은 점선은 해석해의 계산결과를 나타낸 것이다. 파랑과 흐름이 순방향이고 유속의 크기가 $U/C_0=0.1$ 경우 파랑에너지스펙트럼 $S(f_p)$ 값이 약 12% 감소하였고, 파랑과 역방향 흐름이면서 유속크기가 $U/C_0=-0.1$ 경우 $S(f_p)$ 값이 약 18% 증가하였다. 해석해와 SWAN 모형의 두 계산결과가 Fig. 1에 나타난 바와 같이 매우 잘 일치됨을 알 수 있다. 이는 파랑-흐름 상호작용에 의한 파랑변형을 SWAN모형이 충분히 잘 재현할 수 있었고, 특

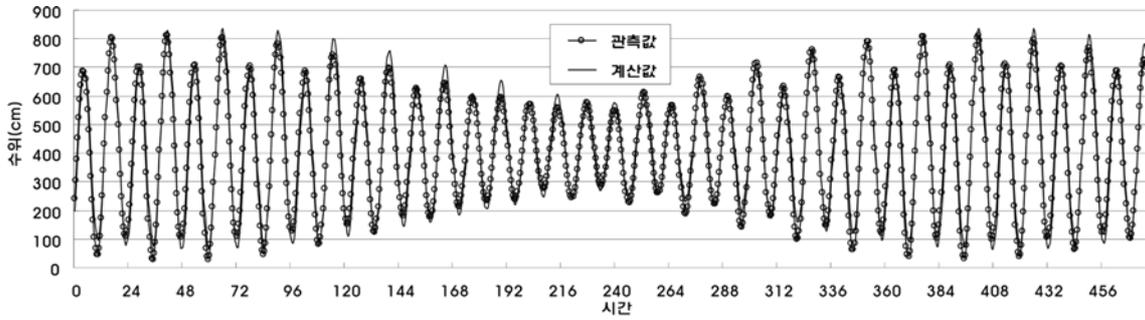
히 설계파의 주기가 10초 내외인 경우 실 해역에도 적용 가능함을 보여준다.

3. 가로림만 실 해역 수치 모의실험

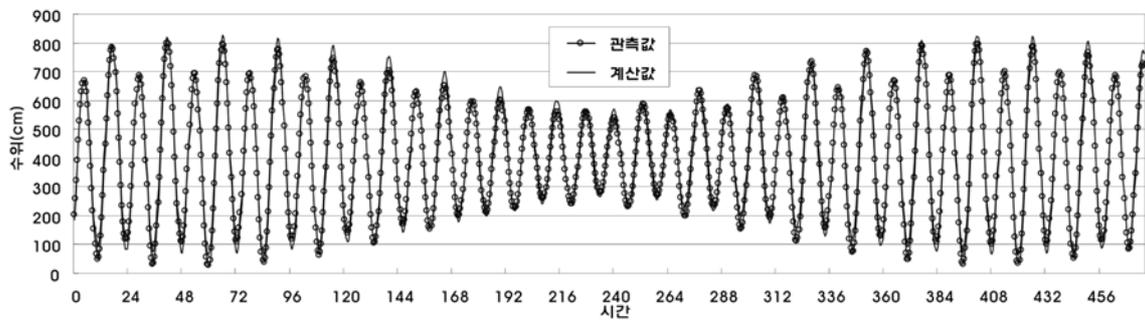
3.1 조위 및 조류의 유속 분포

가로림만 해역(Fig. 2)에서 조위와 조류의 해수유동을 재현하기 위해 2차원 비선형 천수방정식의 수심 적분 모형을 사용하였다. 본 모형은 (주)헤인이엔씨 기술연구소와 성균관대학교가 공동으로 개발한 모형으로 오일러-라그랑지적 방법에 의해 수치 계산되고 확산과정은 ADI 유한차분법이 사용된다. 주요 4개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)를 위해 개방경계에 적용하였는데, 기존의 조석관측 자료와 수치실험 결과의 조위 및 조류의 계산치가 잘 일치할 때까지 경계 조석조건을 수정 입력하여 수차례에 걸친 실험을 수행하였다. 해수유동모형의 검증을 위하여 ‘가로림 조력 타당성 조사(2단계) 최종보고서(한국서부발전(주), 2007)’에 보고된 현장관측 자료를 이용하였다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 조위는 대신항 검조소(PT-3)와 가로림만 입구 조석관측점(T-1)의 자료를 이용하여 모형 검증을 수행하였으며, 조류의 검증은 가로림만 내 2개 지점(C-1, C-2)에서 관측된 자료를 이용하였다.

**Fig. 2.** Garolim Bay and bathymetric chart.



(a)Daesan Port(PT-3)



(b)T-1

Fig. 3. Comparison of tidal elevations.

Table 2. Comparison of tidal currents (in cm/s)

Observed Location	M_2			S_2			K_1			O_1		
	Obs.	Cal.	Err. (%)									
C-1	65.5	87.4	33	34.9	34.1	2	7.1	8.3	17	5.4	6.1	13
C-2	49.3	58.4	18	24.2	22.6	6	5.5	5.6	1	5.5	4.1	26

Fig. 3은 조위에 대한 각 관측위치별 비교 검증한 결과이며 관측 자료와 모형의 계산 값이 잘 일치됨을 보여주고 있다. Table 2에서는 관측된 조류 유속과 모형의 계산 값을 조화상수별로 비교한 결과를 정리한 것이며 조류의 유속도 비교적 잘 일치하였다. Fig. 4는 가로림만 해역에서 수치 모의한 창조시 최강조류의 유속 분포를 도시한 것이며, Fig. 5에서는 낙조시 최강조류의 유속 분포를 보여 주고 있다.

3.2 천해 파랑 변형 모의실험

흐름에 의한 파랑변형 수치모의 실험을 위하여 SWAN 모형을 Fig. 6에 나타난 6.5 km×8.0 km 영역에 대해 계산 격자를 25 m 등간격으로 수립하였다. Fig. 4와 Fig. 5에서 나타난 최강 조류의 유속장이 포함된 대조기의 2 주기 동안 변동된 조위와 조류의 유속 조건을 매 30분마다 입력하여 조위변동에 따른 수심변화를 고려하여 파랑-흐름의 상

호작용에 의한 입사 파랑의 변형에 대한 수치모의 실험을 수행하였다. 입사 파랑의 제원으로서는 인근 외해로부터 가로림만 입구로 전파되어 들어오는 풍파(wind sea)가 입사할 경우를 가정한 NNW 방향의 파고 1 m, 그리고 한국 해양연구원(2005)에서 제안한 50년 발생 빈도의 설계파고인 NNW 방향의 3 m를 선정하였으며, 파랑 주기는 8초와 10초를 각각 사용하였다. 이러한 입사파랑 조건을 JONSWAP 스펙트럼으로 변환하여 Fig. 6의 외해경계에서 입사파랑 조건으로 주었다. 파랑변형 모의실험은 Table 3에 나타난 바와 같이 (1) 해수유동에 따른 실험해역의 수심과 조류의 변화를 고려하지 않는 경우, (2) 수심은 고정하고 조류의 변화만 고려한 경우, (3) 조류의 흐름은 없고 조위에 따른 수심변화만 고려한 경우, (4) 조위에 따른 수심변화와 조류의 시간적 변화를 둘다 고려한 경우의 모의 조건에 대해 수치실험을 실시하였다.

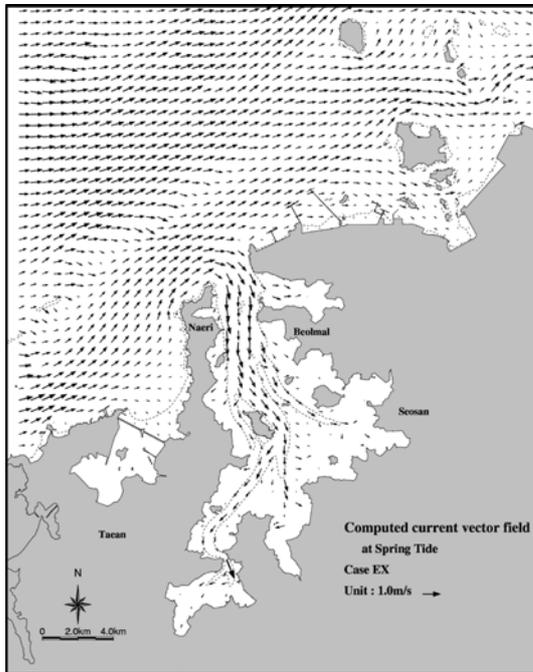


Fig. 4. Maximum flood-currents in Garolim Bay.

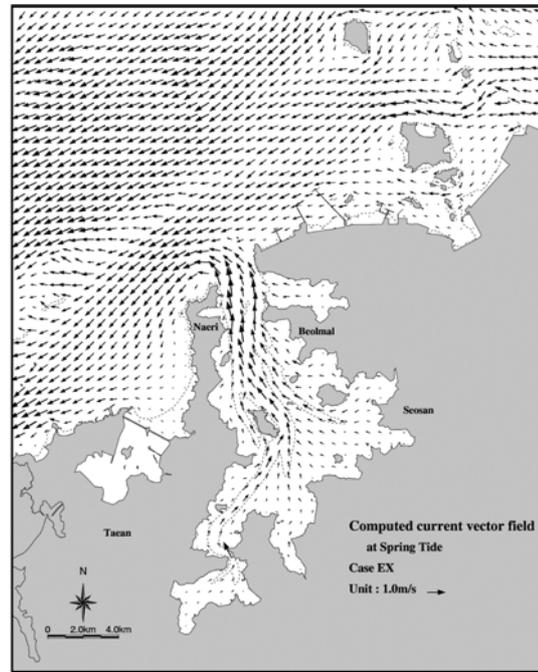


Fig. 5. Maximum ebb-currents in Garolim Bay.

3.3 파랑변형 실험 결과

친해파랑 변형에 대한 모의실험 결과는 Table 3에 정리 되어있다. 여기서 X표시는 조위의 시간적 변화 또는 조류의 흐름을 전혀 고려하지 않은 경우이며, Fig. 6에 표시된 가로림만 입구에 위치한 point2 지점에서 앞서 기술한 모

의 실험조건에 대해 계산된 입사파고의 최대 변형비를 나타낸 것이다. Fig. 7에서는 입사파고 3 m와 주기 8초에 상응하는 파랑스펙트럼이 약 2 km 거리에 위치한 만 입구의 point2와 내측의 point3지점으로 전파되어 오는 과정에서 창조류와 낙조류를 만나 변형되는 형상을 보여 주고 있

Table 3. Experimental results of wave height changes at point2(in Fig. 6)

Experiment Cases	Wave height (m)	Wave period (sec)	Tidal current	Tidal elevation	Maximum ratio(%) of wave height change		
					Flood	Ebb	
Case1	1	8	×	×	0	0	
Case2			○	×	-13.96	56.15	
Case3			×	○	0.04	-12.50	
Case4			○	○	-16.71	52.62	
Case5		10	10	×	×	0	0
Case6				○	×	-11.54	51.03
Case7				×	○	0.20	-10.86
Case8				○	○	-17.04	46.29
Case9	3	8	×	×	0	0	
Case10			○	×	-12.52	49.46	
Case11			×	○	1.76	-27.27	
Case12			○	○	-22.53	40.50	
Case13		10	10	×	×	0	0
Case14				○	×	-11.66	47.54
Case15				×	○	2.06	-28.37
Case16				○	○	-25.64	38.94

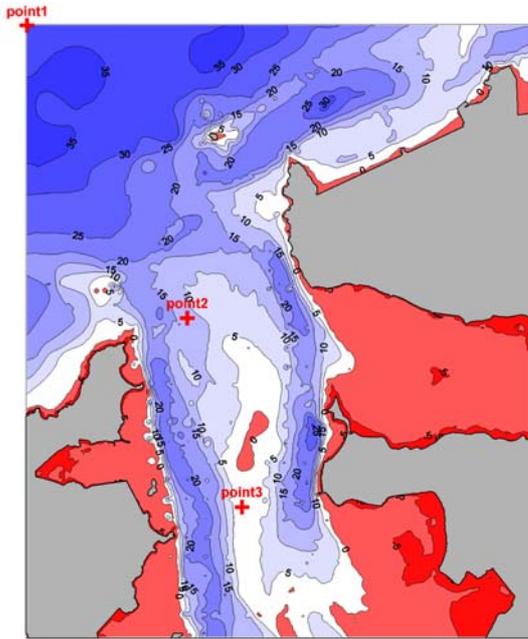


Fig. 6. SWAN model domain with 3 reference locations; point 2 is the reference site for the wave- height changes in Table 3.

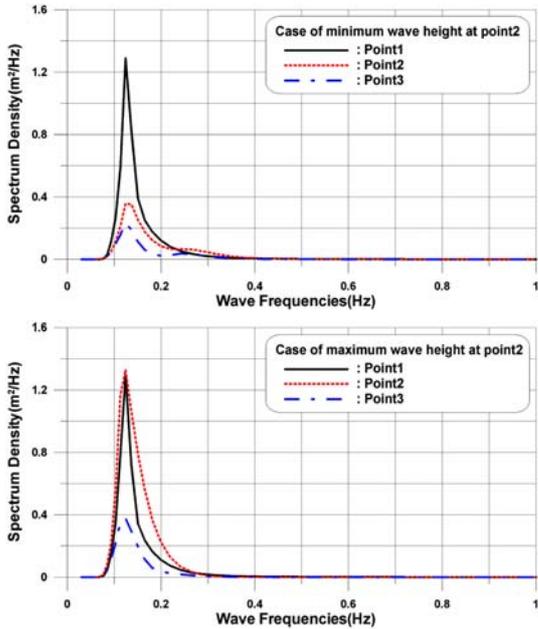


Fig. 7. Wave spectrum changes for the cases of following flood (upper)- and opposing ebb(lower)- currents.

다. 파랑 전파방향에 대해 순방향인 창조류를 만나면 스펙트럼 에너지밀도($S(f)$)가 첨두 주파수(f_p)를 중심으로 급격

히 감소하는 반면에 역방향인 낙조류를 만나면 스펙트럼 에너지 밀도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 Fig. 5에 나타난 강한 낙조류의 흐름이 있는 만 입구 point2 지점에서는 첨두 주파수(f_p) 주변의 고주파수 영역에서 에너지 밀도가 전체적으로 증가됨을 보여주고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 point2(Fig. 6)지점에서 입사파고 1 m와 3 m 각각에 대해 파고의 변형이 시간별 조건의 변동에 따라 어떻게 변하는지를 보다 자세히 볼 수 있도록 조위변화에 따른 수심과 조류 흐름의 시간적 변동 상황을 함께 보여주고 있다. 여기서 파고의 증폭 또는 감쇄를 상

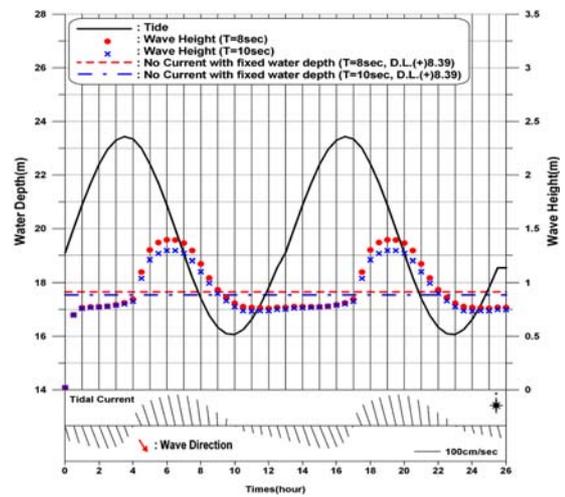


Fig. 8. Time-variation of wave height($H_0=1$ m) at the entrance of Garolim Bay(4 and 8 cases in Table 3).

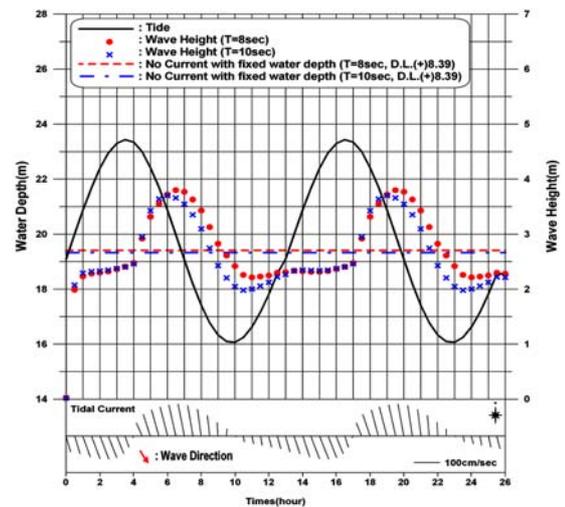


Fig. 9. Time-variation of wave height($H_0=3$ m) at the entrance of Garolim Bay(12 and 16 cases in Table 3).

대적으로 비교해서 볼 수 있도록 모의 실험조건 (I), 즉, 고정된 수심과 흐름이 없는 경우의 파고를 함께 도시하였다.

NNW 파향의 입사 파랑이 진행 방향과 역방향인 낙조류를 만나면 흐름의 세기에 비례해서 파고가 증가하고, 순방향인 창조류를 만나면 흐름의 세기에 비례해서 감소함을 보여주고 있다. 그러나 조류의 벡터에서 나타났듯이 흐름의 세기와 방향이 시간에 따라 변하기 때문에 파랑의 변형 폭은 주로 조류의 유속과 방향에 의해 결정됨을 알 수 있다. 만 입구의 point2 지점에서는 창조류의 최강유속은 1.1 m/s이며 낙조류의 경우 1.4 m/s로 전반적으로 낙조시에 더 강한 흐름을 보인다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 바와 같이 창조류의 경우 낙조류에 비해 유속도 약하지만 입사파와 만나는 방향이 순방향에서 많이 벗어나고 수심도 상대적으로 깊어져 파랑에너지의 감소가 작은 것을 알 수 있다. 최대 7.4 m의 조위변화로 인한 파고변화는 창조류시 최대수심~23.5 m 정도로 깊어져 약 2% 정도까지 증가하였으나, 조위가 가장 낮아지는 낙조류시의 최저수심~16 m에서는 해저마찰이 증가됨에 따라 최대 28% 정도로 비교적 큰 파고의 감소를 보였다. 입사 파랑의 주기에 따른 파고의 변형 비는 8초 주기의 경우 10초 일 때 보다 약간 더 크며, 이는 해저 마찰에 의한 파랑에너지 손실이 파장이 길어짐에 따라 더 커짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 가로림만 입구의 협수로 해역을 대상으로 조류의 강한흐름과 조차로 인한 수심의 시간적 변화가 큰 경우 입사 설계파랑의 천해파랑 변형을 추정하기위해 SWAN 모형으로 수치모의 실험하였다. SWAN모형의 실 해역 적용에 앞서 파랑-해류 상호작용에 의한 천해에서의 파랑스펙트럼 변형을 유도한 이론적 해석해(Suh et al. 1994)와 1-D 수조에서 모의 실험한 결과를 상호 비교 한 결과 잘 일치하였다. 가로림만 외해로부터 NNW방향의 입사 설계 파랑의 주기 8초와 10초, 파고 3 m에 대하여 모의 실험한 결과에 의하면 만 입구에서 최강유속, 1.4 m/s의 낙조류와 파랑이 상호 역방향으로 만나 파고가 40%정도 증가되었으며, 창조류의 경우에는 최강유속이 1.1 m/s로 조류 흐름의 세기도 약할 뿐만 아니라 진입파랑과 순방향에서 약간 벗어나 파고의 감소폭은 26% 정도로 작았다.

본 연구의 대상해역은 향후 520 MW 용량의 가로림 조력발전시설 건설이 예정된 해역이며 방조제, 수문, 발전장치 등 관련 구조물의 설계에 있어 보다 정밀한 설계파랑

자료가 요구된다. 본 모의 실험한 결과에 의하면 만입구의 협수로 지점에서는 강한 조류의 흐름이 상존하고 있기 때문에 설계파랑 산정에 있어 파랑-조류흐름의 상호작용에 의한 파랑변형이 가장 중요한 결정요인으로 파악되었다. 이는 강한 연안류가 흐르는 서해안과 남해안에 산재한 섬과 섬 또는 육지해안 사이의 협수로 인근 지점에서의 설계파랑 결정시에도 고려해야할 중요 요인이라 판단된다. 향후 연구과제로서는 파랑-해류 상호작용으로 야기되는 쇄파 기준과 특성(Smith, 1999)에 대한 연구와 실 해역에서 파랑 관측을 통해 보다 정밀한 모형의 검증 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 (주)헤인이앤씨의 “가로림 조력사업”의 일환으로 수행되었으며, 지원해주신 고진석 사장님께 감사드립니다. 본 논문에 인용된 문헌을 제공해주신 한국해양연구원 이동영 박사님과 세종대학교 이창훈 교수님께도 감사드립니다.

참고문헌

- 이창훈 (1998). 해류의 영향을 받는 해역에서 시간의존 파랑식의 내부조파. 대한토목학회논문집, 18(2), 195-203.
 한국서부발전(주) (2007). 가로림 조력 타당성조사(2단계) 최종보고서. 802p.
 한국해양연구원 (2005). 전해역 심해설계파 추정보고서(II). BSPE95100-1767-2, 450p.
 Booij, N. (1981). Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Report No. 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Technology.
 Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C. (1996). The SWAN model for shallow water. Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, 668-676.
 Chen, Q., Madsen, P.A., Schaffer, H.A., and Basco, D.R. (1998). Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach. Coastal Engineering, 33, 11-39.
 Eckart, C. (1951). Surface waves on water of variable depth. Rep. No. SIO51-12, Scripps Inst. of Oceanography, La Jolla, Calif.
 Hedges, T.S., Anastasiou, K. and Gabriel, D. (1985). Interaction of random waves and currents. J. Wtrwy., Port, Coast. And Oc. Engrg., 111(2), 275-288.
 Kirby, J.T. (1984). A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography. J. Geophys. Res., 89(C1), 745-747.

- Li, Y.C. (1999). Wave-current interaction. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Edited by J.B. Herbich, McGraw-Hill, 703-726.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1961). The changes of amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents. J. Fluid Mechanics, 10(4), 529-549.
- Perigrine, D.H. (1976). Interaction of Water Waves and Currents. Advances in Applied Mathematics, 16, Academic, New York, 9-17.
- Smith, J.M. (1997). One-dimensional wave-current interaction. Coastal Engineering Technical Note, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Smith, J.M. (1999). Wave breaking on an opposing current. Coastal Engineering Technical Note, IV-17, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 9.
- Sorensen, R.M. (2006). Basic coastal engineering, Springer, New York, 321.
- Suh, K.D., Kim, Y.-Y. and Lee, D.Y. (1994). Equilibrium-range spectrum of waves propagating on currents. J. Waterway, Port Coastal and Ocean Eng., 120(5), 434-450.
- SWAN. (2006). SWAN user manual. Delft University of Technology.
- Yoon, S.B. and Liu, P.L.F. (1989). Interaction of currents and weakly nonlinear water waves in shallow water. J. Fluid Mech., 205, 397-419.

원고접수일: 2009년 6월 22일

수정본채택: 2009년 7월 21일

게재확정일: 2009년 8월 5일