

불규칙 파랑의 영향을 받는 유사제트류의 수치모의 Numerical Simulation of Jet-like Currents Influenced by Irregular Waves

최준우* · 박원경* · 배재석* · 윤성범

Jun Woo Choi*, Won Kyung Park*, Jae Seok Bae* and Sung Bum Yoon**

요 지 : 수치실험을 통해 파랑과 흐름의 상호작용이 파랑전파방향과 반대방향으로 유출되는 유사제트류에 미치는 영향을 연구하였다. 파랑모형인 REF/DIF S와 흐름모형인 SHORECIRC의 결합모형을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 유사제트류의 영향으로 굴절된 파랑은 흐름의 중심영역을 따라 집중화되고 높은 파고를 갖는 파랑에서 유사제트류가 더 일찍 퍼지는 현상이 나타났다. 수치결과로부터 유출구 부근에서 유사제트류 진행의 횡방향으로 급격한 파고변화가 유사제트류를 진행방향 좌우로 퍼지게 하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 흐름의 횡방향으로 작용하는 파잉어응력 기울기항이 흐름의 진행방향으로 작용하여 흐름을 강화시키는 파잉어응력 기울기항보다 유사제트류에 더 큰 영향을 미치게 된다. 결론적으로 하구에서처럼 흐름과 반대방향으로 입사하는 파랑이 있는 곳에서는 파랑과 흐름사이의 상호영향이 반드시 고려되어야 한다.

핵심어 : 유사제트류, 불규칙파, 파랑굴절, 파랑흐름상호작용, 수치해석

Abstract : The effect of wave and current interactions on jet-like current flowing against waves was investigated based on numerical simulations. The numerical simulations were conducted using a model system of REF/DIF(a wave model) and SHORECIRC(a current model). In the simulations, irregular waves refracted due to the jet-like opposing current were focused along the centerline of current, and the jet-like current was spreaded earlier when the wave heights become larger. The numerical results show that the rapid change of wave height distribution in transverse direction near current inlet plays a significant role to spread the jet-like current. In other words, the radiation stress gradients acting in transverse direction have a more significant effect on the jet-like current than its gradients acting in flowing direction which tend to accelerate the current do. In conclusion, it is indispensable to take into account the interaction between waves and current when the jet-like current such as river mouth meets opposing waves.

Keywords : Jet-like current, irregular waves, wave refraction, wave-current interaction, numerical simulation

1. 서 론

수치실험을 통해 파랑-흐름 상호작용이 파랑과 반대방향으로 유출되는 유사제트류에 미치는 영향을 연구하였다. 파랑모형과 흐름모형을 결합하여 파랑과 유체흐름을 불규칙파의 경우에 대해 수치모의하였다. 이 수치실험을 통하여 미주 오는 유사제트류에 의한 파랑굴절로 파집중현상이 발생하므로 변화되는 유사제트류의 양상을 예측하고 이 변화양상에 대한 역학적 분석을 시도하였다.

서로 반대방향으로 전파하고 진행하는 파랑과 유사제트류에 관련된 연구는 오랜 역사에 비해 크게 진전되지 못했다. 특히 제트형태로 유출되는 흐름과 파랑의 조파를 동시에 수행하여 정상상태에 도달시켜야 하는 어려움과 파랑유도류를 포함한 파랑에 의한 흐름의 영향이 자유수면 부근에서 크게 작용함에 따른 계측의 어려움 등으로 인하여 수치실험을 통한 연구는 문헌을 찾기 어렵다. 최근 Natale and Vicinanza(2000)와 Greco et al.(2007)은 조파수조에 수온보다 높은 온도의 유사제트를 파랑전파와 동

*한양대학교 토목공학과 (Dept. of Civil Engineering, Hanyang University)

**한양대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Dept. of Civil & Environ. Engrg., Ansan, Kyunggi, 426-791, Korea. sbyoon@hanyang.ac.kr)

시에 분출시켜 이에 따른 유사제트류의 변화양상을 관측하였다. 이들은 적외선 사진의 분석을 통하여 유사제트류는 반대방향으로 전파하는 파랑에 의해 흐름진행의 횡방향으로 퍼지게 된다고 발표하였다. 이 결과는 Yoon and Liu(1990)의 파랑전파의 반대방향으로 진행되는 유사제트류는 파랑의 파고를 증가시키고 이는 다시 유사제트류를 강화시킨다는 결론과는 상충된다. 따라서 본 연구에서는 Yoon and Liu(1990)가 사용한 수치모형보다 발전된 형태를 가진 모형을 이용하여 두 상충되는 결론에 대한 원인을 파악하고 수치실험에서 발생한 유사제트류의 퍼지는 현상에 대해 역학적으로 분석한다.

본 연구를 통하여 해안의 하구와 같이 외해방향으로 유출되는 유사제트류가 발생하는 경우에 대한 파랑과 흐름의 상호작용에 따른 흐름의 변화를 예측할 수 있을 것으로 생각한다. 이러한 흐름양상의 예측은 유사제트류에 기인한 외해로의 오염물질 이동문제의 해석에 기초적인 자료를 제공할 것으로 생각한다.

2. 수치모형

흐름의 영향이 고려된 파랑변형 그리고 파랑의 영향이 고려된 흐름의 수치모의를 위해서는 흐름의 영향을 고려할 수 있는 파랑모형에 흐름모형을 결합함으로써 수행할 수 있다. 결합모형을 이용하여 파랑과 흐름 상호작용을 수치모의하기 위해서는 파랑모형에서 파랑에 의한 잉여응력(radiation stress)이 흐름모형을 위해 계산되어야 한다. 이 잉여응력의 기율기에 의해 변형된 흐름의 계산결과는 다시 파랑모형에 입력되어 반복 계산된다. 불규칙 파랑모형의 잉여응력은 주파수-방향 스펙트럼의 각 성분으로 계산된 파고와 파향을 이용하여 산정하고 스펙트럼에 대해 합산하여 산정하게 된다. 본 연구에 사용된 파랑 수치모형인 REF/DIF S (Kirby and Özkan, 1994), 그리고 흐름 수치모형인 SHORECIRC (Svendsen et al., 2002, Putrevu and Svendsen, 1999)는 각각 독립적으로 개발되었으며, 그 결

과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 게재되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

3. 모형 set-up

파랑과 흐름의 상호작용을 통한 파랑전파의 반대방향으로 진행되는 유사제트류의 변화양상을 수치실험하기 위해 Fig. 1과 같은 경계조건과 0.46 m의 일정수심을 갖는 수치수조를 구성하여 협대역 및 광대역 다방향 주파수 스펙트럼 불규칙파의 경우를 수치모의하였다. 불규칙파 스펙트럼은 TMA 주파수분포(Bouws et al., 1985)와 wrapped normal 방향분포함수(Borgman, 1984)를 이용하여 각각 유의파 파고에 해당하는 에너지를 81개의 주파수 성분과 121개의 방향 성분으로 나누어 구성하였다. 7 cm와 10 cm의 유의파고를 입력조건으로 800 sec 동안에 대한 실험이 수행되었다. 세부 실험조건과 스펙트럼을 만들기 위한 파라미터들을 Table 1에 나타내었다. 여기서 와 는 각각 주파수와 방향스펙트럼의 분산정도를 나타내는 계수이다. 유사제트류를 수치모의하기 위해 유입유속이 10 cm/s가 되도록

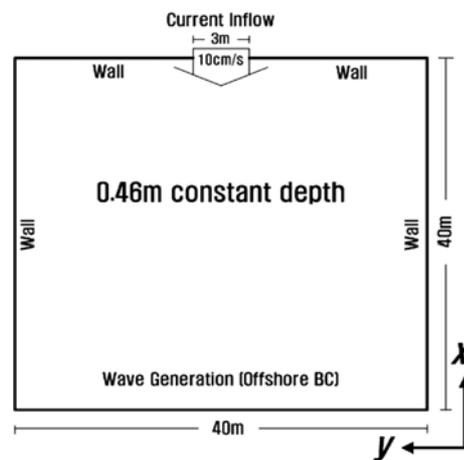


Fig. 1. Bathymetry and boundary conditions.

Table 1. Input wave and current conditions

Wave input conditions		Peak Period (sec)	Significant wave height (cm)	γ	σ (degree)	Influx velocity (cm/s)
No waves		-	-	-	-	10
Non-breaking Case	Narrow direction-frequency	1.3	7	20	10	10
	Broad direction-frequency	1.3	7	2	30	10
Breaking Case	Narrow direction-frequency	1.3	10	20	10	10
	Broad direction-frequency	1.3	10	2	30	10

록 고정된 수위에 따른 유량을 Fig. 1과 같이 3 m폭을 통하여 유입시켰다. 그리고 수조에 유입된 유량만큼을 매 계산시간마다 전체수조에 걸쳐 일정수면변위를 감소시켜 연속방정식을 만족시켰다.

파랑과 흐름의 상호작용을 모의하기 위해 파랑모형과 흐름모형 각각을 부프로그램(sub-program)으로 하는 주프로그램(main-program)을 작성하여 파랑정보와 흐름정보의 상호교환(feedback)을 조절하게 하였다. 파고의 변화가 흐름 변화에 비해 느리다는 가정 하에 10초 동안의 흐름계산 후 파랑계산을 1회 수행하는 형식을 취하였다. 결합모형을 위한 공간격자간격은 0.1 m×0.1 m, 시간간격은 0.02초로 하였다. 수치모의를 위한 모형의 물리적 혹은 경험적 상수들

은 각 모형의 초기 설정치를 사용하였다.

REF/DIF S와 SHORECIRC를 결합시킨 모형의 경우 횡방향 중복파 발생시 REF/DIF S에서 계산해 내는 잉여응력에 오류가 발생한다(최준우 등, 2007). 그러나 중복파의 영향이 적은 불규칙파를 수치모의할 경우는 그 적용성에 문제가 없다. 그러므로 불규칙파의 경우만을 수치모의하였다.

4. 수치모의

협대역과 광대역 스펙트럼 불규칙파와 반대방향으로 진행되는 유사제트류의 변화양상을 수치실험한 결과를 Figs. 2와 3에 나타내었다. 파랑이 없는 경우(A), 유의파고가

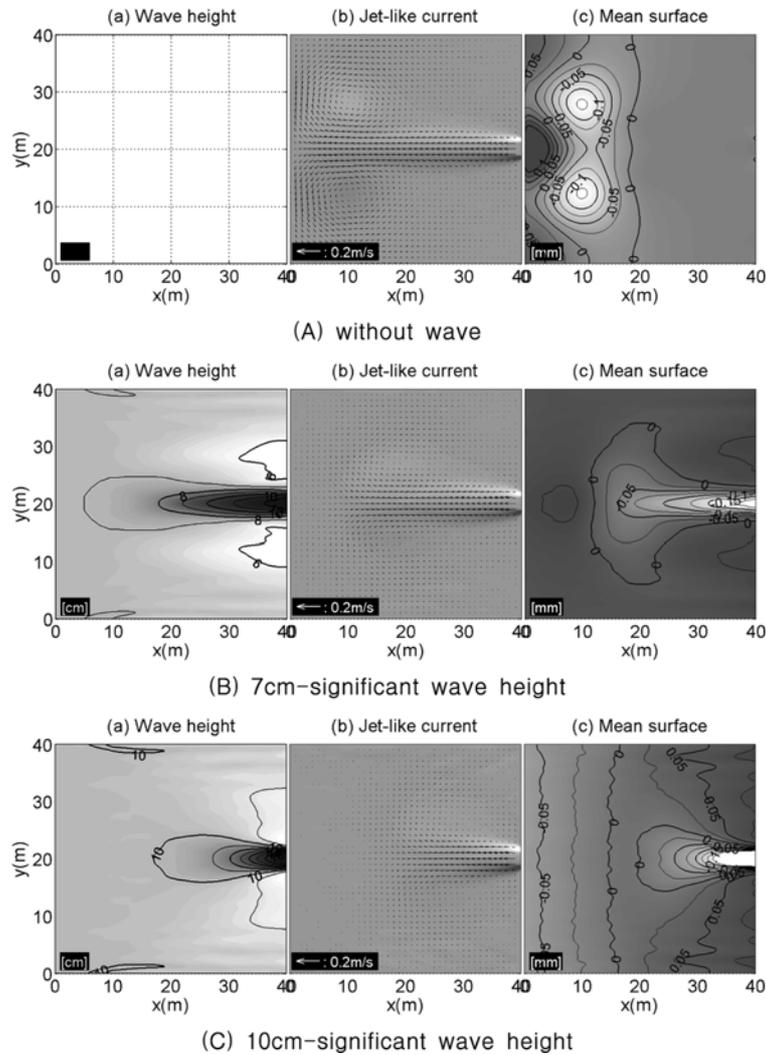


Fig. 2. Wave height, velocity vectors, mean surface elevation distribution resulted from 800 sec-simulation with the narrow-banded spectral wave condition.

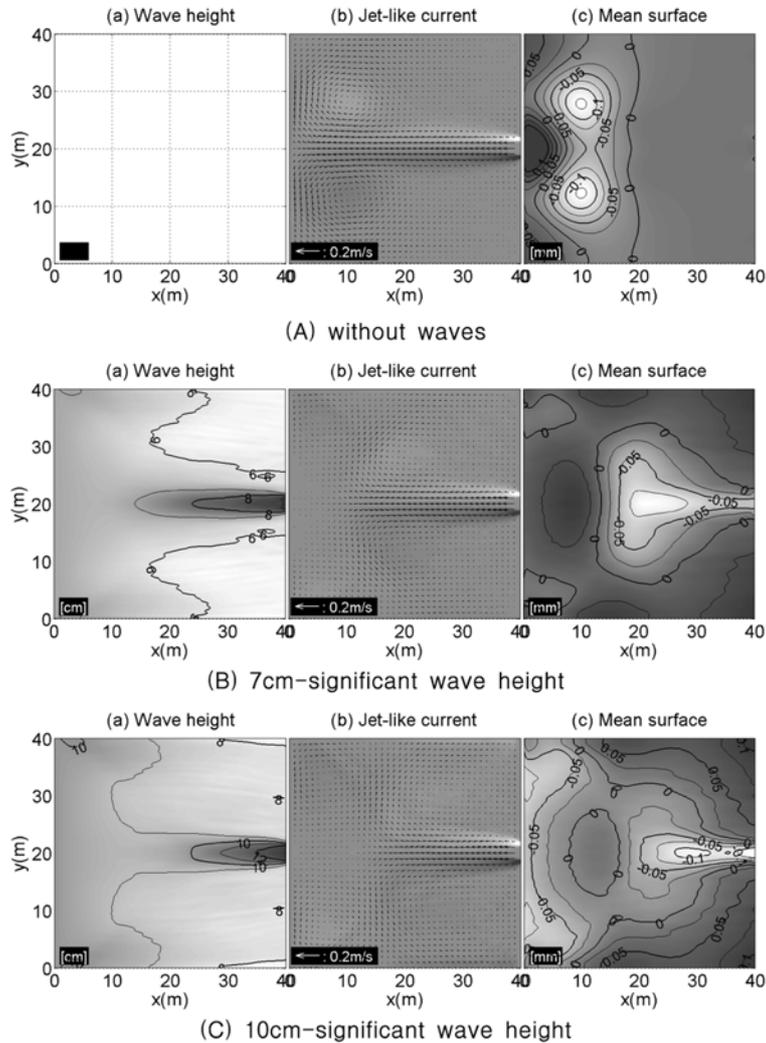


Fig. 3. Wave height distribution, velocity vectors, mean surface elevation resulted from 800 sec-simulation with the broad-banded spectral wave condition.

7 cm인 경우(B), 유의파고가 10 cm인 경우(C)에 대하여 파고분포, 시간평균 유속벡터, 평균수면변위를 도시하였다.

파랑이 존재하는 경우의 파고분포를 통하여 유사제트류에 의한 파랑굴절로 파랑집중화 현상이 발생하고 이로 인하여 유사제트류 중심부에 파고가 상승된 것을 알 수 있다. 파랑이 없는 경우, 파고가 작은 경우, 파고가 큰 경우의 순서로 유사제트류가 발달되지 못하고 진행방향의 좌우로 퍼지는 현상이 강해지는 것을 속도벡터도를 통해 알 수 있다. 이와 같은 사실은 Fig. 4의 세 경우에 대한 파고분포와 유속분포의 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 이는 파고의 자승에 비례하여 바닥마찰 저항이 증가하고, 쇄파

에 의한 난류효과가 증가하며, 또한 파랑에 의한 잉여응력 기울기(즉, 단위면적당 파랑잉여력)가 증가한 때문이다. 이 가운데 바닥마찰저항과 난류효과가 유사제트류 발달을 방해하는 형태로 작용한다는 것은 자명하므로 파랑잉여력이 흐름에 미치는 영향에 대한 분석을 Figs. 5와 6을 이용하여 다음에 기술한다.

Fig. 5에 협대역 불규칙파의 10 cm 유의파고의 경우에 대하여 파랑잉여력의 4개 성분을 각각 벡터도로 파고분포와 함께 표시하였다. x 방향으로 작용하는 dS_{xx}/dx 와 dS_{xy}/dy 가운데 dS_{xx}/dx 는 유사제트류를 강화시키는 방향으로 작용하며, dS_{xy}/dy 는 유사제트류를 약화시키는 방향으로 작

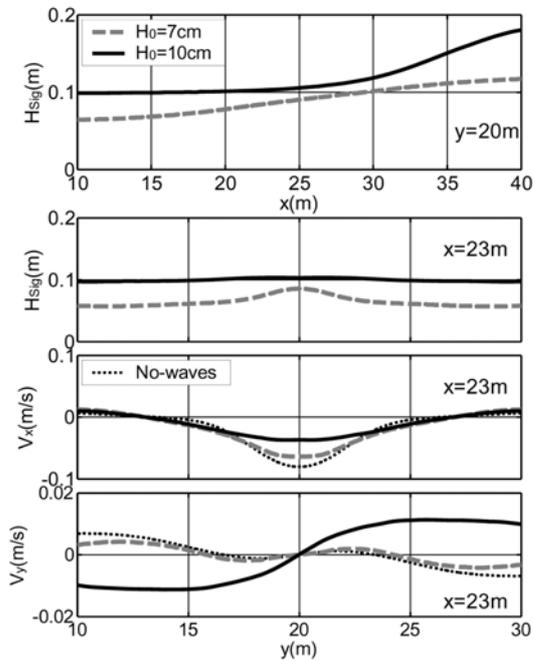


Fig. 4. Wave height and current velocity of the 7 cm- and the 10 cm-Hsig narrow-banded spectral wave cases.

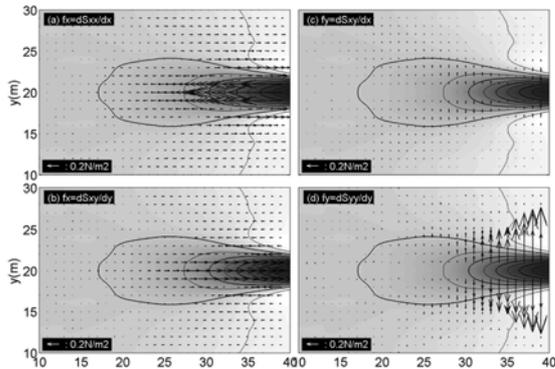


Fig. 5. Each radiation stress gradient vector with wave height distribution of the 10 cm-Hsig narrow banded spectral wave case.

용한다고 할 수 있다. 또한, y 방향으로 작용하는 dS_{xy}/dx 와 dS_{yy}/dy 가운데 dS_{xy}/dx 보다 dS_{yy}/dy 가 유사제트류에 큰 영향을 줄 것으로 생각할 수 있다. Fig. 6에 x 와 y 방향으로 작용하는 파랑잉여력 각 항과 그 합력을 벡터도로 파고분포와 함께 도시하였다. 파랑잉여력은 기울기의 감소방향으로 작용하므로 x 방향의 파랑잉여력은 유사제트류의 진행을 가속시키고, y 방향의 파랑잉여력은 유사제트류의 진행을 방해한다고 생각할 수 있다. 또한, 유사제트류에 의

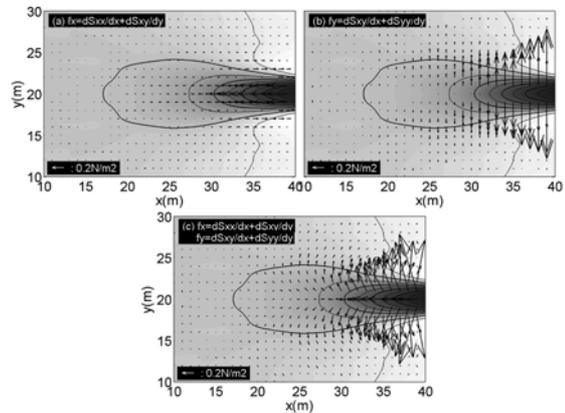


Fig. 6. (a) x -directional and (b) y -directional vectors of the gradient of radiation stress and (c) their vector sum with wave height distribution of the 10 cm-Hsig narrow banded spectral case.

해 증폭된 파고분포의 기울기가 유사제트류의 유출방향보다 유출방향 좌우로 더 급하므로 y 방향 파랑잉여력이 더 우세하게 작용하여 유사제트류가 유출방향으로 더 발달하지 못하고 횡방향으로 퍼지게 하는 역할을 한다고 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위해서 10 cm 유의파고의 경우에 대하여 인위적으로 x 방향 파랑잉여력은 고려하고 y 방향 파랑잉여력은 무시하여 수치해석을 실시하고 그 반대의 경우도 수치해석하여 그 결과를 Figs. 7과 8에 도시하였다.

Figs. 7과 8에서 y 방향 파랑잉여력만을 고려한 경우에 유사제트류는 유출구 근처에서 횡방향으로 일찍 퍼지고 그로 인하여 파랑집중에 의한 파고분포가 길게 발달하지 못함을 알 수 있다. 그러나 x 방향 파랑잉여력만을 고려한 경우, 모든 파랑잉여력을 고려한 유의파고 10 cm의 경우에 비해 유사제트류가 강화되었고 그에 따른 파고분포도 길게 발달했음을 알 수 있다. 비록 파랑이 있는 경우에 증가된 마찰저항으로 파랑이 없는 경우에 비해 유사제트류가 약화되는 경향이 있지만, x 방향 파랑잉여력은 유사제트류를 강화시키고, y 방향의 파랑잉여력은 유사제트류를 약화시킨다는 사실을 확인할 수 있었다. x 방향 파랑잉여력 가운데 dS_{xy}/dy 항 역시 유출 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 하므로(Yoon and Liu, 1990), dS_{xx}/dx 항의 잉여력만이 유사제트류의 진행방향으로 작용하여 유사제트류를 강화시키는 역할을 할뿐 나머지 잉여력들은 모두 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

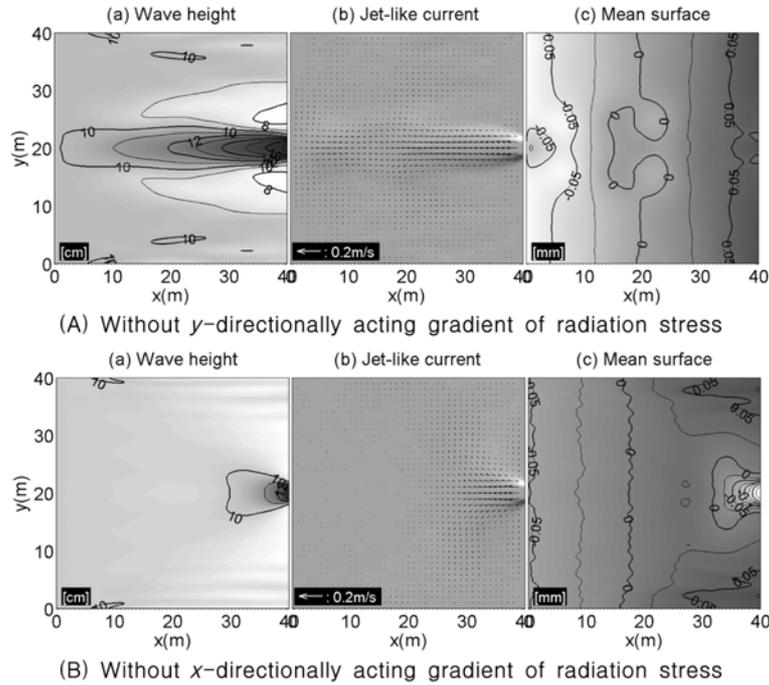


Fig. 7. Wave height, velocity vectors, mean surface elevation distribution resulted from 800 sec-simulation with the 10cm-Hsig narrow banded spectral wave case.

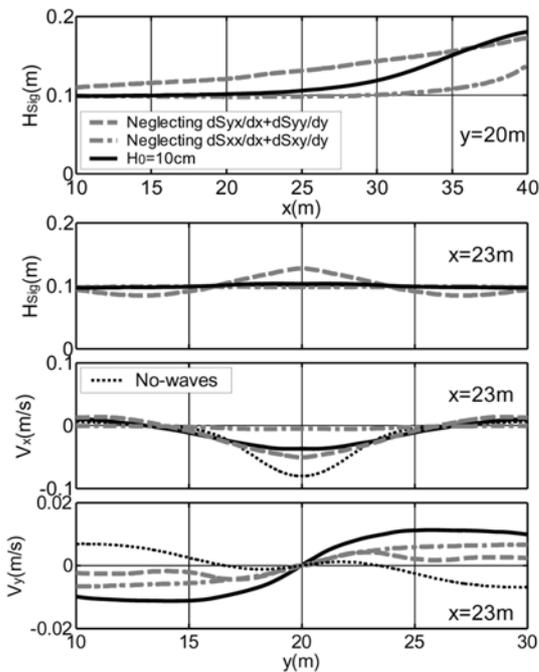


Fig. 8. Results obtained by neglecting either x- or y-directional force due to the gradient of radiation stress for the 10 cm-Hsig case.

이러한 결과분석으로부터 Yoon and Liu(1990)의 수치 모의 가운데 y방향으로 작용하는 파랑잉여력을 무시하여 유사제트류가 마주오는 파랑에 의해 가속된다는 결론을 얻게 된 것으로 생각된다. 다시 말해서, 파랑이 유사제트류 진행의 반대방향으로 전파하는 경우, 유사제트류에 의해 증폭된 파랑의 잉여력 dS_{xx}/dx 은 유사제트류를 강화시키는 역할을 하지만, 바닥마찰 및 쇠파난류저항뿐만 아니라 dS_{xx}/dx 항을 제외한 파랑잉여력은 모두 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 하여 유사제트류를 횡방향으로 퍼지게 함을 알 수 있다.

5. 결 론

불규칙파 경우에 대하여 평균개념의 결합모형을 이용한 수치모의를 통하여 파랑진행방향의 반대방향으로 유출되어 진행되는 유사제트류가 계속 발달하지 못하고 파랑의 집중화로 인한 영향에 의해 횡방향으로 퍼짐을 알 수 있었다. Fig. 9에 그 역학적 개념을 도시하였다.

유사제트류가 파랑에만 영향을 준다면 상승된 파고의 분포는 유사제트류의 중심부를 따라 유사제트류의 발달과 함께 길게 나타날 것이지만 파랑의 집중화에 따른 증가된 마

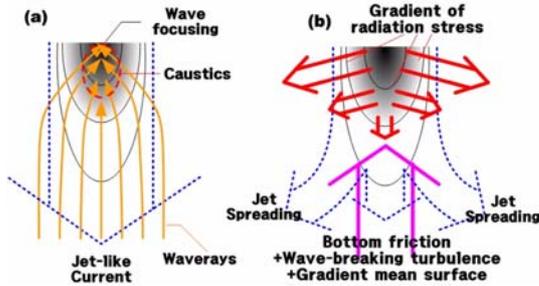


Fig. 9. Conceptual sketch of jet-like current spreaded due to radiation stress gradient of focused wave height distribution.

찰저항 및 쇠파난류효과 그리고 파랑잉여력의 작용으로 유사제트류는 횡방향으로 퍼지게 되고, 따라서 유사제트류의 중심부의 파랑집중화 현상으로 인한 파고상승의 효과도 줄어들어 유사제트류의 유출부 부근에만 남게됨을 알 수 있었다. 결론적으로 파랑과 흐름의 상호작용이 유사제트류의 발달양상 변화에 미치는 영향은 매우 중요함을 알 수 있다.

이러한 결론으로부터 하구나 외해방향으로 유출되는 유사제트류가 있는 곳에서 오염물이 높은 파랑이 있는 경우 외해쪽으로 빠져나가지 못하고 하구(유출구)근처의 해안에 머물게 됨을 예상할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(지진해일 재해저감기술 개발, 과제번호: NEMA-06-NH-06)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

최준우, 백운일, 윤성범 (2007). 수중타원형 천퇴를 통과하는 규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형. 한국해양해양공학

회지, 19(6), 557-564.

Borgman, L.E. (1984). Directional spectrum estimation for the Sxy gages. Technical Report. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg.

Bouws, E., Gunther, H., Rosental, W., Vincent, C.L. (1985). Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, Part I-spectral form. Journal of Geophysical Research, 90(C1), 975-986.

Greco, R., Vicinanza, D., Natale, M. (2007). Wave-jet nonlinear interaction: Mathematical model development and experimental results. Intl. J. Offshore and Polar Eng., 17(2), 119-124.

Kirby, J.T., Özkan, H.T. (1994). Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S, version 1.1, User Manual. Technical Report CACR-94-04, University of Delaware.

Natale, M., Vicinanza, D. (2000). Experimental velocity profiles in wave-jet interaction. ISOPE-2000: 10th Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, USA, 639-646.

Putrevu, U., Svendsen, I.A. (1999). Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 409-427.

Svendsen, I.A., Hass, K., Zhao, Q. (2002). Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC version 2.4, User Manual, Technical Report, University of Delaware.

Yoon, S.B., Liu, P.L.-F. (1990). Effects of opposing waves on momentum jet. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 116(5), 545-557.

Received October 1, 2008

Accepted October 14, 2008