

수치모의를 통한 유사제트-파랑의 상호작용 해석

최준우*, 배재석**, 노민***, 윤성범****

Analysis of Interaction of Jet-like Current and Wave using Numerical Simulation

Junwoo Choi*, Jae Seok Bae**, Min Roh*** and Sung Bum Yoon****

Key Words : Jet-like current; waves; wave refraction; wave-current interaction; numerical simulation

Abstract

The effect of wave and current interactions on jet-like current flowing against waves was investigated based on numerical simulations. The numerical simulations are conducted by a combined model system of REF/DIF(a wave model) plus SHORECIRC(a current model) and a Boussinesq equation model, FUNWAVE. In the simulations, regular and irregular waves refracted due to the jet-like opposing current were focused along the core region of current, and the jet-like current was earlier spreaded when the waves had larger wave heights. 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 gradients of radiation stress forcing in transverse direction have a more significant effect on the jet-like current than its relatively small gradients forcing in flowing direction, which tend to accelerate the current, do. In conclusion, it is indispensable to take into account the interaction effect of wave transformation and current characteristics when waves meet the opposing jet-like current such as river mouth.

1. 서론

수치실험을 통해 파랑과 흐름의 상호작용이 파랑 전파에 반대방향으로 진행되는 유사제트류에 미치는 영향을 연구하였다. 유체 흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있는 Boussinesq 방정식모형을 이용하여 규칙파를 그리고 파랑모형과 흐름모형을 결합하여 불규칙파를 수치모의하였다. 이 수치실험을 통하여 마주 오는 유사제트류에 의한 파랑굴절로 파집중현상이 발생하므로 변화되는 유사제트류의 양상을 예측하고 이 변화양상에 대한 역학적 분석을 시도하였다.

서로 반대방향으로 전파하고 진행되는 파랑과 유사제트류에 관련된 연구는 오랜동안 크게 진보되지 못했다. 특히 제트형태로 분출되는 흐름과 파랑의 조파를 동시에 수행하여 정상상태에 도달시켜야 하는 어려움과 파랑유도류를 포함한 파랑에 의한 흐름의 영향이 자유수면 부근에서 크게 작용함에 따른 계측의 어려움등으로 인하여 수치실험을 통한 연구는 문헌을 찾기 어렵다. 최근 Natale et al.(2000)과 Greco et al.(2007)은 조파수조에 수온보다 높은 온도의 유사제트를 파랑전파와 동시에 분출시켜 이에 따른 유사제트류의 변화양상을 관측하였다. 이들은 적외선 사진의 분석을 통하여 유사제트류는 반대방향으로 전파하는 파랑에 의해 흐름진행의 횡방향으로 퍼지게 된다고 발표하였다. 이 결

과는 Yoon and Liu(1990)의 파랑전파의 반대방향으로 진행되는 유사제트류는 파랑의 파고를 증가시키고 이는 다시 유사제트류를 가속시킨다는 결론과는 상충된다. 따라서 본 연구에서는 Yoon and Liu(1990)가 사용한 수치모형보다 발전된 형태를 가진 모형을 이용하여 두 상충되는 결론에 대한 원인을 파악하고 수치실험에서 발생된 유사제트류의 퍼지는 현상에 대해 역학적으로 분석한다. 이를 통하여 해안의 강어귀에서 발생하고 있는 파랑과 유사제트류의 상호작용에 따른 흐름변화를 예측할 수 있도록 하고자 한다.

2. 수치모형

2.1 모형의 개요

흐름의 영향이 고려된 파랑변형 그리고 파랑의 영향이 고려된 흐름의 수치모의를 위해서는 유체흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있는 Boussinesq 방정식모형을 사용하거나 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 기술기에 의해 발생된 흐름의 계산결과는 다시 파랑모형의 입력조건으로 하여 반복 계산된다. 불규칙 파랑모형의 잉여응력은 주파수-방향 스펙트럼의 각 성분으로 계산된 파고와 파향을 이용하여 산정하고 스펙트럼에 대해 합산하여 산정하게 된다. 순간 유체흐름과 파랑을 동시에 계산할 수 있는 FUNWAVE는 Wei et al.(1995)에 소개된 비선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 하며, Chen

* 한양대학교 토목공학과, wavechoi@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 토목공학과, bijae194@hanyang.ac.kr

*** 한양대학교 토목공학과, mincr@hanyang.ac.kr

**** 한양대학교 토목환경공학과, sbyoon@hanyang.ac.kr

et al.(2003)은 비회전성 가정으로 유도된 이 지배방정식의 운동 방정식에 부분적 회전을 고려할 수 있도록 추가항을 첨가하여 개선된 모형을 개발하였다. 이 항은 수직방향 2차 비선형 효과를 포함한 와도(vorticity)를 나타낸다. FUNWAVE는 수치모의를 위한 바다마찰, 쇄파, 내부조파 및 흡수층에 대한 부가적 모형들을 포함하고 있다. 이 두 모형체계, 즉 Boussinesq 방정식모형과 결합모형의 가장 큰 차이점은 전자의 경우 파랑의 위상정보를 포함한 결과를 얻을 수 있지만 후자의 경우는 파랑의 위상정보가 사라질 수 있을 정도의 시간간격으로 이동평균된 평균적 개념의 결과를 얻게되는 것이다.

본 연구에 사용된 수치모형인 FUNWAVE(Wei et al., 1995, Kirby et al., 1998, Kennedy et al., 2000, Chen et al., 2003), REF/DIF S(Kirby and Özkan, 1994) 그리고 SHORECIRC(Svendsen et al., 2002, Putrevu and Svendsen, 1999)는 각각 독립적으로 개발되어 그 결과들이 충분히 검증되어 많은 문헌에 게재되어 있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

2.2 모형 setup

파랑과 흐름의 상호작용을 통한 파랑전파의 반대방향으로 진행되는 유사제트류의 변화양상을 수치실험하기 위해 Fig.1과 같은 경계조건과 0.46m의 일정수심을 갖는 수치수조를 구성하여 규칙파의 경우와 협대역 다방향 주파수 스펙트럼 불규칙파의 경우를 수치모의하였다. 불규칙파 스펙트럼은 TMA 주파수분포(Bouws et al.,1985)와 wrapped normal 방향분포(Borgman, 1984)함수를 이용하여 각각 유의파 파고에 해당하는 에너지를 81개의 주파수 성분과 121개의 방향 성분으로 나누어 Table 1에 나타나있는 파라미터들을 사용하여 구성하였다. 또한 쇄파의 발생여부에 따라 0.04와 0.1(0.14)m의 파고를 입력조건으로 실험이 수행되었다. 유사제트류를 수치모의하기 위해 고정된 수위에 따른 유량을 그림과 같이 3m폭을 통하여 유입시키고 수조에 유입된 유량만큼을 매 계산시간마다 전체수조에 걸쳐 일정수면변위를 감소시키므로 연속방정식을 만족시켰다.

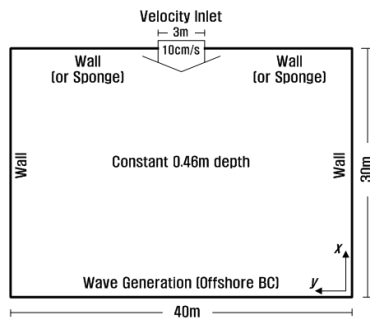


Fig. 1. Bathymetry and boundary conditions.

파랑과 흐름의 상호작용을 모의하기 위해 파랑모형과 흐름모형을 부프로그램(sub-program)으로 하는 주프로그램(main-program)을 작성하여 파랑정보와 흐름정보의 입출력(feedback)을 조절하게 하였다. 파고의 변화가 흐름변화에 비해 느리다는 가정 하에 10초 동안의 흐름계산 후 파랑계산을 하는 형식을 취하였다. FUNWAVE와 결합모형을 위한 공간격자간격은 0.1m× 0.1m, 시간간격은 0.02초로 하였고, FUNWAVE의 내부조파와 흡수층계를 제외하고 반사경계를 사용하였다. 수치모의를 위한 모형의 물리적 혹은 경험적 상수들은 각 모형의 초기 설정치를 사용하였다.

Table 1. Input wave conditions.

Wave input conditions		Peak Period (sec)	Significant wave height (cm)	γ	σ (degree)
Non-breaking Case	Monochromatic	1.3	4	-	-
	Narrow direction-frequency	1.3	4	20	10
Breaking Case	Monochromatic	1.3	14	-	-
	Narrow direction-frequency	1.3	10	20	10

FUNWAVE의 경우 다방향 불규칙파 조파시 스펙트럼의 각 성분에 무작위(random)위상을 사용하므로 각 방향성분의 위상차에 따라 평탄한 지형에서도 파고분포가 일정하지 않고, 횡방향으로 불규칙한 변화를 보이게 되고(최준우 등, 2007b) 이는 유사제트류를 충분히 발달시켜 정상상태에 도달시키기 어렵다. 또한, REF/DIF와 SHORECIRC를 결합시킨 모형의 경우 중복파가 발생시 REF/DIF에서 계산해 내는 잉여응력에 오류가 발생한다(최준우 등, 2007a). 그러나 중복파의 영향이 적은 불규칙파를 수치모의할 경우는 그 적용성에 문제가 없다. 따라서 규칙파를 수치모의하기 위해 FUNWAVE를 이용하고 불규칙파를 수치모의하기 위해 파랑모형인 REF/DIF와 흐름모형인 SHORECIRC를 결합하여 이용하였다.

3. 수치모의

3.1 불규칙파(협대역 스펙트럼)

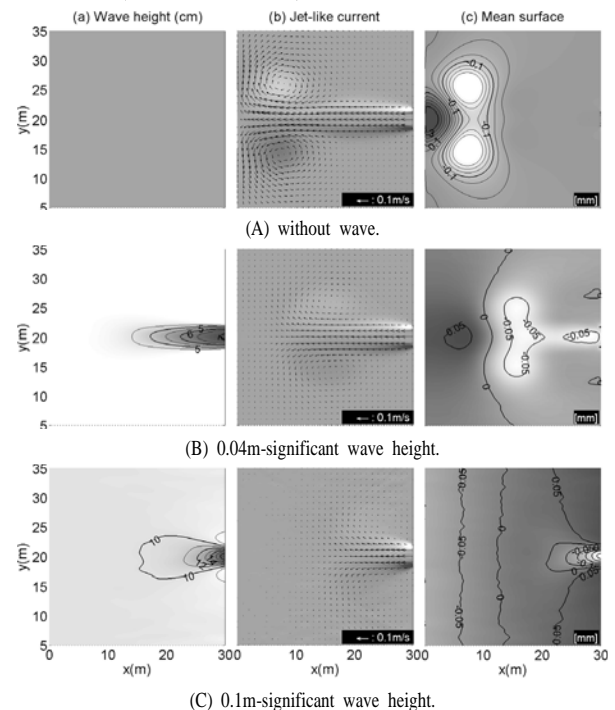


Fig. 2. Wave height, velocity vectors, mean surface elevation distribution resulted from 800sec-simulation(REF/DIF+SHORECIRC).

협대역 스펙트럼 불규칙파 전파의 반대방향으로 진행되는 유사제트류의 변화양상을 수치실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 파랑이 없는 경우(A), 쇄파가 발생하지 않는 경우(B), 쇄파가 발생하는 경우(C)에 대하여 파고분포, 유속벡터, 평균수면변위를

도시하였다. 파랑이 존재하는 경우의 파고분포를 통하여 유사제트류에 의한 파랑굴절로 파랑집중화 현상하고 이로 인하여 유사제트류 중심부에 파고가 상승된 것을 알 수 있다. 파랑이 없는 경우와 쇄파가 발생하지 않는 경우의 평균수면변위에서는 유사제트류의 와류에 의한 변화가 나타나지만, 쇄파가 있는 경우에는 잉여응력에 의한 평균수면변위의 쇄파후 수면상승변화가 와류에 의한 변화보다 두드러져 잘 나타나지 않는다. 가장 중요한 차이는 파랑이 없는 경우, 쇄파가 일어나지 않는 파고가 작은 경우, 파고가 큰 경우의 순서로 유사제트류가 발달되지 못하고 진행의 좌우로 퍼지는 것을 속도벡터도를 통해 알 수 있다. 이는 파랑이 존재하여 파고의 자승에 비례하여 바닥마찰 저항이 증가하고, 쇄파에 의한 난류효과 증가, 그리고 파랑에 의한 잉여응력 기울기(단위면적당 파랑잉여력)에 기인한 것이다. 이 가운데 바닥마찰저항과 난류효과가 유사제트류 발달을 방해하는 형태로 작용한다는 것은 자명하므로 파랑잉여력이 흐름에 미치는 영향에 대한 분석을 Fig. 3을 이용하여 다음에 기술한다.

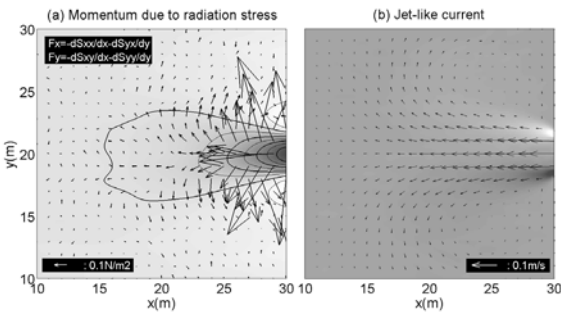


Fig. 3. Radiation stress gradient vectors with wave height distribution and jet-like current vectors(0.1m-significant wave height).

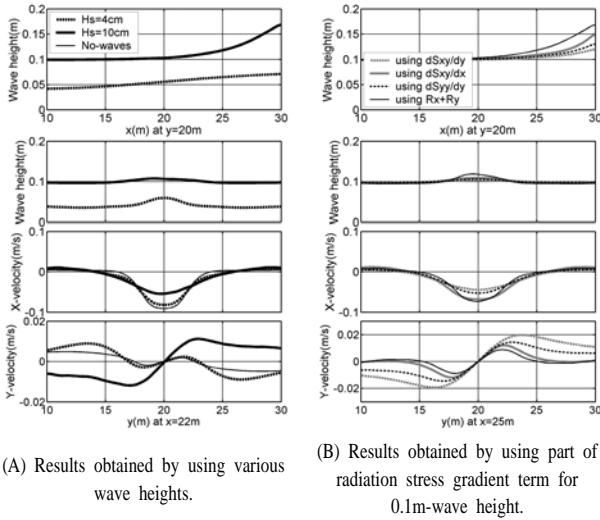


Fig. 4. Comparisons of wave height and jet-like current velocity distributions (RFF/DIF+SHORECIRC).

Fig. 3에 쇄파가 발생하는 0.1m 파고의 경우에 대한 유속벡터도와 x와 y방향으로 작용하는 파랑잉여력 항을 이용한 벡터도를 파고분포와 함께 도시하였다. 그림에서 유사제트류에 의해 증폭된 파고분포의 기울기가 파랑진행방향이 아닌 진행방향 좌우로 더 급한 것을 알 수 있다. 따라서 기울기의 하강방향으로 작용하는 파랑잉여력은 유사제트류 진행의 횡방향으로 더 우세하게 작용하여 유사제트류가 유출방향으로 더 발달하지 못하고 횡방향으로 퍼지게 하는 역할을 함을 알 수 있다. Fig. 4(A)는 조파 파고 4cm와 10cm에 의한 파고분포와 파랑이 없는 경우를 포함

한 잉여력에 의해 변형된 유사제트류의 분포를 나타내고 있다. 쇄파가 일어나는 큰 파고를 갖는 경우가 작은 파고의 경우보다 유사제트류를 더 많이 퍼지게 한다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(B)는 4개 잉여력항 각각의 유사제트류에 대한 역할을 분석하기 위해 dS_{xx}/dx 항을 제외한 항들을 선택적으로 작용시킴으로 수치모의의 결과를 나타내고 있다. 파랑잉여력 가운데 x방향으로 작용하는 dS_{xy}/dy 와 y방향으로 작용하는 dS_{yx}/dx 와 dS_{yy}/dy 를 각각 따로 작용시켰을 때 정도의 차이는 있으나 유사제트류의 변형양상이 모두 유출방향으로 발달하지 못하고 모든 잉여력을 작용시켰을 때보다 일찍 좌우로 퍼지는 것을 알 수 있었다. 따라서 dS_{xx}/dx 항의 잉여력만이 유사제트류의 진행방향으로 작용하여 유사제트류를 가속시키는 역할을 할뿐 나머지 잉여력들은 모두 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 한다는 것을 유추할 수 있다. 이 결과분석으로부터 Yoon and Liu(1990)의 수치모의 가운데 y방향으로 작용하는 파랑잉여력을 무시했다는 점과 쇄파에 의한 난류영향을 고려하지 않았다는 점으로 인하여 유사제트류가 마주오는 파랑에 의해 가속된다는 결론을 얻게 된 것으로 생각된다. 다시말해서, 파랑이 유사제트류 진행의 반대방향으로 전파하는 경우, 유사제트류에 의해 증폭된 파랑의 잉여력항 dS_{xx}/dx 는 유사제트류를 가속시키는 역할을 하지만, 바닥마찰 및 쇄파난류저항뿐만 아니라 dS_{xx}/dx 항을 제외한 파랑잉여력은 모두 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 하여 유사제트류를 횡방향으로 퍼지게함을 알 수 있었다.

3.2 규칙파

앞에서 언급한 것처럼 파랑모형과 흐름모형의 결합으로 파랑과 흐름을 수치모의하게 되면 모형의 지배방정식이 갖는 특성상 파랑의 위상정보가 사라질 수 있을 정도의 시간간격으로 이동평균된 결과를 얻게된다. 평균적 개념의 파랑잉여력에 의한 평균흐름이 아닌 실제 순간적인 물리현상을 고찰하기 위해 순간적 파랑과 흐름을 계산해 낼 수 있는 FUNWAVE를 사용하여 규칙파에 관하여 수치모의하여 그 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다.

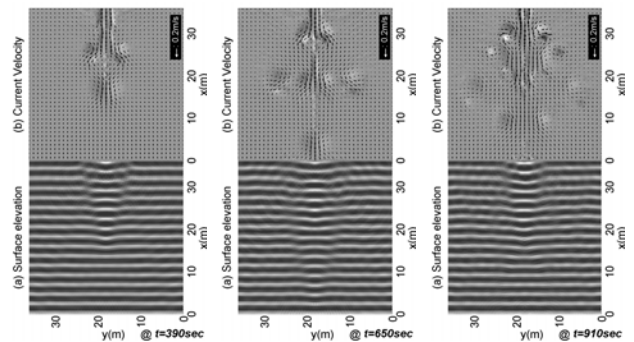


Fig. 5. Instantaneous snapshots of velocity vectors and free surface elevation distribution(FUNWAVE).

Fig. 5에 파랑의 모습을 나타내는 순간 자유수면변위와 이에 따라 변화하는 20초 평균 흐름장을 벡터도로 나타내었고 Fig. 6에 200초동안의 결과시계열을 이용하여 파고분포, 흐름벡터, 그리고 평균수면변위를 도시하였다. FUNWAVE를 이용하여 규칙파를 수치모의한 경우에서도 역시 마주오는 유사제트류에 의해 파랑은 굴절되고 굴절에 의한 파집중화 현상으로 유사제트류 중심에 파고의 증폭이 발생했다. 이러한 파랑의 변형에 의해 유사제트류는 유출방향의 횡방향으로 퍼지는 양상을 가지게 됨을 알 수 있었다. 순간변수를 계산하는 FUNWAVE의 결과는 완전한

정상상태의 결과를 갖지 못하고 발달하는 유사제트류에 의해 집중된 파랑이 쇄파하며 유사제트류의 발달을 일시적으로 방해하며 횡방향으로 퍼트리면 유사제트류는 다시 발달하여 파랑을 집중화시키는 양상을 반복하여, 평균적으로 유사제트류가 퍼지는 결과를 만든다. 따라서 횡방향으로 퍼지는 흐름이외에 유사제트류의 발달방향으로 흐르는 부분적인 흐름이 주기적으로 진행함을 알 수 있다. 불규칙파의 경우와 비교해서 그 결과를 기술하기엔 규칙파와 불규칙파라는 파랑조건 차이뿐만 아니라 사용된 모형특성과 입력조건들의 차이로 어려운 점이 있다. 그러나 규칙파의 경우 파집중에 의한 파고상승의 분포가 불규칙파의 경우보다 좁게 발생하므로 파고 기울기에 의한 영향뿐만 아니라 바닥마찰 및 쇄파난류효과와의 작용영역이 불규칙파의 경우에 비해 비교적 국지적임을 알 수 있었다.

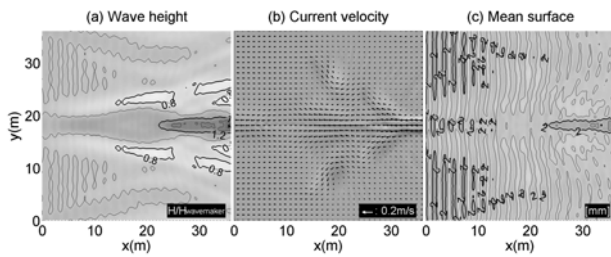


Fig. 6. Wave height, velocity, mean surface elevation averaged over results from 600~800sec with 0.14m-wave height(FUNWAVE).

4. 결론

불규칙파와 규칙파의 경우에 대하여 각각 평균개념의 결합모형과 순간개념의 Boussinesq모형으로 수치모의함으로써 파랑진행방향의 반대방향으로 유출되어 진행되는 유사제트류가 계속 발달하지 못하고 파랑의 집중화로 인한 영향에 의해 횡방향으로 퍼짐을 알 수 있었다. Fig. 7에 그 역학적 개념을 도시하였다.

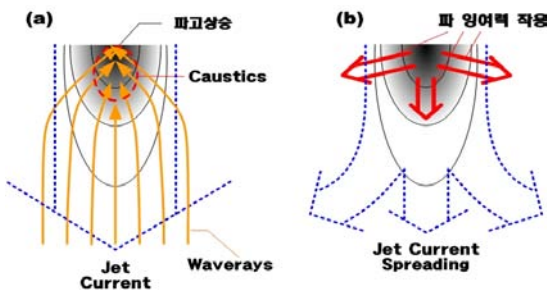


Fig. 7. Conceptual sketch of jet-like current spreaded due to radiation stress gradient of focused wave height distribution.

유사제트류가 파랑에만 영향을 준다면 상승된 파고의 분포는 유사제트류의 중심부를 따라 유사제트류의 발달과 함께 길게 나타날 것이지만 파랑의 집중화에 따른 증가된 마찰저항 및 쇄파난류효과 그리고 파랑잉여력의 작용으로 유사제트류는 횡방향으로 퍼지게 되고 따라서 유사제트류의 중심부의 파랑집중화 현상으로 인한 파고상승의 분포도 줄어들어 유사제트류의 유출부 부근에만 남게됨을 알 수 있었다. 결론적으로 파랑과 흐름의 상호작용이 유사제트류의 발달양상 변화에 미치는 영향은 매우 중요함을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 최준우, 백운일, 윤성범, 수중타원형 천퇴를 통과하는 규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형, 한국해양해양공학회지, 제19권, 제6호 (2007a), pp. 557-564.
- [2] 최준우, 백운일, 윤성범, 수중타원형 천퇴상 불규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형 수치모의, 한국해양해양공학회지, 제19권, 제6호 (2007b), pp. 565-573.
- [3] Borgman, L.E., Directional spectrum estimation for the Sxy gages, Technical Report, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg (1984).
- [4] Bouws, E., Gunther, H., Rosental, W., Vincent, C.L., Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, Part I-spectral form, Journal of Geophysical Research, 90(C1), (1985), pp. 975-986.
- [5] Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Shi, F., Thornton, E.B., Boussinesq modeling of longshore current, Journal of Geophysical Research, 108(C11), (2003), pp. 26-1-26-18.
- [6] Di Natale, M., Vicinanza, D., Experimental velocity profiles in wave-jet interaction, ISOPE-2000: Tenth Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, WA, USA (2000), pp. 639-646.
- [7] Greco, R., Vicinanza, D., Di Natale, M., Wave-jet nonlinear interaction: Mathematical model development and experimental results, Intl. J. Offshore and Polar Eng., Vol. 17, No. 2 (2007), pp. 119-124.
- [8] Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runoff. I: 1D., Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 126, (2000), pp. 39-47.
- [9] Kirby, J.T., Özkan, H.T., Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S, version 1.1, User Manual, Technical Report CACR-94-04, University of Delaware (1994).
- [10] Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B., Dalrymple, R.A., Fully nonlinear Boussinesq wave model, User Manual, Technical Report CACR-98-06, University of Delaware (1998).
- [11] Putrevu, U., Svendsen, I.A., Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents. European Journal of Mechanics-B/Fluids (1999), pp. 409-427.
- [12] Svendsen, I.A., Hass, K., Zhao, Q., Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC version 2.4, User Manual, Technical Report, University of Delaware (2002).
- [13] Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T., Subramanya, R., A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear unsteady wave. Journal of Fluid Mechanics, 294 (1995), pp. 71-92.
- [14] Yoon, S.B., Liu, P.L.-F., Effects of opposing waves on momentum jet, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 116, No. 5 (1990), pp. 545-557.