

유출유사제트류와 파랑의 상호작용 수치모의 Numerical Simulation of Interaction between Waves and a Seawardly Discharged Jet-like Current

최준우¹, 배재석², 윤성범³
Junwoo Choi¹, Jae Seok Bae² and Sung Bum Yoon³

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 마주 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 분출되는 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 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 결과는 Yoon and Liu(1990)의 파랑전파의 반대방향으로 진행하는 유사제트류

는 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 발생된 유사제트류의 퍼지는 현상에 대해 역학적으로 분석한다. 이를 통하여 해안의 하구에서 발생하고 있는 파랑과 유사제트류의 상호작용에 따른 흐름변화를 규명하고자 한다.

2. 수치모형

2.1 모형의 개요

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 기울기에 의해 변형된 흐름의 계산결과는 다시 파랑모형에 입력되어 반복계산된다. 불규칙 파랑모형의 잉여응력은 주파수-방향 스펙트럼의 각 성분으로 계산된 파고와 파향을 이용하여 산정하고 스펙트럼에 대해 합산하여 산정하게 된다. 본 연구에 사용된 파랑 수치모

1 발표자: 한양대학교 토목공학과 박사후과정
2 한양대학교 토목공학과 박사과정
3 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

형인 REF/DIF S(Kirby and Özkan, 1994), 그리고 흐름 수치모형인 SHORECIRC(Svendsen et al., 2002)는 각각 독립적으로 개발되었으며, 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 협대역 다방향 주파수 스펙트럼 불규칙파의 경우를 수치모의하였다. 불규칙파 스펙트럼은 TMA 주파수분포와 wrapped normal 방향분포함수를 이용하여 각각 유의파 파고에 해당하는 에너지를 81개의 주파수 성분과 121개의 방향 성분으로 나누고 파라미터는 $\gamma=20$ 과 $\sigma=10^\circ$ 를 사용하여 구성하였다. 또한 쇄파의 발생여부에 따라 7cm와 10cm의 유의파고를 입력조건으로 800sec동안에 대한 실험이 수행되었다. 유사제트류를 수치모의하기 위해 유입유속이 10cm/s가 되도록 고정된 수위에 따른 유량을 그림과 같이 3m폭을 통하여 유입시켰다. 그리고 수조에 유입된 유량만큼을 매 계산시간마다 전체수조에 걸쳐 일정수면변위를 감소시키므로 연속방정식을 만족시켰다.

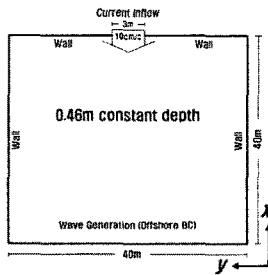


Fig. 1. Bathymetry and boundary conditions

파랑과 흐름의 상호작용을 모의하기 위해 파랑 모형과 흐름모형 각각을 부프로그램(sub-program)으로 하는 주프로그램(main-program)을 작성하여 파랑정보와 흐름정보의 상호교환(feedback)을 조절하게 하였다. 파고의 변화가 흐름변화에 비해 느리다는 가정 하에 10초 동안의 흐름계산 후 파랑계산을 1회 수행하는 형식을 취하였다. 결합모형을 위한 공간격자간격은 $0.1m \times 0.1m$, 시간간격은 0.02초로 하였다. 수치모의를

위한 모형의 물리적 혹은 경험적 상수들은 각 모형의 초기 설정치를 사용하였다.

REF/DIF와 SHORECIRC를 결합시킨 모형의 경우 중복과 발생시 REF/DIF에서 계산해 내는 잉여응력에 오류가 발생한다(최준우 등, 2007). 그러나 중복파의 영향이 적은 불규칙파를 수치모의할 경우는 그 적용성에 문제가 없다. 그러므로 불규칙파의 경우만을 수치모의 하였다.

3. 수치모의

협대역 스펙트럼 불규칙파와 반대방향으로 진행되는 유사제트류의 변화양상을 수치실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 파랑이 없는 경우(A), 유의파고가 7cm인 경우(B), 유의파고가 10cm인 경우(C)에 대하여 파고분포, 시간평균 유속벡터, 평균수면변위를 도시하였다.

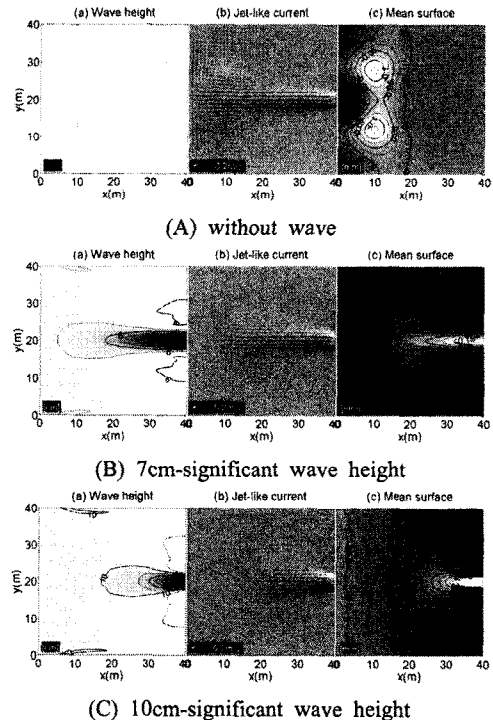


Fig. 2. Wave height, velocity vectors, mean surface elevation distribution

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. 3의 세 경우에 대한 파고분포와 유속분포의 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 이는 파고의 자승에 비례하여 바닥마찰 저항이 증가하고, 쇄파에 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 Fig. 4를 이용하여 다음에 기술한다.

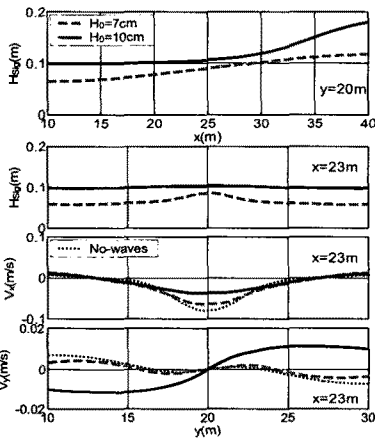


Fig. 3. Wave height and current velocity of the 7cm- and the 10cm- H_{sig} cases

Fig. 4에 쇄파가 발생하는 10cm 유의파고의 경우에 대하여 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 의해 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 10cm 유의파고의 경우에 대하여 인위적으로 x 방향 파랑잉여력은 고려하고 y 방향 파랑잉여력은 무시하여 수치해석을 실시하고 그 반대의 경우도 수치해석하여 그

결과를 Fig. 5에 도시하였다.

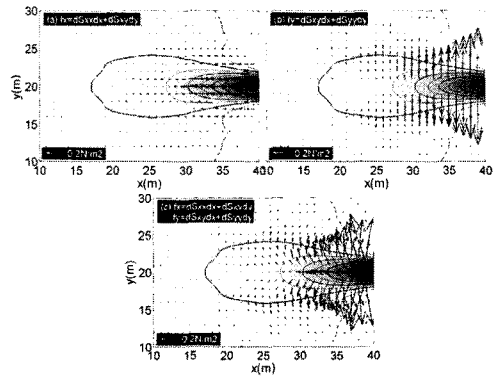


Fig. 4. (a) x -directional and (b) y -directional vectors of the gradient of radiation stress and (c) their vector sum with wave height distribution of the 10cm- H_{sig} case

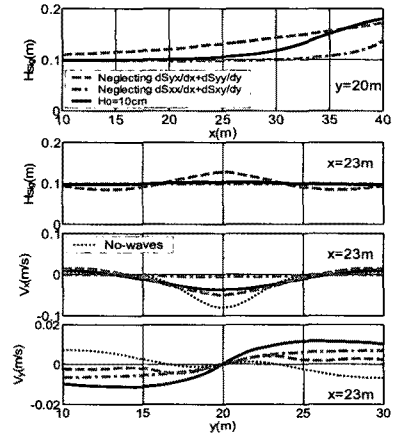


Fig. 5. Results obtained by neglecting either x - or y -directional force due to the gradient of radiation stress for the 10cm- H_{sig} case

Fig. 5에서 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 10cm의 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. 본 논문에서 결과를 제시하지는 않

았지만, 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.

이러한 결과분석으로부터 Yoon and Liu(1990)의 수치모의 가운데 y 방향으로 작용하는 파랑잉여력을 무시하여 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 강화시키는 역할을 하지만, 바닥마찰 및 쇄파난류저항뿐만 아니라 dS_{xx}/dx 항을 제외한 파랑잉여력은 모두 유사제트류의 발달을 방해하는 역할을 하여 유사제트류를 횡방향으로 퍼지게함을 알 수 있다.

4. 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. 6에 그 역학적 개념을 도시하였다.

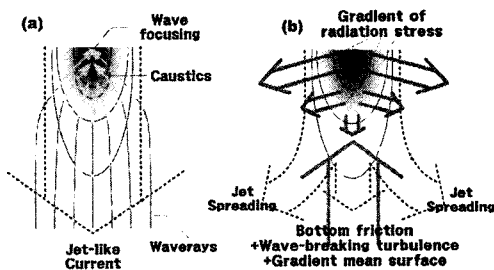


Fig. 6. Conceptual sketch of jet-like current spreaded due to radiation stress gradient of focused wave height distribution

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 중

심부의 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.

감사의 글

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

참고문헌

- 최준우, 백운일, 윤성범 (2007) 수중타원형 천퇴를 통과하는 규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형. 한국해양해양공학회지, 제19권, 제6호, pp. 557-564.
- Natale, M., Vicinanza, D. (2000) Experimental velocity profiles in wave-jet interaction. ISOPE-2000: 10th Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., Seattle, WA, USA, pp. 639-646.
- Greco, R., Vicinanza, D., Natale, M. (2007) Wave-jet nonlinear interaction: Mathematical model development and experimental results. Intl. J. Offshore and Polar Eng., Vol. 17, No. 2, pp. 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.
- 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., Vol. 116, No. 5, pp. 545-557.