

해양장파의 증폭과 변형에 대한 연구

A Study on Amplification and Deformation of Long-Period Waves

배제석*, 신홍훈**, 조영준***, 윤성범****
Jae Seok Bae, Choong Hun Shin, Young Joon Cho, Sung Bum Yoon

요 지

본 연구에서는 일본 전력중앙연구소에서 수행된 wave fission 수리모형실험 자료를 토대로 일차원 FUNWAVE 수치모형을 이용하여 wave fission 현상을 재현하는 수치모의를 수행하였다. FUNWAVE 수치모형은 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며 파의 분산효과와 비선형 효과를 고려할 수 있는 수치모형이다. 따라서 wave fission의 주된 발생원인인 분산효과와 비선형효과에 대한 고려를 통해 수치모의 결과는 수리모형실험의 관측치와 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서는 추가적으로 해수의 흐름이 존재하는 경우를 가정하고 수로 내 일정한 유량의 흐름을 추가하여 wave fission 일차원 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과 파의 진행방향과 반대방향으로 흐름이 존재하는 경우 wave fission으로 인한 수면변위의 크기가 상대적으로 증가함을 확인할 수 있었으며 반대로 파의 진행방향과 동일한 방향으로 흐름이 존재하는 경우 wave fission으로 인한 수면변위의 크기가 상대적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 해양장파, 분산효과, 비선형효과, FUNWAVE, wave fission

1. 서 론

지진해일과 같은 해양장파가 천해역의 완만한 경사지역을 전파할 경우, wave fission 현상이 발생할 수 있다. 실제로 1983년 동해 중부 지진해일 발생 당시 일본 서안의 수심이 완만한 해안지역을 따라 지진해일 wave fission 현상이 관측된 바 있다(Shuto, 1985). Wave fission은 지진해일과 같은 장파의 파봉이 짧은 파들로 분리되는 현상으로 마치 짧은 파가 장파의 파봉을 올라타고 전파해 가는 듯한 양상을 보인다. 즉, wave fission 현상이 발생하면 지진해일과 같은 해양장파의 진폭 크기는 상당히 증폭된 크기로 관측되며 아울러 해안에서의 처오름 높이도 wave fission이 발생하지 않은 경우에 비하여 상대적으로 크게 관측될 수 있는 것이다. 과거 wave fission에 대한 연구는 수리모형실험을 비롯하여 다양한 방법으로 다수의 연구가 진행된 바 있다(Masselink et al, 1998; Begi et al, 1993; Matsuyama et al, 2007). 특히, 일본 전력중앙연구소(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)에서는 길이 205m, 폭 3.4m, 수심 6m의 수로에서 wave fission 수리실험을 수행하였다(Matsuyama et al, 2007).

* 정회원·한양대학교 건설환경공학과 박사과정·E-mail : bjjae194@hanyang.ac.kr
** 정회원·한양대학교 건설환경공학과 박사과정·E-mail : lavici@hanyang.ac.kr
*** 정회원·한양대학교 건설환경공학과 석사과정·E-mail : yjcho116@hanyang.ac.kr
**** 정회원·교신저자·한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수·E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr

본 연구에서는 Matsuyama et al (2007)의 수리실험 결과를 토대로 일차원 FUNWAVE 수치모형을 이용하여 wave fission 현상을 재현하는 수치모의실험을 수행하고 그 결과를 수리실험결과와 비교하였다. 아울러 실제 지형에서는 조석 등의 영향으로 해수의 흐름이 존재한다는 사실을 바탕으로 수로 내 일정한 유량의 흐름이 존재하는 경우에 대해서도 동일한 wave fission 재현 수치모의를 수행하였으며 이는 해수 흐름의 방향과 유무에 따라 어떻게 wave fission이 변화하는지 검토해보고자 하였다.

2. 수리모형실험 재원

그림 1은 Matsuyama et al (2007)의 수리실험 재원을 보여주고 있다. 정수면으로 부터 바닥까지 깊이로 정의 되는 수심은 4 m에서부터 0m까지 변화되는 경사지형이다. 특히, 1/10 기울기, 수평거리 35.5m의 경사지역을 지나며 수심은 4m에서 0.45m까지 변화하고 이후 1/200 기울기의 경사지역을 지나며 수심은 0.45m에서 0m까지 완만히 변화되는 지형이다. Matsuyama et al (2007)은 피스톤 타입 조파장치를 이용하여 사인함수 형태의 파를 한 주기만 발생시켜 수리실험을 수행하였다. 그림 2는 Matsuyama et al (2007)의 수리모형 실험에서 조파장치를 통해 생성된 초기파형을 보여주고 있으며 이 파의 진폭은 0.03m이고 주기는 20sec이다.

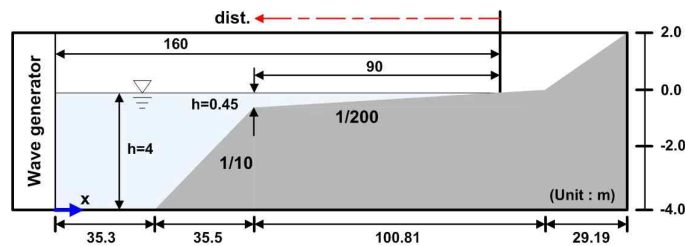


그림 1. 수리실험 재원

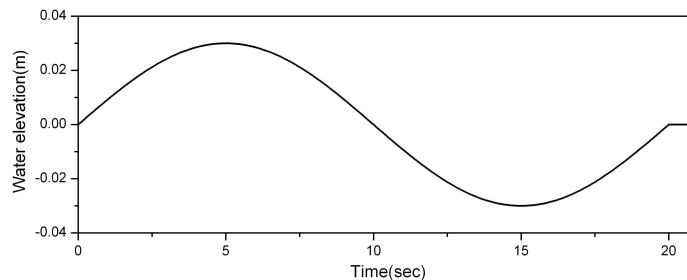


그림 2. 수리실험의 목표 초기파형

3. 수치모의

장파의 변형인 wave fission은 파의 비선형효과와 분산효과에 의해서 발생하는 현상이다. 따라서 wave fission을 효과적으로 재현하기 위해서는 파의 비선형성과 분산성을 충분히 고려할 수 있는 수치모형을 적용해야 한다. Boussinesq 방정식(Wei et al, 1995)은 분산항을 포함하고 있어 약한 분산효과를 충분히 고려할 수 있으므로 본 연구에서는 Boussinesq 모형으로 미국 Delaware 대학에서 개발한 일차원 FUNWAVE 모형을 wave fission 수치모의에 적용하였다. 또한, 분산성이

고려되지 않고 비선형효과만이 고려된 경우에 대한 수치모의를 위하여 일차원 비선형 천수방정식 (NSWE) 모형도 추가적으로 적용되었다. 계산영역은 $x = 0.1m$ 의 계산격자를 적용하여 구성하였으며 계산시간간격은 $\Delta t = 0.01sec$ 로 설정하였다. 수치모의 결과는 그림 1에서 $dist.=40m$ 지점의 시간이력을 Matsuyama et al (2007)의 수리실험의 결과와 비교하였다.

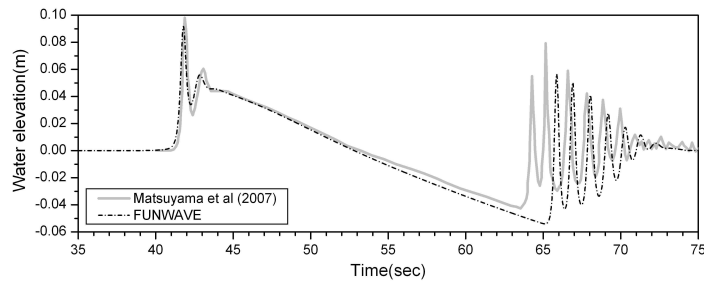


그림 3. 시간이력 비교(dist.=40m)

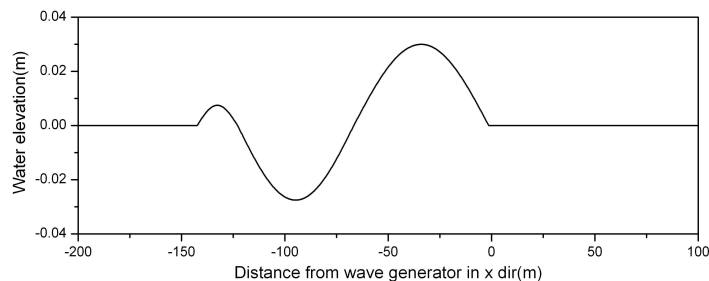


그림 4. 수치모의를 위한 초기파형

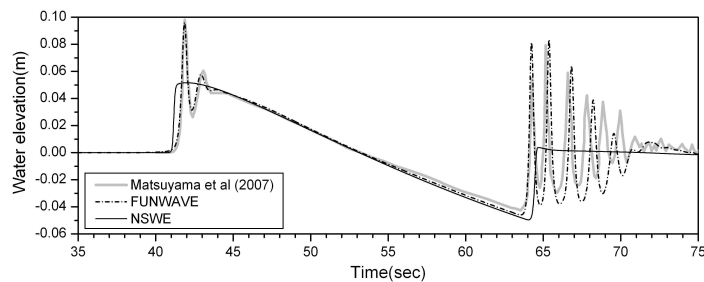


그림 5. 시간이력 비교(dist.=40m)

그림 3은 그림 2의 초기파형을 적용한 일차원 FUNWAVE 수치모의 결과를 수리실험결과와 비교하여 도시한 것으로 조파 시작 후 약 41sec가 지난 시점에서 첫 파가 도달하고 있으며 약 50sec가 경과한 시간까지는 수리실험 결과와 수치모의 결과가 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 파봉이 도달하는 41sec에서 45sec 범위를 본다면 wave fission이 발생하여 장파의 파봉에 짧은 파가 생성되었음을 확연히 구분할 수 있다. 하지만 파곡이 도달하는 약 63sec 이후의 결과를 비교해 본다면 수리실험과 FUNWAVE 수치실험의 결과에서 상당한 위상차가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 수리실험에서 피스톤 타입 조파장치의 한계로 인하여 실제 발생시킨 초기파형이 Matsuyama et al (2007)이 제시한 그림 2의 초기파형과 다른 형태로 입력되어 발생한 결과라고 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 추가적으로 초기입력파를 그림 4와 같이 수정하

여 일차원 FUNWAVE 모형과 비선형 천수방정식(NSWE) 모형을 이용하여 수치모의를 수행하였으며 이를 수리실험결과와 비교하여 그림 5에 제시하였다. 그림 5에서는 수리실험 및 FUNWAVE 수치모의 결과는 상당히 잘 일치하고 있으며 아울러 그림 3에서 지적된 파곡부의 위상차이도 거의 사라졌음을 확인할 수 있다. 또한, 비선형천수방정식(NSWE) 모형을 적용한 결과와 비교해본다면 FUNWAVE 및 수리실험과 달리 wave fission이 재현되지 않았음을 확인할 수 있다. 이는 비선형천수방정식(NSWE) 모형이 wave fission 발생의 중요 요인인 분산효과에 대한 고려를 할 수 없는 한계로 인한 결과로 판단할 수 있다.

실제 지형에서는 조석으로 인한 해수의 흐름이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 수로 내 흐름이 존재하는 경우에 발생하는 wave fission의 변화를 확인해 보고자 수로 내 일정한 유량의 흐름을 추가하여 일차원 FUNWAVE 수치모형 실험을 수행하였다. 이때, 지형자료는 수심 $= 0.1m$ 이 하인 지형의 수심을 모두 $h = 0.1m$ 로 수정하여 적용하였다. 흐름은 파의 진행방향과 동일한 방향으로 흐르는 경우와 파의 진행방향과 반대방향으로 흐르는 경우를 가정하였으며 흐름의 유속은 수심 $h = 0.1m$ 인 그림 1의 우측경계를 기준으로 $0.3m/s$ 와 $0.5m/s$ 로 설정하였다. 따라서 경사지형을 비롯하여 수심이 변화하는 각 격자점에서는 수심에 따라 흐름 유속의 크기가 상대적으로 변화하도록 설정되었다.

Brevik et al (1980)은 파의 진행방향과 동일한 방향으로 흐름이 존재하는 경우, 파장의 길이는 흐름의 유속이 클수록 증가하는 경향을 보이며 파의 진폭은 상대적으로 감소함을 제시하였고, 파의 진행방향과 반대 방향으로 흐름이 존재하는 경우, 파의 파장은 흐름 유속이 클수록 짧아지는 경향을 보이고 파의 진폭은 상대적으로 증가함을 제시한 바 있다. 그림 6은 흐름이 존재하는 경우에 대한 수치모의 결과를 흐름이 없는 경우와 함께 비교하여 도시한 것이다. Brevik et al (1980)이 제시한 흐름이 파에 작용하는 영향에 대한 경향이 비교적 유사하게 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 흐름의 방향이 파의 전파방향과 동일한 경우 흐름 유속의 크기가 클수록 파가 빨리 전파되었으며 흐름의 방향이 파의 진행방향과 반대방향일 경우 흐름 유속이 클수록 파가 상대적으로 늦게 전파되었다. 또한, wave fission의 크기도 일정한 유량의 흐름 방향이 파의 진행 방향과 반대방향으로 흐르는 경우 흐름 유속의 크기가 클수록 장파 파봉의 진폭 크기가 커져 wave fission의 진폭 크기 또한 증가함을 확인 할 수 있으며 흐름의 방향이 파의 진행 방향과 동일한 방향으로 흐르는 경우 흐름 유속의 크기가 클수록 장파 파봉의 진폭 크기가 감소되는 영향으로 wave fission의 진폭 역시 감소하였음을 확인할 수 있었다. 하지만 진폭의 크기는 흐름에 따라 변화되었지만 장파의 파봉에서 wave fission으로 분리되는 짧은 파의 파봉 개수는 3개로 동일함을 확인할 수 있다.

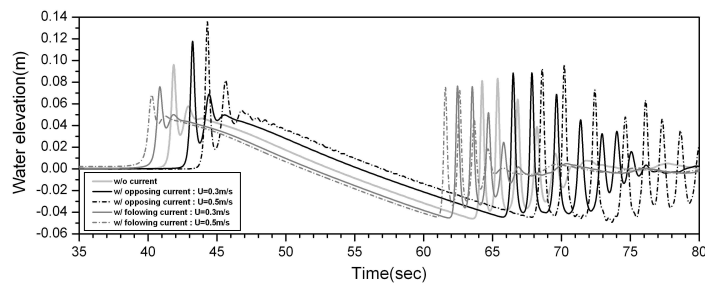


그림 6. 흐름이 존재하는 경우 수치모의 시간이력 비교(dist.=40m)

5. 결 론

지진해일과 같은 중간정도의 장파가 완경사 지형을 전파해가면 파의 비선형 및 분산효과에 의해서 파봉이 짧은 파들로 분리되는 현상인 wave fission이 발생하며 마치 짧은 파가 장파의 파봉을 올라타고 전파해 가는 듯한 양상을 보인다. 본 연구에서는 일본 전력중앙연구소에서 수행된 Matsuyama et al (2007)의 wave fission 수치실험 결과를 바탕으로 wave fission 재현을 위한 수치모형실험을 수행하였다. 파의 비선형 및 분산효과를 고려할 수 있는 FUNWAVE 모형을 이용하여 수행된 수치모의 결과는 수치실험 결과와 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 하지만 비선형천수방정식 모형을 이용한 수치모의 결과는 파의 분산효과를 고려할 수 없는 한계로 인하여 wave fission이 재현될 수 없었다. 추가적으로 조석 등의 영향으로 해수의 흐름이 존재하는 경우를 가정하고 계산 영역 내 일정한 유량의 흐름을 발생시켜 수치모의를 수행하였다. 흐름이 파의 진행방향과 반대방향으로 존재하는 경우 파가 경사지형을 거슬러 올라 전파해감에 따라 수심이 작아져 흐름 유속이 증가하고 그 영향으로 파의 진폭이 증가하여 wave fission의 진폭 역시 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며 반대로 파의 방향과 동일한 방향으로 흐름이 존재할 경우 흐름 유속이 증가함에 따라 파의 진폭이 감소하고 그 영향으로 wave fission의 진폭 또한 감소되었음을 확인할 수 있었다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Beji, S. and Battjes, J. A. (1994). Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar. Coastal Eng. Vol. 23, No. 1-2, pp. 1-16.
2. Brevik, I. and B. Aas (1980). Flume experiment on wave and currents, I. Ripple bed. Coastal Eng. Vol. 3, pp. 149-177.
3. Masselink, G. and Short, A. D. (1998). Field investigation of wave propagation over a bar and consequent generation of secondary waves. Coastal Eng. Vol. 33, No. 1, pp. 1-9.
4. Matsuyama, M., Ikeno, M., Sakakiyama, T. and Takeda, T. (1998). A study on tsunami wave fission in an undistorted experiment. Pure appl. geophys. Vol. 164, pp. 617-631.
5. Shuto, N (1985). The Nihonkai-Chubu earthquake tsunami on the north Akita coast, Coastal Engineering Journal, Vol. 28, pp. 255-264.
6. Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T. and Subramanya, R. (1995). A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1: Highly nonlinear unsteady wave. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 294, pp. 71-92.