

울진 원전에서의 유사 이송모의: 1983년 동해 중부 지진해일 Simulation of Sediment Transport in the Ulchin Power station: 1983 Central East Sea Tsunami

손대회¹, 진소범², 김성민¹, 조용식³
Dae-Hee Sohn¹, So-Beom Jin², Yong-Sik Cho³, Sung-Min Kim¹

1. 서 론

지진해일은 발생 빈도는 낮으나 일단 발생하게 되면, 빠른 속도로 해안에 전파해 큰 피해를 야기한다. 지진해일은 상당히 큰 에너지를 가지고 있어 유사와 각종 부유물 등 많은 물질을 이동시켜 해안 변형 등의 피해를 발생시킨다. 2004년 12월 26일 인도네시아 근해에서 발생한 서아시아 지진해일은 약 280,000명의 인명피해와 막대한 재산피해를 입혔다(중앙일보, 2004년 1월 26일). 또한 서아시아 지진해일은 엄청난 유사를 동반하였으며, 인도네시아 반다아체 지역의 경우 유사로 인해 해안 지형이 완전히 변하는 피해를 입었다.

우리나라는 과거에 지진해일로 인해 피해를 입은 경우가 비교적 적었으며, 주요 지진해일로는 1983년 동해 중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일이 있다. 기상청에 따르면 우리나라 근해에서 최근 해저지진이 자주 발생하고 있으며 그 횟수도 매년 증가하고 있어 지진해일에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다(2001년 16회, 2002년 21회, 2003년 21회, 2004년 24회, 2005년 24회).

기존의 지진해일에 관한 연구들은 지진해일의 전파와 처오름에 주로 그 주제를 맞추었다. Cho와 Yoon(1998)과 Yoon(2002), 그리고 윤성범 등(2004)은 지진해일 전파과정에서 중요시되는 분

산효과를 고려할 수 있는 수치기법의 개발을 연구하였다. 그리고 김재홍과 조용식(2005)은 2차 풍상차분기법을 이용하여 동해에서의 지진해일의 전파와 처오름을 연구하였다.

본 연구에서는 지진해일로 인한 유사이송을 모의하기 위하여 천수이론을 이용하여 유도된 유사이송식을 이용하였다. 대상 지역은 울진 원자력 발전소로 하였으며, 1983년 동해 중부 지진해일을 대상으로 수치모의를 수행하였다. 그리고 모의결과는 몇가지로 나누어 검토하였다.

2. 유사 이송식

본 연구에서 이용한 유사 이송식은 유사가 발생하는 영역을 소류층과 부유층으로 분리하여 고려하는 방법으로 유도된 관계식이다. 유사의 이동형태에 따라 소류층과 부유층으로 구분되는데, 편의를 위해 소류층을 이동하는 유사를 소류사, 부유층을 이동하는 유사를 부유사로 보기로 한다. 본 연구에서는 高橋智幸(1998)에서 검토한 이론과 결과를 이용하였다.

2.1 소류층

Fig. 1은 소류층과 부유층 분리 모델의 개념도를 나타내는 것으로, 미소구간 δx 에 대해서 미소시간 δt 동안에 출입하는 유사량들을 표현하였다.

소류층 구간에 질량보존의 법칙을 적용하고자할

1 한양대학교 토목공학과 석사과정

2 한국원자력안전기술원(KINS) 책임연구원

3 한양대학교 토목공학과 교수, 교신저자(E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

때 고려해야 하는 항들은 다음과 같다.

저면과의 교환사량:

$$\rho_s (1-\lambda) \delta Z_B \delta x \quad (1)$$

유하방향으로 소류형태로 이동하는 유사량:

$$\rho_s \left(q_B + \frac{\partial q_B}{\partial x} \delta x \right) \delta t - \rho_s q_B \delta t = \rho_s \frac{\partial q_B}{\partial x} \delta x \delta t \quad (2)$$

확산에 의해 부유층으로 부유되는 유사량:

$$\rho_s \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \delta x \delta t \quad (3)$$

중력에 의한 부유층에서 침강해오는 유사량:

$$\rho_s w_0 C \delta x \delta t \quad (4)$$

소류층 내부의 증감하는 유사량:

$$\rho_s \frac{\partial \bar{C}_B}{\partial t} h_B \delta x \delta t \quad (5)$$

이때, ρ_s 는 유사의 밀도, λ 는 유사의 공극률, Z_B 는 기준면에서의 저면고, q_B 는 소류사량, ϵ_z 는 연직방향의 확산계수, C 는 소류층과 부유층의 경계부근의 농도, w_0 는 유사의 침강속도, \bar{C}_B 는 평균 소류층농도, 그리고 h_B 는 소류층 두께를 나타낸다. 식 (1)~(5)를 정리하면 다음과 같은 소류층에 있어서의 유사 이송식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial x} + \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_0 C + \frac{\partial \bar{C}_B h_B}{\partial t} \right) = 0 \quad (6)$$

소류층과 부유층 사이의 교환사량 w_{ex} 을 다음과 같이 정의한다.

$$w_{ex} = \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_0 C \quad (7)$$

식 (7)의 교환사량의 정의를 이용함으로써 식 (6)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial x} + w_{ex} + \frac{\partial \bar{C}_B h_B}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

2.2 부유층

부유층에서의 유사 이송식을 구하기 위하여 질량 보존 법칙을 고려하며, 이때 고려할 항들은 다음과 같다. Fig. 1을 참고하여 확인할 수 있다.

유하방향으로 부유형태로 이동하는 유사량:

$$\begin{aligned} \rho_s \left(\bar{C}_s M + \frac{\partial \bar{C}_s M}{\partial x} \delta x \right) \delta t - \rho_s \bar{C}_s M \delta t \\ = \rho_s \frac{\partial \bar{C}_s M}{\partial x} \delta x \delta t \end{aligned} \quad (9)$$

확산에 의해 소류층에서 부유해 오는 유사량:

$$\rho_s \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \delta x \delta t \quad (10)$$

중력에 의해 소류층으로 침강되는 유사량:

$$\rho_s w_0 C \delta x \delta t \quad (11)$$

부유층 내부의 증감하는 유사량:

$$\rho_s \frac{\partial \bar{C}_s h_s}{\partial t} \delta x \delta t \quad (12)$$

이때, \bar{C}_s 는 평균 부유층농도, M 은 유량을 나타낸다. 식 (9)~(12)를 정리하면 다음과 같은 부유층의 유사 이송식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{C}_s M}{\partial x} + \epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_0 C + \frac{\partial \bar{C}_s h_s}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

식 (13)은 소류층과 부유층 사이의 교환사량 w_{ex} 을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{C}_s M}{\partial x} - w_{ex} + \frac{\partial \bar{C}_s h_s}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

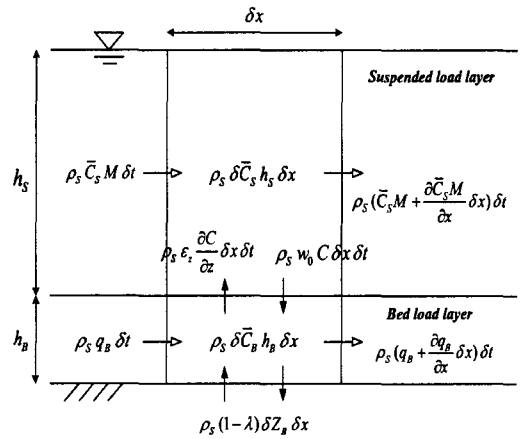


Fig. 1. 소류층과 부유층 분리모형의 개념도

2.3 소류사량과 교환사량

앞에서 검토한 소류층과 부유층의 유사 이송식을 이용하면, 유량 M , 그리고 부유층 두께 h_s 값이 주어지면 차분식을 이용하여 저면고 Z_B 와 평균 부유층농도 \bar{C}_s 의 변화를 검토할 수 있다. 이때, 유사 소류사량 q_B 와 교환사량 w_{ex} 을 얻을 수 있는 식이 필요하다.

高橋智幸(1998)은 지진해일을 대상으로 소류사량 q_B 와 교환사량 w_{ex} 에 관한 관계식을 얻기 위하여 관로를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험의 내용은 高橋智幸(1998)에서 확인할 수 있으며, 여기서는 아래와 같은 최종 결과식들만 소개한다.

$$q_B = 21 \sqrt{sgd^3} \tau_*^{3/2} \quad (15)$$

$$w_{ex} = 0.012 \sqrt{sgd} \tau_*^2 - w_0 \bar{C} \quad (16)$$

여기서, τ_* 는 shield 수, s 는 사립자의 수중비중, g 는 중력가속도, d 는 사립자의 입경, 그리고 w_0 는 사립자의 침강속도를 나타낸다. shield 수는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (17)$$

이때, u_* 는 마찰속도이다.

3. 지배방정식과 수치기법

지진해일이 해안지역으로 접근해오면 상대적으로 비선형성과 바다 마찰효과의 중요성이 증가하게 되며, 이러한 특성을 고려하여 지배방정식으로 비선형 천수방정식을 이용하는 것이 적당하다. 본 연구에서는 다음과 같은 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 선택하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (20)$$

여기서, η 는 자유수면변위, M 과 N 은 x 축과 y 축 방향의 선유량, D 는 전수심, g 는 중력가속도, 그리고 n 은 Manning의 조도계수를 나타낸다.

유사 이송식으로는 2장에서 살펴보았던 식 (8)과 식 (14)의 2차원 형태를 표현한 다음식을 이용하였다.

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} + w_{ex} \right) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \bar{C}M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{C}N}{\partial y} - w_{ex} + \frac{\partial \bar{C}D}{\partial t} = 0 \quad (22)$$

여기서, Z_B 는 기준면으로부터의 저면고, λ 는 저면 사립자의 공극률, q_{Bx} 와 q_{By} 는 x 축과 y 축 방향으로의 소류사량, 그리고 \bar{C} 는 평균 부유사농도이다. 참고로, 식 (8)의 4번째 항을 생략하고 2차원화한 것은 소류농도와 소류층 두께의 시간변화가 충분히 가정하였기 때문이다.

4. 모의결과

1983년 동해 중부 지진해일을 대상으로 하여 울진 원자력 발전소 지역의 유사 이송을 모의하였다. Fig. 2는 모의 지역을 나타낸 것인데, 경계조건을 위한 영역의 3개의 끝 지점과 수위와 바닥지형의 변화를 검토할 목적으로 선택한 3개의 지점의 위치를 나타내었다.

영역의 경계조건을 3개의 끝지점의 수위자료를 선택 보간하여 처리하였으며, 이용한 수위자료는 기존의 수치모형을 이용하여 1983년 지진해일을 모의하여 3개의 영역 끝 점에서 매시간 얻은 결과이다.

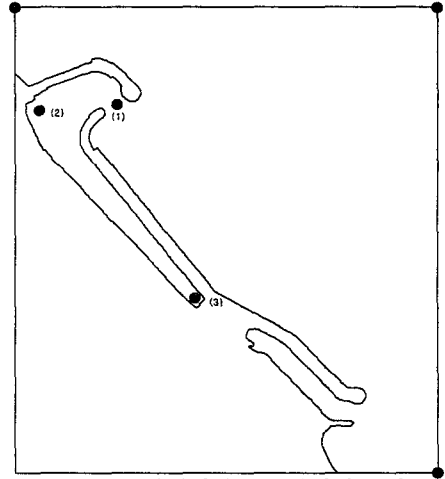


Fig. 2. 모의영역과 검토지점의 표시도

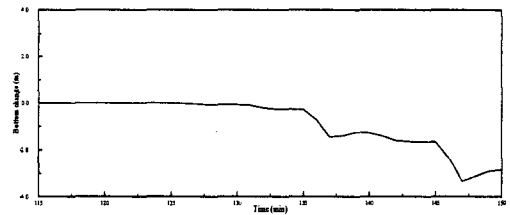
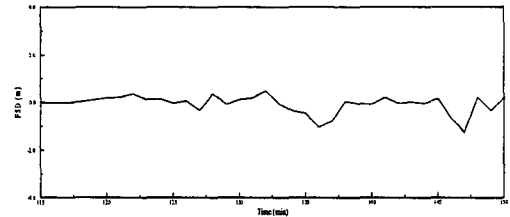


Fig. 3. 지점 1의 수위와 바닥지형의 변화

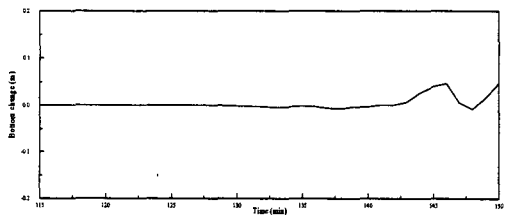
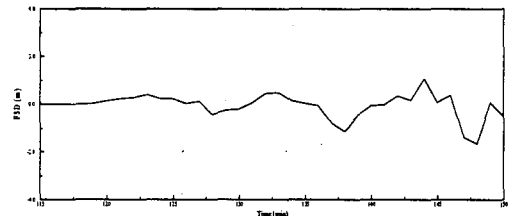


Fig. 4. 지점 2의 수위와 바닥지형의 변화

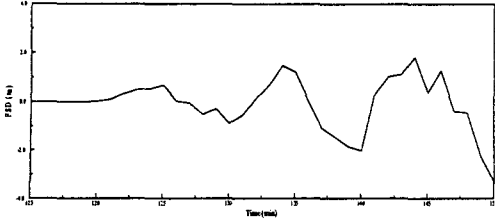


Fig. 5. 지점 3의 수위변화

모의를 위해 이용한 조건으로 사립자의 침강속도를 0.031, 비중을 2.59, 입경을 0.6mm, 그리고 공극률을 0.38로 적용하였다. 이 조건들은 직접 채분석 등의 실험을 통하여 결정된 것이다.

Fig. 3~5는 검토한 지점의 시간에 따른 수위변화와 유사이송에 의해 나타나는 바닥지형의 변화를 검토한 것이다. 수위변화는 취수로의 가장 내부 지점인 지점 3에서 가장 크게 나타났으며, 지점 1에서는 침식이 크게, 그리고 지점 2에서는 퇴적이 일부 나타났다. 지점 3에서 바닥지형의 변화를 생략한 것은 너무 변화가 미세하였기 때문이다.

Fig. 6은 지진발생 후 150분 후에 모의영역에서 나타나는 바닥지형의 변화를 나타낸 것이다. 양의 값은 퇴적을 의미하고 음의 값은 침식을 의미한다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 취수로 입구에서 침식이 크게 나타나고 있는데, 이는 이 지점이 면적이 적어 유속이 빠르게 나타나기 때문으로 판단된다. 그리고, 영역의 끝지점 부근에서 퇴적이 크게 발생한 것은 경계조건을 정확하게 나타내지 주지 못한 점 때문으로 생각된다.

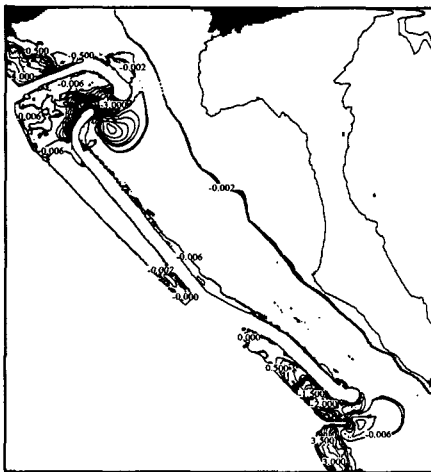


Fig. 6. 유사이송 결과 (150분 후)

5. 결 론

본 연구에서는 지진해일의 유사이송을 검토하기 위해 高橋智幸(1998)이 도입한 유사이송식을 이용하여 울진 원전에 대해서 1983년 지진해일의 모의를 수행하였다.

선형 보간을 이용하여 경계조건을 처리하였기 때문에 결과의 정확도는 떨어지지만 수용할 수 있는 정도의 결과를 얻었다. 그리고, 모의결과는 일반적으로 판단할 수 있는 현상을 적절히 나타내었다. 이후 기존의 지진해일 모의 모델에 본 연구에서 적용한 유사이송식을 적절히 결합할 수 있다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김재홍, 조용식 (2005). 동해에서의 지진해일 모의. 한국수자원학회논문집, 제38권, 제6권, pp. 463-471.
- 윤성범, 임채호, 이종인 (2004). 지진해일 전파모의를 위한 2차원 유한차분 모형의 능동적 분산보정기법. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 6B호, pp. 577-583.
- 중앙일보 (2004). 남아시아 쓰나미 사망자 28만 명 넘어. 1월 26일. 제40판, p. 18.
- Cho, Y.-S. and Yoon, S.B. (1998). A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations. Coastal Engineering Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
- Yoon, S.B. (2002) Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography. Journal of Geophysical Research, AGU, Vol. 107, No. C10, pp. 4(1)-4(11).
- 高橋智幸 (1998). 津波による土砂移動に関する研究.