지진해일 해석을 위한 실용적인 기법의 적용 - 부산 신항만 지역

Application of Practical Scheme for Analysis of Tsunamis - Busan New Port Area

최문규* · 조용식**

Choi, Moon Kyu · Cho, Yong sik

Abstract

In this study, new dispersion-correction terms are added to leap-frog finite difference scheme for the linear shallow-water equations with the purpose of considering the dispersion effects of the linear Boussinesq equations for the propagation of tsunamis. The new model is applied to near Gadeok island in Pusan about The Central East Sea Tsunami in 1983 and The Hokkaido Nansei Oki Earthquake Tsunami in 1993 one simulated in the study.

key-words : tsunami, linear shallow-water equations, linear Boussinesq equation, dispersion effects, leap-frog finite difference scheme

1. 서 론

지진해일은 그 진행속도가 매우 빠르고 파장이 길어 파형의 큰 변화없이 먼 거리를 진행할 수 있으며, 태평양과 같은 대양에서 지진해일이 발생하게 되면 주변 지역은 물론 멀리 떨어진 지역에서도 심한 범람피해를 초래할 수 있다. 예를 들어, 1960년 칠레연안으로부터 100km 정도 떨어진 태평양에서 발생한 지진해일은 대략 16시간이 지난 다음 진원지로부터 10,000km정도 떨어진 하와이 제도를 강타하여 하와이섬의 힐로만(Hilo Bay)에서 61명의 인명피해와 수천만 달러의 재산피해를 입혔으며, 약 24 시간 뒤에 일본의 태평안 연안에 도달하여 약 140여명의 인명피해와 엄청난 재산피해를 발생시켰다.

2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라 아체(Ache)지역에서 약 60km 떨어진 인도양에서 발생한 서아시아 지진해일은 진원 부근에 위치한 인도네시아 및 타일랜드는 물론 수천 km 떨어진 아프리카까지 전파하여 막대한 인명 및 재산피해를 발생시켰다. 대략 300,000여명의 인명피해가 발생하였으며, 약 100억 달러의 재산피해가 발생한 것으로 보고되고 있다.

기존의 수치기법으로는 Cho와 Yoon(1998)등이 선형 천수방정식을 leap-frog 기법으로 차분하여 일정한 수심에서 수치적인 분산오차가 Boussinesq 방정식의 물리적인 분산항을 대체하도록 수심, 격자간격 및 계산 시간간격 사이의 관계식을 유도하였다. 그러나, Cho와 Yoon(1998)이 제안한 관계식은 유한차분식이 Boussinesq 방정식의 분산항과 일치하는 수치분산을 생성하도록 격자간격과 계산 시간간격을 결정하여야 하기 때문에 실제 지형과 같이 수심이 변하는 지형에서는 수심이 변하는 경우마다 격자간격과 계산 시간간격을 변화시켜야만 하는 문제점이 있어 실제 문제에 적용이 어려웠다.

본 연구에서는 Cho와 Yoon(1998)이 제안한 leap-frog 유한차분기법의 분산보정항을 수정하여 수심이 변하는 경우에 대해서도 격자간격과 계산 시간간격을 변화시키지 않으면서 Boussinesq 방정식의 분산항과 일치하는 수치분산항을 생성할 수 있는 기법을 개발하였다. 그리고, 기존의 지진해일 전파모형에서 많이 사용해 왔던 선형 천수방정식을 지배방정식으로 선정하여 기법의 적용성을 향상시켰다.

* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 · 석사과정

** 정회원 · 한양대학교 토목공학과 · 교수 · 교신저자 · E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr

2. 지배방정식과 수치기법

일본 서해에서 발생하여 우리나라 동해안에 영향을 주는 지진해일과 같이 파장에 비해 비교적 먼 거리를 전파하는 원해 지진해일(offshore tsunami)을 모의하기 위해서는 분산을 고려하기 위해 다음과 같은 선형 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 사용하는 것이 바람직하다.

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}-gh\left(\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2}\right)=\frac{gh^3}{3}\left(\frac{\partial^4\zeta}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\zeta}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4\zeta}{\partial y^4}\right) \tag{1}$$

본 연구에서는 수정기법(modified scheme)을 이용하기 위해 분산항을 생략한 다음과 같은 선형 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+gh\frac{\partial\zeta}{\partial x}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+gh\frac{\partial\zeta}{\partial y}=0 \tag{4}$$

본 연구에서는 수정기법을 사용하여 식 (2)-(4)을 다음과 같이 차분화하였다.

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1}-P_{i+1/2,j}^{n}}{\Delta t}+gh_{i+1/2,j}\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x}$$

$$+\frac{\alpha g}{12\Delta x}h_{i+1/2,j}\left[\ \zeta_{i+2,j}^{n+1/2}-3\zeta_{i+1,j}^{n+1/2}+3\zeta_{i,j}^{n+1/2}-\zeta_{i-1,j}^{n+1/2}\right] \tag{5}$$

$$+\frac{\gamma g}{12\Delta x}h_{i+1/2,j}\left[\ \left(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2}-2\zeta_{i+1,j}^{n+1/2}+\zeta_{i+1,j-1}^{n+1/2}\right)-\left(\zeta_{i,j+1}^{n+1/2}-2\zeta_{i,j}^{n+1/2}+\zeta_{i,j-1}^{n+1/2}\right)\right]=0$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t}+\frac{P_{i+1/2,j}^{n}-P_{i-1/2,j}^{n}}{\Delta x}+\frac{Q_{i,j+1/2}^{n}-Q_{i,j-1/2}^{n}}{\Delta y}=0 \tag{6}$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1}-Q_{i,j+1/2}^{n}}{\Delta t}+gh_{i,j+1/2}\frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y}$$

$$+\frac{\alpha g}{12\Delta y}h_{i,j+1/2}\left[\ \zeta_{i,j+2}^{n+1/2}-3\zeta_{i,j+1}^{n+1/2}+3\zeta_{i,j}^{n+1/2}-\zeta_{i,j-1}^{n+1/2}\right] \tag{7}$$

$$+\frac{\gamma g}{12\Delta y}h_{i,j+1/2}\left[\ \left(\zeta_{i+1,j+1}^{n+1/2}-2\zeta_{i,j+1}^{n+1/2}+\zeta_{i-1,j+1}^{n+1/2}\right)-\left(\zeta_{i+1,j}^{n+1/2}-2\zeta_{i,j}^{n+1/2}+\zeta_{i-1,j}^{n+1/2}\right)\right]=0$$

식 (5)-(7)에서 분산보정계수 α와 γ를 각각 0과 1로 정하면, Cho와 Yoon(1998)이 제안한 기법과 같아진다.

식 (5)-(7)의 모든 항을 Taylor 급수를 이용하여 기준 격자점 (i, j, n)에 대하여 전개한 후 P와 Q를 소거하면 다음과 같은 ζ에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}-C_0^2\left(\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2}\right)-C_0^2\frac{(\Delta x)^2}{12}(1+\alpha-C_r^2)\left(\frac{\partial^4\zeta}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\zeta}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4\zeta}{\partial y^4}\right)$$

$$+(1+\alpha-\gamma)C_0^2\frac{(\Delta x)^2}{6}\frac{\partial^4\zeta}{\partial x^2\partial y^2}=O\left((\Delta x)^3,(\Delta x)^2\Delta t,\Delta x(\Delta t)^2,(\Delta t)^3\right) \tag{8}$$

식 (8)의 유도과정에서 $\Delta x=\Delta y$가 사용되었으며, $C_0(=\sqrt{gh})$와 $C_r(=C_0\Delta t/\Delta x)$은 각각 장파의 전파속도와 Courant 수를 나타낸다.

식 (8)을 식 (1)의 선형 Boussinesq 방정식과 같아지도록 분산보정계수 α와 γ를 결정하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{4h^2 + gh(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}{(\Delta x)^2} \tag{9}$$

$$\gamma = \alpha + 1 \tag{10}$$

Cho와 Yoon(1998)이 제안한 기법($\alpha = 0$)의 경우 식 (1)의 선형 Boussinesq 방정식과 같아지기 위해서는 다음과 같은 관계식을 만족해야 한다.

$$(\Delta x)^2 = 4h^2 + gh(\Delta t)^2 \tag{11}$$

식 (9)와 (10)은 Cho와 Yoon(1998)이 제안한 관계식 (11)의 경우와 다르게 수심이 변하는 경우, 격자간격과 계산 시간간격 대신 분산보정계수 α와 γ를 변화시켜 식 (8)이 식 (1)과 일치하도록 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 수치기법의 적용

수립한 모형으로 1983년 동해중부 지진해일과 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 적용을 하였다. 수치모형 시에는 다중격자 연결모형을 사용하였다. 영역은 O, A, B, C, D영역으로 총 5개이고 그림 1은 전체영역인 O영역을 나타내고 있고 그림 2에서는 가장 작은 영역인 D영역을 나타내고 있다.

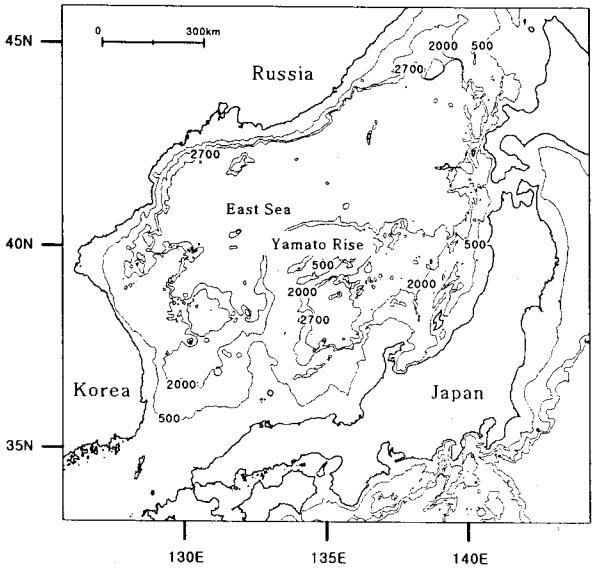

그림 1. 전체영역의 해안선과 수심(O영역)

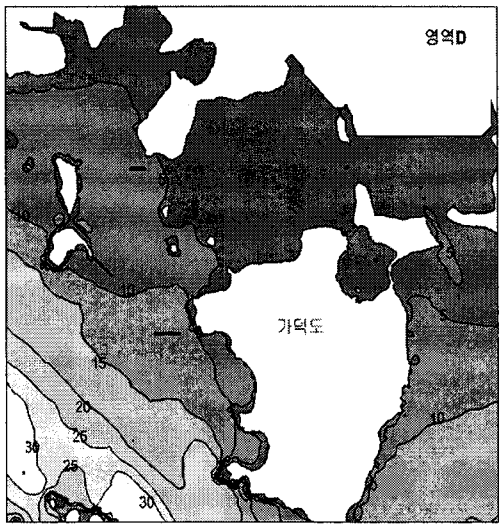

그림 2. 다중격자연결모형구성(D영역)

1983년 동해 중부 지진해일은 1983년 5월 26일 정오 일본 추전현(秋田縣) 서쪽 외해에서 발생한 Richter 규모 7.7의 해저지진은 거대한 지진해일을 동반하였으며, 추전(秋田) 해안, 북해도로부터 한반도까지 영향을 미친 비교적 단주기의 지진해일이었다.

그리고 1993년 북해도 남서 외해 지진해일은 1993년 7월 12일 밤 10시 17분, 일본 북해도(北海島) 남서 외해에서 발생한 Richter 규모 7.8의 지진은 거대한 지진해일을 동반하였으며, 이 지진해일은 일본의 서해안뿐만 아니라 우리나라 동해안, 러시아 연해주 연안까지 확대되어 수많은 인명피해 및 엄청난 재산피해를 야기하였다.

그림 3과 4는 영역 D에서의 지진해일로 인한 최대파고분포를 나타낸 것이며, 가덕도에서의 정수면(still water level)을 기준으로 계산한 것이다. 1983년 동해 중부 지진해일로 인한 최대 파고는 0.02~0.09m가 계산되었고 1993년 북해도 남서 외해 지진해일로 인한 최대 파고는 0.01~0.07m로 계산이 되었다.

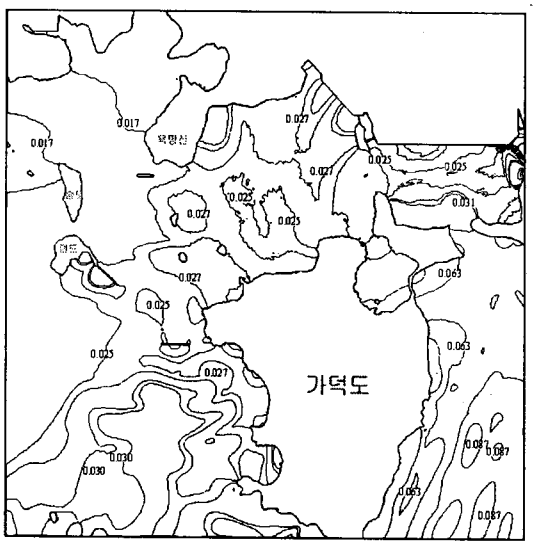

그림 3. 가덕도 부근에서의 최대파고분포 (1983년, 단위: m)

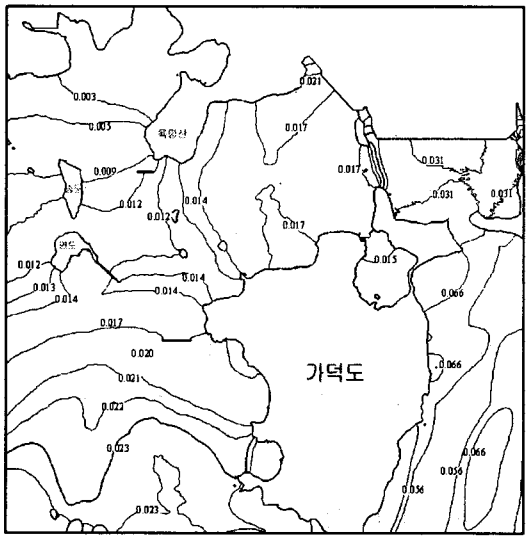

그림 4. 가덕도 부근에서의 최대파고분포 (1993년, 단위: m)

4. 결 론

대상 영역의 1983년과 1993년 지진해일에 대한 최대파고는 전체적으로 10cm에 못 미치는 작은 값으로 계산되어진다. 지진해일에 의한 해수면 상승 효과가 작게 나타나는 것은 지진해일이 동해상을 전파하는 동안 대화퇴에서의 에너지 분기에 의해 지진해일의 파향선이 동해안 및 러시아와 일본 은기제도 쪽으로 굴절되고 남해안에 도달한 지진해일은 가덕도와 거제도에 의해 전파 경로가 차단되었기 때문으로 판단된다. 또한 1993년 북해도 남서 외해 지진해일에 의한 결과는 1983년 동해 중부 지진해일보다 작은 수치로 계산되어진다. 이는 초기파원의 위치가 동해중부 지진해일보다 북측에 위치하여 대화퇴에서의 에너지 분기가 다른 양상으로 나타나기 때문으로 판단된다.

대상 영역에서의 최대파고가 전체적으로 작은 값으로 계산이 되어진다. 1983년과 1993년 지진해일에 의한 피해는 거의 없는 것으로 계산이 되고 본 연구에서 계산된 결과 값은 부산 인근에서 일어날 수 있는 가상 지진해일에 관해 연구 시에 많은 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. Cho, Yong-Sik and Yoon, S.B., (1998). "A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations", Coastal Engineering Journal (SCIE), Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
2. Sohn, D.-H., Cho, Yong-Sik, Ha, T.-M. and Kim, S.-M. (2006). "Development of practical dispersion-correction scheme for propagation of tsunamis, Journal of Korean Society of Civil Engineers" Vol. 26, No. 5B, pp. 551-555.
3. (주)세광종합기술단 (2007). "부산항 신항 2-4단계 컨테이너부두 축조공사 보고서"