

예경보와 방재시스템의 연계를 위한 지진해일 범람도의 실용적 작성 Practical Construction of Tsunami Inundation Map to Link Disaster Forecast/Warning and Prevention Systems

최준우* · 김경희* · 전영준** · 윤성범***

Junwoo Choi*, Kyung Hee Kim*, Young Joon Jeon** and Sung Bum Yoon***

요 지 : 일반적으로 지진해일 경보 발령 시 예상해일고를 산정하기 위해 큰 격자의 선형모형을 사용하게 되므로 범람역이 과소 산정된다. 그러므로 비상대피 계획을 위해 예보해일고에 상응하는 정도 높은 범람도를 필요로 한다. 본 연구에서는 범람역의 정량예보를 위해 상대적으로 정도 높은 지진해일 범람도를 작성하는 실용적인 방법을 제안하였다. 이 방법은 다음과 같다. 선형 지진해일 수치모형을 사용하여 대상지역 주변에 특정 지진해일고를 유발시키는 잠재 지진해일 발생원의 단층 변위를 산정한다. 이렇게 구해진 단층 변위에 대해 비선형 범람 수치모형을 이용하여 대상지역의 최대 침수포락선을 계산하고 범람도를 작성한다. 본 연구에서는 임원항을 대상지역으로 11개의 잠재 지진해일 발생원에 대해 예상범람도를 작성하여 제안된 기법의 타당성을 검토하였다.

핵심용어 : 예보 지진해일고, 선형 모형, 잠재 지진해일 발생원, 비선형 범람모형, 범람도

Abstract : In general, forecast tsunami heights announced for tsunami warning are computed by using a linear tsunami model with coarse grids which leads the underestimation of inundation area. Thus, an accurate tsunami inundation map corresponding the forecast tsunami height is needed for an emergency evacuation plan. A practical way to construct a relatively accurate tsunami inundation map was proposed in this study for the quantitative forecast of inundation area. This procedure can be introduced as in the followings: The fault dislocations of potential tsunami sources generating a specific tsunami height near an interested area are found by using a linear tsunami model. Based on these fault dislocations, maximum inundation envelops of the interested area are computed and illustrated by using nonlinear inundation numerical model. In this study, the tsunami inundation map for Imwon area was constructed according to 11 potential tsunami sources, and the validity of this process was examined.

Keywords : forecast tsunami height, linear model, potential tsunami source, nonlinear inundation model, inundation map

1. 서 론

지진해일이 발생했을 때 인명과 재산 피해를 최소화하기 위해서는 신속한 예경보와 함께 정확한 예상 해일고와 그에 따른 해안지역의 예상 범람역을 제공하여 신속하고 안전하게 대피할 수 있도록 하는 방재시스템이 필수적이다. 그러나 지진해일 발생 시 지진발생원의 위치와 단층변위 특성을 파악하고 상세한 수치모형을 이용하여 대상지역에 대

한 지진해일 예상 범람영역을 산정하는 데 필요한 계산 소요시간이 지진해일이 해안에 도달하는 데 걸리는 시간보다 훨씬 길어 실시간 예경보가 사실상 불가능하다. 따라서 일반적으로 지진해일 해일고를 예보하기 위해 정확도는 낮지만 신속한 결과를 주는 큰 격자의 광역 선형 수치모형을 사용하게 된다. 그러나 이러한 예보용 광역 수치모형으로부터 얻어지는 해일고는 실제에 비해 매우 작아 범람역이 과소 산정되므로 위험한 상황과 피해를 발생시킬 가능성이 있

*한양대학교 대학원 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Hanyang University)

**현대건설 토목사업본부(Division of Civil Works, Hyundai Engineering and Construction Co., LTD.)

***한양대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Dept. of Civil & Environ. Engrg. 1271 Sa-3-dong, Sangnok-gu, Ansan, Kyunggi, 426-791, Korea. sbyoon@hanyang.ac.kr)

다. 일본이나 미국에서도 이러한 현실적인 제약 조건을 인식하고 실시간 정량 예보 대신 발생 가능한 가상적인 최대 지진해일을 상정하여 대상지역에 대한 지진해일 최대 예상 범람역을 산정하고 이를 바탕으로 범람예상도와 재해정보 지도를 작성하여 지역사회에 배포함으로써 방재활동에 활용하고 있다. 그러나 작은 규모의 지진해일 내습 시에도 가상적인 최대 규모의 범람예상도를 사용함으로써 주민 대피 등 방재활동에 있어서 과잉대응의 우려가 있는 것도 사실이다.

만약 과소 산정되는 예보해일고에 상응하는 지진해일 발생원에 대해 실제 범람영역을 미리 예측하여 예보해일고 별로 범람예상도를 작성하여 두고, 유사시 예보해일고가 통보되면 이에 상응하는 범람예상도를 제시하여 활용한다면 과잉대응에 따른 문제점을 어느 정도 해결할 수 있어, 정량적인 예보를 향한 진일보된 방안이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 예보해일고에 연계된 예상 범람도 작성기법을 제안한다. 우선 특정 해안 지점에 지진해일을 발생시킬 가능성이 높은 지진해일 발생원의 위치를 파악하고, 광역 수치모형을 이용하여 대상지역에서 소정의 예보해일고를 유발시키는 발생원의 해저지형 단층 변위값을 찾아낸다. 이렇게 얻어진 각 발생원별 초기 단층이동 변위값들을 입력조건으로 정확도 높은 상세형 비선형 지진해일 수치모형을 이용하여 대상지역의 범람역을 다시 계산한 다음, 이들을 겹쳐서 최대 침수포락선을 작성한다. 이러한 과정을 통해 지진해일 예보해일고별로 침수예상도를 미리 작성해 두면, 전술한 바와 같이 지진해일 발생 시 대상 지역에서 소정의 지진해일 예보해일고가 주어졌을 때 이에 상응하는 범람역을 신속하게 파악할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 우리나라 동해안의 특정 대상지역에 특정 예보해일고를 발생시킬 수 있는 다양한 크기를 가진 11개의 지진해일 발생원으로부터 전파되는 가상 지진해일을 수치해석하고, 그 크기의 단계별로 침수포락선을 표시하여 예상범람도를 작성하는 예경보와 방재시스템의 연계 방법을 수립하고 그 타당성을 검토한다. 적용 대상지역으로는 1983년과 1993년 동해 지진해일 발생 시 가장 큰 피해를 입었던 임원항을 선정하였다.

2. 지배방정식 및 수치기법

대상지역에서 특정 지진해일 예보해일고를 발생시킬 수 있는 지진해일 발생원의 해저 단층 변위값을 얻기 위한 광역 수치모형으로 격자접속기법을 사용하지 않는 분산보정

유한차분모형(DCFDM, Dispersion-Correction Finite Difference Model)을 사용하였다. 이 모형은 Yoon et al.(2007a)에 의해 제안된 수치적인 오차는 제거하고 물리적인 분산은 고려하도록 분산보정을 수행하는 선형 Boussinesq-type 파동방정식(LBTWE)을 사용한다. 반면에 특정 예보해일고에 상응하는 지진해일 발생원에 의한 범람역 계산을 위한 상세역모형으로는 수치 분해능문제를 해결할 수 있는 Yoon et al.(2007b) 및 Lim et al.(2008)이 개발한 동시격자접속기법(Active nesting scheme)을 도입한 접속격자-분산보정 유한차분모형(NDCFDM, Nested Dispersion-Correction Finite Difference Model)을 사용하고, 비선형효과와 바닥마찰이 고려되어야 하는 해안근처의 범람모형으로는 Yoon and Cho(2001)에 의해 발표된 이동경계(MB, Moving Boundary)를 도입한 비선형 천수방정식(NSWE, Nonlinear Shallow Water Equations) 모형을 이용하였다. 본 연구에 사용된 수치모형인 원거리전과 분산보정 지진해일 수치모형, 접속격자기법을 사용하는 분산보정 지진해일 수치모형과 이동경계기법을 포함한 비선형 천수방정식 모형은 그 결과들이 위에 제시한 문헌들을 통해 충분히 검증되어있다. 따라서 자세한 내용은 그 문헌들로 대신한다.

3. 잠재 지진해일 발생원의 위치 및 단층 파라미터

지진해일 수치모의는 발생원의 초기 수면변위를 산정하는 것으로부터 시작된다. 일반적으로 지진해일 발생원의 초기 수면변위를 추정하기 위해 초기 수면변위가 해저 변위의 연직성분과 같다는 가정으로부터 Fig. 1에 나타낸 단층

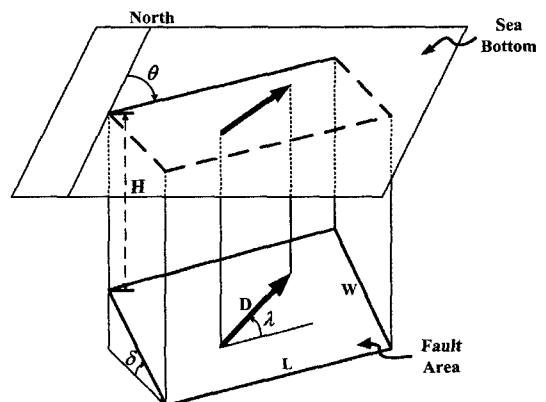


Fig. 1. Definition sketch for fault parameters of tsunami source.

Table 1. Parameters according to return period of potential tsunami sources (KEDO, 1999)

Return period	25 yr	100 yr	PMT
<i>M</i>	6.8	7.4	7.8
<i>L</i> (km)	39	85	134
<i>W</i> (km)	13	28	44
<i>D</i> (m)	1.5	3.2	5.1
<i>H</i> (km)	1.0	1.0	1.0
δ ($^{\circ}$)	40	40	40
λ ($^{\circ}$)	90	90	90

Table 2. Location and of potential tsunami sources (KEDO, 1999)

Source No.	Location		Orientation θ ($^{\circ}$)
	Latitude($^{\circ}$ N)	Longitude($^{\circ}$ E)	
1	37.5	137.5	0.0
2	38.3	137.7	14.5
3	39.0	138.0	27.5
4	39.7	138.4	17.0
5	40.2	138.7	10.0
6	40.9	138.9	1.0
7	41.7	139.0	1.0
8	42.1	139.1	4.0
9	42.9	139.1	2.0
10	43.5	139.2	2.0
11	44.4	139.2	3.0

파라미터를 기초로 한 Mansinha and Smylie (1971)의 모형을 사용한다. Fig. 1에서 θ 는 진북과 이루는 단층의 주향을 표시하며, δ 는 dip angle, λ 는 slip angle, W 는 단층의 경사폭, L 은 단층의 길이, D 는 단층의 변위(dislocation), H 는 단층면의 상연깊이를 나타낸다.

KEDO(1999)로부터 발췌된 Table 1은 동해의 잠재적 지진해일 발생원에 대한 발생빈도에 따른 파라미터의 값을 나타내며, Table 2는 우리나라 동해안에 지진해일을 유발시킬 수 있는 가능성이 매우 높은 일본 홋카이도와 혼슈의 서쪽 해안을 따라 남북으로 길게 발달된 단층대에 설정된 11개의 잠재적 지진해일 발생원의 위치정보 및 진북과 이루는 단층의 주향을 나타내는 θ 값을 제시하고 있다. Table 1에 제시된 바와 같이 단층의 길이와 폭 및 변위는 지진의 규모에 비례하여 증가한다. 그러나 본 연구에서는 단층변위 D 를 제외한 나머지 파라미터는 Table 1의 PMT(Probable Maximum Tsunami)의 값을 사용하였고, 단층변위 D 만을 조정하여 초기 수면변위를 결정하였다. 이는 각종 파라미터 중에서 단층변위가 초기 수면 변위 결정에 가장 큰 영향을 미치는 물리적인 근거에 의한 것 이외에도 파라미터

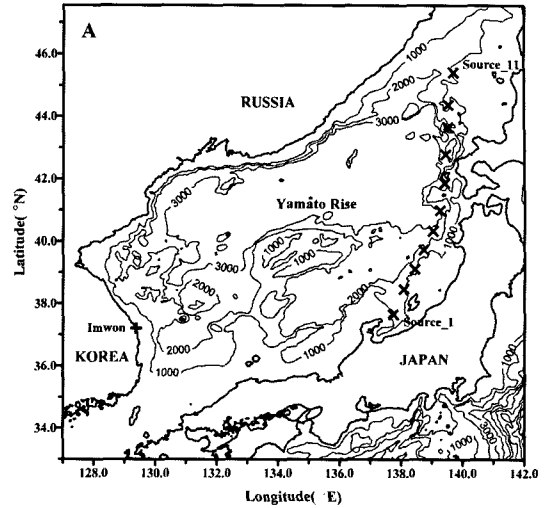


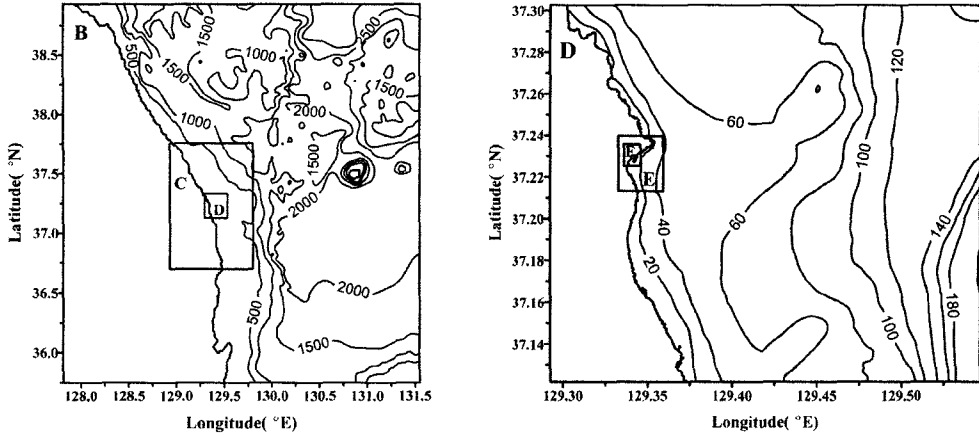
Fig. 2. Full computational domain for non-nested DCFDM to find dislocations (D) and computational domain A for NDCFDM to compute inundation area (depth unit: m).

의 복잡한 조합에 따른 방대한 수치계산을 단순화하기 위한 목적도 있다.

Fig. 2에 나타난 수치 계산영역은 격자 크기가 1분인 동해 전체를 나타내는 영역이다. 이 계산영역에 대해 예보용 광역 수치모형을 사용하여 대상지점인 임원에서 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m의 예보해일고를 주는 11개 지진해일 발생원의 해저지형 단층 변위값 D 를 찾기 위한 계산을 수행하였다. 사용된 격자의 갯수는 1209(N)×1250(E), 격자의 크기 Δx 는 997.0~1159.0 m이고, Δt 는 3.0초를 사용하였다. 여기서 격자의 크기는 지구의 곡면효과와 파의 분산효과를 고려하므로 그 크기가 위도에 따라 변화된다(Lim et al., 2008). 이 영역에서 임원지역의 대표 지진해일고는 Fig. 2에 한 점(+표시)으로 나타나 있는 위도 37.13°, 경도 129.20° 근처의 9개의 격자점에서 최대수면고의 평균값을 구하여 산출하였다. 이 수면고를 지진해일 예경보시 발표되는 임원지역의 예보해일고에 상응하는 것으로 하였다.

4. 범람영역에 대한 수치실험 조건

Fig. 2의 격자 크기가 1분인 동해 전체를 나타내는 영역은 상세역 모형인 격자접속분산보정 유한차분모형(NDCFDM)을 사용하여 범람영역을 계산하기 위한 영역 A이기도 하다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 계산영역 B, C, D, E, F의 계산영역과 격자접속 영역을 나타낸다. 격자크기는 A영역에서 F영역으로 가면서 1/3배로 줄어들게 된다. 즉, A영역의 한



(a) Sub-regions B, C, D (depth unit : m).

(b) Sub-regions D, E, F (depth unit : m).

Fig. 3. Computational domain of sub-regions for NDCFDM+ NSWE+MB to compute inundation area.

Table 3. Computational information for inundation area of Imwon harbor

Region	No. of Grids	$\Delta x(m)$	$\Delta t(s)$	Remarks
A	1209×1550	930.0~1159.0	3.0	LBTWE
B	916×970	358.0~374.0	1.0	LBTWE
C	580×955	123.3	0.33	NSWE
D	562×490	41.1	0.11	NSWE
E	169×235	13.7	0.11	NSWE
F	217×268	4.5667	0.11	NSWE+MB

격자 크기는 F영역의 243배가 된다.

Table 3는 격자접속을 위한 영역들의 수치모의 조건들을 나타낸다. 영역 A, B는 LBTWE를 사용하여 직각좌표계에서 곡면효과와 분산보정을 고려하기 위해 가변 격자를 사용하였다. 그리고 A~D영역으로 가면서 1/3배로 줄어드는 시간간격을 수치모의에 사용하였으며, D와 F영역의 계산을 위한 시간 간격은 같다. F영역에서는 범람모형을 사용하는 비선형 천수방정식(NSWE+MB) 모형을 사용하였다.

Fig. 4는 상세역 F의 계산영역을 나타내고 있으며, 그림에서 gage ①~⑦들은 계산된 수면고를 기록하여 저장하기 위한 격자점을 나타낸다. gage ①에서는 임원항에 도달한 지진해일 파의 시간이력을 기록하며, gage ②~⑦은 지진해일의 전파 후 해안에 도달하는 파의 범람고를 산정하기 위해 설치하였다.

5. 예보해일고에 상응하는 단층변위 산정

예경보시 발표되는 대상지점에서의 특정 예보해일고를 유발하는 지진해일 발생원의 여러 제원들을 정확하게 추정하

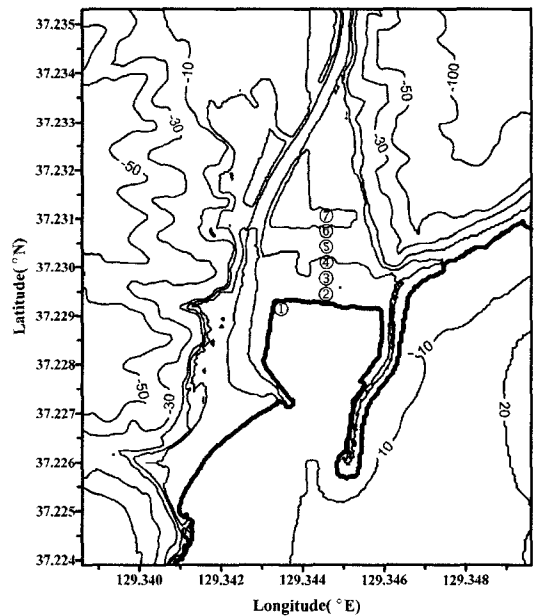


Fig. 4. Computational domain of sub-region F to compute inundation area and location of gages ① ~ ⑦.

는 것은 지진학적 관점에서 가능한 일이 아니다. 따라서 이 과정을 11개 발생원의 위치 및 각종 단층 파라미터들을 통계적 근거를 바탕으로 고정시키고 초기 수면변위 결정에 가장 큰 영향을 미치는 물리적인 근거로부터 예보해일고별 단층변위만을 찾는 것으로 간략화시켰다. 그러나 단층변위 D 를 구하는 과정 또한 광역선형모형을 이용한 많은 반복 계산을 필요로 한다. 기본적으로는 주어진 발생원의 위치에 Table 1의 단층 파라미터 중 단층변위 D 를 제외한 $L, W,$

H , δ 및 λ 는 PMT의 값을 그대로 사용하고, D 를 가정하여 광역 수치모형으로 대상지역인 임원지점에서 최대해일고를 구한 다음, 원하는 특정 예보해일고와 비교하고, 이 2개의 해일고 값이 서로 같아질 때까지 단층변위 D 를 조정하는 단순한 반복과정이다. 그러나 이 방법은 수많은 수치계산을 필요로 하므로 경제적이지 못하다. 본 연구에서는 광역 수치모형이 해일의 전파과정과 굴절, 회절, 천수화등 선형 변형만을 수치모의할 수 있는 선형(linear) 지배방정식을 사용하고 초기수면변위와 단층변위 사이에 비선형적 관계가 없으므로 대상지점에서의 해일고는 발생원의 단층변위와 선형 비례관계가 있다는 점을 이용하였다. 즉, 선형관계에 착안하여 발생원의 몇 가지 단층변위에 대해 광역 수치모의를 수행하여 대상지점에서의 해일고를 구한 다음, 단층변위와 대상지점 해일고 사이의 상관관계를 파악하여 선형관계식을 얻고, 이를 이용하여 주어진 대상지점에서의 예보해일고에 대한 발생원에서의 단층변위를 쉽게 구할 수 있었다. Fig. 5는 Table 2와 Fig. 2의 5번 발생원에 대한 예보해일고와 단층변위 사이의 선형관계를 보여준다.

Table 4는 이렇게 구해진 임원지점에서의 특정 예보해일고를 유발하는 지진해일 발생원에서의 단층변위 D 를 정리하여 제시하였다.

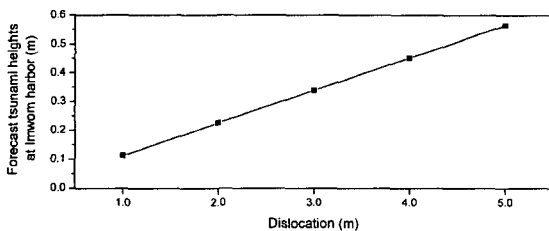


Fig. 5. Relation between dislocation at source_5 and its corresponding forecast tsunami heights near Imwon area.

6. 범람 수치모의

예보용 광역모형(DCFDM)을 이용하여 임원지점(위도 37.13°, 경도 129.20°)에서 예보해일고 0.1~0.5 m를 주는 단층변위 값들은 Table 4에 제시한 바와 같다. 이 단층변위 값들을 입력조건으로 상세역모형(NDCFDM+NSWE+MB)을 이용하여 임원지역에서의 범람을 수치모의하고, 임원항 내에 위치한 gage ①에서의 최대해일고 값을 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 임원지점에서 동일한 해일고가 예보되더라도 실제 임원항에서의 해일고는 발생원의 위치에 따라 서로 달라진다. 예를 들어 임원지점에서 해일고가 0.5 m로 동일하게 예보되는 경우라 할지라도 발생원이 2, 6, 7, 및 8번에 위치하면 임원항 내의 실제 해일고는 4~5 m에 달하고, 발생원이 3, 9 및 11번에 위치하면 실제 해일고는 3 m 이하로 작아진다. 다시말해서, 앞의 11개 발생원의 단층변위 값에 대하여 예보용 선형광역모형으로는 임원지점에서 모두 0.5 m의 해일고가 계산되지만 접속격자기법을 사용하는 비선형 상세역모형으로 계산된 임원항내 해일고는 0.5 m보다 매우 크고 발생원별로 차이를 보인다. 예보용 광역모형의 한계성을 보여주는 이러한 차이의 원인은 두 모형이 가지는 특성의 차이로 설명할 수 있다. 첫째, 광역모형은 격자크기의 한계로 임원항의 지형을 상세히 표현할 수 없기 때문에 격자분해능에 따른 오차를 내포하고 있을 뿐만 아니라 임원지점의 위치와 상세역모형의 임원항내 축점은 동일한 지점이 아니다. 둘째, 서로 다른 위치에서 발생한 지진해일은 임원항 앞바다에 위치한 임원지점까지 동해의 대화퇴 및 임원을 기점으로 한 K자 모양의 수중산맥과 같은 복잡한 해저지형의 영향을 받아 서로 상이하게 변형되며 전파한다. 이렇게 발생위치별로 서

Table 4. Dislocation at each source location corresponding to forecast tsunami heights near Imwon area

Source location	Forecast tsunami height (m)				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	2.040	4.080	6.120	8.160	10.200
2	0.902	1.804	2.070	3.609	4.510
3	0.887	1.773	2.660	3.547	4.454
4	0.661	1.322	1.984	2.645	3.310
5	0.884	1.768	2.652	3.536	4.430
6	0.894	1.787	2.681	3.575	4.480
7	1.020	2.040	3.060	4.080	5.115
8	1.179	2.358	3.537	4.716	5.910
9	2.517	5.035	7.552	10.070	12.590
10	2.745	5.492	8.239	10.987	13.734
11	5.337	10.682	16.027	21.372	26.717

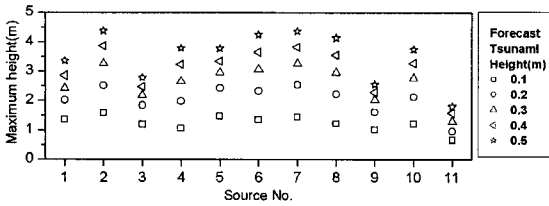


Fig. 6. Predicted tsunami heights using NDCFD+NSWE+MB corresponding to forecast tsunami heights.

로 다르게 변형되어온 지진해일은 다시 임원항내 측점까지 전파해 오면서 광역모형만으로는 구현할 수 없는 비선형효과, 마찰효과 그리고 범람현상에 기인한 변형을 하게 된다. 따라서 발생위치별로 다르게 변형되어온 지진해일은 해안근처에서의 비선형효과, 마찰효과, 범람현상의 영향 정도에 따라 임원항내 측점에서 서로 다른 해일고를 발생시킨다. 지진해일이 임원지점으로부터 임원항내 측점까지 전파되며 겪는 비선형효과, 마찰효과 그리고 범람현상의 포괄적 영향은 임원지점에서의 예보해일고와 위치별로 서로 다르게 변형된 지진해일의 임원항내 측점에서의 평균해일고를 비교하여 다음에 기술하였다.

임원지점에서의 예보해일고와 임원항내 gage ①에서의 지진해일 발생원 각각에 의한 11개 최대해일고의 평균값 사이의 비를 산출하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7로부터 실제해일고의 예보해일고에 대한 증폭비는 예보해일고가 증가할수록 비선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유를 살펴보면 우선은 예보용 광역모형은 완전반사 조건을 채용하므로 해일고가 큰 경우 월파가 허용되는 이동경계 기법을 사용하는 상세역모형에 비해 해안의 특정지점 즉 gage ①에서 해일고가 실제보다 크게 산정되는 경향이 있기 때

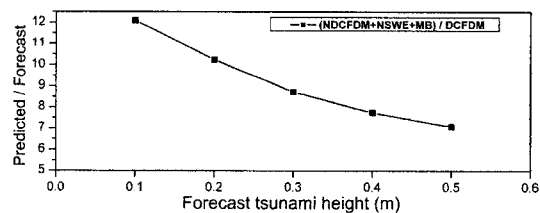


Fig. 7. Ratio of forecast tsunami height using DCFDM and mean value of predicted tsunami heights using NDCFD+NSWE+MB.

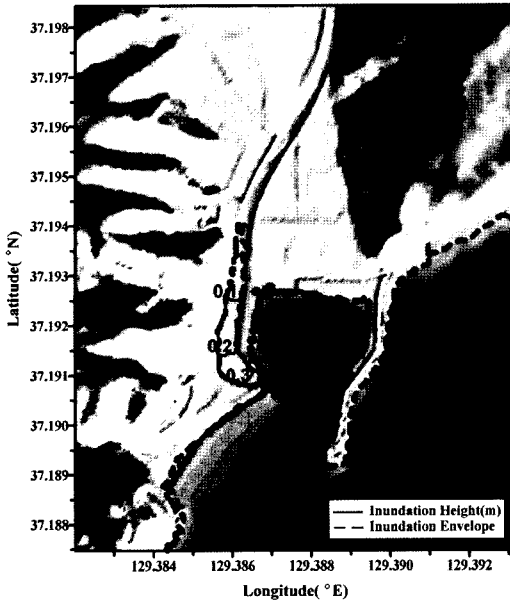
문이다. 그러므로 해일고가 커질수록 상세역 모형은 해안에서의 증폭이 감소하게 된다. 또한 임원항내 gage ①의 위치까지 도달하는 지진해일은 비선형 효과와 마찰을 무시할 수 없는 수심을 통과하여 전파되므로 선형모형(DCFDM)과 비선형모형(NDCFD+NSWE+MB)의 계산결과가 비선형적 관계를 갖는 것이 당연하다. Table 5에 두 모형사이 평균 최대해일고 값의 비를 정리하여 나타내었다.

7. 예보해일고에 대한 침수 예상도

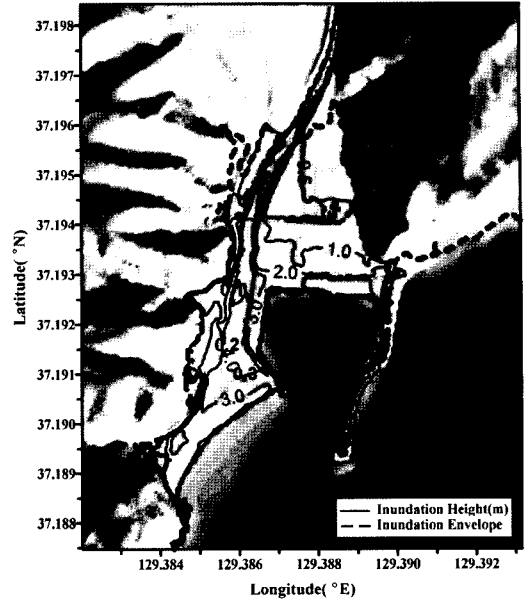
앞에서 언급했던 것처럼 광역모형(DCFDM)을 사용하여 대상지역에서 소정의 예보해일고를 발생시키는 여러 발생원들의 단층 변위값을 구하고, 이를 입력조건으로 상세역모형(NDCFD+NSWE+MB)을 이용하여 예보해일고 하나에 대해 11개의 범람역을 설정할 수 있다. 이 11개의 범람역은 예보해일고가 동일하므로 많은 부분이 중복되지만 지진해일이 서로 다른 발생원으로부터 전파되었으므로 대상지역에 내습하는 방향이 서로 달라 중복되지 않는 부분도 발생한다. 만약 예경보 발령 시 예보해일고와 발생원을 동시에 고려한 대피계획을 세운다면 5가지 예보해일고에 각각 11가지 발생원이 연관되므로 총 55장의 범람도가 작성·배포되어야 한다. 미국이나 일본의 경우와 같이 최대규모의 지진해일을 상정하여 최대예상범람도 한 장만을 작성하여 배포하는 경우에 비하면 정량 예보로 과잉 대응을 피할 수 있는 장점도 있으나, 필요 이상의 상세함으로 인해 유사시 큰 혼란이 예상된다. 따라서 동일한 예보해일고에 대해서는 각각의 발생원에 의한 범람역을 종합하여 한 장의 예상범람도를 작성하는 것이 현실적이다. 이를 위해 본 연구에서는 11개의 범람역을 중첩하여 침수포락선을 구하는 방법을 제안한다. Fig. 8은 이와 같은 중첩기법을 이용하여 본 연구의 대상지역인 임원항에 대한 0.1 m와 0.5 m의 예보해일고에 상응하는 침수예상도를 보여준다. Fig. 8(a)는 임원지역에 0.1 m 해일고의 지진해일이 발생할 것으로 예경보가 내려진 경우에 대피를 위한 예상범람도이며, 임원천을 따라 지진해일 파가 어느 정도 진입한 것을 보이고 있지만 대부분의 임원항 지역은 침수되지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 임원지역 예보해일고가 0.5 m일 경우를 나타내며, 임원천과 임원항 사이의 모든 지역이 침수됨을 알 수 있다.

Table 5. Ratio of forecast (DCFDM) and predicted (NDCFD+NSWE+MB) tsunami heights

Forecast height near Imwon (m)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
Predicted height at Imwon (m)	1.21	2.04	2.62	3.09	3.54
Ratio of forecast and predicted tsunami heights	12.10	10.23	8.73	7.72	7.08

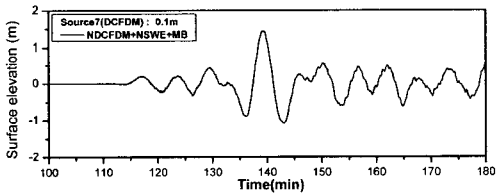


(a) Inundation envelopes corresponding to 0.1m forecast tsunami height near Imwon area.

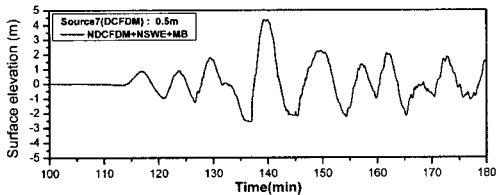


(b) Inundation envelopes corresponding to 0.5m forecast tsunami height near Imwon area.

Fig. 8. Inundation envelopes at Inwon harbor.



(a) Predicted tsunami height at Imwon harbor corresponding to 0.1m forecast tsunami height.



(b) Predicted tsunami height at Imwon harbor corresponding to 0.5m forecast tsunami height.

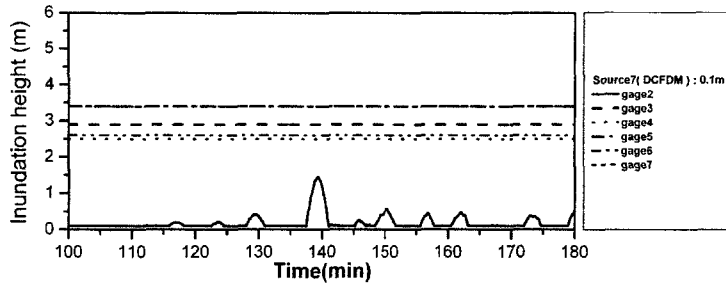
Fig. 9. Time series of tsunami height at wave gage ① for tsunami source 7 calculated using NDCFDM+NSWE+MB model.

Fig. 9는 임원지역의 지진해일 예보해일고가 0.1m와 0.5m일 경우, 잠재적 지진해일 발생원중 가장 큰 영향을 미치는 지진해일 발생원 7에서 전파되어 온 지진해일의 임원항내 gage ①에서의 시간이력을 나타낸다. Fig. 10은 gage ②~⑦에서의 범람고를 나타낸다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)로부터 예보해일고가 0.1m인 발생원 7에서 전파되어 온 지진해일 파는 발생 후 약 115분에 임원항에 도달하며, 139분

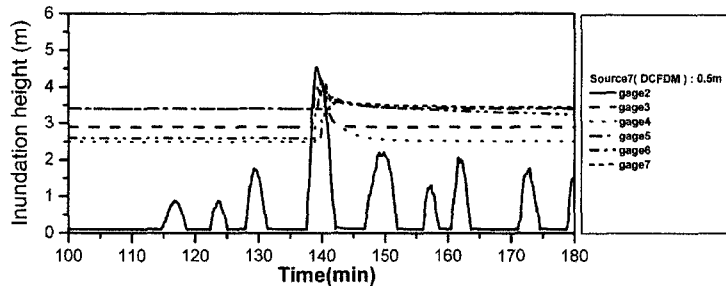
에 최대해일고는 1.43m인 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)로부터 예보해일고가 0.5m인 발생원 7에서 전파되어 온 지진해일 파는 예보해일고가 0.1m인 파와 동일하게 첫 파 도달시간과 최대해일고 도달시간을 나타내며, 최대해일고는 4.35m를 나타낸다.

본 연구의 결과에서 알 수 있듯이 지진해일이 발생하여 임원지역 앞 바다에 0.1m의 해일고가 예보되어도 실제 최대해일고가 1.43m가 될 수 있으며, 0.5m의 예보해일고는 실제 최대해일고가 4.35m에 이르러 대부분의 임원항 지역이 침수될 가능성이 있다. 따라서 주민들의 대피장소는 0.5m의 지진해일 해일고가 아닌 4.35m 이상의 해일고를 고려하여 지정되어야 할 것이다.

끝으로 지진해일 발생시 선형광역모형을 이용하여 예보되는 해일고에 상응하고 비선형상세역모형으로부터 예측된 실제 예상범람역을 바탕으로 방재활동에 적용가능한 범람 예상도를 작성하기 위해 다음과 같은 방법을 제시한다. 첫째, 대상지역에 내습가능성이 높은 지진해일 발생원의 위치 및 단층변위를 제외한 단층계수들을 상정한다. 둘째, 대상지역에서 소정의 예보해일고를 유발시키는 발생원의 단층변위를 선형모형과 그 특성을 이용하여 결정한다. 셋째, 각 발생원별 단층변위값들을 입력조건으로 대상지역의 범람역을 비선형상세역모형으로 계산한다. 넷째, 각 예보해일고별



(a) Predicted inundation height at Imwon harbor corresponding to 0.1m forecast tsunami height.



(b) Predicted inundation height at Imwon harbor corresponding to 0.5m forecast tsunami height.

Fig. 10. Time series of inundation heights from gage ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦ for tsunami source 7 using NDCFD+ NSWE+MB.

로 상정발생원들에 대한 대상지역의 지진해일 최대침수역의 포락선으로부터 예보해일고별 침수예상도(최대침수포락선)를 나타내는 예상범람도를 작성한다. 지진해일 예경보시 예보해일고가 발표되면 이 예보해일고에 상응하는 예상범람역을 표시한 침수예상도(최대침수포락선)를 이용하여 방재활동을 수행하므로 예보파고와 관계없이 예상가능최대범람역으로 작성된 예상범람도를 이용하므로 발생될 파고대응을 방지할 수 있을 것이다.

8. 결 론

지진해일이 발생할 경우 대상지역의 주민들을 신속히 대피시키기 위해 일반적으로 큰 격자와 선형 방정식을 채용하는 광역모형을 이용하여 수치모의를 실시하고, 예상 해일고를 산정하여 예경보를 발령한다. 그러나 서로 다른 위치에서 발생한 지진해일은 동해의 복잡한 해저지형의 영향을 받아 발생원의 위치에따라 상이하게 변형되고 다시 해안지역에서 광역모형으로는 구현할 수 없는 비선형효과, 마찰효과 그리고 범람현상에 기인한 변형을 하게 된다. 따라서 광역모형은 선형 지배방정식과 큰 격자에 의한 수치오차와 지형의 근사화로 인해 상대적으로 정확성이 떨어지게 된다. 본 연구에서도 선형모형인 광역모형으로 예측한 대상지역(임원항)의 지진해일 해일고는 정확도 높은 상세역모

형의 결과와는 크게 다르며 그 값이 매우 작다는 것을 알 수 있었다. 따라서 선형모형의 결과인 예보해일고만으로 범람영역을 추측하는 것은 위험한 상황과 피해를 발생시킬 가능성이 있다.

본 연구에서는 예경보 발령 시 사용하는 광역모형의 예보해일고에 상응하는 실제 범람영역을 예측하기 위해 대상지역에서 일정범위 안의 지진해일 해일고를 발생시킬 수 있는 여러 위치의 지진해일 발생원의 해저 단층의 변위값을 찾아내고, 이 변형 값들을 입력조건으로 정확도 높은 상세역모형을 이용하여 대상지역의 최대 침수포락선을 구하는 예상범람도 작성법을 제안하고 임원항을 대상지역으로 하여 이를 시범적용하였다.

감사의 글

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

참고문헌

KEDO (1999). Estimation of Tsunami height for KEDO LWR project. Korea Power Engineering Company, Inc.
 Lim, C.H., Bae, J.S., Lee, J.I., Yoon, S.B. (2008). Propagation

- characteristics of historical tsunamis that attacked the east coast of Korea. *Natural Hazards* (in press).
- Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971). The displacement fields of inclined faults. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 61(5), pp. 1433-1440.
- Yoon, S.B. (2002). Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography. *J. Geophys. Res.*, AGU, 107(C10), 4(1)-4(11).
- Yoon, S.B. and Cho, J.H. (2001). Numerical simulation of coastal inundation over discontinuous topography, *Water Engineering Research*, Korea Water Resources Association, Vol. 2, No. 2, pp. 75-87.
- Yoon, S.B., Lim, C.H., Choi, J. (2007a). Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 18(1), pp. 31-53.
- Yoon, S.B., Lim, C.H., Bae, J.S., Jeon, Y.J. (2007b). Grid nesting for dispersion-correction finite difference model for tsunami simulation. *Proceedings of 32nd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Venice, Italy.

Received January 8, 2008

Accepted April 3, 2008