



工學碩士 學位論文

동해연안에 영향을 미친 지진해일파의 수치시뮬레이션 및 공진장치에 의한 지진해일파와 풍파의 제어에 관한 연구

Numerical Simulation of Tsunamis that Affected

The Coastal Zone of East Sea and

A Study on the Control of Tsunamis and Wind Wave by

Resonator

1945

指導教授 金 度 三

2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

全 種 赫

본 논문을 전종혁의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2016年 2月

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

전 종 혁



Numerical Simulation of Tsunamis that Affected The Coastal Zone of East Sea and A Study on the Control of Tsunamis and Wind Wave by Resonator

by

Jong Hyeok Jeon

Department of Civil and Environmental Engineering

Graduate School

Korea Maritime University

1945

ABSTRACT

The Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model (COMCOT) was based on the non-linear shallow water wave equations to simulate tsunami propagation process, which was applied to find numerical simulation of tsunami generated of Central East Sea earthquake (1983) and Southwest off Hokkaido earthquake (1993). Also COMCOT model was used to find numerical simulation of virtual tsunami generated by hypothetical earthquake. From this, characteristics of tsunami such as variation of water level and maximum water level height, propagation time of tsunami at the coastal zone of East sea are reviewed. In addition, we estimated variation of water level and range of inundation of tsunami caused by Central East Sea earthquake (1983) on Imwon harbor. Thus COMCOT model validity had been verified by compare of research result and already



existed results.

The potential of possible impacts of tsunami on Jeju Island caused by the triple interlocked Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes (M 9.0 on the Richter scale) could be predicted using the proposed model. According to the results, the maximum water level height estimated in the coastal areas of Jeju Island was about 1.25m at Sagye harbor.

Resonators which had been already developed are attached to existing breakwater to control tsunami, the usefulness of resonators were numerically reviewed with the tsunami due to Central East Sea earthquake (1983) and Southwest off Hokkaido earthquake (1993). In the case of Mukho harbor, it showed the maximum reduction of water level height to 40~50%. And resonators of new type proposed from recent study were then applied to Samcheok harbor with a relatively long waters. The confirmed exceptionally outstanding reduction of water level.

Finally, the numerical study using the SWAN model was conducted for the Mukho harbor and Samcheok harbor in order to review wind wave due to the effects of resonator. The results confirmed usefulness of resonator.

1945



동해연안에 영향을 미친 지진해일파의 수치시뮬레이션 및 공진장치에 의한 지진해일파와 풍파의 제어에 관한 연구



全種赫

이 연구는 지진해일의 전파과정을 수치모의할 수 있는 비선형천수방정식에 기초한 COMCOT모델을 적용 하여 1983년의 동해중부지진, 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일과 지진공백역에서의 가상 지진해일을 수치시뮬레이션하였으며, 이로부터 동해연안에서의 수위변동과 최대수위상승고 및 전파시간 등과 같은 지진해일의 제반특성을 검토하였다. 또한, 1983년 동해중부지진시의 지진해일에 의한 임원항에서 의 수위변동, 침수범위 등을 추정함과 동시에 기존의 연구결과와의 비교로부터 COMCOT모델의 타당성을 검중하였다.

이로부터 일본 태평양연안에서 발생 가능성이 제기되고 있는 리히터 규모 M9.0의 Tokai, Tonankai 및



iii

Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 제주도연안에 미치는 영향을 검토하였다. 결과에 의하면 제주도 연안의 사계항에서 최대수위가 1.25m 추정되었다.

지진해일을 제어하기 위하여 기개발된 공진장치를 기존의 방과제에 부착하는 방식을, 1983년의 동해중부 지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 내습시에 적용하여 공진장치의 유용성을 수치적으로 검토하였다. 여기서, 묵호항의 경우, 최대 40~50%까지 수위가 저감된 결과를 나타내었다. 그리고, 최근에 제안된 새로운 형태의 공진장치를 비교적 긴 해역을 가지는 삼척항에 적용하여 수위저감에 대한 우수성을 확인하였다.

마지막으로 풍파에 대한 공진장치의 효과를 검토하기 위하여 묵호항과 삼척항을 대상으로 SWAN모델로 부터 수치해석을 수행하였으며, 또한 그의 유용성을 확인할 수 있었다.







2.1 석 언	9
2.2 수치해석이론	10
2.2.1 지배방정식	10
2.2.2 유한차분근사	11

제 2 장 과거의 지진에 의한 지진해일고의 추정

ABSTRACT	i
요 약 i	iii
목 차	v
LIST OF TABLES	X
LIST OF PHOTOS	ii
LIST OF FIGURES xi	iii
제 1 장 서 론 1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.1.1 지진해일	1
1.1.2 지진해일의 제어에 대한 공진장치의 효과	3
1.1.3 천해설계파의 제어에 대한 공진장치의 효과	4
1.2 연구의 구성	5

2.2.3	. 13
2.2.4 격자접속기법	. 14
22.5 단충파라미터	. 15
2.3 수치모델검증	. 16
2.3.1 1983 년 동해중부지진해일	. 16
2.4 과거 수치해도와 현재의 수치해도 비교	. 17
2.4.1 대상영역	. 17
2.4.2 수치해석결과	. 18
2.5 1983 년, 1993 년 및 지진공백역 지진에 의한 지진해일고의 추정	. 19
2.5.1 대상영역 및 계산조건	. 19
2.52 수치해석결과	. 22
2.6 결 언	. 30
<참고문헌>	31
34 SF LH 30∧	

제 3 장 Tokai, Tonankai 및 Nankai 의 3 연동지진에 의한 제주도 연안에서의 지진해일고 추정

3	.1 서언	32
3	.2 대상영역 및 계산조건	33
3	.3 지진해일의 초기수위	36
3	.4 수치해석결과	36
	3.4.1 대상지역(송악공원 주변)	38





vii

제 4 장 실해역에서 공진장치에 의한 지진해일파의 제어에 관한 수치적인 연구	
4.1 석 언	46
4.2 실해역에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 유효성 검토	47
4.2.1 대상지역(삼착항)	47
4.2.2 수치해석결과	49
4.3 묵호항에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 크기변화 검토	50
4.3.1 대상지역(묵호항)	50
4.3.2 수치해석결과	52
4.3.3 수치해석결과(길이 L 을 고정, 중앙부폭 B 와 폭 B`의 크기를 변화시킴)	54
4.3.4 수치해석결과(중앙부폭 B 와 폭 B`을 고정, 길이 L 의 크기를 변화시킴)	56
4.4 임원항에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 크기변화 검토	59
4.4.1 대상지역(임원항)	59
4.4.2 수치해석결과	60
4.4.3 수치해석결과(길이 L을 고정, 중앙부폭 B와 폭 B`의 크기를 변화시킴)	62
4.4.4 <mark>수치해석결과(중앙부폭</mark> B 와 폭 B`을 고정, 길이 L 의 크기를 변화시킴)	65
4.5 결 언	68
<참고문헌>	69

3.4.2 대상지역(사계항 및 화순항)	40
3.5 결 언	44
<참고문헌>	45



viii

5.1 서 언	70
5.2 공진장치의 형태와 설치위치에 따른 수치해석 결과	71
5.2.1 대상지역(삼척항)	71
5.2.2 수치해석결과	72
5.3 결 언	76
<참고문헌>	77
제 6 장 SWAN 모델을 이용한 공진장치에 의한 풍파의 제어에 관한 연구	
6.1 세 언	78
6.2 수치해석이론 1945	
62.1 SWAN 모델의 개요	78
6.3 SWAN 모델에 의한 수치해석	81
6.3.1 대상지역(묵호항)	81
6.3.2 수치해석결과	83
6.3.3 수치해석결과(길이 L을 고정, 중앙부폭 B 와 폭 B`의 크기를 변화시킴)	84
6.3.4 <mark>수치해석결과(중앙부폭</mark> B 와 폭 B`을 고정, 길이 L 의 크기를 변화시킴)	86
6.3.5 대상지역(삼척항)	88
6.3.6 수치해석결과	89
6.4 결 언	92

설치위치에 관한 연구

제 5 장 삼척항에서 지진해일의 제어를 위한 공진장치의 형태와



7.4 삼척항에서 지진해일파의 제어를 위한 공진장치의 형태와 설치위치	17
7.5 SWAN 모델을 이용한 공진장치에 의한 풍파의 제어	17
1945 3/ QF LH 8/ 3/	

7.5 SWAN 모델을 이용한 공진장치에 의한 풍파의 제어	. 97

7.2 Tokai, Tonankai, Nankai 지진에 의한 지진해일	95
7.3 실해역에서 공진장치에 의한 지진해일파의 제어	96

LIST OF TABLES

Table 2.1 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984)	
Table 2.2 Computation conditions	
Table 2.3 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984)	
Table 2.4 .Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994)	
Table 2.5 Fault parameters for Hypothetical earthquake (Ishikawa, 1994)	
Table 3.1 Computation conditions	
DITIME AND OCEAN	
Table 4.1 Computation condition	
Table 4.2 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994)	
Table 4.3 Computation condition	
Table 4.4 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994)	
Table 4.5 Computation condition	
Table 4.6 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984)	
Table 5.1 Computation condition	
Table 5.2 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994)	
Table 6.1 Deepwater design wave and water level for Mukho	
Table 62 Mesh sizes applied to each simulating area	Q1
Table 0.2 Tytesit sizes applied to call sufficiently alea	01
Table 6.3 Deepwater design wave and water level for Samcheok	
Table 6.4 Mesh sizes applied to each simulating area	



LIST OF PHOTOS

Photo 1.1 Damages by East Japan Tsunami at Rikuzentakata (Takahashi et al., 2011)	1
Photo 1.2 After 1983 Central East Sea tsunami in Imwon	3





LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Shape of wave resonator proposed firstly by Nakamura et al.(1985)	4
Fig. 1.2 Wave resonator constructed at Pier J of Long Beach port to attenuate excessive ship motions	4
Fig. 1.3 Wave resonator constructed at the yacht harbor of Rome at Ostia, Italy	4
Fig. 2.1 Sketch of the arrangement of variables and grid points for this finite difference method	. 11
Fig. 2.2 The schematic sketch of moving boundary condition	13
Fig. 2.3 Nesting method	15
Fig. 2.4 Fault types	16
Fig. 2.5 Fault Plane and Fault parameter definitions	16
Fig. 2.6 Simulation of inundation at Imwon harbor during 1983 Central East Sea Tsunami (Cho et al, 2007)	17
Fig. 2.7 Simulation of inundation at Imwon harbor during 1983 Central East Sea Tsunami (COMCOT model)	17
Fig. 2.8 Spatial distribution of water depth and topography altitude at the past Imwon	18
Fig. 2.9 Spatial distribution of water depth and topography altitude at the present Imwon	18
Fig. 2.10 Maximum water level height at the past Imwon	19
Fig. 2.11 Maximum water level height at the present Imwon	19
Fig. 2.12 Comparison of time history of water surface elevation between past and presnet at Imwon harbor	19
Fig. 2.13 Distribution of water depth at AREANO.1	20
Fig. 2.14 Spatial distribution of water depth and topography altitude at each region	21
Fig. 2.15 Propagation process of 1983 Central East Sea tsunami	23
Fig. 2.16 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Jumunjin harbor	23
Fig. 2.17 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Mukho harbor	24
Fig. 2.18 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Imwon harbor	24
Fig. 2.19 Propagation process of 1993 Southwest of Hokkaido tsunami	26



Fig. 2.20 Time history of water surface elevation calculated by 1993 Southwest of Hokkaido tsunami at

Jumunjin harbor	26
Fig. 2.21 Time history of water surface elevation calculated by 1993 Southwest of Hokkaido tsunami at	
Mukho harbor	26
Fig. 2.22 Time history of water surface elevation calculated by 1993 Southwest of Hokkaido tsunami at	
Imwon harbor	27
Fig. 2.23 Propagation process of Hypothetical tsunami 2	28
Fig. 2.24 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Jumunjin harbor	28
Fig. 2.25 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Mukho harbor	29
Fig. 2.26 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Imwon harbor	29
Fig. 2.27 Maximum Water Level at each region	30
Fig. 3.1 Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis of the past	33
Fig. 3.2 Distribution of tsunami height in Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis	33
Fig. 3.3 Distribution of water depth at AREA No.1	33
Fig. 3.4 Distribution of water depth at AREA No.2~6.	35
Fig. 3.5 Initial water level by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis	36
Fig. 3.6 Propagation process by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis	38
Fig. 3.7 Calculation points	39
Fig. 3.8 Maximum water level height at Around Songak park	39
Fig. 3.9 Time history of water surface elevation at each point suggested in Fig. 3.7	40
Fig. 3.10 Maximum water level at calculation points	40
Fig. 3.11 Calculation points	41
Fig. 3.12 Maximum water level height at Sagye harbor and Hwasoon harbor	41
Fig. 3.13 Time history of water surface elevation at each point suggested in Fig.3.11	42



Fig. 3.14 Maximum water level at calculation points	43
Fig. 3.15 Predicted inundation area at Sagye harbor and Hwasoon harbor	43

Fig. 4.1 Shape of wave resonator proposed firstly by Nakamura et al.(1985)	46
Fig. 4.2 Specifications of the extended breakwater and resonator	47
Fig. 4.3 Computation area	48
Fig. 4.4 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Samchuck	48
Fig. 4.5 Maximum water level by effect of resonator at Samchuck harbor	49
Fig. 4.6 Time history of water surface elevation at Samcheok harbor	50
Fig. 4.7 Computation area	51
Fig. 4.8 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Mukho	51
Fig. 4.9 Specifications of Existing breakwater and resonator	51
Fig. 4.10 Maximum water level by effect of resonator at Mukho harbor	53
Fig. 4.11 Time history of water surface elevation by effect of resonator at Mukho harbor	54
Fig. 4.12 Resonator specification in relation to <i>B</i> and <i>B</i> ` size changes. (<i>L</i> =200m fixed)	55
Fig. 4.13 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (B, B°) at	
Mukho harbor (L=200m fixed)	55
Fig. 4.14 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (B, B°) at Mukho harbor $(L=200 \text{ m fixed})$.	56
Fig. 4.15 Resonator specification in relation to L size changes. ($B=735m$, $B=200m$ fixed)	57
Fig. 4.16 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (L) at	
Mukho harbor (B, B) fixed)	57
Fig. 4.17 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (L) at	
Mukho harbor (B, B) fixed)	58
Fig. 4.18 Computation area	59
Fig. 4.19 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Imwon	. 59



Fig. 4.20 Specifications of existing breakwater and resonator	60
Fig. 4.21 Maximum water level by effect of resonator at Imwon harbor	61
Fig. 4.22 Time history of water surface elevation by effect of resonator at Imwon harbor	62
Fig. 4.23 Resonator specification in relation to B and B size changes. (L =100m fixed)	63
Fig. 4.24 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (B, B°) at	
Imwon harbor (L=100m fixed)	64
Fig. 4.25 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (B, B) at	
Imwon harbor (L=200m fixed)	65
Fig. 4.26 Resonator specification in relation to L size changes. (B =330m, B `=100m fixed)	66
Fig. 4.27 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (L) at	
Intwon harbor (B, B` fixed)	66
Fig. 4.28 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (L) at	
Intwon harbor (B, B` fixed)	67
Fig. 5.1 Rectangular resonator	71
Fig. 52 Newly developed reconstor	71
Fig. 5.2 Computation and	
Fig. 5.4 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Samchuck	/1
Fig. 5.5 Resonator specification of new type I	
Fig. 5.6 Resonator specification of new type II	
Fig. 5.7 Spatial distribution of maximum water level for Case (a)	
Fig. 5.8 Spatial distribution of maximum water level for Case (b)	
Fig. 5.9 Spatial distribution of maximum water level for Case (c)	
Fig. 5.10 Spatial distribution of maximum water level for Case (d)	
Fig. 5.11 Spatial distribution of maximum water level for Case (e)	73



Fig. 5.12 Spatial distribution of maximum water level for Case (f)	73
Fig. 5.13 Time history of water surface elevation by new types I of resonators at Samcheok harbor	74
Fig. 5.14 Time history of water surface elevation by new types II of resonators at Samcheok harbor	75
Fig. 5.15 Time history of water surface elevation by effect of new types of resonators at Samcheok harbor	76

Fig. 6.1 Computation area		
Fig. 6.2 Spatial distributions of wave heights on AREANo.1 [Wide] (Dir=SE)		
Fig. 6.3 Spatial distributions of wave heights on AREANo.2 [Middle] (Dir=SE)		
Fig. 6.4 Spatial distributions of wave heights on AREANo.3 [Narrow] (Dir=SE)		
Fig. 6.5 Specifications of existing breakwater and resonator		
Fig. 6.6 Spatial distributions of wave heights at Mukho harbor		
Fig. 6.7 Distribution of significant wave heights at Mukho harbor		
Fig. 6.8 Comparison of wave heights data results of 7 points by effect of resonator		
Fig. 6.9 Resonator specification in relation to B and B size changes (L =200m fixed)		
Fig. 6.10 Comparison of spatial distributions of wave heights by effect of resonators size (B, B) at		
Mukho harbor (L=200m fixed).	86	
Fig. 6.11 Comparison of wave heights data results of 7 points by effect of resonators size (B, B^{*})	86	
Fig. 6.12 Resonator specification in relation to L size changes ($B=735m$, $B=200m$ fixed)	87	
Fig. 6.13 Comparison of spatial distributions of wave heights by effect of resonators size (B, B) at		
Mukho harbor (L=200m fixed)		87
Fig. 6.14 Comparison of wave heights data results of 7 points by effect of resonators size (L)	88	
Fig. 6.15 Specifications of representative study case in Samcheok harbor	89	
Fig. 6.16 Computation area		
Fig. 6.17 Spatial distributions of wave heights on AREA No.1 (Dir=SSE)		
Fig. 6.18 Spatial distributions of wave heights on AREA No.2 (Dir=SSE)		
Fig. 6.19 Spatial distributions of wave heights on AREA No.3 (Dir=SSE)		



Fig. 6.20 Spatial distributions of wave heights at Samcheok harbor	91
Fig. 6.21 Comparison of wave heights data results of 20 points by representative study case	91





1장 시론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.1.1 지진해일

2011년 3월 11일 14시 46분에 일본 동북지방의 태평양 연안에서 규모 M9.0의 동일본 대지진이 발생하여 이로 인한 지진해일로 심각한 인명피해 (20,000여명의 사망자와 행방불명자)와 Photo 1.1에 나타내는 일례와 같은 침수·범람 (침수면적 535km²)에 의한 가옥 (22만호 중에 12만호는 전파) 및 사회간접자본의 물적 피해를 입었다. 여기서, 사후조사로부터 Ishimaki 지역에서는 최대침수고가 18m, Miwako 지역에서는 최대처오름높이가 29m 정도로 추정되고 있다 (Takahashi et al, 2011). 또한, 세계 최대 지진해일방파제로 알려져 있는 Kamaishi 방파제의 북방파제가 파괴되어 지진해일방파제의 기능에 대한 의문이 제기되고 있는 부분도 있었지만, Kamaishi 방파제에 의해 지진해일의 도달시간이 약 6분 정도가 지체되어 보다 긴 대피시간을 확보할 수 있었고, 또한 지진해일고가 13.7m에서 8m로 약 40% 정도로 줄어들었기 때문에 인적·물적 피해가 감소되어 최악의 상황을 방지할 수 있었던 것으로 알려지고 있다 (Takahashi et al., 2011).



Photo 1.1 Damages by East Japan Tsunami at Rikuzentakata(Takahashi et al., 2011)

우리나라의 경우도 동해안의 일본 근해에서 발생한 1983년 동해중부지진해일로 인하여 동해안에 위치한 임원항에서 3~5m의 처오름 (국립방재연구소, 1998)이 발생한 Photo 1.2와 같은 사례가 있고 김도삼 등(2007b)의 연구에 따르면 향후 일본의 지진공백역에서 발생 가능한 지진해일에 의한 큰 피해가 예상된다. 우리나라의



지진해일 발생에 대한 과거연구자료를 보면, 최병호 등(1993, 1994, 1995, 1997)은 1983년 동해중부지진해일과 1993년 북해도남서외해지진해일을 해석하였다. 국립방재연구소(1998)는 우리나라 동해안에 영향을 미친 지진해일에 대한 광범위한 조사와 함께 지형의 fractal차원을 도입하여 대화퇴의 중요성을 재확인하였다. 윤성범 등(2002)은 2차원완변수심상에서 분산보정의 유한차분기법을 제시하였다. Cho et al(2007)은 대양을 횡단하는 지진해일 전파과정을 계산하기 위해 선형 Boussinesq 방정식을 천수방정식으로 대치하고, 수치모의에 있어서 적정의 시간, 공간격자간격을 사용하여 물리적 분산항을 수치분항으로 이론으로 설명하였다. 수치계산에 있어서 지진해일의 운동은 비선형천수이론으로 수치해석을 실시하였다. 또한, 김도삼 등(2007ab)은 격자접속기법과, 이동경계조건을 도입하여 1983년의 동해중부지진, 1993년의 북해도남서외해지진 및 Ishikawa(1994)가 제안한 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일의 특성을 수치모형실험으로부터 검토하고, 관측치와 비교하였다.

그리고, 이광호 등(2012)은 지진해일의 전파과정을 수치모의할 수 있는 비선형수치모델을 구축하고, 이로부터 최근 일본 태평양 연안에서 발생 가능성이 제기되고 있는 규모 M9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 거대한 규모의 연동형 지진이 발생할 경우 우리나라의 연안에서도 지진해일의 전파에 따른 적지 않은 영향을 받을 수 있고, 특히 과원역에서 가장 인접해 있는 제주도 연안에서의 피해발생이 가장 우려되며, 따라서 제주도 연안에서 예상 지진해일고 및 예상 침수지역을 추정하는 것은 장기적인 연안방재 및 연안개발의 측면에서 기본적으로 숙지 및 고려되어야 하는 요소로 판단된다.

이 연구에서는 지진해일 전파계산의 정밀도를 검증하기 위해 과거에 우리나라에 영향을 미친 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진 및 지진공백역에서의 지진을 현재의 실해역으로부터 수치모델하여 모델의 타당성을 확인하고 Tokai, Tonankai, Nankai 지진에 의한 지진해일의 시뮬레이션 또한 수치해석한다. 이 중에서도 우리나라에 많은 인명 및 재산피해를 가져다준 1983년 동해중부지진해일로 인한 임원항에서의 과거 자료를 토대로 COMCOT(Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model)모델(Liuetal, 1998)의 타탕성을 입증하였다.

이상에서 얻어진 가상의 결과는 우리나라 연안에서 향후 연안방재 및 개발, 해안· 항만구조물의 배치 및 내파설계 등에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.





Photo 1.2 After 1983 Central East Sea tsunami in Imwon.

1.1.2 지진해일의 제어에 대한 공진장치의 효과

막대한 인적·물적 피해가 예상되는 지진해일을 구조적인 방법으로 제어하기 위해서 지진해일방파제나 방조제 등과 같은 초대형 구조물을 구축하는 방안 이외에 Nakamura et al.(1985)에 의해 파동필터이론으로부터 처음 개발된 Fig. 1.1의 공진장치를 기존의 방파제에 부착하여 단주기파 (Nakamura et al., 1996; Morita and Nakamura, 2003; Lee et al., 2010, 2012a)와 장주기파 (Nakamuta and Morita, 1998; Nakamura et al., 2011; Poon et al., 1998; Lee et al., 2012c)를 제어하려는 연구가 다수 수행되어 왔으며, 최근에는 지진해일파를 제어할 목적으로 초장기주기파와 고립파의 제어에도 적용되고 있다 (Nakamura et al., 2007, 2010, 2012; Latt and Nakamura, 2011; Lee et al., 2010, 2012b). 그러나, Nakamura et al.(2007, 2010, 2012), Latt and Nakamura(2011) 및 Lee et al.(2010, 2012b) 등의 연구에서는 일정 수심역에 대해 지진해일파의 모델로 초장주기파 혹은 고립파를 적용하고 있으므로 실현장에서의 지진해일파를 대상으로 하는 경우 그의 유용성과 적용성 등에 관하여 또 다른 검토 여지를 남겨두고 있는 것으로 판단된다.

여기서, Fig. 1.1과 같은 공진장치에 관한 연구결과를 근거로 하여 실현장에 적용된 사례로 다음을 들 수 있다. Poonet al.(1998)은 미국 Long Beach 항내 J부두에서 1분 오더의 크기를 갖는 선박의 장주기운동을 제어할 목적으로 독자적으로 Fig. 1.2와 같은 공진장치를 고안하여 장주기과의 제어기능을 실험적으로 그리고 수치적으로 각각 검토하였고, Bellotti(2007)는 이탈리아 Ostia에 있는 로마 요트항내에서 장주기과를 제어하기 위하여 Nakamura et al.(1996)와 Nakamura and Morita(1998)에 의한 연구결과를 참조하여 Fig. 1.3과 같은 공진장치를 기존의 방과제에 적용하고 있다. 한편, Lee et al.(2010, 2012a,b,c)은 Nakamura et al.(1996)와 Nakamura and Morita(1998)의 연구결과를 고려하여 3차원수리모형실험과 3D-NIT모델에 기초한 고정도 수치해석법 등을 적용하여 단주기과, 장주기과 및 고립파의 각각 및 그들의 동시 제어에 관한 Fig. 1의 공진장치의 유용성을 검토하였다.





Fig. 1.1 Shape of wave resonator proposed firstly by Nakamura et al.(1985).



Fig. 1.2 Wave resonator constructed at Pier J of Long Beach port to attenuate excessive ship motions. Fig. 1.3 Wave resonator constructed at the yacht harbor of Rome at Ostia, Italy.

이 연구에서는 이상에서 지적한 바와 같이 공진장치를 실해역에서의 지진해일파동장에 적용하여 그의 유용성과 적용성을 수치적으로 검토한다. 선행한 수치모의와 같이 지진해일파의 생성과 전파모의를 위해 개발되어 널리 사용되고 있는 COMCOT(Comell Multigrid Coupled Tsunami Model)모델(Liu et al.,1998)을 적용하였다. 대상으로 한 지진해일은 1983년의 동해중부지진해일과 1993년 북해도남서외해지진해일이며, 대상지로 삼척, 묵호 및 임원을 선정하여 공진장치의 설치 유무에 따른 지진해일파에 의한 최고수위 저감 정도를 중심으로 수위의 시·공간분포 및 침수 범람 등에서 공진장치의 유용성과 적용성을 검토하였다. 또한, 공진장치의 형태 및 크기와 설치위치를 기존의 방파제에 맞게 변화시켜 공진장치의 최적의 형태를 검토한다.

1.1.3 천해설계파의 제어에 대한 공진장치의 효과

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높으며, 국토가 좁고 인구가 많은 우리나라와 같은 환경에서는 연안매립으로 대표되는 해안지역개발이 불가피한 경우가 많다. 이러한 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및



설계에 있어서 주요 외력조건은 일반적으로 육지지형의 영향이 고려된 바람장으로부터 얻어진 해상풍이 침수·범람해석의 압력치로 되는 주기가 짧은 천해파랑이다. 이 중에서 고파랑의 설계파는 태풍 내습시에 파랑의 통계적 특성으로 산정되며, 이와 같이 연안역에서 연안재해의 원인인 고파랑에 대한 위험성을 인식하고, 전술한 지진해일뿐만 아니라 천해설계파에 대한 공진장치의 제어기능도 동시에 검토한다.

해안· 항만구조물의 설계에서 가장 중요한 외력인 파고와 주기는 주어진 심해설계파 조건을 이용하여 천해설계파로 산정되며, 이러한 천해설계파의 산정에 이 연구에서는 SWAN(참고문헌)을 적용한다.

앞서 동해연안의 대표적인 항만을 대상으로 지진해일파를 대상으로 우리나라 연안에 전파되어 발생할 수 있는 최대수위상승고를 수치적으로 검토하고, 실현장에서의 지진해일파를 구조적인 방법으로 제어하기 위해서 공진장치를 설치하여 그의 유용성과 적용성 등에 관하여 연구하였다.

따라서, 이 장에서는 심해설계파 조건을 이용하여 주기가 짧은 풍파(0~30 sec)나 천해설계파로부터 실해역에서 공진장치의 유효성 및 적용성등을 검토한다.

NINE AND OCEAN

1.2 연구의 구성

이 연구는 총 7장으로 구성되며, 각장의 내용은 다음과 같다

제 1장에서는 이 연구의 배경과 목적에 대하여 서술하고, 다음으로 구성에 대하여 간단히 기술한다.

제 2장에서는 지진해일 시뮬레이션인 COMCOT 프로그램의 수치모델의 기초방정식, 유한차분식 및 단층파라미터 등과 같은 수치해석의 수행에서 필요한 전반적인 사항을 기술한다. 최신 수치해도 와 Google earth pro (2014)을 바탕으로 현상태의 실해역을 대상으로 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진 및 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션을 수행하여 지진해일의 전파과정 및 대상지역의 각 위치에서 수위변동의 시계열 등에 관한 수치해석결과를 제시함과 동시에 그의 특성을 분석한다.

제 3장에서는 일본 태평양 연안에서 발생 가능성이 높은 규모 M9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 우리나라 제주도 연안에 전파되어 발생할 수 있는 지진해일고와 침수위치 및 침수역을 수치적으로 검토한다.

제 4장에서는 인적·물적 피해가 예상되는 지진해일파를 구조적인 방법으로 제어하기 위해서 피해규 모가 컸던 동해연안 중심으로 기존방파제에 공진장치를 부착하여 지진해일파를 제어할 목적으로 그의 유용성과 적용성을 검토하고, 나아가 Nakamura et al.(1996) 제안한 공진장치 형태를 기초로 하여 그 제원인 중앙부폭 B, 폭 B', 길이 L의 크기 변화에 따른 수치해석결과를 비교하여 최적의 형태를 검토한다.

제 5장에서는 방파제가 비교적 긴 해역을 가지는 삼척항을 대상으로 직사각형태의 공진장치에서 더 나아가 새로운 형태의 공진장치(Latt and Nakamura, 2011)를 기존방파제에 부착하여 그 제원인 길이 *l*_w,



la의 크기 변형에 따른 수치해석결과를 비교하여 최적의 형태를 검토한다.

제 6장에서는 SWAN 모델을 이용하여 묵호항과 삼척항 전면해역에 큰 영향을 줄 수 있는 지점의 심해파랑제원으로부터 풍파를 추산하고, 대표적인 공진장치를 대상으로 주기가 짧은 풍파(0~30sec)에 대해서도 공진장치의 효과여부를 검토한다.

제 7장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 이 논문의 결론으로 한다. 마지막으로 이 연구에서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 수록한다.





<참고문헌>

국립방재연구소 (1998). 동해안에서의 지진해일 위험도 평가, 국립방재연구소 연구보고서, NIDP-98-06.

- 김도삼, 김지민, 이광호. (2007a). 동해연안에 영향을 미친 지진해일의 수치시뮬레이션 한국해양공학회지, 21(6), 72-80.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규. (2007). 일본 지진공백역에서의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석. 한국해양공학회지, 21(6), 64-71.
- 윤성범, 임채호, 조용식, 최철순 (2002). 지진해일 전파 분산보정 유한차분모형의 정밀도 평가, 한국해안·해양공학회지, 14(2), 116-127.
- 이광호, 김민지, 김도삼 (2012). 일본 태평양 연안의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일이 제주도 연안에 미치는 영향, 한국해안 · 해양공학회논문집, 24(4), 295-304.
- 최병호, 김덕구, 노상준, 이호준 (1997). 1994년 필리핀 민도로스섬의 쓰나미 산정, 한국해안 · 해양공학회지, 9(3), 140-154.
- 최병호, 우승범, Pelinovsky, E. (1994). 1993년 동해 쓰나미의 산정, 한국해안·해양공학회지, 6(4), 404-412.
- 최병호, 이호준 (1993). 1983년 동해 쓰나미의 산정, 대한토목학회논문집, 13(3), 207-219.
- 최병호, 정홍화 (1995). 1992년 니카라구아 쓰나미의 범람 산정, 한국해안·해양공학회지, 7(1), 24-32.
- 최병호, 윤성범, 조용식, 김경옥 (2012). 일본서남해의 지진에 의한 쓰나미의 제주도로의 전파, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, 1951-1954.
- Bellotti, Giorgio. "Transient response of harbours to long waves under resonance conditions." Coastal Engineering 54.9 (2007): 680-693.
- Cho, Y.S., Sohn, D.H. and Lee, S.O. (2007) Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis, Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 1,769-1,777.
- Ishikawa, Y. (1994). Remaining earthquake vacant region, Monthly Ocean, 7, 102-104.
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011). Effectiveness of a newly developed resonator against tsunamis, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3, 67(2), 637-642.
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011).performance of wave resonators located at a harbor entrance for reducing very long waves, Ser. B3, 67(2), 892-896.
- Lee, H. J., Kim, K. H., & Cho, Y. S. (2002). Numerical Simulations of 1983 Central East Sea Tsunami at Imwon: 2. Run-up Process at Imwon Port. Journal of Korea Water Resources Association, 35(4), 453-461.
- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Part, J.B. and An, S.W.(2012a). A study on the control of short-period waves by resonator, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 36-47.
- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Part, J.B. and An, S.W.(2012b). A study on the control of solitary waves by resonator, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 48-57.



- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Choi, N.H., Part, J.B. and An, S.W.(2012c). Application of wave resonator to the field for controlling secondary undulation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 58-65.
- Lee, K.H., Jeong, S.H., Jeong, J.W. and Kim, D.S.(2010). Effectiveness of a wave resonator under short-period waves and solitary waves, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 30(1B), 89-100.
- Liu, PL.-F., Woo, S.B., Cho, Y.S (1998) Computer programs for tsunami propagation and inundation, Technical report, Cornell University
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., & Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. Geophysical Research Letters, 38(7).
- Nakamura, T., Mochizuki, H. & Morita, S. (1985): Performance of a resonator designed by the Wave Filter Theory-Applicability to a harbor, Proc. Coastal Eng. Conf., JSCE, Vol.25, pp.1280-1292, 1996 (in Japanese)
- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita S. (1996): "Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a habour", Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, pp.1280-1292
- Nakamura, T., Morita, S. and Kato, K. (1998): "Wave Protection Performance of a Resonator Founded at Harbor Entrance", Proc. Coastal Eng., JSCE, Vol 45, pp 721-725
- Poon, Y.K., Raichlen, F. and Walker, J. (1998). "Application of Physical Models in Long Wave Studies for the Port of Long Beach,", Proc. 26th ICCE, ASCE, pp 1222-1235





2장 과거의 지진에 의한 지진해일의 추정

2.1 서 언

우리나라는 1983년 5월 26일 일본 아키타의 전면해역에서 발생한 규모 M7.7의 동해중부지진과 1993년 7월 12일의 일본 북해도남서외해지진에 의해 발생한 지진해일에 의해 피해를 입은 적이 있다. 지진해일은 해저지진이나 해저지반의 sliding, 해저화산활동 등으로 지층의 수직이동(단층활동)이 발생하면 해면이 변화하여 형성된 대단히 긴 주기를 갖는 해양파를 말하며, 연직변위가 클수록 크기는 증가한다. 또한, 만이나 항구에서 상당한 수위상승 또는 진동을 유발시켜 해안지역을 침수시키거나 해안 및 항만구조물에 심각한 피해를 준다. 발생된 지진해일은 연안에 가까워짐에 따라 천수, 굴절, 반사, 회절, 공진(부진동) 등에 의해 변형된다. 지진해일이 발생하는 해역의 수심이 1,000m 이상인 경우는 대부분 심해에 해당하며, 심해를 횡단하는 중의 지진해일은 천수효과와 파고분산에 의한 파고의 상쇄효과 때문에(solition) 파고의 증폭은 없고, 지진해일의 전과속도는 $C = \sqrt{gh}$ 로 수심에 비례하여 전파된다(여기서 C 는 위상전파속도, g 는 중력가속도, h 는 수심, 지진해일이 천해에 도달하면 파장이 감소하고, 일반적으로 파고는 높아진다. 이 때의 해일의 높이는 천수효과에 의해 $h^{1/4}$ (h 는 수심)에 반비례하여 증폭되고, 굴절에 의해 $b^{1/2}$ (b 는 폭)에 반비례하여 증폭된다. 이의 관계는 Green정리로 알려져 있고, 다음의 식(21)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{\left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/2} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{1/4}}$$
(2.1)

이상과 같이 발생된 지진해일이 미치는 영향을 정확히 예측하기 위해 해저지형변화에 따른 천수, 굴절, 회절, 반사, 분산, 침수 등의 현상을 모두 고려할 수 있는 수치모델을 통해 많은 연구가 수행 중이다. 이 연구에 사용한 수치모델로는 지진해일의 생성과 전파모의를 위해 개발된 지진해일과 시·공간적으로 유사한 특성을 갖는 이상파랑의 수치모의에도 적합한 것으로 알려진 COMCOT(Comell Multigrid Coupled Tsunami Model)모델 (Liuetal,1998)을 적용하였다.

따라서, 이 장에서는 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진 및 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일이 우리나라 연안에 전파되어 발생할 수 있는 최대수위상승고를 수치적으로 검토한다. 본 수치해석모델의 검증은 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대해 실시되었으며, 지진해일의 전파과정 및



전파시간 등과 같은 기본적인 수리특성을 고찰하여 향후 연안방재와 연안개발에 중요한 기초자료를 수립하고자 한다.

2.2 수치해석이론

2.2.1 지배방정식

지진해일의 기초방정식으로 연속방정식과 Navier-Stokes운동방정식을 파형경사 및 수심·파장비가 충분히 작다고 가정하는 장파근사를 이용하여 연직방향으로 적분한 비선형천수방정식을 적용하였다. 장파근사의 가정에 의해 압력은 정수압분포가 되며, 수평방향(x방향과 y방향)에 대한 유속성분인 u, v는 연직방향에 대하여 일정한 분포를 갖는다. 지진해일의 거동은 해면상의 수위분포를 초기조건으로 하여 연속방정식과 운동방정식을 시간발전에 따라 해석함으로써 수치적으로 표현할 수 있다. 이 연구에서 적용하는 COMCOT모델에서는 지진해일의 수치해석을 위하여 다음의 연속방정식과 운동방정식 (2.2)~(2.4)을 사용한다.

AND ULFAN

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\partial M = \partial \left(M^2 \right), \quad \partial \left(MN \right) = \partial \eta = g n_x^2 + M \sqrt{M^2 + M^2} = 0$$
(2.2)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n_n}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$
(2.3)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn_n^2}{D^{7/3}} N\sqrt{M^2 + N^2} = 0$$
(24)

여기서, t는 시간, x, y 는 수평방향의 좌표, g 는 중력가속도, ŋ 는 수면변위, n_n 은 Manning의 조도계수, D 는 수심 h와 지진해일에 의한 수면변위 ŋ를 합한 전수심, M, N 은 x, y 방향의 유량플럭스로 다음과 같이 정의된다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h+\eta) = uD$$
 (2.5)

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h+\eta) = vD$$
 (2.6)

지진해일의 수치사뮬레이션 방법에는 지진해일의 운동을 나타내는 상기의 방정식을 유한차분법이나 유한요소법을 적용하여 계산하는 것이 일반적이다. COMOCT모델에서는 지진해일의 수치해석모델에 연속방정식 및 운동방정식을 leap-frog법에 의해 차분화하였다. leap-frog법에서는 수면변위 η 와 유랑플럭스 M, N이 정의되는 지점을 1/2격자만큼 엇갈리게 배치한다.



2.2.2 유한차분근사

COMCOT모델에서 사용하는 지진해일의 수치해석모델에서는 연속방정식 및 운동방정식을 유한차분법에 기초하여 이산화한다. 이 때, 공간 및 시간항에는 각각 다음의 Fig. 2.1에 나타내는 바와 같은 staggered mesh와 leap-frog법에 의한 스킴을 적용한다. Leap-frog법의 차분스킴에서는 수위와 수평유량의 계산점을 각각 다른 위치에 정의하며, 그림에서 직각좌표 *x*, *y* 에 대응하는 이산화량을 아래첨자로, 시간에는 윗첨자로 각각 나타낸다.



Fig. 2.1 Sketch of the arrangement of variables and grid points for this finite difference method.

연속식(2.2)에서 각 항의 치분식은 중앙치분으로부터 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left[\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^{k} \right]$$
(2.7)

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left[M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right]$$
(2.8)

$$\frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} \left[N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2} \right]$$
(29)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta t} \Big[\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k \Big] + \frac{1}{\Delta x} \Big[M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \Big] + \frac{1}{\Delta y} \Big[N_{i,j-1/2}^{k+1/2} \Big]$$
(2.10)

운동방정식의 차분화에서는 표시를 간단히 하기 위하여 비선형항을 분리하여 나타내며, (*x*, *y*) 방향의 선형항은 각각 다음의 식과 같이 표현된다.



$$M_{i,j+1/2}^{k+1/2} = M_{i+1/2,j}^{k-1/2} - gD_{i+1/2,j}^{k} \frac{\Delta t}{\Delta x} \Big[\eta_{i+1,j}^{k} - \eta_{i,j}^{k} \Big]$$
(2.11)

$$N_{i,j+1/2}^{k+1/2} = N_{i,j+1/2}^{k-1/2} - gD_{i,j+1/2}^{k} \frac{\Delta t}{\Delta y} \Big[\eta_{i,j+1}^{k} - \eta_{i,j}^{k} \Big]$$
(2.12)

비선형항에 풍상차분을 적용하면 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\left\{ M_{i+3/2,j}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{\left\{ M_{i-1/2,j}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right]$$
(2.13)

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D}\right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{11} \frac{\left\{M_{i+1/2,j+1}^{k-1/2} N_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}\right\}^2}{D_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}} + v_{21} \frac{M_{i+1/2,j}^{k-1/2} N_{i+1/2,j}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + v_{31} \frac{M_{i+1/2,j-1}^{k-1/2} N_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}} \right]$$
(2.14)

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D}\right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{\left\{ M_{i+1,j+1/2}^{k-1/2} N_{i+1,j+1/2}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{22} \frac{M_{i,j+1/2}^{k-1/2} N_{i,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{32} \frac{M_{i-1,j+1/2}^{k-1/2} N_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}} \right] \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{12} \frac{\left\{ N_{i,j+3/2}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i,j+3/2}^{k-1/2}} + v_{22} \frac{\left\{ N_{i,j+1/2}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + v_{32} \frac{\left\{ N_{i,j-1/2}^{k-1/2} \right\}^2}{D_{i,j-1/2}^{k-1/2}} \right] \quad (2.16)$$

여기서, 식(2.13)~(2.16)에 주어진 계수 $\lambda_{i, V_i}(i=1,2,3)$ 는 유량의 방향에 의해 다음의 값이 취해진다.

$$1945$$

$$M_{i+1/2,j}^{k-1/2} \ge 0; \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = -1$$

$$(2.17)$$

$$N_{i+1/2,j}^{k-1/2} \ge 0; v_1 = 0, v_2 = 1, v_3 = -1$$

$$N_{i+1/2,j}^{k-1/2} < 0; v_1 = 1, v_2 = -1, v_3 = 0$$
(2.18)

$$M_{i,j+1/2}^{k-1/2} \ge 0; \lambda_1 = 0, \ \lambda_2 = 1, \ \lambda_3 = -1$$

$$M_{i,j+1/2}^{k-1/2} < 0; \lambda_1 = 1, \ \lambda_2 = -1, \ \lambda_3 = 0$$
(2.19)

$$N_{i,j+1/2}^{k-1/2} \ge 0; v_1 = 0, v_2 = 1, v_3 = -1$$

$$N_{i,j+1/2}^{k-1/2} < 0; v_1 = 1, v_2 = -1, v_3 = 0$$
(2.20)

운동방정식에서 해저전단력항 au_x, au_y 은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn_n^2}{\left\{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}\right\}^{7/3}} \times \frac{1}{2} \times \left[M_{i+1/2,j}^{k+1/2} + M_{i+1/2,j}^{k-1/2}\right] \sqrt{\left\{M_{i+1/2,j}^{k-1/2}\right\}^2 + \left\{N_{i+1/2,j}^{k-1/2}\right\}^2}$$
(2.21)



$$\frac{\tau_{y}}{\rho_{w}} = \frac{gn_{n}^{2}}{\left\{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}\right\}^{7/3}} \times \frac{1}{2} \times \left[N_{i,j+1/2}^{k+1/2} + N_{i,j+1/2}^{k-1/2}\right] \sqrt{\left\{M_{i,j+1/2}^{k-1/2}\right\}^{2} + \left\{N_{i,j+1/2}^{k-1/2}\right\}^{2}}$$
(2.22)

2.2.3 경계조건

(1) 이동경계조건

유한치분법을 이용하여 수치계산을 수행하기 위해서는 전체영역을 일정한 수의 격자로 차분화하여야하며, 초기에는 모든 영역에서 자유수면변위와 체적흐름율이 0이 된다. 또한, 초기의 해안선은 전체수심, 즉 수심과 자유수면변위의 합이 0이 되는 곳을 연결한 선으로 정의된다. COMCOT모델의 수치모형에서는 혼란을 방지하기 위해 격자가 육지에 속할 때는 수심은 0보다 작은 값을 갖도록 하며, 초기수심은 평균해수면상의 수심으로 주어진다.

Fig. 22는 이동경계조건을 설명하기 위한 단순화된 계단지형을 보여주고 있다. 초기에 평균해수면(MWL)보 다 높은 격자, 즉 건조격자(dry grid, 격자 *i*+1)는 전체수심 *H*가 0보다 작은 값을 가지며, 평균해수면보다 아래에 존재하는 격자, 즉 침윤격자(wet grid, 격자 *i*+1, *i*)는 전체수심 *H*가 0보다 큰 값을 갖는다. 따라서, 건조격자와 침윤격자의 경계는 초기의 해안선을 형성하게 된다. 이 연구의 수치모형에서는 먼저 연속방정식을 해석하여 전 영역에서의 자유수면변위를 계산한다. 이때 초기의 건조격자, 즉 전체수심이 0보다 작은 격자의 자유수면변위는 계속 0을 유지하게 되는데, 이는 주변격자의 체적호름율이 0이기 때문이다. 다음으로, 연속방정식에서 새로이 계산한 자유수면변위를 이용하여 해안선의 격자를 수정한다. 즉, Fig. 22를 이용하여 해안선에서의 전체수심이 육지방향의 다음 격자로 해안선의 이동이 가능한가를 검사하며, 이때 운동량방정식을 이용하여 유량 *M*과 *N*를 계산한다.



Fig. 2.2 The schematic sketch of moving boundary condition.

이동경계조건에서 발생 가능한 두 경우, 즉 해안선이 육지방향으로 이동하지 않는 경우와 이동하는 경우에 대하여 간단히 설명한다. Fig. 2.2에서와 같이 실제 경사지형은 계단지형으로 단순화되었으며, 격자 *i*-1, *i* 및



i+1에서는 자유수면변위를, 격자 i-1/2, i+1/2 및 i+3/2에서는 유량을 각각 계산한다. Fg. 22(a) 경우에서 격자 i는 침윤격자이므로 초기에 전체수심 D_i 는 0보다 큰 값을 갖는 반면에, 격자 i+1는 건조격자이므로 전체수심 D_{i+1} 은 0보다 작은 값을 갖는다. 또한, 해안선은 격자 i와 i+1 사이에 존재하며, 격자 i+1/2에서의 유량 $M_{i+1/2}$ 은 0이므로 해안선은 육지방향으로 이동하지 않는다.Fg. 22(b) 경우는 입사파의 영향으로 수위가 상승한 것으로, 격자 i+1/2에서의 유량 $M_{i+1/2}$ 은 0보다 큰 값을 갖게 된다. 따라서 격자 i와 i+1 사이에 존재하던 초기의 해안선은 육지방향으로 이동된다.

COMCOT모델의 수치모형에서는 연속방정식에서 새로운 자유수면변위와 전체수심을 계산한 후에 격자 *i*의 전체수심 *D_i*가 0보다 작은 경우에는 물론 해안선이 육지방향으로 이동하지 않는다. 그러나, *D_i*가 0보다 큰 경우에는 해안선이 육지방향으로 이동할 수 있으며, 다음과 같은 세 경우로 구분하여 이동여부를 검사한다.

경우 1; $D_{i+1} \le 0$ 이며 $h_{i+1} + \eta_i \le 0$ 일 때, 해안선은 격자 *i*와 *i*+1 사이에 존재하며, 유량 $M_{i+1/2}$ 은 0이다.

경우 2; $D_{i+1} \le 0$ 이며, $h_{i+1} + \eta_i > 0$ 일 때, 해안선은 육지방향으로 이동하여 격자 i+1과 i+2 사이에 존재하며, 유량 $M_{i+1/2}$ 은 0이 아닐 수도 있으며 $M_{i+3/2}$ 은 0이 된다. 범람 수위는 $H_f = h_{i+1} + \eta_i$ 가 된다.

경우 3; $D_{i+1} > 0$ 일 때, 해안선은 육지방향으로 이동하여 격자 i+1과 i+2 사이에 존재하며. 유량 $M_{i+1/2}$ 은 0이 아닌 값을 가질 수 있으며, $M_{i+3/2}$ 은 0이 된다. 범람수위는 $H_i = \max(h_{i+1} + \eta_i, h_{i+1} + \eta_{i+1})$ 가 된다.

위의 세 경우를 포함하면 섬 또는 방과제와 같은 특수지형이 수치계산 영역내에 존재하더라도 개발된 이동경계조건의 적용이 가능하며, 해안선이 외해방향으로 이동할 때도 수정없이 사용이 가능하다. 또한, 앞에서 언급한 것과 같이 위의 기법은 *x*축 방향만을 고려한 것이지만 *y*축 방향에 대해서도 같은 과정을 반복하여 사용할 수 있다.

수치계산을 하는 동안 모든 격자에 대하여 위의 과정을 반복하게 되면 엄청난 컴퓨터 사용시간을 필요하게 되므로 매우 비경제적이다. 따라서, 범람의 우려가 전혀없는 산안지형 등과 같은 고도가 높은 지역에 대해서는 적절한 선형천수방정식을 쓰고 Nesting 과정에서 마지막 영역만을 비선형천수방정식을 사용하는 것이 경제적이며 또한 효율적이다.

2.2.4 격자접속기법

지진해일 수치시뮬레이션에서 지진해일을 충분히 재현하려면 계산영역 내에 파원역이 포함되어야 하므로 광대한 계산영역을 필요로 한다. 그리고, 연안에서는 천수, 굴절, 반사 등의 여러 현상이 발생하여 육지의 침수계산에 큰 영향을 미치기 때문에 높은 공간 해상도가 요구된다. 하지만, 광역에서 높은 공간해상도로 계산을 수행하는 경우 방대한 격자수와 계산시간이 필요하므로 지진해일의 수치시뮬레이션에서는 다른 크기의 격자간격의 영역을 접속시켜 동시에 계산을 실시하는 격자접속기법이 많이 이용되며, 이 모델에서도 유량 및 수위를 영역마다 접속시켜 계산하였다.



(1) 유량접속

Fig. 2.3은 격자접속기법에 있어서의 영역간의 접속방법을 나타낸다. 이 연구에서는 공간해상도를 1:3의 비율로 설정하였다. 유량의 접속은 소영역 경계상에서의 유랑에 넓은 영역에서 계산된 유량을 적용하였다. 또한 넓은 영역의 유량과 소영역의 유량이 중복되는 격자에 대해서는 넓은 영역에서 계산된 유량을 적용하고 그 외의 경계선상의 유량에 대해서는 선형 보간을 이용하여 산정된 유량을 적용하였다.

(2) 수위접속

수위에 대해서는 계산의 안정을 위해 소영역에서 계산된 수위를 넓은 영역에 접속하고 있어 넓은 영역격자가 포함하는 전수심이 0인 격자를 제외한 소영역격자에서 산정된 수위의 평균을 넓은 영역격자의 수위로 적용하였다.



Fig. 2.3 Nesting method.

2.2.5 단층파라미터

지진해일의 수치계산에서 초기조건으로 지진단층모델을 사용하여 계산되는 해저지각변동의 연직성분을 해면상에 주는 방법을 사용하고 있다.

Fig. 2.4에 나타내는 단층운동 자체는 미세하게 보면 대단히 복잡한 과정을 갖지만 운동자체를 거시적으로 보면 간단한 모델로 나타낼 수가 있다. 가장 간단한 모델은 Fig. 2.5에 나타내는 바와 같은 길이 L, 폭 W를 갖는 직사각형의 단층면이 평균적으로 미끌어지는 량 또는 엇갈리는 량 *u*'만큼 서로 어긋나는 것을 고려한다. 이 때, 단층의 기학적인 특성은 미끌어지는 방향 λ, 단층의 주향(走向) θ, 단층면의 경사각 δ 에 의해 표현된다.



이상의 6개가 단층파라미터이며, 이는 지진파해석으로부터 추정된다.



Fig. 2.4 Fault types.

통상 해저변위를 해면상으로 줄 때에는 변동전체가 순간적으로 완료되는 것으로 하고 있다. 실제의 지진단층운동에 있어서 지진동은 순간적으로 발생하는 것이 아니라 수 초에서부터 100초 정도의 지속시간을 갖는 것으로 알려져 있지만, 지진해일 발생시의 수위변동이 순간적으로 해면상에 변화가 발생한 경우와 1~2분의 상승시간으로 완료된 경우와는 거의 차이가 없는 것이 Aida(1969)의 연구에 의해 확인되어 있다.



Fig. 2.5 Fault Plane and Fault parameter definitions.

2.3 수치모델검증

2.3.1 1983년 동해중부지진해일

우리나라 동해 연안에 위치한 임원항은 1983년 5월 26일 일본 Akita현의 앞바다에서 발생한 M 7.7의 동해중부지진에 의해 발생한 지진해일의 내습으로 침수피해를 입은 사례가 있다. 따라서, 이 연구에서 적용하는 수치모델의 침수계산에 대한 계산정도를 확인하기 위해 1983년에 발생한 동해중부지진에 의한 임원항의 침수피해를 COMCOT(Comell Multigrid Coupled Tsunami Model)모델(Liu et al., 1998)을 적용하여 수치적으로


검토한다. 동해중부지진에 대한 여러 가지 단층모델 중에서 실제로 측정된 결과와 대응성이 높다고 알려진 Aida(1984)의 모델을 적용하였으며, 구체적인 단층파라미터를 Table 2.1에 나타낸다. Fig. 2.6~2.7은 임원항에 지진해일 내습시 계산결과에서 영역내의 최고수위분포 및 범람지역을 나타내며, 이는 에너지의 전파과정 및 침수 피해 현황을 나타낸다. Aida(1984) 모델로부터 Fig. 2.6과 같이 비선형 찬수방정식에 근거한 유한차분 수치모형을 이용하여 나타낸 침수범위에 대한 수치해석한 조용식 등(2007)연구결과와 비선형 찬수방정식에 근거한 COMCOT모델의 수치결과인 Fig. 2.7를 비교하면, 항내의 와류현상이라든지 침수 범위 및 최고수위공간분포 등이 거의 일치하므로 이 연구에서 제안한 수치모델의 타당성을 확인할 수 있다.

Table 2.1 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984).

Aida	Latitude	Longitude	H'(km)	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	L(km)	W(km)	<i>u'</i> (<i>m</i>)
	$(^{\circ}N)$	(°E)	(Depth)	(Strike angle)	(Dip <i>a</i> ngle)	(Slipangle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
Fault 1	40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	7.60
Fault 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	3.05



Fig. 2.6 Simulation of inundation at Imwon harbor during 1983 Central East Sea Tsunami(Cho et al, 2007).



Fig. 2.7 Simulation of inundation at Imwon harbor during 1983 Central East Sea Tsunami(COMCOT model).

2.4 과거 수치해도와 현재의 수치해도의 비교

2.4.1 대상영역

임원항에 가장 많은 피해를 준 1983년 동해중부지진해일을 대상으로 조용식 등(2007)의 연구에서 사용했던 과거 수치해도 자료와 주변지형의 표고로부터 COMCOT프로그램의 수치모델검증을 하였지만,



실제의 연구에서는 현재의 실해역을 대상으로 연구를 진행하기 때문에 2014년 이후의 Google earth pro(2014)로부터 주변지형의 표고 및 수치해도를 이용하여 수치시뮬레이션하였다.

여기서, Fig. 2.8과 2.9는 임원항의 과거 및 현재의 수심 및 주변지형의 표고를 나타내며 그림에서 수심은 (+)값으로, 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다.



Fig. 2.8 Spatial distribution of water depth and topography altitude at the past Imwon.

Fig. 2.9 Spatial distribution of water depth and topography altitude at the present Imwon.

2.4.2 수치해석결과

(1) 최고수위공간분포

Fig. 2.10-11은 지진해일의 내습시 영역내에서 산정된 최고수위의 공간분포를 각각 나타낸다. 그림을 보면 과거 임원항을 경우, 방파제 길이가 현재 방파제에 비해 짧고 임원항의 항내 면적 또한 작아서 파 영향을 직접적으로 받게 되므로써 항내에 최대 약 3.1m~3.2m 최고수위상승을 보이고 있다,

1945

현재의 임원항은 방파제 길이가 길고 항내 면적이 넓으며, 매립한 곳이 많아져 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일로부터 직접적인 영향이 작으며, 항내에서 최대 약 2.3m~2.4m정도의 수위를 보이고 있다. 이는 과거의 임원항과 비교했을 때 0.7~0.8m 정도 수위저감을 보이고 있다는 것을 확인할 수있다.

또한, 침수피해면적(빨간색부분)를 살펴보면 과거 임원항의 배후도로를 넘어서 비교적 지형 표고가 낮은 임원항 교량 인근 부분까지 좀 더 침수피해 면적이 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며, 현재의 임원항은 임원항 의 배후도로 부분까지만 침수 되었다.





Fig. 2.10 Maximum water level height at the past Imwon.



Fig. 2.11 Maximum water level height at the present Imwon.

(2) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 2.12는 그림 중에 표기된 항내측 Location 8에서 수위의 시간변동을 나타낸 것으로, 파란 실선은 과거 임원항의 경우를, 빨간 실선은 최근 임원항의 경우를 각각 나타내고 있다.

그림으로부터 전체적인 수위변동의 경향은 비슷하지만 최저수위부분과 최고수위부분에서 크게 차이가 나는것을 확인할 수 있으며, 최고수위의 차이는 약 0.7m 정도를 보이는 것을 알 수 있다. 결과적으로 과거 임원항의 경우가 최근 임원항의 경우보다 수위가 높은 것을 알 수 있다.



Fig. 2.12 Comparison of time history of water surface elevation between past and present at Imwon harbor.

2.5 1983년, 1993년 및 지진공백역의 지진에 의한 지진해일의 추정

2.5.1 대상영역 및 계산조건



대상영역은 1983년 1993년, 지진공백역에서의 지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 좌하측 격자점(경도 123°, 위도 30°) 및 우상측 격자점(경도 145°, 위도 46°)을 취하였다. Fig. 2.13은 제1·영역에서 수심의 공간분포를 나타내며, 이는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 1 '데이터(약 1.8km 간격)를 사용하였다. NOAA에서 주어지는 수십자료는 구좌표이므로 ArcGIS프로그램(ArcMap 10, 2011)을 이용하여 직각좌표로 변환하였고, 이와 우리나라 전자수치해도로부터 얻어지는 직각좌표의 상세역을 접합하였다. 동해상에는 최고 35~4km의 수심분포가 나타나며, 해저에 퇴적물이 퇴적되어 형성된 얕은 구릉인 대화퇴의 수심이 약 200~500m정도의 상대적으로 아주 얕은 부분도 존재한다. Fig. 2.14는 계산을 수행한 주문진, 묵호, 입원 지역에서의 Google earth pro(2013)에서 얻어진 주변지형의 표고와 해역의 수심을 나타내며, 지진해일에 의한 최대수위분포를 보다 정확히 예측하기 위해 6개의 영역으로 구성하였으며, 수치계산에서의 상세한 조건들은 Table 2.2에 나타낸다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시간부터 180분 동안 수치모의하였다. Table 2.3~25는 1983년, 1993년, 지진공백역에 의한 지진해일 수치계산을 위한 지진단층파라미터 를 나타낸다.



Fig. 2.13 Distribution of water depth at AREA NO.1.







(b) Mukho



(c) Imwon Fig. 2.14 Spatial distribution of water depth and topography altitude at each region.

Numberof	meshsize	Number of mesh					
Area	(m)	Jumujin	Imwon				
AREA NO.1	1,215		1333×1629				
AREA NO.2	405	687×1182					
AREA NO.3	135		1098×1101				
AREA NO.4	45	1251×1260	975×873	1218×1068			
AREA NO.5	15	1272×1266	1314×1311	1368×1281			
AREA NO.6	5	486×441 1116×891 408×39					



Aida	Latitude $(^{\circ}N)$	Longitude (° E)	H'(km) (Depth)	$\theta(\text{deg})$ (Strike angle)	λ (deg) (Dipangle)	$\delta(\text{deg})$ (Slipangle)	L(km) (Length)	W(km) (Width)	u'(m) (Dislocation)
Fault 1	40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	7.60
Fault 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	3.05

Table 2.3 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984).

Table 2.4 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994).

Aida	Latitude	Longitude	H'(km)	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\deg)$	L(km)	W(km)	<i>u'</i> (<i>m</i>)
	$(^{\circ}N)$	(°E)	(Depth)	(Strike angle)	(Dipangle)	(Slipangle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
Fault 1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	12
Fault 2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	2.5
Fault3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	5.71

Table 2.5 Fault parameters for Hypothetical earthquake (Ishikawa, 1994).

Hypothetica	Latitude	Longitude	H'(km)	heta(deg) (Strike angle)	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	L(km)	W(km)	u'(m)
1 earthquake	(°N)	(°E)	(Depth)		(Dipangle)	(Slipangle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
2	38.3	138.5	1	25	35	90	140	50	5.0

2.5.2 **수치해석결과**

먼저, 전술한 기초방정식과 단층파라미터를 기초로 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션으로 재현하였다. Fig. 2.15는 동해중부지진에 의한 지진해일을 제 1영역에 대해 시뮬레이션한 결과이다. 결과에 의하면 지진발생 후 약 100분 후에 우리나라 동해안으로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있다. 지진해일이 전파되는 과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 Fig.2.15에 제시된 수심전파과정으로부터 충분히 예상되는 것으로 판단된다. Fig.2.16-2.17은 동해중부지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션한 결과로 각 지역에서의 시간에 따른 수위변회를 나타낸다. 수치시뮬레이션결과, 주문진은 1.04m, 묵호는 약 1.7m, 임원은 약 2.41m 최대수위를 나타낸다.





[1983.5.26 Tsunami] Time=0.0min



[1983.5.26 Tsunami] Time=60.0min



[1983.5.26 Tsunami] Time=120.0min



[1983.5.26 Tsunami] Time=30.0min



[1983.5.26 Tsunami] Time=90.0min



[1983.5.26 Tsunami] Time=180.0min



1945





Fig. 2.16 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Jumunjin harbor.



Fig. 2.17 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Mukho harbor.



Fig. 2.18 Time history of water surface elevation calculated by 1983 Central East Sea tsunami at Imwon harbor.

다음으로, Fg. 2.19은 북해도남서외해지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션으로 재현하였다. 제 1영역내의 전파과정을 통해 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 알 수 있으며, 에너지의 대부분은 러시아방향으로 전파한다. 결과에 의하면 지진발생 후 약 100분 후에 우리나라 동해안으로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알



수 있다. 지진해일이 전파되는 과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 Fig. 2.19에 제시된 수심전파과정으로부터 충분히 예상되는 것으로 판단된다. Fig. 2.20~2.22는 동해중부지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션한 결과로 각 지역에서의 시간에 따른 수위변화를 나타낸다. 수치시뮬레이션결과, 주문진은 0.84m, 묵호는 약 1.75m, 임원은 약 2.29m 최대수위를 나타낸다.

그리고 수심이 깊은 심해에서는 전파속도가 빠르고 천해로 전파됨에 따라 전파속도가 상대적으로 줄어드는 것을 알 수 있다.











Fig. 2.19 Propagation process of 1993 Southwest of Hokkaido tsunami.







Fig. 2.21 Time history of water surface elevation calculated by 1993 Southwest of Hokkaido tsunami at Mukho harbor.





Fig. 2.22 Time history of water surface elevation calculated by 1993 Southwest of Hokkaido tsunami at Imwon harbor.

Fg 223은 지진공백역에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션으로 재현하였다. 수치시뮬레이션은 지진공백역에 서 가정된 단층파라미터 중에 가장 높은 수위상승량이 나타나는 가상지진해일 2의 값을 사용한다. 제 1영역내의 전파과정을 통해 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 알 수 있으며, 에너지의 대부분은 러시아방향으로 전파한다. 결과에 의하면 지진발생 후 약 100분 후에 우리나라 동해안으로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있다. 지진해일이 전파되는 과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 Fg 223에 제시된 수십전파과정으로부터 충분히 예상되는 것으로 판단된다. Fg. 224~226는 지진공백역에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션한 결과로 각 지역에서의 시간에 따른 수위변화를 나타낸다. 수치시뮬레이션결과, 주문진은 0.88m, 묵호는 약 1.45m, 임원은 약 2.33m 최대수위를 나타낸다.



[remaining2 Tsunami] Time=0.0min



[remaining2 Tsunami] Time=30.0min





[remaining2 Tsunami] Time=60.0min



[remaining2 Tsunami] Time=90.0min



[remaining2 Tsunami] Time=120.0min [remaining2 Tsunami] Time=180.0min

Fig. 2.23 Propagation process of Hypothetical tsunami 2.



Fig. 2.24 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Jumunjin harbor.





Fig. 2.25 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Mukho harbor.



Fig. 2.26 Time history of water surface elevation calculated by Hypothetical tsunami 2 at Imwon harbor.

다음은 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진, 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일 수치시뮬레이션을 통한 주문진, 묵호, 임원 지역에서의 최대수위상승고 값을 Fg. 2.27에 나타내었다. 1983년의 경우 임원지역에서 최대 2.41m, 또한 1993년의 경우 임원지역에서 최대 2.29m 수위가 상승하였다. 그리고 지진공백역의 경우 임원지역에서 최대 2.33m수위가 상승할 것으로 예상되며, 이처럼 3개 지진해일의 경우 모두 임원지역에서 피해가 가장 컸었으며, 앞으로의 발생할 지진해일에 대한 대책이 가장 필요한 지역으로 생각된다.





2.6 결 언

이 장에서는 우리나라 동해연안에 큰 피해를 초래한 1983년 동해중부지진,1993년 북해도남서외해지진 뿐 만 아니라 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일의 기본특성을 COMCOT모델로부터 수치해석모델로부터 검토하였다. 각각의 지진해일에 대한 전파양상 및 전파시간뿐만 아니라 여러지역에서의 최대수위상승고를 수치시뮬레이션을 통해 비교·검토하였다. COMCOT모델의 검증은 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대해 실시되었다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 이 연구의 결언으로 하여 아래에 기술한다.

- (1) 1983년 동해중부지진해일의 내습으로 침수피해를 입은 임원항을 대상으로 수치모델에 의한 최고수위공간분포 및 최대침수영역의 계산결과들로부터 과거 연구사례와 비교하여 COMCOT모델의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한, 과거 수심과 지형을 현재의 항만 상태와 비교하여 차이를 제시하며, 최신화된 결과값으로부터 동해연안에 향후 연안방재 및 개발, 항만구조물의 배치 등에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.
- (2) 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진 및 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일을 시뮬레이션으로 재현한 결과, 지진발생 후 약 100분 후에 우리나라 동해연안으로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있었다. 그리고 수심분포에 따라 지진해일이 전파되는 과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있었다.
- (3) 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진, 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일 수치시뮬레이션을 통해 주문진, 묵호, 임원에서의 최대수위상승고 값을 검토하였다. 3개 지진해일의 경우 모두 임원지역에서 수위상승고가 가장 컸으며, 임원지역은 앞으로의 발생할 지진해일에 대한 방재대책이 가장 필요한 지역으로 생각된다.



<참고문헌>

국립방재연구소 (1998). 동해안에서의 지진해일 위험도 평가, 국립방재연구소 연구보고서, NIDP-98-06.

김도삼, 김지민, 이광호 (2007). 동해연안에 영향을 미친 지진해일의 수치사뮬레이션, 한국해양공학회지, 21(6), 72-80.

윤성범, 임채호, 조용식, 최철순 (2002). 지진해일 전파 분산보정 유한차분모형의 정밀도 평가,

한국해안·해양공학회지, 14(2), 116-127.

최병호, 이호준 (1993). 1983년 동해 쓰나미의 산정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 13(3), 207-219.

- Abe, K. (1993). Characteristic properties of Nicaragua tsunami, Proceedings of 3rd UJNR Tsunami Workshop, 57-76.
- Aida, I. (1969). Numerical Experiments for Tsunami Caused by Moving Deformations of the Sea Bottom, Bull. Earthquake Res. Inst., 47, 673-700.
- Aida, I. (1984). A Source Models of the 1983 Nihonkai-earthquakes Tsunami. Proc. Symp. Nihonkai Chubu Earthquake Tsunami, JSCE, 673-700.

Hiller, A (2011). Manual for working with ArcGIS 10. Selected Works, University of Pennsylvania.

- Ishikawa, Y. (1994). Remaining earthquake vacant region, Monthly Ocean, 7, 102-104.
- Liu, P.L.-F., Woo, S.B., Cho, Y.S (1998) Computer programs for tsunami propagation and inundation, Technical report, Cornell University
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tencile faults in a half space. Bulletin of the Seismological
- Park, D., Cho, Y. S., & Kim, S. M. (2007). Simulation of Inundation at Imwon port during 1983 Central East Sea Tsunami. Journal of Coastal Research, 50, 1168-1172.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imammura, F. and Ortis, M. (1994). Fault Model to Describe Hokkaido Nansei Offshore Earthquake for Tsunami, JSCE, 41, 251-255.



3장 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 제주도 연안에서의 지진해일 추정

3.1 세 언

일본 Nankai해구에서 1946년 12월 21일 발생한 M8.0의 Nankai지진은 Kochi현에서 최대 6m의 지진해일을 발생시켜 약 700명이 사망하고, 35,000채 이상의 가옥이 파손되는 등의 막대한 인적·물적 피해를 초래하였다. Nankai해구는 일본 중부의 Shizuoka현에서 남부 Kyushu의 Miyazaki현까지 수심 4,000m, 연장 약 780km에 이르는 지역으로, 필리핀판과 유라시아판이 만나는 섭입대이다. Fig.3.1은 Tokai(東海), Tonankai(東南海), Nankai(南海)지진대로 이루어진 Nankai해구에서 발생한 과거지진의 사례를 나타낸 것으로, 1854년 Tokai지진, 1944년 Tonankai지진, 1946년 Nankai지진이 발생하였으며, 특히 Tokai지진의 경우는 1984년에 발생한 이후에 150년 이상 잠복기에 있는 것으로 알려져 있다. 日本 中央防災会議(2012)에서 이들 3개 지진은 최대 규모 M 8.0급으로 각각 100~150년의 주기로 발생하였고, 동시발생은 300~500년 주기로 추정하고 있다. 또한 Nankai해구에서 강진이 1707년에 마지막으로 발생하였고, 그 지진해일의 규모는 300-500년마다 증가하기 때문에 2011년 동일본대지진에 상응하는 규모의 지진이 일본의 남서쪽에서도 발생할 수 있다고 예측하고 있다. 한편, 日本 地震調査委員会(2012)는 Nankai해구에서 각각의 지진이 단독으로 30년 이내에 발생할 확률을 Tokai지진의 경우는 88%, Tonankai지진은 70%, Nankai지진은 60%로 추정하였다. Fig.3.2에 2001년 日本 中央防災会議에서 발표한 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 예상 지진해일의 분포와 Nankai해구의 범위를 제시한다. 그림에 주어진 바와 같이 거대한 규모의 연동형 지진이 발생할 경우 우리나라의 연안에서도 지진해일의 전파에 따른 적지 않은 영향을 받을 수 있다. 특히, 파원역에서 가장 인접해 있는 제주도 연안에서의 피해발생이 가장 우려되며, 따라서 제주도 연안에서 예상 지진해일 및 예상 침수지역을 추정하는 것은 장기적인 연안방재 및 연안개발의 측면에서 기본적으로 숙지 및 고려되어야 하는 요소로 판단된다.

따라서, 이 장에서는 이상과 같은 배경으로부터 일본 태평양 연안에서 발생 가능성이 높은 규모 M9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 우리나라 제주도 연안에 전파되어 발생할 수 있는 지진해일과 침수위치 및 침수역을 COMCOT모델에 의한 수치해석으로부터 검토한다. 더불어, 지진해일의 전파시간 등과 같은 기본적인 수리특성을 고찰하여 향후 연안방재와 연안개발에 중요한 기초자료를 수립하고자 한다.



32





Fig. 3.1 Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis of the past.

Fig. 3.2 Distribution of tsunami height in Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

3.2 대상영역 및 계산조건

대상영역은 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 좌하측 격자점(경도 124.667°, 위도 28.75°) 및 우상측 격자점(경도 142.15°, 위도 36.733°)을 취하였다. Fig. 3.3은 제1·영역에서 수심의 공간분포를 나타내며, 이는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 1·데이터(약 1.8km 간격)를 사용하였다. NOAA에서 주어지는 수심자료는 구좌표이므로 ArcGIS프로그램(ArcMap 10, 2011)을 이용하여 직각좌표로 변환하였고, 이와 우리나라 전자수치해도로부터 얻어지는 직각좌표의 상세역을 접합하였다. 여기서, Fig. 3.3의 제 1·영역에서 주어지는 수심분포도로부터 진원지 주변인 일본의 태평양 연안에서는 수심이 1~3km에서 4~8km로 급격히 변화되는 것을 볼 수 있고, 이로 인하여 지진해일의 전파양상이 크게 변할 것으로 예상된다.



Depth(m) 100 200 400 600 800 900 1000 1200 1600 2000 2400 2800 3200 3600 4000 4400 4800 5200 5600 6000 6400 6800 700 Fig.3.3 Distribution of water depth at AREA No.1.



Fig. 3.4는 세부영역인 제 2영역에서 제 6영역을 나타내고 있다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시간부터 10시간 동안 수치모의하였으며, 수치계산에서의 상세한 조건을 Table 3.1에 나타낸다. 먼저, 제 1영역에 대한 수치계산을 수행하여 제주도의 전 연안에서 지진해일의 공간분포를 검토하였고, 이로부터 서귀포시 연안에서 상대적으로 큰 지진해일을 나타내는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제주도 서귀포시 연안에서 지진해일에 의한 수위상승고를 보다 정확히 예측하기 위해 6개의 영역을 구성하였고, 이 때 제 6영역의 격자크기는 5m이다. 또한 6영역에서는 Google earth pro(2014)를 이용하여 해역의 수심과 주변지형의 표고를 상세히 수치시뮬레이션 하였다.

	Table 3.1 Computation conditions.								
	meshsize	Number of mesh							
Number of Alea	(m)	Around Songak Park	Sagye port and Hwasoon port						
AREA No.1	1,215	1316×7	788						
AREA No.2	405	1221×8	394						
AREA No.3	135	1077×1	494						
AREA No.4	45	1062×7	רח						
AREA No.5	15	879×723	939×669						
AREA No.6	5	459×549	834×480						







10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 (c) AREA No.4



Depth(m) 1 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 25 (e) AREA No.6(Around Songak Park)

-10 -12

16



(f) AREA No.6(Sagye port and Hwasoon port) Fig. 3.4 Distribution of water depth at AREA No.2~6.



3.3 지진해일의 초기수위

日本 中央防災会議(2003)에서는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진을 최대 M8.7로 상정하였지만 2011년 동일본대지진 발생 이후 M 9.0 지진의 발생 가능성을 제기하였다. 지진의 에너지 EUJ와 규모 M과의 관계를 나타내는 Gutenberg-Richter의 식 (3.1)에 의하면 M9.0의 지진에너지는 M8.7의 2.82배에 상당하므로 이 연구에서는 일본 중앙방재회의에서 검토된 3연동지진에 대해 Okada(1985)모델에서 계산된 지각변동량과 수위변동량을 각각 2.82배한 값을 적용함으로써 파원역을 변경하지 않고 계산을 수행하였다(川崎・鈴木, 2012). Fig.3.5는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일의 초기수면형상을 나타낸 것으로 그림으로부터 초기수위의 최대치가 약 13m에 달하는 것을 볼 수 있다.

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M$$

(3.1)

Fig.3.5 Initial water level by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

3.4 수치해석결과

Fig. 3.6은 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일을 제 1영역에 대해 시뮬레이션한 결과이다. 결과에 의하면 지진발생 후 약 4시간 후에 제주도로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있다. 전체적인 전파양상을 살펴보면 지진발생과 동시에 지진해일이 일본 태평양 연안으로 전파되고, 시간의 경과와 더불어 일본의 남서측으로 굴절되면서 일부는 우리나라 제주도 및 남해안으로 전파되어가는 것을 알 수 있고, 상대적으로 남중국측으로 큰 에너지의 지진해일이 전파되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3.3에 제시된 수심분포로부터 충분히 예상되는 것으로 판단된다. 한편, 이광호 등(2012)에 대해 지진해일의 전파과정을 수치모의할 수 있는 비선형수치모델을 구축한 수치 모델을 통해 규모 M9.0의 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진으로 인한 지진해일이 제주도 연안에 미치는 영향을 연구한 사례가 있다. 이 연구에서는



COMCOT(Comell Multigrid Coupled Tsunami Model)모델(Liu et al.,1998)로부터 송악파크 주변과 사계항, 화순항 부분에서 수위변동 등을 수채해석하였다.



Collection



Fig. 3.6 Propagation process by simultaneous occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai tsunamis.

1945

3.4.1 대상지역(송악공원 주변)

(1) 최고수위공간분포

Fig. 3.8은 송악공원 주변에 3연동 지진에 의한 지진해일의 내습시 영역내에서 산정된 최고수위의 공간분포를 나타낸다. 그림에서 수심은 (+)값으로, 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다.

최고수위분포를 보면 송악파크 주변의 만부분에서 수위변화가 집중되며, 최대수위가 1.05m까지 발생하였다. 이는 이광호 등 (2012)에 의한 최고수위 약 1.0m와 비슷한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.





Fig. 3.7 Calculation points.



Fig. 3.8 Maximum water level height at Around Songak park.

(2) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 3.7은 송악파크 주변에서의 계산지점을 나타내며, Fig. 3.9은 그림 중에 표기된 송악파크 주변에서 대표적 인 Location 2와 Location 4에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, Location2에서는 약 560분(33600초)에서 최고수위가 약 1.04m 정도 나타났으며, Location 4에서는 약 350분(21000초)에서 최고수위가 약 0.93m정도 나타난 것을 알 수 있다.







송악파크 주변의 총 7개의 계산지점으로부터 최대수위상승고를 Fig. 3.10에 나타내었다. Location 3에서 최대수위 0.48m로 가장 적게 상승하였고, Location2, 4에서 최대수위가 1.04m, 0.93m로 가장 높게 상승하였다.



3.4.2 대상지역(사계항 및 화순항)

(1) 최고수위공간분포

Fig. 3.12은 사계항 및 화순항에 3연동 지진에 의한 지진해일의 내습시 영역내에서 최고수위의공간분포를 나타낸다. 그림에서 수심은 (+)값으로, 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다.

최고수위분포를 보면 먼저 사계항부분에서 수위변화가 집중되며, 최대수위가 약 1.25m까지 발생하였다. 이광호 등 (2012)에서 최고수위가 약 1.6m 나온 것과 0.35m 정도의 차이를 가진다는 것을 알 수 있다. 이는



사계항 부근의 지형데이터를 최신의 데이터를 적용하였기 때문에 최고수위가 감소하였다고 판단된다.

다음으로는 화순항내 모래사장의 주변에서 수위변화가 큰 폭으로 발생하며 최대수위가 약 09m 정도 발생하는 것을 알 수 있다. 이광호 등 (2012)의 최고수위 약 1.1m와 0.2m 정도의 차이를 가진다는 것을 알 수 있다.



Fig. 3.11 Calculation points.



Fig. 3.12 Maximum water level height at Sagye harbor and Hwasoon harbor.

(2) 시간변동에 따른 수위변동그래프

Fig. 3.11은 사계항에서부터 화순항까지 14개의 계산지점을 나타내며, Fig. 3.13은 그림 중에 표기된 대표적 지점인 사계항 주변 Location 2와 화순항 주변 Location 4의 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, Location2에서는 약 435분(26100초)에서 최고수위가 약 1.24m 정도 나타났으며, Location 8에서는 약 400분(24000초)에서 최고수위가 약 0.84m정도 나타난 것을 알 수 있다.





사계항에서부터 회순항까지 총 14개의 계산지점으로부터 최대수위상승고 값을 Fig. 3.14에 나타내었다. 사계항인 Location2 에서 최대수위가 1.24m로 가장 높게 나타났으며, 용머리해안에서 최대수위가 0.50m로 가장 적게 상승하였다.





한편, 사계항 주변과 화순항 주변에서 침수계산을 수행하였으며, 이로부터 사계항 주변은 거의 침수되지 않는 것으로 나타났고, 용머리해안 및 화순항 주변의 일부에서 침수가 발생하였으며, 그 결과를 Fig. 3.15에 나타낸다. 그림에서부터 침수면적은 상대적으로 넓지 않고 저개발된 비주거 지역이며, 해안선의 자연해빈 부분을 따라서 침수되었다. 따라서, 침수범람으로 인한 피해는 예상되지 않지만 이러한 예상침수역이 고려되어 연안개발의 방향에 도움이 될 것으로 여겨진다.



Fig. 3.15 Predicted inundation area at Sagye harbor and Hwasoon harbor.



3.5 결 언

이 장에서는 우리나라 제주도 연안에 영향을 미칠 가능성이 있는 Tokai, Tonankai 및 Nankai 의 3 연동지진에 의한 지진해일에 있어서 제주도 연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 기본특성을 COMCOT 모델로부터 검토하였다. 이로부터 송악공원, 사계항 및 화순항에서 정확한 수위변동의 크기와 침수영역의 범위 를 예측하였다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술한다.

(1) Tokai, Tonankai 및 Nankai 의 3 연동지진해일 대한 제 1 영역의 수치해석결과로부터 진원지인 일본 중남부 부근에서는 최대 13m 의 수위변화가 발생하였으며, 우리나라 제주도 및 남해안보다는 남중국으로 더 많은 에너 지가 전파되는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 지진해일의 내습에 따른 제주도 연안에서 최고수위분포를 살펴보면 서귀포연안에서 최대 약 0.9~1.25m 정도 상승할 것으로 예상되며, 지진발생으로부터 약 4 시간 후에 서귀포연안에 도달할 것으로 예측되고, 송악공 원 주변에서의 최고수위는 약 1.04m, 사계항에서의 최고수위는 1.24m, 화순항 주변에서의 최고수위는 0.91m 로 각각 예상되며, 화순항 주변 및 용머리해안 주변에서 일부 침수도 예상된다.





<참고문헌>

- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T. (2011). Tsunami source of the 2011 of the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake. Earth Planets Space, Letters, 63, 815-820.
- Hiller, A (2011). Manual for working with ArcGIS 10. Selected Works, University of Pennsylvania.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tencile faults in a half space. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4), 1135-1154.
- Lee, K. H., Kim, M. J., Kawasaki, K., Cho, S., & Kim, D. S. (2012). Effects on the Jeju Island of Tsunamis Caused by Triple Interlocked Tokai, Tonankai, Nankai Earthquakes in Pacific Coast of Japan. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(4), 295-304.
- 川崎浩司, 鈴木一輝 (2012). 東海・東南海・南海三連動型巨大地震に伴う津波伝播特性に関する数値的研究, 土木 学会論文集 B3 (海洋開発), 68(2) (印刷中).
- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫 (1998). GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工**学**論文集, 第45巻, 356-360.
- 本間仁 (1940). 低溢流堰堤の越流係数, 土木学会誌, 第26巻, 6号, 635-645, 9号, 849-862.
- 日本 地震調査委員会 (2012). 溝型地震の長期評価の概要 (算定基準日 平成 24年 (2012年) 1月1日), http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/kaikou.htm.
- 日本 中央防災会議 (2001). 東南海,南海地震の被害想定について,東南海,南海地震等に関する専門調査会(第14回),資料 2,38-40,<u>http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/14/</u>.
- 日本 中央防災会議 (2003). 津波の計算手法, 東南海, 南海地震等に関する専門調査会(第16回), 参考資料 2, 110-124, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/.
- 日本 中央防災会議 (2012). 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第16回) 議事概要について, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/.



4장 실해역에서 공진장치에 의한 지진해일파의 제어에 관한 수치적인 연구

4.1 서 언

막대한 인적·물적 피해가 예상되는 지진해일을 구조적인 방법으로 제어하기 위해서 지진해일방과제나 방조제 등과 같은 초대형 구조물을 구축하는 방안 이외에 Nakamura et al.(1985)에 의해 파동필터이론으로부터 처음 개발된 Fig. 4.1의 공진장치를 기존의 방과제에 부착하여 단주기과 (Nakamura et al., 1996; Morita and Nakamura, 2003; Lee et al., 2010, 2012a)와 장주기과 (Nakamuta and Morita, 1998; Nakamura et al., 2011; Poon et al., 1998; Headland and Poon, 1998; Lee et al., 2010, 2012a)를 제어하려는 연구가 다수 수행되어 왔으며, 최근에는 지진해일을 제어할 목적으로 초장기주기파와 고립파의 제어에도 적용되고 있다 (Nakamura et al., 2007, 2010, 2012; Latt and Nakamura, 2011; Lee et al., 2010, 2012b). 그러나 Nakamura et al.(2007, 2010, 2012), Latt and Nakamura(2011) 및 Lee et al.(2010, 2012b) 등의 연구에서는 일정 수심역에 대해 지진해일의 모델로 초장주기파 혹은 고립파를 적용하고 있으므로 실현장에서의 지진해일을 대상으로 하는 경우 그의 유용성과 적용성 등에 관하여 또 다른 검토 여지를 남겨두고 있는 것으로 판단된다.



Fig. 4.1 Shape of wave resonator proposed firstly by Nakamura et al.(1985).

따라서, 이 연구에서는 이상에서 지적한 바와 같이 공진장치를 실해역에서의 지진해일파동장에 적용하여 그의 유용성과 적용성을 수치적으로 검토한다. 선행한 수치모의와 같이 지진해일의 생성과 전파모의를 위해 개발되어 널리 사용되고 있는 COMCOT모델을 적용하였다. 대상으로 한 지진해일은 1983년의 동해중부지진해일과 1993년 북해도남서외해지진해일이며, 대상지로 삼척, 묵호 및 임원을 선정하여 공진장치의 설치 유-무에 따른 지진해일의 저감



정도를 중심으로 지진해일의 시·공간분포 및 침수·범람 등에서 공진장치의 유용성과 적용성을 검토하였다.

4.2 실해역에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 유효성 검토

4.2.1 대상지역(삼척항)

삼척항은 1983년 동해중부지진해일시와 1993년 북해도남서외해지진해일시에 큰 피해는 발생되지 않았지만, 향후 예상되는 큰 지진해일의 피해를 예방하기 위하여 다음의 Fig. 4.2에 나타내는 바와 같이 기존방파제(Fig. 4.2에서 (a)부분-검정)의 연장공사(Fig. 4.2에서 (b)부분-파랑)를 실시하였다. 이 연구에서는 연장부분 대신에 기존방파제에 Fig. 4.1에 나타내는 바와 같은 공진장치(Fig. 4.2에서 (c)부분-빨강)를 부착한 가상적인 경우를 가정하여 방파제를 연장시킨 경우와 가상으로 공진장치를 부착한 두 경우에 대해 삼척항내에서 지진해일의 수위변동으로부터 공진장치의 유효성 등을 검토한다.

여기서는 직사각형의 공진장치에 관한 제원은 Fig. 4.1의 공진장치 형태를 참조하여 치수를 d₁ =9.2m, d₂=9.4m, *l*=83m, *B*=183m, *L*=50m로 가정하였으며, *B* = 2**B*+*l*에서 *B*'는 새로운 제원 값을 추가적으로 고려하여 중앙부폭을 세분화하였다. 즉, *B*=183m이고 *B*=50m씩 양쪽에 배치하였다. 공진장치의 부착시 사용된 길이는 총 200m(50*4)로 기존방파제의 연장길이 160m보다 40m 정도 길게 구성되어 있다.



Fig. 4.2 Specifications of the extended breakwater and resonator.

(1) 대상영역 및 계산조건

대상영역은 1993년 북해도 남서외해지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 좌하측 격자점(경도 123°, 위도 30°) 및 우상측 격자점(경도 145°, 위도 46°)을 취하였다. 수치해석에 적용되는 해역의 수심과 주변지형의 표고는 최신의 수치해도와 Google earth pro(2014)를 통하여 획득되었으며, 대상으로 한 지진해일은 1993년 7월 12일에 발생한 북해도남서외해지진해일이다. Fig. 4.3은 1993년 일본 북해도 Okusin 섬에서 발생된 북해도남서외해지진



해일이 동해를 전파하는 과정 및 계산영역을, Fig. 4.4은 삼척항의 해역에서 수심 및 주변지형의 표고를 제시하며 수심은 (+)값으로, 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다. 계산시간은 삼척항에서 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시간에서부터 180분 동안 수치모의를 실시하였다. 수치모의에 사용된 격자에 관한 정보 및 단층파라미터는 Table 4.1와 Table 4.2에 제시된 바와 같다.



Table 4.1 Computation condition.

Number of Area	mesh size (m)	Number of mesh	SWE Type
AREA NO.1	1,215	1333×1629	
AREA NO.2	405	687×1182	
AREA NO.3	135	888×1311	Linear
AREA NO.4	45	180×216	
AREA NO.5	15	171×189	
AREA NO.8	5	342×240	Nonlinear

Table 4.2 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwest off earthquake (Takahashi et al., 1994).

Aida	Latitude	Longitude $(^{\circ}E)$	H'(km) (Denth)	θ (deg)	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	L(km) (Lenoth)	W(km) (Width)	u'(m) (Dislocation)
Fault 1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	12
Fault 2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	25
Fault3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	5.71



4.2.2 수치해석결과

(1) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.5은 지진해일의 내습시 영역내에서 산정된 최고수위의 공간분포를 나타낸다. 그림을 보면 삼척항내는 우측 외곽방과제로 인하여 지진해일로부터 직접적인 영향을 받지 않는 것을 알 수 있고, 우측 외곽방과제 중앙부에서 최고수위가 32m에 이르는 것을 확인할 있다. 공진장치를 적용한 경우에는 지진해일의 반사 및 회절 현상으로 인하여 공진장치의 좌측 전면해역에서는 부착 전보다 수위가 높아지는 것을 볼 수 있다. 항내측에서 최대수위분포를 살펴보면 공진장치를 부착한 경우가 방과제를 연장한 경우보다도 대략 0.3m 정도의 수위가 저감되는 것을 볼 수 있고, 이로부터 공장치의 유용성을 확인할 수 있다.



(b) With resonator. Fig. 4.5 Maximum water level by effect of resonator at Samchuck harbor.

(2) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 4.6은 그림 중에 표기된 항내측 Location 7과 9에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은



기존방파제를 연장한 현재의 삼척항 경우를, 빨간 실선은 가상적으로 공진장치를 부착하였을 경우를 각각 나타내고 있다. 그림으로부터 Location 7의 경우에는 약 130분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.25m, 148분에서 최대수위가 0.2m 정도 저감을 확인할 수 있으며, 이는 최고수위가 0.9m에서 30% 정도 저감된 결과이다. Location 8의 경우에는 150분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.25m, 163분에서 최대수위가 0.3m 정도 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 최고수위가 1.0m에서 30% 정도 저감된 결과이다. 결과적으로 기존방파제의 연장보다 방파제 입구부에 공진장치를 부착하는 것이 지진해일의 제어에 더 효과적이라는 것을 판단할 수 있다.



Fig. 4.6 Time history of water surface elevation at Samcheok harbor.

4.3 묵호항에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 크기변화 검토

4.3.1 대상지역(묵호항)

삼척항의 경우와 동일하게 최신 수치해도와 Google earth pro(2014)로부터 해역에서 수심과 항 주변에서 지형 데이터를 각각 획득하였고, 1993년 7월 12일의 북해도남서외해지진해일을 대상으로 하였다. Fig. 4.7은 1993년 일본 북해도 Okusiri 섬에서 발생된 북해도남서외해지진해일이 동해를 전파하는 과정 및 계산영역을, Fig. 4.8은 묵호항의 해역에서 수심 및 주변지형의 표고를 제시하며 수심은 (+)값으로, 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다.



계산시간은 묵호항에서 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시에서부터 180분 동안 수치모의하였다. 그리고 Fig.4.9에 나타내는 공진장치에 대해 그의 치수는 $d_1=20m$, $d_2=23m$, l=335m로 하였으며, 여기서는 직사각형의 공진장치는 l=200m, B=735m, B=2*B*+l에서 B'라는 새로운 제원값을 추가적으로 고려하여 중앙부폭을 세분화하였고, 그 값은 B=200m이다. 이로부터 먼저 실해역에서의 방파제와 기준이 되는 직사각형 공진장치를 비교 한 후에 중앙부폭 B, 폭 B'와 길이 L의 치수를 변화시켜 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일파의 제어효과를 동시에 검토한다. 수치모의에 사용된 격자에 관한 정보 및 단층파라미터는 Table 4.3와 Table 4.4 에 나타낸다.



[1993.7.12 Tsunami] AREA No.1 Fig. 4.7 Computation area.



Fig. 4.8 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Mukho.



Fig. 4.9 Specifications of Existing breakwater and resonator.



Number of Area	mesh size (m)	Number of mesh	SWE Type
AREA NO.1	1,215	1333×1629	
AREA NO.2	405	687×1182	
AREA NO.3	135	1098×1101	Linear
AREA NO.4	45	975×873	Lanca
AREA NO.5	15	1314×1311	
AREA NO.8	5		Nonlinear

Table 4.3 Computation condition.

Table 4.4 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwest off earthquake (Takahashi et al., 1994).

Aida	Latitude	Longitude	H'(km)	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	L(km)	W(km)	<i>u'</i> (<i>m</i>)
Alda	$(^{\circ}N)$	(°E)	(Depth)	(Strikeangle)	(Dip <i>a</i> ngle)	(Slip <i>a</i> ngle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
Fault 1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	12
Fault 2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	2.5
Fault3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	5.71

4.3.2 수치해석결과

(1) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.10는 지진해일의 내습시 묵호항내 및 주변 해역에서 지진해일의 최고수위의 공간분포 및 범람역을 나타내며, 그림에서의 공진장치는 *B=735m, B=200m, L=200m의 크*기를 갖는다. 그림을 살펴보면 항내는 우측 외곽방과제로 인하여 지진해일이 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 지진해일의 반사 및 회절로 인하여 항내에 수위변동이 발생되는 것으로 판단된다. 두 경우 모두 한섬해수욕장 부근에서 최고수위 4.0m가 발생되는 것을 알 수 있으며, 항내측의 경우는 공진장치를 설치한 경우가 전체적으로 최고수위가 저감되고, 또한 침수피해면적이 작아지는 것을 볼 수 있으며, 항의 최내측에서는 0.5m정도의 수위저감을 확인할 수 있다.






(2) 시간변동에 따른 수위변동그래프

Fig. 4.11은 그림 중에 표기된 항최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 현재 묵호항의 경우를, 빨간 파선은 *B=*735m, *B*=200m, *L=*200m의 크기를 갖는 가상적으로 공진장치를 부착한 경우이다. 그림으로부터 공진장치가 부착된 경우가 Location 7과 8 모두 약 8,200초 (137분)에서 0.5m의 최대수위 저감을 각각 나타내었고, 이는 최고수위가 1.6m와 2.0m에서 25%~30% 정도 저감된 결과이다.

결과적으로 기존방파제의 입구부에 공진장치를 설치하는 것이 지진해일의 저감에 효과적이라는 것을 알 수 있다.







4.3.3 수치해석결과(길이 *L*을 고정, 중앙부폭 *B*와 폭 *B*⁵의 크기를 변화시킴) (1) 제원

Fig. 4.12은 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인 B=735m, B`=200m, L=200m의 경우를 기준으로 하여, 길이 L=200m를 고정하고 중앙부폭 B를 835m, 635m로 폭 B`를 100m, 300m로 크기를 변화시킨 경우이다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 d₁=20m, d₂=23m로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 검토한다.



Fig.4.12 Resonator specification in relation to B and B` size changes (L=200m fixed).

(2) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.13은 공진장치의 중앙부폭 B, 폭 B`의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 L=200m로 고정시킨 경우에 Fig. 4.10(b)인 직사각형 공진장치(B=735m, B`=200)와 (a) B=635m, B`=100n, (b) B=835m, B`=300m의 경우 지진해일 내습시 영역내의 최고수위의 공간분포 및 범람역을 나타낸다. 그림으로부터 세 경우 모두



항외측에서 전술한 바와 같이 최고수위변동은 거의 차이가 나타나지 않으며, 파랑의 반사 및 회절현상으로 인해 묵호항 주변지역인 한섬해수욕장 부근에서 최고수위가 4.0m로 발생되는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 공진장치의 크기변화에 따른 최고수위의 변화를 살펴보면 *B=*835m, *B*=300m, *L=*200m의 경우가 공진장치 부근 및 항내측에서 침수면적이 작고, 항내에서 약 0.4m 정도의 수위저감을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 공진장치의 중앙부폭 *B* 및 폭 *B* 크기가 클수록 최고수위가 저감되는 것을 알 수 있고, 따라서 해역의 특성을 고려하여 최적의 공진장치를 고안할 필요가 있을 것으로 판단된다.



 $\begin{array}{c} [\text{inundation \& Maximum water level height]} & 0.0 & 0.4 & 0.8 & 1.2 & 1.4 & 1.6 & 1.8 & 2.0 & 2.2 & 2.4 & 2.6 & 2.8 & 3.2 & 3.6 & 4.6 \\ \hline (a) B = 635 \text{m}, B^{\,\circ} = 100 \text{m}[L = 200 \text{m} \text{ fixed}] & (b) B = 835 \text{m}, B^{\,\circ} = 300 \text{m}[L = 200 \text{m} \text{ fixed}] \\ \hline \text{Fig. 4.13 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size } (B, B^{\,\circ}) \text{ at Mukho harbor } (L = 200 \text{m} \text{ fixed}). \end{array}$

1945

(3) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 4.14은 그림 중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란색 실선은 폭 *B*=100m, 빨간색 짧은 파선은 폭 *B*=200m 그리고 초록색 긴 파선은 폭 *B*=300m의 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 Location 7의 경우에는 약 9700초(161분) 때 폭 *B*=300m와 100m의 경우와 비교하면 최대수위가 0.5m 차이를 보였고, 이는 최고수위가 1.1m에서 45% 정도로 저감된 결과이다. Location 8의 경우에도 약 8220초(137분)와 9400초(156분) 때 폭 *B*=300m와 100m를 비교하면 최대수위가 0.5m 차이를 보이며, 이는 최고수위가 1.4m에서 35% 정도로 저감된 결과이다. 결과적으로 폭 *B*의 크기가 300m일 때 수위저감에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다.

동시에 현재의 묵호항과 폭 B`=300m일 때 비교하면 최대수위가 약 0.8m정도 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 최고수위가 1.6m와 2.0m에서 40%~50%정도 저감된 결과이다.





(*L*=200m fixed).

4.3.4 수치해석결과(중앙부폭 *B*와 폭 *B*`을 고정, 길이 *L*의 크기를 변화시킴) (1) 제원

Fig. 4.15은 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인 B=735m, B`=200m, L=200m의 경우를 기준으로 하여, 중앙부폭 B를 735m, 폭 B`를 200m로 고정하고 길이 L를 100m, 300m로 변화시킨 것이다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 d₁=20m, d₂=23m로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 검토한다.





Fig. 4.15 Resonator specification in relation to L size changes (B=735m, B=200m fixed).

(2) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.16은 공진장치의 길이 L 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 B=735m, B=200m로 고정된 상태에서 앞서 고려된 Fig. 4.10(b)인 직사각형 공진장치(L=200)와 (a)L=100n, (b)L=300m의 경우 지진해일 내습시 영역내에서 최고수위의 공간분포 및 범람역을 비교한 결과이다. 그림으로부터 세 경우 모두 항외측에서는 전술한 바와 같이 최고수위변동에서 거의 차이가 나타나지 않으며, 파랑의 반사 및 회절현상으로 인해 파가 묵호항 주변 지역인 한섬해수욕장 부근에서 최고수위가 4.0m로 발생되는 것을 볼 수 있다. 여기서, 공진장치의 길이 L의 크기변화에 따른 최고수위의 변화를 살펴보면 길이 L이 300m, 200m와 100m인 경우 침수피해면적과 수위변동에서 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.



(a) L=100m [B=735m, B`=200m fixed](b) L=300m [B=735m, B`=200m fixed]Fig. 4.16 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (L) at Mukho harbor (B, B` fixed).



(3) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 4.17은 그림 중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란색 실선은 길이 *L*=100m, 빨간색 짧은 파선은 길이 *L*=200m 그리고 초록색 긴 파선은 길이 *L*=300m의 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 Location 7의 경우 약 8300초(138분) 때 길이 *L*=300m와 100m를 비교하면 최대 수위가 0.25m 차이를 보였고, 이는 최고수위가 1.4m에서 17% 정도 수위가 저감된 결과이다. Location 8의 경우에는 약 8300초(138분) 때 길이 *L*=300m와 100m를 비교하면 최대수위가 0.3m 차이를 보이며, 이는 최고수위가 1.6m에서 18% 정도 수위가 저감된 결과이다. 결과적으로 길이 *L*의 크기가 300m일 때 수위저감에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있지만 어떤 특정 시간의 경우를 제외하고는 길이 *L*의 변화에 따라 거의 비슷한 결과를 보이기 때문에 경제성을 감안하여 최소길이인 *L*=100m을 설치하는 것이 효율적이라 판단된다.



Fig. 4.17 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (L) at Mukho harbor (B, B` fixed).



4.4 임원항에서 지진해일의 제어에 관한 공진장치의 크기변화 검토

4.4.1 대상지역(임원항)

묵호항의 경우와 동일하게 최신 수치해도와 Google earth pro(2014)로부터 해역에서 수심과 항 주변에서 지형 데이터를 각각 획득하였고, 1983년 5월 26일의 동해중부지진해일을 대상으로 하였다. Fig. 4.18은 1983년 5월 26일 일본 Akita현의 앞바다에서 발생한 M7.7의 동해중부지진이 동해를 전파하는 과정 및 계산영역을, Fig. 4.19은 임원항의 해역에서 수심 및 주변지형의 표고를 제시하며, 수심은 (+) 값으로, 주변지형은 (-) 값으로 표기되어 있다. 계산시간은 임원항에서 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시에서부터 180분 동안 수치모의하였다. 그리고, Fig. 4.20에 나타내는 공진장치에 대해 d_1 =15m, d_2 =14.5m, k=155m로 하였으며, 여기서는 직사각형의 공진장치의 크기를 L=100m, B=330m, 그리고 B=2*B +k에서 B 라는 새로운 제원값을 추가적으로 고려하여 중앙부폭을 세분화 하였고, 그 값은 B=100m이다. 이로부터 먼저 실해역에서의 방파제와 기준이 되는 직사각형 공진장치를 비교 한 후에, 중앙부폭 B, 폭 B와 길이 L의 치수를 변화시켜 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 동시에 검토한다. 수치모의에 사용된 격자에 관한 정보 및 단층파라미터는 Table 4.5와 Table 4.6에 나타낸다.



Fig. 4.18 Computation area.

Fig. 4.19 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Imwon.





Fig. 4.20 Specifications of existing breakwater and resonator.

Number of Area	mesh size (m)	Number of mesh	SWE Type
AREA NO.1	1,215	1333×1629	
AREA NO.2	405	687×1182	
AREA NO.3	135	1098×1101	Linear
AREA NO.4	45	1218×1068	LAIRCU
AREA NO.5	15	1368×1281	
AREA NO.8	5	408×393	Nonlinear

Table 4.5 Computation condition.

Table 4.6 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984).

Aida	Latitude	Longitude	H'(km)	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\deg)$	L(km)	W(km)	<i>u'</i> (<i>m</i>)
Alua	$(^{\circ}N)$	$(^{\circ}E)$	(Depth)	(Strike angle)	(Dip <i>a</i> ngle)	(Slipangle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
Fault 1	42.21	138.84	2	22	40	90	40	30	7.60
Fault 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	3.05

4.4.2 수치해석결과

(1) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.21는 지진해일의 내습시 임원항내 및 주변해역에서 지진해일의 최고수위의 공간분포 및 범람역을 나타내며, 그림에서의 공진장치는 B=330m, B=100m, L=100m의 크기를 갖는다. 그림을 살펴보면 항내는 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일이 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 지진해일의 반사 및



회절현상으로 인하여 항내에서 수위변동이 발생되는 것으로 판단된다. 두 경우 모두 외측방파제부근에서 최고수위 4.6m가 발생되는 것을 알 수 있다. 항 내측의 경우는 공진장치를 설치한 경우가 전체적으로 최고수위가 저감되고, 또한 침수면적이 작아지는 것을 볼 수 있으며, 항의 최내측에서는 0.4m 정도의 수위저감을 확인할 수 있다.



Fig. 4.21 Maximum water level by effect of resonator at Imwon harbor.

(2) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 4.22은 그림 중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 현재 임원항의 경우를, 빨간 파선은 *B=*330m, *B*=100m, *L*=100m의 크기의 공진장치를 부착한 경우이다. 그림으로부터 공진장치가 부착된 경우가 Location 7과 8 모두 약 156분에서 약 0.5m의 최대수위 저감을 각각 나타내었고, 이는 최고수위가 2.3m에서 21% 정도 저감된 결과이다.

결과적으로 기존방파제의 입구부에 공진장치를 설치하는 것이 지진해일의 저감에 효과적이라는 것을 할 수 있다.





Fig. 4.22 Time history of water surface elevation by effect of resonator at Imwon harbor.

4.4.3 수치해석결과(길이 L을 고정, 중앙부폭 B와 폭 B`의 크기를 변화시킴)

(1) 제원

Fig. 4.23은 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인 B=330m, B`=100m, L=100m의 경우를 기준으로 하여, 길이 L=100m를 고정하고 중앙부폭 B를 380m, 280m, 폭 B`=50m, 150m로 크기를 변화시킨 경우이다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 d₁=15m, d₂=14.5m로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 검토한다.





Fig. 4.23 Resonator specification in relation to B and B` size changes (L=100m fixed).

(2) 최고수위의 공간분포

Fig. 4.24은 공진장치의 중앙부폭 B, 폭 B 의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 L=100m로 고정된 상태에서 앞서 고려된 Fig.4.21(b)인 직사각형 공진장치(B=330m,B=100)와 (a)B=280m,B=50n,(b)B=380m, B=150m일 때 지진해일 내습시 영역내에서 최고수위의 공간분포 및 범람역을 비교한 것이다. 그림으로부터 세 경우 모두 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일이 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 지진해일의 반사 및 회절현상으로 인하여 항내에서 수위변동이 발생된다. 여기서, 공진장치의 폭 B의 크기변화에 따른 최고수의 변화를 살펴보면 B=380m,B=150m,L=100m의 경우가 항내측에서 침수면적이 작고, 항내에서 약 0.4m 정도의 수위저감을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 공진장치의 중앙부폭 B, 폭 B' 크기가 클수록 최고수위가 저감되므로, 해역의 특성을 고려하여 최적의 공진장치를 고안할 필요가 있을 것으로 판단된다.







(a) B=280m, B=50m [L=100m fixed] (b) B=380m, B=150m [L=100m fixed] Fig. 4.24 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (B, B) at Imwon harbor (L=100m fixed).

(3) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 4.25은 그림 중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란색 실선은 폭 *B*=50m, 빨간색 짧은 파선은 폭 *B*=100m 그리고 초록색 긴 파선은 폭 *B*=150m 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 Location 7의 경우에는 약 156분 때 폭 *B*=150m와 50m를 비교해보았을 때 최대 수위가 0.4m차이를 보였고, 이는 최고수위가 2.2m에서 18%정도 수위가 저감된 결과이다. Location 8의 경우에도 약 156분 때 폭 *B*=150m와 50m를 비교해보았을 때 최고수위가 0.4m차이를 보이며, 이는 최고수위가 2.2m에서 18%정도 수위가 저감된 결과이다.

결과적으로 폭 B'의 크기가 150m일 때 수위저감에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있지만, 그림을 보면 폭 가 100m와 150m를 비교해보았을 때 높은 수위부분에서 유사한 값을 가지므로 폭 B'=100m가 공진장치 설치에 있어 효율적이라 판단된다.

동시에 현재의 임원항과 폭 B`=150m일 때 비교하면, 최대수위가 약 0.5m정도 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 최고수위가 2.3m에서 0.21%정도 저감된 결과이다.





4.4.4 수치해석결과(중앙부폭 B와 폭 B`을 고정, 길이 L의 크기를 변화시킴)

(1) 제원

Fig. 4.26은 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인 B=330m, B`=100m, L=100m의 경우를 기준으로 하여, 중앙부폭 B를 330m, 폭 B`를 100m로 고정하고 길이 L를 50m, 150m로 크기 변화하였다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 d₁=15m, d₂=14.5m로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 검토한다.





Fig. 4.26 Resonator specification in relation to L size changes (B=330m, B`=100m fixed).

(2) 최고수위의 공간분포

Fg. 4.27은 공진장치의 길이 L 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 B=330m, B=100m로 고정된 상태에서 앞서 고려된 Fg. 4.21(b)인 직사각형 공진장치(L=100)와 (a)L=50n, (b)L=150m의 지진해일 내습시 영역내의 최고수위의 공간분포 및 범람역을 비교한다. 그림으로부터 세 경우 모두 우측 외곽방과제로 인하여 지진해일이 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 지진해일의 반사 및 회절현상으로 인하여 항내에서 수위변동이 발생되는 것으로 판단된다. 여기서, 공진장치의 길이 L 크기변화에 따른 최고수위의 변화를 살펴보면 길이 L=150m, 50m를 비교하면 항내 중앙부분에서는 0.2m정도 수위 변화가 생기지만 항의 최내측부분과 침수면적에서 수위변동 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.



(a) *L*=50m [*B*=330m, *B*`=100m fixed] (b) *L*=150m [*B*=330m, *B*`=100m fixed] Fig. 4.27 Comparison of Maximum water level by effect of resonators size (*L*) at Imwon harbor (*B*, *B*` fixed).



(3) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 428은 그림중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란색 실선은 길이 *L*=50m, 빨간색 짧은 파선은 길이 *L*=100m 그리고 초록색 긴 파선은 길이 *L*=150m 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 Location 7와 8 경우 모두 길이 *L*의 크기와 관련해서 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 결과적으로 길이 *L*의 크기는 50m일때가 가장 효율적이라 판단된다.

결과적으로 임원항의 경우에는 공진장치 설치에 있어서 중앙부폭 B=330m, 폭 B`=100m, 길이 L=50m일때가 지진해일을 제어하는데 있어 가장 효과적이라 판단된다.



Fig. 4.28 Time history of water surface elevation by effect of resonators size (L) at Imwon harbor (B, B` fixed).



4.5 결 언

이 장에서는 실해역에서 기존 파랑제어구조물의 활용 및 개량을 통한 지진해일 제어를 목적으로 공진장치를 기존방파제에 부착하여 비교·검토한 삼척항의 수치해석결과로 유효성을 입증하였고, Nakamura et al.(1985)가 제안한 공진장치 형태에서 중앙부폭 B, 폭 B', 길이 L를 항 조건에 맞게 변화시킨 묵호항과 임원항의 수치해석결과로 공진장치의 최적의 형태를 검토하였다. 검토된 결과들로부터 지진해일을 효과적으로 제어할 수 있는 방안을 도출하였다. 이 연구의 주요내용은 다음과 같다.

- (1) 삼척항의 경우, 과거 삼척항을 토대로 방파제가 연장된 현재의 삼척항과 항 입구부에 공진장치를 부착한 경우를 비교했을때, 최고수위에서 공진장치의 효과로 약 30% 정도 수위가 저감되었다. 이 결과로부터 공진장치의 유효성을 입증하였다.
- (2) 묵호항의 경우, 현재방과제와 직사각형 공진장치인 중앙부폭 B=735m, 폭 B=200m, 길이 L=200m를 비교하였을 때 최고수위가 1.6m와 2.0m에서 25~30% 정도 저감된 결과를 나타냈으며, 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 중앙부폭 B, 폭 B 변화시킨 결과에서 크기가 가장 큰 B=300m와 현재의 묵호항을 비교했을 때 최고수위가 1.6m와 2.0m에서 40~50% 정도 수위가 저감된 결과를 나타내었다. 길이 L을 변화시킨 결과에서는 길이가 가장 긴 경우에 최대수위가 18% 정도 차이를 보이나 특정시간때의 경우를 제외하고는 길이 L 변화와 관계없이 거의 유사한 값을 가지기 때문에 길이 L는 최소화하는 것이 효율적이다. 결과적으로 묵호항에서 공진장치 설치시 B=835m, B=300m, L=100일때가 가장 효과적인 공진장치의 제원값이라 판단된다.
- (3) 임원항의 경우, 현재의 방과제와 직사각형 공진장치인 중앙부폭 B=330m, 폭 B=100m, 길이 L=100m를 비교하였을 때 최고수위가 2.3m에서 21% 정도 저감된 결과를 나타냈으며, 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 중앙부폭 B', 폭 B 변화시킨 결과에서B'=150m과 B'=100m은 거의 유사한 결과값을 가지기 때문에 B'=100m이 효율적이며, 현재의 임원항과 B'=100m을 비교했을 때 최고수위가 2.3m에서 0.21% 정도 저감된 결과를 나타낸다. 길이 L을 변화시킨 결과에서는 길이 변화에 상관없이 수위변동차이가 거의 없으므로 길이 L는 최소화하는 것이 효과적이다. 결과적으로 임원항에서 공진장치 설치시 B=330m, B'=100m, L=50m일때가 가장 효과적이라 판단된다.

각 실해역마다 항로에 방해가 되지 않는 부분에 대해서 공진장치 폭과 길이를 적절히 선정하여 지진해일에 대해 대비할 필요가 있다고 판단된다.



<참고문헌>

- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., & Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. Geophysical Research Letters, 38(7).
- Liu, PL.-F., Woo, S.B., Cho, Y.S (1998) Computer programs for tsunami propagation and inundation, Technical report, Cornell University
- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita S. (1996): "Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a habour", Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, pp.1280-1292
- Nakamura, T., Morita, S. and Kato, K. (1998): "Wave Protection Performance of a Resonator Founded at Harbor Entrance", Proc. Coastal Eng., JSCE, Vol 45, pp 721-725
- Nakamura, T., Mochizuki, H. & Morita, S.: Performance of a resonator designed by the Wave Filter Theory-Applicability to a harbor, Proc. Coastal Eng. Conf., JSCE, Vol.25, pp.1280-1292, 1996 (in Japanese).
- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Part, J.B. and An, S.W.(2012a). A study on the control of short-period waves by resonator, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 36-47.
- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Part, J.B. and An, S.W.(2012b). A study on the control of solitary waves by resonator, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 48-57.
- Lee, K.H., Beom, S.S., Kim, D.S., Choi, N.H., Part, J.B. and An, S.W.(2012c). Application of wave resonator to the field for controlling secondary undulation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(1), 58-65.
- Lee, K.H., Jeong, S.H., Jeong, J.W. and Kim, D.S. (2010). Effectiveness of a wave resonator under short-period waves and solitary waves, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 30(1B), 89-100.



5장 삼척항에서 지진해일의 제어를 위한 공진 장치의 형태와 설치위치에 관한 연구

5.1 서 언

항내로 침입하는 특정 주파수대의 파랑을 제어할 목적으로 Nakamura et al.(1996)에 의해 파랑필터이론으로부 터 공진장치가 고안된 이후,Poonet al.(1998)과 Headland and Poon(1998)의 연구결과에 의해 미국 Long Beach 항내 J-부두에 선박의 장주기운동을 제어하기 위하여 공진장치가 현장에 설치되었으며, 또한 Nakamura et al.(1996)에 의한 공진장치의 기능을 참조한 Bellotti(2007)의 연구결과에 의해 이탈리아 로마 요트항에 장주기파의 제어를 위하여 공진장치가 적용된 사례가 있다. 최근에는 Nakamura et al.(2007) 및 Lee et al.(2012b)은 지진해일과 같은 초장주기파와 고립파의 제어에도 공진장치의 유용성과 적용성을 확인하고 있지만, 실현장에서 발생되는 지진해일파을 대상으로 그의 타당성을 검토한 연구는 수행된 경우가 없다. 이로부터 앞서 직사각형 공진장치 설치에 의해서 지진해일과 같은 장주기파에 대해 항내로 들어오는 파에 대해서 수위저감을 효과를 입증하였다. 나아가 Latt and Nakamura(2011a,b)는 초장주기파와 장주기파에 대해서 리아스식 만과 같은 긴 해역을 가지는 항만 입구 부분에 Fig. 5.1과 같은 기존형태인 직사각형 공진장치와 Fig. 5.2와 같은 새로운 형태의 공진장치를 각각 설치, 비교하여 지진해일파와 유사한 파의 제어에 효과성을 입증하였고, 새로운 형태의 크기와 설치위치를 변화시켜 공진에 의한 파 제어의 최적의 상태를 연구하였다.

따라서, 이 연구에서는 새로운 형태의 공진장치를 실해역에서의 지진해일파동장에 적용하여 그의 타당성을 COMCOT 모델을 적용하여 수치적으로 검토한다. 여기서, 실제의 지진해일로는 1993년 북해도남서외해지진해 일을 대상으로 하였으며, 전술한 연구로부터 비교적 긴 해역인 삼척항을 대상으로하여 Latt and Nakamura(2011a,b) 가 제안한 새로운 형태의 공진장치의 크기와 설치위치에 따른 지진해일의 제어 효과에 대해 검토한다.





5.2 공진장치의 형태와 설치위치에 따른 수치해석 결과

5.2.1 대상지역(삼척항)

이 연구에서는 방파제가 비교적 긴 해역을 가지는 삼척항을 대상으로 Fg. 5.2에 제시하는 G자 형태에 가까운 새로운 형태의 공진장치(Latt and Nakamura, 2011)를 적용하여 실제 지진해일에 대한 그의 유용성을 검토한다. 수치해석에 적용되는 해역의 수심과 주변지형의 표고는 최신의 수치해도와 Google earth pro(2014)를 통하여 획득되었으며, 대상으로 한 지진해일은 1993년 7월 12일에 발생한 북해도남서외해지진해일이다. Fig. 5.3은 1993년 일본 북해도 Okusini섬에서 발생된 북해도남서외해지진해일이 동해를 전파하는 과정 및 계산영역을 보여주며, Fig. 5.4은 삼척항의 해역에서 수심 및 주변지형의 고도를 제시하며 수심은 (+)값으로 주변지형은 (-)값으로 표기되어 있다. 계산시간은 삼척항에서 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진 발생시간에서부터 180분 동안 수치모의를 실시하였다. 수치모의에 사용된 격자에 관한 정보 및 단층파라미터는 Table 5.1와 Table 5.2에 제시된 바와 같다. Fig. 5.5는 l_a = 50m, B_w = 50m d_w 를 삼척항 방파제 길이에 비례하여 100m, 135m, 170m (Fig. 5.5에서 (a), (b), (c)로 나타내었음)로 한 경우에 다른 수치해석을 수행하였고, Fig. 5.6에서는 B_w = 50m, l_w =170m으로부터 길이 l_a 를 50m, 70m, 90m (Fig. 5.6에서 (d), (e), (f)로 나타내었음)로 한 경우에 수치해석을 수행하였다.



[1993.7.12 Tsunami] AREA No.1 Fig. 5.3 Computation area.



Fig. 5.4 Spatial distribution of water depth and topography altitude at Samchuck.



Number of Area	mesh size (m)	Number of mesh	SWE Type
AREA NO.1	1,215	1333×1629	
AREA NO.2	405	687×1182	
AREA NO.3	135	888×1311	Linear
AREA NO.4	45	180×216	Laikta
AREA NO.5	15	171×189	
AREA NO.8	5	342×240	Nonlinear

Table 5.1 Computation condition.

Table 5.2 Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwestoff earthquake (Takahashi et al., 1994).

Aida	Latitude	Longitude	H'(km)	$\theta(\text{deg})$	$\lambda(\text{deg})$	$\delta(\text{deg})$	L(km)	W(km)	<i>u'</i> (<i>m</i>)
Alda	$(^{\circ}N)$	(°E)	(Depth)	(Strike angle)	(Dip <i>a</i> ngle)	(Slip <i>a</i> ngle)	(Length)	(Width)	(Dislocation)
Fault 1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	12
Fault 2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	2.5
Fault 3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	5.71



Fig. 5.5 Resonator specification of new type I.

Fig. 5.6 Resonator specification of new type II.

5.2.2 수치해석결과

(1) 최고수위공간분포

Fig. 5.7~5.12은 지진해일의 내습시 삼척항내 및 주변 해역에서 최고수위의 공간분포를 나타낸다. 그림을 살펴보면 항내는 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일이 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 항구에서 반사 및 회절로 인하여 항내에서 수위변동이 주로 발생되는 것으로 판단된다. 먼저, 길이 l_w 를 변화시킨 경우[Case(a)~(c)], Case(a)와 Case(c)를 비교하면 항내측에서 전반적으로 0.1m~0.15m 정도 수위저감을 나타내는 것을 알 수 있다. 다음으로, 길이 l_a 를 변화시킨 경우[Case(d)~(f)], Case(d)와 Case(f)를 비교하면 공진장치가 설치된 항 입구부에서 공진현상으로 인해 최대 0.3m~0.35m 정도 수위가 상승하였으며,



항최내측에서 최고수위변동은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 결과적으로 길이 l_w 는 길이가 가장 긴 170m인 Case(c) 경우가 상대적으로 가장 효과적이며, 길이 l_a 는 수위저감에 크게 작용하지 않으므로 길이 l_a 에 대해서는 방파제에 맞게 최소한으로 설치하는 것이 효율적이라 판단된다.



Fig. 5.9 Spatial distribution of maximum water level for



Fig. 5.10 Spatial distribution of maximum water level for Case (d).



Fig. 5.12 Spatial distribution of maximum water level for Case (f).



Fig. 5.11 Spatial distribution of maximum water level for Case (e).



(2) 시간변동에 따른 수위변동

Fig. 5.13는 그림 중에 표기된 항내측 Location 7과 9에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 Fig. 5.7와 같은 Case(a)의 경우를, 빨간 짧은 파선은 Fig. 5.8와 같은 Case(b)의 경우를, 그리고 초록의 긴 파선은 Fig. 5.8와 같은 Case(c)의 경우를 각각 나타내고 있다. 그림으로부터 Location 7의 경우에는 149분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.16m 정도 저감되었고, 이는 최고수위가 0.75m에서 20% 정도 저감된 결과이다. Location 9의 경우에는 150분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.1m 정도 저감을 나타내며, 이는 최고수위가 0.9m에서 10% 정도 저감된 결과이다. 결과적으로 길이 l_w 를 길게 한 Case(c)가 상대적으로 가장 수위저감에 효과적인 것을 알 수 있다.



Fig. 5.13 Time history of water surface elevation by new types I of resonators at Samcheok harbor.

 Fig. 5.14는 그림 중에 표기된 항내측 Location 7과 9에서 수위변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 Fig.

 5.10와 같은 Case(d)의 경우를, 빨간 짧은 파선은 Fig. 5.11와 같은 Case(e)의 경우를, 그리고 초록의 긴 파선은 Fig.

 5.12와 같은 Case(f)의 경우를 각각 나타내고 있다. 그림으로부터 Location 7의 경우와 Location 9의 경우 모두 길이



l_a에 대해서 차이가 없는 것을 알 수 있다. 결과적으로 길이 l_a의 변화는 수위저감에 크게 작용하지 않는 것을 알 수 있으며, 길이 l_a는 방파제에 맞게 최소한으로 설치하는 것이 효율적이라 판단된다.



Fig. 5.14 Time history of water surface elevation by new types II of resonators at Samcheok harbor.

(3) 현재의 삼척항과의 비교 [시간변동에 따른 수위변동]

Fig. 5.15는 그림 중에 표기된 항내측 Location 7과 9에서 현재의 삼척항과 새로운 형태의 공진장치 결과 중 대표적인 두 경우인 Case(c)와 Case(f)를 비교한다. 파란 실선은 현재의 삼척항 경우를, 빨간 짧은 파선은 새로운 형태의 공진장치에서 길이 l_w 를 최대로 Case(c)의 경우를, 그리고 초록의 긴 파선은 새로운 형태의 공진장치에서 길이 l_a 를 최대로 Case(f)의 경우를 각각 나타내고 있다. Case(c)와 Case(f)는 거의 유사한 결과값을 보이며 현재의 삼척항과 비교하였을 때 먼저, Location 7의 경우에는 149분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.36m 정도 저감되었고, 이는 최고수위가 0.9m에서 40% 정도 저감된 결과이다. Location 9의 경우에는 150분에서 공진장치에 의한 최대수위가 0.27m 정도 각각 수위저감 하였다. 이는 최고수위가 0.9m와 1.0m에서 각각 약 20%~30% 정도 저감된 결과이다.



결과적으로, 새로운 형태의 공진장치는 선행한 연구중 공진장치의 유효성 검증을 위해 항 입구부에 설치한 직사각형 공진장치보다 수위저감에 더 효과적인것을 알 수 있다.

이로부터 Latt and Nakamura(2011)가 제안한 새로운 형태의 공진장치를 항에 적절히 배치함으로서 지진해일을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig.5.15 Time history of water surface elevation by effect of new types of resonators at Samcheok harbor.

5.3 결 언

이 연구에서는Latt and Nakamura(2011)가 제안한 새로운 형태의 공진장치를 현재의 삼척항에 설치하여 길이 l_w 와 l_a 를 변화시켜 최적의 길이와 설치위치를 알아보았다.

주요한 내용으로는, 새로운 형태의 공진장치의 길이 l_w 를 변화시킨 경우, 상대적으로 길이가 긴 경우 최고수위에서 약 10-20% 정도 저감하였고, 길이 l_a 를 변화시킨 결과는 결과값에 거의 유사하게 나타나므로 방파제에 맞게 최소화하는 것이 효율적이다. 또한 새로운 형태의 공진장치와 현재의 삼척항을 비교한다면, 전술한 연구결과인 직사각형 공진장치보다 수위저감에 더 효과적인것을 알 수 있다.



<참고문헌>

- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita S. (1996). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a habour, Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, 1280-1292.
- Nakamura, T., Saeki, S., Nyein, Z. L. and Nakayama, A. (2007). Effectiveness of a resonator under wave breaking and non-wave breaking conditions for sheltering a harbor; Annual Journal of civil Engineering in Ocean, 23, JSCE, 799-804.
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011). Effectiveness of a newly developed resonator against tsunamis, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3, 67(2), 637-642.
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011).performance of wave resonators located at a harbor entrance for reducing very long waves, Ser. B3, 67(2), 892-896.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imammura, F. and Ortis, M. (1994). Fault model to describe Hokkaido Nansei Offshore Earthquake for tsunami, JSCE, 41, 251-255.





6장 SWAN모델을 이용한 공진장치에 의한 풍파의 제어에 관한 연구

6.1 세언

전술한 지진해일로부터 동해연안의 대표적인 항만을 대상으로 우리나라 연안에 전파되어 발생할 수 있는 최대수위상승고를 수치적으로 검토하고, 실현장에서의 지진해일을 구조적인 방법으로 제어하기 위해서 공진장치를 설치하여 그의 유용성과 적용성 등에 관하여 연구하였다.

그러나 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및 설계에 있어서 주요 외력조건은 일반적으로 육지지형의 영향이 고려된 바람장으로부터 얻어진 해상풍이 참수 범람해석의 입력치로 되는 주기가 짧은 풍파의 영향을 고려한다. 연안역에서 연안재해의 원인인 고파랑에 대한 위험성을 인식하고, 전술한 지진해일뿐만 아니라 다각도로 재해현상에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 이 장에서는 SWAN모델의 심해설계과 조건을 이용한 풍파로부터 동해연안의 실해역들을 대상으로 지진해일 제어의 연구에서 검토했던 대표적인 공진장치의 형태와 크기를 이용하여 고파랑에 대한 제어 효과를 검토한다.

1945

Ó

6.2 수치해석이론

6.2.1 SWAN 모델의 개요

SWAN(Simulation Wave Nearshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물(장애물)에 의한 파랑의 반사, 차단 및 전달, phase-decoupled approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 평균수위변동(wave-induced set-up)이 있다. 그리고, 바람에 의한 파랑에너지의 생성, 백파(whitecapping), 쇄파(depth-induced wave breaking), 저면마찰(bottom friction)에 의한 파랑에너지의 소산, 비선형상호작용에 의한 파랑간의 에너지전달 등의 파랑에너지의 생성, 소산 등을 고려할 수 있다.

SWAN모형에서 파랑은 쇄파대에서와 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $N(\sigma, \theta)$ (σ 와 θ 는 각각 상대주파수와 파향)은 흐름이 존재할 때 파동(action density)은 보존되는 반면에 에너지(energy density)는 보존되지 않기 때문에 energy density spectrum $E(\sigma, \theta)$ 보다 일반화된 물리랑이다.



 $N(\sigma, \theta)$ 는 $E(\sigma, \theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

SWAN에서 파랑스펙트럼에 관한 기초방정식은 다음과 같이 주어진다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial X}C_{X}N + \frac{\partial}{\partial Y}C_{Y}N + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_{\sigma}N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_{\theta}N = \frac{S}{\sigma}$$
(3.1)

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 파동의 국소적인 시간변화를, 두 번째와 세 번째 항은 파동의 이류항을, 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는 상대주파수의 변화를, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 각각 나타낸다. 그리고, *C_X*, *C_Y*는 각각 *X*, *Y* 방향의 전파속도(군속도)를, *C_σ*와 *C_θ*는 σ와 *θ* 공간에서의 전파속도를, 우변 *S* = *S*(σ, θ) 는 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지 입·출력을 표현한 것으로, 다음 식과 같이 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \tag{3.2}$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입을 나타내며, S_{ds} 는 쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항을, S_{nl} 은 비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달을 각각 나타내고 있다.

수면상에 바람이 불면 수면파가 발생하고 이것이 시·공간적으로 발달한다. 이와 같은 풍파의 발생 · 발달과정은 바람과 수면파의 상호작용에 의한 결과로 바람으로부터 파랑으로 에너지가 이송되기 때문에 발생된다. 이것을 표현한 것이 바람에 의한 파랑으로 에너지유입항이며, 바람으로부터 파랑으로의 에너지전송은 Phillips(1957)의 공명기구(resonance mechanism)와 Miles(1957)의 불안정기구(feed-back)로 설명되며, 대응하는 source 항은 통상 선형과 지수함수적인 증가의 합으로 기술된다. SWAN에서는 일반적으로 다음의 식을 나타낸다.

$$S_{in}(\sigma,\theta) = A + BE(\sigma,\theta) \tag{3.3}$$

여기서, A 는 선형파의 성장을, BE 는 파의 지속적 성장을 의미한다. A 와 B 는 주파수와 파향, 풍속과 풍향에 의존한다. 모델에서 사용되는 풍속은 해면상 10m에서의 풍속이며, 계산에 사용되는 마찰속도 U_{*} 는 다음과 같다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \tag{3.4}$$

Collection

여기서, Cn는 다음의 식으로 표현되는 Wu(1982)의 저항계수이다.

$$C_{D}(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5m / s \\ (0.8 + 0.065m / s \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \ge 7.5m / s \end{cases}$$
(3.5)

파랑에너지의 소산항은 세 가지의 다른 요인, 백과(whitecapping, $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$), 해저마찰(bottom friction, $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$)과 쇄과(depth-induced breaking, $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$)의 합으로 표현된다.

SWAN을 포함하는 현재의 제3세대 파랑추산모델에 있어서 백파의 수식회는 다음과 같은 pulse-based model(Hasselmann, 1974)에 기초한다.

$$S_{ds,w}(\sigma,\theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma,\theta)$$
(3.6)

여기서, Γ 는 파형경사의 종속계수, k는 파수, $\tilde{\sigma}$, 와 \tilde{k} 는 각각 평균각주파수와 평균파수를 나타낸다. Komenetal.(1984)은 충분히 발달된 조건에서 파의 에너지평형이 완료되는 것으로 하며 값을 산정하고 있다.

Depth-induced dissipation은 해저마찰, 저면운동(bottom motion), 침투(percolation) 또는 바닥의 불규칙성으로 인한 back-scattering에 의해 발생한다. 대륙붕에서 소산의 지배적인 메카니즘은 해저마찰로 발생하며, 일반적으로 다음과 같이 제시된다.

$$S_{ds,b}(\sigma,\theta) = -C_{bottom} \frac{G^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma,\theta)$$
(3.7)

여기서, *C*_{bottom} 은 해저마찰계수를 나타내며, Hasselmann et al.(JONSWAP, 1973)은 경험상수의 이용을 제안하였다. 해저마찰에 의한 파랑에너지의 소산에 미치는 평균류의 영향은 저면조도길이스케일의 정확한 산정이 평균류의 효과보다 에너지소산율에 큰 영향을 주지 않기 때문에 고려되지 않는다.

파랑장에서 수심에 의해 발생되는 쇄파에 의한 파랑에너지소산의 계산에는 단파(bore)의 소산이 적용된다(Battjes and Janssen, 1978). Eldeberky and Battjes(1995)는 스펙트럼형이 보존되는 Battjes and Janssen (1978)의 단파모델에 의한 스펙트럼을 체계화하였다. SWAN은 방향성을 고려하여 다음과 같이 사용하였다.

$$S_{ds,br}(\sigma,\theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma,\theta)$$
(3.8)



여기서, E_{tot} 는 총파랑에너지를, $D_{tot} < 0$ 은 Battjes and Janssen (1978) 에 따른 쇄파에 의한 총에너지의 소산율을 나타낸다. D_{tot} 의 값은 쇄파지표(breaking parameter)인 $Y = H_{max}$ (H_{max} 는 수심 h 에서 존재할 수 있는 최대파고)를 따른다. SWAN에서는 상수값과 변수값이 이용되며, 상수값은 Y = 0.73 (Battjes and Stive, 1985)이다.

심해에서는 quadruplet wave-wave interactions이 스펙트럼의 발달에 지배적인 요소이다. 이 현상으로 파랑에너지는 스펙트럼피크에서 저주파수와 고주파수영역으로 전달된다. 극천해역에서는 triad wave-wave interactions에 의해 에너지가 저주파수영역에서 종종 고주파수영역으로 전달되며, 따라서 고차의 조화성분으로 된다. quadruplet wave-wave interactions을 완전히 계산하기에는 상당한 시간이 소요되며, FD-RIAM이라 불리는 기법으로 수행된다. 계산속도를 향상시키기 위해 파라미터법(parametric method)을 비롯한 많은 기법이 제안되어 있으며, Discrete Interaction Approximation(DIA)으로 실행된다. DIA근서는 발달과정에 있는 파랑스펙트럼의 본질적인 특징을 상당히 잘 나타내고 있다는 것이 밝혀져 있다. 경우에 따라 DIA기법은 충분한 정확도를 나타내지 않을 수도 있다. DIA의 정도는 quadruplet configurations의 수가 증가함에 따라 향상될 수 있다.

6.3 SWAN모델에 의한 수치해석

6.3.1 대상지역(묵호항)

묵호항 전면해역의 천해파랑을 추산하기 위하여 연안격자점의 신심해설계파(한국해양연구원, 2005)에 대하여 대상영역을 광역은 180m, 중역은 60m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였다. 여기서, 해당지역에 영향을 미칠 수 있는 모든 연안격자점의 신심설계파를 고려하기 위해 묵호항 전면해역에 큰영향을 줄 수 있는 심해파랑의 지점과 제원, 계산조건 및 계산지역을 Table 6.1~62과 Fig. 6.1에 각각 나타내었으며, 조건에 대해서 평면파랑 계산을 수행하였다. 여기서, 설계조위는 묵호항 조위검조소로부터 약최고고조위(Approx. HHW)을 사용하였고, 계산영역의 수심과 해안선 및 구조물은 묵호항의 최근 수치해도를 이용하여 추출하였다.

Table 6.1 Deepwater design wave ar	nd water level for Mukho.
------------------------------------	---------------------------

심해파랑지점	심해설계파 제원			아키ㅋㅋㅈ이 ()	서계고이 (~~)	
	$T_s(s)$	$H_s(\mathbf{m})$	dir	47411112277 (M)	실제소귀 (m)	
76(<i>N</i> 34°63', <i>E</i> 129°33')	11.73	7.67	SE	0.480	DL(+)0.480	

Areanumber	dx, dy (m)	Meshx	Meshy	Mesh x size	Mesh y size	Remark(AREA)
AREA No.1	180	226	218	40680	39240	Wide
AREA No.2	60	179	141	10740	8460	Middle
AREA No.3	20	209	160	4180	3200	Narrow

Table 6.2 Mesh sizes applied to each simulating area.



Fig. 6.2는 Table 6.1의 설계조위 및 심해파랑조건으로부터 광역에서 수행된 묵호항 전면해역에서의 등파고선 도이다.



전술한 지진해일 제어를 위하여 공진장치를 기존 방파제에 설치하여 비교한 방법과 같게 시뮬레이션하였다. Fig. 65에 나타내는 공진장치에 대해 치수는 $d_1=20m$, $d_2=23m$, L=335m로 하였으며, 여기서는 직사각형의 공진장치의 제원값을 L=200m, B=735m, B=2*B+1에서 B 라는새로운 제원값을 추가적으로 고려하여 중앙부폭을 세분화 하였고, 그 값은 B=200m이다. 먼저 현재의 방파제와 기준이 되는 직사각형 공진장치를 비교 한 후에 B, B 와 L의 치수를 변화시켜 공진장치의 크기변화에 따른 지진해일의 제어효과를 동시에 검토하였다.





Fig. 6.5 Specifications of existing breakwater and resonator.

6.3.2 수치해석결과

(1) 등파고선도

Fig. 6.6는 풍파의 내습시 묵호항내 및 주변해역에서 등파고선도를 나타내며, 그림 (b)에서 공진장치는 B=735m, B=200m, L=200m의 크기를 갖는다. 그림을 살펴보면 항내는 우측 외곽방파제로 인하여 파가 치단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않고, 단지 파의 회절로 인하여 항내에서 파고변동이 발생되는 것으로 판단된다. 항내측의 경우를 보면 공진장치를 설치한 경우가 전체적으로 파고가 감소되고, 항의 최내측에서는 0.05m 정도의 파고 감소를 확인할 수 있다.



Fig. 6.6 Spatial distributions of wave heights at Mukho harbor.

(2) 유의파고도

Fg.6.7는 풍파의 내습시 묵호항내 및 주변해역에서 유의파고도를 나타내며, 등파고선도보다는 정확한 파고값을 확인할 수 있다. 그림을 살펴보면 공진장치를 설치한 경우가 전체적으로 파고가 감소되고, 항최내측



부분에서는 평균적으로 0.03~0.05m 정도 파고가 감소되는 것을 확인할 수 있다.





(3) 파고데이터를 이용한 그래프

Fig. 6.8는 묵호항 최내측부분에서 주요 지점 7개를 산정하여 유의파고도로부터 결과값들을 지점에 따라 그래프 로 나타내었다. 그래프을 살펴보면 공진장치를 항 입구부에 설치한 경우가 최소 0.01m ~ 최대 0.04m 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 풍파에 대해서도 공진장치에 의한 효과가 발생한다는 것을 알 수 있다.



6.3.3 수치해석결과(길이 *L*을 고정, 중앙부폭 *B*와 폭 *B*`의 크기를 변화시킴) (1) 제원

 Fig. 69은 공진장치의 크기에 따른 풍파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인

 B=735m, B`=200m, L=200m의 경우를 기준으로 하여, 길이 L=200m를 고정하고 중앙부폭 B=635m, 835m, 폭 B`=



100m, 300m로 크기 변화하였다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 $d_1=20m$, $d_2=23m$ 로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 풍파의 제어효과를 검토한다.



Fig. 6.9 Resonator specification in relation to B and B` size changes (L=200m fixed).

ME AND OCED

(2) 등파고선도

Fig. 6.10는 공전장치의 중앙부폭 B, 폭 B' 크기에 따른 풍파의 저감효과를 검토하기 위하여 L=200m로 고정된 상태에서 전술한 Fig. 6.6(b)인 직사각형 공진장치(B=735m, B=200)와 (a) B=635m, B'=100m, (b) B=835m, B'=300m를 비교한다. 그림을 살펴보면 공진장치의 중앙부폭 B, 폭 B' 크기변화에 따른 풍파의 저감 차이가 거의 없다는 것을 알 수있다.



Fig. 6.10 Comparison of spatial distributions of wave heights by effect of resonators size (B, B^{*}) at Mukho harbor (L=200m fixed).



(3) 파고데이터를 이용한 그래프

Fig. 6.11는 묵호항 최내측부분에서 주요 지점 7개를 산정하여 유의파고도로부터 결과값들을 지점에 따라 그래프로 나타내었다. 그래프을 실펴보면 파란색 실선(원)은 폭 B'=100m, 빨간색 짧은 파선(세모)은 폭 B'=200m 그리고 보라색 긴 파선(네모)은 폭 B'=300m 공진장치를 부착한 결과이다. 폭 B'=300m와 100m를 비교해보면 평균적으로 0.01m정도 차이를 보이는 것을 알 수있다. 중앙부폭 B, 폭 B'에 변화에 대해서는 파고의 변동량이 크지 않는다는 것을 확인할 수 있다.



6.3.4 수치해석결과(중앙부폭 B와 폭 B`을 고정, 길이 L의 크기를 변화시킴) (1) 제원

Fig. 6.12은 공진장치의 크기에 따른 풍파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 직사각형 공진장치인 B=735m, B`=200m, L=200m의 경우를 기준으로 하여, 중앙부폭 B=735m, 폭 B`=200m로 고정하고 길이 L=100m, 300m로 크기 변화하였다. 그 밖에 치수는 앞과 동일하게 d₁=20m, d₂=23m로 하였으며, 공진장치의 크기변화에 따른 풍파의 제어효과를 검토한다.





Fig. 6.12 Resonator specification in relation to L size changes (B=735m, B=200m fixed).

(2) 등파고선도

Fig. 6.13는 공진장치의 길이 *L* 크기에 따른 풍파의 저감효과를 검토하기 위하여 *B*=735m, *B*`=200m로 고정된 상태에서 전술한 Fig. 6.6(b)인 직사각형 공진장치(*L*=200)와 (a) *L*=100n, (b) *L*=300m를 비교한다. 그림을 살펴보면 항내측 부분에서 길이 *L* 크기가 클수록 공진장치로부터 파고의 제어효과가 중앙부폭 *B*, 폭 *B*` 일때 보다 큰 것을 알 수 있다.



(a) L=100m [B=735m, B`=200m fixed] (b) L=300m [B=735m, B`=200m fixed]Fig. 6.13 Comparison of spatial distributions of wave heights by effect of resonators size (B, B`) at Mukho harbor (L=200m fixed).

(3) 파고데이터를 이용한 그래프

Fig. 6.14는 묵호항 최내측부분에서 주요 지점 7개를 산정하여 유의파고도로부터 결과값들을 지점에 따라 그래프로 나타내었다. 그래프을 살펴보면 파란색 실선(원)은 폭 L=100m, 빨간색 짧은 파선(세모)은 폭 L=200m 그리고 보라색 긴 파선(네모)은 폭 L=300m 공진장치를 부착한 결과이다. 길이 L=300m와 100m를 비교해보면 평균적으로 0.02m정도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 공진장치의 길이 L의 크기변화 대해서는 파고의



저감효과가 B, B^{*} 일때보다 변동폭이 큰 결과가 나왔다. 이는 공진장치에 의한 파 제어에 있어서 길이 L보다는 중앙부폭 B^{*}와 폭 B⁻에 영향이 크다는 전술한 지진해일 연구 결과와는 상이한 결과를 확인할 수 있다.



Fig. 6.14 Comparison of wave heights data results of 7 points by effect of resonators size (L).

6.3.5 대상지역(삼척항)

삼착항 전면해역의 천해파랑을 추산하기 위하여 연안격자점의 신심해설계과(한국해양연구원, 2005)에 대하여 방파제 폭이 작은 삼착항을 고려하여 180m, 60m, 20m로 구성했던 기존 방식에서, 영역을 큰 격자에서 다음의 작은 격자의 크기비율을 1/3로 구성하여 총 4개로 나누어 시뮬레이션하였다. 제 1영역은 135m, 제 2번영역은 45m, 제 3번영역은 15m, 제 4번영역은 5m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였다. 여기서, 삼착항 전면해역에 큰 영향을 줄 수 있는 심해파랑의 지점과 제원 및 계산조건 및 계산지역을 Table 63~64 과 Fig. 6.15에 나타내었으며, 조건에 대해서 평면파랑 계산을 수행하였다. 여기서, 설계조위는 동해항 조위검조소로부터 약최고고조위(Approx. H.H.W)을 사용하였고, 계산영역의 수심과 해안선 및 구조물은 최근 수치해도를 이용하여 추출하였다.

Table 6.3 Deepwater design wave and water level for Samcheok.

심해파랑지점	심해설계파 제원			01-オココスの (…)	서게ㅈ이 (m)	
	$T_s(s)$	$H_s(\mathbf{m})$	dir	97391222277 (M)	실계조귀 (m)	
74(<i>N</i> 37°36', <i>E</i> 129°67')	12.67	8.68	SSE	0.450	DL(+)0.450	

Areanumber	dx, dy (m)	Meshx	Meshy	Mesh x size	Mesh y size
AREA No.1	135	594	561	80190	75735
AREA No.2	45	255	213	11475	9585
AREA No.3	15	369	294	5535	4410
AREA No.4	5	348	240	1740	1200

Table 6.4 Mesh sizes applied to each simulating area.


6.3.6 수치해석결과

(1) 제원

Fg. 6.15은 삼착항에 공진장치 설치시 지진해일의 제어에 탁월한 효과가 있었던 대표적인 결과의 경우들로부터 풍파의 제어에 대해 수치모의 한다. 대표적인 공진장치의 형태로 직사각형 공진장치와 새로운 형태의 공진장치 두 경우를 말하며, 이로부터 현재의 삼척항과 비교하였다. 검정색부분인 (a)는 현재의 삼척항, 파란색과 빨간색 부분인 (b)는 직사각형 공진장치, 빨간색만의 부분인 (c)는 새로운 공진장치의 형태의 제원값을 보여준다. 제원값은 선행한 연구의 수치값과 같으며 공진장치의 형태로부터 풍파의 제어 효과를 검토한다.



Fig. 6.15 Specifications of representative study case in Samcheok harbor.

 Fig. 6.16는 Table 6.3의 설계조위 및 심해파랑조건으로부터 제 1영역에서 수행된 삼척항 전면해역에서의

 등파고선도이다.



Fig. 6.16 Computation area.

Fig. 6.17 Spatial distributions of wave heights on AREA No.1 (Dir=SSE).



Fig. 6.18~6.19는 Table 6.3의 설계조위 및 심해파랑조건으로부터 제 2영역과 제 3영역에 수행된 삼척항 전면해 역에서의 등파고선도이다.



Fig. 6.18 Spatial distributions of wave heights on AREA No.2 (Dir=SSE).



Fig. 6.19 Spatial distributions of wave heights on AREA No.3 (Dir=SSE).

(2) 등파고선도

Fg. 620는 풍파의 내습시 제 4영역으로서 삼착항내 및 주변해역에서 등파고선도를 나타낸다. 그림 (a)은 현재의 삼착항에서 방파제 및 전면해역의 경우를 나타낸다. 그림 (b)은 삼착항의 공진장치 유효성을 확인하기 위해 항입구부에 설치했던 직사각형의 공진장치의 경우이고, 그림 (c)는 새로운 형태의 공진장치를 설치한 경우이다. 그림을 보면 3가지 경우중에 (b)경우인 항입구에 직사각형 공진장치를 설치했을때가 항내에서 가장 파고값이 높은 것을 알 수 있다. (a)와 (c)경우는 거의 유사한 등파고값을 가지는 것을 알 수 있으며, 등파고선도를 통해서는 정확한 결과값들은 알 수 없으므로 파고데이터를 이용한 그래프를 확인한다.



(a) Without resonator.





(b) Rectangular resonator. (c) New type of resonator. Fig. 6.20 Spatial distributions of wave heights at Samcheok harbor.

(3) 파고데이터를 이용한 그래프

Fg. 6.21는 삼척항 최내측지점 20개를 산정하여 유의파고도로부터 결과값들을 지점에 따른 파고 값 그래프 를 나타내었다. 그래프를 살펴보면 파란색 실선(원)은 현재의 삼척항, 빨간색 짧은 파선(세모)은 직사각형 공진장치 그리고 초록색 긴 파선(네모)은 새로운 형태의 공진장치를 부착한 결과이다. 항최내측 부분에서는 새로운 형태의 공진장치와 현재의 삼척항을 비교하면 최대 0.22m-0.28m까지 유의파고의 저감을 보이며, 12번 지점 이후부터는 현재의 삼척항과 거의 유사한 결과를 보여준다. 반면에 직사각형 공진장치와 현재의 삼척항은 거의 유사한 값을 가지며 17번 지점 이후부터는 직사각형 공진장치의 경우가 더욱 증가하는 경향을 보인다. 결과적으로 항입구에 직사각형 공진장치를 부착한 경우, 수위를 저감시켰던 지진해일의 경우와는 다르게 풍파에 의한 결과값은 현재의 방파제와 거의 유사한 값을 나타내다가 유의파고값이 더 커지는 결과를 보였다.

대해서도 공진장치의 유효성을 입증하였다.



Fig. 6.21 Comparison of wave heights data results of 20 points by representative study case.



6.4 결 언

이 연구에서는 심해설계과 조건을 이용한 주기가 짧은 풍과의 제어를 목적으로 실해역에서 기존방과제에 공진장치를 부착하여 공진장치의 효과를 검토하였다. 대표적으로 묵호항과 삼척항을 대상으로 하였으며, 묵호항의 경우는 먼저 직사각형 공진장치를 현재의 방과제와 비교한 후 제원값인 중앙부폭 B, 폭 B`그리고 길이 L의 크기변화하여 풍과 제어의 최적화된 공진장치를 검토하였으며, 삼척항의 경우는 지진해일 제어의 연구에서 대표적인 공진장치의 제원값으로 수치모의하여, 풍파의 제어에 관한 공진장치의 유효성을 확인하였다.

- (1) 묵호항의 경우, 현재의 방과제와 공진장치를 비교하였을 때 항최내측 부분에서 평균적으로 0.03~0.05m정도 파고가 감소되었고, 이는 공진장치가 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 전술한 지진해일과 같은 장주기파에 대해서는 공진장치의 제원인 중앙부폭 B, 폭 B'에 대한 변화로부터 수위저감의 효과를 크게 발생시켰지만, 풍파에서는 중앙부폭 B, 폭 B'의 변화로부터 유의파고값의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 길이 L을 변화시킨 경우는 중앙부폭 B, 폭 B' 변화시킨 경우보다 유의파고값이 더 저감하는 경향을 보였다.
- (2) 삼착항의 경우, 전술한 연구사례를 바탕으로 공진장치 연구중 대표적인 공진장치 형태 두 가지 경우를 현재의 삼착항과 비교한 결과이다. 항 입구에 직사각형 공진장치를 부착한 경우, 수위를 저감시켰던 지진해일에 경우와는 다르게 풍파에 의한 결과값은 현재의 방파제와 거의 유사한 값을 나타내다가 유의파고값이 더 커지는 결과를 보였다. 반면에, 새로운 형태의 공진장치를 부착한 경우, 항최내측에서 최대 0.22m-0.28m까지 유의파고값의 저감을 보여줌으로서 풍파에 대해서도 공진장치의 유효성을 입증하였다.



<참고문헌>

- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita S. (1996). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a habour, Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, 1280-1292.
- Nakamura, T., Saeki, S., Nyein, Z. L. and Nakayama, A. (2007). Effectiveness of a resonator under wave breaking and non-wave breaking conditions for sheltering a harbor; Annual Journal of civil Engineering in Ocean, 23, JSCE, 799-804.
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011). Effectiveness of a newly developed resonator against tsunamis, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3, 67(2), 637-642.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imammura, F. and Ortis, M. (1994). Fault model to describe Hokkaido Nansei Offshore Earthquake for tsunami, JSCE, 41, 251-255.





7_{장 결론}

이 연구에서는 우리나라 동해연안에 큰 피해를 초래한 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진뿐 만 아니라 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일의 기본특성을 COMCOT모델로부터 검토하였다. 각각의 지진해일에 대한 수위변동과 최대수위상승고 및 전파시간 등과 같은 지진해일의 제반특성을 검토하였다. COMCOT모델의 검증은 임원항을 대상으로 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대해 실시되었다.

또한 우리나라 제주도 연안에 영향을 미칠 가능성이 있는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일에 있어서 제주도 연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 기본특성을 COMCOT모델로 부터 검토하였다. 이로부터 송악공원, 사계항 및 화순항에서 정확한 수위변동의 크기와 침수영역의 범위를 예측하였다.

그리고 실해역에서 지진해일의 제어를 목적으로 공진장치를 기존방파제에 부착하여 유효성을 입증하고 공진장치의 크기를 변화시켜 최적의 형태를 검토하였다. 또한 직사각형 공진장치 형태에서 나아가 새로운 형태의 공진장치를 설치하여 그 길이를 변화시켜 지진해일의 제어의 유효성과 적용성을 확인하였다.

지진해일과 같은 장주기파에 대한 제어의 연구와 동시에 주기가 짮은 단주기성 풍파에 대해서도 공진장치으로부터 제어의 효과가 유효한지 검토하였다. 이상의 과정으로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

7.1 지진해일

이 장에서는 우리나라 동해연안에 큰 피해를 초래한 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진뿐 만 아니라 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일의 기본특성을 COMCOT모델로부터 검토하였다. 각각의 지진해일에 대한 전파양상 및 전파시간뿐 만 아니라 여러지역에서의 최대수위상승고를 수치시뮬레이션을 통해 비교·검토하였다. COMCOT 모델을 적용하여 지진해일의 전파특성을 추정하였으며, COMCOT모델의 검증은 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일에 대해 실시되었다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 시항을 이 연구의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 1983년 동해중부지진해일의 내습으로 침수피해를 입은 임원항을 대상으로 COMCOT모델 의한 최고수위공간분포 및 최대침수영역의 계산결과들로부터 과거 연구사례와 비교하여 본 모델의 타당성을 검증할 수 있었다. 또한, 과거 수심과 지형을 현재의 항만 상태와 비교하여 차이를 제시하며, 최신화된



결과값으로부터 우리나라 연안에 향후 연안방재 및 개발, 항민구조물의 배치 등에 기초자료로 활용할 수 있게 연구하였다.

- (2) 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진 및 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일을 시뮬레이션으로 재현한 결과, 지진발생 후 약 100분 후에 우리나라 동해연안으로 지진해일이 전파되어 오는 것을 알 수 있었다. 그리고 수심분포에 따라 지진해일이 전파되는 과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있었다.
- (3) 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진, 지진공백역에서의 지진에 의한 지진해일 수치시뮬레이션을 통해 주문진, 묵호, 임원에서의 최대수위상승고 값을 검토하였다. 3개 지진해일의 경우 모두 임원지역에서 수위상승고가 가장 컸으며, 임원지역은 앞으로의 발생할 지진해일에 대한 방재대책이 가장 필요한 지역으로 생각된다.

INE AND OCF

7.2 Tokai, Tonankai, Nankai지진에 의한 지진해일

이 연구에서는 우리나라 제주도 연안에 영향을 미칠 가능성이 있는 Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진에 의한 지진해일에 있어서 제주도 연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 기본특성을 COMCOT모델로 검토하였다. 이로부터 송악공원, 사계항 및 화순항에서 정확한 수위변동의 크기와 침수영역의 범위를 예측하였다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술한다.

- (1) Tokai, Tonankai 및 Nankai의 3연동지진해일 대한 제 1영역의 수치해석결과로부터 진원지인 일본 중남부 부근에서는 최대 13m의 수위변화가 발생하였으며, 우리나라 제주도 및 남해안보다는 남중국으로 더 많은 에너지가 전파되는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 지진해일의 내습에 따른 제주도 연안에서 최고수위분포를 살펴보면 서귀포시 연안에서 최대 약 09~1.25m정도 상승할것으로 예상되며, 지진발생으로부터 약 4시간 후에 서귀포시 연안에 도달할 것으로 예측되고, 송악공원 주변에서의 최고수위는 약 1.04m, 사계항에서의 최고수위는 1.24m, 화순항 주변에서의 최고수위는 0.91m로 각각 예상되며, 화순항 주변 및 용머리해안 주변에서 일부 침수도 예상된다.



7.3 실해역에서 공진장치에 의한 지진해일의 제어

이 연구에서는 실해역에서 기존 파랑제어구조물의 활용 및 개량을 통한 지진해일의 제어를 목적으로 공진장치를 기존방파제에 부착하여 비교 검토한 삼척항의 수치해석결과로 유효성을 입증하였고, Nakamura et al.(1985)가 제안한 공진장치 형태에서 중앙부폭 B, 폭 B', 길이 L를 항구 조건에 맞게 변화시킨 묵호항과 임원항의 수치해석결과로 공진장치의 최적의 형태를 검토하였다. 검토된 결과들로부터 지진해일을 효과적으로 제어할 수 있는 방안을 도출하였다. 이 연구의 주요내용은 다음과 같다.

- (1) 삼척항의 경우, 과거 삼척항을 토대로 방과제가 연장된 현재의 삼척항과 항 입구부에 공진장치를 부착한 경우를 비교했을때, 최고수위에서 공진장치의 효과로 약 30%정도 수위가 저감되었다. 이 결과로부터 공진장치의 유효성을 입증하였다.
- (2) 묵호항의 경우, 현재방과제와 직사각형 공진장치인 중앙부폭 B=735m, 폭 B=200m, 길이 L=200m를 비교하였을 때 최대수위가 1.6m와 20m에서 25%~30% 정도 저감된 결과를 나타냈으며, 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 중앙부폭 B, 폭 B 변화시킨 결과에서 크기가 가장 큰 B=300m와 현재의 묵호항을 비교했을 때 최고수위가 1.6m와 2.0m에서 40%~50% 정도 수위가 저감된 결과를 나타내었다. 길이 L을 변화시킨 결과에서는 길이가 가장 긴 경우에 최대수위가 18% 정도 차이를 보이나 특정시간때의 경우를 제외하고는 길이L 변화와 관계없이 거의 유사한 값을 가지기 때문에 길이 L는 최소화하는 것이 효율적이다. 결과적으로 묵호항에서 공진장치 설치시 B=835m, B=300m,L=100일때가 가장 효과적인 공진장치의 제원값이라 판단된다.
- (3) 임원항의 경우, 현재의 방과제와 직사각형 공진장치인 중앙부폭 B=330m, 폭 B=100m, 길이 L=100m를 비교하였을 때 최고수위가 2.3m에서 21%정도 저감된 결과를 나타냈으며, 공진장치의 크기에 따른 지진해일의 저감효과를 검토하기 위하여 중앙부폭 B', 폭 B 변화시킨 결과에서 B'=150m과 B'=100m은 거의 유사한 결과값을 가지기 때문에 B'=100m이 효율적이며, 현재의 임원항과 B'=100m을 비교했을 때 최고수위가 2.3m에서 0.21%정도 저감된 결과를 나타낸다. 길이L을 변화시킨 결과에서는 길이 변화에 상관없이 수위변동차이가 거의 없으므로 길이 L는 최소화하는 것이 효과적이다. 결과적으로 임원항에서 공진장치 설치시 B=330m, B'=100m, L=50m일때가 가장 효과적이라 판단된다.



7.4 삼척항에서 지진해일의 제어를 위한 공진장치의 형태와 설치위치

이 연구에서는 Latt and Nakamura(2011)가 제안한 새로운 형태의 공진장치를 현재의 삼척항에 설치하여 길이 l_w 와 l_a 를 변화시켜 최적의 길이와 설치위치를 알아보았다.

주요한 내용으로는, 새로운 형태의 공진장치의 길이 l_w 를 변화시킨 경우, 상대적으로 길이가 긴 경우 최고수위에서 약 10-20% 정도 저감하였고, 길이 l_a 를 변화시킨 결과는 결과값에 거의 유사하게 나타나므로 방파제에 맞게 최소화하는 것이 효율적이다. 또한 새로운 형태의 공진장치와 현재의 삼척항을 비교한 결과, 4장에서 연구한 직사각형 공진장치보다 수위저감에 더 효과적인것을 알 수 있다.

7.5 SWAN모델을 이용한 공진장치에 의한 풍파의 제어

이 연구에서는 심해설계파 조건을 이용한 주기가 짧은 풍파의 제어를 목적으로 실해역에서 기존방파제에 공진장치를 부착하여 공진장치의 효과를 검토하였다. 대표적으로 묵호항과 삼척항을 대상으로 하였으며, 묵호항의 경우는 먼저 직사각형 공진장치를 현재의 방파제와 비교한 후 제원값인 중앙부폭 B, 폭 B'그리고 길이 L의 크기변화하여 풍파 제어의 최적화된 공진장치를 검토하였으며, 삼척항의 경우는 지진해일 제어의 연구에서 대표적인 공진장치의 제원값으로 수치모의하여, 풍파의 제어에 관한 공진장치의 유효성을 확인 하였다.

- (1) 묵호항의 경우, 현재의 방과제와 공진장치를 비교하였을 때 항최내측 부분에서 평균적으로 0.03~0.05m정도 파고가 감소되었고, 이는 공진장치가 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 전술한 지진해일과 같은 장주기파에 대해서는 공진장치의 제원인 중앙부폭 B, 폭 B'에 대한 변화로부터 수위저감의 효과를 크게 발생시켰지만, 풍파로부터는 중앙부폭 B, 폭 B'의 변화로는 유의파고값의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 길이 L을 변화시킨 경우는 중앙부폭 B, 폭 B' 변화시킨 경우보다 유의파고값이 더 저감하는 경향을 보였다.
- (2) 삼척항의 경우, 전술한 연구사례를 바탕으로 공진장치 연구중 대표적인 공진장치 형태 두 가지 경우를 현재의 삼척항과 비교한 결과이다. 항 입구에 직사각형 공진장치를 부착한 경우, 수위를 저감시켰던 지진해일에 경우와는 다르게 풍파에 의한 결과값은 현재의 방파제와 거의 유사한 값을 나타내다가 유의파고값이 더 커지는 결과를 보였다. 반면에, 새로운 형태의 공진장치를 부착한 경우, 항최내측에서 최대 0.22m-0.28m까지 유의파고값의 저감을 보여줌으로서 풍파에 대해서도 공진장치의 유효성을 입증하였다.



감사의 글

연구실에 제 이름이 소속되어있는지도 벌써 4년이라는 시간이 흘렀습니다. 처음에 저는 공부하 는것이 적성이 안맞다고 제 스스로 생각하고 다니던 대학 2학년때 연구실에 들어오게 되었습니다. 불연듯 생각납니다. 김도삼교수님께서 제게 "이번 학기 평점이 4.0 못받으면 연구실에서 나갈준비 하는게 좋을꺼같다."라고 농담섞인 말씀을 하셨습니다.

제 자존심에 불을 지폈습니다. 그래서 오기로 시작된 작은 도전이 저를 바꿔놓게되고 지금은 공 부하는 것에 꿈을 키우게 되었습니다. 저희 아버지께서도 "공부해라, 공부해라, 공부만이 살길이 다."이라고 항상 말하셔도 듣지 않던 저에게... 교수님께서 저희 4년을 값진 시간으로 만들어주셨 습니다. 감사합니다. 존경합니다. 교수님.

지내왔던 시간보다 앞으로 교수님과 지낼 시간들에 대해서 교수님께서 베풀어주신 은혜 갚아나 가겠습니다.

그리고 항상 저에게 웃어주시며 많은 조언을 해주시던 경갑수교수님, 따듯한 말을 건네주시며 면담을 해주시던 김태형교수님, 연구의 폭을 넓혀주시고 많은 관심으로 지켜봐 주신 이중우교수 님, 학부과정부터 많은 가르침을 주신 김태곤교수님, 이재하교수님. 감사합니다.

더 좋은 논문이 될 수 있도록 지도와 조언을 해주신 이광호 선배님, 항상 격려해주시는 김창훈 선배님, 항상 저에게 따듯한 말과 많은 도움을 주신 정욱진 선배님, 힘들때 힘이 되어주신 김동욱 선배님, 조금 더 많은 얘기를 나누고픈 신동훈 선배님, 매번 저에게 정답게 대해주시는 변찬식 선 배님, 정성호 선배님, 박광수 선배님, 최낙훈선배님, 이윤두 선배님, 정익한 선배님, 염승현 선배님 모두 감사의 말씀을 전합니다.

"일본갈려면 빨리가라" 조언해주신 진은이형, 연구실에 히어로 정현이형, 이제 유부녀가 된 예 쁜 민지누나, 자신감을 북돋아 준 진우형, 프로그램의 넘사벽이신 동진이형, "한판 할까!(게임^^)" 를 연신 외치던 승민이형, "괜찮타", "괜찮타" 해준 영훈이형, ??에서 !!가 될때까지 열심히 하는 경 환이형, 연구실 이끌어 가라~! 흥원이, 앞으로 가 더욱 기대되는 주현이, 내가 데리고 와서 지금 까지 옆에서 함께 많은 일들을 헤쳐나간 동지 승민이~ 모두 모두 감사합니다.

우리 09학번 (허)진영, 성철, 민성, 충원이, (정)진영 고~오맙다! 그리고 효재형, 성진이형, 배성이 형, 경석이형, 희재형, 정석이형, 양록이형, 웅기형 모두 모두 감사하고 사랑합니다.

"거기서 잘 지내고 있냐?"보고싶은 영현이, 강한 녀석 웅빈이, 나라말고 사람지키자 영원한 친 구 영환이, 니가 제일 멋지다 세원이, 입으로 할 수 있는거(말빨, 노래)는 니가 짱짱맨이다! 기환이, 돈 그만쓰고 짬뽕한사리 먹으러 가자 동욱이, 같이 힘내자! 승철아, 원펀맨 민구, 러시아 원피스를 꿈꾸며 샤샤, 코는 이태리 지원이, 너무 잘생긴 종만이, 일본가서 보자 진호야~ 모두 모두 고맙다.



마지막으로 우리 아버지, 어머니 그리고 우리 누나.

철없던 아들, 벌써 이렇게 커서 석사를 졸업하게 됬습니다. 60세이시면 이제 고생하실 나이도 지났는데 저하나 때문에 힘드시죠.. 제가 공부할때 항상 할머니때 아버지가 공부하시던 옛추억을 말씀하시면서 모든 지원을 해주겠다고, 아낌없는 나무가 되어주신다는 아버지. 사랑합니다. 그리 고 존경합니다. 그 많은 일들을 묵묵히 헤쳐나가신 어머니.. 곁에서 항상 제가 아들이자 친구 같 이 그렇게 은혜 다 갚아 갈께요. 어머니 사랑하고 존경합니다. 그리고 우리누나 공부안한다고 아 직도 스키마가 부족하다는데 더 열심히 해볼께 고맙고 누나도 사랑한다.

> 2016년 2월 전종혁 드림



