

공진장치에 의한 지진해일파의 제어에 관한 수치시뮬레이션(I) (임원항과 묵호항에 대해) Numerical Simulation on Control of Tsunami by Resonator (I) (for Imwon and Mukho ports)

이광호* · 전종혁** · 김도삼*** · 이윤두****

Kwang-Ho Lee*, Jong-Hyeok Jeon**, Do-Sam Kim*** and Yun-Du Lee****

요 지 : 항내로 침입하는 특정 주파수대의 파랑을 제어할 목적으로 파랑필터이론에 근거한 공진장치가 고안된 이후, 선박의 장주기운동을 제어하기 위하여 미국 Long Beach 항 J-부두와 이탈리아 로마 요트항 등지의 실해역에 공진장치가 적용된 사례가 보고되어 있다. 최근, 초장주기파 혹은 고립파로 근사된 지진해일파의 제어에 관한 공진장치의 유용성과 적용성은 확인되어 있지만, 실해역에서의 지진해일파를 대상으로 한 검토는 보고된 사례가 없다. 본 연구에서는 우리나라 동해안에 위치한 묵호항과 임원항에 기개발된 형상의 공진장치를 적용하여 1983년 동해중부지진해일과 1993년 북해도남서외해지진해일의 작용 하에 항내에서 지진해일고의 저감율을 COMCOT 모델에 의한 수치해석으로부터 검토하였다. 결과에 따르면 묵호항에서는 최대 40%~50% 정도, 임원항에서는 최대 21% 정도의 저감율을 각각 나타내었으며, 이로부터 실해역의 지진해일파에 대해서도 공진장치의 유용성을 확인할 수 있었다. 또한, 최적의 공진장치를 얻기 위해서는 현장 여건 등을 고려하여 공진장치의 형상, 배치 및 크기에 관해 다각도로 검토될 필요가 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 공진장치, 실해역, 지진해일파, 저감율, 묵호항, 임원항, 수치해석

Abstract : After the resonator on the basis of the wave-filter theory was designed to control the waves with a specific frequency range surging into the harbor, the several case with the use of resonator have been reported in some part of sea, including the port of Long Beach, USA, and yacht harbor at Rome, Italy in order to control the long-period wave motion from the vessels. Recently, the utility and applicability of the resonator has been sufficiently verified in respect of the control of tsunami approximated as the solitary wave and/or the super long-period waves. However, the case with the application of tsunami in the real sea have not been reported yet. In this research, the respective case with the use of existing resonator at the port of Mukho and Imwon located in the eastern coast of South Korea were studied by using the numerical analysis through the COMCOT model adapting the reduction rate of 1983 Central East Sea tsunami and 1993 Hokkaido Southwest off tsunami. Consequently, the effectiveness of resonator against tsunami in the real sea was confirmed through the reduction rate of maximum 40~50% at the port of Mukho, and maximum 21% at the port of Imwom, respectively. In addition, it was concluded that it is necessary to study about the various case with application of different shape, arrangement, and size of resonator in order to design the optimal resonator considering the site condition.

Keywords : resonator, real sea, tsunami, reduction rate of tsunami height, Mukho port, Imwon port, numerical analysis

1. 서 론

2011년 3월 11일 14시 46분 일본 동북지방의 태평양연안에서 발생한 규모 M9.0의 동일본대지진 및 지진해일파로 인

청난 인명피해(20,000여명의 사망자와 행방불명자)와 Photo 1과 같은 침수·범람(침수면적 535 km²)에 의한 가옥(22만호 중에 12만호는 전파) 및 사회간접자본의 물적피해를 입었다. 사후조사에 따르면 Ishimaki 지역에서는 최대침수고가 18 m,

*가톨릭관동대학교 토목공학과 부교수(Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Catholic Kwandong University)

**일본 나고야대학 대학원 환경학연구과 박사과정(Doctor Course Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan)

***한국해양대학교 건설공학과 교수(Corresponding author; Do-Sam Kim, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4463, Fax: +82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr)

****부산광역시 건설안전시험사업소 도로보수팀장(Deputy Director of Road Maintenance Team, Construction Safety Test Office, Busan Metropolitan City)



Photo 1. Damages by East Japan tsunami at Rikuzentakata in Japan (Mori et al., 2011).



Photo 2. Damaged caissons of Kamaishi Breakwater in Japan (Takahashi et al., 2011).

Miwako 지역에서는 최대치오름고가 29 m 정도로 추정되고 있다(Takahashi et al., 2011). 또한, Photo 2에 나타내는 바와 같이 세계 최대크기의 지진해일방파제로 알려진 Kamaishi 방파제의 북방파제가 파괴되어 지진해일방파제로의 기능에 대한 의문이 제기되고 있는 부분도 있었지만, 방파제에 의해 지진해일파의 도달시간이 약 6 min 정도가 지체되어 보다 긴 대피시간을 확보할 수 있었고, 또한 지진해일고가 13.7 m에서 8 m로 약 40% 정도로 감소되어 인적·물적피해에 최악의 상황을 막을 수 있었던 것으로 보고되어 있다(Mori et al., 2011; Takahashi et al., 2011).

우리나라의 경우도 일본 Akita현 근해에서 발생한 1983년 동해중부지진해일의 내습으로 동해안에 위치한 임원항에서 3~5 m의 치오름과 인적·물적피해(Kim et al., 2007a; Yoon et al., 2002; Cho et al., 2007)가 발생한 사례가 있고, Kim et al.(2007b)의 연구에 따르면 향후 일본의 지진공백역에서 발생할 수 있는 지진해일파에 의한 큰 피해가 예상된다.

한편, 이상과 같은 지진해일파를 제어할 목적으로 Fig. 1에 나타내는 공진장치를 기존방파제에 적용하는 방안이 강구되

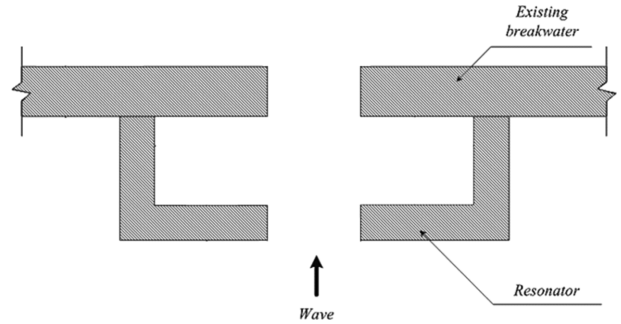


Fig. 1. Shape of resonator proposed firstly by Nakamura et al. (1985).



Fig. 2. Resonator constructed at Pier J of Long Beach port in USA to attenuate excessive ship motions (Poon et al., 1998; <http://earth.google.com>).

어 왔다(Nakamura et al., 2007; Nakamura and Latt, 2010; Latt and Nakamura, 2011; Lee et al., 2010, 2012b). 그러나, 이들의 연구에서는 모두 일정 수심역상에서 초장주기파(검토된 주기는 600~1,800 s) 혹은 고립파로 근사시킨 지진해일파를 대상으로 하였다. 일반적으로, 이러한 결과는 변동수심의 실험역에서 실제 지진해일파와 공진장치와의 상호간섭에 따른 수리특성과 크게 상이할 것으로 판단되며, 따라서 개발된 공진장치의 유용성은 실험역의 지진해일파를 대상으로 면밀히 검토될 필요가 있을 것이다.

한편, 기존 방파제에 부착하여 단주기파(Nakamura et al., 1985; Lee et al., 2010, 2012a), 장주기파(Nakamura et al., 1998; Nakamura and Latt, 2010; Poon et al., 1998; Lee et al., 2012c) 및 고립파(Lee et al., 2010, 2012b)를 제어하려는 목적으로 파동필터이론으로부터 개발된 공진장치의 형상을 Fig. 1에 제시한다(Nakamura et al., 1985). 이와 더불어 1분 오더의 크기를 갖는 선박의 장주기운동을 제어할 목적으로 미국 Long Beach 항 J부두에서 Fig. 2와 같은 공진장치(Poon et al., 1998)가, 그리고 이탈리아 Ostia에 있는 로마 요트항에 단주기파를 제어할 목적으로 Fig. 3과 같은 공진장치(Bellotti, 2007)가 각각 도입된 사례가 있다. 또한, Lee et al.(2010, 2012a, b, c)은 3차원수리모형실험과 3D-NIT(3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank) 모델에 기초



Fig. 3. Resonator constructed at Ostia-Rome yacht harbour in Italy (Bellotti, 2007; <http://earth.google.com>).

한 수치해석법으로부터 단주기파, 장주기파 및 고립파의 제어에 대해 Fig. 1과 같은 공진장치의 유용성을 검토하였다.

본 연구에서는 Fig. 1의 공진장치를 지금까지 검토되지 않은 실해역의 지진해일파동장에 적용하여 지진해일파의 제어에 관한 그의 유용성을 수치적으로 검토한다. 수치모의에는 지진해일파의 생성과 전파 등에 널리 사용되고 있고, 그의 타당성이 입증된 COMCOT(Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model) 모델(Liu et al., 1998)을 적용한다. 이 때, 1983년의 동해중부지진해일과 1993년의 북해도남서외해지진해일을 대상으로 하고, 대상으로 동해안의 묵호항과 임원항을 선정하여 공진장치의 설치유무에 따른 지진해일고의 저감율을 중심으로 지진해일고의 시·공간분포 및 침수·범람 등에서 공진장치의 유용성을 검토한다.

2. 수치이론에서 기초방정식

본 연구에 적용된 수치모형은 전술한 바와 같이 COMCOT 모델(Liu et al., 1998)이며, 이 모델에서 지배방정식은 다음의 식(1)~(3)에 나타내는 비선형천수방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

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

여기서, t 는 시간, x, y 는 수평방향의 좌표, g 는 중력가속도, η 는 수면변위, n_n 은 Manning의 조도계수, D 는 수심 h 와 지진해일파에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심, M, N 은 x, y 방향의 유량플럭스로 다음과 같이 정의된다.

$$M \equiv \int_{-h}^{\eta} u dz = U(h + \eta) = UD \quad (4)$$

$$N \equiv \int_{-h}^{\eta} v dz = V(h + \eta) = VD \quad (5)$$

3. 수치모델의 검증

우리나라 동해안에 위치한 임원항은 1983년 5월 26일 일본 Akita현 앞바다에서 발생한 M7.7의 동해중부지진에 의해 발생한 지진해일(동해중부지진해일)의 내습으로 인명 및 침수피해를 입은 사례가 있다. 본 연구에서는 COMCOT 모델(Liu et al., 1998)로부터 산정되는 지진해일고 및 침수·범람역의 정도를 검증하기 위하여 동해중부지진해일에 의해 발생한 임원항 인근에서 파변동 및 침수·범람역을 수치적으로 계산하며, 그 결과를 Lee et al.(2002)와 비교한다. 이 때, 단층 파라미터로는 Table 1에 나타내는 Aida(1984) 모델을 적용하며, 격자크기 등의 계산조건은 Table 2에 제시된 바와 같다.

Figs. 4와 5는 임원항에서 최고파의 공간분포와 침수·범람역을 나타낸 결과이며, Fig. 4는 본 연구와 동일한 Aida(1984) 모델로부터 비선형천수방정식에 근거한 유한차분수치

Table 1. Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake (Aida, 1984)

Faults	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	Strike angle (°)	Dip angle (°)	Slip angle (°)	Length (km)	Width (km)	Dislocation (km)
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. Computation conditions

Number of area	Number of grids	Grid size (m)	Coord. system	SWE type
Area No.1	1333 × 1629	1215	Cartesian	Linear
Area No.2	687 × 1182	405		
Area No.3	1098 × 1101	135		
Area No.4	1218 × 1068	45		
Area No.5	1368 × 1281	15		
Area No.6	408 × 393	5		Nonlinear

SWE: Shallow Water Equation

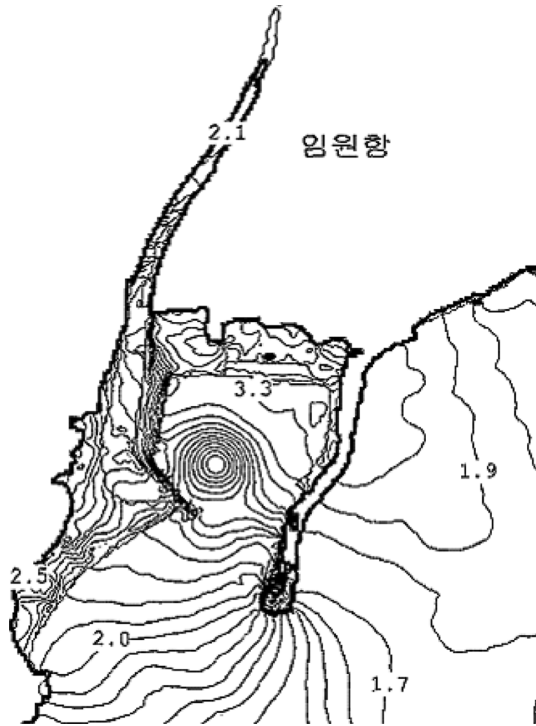


Fig. 4. Simulation of inundation at Imwon port during 1983 Central East Sea tsunami (Lee et al., 2002).

모형으로부터 얻어진 Lee et al.(2002)의 수치결과를, Fig. 5는 COMCOT 모델(Liu et al., 1998)로부터 얻어진 본 수치결과를 각각 나타낸다. 두 수치해석결과를 비교하면 항내·외측에서 최고파 및 침수·범람역이 거의 동일한 것을 확인할 수 있고, 특히 항내 좌측에서 발생하는 지진해일고의 집중현상이 두 해석결과에서 동일하게 관찰된다는 것을 알 수 있다. 그러나, 방파제의 좌측 항입구부에서 최고파는 거의 동일한 값을 나타내지만, 공간분포가 약간 상이한 것을 볼 수 있다. 이는 해도와 절점간격 등의 차이에 의해 발생된 것으로 판단되며, 전반적으로 침수·범람역의 범위 및 최고파의 값 등이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있고, 따라서 본 연구에서 적

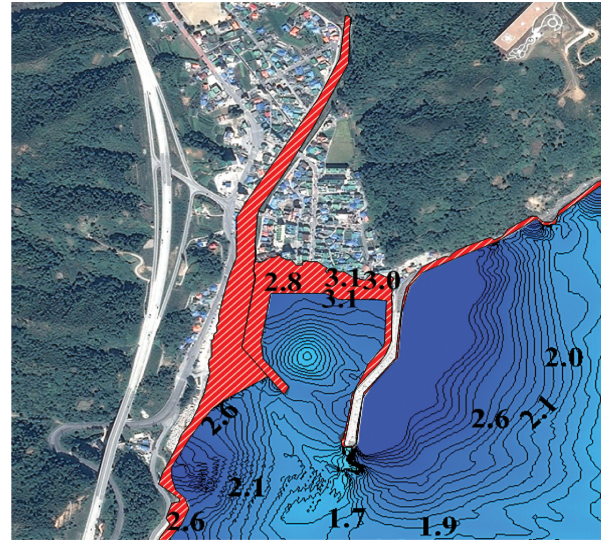


Fig. 5. Present simulation by COMCOT model (Liu et al., 1998).

용하는 COMCOT 모델(Liu et al., 1998)에 의한 수치해석결과와 타당성을 입증할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 실해역에서 지진해일파의 제어에 대한 공진장치의 유효성 검토

4.1 묵호항

4.1.1 수심과 지형 및 공진장치

최신의 수치해도와 Google earth pro로부터 묵호항의 인근 해역에서 수심과 주변의 지형데이터를 각각 획득하였고, 공진장치의 유용성은 1993년 7월 12일 일본 북해도 Okusiri 섬에서 발생한 북해도남서외해지진해일을 대상으로 검토된다. 이 때, 단층파라미터(Takahashi et al., 1994) 및 계산영역 등의 계산조건은 Tables 3, 4에 제시된 바와 같다. Fig. 6은 북해도남서외해지진해일이 일본 북해도 Okusiri 섬에서부터 동해를 전파하는 과정과 계산영역을, Fig. 7은 묵호항내·외에서 수심 및 주변지형의 표고를 각각 제시하며, 수심은 (+) 값으

Table 3. Computation conditions

Number of area	Number of grid	Grid size (m)	Coord. system	SWE type
Area No.1	1333 × 1629	1215	Cartesian	Linear
Area No.2	687 × 1182	405		
Area No.3	1098 × 1101	135		
Area No.4	975 × 873	45		
Area No.5	1314 × 1311	15		
Area No.6	1116 × 891	5		Nonlinear

Table 4. Fault parameters for 1993 Hokkaido Southwest Off earthquake (Takahashi et al., 1994)

Faults	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	Strike angle (°)	Dip angle (°)	Slip angle (°)	Length (km)	Width (km)	Dislocation (km)
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

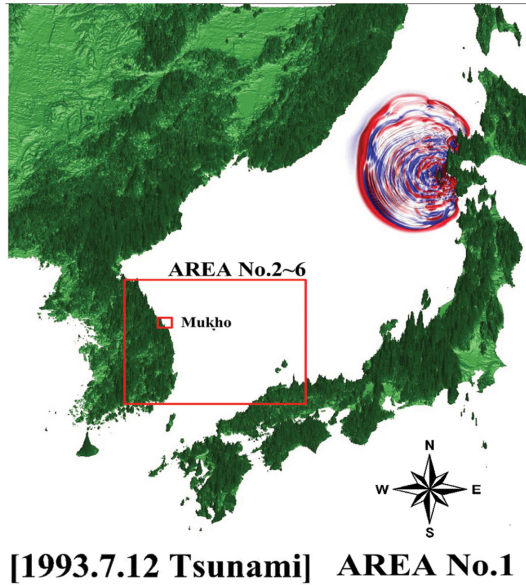


Fig. 6. Computation areas.

로, 주변지형의 표고는 (-) 값으로 표기되어 있다. 계산은 묵호항에서 지진해일파의 영향이 충분히 고려될 수 있도록 지진해일파의 발생 시부터 180분 동안 수행되었다. 그리고, Fig. 8에 본 계산에 적용된 공진장치의 형상과 크기를 나타내며, 이는 $d_1 = 20$ m, $d_2 = 23$ m, $l = 335$ m, $L = 200$ m, $B = 735$ m, $B' = 200$ m($B = 2B' + l$)의 크기를 갖는다.

4.1.2 수치해석결과

(1) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 9는 지진해일파의 내습 시 묵호항내·외에서 최고파의 공간분포 및 침수·범람역을 나타낸 것이며, Fig. 9(a)가 공진장치가 부착되지 않은 현상태를, Fig. 9(b)가 항입구부에 전술한 Fig. 8의 공진장치가 부착된 경우이다. 그림을 살펴보면 항내는 우측 외곽방파제에 의한 지진해일파의 차단으로 직접

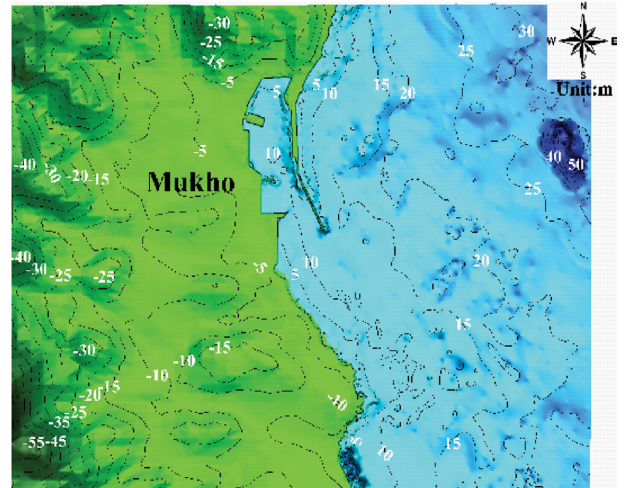


Fig. 7. Spatial distribution of water depth and terrain elevation around Mukho port.

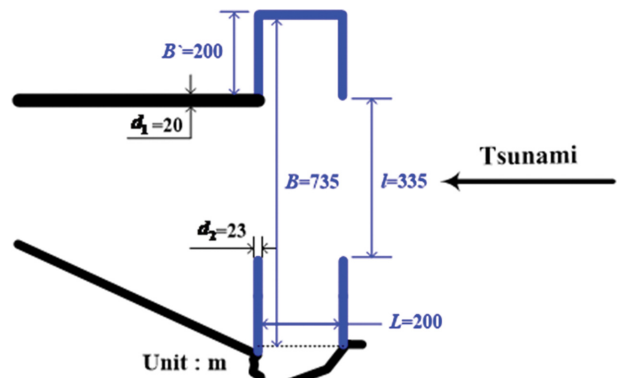


Fig. 8. Size and shape of resonator installed to the existing breakwater of Mukho port.

적인 영향을 받지 않고, 항입구부에서 지진해일파의 반사 및 회절로 인하여 파변동이 발생된다. 두 경우 모두 한섬해수욕장 부근에서 최고파 4.0 m가 발생되며, 항내측의 경우는 공

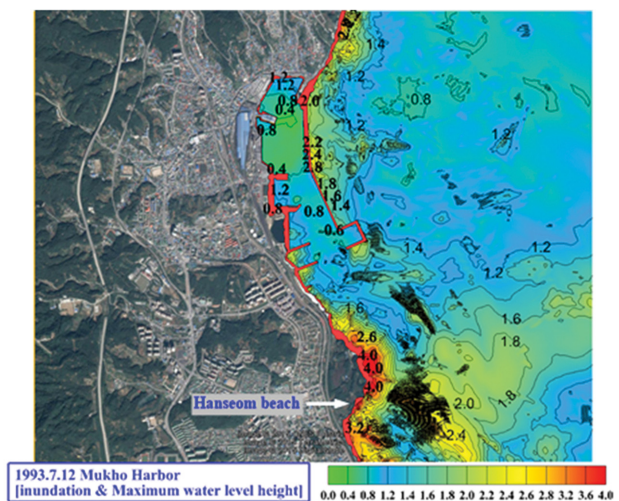
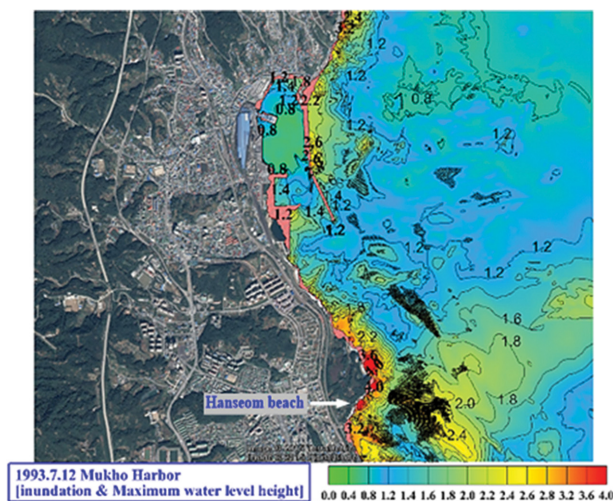


Fig. 9. Maximum tsunami water level at Mukho port whether the resonator is installed or not.

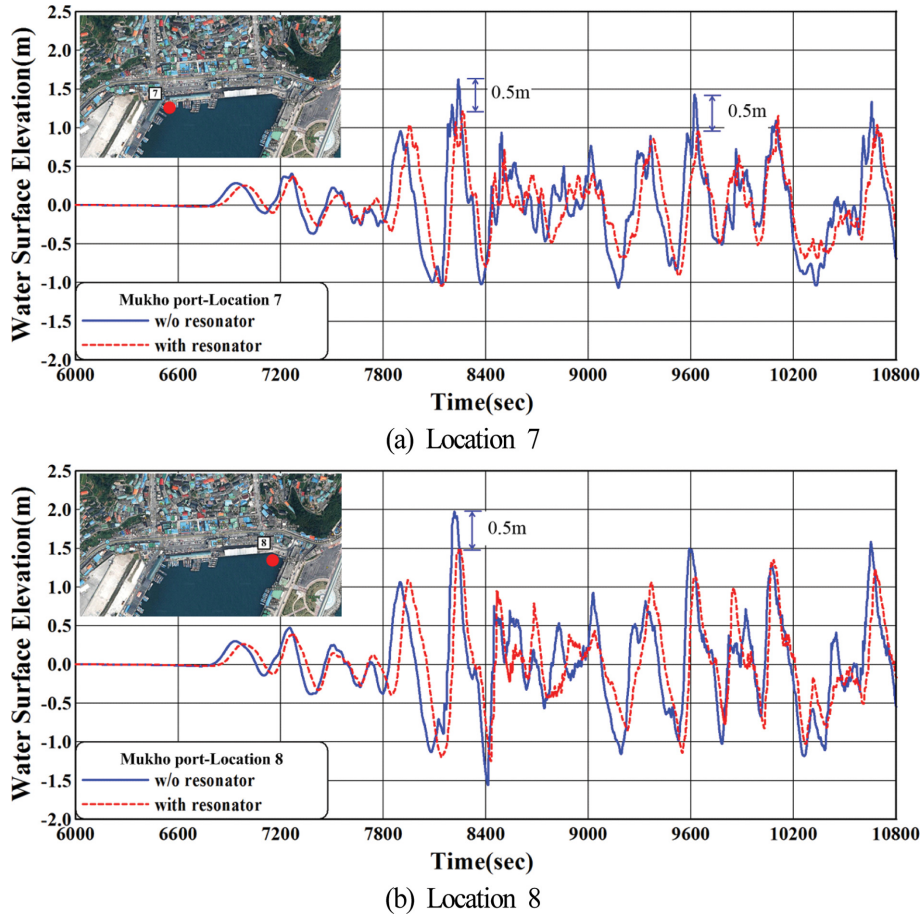


Fig. 10. Time variation of tsunami water elevation at the most inside of Mukho port whether the resonator is installed or not.

진장치가 설치된 경우가 전체적으로 최고파가 저감되고, 또한 침수·범람면적이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

(2) 지진해일파의 시간변동

Fig. 10은 그림 중의 삽도에 표기된 항의 최대측 7과 8번 위치에서 파변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 현재 묵호항의 경우를, 빨간 파선은 Fig. 8에서 $B = 735$ m, $B' = 200$ m, $L = 200$ m의 크기를 갖는 공진장치가 부착된 경우이다. 그림으로부터 공진장치의 경우가 7과 8번 위치 모두 약 8,200 s(137 min)에서 최대 0.5 m의 파 저감을 각각 나타내었으며, 이는 25~30% 정도 저감된 결과이다. 이로부터 실패역의 지진해일파에 대해 공진장치의 유용성이 나타난다.

4.1.3 공진장치에서 폭의 변화에 따른 저감효과

(1) 공진장치의 폭

Fig. 11은 공진장치에서 폭의 변화에 따른 지진해일파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 Fig. 8에서 제시된 바와 같은 $B = 735$ m, $B' = 200$ m, $L = 200$ m의 공진장치를 기준으로, 길이 $L = 200$ m를 고정하고 중앙부 폭을 $B = 835$ m, 635 m($B' = 100$ m, 300 m)로 변화시킨 경우에 공진장치의 형상과 크기를 나타내며, 반면 $d_1 = 20$ m, $d_2 = 23$ m는 일정하

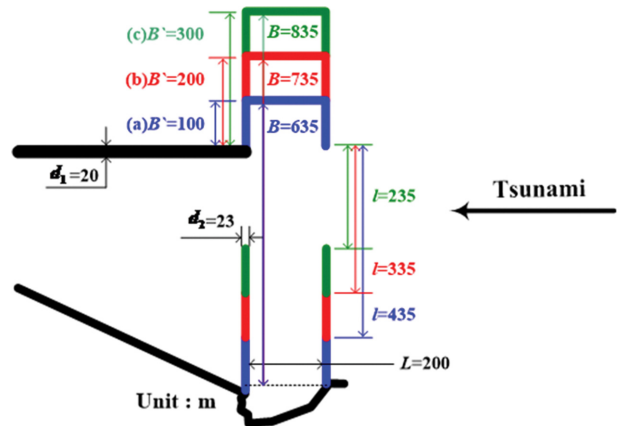


Fig. 11. Size and shape of resonator with the change of width B or B' (for the fixed $L = 200$ m).

게 유지된다.

(2) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 12는 공진장치에서 중앙부의 폭 B 를 변화시킨 경우 최고파의 공간분포와 침수·범람역을 나타낸 것이며, Fig. 12(a)가 $B = 635$ m($B' = 100$ m), (b)가 $B = 835$ m($B' = 300$ m)에 대한 경우이다. 여기서, 후술하는 Fig. 14에서 $B = 735$ m($B' = 200$ m)의 경우도 포함하여 고찰한다. 그림으로부터 세

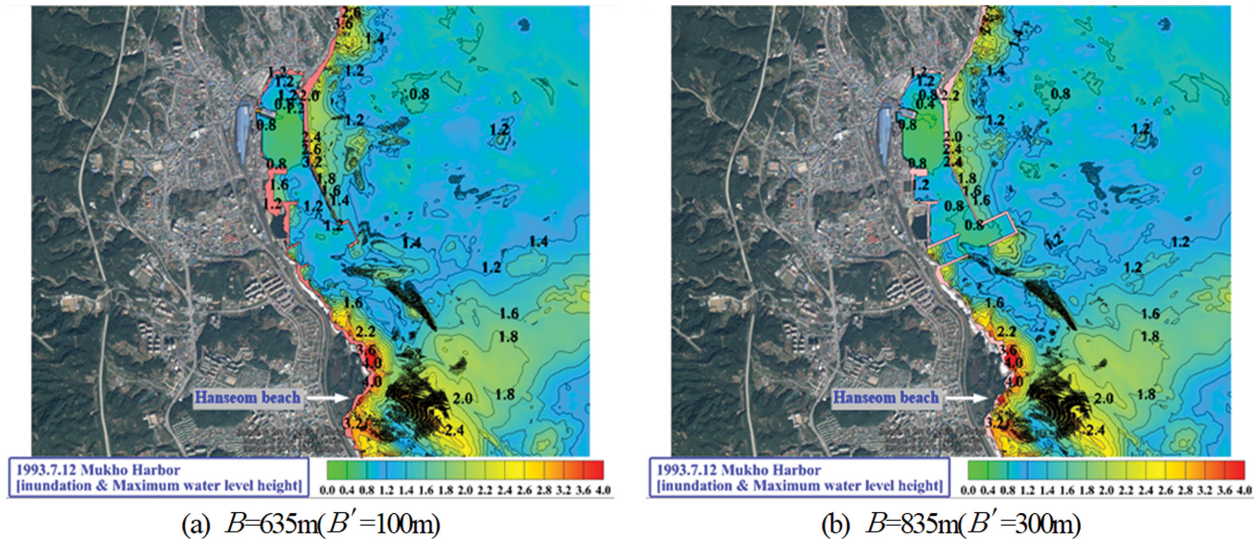


Fig. 12. Comparison of maximum tsunami water level with the change of resonator width B at Mukho port (for the fixed $L = 200$ m).

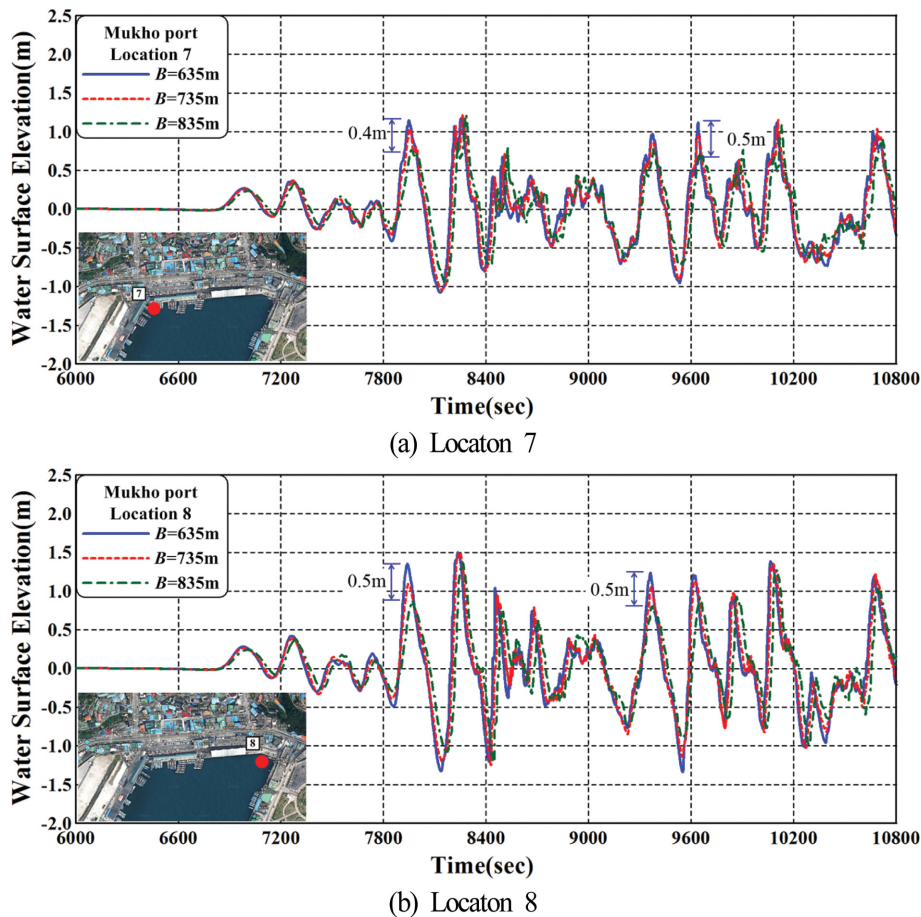


Fig. 13. Time variation of tsunami water level with the change of resonator width B at Mukho port (for the fixed $L = 200$ m).

경우 모두 항의측 최고파의 변동에서는 거의 차이가 나타나지 않으며, 회절을 포함한 지진해일파의 변형으로 한섬해수욕장 부근에서 지진해일고가 4.0 m에 도달된다. 항의 최내측에서 폭의 변화에 따른 최고파의 변화를 살펴보면 Fig. 12(b)인 $B = 835$ m($B' = 300$ m)의 경우가 가장 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 공진장치의 폭이 넓을수록 최

고파가 감소하는 반비례 관계를 나타내며, 일정수심의 경우에 공진장치의 폭이 증가할수록 지진해일파의 에너지가 공진장치에 포획되는 양이 증가되기 때문에 항내에서 지진해일고가 작아진다는 Lee et al.(2010, 2012c)의 결과와 일치한다.

(3) 지진해일파의 시간변동

전술한 Fig. 10과 같이 그림 중에 표기된 항의 최내측

Locations 7과 8에서 파변동에 대한 시계열을 나타낸 것이 Fig. 13이다. 그림에서 파란 실선은 폭 $B = 635$ m, 빨간 파선은 폭 $B = 735$ m, 그리고 초록 파선은 폭 $B = 835$ m의 공진장치를 각각 부착한 결과이며, 빨간 파선의 결과는 Fig. 10에서 제시된 시계열의 결과이다. 그림으로부터 Location 7의 경우는 약 9,700 s(161 min)에서 폭 $B = 835$ m와 $B = 635$ m의 경우와 비교하면 $B = 835$ m의 경우가 0.5 m 정도 감소되며, 이는 45% 정도 저감된 결과이다. Location 8의 경우에도 약 8,220 s(137 min)와 9,400 s(156 min)에서 폭 $B = 835$ m의 경우가 0.5 m 정도 감소되며, 이는 35% 정도 저감된 결과이다. 결과적으로, 폭이 가장 넓은 $B = 835$ m일 때 파 저감의 효과가 가장 탁월하다는 것을 알 수 있다.

또한, 공진장치가 미부착된 현재의 묵호항에 대한 Fig. 10의 결과와 Fig. 13에서 폭 $B = 835$ m의 경우를 비교하면 공진장치의 부착으로 최고파가 1.6 m와 2.0 m에서 약 0.8 m 정도 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 40%~50% 정도 저감된 결과이다.

이상에서 공진장치의 부착여부에 따른 파변동과 공진장치 폭의 변화에 따른 파변동으로부터 공진장치가 부착된 경우가 작은 파변동을 나타내고, 또한 공진장치의 폭이 증가할수록 파변동이 작아지는 결과를 도출할 수 있었다. 이러한 결과는 고립파 및 현지의 장주기파에 대해 공진장치의 유용성을 검토한 Lee et al.(2010, 2012c)과 일치하며, 따라서 실해역의 실제 지진해일파에 대해서도 공진장치의 유용성이 확인된다.

4.1.4 공진장치에서 길이의 변화에 따른 저감효과

(1) 공진장치의 길이

Fig. 14는 공진장치의 길이에 따른 지진해일파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 Fig. 8의 공진장치 $B = 735$ m,

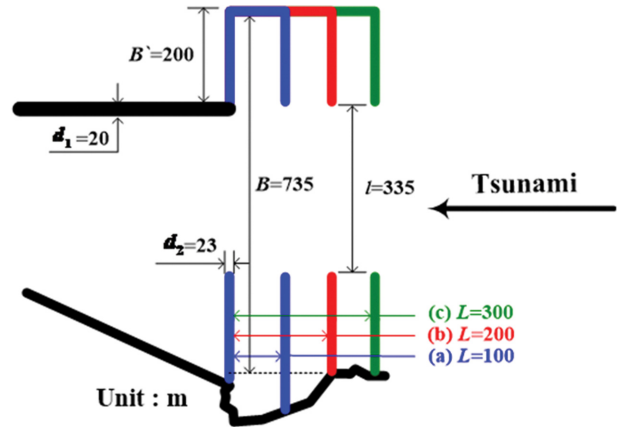


Fig. 14. Size and shape of resonator with the change of length L (for the fixed $B = 735$ m or $B' = 200$ m).

$B' = 200$ m, $L = 200$ m의 경우를 기준으로, 중앙부의 폭을 $B = 735$ m($B' = 200$ m)로 고정하고 길이 L 을 100 m, 300 m로 변화시킨 경우이며, 여기서 $d_1 = 20$ m, $d_2 = 23$ m는 일정하게 유지되었다. 이하에서는 공진장치 길이의 변화에 따른 지진해일파의 제어효과를 검토한다.

(2) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 15는 동해중부지진해일 내습 시 묵호항 주변에서 최고파의 공간분포 및 범람·침수역을 나타낸 결과이다. 이의 계산에서 공진장치는 Fig. 14에서 제시된 바와 같이 모두 $B = 735$ m($B' = 200$ m)로 고정되었으며, Fig. 15(a)는 $L = 100$ m, Fig. 15(b)는 $L = 300$ m의 경우이고, 여기서 $L = 200$ m에 대한 Fig. 11의 경우도 함께 고찰한다.

그림으로부터 세 경우 모두 항외측 및 항의 최내측에서는 침수·범람의 면적과 최고파의 공간변동에 유의한 차이가 거의 나타나지 않지만, 항내의 중간부분에서는 $L = 300$ m의 경우가 $L = 100$ m의 경우보다 다소 작은 값을 나타내는 것을

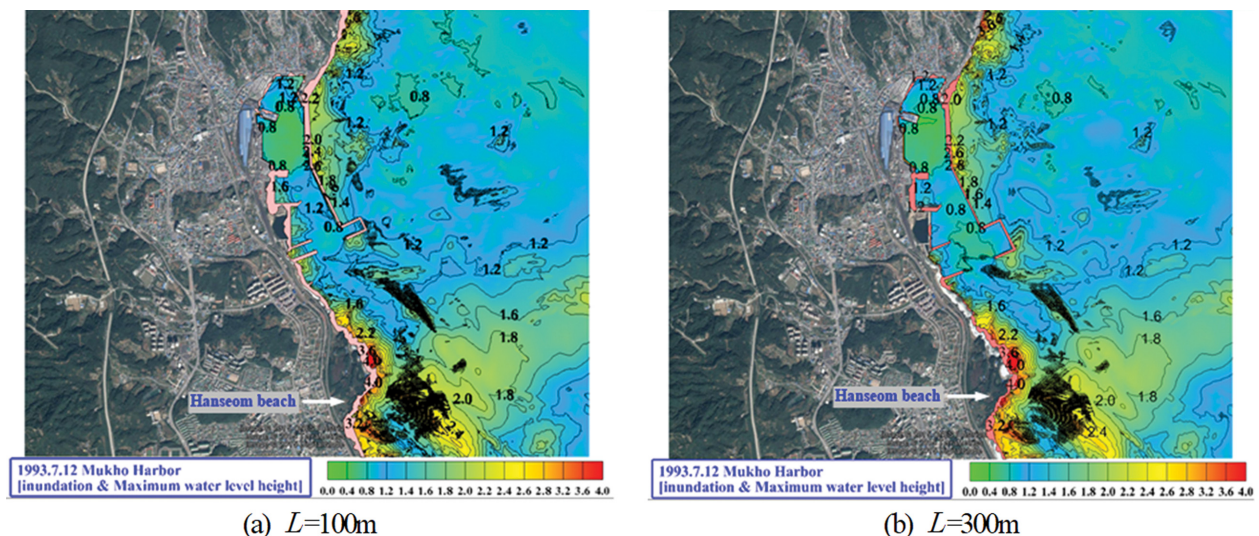


Fig. 15. Comparison of maximum tsunami water level with the change of resonator length L at Mukho port (for the fixed $B = 735$ m or $B' = 200$ m).

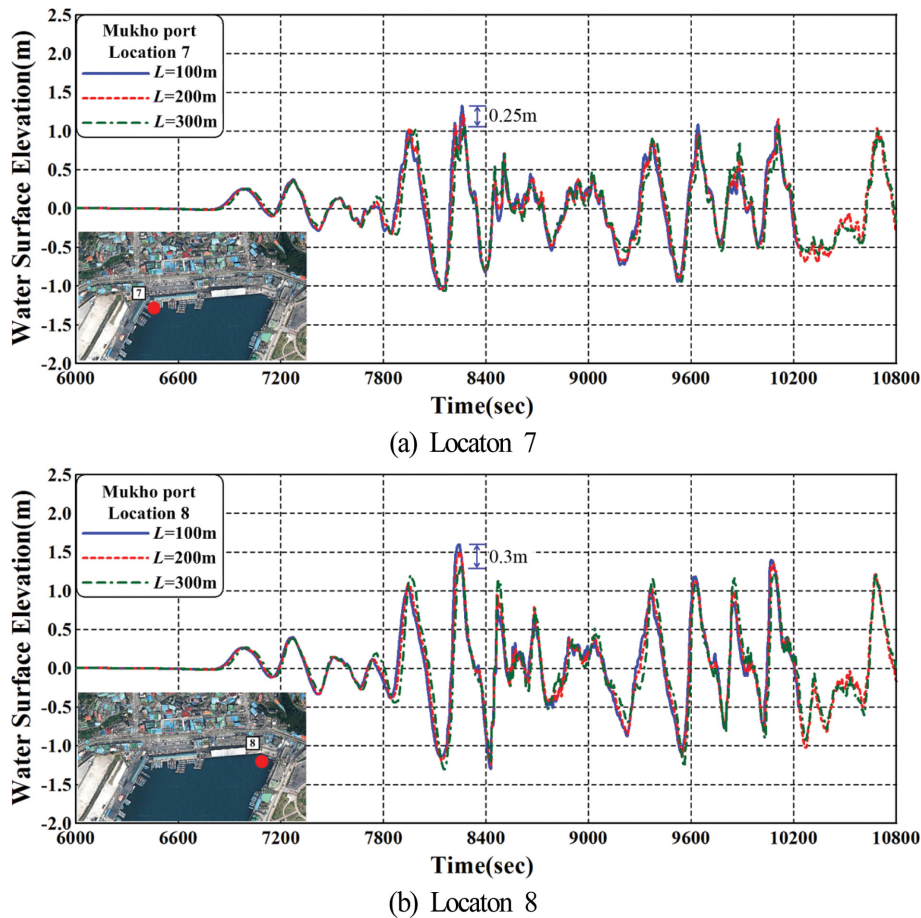


Fig. 16. Time variation of tsunami water level with the change of resonator length L at Mukho port (for the fixed $B = 735$ m or $B' = 200$ m).

알 수 있다.

(3) 지진해일파의 시간변동

Fig. 16은 그림 중에 표기된 항의 최내측 Locations 7과 8에서 파변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 길이 $L = 100$ m, 빨간 파선은 길이 $L = 200$ m, 그리고 초록 파선은 길이 $L = 300$ m의 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 Location 7의 경우 약 8,300 s(138 min)에서 $L = 300$ m와 $L = 100$ m의 결과를 비교하면 최고파가 0.25 m의 차이를 나타내며, 이로부터 $L = 300$ m의 경우가 $L = 100$ m의 경우보다 17% 정도 파가 저감되는 결과를 나타낸다. Location 8에서는 약 8,300 s(138 min)에서 $L = 300$ m와 $L = 100$ m의 차이로 0.3 m가 주어지며, 이는 18% 정도로 저감된 결과이다. 결과적으로, 길이가 $L = 300$ m일 때 파 저감에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있지만, 전술한 폭 B 의 변화에 따른 저감을 보다는 다소 작은 값을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

이상에서 공진장치 폭의 변화에서 기술한 바와 같이 공진장치의 유무에 따른 파변동과 공진장치 길이의 변화에 따른 파변동으로부터 공진장치가 부착된 경우가 작은 파변동을 나타내고, 또한 공진장치의 길이가 증가할수록 파변동이 작아지는 결과를 얻을 수 있었다. 역시, 이러한 결과는 고립파 및 현지의 장주기파에 대해 공진장치의 유용성을 검토한 Lee et

al.(2010, 2012c)과 일치한다. 그러나, Lee et al.(2010, 2012c)에서는 공진장치의 폭의 변화보다는 길이의 변화가 파 저감에 보다 큰 영향을 미치지만, 본 연구에서는 반대로 길이의 변화가 폭의 변화보다 파 저감에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것은 항의 입구부에서 설치된 공진장치에 입사하는 지진해일파의 입사각과 관련이 있는 것으로 여겨지며, Lee et al.(2010, 2012c)의 경우는 고립파와 장주기파가 직각으로 입사하는 반면, 본 연구에서는 주변지형과 구조물의 끝단에서 발생하는 회절변형으로 경사지게 입사되기 때문인 것으로 판단된다.

여기서, 본 계산에서는 묵호항의 현지 여건상 공진장치의 길이변화를 크게 할 수 없었다. 실제로 공진장치를 초장주기파(검토된 주기가 600 s~1,800 s)에 대해 공진장치의 유용성을 검토한 Latt and Nakamura(2011)에 따르면 리아스식 해안을 따라 세장형으로 발달된 만내에서 공진장치의 길이를 2 km 정도로 고려하여 있는 점을 감안하면 묵호항에 적용된 공진장치의 길이는 상대적으로 매우 짧은 것으로 여겨지며, 따라서 항내의 파변화에 공진현상이 충분히 발휘된 결과로는 판단되지 않는다. 또한, 본 계산에서는 한정된 공진장치의 폭과 길이에 대해 검토되었지만, 공진장치의 크기를 최적화시키기 위해서는 보다 많은 경우의 수에 대해 계산이 수행될 필

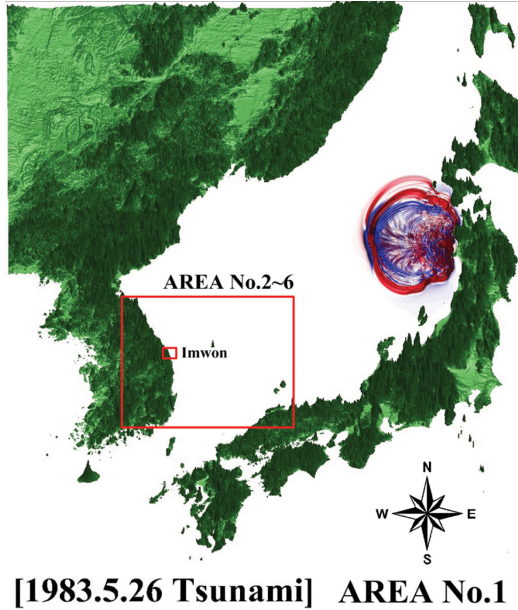


Fig. 17. Computation areas.

요가 있을 것이다.

4.2 임원항

4.2.1 수심과 지형 및 공진장치

전술한 묵호항의 경우와 동일하게 최신의 수치해도와 Google earth pro로부터 대상 해역의 수심과 항 주변에서 지형데이터를 각각 획득하였고, 지진해일파로는 1983년 5월 26일 M7.7의 동해중부지진해일을 대상으로 하였다. 이의 단층파라미터와 계산조건은 전술한 Tables 3, 4와 동일하다. Fig. 17은 동해중부지진해일이 일본 Akita현 앞바다에서 동해를 전파하는 과정과 계산영역을, Fig. 18은 임원항 주변에서 해역의 수심과 주변지형의 표고를 제시하며, 수심은 (+) 값으로, 주변지형은 (-) 값으로 각각 표기되어 있다. 계산시간은 임원항에서 지진해일파의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진해일파의

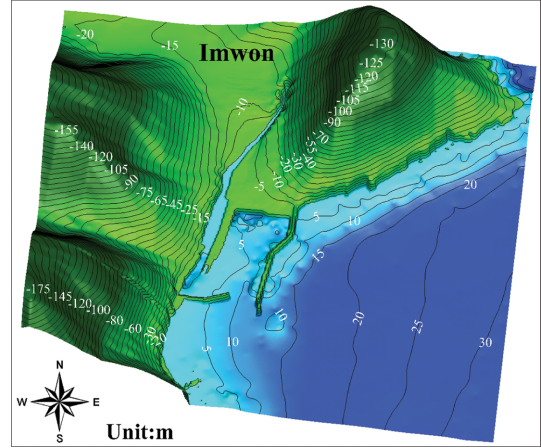


Fig. 18. Spatial distribution of water depth and terrain elevation around Imwon port.

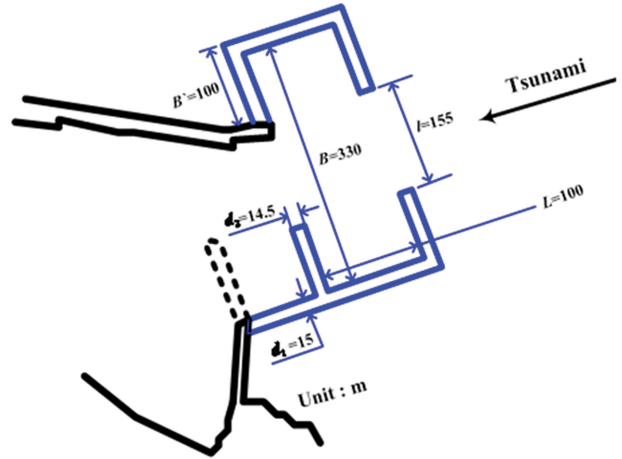
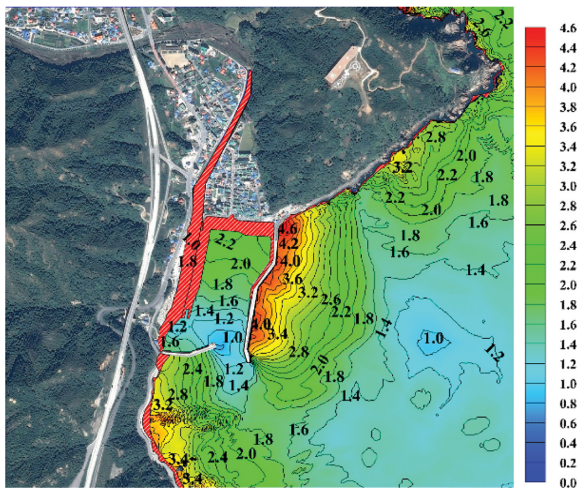
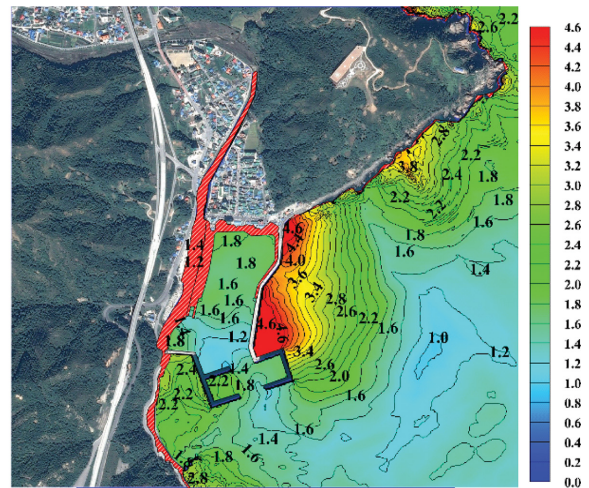


Fig. 19. Size and shape of resonator installed to the existing break-water of Imwon port.

발생부터 180분 동안 수치모의되었다. 그리고, Fig. 19에는 본 계산에 적용한 공진장치의 형상과 크기를 나타내며, 이는



(a) Without resonator



(b) With resonator

Fig. 20. Maximum tsunami water level at Imwon port whether the resonator is installed or not.

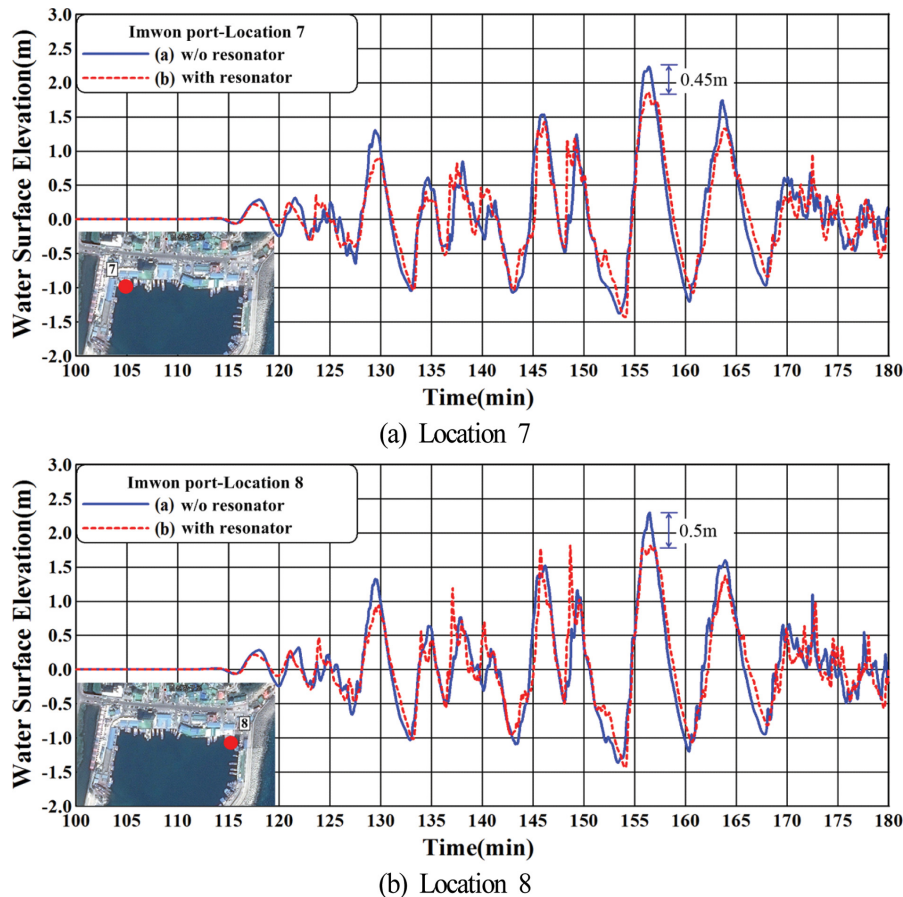


Fig. 21. Time variation of tsunami water surface elevation at the most inside of Imwon port.

$d_1 = 15$ m, $d_2 = 14.5$ m, $l = 155$ m, $L = 100$ m, $B = 330$ m, $B' = 100$ m ($B = 2B' + l$)의 크기를 가지며, 파선은 방파제가 제거되는 부분을 나타낸다.

4.2.2 수치해석결과

(1) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 20는 동해중부지진해일 내습 시 임원항내 및 주변 해역에서 지진해일파에 대한 최고파의 공간분포 및 침수·범람역을 나타낸 것으로, Fig. 20(a)가 공진장치가 부착되지 않은 현상태를, Fig. 20(b)가 항입구에 공진장치가 부착된 경우이며, 이 때 적용된 공진장치의 크기는 Fig. 19에 제시된 바와 같이 $B = 330$ m, $B' = 100$ m, $L = 100$ m이다. 그림을 살펴보면 임원항내에는 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일파가 차단되어 직접적인 영향을 받지 않고, 주로 항입구부에서 지진해일파의 반사 및 회절로 인하여 항내의 파면동이 발생된다. 두 경우 모두 외측방파제 부근에서 최고파 4.6 m 정도가 발생되며, 항내측에서는 공진장치가 설치된 경우가 전체적으로 최고파가 저감되고, 또한 침수·범람 면적이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

(2) 지진해일파의 시간변동

Fig. 21은 그림 중의 삽도에 표기된 임원항의 최내측 7과 8번 위치에서 파면동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선

은 현재 임원항의 경우를, 빨간 파선은 Fig. 19의 공진장치를 부착한 경우이다. 그림으로부터 공진장치가 부착된 경우가 7과 8번 위치 모두 약 156 min에서 0.5 m 정도의 최고파가 각각 저감되며, 이는 현 상태의 최고파 2.3 m에 비교하면 21% 정도의 저감율을 나타낸다. 역시, 묵호항의 경우와 동일하게 기존방파제 입구부에 공진장치를 설치하는 것이 지진해

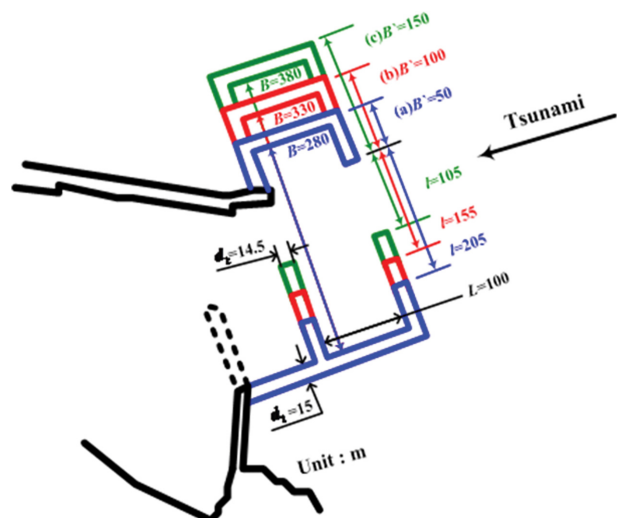


Fig. 22. Size and shape of resonator with the change of width B or B' (for the fixed $L = 100$ m).

일파의 저감에 유용하다는 것을 확인할 수 있다.

4.2.3 공진장치에서 폭의 변화에 따른 저감효과

(1) 공진장치의 폭

Fig. 22는 공진장치에서 폭의 변화에 따른 지진해일파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 Fig. 19의 공진장치에서 $B = 330$ m, $B' = 100$ m, $L = 100$ m를 기준으로, 길이 $L = 100$ m

를 고정하고 중앙부의 폭을 $B = 380$ m, 280 m($B' = 50$ m, 150 m)로 변화시킨 경우에 공진장치의 형상과 크기를 각각 나타내며, 이 때 $d_1 = 15$ m, $d_2 = 14.5$ m는 일정하게 유지된다.

(2) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 23은 공진장치에서 중앙부의 폭 B 를 변화시킨 경우 지진해일파에서 최고파의 공간분포와 침수·범람역을 나타낸 것

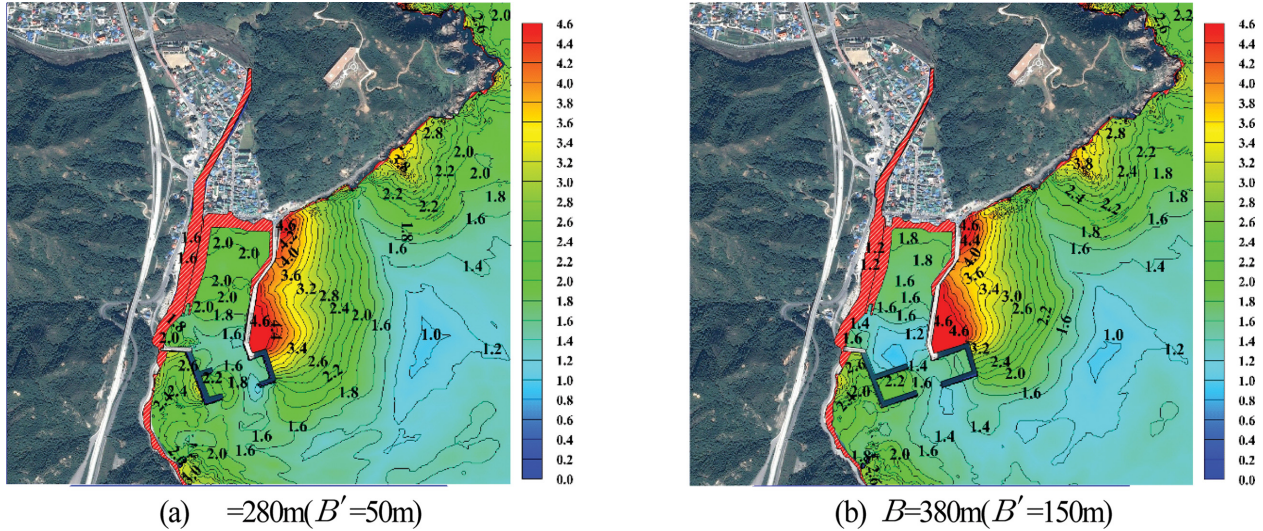
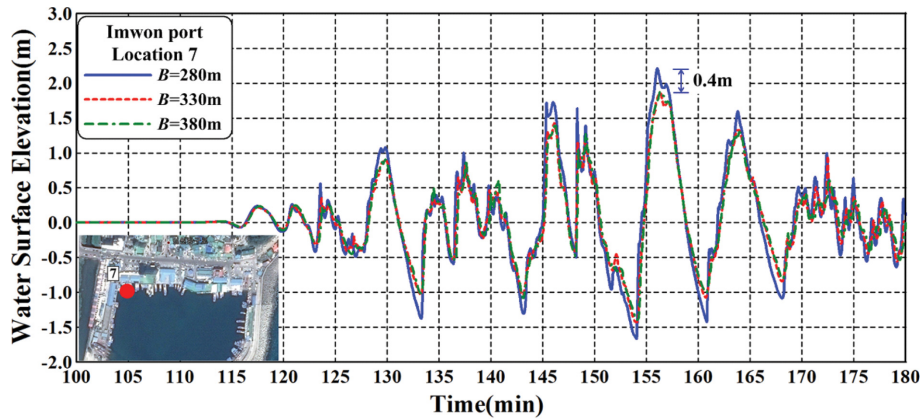
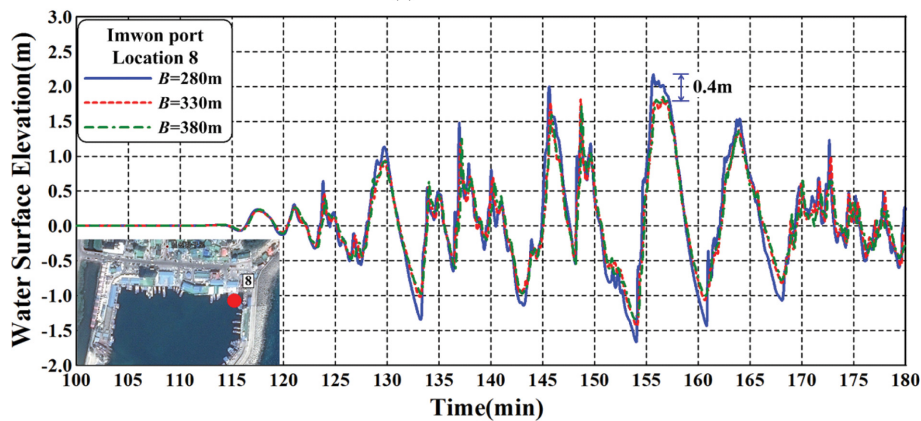


Fig. 23. Comparison of maximum tsunami water level with the change of resonator width B at Imwon port (for the fixed $L = 100$ m).



(a) Location 7



(b) Location 8

Fig. 24. Time variation of tsunami water level with the change of resonator width B at Imwon port (for the fixed $L = 100$ m).

이며, Fig. 23(a)가 $B = 280$ m ($B' = 50$ m), (b)가 $B = 380$ m ($B' = 150$ m)에 대한 경우이다. 여기서는 Fig. 25에서 $B = 330$ m ($B' = 100$ m)의 경우도 포함하여 함께 고찰하는 것으로 한다. 그림으로부터 세 경우 모두 전술한 바와 같이 항내는 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일파가 차단되기 때문에 직접적인 영향을 받지 않으며, 지진해일파의 회절변형을 포함한 파랑변형과 공진장치 내 공진현상이 항내 파변동에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 공진장치의 폭 B 의 변화에 따른 최고파의 변화를 살펴보면 $B = 380$ m ($B' = 150$ m)와 $B = 330$ m ($B' = 100$ m)의 두 경우는 항내측에서 거의 동등한 크기의 최고파를 나타내며, 두 경우는 공진장치의 폭이 제일 작은 $B = 280$ m ($B' = 50$ m)의 경우보다 작은 최고파의 공간분포를 나타낸다. 따라서, 임원항의 경우에도 전술한 바와 같은 공진장치의 유용성을 확인할 수 있고, 더불어 공진장치에서 폭 B 가 증가될수록 지진해일파가 저감되지만, $B = 380$ m ($B' = 150$ m)와 $B = 330$ m ($B' = 100$ m)의 경우는 값의 차이가 크지 않기 때문에 다른 많은 폭에 대한 검토로부터 큰 저감을 나타내는 합리적인 값을 선정할 필요가 있을 것이다.

(3) 지진해일파의 시간변동

전술한 Fig. 21에서와 동일한 위치인 항의 최내측 7과 8번 위치에서 파변동의 시계열을 나타낸 것이 Fig. 24이다. 그림에서 파란 실선은 폭 $B = 280$ m, 빨간 파선은 폭 $B = 330$ m, 그리고 초록 파선은 폭 $B = 380$ m의 공진장치를 부착한 결과이다. 그림으로부터 7번과 8번 위치 모두 약 156 min에서 폭 $B = 380$ m의 경우는 $B = 280$ m보다 최고파가 0.4 m 정도로 저감되었고, 이는 $B = 280$ m의 최고파 2.2 m에서 18% 정도 저감율을 각각 나타내며, 전반적으로 파변동의 극대치에서 유사한 크기의 저감율을 확인할 수 있다. 그리고, 공진장치가 없는 현상태의 임원항과 폭 $B = 380$ m의 공진장치를 부착한 경우를 비교하면 $B = 380$ m의 경우 최고파가 약 0.5 m 정도로 감소되며, 이는 현상태의 최고파 2.3 m에서 21% 정

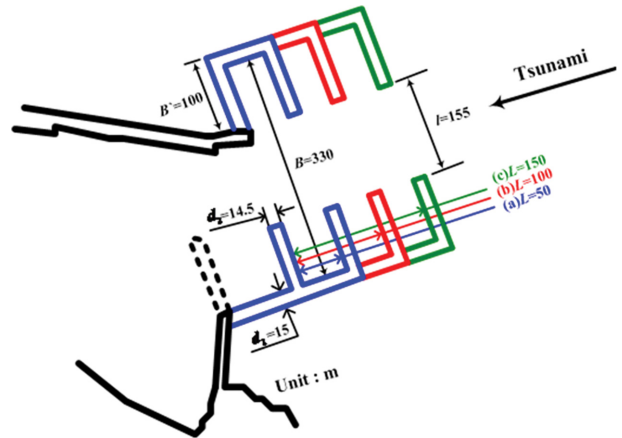


Fig. 25. Size and shape of resonator with the change of length L (for the fixed $B = 330$ m or $B' = 100$ m).

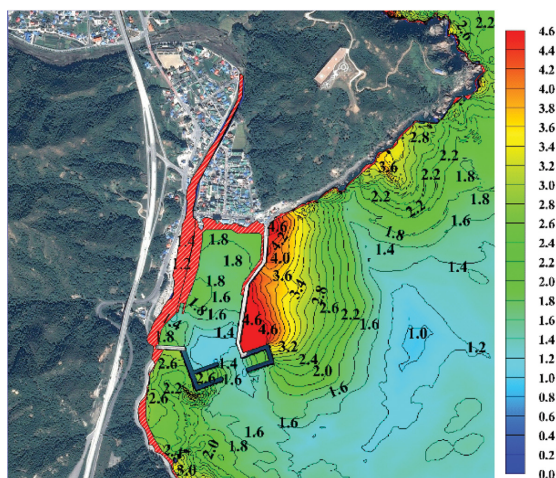
도의 저감율을 나타낸다. 결과적으로, 폭 B 의 크기가 $B = 380$ m일 때 파 저감에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있지만, 폭 $B = 330$ m와 $B = 380$ m의 차이는 크지 않기 때문에 여러 조건을 고려한 많은 케이스에 대한 계산으로부터 합리적인 폭이 선정될 필요가 있다.

이상은 값의 차이가 있지만 묵호항에서의 경우와 동일한 경향을 나타내고, 또한 이러한 결과는 고립파 및 현지의 장주기파에 대해 공진장치의 유용성을 검토한 Lee et al.(2010, 2012c)의 선행연구와 일치한다. 따라서, 실패역의 실제 지진해일파에 대해서도 공진장치의 유용성이 확인된다.

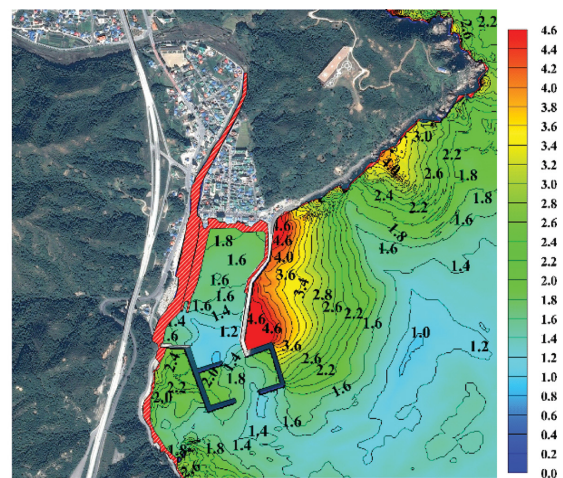
4.2.3 공진장치에서 길이의 변화에 따른 저감효과

(1) 공진장치의 길이

Fig. 25는 공진장치에서 길이의 변화에 따른 지진해일파의 저감효과를 검토하기 위하여 전술한 Fig. 19의 공진장치 $B = 330$ m, $B' = 100$ m, $L = 100$ m를 기준으로, 중앙부의 폭 $B = 330$ m ($B' = 100$ m)를 고정하고 길이를 $L = 50$ m, 150 m로 변



(a) $L = 50$ m



(b) $L = 150$ m

Fig. 26. Comparison of maximum tsunami water level with the change of resonator length L at Imwon port (for the fixed $B = 330$ m or $B' = 100$ m).

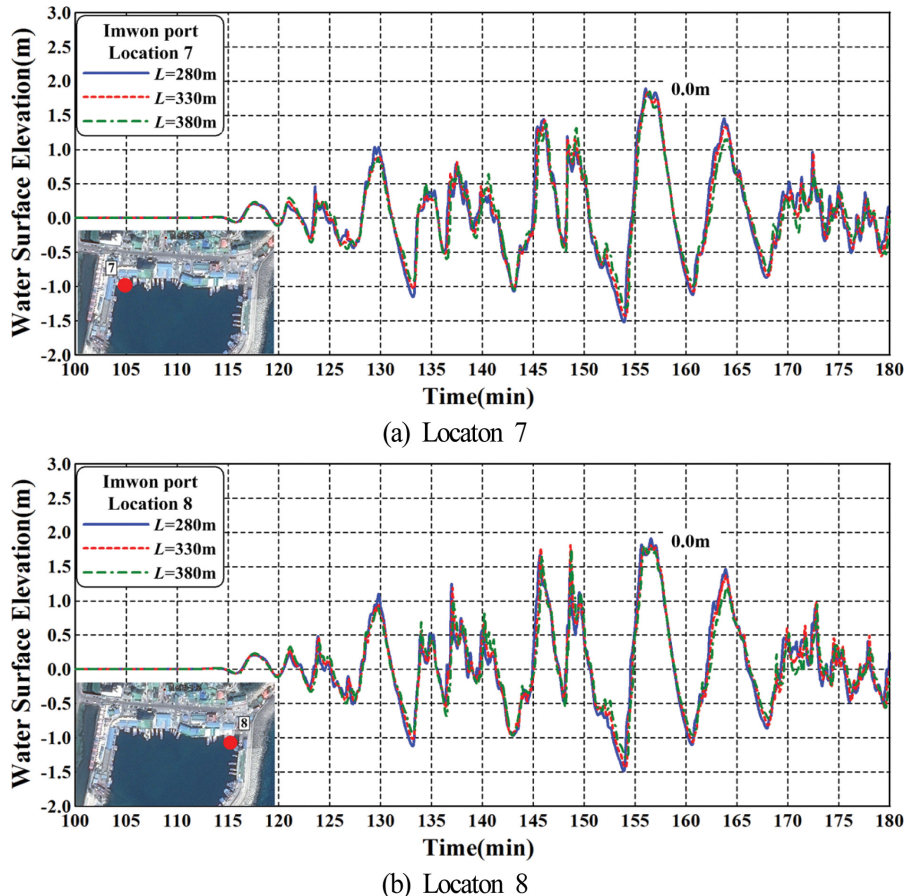


Fig. 27. Time variation of tsunami water level with the change of resonator length L at Imwon port (for the fixed $B = 330$ m or $B' = 100$ m).

화시킨 경우에 공진장치의 형상과 크기를 나타내며, 이 때 $d_1 = 15$ m, $d_2 = 14.5$ m는 일정하게 유지된다.

(2) 최고지진해일파의 공간분포

Fig. 26은 공진장치의 길이 L 을 변화시킨 경우 지진해일파에서 최고파의 공간분포와 침수·범람역을 나타낸 것으로, Fig. 26(a)가 $L = 50$ m, Fig. 26(b)가 $L = 150$ m에 대한 경우이다. 여기서, 전술한 $L = 100$ m의 경우도 포함하여 검토하는 것으로 한다. 그림에서 세 경우 모두 우측 외곽방파제로 인하여 지진해일파의 대부분이 차폐되어 항내는 지진해일파로부터 직접적인 영향을 받지 않으며, 항외측에서는 대략 4.6 m 전후의 큰 지진해일고가 형성되는 것을 볼 수 있다. 항내에서 공진장치의 길이의 변화에 따른 최고파의 변화를 살펴보면 길이 $L = 100$ m와 $L = 150$ m는 항내에서 거의 동등한 크기의 파를 나타내고, $L = 150$ m와 $L = 50$ m에서는 항내 중앙부분에서 0.2 m 정도의 차가 발생하지만, 항의 최내측에서는 세 경우 모두 수위와 침수·범람역에서 거의 차이가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

(3) 지진해일파의 시간변동

Fig. 27은 그림 중의 삽도에 표기된 항의 최내측 7과 8번 위치에서 파변동의 시계열을 나타낸 것으로, 파란 실선은 $L = 50$ m, 빨간 파선은 $L = 100$ m, 그리고 초록 파선은 $L = 150$ m를 갖는 공진장치를 부착하여 산정된 결과이다. 그림을 살펴

보면 7과 8번 위치 모두 부분적으로 약간의 차이가 인정되지만, 대부분 공진장치의 길이 L 의 변화에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다. 이러한 점을 고려하면 이 경우에는 $L = 50$ m의 공진장치가 가장 합리적인 것으로 된다.

이상에서와 같이 임원항의 경우는 목호항과는 달리 공진장치의 길이 변화에 따른 저감율이 거의 나타나지 않는 결과가 도출되었다. 이는 목호항의 경우에서 언급된 바와 같이 임원항의 현장 여건상 적용된 공진장치에서 공진형상이 충분히 발생되기에는 모든 길이가 상대적으로 짧았기 때문으로 판단된다. 반면, 공진장치에서 폭의 변화는 목호항과 같이 폭이 증가할수록 파의 저감효과가 도출되었으며, 폭이 넓을수록 공진장치 내에 포획되는 에너지가 많아지기 때문에 배후의 항내에 파가 감소한다는 Lee et al.(2010, 2012c)의 연구와 일치하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제의 지진해일파가 존재하는 실해역에서 지진해일파의 제어에 관한 공진장치의 유용성을 확인할 목적으로 타당성이 널리 입증된 COMCOT(Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model) 모델(Liu et al., 1998)을 적용하여 동해안의 목호항과 임원항에서 공진장치의 부착여부, 공

진장치에서 폭과 길이의 변화에 따른 최대지진해일고의 공간 분포와 파의 시간변화 및 공진장치의 유용성 등을 검토하였다. 여기서, 적용된 실제의 지진해일파는 1983년에 발생한 동해중부지진해일과 1993년에 발생한 북해도남서외해지진해일이였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 본 연구의 결론으로 이하에 기술한다.

(1) 묵호항과 임원항에서 현상태의 방파제에 본 연구의 공진장치를 부착한 경우 실제 지진해일고의 저감을 도모할 수 있으며, 묵호항에서는 최대 40%~50% 정도, 임원항에서는 최대 21% 정도의 저감율이 나타났다.

(2) 묵호항과 임원항에서 공진장치의 폭이 증가할수록 지진해일고가 저감되는 효과가 나타났다. 이는 공진장치의 폭이 증가할수록 내부에 포획되는 지진해일파의 에너지가 많아지고, 이로 인하여 배후의 항내로 침입하는 지진해일고가 감소된 것으로 판단된다.

(3) 묵호항과 임원항에서 공진장치의 길이를 변화시킨 경우 묵호항에서는 길이가 증가할수록 지진해일고가 저감되는 효과가 다소 얻어졌지만, 임원항에서는 지진해일고의 유의한 변화는 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 충분한 공진형상이 발휘되기에는 짧은 길이의 공진장치가 적용된 결과로 판단된다. 따라서, 현장 여건과 지진해일파의 특성에 부합되는 공진장치의 최적화를 위해서는 공진장치의 형상, 배치 및 크기에 관한 보다 많은 경우의 수에 대한 검토가 수행될 필요가 있다.

References

- Aida, I. (1984). A source models of the 1983 Nihonkai-earthquakes tsunami, Proceedings of Symposium on Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami. JSCE, 9-21 (in Japanese).
- Bellotti, G. (2007). Transient response of harbours to long waves under resonance conditions. Coastal Engineering, 54(9), 680-693.
- Yoon, S.B., Lim, C.H., Cho, Y.S. and Choi, C.S. (2002). Accuracy evaluation of dispersion-correction finite difference model for tsunami propagation. Journal of Ocean Engineering and Technology, 14(2), 116-127.
- 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, 34, 1769-1777.
- Kim, D.S., Kim, J.M. and Lee, K.H. (2007a). Numerical simulation of tsunamis that affected the coastal zone of east sea. Journal of Ocean Engineering and Technology, 21(6), 72-80 (in Korean).
- Kim, D.S., Kim, J.M., Lee, K.H. and Son B.K. (2007b). Analysis of the effects on the southeastern coast of Korea by a tsunami originating from hypothetical earthquake in Japan. Journal of Ocean Engineering and Technology, 21(6), 64-71 (in Korean).
- Latt, N.Z. and Nakamura, T. (2011). Performance of wave resonators located at a harbor entrance for reducing very long waves. Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean, 67(2), 892-896 (in Japanese).
- Lee, H.J., Kim, K.H. and 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 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Liu, P.L.-F., Woo, S.B. and Cho, Y.S. (1998). Computer programs for tsunami propagation and inundation, Technical report, Cornell University.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T. and Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run up. Geophysical Research Letters, 38(7).
- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita, S. (1985). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a harbor. Proc. Coastal Eng., JSCE, 25, 1280-1292 (in Japanese).
- Nakamura, T., Morita, S. and Kato, K. (1998). Wave protection performance of a resonator founded at harbor entrance. Proc. Coastal Eng., JSCE, 45, 721-725 (in Japanese).
- 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. Proc. Civil Eng. in the Ocean, 23, 799-804 (in Japanese).
- Nakamura, T. and Latt, N.Z. (2010). Development of a new resonator with additional walls to attenuate very long waves. Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean, 26, 855-860.
- 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, 1222-1235.
- Takahashi, S., Kuriyama, Y. and Tomita, T. (2011). Urgent survey for 2011 great east Japan earthquake and tsunami disaster in ports and coasts-part I(tsunami). Technical Note of PARI, 1231 (in Japanese).
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Ortis, M. (1994). Fault model to describe Hokkaido Nansei offshore earthquake for tsunami. JSCE, 41, 251-255 (in Japanese).

Received 20 November, 2020

Revised 11 December, 2020

Accepted 15 December, 2020