



工學碩士 學位論文

항만에서의 장주기파랑반응 분석과 저감대책 연구

Analysis and Reduction of Longwave Response in a Harbor



2019年 2月

韓國海洋大學校 産業大學院

土木環境工學科

兪在雄

本 論文을 兪在雄의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 김 태 형(印) 종 員 工學博士 오 재 홍(印) 종 員 工學博士 이 중 우(印)

韓國海洋大學校 産業大學院

土木環境工學科

俞在雄



Analysis and Reduction of Longwave Response in a Harbor

Jae-Woong Yoo

Department of Civil and Environmental Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

A large development at the coastal water causes serious changes to the wave energy transmission. Especially, variation to the wave field introduced into the inner harbor area induces strong impact to wave energy transmission system. In order to reduce damages of ships and harbor structures due to wave attack, it is necessary to predict the change of wave field. However, harbor tranquility review is being conducted on the wind wave and swell of $10 \sim 20$ sec periods to be an engineering problem. The long period waves more than 20sec still show not just damages to the vessels and harbor structure in real field, but also give difficulties on port operation by lowering the annual berthing ratio. This study deals the extended mild-slope equation model simulation for predicting wave responses at Sadong port, Ulundo with a new airport plan, Korea. Possibilities of harbor oscillation reduction introducing a resonance basin are discussed. For the existing configuration of Sadong port, the resonance basin and breakwater gap give larger reduction to amplification factors appeared, such as 20% reduction for Case 1 and 40% for Case 2, at the particular resonance modes. For the analysis of berthing capability at the new port, a 500m extension of breakwater was added with an existing



900m north breakwater and compared with the present planform of port. Due to addition of the extended breakwater at north side, the unexpected variation of harbor responses in the new port show up to a noticeable level. In this case the variation occurred in a way of wave height reduction to the harbor basin but induces difficulties to both the ship passage and pier face. Thus, in this simulation, we have dealt with the response characteristics of long period waves on the water area expansion as per the port development plan, together with introduction of a resonance basin for control of oscillation wave periods, using the offshore field wave data collected. Based on those analyzed results, it is to be recommended to the future port rearrangement or reengineering.





ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	V
LIST OF FIGURES	vi

제1장 서론	······1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 기본이론	······3
1.3 연구 동향	6
1.4 연구의 내용 및 범위	
제2장 대상해역의 특성	10
2.1 대상해역의 특성	10
2.2 대상해역의 자연조건	······ 13
2.2.1 기상 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	······ 13
2.2.2 해상	15

7	세3장 수치모델의 구성 및 검증	19
	3.1 수치모델의 기초이론	19
	3.1.1 지배방정식	19
	3.1.2 경계조건의 적용	21
	3.1.3 모델방정식의 유도	25
	3.2 수치모델의 구성	32
	3.3 모델의 검증	-36

제4장 수치실험 및 분석40
4.1 장주기 파랑반응 해석40
4.1.1 모델 실험결과40
4.1.2 실험결과의 분석
4.2 장주기 파랑의 항만반응 저감방안89
4.2.1 이론적 배경
4.2.2 항만반응 저감방안89
4.2.3 항내 장주기 파랑반응 저감대책 해석
4.2.4 적용 저감대책
제5장 결론 ~~~~~ 101
5.1 결론
5.2 제언
1945 16
참고문헌



LIST OF TABLES

Table	1.1	Observed surface seiche periods in typical lakes and observed decay
		rates ······5
Table	2.1	Maximum wind speed according to wave direction14
Table	2.2	Analyzed wave occurrence frequency in terms of maximum wave height
		and average period (Ulleung-eup 2015.01 \sim 2018.01)
Table	3.1	Numerical model conditions
Table	3.2	Applied wave conditions
Table	3.3	Comparison points for the verification of the model
Table	4.1	Result of Numerical model simulation at PT-1, Before project
Table	4.2	Result of Numerical model simulation at PT-1, After project
Table	4.3	Result of Numerical model simulation at PT-1, After airport project $\cdots 70$
Table	4.4	Result of Numerical model simulation at PT-2, Before project71
Table	4.5	Result of Numerical model simulation at PT-2, After project72
Table	4.6	Result of Numerical model simulation at PT-2, After airport project73
Table	4.7	Result of Numerical model simulation at PT-3, Before project74
Table	4.8	Result of Numerical model simulation at PT-3, After project75
Table	4.9	Result of Numerical model simulation at PT-3, After airport project76
Table	4.10	Result of Numerical model simulation at PT-4, Before project77
Table	4.11	Result of Numerical model simulation at PT-4, After project78
Table	4.12	Result of Numerical model simulation at PT-4, After airport project79
Table	4.13	Result of Numerical model simulation at PT-5, Before project
Table	4.14	Result of Numerical model simulation at PT-5, After project
Table	4.15	Result of Numerical model simulation at PT–5, After airport project $^{\circ}82$
Table	4.16	Result of Numerical model simulation at PT-6, Before project
Table	4.17	Result of Numerical model simulation at PT-6, After project
Table	4.18	Result of Numerical model simulation at PT–6, After airport project $^{\circ}85$
Table	4.19	Numerical model conditions93

LIST OF FIGURES

Fig.	1.1	Damaged mooring line, pier and rubber fender by harbor oscillation $\cdots\!$										
Fig.	1.2	Fig. 1.2 Schematic diagram of a (a)uninodal(mode1), (b)binodal(mode2),										
		and (c)trinodal(mode3) seiche in a rectangular basin(Farmer,2014)4										
Fig.	1.3	Bird's-eye view of Ulleung airport and Sadong harbor										
Fig.	2.1	ocation map of object area11										
Fig.	2.2	Stage 2 of Sadong harbor expansion and Ulleung airport plans11										
Fig.	2.3	Plan view of seawater circulation box plan with Ulleung airport plan $\cdots 12$										
Fig.	2.4	Section view of seawater circulation box plan12										
Fig.	2.5	Climate of subject area, temperature & amount of precipitation13										
Fig.	2.6	Wind rose of Ulleungdo										
Fig.	2.7	Location of Ulleung-eup buoy15										
Fig.	2.8	Distribution chart of Average wave period & Maximum wave height $\cdots 16$										
Fig.	2.9	Maximum wave height at Ulleung-eup buoy (2015~2017)17										
Fig.	2.10	Significant wave height at Ulleung-eup buoy (2015~2017)17										
Fig.	2.11	Average wave height at Ulleung-eup buoy (2015~2017)18										
Fig.	2.12	Average Wave Period at Ulleung-eup buoy (2015~2017)										
Fig.	3.1	Definition sketch of model domain24										
Fig.	3.2	Bathymetry of Sadong port, Before&After&After(airport)										
Fig.	3.3	Numerical mesh for Sadong port, Before&After&After(airport)34										
Fig.	3.4	Numerical mesh for Sadong port detail, Before&After&After(airport) 35										
Fig.	3.5	Rectangular harbor with semi-circular open boundary										
Fig.	3.6	Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting										
		rectangular harbor										
Fig.	3.7	Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient										
Fig.	3.8	Harbor response curves for various values of the friction factor										
Fig.	4.1	Selected points for harbor oscillation analysis44										
Fig.	4.2	Result of numerical model simulation at PT-1, Non-circulation45										
Fig.	4.3	Result of numerical model simulation at PT-2, Non-circulation45										
Fig.	4.4	Result of numerical model simulation at PT-3, Non-circulation46										
Fig.	4.5	Result of numerical model simulation at PT-4, Non-circulation46										
Fig.	4.6	Result of numerical model simulation at PT-5, Non-circulation47										
Fig.	4.7	Result of numerical model simulation at PT-6, Non-circulation47										
Fig.	4.8	Result of numerical model simulation at PT-1, Circulation										

Fig.	4.9	Result of numerical model simulation at PT-2, Circulation 48
Fig.	4.10	Result of numerical model simulation at PT-3, Circulation
Fig.	4.11	Result of numerical model simulation at PT-4, Circulation
Fig.	4.12	Result of numerical model simulation at PT-5, Circulation50
Fig.	4.13	Result of numerical model simulation at PT-6, Circulation50
Fig.	4.14	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-1, Circulation $\cdots 51$
Fig.	4.15	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-2, Circulation $\cdots 51$
Fig.	4.16	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-3, Circulation $\cdots 52$
Fig.	4.17	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-4, Circulation $\cdots 52$
Fig.	4.18	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-5, Circulation $\cdots 53$
Fig.	4.19	Result of numerical model simulation BF-CASE at PT-6, Circulation $\cdots 53$
Fig.	4.20	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-1, Circulation $\cdots 54$
Fig.	4.21	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-2, Circulation $\cdots 54$
Fig.	4.22	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-3, Circulation 55
Fig.	4.23	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-4, Circulation 55
Fig.	4.24	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-5, Circulation 56
Fig.	4.25	Result of numerical model simulation AF-CASE at PT-6, Circulation 56
Fig.	4.26	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-1, Circulation 57
Fig.	4.27	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-2, Circulation 57
Fig.	4.28	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-3, Circulation 58
Fig.	4.29	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-4, Circulation 58
Fig.	4.30	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-5, Circulation 59
Fig.	4.31	Result of numerical model simulation AFA-CASE at PT-6, Circulation 59
Fig.	4.32	Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=480s Dir=202.5°60
Fig.	4.33	Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5°60
Fig.	4.34	Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=250s Dir=202.5°61
Fig.	4.35	Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=160s Dir=202.5°61
Fig.	4.36	Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=480s Dir=202.5°62
Fig.	4.37	Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5°62
Fig.	4.38	Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=280s Dir=202.5°63
Fig.	4.39	Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=270s Dir=202.5°63
Fig.	4.40	Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=95s Dir=202.5°
Fig.	4.41	Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5°64
Fig.	4.42	Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=440s Dir=202.5°65
Fig.	4.43	Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=280s Dir=202.5°65
Fig.	4.44	Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=270s Dir=202.5°
Fig.	4.45	Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=95s Dir=202.5°
Fig.	4.46	Long wave agitation increases from the sea to the basin & The plan to

unharmonize with resonant period90 Fig. 4.48 Resonant breakwater and wave trap at the entrance of channel90 Fig. 4.52 Numerical mesh for wave resonance bay circulation gap at Samcheok Fig. 4.53 Comparison of amplification factors at station 1 for Samcheok port95 Fig. 4.54 Comparison of amplification factors at station 6 for Samcheok port95 Fig. 4.55 Comparison of amplification factors at station 16 for Samcheok port 96 Fig. 4.56 Comparison of amplification factors at station 17 for Samcheok port96 Fig. 4.57 Results of harbor response at Samcheok port (present, T=119.3sec)97 Fig. 4.58 Results of harbor response at Samcheok port (Case 1, T=119.3sec)98 Fig. 4.59 Results of harbor response at Samcheok port (Case 2, T=119.3sec)98 Fig. 4.61 Results of harbor response at Samcheok port (Case 1, T=568.1sec)99 Fig. 4.62 Results of harbor response at Samcheok port (Case 2, T=568.1sec) 100

1945



제1장 서 론

1.1 연구 배경

고대의 항만은 자연적 입지 조건에 기반을 두고 만들어진 자연항이 대부분이 었다. 따라서 항만시설의 유지와 관리의 필요성이 없거나 부담이 크지 않았지 만, 외해로 진출하고자 하는 인간의 욕망과 산업의 발달, 국가 간 교역량의 증 가로 인해 항만의 규모와 역할이 거대해지면서 항만시설의 유지 및 보수, 나아 가 항만의 확장의 중요성이 대두되고 있다. 특히 항만건설과 같은 연안역에서 의 대규모 개발은 외해로부터 내습하는 파랑에너지의 전파에 상당한 변화를 초 래하게 되며, 항만내로 전파되는 파랑장의 변화는 기존의 파랑에너지 전달체계 에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 이러한 파랑에너지의 변화를 사전에 예측하 여 적절한 대응책을 마련하지 못할 경우, 항내 정온도 및 선박 계류 안정성 저 하 등과 같은 문제점들을 야기하게 되며, 이는 항만 내에서의 선박 및 항만구 조물의 피해뿐만이 아니라 항만의 가동률에 직·간접적인 영향을 미치게 되어 항만운영에 전반적인 어려움을 야기한다(Fig. 1.1). 일반적으로 이러한 문제점을 해결하기 위한 대응책으로는 방파제 등과 같은 외곽시설(counter facility)을 배 치하여 직접적으로 항내에 내습하는 파랑에너지를 저감시키는 것이며, 이를 위 해 수행되는 항만내의 파랑장 검토 즉, 항내 정온도 검토는 주로 공학적으로 문제가 되는 파랑 주기 10~20sec에 해당하는 중력파, 풍파(wind wave)와 너울 성 파랑(swell)에 대하여 수행되고 있다. 항만 설계자의 입장에서는 항만의 가 동률을 높이기 위해 파랑의 전파 빈도가 높은 주기를 갖는 풍파와 너울성파랑 에 대해 검토를 수행하는 것이 옳으나, 실제 현장에서는 주기 20sec 이상의 장 주기 파랑에 의한 항내 부진동 현상으로 인하여 선박의 접이안과 하역작업 뿐 만 아니라 항만구조물에 상당한 피해를 입고 있는 실정이다.

국내에서는 80년대에 이르기까지도 장주기 파랑으로 인한 부진동 현상을 항



- 1 -

만구조물의 설계과정에서 간과하였으며, 항만구조물이 배치된 후 실제 항만의 운영과정에서 항내 부진동 현상을 발견하여 이에 대한 대응책을 강구하고자 하 였다. 수리모형실험을 통한 파랑의 분석은 주로 단주기파에서 실행할 수 있다 는 한계점을 가지므로, 장주기파랑에 대한 부진동의 해석은 현장관측 및 수치 모델실험을 통해서 수행한다. 하지만, 현장관측의 경우는 항만구조물의 배치 전·후에 대하여 수행하기에는 기기설비의 과대 및 장시간에 걸친 조사가 요구 되므로 수치모델실험을 통한 항만 부진동의 영향에 대한 검토를 설계 과정에 포함시키고 있다.



Fig. 1.1 Damaged mooring line, pier and rubber fender by harbor oscillation

1.2 연구 기본이론

Collection @ kmou

항만 부진동(harbor oscillation)은 항내의 수면이 장주기 파랑의 입사로 인해 승강하는 현상을 일컫는 것으로 항 또는 만의 고유진동주기에 비교적 가까운 주기를 갖는 외부의 장주기파와의 공진현상(resonance phenomena)에 의해서 입사파의 파고에 비해 훨씬 높은 파고의 파가 발생하는 현상을 말한다.

부진동은 파동이 한정된 공간 안에 갇혀서 제자리에서 진동하는 형태의 정상 파(standing wave)의 특별한 케이스로서, 진행하는 파랑이 항내 직립구조물에 입사하여 파랑에너지를 잃지 않고 완전 반사의 형태로 반사되어 입사파와 중첩 되는 메커니즘을 갖는다.

Fig. 1.2은 폐쇄수역에서 발생하는 정상파의 자유진동에 의한 수면변동을 각 각의 모드에 따라 분류한 것이다. 짙은 실선은 수면의 형상이며, 옅은 실선은 반주기(one-half period) 후의 수면의 형상을 나타낸 것이다. (antinode)는 진 폭의 변화가 가장 큰 배이고, *N*(node)는 진폭이 0인 마디이며, 수면의 변화에 따라 흐름의 수직, 수평 벡터의 방향 또한 변화한다.

OH OF CH

Wilson(1972)은 만이나 호수에서 부진동을 유기하는 외적 교란원인을 다음과 같이 정의했다.

(1) 부진동의 주기와 동일한 주기를 가진 기압변동이 통과하는 경우

(2) 전선의 통과로 인한 기압의 갑작스런 변동이 생기는 경우

(3) 풍속과 풍압의 변동이 동반된 돌풍이 갑자기 수면에 가해질 경우

(4) 육지 쪽으로 부는 강한 바람에 의해 육지 쪽으로 쌓였던 물이 갑자기 방 출되는 경우

(5) 만이나 호수의 한쪽으로부터 갑작스럽게 다량의 물이 유입될 때



(c)

Collection @ kmou

Fig. 1.2 Schematic diagram of a (a) uninodal(mode 1), (b) binodal(mode 2) , and (c) trinodal(mode3) seiche in a rectangular basin(Farmer, 2014) Table 1.1은 전세계 대표적인 만(灣)과 호수에서의 부진동 주기를 나타내는 표이다.

Table	1.1	Observed	surface	seiche	periods	in	typical	lakes	and	observed	decay
rates											

	Obs	erved p	Fracional decrease in				
Lake and location	T1	T2	T3	T4	T5	T6	uninodal seiche over each successive period
Geneva (Switzerland-France)	74.0	35.5	AND	OCF/			0.030
Garda(Italy)	42.9	28.6	21.8	15.0	121.	9.9	0.045
Loch Earn(Scotland)	14.5	8.1	6.0	4.0	3.5	2.9	
Erie(U.S Canada)	858.0	542.3	350.9	250.5			0.322
Konigssee(Germany)	11.6		194				0.204
Vattern(Sweden)	179.0	97.5	80.7 ^L	57.9	48.1	42.6	0.113
Yamanaka(Japan)	15.6	10.6	5.5				0.199
Baikal(Russia)	278.2						

1.3 연구 동향

수치모델실험에 의한 장주기 항만반응 특성의 해석은 항만의 형상 및 항만의 수심에 따라 정형항만과 비정형항만으로 나누어 수행한다. 정형항만의 경우 해 석조건은 대상항만의 수심이 일정하고 항만의 형상이 단순한 경우로서 McNown(1952)의 기초연구를 시작으로, Miles & Munk(1961)이 항만에서 외해 로 진행하는 방사파의 개념 및 항 역설(Harbor paradox)을 제시하여 항만진동 문제를 발전시켰다. 항만진동문제에 대한 해석은 정합점근전개법 (Mei & Pertroni, 1973)과 Fourier 해석법(Ippen & Goda, 1963)으로 다루어졌으나 Lee(1969)가 수리모형실험결과를 변수분리법에 의한 이론식과의 접근정도를 제 시한 이후, 많은 학자들에 의해 다양한 수치모델실험으로 해석되고 있다.

비정형 항만의 경우 복잡한 해안선 및 수심, 복잡한 항만형상을 반영한 조건 으로 Knapp & Vanoni(1945)의 수리모형실험을 수행하였으며, 나아가 Wilson(1954, 1949)이 수리모형실험의 중요성을 강조하였다. 이후 문제의 근사 적 해를 찾는 해석기법인 유한차분법(FDM, Leendertse, 1967; Olsen & Hwang, 1971; Roger & Mei, 1978, Takayama & Hiraishi, 1988; Kioka, 1996), 경계적분법(Lee, 1969; Hwang & Tuck, 1970, Lee & Raichelen, 1971; Hwang, 1978; Harms, 1979; Mattioli & Tinti, 1979), 유한요소법(FEM, Bai & Yeung, 1974; Zienkiewicz et al., 1977; Chen & Mei, 1974; Chen, 1984), 복합요소법 (HEM, Chen & Houston, 1987; Chen, 1986; Lee, 1989; Thompson et al., 1993)등의 수치모델실험을 통해 복잡하고 광범위한 항만 내의 진동문제를 분석 해왔다.

특히, 장주기파에 의해 발생하는 항만 내의 진동문제는 항만의 운영 측면과 직결되어 있어, 이를 제어하기 위한 방안을 검토하는 연구들이 진행되어 왔다. Jeong et al.(2002)는 국내에 위치한 속초항과 청초호의 장주기파 공진을 검토 하기 위하여 항내·외 8개 정점에서 파향·파고계, 초음파식 파고계, 수압식 파고 계, 유속계 등을 이용하여 장·단주기파 현장관측을 실시하였으며, 자료 분석을 통해 속초항과 청초호의 공진 모드의 주기를 검토하였다. 또한 Jeon et al.(2006)은 국내에서 부진동의 문제가 가장 현저하게 발생하는 포항신항을 대 상으로, 영일만 입구의 4.1km에 달하는 방파제 건설과 신항만 계획을 반영하여 이들이 항만 부진동에 어떠한 변화를 야기할 것인가에 대한 검토를 수행하였 다. 이외에도 Lee et al.(2012)는 2차원 타원형 완경사 방정식 해석모델인 CG-WAVE를 통해 포항신항에서 발생될 수 있는 부진동 및 계류선박의 장주 기동요를 감쇠시키기 위하여 여러 크기의 공진장치를 적용하여 선박의 이상동 요를 발생시키는 공진주기를 보다 장주기 측으로 이동시키는 방안을 검토한 바 있다.





1.4 연구의 내용 및 범위

본 연구는 울릉 사동항 개발사업과 울릉공항의 건설에 따른 항만의 형상의 변화로 인한 파랑응답해석을 수행하고자 한다. 대상 항만인 울릉 사동항은 1993년 울릉 사동항 1단계 사업에 착수, 2008년 11월 방파제 750m, 방파호안 430m 여객선·어선 접안시설(부두) 620m을 준공하였으나 기존의 계획보다 축소 된 규모로 마무리 되면서 독도 영토관리 강화를 위한 독도의 모도(母島)로서의 기능, 안정적인 교통권 확보와 늘어나는 관광 수요를 대처하기 위한 기능의 요 구를 바탕으로 울릉 사동항 2단계 사업이 진행되고 있다. 동시에 울릉 사동항 전면을 매립하여 길이 1.2km, 폭 30m의 중소형 비행기를 운항할 수 있는 울릉 공항건설이 예정되어있다(Fig. 1.3).



Fig. 1.3 Bird's-eye view of Ulleung airport and Sadong harbor

본 연구에서는 또한 장주기파랑에 의한 항만진동문제의 저감대책에 대해 논의하기 위해 강원도 남부에 위치한 삼척항을 대상으로 공진만 형성 및 해수 소통구를 반영한 파랑변형 수치모델 실험을 진행하고자 한다. 울릉 사동항 및 강원 삼척항의 파랑변형 수치모델실험을 위해 적용한 해석모델은 항만, 연안역, 연안의 inlet, 섬의 주변과 부유구조물 등에 적용할 수 있는 파랑전파 모델으로 기본적인 완경사방정식에서 고려하는 파의 굴절-회절의 복합효과뿐만 아니라 마찰, 쇄파, 비선형적인 파의 분산, 항만 입구에서의 파의 손실 등에 의한 파의 감쇄를 계산할 수 있는 2차원 타원형 완경사 파랑 방정식 모델이다.

항내에 입사하는 파랑의 조건은 10~1500sec에 이르는 범위의 주기대이며, 울릉 사동항의 파랑의 입사파향은 해안선에 내습빈도가 높은 ENE 파향에 대 해 수행하였으며, 강원 삼척항의 파랑의 입사파향은 항내로의 내습빈도가 높은 SE 파향에 대하여 공진 주기에 이르는 광범위한 주파수대를 적용한 항내진동 현상을 수행하였다. 제 2장에서는 대상해역의 특성에 대해 정리하였으며, 제 3 장에서는 적용한 수치모델의 기초이론 및 적용성을 검토하였다. 제 4장에서는 수치모델실험의 결과를 해석모델에 대해 제시 및 분석하였으며, 추가적으로 항 만반응 저감대책 및 이를 적용한 수치모델실험을 수행하여 그 결과를 제시하였 다. 제 5장에서 이를 요약 및 정리하고자 한다.





제 2 장 대상해역의 특성

2.1 대상해역의 특성

본 연구의 대상항인 울릉 사동항은 지방관리항으로서 행정구역 상 경상북도 울릉군 울릉읍 사동 1리에 속한다. 울릉 사동항을 포함하고 있는 울릉군은 경 상북도 울진 죽변으로부터 130.3km 떨어져 있으며 이는 육지와의 최단거리에 해당한다. 울릉 사동항을 포함하고 있는 울릉군의 연장거리(cross distance)는 동서간 96.3km, 남북간 34.8km이며 이는 울릉도 서남단에 위치하고 있는 독도 를 포함한 연장한 거리이다(Fig. 2.1).

대상항만인 울릉 사동항은 본래 울릉도의 관문항인 도동항의 부속항 역할을 맡아왔던 항만이었으나, 도동항의 확장 필요성이 제기되며 대규모 개발이 진행 되었다. 사동항이 위치한 경상북도 울릉군 지역은 환동해 경제권이라는 지리적 이점을 지니고 있으며, 육지로부터의 여객 및 화물수요에 대처하는 울릉도 교 통의 허브 역할, 조업어선의 피항지 및 아름다운 자연환경을 보유하고 있는 관 광시설로의 역할, 독도 영토관리 강화를 위한 독도의 모도(母島)로서의 역할이 라는 관점에서 그 기능을 수행하고자 한다.

울릉 사동항은 전면해역의 수심이 20~30m의 대수심역이며, 지리석 특성상 외해로부터의 파랑의 영향이 매우 지배적이다. 또한 NE~SE계열의 다방향·장 주기·고파랑이 내습하며, 항내 정온도 확보에 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다. 전술한 사동항의 확장에 의한 기대효과 및 항내 문제점을 개선하기 위하여 1993년 사동항 1단계 사업에 착수하여 2008년 11월 1단계 사업을 완료하며 방 파제 750m, 방파호안 430m, 여객선·어선 접안시설(부두) 620m의 항만시설을 배치하였다. 그러나 충분한 접안시설의 건설이 이루어지지 않아 추가접안시설 을 포함한 사동항 2단계 사업에 착수하여 2019년 준공목표로 현재 진행 중이



며, 사동항 외곽방파제 전면을 매립하여 길이 1.2km, 폭 30m의 울릉공항 활주 로를 갖는 울릉공항이 2020년까지 완공될 예정이다(Fig. 2.2).



Fig. 2.1 Location map of object area



Fig. 2.2 Stage 2 of Sadong harbor expansion and Ulleung airport plans

사동항의 확장시 1단계구역과 2단계 구역의 수질개선을 위해 해수유통구를 계획하였으며 Fig.2.3~Fig.2.4와 같이 평균해면 이하에 암거형 BOX 3개소 (20m×3m×2 및 10m×3m×1)를 계획하였으며, 울릉공항은 남방파제 동안측에 매 립을 통해 조성하는 것으로 계획하고 있다.



Fig. 2.3 Plan view of seawater circulation box plan with Ulleung airport plan



Fig. 2.4 Section view of seawater circulation box plan

2.2 대상해역의 자연조건

2.2.1 기상

본 연구의 대상지역인 울릉도는 여름은 시원하고 겨울은 온난한 해양성 기 후이며, 2010년 기준(Fig. 2.1), 연평균 기온은 12.6°C이며, 월별 평균기온은 8 월에 25.9°C로 최고 기온을 보이며, 1월은 1.0°C로 최저기온을 나타낸다. 기온 최고극값은 8월에 32.7°C이고 최저극값은 1월에 -7.2°C이다. 연평균 강수량은 1,448.3mm이며, 강수(0.1mm이상)일수는 연중 148일로 많다.

해수면에서 수심 400m까지는 수온이 계절의 영향을 받지만 심해에서는 계절변화를 하지 않는 것이 국립기상연구소가 무인 관측기기를 사용하여 울 릉분지 근처에서 관측한 결과에 의해 확인되었다. 해수면부근에서는 3월에 10.8°C로 최저, 10월에 22.6°C로 최고값을 기록하고 수심 200m에서는 7월에 3°C로 최저, 11월에 5.5°C로 최고값을 기록했다. 이에 반해 최대 수심이 2200m인 울릉분지에서 수심 400m 이상 깊은 수심의 해수 온도는 0.3~0.8°C 로 연중 거의 일정하다.



Fig. 2.5 Climate of subject area, temperature & amount of precipitation

평균풍속은 3.7m/s 이며, 풍향별 출현율은 NW방향이 우세하게 나타나고 있다. Fig 2.3에 2015~2017년도까지의 울릉도 바람장미도를 제시하였으며, Table 1을 통해 풍향별 최대풍속 자료를 나타내었다.



Fable 2.1 Maximum	wind sp	eed according	to wave	direction	(unit :	0.1m/s)
-------------------	---------	---------------	---------	-----------	---------	---------

월별 풍향별	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
NNE	12.9	10.1	11.8	11.0	10.8	9.5	8.3	13.8	11.6	13.0	13.1	10.4
NE	12.9	10.4	11.9	12.2	8.1	11.2	10.5	16.1	12.0	13.8	10.3	10.5
ENE	8.9	8.6	6.9	6.1	4.4	4.4	5.5	9.3	4.9	6.8	7.7	5.4
E	5.5	5.5	5.4	2.1	2.9	2.8	2.3	3.6	5.1	4.2	5.0	6.2
ESE	5.0	4.7	4.8	2.2	2.3	2.1	2.1	3.9	4.7	5.2	6.3	7.8
SE	5.4	4.8	4.5	2.6	2.9	2.7	2.5	3.9	4.9	4.9	5.6	5.7
SSE	5.6	6.4	4.6	3.5	3.4	2.6	3.3	4.4	4.5	4.2	5.9	4.5
S	6.8	5.6	6.7	6.5	8.2	5.0	5.8	8.4	7.2	6.5	8.8	10.3
SSW	10.5	8.4	7.5	9.7	10.8	7.6	10.5	10.1	10.2	7.3	9.7	9.0
SW	10.8	9.9	9.6	12.5	11.3	9.3	11.8	10.1	8.6	9.4	10.7	10.2
WSW	7.9	9.2	7.9	10.7	10.5	8.1	7.6	9.0	7.2	8.0	8.7	10.4
W	7.7	7.6	8.8	8.4	8.0	5.4	4.1	5.0	4.9	6.4	7.4	7.3
WNW	8.3	9.1	7.5	7.9	8.7	6.3	1.8	4.2	6.6	6.9	7.4	9.5
NW	7.5	8.7	7.7	9.6	13.7	3.7	1.4	12.5	9.4	9.3	10.9	10.0
NNW	9.0	10.3	10.6	7.3	10.6	9.6	2.2	8.2	8.4	9.3	11.4	7.2
N	8.2	8.9	9.5	9.0	7.8	10.4	5.3	14.6	8.6	9.5	9.6	10.3



2.2.2 해상

대상항인 울릉 사동항은 울릉도 섬 남단에 위치함으로 북측으로부터 차폐 되어 있는 지리적 특성을 지닌다. 또한 항 서쪽에 위치한 가두봉으로 인해 W계열의 파랑에 대한 직접적인 영향을 받지 않는다. 하지만 섬이라는 특수 환경으로 인해 장주기 고파랑이 내습하는 해역이며, 전술한 지리적 특성으로 바탕으로 NE~SE계열의 다방향 파랑이 내습하고 있다. 조류의 방향은 크게 남·북으로 발생하고 있으며, 낙조 시 다소 강한 흐름을 보이고 있다.

대상해역에 입사하는 파랑의 제원을 분석하기 위하여 사동해수욕장 전면에 위치하고 있는 기상청 파고부이(울릉읍, 22464)(Fig. 2.4)의 데이터분석을 수 행하였다. 파랑 데이터는 2015년 1월 1일을 기준으로 3년간의 최대파고 (maximum wave height), 유의파고(significant wave height), 평균파고 (average wave height), 평균주기(average wave period) 자료이며, 1시간을 기준으로 관측하였다. 이를 최대파고 및 평균주기에 대한 출현율으로 산정하 여 Table 2.2 에 제시하였다.



Fig. 2.7 Location of Ulleung-eup buoy



T(s) H(m)	~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~	Total	%
0.0~0.5	1846	1784	851	138	27	1	0	0	0	4647	19.07
0.6~1.0	1349	4006	3300	1438	275	22	1	0	0	10391	42.64
1.1~1.5	76	1530	2229	1225	583	94	6	0	0	5743	23.57
1.6~2.0	1	243	947	634	233	94	8	0	0	2160	8.86
2.1~2.5	0	10	240	305	149	63	22	0	0	789	3.24
2.6~3.0	0	0	46	127	100	33	9	0	0	315	1.29
3.1~3.5	0	0	8	59	75	27	4	0	0	173	0.71
3.6~4.0	0	0	1	15	52	21	3	0	0	92	0.38
4.1~4.5	0	0	0	6	19	9	5	0	0	39	0.16
4.6~5.0	0	0	0	0	4	3	1	0	0	8	0.03
5.1~5.5	0	0	0	0	2	11/	3	0	0	6	0.02
5.6~6.0	0	0	0	0	-0	- 3	1	0	0	4	0.01
6.1~6.5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.004
6.6~7.0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0.008
Total	3272	7573	7622	3947	1520	373	63	0	0	24370	100
%	13.43	31.08	31.28	13.20	6.24	1.53	0.26	0	0	100	

Table 2.2 Analyzed wave occurrence frequency in terms of maximum wave height and average period (Ulleung-eup 2015.01 \sim 2018.01)



Fig. 2.8 Distribution chart of Average wave period & Maximum wave height



Fig. 2.10 Significant wave height at Ulleung-eup buoy (2015~2017)



Fig. 2.12 Average Wave Period at Ulleung-eup buoy (2015~2017)

제3장 수치모델의 구성 및 검증

3.1 수치모델의 기초이론

본 연구의 대상항의 항만확장 개발에 따른 장주기파랑반응 특성을 확인 하 고, 이를 저감하기 위한 계획을 반영하여 2차원 타원형 완경사 파랑 방정식 모 델을 구성하고 수치모델실험을 수행하여 파랑응답을 해석하였다. 수치해석모델 의 기초이론은 다음과 같다.

NE AND OCEAN

3.1.1 지배방정식

Collection @ kmou

본 연구의 해석모델인 CG-WAVE(Panchang & Xu 1995)는 타원형의 완경사 파랑 방정식을 지배방정식으로 하는 2차원 유한요소(finite element)모델이다.

CG-WAVE는 파랑의 굴절, 회절, 해양구조물에 의한 반사, 마찰 및 쇄파작용 으로 인한 파랑 에너지의 소산 및 비선형 분산관계식을 통한 파랑의 비선형 해 석 효과를 동시에 재현할 수 있으며, 연안역으로 입사하는 광범위한 주기의 파 랑의 해석이 가능하다. 본 해석 모델의 지배방정식의 기초가 되는 완경사방정 식(Mild Slope Equation)은 일반 선형파 이론의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의 해 개발된 이후 Chen과 Mei(1974, 1975)에 의해 유한요소법(FEM)과 복합요소 법(HEM)으로 제안되어 많은 학자들을 통해 연구 및 개량되었다.

하지만 기초방정식인 완경사방정식은 파랑의 해저지형과의 마찰, 한정된 계 산영역으로 인해 발생하는 경계면에서의 파랑의 흡수, 연안에 흡수되지 않고 반사되어지는 반사파의 산란(scattering) 등을 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 개선하여 보다 정확한 해석결과를 도출하기 위하

여 완경사방정식을 개량한 2차원 타원형 완경사 파랑 방정식을 활용하고자 하며, 그 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\mathcal{C}\mathcal{C}_g \nabla \mathfrak{n}) + \left(\frac{\mathcal{C}_g}{\mathcal{C}} \sigma^2 + i\sigma w + i\mathcal{C}_g \sigma \mathfrak{r}\right) \widehat{\mathfrak{n}} = 0$$
(3.1)

여기서,
$$C(x, y) = \sigma/k$$
; 위상속도(phase velocity)
 $C_{g}(x, y) = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC$; 군속도 (group velocity)
 $\mathfrak{n}(x, y) = 복소해면 변동함수$
 $\sigma = \frac{2\pi}{T}$; 각주파수 (radians/sec)
 $w = 마찰황$
 $\mathfrak{g} = 쇄파파라메타$
 $n = \frac{1}{2}(1 + \frac{2kd}{shinh2kd})$
 $k(x, y) = 수심 d(x, y)에서 선형분산관계식 $\sigma^{2} = gktanh(kd) = 만족$
하는 파수 $(= 2\pi/L) =$ 가리킨다.$

마찰항인 는 Dalrymple et al.(1984)에 의해 아래와 같은 진폭 감쇠계수를 나타낸다.

$$w = \left(\frac{2n_{\rm O}}{k}\right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd)\sinh kd}\right]$$
(3.2)

여기서, a = H/2; 파랑의 진폭

Collection @ kmou

- 20 -

$$f_r = 마찰계수$$

레이놀즈수와 저면조도에 의해 좌우되는 마찰계수 는, Madsen(1976)과 Dalrymple et al.(1984)를 참조하여 적용하였다. 일반적으로 마찰계수 f_r의 크 기는 Manning의 소산계수 또는 조도계수 n과 비슷한 범위의 값을 가지며, 공 간 (x, y)의 함수로서 f_r을 지정할 때 항내 진입에 따른 손실요소를 위해 항만 입구에 더 큰 값을 부여한다. 쇄파파라메타인 γ에는, 다음의 식을 적용한다 (Dally et al., 1985; Demirbilek, 1994).

1.1.1.10

$$\chi = \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.4^2 d^2}{4a^2} \right)$$
(3.3)

위의 관계식 외에도, 2차원 타원형 완경사 방정식은 비선형파의 시뮬레이션 에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있으며, 식 (3.2)에 있는 비선형 산란관계식으로 다음으로 정리된다.

OH OF CH

$$\sigma^{2} = gk[1 + (ka)^{2}F_{1} \tanh^{5}kd] \tanh\{kd + kaF_{2}\}$$
(3.4)

$$F_{1} = \frac{\cosh(4kd) - 2\tanh^{2}(kd)}{8\sinh^{4}(kd)}$$

$$F_{2} = \left(\frac{kd}{\sinh(kd)}\right)^{4}$$
(3.5)

3.1.2 경계조건의 적용

Collection @ kmou

불투과성 직립벽에 직교하는 흐름은 엄밀히 벽을 통과할 수 없으므로

- 21 -

∂n/∂n=0이 되어야한다. 그러나 해안선이나 투과성 구조물에 대해서는 다음과 같은 부분반사경계조건이 적용 할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial n} = \mathbf{a} \, \mathbf{n} \tag{3.6}$$

a는 복소계수로 식 (3.7)과 같이 사용한다.

$$a = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \tag{3.7}$$

여기서, K_r = 반사계수

Collection @ kmou

아래와 같이 적용된 Sommerfeld의 방사조건(Radiation condition)는 개방경계 를 따라 유출되는 파랑은 무한대로 전파되어 소멸하는 것으로 아래와 같은 식 이 적용된다.

$$\lim_{kr\to\infty}\sqrt{kr}\left(\frac{\partial}{\partial r}-ik\right)\underset{n_{s}\to0}{\overset{}{\longrightarrow}}0$$
(3.8)

여기서, n_s = 산란파의 포텐셜 r = 중심 축에서부터 임의의 점까지의 거리

∩_s는 Mei(1983)가 제시하였는데, 의도하는 산란파의 포텐셜 ∩_s는 완경사방
 정식의 해이고, 식 (3.8)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나타내어
 질 수 있다.

$$\eta_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) \left(\alpha_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta \right)$$
(3.9)

여기서, $H_n(kr)$ = 제1종 Hankel함수를 나타낸다. 제2종 Hankel함수는 무한 대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (3.9)에서 제외되었다.

그러나 \hat{n}_s 는 일정수심의 외부 영역을 필요하다. Fig. 3.1와 같은 항만 문제 에서도, 식 (3.9)에서 나타낸 산란파의 포텐셜은 개방경계와 관련된 단면 A_1 및 A_2 에서 직선상의 완전반사 해안선을 필요로 한다. 이 문제를 극복하기 위 하여, Xu et al.(1996)은 개방경계를 따라 포물선형근사를 포함한 개방경계조건 을 개발하였다.

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{n}}_{s}}{\partial r} + p \hat{\mathbf{n}}_{s} + q \frac{\partial \hat{\mathbf{n}}_{s^{2}}}{\partial \Theta^{2}} = 0$$

$$(3.10)$$

$$\stackrel{\text{od}}{=} \frac{k^{2}r^{2} + k_{0}^{2}r^{2} + ik_{0}r + \frac{1}{4}}{2ik_{0}r^{2}}$$

$$q = \frac{1}{2ik_{0}r^{2}}$$

이때 k_0 는 개방경계 Γ를 따라 평균수심에 상응하는 파수를 채용하였다. 모델 영역 Ω내에서, 확장완경사방정식이 적용한다. 반원형호 Γ를 따라서 개방경계조 건으로 위와 같이 포물선형 근사를 사용한다.





3.1.3 모델방정식의 유도

n의 해를 구할 시, 최고파압과 최고파속, 파랑의 진폭 그리고 파랑의 위상각은 n의 값에서 구한다. 파랑표면의 미소 수립자의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \left[\Phi_1 \cos \omega t + \Phi_2 \sin \omega t\right] Z_{(Z)}$$
(3.11)

$$Z_{(Z)} = \frac{\cosh\left[k(z+h)\right]}{\cosh\left(kh\right)} \tag{3.12}$$

ĥ의 항에서의 포텐셜은 아래와 같다.

$$\Phi = \frac{g}{i\omega} \quad n \tag{3.13}$$

식 (3.11)에서 위 식은 다음과 같이 다시 정리된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} K \Big[\widehat{\eta}(x, y) e^{-i \left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right)} \Big]_{Z_{(Z)}}$$
(3.14)

$$\widehat{\mathfrak{n}} = \mathfrak{n}_1 + i\widehat{\mathfrak{n}_2} \tag{3.15}$$

위 식을 실수부와 $\widehat{n_1}$, 허수부 $\widehat{n_2}$ 를 분리하고 $-\pi/2 - \omega t$ 를 a로 대체한다.

$$\Phi = \frac{g}{\omega} [\eta_1 \cos a + \eta_2 \sin a] Z$$
(3.16)
식(3.16)의 Φ에 대해 방향별 도함수 식을 평가하여 수립자의 속도에 관한 식을 구한다.

$$_{V_{X}} = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial n_{1}}{\partial X} \right) \cos a + \left(\frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial X} \right) \sin a \right] Z$$
(3.17)

$$V_{y} = \frac{g}{\omega} \left[\left(\frac{\partial \widehat{\mathfrak{n}_{1}}}{\partial y} \right) \cos \mathfrak{a} + \left(\frac{\partial \widehat{\mathfrak{n}_{2}}}{\partial y} \right) \sin \mathfrak{a} \right] Z$$
(3.18)

여기서, 속도의 수평성분을 포함하는 Z는 국지상수이다.

앞 식의 v_x 와 v_y 를 아래와 같이 대체하여 속도의 수평성분의 크기를 구할 수 있다.

$$|\psi|^{2} = (\psi_{x})^{2} + (\psi_{y})^{2}$$
(3.19)
$$|\psi|^{2} = \left(\frac{g}{\omega}\right)^{2} Z^{2} \left\{ \left[\left(\frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial y}\right)^{2} \right] \cos^{2} \alpha + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{n_{y}}}{\partial y}\right)^{2} \right] \sin^{2} \alpha - \left[\frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial y} \right] \sin(2\alpha) \right\}$$

(3.20)

a에 대응하는 │H²의 도함수가 0일 때 최고 수평속도는 나타나며 다음과 같 다.

$$\left\{ -\left[\left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_1}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_1}}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_2}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_2}}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \sin(2\mathfrak{a})$$

$$-2 \left[\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_1}}{\partial x} \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_2}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_1}}{\partial y} \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_2}}{\partial y} \right] \cos(2\mathfrak{a}) = 0$$

$$(3.21)$$

식 (3.21)을 이항하여 정리하면 식(3.22)과 같다.

$$a = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{2\left[\frac{\partial n_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial y}\right]}{-\left[\left(\frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial y}\right)^2\right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial y}\right)^2\right]}\right]$$
(3.22)

속도의 수평성분의 값은 α에서 최대값 그리고 α+π/2에서 최소값을 가지게 되며 | μ의 값은 다음의 두각에 의해 계산된다.

그 중 큰 값은 전체 과정에서 가장 큰 속도가 되며, 압력은 베르누이식의 선 형식으로부터 얻어진다.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{P}{p} + gz = constant$$
(3.23)

운동 수두(속도에 의한 압력)은 이와 같은 선형식에서 무시하였다. 식 (3.14) 의 Φ의 식은 이 식에서 대체 되었고, 식들을 다시 풀면 식 (3.24)로 정리된다.

1945

$$P = -\rho g z + \rho g K (\eta e^{-i\omega t}) Z + C$$
(3.24)

상수 C는 Z=0일 때 0으로 하여 파의 주기에서 가장 큰 압력이 (îe^{-iwt})의 실수부가 *H*/2일 때 발생한다.

$$P_{\max} = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} Z \tag{3.25}$$

파랑의 위상각 β는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \arctan \frac{n_2}{n_1} \tag{3.26}$$

이 때 cosβ는 -1에서 1까지 변화하고, 진폭A는 다음 식으로 구한다.

$$A = \sqrt{\widehat{\mathfrak{n}_1} + \widehat{\mathfrak{n}_2}} \tag{3.27}$$

시간 0에서 순간 해수면 높이는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mathbf{n} = K[\mathbf{n}e^{-i\omega t}] = [\widehat{\mathbf{n}_1}\cos\omega t + \widehat{\mathbf{n}_2}\sin\omega t]$$
(3.28)

본 연구는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 복잡한 해안지역에 서의 모델링에 적합한 2차원 타원형 완경사 방정식을 사용한다(Lee, 1989).

개방해역(일정수심)에서의 산란파 중, 그 입사파는 다음과 같이 정의된다.

$$\widehat{\mathfrak{n}}_{I} = A e^{ikr\cos(\Theta - \Theta_{I})} = A \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_{n} i^{n} J_{n}(kr) \cos n(\Theta - \Theta_{I})$$
(3.29)

여기서, A=진폭 θ_I= x축과 이루는 입사파향 J_n = 제1종 n차 Bessel함수

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \text{when } n = 0 \\ 2 & \text{when } n \neq 0 \end{cases}$$
(3.30)

입사파는 x축의 양의 방향을 따라 이동은 입사파향의 θ₁가 0일 때 이며, Ω 영역을 유한요소망에 의한 수치모델영역, Ω₀는 무한대로 방사하는 외부영역으 로 정의한다. 영역 Γ 내부에 복잡한 지형과 구조물 및 섬들이 존재한다고 하면, Ω₀에서 입사파와 산란파의 합인 총파랑은 식 (3.31)과 같이 정의한다.

$$n_{ext} = \hat{n}_{I} + \hat{n}_{S}$$
(3.31)
식 (3.1)는 일반형으로 다음과 같이 쓸 수 있다.
 $\nabla \cdot (a \nabla \hat{n}) + b\hat{n} = 0$ (3.32)
여기서 $a \equiv CC_{g}$
 $b \equiv \frac{C_{g}}{C} \sigma^{2} + i_{0}w + iC_{g}\sigma_{X}$

Mei(1994)는 해안선과 구조물에서 식 (3.2)과 무한 영역에서의 식 (3.4)에 의 한 경계조건으로 식 (3.32)를 푸는 문제는 다음의 범함수 F가 일정하다는 것을 나타낸 바 있다.

$$F = \int \int_{\Omega} \frac{1}{2} [\tilde{a} (\nabla \hat{n})^2 - \tilde{b}\Phi^2] dA - \int_{B} \frac{1}{2} a \tilde{a} \hat{n}^2 ds + \int_{\Gamma} a \left[\left(\frac{1}{2} \hat{n}_{S+} n_{I} \right) \frac{\partial \hat{n}_{S}}{\partial n} - \hat{n} \frac{\partial (\hat{n}_{S+} + \hat{n}_{I})}{\partial n} \right] ds$$

$$(3.33)$$

범함수 F는 최소화하여 Ω 영역에서 파랑 포텐셜의 해를 찾을 수 있다. 방정 식의 선형행렬식으로 개방해역에서의 완경사 방정식의 복합요소식이 된다. 경 계조건에서, 해안 경계와 원형 개방경계를 통합하여, 반복법(Iterative method) 으로 연립방정식을 풀어 파랑장을 구할 수 있다. 이에 대한 상세한 유도와 해 석기법은 Lee(1989)를 참조하였다.





3.2 수치모델의 구성

Collection @ kmou

본 연구에서는 항만의 대규모 개발에 따른 항내 형상변화로 인해 항내로 입 사하는 장주기파랑에 대한 파랑응답해석을 위해 2차원 타원형 완경사 파랑 방 정식 모델을 구축하였다. 해석모델의 계산영역은 현재 개발 및 개발예정인 부 지를 포함한 울릉 사동항 전체해역의 공진현상을 재현할 수 있도록 충분히 넓 게 설정하였으며, 수심이 낮은 해역인 삼척항의 경우는 항만내 장주기 반응을 저감하기 위한 공진영역을 도입한 계획을 포함하도록 설정하였다. 계산영역의 수심은 대상항만에서 최신의 해도 및 수심측량 성과자료를 활용하여 해석모델 내에 재현하였다.

해석모델은 유한요소망을 통해 근사해를 도출하는 유한요소법(FEM; Finite Elements Method)를 바탕으로 하고 있으며, 요소 간의 절점간격은 파랑의 주 기에 따라 변하는 파장을 적절히 재현하기 위해 계산영역을 고려하였다. 또한 계산 영역 내 수심은 사동항의 경우 최대 200m 이상까지 존재하며 파랑의 진 행에 있어 쇄파에 의한 감쇠현상이 없도록 격자와 수심 및 입력조건을 구성하 여 수치모델실험을 수행하였다.

장주기파랑에 의한 항내 반응특성 해석을 위해 고려한 파랑의 제원은 다음과 같다. 입사파랑의 파고는 항내 공진현상에 의한 파고의 증폭비를 산정하기 위 해 1.0m로 설정하였고, 부진동 제 1모드의 공진 주기에 이르는 광범위한 주파 수대(10sec~1500sec)의 단일방향 규칙파를 사용하였으며, 파랑의 입사방향은 사동항을 따른 해안선에 내습빈도가 높은 ENE 파향에 대하여 수행하고자 한 다. 입사주기의 설정은 주기 10~95sec는 5sec 간격, 주기 100~300sec는 10sec 간격, 주기 320~1500sec는 20sec 간격으로 적용하였다.

수치모델실험의 파랑조건이 장주기파랑이고, 항만의 형상에 따른 항내 반응 특성 변화를 해석하고자함을 고려하여 계산영역 내 구조물의 반사율을 적용하

였다. 반사율의 적용은 항만설계 기준 및 Goda 이론에 입각하여 직립구조물 0.95, 방파제 0.97, 자연해빈은 0.93로 적용하였으며, 이는 일반적으로 장주기파 랑에 적용할 수 있는 반사율이고 기존의 연구성과 및 각 항만별 수치모델실험 의 반사율 적용조건은 다소 차이가 있을 수도 있으나, 정상적인 실험결과 비교 는 가능하므로 실험조건적용이 가능한 것으로 사료된다.

Table 3.1 Numerical me	odel conditions
------------------------	-----------------

Model Conditions	Sadong port			
Target range (m)	2500 by 2500			
Average element space (m)	30m			
Number of elements	Before : 8,507 After : 7,600 After(airport) : 7,146			
Shore boundary 🗧	Beach, vertical wall, TTP, armor rock, natural rock			
Open boundary	Semicircular			
Reflection coefficient	According to coast line			
Table 3.2 Applied wave conditions				

Table 3.2 Applied wave conditions

Wave Conditions					
Wave height (m)	1 (Normalized)				
	10~95	5 (interval)			
Wave period (sec)	100~300	10 (interval)			
	320~1500	20 (interval)			
Wave direction (°)	202.5	SE			





Fig. 3.2 Bathymetry of Sadong port , Before & After & After(airport)



Fig. 3.3 Numerical mesh for Sadong port ; Before & After & After(airport)







3.3 모델의 검증

본 연구는 항만의 형상에 따른 장주기파랑의 특성을 확인하기 위해 2차원 타 원형 완경사 방정식 모델을 적용하고자 한다. 이에 앞서 장방형만을 바탕으로 수행되었던 기존의 연구결과를 바탕으로 비선형성, 마찰효과 반사계수의 변화 에 따라 그 반응 특성을 비교 및 분석하여 해석모델의 적용성을 검토하였다.

기존 연구결과는 과거 Lee(1969)의 수리실험을 통해 Ippen과 Goda(1963)의 선형파 이론으로부터 구한 해석해가 만의 공진주파수 부근에서 큰 진폭를 나타 내었음을 밝혔으며, Chen(1986) 및 Lee(1989)는 해저마찰, 해안경계에서의 반사 계수의 영향과 주파수에 따른 반응특성을 수치모델을 통해 분석한 바 있다.

파랑에너지의 분산이 항내 공진현상 및 저면마찰에 의해 그 영향이 발생되는 비교지점을 Table 3.3에 나타내었고, Fig. 3.5의 수리모델 설치도를 통해 길이 L=0.3111m, 폭 B=0.0604m, 수심 H=0.2572m의 해역에 대하여 장방형 항만의 개방경계와 형태를 적용하여 Ippen과 Goda(1963), Lee(1971)가 각각 수행한 해 석해와 수리실험 결과를 이용하여 해석모델의 적용성을 검토하였다.

		- H	
Uh			

Amplitude	KI	Amplitude	KI
0.13	0.2	0.30	1.8
0.13	0.4	0.25	2.0
0.13	0.6	0.25	2.5
0.13	0.8	0.30	3.0
0.13	1.0	0.25	3.5
0.13	1.1	0.35	4.0
0.38	1.2	0.35	4.2
0.38	1.3	0.35	4.4
0.25	1.4	0.25	4.6
0.25	1.5	0.30	4.8
0.25	1.6	0.30	5.0

Table 3.3 Comparison points for the verification of the model





Fig. 3.5 Rectangular harbor with semi-circular open boundary



Fig. 3.6 Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting rectangular harbor

Fig. 3.5에서 나타난 항만 내측의 A지점을 기준으로 해안경계에서 해저마찰 을 고려하지 않은 완전반사의 조건을 적용한 선형과 모델의 결과는 Fig. 3.6와 같이 Ippen & Goda(1963)의 해석해와 잘 일치하는 것으로 나타났다.



Fig. 3.7 Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient

Fig. 3.7와 같이 완전반사에 대해 반사계수 를 변화시켰을 경우, 반사계수 가 감소함에 따라 진폭이 점차 감쇠되는 것으로 나타났으며 특히, 반사계수의 변화는 공진의 첨두 주파수에 영향을 미치지 않는다는 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 3.8 Harbor response curves for various values of the friction factor

수치모델에서의 해저면 마찰의 효과는 마찰계수 를 증가시킴에 따라 수리 모델실험 해석해에 접근하며, 마찰계수를 증가시킬 때 공진의 첨두 주파수가 큰 쪽으로 이동함이 나타났다. 두 번째의 공진 첨두치에 대해서 마찰로 인한 에너지 소산은 크게 나타나지 않으며, 단주기 파랑에서는 장주기 파랑보다 마 찰효과가 크게 작용되지 않음을 확인하였다. 이로써 항만의 형상에 따른 장주 기파랑의 특성을 확인하기 위한 해석모델의 적용성은 충분히 검토되었다.



제 4 장 수치실험 및 분석

4.1 장주기 파랑반응 해석

수치모델실험을 위해 구성된 해석모델을 바탕으로 대상항만으로 입사하는 장 주기파랑에 의한 공진현상 해석을 수행하였다. 공진현상 해석을 위해 항내 6개 정점에서 파고 증폭비를 산출하였으며(Fig. 4.1), 이를 바탕으로 대상항만의 개 발에 따른 총 3가지 경우(현재의 항만-1단계 개발 후 : BF, 2단계 개발 후 : AF, 공항개발계획 반영 : AFA)의 항만 형상변화를 고려하여 수치실험 결과를 비교하여 분석하였다. 이에 부가하여 항내 수질환경개선을 위한 해수유통구를 적용한 경우도 포함시키고 해수유통구 구간에 완전투과조건을 반영하였을 때 장주기 항만반응 특성에 대해서도 분석하였다.

4.1.1 모델 실험결과

PT-1(화물야적장 전면)에서의 해석결과는 다음과 같다. BF-CASE의 경우 제 1공진모드는 주기 460sec에서 발생하며 파고 증폭비는 9.20, 제 2 공진모드 는 주기 250sec에서 발생하며 파고 증폭비는 8.20 값을 갖지만 AF-CASE 및 AFA-CASE 에서 제 1 공진모드와 제 2 공진모드의 역전이 발생하며, 제 1 공 진모드는 주기 270sec에서 파고 증폭비 7.02(AF), 7.25(AFA) 제 2 공진모드는 주기 460sec에서 파고 증폭비 6.60(AF), 6.72(AFA) 값을 갖는다. 즉, BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE의 최대 파고 증폭비가 약 10~20%정도 감소하며, 최대 파고 증폭이 일어나는 공진주기가 190sec 가량 짧 아진다.

1945

PT-2(여객터미널 전면)에서의 해석결과는 정점 PT-1의 결과와 전체적으로 비슷한 경향을 띈다. BF-CASE의 경우 제 1공진모드는 주기 460sec에서 파고



증폭비 9.04, 제 2 공진모드는 주기 250sec에서 파고 증폭비 7.78 값을 가지며, AF-CASE 및 AFA-CASE 에서의 제 1공진모드와 제 2 공진모드의 역전이 발 생한다. AF-CASE 및 AFA-CASE의 제 1 공진모드는 주기 280sec(AF), 270sec(AFA)에서 파고 증폭비 6.68(AF), 6.88(AFA) 값을 가지며, 제 2 공진모 드는 주기 480sec(AF), 440sec(AFA)에서 6.50(AF), 6.62(AFA) 값을 갖는다. 즉, BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE의 최대 파고 증폭비가 약 10~20%정도 감소하며, 최대 파고 증폭이 일어나는 공진주기가 190sec 가 량 짧아진다.

PT-3(연결호안 전면)에서의 해석결과는 다음과 같다. BF-CASE의 제 1 공 진모드는 주기 460sec에서 파고 증폭비 8.28 값을 가지며, 제 2 공진모드는 주 기 250sec에서 5.60 값을 갖는다. AF-CASE 및 AFA-CASE에도 BF-CASE와 마찬가지로 주기 460sec에서 제 1 공진주기, 주기 280sec에서 제 2 공진주기를 갖지만 파고의 증폭비는 공항을 건설함으로 인해 제 1 공진주기에서 약 4%(5.76→6.14), 제 2 공진주기에서 약 9%(4.61→5.50) 정도의 파고 증폭비 상 승을 보인다. 즉, BF-CASE와 비교하여 AF-CASE에서 최대 파고 증폭비가 약 10~20%정도 감소하였지만, AFA-CASE에서 약 5~9% 가량 재증가 하는 것을 확인할 수 있다.

PT-4(여객부두 전면)에서의 해석결과는 앞선 정점들과 비교하여 100sec 이 내 주기의 파랑에 대해 파고 증폭비가 크게 증가한다. BF-CASE에서 제 1 공 진모드는 앞선 정점들과 마찬가지로 주기 460sec에서 파고 증폭비 7.39 값을 갖지만, 제 2 공진모드는 주기 160sec에서 4.49의 파고 증폭비를 가지며 앞서 도출된 정점들에 비해 제 2 공진모드의 주기가 짧아지는 현상이 나타난다. AF-CASE 및 AFA-CASE의 제 1 진공모드는 주기 480sec(AF), 460sec(AFA) 에서 파고 증폭비 5.20(AF), 5.28(AFA) 값을 가지며, 제 2 진공모드는 BF-CASE 보다 더 짧은 주기인 95sec에서 파고 증폭비 4.59(AF), 4.63(AFA) 값을 갖는다. 즉, BF-CASE와 비교하여 AF-CASE에서 제 1 진공주기의 최대 파고 증폭비가 약 20%정도 감소하였지만 제 2 진공주기의 최대 파고 증폭비는



일정하였고, 다만 제 2 진공주기가 65sec 가량 짧아진다.

PT-5(해군부두 전면)에서의 파고 증폭비는 앞선 정점들과 비교하여 전반적 으로 감소하는 양상을 띄며, BF-CASE의 제 1 공진모드는 주기 480sec에서 5.95의 파고 증폭비 값을 가지며, 주기 120sec에서 파고 증폭비 2.1의 값을 가지 며 제 2 공진모드가 발생한다. AF-CASE 및 AFA-CASE에서는 BF-CASE와 마찬가지로 주기 480sec에서 파고 증폭비 4.7을 가지며 제 1 공진모드가 나타 나고, 주기 55sec에서 파고 증폭비 2.4(AF), 1.9(AFA)를 가지며 제 2 공진모드 가 발생한다. 이는 BF-CASE의 제 2 공진모드 주기의 절반에 해당하는 값이 다.

PT-6(울릉공항 매립지 전면)에서의 결과는 다음과 같다. 100sec 이상 주기의 파랑에 대해 파고 증폭비가 크게 감소하며, 오히려 100sec 이내 주기의 파랑에 대한 파고 증폭비가 크게 증가한다. 이는 정점이 항내에 위치하지 않아 항내 형 상에 따른 공진현상의 영향을 받지 않기 때문으로 보이며, 또한 전체적으로 개 발사업에 따른 파고 증폭비의 변화를 찾아 볼 수 없다.

항내 수절환경개선을 위한 해수유통구 구간에 완전투과조건을 반영하였을 때 장주기 항만반응 특성의 해석결과는 다음과 같다. 해수유통구로 인해 각 정점 의 최대 파고 증폭비가 BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE에서 전반적으로 약 5~20%정도 감소하는 형태가 나타나지만 오히려 100sec 이내 주기의 파랑에 대해서는 파고 증폭비가 전체적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 특히, BF-CASE에서는 해수유통구의 적용으로 인해 정점 PT-1, PT-2에서 제 1 진공모드와 제 2진공모드의 역전현상이 발생하며, 전체적으로 제 1 진공모드 및 제 2 진공모드의 주기값은 해수유통구 적용 이전과 큰 차이를 나타내지 않 는다. 다만 설계에서는 해수유통구를 평균해면 이하로 계획한 암거형식의 구조 이기 때문에 본 연구에서 완전투과조건을 적용한 해석결과는 증폭비의 감소가 실제보다 과대해석된 것으로 보인다.

항만의 형상변화에 따른 수치모델의 해석결과들을 각 케이스로 분류하여, 입



- 42 -

사파랑의 주기에 따른 항내 파고 증폭비를 통해 그래프로 제시하였으며(Fig. 4.2~4.31), 이를 통해 각 정점에 따른 각 공진모드의 주기 및 개발사업으로 인 해 발생하는 파고 증폭비의 중·감소를 파악할 수 있다. 그래프 상에서 가장 높 은 파고증폭비에 해당하는 주기를 제 1 공진모드(Mode 1), 다음으로 높은 파고 증폭비를 나타내는 주기를 제 2 공진모드(Mode 2)로 정의하며, 이는 대상항만 의 형상 및 대상항만의 수심에 의해 결정되는 수치로서 각 모드에 해당하는 주 기를 갖는 파랑이 입사할 경우 파랑의 공진현상에 의해 파고의 증폭현상이 발 생하여 항내정온도 감소 및 선박, 항만구조물의 피해를 유발한다. 각 케이스의 공진모드(BF : 480s/460s/250s/160s, AF : 480s/460s/280s/270s/95s, AFA : 460s/440s/280s/270s/95s)에 해당하는 해석결과를 등파고선도를 통해 제시하였 으며(Fig. 4.32~4.45), 이를 통해 항만 형상에 따른 공진모드의 주기를 갖는 파 랑이 입사할 경우 항내의 전반적인 파랑반응 특성문포를 확인할 수 있다.







Fig. 4.1 Selected points for harbor oscillation analysis



Fig. 4.3 Result of Numerical model simulation at PT-2, Non-circulation



Fig. 4.5 Result of Numerical model simulation at PT-4, Non-circulation



Fig. 4.6 Result of Numerical model simulation at PT-5, Non-circulation



Fig. 4.7 Result of Numerical model simulation at PT-6, Non-circulation



Fig. 4.8 Result of Numerical model simulation at PT-1, Circulation



Fig. 4.9 Result of Numerical model simulation at PT-2, Circulation



Fig. 4.10 Result of Numerical model simulation at PT-3, Circulation



Fig. 4.11 Result of Numerical model simulation at PT-4, Circulation



Fig. 4.12 Result of Numerical model simulation at PT-5, Circulation



Fig. 4.13 Result of Numerical model simulation at PT-6, Circulation



Fig. 4.14 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-1, Circulation



Fig. 4.15 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-2, Circulation



Fig. 4.16 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-3, Circulation



Fig. 4.17 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-4, Circulation



Fig. 4.18 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-5, Circulation



Fig. 4.19 Result of Numerical model simulation BF-CASE at PT-6, Circulation



Fig. 4.20 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-1, Circulation



Fig. 4.21 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-2, Circulation



Fig. 4.22 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-3, Circulation



Fig. 4.23 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-4, Circulation



Fig. 4.24 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-5, Circulation



Fig. 4.25 Result of Numerical model simulation AF-CASE at PT-6, Circulation



Fig. 4.26 Result of Numerical model simulation AFA-CASE at PT-1,



Fig. 4.27 Result of Numerical model simulation AFA-CASE at PT-2,

Circulation



Fig. 4.28 Result of Numerical model simulation AFA-CASE at PT-3,





Circulation



Fig. 4.30 Result of Numerical model simulation AFA-CASE at PT-5,



Fig. 4.31 Result of Numerical model simulation AFA-CASE at PT-6,

Circulation



Fig. 4.33 Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5 $^\circ$



Fig. 4.35 Amplification ratio of BF-CASE, H=1.0m T=160s Dir=202.5 $^\circ$


Fig. 4.37 Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5 $^{\circ}$



Fig. 4.38 Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=280s Dir=202.5°



Fig. 4.39 Amplification ratio of AF-CASE, H=1.0m T=270s Dir=202.5°



Fig. 4.41 Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=460s Dir=202.5°



Fig. 4.43 Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=280s Dir=202.5°



Fig. 4.44 Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=270s Dir=202.5°



Fig. 4.45 Amplification ratio of AFA-CASE, H=1.0m T=95s Dir=202.5 $^\circ$

4.1.2 실험 결과의 분석

항내 부진동 및 장주기파랑의 특성을 해석하기 위한 수치모델실험의 결과는 다음과 같다. 종합적으로 울릉 사동항 내의 제 1 공진주기는 460~480sec로, 5.95~9.20의 파고 중폭비를 나타내고 있어 항내부진동 현상이 발생하는 것으 로 사료된다. BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE의 최대 파고 중폭비는 6~9에서 4~7으로 감소하는 현상이 나타나며, 특히, PT-1(화물야적장 전면), PT-2(여객터미널 전면)에서는 제 1 공진모드와 제 2 공진모드가 역전하 는 현상이 나타난다. 하지만 AF-CASE 및 AFA-CASE의 100sec 이내 주기의 파랑에 대해서는 오히려 파고 중폭비가 증가하는 현상을 보이고 있으며, 특히 항입구부에서 가까운 PT-4에서 크게 증가하는 것으로 나타났다. BF-CASE의 파고 증폭비 산출 정점에서의 최대 파고 증폭비는 PT-1에서 9.2, PT-2에서 9.04, PT-3에서 8.68, PT-4에서 7.39, PT-5에서 6이며 이는 항내 측의 정점일 수록 큰 증폭비를 갖는다고 볼 수 있다.

각 정점의 주기에 따른 파고 증폭비 값을 Table을 통해 제시하였다(Table 4.1~4.18).



POINT 1, Before							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.3111	250	8.233(Mode2)	860	2.8905		
15	0.1572	260	7.8565	880	2.8224		
20	0.0477	270	7.3194	900	2.7607		
25	0.3864	280	6.8271	920	2.7046		
30	0.0839	290	6.4478	940	2.6532		
35	0.2505	300	6.187	960	2.6063		
40	0.0515	320	5.9703	980	2.5631		
45	0.3244	340	6.071	1000	2.5233		
50	0.2599	360	6.4159	1020	2.4866		
55	0.8164	380	6.9574	1040	2.4525		
60	3.1077	400	7.6444	1060	2.4209		
65	1.5969	420	8.3728	1080	2.3917		
70	0.6997	440	8.9576	1100	2.3643		
75	0.8422	460	9.183(Mode1)	1120	2.3389		
80	1.6238 🧲	480	8.9543	1140	2.3149		
85	1.87	500	8.3799	1160	2.2926		
90	0.3639	520	7.6582	1180	2.2717		
95	1.1106	540	6.9384	1200	2.2519		
100	1.6954	560	6.2913	1220	2.2333		
110	1.4207	580	5.7365	1240	2.2158		
120	1.0153	600	5.2691	1260	2.1994		
130	0.7497	620	4.8774	1280	2.1838		
140	1.7008	640	4.5478	1300	2.169		
150	2.1285	660	4.2692	1320	2.1551		
160	3.8662	680	4.0321	1340	2.1419		
170	5.1201	700	3.8288	1360	2.1294		
180	4.6697	720	3.653	1380	2.1173		
190	5.3019	740	3.4998	1400	2.1061		
200	6.2158	760	3.3659	1420	2.0954		
210	6.2135	780	3.2477	1440	2.0851		
220	5.8244	800	3.1429	1460	2.0752		
230	5.6825	820	3.0494	1480	2.0658		
240	7.9942	840	2.9658	1500	2.0568		

Table 4.1 Result of Numerical model simulation at PT-1, before project

POINT 1, After							
Period	Amplification	Perio	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	d (s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.4367	250	6.2181	860	2.9179		
15	0.6868	260	6.829	880	2.8569		
20	0.3043	270	7.0159(Mode 1)	900	2.8013		
25	0.9017	280	6.8797	920	2.7502		
30	0.2015	290	6.594	940	2.7032		
35	1.1671	300	6.3108	960	2.6599		
40	0.4603	320	5.941	980	2.6198		
45	0.4845	340	5.8039	1000	2.5827		
50	0.3479	360	5.8555	1020	2.5482		
55	3.0098	380	6.0239	1040	2.5164		
60	3.5497	400	6.2436	1060	2.4864		
65	1.3672	420	6.451	1080	2.4587		
70	0.5028	440	6.5837	1100	2.4327		
75	0.1297	460	6.5973(Mode 2)	1120	2.4084		
80	0.2791 🧲	480	6.4799	1140	2.3855		
85	0.2389	500	6.2533	1160	2.3642		
90	0.7677	520	5.9573	1180	2.344		
95	1.0537	540	5.6323	1200	2.3253		
100	0.857	560	5.3072	1220	2.3074		
110	0.6498	580	4.9994	1240	2.2907		
120	0.5614	600	4.7174	1260	2.2749		
130	0.7404	620	4.4638	1280	2.26		
140	1.1496	640	4.2381	1300	2.2458		
150	1.5211	660	4.0379	1320	2.2326		
160	1.9966	680	3.8606	1340	2.2201		
170	3.0173	700	3.7034	1360	2.2082		
180	4.1709	720	3.564	1380	2.1969		
190	4.8256	740	3.4397	1400	2.1861		
200	4.7159	760	3.3285	1420	2.176		
210	4.0573	780	3.2289	1440	2.1663		
220	3.6761	800	3.1391	1460	2.1572		
230	3.8031	820	3.0581	1480	2.1486		
240	5.1019	840	2.9847	1500	2.1404		

Table 4.2 Result of Numerical model simulation at PT-1, after project

POINT 1, After(airport)							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.0344	250	6.468	860	2.866		
15	0.1219	260	7.0597	880	2.8077		
20	0.1248	270	7.2465(Mode1)	900	2.7544		
25	0.2589	280	7.103	920	2.7056		
30	0.2623	290	6.8	940	2.6606		
35	0.9457	300	6.491	960	2.6192		
40	0.4299	320	6.0873	980	2.5811		
45	0.4604	340	5.9491	1000	2.5455		
50	0.318	360	6.0096	1020	2.5128		
55	2.4746	380	6.1924	1040	2.4821		
60	3.3264	400	6.4253	1060	2.4537		
65	1.2225	420	6.6339	1080	2.4271		
70	0.4516	440	6.7465	1100	2.4022		
75	0.021	460	6.7188(Mode2)	1120	2.3789		
80	0.1514 🧲	480	6.5484	1140	2.3573		
85	0.4503	500	6.2696	1160	2.3366		
90	0.872	520	5.9316	1180	2.3173		
95	1.0795	540	5.5767	1200	2.2991		
100	0.9487	560	5.2327	1220	2.282		
110	0.8276	580	4.9147	1240	2.266		
120	0.448	600	4.6281	1260	2.266		
130	0.6305	620	4.3737	1280	2.266		
140	1.146	640	4.1495	1300	2.2362		
150	1.4542	660	3.9521	1320	2.2093		
160	1.899	680	3.7783	1340	2.197		
170	2.8519	700	3.625	1360	2.1853		
180	3.8424	720	3.4893	1380	2.174		
190	4.5306	740	3.3687	1400	2.1635		
200	4.5724	760	3.2613	1420	2.1533		
210	4.0772	780	3.1652	1440	2.1437		
220	3.8092	800	3.0787	1460	2.1345		
230	4.0508	820	3.0008	1480	2.1259		
240	5.4223	840	2.9302	1500	2.1174		

Table 4.3 Result of Numerical model simulation at PT-1, after airport project

POINT 2, Before							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.0602	250	7.7788(Mode2)	860	2.8773		
15	0.119	260	7.4566	880	2.8101		
20	0.0606	270	6.9742	900	2.7492		
25	0.2523	280	6.5279	920	2.6938		
30	0.566	290	6.185	940	2.6431		
35	0.2853	300	5.9513	960	2.5967		
40	0.1352	320	5.7712	980	2.5541		
45	1.7979	340	5.8914	1000	2.5148		
50	1.2325	360	6.247	1020	2.4785		
55	1.5275	380	6.7934	1040	2.4448		
60	2.719	400	7.4819	1060	2.4138		
65	0.6719	420	8.2118	1080	2.3847		
70	0.1643 📉	440	8.8012	1100	2.3578		
75	0.2203	460	9.0362(Mode1)	1120	2.3325		
80	0.5733 🧲	480	8.8232	1140	2.3089		
85	0.8189	500	8.2669	1160	2.2868		
90	0.1851	520	7.5623	1180	2.2662		
95	0.6288	540	6.8577	1200	2.2467		
100	1.0418	560	6.2236	1220	2.2283		
110	0.9797	580	5.6788	1240	2.2111		
120	0.7545	600	5.2197	1260	2.1948		
130	0.5876	620	4.8344	1280	2.1793		
140	1.3878	640	4.5101	1300	2.1648		
150	1.7902	660	4.236	1320	2.1509		
160	3.3304	680	4.0027	1340	2.1378		
170	4.4947	700	3.8022	1360	2.1255		
180	4.1632	720	3.6291	1380	2.1137		
190	4.7872	740	3.4783	1400	2.1025		
200	5.6742	760	3.346	1420	2.0918		
210	5.7243	780	3.2296	1440	2.0816		
220	5.4073	800	3.1263	1460	2.0719		
230	5.3109	820	3.0341	1480	2.0628		
240	7.5146	840	2.9516	1500	2.0538		

Table 4.4 Result of Numerical model simulation at PT-2, before project

POINT 2, After							
Period	Amplification	Perio	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	d (s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.2699	250	4.7902	860	2.9043		
15	0.1328	260	5.8686	880	2.8441		
20	0.4894	270	6.4748	900	2.7893		
25	0.517	280	6.6777(Mode 1)	920	2.739		
30	0.786	290	6.5719	940	2.6926		
35	0.9563	300	6.3196	960	2.6501		
40	0.9045	320	6.0651	980	2.6105		
45	1.9719	340	5.7382	1000	2.5739		
50	1.7042	360	5.6287	1020	2.5399		
55	5.843	380	5.698	1040	2.5084		
60	3.1538	400	5.8784	1060	2.4789		
65	0.5778	420	6.1078	1080	2.4515		
70	0.1178	440	6.3238	1100	2.426		
75	0.0337 🥿	460	6.4658	1120	2.402		
80	0.0973 🧲	480	6.4891(Mode 2)	1140	2.3794		
85	0.1034	500	6.3821	1160	2.3583		
90	0.3859	520	6.1663	1180	2.3385		
95	0.5916	540	5.8812	1200	2.32		
100	0.5223	560	5.5651	1220	2.3023		
110	0.4453	580	5.2483	1240	2.2857		
120	0.4152	600	4.9476	1260	2.2701		
130	0.5781	620	4.6719	1280	2.2554		
140	0.9344	640	4.4236	1300	2.2415		
150	1.2748	660	4.202	1320	2.2284		
160	1.7145	680	4.0056	1340	2.2159		
170	2.6423	700	3.8317	1360	2.204		
180	3.7101	720	3.6772	1380	2.1929		
190	4.3492	740	3.54	1400	2.1824		
200	4.2964	760	3.4178	1420	2.1725		
210	3.7307	780	3.3085	1440	2.1629		
220	3.4072	800	3.2104	1460	2.1541		
230	3.5495	820	3.1221	1480	2.1455		
240	4.7902	840	3.0423	1500	2.1372		

Table 4.5 Result of Numerical model simulation at PT-2, after project

POINT 2, After(airport)							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.1226	250	6.0848	860	2.8521		
15	0.1511	260	6.6721	880	2.7947		
20	0.2432	270	6.8776(Mode1)	900	2.7422		
25	0.1517	280	6.7678	920	2.694		
30	0.6934	290	6.5015	940	2.6499		
35	0.7167	300	6.224	960	2.6089		
40	0.8179	320	5.8674	980	2.5714		
45	1.9607	340	5.7586	1000	2.5365		
50	1.5063	360	5.8381	1020	2.5041		
55	4.5304	380	6.0341	1040	2.4739		
60	2.8507	400	6.2772	1060	2.4459		
65	0.5059	420	6.4952	1080	2.4199		
70	0.1017	440	6.6184(Mode2)	1100	2.3953		
75	0.0045 💦	460	6.6019	1120	2.3724		
80	0.0502 🧲	480	6.4437	1140	2.3509		
85	0.1867	500	6.1774	1160	2.3308		
90	0.4238	520	5.8509	1180	2.3117		
95	0.5885	540	5.5062	1200	2.2938		
100	0.5637	560	5.1714	1220	2.2769		
110	0.5556	580	4.8609	1240	2.2609		
120	0.3257	600	4.5808	1260	2.2609		
130	0.4857	620	4.3319	1280	2.2609		
140	0.9214	640	4.1123	1300	2.2315		
150	1.207	660	3.9187	1320	2.205		
160	1.6173	680	3.7484	1340	2.1928		
170	2.4789	700	3.5979	1360	2.1813		
180	3.3953	720	3.4648	1380	2.1704		
190	4.0596	740	3.3464	1400	2.1599		
200	4.145	760	3.2406	1420	2.15		
210	3.7323	780	3.1462	1440	2.1405		
220	3.5153	800	3.0613	1460	2.1313		
230	3.7655	820	2.9845	1480	2.1228		
240	5.0728	840	2.9152	1500	2.1146		

Table 4.6 Result of Numerical model simulation at PT-2, after airport project

POINT 3, Before							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.5415	250	5.5959(Mode2)	860	2.8074		
15	0.1559	260	5.5192	880	2.745		
20	0.0747	270	5.2898	900	2.6884		
25	0.1981	280	5.0589	920	2.6367		
30	0.4318	290	4.8859	940	2.5896		
35	0.2912	300	4.782	960	2.5463		
40	0.0285	320	4.7734	980	2.5065		
45	0.8984	340	4.9857	1000	2.4697		
50	0.6707	360	5.3901	1020	2.436		
55	0.6406	380	5.9568	1040	2.4045		
60	1.4991	400	6.6502	1060	2.3755		
65	1.0126	420	7.384	1080	2.3483		
70	0.5118	440	7.9931	1100	2.323		
75	0.6357 🥿	460	8.2774(Mode1)	1120	2.2994		
80	1.1874 🧲	480	8.1422	1140	2.2773		
85	1.2712	500	7.6783	1160	2.2566		
90	0.2227	520	7.0638	1180	2.2372		
95	0.6027	540	6.4378	1200	2.2189		
100	0.7915	560	5.8688	1220	2.2016		
110	0.4584	580	5.3766	1240	2.1855		
120	0.2107	600	4.9599	1260	2.1701		
130	0.1099	620	4.6088	1280	2.1556		
140	0.2874	640	4.3125	1300	2.142		
150	0.4946	660	4.0616	1320	2.1291		
160	1.1639	680	3.8471	1340	2.1168		
170	1.868	700	3.6628	1360	2.1051		
180	1.9727	720	3.5032	1380	2.094		
190	2.508	740	3.3642	1400	2.0834		
200	3.2283	760	3.2421	1420	2.0735		
210	3.4762	780	3.1341	1440	2.0638		
220	3.4638	800	3.0385	1460	2.0547		
230	3.5582	820	2.9531	1480	2.0461		
240	5.2309	840	2.8765	1500	2.0377		

Table 4.7 Result of Numerical model simulation at PT-3, before project

	POINT 3, After							
Period	Amplification	Perio	Amplification	Period	Amplification			
(s)	ratio	d (s)	ratio	(s)	ratio			
10	0.3994	250	3.6948	860	2.8091			
15	0.4268	260	4.2479	880	2.7553			
20	0.1883	270	4.5386	900	2.7062			
25	0.3178	280	4.6117(Mode 2)	920	2.661			
30	0.3099	290	4.5564	940	2.6194			
35	1.1095	300	4.4771	960	2.5809			
40	0.3614	320	4.4137	980	2.5452			
45	0.4483	340	4.4749	1000	2.5123			
50	0.7157	360	4.6537	1020	2.4817			
55	2.4451	380	4.9091	1040	2.4532			
60	1.5288	400	5.1971	1060	2.4265			
65	0.7978	420	5.4678	1080	2.4018			
70	0.3699	440	5.6674	1100	2.3785			
75	0.1024	460	5.7552(Mode 1)	1120	2.3567			
80	0.244 🧲	480	5.7185	1140	2.3364			
85	0.2055	500	5.5748	1160	2.3172			
90	0.63	520	5.3587	1180	2.2991			
95	0.8036	540	5.1062	1200	2.282			
100	0.596	560	4.8454	1220	2.2662			
110	0.3589	580	4.5933	1240	2.251			
120	0.2325	600	4.3589	1260	2.2369			
130	0.2167	620	4.1458	1280	2.2234			
140	0.2319	640	3.9542	1300	2.2106			
150	0.2458	660	3.7833	1320	2.1987			
160	0.3606	680	3.6312	1340	2.1873			
170	0.7063	700	3.4957	1360	2.1766			
180	1.2161	720	3.3748	1380	2.1664			
190	1.68	740	3.2666	1400	2.1567			
200	1.8855	760	3.1697	1420	2.1476			
210	1.8144	780	3.0824	1440	2.1388			
220	1.7995	800	3.0037	1460	2.1306			
230	2.0101	820	2.9326	1480	2.1226			
240	2.8725	840	2.8681	1500	2.1153			

Table 4.8 Result of Numerical model simulation at PT-3, after project

POINT 3, After(airport)							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.0982	250	4.6667	860	2.7956		
15	0.5987	260	5.2289	880	2.7419		
20	0.35	270	5.4954	900	2.6928		
25	0.1695	280	5.5044(Mode2)	920	2.6476		
30	0.7204	290	5.3691	940	2.6061		
35	0.5452	300	5.2087	960	2.568		
40	0.3158	320	5.024	980	2.5325		
45	1.1826	340	5.024	1000	2.4997		
50	0.8193	360	5.173	1020	2.4695		
55	1.6914	380	5.4165	1040	2.4411		
60	1.5822	400	5.6971	1060	2.4148		
65	0.7345	420	5.9506	1080	2.3901		
70	0.2959 🚬	440	6.1126	1100	2.3671		
75	0.0136 🚬	460	6.1405(Mode1)	1120	2.3455		
80	0.0922 🧲	480	6.0301	1140	2.3253		
85	0.2462	500	5.8117	1160	2.3062		
90	0.4154	520	5.5306	1180	2.2884		
95	0.4327	540	5.2266	1200	2.2715		
100	0.3111	560	4.927	1220	2.2556		
110	0.1664	580	4.6467	1240	2.2405		
120	0.0594	600	4.3924	1260	2.2405		
130	0.102	620	4.1652	1280	2.2405		
140	0.2708	640	3.9638	1300	2.2129		
150	0.4514	660	3.7858	1320	2.1879		
160	0.719	680	3.6286	1340	2.1764		
170	1.2529	700	3.4895	1360	2.1656		
180	1.8886	720	3.3661	1380	2.1551		
190	2.4378	740	3.2562	1400	2.1453		
200	2.6486	760	3.1581	1420	2.1358		
210	2.5067	780	3.0701	1440	2.127		
220	2.4583	800	2.9909	1460	2.1184		
230	2.7287	820	2.9193	1480	2.1101		
240	3.7913	840	2.8546	1500	2.1025		

Table 4.9 Result of Numerical model simulation at PT-3, after airport project

POINT 4, Before							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.4408	250	3.0808	860	2.7295		
15	0.1891	260	3.218	880	2.6725		
20	0.3269	270	3.2556	900	2.6206		
25	1.0611	280	3.2692	920	2.5733		
30	0.1092	290	3.2971	940	2.5301		
35	0.7489	300	3.3515	960	2.4903		
40	0.2772	320	3.5576	980	2.4539		
45	0.8474	340	3.8908	1000	2.4202		
50	0.4943	360	4.3621	1020	2.389		
55	1.3198	380	4.9604	1040	2.3601		
60	1.6883	400	5.6664	1060	2.3331		
65	1.2927	420	6.411	1080	2.3082		
70	0.3436	440	7.0488	1100	2.285		
75	0.7807	460	7.3947(Mode1)	1120	2.2631		
80	1.9145 🧲	480	7.3526	1140	2.2428		
85	2.9432	500	6.9971	1160	2.2237		
90	2.2796	520	6.488	1180	2.2057		
95	4.3854	540	5.9541	1200	2.1888		
100	2.8287	560	5.4609	1220	2.173		
110	0.843	580	5.0302	1240	2.158		
120	2.7387	600	4.6627	1260	2.1437		
130	2.4475	620	4.3514	1280	2.1304		
140	3.7645	640	4.0874	1300	2.1178		
150	3.4328	660	3.863	1320	2.1058		
160	4.4855(Mode2)	680	3.6706	1340	2.0942		
170	4.4736	700	3.5048	1360	2.0835		
180	3.1656	720	3.361	1380	2.0731		
190	2.8116	740	3.2352	1400	2.0635		
200	2.6401	760	3.1247	1420	2.054		
210	2.2039	780	3.027	1440	2.0451		
220	1.8694	800	2.94	1460	2.0367		
230	1.8289	820	2.8623	1480	2.0287		
240	2.7408	840	2.7925	1500	2.0209		

Table 4.10 Result of Numerical model simulation at PT-4, before project

POINT 4, After							
Perio	Amplification	Perio	Amplification	Period	Amplification		
d (s)	ratio	d (s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.2696	250	2.1778	860	2.7366		
15	0.7164	260	2.6291	880	2.6877		
20	2.1516	270	2.941	900	2.6429		
25	1.8823	280	3.1212	920	2.6015		
30	0.5499	290	3.2023	940	2.5635		
35	2.8039	300	3.2475	960	2.5284		
40	1.9608	320	3.3787	980	2.4957		
45	3.3021	340	3.5719	1000	2.4655		
50	1.3796	360	3.8356	1020	2.4375		
55	4.1047	380	4.1501	1040	2.4113		
60	3.6562	400	4.4854	1060	2.3869		
65	2.4599	420	4.7999	1080	2.3642		
70	1.9548 📉	440	5.046	1100	2.3427		
75	1.6027	460	5.1852	1120	2.3228		
80	1.8271 🧲	480	5.2037(Mode 1)	1140	2.3038		
85	1.2614	500	5.1163	1160	2.2861		
90	3.8085	520	4.9545	1180	2.2692		
95	4.5891(Mode 2)	540	4.7516	1200	2.2536		
100	3.2848	560	4.5346	1220	2.2386		
110	1.9528	580	4.32	1240	2.2247		
120	1.3348	600	4.1178	1260	2.2116		
130	1.3894	620	3.9321	1280	2.1992		
140	1.7075	640	3.7641	1300	2.1874		
150	1.8036	660	3.613	1320	2.1762		
160	1.8729	680	3.4777	1340	2.1656		
170	2.24	700	3.3566	1360	2.1555		
180	2.4453	720	3.2481	1380	2.146		
190	2.2438	740	3.1509	1400	2.1372		
200	1.7763	760	3.0636	1420	2.1287		
210	1.3052	780	2.9847	1440	2.1205		
220	1.0913	800	2.9134	1460	2.1129		
230	1.1319	820	2.8487	1480	2.1056		
240	1.6274	840	2.7901	1500	2.0986		

Table 4.11 Result of Numerical model simulation at PT-4, after project

POINT 4, After(airport)							
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification		
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio		
10	0.1695	250	2.2653	860	2.6904		
15	0.2008	260	2.7093	880	2.6436		
20	0.4268	270	3.0309	900	2.6008		
25	0.4804	280	3.2174	920	2.5612		
30	0.4989	290	3.3005	940	2.525		
35	1.8441	300	3.341	960	2.4915		
40	1.737	320	3.4575	980	2.4605		
45	3.0295	340	3.654	1000	2.4316		
50	1.1424	360	3.9306	1020	2.4049		
55	3.1856	380	4.2616	1040	2.38		
60	3.2551	400	4.6119	1060	2.3567		
65	2.2117	420	4.9317	1080	2.3351		
70	1.7668	440	5.1666	1100	2.3146		
75	0.6645	460	5.277(Mode1)	1120	2.2956		
80	1.0178 🧲	480	5.2561	1140	2.2777		
85	2.4316	500	5.1278	1160	2.2608		
90	4.2372	520	4.9316	1180	2.245		
95	4.6311(Mode2)	540	4.7039	1200	2.2301		
100	3.5817	560	4.4707	1220	2.216		
110	2.449	580	4.2472	1240	2.2026		
120	1.0628	600	4.0406	1260	2.2026		
130	1.1674	620	3.8539	1280	2.2026		
140	1.6754	640	3.6868	1300	2.1779		
150	1.6942	660	3.5378	1320	2.1559		
160	1.7545	680	3.4053	1340	2.1457		
170	2.0869	700	3.2874	1360	2.136		
180	2.2197	720	3.1823	1380	2.1267		
190	2.0715	740	3.0884	1400	2.118		
200	1.6793	760	3.0041	1420	2.1097		
210	1.2672	780	2.9282	1440	2.1016		
220	1.1028	800	2.8599	1460	2.094		
230	1.2005	820	2.7979	1480	2.0866		
240	1.7267	840	2.7418	1500	2.0797		

Table 4.12 Result of Numerical model simulation at PT-4, after airport project

POINT 5, Before					
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio
10	0.3735	250	1.8994	860	2.57
15	0.3095	260	1.7355	880	2.5232
20	0.5027	270	1.6347	900	2.4808
25	0.3309	280	1.6148	920	2.4418
30	0.7353	290	1.6601	940	2.4063
35	1.5004	300	1.7503	960	2.3734
40	0.4907	320	2.0222	980	2.3432
45	0.5483	340	2.3884	1000	2.3153
50	0.5466	360	2.8601	1020	2.2895
55	1.6018	380	3.4309	1040	2.2654
60	2.4039	400	4.094	1060	2.243
65	0.752	420	4.8022	1080	2.2223
70	0.2833	440	5.4419	1100	2.2027
75	0.3303 🥿	460	5.857	1120	2.1845
80	0.5534 🧲	480	5.9528(Mode1)	1140	2.1674
85	0.1889	500	5.7726	1160	2.1514
90	0.5665	520	5.4408	1180	2.1364
95	0.8213	540	5.0648	1200	2.1223
100	0.6401	560	4.7036	1220	2.109
110	0.8558	580	4.3808	1240	2.0963
120	2.104(Mode 2)	600	4.1009	1260	2.0845
130	1.0693	620	3.8608	1280	2.0732
140	0.7926	640	3.6555	1300	2.0624
150	0.4124	660	3.4794	1320	2.0524
160	0.8281	680	3.3276	1340	2.0429
170	1.4449	700	3.1959	1360	2.0337
180	1.5977	720	3.081	1380	2.025
190	1.9491	740	2.9802	1400	2.0169
200	2.2529	760	2.8911	1420	2.0089
210	2.1079	780	2.8121	1440	2.0015
220	1.7957	800	2.7416	1460	1.9943
230	1.5696	820	2.6785	1480	1.9875
240	2.0098	840	2.6214	1500	1.981

Table 4.13 Result of Numerical model simulation at PT-5, before project

POINT 5, After					
Perio	Amplification	Perio		Period	Amplification
d (s)	ratio	d (s)	Amplification ratio	(s)	ratio
10	0.4723	250	1.5937	860	2.6551
15	0.2597	260	1.8623	880	2.6111
20	0.7434	270	2.0704	900	2.571
25	0.6439	280	2.2221	920	2.5338
30	0.4164	290	2.3222	940	2.4997
35	1.1915	300	2.4009	960	2.4682
40	0.3847	320	2.599	980	2.439
45	0.6774	340	2.8442	1000	2.4117
50	0.2702	360	3.1426	1020	2.3864
55	2.3993(Mode 2)	380	3.4808	1040	2.3628
60	2.0132	400	3.8362	1060	2.3408
65	1.4977	420	4.1734	1080	2.3201
70	0.8621	440	4.4487	1100	2.3007
75	0.6852	460	4.6259	1120	2.2825
80	0.9803 🧲	480	4.6902(Mode 1)	1140	2.2656
85	0.5109	500	4.6524	1160	2.2494
90	0.9728	520	4.5404	1180	2.2345
95	0.7432	540	4.3844	1200	2.2201
100	0.3852	560	4.2094	1220	2.2067
110	0.4089	580	4.0319	1240	2.1941
120	0.4641	600	< 3.8616	1260	2.182
130	0.6424	620	3.7033	1280	2.1706
140	0.9539	640	3.5586	1300	2.1601
150	1.1803	660	3.4278	1320	2.1498
160	1.3997	680	3.3099	1340	2.1403
170	1.8736	700	3.2041	1360	2.1313
180	2.263	720	3.1088	1380	2.1225
190	2.2609	740	3.0229	1400	2.1143
200	1.8912	760	2.9457	1420	2.1065
210	1.3934	780	2.8758	1440	2.0992
220	1.0941	800	2.8127	1460	2.0923
230	1.0087	820	2.7552	1480	2.0855
240	1.2898	840	2.7028	1500	2.0791

Table 4.14 Result of Numerical model simulation at PT-5, after project

POINT 5, After(airport)					
Period	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification
(s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio
10	0.1025	250	1.6448	860	2.6102
15	0.1194	260	1.9011	880	2.5683
20	0.4099	270	2.1159	900	2.5301
25	0.2252	280	2.2739	920	2.4949
30	0.3815	290	2.3794	940	2.4622
35	0.9149	300	2.4583	960	2.4322
40	0.3341	320	2.6489	980	2.4043
45	0.8207	340	2.9002	1000	2.3786
50	0.2508	360	3.2118	1020	2.3546
55	1.937(Mode 2)	380	3.5667	1040	2.332
60	1.9109	400	3.9376	1060	2.3112
65	1.4545	420	4.2814	1080	2.2918
70	0.8371	440	4.5491	1100	2.2734
75	0.3322	460	4.7025	1120	2.2562
80	0.5379 🧲	480	4.7325(Mode1)	1140	2.2401
85	0.9822	500	4.659	1160	2.2248
90	1.1351	520	4.516	1180	2.2106
95	0.7862	540	4.3373	1200	2.197
100	0.4359	560	4.1476	1220	2.1844
110	0.5008	580	3.9618	1240	2.1722
120	0.3785	600	3.7877	1260	2.1722
130	0.5379	620	3.6283	1280	2.1722
140	0.9298	640	3.4846	1300	2.15
150	1.1077	660	3.3557	1320	2.13
160	1.3126	680	3.2404	1340	2.1206
170	1.7483	700	3.1374	1360	2.112
180	2.0623	720	3.0454	1380	2.1036
190	2.1042	740	2.9628	1400	2.0956
200	1.8104	760	2.8884	1420	2.088
210	1.3732	780	2.8214	1440	2.0807
220	1.1142	800	2.7608	1460	2.0737
230	1.0702	820	2.7059	1480	2.0671
240	1.3579	840	2.6558	1500	2.0608

Table 4.15 Result of Numerical model simulation at PT-5, after airport project

POINT 6, Before					
Perio	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification
d (s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio
10	1.0545	250	1.3108	860	1.9556
15	0.9284	260	1.5227	880	1.9475
20	0.5547	270	1.66	900	1.9399
25	1.7069	280	1.7252	920	1.9329
30	1.5607	290	1.7443	940	1.9263
35	1.5191	300	1.7372	960	1.9201
40	2.1888	320	1.6843	980	1.9143
45	1.69	340	1.6093	1000	1.9088
50	2.1019	360	1.5236	1020	1.9037
55	1.9559	380	1.443	1040	1.8989
60	1.2866	400	1.3897	1060	1.8944
65	2.2137	420	1.4004	1080	1.8901
70	2.834	440	1.5055	1100	1.886
75	3.5642(Mode 2)	460	1.6852	1120	1.8822
80	2.7089 🧲	480	1.8723	1140	1.8786
85	1.1838	500	2.0127	1160	1.8751
90	0.4255	520	2.0951	1180	1.8719
95	1.1027	540	2.1333	1200	1.8688
100	1.7666	560	2.1442	1220	1.8658
110	2.9546	580	2.1399	1240	1.8631
120	3.0518	600	<u> </u>	1260	1.8604
130	3.6384(Mode 1)	620	2.1124	1280	1.8578
140	2.8372	640	2.0956	1300	1.8554
150	2.1156	660	2.0786	1320	1.8531
160	1.2429	680	2.0623	1340	1.8509
170	0.5012	700	2.047	1360	1.8488
180	0.4725	720	2.0325	1380	1.8468
190	0.4679	740	2.0189	1400	1.8449
200	0.4828	760	2.0063	1420	1.8431
210	0.5376	780	1.9946	1440	1.8413
220	0.5775	800	1.9837	1460	1.8396
230	0.7144	820	1.9737	1480	1.838
240	1.1583	840	1.9643	1500	1.8364

Table 4.16 Result of Numerical model simulation at PT-6, before project

POINT 6, After					
Perio	Amplification	Period	Amplification	Period	Amplification
d (s)	ratio	(s)	ratio	(s)	ratio
10	1.7401	250	1.0157	860	1.9983
15	1.4306	260	1.2268	880	1.993
20	1.6792	270	1.5001	900	1.9879
25	1.3597	280	1.704	920	1.983
30	2.2028	290	1.8205	940	1.9784
35	1.9026	300	1.8739	960	1.9741
40	1.8434	320	1.88	980	1.97
45	3.0407	340	1.8393	1000	1.966
50	2.5397	360	1.7902	1020	1.9623
55	1.1809	380	1.7495	1040	1.9588
60	2.2447	400	1.7279	1060	1.9554
65	3.4516	420	1.7331	1080	1.9523
70	4.3306(Mode 1)	440	1.7668	1100	1.9492
75	3.2085	460	1.8221	1120	1.9464
80	1.9925 🧲	480	1.8859	1140	1.9436
85	0.6057	500	1.9455	1160	1.941
90	0.9099	520	1.9934	1180	1.9385
95	1.7248	540	2.0276	1200	1.9362
100	2.4459	560	2.0496	1220	1.9339
110	3.2012	580	2.0621	1240	1.9318
120	3.2335	600	2.0675	1260	1.9297
130	3.4474(Mode 2)	620	2.0682	1280	1.9277
140	2.4508	640	2.0659	1300	1.9258
150	1.4657	660	2.0615	1320	1.9241
160	0.8804	680	2.0558	1340	1.9224
170	0.7206	700	2.0493	1360	1.9207
180	0.7715	720	2.0426	1380	1.9191
190	0.7264	740	2.0359	1400	1.9176
200	0.66	760	2.029	1420	1.9161
210	0.6112	780	2.0225	1440	1.9148
220	0.6046	800	2.0161	1460	1.9134
230	0.7381	820	2.0099	1480	1.9121
240	0.9668	840	2.004	1500	1.9109

Table 4.17 Result of Numerical model simulation at PT-6, after project

POINT 6, After(airport)					
Peri		Period	Amplification	Period	Amplification
od	Amplification ratio		ratio		ratio
(s)		(8)	Tatio	(8)	Tatio
10	0.3437	250	0.8732	860	1.977
15	0.5937	260	1.1639	880	1.9721
20	1.1641	270	1.4526	900	1.9675
25	1.5961	280	1.6443	920	1.963
30	2.3373	290	1.7408	940	1.9589
35	2.2634	300	1.7763	960	1.9549
40	2.888	320	1.7593	980	1.9512
45	2.2499	340	1.7079	1000	1.9477
50	3.7329(Mode 2)	360	1.6576	1020	1.9443
55	3.105	380	1.6235	1040	1.9411
60	2.9231	400	1.6161	1060	1.9381
65	4.2873	420	1.6426	1080	1.9353
70	4.4267(Mode 1)	440	1.7011	1100	1.9326
75	3.3048	460	1.7788	1120	1.93
80	2.3156	480	1.8585	1140	1.9276
85	1.4583	500	1.9265	1160	1.9253
90	1.2905	520	1.9772	1180	1.9231
95	1.4825	540	19-2.0112	1200	1.921
100	1.7248	560	2.0317	1220	1.9189
110	2.5831	580	2.0424	1240	1.917
120	2.7765	600	2.0463	1260	1.917
130	2.7125	620	2.046	1280	1.917
140	2.0855	640	2.0426	1300	1.9135
150	1.9203	660	2.0377	1320	1.9102
160	1.7703	680	2.0318	1340	1.9087
170	1.5447	700	2.0255	1360	1.9072
180	1.2739	720	2.0187	1380	1.9058
190	0.9213	740	2.0122	1400	1.9045
200	0.6644	760	2.0057	1420	1.9032
210	0.5561	780	1.9995	1440	1.902
220	0.5077	800	1.9934	1460	1.9008
230	0.5782	820	1.9877	1480	1.8996
240	0.7348	840	1.9822	1500	1.8986

Table 4.18 Result of Numerical model simulation at PT-6, after airport project



4.2 장주기 파랑의 항만반응 저감방안

4.2.1 이론적 배경

일반적으로 항만에서 발생하는 진동 현상을 저감시키기 위해서는 항만의 고유진동주기의 변형 혹은 파고증폭비의 감쇄의 관점에서 접근해야 한다. 전 자의 방법은 항만이 지니고 있는 1개 이상의 고유진동주기에 대해 외해로부 터 입사하는 파랑의 주기가 접근하여 공명하는 현상을 억제하는 방법으로 실 제 항만에 적용하기에는 다소 무리가 있다. 다만, 항만으로의 이용도가 크지 않거나 일시적인 박지로 활용할 수 있는 공간으로 공진을 유도하여 반응주파 수를 걸러내는 방법과 기존 안벽의 구조를 변경하여 어느 정도 감쇄효과를 가져오는 방법이 있다.

4.2.2 항만반응 저감방안

항만 내 장주기 파랑반응을 저감할 수 있는 보다 구체적인 방법에 대해 고 려하고자 한다. 파랑이 연이은 내부 수역으로 내습하게 되면 항만의 고유주기 와 비슷한 장주기파랑은 각 수역에 대한 증폭비의 영향을 받아 성장하게 된 다. 이와 같은 현상을 항만의 비대칭 형상의 설계 적용을 통해 제거할 수 있 다(Fig. 4.46). 또는 포착에너지의 누출을 통한 공진현상의 경감을 유도하는 것인데, 파랑에너지가 충분히 성장하지 않도록 에너지의 분산효과를 고려하여 인접수역에 대형 관로 혹은 수로를 배치하여 에너지의 누출을 기대하는 방법 이다(Fig. 4.47). Fig. 4.48 및 4.49와 같이 입사파랑의 에너지가 내항수로에 도 달하기 전 방파제와 같은 외곽시설 또는 Wave trap의 설치 및 돌제 내부에 단위 포착구조물을 설치하여 에너지를 저감시키는 방법이 존재한다.

1945





Fig. 4.46 Long wave agitation increases from the sea to the basin & The plan to unharmonize with resonant period



Fig. 4.47 The plan to control resonance by escaping energy concentration



Fig. 4.48 Resonant breakwater and wave trap at the entrance of channel



4.2.3 항내 장주기 파랑반응 저감대책 해석

항내 장주기 파랑반응을 저감시키기 위한 방안을 도출하기 위하여 비교적 수심이 낮은 실제 항만에 적용한 결과를 분석하고자 한다. 대상 항만인 강원 도 남부에 위치한 삼척항은 최근 시멘트수송지원, 해안산업단지 조성, 어선계 류지 정비 및 친수공간 확보 등으로 인한 항만시설의 변화가 있다. 방파제 및 접안시설을 포함한 항만 전면을 매립하여 건설되어 운영하고 있으나 장주기 파랑에 대한 항만가동율에 많은 영향을 받고 있는 실정이며 항만특성을 파악 하고 저감대책의 효과를 분석하기 위하여 실험을 수행하였다.



Fig. 4.50 General arrangement of Samcheok port

4.2.4 적용 저감대책

항내 부진동 현상을 해석하기 위한 계산영역은 항내외에서 공진현상을 재현 할 수 있도록 영역을 구분하여 넓게 설정하였으며 항내로의 내습빈도가 높은 SE파향에 대하여 공진 주기에 이르는 광범위한 주파수대를 적용한 항내진동현 상을 수행하고, 주파수 응답특성을 검토하였다. 대상항만의 항내파랑증폭 현상 의 제어를 위해 Fig. 4. 52와 같이 항만입구 동측방파제 연결부에 반원형 공진 만(St.17,18,19)을 계획하고 오십천으로 향하는 서측방파제는 폭 50m로 해수소 통구(St.16)를 계획하였다.





Fig. 4.51 Bathymetry and numerical mesh for Samcheok port area

Model Conditions	Samcheok port	
Target range (m)	1945 1500 by 1500	
Average element space (m)	10~50m	
Number of elements	Before : 5,289 After : 5,110	
Shore boundary	Beach, vertical wall, TTP, armor rock, natural rock	
Open boundary	Semicircular	
Reflection coefficient	According to coast line	

Table 4.19 Numerical model conditions

대상항만에서의 장주기파랑 반응특성 모델실험의 결과를 STATION 1, 6, 16, 17에 대하여 정리한 것은 다음과 같다. 공진만의 반영은 항내에서 첨두 주 파수의 영향을 저감시키는데 기여하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.54와 Fig. 4.55 는 각각 St. 6과 St.16에서 주기 6sec~1500sec까지 남동쪽에서 입사되는 파랑 에 대한 증폭비를 비교한 것이다. 검토결과, 기존 삼척항 내의 제1 공진주기는 850~900초, 제2 공진주기는 270~290초이나 증폭비가 크지 않았고, 삼척항에 서 부진동 저감방안의 하나로 도입한 입구폭 50m, 공진수역의도입(Case 1), 항 만입구에서 오십천측 도류제의 일부를 해수소통구 50m(Case 2)의 적용에 따른 현재 항만과 저감방안에 따른 반응특성의 비교는 Fig. 4.56에 나타난 바와 같이 현재상태보다 상대적으로 피크치가 저감되는 것을 알 수 있다.



Fig. 4.52 FEM mesh for wave resonance bay circulation gap at Samcheok port

전반적으로 항만의 평면배치가 대칭형구조인 경우는 부진동을 야기하고 있으 므로 설계초기에 평면배치가 매우 중요하다 하겠다.



Fig. 4.53 Comparison of amplification factors at station 1 for Samcheok port



Fig. 4.54 Comparison of amplification factors at station 6 for Samcheok port

최대파고 증폭비는 항내측으로 갈수록 커지나, 삼척항의 경우 어선계류측 및

오십천의 경우는 큰 변화를 가져오지 않았지만 본항측에서는 고려한 공진수역 및 소통구로 인한 반응이 낮아지는 것을 확인하였다.



Fig. 4.55 Comparison of amplification factors at station 16 for Samcheok port



Fig. 4.56 Comparison of amplification factors at station 17 for Samcheok port

Fig. 4.57~Fig. 4.59는 현재상태의 항만과 항만입구 동방파제에 공진만을 계 획한 경우(Case 1)과 이와 병행하여 서측방파제에 약 50m의 해수소통로를 계

획하였을 때의 삼척항의 공진 제2모드에 해당하는 주기 189sec의 파랑이 파향 SE,로 입사될 때 항내반응 특성을 파고비의 등고선도로 나타낸 것이다.

항만입구 방파제에 공진만을 계획함과 동시에 서측방파제에 해수소통구를 반영한 경우 입사파랑의 에너지를 상당한 수준으로 저감시켜 파랑의 항내진입 을 저감시키고 있다. 즉, 입사파가 항내로 진입함에 따라 저감되는 양상을 나타 내었다.

Fig. 4.62와 Fig, 4,66은 입사파의 주기가 119초, 568초인 경우 현재상태와 공 진수역을 반영(Case 2)한 결과를 파고 등고선치로 나타낸 것으로 항내역의 파 고가 상대적으로 낮아짐을 알 수 있다. 전반적으로 Case 1을 적용한 경우 첨두 증폭비를 20%, Case 2를 적용한 경우 40% 정도 저감되는 것으로 나타났다.



Fig. 4.57 Results of harbor response at Samcheok port (present, T=119.3sec)



Fig. 4.58 Results of harbor response at Samcheok port (Case 1, T=119.3sec)



Fig. 4.59 Results of harbor response at Samcheok port (Case 2, T=119.3sec)



Fig. 4.60 Results of harbor response at Samcheok port (present, T=568.1sec)



Fig. 4.61 Results of harbor response at Samcheok port (Case 1, T=568.1sec)



Fig. 4.62 Results of harbor response at Samcheok port (Case 2, T=568.1sec)




제5장 결 론

5.1 결 론

대규모 SOC 사업인 항만의 개발은 외해로부터 내습하는 파랑에너지의 전파 에 상당한 변화를 초래하며, 항만내로 전파되는 파랑장의 변화는 항내정온도 및 선박계류안정성 등과 같은 항만의 운영이라는 관점에 있어 지대한 영향을 미치게 되는 바, 본 연구는 대규모 항만 개발에 따른 항내 형상변화로 인한 장 주기파랑 반응 특성에 대해 2차원 타원형 완경사 방정식 해석모델을 적용하여 파랑의 주파수 응답해석을 수행하였으며, 해석 영역 내 6개 정점에서의 해석결 과에 대해 비교분석 하였다. 아울러 장주기 파랑 저감방안에 대한 적용 결과도 반영하였다.

연구 수행을 통해 도출된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 장주기파랑에 대한 주파수 응답특성을 검토한 결과, 울릉 사동항에서 발 생하는 제 1 공진주기는 약 460~480sec, 제 2 공진주기는 약 160~200sec 주 기대에서 발생하였으며, 이는 부진동 현상과 더불어 계류선박의 장주기 동요를 발생시키는 주기인 30~300sec 즉, 외중력파의 범위 내에 존재하는 것으로 보 인다. 특히, 항만의 개발로 인해 BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE의 정점 PT-1,2에서 제 1 진공모드와 제 2 진공모드의 역전현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

(2) 각 진공모드에 대한 최대 파고 증폭비를 확인한 결과, BF-CASE에서는 7~9의 증폭비를 나타내는데 비해, 개발사업이 진행된 AF-CASE 및 AF-CASE에서는 항내 최대 파고 증폭비가 5~7로 약 22~29%정도가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 항내로 입사하는 장주기파랑의 에너지가 최내측



(PT-1,2,3)에 전달되기 전, 개발사업으로 인해 건설된 여객 및 해군부두 접안시 설이 만들어낸 새로운 공진만에 의해 소산되기 때문이라고 사료된다.

(3) 장주기파랑에 대한 항내 반응특성은 모든 케이스에 대해 항 내측으로 이 동할수록 최대 파고 증폭비가 증가하는 현상을 나타낸다. 특히, 정점 PT-4에서 는 주기 100sec 이내의 파랑에 대해 BF-CASE와 비교하여 AF-CASE 및 AFA-CASE에서 큰 파고 증폭비를 확인할 수 있다. 이는 항입구부의 형상으로 인한 영향으로 보이며, 이로 인해 여객 부두에서의 선박 접·이안 부분에 있어 문제가 야기될 수 있을 것으로 보인다.

NE AND OCEN

(4) 항내 수질환경개선을 위한 해수유통구 구간은 경계에 대해 완전투과조건 을 반영시 공진주기에서의 최대파고증폭비가 전반적으로 5~30%까지 감소하는 형태를 나타내지만, 일부구간에서 100sec 이내 주기에서 증폭비가 증가하는 경 향을 나타내기도 하였고, 특히, BF-CASE에서는 해수유통구의 적용시 정점 PT-1, PT-2에서 제 1 진공모드와 제 2 진공모드의 역전현상이 발생하였다. 다 만 설계에서는 해수유통구를 평균해면 이하로 계획한 암거형식의 구조이기 때 문에 본 연구에서 완전투과조건을 적용한 해석결과는 증폭비의 감소가 실제보 다 과대해석된 것으로 보인다.

(5) 부진동의 저감방안의 적용에서는 대상항만의 공진현상을 저감시키기 위해 항만입구 동측방파제 연결부에 추가적인 공진만을 형성함으로써 공진현상을 유 발할 수 있는 파랑의 주파수를 일부 걸러내고, 서측방파제에 폭 50m의 해수소 통구 배치를 통해 항내로 입사하는 파랑 에너지를 분산 및 유출하였다. 이를 통 해 삼척항의 어선계류측 및 오십천 영역에서의 최대파고 증폭비의 변화는 미미 하였지만, 본항측에의 최대파고 증폭비가 현저히 감소하는 결과를 나타내었다.



5.2 제 언

항내 부진동 및 장주기 반응특성은 해석 경계에 대한 반사계수 및 마찰계수 에 의해 해석결과가 크게 상이하며, 고로 해석영역에 대한 세부적인 검토가 요 구된다. 또한 본 연구는 대상항만에 대한 장주기파랑의 현장관측이라는 사전조 사가 수행되지 못했기 때문에, 향후 사전조사를 통한 실측자료 확보를 바탕으 로 항내 장주기파 반응특성에 대해 보다 세밀하고 집중적인 연구가 필요할 것 으로 보인다. 끝으로 본 연구의 기초자료 및 항내에서 발생하는 공진현상을 저 감할 수 있는 접근 방안과 사례를 참조하여, 장래 대상항만에 적용할 수 있는 대응책의 수립이나 보안방안에 활용되기를 기대한다.





참고문헌

이중우, 허명규 (2001), "공진방파제를 이용한 항만부진동의 저감", 한국항만학 회지, 제 15권 제2호, pp.152-159.

전민수 (2007), "영일만에서의 신항건설에 따른 장주기파랑의 반응특성연구", 한국해양대학교 대학원 공학석사학위논문

한국가스공사 (2017), 방류해수 등이 호안 내 너울성파도에 미치는 영향분석(호 산 KOGAS LNG부두 스웰 실태분석 및 개선대책 연구)

Berkhoff, J. C. W. (1956). "Destruction of Wave Energy by Vertical Walls," ASCE Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol. 82 (WW1-912), pp. 1–13.

Berkhoff, J. C. W. (1972). Computation of Combined Refraction – Diffraction, Proc. 13th International Coastal Engineering Conference, pp 741–790

1945

Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974). "Oscillation and Wave Forces in a Man-made Harbor in the Open Sea", Proc. 10th Naval Hydrodynamics Symposium, pp. 573–596.

Dally, W. R., Dean, R. G., and R. A. Dalrymple, R. A. (1985). Wave Height Variation across Beaches of Arbitrary Profile, J. Geophys. Research, 90, pp. 1917–1927.



Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984). Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 110, pp. 67–79.

Demirbilek, Z. (1994). Comparison between REFDIFS and CERC Shoal Laboratory Study, Unpublished Report, Waterways Exp. Station, Vicksburg, MS, p. 53.

 Farmer, D. M. (2014), "Seiche." AccessScience. McGraw-Hill Education.

 Web. 23 Nov. 2015.

Freeman, N.G., Hamblin, P.F., and Murty, T.S.(1974), Helmholtz resonance in harbours of the Great Lakes, Proc. 17th Conf. Great Lakes Res., pp. 399–411

Ippen, A. T. and Goda, Y. (1963), "Wave Induced Oscillations in Harbors : The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open-Sea", Hydrodynamic Laboratory Report No. 59, MIT.

Jeon, M. S., et al. (2006), "Variation of Harbor Oscillations in Yeongil Bay", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 30, Issue 6, pp. 533–539.

Jeong, W. M., et al. (2002), "Long-Period Wave Oscillations in Sokcho Harbor and Cheongcho Lagoon, (1. Field Measurements and Data Analysis)", J. Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 14, Issue 1, pp. 51–64.



- 102 -

Lee, J. J. (1969), "Wave Induced Oscillations in Harbors of Arbitrary Shape", Report No. KH-20, W. M. Keck Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.

Lee, J. J. and F. Raichen (1972), "Oscillations in harbors with connected basins" Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 98, pp. 311–320.

Lee, J. W. (1989), "Hybrid Element Analysis of Water Waves for Harbor Design", Ph. D. Thesis, Department of Ocean Engineering, University of Hawaii.

Lee, K. H., et al. (2012), "Application of Wave Resonator to the Field for Controlling Secondary Undulation", J. Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 24, Issue 1, pp. 58–65.

Li, B. (1994). A Generalized Conjugate Gradient Model for the Mild Slope Equation, Coastal Engineering, 23, pp. 215–225.

Madsen, O. S. (1976). Wave Climate of the Continental Margin : Elements of its Mathematical Description, Marine Sediment Transport and Environmental Management (eds. D. Stanley and D.J.P. Swift), John Wiley, New York, pp. 65–87.

Mehaute, B. L. and Li, S. H. (1970). TOPICS IN OCEAN ENGINEERING



Volume 2, part 1. harbor design : scale model or computer?, Gulf publishing company, pp. 3-24.

Panchang, V. G., Cushman-Roisin, B., and Pearce, B. R. (1988). Combined refraction-Diffraction of Short Waves for Large Coastal Regions, Coastal Engineering, 12, pp. 133–156.

Panchang, V. G., Ge, G., Cushman-Roisin, B., and Pearce, B. R. (1991). Solution to the Mild-Slope Wave Problem by Iteration, Applied Ocean research, 13, pp. 187–199.

Per, Bruun (1989). Port Engineering VOLUME 1, Gulf publishing company.

Us Army Engineers Waterways Experiment Station(1984), Shore Protection Manual(4thed.), CREC, Us Government Printing Office, Washington, DC.

Willson, B. W. (1967). "The threshold of surge damage for moored ships." Proc. Inst. civil Engineers, Vol. 38, pp. 107–134.

Wilson, B. W. (1972), "Seiches" Advances in Hydroscience Vol. 8, Academic press, pp. 1–94.

Xu, B., Panchang, V. G., and Demirbilek, Z. (1996), "Exterior Reflections in Elliptic Harbor Wave Models", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engr., Vol. 122, pp. 188–126.