

장전항 최적 설계를 위한 정온도 해석

홍기용⁽¹⁾, 양찬규⁽²⁾

Wave Simulation for the Optimum Design of Jangjeon Harbour

by

Keyyong Hong⁽¹⁾ and Chankyu Yang⁽²⁾

요 약

장전항 시설물의 최적설계를 위한 항내 파랑분포 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 장전항 인근 해역의 바람자료에 기초한 극치통계해석에 의해 추정된 심해 설계파를 수치 시뮬레이션의 외해 경계조건으로 적용하였다. 파랑 시뮬레이션을 위해 Boussinesq 천해파 이론을 사용하였으며, 파의 분산성과 비선형성을 포함하였다. 해안 경계에 대해서는 파랑의 부분적인 반사가 가능토록 유공을 두거나, 파랑 에너지를 모두 흡수하는 해면층을 두어 모사하였다. 방파제 설계 파고를 산정하기 위해서 광역모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 설계된 방파제 및 부두 배치에 대한 항내 정온도 해석을 위하여 상세모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Abstract

Wave distribution in Jangjeon Harbour is numerically simulated for an optimum design of the harbour facilities. A deep-water design wave is estimated based on stochastic extreme wave analysis of wind data in the vicinity of the harbour, and it is applied to the boundary condition at open sea. Boussinesq wave theory that includes effects of frequency dispersion and nonlinearity is employed for the wave simulation. The porosity and sponge layer are adapted at beach to depict partial reflection and complete absorption of waves, respectively. The design wave for breakwater is computed in global domain with coarse grids and the wave distribution inside of wharf is simulated in local domain with fine grids.

Keywords: design wave, stochastic extreme wave, Boussinesq wave theory, wave distribution

1) 정희원, 한국해양연구소 해양개발시스템연구본부, kyhong@kriso.re.kr

2) 정희원, 한국해양연구소 해양개발시스템연구본부, ckyang@kriso.re.kr

1. 서 론

장전항은 금강산 관광사업에서 유람선이 정박하는 항구로서 유람선이 안전하고, 효율적이며, 경제적으로 운용될 수 있도록 제반 시설의 설치가 진행되고 있다. 항 내 시설물의 최적 설계를 위해서는 바람, 조류, 조위, 파랑 등 설계 외력 환경의 정확한 추정이 요구되며, 특히 파랑은 시설물에 작용하는 주요 외력으로서뿐만 아니라 유람선의 운항조건을 결정하는 가장 직접적인 환경조건이 된다. 장전항의 지형조건, 유람선 운항조건, 그리고 장전항 이용 제한조건 등을 고려한 장전항 최적 모델이 결정되었으나, 파랑 하중에 대해서 안정된 항내 정온도를 제공할 수 있는 최적 모델인지 여부가 검토되어야 한다. 본 연구는 파랑 시뮬레이션에 의해 기 설계된 장전항 부두 및 방파제 모델이 적정한 항내 정온도를 유지할 수 있는지 여부를 검토하고, 검토 결과에 따라 모델을 개선하여 실시설계를 위한 최적 모델을 선정할 필요에 따라 수행되었다.

장전항 내 파랑분포의 수치 시뮬레이션을 위해서는 장전항 인근해역의 파랑 또는 바람 자료의 수집과 해석을 통한 심해 설계파의 선정이 먼저 이루어져야 한다. 이를 위하여 기존의 연구 결과들을 활용하였으며, 기타 입수할 수 있는 자료들을 수집하여 서로 비교하였다.

선정된 심해 설계파를 수심의 영향이 미치지 않는 장전항 외해의 가상 경계에 적용하였으며, 지형조건, 유람선 운항조건 및 장전항 이용 제한조건에 의해 결정된 방파제 배치에 대해 파랑전파 시뮬레이션을 수행하였다. 입사파는 심해 설계파의 특성을 갖는 선형 규칙파를 가정하였으며, 파의 방향은 실패역파의 진행 방향과 설계 관점에서 가장 위험한 입사방향을 동시에 고려하여 북동 방향으로부터의 입사파를 가정하였다. 파랑전파 모사를 위한 수치 모델은 천해파 이론인 Boussinesq 이론을 적용하였다. Boussinesq 이론은 심해파의 파장이 수심에 비해 충분히 길고, 파고가 수심에 비해 충분히 작은 경우에 적용될 수 있으며, 장전항의 지리 조건과 선정된 심해 설계파의 특성치를 고려할 때 장전항 파랑전파 시뮬레이션에 유효한 파랑 이론이다.

수치 프로그램은 DHI(Danish Hydraulic Institute)에 의해 개발된 MIKE21 파랑 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 시뮬레이션을 통하여 항내 파랑분포를 구하였으며, 주요 항만 시설물 설치 위치에서의 최대 파랑의 크기를 산출하였다. 또한

결과 해석을 통하여 장전항 최적설계 모델의 적정성 여부를 판단하였다.

2. 장전항 심해설계파의 선정

이상적인 심해설계파의 산정은 해당 해역에서의 장기간의 파랑 관측자료를 기초로 극치통계해석 방법에 의해 재현기간별 설계파를 산정하는 것이다. 그러나 대부분의 해역에서 장기 파랑 관측자료가 축적되어 있지 않으며, 본 연구의 대상 해역인 동해 장전항 인근 해역에서도 파랑 관측자료는 사실상 존재하지 않는 실정이다. 또한 파랑관측은 태풍시와 같은 거친 해상 상태에서는 결측률이 높아서 관심대상인 높은 파도의 계측에서는 오히려 불확실성이 증가하는 어려움이 있다.

파랑 관측자료를 직접 이용할 수 없는 경우에는 해상풍 계측자료나 일기도 분석에 의한 해상풍 추산자료에 기초하여 파랑을 추정하고 극치통계해석법을 이에 적용하여 재현기간별 설계파를 산정할 수 있다. 일기도 등의 해상풍 기초자료는 파랑자료에 비해 상대적으로 장기간의 관측자료가 축적되어 있으며, 최근에 해상풍과 이에 기초한 파랑 추정 기술의 연구가 활발해지면서, 해상풍에 의한 심해설계파 추정의 정도가 높아짐에 따라 이의 사용이 일반화되고 있다.

수산청[1988]에서는 해상풍 관측자료와 일기도 분석에 의한 해상풍 추산자료를 기초로 하여 심해파를 산정하고 해상에서의 파랑 관측자료에 의해 심해파 추정치를 보정하여 정도를 높인 심해 설계파를 제시하였으며, 해운항만청[1988]에서도 동일한 방법으로 항만 설계를 위한 심해설계파의 기준치를 제시한바 있다. 또한 항만시설물 설계기준서(해운항만청[1993])는 위의 두 보고서의 결과를 인용하여 설계기준으로서의 심해설계파를 제시하고 있다.

본 연구에서는 가장 광범위한 기초자료를 사용하여 동해 및 남해에서의 심해파를 추정한 수산청 보고서를 중심으로 장전항 해역의 심해파를 검토하고, 이에 기초하여 장전항 내의 파랑 시뮬레이션을 위한 장전항 해역의 심해설계파를 설정하고자 한다.

2.1 해상풍의 분포

심해 설계파의 추산에 사용될 수 있는 기초자료로는 파랑 및 해상풍 관측자료와 해상풍을 추산할 수 있는 기압 배치도가 있다. 파랑자료가 제한적

인데 비해 해상풍 자료는 비교적 장기간에 걸쳐 축적되어 있어 심해 설계과의 산정은 이에 의존하는 것이 일반적이다.

우리나라 연안에서 높은 파랑을 유발하는 해상풍은 겨울에 발생하는 시베리아 고기압에 의한 대륙풍, 중국 대륙에서 발생한 온대성 저기압이 동진하면서 후면에 고기압과 만나면서 발생하는 동해선풍, 그리고 여름에 나타나는 열대성 저기압인 태풍 등이 있다. 이중 동해안에서 높은 파랑을 유발하는 해상풍은 북동풍인 동해선풍과 대체로 남동풍인 태풍에 주로 기인하며, 특히 지금까지의 관측결과들은 동해선풍에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

태풍의 강도는 서해와 남해 그리고 동해 남부에서 크게 나타나지만 육지에 상륙한 후에는 세력이 약화되기 때문에 동해 중북부에서는 상대적으로 낮은 강도를 갖는다. 반면에 동해선풍을 일으키는 온대성 저기압은 서해와 남해에서보다 동해에서 크게 발달하여 큰 파랑을 일으키는 경우가 많다. 따라서 우리나라의 서해와 남해에서는 주로 태풍에 의해 심해 설계과가 설정되고, 동해에서는 태풍과 온대성 저기압이 모두 중요하나 대체로 온대성 저기압이 심해 설계과의 산정 기준이 된다.

2.2 심해 설계과의 추정

심해설계과의 추정은 해상풍으로부터 심해파랑을 추산하는 과정과 산정된 심해파랑 자료로부터 극치통계해석을 통하여 설계과를 산정하는 과정으로 나눌 수 있다. 수산청[1988]에서는 태풍과 비태풍시를 구분하여 장기간(30년~50년)의 기상자료를 기초로 해역에 적합한 다양한 파랑 추산방법을 사용하여 동해와 남해에서의 심해 설계과를 산정하였다. 또한 이들 추정값들은 실해역 관측값들과의 비교를 통하여 보정되었다. 아래는 수산청의 심해 설계과 추정 내용에 대한 요약이다.

태풍 통과시의 파랑추산은 풍역 변화가 매우 심하므로, 해상의 파랑분포는 스펙트럼 방법의 HYPА(Hybrid Parametrical Wave Prediction) 모델(Gunther et al.[1979])과 유의파법의 Wilson 모델[1961]을 적용하여 추산하였다. 비태풍의 경우 서해안에서는 농계 계절풍을 유발하는 대륙성 고기압이 서해보다 규모가 크기 때문에 SMB(Sverdrup-Munk-Bretschneider) 모델[1947]의 적용이 가능하다. 반면에 동해의 규모는 대륙성 고기압보다 크거나 비슷하기 때문에 일정한 풍역을 기대할 수 없고, 동해선풍과 같이 돌발적인 풍역이 형성

되는 해역에서는 유의파법의 적용이 어려우므로 스펙트럼법의 DSA(Densite Spectro-Angulaire)-5 모델(Gelci et al.[1957])과 HYPА 모델을 적용하였다.

설계과의 산정을 위한 극치통계해석은 Petruas-kas & Aagaad [1971]가 제안한 방법이 흔히 사용된다. 이것은 분석하려는 파고 데이터를 여러종류의 분포함수에 적용하고 각각의 상관계수를 구하여 적합도를 판단함으로써 타당한 분포함수를 선택하는 방법이다. 설계과 주기는 파고와 파주기의 자료를 선형회귀분석하여 구한 선형 관계식을 사용하여 산정할 수 있다.

2.3 장전항의 심해설계과

장전항의 정온도에 영향을 미치는 심해 설계과 산정을 위해서는 128° 20' E ~ 128° 30' E 과 38° 50' N ~ 39° 00' N으로 주어지는 해역에서의 파랑추산이 바람직하며, 가장 근접한 계산 격자점은 경도 129.07° E, 위도 38.80° N 인 경우이다. 상기 격자점의 해역이 심해이고, 이 해역에서의 동해선풍과 태풍이 해안의 영향을 거의 받지 않으므로 장전항에서의 심해 설계과의 선정에 상기 격자점에서의 값을 원용하는 것이 가능하다(해운항만청[1993]).

수산청[1998] 파랑추산 결과는 태풍통과시 HYPА 모델의 결과가 심해파랑 관측값과 가장 근사하는 것으로 나타났으며, Wilson 모델의 결과는 대체로 관측값보다 큰 값을 보여준다. 동계선풍의 경우에도 HYPА 모델이 관측값과 가장 근접한 결과를 보였으며, DSA-5 모델은 관측값보다 낮은 값을 준다. Table 1은 Wilson 법과 Weibull 분포함수를 사용하여 태풍시의 심해파를 추산한 결과이다. 여기서 TTL 항목은 방향을 고려치 않은 최대치를 나타낸다. Table 2와 3은 비태풍시의 재현기간별 심해과의 산정 결과를 보여준다. Table 2는 울진 측후소의 관측자료를 바탕으로 SMB 모델과 Log Normal 분포를 사용한 경우이며, Table 3은 동해선풍에 대해 DSA-5 모델과 Weibull 분포 함수를 사용한 결과이다. Table 4는 HYPА 모델을 사용하여 태풍과 동해선풍에 대하여 재현기간별 심해과를 추산한 결과이다.

장전항 해역에서의 큰 심해과는 동해선풍과 태풍에 의해 발생하며, 이들은 각각 북동풍과 남동풍의 방향성을 지닌다. 태풍의 경우 HYPА 모델에 의한 추정값이 Wilson 모델에 의한 값보다 작은편이나, 실해역의 관측값은 HYPА 모델의 결과

Table 1 Deep-water design waves by Wilson model and Weibull distribution at 38.80° N and 129.07° E based on typhoon data.

wave direction	height / period	correlation coefficient	return period (yr)						shape parameter
			10	20	30	50	70	100	
TTL (S)	$H_s(m)$	0.9943	5.82	6.49	6.85	7.28	7.55	7.83	1.75
	$T_s(s)$		10.14	10.63	10.90	11.22	11.41	11.62	
S	$H_s(m)$	0.9862	5.71	6.49	6.91	7.04	7.74	8.02	2.00
	$T_s(s)$		10.06	10.77	11.15	11.26	11.90	12.15	
SSE	$H_s(m)$	0.9950	5.57	6.25	6.62	7.05	7.32	7.59	2.00
	$T_s(s)$		9.95	10.55	10.87	11.24	11.47	11.71	
SE	$H_s(m)$	0.9943	4.56	5.17	5.50	5.90	6.16	6.42	1.50
	$T_s(s)$		9.12	9.73	10.07	10.47	10.73	10.99	

Table 2 Deep-water design waves at 38.80° N and 129.07° E by SMB model and log normal distribution based on observed data at Ulzin Weather Station in winter.

wave direction	height / period	correlation coefficient	return period (yr)					
			10	20	30	50	70	100
NNE	$H_s(m)$	0.9924	6.05	6.42	6.63	6.89	7.06	7.24
	$T_s(s)$		10.69	11.24	11.56	11.95	12.20	12.47

Table 3 Deep-water design waves at 38.80° N and 129.07° E by DSA-5 model and Weibull distribution based on the East Sea cyclone data.

wave direction	height / period	correlation coefficient	return period (yr)						shape parameter
			10	20	30	50	70	100	
NE	$H_s(m)$	0.9944	6.09	6.75	7.13	7.59	7.88	8.19	1.25
	$T_s(s)$		10.21	10.99	11.44	11.99	12.33	12.70	

Table 4 Deep-water design waves at 38.80° N and 129.07° E by HYP A model.

wave direction	height / period	return period (yr)						wind type
		10	20	30	50	70	100	
SE	$H_s(m)$	5.2	5.8	6.1	6.5	6.7	7.0	typhoon
	$T_s(s)$	9.0	9.0	10.0	10.0	10.0	11.0	
NE	$H_s(m)$	6.1	6.8	7.1	7.6	7.9	8.2	East sea cyclone
	$T_s(s)$	10.0	11.0	11.0	12.0	12.0	13.0	

에 보다 근접한 결과를 보여준다(수산청[1988]). 동해선풍의 경우에도 HYPА 모델의 결과가 DSA-5 모델에 비해 관측값에 근접함을 알 수 있다. 장전항 해역에서는 동해선풍에 의한 심해파랑이 태풍에 의해 생성되는 심해파에 비해 보다 큰 파고를 보여준다(Table 4).

그러므로 장전항의 근해의 심해 설계파는 동해선풍에 의해 발생하며, HYPА 모델에 의해 가장 정확한 값이 추정될 수 있다. 이로부터 장전항에서의 파랑 시뮬레이션을 위해서 파고 7.6 m, 파주기 12.0 sec, 그리고 북동풍의 파향을 갖는 50년 재현기간의 심해 설계파가 선정될 수 있다.

3. 장전항 파랑분포 시뮬레이션

천해영역에서 파랑의 거동은 많은 물리적 현상의 주요 원인으로써 관심의 대상이 되어왔으며, 특히 항만 설계 등에서와 같이 파의 진행방향 및 파고에 대한 정확한 정보를 필요로 하는 경우에는 파랑의 전파와 이에 따르는 특성 변화에 대한 정확한 예측 및 분석이 요구된다. 이와 같은 정보들은 항내 정온도 향상을 위한 방파제 설치나 항만을 출입하는 선박의 안전성을 판단할 수 있는 자료로 활용된다. 특정 해역의 상세한 파랑 정보의 획득을 위하여 해역의 특성에 알맞은 파랑 이론을 사용하는 수치 시뮬레이션이 흔히 사용된다. 관측을 통한 파랑 정보의 수집은 공간적, 시간적 제약 때문에 설계에 필요한 충분한 자료의 취득이 어렵기 때문이다.

파랑 시뮬레이션을 위해 Boussinesq 이론을 사용하였다. Boussinesq 이론은 천해영역에서의 파 이론으로서 파장이 수심에 비해 크고 파진폭이 수심에 비해 작은 경우에 적용 가능한 이론이다. 본 연구의 대상 항만은 수심이 10m 내외이고, 경계조건이 적용되는 외해 경계의 수심이 70m 내외이며, 경계조건으로 사용되는 심해 설계파의 주기가 12.0sec, 파고가 7.6m, 파장이 225m 이므로 Boussinesq 이론의 적용이 타당한 해역이다. 아래에서는 Boussinesq 파이론에 대한 고찰과 수치 프로그램으로 사용한 DHI의 MIKE21 프로그램의 소개, 그리고 장전항 파랑 시뮬레이션을 위한 입력자료의 작성 및 격자의 생성과 프로그램의 실행 과정이 요약된다.

3.1 Boussinesq 파이론

일반적으로 선형화된 천해파 근사는 다음 두 비가

작다는 가정하에 유효하다.

$$\epsilon \equiv \frac{A}{d} \ll 1, \quad \mu \equiv kd \ll 1 \quad (1)$$

여기서 A , k , d 는 각각 파진폭, 파수, 수심을 나타낸다. 선형화를 위한 구속조건인 식(1)의 첫 번째 가정은 천해영역에서 흔히 너무 가혹한 조건이며, 이로부터 비선형 천해파 이론의 필요성이 대두된다. 식(1)의 두 번째 항은 천해파에 대한 가정이다. 천해파 이론은 식(1)에 정의된 두 미소인수들의 상대적 크기에 따라 근사 방정식이 달라지며, Airy[1845]와 Boussinesq[1877]에 의해 두 개의 상이한 이론이 정립되었다. Airy의 이론은 $\mu \rightarrow 0, \epsilon = O(1)$ 의 조건을 만족하는 천해파의 선형 이론이다. 첫 번째 가정은 매우 긴 장파에 대한 가정이며, 두 번째 가정은 유한진폭의 가정이다. 그러므로 Airy 이론은 유한진폭의 매우 긴 장파의 선형근사 이론이다. Boussinesq의 이론은 $O(\epsilon) = O(\mu^2) < 1$ 의 조건을 만족하는 천해파 이론이다. 따라서 Boussinesq 파는 약비선형의 보통 장파임을 알 수 있다. 한편 Airy 이론이 만족하는 조건의 정반대 경우인 $\mu = O(1), \epsilon \rightarrow 0$ 경우를 생각해 보자. 첫 번째 조건은 심해를 의미하며, 두 번째 조건은 약비선형을 의미한다. 그러므로 이것은 흔히 Stokes 파로 불리는 약비선형 심해파의 경우임을 알 수 있다.

최초의 Boussinesq 이론은 비점성, 비압축성 유체의 비회전 운동을 가정하고 균일한 수심에 대해 전개되었고, 단방향 파의 전파만 고려되었다. Ursell[1953]은 Airy와 Jeffreys & Jeffreys [1946] 이론이 Boussinesq 이론의 특별한 경우로서 포함될 수 있음을 보였고, Lin & Clark[1959]는 Boussinesq 이론을 일정수심 상에서 평면파의 회절 및 반사 문제에 적용하였다. Mei & Le-Méhauté [1966]는 Boussinesq 이론을 완만히 변화하는 수심에 대한 이론으로 확장하였고, Peregrine[1967]은 소진폭(small amplitude)으로부터 유한진폭(finite amplitude)을 갖는 임의 장파의 거동을 지배하는 Boussinesq 형 방정식으로 확장하였다.

Madsen et al.[1991]은 파의 분산성과 비선형성을 포함하는 Boussinesq 방정식을 유도하였으며, Madsen & Sørensen[1992]은 이를 수심 변화를 고려한 다음과 같은 방정식으로 확장하였다.

○ 연속방정식

$$nS_t + P_x + Q_y = 0 \quad (2)$$

○ x - 모멘텀

$$\begin{aligned} nP_t + \left(\frac{P^2}{h}\right)_x + \left(\frac{PQ}{h}\right)_y + n^2ghS_x \\ + n^2P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] \\ + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2h^2} + n\Psi_1 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

○ y - 모멘텀

$$\begin{aligned} nQ_t + \left(\frac{Q^2}{h}\right)_y + \left(\frac{PQ}{h}\right)_x + n^2ghS_y \\ + n^2Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] \\ + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{C^2h^2} + n\Psi_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, Boussinesq 항 Ψ_1 과 Ψ_2 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Psi_1 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) \\ & - nBgd^3(S_{xxx} + S_{xyy}) \\ & - dd_x\left(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + nBgd(2S_{xx} + S_{yy})\right) \\ & - dd_y\left(\frac{1}{6}Q_{xt} + nBgdS_{xy}\right) \\ \Psi_2 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(Q_{yyt} + P_{xyt}) \\ & - nBgd^3(S_{yyy} + S_{xxy}) \\ & - dd_y\left(\frac{1}{3}Q_{yt} + \frac{1}{6}P_{xt} + nBgd(2S_{yy} + S_{xx})\right) \\ & - dd_x\left(\frac{1}{6}P_{yt} + nBgdS_{xy}\right) \end{aligned}$$

where

$S(x, y, t)$: water surface level above datum (m)

$P(x, y, t)$: flux density in the x-direction (m³/s/m)

$Q(x, y, t)$: flux density in the y-direction (m³/s/m)

h : total water depth (= $d + S$, m)

d : still water depth (m)

g : gravity acceleration (m/sec²)

n : porosity

α : resistance coefficient for laminar flow in porous media

β : resistance coefficient for turbulence flow in porous media

C : Chezy resistance number (m^{1/2}/s)

t : time(s)

B : linear dispersion factor

유공(porosity)은 해안이나 수심의 변화 등으로 입사파 전체가 반사하거나 부분적인 반사가 발생하는 경우를 고려하기 위한 가상의 물리량이며, 유공의 효과를 포함시키기 위해서 식(3)과 식(4)의 α 와 β 를 다음 식에 의해 결정한다.

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{D_p^2} \quad (5)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{D_p} \quad (6)$$

where

α_0 = a laminar particle form resistance coefficient,

β_0 = a turbulence particle form resistance coefficient,

ν = kinematic viscosity of water,

D_p = characteristic diameter of the structure units (the grain size).

3.2 수치해석 프로그램

수치해석을 위해 이용된 프로그램은 DHI(Danish Hydraulic Institute)의 "MIKE21"로서, 그 신뢰성 및 정확성이 많은 연구를 통해 입증되었고 (Abbott et al.[1978]; Madsen et al.[1983], [1984] and [1991]), 현재 널리 사용되고 있는 상용 프로

그램이다. MIKE21의 "Boussinesq Wave Module"은 해양의 수심자료, 개방경계의 경계조건, 흡수경계의 해면층(sponge layer) 배열, 유공구조물의 배치 등을 입력자료로 하여 계산영역 내의 파랑에 대한 시간영역 해를 제공한다.

MIKE21에서 사용하고 있는 수치해석 기법을 정리하면, 우선 시간에 대해서는 중심차분을 이용한 음해법을 사용하며, 공간에 대해서는 등간격 사각격자계 상에 엇갈려 정의된 종속변수를 사용하여 차별화한다. 이 방법은 ADI(Alternating Direction Implicit) 기법에 기초하며, 형성된 유한차분식은 three-diagonal system으로 얻어지고 double sweep 알고리즘을 이용하여 계산될 수 있다.

3.3 장전항 시물레이션

장전항의 파랑 시물레이션은 방파제 설치를 위한 50년 반복주기의 설계파 산정과 여객선 운항의 안전과 관련하여 중요한 의미를 갖는 방파제 설치 후의 부두 안벽에서의 파랑 분포 시물레이션을 주목적으로 한다. 파랑 시물레이션은 다음을 전제로 수행되었다.

- 1) 장전항 외해에서 유의파고 7.6m, 유의파주기 12.0sec의 심해설계파를 경계조건으로 적용하였다.
- 2) 설계파 또는 파랑분포는 외해 입사파가 계산 격자점에 도달하여 안정된 값을 보이는 시간 영역에서 산정하였으며, 만 안쪽의 해안에 의한 교란들은 무시하였다.
- 3) 입사파는 단일 규칙파로 가정하였으며, 따라서 각 격자점에서 산정된 설계파 또는 파랑분포는 12.0sec의 유의파주기를 갖는 유의파고와 각각에 상응하는 파장이다.
- 4) 산정된 유의파는 안정된 시간 영역에서의 유의파들을 평균하여 구하였다.
- 5) 파장은 파주기를 사용하여 천해 영역에서의 분산방정식으로부터 구하였다

$$\frac{(\omega/k)^2}{gd} = \frac{1+Bk^2 d^2}{1+(B+\frac{1}{3})k^2 d^2} \quad (7)$$

where ω : angular frequency,
 g : gravity acceleration

장전항은 북동 방향으로 열려 있고 만구의 폭이 만해 최대 폭의 약 2/3 정도에 달하므로 북동 방향으로부터의 파에 대해 취약한 지형적 조건을 갖

고 있다. 만 입구에서의 수심은 13m 내외이며, 만 중심부의 수심은 약 9m 정도로 수심 변화는 비교적 완만한 편이다. 항내 해안선은 북쪽의 기존 부두 시설과 동쪽의 여객선 부두 시설 예정지, 그리고 중앙부의 암벽 해안을 제외하고는 입사파 에너지의 대부분이 흡수되는 토사로 이루어진 해안이다. 금강산 관광사업을 위한 신규 항만시설로는 여객선 부두와 부두 전면 방파제가 있다.

수치모사는 부두가 설치되지 않은 상태(경우 I)의 광역 모델과, 부두 설치 후(경우 II)의 광역모델 및 상세모델에 대해 수행하였다. 부두 시설 설치 후의 부두 주변의 파랑 변형을 보다 엄밀히 관찰하기 위해서는 보다 정밀한 격자계를 사용한 시물레이션이 요구되며, 이에 따라 II의 경우에는 광역모델에서 얻어진 결과를 경계조건으로 사용하여 상세모델 수치모사를 수행하였다. 광역모델에 대한 수심 분포는 Fig. 1과 같다. 암벽과 같이 입사파 전체가 반사하거나 급격한 수심의 변화 등으로 부분적인 반사가 발생하는 해안에 대해서는 유공을 두어 현상을 모사하였다. 또한 토사로 이루어진 완만한 해안에서는 해면층을 두어 입사파 에너지 모두가 흡수되는 현상을 고려하였다.

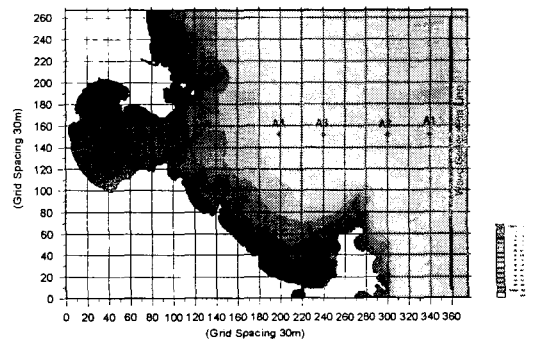


Fig. 1 Bathymetry of Jangjeon Harbour (0 to 60⁺ at intervals of 5m).

격자는 x-방향과 y-방향 모두 등간격으로 하였으며, 광역모델의 경우 x-방향과 y-방향 모두 30m로 하였고, 상세모델의 경우는 15m로 하였다. 시간 간격은 광역 모델의 경우 1초를 상세 모델의 경우는 0.5초를 선택하고, Courant 수는 0.8로 하였다. 유공의 유공계수는 공극율을 고려하여 0.85로 하였고, 식(5)과 (6)의 $\nu, D_p, \alpha_0, \beta_0$ 는 각각 해수의 특성과 해안경계의 물리적 특성을 고려하여 $1.4 \cdot 10^{-6} m^2/sec, 0.2 m, 1000, 2.8$ 로 정하였으며, 이에 따라 유공 전면에서의 반사계수는 0.5

로 결정되었다. 천해파는 심해파와는 달리 해저면의 저항에 의한 에너지 감쇄가 존재하고, 이 효과를 고려하기 위해서 식(3)와 식(4)에서 해저면 마찰항을 포함시키며, 본 계산에서는 Chezy 수를 $32 m^{1/2}/sec$ 로 하여 장전항 해저면의 마찰 특성을 고려하였다.

광역모델에 대해서는 3000sec 까지, 그리고 상세모델은 4000sec 까지 파랑 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 순간 자유표면 분포, 유의파고 분포, 계산영역 내 각 위치에 최초 파도가 도달한 시각을 살펴보았다. 또한 항내 주요 위치에서의 파고의 시간영역 변화를 고찰하였다.

4. 결과 및 해석

4.1 부두 설치 이전 광역 시뮬레이션 (경우 I)

계산 영역내의 시간적, 공간적 자유표면 분포를 조사하였다. Fig. 2에는 계산영역 내의 각 위치에 입사파의 전면이 도달하는데 걸리는 경과 시간이 보여진다. 시뮬레이션 시작 약 500sec 후에는 외해 입사파의 전면이 장전항 입구에 도달하기 시작하고, 약 750sec 후에는 입사파의 전면이 항 안쪽에 도달한다. 입사파는 항의 안쪽으로 접근하면서 파장이 짧아지고 파의 전파 속도가 느려지므로 항내의 전파속도는 외해에 비해 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 항의 안쪽에서 반사된 파가 입사파와 중첩되면서 보다 복잡한 형상을 띠게되며, Fig. 3은 파고분포가 정상상태에 도달한 경과시간 $t=2,400sec$ 일 때의 항내 파고분포를 보여준다.

Fig. 4에는 계산 영역 내의 각 위치에서의 파

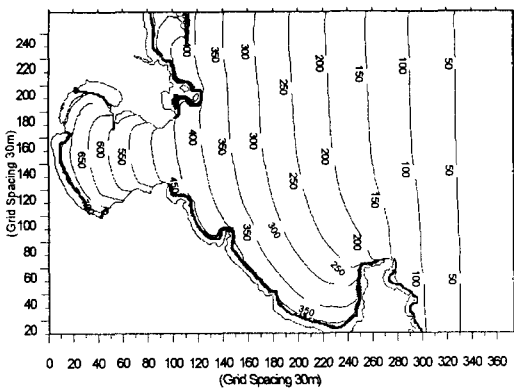


Fig. 2 Arrival time of wave front in seconds for case I.

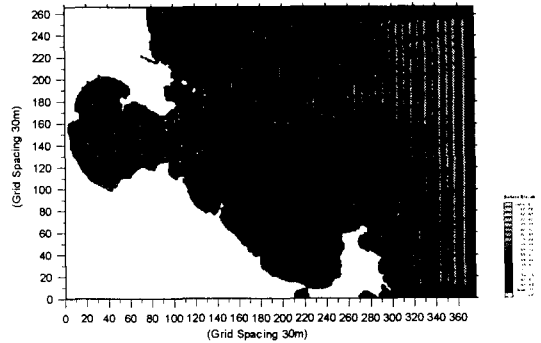


Fig. 3 Surface elevation at $t=2,400sec$ for case I (5.0^+ to -3.0^- at intervals of 0.5m).

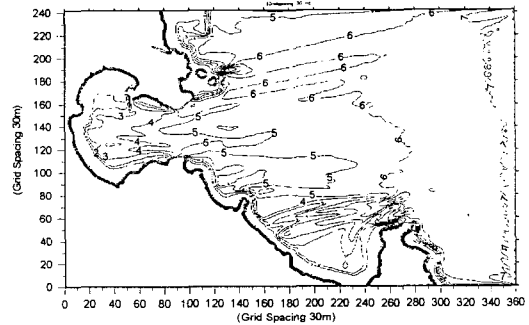


Fig. 4 Distribution of significant wave height in meter for case I.

고 등고선이 보여진다. 외해로부터 장전항 내에 이르는 중심선을 따라 위치한 격자점(Fig. 1)에서의 자유표면 높이의 시간영역 변화가 Fig. 5에 보여진다. 내해에 가까워짐에 따라 파고의 크기가 감소하며, 내해의 복잡한 지형에 따른 국부적인 교란의 발생으로 시간 영역 변화가 심하게 일어남을 볼 수 있다.

방파제 설계파의 산정을 위해서 방파제 설치 지점에서의 시간 영역 파랑 분포를 구하고, 이로부터 방파제 설계파고를 추정하였다. 이 때 외해 입사파가 계산 격자점에 도달하여 안정된 값을 보이는 시간 영역에서 설계파를 산정하였으며, 만 안쪽의 해안에 의한 교란들은 무시하였다. 또한 산정된 설계파는 유의파주기 12.0sec의 입사파에 의한 시간영역 유의파들을 평균하여 구하였다. 산정된 설계유의파의 파랑 특성치는 Table 5와 같다. 여기서 위치 항목의 괄호안에 주어진 숫자는 방파제의 육지 쪽 끝에 위치한 호안으로부터 방파제를 따라 외해 쪽으로 측정한 거리를 나타낸다.

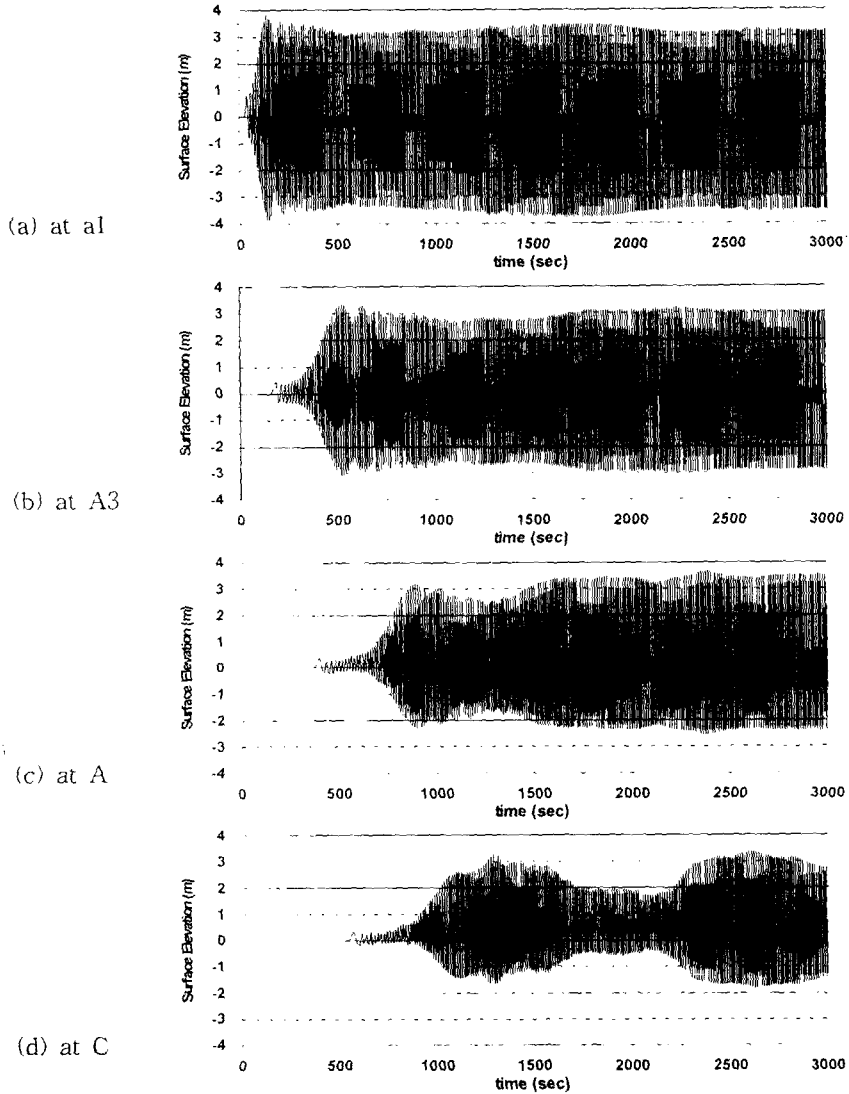


Fig. 5 Time history of surface elevation at grid points for case I.

Table 5 Characteristics of design waves along a breakwater at Jangjeon Harbour (unit : m).

properties \ location (distance)	pt1 (8)	pt2 (52)	pt3 (140)	pt4 (184)	pt5 (228)	pt6 (316)	pt7 (360)
d	9.2668	9.2404	9.1845	9.1483	9.0802	8.9552	8.8130
max. η	4.1045	3.9382	3.1987	3.3543	3.5469	2.7245	3.0910
min. η	-2.2554	-2.2884	-1.6642	-1.6521	-1.7656	-1.1100	-1.4016
H_s	4.20487	4.26176	4.24533	4.10969	3.78308	2.38833	3.18406
L	110.467	110.321	110.011	109.809	109.428	108.725	107.917

(d : water depth, η : surface elevation, H_s : significant wave height, L : wavelength)

4.2 부두 설치 후 시뮬레이션 (경우 II)

먼저 광역모델에 대해 계산 영역의 순간 자유표면 분포를 조사하였으며, 이어서 광역모델 결과를 바탕으로 부두 주변의 파랑 변형을 보다 정밀히 조사하기 위하여 상세모델에 대해 수치모사를 수행하였다. 부두 시설 설치 후에는 방파제에 의한 후면의 파랑 감소와 전면의 국부적인 교란의 발생이 목격된다. 상세 시뮬레이션을 통한 계산 영역의 순간 자유표면 분포가 시뮬레이션 경과시간 $t=2,400\text{sec}$ (Fig. 6)에서 보여지며, Fig. 7에는 유의 파고 분포가 주어진다.

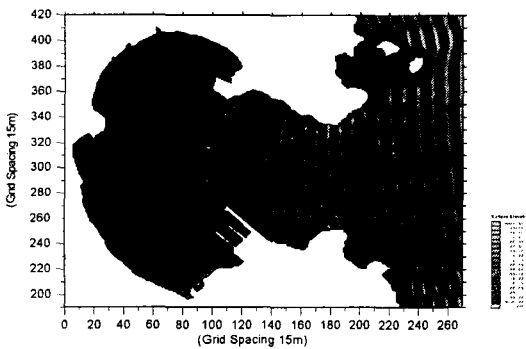


Fig. 6 Surface elevation at $t=2,400\text{sec}$ for case II (5.0^+ to -3.0^- at intervals of 0.5m).

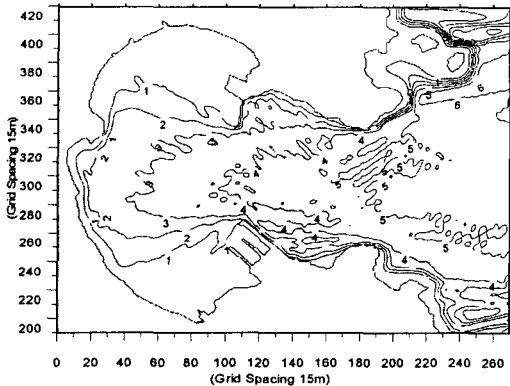


Fig. 7 Distribution of significant wave height in meter for case II.

방파제 설치 후 방파제 후면 안벽에서의 파랑 분포는 여객선 운항의 안전성과 밀접한 관련을 갖는다. Fig. 8은 부두 주변의 파고 분포를 보여준다. 방파제 설치에 의해 후면의 파고가 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. 특히 여객선이 접안하는

안벽 내에서의 파고 분포는 유의파고 0.77m 이하로 방파제 전면의 최대 유의파고 3.80m 에 비해 매우 안정된 값을 보이고 있다(Fig. 9).

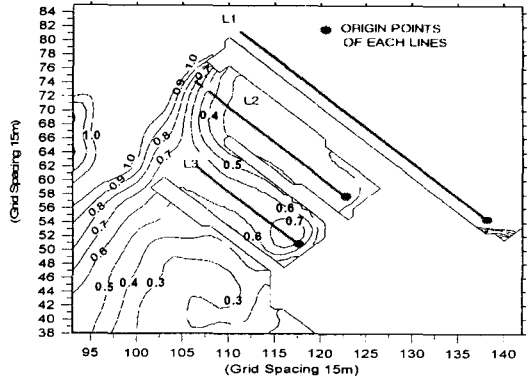


Fig. 8 Distribution of significant wave height around breakwater and wharf in meter.

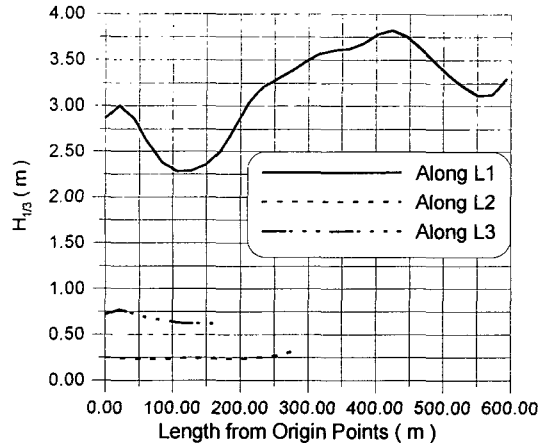


Fig. 9 Distribution of significant wave height inside wharf in meter.

5. 결론

본 연구는 장전항 내 여객선 부두의 최적 설계를 위해 장전항의 정온도를 해석하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 파랑 시뮬레이션을 위한 심해 설계파를 설정하고, 방파제의 설계파를 산정하며, 방파제 설치 후의 부두 내의 정온도를 해석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 장전항 근해의 심해 설계파는 동해선풍에 의해 발생하며, HYPA 모델에 의해 가장 정확한 값이

추정될 수 있다. 장전항에서의 파랑 시뮬레이션을 위해서 38.80° N, 129.07° E 해역에서 파고 7.6m, 파주기 12.0sec, 그리고 북동풍의 파향을 갖는 50년 재현기간의 심해 설계파가 설정될 수 있다.

2) 파랑 시뮬레이션을 위해 Boussinesq 이론을 사용하였다. 장전항은 수심이 10m 내외이고, 경계조건이 적용되는 외해 경계의 수심이 70m 내외이며, 경계조건으로 사용되는 심해 설계파의 주기가 12.0sec, 파고가 7.60m, 파장이 225m 이므로 Boussinesq 이론의 적용이 타당한 해역이다.

3) 방파제 설계파는 외해 입사파가 방파제 설치 위치에 도달하여 안정된 값을 보이는 시간 영역에서 유의파들을 평균하여 산정하였으며, 만 안쪽의 해안에 의한 교란들은 무시하였다. 산정된 방파제 설계파는 유의파주기 12.0sec, 유의파고 4.26m, 파장 110.32m 의 파랑 특성을 갖는다.

4) 방파제 설치에 의해 방파제 후면의 파고는 급격히 감소하며, 접안 시설에서의 파고는 0.77m 이내로 제한된다.

후 기

본 연구는 현대건설주식회사의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 수산청, 1988, *해역별(동해·남해) 심해파 추정 보고서*.
- [2] 해운항만청, 1988, *전국 항만 설계파 추산 보고서*.
- [3] 해운항만청, 1993, *항만 시설물 설계 기준서*.
- [4] Abbott, M. B., Petersen, H. M. and Skovgaard, O., 1978, "On the Numerical Modeling of Short Waves in Shallow Water", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.16, No.3, 173-203.
- [5] Airy, G. B., 1845, "Tides and Waves", Art. 192 in *Encyclopedia Metropolitana*, London.
- [6] Boussinesq, J., 1877, "Essai Sur la Théorie des Eaux Courantes", *Mém. Prés. Acad. Sci. Paris*, (Ser.2), Vol.23, No.1.
- [7] Gelci, R., Caxale, H. and Vassal, J., 1957, "Prevision de la houle. La method des densites spectro-angulaires", *Bulletin d'information du Comite Central d'Océanographie et d'Etudes des Cotes*, LX(8).
- [8] Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthington, B.A., Hasselmann, K. and Ewing, J.A., 1979, "A hybrid parametrical wave prediction model", *J. Geophys. Res.*, Vol.84, 5727-5738.
- [9] Jeffreys, H. and Jeffreys, B. S., 1946, *Methods of Mathematical Physics*, 1st ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [10] Lin, C. C. and Clark, A., 1959, "On the Theory of Shallow Water Waves", *Tseng Hua Journal of Chinese Studies*, Special Number 1, Dec. 1959, 54-61.
- [11] Madsen, P. A., 1983, "Wave Reflection From A Vertical Permeable Wave Absorber", Vol.7, 381-396.
- [12] Madsen, P. A., Murray, R., and Sørensen, O. R., 1991, "A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics", *Coastal Engineering*, Vol.15, 371-388.
- [13] Madsen, P. A. and Sørensen, O. R., 1992, "A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry", *Coastal Engineering*, Vol.18, 183-204.
- [14] Madsen, P. A. and Warren, I. R., 1984, "Performance of a Numerical Short-Wave Model", *Coastal Engineering*, Vol.8, 73-93.
- [15] Mei, C. C. and LeMéhauté, B., 1969, "Note on the Equations of Long Waves over an Uneven Bottom", *Journal of Geophys. Res.*, Vol.71, No.2, 393-400.
- [16] Peregrine, G. H., 1967, "Long Waves on a Beach", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.27, Part4, 715-827.
- [17] Petruskas, C. and Aagaard, D.M., 1971, "Extrapolation of historical storm data for estimating design wave heights", *J. Soc. Petro. Eng.*, Vol.11.
- [18] Sverdrup, D.J. and Munk, W.H., 1947, *Wind, sea and swell, theory of relationship in forecasting*, Washington, D.C., U.S. Dept. of Navy Hydrog. Office, No. 601.
- [19] Ursell, F., 1953, "The Long-Wave Paradox in the Theory of Gravity Waves", *Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol.49, 685-694.
- [20] Wilson, B., 1961, "Deep water wave generation by moving wind streams", *ASCE*, Vol.87, No.WW2.