

소규모 항만 구조물 주변에서 불규칙파에 대한 SWASH 모형의 반사 및 회절 Characteristic of Wave Diffraction and Reflection for Irregular Waves in SWASH Model Around Small Port Structures

권경환* · 박창욱** · 박일흠* · 김종훈**

Kyong Hwan Kwon*, Chang Wook Park**, Il Heum Park* and Jong Hoon Kim**

요지 : 불규칙파에 의한 정온도 평가 시 주로 사용하는 Boussinesq 근사의 수치모형은 항의 개구부 폭이 약 30 m 내외의 좁은 마린아와 같은 소규모 항만에서는 격자 크기의 적용성 한계가 있고, 항 내로 진행되는 파의 회절에 대한 평가 시 정확한 정온도 평가가 어려울 수 있다. 본 연구에서는 정수면의 비정수압 항이 고려되어 해수면과 바닥 층에서의 유속으로 계산하는 비선형 천수방정식 모형인 SWASH 모형(Zijlema and Stelling, 2005)을 사용하여 좁은 항의 개구부에서 정온도 평가의 적용성을 검토하였다. SWASH 모형은 구조물 및 지형에 입사하는 반사파 적용 시 수심과 공극을 계수 및 구조물 크기에 따라 부분 반사를 제어한다. 본 연구에서는 실제 구조물 단면 형태에 따른 구조물 전면에서의 반사파의 평가와 단면의 형태 및 구조물의 형태에 따라 반사율 적용성을 검토하였다. 항 내에 진입하는 회절 파랑에 의한 모델의 재현성을 평가하기 위해 구조물 직각 및 경사로 입사하는 영역을 구성하여 기존의 Goda et al.(1978)가 제시한 회절도 이론값과 비교하였다. 수심평균으로 계산된 단면 구조물 반사율 실험 결과는 Stelling and Ahrens(1981)이 제시한 반사율의 개략치와 유사한 반사율을 나타내며, 경계에서의 반사파의 제어와 구조물의 형상 및 지형에 따라 반사파가 잘 재현되는 것으로 판단된다. 회절도 검토 결과 파랑 진입 각도 및 회절파의 형태가 계산치가 이론값과 아주 유사하게 나타나지만, 경사 입사 및 직각 입사 모두 방향 집중도가 작은 경우 파고 비가 0.5~0.6인 일부 구간에서 회절도가 저평가되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : SWASH 모형, 정온도, 반사, 회절도, 불규칙파

Abstract : The numerical model of Boussinesq approximation, which is mainly used for evaluating the port calmness due to the irregular waves, has a limit of applicability of lattice size in ports such as marinas with narrow port openings of around 30 m. The SWASH model controls the partial reflection according to the depth, porosity coefficient and structure size when applying the reflected wave incident on the structure and terrain. In this study, the partial reflection evaluation at the front of the structure according to the bottom shape and the shape of the structure are examined. In order to evaluate the reproducibility of the model due to the diffraction waves entering the term, the area of incidence at right angles and inclination of the structure is constructed and compared with the diffraction theory suggested by Goda et al. (1978). The experimental results of the sectional structure reflectances calculated as the depth mean show reflectances similar to the approximate values of the reflectances presented by Stelling and Ahrens (1981). It is considered that the reflected wave is well reproduced according to the control of the reflected wave at the boundary and the shape and topography of the structure. Compared with previous studies to examine the diffraction of the wave incident from the breakwater opening, the wave incidence angle and the shape of the diffraction wave are very similar to the theoretical values, but both oblique and rectangular incidence In the case where the direction concentration is small, the diffraction degree is underestimated in some sections with the crest ratio of 0.5 to 0.6.

Keywords : SWASH model, reflection, diffraction diagram, irregular waves

1. 서 론

항만 정온도 평가는 하역 한계파고 또는 정박 한계파고를 넘지 않는 파고의 시간적 발생확률로 계산할 수 있다. 정박

한계파고로 정의되는 이상시 파랑에 대한 정온도는 일반적으로 설계공용기간의 재현기간 확률파에 대하여 항내파랑이 항만시설의 성능에 영향을 끼치는 점을 고려하여 항내 파랑이 항만시설에 큰 피해를 끼치지 않도록 파고의 한계값을 설정

*전남대학교 조선해양공학과(Corresponding author: Kyong Hwan Kwon, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chonnam National University, 50, Daehak-ro Yeosu Chonnam 59626, Korea, Tel: +82-2-6956-4216, kkhms1120@hotmail.com)

** (주)오서닉 해양환경연구소(Oceanic, Ocean Environment Inst.)

하며, 항내 파고계산으로 산출된 파고가 이 한계값을 넘지 않는 것으로 평가한다(Ministry of oceans and fisheries, 2014).

Lee et al.(2003)의 연구에 따르면 확장형 Boussinesq 방정식의 유도과정에서 바닥의 경사가 완만하다는 가정하에 Madsen과 Sorensen(1992)의 식에서는 바닥의 곡률 항과 바닥 경사의 제곱 항이 생략되어있고, Nwogu(1993)의 식에서는 바닥의 곡률 항이 포함되어 있지만 바닥경사의 제곱 항이 생략되어 있음을 확인하고 경사면 위를 진행하는 파가 1:1 이상의 수심이 급변하는 지형에서는 부정확한 계산의 결과를 재현함을 보였다. 개구부 폭이 약 30 m 내·외의 좁은 마리나 및 소규모 항만에서 항 내로 진입하는 회절파 및 반사파 계산 시에 좁은 항의 개구부의 격자 해상도가 충분히 확보되어야 계산의 정확도를 높일 수 있다. 작은 격자의 해상도는 구조물 주변에서 수심 급변 구역을 생성하고 수심이 급변하는 구역에서 Boussinesq 근사의 수치모형은 정온도 수치모형 계산 시 적용성에 한계가 있고, 항 내로 진행하는 파의 회절에 대한 평가 시 정확한 정온도 평가가 어려울 수 있다. 본 연구에서는 정수면의 비정수압 항이 고려되어 해수면과 저면에서의 유속으로 계산하는 비선형 천수방정식 모형인 SWASH 모형(Zijlema and Stelling, 2005)을 사용하여 좁은 항의 개구부에서 정온도 평가의 적용성을 검토하였다.

SWASH 모형은 구조물 및 지형에 입사하는 반사파 적용 시 수심과 공극율 계수 및 구조물 크기에 따라 부분 반사를 제어한다. 본 연구에서는 실제 구조물 단면 형태에 따른 구조물 전면에서의 부분 반사 평가와 단면 및 구조물의 형태에 따라 반사율 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 항 내에 진입하는 회절 파랑에 의한 모델의 재현성을 평가하기 위해 Goda et al.(1978)가 제시한 회절도와 수치모형실험 결과를 비교하였으며, 소규모 항만에서 SWASH 모형의 적용성을 파악하기 위해 Goda의 회절도 중 방파제의 개구부 폭 대비 파장 비(B/L)가 작은 1.0 및 2.0인 계산 영역에서 이론값과 수치모형 실험결과를 비교하였다. 수치모형실험에 적용하는 불규칙파의 방향 집중도 파라미터는 Goda의 회절도에 사용된 Mituyasu형 방향집중함수 $S_{max} = 10, 75$ 와 유사한 방향분산계수 $ms = 1.8, 17.2$ 로 환산하여 실험을 수행하였다.

2. SWASH모형의 개요

SWASH(Simulating WAVes till SHore) 모형은 Stelling and Zijlema(2003), Stelling and Duinmeijer(2003)과 Zijlema and Stelling(2005, 2008)의 연구를 기초로 개발되었다. SWASH 모형은 1, 2, 3차원의 비정수압, 자유수면, 회전류, 유사이송을 계산하며 지배방정식은 비정수압과 이송방정식을 포함하는 비선형 천수방정식을 해석한다. SWASH 모형은 비선형 비정수압 효과를 고려하여 모의할 수 있으며 연직방향을 나누어 계산이 가능하여 수심평균된 값뿐만 아니라 층별 결과

를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 현재 가장 최근 버전인 SWASH 6.01(released of Aug 24, 2019)을 이용하여 계산을 수행하였다.

2.1 지배방정식

SWASH 모형은 수심평균, 비정수압과 자유수면 흐름을 Navier-Stokes 방정식의 질량·운동량 보존 조건으로 유도한 비선형 천수방정식을 적용한다(Zijlema and Stelling, 2005).

연속방정식은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2 \nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{yy} = 2 \nu_t \frac{\partial v}{\partial y}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\nu_t = l^m \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, x 와 y 는 정수면에 위치하고 있으며 t 는 시간, $\zeta(x, y, t)$ 는 정수면을 기준으로 자유수면까지의 높이, $d(x, y)$ 는 정수면, $h = \zeta + d$ 는 총 수심, $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ 는 x, y 방향에 대한 수심평균유속, $q(x, y, z, t)$ 는 비정수압 압력성분, g 는 중력가속도, c_f 는 무차원 저면마찰계수, τ_{xx} , τ_{yy} , τ_{yx} , τ_{xy} 는 수평난류응력, $\nu_t(x, y, t)$ 는 쇄파와 Subgrid 난류에 의한 수평와점성계수, 는 혼합거리이다. 식(2)에서 비정수압형태의 압력경도는 식(6)과 같이 표현이 가능하다(Stelling and Zijlema, 2003).

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q_b}{\partial x} = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial (\zeta - d)}{\partial x} \quad (6)$$

q_b 는 저면의 비정수압력이다. 단파에서 주파수분산의 정확한 표현을 위해 Keller-box method를 적용하였고 식(7)과 같다(Lam and Simlson, 1976).

$$\frac{q|_{z=\zeta} - q|_{z=-d}}{h} = -\frac{q_b}{h} = \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} + \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=-d} \quad (7)$$

자유수면에서 비정수압력은 0이다. 다음 고려될 변수는 자유수면의 연직속도성분(w_s)과 저면의 연직속도성분(w_b)이다. 수직속도성분에 대한 운동량 방정식은 식(8)과 같다.

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = 0, \frac{\partial w_b}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=-d} = 0 \quad (8)$$

식(8)에서는 이류·확산항은 일반적으로 연직가속도에 비해 충분히 작기 때문에 무시한다. 이는 비정수압의 압력경도에 의하여 결정된다. 식(7)과 식(8)을 이용하여 식(9)가 유도된다.

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (9)$$

저면의 연직방향 속도성분(w_b)은 운동학적인 경계조건을 이용하여 표현가능하다.

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (10)$$

이를 이용하여 국부적인 질량보존이 성립되며 식(11)과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (11)$$

비정수압 경사의 공간 이산화에는 많은 수치 기법들이 있지만 SWASH 모형에서는 Keller-box 방법과 중앙차분 방법 중 선택할 수 있다. 본 연구에서는 수평 및 수직 운동량 방정식의 이산화는 Keller-Box 기법(Zijlema and Stelling, 2008)을 기반으로 계산하였다.

2.2 격자의 구성 및 반사구조물

기존 다방향 불규칙과 실험에 사용되던 Boussinesq type의 수치모형인 Bouss2D(Nwogu and Demirbilek, 2001)와 SWASH 모형의 격자 구성 및 반사구조물의 재현에 대해 비교하고 차이점에 대해 검토하였다. Fig. 1에서 이형소파블럭 사면을 예를 들어 격자의 구성 및 단면 반사 제어에 대해 도시하였다. SWASH 모형의 반사파 계산은 구조물의 반사경계 처리를 실제 수심 입력 데이터와 구조물의 경사, 공극률, 높이 및 크기에 따라 반사 및 투과파를 계산하고 다공성 구조

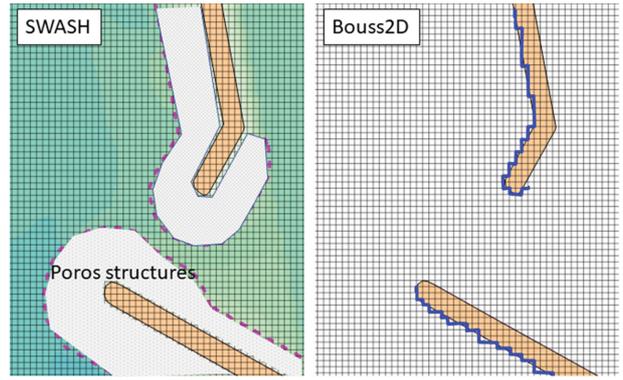


Fig. 2. Two-Dimensional Grid of SWASH and Bouss2D model near the Breakwater in Numerical Model Experiments (Left: Reflection boundary of the SWASH model, Right: Reflection boundary of the Bouss2D model).

물은 공극률 계수(0.0~1.0), 구성물질의 크기 및 높이(meter)로 정의된다. 또한, WET/DRY 조건에서 범람 및 월파 계산이 가능하다.

방파제 개구부에서 2차원 평면적인 반사파 제어를 Fig. 2에 도시하였다. Bouss2D 모형과 SWASH 모형의 반사율 적용 격자의 개요를 보면 Bouss2D 모형은 하나의 격자면에서의 반사율 감쇄 계수로 반사파를 제어하는 반면, SWASH 모형은 실제 경사의 수심(불투과층)과 평면에 배치된 다공성 구조물의 공극률, 높이 및 크기가 반영되어 반사파를 제어한다. SWASH 모형은 규모가 작은 소규모 항만 및 국부적인 구역에서 파랑의 쇄파, 반사, 굴절 및 회절 현상을 구조물의 형태에 따라 잘 재현할 것으로 판단된다.

2.3 Boussinesq-type 모형과 SWASH 모형의 특징

Boussinesq-type의 파랑모형은 상대 수심이 큰 영역에서는 다소 부정확한 결과를 얻지만 고계도함수의 근사를 사용하며 비

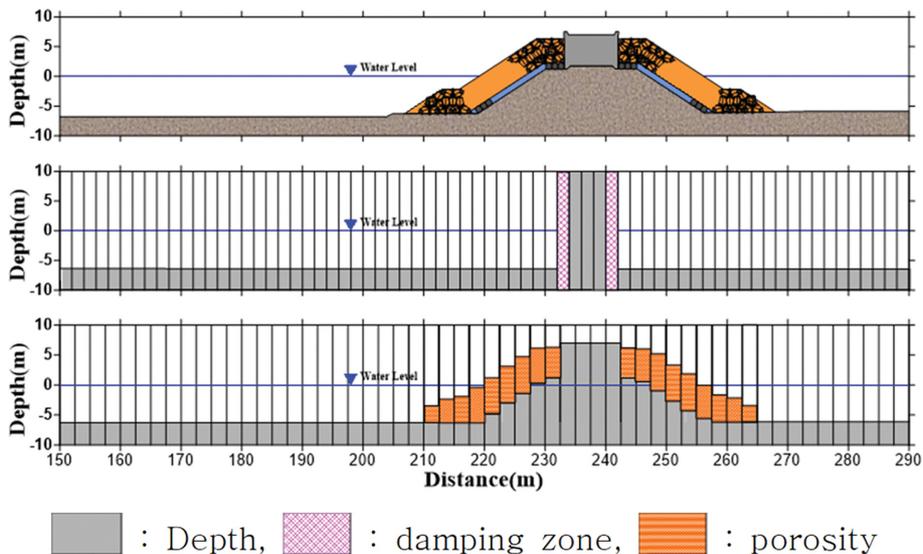


Fig. 1. One-Dimensional Sectional Grid Control of Reflected Wave near the Breakwater in Numerical Model Experiment (Up: Breakwater cross-sectional shape, middle : Reflection boundary of the Bouss2D model, Down: Reflection boundary of the SWASH model).

선형성을 고려하기 때문에 쇄파대 내의 모의에 정확성을 인정 받고 있다. 기존의 Boussinesq-type의 파랑모형은 주파수 분산의 정확성을 높이기 위하여 도함수의 차수를 증가시켜 값은 근사시키는 방법을 사용하지만, 최근 SWASH, COULWAVE와 같이 다층기능을 이용한 수치기법으로 선형분산의 정확성을 개선한 모델들이 있다. 본 연구에서는 사용된 SWASH 모형은 연직방향의 층을 나눌 수 있는 다층기능과 비정수압 기법을 이용하여 선형분산의 정확성이 향상된 파랑변형계산을 수행할 수 있다(Zijlema and Stelling, 2005). 수심평균된 결과 값을 얻는 기존의 Boussinesq-type의 파랑모형과 달리 SWASH 모형은 층별 자료를 얻을 수 있어 발전된 형태라고 말할 수 있다.

쇄파되는 파와 도수의 유사성을 고려하여 쇄파에 의한 에너지소산을 계산하고 쇄파조건에서 비선형파의 특징을 잘 재현하고 정수압흐름의 계산이 비정수압의 압력을 무시함으로써 간단하게 계산할 수 있기 때문에 대규모의 조석과 폭풍해일과 같은 계산에 적절하다.

3. 불규칙파 단면 반사율 실험

방파제의 단면 반사율 실험은 수심 평균 단면 수조에서 불규칙파 조파조건으로 수행하였고, 공극 구조물의 반사율에 대한 SWASH 모형의 적용성을 검토하기 위해 Stellig and Ahrens(1981)의 반사율의 개략치와 비교하였다.

3.1 모형 구성

방파제는 1:1.5 경사로 Tetrapod(T.T.P)가 2열로 정적 되어 있는 마리아의 방파제 단면을 대상으로 수행하였다. 입사파의 재원은 $H_s = 4.0$ m, $T_p = 15.16$ sec이며, 격자의 간격은 2.5 m, 불규칙파는 JONSWAP spectrum을 사용하였다. 입사파 조건에서 파장(L)은 200 m이며, 계산격자 안정조건에서 수심대비 파고비가 $H/d \ll 1$ 인 경우 한 파장에 50개, 수심대비 파고비가 큰 경우 한 파장에 100개의 격자가 필요하다. 본 실험에서는 수심대비 파고비가 비교적 작은 조건으로 격자의 간격을 2.5 m로 한 파장에 80개의 격자를 나누어 구성하였다. 바닥은 실제 방파제 사면(1:25)의 불투과 지점까지의 수

Table 1. Computational information of wave reflection numerical simulation

Information		
Grid size (m)	2.5 m	
Incident wave height (H_s)	4.0 m	
Peak wave periods (T_p)	15.16 sec	
Simulation time	2 hours	
Spectrum	JONSWAP	
Porosity structure	size	3.0 m
	alpha0	200
	beta0	1.1
	wper	15.16 s
Case	C1	Equal bottom level (20 m)
	C2	C1+ Real Bottom level (1:40)
	C3	C2+ Upright wall
	C4	C3+ Impermeable slope layer
	C5	C4+ Poros structure

심으로 재현하였으며, 사석 및 T.T.P의 높이는 실제 투수성 구조물의 높이로 정의하였다. 다공성 구조물(C5) 실험에서 구조물의 입력조건인 alpha0, beta0 값은 SWASH 모형의 default 값을 사용하였고, 구조물의 크기(size)는 T.T.P 구조물의 지름을 적용하였다. 실험안은 Table 1과 같으며, 쇄파에 영향을 주지 않는 20 m 등수심(C1)과 실제 지형을 적용한 조건(C2), 직립구조물인 경우(C3), 불투수층 경사구조물(C4)을 적용한 조건 그리고 실제 이형 방파제 구조물 단면과 같이 실제 사석 및 T.T.P를 투수층으로 적용한 실험안(C5)으로 구성하였다.

3.2 단면 반사율 실험결과

단면의 반사율 실험결과는 Fig. 4와 Table 2에 제시하였다. 파고 계산결과는 SWASH 모형에서 식(12)으로 계산되는 유의파고(H_s)를 사용하였다. $E(f)$ 는 스펙트럼 밀도의 분산함수이고, f 는 주파수이다. 실험결과에서 계산영역의 최대 유의파고는 $H_{s,max}$ 로 정의한다. 등수심 20 m 조건(C1)에서의 실험결과인 Fig. 4와 Table 2를 보면 계산된 유의파고(H_s)가 4.0 m로 외부조파 경계에서 목표 파고값이 잘 계산되는 것으로 판단된다. 입사파고 대비 최대 유의파고($H_0/H_{s,max}$)는 1.0으로,

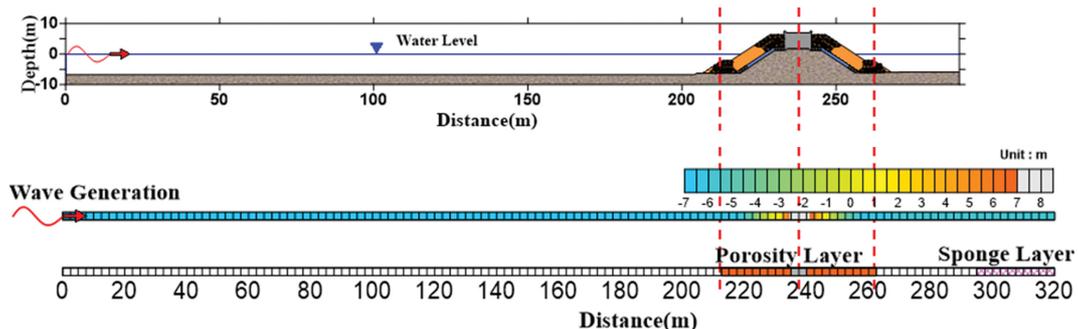


Fig. 3. Definition sketch of wave reflection numerical simulation.

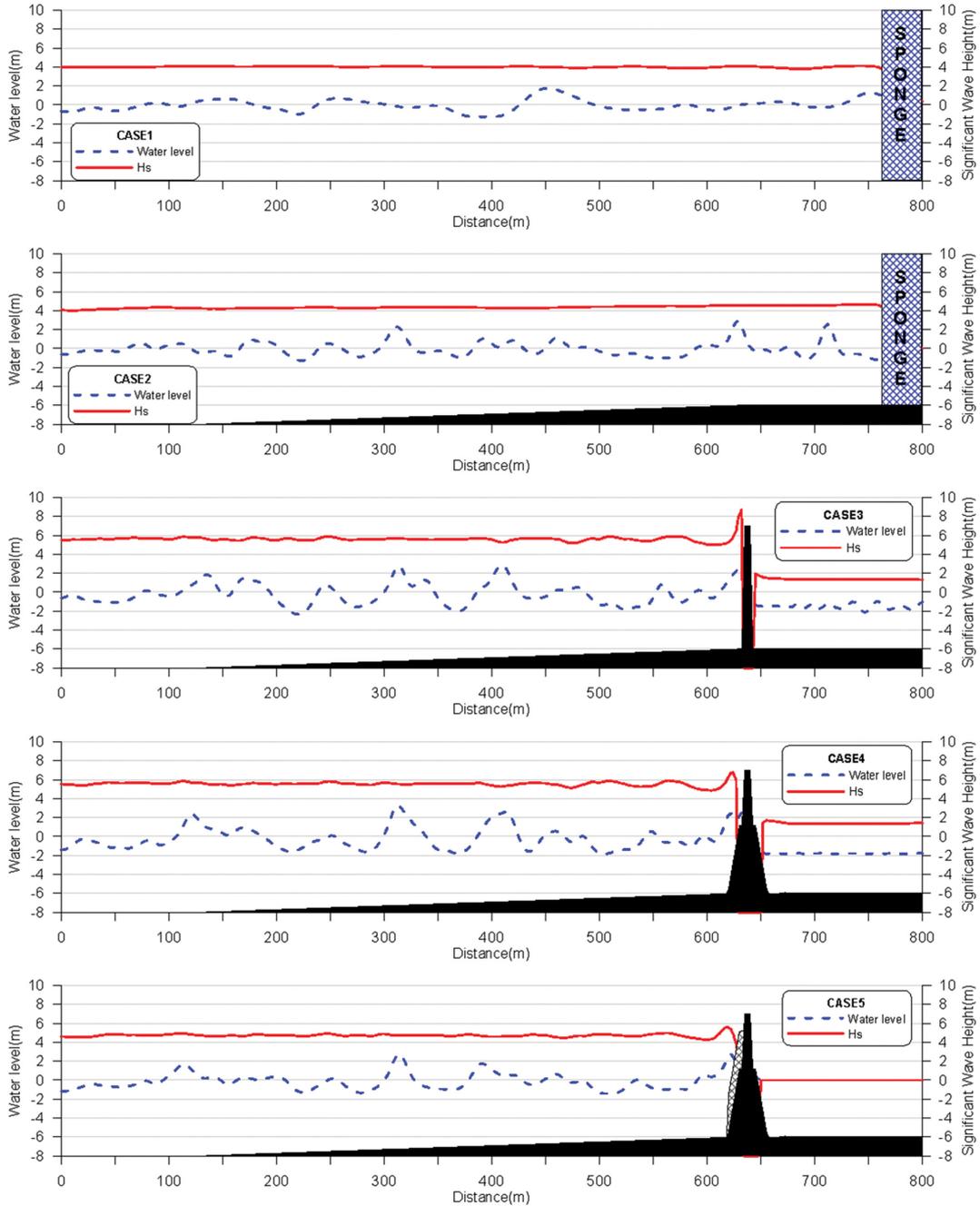


Fig. 4. Breakwater cross section reflection simulation results.

Table 2. Comparison of breakwater cross section reflection simulation results and theoretical values (Stelling and Ahrens, 1981)

CASE	$H_{s,max}$ (m)	$H_{s,max}/H_0$	Approximate value of reflections
C1	4.1	1.0	-
C2	4.4	1.1	-
C3	8.2	2.0	0.7~1.0 (Up right wall)
C4	6.8	1.7	-
C5	5.6	1.4	0.3~0.5 (wave dissipation concrete block)

반사경계인 sponge layer에서 파의 흡수가 잘 이루어지는 것으로 판단된다.

$$H_s = 4 \sqrt{\int E(f) df} \tag{12}$$

실제 지형(C2)에서는 파고비가 1.1로 계산되며, 이는 천수 변형에 의한 wave setup으로 10% 파고 증가가 나타난다. 직립 구조물(C3)인 경우 전반사로 최대 2.0의 파고비를 보이고 이는 Ministry of oceans and fisheries(2014)에서 제시한 Stelling

and Ahrens(1981)의 직립구조물 전면의 반사율과 유사한 값을 나타낸다. 불투수 사석층(C4)을 적용한 계산 결과 파고비는 1.7로 계산되었다. 실제 투수 사석 구조물(C5)을 적용한 실험의 계산 결과는 파고비가 1.4로 반사율이 0.4로 나타나며, 이는 Stelling and Ahrens(1981)의 이형소파블럭사면의 반사계수 개략치(0.3~0.5)와 유사하게 계산되었다.

SWASH 모형의 수심평균으로 계산된 단면 구조물 반사율 실험결과는 Stelling and Ahrens(1981)이 제시한 반사율의 개략치와 유사한 반사율을 나타내며, 구조물의 형상 및 지형에 따라 반사파가 잘 재현되는 것으로 판단된다.

4. 방파제 개구부의 불규칙파 회절도 실험

항 내에 진입하는 회절 파랑에 의한 모델의 재현성을 평가하기 위해 Goda et al.(1978)가 제시한 회절도와 SWASH 모형의 수치실험 결과를 평면적으로 비교하였다. 본 연구에서는 규모가 작은 항만에서의 SWASH 모형 적용성을 파악하기 위해 Goda의 회절도 중 방파제의 개구부 폭 대비 파장 비 (B/L)가 작은 1.0 및 2.0인 계산 영역에서 이론값과 수치모형 실험 결과를 비교하였다. 수치 모의에 적용하는 불규칙파의 방향 집중도 파라미터는 Goda의 회절도에 사용된 Mituyasu형 방향집중합수 $S_{max} = 10, 75$ 와 유사한 방향분산계수 $ms = 1.8, 17.2$ 로 환산하여 실험을 수행하였다.

4.1 불규칙파 입사파 경계조건

불규칙파 입사 조건에서 Goda et al.(1978)에 의해 작성된 불규칙파 회절도는 Bretschneider-Mituyasu 스펙트럼과 Mituyasu 방향합수를 이용하여 S_{max} 로 정의된다. SWASH 모형은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하고 방향집중도를 Wrapped-normal 방향합수(DSPR, σ_θ)를 사용한 방향분산계수(ms)로 정의한다. Mituyasu형 방향합수(S_{max})와 Wrapped-normal 방향합수(σ_θ)는 완전히 일치하지 않지만 Goda et al.(1999)은 두 방향합수와의 관계를 방향각의 표준편차 값을 이용한 비교를 통해 식(13) 및 식(14)를 조합하여 평균 집중도 파라미터를 환산할 수 있다고 제시하였다. 환산된 Wrapped-normal형 방향합수(σ_θ)를 방향분산계수(ms)로 환산하기 위해 식(15)을 통해 계산하여 입력하였다. Goda의 회절도에 적용된 방향집중합수 $S_{max} = 10, 75$ 는 방향분산계수 $ms = 1.8, 17.2$ 로 환산되어 SWASH 모형을 이용한 수치모형실험에 적용하였다.

$$\sigma_\theta \doteq \frac{180^\circ}{\pi} \left(\frac{2}{1+S} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$$\bar{s} = \begin{cases} (S_{max} + 6.3)/4.1 : m = 3 \\ (S_{max} + 4.0)/2.8 : \gamma = 1.0 \text{ or } m = 5 \\ (S_{max} + 1.0)/2.1 : \gamma = 3.3 \\ (S_{max} + 0.2)/1.7 : \gamma = 10 \end{cases} \quad (14)$$

Table 3. Relation with Mituyasu spreading function (S_{max}), directional spreading factor (σ_θ) and Directional distribution (ms)

Wave conditions	$\gamma = 3.3$		
	S_{max}	σ_θ (DSPR, in $^\circ$)	ms
Wind wave	10	32.46	1.8
Swell with long decay distance	75	13.29	17.2

$$D(\theta) = A(\cos \theta)^m \quad (15)$$

4.2 다방향 불규칙파의 조파

SWASH 모형의 다방향 불규칙파 조파는 주기와 수심의 관계식에 의해 최대 주파수와 최소 주파수를 결정한다. 최대 주파수 영역 밖의 파랑 성분은 제외되고 수심방향으로 layer를 나누어 고주파수의 파랑장 재현성을 향상시킬 수 있다. 본 연구의 실험조건인 주기 10.0 sec, 수심 12.0 m인 실험조건에서 SWASH 모형의 외부조파기법을 사용하여 식(16)에 의해 최소 주파수 0.05 Hz와 최대주파수 0.30 Hz 내의 불규칙 파형이 조파되며, 외부조파로 인한 실험영역 내의 재반사를 방지하기 위해 weakly reflective의 경계조건을 사용하였다. 조파시간(2시간)에 계산되는 불규칙파의 단일파 개수는 750개로 식(17)으로 계산된다. 모델의 분산관계식에 의해 허용되는 최대주파수(w_{cf} , cut-off frequency)는 식(18)에 의해 결정되며 수직 Layer(K)의 증가로 허용 가능한 주파수를 확장할 수 있다.

$$frequency_{min} = 0.5 \times \frac{1}{T}, frequency_{max} = 3 \times \frac{1}{T_p} \quad (16)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T_{cycle}}, N = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f} \quad (17)$$

$$w_{cf} = 2K \sqrt{\frac{g}{d}}, T_{min} = 2\pi/w_{cf} \quad (18)$$

4.3 모형구성

직각으로 입사하는 파에 대한 회절도 실험은 소규모 항만의 좁은 방파제 개구부 폭 재현을 위해 개구부 폭 대비 파장 비가 1.0인 영역을 구성하였으며, 경사로 입사하는 파에 대한 회절도 실험은 개구부 폭 대비 파장 비가 2.0인 영역을 구성하였다. 격자의 크기는 4.0 m, 계산 영역은 남북 동서 방향으로 2.0 km로 구성하였다(Fig. 5). 파랑은 SWASH 모형의 모듈 중 불규칙파 조파 기능을 사용하였다. 불규칙파의 스펙트럼은 JONSWAP(Deutsches hydrographisches institut, 1973)을 사용하였고, 형상계수는 JONSWAP 연구에서 제시한 평균값인 $\gamma = 3.3$ 을 사용하였다. 경계에서의 반사파 제어를 위해 모형의 동, 서와 북측 경계에 100.0 m 두께의 Sponge layer를 주었다.

실험안은 Table 5에 제시하였으며, 직각 입사파의 경우 방향분산계수 $ms = 1.8, 17.2$ 인 경우에 대해 계산을 수행하였다. 본 실험조건이 불규칙파의 조파 시 최대 허용주파수(w_f)=

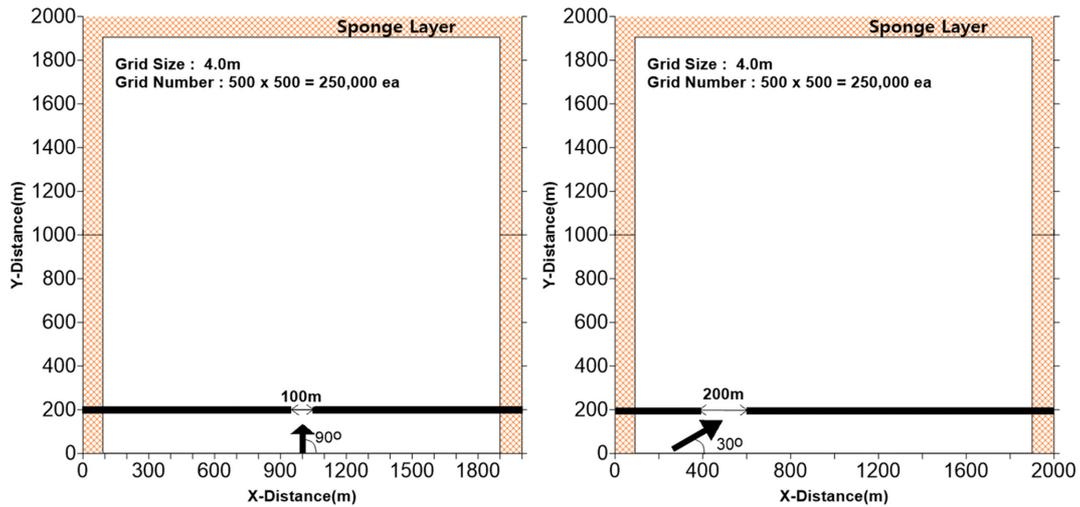


Fig. 5. Definition sketch of wave diffraction numerical simulation.

Table 4. Computational informations of wave diffraction numerical simulation

Model information			
Grid size (m)	4.0 m	γ (peak enhancement factor)	3.3
Depth (m)	12.0 m	Minimum frequency	0.05 Hz
Incident wave height (H_s)	1.0 m	Maximum frequency	0.30 Hz
Peak wave periods (T_p)	10.0 sec	Time cycle	2 hours
Spectrum	JONSWAP	Number of waves	750

Table 5. Diffraction simulation plan (case)

CASE	D1	D2	D3	D4	D5	D6
ms (S_{max})	1.8(10)		17.2(75)		1.8(10)	17.2(75)
Incident wave direction		90°			30°	
Vertical layer	1	2	1	2	1	
w_f (cut off frequency)	0.29	0.58	0.29	0.58	0.29	

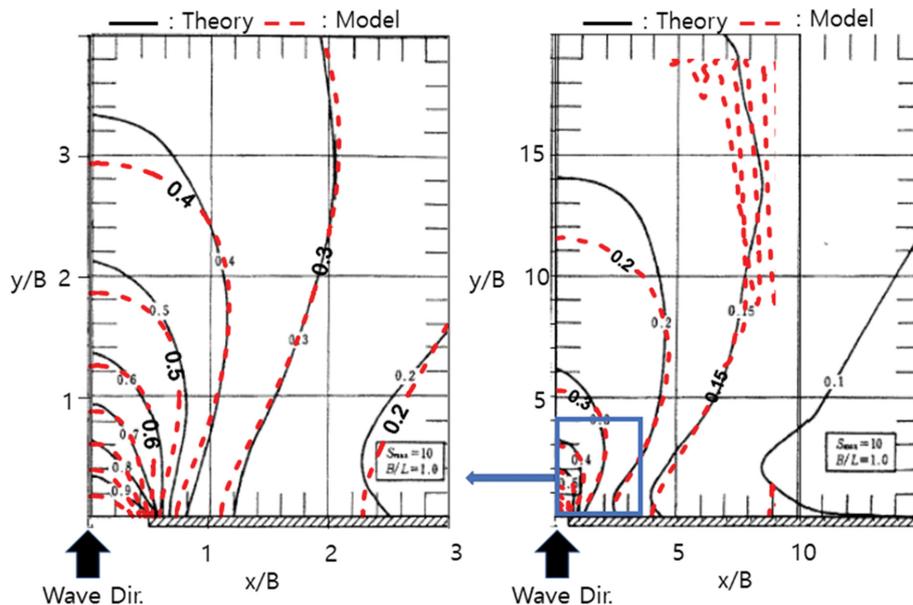


Fig. 6. Diffraction diagrams for ms = 1.8, one vertical layer (D1).

0.29 Hz)가 최대주파수($frequency_{max} = 0.3$ Hz)보다 작기 때문에 수직적인 격자구성에 대한 검토를 위해 수심 평균 계산 시와 수직 layer를 2개로 나눈 경우($w_f = 0.58$ Hz)에 대한 실험을 수행하였다. 경사(30°) 입사파에 대한 회절도 검토를 위해 방향분산계수를 $ms = 1.8, 17.2$ 인 경우에 대한 회절도를 검토하였다.

4.4 회절도 실험결과

구조물에 직각으로 입사하고 불규칙파의 방향 집중도가 작은($ms = 1.8$) 경우의 실험결과를 Fig. 6~7에 도시하였다. 실험안 D1에서의 방파제 개구부 후면에서의 파고비 계산결과,

실험 결과가 이론해의 전파양상을 잘 재현한다. 불규칙파의 방향분산 각도가 큰 경우 수치모형실험의 회절도가 파고비 0.4~0.6 영역에서 일부 저평가되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 실험안 D1에서 2개의 수직 layer로 나눈 실험안 D2의 경우 파고비 계산결과, 실험 결과와 이론해의 향내로 진입하는 파의 전파양상은 유사하지만 실험안 D1과 마찬가지로 파고비 0.4~0.6 구간에서 일부 회절도가 저평가되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7).

구조물로 직각으로 입사하고 불규칙파의 방향 집중도가 큰($ms = 17.2$) 경우의 실험결과를 Fig. 8~9에 도시하였다. 실험안 D3에서의 방파제 개구부 후면에서의 파고비 계산결과, 실험

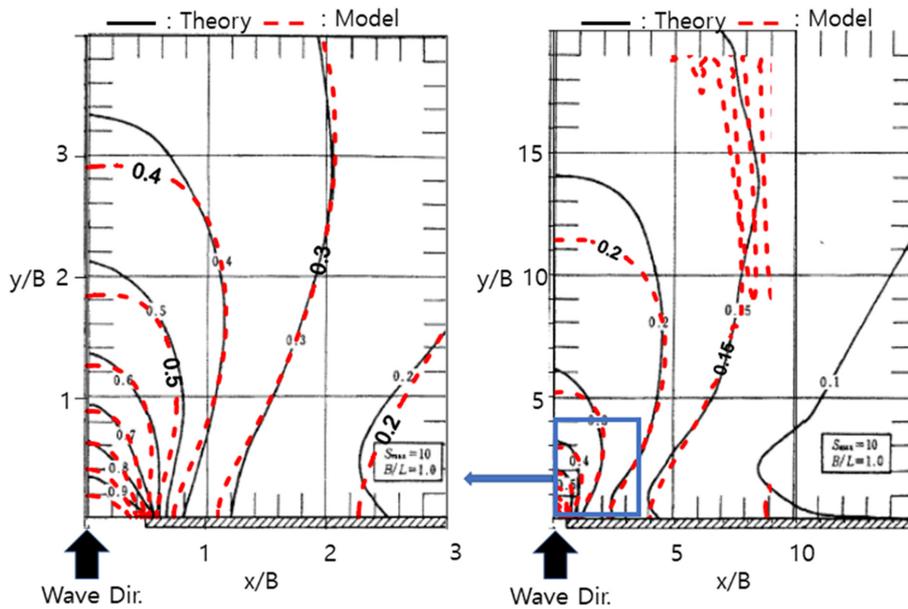


Fig. 7. Diffraction diagrams for $ms = 1.8$, two vertical layers (D2).

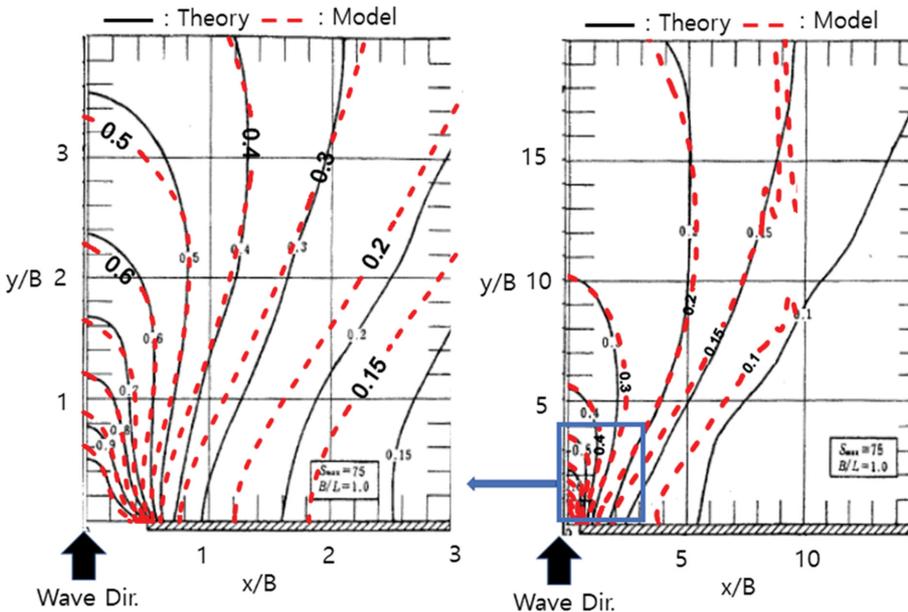


Fig. 8. Diffraction diagrams for $ms = 17.2$, one vertical layer (D3).

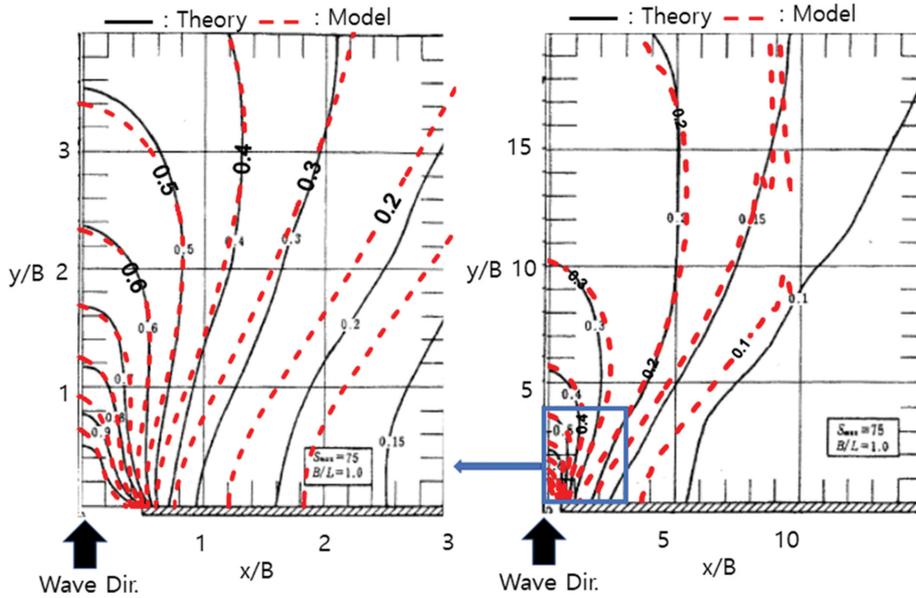


Fig. 9. Diffraction diagrams for $ms = 17.2$, two vertical layers (D4).

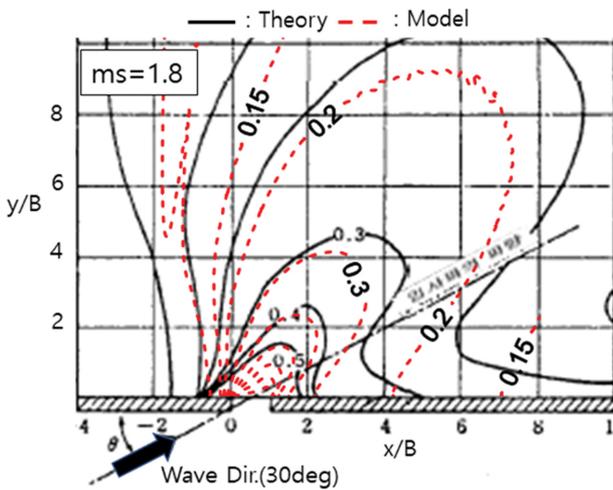


Fig. 10. Diffraction diagrams for incident wave at 30° , $ms = 1.8$ (D5).

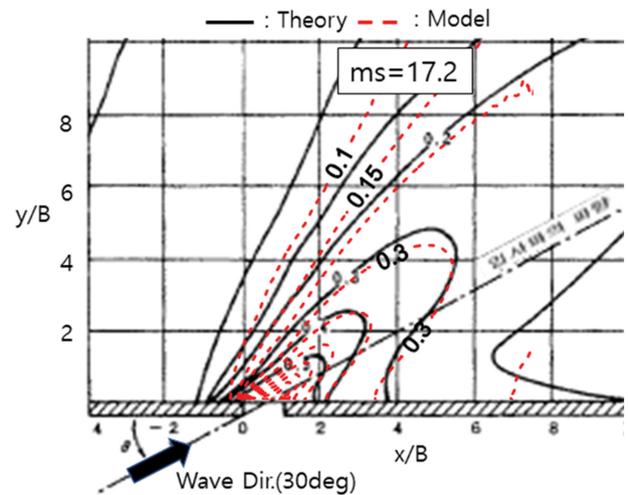


Fig. 11. Diffraction diagrams for incident wave at 30° , $ms = 17.2$ (D6).

험결과와 이론해의 전파 형태는 아주 유사하게 나타나고, 파고비가 0.5~0.6인 구간에서 일부 파랑에너지 전파가 낮은 것으로 판단되지만 아주 유사한 결과를 나타낸다(Fig. 8). 실험안 D3에서 2개의 수직 층을 나눈 실험안 D4의 경우를 보면, 파고비 계산결과가 이론해의 형태와 크기가 유사하며, 수심 평균 실험안 D3에 비해 정확도가 높아진 것을 확인하였다(Fig. 9).

경사 입사에 의한 실험 D5에서의 방파제 개구부 후면에서의 파고비 계산결과는 Fig. 10에 도시하였으며, 불규칙파의 방향분산이 집중도가 작은 경우($ms = 1.8$) 진입 각도 및 전파양상은 잘 재현하는 것으로 판단되지만 수치모형 실험결과가 이론해에 비해 영향범위가 저평가 되는 경향을 보인다. 경사 입사에 의한 실험 D6에서의 방파제 개구부 후면에서의 파고비 계산결과는 Fig. 11에 도시하였으며, 불규칙파의 방향 집중도

가 큰 경우($ms = 17.2$) 수치모형 실험결과가 이론해와 입사파의 진입각도 및 전파양상이 유사한 분포를 보이는 것을 확인하였다.

회절도 실험결과 직각 입사 및 경사 입사 모두 방향 집중도가 작은 경우, 회절도 이론값 보다 저평가되는 경향을 보이는 반면에 방향집중도가 큰 경우, 계산 값과 이론값이 유사한 형태를 보이며 이는 연안에서 충분히 발달된 너울성 파랑의 정도도를 평가하는 경우에는 적용이 가능할 것으로 판단된다. 방향집중도가 낮은 경우가 높은 경우에 대비 파고비가 저평가되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 방향집중도가 작을수록 방파제 개구부로 진입하는 파의 에너지 전파 영향 범위가 넓어져서 저평가되는 것으로 사료된다.

수직층을 2개로 나눈 경우의 방파제 회절도 검토 결과, 수직층 증가가 방향집중도가 높은 경우의 정확도 향상에 기여했

지만 방향 집중도가 낮은 실험의 정확도 향상에는 기여하지 못하였다. 이는 수직층의 최대허용주파수를 증가시켜 허용 가능한 불규칙파의 범위를 키우는 효과보다는 분산항의 기능 향상으로 인한 모형의 정확도 개선의 영향인 것으로 판단된다.

5. 결 론

Lee et al.(2003)의 연구에 따르면 Boussinesq 근사의 수치 모형의 경우 1:1 이상의 수심이 급변하는 지형에서는 부정확한 계산의 결과를 재현함을 보였다. 개구부 폭이 약 30 m 내외의 좁은 마리나 및 소규모 항만에서 항 내로 진입하는 회절파 및 반사파 계산 시에 좁은 항의 개구부의 격자 해상도가 충분히 확보되어야 계산의 정확도를 높일 수 있다. 작은 격자의 해상도는 구조물 주변에서 1:1 이상의 수심 급변 구역을 생성하고 수심이 급변하는 구역에서 Boussinesq 근사의 수치모형은 항 내로 진행되는 파의 회절에 대한 평가 시 정확한 정온도 평가가 어려울 수 있다. 본 연구에서는 좁은 항의 개구부에서 정온도 평가 시 정수면의 비정수압 항이 고려되고 비선형 천수방정식 모형인 SWASH 모형(Zijlema and Stelling, 2005)의 항만 정온도 실험에 대한 적용성을 검토하였다. 반사파의 재현을 수심, porosity 구조물의 크기 및 높이로 반영하는 SWASH 모형에 대해 항 내 정온도 계산의 적합성을 반사율 및 항 내 회절실험을 통해 검토하였다.

SWASH 모형의 수심평균으로 계산된 단면 구조물 반사율 실험결과와 Stelling and Ahrens(1981)이 제시한 반사율의 개략치와 유사한 반사율을 나타내며, 경계에서의 반사파의 제어와 구조물의 형상 및 지형에 따라 반사파가 잘 재현되는 것으로 나타났다.

방파제 개구부에서 입사하는 파의 회절도 검토를 위해 기존 연구(Goda et al., 1978)와 비교한 결과, 파랑 입사각 및 회절파의 형태가 이론값과 아주 유사하게 나타나지만, 경사 입사 및 직각 입사 모두 방향 집중도가 작은 경우 파고비가 0.5~0.6인 일부 구간에서 회절도가 저평가되는 것으로 나타났다.

수직층을 2개로 나눈 경우의 방파제 회절도 검토 결과, 수직층 증가가 방향집중도가 높은경우의 정확도 향상에 기여했지만 방향 집중도가 낮은 실험의 정확도 향상에는 기여하지 못하였다. 이는 수직층의 최대허용주파수를 증가시켜 허용 가능한 불규칙파의 범위를 키우는 효과보다는 분산항의 기능 향상으로 인한 모형의 정확도 개선의 영향인 것으로 판단된다. 수직층의 모형에 대한 민감도의 정확한 검토를 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

Deutsches hydrographisches institut (1973). Measurements of

Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Hamburg, Deutsche.
 Goda, Y., Takayama, T. and Suzuki, Y. (1978). Diffraction diagrams for directional random waves. Proc. 16th International Conference Coastal Engineering, 628-650.
 Goda, Y. (1999). A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum. Coastal Engineering Journal, 41(1), 1-20.
 Lam, D.C.L. and Simpson, R.B. (1976). Centered differencing and the box scheme for diffusion convection problems. Journal of Computational Physics, 22(4), 486-500.
 Lee, C.H., Cho, E.K. and Cho, Y.J. (2003). Behavior of extended boussinesq equations on variations of bottom topography. Journal of Korean Society of Civil Engineers, 23(6B), 607-613 (in Korean).
 Madsen, P.A., Murray, R. and Sorensen, O.R. (1991). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Coastal Engineering, 15, 371-388.
 Ministry of oceans and fisheries (2014). Harbor and fishing port design standard explanation (in Korean).
 Nwogu, O.G. (1993). Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 119, 618-638.
 Nwogu, O.G. and Demirbilek, Z. (2001). BOUSS-2D: A Boussinesque wave model for coastal regions and harbors, CHL TR-01-25, Washington, DC.
 Stelling, W.N. and Ahrens, J.P. (1981). Estimation of Wave Reflection and Energy Dissipation Coefficients for Beaches, Revetments, and Breakwaters. Technical paper. U.S. Army, Corps of Coastal engineering research center fort belvoir va, Washington, DC.
 Stelling, G.S. and Duinmeijer, S.P.A. (2003). A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 43, 1329-1354.
 Stelling, G. and Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 43, 1-23.
 Zijlema, M. and Stelling, G.S. (2005). Further experiences with computing non - hydrostatic free surface flows involving water waves. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 48, 169-197.
 Zijlema, M. and Stelling, G.S. (2008). Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure. Coastal Engineering, 55, 780-790.

Received 18 November, 2019
 1st Revised 19 December, 2019
 2nd Revised 24 December, 2019
 3rd Revised 26 December, 2019
 Accepted 26 December, 2019