



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

파랑 내습시 하구역 호안의
월파량에 관한 연구



2014년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

장 성 철

공 학 석 사 학 위 논 문

파랑 내습시 하구역 호안의
월파량에 관한 연구

지도교수 김 현 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

장 성 철

장성철의 공학석사 학위논문을 인준함.

2014년 2월 일



주 심 공학박사 이 인 철 印

위 원 공학박사 윤 한 삼 印

위 원 공학박사 김 헌 태 印

목 차

List of Figures.....	iii
List of Tables.....	v
List of Symbols.....	vi
ABSTRACT.....	vii
 I. 서 론	 1
1.1. 연구배경.....	1
1.2. 연구방법.....	3
 II. 단순 하구 모형의 파랑변형	 4
2.1. 수치모형의 개요.....	4
2.1.1. 지배방정식.....	4
2.1.2. 파랑변형 제약 조건.....	6
2.2. 파랑변형 수치실험.....	11
2.2.1. 단순화한 하구 모형.....	11
2.2.2. 실험조건.....	12
2.2.3. 실험 결과 및 파고 분포.....	14
 III. 수영만 하구의 파랑변형	 30
3.1. 실험개요 및 조건.....	30
3.1.1. 수영만의 담수유입 조건.....	30
3.1.2. Storm surge의 산정.....	32
3.2. 파랑변형 수치해석 결과.....	36
 IV. 수영만 호안 월파랑 산정	 40
4.1. 실험개요 및 조건.....	40
4.1.1. 수치파동수로(CADMAS-SURF) 모형.....	42
4.1.2. 수치파동수로의 지배방정식.....	43
4.2. 월파랑 산정식.....	45
4.2.1. 평균 월파랑과 제체높이의 관계.....	45
4.2.2. 월파랑 검증.....	49
4.3. 월파랑 계산 결과.....	52
4.3.1. 수치모형 실험 조건.....	52
4.3.2. 호안단면별 월파랑 산정 결과.....	56
4.3.3. 수위에 따른 월파랑.....	59
4.3.4. 수영만 호안 월파랑 산정식.....	62

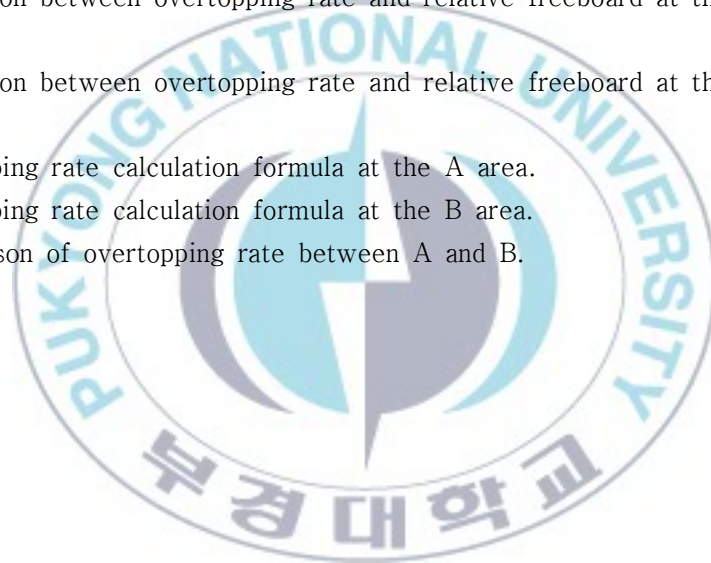
V. 요약 및 결론.....	64
참고문헌.....	66



List of Figures

- Fig. 1. Study area of this paper.
- Fig. 2. Definition sketch of wave and current vectors.
- Fig. 3. The virtual topography in this study.
- Fig. 4. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 5. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 6. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 7. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 8. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 9. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 10. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 11. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 12. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 13. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 14. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 15. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$).
- Fig. 16. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($H=3 \text{ m}$, $h_c=5 \text{ m}$).
- Fig. 17. Bathymetry for the Suyeong bay.
- Fig. 18. ADCIRC model domain with bathymetry.

- Fig. 19. Time series of tide at the Suyeong bay.
- Fig. 20. Water level fluctuations by ADCIRC cases.
- Fig. 21. STWAVE significant wave height for each cases.
- Fig. 22. Location of study area for overtopping rate
- Fig. 23. The cross section of A area (Entrance of estuary in suyeong bay).
- Fig. 24. The cross section of B area (Revetment at reclaimed land in suyeong bay).
- Fig. 25. Permissible amount of overtopping(CEM, 2004).
- Fig. 26. Specification of numerical wave channel.
- Fig. 27. Comparison of the result between empirical formulas and computed data by using the numerical model.
- Fig. 28. The cross section in the numerical wave channel.
- Fig. 29. Comparison with overtopping rate in the cases.
- Fig. 30. Correlation between overtopping rate and relative freeboard at the A area.
- Fig. 31. Correlation between overtopping rate and relative freeboard at the B area.
- Fig. 32. Overtopping rate calculation formula at the A area.
- Fig. 33. Overtopping rate calculation formula at the B area.
- Fig. 34. Comparison of overtopping rate between A and B.



List of Tables

Table 1. Condition of the test on numerical simulation
Table 2. The result of numerical simulation for each cross section ($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)
Table 3. The result of numerical simulation for each cross section ($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)
Table 4. The result of numerical simulation for each cross section ($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)
Table 5. The result of numerical simulation for each cross section ($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)
Table 6. The result of numerical simulation for each cross section ($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)
Table 7. The result of numerical simulation for each cross section ($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)
Table 8. Comparison of conditions between virtual and real
Table 9. Calculating flushing time and total fresh water in Suyeong bay
Table 10. Water level conditions in the numerical simulation
Table 11. Computation of water level
Table 12. Grid specifications in the numerical model
Table 13. Result of significant wave height
Table 14. Considering importance of the area
Table 15. Permissible amount of overtopping about the use
Table 16. Limit of damage from overtopping rate
Table 17. The empirical formulas of preceding research
Table 18. The formulas in order to compare data from numerical model
Table 19. Wave conditions for operating numerical model
Table 20. Signification wave for using the numerical model
Table 21. Result of the numerical calculation(A Area)
Table 22. Result of the numerical calculation(B Area)

List of Symbols

E	: Wave energy density
ρ_w	: Density of water
S	: Source & Sink term
μ	: Angle of wave direction
ω	: Angular frequency
g	: Acceleration of gravity
k	: Wave number
d	: Depth of water
C	: Group celerity
T	: Wave period
H	: Wave height
L	: Wave length
λ	: Division coefficient
u_*	: Coefficient of friction
Δt	: Equivalence time interval
Δx	: Equivalence grid size
Γ	: Energy flux
$S(f)$	: Frequency spectrum
B	: Width of estuary
q	: Overtopping rate
Q	: Dimensionless Overtopping rate
R_c	: Revetment height
R	: Relative revetment height

Overtopping Rate on the Breakwater around Estuary by Wave

Sung-Chul Jang

*Graduate School, Department of Ocean Engineering
Pukyong National University*

ABSTRACT

Wave overtopping has been studied under the view of its reducing capability of the various wave dissipating structures. Therefore, researches for the effect of wave overtopping caused influx of stream are insufficient. In this study, it was analyzed the effort of wave overtopping by influx of stream on the breakwater around the estuary.

This study was carried out to calculating wave overtopping rate using horizontal and vertical 2D wave numerical modeling for the design of breakwater stability.

To accomplish the main purpose, investigate the wave deformation according to the input and boundary conditions (incident wave, variation of river width, water elevation) and quantify the wave overtopping rate on the breakwater around estuary.

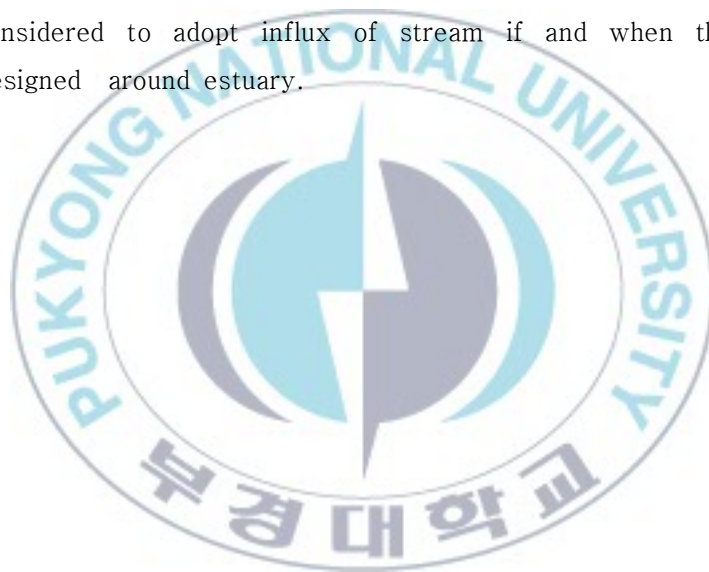
Two main results are summarized as follows:

First, long-period wave energy was transmitted upstream better than short-period it. Wave heights was increased about from 8 to 18 percents in time of twice river's width using numerical wave transformation model(STWAVE). The wave deformation around estuary was dominantly affected on the shape of estuary, especially width of estuary is the most important parameter. In other words, wave energy

will be dissipated around estuary as width of estuary decrease.

Second, the value of water level rising is 0.12 m which is considered influx of stream only, but 0.23 m considered both influx of stream and storm surge in Suyeong bay. This results indicated that the condition which is considered storm surge has double value more than another condition. In order to carried out overtopping rate, the numerical wave channel model(CADMAS-SURF) was operated. Using calculated the wave condition on the breakwater, the overtopping rate considered both influx of stream and storm surge is increased by 0.07 m³/sec/m(about 1.8 times) in the area A and the overtopping rate is increased by 0.2 m³/sec/m(about 2times) in the area B than the condition which is considered storm surge only. From the results, damage possibility in the area B is higher than area A.

We will be considered to adopt influx of stream if and when the breakwater be designed around estuary.



I. 서론

1.1 연구배경

최근 해안공간의 적극적인 활용이 급전되고 있는 상황에서 연안 개발이 활발하게 이루어져 왔다. 대규모 항만을 비롯한 산업단지, 해안 도시개발 등이 두드러짐에 따라 해안매립, 간척 등 해안의 개발수요가 가속화 되고 있다. 이와 같은 매립, 간척 등과 같은 해안지역에서의 대규모 토지이용의 변화로 하구역 인근의 호안, 수변지역의 원활한 이용과 방재대책을 위해 기상·해상의 외력환경 예측이 중요한 문제로 대두되고 있다(이, 2000). 해안 이용을 위한 방재대책 중 호안 구조물을 계획하고 설계하는 과정에서 구조물 기능이 가장 효율적이면서 경제성을 가질 수 있도록 설계/시설 하는 것이 중요시 되고 있다. 이러한 호안에 작용하는 해양 외력의 정확한 예측이 많은 연구자들에 의해 당면과제로 제기되어 왔다. 특히, 주 관심이 되는 해안의 수리 특성은 주로 구조물에 영향을 미치는 외력 차원에서 파랑과 조석현상이다.

본 연구 대상 해역인 수영강 주변 지역은 수영만 요트경기장 만들 당시 매립지로서 저지대를 형성하고 있다. 이러한 지형 특성은 부산지역에 내습하는 태풍에 취약성을 가지는데, 실제 2003년 No.0314.매미(MAEMI.2003.09), 2008년 No.1004.덴무(DIANMU.2010.08), 2011년 No.1109.무이파(MUIFA.2011.08) 등의 태풍내습시 월파와 침수 등에 의해 건물 및 차량, 인명 피해 등을 입었으며, 향후 태풍 방지대책이 수립되지 않는 이상 대상지역은 태풍으로 인한 피해가 더 커질 것으로 예상된다(장, 2013).

이와 같이 태풍에 취약한 연구대상 해역에 대해 2011년도에 월파에 의한 피해를 막기 위하여 마린시티 앞 해상을 길이 780 m, 너비 50 m 규모(면적 39000 m²)로 매립해 테트라포드를 설치, 태풍과 해일 등의 연안재해를 방지하고 친수공간으로 활용하기로 계획이 수립되었다. 그러나 사업예산문제로 담보상태에서 2012년 대체방안으로 태풍 등 자

연재해 피해를 일정 부분 대비하기 위하여 호안의 높이를 증축하는 공사로 총 구간 784 m를 제체높이 1.2 m로 증축하고 해안도로를 따라 길이 1500 m, 폭 5 m의 보도를 신설하였다. 하지만 하구 주변 해역이라는 지형적인 특성으로 인하여 호안구조물이 받는 정확한 외력을 예상하기 어렵고 또한 매미(2003)와 같은 거대태풍이 내습에 대한 월파의 피해 가능성은 아직까지 미지수이다. 결국 해안구조물 설계에 있어 해양 외력 환경을 정확히 예측하고 이를 설계에 반영하지 못하고 있음을 보여주는 사례라고 할 수 있다.

본 연구 대상해역인 수영강 하구역의 경우하천이 해역과 합류하는 하구역(Estuary)에 있어서는 파랑과 하천의 공존현상이 발생으로 특히 파랑외력의 예측에 어려움이 존재한다. 외해 작용으로 인하여 해수의 침입에 의한 하천수와 해수가 혼합되어 하구수위의 상승과 역류 현상 등이 일어나며 이러한 현상들은 하구의 지리적 위치와 형상에 큰 영향을 받는다. 개발에 따른 하구형상변화의 영향으로 파랑외력의 변화도 예상되며, 하구주변해역 호안의 설계 시 하구형상에 따른 파랑외력 산정과 이에 따른 호안의 안정성 및 기능성의 재검토가 요구되어 진다. 따라서 본 연구에서는 수영강 하구를 대상으로 외해 입사하는 파랑(장주기, 단주기)의 하구주변에서의 파랑변형과 하천내로 파가 진행할 경우 심해내습파랑조건, 하구형상, 하천수심 등의 조건변화에 따라 파랑에너지변화특성을 살펴보고자 한다. 또한 수영강 하구역의 실 호안구조물을 대상으로 구조물 배후로의 월파량을 산정하고 이를 해양환경조건(파고, 주기, 수위)과 비교 검토하고자 한다.

이상의 검토과정을 통해 실제 수영만 및 임의의 개구폭을 가진 소하천에서의 파랑변형특성을 검토함으로서 하천주변 호안의 안정성 및 기능성 고려의 당위성/필요성에 대해 고찰하고자 한다.

1.2. 연구방법

본 논문에서는 외해 입사하여 천해역으로의 파랑변형과 하구역으로 내습하여 하도를 따라 진행하는 파랑의 계산을 위하여 수치파랑변형 모델인 STWAVE(Steady-State Spectral Wave Model) 사용하여 연구를 수행하였다. 소하천 입구부에서의 하구폭의 변화에 따른 파랑변형 현상을 살펴보기 위해 수영강 하구역과 같은 실제 해역을 단순화시켜 Fig. 1(a)와 같이 임의의 가상 수치모의 대상으로 설정하였다. 또한 호안에서 계산되는 파랑제원을 이용하여 호안 단면에 대한 월파량을 산정하였는데 수치파동수로(CADMAS-SURF)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 하천해안매립으로 하구 폭이 B_1 에서 B_2 로 변화함에 따라서 하구역 주변 호안에서의 수리 현상이 변화될 것으로 예상된다. 또한, 본 연구에서는 실효 하구주변호안의 안정성 및 기능성의 평가를 위해 수영만 하구지역(Fig. 1(b))을 대상지역으로 선정하였다.

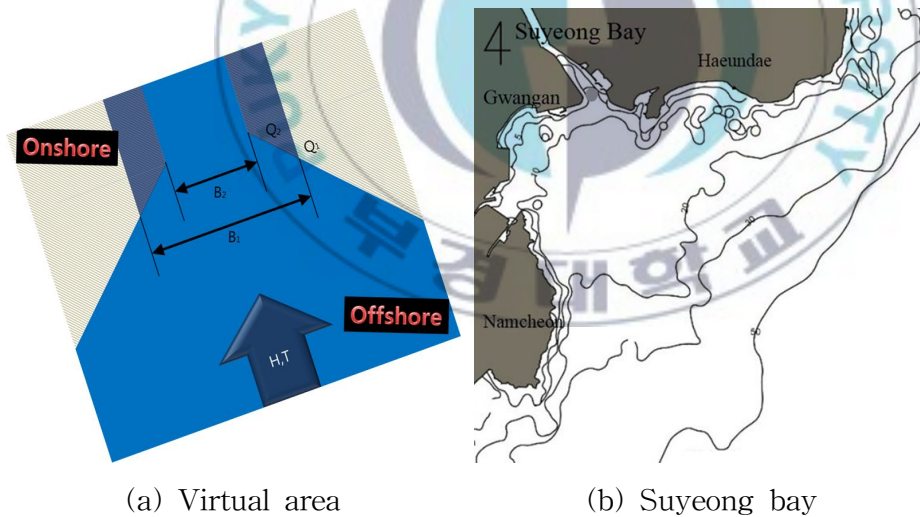


Fig. 1. Study area of this paper.

II. 단순 하구 모형의 파랑변형

2.1. 수치모델의 개요

외해에서 연안으로 입사하는 파랑의 변형을 시뮬레이션 하기 위하여 본 논문에서는 미국공병단에서 개발한 STWAVE(Steady-State Spectral Wave Model, Smith et al., 1999)를 사용하였다. STWAVE 모델은 연안역에서 풍파의 성장과 전파에 있어서 쉬운 적용성, 유연함 그리고 강력함을 갖춘 모형으로서 수심변화에 의한 굴절·천수변형, 흐름에 의한 굴절·천수변형, 수심 및 파형경사에 의한 쇄파, 회절, 바람에 의한 파의 성장, 그리고 파 상호작용 및 파랑장의 성장에 있어서 에너지를 재분배하고 감쇠시키는 백파 현상을 재현 할 수 있다. 수치모델의 제약 및 가정조건은 다음과 같다.

- ♦ 환경사의 해저지형을 가정하며 파의 반사는 무시한다.
- ♦ 공간적으로 균일한 심해파랑장을 가정한다.
- ♦ 파, 흐름 및 바람은 정상상태를 가정한다.
- ♦ 선형파의 굴절 및 천수변형을 계산한다.
- ♦ 수심에 대해 평균 흐름을 고려한다.
- ♦ 저면마찰은 무시한다.

2.1.1. 지배방정식

정상상태의 스펙트럼 파랑작용 보존에 대한 지배방정식은 다음과 같다(Jonsson, 1990).

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{w_r} = \sum \frac{S}{w_r} \quad (2-1)$$

여기서, E : 파랑에너지, ρ_w : 물의 밀도, S : 에너지의 source와 sink 항, μ : 파향선 각도, w : 각주파수, 하첨자 r : 기준축에서 흐름

에 상대적인 파의 매개변수, α : 흐름에 절대적인 파의 매개변수를 의미한다. 파와 흐름의 상호작용은 기준점을 흐름과 함께 움직이는 이동 좌표계로 고려하며, 이 경우 파의 분산관계는 다음의 식으로 나타낸다 (Jonsson, 1990).

$$w_r^2 = gk \tanh(kd) \quad (2-2)$$

이에 비해 절대 각주파수 w_r 의 분산 방정식은 (2-3)과 같다.

$$w_a = w_r + kU \cos(\delta - \alpha) \quad (2-3)$$

여기서 U : 흐름의 속도, g : 중력가속도, k : 파수, d : 수심, δ : 상대적 흐름의 방향(x축), α : 파향과 x축 사이각이다. 절대 파속과 군속도의 방향은 파봉선의 직각(wave orthogonal) 방향이다. 절대 기준축에서는 식 (2-4), 식 (2-5)와 같다.

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha) \quad (2-4)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad (2-5)$$

파향선 각도 μ 는 식 (2-6)과 같다.

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{C_{gr}} \sin \alpha + \overline{U} \sin \delta}{\overline{C_{gr}} \cos \alpha + \overline{U} \cos \delta} \right) \quad (2-6)$$

여기서, 하첨자 i 는 x 와 y 축 성분에 대한 텐서(tensor) 표기법이며, 흐름에 대한 상대 파속도와 파의 군속도는 식 (2-7), 식 (2-8)과 같고, 파에너지 전파는 Fig. 2와 같이 정의된다.

(2-7)

(2-8)



Fig. 2. Definition sketch of wave and current vectors.

2.1.2. 파랑변형 제약조건

(1) 굴절과 천수

굴절과 천수효과는 파향선이 진행한 뒤를 따라 운동 보존을 적용하여 스펙트럼 파랑모델에서 도입된다. 파향선은 한 격자 열로부터 단계적으로 추적된다. 이때 2차원 파랑스펙트럼은 외해쪽의 처음 격자열을 초기 입력치로 한다. 해안으로 진행될 때 항 입구에서의 낙조류와 같은 강한 흐름에 의해서 파의 전파가 저지된다. 이러한 파의 저지현상은 분산방정식의 해가 없을 경우도 있고, 또는 상대적인 군 파속도가

반대로 흐르는 흐름의 크기보다 작을 경우에 파랑에너지가 흐름에 대해 전파되지 못하기 때문에 일어난다. 심해에는 흐름이 없을 경우 심해파속의 $1/4(0.25gT_a/2\pi)$, 이때 T_a 는 절대파 주기)보다 큰 크기를 갖는 반대 흐름 때문에 저지현상이 발생한다. 파의 저지현상이 일어나게 되면 파 에너지는 쇄파를 통해 소산된다. Lai, Long & Huang(1989)은 실험 자료를 통해 파 에너지의 저지현상이 일어나지 않는 저주파수에 전달되는 비선형 에너지를 통해 선형 저지점을 통과할 수 있었다고 하였다. 이러한 비선형 에너지의 전달은 STWAVE에 포함되지 않는다.

(2) 회절

STWAVE에서 회절은 파에너지의 평활(Smoothing)방법을 통해 반영된다.

$$E_j(w_a, \alpha) = 0.55E_j(w_a, \alpha) + 0.225 [E_{j+1}(w_a, \alpha) + E_{j-1}(w_a, \alpha)] \quad (2-9)$$

여기서, E 는 주파수와 방향으로 주어지는 에너지 밀도를 의미하고, 아래첨자 j 는 가로축 방향의 격자번호를 의미한다.

(3) 쇄파

에너지 근원 및 소산항에서 쇄파의 지균은 수심에 대한 파고 비율의 함수로 적용한다.

$$\frac{H_{mo_{max}}}{d} = 0.64 \quad (2-10)$$

이 때 H_{mo} 는 에너지에 기초한 제로모멘트 파고이다. Smith, Resio, and Vincent(1997)와 Battjes(1982)& Battjes & Janssen(1978)은 낙조류상의 불규칙 쇄파를 실험실에서 측정하였고 간단하고 정밀한 Miche

관정식(1951)과 같은 쇄파 관계식을 찾았다.

$$H_{mo_{\max}} = 0.1L \tanh(kd) \quad (2-11)$$

식 (2-11)을 제로 모멘트 파고에서 최대 한계로 적용한다.

(4) 바람 입력

바람의 영향은 바람장(wind field)에서 바람장으로의 모멘텀 이동을 통해 파가 성장하게 된다. STWAVE모델에서 바람장으로의 에너지 플럭스는 다음과 같이 주어진다(Resio, 1988a).

$$F_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g} \quad (2-12)$$

여기서, λ 는 분할 계수(0.75), C_m 은 평균파속, u_* 는 마찰속도를 의미한다. 스펙트럼으로 얻어지는 에너지는 격자들 사이로 이동하는 파의 등가 시간(equivalent time)을 통해 에너지 flux의 곱을 통해 계산된다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta \overline{C_g} \cos \alpha_m} \quad (2-13)$$

여기서 Δt 는 등가 이동시간, Δx 는 격자간격, β 는 계수값으로 풍해(wind sea)에서 0.9, C_{mg} 는 스펙트럼의 평균 군속도, α_m 은 평균 파 방향을 각각 나타낸다. STWAVE는 반평면(half-plane)모델이므로 해안 방향으로 부는 바람만이 포함된다.

(5) 파 상호작용 및 백파(whitecapping)

에너지가 바람에서 파로 전해질 때에 에너지는 비선형 파의 상호작

용을 통해 재분배된다. STWAVE에서 스펙트럼 피크점의 주파수는 취송거리를 증가시키게 된다. 이 변화비율에 관한 식은 다음과 같다.

$$(f_p)_{i+1} = \left[(f_p)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right]^{-3/7} \quad (2-14)$$

여기서 아래첨자 i 는 격자의 세로축을 의미하고, ζ 는 무차원상수이다(Resio and Perrie, 1989). 파랑에너지는 높은 주파수로 전이된 에너지를 통해 분산되고 쇄파(백파)와 난류/점성효과에 의해서도 분산된다.

바람장에서는 바람과 같은 유입되는 에너지와, 높은 주파수로의 비선형흐름 같은 나가는 에너지가 동적인 균형을 이루게 된다(Resio, 1987, 1988a). 주파수가 큰 에너지의 흐름은 STWAVE에서 다음과 같이 적용되었다(Resio, 1987).

$$\Gamma_E = \frac{\varepsilon g^{1/2} E_{tot}^3 k_p^{9/2}}{\tanh^{3/4}(k_p d)} \quad (2-15)$$

여기서, Γ_E 는 에너지 흐름(energy flux), ε 은 계수로서 30을 쓰고, E_{tot} 는 $\rho_w g$ 로 나눈 스펙트럼에서의 전체에너지, k_p 는 스펙트럼의 정점(peak)에 관련된 파수이다.

(6) 방사응력 경사(Radiation stress gradients)

STWAVE모델에서 잉여응력에서의 기울기는 파의 치오름(setup), 처내림(setdown)에 대한 부분을 제공하기 위해 계산되었다. 방사응력 텐서는 선형파랑이론에 기초하여 다음의 식으로 계산한다.

$$S_{xx} = \rho_w g \iint E(f, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad (2-16)$$

$$S_{xy} = \rho_w g \iint E\left(\frac{f, \alpha}{2}\right) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \sin 2\alpha \right] df d\alpha \quad (2-17)$$

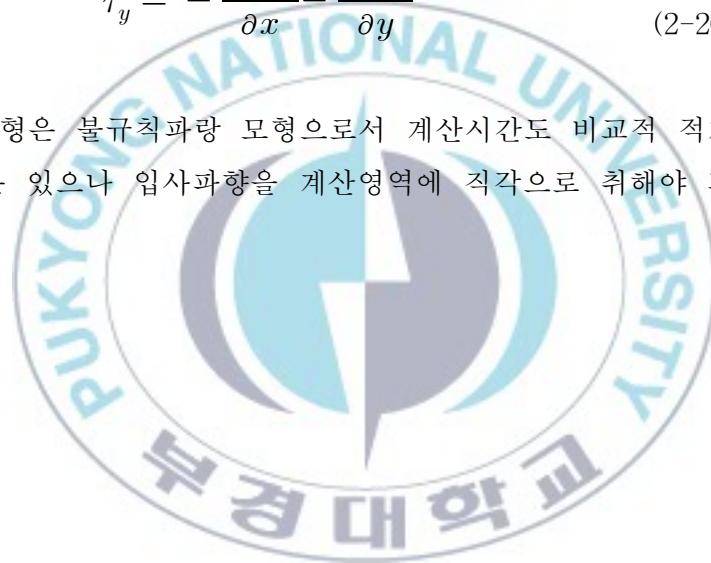
$$S_{yy} = \rho_w g \iint E(f, \alpha) \left[0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha \quad (2-18)$$

방사응력의 기울기는 다음과 같이 계산한다.

$$\tau_x = - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (2-19)$$

$$\tau_y = - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (2-20)$$

STWAVE 모형은 불규칙파랑 모형으로서 계산시간도 비교적 적게 소요되는 장점은 있으나 입사파향을 계산영역에 직각으로 취해야 되는 단점이 있다.



2.2. 파랑변형 수치실험

2.2.1. 단순화한 하구 모형

본 연구에서 검토하고자 하는 수영강 하구역을 단순화한 하구모형을 Fig. 3와 같이 나타내었다. 외해에서의 파랑이 육지로 진행함에 따라 하구폭 변화에 따라 전달되는 파랑에너지 변형, 하도를 따라 내습하는 파고 분포를 알아보기 위하여 설정하였다.

외해에서 육지와 처음 만나는 부분까지 거리를 10 km, 처음 만나는 육지부터 하구까지의 거리를 5 km, 파랑 에너지가 집중되어 하구역으로 들어가는 해역의 경사부분은 1:2로 육지부분을 구축하였다. 그리고 해저지형은 파향과 같은 방향으로 1:250의 경사를 주어 육지쪽으로 갈수록 수심이 작아지게 하였다. 하천 내 해저지형의 변화는 고려하지 않고 일정 수심을 설정하였다.

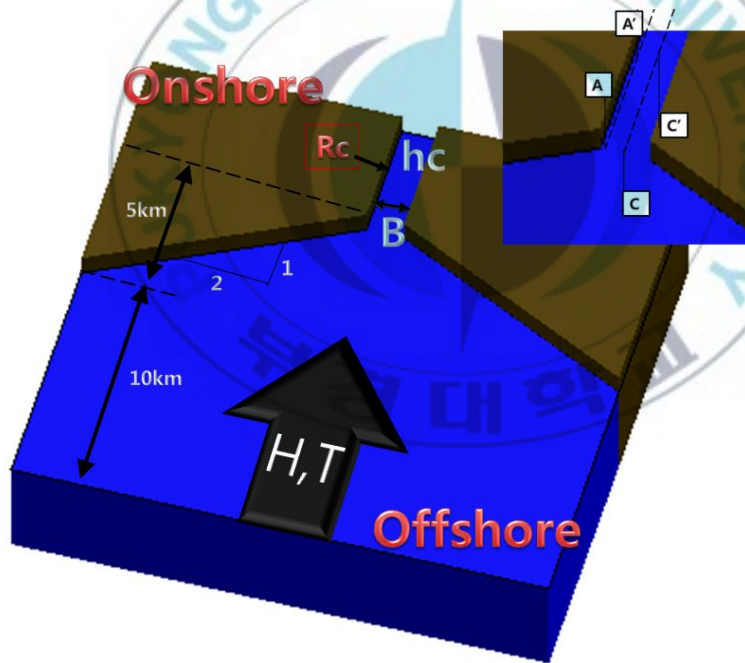


Fig. 3. The virtual topography in this study.

2.2.2. 실험조건

계산격자는 가로 100 m, 세로 100 m이며, 각 케이스에서 하구역($x=0$)에서 하도를 따라 $A-A'$ 단면과 $C-C'$ 단면에서의 파고분포를 4 km까지 200 m간격으로 계측하여 수치실험을 진행하였다. 심해입사파랑의 제원으로 각각의 유의파고와 최대주기에 대응하는 불규칙입사파 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다.

단순화한 하구 모형을 사용하여 하천 내 파고 분포의 주요 변수를 선정하기 위하여 하구폭(B), 하구수심(h_c), 유의파고($H_{1/3}$), 최대주기(T_p)의 변화를 주어 수치시뮬레이션에 사용하였다. 각 케이스(case)에 사용된 파라메타는 하구폭 0.5 km, 하구수심 5 m, 10 m, 유의파고 3 m, 5 m, 10 m, 최대주기 8 sec, 10 sec, 12sec, 15sec(유의주기 6.4 sec, 8 sec, 10.4 sec, 12 sec)의 변화를 주어 총 72가지 케이스로 수치실험을 수행하였다(Table 1).

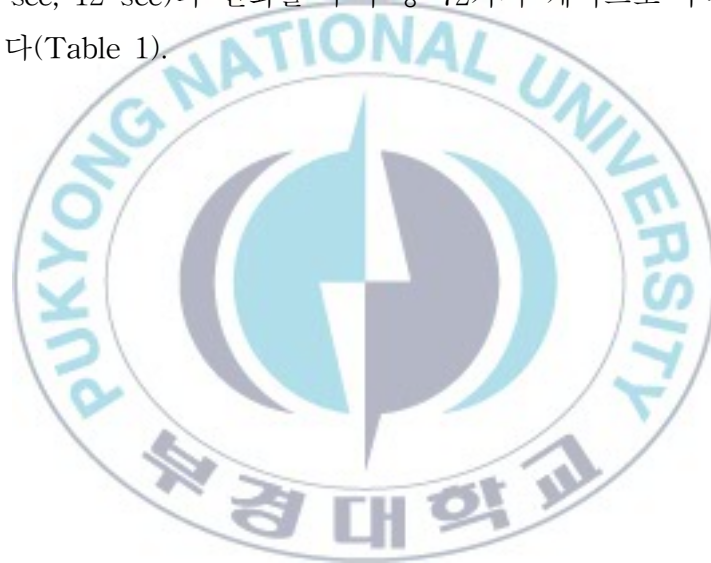


Table 1. Condition of the test on numerical simulation

B (m)	hc (m)	H (m)	T (sec)	CASE (No.)	B (m)	hc (m)	H (m)	T (sec)	CASE (No.)	B (m)	hc (m)	H (m)	T (sec)
500	5	3	8	case1	1000	5	3	8	case25	1500	5	3	8
			10	case2				10	case26				10
			13	case3				13	case27				13
			15	case4				15	case28				15
		5	8	case5			5	8	case29			5	8
			10	case6				10	case30				10
			13	case7				13	case31				13
			15	case8				15	case32				15
		10	8	case9			10	8	case33			10	8
			10	case10				10	case34				10
			13	case11				13	case35				13
			15	case12				15	case36				15
	10	3	8	case13		10	3	8	case37		10	3	8
			10	case14				10	case38				10
			13	case15				13	case39				13
			15	case16				15	case40				15
		5	8	case17			5	8	case41			5	8
			10	case18				10	case42				10
			13	case19				13	case43				13
			15	case20				15	case44				15
		10	8	case21			10	8	case45			10	8
			10	case22				10	case46				10
			13	case23				13	case47				13
			15	case24				15	case48				15

2.2.3. 실험결과 및 파고 분포

Table 1의 수치실험을 수행하여 외해에서 하구역으로 입사하는 파랑의 변형과 하구에서 하도를 진행하는 파랑의 파고분포를 알아보았다. 파고 분포는 하천의 중앙($C-C'$)지역과 호안지역($A-A'$)에서 하구역을 영점($x=0$)으로 총 길이 4 km에 대하여 파랑진행방향과 평행한 방향으로 계측을 수행하였다. 결과의 표기에서 H : 심해입사유의파고, T : 심해입사최대파주기, x : 하구로부터 떨어진 직선거리, HA : 호안 주변에서의 파고, HC : 하천중앙에서의 파고, B : 하구폭, h_c : 하천에서 수심을 나타내고 있다.

각 결과는 Table 2~Table 7에 하구폭과 하천수심별로 정리하여 나타내었다.



Table 2. The result of numerical simulation for each cross section($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10							
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13			
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA		
0.00	2.16	1.55	2.16	1.47	2.24	1.41	2.27	1.39	2.79	2.07	2.93	2.08	3.01	1.98	3.04	1.95	2.79	2.02	2.93	2.03	3.01	1.93		
0.20	1.92	1.13	1.92	1.07	1.99	1.04	2.01	1.03	2.52	1.49	2.64	1.48	2.71	1.42	2.73	1.41	2.52	1.44	2.64	1.45	2.70	1.41		
0.40	1.65	0.95	1.65	0.90	1.72	0.88	1.74	0.88	2.16	1.24	2.27	1.25	2.34	1.20	2.36	1.20	2.17	1.21	2.28	1.22	2.34	1.20		
0.60	1.41	0.81	1.41	0.77	1.48	0.76	1.50	0.76	1.85	1.06	1.95	1.06	2.02	1.03	2.04	1.03	1.87	1.04	1.96	1.05	2.02	1.03		
0.80	1.21	0.69	1.21	0.66	1.28	0.65	1.29	0.65	1.59	0.90	1.68	0.91	1.74	0.89	1.76	0.89	1.61	0.89	1.69	0.90	1.74	0.89		
1.00	1.04	0.59	1.04	0.56	1.10	0.56	1.12	0.56	1.36	0.77	1.44	0.78	1.50	0.77	1.52	0.77	1.39	0.76	1.45	0.77	1.50	0.76		
1.20	0.89	0.50	0.90	0.48	0.95	0.49	0.96	0.49	1.17	0.66	1.24	0.67	1.29	0.66	1.31	0.66	1.20	0.66	1.25	0.66	1.30	0.66		
1.40	0.77	0.43	0.77	0.41	0.82	0.42	0.83	0.42	1.01	0.56	1.07	0.57	1.12	0.57	1.13	0.57	1.03	0.57	1.08	0.57	1.12	0.57		
1.60	0.66	0.37	0.67	0.36	0.71	0.36	0.72	0.36	0.87	0.48	0.92	0.49	0.96	0.49	0.98	0.49	0.89	0.49	0.93	0.49	0.97	0.49		
1.80	0.57	0.32	0.57	0.31	0.61	0.31	0.62	0.31	0.75	0.42	0.79	0.42	0.83	0.42	0.84	0.42	0.77	0.42	0.80	0.42	0.83	0.42		
2.00	0.49	0.27	0.49	0.26	0.53	0.27	0.54	0.27	0.65	0.36	0.68	0.36	0.72	0.36	0.73	0.37	0.66	0.36	0.69	0.36	0.72	0.36		
2.20	0.42	0.23	0.43	0.23	0.46	0.23	0.46	0.23	0.56	0.31	0.59	0.31	0.62	0.31	0.63	0.32	0.57	0.31	0.60	0.31	0.62	0.31		
2.40	0.37	0.20	0.37	0.20	0.39	0.20	0.40	0.20	0.48	0.27	0.51	0.27	0.54	0.27	0.54	0.27	0.50	0.27	0.52	0.27	0.54	0.27		
2.60	0.32	0.17	0.32	0.17	0.34	0.17	0.35	0.17	0.42	0.23	0.44	0.23	0.46	0.23	0.47	0.23	0.43	0.23	0.44	0.23	0.46	0.23		
2.80	0.27	0.15	0.27	0.14	0.29	0.15	0.30	0.15	0.36	0.20	0.38	0.20	0.40	0.20	0.41	0.20	0.37	0.20	0.38	0.20	0.40	0.20		
3.00	0.24	0.13	0.24	0.12	0.25	0.13	0.26	0.13	0.31	0.17	0.33	0.17	0.35	0.17	0.35	0.18	0.32	0.18	0.33	0.17	0.35	0.17		
3.20	0.20	0.11	0.20	0.11	0.22	0.11	0.22	0.11	0.27	0.15	0.28	0.15	0.30	0.15	0.30	0.15	0.28	0.15	0.29	0.15	0.30	0.15		
3.40	0.18	0.10	0.18	0.09	0.19	0.10	0.19	0.10	0.23	0.13	0.24	0.13	0.26	0.13	0.26	0.13	0.24	0.13	0.25	0.13	0.26	0.13		
3.60	0.15	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.17	0.08	0.20	0.11	0.21	0.11	0.22	0.11	0.23	0.11	0.21	0.11	0.21	0.11	0.22	0.11		
3.80	0.13	0.07	0.13	0.07	0.14	0.07	0.14	0.07	0.18	0.10	0.18	0.10	0.19	0.10	0.20	0.10	0.18	0.10	0.19	0.10	0.19	0.10		
4.00	0.12	0.06	0.11	0.06	0.12	0.06	0.12	0.06	0.15	0.08	0.16	0.08	0.17	0.08	0.17	0.08	0.16	0.09	0.16	0.08	0.17	0.08		

Table 3. The result of numerical simulation for each cross section($B=0.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10							
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13			
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA		
0.00	2.31	1.78	2.24	1.65	2.26	1.53	2.26	1.48	3.85	2.97	3.73	2.76	3.76	2.55	3.77	2.46	4.93	3.80	5.46	4.05	5.75	3.94		
0.20	2.06	1.33	1.99	1.21	2.01	1.10	2.01	1.07	3.43	2.22	3.32	2.02	3.36	1.84	3.36	1.78	4.43	2.80	4.89	2.94	5.15	2.82		
0.40	1.75	1.11	1.70	1.02	1.74	0.93	1.74	0.91	2.91	1.85	2.84	1.70	2.90	1.56	2.90	1.52	3.80	2.35	4.20	2.47	4.45	2.33		
0.60	1.49	0.94	1.45	0.86	1.50	0.80	1.50	0.78	2.48	1.56	2.42	1.44	2.49	1.34	2.50	1.30	3.26	2.00	3.60	2.11	3.84	2.05		
0.80	1.27	0.79	1.25	0.73	1.29	0.69	1.30	0.67	2.12	1.32	2.08	1.22	2.15	1.15	2.16	1.12	2.80	1.71	3.09	1.80	3.31	1.76		
1.00	1.09	0.68	1.07	0.63	1.11	0.59	1.12	0.58	1.82	1.13	1.78	1.04	1.85	0.99	1.86	0.97	2.41	1.46	2.65	1.54	2.85	1.52		
1.20	0.94	0.58	0.92	0.53	0.96	0.51	0.97	0.50	1.57	0.96	1.53	0.89	1.60	0.85	1.61	0.83	2.09	1.26	2.29	1.32	2.46	1.31		
1.40	0.81	0.50	0.79	0.46	0.83	0.44	0.83	0.43	1.35	0.83	1.32	0.76	1.38	0.73	1.39	0.72	1.80	1.09	1.97	1.13	2.12	1.13		
1.60	0.70	0.43	0.68	0.39	0.71	0.38	0.72	0.37	1.17	0.71	1.14	0.66	1.19	0.63	1.20	0.62	1.56	0.94	1.70	0.97	1.83	0.97		
1.80	0.61	0.37	0.59	0.34	0.62	0.33	0.62	0.32	1.01	0.61	0.98	0.56	1.03	0.55	1.04	0.54	1.36	0.81	1.47	0.84	1.58	0.84		
2.00	0.53	0.32	0.51	0.29	0.53	0.28	0.54	0.28	0.88	0.53	0.85	0.49	0.89	0.47	0.90	0.46	1.18	0.71	1.27	0.72	1.37	0.72		
2.20	0.46	0.28	0.44	0.25	0.46	0.24	0.46	0.24	0.76	0.46	0.73	0.42	0.77	0.41	0.77	0.40	1.03	0.62	1.10	0.62	1.18	0.63		
2.40	0.40	0.24	0.38	0.22	0.40	0.21	0.40	0.21	0.67	0.40	0.63	0.36	0.66	0.35	0.67	0.35	0.90	0.54	0.95	0.54	1.02	0.54		
2.60	0.35	0.21	0.33	0.19	0.34	0.18	0.35	0.18	0.58	0.35	0.55	0.31	0.57	0.30	0.58	0.30	0.79	0.47	0.82	0.47	0.89	0.47		
2.80	0.30	0.18	0.29	0.16	0.30	0.16	0.30	0.16	0.51	0.31	0.48	0.27	0.50	0.26	0.50	0.26	0.69	0.41	0.72	0.41	0.77	0.41		
3.00	0.27	0.16	0.25	0.14	0.26	0.14	0.26	0.13	0.44	0.27	0.41	0.24	0.43	0.23	0.43	0.22	0.60	0.36	0.62	0.35	0.66	0.35		
3.20	0.23	0.14	0.22	0.12	0.22	0.12	0.22	0.12	0.39	0.24	0.36	0.21	0.37	0.20	0.37	0.19	0.53	0.32	0.54	0.31	0.58	0.31		
3.40	0.21	0.12	0.19	0.11	0.19	0.10	0.19	0.10	0.34	0.21	0.31	0.18	0.32	0.17	0.32	0.17	0.46	0.28	0.47	0.27	0.50	0.26		
3.60	0.18	0.11	0.16	0.09	0.17	0.09	0.17	0.09	0.30	0.18	0.27	0.16	0.28	0.15	0.28	0.15	0.41	0.25	0.41	0.23	0.43	0.23		
3.80	0.16	0.10	0.14	0.08	0.15	0.08	0.15	0.08	0.26	0.16	0.24	0.14	0.24	0.13	0.24	0.13	0.36	0.22	0.36	0.21	0.38	0.20		
4.00	0.14	0.09	0.12	0.07	0.13	0.07	0.13	0.07	0.23	0.14	0.21	0.12	0.21	0.11	0.21	0.11	0.32	0.19	0.31	0.18	0.33	0.17		

Table 4. The result of numerical simulation for each cross section($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10					
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13	
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA
0.00	2.33	1.62	2.38	1.55	2.61	1.53	2.71	1.53	2.79	2.08	2.93	2.01	3.01	1.93	3.04	1.89	2.79	2.02	2.93	2.02	3.00	1.91
0.20	2.29	1.22	2.34	1.17	2.58	1.16	2.68	1.17	2.76	1.53	2.90	1.51	2.98	1.41	3.01	1.39	2.76	1.49	2.90	1.49	2.97	1.40
0.40	2.23	1.09	2.29	1.04	2.53	1.03	2.63	1.04	2.69	1.34	2.84	1.32	2.93	1.23	2.97	1.21	2.70	1.30	2.84	1.30	2.93	1.23
0.60	2.15	1.00	2.22	0.96	2.47	0.95	2.57	0.96	2.61	1.23	2.76	1.21	2.87	1.12	2.91	1.11	2.62	1.19	2.76	1.19	2.86	1.12
0.80	2.07	0.94	2.14	0.90	2.40	0.89	2.50	0.90	2.50	1.15	2.67	1.13	2.79	1.05	2.83	1.04	2.53	1.11	2.67	1.10	2.79	1.04
1.00	1.98	0.89	2.06	0.85	2.32	0.84	2.43	0.85	2.40	1.08	2.57	1.06	2.71	0.99	2.75	0.98	2.43	1.04	2.58	1.04	2.71	0.99
1.20	1.89	0.84	1.98	0.80	2.24	0.80	2.35	0.81	2.29	1.02	2.47	1.00	2.62	0.94	2.67	0.93	2.33	0.98	2.49	0.98	2.62	0.94
1.40	1.81	0.79	1.90	0.76	2.17	0.77	2.27	0.78	2.19	0.96	2.37	0.95	2.53	0.9	2.58	0.89	2.24	0.93	2.39	0.93	2.53	0.89
1.60	1.73	0.75	1.83	0.72	2.09	0.73	2.20	0.75	2.10	0.91	2.28	0.90	2.44	0.86	2.50	0.85	2.15	0.89	2.30	0.89	2.45	0.86
1.80	1.65	0.71	1.75	0.69	2.02	0.70	2.13	0.72	2.01	0.86	2.19	0.86	2.36	0.82	2.41	0.82	2.06	0.84	2.21	0.85	2.36	0.82
2.00	1.58	0.67	1.68	0.66	1.95	0.68	2.06	0.69	1.92	0.81	2.10	0.82	2.28	0.8	2.33	0.79	1.98	0.80	2.13	0.81	2.28	0.79
2.20	1.52	0.63	1.62	0.62	1.89	0.65	1.99	0.67	1.84	0.77	2.02	0.78	2.20	0.76	2.26	0.76	1.90	0.76	2.05	0.77	2.21	0.76
2.40	1.45	0.60	1.56	0.59	1.82	0.63	1.92	0.65	1.76	0.73	1.94	0.74	2.13	0.73	2.18	0.73	1.82	0.72	1.97	0.74	2.13	0.73
2.60	1.39	0.57	1.50	0.57	1.76	0.60	1.86	0.62	1.69	0.69	1.87	0.71	2.05	0.71	2.11	0.71	1.75	0.69	1.90	0.70	2.06	0.70
2.80	1.34	0.54	1.44	0.54	1.70	0.58	1.80	0.60	1.62	0.66	1.79	0.68	1.98	0.68	2.04	0.68	1.69	0.66	1.82	0.67	1.99	0.68
3.00	1.28	0.51	1.38	0.52	1.64	0.56	1.74	0.58	1.56	0.62	1.73	0.65	1.92	0.65	1.98	0.66	1.62	0.63	1.76	0.64	1.92	0.65
3.20	1.23	0.49	1.33	0.50	1.59	0.54	1.69	0.56	1.50	0.59	1.66	0.62	1.85	0.63	1.91	0.64	1.56	0.60	1.70	0.62	1.86	0.63
3.40	1.19	0.47	1.28	0.47	1.53	0.52	1.63	0.54	1.44	0.57	1.60	0.59	1.79	0.61	1.85	0.62	1.50	0.57	1.63	0.59	1.80	0.61
3.60	1.14	0.44	1.24	0.45	1.48	0.50	1.58	0.52	1.38	0.54	1.54	0.57	1.73	0.59	1.79	0.59	1.45	0.55	1.57	0.57	1.73	0.59
3.80	1.10	0.42	1.19	0.43	1.43	0.49	1.53	0.51	1.33	0.52	1.49	0.54	1.67	0.57	1.73	0.58	1.39	0.53	1.52	0.55	1.68	0.57
4.00	1.05	0.40	1.15	0.42	1.39	0.47	1.48	0.49	1.28	0.49	1.43	0.52	1.62	0.55	1.68	0.56	1.34	0.50	1.46	0.52	1.62	0.55

Table 5. The result of numerical simulation for each cross section($B=1.0 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10							
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13			
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA		
0.00	2.39	1.83	2.35	1.71	2.47	1.61	2.54	1.57	3.99	3.05	3.92	2.85	4.12	2.68	4.23	2.62	4.93	3.81	5.46	4.07	5.75	3.89		
0.20	2.36	1.39	2.33	1.29	2.45	1.19	2.51	1.17	3.94	2.32	3.88	2.15	4.08	1.98	4.19	1.94	4.87	2.88	5.40	3.03	5.70	2.83		
0.40	2.29	1.24	2.26	1.14	2.40	1.05	2.47	1.03	3.81	2.07	3.77	1.91	4.01	1.75	4.12	1.72	4.74	2.54	5.27	2.67	5.61	2.48		
0.60	2.18	1.15	2.18	1.06	2.34	0.96	2.41	0.95	3.63	1.92	3.63	1.76	3.90	1.61	4.02	1.58	4.55	2.34	5.08	2.46	5.47	2.27		
0.80	2.06	1.08	2.08	0.99	2.27	0.90	2.34	0.89	3.44	1.80	3.47	1.66	3.78	1.50	3.90	1.48	4.34	2.20	4.87	2.30	5.30	2.12		
1.00	1.95	1.02	1.98	0.94	2.19	0.85	2.27	0.84	3.25	1.70	3.30	1.56	3.65	1.42	3.78	1.40	4.13	2.07	4.66	2.17	5.12	2.00		
1.20	1.85	0.96	1.89	0.88	2.11	0.81	2.19	0.80	3.08	1.60	3.15	1.47	3.51	1.35	3.65	1.33	3.92	1.95	4.44	2.05	4.93	1.90		
1.40	1.75	0.90	1.80	0.83	2.03	0.77	2.11	0.76	2.92	1.50	3.00	1.39	3.38	1.29	3.52	1.27	3.73	1.84	4.24	1.94	4.75	1.81		
1.60	1.66	0.84	1.71	0.79	1.95	0.74	2.04	0.73	2.77	1.41	2.86	1.31	3.25	1.23	3.40	1.22	3.55	1.73	4.05	1.83	4.58	1.73		
1.80	1.58	0.79	1.64	0.74	1.88	0.71	1.97	0.70	2.63	1.32	2.73	1.24	3.13	1.18	3.28	1.17	3.38	1.63	3.87	1.73	4.40	1.63		
2.00	1.50	0.74	1.56	0.70	1.81	0.67	1.90	0.67	2.50	1.24	2.60	1.17	3.02	1.12	3.16	1.12	3.23	1.54	3.70	1.63	4.24	1.58		
2.20	1.43	0.70	1.49	0.66	1.74	0.65	1.83	0.65	2.38	1.16	2.49	1.10	2.90	1.08	3.05	1.08	3.08	1.45	3.54	1.54	4.08	1.51		
2.40	1.36	0.66	1.43	0.63	1.68	0.62	1.77	0.62	2.27	1.09	2.38	1.04	2.80	1.03	2.95	1.04	2.95	1.37	3.39	1.46	3.93	1.45		
2.60	1.30	0.62	1.37	0.59	1.62	0.59	1.71	0.60	2.17	1.03	2.28	0.98	2.69	0.99	2.84	1.00	2.82	1.29	3.24	1.38	3.79	1.39		
2.80	1.24	0.58	1.31	0.56	1.56	0.57	1.65	0.58	2.07	0.97	2.18	0.93	2.60	0.95	2.75	0.96	2.70	1.22	3.11	1.31	3.65	1.33		
3.00	1.19	0.55	1.26	0.53	1.50	0.55	1.59	0.55	1.98	0.91	2.09	0.88	2.50	0.91	2.65	0.92	2.58	1.16	2.98	1.24	3.52	1.28		
3.20	1.14	0.52	1.21	0.50	1.45	0.52	1.54	0.53	1.90	0.86	2.01	0.84	2.41	0.87	2.56	0.89	2.48	1.10	2.86	1.18	3.39	1.23		
3.40	1.09	0.49	1.16	0.47	1.40	0.50	1.48	0.52	1.82	0.82	1.93	0.80	2.33	0.84	2.47	0.86	2.38	1.04	2.75	1.12	3.27	1.18		
3.60	1.05	0.47	1.11	0.45	1.35	0.48	1.43	0.50	1.75	0.78	1.85	0.76	2.24	0.81	2.39	0.83	2.28	0.99	2.64	1.07	3.16	1.13		
3.80	1.01	0.44	1.07	0.43	1.30	0.47	1.39	0.48	1.68	0.74	1.78	0.72	2.17	0.78	2.31	0.80	2.19	0.95	2.54	1.02	3.05	1.09		
4.00	0.97	0.42	1.03	0.41	1.25	0.45	1.34	0.46	1.61	0.70	1.71	0.69	2.09	0.75	2.23	0.77	2.11	0.90	2.44	0.97	2.94	1.05		

Table 6. The result of numerical simulation for each cross section($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=5 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10							
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13			
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA		
0.00	2.44	1.67	2.53	1.62	2.86	1.60	3.03	1.61	2.79	2.04	2.93	2.03	3.01	1.88	3.04	1.83	2.79	2.00	2.93	2.00	3.01	1.87		
0.20	2.42	1.28	2.51	1.24	2.84	1.23	3.00	1.24	2.77	1.55	2.91	1.54	2.99	1.41	3.02	1.39	2.77	1.52	2.91	1.52	2.99	1.41		
0.40	2.39	1.15	2.48	1.11	2.82	1.10	2.98	1.12	2.75	1.39	2.89	1.37	2.97	1.26	3.01	1.24	2.74	1.36	2.88	1.36	2.97	1.26		
0.60	2.36	1.07	2.46	1.04	2.79	1.02	2.95	1.04	2.72	1.26	2.86	1.24	2.95	1.13	2.99	1.11	2.71	1.23	2.86	1.22	2.95	1.13		
0.80	2.32	1.02	2.42	0.98	2.77	0.96	2.93	0.98	2.68	1.20	2.83	1.17	2.93	1.06	2.97	1.04	2.68	1.16	2.82	1.16	2.93	1.06		
1.00	2.28	0.98	2.39	0.94	2.74	0.92	2.90	0.94	2.63	1.14	2.79	1.12	2.90	1.01	2.94	0.99	2.64	1.11	2.79	1.10	2.90	1.01		
1.20	2.23	0.94	2.35	0.90	2.70	0.88	2.87	0.90	2.58	1.11	2.75	1.09	2.87	0.98	2.92	0.96	2.59	1.08	2.75	1.07	2.87	0.98		
1.40	2.18	0.91	2.30	0.87	2.67	0.85	2.83	0.87	2.52	1.07	2.70	1.05	2.84	0.95	2.89	0.93	2.55	1.04	2.70	1.03	2.84	0.95		
1.60	2.13	0.88	2.26	0.84	2.63	0.83	2.80	0.84	2.47	1.02	2.65	1.00	2.80	0.90	2.85	0.88	2.49	0.99	2.66	0.98	2.80	0.90		
1.80	2.08	0.85	2.21	0.82	2.59	0.80	2.76	0.82	2.41	1.00	2.60	0.97	2.76	0.88	2.82	0.86	2.44	0.96	2.61	0.95	2.76	0.88		
2.00	2.03	0.82	2.17	0.79	2.55	0.78	2.72	0.80	2.35	0.96	2.54	0.93	2.72	0.85	2.78	0.83	2.39	0.92	2.56	0.92	2.72	0.84		
2.20	1.98	0.80	2.12	0.77	2.51	0.76	2.68	0.78	2.30	0.94	2.49	0.92	2.68	0.84	2.74	0.83	2.34	0.91	2.51	0.90	2.68	0.84		
2.40	1.93	0.77	2.08	0.74	2.47	0.74	2.64	0.76	2.24	0.90	2.44	0.88	2.64	0.81	2.70	0.80	2.29	0.87	2.46	0.87	2.64	0.81		
2.60	1.88	0.74	2.03	0.72	2.43	0.72	2.60	0.74	2.19	0.87	2.39	0.85	2.60	0.78	2.66	0.77	2.24	0.84	2.41	0.84	2.60	0.78		
2.80	1.84	0.72	1.99	0.70	2.39	0.71	2.56	0.72	2.13	0.82	2.34	0.81	2.56	0.75	2.62	0.74	2.19	0.80	2.36	0.80	2.56	0.75		
3.00	1.79	0.69	1.95	0.68	2.35	0.69	2.52	0.71	2.08	0.79	2.29	0.78	2.51	0.73	2.58	0.72	2.14	0.77	2.31	0.77	2.52	0.73		
3.20	1.75	0.67	1.91	0.66	2.31	0.67	2.48	0.70	2.03	0.75	2.24	0.74	2.47	0.70	2.54	0.69	2.09	0.73	2.27	0.73	2.48	0.69		
3.40	1.71	0.65	1.87	0.64	2.27	0.66	2.45	0.68	1.99	0.74	2.20	0.74	2.43	0.70	2.51	0.69	2.05	0.73	2.22	0.73	2.44	0.70		
3.60	1.67	0.63	1.83	0.62	2.24	0.65	2.41	0.67	1.94	0.72	2.15	0.72	2.39	0.69	2.47	0.68	2.00	0.71	2.18	0.71	2.39	0.69		
3.80	1.63	0.61	1.79	0.60	2.20	0.63	2.37	0.66	1.90	0.71	2.11	0.71	2.35	0.68	2.43	0.68	1.96	0.70	2.13	0.70	2.35	0.68		
4.00	1.60	0.59	1.76	0.58	2.16	0.62	2.33	0.64	1.86	0.68	2.06	0.68	2.31	0.66	2.39	0.66	1.92	0.67	2.09	0.68	2.32	0.66		

Table 7. The result of numerical simulation for each cross section($B=1.5 \text{ km}$, $h_c=10 \text{ m}$)

H (m)	3								5								10							
T (sec)	8		10		13		15		8		10		13		15		8		10		13			
x (km)	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA	HC	HA		
0.00	2.45	1.82	2.44	1.72	2.63	1.63	2.74	1.60	4.08	3.03	4.06	2.86	4.39	2.71	4.57	2.66	4.93	3.75	5.47	4.00	5.75	3.79		
0.20	2.43	1.43	2.42	1.34	2.61	1.24	2.72	1.23	4.05	2.38	4.03	2.23	4.36	2.07	4.54	2.04	4.89	2.92	5.42	3.08	5.72	2.85		
0.40	2.41	1.29	2.40	1.21	2.59	1.12	2.70	1.11	4.02	2.15	3.99	2.01	4.32	1.87	4.51	1.85	4.85	2.62	5.38	2.77	5.68	2.55		
0.60	2.37	1.19	2.37	1.11	2.57	1.01	2.68	1.00	3.96	1.98	3.94	1.84	4.29	1.69	4.47	1.67	4.79	2.40	5.31	2.52	5.64	2.29		
0.80	2.32	1.14	2.33	1.06	2.55	0.96	2.66	0.95	3.87	1.90	3.88	1.77	4.24	1.61	4.43	1.58	4.70	2.29	5.23	2.40	5.60	2.16		
1.00	2.26	1.10	2.28	1.02	2.52	0.92	2.63	0.91	3.76	1.84	3.79	1.70	4.19	1.54	4.38	1.51	4.59	2.20	5.14	2.30	5.54	2.06		
1.20	2.19	1.07	2.22	0.99	2.48	0.90	2.60	0.88	3.64	1.79	3.70	1.65	4.14	1.49	4.33	1.47	4.47	2.14	5.03	2.23	5.47	2.00		
1.40	2.12	1.04	2.17	0.96	2.44	0.87	2.57	0.85	3.53	1.73	3.61	1.60	4.07	1.45	4.28	1.42	4.35	2.07	4.91	2.16	5.39	1.93		
1.60	2.05	1.00	2.11	0.92	2.40	0.83	2.53	0.81	3.41	1.66	3.51	1.54	4.00	1.38	4.21	1.36	4.22	1.98	4.79	2.07	5.30	1.84		
1.80	1.98	0.97	2.05	0.90	2.36	0.81	2.49	0.79	3.30	1.61	3.42	1.49	3.94	1.35	4.15	1.32	4.10	1.92	4.67	2.01	5.21	1.80		
2.00	1.92	0.93	2.00	0.86	2.32	0.78	2.45	0.77	3.20	1.55	3.33	1.44	3.86	1.30	4.08	1.28	3.98	1.85	4.54	1.94	5.12	1.73		
2.20	1.86	0.90	1.94	0.84	2.28	0.77	2.41	0.76	3.10	1.51	3.24	1.41	3.79	1.29	4.02	1.27	3.87	1.81	4.43	1.90	5.03	1.71		
2.40	1.80	0.87	1.89	0.81	2.23	0.74	2.37	0.73	3.00	1.44	3.15	1.35	3.72	1.24	3.95	1.22	3.76	1.73	4.31	1.82	4.94	1.65		
2.60	1.75	0.83	1.84	0.78	2.19	0.72	2.33	0.71	2.91	1.38	3.07	1.30	3.65	1.20	3.89	1.18	3.65	1.66	4.20	1.75	4.85	1.59		
2.80	1.70	0.78	1.80	0.74	2.15	0.69	2.29	0.68	2.83	1.31	2.99	1.23	3.58	1.15	3.82	1.13	3.55	1.57	4.10	1.66	4.75	1.52		
3.00	1.65	0.75	1.75	0.71	2.11	0.67	2.25	0.66	2.75	1.25	2.91	1.18	3.51	1.11	3.75	1.10	3.45	1.51	3.99	1.59	4.66	1.47		
3.20	1.60	0.71	1.70	0.67	2.07	0.64	2.21	0.63	2.67	1.18	2.84	1.11	3.44	1.06	3.69	1.06	3.36	1.42	3.89	1.51	4.57	1.41		
3.40	1.56	0.69	1.66	0.66	2.03	0.64	2.17	0.64	2.60	1.16	2.77	1.10	3.38	1.06	3.62	1.06	3.28	1.41	3.80	1.49	4.49	1.41		
3.60	1.52	0.67	1.62	0.64	1.99	0.63	2.14	0.63	2.53	1.12	2.70	1.07	3.31	1.04	3.56	1.04	3.19	1.36	3.71	1.45	4.40	1.38		
3.80	1.48	0.65	1.58	0.63	1.95	0.62	2.10	0.62	2.46	1.09	2.64	1.05	3.25	1.03	3.50	1.03	3.11	1.33	3.62	1.42	4.32	1.37		
4.00	1.44	0.62	1.55	0.60	1.91	0.60	2.06	0.60	2.40	1.04	2.58	1.00	3.19	0.99	3.44	1.00	3.04	1.27	3.54	1.36	4.24	1.32		

(1) 하천 중앙($C-C'$)단면에서의 파고 분포

$C-C'$ 단면에서의 파고분포를 Fig. 4~Fig. 9에 하구에서 하천을 따라 내습하는 거리(x)와 하구에서의 파장(L)의 비와, 심해입사유의파고(H_i)와 지점에서의 파고(H)의 비의 무차원화 하여 떨어진 거리에 따라 파고사이의 관계를 도시화하여 나타내었다. 하구폭(B)의 변화(0.5 km, 1.0 km, 1.5 km)와 하천수심(h_c)의 변화(5 m, 10 m)로 구분 하였으며 각 최대파랑주기(8 sec, 10 sec, 13 sec, 15 sec)에 따라 파고비의 변화를 해석하였다. 각 케이스의 결과를 살펴보면 주기가 증가할수록 하구에서의 파고비의 증가를 확인할 수 있으며 이는 장주기파랑이 내습할 때 더 큰 파랑에너지가 전달되는 것으로 확인되어 진다.

하구 수심이 5 m일 때의 파고 분포를 살펴보면 파고가 증가함에 따라 파고비가 감소하는 것을 확인할 수가 있다. 이는 동일 수심에서 천수변형이 큰 파고에서 크게 나타나 에너지의 소산이 많이 발생한 것으로 생각할 수 있다.

하구 수심 5 m 일 때 하구폭의 영향에 관계없이 하구까지의 파고비는 심해 입사파고 3 m 일 때 약 0.8, 5 m 일 때 약 0.6, 10 m 일 때 약 0.3의 값을 가지는 것으로 나타났으며 이는 하구에서의 파고는 하구 폭의 영향이 미치지 않는 것을 의미한다.

하구 수심 10 m 일 때 결과를 살펴보면 파고 3 m와 5 m 일 때의 파고비가 동일 하게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 이것은 하구까지의 천수변형에 의한 에너지의 소산율이 동일하며 하천내에서는 지형적인 영향에 의한 에너지가 전달되는 것을 확인 할 수 있다.

이상을 살펴 볼 때 하천내에서의 파고의 변화에 가장 지배적인 인자는 하구폭인 것을 확인 할 수 있다.

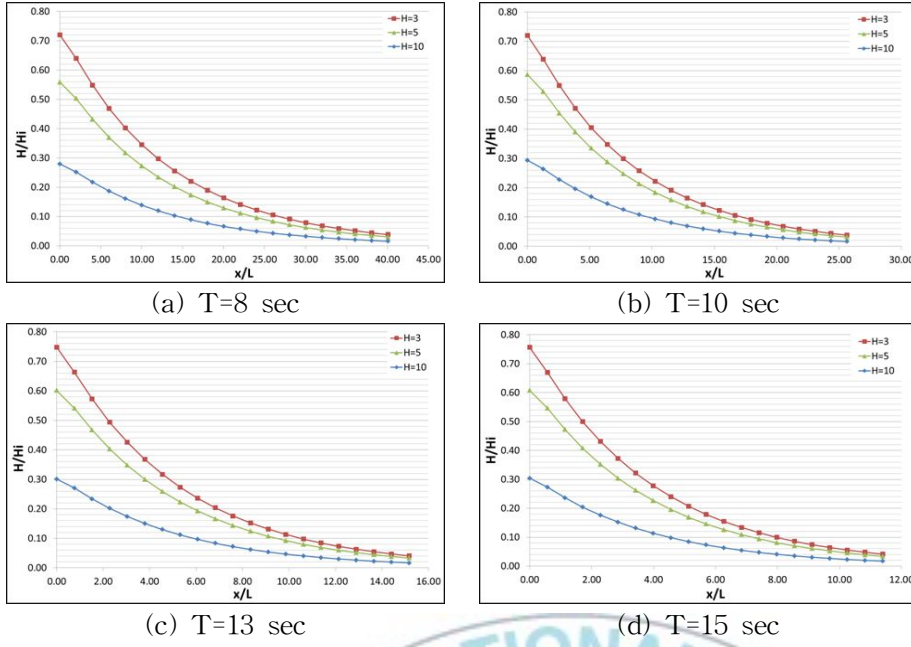


Fig. 4. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period ($B=0.5$ km, $h_c=5$ m).

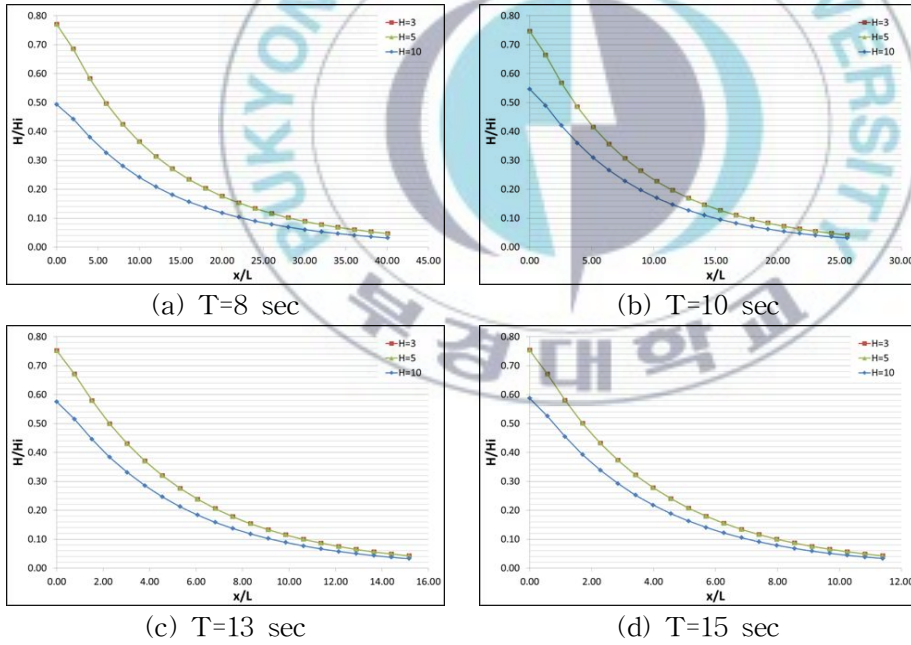


Fig. 5. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period ($B=0.5$ km, $h_c=10$ m).

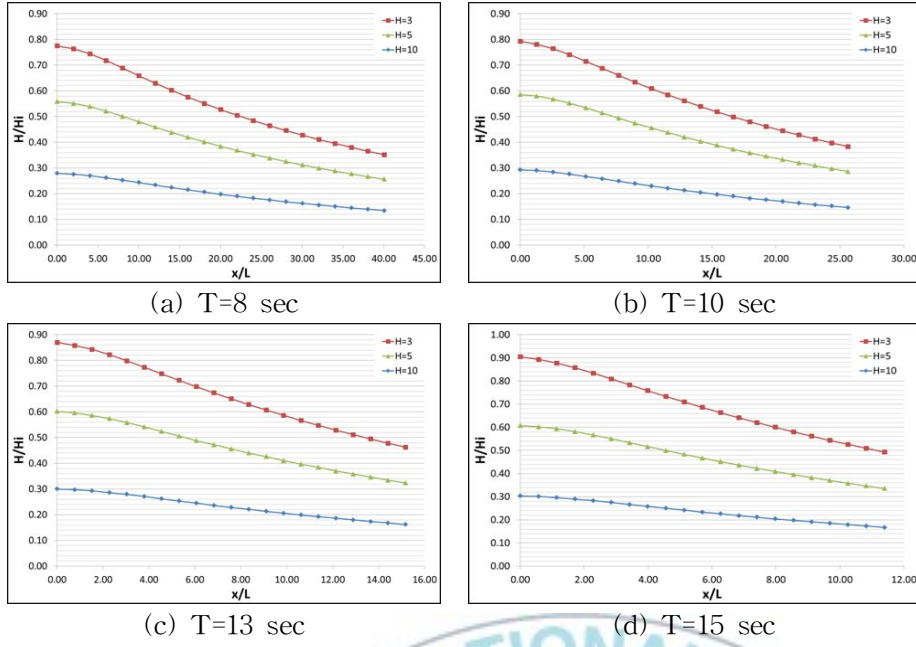


Fig. 6. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0$ km, $h_c=5$ m).

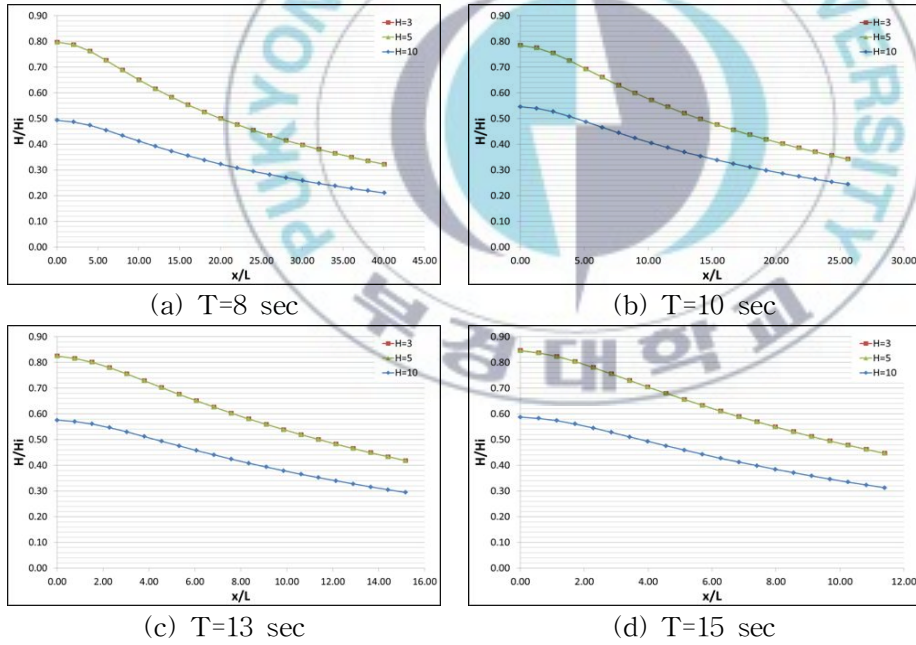


Fig. 7. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0$ km, $h_c=10$ m).

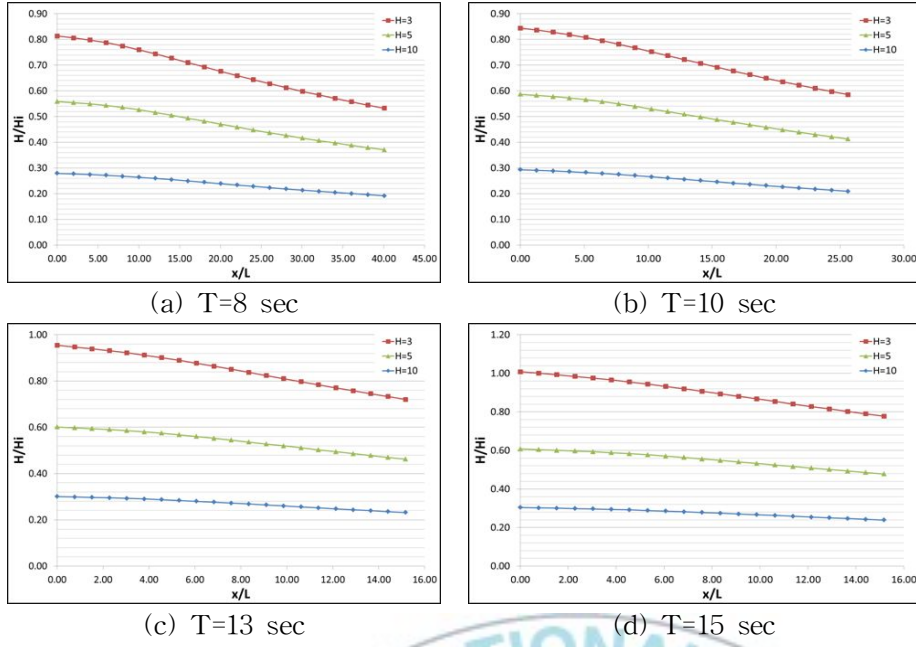


Fig. 8. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5$ km, $h_c=5$ m).

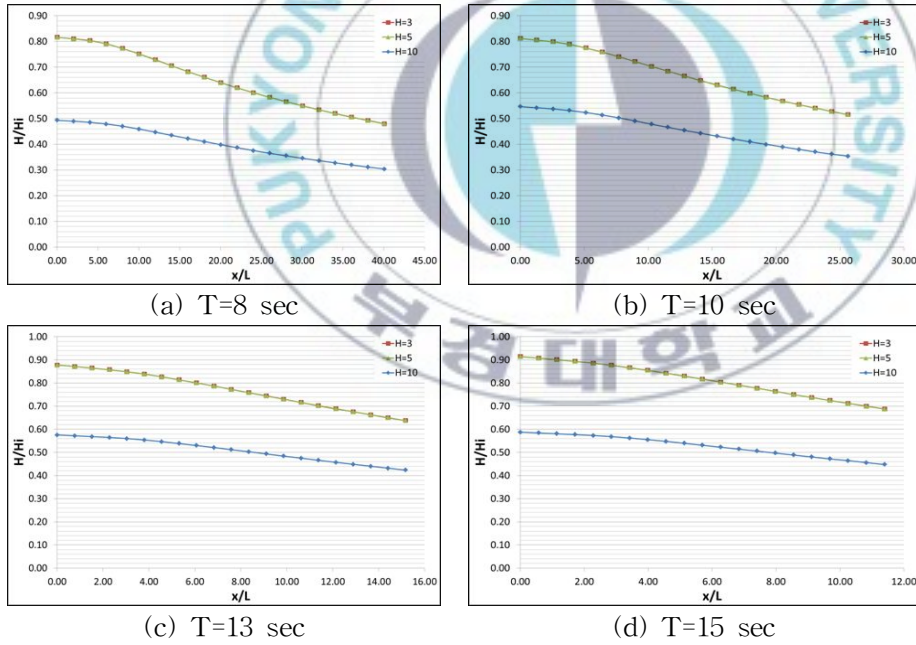


Fig. 9. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5$ km, $h_c=10$ m).

(2) 하천변($A-A'$)단면에서의 파고 분포

$A-A'$ 단면에서의 파고분포를 Fig. 10~Fig. 15에 하구에서 하천을 따라 내습하는 거리(x)와 하구에서의 파장(L)의 비와, 심해입사유의파랑(H_i)과 각 지점에서의 파고(H)의 비를 이용하여 무차원화 한 변수의 비교를 나타내었다. 각 하구폭(B)의 변화(0.5 km, 1.0 km, 1.5 km)와 하구내 수심(h_c)의 변화(5 m, 10 m)로 구분 하였으며 각 최대주기(8 sec, 10 sec, 13 sec, 15 sec)에 따라 파고변화를 도시화하였다.

결과를 살펴보면 C-C'단면과 대조적으로 주기가 작을수록 하구에서의 파고가 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그리고 파고가 작을수록 파고비의 감소율이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 하구에서의 에너지의 보존이 파고가 낮을수록 잘 된 것으로 확인된다.

그리고 하구 내 수심 10 m의 결과를 살펴보면 C-C'의 단면과 같이 파고 3 m와 5 m의 파고비의 변화가 동일하게 나타났다.

또한 C-C'단면보다 주기의 영향을 더욱 크게 받는 것을 확인할 수가 있다.



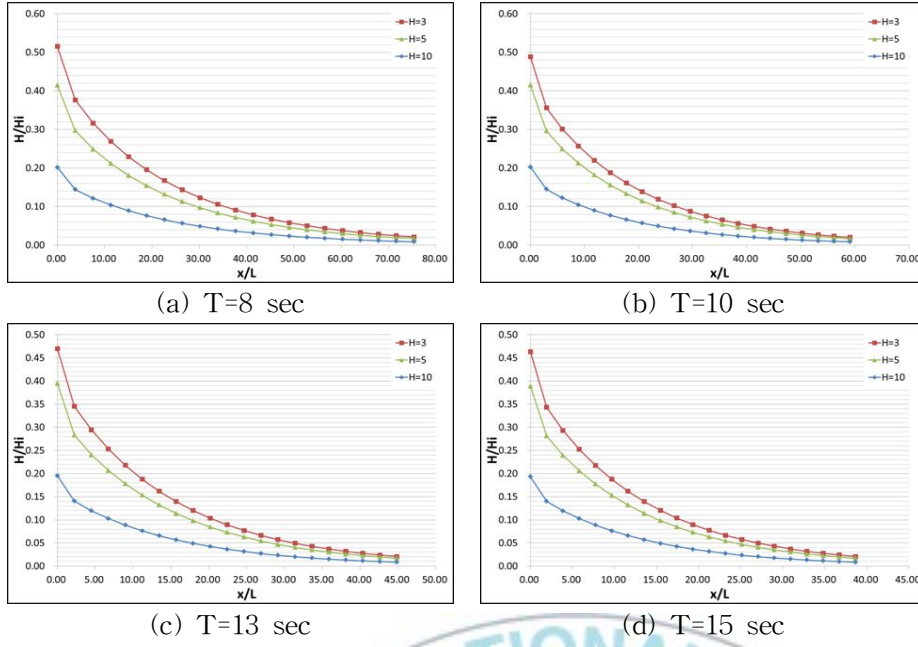


Fig. 10. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5$ km, $h_c=5$ m).

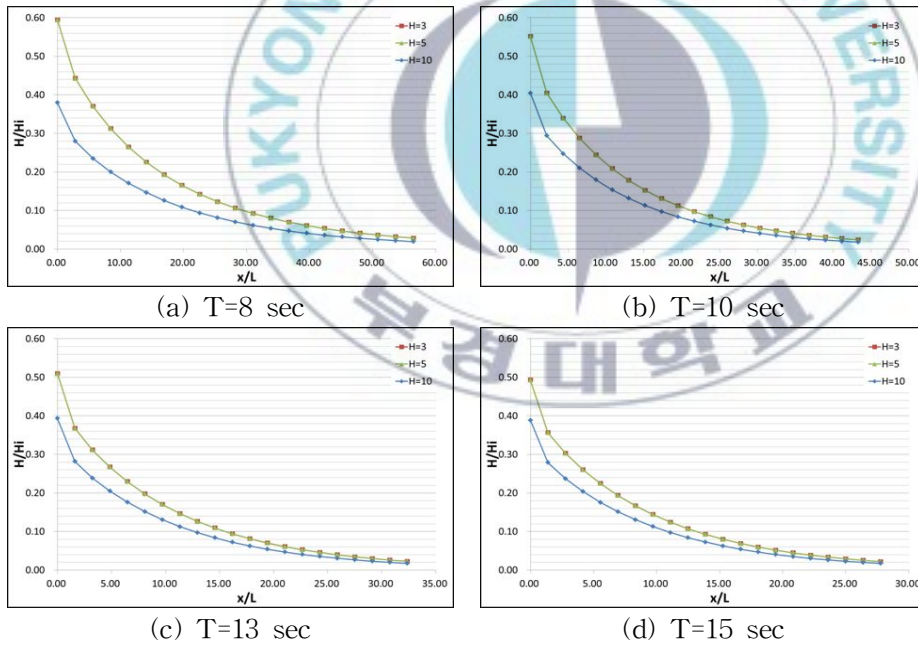


Fig. 11. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=0.5$ km, $h_c=10$ m).

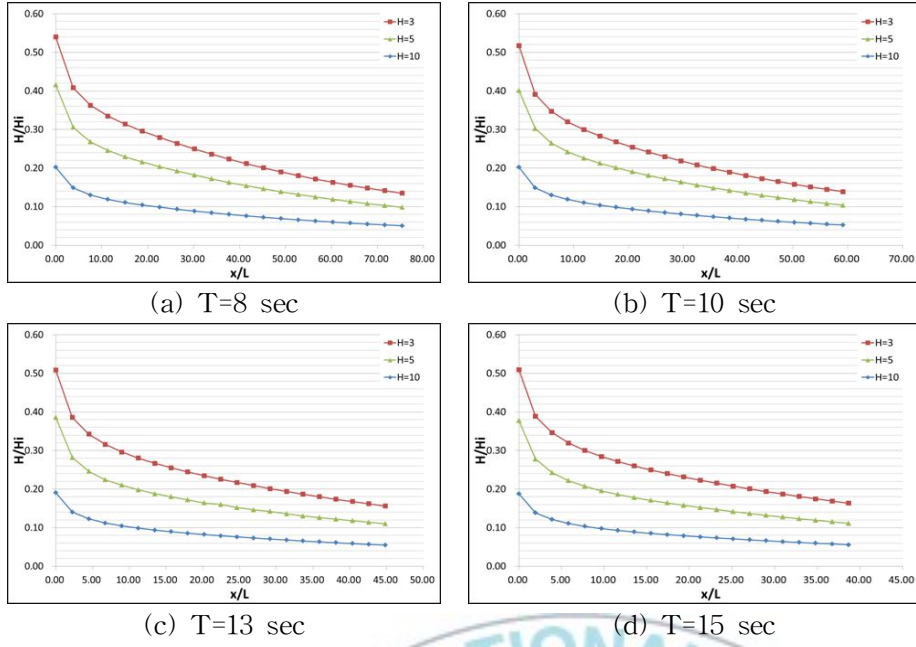


Fig. 12. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0$ km, $h_c=5$ m).

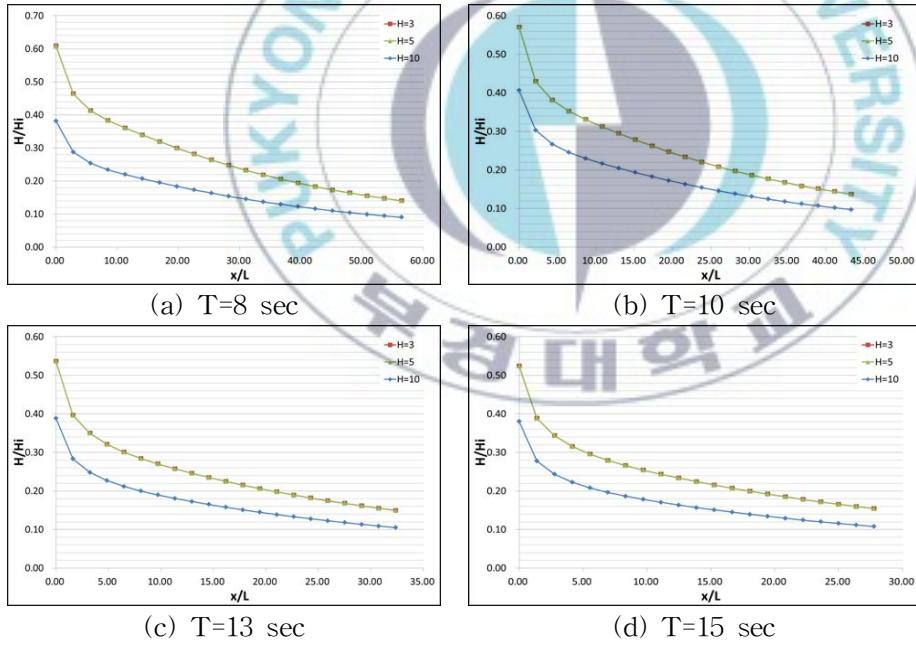


Fig. 13. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.0$ km, $h_c=10$ m).

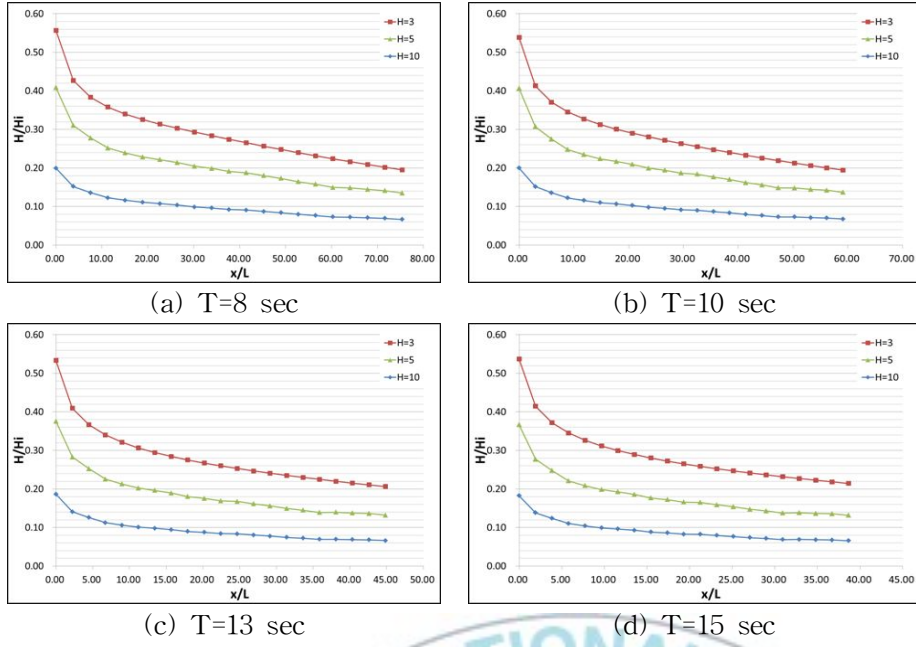


Fig. 14. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5$ km, $h_c=5$ m).

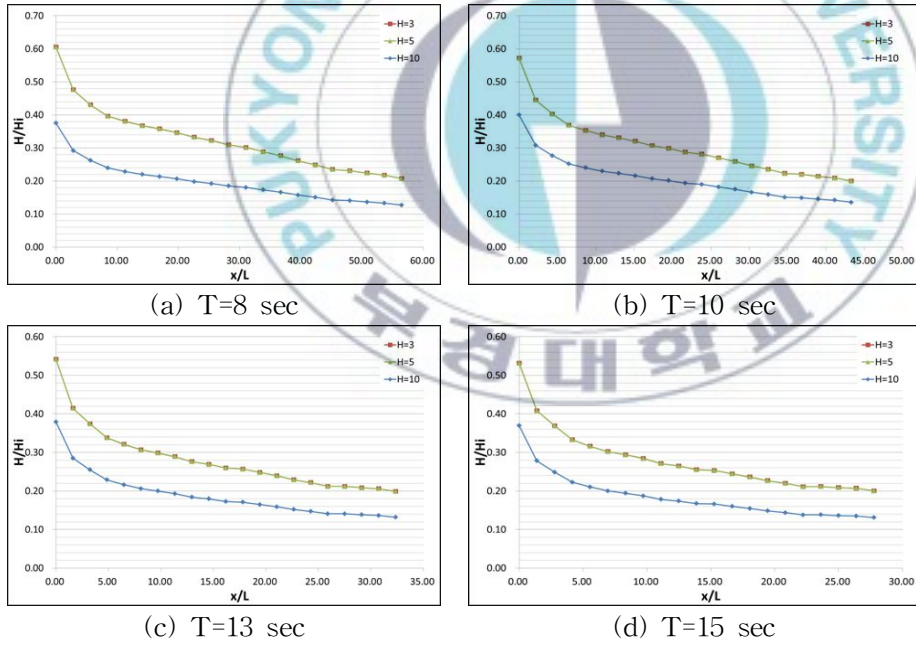


Fig. 15. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($B=1.5$ km, $h_c=10$ m).

(3) 하구폭(B) 변화에 따른 파고 분포

각 단면에서의 결과를 살펴 볼 때 하천내에서의 파랑변형(에너지전달)의 주요 변수는 하구 폭인 것을 확인할 수가 있으며 다음은 하구폭의 변화에 따른 $C-C'$ 단면에서의 파고분포를 Fig. 16에 하구에서 하천을 따라 내습하는 거리(x)와 하구에서의 파장(L)의 비와, 심해입사유의파랑(H_i)과 각 지점에서의 파고(H)의 비를 이용하여 비교하여 나타내었다. 하구 폭이 작아질수록 파고비 또한 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 폭이 작아질수록 에너지의 소산이 크게 발생하고 반대로 폭이 클수록 큰 에너지를 가지는 파랑이 하천으로 유입됨을 의미한다. 하구에서 파고비의 변동폭은 주기의 증가에 따라 크게 증가되었다. 하구폭이 2배, 3배 증가함에 따라 주기 8 sec에서는 8.33%, 12.50%, 10 sec에서는 9.72%, 16.67%, 13sec에서는 16.00%, 26.67%, 15sec에서는 18.42%, 32.89%의 증가를 보였다.

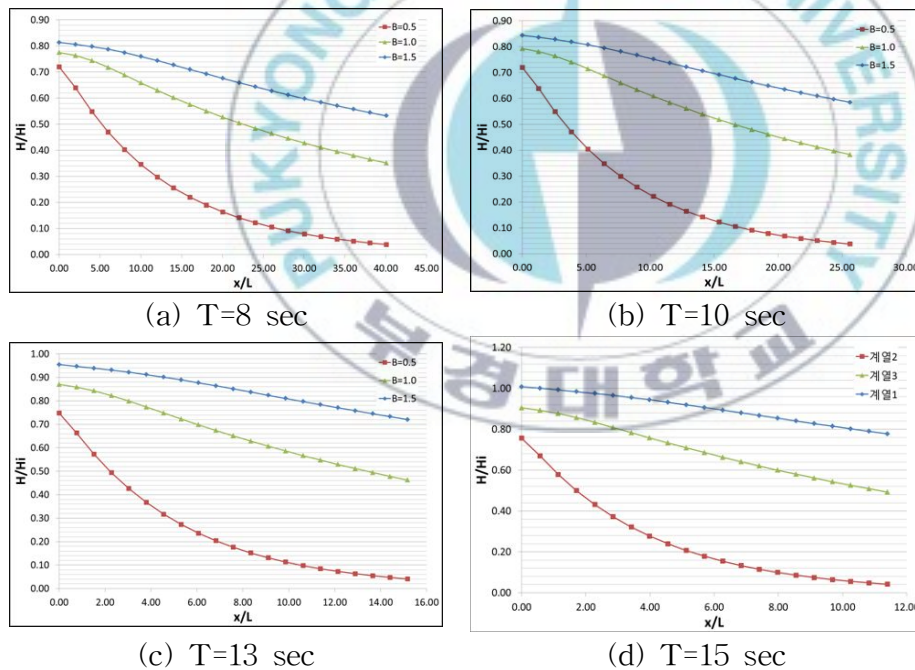


Fig. 16. Comparison of wave height rate result from width of the estuary for each wave period($H=3.0$ m, $h_c=5$ m).

Ⅲ. 수영만 하구의 파랑변형

3.1. 실험개요 및 조건

본 연구에서는 실제해역을 수영만을 대상으로 선정하였다. 2장에서는 단순화한 하구 모형을 대상으로 하구역에서의 심해파랑작용에 대한 현상을 살펴보았다. 즉, 일정한 해저경사(1:250)를 가지고 육지쪽으로 수심이 감소하게 설정하였으나 실제해역에서는 불규칙하고 다양한 해저지형이 존재한다. 따라서 실제적용해역에서의 수치모의에는 실 관측된 해저지형자료를 적용하여 수행하였다. 그리고 조석과 기상(바람)에 의한 조위의 상승, 태풍해일에 따른 수위의 상승, 설계파랑제원의 선정 등이 수치모형에는 고려되었다.

본 논문에서는 하구주변 해역의 지역적인 특징으로 생각되는 하천유량의 유입으로 인한 하구주변 해역수위의 상승을 고려하여 수치모델 실험을 수행하였다. 상기 2가지 수치모의 실험에서 고려된 조건을 비교정리하면 Table 8과 같다.

Table 8. Comparison of conditions between virtual and real

	수위변화	해저지형	파랑제원
단순화한 하구모형	고려하지 않음	고려하지 않음	케이스별 변화
수영만 하구	고려 됨	고려 됨	실해수역 50년 빈도 심해 설계파

3.1.1. 수영만의 담수유입조건

수영만은 지형적으로 수영강 하구의 상부에서 외해쪽으로 폭이 넓어지고, 수심이 깊어지는 연안 평야형 하구이며, 모양은 거의 삼각형이다. 따라서 이 해역은 외해와 접하는 단면이 매우 넓어 만내수가 외해수의 침입을 직접 받는 특성을 가지고 있다(Fig. 17). 수영만에 유입된

담수의 체류시간과 그 계절적 변동 특성(Lee, 1991)에서 1989년 5월부터 1990년 4월까지 월별 관측하여 Officer(1977)가 제안한 식을 사용, 담수량 및 체류시간을 계산하였다. 결과는 Table 9과 같다. 결과에 따르면 2월, 5월, 11월의 평균 담수량은 $4.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 크지 않지만 강우가 집중되는 8월의 유출량은 약 $1130 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 250배 크다.

본 연구에서는 해역에서의 최악의 외력 조건을 대상으로 호안에 대한 기능성 및 안정성에 대한 평가를 위해 하천수의 유입량이 가장 큰 8월의 유출량을 사용하였다.

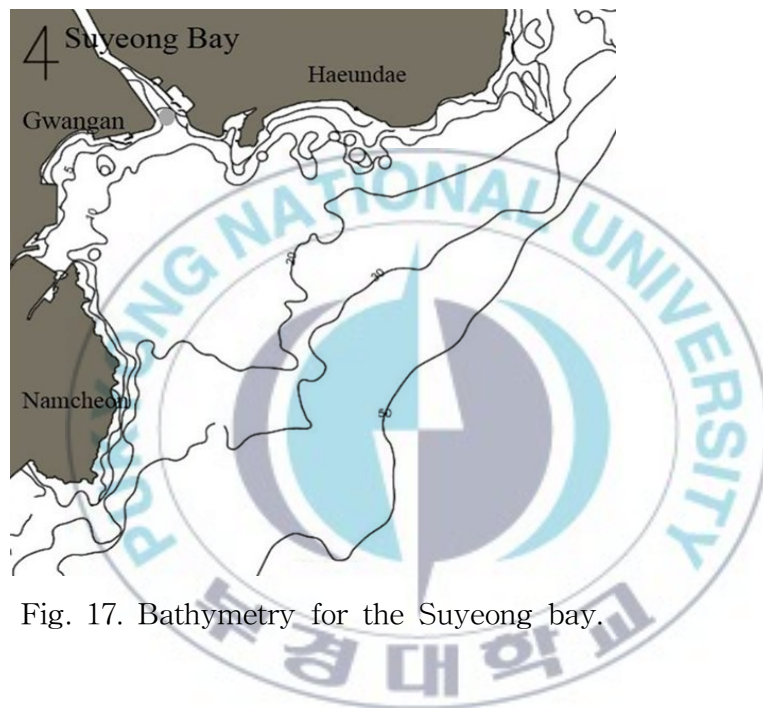


Fig. 17. Bathymetry for the Suyeong bay.

Table 9. Calculating flushing time and total fresh water in Suyeong bay

	Total Fresh Water (ton)	River Discharge (ton/sec)	Flushing Time (day)
May	3,660,033	4	10.6
August	130,826,880	1,130	1.34
November	4,792,366	4	13.87
February	3,168,266	4	9.23

3.1.2. Storm surge의 산정

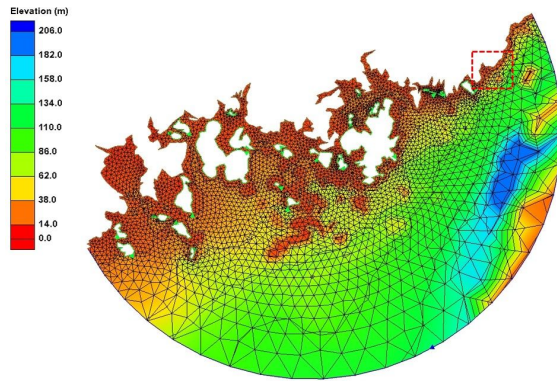
과랑변형계산에 앞서 입력조건에 해당하는 수위를 결정하기 위해 태풍내습시 Storm surge를 계산하였다.

(1) Storm surge 수치모형 구축

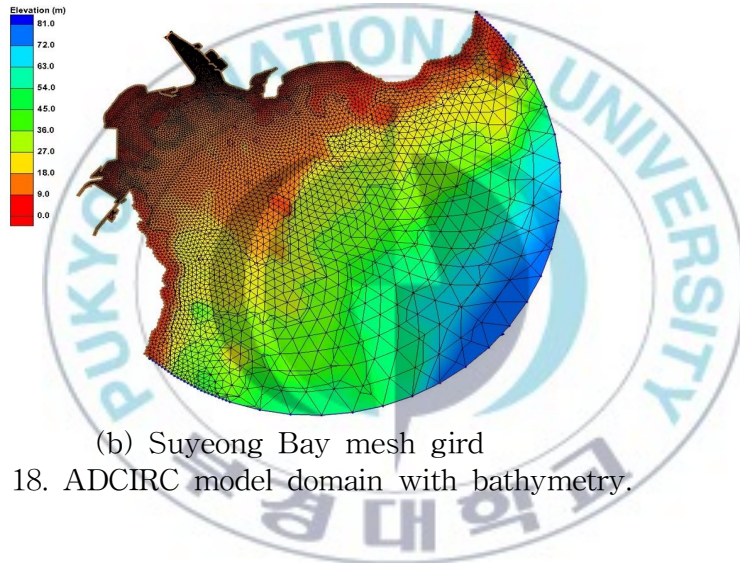
ADCIRC(Advance CIRCulation Model for Oceanic, Coastal and Estuaries Water)는 정밀한 경계처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할수 있도록 개발된 유한요소 모형이다(Luettich et al., 1992). ADCIRC는 연안, 대륙붕, 강어귀 등의 해수면변화를 예측할 수 있다. 또한, 미국 국립허리케인센터의 기본 모델로 선정되어 미 연안의 Florida, Southern Louisiana, New Orleans 등지에서 발생한 허리케인에 적용하여 Effect of Wave Forces on Storm Surge(Robert J. Weaver and DonaldN. Slinn, 2004), A New Generation Hurricane Storm Surge Model for Southern Louisiana Joannes(J. Westerink, 2005) 등의 연구에서 우수한 신뢰성을 나타낸바 있다.

계산영역은 한반도남해지역을 포함하는 광역과 수영만지역을 협역으로 구성, 광역계산결과를 협역에서의 계산 경계조건으로 이용하여 수행하였다(Fig. 18). 계산영역의 해안선 및 해저지형(수심)자료는 국립해양조사원(NORI)에서 발간하는 수치해도(2011)를 이용하였다. 수치실험에서는 수영강으로부터 유출되는 담수유량유입량은 $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 적용하였으며 조석은 4대 분조(M_2, S_2, O_1, K_1)값을 적용하였다. 또한 수치

실험에서 사용한 기상자료는 태풍 “Meami”의 기상자료로 기상청에서 관측된 데이터를 사용하였다. 실험조건은 Table 10에 정리하였다.



(a) Southern Korea mesh grid



(b) Suyeong Bay mesh grid

Fig. 18. ADCIRC model domain with bathymetry.

Table 10. Water level conditions in the numerical simulation

Input	Case1	Case 2	Case3	Case 4
River flow	○	○		○
Tide		○	○	○
Storm Surge			○	○

(2) Storm Surge 결과

4대 분조(M2,S2,O1,K1)값을 입력하여 15일간 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통한 수영만의 조위를 광안등표의 조위값과 비교해 보았다(Fig. 19). 대부분 실제 관측값과 일치하는 결과를 나타내었다. 또한 수영만의 비 조화상수 중 APPROX..H.H.W 값은 1.137 m, 시뮬레이션 한 APPROX.H.H.W 값은 1.115 m로 나타났다.

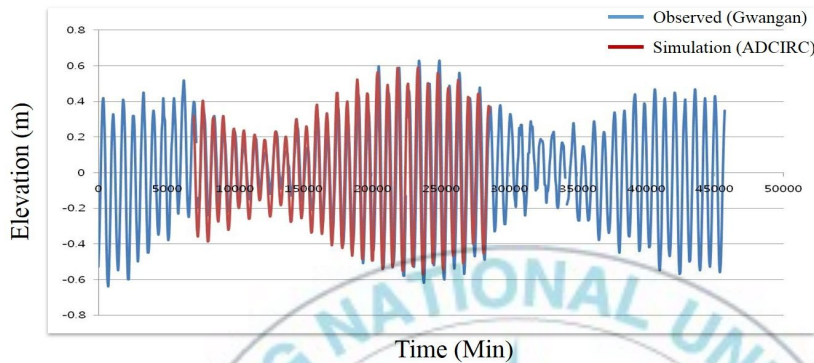


Fig. 19. Time series of tide at the Suyeong bay.

Fig. 20는 ADCIRC 모델을 사용하여 시뮬레이션한 후 각 케이스에 따른 수위변동을 도시화하여 나타내었다.

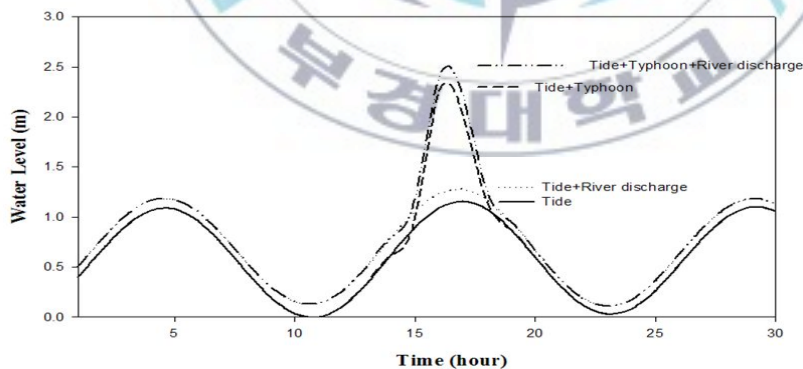


Fig. 20. Water level fluctuations by ADCIRC cases.

수영만 입구에서의 각 케이스별 수위 값은 Table 11에 정리하였다. 그 결과 수영만 입구에서 하천유량으로 인한 수위의 증가는 약 0.12 m로 나타났다. 해일피해영향분석 및 피해방지계획 수립용역보고서 (2005)에 따르면 태풍 “Maemi”에 의한 수영만의 폭풍해일고는 0.86 m로 계산되었다. 하지만 ADCIRC 모델로 계산한 결과는 1.085 m로 나타났다. 이는 좁은 만입구로 진행할 때 지형조건에 의해 수위가 상승한 것으로 판단된다.

Table 11. Computation of water level

Case	Water Level(m)
Case 1 (river discharge)	0.115
Case 2 (tide + river discharge)	1.254
Case 3 (tidal + storm surge)	2.105
Case 4 (tide + storm surge + river discharge)	2.333



3.2. 파랑변형 수치해석 결과

(1) 수치모형 구축

수치모형 구성은 가로 30 m, 세로 30 m의 격자를 가진 10.2 km × 11.8 km의 모형영역을 구축하고 해저지형(수심) 및 마찰계수는 ADCIRC 모델의 메쉬(Mesh) 값을 보간 사용하였다. 또한 실험 수위조건은 ADCIRC 모델에서 계산된 하천유량, 조석, 바람, 폭풍해일고(Storm surge) 값을 적용하였다(Table 12). 한국해양과학기술에서 검토한 심해입사파랑 조건인 50년 확률빈도파랑제원인 $H_{1/3}$ (10 m), T_s (15 sec), 파향(S10°W)을 채택하였으며 수치모델적용 조파 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 재현하였다.

Table 12. Grid specifications in the numerical model

Model	STWAVE Version (3.0)	
Grid Definition	Distance (km)	10.2 x 11.8
	Grid size (m)	30 x 30
	Grid number	133,280 (340 x 392)
(Wind + Pressure + Tide + River discharge)	Water Level	case 1
		case 2
		case 3
		case 4

(2) 파랑변형 수치실험 결과

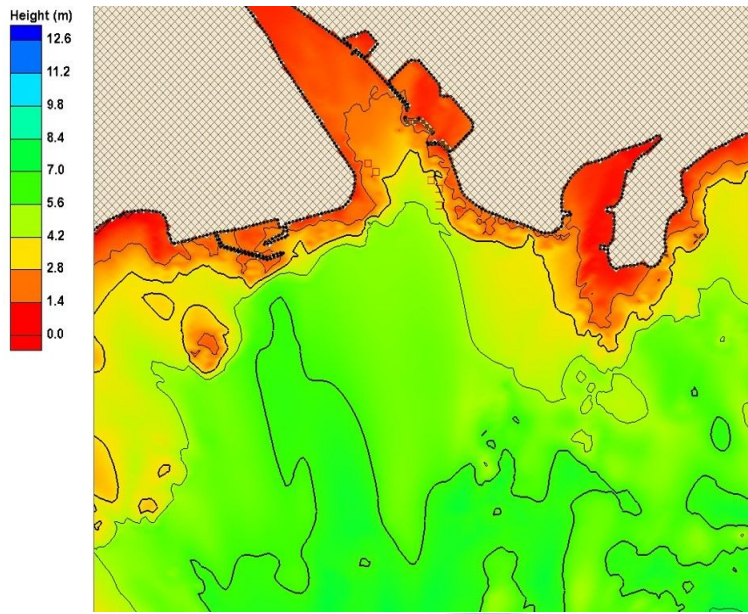
Fig. 21는 수영만해역에서 50년 확률빈도 심해설계파랑제원으로 수치시뮬레이션을 수행하고 case 1~case 4에서 계산된 수위조건으로 수영만 입구에서의 파고분포를 나타낸 것이다. 파고분포를 살펴보면 수위가 증가할수록 만내에 크기가 큰 입사파고의 분포가 확장되었다. 만 입구에 설치된 민락동호안과 마린시티지역에 호안에서 약 100m 지점에서의 각 케이스에 따른 파고계측 값을 Table 13에 정리하였다. 가상지역에서의 수치 시뮬레이션과의 차이를 살펴보면 하천형상의 차이로 인해 파고 분포가 일정한 변화로 이루어지지 않고 불규칙적으로

회절현상이 발생한 것이 확인된다. 그리고 수영만입구의 파고 분포가 수위상승과 더불어 높은 파고를 가진(파랑에너지가 큰) 파랑이 하천으로 내습되는 것이 확인되어지며 하천을 따라 그 분포가 급격하게 감소하는 것이 확인된다. 이러한 현상은 하구에서의 파랑에너지의 소산이 크게 발생한 것으로 생각되며 파랑에너지의 전달이 하구역 호안에서 크게 발생하였을 것으로 생각된다. 이는 하구주변호안에서 파랑의 내습이 크게 발생하였을 가능성을 포함하고 있다.

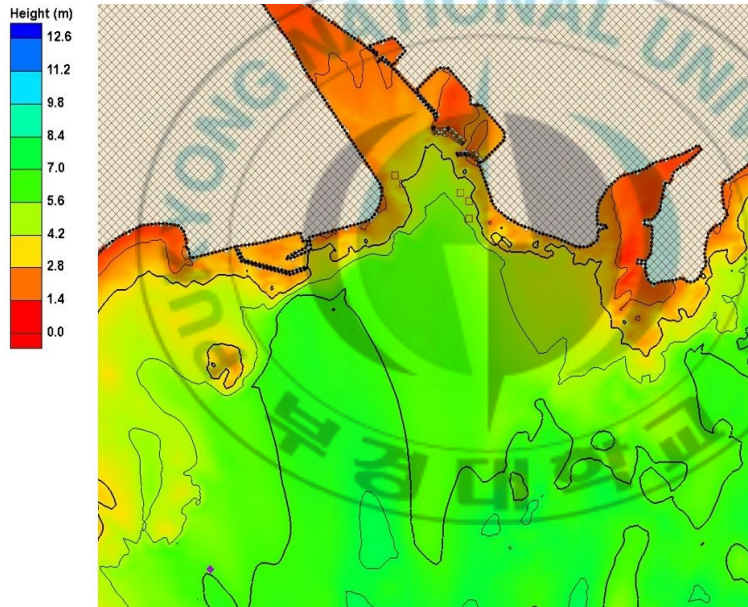
또한 실향에서 실향입사파랑 내습 시에 하구주변에서 파고분포를 살펴보았을 때 하구주변의 파고 값이 주변해역에서의 파고분포에 비해 큰 값을 나타냈다. 이러한 현상으로 하구주변 해역에서의 호안이 월파에 취약할 것으로 예상되어진다.

Table 13. Result of significant wave height

Case	Wave height (m)	
	Millak park	Marin city
Case 1 (river discharge)	2.37	3.62
Case 2 (tide + river discharge)	3.03	3.97
Case 3 (tide + storm surge)	3.48	4.26
Case 4 (tide + storm surge + river discharge)	3.55	4.31

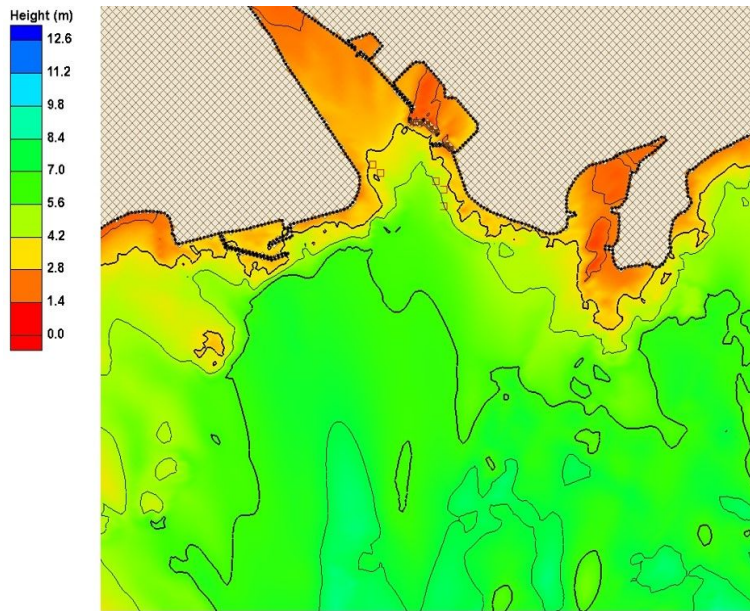


(a) Case 1 (river discharge)

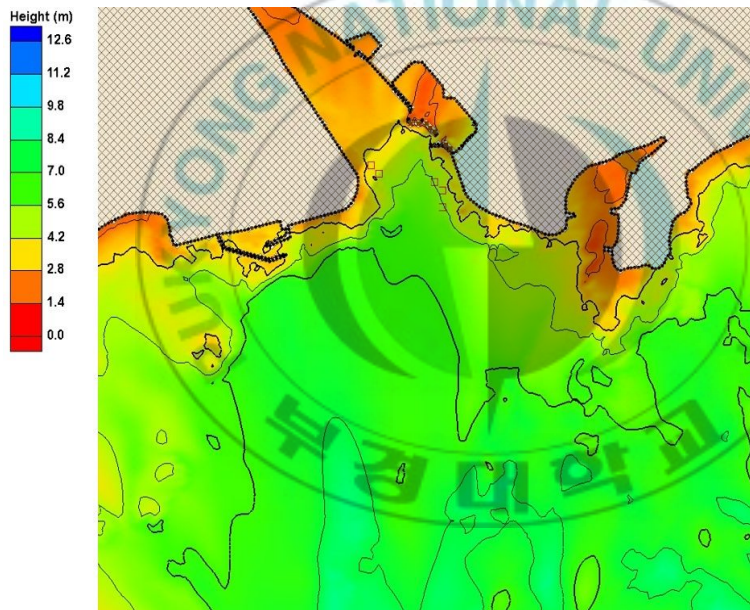


(b) Case 2 (tide+river discharge)

Fig. 21. STWAVE significant wave height for each cases.



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 21. Continued.

IV. 수영만 호안 월파량 산정

4.1. 실험개요 및 조건

수영만에서의 파랑변형 수치실험 결과를 살펴보면 Fig. 22의 A와 B 지역에서의 파고 값이 주변 호안에 비하여 높게 분포 되어있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 설계조위증가(수위의 상승)에 따라서 고파랑이 내습하는 것이 확인되어, 수위상승에 따른 호안 월파량의 비교를 수행하였다. 두 지역에서의 호안구조물의 월파에 대한 기능성의 검토를 위하여 다음의 수치파동수로를 이용한 월파량 계산을 하였다.



Fig. 22. Location of study area for overtopping rate

Fig. 22에서 나타낸 지역의 호안단면은 다음 Fig. 23~Fig. 24와 같다. A지역은 수영강 하구부 호안으로 총 연장 576.1 m, 천단폭 3.7 m, 천단고 높이 D.L.(+)5.5 m, 상치두께 1.3 m이며 16 ton의 소파블록을 1:1.5 경사로 2열 거치하여 건설된 호안구조물이다. B지역은 수영만 매립지 호안으로 총 연장 782 m, 천단폭 1.3 m, 천단고 높이 E.L.(+)5.0

m, 상치두께 2.9 m이며 20 ton의 소파블록을 1:1.5 경사로 2열거치 하여 건설된 호안구조물이다. B지역에서의 해저면은 E.L.(-) 5.0 m로 하였으며 이에 따라 단면크기를 조절 하였다. 두 대상 호안에서의 차이는 A지역은 사석 경사제이며 파라펫이 건설되지 않았으며, B지역 호안은 사석경사제이며 파라펫이 추가로 건설된 호안이다.

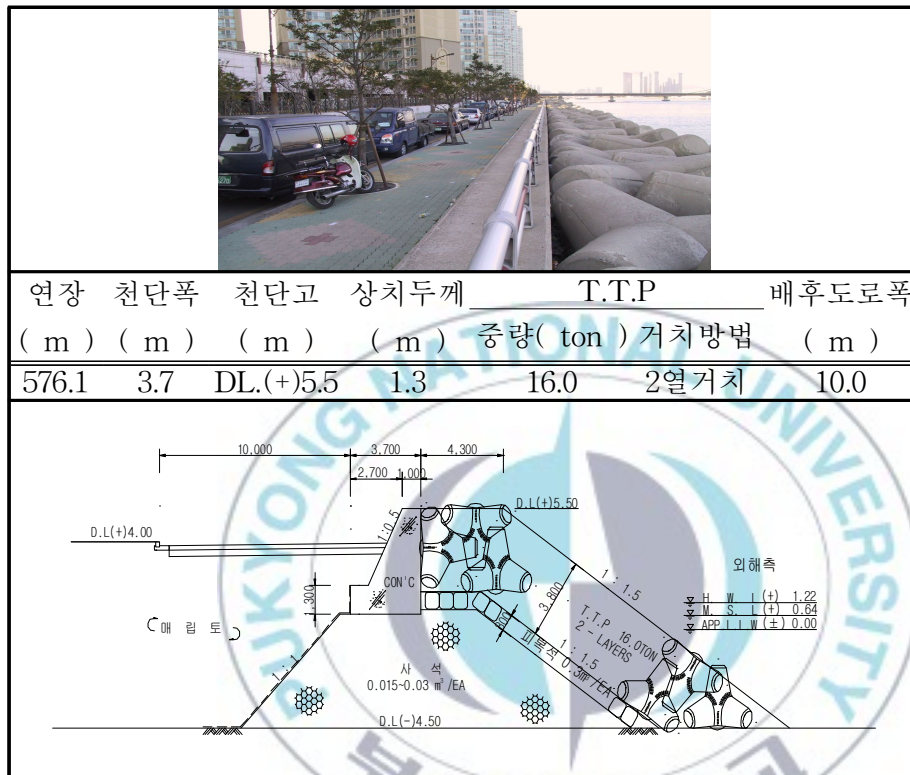


Fig. 23. The cross section of A area
(Entrance of estuary in suyeong bay).

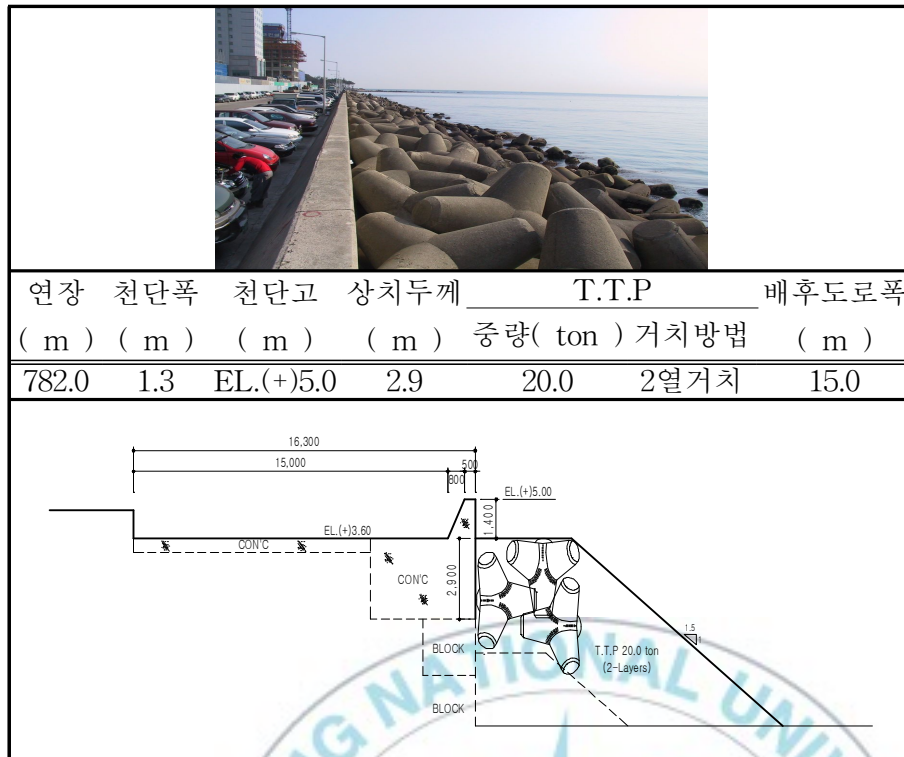


Fig. 24. The cross section of B area
(Revetment at reclaimed land in Suyeong bay).

4.1.1. 수치파동수로(CADMAS-SURF) 모형

본 연구에서는 설계파랑에 대한 호안 단면에서의 월파유량을 산정하기 위하여 수치파동수로(CADMAS-SURF) 수치모형을 사용하고자 한다. 수치파동수로(CADMAS-SURF)의 주요 특징은 다음과 같다.

- ① 자유표면이 다가함수(多價函數)로 되는 복잡한 흐름을 해석의 대상으로 한다.
- ② 2차원 비압축유체의 Navier-Stokes방정식과 연속식을 기초방정식으로 한다.
- ③ 자유표면 해석모델에 VOF법을 적용한다.
- ④ Porous모델을 사용하여 형상근사정도를 높인다.

- ⑤ 셀단위로 임의의 위치에 구조물과 경계조건을 설정할 수 있는 것으로 한다.
- ⑥ 조파모델로서 조파경계 및 조파소스의 두 가지를 적용한다.
- ⑦ 조파함수로서, Stokes과 등의 6종류를 적용한다.
- ⑧ 무반사모델로 Sommerfeld의 방사경계와 에너지 감쇠대 두 가지를 채용한다.
- ⑨ 기포 및 물방울의 처리로서 TimerDoor법을 적용한다.

4.1.2. 모형의 지배방정식

수치파동수로의 기초방정식에는 2차원 비압축성 점성유체를 대상으로 한 연속식과 Navier-Stokes방정식을 Porous모델을 근거하여 확장한 다음의 식 (4-1)~(4-3)을 채용하였다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_\rho \quad (4-1)$$

- 운동방정식

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z wu}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z ww}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x w + S_w - R_w \end{aligned} \quad (4-3)$$

여기서, t 는 시간, x, z 는 수평, 연직좌표, u, w 는 유속의 수평, 연직성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν_e 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, g 는 중력가속도, γ_x, γ_z 는 수평, 연직방향의 면적투과율이다. $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 한다면 다음과 같이 나타내며, 우변 제2항이 구조물로부터 받은 관성력의 효과를 나타낸다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \quad (4-4)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \quad (4-5)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \quad (4-6)$$

또한 다공질체로부터의 저항력이 R_x, R_z 는 다음과 같이 C_D 를 저항력계수로 하여 유속의 제곱에 비례하는 형으로 모델화하였다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (4-7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (4-8)$$

$\Delta x, \Delta z$ 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

자유표면해석모델에는 범용성이 높고, 복잡한 표면형상이 해석가능한 VOF(Volume of Fluid)법을 채용하였다. Porous모델에 기초하는 VOF 함수 F 의 이류방정식은 다음과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (4-9)$$

식 (4-1)~(4-3) 및 식 (4-9)에서 나타낸 S_ρ, S_u, S_w, S_F 는 조파소스에 관한 항으로 다음 식 (4-10)과 같이 나타낸다.

$$S_p = q(z,t), S_u = uq(z,t), S_w = wq(z,t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z,t)}{\partial z}, S_F = Fq(z,t) \quad (4-10)$$

여기서 $q(z,t)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서의 격자간격을 Δx_s 로 하여 다음의 식 (4-11)으로 나타낼 수 있다.

$$q(z,t) = 2 \frac{U(x,t)}{\Delta x_s} \quad (4-11)$$

식(4-11) 계산방법은 식(4-1)~(4-3)을 반복 계산하여 매 시간간격마다 미지수인 u, w, p 를 결정하며 이들을 난류모델에 입력하여 와점성계수를 구한다. 그리고 u, w 를 F 의 이송방정식 식(4-9)에 입력하여 수면곡선을 추적한다. 또한 원하는 조파소스를 입력하여 수치파동수로 내에 파동장을 u, w, p, F 로 결정하며 계산종료 시간까지 반복계산을 수행하는 절차를 가진다.

4.2. 월파량 산정식

4.2.1. 평균 월파량과 제체높이의 관계

호안 구조물의 설계시에는 여러 가지 구조형식을 선정하고, 각 형식마다의 파의 처오름이나 월파특성에 따라 마루높이를 결정하게 된다. 마루높이는 설계 고조위를 기준으로 설계하여야 하며 파가 내습할 때 월파를 방지할 수 있는 충분한 높이로 결정되어야 한다.

호안의 제체높이를 결정하는 방법은 두 가지 기본 원칙으로 설계한다. 하나는 파의 처오름 높이를 기준으로 하여 월파가 생기지 않도록 호안의 제체높이를 처오름 높이보다 더 높게 결정하는 것이다. 다른 하나는 월파량을 기준으로 하여 발생 월파량이 허용 월파량 이하가 되도록 구조물의 마루높이를 설계하는 방법이다(Goda, 1984).

Fig. 25는 CEM(2004)에서 제시하고 있는 허용월파량 기준이며, Table 14~Table 16은 국내 설계 기준서인 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 2005)에 제시되어 있는 내용이다. 통상적으로 국내 항만구조물 설계시의 허용월파량은 $0.02 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 를 적용하고 있다.

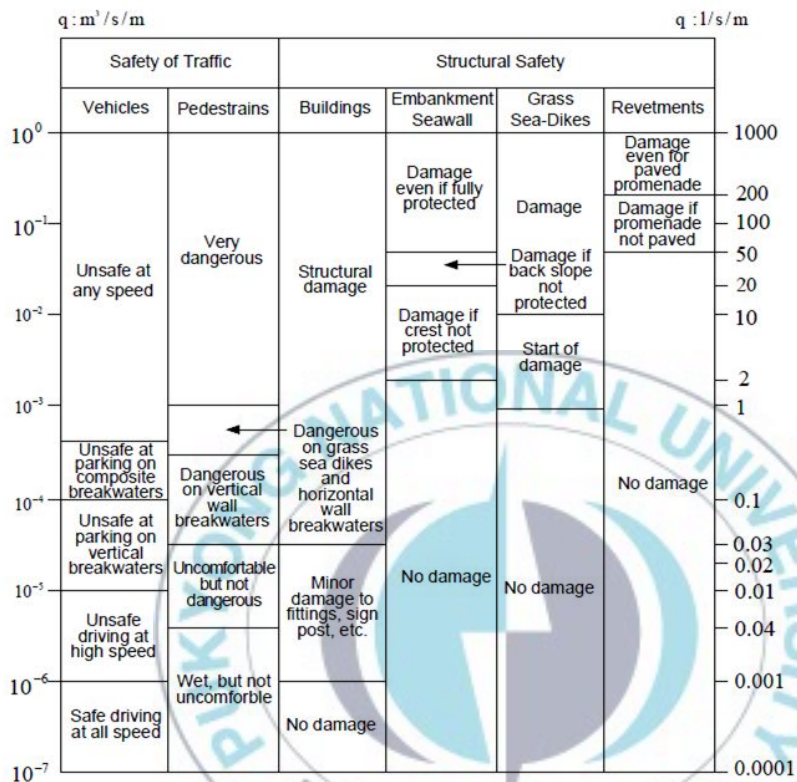


Fig. 25. Permissible amount of overtopping(CEM, 2004).

Table 14. Considering importance of the area

요건	월파량($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)
배후에 민가, 공공시설 밀집으로 월파, 물보라 등의 유입으로 중대한 피해가 예상되는 지역	0.01 정도
기타 중요한 지역	0.02 정도
기타 지역	0.02 ~ 0.06

항만 및 어항 설계기준(2005)

Table 15. Permissible amount of overtopping about the use

이용방법	상태(호안 후면)	월과량($m^3/sec/m$)
보행	위험없음	2×10^{-4}
자동차	고속통행 가능	2×10^{-5}
	안전운전	2×10^{-4}
가옥	위험 없음	7×10^{-4}

항만 및 어항 설계기준(2005)

Table 16. Limit of damage from overtopping rate

종 별	피복공	월과량 ($m^3/sec/m$)
호	배후포장 있음	0.2
안	배후포장 없음	0.05
제 방	전사면, 천단마루 및 후사면 콘크리트 처리	0.05
	전사면과 천단마루 콘크리트 처리, 후사면 미시공	0.02
	전사면 콘크리트 처리, 천단마루 및 후사면 미시공	0.005 이하

항만 및 어항 설계기준(2005)

기존 연구에서 월과량의 산정에 대부분 입사파고에 대한 제체높이의 비인 상대여유고($R = R_c/H_{1/3}$)로 무차원화한 변수를 이용하여 월과량을 산정하였다. 월과량산정에 영향을 미치는 변수 중에서 지배적인 변수를 분석해보면, 평균월과량은 식(4-12) 및 식(4-13)과 같은 형태의 무차원 경험식으로 나타낼 수 있다. 특히 Owen(1982)에 의해 제안된 식의 지수함수(exponential function) 형태의 식이 최근까지도 많이 사용되고 있다.

$$Q = a \exp(-bR) \quad (4-12)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (4-13)$$

여기서, Q 는 무차원 월과량, R 은 상대여유고, 변수 a 와 b 는 Q 와 R 의 상관관계를 지수함수 및 거듭제곱함수의 형태로 추세선을 나타낼 경

우에 구조물의 형상, 입사파 조건 등에 의해서 결정되는 값이며, 변수 a 값은 여유고(R)가 0인 조건(zero freeboard)에서의 무차원 월파량 (Q)을 의미하고, b 는 단면형상 및 입사파 조건에 의해 변하는 각 계수 (angular coefficient)이다. 기존 월파량 산정식을 정리하면 Table 17 과 같다.

Table 17. The Empirical Formulas of Preceding Research

Author	Equation	Q	R
Owen (1982)	$Q = a \exp(-bR)$	$\frac{q}{gH_{1/3}T_{om}}$	$\frac{R_c}{H_{1/3}} \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{1}{\gamma}$
Bradbury and Allop (1988)	$Q = aR^{-b}$ 상치콘크리트 설치 피복석 거치 경사제	$\frac{q}{gH_{1/3}T_{om}}$	$\left(\frac{R_c}{H_{1/3}} \right)^2 \left(\frac{S_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Aminti and Franco (1988)	$Q = aR^{-b}$ 피복석, 이형블록 (T.T.P., Cube) 불투과성 경사제	$\frac{q}{gH_{1/3}T_{om}}$	$\left(\frac{R_c}{H_{1/3}} \right)^2 \left(\frac{S_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Franco et.al. (1994)	$Q = a \exp(-bR)$ 직립케이슨	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{1/3}\gamma}$
Pedersen (1996)	$Q = R$ 상치콘크리트 설치 피복석 피복 투과성 경사제	$\frac{qT_{om}}{L_{om}^2}$	$3.2 \cdot 10^{-5} \frac{H_{1/3}^5 \tan \alpha}{R_c^3 A_c G}$
Franco and Franco (1999)	$Q = a \exp(-bR)$ 직립케이슨	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{1/3}}$
EurOtop (2007)	$Q = a \exp(-bR)$ 직립케이슨	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{1/3}}$

4.2.2. 월파랑 검증

월파랑 검증에 사용할 경험식을 Table 18에 작성하였다. 여기서 q 는 폭당평균 월파랑을 의미하며 $H_{1/3}$ 은 유의파고(significant wave height), R_c 는 제체의 마루높이다. 그리고 EurOtop(2007)에서는 직립식 단면에서의 월파랑산정식을 쇄파조건과 비 쇄파조건으로 구분하여 제시하였다. 쇄파와 비 쇄파조건은 구조물 전면에서 쇄파의 발생 여부에 따른 조건으로 충격지수(impulsiveness parameter, h_*)를 이용하여 구분할 수 있도록 하였다(Besley 등, 1998).

월파랑 검증에 사용된 단면은 폭은 0.4 m, 제체높이는 0.1 m인 직립호안에 대하여 수심 0.5 m에서 수치모델해석을 수행하였다. 사용된 파랑제원은 규칙파랑 조건으로 Table 19과 같다. 파랑주기는 2.0 sec, 2.4 sec, 2.8 sec이며 파고는 각주기에 대하여 0.1 m~0.16 m의 범위를 갖는다.

Table 18. The formulas in order to compare data from numerical model

Author	Equation	Note
Franco and Franco (1999)	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.082 \exp\left(-3.0 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right)$	$0.3 < \frac{R_c}{H_{1/3}} < 2.7$
EurOtop (2007)	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right)$	$h_* > 0.3$
	$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.04 \exp\left(-1.8 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right)$	$h_* < 0.2$
		$h_* = 1.35 \frac{h_s}{H_m} \frac{2\pi h_s}{g T_m^2}$

Table 19. Wave Conditions for Operating Numerical Model

T(sec)	2.00	2.40	2.80
L(m)	4.05	5.00	5.93
kh	0.78	0.63	0.53
H(m)	0.100, 0.110, 0.125, 0.140, 0.150, 0.160		

수치파동수로 Fig. 26에서 보이는 바와 같이 감쇠대, 조파기, 파랑 전달부, 전이부 그리고 구조물 부위로 구성하였으며 여기서, L은 입사 파장을 의미한다. 조파방법에는 수치조파로서 내부조파기법을 이용하였으며 본 기법은 구조물로부터의 반사파를 재 반사시키지 않고 감쇠대쪽으로 통과시키는 기능을 갖추고 있다.

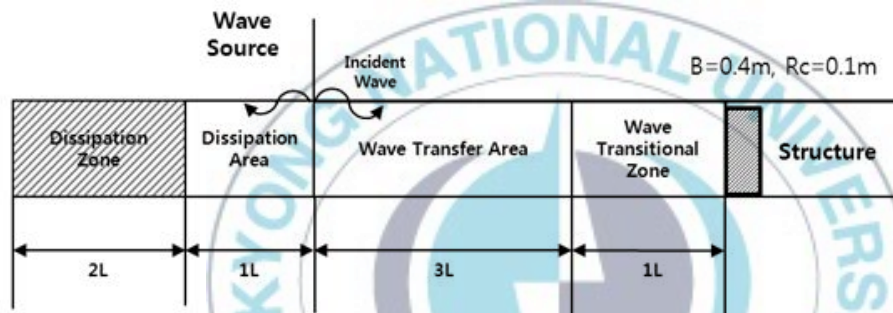


Fig. 26. Specification of numerical wave channel.

본 연구에 사용된 CADMAS-SURF는 격자간격을 다르게 설정할 수 있으므로 구조물 부위에는 간격을 좁게, 그리고 파랑전달부에는 간격을 넓게 하여 전체적으로 적정격자수를 유지하였으며, 이들 사이에는 파랑전이부를 배치하여 격자간격을 축차적으로 변화하도록 하였다. 월파량의 계측에는 CADMAS-SURF에서 월파영역을 지정하여 영역내의 월파유량을 계산한다. 월파유량은 계산 지속시간 동안 지정된영역내에서 VOF 함수 F값의 면적 적분 값에 월류가 시작된 시간부터 계산시간이 종결되는 시간의 차로 평균한 값이다. 경험식에서의 계산 값과 수치모형에서의 결과 값과의 비교는 Fig. 27에 나타내었다.

기존 연구에서 고안된 경험식과 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인되며 이에 따라 본 모델을 사용하여 월과유량 계산을 수행하는데 적합하다고 판단된다.

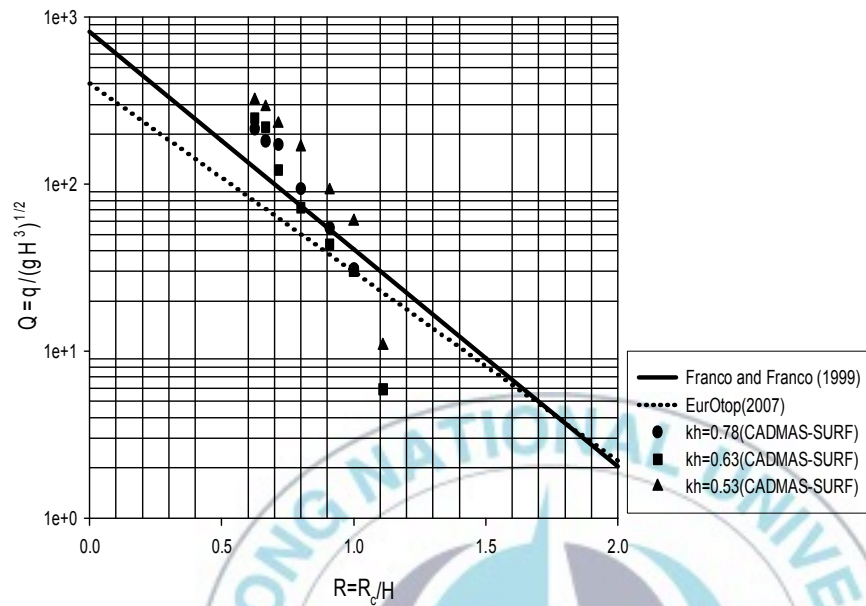


Fig. 27. Comparison of the result between empirical formulas and computed data by using the numerical model.

4.3. 월파랑 계산 결과

4.3.1. 수치모형 실험 조건

각 호안 단면에 대하여 파랑변형 수치모의를 통한 결과 값을 기초로 하여 다음 설계파랑을 결정하였다(Table 20). 수치실험의 독립변수는 주기(10 sec, 12 sec, 15 sec), 파고(2.5 m, 3.0 m, 3.5 m, 4.0 m, 4.3 m, 4.5 m), 조위(Case 1, Case 2, Case 3, Case 4)이며, 각 조건에 해당하는 파랑을 사용하여 규칙파 조건으로 수치실험을 수행하였다.

여기서 T 는 주기, L 은 파장, H 는 파고, R 은 상대여유고이며 천단고 제체 높이와 파고비로 무차원화하여 나타내었다. 그리고 s 는 파형경사로 파고와 파장비로 무차원화 하여 표기하였다.



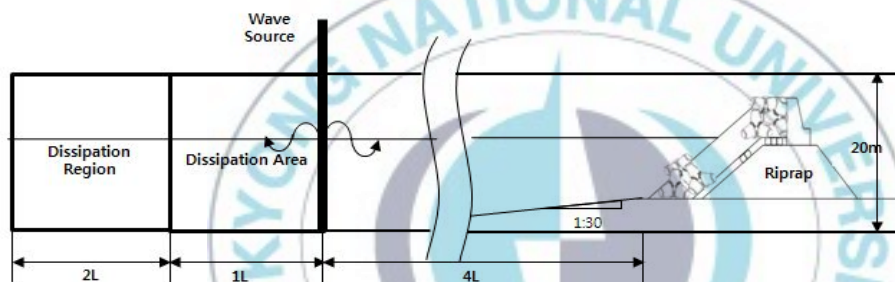
Table 20. Signification wave for using the numerical model

Case 1. (A area)					Case 1. (B area)			
Wave period (T, sec)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steep-ness (s)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steep-ness (s)
10	65.20	2.50	2.15	0.038	69.02	3.50	1.39	0.051
		3.00	1.79	0.046		4.00	1.22	0.058
		3.50	1.54	0.054		4.30	1.13	0.062
		4.00	1.35	0.061		4.50	1.08	0.065
12	79.01	2.50	2.15	0.032	83.74	3.50	1.39	0.042
		3.00	1.79	0.038		4.00	1.22	0.048
		3.50	1.54	0.044		4.30	1.13	0.051
		4.00	1.35	0.051		4.50	1.08	0.054
15	99.55	2.50	2.15	0.025	105.62	3.50	1.39	0.033
		3.00	1.79	0.030		4.00	1.22	0.038
		3.50	1.54	0.035		4.30	1.13	0.041
		4.00	1.35	0.040		4.50	1.08	0.043
Case2 (A area)					Case2 (B area)			
Wave period (T, sec)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steep-ness (s)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steep-ness (s)
10	72.17	2.50	1.70	0.035	75.52	3.50	1.07	0.046
		3.00	1.42	0.042		4.00	0.94	0.053
		3.50	1.21	0.048		4.30	0.87	0.057
		4.00	1.06	0.055		4.50	0.83	0.060
12	87.67	2.50	1.70	0.029	91.86	3.50	1.07	0.038
		3.00	1.42	0.034		4.00	0.94	0.044
		3.50	1.21	0.040		4.30	0.87	0.047
		4.00	1.06	0.046		4.50	0.83	0.049
15	110.68	2.50	1.70	0.023	116.09	3.50	1.07	0.030
		3.00	1.42	0.027		4.00	0.94	0.034
		3.50	1.21	0.032		4.30	0.87	0.037
		4.00	1.06	0.036		4.50	0.83	0.039

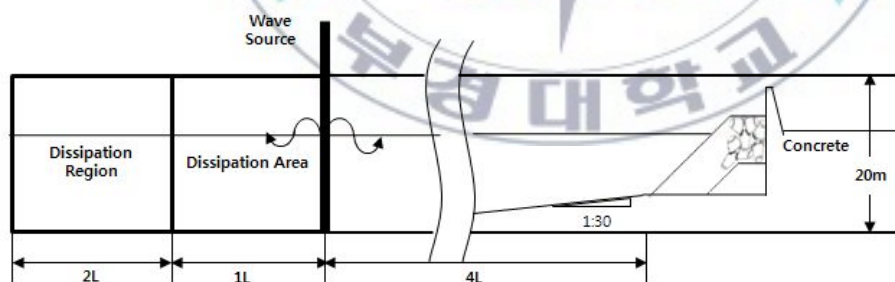
Table 20. Continued

	Case 3 (A area)				Case 3 (B area)			
Wave period (T, sec)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steepness (s)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steepness (s)
10	76.91	2.50	1.36	0.033	79.98	3.50	0.83	0.044
		3.00	1.13	0.039		4.00	0.72	0.050
		3.50	0.97	0.046		4.30	0.67	0.054
		4.00	0.85	0.052		4.50	0.64	0.056
12	93.61	2.50	1.36	0.027	97.48	3.50	0.83	0.036
		3.00	1.13	0.032		4.00	0.72	0.041
		3.50	0.97	0.037		4.30	0.67	0.044
		4.00	0.85	0.043		4.50	0.64	0.046
15	118.35	2.50	1.36	0.021	123.38	3.50	0.83	0.028
		3.00	1.13	0.025		4.00	0.72	0.032
		3.50	0.97	0.030		4.30	0.67	0.035
		4.00	0.85	0.034		4.50	0.64	0.036
	Case 4 (A area)				Case 4 (B area)			
Wave period (T, sec)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steepness (s)	Wave length (L, m)	Wave height (H, m)	Free-board (R)	Wave steepness (s)
10	78.06	2.50	1.27	0.032	81.07	3.50	0.76	0.043
		3.00	1.06	0.038		4.00	0.67	0.049
		3.50	0.91	0.045		4.30	0.62	0.053
		4.00	0.79	0.051		4.50	0.59	0.056
12	95.05	2.50	1.27	0.026	98.85	3.50	0.76	0.035
		3.00	1.06	0.032		4.00	0.67	0.040
		3.50	0.91	0.037		4.30	0.62	0.044
		4.00	0.79	0.042		4.50	0.59	0.046
15	120.23	2.50	1.27	0.021	125.17	3.50	0.76	0.028
		3.00	1.06	0.025		4.00	0.67	0.032
		3.50	0.91	0.029		4.30	0.62	0.034
		4.00	0.79	0.033		4.50	0.59	0.036

수치파동수로 는 다음 Fig. 28와 같이 A지역과 B지역의 호안단면에 맞추어 구축 하였으며, T.T.P의 공극율은 0.50, 항력계수(C_D)는 0.9, 관성계수(C_M)은 1.5이며, 사석의 공극율은 0.43, 항력계수는 1.0, 관성계수는 1.2를 적용하여 격자를 생성하였다. 구조물에서의 격자크기는 Δx 는 0.5 m간격으로 주었으며 Δz 는 0.2 m간격으로 설정하였다. 수치파동수조의 총 연장은 7L+40 m, 수조 높이는 20 m이며, 구조물 전면에 1:30의 해저경사를 주었다. 파랑 전달부의 계산에서 격자의 생성은 Δx 는 L/100으로 주었으며 구조물 전면 1L에서 가변격자를 0.96배의 감소를 주어 변화시켰다. 시간간격은 자동시간간격을 사용하였으며 자동시간간격의 상한한계는 0.1 하한한계는 0.001을 주어 수치 모델 해석을 수행하였다.



(a) A revetment at the A area



(b) A revetment at the B area

Fig. 28. The cross section in the numerical wave channel.

4.3.2. 호안단면별 월파량 산정 결과

수치파동수로(CADMAS-SURF)를 이용한 월파량의 계측 결과는 다음과 같다(Table 21~Table 22). A지역에서의 월파현상은 'case 3'부터 계측이 되었으며, B지역에서는 'case 2'부터 월파가 발생하였다. Fig. 29는 Case에 따른 월파량을 도시화 한 것이다. A지역에서 보다 B 지역에서 약 2.5배 큰 월파량이 계측되었으며 이는 두 지역 호안단면 간 상대여유고의 차이에서 발생된 것으로 생각되어 진다. 그리고 A지역 보다 B지역의 호안 구조물이 월파에 대하여 기능이 떨어지는 것으로 확인 된다. A지역의 상대적으로 여유고(제체높이)가 B지역보다 크게 설계되어 있음을 알 수 있다. 수위가 상승함에 따라 상대여유고가 줄어들었으며, 이에 따른 월파량은 증가하였다.

각 수위 조건에서 주기의 증가에 따라 월파량은 몇몇은 감소하는 경향을 보였으나 대부분 1.5~7배의 증가폭을 나타내고 있다. 그리고 상대적으로 큰 파형경사에 월파량은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 'Case 3'과 'Case 4'의 비교를 통해 하천수 유입에 따른 월파량의 증가를 확인할 수가 있다.

실제해역에서의 파랑변형 수치모델을 통해 얻어진 각 케이스별 호안 전면 입사파고에 대하여 'Case 3'과 'Case 4'의 수위증가에 따른 월파량의 증가는 A지역에서는 $0.07 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ (약 1.8배), B지역에서는 $0.2 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ (약 1.5배)의 증가를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

Table 21. Result of the numerical calculation(A Area)

c a s e 3 (+) 2 . 1 0 5	T(sec)	H (m)	R	s	q(m ³ /sec/m)
	10	2.50	1.36	0.033	0.0022
		3.00	1.13	0.039	0.0078
		3.50	0.97	0.046	0.0189
		4.00	0.85	0.052	0.0300
	12	2.50	1.36	0.027	0.0078
		3.00	1.13	0.032	0.0117
		3.50	0.97	0.037	0.0875
		4.00	0.85	0.043	0.1733
	15	2.50	1.36	0.021	0.0120
		3.00	1.13	0.025	0.0610
		3.50	0.97	0.030	0.0960
		4.00	0.85	0.034	0.0915
c a s e 4 (+) 2 . 3 3 0	T(sec)	H (m)	R	s	q(m ³ /sec/m)
	10	2.50	1.27	0.032	0.0067
		3.00	1.06	0.038	0.0267
		3.50	0.91	0.045	0.0460
		4.00	0.79	0.051	0.0520
	12	2.50	1.27	0.026	0.0196
		3.00	1.06	0.032	0.0500
		3.50	0.91	0.037	0.1075
		4.00	0.79	0.042	0.1292
	15	2.50	1.27	0.021	0.0237
		3.00	1.06	0.025	0.1073
		3.50	0.91	0.029	0.1724
		4.00	0.79	0.033	0.1644

Table 22. Result of the numerical calculation(B Area)

c a s e 2 (+) 1 . 2 5 4	T(sec)	H (m)	R	s	q(m ³ /sec/m)
	10	3.50	1.07	0.046	0.0170
		4.00	0.94	0.053	0.0200
		4.30	0.87	0.057	0.0146
		4.50	0.83	0.060	0.0083
	12	3.50	1.07	0.038	0.0817
		4.00	0.94	0.044	0.1518
		4.30	0.87	0.047	0.1793
		4.50	0.83	0.049	0.1160
	15	3.50	1.07	0.030	0.0916
		4.00	0.94	0.034	0.1345
		4.30	0.87	0.037	0.1778
		4.50	0.83	0.039	0.1386
c a s e 3 (+) 2 . 1 0 5	T(sec)	H (m)	R	s	q(m ³ /sec/m)
	10	3.50	0.83	0.044	0.3410
		4.00	0.72	0.050	0.3000
		4.30	0.67	0.054	0.3600
		4.50	0.64	0.056	0.3240
	12	3.50	0.83	0.036	0.3347
		4.00	0.72	0.041	0.3702
		4.30	0.67	0.044	0.3682
		4.50	0.64	0.046	0.3730
	15	3.50	0.83	0.028	0.4489
		4.00	0.72	0.032	0.3976
		4.30	0.67	0.035	0.5062
		4.50	0.64	0.036	0.4836
c a s e 4 (+) 2 . 3 3 0	T(sec)	H (m)	R	s	q(m ³ /sec/m)
	10	3.50	0.76	0.043	0.4400
		4.00	0.67	0.049	0.6600
		4.30	0.62	0.053	0.6710
		4.50	0.59	0.056	0.6300
	12	3.50	0.76	0.035	0.6078
		4.00	0.67	0.040	0.6772
		4.30	0.62	0.044	0.6806
		4.50	0.59	0.046	0.7920
	15	3.50	0.76	0.028	0.6920
		4.00	0.67	0.032	0.8667
		4.30	0.62	0.034	0.7433
		4.50	0.59	0.036	0.7320

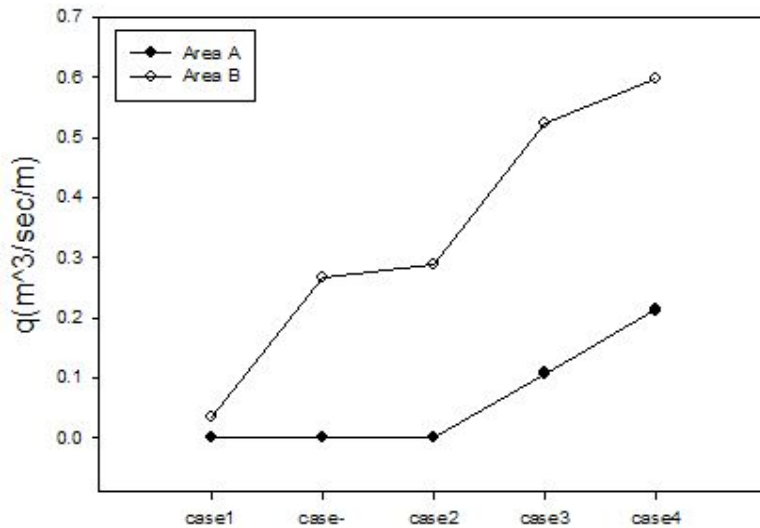


Fig. 29. Comparison with overtopping rate in the cases.

4.3.3. 수위에 따른 월파량

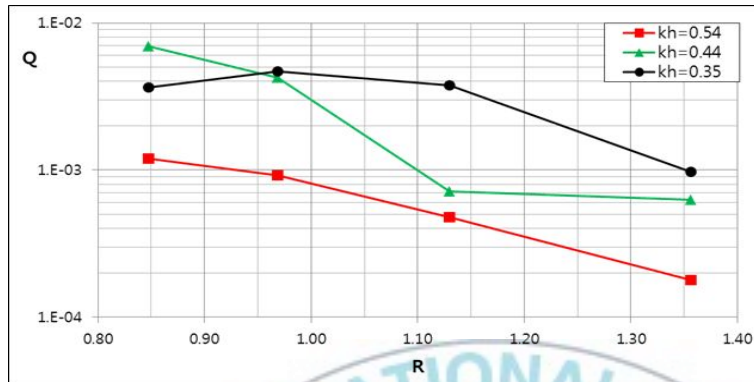
Fig. 28와 같이 구축된 수치모형수로에 Table 20의 실험조건을 적용하여 수위변화에 따라 월파량을 정리하였다.

같은 케이스에서 파고 변화에 따른 상대여유고와 무차원월파량의 관계를 분석해 보면 파고와 주기의 증가에 따라 월파량이 증가하는 경향을 나타냈다. 다시 말해 만내에 상대수심이 감소할수록(주기가 길어질수록), 고파랑이 내습할수록 월파량이 급증하는 것을 확인할 수 있다. 설계조위의 적용 조건에 따른 수위상승으로 인한 월파량을 비교하기 위하여 수위변화에 직접적인 영향을 미치는 변수인 제체높이를 파라메타로 두어 해석을 수행하였다. 각 케이스에 대한 상대여유고와 무차원월파량의 관계를 이용하여 각 호안단면에서의 월파량을 산정하였다. 다음 Fig. 30~Fig. 31에 주기조건을 무차원화 한 상대수심(kh)에 대하여 각 케이스별 $R-Q$ 의 상관관계를 도시화 하였다.

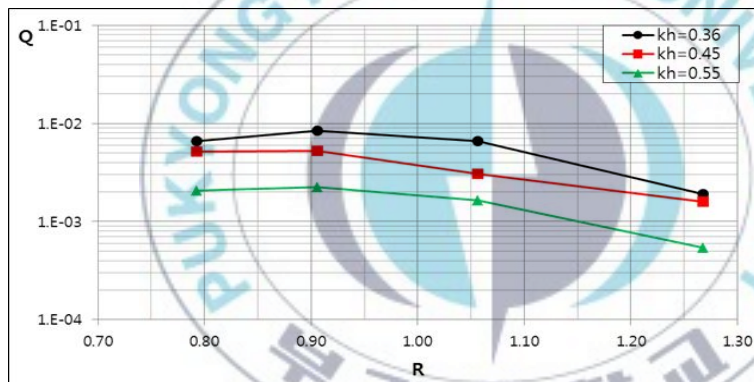
여기서, k 는 파수(wave number)로 $k=2\pi/L$ 로 나타낸다. Q 는 무차원

월파량($Q=q/\sqrt{gH^3}$)으로 나타내며 R 은 상대여유고로 제체높이에 대한 파고비($R=R_c/H$)이다.

상대여유고의 감소에 따라서 월파량이 증가하는 경향이 나타났으며, 주기가 길어질수록(상대수심이 낮을수록) 월파량이 크게 계산되었다.

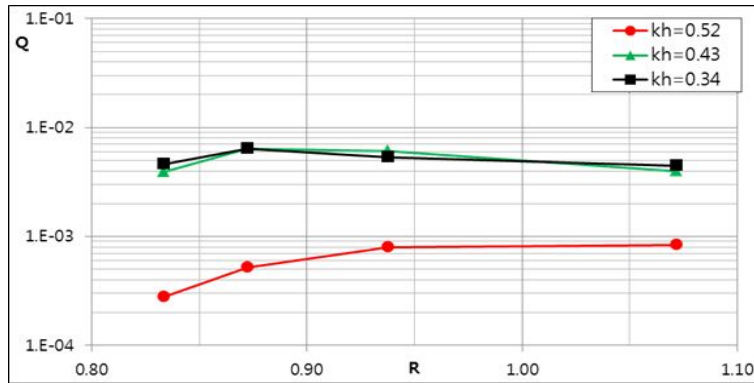


(a) case 3 (+) 2.105 m

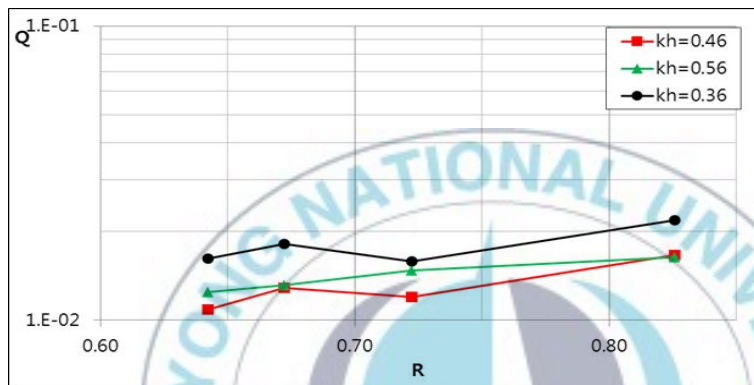


(b) case 4 (+) 2.330 m

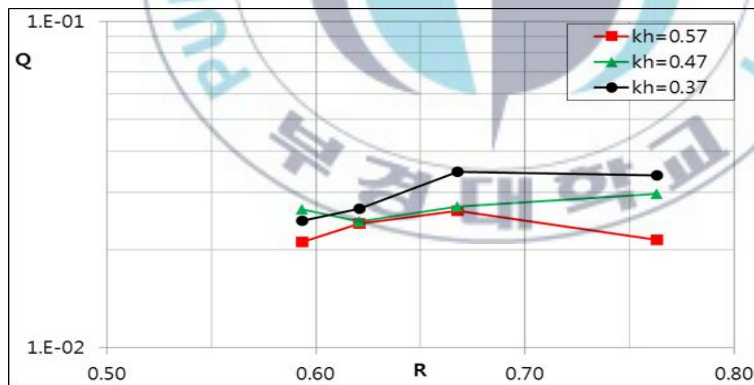
Fig. 30. Correlation between overtopping rate and relative freeboard at the A area.



(a) case 2 (+) 1.254 m



(b) case 3 (+) 2.105 m



(c) case 4 (+) 2.330 m

Fig. 31. Correlation between overtopping rate and relative freeboard at the B area.

4.3.4. 수영만 호안 월파량 산정식

4.3.3절에서 상대여유고와 무차원 월파량간의 관계를 도시화하였다. 호안단면에 대하여 상대수심에 따른 $R-Q$ 관계의 결과를 다음과 같이 지수형태의 추세선으로 나타낼 수 있다(Fig. 32~Fig. 33). 추세선의 식은 다음 식 (4-14)과 식 (4-15)와 같다. 식 (4-14)은 A지역의 호안단면에 대한 산정식이며 식 (4-15)는 B지역의 호안단면에 대한 산정식이다. Fig. 34는 A지역과 B지역에서의 호안단면에 대한 월파량산정식을 도시화 하여 비교를 위해 나타내었으며, A지역에서 $R > 1$ 인 조건($R_c > H$)에서 월파량이 더 크게 산정되는 것을 확인 할 수 있다.

이는 B지역 호안에서의 파라펫이 상대여유고가 높은 조건에서 월파를 효과적으로 제어하는 것으로 생각되어 진다.

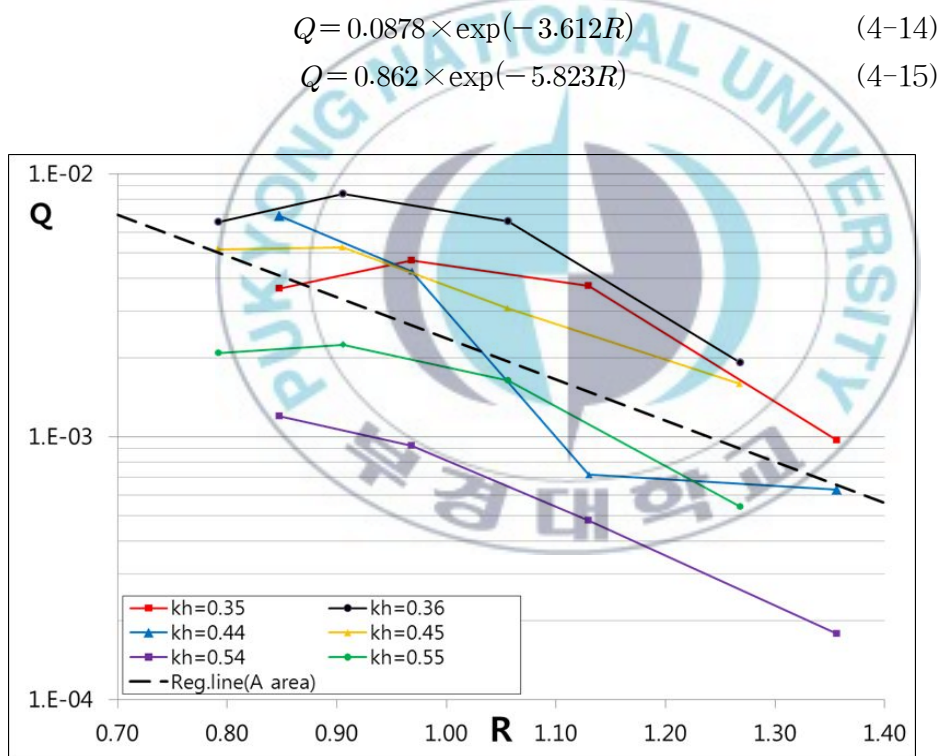


Fig. 32. Overtopping rate calculation formula at the A area.

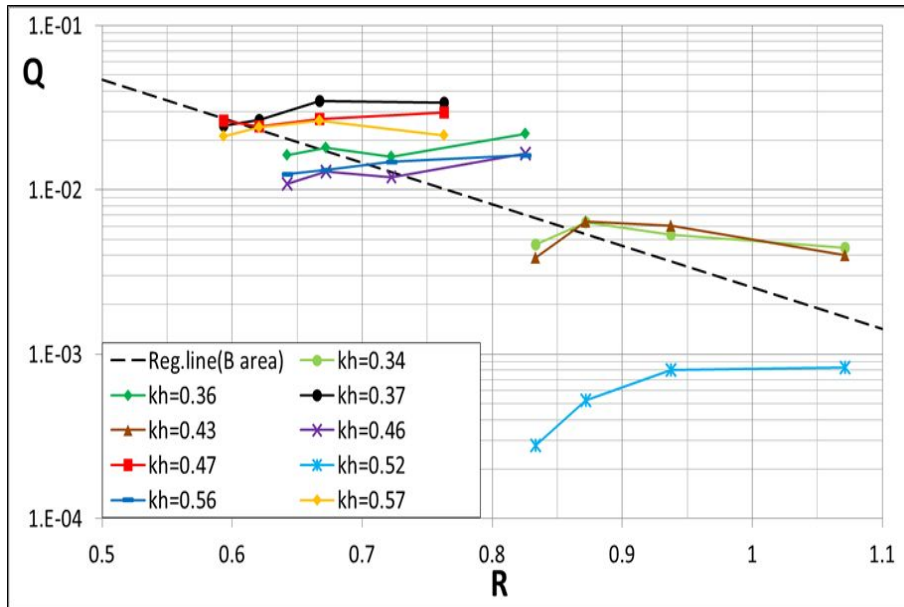


Fig. 33. Overtopping rate calculation formula at the B area.

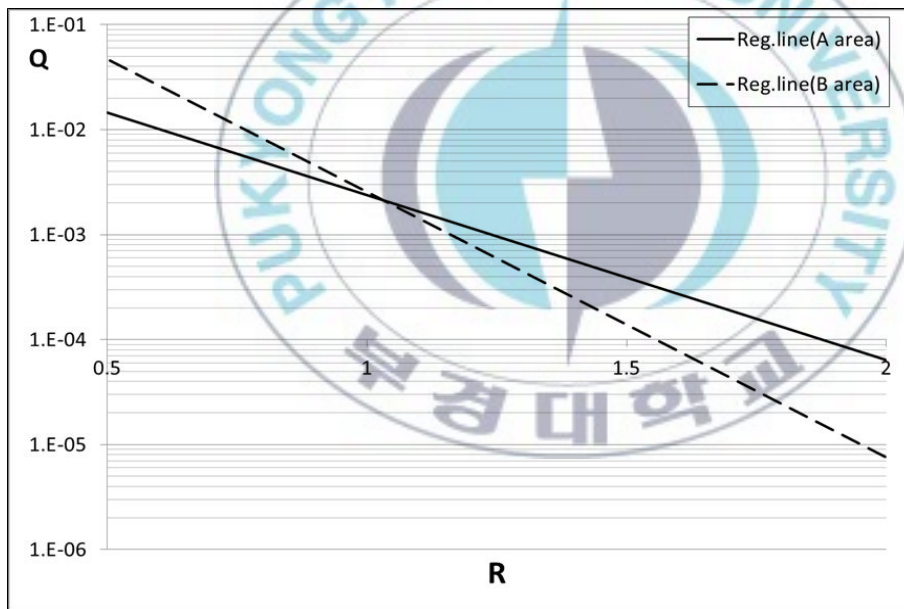


Fig. 34. Comparison of overtopping rate between A and B.

V. 요약 및 결론

본 연구는 하구역 주변 해안 개발에 따른 외해 입사 파랑의 변동 특성과 안전한 호안 설계를 위한 월파량을 산정하는데 목적이 있다. 연구방법으로 하구역으로 외해 입사하는 파랑이 하구형상, 하구폭, 하천수심등의 제약조건에 따라 변형하는 특성을 단순화한 하구모형과 수영만 하구역을 대상으로 검토하고 주변호안에 미치는 월파량을 산정 후 그 정도를 정량화 하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단순화한 하구 모형을 바탕으로 검토한 결과, 단주기 파랑조건보다 장주기 파랑이 내습할 시 더 큰 에너지가 하천상류로 전달되었다. 더구나 하구 폭이 2배 증가하면 주기에 따라 약 8~18%의 파고 증가를 나타 내었다.

(2) 하구역에서의 파랑 변형은 하구 형상에 지배적이며, 특히 하구폭이 가장 크게 영향을 미치는 파라메타로 판단된다. 즉, 폭이 감소할수록 하천 개구부에서 에너지 감소가 급격히 발생하고 내부로 진입한 에너지는 하구주변 호안에서 소산되는 것으로 생각된다.

(3) 수영만 하구역의 하천 유입만을 고려한 수위의 상승은 0.12 m, 하천유입을 고려한 폭풍해일고 계산에서의 수위 상승은 0.23 m로 2배 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 하천 유입과 폭풍해일고를 함께 고려한 경우 수영만 호안지역에서의 월파량은 폭풍해일고만 고려한 경우보다 A지역은 $0.07 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ (약 1.8배), B지역에서는 $0.2\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ (약 1.5배)의 증가를 보였다. 또한 월파량만을 보았을 때 B지역이 A지역보다 월파 피해 가능성이 클 것으로 판단된다.

(5) 수영만 A, B 지역에 대한 호안 월파랑 산정식은 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\text{A area : } Q = 0.0878 \exp(-3.612R)$$

$$\text{B area : } Q = 0.862 \exp(-5.823R)$$

한편 본 연구는 하구역 하구폭 감소에 따른 호안 구조물 월파 현상에 대해 검토하고자 하였으나 모델에서 가정 또는 제약조건으로 주어진 에너지 소산(구조물에서의 반사)이 실제 해역에서는 또 다른 외력으로 주변 호안에 영향을 줄 가능성이 있다고 판단되며 이에 대한 검토가 필요하다고 생각된다. 아울러 하천 주변 해역에서의 호안구조물 설계시에 하천유량의 유입을 검토하여 단면설계에 적용해야 할 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- 박현수(2004). 태풍 “매미”에 의한 직립호안의 월파량 추정에 관한 실험적 연구, 부산대학교 석사학위논문.
- 이원 (2008). 사석경사제 호안의 월파특성, 한양대학교 석사학위논문.
- 이종인, 김영택, 이정욱 (2003). 경사입사파에 대한 월파실험. 대한토목학회 2003년도 정기학술대회 논문집, 5167-5170.
- 이철웅 (2003). 월파에 대한 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석. 한국해안해양공학회지, Vol.15, No.4, 214-223.
- 장성호 (2013). 연안도시 태풍 침수피해 방지대책에 관한 연구. 한국해양대학교 석사학위논문.
- 편종근, 김규환, 김태원 (2006). 반파경사 구조물의 월파유량 특성. 한국해안해양공학회 2006년도 학술발표논문집, 193-196.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- Aminti, P and Franco, L. (1988). “Wave overtopping on rubble mound breakwaters.” Proceedings of the 21th International Conference Coastal Engineering 1988, 770-781.
- Andersen, T.L. and Burcharth, H.F. (2009). “Three-dimensional investigation of wave overtopping on rubble mound structures.” Coastal Engineering, Vol. 56, 180-189.
- Briganti, R., Bellotti, G., Franco, L., De Rouck, J. and Geeraerts, J. (2005). “Field measurements of wave overtopping at the rubble mound break water of Rome - Ostia Yachtharbour.” Coastal Engineering, Vol. 52, 1155-1174.
- Coastal Engineering Manual (CEM) (2004). U. S. Army Corps of Engineers.
- EurOtop (2007). “European Overtopping Manual, Wave overtopping of sea defences and related structures : Assessment Manual.” Pullen, E. T., Allsop, N.W.H., Bruce T, Kortenhaus A,

- Schüttrumpf H, Van der Meer J.W.,
www.overtopping-manual.com.
- Goda,Y.(1985). Random seas and design of maritime structures.
World Scientific Publishing.
- Lee, B.G., K.D.Cho and D.S.Kim(1991), A Study on the Seasonal
Variations of Fresh Water Distribution and Flushing Time
in Suyoung Bay, Bull Korean Fish. Tec. Soc, Vol. 27, No.
3, pp. 170-177.
- Luettich,R,A,Westerink,J.J.,(2005). Formulation and Numerical
Implementation of the 2D/3D ADCIRC finite Element Model
version 44.xx.
- Korea Meteorological Administration. www.kma.go.kr
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration.
www.khoa.go.kr
- Owen,M.W.(1980). "Design of sea walls allowing for wave
overtopping." Report No. EX924, HR Wallingford.
- Owen, M.W. (1982). "The Hydraulic Design of Seawall Profiles."
Proceedings of the Coastal Protection Conference, Institution
of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London,
UK,185-192.
- Robert J. Weaver and Donald N.Slinn(2004), Effect of Wave Forces
on Storm Surge. University of Florida Department of Civil
and Coastal Engineering Gainesville, FL. 32611, USA
- Smith, J.M., Resio, D.T., Zundel, A.K.,(1999). STWAVE : Steady
state spectral wave model. Instruction Report CHL-99-1,
US Army EngineerWaterways Experiment STATION,
Vicksburg, MS, USA