



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

工學碩士 學位論文

수로 특성을 갖는 감조하천의
퇴적환경 수치시뮬레이션

Numerical Analysis of Sedimentation Environment
in a Tidal River with Waterway

The seal of Korea Maritime & Ocean University is a circular emblem. It features a central stylized 'M' shape above a wave-like base. The text 'KOREA MARITIME & OCEAN UNIVERSITY' is written in a circular path around the top. Below the wave, the year '1945' is inscribed. The Korean text '한국해양대학교' is written along the bottom inner edge of the seal.

指導教授 李重雨

2020年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

李容勳

本 論文을 宋炫雨의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 김 태 형 (印)

委 員 工學博士 오 재 흥 (印)

委 員 工學博士 이 중 우 (印)

2019年 12月

韓國海洋大學校 大學院

目 次

	Page
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	vi
1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 연구 방법	4
2. 현장조사 및 대상해역의 특성	6
2.1 아산만의 지형조건	6
2.2 아산만의 해양물리적 특성	9
2.2.1 조석	9
2.2.2 조류	12
2.2.3 파랑	14
2.3 유역 및 하천 현황	17
2.3.1 일반 현황	17
2.3.2 대상유역의 기하학적 특성	18
2.3.3 하천 현황	20
3. 모델의 구성	23
3.1 해수유동 모델	23
3.1.1 지배 방정식	23
3.1.2 운동학적 경계조건	27
3.1.3 해저 경계조건	27

3.1.4	수심평균 흐름	27
3.1.5	표면 경계조건	28
3.1.6	개방 경계조건	31
3.1.7	수치해석 기법	31
3.2	퇴적물이동 모델	34
3.2.1	부유사 이송 방정식	34
3.2.2	부유사량	39
3.2.3	소류사량	41
4.	수치시뮬레이션	43
4.1	해수유동 실험	43
4.1.1	실험내용	43
4.1.2	모형 수립	44
4.1.3	모형 검증	49
4.1.4	시뮬레이션 결과	51
4.2	퇴적물이동 실험	61
4.2.1	실험내용	61
4.2.2	모형수립	62
4.2.3	모형검증	68
4.2.4	시뮬레이션 결과	68
5.	결론 및 제언	75
5.1	결론	75
5.2	제언	77
	참고문헌	78

LIST OF TABLES

Table 2.1 Performance of tidal bench mark of the target area	12
Table 2.2 Overview of continuous tidal current	13
Table 2.3 Overview of wave observation	15
Table 2.4 Wave coefficients	16
Table 2.5 Waves-specific significant exposure, rate of appearance	17
Table 2.6 Wave period(T_p), prevalence(W_1 , winter)	17
Table 2.7 Geometric characteristics of target catchment basin map	21
Table 2.8 River status	21
Table 4.1 Overview of hydrodynamic simulation	44
Table 4.2 Freshwater inflow condition (m^3/s)	45
Table 4.3 Information of river boundary on the Huff quartile method	48
Table 4.4 Observational data used to verify hydrodynamic model	49
Table 4.5 Overview of sediment transport simulation	62
Table 4.6 River boundary condition	63
Table 4.7 Suspended solid condition(mg/L)	66
Table 4.8 Summary of sediment characteristics	67
Table 4.9 Sedimentation rate verification (cm/yr)	68

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 General introduction of Aqua-velvet project	2
Fig. 1.2 Schematic flow of research	5
Fig. 2.1 Location of study site	8
Fig. 2.2 View of Asan lake and water gates	9
Fig. 2.3 Tidal observation station map	10
Fig. 2.4 Tidal levels of target area	11
Fig. 2.5 Geological map for the study area	19
Fig. 2.6 River basin	20
Fig. 2.7 River condition near study site	22
Fig. 3.1 Definition of water level(ζ), depth(h) and total depth(H)	24
Fig. 3.2 Definition sketch of grid system to North-East orientation	24
Fig. 3.3 Staggered grid system of model	33
Fig. 4.1 Simulation area and bathymetric chart	46
Fig. 4.2 Simulation grid system	46
Fig. 4.3 Bathymetric chart of study area	47
Fig. 4.4 Grid system of study area	47
Fig. 4.5 River basin composition	48
Fig. 4.6 Observation data location	49
Fig. 4.7 Tide curve(T4)	50
Fig. 4.8 Tidal current curve(PC2)	50
Fig. 4.9 Max. flood and ebb current in ordinary times	53
Fig. 4.10 Max. flood and ebb current of the study area in ordinary times	54
Fig. 4.11 Max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in ordinary times	54
Fig. 4.12 Change of max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in ordinary times	56
Fig. 4.13 Max. flood and ebb current in flood times	57

Fig. 4.14 Max. flood and ebb current of the study area in flood times ... 58

Fig. 4.15 Max. flood and ebb current of the study area
 after development of aqua-velvet in flood times 59

Fig. 4.16 Change of max. flood and ebb current of the study area
 after development of aqua-velvet in flood times 60

Fig. 4.17 Initial concentration of suspended solid 65

Fig. 4.18 Annual sediment rate 70

Fig. 4.19 Sediment rate after 4 years of construction 71

Fig. 4.20 Sediment rate after 1 year of development 72

Fig. 4.21 Sediment rate after 5 years of development 73

Fig. 4.22 Sediment rate after 10 years of development 74



Numerical Analysis of Sedimentation Environment in a Tidal River with Waterway

YongHoon Lee

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

Abstract

The drainage channel located inside Asan Bay area has the characteristics of a man-made tidal stream created by the port construction. These artificially established waterways exhibit extreme characteristics, such as sedimentation or erosion, due to the large and simplified flow rates compared to ordinary streams. Therefore, in order to identify the current status of the sedimentary environment, the influences of tide, wave, and streams acting as external conditions of the sedimentary environment were analyzed in this study. The current state of flow and sedimentary environment was estimated numerically.

As a result of the simulation, it has been confirmed that the ebb currents have weakened in the narrow waterway during normal period, while the ebb currents have been reinforced during the flooding period. The effects of the flow rate excluded from the stream during the flooding period are outstanding. It was also shown that erosion is dominant in the narrow waterways and curves, while in other waterways, deposition is dominant. Based on this, long-term modeling was performed for the next 1, 5 and 10 years, and as a result, it is seemed that the sedimentary environment of the drainage is kept

in equilibrium.

However, it is deemed necessary to analyze and make correction to the results, because the most of the drainage channels are high in the air exposure time, resulting in solidification of the ground, therefore, it does not follow the long-term simulation result.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

우리나라의 서해와 남해는 조석간만의 차가 크기 때문에 서해 및 남해로 유입하는 하천은 유로가 길고 유역면적이 넓으며 유량이 많은 반면, 하류에서는 조류작용에 영향을 받는 감소하천의 특성을 나타내는 경우가 많다. 감소하천의 하구역 부근에서는 조류에 의한 퇴적작용으로 갯벌이 형성되기도 한다. 특히, 감소하천에서는 침식으로 자갈, 모래, 점토 등이 하류로 이동되다가 바다를 접하게 되면 유속이 떨어져 무거운 것부터 바닥에 가라앉게 되지만 점토 등 세립질 성분은 밀물, 썰물에 따라 해안가 또는 폭넓은 수로에서 전진과 후퇴를 반복하다 특정지역에 퇴적되면서 점토질 층의 규모가 커져 갯벌로 변화하게 된다. 최근 갯벌을 인공적으로 매립하여 간척지 개발이 진행되면서 갯벌보존과 개발이 첨예하게 대립되는 경우도 늘어나고 있는 실정이다. 본 연구대상지는 아산만 최내측에 위치하고 평택·당진항 개발로 인하여 인위적으로 조성된 항만 배수로로, 지속적인 퇴적과 무분별하게 조성·시공되어 있는 호안 및 석축으로 인한 배수불능과 오염물 퇴적 등의 문제가 있는 지역이다.

아산만은 조석간만의 차이가 큰 대조차 해역으로 조석에 의한 영향이 탁월하고 세립질 퇴적물에 의한 침·퇴적영향이 큰 곳이다. 특히, 연구대상지는 평택·당진항 개발로 인하여 인위적으로 조성된 배수로로, 육상으로부터의 담수유입량에 따른 계절별 영향이 크고 얕은 수심으로 인하여 파랑의 영향도 동시에 받는 곳이다 (아산시, 1998; 평택시, 2014).

따라서, 본 연구에서는 연구대상지의 퇴적물 이동에 관여하는 해양외력조건인 조석, 조류, 파랑, 담수유입량에 대한 자료를 수집·분석하고 (경기도, 2009; 하천관리정보시스템, 2014), 퇴적물특성치인 점착성 및 비점착성 퇴적물에 대한

인자들에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 연구의 과정에서 수행하게 되는 해양의 퇴적물 이동에 관여하는 모든 인자에 대한 분석 결과는 향후 연구의 충분한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 대상 구간을 평택항 문화·관광 클러스터로 조성하기 위한 ‘아쿠아벨벳 사업’(평택시, 2017)이 현재 평택시 주관으로 수행되고 있으며, 수변테마파크, 산책로, 공원, 오토캠핑장, 관광휴양레저 및 체육시설, 문화예술공연 및 전시, 갯벌체험 등 다양한 공간으로 이루어져 있다. 해당 사업은 본 연구 구간과 공간적·내용적 중복성이 높은 사업으로 본 연구와 연계하여 장기적인 퇴적물 이동에 의한 해저지형변화에 대한 검토를 수치모델로 수행하고자 한다.



Fig. 1.1 General introduction of Aqua-velvet project

1.2 연구목적

아산만 지역은 조차가 최대 9m 이상으로 Hayes(1979)의 분류에 의하면 대조차 환경에 해당한다. 파랑 작용과 더불어 이러한 강한 조류는 필연적으로 해저면 퇴적물의 침식 및 퇴적에 큰 영향을 미친다. 특히, 아산만은 조류의 이동에 의해 크고 작은 사질 및 니질 퇴적체가 잘 발달하고 있으며, 조류에 의해 침식, 이동, 퇴적을 반복하고 있다. 특히, 대조기에 강한 조류속에 의해서 재부유된 퇴적물이 아산만 내측으로 유입된다. 또한, 아산만 지역은 심해파의 영향은 미미하고 풍파의 영향이 큰 해역이고 풍파가 충분히 발달할 수 있는 취송영역에 제한이 있어 그 영향은 미미하지만, 장기적인 관점에서 파랑의 잉여응력에 의한 퇴적환경 변화는 클 것으로 예상됨으로 관련 연구가 필요한 실정이다 (평택시, 2014; 평택지방해양수산청, 2007, 2015a, 2015b).

해당 지역의 지리적 특성을 고려하여 퇴적물의 이동에 관여하는 해양외력조건인 조석, 조류, 파랑, 담수유입량에 대한 자료를 수집하고, 이를 근거하여 해수유동 실험을 수행하여 현황을 재현하고, 이후 퇴적물이동 실험의 외력조건으로 제공하게 된다.

해수유동 실험 이후 수행되는 퇴적물이동 실험은 대상 해역의 퇴적물 이동에 영향을 미치는 조석·조류, 파랑, 하천 등의 외력조건에 따른 퇴적특성치를 반영하여 퇴적환경 변화 양상을 분석 및 예측하고, 장기적인 퇴적물이동 양상을 파악하는 데 목적이 있다. 아산만 내에서의 조석 및 조류 특성과 퇴적환경 특성은 평택시(2014)가 아산만 조력발전소 건립에 따른 환경 및 재해 연구에서 파악할 수 있으나 항만개발에 따른 배후역의 좁은 수로에서 퇴적환경에 대해서는 제외하였다.

1.3 연구방법

본 연구에서는 Fig. 1.2와 같이 총 5가지 단계의 과정을 거쳐 수행하고자 한다. 먼저 연구의 전반적인 배경을 소개한 후, 연구대상지에 대한 입지 및 해양 물리 현황 등을 조사·파악하고, 이를 근거하여 이후 수행될 수치시물레이션에서 입력 및 검증자료로 활용한다.

다음 과정인 수치시물레이션에서는 해수유동 및 퇴적물이동 실험을 수행하여, 연구대상지의 해수유동과 퇴적물이동에 관여하는 외력조건을 조사·분석하고자 한다. 또한, 수치시물레이션을 통하여 연구대상지의 해수유동 및 퇴적물이동 양상을 해석하고자 한다. 따라서, 해수유동과 퇴적물 이동에 관한 지배방정식과 모델 구성에 필요한 필수자료의 정리와 주요 항목에 대해 정리한다.

마지막 단계에는 수치시물레이션을 수행하고 그 결과를 연구대상지의 장기적인 퇴적물이동에 관여하는 외력조건과 연계하여 요약정리한 후 결론을 도출하고, 연구과정에서 부족한 사항 또는 제안 사항 등을 제시하고자 한다.

연구방법 중 수치시물레이션 부분을 세부적으로 설명하면 다음과 같다.

먼저 해수유동 실험에서는 Deltares(2019)의 Delft3D(Flow/Mor module) 모델을 사용하여 사업지역의 해수유동 현황 재현을 하고 퇴적물이동 실험을 위한 외력조건을 제공하고자 한다. 이때 조석조건은 주요 4대 분조(M2, S2, K1, O1)의 조석 조화상수를 사용하여 개방경계 격자별로 실험기간의 실시간 조위를 채 구성하고 이를 입력하게되며, 모델 영역내의 조석 및 조류 관측치를 사용한 보정 과정을 통하여 개방 경계 조석조건을 반영한다. 또한 수로의 유로 변화에 따른 흐름을 적절히 재현할 수 있도록 곡면격자체계를 채용하여 재현성을 향상시키고자 한다.

퇴적물이동 실험에서도 동일한 Delft3D(Flow/Mor module) 모델을 사용하여 실험을 진행하고, 기존 연구자료를 활용하여 퇴적특성치를 산정하게 된다. 하천

유량은 육상으로부터 유입되는 퇴적물을 고려하기 위해서 적용하게 되는데 이를 위해 인근 방조제의 방류량 통계자료를 이용하여 평상시와 하계 홍수시의 방류조건을 파악하기로 하였다.

여기서 아산호는 1983~2016년, 삼교호는 1986~2016년의 방류량 자료를 분석하고, 부유사 초기 및 경계농도에서는 초기 및 외해 경계의 부유퇴적물 농도와 아산, 삼교방조제의 부유퇴적물 유입농도는 기존 부유사 관측 자료를 이용하여 공간 부유사농도를 입력하기로 하였다.

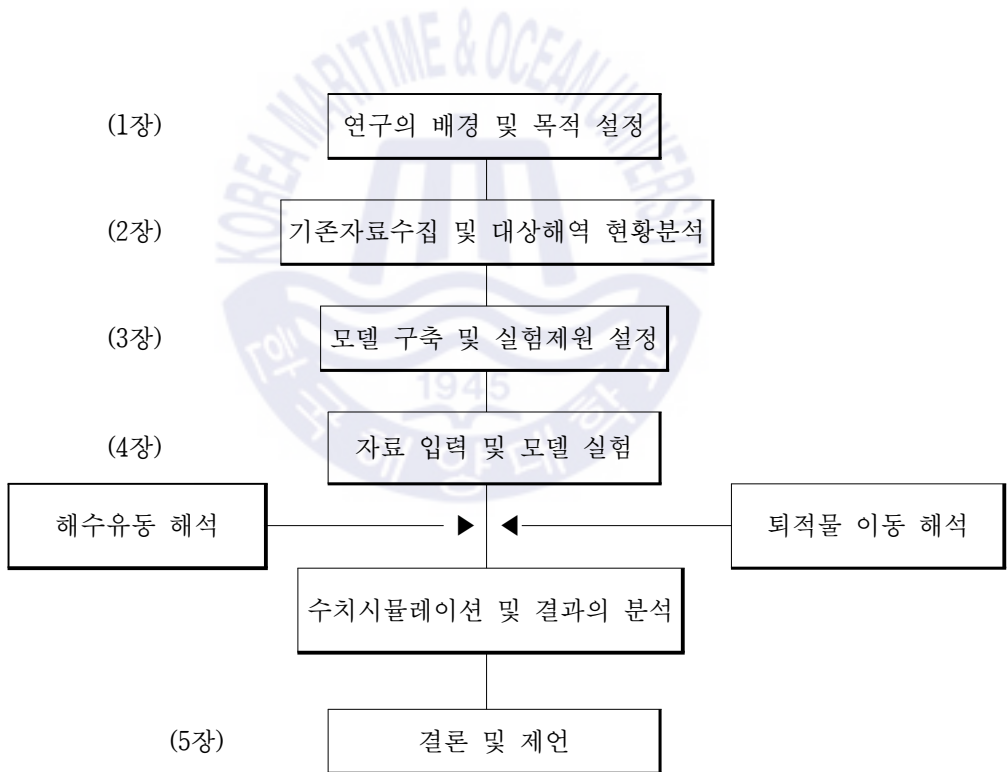


Fig. 1.2 Schematic flow of research

제 2 장 현장조사 및 대상해역의 특성

2.1 아산만의 지형조건

아산만은 태풍, 해일 등의 영향을 받지 않는 천혜의 입지여건을 갖추고 있고, 중국과 근접해 있어 대중국 교역기지 항만으로 최적의 위치를 점하고 있다. 우리나라 경제권의 절반 이상을 차지하고 있는 서울, 인천, 수원, 성남, 천안, 충주, 청주, 대전 등 대도시가 반경 80km 이내에 위치하여 서해안, 경부, 동서 고속도로, 국도 6개의 노선(1, 8, 39, 43, 45, 82호선) 등이 통과하는 교통 요충지에 위치하여 평택항 이용 시 산업 및 소비중심지인 수도권 및 중부권으로 신속한 내륙운송이 가능하여 시간과 물류비를 절감할 수 있다.

수도권에 집중된 산업, 경제, SOC, 정보 인프라 등과의 연계활용이 가능하고 "3대 국책항만", "5대 국책사업"으로 책정되어 있으며, LNG 인수기지, LPG 분배기지, 화력발전소, 산업단지, 종합물류단지 등과의 산업 벨트화가 형성되어 있다. 아산만 인근에는 포승국가산업단지, 석문국가산업단지, 아산국가산업단지, 황해경제자유구역 등이 위치해 있으며, 산업단지 전용도로로 쓰이는 서해안 산업관광도로(38호선)가 위치해 있고 서해안 고속도로와 연계가 가능하며, 서해안 고속도로를 이용하여 수도권 및 인천국제공항까지 1시간 이내의 접근 거리에 있다. 최근 급부상하고 있는 동북아(중국, 한국, 일본, 러시아) 중심에 위치하여 세계물류 및 국제종합무역의 중심항만으로 발전할 수 있는 무한한 잠재력을 보유하고 있다.

아산만 내부에 위치한 평택·당진항은 수도권 및 중부권의 대중국 화물처리의 거점항만으로 개발하기 위하여 항만물동량의 안정적 증가 전망과 선박의 대형화 추세에 대비하여 항로의 확장, 증심 및 배후 수송망 확충으로 항만의 이용여건을 개선하고 있다. 특히, 항만이 아산만 내부에 위치하고 있어서 천혜의 항만입지여건을 갖추고 있으나 아산만으로 유입하는 안성천, 발안천 및 삽교천으

로부터 흐름환경의 변화가 심한 지역에 속한다. 외해로부터 아산만에 이르는 수로는 인천항 접근수로 중 하나인 동수로 중간에 위치한 풍도 북방을 거쳐 동으로 약 15km, 그리고 다시 남동방향으로 약 25km 들어가며 폭 0.5~4km, 수심 10~40m를 유지하고 있다.

연구대상으로 선택한 감조하천의 수로는 평택·당진항의 내항확장에 따른 준설토 투기장을 항만시설용부지와 항만배후단지로 전환함에 따라 투기장의 유출수처리와 기존해안선에서의 우수처리를 위해 인위적으로 조성된 배수로로 조성, 하천, 파랑 등의 영향을 동시에 받고 있는 곳이다. 이러한 인위적으로 조성된 배수로는 일반 하천에 비하여 유속이 크고 단순화된 유로로 인하여 퇴적 또는 침식우세 등의 극단적인 성격이 보인다.

배수로 주변 바다측은 평택·당진항 내항과 항만배후단지가 조성 중이며, 육지측은 황해경제자유구역 조성을 위한 공사가 진행 중이고, 배수로 따라 뺨은 도로를 사이에 두고 상가와 주택, 그리고 산업시설 등이 위치하고 있다. 만의 남측에는 삽교호, 동측에는 아산호, 그리고 만 입구의 북측에는 남양호가 각각 위치하고 있고, 방조제에 의하여 아산만과 차단되어 있으며 배수갑문을 통하여 담수 유출이 이루어진다.

인근 토양은 하천의 범람으로 형성된 범람원, 하구에서 발달된 퇴적토, 하천 침식에 의한 하안단구와 해성충적토로 구분되는데 일반적인 형태는 진흙으로 크고 작은 모래와 찰흙으로 구성되어 있어 벼농사에 적합하다. 또한 야산지역은 보리 및 고등채소에 적합하며, 구릉지역은 개발로 인해 낙농업 및 과수농업이 발달해 있다.



(삼교호 배수갑문 전경)



(아산호-평택호 전경)



(평택호 배수갑문 전경)



(포승현덕지구 연안수로출구 전경)

Fig. 2.2 View of Asan lake and water gates

2.2 아산만의 해양물리적 특성

2.2.1 조석

평택·당진항의 조위는 노미각 검조소(평택LNG인수기지항 들핀)에서의 관측 조석을 사용하고 있다. 연구대상지역은 아산만 내측에 위치하며 항만구역과 해안이 접하는 배수로이므로 가장 최근 고시인 「제3차 전국무역항 기본계획 수정 계획(2015)」의 평택동부두, 평택서부두 및 삼교호의 조위를 비교하였다.



Fig. 2.3 Tide observation station map

「아산항 2단계 개발사업 추가과업 실시설계(1998)」, 「평택·아산항 외곽호안 2공구 대안설계(2003)」, 「평택·당진항 항만배후단지 부지조성사업(기반시설) 기본 및 실시설계(2007)」, 「평택·당진항 항만배후단지(2-1단계) 조성사업 기본 및 실시설계(2015)」시 적용조위 조사결과 평택·당진항 기준조위인 노미각 검조소 관측조석을 적용한 것으로 조사되었다.

‘제3차 전국무역항 기본계획(해양수산부, 2011)’에서 적용조위 또한 노미각 관측결과를 적용하였으며, 이후 ‘제3차 전국무역항 기본계획 수정계획(해양수산부, 2015)’시 노미각은 서부두로 명칭변경 후 동부두 조위를 추가 적용한 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 과업대상지와 관련된 용역보고서에 적용하고, 전국무역항 기본계획 수립시 기준조위인 서부두 기본수준점을 채택하여, 조석특성을 파악하였다.

아래 표와 같이 삼교호의 평균해면은 동부두, 서부두보다 높으며 동부두와 서부두는 인접하여 평균해면의 차이가 크게 없음을 확인 할 수 있다. 세 측정구간에서의 대조차 역시 삼교호에서 가장 큰 차이를 보이고 있는데 아산만 가장 끝자락에 위치하여 삼교천 방조제, 아산만 방조제의 영향을 삼교호의 경우 아산만 안쪽에 위치하여 가장 큰 대조차를 나타내고 있다. 평균고조간격의 경우에는 서부두에서 가장 큰 값을 나타내는 것으로 측정되었다.

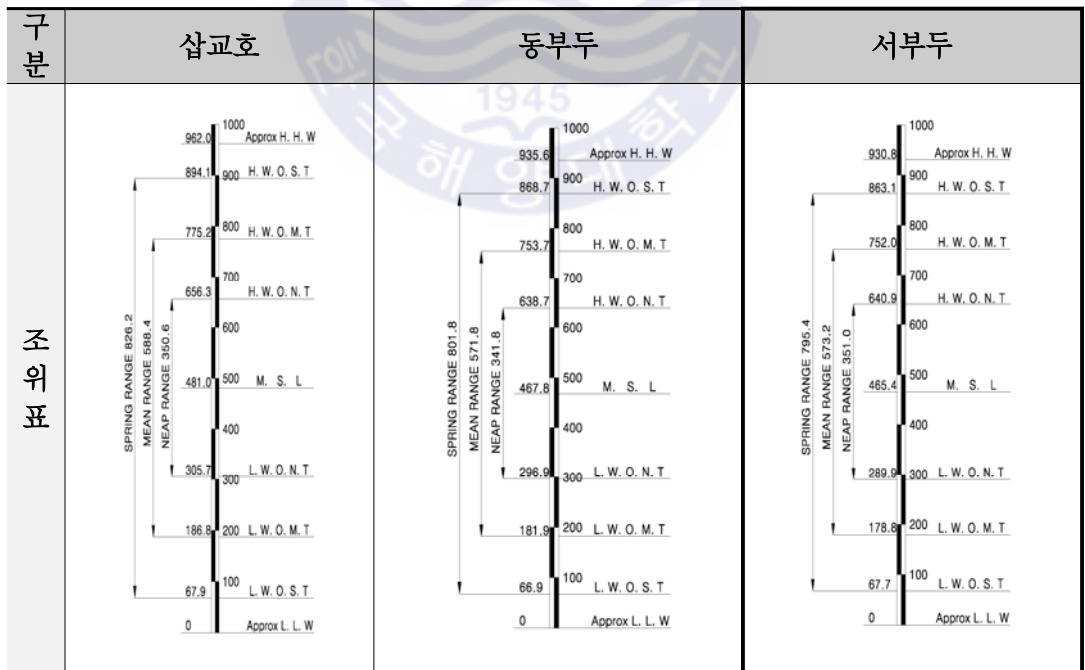


Fig. 2.4 Tidal levels of target area

Table 2.1 Performance of tidal bench mark of the target area

구 분			삽교호		동부두		서부두	
			반조차 (cm)	지각	반조차 (cm)	지각	반조차 (cm)	지각
조 화 상 수	M2	주태음반일주조	294.2	120.3	285.9	118.4	286.6	126.5
	S2	주태양반일주조	118.9	168.7	115.0	166.4	111.1	175.4
	K1	일월합성일주조	39.4	293.2	38.8	292.9	39.1	294.4
	O1	주태음일주조	28.5	264.9	28.1	264.2	28.6	266.1
비 조 화 상 수	평균고조간격	(M.H.W.T.)	4h 08m		4h 04m		4h 21m	
	약최고고조위	(Approx. H.H.W.)	DL.(+) 962.0		DL.(+) 935.6		DL.(+) 930.8	
	대조평균고조위	(H.W.O.S.T.)	DL.(+) 894.1		DL.(+) 868.7		DL.(+) 863.1	
	평균고조위	(H.W.O.M.T.)	DL.(+) 775.2		DL.(+) 753.7		DL.(+) 752.0	
	소조평균고조위	(H.W.O.N.T.)	DL.(+) 656.3		DL.(+) 638.7		DL.(+) 640.9	
	평균해면	(M. S. L.)	DL.(+) 481.0		DL.(+) 467.8		DL.(+) 465.4	
	소조평균저조위	(L.W.O.N.T.)	DL.(+) 305.7		DL.(+) 296.9		DL.(+) 289.9	
	평균저조위	(L.W.O.M.T.)	DL.(+) 186.8		DL.(+) 181.9		DL.(+) 178.8	
	대조평균저조위	(L.W.O.S.T.)	DL.(+) 67.9		DL.(+) 66.9		DL.(+) 67.7	
	약최저저조위	(Approx. L.L.W.)	DL.(±) 0.0		DL.(±) 0.0		DL.(±) 0.0	
	대 조 차	(Spring Range)	826.2		801.8		795.4	
	평균조차	(Mean Range)	588.4		571.8		573.2	
	소 조 차	(Neap Range)	350.6		341.8		351.0	

2.2.2 조류

「평택·당진항 수리현상조사용역(2015b)」의 관측결과를 검토·분석하여 조류 특성을 파악하였다. 평택·당진항의 단계별 개발에 따른 조류속의 변화를 파악하기 위하여 노미각 남측(PC1), 행담도 동측(PC2), 내항 입구(PC3)의 3개 측정점에서 2014년 동계 및 2015년 하계 약 15일간 연속 층별 조류 관측을 실시한 자료를 분석한 결과는 아래와 같다.

Table 2.2 Overview of continuous tidal current

측 점	위경도	관측기간		수 심	관측층
		동 계	하 계		
PC1 (노미각 남측)	36-59-05 N 126-47-09 E	○	○	17.2	전층 (1m 간격)
PC2 (행담도 동측)	36-56-44 N 126-49-14 E	○	○	13.0	
PC3 (내항 입구)	36-57-27 N 126-50-16 E	○	○	14.1	

주) 동계 : 2014년 12월 1일~2014년 12월 15일, 하계 : 2015년 7월 3일~2015년 7월 17일

1) 2014년 동계

노미각 남측(PC1)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 52.2, 53.2, 54.1%, 낙조류의 출현율은 각각 47.8, 46.8, 45.9%로 창조류의 출현율이 높다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 111, 109, 87cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 73, 73, 70cm/s로 창조류가 낙조류보다 강하다. 창조류의 평균유속은 표·중·저층에서 각각 48, 49, 43cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 34, 34, 32cm/s이다.

행담도 동측(PC2)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 50.4, 50.1, 50.7%, 낙조류의 출현율은 각각 49.6, 49.9, 49.3%로 창조류의 출현율이 높다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 113, 104, 96cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 73, 77, 74cm/s로 창조류가 낙조류보다 강하다. 창조류의 평균유속은

표·중·저층에서 각각 50, 46, 42cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 37, 38, 37cm/s이다.

내항 입구(PC3)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 40.8, 53.3, 66.1%, 낙조류의 출현율은 각각 59.2, 46.7, 33.9%로 표층에서는 낙조류의 출현율이, 중·저층에서는 창조류의 출현율이 높은 것으로 나타났다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 37, 39, 39cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 36, 35, 29cm/s이다. 창조류의 평균유속은 표·중·저층에서 각각 13, 13, 13cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 17, 13, 9cm/s이다.

주 유향은 PC1, PC2, PC3에서 대체로 창조류시 E~SSE, 낙조류시 W~NNW로 나타난다. 100cm/s 이상의 유속 출현율은 노미각 남측(PC1)의 표·중·저층에서 각각 1.0, 0.7, 0.0%이며, 행담도 동측(PC2)의 표·중·저층에서 각각 1.7, 0.5, 0.0%이다. 내항 입구(PC3)에서는 최강유속이 50cm/s 이하를 나타내는데 50cm/s 이상으로 유속 출현율이 높은 측점은 PC2 > PC1 > PC3 순으로 나타난다.

2) 2015년 하계

노미각 남측(PC1)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 56.8, 55.5, 55.4%, 낙조류의 출현율은 각각 43.2, 44.5, 44.6%로 창조류의 출현율이 높다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 111, 107, 90cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 70, 69, 64cm/s로 창조류가 낙조류보다 강하다. 창조류의 평균유속은 표·중·저층에서 각각 53, 53, 45cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 38, 37, 35cm/s이다.

행담도 동측(PC2)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 51.2, 51.5, 51.3%, 낙조류의 출현율은 각각 48.8, 48.5, 48.7%로 창조류의 출현율이 높다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 119, 113, 102cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 72, 76, 70cm/s로 창조류가 낙조류보다 강하다. 창조류의 평균유속은 표·중·저층에서 각각 58, 54, 51cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 48, 48,

39cm/s이다.

내항 입구(PC3)의 표·중·저층에서 창조류의 출현율은 각각 42.9, 53.2, 60.5%, 낙조류의 출현율은 각각 57.1, 46.8, 39.5%로 표층에서는 낙조류의 출현율이, 중·저층에서는 창조류의 출현율이 높게 나타났다. 창조류의 최강유속은 표·중·저층에서 각각 35, 34, 36cm/s이고, 낙조류의 최강유속은 38, 36, 30cm/s이다. 창조류의 평균유속은 표·중·저층에서 각각 14, 15, 14cm/s이고, 낙조류의 평균유속은 각각 18, 15, 11cm/s이다.

주 유향은 PC1, PC2, PC3에서 대체로 창조류시 ESE~SSE, 낙조류시 W~WNW로 나타난다. 100cm/s 이상의 유속 출현율은 노미각 남측(PC1)의 표·중·저층에서 각각 1.2, 0.6, 0.0%이며, 행담도 동측(PC2)의 표·중·저층에서 각각 4.4, 1.7, 0.5%의 결과를 나타냈다. 내항 입구(PC3)에서는 최강유속이 50cm/s 이하이며, 50cm/s 이상의 유속 출현율이 높은 측점은 PC2 > PC1 > PC3 순으로 나타난다.

2.2.3 파랑

연구 대상해역에 대한 파랑 검토는 현재 수행중인 「평택·당진항 수리현상조사용역(2차)」의 관측결과를 검토·분석하여 설계 기초자료로 활용하였다. 아산만 일대는 천해역에 위치하고 있으며, 외해로부터 발달한 파랑이 만내로 접근해 오면서 굴절, 회절 및 해저마찰 등에 의하여 감소하여 정온한 상태를 유지하고 있다.

Table 2.3 Overview of wave observation

관측위치	경위도	관측기간	관측기기
W1 (노미각 남측)	37° 59' 05" N 126° 47' 09" E	2014.12.1 ~ 2014.12.15 (15일)	ADCP (614.4 kHz) (WorkHorse Model)

자료 : 평택·당진항 수리현상조사 보고서(2015. 9)

평택·당진항 항로와 항내의 파랑 전파 특성을 파악하기 위해 2014년 동계(2014. 12. 1 ~ 12. 15)에 W1 정점에서 약 15일간 파랑 관측을 실시하였다. 파랑 관측은 ADCP를 설치하여 수행하였으며, 파향도 관측하였다.

1) 평균값 및 최대, 최소값

동계시 W1 정점의 유의파고(Hs) 범위는 0.11~1.74m의 범위로 나타나며, 평균값은 0.39m로 제시되었다. 첨두주기(Tp)의 범위는 2.10~6.90sec의 범위로 나타나며, 평균값은 2.89sec이다.

Table 2.4 wave coefficients

관측위치	항 목		Hs (m)	Tp (sec)	DP (°)	Hmax (m)	Tmean (sec)
동 계	W1	최고	1.74	6.90	358.00	2.85	4.80
		최저	0.11	2.10	1.00	0.18	2.30
		평균	0.39	2.89	217.44	0.63	2.97

첨두파향(Dp)의 관측기간 동안 평균값은 217.44°(SW) 방향으로 제시된다. 관측기간 동안 최대파고(Hmax)의 범위는 0.18~2.85m의 범위로 나타나며, 평균값은 0.63m이다. 평균주기(Tmean)의 범위는 2.30~4.80sec의 범위로 나타나며, 관측기간 동안의 평균은 2.97sec인 것으로 관측된다.

2) 파향별 파고·주기 출현율

동계시 W1 정점 유의파의 파향별 출현율은 주로 WSW~NW 방향에서 출현하였으며, W 파향의 경우 18.4%, WNW 파향은 18.1%로 각각 출현하였다. 유의파고의 출현율은 관측기간 동안 1.0m 이하가 93.8%로 관측되었다. 첨두주기의 출현율은 관측기간 동안 5.0sec이하에서 94.6%로 가장 많았고, 5.0~6.0sec에서 4.2%, 6.0~7.0sec에서 1.2%의 출현율로 나타났으며 관측기간에서 W 방향의 유의파고가 크고 자주 나타나며, 파랑의 주된 전파 방향에서의 주기는 5.0sec 이하로 나타났다.

Table 2.5 Waves-specific significant exposure, rate of appearance

파향 파고	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	합계
< 0.5	2.2	2.5	2.8	6.1	4.2	4.7	3.6	2.5	2.2	1.7	4.4	7.8	11.1	12	6.7	3.9	78.4
0.5~1.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.8	0.3	0.0	2.5	4.2	4.7	0.8	0.0	15.4
1.0~1.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	2.8	0.8	0.6	0.0	5.3
1.5~2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.9
2.0~2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5~3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
> 3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
합 계	2.2	2.5	3.1	7.0	4.8	5.3	3.6	2.5	3.0	2.0	4.4	11.1	18.4	18.1	8.1	3.9	100

Table 2.6 Wave period (Tp), prevalence (W1, Winter)

파향 주기	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	합계
< 0.5	2.2	2.5	3.1	6.7	4.4	5.3	3.6	2.5	3.1	1.9	4.4	11.1	15.3	16.5	8.1	3.9	94.6
0.5~1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	1.1	0.0	0.0	4.2
1.0~1.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	1.2
1.5~2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0~2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5~3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
> 3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
합 계	2.2	2.5	3.1	7.0	4.7	5.3	3.6	2.5	3.1	1.9	4.4	11.1	18.4	18.2	8.1	3.9	100

2.3 유역 및 하천 현황

2.3.1 일반 현황

한반도 중부 서해안에 위치하고 있는 평택·당진항은 행정구역상으로는 경기도 평택시와 화성시, 그리고 충청남도 아산시와 당진시의 경계에 위치하며, 항 북측이 바다와 접하고 있는 지리적 특징을 지니고 있고, 대체로 산악과 구릉이 연결된 넓은 평야지대로 이루어져 있다. 평택·당진항은 아산만 내부에 위치하고 있어 태풍, 해일 등의 영향을 받지 않는 천혜의 입지여건을 갖추고 있으며, 중국과 근접해 있어 대중국 교역기지 항만으로서 최적의 위치를 점하고 있다.

외해로부터 아산만에 이르는 수로는 인천항 접근수로 중 하나인 동수로 중간에 위치한 풍도 북방을 거쳐 동으로 약 15km, 그리고 다시 남동방향으로 약 25km 들어가며, 폭 0.5~4km, 수심 10~40m인 수로를 형성하고 있다. 아산만으로 이루어지는 수로 중앙부는 섬들과 중앙천퇴를 중심으로 북측수로와 남측수로로 분리되며, 수심은 15~30m의 분포를 나타내고 있다. 북측수로는 방도 부근 간출암 해역에서 거의 사라지고 있음. 만 입구는 폭이 약 2km인 협수로를 이루고 있으며, 내측으로 가면서 폭이 넓어짐. 입구로부터 북동측 해안을 따라 만호리까지 약 7km의 수역은 수심 10~20m인 평택·당진항 진입항로와 박지가 형성되어 있고, 외항도류제로부터 남동쪽으로 행담도까지 수심 7~12m의 수로가 형성되어 있다. 만 내측의 대부분은 저조시 노출되는 조간대로 구성되어 있으며, 조간대 사이로 좁고 얇은 수로가 아산호 및 삼교호로 연결되어 있다. 한편, 한진각으로부터 외항 도류제 서측의 영암사이에는 간출암이 산재하고 있다.

만의 남측에는 삼교호, 동측에는 아산호, 만입구 북측에는 남양호가 각각 위치하고 있는데, 이 담수호들은 방조제에 의해 아산만과 차단되어 있으며, 배수갑문을 통하여 담수 유출이 이루어진다. 각 호로 유입되는 하천의 유역면적은 아산호로 유입되는 안성천이 1,722km², 삼교호로 유입되는 삼교천이 1,650km², 남양호로 유

입되는 발안천이 61km² 이다.

서해안 인접지역에서 흔히 볼 수 있는 한반도 특유의 노년기 최후단계인 저구릉들로 이루어져 있고 아산만을 경계로 평택, 아산, 당진지역으로 구분되며 각각 독립된 지형을 이루고 있다. 평택지역은 최하 해수표면에서 최고 150m 에 준하는 기복을 보여주고 있으나 충적층지대는 해발 10m 미만이며 능부는 대개 표고 30m 정도로 낮고 완만한 구릉으로 형성되어 있다 (한국지질자원연구원, 2004).

이 지역에서 비교적 높은 지형을 이루는 현덕면 신왕리 일대는 화강암 분출지역이며 그 밖의 들출지대는 풍화에 강력한 규암, 규장암류 산출지역일 뿐이고, 이러한 낮은 구릉으로 이루어진 산계는 주능선의 구별을 할 수 없으며 전체적으로 보아 수지상의 양상으로 수계는 심한 골곡을 가지며 방사상으로 발달되어 있다.

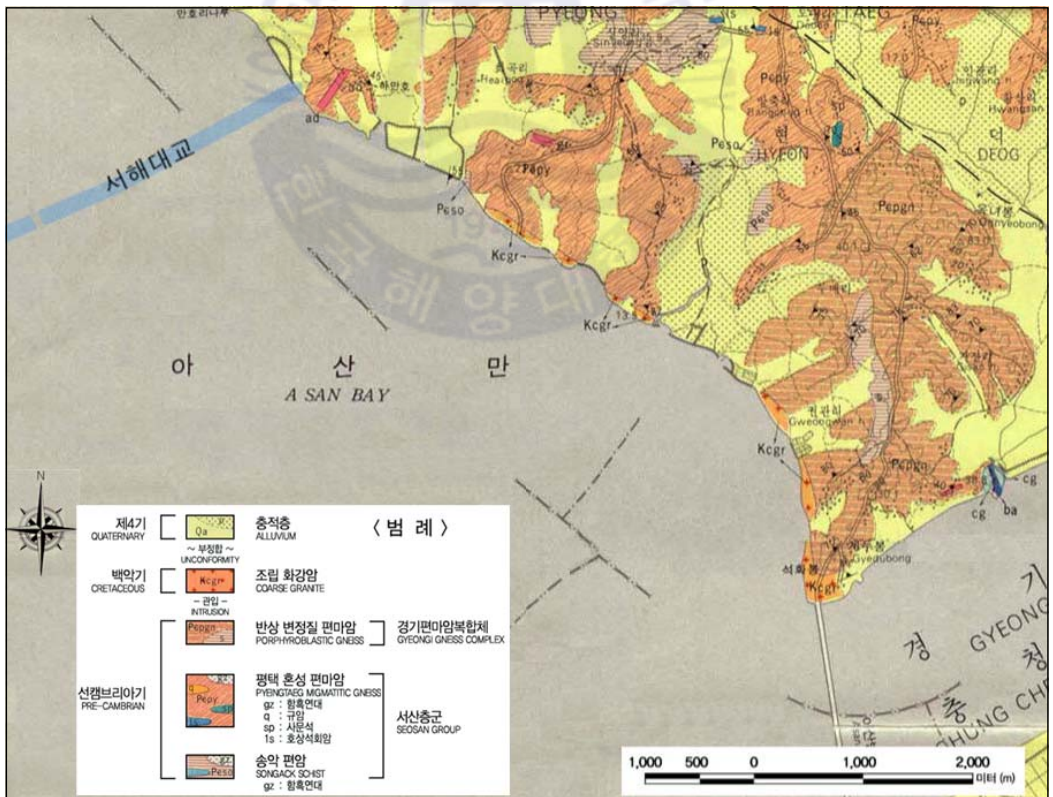


Fig. 2.5 Geological map for the study area

2.3.2 대상유역의 기하학적 특성

홍수량 유출특성을 검토하기 위하여 각 산정지점에 대한 유역면적, 유로연장, 평균 폭 등을 조사하였으며, 토지이용현황, 정밀토양형 분석을 통하여 유출모형의 매개변수 산정을 위한 기초자료를 획득하였다. 대상유역의 기하학적 특성은 다음 Fig. 2.6 및 Table 2.7과 같다.

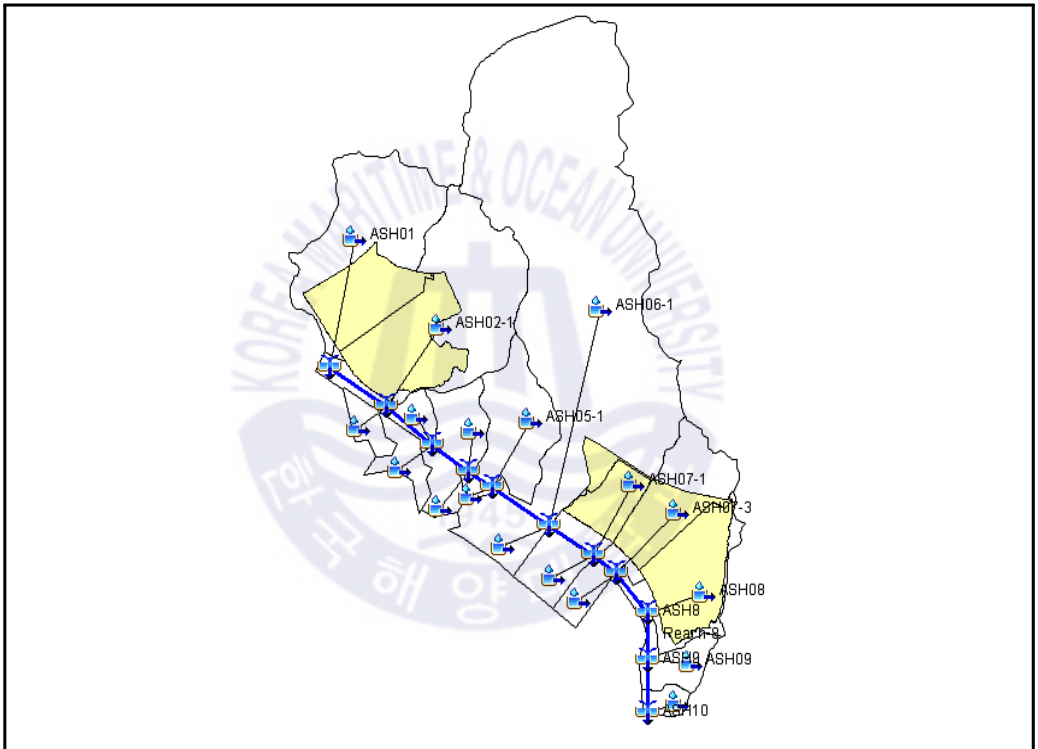


Fig. 2.6 River basin

Table 2.7 Geometric characteristics of target catchment basin map

산정지점	유역면적 A(km ²)	유로연장 L(km)	평균 폭 A/L(km)
ASH1	2.67	2.31	1.16
ASH2	6.06	2.49	1.36
ASH3	6.63	0.70	0.81
ASH4	7.47	1.16	0.72
ASH5	8.70	1.81	0.68
ASH6	18.27	6.20	1.54
ASH6-2	19.38	1.15	0.97
ASH7	20.91	1.72	0.89
ASH8	22.33	1.61	0.88
ASH9	22.78	1.02	0.44
ASH10(하구)	22.95	0.49	0.35

2.3.3 하천 현황

연구대상지 주변의 하천 및 수문현황을 파악하기 위하여 현장 및 문헌조사를 실시한 결과, 사업대상지 내에 법정하천은 존재하지 않으며, 사업대상지 인근에 지방하천인 방림천(남양천 등 5개 하천에 포함)이 있는 것으로 조사되었다.

Table 2.8 River status

하천명	수 계			시 점	종 점	유로연장 (km)	유역면적 (km ²)
	본 류	1지류	2지류				
방림천	방림천			평택시 포승읍 방림리	평택시 현덕면 해안	4.09	8.80

자료: 남양천 등 5개 하천기본계획(2009.06, 경기도)



자료 : 한국하천일람(시도별, 2014, 하천관리정보시스템 www.river.go.kr)

Fig. 2.7 River condition near study site

제 3 장 모델의 구성

3.1 해수유동 모델

본 연구에서 적용하는 해수유동모델로 Delft3D모형을 선택하였으며 이는 흐름, 토사이송, 파랑, 수질, 바닥지형 변화와 생태환경의 모의를 수행하는 3차원 수치모형으로서 네덜란드의 Deltares(구.WL|Delft Hydraulics, 2019)에서 개발하였다. 본 모형의 패키지는 상호 접속할 수 있는 다수의 모듈로 되어 있으며, 수질, 파랑과 지형변화와 같은 모듈에 대한 동수역학적 기본 자료를 제공한다. Flow/Mor 모듈은 연속방정식과 운동방정식, 열·염 보존 방정식, 퇴적물질을 포함한 물질보존방정식으로 구성되어 있다.

3.1.1 지배 방정식

Delft3D-Flow는 천수화와 Boussinesq 가정하에서 비압축성유체에 대한 Navier Stokes 방정식에서 출발한다. 연직방향의 운동량방정식에서 연직방향의 가속도를 무시하면, 정수압 방정식이 되며, 3차원 모델에서는 연직방향의 유속성분을 연속방정식으로부터 계산한다. 적절한 초기조건과 경계조건을 사용하여 유한차분 계산격자상에서 편미분방정식들의 해를 구하게 되는데 Delft3D-Flow는 다음과 같은 수평방향의 좌표계를 이용할 수 있다.

모델영역의 수심이 수평방향 길이에 비해 상당히 작으므로 σ (직교)좌표계를 적용하였고, 천해역 가정(shallow water assumption)이 타당성을 가지며 수심방향의 운동량방정식은 정수압(hydrostatic pressure)의 관계로 간략화된다.

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (3.1)$$

여기서, z : 실제 연직좌표계

$H (=d+\zeta)$: 총 수심

d : 수심, ζ : 기준면($z=0$)상의 자유수면 변위

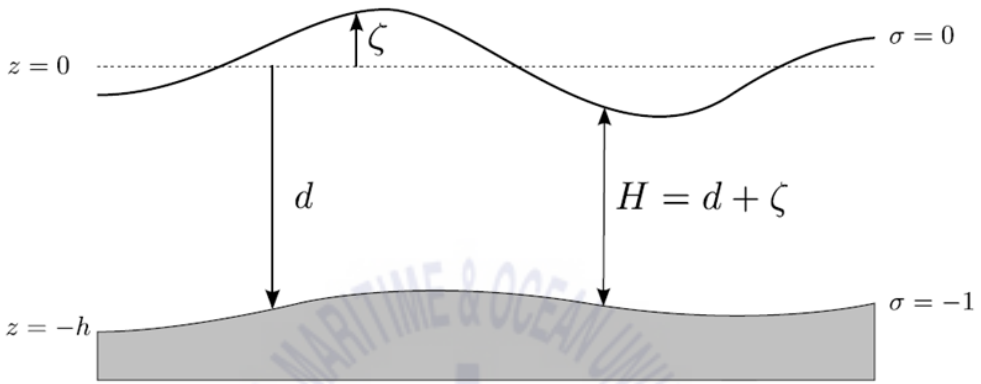


Fig. 3.1 Definition of water level (ζ), depth (h) and total depth (H)

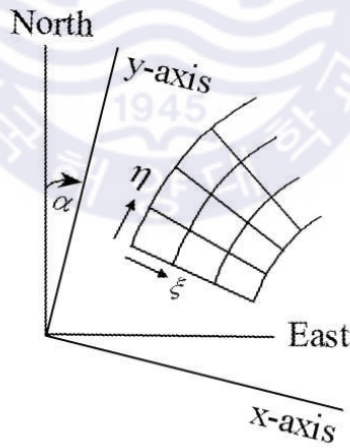


Fig. 3.2 Definition sketch of grid system to North-East orientation

σ 좌표계에서 수심평균 연속방정식과 수평방향 ξ , η 방향의 운동량방정식은 아래 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} \\ + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = (d + \zeta) Q \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서, $\sqrt{G_{\xi\xi}}, \sqrt{G_{\eta\eta}}$: $\sqrt{G_{\xi\xi}} = R \cos \phi$, $\sqrt{G_{\eta\eta}} = R$ 는 각각 곡선좌표계를 직교좌표계로 변환하기 위한 계수

ϕ : 위도

R : 지구의 반경

U, V : 수평방향의 수심평균유속 $U, V = \frac{1}{(d + \zeta)} \int_d^\zeta (u, v) dz$

Q : 강수 P 및 증발 E 로 인한 물의 유출, 유입의 단위 면적당 수량

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{oin} - q_{out}) d\sigma$$

q_{in}, q_{out} : 단위 체적당 국부적 발생 유입량 및 용출량

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + S_\xi \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u = \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + S_\eta \end{aligned} \quad (3.4)$$

여기서, f : Coriolis 상수, ν_V : 수직와동점성계수

S_ξ, S_η : ξ, η 방향의 운동량 source나 sink로서 유체로 인한 외력항

또한, u 와 v 는 각각 수평방향인 ξ , η 방향의 유속을 \bar{w} 는 연직 ζ 방향의 이동 σ 면에 대한 상대유속으로 연속방정식으로부터 계산되며, 고정좌표계에서의 실제 수심방향의 유속 w 는 아래 식으로부터 얻어진다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (3.5)$$

$$w = \bar{w} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (3.6)$$

σ 좌표계에서 수심평균 연속방정식으로 정리하면

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (3.7)$$

ξ 와 η 방향에서의 운동량 방정식은 아래식과 같다. 정수압항 외에는 밀도변화를 무시한다(Boussinesq 가정).

σ 좌표계에서 연직방향의 속도성분 w 는 연속방정식으로 계산한다. 강수와 증발의 영향은 표면에서 계산되며, 연직 속도성분 w 는 σ 면에서 정의된다. w 는 이동 σ 평면에 대한 연직 속도성분이며, 상승 또는 하강운동에 따른 속도로 해석될 수도 있다.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\
& - \frac{V^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fV = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi \\
& + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + M_\xi
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial U}{\partial \sigma} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \xi} \\
& - \frac{U^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fU = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta \\
& + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + M_\eta
\end{aligned} \tag{3.9}$$

이때 P_ξ, P_η 는 압력경사, F_ξ, F_η 는 난류운동량플럭스를 나타내며, M_ξ, M_η 는 외부로부터의 운동량 생성과 소멸항 (수리구조물, 물의 유입과 유출, 파랑 응력 등에 의한 외력)을 나타낸다.

3.1.2 운동학적 경계조건

σ 좌표계에서 자유표면 ($\sigma=0, z=\zeta$)과 바닥 ($\sigma=-1, z=-d$)은 σ 좌표평면에 있다. w 는 σ 평면과 관련된 연직방향 유속이고, 표면과 바닥의 불침투성은 다음에 규정된 운동학적 조건으로 반영된다.

$$w|_{\sigma=-1} = 0, \quad |\omega_{\sigma=0} = 0w|_{z=-d} = 0, \quad w|_{z=\zeta} = 0 \tag{3.10}$$

3.1.3 해저 경계조건

해저에서 운동량 방정식을 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{v_V \partial u}{H \partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho_0} \tau_{b\xi} \qquad \frac{v_V \partial v}{H \partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho_0} \tau_{b\eta} \quad (3.11)$$

여기서 $\tau_{b\xi}$ 와 $\tau_{b\eta}$ 는 각각 ξ 와 η 방향의 바닥에서의 응력의 구성요소로 바닥에서의 응력은 흐름과 파도가 결합된 함수이고, 단면에서 흐름만으로 인한 값을 피하기 위해 제한을 두었다.

3.1.4 수심평균 흐름

$|\vec{U}|$ 는 수심평균한 수평방향 속도의 절대값(크기)을 나타낸다.

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho_0 g \vec{U} |\vec{U}|}{C_{2D}^2} \quad (3.12)$$

3.1.5 표면 경계조건

개방 경계는 가상의 “water-water” 경계이고, 제한된 계산 영역을 얻고 계산을 요구하는 노력을 줄이기 위해 도입되었다. 사실상 흐름은 이러한 경계들을 방해받지 않고 넘나들 수 있다. 개방 경계의 수위에서 일반적인 속도의 구성요소나 조합은 해결할 수 있는 수학적 초기 경계값 문제를 얻기 위해 규정되어야 한다. 유입 경계에서 접선 속도의 구성요소 또한 지정되어야 한다. 현재의 실행에서 접선 속도 성분을 0으로 놓고 흐름은 개방 경계에서의 일반적 흐름으로 가정한다. 경계 조건에서 필요한 데이터는 측정값과 조석표 및 전지구 조석모형을 통해서 얻을 수 있다. 만약 개방 경계에서 들어오는 파랑을 정확하게 규정하지 않으면 경계에서 나가는 파랑은 지역으로의 교란의 전파를 초래한다.

경계를 따라서 zero flow를 가정하기 위해 zero order 경계조건은 Riemann

불변식이라 불리는 일반적인 개방 경계에서의 선형 1차 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$R = U \pm 2\sqrt{gH} \quad (3.13)$$

두 개의 Riemann 불변식은 $R = U \pm \sqrt{gH}$ 의 전파속도로 반대방향으로 움직이는 파동이다. 그 결과는 전파 방향에 종속되며 개방 경계에서 들어오는 파도는 지정되어야 한다. 왼쪽 경계에서 긍정적 신호를 제한했고, 선형화된 Riemann 불변식은 다음 식(3.14)와 같다.

$$U + 2\sqrt{gH} = U + 2\sqrt{g(d+\zeta)} \approx U + 2\sqrt{gd} + \zeta\sqrt{\frac{g}{d}}, \frac{|\zeta|}{d} \ll 1 \quad (3.14)$$

경계 조건은 다음과 같이 $f(t) = U + \zeta\sqrt{g/d}$ 을 적용하였고, $2\sqrt{gd}$ 항은 계산 영역에서 추가된 값과 알려진 시계 심도로부터 계산할 수 있다. 기준면은 평균 수면이 0인 곳에서 선택한 것으로 가정한다.

Riemann 불변식에 기인한 경계 조건은 1차원에 반영되지 않았다. 그러나 이 경계 조건은 코리올리의 힘(Coriol's force)과 바닥에서의 마찰을 무시한다면 경계를 수직으로 지나는 파도만이 반영되지 않게 된다. 그럼에도 불구하고 사실상 사선 경사를 가진 곳에서 파도에 대한 반영을 감소시킨다.

조위와 유속에 대한 정보를 가지고 있지 않기 때문에 들어오는 Riemann 불변식과 선택하게 될 다른 종류의 경계를 알지 못한다. 조위 또는 수위나 유속 경계조건은 초기 경계나 Riemann 불변식의 시간 결과물이 더해진 고유 진동수에 기인한 단파 구성요소에 약하게 반영될 수 있다. 계산 영역에서는 다음과 같이 U-방향으로 나타내기 위한 단순화한 형태의 경계조건이 바람직하다.

$$\text{조위} : \zeta = F_{\zeta}(t)$$

$$\text{유출량} : Q = F_Q(t)$$

$$\text{유속(법선 방향으로)} : U = F_U(t)$$

$$\text{Riemann invariant} : U \pm \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} = F_R(t)$$

경계조건은 경계점의 제한된 수로 지정되며 중간의 점들은 보간법을 이용하여 결정한다. 만일 관측된 높이 데이터가 사용 불가능하다면 개방 경계에서의 순압형 barotropic forcing은 다음과 같이 선형 중첩으로 처리한다. 1차 선형 연속 방정식에 Riemann 경계 조건을 대입하기 위해서는 잘 알려진 방사선 경계조건을 적용하는 것이 바람직하다.

Stelling(1984)은 모형 지역에서의 고유 진동수와 교란의 영향을 덜 받는 경계영역을 만들기 위해 조위와 유속 경계 조건에 Riemann 불변식의 시간 결과를 더했다.

반사계수 α 는 다음 값들을 권고한다.

$$\begin{aligned} \text{수위 경계} : \zeta + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \{U \pm 2\sqrt{gH}\} &= F_{\zeta}(t) & \text{수위 경계} : \alpha &= T_d \sqrt{\frac{G}{d}} \\ \text{유속 경계} : \zeta + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \{U \pm 2\sqrt{gH}\} &= F_U(t) & \text{유속 경계} : \alpha &= T_d \end{aligned}$$

T_d 는 자유표면파가 모형 지역의 왼쪽 경계에서 오른쪽 경계까지 이동하는 시간이다. 대양과 바다모형에서 T_d 의 기간은 tidal forcing의 기간과 같다. 이러한 경우에 α 는 반드시 0으로 설정되어야 하고, 그렇지 않으면 경계조건의 구성요소 중 하나의 크기가 줄어든다. 이러한 값은 T_d 기간의 파도를 대입한 수평 기류 없이 1차 선형 장파 방정식의 푸리에 해로 구할 수 있다.

모형의 개방경계조건으로는 다음식에 의해 산정되는 수위 변화를 부여하였으며 이때 경계에서의 수위는 조석 관측자료와 유속 관측자료를 재현하도록

해면경사와 위상차를 부여하여 시간별로 다르게 입력하였다.

$$H(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cdot F_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + (V_0 + u)_i - G_i) \quad (3.15)$$

여기서, $H(t)$: 시간에 따른 수면고

A_0 : 일정기간의 평균해면

k : 요소의 수, i : 요소의 인자

A_i : 진폭, F_i : 교점진폭

G_i : 위상

ω_i : 각속도, $(V_0 + u)_i$ =편각

3.1.6 개방 경계조건

용해된 물질의 수평방향 이동은 이류의 지배를 받는다. 수송방정식이 이류의 지배를 받고 파의 특성을 가지며 수학적 관점에서 쌍곡선 형식이고, 흐름에 평행한다. 확산이 없을 때 흐름을 따라 움직이는 관측자는 일정한 농도를 가지며 개방 경계는 계산 영역으로 제한된다. 개방 경계에서 유입이 되는 동안에 경계 조건이 필요하며 유출하는 동안에 농도는 구속받지 않는다.

3.1.7 수치해석 기법

DELFT3D-FLOW의 계산 방법은 유한 차분법에 바탕을 둔다. 공간에서의 천해 방정식을 차분화하기 위해서 모형 영역을 곡선 격자(curvilinear grid)로 구성한다. 격자 좌표는 직사각형 직교좌표(Cartesian 좌표계)나 구좌표(spherical 좌표계)로부터 결정할 수 있다. 직교좌표에서는 모델영역의 위도를 입력하여 전 영역에서 고정값의 코리올리력의 계산하지만, 구좌표계에서는 위도좌표계에서 코리올리력을 계산하므로 위도방향으로 그 값이 변하게 된다.

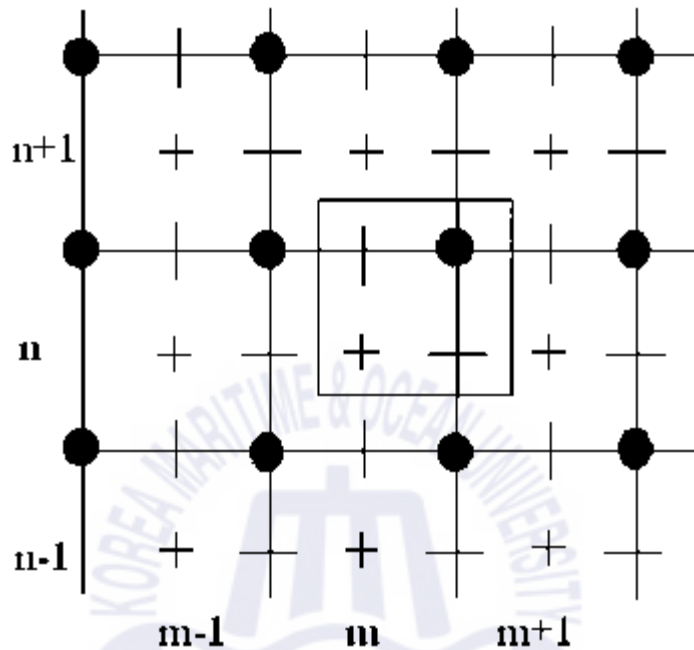
따라서 영역이 커지면 구좌표계를 사용하게 된다. 어느 경우든 물리적인 공간에 대해서는 곡선 격자좌표가 채택되어야 한다. 곡선격자의 구성은 다음과 같이 이행하여야 한다.

- 모델영역에서 수륙경계와 가능한 한 가깝게 일치시켜야 한다.
- 격자는 직교하게 구성하여야 한다.
- 유한차분식에서 부정확성을 최소화하기 위해서는 계산영역 전체에 대해 격자간격이 점진적으로 변하도록 해야 한다.

Fig. 3.1은 모델에서 채택하고 있는 엇갈림 격자(staggered grid)체계를 나타내는데 수위, 성분의 농도, 염도, 온도 그룹(+)은 같은 지점을 택하고, ξ -방향 수평유속성분 (-), η -방향 수평유속성분 (1), 및 평균수면하의 수심(\cdot) 등은 이와 다른 지점으로 구성하였다.

엇갈림 격자의 이점은 다음과 같다.

- 경계조건들은 다소 간단한 방법으로 실행할 수 있다.
- 비엇갈림격자(non-staggered grid)에서의 추산과 비교할 때 같은 정확도를 얻기 위해서 더 적은 수의 분할된 변수를 이용하는 것이 가능하다.
- 천해의 엇갈림 격자는 수심이 공간적인 변동을 막아준다(Stelling, 1984).



Legend:

- full lines** the numerical grid
- grey area** items with the same grid indices (m, n)
 - + water level, concentration of constituents, salinity, temperature
 - horizontal velocity component in ξ -direction (also called u - and m -direction)
 - | horizontal velocity component in η -direction (also called v - and n -direction)
 - depth below mean (still) water level (reference level)

Fig. 3.3 Staggered grid system of model

3.2 퇴적물 이동 모델

3.2.1 부유사 이송 방정식

DELFT-3D의 지형변화 예측모형에 결합되어 있는 TRANSPOR-2004 모듈은 그 적용성이 인정되고 있으며, 표사량의 계산에서 점성토의 함유율을 고려한 모형이다.

TRANSPOR-2004 모듈의 계산절차에 대하여 살펴보면, 먼저 흐름방향의 수심 평균된 유속(v_R), 유의파고(H_s), 첨두주기(T_p), 파와 흐름사이의 각도(ϕ), 입도상수, 점성토의 비율, 수온, 염도 등이 입력되고 이러한 자료로부터 유체 밀도나 동점성계수와 같은 일반적인 매개변수를 계산한다.

파랑 매개변수의 계산에서는 흐름에 의해 수정된 파장(L), 상대 파주기(T_r), 저면 부근의 최대궤도진폭(A_δ), 저면 부근의 최대궤도속도(U_δ), 파의 진행방향 최대궤도속도($U_{\delta,for}$)와 반대방향의 최대궤도속도($U_{\delta,back}$), 기준점 농도에 대한 최대궤도속도($U_{\delta,r}$), 시간 및 수심 평균된 return velocity(u_r), 파동경계층에서 streaming velocity(u_δ), 파동경계층의 두께(δ_w), 유효유체혼합층의 두께(δ_m)등을 계산하고 전체 흐름벡터(V_R)는 다음 식과 같이 계산된다.

$$V_R = [v_R^2 + u_r^2 + 2v_R u_r \cos\phi]^{0.5} \quad (3.16)$$

여기서, u_r 은 파곡(wave trough)아래의 시간 및 수심 평균된 return velocity로서 파봉(wave crest)과 파곡 사이의 질량수송에 따른 보상류로서 다음과 같이 계산된다.

$$u_r = -0.125g^{0.5} H_s^2 / (h^{0.5} h_t) \quad (3.17)$$

여기서, h 는 수심이며, h_t 는 다음과 같이 계산된다.

$$h_t = (0.95 - 0.35H_s/h)h \quad (3.18)$$

토사특성치의 계산은 무차원 입도상수에 따른 초기운동에 대한 Shields 매개변수를 계산한다.

$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0.115(D_*)^{-0.5} && : 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0.140(D_*)^{-0.64} && : 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0.040(D_*)^{-0.1} && : 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr} &= 0.013(D_*)^{0.29} && : 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0.055 && : D_* > 150 \end{aligned}$$

무차원 입도상수 D_* 는 다음과 같이 계산된다.

$$D_* = d_{50}[(s-1)g/\nu_2]^{1/3} \quad (3.19)$$

여기서, s 는 상대밀도로 $s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = 2.65$, ν 는 물의 동점성계수이다.

이러한 Shields 매개변수를 이용하여 이동한계 저면전단응력들($\tau_{cr}, \tau_{cr,1}$)과 이동한계 수심평균 유속(u_{cr}), 이동한계 궤도속도(U_{cr})을 구한다.

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho)gd_{50}\theta_{cr} \quad (3.20)$$

$$\tau_{cr,1} = (1 + p_m)^3(\rho_s - \rho)gd_{50}\theta_{cr} \quad (3.21)$$

$$u_{cr} = 5.75[(s-1)gd_{50}]^{0.5}\theta_{cr}^{0.5}\log(4h/d_{90}) \quad (3.22)$$

$$U_{cr} = [0.12(s-1)gd_{50}^{0.5}T_p^{0.5}]^{2/3} \quad : d_{50} < 0.0005m \quad (3.23)$$

$$U_{cr} = [1.09(s-1)gd_{50}^{0.75}T_p^{0.25}]^{0.571} \quad : d_{50} \geq 0.0005m \quad (3.24)$$

여기서, p_m 은 저면에서 점성토의 비율이다.

이동매개변수(mobility parameter) Ψ 는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\Psi = (U_{wc})^2 / ((s-1)gd_{50}) \quad (3.25)$$

$$U_{wc} = [(U_{\delta,r} + |u_r|)^2 + v_R^2 + 2(U_{\delta,r} + |u_r|)v_R\cos\phi]^{0.5} \quad (3.26)$$

여기서, $U_{\delta,r}$ 은 기준점 농도에 관한 최대궤도속도를 나타낸다.

부상되는 모래의 입경은 이동매개 변수값에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$d_s = \max[d_{10}, (1 + 0.0006(d_{50}/d_{10} - 1)(\Psi - 550))d_{50}] : \Psi < 550 \quad (3.27)$$

$$d_s = d_{50} : \Psi \geq 550 \quad (3.28)$$

비점착성 부유사의 침강속도는 Rijn(1993)이 제안한 바와 같이 부상된 입경에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$w_s = \frac{(s-1)gd_s^2}{18\nu} : 65\mu m < d_s \leq 100\mu m \quad (3.29)$$

$$w_s = \frac{10\nu}{d_s} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd_s^3}{\nu^2} \right) - 1 \right] : 100\mu m < d_s \leq 1000\mu m \quad (3.30)$$

$$w_s = 1.1[(s-1)gd_s]^{0.5} : 1000\mu m < d_s \quad (3.31)$$

토사의 특성치들에 대한 계산이 끝나면 저면조도와 마찰계수들을 계산한 후 파-흐름 공존장에서 시간 평균된 유효 저면전단응력과 저면전단속도를 계산한다. 먼저, 흐름에 의한 저면전단응력($\tau_{b,c}$)과 파에 의한 저면전단응력($\tau_{b,w}$), 그리고 파-흐름에 의한 저면전단응력 ($\tau_{b,cw}$)는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}\tau_{b,c} &= 0.125f_c V_R^2 \\ \tau_{b,w} &= 0.25\rho f_w U_{\delta,r}^2 \\ \tau_{b,cw} &= \alpha_{cw}\tau_{b,c} + \tau_{b,w}\end{aligned}\tag{3.32}$$

여기서, f_c 는 흐름과 관련한 전체 마찰계수, f_w 는 파와 관련한 전체 마찰계수, $U_{\delta,r}$ 은 최대궤도속도 그리고 α_{cw} 는 파-흐름 상호작용을 나타내는 계수이다.

파와 흐름에 의한 유효 저면전단응력($\tau'_{b,cw}$)와 유효 저면전단속도($u'_{*,cw}$)는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau'_{b,cw} = \alpha_{cw}\mu_c\tau_{b,c} + \mu_w\tau_{b,w}\tag{3.33}$$

$$u'_{*,cw} = (\tau'_{b,cw}/\rho)^{0.5}\tag{3.34}$$

여기서, μ_c 와 μ_w 는 흐름 및 파와 관련된 효율계수이다.

무차원 저면전단응력 매개변수는 파와 흐름이 공존할 경우와 흐름만이 존재할 경우에 대하여 각각 다음 식에 의하여 산정한다.

$$T_{cw} = [\tau'_{b,cw} - \tau_{cr,1}]/\tau_{cr}\tag{3.35}$$

$$T_c = [\tau'_{b,c} - \tau_{cr,1}]/\tau_{cr}\tag{3.36}$$

다음 단계에서는 수심에 걸쳐 속도분포를 계산하고 흐름방향에서의 속도분포는 파동경계층의 내부와 외부로 나뉜 2 layer 접근법에 의해 다음과 같다.

$$v_{R,z} = \frac{v_R \ln(30z/k_a)}{-1 + \ln(30h/k_a)} : z \geq \delta_m \quad (3.37)$$

$$v_{R,z} = \frac{v_{\delta,m} \ln(30z/k_{s,c})}{\ln(30\delta_m/k_{s,c})} : z < \delta_m \quad (3.38)$$

여기서, δ_m 은 파동경계층의 두께, k_a 는 걸보기 저면조도, $k_{s,c}$ 전체 흐름과 관련된 저면조도를 의미하며, $v_{\delta,m}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$v_{\delta,m} = \frac{v_R \ln(30\delta_m/k_a)}{-1 + \ln(30h/k_a)} \quad (3.39)$$

파 방향의 속도분포는 3 layer 접근법에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$u_{r,z} = \alpha_r [u_{r,\delta} / \ln(30\delta_m/k_{s,c})] \ln(30z/k_{s,c}) : z < \delta_m \quad (3.40)$$

$$u_{r,z} = \alpha_r [u_r / (-1 + \ln(30h/k_a))] \ln(30z/k_a) : \delta_m < z < 0.5h \quad (3.41)$$

$$u_{r,z} = u_{r,mid} [1 - ((z - 0.5h) / (0.5h))^3] : 0.5h \leq z < h \quad (3.42)$$

여기서, α_r 은 조정계수이고, $u_{r,\delta}$ 와 $u_{r,mid}$ 는 다음과 같다.

$$u_{r,\delta} = [u_r \ln(30\delta_m/k_a) / [-1 + \ln(30h/k_a)]] \quad (3.43)$$

$$u_{r,mid} = \alpha_r [u_r / (-1 + \ln(30h/k_a))] \ln(15z/k_a) \quad (3.44)$$

그리고 수심에 걸친 파-흐름 공존장에서 토사의 혼합계수($\epsilon_{s,cw}$)를 산정하고 수치 적분에 의해 수심에 걸친 농도분포를 계산하고 부유사의 농도분포를 계산하기 위해서 기준점 높이와 기준점 농도를 계산한다.

기준점 높이(a)는 다음의 식과 같이 산정한다.

$$a = \max.(0.5k_{s,c,r}, 0.5k_{s,w,r}, 0.01) \quad (3.45)$$

여기서, $k_{s,c,r}$ 과 $k_{s,w,r}$ 은 사런(ripple)에 의한 흐름 및 파와 관련된 조도계수이다. 기준점 농도 c_a 는 다음과 같이 산정되며, 최대값은 0.05이다.

$$c_a = 0.015(1 - p_m)(d_{50}/a)T_{cw}^{1.5}/(D_*)^{0.3} \quad (3.46)$$

z 가 a 보다 클 경우에 부유사 농도는 다음 식에 의해서 계산된다.

$$\frac{d_c}{d_z} = \frac{(1-c)^5 c w_s}{\epsilon_{s,cw} (1 + (c/c_{\max})^{0.8} - 2(c/c_{\max})^{0.4})} \quad (3.47)$$

여기서, c_{\max} 는 최대 체적 농도로서 0.65의 값을 가진다.

이러한 과정을 통하여 부유사의 농도분포를 계산한 수 부유사량과 소류사량을 최종적으로 계산하게 되며 각각의 계산 절차는 다음과 같다.

3.2.2 부유사량

시간 평균 부유사량 q_s 는 흐름 및 파와 관련하여 각각 파와 흐름방향 성분을 평가하여 계산하는데, 흐름과 관련된 흐름방향의 표사량과 흐름과 관련된 파 방향의 부유사량은 다음 식과 같이 주어진다.

$$q_{s,c1} = \rho_s \int_a^h (v_{R,z} c_z) dz \quad (3.48)$$

$$q_{s,c2} = \rho_s \int_a^h (u_{r,z} c_z) dz \quad (3.49)$$

여기서, 첨자 $c1$ 과 $c2$ 는 흐름에 관련된 흐름과 파 방향을 의미하고 c_z 는 연직방향의 높이 z 에서 농도를 의미하고 $v_{R,z}$ 은 흐름방향의 속도분포를 의미하고, $u_{r,z}$ 은 파 방향의 속도분포이다. TRANSPOR-2004 모형에서 새롭게 추가된 파와 관련한 파 방향의 부유사량은 아래의 식을 이용하여 평가하게 된다.

$$q_{s,w} = \rho_s F \int_a^{0.5} c_z dz \quad (3.50)$$

여기서, 파에 의한 속도성분인 F 는 다음과 같이 평가한다.

$$F = 0.1(U_{asym} + u_\delta) \quad (3.51)$$

$$U_{asym} = [(U_{\delta,for})^4 - (U_{\delta,back})^4] / [(U_{\delta,for})^3 + (U_{\delta,back})^3] \quad (3.52)$$

여기서, U_{asym} 은 속도의 비대칭 값을 의미하고, $U_{\delta,for}$ 과 $U_{\delta,back}$ 은 각각 파 방향과 파의 반대방향으로의 저면부근의 궤도 속도이며 u_δ 는 파동 경계층의 선단에서 흐름 속도이다.

이러한 파 및 흐름방향의 부유사량을 모형 좌표계에서 기준축인 양의 x 축과 파 및 흐름방향이 이루는 각도를 고려하여 x 및 y 방향의 부유사량인 $q_{s,c,x}$, $q_{s,c,y}$, $q_{s,w,x}$ 및 $q_{s,w,y}$ 를 산출한다.

3.2.3 소류사량

기준점 높이 a 이하에서 시간 평균한 소류사량은 다음의 과정을 통하여 평가하게 되며 x (흐름) 및 y (흐름과 직교하는) 방향의 순간 유속과 속도벡터는 다음과 같다.

$$\sum U_{\delta,cw,x,t} = v_{R,a} + u_{\delta,a} \cos\phi + U_{a,t} \cos\phi + u_a \cos\phi \quad (3.53)$$

$$\sum U_{\delta,cw,y,t} = u_{r,a} \sin\phi + U_{a,t} \sin\phi + u_a \sin\phi \quad (3.54)$$

$$\overrightarrow{U}_t = [(U_{a,cw,x,t})^2 + (U_{a,cw,y,t})^2]^{0.5} \quad (3.55)$$

여기서, $U_{\delta,cw,x,t}$ 는 x (흐름) 방향의 순간 속도이고, $U_{\delta,cw,y,t}$ 는 y (흐름방향과 직교) 방향의 순간 속도이다. $U_{a,t}$ 는 저면 부근 파 방향 또는 흐름 방향의 속도 속도이고, \overrightarrow{U}_t 는 순간 속도 벡터이고 순간 마찰계수 f'_{cw} 는 다음과 같이 계산한다.

$$f'_{cw} = (\alpha_v)^{0.5} \beta_f f'_c [(1 - (\alpha_v)^{0.5})] f'_w \quad (3.56)$$

위 식에서 나타낸 계수 α_v 와 β_f 는 다음과 같다.

$$\alpha_v = \frac{|V_a|}{|V_a| + |U_a|} \quad (3.57)$$

$$\beta_f = 0.25 \left[\frac{-1 + \ln(30h/k_{s,c})}{\ln(30a/k_{s,c})} \right]^2 \quad (3.58)$$

여기서, $k_{s,c}$ 는 흐름과 관련된 저면조도를 의미한다.

입자와 관련되 순간 저면전단응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau'_{b,cw,t} = 0.5\rho f'_{cw}(\overline{U}_t)^2 \quad (3.59)$$

전체 주기에 걸쳐 계산된 소류사량 $q_{b,t}$ 와 소류사량의 x (흐름) 및 y (흐름과 직교) 방향 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$q_{b,t} = 0.5(1-p_m)\rho_s f_{slope1} d_{50} u'_{*,cw,t} T_{cw,t} / (D_*)^{0.3} \quad (3.60)$$

$$q_{b,t,x} = (U_{x,t} / \overline{U}_t) q_{b,t} \quad (3.61)$$

$$q_{b,t,y} = (U_{y,t} / \overline{U}_t) q_{b,t} \quad (3.62)$$

여기서, ρ_s 는 토사의 밀도, p_m 은 저면중에 점성토의 함유율, $u'_{*,cw,t}$ 는 파와 흐름에 의한 유효 저면 전단 속도이며, 최종적으로 시간 평균된 파와 흐름방향의 소류사의 수송량은 다음과 같이 계산한다.

$$q_b = \frac{1}{T_p} [(\sum q_{b,t,x})^2 + (\sum q_{b,t,y})^2] \quad (3.63)$$

$$q_{b,c} = \frac{1}{T_p} \left[\sum q_{b,t,x} - \frac{1}{\tan\phi} (\sum q_{b,t,y}) \right] \quad (3.64)$$

$$q_{b,w} = \frac{1}{T_p} (\sum q_{b,t,y}) / \sin\phi \quad (3.65)$$

이러한 소류사의 파 및 흐름방향의 수송량을 모형 좌표계상에서 x 축과 이루는 각도를 고려하여 x 및 y 방향의 소류사량인 $q_{b,c,x}$, $q_{b,c,y}$, $q_{b,w,x}$ 및 $q_{b,w,y}$ 값을 산출한다.

제 4 장 수치시물레이션

4.1 해수유동 실험

해수유동 실험은 본 연구의 대상지인 평택·당진항 배수로 부근의 해수유동 현황을 파악하고, 이후 수행될 퇴적물이동 실험에 필요한 외력조건을 제공하기 위하여 수행하였다. 또한, 해수유동 실험의 결과를 기준하여 파랑, 하천 등의 추가적인 외력조건들을 추가하고 퇴적물이동에 대한 수치시물레이션을 수행하였다.

4.1.1 실험내용

해수유동 실험은 모형 수립, 검증 및 예측의 과정으로 수행된다. 모형 수립은 설정된 실험영역 내를 계산격자망에 맞춰 수심 및 경계조건을 적용하는 단계이고, 모형 검증은 계산 결과를 현장 관측치와 대응되게 조정하는 과정이다. 위 과정이 완료되면 사업에 따른 지형 및 수심의 변화를 모형에 재입력하여 예측 실험을 수행하고 그 결과를 분석·평가하게 된다.

본 연구에서의 실험조건은 조석의 주요 4대 분조인 M2, S2, K1, O1을 고려하고 이에 대응하는 해양조사 결과를 이용하여 모형검증을 수행하였다. 또한, 인근에 위치한 아산, 삼교방조제와 배수로로 직접 유입되는 하천에 대한 자료를 수집하여 평수시와 홍수시에 대한 영향을 예측하였다.

Table 4.1에 해수유동 실험의 전반적인 목적, 실험조건, 하천유량 등의 고려사항들을 제시하였다. 또한, 현재 평택시에서 추진 중인 배수로 부근의 친수공간 조성사업인 “아쿠아벨벳사업”의 영향을 고려하여, 장기적인 퇴적물이동 양상을 파악하기 위한 해수유동 양상을 재현하고자 하였다.

Table 4.1 Overview of hydrodynamic simulation

항 목		실험 내용		
사용 모델		• Delft3D(Flow/Mor module) 모델		
실험 목적		• 사업지역의 해수유동 현황 재현 • 퇴적물이동 실험을 위한 외력조건 제공		
격자 구성	계산 영역	• 사업지역을 포함한 아산만 남쪽 내만 - 13.25km(동서) × 10.20km(남북)		
	격자 체계	- 최소 20m, 최대 250m의 곡면가변격자 체계 - 격자수 : 17,484개 (동서방향 : 124개, 남북방향 : 141개)		
실험 조건	실험 조석	• 조석의 주요 4대 분조 (M2, S2, K1, O1)		
	실험 기간	• 16일 (대·중·소조기 포함)		
하천 유량 (m ³ /s)	구 분	아산	삽교	방림천(ASH6)
	홍 수 시	1,015/15/3.7	2,212/12/2.4	304.7
	평 수 시	825/4/2.9	1,965/4/1.3	0.074
실험 안		• 현재상태 • 사업시행 후(평택시 “아쿠아벨벳사업” 고려)		

주) 아산, 삽교방조제 : 평택·당진항 수리현상조사 보고서(2017.2), 평균방류량(m³/s)/30일방류횟수/1회 방류지속시간(hr)

방림천(ASH6) : 배수로 유입하천 중 평수시 유량산정시 기준이 되는 지점(남양천 등 5개 하천정 비기본계획, 2009)

4.1.2 모형 수립

가. 실험영역 및 격자구성

해수유동 실험을 위한 계산영역은 배수로 전체의 조석에 의한 해수유동 영향이 제대로 재현될 수 있고 행담도를 포함하는 아산만 남쪽 내만 전체가 포함되도록 동서방향 13.25km, 남북방향 10.20km에 이르는 해역으로 설정하였다.

또한, 배수로의 유로 변화에 따른 흐름을 적절히 재현할 수 있도록 곡면격자 체계를 채용하였으며, 평택시 “아쿠아벨벳사업”으로 인한 해황의 변화가 검토될 수 있도록 최대 250m의 격자에서 최소 20m의 가변격자망을 구성하여 고해상도 해석이 가능하도록 하였다(Fig. 4.1, Fig. 4.2).

본 실험에서는 최신 해도와 수심 측량 성과도를 이용하여 해수유동 실험의 수심장을 구축하였으며, 실험안은 현재상태와, 평택시 “아쿠아벨벳사업” 이후로 구성하였다. 또한, 연구대상지인 배수로로 유입되는 하천의 영향이 제대로 고려 될 수 있도록 홍수시와 평수시로 구분하여 실험을 수행하였다.

나. 조석조건

국립해양조사원의 조석 관측자료와 개방경계 부근의 기존 조석 관측자료를 근거로, 4개 분조(M2, S2, K1, O1)의 조석 조화상수를 사용하여 개방경계 격자 별로 실험기간의 실시간 조위를 재구성하고 이를 입력하였으며, 모델 영역내의 조석 및 조류 관측치를 사용한 보정과정을 통해 개방경계 조석조건을 입력하였다.

다. 하천 경계조건

사업지구 인근에 존재하는 아산과 삼교방조제의 유량조건을 파악하기 위하여 “평택·당진항 수리현상조사보고서(평택지방해양수산청, 2017.2)”를 참조하여 홍수시와 평수시 유량조건을 결정하였다. 또한, 배수로로 유입되는 소규모 하천의 홍수시 유량은 금회 계산된 결과를 이용하였으며, 평수시 유량은 “남양천 등 5개 하천정비기본계획 보고서(경기도, 2009)”에 제시된 방림천(금회 산정지점; ASH6)의 자료를 근거하여 유역면적 대비 각 지점별 값을 계산하였다(Table 4.2).

Table 4.2 Freshwater inflow condition (m³/s)

산정 지점	ASH1	ASH2	ASH3	ASH4	ASH5	ASH6	ASH6-2	ASH7	ASH8	ASH9
홍수량	52.4	118.0	126.8	142.5	161.3	304.7	320.1	337.0	347.4	347.4
평수량	0.011	0.025	0.027	0.030	0.035	0.074	0.078	0.085	0.090	0.092

주) 홍수량 : 80년 재현빈도, 평수량 : 하천정비기본계획 참조, ASH6 - 방림천

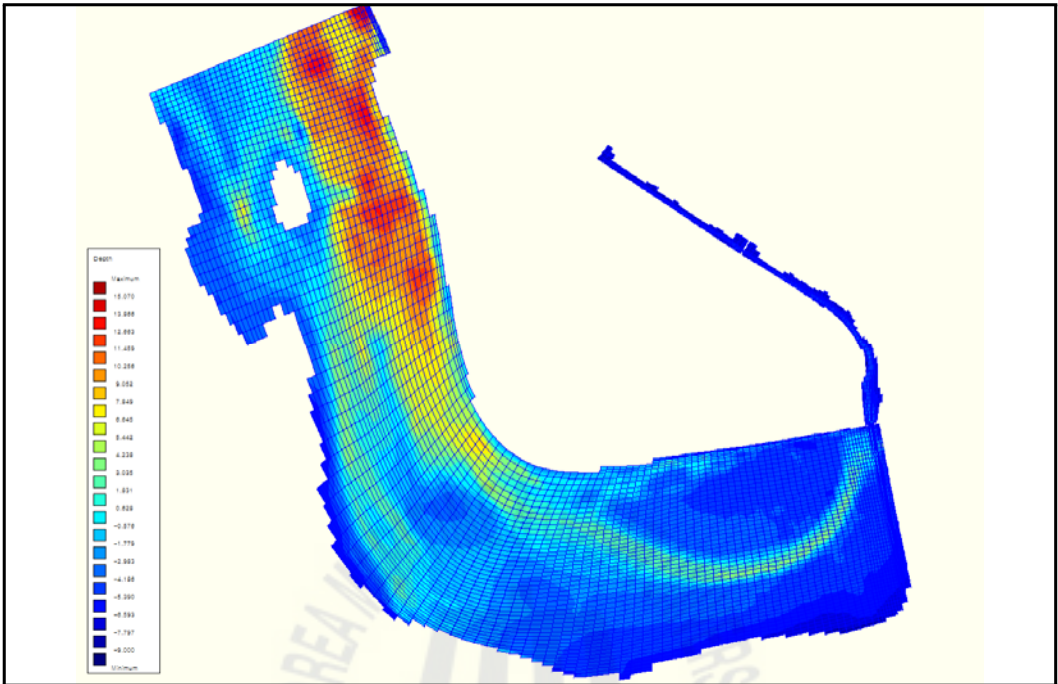


Fig. 4.1 Simulation area and bathymetric chart

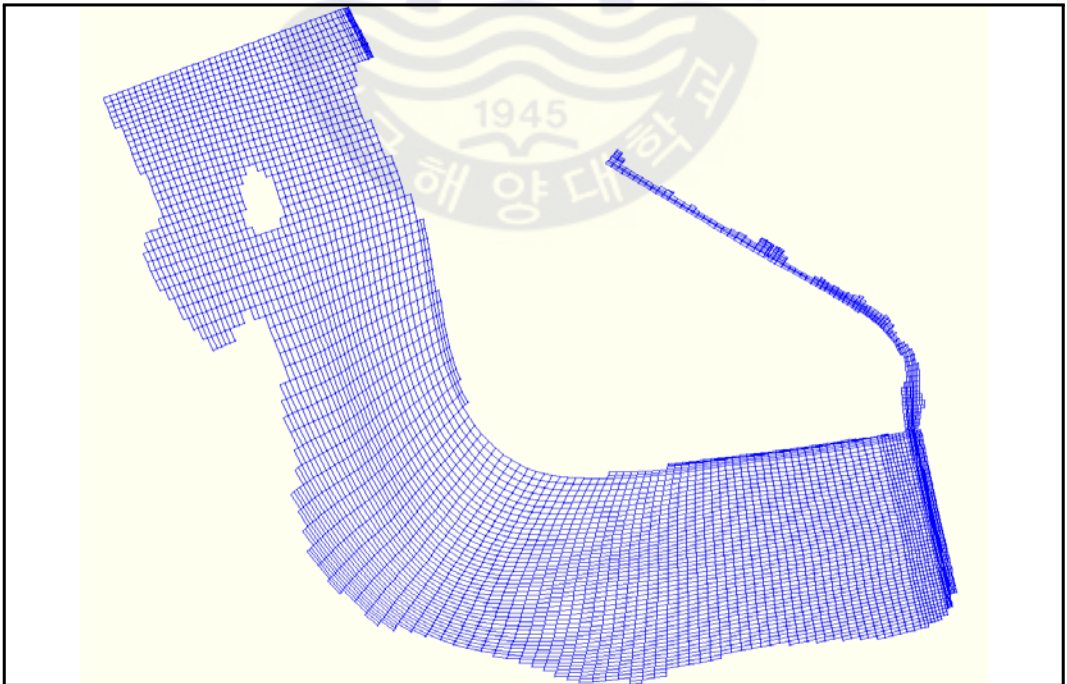


Fig. 4.2 Simulation grid system

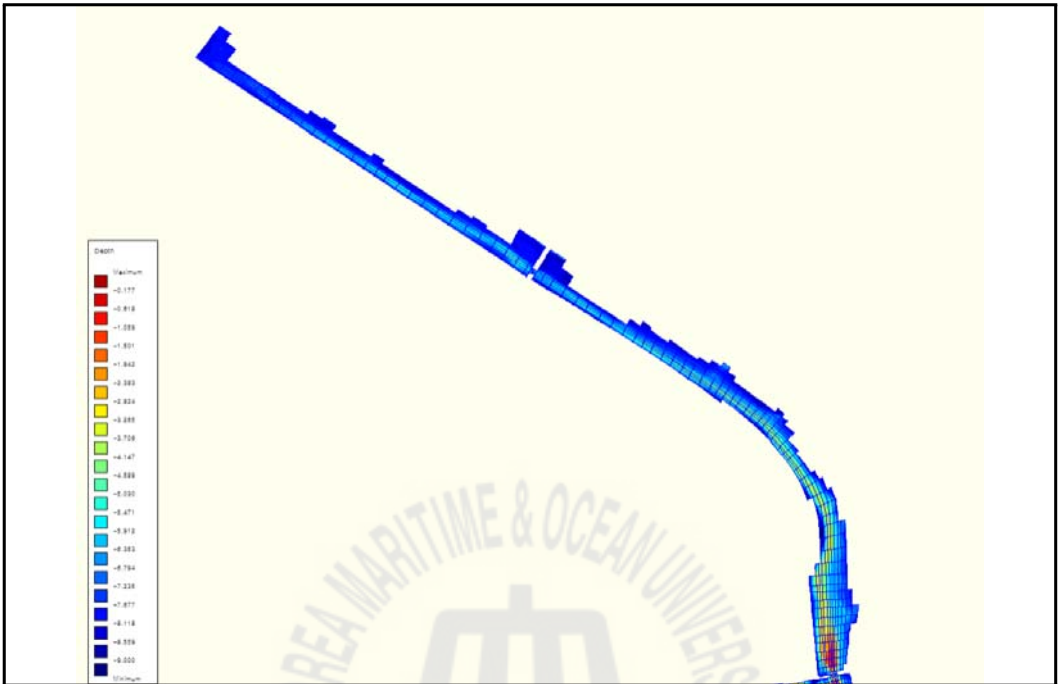


Fig. 4.3 Bathymetric chart of study area

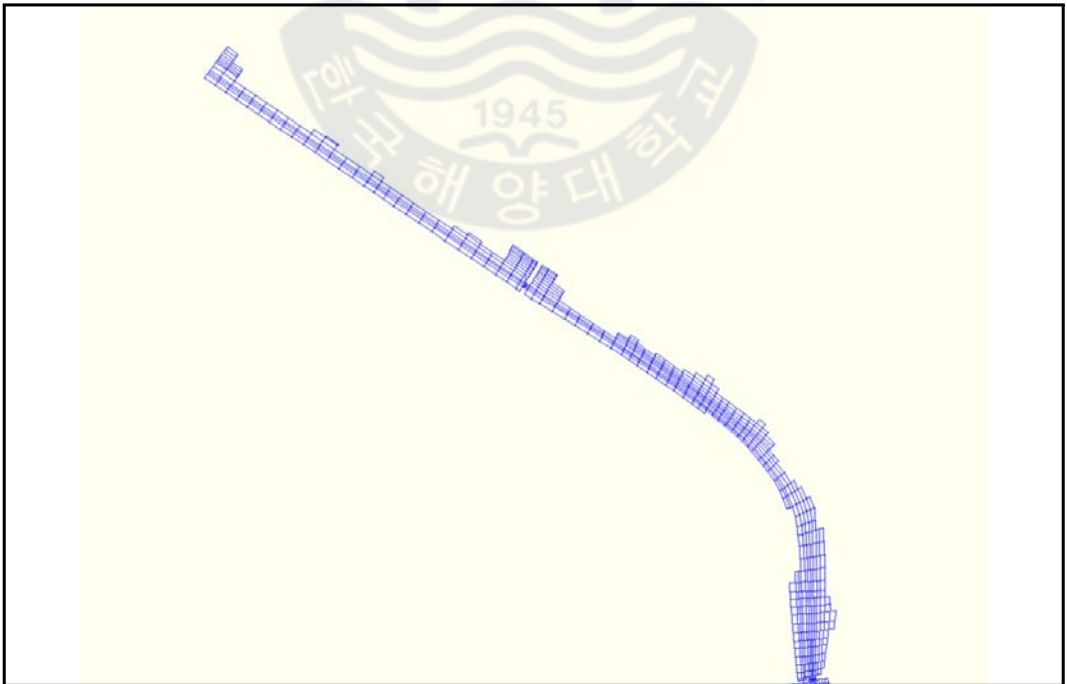


Fig. 4.4 Grid system of study area

Table 4.3 Information of river boundary on the Huff quartile method

산정지점	유역면적 A(km ²)	유로연장 L(km)	평균 폭 A/L(km)
ASH1	2.67	2.31	1.16
ASH2	6.06	2.49	1.36
ASH3	6.63	0.70	0.81
ASH4	7.47	1.16	0.72
ASH5	8.70	1.81	0.68
ASH6	18.27	6.20	1.54
ASH6-2	19.38	1.15	0.97
ASH7	20.91	1.72	0.89
ASH8	22.33	1.61	0.88
ASH9	22.78	1.02	0.44
ASH10(하구)	22.95	0.49	0.35

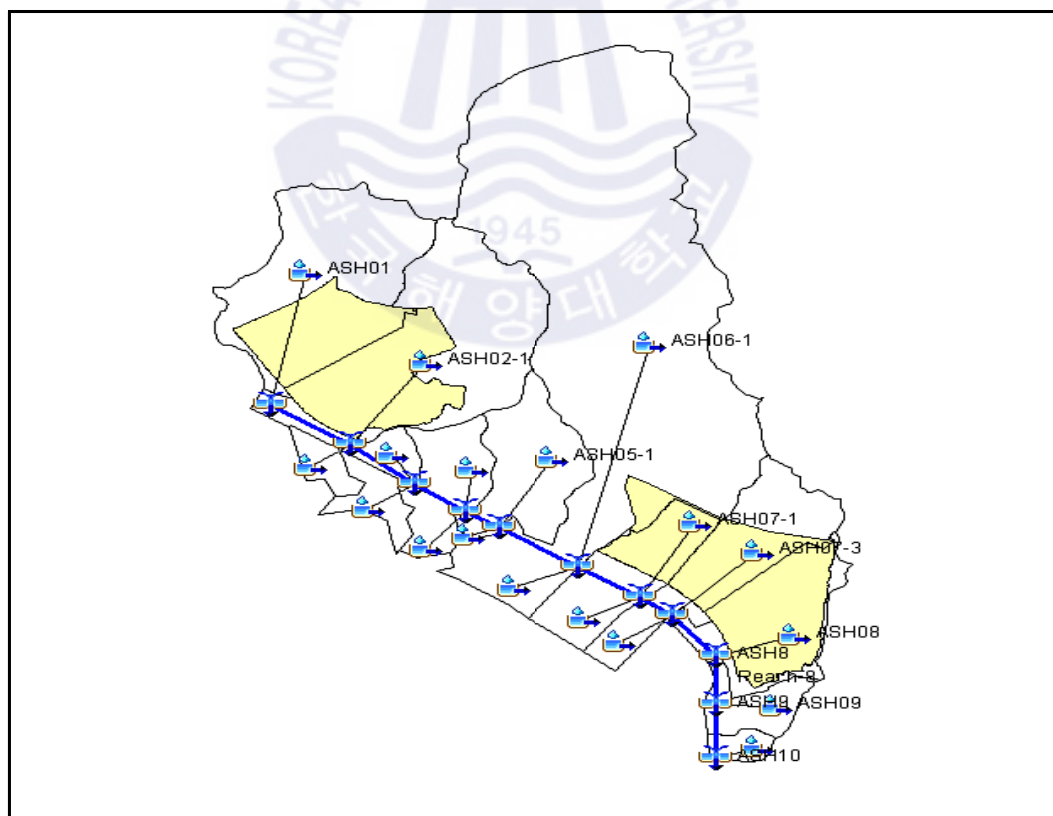


Fig. 4.5 River basin composition

4.1.3 모형검증

수치모의 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 가장 중요한 단계인 모형검증을 위하여 “평택·당진항 수리현상조사 보고서(평택지방해양수산청, 2017)”에서 수행된 조석 및 조류 관측자료를 이용하였다. 조석은 내항 2공구 외측(T1), 조류는 행담도 동측(PC1)의 성과를 이용하였다.

Table 4.4 Observational data used to verify hydrodynamic model

구분	정점	관측위치	관측기간
조석	T4	내항 2공구 외측	2016. 8. 11 ~ 9. 9
조류	PC2	행담도 동측	2016. 1. 20 ~ 2. 4
퇴적률	수로 III, IV 구역	-	2010. 5 ~ 2016. 2

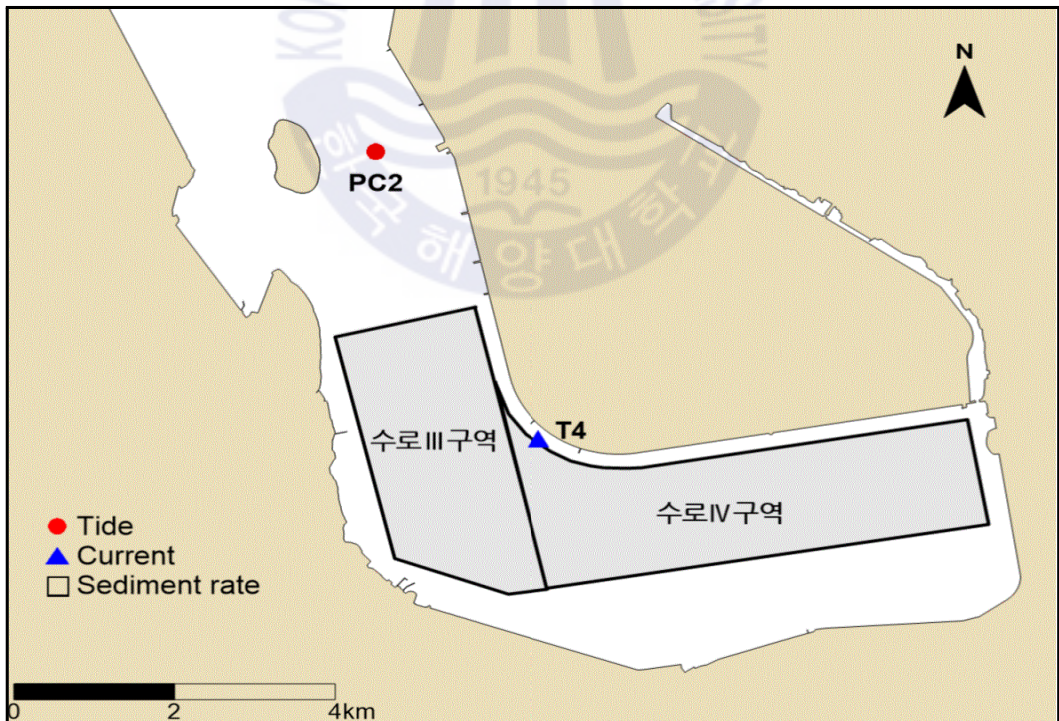


Fig. 4.6 Observation data location

실험조건에 해당하는 주요 4대 분조의 진폭과 지각에 대한 검증은 다음의 그림에 제시된 바와 같이 조위 및 조류곡선으로 도시하였다. Fig. 4.7과 Fig. 4.8에 제시된 바와 같이 전반적으로 진폭과 지각이 가시적으로 잘 재현되는 것으로 파악된다.

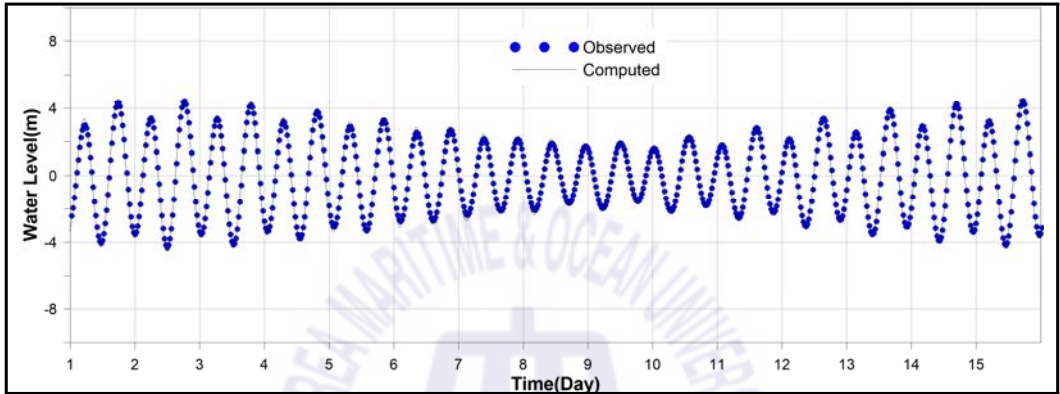


Fig. 4.7 Tide curve (T4)

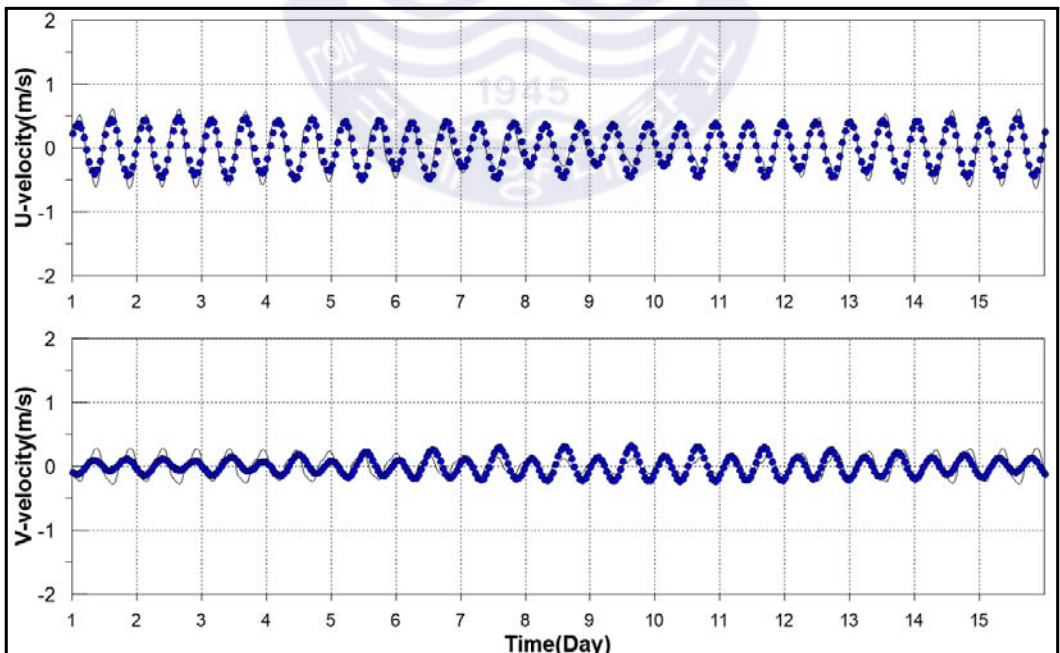


Fig. 4.8 Tidal current curve(PC2)

4.1.4 시뮬레이션 결과

금회 연구대상지인 평택·당진항 배수로의 해수유동 현황을 파악하였으며, 실험안에 제시된 바와 같이 평수시와 홍수시로 구분하여 결과를 서술하였다.

가. 평수시

연구대상지를 포함하는 아산만 내측 해역의 유황은 창조시 행담도 북쪽에서 유입되어 내항 2공구 외측을 거쳐 주수로부를 거쳐 아산 방조제 부근에서 약화되는 양상을 보이며, 낙조시는 이와 반대의 경로를 거치면서 내항 2공구 외측과 행담도 쪽으로 유출되면서 강화되는 양상을 보인다(Fig. 4.9)

연구대상지인 배수로의 유속 양상을 살펴보면 창조시 남쪽 입구부에서 최대 1.08m/s의 유속을 보이며 북류하며 약화되었다가, 협수로를 거치면서 1.04m/s 이상의 유속 분포를 보이고, 한편, 가장 협수로인 배수로 중앙부에서 1.54m/s 이상의 유속으로 최강 유속을 보인다. 낙조시는 창조시 보다 약화된 유속이 유출되는데 남쪽 입구부에서 0.59m/s, 협수로에서 0.62m/s, 가장 협수로인 배수로 중앙부에서 0.85m/s 이상의 유속으로 최강 유속을 보인다(Fig. 4.10).

평택시 아쿠아벨벳사업으로 인한 유속변화는 전술한 지점에서 창조시 (-)0.07m/s, (-)0.22m/s, (-)0.06m/s, 낙조시 (-)0.10m/s, (-)0.19m/s, (-)0.13m/s가 나타나고 있다(Fig. 4.11, 4.12).

이러한 감소현상은 연구대상지인 배수로 부근의 정비공사로 인한 배수로 폭의 변화가 조랑감소로 이어져 나타나는 현상으로 판단된다.

나. 홍수시

평수시와 비교하여, 아산만 내측 해역의 유황은 큰 변화가 없으나, 연구대상지인 배수로는 낙조시의 유속이 창조시 보다 크게 나타나고 있다(Fig. 4.13).

연구대상지인 배수로의 유속 양상을 살펴보면 전술한 각 지점에서 창조시에는 0.76m/s, 0.80m/s, 0.85m/s 이상의 유속이, 낙조시에는 창조시 보다 강화된

유속이 유출되는데 1.21m/s, 1.51m/s, 2.11m/s 이상의 유속으로 최강 유속을 보인다(Fig. 4.14).

평택시 아쿠아벨벳사업으로 인한 유속변화는 전술한 지점에서 창조시 (-)0.06m/s, (-)0.07m/s, (-)0.15m/s, 낙조시 (-)0.27m/s, (-)0.04m/s, (+)0.13m/s 나타나고 있다 (Fig. 4.15 및 Fig. 4.16 참조).

이는 평수시와는 반대로 홍수시 하천에서 배제되는 유량에 의한 영향이 탁월하기 때문인 것으로 판단된다.



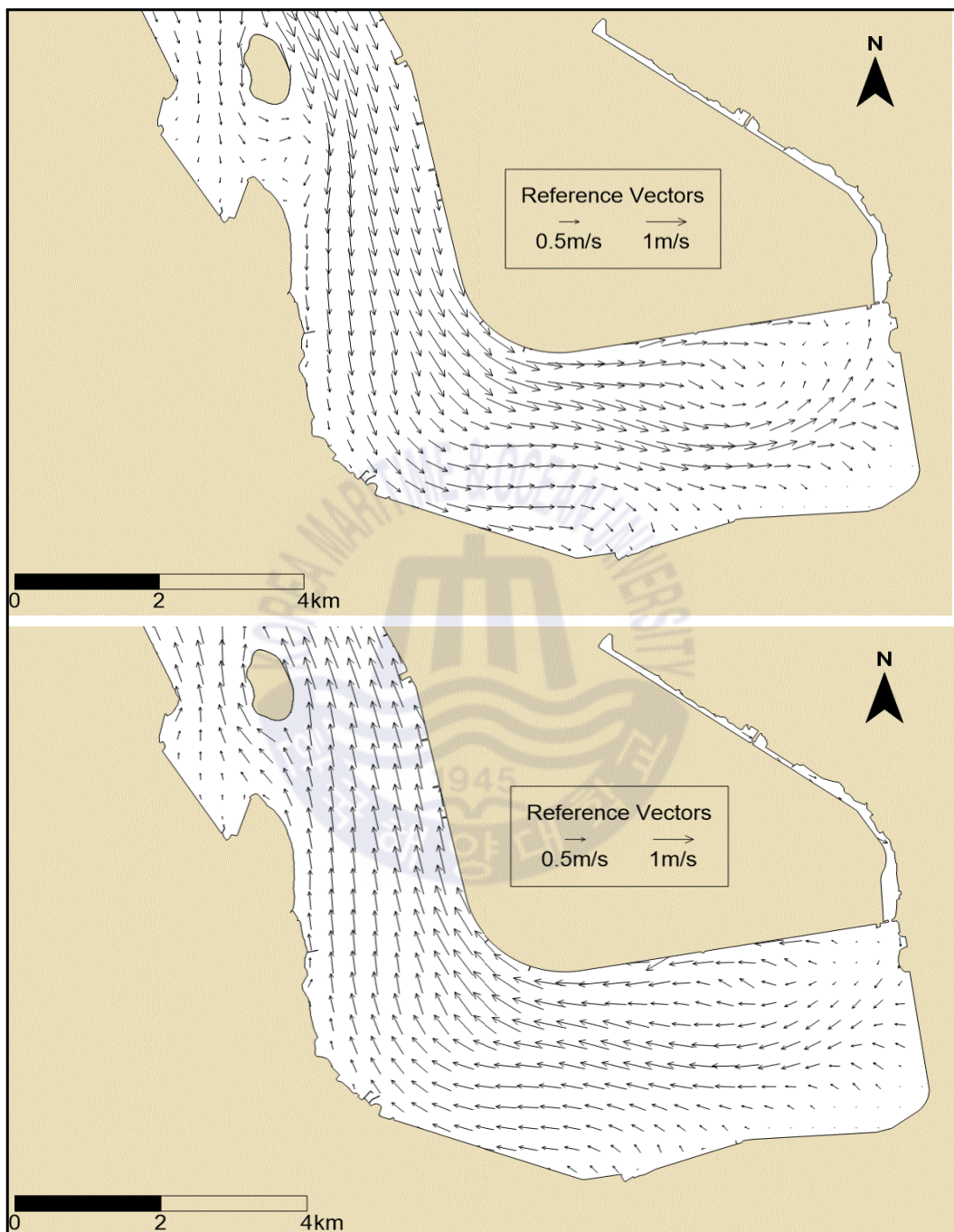


Fig. 4.9 Max. flood and ebb current in ordinary times

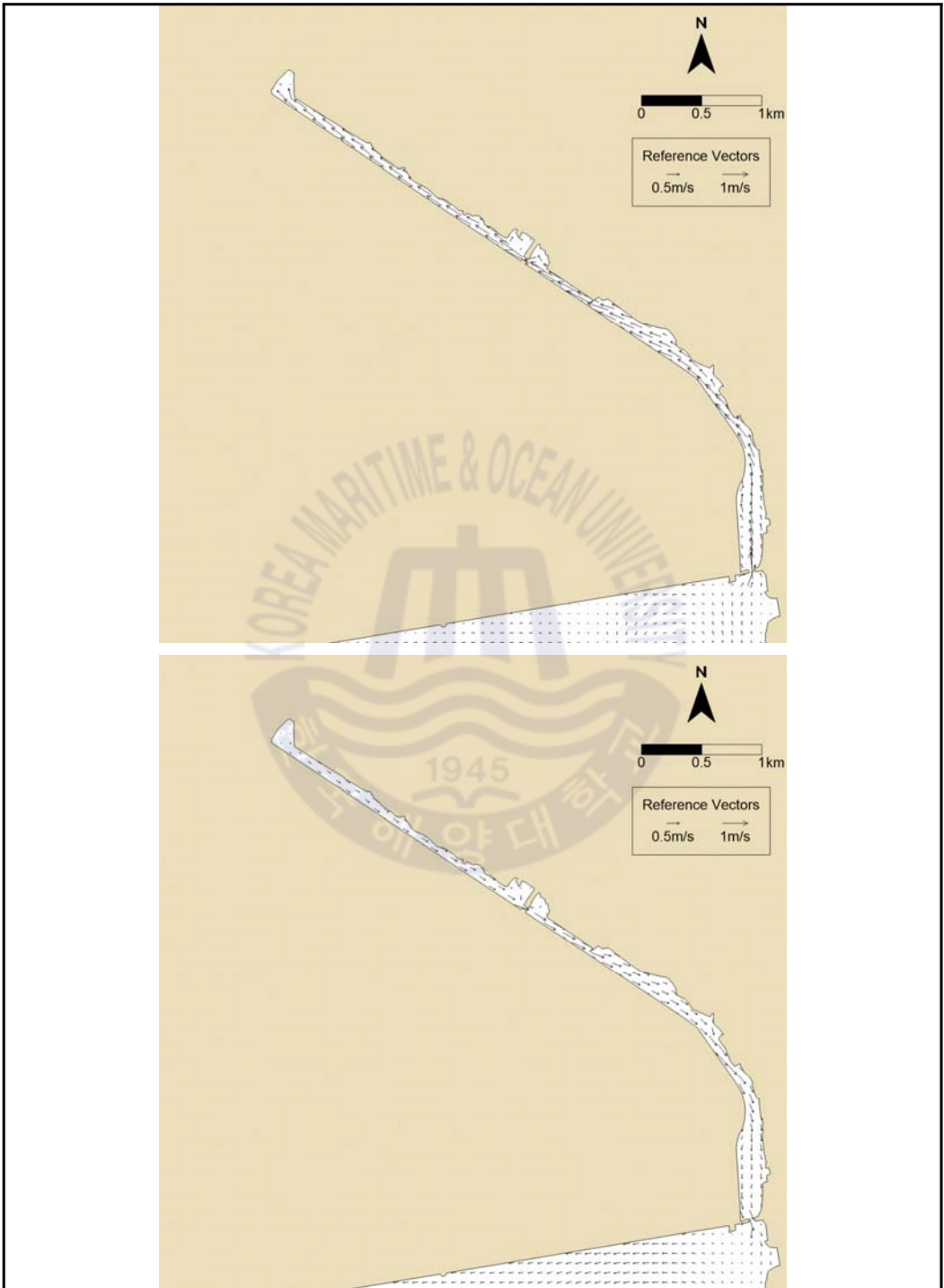


Fig. 4.10 Max. flood and ebb current of the study area in ordinary times

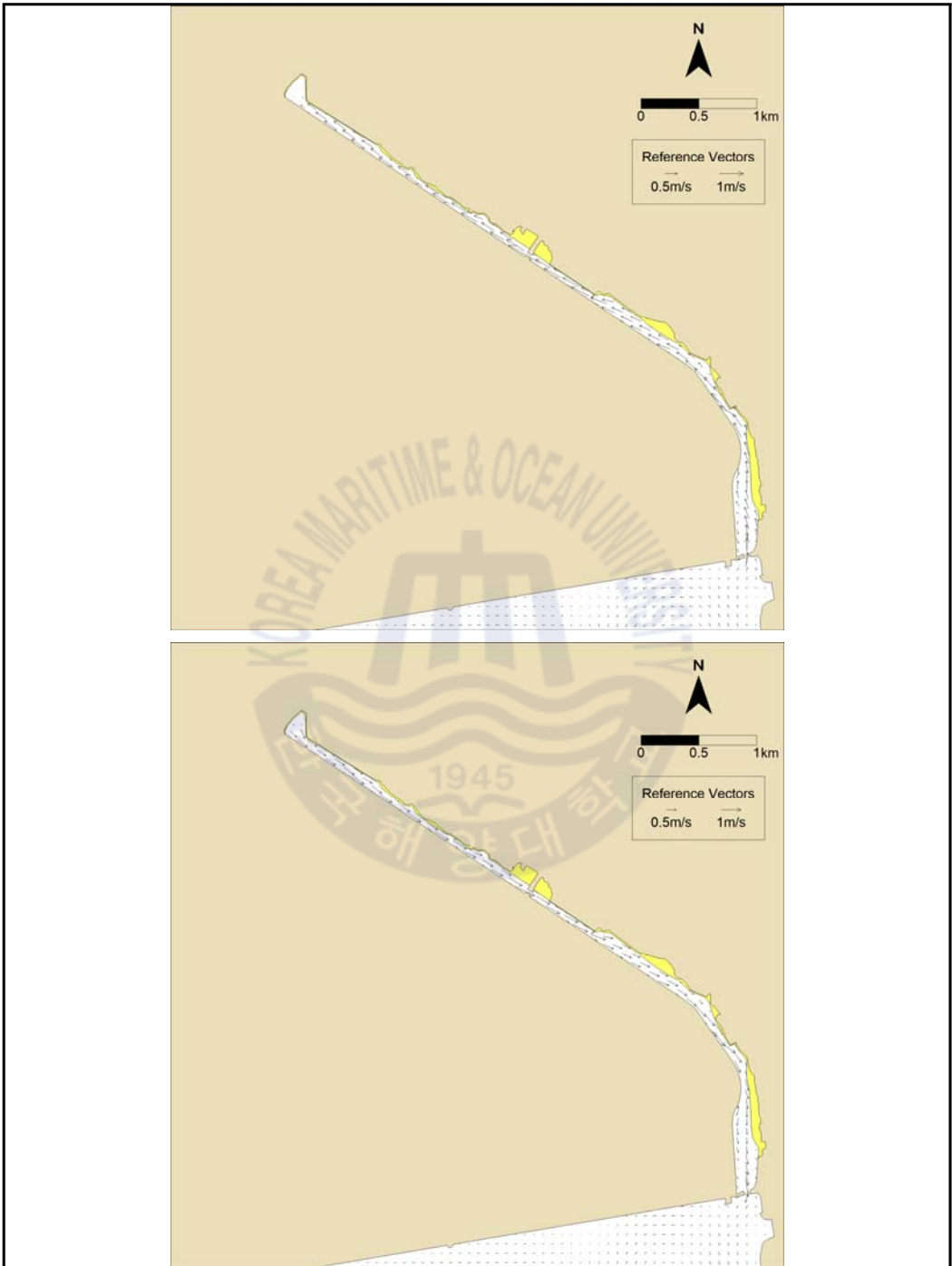


Fig. 4.11 Max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in ordinary times

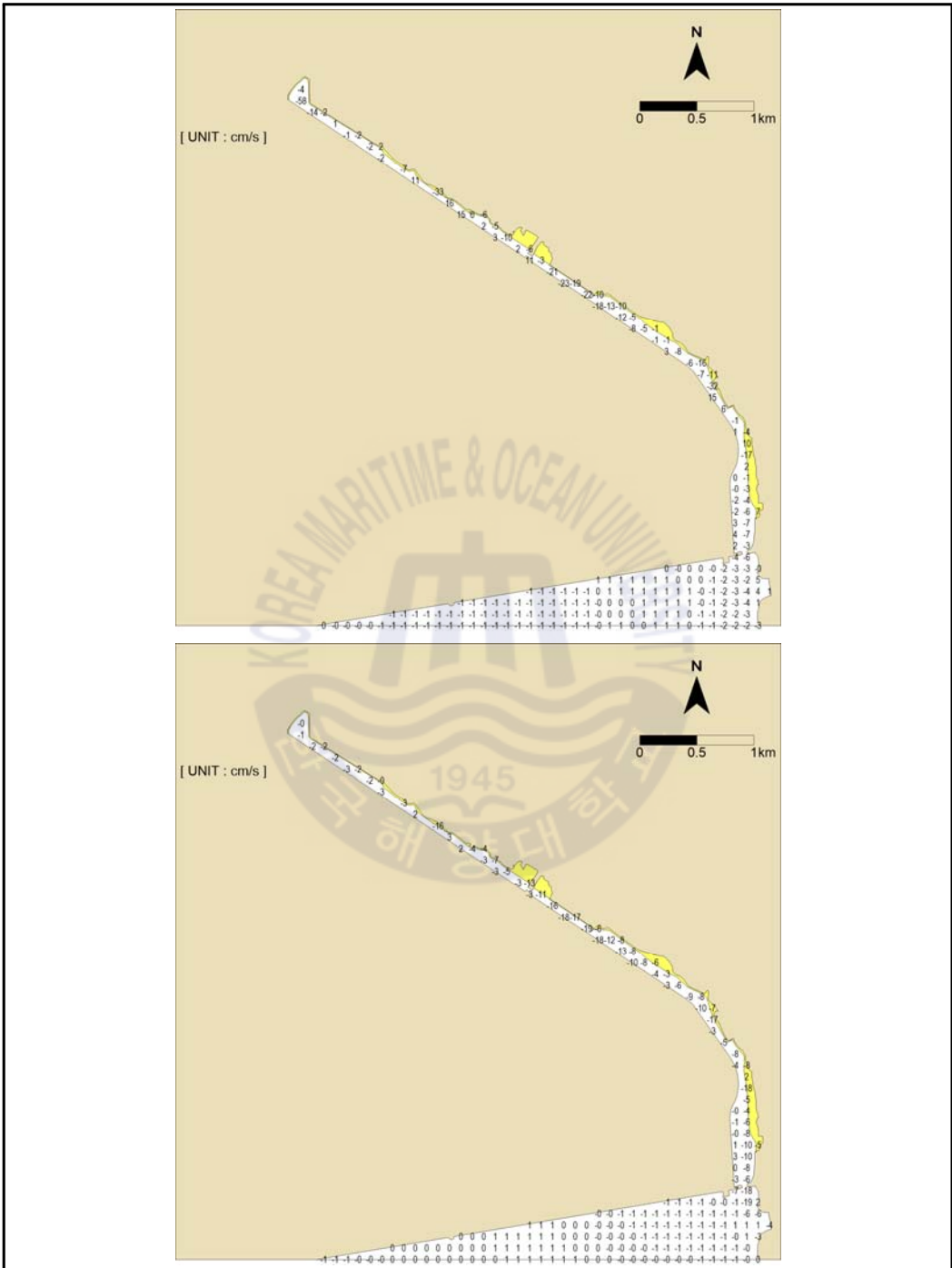


Fig. 4.12 Change of max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in ordinary times

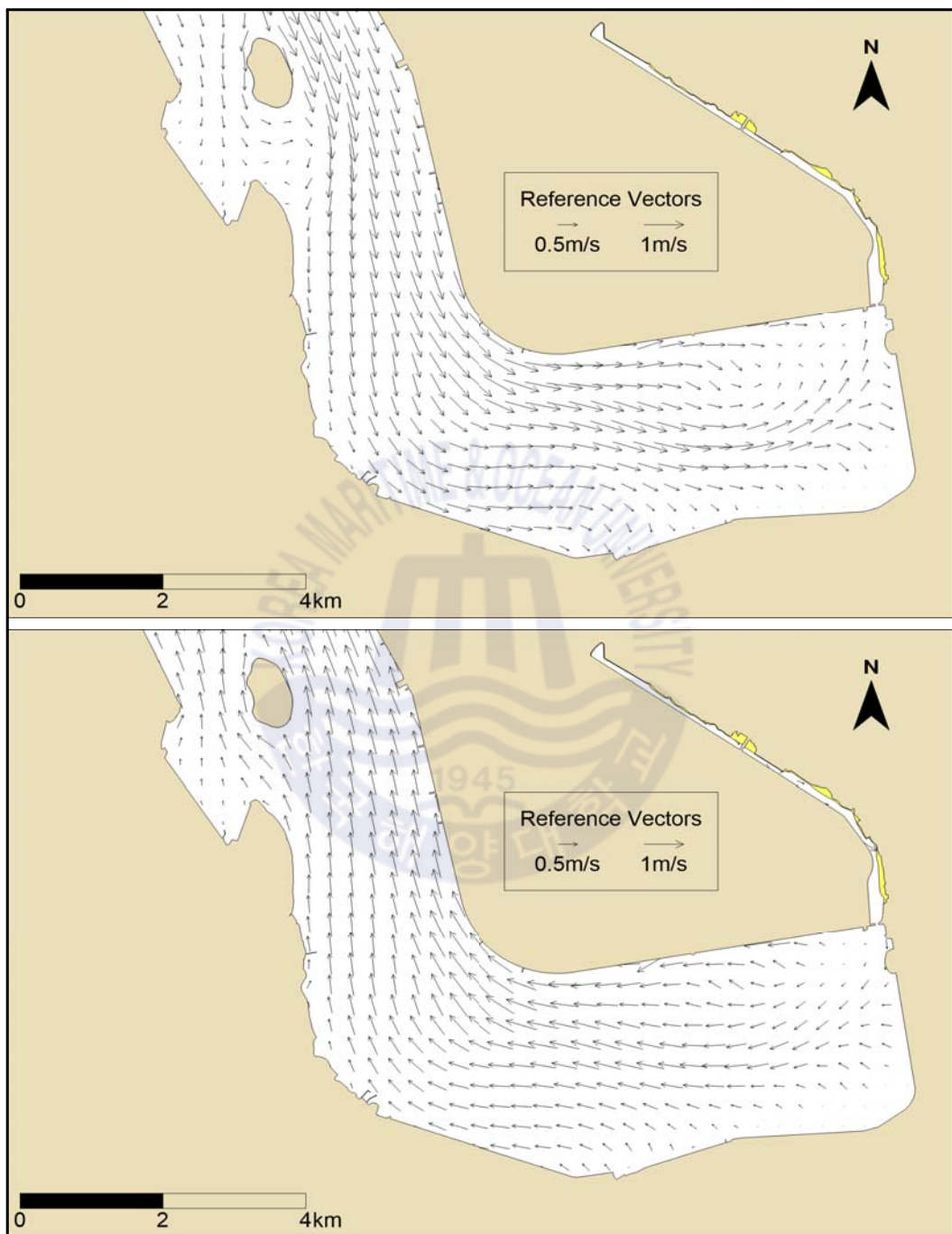


Fig. 4.13 Max. flood and ebb current in flood times

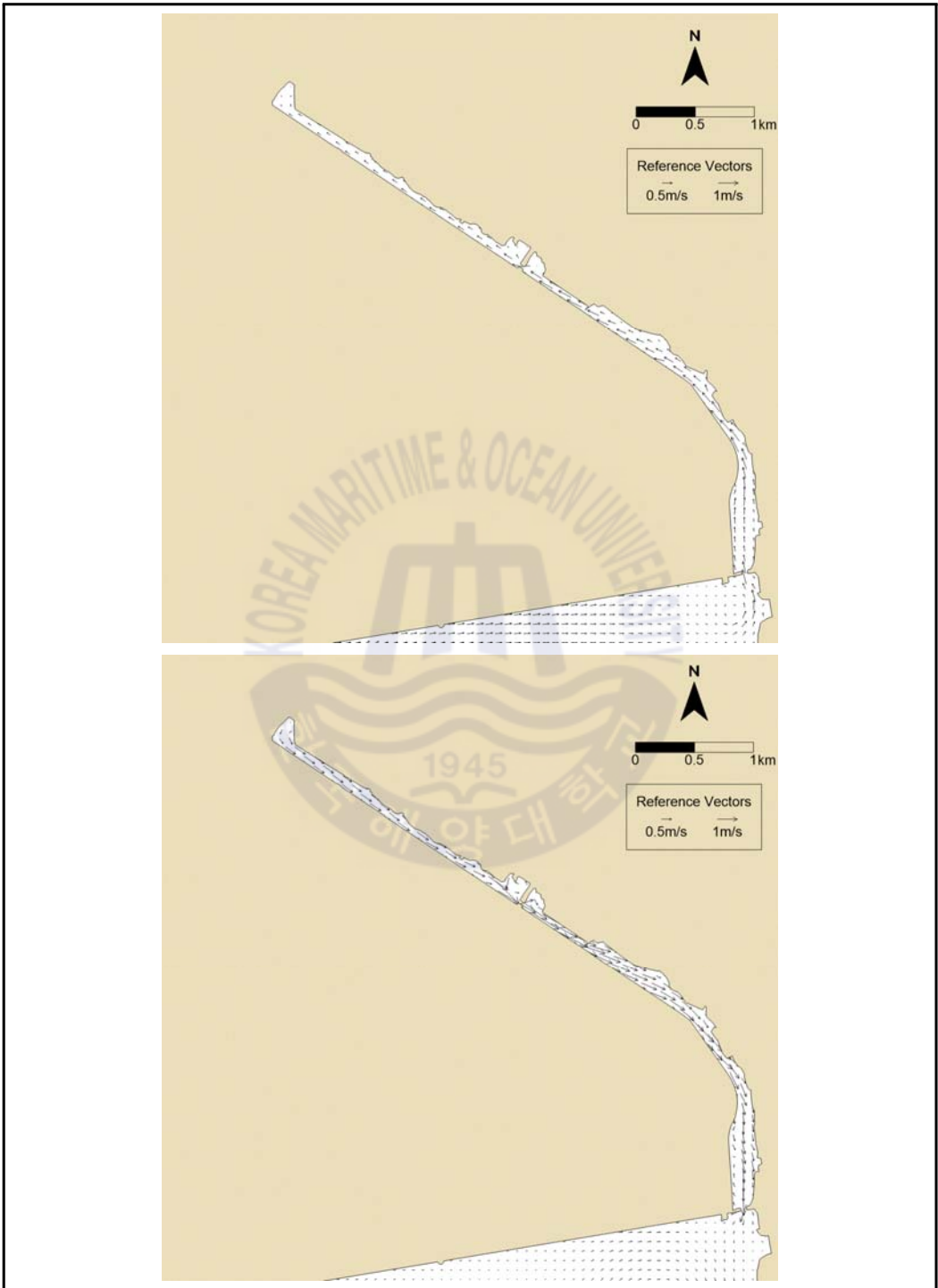


Fig. 4.14 Max. flood and ebb current of the study area in flood times

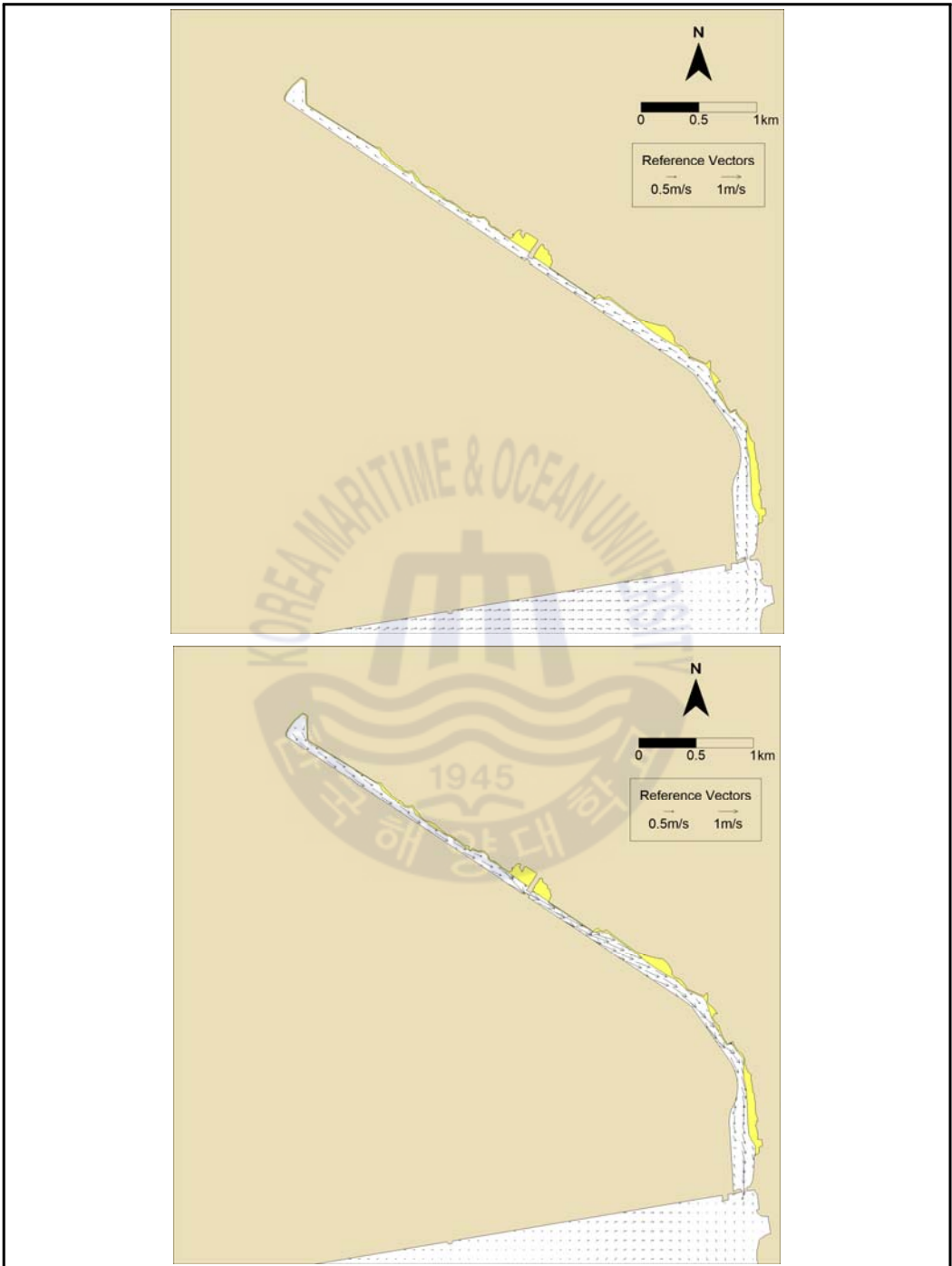


Fig. 4.15 Max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in flood times

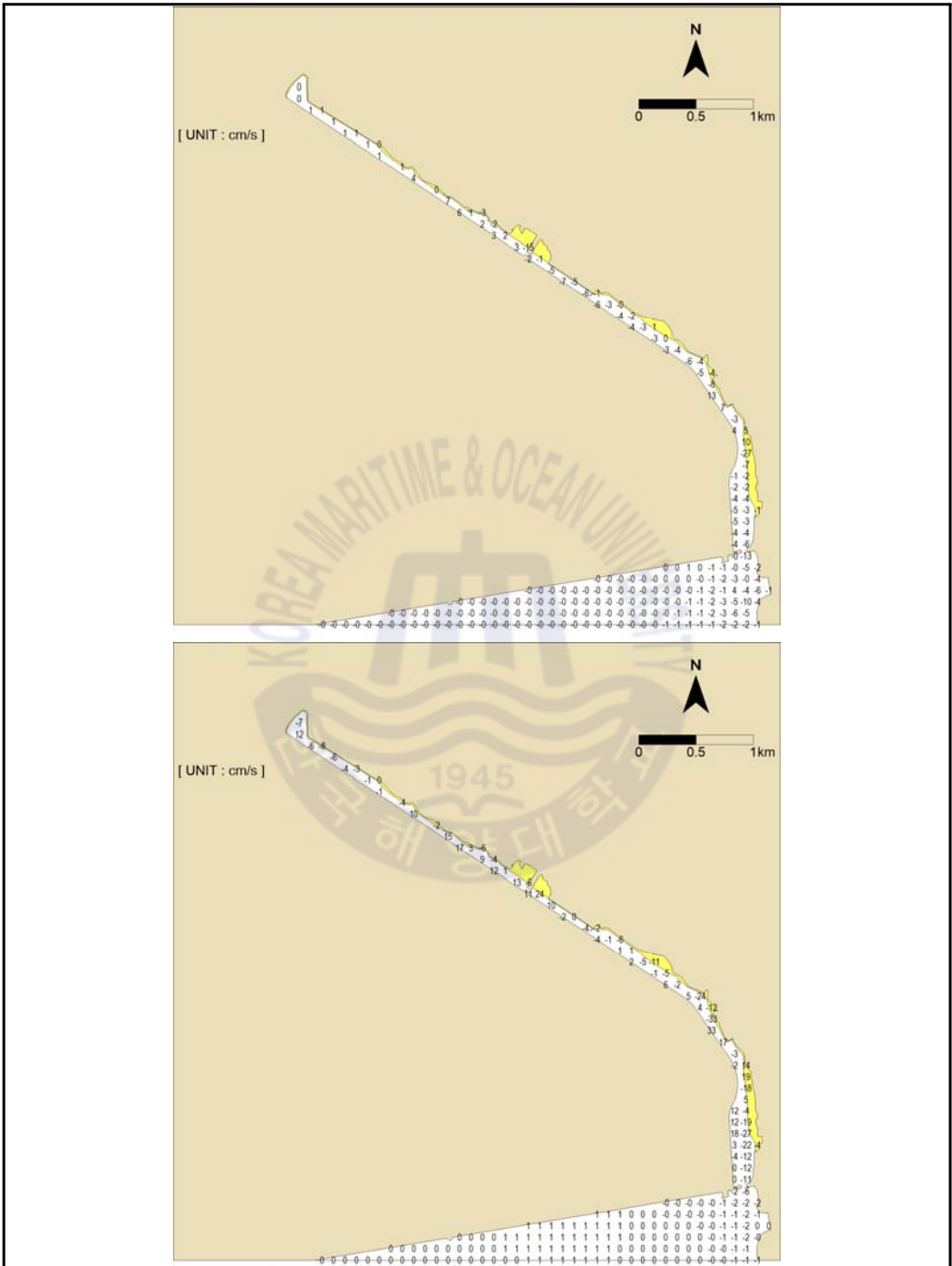


Fig. 4.16 Change of max. flood and ebb current of the study area after development of aqua-velvet in flood times

4.2 퇴적물이동 실험

퇴적물이동 실험은 본 연구의 대상지인 평택·당진항 건설에 따른 인위적으로 조성된 배수로 부근의 퇴적물이동에 따른 해저지형변화를 파악하기 위하여 수행하였다. 또한, 퇴적물이동 실험은 해수유동 실험의 결과를 외력 조건으로 하되, 파랑 영향에 의한 저면전단응력을 추가적으로 고려하여 현실적인 해저지형변화가 계산되도록 시도하였다.

4.2.1 실험내용

연구대상지인 배수로는 주로 조류에 의해 침식, 이동, 퇴적을 반복한다. 특히, 대조기에 강한 조류속에 의해서 재부유된 퇴적물이 아산만 내측으로 유입되며, 하계에는 방조제를 통하여 유입되기도 한다.

연구대상지인 배수로가 위치한 곳은 심해파의 영향은 미미하고 풍파의 영향이 큰 해역이다. 그러나, 풍파가 충분히 발달할 수 있는 취송영역에 제한이 있어 그 영향은 미미하지만, 장기적인 관점에서 파랑의 잉여응력에 의한 퇴적환경 변화는 클 것으로 판단된다. 따라서, 장기파랑에 관여하는 풍파의 계절적 영향을 분석하여 주풍향과 풍속을 선정하여 풍파의 영향을 고려하였다.

연구대상지인 배수로 부근에 위치한 아산, 삼교방조제와 배수로로 유입되는 하천의 유량과 유사량은 “평택·당진항 수리현상조사 보고서(2017.2)”과 “남양천 등 5개 하천정비기본계획 보고서(2009. 6)”의 자료를 이용하여 결정하였으며, 퇴적물이동 실험의 입력자료인 퇴적특성치는 기존 실험 및 연구성과를 이용하여 결정하였다.

퇴적물이동 실험의 목적, 모델구성, 담수유입량, 파랑 등에 대한 부분을 Table 4.5에 제시하였다.

Table 4.5 Overview of sediment transport simulation

항 목		내 용				
사용 모델		• Delft3D(Flow/Mor module) 모델				
실험 목적		• 사업시행으로 인한 퇴적환경변화 예측				
모델 구성		• 해수유동 실험과 동일				
구 분		평상시	하계 홍수시	하계 태풍시	동계 황천시	동계 폭풍시
적용 일수		260	89	1	14	1
담수 유입량	아산	825/4/2.9	1,015/15/3.7		825/4/2.9	
	삼교	1,965/4/1.3	2,212/12/2.4		1,965/4/1.3	
	방림천 (ASH6)	0.209	0.952		0.209	
파랑	풍향	-	-	SSE	NW	NW
	풍속(m/s)	-	-	15.6	10.1	15.3

주) 아산, 삼교방조제 : 평택·당진항 수리현상조사 보고서(2017.2), 평균방류량(m³/s)/30일방류횟수/1회방류지속시간(hr)
 방림천(ASH6) - 배수로 유입하천 중 평수시 유량산정시 기준이 되는 지점(남양천 등 5개 하천정비기본계획, 2009)

4.2.2 모형수립

퇴적물이동 실험은 연구대상 해역의 퇴적물 이동에 영향을 미치는 조석·조류, 파랑, 하천 유량 등의 외력 조건을 반영하여 수행하였다.

계절별 대표 파랑 분포를 산출하기 위한 덕적도 부이의 21년(1996~2016년) 간 파랑자료와 인천 기상대에서 관측한 36년(1981~2016년)간의 바람자료, 아산, 삼교방조제의 방류량 자료를 분석하여 외력 조건 및 외력 조건별 지속일수를 설정하였다. 지속일수는 1년 중 260일을 평상시로, 89일을 하계 홍수시로, 1일을 하계 태풍시, 14일을 동계 황천시로, 1일을 동계 폭풍시로 설정하였다. 퇴적물은 각 계절별 대표상황을 18일간 모의하고, 그 결과를 각 계절별 지속일수로 환산한 후 이를 합산하여 1년간의 결과로 산정하였다.

가. 하천 유량

육상으로부터 유입되는 퇴적물을 고려하기 위해서 인근 방조제의 방류량 통계자료를 이용하여 평상시와 하계 홍수시의 방류조건을 파악하였다. 아산호는 1983~2016년, 삽교호는 1986~2016년의 방류량 자료를 분석하였다. 평상시의 방류량은 방류량이 상대적으로 적은 1~6월과 10~12월의 방류량, 방류횟수, 방류시간을 통계분석하여 입력하였으며, 홍수시의 방류량은 방류량이 상대적으로 많은 7~9월의 방류량, 방류횟수, 방류시간을 통계분석하여 입력하였다. 동계 황천시와 폭풍시의 방류량은 평상시와 동일하게 입력하였다.

배수로 유입하천의 방류량은 “남양천 등 5개 하천정비기본계획(경기도, 2009.6)”의 자료를 근거하여 각 유입지점별 유역면적을 고려하여 유입량을 산정하였다. 평상시와 홍수시의 방류량은 전술한 바와 같이, 7~9월의 방류량을 홍수시로, 1~6월과 10~12월의 방류량을 평수시로 입력하였다. 동계 황천시와 폭풍시의 방류량은 평상시와 동일하게 입력하였다. 방류는 낙조시 조위가 평균 해면일 때 시작하여 1회 방류시간동안 정현곡선의 형태로 지속하였으며, 이를 모델 수행 기간(18일)동안 Table 4.6에 제시된 방류횟수 만큼 반복하도록 하였다.

Table 4.6 River boundary condition

산정 지점	ASH1	ASH2	ASH3	ASH4	ASH5	ASH6	ASH6-2	ASH7	ASH8	ASH9
홍수량	0.139	0.316	0.345	0.389	0.453	0.952	1.010	1.090	1.164	1.187
평수량	0.031	0.069	0.076	0.085	0.100	0.209	0.222	0.239	0.255	0.261

주) 홍수량 : 7~8월(하계), 평수량 : 1~6월, 9월~12월(동계)

나. 파 랑

파랑의 영향이 우세할 것으로 판단되는 하계 태풍시, 동계 황천시, 동계 폭풍시 파랑에 의한 저면 전단응력의 증가를 고려하기 위하여 인천 기상대에서 관측한 36년(1981~2016)간의 바람자료를 분석하였다. 1년 동안 대상해역에서 파랑이 우세할 것으로 판단되는 시기를 하계 및 동계로 구분하여 바람 입력제원을 산정하였다.

바람 입력 제원은 동계 황천시는 동계에 출현율이 높은 W, WNW, NW, NNW, N 풍향의 상위 15일을 평균하여 10.1m/s로 결정하고, 동계 폭풍시는 상위 1일에 해당되는 풍속을 평균하여 15.3m/s로 결정하였다. 주풍향은 동계 황천시와 동계 폭풍시 모두 NW로 설정하였다. 또한, 태풍 통과로 인한 영향을 고려하기 위해 최근 영향을 미친 태풍 곤파스, 무이파, 블라벤 내습시 덕적도 부이에서 관측한 외해파와 해상풍 중 대상해역에 영향이 클 것으로 판단되는 시점(태풍 블라벤 내습시, 2012년 8월 28일 16시)의 해상풍(SSE, 15.6m/s)을 하계 태풍시 외력조건으로 설정하였다.

다. 부유사 초기 및 경계농도

초기 및 외해 경계의 부유퇴적물 농도와 아산, 삼교방조제의 부유퇴적물 유입 농도는 기존 부유사 관측 자료를 이용하여 공간 부유사농도를 입력하였다.

배수로 유입하천의 부유사 유입농도는 전술한 바와 같이 “남양천 등 5개 하천정비기본계획(경기도, 2009.6)”의 방림천(ASH6)의 유사량을 참고하여 각 유역면적을 고려하여 Table 4.7에 제시된 바와 같이 산정하였다.

라. 해저면 조도

해저면에 가해지는 저면 전단응력을 계산하기 위해 사용하는 해저면 조도(k_s)는 Soulsby (1983)의 연구결과 및 보정 실험을 통해 0.02m로 적용하였다.

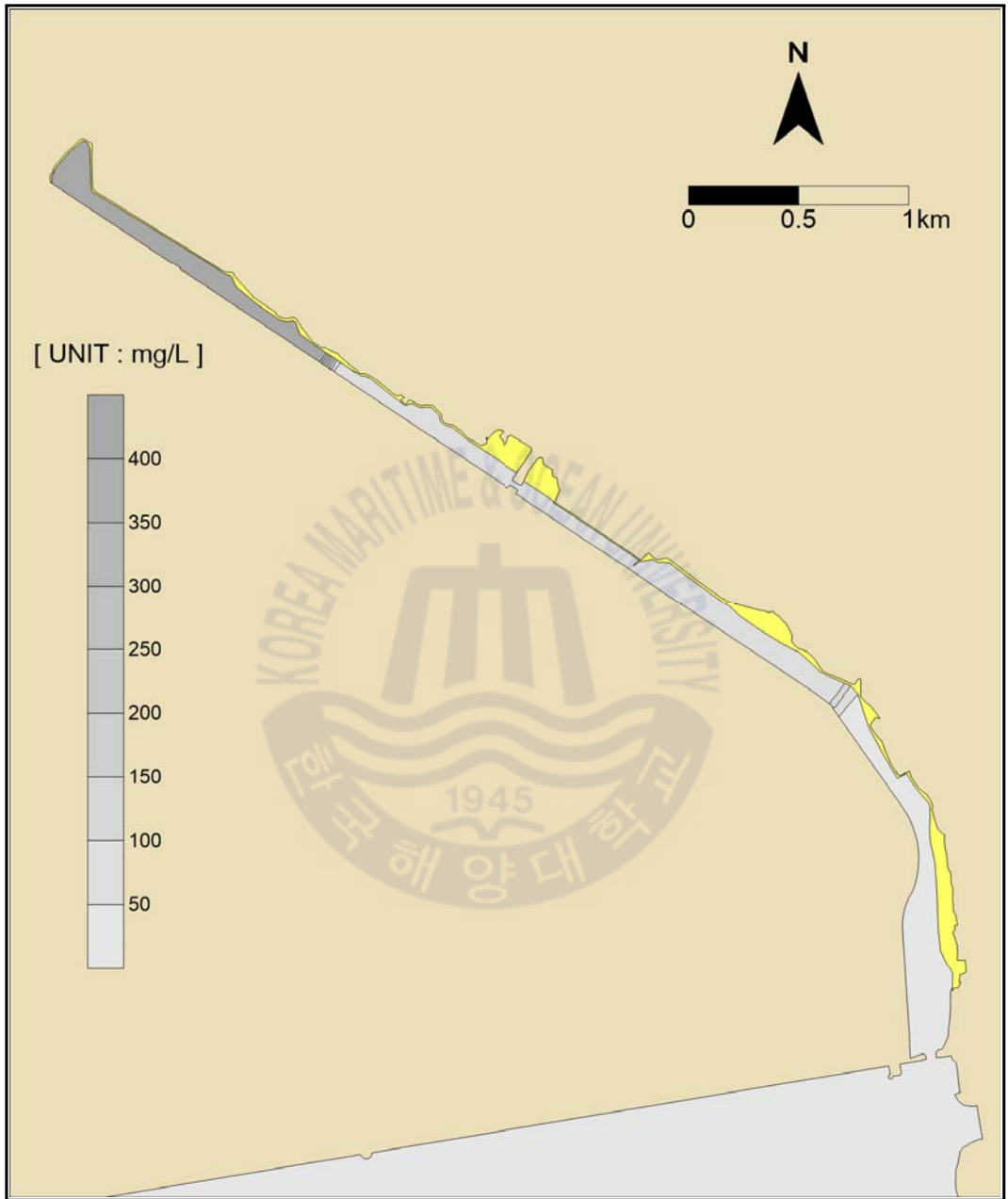


Fig. 4.17 Initial concentration of suspended solid

Table 4.7 Suspended solid condition (mg/L)

산정 지점	ASH1	ASH2	ASH3	ASH4	ASH5	ASH6	ASH6-2	ASH7	ASH8	ASH9
홍수시	2.636	5.982	6.544	7.374	8.588	18.034	19.130	20.640	22.042	22.486
평수시	19.270	43.736	47.850	53.913	62.790	131.859	139.870	150.913	161.161	164.409

주) 홍수시 : 7~8월(하계), 평수시 : 1~6월, 9월~12월(동계)

마. 퇴적물특성치

퇴적물특성치는 보정실험을 통해 퇴적한계 전단응력(critical total bed shear stress for resuspension)은 0.08N/m^2 , 침식한계 전단응력(critical total bed shear stress for settling)은 0.2N/m^2 로 입력하였다. 침식율 계수는 $0.003\text{g/s} \cdot \text{m}^2$ 이고, 퇴적층의 공극율(porosity)은 0.45~0.65로 각각 입력하였다.

침강속도는 부유 퇴적물의 농도와 수층에 작용하는 외력에 의해서 결정되는 Shrestha and Orlob(1996)의 식을 적용하였다. 소류사 입력 입경인 d_{50} 과 d_{90} 은 "평택·당진항 수리현상조사 보고서(2016)"의 해저질 조사 자료에서 $0.0625\text{mm}(4\phi)$ 이상의 모래질 입자를 이용하여 각각 $0.447\text{mm}(2.83\phi)$ 와 $1.240\text{mm}(1.63\phi)$ 로 입력하였다. 안식각은 Bagnold(1966)의 실험값을 이용하여 30° 로 적용하였다.

퇴적물특성치를 Table 4.8에 정리하여 제시하였다.

Table 4.8 Summary of sediment characteristics

입력 계수		입력값					설정 근거	
		평상시	하계 홍수시	하계 태풍시	동계 황천시	동계 폭풍시		
부유사	초기(mg/L)	-					• 공간 부유사 농도로 입력	
	외해(mg/L)	33		39	39		• 기존 부유사 관측자료 활용	
	방조제 (mg/L)	아산	33	80	80	39		• 기존 관측자료를 참고하여 결정
		삼교	33	100	100	39		
해저질	해저면 조도(k_s, m)	0.02					• Soulsby(1983)의 연구결과 및 보정 실험을 통해 결정	
퇴적 작용	퇴적한계 전단응력 ($\tau_d, N/m^2$)	0.08					• Mehta(1986) 실험값 및 보정 실험을 통해 결정	
	부유 퇴적물 침강속도 ($w_{s0}, mm/s$)	1.95×10 ⁻⁴ ~0.28					• Shrestha and Orlob(1996)의 식 이용	
침식 작용	기준침식율 ($\frac{dm_e}{dt}$, g/s·m ²)	0.003					• 보정 실험을 통해 결정	
	실험상수 $\beta(-)$	1.0					"	
	침식한계 전단응력 ($\tau_{ce}, N/m^2$)	0.2					• Villaret and Paulic(1986)의 실험식, 금회 해저질 관측 자료와 보정 실험을 통해 결정	
소류사	중양입경 [누적무게비 상위 50%, d50(mm)]	0.447					• 금회 해저질 관측자료 활용	
	누적무게비 가 상위 10%에 해당되는 입자의 직경 (d90, mm)	1.240					"	
	AOR(°)	30					• Bagnold(1966)의 실험값 적용	

4.2.3 모형검증

퇴적을 검증을 위하여 전술한 바와 같이 “평택·당진항 수리현상조사 보고서 (평택지방해양수산청, 2017)”의 자료를 이용하였다. 해수유동 실험의 모형검증 편에 제시된 관측자료 위치도와 같이, 사업지구와 인접한 수로 IV의 경우 관측치와 계산치의 연간 퇴적률은 각각 3.5cm/yr와 3.4cm/yr로 근접하게 보정이 되었다.

수로Ⅲ은 관측치와 계산치의 연간 퇴적률은 7.2cm/yr, 6.4cm/yr로 차이가 발생하는데, 이는 외해 경계의 영향으로 판단되며 연구대상지가 인접한 수로 IV의 결과보정으로 만족할 만한 검증이 이루어졌다고 판단된다.

Table 4.9 Sedimentation rate verification (cm/yr)

영역	관측치	계산치	관측기간
수로 Ⅲ	3.5	3.4	2010. 5 ~ 2016. 2
수로 Ⅳ	7.2	6.4	

자료 : 평택·당진항 수리현상조사 보고서(평택지방해양수산청, 2017.2)
 주) 퇴적률 - 6년간 평균퇴적률로 퇴적물이동 실험시 검증자료로 활용

4.2.4 시뮬레이션 결과

금회 퇴적물이동 실험은 각 실험시기에 해당하는 지형 및 수심에 대하여, 연간퇴적량에 해당하는 모델링기간(modeling time)을 고려하여 수행하였다

연간퇴적량, 총퇴적량(공사기간 4년), 공사완료(1, 5, 10년) 후 등으로 나누어서 수치모의 결과를 다음과 같이 제시하였다.

가. 연간퇴적량

현재 상태의 연간퇴적량을 Fig. 4.18에 도시하였다. 제시된 바와 같이 배수로 입구부를 포함하는 준설1구역, 서부두 진입도로 전 준설2구역, 후 준설4구역에서 퇴적이 우세하고, 준설1구역 이후인 준설 미 실시 구역에서 침식이 우세한

양상을 보이고 있다.

나. 총퇴적량(공사기간 4년 후)

공사가 수행되는 기간의 총퇴적량을 Fig. 4.19에 도시하였다. 배수로 입구부인 준설1구역은 전반적인 퇴적증가가 나타나고, 그 외의 지역에서는 준설이 진행된 영역에서는 침식이, 그 부근역에서는 퇴적이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 외해역에서 부유사 진입, 그리고 준설영역에서의 유속증가 및 그 외의 영역에서는 상대적인 유속감소가 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

다. 공사완료(1, 5, 10년 후)

공사완료 1년 이후의 결과를 Fig. 4.20에 도시하였으며, 제시된 바와 같이 준설1구역을 중심으로 한 퇴적증가, 그리고 준설영역과 그 부근역에서의 침식과 퇴적증가가 나타나고 있음. 또한, 준설4구역의 북쪽 끝단 부근역에서 퇴적이 우세하게 진행되는 것으로 나타났다.

공사완료 5년 후의 결과는 Fig. 4.21에 도시하였다. 공사완료 1년 후와 유사한 결과를 보이고 있으나, 1구역과 3구역은 침식이 증가하나 그 외 구역에서는 퇴적이 증가하는 것으로 나타났다. 공사완료 10년 후의 결과는 Fig. 4.22에 도시하였다. 공사완료 5년 후와 비교하면 거의 비슷한 결과를 보이고 있으나 퇴적 영역의 증가가 나타나고 있다.

라. 결과분석

금회 실험은 파랑, 담수유입, 조석 등의 시기별 특성을 고려한 특정 실험조건에서 수행되었기 때문에, 정성적인 평가는 가능하지만 정량적인 평가는 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 향후 퇴적환경 모니터링을 통한 침·퇴적 유지관리가 필요할 것으로 사료된다.

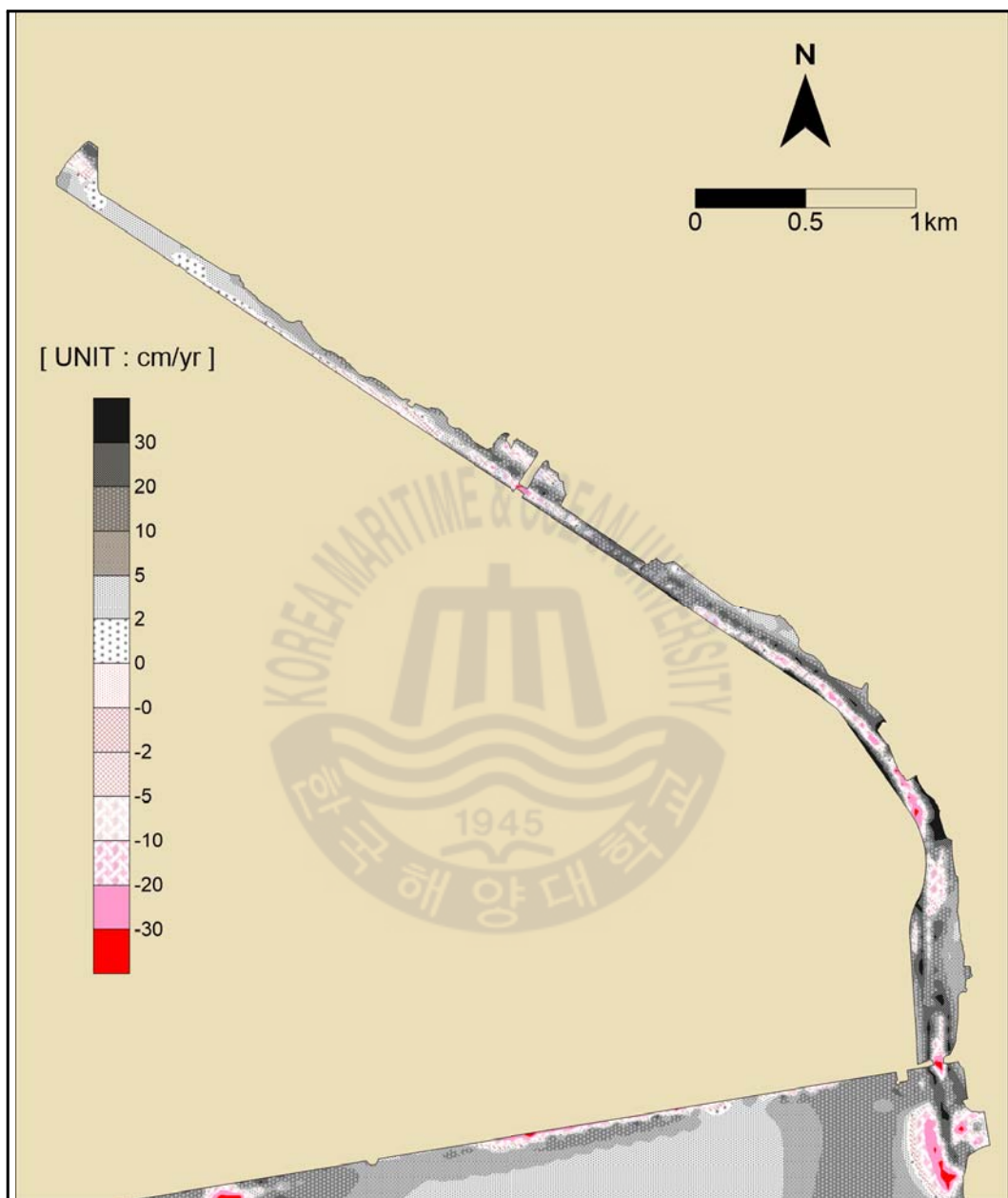


Fig. 4.18 Annual sediment rate

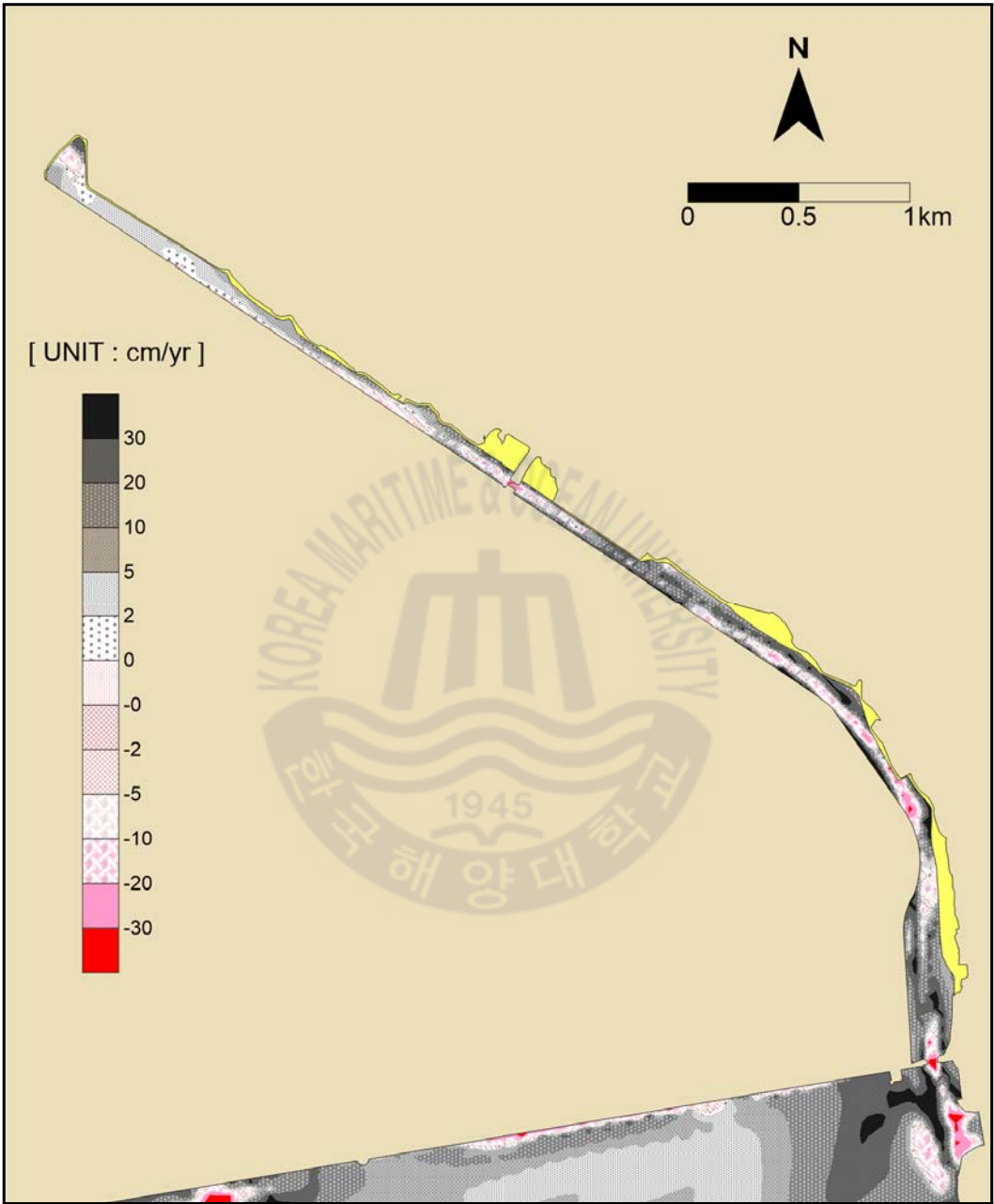


Fig. 4.19 Sediment rate after 4 years of construction

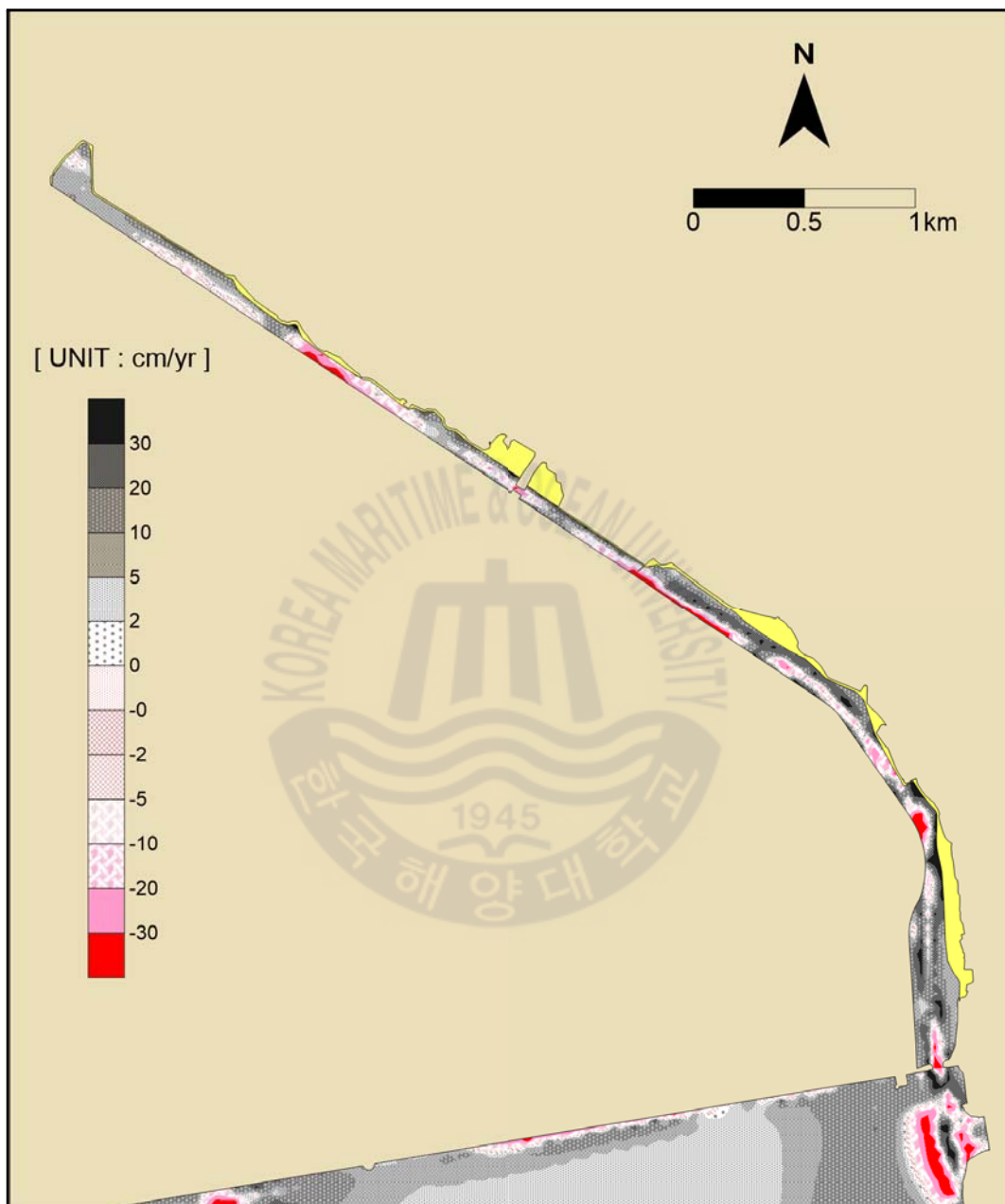


Fig. 4.20 Sediment rate after 1 year of development

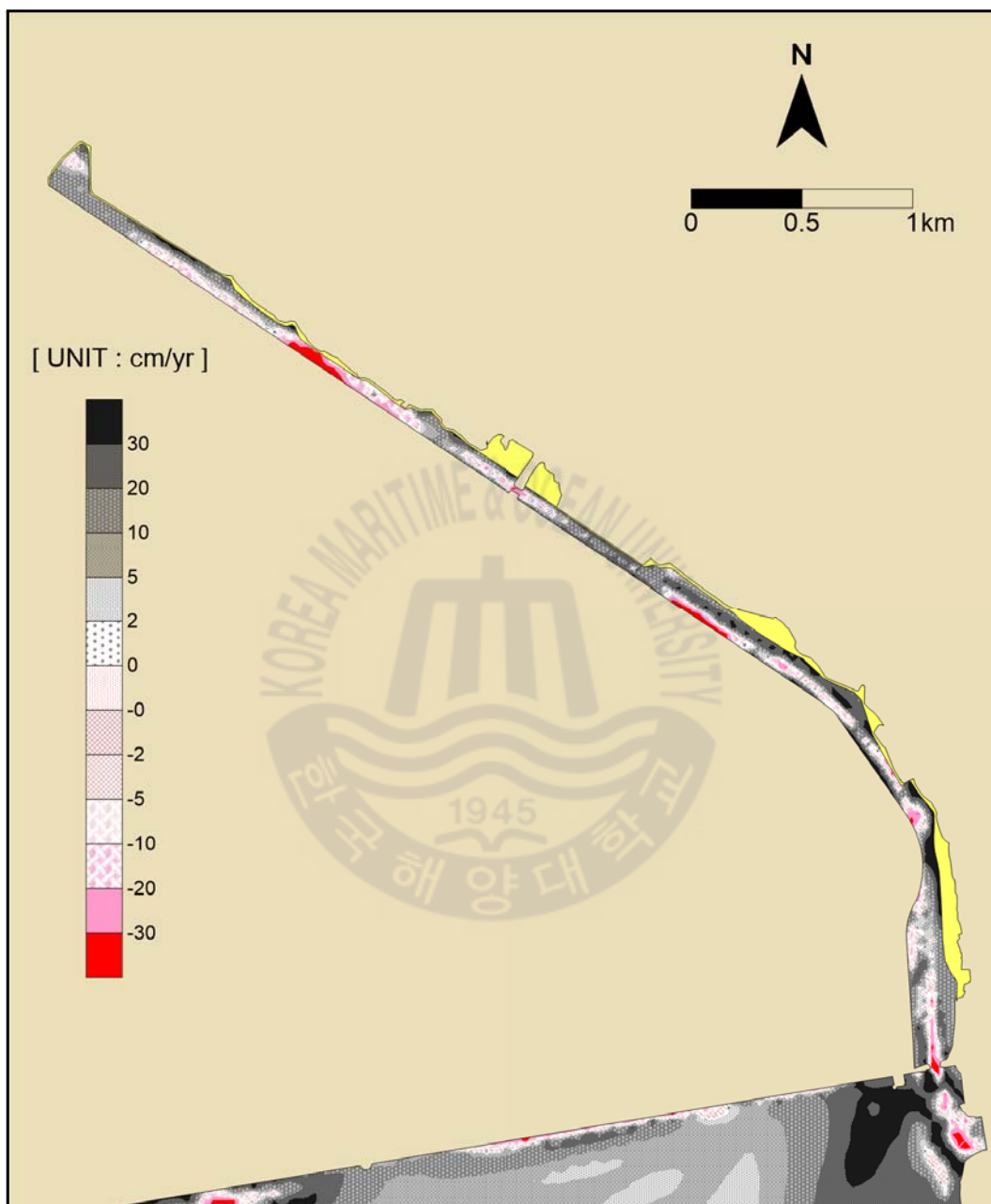


Fig. 4.21 Sediment rate after 5 years of development

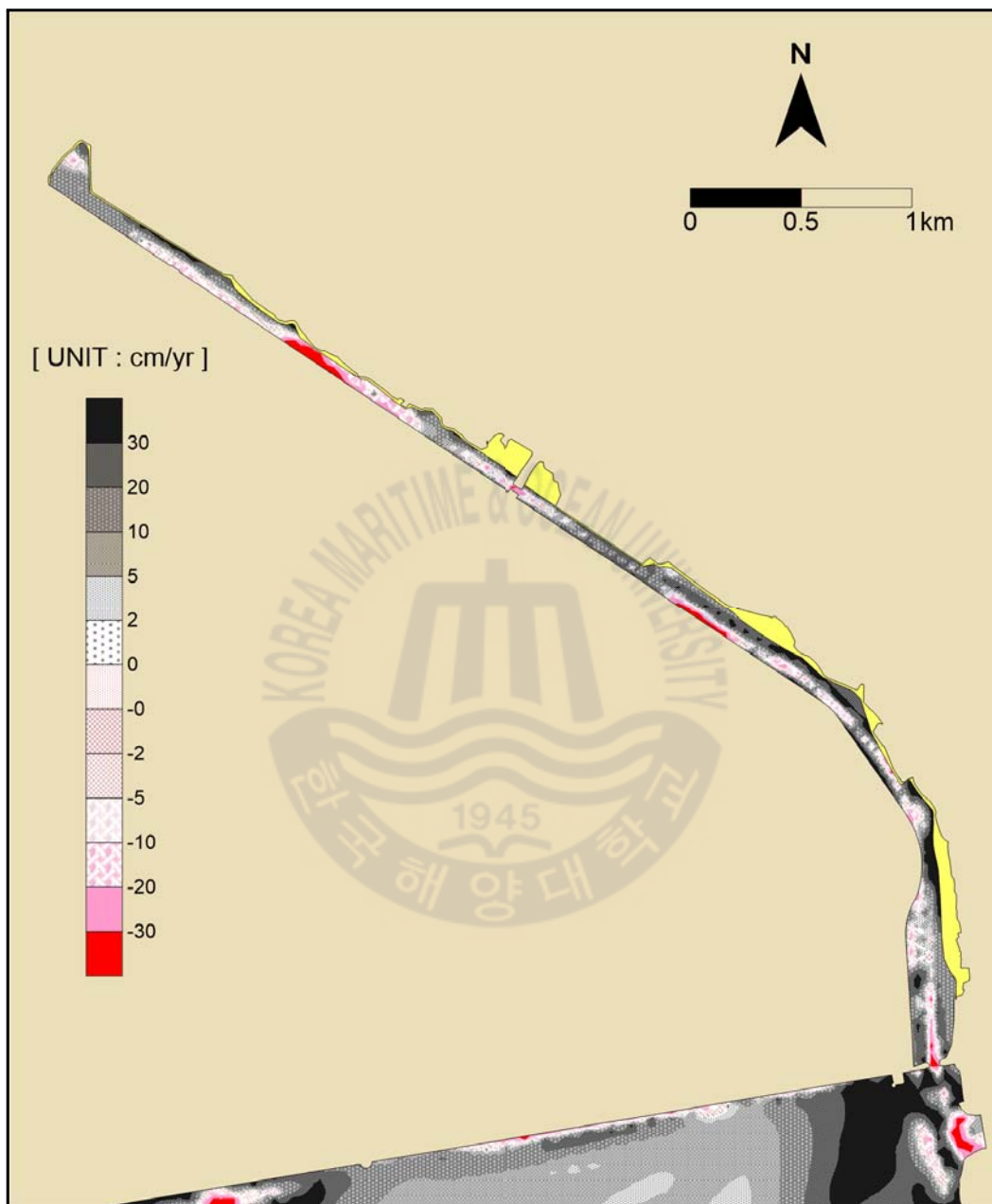


Fig. 4.22 Sediment rate after 10 years of development

제 5 장 결론 및 제언

본 연구대상 지역은 항만건설로 인하여 인공적으로 생성된 아산만 내측에 위치한 배수로로 감조하천의 성격을 띄고 있다. 인위적으로 설정된 배수로는 일반 하천에 비하여 퇴적 또는 침식우세 등의 극단적인 성격이 보인다. 이러한 퇴적환경 현황을 파악하기 위하여 금회 연구에서는 퇴적환경의 외력조건으로 작용하는 조석, 파랑, 그리고 하천 등의 영향을 분석하였으며, 이에 따라 Delft3D의 유동과 퇴적물이동 모델을 적용하여 유동 및 퇴적환경 현황을 재현하였다. 재현결과 협수로와 곡선부에서 침식이 기타 수로에서는 퇴적이 우세한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

또한, 이를 근거하여 차후 1, 5, 10년에 대한 장기간의 모델링을 수행하였으며, 이에 대한 결과 현재 배수로의 퇴적환경은 평형상태로 유지되는 것으로 판단된다.

5.1 결론

아산만 평택·당진항 건설에 따른 내측에 위치한 배수로에 대해 해수유동 실험을 평수시와 홍수시로 조사·분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 평수시 배수로에서 창조시는 남쪽 입구부에서 최대 유속(1.08m/s)을 보이며 북류하며 약화되었다가, 협수로를 거치면서 1.04m/s 이상의 유속 분포를 보이고 가장 협소한 배수로 중앙부에서 최강 유속이 1.54m/s 이상으로 나타났다. 낙조시는 창조시보다 약화된 유속이 유출되는데 남쪽 입구부에서 0.59m/s, 협수로에서 0.62m/s, 배수로 중앙부에서 0.85m/s 이상의 최강 유속을 나타내었다. 이러한 감소현상은 정비공사로 인한 배수로 폭의 변화가 조랑감소로 이어져 나타나는 현상으로 판단된다.

2) 홍수시에는 평수시와 비교하여 아산만 내측 해역의 유황은 큰 변화가 없으나, 배수로에서는 낙조시의 유속이 창조시 보다 크게 나타난다. 전술한 각 지점에서 창조시에는 0.76m/s, 0.80m/s, 0.85m/s 이상의 유속이, 낙조시에는 창조시 보다 강화된 1.21m/s, 1.51m/s, 2.11m/s 이상으로 최강 유속을 보였다. 이는 평수시와는 반대로 홍수시 하천에서 배제되는 유량에 의한 영향이 탁월하기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 배수로 부근의 퇴적물이동에 따른 해저지형변화를 파악하기 위하여, 연간퇴적량에 해당하는 모델링기간을 고려하여 실험을 수행하였다. 연간퇴적량, 총퇴적량(공사기간 4년), 공사완료(1, 5, 10년) 후 등으로 나누어서 수치시뮬레이션한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

3) 공사완료 1년 이후의 결과는 준설1구역을 중심으로 한 퇴적증가, 그리고 준설영역과 그 부근역에서의 침식과 퇴적증가가 나타났으며, 준설4구역의 북쪽 끝단 부근역에서 퇴적이 우세하게 진행되는 것으로 나타났다. 공사완료 5년 후의 결과는 1년 후와 유사한 결과를 보이나, 1구역과 3구역은 침식이 증가하는 반면에 그 외 구역에서는 퇴적이 증가하는 것으로 나타났다. 공사완료 10년 후의 결과는 5년 후와 비교하면 거의 비슷한 결과를 보이나 전반적으로 퇴적영역의 증가가 나타나고 있다.

이상은 파랑, 담수유입, 조석 등의 시기별 특성을 고려한 특정 실험조건에서 수행되었기 때문에, 정성적인 평가는 가능하지만 정량적인 평가는 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 향후 퇴적환경 모니터링을 통한 침·퇴적 유지관리가 필요할 것으로 사료된다.

5.2 제언

최근 대상 구간을 평택항 문화·관광 클러스터로 조성하기 위한 「아쿠아벨벳 사업」이 평택시 주관으로 수행되고 있지만 평택·당진항 개발로 인하여 인위적으로 조성된 배수로로, 지속적인 퇴적과 무분별하게 조성·시공되어 있는 호안 및 석축으로 인한 배수불능과 오염물 퇴적 등의 문제가 있는 지역이다.

본 연구에서는 연구대상지의 퇴적물 이동에 관여하는 해양외력조건인 조석, 조류, 파랑, 담수유입량에 대한 자료를 수집·분석하고, 퇴적물특성치인 점착성 및 비점착성 퇴적물에 대한 인자들에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 연구의 과정에서 수행하게 되는 해양의 퇴적물이동에 관여하는 모든 인자에 대한 분석 결과는 향후 연구의 충분한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

물론, 본 연구에서 수행된 예측실험은 담수영향을 고려하였으며, 조석, 파랑 등의 영향을 고려한 종합적인 지형변화 예측 및 분석이 수행되었다.

그러나, 최근의 해당 배수로 인근지역에 진행되고 있는 황해자유무역지구 개발 등 대규모 토목 공사로 인하여 연구대상지인 배수로 부근의 해수유동, 담수유입, 침식·퇴적 변화 등에 대한 현장자료를 반영한 수치모의가 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 이러한 해당 지역에 대한 후속적인 현장모니터링과 이에 퇴적환경변화에 대한 연구를 계속 진행할 예정이다.

참고문헌

- 국토해양부(2011), 제3차 전국무역항 기본계획
- 경기도(2009), 남양천 등 5개 하천기본계획 보고서
- 아산시(1998), 아산항 2단계 개발사업 추가과업 실시설계 보고서
- 평택시(2014), 아산만 조력발전소 건립에 따른 환경·재해 연구
- 평택시(2017), 아쿠아벨벳 프로젝트(평택항만배수로 정비사업, 2017-2021)
- 평택지방해양수산청 (2007), 평택·당진항 항만배후단지 부지조성사업(기반시설)기본 및 실시설계 보고서
- 평택지방해양수산청 (2015a), 평택·당진항 항만배후단지(2-1단계) 조성사업 기본 및 실시설계 보고서
- 평택지방해양수산청(2015b), 평택·당진항 수리현상조사용역 보고서
- 평택지방해양수산청(2018), 평택·당진항 배수로 정비공사 환경영향평가서
- 하천관리정보시스템(2014), 한국하천일람
- 한국지질자원연구원(2004), 한국의 지질노두 150선.
- 해양수산부(2011), 제3차 전국무역항 기본계획
- 해양수산부(2015), 제3차 전국무역항 기본계획 수정계획
- Bagnold, R. A., (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US government Print Office.
- Boris, J. and D. Book, (1973). "Flux corrected transport I. SHASTA, a fluid transport algorithm that works." Journal of Computational Physics, Vol. 11, pp. 38-96.
- Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. (2001). General view on sand transport by currents and waves: data analysis and engineering modelling for uniform and graded sand.

- Deltares, (2019). User manual for Delft3D-FLOW (Hydro - Morphodynamics), pp. 1-685.
- Forester, C. K., (1979). "Higher Order Monotonic Convective Difference Schemes." *Journal of Computational Physics*, Vol. 23, pp. 1-22.
- Hirsch, C., (1990). *Numerical computation of internal and external flows*. John Wiley & Sons, New York.
- Huang, W. and M. Spaulding, (1996). "Modelling horizontal diffusion with sigma coordinate system." *Journal of Hydraulic Engineering*, No. 122, Vol. 6, pp. 349 - 352.
- In Corpus Christi, USA (2003). "Sediment transport by current sand waves; general approximation formulae Coastal Sediments."
- Jagers, H. R. A. and S. A. H. van Schijndel (2000). 3D computations around structures. Tech. Rep. Q2487, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, In Dutch (3D rekenen rondom constructies).
- Los, F. and J. Brinkman, (1988). "Phytoplankton modelling by means of optimization; a 10-year experience with Bloom II." *Verh. Int. Ver. Limnol*, Vol. 23, pp. 790 - 795.
- Mancini, J. L., (1978). "Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions." *Journal Water Pollution Control Federation*, pp. 2477 - 2484.
- Rijn, L. C. van, (1984). "Sediment transport, Part I: bed load transport." *Journal of Hydraulic Engineering*, No. 110, Vol. 10, pp. 1431 - 1456.
- Rijn, L. C. van (1993), *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, The Netherlands.
- Stelling, G. S. (1984), *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*. Tech. Rep. No. 35, Rijkswaterstaat.