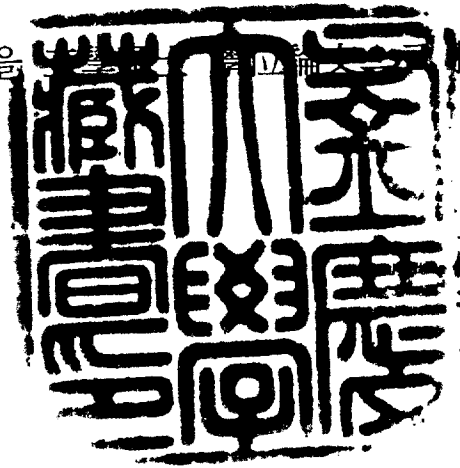


工學碩士 學位論文

蔚山港의 堆積特性에 關한 研究

指導教授 柳 青 魯

이 論文을



提出함

2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

海洋開發學科

宋 薰

이 論文을 宋薰의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2001年 12月 15日

主 審 工學博士 金 憲 泰



委 員 工學博士 尹 吉 秀



委 員 工學博士 柳 青 魯



목 차

List of Figures	ii
List of Tables	vi
Abstract	vii
1. 연구배경 및 목적	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	1
2. 울산항의 수리 및 퇴적환경	4
2.1 지형학적 특성	4
2.2 기상학적 특성	7
2.3 수리학적 특성	7
2.4 퇴적 특성	8
3. 수치모델에 의한 해수유동의 예측	16
3.1 해수유동 수치모델링	16
3.1.1 수치모델의 개요	16
3.1.2 기초방정식의 차분화	19
3.2 수치모델의 구축 및 검증	21
3.3 계산 대상해역에서의 해수유동특성	31
4. 퇴적환경에 관한 수치실험	44
4.1 입자추적모델의 구성	44
4.2 입자의 침강속도	47
4.3 유입토사의 확산과 퇴적	48
4.3.1 울산항의 퇴적토층 지질조사	48
4.3.2 울산신항만 건설 전의 퇴적특성	50
4.3.3 울산신항만 건설 후의 퇴적환경 변화	55
5. 결론 및 고찰	68

참고문헌

List of Figures

- Fig. 1-1. Flow chart of the work.
- Fig. 2-1. Study area (large scale).
- Fig. 2-2. Study area (small scale).
- Fig. 2-3. Mean insert height per unit area in Ulsan Bay same data as Table 2-1.
- Fig. 2-4. Dredging station in 1986-1990.
- Fig. 2-5. Dredging station in 1991-1995.
- Fig. 2-6. Dredging station in 1996-2000.
- Fig. 2-7. Annual dredging amount per unit area in Ulsan Bay.
- Fig. 2-8. Annual amount of rainfall per unit area in Ulsan Bay.
- Fig. 3-1. Grid system.
- Fig. 3-2. Definition of variables.
- Fig. 3-3. Grid system of the computing area (large scale).
- Fig. 3-4. Bottom topography of study area (2D) (large scale).
- Fig. 3-5. Grid system of the computing area (small scale).
- Fig. 3-6. Bottom topography of study area (2D) (small scale).
- Fig. 3-7. Comparison of the tidal curve at P.
- Fig. 3-8. Maximum flood current in Ulsan Bay (large scale).
- Fig. 3-9. Maximum ebb current in Ulsan Bay (large scale).
- Fig. 3-10. Residual current in Ulsan Bay (large scale).
- Fig. 3-11. Maximum flood current before construction Ulsan New Port (small scale).
- Fig. 3-12. Maximum ebb current before construction Ulsan New Port (small scale).

- Fig. 3-13. Residual current before construction Ulsan New Port (small scale).
- Fig. 3-14. Maximum flood current after construction Ulsan New Port (small scale).
- Fig. 3-15. Maximum ebb current after construction Ulsan New Port (small scale).
- Fig. 3-16. Residual current after construction Ulsan New Port (small scale).
- Fig. 3-17. Velocity decreasing rate of tidal current due to the construction of the New Port breakwaters (maximum flood).
- Fig. 3-18. Velocity decreasing rate of tidal current due to the construction of the New Port breakwaters (maximum ebb).
- Fig. 4-1. Grid system for interpolation of particle position.
- Fig. 4-2. Boring Point.
- Fig. 4-3. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.0015\text{ mm}$).
- Fig. 4-4. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.003\text{ mm}$).
- Fig. 4-5. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.006\text{ mm}$).
- Fig. 4-6. Sedimentation characteristic after construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.0015\text{ mm}$).
- Fig. 4-7. Sedimentation characteristic after construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.003\text{ mm}$).

- Fig. 4-8. Sedimentation characteristic after construction of Ulsan New Port (after 30 *day*, $\Phi=0.006$ *mm*).
- Fig. 4-9. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ *mm*).
- Fig. 4-10. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ *mm*).
- Fig. 4-11. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003$ *mm*).
- Fig. 4-12. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003$ *mm*).
- Fig. 4-13. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006$ *mm*).
- Fig. 4-14. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006$ *mm*).
- Fig. 4-15. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ *mm*).
- Fig. 4-16. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ *mm*).
- Fig. 4-17. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003$ *mm*).
- Fig. 4-18. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003$ *mm*).
- Fig. 4-19. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006$ *mm*).

- Fig. 4-20. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).
- Fig. 4-21. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.0015\text{ mm}$).
- Fig. 4-22. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.0015\text{ mm}$).
- Fig. 4-23. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).
- Fig. 4-24. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).
- Fig. 4-25. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).
- Fig. 4-26. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).

List of Tables

Table 2-1. Annual Amount of deposition sediment referred from
selected reports

Table 2-2. Annual Amount and area of dredging

Table 3-1. Harmonic analysis results of the tide in the Ulsan
Bay

Table 3-2. Discharge of the Tae-Hwa river

Table 3-3. Computation conditions of the tidal current model

Table 4-1. Settling velocity of the suspended solids (Kim, 1997)

Table 4-2. Soil exploration of the transported deposit

A Study on the Characteristics of Deposition in Ulsan Port

Hoon Song

Department of Ocean Science and Technology,
Graduate School of Industry,
Pukyong National University

ABSTRACT

Ulsan Port located in South East coast of Korea peninsula has been pointed out as the most important port to control the channel by dredging every year caused by the sediment from Tae-hwa river.

Ulsan New Port is now under construction.

It may affect to the deposition environment in the port.

In this study, deposition characteristics by the sediment from the river was checked with the sense of temporal and spatial changes by the review of conventional field works and fundamental numerical simulation considering the new port construction conditions.

As the results, comparative discussions on the deposition were made under the condition of before and after construction of the new port.

The main results obtained can be summarized as follows:

1. The most of deposition was controlled by sediments from Tae-hwa river under the flood in summer.
2. The temporal and spatial deposition characteristics were analyzed using the numerical model that coupled 2-D tidal

current and deposition models.

3. The temporal and spatial changes of deposition by the new port construction are significantly irregular, however, it is pointed out that the new port construction make increase of deposition in inner port and decrease of current velocity significantly in the outer port.

1. 연구배경 및 목적

1.1 연구배경

항만공사 및 기존항만의 기능을 유지하는데 있어서 준설공사를 배제하고는 논의하기 어려울 정도로 전국 항만의 기능을 유지하는데 준설공사는 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 울산항과 같이 태화강을 비롯한 여러강과 하천들이 유입하는 경우에는 항만의 제 기능이 유지될 수 있도록 매년 막대한 예산을 들여 준설공사를 시행하고 있다. 그럼에도 불구하고 준설공사 시 착공전 측량과 자체적으로 예상한 매몰량과는 현격한 차이가 있어 공사추진에 어려움을 겪는 일이 종종 있음에도 이러한 항내매몰 등에 관한 연구는 그다지 많지 않다. 경제적인 면에 있어서도 항만의 준설계획이 효율적으로 이루어질 수 있도록 하기 위해서는 항내의 물질수송 및 퇴적기구를 보다 체계적이고도 과학적으로 정도 높게 예측해야 함을 강조할 수 있다. (Kim, 1998)

기존의 울산항 퇴적에 대한 연구는 울산항 개발과정에 따른 준설, 자연매몰·퇴적에 의한 수심변화의 특징을 해석하여 기본적인 매몰특성을 파악하는 내용이 대부분이었으나, 본 연구에서는 여기에 수치적 입사추적법을 이용하여 신항만건설등 지형변화에 따른 퇴적한양의 변화를 정량적으로 비교·분석 하고자 한다.

항만내의 매몰현상은 그 항이 제 기능을 수행 할 수 있는지에 막대한 영향을 준다. 특히, 울산항은 유입하천을 가진 내만이며, 현재 진행중인 신항만건설은 울산항의 유동환경 뿐만 아니라 물질수송기구에도 커다란 변화를 야기할 것으로 예상된다. 이러한 울산항내의 물질수송기구 및 퇴적특성의 규명은 울산항의 항만기능 유지를 위한 효율적인 항로유지 및 환경관리를 위한 대책수립의 기본적인 자료가 될 것이다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구는 울산항의 항만기능 유지를 위한 항로유지준설 및 수질환경관리를 위해 기초자료가 되는 울산항내의 물질수송기구 및 퇴

적환경의 변화특성을 파악하고자 한 것으로 다음과 같은 연구내용으로 구성하였다.

1) 울산항 내로 유입되는 토사량을 유입하천 유량의 함수로 연관시켜 추정하고 다시 수치입자수로 환산한 후 Lagrangian 입자추적 실험을 통하여 토사의 수송과정 및 퇴적특성을 규명하고자 한다. 그리고 울산항내 준설공사 범위 및 준설량 설정에 필요한 자료를 제공하기 위하여 울산신항만의 건설에 따른 울산항내의 유동환경 및 퇴적기구에 미치는 영향을 파악하고, 울산항내의 물질수송기구 및 퇴적환경변화를 예측하고자 한다.

2) 울산 신항만개발에 따른 지형변화로 인하여 변화하는 해수유동을 재현하여, 유동환경변화 특성과 부유토사의 침강속도를 고려한 Lagrangian 입자추적모델을 적용하여 울산항내의 퇴적환경변화의 특징을 규명한다.

이를 체계적으로 논의하기 위하여 제 2장에서는 울산항의 개항과 기상 및 수질, 그리고 1986년부터 2000년까지의 준설현황을 조사, 분석하고 울산항 해역 물리환경 특성을 정리하였다. 제 3장에서는 2 차원 수심평균 유동모델을 이용하여 울산항 및 주변해역의 해수유동을 재현한 후, 재현된 유동장 하에서 태화강 하구로부터 유입되는 부유토사의 입경에 해당하는 수치입자를 연속 투하하여 Lagrangian 입자추적 실험을 실시하였다. 이 결과를 이용하여 울산만내의 퇴적토사량의 분포특성을 논의하고, 신항만건설 전·후의 유동환경 변화로 인하여 야기되는 물질수송기구 및 퇴적특성의 변화에 대해 논의한다. 제 4장에서는 입자추적 실험을 통하여 얻어진 결과와 울산항내에서 1986년부터 2000년까지 실시된 준설량과의 관련성을 규명하여 울산만내의 퇴적영역 및 퇴적량을 보다 정도 높게 예측하여 보다 경제적 및 효율적인 유지준설을 할 수 있는 방안에 대해 검토한다.

이상의 연구과정 및 내용을 요약하면 Fig. 1-1과 같다.

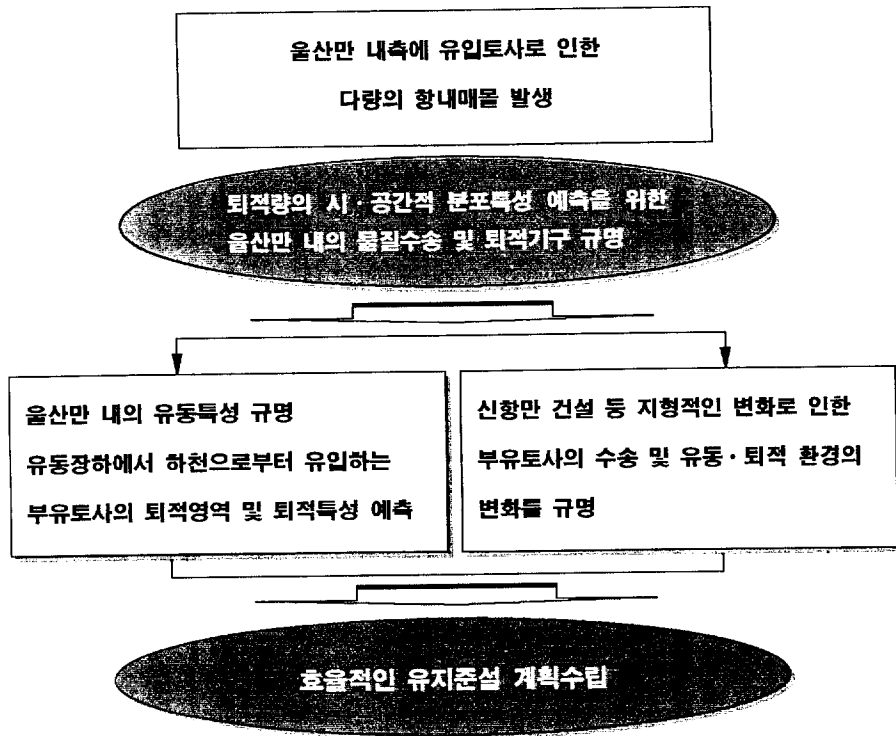


Fig. 1-1. Flow chart of the work.

2. 울산항의 수리 및 퇴적환경

2.1. 지형학적 특성

울산만은 Fig. 2-1에서 나타낸 바와 같이 동해안 남부에 위치하여, 폭 900~2500 m, 길이 약 6.6 km인 만으로 태화강(유역면적 652 km²)이 유입하고 있다. 수심은 울산만 남측해역의 중앙수로에서는 20 m로부터 점차 얕아져 북부에서는 준설공사를 실시하여 10 m를 유지하고 있다. 수면적은 6.3 km²이고 동쪽은 산악으로 가로막혀 있으며, 남쪽으로 개방되어 있다. 울산만은 원래 소어항이었으나 장생포에서 정류공장 건설을 위해 5천톤급 접안시설을 하고, 북내항에 군수물자 하역을 목적으로 물양장 240 m가 항만시설의 전부였다. 1962년 2월 울산공업단지 조성사업 착수와 동시에 북내항을 개발하기 시작하여 현재는 4 만톤급의 선박까지 접안 할 수 있게 되었다. 한편, 만입구에서 1989년부터 동방파제(646 m) 축조공사를 착수하여 1998년도에 완공하였고, 온산항에 울산신항만 방파제 1단계(1공구) 축조공사가 진행되고 있다.

울산시역을 관통하여 울산항으로 유입하는 주요하천인 태화강 유역의 개황을 살펴보면 다음과 같다. 태화강은 울주군 상북면 덕현리에서 발원하여 남구 매암동 부근의 동해(울산만)로 유입되는 하천으로 유역면적 652.4 km², 유로연장 44.7 km, 유역평균폭 14.6 km로서 유역은 사각형 형상을 하고 있다. 그리고 동경 129° 0' 20" ~ 129° 25' 00", 북위 35° 27' 19" ~ 35° 45' 37" 사이에 위치하고 있으며 남북의 길이는 약 35.5 km, 동서의 길이는 약 37.5 km 정도이다.

울산항의 항세를 살펴보면, 항계수역은 약 83 km² (2,511 만평)이고 2001년 현재 울산항 동시 접안능력이 90척 3,068,000 DWT이며 24,477,000 톤의 동시 접안능력과 14,182 m의 안벽시설을 갖추고 있다. 항로는 길이 13.5 km, 폭 250 m, 수심 (-)12 m를 유지한다.

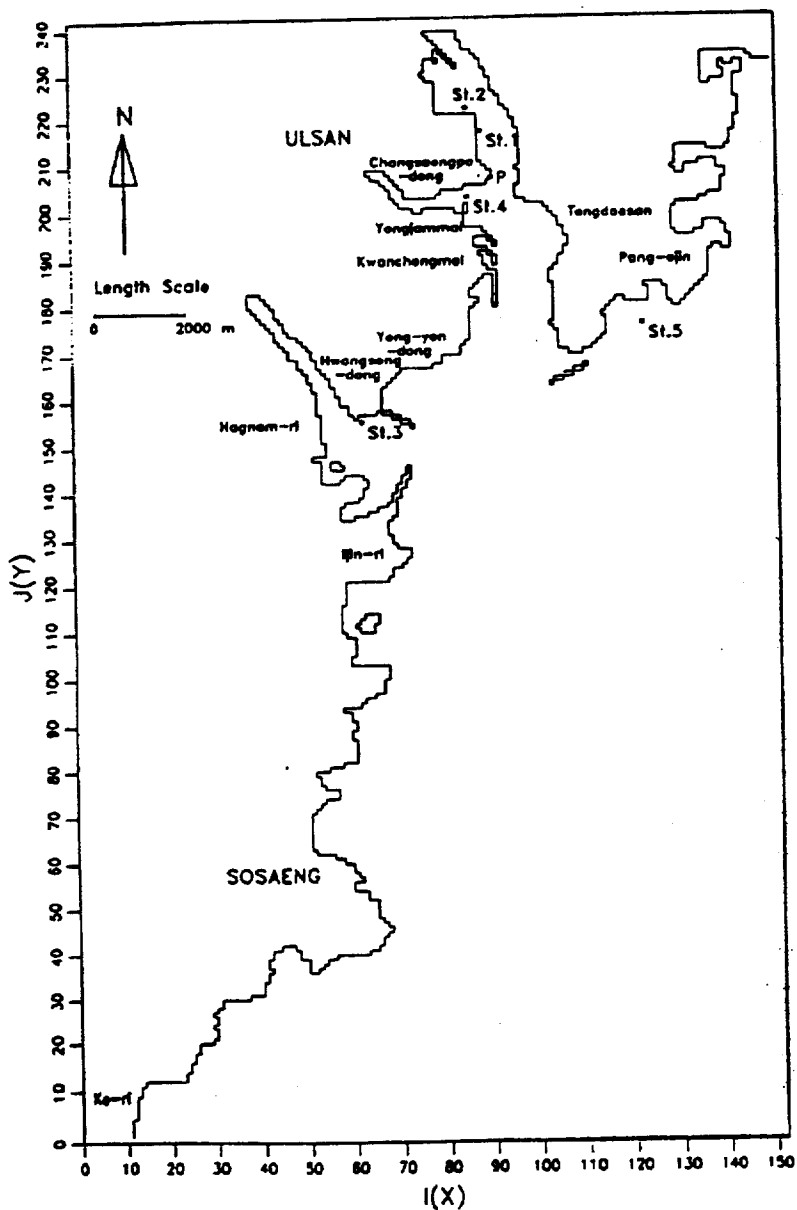


Fig. 2-1. Study area (large scale).

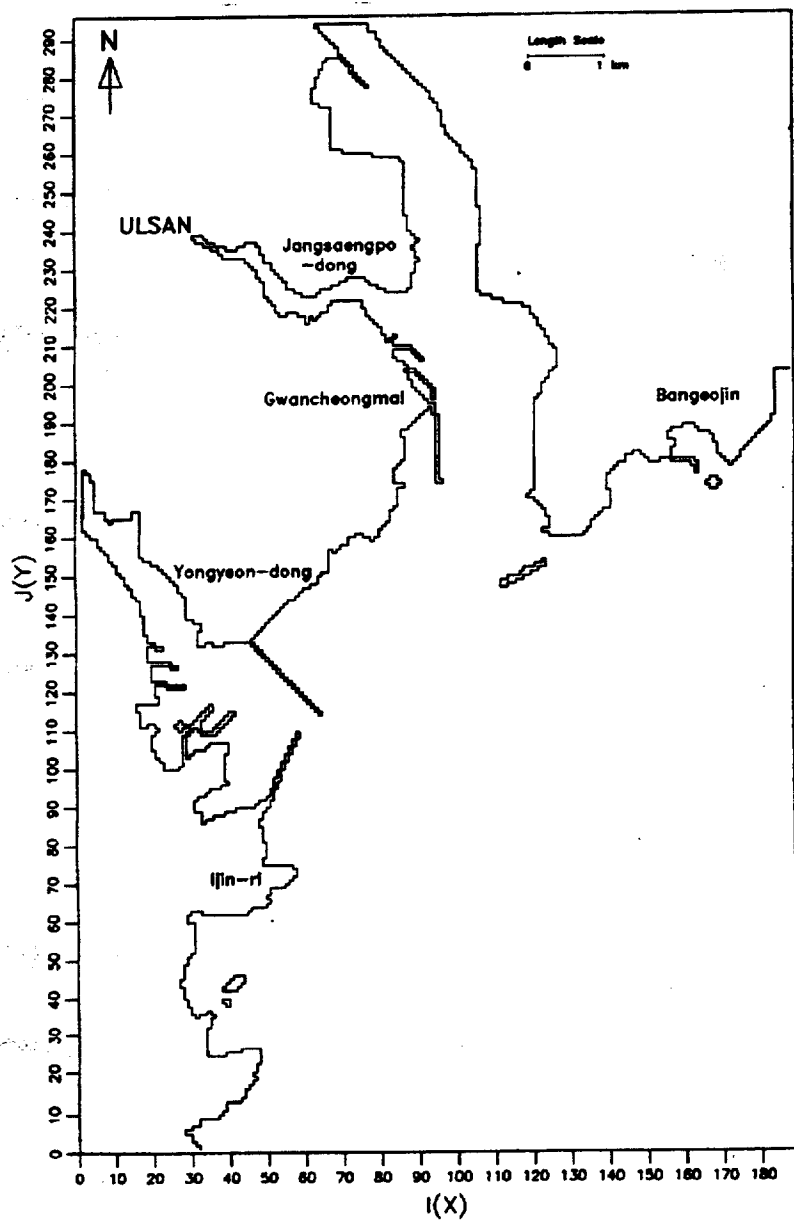


Fig. 2-2. Study area (small scale).

2.2 기상학적 특성

울산지방의 기후는 한반도의 북부지방에 비하여 온화하지만 한반도의 전형적인 특징인 Monsoon 기후망에 속하여 동하절기의 기후가 현저히 다르다. 하절기에는 해양성 기후의 영향을 받아 일반적으로 고온다습한데 반하여, 동절기에는 대륙성기후로 변하여 한랭건조하다. 풍향은 북풍에서 북북서풍으로 바뀌고 1~2월 중에는 대륙성기후로 인하여 한랭한 날씨가 계속되어 기온이 영하로 떨어지게 되고, 3월부터는 기후가 다시 변하기 시작하여 기온이 높아지고 강우량도 증가되며, 4~5월을 지나 6월부터는 다시 우기가 시작되는 기상형태를 나타내고 있다. 울산지역의 년평균 강수량은 1,310.3 mm를 나타내고 있으며, 조사자료중 년최대 강수량은 1991년의 2,058.9 mm, 년최소 강수량은 1995년 693.0 mm를 기록하였다. 월별 강수분포는 6~9월에 764.1 mm로서 년평균 강수량의 58 %를 차지하며 11월~2월 사이에는 142.2 mm로서 비교적 건조한 날씨로 조사되었다. 기온은 최고, 최저, 평균, 평균최고, 평균최저로 구분하여 월별로 분석하였는 바 최고기온은 38.6 ℃(1983.8.3), 최저기온은 영하 12.5 ℃(1977.2.16), 연평균기온은 13.5 ℃로 나타났다. 년평균 상대습도는 70 %로 분석되었으며 최소 상대습도는 11 %이고, 년평균 증발량은 1,288.6 mm이었으며, 일 최대 증발량은 15.0 mm이었다. 울산측후소의 평균풍속은 2.5 m/sec이고 최대풍속은 풍향SW, 풍속 20.7 m/sec(1976.6.8)가 발생하였다. 울산의 천기일수는 강수일수가 99일, 적설일수가 5일, 결빙일수는 95일로 분석되었다.

태화강의 하구부는 울산항내 깊숙한 곳에 위치해 있고 개수방향이 S자형으로 열려 있어 외해에서 발생한 파랑은 굴절현상을 일으켜 Energy가 소멸되며 발생빈도도 적을 것으로 판단된다. 또한, 울산항 파랑관측소의 관측자료에 의하면 파고별 발생빈도는 0.5 미만의 파고발생율이 연간 88.4 %를 점하고 있으며 2.0~4.0인 경우가 0.20 %로 파랑의 영향은 적은 것으로 분석되었다.

2.3 수리학적 특성

우리나라의 연안에서는 어디에서나 다소의 일조부등이 있고, 특히

동해안에서는 현저하게 1일 1회조가 될 때가 많다. 일반적으로 이 현상은 태양이 적도로부터 가장 멀리 떨어져 있을 때에 가장 현저하고, 태양이 적도부근에 있을 때는 비교적 적으며, 조석의 차이도 매우 적어 1일의 승강의 차는 최대 100 cm내외에 불과하다.

울산항의 조석은 수로국 조석 조화분석에 의한 결과에 의하면, 약 최고고조위가 60.80 cm, 평균해면이 30.4 cm이고 대조차가 48.2 cm이며, 온산항은 약 최고고조위가 63.2 cm, 평균해면이 31.6 cm이고, 대조차는 49.6 cm로서, 남측에 있는 부산항보다는 조위차가 적고 북쪽에 위치한 포항보다는 크다. 그러나 태화강 최대 홍수시 울산 만내의 최대 유속에 관해서는 조사자료가 없어 그 값의 영향을 단언하기는 어렵지만 유입토사의 성질과 그 침전, 하천수와 해수의 확산문제, 해수오염 등 여러 측면에서 영향이 미칠 것으로 예상된다. 울산항의 조류는 대조시 조석 간만의 차가 48.2 cm에 지나지 않으므로 이에 따른 조류 역시 매우 미약하여 항내에서는 창·낙조시 모두 0.23 m/sec 정도이며, 항외에서는 창조시에 0.75 m/sec, 낙조시에 1.18 m/sec 정도로서 조류로 인한 접·이안 및 기타 조선상에 미치는 영향은 없으나, 이와 같은 미미한 조류속은 항내외 해수교환을 지체시켜 항내 오염의 원인이 되고 있다.

2.4 퇴적특성

항만 시설물 중 항로를 비롯한 선회장, 박지 등 수역시설은 항상 일정한 소요수심을 유지하기 위해 매몰량을 조사하고, 그 결과에 따라 유지준설을 하여야 한다. 울산항 매몰의 주 원인은 태화강으로부터 유입되는 하천유사로서 과거 수심자료를 이용하여 추정된 매몰현황은 다음 Table 2-1과 같다.

울산항은 태화강 하류와 접한 하구항으로서 강 상류에서 유입되는 토사 등으로 매년 막대한 양의 유지준설이 필요한데, 연 평균 14만 m³의 토사가 유입되어 항내수심은 평균 약 24 cm가 상승한다. 이를 해결하기 위하여 매년 유지준설비가 약 1,000 백만원이 소요되고 있는 실정이다.

1986년부터 2000년까지 울산항내 준설량은 Table 2-2와 같으며,

해당년도의 준설구역을 Fig. 2-4 ~ Fig. 2-6과 같이 표현하였다. 이 결과를 토대로 준설량과 강우량과의 상관성을 파악하기 위하여 변화추이를 살펴보면, Fig. 2-7 ~ Fig. 2-8에서 나타난 바와 같다. 이는 준설구역이 다방면에 걸쳐 있고, 당해의 예산문제 등 여러 가지 요인이 있어 강우량과 준설량의 관계가 명확하게는 나타나지 않으나, 강우량이 많았던 해의 1~2년 후에 준설량이 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이 조사는 준설구역과 연도별 예산상의 차이로 인하여 단순비교에는 어려움이 있어 단위면적당 준설량을 비교해 보았다. 단, 1994년부터 시작된 항로직선화 사업은 퇴적량과는 상관없이 선박의 통항편리를 도모하기 위하여 인위적으로 항로를 변경하기 위한 공사이므로 조사대상에서 제외 하였다.

Table 2-1. Annual amount of deposition sediment referred from selected reports

year	area (<i>m</i> ²)	during	deposition (<i>m</i> ³)	mean height (<i>cm</i>)	reported by	remark
1983	2,120,000	'79-'83	221,000	10.4	You-il co.	
1984	2,770,000	'83-'84	203,300	7.3	You-il co.	
1985	2,770,000	'84-'85	598,300	21.6	Dae-han co.	
1986	2,423,000	'85-'86	466,900	19.2	Dae-han co.	
1987	3,821,800	'86-'87	1,107,500	41.0	Dae-han co.	typhoon
1989	3,821,800	'87-'88	212,800	6.0	Dae-han co.	
1990	3,821,800	'89-'90	225,800	6.0	H.A co.	
1991	3,325,000	'90-'91	428,800	12.9	H.A co.	typhoon

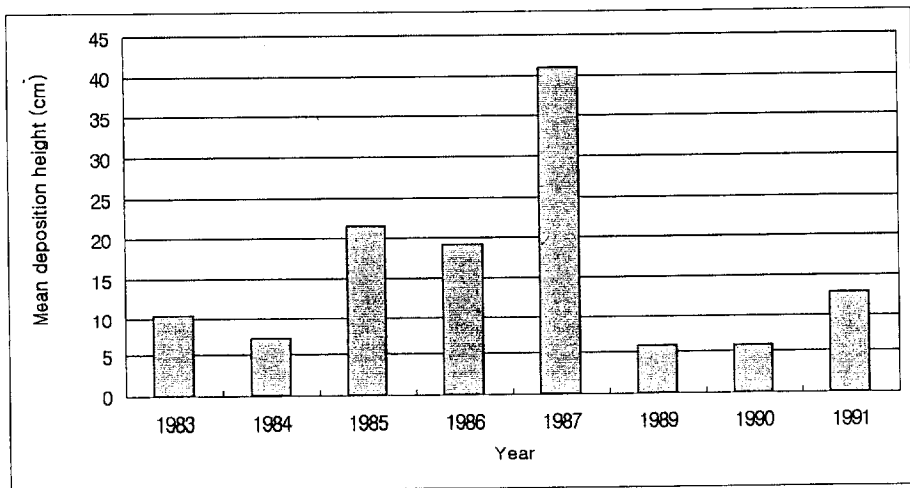


Fig. 2-3. Mean deposition height per unit area in Ulsan Bay same data as Table 2-1.

Table 2-2. Annual amount and area of dredging

year	area (m')	amount (m')	amount per unit area (m)
1986	112,800	120,000	1.06
1987	272,000	334,600	1.23
1988	155,363	208,750	1.34
1989	211,544	250,000	1.18
1990	155,500	222,000	1.43
1991	122,000	207,000	1.70
1992	129,000	235,000	1.82
1993	196,400	197,000	1.00
1994	118,000	529,000	4.48
1995	34,770	77,500	2.23
1996	17,400	22,000	1.26
1997	32,200	31,000	0.96
1998	38,500	77,500	2.01
1999	43,914	62,500	1.42
2000	51,600	57,100	1.11

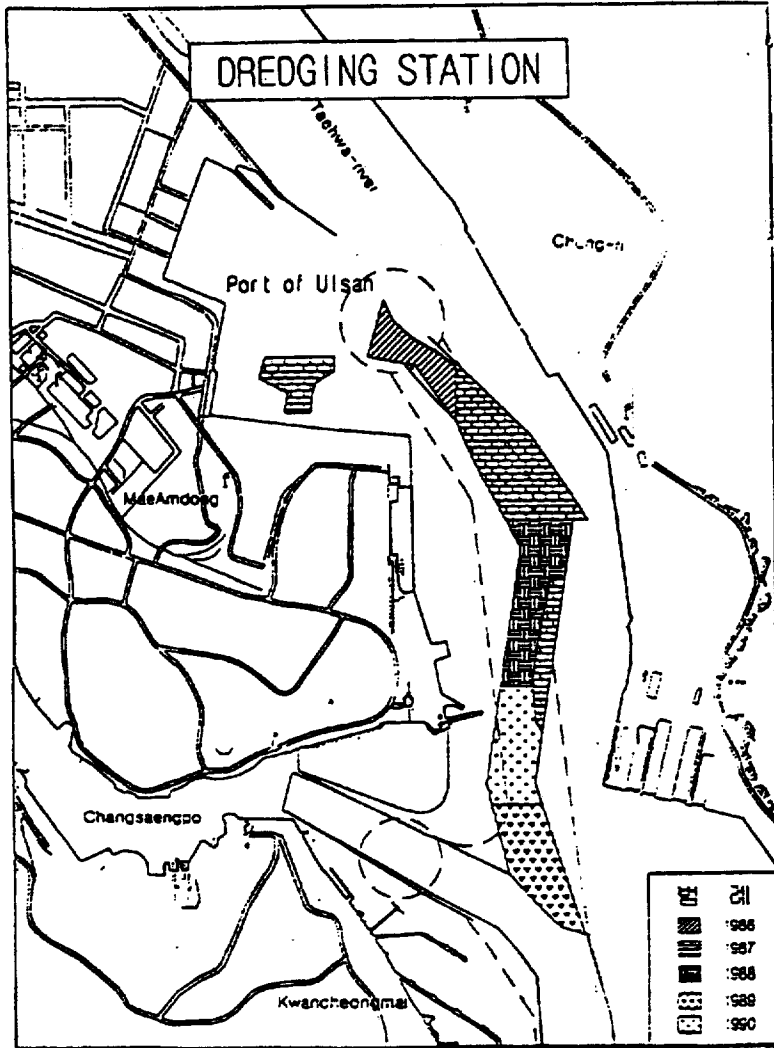


Fig. 2-4. Dredging station in 1986 ~ 1990.

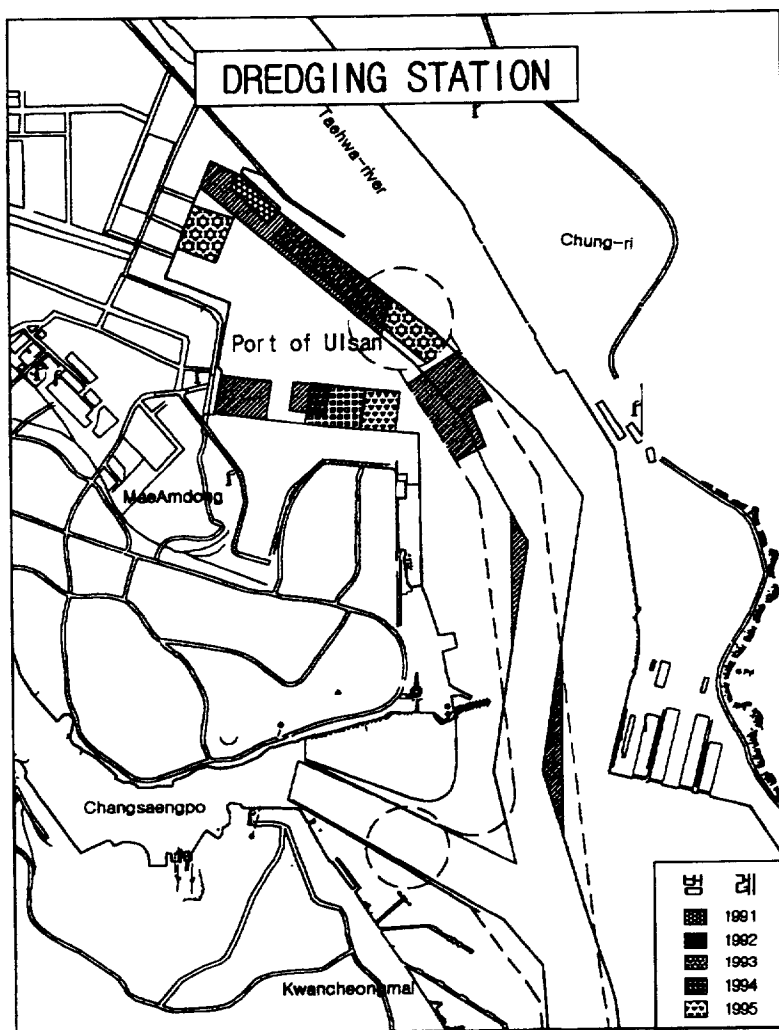


Fig. 2-5. Dredging station in 1991 ~ 1995.

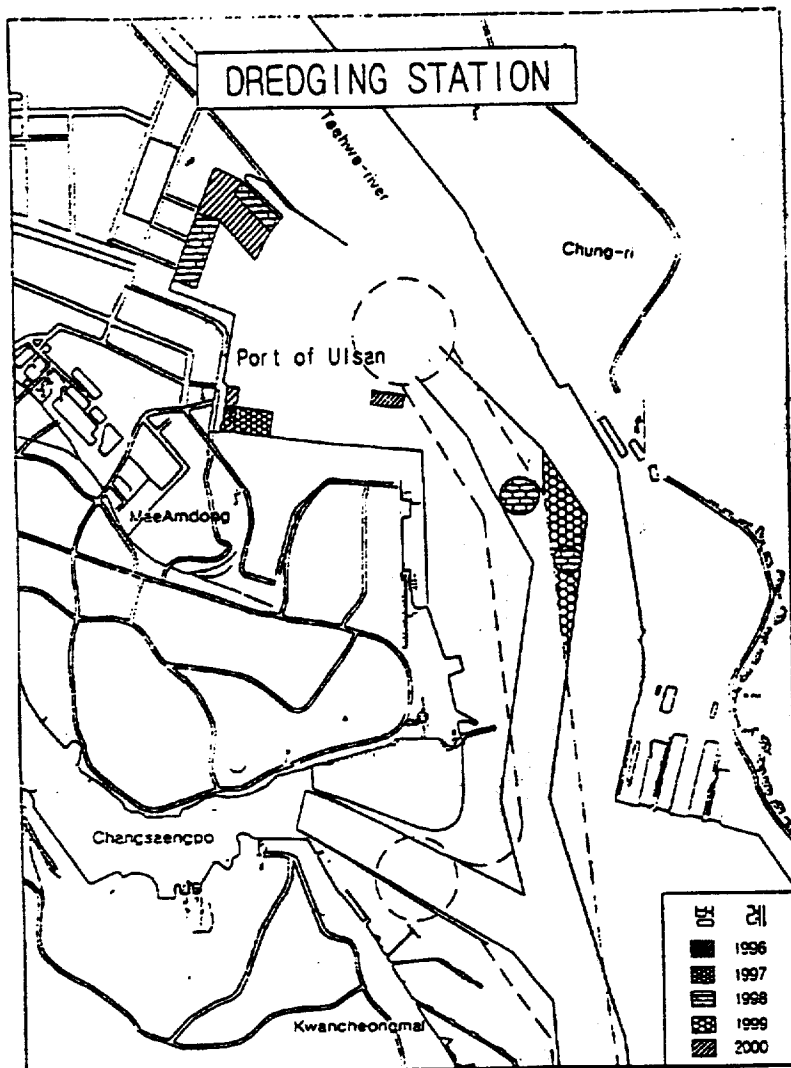


Fig. 2-6. Dredging station in 1996 ~ 2000.

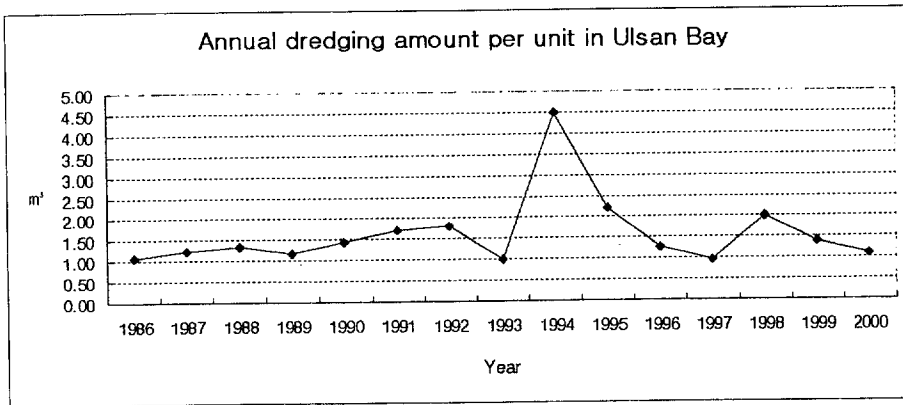


Fig. 2-7. Annual dredging amount per unit area in Ulsan Bay.

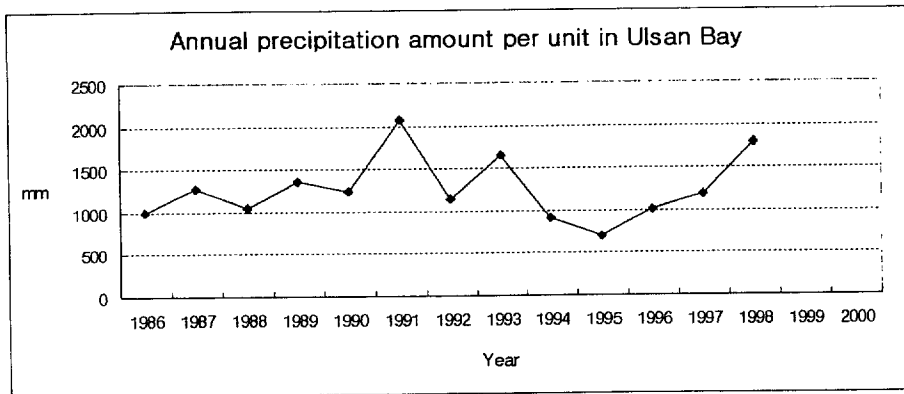


Fig. 2-8. Annual amount of rainfall per unit area in Ulsan Bay.

3. 수치모델에 의한 해수유동의 예측

해양구조물 건설 및 주변해역의 매립·준설에 따른 해수유동변화 특성을 검토하기 위하여 2차원 및 3차원 수치모델의 실험이 사용된다. 이러한 수치모델을 통한 제 현상을 정확히 예측하기 위해서 우선 모델의 현장해역에 대한 적용성이 검증되어야 한다. 가능한 자료를 이용하여 재현성이 종합적으로 검토되어야 한다. 따라서, 계산영역 내의 실측조위의 비교, 계산영역 개경계의 유량, 혹은 계산영역에서의 입자 추적에 관한 실측결과와 비교 등이 주요 검토내용이 된다. 이 때 종합적으로 판단해야 될 주요 물리적 현상은 현장관측으로부터 얻어진 유동의 주요패턴 즉, 창·낙조류 시의 주류축 및 와동특성, 항류특성의 재현성이라 할 수 있다.

본 장에서는 울산항 해역의 해수유동특성을 규명하기 위하여 수치모델을 구축하고, 이를 바탕으로 재현된 수치모델의 결과를 기존의 연구자들이 관측한 유속 자료를 조화분해 하여 얻어진 결과와 비교하여 재현성을 검토한다.

3.1 해수유동 수치모델링

연안해역의 흐름은 일반적으로는 3차원적인 현상으로서 수평성분 흐름의 연직분포나 연직방향의 흐름이 중요하게 작용하나, 일반적으로 수심평균하여 적분한 2차원 모델에 의해 해역의 흐름특성을 비교적 유사하게 재현할 수 있다.

2차원 단층모델은 다른 다층모델이나 3차원 모델에 비해 간단하고 파라미터가 적기 때문에 취급이 용이하고 실용적인 모델로서, 연안 해역의 흐름이나 물질확산의 예측에 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 2차원 단층모델을 적용하여 울산항에서의 부유토사의 이류·확산을 계산할 수 있는 유동모델을 구축하고 유동의 변화특성을 파악하고자 한다.

3.1.1 수치모델의 개요

연안해역에서의 유동은 Fig. 3-1.에서 정의한 바와 같이 평균

해면의 한 점 O를 원점으로 잡고 수평면상에 x, y축을 취하고, 연직 방향으로 z축을 취하면, 비압축성 유체에 대한 운동방정식 및 연속방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

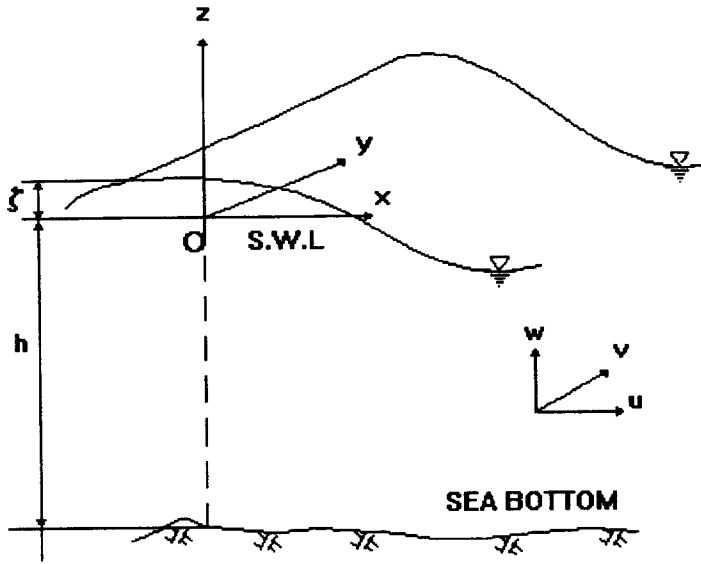


Fig. 3-1. Grid system.

운동방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \quad (3.3)$$

연속방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

여기서, u, v, w : 각각 x, y, z 방향의 유속

f : Coriolis 계수($= 2\omega \sin \phi$, ϕ 는 위도)

ρ : 해수 밀도

p : 압력

g : 는 중력가속도

A_h, A_v : 수평과 연직 방향의 와동점성 계수

t : 시간

식 (3.1)-(3.4)는 다음과 같은 해면($z=\zeta$) 및 해저($z=-h$)의 조건과

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w = 0 \quad (3.5)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \quad (3.6)$$

적분기호아래에서의 미분에 관한 공식을 적분함으로써 다음과 같이 수심방향으로 평균화 된 2차원 유동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)v] = 0 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

여기서, u, v : $-h \leq z < \zeta$ 사이에서 수심평균 한 x, y 방향의 유속

A_h : $-h \leq z < \zeta$ 사이에서 평균화된 수평와동점성계수

ζ : 수면변위

h : 평균수면하의 수심

C : Chezy 의 조도계수이다.

3.1.2 기초방정식의 차분화

2 차원 단층모델에서 이용하게 될 기초방정식인 식 (3.7)-식 (3.9)로 나타나는 연속량을 차분법 또는 유한요소법에 의해 적당한 이산량으로 변환시킴으로써 수치해를 구할 수 있다. 이에 관한 많은 해법 중 해의 수렴성과 계산시간의 경제성 등에 탁월하여 조류 및 확산 계산시 주로 이용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit Method)에 의해 차분식을 정식화하면 다음과 같다.

우선, 대상해역을 평면적으로 Fig. 3-2에서와 같은 형태로 격차분할하고, 수위(ζ), 유속(u, v) 및 수심(h) 등을 정의하여, 점 $(i, j), (i + (1/2), j)$ 는 시간 step을 2등분하여, 전반시간step $(n + (1/2)) \Delta t$ 에 있어서 식 (3.7)의 좌변 제 1항의 ζ , 제 2항의 u , 그리고 식 (3.8)의 좌변 제 2항의 u (미분상수는 제외), 제 5항의 ζ 를 음해법으로 나타내고, 식 (3.10)과 식 (3.11)과 같이 점화식을 유도하여 ζ, u 를 x 방향으로 순차적으로 구하고, 이 값을 이용하여 식 (3.9)로부터 양해법으로 v 를 구한다.

$$\zeta_{i,j}^{(n+(1/2))} = -P_{i,j} \times u_{i+(1/2),j}^{(n+(1/2))} + Q_{i,j} \quad (3.10)$$

$$u_{i-(1/2),j}^{(n+(1/2))} = -R_{i-1,j} \times \zeta_{i,j}^{(n+(1/2))} + S_{i-1,j} \quad (3.11)$$

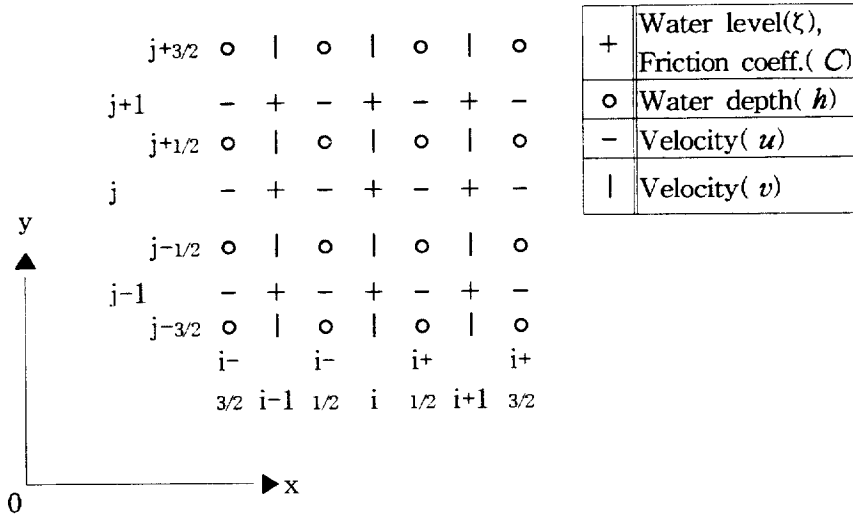


Fig. 3-2. Definition of variables.

다음에 후반의 시간 step인 $(n+1)\Delta t$ 에서는 식 (3.7)의 좌변 제 1항의 ξ , 제 3항의 v , 그리고 식 (3.3)의 좌변 제 3항의 v (미분항은 제외), 제 5항의 ξ 를 음해법으로 나타내어 정리하고, 식 (3.12) 및 식 (3.13)을 유도한 후, ξ 와 v 를 y 방향으로 순차적으로 계산한다. 다시 이 값들을 이용하여 식 (3.8)로부터 양해법에 의해 u 값을 계산한다.

$$\xi_{i,j}^{(n+1)} = -P_{i,j} \times v_{i,j+(1/2)}^{(n+1)} + Q_{i,j} \quad (3.12)$$

$$v_{i,j-(1/2)}^{(n+1)} = -R_{i,j-1} \times \xi_{i,j}^{(n+1)} + S_{i,j-1} \quad (3.13)$$

여기서, $P_{i,j}$, $Q_{i,j}$, $R_{i-1,j}$, $S_{i-1,j}$, $P_{i,j}$, $Q_{i,j}$, $R_{i,j-1}$, $S_{i,j-1}$ 는 $(n+(1/2))\Delta t$ 또는 $(n+1)\Delta t$ 보다 앞 단계 시각에서 결정된 기지량이다. 이러한 계산을 반복하여 계산결과가 안정될 때까지 계산을 수행하면 대상해역의 중앙영역에서의 수위 및 유속을 구할 수 있다. 그리고, 경계에서는 다음과 같은 경계조건에 의해

서 계산된다.

$$\begin{aligned} lU + mV &= U_n^* \quad \text{on } S_1 \\ \zeta &= \zeta^* \quad \text{on } S_2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

여기서, (l, m) 은 경계에 있어서 x, y 방향의 단위 법선 벡터이고, U_n^* , ζ^* 는 각각 경계 S_1 및 S_2 에 있어서 경계에 직각 방향의 유속 및 수위로서 사전에 주어진다.

여기서, u, v 는 $-h \leq z < \zeta$ 사이에서 평균화된 x, y 방향의 유속성분을 나타내고, A_h 는 수평와동점성계수를 각각 나타내며, C 는 Chezy의 조도계수, f 는 Coriolis계수, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, t 는 시간, h 는 평균해면하의 수심이다.

이상의 계산과정에 따라 대상 해역에서의 유동패턴을 시뮬레이션하고자 한다.

3.2. 수치모델의 구축 및 검증

전술한 ADI법에 의한 해수유동모델을 현지에 적용하기 위하여, 울산항 및 온산항 부근해역의 대상지역을 2 차원 격자망으로 구성하는데 있어서 격자 간격이 너무 크면 대상지역의 지형을 충분히 고려할 수 없고, 또 격자 간격이 너무 좁으면 대상지역의 지형을 충분히 고려할 수 있으나 계산 시간이 과다해지므로, 본 연구에서는 연구 대상 지역의 지형이 심하게 왜곡되지 않는 범위내에서 Fig. 3-3 과 같이 격자망을 구성하였으며, 대상해역의 등수심도는 Fig. 3-4 와 같다.

또한 대상해역에서 해수유동 현상은 바람에 의해 직접적으로 영향을 받지만 풍향·풍속의 변화에 의한 취송류 성분은 해수유동 현상보다 더 불규칙하게 변화하는 성분을 가지므로 해수유동 현상을 파악하는데 있어서 바람의 응력효과는 무시하였다. 이렇게 함으로써 실제 현상을 정확히 파악하는 데는 제약을 받는 것으로 생각되나, 지형성 경계 조건에 따른 해수유동 특성의 변화를

해석하는 데는 큰 무리가 없다.

시간간격 ($\Delta t/2$)은 계산의 안정성 및 수렴성을 지배하는 주된 인자로서, 일반적으로 식 (3.15)와 같은 안정조건을 만족하도록 계산시간간격 Δt 를 설정하였다.

$$\frac{\Delta t}{2} \leq \frac{\alpha \cdot \Delta S}{\sqrt{g h_{\max}}}, \quad (\alpha = 1 \sim 3) \quad (3.15)$$

여기서, $h_{\max}$: 대상해역의 최대수심

g : 중력가속도

ΔS : 격자간격

Δt : 시간간격

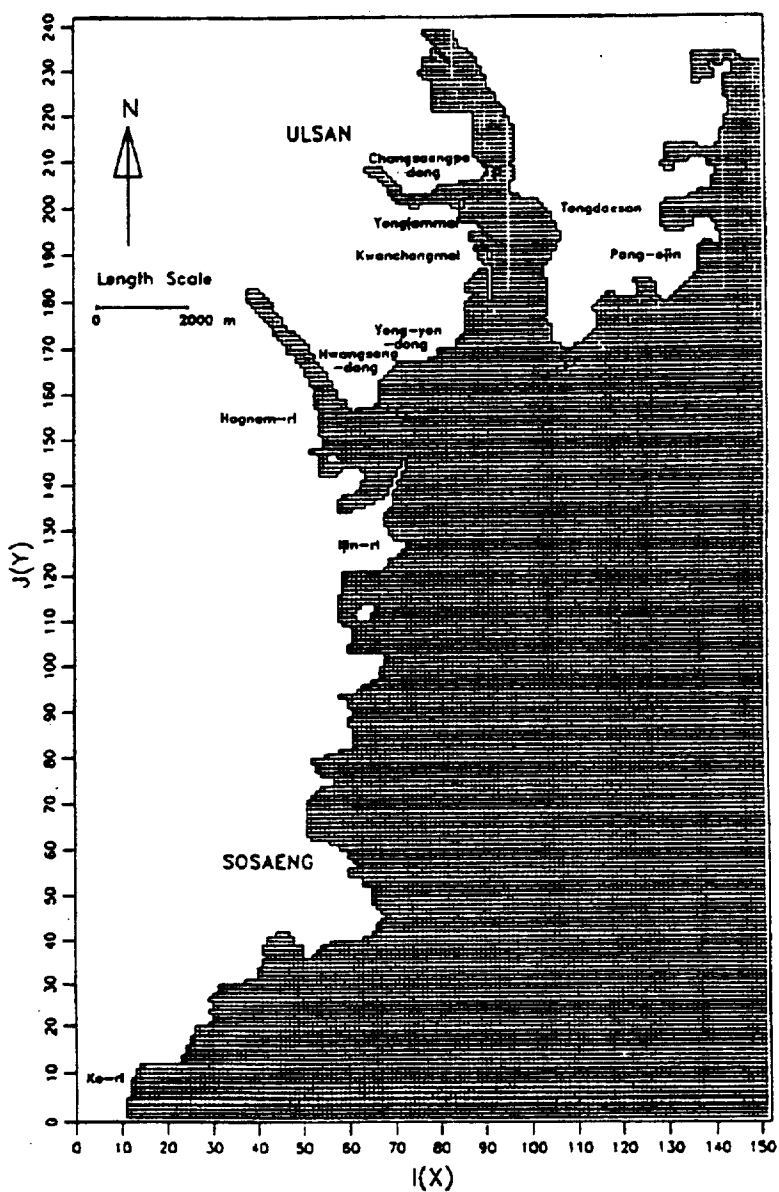


Fig. 3-3. Grid system of the computing area (large scale).

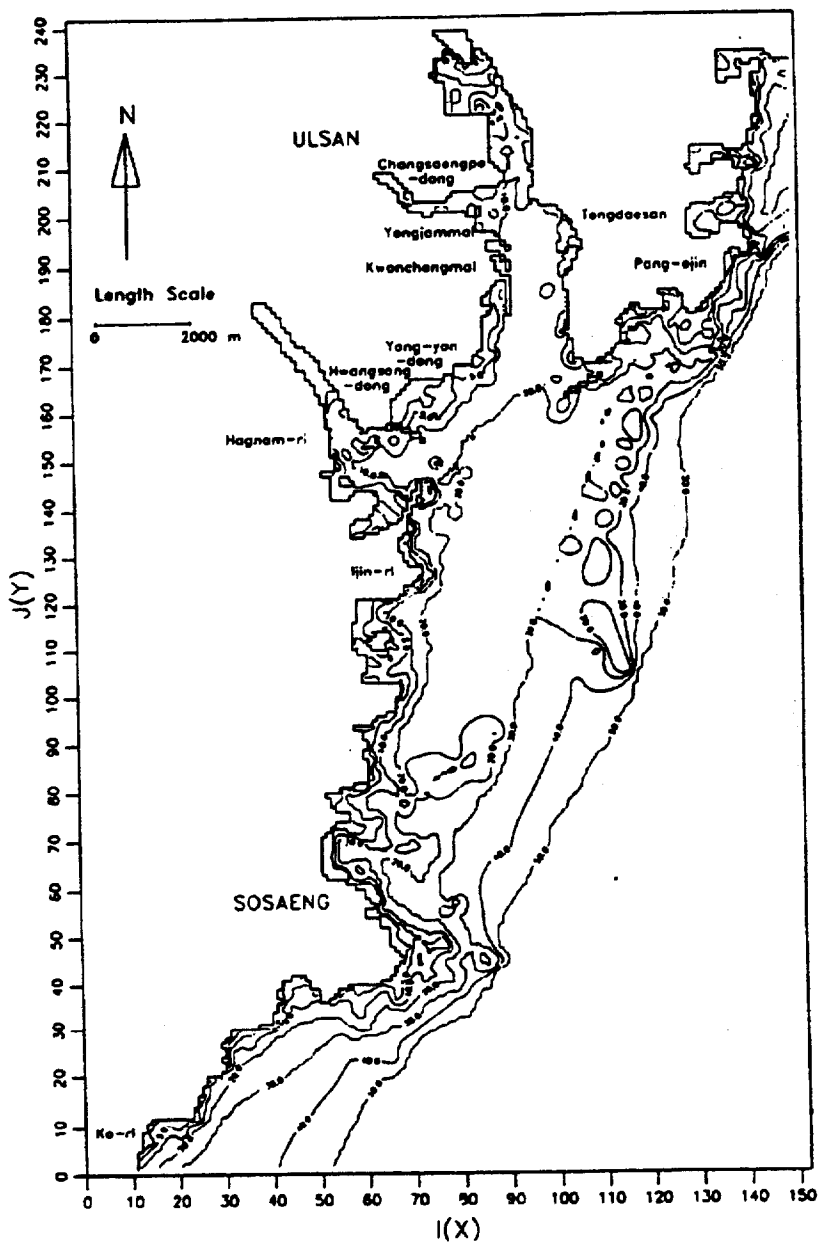


Fig. 3-4. Bottom topography of study area (2D) (large scale).

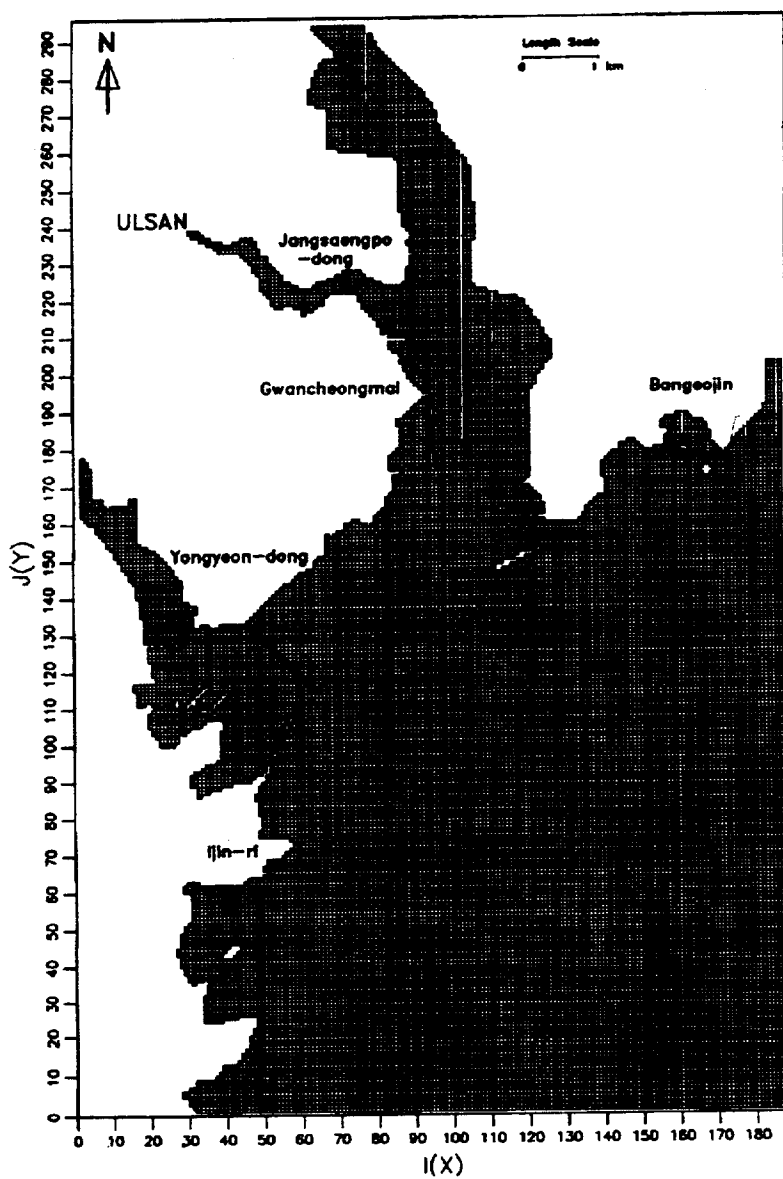


Fig. 3-5. Grid system of the computing area (small scale).

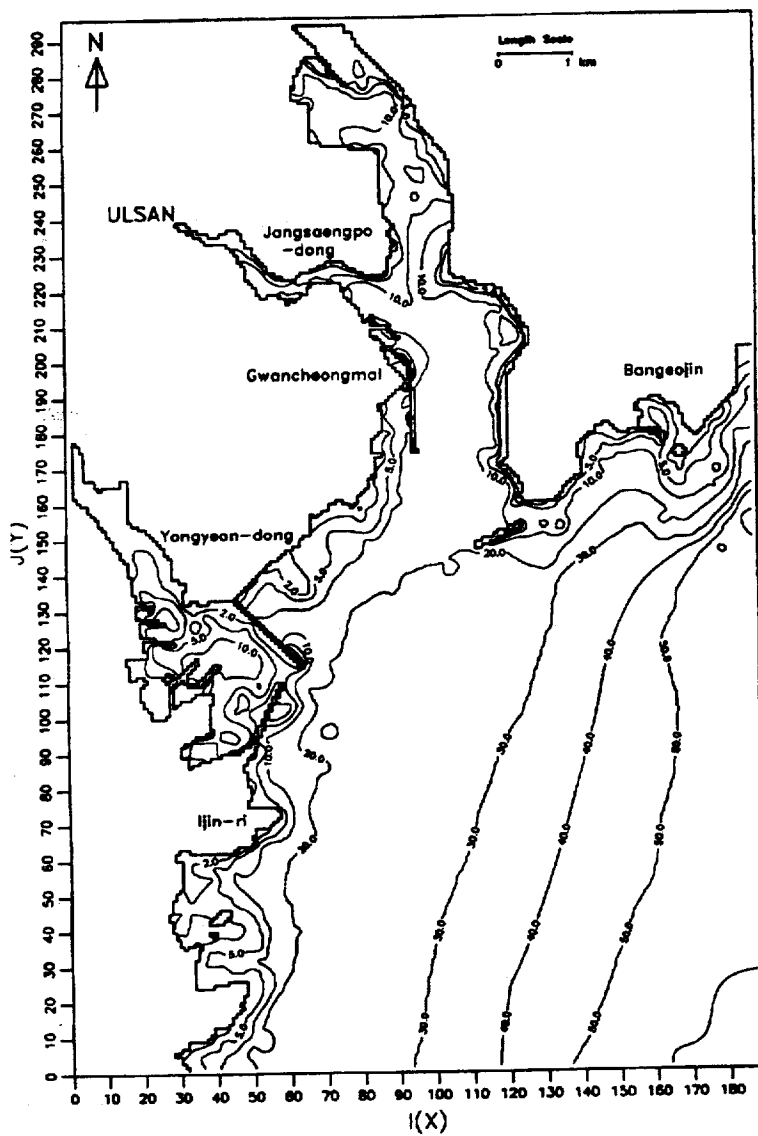


Fig. 3-6. Bottom topography of study area (2D) (small scale).

Table 3-1은 본 모델의 울산만 주변해역에 대한 적용성을 검증하기 위하여 Fig. 2-1 중에 표시되어 있는 P지점 및 st. 1~st. 5 지점에 대한 조위의 계산치와 관측치를 조화분해하여 비교한 것으로, 계산결과 중 각 분조의 조화상수는 관측치의 88 % 정도로 재현하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3-5는 P에서의 계산치와 관측치 (2000년 9월)의 조위를 나타낸 것으로 2000년 9월 21일 경에 내습한 “사오마이” 태풍이 내습하여 계산에서 얻어진 수위에 비해 약 30 cm 정도 해면이 상승하여 계산치의 조위와 다소 차이를 나타내고 있다. 그러나 계산치 조위는 비교적 실측치 조위를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

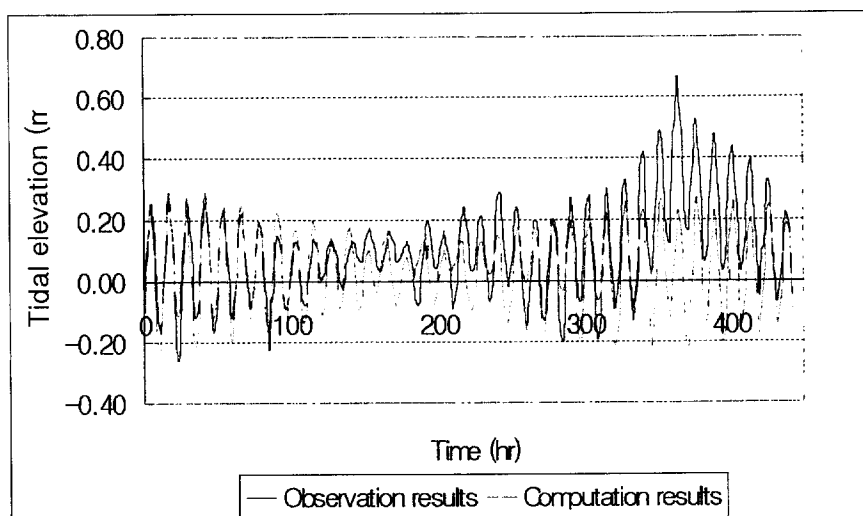


Fig. 3-5. Comparison of the tidal curve at P.

Table 3-1. Harmonics analysis results of the tide in the Ulsan Bay

st.	Partial Tide	Observation		Computation	
		H(cm)	Lag(°)	H(cm)	Lag(°)
1	O_1	3	352	3.6	358
	K_1	3.1	46	2.79	12.8
	M_2	16.4	212	9.72	195.6
	S_2	7.8	247	7.53	247.86
2	O_1	3	350.3	3.53	358.7
	K_1	3.3	45.1	2.74	13.3
	M_2	16.3	212.3	9.55	196.5
	S_2	7.8	246.8	7.39	248.8
3	O_1	3.7	357	3.74	357.6
	K_1	3.6	46.2	2.91	11.64
	M_2	17.3	209.4	10.10	190.62
	S_2	7.5	248	7.74	245.1
4	O_1	2.9	353.13	3.67	357.9
	K_1	3.16	44.28	2.85	12.3
	M_2	16.38	210.78	9.91	194.7
	S_2	7.8	243.64	7.67	246.9
5	O_1	3.63	353.3	3.83	352.7
	K_1	3.51	46.1	2.87	6.2
	M_2	16.39	207.8	7.84	194.347
	S_2	7.27	242.9	7.36	244.6845

경계조건으로는 경계면의 성질에 따라 육지경계조건, 하천경계조건, 해양경계조건 3 가지로 구분한다. 육지경계 조건으로는 경계면을 통한 해수의 유출·유입은 0(zero). 즉, $u \cos \theta + v \sin \theta = 0$ 의 조건이 주어진다. 단, 여기서, θ 는 x 축과 해양법선이 이루는 각도를 나타낸다. 따라서 모형상에서 x 축 방향의 육지 경계면에서는 $v=0$, y 축 방향의 경계면에서 $u=0$ 인 조건이 주어지게 된다. 하천경계조건으로는 하천의 평균유량 및 최대유량이 주어지며, 해양경계조건은 조석이 주 경계조건으로 설정되며 조석은 이 경계면에서 반일주조 탁월의 특성을 고려하면 평균대조차를 대조기의 조석 진폭으로 하고, 그 주기는 M_2 분조 12시간 25분으로 S_2 분조 12시간 K_1 분조 23시간 55분 O_1 분조 25시간 48분으로 하는 정현곡선을 입력할 수 있다.

유동계산을 위한 경계치로서 해양조사원의 관측치로부터 추정된 조위와 지각값을 개경계 조건으로 부여하였다. 대상으로 하는 주변해역의 근접항인 울산항과 온산항의 조석자료를 참고하면, 대상영역의 조석형태수 $F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} = 0.294$ 이므로 반일주조가 우세한 혼합조 형태($0.25 < F < 1.5$)로 볼 수 있다. 따라서 본 계산에서는 M_2, S_2, K_1, O_1 분조를 모두 고려하여 그 결과를 대조기 1시간 간격으로 출력하도록 하였으며, 수평와동점성계수(A_h)는 Richardson의 4/3승 법칙에 기초하여

$$A_h = \epsilon (\Delta S)^{4/3} \quad (3.16)$$

여기서, ϵ : 정수(= 0.01~0.02 (C.G.S))

ΔS : 격자간격

의 표현식을 이용하여 매시간 step마다 계산되도록 하였다. 수치모델의 계산 시간간격(Δt)은 계산의 안정도를 고려하여 5 sec로, 계산격자의 간격은 $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$ 로 구성하였으며, 하구역의 유출량은 Table. 3-2 와 같이 낙동강 홍수통제소에서 관측된 태화강의 유출량(2000년)을 사용하였고, 이러한 입력조건을 요약하면

Table. 3-3 과 같다.

Table 3-2. Discharge of the Tae-Hwa river

River System	Gauging Station	Date	Water Level (m)	Bedth of Water Surface (m)	Section Area (m ²)	Mean Velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /s)	Method of the Measurement	Remark
Tae-hwa river	Ulsan	00.6.21	1.16	171.5	97.11	0.132	12.77	eulerian	report
		7. 8	1.16	171.5	122.93	0.010	12.24	"	"
		7.23	1.12	171.5	98.11	0.079	7.80	"	"
		7.24	1.40	171.5	286.25	0.446	127.74	largrangian	"
		8.22	1.20	171.5	108.55	0.190	20.67	eulerian	"
		8.26	1.56	178.0	314.0	0.432	135.69	largrangian	"
		8.26	1.80	178.0	357.98	0.454	162.55	"	"
		9.14	1.67	178.0	333.70	0.433	144.46	"	"
		9.14	1.93	178.0	383.33	0.489	187.63	"	"
		9.15	1.97	178.0	398.78	0.509	202.96	"	"
		9.15	1.89	182.0	383.05	0.590	225.91	"	"
		9.16	1.88	181.2	380.75	0.584	222.24	"	"
		9.16	4.20	424.0	878.68	1.340	1177.40	"	"
		9.16	3.35	189.0	659.28	0.891	587.63	"	"
		9.16	3.09	198.3	633.26	0.768	486.61	"	"
		9.16	2.59	182.0	495.28	0.766	379.79	"	"

Table 3-3. Computation conditions of the tidal current model

Parameters	Computation conditions
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$
Water depth (h)	2 - 95 m
Time interval (Δt)	5 sec (CFL condition satisfied)
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin \varphi$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$, $\varphi = 35^\circ 27' \text{ N}$
Bottom friction coeff	$C = \frac{1}{0.026} H^{\frac{1}{6}}$
Tidal condition	Table 3-1. Harmonics analysis results of the tide in the Ulsan Bay
River discharge	Tae-Hwa river : 570.734 m ³ /sec (flood)

3.3 계산 대상해역의 해수유동특성

구성된 수치모델의 현지에의 적용성을 검토하기 위하여 관측된 현장의 유동값과 수치모델에 의해 계산된 유동값을 비교하였다. 대상해역에서의 기존에 조사된 정점 관측한 연속 유속측정 자료를 이용하여 관측결과와 계산치를 비교하여, 본 수치모델의 울산만 해역에서의 재현성을 검증해 보고자 한다.

하천수 유입시의 유동패턴의 변화를 검토하기 위해 확정된 모델에 Fig. 3-3의 격자망 상의 하천수 유출부에 해당하는 격자점에 하천유출량을 대입하여 총 유량을 모델에 입력하였다. 하구에 유입되는 유출량과 토사량은 홍수기에 대부분(70%)의 양이 하구로부터 유출되므로, 홍수시 유량을 고려하여 계산된 결과는 다음과 같이 나타났다.

앞에서 언급한 경계조건을 바탕으로 계산된 대상해역에서의 유동패턴은 대조기 창·낙조 최강류시 Fig. 3-6 ~ Fig. 3-8과 같이 나타났다. 이상과 같은 수치모델의 결과는 이 해역의 바람과 파랑에 의한 복잡한 해수유동패턴을 무시하였음에도 불구하고 창·낙조류시의 유속과 유량 등 정상적인 해수유동패턴이 기존의 관측자료들과 비교 검토하여 비교적 근사하게 재현되었다고 판단할 수 있었다(한, 1996).

이 해수유동모델을 토대로 유입토사의 퇴적특성을 예측하기 위한 입자추적모델의 기초자료로 사용하고자 한다. 아울러 2011년도 준공예정인 현재 울산신항만 건설공사가 활발히 진행중에 있어 신항만 완공후의 창·낙조 최강류시의 유동패턴을 알아보하고자 하였다. 이들 결과중 매립에 의한 해안선의 변화는 신항만 건설계획에 따라 수치모형의 육지경계를 수정, 입력시킴으로서 해수유동 시뮬레이션 모델의 수정이 가능하다. 이에 따라 계산된 유동의 대표적인 특성 즉, 신항만건설후의 유동계산 결과를 최강류와 잔차류의 경우만 Fig. 3-14 ~ Fig. 3-16과 같이 나타내었다. 이를 통하여 신항만 건설로 인한 유동의 큰 변화는 없으나 새로이 축조될 방파제 주변으로 흐름의 차이를 알 수 있다.

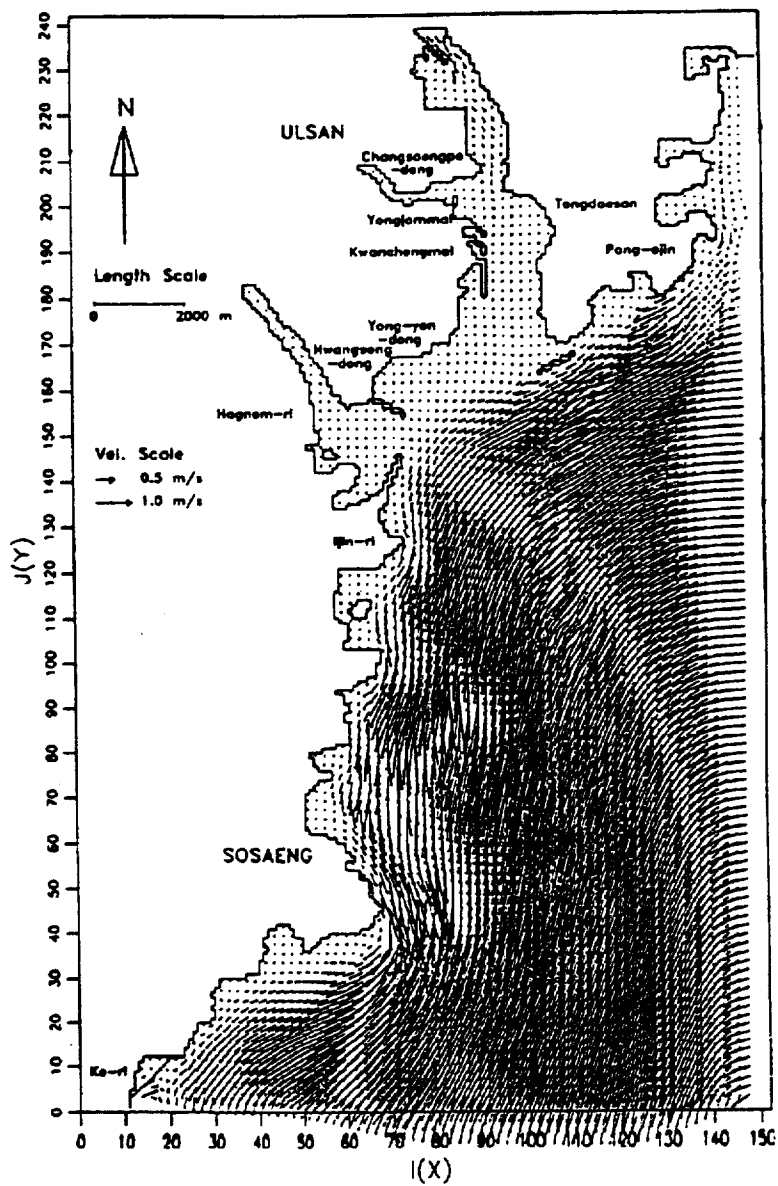


Fig. 3-8. Maximum flood current in Ulsan Bay (large scale).

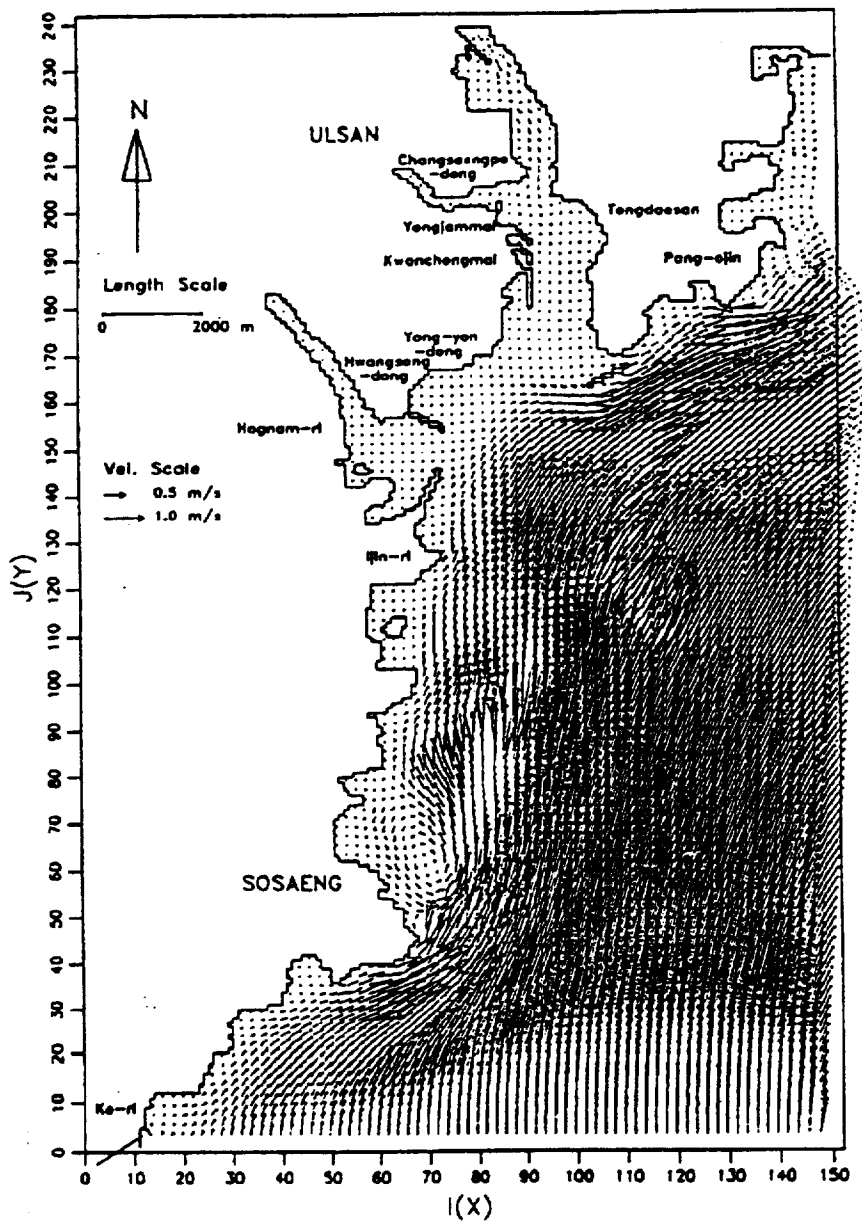


Fig. 3-9. Maximum ebb current in Ulsan Bay (large scale).

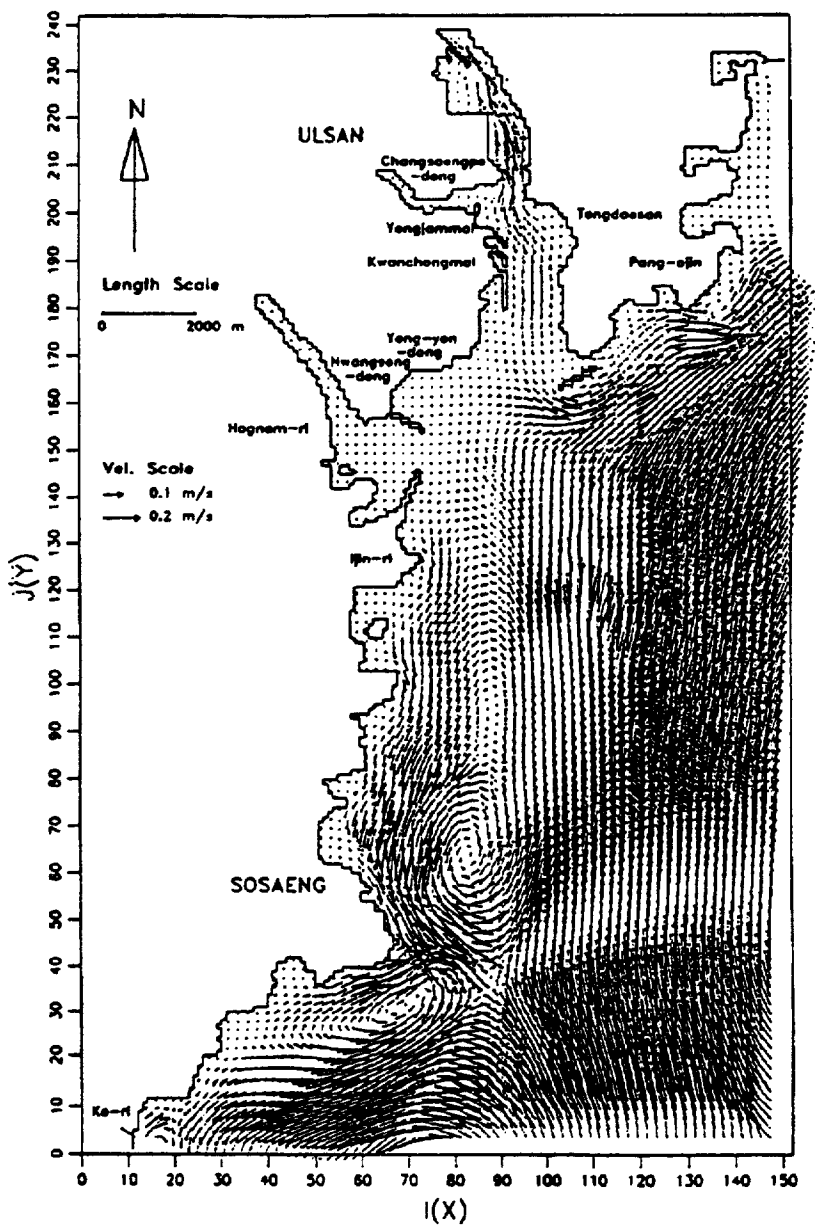


Fig. 3-10. Residual current in Ulsan Bay (large scale).

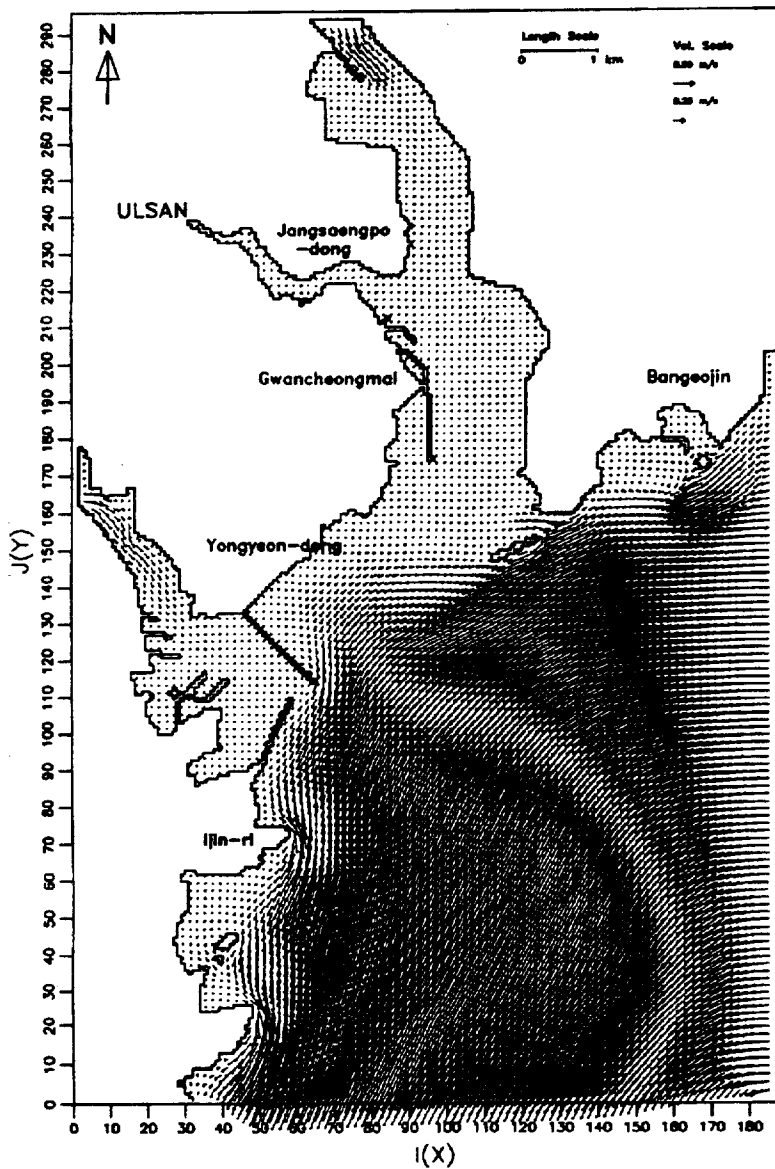


Fig. 3-11. Maximum flood current before construction Ulsan New Port (small scale).

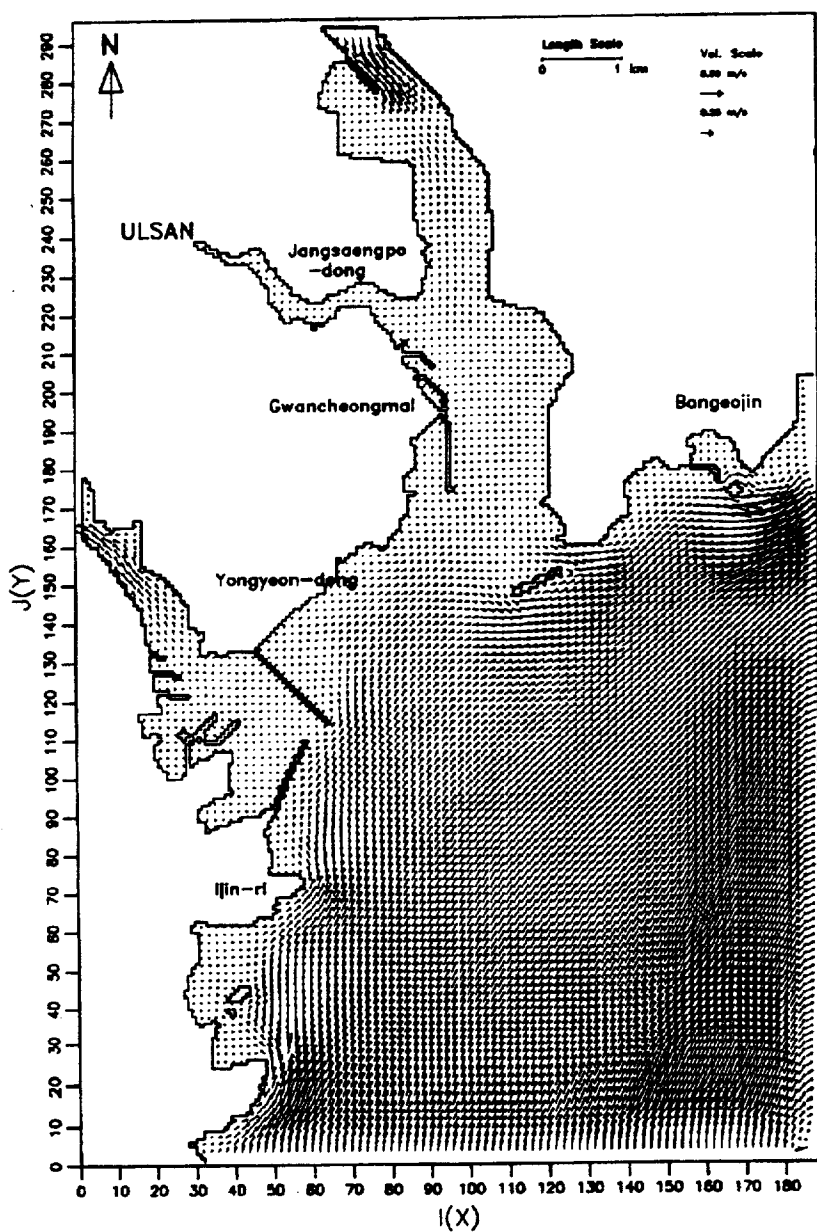


Fig. 3-12. Maximum ebb current before construction Ulsan New Port (small scale).

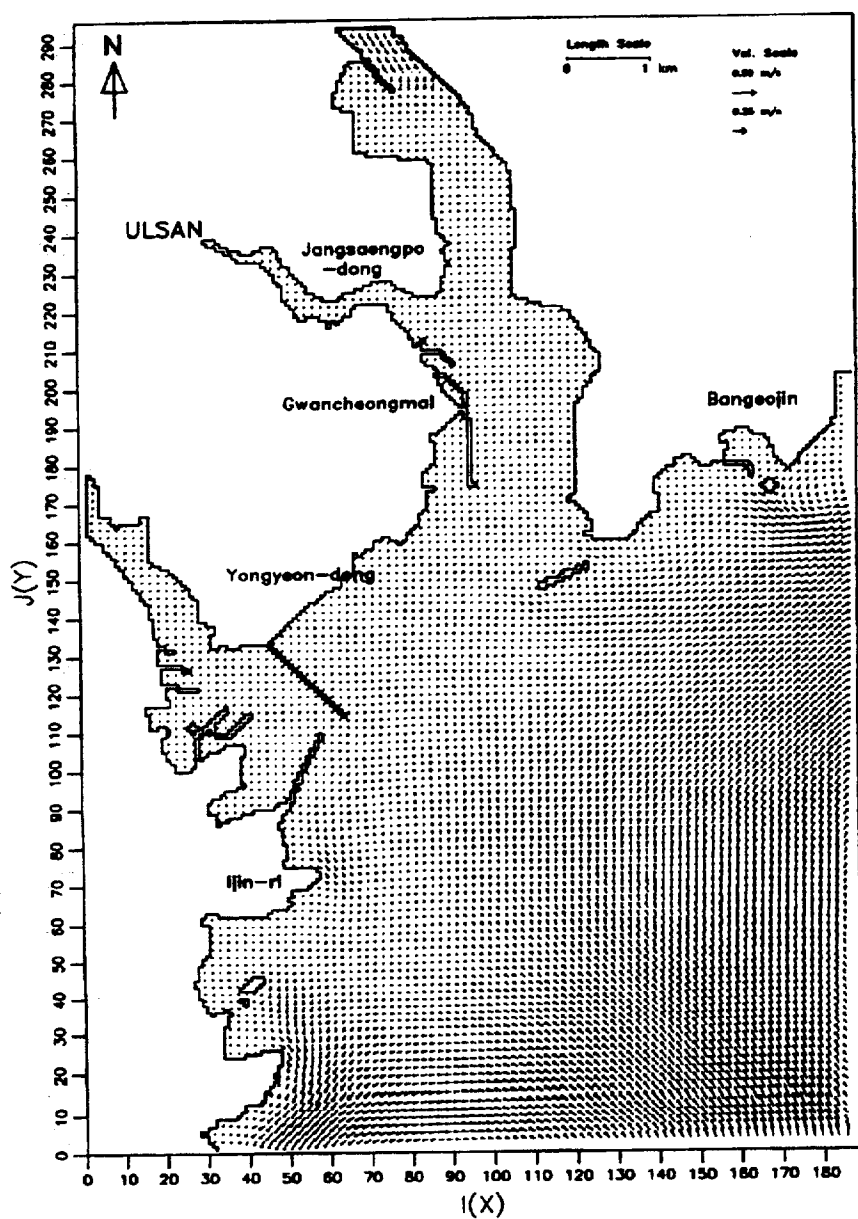


Fig. 3-13. Residual current before construction Ulsan New Port (small scale).

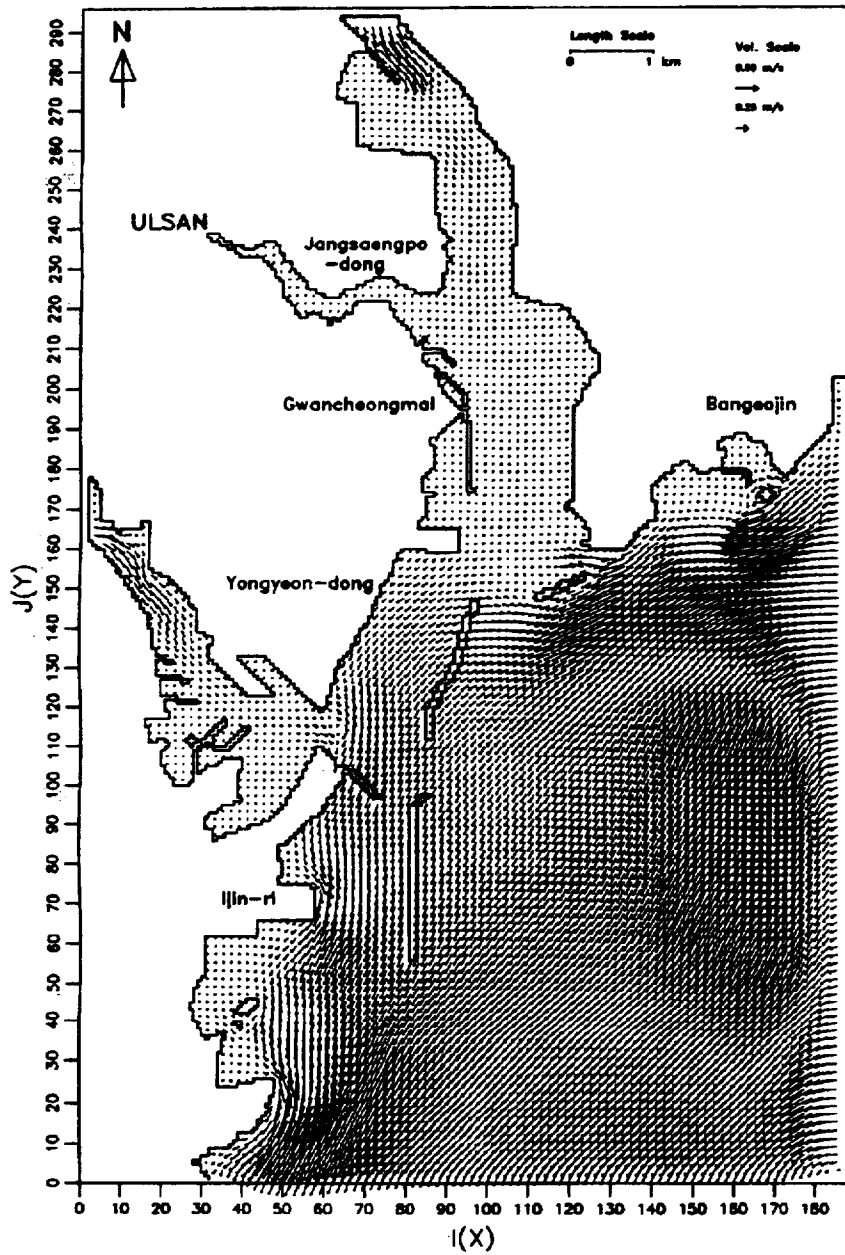


Fig. 3-14. Maximum flood current before construction Ulsan New Port (small scale).

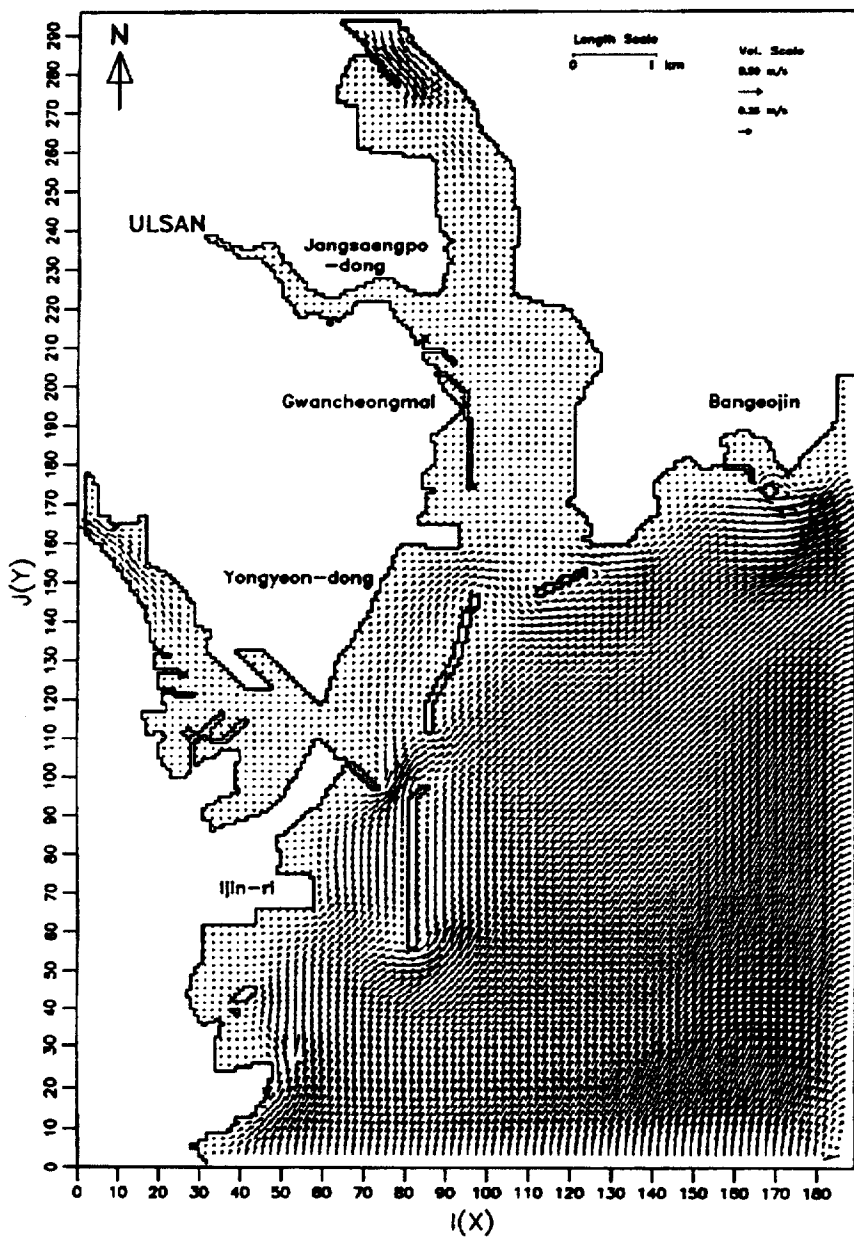


Fig. 3-15. Maximum ebb current before construction Ulsan New Port (small scale).

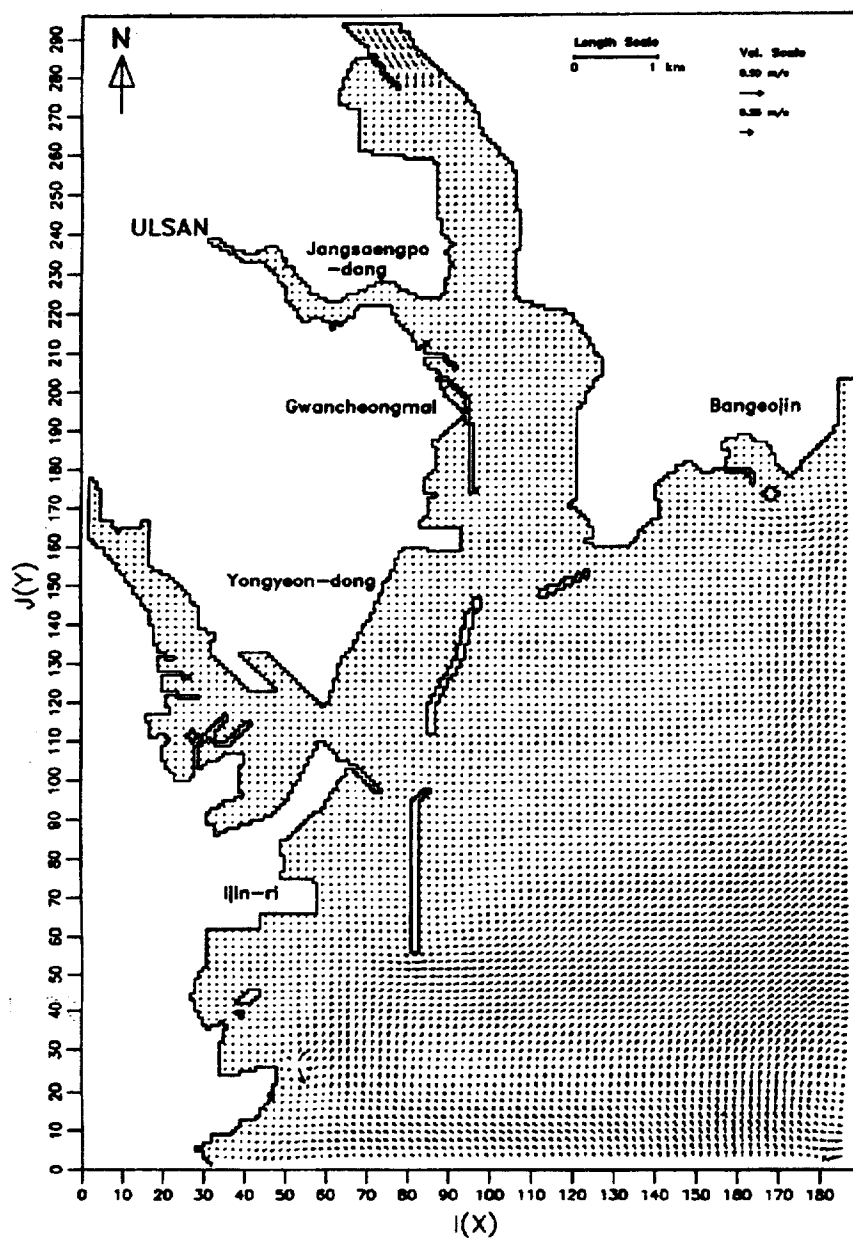


Fig. 3-16. Residual current after construction Ulsan New Port (small scale).

이러한 유동벡터도로서는 그 유동양상이 비슷하여 정량적인 파악이 어려우므로 이들 최강류시의 신항만건설 전·후의 차이를 검토하기 위하여 각 단계별로 다음과 같이 유속에의 변화율을 계산해 보았다.

$$\text{유속변화율} = \frac{\vec{u}(\text{건설후}) - \vec{u}(\text{건설전})}{\vec{u}(\text{건설전})}$$

Fig. 3-17 ~ Fig. 3-18 은 신항만 건설후의 창·낙조류시의 유속저감을 10 %, 50 %, 70 %, 80 % 의 영역을 도시하고 있다. 공사구간 주변에는 대체적으로 10 % ~ 80 % 내외로 유속의 감소효과를 보여주는 것으로 나타났으며, 신항만 건설 공사구간의 경계영역에서 1 km ~ 5 km 이내의 해역에서 유속의 감소현상을 뚜렷이 볼 수 있다.

이러한 유속 저감 영역의 증대는 항내의 수질환경 및 토사유입에 의한 매물의 시·공간적 특성을 변화시킬 것으로 생각할 수 있다.

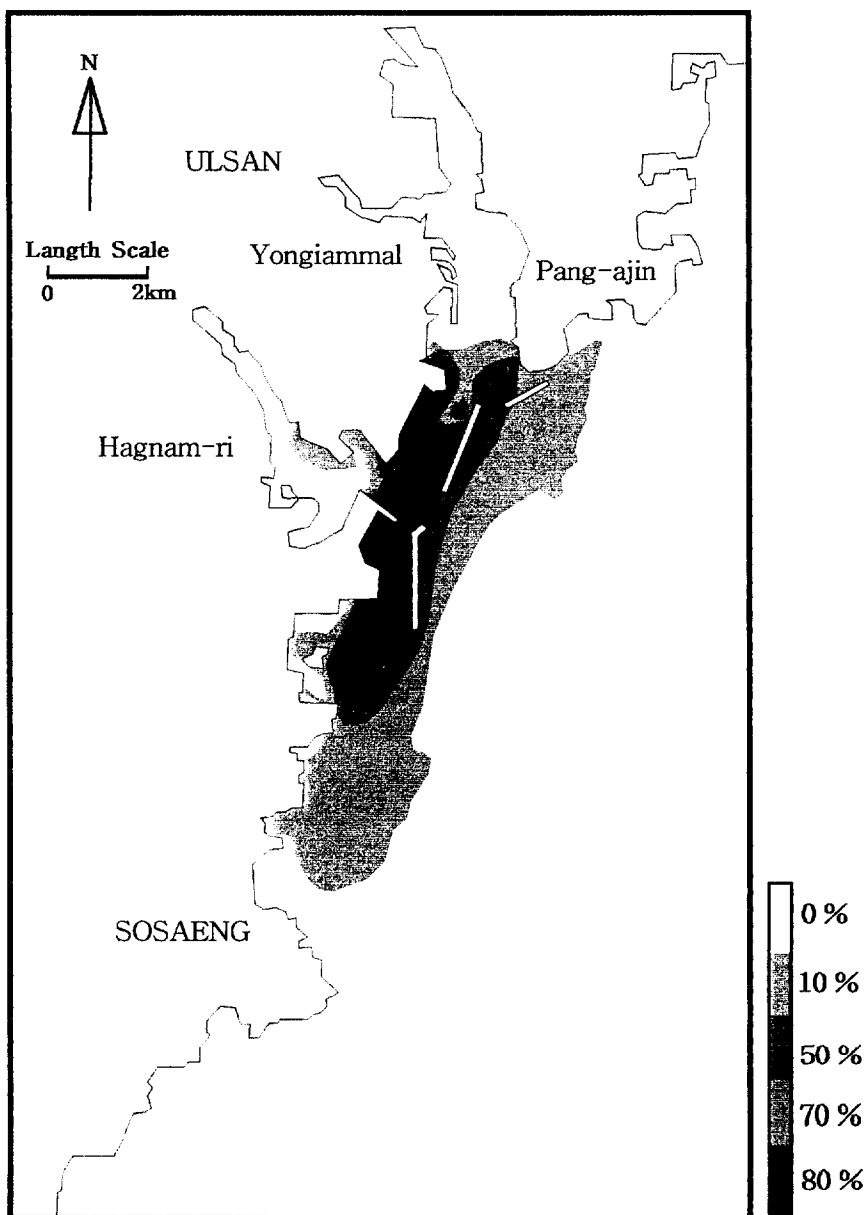


Fig. 3-17. Velocity decreasing rate of tidal current due to the construction of the New Port breakwaters (maximum flood).

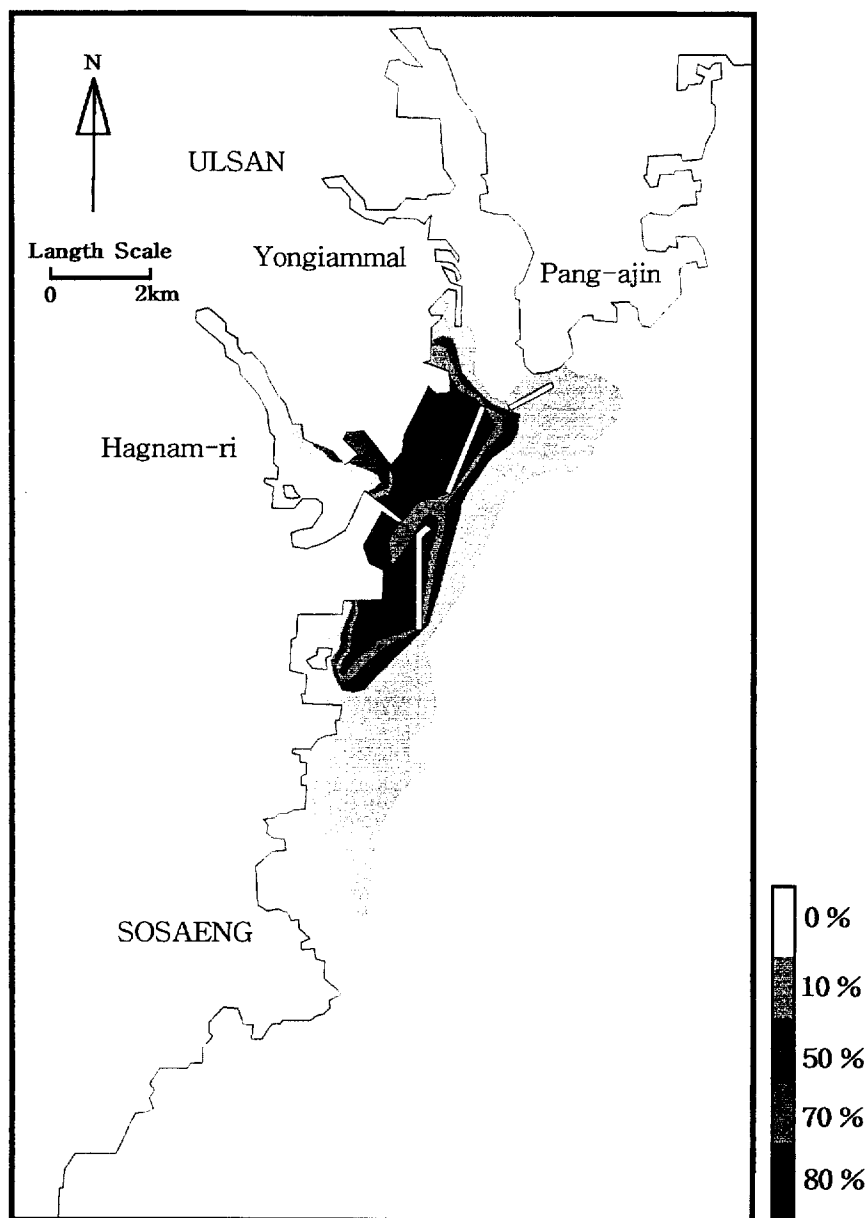


Fig. 3-17. Velocity decreasing rate of tidal current due to the construction of the New Port breakwaters (maximum ebb).

4. 퇴적환경에 관한 수치실험

4.1 입자추적모델의 구성

하천으로부터 유입되어 들어오는 유사량의 거동을 파악하고 그 이동양상을 정성적으로 파악하기 위해 수치적 입자를 태화강 하구 부에 투하하여 그 거동을 시간에 따라 추적하였다. 실제 입자의 이동을 결정하는 표층에서의 이류속도에 의해 단위시간(Δt)동안 한 입자의 이동거리를 계산하였으며, 그 계산방법은 다음과 같다.

만약, 시간 t_0 일 때 $x_0 = (x_0, y_0)$ 에 위치한 입자가 시각 t 일때 새로운 위치 $x = \overline{x_0} + \overline{\Delta x}$ 로 움직였다면 이것은 Lagrangian 평균속도 $\overline{V_L}(\overline{x}(x, t), t)$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{V_L}(\overline{x}(x, t), t) = \overline{V}(\overline{x}, t) + \overline{\Delta x} \cdot \nabla \overline{V}(\overline{x_0}, t) \quad (4.1)$$

$$\overline{\Delta x} = \int_{t_0}^t \overline{V}(\overline{x}, t) dt \quad (4.2)$$

식 (4.1) 를 미소시간간격 $\Delta t = (t - t_0)$ 에 대해 적분하면 식 (4.3)과 같은 새로운 위치 $\overline{x}(\overline{x_0}, t)$ 에 대한 식을 얻을 수 있으며, 이것을 성분별로 나타내면 식 (4.4a) 및 식 (4.4b) 와 같다.

$$\overline{x}(\overline{x_0}, t) = \overline{x_0} + \int_{t_0}^t [\overline{V}(\overline{x}, t) + \int_{t_0}^t \overline{V}(\overline{x_0}, t') dt' \cdot \nabla \overline{V}(\overline{x_0}, t)] dt \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} x(x_0, t) = x_0 + \int_{t_0}^t [u(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial x} u(x_0, y_0, t) \\ + (\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial y} u(x_0, y_0, t)] dt \end{aligned} \quad (4.4a)$$

$$\begin{aligned} x(y_0, t) = y_0 + \int_{t_0}^t [v(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial x} v(x_0, y_0, t) \\ + (\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial y} v(x_0, y_0, t)] dt \end{aligned} \quad (4.4b)$$

여기서, u, v : 입자가 위치한 임의 지점의 총 이류속도 성분

또한, 위 식을 이용하여 매시간 간격마다 움직이는 입자의 위치를 추적하려면, 입자가 위치하는 임의 점에 대한 $u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 의 값을 알아야 한다. 이를 위해 먼저 각 격자점의 u, v 의 미분치를 먼저 계산해야 한다.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta x}(u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) \quad (4.5)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta y}(u_{i,j+1} - u_{i,j-1}) \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta x}(v_{i+1,j} - v_{i-1,j}) \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta y}(v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) \quad (4.8)$$

다음에 임의의 점에 대한 유속성분 및 미분값은 선형보간법에 의해서 구하는데, 이는 Fig. 5-1.에서와 같이 임의의 점에 인접한 4개의 격자에 대하여 I점에 대한 x방향의 거리를 G_0 라 하고, j점에 대한 y방향의 거리는 $(1-G_5)$ 이다.

단, 여기서 G_0, G_5 는 격자거리를 나타내고 당연히 $0 \leq G_0 \leq 1$ 이 된다. 이들의 거리를 1에서 빼 것을 직접 가중치로 보면 임의의 변수에 대한 임의점 $L(X, Y)$ 에서의 값은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$f(L) = G_4(f_{i,j}) + G_3(f_{i,j+1}) + G_2(f_{i+1,j}) + G_1(f_{i+1,j+1}) \quad (4.9)$$

여기서, $f(L)$ 은 임의의 변수($u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$)에 대한 L점의 값

$$G_0 : X(L) - I$$

$G5 : Y(L) - J$
 $I : \text{IFIX} [X(L)]$
 $J : \text{IFIX} [Y(L)]$
 $G1 : G0 \cdot G5$
 $G2 : G0 \cdot (1 - G5)$
 $G3 : (1 - G0) \cdot G5 = G5 - G1$
 $G4 : (1 - G0) \cdot (1 - G5) = 1 - G0 + G1 - G5$
 $X(L) : L\text{점의 } X\text{좌표}$
 $Y(L) : L\text{점의 } Y\text{좌표}$

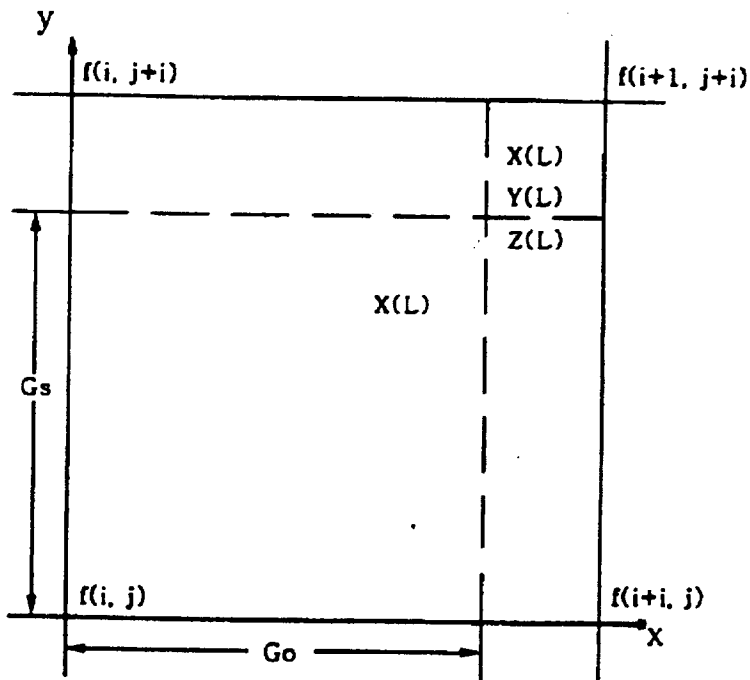


Fig. 4-1. Grid system for interpolation of particle position.

한편 난류확산의 계산에서 중요한 확산계수의 결정은 Leendertse

(1971)이 제안한 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} K_x &= 5.93 |\bar{u}| h \sqrt{g} / C \text{ (m}^3/\text{sec)} \\ K_y &= 5.93 |\bar{v}| h \sqrt{g} / C \text{ (m}^3/\text{sec)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

위 식으로부터 얻어진 확산계수를 Venkatesh(1987)의 방법에 따라 단위시간 동안 이동된 거리(d)와 방향(θ_R)을 random number로 표현하여

$$\begin{aligned} d &= R_1 (6(K_x + K_y) \Delta t)^{1/2} \\ \theta_k &= 2\pi \times R_2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

여기서, R_1, R_2 : 임의의 난수

K_x, K_y : 수평확산계수

와 같이 표현하여 난류확산에 의한 부유사의 확산을 계산하였다.

4.2 입자의 침강속도

본 논문에서의 입자의 퇴적특성을 알아보기 위하여 토사의 입경에 따른 침강 속도를 고려하여, 입자의 침강거리를 구하고, 이것을 입자의 이동위치에 따라 계산하였다.

입자의 침강거리는 식 (4.12)와 같이 산정하였다.

$$s(m, n) = s_0(m, n-1) + V \times dt \quad (4.12)$$

여기서, $s(m, n)$: m 번째 입자의 n번째 시간 step에서의 입자의 침강거리

$s_0(m, n-1)$: m 번째 입자의 n-1번째 시간 step에서 입자의 침강거리

V : 입자의 침강속도

이렇게 계산된 각 시간 step에서 입자의 침강거리와 그 격자 지점에서 수심값을 비교하여, 입자의 침강거리가 그 지점의 수심과 같거나 큰 경우 입자는 해저면에 퇴적한 것으로 가정하였으며, 재부상 및 소류력에 의한 이동은 고려하지 않았다. Table 4-1은 토사의 대표입경에 따른 침강속도를 나타낸다.

Table 4-1 Settling velocity of the suspended solids (Kim, 1997)

Material		Range of diameter (mm)	Representative diameter (mm)	Settling velocity (cm/sec)
sand	very coarse	2-1	1.5	0.7366
	coarse	1-0.5	0.75	0.392
	medium	0.5-0.25	0.375	0.2086
	fine	0.25-0.125	0.188	0.1113
	very fine	0.125-0.062	0.094	0.0592
silt	coarse	0.062-0.031	0.047	0.0321
	medium	0.031-0.016	0.023	0.0165
	fine	0.016-0.008	0.012	0.0091
	very fine	0.008-0.004	0.006	0.0048
mud	coarse	0.004-0.002	0.003	0.0026
	medium	0.002-0.001	0.0015	0.0014

4.3 유입토사의 확산과 퇴적

4.3.1 울산항의 퇴적토층 지질조사

일반항로 구간을 대상으로 선정된 Fig. 4-2 의 7개소에 시추조사 및 표준관입시험을 실시한 결과로 퇴적층 토질조사 결과를 도식화하면 Table 4-2 와 같다.

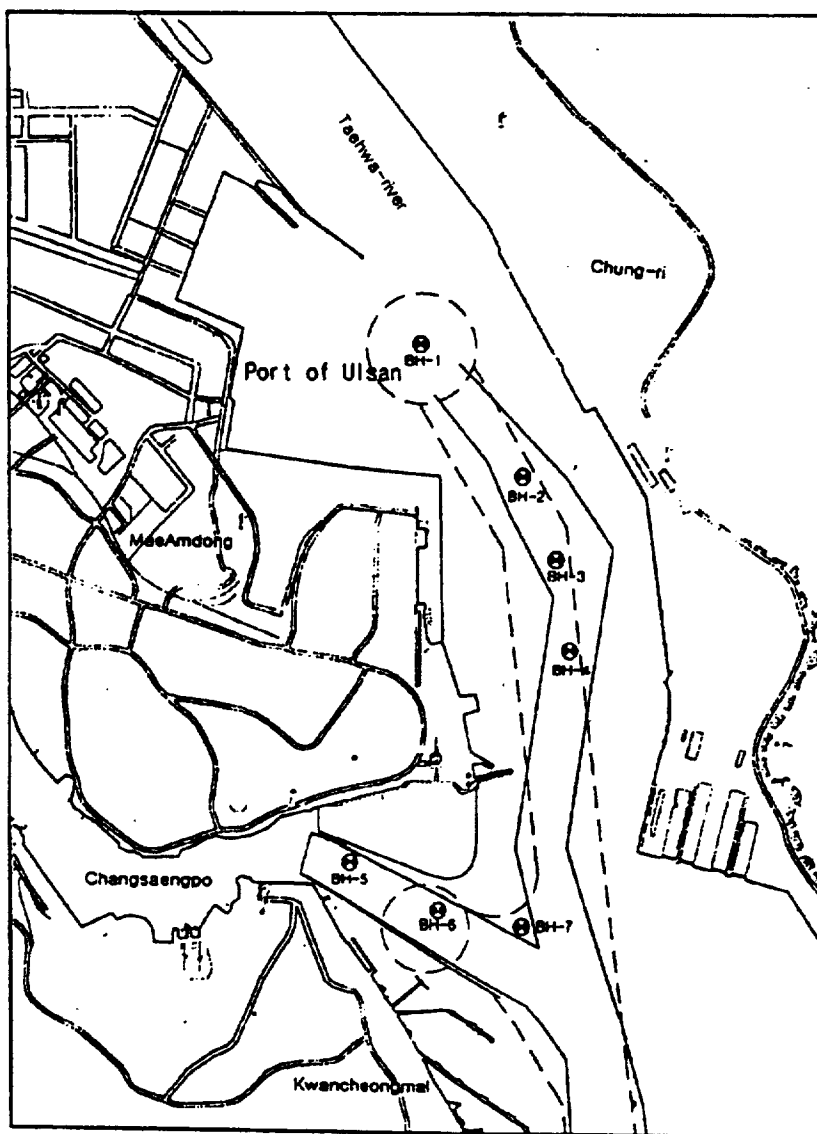


Fig. 4-2. Boring Point.

Table 4-2. Soil classification of the transported deposit.

Hole No.	Classification	Depth(m)	USCS	SPT	Remark
BH-1	Silty Sand	4	SM	0/30~7/30	용역
BH-2	Fat Clay	4	CH	0/30~1/30	"
BH-3	"	2	CH	0/30~2/30	"
BH-4	"	2	CH	0/30	"
BH-5	"	2	CH	0/30	"
BH-6	"	2	CH	0/30~1/30	"
BH-7	"	4	CH	0/30~1/30	"

조사결과, 퇴적토층은 고소성의 실트질 점토 (CH)가 대부분을 점하고 있으며, BH-1 지점에서는 현지표하 2.0 m 깊이에서부터 실트질 모래 (SM)가 분포되어 있다. 점토층의 상부 약 1~2 m 구간은 유기물이 함유된 매우 연약한 상태로 구성되어 있다. 따라서 퇴적층의 대부분을 차지하는 실트질과 점토질의 입경을 Table 4-1 에 의거 작은 순으로 3개 선정한 후, 30일 동안 연속적으로 입자를 투여하고 마지막 72시간은 입자투여 없이 유동모델만을 실행함으로써 최대한 입자를 침강시켜 퇴적되는 지역을 알고자 하였다. 총 720시간의 Lagrangian 입자추적 실험을 행하여 울산항에서 주로 퇴적되는 구간을 나타내었다.

유량조건은 태화강의 홍수량 $4.9 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{day}$ 를 방류하였을 때, 최대 ss농도를 $100 \text{ mg}/\ell$ 로 하면 모래의 유실량은 $4.9 \times 10^6 \text{ kg}/\text{day}$ 가 된다. 여기에서 위의 3가지의 경우가 부유사의 전부라고 가정하고, 입경에 비례적으로 입자의 투하시간을 달리하여 계산하였다. 총투하중립입자수는 모래유실량을 중립입자 단위중량으로 나누어 양적으로 투하시간을 결정하였다. 즉, 하루의 총 투입입자수를 1:2:4로 배분하여 계산하였다.

4.3.2 울산신항만 건설전의 퇴적특성

Fig. 4-3, Fig. 4-4, Fig. 4-5 는 부유사의 종류별 대표입경(ϕ)을 0.0015 mm, 0.003 mm, 0.006 mm 로 선정하여 해당 부유토사 입자를 태화강 하구에서 연속 방류하여 입자의 침강속도를 고려하여 30 일 경과 후의 Lagrangian 입자추적 실험한 결과를 나타낸 것이다. 전술한 Fig. 2-4, Fig. 2-5, Fig. 2-6 의 준설구역도와 비교해 보면 준설이 이루어지고 있는 해역과 퇴적이 많이 되는 곳이 잘 비교되고 있다. 이 실험결과를 바탕으로 신항만 건설전 A-A' 단면의 시간경과에 따른 퇴적양상과 누적량을 Fig. 4-9 ~ Fig. 4-14 에 입경별로 나타내었다.

또한 Fig. 4-21 ~ Fig. 4-26 에는 A-A' 단면상에서 신항만 건설 후 최대 퇴적되는 지점을 기준으로 신항만 건설 전·후의 양상을 비교한 결과를 입경별로 표현하였다.

이들 그림에서 태화강의 홍수시 유입되는 토사에 의한 퇴적·매물 토량의 증대는 시간의 함수로 증대됨을 알 수 있고, 주 수로의 양단에 퇴적량이 많은 공간적 분포특성을 파악할 수 있으며, 홍수시의 월간 퇴적량을 많은 곳에서 4 cm ~ 10 cm 정도로 나타났다.

이러한 퇴적량의 시·공간적 분포특성은 정량적 일치도에서는 약간의 문제를 지적할 수 있으나, 항로의 관리 및 퇴적환경의 특성을 파악할 수 있는 좋은 자료임을 알 수 있다.

또한 신항만 건설에 의한 퇴적물의 증가양상을 파악할 수 있으며, 시·공간적으로 불규칙한 변동특성을 보이거나 태화강이 유입되는 울산 구항 내측에서 발생하는 퇴적물의 증가양상을 파악할 수 있다.

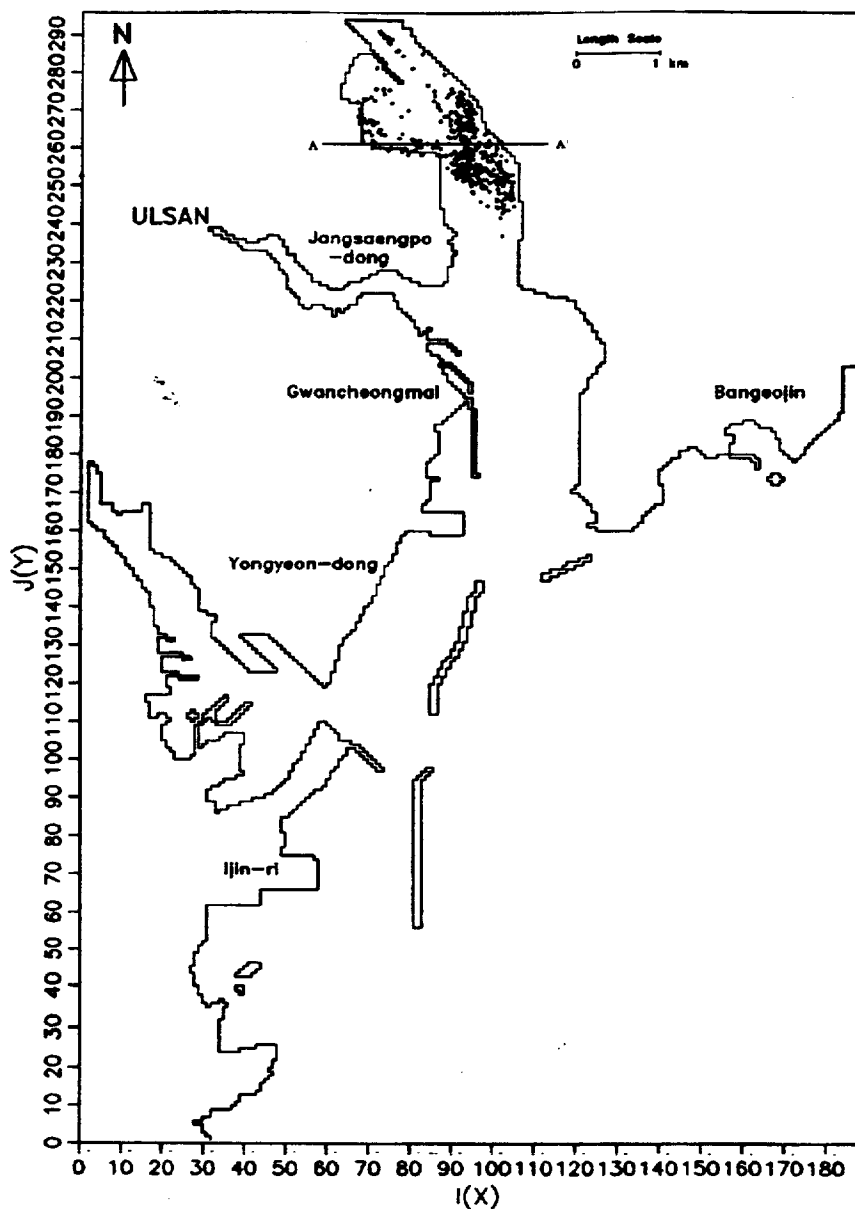


Fig. 4-3. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi=0.0015$ mm).

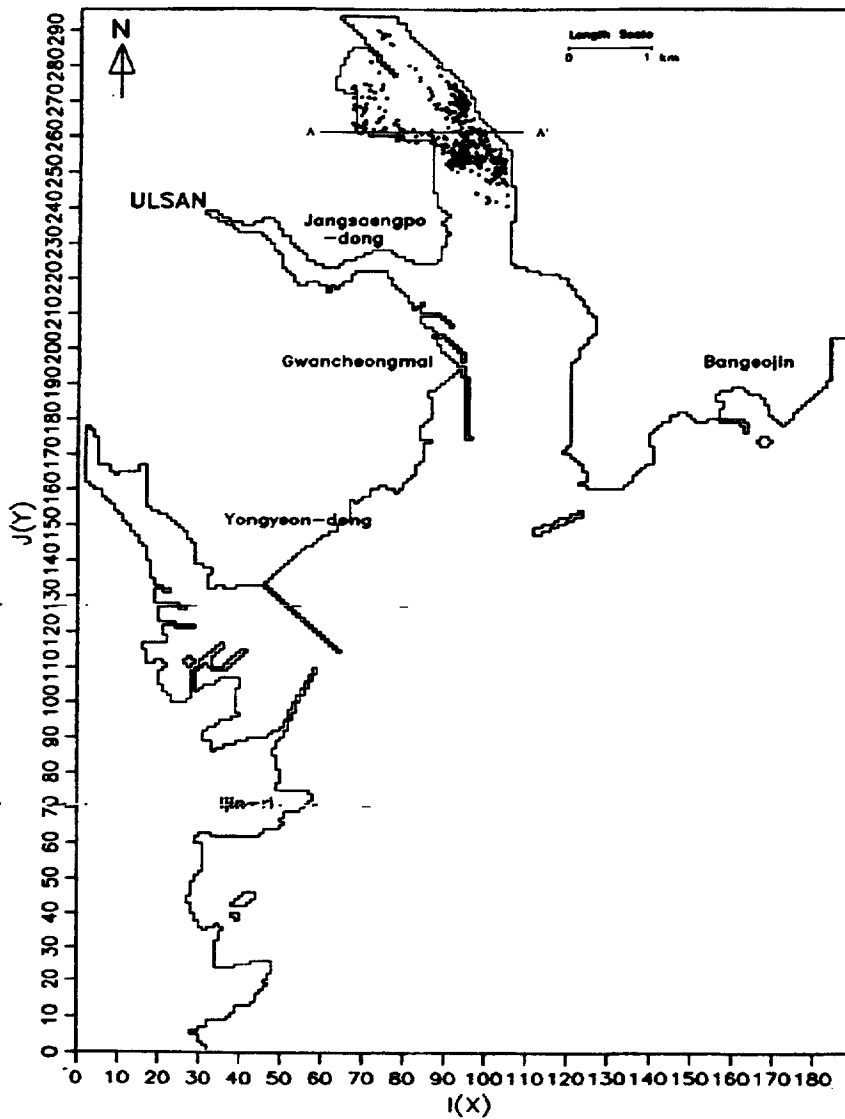


Fig. 4-4. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi=0.003$ mm).

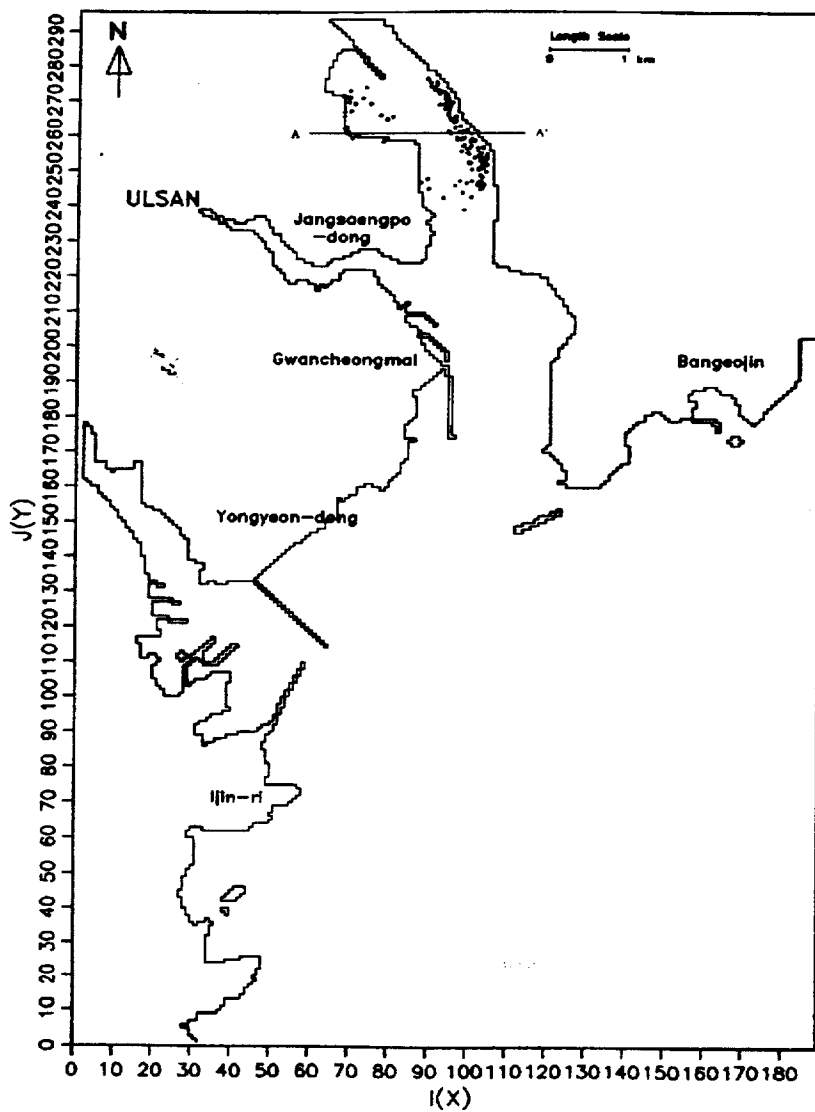


Fig. 4-5. Sedimentation characteristic before construction of Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi=0.006$ mm).

4.3.3 울산신항만 건설후의 퇴적환경 변화

울산신항만 건설에 의한 지형변화가 울산만내의 유동환경 및 퇴적특성 변화를 예측하기 위하여 태화강 하구역에서 입경 ($\Phi = 0.0015 \text{ mm}$, $\Phi = 0.003 \text{ mm}$, $\Phi = 0.006 \text{ mm}$) 이 3종류인 입자를 대상으로 입자추적 실험한 결과를 나타낸 것이 Fig. 4-6 ~ Fig. 4-8 이다. Fig. 4-6 및 Fig. 4-8 은 각각의 입자를 태화강 하류에서 방류하여 30 일 후의 퇴적분포를 나타내는데, 신항만 건설 전·후에서 초기에는 입자들의 확산 차이가 적어 해수교환율 변화가 미미하게 보이나 시간이 경과함에 따라 입자들의 확산범위 차이가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이 실험결과를 바탕으로 신항만 건설후 A-A' 단면의 시간경과에 따른 퇴적양상과 누적량을 Fig. 4-15 ~ Fig. 4-20에 입경별로 표현하였다. 울산신항만 건설후에는 울산만의 만구폭이 감소하므로 남북방향의 흐름이 방파제에 의하여 차단됨으로서 유속이 감소한다. 따라서 태화강으로부터 울산만의 동측해안을 연결하는 해역과 동대산과 용잠말 사이의 중앙수로에 주로 퇴적이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 울산신항만 건설과 함께 울산만 남부에 신설될 방파제에 의하여 해수교환은 차단될 것이므로 태화강으로부터 유입하는 부유토사는 울산만내에 대부분 퇴적하여 항내 매몰을 더욱 가속화 시킬 것으로 예상된다.

전술한 유동 및 퇴적분포특성 등을 참고하여, 현장의 입경분포와 비교해 볼 때, 정성적으로는 대체로 일치하는 경향을 보여주나, 약간의 오차는 본 논문에서 조류와 입자의 침강속도만을 고려하였고, 밀도류를 고려할 수 없는, 수심평균한 유속으로 입자추적한 결과로 생각된다. 이것은 2차원 모델의 한계로부터 발생하는 현상이므로 보다 정확한 부유토사의 수송과 퇴적특성을 규명하기 위해서는 3차원 모델에 의한 검토가 수행되어야 할 것이다. 또한, 토사의 수송 및 퇴적기구를 정략적으로 어떻게 정도 높게 예측할 수 있으며, 부유사 농도계산과 부유사가 수심변화에 미치는 영향의 정략적인 평가와 파랑에 의한 표사량도 산정되어야 할 것이다.

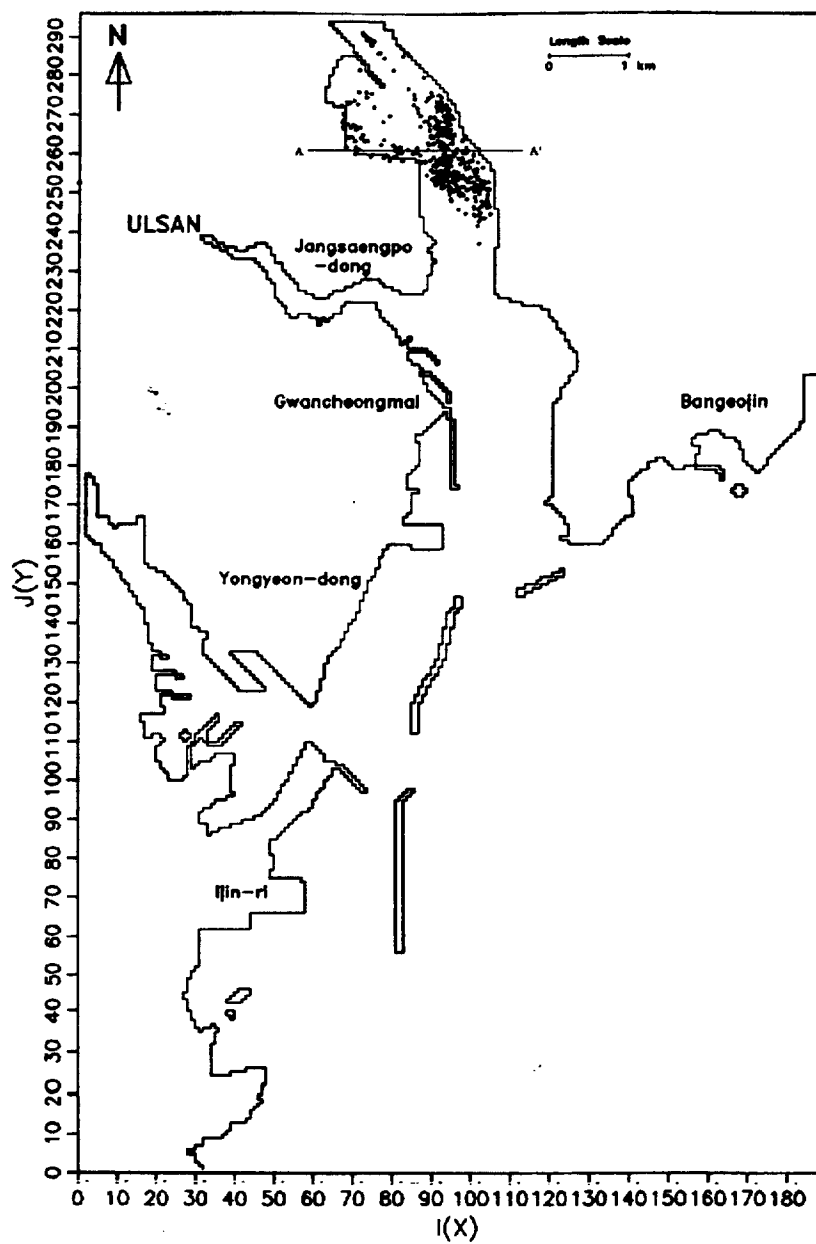


Fig. 4-6. Sedimentation characteristic after construction of Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi = 0.0015 \text{ mm}$).

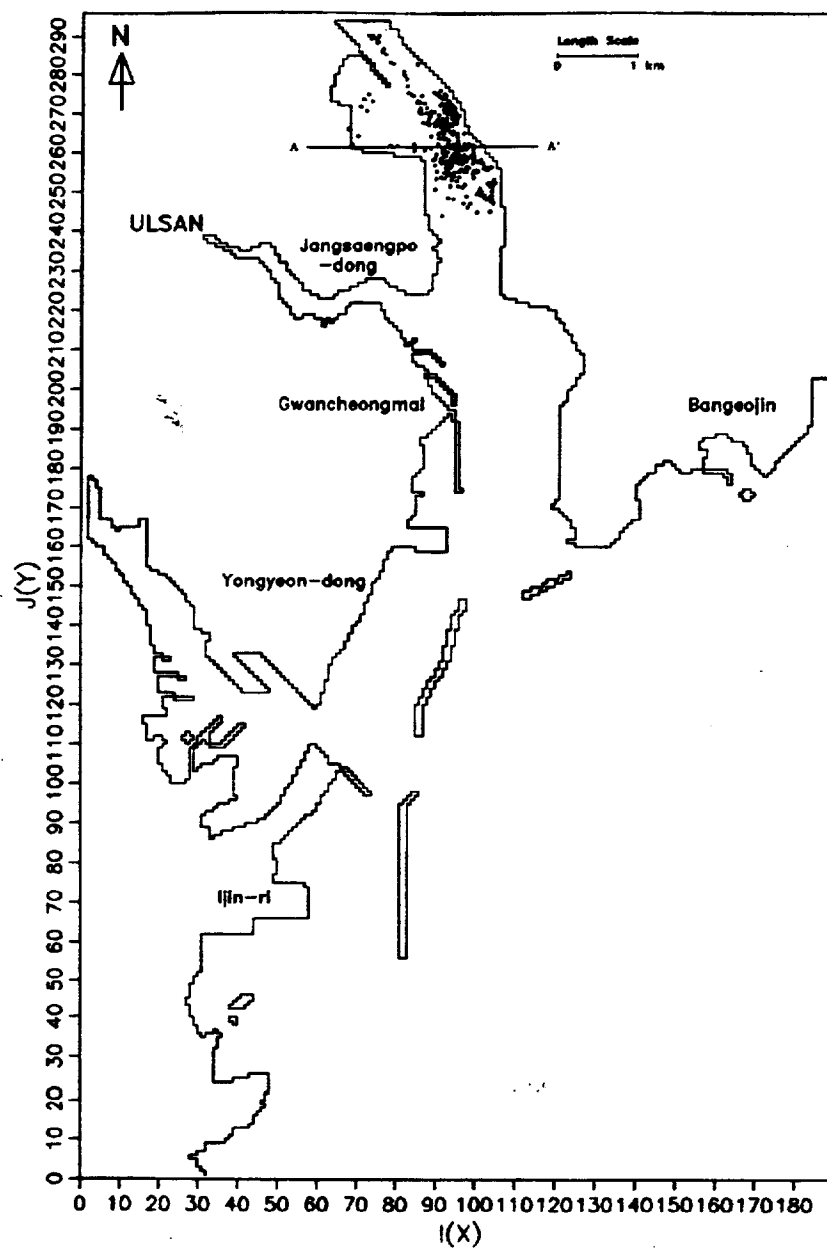


Fig. 4-7. Sedimentation characteristic after construction of Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi = 0.003$ mm).

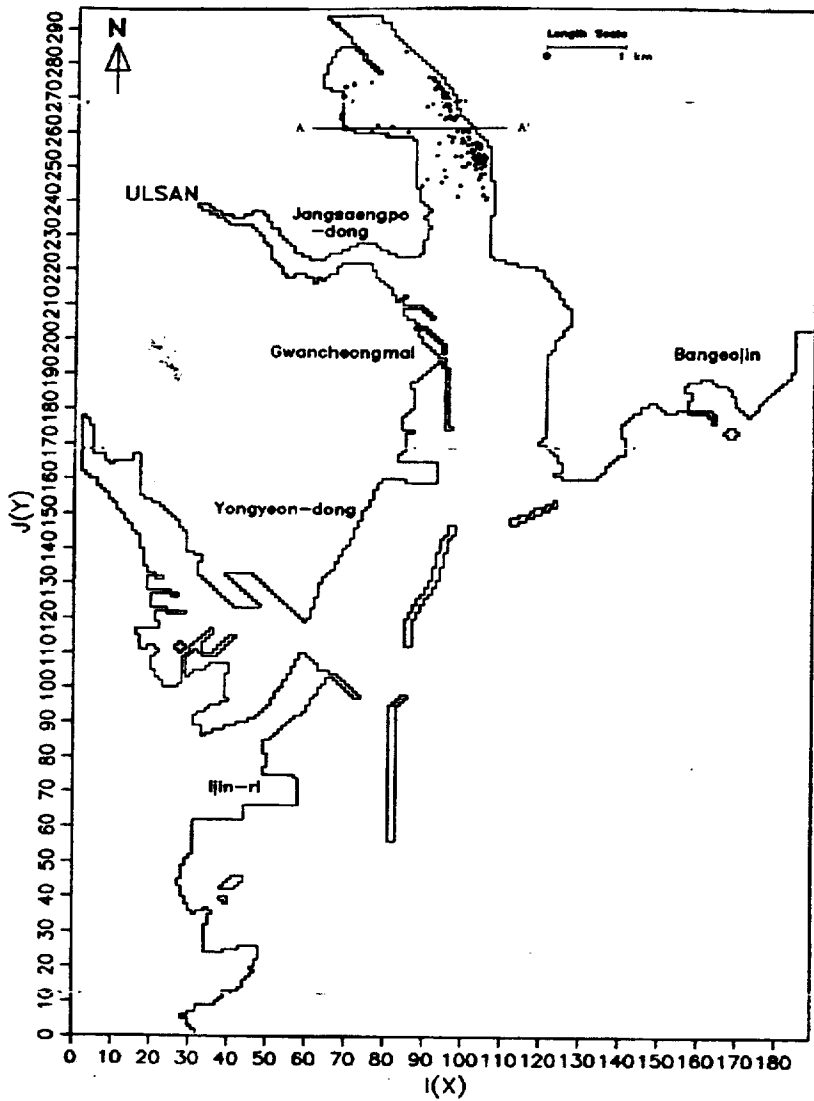


Fig. 4-8 Sedimentation characteristic after construction Ulsan New Port (after 30 day, $\Phi=0.006 \text{ mm}$).

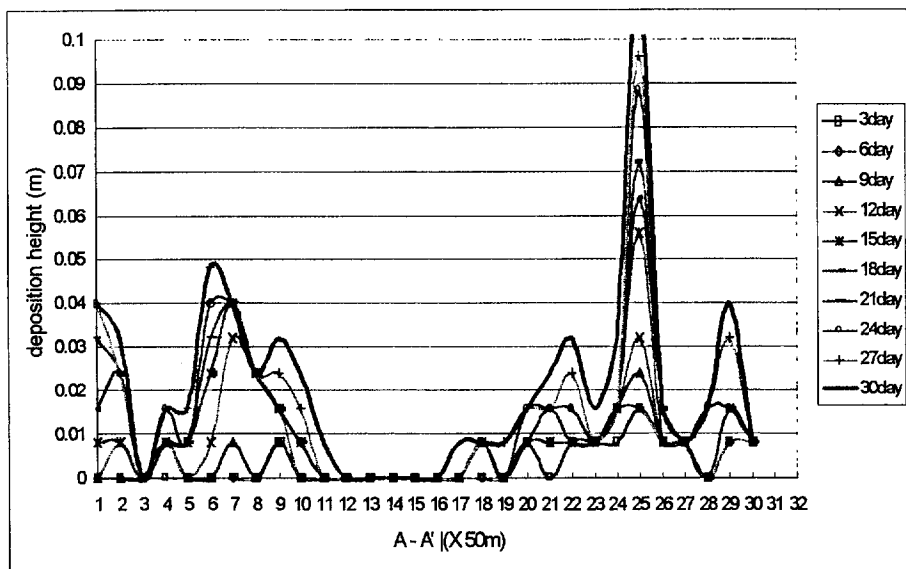


Fig. 4-9. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ mm).

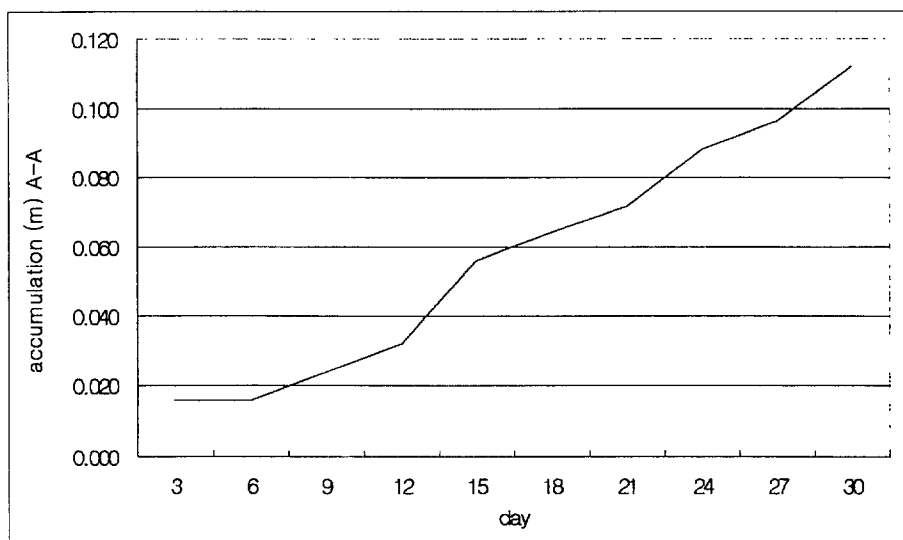


Fig. 4-10. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015$ mm).

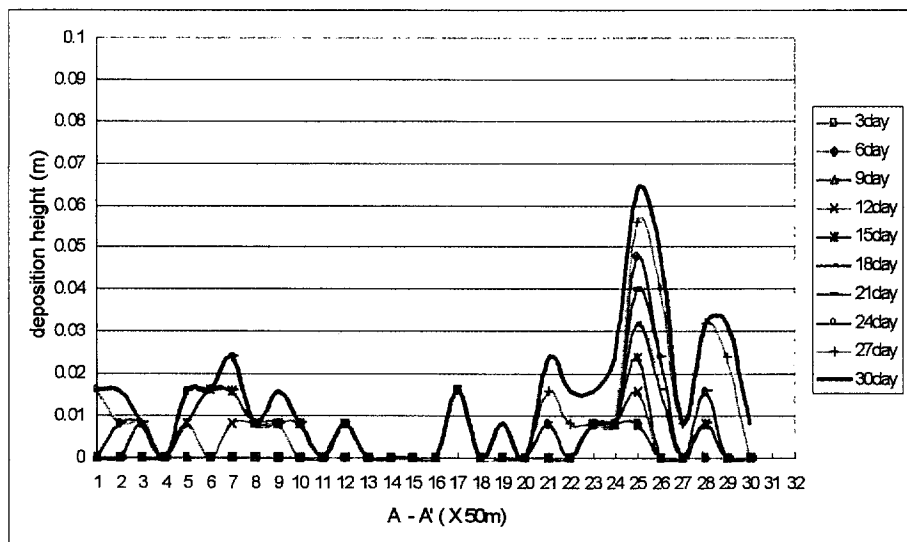


Fig. 4-11. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).

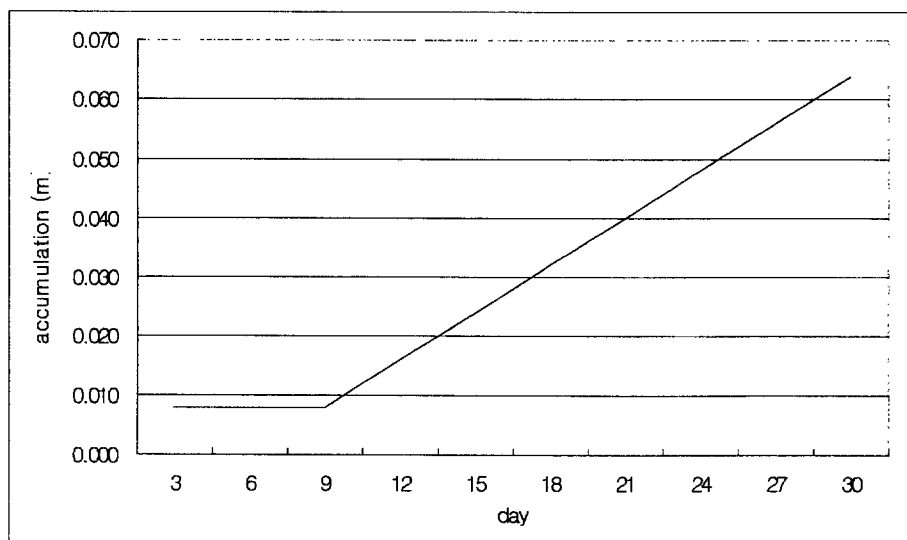


Fig. 4-12. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).

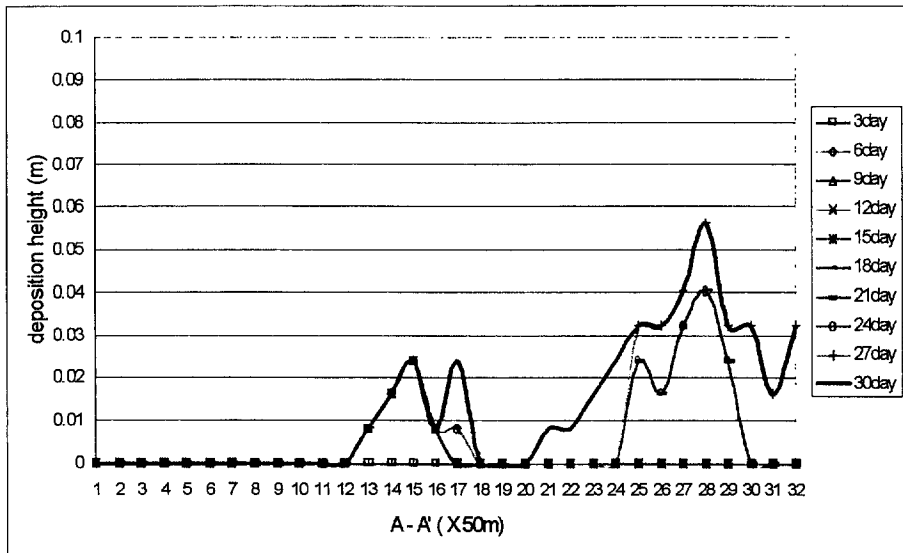


Fig. 4-13. Deposition height distribution across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).

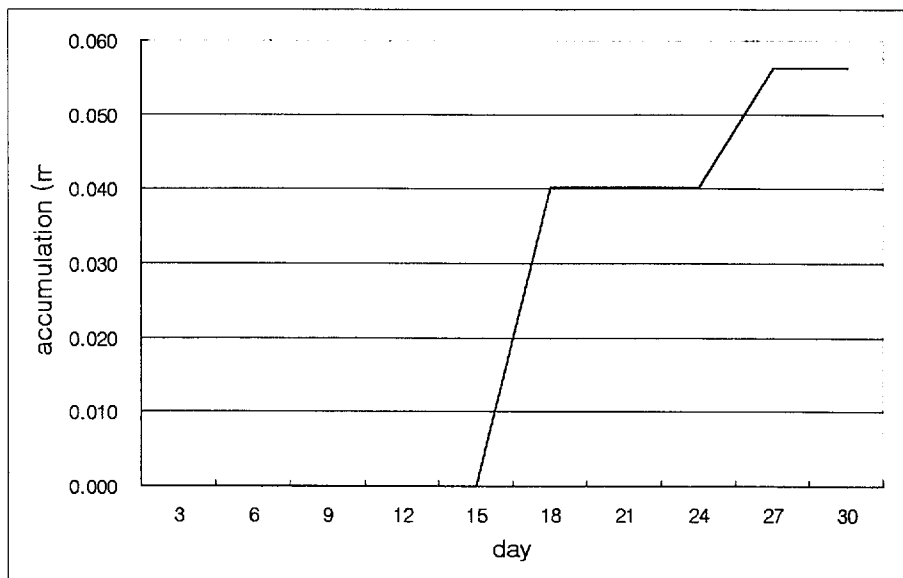


Fig. 4-14. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section before construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).

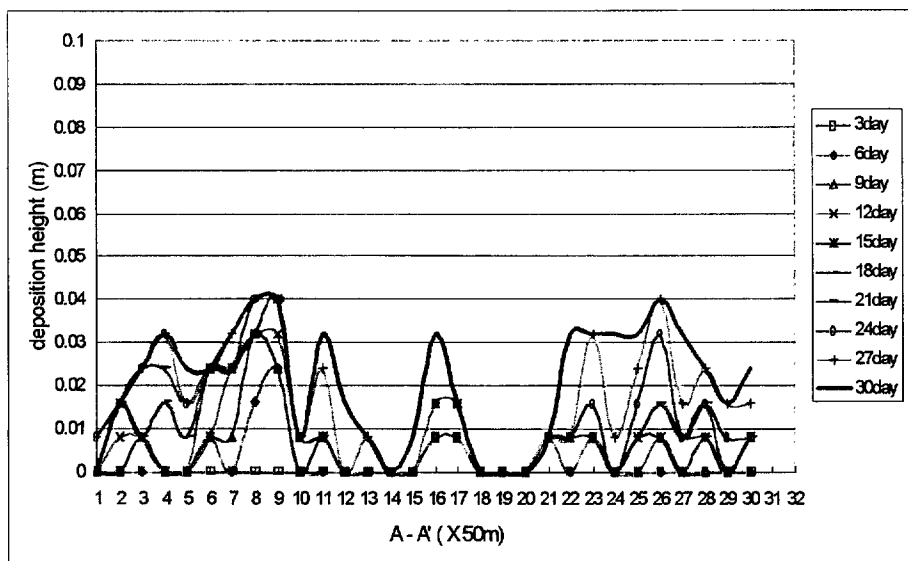


Fig. 4-15. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015 \text{ mm}$).

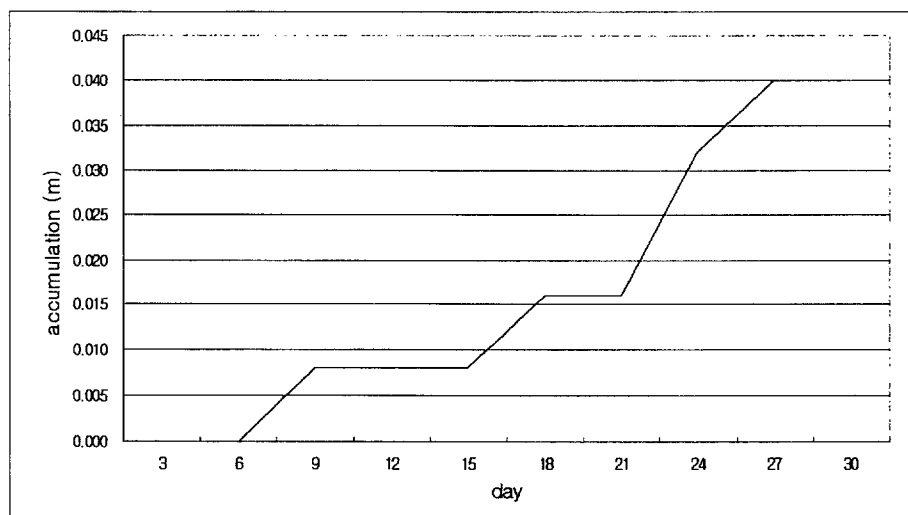


Fig. 4-16. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.0015 \text{ mm}$).

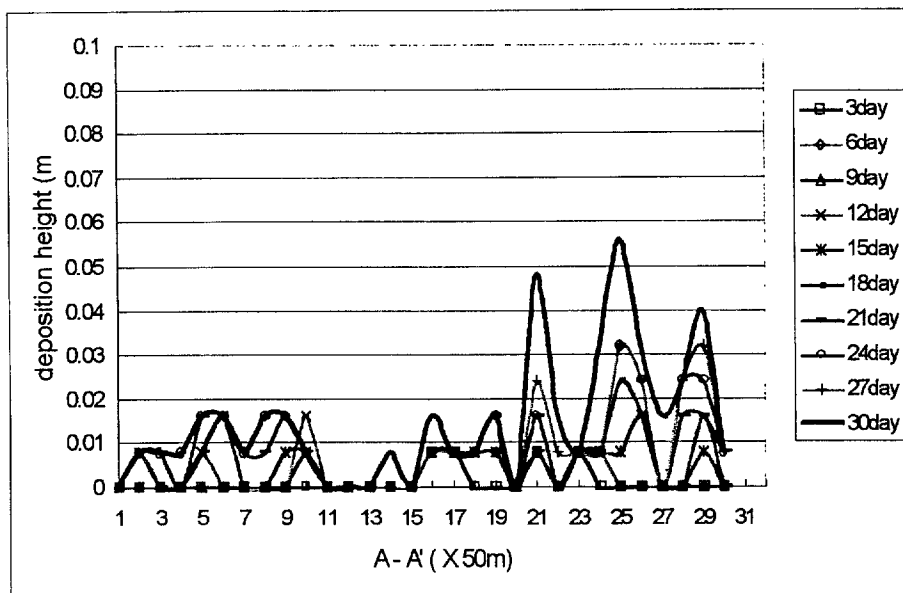


Fig. 4-17. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003 \text{ mm}$).

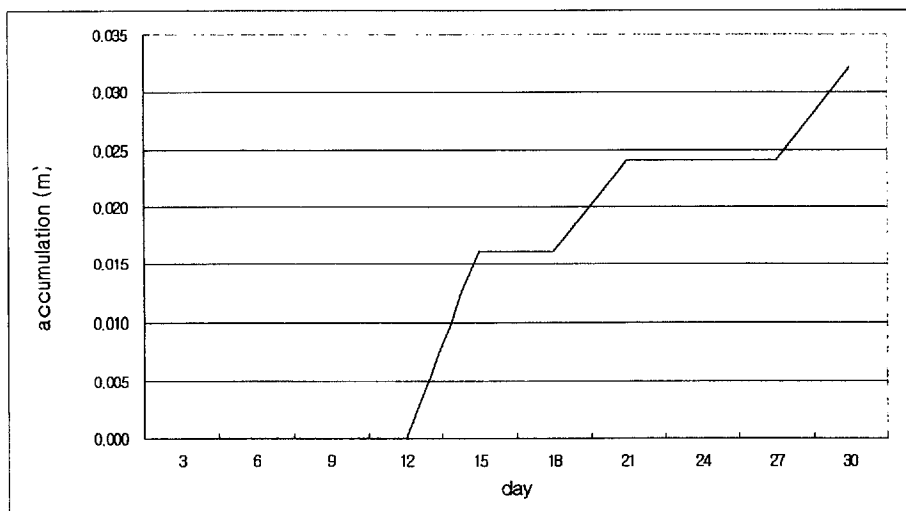


Fig. 4-18. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.003 \text{ mm}$).

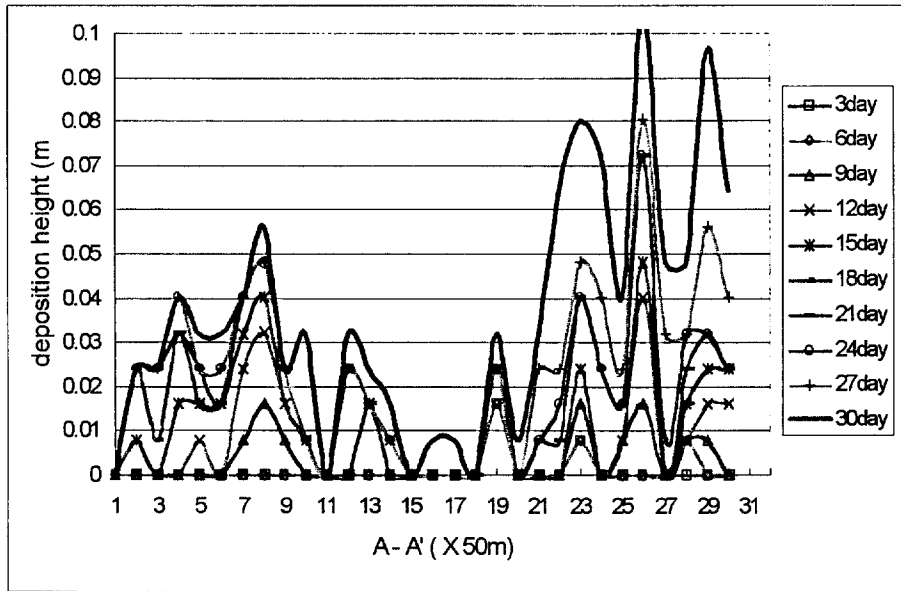


Fig. 4-19. Deposition height distribution across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).

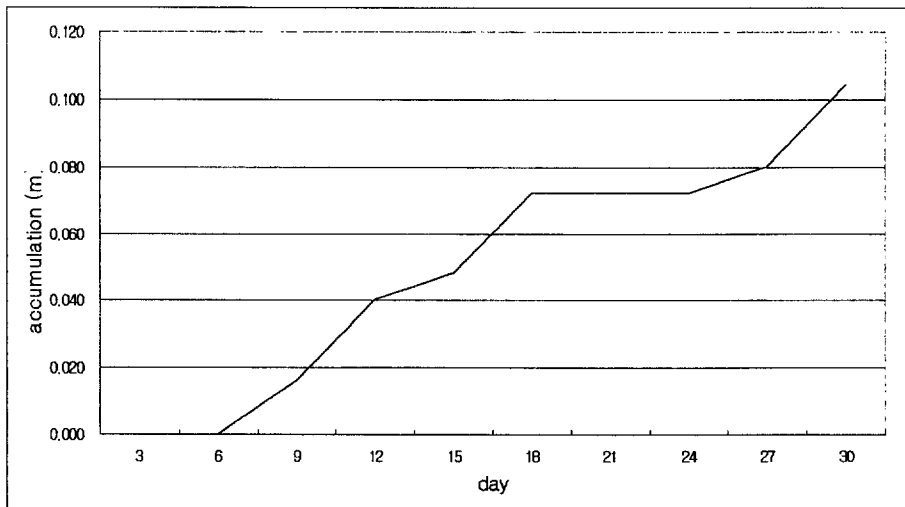


Fig. 4-20. Temporal changes of accumulated sediment height across A-A' section after construction of Ulsan New Port ($\Phi=0.006\text{ mm}$).

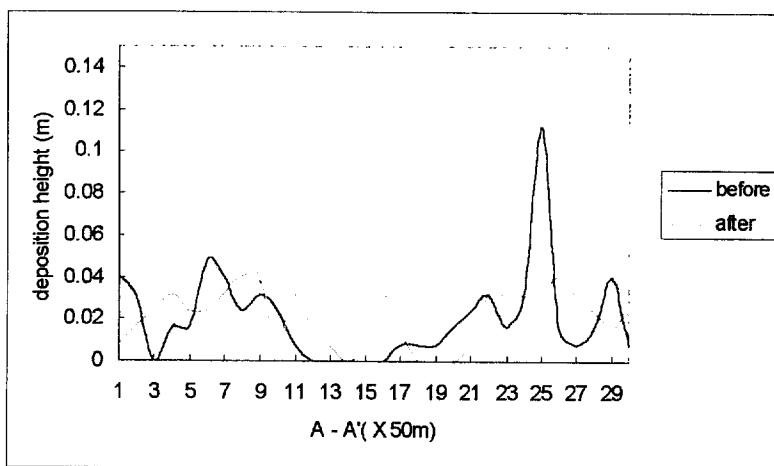


Fig. 4-21. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\phi=0.0015\text{ mm}$).

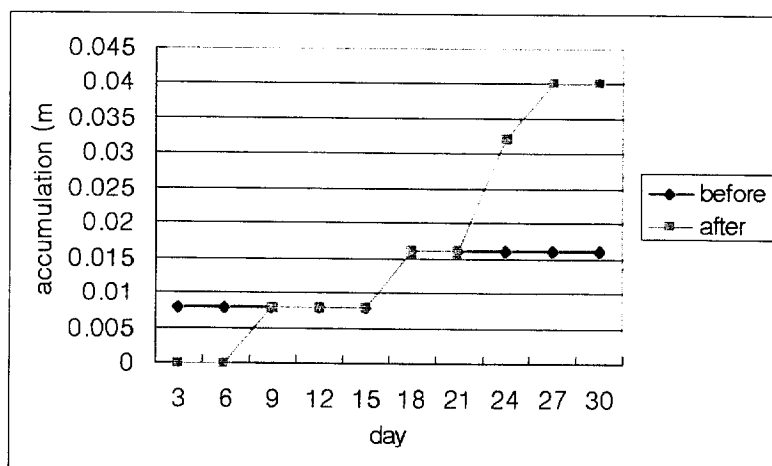


Fig. 4-22. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\phi=0.0015\text{ mm}$).

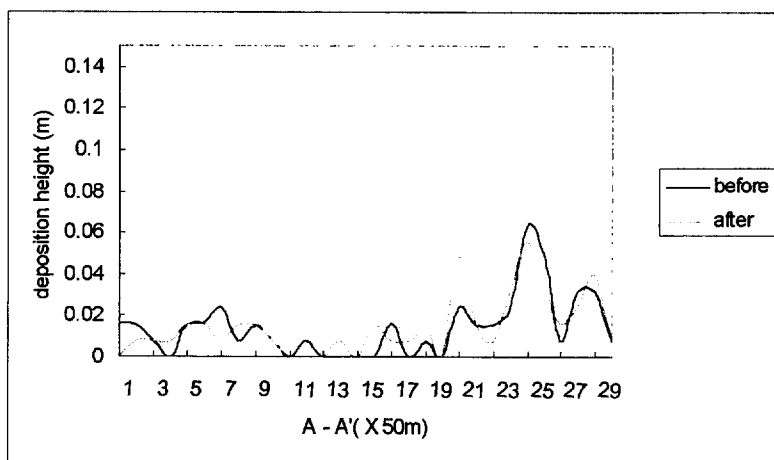


Fig. 4-23. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).

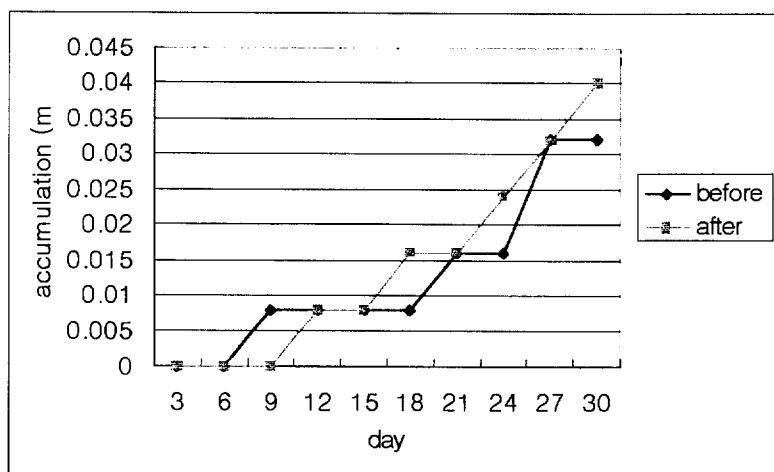


Fig. 4-24. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\Phi=0.003\text{ mm}$).

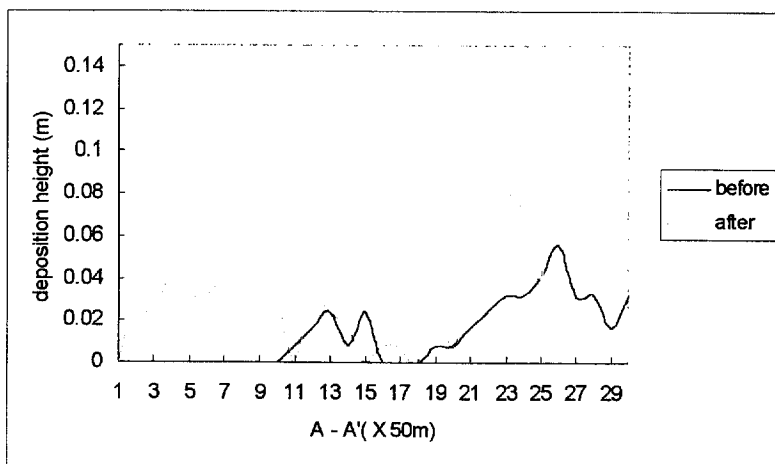


Fig. 4-25. Comparison of deposition height in A-A' before and after construction of the New Port ($\phi=0.006\text{ mm}$).

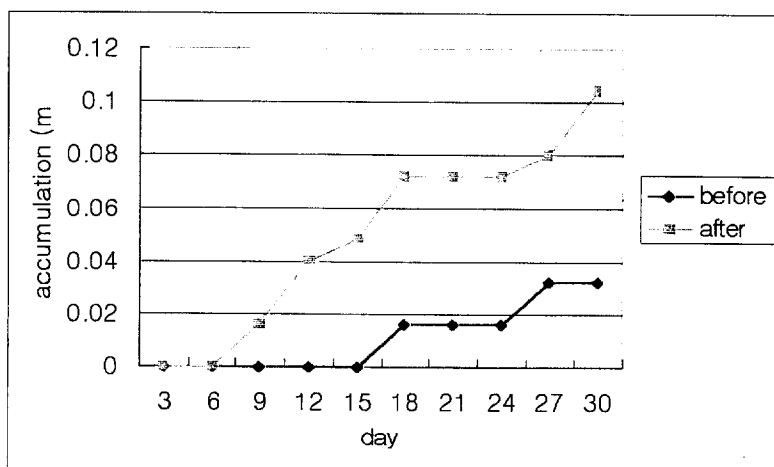


Fig. 4-26. Comparison of accumulation in A-A' before and after construction of the New Port ($\phi=0.006\text{ mm}$).

5. 결론 및 고찰

본 연구는 현재 활발한 퇴적활동이 진행중인 울산항과 태화강 하구역을 대상으로 퇴적현상에 대하여 울산항으로 유입되는 유량과의 관계를 고찰하였으며, 재현된 유동장하에서 하천으로부터 유입하는 부유토사의 퇴적영역 및 퇴적율의 변화특성을 시·공간적으로 해석하였다. 또한 신항만 건설로 예상되는 지형변화로 인한 유동환경변화를 해석하고 퇴적환경의 변화중 역시 시·공간적으로 해석하고 그 특징을 논의하였다.

이러한 연구과정에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 항내 퇴적층의 토질을 고려한 수치실험 결과, 토사는 준설�빈도가 큰 해역과 다량의 퇴적영역은 유사한 지역임을 알 수 있었다.
- (2) 울산신항만 건설 등에 의한 하구주변 연안의 지형변화로 인하여 울산항내 태화강으로부터 유입되는 부유토사의 울산만내 퇴적율이 더욱 증가하는 퇴적환경의 시·공간적 특성을 파악할 수 있었다.
- (3) 울산본항내의 퇴적특성에는 신항만 건설이 크게 영향을 미치지 않으나, 퇴적율의 증가양상을 파악할 수 있었으며 만구폭의 감소로 인해 울산만의 동측 해안선 주변과 동대산에서 용잠말 사이에 이르는 중앙수로 부근에 주로 퇴적이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

울산항은 항내 유량에 영향이 큰 태화강의 하구에 본항이 위치하고 있고, 남측의 온산항에 신항만건설과 같은 대규모 공사로 인하여 지형변화가 예상된다. 따라서 향후 유량변화와 파랑작용 및 지형변화에 따른 정성적, 정량적으로 정도 높게 예측할 수 있는 모델을 개발하여 보다 효율적인 유지준설 계획을 수립할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 울산지방해양수산청, 2001. 울산항 준설품사 환경영향평가 보고서, 93~110.
- 울산지방해양수산청, 2001. 울산신항만 개발사업 사후환경영향조사 결과통보서, 172~199.
- 한동대학교 건설환경연구소, 2000~2001. 울산 신항 파랑관측 연구 용역 관측자료.
- 해양수산부, 1997. 울산 신항만 방파제 기본설계보고서, 107~116. 489~497.
- 낙동강 홍수통제소, 2000. 울산 태화강 유량 관측자료.
- 울산광역시, 2000. 울산재해백서, 27~30.
- 한재석, 1996. 하천수 유입에 따른 울산항 주변해역의 해수유동특성, 부경대학교 산업대학원 석사학위논문, 3~6.
- 해양수산부, 1997. 울산 신항만 방파제 기본설계 환경영향평가서, 260~319.
- 건설부, 1970. 태화강 하구언 건설타당성조사 보고서, 139~142.
- 박종화, 1994. 심해파랑추산모형의 개발 및 오염물질 수송에의 응용, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 117.
- 해운항만청, 1988. 울산항 기본계획 보고서, 제2권 기본계획편, 287~290.
- Leendertse, J.J., 1967. Aspects of a computational model for long period water wave propagation, RM-5295-PR, The Rand Corporation, May, 2~11.
- 홍훈기, 1991. 항내 해수교환기능을 고려한 방파제의 배치설계에 관한 기초적 연구, 47.
- Mitsuyasu, 1968. On the growth of the spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch, Proc. 17th Japanese Conf. Coastal Eng, 1~7.
- 건설부, 1991. 태화강 하천 정비 기본계획, 84.
- 윤용남, 1996. 수문학, 237.

- Kim, W. H. and Y. A. Park, 1980. Microbiogenic sediments in the Nagdong estuary, Korea. J. Oceanol. Soc. Korea. 15: 34-48.
- 金種仁, 1997. 大阪湾における河川からの流入土砂の輸送・堆積機構に関する研究, 大阪大學校, 90-134.
- Bretschneider, C.L., 1968. Significant waves and wave spectrum, Ocean Industry, 40~46.
- Janssen, P.A.E.M., G.J. Komen and W.T.P. De Voogt, 1984. An operational coupled hybrid wave prediction model, Jour. Geophys. Res., 89(c3), 3635~3654.
- 김종열, 1998. 매물특성에 관한 연구, 부경대학교 산업대학원 석사학위논문, 1~2.