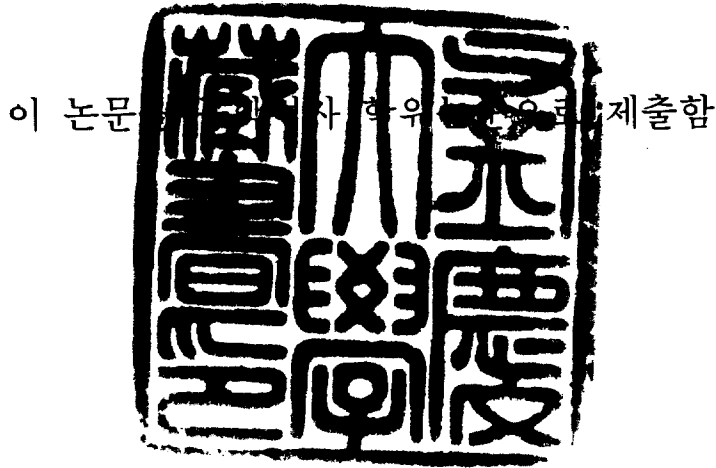


공학석사 학위논문

영일만 해수 순환 특성에
미치는 해류의 영향

지도교수 류 청 로



2002년 2월

부경대학교 대학원

해 양 공 학 과

윤 화 진

윤화진의 공학석사 학위논문을 인준함.

2001年 12月 26日

주	심	공학박사	윤	길	수
위	원	공학박사	김	헌	태
위	원	공학박사	류	청	로



목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iii
List of Symbols	iv
ABSTRACT	v
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법 및 내용	4
2. 영일만의 수리환경 현황 및 특성	6
2.1 해저지형	6
2.2 하천	6
2.3 조석	7
2.4 해조류	12
2.5 기상	12
3. 수치모델	13
3.1 해수 유동 수치 모델	13
3.1.1 기초방정식	13
3.1.2 수치해법	13
3.2 광역모델(Coarse mesh model)	18
3.3 중간역 모델(Intermediate mesh model)	25
3.4 상세역 모델	30
3.4.1 상세역 모델(fine mesh grid)의 구축	30
3.4.2 만 내의 순환	31
3.5 입자추적	39
4. 영일만 내의 해류의 영향	43
4.1 조석·조류와 영일만 하천 유출수의 영향	43
4.2 영일만 해수 순환에 미치는 해류의 영향	48
5. 요약 및 결론	50

참고문헌

List of Figures

Fig 1-1.	History of the study.	3
Fig. 1-2.	Schematic flow of the study.	5
Fig. 2-1.	The points of tidal observation by POSCO.	9
Fig. 3-3.	Volume transport at model open boundaries.	21
Fig. 3-4.	Horizontal grid system of computation area.	22
Fig. 3-5.	Bathymetry of computation area.	23
Fig. 3-6.	Current velocity fields in the East Sea (current).	24
Fig. 3-7.	Horizontal grid system of computation area.	27
Fig. 3-8.	Bathymetry of computation area.	28
Fig. 3-9.	Current velocity fields in the East Sea coastal (current).	29
Fig. 3-10.	Horizontal grid system of computation area around Yongil Bay.	33
Fig. 3-11.	Bottom topography of study area(3D).	34
Fig. 3-12.	Bathymetry of computation area around Yongil Bay.	35
Fig. 3-13.	Current velocity fields in Yongil bay (current).	36
Fig. 3-14.	Location map of velocity computing point	37
Fig. 3-15.	Stick diagrams of computing current in Yongil bay.	38
Fig. 3-16.	Grid system for interpolation of particle position.	41
Fig. 3-17.	The movement of particles.	42
Fig. 4-1.	Computed tidal currents vector diagram on the (a) flood, (b) ebb flow under the spring tide(Kim, 2000).	44
Fig. 4-2.	Maximum flooding flow and ebbing flow in spring tide.	45
Fig. 4-3.	Tidal residual currents with river discharges(a) and without river discharges(b)(Kim, 2001).	46
Fig. 4-4.	Map of observation current in Yongil bay(수로국, 1972). ..	47
Fig. 4-5.	Map of currents in Yongil bay.	49

List of Tables

Table 2-1. Tidal characteristics in Yongil bay.	10
Table 2-2. The max. current speed in continuous observation.	11
Table 3-1. Computation conditions of the current model (coarse mesh).	20
Table 3-2. Computation conditions of the current model(intermediate mesh).	25
Table 3-3. Computation conditions of the current model(fine mesh).	30

List of Symbols

- U, V : Current velocity of x, y direction, respectively
- C : Bottom friction coefficient
- f : Coriolis coefficient
- g : Gravitational acceleration
- h : The water depth under mean water level
- ζ : Water level
- $h_{\max}$: Maximum water depth
- n : The number of the calculation step
- p : Pressure
- l, m : Unit normal vector of x, y direction in boundary surface, respectively
- A_h : Horizontal eddy viscosity coefficient, respectively
- Δs : Mesh size
- Δt : Time interval
- ρ : Water density
- ω : Angular velocity
- ϕ : Latitude
- t : Time
- K : Diffusivity
- c : Unit concentration
- σ^2 : Covariance of concentration
- D_x, D_y, D_z : Turbulent diffusivity of x, y, z direction, respectively

The effect of Ocean Current in Yongil Bay

Hwa-jin Yoon

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

ABSTRACT

Yongil Bay is located at eastern coast of Korea. The study aims is examine into current system cause by ocean current. To the study, it is used 2D numerical model. And following steps adopted and the applicability of model is checked.

- 1) Large scale current model was developed to considering ocean current. That area is the East sea.(form the Korea channel to the Tatar channel)
- 2) Middle scale current model was build for effect of ocean current. The area is from Ulsan to Chukpyon.
- 3) Small scale current model was developed and the study area is around Yongil bay. The open boundary condition is only ocean current.
- 4) To study characteristic of current, a particle was suspended inside the Yongil bay.

Instide of bay, the velocity is 0.001~0.46 cm/s. This value appeared only cause by ocean current.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

영일만은 경북 포항시 흥해읍 달만갑과 대보면 장기갑을 입구로 가지는 내만으로서 동해안의 회유성 어류, 패류 및 해조류의 서식지로서 좋은 조건을 갖추고 있으며 양식장의 적지로서 수산업상 중요한 위치를 차지하고 있다.

영일만의 해양환경에 관한 조사연구는 교통부 수로국이 선박의 안전운행과 항만개발의 기초자료를 제공하기 위하여 해수유동에 대한 조사를 실시한(국립해양조사원, 1971) 이래, 동 조사의 표본과 자료를 이용한 박병권 등(1972)의 해저퇴적물의 분포 분석과 한상복(1974)의 해수의 광학적인 특성에 관한 연구가 있으며, 최근에는 성기탁 등(1993)이 현지 유속 관측자료에 근거하여 영일만 내의 항류와 조류의 분포 특성을 제시한 바 있으며, 이종섭 등(1995)은 1989~1990년의 체계적인 관측자료를 토대로 영일만의 해수유동, 확산 및 형산강 유출수의 거동에 대한 기초자료를 제시하였다. 또한 이문옥 등(1999)은 2차원 수치실험을 통하여 홍수시 영일만 내로 유출하는 하천유출수의 거동과 SS 확산 특성을 연구하였다. 최근 김(2000)과 김(2001)은 조석, 조류, 하천 방류수를 유동 인자로 하여 수치모형을 수행하였다. 이외에도 영일만 내에 위치한 포항제철소의 부지확장과 배출수에 의한 영일만 해양환경 변화를 조사, 분석하여 해양환경에 미치는 악영향을 사전에 예측하고 주변 해양환경의 안정성을 유지하기 위한 목적의 해양물리 및 생태환경에 대한 조사, 분석이 포항제철에 의하여 수 차례에 걸쳐 이루어 졌다. Fig. 1-1은 이들 연구과정을 종합하여 나타낸 것이다.

최근 영일만은 포항제철을 비롯한 대규모 공업단지에서 배출되는 산업폐수와 지역주민에 의하여 배출되는 생활폐수 등 만 내로 유입

되는 오염물질의 절대량이 증가함에 따라 만내의 수질이 점차 악화되어, 만내 해역의 대부분이 Ⅱ,Ⅲ등급 해역으로 수질이 관리되고 있는 실정이다.

따라서 만 내의 수질상태를 예측할 수 있는 오염물질의 확산기구 구멍이 절실히 요구되며, 이러한 요구에 선행되어 만 내의 해수유동 특성이 기본적으로 구명되어야 할 것이다.

영일만의 주 해수 순환 기구에 대해서 아직 명확히 밝혀진 바는 없다. 영일만의 해수 순환 구조에 영향을 미치는 요인으로 조석, 조류, 해류, 취송류, 하천 방류수 등이 있다. 현재 각 요인에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 해류에 의한 영일만의 해수 순환 구조에 대한 연구는 극히 미비한 실정이다. 기존 연구자들의 연구결과를 보면 해류에 대한 영향이 불확실하게 언급이 되어 있을 따름이다.

따라서, 본 논문에서는 해류의 영향을 고려하였을 때 영일만의 해수 순환 특성에 대해 규명하고 만 내 미치는 해류 영향을 정성적·정량적으로 규명하고자 한다. 이는 영일만의 오염물질 확산 특성 구명을 위한 기초적 연구자료가 될 것이다.

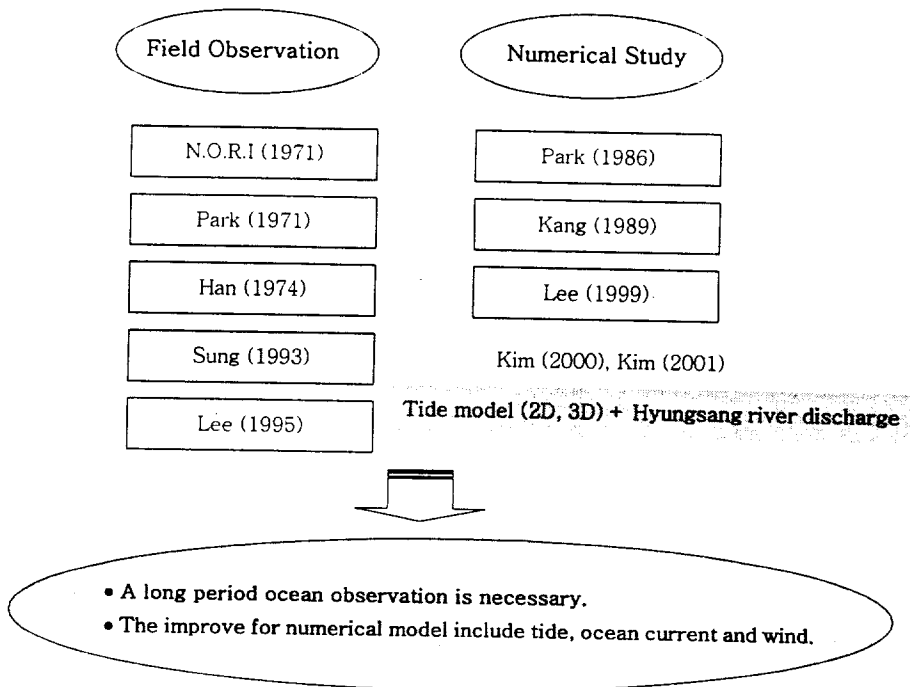


Fig 1-1. History of the study.

1.2 연구방법 및 내용

영일만은 동해 연안에 위치한 영일만의 지리학적 특성상 쓰시마 난류의 영향을 직·간접적으로 받을 것이라 사료된다.

영일만의 해수유동 특성을 수치모델링으로 규명하기 위해서는 동해에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 해류의 영향을 고려해야만 한다.

영일만에 어느정도 해류가 영향을 미치는지 검토하기 위하여 세번의 수치모의 단계를 거쳐야 한다. 먼저 대한해협에서부터 러시아 타타르 해협에 이르는 광역모델을 구축해야 한다. 구축된 광역모델에서 다음 단계에 대한 개경계 값을 구한다. 울산 위~죽변 해역에 이르는 중간 규모의 모델에 앞서 구한 해류값을 개경계에 입력시켜 계산을 하며 역시 다음 단계에 대한 경계값을 계산하도록 한다. 그런다음 마지막으로 영일만 주변 해역에 대한 상세역모델을 구축하여 타 기구에 의한 영일만 내의 순환에 대해서 논하고자 한다.

이러한 세 단계 다중 격자 기법(multi-grid system)을 이용하여 해류가 영일만 해수 순환에 미치는 영향을 정성적·정량적으로 규명하고 해류에 의한 오염물질의 거동에 대해서 살펴보고자 한다.

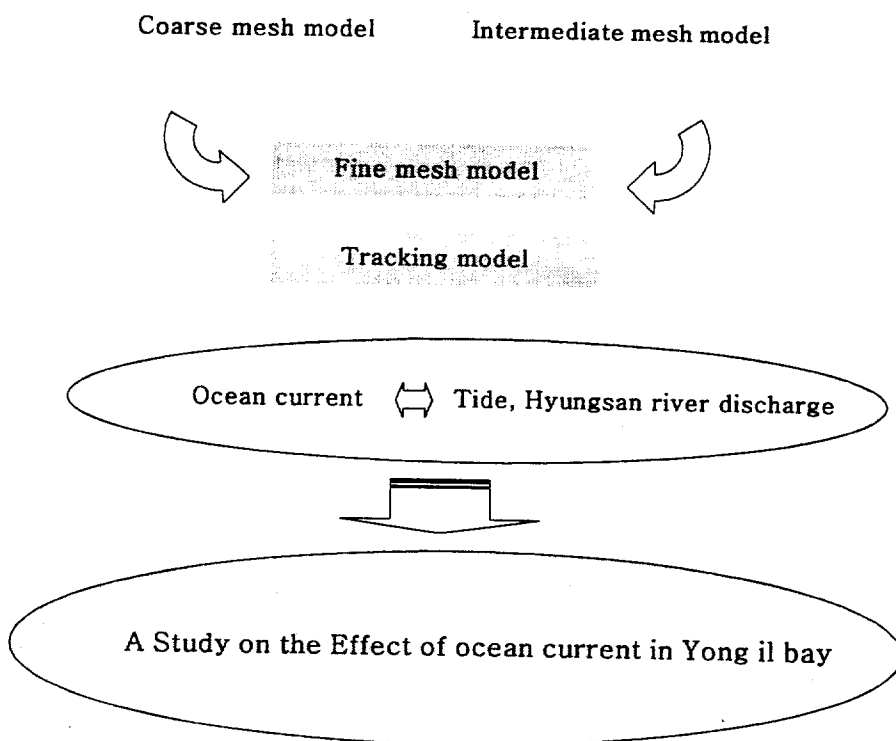


Fig. 1-2. Schematic flow of the study.

2. 영일만의 수리환경 현황 및 특성

2.1 해저지형

영일만은 동해안의 남쪽에 위치하고 있는 수면적 약 100 km^2 의 내만으로 행정구역상으로는 경상북도 포항시에 속한다. 일반적으로 영일만은 달만갑과 장기갑을 연결하는 선의 안쪽을 말하는데, 만의 폭은 약 10 km 이고 길이는 약 12 km 이며 거의 직사각형의 형태를 이루고 있다.

만 입구 중앙부의 수심이 가장 깊어서 $25\sim 30\text{m}$ 를 나타내고, 만의 안쪽으로 갈수록 그리고 해안쪽으로 갈수록 점차 수심이 얕아진다 (Fig. 2-1). 따라서 등수심선은 해안선에 거의 평행하게 나타나는데, 포항 신항 일대의 해저가 비교적 평탄한 반면에 만의 동쪽인 구룡반도 전면에서는 해저경사가 비교적 급하여 해안선으로부터 약 500m 거리에 20m 수심이 나타난다. 만의 중심 방향으로 해저경사가 약 $1/1,000$ 으로 완만한 편이다. 한편, 달만갑으로부터 동쪽으로 3km 지점에는 수심이 주위보다 5m 정도 얕은 일종의 천퇴가 직경 약 1km 로 위치하고 있는데, 가장 얕은 수심이 약 15m 내외이다.

2.2 하천

형산강

형산강은 남한 10대 하천의 하나로서 유역 면적은 $1,167\text{ km}^2$ 이고, 유로 연장은 62.2 km 이다. 유역 형상은 유역 평균 폭이 18.8 km , 유역 형상계수가 0.3인 장방형이고, 하상의 평균 구배는 $1/2,500$ 이고, 하류부의 하폭은 약 100 m 이다.

연평균 평수량은 $17.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고, 연평균 갈수량은 $4.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 100년 빈도 최대 홍수량은 하구에서 $3,600 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 연간 평균 유출량은 $500,640 \text{ m}^3$ 이며, 연간 최소 및 최대 유출량은 각각 $290,000 \text{ m}^3$ 및 $1,800,000 \text{ m}^3$ 로 연도별로 차이가 크다.

형산강의 하구부는 포항제철의 부지 확장계획에 의거하여 1977년 및 1978년의 2년에 걸쳐 이체유로공사가 실시되어 현재와 같은 형산강의 유로를 형성하였다. 이체유로공사는 형산강 하류 약 900 m 지점을 공사 시점으로 하여 유로연장 1,930m 구간에 대하여 실시되었으며, 계획 법선에 의한 하폭은 이체공사 시점에서 458 m, 종점에서 400 m이다.

냉천

유역 면적이 78 km^2 , 유로 연장이 19 km의 소하천인 냉천은 포항시 조천면과 양북면의 경계에서 발원하여 포항신항 동안 호안에 평행하게 하구 도류제를 형성하고 있다. 계획 홍수량은 50년 빈도 홍수량인 $574 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 좌우 하천제방 법선간 하천폭은 100 m 이다.

2.3 조석

포항신항 안쪽에 있는 수로국 검조소에서 1973~1975년의 3년간 관측자료와 1994년 7월과 1995년 1월의 각 1개월 관측자료(포항종합제철주식회사, 1995)를 조화분석하여 조화상수 및 비조화상수를 구한 결과는 Table 2-1. 과 같다.

조석의 주기성을 나타내는 지표인 조석 형태수 ($F = (H'/(H_m + H_s))$)가 기준 조석의 경우 달만갑에서 2.1, 장기갑에서 2.2, 그리고 포항 신항에서 2.3으로서 관측지점 및 관측기간에 따라 다소의 차이는 있으나, 일주조가 우세한 혼합조의 형태를 나타낸

다. 우리나라의 거의 대부분의 연안에서는 반일주조가 우세하지만, 영일만의 경우는 일주조가 우세하다. 이때의 대조차는 M_2 분조와 S_2 분조 조차의 합이 아니라 K_1 분조와 O_1 분조 조차의 합으로 표시되며, 따라서 대조차는 달만갑에서 16.6 cm, 장기갑에서 17.0 cm, 그리고 포항 신항에서 17.8 cm이다.

1994년 7월과 1995년 1월의 3개 측정(PC-1, PC-2, PC-3)에서의 30일 연속 유속 관측(포항종합제철주식회사, 1995)시 관측된 최강유속은 Table 2-2와 같다. Fig. 2-1은 포항제철에서 관측한 측정점의 위치를 나타낸 그림이다.

영일만은 조차가 작기 때문에 유속도 우리나라의 다른 해역과 비교할 때 매우 약한 편으로 관측된 유속 20 cm/s 미만으로 아주 미약하며, 조류는 다른 해역에 비하여 1/4주조류가 우세하다. 따라서 조류보다 해류의 유동 상태가 우세하다.

항류는 달만갑쪽에서 10 cm/s로 만내에 유입하여 포항제철소 앞에 이르러 형산강 하천수와 합류하여 장기갑쪽으로 편향하여 10 cm/s로 유출되고 있다.

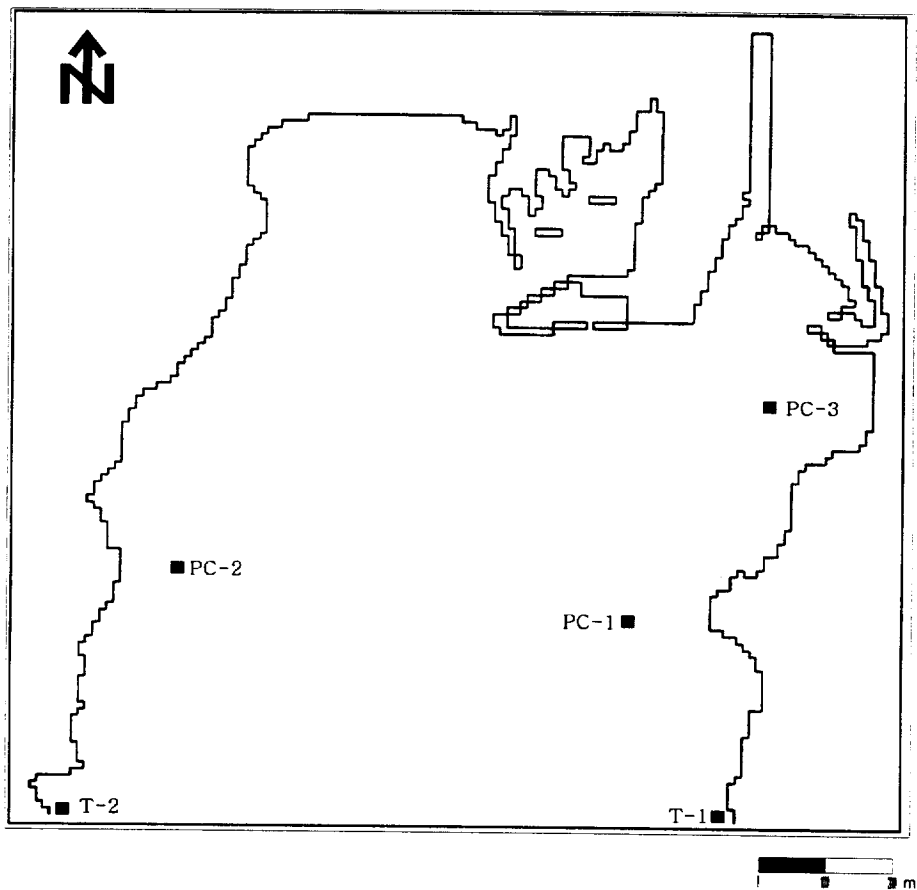


Fig. 2-1. The points of tidal observation by POSCO.

Table 2-1. Tidal characteristics in Yongil bay.

Location	Changgigap					
Latitude(N)	36° 03' 27"					
Longitude(E)	129° 32' 05"					
Period	1994. 7.1 ~ 7.30		1995.1.17~2.15		Mean	
	Semi-range (cm)	Phase Lag (')	Semi-range (cm)	Phase Lag (')	Semi-range (cm)	Phase Lag (')
M ₂	H _m 3.2	K _m 115.8	H _m 3.3	K _m 111.0	H _m 3.3	K _m 113.4
S ₂	H _s 0.6	K _s 203.5	H _s 0.8	K _s 206.0	H _s 0.7	K _s 204.8
K ₁	H' 4.0	K' 358.2	H' 4.2	K' 360.0	H' 4.1	K' 359.1
O ₁	H _o 4.3	K _o 327.9	H _o 4.5	K _o 327.1	H _o 4.4	K _o 327.5
S _o = H _m + H' + H _o	12.2 cm		12.9 cm		12.6 cm	
Spring Range	16.2 cm		17.0 cm		16.6 cm	
Location	Talmangap					
Latitude(N)	36° 05' 50"					
Longitude(E)	129° 26' 00"					
Period	1994. 7.1 ~ 7.30		1995.1.17~2.15		Mean	
	Semi-range (cm)	Phase Lag (')	Semi-range (cm)	Phase Lag (')	Semi-range (cm)	Phase Lag (')
M ₂	H _m 3.2	K _m 114.5	H _m 3.3	K _m 108.6	H _m 3.3	K _m 111.6
S ₂	H _s 0.7	K _s 193.7	H _s 0.7	K _s 213.1	H _s 0.7	K _s 203.4
K ₁	H' 4.0	K' 358.6	H' 4.1	K' 0.8	H' 4.0	K' 359.7
O ₁	H _o 3.9	K _o 327.9	H _o 4.4	K _o 325.5	H _o 4.3	K _o 326.7
S _o = H _m + H' + H _o	12.0 cm		12.5 cm		12.3 cm	
Spring Range	16.6 cm		17.4 cm		17.0 cm	

Table 2-2. The max. current speed in continuous observation.

Season	Point	Layer	Westward current			Eastward current		
			Date	Dir. (°)	Speed (cm/s)	Date	Dir. (°)	Speed (cm/s)
Summer	PC-1	Surface	1994. 7.16	233	22	1994. 7.13	41	17
		Bottom	1994. 7.11	243	20	1994. 7.13	91	19
	PC-2	Surface	1994. 7.16	295	19	1994. 7.16	103	12
		Bottom	1994. 7.18	246	15	1994. 7.17	68	19
	PC-3	Surface	1994. 7.4	305	19	1994. 7.13	103	8
		Bottom	1994. 7.4	349	22	1994. 7.5	55	28
Winter	PC-1	Surface	1995. 2.1	236	14	1995. 1.25	114	8
		Bottom	1995. 2.2	239	17	1995. 1.18	95	5
	PC-2	Surface	1995. 1.23	226	11	1995. 2.12	35	9
		Bottom	1995. 2.1	229	11	1995. 2.12	59	10
	PC-3	Surface	1995. 2.1	285	5	1995. 2.1	121	5
		Bottom	1995. 2.1	227	8	1995. 1.22	37	7

1994년7월과 1995년 1월의 관측결과에 의한 영일만의 유동특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 유향, 유속별 조류 출현율

유향, 유속 출현율은 여름철에는 유속 10 cm/s 이하가 표층은 86.8~97.9 %, 저층은 93.9~98.2 % 로서 주 방향은 SE 및 NE이며 만 내측(PC-3)보다는 외측(PC-1, PC-2) 유속이 강하게 나타났다. 겨울철에는 유속 10 cm/s 이하가 표층은 93.1~100 %, 저층은 99.1~100 % 로서 주 방향은 SSE ~WSW 및 E ~ ESE 이며 여름철과 같이 내측(PC-3) 보다는 외측(PC-1, PC-2) 유속이 강하다.

(2) 최강 유속

영일만에서 관측된 최강유속은 여름철에 서향류가 22cm/s(223°)이고, 동향류는 19 cm/s(91°)로 서향류가 약 1.2배 강하게 나타났으며, 겨울철에도 서향류가 14 cm/s(236°)이고 동향류가 10 cm/s(59°)로 서향류가 동향류의 약 1.4배로 강하다.

(3) 잔차류

포항항 전면의 여름철 잔차류는 0.8 ~ 2.5 cm/s 이며, 겨울철 잔차류는 0.8 ~ 2.5 cm/s로 유향은 PC-1에서 W방향으로 유입되어 PC-3에서 SW방향으로 통하여 PC-2에서 NW ~ E 방향으로 흐르는 경향을 보이는데 이는 미약하나마 달만갑으로 유입되어 장기갑쪽으로 편향되어 흐르는 영일만내의 일반적인 경향성을 보여준다.

2.4 해조류

영일만의 해조류는 조차가 작기 때문에 조류 성분보다 풍성류와 파랑에 의한 연안류 성분이 크다.

최강유속은 10~20cm/s에 달하나 대체로 5~10cm/s이며, 유향 역시 가변성이 많아 만 내의 해안을 따라 우회 또는 좌회 한다. 유속과 유향이 외해의 해류, 바람 및 하천수 등에 따라 가변성을 나타내고 있다.

2.5 기상

포항측후소에서 1961~1990년의 30년간 기상 관측자료에 의하면 연평균 기온은 13.4°C 이고, 월평균 기온은 최저가 1월에 0.7°C, 최고가 8월에 25.6°C이다. 연평균 강우량은 1,091mm로서 전국 평균 1,160mm 보다 적다. 강우량의 월별분포를 보면 연 강우량의 약 60%가 6~9월에 집중된다.

1966~1981년의 16년간 풍향과 풍속의 출현 빈도는 외해로부터 영일만쪽으로 불어오는 N~E 계열이 30.5%이고, 내륙으로부터 영일만쪽으로 향하는 S~W계열은 52.9%로서 육지로부터의 바람 출현율이 바다로부터의 바람 출현율 보다 높으나, 풍속은 N~E 방향이 더 강하다. 계절별로는 여름에는 N~E 바람이 우세하고 겨울에는 S~W 바람이 우세하다.

3. 수치모델

3.1 해수 유동 수치 모델

3.1.1 기초방정식

연안해역의 유동은 평균해면을 원점으로 하는 연직방향으로 z 축을 취하고, 수면상에 x, y 축을 Fig. 3-1과 같이 취하여 비압축성 유체에 대한 운동방정식 및 연속방정식으로 나타낼 수 있다. 여기에 해면 ($z = \zeta$) 및 해저 ($z = -h$) 조건을 도입하여 정체 해면 하, 즉 $-h \leq z \leq \zeta$ 의 범위에 대해 적분함으로서, 다음과 같이 수심방향으로 평균화된 2차원 유동의 방정식으로 변환할 수 있다. 이를 2차원 단층유동모델의 기본방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)v] = 0 \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

여기서 U, V, A_h 는 $-h \leq z \leq \zeta$ 사이에서 평균화된 x, y 방향의 유속 성분과 수평외동점성계수를 각각 나타내며, C 는 Chezy 의 조도계수, f 는 Coriolis 계수, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, t 는 시간, h 는 평균수면하의 수심이며, ζ 는 수면변위이다.

3.1.2 수치해법

전술한 기초방정식의 해법으로는 수렴성과 연산시간의 경제성 등이 탁

월하여 조류 및 확산 계산에 최근 널리 이용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit Method)을 사용하였으며 이 방법에 의한 수치해법의 개요는 다음과 같다.

먼저 대상해역을 평면적으로 Fig3-2에 나타낸 바와 같이 격자 분할하여, 수위, 유속, 수심 등을 정의하고 점 $((i, j), (i+(1/2), j)$ 및 $(i, j+(1/2))$ 에 있어서 식(3-1), 식(3-2), 식(3-3)을 각각 차분 표시한다. ADI법에서는 time-step Δt 를 둘로 나누어, 전반 시간대인 $(n+(1/2))\Delta t$ 에 있어서 식(3-1)의 좌변 제 1항의 ζ , 제 2항의 U , 그리고 식(3-2)의 좌변 제 2항의 U (미분항은 제외), 제 5항의 ζ 를 음해법으로 나타내고 정리하여, 식(3-4), 식(3-5)를 유도한 후, ζ 와 U 를 x 방향으로 순차적으로 계산한다. 다시 이 값들을 이용하여 식(3-3)으로부터 양해법에 의해 V 를 계산한다.

$$\zeta_{i,j}^{(n+(1/2))} = -P_{i,j} \times U_{i+(1/2),j}^{(n+(1/2))} + Q_{i,j} \quad (3-4)$$

$$U_{i-(1/2),j}^{(n+(1/2))} = -R_{i-1,j} \times \zeta_{i,j}^{(n+(1/2))} + S_{i-1,j} \quad (3-5)$$

다음 후반 시간대인 $(n+1)\Delta t$ 에서는 식(3-1)의 좌변 제 1항의 ζ , 제 3항의 V , 그리고 식(3-3)의 좌변 제 3항의 V (미분항은 제외), 제 5항의 ζ 를 음해법으로 나타내고 정리하여, 식(3-6) 및 식(3-7)을 유도한 후, ζ 와 V 를 y 방향으로 순차적으로 계산한다. 다시 이 값들을 이용하여 식(3-2)로부터 양해법에 의해 U 값을 계산한다.

$$\zeta_{i,j}^{(n+1)} = -p_{i,j} \times V_{i,j+(1/2)}^{(n+1)} + q_{i,j} \quad (3-6)$$

$$V_{i,j-(1/2)}^{(n+1)} = -r_{i,j-1} \times \zeta_{i,j}^{(n+1)} + s_{i,j-1} \quad (3-7)$$

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 $(n+1)\Delta t$ 의 이전 단계에서 결정된 기지량이다. 이러한 계산을 반복하여 계산결과가 안정될 때까지 계산을 수행하면 대상해역의 중앙영역에서의 수위 및 유속을 구할 수 있다

(Leendertse, 1967).

그리고, 경계에서는 다음과 같은 경계조건에 의해서 계산된다.

$$\begin{aligned} lU + mV &= U_n^* \quad \text{on } S_1 \\ \zeta &= \zeta^* \quad \text{on } S_2 \end{aligned} \quad (3-8)$$

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

대상 해역에서 해수 유동 현상은 바람에 의해 직접적으로 영향을 받지만, 풍향·풍속의 변화에 의한 취송류 성분은 해수 유동 현상보다 더 불규칙하게 변화하는 성분을 가지므로 해수유동 현상을 정확히 재현하는데는 제약을 받는 것으로 생각되나 바람의 응력효과는 무시하였다.

또한 시간간격($\Delta t/2$)은 계산의 안정성 및 수렴성을 지배하는 주된 인자로서, 일반적으로 다음의 안정조건을 만족하도록 $\Delta t/2$ 를 정했다.

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

여기서, $h_{\max}$: 대상역의 최대수심

g : 중력가속도

ΔS : 격자간격

Δt : 시간간격

경계조건으로는 경계면의 성질에 따라 육지경계조건, 해양경계조건의 2가지로 구분한다. 육지경계 조건으로는 경계면을 통한 해수의 유출·입은 0, 즉, $u \cos \theta + v \sin \theta = 0$ 의 조건이 주어진다. 단, 여기서 θ 는 x 축과 해양법선이 이루는 각도를 나타낸다. 따라서 수치모형상에

서 x 축 방향의 육지경계면에서는 $v = 0$, y 축 방향의 경계면에서는 $u = 0$ 의 조건이 주어지게 된다.

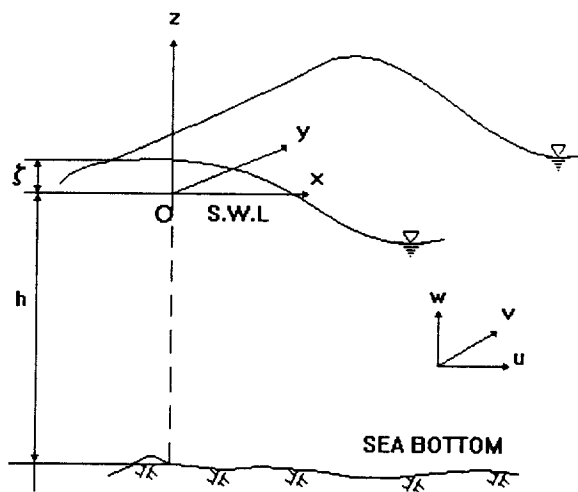


Fig. 3-1. Coordinate system.

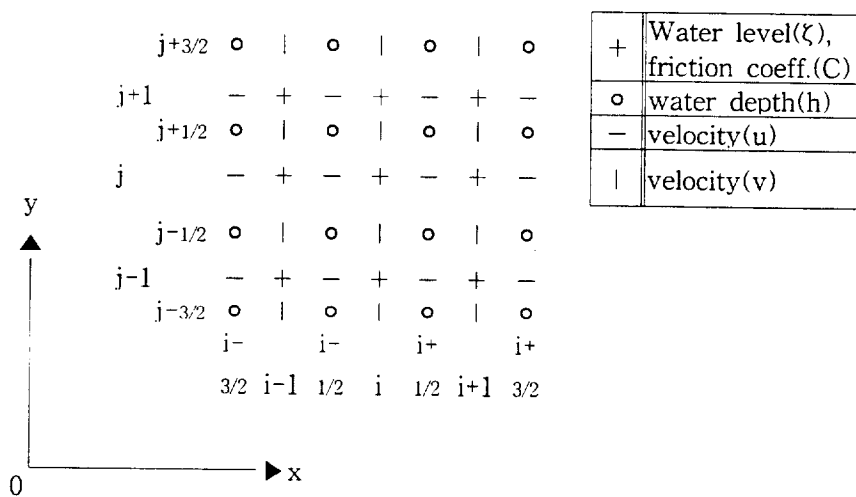


Fig. 3-2. Classification of grid systems.

3.2 광역모델(Coarse mesh model)

동해는 한반도, 일본열도, 시베리아 동안에 의해 둘러싸인 타원형의 준 폐쇄 해역으로 단지 수심이 얕은 몇 개의 해협을 통해서만 외해수와의 교환이 일어난다. 표면적은 10^6 km^2 , 평균수심은 1,361m이다. 동해 남부와 일본 서안에서 대륙붕이 비교적 발달한 편이나 그 외 지역은 수심 2,000m 이상으로 지중해와 비슷하게 지역해이면서도 심해에 속한다. 외해역의 해수와 교환은, 대한해협을 통해 동중국해에서 북상해온 고온·고염의 대마난류수가 유입되고 반면에 일본열도 사이에 위치한 Soya, Tsugaru 해협을 통해 동해의 해수가 태평양으로 유출된다. 준 폐쇄성 해역이면서 심해인 동해에는 대양에서 존재하는 거의 모든 종류의 물리현상이 나타나고 있어 소대양이라고 불릴 정도로 물리현상이 매우 다양하고 복잡하다.

영일만으로 유입되는 해류를 고려하기 위하여 대한해협에서부터 러시아 Tatar 해협에 이르는 광역모델(coarse mesh model)을 구축하였다. 광역모델에서 영일만 부근 해역을 대상으로 한 상세역모델(fine mesh model)의 개방 경계값을 산출하여 이 값을 적용하였다. 그러나, 두 모델간의 스케일 차이가 너무 큰 이유로 적절한 경계값 적용을 위하여 중간역 모델(intermediate mesh model)이 필요하다.

대한해협을 통한 쓰시마 난류(TC)의 용적 수송량은 연간 변동이 크며, 시기와 연구자에 따라 큰 차이를 보인다.

Miyazaki(1952)와 Yi(1966)는 대한해협을 통한 쓰시마 난류의 계절적 변동에 대해 지형류 계산 방법을 이용해 연구하였다.

Miyazaki(1952)는 TC의 최대 수송량을 $2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^3/\text{s}$ (여름철), 최소 수송량을 $0.2 \times 10^{12} \text{ cm}^3/\text{s}$ (겨울철)로 보았고, Yi(1966)도 Miyazaki의 결과와 거의 유사한 값을 구했다. 그러나, 이 값은 대한해협이 매우 천해이고, 저면 근처의 속도가 클 것이기 때문에 전 계절에 대해 과소평가된 값이며(Miita, 1976), 겨울과 여름의 수송량 차이가 과대평가되었다.

Miita(1976)는 1924년~1974년까지 관측을 통해 대한해협을 통한 여름철 용적 수송량을 $3.3 \times 10^{12} \sim 3.7 \times 10^{12} \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 추정하였으나, 겨울철 수송량은 data 부족으로 추정하지 못하였다.

한편, Yoon(1982, b)은 대한해협을 통한 TC의 계절적인 용적 수송량 변동을 $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^3/\text{s}$ 으로 일정하게 두어 모델에 사용하였다.

따라서 본 논문에서는 기존의 연구 문헌을 조사·검토한 결과 대한해협을 통한 TC의 유입량을 2 Sv.으로 하여 해류모형을 구축하였다. 이 값은 대한해협을 통과하는 쓰시마 난류의 연평균 유량이다. 유출량은 Tsugaru 해협과 Soya 해협을 통해 유입량만큼 유출된다.

$$V_2 = 1.3 V_1 \quad (3-9)$$

$$V_3 = 0.7 V_1 \quad (3-10)$$

여기서 V_1 은 대한해협을 통해 유입되는 TC의 총수송량이고, V_2 와 V_3 은 각각 Tsugaru 해협과 Soya 해협을 통해 유출되는 수송량을 나타낸다.

좁은 유출구에서는 Yoon(1982 a, b)에 의한 opening channel을 따라서는 경사가 없다는 간단한 가정이 사용되었다.

Table 3-1은 해류모델의 계산조건을 나타낸 것이며 Fig. 3-3 해류모

델의 개방경계조건을 나타낸 그림이다.

Table 3-1. Computation conditions of the current model.

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 18,000\text{m}$
Water depth (h)	Water depth on US chart No. 529
Time interval (Δt)	30 sec (C.F.L condition satisfied)
Coriolis coefficient	$f = f_0 + \beta y$
Bottom friction coeff.	$C = 19.4 \ln(0.9 h)$ where h controlled by friction depth in the deep sea.
Total computing time	2000 day

Fig. 3-4는 대상해역의 계산격자망을 나타낸 것이고, Fig. 3-5는 대상해역의 수심도를 나타낸 것이다.

Fig. 3-6은 해류모델의 결과를 나타낸 그림이다. 본 계산 결과 대한해협을 통해 들어온 대마난류수가 동해 중앙을 가로질러 Tsugaru 해협 서쪽 해역에서 합쳐져 태평양으로 빠져나가는 경향을 잘 나타내고 있다. 이는 기존 연구자(Yoon:1982 등)와 해류모식도(Uda, 1934 ; Naganuma, 1972)의 결과와 일치하는 것이다.

그러나, 계산결과 eddy와 같은 소규모 흐름을 제대로 재현하지 못하고 있다. 이는 본 연구의 목적이 동해 유동장을 재현하는 것이 아니기 때문에 동해 유동장의 중요한 요소인 수온, 염분의 영향을 고려하지 않았기 때문이라 사료된다.

Tsugaru 해협과 Soya 해협에서 유속 벡터가 크게 나온 것은 각 해협을 통한 유출 유속이 상대적으로 좁은 입구를 통과하기 때문이다.

대한해협에서의 최강 유속은 약 10cm/s이고, Tsugaru 해협의 최강

유속은 36cm/s, Soya 해협을의 최강 유속은 약 17cm/s이다.
 이 값은 Yoon(1982(a))의 모델에서 대한해협을의 최강 유속이 12cm/s,
 Tsugaru 해협에서 약 35cm/s 라는 결과와 유사한 결과이다.

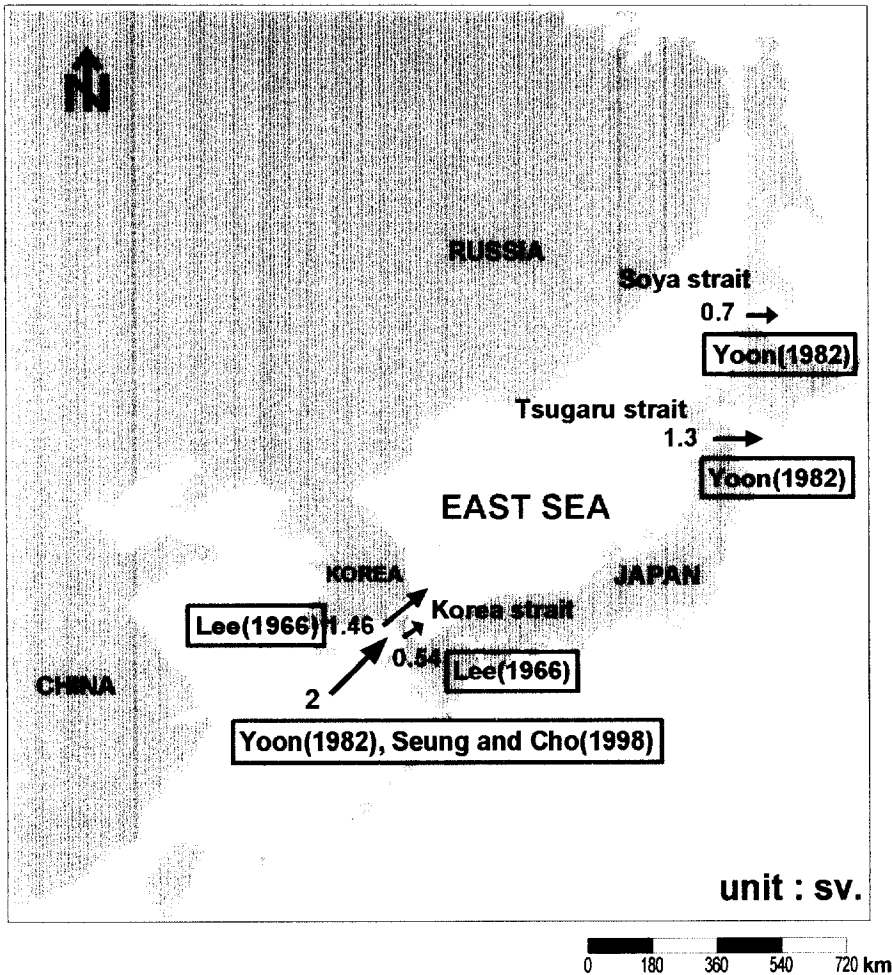


Fig. 3-3. Volume transport at model open boundaries.

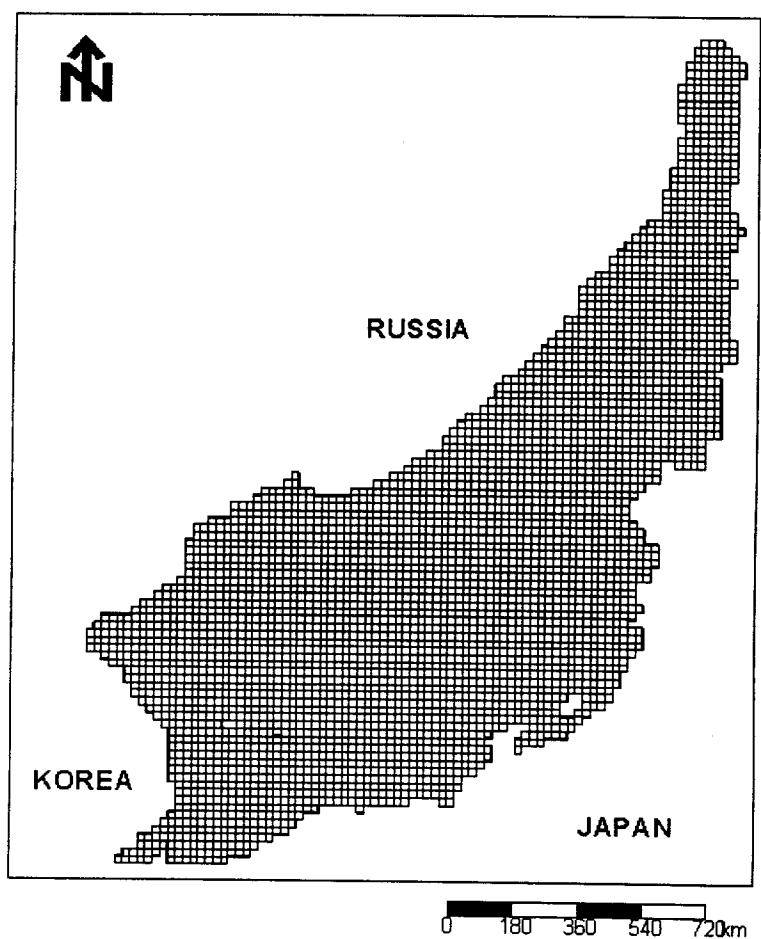


Fig. 3-4. Horizontal grid system of computation area.

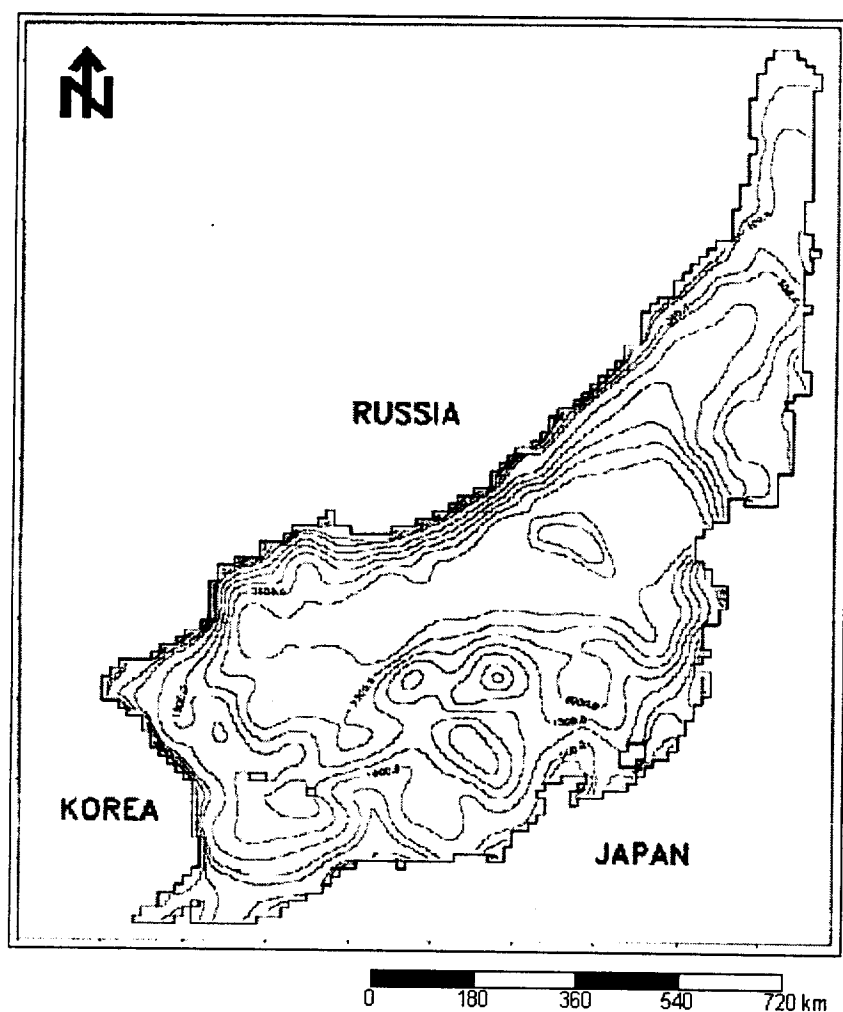


Fig. 3-5. Bathymetry of computation area.

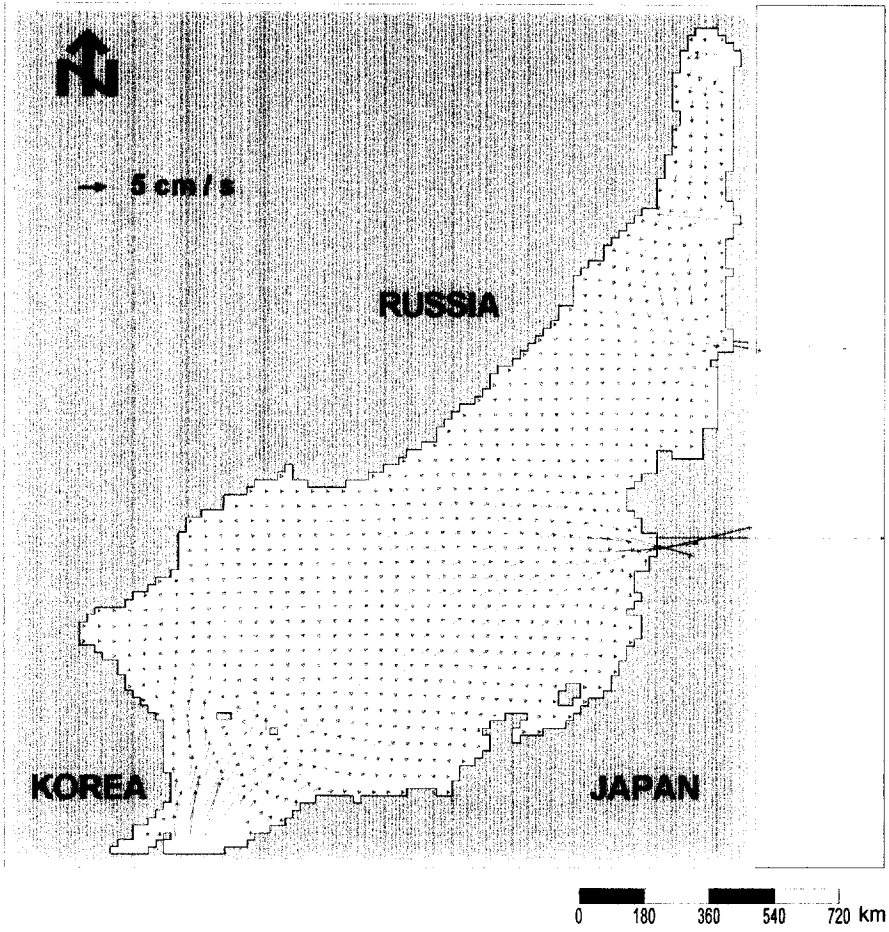


Fig. 3-6. Current velocity fields in the East Sea (current).

3.3 중간역 모델(Intermediate mesh model)

동해 전해역을 대상으로 하는 광역 모델과 영일만 부근 해역에 대한 상세역 모델간의 큰 스케일 차로 인하여 해류에 대한 경계값의 적용에 어려움이 있다. 따라서, 외해 경계조건의 적절한 적용을 위하여 두 모델의 중간 규모의 모델이 필요하다. 이를 위해 울산 위부터 죽변까지를 대상으로 한 중간역 모델을 구축하였으며, 모델의 경계조건은 다음과 같다. 이 모델에서도 단지 해류만을 외해 경계조건으로 사용하였다.

Table 3-2. Computation conditions of the current model.

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 1,000\text{m}$
Water depth (h)	Water depth on US chart No. 428
Time interval (Δt)	12 sec (C.F.L condition satisfied)
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin \phi$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$, $\phi = 36.64^\circ N$
Bottom friction coeff.	$C = 19.4 \ln(0.9 h)$ where h controlled by friction depth in the deep sea.
Total computing time	30 day

Fig. 3-7은 대상영역의 격자망이며 Fig. 3-8은 수심도이다. 격자는 152×170 이며, 계산간격은 1km이다.

Fig. 3-10은 중간 스케일 모델의 결과이다. 영역의 주 흐름 방향은 북~북동 방향이며 동해를 가로지르는 흐름과 동해 연안을 따라 북

상하는 흐름이 나타났다. 유속은 평균 약 3~5cm/s이다. 동해를 가로지르는 해류의 유속에 비해 동해 연안에서의 해류 속도는 상대적으로 작게 나타났으며 특히, 북으로 갈수록 쓰시마 난류의 영향이 감소되고 있음을 알 수 있다.

광역모델에서 이 영역의 유속은 약 3cm/s이며, 주 유향은 북~북동 방향이다. 따라서 광역모델과 중역모델간의 흐름 특성이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

이 모델의 수행 결과 영일만으로 유입·유출하는 해류는 미약하나 분명히 만의 흐름에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그 흐름을 살펴보면, 장기갑으로 유입하는 흐름과 달만갑과 장기갑으로 유출하는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 이 결과에서 영일만의 해류의 영향을 논하기에는 다소 무리가 있다. 전 대상 영역에 비해 영일만이 차지하는 면적이 상대적으로 작기 때문이다.

따라서 영일만에 미치는 해류의 영향을 자세히 살펴보기 위해 영일만을 대상으로 한 좀 더 세밀한 격자의 모델이 필요하다.

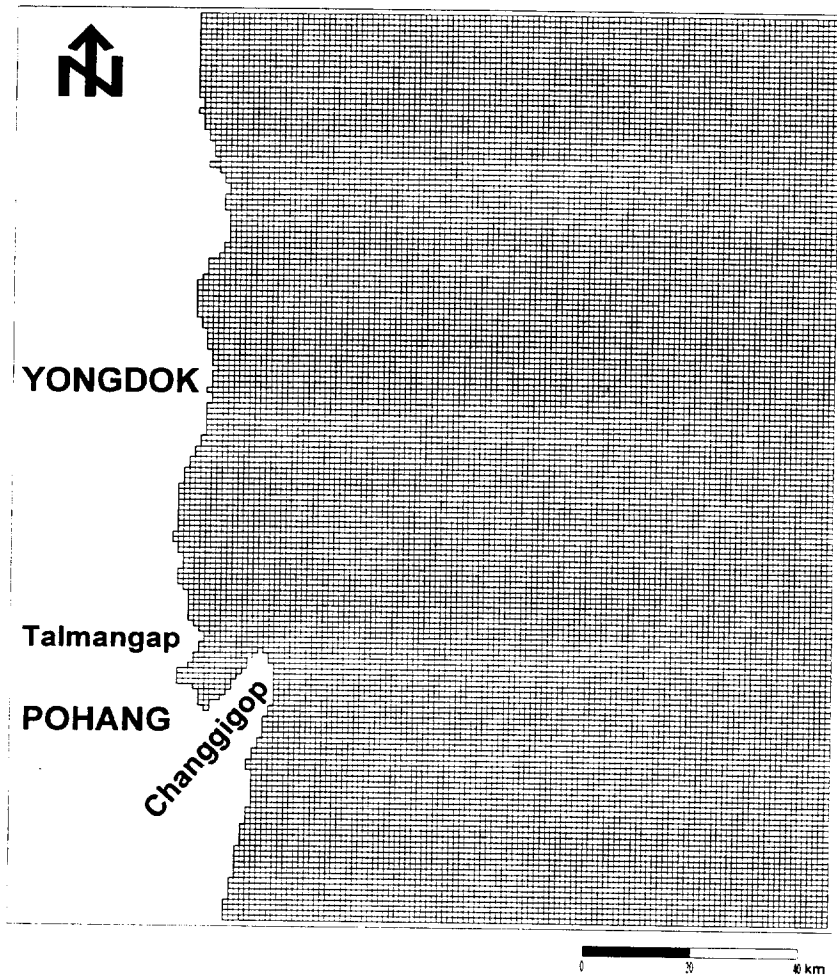


Fig. 3-7. Horizontal grid system of computation area.

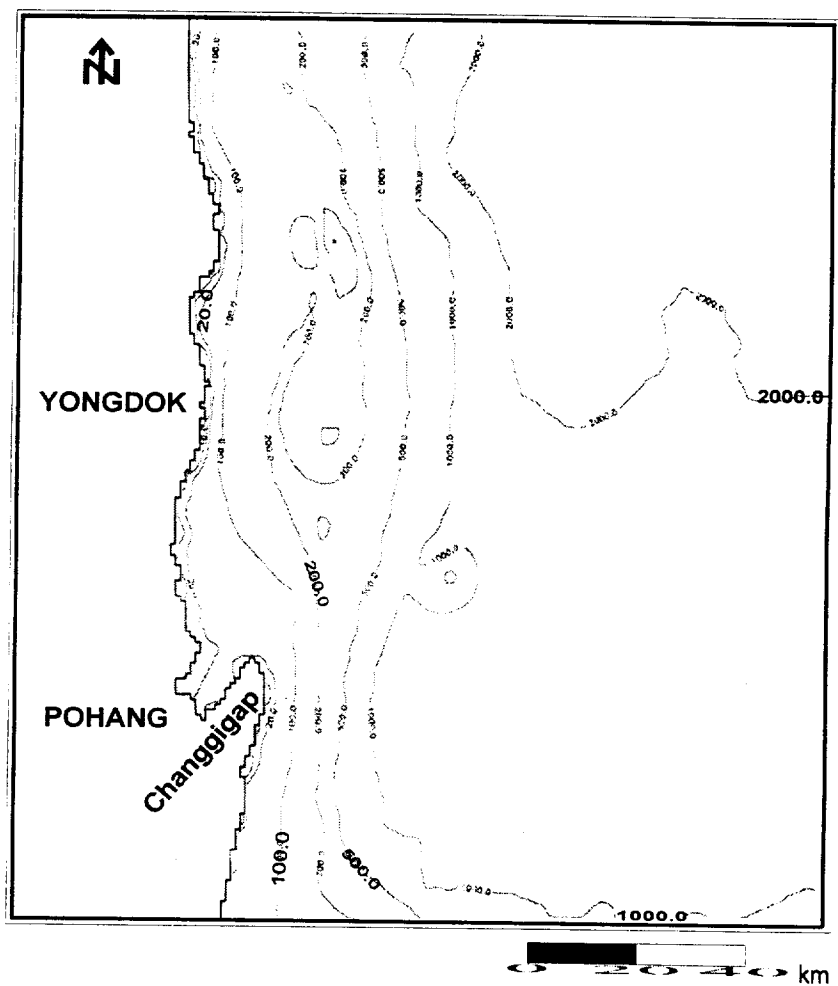


Fig. 3-8. Bathymetry of computation area.

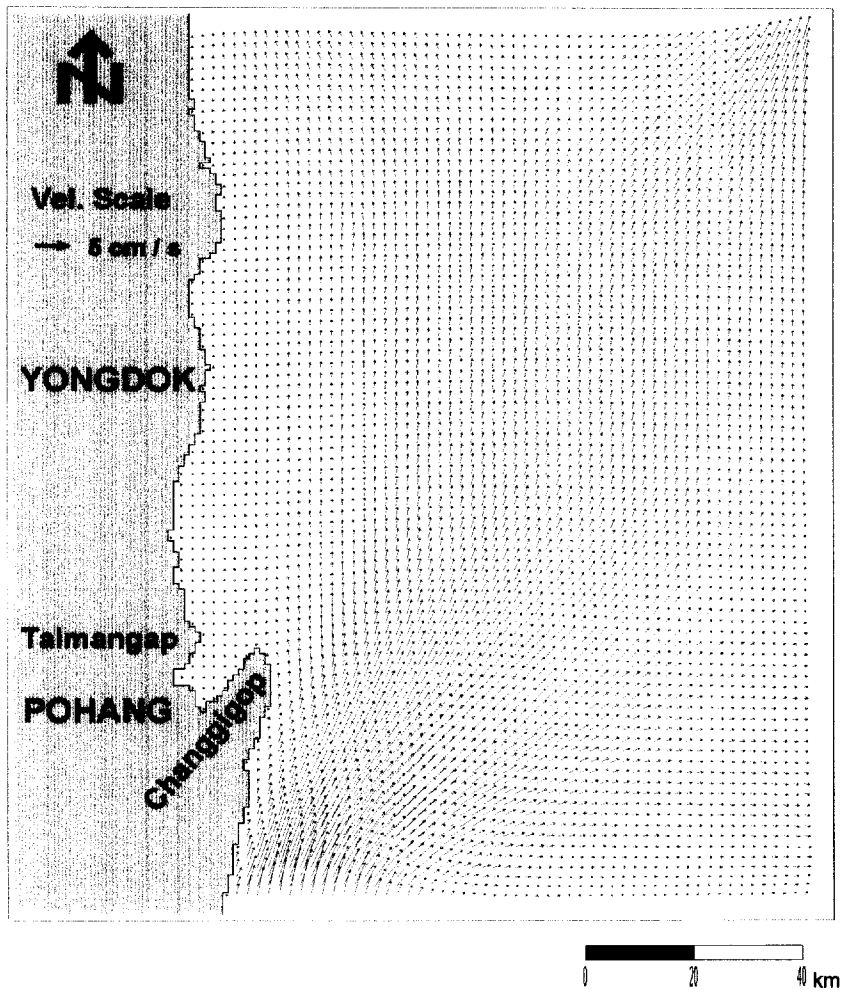


Fig. 3-9. Current velocity fields in the East Sea coastal (current).

3.4 상세역 모델

3.4.1 상세역 모델(fine mesh grid)의 구축

앞서 논의한 모델링 단계를 거쳐 영일만 부근 해역을 대상으로 영일만의 해수 순환에 해류가 미치는 영향에 대해 논의하고자 한다.

전 단계의 수치모델에서 상세역 모델의 외해 경계값을 구하였으며, 해류만을 외해 경계 조건으로 사용하였다.

계산조건은 Table 3-3과 같다. 협소한 영역이므로 β 효과는 무시하였다.

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

Conditions and Parameters	Used Values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$
Depth(H)	Water depth on US chart No. 132
Time interval (Δt)	3 sec (C.F.L condition satisfied)
Coriolis Parameter	$f = 2\omega \sin \varphi$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$, $\phi = 36.7^\circ N$
Bottom friction coeff	$C = 19.4 \ln(0.9 h)$ where h controlled by friction depth in the deep sea.
Total computation time	10 days

Fig. 3-10은 대상영역의 격자망을 나타낸 그림이며 이 영역의 3차원 지형도는 Fig. 3-11에 나타내었다.

Fig. 3-12는 대상영역의 수심도를 나타낸 그림이다. 해류의 영향을

충분히 고려하기 위하여 수심 약 250m가 되는 영역을 계산 대상영역으로 정하였다.

Table 3-3과 같은 조건으로 협역모델의 계산을 수행하였다. Fig. 3-13은 수행 결과를 나타낸 그림이다.

전체 흐름 경향을 살펴보면 북진하는 흐름과 장기갑 부근에서 북서쪽으로 휘돌아 진행하는 흐름으로 나뉜다. 북서방향의 흐름은 달만갑 부근에서 다시 북진한다.

영일만의 해류는 이 북서방향 해류의 일부로 그 크기가 만 입구의 해류에 비해 매우 작다. 그러나 분명 만 안쪽까지 해류가 미약하나 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 흐름 경향은 포항시 자료와 일치하는 결과이다.

만 입구의 유속이 만 전체의 유속 보다 매우 큰데, 이 값은 3~6.5cm/s 이며, 만 내의 유속은 이보다 작은 값 0.001~0.46cm/s의 값을 가진다.

3.4.2 만 내의 순환

3.5.1에서 논의된 만 내의 흐름에 대해 자세히 살펴보기 위해 만을 5개의 단면으로 나누었다(Fig.3-14).

Fig. 3-15는 위의 결과를 Stick diagrams으로 나타내 것이다.

그 결과 만 입구 쪽인 A-A', B-B' 단면은 유속이 각각 0.015~0.46cm/s, 0.003~0.09cm/s 로 비교적 크게 나타났다. 주 유형은 북서쪽이며, 구룡포 쪽에서 북상한 해류가 장기갑에서 달만갑으로 시계방향으로 돌아 지형을 따라 계속 북진하였다. 이 중의 일부가 영일만 내로 진입하여 만 내의 순환에 영향을 준다고 사료된다.

만 중앙의 C-C' 단면과 만 안쪽인 D-D' 단면은 유속값이 각각 0.001~0.0071cm/s, 0.003~0.005cm/s 이며, 유형은 만 입구쪽과 반대였다. 그러나, 이 유속의 값은 아주 작은 것으로 해류가 만 중앙에

서부터 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있었다. 만의 가장 안쪽인 E-E' 단면에서는 해류에 의한 흐름이 나타나지 않았다.

1972. 8. 23 ~ 8. 30에 걸친 수로국의 영일만내 26개 정점에 대한 해류 관측을 실시하였는데, 만내의 유속이 1.75 ~ 4.8cm/s로 관측되었다. 이 값은 본 연구 결과(0.001 ~ 0.46cm/s)와는 다소 차이가 있는 값이다. 그러나, 1972년 관측결과는 형산강수에 의한 표층 유속이 포함되어 있는 것으로 실제 해류의 값은 관측값 보다는 작을 것이라 사료된다.

1973년의 수로기술 연보에 실린 영일만의 해조류 개황에서 만 중앙부의 해류 분포는 2.9cm/s~3.0cm/s로 불규칙하게 나타나고 있다. 만 중앙부의 해류 유속이 0.001~0.11cm/s인 본 논문의 결과와 차이를 보이는데, 이는 관측지속시간이 1일이 채 안 된다는 점과 형산강 유출수의 영향을 제거하지 않았다는 이유로 실제로는 이 보다 작을 것이라 사료된다. 또한 본 논문에서는 하천 유출수와 바람의 영향을 고려하지 않았다는 점에서 차이를 찾을 수 있다.

기존 문헌의 관측값에 대한 유향의 비교는 하지 않았다. 영일만의 표층유속과 유향은 관측시의 바람에 크게 의존하는데, 본 논문에서는 바람의 영향을 고려하지 않았기 때문이다.

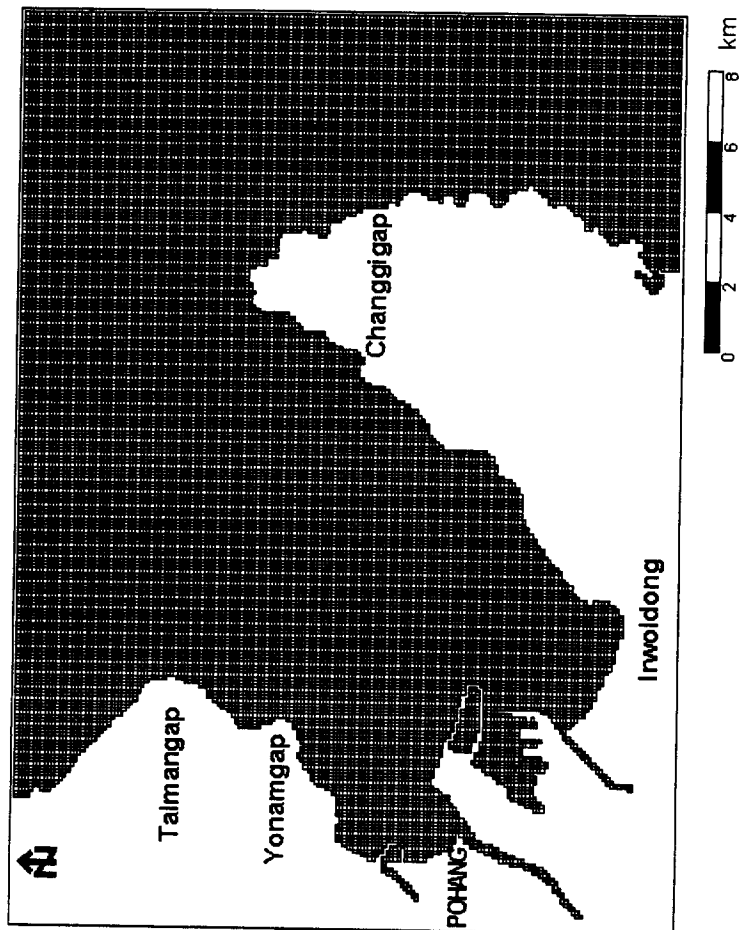


Fig. 3-10. Horizontal grid system of computation area around Yong il Bay.

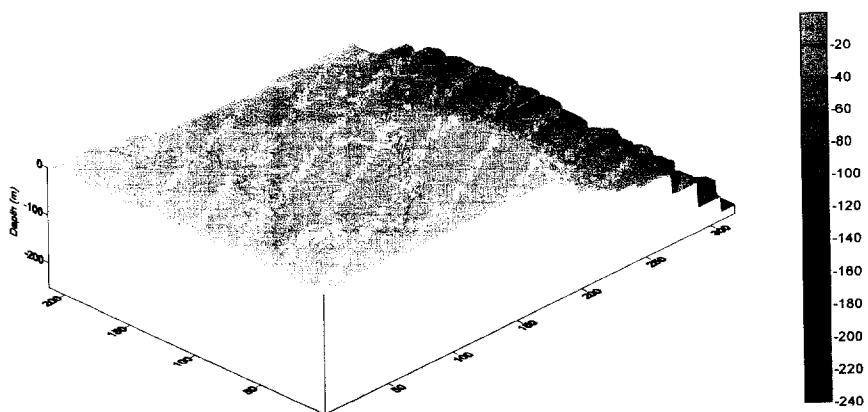
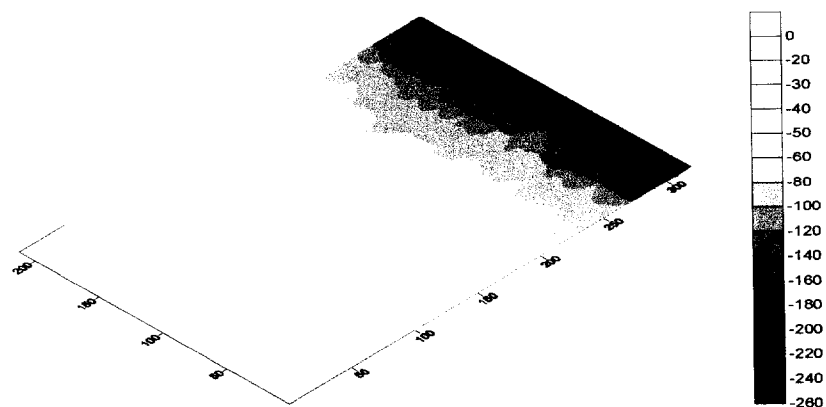


Fig. 3-11. Bottom topography of study area(3D).

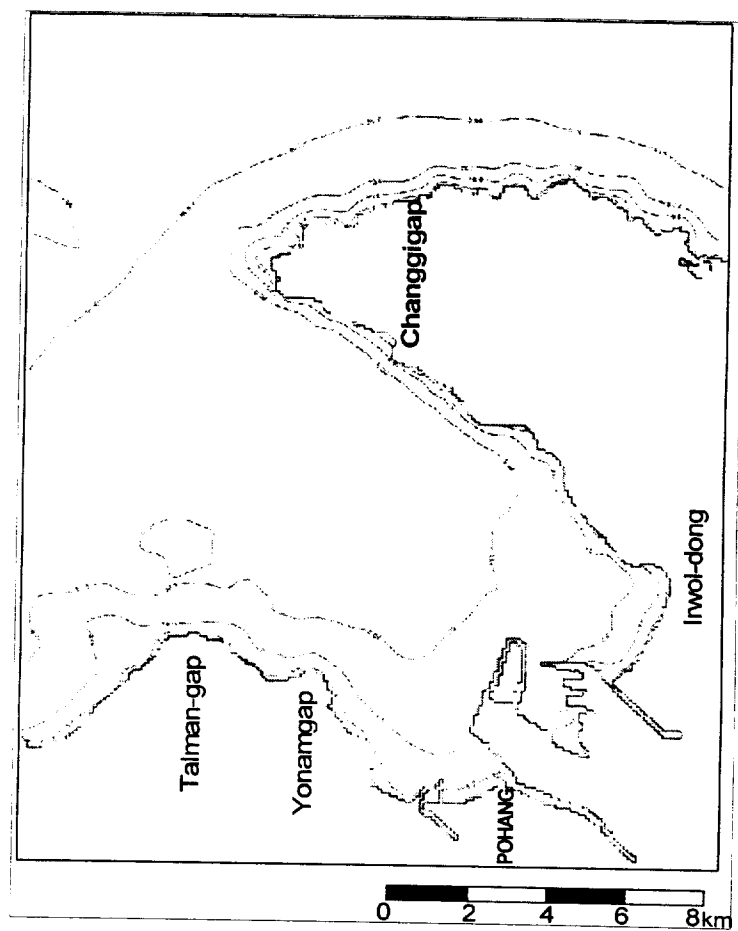


Fig. 3-12. Bathymetry of computation area around Yongil Bay.

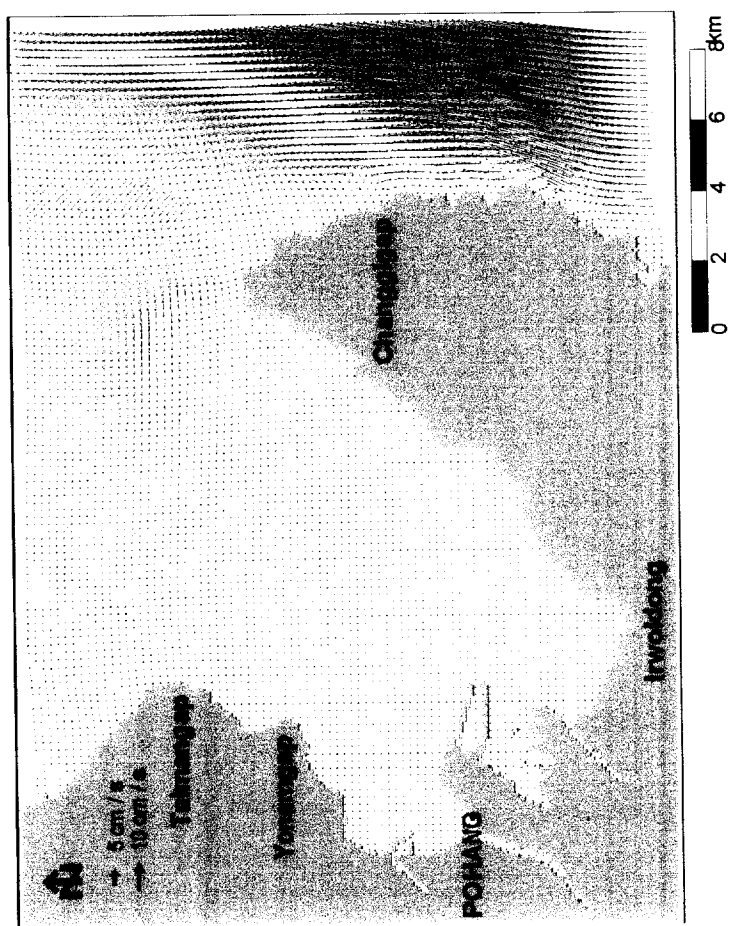


Fig. 3-13. Current velocity fields in Yong il bay (current).

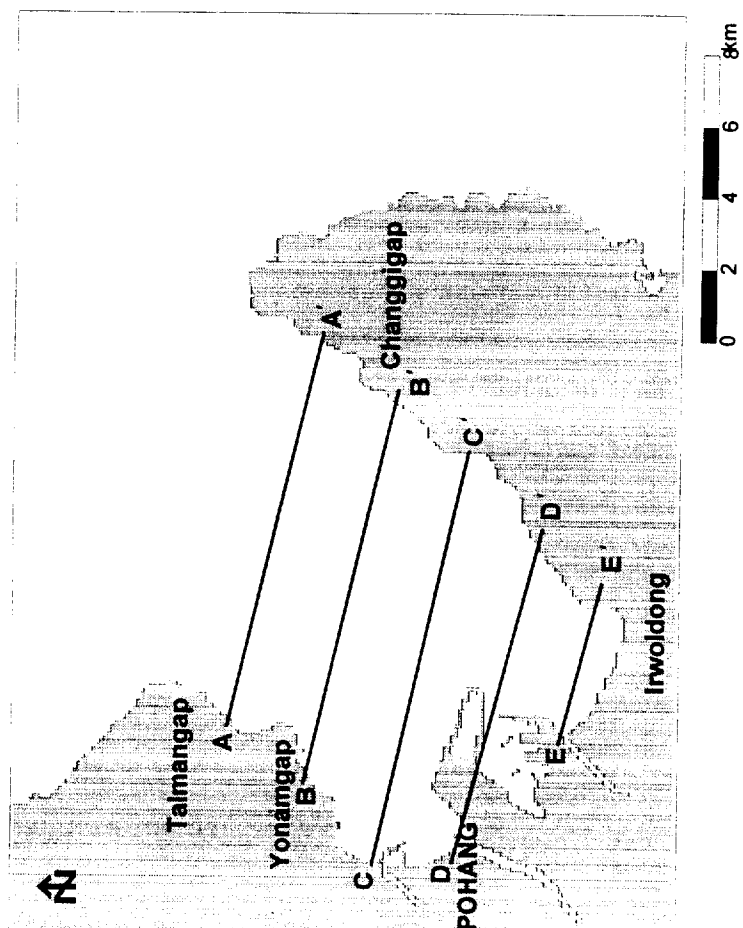


Fig. 3-14. Location map of velocity computing point

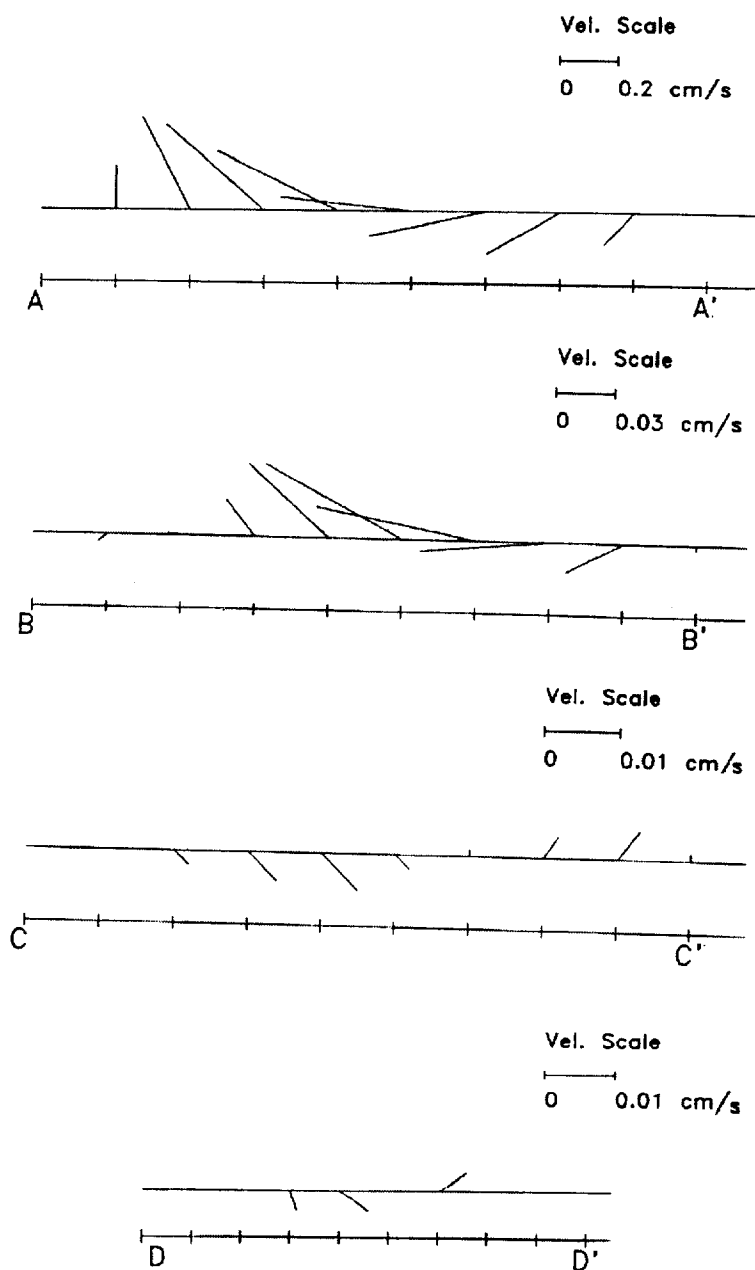


Fig. 3-15. Stick diagrams of computing current in Yongil bay.

3.5 입자추적

해류에 의한 영일만의 해수 순환 특성을 앞서 논의해 왔다. 해류가 미치는 영일만의 영향정도를 좀 더 자세히 살펴보기 위해서 입자추적 수치모델을 구축하였다. 해류에 의한 영일만의 유동장에서 만 안쪽에 발생한 부유물질의 이동 경로와 체류시간에 대해서 간단히 논해 보고자 한다.

표층에서의 이류속도에 의해 단위시간(Δt)동안 한 입자가 이동하는 거리는 다음과 같은 방법으로 계산한다. 시간 t_0 일 때 $\vec{x}_0 = (x_0, y_0)$ 에 위치하던 입자가 시각 t 일 때의 새로운 위치 $x_0 = \vec{x}_0 + \Delta \vec{x}$ 로 움직였다면 Lagrangian 평균속도 $\vec{V}_L\{\vec{x}(\vec{x}, t), t\}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{V}_L\{\vec{x}(\vec{x}, t), t\} = \vec{V}(\vec{x}, t) + \Delta \vec{x} \cdot \nabla \vec{V}(\vec{x}_0, t) \quad (3-11)$$

$$\Delta \vec{x} = \int_{t_0}^t \vec{V}(\vec{x}, t) dt \quad (3-12)$$

식(3-12)를 미소 시간간격 $\Delta t = (t - t_0)$ 에 대해 적분하면 식(3-13)과 같은 새로운 위치 $\vec{x}(\vec{x}_0, t)$ 를 구할 수 있다. 이를 성분별로 나타내면 식(3-14), 식(3-15)와 같다.

$$\vec{x}(\vec{x}_0, t) = \vec{x}_0 + \int_{t_0}^t [\vec{V}(\vec{x}, t) + \int_{t_0}^t \vec{V}(\vec{x}_0, t') dt' \cdot \nabla \vec{V}(\vec{x}_0, t)] dt \quad (3-13)$$

$$x(x_0, t) = x_0 + \int_{t_0}^t [u(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial x} u(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial y} u(x_0, y_0, t)] dt \quad (3-14)$$

$$y(y_0, t) = y_0 + \int_{t_0}^t [v(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial x} v(x_0, y_0, t) + (\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt') \frac{\partial}{\partial y} v(x_0, y_0, t)] dt \quad (3-15)$$

여기서, u, v 는 입자가 위치한 임의 수층의 이류속도 성분이다. 또한, 이 식을 이용하여 매시간 간격마다 움직이는 입자의 위치를

추적하려면 입자가 위치하는 임의의 점에 대한 u , v , $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$, $\partial v/\partial y$ 의 값을 알아야 한다. 이를 위해 먼저 각 격자점의 u , v 의 미분치를 다음과 같이 계산한다

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta x}(u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) \quad (3-16)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta y}(u_{i,j+1} - u_{i,j-1}) \quad (3-17)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta x}(v_{i+1,j} - v_{i-1,j}) \quad (3-18)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{1}{2\Delta y}(v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) \quad (3-19)$$

다음에 임의의 점에 대한 유속성분 및 미분값은 선형보간법에 의해서 구한다. 이는 Fig. 3-16에 나타낸 것과 같이 임의의 점에 인접한 4개의 격자에 대하여 i 점에 대한 X 방향의 거리는 G_0 이고, j 점에 대한 Y 방향의 거리는 $(1 - G_5)$ 이다. 여기서, G_0, G_5 는 격자거리를 나타내고 $0 \leq G_0 \leq 1$ 이다. 이들 거리를 1에서 뺀 것을 직접 가중치로 보면 임의의 변수에 대한 임의점 $L(X,Y)$ 에서의 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(L) = G_4(f_{i,j}) + G_3(f_{i,j+1}) + G_2(f_{i+1,j}) + G_1(f_{i+1,j+1}) \quad (3-20)$$

여기서, $f(L)$ 은 임의의 변수(u , v , $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$, $\partial v/\partial y$)에 대한 L 점의 값이다. G_0 는 $X(I)-I$, G_5 는 $Y(L)-J$, I 는 IFIX $[X(L)]$, J 는 IFIX $[Y(L)]$, G_1 는 $G_0 \cdot G_5$, G_2 는 $G_0 \cdot (1 - G_5)$, G_3 는 $(1 - G_0) \cdot G_5 = G_5 - G_1$, G_4 는 $(1 - G_0) \cdot (1 - G_5) = 1 - G_0 + G_1 - G_5$, $X(L)$ 은 L 점의 X 좌표, $Y(L)$ 은 L 점의 Y 좌표이다.

입자추적 수치모델은 협역 수치 모델의 유동장으로 수행하였으며

입력자료는 해수유동 실험에서 얻어진 안정조건인 100시간 후부터 입자를 방출하였다.

Fig. 3-17은 입자추적의 결과를 나타낸 것으로 대표적인 입자의 위치를 한 그림에 도출한 것이다. 각 입자의 간격은 1일이며, 입자는 등수심선을 따라 영역 바깥으로 유출된다. 만 안쪽의 유속에 비해 만 입구쪽의 흐름이 매우 세기 때문에 만 안쪽으로 입자의 거동은 볼 수 없었으나, 전체적인 흐름의 형상은 알 수 있었다.

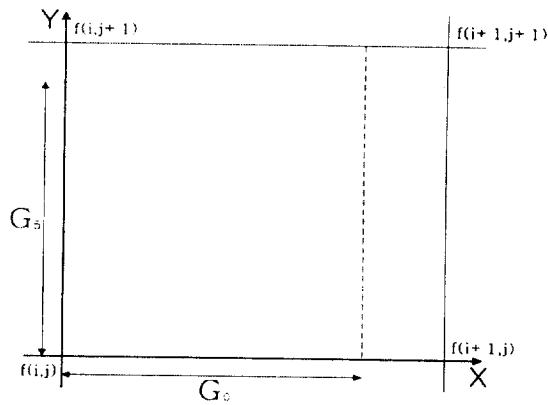


Fig. 3-16. Grid system for interpolation of particle position.

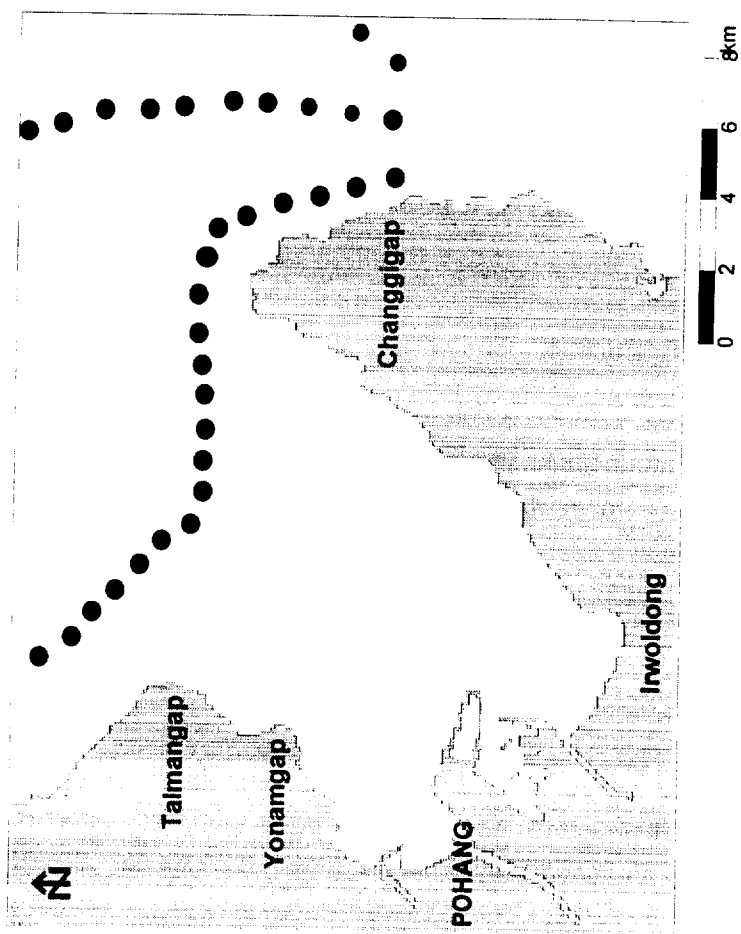


Fig. 3-17. The movement of particles.

4. 영일만 내의 해류의 영향

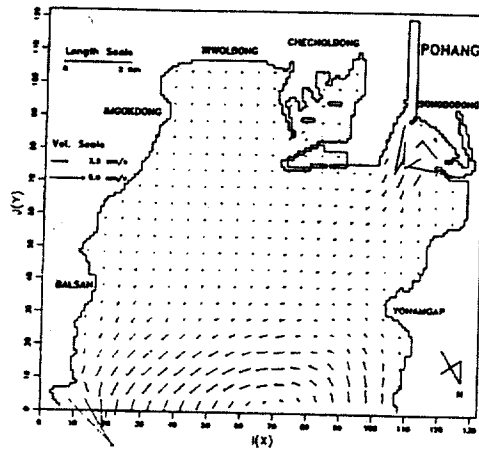
4.1 조석·조류와 영일만 하천 유출수의 영향

조석·조류에 의한 영일만 해수 순환 특성은 Kim(2000)의 연구 결과에 비교적 잘 나타나 있다(Fig. 4-1). 조석의 4대 분조를 경계조건으로 하여 2차원 수치모델로 형산강 유출수를 고려하지 않고 수행하였다.

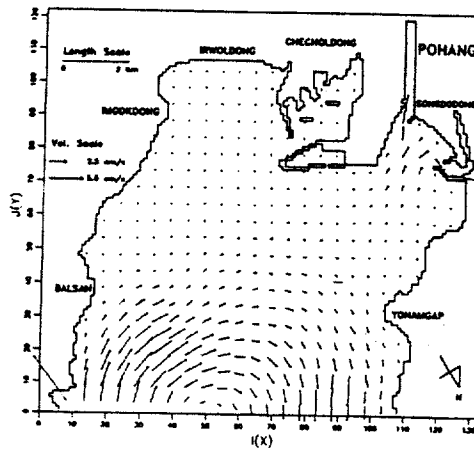
모델의 결과 만 안쪽까지 조석이 미치는 영향은 크지 않으며, 창조시 때는 장기갑에서 달만갑 방향으로, 낙조시 때는 달만갑에서 장기갑 방향으로 직접 유출된다.

Kim(2001)은 영일만의 조석잔차류의 거동 특성에 대해서 연구하였는데, 조석의 거동에 대해서는 형산강 하천 유출수가 직접적인 영향을 미치지 않는다고 결론을 내렸다(Fig. 4-2). 그러나, 조석 잔차류의 거동에는 영향을 크게 미친다고 하였다. Fig. 4-3은 Kim(2001)의 조석 잔차류와 형산강 하천 유출수를 고려하였을 때의 만 내의 순환에 대해 나타낸 그림이다. 형산강 하천 유출수를 고려하지 않았을 때와 고려하지 않았을 때의 결과로 미루어 보면, 영일만 내의 조석 잔차류의 거동은 지형적 형상에 의해서 보다 형산강 하천 유출수의 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-4는 I.R Imagery를 이용해 분석한 영일만의 표층 해류 개황도이다(수로국 보고서, 1972).



(a)



(b)

Fig. 4-1. Computed tidal currents vector diagram on the (a) flood, (b) ebb flow under the spring tide(Kim, 2000).

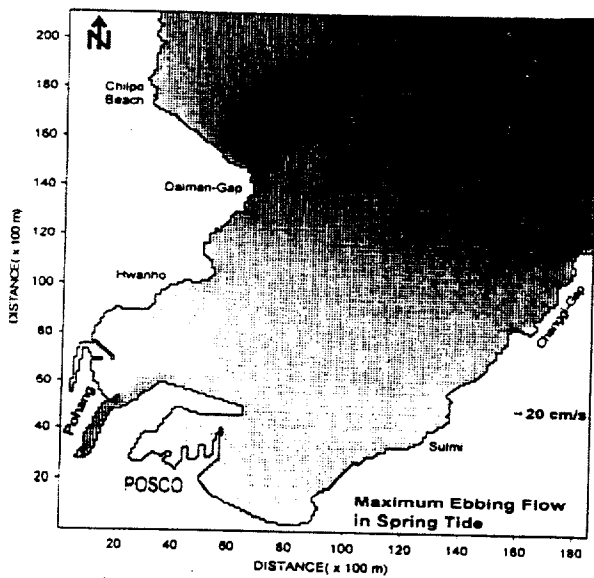
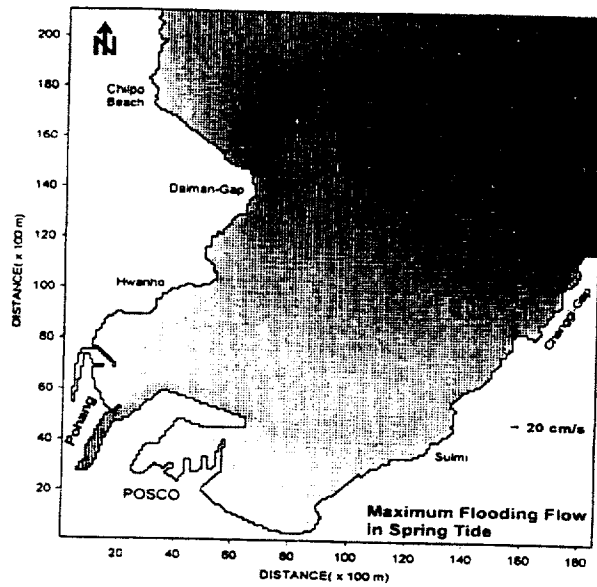
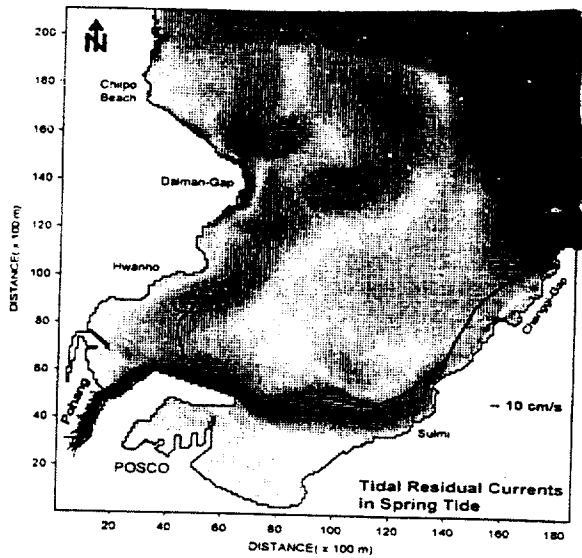
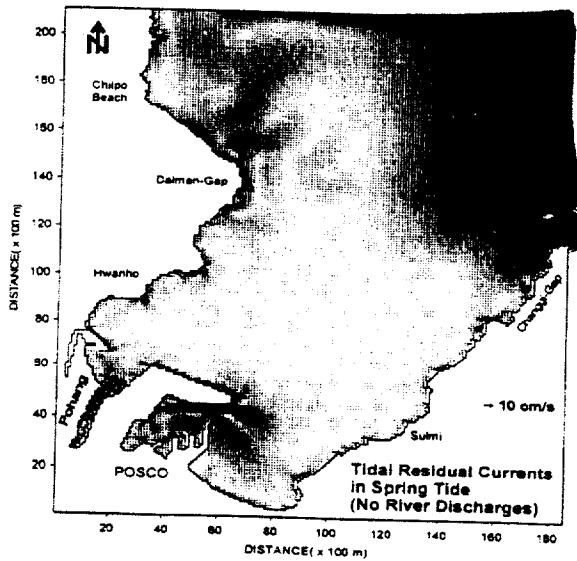


Fig. 4-2. Maximum flooding flow and ebbing flow in spring tide.



(a)



(b)

Fig. 4-3. Tidal residual currents with river discharges(a) and without river discharges(b)(Kim, 2001).

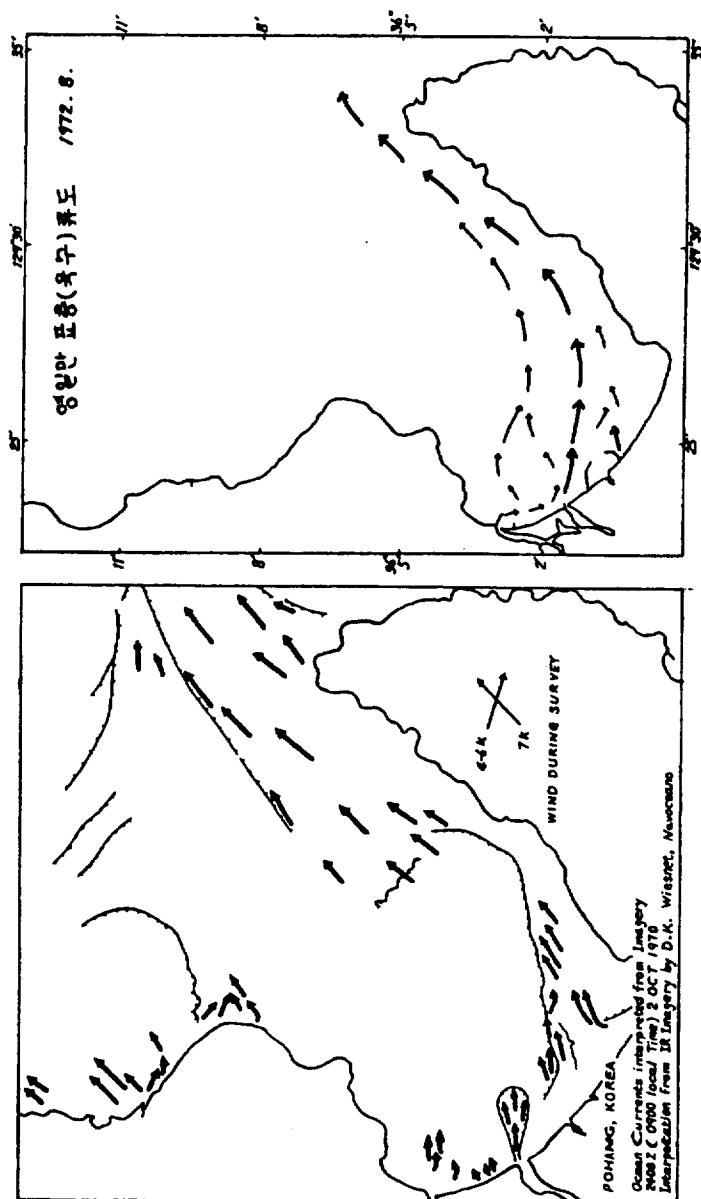


Fig. 4-4. Map of observation current in Yong il bay(수로국, 1972).

4.2 영일만 해수 순환에 미치는 해류의 영향

영일만 내에 미치는 해류의 영향에 대해 명확히 파악하기 위하여 다른 기구에 의한 만 내의 해수 순환과 비교하였다.

만 입구부에서는 조석과 해류가 만 내 순환에 큰 영향을 미친다. 해류는 창조시에는 조석과 같은 방향으로, 낙조시에는 조석의 거동에 반대되는 흐름으로 작용하여 영일만에 지속적인 영향을 미친다.

만 중앙부에는 조석과 해류, 형산강 하천 유출수가 복합 요소로 순환에 영향을 미치는데, 만 중앙보다는 해안선을 따라서 연안에 영향을 미친다.

만 안쪽에서는 형산강 하천 유출수가 영일만 내 순환을 지배하는 인자로 작용하며, 이 해역에 조석과 해류가 거의 영향을 미치지 않고 있다. 형산강 하천 유출수는 조석 잔차류와 더불어 포항 제철 전면 해상에서 장기갑 전면 연안을 따라 만외로 유출하는 경향을 볼 수 있었다. 이때, 해류의 유형이 하천 유출수의 거동 방향과 같아 만 안쪽 흐름에 미약하나마 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-5는 위의 내용을 종합하여 모식적으로 나타낸 것이다.

영일만의 해수 순환에 대해서 조석·조류, 형산강 하천 유출수, 해류에 대해 살펴본 결과 만 내의 순환에 미치는 해류의 영향은 해류 유속이 0.001 ~ 0.46 cm/s로 미약하지만 흐름을 유발하는 다른 기구와의 상호 작용을 통해 장기적이고, 꾸준한 영향을 미친다고 사료된다.

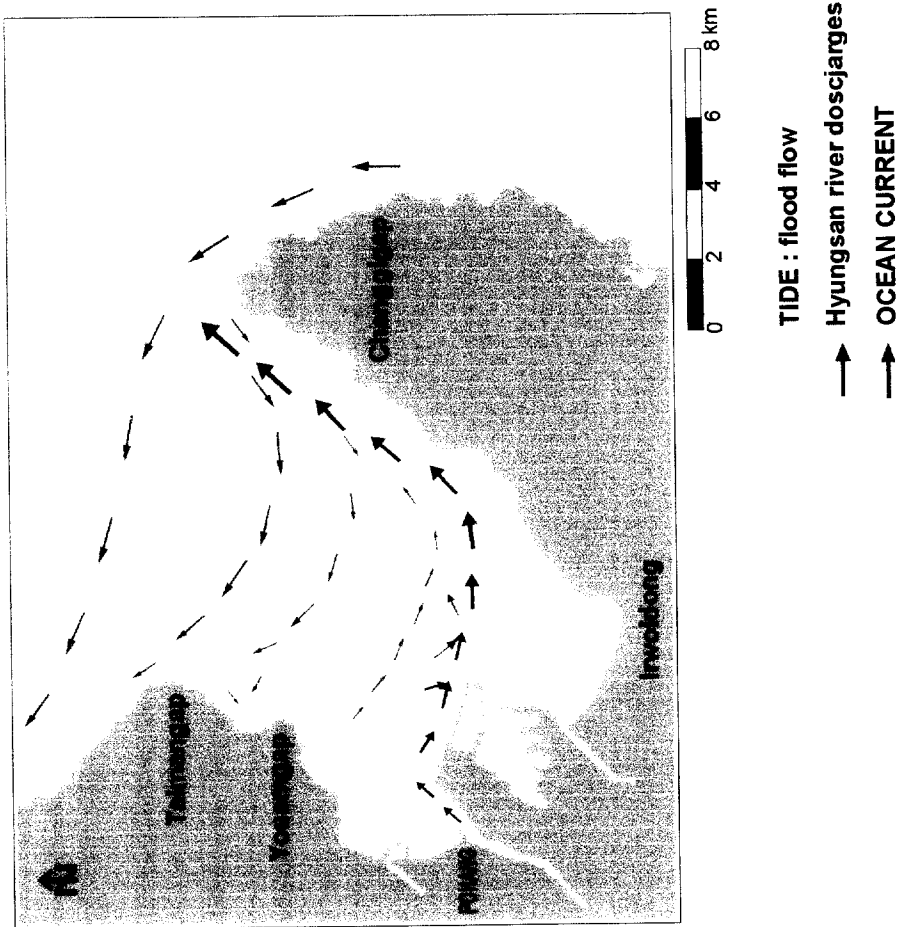


Fig. 4-5. Map of currents in Yong il bay.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 2차원 수심적분 모델을 사용하여 영일만 해수 순환에 영향을 미치는 해류에 대해 연구하였다. 이를 위하여 동해 전 해역을 대상으로 한 과역 모델과 울산~죽변 해역에 대한 중간역 모델에 대한 해류 계산이 선행되었다.

동해 전역을 대상으로 한 해류모델 구축과 그 시계열 데이터로부터 상세역 모델의 외해 경계조건을 합리적으로 도출하였다.

영일만 내로 유입하는 해류는 지형을 거슬러 올라가는 주 해류의 일부가 유입된 것으로 협역모델 계산 결과 영일만 내의 해류의 값은 만 입구에서 $0.15\sim 0.46\text{cm/s}$, 만 중앙부에서, $0.0026\sim 0.09\text{cm/s}$ 이며, 만 안쪽에서 $0.001\sim 0.0036\text{cm/s}$ 이다. 만 입구부와 만 중앙부에서는 해류의 유향이 장기갑에서 달만갑으로 향하지만, 만 안쪽에서는 지형의 영향으로 인하여 반대방향의 흐름이 발생하였다.

영일만 해수 순환의 기구에 대한 기존 연구자의 결과와 본 수치실험 결과 만 입구부에서는 조석·조류와 해류가 순환에 영향을 크게 미치고 있다. 그리고, 만 가장 안쪽에서는 형산강 하천 유출수가 영일만 순환에 가장 큰 영향을 미치고 있었으며, 만 중앙은 형산강과 조석·조류, 잔차류, 해류의 영향이 존재한다는 사실을 알 수 있었다.

해류가 영일만 순환에 미치는 영향에 대해서 보다 정확한 값을 얻기 위해선 열염순환과 바람장에 대한 연구가 추가로 되어야 할 것이다.

참고문헌

- Simons, T.J., 1974. Verification of Numerical Models of Lake Ontario; Part I. Circulation in Spring and Early Summer, *J. of Phys. Oceanog.* **4**: 507~523.
- Chung, J.Y., 1977. The effect of Stability on the Intensity of Vertical Turbulent Diffusion in the Western Channel of the Korea Strait, *J. Oceanog. Soc. Korea*, **12**(1): 7~12.
- Weatherly, G. and P.J. Martin, 1978. On the Structure and Dynamic of the Ocean Bottom Boundary Layer, *J. of Phys. Oceanog.* **8**: 557~570.
- Yoon, J.H., 1982. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part I. Formation of the East Korean Warm Current, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **38**:43~51.
- Yoon, J.H., 1982. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part II. Influence of seasonal variations in atmospheric conditions on the Tsushima Current, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **38**:81~94.
- Kawabe, M., 1982. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part I. Data analysis, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **38**:95~107.
- Yoon, J.H., 1982. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part III. Mechanism of the nearshore branch of the Tsushima Current, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **38**:125~130.
- Kawabe, M., 1982. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, Part II. Numerical Experiment, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **38**:183~192.
- Kantha L.H., G.L. Mellor and A.F. Blumberg, 1982. A Diagnostic

- Calculation of the General Circulation in the South Atlantic Bight, *J. of Phys. Oceanog.* **12**: 805~819.
- Cooper. C. and B. Pearce, 1982. Numerical Simulations of Hurricane-Generated Current, *J. of Phys. Oceanog.* **12**: 1071~1091.
- Oey, L.Y., G.L. Mellor and R.I. Hires, 1985. A Three-Dimensional Simulation of the Hudson-Raritan Estuary; Part I. Description of the Model and Model Simulations, *J. of Phys. Oceanog.* **15**: 1676~1692.
- Oey, L.Y., G.L. Mellor and R.I. Hires, 1985. A Three-Dimensional Simulation of the Hudson-Raritan Estuary; Part II. Comparison with Observation, *J. of Phys. Oceanog.* **15**: 1693~1709.
- Seung, Y.H., 1988. Application of a simple Buoyancy Adjustment Model to the Japan Sea, *Bull. Korean Fish. Soc.* **21**(6): 277~288.
- Matsuyama, M., 1990. The structure of the Nearshore Branch of the Tsushima Current on the shelf off the San'in coast in summer, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **46**: 156~166.
- Lee, J.C. and S.Y. Kim, 1991. Variability of sea levels at Mukho and Ullungdo off the East Sea coast of Korea, *Bull. Korean Fish. Soc.* **24**(6): 413~427.
- Haney, R.L., 1991. On the Pressure Gradient Force over Steep Topography in Sigma Coordinate Ocean Models, Notes and Correspondence, *J. of Phys. Oceanog.* **21**: 610~619.
- Pang, I.C., T.H. Kim, T. Matsuno and H.K. Rho, 1993. On the Origin of the Tsushima Current (I): Barotropic Case, *Bull. Korean*

- Fish. Soc.* **26**(6): 580~593.
- Katoh, O., 1993. Detailed current structures in the Eastern Channel of the Tsushima Strait in summer, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **49**: 17~30.
- Katoh, O., 1994. Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan Sea, *J. Oceanog. Soc. Japan*, **50**: 317~338.
- Allen, J.S., P.A. Newberger and J. Federiuk, 1995. Upwelling Circulation on the Oregon Continental Shelf; Part 1. Response to Idealized Forcing, *J. of Phys. Oceanog.* **25**: 1843~1866.
- Shin, C.W., S.K. Byun and C.S. Kim, 1996. Comparison between geostrophic currents and measured currents in the southwestern part of the East Sea, *J. Oceanog. Soc. Korea*, **31**(2): 89~96.
- Choi, B.H. and O. Wang, 1997. Modeling of circulation for the East Sea using reduced gravity models, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, **9**(3): 105~114.
- Lee, D.K., J.C. Lee, S.R. Lee and H.J. Lie, 1997. A circulation study of the East Sea using satellite-tracked drifters 1: Tsushima Current, *J. Korean Fish. Soc.* **30**(6): 1021~1032.
- Hong, C.H. and Y.K. Choi, 1997. The Response of Temperature and Velocity Fields to M_2 Tide in Deukryang Bay in the Southern Sea of Korea, *J. Korean Fish. Soc.* **30**(4): 667~678.
- Seung, Y.H. and K.H. Cho, 1998. A note the outflow boundary conditions in modelling the East Sea circulation, *J. Oceanog. Soc. Korea*, **33**(4): 212~218.
- 김헌덕, 2000. 영일만의 유동과 수질 특성에 관한 연구, 석사학위논문

문.

- 김영의, 전종률, 1989. 동해의 해수순환에 대한 Numerical Modelling 연구, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **24**(2): 96~108.
- 김종규, 2001. 영일만의 조석잔차류 거동 특성, *J. Korean Soc. Mari Envir. Eng*, **4**(1): 14~23.
- 이종섭, 김차겸, 김종화, 임기봉, 1995. 영일만의 해수유동 구조 및 확산특성, *J. Oceanog. Soc. Korea*, **30**(5): 467~479.
- 승영호, 1992. 동한난류의 이안 및 북한한류의 형성에 관한 단순모델, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **27**(3): 189~196.
- 승영호, 1992. 한반도 주변의 수괴와 해수순환, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **27**(4): 324~331.
- 승영호, 김균, 1993. 동해 순환의 수치모델, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **28**(4): 292~304.
- Nam, S.Y. and Y.H. Seung, 1992. 동해 해수유입에 대한 수치모델: 대마난류 형성 및 수송량. *Bull. Korean Fish. Soc.* **25**(1): 58~64.
- 金哲鎬, 1996. 東海 北西海域의 表層海況 特性, 韓國海岸·海洋工學會誌, **8**(2): 215~220.
- 卞相慶, 張善德, 1984. 韓國海峽 西水道에서 對馬暖流의 2個 支流, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**(2): 200~209.
- 林晴煥, 安希洙, 1985. 大韓海峽과 東海 中部에서의 容積 輸送量의 比較研究, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **20**(1): 50~55.
- 李興宰, 石文植, 金哲鎬, 1989. 韓國 東海에서 南東深層流 觀測, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **24**(2): 63~68.