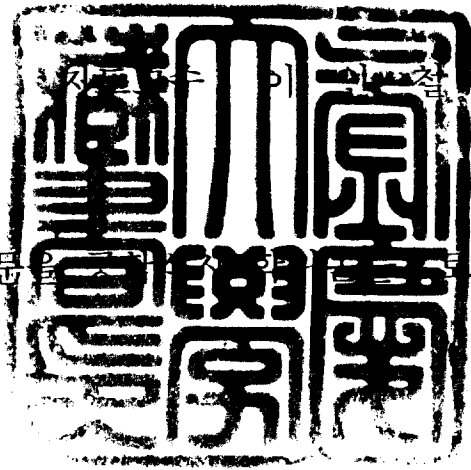


공학석사 학위논문

해양심층수 개발해역의
수질환경 변화예측



이 논문을 제출함.

2006년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

윤 석 진

윤석진의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 12월 22일

주 심 공학박사 류 청 로



위 원 공학박사 김 헌 태



위 원 공학박사 이 인 철



목 차

List of Figures	ii
List of Tables	v
ABSTRACT	vi
 1. 서론	 1
 2. 해양심층수 개발해역의 해양환경특성	 4
2.1 유입오염부하량 해석	4
2.1.1 담수유입량 산정	4
2.1.2 오염부하량 산정	7
2.2 해수유동구조 해석	10
2.2.1 해양물리환경조사	10
2.2.2 해수유동 수치모형실험	25
2.3 수질환경특성	52
2.3.1 부유사(SS) 확산 수치모형실험	52
2.3.2 물질순환예측 생태계모델링	60
 3. 심층수 해양방류시 수질환경 변화예측	 78
3.1 수온·염분 변화예측	78
3.1.1 심층수 해양방류조건	78
3.1.2 예측결과	79
3.2 부유사(SS) 확산 변화예측	82
3.3 물질순환 변화예측	82
3.3.1 심층수 방류수질조건	82
3.3.2 예측결과	82
 4. 요약 및 결론	 87
 참고문헌	 89

List of Figures

- Fig. 1.1 Bottom topography, the oceanographic observation station, river discharge point, and etc. in Goseong sea basin.
- Fig. 2.1 Schematic view of the rainfall-outflow model (Tank model).
- Fig. 2.2 The stick diagram of observed tidal current in Spring tide (St. 1, depth 15.0 m).
- Fig. 2.3 The stick diagram of observed tidal current in Spring tide (St. 7, depth 13.5 m).
- Fig. 2.4 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 9.0 m).
- Fig. 2.5 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 15.0 m).
- Fig. 2.6 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 21.0 m).
- Fig. 2.7 The observed tidal current ellipses in Spring tide (St. 1, depth 15.0 m).
- Fig. 2.8 The observed tidal current ellipses in Spring tide (St. 7, depth 13.5 m).
- Fig. 2.9 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 9.0 m).
- Fig. 2.10 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 15.0 m).
- Fig. 2.11 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 21.0 m).
- Fig. 2.12 Vertical distribution of temperature (flood flow; Spring tide).
- Fig. 2.13 Vertical distribution of temperature (ebb flow; Spring tide).
- Fig. 2.14 Vertical distribution of temperature (flood flow; Neap tide).
- Fig. 2.15 Vertical distribution of temperature (ebb flow; Neap tide).

- Fig. 2.16 Vertical distribution of salinity (flood flow; Spring tide).
- Fig. 2.17 Vertical distribution of salinity (ebb flow; Spring tide).
- Fig. 2.18 Vertical distribution of salinity (flood flow; Neap tide).
- Fig. 2.19 Vertical distribution of salinity (ebb flow; Neap tide).
- Fig. 2.20 Vertical distribution of sigma-t (flood flow; Spring tide).
- Fig. 2.21 Vertical distribution of sigma-t (ebb flow; Spring tide).
- Fig. 2.22 Vertical distribution of sigma-t (flood flow; Neap tide).
- Fig. 2.23 Vertical distribution of sigma-t (ebb flow; Neap tide).
- Fig. 2.24 Vertical distribution of observed SS concentration.
- Fig. 2.25 Coordinates system of tidal current model.
- Fig. 2.26 Grid system for numerical simulation.
- Fig. 2.27 Input time series of tidal open boundary condition (Four largeness tide value).
- Fig. 2.28 Input condition of surface/bottom open boundary of water temperature and salinity (2002year).
- Fig. 2.29 Computed tidal current at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum flood flow (with non-discharge of DSW).
- Fig. 2.30 Computed tidal current at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum ebb flow (with non-discharge of DSW).
- Fig. 2.31 Verification result of water temperature(a) and salinity(b).
- Fig. 2.32 Simulated result of Water Temp. at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum flood flow (with non-discharge Cond. of DSW).
- Fig. 2.33 Simulated result of Water Temp. at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum ebb flow (with non-discharge Cond. of DSW).
- Fig. 2.34 Simulated result of Salinity at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum flood flow (with non-discharge Cond. of DSW).
- Fig. 2.35 Simulated result of Salinity at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum ebb flow (with non-discharge Cond. of DSW).
- Fig. 2.36 Simulated max. diffusion distribution of SS concentration at 1st

layer(a) and 5th layer(b) (with CASE I).

Fig. 2.37 Simulated max. diffusion distribution of SS concentration at 1st layer(a), 5th layer(b) and 9th layer(c) (with CASEII).

Fig. 2.38 Flow chart of nutrient circulation simulation.

Fig. 2.39 Verification result of surface concentration.

Fig. 2.40 Simulated horizontal distribution of Water Quality at 1st layer (with non-discharge Cond. of DSW).

Fig. 3.1 Simulated result of Water Temp. changes at 1st layer(a) and 5th layer(b) on maximum flood flow (with discharge Cond. of DSW).

Fig. 3.2 Simulated horizontal distribution of Water Quality at 1st layer (with discharge Cond. of DSW).

List of Tables

- Table 2.1 Estimated result of river discharge at each river discharge point in 2002
- Table 2.2 Estimated result of annual mean inflowing pollutant loads at river discharge point in 2002
- Table 2.3 Estimated result of inflowing pollutant loads at river discharge point during passage of Typhoon Rusa in 2002
- Table 2.4 Meteorological data of study area (2003, 2004yr ; Sokcho)
- Table 2.5 Result of SS filtration on ebb flow in Neap tide
- Table 2.6 Tidal boundary condition of tidal current model
- Table 2.7 Computation conditions of tidal current model
- Table 2.8 Estimated result of SS maximum diffusion area at each case
- Table 2.9 Boundary condition of water quality concentration
- Table 2.10 Main biological parameter of ecological model
- Table 3.1 Discharge condition of Deep Sea Water
- Table 3.2 Distribution area of surface concentration at each water quality factors

Numerical Prediction of Water Quality Changes
at the Developing Region of Deep Sea Water

Seok Jin Yoon

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

ABSTRACT

As a basic study for establishing a influence forecasting/estimating model, used for deep sea water discharge to the ocean, this study was carried out as follows: 1) estimating the amount of river discharge and pollutant loads into the developing region of deep sea water in the East Sea, Korea, 2) a field observation of tidal current, vertical water temperature, salinity and SS concentration distribution, 3) 3-D numerical modeling of tidal current to analyze the physical oceanographic status, 4) numerical prediction of water temperature, salinity, suspended solids and nutrient circulation by SWEM model. The amount of river discharge flowing into this study area was estimated about 462.7×10^3 m³/day during passage Typhoon Rusa in 2002. The result of field observation, tidal current was controled by residual current. We could find a stratification within approximately the depth of 30~40 m in field observation area, and the differences of sigma-t between the surface layer and bottom layer were about 4.2. As result of numerical prediction of water temperature and nutrient circulation, when discharging 20,000 ton/day, water temperature was decreased about 1℃ and the maximum area is about 4.25 km north and south, about 1.25 km east and west, and the concentration of COD, T-N and T-P was increased, increased and decreased by discharged deep sea water, respectively.

1. 서론

최근, 자원고갈과 환경오염이 심화되면서 환경친화적 순환재생형 자원 개발의 필요성이 절실하게 대두되고 있다. 특히, 자원의 수입 의존도가 높은 우리나라는 가용한 자원을 효율적으로 개발하고 지속가능한 발전을 위해서 새로운 자원을 개발 이용하는 기반 기술의 구축이 절실하다. 대체 에너지, 대체 수자원 등으로 분류되고 있는 많은 자원들이 자원과 환경문제를 동시에 만족시키기 위하여 개발되어 왔으며, 그 일부는 실용화되고 있다. 그러나 많은 대체자원들이 실용화를 이루지 못하고 개발이 지연되고 있는 것은 가용량의 한계나 환경을 고려하지 못한 일방적인 경제성 평가에 기인한 것으로 평가된다(홍 등, 1999).

해양 심층수는 저온성, 청정성, 안정성, 부영양성 및 미네랄성 등의 특징을 가진 유용한 해양자원으로서 다단계 이용기술의 정립 및 산업화를 위한 기술들이 개발되고 있으며, 이에 따른 연안해역으로의 해양심층수의 해양방류가 필요할 것이다. 심층수가 가진 청정성과 부영양성을 적극적으로 재활용하여 방류시설 인근해역의 비옥화를 통한 기초생산력 증대와 수산자원의 증강을 위해 재활용될 수 있는 방안의 연구가 필요하다. 특히, 해양심층수의 산업자원화가 급속히 진행되고 있는 일본에서는 최근 들어 해양심층수의 대량배수가 연안해역의 유해성 식물성플랑크톤의 군집과 증식에 미치는 영향에 관한 연구(深見, 2002)가 수행되고 있어 심층수의 재활용 방안에 관한 순기능과 역기능에 관하여 관심이 주목되고 있어, 심층수 방류가 해역 비옥화라는 순기능이외에 생태계에 미치는 역기능에 대해서도 정량적인 평가가 이루어져야 할 것이다(이 등, 2005).

이를 위해서는 심층수의 이용 기술뿐만 아니라 취수 및 방류해역의 환경변화를 미리 예측하고 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 근거를 마련하는 것도 매우 중요하다. 동해 해양심층수 개발해역인 강원도 고성군 죽왕면 오호리 주변해역은 해안선으로부터 약 1 km떨어진 해역부터 수심이 급격히 변화하는 복잡한 해저지형을 이루고 있다(Fig. 1.1). 이에 따라 낮

은 수온에 영양염이 풍부한 심층수를 표층, 또는 저층에 방류할 경우 수온·염분의 연직변화로 인한 해수유동구조 및 영양염 농도의 연직변화와 이에 따른 기초생산력의 변화가 예상되어진다(이 등, 2005). 따라서 심층수 방류가 해양환경에 미치는 물리환경적 변화 및 수질·생태계환경 변화에 대한 예측·평가시스템의 개발이 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 해양심층수를 취수 이용 후 다시 해양으로 방류할 경우 예상되어지는 인근해역의 수질 및 영양염 순환구조의 변화를 예측평가하고, 방류해역의 환경용량 평가 생태계 모델링 및 심층수 취수/방류의 적정 사업용량 평가기법의 개발과 심층수 사업해역의 환경변화 예측 모델링/모니터링 시스템 개발의 기초적 연구로서 심층수 개발해역의 해양환경특성을 파악하고 추후 심층수 방류로 인한 수질환경변화를 예측하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

1) 육역으로부터 유입하는 담수유입량과 오염물질(COD, SS, TN, TP)의 유입부하량 해석하였다.

2) 해양물리환경조사 및 해수유동 수치모형실험을 실시하여 심층수 개발해역의 해수유동구조를 해석하였다.

3) 부유사(SS)확산 수치모형실험과 물질순환예측 생태계모델링을 수행하여 심층수 개발해역의 수질환경 특성을 파악하였다.

4) 심층수 해양방류량 및 방류위치에 따른 수온·염분 변화예측, 부유사(SS) 확산변화예측, 물질순환 변화예측 등의 수치모형실험을 수행하여 심층수 해양방류시 개발해역의 수질환경 변화를 예측해 보았다.

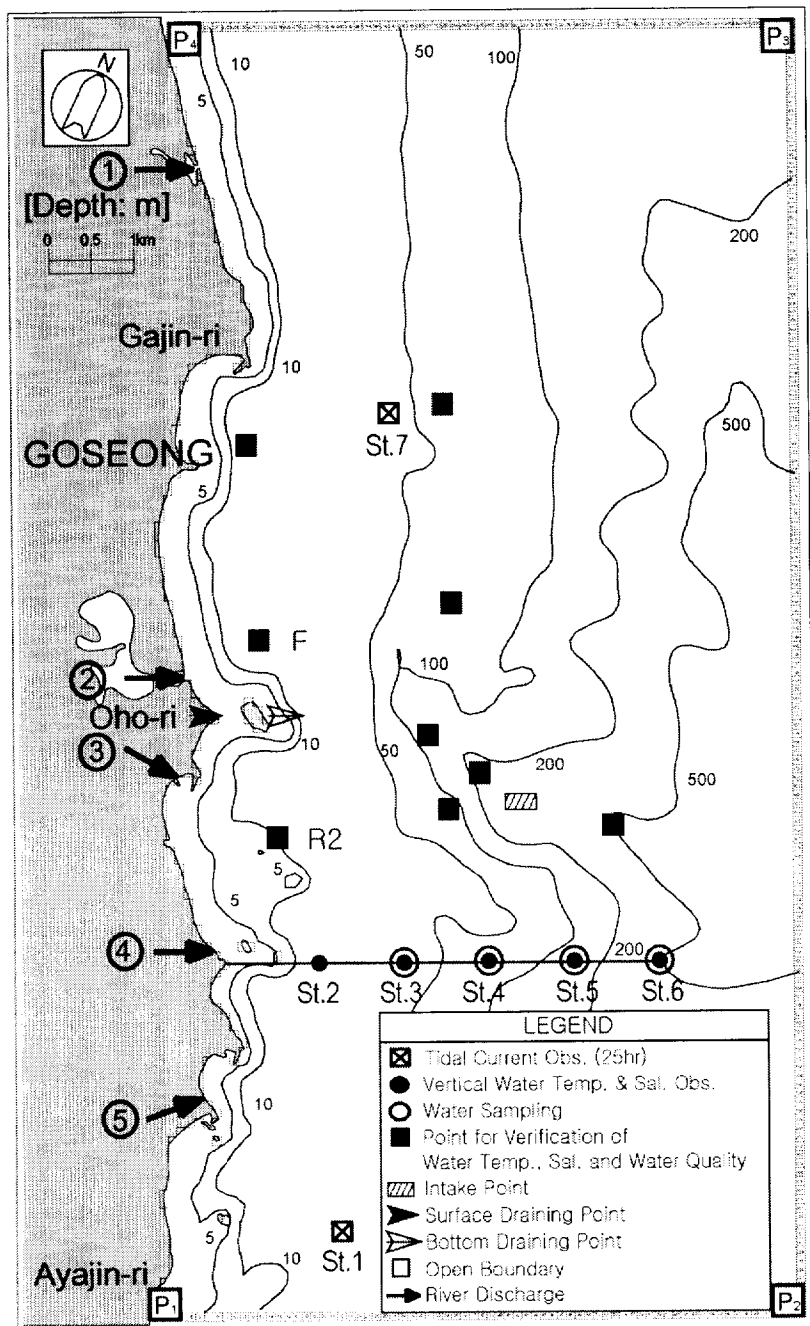


Fig. 1.1 Bottom topography, the oceanographic observation station, river discharge point, and etc. in Goseong sea basin.

2. 해양심층수 개발해역의 해양환경특성

2.1 유입오염부하량 해석

2.1.1 담수유입량 산정

연구대상해역내로 유하하는 하천(Fig. 1.1의 ①~⑤지점)으로부터의 담수유입량을 산정하기 위해 지형도(육도)로부터 수계별 유역면적을 산정한 후, Tank model을 이용하여 일별하천유량을 산정하였다.

(1) 산정방법

1) Tank model의 개요

본 연구에서 사용되어진 Tank 모델은 이수 계획시 필요한 일단위 장기 유출량을 추정하는데 최근 많이 사용되는 모형으로(Yokoo et al., 2001; Hashino et al., 2002) 대부분의 다른 유출 모형이 복잡한 구조와 매개변수를 보정하는데 있어 많은 실측자료를 필요로 하는데 반해, Tank 모형은 모형 구조의 단순성과 적은 양의 입력자료가 요구된다는 점에서 좋은 모형으로 평가받고 있다(菅原正己, 1986; 이인철, 2003).

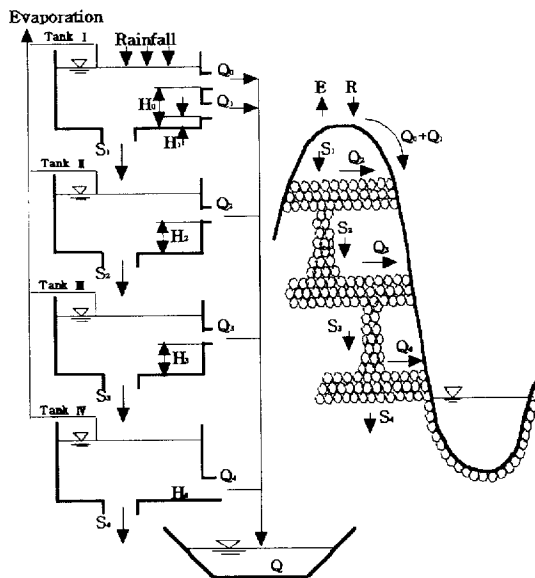


Fig. 2.2 Schematic view of the rainfall-outflow model (Tank model).

연구대상해역으로 유입되는 일별 하천유량을 산정하기 위해 Fig 2.1과 같이 4개의 Tank가 직렬로 배치된 cascade 모델을 구축하였다. 본 Tank 모델은 하천유량을 근사적으로 1단은 표층유출(단기유출, 2일 이내), 2단은 중간유출(약 1주일 정도), 3단은 준기저유출(2~3개월 정도), 4단은 기저유출(년 단위 정도)의 반감기를 가진 4개 성분의 합으로 표시한 것으로, Fig. 2.1의 우측에 나타내어진 지하수의 단층적 구조를 단순화시킨 모형이다. 이는 강우가 발생하면 각 Tank의 우측 유출공과 바닥 침투공을 통해 물이 저류되며, 해당 유출공의 높이에 수위가 도달하면 물이 하천으로 유출된다는 개념으로서, 각 Tank의 유출공에서 유출되는 유출량의 합계를 유역의 총유출량으로 산정하는 모델이다. Tank 모델내 첫 번째 Tank의 기본식은 다음과 같다.

$$X_1 = X_1' + R - E \quad (2.1)$$

$$Q_0 = A_0 \cdot (X_1 - H_0) \quad (2.2)$$

$$Q_1 = A_1 \cdot (X_1 - H_1) \quad (2.3)$$

$$S_1 = B_1 \cdot X_1 \quad (2.4)$$

여기서, R : 강우량(mm/day), E : 증발산량(mm/day), Q_0, Q_1 : 표층 및 1단 유출량(mm/day), A_0, A_1 : 표층 및 1단 유출계수, H_0, H_1 : 표층 및 1단의 바닥에서 유출공까지의 높이(mm), X_1 : 저류고(mm), X_1' : 전일 1단 저류고(mm), S_1 : 침투량(mm/day), B_1 : 침투계수이다. 또한 두 번째 이하 Tank에서의 기본식은 다음과 같다.

$$X_i = X_i' + S_{i-1} - E \quad (2.5)$$

$$Q_i = A_i \cdot (X_i - H_i) \quad (2.6)$$

$$S_i = B_i \cdot X_i \quad (2.7)$$

여기서, Q_i : i단의 유출량(mm/day), A_i : i단의 유출계수, H_i : i단의 바닥

에서 유출공까지의 높이(mm), X_i : i단의 저류고(mm), X_i' : 전일의 i단 저류고(mm), S_i : i단의 침투량(mm/day), B_i : i단의 침투계수이다. 최종적으로 각 Tank의 유출량을 구하고 다음 식 (2.8)을 기본방정식으로 하는 일별 하천유출량을 구한다.

또한 식 (2.9)에 의해 대상해역내로의 각 유입점별 최종 담수유입량을 산정하였다.

$$Q(m^3/sec)=(Q_0+\sum_{i=1}^n Q_i) \times \text{Watershed area}(km^2)/86.4(sec) \quad (2.8)$$

$$Q_d(m^3/day)=Q \times f \quad (2.9)$$

여기서 Q : 하천유출량, Q_0, Q_i : 표층 및 i단(1단 : 표층유출, 2단 : 중간유출, 3단 : 준기저유출, 4단 : 기저유출)의 유출량, Q_d : 담수유입량, f : 유달율(=0.8)을 나타낸다.

2) 계산조건

Tank 모델을 적용하여 일별 하천유출량을 산정할 대상수계는 Fig. 1.1에서 나타낸 바와 같이 연구대상해역으로 유입되는 송지호 및 남천을 포함한 4개의 대상하천 및 1개의 석호로서 구분하였다. 즉, 대상해역 내 하천 및 석호로부터 유입되는 담수유입량은 크게 5가지로 구분할 수 있는데, 유역면적이 상대적으로 큰 남천(①)과 문암천(⑤), 유역면적이 적은 인정천(③)과 황포천(④)으로 구분할 수 있으며, 송지호(②)는 석호로서 분류할 수 있다. 한편, Tank 모델의 입력자료는 일별강우량과 일별증발산량자료(강릉기상대, 2002)를 사용하였다. 특히, 태풍 “루사”시(2002년 8월 31일)는 1904년 한반도에서 기상 관측이 시작된 이래 가장 많은 1일 강수량을 기록한 태풍으로, 이전까지 1일 최고 강수량 기록이던 1981년 9월의 547.4mm(전남 장흥)보다 훨씬 많은 870.5mm(강릉)를 기록한 바 있다(우 등, 2002).

(2) 산정결과

연구대상해역으로 유입하는 5개 유입점의 연평균 총 담수유입량은 $462.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었으며, 유입점의 연평균 담수유입량은 남천이 $176.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 가장 많고, 다음으로 문암천, 황포천의 순이었다. 특히, 심층수 방류예정 해역과 인접한 인정천과 송지호는 각각 $41.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 $22.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산정되어 연간에 걸쳐 담수유입량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 태풍 “루사”시 총 담수유입량은 약 $36,466 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 이었으며, 태풍 ‘루사’시 담수유입량이 연평균 총 담수유입량에 비해 약 91배 정도 많은 것으로 나타났다(Table 2.1).

Table 2.1 Estimated result of river discharge at each river discharge point in 2002

Division	River	Watershed area(km ²)	River discharge($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$)	
			Annual mean	Typhoon Rusa
①	Nam-cheon	47.2	153.0	13,934.3
②	Songji-ho	6.6	19.5	1,778.9
③	Injeong-cheon	11.2	35.8	3,261.2
④	Hwangpo-cheon	14.9	45.6	4,150.7
⑤	Moonam-cheon	45.1	146.5	13,341.3
Total	-	125	400.4	36,466.4

2.1.2 오염부하량 산정

(1) 산정방법

연구대상해역과 인접한 수계로부터의 유입오염부하량을 산정하기 위해 상기 Tank model에 의해 산정된 일별하천유량과 2002년 환경부 수질관측망자료(환경부) 중 강원도 간성북천측정소에서 관측된 월별 평균COD, SS, 총질소(TN), 총인(TP) 등의 4개 수질항목을 곱하여 일별 유입오염부하량을 산정하였다. 산정방식은 Tank 모델을 통해 산정된 1일 하천유량

에 일별 수질변동값으로 환산된 수질오염물질 농도를 곱하여 계산하는 방식으로, 일별 수질변동값의 계산에는 선형보간법을 사용하였다. 이를 통해 연구대상해역내로 유입하는 하천별 유입오염부하량의 연간 총발생량을 산정하였다.

해양심층수 개발해역과 인접한 육상수역 및 하천으로부터 유입되는 오염부하량의 산정지점은 담수유입량 산정지점과 동일한 5개 지점이며 유입지점 및 하천 말단부로부터 유입되는 COD, SS, 총질소(TN), 총인(TP) 등 4개 항목에 대하여 식 (2.10)에 의해 유입오염부하량을 산정하였다.

$$L_i \text{ (ton/day)} = Q_d \times C_i \times 10^{-6} \quad (2.10)$$

여기서 L_i 및 Q_d : 각 유입점의 일별 오염부하량 ($i = \text{COD, SS, TN, TP}$) 및 일별 담수유입량(m^3/day), C_i (mg/l) : 일별 수질농도로서 강원도 간성 북천측정소에서 관측된 월평균 COD, SS, TN, TP의 농도(환경부 수질관측망자료, 2002년)를 선형보간법에 의해 추정된 농도이다.

(2) 산정결과

대상해역 유입지점별 COD, TN, TP 및 SS의 연평균 유입오염부하량과 태풍 “루사”시 유입오염부하량을 산정한 결과는 각각 Table 2.2와 Table 2.3과 같다. 태풍 “루사”시 대상해역으로 유입되는 COD의 총 유입오염부하량은 606.9 kg-COD/day이었으며, TN과 TP의 유입오염부하량은 각각 350.9 kg-TN/day와 3.41 kg-TP/day로 산정되었다. 또한, 유입점별 유입오염부하량의 특징을 살펴보면, COD의 경우 남천과 문암천에서 각각 20,902 kg-COD/day와 20,012 kg-COD/day로 큰 값을, 송지호에서는 2,668 kg-COD/day로 가장 적은 값을 나타내었다. 부유사(SS) 유입부하량의 경우, 태풍 “루사”시 58,346 kg-SS/day로 연평균 유입부하량에 비해 약 77배 많은 것으로 나타났다.

Table 2.2 Estimated result of annual mean inflowing pollutant loads at river discharge point in 2002

Division	River	Pollutant Loads (kg/day)			
		COD	TN	TP	SS
①	Nam-cheon	231.9	134.1	1.28	289.8
②	Songji-ho	29.6	17.1	0.16	37.0
③	Injeong-cheon	54.3	31.4	0.30	67.8
④	Hwangpo-cheon	69.1	39.9	0.38	86.3
⑤	Moonam-cheon	222.0	128.4	1.29	277.4
Total	-	606.9	350.9	3.41	758.3

Table 2.3 Estimated result of inflowing pollutant loads at river discharge point during passage of Typhoon Rusa in 2002

Division	River	Pollutant Loads (kg/day)			
		COD	TN	TP	SS
①	Nam-cheon	20,901.5	9,252.3	111.48	22,294.9
②	Songji-ho	2,668.3	1,181.2	14.23	2,846.2
③	Injeong-cheon	4,891.8	2,165.5	26.09	5,218.0
④	Hwangpo-cheon	6,226.0	2,756.0	33.21	6,641.1
⑤	Moonam-cheon	20,012.0	8,858.6	106.73	21,346.1
Total	-	54,699.6	24,213.6	291.74	58,346.3

2.2 해수유동구조 해석

2.2.1 해양물리환경조사

(1) 조사내용 및 방법

심층수 개발해역의 해수유동구조를 해석하고자 Fig. 1.1에 나타난 현장 조사정점에서 대조기인 2003년 7월 1일~2일과 소조기인 2004년 9월 20일~21일에 걸쳐 해수유동 및 수온·염분·SS농도의 연직변화에 대한 현장조사를 실시하였다. 조사영역은 심층수 해양방류시 인근 해양환경에 직·간접적으로 영향을 받을 수 있는 영역으로 설정하였다.

가) 정점연속조류관측

현장조사기간 중의 해수유동에 관한 오일러적인 정점연속측류(25시간)는 대조기시 St. 1정점에서 수심 15m에 ACM-16M을 계류하여 25시간 유향 및 유속을 측정하였고, St. 7정점에서 수면하 5.5 m에 ADCP유속계를 계류하여 연직으로 4 m별의 매시 유향 및 유속을 측정하였다. 소조기시에는 St. 1정점에서 수심 5 m에 RDCP유속계를 계류하여 연직으로 1.5 m별로 매시 유향 및 유속을 측정하였다.

나) Sigma-t의 연직분포

Sigma-t의 연직 공간분포를 파악하기 위하여 대조기시 St. 2~St. 5정점, 소조기시 St. 3~St. 6정점에서 CTD를 이용하여 창·낙조류시의 연직 수온·염분을 관측하였다. 관측된 수온·염분 자료로부터 식 (2.11)~식 (2.12)의 상태방정식을 이용하여 밀도 ρ 를 구하고, 식 (2.13)을 이용하여 sigma-t를 구하였다(Gill, 1982).

$$\rho w = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \rho(s, t, 0) = & \rho w + (b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4) S \\ & + (C_0 + C_1 t + C_2 t^2) S^{3/2} + D_0 S^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\sigma = \rho - 1000 \quad (2.13)$$

여기서 $a_0 = 999.842594$, $a_1 = 6.793952 \times 10^{-2}$, $a_2 = -9.095290 \times 10^{-3}$,
 $a_3 = 1.001685 \times 10^{-4}$, $a_4 = -1.120083 \times 10^{-6}$, $a_5 = 6.536332 \times 10^{-9}$, $b_0 =$
 8.24493×10^{-1} , $b_1 = -4.0899 \times 10^{-3}$, $b_2 = 7.6438 \times 10^{-5}$, $b_3 = -8.2467 \times$
 10^{-7} , $b_4 = 5.3875 \times 10^{-9}$, $C_0 = -5.72466 \times 10^{-3}$, $C_1 = 1.0227 \times 10^{-4}$, C_2
 $= -1.6546 \times 10^{-6}$, $D_0 = 4.8314 \times 10^{-4}$ 이다.

다) 부유사(SS)의 연직농도분포

부유사(SS) 농도의 연직 공간분포를 파악하기 위하여 소조기 낙조류시 St. 3~St. 6정점에서 Carousel Water Sampler를 이용하여 층별로 채수를 실시하였다. 채수한 sample을 GF/C필터로 여과한 후 SS의 무게를 측정하여 SS 농도를 구하였다.

(2) 조사결과 및 분석

가) 정점연속조류관측

Fig. 2.2~Fig. 2.6은 대·소조기시 정점별 25시간 유속·유향 경시변화를 조류벡터도(stick diagram)로 나타낸 것이다. 대조기시 정점 St. 1(아야진항 인근해역)의 수심 15.0 m에서 유속이 약 26~90 cm/sec의 범위로 매우 강한 북북동향의 흐름이 나타났고(Fig. 2.2), 정점 St. 7(가진리 인근해역)의 수심 13.5 m에서 유속이 약 17~35 cm/sec의 범위로 강한 남남동향의 흐름이 나타났다(Fig. 2.3). 그리고 소조기시 유속은 St. 1에서 수심 9.0 m, 15.0 m, 21.0 m에서 각각 약 2~50 cm/sec, 2~43 cm/sec, 2~35 cm/sec의 범위로 관측되었으며, 수심 9.0 m에서는 북북서향의 흐름이 강하게 나타나는 반면, 수심 15.0 m에서는 표층에 비하여 북북서향의 흐름이 감소하고, 남남서향의 흐름이 증가하였음을 알 수 있다(Fig. 2.4~Fig. 2.6).

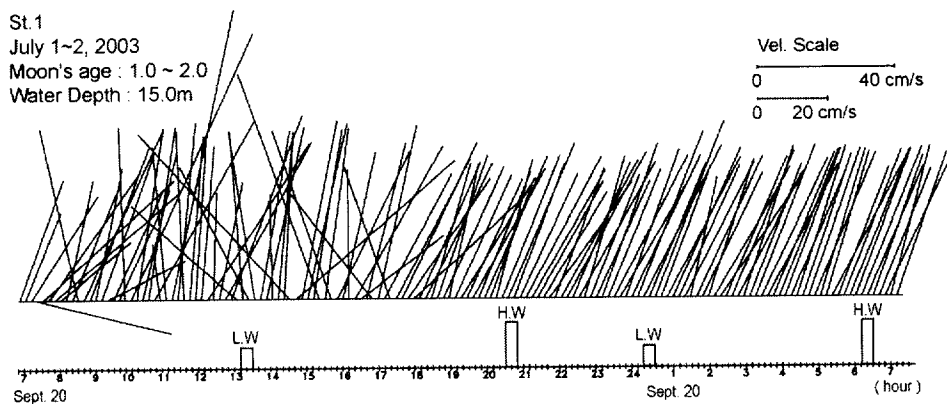


Fig. 2.2 The stick diagram of observed tidal current in Spring tide (St. 1, depth 15.0 m).

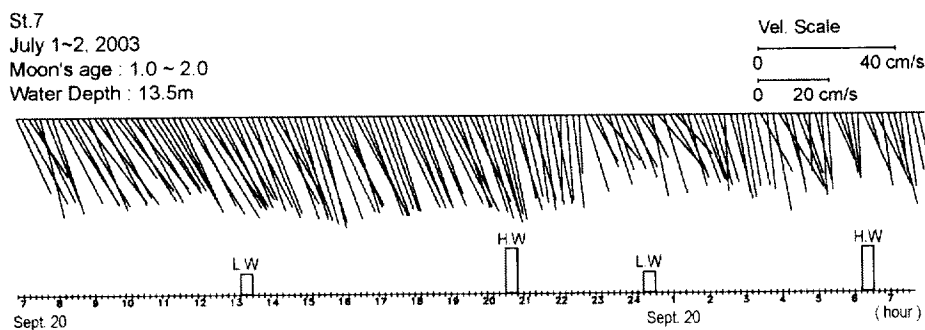


Fig. 2.3 The stick diagram of observed tidal current in Spring tide (St. 7, depth 13.5 m).

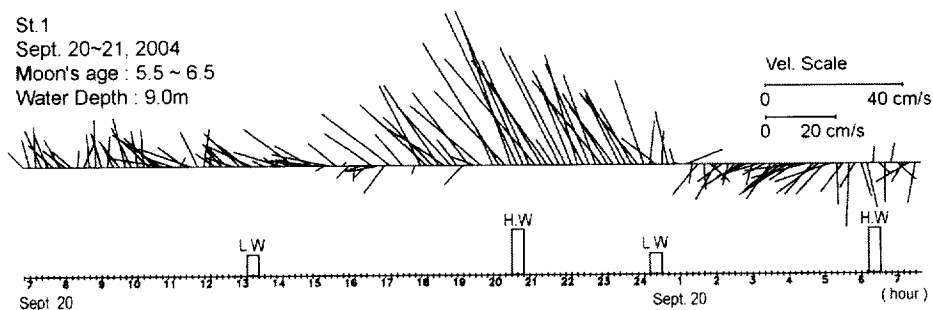


Fig. 2.4 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 9.0 m).

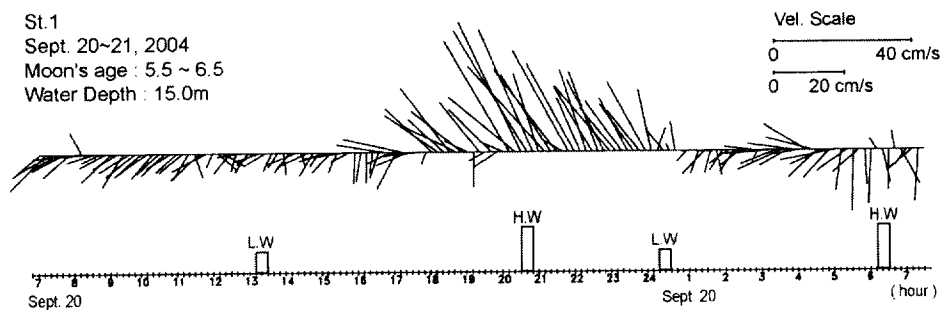


Fig. 2.5 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 15.0 m).

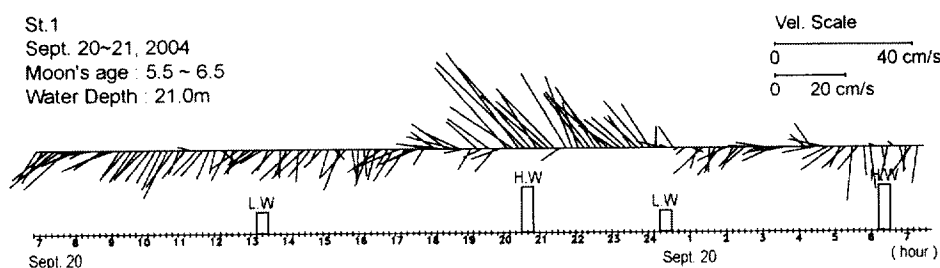


Fig. 2.6 The stick diagram of observed tidal current in Neap tide (St. 1, depth 21.0 m).

Fig. 2.7~Fig. 2.11은 25시간 정점연속조류관측 자료를 바탕으로 조화분해하여 얻어진 대·소조기시 정점별, 수심별 조류타원도를 나타낸다.

대조기시 St. 1에서는 일주조 성분과 반일주조 성분이 약 ± 8 cm/sec의 크기로서 각각 북서-남동향, 북서서-남동동향의 왕복류 흐름을 보였으며, 항류 성분은 북북동향으로 약 44 cm/sec로 매우 강하게 나타났다 (Fig. 2.7). St. 7에서는 일주조 성분이 약 ± 3 cm/sec의 북북동-남남서향, 반일주조 성분이 약 ± 6 cm/sec의 북서-남동향의 왕복류 흐름을 나타내었으며, 항류 성분은 남남동향으로 약 25 cm/sec의 강한 유속 값을 나타내었다(Fig. 2.8).

소조기시 St. 1 수심 9.0 m에서는 일주조 성분은 약 ± 10 cm/sec의 북북동-남남서향, 반일주조 성분은 약 ± 11 cm/sec의 남북향의 왕복류 흐름이었으며, 항류 성분은 약 10 cm/sec의 북서향류로 대조기에 비하여 약

77%정도 유속이 감소하였다(Fig. 2.9). 그리고 수심 15.0 m에서는 일주조 성분과 반일주조 성분이 각각 약 ± 11 cm/sec와 약 ± 7 cm/sec의 북서향(Fig. 2.10), 수심 21.0 m에서는 각각 약 ± 9 cm/sec와 약 ± 6 cm/sec의 북서향의 흐름을 나타내었다(Fig. 2.11). 그리고 수심 15.0 m, 21.0 m에서 항류 성분은 9.0 m에 비해 약 30% 감소하며 북서향류에서 남서향류로 흐름방향이 변화하였다.

대·소조기시 유속의 연직변화를 살펴보면 대조기시 강한 항류의 영향으로 조석현상이 거의 나타나지 않고 일방향 흐름만이 나타났으며, St. 1의 소조기시 항류 성분은 대조기에 비하여 약 77~84% 정도 감소하였다. 심층수 개발해역이 위치하는 북위 약 38° N 해역은 동한난류와 북한한류가 만나 한국연안으로부터 분리되어 중앙분지로 동향하며 극전선 jet를 형성하는데(Yoon, 1982), 현장조사 결과에서 나타난 항류성분은 이에 의한 영향인 것으로 판단된다.

또한, 소조기시 관측결과를 통해 대상해역의 조류 특성을 살펴보면, 일주조 성분이 반일주조 성분보다 대체로 우세한 것으로 나타났고 대상해역에서 일주조와 반일주조의 흐름방향이 반대방향인 것으로 조사되었다.

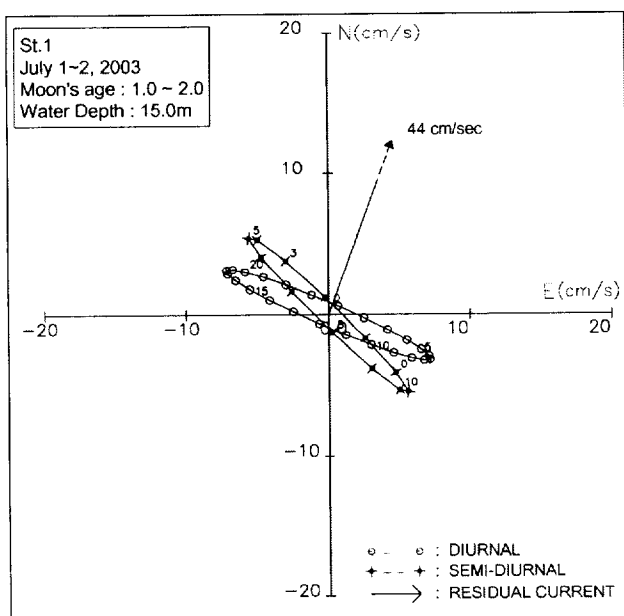


Fig. 2.7 The observed tidal current ellipses in Spring tide (St. 1, depth 15.0 m).

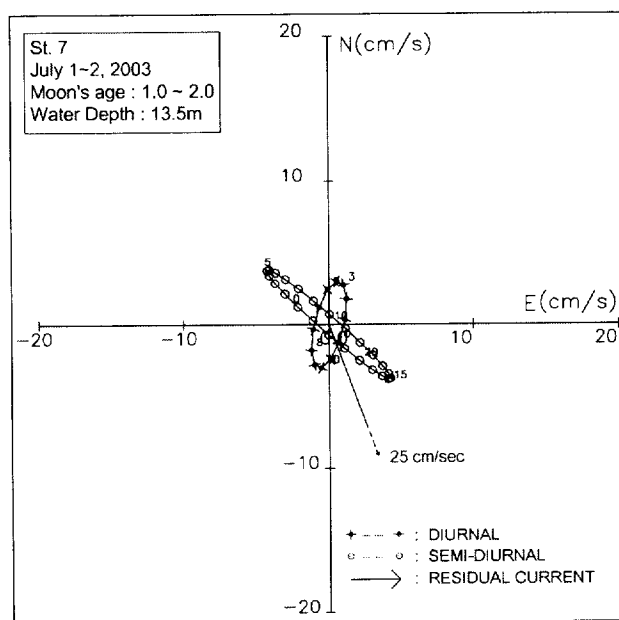


Fig. 2.8 The observed tidal current ellipses in Spring tide (St. 7, depth 13.5 m).

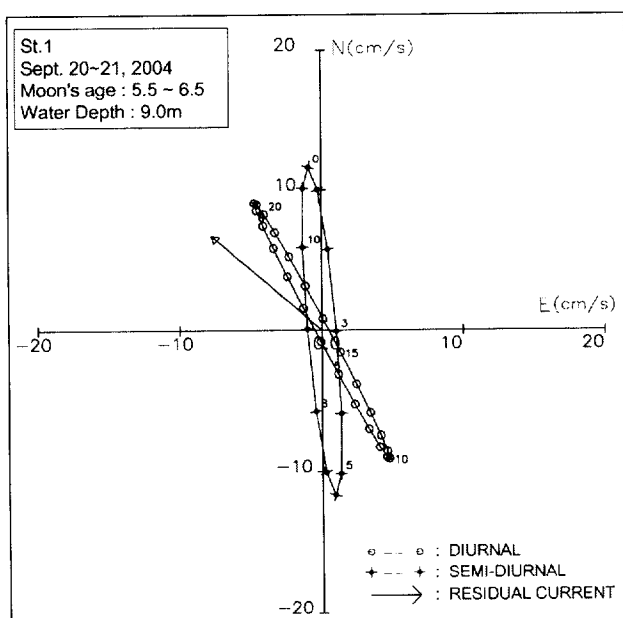


Fig. 2.9 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 9.0 m).

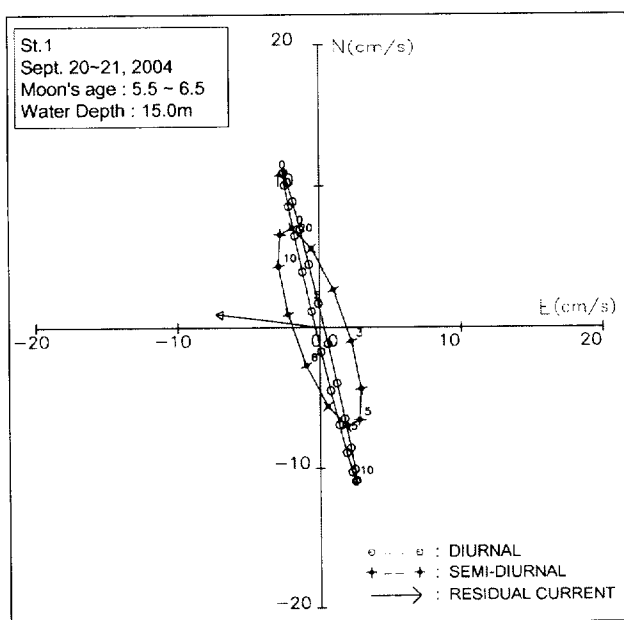


Fig. 2.10 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 15.0 m).

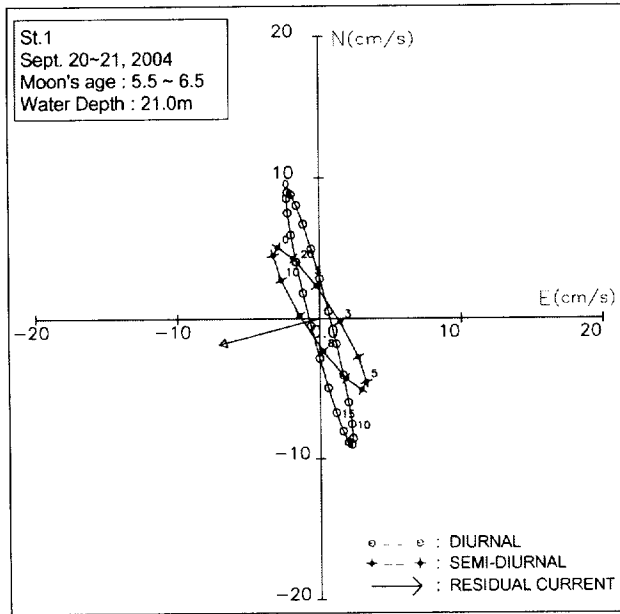


Fig. 2.11 The observed tidal current ellipses in Neap tide (St. 1, depth 21.0 m).

나) Sigma-t의 연직분포

1) 수온의 연직분포

대조기 창·낙조류시 수온의 연직분포는 각각 Fig. 2.12 및 Fig. 2.13과 같다. 창조류시 수온은 약 2~20℃범위였으며, 수심 약 30 m이내에서는 수온 10℃이상으로서 수온의 급변으로 인해 성층현상이 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 50~80 m의 경우 약 2℃의 차이를 보이고, 수심 80 m이하로 갈수록 대체로 수온 2~3℃의 분포를 보이며, 표층과 저층(100 m이상의 수심)과의 수온차가 약 18℃정도에 달하는 것으로 나타났다. 그리고 낙조류시는 창조류시와 거의 유사한 경향을 보였으나, 외해측 수심 10m까지 20℃이상의 수온대가 나타나는데, 이는 창조류 관측시간에 비하여 낙조류 관측시간대의 기온이 다소 높았기 때문인 것으로 판단된다(Table 2.4).

소조기 창·낙조류시 수온의 연직분포는 각각 Fig. 2.14 및 Fig. 2.15와 같다. 소조기 창·낙조류시의 수온은 약 2~20℃범위로 대조기와 같은 범

위를 가지는 반면, 수온 20℃이상의 수괴가 수심 약 20m까지 분포하며, 10℃이상의 수괴가 약 40 m까지 분포하여 대조기에 비하여 표층의 수온이 높게 나타났는데, 이는 소조기 관측시 강우의 영향에 의한 것으로 판단된다(Table 2.4). 소조기시 중층과 저층의 수온 연직분포는 대조기시와 유사한 경향을 보인다.

2) 염분의 연직분포

대조기 창·낙조류시 염분의 연직분포는 Fig. 2.16 및 Fig. 2.17과 같다. 대조기시 염분은 약 33.2~34.0 psu의 범위로 표·저층의 염분차가 약 0.8 psu정도이고, 수심 약 30 m부터 심층으로 갈수록 거의 일정한 수괴를 나타내며, 수심 약 100m부터 34.0 psu의 고염분 수괴가 나타났다. 수심 30 m이내의 표층해수는 창조류시와 낙조류시의 염분분포에 차이가 나타나는데, 이는 창조류 관측시 강우에 의한 영향인 것으로 생각된다(Table 2.4).

소조기 창·낙조류시 염분의 연직분포는 Fig. 2.18 및 Fig. 2.19와 같다. 소조기시 표층의 경우 대조기시에 비하여 염분이 낮게 나타나는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 강우의 영향인 것으로 판단된다. 중·저층의 경우 대조기시와 유사한 경향을 보이나, 34.0 psu의 고염분 수괴가 약 250 m부터 나타났다.

3) Sigma-t의 연직분포

Fig. 2.20~Fig. 2.21은 대조기와 소조기의 창·낙조류시 Sigma-t의 연직분포를 나타낸다. 대조기시의 연직분포를 살펴보면 표층과 저층은 약 24.0~27.0의 범위로 표·저층간의 차이가 약 3.0으로 나타났으며, 수심 약 30 m까지는 성층현상이 두드러지고, 약 70 m부터는 27.0으로 일정하게 나타난다. 소조기시도 대조기시와 유사한 경향을 나타내었는데, 표층과 저층은 약 23.0~27.0범위로 표·저층간의 차이가 약 4.0으로 나타났으며, 수심 약 40 m이내에서 성층현상이 두드러지게 나타나고, 약 250 m부터 27.2로 일정하게 나타났다.

Table 2.4 Meteorological data of study area (2003, 2004yr ; Sokcho)

Date		Maximum Temperature (℃)	Minimum Temperature (℃)	Mean Temperature (℃)	Amount of Precipitation (mm)
Spring Tide	2003/06/29	28.1	18.4	23.9	0.0
	2003/06/30	27.0	20.3	22.8	0.0
	2003/07/01	22.0	18.8	20.0	3.5
	2003/07/02	24.9	16.9	21.2	0.0
Neap Tide	2004/09/18	24.0	20.5	21.8	8.0
	2004/09/19	25.3	16.3	20.5	0.0
	2004/09/20	20.4	14.6	16.7	11.0
	2004/09/21	21.0	14.1	16.9	3.0

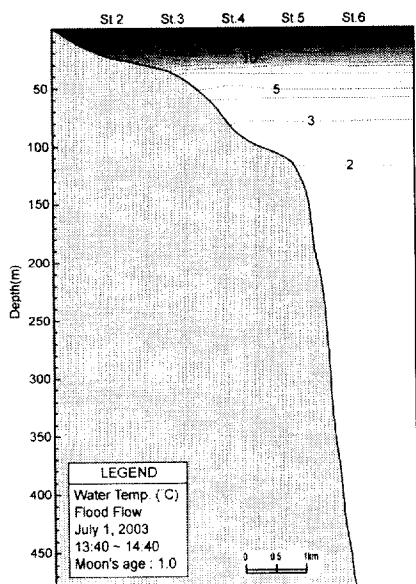


Fig. 2.12 Vertical distribution of temperature (flood flow; Spring tide).

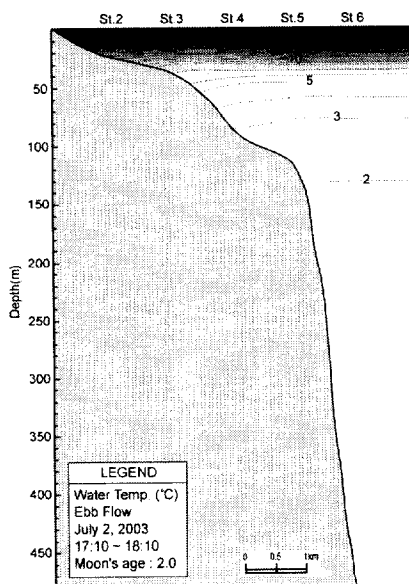


Fig. 2.13 Vertical distribution of temperature (ebb flow; Spring tide).

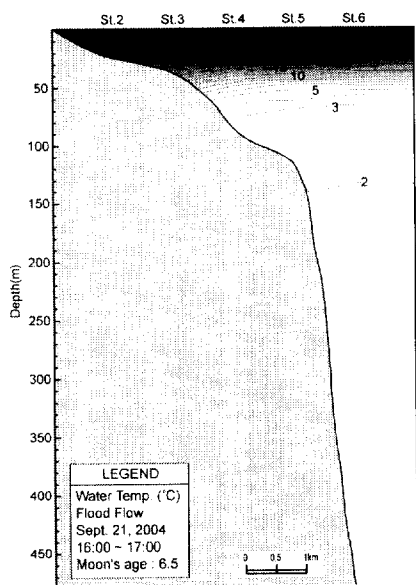


Fig. 2.14 Vertical distribution of temperature (flood flow; Neap tide).

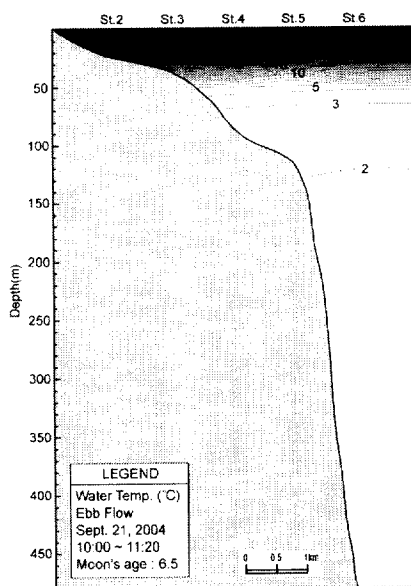


Fig. 2.15 Vertical distribution of temperature (ebb flow; Neap tide).

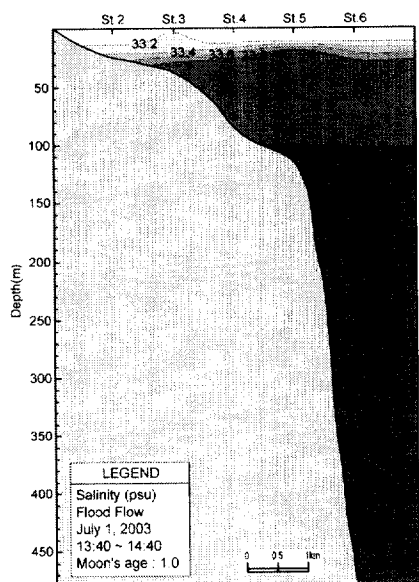


Fig. 2.16 Vertical distribution of salinity (flood flow; Spring tide).

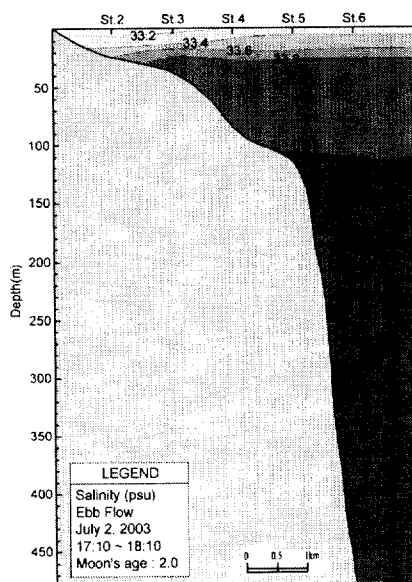


Fig. 2.17 Vertical distribution of salinity (ebb flow; Spring tide).

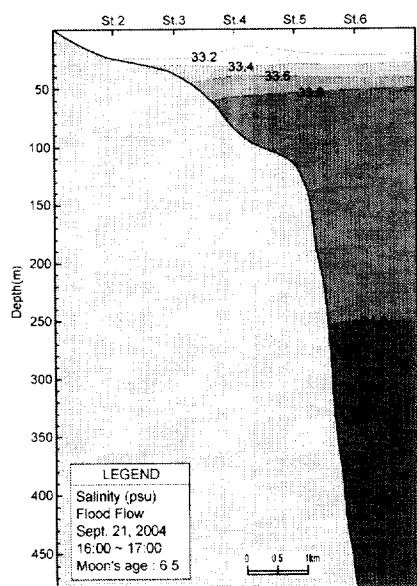


Fig. 2.18 Vertical distribution of salinity (flood flow; Neap tide).

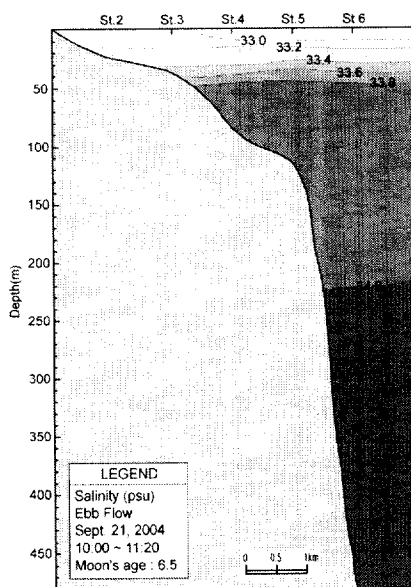


Fig. 2.19 Vertical distribution of salinity (ebb flow; Neap tide).

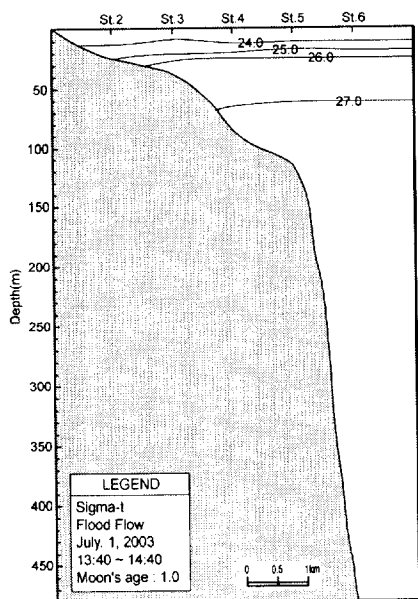


Fig. 2.20 Vertical distribution of sigma-t (flood flow; Spring tide).

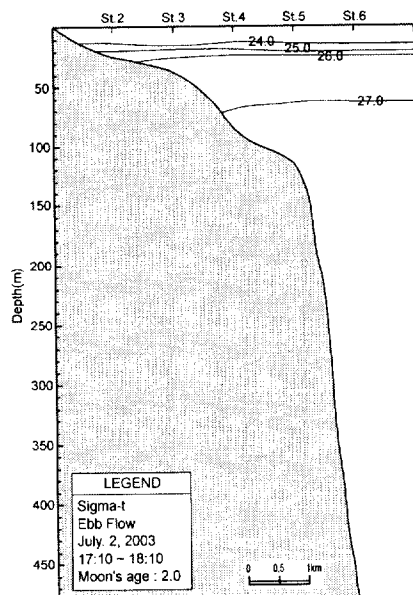


Fig. 2.21 Vertical distribution of sigma-t (ebb flow; Spring tide).

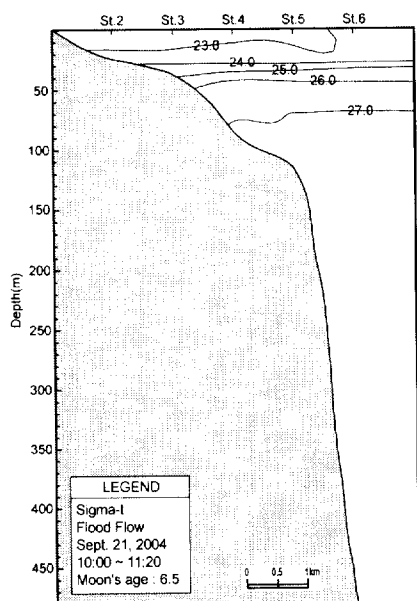


Fig. 2.22 Vertical distribution of sigma-t (flood flow; Neap tide).

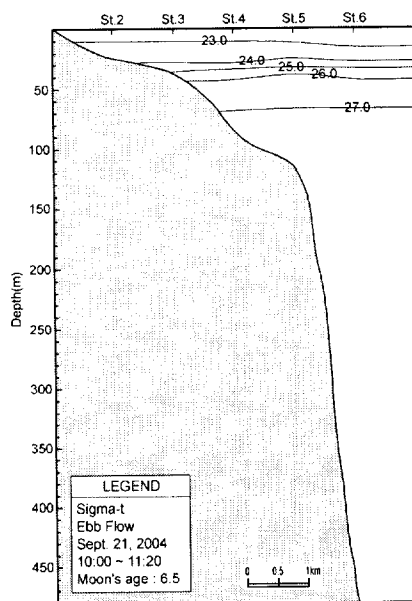


Fig. 2.23 Vertical distribution of sigma-t (ebb flow; Neap tide).

다) 부유사(SS)의 연직농도분포

Table 2.5와 Fig. 2.24는 소조기 낙조류시 St. 3~St. 6의 4개 정점에서 수심방향으로 채수한 해수를 실험실에서 여과하여 측정된 부유사(SS)의 연직농도변화를 나타낸 것이다.

장 등(1996)은 동해의 연직구조를 수온의 변동양상에 따라, 주로 계절적인 요소에 의한 표층(0~50 m), 난류수와 냉수간의 상호작용과 상층으로부터 열의 전달작용에 의한 차층(100~150 m), 연안 저층냉수의 이류에 의하여 지배되는 중층(200~300m)으로 나누었는데, 부유사(SS) 연직 농도분포결과를 장 등(1996)의 연구결과를 토대로 대상해역의 연직구조를 파악할 수 있다.

그 결과에 따르면 수심 약 30~70 m에서 sigma-t 연직분포(Fig. 2.23)의 밀도경계면과 유사하게 나타난 SS 저농도역의 상층부를 표층, 수심 150 m까지를 중층, 150 m 이하를 저층으로 구분할 수 있다. 표층의 경우 St. 4 수심 약 7 m에서 SS농도가 15.2 ppm, St. 5 수심 약 50 m에서 11.7 ppm으로 10.0 ppm 이상의 고농도역이 나타났는데, 이는 강우시 육역으로부터 유입된 SS가 확산·침강하는 것으로 판단된다. 또한, 차층은 수심 약 100 m, 중층은 수심 약 350~450 m 범위에서 각각 SS 고농도역이 분포하는 것으로 조사되었다.

이상의 결과를 바탕으로 심층수 개발해역에서의 부유사(SS)의 확산특성을 살펴보면 표층(0~50 m)은 해류, 육역 및 해상 유입 강우의 영향으로 고농도의 부유사(SS)가 육상으로부터 유입하여 외해측으로 확산·침강하는 것으로 판단되며, 성층구조 이하의 수심(차층 및 중층)에서 고농도 수괴의 출현은 동해 고유수의 거동과 관계가 있을 것으로 판단된다.

Table 2.5 Result of SS filtration on ebb flow in Neap tide

St.	Depth (m)	SS Con. (ppm)	St.	Depth (m)	SS Con. (ppm)	St.	Depth (m)	SS Con. (ppm)	St.	Depth (m)	SS Con. (ppm)
3	0	2.69	4	0	3.93	5	0	2.75	6	0	3.81
	3	1.82		3	13.64		5	1.83		5	3.77
	5	2.13		5	12.26		7	2.90		10	0.90
	7	2.79		7	15.24		10	2.68		20	2.63
	10	1.80		10	3.79		15	4.50		50	2.75
	15	3.62		15	2.73		17	4.50		70	1.00
	20	3.48		30	2.87		20	1.80		100	8.49
	25	0.90		40	1.85		30	3.59		150	2.78
	30	1.80		50	0.88		50	11.71		200	2.80
	35	0.90		70	3.61		70	0.91		300	3.64
4	40	2.73	5	80	3.67	6	100	4.46	7	400	4.67
	50	0.91		-	-		110	2.79		452	3.70

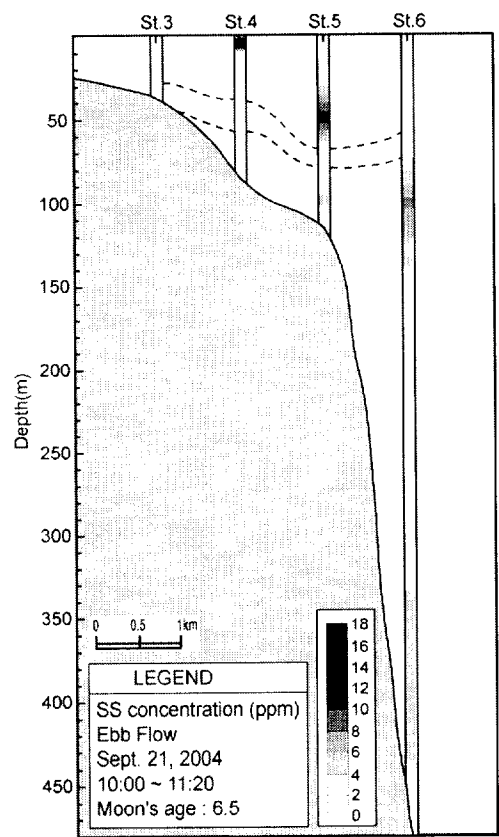
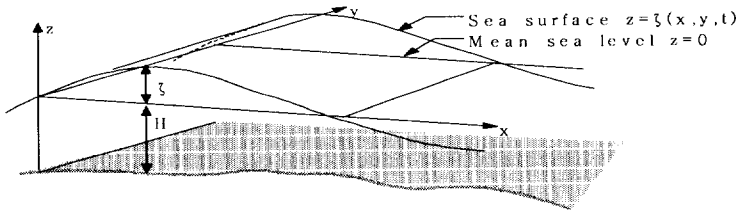


Fig. 2.24 Vertical distribution of observed SS concentration.

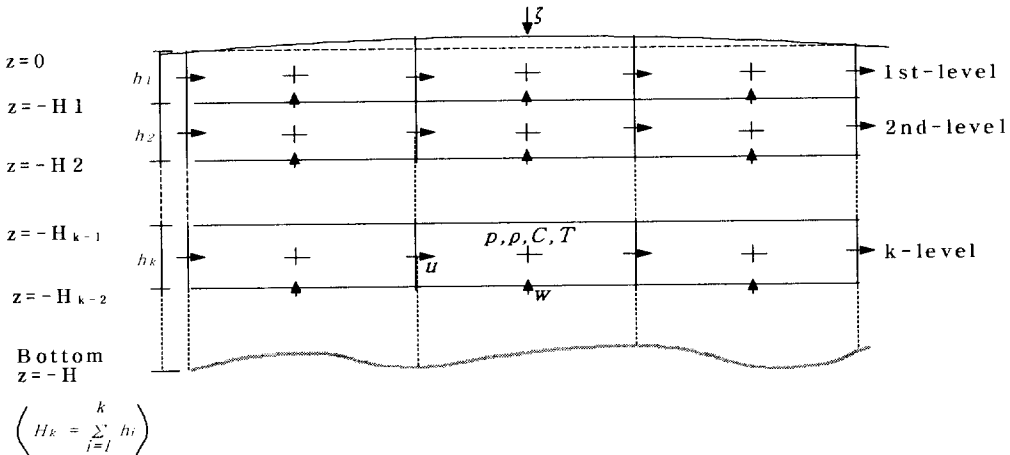
2.2.2 해수유동 수치모형실험

(1) 수치모형의 개요

해수유동 수치모형은 정수압·부시네스크 근사를 가정한 3차원 Navier-Stokes 운동량방정식과 연속식, 수온과 염분의 이류확산방정식 및 해수의 밀도와 수온·염분을 관련시킨 상태방정식(Japan Society on Oceanography, 1990)을 기초방정식으로 한 연직 다층의 Level model로서 밀도류와 취송류를 고려한 해수유동의 시공간적 변동특성을 계산할 수 있는 모형이다 (이인철, 2001). Fig. 2.25는 수치모형 계산상의 축좌표계 (a) 및 연직좌표계 (b)를 나타낸다.



(a) axis coordinates system



(b) vertical coordinates system

Fig. 2.25 Coordinates system of tidal current model.

가) 기본방정식

해수유동 수치모형의 임의 k층에서의 기본방정식은 식 (2.14)~식 (2.20)과 같다.

1) 운동방정식

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$+ \frac{(u_{k-1/2} - u_k)w_{k-1/2} - (u_{k+1/2} - u_k)w_{k+1/2}}{h_k} - fv_k$$

$$= -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2}$$

$$+ \gamma_i^2 \frac{(u_{k-1} - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k}$$

$$- \gamma_i^2 \frac{(u_k - u_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k}$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} \quad (2.15)$$

$$+ \frac{(v_{k-1/2} - v_k)w_{k-1/2} - (v_{k+1/2} - v_k)w_{k+1/2}}{h_k} - fu_k$$

$$= -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2}$$

$$+ \gamma_i^2 \frac{(v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k}$$

$$- \gamma_i^2 \frac{(v_k - v_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k}$$

$$P_k = \sum_{i=1}^k g \rho_i h_i - 0.5 g \rho_k h_k \quad (2.16)$$

2) 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u_1 (h_1 + \zeta) + \frac{\partial}{\partial y} v_1 (h_1 + \zeta) - w_{3/2} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} u_k h_k + \frac{\partial}{\partial y} v_k h_k + w_{k-1/2} - w_{k+1/2} = 0 \quad (2.18)$$

3) 수온(T)과 염분(C)의 확산방정식

$$\frac{\partial T_k h_k}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{xk} T_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{yk} T_k) \quad (2.19)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} [K_{xk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_{yk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial y}]$$

$$+ K_z (T_{k-1} - T_k) - K_z (T_k - T_{k+1})$$

$$- w_{k-1/2} T^* + w_{k+1/2} T^* + \frac{1}{\rho_w c_p} (q_{k-1/2} - q_{k+1/2})$$

$$\frac{\partial C_k h_k}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{xk} C_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{yk} C_k) \quad (2.20)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} [K_{xk} h_k \frac{\partial C_k}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_{yk} h_k \frac{\partial C_k}{\partial y}]$$

$$+ K_z (C_{k-1} - C_k) - K_z (C_k - C_{k+1})$$

$$- w_{k-1/2} C^* + w_{k+1/2} C^*$$

여기서, t 는 시간(sec), h_k 는 층두께(m), ζ 는 평균수면까지의 해면상승수위(m), u_k , v_k , w_k 는 각각 x, y, z방향의 평균유속(m/sec), ρ_k 와 ρ_w 는 해수밀도(kg/m³), P_k 는 해수압(kg/(msec²)), A_x 와 A_y 는 x, y 방향의 수평외동점성계수($=1 \times 10^6$ cm²/sec), γ_i 는 내부 층간의 마찰계수($=0.0025$), f 는 Coriolis 계수(7.819×10^{-5} s⁻¹), g 는 중력가속도($=980$ cm s⁻²)이다. 또한 T_k 와 C_k 는 수온(K)과 염소이온농도(kgm⁻³), M_{xk} 와 M_{yk} 는 x, y 방향의 선유량(m²s⁻¹),

K_x 와 K_y 는 열과 염소이온농도에 관한 x, y 방향의 와동확산계수(m^2s^{-1}), K_z 는 열과 염소이온농도에 관한 연직혼합계수(ms^{-1}), $q_{k+1/2}$ 는 내부층 사이에 도달하는 일사량($Jm^{-2}s^{-1}$), c_p 는 해수의 비열($Jkg^{-1}K^{-1}$)이다.

4) 상태방정식

계산대상해역의 밀도장은 실제 해양관측에 기초한 식 (2.21)과 식 (2.22)와 같은 상태방정식을 적용하여 계산한다.

$$\rho_k = \rho_w + [b_0 + b_1(T_k - 273) + b_2(T_k - 273)^2 \quad (2.21)$$

$$+ b_3(T_k - 273)^3 + b_4(T_k - 273)^4]c_f C_k \\ + [c_0 + c_1(T_k - 273) + c_2(T_k - 273)^2](c_f C_k)^{3/2} \\ + d_0(c_f C_k)^2$$

$$\rho_w = a_0 + a_1(T_k - 273) + a_2(T_k - 273)^2 \quad (2.22)$$

$$+ a_3(T_k - 273) + a_4(T_k - 273)^4 + a_5(T_k - 273)^5$$

여기서, c_f 는 염분 Cl^- 농도의 변환계수($=1.80655$), $a_0 \sim a_5$, $b_0 \sim b_4$, $c_0 \sim c_2$ 와 d_0 는 정수이다.

나) 경계조건의 설정

1) 자유수면에서의 경계조건

㉠ 풍압력

해수유동장의 자유수면($z = \zeta(x, y, t)$) 경계조건에 있어서는 육역과 해역의 연직경계면에는 Non-slip 조건을 적용하고, 자유수면에서의 풍압력은 다음 식과 같다.

$$(\tau_{0x}, \tau_{0y}) = \left(\frac{\rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta)}, \frac{\rho_a \gamma_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta)} \right) \quad (2.23)$$

여기서, τ_{0x} 와 τ_{0y} 는 자유수면에서의 바람에 의한 응력(Nm^{-2}), h_1 는 1 층의 층두께(m), W_x , W_y 는 x, y 방향의 풍속(ms^{-1}), ρ_a 는 공기밀도 (kg/m^3), γ_a^2 는 해면마찰계수(=0.001)이다.

㉞ 해면을 통한 열수지

자유수면에서의 순열 flux는 식 (2.24)와 같이 대기-자유수면간의 열교환에 의한 단파방사, 장파방사, 증발에 의한 잠열, 열전달에 의한 현열수송 등 해면을 통한 열수지방정식을 사용하였으며, 자유수면에서의 염분 flux는 강우와 증발에 의한 담수의 출입을 고려한 식 (2.25)를 적용한다.

$$T_H = -\frac{1}{\rho_w} c_p (q_e + q_c + q_r) + R_{\infty} T_{\infty} \quad (2.24)$$

$$C_H = S(0)(E_r - P_r)/\rho_w \quad (2.25)$$

여기서, T_H 와 C_H 는 자유수면에서의 순열flux와 염분flux를 나타낸다. 또한 q_e 는 해면에서의 증발에 의한 잠열($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$), q_c 는 해면에서의 열전달에 의한 현열($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$), q_r 는 해면에서의 유효역방사전달량($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$), R_{∞} 은 육수·강수의 유입에 대한 해면상승율(ms^{-1}), T_{∞} 는 유입수온(K), $S(0)$ 는 해면에서의 염분, $E_r - P_r$ 는 증발-강우에 의한 해면에서의 순담수량 flux이다.

2) 해저와 외해경계조건

해저($z=-H$) 경계조건으로는 수온과 염분의 연직구배는 zero이고, 경계와 통하는 열과 염분의 이동은 없는 것으로 가정한다. 또한 해저면에서의 마찰응력은 식 (2.26)과 같이 설정하며, 외해경계조건으로 개경계에서의 조위진동에 있어서는 식 (2.27)과 같은 강제수위로 설정하였다.

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \left(\frac{\gamma_b^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k}, \frac{\gamma_b^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k} \right) \quad (2.26)$$

$$\zeta(t) = \zeta_0 \cos(ut - k) \quad (2.27)$$

여기서, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저면에서 마찰응력(Nm^{-2}), γ_b^2 는 해저마찰계수($=g/C^2$, $C=h^{1/6}/0.026$)이며, $\zeta(t)$ 는 경계격자의 조위, w 는 가속도, t 는 시간이고, ζ_0 와 k 는 각각 경계격자의 조석진동과 위상각이다.

(2) 실험개요

연구대상해역의 해수유동현상을 재현하고, 향후 심층수 해양방류시 해수 유동 변화를 예측하기 위한 수치실험 모형을 구축하여 조위 및 조류에 대한 검증은 실시한 후, 현상태(2002년도, 하계)를 대상으로 하여 3차원 해수유동 수치모형실험을 실시하였다.

(3) 실험방법

가) 모형의 구축

1) 계산대상영역 및 대상설정

수치모형 실험시 설정된 영역은 주요 대상 해역인 강원도 고성군 오호리를 중심으로 동서방향으로 9.0 km, 남북방향으로는 15.0 km로, 심층수 방류로 인해 해양환경에 영향을 미칠 것으로 예상되는 해역을 포함하여 결정하였다. 그리고 조류의 현황재현은 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)를 대상으로 실험을 수행하였다. 대상지역의 수심자료는 최신의 해도와 수심 관측 자료를 이용하여 독취된 자료를 이용하였으며, 해역의 3차원 해저지형도와 해수유동실험의 등수심도 및 계산결과 검증점은 Fig. 1.1과 같다.

2) 계산격자구성

계산대상영역의 격자간격은 계산시간 및 계산의 안정도를 고려하여 100 m 정방격자 등간격으로, 총 격자수는 13,500개(90×150)의 격자망으로 작성하였다(Fig. 2.26). 또한 수심방향의 연직 층분할은 대상 해역의 수심과 심층수 취/배수구 설치 장소의 수심을 고려하여 15개층으로 분할하였다. 연직층의 두께는 제1층부터 제3층까지는 3 m, 제4층부터 제5층까지는 5 m, 제6층부터 제7층까지는 8m, 제8층부터 제14층까지는 10 m로 하였으며, 마지막 연직층인 제 15층은 나머지 수심으로 구분하였다.

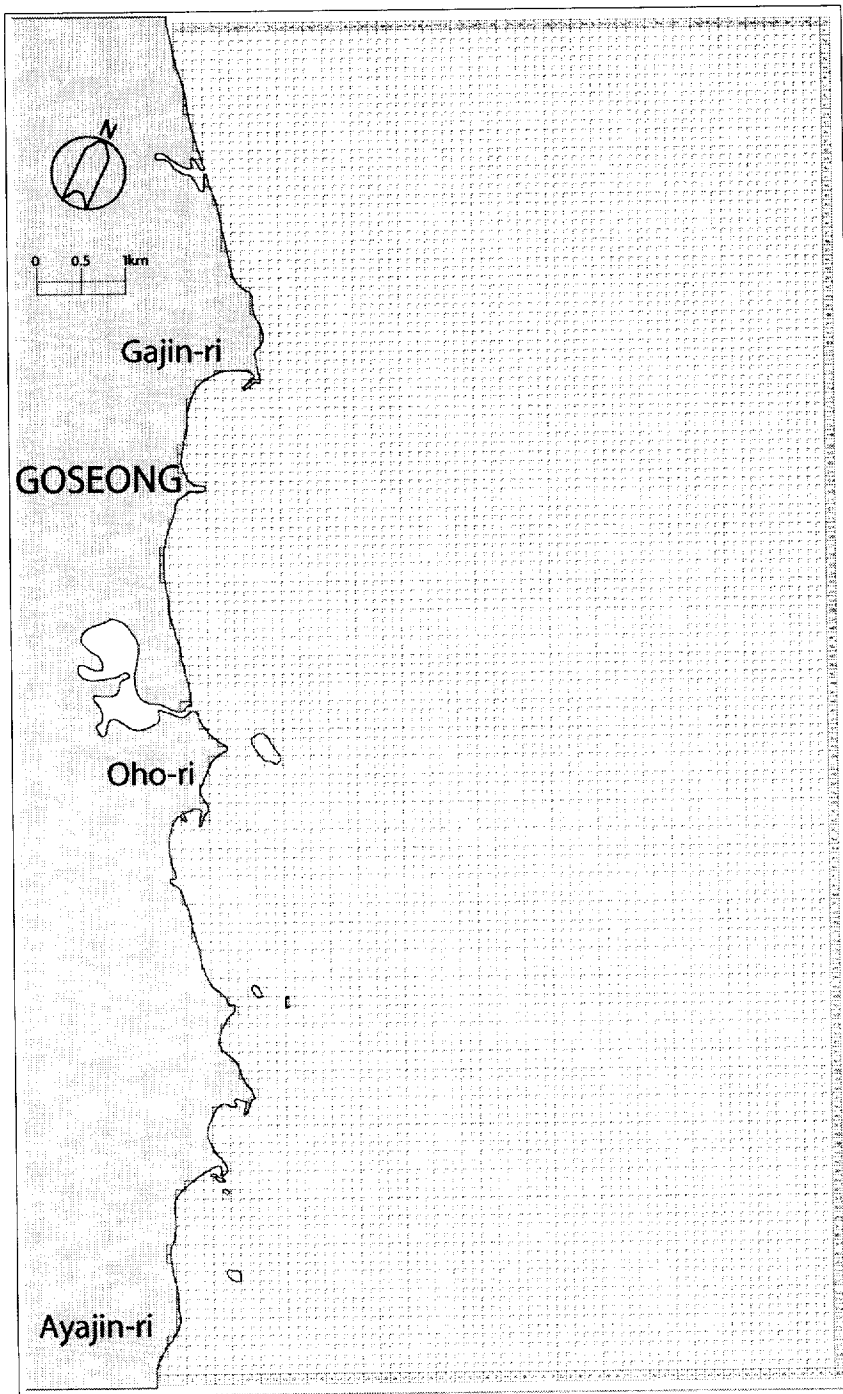


Fig. 2.26 Grid system for numerical simulation.

나) 계산조건

수치실험의 계산조건은 수심 및 해안지형, 조석경계조건, 외해수온염분 경계조건, Coriolis 계수, 시간차분 간격, 담수유입량, 기상자료 등이다.

1) 조석경계조건

계산대상영역의 개경계에서의 조위 및 조류에 관한 해양관측조사 및 연구성과가 극히 미비하여 조석의 조화상수에 관한 자료를 수집할 수 없었으므로 해수유동 수치실험시 입력조건으로 주어지는 조석경계조건은 거진항과 속초항의 두 검조소 조위관측자료와 해수유동모델의 계산대상내의 임의 정점과의 조위비교를 통해서 획득하였다. 구체적으로는 거진항과 속초항의 주요 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 조화상수 값을 사용해서 작성한 조위시계열과 계산영역내 임의정점의 조위변동 시계열을 일치시키는 과정을 시행착오법으로 수행하였으며, 조위시계열 비교과정에서 조위진폭차가 5%미만일 경우와 위상차가 10분 미만일 때를 일치하는 것으로 판단하였다.

한편, Fig. 1.1의 개경계 조석진동은 좌변의 경계격자 및 상부우단의 격자에 각 분조별 조화상수를 설정하고 식 (2.28)에 의해 강제조위를 부여하였다.

$$\zeta(t) = \sum_i f_i \zeta_i \cos \{ (V_0 + u) l_i + \omega_i t - k_i \} \quad (2.28)$$

여기서, 첨자 i 는 분조의 종류를 나타내며, $\zeta(t)$ 는 경계격자의 조위, f , $(V_0 + u)l$ 은 각각 천문인수, 천문상수, ζ 는 조위진폭, k 는 지각, ω 는 각속도, t 는 시간이다. 또한 상부의 다른 격자는 좌단과 우단의 조위를 선형보간하여 설정하였다.

한편, 3차원 해수유동 수치실험의 조석경계조건은 상술의 계산대상영역의 조석경계의 조위검증과정을 기초로하여 관측 정점에서의 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 진폭·위상과 각 경계조건에서 임의 진폭·위상을 입력

하여 계산되어진 관측 정점에서의 계산치 진폭·위상을 비교함으로써 조석경계조건을 시행착오법으로 구하였다. 이상으로부터 얻어진 각 개방경계지점에서의 조위경계조건은 Table 2.6에 나타내었으며, Fig. 2.27은 26일간의 외해경계에서의 조석경계조건 시계열을 나타낸다.

Table 2.6 Tidal boundary condition of tidal current model

	P ₁		P ₂		P ₃		P ₄	
	Amp. (m)	phase (°)	Amp. (m)	phase (°)	Amp. (m)	phase (°)	Amp. (m)	phase (°)
M ₂	0.0690	83.39	0.070	82.99	0.0690	88.81	0.0650	89.09
S ₂	0.0362	102.35	0.0342	102.40	0.0325	109.92	0.0180	109.90
K ₁	0.0496	354.82	0.0556	354.82	0.0470	12.35	0.0470	12.40
O ₁	0.0462	323.64	0.0458	323.64	0.0460	313.23	0.0460	313.00

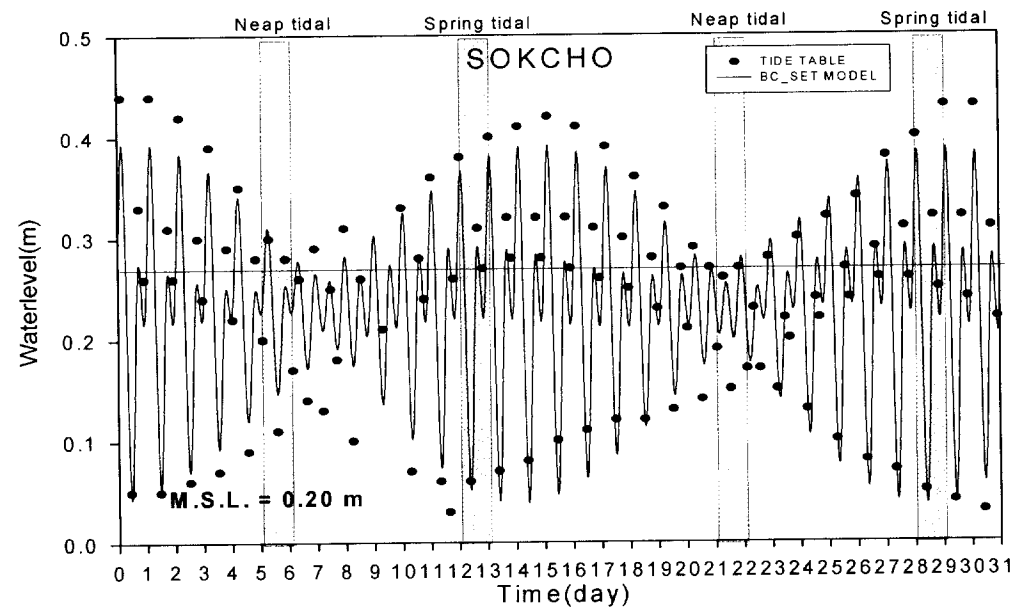


Fig. 2.27 Input time series of tidal open boundary condition
(Four largeness tide value).

2) 기상입력조건

계산에 이용한 기상자료는 2002년 기상청 일별기상자료를 바탕으로 기온, 강수량, 일사량, 증발량, 풍향·풍속, 습도, 운량 등 7개 기상요소에 대해 속초 및 강릉기상대에서 관측된 일평균 값을 1년간 일별 실시간으로 입력하였다.

3) 외해 수온 및 염분 경계조건

외해에서의 수온 및 염분 경계조건은 국립수산물과학원의 한국해양환경조사자료를 기초로 하여 계산대상해역과 가장 인접한 해양관측정점인 거진해역(N 38°24'33", E 128°31'13")과 속초해역(N 38°12'58", E 128°36'18")에서의 표·저층 수온 및 염분 관측자료(1997년부터 2002년까지 6년간)를 바탕으로 산정하였다(Fig. 2.28).

수온 및 염분의 표·저층의 경계조건은 계산시 일변화의 정현함수로 입력하였으며, 각 계산모형 경계에서의 입력조건은 6년간 수온 및 염분 연평균치에 일변화를 고려함으로써 나타내었다. 이상으로부터 얻어진 입력조건은 식 (2.29)~식 (2.30)과 같다. 또한 우측 외해경계조건은 기존 관측자료가 부족하여 상술한 거진과 속초 부근해역의 표·저층 수온·염분 경계조건을 선형보간하여 이용하였다.

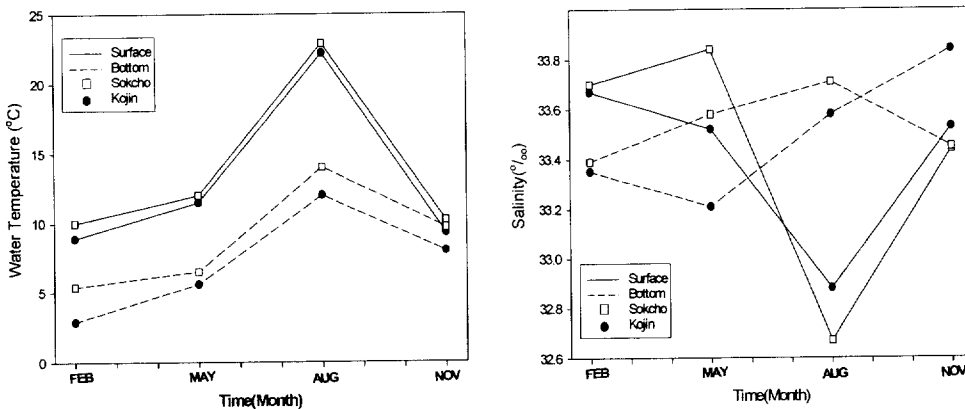


Fig. 2.28 Input condition of surface/bottom open boundary of water temperature and salinity (2002 year).

① 수온경계조건

$$T_{11} = 15.7 + 6.50 * \cos(\omega * (id + 159.8)) \quad (2.29)$$

$$T_{12} = 10.4 + 2.50 * \cos(\omega * (id + 159.8))$$

$$T_{21} = 16.2 + 6.50 * \cos(\omega * (id + 159.8))$$

$$T_{22} = 10.5 + 2.50 * \cos(\omega * (id + 159.8))$$

② 염분경계조건

$$A_{11} = 33.25 + 0.40 * \cos(\omega * (id - 10.0)) \quad (2.30)$$

$$A_{12} = 33.55 + 0.30 * \cos(\omega * (id + 95.9))$$

$$A_{21} = 33.25 + 0.56 * \cos(\omega * (id + 29.8))$$

$$A_{22} = 33.54 + 0.14 * \cos(\omega * (id + 90.5))$$

여기서, T_{11}, T_{12} 및 T_{21}, T_{22} 는 각각 거진해역 및 속초해역의 표층과 저층수온, A_{11}, A_{12} 및 A_{21}, A_{22} 는 각각 거진해역 및 속초해역의 표층과 저층염분, id 는 1월 1일을 1로 한 경과일수, ω 는 각속도이다.

4) 담수유입량 입력조건

Table 2.1의 연평균 담수유입량을 입력조건으로 사용하였다.

5) 기타 계산조건

해수유동모델에 설정하는 기타 계산조건은 Table 2.7과 같다.

Table 2.7 Computation conditions of tidal current model

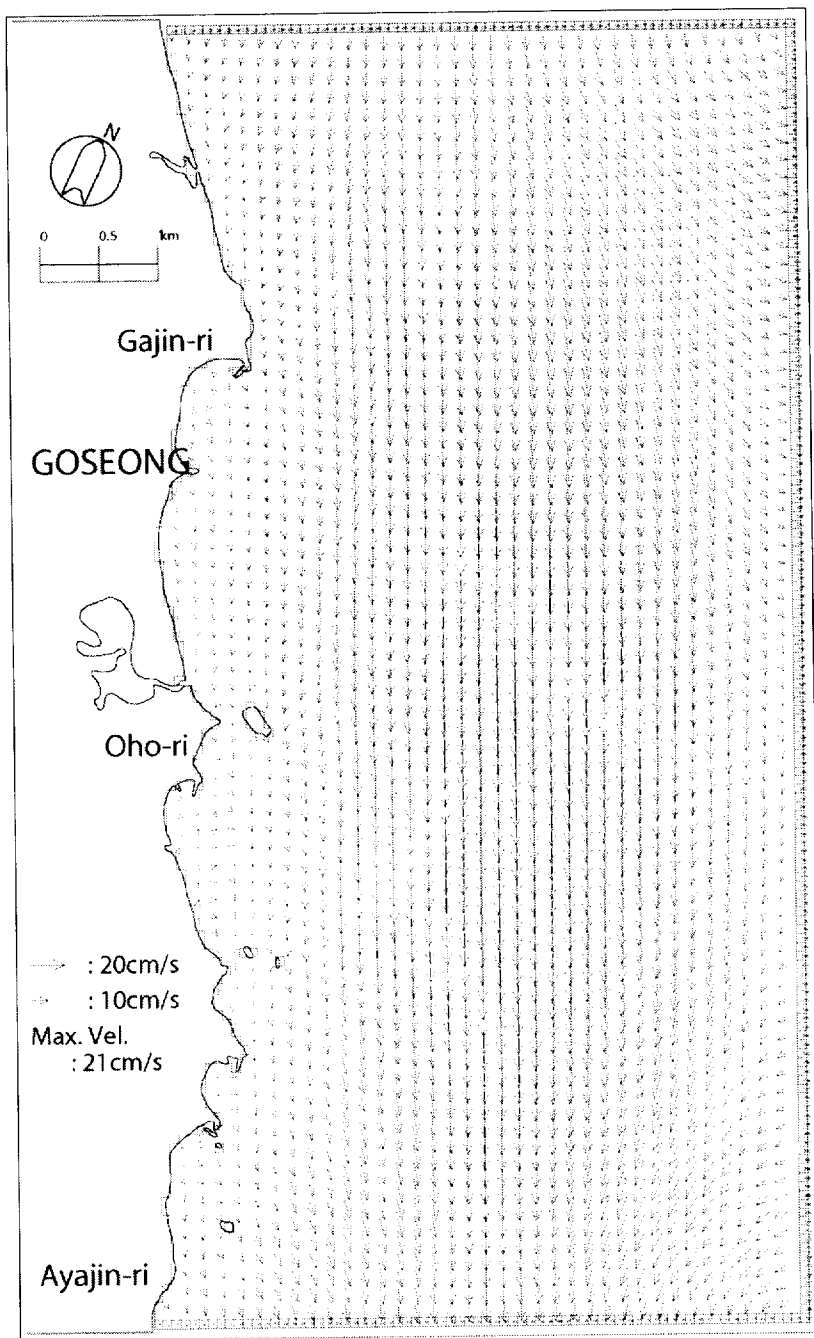
Division	Parameter	Input value	unit
Time interval	Δt	3	sec
Coriolis factor	f	7.819×10^{-5}	1/sec
Acceleration of gravity	g	9.8	m/sec ²
Eddy viscosity coef.	A_x, A_y	100	m/sec ²
Water surface friction coef.	γ_a^2	0.0026	—
Internal friction coef.	γ_i^2	0.0025	—
Bottom friction coef.	γ_b^2	$\gamma_b^2 = g/c^2$ c : Chezy coefficient	
Horizontal eddy diffusion coef.	K_x, K_y	$K_x = \alpha \Delta s \cdot u + \beta$ $K_y = \alpha \Delta s \cdot v + \beta$ Δs : mesh interval(m) u, v : current velocity of x,y-direction(m/sec) $\alpha=100, \beta=50$	
Vertical mixing coef.	K_z	$K_z = R_i \cdot K_{zo}$ R_i : Reynolds number $K_{zo}: 1.0 \times 10^{-3}$ (m/sec)	

(4) 실험결과 및 분석

가) 해수유동

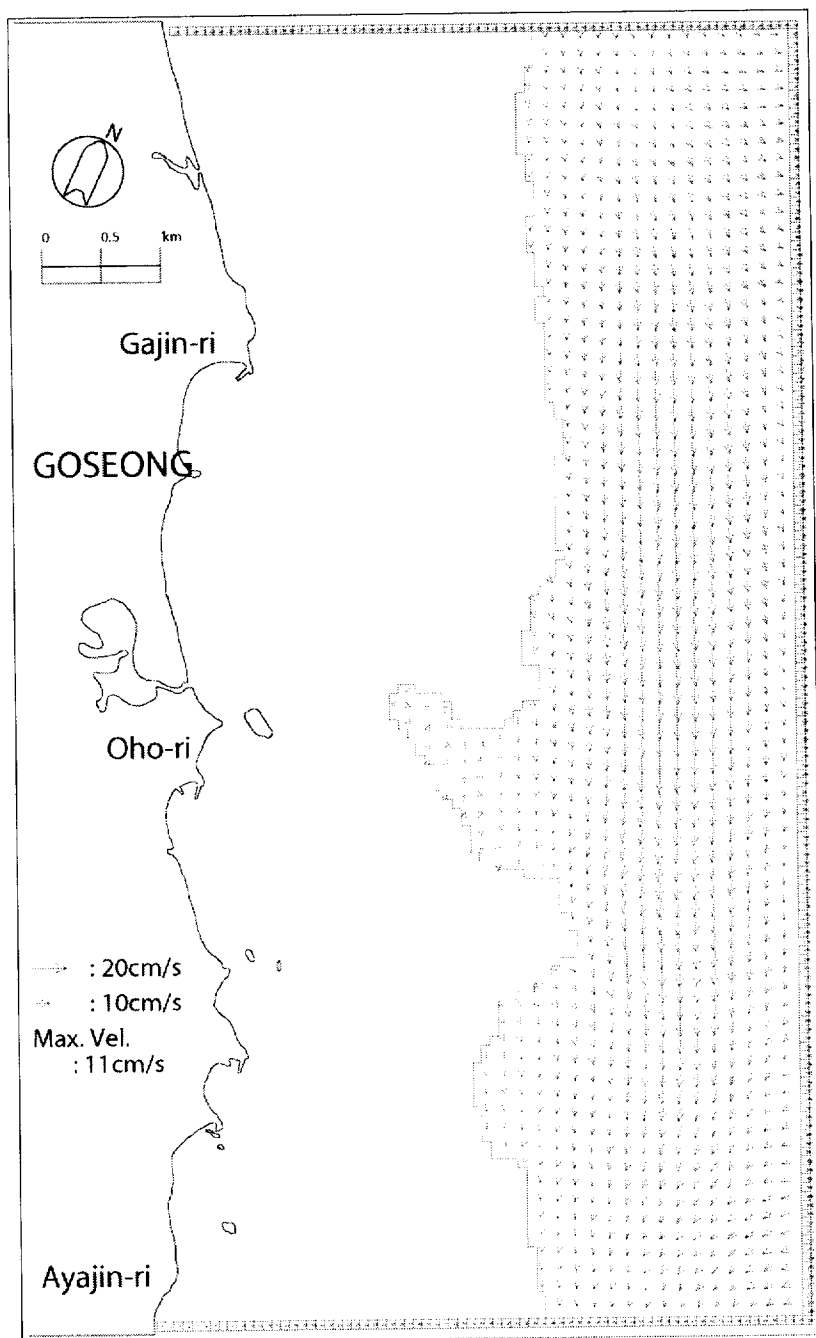
해수유동 수치실험결과 최강 창·낙조류시 표·저층 유속벡터도를 각각 Fig. 2.29~Fig. 2.30과 같이 나타내었다.

전반적으로 창조류시의 유속이 낙조류시에 비하여 다소 강하게 나타났으며, 창조류시의 흐름은 북쪽에서 남쪽방향으로 흐르며, 낙조류시는 이와 반대로 남쪽에서 북쪽방향으로 흐르는 왕복성 조류의 형태를 보였다. 최강 창·낙조류시 최대 유속의 크기는 각각 약 21 cm/sec와 약 17 cm/sec로 나타났다. 또한, 층별의 유속변화는 표층에서 유속이 빠르며 수심이 깊어질수록 느려지는 양상을 보였으며, 저층에서 최강 창·낙조류시 흐름방향은 각각 연안으로부터 외해로 유입·유출되는 경향을 나타내었다. 이로부터 부유사(SS)의 연직농도분포(Fig 2.24)에서 나타나는 저층 고농도 SS는 외해로부터 유입된 것으로 판단할 수 있다.



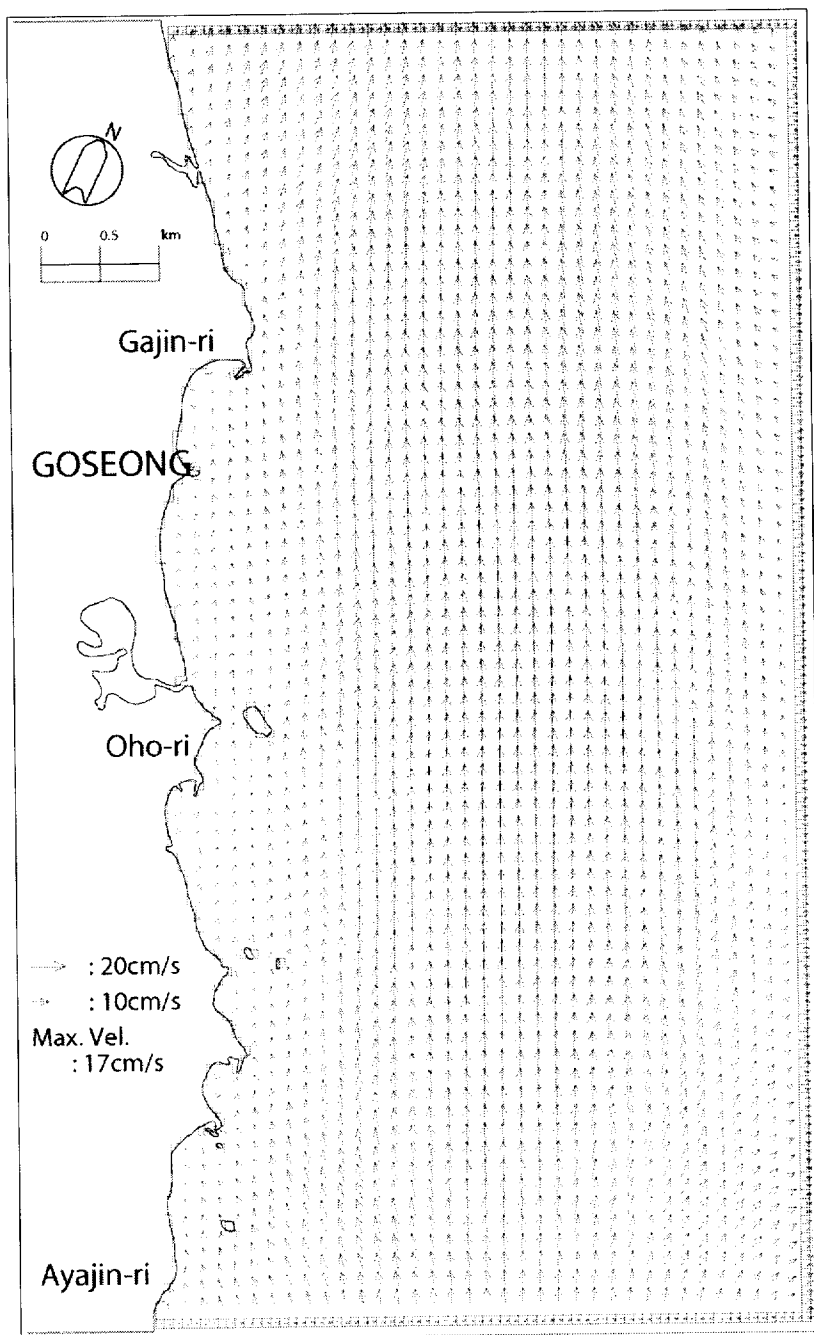
(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.29 Computed tidal current at 1st layer(a) and 15th layer(b)
on maximum flood flow (with non-discharge of DSW).



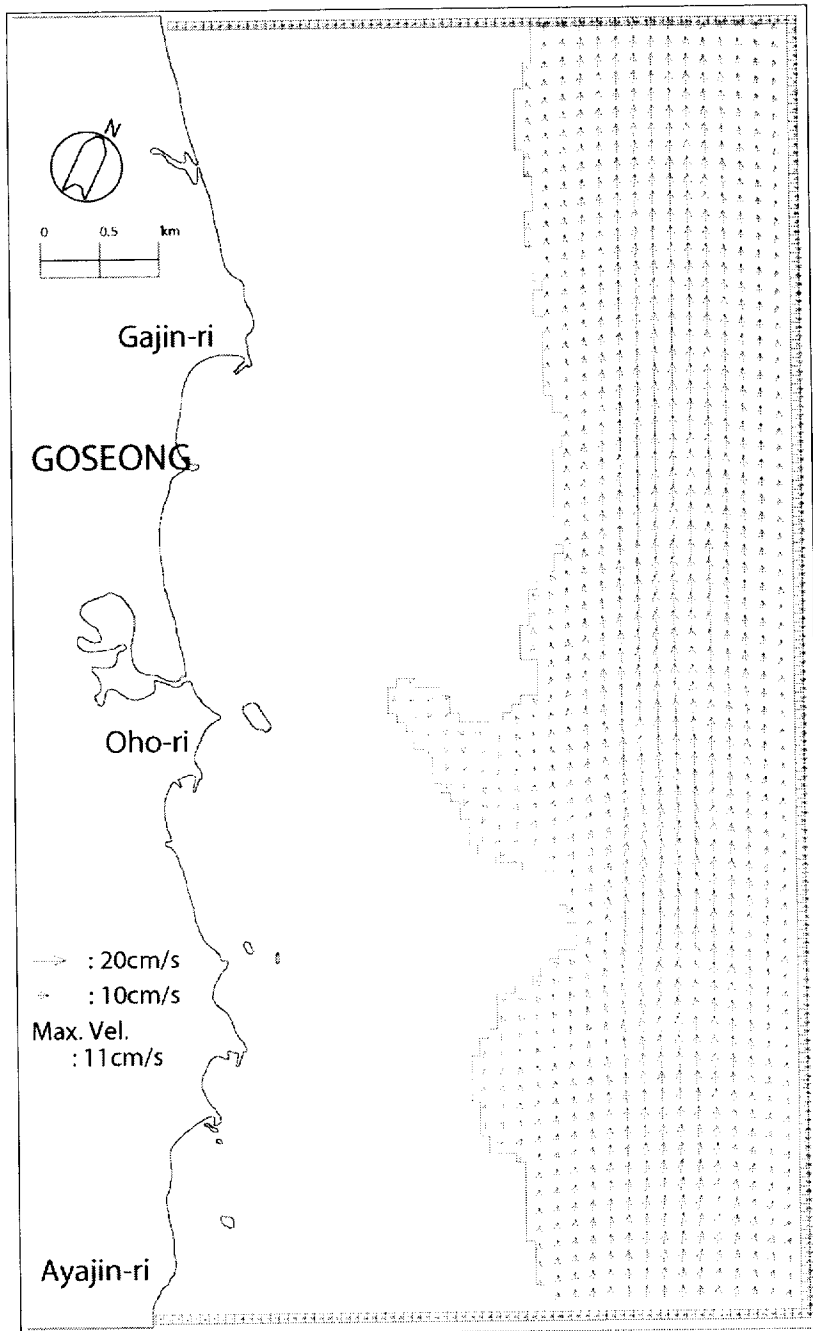
(b) 15th layer(105~115m)

Fig. 2.29 (Continue).



(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.30 Computed tidal current at 1st layer(a) and 15th layer(b)
on maximum ebb flow (with non-discharge of DSW).



(b) 15th layer(105~115m)

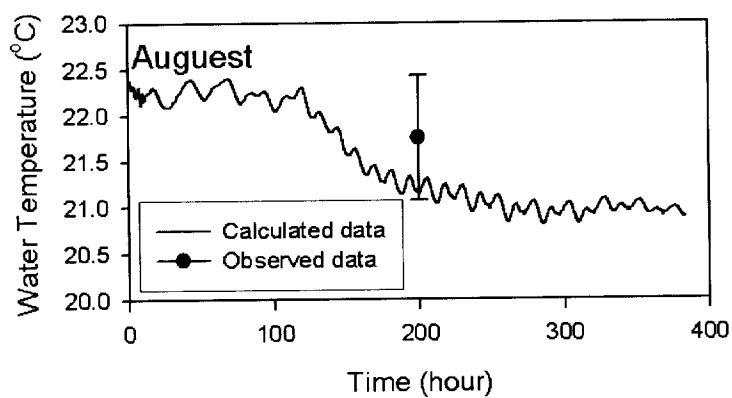
Fig. 2.30 (Continue).

나) 수온 · 염분

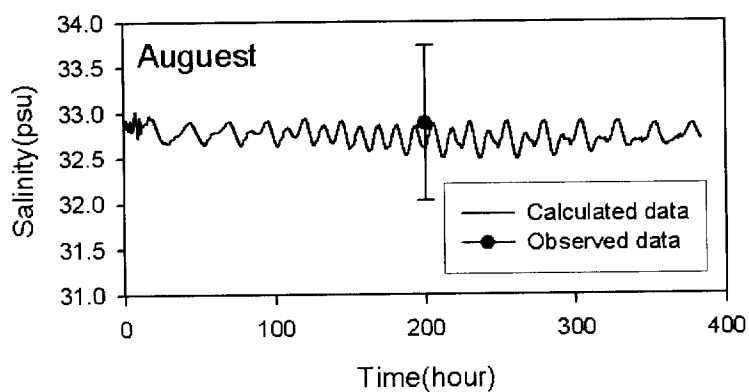
Fig. 2.31은 심층수 개발해역에서 하계에 관측된 표층 수온 및 염분의 평균치와 계산결과의 평균치를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 대상해역에서의 관측 수온은 대체로 21.0~22.5 °C의 범위 내에서 변화하며, 관측 염분은 32.0~33.8 psu의 분포 내에서 변화하고 있는데 비교적 계산결과와 유사하게 변화하였다. 따라서 본 수치모형은 연구대상해역의 수온 · 염분의 재현성이 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 2.32~Fig. 2.33은 최강 창 · 낙조류시 표 · 저층 수온의 공간분포를 등수온선 0.1 °C 간격으로 수온분포도를 나타낸 것이다. 전반적인 수온의 공간분포특성을 살펴보면, 차가운 담수의 유입으로 인해 연안의 수온이 외해에 비해 낮게 나타났으며, 담수유입점 주변은 인근해역에 비하여 수온이 낮게 나타났다. 위치별로는 남측해역이 북측해역에 비해 수온이 높게 나타났다. 그리고 창 · 낙조류시의 수온 공간분포는 창조류시 남향하는 차가운 해수의 영향으로 등수온선이 남쪽으로 치우쳐 나타났고, 낙조류시 북향하는 따뜻한 해수의 영향으로 등수온선이 북쪽으로 치우쳐 나타났다.

Fig. 2.39~Fig. 2.40은 최강 창 · 낙조류시 표 · 저층 염분의 공간분포를 등염분선 0.1 psu 간격으로 염분분포도를 나타낸 것이다. 전반적인 염분 공간분포특성을 살펴보면, 담수의 유입으로 인해 연안의 염분이 외해에 비해 낮게 나타났으며, 담수유입점 주변은 인근해역에 비하여 염분이 낮게 나타났는데, 특히 담수유입량이 많은 남천(①)과 문암천(⑤)에서는 염분이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 위치별로는 남측해역이 북측해역에 비해 염분이 높게 나타났고 창 · 낙조류시의 공간분포는 수온분포와 유사한 경향을 보였다.

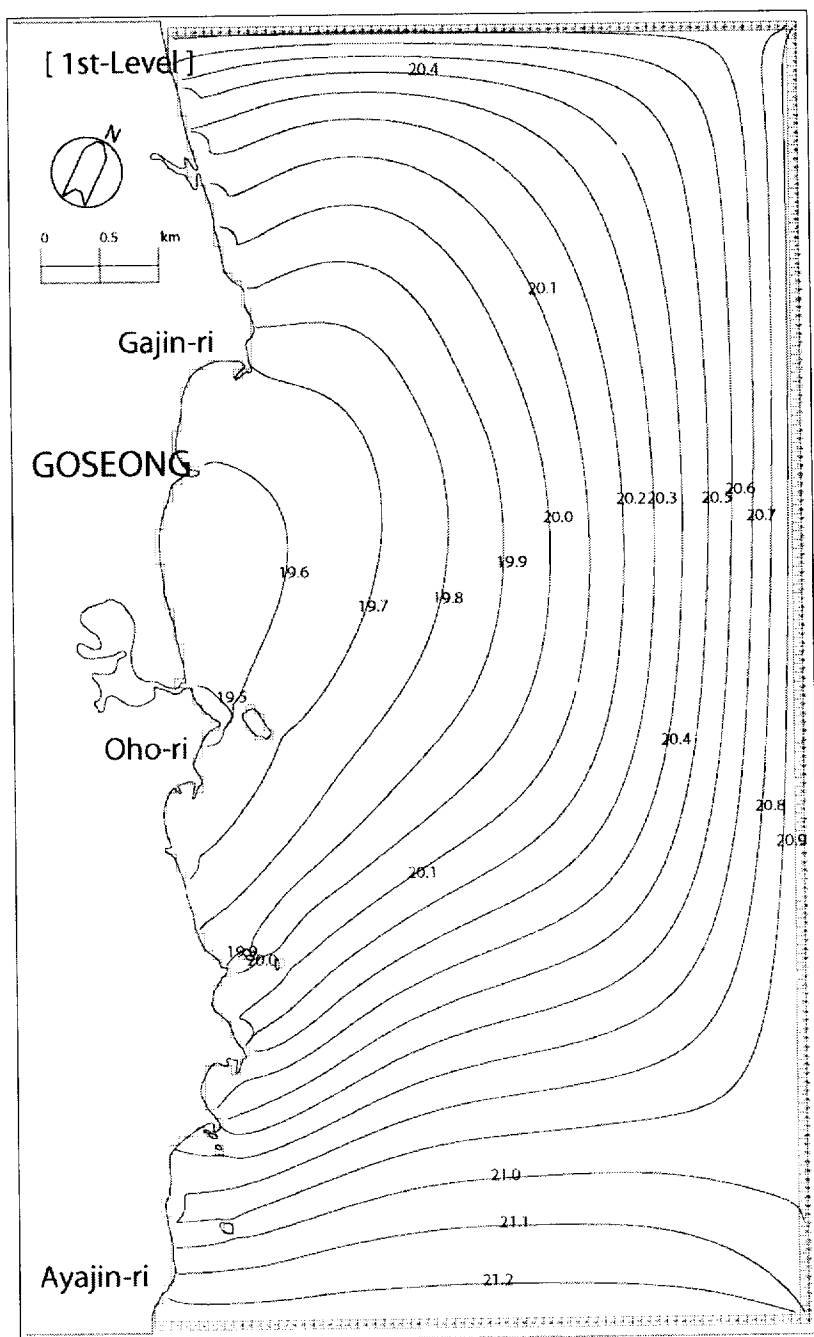


(a) water temperature



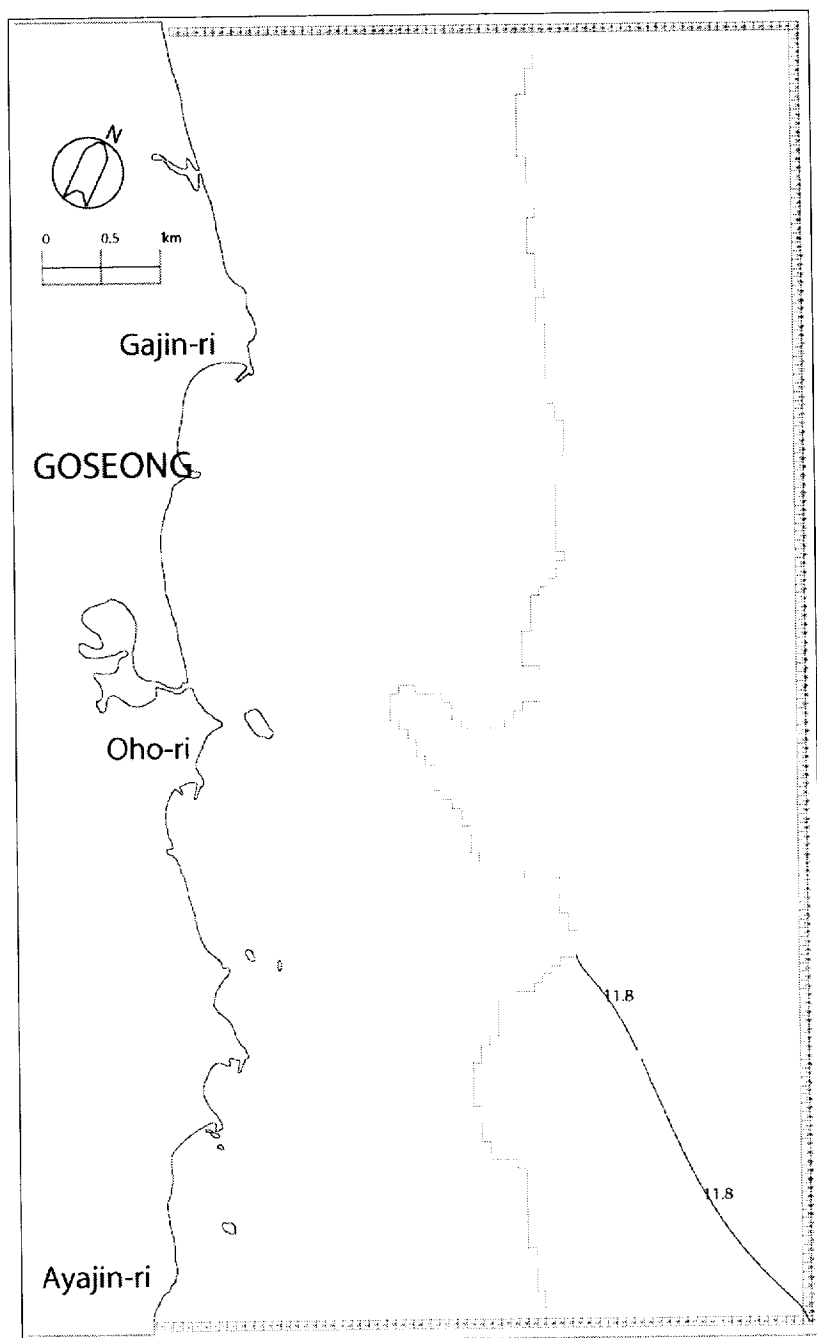
(b) salinity

Fig. 2.31 Verification result of water temperature(a) and salinity(b).



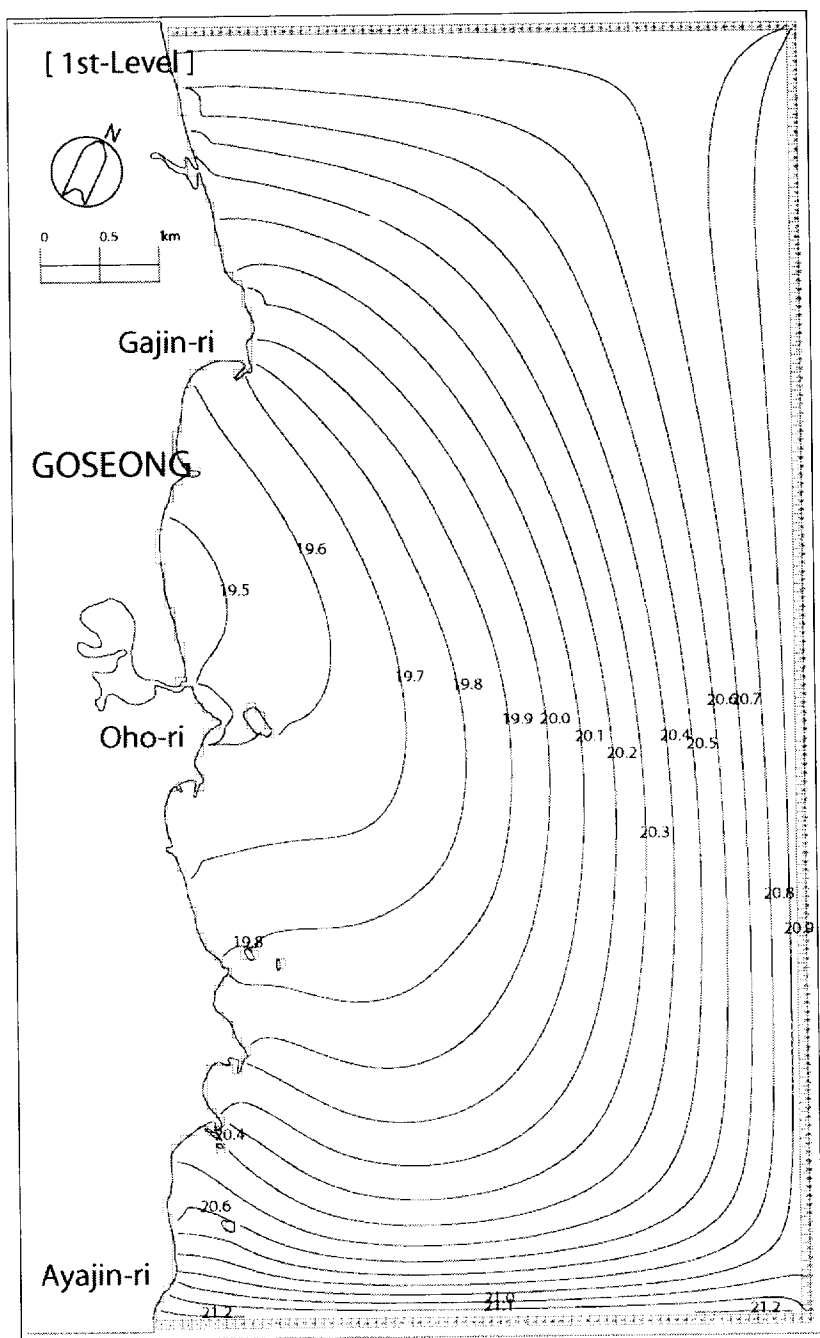
(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.32 Simulated result of Water Temp. at 1st layer(a) and 15th layer(b) on maximum flood flow (with non-discharge Cond. of DSW).



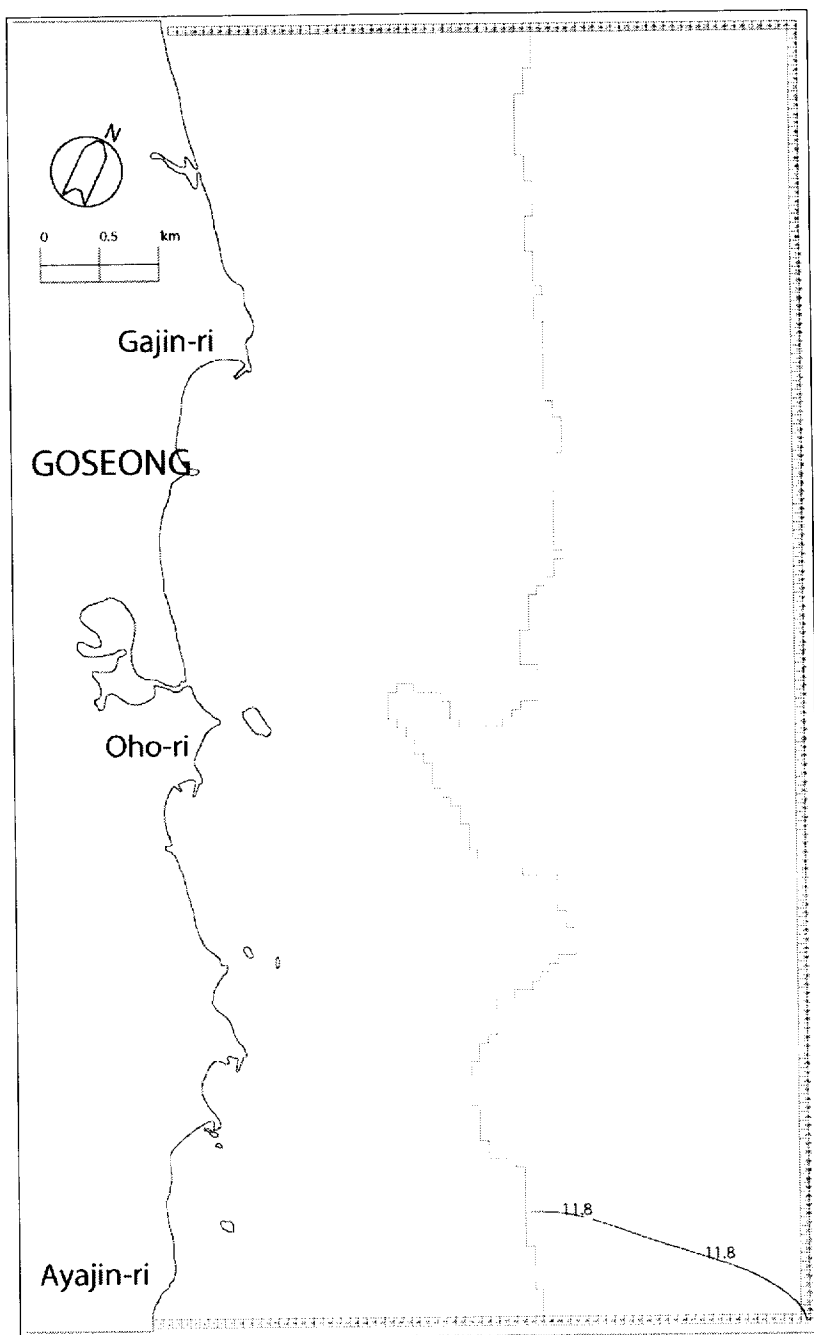
(b) 15th layer(105~115m)

Fig. 2.32 (Continue).



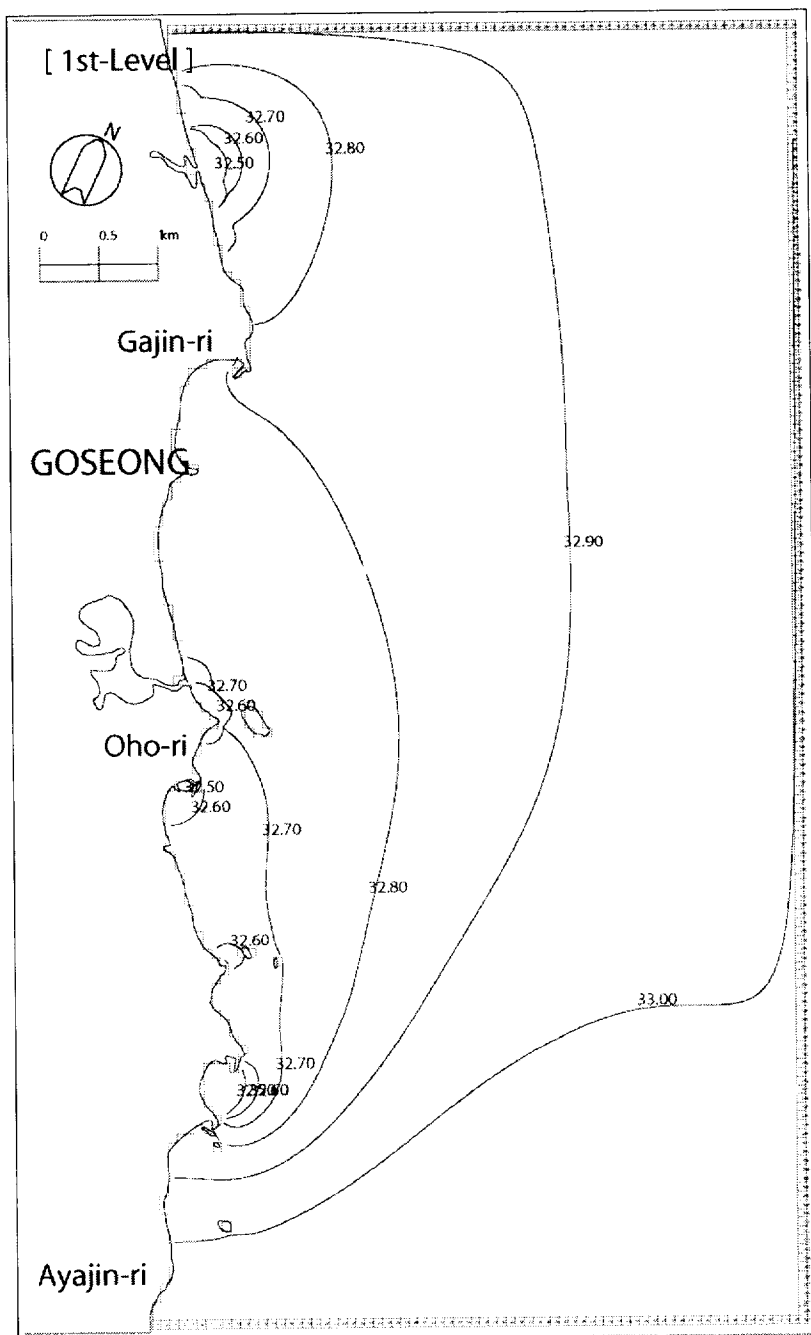
(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.33 Simulated result of Water Temp. at 1st layer(a) and 15th layer(b)
on maximum ebb flow (with non-discharge Cond. of DSW).



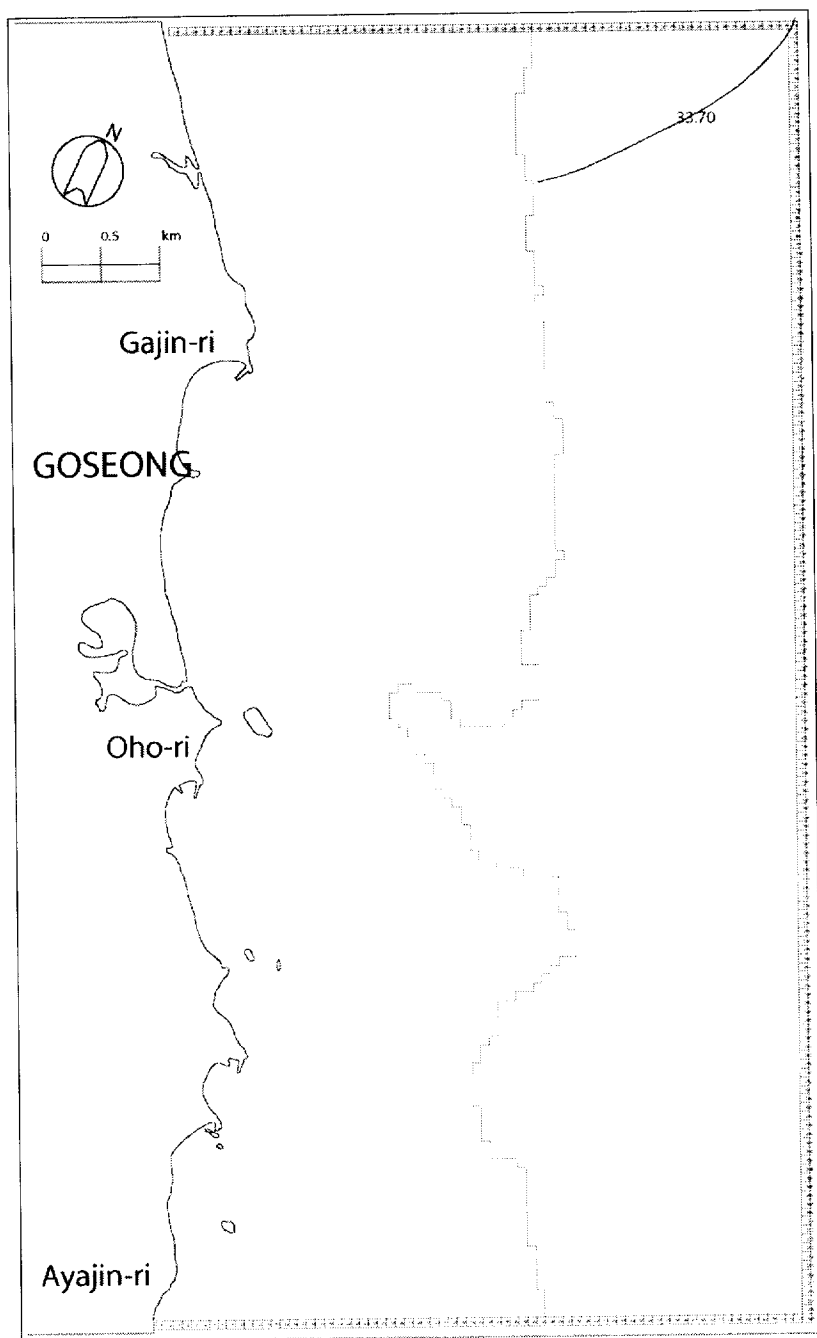
(b) 15th layer(105~115m)

Fig. 2.33 (Continue).



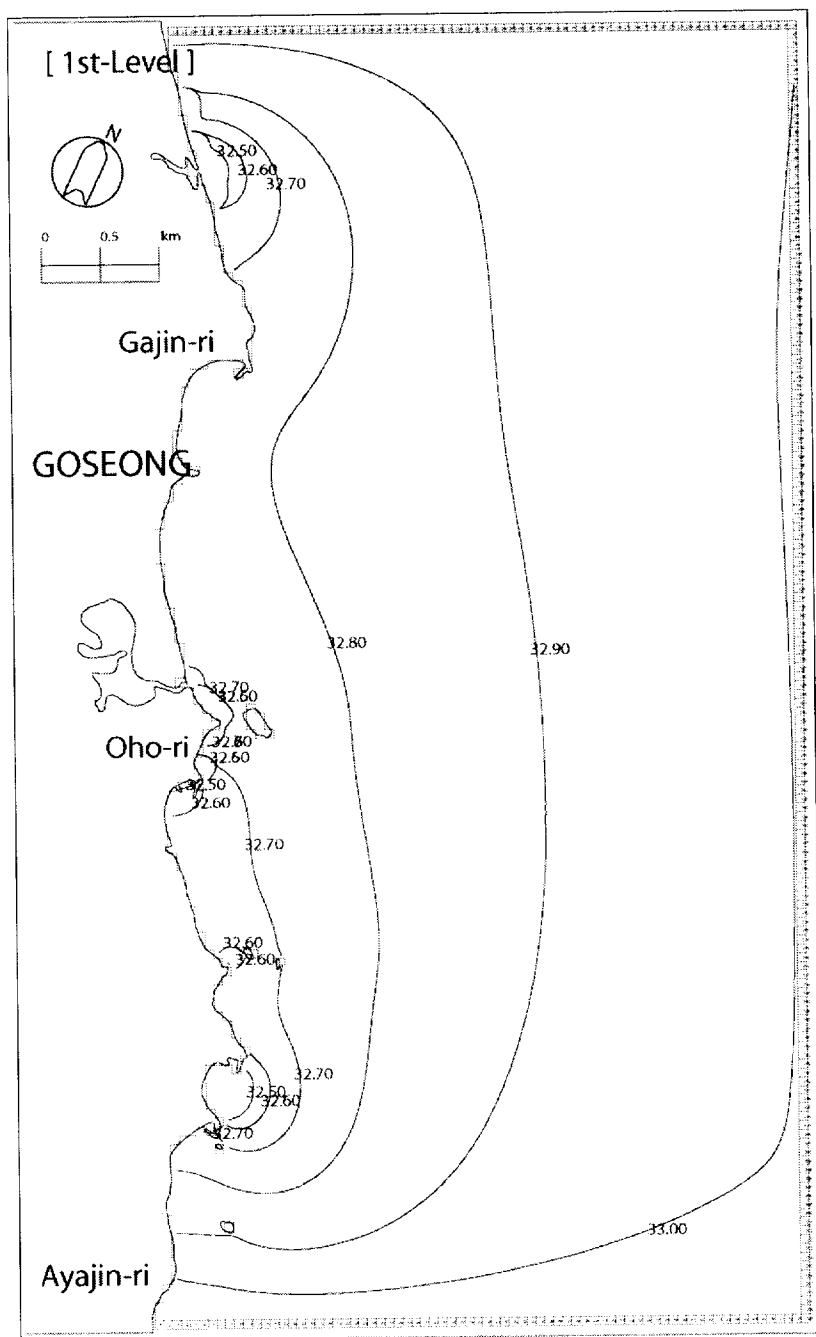
(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.34 Simulated result of Salinity at 1st layer(a) and 15th layer(b)
on maximum flood flow (with non-discharge Cond. of DSW).



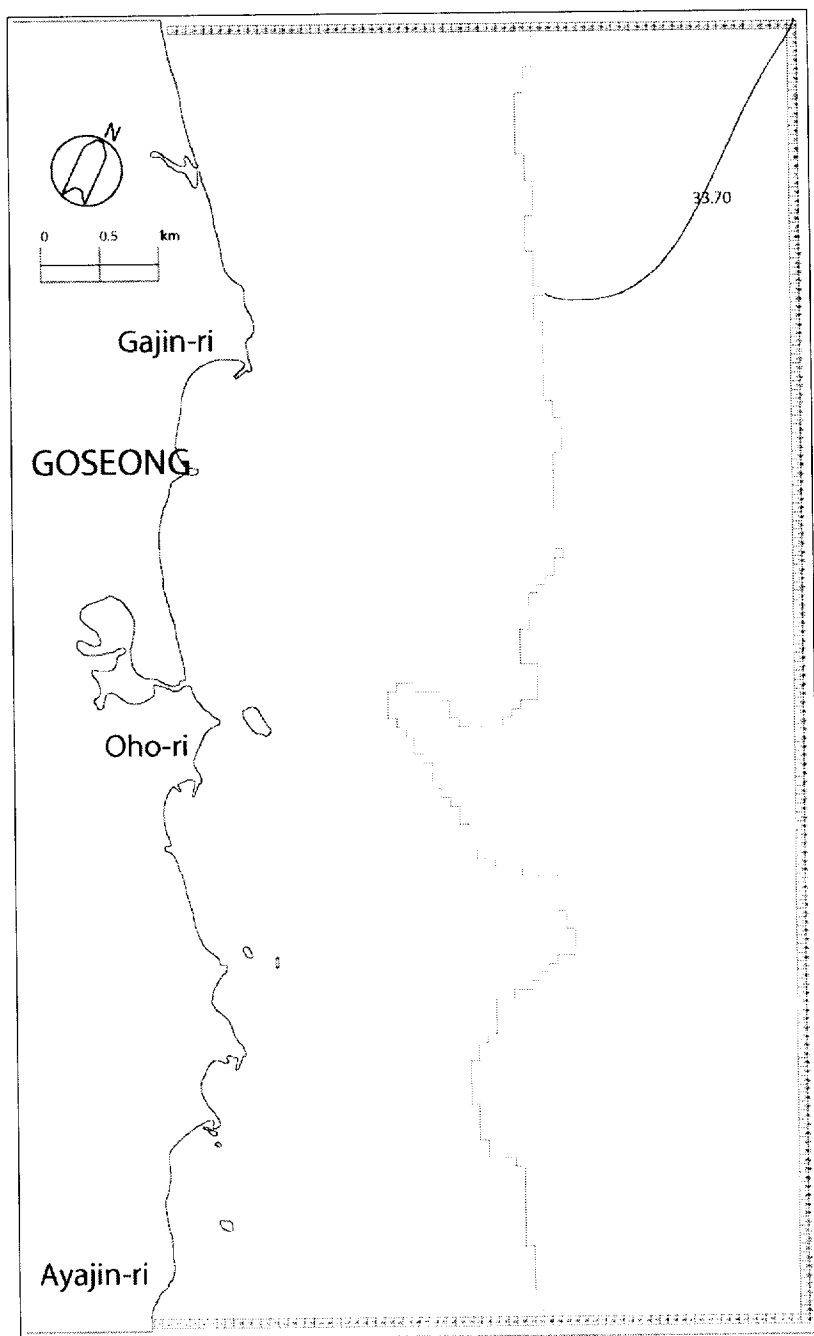
(b) 15th layer(105~115m)

Fig. 2.34 (Continue).



(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.35 Simulated result of Salinity at 1st layer(a) and 15th layer(b)
on maximum ebb flow (with non-discharge Cond. of DSW).



(b) 15th layer(105~115m)

Fig. 2.35 (Continue).

2.3 수질환경특성

2.3.1 부유사(SS) 확산 수치모형실험

(1) 실험개요

연구대상해역의 해수유동특성에 따른 담수유입 및 부유사(SS)의 확산 양상을 수치모형실험으로 예측하고, 확산된 부유사(SS)로 인한 심층수 개발해역의 청정성 저하 가능성을 평가해 보았다. 수치모형은 보존성 물질을 대상으로 하는 확산모형을 사용하였으며, 예측대상 확산양상은 부유사 최대확산 발생시의 상황을 실험상황으로 설정하여 실험을 수행하였다.

(2) 기본방정식

부유사(SS)확산 수치모형의 임의 k층에서의 기본방정식은 해수유동 수치모형에서 수온·염분 계산에 이용하는 이류확산방정식에 부유사(SS) 침강항을 고려한 식 (3.31)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_k h_k}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (M_{xk} C_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{yk} C_k) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} [K_{xk} h_k \frac{\partial C_k}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_{yk} h_k \frac{\partial C_k}{\partial y}] \\ & + K_z (C_{k-1} - C_k) - K_z (C_k - C_{k+1}) \\ & - w_{k-1/2} C_k^* + w_{k+1/2} C_k^* - \frac{w_{s1}}{h_1} C_k \end{aligned} \quad (3.31)$$

여기서, t 는 시간(sec), h_k 는 층두께(m), C_k 는 부유사(SS)농도(kgm^{-3}), M_{xk} 와 M_{yk} 는 x, y 방향의 선유량(m^2s^{-1}), K_x 와 K_y 는 부유사(SS)농도에 관한 x, y 방향의 와동확산계수(m^2s^{-1}), K_z 는 부유사(SS)농도에 관한 연직혼합계수(ms^{-1}), w_k 는 z방향의 평균유속(m/sec), w_{s1} 은 침강속도(ms^{-1})이다.

일반적으로 부유사(SS)의 계산에서 토사의 입경을 2종류(점토와 실트)

또는 3종류(점토와 실트를 2종류로 분할)로 구분하여 각각의 농도를 계산한 후 이들을 합계해서 부유사(SS)의 농도로 한다. 이는 입경에 의해 부유사(SS)의 침강속도가 다르기 때문이며, 침강속도는 Stokes식에 의해 산출하여 설정하며, 부유사(SS) 부하량에 대해서는 하천으로부터 유입하는 경우로 설정하여 입력한다.

(3) 모형의 구축 및 계산조건

가) 모형의 계산영역, 격자망, 수심

부유사(SS) 확산모형의 계산영역, 격자망, 수심은 전술한 해수유동실험의 실험모형 조건과 동일하게 구성하였다.

나) 유동조건

연구대상해역의 대표적 유동장으로 판단되는 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 수위 및 유속장을 재현하였는 바, 이는 전술한 해수유동실험의 실험 결과를 사용하였다.

다) 담수유입량 및 부유사(SS) 유입부하량

부유사(SS) 확산 수치모형실험의 입력조건인 담수유입량은 전술한 해수유동모형의 담수유입량 입력조건과 동일하게 설정하였으며, 부유사(SS) 유입부하량은 Table 2.2와 Table 2.3에 나타난 바와 같이 연평균 및 태풍 “루사”시 유입점별 부유사(SS) 유입부하량 산정결과를 각각 평수시(CASE I)와 홍수시(CASE II)의 입력조건으로 설정하여 계산하였다.

라) 초기 및 경계조건

실험시 초기농도는 전영역에서 0(zero)으로 하고, 경계에서는 폐경계의 경우 경계를 통한 물질수지가 없으며 개경계의 경우 창조시 유입물질은 0(zero), 낙조시에는 모형의 내부에서 계산된 농도가 경계 밖으로 자연스럽게 유출되도록 조건을 설정하였다.

마) 부유사(SS) 발생원 처리방법 및 부하지점

육역으로부터 유입하는 부유사(SS) 유입부하량은 강우후 일정 유달과정을 거쳐 연구대상해역으로 유입하는 시간동안에 발생되고 강우후 청천시는 발생이 없는 단속적(순간방류)인 발생원으로 처리해야 함이 타당하

다. 그러나 실제 단속적인 발생원을 주기적 흐름인 조류장에서 처리할 시 최초 부하시점을 어떠한 조석조건(조석위상)과 일치시켜야 할 것인가를 결정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 실제 현장에서의 하천과 조석의 위상차 등과 같은 문제점 때문에 수치계산과정에서 매 적분시간마다 일정 부하량을 입력하는 연속적인 발생원으로 간주하였다. 한편, 실험의 부하시점은 담수유입점에 해당하는 격자점의 중앙부로 설정하였다.

마) 총 계산시간 및 결과취득

본 연구에서 부유사(SS) 확산 수치실험의 총 계산시간은 1조석 주기 단위의 농도변화가 거의 나타나지 않는 준정상상태가 되는 시점으로 설정하였으며, 총 16일 동안 계산을 수행하였다. 실험결과는 매 계산시 각 CASE별 대·소조기시 당 해역에서의 부유사(SS) 계산농도를 취득하였다. 획득되어진 계산결과를 바탕으로 수치실험 CASE에 따라 대상해역에서 발생할 수 있는 부유사(SS)의 최대확산범위 분포도를 작성하여 제시하였다.

(4) 실험결과 및 분석

심층수 개발해역의 하천유입점에서 해역으로 유입되는 부유사(SS)로 인해 인근해역의 청정성에 영향을 미치는 부유사(SS)의 확산예측결과를 CASE별로 최대확산범위를 나타내면 Fig. 2.36~Fig. 2.37 및 Table 2.8과 같다. 부유사(SS) 등농도선은 1.0, 2.0, 3.0 ppm의 총 3개의 부유사(SS) 확산농도 등치선값을 적용하여 도시하였으며, 각 수치실험 CASE별로 부유사의 최대확산범위를 살펴보았다.

심층수 개발해역에서 부유사(SS) 최대확산범위의 공간분포를 살펴보면, 오토리 전면해역을 중심으로 북측에 비하여 남측이 넓게 나타났는데 이는 담수유입점 수가 북측이 1개, 남측이 4개로 남측으로 유입하는 부유사(SS) 유입부하량이 비교적 많고, 창조류시 유속이 낙조류시 유속에 비하여 다소 빠르기 때문에 확산범위가 전반적으로 남측으로 넓게 확산되는 것으로 판단된다.

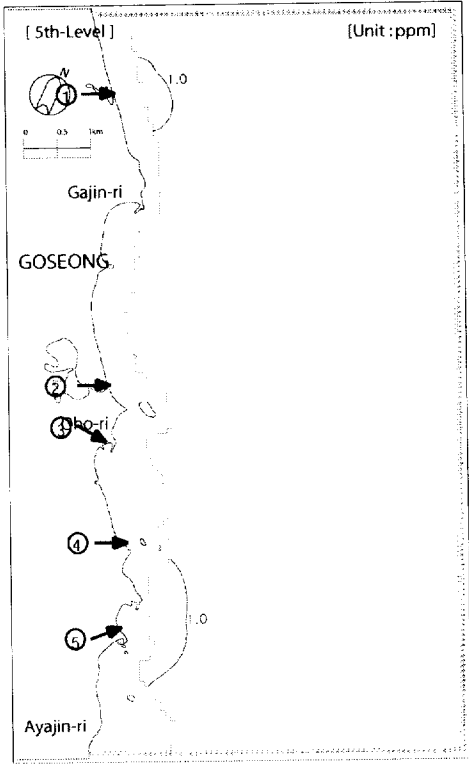
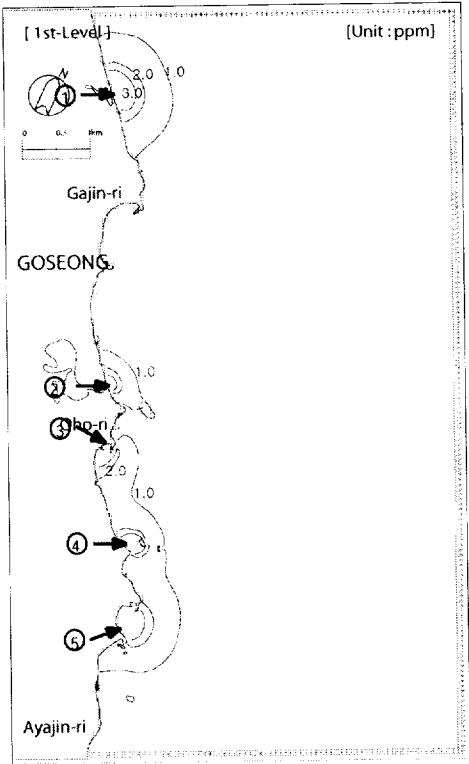
부유사(SS)의 해양환경에 미치는 영향기준농도를 1.0 ppm으로 가정하였을 때 표층(수심 0~3m)의 부유사 확산 수평분포를 살펴보면, 평수시(CASE I)에 동서방향 약 0.91~3.52 km, 남북방향 약 0.66~1.07 km로 나타났으며, 확산면적은 약 0.36~2.25 km²로 산정되었다(Fig. 3.1). 그리고 홍수시(CASE II)에는 전반적으로 동서방향 약 1.34~1.82 km, 남북방향 약 2.71~6.28 km로 나타났으며, 확산면적은 약 1.39~3.05 km²로 산정되었다(Fig. 3.2).

한편, 부유사 확산 연직분포를 살펴보면 전반적으로 저층으로 갈수록 부유사 농도가 낮아지고 확산범위가 감소하는 것을 알 수 있다. 평수시(CASE I)에는 수심 약 19 m까지, 홍수시(CASE II)는 수심 약 55 m까지 부유사 확산 영향범위가 나타났다. 특히, 홍수시의 경우를 현장조사에 의한 부유사 연직농도분포 결과(Fig. 2.27)와 비교해보면, 현장조사 결과에서와 유사하게 수심 55 m이하로 부유사가 침강하지 않음을 알 수 있는데, 이는 부유사가 밀도경계면 이하로는 침강·확산되지 않음을 알 수 있고 이로 인해 SS 저농도역이 밀도경계면과 유사하게 존재한다고 판단된다.

이상의 결과를 바탕으로 심층수 개발해역의 육역으로부터의 부유사 유입에 따른 해수수괴 청정성을 평가해 보았다. 우리나라 기상 관측 이래 최대 1일 강수량을 기록한 태풍 “루사”시의 조건을 홍수시로 하여 부유사 확산 수치모형실험을 실시한 결과, 심층수 취수지역이 해안선으로부터 3 km이상 떨어져 있는 반면, 부유사 최대확산범위가 해안선으로부터 약 2 km까지이며 연직으로는 밀도경계면 이하로 침강되지 않는 것으로 나타나 심층수 개발해역은 육역으로부터 유입되는 부유사(SS)의 확산으로 인한 청정성 저하 가능성은 없을 것으로 판단된다.

Table 2.8 Estimated result of SS maximum diffusion area at each case

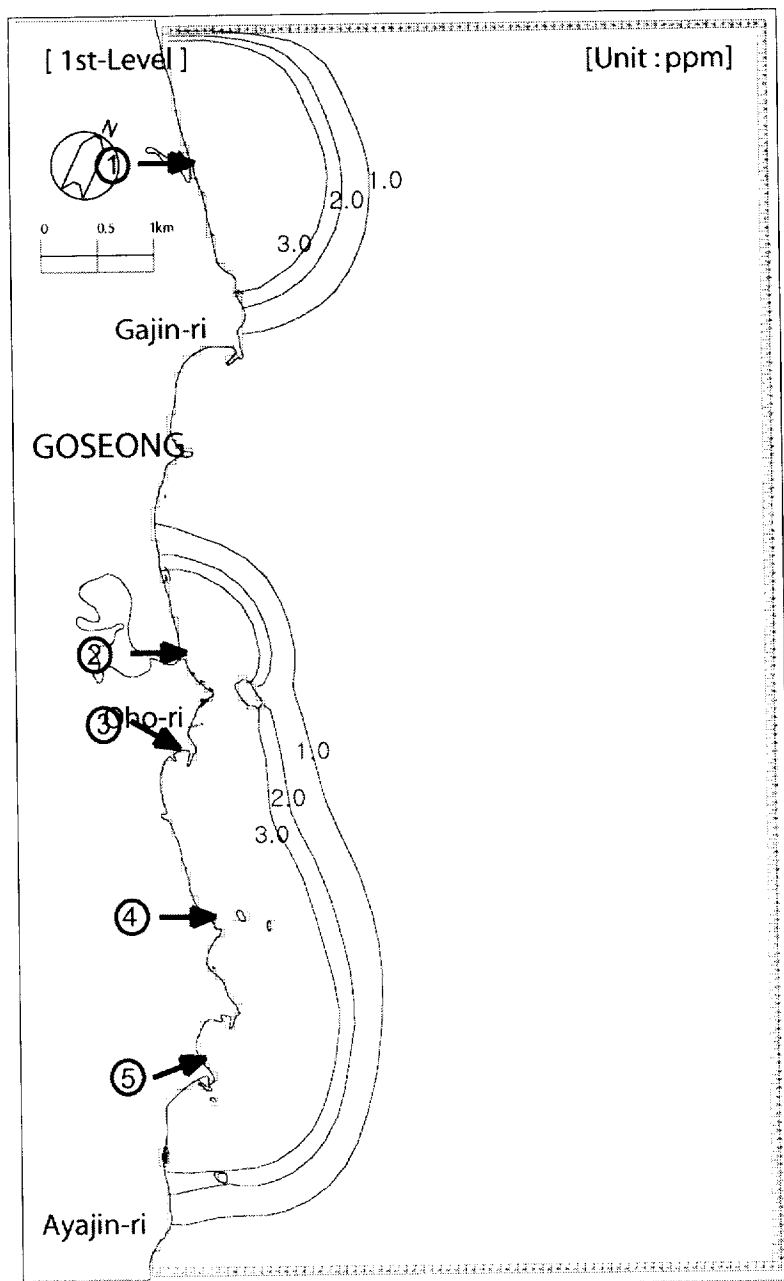
	Depth (m)	SS Con. (ppm)	SS maximum diffusion area		
			East & West distance(km)	South & North distance(km)	Area(km ²)
CASE 1	0~3	SS ≥ 1.0	0.66~1.07	0.91~3.52	0.36~2.25
	14~19	SS ≥ 1.0	0.53~0.66	1.12~1.87	0.34~0.83
CASE 2	0~3	3.0>SS ≥ 1.0	1.34~1.82	2.71~6.28	1.39~3.05
		SS ≥ 3.0	1.42~1.55	2.26~5.48	2.06~4.88
	14~19	3.0>SS ≥ 0.1	1.55~1.88	3.06~6.50	2.18~5.02
		SS ≥ 3.0	1.25~1.30	2.23~5.40	1.83~3.26
	45~55	SS ≥ 1.0	0.18~0.59	1.23~3.05	0.17~1.39



(a) 1st layer(0~3m)

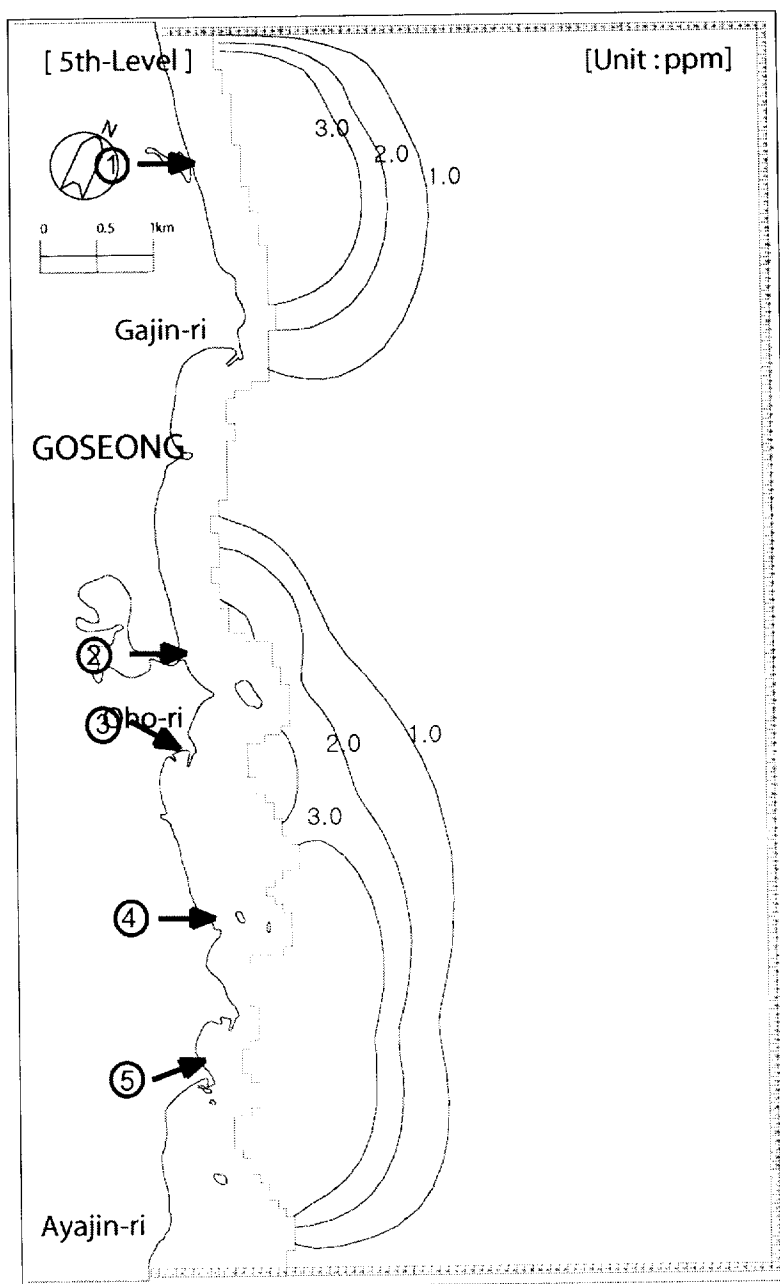
(b) 5th layer(14~19m)

Fig. 2.36 Simulated max. diffusion distribution of SS concentration at 1st layer(a) and 5th layer(b) (with CASE I).



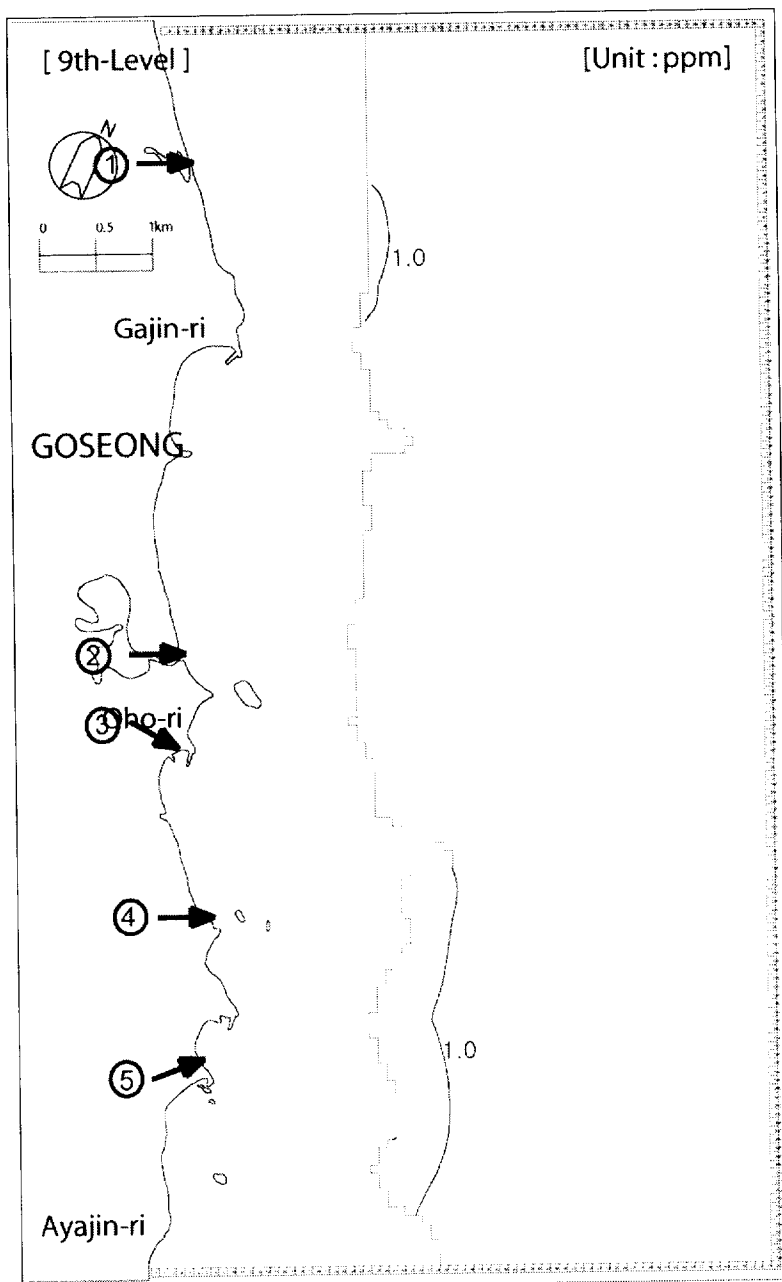
(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 2.37 Simulated max. diffusion distribution of SS concentration at 1st layer(a), 5th layer(b) and 9th layer(c) (with CASEII).



(b) 5th layer(14~19m)

Fig. 2.37 (Continue).



(c) 9th layer(45~55m)

Fig. 2.37 (Continue).

2.3.2 물질순환예측 생태계모델링

(1) 생태계모델의 개요

가) 수치모형의 개념

본 연구에서 이용되는 해양생태계예측 수치모형(3차원 수질·생태계모델)은 수층과 저질간의 영양염 순환과정을 고려할 수 있는 모델로서(이, 2001), 연안해역의 해양생태계 변화, 부영양화 현상 등과 관련한 비보존성 물질(영양염류 등)의 수평·수직분포 및 물질순환과정을 실시간으로 재현/예측하는 수치모형으로 연안개발에 따른 해역의 수질관리 방안을 구축하기 위해 적용되었다. 수치모형의 구조는 대상해역내의 해수유동 특성을 수치실험하기 위한 3차원 해수유동 수치모형과 연결되어 유동계산에서 얻어진 시간간격별의 유속 및 물리적 변수를 가지고 생태계구성요소의 농도 분포를 예측하는 구조로 구성된다.

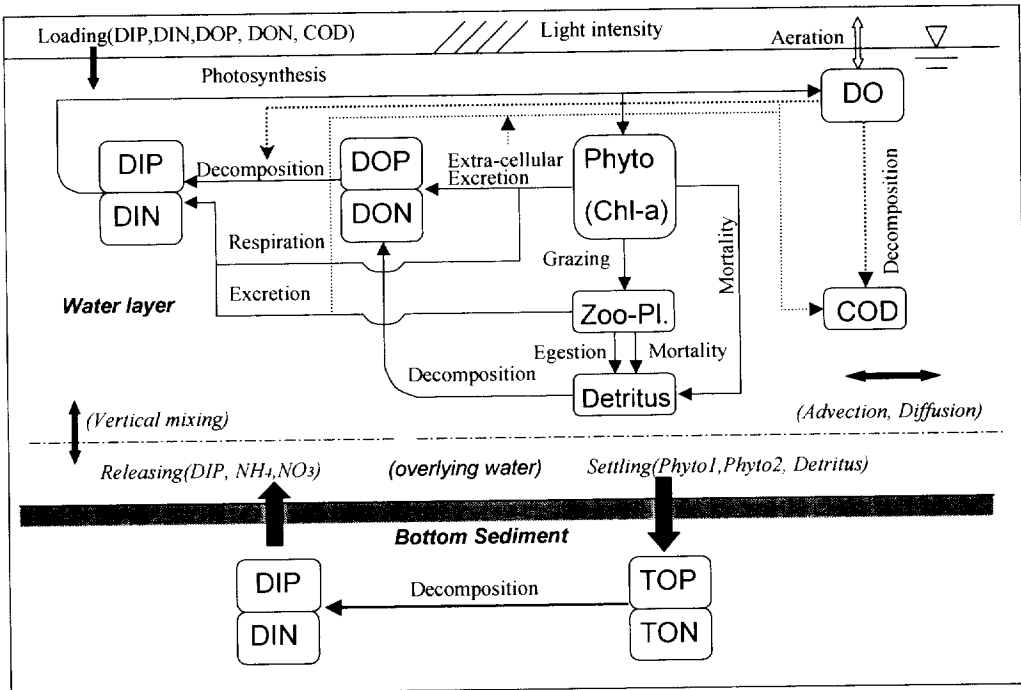


Fig. 2.38 Flow chart of nutrient circulation simulation.

Fig. 2.38은 저차 생산자 계만을 대상으로 한 해양 생태계내 물질순환의 구조를 나타낸 것으로 질소 및 인의 순환과 용존산소 순환의 동적상호관계를 나타낸다. 생태계의 구성요소는 5개의 유기상, 2개의 무기상 요소 및 2개의 수질요소로 구성되며, 유기상 요소는 식물플랑크톤 (Phyto : Chl-a), 동물플랑크톤 (Zoo), 입자성 비생물유기물 (Detritus), 용존성 유기인 (DOP) 및 용존성 유기질소 (DON)가 있고, 무기상 요소는 용존성 무기인 (인산인: DIP)과 용존 무기질소 (DIN)로 구분되며, 수질의 구성요소는 용존산소(DO)와 화학적 산소 요구량 (COD)으로 구성된다. 그리고 저면상의 구성요소는 수중으로부터 침강되는 총용존성 인(TOP)과 총용존성 질소(TON)로 설정하였다. 이들 물질순환을 구동하고 있는 것은 식물성플랑크톤에 의한 광합성이며, 질소/인의 섭취와 유기물의 분해 및 무기화(분해)에 의해 순환한다.

나) 기초방정식

생태계 모형의 기본구조는 물질의 유입, 유출, 물리적 이류/확산 및 생물/화학적과정에 의한 변환 등의 제과정에 대하여 물질수지(질량보존법칙)가 성립되는 것으로 구성된다. 해역의 임의 지점에 있어 생태계 구성요소의 각 현존량(B)의 시간에 따른 농도 변화는 식 (2.32)와 같은 확산방정식에 의해서 기술되며, 이를 해수유동 예측모델과 같이 연직방향으로 적분하면 식 (2.33)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial B}{\partial x} + v \frac{\partial B}{\partial y} + w \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] \quad (2.32)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] \pm \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial S(x, y, z, t)}{\partial t} + L_c$$

$$\frac{\partial B_k, h_k}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{xk}, B_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{yk}, B_k) \quad (2.33)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xk} h_k \left(\frac{\partial B_k}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yk} h_k \left(\frac{\partial B_k}{\partial y} \right) \right]$$

$$+ K_z (B_{k-1} - B_k) - K_z (B_k - B_{k-1}) - w_{k-1/2} B^*$$

$$+w_{k+1/2} B^* + \left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^* \cdot h_k + L_c \cdot h_k$$

여기서 B : 생태계 구성요소(상태변수)의 현존량, x, y, z : 좌표변수, t : 시간간격, u, v, w : x, y, z 방향의 유속성분, K_x, K_y, K_z : x, y, z 방향의 와동확산계수, S : 모든 생물/화학적 과정에 의한 물질변화량, L_c : 외부부하량, B_k, B_{k-1} 및 B_{k+1} : 각각 제 k 층, 제 $k-1$ 층, 제 $k+1$ 층의 생태계요소의 현존량(kg/m^3), h_k : 제 k 층의 수심(m ; 단, 표층은 $h_k = h_1 + \zeta$), M_{xk} 와 M_{yk} : 제 k 층의 x, y 방향의 선유량(m^2/sec), K_{xk} 와 K_{yk} : 제 k 층의 열에 관한 x, y 방향의 와동확산계수(m^2/sec), K_z : 열에 관한 z 방향의 혼합계수(m^2/sec), $w_{k-1/2}$ 와 $w_{k+1/2}$: 각각 제 k 층과 제 $k-1$ 층, 제 $k+1$ 층의 경계면에서의 z 방향의 유속(m/sec), $(\partial B/\partial t)^*$ 는 생태계내의 각종 생물화학적 과정에 의한 현존량(B)의 생성 및 소멸항을 나타낸다.

(2) 물질순환과정의 정식화

상기 기초방정식에서의 생태계 구성요소(상태변수)의 물질순환과정은 크게 1) 생물순환, 2) 인 순환, 3) 질소순환, 4) 용존산소 순환으로 대별되며, 이들 물질순환과정을 정식화하면 식 (2.34)~식 (2.48)과 같다.

가) 생물순환

1) 식물플랑크톤 (Phyto)

식물플랑크톤은 수역 내에 여러 종들이 분포하고 있으나, 가능한 한 우점종에 대한 평균적인 단일종 군집을 고려한다. 식물플랑크톤의 생물량, P ($Chl-a(mg/l)$)의 시간에 따른 농도 변화는 식 (2.34)와 같이 기술된다. 여기서, 광합성에 의한 증식속도는 식 (2.35)와 같으며, 동물플랑크톤에 의한 섭이는 식 (2.36)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} = & (\text{광합성에 의한 증식}) - (\text{배설}) - (\text{고사}) - (\text{호흡}) \\ & - (\text{동물플랑크톤에 의한 섭이}) - (\text{침강}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$= G_P \cdot P - E_P \cdot G_P \cdot P - D_P \cdot \exp(\theta_{dp} \cdot T) \cdot P \\ - R_e \cdot T_1 \cdot PA_1 - G_Z ZP - \frac{w_P}{h} \cdot P$$

$$G_P = (\text{최대비증식속도}) \cdot (\text{수온의존항}) \cdot (\text{조도의존항}) \\ \cdot (\text{질소농도의존항}) \cdot (\text{인농도의존항}) \quad (2.35)$$

$$= G_{\max} \cdot F_T \cdot F_I (F_H + F_O) \cdot F_P \\ = [G_0 \cdot \exp(\theta_{gp} \cdot T_k)] \cdot \left[\frac{T_k}{T_{opt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{T_k}{T_{opt}}\right) RIGHT \right] \cdot \frac{I_k}{K_I + I_k} \cdot \\ \left[\frac{NNH_k}{K_H + NH_k} + \frac{NO_k}{K_O + NO_k} \cdot P_{NO} RIGHT \right] \cdot \frac{DIP_k}{K_P + DIP_k}$$

$$\text{여기서, } R_{NO} = \exp(-14.01.462 \cdot NH_k)$$

$$G_Z = (\text{최대섭이속도}) \cdot (\text{수온의존항}) \cdot (\text{Chl-a농도의존항}) \quad (2.36)$$

$$= \mu_Z \left[\frac{T_k}{T_{Zopt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{T_k}{T_{opt}}\right) RIGHT \right] \cdot \frac{K_{ZP} P_k}{K_{ZP} + P_k}$$

2) 동물플랑크톤 (Zoo)

식물플랑크톤 구성 요소와 같이 평균적인 단일 동물플랑크톤 군집을 대상으로 한다. 동물플랑크톤 생물량의 정식화는 식 (2.37)과 같다. 그리고, 동물플랑크톤의 일주 수직이동은 식 (2.38)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Zoo}{\partial t} = (\text{섭이}) - (\text{배설}) - (\text{불소화배설}) - (\text{자연사망}) \pm (\text{일주 수직이동}) \quad (2.37)$$

$$= f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP_k - (1 - \alpha_s) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP_k \\ - (\alpha_s - v) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP_k - D_Z \exp(\theta_{dz} \cdot T_k) \cdot ZP_k \pm W_Z(t)$$

$$W_Z(T) = -W_{down} \sin\left\{\frac{\pi}{D} t\right\} \quad : \text{하강} \quad (2.38)$$

$$W_{up} \sin \left\{ \frac{\pi}{1-D}(t-D) \right\} \quad : \text{상승}$$

여기서, W_{down} , W_{up} : 각각 최대하강 및 최대상승속도 (m/day), D : 일조시간(day)

3) 입자성 유기물 (Detritus)

비생물의 입자성 유기물(detritus)의 시간변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Det}{\partial t} &= (\text{Phyto의 고사}) + (\text{Zoo의 배설}) + (\text{Zoo의 자연사망}) - (\text{분해}) \\ &\quad - (\text{침강}) \\ &= f_{PZ}(D_P \exp(\theta_{dp} \cdot T) \cdot P + (1 - \alpha_s) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP \\ &\quad + D_Z \exp(\theta_{dz} \cdot T) \cdot ZP - K_D \exp(\theta_{dd} \cdot T) \cdot Det - \frac{w_D}{h} Det \end{aligned} \quad (2.39)$$

나) 인순환

1) 용존성 무기인 (DIP : mgP/l)

인산염(DIP)의 생물 과정에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial DIP}{\partial t} &= -(\text{Phyto에 의한 섭취}) + (\text{Phyto의 호흡}) + (\text{DOP, TOP의 분해}) \\ &\quad + (\text{계외로부터의 공급 : 유입부하, 저질용출}) \\ &= -f_{PP}(G_P \cdot P) + f_{PP}(R_e \cdot TP) \\ &\quad + K_{OP} \exp(\theta_{dop} \cdot T_k) \cdot DOP_k + L_{IP} + R_{IP} \end{aligned} \quad (2.40)$$

여기서, L_{IP} 는 육역으로부터의 유입부하량이며, R_{IP} 는 저질로부터의 용출속도($g/m^2/sec$)를 나타낸다.

2) 용존성 유기인 (DOP : mgP/l)

용존성 유기인(DOP) 및 용존성 유기질소(DON)는 C/P, C/N, N/P, Chl-a/P조성비를 이용해서 환산된다. DOP의 시간 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial DOP}{\partial t} &= (\text{생물의 배설, 호흡, 고사에 의한 회귀}) - (\text{Detritus분해}) \\ &\quad - (\text{분해}) \\ &= f_{PP}(E_P \cdot G_P \cdot P) + f_{ZP}(\alpha_s - v) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP + f_{ZP} K_D \exp(\theta_{dd} \cdot T) \cdot Det \\ &\quad - K_{OP} \exp(\theta_{dop} \cdot T) \cdot DOP\end{aligned}\quad (2.41)$$

3) 저질 총유기인 (TOP :mgP/l)

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= (\text{식물플랑크톤과 Detritus의 침강}) - (\text{분해}) - (\text{퇴적}) \\ &= f_{PP} \frac{w_P}{\gamma h'_1} \cdot P_k + f_{ZP} \frac{w_D}{\gamma h'_1} \cdot Det_{k_{btm}} \\ &\quad - K_T \exp(\theta_{dtp} \cdot T_{k_{btm}}) \cdot T' - \frac{w_M}{h'_1} \cdot T\end{aligned}\quad (2.42)$$

다) 질소순환

1) 용존성 무기질소 (DIN :mgN/l)

용존성무기질소(DIN)는 암모니아질소($NH_4^+ - N$), 아질산($NO_2^- - N$), 질산질소($NO_3^- - N$)의 합이고, 각 형태의 구별은 고려하지 않았음. DIN의 생물 과정에 관한 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial DIN}{\partial t} &= -(\text{Phyto에 의한 섭취}) + (\text{Phyto의 호흡}) + (\text{DON, TON의 분해}) \\ &\quad + (\text{계외로부터의 공급 : 유입부하, 저질용출}) \\ &= -f_{PN}(G_P \cdot P) + f_{PN}(R_c \cdot TP)\end{aligned}\quad (2.43)$$

$$+K_{ON}\exp(\theta_{don}\cdot T_k)\cdot DON_k +LIN+RIN$$

여기서, LIN은 육역으로부터의 유입부하량이며, RIN은 저질로부터의 용출속도($g/m^2/sec$)를 나타낸다.

2) 용존성 유기질소 (DON : mgN/l)

용존성 유기질소(DON)는 N/P조성비를 이용해서 환산된다. DON의 시간 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial DON}{\partial t} &= (\text{생물의 배설, 호흡, 고사에 의한 회귀}) - (\text{Detritus분해}) \\ &\quad - (\text{분해}) \\ &= f_{PN}(E_P G_P P) + f_{ZN}(\alpha_s - v) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP + f_{ZN} K_D \exp(\theta_{dt} T) \cdot Det \\ &\quad - K_{ON} \exp(\theta_{dop} \cdot T) \cdot DON \end{aligned} \quad (2.44)$$

3) 저질 총유기질소 (TON : mgN/l)

$$\begin{aligned} \frac{\partial TON}{\partial t} &= (\text{식물플랑크톤과 Detritus의 침강}) - (\text{분해}) - (\text{퇴적}) \\ &= R_{NP} \cdot TOP \end{aligned} \quad (2.45)$$

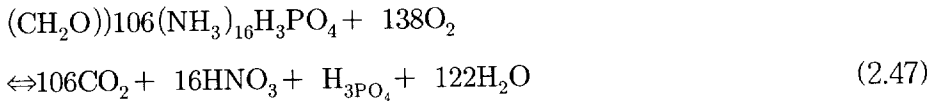
라) 용존산소순환

1) 용존산소 (DO : mg/l)

용존 산소(DO)의 단위 시간당 변화량에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial DO}{\partial t} &= (\text{Phyto의 증식}) - (\text{생물의 호흡}) - (\text{COD의 분해}) + (\text{재폭기}) \\ &\quad - (\text{저니산소소비}) - (\text{DOM, TOM의 분해}) \\ &= f_{CO} f_{PC}(G_P P) - f_{CO} f_{PC}(R_e TP) \\ &\quad - f_{CO} K_c \exp(\theta_{dc} T) \cdot COD + K_A \cdot (DO_{sat} - DO_1) - S_{OD} + f_{PO} \cdot DOM \end{aligned} \quad (2.46)$$

생물 과정에 의한 산소의 생산 또는 소비량은 Richard(1965) 식에 의해 유기물을 완전하게 산화하는데 필요한 이론적인 산소량으로부터 구할 수 있다.



따라서 [TOD : C]의 환산 계수를 이용한 산소량 변화는 다음과 같이 표현된다.

- ① 광합성에 의한 산소 공급 = $[TOD : C_p] \cdot v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2 \cdot P$
- ② 식물플랑크톤의 호흡에 의한 산소 소비 = $[TOD : C_p] \cdot v_1(T) \cdot P$
- ③ 동물플랑크톤의 호흡에 의한 소비 = $[TOD : C_z] \cdot (\mu_z - \nu_z) \cdot v_3(T) \cdot Z$
- ④ 입자성 유기물 분해에 의한 소비 = $[TOD : C_{POM}] \cdot v_6(T) \cdot Detritus$
- ⑤ 용존성 유기물 분해에 의한 소비 = $[TOD : C_{DOM}] \cdot v_7(T) \cdot DOM$

2) 화학적 산소 요구량 (COD : mg/l)

생태계에서는 동 · 식물플랑크톤, 입자성 및 용존성 유기물의 거동을 알면 COD의 단위 시간당 변화량을 알 수 있다. 따라서 각 형태별 유기물의 변화량을 수식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD}{\partial t} &= (\text{Phyto의 배설}) + (\text{Zoo의 불소화배설}) + (\text{Detritus의 분해}) \\ &\quad - (\text{분해}) \\ &= -f_{PC}(E_P \cdot G_P \cdot P) + f_{ZC}(\alpha_s - v) \cdot f_{PZ}(G_Z) \cdot ZP + f_{ZC}K_D \cdot \exp(\theta_{dd}T_k) \cdot Det_k \\ &\quad - K_c \cdot \exp(\theta_{dc}T_k) \cdot COD_k \end{aligned} \quad (2.48)$$

위 식의 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역내 각 형태의 유기물에 대

한 단위시간당 증감량이 구해진다. 이는 생물과정을 용존산소(DO)로 환산하는 것과 같은 방법으로, COD농도로 환산하는 계수를 곱함으로써 COD의 변화량 즉 내부생산량을 평가할 수 있다.

(3) 실험방법

가) 수치모델의 영역

해양생태계 수치모델실험의 계산대상기간은 해수유동장 계산시 적용된 기간과 동일하게 현상태(2002년 하계)를 실험Case로 설정하였다. 또한 생태계 모델 계산의 계산영역, 격자체계는 앞서 해수유동 수치실험에서 적용되어진 것과 동일하며, 해수유동의 실시간 유동장 계산과 연동하여 생태계 수치모델실험을 수행한다.

나) 계산 및 실험조건

1) 계산입력자료

㉠ 해수유동장

연구대상해역에서의 해양생태계모델의 입력자료인 해수유동장은 앞서 구축되어진 3차원 해수유동 수치모델의 전 계산격자점에서의 시간간격별의 유동계산결과를 이용하였다.

㉡ 기상조건

기상자료는 해수유동 수치모델실험에서 사용되어진 바와 같이 기온, 강수량, 일사량, 증발량, 풍향·풍속, 습도, 운량 등 7개 기상요소에 대해 2002년 속초 및 강릉기상대에서 관측된 일평균 값을 1년간 일별 실시간으로 입력하였다.

㉢ 담수유입량 입력조건

계산영역내로 유입되는 담수유입량은 Table 2.1에서와 같이 남천 및 송지호, 인정천, 황포천 및 문암천으로부터 대상계산영역 내로 유입되는 담수유입지점과 동일하게 적용하였다.

㉣ 오염부하량 입력조건

계산영역내로 유입되는 유입부하량의 입력조건은 Table 2.2와 같이 대상해역 주변하천인 남천 및 송지호, 인정천, 황포천 및 문암천 등으로부터

유입되는 유입오염부하량을 기준으로 설정하였다. 특히, 부하량의 설정에 있어서는 대상유역내에 하수도 보급률이 높지 않고, 일부지역에서는 하수 관거의 오점으로 인하여 오염물질의 배출경로가 명확하지 않기 때문에, 하천 및 배수구에서 대상해역내로 유입하는 오염물질은 모두 비점원으로 간주하였다.

㉮ 수질농도 경계조건

수질계산 항목의 외해 경계농도(가진 북측인근해역, 우측외해, 아야진 남측인근해역)는 기존 해양환경조사 결과를 바탕으로 계산대상해역의 경계에 인접한 조사정점에서의 관측치를 수질의 경계농도로 적용하였으며, 계산영역내부에서의 초기조건은 3, 5, 8, 11월의 수질관측치를 표층·저층 관측치의 연평균치로서 산정하여 적용하였다. 수질의 외해경계농도로 사용되어진 2002년 해양환경조사자료는 Table 2.9와 같다.

Table 2.9 Boundary condition of water quality concentration

Division		Upper boundary (L2+L2F2)*	Right boundary (L2F2+F2+R2F2)*	Lower boundary (R2+R2F2)*
Water Temp.(℃)	surface	13.92	14.13	14.08
	bottom	11.03	6.73	11.47
Salinity(‰)	surface	33.09	33.16	33.29
	bottom	33.43	33.70	33.62
DO(mg/l)	surface	8.26	8.65	8.86
	bottom	8.50	8.96	9.22
pH	surface	8.18	8.20	8.19
	bottom	8.10	7.97	8.08
COD(mg/l)	surface	0.83	0.98	0.95
	bottom	0.65	0.73	0.65
TN(mg/l)	surface	0.070	0.070	0.077
	bottom	0.066	0.072	0.077
TP(mg/l)	surface	0.021	0.018	0.022
	bottom	0.024	0.035	0.026
Chl-a(mg/l)	surface	0.044	0.33	0.37
	bottom	0.031	0.15	0.19

㉮ 해양생태계 모형 계산변수 설정

생태계 모형실험시 적용되어지는 생태계 모형의 주요 생물학적 파라미터는 Table 2.10과 같이 기존문헌 및 연구보고서에서 적용성이 인정된 결과들을 동일하게 적용하여 사용하였다.

식물플랑크톤 성장속도의 온도 의존성을 지수함수로 표현한 대부분의 모델들은 20℃를 기준으로 하고 있으나, Eppley(1972)는 0℃를 기준으로 하고 있다. Eppley는 다양한 종에 관한 많은 연구 결과로부터 0℃의 최대 성장속도는 0.59/day로 제시하였으나 본 연구에서는 0.60/day 값을 적용하였다.

식물플랑크톤의 호흡속도, 고사속도, 유기물의 무기화 속도, 반포화 정수 등도 문헌자료(Jørgensen, 1979)를 이용하여 입력하였다. 심층수 방류해역의 퇴적물로부터 인의 용출속도는 대상해역으로부터 해양관측결과가 미비하므로 변동범위가 다소 큰 범위에 있으나 본 모델에서는 용존성 무기인과 용존성 무기질소의 저질로부터의 용출속도를 각각 $50 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 및 $250 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 로 대상해역과 유사한 해역에 대해 적용되어진 바 있는 수치로 설정하였다.

Table 2.10 Main biological parameter of ecological model

Symbol	Definitions	Value	Unit
$G_{\max}$	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	0.06	1/day
Θ	Temperature coefficient	0.0693	1/°C
G_Z	Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	0.18	1/day
E_P	Excretion rate of phytoplankton at 0°C	0.05	-
D_P	Mortality rate of phytoplankton at 0°C	0.01	1/day
R_e	Respiration rate of phytoplankton at 0°C	0.01	1/day °C
W_P	Settling rate of phytoplankton	0.2	m/day
W_D	Settling rate of detritus	0.3	m/day
μ_Z	Filtration rate of zooplankton	0.35	ℓ /mg/day
D_Z	Natural death rate of zooplankton at 0°C	0.04	1/day
K_{ZP}	Half saturation effects of zooplankton	0.06	mg/ ℓ
N_{YU}	Total growth efficiency of zooplankton	0.3	-
α	Digestion efficiency of zooplankton	0.7	-
K_{DE}	Decomposition of Detritus	0.03	1/day
K_{ON}	Decomposition of DON	0.04	1/day
K_A	Reaeration coefficient at sea surface	0.15	m/day
K_P	Half saturation constant for uptake of DIP	0.003	mg/ ℓ
K_H	Half saturation constant for uptake of NH ₄ -N	0.03	mg/ ℓ
K_O	Half saturation constant for uptake of NO ₃ -N	0.03	mg/ ℓ
K_I	Optimum intensity of radiation for photosynthesis	200	15 klux
f_{PW}	Ratio of Dryweight/Chl-a	110.0	-
f_{PC}	Ratio of COD/Chl-a for phytoplankton	0.59 f_{PW}	-
f_{PN}	Ratio of N/Chl-a for phytoplankton	6.022	-
f_{ZN}	Ratio of N/Dryweight for detritus	0.0547	-
f_{PP}	Ratio of P/Chl-a for phytoplankton	0.833	-
f_{ZP}	Ratio of P/Dryweight for Detritus	0.00757	-
f_{ZC}	Ratio of COD/Dryweight for zooplankton	0.59	-
f_{DC}	Ratio of COD/Dryweight for detritus	0.59	-
f_{PO}	Ratio of DO/Chl-a for phytoplankton	2.26 f_{PC}	-

(4) 실험결과 및 분석

가) 재현성 검증

본 연구에서는 대상영역의 표층과 저층에 대하여 식물플랑크톤의 지표로서 클로로필-a(Chl-a), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P), 용존산소(DO)의 농도분포에 대하여 생태계 수치예측실험을 수행하였다. 수치실험으로 재현된 심층수 방류예상해역 수질농도 계산결과와 현장관측자료가 충분한 COD, T-N, T-P농도를 대상으로 설정하여 재현성 평가를 실시하였다. 특히, T-N농도 및 T-P농도는 각각 수질계산항목인 용존성 유기질소(DON) 및 용존성 무기질소(DIN)의 합과 용존성 유기인(DOP)과 용존성 무기인(DIP)의 합으로 나타내어 검증하였다.

Fig. 2.39는 계산된 COD, T-N 및 T-P의 검증결과를 나타낸 것이다. 수질의 검증에 이용된 현장 수질관측값은 Fig. 1.1의 수질검증정점에서의 관측결과를 이용하였으며, 이들 관측치와 모델에 의해 계산된 대상해역내의 표층의 각각의 수질계산결과와 비교·검증하였다.

수질예측의 검증결과, 대상해역에서의 관측 COD농도는 1.80 ~ 1.90 ppm의 범위이며, 계산치는 각각 1.85 ~ 1.90 ppm의 범위이다. T-N 및 T-P의 관측치는 각각 0.05 ~ 0.07 ppm과 0.022 ~ 0.032 ppm의 범위이며, 계산치는 각각 0.05 ~ 0.06 ppm과 0.024 ~ 0.026 ppm의 범위이다. 이상의 결과를 통해 계산치와 관측치가 유사한 값을 나타내었으며 이를 통해 본 수치모형이 대상해역의 수질계산을 양호하게 재현할 수 있는 것으로 판단된다.

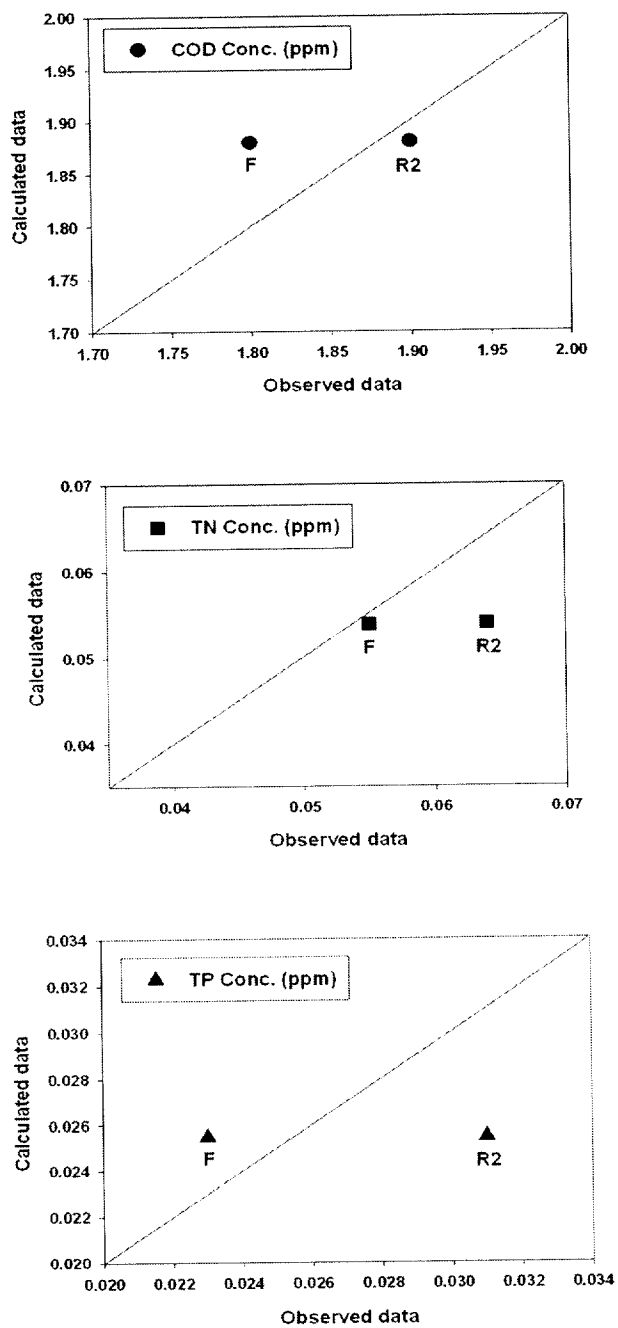
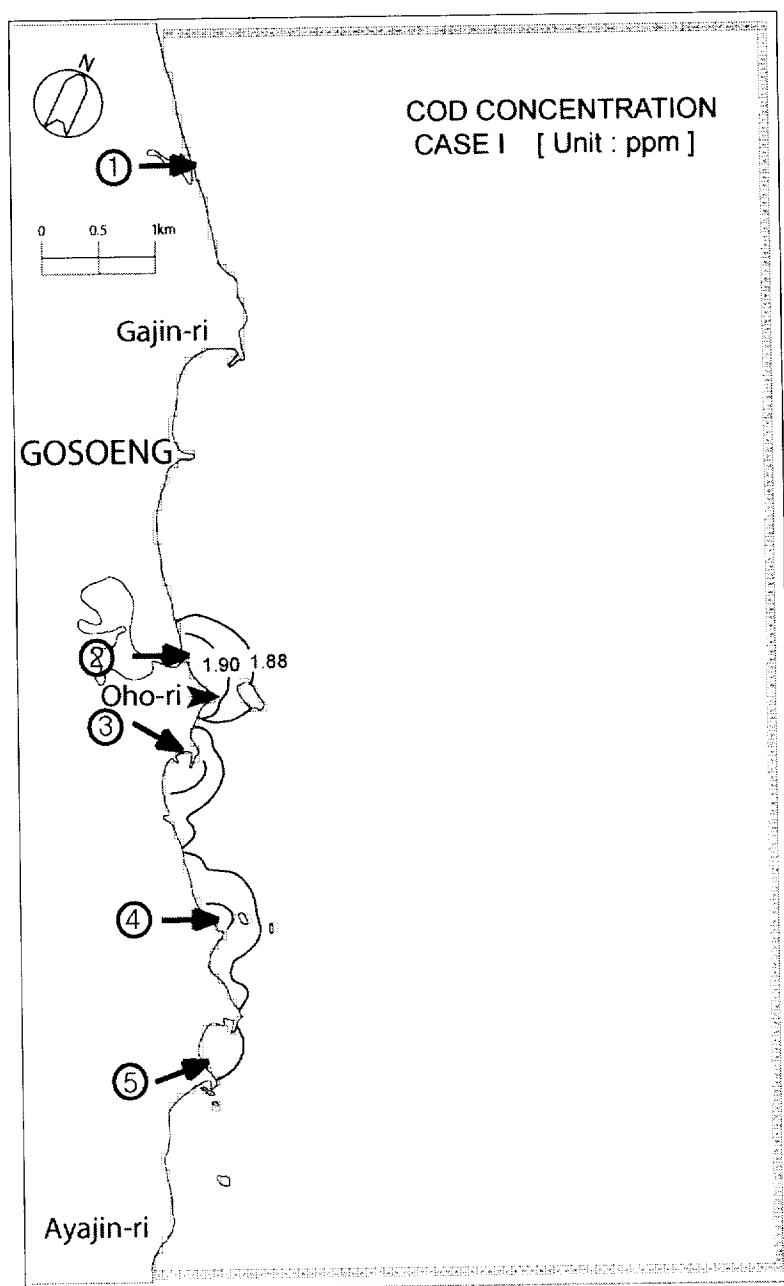


Fig. 2.39 Verification result of surface concentration.

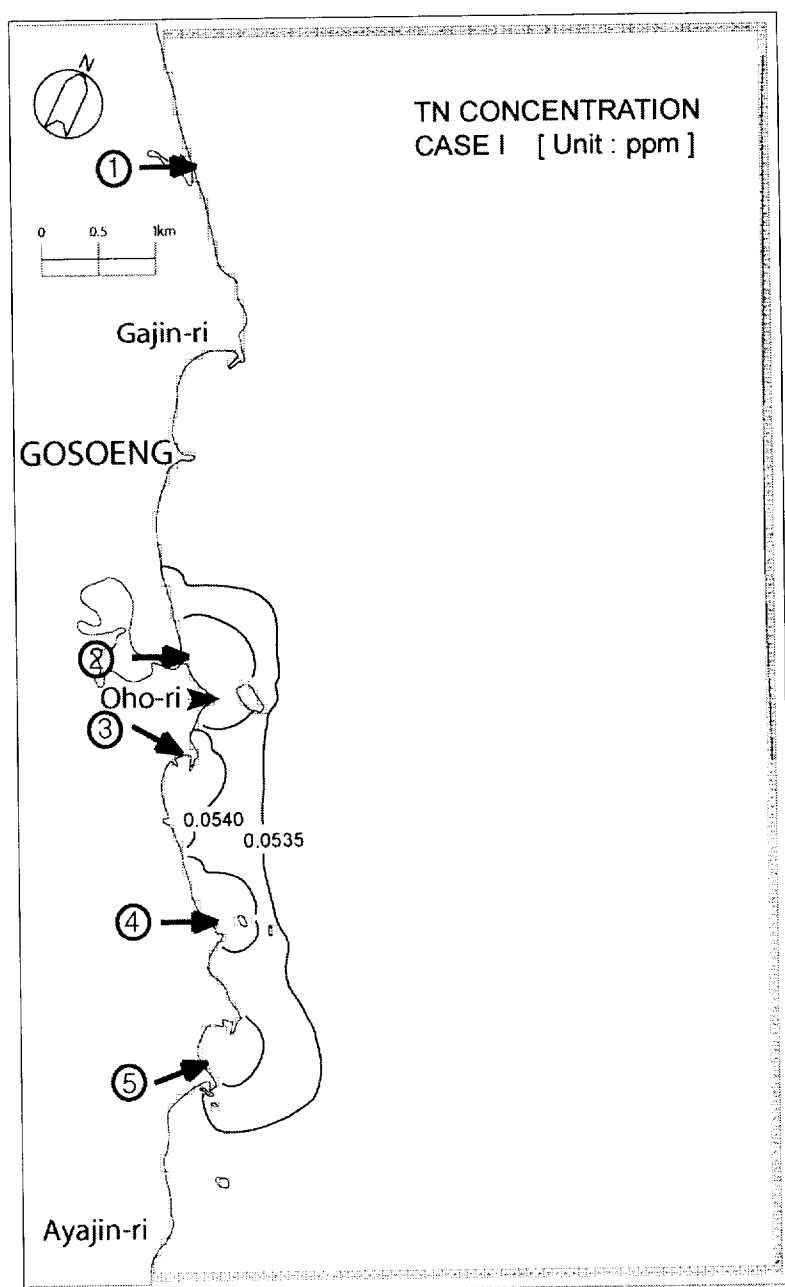
나) 물질순환 예측결과

심층수 개발해역에서의 전반적인 수질농도범위를 살펴보면, 무방류시 (CASE I) 화학적 산소요구량(COD)의 표층농도는 1.86 ~ 1.92 ppm의 범위로 나타났고, 총질소(T-N)의 표층농도는 0.0530 ~ 0.0545 ppm의 범위로 나타났으며, 총인(T-P)은 0.0215 ~ 0.0230 ppm의 범위로 나타났다 (Fig. 2.40). 수질농도의 공간분포를 살펴보면, 오염물질이 유입하는 하천 유입지점에서 농도가 높게 나타났으며 외해측의 경우 연안으로부터 유입된 오염물질이 확산되지 않고 해수의 농도가 일정한 것으로 나타났다.

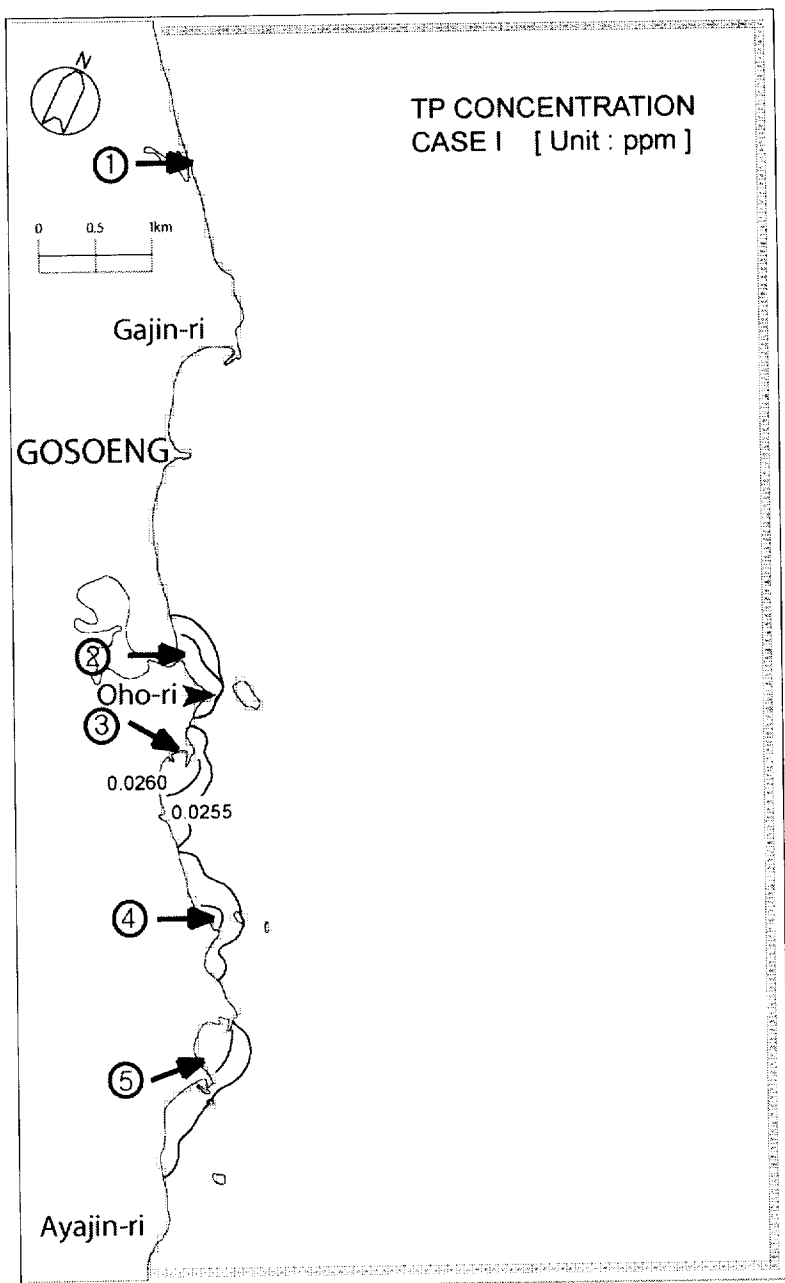


(a) COD concentration

Fig. 2.40 Simulated horizontal distribution of Water Quality at 1st layer
(with non-discharge Cond. of DSW).



(b) TN concentration
Fig. 2.40 (Continue).



(c) TP concentration

Fig. 2.40 (Continue).

3. 심층수 해양방류시 수질환경 변화예측

3.1 수온·염분 변화예측

저온의 심층수를 해양으로 방류할 경우 개발해역의 수온이 감소하게 된다. 어류들은 급격한 온도변화에 민감하기 때문에 이러한 환경변화는 어획량의 감소에 영향을 미칠 수 있다. 특히 연안어업의 경우 냉수대가 발생하면 따뜻한 바닷물에 사는 어종이 연안쪽으로 접안을 못하고 외해역으로 분산되기 때문에 연안의 어획량이 다소 감소하는 경향을 나타낼 수 있다(김 등, 2000).

3.1.1 심층수 해양방류조건

심층수 해양방류시 개발해역의 수온·염분 변화를 예측해 보고자 Table 3.1과 같은 방류조건을 설정하였다.

해양방류량의 경우 일본과 국내 심층수연구센터의 계획량을 참고하여 2,000 ton/day 및 20,000 ton/day로 산정하였으며, 수온 및 염분의 경우 심층수 취수정점에서의 현장조사 자료를 바탕으로 원수 수온 4℃와 염분 34.01 psu로 설정하였다. 방류위치의 경우, 수치모형의 1층과 5층으로 설정하여 수치예측실험을 실시하였는데, 1층의 경우 심층수를 연안선으로부터 해양의 표층으로 직접 방류하는 경우로 설정하였고, 5층의 경우 동해 심층수 연구센터에서 계획하고 있는 수심 20 m 저층에서 방류하는 경우로 설정하였다(Table 3.1).

Table 3.1 Discharge condition of Deep Sea Water

Division	Discharge (ton/day)	Water temperature(℃)	Salinity(psu)	Discharge location (Depth : m)
CASE I	2,000	4.0	34.01	1st Layer(0~3)
CASE II	20,000			1st Layer(0~3)
CASE III	2,000			5th Layer(14~19)
CASE IV	20,000			5th Layer(14~19)

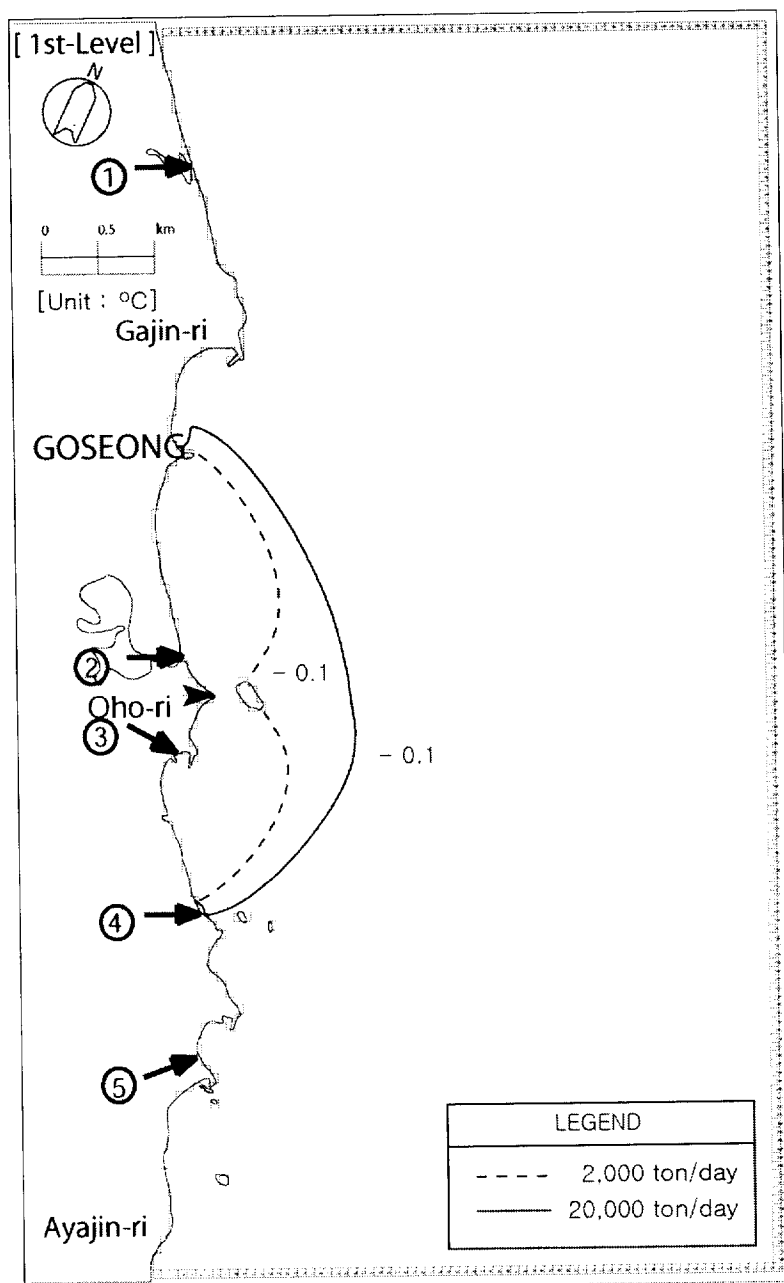
3.1.2 예측결과

Fig 3.1은 저온의 심층수 해양방류시 방류량 및 방류위치에 따른 CASE별 최대수온감소량을 0.1°C 등수온선으로 나타내었다.

심층수 방류지점을 중심으로 수온이 약 0.1°C 감소하였는데, 해안선에서 심층수를 해양표층으로 직접 방류한 경우 수온감소 최대영향범위는 2,000 ton/day 방류시 방류지점을 중심으로 연안을 따라 남북방향으로 약 3.88 km, 외해측 동서방향으로 약 0.63 km로 나타났으며, 20,000 ton/day 방류시 남북방향 약 4.25 km, 동서방향 약 1.25 km로 나타났다. 즉 방류량이 10배 증가함에 따라 영향범위가 남북방향 약 1.1배, 동서방향 약 2.0배 증가하였다.

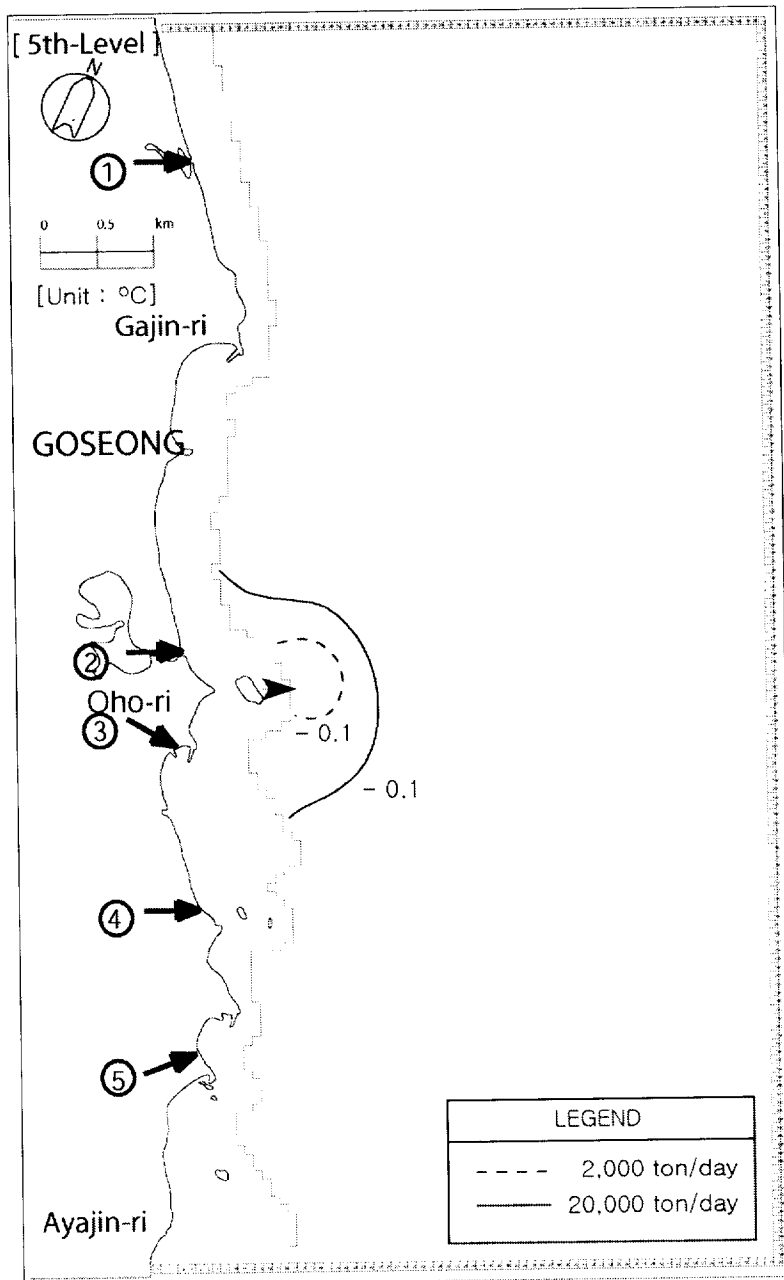
한편, 심층수를 연안으로부터 약 500 m 떨어진 수심 20 m의 저층에서 방류한 경우 수온감소 최대영향범위는 2,000 ton/day 방류시 방류지점을 중심으로 연안을 따라 남북방향으로 약 0.75 km, 외해측 동서방향으로 약 0.44 km로 나타났으며, 20,000 ton/day 방류시 남북방향 약 2.19 km, 동서방향 약 0.75 km로 나타났다. 저층방류일 경우 방류량이 10배 증가함에 따라 영향범위가 동서방향 약 2.9배, 남북방향 약 1.7배 증가하였다.

이상의 결과를 바탕으로 표층 방류시와 저층 방류시를 비교해보면, 20,000 ton/day 방류시 표층 방류시에 비해 저층 방류시 수온감소의 최대 영향범위가 약 0.5~0.6 정도 감소한 것으로 나타났다.



(a) 1st layer(0~3m)

Fig. 3.1 Simulated result of Water Temp. changes at 1st layer(a) and 5th layer(b) on maximum flood flow (with discharge Cond. of DSW).



(b) 5th layer(14~19m)

Fig. 3.1 (Continue).

3.2 부유사(SS) 확산 변화예측

심층수 해양방류시 개발해역의 수괴변화에 따른 부유사(SS)의 확산 변화를 예측해 보고자 하였다. Table 3.1에서 나타낸 실험CASE별 수행 결과, 부유사(SS)의 확산변화가 10^{-3} 의 order로 그 영향이 미미한 것으로 나타났다. 이는 수온·염분의 변화가 크지 않은 점을 감안하여, 심층수 해양방류량이 적어 심층수 개발해역의 수괴에 큰 영향을 미치지 않음으로서 부유사(SS)의 확산도 방류 전·후 변화가 없는 것으로 판단된다.

3.3 물질순환 변화예측

3.3.1 심층수 방류수질조건

계산영역내로 방류되는 심층수의 방류조건은 방류량 및 방류수의 수온·염분의 경우, 앞서 수행한 수온·염분 변화예측 실험에서 산정한 값 중 동해 심층수 개발해역의 목표량인 20,000 ton/day의 값을 적용하였으며, 수온·염분의 입력조 심층수 취수역의 기존 해양환경조사 결과를 바탕으로 COD농도 0.147 ppm, T-N농도 0.261 ppm, T-P농도 0.042 ppm을 사용하여 오염부하량을 산정하여 실험을 수행하였다.

3.3.2 예측결과

Fig. 3.2는 심층수 해양방류시 수질농도범위를 나타낸다. 전반적인 수질농도범위를 살펴보면, COD, T-N 및 T-P의 표층농도는 전반적으로 무방류시와 유사한 농도범위를 나타내었다.

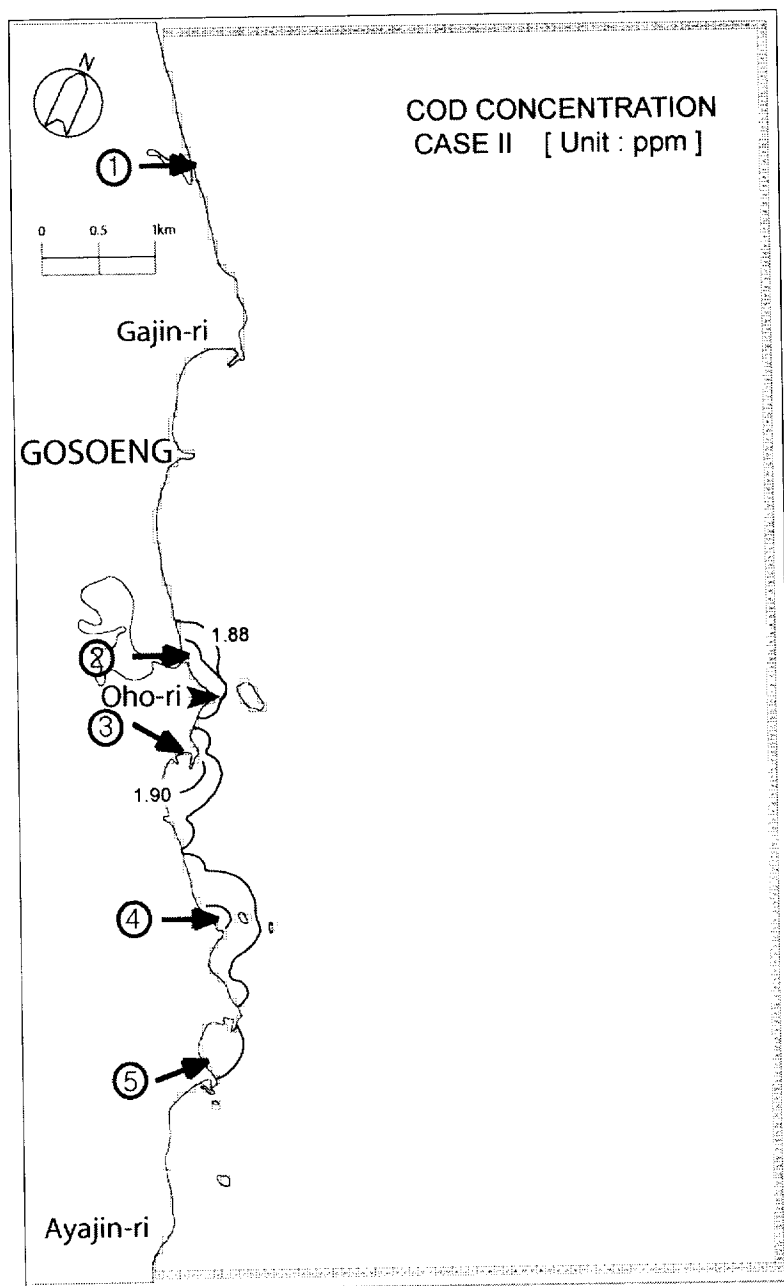
수질항목별 심층수 무방류·방류시 농도의 공간분포를 살펴보면, COD의 경우 무방류시 표층농도 1.88 ppm 등농도선의 분포범위가 해안선으로부터 약 341 m까지 나타났으나, 방류시는 112 m로 범위가 감소하였다. T-N의 경우도 표층농도 0.0535 ppm 등농도선의 분포범위가 무방류시 약 572 m에서 방류시 약 282 m로 감소하였다. 반면에 T-P의 경우 표층농도 0.0255 ppm 등농도선이 무방류시 약 104 m에서 방류시 약 317 m로 증가하였다(Table 3.2).

이상의 결과로부터 심층수 방류로 인하여 COD와 T-N의 농도는 감소

하였으나, T-P의 농도는 증가하였음을 알 수 있는데, 이는 COD, T-N의 경우 방류되는 심층수의 농도보다 육역으로부터 유입되는 농도가 높고 T-P의 경우 낮기 때문인 것으로 판단된다. 이로부터 심층수 방류시 대상 해역의 COD, T-N의 농도는 감소하는 반면, T-P의 농도가 증가할 것으로 예상된다.

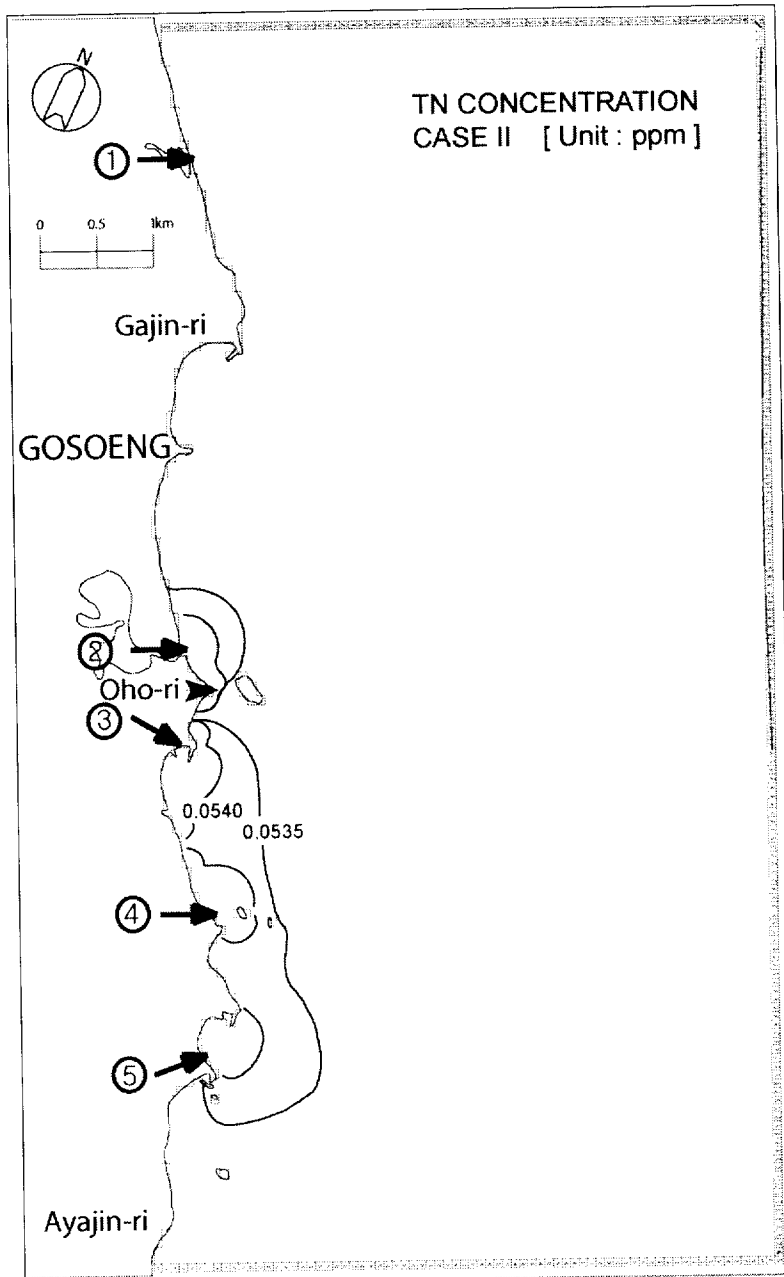
Table 3.2 Distribution area of surface concentration at each water quality factors

Factor	Surface concentration(ppm)	Distribution distance(m)	
		Non-discharge	Discharge
COD	1.88	341	112
TN	0.0535	572	282
TP	0.0255	104	317



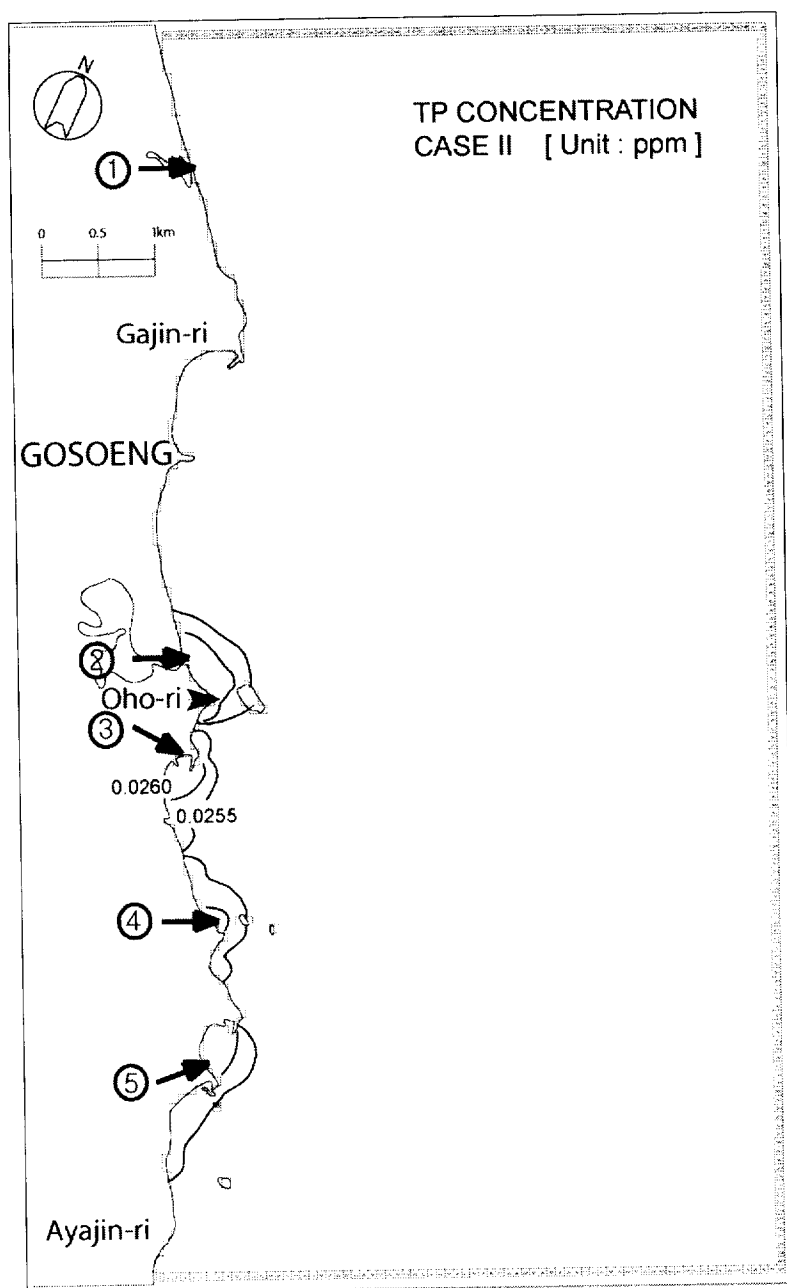
(a) COD concentration

Fig. 3.2 Simulated horizontal distribution of Water Quality at 1st layer
(with discharge Cond. of DSW).



(b) TN concentration

Fig. 3.2 (Continue).



(c) TP concentration
Fig. 3.2 (Continue).

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 심층수의 취수이용 후 해양방류시, 방류해역의 환경용량 평가 생태계 모델링 및 심층수 취수/방류의 적정 사업용량 평가기법의 개발과 심층수 사업해역의 환경변화 예측 모델링/모니터링 시스템 개발의 기초적 연구로서 1) 유입오염부하량 해석, 2) 물리해양환경조사, 3) 심층수 개발해역의 해수유동 수치모형실험, 4) 부유사(SS)확산 수치모형실험, 5) 물질순환예측 생태계모델링 등의 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 태풍 “루사”시 대상해역으로 유입되는 COD의 총 유입오염부하량은 606.9 kg-COD/day이었으며, TN과 TP의 유입오염부하량은 각각 350.9 kg-TN/day와 3.41 kg-TP/day로 산정되었다. 부유사(SS) 유입부하량의 경우, 태풍 “루사”시 58,346.3 kg-SS/day로 연평균 SS 유입부하량에 비해 약 77배 정도 많은 것으로 나타났다.

2) 대상해역의 조류 특성을 살펴보면, 일주조 성분이 반일주조 성분보다 대체로 우세한 것으로 나타났고 대상해역에서 일주조와 반일주조의 흐름방향이 반대방향인 것으로 조사되었다.

3) 부유사(SS) 농도분포에 따라 대상해역의 연직구조를 파악해보면, 수심 약 30~70 m에서 밀도경계면과 유사하게 나타난 SS 저농도역의 상층부를 표층, 수심 150 m까지를 중층, 150 m 이하를 저층으로 구분할 수 있다.

4) 심층수 해양방류시 개발해역의 수온·염분 변화예측결과, 심층수 방류지점을 중심으로 수온 0.1℃ 감소를 기준으로 하였을 때 방류량 및 방류방식에 따른 최대영향범위 변화를 살펴보면, 방류량이 10배 증가함에 따라 최대영향범위가 동서방향 약 1.1배, 남북방향 약 2.0배 증가하였으며, 표층 방류시에 비해 저층 방류시 수온감소의 최대영향범위가 약 0.5~0.6 정도 감소한 것으로 나타났다.

5) 심층수 해양방류시 물질순환예측 결과, COD와 T-N의 농도는 감소하였으나 T-P의 농도는 증가하였음을 알 수 있는데 이는 COD, T-N의

경우 방류되는 심층수의 농도보다 육역으로부터 유입되는 농도가 높고 T-P의 경우 낮기 때문인 것으로 판단된다. 이로부터 심층수 방류시 대상 해역의 COD, T-N의 농도는 감소하는 반면, T-P의 농도가 증가할 것으로 예상된다.

참고문헌

- 강시환, 박연숙, 김상익, 이호진 (2001). 속초 해양방류 하 · 폐수의 혼합구역에 대한 특성분석, 한국해양환경공학회지, 제13권 제3호, pp.245-253.
- 국립수산과학원 (1996~2002). 한국해양환경조사연보.
- 국립해양조사원 (2002~2004). 조석표.
- 기상청 (2001). 한국기후표(1971~2000).
- 기상청 (2002~2004). 기상월보(1월~12월).
- 김남원, 김창완, 우효섭 (2002). 태풍 루사(Rusa)의 강우와 홍수피해 특성, 대한토목학회지, 제50권 제10호, pp.7.
- 김동명 (2003). 생태계모델을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가, 한국환경과학회지, 제12권 제7호, pp.745-751.
- 김학균, 이필용, 이삼근, 조용철, 최희구 (2000). 해양환경정보총람, 해양수산부 국립수산진흥원, pp.57-58.
- 문덕수, 김현주, 정동호 (2005). 해양심층수의 안정성 조사 및 분석, 2005년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp.1626-1629.
- 윤한삼 (2004). 육역-해역혼합모델을 이용한 연안해양환경 특성평가 및 해역 관리에 관한 연구, 부경대학교 대학원, pp.104-186.
- 이인철, 윤한삼 (2005). 동해 심층수 개발해역의 오염부하량 해석과 해황변동, 한국해양공학회지, 제19권 제1호, pp.14-19.
- 이인철 (2003). Tank모델에 의한 영일만 유입오염부하량의 계절변동 예측, 한국해양환경공학회지, 제6권 제3호, pp.63-71.
- 이인철 (2001). 廣島灣에서의 잔차류와 물질수송의 수치모형실험, 한국해양공학회지, 제 15권 제1호, pp.45-51.
- 이인철, 류청로 (2001). 수-저질 생태계 모델에 의한 博多灣의 물질순환예측, 한국해양환경공학회지, 제4권 제2호, pp.3-14.
- 조광우, 맹준호, 신범식, 김병준 (2003). 해수유동 및 부유사확산의 예측기법 개선에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원.

- 최병호, 김동훈, 장경일 (1996). 東海에서의 浮漂追跡 시뮬레이션, 한국
해안·해양공학회 정기학술강연회 발표논문 초록집, pp.147-150.
- 해양수산부 (2003). 해양심층수의 다목적 개발(2), pp.318-418.
- 해양수산부 (2004). 해양심층수의 다목적 개발(3), pp.435-492.
- 홍석원, 김현주, 강윤구 (1998). 해양에너지이용공학, 신기술, pp.11-27.
- 환경부 (2002). Homepage: <http://www.me.go.kr>
- 深見公雄 (2002). 海洋深層水の大量排水が岸海域の植物プランクトン群集に与
える影響, 私信.
- Gill, A. E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press,
pp.599-600.
- Hashino, M., H. Yao and H. Yoshida (2002). Studies and evaluations
on interception processes during rainfall based on a tank model,
J. of Hydrology, pp.255, pp.1-11.
- Jorgensen, B.B. (1977). The Sulfur Cycle of a Coastal Marine
Sediment, Limnol. & Oceanogr.
- Lee, C.K. (1970). On the currents in the western channel of the
Korea Strait(in Korean), Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Korea, 6:
pp.175-232.
- Leendertse, J.J (1971). A water quality simulation model for
well-mixed estuaries and coastal sea, Vol. 2, Rand Corporation.
- Yakoo, Y., S. Kazamz, M. Sawamoto and H. Nishimura (2001).
Regionalization of lumped water balance model parameters based
on muliple regression, J. of Hydrology, pp.246, pp.209-222.
- Yi, S.U. (1966). Seasonal and secular variations of the water volume
transport across the Korea Strait, J. Oceanol. Soc. Korea, 1:
7-13.
- 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, pp.125-130.

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, pp.125~130.