

영일만내의 유동과 수질특성에 관한 연구

김헌덕 · 김종인* · 류청로**

포항종합제철(주) 환경안전부 · 동아대학교 토목공학과* · 부경대학교 해양공학과**

Study on Current and Water Quality Characteristics in Yongil Bay

Hun-Duk Kim, Jong-In KIM* AND Cheong-Ro Ryu**

Pohang Iron & Steel Co. · Donga University, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Water level difference 수위차, Water quality characteristics 수질특성, Numerical experiment 수치실험, 3-D baroclinic model 3차원 밀도류모델, Current characteristics 유동특성

ABSTRACT: The water quality in Yeongil Bay is getting worse due to the sewage and the waste water from the surrounding industrial complex. The study aims to simulate the current system that is necessary to built ecosystem model for the optimum water quality control and clarify the correlation of current system characteristics with water quality in Yongil Bay. To clarify the characteristics of coastal water movement system and verify the applicability of the 3-D model, the current system was simulated using 3-D baroclinic model considered tidal current and density effects.

As the results of numerical experiments, it is proved the 3-D model is the most applicable on the Yongil Bay where current flows slowly and the flow direction is varied by depths. From the results of simulation considered tidal current only, it can be clearly said the water in Yongil Bay flows in through the surface layer and flows out through the bottom layer. And the fresh water from the Hyongsan river and the heated discharge from POSCO have little effect on the current structure in Yongil Bay, but have an important effect upon the density structure by diffusion of heat and salt. And the water quality distribution is closely related with the current structure characteristics as well as the tidal residual current system.

1. 서 론

영일만은 경북 포항시 흥해읍 달만갑과 대보면 장기갑 사이를 만 입구로 하는 내만으로 동해안의 회유성 어류, 패류 및 해조류가 서식하기 좋은 자연적 환경조건을 갖추고 있으며, 양식장의 적지로서 수산업상 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 포항제철을 비롯한 대규모 공업단지에서 배출되는 산업폐수와 지역주민에 의하여 배출되는 생활폐수 등이 영일만에 유입되어 오염물질의 절대량이 증가하여 영일만내의 수질이 점차 악화되고 있는 실정이다. 따라서 영일만내의 수질상태를 예측할 수 있는 오염물질의 확산기구를 규명할 필요가 있으므로 확산기구해석에 기초자료가 되는 만내의 해수유동특성을 파악해야 할 필요가 있다.

영일만의 물리해양학적 조사연구는 교통부 수로국이 선박의 안전운행과 항만개발의 기초자료를 제공하기 위하여 해수유동에 대한 조사를 실시한(수로국,1971) 이래 성 등(1993)은 현지 유속 관측자료에 근거하여 영일만 내의 잔차류와 조류의 분포특성을 제시하였으며, 이 등(1995)은 1989~1990년의 체계적인

관측자료를 토대로 영일만의 해수유동, 확산 및 형산강 유출수의 거동에 대한 기초자료를 제시한 바 있다.

이러한 지금까지의 연구에서와 같은 현장관측에서 획득한 자료의 해석을 통한 방법만으로는 조차가 작고 해수의 흐름이 미약한 영일만의 유동특성을 규명하기에는 한계가 있으며, 현장관측에는 많은 장비와 시간과 인력이 소요된다. 한편, 물리해양학적 조사, 연구와 접목되지 못한 해역에 대한 오염도 조사 또한, 조사시점에서의 영일만의 수질오염을 판단하는 이외에 오염의 원인 파악과 향후의 오염예측 및 오염저감방안 수립에는 한계가 있다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해서는 영일만의 해수유동을 정도 높게 재현할 수 있는 유동모델의 구축이 필요하며, 영일만내의 해수유동특성과 수질분포특성과의 관련성을 규명해둘 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 3차원 밀도류 해수유동 수치모델을 구축하여 영일만의 해수유동을 재현하여 물질수송에 중요한 조석잔차류의 유동구조특성과 하천수 및 온배수확산에 의한 밀도변화특성을 파악하며, 해수의 유동특성이 수질분포특성에 미치는 관련성을 규명하고자 한다.

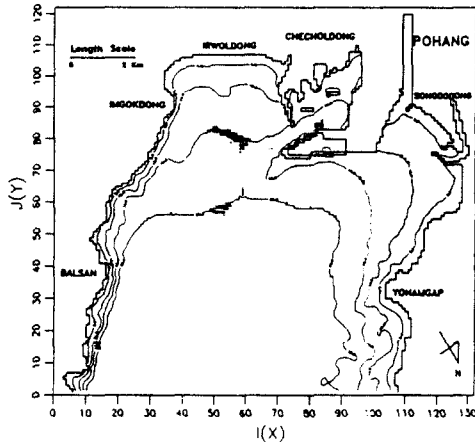


Fig. 1 The Bottom Topography of Young-il Bay

2. 영일만의 해저지형

영일만은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 달만갑과 장기갑을 연결하는 수표면적이 약 100 km² 인만으로, 만구폭은 약 10 km, 길이는 약 12 km인 직사각형에 가까운 만의 형상을 하고 있다.

만 입구 중앙부의 수심이 가장 깊어서 25~30m를 나타내고, 만내측 및 해안으로 갈수록 점차 수심이 얕아지며, 만내측 방향으로 해저경사는 약 1/1,000으로 완만한 편이다(Fig. 1). 따라서 등심선은 해안선에 거의 평행하며, 포항신항 주변의 해저지형이 비교적 평탄한 반면 구룡반도 전면에서는 해저경사가 비교적 급하여 해안선으로부터 약 500 m 떨어진 해역에 20 m 수심이 나타난다.

3. 영일만내의 수질특성

3.1 영일만의 수질관리등급

영일만은 인근 공단 및 도시 활동에 의한 공업폐수와 생활하수인 담수가 대량으로 유입되며 냉각수가 유입하는 하구특성을 가지고 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 영일만은 청정해역인 동해 동남부 해역으로 열려져 있는 지형적인 구조를 가지고 있으므로 국내의 해역 관리등급을 기준으로 3개 등급의 수질 환경기준관리영역으로 나누어 관리되고 있다.

영일만에서 III등급 해역은 포항시 두호동 이내리 남단(N36° 03.6', E129° 23.5')에서 송정동 북측 방파제선단의 연장선과 육지가 만나는 지점인 동해면 임곡동 서북단(N35° 00', E129° 27.6')을 연결한 내측해역으로 지정되어 있으며, II등급 해역은 포항시 여남동 동단(N35° 04.4', E129° 25.3')에서 동해면과 대보면의 경계해면 지점(N36° 03.0', E129° 31.5')을 연결한 내측해역 중 III등급을 제외한 수역을 말한다. I등급 해역은 앞서의 II등급 해역의 외측 해역 전체에 해당된다.

3.2 수질조사결과

형산강 하구에서 영일만 입구에 이르는 전 해역을 대상

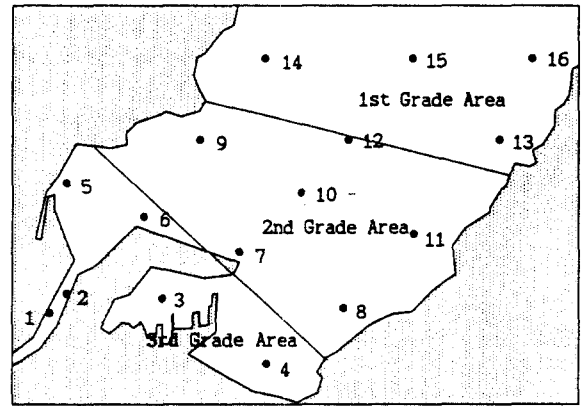


Fig. 2 Location Map of Water Quality Measuring Point

으로 한 최근에 실시한 영일만 해역의 수질조사는 1998년 포항산업과학연구원에 의하여 수행되었다. 총 16개의 조사정점(Fig. 2)에 대하여 계절별로 실시되었다. 해수시료채취는 수심에 따라 표층, 중층, 저층의 3개 수심에서 실시되었다.

3.2.1 수온

1998년의 겨울의 영일만내 층별 온도분포는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 대부분 10.5~12 °C 범위였으며, 겨울철에 흔히 나타나는 표층과 저층사이에 발생하는 대류현상에 의해 각 층간의 온도차는 0.5 °C 이내로 매우 강한 연직혼합이 발생하고 있음을 알 수 있다. 전 층에 걸쳐 달만갑 방향의 수온이 11.5 °C 이상으로 상대적으로 높게 나타나고 있는데, 이는 달만갑 방향으로부터 유입되는 큰 부피를 갖는 외해 수괴에 의한 영향으로 추정할 수 있다. 이에 반해 상대적으로 정체되어 있고 부피가 작은 도구 해수 육장 전면 해역의 수온이 가장 낮고, 임곡과 발산방면의 수온이 11 °C 이하의 낮은 온도 분포를 나타내고 있어, 만 남쪽에서 차가운 대기온도의 영향이 크게 작용하고 있다는 것을 알 수 있다. 반면, 포항제철의 냉각수 배출수에 의한 영향은 형산강 하구역에 제한되어 나타나고 있다.

3.2.2 염분

영일만내 해수의 염분은 동계에 20.4~34.6 ‰, 하계에 19.2~33.4 ‰ 범위의 값을 가지며, 공간적인 염분의 계절변화는 거의 없음을 알 수 있다.(Fig. 3). 염분은 전체적으로 외해측이 내만측보다, 저층이 표층보다 높은 염분을 나타낸다. 이는 일반적인 현상으로서 내만측 해역에는 형산강 담수의 유입에 의한 수평혼합 때문이고, 염분이 높아짐에 따라 밀도가 증가하여 수괴가 침강함으로써 연직혼합이 이루어지기 때문이다.

저염수는 주로 형산강 담수의 영향을 받는 해역에 위치하는 St. 1과 St. 2의 표층에서 나타나며, 상대적으로 고염수는 주로 달만갑 및 장기갑 주변해역에 분포하고 있다.

영일만의 염분분포에서 특징적인 현상은 전층에 걸쳐 만 북측해역에 비해 남측 해역이 낮은 염분을 나타내고 있다. 이 결과로부터 형산강 담수유입의 영향이 만 북측해역보다 남측해

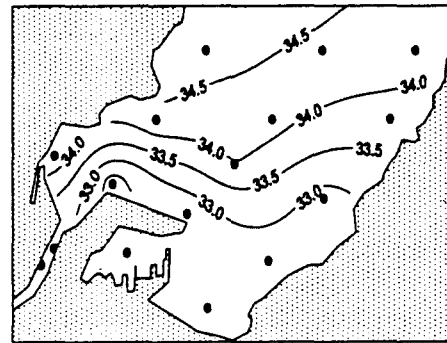
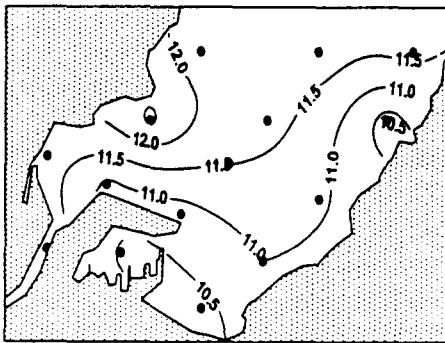
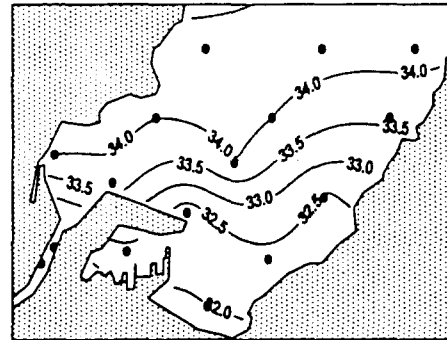
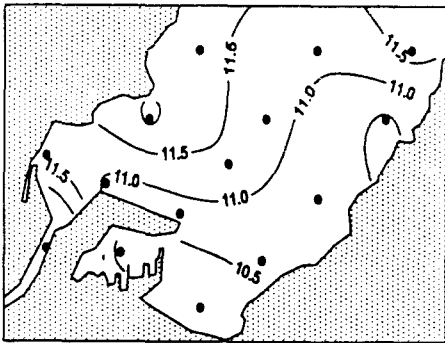
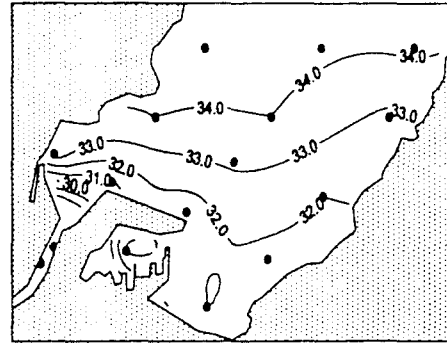
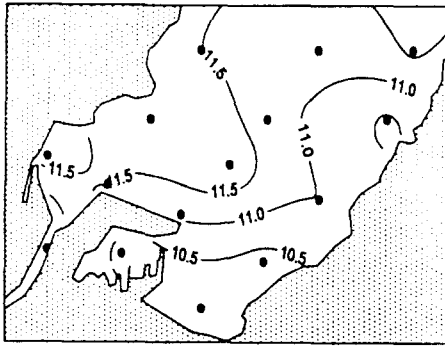


Fig. 3 Temperature distribution at the surface, middle, bottom in Young-il Bay (in Winter)

Fig. 4 Salinity distribution at the surface, middle, bottom in Young-il Bay (in Winter)

역에서 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있고, 이로부터 영일만의 유동구조와 밀접한 관계가 있을 것으로 추정할 수 있다.

3.2.3 DO(Dissolved Oxygen)

계절에 따라 DO 농도는 동계에 6.5~7.3 ppm의 범위에 분포한다(Fig 5). 동계에는 전 층에 걸쳐 높은 용존산소를 나타내고 있는데, 수질환경 기준상 전 층에서 6 ppm 이상의 I등급 기준을 만족한다. 형산강 하구역에서 포항제철 투기장 전면부와 임곡 부근해역에 이르는 해역이 상대적으로 낮은 농도를 보이나, 층별 차이는 거의 없었다.

3.2.4 총 질소(Total Inorganic Nitrogen)

총 질소는 해역 수질관리 기준상 해양 환경내에서 200 ppb

를 넘지 않도록 규정하고 있다. 총 질소농도의 해역 수질기준은 I등급 50 ppb 이내, II등급 100 ppb 이내, III등급 200 ppb 이내로 규정하고 있다. 동계 중 총 질소의 농도는 129.9~2203.7 ppb 범위에 분포하고 있다(Fig. 7). 동계 중 총 질소농도 분포를 보면, 총 질소농도만으로 판단할 때 영일만의 등급별 해역수질관리기준을 상회하는 등 전체적으로 III등급 이하의 수질상태로 부영양화가 심각한 상황에 있음을 알 수 있다. 해역별로는 형산강 하구역, 포항 구항 및 일월동 주변해역에서 보다 높은 농도를 나타내고 있는데, 이는 질소의 오염원이 포항 구항, 형산강 및 임곡의 정체된 해역에 있음을 추정할 수 있으며, 영일만의 유동특성상 포항 구항, 형산강 및 임곡 주변

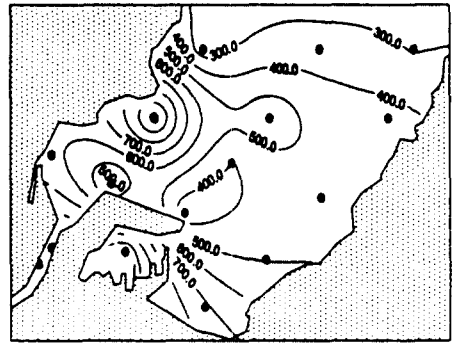
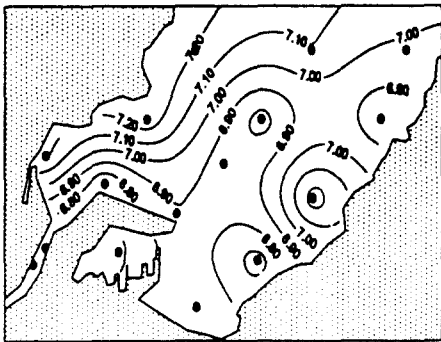
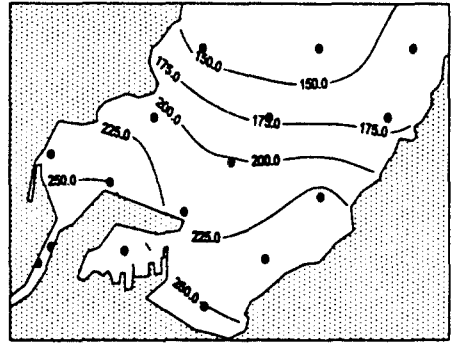
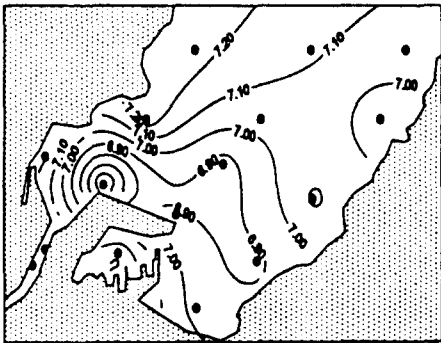
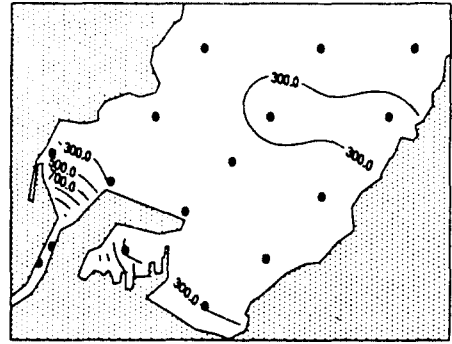
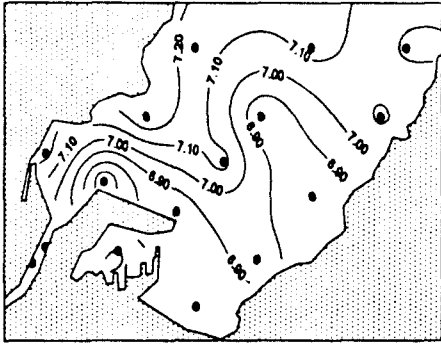


Fig. 5 DO distribution at the surface, middle, bottom in Young-il Bay (in winter)

Fig. 6 TIN distribution at the surface, middle, bottom in Young-il Bay (in winter)

해역은 직사각형의 모서리부에 위치하여 해수가 교환되기 어려운 해역이며, 유동특성과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문이다. 특히, 연직방향의 총 질소농도분포로부터 알 수 있는 바와 같이 표층에 비하여 저층에서의 농도가 크게 나타나고 있는데 이는 기온하강에 의한 강한 연직혼합과 영일만의 유동특성에 의한 해수교환의 정체성이 강하기 때문이라 할 수 있다.

4. 수치실험의 내용

수치실험은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 장기갑과 달만갑의 내만인 영일만을 대상으로 수행하였으며, 모델의 재현성 검증

을 위하여 설정한 조위(St. PT-1) 및 유속(St. PC1, St. PC2, St. PC3)의 비교정점을 나타낸다, 수치실험에 사용한 입력조건은 Table 1과 같다.

Fig. 8은 3차원 밀도류 모델의 영일만내의 유동재현을 위하여 나타난 실측조위와 계산조위를 나타낸 것으로, 관측치 중에는 조위이외의 성분에 의한 수위상승이 불규칙적으로 나타나고 있으므로 Butter-worth 수치필터를 사용하여 조류이외의 성분을 제거하여 나타난 결과 계산조위는 영일만내의 조위를 양호하게 재현하고 있었다.

Table 1 Conditions for numerical simulation

Item		Simulation condition
Time interval		10 sec
Horizo. mesh interval		100 m
Vertical direction resolution(7 levels)		2 m, 2 m, 2 m, 4 m, 4 m, 5 m, 8 m
Summer atmospheric condition (Feb. '98)		<ul style="list-style-type: none"> • Air Temp.: 3.1 °C • Vapor pressure : 26.2h Pa • Cloud: 6.7
Sea boundary cond (Feb. mean)-Youngil		<ul style="list-style-type: none"> • Seawater Temp. : 10.3 °C • Salinity : 33.98 ‰
Discharge boundary condition	Hyongsan River	<ul style="list-style-type: none"> • Temperature: 9.2 °C • Quantity: 8.6 m³/sec
	POSCO Dis.	<ul style="list-style-type: none"> • Temperature : Seawater Temp. +7 °C • Salinity : 33.98 ‰ • Quantity: 17.7 m³/sec
Tide		M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁
Drag coefficient		<ul style="list-style-type: none"> • Sea floor: 2.6×10⁻³ • Wall: 1.0×10⁻³
Horizontal eddy coef.		SGS Model: 50 ~ 0.1 m ² /sec
Vertical eddy coef.		Neutral cond. 0.005 m ² /sec
Coriolis parameter		4.1711×10 ⁻⁷ /sec(N35 °)
Total computing time		60 tides

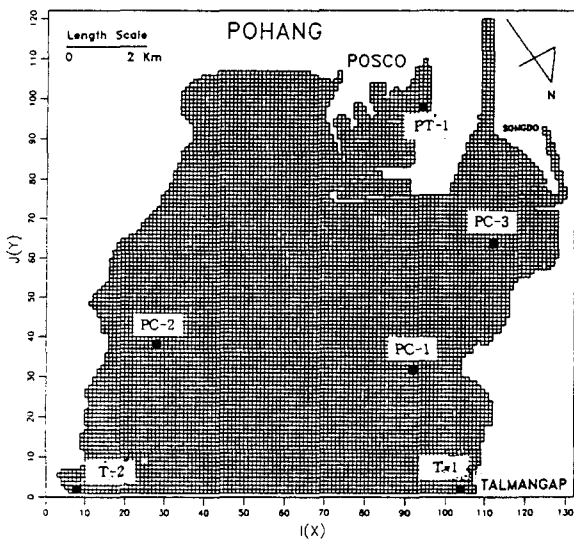


Fig. 7 Horizontal grid system and measuring station of the tide and current in computation domain

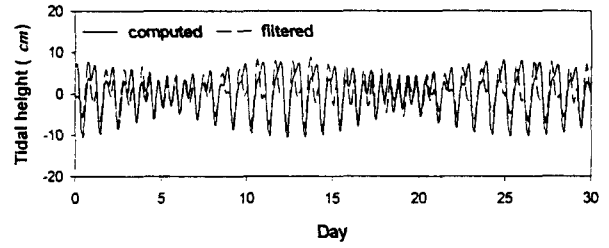


Fig. 8 Comparison of tidal level between computed and observed data at St. PT-1

5. 수치실험의 결과와 고찰

5.1 영일만의 조석잔차류 특성

3 차원 밀도류 모델을 사용하여 계산한 영일만내의 동계 대조기 수심별(1 m, 3 m, 5.5 m) 잔차류의 유속벡터는 Fig. 9와 같다. 제 1층(수심 1 m)에서는 전반적으로 외해수가 형산강 하구역 및 일월동 전방해역으로 영일만 내측으로 유입하는 특성을 나타내고 있다. 반면, 제 2층(수심 3 m)을 통하여 형산강 하천수와 발전소 냉각수가 혼합하여 포항제철 제 4투기장 전방호안을 따라 남동진하여 일월동 전방해역으로 향하는 잔차류의 특성을 나타내고 있다. 그러나 제 3층(수심 5.5 m)에서는 일월동과 입곡동 전방해역에는 잔차류의 유속이 매우 작아 저층수는 교환되기 어려워 거의 정체되어 있고, 게다가 형산강 하천수 및 생활폐수와 함께 유입된 오염물질이 순환되기 어려운 해역으로 수송되어 계속 축적되기 쉬운 유동상황하에 놓여 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 일월동(도구 해수욕장) 전면해역에 정체성 해역이 형성되어 동계에도 표층보다 저층에서 영양염류의 오염도가 높게 나타나는 것은 영일만내의 잔차류 특성과 밀접한 관계를 가지고 있음을 잘 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 하천수와 냉각수 유입을 고려하여 계산한 수심 1 m 및 3 m에 있어서의 최강 조류·낙조류시의 밀도분포를 Sigma-t로서 나타낸 것으로 형산강 하천수가 수송되어 정체되는 남쪽해역이 외해수가 유입하는 북측해역에 비하여 낮은 밀도를 나타내고 있다. 또한 제 1층(1 m)에서는 등 밀도선은 밀물시에는 제 4투기장 전방해역에 평행하게 분포하고 있으며, 썰물시에는 형산강하구를 중심으로 환상으로 확산되고 있는 특성을 나타내고 있다. 반면, 제 2층(3 m)에서의 등 밀도선은 조시와 관계없이 형산강하구와 장기갑을 연결하는 선과 평행하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서 2제 2층을 통하여 만내수가 만외로 유출되고 있음을 알 수 있다.

영양염류의 수심별, 해역별 농도분포는 표층보다 저층의 농도가 높고, 저층 중에서도 만 북측보다 만 남측에서 농도가 높은 현상을 뚜렷이 나타내고 있다. 이러한 현상은 물질수송에 중요한 역할을 하는 조류잔차류의 유동특성 즉, 외해수가 상층에서 유입되어 하층으로 유출되고, 만 북측인 달만갑에서 유입되어 포항신항 전면해역에서 환류하여 장기갑으로 유출되는 흐름이 형성되는 영일만의 유동특성과 밀접한 관련성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

한편, 일월동(도구 해수욕장) 전면해역에서 영양염류의 오염

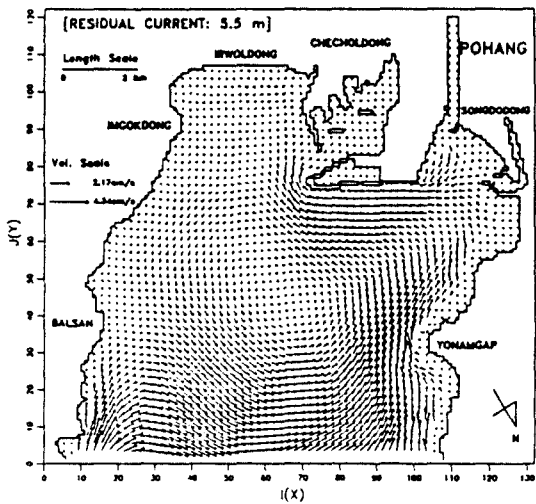
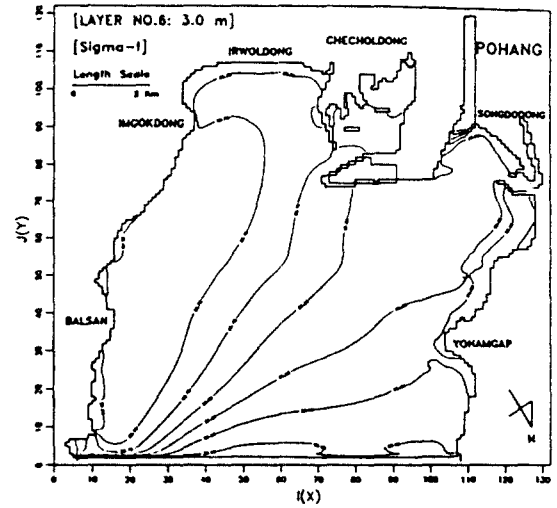
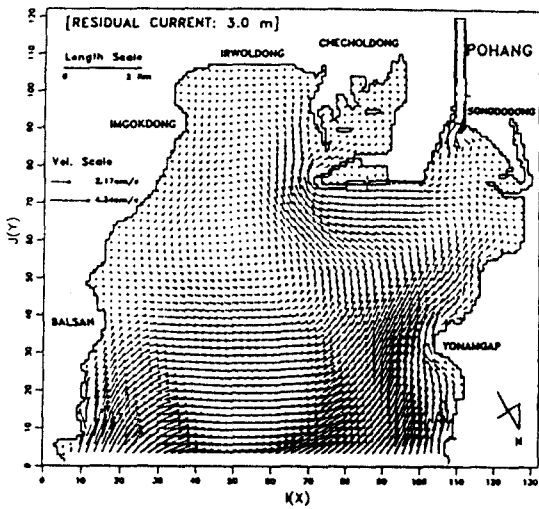
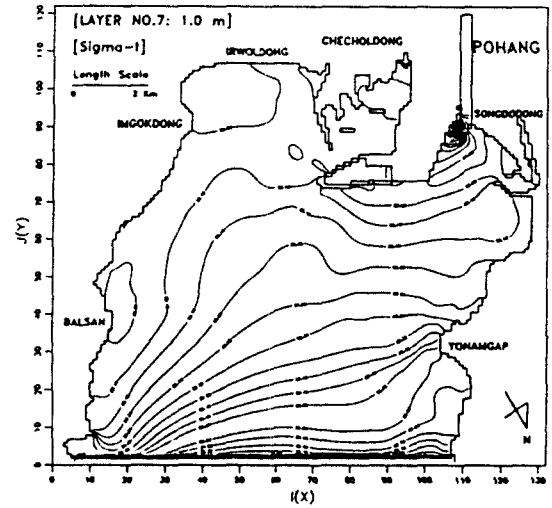
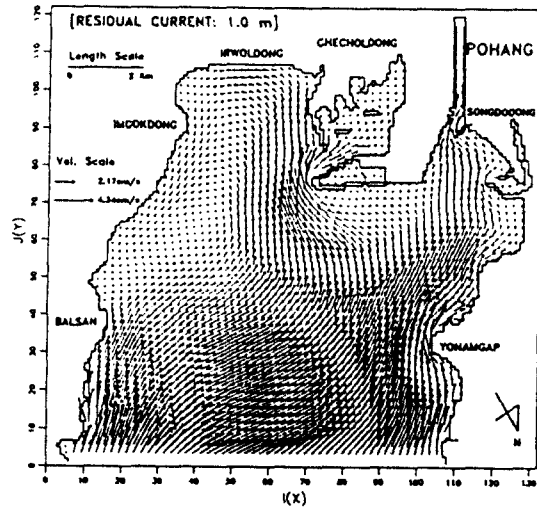


Fig. 9 Computed tidal residual currents at 1 m, 3 m, 5.5 m depths in Young-il Bay (in winter)

도가 높게 나타나는 것은 영일만 내의 유동특성에 의하여 정체성 해역이 형성된 것을 알 수 있다.

Fig. 10 Computed sigma-t at 1 m and 3 m depth on the flood, flow in Young-il Bay (in winter)

4. 결 론

본 연구에서는 1994년 7월과 1995년 1월에 실시된 현장관측 자료를 분석하고, 3차원 밀도류 해수유동 수치모델을 구축하여 영일만의 유동을 재현하여 조류잔차류의 유동구조와 하천수 및 발전소 냉각수의 확산특성을 규명하였다. 또한 1998년의 영일만 오염도 조사자료를 분석하여 영일만의 오염도 현황 및 특성을 파악한 후 영일만의 수질분포와 유동구조의 관련성을 고찰하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하천수 및 냉각수의 유량은 영일만내의 해수용량에 비하여 매우 작으므로 영일만의 해수유동 및 밀도구조특성에 미치는 영향이 미미하다.
- (2) 영일만에서는 만외수는 표층을 통하여 유입되고, 만내수는 미약한 저층을 통하여 유출되는 유동구조를 가진다.

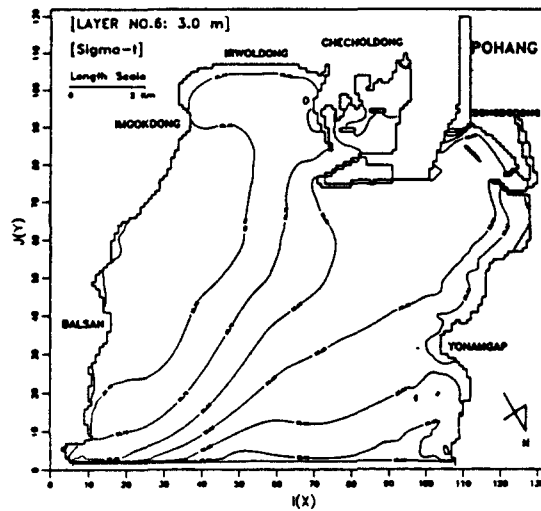
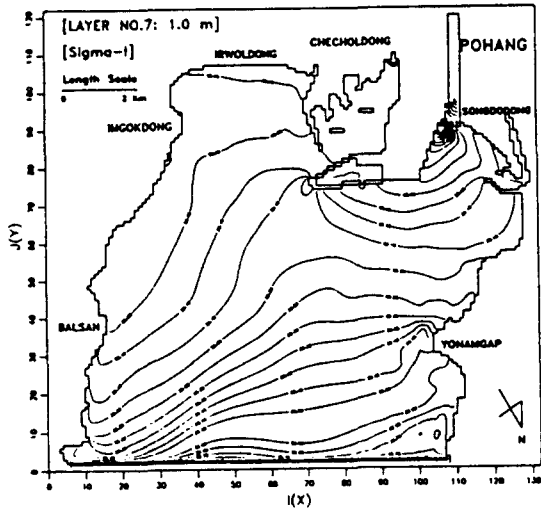


Fig. 11 Computed sigma-t at 1 m and 3 m depth on the ebb flow in Young-il Bay (in winter)

(3) 해수의 흐름방향은 영일만 북측에 위치한 달만갑 부근 해역에서 유입되어 포항방향 전면해역에서 환류하여 장기갑 전방해역으로 유출된다.

(4) 이러한 영일만내의 흐름 특성으로 인하여 영일만 중앙으로 돌출한 포항방향의 영향으로 일월동(도구 해수욕장) 전방해역에 정체성 해역이 형성된다.

(5) 영양염류의 수심별, 해역별 농도분포는 표층보다 저층의 농도가 높고, 저층 중에서도 만 북측보다 만 남측에서 농도가 높은 현상을 뚜렷이 나타내었으며, 일월동(도구 해수욕장) 전면해역에서 영양염류의 오염도가 높게 나타났다. 이는 영일만의 지형 및 유동특성에 의하여 정체성 해역이 형성된 결과이며, 영일만의 수질분포는 유동특성과 밀접한 관련성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 영일만내에서 발생하는 수질악화 및 적조발생은 조류간차류의 연직유동구조특성과 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수질오염의 예측 및 저감방안을 수립하기 위해서는 해양수질모델에 의한 검토가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

김종인(1997). "오사카만에 있어 하천으로부터의 유입토사의 수송 및 퇴적기구", 오사카대학 공학박사학위논문, pp. 31~52.

김종인, 김현주(1999). "3-D 밀도류모델을 이용한 고온·고염수의 확산해석", 한국해양공학회지 제 13권 제3-2호, pp 3~13

이종섭, 김차경, 김종화, 임기봉 (1995). "영일만의 해수유동구조 및 확산특성", 한국해양학회지 Vol. 30, No. 5, pp. 467~479.

성기탁, 임기봉, 이석철(1993). "영일만의 향류와 조류의 분포", 수산진흥원연구보고, 47: 1-7.

포항종합제철(주)(1992). "포항제철주변 해양환경조사 보고서" 1-1~19, 2-1~28.

포항종합제철(주)(1998). "영일만 해양오염도 조사와 평가에 관한연구", pp 11~68.

포항종합제철(주)(1998). "포항제철소 제 4투기장 조성 수치모형실험 보고서", pp 15~74.

포항산업과학연구원(1998). "형산강수계 수질개선 대책 연구", pp 29~49.

국립수산진흥원(1998). "한국해양환경 조사연보", 제2권 제35호.

이석우(1994): "한국항만수리지

이석우(1992): "한국근해 해상지.