광양만과 진주만 해역에서 담수 유입으로 인한 밀도성층 변화 Variation of Density Stratification due to Fresh Water Discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay

강영승* · 채영기** · 이형래***

Young Seung Kang* Yeongki Chae** and Hyung Rae Lee***

요 지 : 본 연구에서는 EFDC 모델을 이용하여 광양만과 진주만 해역에 대한 조석과 수온, 염분을 고려한 3차원 해수순환 양상을 재현하였다. 수치모델 결과는 관측 자료를 이용하여 검증하였고 그 결과 모델은 관측결과를 잘 재현하였다. 실험 결과, 연구해역의 해수순환은 노량수도와 대방수도 중간 해역에서 해수가 수렴 및 발산되는 양상을 보이고 잔차류는 전형적인 2층 순환구조를 보인다. 모델을 통해 광양만과 진주만 일대의 밀도성층 변화를 분석한 결과, 연구해역은 담수의 영향이 지배적인 해역으로 진주만의 경우 남강댐 방류의 영향을 지배적으로 받는 해역이지만 남강댐에서 방류를 하지 않는 경우에는 섬진강의 영향도 받는 것으로 나타났다. 한편 남강댐 방류시에는 광양만의 성층이 상대적으로 강화되는 결과를 볼 수 있었다.

핵심용어 : 밀도성층, 담수, 잔차류, 광양만과 진주만

Abstract : This study simulate three-dimensional ocean circulation patterns using the EFDC model in the Kwangyang Bay and Jinju Bay, considering tide, water temperature and salinity. The numerical model results were verified using observed data. The model results well reproduced the observed data. As a result, ocean circulation patterns in the study area show convergence and divergence in the middle area of Noryang waterway and Daebang waterway, the residual flow patterns show typical two-layer circulation. According to the change of the density stratification in the Kwangyang Bay and Jinju Bay, the effect of fresh water is dominant in study area. In the case of Jinju Bay, although it is strongly influenced by the Namgang fresh water, also it is affected by Seomjin River when there is no discharge by Namgang Dam. On the other hand, the stratification of the Kwangyang Bay is relatively enhanced by the discharge of Namgang Dam.

Keywords : density stratification, fresh water discharge, residual current, Kwangyang Bay and Jinju Bay

1. 서 론

연구해역인 광양만과 진주만 해역은 우리나라 남해안의 중앙에 위치하고 있으며, 남해도를 기준으로 서측의 광양만은 남측의 여수수도를 통해 외해와 연결되어 있고, 동측의 진주만은 북쪽으로 사천만, 남쪽으로 강진만과 연결되며 창선도 북측의 대방수도와 남측의 창선수도를 통해 외해로 연결되어 있다(한, 1995). 광양만의 경우 남해도 서쪽에 수심 20 m 이상의 골이 존재하고 있고 상류로 가면서 모도 북측수로와 노량수도로 분기되는데 수로중앙부의 수심은 30 m 이상이고 만의 서측은 수심 5 m 이내로 낮은 수심 분포를 보인다. 한편, 진주만 동측의 대방수도 부근의 수심은 20 m 이상이며 창선도 서측 강진만 해역의 수심은 5 m 이내로 얇은 수심 분포를 보인다. 반면 광양만 북측은 섬진강, 사천만 북단에 있는 가화

천은 남강댐의 방수로와 각각 연결되어 본 연구해역은 담수의 영향을 직간접적으로 받는 해역이다.

담수와 해수가 만나는 기수역의 물리적인 특성은 주로 강우량, 기온, 바람, 조석 등에 의해 영향을 받는데, 특히 기수역의 해수순환은 계절별 담수유입량의 변화에 따라 순환양상이 다르게 나타난다. 이를 파악하기 위해서는 장기간의 관측이 필요한데 Lee *et al.*(2006)이 1994년부터 1999년까지 광양만 북동부 해역에서 해류관측을 실시한 결과에 의하면 노량수도와 대도 북측수로에서 지속적으로 양쪽으로 발산하는 해류를 보상하기 위해 노량수도 서측해역에서 반시계방향의 순환이 존재하며 그 중 일부가 노량수도를 통해 진주만으로 유입되는데 이러한 순환은 여름철에 강하고 겨울철에 약화되는 것으로 보고한 바 있다.

광양만은 광양제철소가 건설된 이후 컨테이너부두 건설과

*(주)전략해양(Corresponding author : Young Seung Kang, Ocean Research and Strategy Corp. Seoul, 153-760, Korea, kys503@hanmail.net)

** (주)전략해양(Ocean Research and Strategy Corp. Seoul, 153-760, Korea)

*** (주)한국해양과학기술(Korea Ocean Science & Engineering Corporation Seoul, 152-769, Korea)

같은 매립공사와 항로유지를 위한 준설공사가 지속적으로 이루어져 왔으며 이에 따른 해양환경 변화를 평가하기 위해 해양관측 및 예측실험이 수행되었다(추 등, 2002). 한편, 광양만에 비해 상대적으로 해양환경변화의 요인이 적었던 진주만 해역에 대한 연구결과가 많지 않으며 최근 Ro(2007, 2010)와 Jung(2007) 등에 의해 해양관측 및 수치모델을 이용한 연구결과가 보고된 바 있다. 한편, Cho(2005)는 광양만과 진주만 해역의 해수유동 상황을 2개의 주요 조석조화상수(M_2 , S_2)를 반영한 수치실험을 수행하여 두 개의 만을 연결하는 노랑수도 해역의 잔차류 특성에 관하여 연구한 바 있다.

기존의 연구결과는 주로 광양만의 개발이 활발하게 이루어졌던 시기에 광양만을 중심으로 수치모델의 동측경계를 노랑수도로 한정하여 수행되어 왔으나 노랑수도를 통한 해수유동은 진주만 해역과 밀접한 연관성을 가지고 있고, 이는 수치모델의 영역을 광양만과 진주만 해역을 동시에 고려해야 함을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 대상해역을 광양만과 진주만을 포함하고 남쪽으로는 여수해역과 동쪽으로는 사량도까지 영역을 확장한 수치모델을 수립하였으며, 모델 경계에서는 2007년 8월~9월에 관측한 조석, 수온, 염분 연속관측 자료를 이용하여 입력하였고 섬진강과 남강댐의 방류량과 진주, 남해, 여수기상대의 바람을 포함한 기상자료를 활용하여, 경압(baroclinic effect)효과와 해양-대기 열교환이 고려된 해수순환 현황을 재현하고, 관측자료를 이용하여 검증된 수치모델을 통해 연구해역의 담수 영향으로 인한 밀도성층 변화를 분석하였다. Fig. 1은 연구해역의 수심과 연구에 활용한 관측정점을 나타낸 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1 사용모델의 개요

연구 대상해역인 광양만과 진주만 일대의 경압효과를 고려한 해수유동특성을 재현하기 위해 사용한 모델은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)모델이다. EFDC모델은 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science, Hamrick, 1992)에서 개발된 것으로 연안, 하구 호소, 습지 등의 해수유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 모델로 현재 세계의 여러 대학 및 연구기관에서 적용한 바 있다(Park *et al.*, 2005).

EFDC 모델은 수직방향으로 좌표계를 사용하며, 수평방향으로는 직각(cartesian)또는 직교-곡선(orthogonal-curvilinear)좌표계를 사용할 수 있으므로 복잡한 연안 지형과 하천의 흐름을 직각좌표계 보다 잘 재현할 수 있는 장점을 가진다. 수직와동점성계수를 계산하기 위하여 Mellor and Yamada(1982)의 turbulence closure scheme(level 2.5)을 사용하고, 질량보존 scheme을 이용하여 천해역에서 3차원의 조건대 처리가 가능하다(Hamrick, 1994; Moustafa and Hamrick, 2000). 또한 EFDC 모델은 수질 모델이나 퇴적물이동 모델과 접합이 용이한 장점을 가지고 있으며(Sission *et al.*, 1997) 물리적, 수치해석적으로 Blumberg and Mellor(1987)의 모델과 많은 공통점을 가지고 있으며 보다 자세한 설명은 Hamrick(1992)에 제시되어 있다.

2.2 관측 자료

해수유동 모델의 개방경계 조건과 보정 및 검증자료로 사

Fig. 1. Lowest low water depth(m) at Kwangyang Bay and Jinju Bay in Korea with the insert showing Korean Peninsula.

용하기 위해 연구해역에서 남강댐 방류가 있었던 2007년 하계에 조석은 3개 정점, 표층저층의 수온과 염분은 8개 정점에서 각각 30일간 연속관측을 수행하였다(Fig. 1). 조석관측 시기는 2007년 8월 16일~9월 15일이며, 세 정점의 관측 위치는 각각 사천대교 남단(T1)과 사량도 북측(T2) 그리고 남해도 동남쪽 미조 부근(T3)이다. 연속수온과 염분 관측시기는 정점별로 상이하지만 2007년 8월 8일~9월 12일의 기간 중 각 30일간이며, 관측 위치는 가화천 남강댐 방수로(TS1), 노량수도 인근(TS2), 사천대교 남단(TS3), 강진만(TS4), 창선대교 북동쪽 서수도(TS5), 사량도 북측(TS6), 여수항 인근(TS7) 그리고 남해도 남동측(TS8)이다. 또한, 모델의 초기조건 입력을 위해 2007년 6월 21일에 모델 영역 내 45개 정점에서 표층, 중층, 저층별로 수온과 염분 관측을 수행하였다.

또한, 국립해양조사원에서 제공하는 광양만 PT1 정점의 조석 조화상수, (주)한국해양과학기술에서 2007년 하계에 관측한 노량대교 인근 PT2 정점의 조석 조화상수와 국립해양조사원에서 2005년 춘계에 30일간 관측한 노량수도의 PC1 정점과 대방수도의 PC2 정점 그리고 노 등(2007)이 2004년 하계에 강진만의 PC3 정점에서 15일간 관측한 조류자료를 수집하여 수치모델 검증자료로 이용하였다(Fig. 1과 Table 1).

2.3 모델 수립

모델의 계산영역은 광양만, 진주만, 사천만과 강진만을 포함하여 동서방향으로 58 km, 남북방향으로 48 km의 해역으로 설정하였고 수평방향으로는 60m~700 m의 직교곡선격자 체계(orthogonal curvilinear grid system)를 채택하여 해안선과

Table 1. Summary of observed tide data

	Station	Location(WGS-84)	Observation period
Tide	T1	34-59-25 N 128-02-26 E	2007.08.16~2007.09.15
	PT1	34-53-24 N 127-45-55 E	1982.03.01~1983.03.04
	PT2	34-56-41 N 127-51-44 E	2007.08.28~2007.09.26
Tidal current	PC1	34-56-43 N 127-52-43 E	2005.04.14~2005.05.16
	PC2	34-55-42 N 128-03-05 E	2005.04.14~2005.05.16
	PC3	34-52-15 N 127-56-00 E	2004.08.15~2004.08.30

지형을 정밀하게 재현하였다(Fig. 2). 한편 연직방향으로는 5개의 sigma층으로 설정하였다. 수치모델에 입력된 수심자료는 국립해양조사원에서 발행한 최근의 수심해도와 광양만에서 국지적으로 개발사업 시행시 측량한 수심자료를 이용하여 각 격자점에 입력하였다. 모델의 초기조건은 해수의 흐름이 없는 상태(cold-start)로 하였으며 모델의 외해경계조건은 주요 4개 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)가 합성된 조위를 경계면에서 정의하였다. 모델의 매 계산시각마다 외해개방경계에 입력되는 조위는 여수항 기준점조소 자료와 전술한 모델경계에서 관측한 조석 자료(T2, T3)를 이용하였고, 수온과 염분 자료 역시 모델 경계에서 연속적으로 관측한 자료를 이용하였으며, 바람 및 기상자료는 진주, 남해, 여수기상대의 매시별 자료를 이용하여 입력하였다. 섬진강과 남강댐의 유량은 국가수자원종합정보 시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공되는 2007년 하계에 대한 매시별 자료를 이용하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 수치모델에 입력된 태양복사에너지와 섬진강과 남강댐의 담수방류량을 각각

Fig. 2. Computational grid map.

Fig. 3. Model input data for solar radiation.

Fig. 4. Model input data for fresh water discharge.

나타낸 것이다. 수치모델은 40일간 계산하였으며, 관측자료를 이용하여 모델 계산결과에 대한 보정 및 검증을 실시하였다.

2.4 수치모델의 보정 및 검증

모델의 보정 및 검증을 위하여 조위 3개 정점(T1, PT1, PT2), 조류 3개 정점(PC1, PC2, PC3), 수온 및 염분 4개 정점(TS2, TS3, TS4, TS5)에서 모델 결과가 관측자료와 잘 일치하도록 반복계산을 수행하였다. 조석검증은 관측된 조석의 조화상수와 계산치를 조화분해한 조화상수를 비교하여 모델 결과의 정확도를 정량적으로 추정하기 위해 절대상대오차(Absolute Relative Error)와 평균오차(Mean Error)를 비교하는 방법으로 검증하였으며 검증에 사용된 조석자료와 조류자료의 관측 개요를 Table 1에 정리하였다.

$$ARE = \left| \frac{X_{modeled} - X_{observed}}{X_{observed}} \right| \times 100(\%), \quad (1)$$

$$ME = X_{modeled} - X_{observed}$$

각 정점에 대한 조석검증 결과 진폭에 대한 절대상대오차(ARE)의 범위는 분조별로 0.4~18.5%이며, M_2 분조, S_2 분조, K_1 분조, O_1 분조 합인 절대상대오차는 세 정점에서 모두 98.4% 이상의 정확성을 보이고 있다(Table 2).

조류검증은 각 정점별로 모델결과와 관측결과를 조류타원도로 비교하였다(Fig. 5). 모델 수행기간인 2007년 8월 3일~

9월 12일에 남강댐에서는 총 15일과 4시간동안 $1,069.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 를 방류하였지만, PC1과 PC2 정점의 관측기간인 2005년 춘계에는 남강댐의 방류가 없었다. PC3의 관측기간인 2004년 8월의 남강댐 방류량은 총 12일과 12시간동안 $830.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 2007년 하계의 방류량이 더 많다. 노량수도 PC1 정점의 경우 O_1 분조에 대해 모델이 약간 작게 산정된 반면, 대방수도 PC2 정점 S_2 분조의 모델 결과는 약간 크게 산정되는 경향을 보이고 있다. PC3의 M_2 분조의 경우 유속의 크기와 방향성이 잘 재현되고, M_2 분조에 비해 7~32% 크기인 S_2 , K_1 , O_1 분조는 유속의 크기와 방향성에서 약간 차이가 있다. 대상해역에서 조류관측 기간이 모델 수행기간과 동일하지 않아 관측치와 계산치가 차이를 나타내고 있으나 전반적으로 조류 검증 결과는 대상해역의 조류분포를 잘 재현하고 있다.

수온과 염분의 검증은 2007년 하계에 노량수도(TS2), 사천대교 남단(TS3), 강진만(TS4), 창선대교 북동쪽 서수도(TS5)의 4개 정점에서 연속적으로 관측한 자료(표층,저층)를 이용하여 모델결과와 비교하였으며 수온과 염분 검증결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 정점별로 제시하였다. 수온과 염분의 계산치는 TS5 정점을 제외하고는 관측치의 일변화와 30일간의 경향성을 잘 재현하고 있다. 이는 TS5 정점의 모델 결과가 200 m 격자를 대표하는데 반해, 관측치는 조사위치가 육지에 인접한 차이 때문인 것으로 보인다. 수온과 염분의 관측치와 계산치의 검증 분석을 위해 Table 3에 통계분석 결과를 제시하였다. TS2,

Table 2. Comparison between model results and observed tidal height

St.	Constituent	Amplitude(cm)				Phase($^{\circ}$)		
		Observation	Model	ME	ARE(%)	Observation	Model	ME
T1	M_2	95.7	95.3	-0.4	0.4	260.6	261.1	0.5
	S_2	56.6	56.3	-0.3	0.5	290.1	289.5	-0.6
	K_1	16.7	17.0	0.3	1.5	192.2	191.7	-0.5
	O_1	13.1	12.8	-0.3	2.0	155.6	154.1	-1.5
	$M_2+S_2+K_1+O_1$	182.1	181.5	-0.6	0.4			
PT1	M_2	108.0	99.6	-8.4	7.8	254.5	240.1	-14.4
	S_2	50.3	57.3	7.0	13.8	282.1	269.4	-12.7
	K_1	19.5	18.0	-1.5	7.8	174.8	185.0	10.2
	O_1	13.3	13.2	-0.1	1.1	152.6	144.4	-8.2
	$M_2+S_2+K_1+O_1$	191.1	188.0	-3.1	1.6			
PT2	M_2	97.1	93.3	-3.8	3.9	259.2	256.9	-2.3
	S_2	45.3	53.4	8.1	17.9	279.0	289.0	10.0
	K_1	21.3	17.4	-3.9	18.5	180.3	194.2	13.9
	O_1	12.5	13.0	0.5	3.8	151.8	156.2	4.4
	$M_2+S_2+K_1+O_1$	176.2	177.0	0.8	0.5			

Fig. 5. Comparison between observed(solid) and model results($\times$).

Fig. 6. Comparison between computed and observed data at TS2 and TS3 station(temperature and salinity).

Fig. 7. Comparison between computed and observed data at TS4 and TS5 station(temperature and salinity).

TS3, TS4, TS5 정점에 대한 연속 관측치와 모델 결과의 최대값, 최소값, 평균값을 절대상대오차(ARE)를 이용하여 비교분석하였다. TS3 정점을 제외하고는 정점별 표저층별 오차는 최대 10.9%로 89% 이상의 정확성을 보이고 있다.

3. 수치 실험

3.1 현황

경압효과(baroclinic effect)를 고려한 수치모델 결과에 의하

면, 남강댐 방류가 없는 시기의 경우 대조기 창조시에 남해도 서측에서는 여수해만 입구로부터 북향하다가 POSCO 남측을 기점으로 광양만과 노량수로로 분기되는데 노량수로에서 2.5 m/s 이상의 강한 유속으로 진주만으로 진행한다. 남해도 동측의 경우는 사랑도 부근에서 서쪽으로 진행하여 대방수도를 지나면서 진주만과 사천만 쪽으로 분기되는데 대방수도에서 2.0 m/s 이상의 빠른 유속으로 진행한다. 강진만에서는 노량수와 대방수도를 통해 유입되는 해수가 진주만에서 합류되어 남하하는 양상을 보이고 강진만과 외해를 연결하는 창선수도

Table 3. Comparison between observed and calculated temperature and salinity

St.	Item	Temperature			Salinity		
		Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg
TS2 surface	Observed	29.3	21.5	24.4	31.0	16.1	25.9
	Calculated	28.0	21.4	24.7	31.4	16.9	26.6
	ARE(%)	4.4	0.5	1.2	1.3	5.0	2.7
TS2 bottom	Observed	26.0	21.4	23.1	32.3	25.1	29.2
	Calculated	25.9	22.1	24.1	32.5	24.2	29.3
	ARE(%)	0.4	3.3	4.3	0.6	3.6	0.3
TS3 surface	Observed	27.8	22.1	24.2	31.3	5.7	24.6
	Calculated	27.3	19.9	24.2	33.1	2.3	23.3
	ARE(%)	1.8	10.0	0.0	5.8	59.6	5.3
TS3 bottom	Observed	26.3	22.3	23.6	33.5	16.6	28.3
	Calculated	26.5	21.2	24.1	33.1	8.2	28.6
	ARE(%)	0.8	4.9	2.1	1.2	50.6	1.1
TS4 surface	Observed	28.0	21.7	24.3	33.2	19.4	26.9
	Calculated	27.2	20.8	24.4	32.2	18.8	26.9
	ARE(%)	2.9	4.1	0.4	3.0	3.1	0.0
TS4 bottom	Observed	25.0	21.3	23.5	32.6	25.6	29.1
	Calculated	26.1	21.1	23.9	32.5	24.1	29.0
	ARE(%)	4.4	0.9	1.7	0.3	5.9	0.3
TS5 surface	Observed	26.9	20.9	23.6	31.6	24.2	28.9
	Calculated	26.0	21.9	24.0	33.2	24.6	29.7
	ARE(%)	3.3	4.8	1.7	5.1	1.7	2.8
TS5 bottom	Observed	25.1	19.2	22.4	33.1	25.8	30.0
	Calculated	25.1	21.3	23.5	33.3	25.4	30.7
	ARE(%)	0.0	10.9	4.9	0.6	1.6	2.3

에서는 1.5 m/s 이상의 유속으로 강진만으로 유입된다. 이와 같은 흐름은 노량수도와 대방수도의 중간지점에서 합류되어 수렴되며 낙조시에는 이와 반대로 발산되는 흐름을 나타낸다. (Fig. 8~Fig. 9). 이상의 결과를 노 등(2007)의 결과와 비교할 때 노량수도와 대방수도 중간 해역에서 해수가 수렴 및 발산되는 경향이 유사하게 나타난다.

섬진강과 남강댐의 담수 유입이 많은 하계에 광양만 및 진주만 일대의 해수순환을 분석하기 위하여 40일 동안 계산된 수치모델 결과의 표층과 저층에 대한 잔차류를 산정하였다 (Fig. 10).

표층 잔차류의 경우, 광양만은 섬진강의 영향으로 전체적으로 남하하는 흐름이 나타나며, 일부 POSCO 남측으로 유입되는 흐름을 보인다. 남강댐 방류의 영향을 받는 사천만 및 진주만 역시 남강댐 담수의 유입구인 가화천에서부터 사천만과 진주만 서측을 거쳐 대방수도를 통해 외해로 빠져나가며, 일부는 강진만으로 남하하는 경향을 나타낸다. 노량수도의 잔

Fig. 8. Horizontal distribution of flood tidal current field(a: surface, b: bottom). **Fig. 9.** Horizontal distribution of ebb tidal current field(a: surface, b: bottom).

Fig. 10. Horizontal distribution of residual current field(a: surface, b: bottom).

Fig. 11. Map of vertical section line.

차류는 광양만과 진주만으로 향하는 서향과 동향의 흐름이 동시에 존재하며 노랑수도 동측과 서측에서는 와류 형태를 나타낸다(Fig. 10).

한편, 저층의 잔차류는 광양만과 진주만에서 모두 표층과 달리 북상하는 밀도류가 나타난다. 광양만의 경우 여수해만에서 POSCO 동측까지 북상하며, 진주만의 경우 대방수도를 거쳐 진주만을 통해 사천대교 인근까지 북상하는 저층흐름을 보인다. 이는 담수가 유입되는 있는 하천에서 볼 수 있는 전형적인 2층 순환구조(two-layer circulation)를 나타낸다.

2층 순환구조를 보다 자세히 분석하기 위하여 광양만의 단면 1과 사천만 및 진주만의 단면 2(Fig. 11)에 대한 염분 수직분포도를 창조류와 낙조류로 구분하여 각각 도시하였다(Fig. 12~Fig.13). 광양만(단면 1)의 경우 창조시 A정점보다 북쪽인 섬진강을 향해 북향하는 고염수의 저층 흐름을 볼 수 있으며, 낙조시에는 A정점과 B정점 중간 지점까지 섬진강의 담수가

Fig. 12. Vertical distribution of salinity at section 1(flood and ebb current).

Fig. 13. Vertical distribution of salinity at section 2(flood and ebb current).

Fig. 14. Horizontal distribution of ensemble averaged PEA(Case N).

남하하는 모습을 보인다. 사천만과 진주만(단면 2)의 경우 창조시 A정점과 B정점 중간 지점까지 저층으로 고염수가 북상하며, 낙조시에는 표층은 C정점과 D정점 중간 지점까지, 저층은 B정점까지 담수가 남하하는 모습을 보인다. 단면 수직 염분분포 분석 결과 섬진강과 남강댐의 담수 영향으로 밀도류에 의한 2층 순환구조가 모델로 잘 재현되었으며, 수심이 낮은 진주만 일대가 상대적으로 더 넓게 담수 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.2 밀도성층 변화

연구해역은 섬진강과 남강댐으로부터 담수가 유입되는 지역으로 광양만은 섬진강을 통해 사계절 담수가 유입되며, 사천만과 진주만은 주로 강수량이 많은 여름철에 남강댐 방류시 담수가 유입된다. 연구해역에서 섬진강과 남강댐 담수영향으로 인한 밀도성층 변화를 분석하기 위해 3차원 해수유동실험을 수행하였다. 예측실험은 2007년 하계상황을 대상으로 검증된 모델을 이용하여 담수 유입이 없는 경우와 섬진강 담수 유입만 있는 경우 및 남강댐 담수 유입만 있는 경우를 가정하여 실험하였다(Table 4).

밀도성층의 변화는 성층강도 계산을 통해 분석하였는데 많은 연구자들이 수직 적분한 potential energy anomaly(이하 PEA) 개념을 도입하여 하구 및 연안의 성층분석을 수행하였다(최 등, 1998; Lee and Cho, 1998; Simpson and Bowers, 1981; Simpson *et al.*, 1990; Rippeth *et al.*, 2001; Lie *et al.*, 2002; Palacios-Hernandez *et al.*, 2002). PEA는 수층을 완전 혼합시키는데 필요한 단위 체적당의 일인데 수층의 현재 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전히 혼합되었을 경우의 위치에너지의 차이를 의미한다(김 등, 2006).

$$PEA = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho) g z dz$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho dz$$

여기서, $\rho(z)$ 는 총 수심 h 인 수층의 수직밀도분포이고, g 는 중력가속도, $\bar{\rho}$ 는 수심평균 밀도이다. PEA가 0이면 완전혼합이고 성층이 강할수록 값이 커지는 반면, 수직적으로 밀도가 역전되어 있으면 음의 값이 된다.

모델 수행기간인 2007년 하계 40일동안 평균 PEA의 공간분포는 광양만의 섬진강 영향을 받는 영역에서 40 J m^{-3} 이상, 사천만 및 진주만의 남강댐 영향 영역에서 35 J m^{-3} 이상으로

성층이 형성되는 것으로 나타난다(Fig. 14). 전체적으로 담수 유입 지점에 가까울수록 PEA값이 크며, 외해역으로 갈수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 담수영향이 큰 연안 지역일수록 성층강도가 크고, 외해역일수록 상대적으로 성층강도가 작은 특성이 모델결과로 나타난다. 남강댐의 담수가 유입되는 가화천 인근에서는 사천대교 남단보다 오히려 작은 PEA값을 보이는데, 이는 사천대교 북단의 수심이 얕고 단기간 동안 많은 양의 담수를 방류하는 남강댐의 영향으로 인해 담수에 의해 수직혼합이 활발하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 노랑수도와 창선수도의 경우 주변해역에 비해 상대적으로 작은 PEA값이 나타나는 것은 강한 유속에 의한 수직혼합 효과로 사료된다.

담수유입이 없는 것으로 가정한 Case X의 경우 외해와 일부 수심이 얕은 연안 인근을 제외하고 대부분의 해역에서 5 J m^{-3} 이하의 값을 보인다(Fig. 15). 섬진강의 담수유입만 있는 것으로 가정한 Case A의 경우 남해도를 기준으로 서측인 광양만과 여수해만을 제외하고는 대부분 10 J m^{-3} 이하로 성층이 약화된 것을 볼 수 있으나(Fig. 16), 반대로 남강댐의 담수 유입만 있는 Case B의 경우 사천만 및 진주만, 강진만은 강한

Fig. 15. Horizontal distribution of ensemble averaged PEA(Case X).

Fig. 16. Horizontal distribution of ensemble averaged PEA(Case A).

Table 4. Summary of model cases

Case	Contents
Case N	Seomjin river and Namgang dam discharge(current status)
Case X	No discharge
Case A	Only Seomjin river discharge
Case B	Only Namgang dam discharge

성층이 형성되며 그 이외의 지역은 성층이 약화되는 특성을 나타내고 있다(Fig. 17).

섬진강과 남강댐의 담수가 연구해역에서 각각 밀도성층 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구해역을 6개의 구역으로 구분(Fig. 18)하여 각 구역별 공간평균 PEA 시계열을 Fig. 19와 Fig. 20에 실험안별로 각각 도시하였다. 전체적으로 모델 수행기간 동안 PEA가 높은 값을 보이는 기간 즉, 성층 강도가 강해지는 기간이 크게 세 시기로 나타난다. 8월 8일~8월 16일과 9월 1일~9월 10일까지 성층강도가 강해지는 두 기간은 증가한 섬진강 유량과 남강댐 담수 방류에 의한 영향이지만(Fig. 4), 섬진강 유량이 상대적으로 적고 남강댐 방류가 없었던 8월 20일부터 8월 28일까지 성층강도가 강해지는 것은 8월 15일부터 8월 27일까지 지속적으로 높은 태양복사에너지의 영향으로 표층 수온상승에 의한 효과로 사료된다(Fig. 3).

성층강도가 강해지는 기간별로 각 구역마다 PEA 통계분석 값을 Table 5에 실험안별로 정리하였다. 분석 결과, 섬진강과 남강댐 담수의 영향을 받는 본 연구 해역은 노랑수도를 통해서 광양만과 진주만의 수괴가 교환되면서 담수에 의한 밀도성층 변화가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 17. Horizontal distribution of ensemble averaged PEA(Case B).

Fig. 18. Map of zone.

Fig. 19. Time series of spatially averaged potential energy anomaly (zone A, B, C).

Fig. 20. Time series of spatially averaged potential energy anomaly (zone D, E, F).

광양만(Zone A)의 경우, 1차 남강댐 방류가 있었던 기간 1(8월 8일~8월 16일)에서 담수유입이 없을 때(Case X)의 평균 PEA값이 5.1 J m^{-3} 인 반면 남강댐 방류를 고려한 Case B에서 5.8 J m^{-3} 로 성층이 강화되며, 2차 남강댐 방류가 있었던 기간 2(9월 1일~9월 10일)에서도 역시 3.3 J m^{-3} 에서 5.4 J m^{-3} 로 성층이 강화되어 광양만은 남강댐 담수의 영향을 일부 받는 것으로 예측되었다(Table 5).

사천만(Zone C)은 남강댐 담수의 영향을 지배적으로 받는 것으로 나타나며, 진주만(Zone D)과 강진만(Zone E)은 기간 1에서 담수 유입이 없을 때(Case X)는 평균 PEA값이 진주만은 2.5 J m^{-3} , 강진만은 5.5 J m^{-3} 인 반면 섬진강 유량을 고려한 Case A의 경우 진주만은 5.1 J m^{-3} , 강진만은 6.8 J m^{-3} 로 성층이 강화되며, 기간 2에도 진주만은 2.3 J m^{-3} , 강진만은

Table 5. Spatially averaged potential energy anomaly($J m^{-3}$)

		Period 1				Period 2				Period 3			
		Case N	Case X	Case A	Case B	Case N	Case X	Case A	Case B	Case N	Case X	Case A	Case B
Zone A	Max.	24.9	17.4	24.5	18.6	26.1	17.3	24.4	19.4	31.1	13.5	32.0	17.7
	Min.	9.6	0.8	9.3	1.4	10.2	3.5	9.7	4.9	9.2	0.6	9.2	0.5
	Avg.	15.3	5.1	15.0	5.8	17.8	8.3	16.7	10.6	20.7	3.3	20.8	5.4
Zone B	Max.	18.0	13.6	17.1	13.5	22.5	21.0	22.2	21.5	25.3	7.6	24.5	7.5
	Min.	10.1	2.8	9.6	3.0	15.2	11.7	14.9	13.3	11.8	3.8	11.4	3.6
	Avg.	13.6	7.3	12.8	7.3	19.6	16.8	19.1	17.6	17.2	6.3	16.7	6.3
Zone C	Max.	45.1	18.4	18.5	45.2	29.5	18.4	18.7	29.5	41.5	14.4	16.4	42.6
	Min.	12.6	0.9	1.2	12.4	2.9	1.8	1.9	2.8	11.6	0.8	1.1	11.9
	Avg.	26.3	4.0	4.3	26.6	16.4	6.7	7.1	16.2	32.0	2.8	4.1	33.2
Zone D	Max.	46.7	7.2	9.7	47.2	21.1	9.5	11.4	20.6	45.1	5.2	18.3	47.2
	Min.	6.9	0.4	1.9	4.7	3.0	1.2	1.7	2.8	3.6	0.7	3.4	1.1
	Avg.	18.8	2.5	5.1	19.5	13.7	5.0	6.8	13.2	27.9	2.3	10.3	28.9
Zone E	Max.	35.7	16.3	17.8	35.8	25.5	17.9	20.0	24.3	31.2	11.0	20.7	30.8
	Min.	7.0	0.6	1.6	6.7	8.9	3.2	4.8	7.8	2.1	0.7	1.7	1.3
	Avg.	17.5	5.5	6.8	17.2	18.9	10.0	12.4	17.6	19.9	4.0	9.7	19.1
Zone F	Max.	12.7	5.7	5.9	11.8	18.1	13.8	14.7	17.4	15.4	3.3	5.0	13.2
	Min.	4.9	2.0	2.3	4.7	6.7	5.0	5.4	6.4	3.0	1.6	2.5	2.3
	Avg.	7.7	3.6	4.0	7.2	13.8	9.8	10.6	13.1	9.6	2.2	3.6	8.0

$4.0 J m^{-3}$ (Case X)에서 섬진강 유량이 있을 (Case A) 경우 진주만은 $10.3 J m^{-3}$, 강진만은 $9.7 J m^{-3}$ 로 각각 성층이 강화되는 것을 볼때 진주만과 강진만 역시 섬진강 담수의 영향을 받는 것으로 예측되었다(Table 5).

섬진강의 유량이 상대적으로 적고 남강댐의 방류가 없었던 기간 2(8월 20일~8월 28일)에는 담수방류가 없는 Case X의 각 구역별 평균 PEA값이 기간 1과 기간 3의 Case X의 평균 PEA값보다 높은 값을 보이고 있다(Table 5). 즉, 담수 방류가 없을 때에도 기간 2의 성층강도가 기간 1과 기간 3보다 강한 것을 나타낸다. 이는 기간 2는 밀도성층에 영향을 주는 요인이 염분이 아닌 수온인 것을 뒷받침한다.

4. 토의 및 결론

연구해역인 사천만과 진주만, 강진만, 광양만은 섬진강과 남강댐의 담수 영향을 받는 해역이고, 진주만과 강진만은 외해역과 연결되는 수로를 제외하면 대부분 수심이 10 m 미만으로 낮아 계절별 수온변화가 큰 해역으로 수온과 염분 변화로 인한 경압(baroclinic)효과가 순압(barotropic)효과와 더불어 중요한 해역이다. 본 연구에서는 순압효과 외에 2007년 하계에 연속관측한 수온과 염분 자료를 이용하여 경압효과를 고려하였으며, 그 결과 섬진강과 남강댐에서 담수 방류시 표층과 달리 저층을 통해 고염의 수괴가 육지를 향해 유입되는 2층 순환 구조(two layer circulation system) 현상을 볼 수 있었다. 또

한, 수치실험을 이용하여 밀도성층변화 분석 결과, 연구해역은 섬진강과 남강댐의 담수가 진주만과 광양만에 각각 밀도성층에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 담수유입이 있는 경우와 유입되지 않는 경우를 구분하여 모델실험을 통해 도출한 결과이며, 남강댐의 담수 방류는 없는 경우가 있지만 Case X와 Case B는 지속적으로 해수역으로 담수를 유입시키는 섬진강 담수가 없는 것으로 가정한 상황으로 광양만과 진주만 양측 해역의 수괴가 상호 영향을 주는 것을 정성적으로 파악하였다. 정량적인 영향정도를 파악하기 위해서는 장기적인 관측을 통한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김태인, 이형래, 장경일 (2006). 새만금해역에서 밀도성층의 계절변동. *Ocean and polar Research*, 28(3), 339-352.
- 최현용, 이상호, 오임상 (1998). 황해 중부 연안 수온전선역의 정량적 해석. *한국해양학회지* 「바다」, 3, 1-8.
- 추효상, 이병길, 이규형 (2002). 다층 진단모델에 의한 광양만의 잔차류 수치실험. *한국환경과학회지*, 11, 637-650.
- 한성대 (1995). Eulerian-Lagrangian 수송 모형에 의한 광양만의 유류확산 모의. *대한환경과학회지*, 17(8), 735-747.
- Blumberg, A.F. and Mellor G.L. (1987). A description of a three dimensional Coastal Ocean Model. Ed. by N. S. Heaps, Coast, Est. Sci., 4, 1-16.
- Cho, C.W. (2005). A study on the circulation between the Gwangy-

- ang bay and the Jinju bay, the south coast of Korea. M.S. thesis, Chonnam National University, 72 p.
- Hamrick, J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering (SRAMSOE) No. 317, Virginia Institute of Marine Science (VIMS), VA.
- Hamrick, J.M. (1994). Linking hydrodynamic and biogeochemical transport and transformation models for estuarine and coastal waters. In M. L. Spaulding, K. W. Bedford, A. F. Blumberg, R. T. Cheng, & J. C. Swanson (Eds.), *Estuarine and coastal modeling III* (pp. 591-608). New York: ASCE.
- Jung, K.Y. (2007). Three-dimensional numerical modeling of tidal, wind-driven and density currents in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. M.S. thesis, Chungnam National University, 130 p.
- Lee, B.-G. and Cho, H.-D. (1998). The spatial characteristics of stratification in Deukryang Bay, Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 7, 223-231.
- Lee, J.C., Kim, J.C. and Park, M.W. (2006). Observations of current in the Northeastern Gwangyang bay. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 11(4), 136-142.
- Lie, H.-J., Lee, S. Cho, S.-H. and Kim, C.-H. (2002). Tidal front in the main tidal channel of Kyunggi Bay, eastern Yellow Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 37, 10-19.
- Mellor G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Review of Geophysics and space Physics*, 20, 851-875.
- Moustafa, M.Z. and Hamrick, J.M. (2000). Calibration of the wetland hydrodynamic model to the everglades nutrient removal project. *Water Quality and Ecosystem Modelling*, 1, 141-167.
- Palacios-Hernandez, E., Beier, E., Lavn, M.F. and Ripa, P. (2002). The effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 705-728.
- Park K., Jung, H.S., Kim, H.S. and Ahn, S.M. (2005). Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model(HEM-3D) : application to Kwang-Yang bay, Korea. *Marine Environmental Research*, 171-193.
- Rippeth, T.P., Fisher, N.R., and Simpson, J.H. (2001). The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2458-2471.
- Ro, Y.J., Jun, W.S., Jung, K.W. and Eom, H.M. (2007). Numerical modeling of tide and tidal current in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. *Ocean Science Journal*, 42(3), 153-163.
- Ro, Y.J. and Jung, K.Y. (2010). Impact of the dam water discharge on the circulation system in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. *Ocean Science Journal*, 45(1), 7-25.
- Simpson, J.H. and Bowers, D. (1981). Models of stratification and frontal movement in the shelf seas. *Deep-Sea Res.*, 28, 727-738.
- Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J.P. and Allen, G. (1990). Tidal straining, density currents and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13, 125-132.
- Sisson, G.M., Shen, J., Kim, S.-C., Boon, John, D. and Kuo, A.Y. (1997). VIMS Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM-3D): Application of the Hydrodynamic Model to the York River System. SRAMSOE #341. SMS/VIMS, College of William and Mary, Gloucester Point, VA. 123 pp.

원고접수일: 2008년 12월 16일

수정본채택: 2011년 2월 11일(1차)

수정본채택: 2011년 2월 14일(2차)

게재확정일: 2011년 2월 14일