남해 강진만에서 남강댐 방류수의 거동 특성 및 체류시간 추정 Model Trajectory Simulation for the Behavior of the Namgang Dam Water in the Kangjin Bay, South Sea, Korea

정광영* · 노영재* · 김백진* · 박광순**

Kwang Young Jung*, Young Jae Ro*, Baek Jin Kim* and Kwang-Soon Park**

요 지 : 하계 남강댐 방류수 유입에 의해 강하게 성층화된 남해 강진만에서 3차원 수치모델과 결합된 라그랑지안 입자추적모델링 실험을 통해 방류수의 거동 특성과 만내 평균 체류시간을 추정했다. 조위와 유속장, 수온장, 염분장에 대해 각각 스킬 분석(skill analysis)을 이용해 검증했고, 그 결과 대부분 85%가 넘는 재현율을 보였다. 방류 초기 투하한 입자는 노랑수도와 대방수도를 통해 외해로 유출되었으나, 최대 방류시기에 투하한 입자는 남향하는 강한 밀도류에 의해 사천만, 진주만, 강진만으로 유입되었으며, 지형적 요인과 해수유동 특성상 외해로 유출되지 못하여 체류시간이 증가했다. 투하한 입자 전체의 평균 체류시간은 약 65.9 시간(약 2.75일)이며, 초기 방류시 투하한 입자의 평균 체류시간은 약 55~65 시간, 방류 종료시 투하한 입자는 약 60~70 시간이다. 방류량 최대시 투하한 입자는 약 70~80 시간으로 방류량이 증가하면서 체류시간이 약 10~20 시간 증가하는 양의 상관성($R=0.81$)으로 나타났다. 이는 강진만 생태계가 장기간 지속적으로 저염수에 의한 염분충격을 받은 것으로 볼 수 있다.

핵심용어 : 수치모델, 라그랑지안 입자추적모델, 강진만, 남강댐, 평균 체류시간

Abstract : A Lagrangian particle tracking model coupled with the ECOM3D were used to study on the behavior of fresh water released from the Namgang Dam in terms of residence time in Kangjin Bay, South Sea, Korea. Model was calibrated until skill cores for elevation, velocity, temperature and salinity are satisfied over 85%. In the numerical simulation, particles were released in 1 hour time interval from the northern boundary. The different patterns of particle trajectory are identified under the varying dynamics from tidal to density-driven current. The average residence time of total particles are approximately 65.9 hours in the entire Kangjin Bay. The average residence time were increased from 55~65 to 70~80 hours during maximum discharge period. Discharge rate of fresh water and average residence time in the Kangjin Bay is high correlated with correlation coefficient over 0.81.

Keywords : numerical model, Lagrangian particle tracking, Kangjin Bay, Namgang Dam, average residence time

1. 서 론

연안 및 하구 해역은 육지와 해양의 경계에 위치하기 때문에 여름철 담수 유입에 쉽게 노출되어 있고, 그 결과 물리학적, 생지화학적 특성이 단기간에 급격히 변하게 된다. 특히 하계 태풍 통과를 전후하여 남강댐에서는 대량 방류를 시작하고, 그에 따른 담수 유입은 하구역에서 급격한 밀도 변화를 야기시켜 해수 순환을 변화시킨다(Ro and Jung, 2010). 또한 육상으로부터 각종 부유 쓰레기 등 오염 물질이 해양환경으로 유입되어 해양환경 오염을 야기시킨다. 이렇듯 여름철 홍수기에 만내로 유입되는 육상기원 담수는 여러 문제점을 안고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 담수의 이동 경로 파악, 담수의 만내 체류시간 산정, 전략적 방류 방안 수립 등의 연

구가 필요한 실정이다.

국내외에서 수치모델을 이용한 입자추적실험(particle tracking experiment)과 체류시간(residence time) 및 교체시간(flushing time) 등 다양한 연구가 진행되었다(Abdelrhman, 2002; Gillibrand, 2001; Liu et al., 2008; Monsen et al., 2002; Sanford et al., 1992; Zimmerman, 1976). 입자추적 실험은 유출유(oil spill) 및 부유물질(suspended solid)과 담수의 거동 양상에 대한 이동 및 확산을 수치해석적인 방법으로 이용되고 있다(정, 1997; Ro et al., 2008; Lee et al., 2009; 이, 2009). 박 등(2009)은 마산만에서 입자추적모델을 이용한 평균 체류시간의 공간분포를 계산했으며, 서와 이(2011)는 입자추적방법을 이용하여 새만금 해역의 수리특성 변화에 대한 분석을 하였다. 김과 윤(2009)은 남강댐 방류에

*충남대학교 자연과학대학 해양환경과학과 (Corresponding author : Young Jae Ro, Oceanography and Ocean Environmental Sciences, College of Natural Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea. royoungj@cnu.ac.kr)

** 한국해양연구원 기후·연안재해연구부 (Climate Change & Coastal Disaster Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Kyunggi 425-600, Korea.)

따른 부유쓰레기의 거동 및 담수 확산에 관한 연구를 한 바 있다.

본 연구의 대상 해역인 강진만에서는 2004년 8월 15호 태풍 “Megi”가 남해안을 통과했을 때 남강댐에서 1차로 8월 18~20일까지 3일간, 2차로 23~24일까지 2일간 $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이상 대량 방류를 시작했고(Fig. 3; WAMIS, 2004), 이 시기에 방류된 담수는 강진만으로 유입되었다. 유입된 담수에 의해 표층 염분이 10 psu까지 감소(Ro and Jung, 2010)하는 등 해양 환경의 급격한 변화는 강진만 생태계에 큰 충격으로 작용하였으며, 그 결과 다량의 생물(특히 피조개)이 대량 폐사하게 되었다. 이러한 급격한 인위적 환경 변화로 유발되는 어장환경의 피해는 어촌사회에 큰 쟁점(issue)으로 부각되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 종합적 연구(해양수산부, 2006)가 수행되었으며 그 결과 다음과 같이 일련의 논문이 출판되었다. Ro(2007)는 강진만의 조류와 잔차류의 특성에 대해 만 중앙부에서 2년간에 걸친 장기간의 유속계 계류를 통한 유속자료에 대한 분석을 하였고, 또한 연구 해역에서 수치모델을 이용한 조석과 조류에 대한 연구(Ro et al., 2007)를 진행하였다. 하계 바람과 담수 유입에 의한 해수순환 수치모델링 실험(정, 2007)을 하였으며, 남강댐 방류수가 강진만 해수순환에 미치는 영향(Ro and Jung, 2010), 성층 형성과 성층 파괴 과정(정과 노, 2010) 등에 대해 연구된 바 있다.

위와 같이 다양한 연구가 진행되었음에도 현재까지 강진만에서 담수 배출시 생태계 충격을 최소화하는 전략적 방류 방안 개발과 같은 연구는 부족한 상태이고, 이를 해결하기 위한 하나의 방법인 입자추적 모델링 실험과 그 결과는 중요한 의미를 갖는다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 투하한 입자들의 이동 궤적과 빈도 분포를 산정하기 위해 라그랑지안 입자추적 모델(Lagrangian particle tracking model)을 사용했으며, 그 결과를 활용하여 강진만 권역에서 생물 대량 폐사의 원인이라고 판단되는 남강댐 방류수의 거동 양상과 특성을 파악하고, 연구 해역으로 유입된 입자(담수)의 만내 평균 체류시간을 추정하여 생태계에 노출되는 저염분 지속 시간이 어느 정도인지 알아보고자 했다.

2. 수치모델과 구성

2.1 연구해역 특성

연구해역인 강진만은 남해 중앙부인 $34^\circ 55' \text{ N}$, $127^\circ 58' \text{ E}$ 에 위치하고 있고, 남해도와 창선도로 둘러싸여 있는 전형적인 반폐쇄성 내만으로 동-서 폭이 약 10 km, 남-북 폭이 약 18 km이며, 평균 수심은 8.9 m, 최대수심은 24 m, 전체 면적은 약 200 km^2 로 비교적 작은 내만에 속한다. 연구 해역은 북쪽에서부터 사천만, 진주만 그리고 강진만으로 구성되어 있으며, 노량수로, 대방수로와 창선수로로 통해 타 해역과 해수 교환이 일어난다. Fig. 1은 연구해역의 해저 수심도이며, 3개

Fig. 1. Bottom topography for Kangjin bay with 6 area included 3 bay (Sachon bay(SB), Jinju Bay(JB) and Kangjin Bay(KB)) and open sea which passing through 3 straits (Daebang (DB), Noryang(NR) and Chanseon(CS)).

의 만(사천만, 진주만과 강진만)과 3개의 외해 권역(노량수도 외해, 대방수도 외해, 창선수도 외해)을 포함한 총 6개의 권역을 보여주었고, 이 분할된 권역을 이용하여 투하된 입자의 분포를 구분했다.

하계 남강댐 방류수가 사천만을 통하여 만내로 유입되고 있으며, 7월부터 9월 사이 하계 홍수기에 $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이상, 3일 이상 지속된 대량방류는 연간 2~4회 정도 발생하고 있다. 2002년 8월 태풍 “Rusa”통과시 최대 $5,512 \text{ m}^3/\text{sec}$, 2004년 8월 태풍 “Megi”통과시 최대 $3,523 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 방류되었으며, 2004년 8월 15일부터 30일간 남강댐 총 방류량은 $8.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 로 (Fig. 3) 강진만 체적($1.96 \times 10^9 \text{ m}^3$)의 절반 정도가 방류되어 연구 해역은 담수 유입에 쉽게 노출되는 것을 알 수 있다(Ro and Jung, 2010; WAMIS, 2004).

기존 연구 결과 대조기 대량 방류가 발생하였을 경우, 연구 해역에서의 창조시 해수 흐름은 대방수도를 통해 유입되는 해수가 진주만에서 사천만으로 북향하는 해류와 강진만으로 남향하는 해류로 나뉘지만, 대방수도 외해에서 유입되는 해수의 유속은 방류 전 보다 감소하고, 진주만 중앙을 가로질러 강진만 서부 해안선 방향으로 남향하는 해류가 발생하며, 진주만 북부로 북향하는 해류, 노량수로를 통해 강진만으로 유입되는 해류는 감소한다(Ro, 2007; Ro et al., 2007).

대량 담수유입이 있을 경우에 바람의 영향은 강한 밀도류에 의해 상대적으로 큰 효과는 없으나 담수 유입이 감소하게 되면서 성층현상에서 상하층간 혼합 작용을 촉진하여 바람을 부과하지 않은 모의실험 보다 2~3일 정도 빠르게 상하층간 혼합된다(정, 2007; 정과 노, 2010). 담수 유입에 의한 효과는 만내로 유입되는 수송량이 증가하고, 잔차류의 증가로 수평 수직적 유속 구조의 변화가 있으며, 상하층간 수심 2.5~3.0 m에서 2층 구조를 보이고 있다. 1차 방류 후 표층 염분은 15 psu까지 감소하였고, 2차 방류 후 10 psu까지 감소하였다고 보고된 바 있다(Ro and Jung, 2010).

2.2 초기 및 경계 조건과 모델 입력 자료

본 연구에서는 해수유동과 밀도류를 재현하고, 입자추적 실험을 수행하기 위하여 Estuaries and Coastal Ocean Modeling(ECOM) code를 사용하였다. 모델의 기술적 세부사항은 Blumberg(2002)에 기술되어 있어 본 연구에서는 기술을 생략하였다. 격자 구성은 Arakawa C-grid를 이용하였으며, 수평 격자체계는 동서 방향으로 200~400 m, 남북 방향으로 100~400 m를 사용하여 110 × 126의 가변격자를 구성하였다(Fig. 2). 수평격자는 해수 유동 및 염분 변화의 재현을 효과적으로 하기 위해 폭이 좁은 노랑수도, 창선수도의 격자 크기를 100 m로 설정하였고, 대방수도의 경우 200 m로 설정하였으며, 모델 격자에 대한 Courant-Friedrichs-Levy(CFL) 조건을 만족하도록 외부 모드를 2초, 내부 모드를 20초의 시간 간격으로 설정하였다. 개방경계조건은 각 경계에서 4대 분조(M2, S2, K1, O1)에 대한 조위와 지각을 부과하였으며, 담수 유입량은 한국 수자원공사에서 제공하는 동일 기간의 남강댐 실방류량 자료를 적용하였다. 모델 도메인 경계에서 외해와의 방사 조건을 Reid and Bodine(1968) 방법으로 부과하였다. 수평

Table 1. Initial and open boundary conditions and used schemes

Model	ECOM3D (Hydroqual, 2002)
Grid System	- Grid : 110 × 126
	- Variable Grid System
	Min. : x = 200 m, y = 100 m
	Max. : x = 400 m, y = 400 m
Time Step	- Vertical Grids ; 5 sigma levels
	- Internal Time Step : 20 sec
Open Boundary Condition	- External Time Step : 2 sec
	- RANDB(Reid and Bodine(1968) type B.C)
Horizontal Diffusivity	- Amp. and Phase : M2, S2, K1 and O1
	- Smagorinsky scheme(Smagorinsky, 1963)
Vertical Mixing	- M-Y 2.5 closure scheme(Mellor and Yamada, 1982)
	- Bottom Friction = 0.0025
Bottom Drag Coefficient	- Bottom Roughness : ZOB = 0.003 m
	- SMOLAR-2 scheme(Smolarkiewicz, P.K. and Clark, T.L. 1986)
Advection	

난류 점성계수는 격자 크기와 수평적인 전단응력에 비례한다는 Smagorinsky(1963)의 비선형 공식으로 계산되었다. 모델링 실험을 위해 사용된 조건 및 scheme은 table 1과 같다.

라그랑지안 입자추적법을 이용하여 방류 위치에 입자를 투하하는 수치모델링을 수행하기 위하여 table 2와 같이 조석만 부과한 경우(P04N), 조석과 담수 유입을 부과한 경우(P04D)로 외력의 유무에 따라 구분하여 실험하였으며, 모델 spin-up 기간을 제외한 모델링 실험 기간은 17일이다. 입자 투하 방식에 따라 총 900개의 입자에 대해 1시간에 5개씩 180 시간 동안 지속적으로 같은 수의 입자를 투하(P04D-C)하여 입자실험에 대한 반응을 살펴보았다. 총 18,000개의 입자를 2004년도 8월 실제 남강댐 방류량(총 $9 \times 10^8 \text{ m}^3$)에 대한 비율(입자 1개당 담수 비율 : $5 \times 10^4 \text{ m}^3$)에 맞추어 입자 개수를 조정하여 투하하는 방법(P04D-R)으로 구성하였으며, Fig. 3은 남강댐의 초당 방류량과 누적 방류량(a), 시간당 투하 입자 수와 누적 투하 입자 수(b)를 보여준다.

2.3 라그랑지안 입자추적 모델

이 연구에서는 만내로 유입된 다량의 담수의 이동 경로를 파악하기 위하여 라그랑지안 입자추적법(Lagrangian particle tracking method)을 이용하여 방류 위치에 입자를 투하하는 수치모델링 실험을 수행했다. 라그랑지안 입자추적법은 일정 부피를 갖는 입자 하나가 서로 독립적으로 움직인다는 가정 하 단위 시간 동안 난류 확산 및 퍼짐에 의한 이동 거리와 유속에 의한 이동 거리의 벡터 합으로 입자 이동 거리를 표시하는 방법이다. 모델 도메인 내의 임의의 위치에 입자가 존재할 경우, 시간에 따른 위치 이동은 다음 식 (1)에 의한다.

$$x(t+dt) = x(t) + Udt$$

$$U = \langle U \rangle + u' \quad (1)$$

Fig. 2. Model grid system for numerical model.

Fig. 3. Time series record of dam water discharge rate (m^3/sec) and accumulate discharge amount (m^3) (a). Number of particles for model input and accumulate particles (b).

여기서 U 는 정점 x 에서의 라그랑지 유속 벡터이고, $\langle U \rangle$ 는 평균 유속장을 나타내며, 모델링 결과 계산된 조류 및 담수 유입에 의한 밀도류를 포함한다. u' 은 난류 유속벡터를 나타내고, ECOM 모델에서는 2차원 난류의 길이를 매 시점마다 별도로 계산하여 난류 확산 계수(K)를 계산하게 되며, 그에 따라 입자를 이동시킬 난류 성분은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} u' &= Rn\sqrt{(4K/dt)}\cos(\Phi) \\ v' &= Rn\sqrt{(4K/dt)}\sin(\Phi) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Rn 은 평균 0, 표준편차 1인 정규분포를 따르는 난수(random number)이며, Φ 는 방향 각도이다. 따라서 임의의 개수의 입자를 동일 지점에 방출하게 되면, 평균 유속에 의해 이동되지만, 난류 성분에 의해 확산이 이루어져 결과적으로는 임의의 공간상 분산이 발생하게 된다.

2.4 입자의 평균 체류시간 계산

입자의 평균 체류시간은 북쪽 경계(담수 유입부)에서 일정 시각에 투하한 각각의 입자가 만 입구 경계(대방수도, 노량수도, 창선수도)를 처음으로 벗어날 때까지 소요되는 시간을

평균한 것으로, 계산식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [t_{1(i,x_{1,2,3})} - t_{0(i,x_0)}] \quad (3)$$

여기서, T_R 은 일정 시각에 투하한 입자 전체의 평균 체류 시간이고, N 은 투하한 전체 입자의 수, i 는 투하한 입자의 일련번호이다. $t_{0(i,x_0)}$ 는 입자(i)가 담수 유입부(x_0 : 초기 투하 위치)에 투하된 시각, $t_{1(i,x_{1,2,3})}$ 는 입자(i)가 만해를 벗어나 $x_{1,2,3}$ 에 도달한 시각이며, $x_{1,2,3}$ 는 입자가 만해를 벗어난 위치(x_1 : 대방수도, x_2 : 노량수도, x_3 : 창선수도)이다.

연구 해역에서 담수 유입부에서 출발한 입자의 체류시간은 담수 유입량에 의해 달라질 수 있다. 실제 시간에 따라 변화된 방류량을 모사하기 위하여 매 시간 유입되는 입자들의 개수를 조절하도록 설정하였고, 동일시기에 투하한 입자들의 평균 체류시간(average residence time)은 입자의 투하 시각에 따라 각각 계산했다. 또한 담수유입 초기, 방류량이 최대인 시기, 방류 종료시기 등 3가지로 구분하여 그 특성을 살펴보았다.

3. 모델링 실험 결과

3.1 모델링 실험 결과의 검증

라그랑지안 입자 추적 실험은 난류 확산 및 퍼짐(turbulence diffusion and spreading)에 의한 이동 거리와 이류(advection)에 의한 이동 거리의 벡터 합으로 표현된다. 난류 유속 벡터는 난수(random number)로 난류 확산 및 퍼짐에 영향을 받으며 평균은 0이 되어야 한다. 반면 이류에 의한 평균 유속은 모델링 결과 계산된 조류(tidal current)와 담수 유입에 의한 밀도류(density-driven current)를 포함하며, 평균 유속에 의해 이동된다. 따라서 모델 결과의 신뢰도는 조류와 조석, 수온과 염분 그리고 밀도장에 의해 좌우되며, 이들의 검증 결과가 필요하다. 모델링 실험 결과에 대한 검증 방법으로는 스킬 점수(skill score)와 상관계수(correlation coefficient)를 이용하였고, 검증 결과 조류의 진폭(amplitude)과 지각(phase)은 85% 이상, 수온과 염분은 80~90% 이상 산출되었다. 위에 열거한 유속장과 수온, 염분장에 대한 자세

Table 2. Run cases for the numerical experiments and initial and discharge conditions

Run Cases	P04N	P04D-C	P04D-R
Salinity (psu)		Surface 28, Bottom 30	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		Surface 26, Bottom 25	
Out forcing	Tide	Tide and Discharge	Tide and Discharge
Discharge Type	-	Virtual Discharge	Real Discharge
Discharge Rate (m^3/sec)	-	650 m^3/sec	Record
Total Discharge (m^3)	-		$9 \times 10^8 \text{ m}^3$
Particle Release Style	One time	Continuously release from start to finish of discharge	Same ratio of particles to discharge rate record
Total Release of Particles	100	900	18,000

한 검증 결과는 기존 투고된 논문(Ro et al., 2006; Ro and Jung, 2010; Jung, 2007; 정과 노, 2010)에 수록되어 있으므로, 기존 연구의 외력과 동일하게 부과한 본 연구에서는 모델링 실험 결과의 검증에 대한 자세한 기술은 생략한다.

3.2 투하 시기별 입자의 이동 경로

연구 해역에서 투하된 입자의 방류 시기별 이동 경로를 파악하기 위하여 대량 방류 초기(Fig. 4)와 최대 방류 시기(Fig. 5), 방류 후기(Fig. 6)에 투하한 입자의 시간에 따른 이동 경로를 각 시기(Fig. 3; period 1~3)에서 12시간, 24시간, 48시간, 96시간 이후 결과를 추출하였다. Fig. 4~6에서 방류량의 증감에 따라 밀도류의 양상이 다르게 나타나 만내 해수 유동이 변화하기 때문(Ro and Jung, 2010)에 위에 언급한 각 시기별로 구분하여 이동 경로를 표시하였다.

Fig. 4는 만내로 유입되는 담수 유입량이 증가하기 전단계인 방류 초기(period 1)에 투하한 입자의 이동 경로를 보여주고 있다. 입자가 투하된 이후 대부분 강한 조류에 의해 대방수로를 통해 빠져나가기 시작했으나(Fig. 4(a)), 이후에는 조석 주기에 따라 대방수로와 진주만해역을 왕복하며 확산되기 시작하며(Fig. 4(b)), 일부 입자들은 진주만을 동쪽에서 서쪽

으로 가로지르며 노랑수도를 빠져나간다(Fig. 4(c), (d)). 또한 소량의 입자들은 약한 밀도류를 타고 남하하여 강진만으로 유입되게 된다. 96시간 후(Fig. 4(d))에는 초기에 대방수도를 통해 빠져나간 입자들이 모델 도메인 남쪽 경계를 통해 도메인 밖으로 빠져나갔고, 노랑수로를 통해 서쪽으로 빠져나간 일부 입자들이 발생했다. 하지만 진주만과 강진만 내부로 들어온 일부 입자는 대부분 만내에 머무르고 있으며, 소량의 입자만이 창선수로를 통과하여 외해로 유출되었다.

Fig. 5는 최대 방류시기(period 2)에 투하된 입자의 시간에 따른 이동 경로를 나타낸 것으로, 남서향하는 강한 밀도류에 의해 투하 12시간이 경과하였음에도 투하된 입자 대부분이 진주만 서부와 강진만 북부 해역으로 짧은 시간에 빠르게 이동하였다(Fig. 5(a)). 24시간이 지난 후에도 입자의 분포 양상은 거의 비슷하지만 강진만 내부로 일부 입자들이 추가로 유입되었고, 노랑수로를 통해 많은 양의 입자들이 빠져나갔다(Fig. 5(b)). 약 48시간 후에는 노랑수로를 통해 미처 서측 경계면으로 빠져나가지 못한 입자들이 남해도 연안을 따라 남하하여 다수의 입자가 강진만에 분포하고 있는 것을 볼 수 있으며(Fig. 5(c)), 입자 투하 약 96시간 후에는 강진만에서 창선도 동쪽으로 이동한 입자 중 일부가 대방수로와 창선수로

Fig. 4. Trajectory of released particles during the early period of discharge (1st period; Aug.17, 2004).

Fig. 5. Trajectory of released particles during the 1st peak discharge (2nd period; Aug.19, 2004).

를 통해 남측 경계로 빠져나갔다(Fig. 5(d)).

Fig. 6은 대량 방류가 중단되고 방류량이 점차 감소하는 시기(period 3)에 투하된 입자의 궤적을 보여주고 있다. 남하하는 입자의 이동 속도는 방류 감소로 세력이 약화된 밀도류에 의해 최대 방류시기의 입자 이동 속도보다 현저히 감소한 것을 알 수 있다(Fig. 6(a), (b)). 사천만에서 진주만으로 유입된 입자의 대부분은 오랜 시간 진주만에 머물고 있으나 96시간 이후 대부분의 입자는 강한 조류의 영향으로 대방수도와 노량수도를 통해 외해역으로 유출되었으며, 일부 소량의 입자만이 강진만으로 이동하여 분포했고, 장기간 만 내에 머물렀다. 방류가 중단된 이후 밀도류가 약화된 상태에서 주로 조류의 영향을 받아 Fig. 6(d)와 같은 분포를 보였다.

3.3 권역별 입자의 분포

Fig. 7은 1차 대량 방류시기에 초기 방류 이후 24시간, 48시간의 표층 염분 분포를 보여준다. 방류가 시작된지 약 24시간 이후부터는 남하하는 강한 밀도류에 의해 강진만 해역의 염분이 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 시기에 투하된 입자의 분포를 보여주며, 염분 분포와 비슷한 양상으로 입자가 분포한다. Fig. 8(b)와 같

이 방류 초기(period 1)에는 대방수도와 노량수도를 통해 남측 입자가 일부 외해로 유출되며, 대량 방류시기(period 2)인 Fig. 8(c), (d), (e)에서는 파란색과 녹색, 노란색 입자가 외해로 빠져나가지 못하고 진주만과 강진만 내부에 주로 분포하는 것을 알 수 있다. 방류량이 감소하는 시기(period 3)에 투하된 Fig. 8(f)의 붉은색 입자의 경우 남하하는 밀도류의 세력이 약해져 강진만까지 남하하지 못하고 주로 진주만에 머무르며, 일부 대방수도와 노량수도를 통해 외해로 빠져나간다.

Fig. 9는 시간에 따른 권역별 입자의 분포 개수를 나타내고 있으며, Fig. 10과 table 3은 입자 추적 실험 기간 중 권역별 평균 입자의 분포 비율을 나타내고 있다. 방류 전 기간 투하된 입자는 각 수로를 통해 빠져나간 양이 기간 평균 20% 이하로, 지형적 특성상 외해로 유출되지 못하며, 사천만, 진주만, 강진만에 약 80% 이상 분포했다. 담수에 직접적인 영향을 받는 사천만과 진주만에서는 전체 입자 중 약 67%에 이르는 입자가 분포하였으며, 상대적으로 담수 유입부와 거리가 멀리 떨어진 강진만에서는 평균 약 13%의 입자가 분포했다. 1차 방류 시기의 입자 수 증가는 세 곳의 만에서 비슷한 양상으로 증가하나, 방류가 일시적으로 중단된 시기에서는 강진만에서 입자수가 일시적으로 감소하는 양상을 보이는

Fig. 6. Trajectory of released particles during the late period of discharge (3rd period; Aug.21, 2004).

Fig. 7. Horizontal distribution of surface salinity at 24 hours (a) and 48 hours (b) after 1st peak discharge.

데, 이는 방류 중단 시기 남향하는 밀도류가 감소하여 강진만에 머무르던 입자들이 조류에 의해 수로 부근으로 이동하거나 수로를 통해 외해로 유출되기 때문으로 판단된다.

대방수도와 노랑수도, 창선수도를 통해 외해로 유출된 입자 수의 비율은 9.4 : 2.3 : 1로 담수 유입부와 가장 가깝고 폭이 넓은 대방수도에서 가장 많은 유출이 있었으며, 강진만

Fig. 8. Horizontal distribution of particles location at shortly after (a) and 12 hours (b), 24 hours (c), 36 hours (d), 48 hours (e) and 60 hours (f) after 1st peak discharge.

하부의 창선수로를 통한 외해 유출이 가장 적었다(Table 3, Fig. 10). 투하된 입자는 외해와 해수 교환이 발생하는 대방수도, 노랑수도를 통해 일부 빠져나간다. 그러나 강한 밀도류

에 의해 남하하여 강진만 해역으로 유입된 입자는 지형적 요인과 해수유동 특성상 쉽게 외해역으로 유출되지 못하여 오랜 시간 만내에 머무른 것으로 사료된다.

Table 3. The Number of average particles and percentage (%) in each area

	Area	N. of particles (percentage, %)	N. of particles (percentage, %)
Bay	Sachon Bay (SB)	3,546 (27.9)	10297 (81.1)
	Jinju Bay (JB)	4,983 (39.3)	
	Kangjin Bay (KB)	1,768 (13.9)	
Open Sea (pass through the strait)	Daebang St. (DB)	1,780 (13.9)	2,392 (18.9)
	Noryang St. (NR)	437 (3.4)	
	Changseon St. (CS)	187 (1.5)	

3.4 권역별 입자의 평균 체류시간

평균 체류시간은 입자가 만내의 임의의 정점으로부터 출발하여 수송되다가 만 입구 경계를 처음으로 벗어날 때까지 걸리는 시간으로 입자의 초기 위치, 방출시점, 경계로부터 거리에 영향을 받는다(Zimmerman, 1976). 본 연구에서는 입자의 초기 위치가 방류 위치와 동일하고, 이 위치부터 각 수로의 경계까지 거리는 변화가 없다. 반면 방출 시점에 따라 남강댐의 방류량이 달라지기 때문에 각 방출 시점에서 투하된 입자의 평균 체류시간을 계산하였으며, 이는 동일 시각에 투하된 입자들이 만내에서 체류하다가 각 수로를 벗어난 입자들을 대상으로 한다.

투하된 입자 전체의 평균 체류시간은 약 65.9시간으로 계산되었고, 이는 연구 해역에 대량으로 담수가 유입되었을 경우 평균 약 2.75일 정도 만내에 머무는 것으로 이해할 수 있다. 초기 소량 방류시(period 1) 투하된 입자의 평균 체류시간은 대략 55~65 시간이고, 방류량이 증가한 시기(period 2)

에 투하된 입자의 평균 체류시간은 70~80 시간이다. 방류량이 감소하는 시기(period 3)의 평균 체류시간은 60~70 시간으로 추정하였다. 방류량이 증가하는 시기에는 평균 체류시간이 증가하고, 방류량이 감소하는 시기에는 평균 체류시간이 감소하게 나타났다(table 4, Fig. 11).

Fig. 11에서 방류량 곡선과 평균 체류시간의 증감 변동이 비슷한 양상을 보이고 있어 담수 유입량과 평균 체류시간과의 상관관계를 알아보기 위해 Fig. 12와 같이 상관계수(correlation coefficient)를 계산한 결과 각각 0.81로 상호 유

Fig. 9. Time series variation of particle number concentration in the each area (a: Sachon Bay, Jinji Bay and Kangjin Bay; b: Daebang, Noryang and Changseon; c: bay and open sea). **Fig. 10.** Average percentage of particle distribution during discharge at total (a; 6 area), bay (b; Sachon, Jinju and Kangjin Bay) and open ocean area (c; Daebang, Noryang and Changseon Strait)

Table 4. Average residence time with each discharge rate

Released time of particles(hour)	1	11	21	31	41	51	60	Total Average
Discharge Rate (m ³ /sec)	1234.9	1391.8	1498.3	3078.9	3523.4	2187.1	1018.3	1557.9
N. of released particles	100	100	100	200	400	200	100	152
Average residence time (hour)	62.0	59.27	59.51	69.95	78.5	61.4	62.8	65.9

Fig. 11. Time series of average residence time for each time-step and discharge rate during 60 hours in Kangjin Bay. **Fig. 12.** Relationship between average residence time and discharge rate in Kangjin Bay.

의한 양의 상관성을 보였다. 그러므로 만내로 유입되는 담수 유입량이 증가할수록 입자의 만내 체류시간은 증가하며, 담수 유입량이 감소할수록 입자의 체류시간은 감소한다고 볼 수 있다. 강진만에서는 담수 유입량이 증가하면 만내로 남향하는 밀도류의 크기가 커지게 되고(Ro and Jung, 2010), 반폐쇄성 내만의 해수유동 특성에 의해 한 번 유입된 입자가 외해로 빠져나가는 것이 쉽지 않아 만내로 유입된 입자의 체류시간이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 라그랑지안 입자추적 모델을 사용하여 여름철 남강댐 대량 방류 시기에 강진만 권역으로 유입되는 담수의 거동 양상과 특성, 빈도 분포 등을 파악했고, 유입된 입자의 만내 평균 체류시간에 대해 연구했다.

초기 소량 방류시에는 진주만을 통과해 남향하는 밀도류의 영향보다 대방수로의 강한 조류에 의해 쉽게 외해역으로 입자가 유출되어 만내로 유입되는 입자의 수는 크지 않았다. 또한 후기 방류량 감소하는 시기 역시 대방수도와 노량수도에서 조류의 영향으로 강진만으로 유입되는 입자보다는 양쪽 수로를 통해 외해역으로 유출되는 입자 수가 많았다. 반면 방류량이 증가하는 시기에는 투하된 입자가 강한 밀도류에 의해 남하하게 되어 강진만 내부로 유입되었고, 폭이 좁은 창선수로를 통해 쉽게 빠져나가지 못해 방류 초기나 후기에 비해 입자가 오랜 시간 만내에 머물렀다.

방류 기간 중 권역별 평균 입자의 분포 비율을 살펴보면, 수로를 통해 빠져나간 양이 약 20%, 만내로 유입된 입자는 약 81% 정도로 대부분의 입자가 만내에 분포했다. 담수 유입부와 인접한 진주만, 사천만에서는 전체의 67%에 이르는 입자가 분포했으며, 방류가 종료된 이후(밀도류가 감소한 후) 조류에 의해 주로 대방수로(13.9%)와 노량수로(3.4%), 창선수로(1.5%)를 통해 입자가 외해역으로 유출되었다.

전체 입자의 만내 평균 체류시간은 약 66시간이며, 초기 소량 방류시보다 최대 방류시에 투하된 입자의 평균 체류시간이 약 1020시간 이상 증가하였다. 담수 유입량과 평균 체류시간과의 상관계수는 0.81로 양의 상관관계를 보였으며, 이는 방류량이 증가할 경우 밀도류가 증가하여 만내로 유입되는 입자의 수가 증가하게 되고, 이는 만내 입자의 체류시간의 증가를 야기 시킨다고 볼 수 있다.

Ro and Jung(2010), 정과 노(2010)의 연구 결과 중 2004년도 태풍 “Megi” 통과 직후(최대 방류량 3,523 m³/sec; WAIMS, 2004) 강진만의 염분은 현장 관측 결과 10 psu까지, 담수유입 모델링 실험 결과 역시 12 psu까지 감소(Fig. 7)했으며, 조석 및 조류, 수온-염분장 검증 결과는 위에서 언급한 바와 같이 신뢰 수준이 높다. 그러나 김과 윤(2009)의 모델링 실험에서는 2002년 태풍 “Rusa” 통과시 최대 5,000 m³/sec 이상 방류(WAIMS, 2002)했던 남강댐 방류량 자료를 160시간 동안 적용했음에도 불구하고 강진만의 염분이 본 연구 결과보다 높은 25~30 psu로 유지되었다. 김과 윤(2009)의 연구에서는 조류에 대한 검증만 이루어졌을 뿐 밀도류에 중요한 영향을 주는 수온-염분장에 대한 검증이 정확히 이루어지지 않아 해수유동 및 염분장을 제대로 모사하지 못한 것으로 사료되며, 그에 따라 염분장 결과가 저추산(underestimate)된 것이라고 생각된다.

입자추적 모델 결과의 신뢰도는 조류와 조석, 수온과 염분 그리고 밀도장에 의해 좌우되는데, 밀도류가 제대로 묘사되지 않는다면 입자추적 모델링 실험 결과 역시 신뢰할 수 없다. 다양한 현장 관측 자료와의 검증을 통해 충분한 신뢰도를 산출한 본 연구의 입자추적실험 결과에서는 강진만 안쪽까지 입자가 유입되었고, 창선수로를 통해 남해 외해로 유출되는 이동 궤적을 보여주었으나, 김과 윤(2009)의 연구에서는 대부분의 입자가 진주만, 사천만에서 체류하다가 대방수로와 노량수로를 통해 외해로 빠져나갔고, 강진만으로는 유입되지 않는 분포를 보였는데, 현장 관측 자료와 모델 결과간의 검증이 부족한 김과 윤(2009)의 입자추적 실험 결과에 대한 신뢰성이 의심된다.

모델 도메인, 초기조건과 개방경계조건을 유사하게 부과한 두 연구에서 그 결과가 크게 차이나는 이유는 모델 도메인의 격자 구성 때문이라고 판단된다. 김과 윤의 모델 격자 크기는 400 m 등격자로서, 300~500 m의 폭을 가진 창선수로와 노량수로에서는 격자 1개로는 해수유동을 제대로 해상할 수 없으며 격자 2개로는 과추산(overestimate) 될 수 있는 문제점을 안고 있다. 하지만 이 연구에서는 가변격자(100~400 m)를 사용해 수로에서의 해상도를 높였으며, 과추산 혹은 저추산의 문제를 해결하고자 노력했으며, 해수유동을 보다 사실적으로 묘사했다고 판단된다.

하계 남강댐에서 투하된 입자의 거동 및 분포 양상, 체류시간을 산정한 결과로 볼 때 강진만 생태계는 장기간 지속적으로 저염수에 의한 염분 충격을 받았을 것으로 볼 수 있다. 내만의 생태계(특히 피조개)가 이러한 환경 조건의 급격하고, 큰 변동에 노출될 경우, 그 충격에 의한 피해는 상상하기 힘들다. 이로 인한 어폐류의 대량 폐사는 어장 환경문제의 주요 이슈로 등장한지 오래되었다. 그러나 국내에서는 보다 엄밀한 생태계 모델링에 의한 정량적 진단의 노력은 많지 않다.

본 연구 결과에서 볼 수 있듯이, 연안 환경에서의 모델에 의한 입자추적 실험 방법은 발전소 온배수, 육상기원 쓰레기, 댐방류 오염물, 퇴적물 등의 이동 경로 및 퇴적 위치 등을 파악하는데 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 ‘운용해양(해양예보)시스템 연구’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이 논문을 검토해주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

김연중, 윤종성 (2009). 남강댐방류에 따른 부유쓰레기의 거동 및 담수확산에 관한 연구. 한국해양공학회지, 23(2), 37-46.
박성은, 홍석진, 이원찬 (2009). Particle Tracking Model을 이용한 평균체류시간의 공간분포 계산. 한국해양공학회지, 23(2), 47-52.

서승원, 이화영 (2011). 입자추적방법을 이용한 새만금 해역의 수리특성 변태 분석. 한국해양 해양공학논문집, 23(6), 442-450.
이종호 (2009). 서해 중부 해역의 동계 해/조류 순환 및 유입자 거동 수치모델링 실험, 석사학위청구논문, 충남대학교.
정광영 (2007). 남해 강진만에서의 바람과 담수 유입에 의한 하계 해수순환 수치모델링, 석사학위청구논문, 충남대학교.
정광영, 노영재 (2010). 남해 강진만에서 성층 형성과 성층 파괴 과정, 한국해양학회지 “바다”, 15(3), 97-109.
정연철 (1997). 라그랑지안 입자추적법에 의한 유출유 확산 모델링. 해양안전공학회지, 3(1) 73-83.
해양수산부 (2006). 피조개 양식어장 인터넷환경 자동감시 및 생산량산정.
Abdelrhman, M.A. (2002). Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 62, 339-351.
Blumberg, A.F.(2002). A primer for ECOMSED, Hydroqual Inc., 188 pp.
Gillibrand, P.A. (2001). Calculating exchange time in a Scottish Fjord using a two-dimensional, laterally-integrated numerical model. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 53, 437-449.
Lee, C.H., Ro, Y.J. and Jung, K.Y. (2009). Particle dispersion experiments of the Hebei Spirit oil spill. Proceeding of the spring meeting, 2009 of the Korean Soc. of Oceanography.
Liu, W.C., Chen, W.B. and Kuo, J.T. (2008). Modeling residence time response to fresh water discharge in a mesotidal estuary, Taiwan. J. of Marine Syst, 74(1-2): 295-314.
Monsen, N.E., Cloern, J.E. and Lucas, L.V. (2002). A Comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. Limnology and Oceanography, 47(5), 1545-1553.
Oey, L.-Y. and Mellor, G.L. (1993). Subtidal variability of estuarine outflow, plume, and coastal current: a model study. J. of Physical Oceanography, 23, 164-171.
Sanford, L.P., Boicourt, W.C. and Rives, S.R. (1992). Model for estimating tidal flushing of small embayments. ASCE J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118, 645-654.
Reid, R.O. and Bodine, B.R. (1968). Numerical model for storm surges in Galveston Bay. ASCE, J. Water Harbors Div., 94, 33-57.
Ro, Y.J. (2005). Numerical modeling of the impact of the river runoff in the formation of the anoxia in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. In: American Geophys. Union, Spring Meeting 2005, abstract # OS22A-01.
Ro, Y.J. (2007). Tidal and sub-tidal current characteristics in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. Ocean Sci. J., 42(1), 19-30.
Ro, Y.J., Jeon, W.S., Jung, K.Y. and Eom, H.M. (2007). Numerical modeling of tide and tidal current in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. Ocean Sci. J., 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 Sci. J., 45(1), 17-35.
Ro, Y.J., Jung, K.Y. and Lee, C.H. (2008). “Hebei spiri” oil spill fate and trajectory modeling in the western coast of Korea, Yellow Sea. PICES 17th Annual Meeting Abstract.

- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Smolarkiewicz, P.K. and Clark, T.L. (1986). The Multidimensional Positive Definite Advection Transport algorithm : Further Development and applications, *J. Comp. Phys.*, 67, 396-438.
- WAMIS, 2002. Dam water discharge data. http://203.237.1.24/WKD/MN_DTDATA.ASPX?code=2018110 Accessed 1 Sep 2002.
- WAMIS, 2004. Dam water discharge data. http://203.237.1.24/WKD/MN_DTDATA.ASPX?code=2018110 Accessed 1 Sep 2004.
- Yanagi, T. (1983). Generation mechanism of the tidal residual circulation. *J Oceanogr. Soc. Japan*, 39(4), 156-166.
- Zimmerman, J.T.F. (1976). Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, Part I: Distribution salinity and Calculation of Mixing Time Scales, *Netherlands J. of Sea Research*. 10, 149-191.
-
- 원고접수일: 2012년 1월 10일
수정본채택: 2012년 2월 17일
게재확정일: 2012년 2월 28일