Numerical Simulations of Water Circulation and Pollutant Transport near a Coastal Area of Wolsung NPPs

월성원전 연안역 해수유동 및 오염물 이동 수치실험

Geon-Hyeong Park¹, Ki-Chul Kim¹, Byung-Il Min¹, Jung-Lyul Lee² and Kyung-Suk Suh^{1*}

¹Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-Daero, Yuseong, Daejeon, Korea

²Sungkyunkwan University, Seobu-Ro 2066, Jangan, Suwon

박건형¹, 김기철¹, 민병일¹, 이정렬², 서경석^{1*}

¹한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

²성균관대학교, 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

(Received June 1, 2012 / Revised July 26, 2012 / Approved October 05, 2012)

Numerical simulations were performed to evaluate the dispersion characteristics of the pollutant around a Wolsung coastal area at located nuclear power plants. Numerical experiments by using EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) showed good agreements by comparison with the time series and harmonic analysis of the tidal elevations. The released pollutants moved in north direction at flood tide and in south direction at ebb tide. The calculated salinity and temperatures showed good agreements with the observed results by NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute). The water circulation due to the variations of the temperature, salinity and tidal components were analyzed to estimate the dispersion characteristics of the pollutant.

Key words: Wolsung, EFDC, Water circulation, Harmonic analysis

원전이 위치한 동해 월성 연안역 주변에서 오염물 이동·확산에 대한 수치 모사를 수행하였다. 월성 연안역의 유속장 재현을 위한 해수유동 수치모형 실험은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 사용하여 조위 시계열 검증 및 조화 분석을 통한 검증을 실시한 결과 양호한 재현성을 나타내었다. 월성 주변해역의 유속장 산정 결과 창조류시에는 남향, 낙조류 시에는 북향으로 진행되는 결과를 알 수 있었다. 또한 국립수산물품질관리원에서 관측한 수온, 염분의 자료를 이용하여 수치모델을 통한 계산값과 관측값을 비교한 결과 양호한 재현성을 나타내었다. 계산된 해수유동자료와 수온, 염분의 결과를 이용하여 오염물질의 확산특성을 해석하였다.

중심단어: 월성, 환경유체역학코드, 해수유동, 조화분석

*Corresponding Author . E-mail :kssuh@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.4788

1. 서론

우리나라의 원자력 발전소는 냉각수로 해수를 이용하고 있으며, 발전소에서 이용된 냉각수는 주변해역으로 흘러들

어가 주변 환경에 영향을 줄 수 있다[1][2][3]. 또한 주변 인접국들의 활발한 원자력 이용과 방사능 물질의 수송 등으로 인해 방사능 사고 위험이 증대됨에 따라 원전 주변 연안역의 해양 방사성물질 거동해석의 필요성이 제기되고 있다. 연안역 주변의 발전소 가동으로 인하여 발생할 수 있는 주

변 환경의 변화는 단기간보다는 장기간에 걸쳐 나타날 가능성이 높은 만큼 지속적으로 조사가 이루어져야한다. 따라서 월성 연안역의 해상지점에서 거리 및 방위별로 지점을 선정하여 해수를 채취하여 조사한바 있다[4].

원자력발전소 주변 해역에 대한 방사성 물질의 확산 특성에 관한 연구는 1989년 “고리주변 환경 종합평가 및 관련 모델 개발”의 환경 영향 평가 보고서 작성시 처음으로 수행되었다[5]. 이 연구에서는 고리 해역에 우세히 작용하는 해양 물리현상에 적합한 모델을 정립하여 해수유동과 이에 의한 오염물의 해양 확산특성 평가하였다. 한국해양연구원에서는 2002년 “해양환경 방사능 감시기술개발” 연구의 일환으로 황해의 3차원 해수 순환모델과 해양 확산모델을 개발한 바 있다[6]. 그러나 개발된 확산 모델은 3차원 유한차분모델로 원전 사고시 해양으로 유출된 방사성물질의 농도 분포 계산을 위한 경우 계산시간이 오래 걸리는 제약점을 갖고 있고, 또한 입자추적 모델은 이론식의 제시와 이상화된 해역에 대해 시험 계산만을 수행하였고, 실제 해역에는 적용하지 않았다. 한국전력연구원에서는 2006년 “원전 액체방사성유출물 해양확산 평가기술 개발” 연구의 일환으로 신고리, 신월성 해역에서 3차원 해양확산 특성 평가 연구를 수행하였다[7]. 이는 원전 건설에 대한 규제 기관의 기술기준에 다른 연구로 해수순환과 액체 방사성유출물의 거동 특성에 국한된 연구로 주로 동해안 전역에 대한 광역 및 중간역에 대한 평가에 국한되었다.

본 연구에서는 동해 연안의 해양환경의 조사·분석을 통하여 월성 연안역 근방에서의 오염 해석을 위하여 상세 격자망을 구성하여 농도를 산정하였다. 연안역에 유입된 오염물질의 거동특성 및 이동경로를 파악하기 위해 EFDC의 수치모델을 이용하였다.

2. 수치모델

본 연구에서 사용된 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)모델은 연안, 하구, 호소, 습지 및 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모사하는 3차원 수치모델로서 미국 VIMS (Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었다[8][9]. EFDC는 크게 유동, 퇴적물 이동, 수질의 세 요소로 구성되어 있으며, 유동모델 부분은 수온과 염분이 함께 고려된 3차원 천해방정식을 기본으로 한다. 해수유동 및 확산을 모사하는 모델은 다수 존재하나, EFDC 모델은 수직·수평적으로 2차원 및 3차원화가 용이하며, 수질 모델과 퇴적물 이동 모델의 접합이 용이한 장점을 가진다. 수평적으로 직교 또는 구면좌표계를 사용하며, Arakawa C-grid로 구성되어

있고 수직적으로는 σ -좌표계를 사용한다. 그리고 Galperin et al.[10]에 의해 수정된 Mellor-Yamada level 2.5 난류모델 [11]을 사용하여 수직혼합을 계산한다. EFDC 모델은 수직 방향으로 σ -좌표계를 사용하고, 수평 방향으로는 직선 또는 직교곡선 좌표계를 사용하고 있다. 유체정역학적 근사와 Boussinesq 근사를 적용하면 기본방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} + \frac{\partial(mwu)}{\partial z} \\ - \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial x} \\ - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \\ \frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvv)}{\partial y} + \frac{\partial(mwv)}{\partial z} \\ + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + p)}{\partial y} \\ - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

상태방정식

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (3)$$

물질보존식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(mHC)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuC)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvC)}{\partial y} + \frac{\partial(mwC)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial C}{\partial z} + wC \right) + mHR_c + Q_c \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

h, ζ : 기준면하 수심(m), 기준면상 수위(m)

u, v : 직교하는 곡선좌표계 x, y에서의 수평 유속 (m/s)

m_x, m_y : 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근 ($m = m_x m_y$) (m)

w : 변환된 연직좌표계 z 에서의 수직유속성분 (m/s)

H : 총수심 ($= H + \zeta$) (m)

p : 수심 z 에서 기준수압 ($\rho_0 g H(1 - z)$) 과의 차를 ρ_0 로 나눈값, 압력

f : Coriolis parameter

A_v : 수직난류 점성계수 (m^2/s)

A_b : 수직난류 확산계수 (m^2/s)

Q_u, Q_v : 운동량 source-sink 항 ($kg \cdot m/s$)

ρ : 밀도

T, S : 수온, 염분

w : 침강속도 (m/s)

R_c, Q_c : 생화학적 source-sink 항, 외부 source-sink 항

지배방정식의 수치해법은 유한차분법 (finite difference method)과 질량 및 부피보존을 위한 유한체적법 (finite volume method)을 사용하고 있다. 자세한 수치전개 기법은 EFDC 보고서에 수록되어 있다[12][13].

3. 수치실험

3.1 계산영역

본 연구에서는 동해의 월성 연안역에 관한 해수유동을 재현하기 위해 해수유동 수치실험을 수행하였다. 계산영역을 동서방향 171 km, 남북방향 235 km로 영역을 구성하였고 격자간격은 1 km $\times$ 1 km의 정방향 격자를 사용하였고 수치실험의 계산 영역은 Fig. 1과 같다. 해수유동 결과를 모사하기 위해 모델의 계산시간은 2005년 1월 1일 ~ 2005년 1월 31일까지 약 30일간의 수치실험을 수행하였고, 모델의 계산시간 간격은 CFL조건을 만족하는 5초로 설정하였다. 동 기간을 수치실험의 기간으로 선택한 이유는 4개 검조소에서 조위의 시계열 자료의 연속성이 존재하는 기간이기 때문이다. Table 1과 Fig. 2에 각각 해수유동실험의 실험조건과 본 연구의 해당위치와 모델영역에 해당하는 검조소 위치를 나타내었다.

3.2 해수유동 수치실험 검증

해수유동 수치실험의 결과를 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 모델 영역내의 4개 지점에 대한 조위비교를 실시하였다. 국립해양조사원에 의해 2005년 1월 1일 ~ 2005년 1월 31일

Fig. 1. Calculated area in numerical experiments.

Fig. 2. Layout near a wolsung area and measured points of tidal elevation.

Table 1. Computational domain and basic parameters in numerical experiments.

Indexs	Input value	Remark
Model	EFDC	3-D
Domain	171 km $\times$ 235 km = 40185 km ²	
Grids	171 $\times$ 235, $\Delta x = \Delta y = 1000$ m	Active cells = 29821
Time step	5 sec	CFL
Boundary Conditions	Tidal Amplitudes and Phases	M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁

까지의 영역내 검조소에 해당하는 부산의 관측된 조위시계열과 모델에서 계산된 조위시계열을 비교한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 외해경계조건으로 입력된 주요 4대 분조 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대해 양호한 재현성을 타나내는 것으로 판단된다. 4대 분조 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대한 진폭은 (H_m , H_s , H_0 , H')이고, 조석형태수는 일주조에 대한 반일주조의 비로서 다음 식으로 표시된다.

$$F = \frac{H' + H_0}{H_m + H_s} \quad (5)$$

조석형태수 0~0.25는 반일주조가 우세하고, 0.25~1.5는 반일주조가 우세한 혼합조, 1.5~3.0은 일주조가 우세한 혼합조, 3.0이상이면 일주조가 우세함을 의미한다. 따라서 본 연구의 모델영역의 4개 지점 중 부산의 조석형태수는 0.1로 반일 주조가 우세함으로 조석 시계열의 흐름은 관측값과 EFDC의 모델 계산값과 유사한 패턴으로 흐르는 것을 알 수 있다. 또한 울산의 조석형태수는 0.26으로서 반일주조가 우세한 혼합조이다. 반면에 후포, 포항의 조석형태수는 1.64, 2.11로 큰 값을 나타

Fig. 3. Comparisons of observed and calculated tidal elevations at Busan.

Fig. 4. Computed tidal currents at maximum flood and ebb tides.

Table 2. Harmonic analysis for observed and calculated tidal elevations.

	M_2				S_2				K_1				O_1			
	Amplitude (cm)		Phase(°)		Amplitude (cm)		Phase(°)		Amplitude (cm)		Phase(°)		Amplitude (cm)		Phase(°)	
	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.
Hupo	4.10	4.06	92.30	90.35	1.10	1.05	117.80	113.86	4.20	4.19	356.80	352.25	4.10	4.17	322.90	319.42
Pohang	3.10	3.10	120.60	109.28	0.70	0.69	167.30	149.87	4.20	3.92	3.20	2.13	4.30	4.09	325.70	323.24
Ulsan	16.30	15.71	212.30	202.56	7.80	7.33	246.80	234.48	3.30	3.12	45.10	39.57	3.00	2.89	350.30	347.41
Pusan	40.00	37.92	232.80	232.64	18.90	17.73	261.30	259.60	4.40	4.41	137.10	138.13	1.60	1.59	112.20	107.86

내고 있다. 이는 일주조가 우세한 혼합조의 형태를 보인다. 4개 지점에 대한 조화분해 비교결과를 Table 2에 제시하였다. 국립해양조사원 홈페이지에서 취합한 4개 지점의 조화분해 결과와 모델에서 계산된 조화분해 결과를 비교해 보면, 다소 차이를 나타내고 있으나 이는 오차범위 내에 있는 것으로 판단된다. 이상의 조위검증결과를 통해 본 연구에서 사용된 EFDC 모델의 월성 연안역에 대한 적용은 해수유동장 재현에 있어 양호한 재현성을 나타내고 있다.

3.3 해수유동 수치실험 결과

본 연구에서는 해수유동 수치실험의 유동장 재현 결과를 이용하여 오염물 이동확산 수치실험을 통한 오염물 이동확산 영향을 모사하는 것을 주목적으로 한다. 해수유동 수치실험은 2005년 1월 1일~10일까지 실시하였으며, 그 결과를 최강 창·낙조류시의 조류벡터도로 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 조류의 유향을 살펴보면 동해 월성 원전 주변을 중심으로 최강 창조류시에는 남향을 최강 낙조류시에는 북향류 흐름으로 나타났다. 본 모델 영역내 유속범위 중 월성 주변의 유속분포를 살펴보면 1월 1일의 최강 창조류시에는 0.1~0.36 m/sec이고, 최강 낙조류시는 0.1~0.34 m/sec이다. 또한 1월 10일의 최강 낙조류는 0.13~0.58 m/sec이고, 최강 낙조류는 0.12~0.56 m/sec로 나타났다.

4. 수온·염분의 검증

본 연구에서는 국립수산물과학원 (<http://www.nrfdi.go.kr>)의 정선해양 관측망과 기상청 (<http://www.kma.go.kr>)의 일사량, 강우량 및 바람, 기압 자료 등을 참고하였다. 국립수산물과학원이 1961년부터 현재까지 본 연구의 모델 영역과 일치하는 8개 정선의 69개 정점에서 매년 2월 간격으로 6회 실시하고 있는 관측점의 자료를 이용하여 수온, 염분 자료를 초기 입력값으로 사용하였다. 2005년 겨울철의 수온, 염분을 검증하기 위하여 1월부터 약 60일 동안의 국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)의 포항 관측소에서 측정된 수온, 염분값과 해수유동모델로 계산되어진 수치해의 비교 시계열 결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. 이때 수온은 7.09~9.31°C, 염분은 33.61~34.00 ‰에 해당하는 분포를 보이고 있고, 관측값과 모델의 결과값과 유사한 양상을 나타내고 있어 본 오염물의 이동·확산의 예측이 가능하다고 생각된다.

5. 오염물 이동 확산

동해에 위치한 월성 원전은 기체 및 액체 유출물 방출시 예상되는 방사성 핵종에 대한 방출량을 제한하고 있고 일반인의 선량한도에도 근거를 두고 있다. 이러한 방출 제한치를 유도방출기준 (DRL, Derived Release Limits) 이라고 한다. 그리하여 2000년에 “방사성 동위원소의 공기 중 및 수중 최대허용농도 (Water Maximum Permissible Concentration)”를 반영하여 월성 연안역에서의 유도방출기준을 설정한 값을 Table 3에 나타내었다[11].

본 연구에서는 오염물 이동·확산을 평가하기에 앞서 2005년의 관측된 조위자료로 해수유동모델을 통해 관측값과 모델의 결과값을 비교 검증하였다. 또한 수온, 염분의 관측값과 모델의 결과값을 비교 검증하여 양호한 결과를 나타내었

Fig. 5. Comparison of the observed and calculated temperature at Pohang.

Fig. 6. Comparison of the observed and calculated salinity at Pohang.

다. 이 결과를 토대로 동해 월성 연안에서 사고를 가정한 오염물 이동·확산을 평가하기 위해 10일간 확산모델 계산을 수행하였다. 방출되는 방사성 핵종의 흡착, 침전 등을 고려하여 해양확산을 평가 하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 월성원전의 액체방출물 유도 방출기준에 근거한 ^{137}Cs 핵종의 연간 유도방출 기준치값을 적용하여 오염물 이동확산 평가를 실시하였다. Table 3에서 제시한 것과 같이 ^{137}Cs 핵종의 유도방출치가 연간 1.3×10^{13} Bq 을 고려하였다. 따라서

본 모델에서는 초당 방출량으로 환산하여 4.12×10^5 Bq/s 로 모델의 초기 방류량으로 가정하여 수치모델을 수행하였다. 동해 월성 원전 연안역의 액체 방사성 유출 특성의 확산도는 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7에서와 같이 10일간의 오염물 이동확산 실험을 살펴보면, 월성 연안역의 오염물의 이동흐름은 겨울철에 북~북동향으로 이동되어 확산되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 북측으로의 확산을 거리에 따른 최대농도

(a) initial (b) after 3days (c) after 5days

(d) after 6days (e) after 8days (f) after 10 days

Fig. 7. Advection and diffusion during the experiment period(after 3, 5, 6, 8, 10days).

Table 3. Released limit of liquid effluents at Wolsung NPPs. (Do not include the radioactive waste repository near Wolsung NPPs)

Nuclide	Water MPC (Bq/month)	DRL	
		Bq/month	Bq/year
^3H	2×10^8	1×10^{16}	1.8×10^{17}
^{131}I	1×10^4	8.1×10^{11}	9.6×10^{12}
^{137}Cs	7×10^5	1.1×10^{12}	1.3×10^{13}
^{134}Cs	3×10^5	8.1×10^{11}	9.6×10^{12}
^{60}Co	2×10^6	4×10^{13}	4.8×10^{14}

Table 4. Travel time of released pollutant according to the distance from Wolsung NPPs

Index	Model results (hours)	
	110 km	174.96
North	100 km	157.15
	90 km	124.00
	80 km	111.00
	70 km	102.00
	60 km	78.96
	50 km	75.00
	40 km	72.99
	30 km	70.99
	20 km	61.00
	10 km	28.70

의 도달시간의 결과를 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서의 확산결과는 동한난류의 방향과 일치하는 북측방향의 확산이 주로 나타난 결과로 생각된다.

6. 결 론

본 연구는 월성원전 부근해역의 EFDC모델을 적용하여 월성 연안역의 해수유동장을 재현하고, 오염물 이동확산현상 모사를 목적으로 수행되었다. 월성 연안역의 오염물 확산 수치실험은 월성 원전만을 대상으로 한 것으로 주변의 방사성폐기물처분장의 유출은 전혀 고려하지 않았다. EFDC모델을 통한 해수유동장 검증과 수온, 염분의 검증을 통해 본 모형이 양호한 재현성을 나타냄으로써 월성 연안역으로 유입된 오염물 확산형태를 제시하였다. 따라서 월성 연안역의 해수유동 수치실험을 결과 유동장은 창조류시에는 남향, 낙조류시에는 북향으로 진행됨을 알 수 있고, 겨울철 수온은 $7.09 \sim 9.31^{\circ}\text{C}$, 염분은 $33.61 \sim 34.00\text{‰}$ 에 해당하는 것을 알 수 있다. 월성 원전을 중심으로 오염물 이동 확산을 살펴보면 북~북동향으로 확산이 진행되는 것을 알 수 있었다. 이는 동한난류의 흐름과 동일한 양상을 나타내는 것으로 생각된다. 이는 월성 원전 연안역의 해수유동은 조석 영향보다는 동한난류와 같은 밀도류가 더 지배적임을 의미한다.

향후 본 연구를 바탕으로 월성 연안역 외의 다른 지역에도 적용하여 연구를 수행할 예정이며 나아가 방사성 핵종의 흡착, 침전을 고려하여 연안의 오염물 이동확산을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] W. J. Wolff, Anthropogenic Influences and Management of Estuaries, Limnologica, Jena, 20(1), pp.153-156 (1990).
- [2] W. Chow, I. P. Murarka, R. W. Brocksen, "Entrainment and Impingement in Power Plant Cooling Systems.", Journal of the Water Pollution Control Federation, 53(6), pp. 965-973 (1981).
- [3] B. R. Melton and G. M. Serviss. Florida Power Corporation-Anclote Power Plant Entrainment Survival of Zooplankton, Environmental Science and Policy, 3(1), pp. 233-248 (2000).
- [4] J. S. Baek, Y. Y. Jeong, S. B. Ahn and W. Kim, "Radiological Environment Investigation of Radioactive Waste Disposal Facility", J. of the Korean Radioactive Waste Society, 6(4), pp. 387-398 (2008).
- [5] KAERI, Environmental Assessment and Relative Model Development near a Kori Site, KAERI/NSC-307/88, Korea Advanced Energy Research Institute (1988).
- [6] KORDI, Development of Monitoring Strategy for Marine Environmental Radioactivity, BSPN 42800-1414-4, Korea Ocean Research and Development Institute (2002).
- [7] KEPRI, Development of Three Dimensional Coastal Dispersion Model for Radioactive Effluents Released from NPPs, R-2004-A-064, Korea Electric Power Research Institute (2006).
- [8] J. M. Hamrick, A Three-dimensional Environment Fluid Dynamics Computer Code Theoretical and Computational Aspects. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering 317, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science (1992).
- [9] J. M. Hamrick, Users Manual for the Environment Fluid Dynamic Computer Code. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 328 (1996).
- [10] B. Galperin, L. H. Kantha, S. Hassid, A. Rosati, "A Quasi-Equilibrium Turbulent Energy Model for Geophysical Flows", J. of Atmospheric Science., 45, pp. 55-62 (1988).
- [11] G. L. Mellor and T. Yamada, "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems", Review of Geophysics, 20(4), pp. 851-875 (1982).
- [12] J. M. Hamrick, Application of the EFDC, Environmental Fluid Dynamic Computer Code to SFWMD Water Conservation Area 2A. A Report to South Florida Water Management District. JMH-SFWMD-94-01, Consulting Engineer, Williamsburg, VA (1994).

- [13] K. Park, A. Y. Kuo, J. Shen, J. M. Hamrick, A Three-Dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM3D): Description of Water Quality and Sediment Processes Submodels. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 327 (1955).
- [14] KEPRI, Development on the Alarm Setpoint Determination of CANDU Effluent Monitors and Upgrade of Offsite Dose Assessment Technology, Korea Electric Power Research Institute (2007).