

論 文

# EMT-3D 모델을 이용한 해양환경중 PFCs의 환경동태 해석

김동명\* · 노경준\*\* · 조현서\*\*\* · Hiroaki Shiraishi\*\*\*\*

\*부경대학교 환경시스템공학부 생태공학전공, \*\*부경대학교 환경시스템공학부 환경공학전공,  
\*\*\*전남대학교 해양기술학부 환경해양학전공, \*\*\*\*일본국립환경연구소 환경리스크연구센터

## Fate and transport of PFCs in marine environment using EMT-3D

Dong-Myung Kim\* · Kyong Joon Roh\*\* · 조현서\*\*\* · Hiroaki Shiraishi\*\*\*\*

\*Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*\*Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

\*\*\*Department of Environmental Oceanography, Chonnam National University, Jeonnam 550-749, Korea

\*\*\*\*Research Center for Environmental Risk, National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 305-8506 Japan

**요 약** : 해양생태계로 유입되는 화학물질의 총합적인 평가 및 관리를 위해서는 동 화합물의 해양환경중의 거동 및 운명, 생태계에의 영향, 관리방안에 따른 화학물질의 변화 예측 및 리스크 평가 등을 행할 필요가 있으며, 이를 위하여는 화학물질에 대한 생태계 모델이 유용한 수단이 될 수 있다. 본 연구에서는 여러 화학물질에 적용할 수 있으며, 지역특성, 존재 데이터 상황, 대상 수산물의 특성을 고려하여 여러 상태함수 및 프로세스의 추가와 삭제가 가능한 3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 해양환경중의 PFCs 관련물질을 대상으로 그 적용성을 검토하였으며, 민감도 분석 및 시나리오 분석을 행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다.

**핵심용어** : EMT-3D, PFCs, PFOA, 해양환경, 유기화학물질, 잔류성오염물질, 내분비계장애물질, 생태계 모델

### 1. 서 론

해양생태계에 대한 POPs(Persistent organic pollutants), EDCs(Endocrine disrupting chemicals), PBTs (Persistent Bio-accumulative and Toxic substance) 등과 같은 화학물질에 의한 오염은 점점 복잡화, 다양화하고 있으며, 사람의 건강이나 생태계에 돌이킬 수 없는 피해를 가져올 우려가 증가되고 있는 실정이다(Kim et al., 2004).

해양생태계로 유입되는 이러한 화학물질의 총합적인 평가 및 관리를 위해서는 동 화합물질의 해양환경중의 거동 및 운명, 생태계에의 영향, 관리방안에 따른 화학물질의 변화 예측, 노출량의 시공간적 변동 및 리스크 평가 등을 행할 필요가 있다. 이를 위해서는 화학물질에 대한 생태계 모델이 유용한 수단이 될 수 있으며, 자연환경을 대상으로 직접 실험할 수 없는 경우에 있어서 모델은 유용한 도구가 될 수 있다.

본 연구에서는 해양에서의 화학물질의 시, 공간적인 거동을 파악할 수 있으며, 지역특성, 존재 데이터의 상황, 대상 수산물의 특성을 고려하여 여러 상태함수 및 프로세스의 추가와 삭제가 가능한 3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 연안역의 PFCs를 대상으로 그 적용성을 검토하였으며, 민감도 분석 및

시나리오 분석을 수행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다.

### 2. 모델링 시스템

본 연구에 적용된 생태계모델(EMT-3D)은 3차원 모델로서, 해양으로 유입된 화학물질의 이류, 확산작용에 의한 이송현상과 생물, 화학적 반응이 고려되어 있다(Fig. 1). EMT-3D는 기존의 여러 해양유체역학모델과의 연결이 용이하며, 여러 화학물질에 대하여 적용성 및 데이터 존재 상황에 따른 유연성을 가지는 3차원 생태계 모델이다(Kim et al., 2004).

본 모델에서는 상태변수로 용존 화학물질, 입자성유기물질 내의 화학물질, 플랑크톤 체내의 화학물질, 어류 체내의 화학물질, 저서생물 체내의 화학물질, 저질 입자성유기물질 내의 화학물질, 저질 간극수 내의 화학물질 등이 고려되어 있으며, 내만으로 유입되는 화학물질 부하는 하천으로부터의 부하, 항구로부터의 부하, 항해중인 선박에 의한 부하, 유역으로부터의 부하, 강우에 의한 부하, 대기입자로부터의 부하, 유역으로부터의 비점원 부하 등을 시공간적으로 고려할 수 있도록 구성되어 있다. 내만으로 유입된 화학물질은 이류, 확산되면서 화학적, 생물학적 과정을 거치게 되는데 본 모델에서는 유기입자에 대한 흡착과 탈착, 생물에 대한 섭취와 농축 및 분비, 대기로의 휘발, 저질로의 침전 및 용출, 생분해, 광분해, 가수분해, 산화 등이 고

\*대표저자 : 종신회원, dmkim@pknu.ac.kr, 051)620-6445

\*\*\*종신회원, hscho@chonnam.ac.kr, 061)659-3146

려되어 있으며, 각 상태함수와 프로세스는 필요에 따라 추가와 삭제가 가능하다.

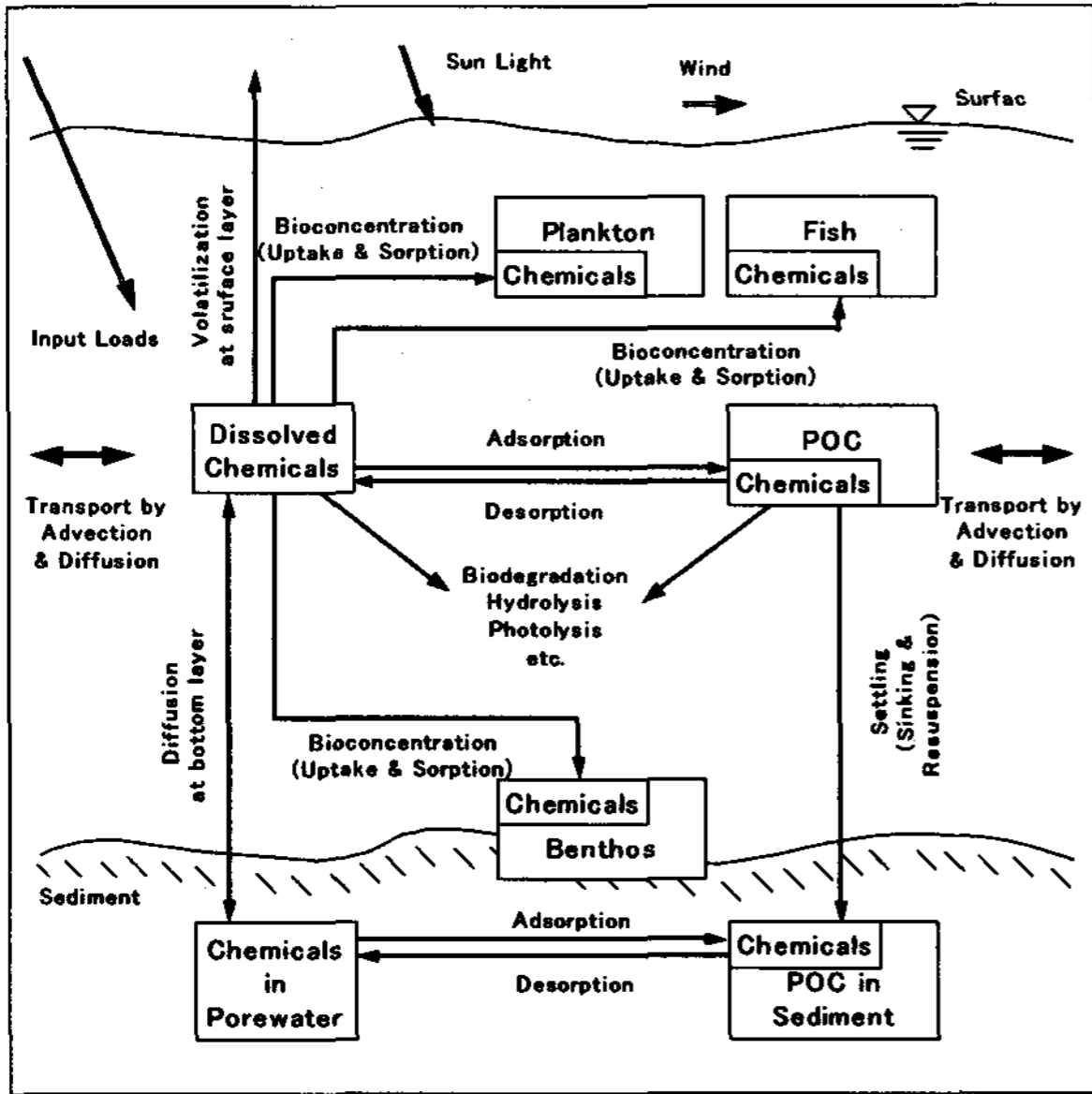


Fig. 1. Schematic diagram of the fate and transport of chemicals in the EMT-3D.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대상해역 및 모델의 적용

EMT-3D를 사용하여 도쿄만을 대상으로 PFOA의 환경동태를 시뮬레이션 하였다. 대상해역은 동서 및 남북방향으로 각 1km구분하였으며, 수직방향으로는 각 격자별 수심의 10%씩 구분하여 10개의 층으로 구성하였다. 생물, 화학적인 과정은 문헌 조사와 데이터의 존재 상황 등을 고려하여 섭취와 흡탈착, 분비와 호흡, 침강을 고려하였으며, 유동장은 도쿄만을 대상으로 수정된 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하여 조석류와 잔차류를 계산한 Kim et al.(2004)의 결과를 이용하였다. 표층의 경우 계산치와 관측치간 관계정도를 나타내는 상관계수와 적합성의 지표가 되는 결정계수를 비교한 결과 전반적으로 모델의 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

시뮬레이션 된 표층 및 저층의 각 상태변수의 분포는 유입부하가 집중되어 있는 도쿄도 인근해역에서 가장 높은 농도 분포를 나타내었으며, 외해로 갈수록 낮아지는 분포를 보였다. 표층의 경우 용존 PFOA의 범위는 5~45ng/L 정도였다. 입자성유기물질 및 식물플랑크톤 체내의 PFOA농도가 각각 20~500µg/kg 및 0.05~0.40µg/kg 범위로 나타났다. 저층의 경우 농도 범위는 용존 PFOA의 경우는 5~40ng/L, 입자성유기물질 내의 PFOA는 20~510µg/kg, 식물플랑크톤 체내의 PFOA의 경우는 0.05~0.40µg/kg 정도로 나타났다.

#### 3.2 민감도 분석 및 시나리오 디자인

모델 보정에 적용된 계수값에 대하여 각 계수값의 2배 및

1/2배에 해당하는 값을 증감시켰을 때 나타나는 상태함수 결과값의 변동량으로 계수의 민감도를 분석하였다.

수층의 용존 PFOA의 경우 분배계수와 침강속도의 증감에 따른 농도변화가 다소 있는 것으로 나타났으나, 그 변화량은 미미한 것으로 나타났다. 입자성유기물질중 PFOA의 경우는 분배계수, 흡착속도, 퇴적속도의 영향이 큰 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 체내의 PFOA의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났으며 다음으로 섭취속도, 분배계수의 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 추후의 PFOA에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상태함수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

유입부하의 증감에 대하여 해역의 PFOA농도가 어떠한 형태로 반응하는지 평가하기 위하여 시나리오 분석을 행하였다. 시나리오분석을 위한 케이스는 도쿄만으로 유입되는 전 부하를 20%, 50%, 80% 줄였을 경우와, 카나가와, 도쿄, 치바지역에 존재하는 하수처리장 및 하천으로부터의 유입부하를 지역별로 각각 80% 줄였을 경우를 설정하였다. 전부하에 대하여 50% 감소의 경우 전지점의 용존 PFOA농도가 20ng/L 이하로 나타났다. 각 지역의 하천으로부터 공급되는 PFOA량을 감소시킨 경우는, 표층은 도쿄로부터의 유입되는 부하를 줄였을 경우가 농도의 변화가 가장 크게 나타났다. 저층의 경우는 치바로부터의 유입부하를 줄였을 경우가 변화가 가장 크게 나타났다.

### 4. 결론

생태계 모델을 이용하여 도쿄만의 PFOA에 대하여 적용된 결과, 모델의 재현성은 비교적 양호한 것으로 나타났다. 민감도 분석결과 용존 PFOA의 경우 계수 변화에 따른 농도변화는 미미한 것으로 나타났다. 입자성유기물질중 PFOA의 경우는, 분배계수, 흡착속도, 퇴적속도의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 식물플랑크톤 체내의 PFOA의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수, 섭취속도, 분배계수의 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 추후의 PFOA에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상태함수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다. 시나리오분석 결과 전부하 50% 감소의 경우 용존 PFOA농도가 10ng/L 이하로 나타났으며, 각 지역별 하수처리장으로부터의 유입부하 삭감에 따른 변화는 거의 관찰되지 않았다. 각 지역의 하천으로부터 공급되는 PFOA량을 감소시키는 경우, 표층의 경우는 도쿄로부터의 유입되는 부하를, 저층의 경우는 치바로부터의 유입부하를 줄였을 경우가 변화가 가장 크게 나타났다.

### 참고 문헌

- {1} Environment Agency, Japan, 1993. Comparisons of Global Environmental Fate Models Applicability of Global Models to Japanese Environment .

Prepared to OECD Phase 1 SIDS Initial Assessment Meeting.

- {2} Horiguchi, F.; Yamamoto, J.; Nakata, K. 2001. A numerical simulation of the seasonal cycle of temperature, salinity and velocity fields in Tokyo Bay. *Marine Pollution Bulletin* 43 (7-12), 145-153
- {3} Jørgensen, S. E. 1994. *Fundamentals of Ecological Modelling*. 2nd ed., Elsevier.
- {4} Jorgensen, L. A.; Jorgensen, S. E.; Nielsen, S. N. 2000. *Ecological Modelling and Ecotoxicology*. Elsevier.
- {5} Kim, D.M.; Nakada, N.; Horiguchi, T.; Takada, H.; Shiraishi, H.; Nakasugi, O., 2004. Numerical simulation of organic chemicals in a marine environment using a coupled 3D hydrodynamic and ecotoxicological model. *Marine Pollution Bulletin* 48 (7-8), 671-678
- {8} Martin, J.W.; Mabury, S.A.; Solomon, K.R.; Muir, D.C.G., 2003. Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(1), 196-204
- {9} U.S. EPA Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division, 2001. Hazard assessment of perfluorooctanoic acid and its salts, pp.107