

# EMT-3D 모델을 이용한 동경만의 PFOA 시뮬레이션

김동명\*

\*부경대학교 환경시스템공학부 생태공학전공

## Numerical Simulation of PFOA in Tokyo Bay using EMT-3D

Dong-Myung Kim\*

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

**요약** : 3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 도쿄만의 PFOA를 대상으로 그 적용성을 검토하였으며, 민감도 분석 및 시나리오 분석을 행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다. 계산치와 대상해역 실측치간의 R값과 R<sup>2</sup>값이 각각 0.7115~0.8759와 0.5062~0.7672로 계산되어 모델의 재현성은 비교적 양호한 것으로 나타났다. 민감도 분석결과 용존 PFOA의 경우 계수 변화에 따른 농도변화는 미미한 것으로 나타났으며, 입자성유기물질중 PFOA는 분배계수, 흡착속도, 퇴적속도의 영향이, 식물플랑크톤 체내의 PFOA는 생물농축계수, 섭취속도, 분배계수의 영향이 큰 것으로 나타났다. PFOA에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상태함수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다. 도쿄만 인근의 각 지역별 하수처리장으로부터의 유입부하 삭감에 따른 변화는 미미한 것으로 평가되었으며, 각 지역의 하천으로부터 공급되는 PFOA량을 감소시킨 경우는 표층의 경우는 도쿄, 저층의 경우는 치바로부터의 유입부하를 줄였을 경우가 변화가 가장 큰 것으로 나타났다.

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

**ABSTRACT**: A three dimensional ecological model (EMT-3D) was applied to Tokyo Bay for the simulation of PFOA. EMT-3D was calibrated with seawater analysis data obtained from the study area in 2004. The simulated results of dissolved PFOA were in good agreement with the observed values, with a correlation coefficient(R) of 0.7115~0.8759 and a coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of 0.5062~0.7672. The results of sensitivity analysis showed that partition rate, adsorption rate and settling rate were important factors for PFOA in particulate organic matter. In the case of PFOA in phytoplankton, bioconcentration factor, uptake rate and partition rate were important factors. Therefore, the parameters must be carefully considered in the modeling. In the case of 50% and 80% total loads reduction, concentration of dissolved PFOA was shown to be lower than 20ng/L and 10ng/L, respectively. In the case of reduction of loads from rivers in each prefecture, Tokyo prefecture was found to have the most influence on the change of dissolved PFOA in surface water while Chiba prefecture was found to have the most influence on the change of dissolved PFOA in bottom water.

**KEY WORDS**: EMT-3D, PFOA, Marine Environment, Organic Chemicals, POPs, EDCs, Ecological Model

### 1. 서론

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).

본 연구의 대상 물질인 암모늄 퍼플루오로옥탄

(ammonium perfluorooctane, PFOA)은 최근 많은 관심을 받고 있는 PFCs(PerFluorinated Chemicals)의 하나로 환경중 잔류성이 강하고 먹이사슬을 통해 인간과 생태계에 농축되어 악영향을 미치는 독성이 강한 물질이다. 또한 신체발달 및 생식 기능상 매우 높은 위험성을 유발시키며, 특히 아동과 가임 연령 여성 건강에 커다란 영향을 미칠 수 있으며, 동물내의 간세포독성과 치사율에 매우 큰 영향을 주는 물질이다.

해양생태계로 유입되는 이러한 화학물질의 총합적인 평가 및 관리를 위해서는 동 화학물질의 해양환경중의 거동 및 운명, 생태계에의 영향, 관리방안에 따른 화학물질의 변화 예측, 노출량의 시공간적 변동 및 리스크 평가

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

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.

현재 화학물질에 관한 모델로는 다매체환경에서의 화학물질 운명예측에 관한 Fugacity model I, II, III, IV (Cahill et al, 2003), CALTOX, MNSEM2(Environment Agency, Japan, 1993), USES(Polder et al., 1998; Linders and Luttk, 1995) 등이 있으나 이러한 다매체환경모델의 경우 초기 리스크 평가와 같은 분야에서는 적용성이 뛰어난 반면 특정 수계에 대한 적용에는 한계점을 가지고 있다. 수환경에 관해서는 AQUATOX, WASP모델 내의 TOXI 등이 개발되어져 있으며, 연안역에 대해서는 Dynamic Pseudo Two-Dimensional Link-Node Model(Seligman et al., 1987), 비보존계 Box Model 등이 적용되어져 왔으나, 이러한 모델의 경우는 수심에 따른

유해물질의 거동해석이나, 수평적 분포특성 파악 등에 한계를 가지고 있었다. 그리고 최근 적용되기 시작한 3차원 모델의 경우도 Kim et al.(2004)의 연구 등 몇몇 연구를 제외하면 용존 화학물질과 입자성유기물질간의 흡착과 탈착만을 고려하고 있어 리스크 평가에 필요한 해양생물이나 수산물 내에 축적되는 화학물질에 대한 고려는 없었다.

따라서, 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 도쿄만의 PFOA를 대상으로 그 적용성을 검토하였으며, 민감도 분석 및 시나리오 분석을 수행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다.

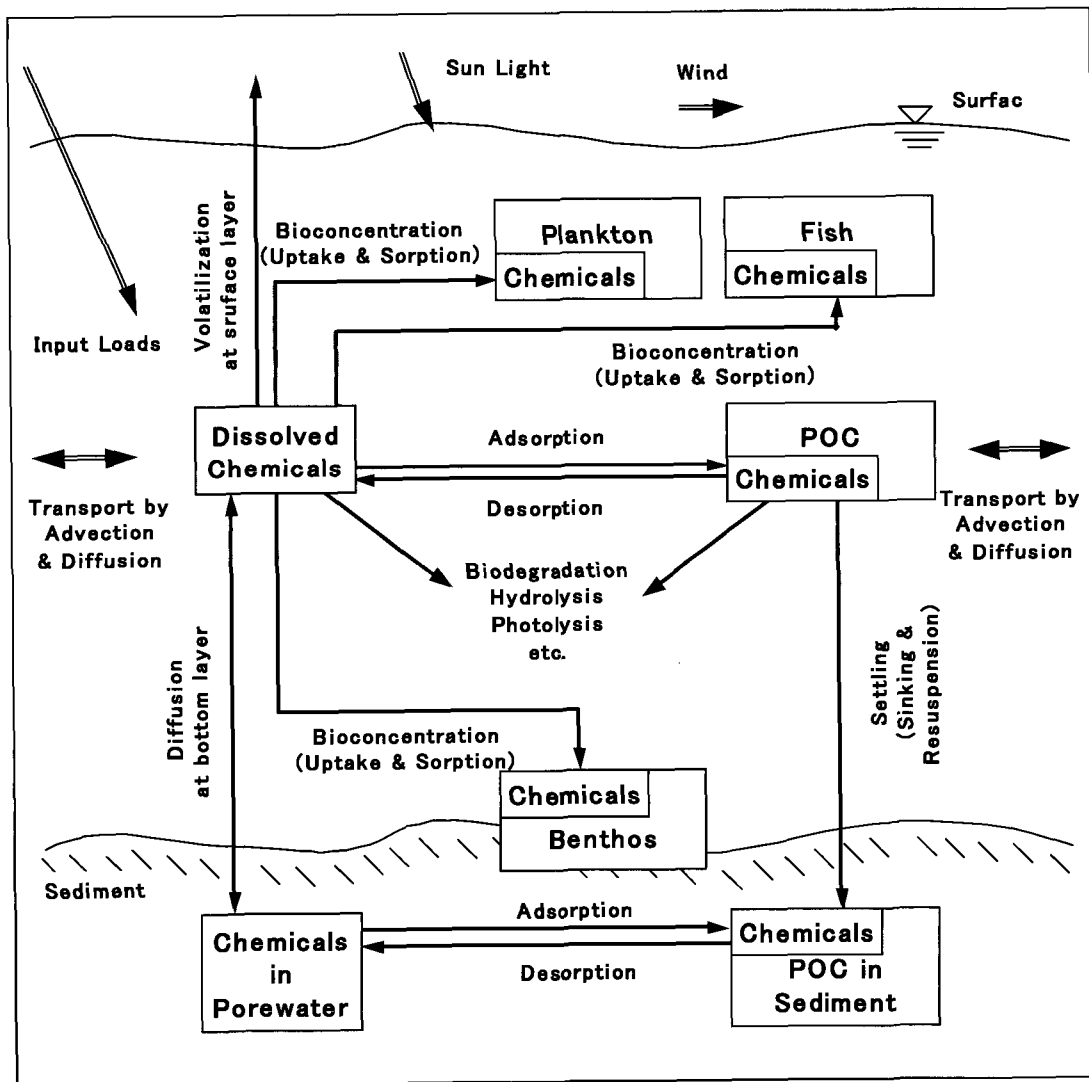


Fig. 1. Schematic diagram of the fate and transport of chemicals in the EMT-3D.

## 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 입자성 유기물질 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, 가

수분해, 산화 등이 고려되어 있으며, 각 상태함수와 프로세스는 필요에 따라 추가와 삭제가 가능하다.

식 (1)은 모델 내 구성요소의 시공간적 변화를 표현한 식이다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z}$$

Chemical transport by advection

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right]$$

Chemical transport by turbulent diffusion

$$+ \frac{dB}{dt}$$

Biological and chemical processes shown in the table 1 (1)

여기서, B는 대상 화학물질, u는 x방향의 유속, v는 y방향의 유속, w는 z방향의 유속, Kx는 x방향의 수평확산계수, Ky는 y방향의 수평확산계수, Kz는 z방향의 수직확산계수이다. 모델에 적용된 생물 화학적인 프로세스는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Biological and chemical processes which were applied in each cell of the EMT-3D

---

d(Dissolved Chemicals)/dt = - Adsorption into POC in water + Desorption from POC in water - Uptake and sorption of plankton + Excretion and respiration from plankton - Uptake and sorption of fish + Excretion and respiration from fish - Uptake and sorption of benthos + Excretion and respiration from benthos - Biodegradation - Hydrolysis - Photolysis - Oxidation - Volatilization at surface layer + Diffusion or release from porewater
d(Chemicals in Plankton)/dt = + Uptake and sorption from water - Excretion and respiration into water
d(Chemicals in Fish)/dt = + Uptake and sorption from water - Excretion and respiration into water
d(Chemicals in Benthos)/dt = + Uptake and sorption from water - Excretion and respiration into water + Uptake and sorption from porewater - Excretion and respiration into porewater
d(Chemicals in POC)/dt = + Adsorption from water - Desorption into water - Sinking to sediment + Resuspension from sediment - Biodegradation - Hydrolysis - Photolysis - Oxidation
d(Dissolved Chemicals in Porewater)/dt = - Adsorption into POC in sediment + Desorption from POC in sediment - Uptake and sorption of benthos + Excretion and respiration of benthos - Biodegradation - Diffusion and release to water column
d(Chemicals in Sediment POC)/dt = + Adsorption from pore water - Desorption into pore water + Sinking - Resuspension - Biodegradation

---

### 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. 이 중 가장 상부의 층을 표층, 가장 하부의 층을 저층으로 하여 PFOA 분석 자료와 비교하였다. 부하는 도쿄만으로 유입되는 하천과 하수처리장으로부터의 유입부하 총 27개소를 고려하였다. 도쿄만내 PFOA조사 정점과 하천 및 하수처리장으로부터의 유입지점은 Fig. 2에 나타내었다.

생물, 화학적인 과정은 문헌조사와 데이터의 존재 상황 등을 고려하여 섭취와 흡탈착, 분비와 호흡, 침강을 고려하였다. 입력조건 및 파라메타는 Table 2에 나타내었으며, 도쿄만으로 유입되는 PFOA 부하량은 Table 3에 나타내었다. 유동장은 도쿄만을 대상으로 수정된 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하여 조석류와 잔차류를 계산한 결과를 이용하였다. 잔차류의 유형은 표층에서는 만내에서 외해쪽으로는 흐름이, 저층에서는 외해쪽

에서 만내로의 흐름이 탁월 한 것으로 나타났으며, 자세한 결과는 Kim et al.(2004)에 나타나있다.

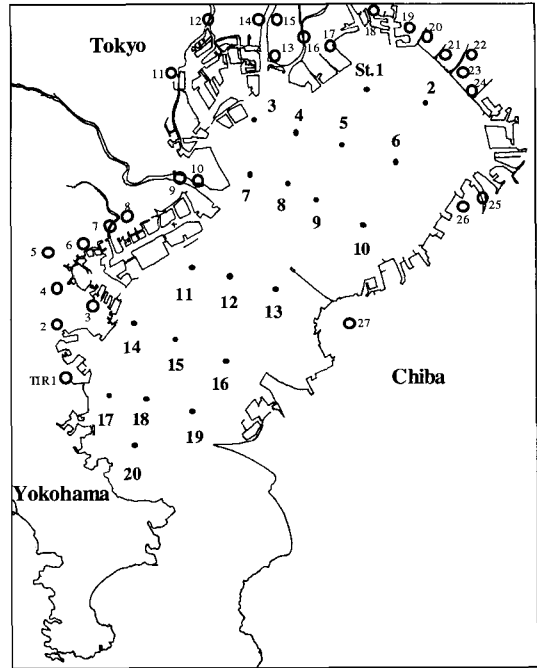


Fig. 2. Sampling stations and locations of input loads in the model region.

Table 2. Input data for EMT-3D

Parameters	Input value
Model region	Tokyo Bay
Target chemicals	PFOA
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 1\text{km}$
Layer	10 layer
Considered biological and chemical processes	Adsorption, Desorption, Uptake and Sorption, Excretion and Respiration, Sinking
Bioconcentration factor of phytoplankton <sup>(1),(2),(3)</sup>	10 (L / kg)
Uptake rate of phytoplankton	11 (L / [kg day])
Excretion rate of phytoplankton <sup>(4),(5),(7)</sup>	1.09 (1 / day)
Adsorption rate of particulate organic carbon	1.13 ( $\times 10^4$ L / [kg day])
Desorption rate of particulate organic carbon	1.57 (1 / day)
Partition rate of particulate organic carbon <sup>(1)</sup>	1.13 ( $\times 10^4$ L / kg)
Settling rate of particulate matter <sup>(6)</sup>	2.78 (g / [m <sup>2</sup> day])
Horizontal eddy viscosity and diffusivity <sup>(6)</sup>	3.0 ( $\times 10^5$ cm <sup>2</sup> /s)

(1) U.S. EPA, 2001 ; (2) Cahill et al., 2003 ; (3) Martin et al., 2003 ; (4) Jørgensen, 1994 ; (5) Kim et al., 2004 ; (6) Horiguchi et al., 2001 ; (7) Jørgensen et al., 2000

Table 3. Pollutant loads flowing into the model region

Input loads	Flow (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day)	PFOA (g/day)
Input loads form sewage treatment plant		
Kanagawa prefecture	679	16.3
Tokyo prefecture	985	29.3
Chiba prefecture	264	8.8
Input loads from river		
Kanagawa prefecture	3592	88.2
Tokyo prefecture	7651	150.5
Chiba prefecture	1633	90.2

대상해역에서 2004년 실측한 용존 PFOA의 값과 생태계모델을 이용하여 계산된 계산치의 비교를 Fig. 3에 나타내었다.

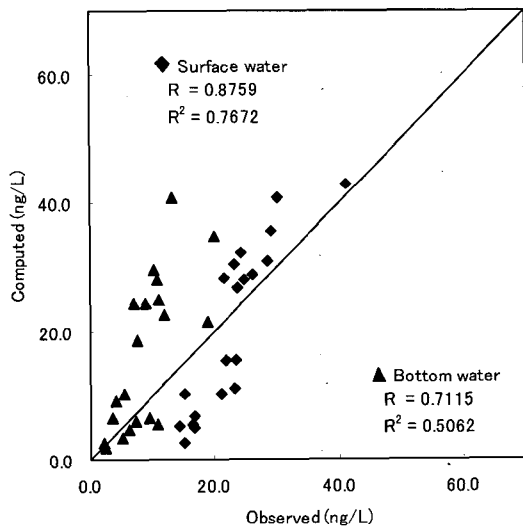


Fig. 3. Comparison of the observed and simulated dissolved PFOA in Tokyo Bay.

표층의 경우 계산치와 관측치간 관계정도를 나타내는 상관계수 R값이 0.8759, 적합성의 지표가 되는 결정계수 R<sup>2</sup>값이 0.7672로 계산되었으며, 저층의 경우 상관계수 R값이 0.7115, 결정계수 R<sup>2</sup>값이 0.5062로 계산되어 표층의 결과가 좀 더 잘 재현된 것으로 나타났다. 추후 저질과의 관계에 대한 연구가 진행된다면 저층의 재현 정도도 더욱 개선될 것으로 사료되며, 전반적으로 모델의 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

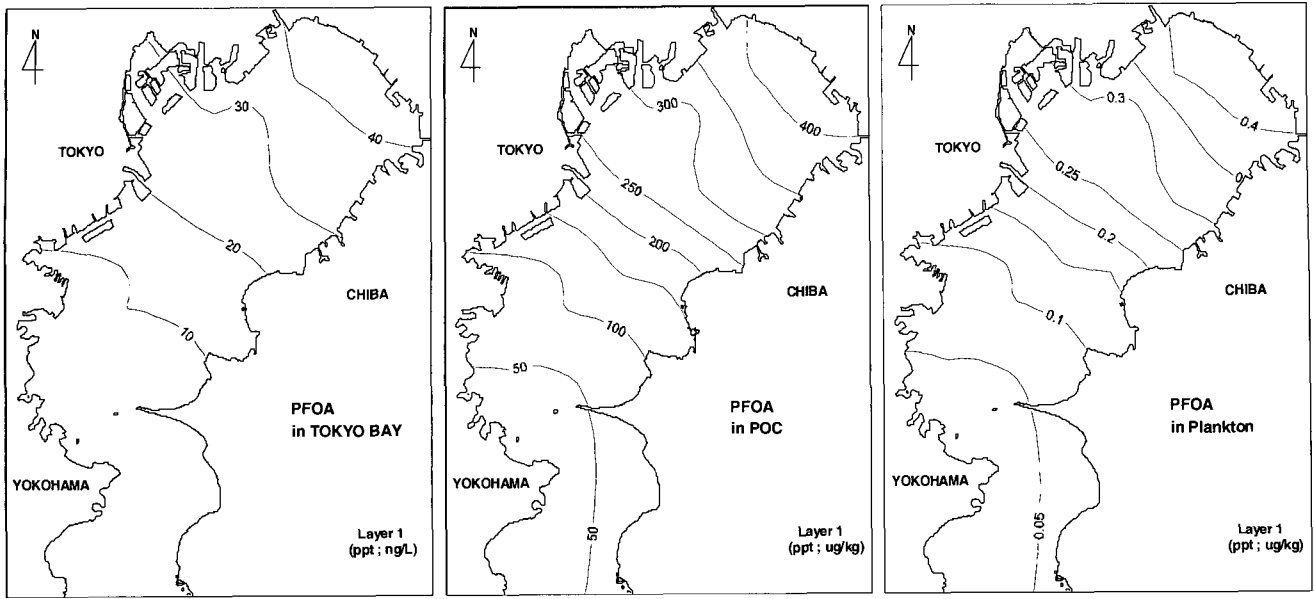
시뮬레이션 된 표층 및 저층의 용존 PFOA, 입자성 유기물질내의 PFOA, 식물플랑크톤 체내의 PFOA 분포를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다.

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 각각20~500µg/kg 및 0.05~0.40µg/kg범위로 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

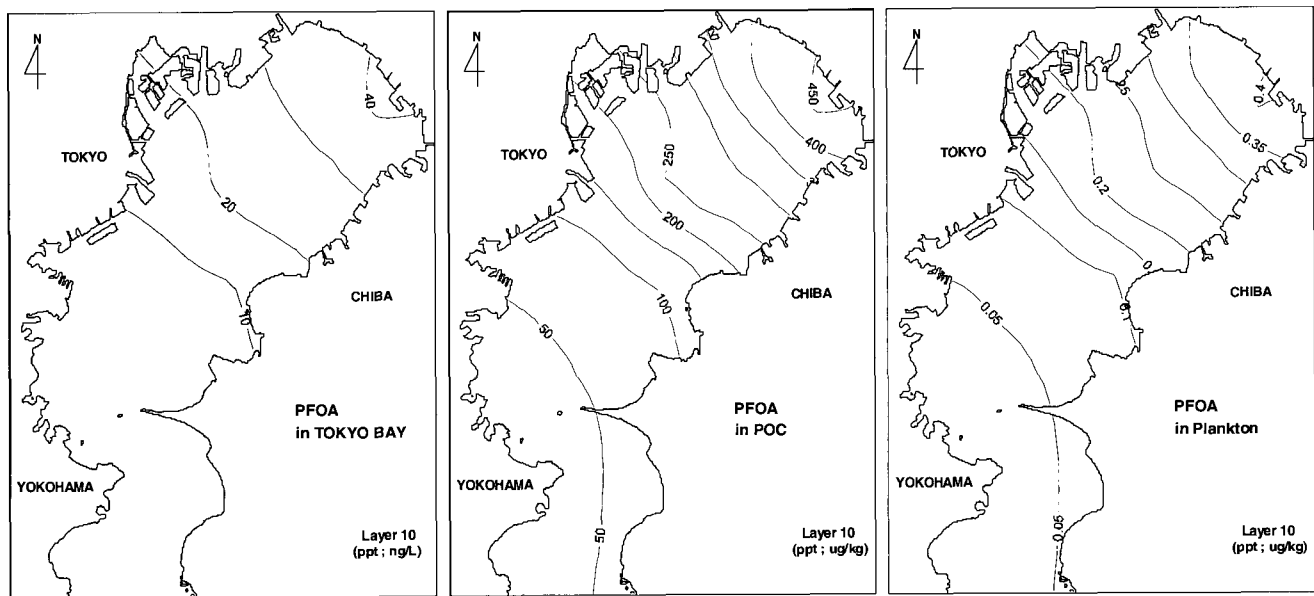
모델 보정에 적용된 계수값에 대하여 각 계수값의 2배 및 1/2배에 해당하는 값을 증감시켰을 때 나타나는 상태함수 결과값의 변동량으로 계수의 민감도를 분석하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 민감도 분석의 결과값이 큰 경우일수록 상태함수의 농도결정에 미치는 영향이 커지는 것을 나타낸다.

수층의 용존 PFOA의 경우 분배계수와 침강속도의 증감에 따른 농도변화가 다소 있는 것으로 나타났으나, 그 변화량은 미미한 것으로 나타났다. 분배계수를 1/2로 감소시킨 경우는 0.41% 증가하였으며, 2배로 증가시킨 경우는 0.76% 감소하였다. 입자성유기물질중 PFOA의 경우는 분배계수, 흡착속도, 퇴적속도의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 특히 분배계수를 1/2배 시킨 경우 약 48.20% 감소하였으며, 2배 시킨 약 87.38% 증가하였다. 식물플랑크톤 체내의 PFOA의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났으며



(a) Dissolved PFOA in surface layer (b) PFOA in POM of surface layer (c) PFOA in phytoplankton of surface layer

Fig. 4. The distribution of the simulated PFOA in the surface layer of model area; (a) dissolved PFOA(ppt: ng/L), (b) PFOA in particulate organic matter(ppb:ug/kg), (c) PFOA in phytoplankton(ppb:ug/kg).



(a) Dissolved PFOA in bottom layer (b) PFOA in POM of bottom layer (c) PFOA in phytoplankton of bottom layer

Fig. 5. The distribution of the simulated PFOA in the bottom layer of model area; (a) dissolved PFOA(ppt: ng/L), (b) PFOA in particulate organic matter(ppb:ug/kg), (c) PFOA in phytoplankton(ppb:ug/kg).

Table 4. Sensitivity analysis of PFOA concentration by change of values of parameters

Item	The changes of PFOA (%)		
	in Water	in POM	in Plankton
POC adsorption rate x 1/2	0.03	-5.56	0.03
POC adsorption rate x 2	-0.02	3.16	-0.02
POC partition coefficient x 1/2	0.41	-48.20	0.41
POC partition coefficient x 2	-0.76	87.38	-0.76
Bioconcentration factor of Plankton x 1/2	0.00	0.00	-49.43
Bioconcentration factor of Plankton x 2	0.00	0.00	95.33
Plankton uptake rate x 1/2	0.00	0.00	-2.34
Plankton uptake rate x 2	0.00	0.00	1.15
Particulate sinking velocity x 1/2	0.11	2.38	0.10
Particulate sinking velocity x 2	-0.21	-4.12	-0.20

다음으로 섭취속도, 분배계수의 영향이 큰 것으로 나타났다. 특히 생물농축계수를 2배 증가시킨 경우는 예측농도가 약 90%이상 증가하였다. 따라서 추후의 PFOA에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상대함수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.3 시나리오 분석

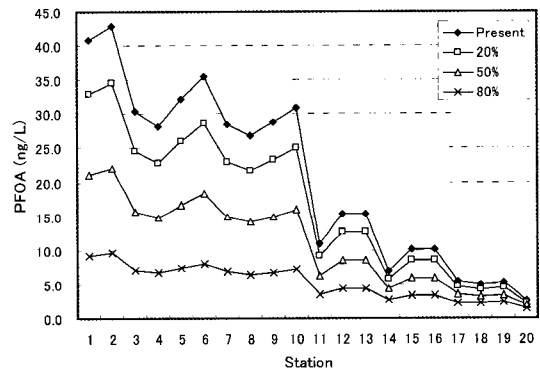
영양염, COD 등 해역에 대한 농도 기준이 있는 경우 시나리오 분석은 기준을 근거로 한 목표수질을 달성하기 위하여 행해지는 경우가 많으나, POPs, EDCs, PBTs 등의 유해화학물질의 경우 해역내 농도에 대한 기준이 설정되어 있지 않은 경우가 많다. 따라서 본 연구의 시나리오 분석은 유입부하에 대하여 해역의 PFOA농도가 어떠한 형태로 반응하는지, 실제 관리시 어느 정도 까지 농도를 개선할 수 있는지에 초점을 맞추어 시행하였다.

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(Table 5).

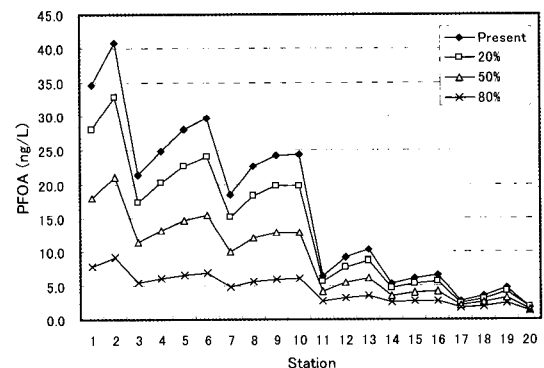
전부하 감소시 농도분포는 Fig. 6에 나타내었으며, 50% 및 80% 감소의 경우 전지점의 용존 PFOA농도가 각각 20ng/L 및 10ng/L 이하로 나타났다. 각 지역별 하수처리장으로부터의 유입부하 삭감에 따른 분포는 Fig. 7에 나타내었으며, 이 경우는 표층 및 저층에서의 변화가 거의

관찰되지 않았다. 각 지역의 하천으로부터 공급되는 PFOA량을 감소시킨 경우는 Fig. 8에 나타내었으며, 표층은 도쿄로부터의 유입되는 부하를 줄였을 경우가 농도의

변화가 가장 크게 나타나 25ng/L이하가 되었다. 저층의 경우는 치바로부터의 유입부하를 줄였을 경우가 변화가 가장 크게 나타났다.



(a) Dissolved PFOA in surface layer

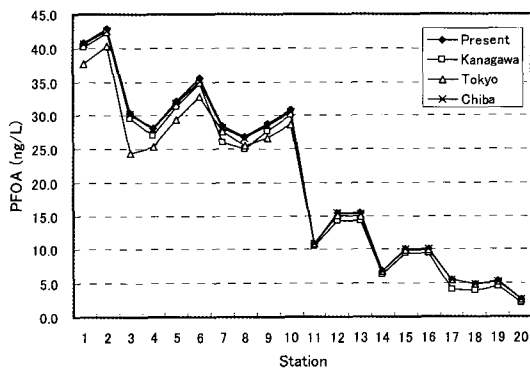


(b) Dissolved PFOA in bottom layer

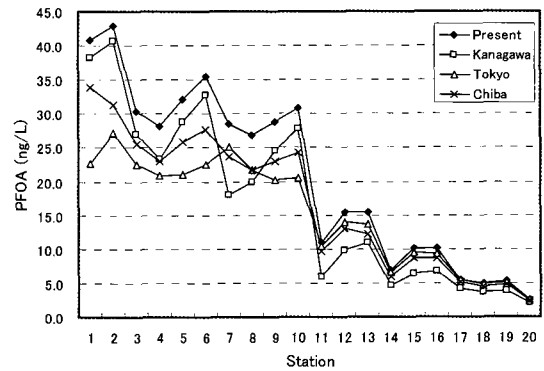
Fig 6. The results of simulation for reduced loads from both the rivers and the STPs.

Table 5. Composition of scenario

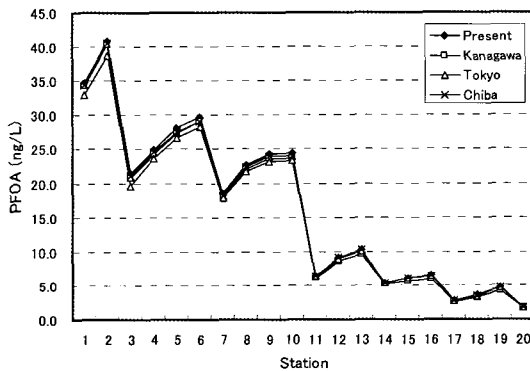
Case No.	Scenario
1	20% reduction from both the rivers and STPs
2	50% reduction from both the rivers and STPs
3	80% reduction from both the rivers and STPs
4	80% reduced loads from the STPs in Kanagawa prefecture
5	80% reduced loads from the STPs in Tokyo prefecture
6	80% reduced loads from the STPs in Chiba prefecture
7	80% reduced loads from the rivers in Kanagawa prefecture
8	80% reduced loads from the rivers in Tokyo prefecture
9	80% reduced loads from the rivers in Chiba prefecture



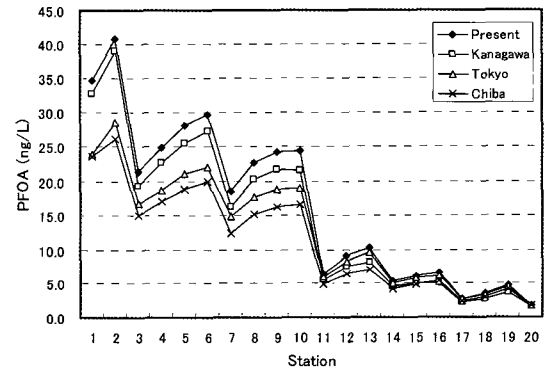
(a) Dissolved PFOA in surface layer



(a) Dissolved PFOA in surface layer



(b) Dissolved PFOA in bottom layer



(b) Dissolved PFOA in bottom layer

Fig 7. The results of simulation for 80% reduced loads from the STPs.

Fig 8. The results of simulation for 80% reduced loads from the rivers.



#### 4. 결론

생태계 모델을 이용하여 도쿄만의 PFOA에 대하여 적용된 결과, 계산치와 대상해역 실측치간의 R값 및 R<sup>2</sup>값이 표층의 경우 각각 0.8759와 0.7672, 저층의 경우 각각 0.7115와 0.5062로 계산되어 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 타나났으며, 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% 및 80% 감소의 경우 용존 PFOA농도가 각각 20ng/L 및 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.

#### 참고문헌

- [1] Cahill, T. M. and Cousins, I., Mackay, D., (2003). General Fugacity Based Model to Predict the Environmental Fate of Multiple Chemical Species. *Environmental Toxicology and Chemistry* 22, pp. 483-493.
- [2] 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.
- [3] Horiguchi, F., Yamamoto, J. and 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), pp. 145-153
- [4] Jørgensen, S. E. (1994). *Fundamentals of Ecological Modelling*. 2nd ed., Elsevier.
- [5] Jørgensen, L. A. Jørgensen, S. E. and Nielsen, S. N. (2000). *Ecological Modelling and Ecotoxicology*. Elsevier.
- [6] Kim, D.M., Nakada, N., Horiguchi, T., Takada, H.,

Shiraishi, H. and 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), pp. 671-678

- [7] Linders, J. and Luttkik, R., (1995). Uniform system for the evaluation of substances. 5. ESPE, Risk Assessment for pesticides. *Chemosphere* 31, pp. 3237-3248.
- [8] Martin, J,W., Mabury, S.A., Solomon, K.R. and Muir, D.C.G., (2003). Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(1), pp. 196-204
- [9] Polder, M. D., Hulzebos, E. M. and Jager D. T. (1998). Bioconcentration of gaseous organic chemicals in plant leaves: Comparison of experimental data with model predictions. *Environmental Toxicology and Chemistry* 17, pp. 962-968.
- [10] Seligman, P. F., Adema, C. M. and Stang, P. M., (1987). Monitoring and prediction of tributyltin in the Elizabeth River and Hampton Roads, Virginia. *Oceans '87*, pp. 1357-1363.
- [11] U.S. EPA Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division(2001). Hazard assessment of perfluorooctanoic acid and its salts, pp. 107

원고접수일 : 2007년 09월 10일

원고채택일 : 2007년 09월 20일