

EMT-3D 모델을 이용한 진해만 PAHs의 거동 예측 시뮬레이션

김동명*

* 부경대학교 생태공학과

Numerical Simulation for the Prediction of PAHs in Jinhae Bay using EMT-3D Model

Dong-Myung Kim*

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

요 약 : 진해만을 대상으로 3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 PAHs 거동예측에 대한 적용성을 검토하였다. 계산치와 실측치를 비교한 결과, 모델의 재현성은 비교적 양호한 것으로 나타났다. 민감도 분석을 시행하여 영향인자를 파악한 결과, 용존 PAHs의 경우 광분해 계수의 영향이, 입자성 유기물질 내 PAHs의 경우는 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 영향이 중요한 요소였다. 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우, 생물농축계수의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 하천, 대기와 하천 및 대기의 오염부하에 대하여 저감에 따른 응답성 평가를 시행하였다.

핵심용어 : PAHs, EMT-3D, 진해만, 생태계모델, 시뮬레이션

Abstract : The behavior prediction of PAHs in Jinhae Bay using a three-dimensional ecological model(EMT-3D) was examined. A three-dimensional ecological model(EMT-3D) was applied to the simulation of PAHs behaviors in Jinhae Bay of Korea. The computed results of simulation were in good agreement with the observed values. The result of sensitivity analysis showed that photolysis coefficient and extinction coefficient were important factors in the variation of dissolved PAHs, and POC partition coefficient was important factor in the variation of PAHs in particulate organic matter. In the case of PAHs in phytoplankton, bioconcentration factor of plankton was the most significant and the most effective in all. In simulations of 30%, 50% and 80% reduction in total loads of PAHs, the concentrations of dissolved PAHs were shown to be lower than 24 ng/L, 20 ng/L and 16 ng/L, respectively.

Key Words : PAHs, EMT-3D, Jinhae Bay, Ecological model, Simulation

1. 서 론

해양생태계 내에서 POPs(Persistent organic pollutants), EDCs(Endocrine disrupting chemicals), PBTs(Persistent Bio-accumulative and Toxic substance) 등과 같은 화학물질의 오염은 점점 복잡화, 다양화되고 있으며, 사람의 건강이나 생태계에 돌이킬 수 없는 피해를 가져올 우려가 증가되고 있다.

PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)는 탄소와 수소로 이루어진 화학물질 중에서 5~6개의 탄소원자가 모여 만들어진 벤젠고리 형태가 최소한 2개 이상 결합되어 있는 화합물(Eisler, 1987)이고, 주로 화석 연료의 불완전 연소에 의해 유발되는 발암성 화합물이다. UNECE(United Nations Economic Commission for Europe)는 스톡홀름 조약에서 채택된 물질에 Chlordencone, PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), Hexabromobiphenyl, HCH(hexa-chlorocyclohexane)의 4개 물질을 추가하여 POPs

(Persistent Organic Pollutants)대상물질로 채택하였다. 잔류성 유기오염물질인 POPs는 유해물질 중에서 느린 분해와 강한 독성의 특징을 가지므로 잔류성이 높아 생태계에 장기간 피해를 주는 물질이다. 그리고 독성(Toxicity), 잔류성(Persistence), 생물축적성(Bioaccumulation), 장거리 이동성(Long-range transport)의 특징을 가지고 있어서 다른 물질과 구별되고, 이러한 종류의 물질을 관리하는 것이 필요하다.

화석연료를 사용하는 인간활동에서 발생하는 산업폐수·도시하수와 하천을 통한 바다로의 유입, 선박의 유류오염사고에 의한 바다로의 직접 유입 그리고 대기에서 바다로의 유입이 PAHs 화합물에 의한 해양오염의 근원에 많은 부분을 차지한다. 특히 진해만과 같은 연안해역의 경우 하천이 중요한 유입경로 중의 하나이다(Tolosa et al., 1996; Lipiatou et al., 1997). 이와 같은 PAHs 화합물에 대해 미국 EPA(환경보호국)는 우선적 오염물질에 16개의 PAHs 화합물을 포함시켰다.

남해안 동쪽에 위치한 진해만은 폐쇄성이 강한 내만으로써 그 연안에는 여러 도시들과 공업단지가 조성되어 있다. 그로 인

* 정회원, dmkim@pknu.ac.kr, 051-629-6545

해 오랜 시간 다량의 산업폐수와 생활하수가 유입되어 환경문제가 일어나는 오염지역으로 인식되고 있으며, 특히 PAHs와 같은 유해화학물질로 해양생태계에 영향이 있을 것으로 예상되는 해역이다(유 등, 2010). 현재까지 PAHs의 농도 분포와 오염 특성에 대한 연구는 진행되어 왔으나 모델을 이용한 PAHs 거동에측에 관한 연구는 없었다.

따라서 본 연구에서는 해양에서의 화학물질의 시, 공간적인 거동을 파악할 수 있으며, 지역특성, 존재 데이터의 상황, 대상 수산물의 특성을 고려할 수 있도록 구축된 3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 진해만의 PAHs를 대상으로 예측 시뮬레이션에 대한 적용성을 검토하였으며, 민감도 분석 및 오염부하에 대한 해역의 응답성 분석을 수행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다.

2. 모델링 시스템

본 연구에서 적용된 생태계모델은 유한차분법에 의한 3차원 모델로서, 수 환경으로 유입된 화학물질의 이류/확산작용에 의한 이송현상과 생물, 화학적인 반응을 고려하였다(Fig. 1).

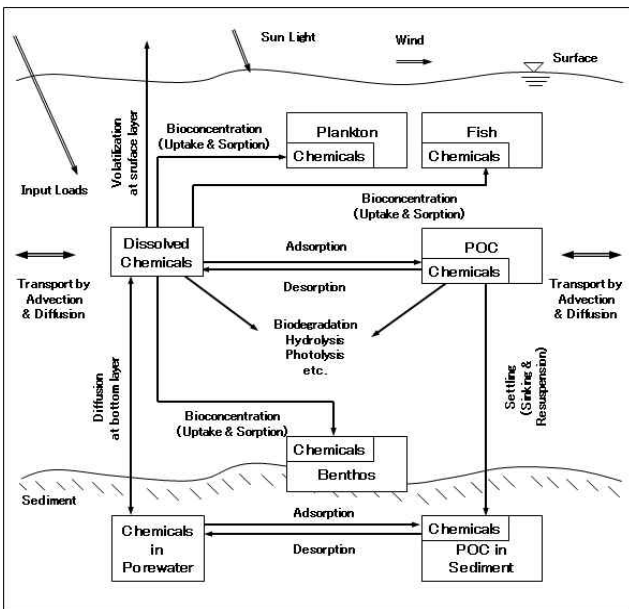


Fig. 1. Schematic diagram of the fate and transport of chemicals in the EMT-3D(Kim et al., 2004).

수 환경으로 유입되는 화학물질부하는 하천으로부터의 부하, 항구로부터의 부하, 항해중인 선박에 의한 부하, 유역으로부터의 부하, 강우에 의한 부하, 대기입자로부터의 부하, 유역으로부터의 비점원 부하 등을 시공간적으로 고려할 수 있도록 되어있다. 수 환경으로 유입된 화학물질은 이류, 확산되면서 화학적, 생물학적 과정을 거치게 되는데 본 모델에서는 입자성 유기물질에 대한 흡착과 탈착, 생물에 대한 섭취와 농축 및 분비, 대기로의 휘발, 퇴적물로의 침전 및 용출, 생분해, 광분해, 가수분해

등을 고려할 수 있게 구성되어 있다.

해역의 임의 지점에 있어 구성요소의 현존량의 시간에 따른 변화는 다음과 같은 방정식에 의해서 기술된다.

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

조석류 또는 잔차류에 의한 운반을 나타내는 항

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

난류확산에 의한 혼합을 나타내는 항

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

생물학적 및 화학적 과정을 나타내는 항

(1)

식(1)에서, x, y, z는 좌표변수, t는 시간, u, v, w는 x, y, z방향의 유속성분, Kx, Ky, Kz는 x, y, z 방향의 와동확산계수, B는 구성요소의 현존량, dB/dt는 생물, 화학적 과정에 의한 단위 시간당 구성요소의 변화량이다. 모델에 적용된 생물화학적 프로세스는 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Biological and chemical processes which were applied in each cell of the EMT-3D(Kim et al., 2004).

| |
|---|
| $\frac{d(\text{Dissolved Chemicals})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> - 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 |
| $\frac{d(\text{Chemicals in Plankton})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> + Uptake from water and desorption into water - Excretion and respiration into water |
| $\frac{d(\text{Chemicals in Fish})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> + Uptake from water and desorption into water - Excretion and respiration into water |
| $\frac{d(\text{Chemicals in Benthos})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> + Uptake from water and desorption into water - Excretion and respiration into water + Uptake from water and desorption into water - Excretion and respiration into porewater |
| $\frac{d(\text{Chemicals in POC})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> + Adsorption from water + Desorption into water - Sinking to sediment + Resuspension from sediment - Biodegradation - Hydrolysis - Photolysis - Oxidation |
| $\frac{d(\text{Dissolved Chemicals in Porewater})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> - 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 |
| $\frac{d(\text{Chemicals in Sediment POC})}{dt} =$ <ul style="list-style-type: none"> + Adsorption from pore water - Desorption into pore water + Sinking - Resuspension - Biodegradation |

3. 결과 및 고찰

3.1 대상해역 및 모델의 적용

진해만을 대상으로 한 PAHs의 환경동태를 EMT-3D를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 대상해역은 수평방향으로는 각 500m, 수직방향으로는 5개의 층으로 구분하였다. 대상해역 및 계산격자의 수평 배열을 Fig. 2에 나타내었다.

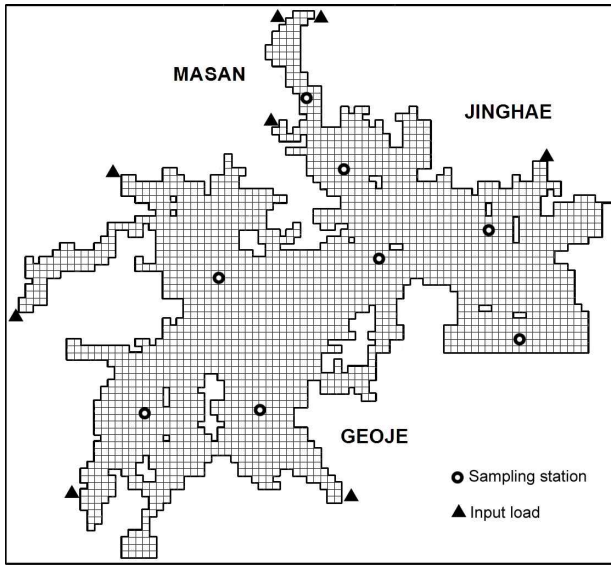


Fig. 2. Model region and grid map.

진해만으로 유입되는 하천수로부터의 부하는 2008년에 실측된 자료(국토해양부, 2008; 유 등, 2009)를 사용하였고 대기로부터의 유입부하는 국토해양부(2008)와 Lee et al.(2005)의 자료를 사용하였다. 해수 중 PAHs의 농도는 2008년에 실측된 자료(유 등, 2010)를 사용하였다. 유입부하 지점과 해수 샘플 정점을 Fig. 2에 표시하였다. 생물, 화학적인 과정은 데이터의 존재 상황 등을 고려하여 흡탈착, 분비와 호흡, 침강, 건침적, 광분해 등을 고려하였다(Table 2).

진해만의 유동장은 홍 등(2007)의 자료를 이용하였다. 침강속도와 확산계수는 홍 등(2007) 및 해양수산부(2006)의 자료를 적용

Table 2. Input data for modified POM and EMT-3D

| Model region | Target chemicals | Used model | Mesh size | Layer |
|--------------|------------------|------------------------|---------------------------------------|---------|
| Jinhae Bay | PAHs | Modified POM EMT-3D | $\Delta x = \Delta y = 500 \text{ m}$ | 5 layer |

하였다. 입자성 유기 물질에 대한 분배계수, 흡탈착 속도는 해양수산부(2006), Mackay et al.(2006), Kim et al.(2004)의 연구결과를 바탕으로 산정하여 적용하였다. 식물플랑크톤에 대한 농축계수, 섭취 및 호흡계수는 Jorgensen(1994), Jorgensen et al.(2000), Mackay et al.(2006)의 연구결과를 적용하였다(Table 3).

계산된 PAHs의 농도와 유 등(2010)에서 2008년 8월에 실측한 PAHs의 농도를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 표층의 용존 PAHs의 경우 절대오차가 0.202~8.541 ng/L의 범위로 평균 3.673 ng/L를 보였고, 상대오차는 1.09~31.80%의 범위로 평균 14.97%로 나타났다. 저층의 용존 PAHs는 절대오차가 21.14~46.64 ng/L의 범위로 평균 30.11 ng/L를 보였고, 상대오차는 39.25~69.60%의 범위로 평균 53.58%를 나타냈다. 저질 중의 PAHs의 경우 절대오차가 1.73~23.36 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 의 범위로 평균 11.43 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 를 보였고, 상대오차는 1.28~11.49%의 범위로 평균 4.67%를 나타냈다. 표층의 용존 PAHs와 저질중의 PAHs의 경우 계산치와 실측치가 유사하여 잘 재현된 것으로 나타났지만 저층의 용존 PAHs의 경우 계산치가 실측치 보다 다소 낮게 계산되었다. 저질에서의 각 성분별 용출특성과 환경 중 각 성분별 따른 입자에 대한 친화성 등에 대한 자료가 추가된다면 재현성이 나아질 것으로 사료된다.

Fig. 4에 계산된 용존 PAHs, 입자성 유기물 내의 PAHs, 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 분포를 나타내었다. 용존 PAHs의 경우, 하천으로부터의 유입부하가 집중되어 있는 마산인근해역에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 만 바깥쪽으로 갈수록 낮아졌다. 마산인근해역의 경우는 30 ng/L 이상의 값을 나타내었으며, 만 중앙부는 22 ng/L, 진해만 서부해역은 18 ng/L 정도의 값을 나타내었다.

입자성 유기물 내의 PAHs의 경우도 용존 PAHs와 분포를

Table 3. Input parameters and values for EMT-3D

| Parameters | Input value | |
|---|-------------|------------------------------|
| Bioconcentration factor of phytoplankton | 1.2 E+3 | (L / kg) |
| Uptake rate of phytoplankton | 1.4 E+3 | (L / [kg day]) |
| Excretion rate of phytoplankton | 1.2 E+0 | (1 / day) |
| Adsorption rate of organic particulates | 4.0 E+4 | (L / [kg day]) |
| Desorption rate of organic particulates | 1.1 E+0 | (1 / day) |
| Partition factor of particulates | 3.5 E+4 | (L / kg) |
| Sinking velocity | 4.3 E-1 | (m / day) |
| Horizontal eddy viscosity and diffusivity | 1.0 E+6 | (cm^2 / s) |

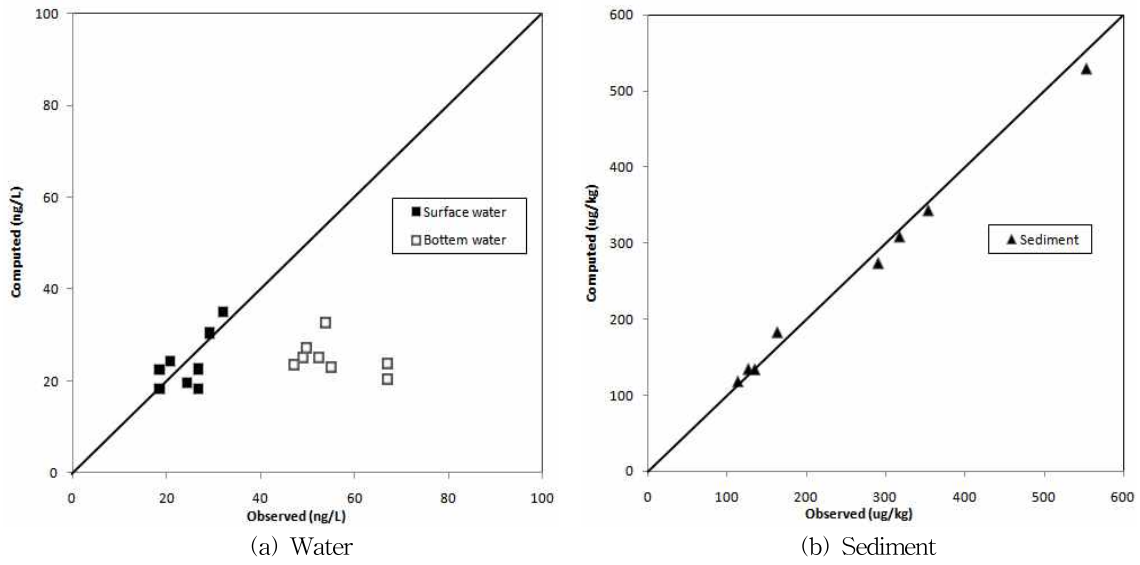


Fig. 3. Comparison with simulated value and observed value in Jinhae Bay.

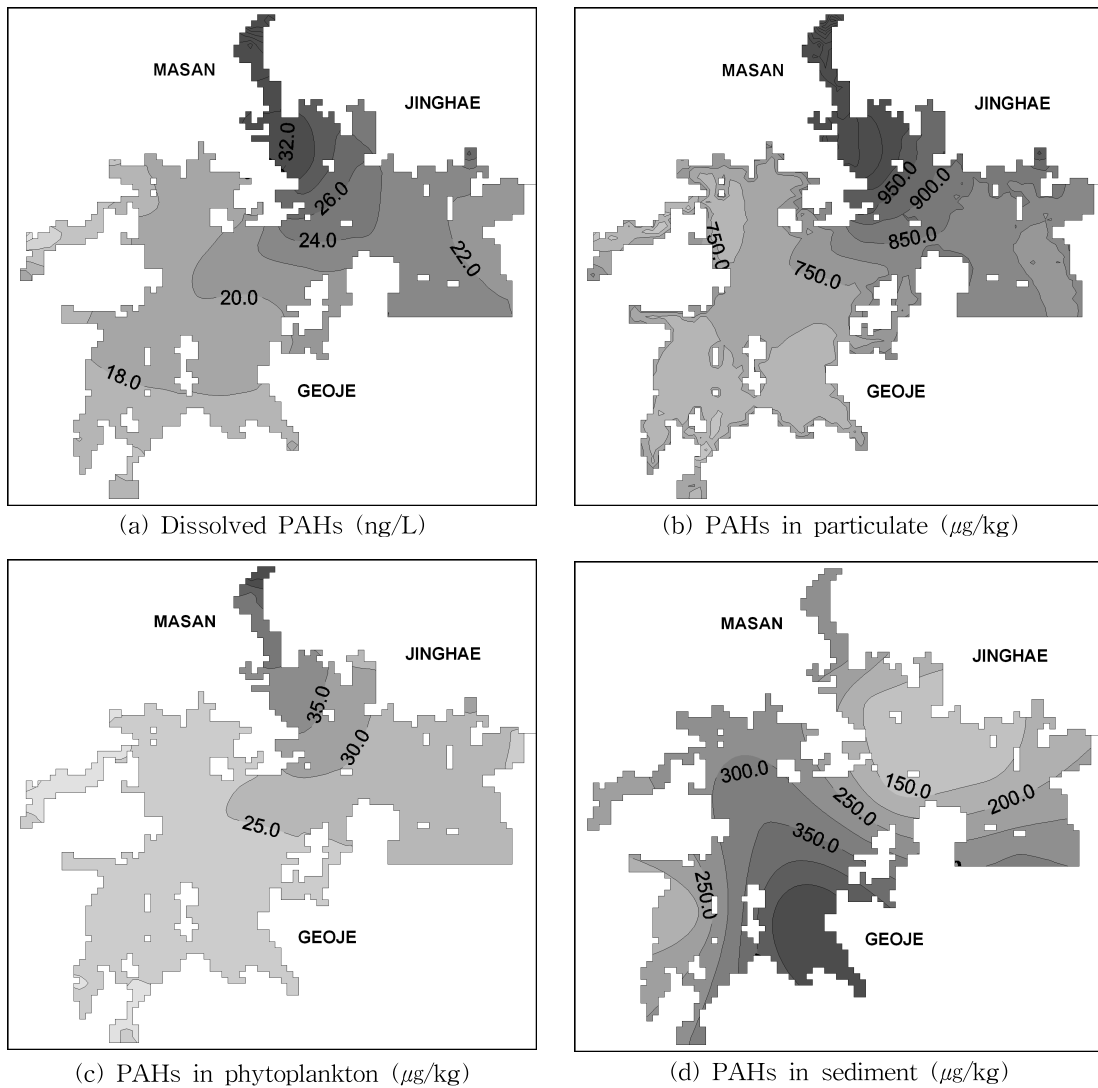


Fig. 4. The distribution of the simulated PAHs concentration in surface layer of water and in sediment.

나타내었으며, 마산인근해역의 경우는 950 µg/kg 이상의 값을 나타내었으며, 만 중앙부는 800 µg/kg, 진해만 서부해역은 700 µg/kg 정도의 농도를 나타내었다. 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우는 마산인근해역에서는 35 µg/kg 이상의 농도를 나타내었으며, 만 중앙부의 28 µg/kg 정도의 값을 나타내었으며, 진해만 서부해역에서 25 µg/kg 이하의 농도값을 나타내었다. 저질층의 PAHs 농도는 진해만 서남부 해역에서 가장 높아 300 µg/kg 이상의 값을 나타내었으며, 만 중앙부가 다소 낮은 150 µg/kg 이하의 값을 나타내었다.

3.2 민감도 분석

모델 보정에 적용된 계수값에 대하여 각 계수값의 2배 및 1/2배로 증감시켰을 때 나타나는 상태변수 결과 값의 변동량으로 계수의 민감도를 분석하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 즉, 민감도 분석의 결과 값이 큰 경우일수록 상태함수의 농도결정에 미치는 영향이 커지는 것을 나타낸다.

수층의 용존 PAHs의 경우 광분해 계수의 증감에 따른 농도 변화가 -11.12% 및 6.54%로 다소 크게 나타났다. 소산계수의 증감에 따른 농도변화가 -9.48% 및 6.37%로 나타났으며, 침강속도 및 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 대해서도 -2.94~1.68%의 농도변화가 나타났다.

입자성 유기물질내 PAHs의 경우는 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 따른 농도변화가 -47.91% 및 84.87%로 가장 영향이 큰 계수로 나타났으며, 다음으로는 광분해속도, 소산계수, 입자성 물질의 침강속도, 입자성 유기 탄소의 흡착속도의 순으로 나타났다.

식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우는 식물플랑크톤의 생물

농축계수의 증감에 따른 농도변화가 -50.04% 및 100.39%로 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 추후의 PAHs에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상태변수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 시나리오 분석

대상해역의 용존 PAHs 및 입자성 유기물질 내 PAHs에 대하여 유입부하의 변화가 미치는 영향을 시뮬레이션 하기 위해 시나리오를 구성하고 해역의 응답성을 평가하였다. 시나리오의 구성은 해역으로 유입되는 PAHs 오염부하에 대하여 저감율 30%, 50%, 80% 각각 적용하여 시뮬레이션 하였다.

먼저 유입부하 30%감소의 경우(Fig. 5)를 살펴보면, 용존 PAHs는 진해만 서부해역에서 2 ng/L 정도, 만 중앙부에서는 4 ng/L 정도 감소하였으며, 고농도 지역으로 갈수록 감소폭이 다소 커지는 형태를 나타내었다. 입자성 유기물질 내 PAHs의 경우는, 만 중앙부에서 100 µg/kg 정도 감소하는 것으로 나타났다. 유입부하 50%감소의 경우(Fig. 6)는, 용존 PAHs는 중앙부의 농도가 18 ng/L 정도, 마산인근해역의 농도가 22 ng/L 정도로 나타났다. 입자성 유기물질 내 PAHs의 경우는, 진해만 서부해역에서 600 µg/kg, 만 중앙부에서 650 µg/kg, 마산인근해역에서 750 µg/kg정도의 농도로 나타났다.

유입부하 80% 감소시의 경우(Fig. 7)는, 용존 PAHs는 대상해역 대부분의 지역에서 15 ng/L 이하의 농도를 나타내었으며, 마산인근해역과 만 중앙부에서 16 ng/L 정도의 농도를 나타내었다. 입자성 유기물질 내 PAHs의 경우는, 대부분의 대상해역에서 550 µg/kg 이하를 나타내었다.

Table 4. Sensitivity analysis of PAHs concentration by change of value of parameters

| Item | The changes of PAHs (%) | | |
|---|-------------------------|--------|-------------|
| | In ater | In POC | In Plankton |
| Bioconcentration factor of Plankton x 1/2 | 0.00 | 0.00 | -50.04 |
| Bioconcentration factor of Plankton x 2 | 0.00 | 0.00 | 100.39 |
| Extinction coefficient x 1/2 | -9.48 | -8.93 | -9.48 |
| Extinction coefficient x 2 | 6.37 | 6.00 | 6.36 |
| Particulates sinking velocity x 1/2 | 1.68 | 4.29 | 1.68 |
| Particulates sinking velocity x 2 | -2.94 | -7.78 | -2.94 |
| Plankton uptake rate x 1/2 | 0.00 | 0.00 | 0.19 |
| Plankton uptake rate x 2 | 0.00 | 0.00 | -0.09 |
| POC adsorption rate x 1/2 | -0.01 | 1.37 | -0.01 |
| POC adsorption rate x 2 | 0.00 | -0.68 | 0.00 |
| Photolysis coefficient x 1/2 | 6.54 | 6.16 | 6.54 |
| Photolysis coefficient x 2 | -11.12 | -10.48 | -11.12 |
| POC partition coefficient x 1/2 | 1.64 | -47.91 | 1.64 |
| POC partition coefficient x 2 | -2.88 | 84.87 | -2.88 |

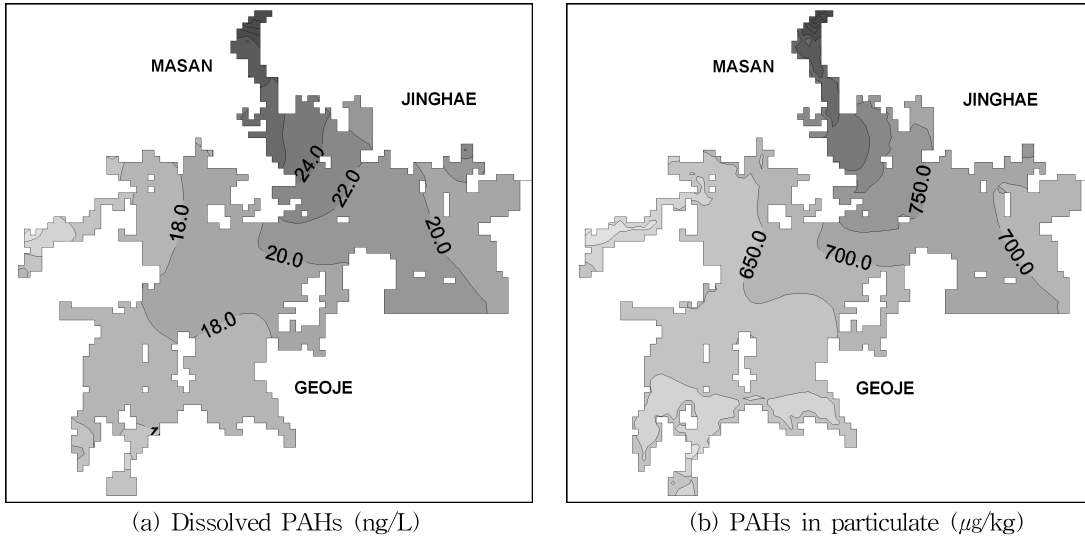


Fig. 5. The results of simulation for 30% reduced loads from the river and the air.

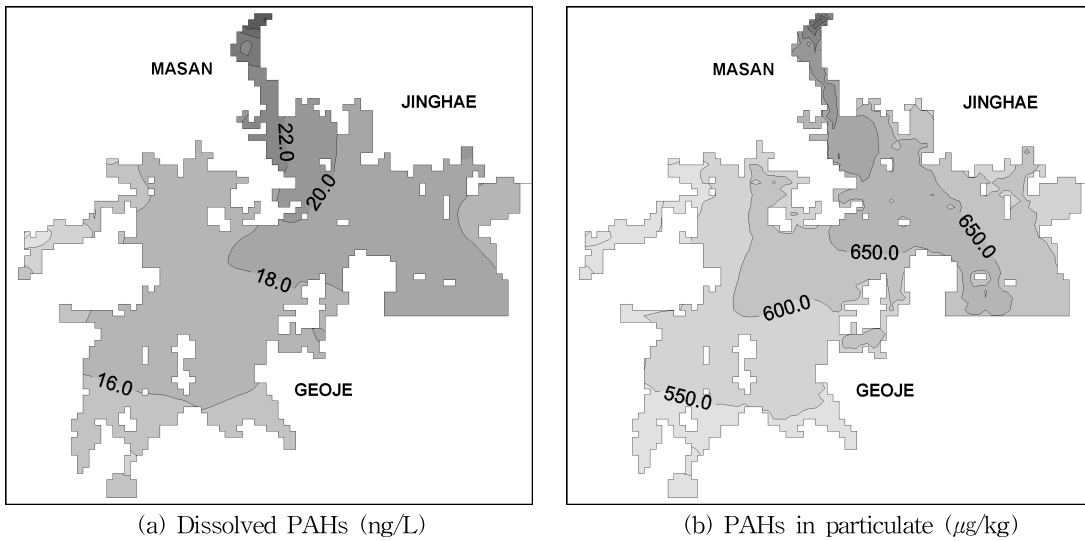


Fig. 6. The results of simulation for 50% reduced loads from the river and the air.

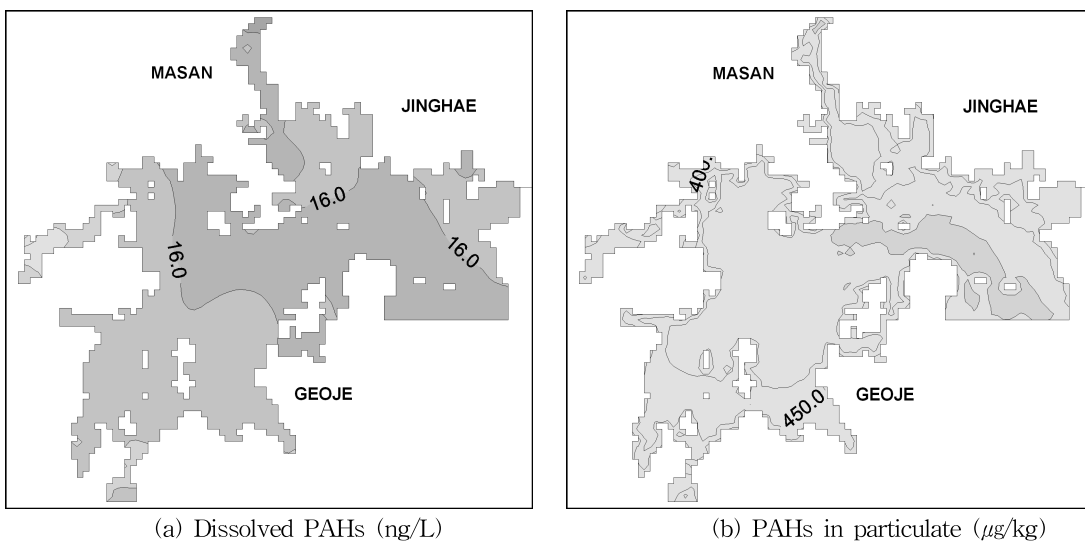


Fig. 7. The results of simulation for 80% reduced loads from the river and the air.

4. 결론

3차원 생태계 모델(EMT-3D)을 사용하여 진해만의 PAHs를 대상으로 그 적용성을 검토하고, 민감도 분석 및 오염부하에 대한 해역의 응답성 분석을 수행하여 영향인자를 판별하고 대안에 따른 영향을 평가하였다.

표층의 용존 PAHs의 경우와 저질층의 PAHs의 경우 계산치와 실측치가 유사하여 잘 재현된 것으로 나타났으며, 저층의 용존 PAHs의 경우 계산치가 실측치 보다 다소 낮게 계산되었다.

민감도 분석결과 수층의 용존 PAHs의 경우 광분해 계수의 증감에 따른 농도변화가 다소 크게 나타났으며, 다음으로 소산 계수, 침강속도, 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 순으로 나타났다. 입자성 유기물질 내 PAHs의 경우는 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 영향이 큰 계수로 나타났으며, 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 추후의 PAHs에 대한 모델 적용 시에는 목적하는 상태변수에 따라 이들 계수에 대한 정밀한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

유입부하의 변화가 대상해역의 용존 PAHs 및 입자성 유기물질내 PAHs에 미치는 영향을 시뮬레이션 하기 위하여 시나리오를 구성하여 해역의 응답성을 평가하였다. 시나리오의 구성은 해역으로 유입되는 오염부하에 대하여 저감율 30%, 50%, 80% 각각 적용하여 시뮬레이션 하였다. 용존 PAHs를 살펴보면, 유입부하 30% 감소의 경우, 진해만 서부해역에서 2 ng/L 정도, 만 중앙부에서는 4 ng/L 정도 감소하였다. 50%감소의 경우, 중앙부의 농도가 18 ng/L 정도, 마산인근해역의 농도가 22 ng/L 정도로 나타났고, 80%감소시의 경우, 대상해역 대부분의 지역에서 15 ng/L 이하의 농도를 나타내었으며, 마산 인근해역과 만 중앙부에서 16 ng/L 정도의 농도를 나타내었다. 입자성 유기물질내 PAHs를 살펴보면, 유입부하 30% 감소의 경우, 만 중앙부에서 100 µg/kg 정도 감소하는 것으로 나타났고, 50% 감소의 경우, 진해만 서부해역에서 600 µg/kg, 만 중앙부에서 650 µg/kg, 마산 인근 해역에서 750 µg/kg 정도의 농도로 나타났다. 80% 감소의 경우는, 대부분의 대상해역에서 550 µg/kg 이하를 나타내었다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원(내분비계 장애물질 해양내 거동 연구)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 국토해양부(2008), 2008년 해양생태계내 내분비계 장애물질 연구보고서, p. 793.
 [2] 유영석, 김해주, 조현서, 허민지, 노경준, 김동명(2009), 진

해만 하천에서 다환방향족탄화수소류(PAHs)의 유입부하량과 오염특성, 한국해양환경공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 185-187.

- [3] 유영석, 김동명, 조현서(2010), 진해만 해수와 해양퇴적물에서 다환방향족탄화수소의 오염특성, 한국생태공학회지, 1(1), pp. 24-36.
 [4] 해양수산부(2006), 2006년 해양생태계내 내분비계장애물질 연구 보고서, p. 418.
 [5] 홍석진, 이원찬, 박종수, 오현택, 윤상필, 김형철, 김동명(2007), 생태계 모델링을 이용한 진해만의 자생 COD 평가, 한국환경과학회지, 16(8), pp. 959-971.
 [6] Eisler, R.(1987), Polycyclic Aromatic Hydrocarbons hazards to fish, wildlife, and invertebrates. U.S. fish and wildlife service, Washington D.C. Biol. Rept., 85, p. 81.
 [7] Jorgensen, S. E.(1994), Fundamentals of Ecological Modelling. 2nd ed., Elsevier p. 632.
 [8] Jorgensen, L. A., S. E. Jorgensen and S. N. Nielsen(2000), Ecological Modelling and Ecotoxicology. Elsevier, Electronic DB file.
 [9] Kim, D. M., N. Nakada, T. Horiguchi, H. Takada, H. Shiraishi and O. Nakasugi(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.
 [10] Lee, S. J., H. B. Moon, M. Choi and J. H. Goo(2005), Estimation of PAHs fluxes via Atmospheric deposition and riverine discharge into the Masan Bay, Korea. J. Fish. Sci. Technol. 9(3), pp. 167-176.
 [11] Lipiatou, L. I., R. Tolosa, I. Simo, J. Bouloubassi, S. Dachs, M. A. Sicre, J. M. Bayona, J. O. Grimault, A. Saliot and J. Abagies(1997), Mass budget and dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Mediterranean sea. Deep-Sea Res., 44, pp. 881-905.
 [12] Mackay, D., W. Y. Shiu, K. Ma and S. C. Lee(2006), Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. Second Edition, Taylor & Francis, p. 4216.
 [13] Tolsa, I., J. M. Bayona and J. Albaiges(1996), Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfur/oxygen derivatives in northwestern mediterranean sediment : Spatial and temporal variability, fluxes and budgets. Environ. Sci. Technol. 30, pp. 2495-2503.

원고접수일 : 2011년 02월 17일

원고수정일 : 2011년 03월 02일 (1차)

: 2011년 03월 16일 (2차)

게재확정일 : 2011년 03월 24일