

## 수동 수질시료채취장치(Passive water-sampling device): 흡착제별 효율 비교와 수환경 적용

이인석<sup>1†</sup> · 오정은<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립수산과학원 남동해수산연구소, <sup>2</sup>부산대학교 화공생명·환경공학부

### Passive Water-sampling Device: Comparison of Adsorption Efficiencies in Accordance with Adsorbent Types and Application to the Water Environment

In-Seok Lee<sup>1†</sup> and Jeong-Eun Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Southeast Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong, 53085, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

Received July 30, 2019 / Revised September 7, 2019 / Accepted September 20, 2019

A Passive water-sampling device is highly complementary to grab (spot) water sampling in environmental analysis. In particular, semipermeable membrane devices (SPMDs) are well-established biomimetic samplers that have proved to be useful for estimating the bioavailable water concentrations of hydrophobic micropollutants. The general performance and applicability of SPMDs have been verified in previous studies, and triolein containing-SPMDs for collecting hydrophobic micropollutants, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), are commercially available in a device package from EST-lab, USA. However, the adsorbent itself is a disposable item after one-time passive sampling, so a more cost-effective adsorbent is required. In terms of cost and efficiency, the adsorption efficiency of commercial triolein (\$20/1 mL) adsorbent was compared with those of two kinds of alternative adsorbents, octanol (\$0.1/1 mL) and olive oil (\$0.03/1 mL) through on-site field application. It was found that olive oil might be a highly cost-effective adsorbent for collecting hydrophobic contaminants, such as PAHs rather than triolein and octanol, if a biological assessment, such as yeast estrogen screen, is not considered. Various micropollutants, such as aliphatic and aromatic hydrocarbons and synthetic musks, were detected in on-site samples collected by using an SPMD. Moreover, a significant increase of these micropollutant concentrations was found at discharge points of the effluents of sewage treatment plants.

**Key words:** Passive water sampling devices, micropollutants, cost-effective, adsorbent, water environment

#### 1. 서 론

수질 중 미량유해물질을 모니터링 하는 방법은 대부분 짧은 시간에 시료채취를 수행하는 불연속적인 grab sampling (혹은 spot sampling) 기법에 의존하고 있어 그 결과는 시료채취 순간의 단편적인 미량유해물질 농도 정보만 나타낸다. 따라서 시간에 따라 변화하는 미량유해물질 농도를 정확히 반영할 수 없으며 지점의 대표 측정치로 사용하기에는 한계가 있다. 이러한 문제점을

해결하기 위해 시료채취 빈도를 증가시킬 수 있으나, 현장 적용성 및 다량의 시료분석에 따른 비용 소모 등의 이유로 대부분의 경우 수행되기 어려운 실정이다. 또한 grab sampling으로 채취된 시료의 분석 값은 지역 및 농도의 대표성 문제 뿐만 아니라 실제로 미량유해물질이 환경 중의 생물에 미치는 영향을 제대로 평가하기 어렵다는 단점도 가진다.<sup>1,2)</sup>

이와 같은 grab sampling의 단점을 극복하고, 수질 내 미량유해물질을 장기간 포집하여 시료 채취 지점의

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

대표적인 결과를 산출하기 위한 위한 모니터링 대안으로 수동 수질시료채취장치(Passive water-sampling device, PWSD) 관련한 다수의 연구가 국외에서는 진행되어 왔다.<sup>2-4)</sup> Passive sampling이란 멤베레인(membrane) 내에 미량유해물질을 포집 할 수 있는 흡착제를 주입하고 적절한 타입의 캔니스터(canister)에 장착한 후 이를 수중에 일정기간 동안 설치하여 수중 미량유해물질이 흡착제에 포집되는 원리를 이용하는 샘플링 기법을 통칭하는 것이다.<sup>1)</sup> PWSD는 기계적인 조작 없이도 대용량 시료의 샘플링이 가능하고 동일기간 동안 다수의 지점에서의 미량유해물질의 분포패턴을 파악할 수 있다. 또한 가장 많이 적용되는 흡착제인 트리올레인(triolein)이 생물상의 지질(lipid) 성분과 유사해 실제 수환경 중 생물상의 미량유해물질 축적 및 노출 정도를 반영할 수 있는 생물 모방(biomimetic) 모니터링 가능성은 생물에 농축되는 실질적인 값에 가까운 결과를 산출할 수 있어 현재 국내 수질 관리가 생태독성관리로 전환되고 있는 시점에서 활용가치가 크다고 할 수 있다.<sup>4,5)</sup>

다양한 종류의 PWSDs 중 미국 지질조사국(USGS)의 허킨스 박사(Dr. Huckins)에 의해 고안된 SPMD (Semipermeable membrane device) type-PWSD는 가장 많이 적용되는 대표적인 타입으로 특히, 다환방향족탄화수소류(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)를 포함한 친지질성(lipophilic) 물질 모니터링에 적합하다고 알려져 있다.<sup>2,3)</sup> 이 장치는 구조상 크게 SPMD와 이를 장착하는 canister로 구분할 수 있는데, 미국의 EST-lab을 통해 상용화되어 부분품이나 패키지(package)로 판매되고 있다.<sup>6)</sup> Canister의 경우 설치/회수하여 반영구적으로 사용이 가능하나, SPMD는 1회 샘플링에 한해 사용되며, 특히 membrane에 주입해 흡착제로 사용하는 triolein의 높은 단가로 인해 EST-lab에서도 판매가가 높아 (standard size, \$50), 1회 passive sampling에 소요되는 단가는 일반적인 grab sampling에 비해 상대적으로 높을 수 밖에 없다.<sup>6)</sup> 따라서 보다 효율적인 SPMD 활용을 위해서는 triolein과 비교해 미량유해물질 포집 효율이 좋을 뿐 아니라 단가가 낮은 비용효과적인(cost-effective) 흡착제가 필요할 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서는 물-옥탄올 분배계수 산정에 사용되는 대표적인 유기용매인 옥탄올(octanol)과 친지질(lipophilic) 성분으로 시중에서 저렴한 가격에 구매하기 용이한 올리브 오일(olive oil)을 비교 흡착제로 선정하였다.

국내에서는 passive sampling 기법이 대기 모니터링

을 위해 적용된 바 있으며<sup>7,8)</sup>, 수질 모니터링에서는 일부 미량유해물질에 대해 전통적인 grab sampling과의 비교를 위해 적용된 사례는 있으나<sup>9)</sup> 흡착제는 triolein을 사용하였으며, triolein 외에 다른 종류의 흡착제를 이용한 사례는 보고된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 SPMD membrane에 주입하는 대표적인 흡착제인 triolein의 높은 단가를 감안해 이를 대체할 수 있는 흡착제 두 종을 선정하여 triolein과 같이 PWSD canister에 장착하여 수환경 중 잔류도가 높은 대표적인 미량유해물질인 PAHs 포집 효율을 비교하여 국내 수환경 적용 가능성을 평가하였다. 따라서 흡착제 효율 비교는 실제 (on-site) 수환경에 적용하였으며, 이와 더불어 하천 중 미량유해물질의 주요 오염원으로 평가되는 하수처리장을 중심으로<sup>10)</sup> 하천의 상류와 하류에 PWSD를 설치해 실제 수환경에 잔류하는 주요 미량유해물질을 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. SPMD membrane 및 흡착제 선정

본 연구에서는 미량유해물질 포집을 위한 흡착제별 효율 비교와 국내 하천 적용성 평가를 위해 미국 USGS의 Dr. Huckins를 통해 연구용인 prest type-SPMD sampler의 canister를 제공 받아 국내에서 제작하였다 (Fig. 1). 미량유해물질 포집을 위한 SPMD membrane은 70~95  $\mu\text{m}$  박막 두께인 LDPE (low-density polyethylene) 재질로 USGS에서는 길이 91.4 cm, 폭 2.5 cm 규격을 사용하지만, 국내에서는 동일 규격을 시중에서 구하기 어려워 본 연구에서는 폭은 5 cm로 하되, 물질의 포집 효율을 결정하는 SA-V 비율 (surface Area to total SPMD volume ratio)은 동일하게 하기 위해 길이는 45.7 cm로

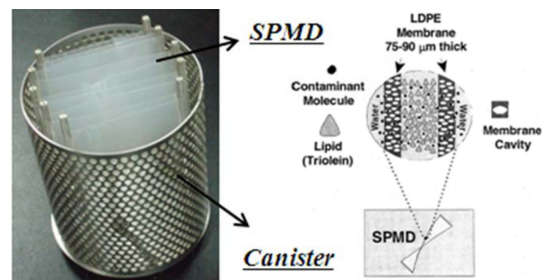


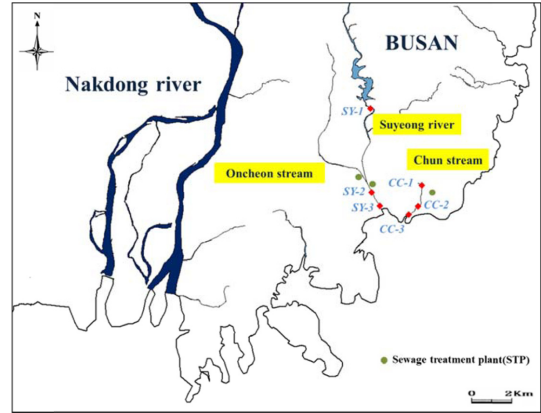
Fig. 1. Configuration of prest SPMD type passive water-sampling device (PWSD) (left) and schematic diagram of a semipermeable membrane device (SPMD) (right) <figures taken and modified from Petty et al.<sup>4)</sup>>.

하였다.

일반적인 SPMD-type PWSD 규격에 맞는 SPMD membrane에 주입되는 triolein (Glyceryl trioleate, Sigma-Aldrich, MO, USA) 양은 1 mL (비중 0.91 g/mL, ≥99%)로 membrane 1개당 약 20,000 원의 비용이 소모된다. 따라서 triolein과 비교해 포집 효율이 높고 단가가 낮은 비용효과적인 흡착제 평가를 위해, 본 연구에서는 물-옥탄을 분배계수의 지표인 octanol (Sigma-Aldrich, ≥99.5%, 약 100원/1 mL)과 친지질(lipophilic) 성분으로 시중에서 저렴한 가격에 구매하기 용이한 olive oil (상품명 Filippo Berio, 100%, 약 30원/1 mL)을 선정하였다. 흡착제 효율 비교를 위한 대상물질은 PAHs를 선정하였다. PAHs는 기존 연구에서 포집율(uptake rate)이 결정된 물질이며, 하천수에서는 하폐수 오염의 지표가 되는 물질이며, 벤젠 고리의 수에 따라 흡착제 내에 포집되는 효율이 다양하다고 보고되어 왔다.<sup>3,11)</sup>

**2.2. PWSD 설치 및 회수**

본 연구에서는 부산의 수영강 (SY)과 춘천 (CC)을 대상으로 하천의 발원지에 가까운 상류 (오염원이 존재하지 않는 지점, 대조군), 중류 (하수처리장 방류구 하류 100 m 이내 지점) 및 하류 (연안 합류 지점)의 세 지점에 PWSD를 설치하였다. 수영강과 춘천은 본 연구진의 이전 조사에서 PAHs가 대체로 수에서 수백 ng/L 수준으로 검출되는 하천으로 평가되었다. 이에 시료채취는 수에서 수백 ng/L 범위의 PAHs 잔류 조건하에서 적합한 PAHs 포집시간인 3주로 정했으며,<sup>3)</sup> 2008년 9월 23일에서 10월 13일까지 3주간 설치한 후 지점별로 장치에 포집되는 물질의 포집량을 평가하였다. 각 지점에 설치한 PWSD에는 흡착제별 포집 효율을 평가하기 위해 triolein, octanol, 및 olive oil을 각각 주입한 SPMD membrane을 canister에 장착하였다. 지점별로 하나의 PWSD를 설치하였으며, canister 내부 지지대에 45.7 cm 규격의 SPMD membrane 6개 (흡착제별로 2개씩)를 장착하였다. PWSD의 물질 포집량을 정량적인 단위로 환산하기 (포집량/SPMD → 포집량/L) 위해 USGS에서



**Fig. 2.** Sampling locations in this study.

는 PRC(Performance reference compounds)를 주입해 sampling rate를 구하나, 본 연구에서는 흡착제별 물질 포집효율만을 비교하는 것이 목적이기 때문에 PRC 주입을 생략하였다. 수영강과 춘천은 부산 소재의 하수처리장 방류수가 부하되는 하천으로 각 PWSD 설치지점과 하천에 대한 정보는 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

**2.3. SPMD 회수/전처리 및 기기분석**

SPMD 회수 및 전처리는 Huckins 등<sup>1,3)</sup>을 참고하여 박막 투석 시간을 일부 수정해 적용하였다. Huckins 등<sup>1)</sup>에서는 비표적(non-target) 유기오염물질 투석의 경우는 투석을 16시간 2회 수행을 권하고 있지만, Huckins 등<sup>3)</sup>에서는 물-옥탄을 분배계수가 8 이하일 경우는 2차 투석 시의 시간이 4~6시간이면 충분하다고 제시하고 있으며 본 연구에서는 2차 투석 시간을 6시간으로 적용하였다. PWSD에 장착했던 SPMD membrane은 회수하여 중류수에 담근 후 부드러운 솔로 표면을 가볍게 문질러 표면의 조류와 기타 이물질을 제거 하였다. 무기물을 제거하기 위해 헥산으로 세정한 (hexane-rinsed) 1 N 염산 용액에 30초간 담그는 과정을 실시하였다. 과정이 완료된 membrane은 아세톤, 이소프로판올 순서의 washing을 통해 수분을 제거하였다. 후드에서 건조된 membrane은 헥산 500 mL에 16시간 (18°C) 동안 투석

**Table 1.** Sampling locations and the information of each sewage treatment plant (STP)

Locations of PWSD deployment		STP information		
		STP	Capacity (m <sup>3</sup> /day)	Source
Suyeong river (SY)	Upstream(1) → Midstream(2, STPs outfall) → Downstream(3)	Suyeong	264,000	Domestic sewage (100%)
		Dongbu	135,000	
Chun stream (CC)	Upstream(1) → Midstream(2, STP outfall) → Downstream(3)	Haeundae	65,000	

(dialysis)하고 hexan을 회수한 뒤, 추가로 hexan 500 mL를 부하하여 6시간 (18°C) 투석하여 membrane 내에 포집된 물질을 회수하였다. 회수한 용액은 8 mL로 농축하였으며, 이 중에서 흡착제별 포집 효율을 비교하기 위한 시료 2 mL와 지점별로 포집된 물질을 정성분석하기 위한 시료 1 mL를 각각 분취하였다. 먼저 흡착제별 포집 효율을 비교하기 위한 15종 PAHs [acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3-cd)pyrene, dibenzo(a,h)anthracene, benzo(ghi)perylene] 분석을 위해 분취한 시료 2 mL에는 정량용 내부표준물질 (Z-014J, AccuStandard inc., CT, USA)을 주입하고 정제용 시료로 하였다. 이 시료는 무수황산나트륨 (Wako chemicals, Japan) 1 g - 중성 실리카겔 (70-230 mesh, neutral, Merck, Germany) 8 g - 무수황산나트륨 1 g 순으로 충전된 컬럼 정제 과정을 거쳤다. 용출된 시료는 0.5 mL로 농축하고 실린지 첨가용 내부표준물질 (*p*-terphenyl-*d*<sub>14</sub>) 첨가 후 가스크로마토그래피/질량분석기 (6890GC/5973MSD, Agilent Technologies, CA, USA)로 분석하였다.<sup>10)</sup> 정량용 내부표준 물질 4종 (acenaphthene-*d*<sub>10</sub>, phenanthrene-*d*<sub>10</sub>, chrysene-*d*<sub>12</sub>, and perylene-*d*<sub>12</sub>)의 회수율은 62~115%였다. 실제 수환경 적용에 따른 지점별 미량유해물질 분포 및 규명을 위해 회수한 일부를 GC/MSD scan mode로 분석하였다 (Table 2).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 흡착제별 효율 비교 결과

수영장과 춘천 각각 3개 지점씩, 총 6개 지점에서

흡착된 acenaphthene(Acp), fluorene(Flu), phenanthrene(PhA), anthracene(AnT), fluoranthene(FluA), pyrene(Pyr) 6종이 90% 이상을 차지하였다. 흡착제별 PAHs 포집 효율 비교 결과를 triolein에 포집된 양을 기준으로 octanol과 olive oil에 각각 포집된 흡착량의 비(amount ratio)로 나타내었다 (Fig. 3). 각 물질에 대한 흡착 효율은 6종 PAHs에 대해 olive oil이 octanol에 비해 높았다. Octanol은 triolein에 비해 대체로 30~80% 수준의 흡착 효율을 보였으며, 특히 벤젠 고리가 두 개인 구조를 가지는 Acp, Flu의 흡착 효율이 상대적으로 낮고 변동폭이 컸다. 이에 비해 olive oil은 triolein에 대해 대체로 80~120% 수준의 흡착 효율을 보였으며, 평균적으로 triolein의 흡착 효율과 유사한 결과를 나타내었다. 전체적으로 triolein을 기준으로 한 총 PAHs의 흡착 효율은 octanol (62.9±9.5%)에 비해 olive oil (106.5±15.7%)이 뛰어났으며 triolein과 거의 유사한 흡착 효율을 나타내었다. 따라서 이와 같은 결과를 비교해 볼 때, 생체 지질(lipid)과 유사한 triolein의 또 다른 특징인 biomimetic sampling이 목적이 아닌 경우에는 비용 대비 경제성 높은 흡착제를 선정함에 있어, olive oil이 triolein의 효율적 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

#### 3.2. 흡착된 주요 미량유해물질 및 지점별 분포

수영장과 춘천의 지점별로 포집되는 미량유해물질 종류와 분포를 확인하기 위해, 3종류의 흡착제별 membrane 시료를 대상으로 투석 후 일부분을 분취/농축하여 GC/MS scan mode로 기기분석 하였다. TIC(total ion chromatogram)를 분석한 결과 다양한 피크(peak)가 검출되었으나, octanol을 제외한 triolein과 olive oil은 TIC가 거의 유사하였으며, 피크 대부분이 검출세기(abundance)가 낮고

**Table 2.** Instrumental conditions for the identification of chemicals

		Conditions
GC	Column	DB-5MS (5%-Phenyl-methylpolysiloxane) (60 m length * 0.32 mm I.D. × 0.25 μm film thickness)
	Carrier gas	He (99.999%) at 1.0 mL/min
	Injection port Temp.	300°C
	Injection mode	Splitless, 2 μL injection
	Oven Temp. program	40°C → 9°C/min → 300°C (20 min)
	Interface Temp.	300°C
	Ionization mode	Electron Ionization
MS	Electron energy	70 eV
	Ion source Temp.	230°C
	Detection mode	Scan mode (50~550 amu)

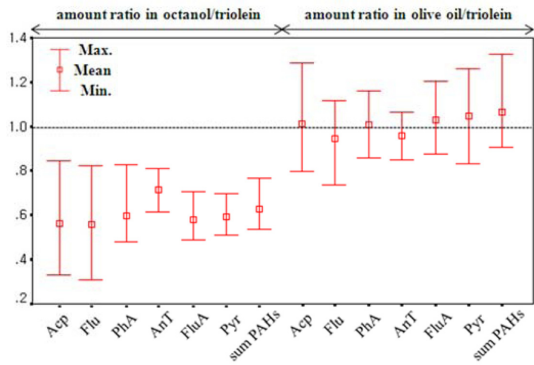


Fig. 3. Comparison of adsorption efficiencies of triolein, olive oil, and octanol.

상류에서 하류로 이동하는 것에 관계없이 유사한 분포를 보였다. 이러한 주요도가 낮은 (minor) 피크들을 제외하고 지점별로 피크를 겹쳤을 때(Overlay), 유의한 증가를 보이는 피크를 NIST(National Institute of Standards and Technology) library (Chemstation, Agilent Technologies) 를 통해 검색하였다. 정성이 가능한 피크에 대한 triolein 과 olive oil 결과는 완벽히 일치함을 보여 olive oil이 triolein과 비교했을 때, 흡착 효율뿐만 아니라 흡착가능 대상물질도 같은 것으로 나타나 triolein과 비교해 비용 효과적인 대체제로 적용할 수 있음을 보였다. Olive oil에 흡착된 물질 정성 결과 흡착제 효율 비교에서 검출된 바 있는 PAH류를 90% 이상의 신뢰성에서 확인할 수 있었으며, 이외에도 decane류를 포함한 다양한 종류의 지방족(aliphatic) 및 방향족(aromatic) 탄화수소류 및 합성사향류가 검출되었다. 이중 상류에서 하류로 이동함

에 따라 가장 큰 증가를 보인 peak의 mass spectrum을 NIST library로 검색한 결과 dodecane과 tridecane이었다.

Decane류는 원유 성분의 하나로 유기합성원료 및 용제로 쓰이며 수계에 대한 배출원은 주로 하폐수처리장으로 알려져 있다<sup>12)</sup>. Decane류는 수영강 상류/중류에서는 잔류량이 유사하게 나타났으나, 중류와 하류 사이에 위치한 3곳의 하수처리장의 영향을 받아 SY3-지점에서는 포집량이 상당히 증가함을 알 수 있었다. 또한 수영강, 춘천 모두에서 galaxolide(HHCB)의 유의적인 증가가 하수처리장 방류지점 이후에서 나타났다 (Fig. 4). Galaxolide는 화장품, 향수 비누 및 세제 등에 향을 내기 위해 인공적으로 만들어져 첨가되는 합성사향류 중에서 국내 사용량이 가장 많으며 하수처리장이 가장 큰 배출원이다.<sup>13,14)</sup>

Fig. 2와 같이 수영강의 경우, 중류의 시료 채취 지점은 수영과 동부 2곳의 하수처리장의 영향을 받지만, 온천천(Oncheon stream) 합류에 따른 유량이 많아 하수처리장에서 방류되는 galaxolide 회색효과가 크게 나타났다. 반면 춘천의 경우는 상류에서 하류까지 해운대 하수처리장 방류수 합류 외에는 합류되는 하천이 없어 중류에서는 유량의 대부분을 하수처리장 방류수가 차지하기 때문에 방류수 합류 지점인 중류에서 galaxolide의 증가 폭이 수영강에 비해 훨씬 큰 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 PWSD가 수중 미량유해물질을 포집 할 수 있는 효율적인 장비라는 것과, 장기간 모니터링을 통해 지점에 따른 미량유해물질 배출원을 판단할 수 있는 장비로 활용될 수 있다는 것을 확인하였다.

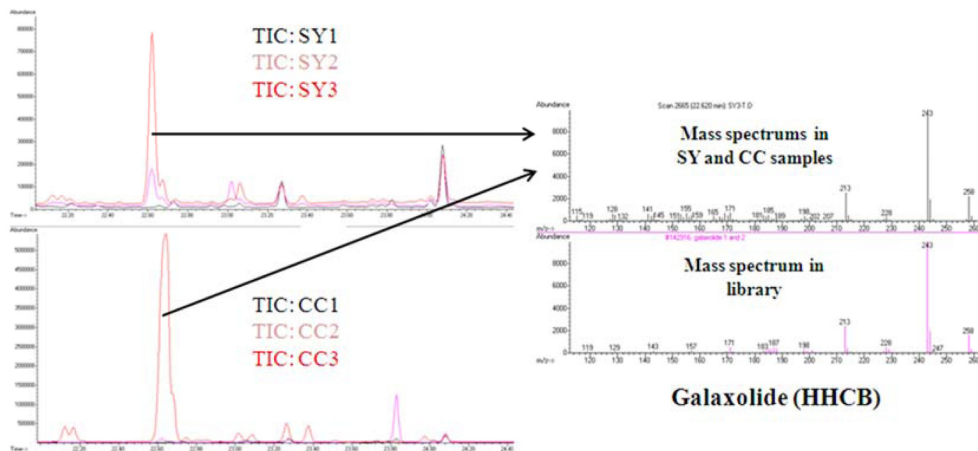


Fig. 4. Identification of mass spectrum of Galaxolide (HHCB) in SY and CC samples.

#### 4. 결 론

국내 수환경에 PWSD를 효율적으로 적용하기 위해, USGS를 통해 제공받은 PWSD canister에 USGS에서 적용하는 membrane과 동일한 SA-V ratio 규격으로 국내에서 구입 가능한 LDPE 재질의 SPMD membrane을 장착한 PWSD를 고안하였다. 국외 연구에서 주로 적용되는 흡착제인 triolein의 높은 가격으로 인한 경제성을 극복하기 위해 triolein의 대안으로 적용될 수 있는 octanol과 olive oil을 동일한 샘플링 지점에 적용하였다. 이를 실제 수환경에 적용한 결과 다양한 미량유해물질이 흡착되는 것을 확인하였으며 membrane 내에 주입되는 흡착제별 포집 효율을 평가한 결과 octanol의 포집효율은 비교적 낮았으나, triolein과 olive oil이 유사한 수준의 포집 효율을 보였다. 따라서 포집 효율 외에 경제성도 같이 고려할 경우 olive oil이 좋은 대안이 될 수 있음을 연구 결과 확인하였다. 다만 이것은 PAHs에 대한 흡착 효율의 비교 결과로 더 다양한 물질에 대한 검증실험이 뒤따라야 할 것으로 판단된다. PWSD를 두 곳의 하천에 대해 적용한 결과, 다양한 미량유해물질이 PWSD에 포집 되었으며, 단편적인 농도 정보만을 제공하고 대응량을 필요로 하는 기존 미량유해물질 모니터링용 수질분석에 대한 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 두 하천의 상/중/하류 지점에 PWSD를 설치하여 유해물질을 분석한 결과 하수처리장을 배출원인 지방족탄화수소류, 다환방향족탄화수소류 및 합성사향류 등이 하수처리장 방류구 이하 지점에서 유의한 증가를 보임을 확인하였다. 이는 실제 수환경에 배출되는 유해물질에 대한 장기간 모니터링에 대해 PWSD가 효율적인 장비가 될 수 있음을 보여주는 결과로 평가된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2019년도 국립수산과학원 수산과학연구소 사업(R2019046)의 지원으로 수행된 연구입니다.

#### 참고문헌

1. J. N. Huckins, J. D. Petty, and K. Booi, "Monitors of Organic Chemicals in the Environment", 2006, 1st edition, 1-24, Springer, USA
2. F. Stuer-Lauridsen, "Review of passive accumulation devices for monitoring organic micropollutants in the

aquatic environment", *Environmental Pollution*, 2005, 136, 503-524.

3. J. N. Huckins, J. D. Petty, C. E. Orazio, J. A. Lebo, R. C. Clark, V. L. Gibson, W. R. Gala, and K. R. Echols, "Determination of uptake kinetics (Sampling rates) by lipid-containing semipermeable membrane devices (SPMDs) for Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water", *Environmental Science and Technology*, 1999, 33, 3918-3923.
4. J. D. Petty, S. D. Jones, and J. N. Huckins, "An approach for assessment of water quality using semipermeable membrane devices (SPMDs) and bioindicator tests", *Chemosphere*, 2000, 41, 311-321.
5. L. R. Zimmerman, E. M. Thurman, and K. C. Bastian, "Determination of persistent organic pollutants in the Mississippi Delta using semipermeable membrane devices", *Science of the Total Environment*, 2000, 248, 169-179.
6. Environmental Sampling Technologies, <http://www.est-lab.com>, July 2019.
7. S. D. Choi, S. Y. Baek, and Y. S. Chang, "Atmospheric levels and distribution of dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the vicinity of an iron and steel making plant", *Atmospheric Environment*, 2008, 42, 2479-2488.
8. S. Y. Baek, S. D. Choi, S. J. Lee, and Y. S. Chang, "Assessment of the spatial distribution of coplanar PCBs, PCNs, and PBDEs in a multi-industry region of South Korea using passive air samplers", *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 7336-7340.
9. U. J. Kim, H. Y. Kim, A. David, I. S. Lee, and J. E. Oh, "Using SPMDs for monitoring hydrophobic organic compounds in urban river water in Korea compared with using conventional water grab samples", *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471, 1537-1534.
10. I. S. Lee, W. J. Sim, C. W. Kim, Y. S. Chang, and J. E. Oh, "Characteristic occurrence patterns of micropollutants and their removal efficiencies in industrial wastewater treatment plants", *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 13, 391-397.
11. 강희형, 이인석, 허인애, 신원식, 황인성, 김영훈, 허진, 신현상, 김준하, "낙동강 하천 및 호소 퇴적물에서의 PAHs, OCPs, Co-PCBs 농도 분포와 발생원 평가", *대한환경공학회지*, 2010, 32, 656-664.
12. NCBI homepage PubChem (Open chemistry database at the National Institute of Health, USA), <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>, July 2019.
13. I. S. Lee, S. H. Lee, and J. E. Oh, "Occurrence and fate of synthetic musk compounds in water environment", *Water Research*, 2010, 44, 214-222.
14. R. Guo, I. S. Lee, U. J. Kim, and J. E. Oh, "Occurrence of synthetic musks in Korean sewage sludges", *Science of the Total Environment*, 2010, 408, 1634-1639.