

경기도 대부도 모래해변에 잔류하는 미세플라스틱의 계절별 분포특성

김인성¹ · 김승규^{2,3,†}

¹인천대학교 생명과학과, ²인천대학교 해양학과, ³인천대학교 기초과학연구소

Seasonal Distribution Characteristics of Microplastics in the Sand Beach of the Daebu Island, Gyeonggi-do

In-Sung Kim¹ and Seung-Kyu Kim^{2,3,†}

¹Department of Life Sciences, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

²Department of Marine Science, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

³Research Institute of Natural Sciences, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

Received October 20, 2015/Revised October 28, 2015/Accepted November 4, 2015

Seasonal variation in the abundance and distribution of microplastics (MPs) in beach sediments was investigated for the Daebu island, Gyeonggi-do, South Korea. Beach surface sediments were sampled at five stations along the high strandline of the island beach in July and November 2013 and March 2014 to represent the summer, winter, and spring seasons, respectively. Six sizes ranging from 0.3 to 5 mm were classified and seven types of polymers were determined using FT-IR. The abundances of microplastics were 8,776-891,844 particles/m² in summer, 4,628-17,724 particles/m² in winter, and 13,784-100,196 particles/m² in spring with a predominant contribution of expanded polystyrene (EPS) of >95% in all seasons. Distinct seasonal differences were exhibited in the MPs abundance (i.e., 6-26 times higher in summer) and spatial distribution pattern (i.e., higher at northern stations in summer with southerly winds but southern stations in winter with northerly winds). On the other hand, similarities in size distribution as well as polymer composition were observed among seasons and stations. Particularly, there were good correlations between EPS of fishery-activity origin and non-EPS of inland origin. In conclusion, well-mixed currents seem to cause spatial and temporal homogeneity in size and polymer distribution, while different wind directions with seasons were likely to generate differences in the MPs abundance with time and space in the beach. However, whether the distribution characteristics of MPs on the beach sediments were determined by the direct reflection of those in flooding seawaters or by the redistribution of deposited MPs is unclear. Further study is required to identify the major mechanism.

Key words: Microplastics, Marine debris, Estuary, Beach sediment, Seasonal variation, Spatial distribution, EPS

1. 서 론

20세기 초 발명 이후에, 초경량에 내구성을 갖추고 불활성이며 부식저항성을 가진 이점 때문에 플라스틱에 대한 수요는 급증하여 전 지구적으로 매년 3억8백만 톤이 생산 및 소비되고 있는 것으로 알려지고 있다.^{1,2)} 사용이 끝난 플라스틱 제품의 대부분은 폐기물로서 매립되거나 소각되지만, 일부는 하폐수처리장 방류나 하천을 통해 해양환경으로 유입된다. 한국환경공단에 따

르면, 2009년 기준 우리나라 폐플라스틱 발생량(430여 만 톤)중 38%만 재활용되는 것으로 알려져 있다(www.keco.or.kr). 유럽연합(EU)의 플라스틱 재활용 비율도 2003년 생산된 플라스틱 폐기물의 39% 정도에만 머무르며³⁾, 생산된 플라스틱의 10% 정도는 수거되지 않은 채 최종적으로 해양으로 이동하여 잔류, 축적하는 것으로 추정⁴⁾되기도 한다. 그 결과로 해양환경에서 관측되는 플라스틱의 양은 지속적으로 증가하여왔는데, 전 세계적으로 해양에서 관측되는 쓰레기의 60-90%가

[†]To whom correspondence should be addressed.

플라스틱인 것으로 추정된다.⁵⁾

해류를 통한 전지구적 해양오염, 다양한 산업적경제적 피해, 비의도적 해양생물의 포획(entanglement) 및 섭취(ingestion) 등으로 인한 생태학적 피해 등으로 인해 중대형플라스틱 쓰레기(plastic debris, >5 mm) 뿐만 아니라 더 작은 크기로 해양환경에 잔류하는 미세플라스틱(microplastics, <5 mm)이 해양환경보전에 있어서 중요한 국제적 관심사 중 하나가 되고 있다.^{6,7)} 해양환경에 잔류하는 미세플라스틱은 화장품 세정제, 연마제, 플라스틱산업의 원재료 등의 목적으로 인위적으로 미세하게 제작된 것이 생산, 유통, 사용, 폐기 중에 유입되는 1차 오염원과 환경에 유입된 중대형플라스틱 쓰레기가 광분해, 생분해, 물리적 파쇄 등 다양한 풍화과정을 통해 더 미세한 조각으로 분해되는 2차 오염원이 있다.^{8,9)} 이러한 수 nm-수 mm의 미세플라스틱은 해수표면, 해수층, 퇴적물 등 다양한 해양환경매체에 잔류하여¹⁰⁻¹²⁾ 해당 매체에서 서식하는 해양생물에 의해 섭취되는 것으로 알려져 있다.^{13,14)}

해양환경 내 잔류미세플라스틱에 대한 집중하는 관심은 플라스틱 제조 및 생산시에 첨가된 다양한 유해 화학물질들(예컨대, polybrominated diphenyl ethers, nonylphenol, triclosan, phthalates류 등)¹⁵⁻¹⁷⁾과 플라스틱에 고농도로 흡착되는 유기오염물질들^{18,19)}에 의해 증폭되고 있다. 최근의 연구에 따르면, 양식등 수산활동에 다량으로 사용되는 스티로폼 부이에 높은 수준의 hexabromocyclododecane (HBCD)가 함유되어 있으며²⁰⁾ 함유된 HBCD가 용출되어 양식장을 포함한 주변 환경을 오염시키는 것으로 보고되기도 하였다.²¹⁾ 결과적으로, 미세플라스틱은 그 자체로써 해양환경 내 잔류 유해오염물질의 새로운 오염원 역할을 하는 동시에 다양한 해양생물의 섭취를 통해 오염물질의 생물증폭을 유발하는 매개체로 인식되고 있다. 따라서, 각 해양환경매체들에서 미세플라스틱이 얼마만큼, 어떤 특성을 가지고 분포하는지를 결정하는 것은 해양환경의 안전성 및 위해성 관리측면에서 매우 중요하다.

해양환경 내 미세플라스틱의 오염도 및 잔류특성에 대한 조사는 그 동안 주로 해수 및 해변퇴적물에 집중되어왔는데, 각 매체에서의 시료채취, 정성 및 정량에 대한 질 관리(QA/QC)를 포함한 공인된 표준 조사 및 분석절차가 확립되어있지 않아서 보고된 조사자료들 사이에 불확실성이 존재한다.^{10,12,22,23)} 해변에 잔류하는 미세플라스틱은 해상에서 미세플라스틱 형태로 유입되거나 해변에 퇴적된 이후 미세플라스틱으로 조각화되는

과정을 통해 형성될 수 있다. 따라서, 한 해변 내에서의 미세플라스틱의 시공간분포는 해상에서 유입되는 과정에서 해류나 바람 등에 의해 그리고 해변에 퇴적된 이후 바람이나 조각화 등을 통한 재분포에 의해 영향 받을 수 있다. 해변에 도달 전후의 과정에서 발생하는 이러한 물리적 인자들의 영향은 계절에 따라 다를 것으로 추정된다. 우리나라 해양환경에 대한 조사는 남해안과 서해안에서만 제한적으로 진행되어왔는데, 해변퇴적물에 잔류하는 미세플라스틱에 대한 기존 연구들은 주로 공간적 분포특성에 국한되어있고,^{11,24,25)} 서로 다른 시기를 대상으로 한 연구는 같은 년도의 장마 전후의 분포도 차이를 조사한 것이 유일하다.²⁵⁾

인천경기연안지역은 우리나라 제2의 무역항인 인천항, 대규모 연안도시 및 산업단지, 한강하구역, 다양한 해양 및 수산활동 등 미세플라스틱의 오염원이 다양하며 그 오염강도 또한 클 것으로 추정된다. 예컨대, 본 연구진에 의해 수행된 이 지역 해수표면 및 해수층¹²⁾, 그리고 해변퇴적물¹¹⁾에 잔류하는 미세플라스틱의 농도는 국내외 해수의 미세플라스틱 오염도와 비교할 때 최상위의 수준인 것으로 조사되기도 하였다. 사전연구 결과, 이 지역 해변퇴적물에 잔류하는 미세플라스틱은 구성재질별이나 크기별 조성 등에서 해수에 잔류하는 것과 다른 것으로 조사되었으며, 해변 퇴적물에서의 오염도 및 분포특성은 해변의 지리적 특성, 조류(혹은 해류) 및 바람의 영향 등에 의해 크게 영향을 받는 것으로 추정되었다.¹¹⁾ 이러한 물리적 인자들은 계절에 따라 뚜렷하게 변화할 수 있기 때문에 해변퇴적물에 잔류할 수 있는 미세플라스틱의 양과 분포특성도 계절적으로 변화할 것으로 판단된다. 따라서, 특정 시기에 국한되어 조사된 자료만으로 해당지역의 오염도 및 분포특성을 대표할 수 있는지에 대한 의문이 제기된다.

본 연구는 특정 한 해변(대부도)에서 서로 다른 계절에 조사된 퇴적물 내 잔류미세플라스틱의 정성정량 분석자료에 기초하여, 계절에 따른 미세플라스틱의 오염도, 잔류특성 및 공간분포 변이경향을 조사하였다. 본 연구결과는 조사지점 선정에 따른 불확실성과 분포특성에 대한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

2.1.1. 조사지점 및 조사시기

본 연구는 경기연안의 대부도 해변에서 여름철(2013

년 7월), 겨울철(2013년 11월), 봄철(2014년 3월) 등 계절에 걸쳐서 수행되었다. 대부도는 위도 37° 17'19.83", 경도 126° 34'35.24"상에 위치해있는 섬으로써 행정구역상 경기도 안산시 단원구 대부북동에 속하며, 인천연안에서 남쪽으로 19 km 정도 떨어져 있다(Fig. 1(a)). 대부도는 북쪽의 인천경기연안 및 한강하구와 남쪽의 아산만 사이에 위치해있으며 영흥도를 비롯한 서쪽에 위치한 많은 섬들에 둘러싸여 있고, 동북쪽으로 시화호 방조제와 연결되어 있다. 따라서 서로 다른 방향에서 접근하는 해류와 조류 및 바람의 방향에 의해 대부도 해변

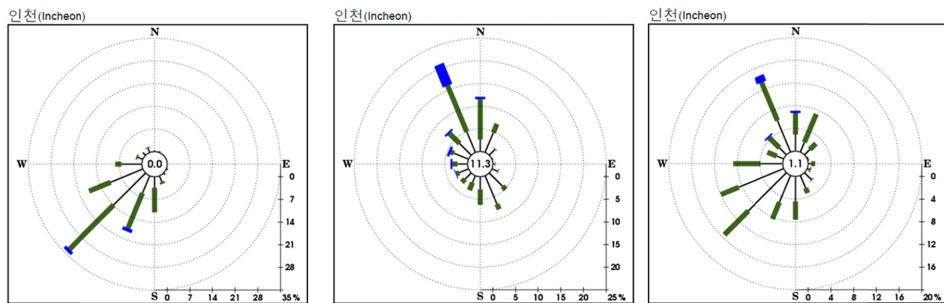
내 미세플라스틱의 잔류특성이 영향을 받을 것으로 추정된다. 한편, 시화호 방조제와 연결되어 있는 대부도는 시화호의 직접적인 영향을 받고 있기 때문에 육상기인성 미세플라스틱의 유입가능성이 상대적으로 클 것으로 추정된다.

2.1.2. 채취방법

해변에 잔류하는 미세플라스틱은 해수표면에 부유하다가 조류나 바람의 영향을 받아 해변으로 밀려와 잔류하거나 퇴적된 중대형플라스틱 쓰레기가 미세화되거



(a)



Jul. 2013

Nov. 2013

Mar. 2014

(b)

Fig. 1. (a) Sampling locations in the Daebu island and (b) Wind-roses measured in Incheon observatory site [quoted from the Korea Meteorological Administration reports (2013) and (2014) (ref. 27)].

나 재분배될 수 있기 때문에 상부 퇴적선(만조선; high strandline) 아래의 지점들에 잔류하는 양은 조사지점(즉, 조석의 일주기)에 따라 크게 영향 받을 수 있다. 따라서, 기존연구들에서 제시된 것처럼^{11,25)} 때 조사시기 해수면이 가장 높을 때 형성된 상부 퇴적선(만조선; high strandline) 상에 잔류하는 미세플라스틱을 조사하였다. 북서쪽으로 바다를 접하고 있는 이 해변의 좌측면은 상업지구의 인공구조물에 의해 만조선이 형성되지 않기 때문에 만조선이 형성되는 우측면의 모래해변(~200 m)에서 만조선에 따라 일정 간격(~50 m)으로 7개 조사지점을 선정하였다(Fig. 1(a)). 이때, 해변의 좌측면 지점은 상업지구 인공구조물에 의해 그리고 좌우측 지점은 암반지대가 형성되어있어 모래해변 만조선이 형성되지 않기 때문에 제외하고 나머지 5지점에서 시료를 채취하였다. 공간분포 조사지점들의 통일성을 위해, 최초 선정된 5개 지점을 각 시기에 형성된 만조선의 변화에 따라 수직적으로 재선정하였다.

각 지점에서 철제재질의 격자틀(50 cm×50 cm)로 모래를 고정시킨 후, 격자틀 안의 모래 표면층(2 cm)을 철제재질의 모종삽으로 채취하여 5 mm, 1 mm의 망목크기를 갖는 체(Tyler sives)를 연속적으로 통과시켰다. 1 mm 체에 걸리진 1-5 mm 시료와 1 mm 체를 통과한 <1 mm 시료 각각을 알루미늄호일에 싼 후 폴리에틸렌 지퍼백에 담아 실험실로 운반하였다. 1 mm 체를 통과한 시료는 균질하게 혼합한 후, 이 중 1 L의 시료만을 취해 크기군별 분류 및 정성정량분석을 진행하였다. 각

조사시기에 형성된 상부 퇴적선을 따라 지정된 5개 지점들에서 동일한 채취 및 분석절차를 통해 각 미세플라스틱의 농도가 결정되었다.

2.2. 정성·정량 분석절차

2.2.1. 크기군별 분류

본 연구에서는 기존 연구¹¹⁾ 및 Fig. 2에 제시된 절차를 통해 6개 크기군(0.3-0.5, 0.5-1, 1-2, 2-2.8, 2.8-4, 4-5 mm)으로 미세플라스틱을 분류하였다(Fig. 2). 우선, 나뭇잎이나 생물체 사체 등의 방해물질을 육안으로 쉽게 구별할 수 있는 2-5 mm 크기군은 각각의 망목크기를 갖는 체(2, 2.8, 4 mm)를 통해 연속적으로 걸러 채취하였다. 미세한 방해물질 및 expanded polystyrene (EPS)가 다량으로 함유되어 있어 육안분류가 불가능한 <2 mm의 시료는 NaCl 포화용액에 담아 비중분류를 수행하였다. 1-2 mm 시료는 부유한 모든 입자를 건어 내어 60에서 건조시켜 정성정량분석을 진행하였으며, <1 mm의 시료는 비중분류를 통해 부유한 모든 입자를 채취해 건조한 후 다시 0.5 mm와 0.3 mm 체를 연속적으로 통과시켜 크기군에 따라 구분하였다.

1-5 mm에 해당되는 각각의 크기군에 잔류하는 모든 미세플라스틱 입자는 육안으로 분류하였으며, 1 mm 이하의 크기군에 잔류하는 미세플라스틱은 32배율 실체현미경(Stemi DV/4; Carl Zeiss, Germany)을 이용하여 분류하였다. 육안으로 분류한 후, 모든 크기군에 잔류하는 미세플라스틱 및 실체가 불분명한 입자는

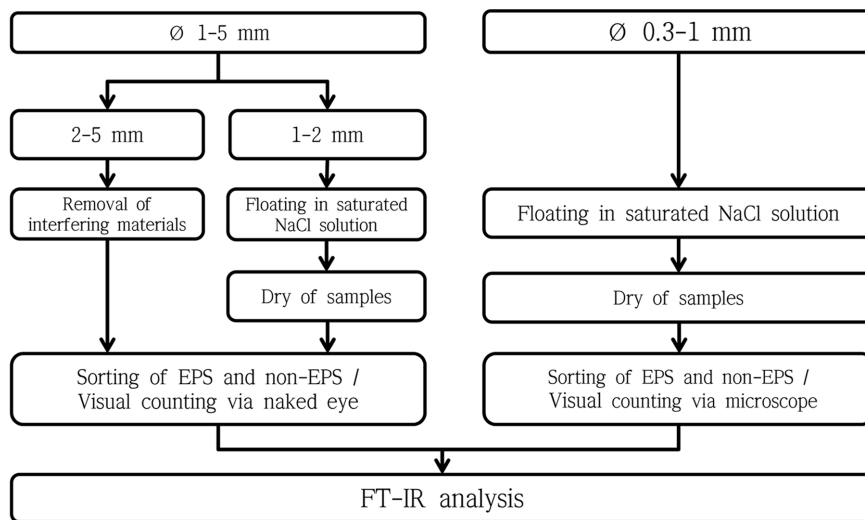


Fig. 2. Analytical procedure for qualitative and quantitative determination of microplastics in beach sediments.

Fourier transform-infrared spectrometry(FT-IR)를 이용해 플라스틱 성분(polymer-type) 및 플라스틱 여부를 판단하였다. 본 연구방법을 통해 육안으로 계수된 미세플라스틱과 FT-IR을 통해 확인된 미세플라스틱은 >0.3 mm의 모든 크기군에 대해 좋은 재현성을 나타냈다.¹¹⁾

2.2.2. 미세플라스틱 구성성분(polymer-type)의 정성 분석

미세플라스틱을 구성하는 성분(polymer-type)의 정성적 결정은 적외선분광광도계인 FT-IR(Agilent Cary 630, Malaysia)을 이용해 수행되었다. 시료의 합성폴리머 성분은 FT-IR 라이브러리상의 기준 스펙트럼과 비교하여 정성하였는데, hit quality가 >700인 것을 해당 성분으로 판단하였다.^{11,12,22)} 정성분석에 사용된 주요 미세플라스틱 성분의 기준 스펙트럼과 시료의 스펙트럼을 비교하여 Fig. 3에 제시하였으며, 각 구성성분을 판단한 스펙트럼상의 주요 결합구조는 채 등(2014)에서 제시된 것

을 따랐다. 본 연구에서 검출된 미세플라스틱의 구성성분은 EPS와 non-EPS로는 polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyurethan foam (PUF), paraffin, ethylene-vinyl acetate(EVA), nylon, polybutadiene 등이다.

시료분석시, 매 시료 분석 전에 FT-IR 기기시료(ATR mode) 주입부를 메탄올(purification > 99.8%)로 세척하였다. 측정된 스펙트럼 범위는 $650\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ (resolution = 4 cm^{-1})였다. 각 크기군 및 재질별 풍부도(abundance; particles/m²)는 FT-IR 분석에 기초하여 보고하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 평균 오염도의 시기별 비교

모든 크기군 및 구성성분을 포함한 미세플라스틱의 총농도의 범위는 여름철에 $8,776\text{-}891,844\text{ particles/m}^2$,

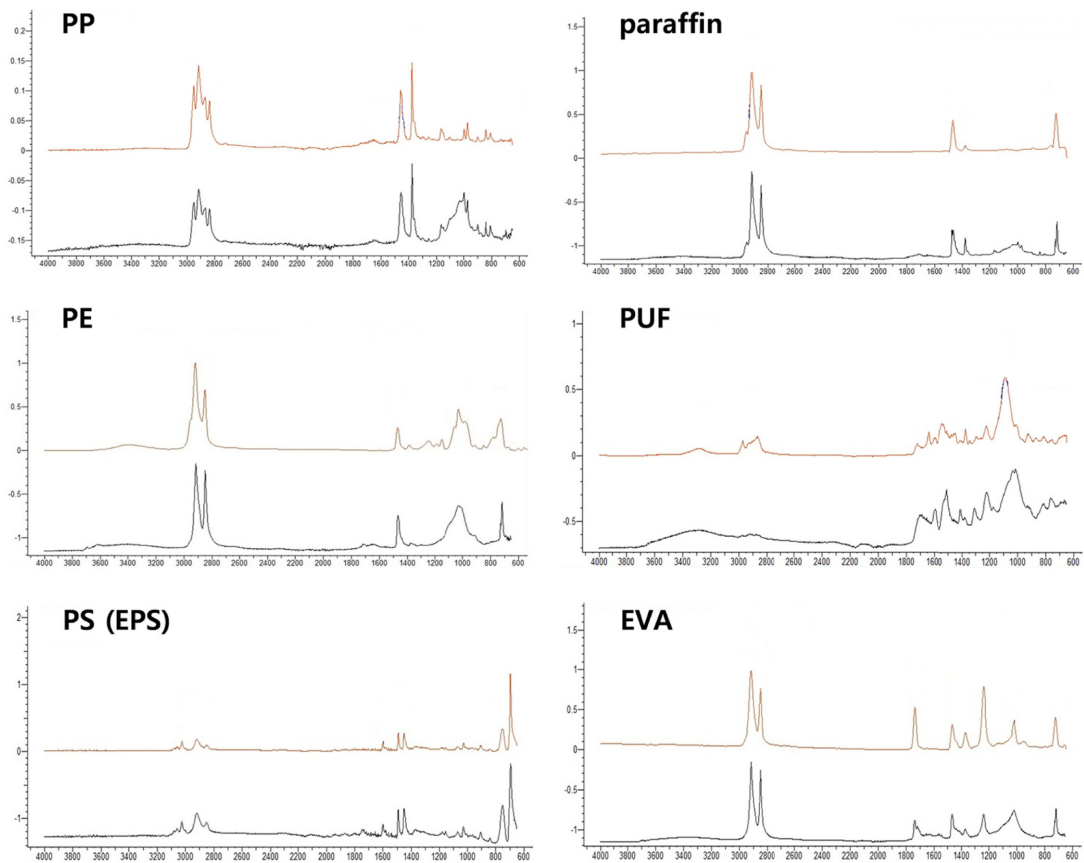


Fig. 3. FT-IR spectrums of samples (black lines) and references (red lines).

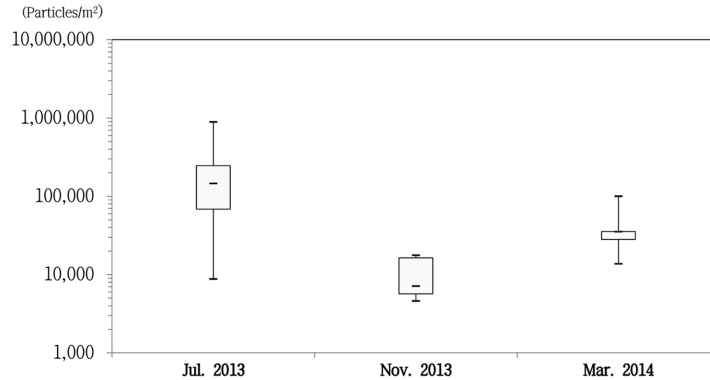


Fig. 4. Concentration ranges of total microplastics (a sum of EPS and non-EPS) determined in this study: The upper and bottom whiskers, the upper and bottom lines of the box, and the lines in the box indicate the minimum, maximum, 75%, 25%, and 50% values, respectively.

겨울철에 4,628-17,724 particles/m², 봄철에 13,784-100,196 particles/m² 인 것으로 조사되었다. 각 시기별 평균농도(±표준편차)는 여름철에 272,349 (±357,535) particles/m²으로 가장 높았으며, 봄철에 42,613 (±33,381) particles/m², 겨울철에 10,318 (±6,247) particles/m² 순으로 나타났다(Fig. 4). 총미세플라스틱 중 EPS와 EPS가 아닌 미세플라스틱(즉, non-EPS)의 평균농도는 여름철에 각각 270,459 particles/m² v.s. 1,890 particles/m², 겨울철에 각각 9,835 particles/m² v.s. 482 particles/m², 봄철에 각각 41,699 particles/m² v.s. 913 particles/m²으로 모든 계절에 걸쳐 EPS가 95% 이상의 높은 점유율을 보였다. 해변퇴적물에서의 EPS의 높은 점유도는 타 연구들에서도 유사하게 보고된 바가 있다.^{11,25)} 특히, 국가해양쓰레기 모니터링결과에 따르면 우리나라 중대형 해변쓰레기(marine litter) 중 스티로폼 부이의 기여도가 전체부피의 30% 정도로 가장 높은 것을 고려할 때, 관측된 EPS는 스티로폼 부이에서 기인했을 가능성이 크다.

결과적으로 국내에서 조사된 해변들뿐만 아니라 본 연구에서 조사된 대부도 해변에 잔류하는 총미세플라스틱의 오염도는 EPS에 의해 좌우된다. 따라서, 인근 해역에서의 스티로폼 부이의 사용량과 계절별 이동경로가 각 지역 해변 내 총미세플라스틱의 오염도를 결정한다. 양식장이나 어업활동을 통해 유실된 폐스티로폼부이는 큰 부피로 인해 바람의 저항을 크게 받기 때문에, 스티로폼부이 및 그로부터 발생하는 EPS의 해양에서의 주요 이동은 바람의 방향에 의해 결정될 수 있다.¹¹⁾ 이 지역 내에서 관측되는 주풍향은 여름철에는 남서풍, 거

울철에는 북서풍, 그리고 봄철에는 남서 및 북서풍의 혼합 형태였다(Fig. 2(b)). 따라서, 이 지역 인근에서 양식활동이 상대적으로 풍부한 남쪽연안¹¹⁾으로부터의 유입이 주된 시기인 여름과 봄철에 상대적으로 높은 농도가 관측된 것이 설명될 수 있다.

우리나라 서해안 해변의 미세플라스틱 오염도는 남해안이나 다른 나라들과 비교하여 상대적으로 높은 수준을 보인 것으로 보고되고 있다.²⁶⁾ 본 연구에서 관측된 대부도해변의 미세플라스틱 오염도는 인천·경기연안 해변의 다른 도서지역에서 관측된 오염도들 보다 최소 3배에서 최대 1,000배까지 높은 수준이었다.

3.2. 평균 구성성분 및 크기군의 시기별 비교

모든 조사시기에 EPS는 가장 높은 점유율을 보였는데 계절별 점유율은 여름철에 99.0-99.8% (평균 99%), 겨울철에 93.1-98.4% (평균 95%), 봄철에 97.1-98.3% (평균 98%)로써 계절별로 유사하였다(Fig. 5(a)). 본 연구에서 검출된 non-EPS들은 모든 계절에 PP > PE > PUF > paraffin, PS, EVA 순으로 나타났으며, nylon (0.8 particles/m²) 및 polybutadiene (2.5 particles/m²)은 각각 겨울철과 봄철에 극소량만 관측되었다(Fig. 5(b)). non-EPS들 중에서 PP와 PE의 평균점유율은 여름철에 40% 와 33%, 겨울철에 47% 와 34%, 봄철에 48% 와 35%로써 계절별로 유사하였으며, 조사된 모든 계절에 두 성분이 전체 non-EPS의 80% 이상을 차지하였다.

EPS와 non-EPS의 평균 크기군별 분포를 Fig. 5(c)와 5(d)에 나타냈다. 전체적으로, 채취된 EPS 및 non-EPS

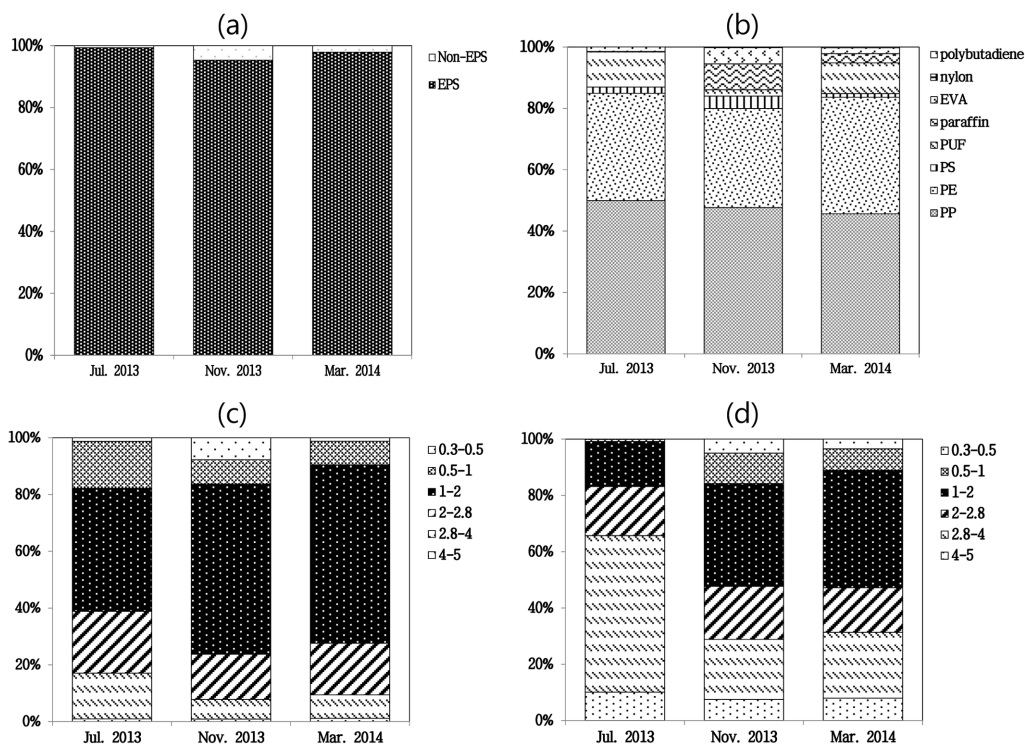


Fig. 5. Average composition profiles measured in this study: (a) EPS and non-EPS, (b) non-EPS polymers, (c) size distribution of EPS, and (d) size distribution of non-EPS.

모두에서 가장 우점한 1-2 mm를 중심으로 중분포 형태를 나타냈다. 그러나, EPS 및 non-EPS 모두 여름철에 1-2 mm의 점유율이 다른 계절에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

3.3. 지점간 오염도 변화의 시계열적 변화

각 해변에서의 평균 분포특성은 해당 해변에서 선택한 조사지점에 따라 크게 영향 받을 수 있다.¹¹⁾ 따라서, 조사지점에 따른 분포특성의 시기별 변화를 살펴보는 것이 중요하다. Fig. 6에서 보듯, EPS의 농도는 조사시기에 따라 지점별 분포양상이 크게 변화하였다. 여름철에는 대부도해변의 북쪽인 좌측지점(DBIB-1)에서 가장 높은 농도를 보이고 남쪽인 우측지점으로 갈수록 낮아지는 경향을 보인 반면 겨울철에는 그 반대경향이 관측되었다. 또, 봄철에는 다른 계절들과 달리 DBIB-2 지점에서 가장 높은 농도가 관측되었다. 이런 결과는 조류가 해안으로 들어오는 올 때 해변의 모든 지역이 동일한 에너지를 받지 않음을 의미한다. 즉, 겨울철에는 북풍의 영향을 받아 표면의 미세플라스틱들이 해변의 남쪽 해변

에 주로 축적되는 반면, 여름철에는 남풍의 영향을 받아 북쪽해변에 주로 축적되는 것으로 추정된다.

한편, 관측된 non-EPS의 우점적 형태는 fragment와 pellet으로서 평균적으로 90%를 차지하였는데, 이것은 해변에서 발견된 non-EPS의 대부분이 육상에서 기인한 중대형플라스틱 쓰레기의 미세화 결과로 발생한 것으로 추정된다. 육상기인성일 것으로 추정되는 non-EPS의 지점별 분포는 모든 계절에 걸쳐 해양기인성(즉, 스티로폼 부이)인 EPS와 아주 유사한 경향을 보였다(Fig. 6). 이것은 해변에 축적되는 분포특성이 미세플라스틱들의 기원과는 상대적으로 덜 연관되어 있는 반면 같은 인자(풍향, 조류 등)에 의해 영향을 받고 있음을 의미한다. 즉, 해변 내 미세플라스틱의 분포는 각 시기의 기상조건에 따라 해변 내 각 지점들이 받는 파도 및 바람 에너지의 일정한 경향성을 반영하는 것으로 판단된다.

3.4. 지점간 크기 및 성분조성의 시계열적 비교

EPS는 모든 시기 그리고 모든 지점에서 가장 우점하였는데, 총미세플라스틱에 대한 EPS 점유율의 지점간

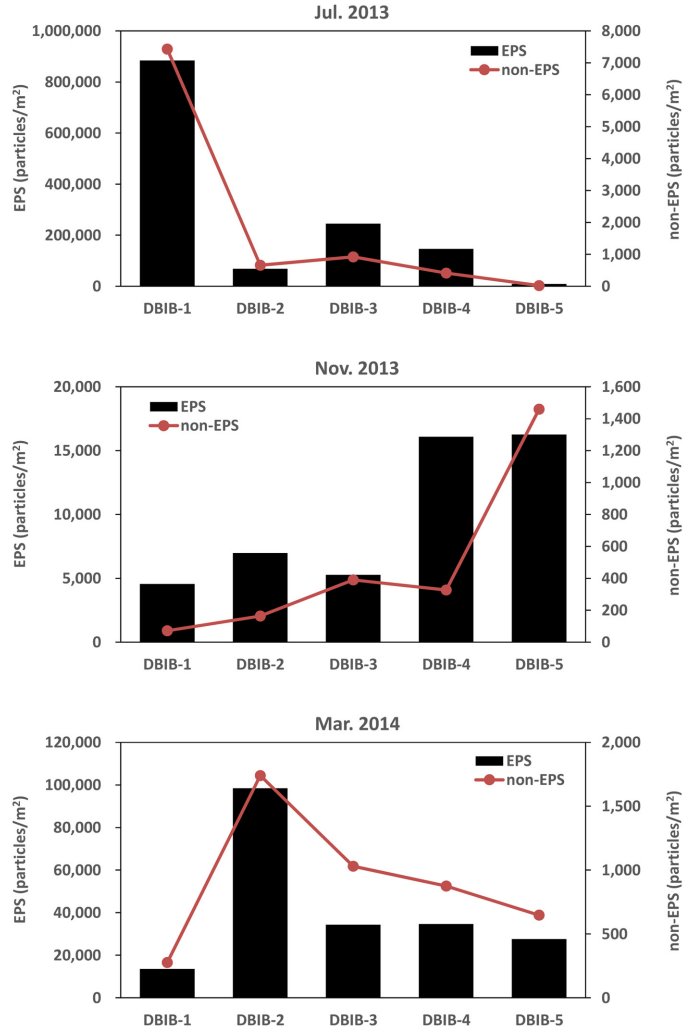


Fig. 6. Seasonal variation in spatial distribution of EPS and non-EPS abundances.

변이(상대표준편차)는 여름철에 0.3%, 겨울철에 3.3%, 봄철에 0.5%로써 매우 작았다. 또한, non-EPS 총농도에 대한 PP와 PE의 점유율은 여름철에 49-95% (평균=73%; 상대표준편차=26%), 겨울철에 74-93% (평균=81%; 상대표준편차=13%), 봄철에 81-86% (평균=84%; 상대표준편차=2.0%)로써 비교적 작았다. 이러한 조사시점 및 조사지점에 관계없이 관측된 미세플라스틱 구성재질 조성비에서의 유사성은 이 해역 내 미세플라스틱의 조성비가 일정하며 해변에 도달할 때 지점에 관계없이 유사한 조성비를 갖고 퇴적됨을 의미한다.

한편, 해변에 퇴적된 미세플라스틱은 조석주기 및 바람방향에 따라 해수 중으로 재이동하고 인근 해역에서

혼합된 후 밀물시 해변에 재퇴적될 수 있다. 또, 기 퇴적된 미세플라스틱이 미세화나 바람에 의해 해변퇴적물 내에서 재분포될 가능성도 있다. 따라서, 관측된 조성비의 유사성이 최초 해변에 도달하기 전의 해상에서 형성된 유사한 조성비의 반영인 것인지 아니면 기 퇴적된 미세플라스틱의 재분포에 의한 것인지는 불분명하다. 상대적으로 가볍고 쉽게 미세화될 수 있는 EPS는 해변내에서의 미세화와 바람등에 의한 재분포가 크게 영향을 줄 수 있다. 그러나, 상대적으로 무겁고 쉽게 미세화되지 않는 non-EPS와 그렇지 않은 EPS 사이에서 관측된 공간 분포에 있어서의 유의미한 상관성을 고려할 때, 기 퇴적된 미세플라스틱의 미세화나 바람등에 의한 해변내 재

분포 기작이 해변내 전체 미세플라스틱의 공간분포를 결정하는 가장 큰 영향인자일 것 같진 않다.

각 지점에서 측정된 EPS와 non-EPS의 크기군 조성비의 변화가 조사시점에 따라 어떻게 변화하는지를 Fig. 7에 제시하였다. 관측된 사실은 (1) 같은 조사시기에 서로 다른 지점들에서 조사된 크기군 분포는 유사하지만,

(2) 지점간 크기군분포는 계절에 따라 다소 변화를 보였다는 점이다. 같은 시기의 다른 지점에서의 크기분포가 유사하다는 것은 인근 해역에서 충분히 혼합된 해수가 해변에 도달함을 의미한다. 한편, EPS와 non-EPS 모두 다른 계절에 비해 여름철에 다른 크기군 분포를 보였는데 그 원인이 여름철에 인근 해역내 미세플라스틱 조성

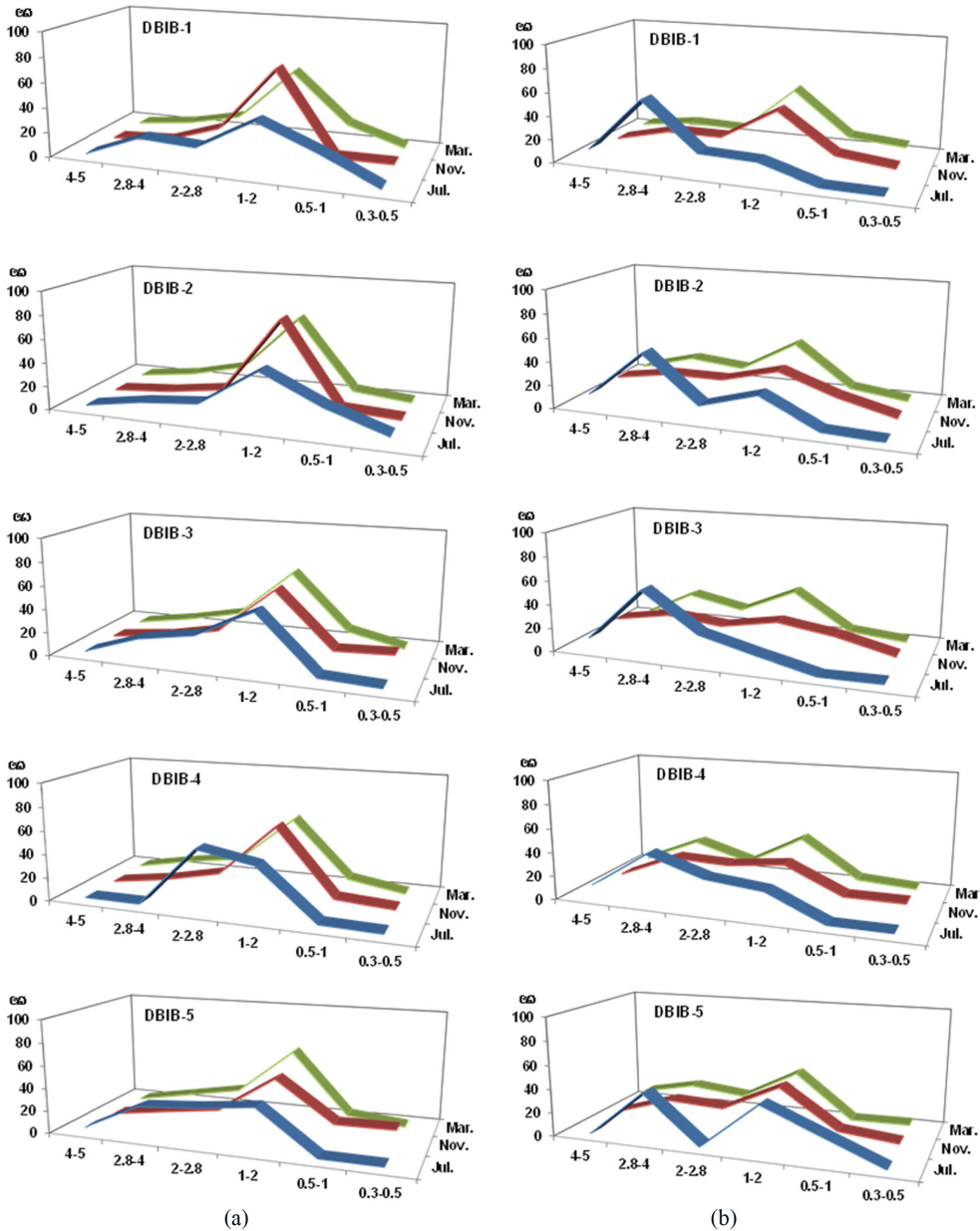


Fig. 7. Inter-season and inter-station comparison of size distribution of (a) EPS and (b) non-EPS measured in July and November 2013 and March 2014. The ranges on X-axis indicate the size categories (unit: mm).

비가 다르기 때문인 것인지 아니면 해변에 도달된 후 인위적 교란 혹은 재분배과정에 의한 것인지는 불분명하다. 구성성분 조성비에 비해 크기군 조성비는 해변 레크레이션 혹은 정화 활동 등에 의해 더 크게 영향 받을 가능성이 크다. 다른 계절에 비해 해변활동이 활발한 여름철에 크기군분포가 달라지는 점은 주목할 필요가 있다.

4. 결 론

모래해변에 잔류하는 미세플라스틱의 분포에 대한 계절의 영향을 보기 위해 여름철(2013년 7월), 겨울철(2013년 11월), 봄철(2014년 3월)에 대부도 해변퇴적물을 조사하였다. 미세플라스틱 분포에 있어서 계절적 차이가 두드러지게 관측된 것은 총오염도와 오염도의 지점별 분포경향이었다. 즉, 총미세플라스틱의 여름철 평균오염도가 다른 계절의 평균오염도에 비해 6-26배 정도 높았다. 또, 주풍향이 남풍인 여름철에는 해변의 북쪽 지점들에서 반면 주풍향이 북풍인 겨울철에는 해변의 남쪽 지점들에서 상대적으로 높은 오염도가 관측되었다. 스티로폼부이가 많이 사용되는 양식장이 주로 남쪽에 분포하는 것과 계절별 주풍향을 고려할 때, 해변퇴적물에 잔류하는 미세플라스틱의 분포에 주로 영향을 주는 인자는 계절별 기상조건(바람)인 것으로 판단된다. 한편, 오염수준이나 오염도의 지점간 분포에 있어서 계절별 큰 변이에도 불구하고, 미세플라스틱의 성분별 조성비나 크기군별 조성비에 있어서는 계절별로 두드러진 차이를 보이지 않았다. 특히, 세 계절 모두에서 해양기인성인 것으로 추정되는 EPS와 육상기인성인 것으로 추정되는 non-EPS의 오염도의 지점간 공간분포가 매우 유사한 것으로 관측되었다. 성분별 조성비가 계절적으로나 지점간으로나 유사한 것은 이 해역 내 미세플라스틱의 조성비가 일정하며 해변에 도달할 때(혹은 해변내에서 재분포할 때) 지점에 관계없이 유사한 조성비를 갖고 축적됨을 의미한다. 따라서, 해변 내 미세플라스틱의 분포에 미치는 주된 영향인자는 기온보다는 조류나 풍향과 같은 물리적 인자인 것으로 추정된다. 이에, 해변퇴적물 잔류 미세플라스틱 연구 시 계절에 따른 기상조건과 해변의 지리적 형태가 고려되어 조사될 필요가 있다. 한편, 해변내 미세플라스틱의 분포는 해변에 퇴적된 후 물리적 파쇄에 의한 미세화와 바람에 의한 재분포 등에 의해 영향받을 수 있다. 본 연구에서 관측된 공간분포에 있어서의 유사성이 해변에 퇴적 전에 발생한 것인지 아니면 해변에 퇴적된 후 재분포에 의해 형성된 것인지는

불분명하며 향후 연구를 통해 규명될 필요가 있다.

대부도에서 조사된 미세플라스틱의 오염수준은 국내의 다른 해변들에서의 미세플라스틱 오염수준과 비교할 때 상대적으로 높은 수준이었다. 특히, 스티로폼부이에서 기인한 EPS의 높은 기여도로 볼 때 이 지역 내 미세플라스틱의 오염은 계절에 관계없이 주로 스티로폼부이에서 기인하는 것으로 추정된다. 타 국내 해변퇴적물 연구결과들과 마찬가지로 본 연구에서 관측된 높은 EPS 기여도는 우리나라 해변 잔류미세플라스틱 오염도가 스티로폼부이의 이용 및 관리와 직접적으로 관련되어 있어 향후 이에 대한 정책적 고려가 필요함을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. A. L. Andrady, M. A. Neal, "Applications and societal benefits of plastics", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **2009**, 364, 1977-1984.
2. R. C. Thompson, S. H. Swan, C. J. Moore, F. S. vom Saal, "Our plastic age", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **2009**, 364, 1973-1976.
3. J. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior, "Plastics recycling: challenges and opportunities", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **2009**, 364, 211526.
4. R. C. Thompson, "Plastic debris in the marine environment: consequences and solutions", *Marine Nature Conservation in Europe 2006*, **2006**, 107-115.
5. J. G. B. Derraik, "The pollution of the marine environment by plastic debris: a review", *Marine Pollution Bulletin*, **2002**, 44, 842-852.
6. D. K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, M. Barlaz, "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science*, **2009**, 364, 1985-1998.
7. A. Sivan, "New perspectives in plastic biodegradation", *Current Opinion in Biotechnology*, **2011**, 22, 422-426.
8. C. J. Moore, "Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat", *Environmental Research*, **2008**, 108, 131-139.

9. C. Matthew, P. Lindequea, C. Halsbandb, T. S. Galloway, "Microplastics as contaminants in the marine environment: A review", *Marine Pollution Bulletin*, **2011**, 62, 2588-2597.
10. V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. C. Thompson, M. Thiel, "Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification", *Environmental Science & Technology*, **2012**, 46, 3060-3075.
11. I. S. Kim, D. H. Chae, S. K. Kim, S. B. Choi, S. B. Woo, "Factors Influencing the Spatial Variation of Microplastics on High-Tidal Coastal Beaches in Korea", *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **2015**, 69, 299-309.
12. D. H. Chae, I. S. Kim, S. K. Kim, Y. K. Song, W. J. Shim, "Abundance and distribution characteristics of microplastics in surface seawaters of the Incheon/Kyeonggi coastal region", *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **2015**, 69, 269-278.
13. R. C. Thompson, Y. Olsen, R. P. Mitchell, A. Davis, S. J. Rowland, A. W. G. John, D. McGonigle, A. E. Russell, "Lost at sea: where is all the plastic?", *Science*, **2004**, 304, 838.
14. M. A. Browne, A. Dissanayake, T. S. Galloway, D. M. Lowe, R. C. Thompson, "Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.)", *Environmental Science & Technology*, **2008**, 42, 5026-5031.
15. M. A. Browne, T. Galloway, R. Thompson, "Microplastic - an emerging contaminant of potential concern?", *Integrated Environmental Assessment and Management*, **2007**, 3, 559-561.
16. C. E. Talsness, A. J. M. Andrade, S. N. Kuriyama, J. A. Taylor, F. S. vom Saal, "Components of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **2009**, 364, 2079-2096.
17. M. Alae, P. Arias, A. Sjodin, A. Bergman, An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environmental International*, **2003**, 29, 683-689.
18. Y. Mato, T. Isobe, H. Takada, H. Kanehiro, C. Ohtake, T. Kaminuma, "Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment", *Environmental Science & Technology*, **2001**, 35, 318-324.
19. A. Van, C. M. Rochman, E. M. Flores, K. L. Hill, E. Vargas, S. A. Vargas, E. Hoh, "Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California", *Chemosphere*, **2012**, 86, 258-263.
20. M. Rani, W.J. Shim, G.M. Han, M. Jang, Y. K. Song, S. H. Hong, "Hexabromocyclododecane in polystyrene based consumer products: an evidence of unregulated use", *Chemosphere*, **2014**, 110, 111-119.
21. N. A. Al-Odaini, W. J. Shim, K. M. Han, M. Jang, S. H. Hong, "Enrichment of hexabromocyclododecanes in coastal sediment near aquaculture areas and a wastewater treatment plant in a semi-enclosed bay in South Korea", *Science of the Total Environment*, **2015**, 505, 290-298.
22. 채두현, 김인성, 송영경, 김성우, 김승규, "해수에 잔류하는 미세플라스틱의 정성정량 분석법 확립", *Journal of the Korean Society of Oceanography (The Sea)*, **2014**, 1, 88-98.
23. Y. K. Song, S. H. Hong, M. Jang, J. H. Kang, O. Y. Kwon, G. M. Han (et al.), "Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer", *Environmental Science and Technology*, **2014**, 48, 9014-9021.
24. N. W. Heo, S. H. Hong, G. M. Han, S. Hong, J. Lee, Y. K. Song (et al.), "Distribution of small plastic debris in cross-section and high strandline on Heungnam beach, South Korea", *Ocean Science Journal*, **2013**, 48, 225-233.
25. J. Lee, S. Hong, Y. K. Song, S. H. Hong, Y. C. Jang, N. W. Heo (et al.), "Relationships among the abundances of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea", *Marine Pollution Bulletin*, **2013**, 77, 349-354.
26. 김인성, "인천경기연안 해변에 잔류하는 미세플라스틱의 공간분포 특성", *인천대학교 석사학위논문*, **2015**,
27. 기상청 (Korea Meteorological Administration), "기상월보", Report #11-1360000-000002-06, **2013/2014**.