선진국 환경시료은행의 특성 분석을 통한 국가환경시료은행의 발전방안

이종천* · 김명진

국립환경과학원 국가환경시료은행

Overview of the Leading Environmental Specimen Banks in the World and Future Challenges of the National Environmental Specimen Bank in Korea

Jong-chun Lee* and Myungjin Kim

National Environmental Specimen Bank at National Institute of Environmental Research

The ESBs (Environmental Specimen Banks) have monitoring functions for the contemporary environmental qualities and also offer the future generation tangible information on the past environment by preserving the specimens. This entails the sampling of the representative specimen for each distinctive ecosystem, which is performed under a strict and stipulated procedure and a condition that does not allow any change in the component so that a retrospective analysis can be readily done even in the distant future. It has been more than 30 years that some developing countries started collecting a broad spectrum of specimens to vindicate the effectiveness of an environmental policy and to monitor the long-term variations of background concentrations of environmental pollutants. Though being late, the National Institute of Environmental Research (NIER), Korea, has successfully launched the National Environmental Specimen Bank (NESB) in 2009 equipped with its state-of-the-art automated cryogenic tanks. Since then, the researchers at the NESB have been doing their best to excel the existing ESBs around the world by learning and improving the expertise. To do so, they conducted a pilot study for developing and testing their own Standard Operating Procedure (SOP) based on the analysis of the examples of the other ESBs. The problems from the pilot study had been reviewed to improve the SOP to meet the requirements for an ESB, that is to say, preserving representative environmental specimens in cryogenic condition and enhancing the analytical method. Furthermore, they also need to prepare themselves to address the future challenges by providing some additional functions, which makes it distinguishable from the other ESBs. If successful, this will be a step further to be recognized as a full-fledged member of the ESB society of the world.

Key words : environmental specimen bank, environmental monitoring, cryogenic storage, retrospective analysis

환경시료은행은 환경질(environmental quality)의 시공간적 변화를 모니터링 하는 역할 뿐 아니라 시료 자체를 장기 보존함으로써 후세에 과거의 환경을 직접적으로 검증할 수 있는 기회를 부여하는 기능을 가지고 있다. 이를 위해서 다양한 생태계의 환경을 대표할 수 있는 선정된 시료를 엄격하게 규정된 채취방법에 따라 채취하여 성분변화가 일어나지 않는 초저온상태에서 장기간 보관함으로써 미래 시점에서 회고적 분석(retrospective analysis)을 수행할 수 있는 시설이 요구된다. 선진국에서는 이미 30여 년 전부터 환경정책의 실효성을 입증하거나 시대별 환경배경농도의 변화를 모니터링 하기 위해 다양한 환경시료를 저장해 오고 있다. 우리나라에서 2009년 자동화된 초저온 저장시설을 갖춘 국가환경시료은행이 국립환경과학원의 연구진에 의해 설립되었다. 이를 계기로 선진국의 시료은행 운영 경험을 발전시켜 단시간 내에 정상케도에 안착시키려는 노력을 경주하고 있다. 아울러 그간 선진국의 운영 사례를 분석하고 이를 토대로 작성된 표준운영절차(SOP)에 따라 시험연구를 진행하고 있다. 이러한 과정에서 도출된 문제점을 분석하고 개선함으로써 환경을 대표하는 시료의 저장 및 분석이라는 기본적인 기능에 충실한 수행체계를 갖추어 나가고 있다. 그러나 이와 동시에 환경시료은행의 기능을 적극 응용하여 독자적 부가기능을 부여하는 청사진이 제시되고 이에 대한 실행방안도 요구되는 상황이다. 이를 계기로 국가환경시료은행이 명실공히 국제적인 환경기구로 인정받는 도약의 발판을 마련해야 할 것이다.

주요어 : 환경시료은행, 환경질 모니터링, 초저온저장, 회고분석

*Corresponding author: roundvoid@korea.kr

1. 서 론

환경시료(environmental specimen)라는 조그만 창으로 우리는 주위 환경을 들여다 보며 이해하고 환경변화에 대처하게 된다. 그러나 창이 방향이 어디로 나 있는지(what to analyze), 얼마나 잘 들여다 보이는 크기인지(sample size)에 따라 환경에 대한 우리의 이해가 달라지게 된다. 또한 같은 창 밖으로 내다 본 풍경이라도 보는 이의 관점에 따라 다른 해석을 불러일으키기도 한다. 그러나 일회적인 분석을 통해 생산된 데이터를 남기고 환경시료는 환경에 대한 재확인 기기와 함께 사라져 버린다.

이러한 문제를 해결하고자 환경시료은행(Environmental Specimen Bank, 이하 ESB)은 환경을 대표할 수 있는 시료(생물, 토양, 물, 공기 등)를 체계적으로 채취하여 초저온 보관을 통해 오랜 기간(수 십 년 이상)이 지난 후에도 성분상의 변화 없이 과거환경을 재현할 수 있게 하는 역할을 수행한다(Becker *et al.*, 2006).

시료의 선정, 채취 및 보관에 관한 일련의 과정은 표준운영절차(Standard Operation Procedure, SOP)에 의해 규정되고 철저히 준수된다. 채취된 환경시료는 장시간 보존이 가능하게끔 상시 액체질소(Liquid Nitrogen, 이하 LN)가 공급되어 영하 150°C 이하의 온도가 유지되는 저장고(LN Freezer)나 액체질소 보조 시스템이 장착된 전기냉동고(electric freezer)에 보관된다. 이러한 초저온 상태에서는 화학성분변화가 거의 일어나지 않는다. 따라서 오랜 시간이 지난 후에도 보존된 시료는 동일한 조건의 분석방법을 통해 한 지역과 한 지점을 대표하는 환경에 대한 배경농도를 설정하는데 쓰일 수 있다.

또한 이러한 과정을 거쳐 시대별로 축적된 시료는 과거로부터 미래시점까지의 환경변화에 대한 역추적을 가능케 하여 환경 변화에 대한 원인규명이나 대책마련을 위한 환경정책에 과학적이고 객관적 자료를 제공해 준다. 이와 더불어 새롭게 개발되는 분석기술을 적용함으로써 과거에는 밝히지 못했던 새로운 환경오염물질이 검출된다거나 과거 분석에서 고려되지 못한 화합물질에 대한 재 분석을 가능하게 해준다. 그 일례로 스웨덴 환경시료은행에서 저장 중이던 1967년에서 90년대에 걸쳐 채집된 어류시료에 대한 브롬화난연제(brominated flame retardant) 분석 결과를 들 수 있다. 과거에는 주목 받지 못했던 이 화합물은 67년에서 80년대 초반의 시료에 상당한 축적이 진행되었음을 보관 시료를 통해 후일 밝혀낼 수 있었다. 또한 저장중인 바다오리알(Guillemot eggs)에서도 69년과 90년 사

Fig. 1. Lead concentration in spruce (*Picea abies*) sprouts and poplar (*Populus nigra*) leaves in urban areas in Saarland, Germany (von Storch *et al.*, 2003).

이에 동 화합물의 유의적 증가를 관찰할 수 있었다(de Wit, 2002).

독일에서는 1971년부터 유연휘발유 사용을 제한하는 법안이 발효된 이후 환경시료은행에 보관된 나뭇잎 시료(독일가문비나무, 포플러)에서 납의 농도가 감소하는 경향이 분석결과에서 드러남에 따라 (Fig. 1) 환경정책의 성과를 입증하는 자료로 홍보되기도 하였다(von Storch *et al.*, 2003).

본 논문에서는 아직 우리나라 환경관련 연구분야에서 생소한 환경시료은행에 대한 이해를 도모하고자 과거 선진국에서 태동된 환경시료은행의 발전과정을 고찰하였다. 이어서 기능 및 시료선정 관점에서 타 환경저장시설과 구별되는 조건에 대해 관련 자료를 바탕으로 논의 하고, 이와 더불어 오랜 기간의 운영을 통해 검증된 선진국의 환경시료은행에 대한 기능과 역할을 비교 분석한 결과를 토대로, 최근 국립환경과학원 내에 최근 설립되어 운영되고 있는 국가환경시료은행의 미래 비전을 제시하였다. 이로써 동 분야에서 선진국과의 수 십 년 간의 기술적 격차를 조속히 극복하여 국경을 초월한 지구적 환경모니터링의 새로운 패러다임을 제시하기 위한 국제적 흐름에 동참하는 계기가 마련되기를 바라고 있다.

2. 환경시료은행의 역사

2.1. 환경시료은행의 태동

살충제가 환경에 미치는 부작용이 보고되기 시작한

1950년대 이후 미국에서 Rachel Carson이 쓴 '침묵의 봄(Silent Spring)'이 발표된 1962년 에 이르러 광범위하게 사용된 유기화합물질에 세간의 이목이 집중되기 시작했다. 이즈음 스웨덴에서는 박물관에 보관된 새들의 깃털을 분석한 결과 종자분의(種子粉衣, seed dressing)에 사용되는 수은이 농지에 서식하는 새들의 집단 폐사를 일으키고 있다는 것이 밝혀짐으로써 환경시료은행의 필요성이 처음으로 제기되기에 이르렀다. 즉, 스웨덴 국립자연사박물관에서 소장 중이던 조류 박제표본의 깃털을 시대별로 채취해서 분석한 결과 지속적인 수은 함유량의 증가가 관찰되었고 이것이 조류의 폐사에 대한 원인으로 지목될 수 있었다(Olsson and Bignert, 1997). 이 연구결과가 환경시료은행 설립의 기폭제가 되어 스웨덴에서는 국가적 차원에서 환경대표시료가 체계적으로 원상태를 보존하며 채취·보존되기 시작하였다. 따라서 이는 미래 시점에서 과거의 환경변화를 추적할 수 있도록 한다는 목표를 가진 최초의 근대적 환경시료은행으로 간주될 수 있다.

이후 1970년대 초 미국, 독일을 주축으로 한 여러 선진국가의 정부연구기관에서도 환경이 인체에 미치는 영향을 분석하기 위해 국가적으로 환경시료 및 인체시료를 초저온상태에서 보관하기 위한 시범사업들이 추진되기 시작했다. 그 결과 1977년에 '환경오염물질에 의한 인체영향평가를 위한 생물시료은행(The Use of biological specimens for the assessment of human exposure to environmental pollutants)'이라는 주제로 환경시료은행 관련 국제 워크숍이 최초로 개최되었다(Berlin *et al.*, 1977). 이 자리에서 환경을 대표하는 대상 시료의 선정기준, 보관 방법의 표준화, 저장시료의 활용방법에 대한 토론과 이에 대한 정보의 교환을 통해 초기 환경시료은행 시범사업(pilot studies)들이 추진될 수 있는 계기가 마련되었다.

2.2. 선진국의 환경시료은행

시범사업의 결과, 미국에서는 1979년에 국립표준기술원(National Institute of Standard and Technology, NIST)과 환경보호청(Environmental Protection Agency)의 공동 프로젝트로 출범하게 된 National Biomonitoring Specimen Bank(NBSB)가 메릴랜드(Maryland)주 Gaithersburg에 있는 NIST본부에 설치되었다. 이후 2001년에는 South Carolina의 Charleston에 해양환경시료은행(Marine Environmental Specimen Bank, MESB)이 추가로 설립되었다. 그러나 2011년 현재 NIST NBSB의 모든 설비와 시설이 Charleston에 있

는 MESB로 이전되어 통합운영 되고 있다(Fig.2).

해양환경시료은행이 위치한 Hollings Marine Laboratory는 2개 층에 총 3개 동이 연결된 형태로 2002년 준공된 이후 2008년 세 번째 동이 추가되었다. 건물 내에는 공동으로 입주하고 있는 5개 연구기관의 실험실이 있는데 이중 해양환경시료은행 관련 NIST의 시설은 다음과 같다.

- 유기분석실험실 (Organic Analysis Lab, 210 m²): 시료의 유기분석을 위해 전처리 시설을 갖춘 실험실이다. 자동화된 유기물질 추출시설인 SPE, PFE와 open-focused microwave extraction 장비가 있다. 분석기기로는 single quad GC-MS, GC-TOF-MS, tandem LC-MS-MS, linear ion trap LC-MS, MALDI-TOF등을 갖추고 있다.
- 무기분석실험실 (Trace Element Analysis Lab, 155 m²): 시료의 미량 무기물질을 분석하기 위한 전처리 시설 및 분석기기를 운영하고 있다. 보유장비로는 Microwave digestion system, Inductively coupled plasma mass spectrometer (ICPMS), ICP with optical emission spectrometry (ICP-OES), Isotope dilution cold vapor ICP-MS (ID-CV-ICPMS), ICPMS with ion and liquid chromatography (ICPMS-IC-LC), High throughput mercury analyzer, Laser ablation system for ICP-MS, ICPMS with gas chromatography (ICPMS-GC) 등이 있다.
- 핵자기공명분석기기실 (Nuclear Magnetic Resonance, 520 m²): 환경적 스트레스 유발물질(environmental stressors)에 의한 해양생물의 영향을 대사체학(metabolomics) 관점에서 연구하기 위해 핵자기공명분석기(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)를 운영하고 있다.
- 생물, 환경시료은행(Biological & Environmental specimen Bank, 242 m²) 및 표준물질 제작실험실(Reference Material Production Facility, 84 m²): 시료의 처리, 저장과정에서 시료의 성분변화를 야기할 수 있는 오염을 최소화 하기 위해 청정조건을 유지시키고 있다. 여기서 청정조건이란 무균(sterile) 상태를 의미하는 것이 아니라 공기중의 먼지와 같은 미세입자의 농도에 대한 기준에 관한 것이다. 청정조건은 ISO의 기준에 따라 유지되고 있는데, 시료은행 출입을 위한 준비실(Ante-Room)은 ISO Class 6이며 1입방미터당 0.5 µm 이상의 입자가 35,200개 이하여야 한다. 각종 초자, 기구

Fig. 2. Marine Environmental Specimen Bank, MESB, at Hollings Marine Laboratory in Charleston, SC, USA.

의 세척 및 계량 등을 위한 청정실은 ISO Class 5($\leq 3,520$ particles per m^3), 그리고 표준시료 (Reference material) 제작실 및 초저온 시료탱크가 있는 freezer room은 ISO Class 7($\leq 352,000$ particles per m^3)으로 유지되고 있다.

NIST의 환경시료은행은 자체 프로젝트 이외에 해양 환경 등 환경 모니터링을 위한 여러 정부기관의 다양한 프로젝트에 따라 정기적으로 채취된 시료를 비롯하여, 원유 유출과 같은 급작스런 환경사고시 주변에서 채취된 환경시료 등을 보관 하고 있는데, 보존된 시료의 회고적 분석(retrospective analysis)을 통해 장기간에 걸친 환경변화를 연구할 수 있게 해준다.

Fig. 3. German Environmental Specimen Bank at Fraunhofer IME.

독일은 1979년 독일연방내무부(German Federal Ministry of the Interior, BMI)와 독일연방연구기술부(German Federal Ministry of Research and Technology, BMFT)의 지원으로 시범사업(pilot project)이 실시되었다. 시범사업의 성공으로 1985년에는 정부 주관으로 환경시료은행이 영구적 시설로 탄생하게 되었는데(Fig. 3), 현재 독일연방환경자연보전 및 핵안전부(the German Federal Ministry for the Environment, Nature, Conservation and Nuclear Safety, BMU)의 소관사업으로 진행되고 있다. 환경시료은행의 관리 및 지도감독은 연방환경청(the Federal Environmental Agency, UBA)의 감독 하에 이루어지고 있지만 실제적인 운영 전반 업무는 5개 기관에서 수행하고 있다(Table 1).

Table 1. The institutions those are responsible for the organization and maintenance of the German Environmental Specimen Bank (German Federal Ministry for the Environment, 2003)

Institutions	Functions	Website
German Federal Environmental Agency UBA Berlin	<ul style="list-style-type: none"> Administration and co-ordination Central data maintenance (ESB Information System) 	www.umweltbundesamt.de
Fraunhofer IME Schmallenberg	<ul style="list-style-type: none"> Storage of environmental specimens Soil sampling Preparation of environmental specimens Inorganic analysis of environmental specimens Assessment 	www.ime.fraunhofer.de
University of Trier, Dept. of Biogeography	<ul style="list-style-type: none"> Sampling of environmental specimens Biometric investigation of environmental specimens Assessment 	www.uni-trier.de/~biogeo/
ERGO Forschungs- gesellschaft mbH, Hamburg	<ul style="list-style-type: none"> Organic analysis of environmental specimens 	www.ergo-enviro.de
FU Berlin, Dept. of Earth Sciences	<ul style="list-style-type: none"> Sampling of sediment/ suspended matter 	www.fu-berlin.de/einrichtungen/fachbereiche/geowiss/
University of Munster, Faculty of Medicine (UKM)	<ul style="list-style-type: none"> Storage of human specimens Sampling of human specimens and anamnesis Analysis of human specimens Assessment 	www.uni-muenster.de/UPB-Hum/ Welcome.html

Fig. 4. Environmental Time Capsule Building in National Institute For Environmental Studies (left) and its Cryo-tanks (right).

일본의 경우 정부차원뿐만 아니라 민간 연구기관에서도 환경시료은행이 운영되고 있다. 일본 환경부 소속 국립연구기관인 국립환경연구소(National Institute for Environmental Studies, NIES)는 1979년 환경시료은행 건립을 위한 시범사업으로 환경시료와 멸종위기종에 대한 유전자원을 영하 20°C의 냉동고에 저장하기 시작했다. 이후 2004년에 연구소 내에 액체질소를 이용한 탱크(영하150°C)에 저장할 수 있는 시설을 갖춘 ‘환경시료타임캡슐(Environmental Specimen Time Capsule Building)’로 재단장 하여 일본의 환경을 대표하는 시료를 장기간 보관할 수 있는 체계를 마련했다(Fig. 4).

또한 일본 에히메 대학 농화학과에서는 살충제에 의한 환경 오염을 연구하기 위한 수단으로 1965년부터 대기, 수질, 토양시료 및 생물시료를 채취, 저장하기 시작했다. 이렇게 시작된 환경시료의 저장작업은 현재까지 지속되고 있는데, 2002년에는 정부의 지원으로 es-Bank를 발족하여 시설 및 사업의 확장을 추진할 수 있었다. 이 시료은행은 다른 시료은행과는 달리 일본 내의 환경시료 뿐만 아니라 미국, 캐나다, 호주 등과 같은 선진국과 베트남, 태국, 인도 등의 개발도상국 등 30여 국가의 환경시료도 같이 저장하고 있는 점이 특징적이다(Tanabe, 2006).

2011년 현재 전 세계에는 우리나라를 비롯 17개 국 24개의 환경시료은행이 설립되어 운영되고 있다. 이 중에는 캐나다와 같이 야생동물을 대표적 환경시료로 하고 있는 경우(Canadian Wildlife Service Specimen Bank)와, 이태리와 같이 남극의 환경시료를 저장하고 있는 시료은행(Antarctic Environmental Specimen Bank)을 운영하는 경우 등 특수한 기능과 목적을 갖고 있는 시료은행도 있다. 프랑스와 영국 등도 시료은행

을 설립하였으며 중국도 상해와 북경에 각각 환경시료은행을 설립하고 있다.

3. 환경시료은행의 조건

각 나라별, 기관별 환경시료은행의 시설 특성은 운영 예산과 연구활동의 목적 등에 따라 구별된다. 그러나 환경시료은행이라면 기본적으로 갖추어야 하는 공통 조건이 있다. 이는 시료채취로부터 저장, 분석에 이르는 전 과정에 대한 표준운영절차가 규정되고, 이에 대한 기록이 문서 혹은 데이터베이스로 보관되어야 하고, 또한 오랜 기간 동안 시료의 성분 변화를 방지하기 위한 초저온 보관시설이 필요하다는 것이다.

2008년에 개최된 ISBER(International Society for Biological and Environmental Repositories, 생물환경 저장소 국제학회) 심포지엄에서는 시료은행 시설의 표준화를 위한 공통적 가이드라인이 제시된 바 있다(ISBER, 2008). 이에 대한 세부사항이 뒤에 논의 되겠지만, 시료은행의 설립 및 운영을 위해 기본적으로 고려해야 할 사항은 어떠한 시료를 무엇을 위해 채취하고 보관할 것이냐에 관한 시료은행의 기능 및 목적에 대한 명확한 이해이다. 미래 시점에서 과거 환경변화의 단초를 제공할 수 있는 시료선정에 대한 고민이 선행되어야 한다는 것이다. 이를 위해서는 환경변화에 따른 화학적 성분변화 및 생체농축 정도가 분석을 통해 명확히 유추될 수 있는 시료종이 선정되어야 하고, 이와 더불어 시료가 한 지역과 한 시점의 환경을 대표할 수 있게끔 채취방법이 고안되어야 한다.

이렇게 시료선정 및 채취과정, 저장시설에 관한 까다로운 기준을 충족시키는 시료라야만 이를 토대로 한 연구결과에 신뢰도를 부여할 수 있다. 이 밖에 환경시

료은행의 설립과 운영을 위해서는 연구직, 기술직 등으로 구성되는 조직에 관한 기준, 기록물 보관에 관한 기준, 시설운영, QA/QC, 안전관리, 교육, 시료의 포장, 이송, 가공 등을 포함하는 기준 등이 있겠으나 이어지는 절에서는 가장 중요한 시설과 시료선정에 관한 기준에 대한 구체적인 조건을 짚어보도록 한다.

3.1. 시설기준

ISBER(International Society for Biological and Environmental Repositories, 생물환경저장소 국제학회)에 따르면 (ISBER, 2008) 환경시료은행의 시설은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 시료가 오염되지 않도록 항상 깨끗한 공기 및 환경이 유지되도록 하는 청정시설의 구비이고, 또 다른 하나는 저장 시료의 성분 변화를 방지하는 초저온 저장시설의 가동이다.

이러한 시설이 운영되는 적정 실내 온도는 15~22°C이며 실내 습도의 상승 및 기화 질소로 인한 안전사고를 방지하기 위해 환기시스템을 항상 가동시켜야 한다. 이와 더불어 액체질소를 사용하는 저장탱크 주변에는 실내공기 중의 산소량을 항상 모니터링 하는 측정기를 설치해 안전사고에 대비하여야 한다.

환경저장시설의 각종 설비에는 전기공급이 항상 일정하게 유지되어야 하므로 정전에 대비하여 UPS(uninterruptible power supply)를 설치하여 각종 센서, 컴퓨터, 제어기 등이 끊김 없이 작동되도록 한다. 이와 더불어 자체 발전시설을 갖추어 놓고 최소 72시간의 정전에도 가동할 수 있는 충분한 연료를 항상 저장해 놓아야 한다.

시료는 종류와 목적에 따라 저장 시설을 달리 할 수 있는데, 장기 보존을 위해 액체질소를 사용하는 액체질소 저장고와 액체질소를 보관시스템으로 하는 기계식 냉동고(Mechanical Freezer), 그리고 백신과 같은 저온 냉장이 필요한 경우에 쓰이는 냉장고가 있다.

먼저 액체질소저장고(Liquid Nitrogen Freezers, 이하 LN Freezer)는 초저온 보관(cryogenic storage)을 위해 사용되는데 기상저장(vapor phase storage)과 액상저장(liquid phase storage)으로 나눌 수 있다. 기상저장은 액체 질소가 기화될 때 700에서 800배의 부피 팽창을 하며 시료의 상변화(phase transition)를 막을 수 있는 유리화 온도(liquid-glass transition temperature, T_g) 이하의 온도가 유지되며 액체질소보다 안전하므로 초저온 보관을 위해 주로 사용된다. 초저온을 유지하기 위한 액체질소는 항상 공급되어야 하므로 액체질소가 저장되는 탱크의 잔량이 상시 모니터링 되어야 한

다. 시료은행 가동에 필요한 3일간의 사용분이 저장탱크 용량의 20%가 되도록 탱크의 용량이 설계되어야 하고 최소한 그 잔량이 유지되어야 한다.

LN Freezer에 액체질소를 공급하는 파이프시스템에는 과도한 압력으로 파이프가 파괴되는 것을 방지하기 위한 자동 밸브가 있는데 이것이 작동되는 경우 급작스런 대기온도 강하로 인한 “whiteout” 현상이 발생할 수 있다. 이 경우 시계(visibility)가 차단되고 산소량이 급감하는 위험한 상황이 발생하게 된다. 따라서 평상시 훈련을 통해 이러한 상황에서 착용하는 자체 호흡기구(self contained breathing apparatus) 사용법 및 대피방법 등을 연구자 및 직원에 주지시켜 만일의 사태에 대비하도록 한다.

3.2. 시료선정 조건

환경시료은행에서 저장되는 시료는 생태계의 먹이사슬을 구성하는 생물의 일부 또는 전부를 대상으로 하는 생태시료와 강, 호수 등의 저질(sediment) 및 수질 시료와 토양 및 대기 등의 환경매질이 대상이 될 수 있다. 선정된 시료에 대한 채취방법(sampling methods)은 시료의 환경 대표성(representativeness)을 확보하기 위해 시료의 선정조건만큼 중요하지만 본 논문에서는 시료의 종류를 선정함에 있어 중요한 기준이 무엇 인지를 중점적으로 다루어 본다.

시료선정에 있어 가장 중요한 조건은 시료가 환경을 얼마나 잘 대표할 수 있는가에 있다. 예를 들어 공해물질이 생태계에 유입되는 경로와 전이과정이 선택된 생물시료의 분석을 통해 규명될 수 있다면 이 생물종은 시료로서 최상의 기준을 만족시키게 된다. 그러나 한 생물종이 다양한 경로로 유입되는 여러 공해물질에 반응하고 그 결과가 생체내에 축적됨으로써 이에 대한 분석결과를 통해 생태계의 영향을 모니터링 하기란 불가능 한 일이다. 따라서 다양한 오염물질에 대한 특정 반응(축적 및 물리 화학적 변형)을 보이는 생물종을 선별하여 시료로 활용할 수 있는 안목이 절대적으로 필요하다. 이를 위해서는 시료 대상 생물종의 환경생리적 특성에 대한 심도 있는 선행 연구가 바탕이 되어야 함은 당연한 일이다.

대부분의 환경시료은행에서는 이와 같은 이유로 생태계로 유입되는 다양한 공해물질을 그물망과 같이 빠짐없이 걸러낼 수 있도록 여러 생물종을 대상시료로 지정해 놓고 있다. 이를 위해 일반적으로 생태계를 구성하고 있는 각 영양단계(trophic level)를 대표하는 종을 선별하는 방법이 사용된다(Fig. 5). 그러나 지역마다

Fig. 5. Structure of an ecosystem as the basis for specimen selection (Klein, 1993).

각기 다른 상태의 생태계가 형성되어 있는 경우 한 지역의 생태계에서 한 수준의 영양단계를 대표할 수 있는 종이 다른 모든 생태계에서도 대표종으로서 존재한다는 보장은 없다. 이러한 경우 동일 영양단계를 구성하는 생물종 중에서 유사한 기능을 가진 다른 생물종이 선택된다(Klein, 1993).

독일 환경시료은행의 경우 대상 생물종 선정에 고려되어야 할 기준을 다음과 같이 명시하고 있다(German Federal Environment Agency, 2008).

- 넓은 지역에 분포하며 충분히 확보 가능한 종
- 특정생태계의 기능을 담당하며 한 지역이나 서식지에 머무르는 종
- 유전적 정체성(genetic identity)이 확보되고 관련 정보가 풍부한 종
- 노출이 되는 공해에 충분한 저항성을 가지는 종
- 종 구분이 용이할 것

동물의 경우 이주성(migratory)인 동물은 정주성(resident) 동물에 비해 한 지역의 장기적 환경변화를 연구하기에 적당한 대상종이 아닐 것이다. 특히 동물종 선정시에는 성별(sex), 연령, 채취 시기, 채취 지역, 영양상태 등이 고려기준에 포함되어야 한다(Olsson and Bignert, 1997). 이러한 요소들은 오염물질이 생체내에 축적되는 과정에서 각 개체에 다른 영향(biological variability)을 미칠 수 있기 때문이다. 이로 인한 차이로 생태계의 환경질 평가에 오류를 일으킬 수 있으므로 시료 대상 확정 이전에 환경에 따른 생물의 생리학적 반응에 대한 세심한 검토가 필요하다(Bignert *et al.*, 1994).

그러나 다시 강조하지만 대상종 선정을 위한 가장 기본적인 명제는 어떠한 목적을 위해 어떠한 시료를 어떻게 채취해야 하는가에 대한 물음에 논리적이고 명확한 설명이 뒷받침되어야 한다는 점이다. 다시 말해 특정 공해물질이 생태계에 유입이 될 때 그 경로상에 노출되어 있는 생물은 어떤 것들이 있고 그 중에서 공해물질이 생물에 축적되는 생리적 과정이 잘 규명되어 있는 종이라야만 저장시료로서의 가치가 합리화될 수 있게 되는 것이다(Odsjo, 2006). 이와 더불어 시료 채취의 용이성, 시료로서 충분한 양이 확보될 수 있는가에 대한 검토도 시료 선정에 필수적으로 따져보아야 할 기준이 된다(Rossbach *et al.*, 2001).

3.3. 우리나라 국가환경시료은행 현황

우리나라도 09년 12월에 3년 간의 공사 끝에 환경부 소속 국립환경과학원에 국가환경시료은행이 준공(Fig. 6) 됨에 따라 늦었지만 세계 유수의 환경시료은행과 견줄 수 있는 기반이 마련되었다. 이후 지난3년간 해외

Fig. 6. National Environmental Specimen Bank at NIER, Korea (left) and vertical liquid nitrogen storage tank (right).

Fig. 7. LN Freezers (left) and electric freezers (right) in the National Environmental Specimen Bank at National Institute of Environmental Research, Korea.

Fig. 8. ISO Class 7 Clean Room for Cryo-milling (left) and sampling treatment in Cryo condition (right).

사례를 기반으로 우리나라 생태계에 적합한 표준운영 절차를 작성하였고 이를 시험하는 단계에 이르렀다.

선진국 표준운영절차의 활용사례 분석을 통해 2008년에는 환경시료은행 표준운영절차(안)를 작성하고 2009년에 이를 바탕으로 한 시험연구(pilot study)가 진행되었다(Kim *et al.*, 2009). 2010년에는 작성된 표준운영절차에 따라 소나무와 잣나무 가지, 신갈나무 잎, 집비둘기 알, 잉어 근육 등 5종의 육상 및 하천생태시료를 채취하고 초저온 냉동고에 보관하는 본격적인 시험연구를 수행하였다(김명진 등, 2010). 2011년부터는 소나무 가지, 느티나무 잎을 추가하여 총 7종의 지침을 활용하여 시료를 체계적으로 채취, 분쇄, 저장하여 연도별 회고분석을 위한 기틀을 마련하고자 연구가 진행 중이다.

국가환경시료은행은 지하 1층, 지상 2층 규모(2,340 m²)의 건물로 액체질소가스를 이용하여 -150°C 초저온 냉동상태로 100~150년 동안 시료를 보관할 수 있는 초저온저장탱크 74기가 연차별 계획에 따라 설치될 예정이다(Fig. 7). 현재 19기의 저장용 탱크는 옥외의 액체질소가스 저장고(Fig. 6, right)에서 자동적으로 액체질소를 공급받고 있는데, 저장탱크의 온도 및 액체질소의 양이 항상 모니터 되고 있다. 앞으로 2030년까지 생태계를 대표하는 14종, 40만점이 저장될 수 있는 용

량을 확보할 예정이다. 국가환경시료은행에는 고효율 공기청정기능이 수반되는 동결분쇄실(ISO Class 7 Clean Room, Fig. 8, Left), 시료제조실(ISO Class 5 Clean Room), 정밀분석실(Fig. 8) 등이 설치되고, 보관되는 시료는 바코드로 DB화되며, 입출입을 기록하는 프로그램을 갖춘 최첨단시설로 운영된다.

4. 우리나라 국가환경시료은행의 미래발전방안

우리나라 국가환경시료은행의 준공과 더불어 수행된 시험사업(pilot study)의 결과로 표준운영절차(SOP)가 제정되어 2009년 5종의 육상 및 하천생태시료를 대상으로 본격적인 시험연구가 진행되었다(Kim *et al.*, 2010). 이어서 2010년부터는 소나무 가지 및 느티나무 잎을 포함 총 7종의 지침이 작성되어 저장시료에 대한 연도별 회고분석을 위한 기틀을 마련하고자 연구가 진행 중이다. 아직 걸음마 단계에 있지만 우리나라의 환경시료은행이 빠른 기간 내에 다른 선진국의 환경시료은행과 대등한 위치를 점하기 위해서는 현재 진행하고 있는 환경시료 저장사업 뿐만 아니라 미래지향적인 부가기능을 확충할 필요가 있다.

세계적인 환경시료은행의 운영 및 활용에 관한 다양

Table 2. Facilities of National Environmental Specimen Bank at NIER, Korea

Main facilities	
■ 1 st Floor: 1,305.18 m ²	Cryogenic freezer room: for 74 LN ₂ Tanks (currently 19 tanks)
	Main control room
	Sample preparation room: ISO5 class clean room
	Cryo-mill: ISO7 class clean room
	Mechanical freezer room
■ 2 nd Floor: 882.57 m ²	Organic and inorganic labs: UPLC, ICP-MS
	Air conditioning control room
■ Outdoor	LN ₂ storage tank

Fig. 9. UPLC for Organic Analysis (left) and ICP-MS for Inorganic Analysis (right) in the National Environmental Specimen Bank.

한 자료를 검토해 본 결과 현재 시점에서 우리 국가환경시료은행이 주 목적으로 삼고 있지는 않지만 향후 동 시설을 극대화 하여 활용할 수 있는 추가기능의 예를 찾아볼 수 있었다. 그 중에서 우리나라의 환경시료은행이 운영 목적에서 벗어나지 않으면서 향후 예산과 인력지원이 현실화 될 때 추진 가능한 추가 연구분야에 대한 미래의 청사진을 제시해 보고자 한다.

4.1. 환경오염사고 모니터링

미국이나 독일의 경우 저장되는 환경시료는 대상 중 에 따라, 아니면 관련 프로젝트에 따라 채집시기, 채취 방법 및 운송 등에 대해 표준운영절차가 각각 다르게 규정되어 있다. 그러나 정해진 프로토콜에 의한 정기적인 시료채취라기 보다는 그때그때 상황에 맞추어 환경시료를 채취하는 경우도 찾아볼 수 있다(Koizumi *et al.*, 2009).

물론 정해진 목적에 따라 선정된 채취대상을 정기적으로 채취하는 것은 장기적 환경모니터링을 위한 가장 기초적이고 중요한 환경시료은행의 역할이라 할 수 있다. 그러나 예를 들어 해양 유류 유출사고와 같은 급작스런 환경사고의 경우 사고 전 후의 환경질 변화를 모니터링하기 위해 환경시료를 사고지역 인근에서 채

취하여 보관 하기도 한다. 이를 위해 냉동 보관된 시료를 이용해 환경복원을 위한 환경정화(remediation) 작업의 QA(quality assurance)의 방편으로 사용하고 향후 오염원인과 피해상황을 밝히기 위한 증거로 보존하기도 한다.

실제로 미국의 경우 1989년 알래스카에서 Exxon Valdes 호에 의한 원유유출사고 발생시 그 지역에서의 홍합과 어류, 해양퇴적물 등의 환경시료를 채취하여 저장함으로써 사고에 의한 환경피해를 모니터링 한 예가 있었다(Becker and Wise, 2010). 최근에는 2010년 8월 미 멕시코만에서 발생한 석유시추선 Deepwater Horizon의 폭발사고 당시 주변 해류의 영향권 내에 있는 연안에서 홍합시료를 채취하여 환경시료은행에 저장하였는데, 미국 해양오염을 모니터링 하기 위한 기존 Mussel Watch 프로그램에서 확보된 이 지역의 배경농도와 비교하여 오염확산 범위를 판단하고 향후 환경영향 모니터링에 활용하기 위한 기초자료로서 활용할 수 있다.

이 밖에 해안으로 밀려들어오는 돌고래 사체와 같은 해양포유동물은 해부를 거쳐 근육 및 장기의 일부를 채취해 시료은행에 보관하기도 하는데, 이를 분석하여 환경인자에 의한 영향 여부를 조사하고 또 환경오염물질의 생체농축을 모니터링 하기 위한 중요한 시료로

활용하기 위함이다.

아직 우리나라 국가환경시료은행의 표준운영절차에는 급작스런 환경사고나 원인불명의 환경오염에 의한 피해지역에서 환경시료를 채취해 장기보관하기 위한 매뉴얼이 포함되어 있지 않다. 그러나 국가적인 환경질 모니터링에 대응하기 위한 시료은행의 운영 목적에도 부합 되듯이 향후 시료은행이 안정적 궤도에 들어서는 시점에서는 심각한 환경사고에 의한 오염시료와 인근 지역의 배경시료도 함께 채취해 보관하는 방안을 마련해 둘 필요가 있다. 이로써 환경사고의 증거 보존 및 환경복원기술의 환경오염정화능력 효과를 평가할 수 있는 기초 자료의 보존이 가능해 지기 때문인데, 일련의 과정을 체계적으로 규정하여 환경사고에 관한 위기대응매뉴얼에 포함시키는 방안을 장기적인 관점에서 수립해 나가야 할 것이다.

4.2. 환경시료은행의 시료를 이용한 현재환경 모니터링

환경시료은행은 기반시설 투자뿐만 아니라 시료의 초저온보관을 위한 유지비용이 적지 않게 요구되는 사업이다. 사업의 근본 취지에 따라 가장 큰 효과는 수 년, 수 십 년이 지난 미래시점에서 기대될 수 있을 것이다. 그러나 독일의 경우 채취된 시료를 초저온 보관과 동시에 그 일부에 대한 화학분석을 실시하여 채취된 시료의 특성을 기록하고 있으며 그 결과는 웹을 통해 공개되고 있다(Paulus *et al.*, 2010).

대개의 경우 현재 혹은 실시간 환경모니터링을 위해 채취되는 시료는 분석과 함께 폐기된다는 점을 상기할 때 환경시료은행의 시료를 이용한 환경모니터링은 추후에도 검증이 가능하다는 장점이 있다. 또한 환경시료은행의 대상시료는 선정 당시부터 전국의 오염상황에 대한 배경농도를 모니터링 하기 위한 목적도 포함되어 있기 때문에 저장과 동시에 시료의 특성을 기록하기 위한 방편으로 분석을 병행한다면 이를 근거로 환경질 변화에 대한 정책자료로서의 즉각적 활용이 가능한 부분이다. 즉 환경시료은행의 활용도를 수 년, 수 십 년 이후의 미래시점으로 미루지 않더라도 현재 투자되는 비용의 일부를 동시 분석에 이용한다면 그 효용가치를 현재형으로 전환시킬 수 있는 방법이 될 수 있다.

물론 이를 위해서는 시료의 채취 및 처리, 보관에 주로 투자되는 예산에 더해져서 독립된 분석시설 확충 및 분석 역량의 제고라는 과제가 선행되어야 하는 문제가 있다. 이는 환경시료은행의 시료에 대한 정밀한 분석에 의해 환경변화의 단초가 제공됨을 고려할 때,

이 부분의 투자는 미래환경을 위한 선행 투자로서 가치를 확보할 수 있을 것이다. 미국의 경우 환경시료은행은 핵자기공명(NMR)을 이용한 분석장비 등 최첨단 분석기기와 연구인력을 환경시료은행의 운영을 위해 투자하고 있는데 그 이유를 바로 여기에서 찾아볼 수 있다.

우리나라의 국가환경시료은행도 시료의 저장 시설뿐 아니라 유기분석실 및 무기분석실(Fig.9)을 갖추고 저장시료에 대한 최적의 분석조건을 찾고자 매진하고 있다. 그러나 아직 예산 및 전문인력 확보에 어려움이 있어 저장시료를 이용한 현재 환경 모니터링이 본격적으로 수행되기에는 미진한 상태이다. 그러나 이에 대한 대안으로 타 부서의 기존 분석시설 및 연구인력을 활용하거나 이와 연계한 공동연구도 고려해 보는 것도 제한된 여건을 극복할 수 있는 하나의 방법이 될 것이다. 그렇지만 궁극적으로 환경시료은행에는 지속가능한 연구능력이 필수적인 만큼 자체연구인력의 보강을 통한 분석능력 배양에 최선의 노력을 경주하고 있다.

4.3. 생물의 유전적 정보 보존

환경시료은행의 대상 시료 중 생물시료의 선정 기준은 앞에서 다루었듯이 지역 대표성과 확보가능성을 토대로 하고 있다. 즉 주변 환경에서 흔하게 서식하는 생물이어야 한다는 것이다. 그러나 이러한 일반적인 측면에서의 선정 기준과는 달리 특수한 상황의 생물종을 채취대상으로 고려해 볼 수도 있다.

예를 들면 희귀종 및 멸종위기종이 그것인데, 많은 경우 이들이 멸종단계에까지 이르는 기간은 무척 짧고 또 일단 멸종이 되고 나면 동일 생물종에 대한 새로운 정보는 더 이상 존재하지 않게 된다. 그러므로 멸종위기종에 대한 연구를 위하거나 한 생물종의 급격한 감소에 대한 원인규명을 위한 목적으로 대상종을 선정할 수도 있다(Olsson and Bignert, 1997).

이러한 경우 채취된 시료에 대한 유전정보(genetic information)의 보존을 위해서는 초저온 저장시설을 갖춘 환경시료은행만큼 적합한 시설을 찾아볼 수 없다. 이 때문에 여러 환경시료은행에서 야생동물의 질병연구, 생물다양성 분야와 생태계의 조직과 기능연구와 같은 기초 생태학 연구를 비롯하여 유전학 연구를 위해 세포와 혈청 등을 저장할 수 있도록 시설을 확충해 나가고 있다(Becker and Wise, 2010). 따라서 이 또한 우리나라 국가환경시료은행의 생태계 보존 부분의 미래 전략을 위해서 관련 기관과의 전략적 제휴를 고려해 볼 필요가 있는 부분이다.

4.4. 표준환경시료의 제작

환경시료은행은 그 운영과정이 엄격한 표준운영절차에 의해 규정되고 문서화 되기 때문에 이러한 이점을 살려 몇 국가에서는 환경시료은행에 환경분석에 필수적인 표준시료(Certified Reference Material, CRM)를 자체 제작하는 기능을 부가하기도 한다(Wise *et al.*, 2006). 이러한 표준시료의 종류는 환경매체를 대표하는 매질이나 시료 중 대량확보가 가능한 시료로서 가능한 환경시료은행 보관 시료와 동일하며 채취 및 보관에 관한 SOP를 준수하며 제작되는 것이 일반적이다(Stoepler *et al.*, 1987). 그 이유는 미래 시점에서의 저장시료 분석을 위해서는 저장시료의 매질(matrix)과 최대한 유사한 화학성분 및 성질을 가진 표준시료가 분석과정의 통계적 처리(bias 제거 등)에 가장 적합하기 때문이다.

이렇게 환경시료의 분석에 필수적인 환경표준시료는 제작 및 보관의 어려움과 인증 조건의 까다로움 때문에 제작하는 곳이 많지 않고 또 상당히 고가로 판매되고 있다. 예를 들어 미국 환경시료은행에서 제작하고 표준기술원(NIST)에서 판매되고 있는 혼합시료(Serial No. 1974b)의 경우 8-10 g씩 담겨있는 유리병 5개 묶음이 \$790에 판매되고 있다. 환경시료의 종류 및 매질이 다른 경우 가장 비슷한 표준물질을 따로 구입해 사용해야 하며 이를 구입하는 과정 및 비용 또한 시료분석에 상당한 부담을 차지하고 있다.

우리나라 국가환경시료은행에서도 한번에 대용량의 시료를 초저온 상태를 유지하며 분쇄, 균질화 시킬 수 있는 장비인 대용량 초저온 분쇄기(Cryo-Mill)가 도입될 예정이다. 향후 이러한 국가환경시료은행의 기반시설과 시료분석을 위한 인증실험실이 연계된다면 우리나라도 표준시료를 자체적으로 대량 생산 할 수 있는 기반이 마련될 수 있을 것이다. 결과적으로 환경시료은행의 활용도 및 국제적 신인도가 제고되고 환경표준시료 국산화 및 수출도 기대할 수 있는 일석 이조의 국가적 사업이 될 수 있을 것이라 기대해 본다.

4.5. 국제협력

마지막으로 우리나라 국가환경시료은행이 정상화 된 미래시점에서 더욱 의미 있는 분야라 할 수 있지만 현재 시점에서도 소홀히 할 수 없는 분야로 국제공조를 예로 들 수 있다. 선진국이 일찍이 30여 년 전부터 구상하고 설립해 추진해 온 동 사업을 우리나라는 그들의 경험을 토대로 단기간 내에 본 체도에 진입시킬 수 있었다. 여기에는 시설의 설계 및 표준운영절차의 설계에 조언을

아끼지 않고 지원해 준 독일, 미국, 일본의 환경시료은행 연구진이 있었다. 특히 미국 국립표준기술원의 환경시료은행은 한국의 국가환경시료은행의 조속한 정상화를 위해 저자의 파견근무를 허가해 주는 등 우리나라 환경시료은행의 운영에 상당한 밑거름을 제공 하였다.

일본의 에히메대학과 일본환경연구소(NIES)도 외국의 연구자를 영입해 공동연구를 진행하고 자국의 환경시료뿐 아니라 세계 각지의 연구자들과 연계해 환경시료를 채취하여 이송, 보관하는 프로젝트를 다년간 진행하고 있다. 이러한 국제적 공조에 따른 역량강화는 향후 지구적 환경변화에 대처하기 위한 주도권을 확보할 수 있다는 점에서도 상당히 주목할 만 하다. 아울러 세계 각국의 환경시료은행의 체제를 단일화 하는 세계환경시료은행의 설립에 관한 제의와 논의가 계속 진행되던 지난 30여 년 동안 일본은 독자적으로 여러 나라와의 제휴를 통해 연구를 꾸준히 진행하고 있었다. 이렇듯 일본 환경시료은행이 국내환경을 벗어나 지역적, 지구적 차원의 환경시료은행을 자체 운영한 경험은 환경시료은행 관련 국제심포지엄 등에서 계속 발표되고 있는데, 이에 필적할 만한 국제공동연구는 아직 다른 나라의 환경시료은행에서는 찾아보기 힘든 상황이다. 이에 따라 환경시료은행간 국제공조에 일본의 환경시료은행이 주도적 역할 수행하는 것은 자연스런 결과이다.

한편 동남아 국가를 위시한 개발도상국에서도 환경시료은행의 필요성에 대해서는 절감하고 있으나 여건상 설립과 운영이 어려운 처지이다. 우리나라도 선진국의 경험을 전수받아 단기간 내에 본격적 운영이 가능할 수 있었던 것처럼 아직 환경시료은행이 없거나 건립하고자 하는 국가에 대해 그간의 경험을 공유해야 할 때가 올 것이다. 더욱이 환경에는 국경이 없다는 것을 감안할 때, 이러한 협력을 통해 설립된 환경시료은행들이 향후 환경모니터링을 위한 지구적 네트워크를 형성한다면 지구적 차원의 환경문제에 대한 해답을 제시해 주는 시설로 새로운 평가를 받을 수 있을 것이다.

5. 맺음말

남극의 빙하에 지난 세월의 환경변화가 기록되어 있듯이 환경시료은행은 현재와 과거를 잇는 박제된 환경을 보존하는 역할을 수행한다. 이를 이용해 무엇을 어떻게 분석하는가는 시대의 요구 및 기술 수준에 달려 있다. 미국, 독일, 일본을 위시한 선진국에서는 이미 30여 년 전부터 환경모니터링의 방편으로 환경을 대표할 수 있는 시료를 선정, 표준운영절차에 따라 채취하

여 초저온 보관하는 환경시료은행을 운영하며 시대별 환경배경농도 계산, 환경정책의 검증, 환경표준시료의 제작, 환경오염인자 분석 등 다양한 방면으로 활용하고 있다. 우리나라도 3년 여의 준비 끝에 환경부 국립환경과학원에 국가환경시료은행이 2009년 12월에 준공됨으로써 우리나라 환경을 대표하는 시대별, 지역별 생체시료를 기반으로 미래지향적 환경모니터링이 가능하게 되었다. 시작은 선진국에 비해 비록 늦었지만 기존 환경시료은행들의 운영상 문제점 등을 분석하여 보완, 개선함으로써 최첨단의 운영체계를 확립하고 시행할 수 있는 좋은 여건이 마련되었다. 국가환경시료은행이 여러모로 부족한 현재 여건 속에서도 임지를 확고히 다지기 위해 주어진 본연의 역할에 충실해야 함은 물론이지만 아울러 시설의 활용도를 극대화 하는 노력을 통해 미래의 세대에 남겨줄 환경 유산으로 자리매김 하는데 더욱 매진해야 할 것이다.

참고문헌

- Becker, P.R., Gunter, E.W., Schluter, C., Shibata, Y. and Wise, S.A. (2006) Environmental specimen banking. *Journal of Environmental Monitoring*, v.8, p.776-778.
- Becker, P.R. and Wise, S.A. (2010) Thirty Years of Progress in Environmental Specimen Banking. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Environmental Specimen Bank*. T. Isobe, K. Nomiyama, A. Subramanian and S. Tanabe, Eds. TERRAPUB, v.4, p.7-14.
- Berlin, A., Wolff, A. and Hasegawa, Y. (1977) Commission of the European Communities. Health Safety Directorate, United States. Environmental Protection Agency and World Health Organization. The Use of biological specimens for the assessment of human exposure to environmental pollutants: proceedings of the International Workshop at Luxembourg, 18-22 April 1977. International Workshop on the Use of biological specimens for the assessment of human exposure to environmental pollutants, Luxembourg, M. Nijhoff for the Commission of the European Communities.
- Bignert, A., Olsson, M., Wit, C., Litzén, K., Rappe, C. and Reutergårdh, L. (1994) Biological variation — an important factor to consider in ecotoxicological studies based on environmental samples. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, v.348(1), p.76-85.
- de Wit, C.A. (2002) An overview of brominated flame retardants in the environment. *Chemosphere*, v.46(5), p.583-624.
- German Federal Environment Agency (2008) German Environmental Specimen Bank-Concept. Berlin: 27.
- German Federal Ministry for the Environment, N. C. a. N. s. (2003) The German Environmental Specimen Bank. K. Lehnigk and U. Hommen.
- ISBER (2008) Collection, Storage, Retrieval and Distribution of Biological Materials for Research. *Cell Preservation Technology*, v.6(1), p.3-58.
- Kim, M., et al. (2010) Application of SOPs(Standard Operating Procedures) in National Environmental Specimen Bank(1) NIER No. 2010-88-1263.
- Kim, M., Kim, J., Cho Y. and Yoo B. (2009) Environmental Specimen Bank and Ecosystem Assessment. *J. of Environmental Impact Assessment*, v.18, p.429-434.
- Klein, R. (1993) The animal specimens of terrestrial and limnetic ecosystems in the environmental specimen banking program of Germany. *Science of the Total Environment*, v.140, p.203-212.
- Koizumi, A., Harada, K., Inoue, K., Hitomi, T., Yang, H.-R., Moon, C.-S., Wang, P., Hung, N., Watanabe, T., Shimbo, S. and Ikeda, M. (2009) Past, present, and future of environmental specimen banks. *Environmental Health and Preventive Medicine*, v.14(6), p.307-318.
- NIES. Time Capsule Program for Environmental Specimens. <http://www.nies.go.jp/timecaps1/indexE.htm>, last updated 2010.11.11.
- Odsjo, T. (2006) The environmental specimen bank, Swedish Museum of Natural History - A base for contaminant monitoring and environmental research. *Journal of Environmental Monitoring*, v.8(8), p.791-794.
- Olsson, M. and Bignert, A. (1997) Specimen banking -- A planning in advance. *Chemosphere*, v.34(9-10), p.1961-1974.
- Paulus, M., Quack, M. and Teubner, D. (2010) Climate Impact Research-Contributions and options of the German ESB. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Environmental Specimen Bank*. T. Isobe, K. Nomiyama, A. Subramanian and S. Tanabe, Eds. TERRAPUB p.95-101.
- Rosbach, M., Giernich, G. and Emons, H. (2001) Representative sampling and sample preparation in biological environmental monitoring using spruce shoots. *Journal of Environmental Monitoring*, v.3(3), p.330-334.
- Stoeppeler, M., Backhaus, F., Schlodt, J. D. and Commerscheidt, N. (1987) Environmental Specimen Bank Specific Reference Materials - Main Aims and Preparation. *Fresenius Zeitschrift Fur Analytische Chemie*, v.326(7), p.707-711.
- Tanabe, S. (2006) Environmental Specimen Bank in Ehime University (es-BANK), Japan for global monitoring. *Journal of Environmental Monitoring*, v.8(8), p.782-790.
- von Storch, H., Costa-Cabral, M., Hagner, C., Feser, F., Pacyna, J., Pacyna, E. and Kolb, S. (2003) Four decades of gasoline lead emissions and control policies in Europe: a retrospective assessment. *The Science of The Total Environment*, v.311(1-3), p.151-176.
- Wise, S., Poster, D., Kucklick, J., Keller, J., VanderPol, S., Sander, L. and Schantz, M. (2006) Standard reference materials (SRMs) for determination of organic contaminants in environmental samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v.386(4), p.1153-1190.