환경영향평가 Vol. 25, No. 6(2016) pp.466~476 J. Environ. Impact Assess. 25(6): 466~476(2016) ISSN 1225-7184
https://doi.org/10.14249/eia.2016.25.6.466

Research Paper

준설물질 유효활용 및 처분을 위한 평가에 있어 생체지표 활용의 재고

원은지* · 최진영* · 김경련*,**
한국해양과학기술원 환경기반연구센터*, 과학기술연합대학원대학교 해양융합과학과**

Significance of Biomarkers in the Assessment of Dredged Materials for Beneficial Reuses and Disposal

Eun-Ji Won* · Jin Young Choi* · Kyoungrean Kim*,**
Korea Institute of Ocean Science and Technology*, University of Science and Technology**

요 약 : 준설은 수저퇴적물을 관리하는 데에 있어 유용한 공법 중 하나로 수심유지, 수환경관리 등 다양한 목적으로 사용되며 준설사업에서 발생되는 수저준설물질(주로 토사 성분)은 임의로 폐기물로 간주되어 폐기물 배출해역에 투기되어왔다. 그러나 준설물질은 여러 목적의 토목사업의 재료로 사용할 수 있기 때문에 준설물질을 자원화할 수 있도록 제도적으로 보장해 줄 필요성이 대두되고 있다. 최근 퇴적물을 평가하는 데에 있어 기존의 오염물질 함량 기준이 생물 영향과 직접 연관되지 않는 한계를 극복하기 위해 생체지표 연구가 수행되고 있다. 생체지표는 오염물질의 노출과 영향을 진단하는 지표로서 다양한 연구에 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 퇴적물의 위해성 평가에 있어 생체지표를 활용하는 것이 가지는 장점을 보여주고 생체지표를 활용한 해양퇴적물의 오염 및 건강성 그리고 준설물질의 처리와 유효활용을 위한 의사결정에 있어 그 유용성을 보여주고자 한다.

주요어 : 준설물질, 유효활용, 위해성평가, 생체지표, 해양생물

Abstract : Dredging is inevitably necessary for the management of water infrastructure such as waterways and polluted bottom sediment. Dredged material management options may be offshore dumping, wetland creation, beach nourishment and various other engineering uses depending on the given circumstances at the time of dredging. Among those options, wetland creation and beach nourishment are the preferred ones in Korea considering significant loss of wetland and beach erosion due to various development projects along the coastal region. In order to use dredged material beneficially, however, dredged material needs to be assessed its suitability with respect to

First Author: Eun-Ji Won, Marine Chemistry & Geochemistry Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 15627, Korea, Tel: +82-31-400-7734, E-mail: ejwon@kiost.ac.kr
Corresponding Author: Kyoungrean Kim, Marine Chemistry & Geochemistry Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 15627, Korea, Department of Integrated Ocean Sciences, University of Science and Technology, Ansan 15627, Korea, Tel:+82-31-400-6185, E-mail: kyoungrean@kiost.ac.kr
Co-Author: Jin Young Choi, Marine Chemistry & Geochemistry Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 15627, Korea, E-mail: jychoi@kiost.ac.kr
Received: 5 September 2016, Revised: 22 December 2016, Accepted: 23 December 2016.

its engineering purpose and environmental criteria. In this paper, we demonstrate that environmental risk of dredged material to be introduced into the marine environment can be easily assessed using biomarkers with relative low cost. Biomarkers can also compliment pollutant contents analysis that may not be specific to their impact on biological response. Biomarker information may be used to assist decision making process in selecting suitable treatment or beneficial use options for dredged materials.

Keywords : Dredged materials, Beneficial use, Risk assessment, Biomarkers, Marine organims

I. 서 론

퇴적물은 수생태계 밑바닥을 구성하며 고유한 생물계를 보유한 통합적이고 복합적인 하나의 계(system)로 지난 수십 년간 인간의 다양한 활동에 의해 오염되어왔다(Tessier & Campbell 1987; Landrum & Robbins 1990). 준설은 오염된 수저퇴적물을 관리하기 위한 물리적 처리방법의 하나로 제시되고 있으며 그 밖에도 항만유지 및 관리, 항로개척 등의 목적으로 수행 되고 있다(Park & Kim 2007; Eom et al. 2009). 준설로 인한 수저준설토 총량은 2000년 이후 꾸준히 증가하였으나 처분양의 대부분이 준설토 투기장 투기에 의존하고 있어 준설토 투기장 조성 및 환경 문제와 관련해 사회적 문제가 제기되고 있다. 특히, 오염퇴적물의 정화를 위한 환경준설을 포함하여 준설로 발생한 준설토는 투기장 내에서의 유기물의 분해로 인한 악취, 수계의 산소소모 및 유해화학물질의 재확산과 해충(깔따구 등) 발생으로 인근 주민에게 직접적으로 피해를 입히기도 하므로 합리적인 대안 수립이 필요한 실정이다(MLM 2009).

준설물질은 그 오염 정도에 따라 외해 투기 기준을 설정하여 관리하고 있다. 그 예로 미국은 저서생물에 미치는 영향이 미미한 수준을 기준으로 삼아 생물 영향의 가능성이 큰 수준으로 오염된 퇴적물은 외해 투기를 허용하지 않고 정화를 해야 하는 대상으로 권고하고 있다(US EPA 2005). 우리나라의 경우 「수질 및 수생태계 목표기준 평가규정」 (환경부 고시 제 2012-26호) 제6조제3항「하천·호소퇴적물 오염평가 기준」(국립환경과학원 예규 제 2015-687호)은 저서생물(특히 무척추동물)에 독성을 미칠 가능성을 반영하여 유기물, 영양염류(완전연소가능량, 총질소, 총인) 3종, 금속류(구리, 납, 니켈(신규), 비소, 수은, 아연, 카드뮴, 크롬) 8종 등 11개 항목별로 세분화하고 4개 등급(I~IV)으로 평가하여 정화가 필요한 퇴적물을 일차적으로 선별하는 기준으로 삼는다. 그러나 우리나라는 준설 방식에 따라 폐기물로 규정(최대직경 100mm이하이고 이물질 함량이 부피기준 1%이하)하고 있고, 준설물질 중 오염물질 농도에 따른 구분, 오염물질 별 처리 기준 또한 없다(ME 2013). 특히 공학적 이용목적의 준설(유지, 박지(泊地), 개발)의 경우 환경준설과 달리 오염여부를 판단하기 위한 이화학적 조사가 이루어 지지 않고 진행되며 준설토의 유효활용 기준 역시 주로 모래(65μm이상 90%)를 양빈재로 사용하기 위한 목적으로 일부 항목에 제한되어 설정되어 있다. 수저준설토의 매립 및 재활용에 있어 토양오염우려기준의 적용 역시 토양특성과 기준 항목의 차이, 실험 방법상의 차이와 같은 문제점이 시사된바 있어(Yi et al. 2015) 수저퇴적물의 평가제도에 대한 개선이 요구되는 실정이다.

특히 특정한 장소의 바다에 준설물질을 이동 배치하는 경우에는 그 곳에 서식하는 해양 동 · 식물에 대한 생물 영향을 고려해야 하나 아직 이러한 기준이 제시된 바가 없다. 더욱이 유효활용에 대한 기준「수저준설토사 유효활용기준 등 규정(해양수산부고시 제 2013-220호, 2013.9.10. 일부 개정)」은 일부 목적에 한하여 기준이 제시되어있을 뿐 아니라 "해양환경공정시험기준" 중 해양폐기물의 생태독성 시험기준을 취하고 있음에도 불구하고 오염(또는 활용 가능성)을 평가하는 기준은 해양환경공정시험기준의 총량 법을 따르고 있다.

생물검정법(bioassay)는 환경 영향 평가의 기법 중 하나로 생물 반응을 정량적으로 측정하여 환경영

향을 평가하는 방법을 일컫는다(Hansen et al. 2007). 생물검정법은 화학물질에 대해 생물체의 분자수준에서 군집수준에 이르는 다양한 범위의 종말점(endpoint)을 포함한다. 생물검정법은 국외에서 환경 기준 설정을 위한 자료로 널리 활용되고 있다(DelValls et al. 2004; Hafner et al. 2005). 생체지표(biomarker)는 분자 및 효소 수준에서의 생물영향을 측정하는 방법으로 생물검정법 중 검출이 매우 용이하고 생물 반응에 있어서 민감성이 높고 또 생물간 유의성이 높아 환경영향평가 사업에서 널리 활용되고 있다(Depledge et al. 1995). 최근 분자생체지표는 생물의 독성발현경로(adverse outcome pathway) 중 초기사건(initiating event)의 반응 기작 파악을 위한 목적으로도 이용되고 있어 오염물질의 잠재적인 독성을 이해하고 나아가 생태계의 변화를 추정하고자 하는 데에 활용되고 있다(Ankley et al. 2010).

환경 영향에 대한 생물 군집변화 및 생태계 교란을 예측하는 데에 활용 목적을 둔 생물 검정법 및 생체지표 연구는 개체수준에서 관찰되는 영향(생식률, 성장 등) 이나 이와 관련된 분자 및 세포 수준에서의 변화를 진단할 수 있는 정보를 제공해 줄 수 있다(Schipper 2009). 그러나 실제 우리나라의 서식종이나 해역에 서식하는 생물을 이용한 자료가 빈약할 뿐 아니라 지금까지 생물 영향을 고려한 국내 퇴적물 평가는 오염물질 함량 분석과 현장의 생물상 조사연구에 비해 적고 이를 고려한 퇴적물 관리 기준 역시 국외 연구를 바탕으로 하여 국내에 적합한 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다(Yoon et al. 2008).

본 논문에서는 준설공사 수행 및 유효활용을 위한 준설물질 기준 설정에 있어서 생체지표 연구가 가진 잠재성과 앞으로의 전개 방향을 제시하고자 한다.

II. 수저준설토의 처리 및 유효활용을 위한 환경 기준

1. 준설물질 처리와 관련된 환경기준과 연구

국내의 준설공사는 항로의 수심확장 및 연안 매립을 위한 기본 준설이 대부분을 차지하고 있으며 그렇게 준설된 퇴적물에 대해서는 오염되지 않았다는 가정에 의거 정화 또는 처리 기준에 대한 확인 없이 매립되거나 폐기물로 구분되어 투기되어왔다. 수저준설토를 포함하는 해양폐기물(준설물질, 하수오니, 분뇨 및 가축분뇨, 폐수처리오니 등)에 대한 관리는 해양환경관리법 시행규칙에 의해 제 2기준 이하는 해양투기가 허용되고 제 1기준을 초과한 폐기물은 투기할 수 없도록 지정되어있으며(해양환경관리법 제23조) 기준 중 생물 영향 측정은 발광박테리아 및 저서성 단각류를 이용한 생물독성시험에서 대조군과의 차이, 30%를 기준으로 하며 그 이상의 독성을 나타내는 준설물질은 해양배출을 금지하고 있다.

투기 이후 이와 관련된 역학 조사로 준설물질의 거동, 투기로 인한 지형 변화에 초점을 두고 투기가 이루어지는 시점을 전후로 한 대상해역에서의 해수 유동 및 수질분석 등 다양한 평가가 수행되고 있다(Lee et al. 2006). 그 예로 Cho et al.(2001) 은 수저준설토사에 용출시험을 적용하여 화학적산소요구량(COD), 강열감량, 중금속 농도(Zn, Pb, Cd, Cu)의 대조구와의 차이를 비교함으로써 준설 지역의 환경영향을 비교한 바 있다. 이러한 연구는 수저준설토의 확산과 희석, 침강 과정에서의 인접 해역에 미치는 영향을 측정함으로써 준설 및 외해 투기과정에서의 환경 영향에 대한 자료로 활용된다. 실제로 국내에서도 많은 퇴적물 기준이 제안되어 왔으나 실질적인 규제기준으로서 사용된 퇴적물기준은 많지 않으며, 개발된 대부분의 기준들이 예비기준 또는 판단에 참고가 되는 권고기준 정도의 성격으로 사용되고 있다.

국외의 경우 퇴적물의 조성 및 유기물 함량에 따른 저서생물의 밀도 감소 등의 변화 및 준설 이후의 회복기간에 대한 연구를 통해 그 환경 영향 및 위해성을 면밀하게 평가하고 있다(Newell et al. 1998; Lewis et al. 2001; Licursi & Gomez 2009). 국내에서도 생태계에 미치는 영향에 대해서는 준설 사업(항만공사) 이후 개체와 군집 수준에서의 연구결과가 보고 된 바 있다. 준설에 의한 생태계 영향에 대한 연구로 저서생물 군집의 조성의 변화 등이 측정 되었다(Jung et al. 1997; Yu et al. 2006). 광양제철소의

Table 1. List of different bioassay used for assessment of dredged materials in other country (Partially adopted from Hansen et al.(2007))

Organisms	Exposure route	Duration	Endpoints	References
Rotifer population *(Brachionus plicatilis)*	Elutriates	7d	Survival (%)	Riba et al. 2001
Amphipod *(Corophium volutator, A. brevicornis)*	Whole sediment	10d	Survival (%)	DelValls et al. 1998a, 1998b
Benthic microalgae *(Cylindrotheca closterium)*	Whole sediment	24-72h	Growth inhibition	Riba et al. 2001
Polychaete *(Arenocola marina)*	Whole sediment	10d	Survival (%), bioaccumulation	Thain & Bifield 1993
Oligochaete (*Earthworm, Eisenia fetida*)	Whole sediment	14d, 2 m	Survival(%), Reproduction	Best et al. 2004
Bivalve *(Ruditapes philippinarum)*	Whole sediment	48h-15d	Survival (%). Burrowing (TB50), Histological damage	DelValls et al. 1998a, 1998b
Fish(benthic and pelagic) (*Solea senegalensis, Sparus aurata*)	Whole sediment	1-3m	Survival (%). Bioaccumulation, Histological damage	DelValls et al. 1998a, 1998b

건설 시기에 조사된 저서다모류 군집이 섬진강 유역의 영향을 받는 여름철과 달리 겨울철에는 상이한 군집을 보여 대규모 매립과 준설공사 기간 중 영향을 받고 있는 것을 확인한 바 있다(Jung et al. 1997). 또한 해사채취 지역에서의 수산자원 생물량 연구를 통해 해사채취에 의한 출현종 및 개체수가 감소하는 결과를 확인하여 해역의 인위적인 활동에 의한 생태계의 변화를 추정할 수 있도록 해 주었다(Yu et al. 2006; Son & Han 2007). 그러나 준설토에 대해서는 오염현황과 이를 기반으로 한 위해성 평가(인체피해확률)(Yoon & Jeong 2008) 외에 생태영향에 대한 자료는 여전히 부족하다. 실제로 준설토 투기장 및 주변 수생태계의 관리를 위한 환경 · 생태계 모니터링은 지역사회 문제를 대처하기 위한 해충방제와 이를 위한 물리화학적 처리에 따른 환경 변화, 그리고 부유물질 유출 예측과 같은 연구에 한정되어 수행되어왔다(Min 2008; Kim et al. 2012). 우리나라에서는 준설된 준설물질의 오염을 평가하는 방법 및 기준이 제시되어 있지 않았으며 최근에서야 생물을 활용하여 생물 영향 및 환경 위해성을 평가하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 수저준설토가 투기되는 투기장 지역 내에 서식하는 생물의 체내 오염물질 농도 분석을 수행한 연구의 예로 Kwon(2004)은 마산만 퇴적물이 투기된 가포해역의 경우 퇴적물 내 중금속 농도가 진해만의 평균 농도에 비해 높았으며 이매패류(바지락, 진주담치, 굴)의 체내 축적된 금속의 농도 역시 투기장 외부에서 채취된 생물체 내에서 측정된 농도에 비해 높은 경향을 보여 생물의 체내 축적이 퇴적물의 오염 농도에 대해 유의한 결과를 보여 줄 수 있음을 시사하였다. 유사하게 국내 폐기물 배출해역에서는 서식생물의 군집과 함께 퇴적물 공극수를 이용하여 독성시험을 실시함으로써 배출해역에 대한 퇴적물 독성 평가를 수행하였다(MOF 2005). 실제로 축적된 오염물질의 농도는 퇴적물 내 오염물질에 대한 생물의 생물이용성을 반영하며, 치사나 생리상태를 측정하는 독성평가 결과는 투기해역의 군집 분석이 보여주는 결과를 해석하기 위한 정보를 제공할 수 있는 장점을 갖는다. 특히 저서군집의 교란의 원인을 판단하고 배출 해역의 목표 및 환경관리를 위한 모니터링 지침서 작성을 위해 활용될 수 있다.

국외에서는 수저준설토의 평가를 위해 식물플랑크톤, 동물플랑크톤(윤충류, 요각류 등), 저서동물, 어류(치어)를 이용하여 다양한 수준에서의 독성평가를 통해 화합물의 통합독성 및 상승효과 등을 평가함으로써 준설토 및 준설토 투기장 관리를 효율적으로 수행해 오고 있다 (Table 1). 이러한 실험은 실험 생물에 따라 노출 시간이 수 분에서 몇 달에 이르기도 하며 생물의 행동변화를 비롯하여 성장과 치사의 변화를 통해 환경에 존재하는 잠재적 위해물질의 생태계 영향의 결과를 보여보여준다. 그리고 결과의 일부는 실제 준설퇴적물과 투기되는 해역의 생물을 이용하고 있어 준설토 투기장의 유역 관리를 목적으로 한

생태계 변화 예측 및 향후 관리에 대한 의사결정을 가능하게 한다.

2. 유효활용 환경기준에 있어서의 연구현황

준설물질은 공학적으로 매립지와 기초 지반을 포함하는 건설재료, 서식지 조성과 개선, 수질개선이나 양식, 농업, 채취장 메우기 등 다양한 목적의 사업에 활용될 수 있다(Kim et al. 2012; Choi & Lee 2015). 유지준설에 의해 발생한 준설물질은 오염에 대한 판단 없이 투기되거나 제시된 용도에 한정하여 오염도 기준을 충족시키게 되어있어 그 활용과 위해성에 대한 판단기준이 제한되어있다.

준설물질의 재활용 및 유효활용에 있어 환경위해성을 고려한 평가방법의 절차는 물리화학적 자료를 확보하기 위한 화학적 평가, 위해성을 평가하기 위한 노출 평가, 그리고 개체에 미치는 위해성을 평가하는 용량 · 반응 평가로 나뉜다. 지금까지의 국내에서 발표 된 유효활용을 위한 수저준설토 평가 방법은 Table 2와 같다(Table 2). 수저준설토 내 오염물질의 농도를 분석하여 인체 노출에 대한 발암가능성을 예측한 인체 위해성평가는 준설토사 처리·활용기준 및 토양환경보전법상의 기준보다 엄격하였으며 향후 유효활용에 있어 적합성 판정을 위해 사용될 수 있을 것으로 예상된다(Yoon & Jeong 2008). 총함량법 분석 외에 퇴적물을 이용한 중금속 용출실험(Korean Standard Leaching Test, KSLT)은 고화제나 시멘트로 고형화 된 준설물질에서 시험수에 용출되는 중금속 농도를 분석함으로써 오염물질의 안정화 정도를 평가하여 성토재, 객복토 또는 기타 건설재료와 같은 방향으로 재활용이 가능함을 분석한다(Yoon et al. 2010; Kim et al. 2012). 최근 화순항 준설토의 유효활용 가능성에 대한 연구의 경우에도 실제 준설토 내 Ni원소가 유효활용의 기준치(「수저준설토사 유효활용기준 등 규정 (해양수산부고시 제 2013-220호, 2013.9.10. 일부개정)」)를 초과한 반면 인위적 오염의 부재 및 발광박테리아의 상대발광저해율(10% 미만)의 결과를 통해 해석하였을 때 양빈재로의 사용에 적합함이 보고된 바 있으며(Choi & Lee 2015), 이와 같은 생물 이용 가능성을 반영한 유효활용 기준 제시를 위한 연구가 진행되고 있다. 그 밖에도 수저준설토의 활용 이후 그 영향을 측정한 연구 역시 유효활용 가능성 및 환경유해성 확인을 목적으로 수행되었다. 그 예로 해양 준설토를 이용한 인공염습지에서의 토양 내 COD감소 및 종속미생물 개체가 증가는 생물분해를 통한 준설토의 다양한 활용 가능성을 보여주었다(Park et al. 2008).

Ⅲ. 생체지표를 이용한 환경 위해성 평가

1. 환경 독성 연구

US EPA에서는 이미 산업 배출수와 생활하수, 퇴적물에 대한 잠재적 독성을 평가하기 위해 연안 무척추동물을 이용한 생물 검정법을 제시하고 있다(US EPA 1995, 2001). 실험생물이 나타내는 생물영향(치사, 성장율 저해, 부화율 감소 등)은 시험 대상 물질이 야기하는 독성의 결과이기 때문에(Stauber & Davies 2000) 이러한 생물 검정법의 결과 (즉, 급, 만성 독성)는 복잡한 환경시료 (예, 수저퇴적물, 해

Table 2. Case studies on environmental investigation of dredged materials for beneficial uses

Target materials	Treatment	Method	Remarks	Reference
Harbor dredged materials	–	Risk assessment	–	Yoon & Jeong 2008
Dredging materials (Hwasun-port)	–	bioluminescent bacteria test	Beach nourishment	Choi & Lee 2015
Dredging sediment (Stagnant water area)	Solidification	Leaching test	–	Kim et al. 2012
Dredging materials (Ulsan)	Solidification	Leaching test	Construction and landfill cover materials	Yoon et al. 2010
Dredged Sediments	Pilot-scale creation of artificial tidal flats	COD, heterotrophic microbial numbers	Artificial tidal flat	Park et al. 2008

수)에 존재하는 미지의 위해 인자를 파악하는 데에도 유용함을 보여주었다(Allan et al. 2012).

생물을 이용한 검정 방법 중 세포수준에서의 변화를 지표로 하는 생체지표 연구는 환경 변화에 대한 민감성, 생물간 정보(유전자 시퀀스, 효소의 특징 등)의 유사성과 더불어 신속히 측정이 가능하기 때문에 생물 및 생태계 영향에 대한 경제적, 환경적 피해가 크게 나타나기 전에 신속한 판단을 할 수 있도록 한다는 장점을 갖는다. 실제로 선진국에서는 환경 모니터링 연구에서 화학적 정성 및 정량 분석과 함께 생체지표를 활용한 평가가 수행되고 있으며(UNEP 1999; Stauber & Davies 2000), 특히 퇴적물의 질을 평가하기 위해 생물검정 및 생체지표를 활용하는 것이 정량 결과와 생태 구조 분석이 가지는 해석적 한계를 보완할 수 있게 하는 것이 많은 연구에서 확인되었다(Martín-Díaz et al. 2004).

2. 수저준설토 및 투기장 평가의 활용

퇴적물 평가에 있어 생물 검정법의 활용은 준설과 준설물질의 처리, 투기장의 관리 등을 포함하는 의사결정에 있어 중요한 자료를 제공할 수 있다. 생물을 이용한 퇴적물 평가는 오염물질의 생물 영향 나아가 인체에 대한 영향을 평가할 수 있다는 점에서 중요하다. 최근 생체지표를 이용한 환경 연구, 특히 퇴적물 평가를 위한 연구들은 특정 오염물질 또는 복합 오염물질에의 노출을 진단할 수 있는 생체 지표를 검색하거나 해독 및 적응과 관련된 생물의 체내 기작을 찾음으로써 대상생물의 지표생물로서의 활용 가능성을 제시한다. 실제로 생물 검정 및 생체지표를 활용해 퇴적물 평가, 준설토 평가, 준설토의 투기장에 대한 단, 장기 모니터링이 수행되고 있다(Table 3). 이러한 연구들은 준설 과정에 의한, 그리고 준설 발생토사의 처리에 대한 환경 영향 평가를 목적으로 두고 있으며 생물학적인 영향의 결과를 바탕으로 기존의 오염물질 함량 분석 결과를 보완하는 데에 이용된다. 그 예로 이탈리아의 Leghorn 항의 준설토 투기장(disposal sites) 주변에서 3년 간 채집 된 숭어(*Mullus barbatus*)의 metallothionein (MT), Cytochrome P450 1A, glutathione S-transferase 발현을 통해 총항산화지수(Total oxyradical scavenging capacity)를 분석하였을 때 시기별 그리고 정점 별로 관찰된 유의한 차이는 준설토의 투기로 인한 생물학적 교란, 생물의 반응, 생물의 기능에 대한 결과로 해석되었으며 투기장 해역에 대한 관리의 필요성을 보여주었다(Regoli et al. 2002). 저서생물을 이용한 예로 게(*Carcinus maenas*)의 체내 metallothionein-like proteins (MTLPs)과 난황전구체(vitellotenin, Vtg)가 준설토가 투기된 항에서 유의하게 증가하는 경향을 보여 준설토 내 생물 이용성을 고려한 중금속 노출에 대해 두 생체지표가 유용하게 사용될 수 있음을 보여주었다(Martín-Díaz et al. 2007, 2008). 이러한 결과들은 생체지표를 이용

Table 3. The studies on evaluating pollution and toxicity of dredged material and disposal sites using biomarkers

Organism	Species	Biomarker	Effect	Pollutants	Target	Reference
Fish	*Mullus barbatus*	CYP1A (A)*, GST (A), MT (C)*	–	–	Disposal site	Regoli et al. 2002
Crustacean	*Carcinus maenas*	VTG (C)	Endocrine disruption effect	Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg, As, PAHs and PCBs	Dredged materials in disposal site	Martín-Díaz et al. 2008
		MTLPs (C)	Bioavailability	Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg, As, PAHs and PCBs	Dredged materials	Martín-Díaz et al. 2007
		Neutral red retention	Health status	–	Dredged materials	Freitas et al. 2012
Bivalves	*Mytilus edulis*	AChE (A)		Pesticide	Dredged materials in disposal site	Radenac et al. 2008
	Ruditapes decussatus	Neutral red retention	Health status	–	Dredged materials	Buratti et al. 2012

* (A) and (C) indicate 'enzyme activities' and 'concentrations' of target biomarkers in test organisms, respectively.

한 다변량분석 결과 환경 규제 제도 구축에 저서성 해양생물의 유용성을 입증하는 결과를 제시하였다. 특히 내분비계 교란 관련 효소의 변화와 준설물질의 내분비 교란의 가능성의 확인은 기존 준설물질 규제의 체계를 정비하고 뒷받침할 수 있는 자료로 활용될 수 있음을 보여주었다(Martín-Díaz et al. 2008)

3. 생체지표 연구의 향후 연계 방향

국내의 경우 오염된 해역에서의 준설 여부 및 준설범위를 설정하기 위해 유해화학물질 정화지수(CI_{HC})와 부영양화 정화지수(CI_{ET})를 사용하고 있다. 정화지수(CI)는 퇴적물 생물 영향 자료 및 각 해역의 화학적 농도를 반영하여 개발 된 것으로 환경 영향의 가능성을 수치화 하여 제시된 값이다. 그러나 기준에 의해 준설 된 준설물질이 투기된 이후에는 수저준설토 및 준설토 투기장 주변을 감시하고 관리하기 위한 연구가 미흡하며 화학적인 분석을 통한 오염물질의 농도제시, 그리고 서식지로서의 가능성을 평가하기 위한 생물 분포 및 군집 조사에 그쳐있다. 실제로 폐기물 투기지역에 대한 생물 영향 연구로 퇴적물의 공극수(또는 용출수: elutriate)를 통한 생태 독성 평가 결과를 투기지역의 운용을 위한 연구의 하나로 수행한 바는 있으나(MOF 2005) 준설물질의 연안에서의 처리와 투기장의 관리에 있어 적용은 수행된 바가 없다. 최근 국외 퇴적물 평가 연구는 MT또는 MTLPs, 그리고 Vtg와 같은 효소 및 발현 유전자는 환경오염물질(중금속, 잔류성 유기오염물질, 내분비계 장애물질 등) 로 인한 퇴적물 오염 및 생물 영향을 연구하는 데에 이용하고 있으며, 특히 저서생물(다모류, 패류, 갑각류 등)에서 환경시료의 화학적 분석 및 생물 축적양과 비교해 유의한 상관 관계를 보여 조기 경보 지표로서의 가능성을 보여주었다(Martín-Díaz et al. 2007, 2008; Won et al. 2008; Freitas et al. 2012).

준설물질의 투기 이후 해당 지역의 관리는 해역의 생물을 이용한 생물학적 검정 방법을 이용한 평가를 바탕으로 관리되어야 한다. 특히 단백질 및 유전체 수준에서의 변화를 측정하는 생체지표의 활용은 개체의 서식 가능성뿐만 아니라 투기 전 후의 변화를 민감하게 추정할 수 있도록 한다. 퇴적물의 경우 오염물질의 독성 및 환경 영향은 총 함량보다 오염물질의 생물에 이용 가능한 형태로서의 존재, 그리고 물리화학적 조건에서의 안정도와 환경 내 거동과 관련이 있으며(Elliott et al. 2003) 다양한 퇴적물 평가 기준이 환경과 생태계를 고려한 값을 제시하고 있다 하더라도 투기장 환경에서의 물리화학적 변화에 의한 오염물질의 거동은 지역에 서식하는 생태계와 연계하여 해석되어야 하기 때문에 이에 대한 관리와 평가 방법 역시 추가적으로 제시될 필요가 있다.

따라서 향후 준설토 투기장의 관리 및 준설물질의 유효활용을 위한 생물검정 방법을 기초로 한 규제 및 생체지표 활용을 통해 생물영향을 고려할 수 있는 접근의 필요성이 요구된다.

IV. 결 론

최근 생체지표를 활용한 퇴적물의 오염도, 건강성 평가는 기존의 오염물질의 함량을 기반으로 하는 환경 평가가 가진 한계점을 보완해 준다. 본 연구에서는 생체지표를 이용한 평가연구가 가지는 민감성과 안전성을 검토하였다. 이는 해양준설사업에서 발생한 수저준설토의 처리 후 투기장 관리, 유효활용 기준에의 활용에 있어 적용가능성과 그 유용성을 시범한다. 또한 생체지표의 활용은 향후 준설물질의 관리(처리 및 최종 처분)과 관련하여 생태계 위해성 평가 활용 분야에서도 이용 될 가능성이 큰 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 해양수산부의 재원과 한국해양과학기술진흥원(지속가능 해양오염퇴적물 정화기술개발: 피복 및 현장처리기술, PM58910)의 지원을 받았습니다.

References

Allan SE, Smith BW, Tanquay RL, Adnerson KA. 2012. Bridging environmental mixtures and

toxic effects. Environ Toxicol & Chem. 31(12): 2877-2887.

Ankley GT, Bennett RS, Erickson RJ, Hoff DJ, Hornung MW, Johnson RD, Mount DR, Nichols JW, Russom CL, Schmieder PK, Serrrano JA, Tietge JE, Villeneuve DL. 2010. Adverse outcome pathways: A conceptual framework to support ecotoxicology research and risk assessment. Environ Toxicol & Chem. 29(3): 730-741.

Best EP, Geter K, Fredrickson H.E, Richmond HL, Furey M. 2004. Validating Pathway Analysis of Organic Contaminants from Aged Dredged Material Using Plants and Worms (No. ERDC-TN-DOER-R3). Engineer research and development center vicksburg ms.

Buratti S, Ramos-Gómez J, Fabbri E, DelValls TA, Martín-Díaz ML. 2012. Application of neutral red retention assay to caged clams (*Ruditapes decussatus*) and crabs (*Carcinus maenas*) in the assessment of dredged material. Ecotoxicology. 21: 75-86.

Cho HY, Choi KH, Yoon GL. 2001. Contaminants assessment of dredged materials by leaching test-focused on the impact assessment of the coastal environment Korean. Geotech Soc. (2): 5-12. [Korean Literature]

Choi JH, Lee SH. 2015. An adaptedness assessment for beach nourishment utilization of dredged materials in Hwasun-Port. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 16(4): 2940-2944. [Korean Literature]

DelValls TA, Andres A, Belzunce MJ, Buceta JL, Casado-Martinez MC, Castro R, Riba I, Viguri JR, Blasco J. 2004. Chemical and ecotoxicological guidelines for managing disposal of dredged material. Trends Analyt Chem. 23(10-11): 819-828.

DelValls TA, Blasco J, Sarasquete C, Forja JM, Gómez-Parra A. 1998a. Evaluation of heavy-metal sediment toxicity in littoral ecosystems using juveniles of the fish *sparus aurata*. Ecotox Environ Safe. 41: 157-167.

DelValls TA, Forja JM, Gómez-Parra A. 1998b. Integrative assessment of sediment quality in 2 littoral ecosystems from the gulf-of-cadiz, spain. Environ Toxicol & Chem. 17:1073-1084.

Depledge MH, Aagaard A, Györkös P. 1995. Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioural biomarker. Mar Pollut Bull. 31: 19-27.

Elliott M, Hemingway KL, Krueger D, Thiel R, Hylland K, Arukwe A, Förlin L, Sayer M. 2003. From the individual to the population and community responses to pollution. Lawrence AJ, Hemingway KL, editor. Effect of Pollution on Fish: Molecular effects and population responses. Blackwell Publishing, Oxford.

Eom KH, Lee DI, Park DS, Kim GY. 2009. Diagnosis for status of dredged and ocean disposal of coastal sediment in Korea. J Environ Impact Assess. 18(3): 185-193. [Korean Literature]

Freitas R, Costa E, Velez C, Santos J, Lima A, Oliveira C, Maria Rodrigues A, Quintino V, Figueira E. 2012. Looking for suitable biomarkers in benthic macroinvertebrates inhabiting coastal areas with low metal contamination: comparison between the bivalve *Cerastoderma edule* and the Polychaete *Diopatra neapolitana*. Ecotox

Environ Safe. 75(1): 109-118.

Hafner C, Gartiser S, Garcia-Käufer M, Schiwy S, Hercher C, Meyer W, Achten C, Larsson M, Engwall M, Keiter S, Hollert H. 2005. Investigations on sediment toxicity of German rivers appling a standardized bioassay battery. Environ Sci Pollut Res. 22: 16358-16370.

Hansen P-D, Blasco J, DelValls TA, Poulsen V, van den Heuvel-Greve M. 2007. Biological analysis (Bioassay, Biomarkers, Biosensors). In: Barceló D, Petrovie M. editor. Sustainable Management of Sediment Resources: Sediment Qualuity and Impact Assessment of Pollutants.

Jung RH, Hong JS, Lee JH. 1997. Spatial and seasonal patterns of polychaete community during the reclamation and dredging activities for the construction of the Pohang steel mill company in Kwangyang Bay, Korea. J. Korean Fish. Soc. 30(5): 730-743.

Kim SH, Ahn TW, Choi IS, Oh J. 2012 The evaluation on solidification of dredged sediment for recycle from stagnant water area. J Environ Impact Assess. 21(1): 63-69. [Korea Literature]

Kim YK, Lee CM, Bae YS. 2012. Seasonal prevalence and integrated control method of insect pests in the dredged soil dumping area in Masan, Korea. J Korean Wetlands Soc. 14(4): 687-698. [Korea Literature]

Kwon YT. 2004. Evaluation of heavy metal pollution in the dumping site of the dredged sediment, Masan bay. J Korean Soc Mar Environ Engineer. 7(2): 75-81. [Korean Literature]

Landrum PF, Robbins JA. 1990. Bioavailability of sediment associated contaminants to benthic invertebrates. In:Baudo R, Giesy Muntau H editor. Sediments: Chemistry and Toxicity of In-Place Pollutants. Lewis Publishers, Inc., Ann Arbor, MI, pp.237-263.

Lee JW, Oh DH, Kim HC, Lee SC, Kim KM. 2006. Evaluation of the behavior of dredged materials in ocean dumping area. Proceeding of the conference of the Korean Instit Navigation Port Res. 433-438 [Korean Literature]

Lewis MA, Weber DE, Stanley RS, Moore JC. 2001. Dredging impact on an urbanized Florida bayou: effects on benthos and algal-periphyton, Environ Pollut. 115: 161-171.

Licursi M, Gomez N. 2009. Effects of dredging on benthic diatom assemblages in a lowland stream. J Environ Manage. 90: 973-982.

Martín-Díaz ML, Blasco J, Sales D, DelValls TA. 2004. Bioamarkers as tools to assess sedument qulity. Laboratory and field surveys. Trends Analyt Chem. 23(10-11): 807-818.

Martín-Díaz ML, Blasco J, Sales D, DelValls TA. 2007. Biomarkers study for sediment quality assessment in Spanish port using the Crab *Carcinus maenas* and the Clam *Ruditapes philippinarum*. Arch Environ Contam Toxicol. 53: 55-76.

Martín-Díaz ML, Sales D, DelValls TA. 2008. Toxicokinetic approach for the assessment of endocrine disruption effects of contaminated dredged material using female *Carcinus maenas*. Ecotoxicology. 17: 495-503.

ME. 2013. Improvement scheme study of optimal

management and institutions of pollution sediment for ecological river restoration (Report) (Ministry of Environment). [Korean Literature]

Min JS. 2008. Environment factor on the outbreak of brine flies and midges in dumping site with dredging soil in Busan New Port (Republic of Korea). Thesis [Korean Literature]

MLTM. 2009. The research on guideline for evaluation of Coastal Area Utilization (I). (Report) 11-1611000-001303-01. (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). [Korean Literature]

MOF. 2005. Construction of marine waste management system (Report) (Ministry of Oceans and Fisheries). [Korean Literature]

Newell RC, Seiderer KJ, Hitchcock DR. 1998. The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity. Oceanogr Mar Biol Annual Review. 36: 127-178.

Park JB, Kim SJ. 2007. The present status of dredging for domestic contaminated sediment. J Koran Soc Civil Engineers. 55(4): 58-65. [Korean Literature]

Park S, Lee IC, Yi BH, Lee JY, Yi Y, Sung K. 2008. Initial change of environmental factors at artificial tidal flat constructed using ocean dredged sediment. J Korean Soc Mar Environ Engineer. 11(2): 63-69. [Korean Literature]

Radenac G, Bocquene G, Fichet D, Miramand P. 2008. Contamination of a dredged material disponal site La Rochelle Bay, France. The use of the acetylcholinesterase activity of *Mytilus edulis L.* as a biomarker of pesticides: the need for a critical approach. Biomarkers. 3: 305-315.

Regoli F, Pellegrini D, Winston GW, Gorbi S, Giuliani S, Virno-Lamberti C, Bompardre S. 2002. Application of biomarkers for assessing the biological impact of dredged materials in the Mediterranean: the relationship between antioxidant responses and susceptibility to oxidative stress in the red mullet (*Mullus barbatus*). Mar Pollut Bull. 44: 912-922.

Riba I, Forja JM, DelValls TA, Guerra R, Iacondini I. 2001. International Conference of Contaminated sediment.Batelle.

Schipper CA. 2009. Assessment of effects ofchemical contaminants in dredged material on marine ecosystems and human health. Netherlands: Dltares, IOS Press.

Son KH, Han KN. 2007. The fluctuation of biological communities as an effect of marine sand mining in the gyeonggi bay. Ocean Polar Res. 29(3): 205-216.

Stauber JL, Davies CM. 2000. Use and limitations of microbial bioassays for assessing copper bioavailability in the aquatic environment. Environ Rev. 8: 255-301.

Tessier A, Campbell PGC. 1987. Partitioning of tracemetals in sediments: relationships with bioavailability. Hydrobiologia. 149: 43-52.

Thain J, Bifield S. 1993. Test guideline for PARCOM, MAFF Fisheries Laboratory, Burnham-on-Crouch, UK.

UNEP. 1999. Manual on the biomarkers recommended for the MED POL Biomonitoring Programme (Ramoge report). Mediterranean Action Plan. MED POL, RAMOGE.

US EPA. 1995. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving water to West coast marine and estuarine organisms. National

exposure research laboratory, office of research and development. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati. 648p.

US EPA. 2001. Methods for assessing the chronic toxicity of marine and estuarine sediment-associated contaminants with amphipod *Leptocheirus plumulosus*. United States, Environmental Protection Agency. Washington.

US EPA. 2005. Contaminated sediment remediation guidance for harzaous waste sites. United States, Environmental Protection Agency. Washington.

Won EJ, Raisuddin S, Shin KH. 2008. Evaluation of induction of metallothionein-like proteins (MTLPs) in the polychaetes for biomonitoring of heavy metal pollution in marine sediments. Mar Pollut Bull. 57: 544-551.

Yi Y, Oh H, Lee DI, Kim GY, Jeon KA, Kim HJ. 2015. A research on diagnosis of institutional problem and improvement plan for management in coastal dredged sediment. J Environ Impact Assess. 24(5): 444-455. [Korean Literature]

Yoon GL, Bae YS, Yoon YW, Kim SH. 2010. Compressive strength and environmental investigation for beneficial use of dredged sediments. J Koran Soc Civil Engineers. 30(2): 119-131. [Korean Literature]

Yoon GL, Lee CW, Jeong WS. 2008. Korean environmental standards for beneficial use of dredged materials. J Korean Geotech Soc. 24(5): 5-13. [Korean Literature]

Yoon GL, Jeong WS. 2008. Assessment of contamination of harbor dredged materials for beneficial use. Korean Geotech Soc. 24(5): 15-25. [Korean Literature]

Yu OH, Lee HG, Lee JH, Kim DS. 2006. Impacts of sand mining on the macrobenthic community in Gyeonggi Bay, Korea. Ocean Polar Res. 28(2): 129-144. [Korean Literature]