

연안준설 사업에 따른 해양 수질 및 퇴적물 영향평가 개선 방안

김영태* · 김귀영** · 전경암** · 이대인** · 유 준** · 김희정** · 김인철** · 엄기혁**†

*, ** 국립수산과학원 해역이용영향평가센터

Improvements in the Environmental Impact Assessment on Seawater and Sediment Qualities for Coastal Dredging Projects

Yeong-Tae Kim* · Gui-Young Kim** · Kyeong-Am Jeon** · Dae-In Lee** · Jun Yu**
· Hee-Jung Kim** · In-Chul Kim** · Ki-Hyuk Eom**†

*, ** Marine Environmental Impact Assessment Center, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

요 약 : 2000년대 초반부터 연안준설 사업의 수요가 크게 증가하였고, 기타 연안개발 사업과도 중첩되어 준설토의 발생량은 지속적으로 증가하고 있다. 이로 인해 주변해역에 대한 환경 영향이 심화될 수밖에 없는 상황에서, 2011년 제출된 해역이용협의서 중 준설이 포함된 사업의 해수 및 해저 퇴적물에 대한 해양환경영향평가 현황을 파악하였다. 해양환경영향평가 항목 중 일반 항목들의 조사 비율은 대체로 높은 반면, 중금속 등 유해 물질의 경우에는 세부항목들 간 조사 비율 편차가 크게 나타났다. 한편 중금속 분석 시 협의서 작성 지침에 따른 전처리 과정(완전 분해)과 분석 방법이 제대로 수행되지 않았다. 또한 작성 지침에 명시되어 있지만, 결과값에 대해 신뢰도 확보를 위한 검증(회수율 및 검출한계 산정) 수행 현황도 매우 미흡한 것으로 파악되었다. 이로 인해 연안 준설 및 개발에 따른 주변 해양환경영향평가가 부실하게 진행되고 있는 것으로 나타났다. 향후 해양 수질 및 퇴적물 환경에 대해 보다 엄정한 평가와 진단을 위해서는 협의서 작성에 관한 세부 지침의 보완이 요구되며, 해역이용협의 제도의 개선을 통해 정확한 해양환경영향평가가 수행되도록 협의서 작성지침의 준수 의무를 강화할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

핵심어 : 연안준설 사업, 준설토, 해역이용협의서, 해양환경영향평가, 전처리 과정, 작성 지침, 해역이용협의 제도

Abstract : Since the early 2000s, demand for coastal dredging projects have been significantly increased, and the dredged sediments have showed the continuing marked increases through the multiple projects with other coastal development and constructions. As significant or potential degradation of marine environment has been mounting, we checked the current situation of marine environmental impact assessment through marine water and sediment qualities in relation with dredging projects of the sea area utilization consultation statements submitted in 2011. While analysis percentages of the general items were usually higher, harmful components such as metals revealed wide variation of analysis percentages. In the event of analysis of metals, the pre-treatment process (full digestion) and analysis method were not properly implemented in accordance with the guidelines for preparation of consultation statements. Although not specified in the guidelines, verification procedures (tests of recovery efficiency and detection limit) to secure the reliability were almost ignored. As a result, most of developers did conduct poor marine environmental impact assessment on coastal dredging and related projects. We suggested that the responsible government authority should establish new detailed guidelines on the sea area utilization consultation for more strict evaluation and diagnosis of marine environment and distinctly request the developer to obey the guidelines by complementing the system of the sea area utilization consultation.

Key Words : Coastal dredging projects, Dredged sediments, Sea area utilization consultation statements, Marine environmental impact assessment, Pre-treatment process, Guidelines for preparation, System of the sea area utilization consultation

* First Author : ytrack@naver.com, 051-720-2963

† Corresponding Author : ekh4465@korea.kr, 051-720-2962

1. 서 론

우리나라는 국토 면적이 협소한 반면, 삼면이 바다와 접해 있어 해안선이 길게 형성되어 있다. 1960년대 이후 임해 산업단지 조성, 항만 및 어항 개발, 그리고 인구 밀집으로 인한 상가 및 택지 개발 등이 준설과 매립을 수반하는 연안복합 개발사업 형식으로 활발히 진행되고 있다(Maeng, 2007; Kim et al., 2009).

준설 과정에서 가장 눈에 띄는 현상은 부유물질(Suspended solids: SS)의 일시적 농도 가중 및 확산에 의한 인위적인 탁도의 증가로써, 지금까지는 이러한 부유사 확산의 범위를 예측하고 이를 저감하기 위한 대책을 수립하는 데에 관심이 집중되어 왔다(Lee et al., 2003). 하지만 연안 퇴적물 내에는 해양 환경과 생태계를 오염시키고 부정적 영향을 미치는 유해 물질들이 다량으로 포함되어 있을 가능성이 높으므로, 연안 개발사업 추진 중 재부유된 준설토사뿐만 아니라 개발에 따른 2차 오염을 방지하기 위한 실질적인 방안 추진이 매우 시급한 상황이다(Kwon, 2004; Yoon and Jeong, 2008). 최근 연구에 따르면, 항만 및 어항 시설 축조, 항로 중심, 그리고 기타 연안개발 사업에 따른 준설 시 발생하는 준설토에는 지난 수십 년 동안 인간의 산업 활동에 따른 영향으로 영양염류와 유기물질이 다량 축적(Enrichment)되어 있기도 하고, 중금속, 난분해성 유기합성물질 등과 같은 유해·독성 물질로도 오염되어 있는 경우가 빈번하게 발생하고 있다(Erftemeijer and Lewis III, 2006; Yoon and Jeong, 2008). 이러한 오염 퇴적토는 준설 과정에서 수중으로 부유되어 수질 및 생태계에 부정적인 영향을 주기 때문에, 효율적인 준설공법 적용을 통한 확산 범위의 저감 대책과 함께, 준설 이후의 오염 준설토에 대한 체계적인 관리와 처리 방안의 수립 및 이행이 매우 중요시되고 있다(Lee et al., 2004). 이에 따라 최근 국내에서도 준설토에 대한 해양 투기(Ocean dumping: Asterisk 8 in relation with Clause 2, Article 12 of Enforcement Regulation of Marine Environmental Management Act), 유효 활용(Beneficial use: Notification No. 2012-338 of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) 등을 위한 환경 기준을 수립하여, 정밀한 분석과 엄정한 평가를 통해 적절한 준설토 처리 방안이 이행되도록 유도하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012a).

하지만, 이와 같이 준설한 퇴적토를 재활용하거나 해역에 투기하기 위한 기준이 마련되었음에도 불구하고, 해양 준설 공사로 인해 직접적인 영향을 받게 되는 주변 해역의 수질 및 퇴적물에 대한 이화학적 특성과 오염도 현황을 정확하게 파악하기 위한 정도관리(Quality management) 이행 노력과 세부 지침 내용은 매우 미흡한 상황이다. 예컨대 준설 공사 및

준설 작업이 포함된 사업에 대한 해역이용협의 시, 퇴적물 내 평가 항목 중 중금속 분석을 위해 해양환경공정시험기준에 준하여 시료의 전처리 방법으로 완전 분해법(Hg 제외)이 적용되어야 한다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012a). 하지만, 이러한 규정이 제대로 준수되고 있지 않으며, 분석 결과에 대한 객관적 신뢰성 확보를 위해 각 중금속 농도값에 대한 회수율 산정, 성분별 검출한계 산정 등의 자료 검증이 누락되어 있는 경우가 많다. 이와 같이 부실한 분석 결과로 인해 해양환경에 대한 영향 및 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 이번 연구를 통해, 준설관련 대상 사업 추진을 위한 해역이용협의 시 해양 수질 및 퇴적물 내 세부 환경영향 평가 항목들의 조사 시기와 분석 과정, 결과값 검증 등에 대한 현황을 파악하여, 보다 과학적이고 체계화된 분석과 측정이 수행되도록 보완책 및 세부지침 마련을 강구하였다. 그리고 이를 통해 정확한 분석 자료를 근거로 해역이용협의를 원활하게 수행하기 위한 의견을 제시하고자 한다.

향후 준설관련 사업뿐만 아니라 다른 해역이용협의 대상 사업을 추진하는데 있어서, 사업 전·후의 이화학적 인자들에 대한 해양환경 영향 평가 및 관리 기준을 강화할 수 있는 기회를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자료 수집 및 조사 방법

2011년 해역이용영향평가센터에서 협의된 해역이용협의 대상 중 준설관련 사업(30건)을 추진하는데 있어서, 해역이용협의 시의 해양 수질 및 퇴적물 평가 항목별로 조사·분석 전반에 대한 현황을 검토하였다. 우선 현장 조사가 진행된 시기를 월별로 파악하고, 주요 조사 시점이 계절별 특성에 맞게 대표성이 있는지를 검토하였다. 보다 구체적인 방법으로 해역이용협의를 위한 작성 지침에 의거하여 간이해역이용협의의 기준이기도 한 준설량 10만^m 미만, 일반해역이용협의의 기준이 되는 10만~20만^m, 해역이용영향평가 대상(항로 준설 제외)에도 포함되는 20만^m 이상의 준설량 범위로 각각 분류한 다음, 각 준설 규모별 협의 현황을 정리하였다. 그 다음으로 연안준설 사업 시행에 따라 주변 해양환경 내 영향을 받는 인자에 대해서는 해역이용협의서의 작성 지침에 언급된 항목(해수 26종, 퇴적물 21종), 준설토에 대한 해양배출처리기준 항목(10종), 수저 준설토사의 유효 활용을 위한 오염도 기준 항목(12종) 등을 종합하였다. 그 다음으로 해수 및 퇴적물 내 세부 평가항목에 대해서 크게 일반 항목, 그리고 중금속 등 유해물질 등으로 구분함으로써 각각의 조사·분석 현황을 정리하였다. 특히 해수 및 퇴적물 내 함량 분석 시 많은 비용과 시간이 소요되고, 분석 과정 및 오염에

연안준설 사업에 따른 해양 수질 및 퇴적물 영향평가 개선 방안

대한 세심한 주의가 필요한 중금속 항목의 경우, 퇴적물 분석 시 전처리(Pre-treatment) 과정으로서 완전분해법을 이용했는지, 부분분해법을 통해 분석이 진행되었는지에 대해 검토하여 두 방법 간의 차이점을 집중 진단·평가하였으며, 해수와 퇴적물 내 중금속 분석 결과값에 대해 회수율 및 검출한계를 산정하여 분석의 정확도(Accuracy)를 검증하고 있는지를 검토하였다. 또한 최근 고시된 준설토의 재활용 또는 외해 투기 시, 기준 농도값과의 비교·평가를 위해 보완 및 개선 방안에 대해 논의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연안준설 사업 및 환경영향 평가 사례 현황

2011년 해역이용협의를 통해, 향후 공사 착공 시의 총 준설 발생 잠재수량은 약 81백만 m^3 으로 계획되었다. 이 중 20만 m^3 이상의 준설 규모에 대한 협의가 15건으로 가장 많았고, 평균 예상 준설량에 있어서도 5,329천 m^3 로 현저하게 많은 규모의 준설토가 발생할 것으로 파악되었다(Table 1). 한편, 이전 연구 자료에 따르면, 항만 기능의 유지와 관리, 항로 개척 및 증심, 오염 퇴적토의 정화 등을 목적으로 하는 준설 사업이 2000년대에 들어서면서 급격하게 증가하였다(Maeng, 2007; Park, 2008; Lee et al, 2009). 우리나라의 연안 준설은 수심 증진을 위해 무역항과 국가어항을 비롯한 항만·어항 구역의 항계 내에 집중되고 있으며, 2001~2008년 동안 매년 평균 약 91백만 m^3 의 준설($13 \times 10^6 \sim 224 \times 10^6 m^3$)이 시행되었다(Lee et al., 2009). 준설 구역별로는 항로 준설로 인한 준설량(65%)이 가장 높았고, 다음으로 유지 준설(28%)이 차지하였으며, 기초 및 박지 준설량(7%)은 상대적으로 낮은 비율을 나타냈다(Park, 2008). 또한 2010년대에도 신규로 추진 중인 항만 개발권역(부산 신항, 군산·새만금 신항, 여수·광양항, 당진·평택항, 인천항 등)을 중심으로 준설 수요가 높게 유지되고 있는 것으로 파악되었다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012b).

Table 1. Dredged sediments for consultation on the coastal area utilization submitted in 2011

Dredging scale (m^3)	Mean dredged sediment (m^3)	Dredging project (case)
$< 10^5$	17,000	7
$10^5 \sim 2 \times 10^5$	178,879	8
$\geq 2 \times 10^5$	5,328,838	15

본 연구에서 준설토에 대한 처리·활용 방안에 대해 투기장에 투기하는 사례가 15건으로 가장 많았고, 다음으로 배후

부지 매립 14건, 외해 투기 4건 등의 순서로 나타났다. 준설량 기준으로는 투기장 55.2%, 매립지 44.5%, 외해 투기 0.3%의 준설토 처리·활용 방안 순서를 나타냈다(Fig. 1).

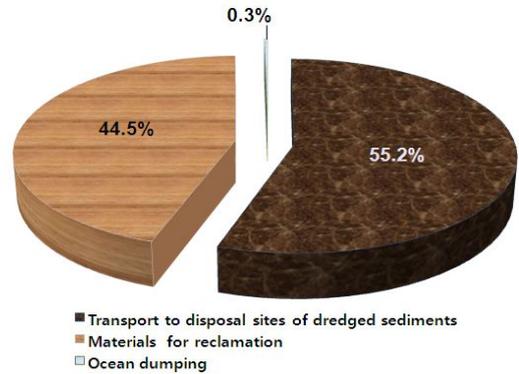


Fig. 1. Plans for treatments/uses on dredged sediments in 2011.

3.2 해양환경 조사 및 분석의 문제점

3.2.1 현장 조사

현장 조사의 월별 현황은 2월, 5월, 8월, 10월, 11월에 수행된 비율이 64.7%로써 각 계절을 대표하는 시기에 현장 조사가 수행된 것으로 나타났다(Fig. 2). 또한 해수 및 퇴적물 시료 분석 시 각각의 평가항목에 대해 해양환경공정시험기준(예외: 퇴적물 내 CN 분석)에 따라 측정·분석하여 결과값을 정리한 것으로 파악되었다.

앞서 설명한 바와 같이 2011년 검토된 준설관련 협의서에서 준설 규모별로 구분한 자료를 보면, 준설량 20만 m^3 이상의 큰 규모로 진행되는 경우가 훨씬 더 많았다. 따라서 연안 개발사업 추진에 따른 준설규모 확대에 의해 주변 해양환경에 미칠 수 있는 부정적인 영향을 평가하기 위해서는 우선 해양 수질 및 퇴적물 내 세부 평가항목별 분석 현황 및 비율 등을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 세부 평가항목에 대한 현장조사 시점을 고려해야 한다. 수계 및 저서계 환경을 구성하는 생·화학적 성분들은 수온, 염분 등 해

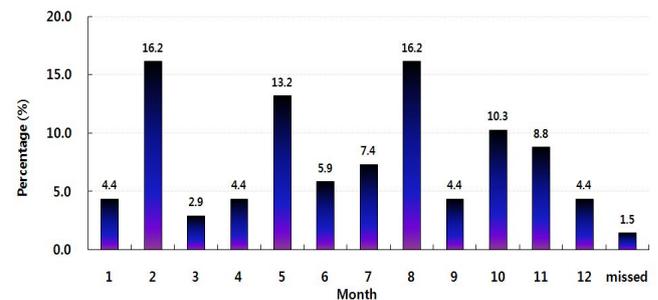


Fig. 2. Distribution of each investigated period in relation to coastal dredged projects.

양물리 인자의 변화에 민감하게 반응한다. 따라서 우리나라 처럼 온도와 강수량 변화가 뚜렷한 온대성 기후 특성을 반영하여 각 계절을 대표하는 조사 시점에 현장 조사를 수행하는 것은 4계절 특성을 반영하기 위해 필수적으로 검토해야 할 사항이다.

국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration)에서 수행한 실시간 해양관측 결과를 정리한 월간 통계보고 자료(2000~2011년)에 의하면, 수온 분포에 있어서 평균 최저온도와 평균 최고온도를 각각 기록하는 시기는 2월과 8월이다(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2000-2011). 이 두 시기를 각각 겨울과 여름을 특징짓는 기준 시점으로 정하고, 그 사이 시기의 중간 온도를 나타내는 시기는 각각 5월과 11월로써 봄과 가을의 특징을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 2월, 5월, 8월, 11월에 수행된 조사가 많을수록 겨울, 봄, 여름, 가을 각각의 계절을 대표하여 현장 조사가 수행된 것으로 판단할 수 있다. 준설 관련 사업에 대한 해역이용협의서를 검토한 결과, 전체적으로는 각 계절을 대표할 수 있는 시기에 현장 조사가 수행되고 있는 것으로 파악되었다(Fig. 2). 겨울과 여름철을 대표하는 2월과 8월에 수행된 조사 비율이 각각 동일하게 16.2%로써 동계와 하계 조사를 비교적 잘 수행하고 있는 것으로 파악되었다. 봄을 대표하는 5월 조사 비율은 13.2%로 나타났다. 한편, 가을을 대표하는 시기인 11월 조사 비율은 8.8%로 다른 계절 조사의 대표성이 있는 시기보다 낮은 조사 비율을 보였고, 10월 조사 비율이 10.3%로 더 높은 조사 비율을 보였다. 조사 수행 시기를 누락한 비율도 1.5%로 나타나(Fig. 2), 해양환경영향 평가를 위한 현장 조사 시기의 준수뿐만 아니라 협의서 작성 시에도 조사 시점을 정확하게 표시하기 위한 노력이 필요한 것으로 파악되었다.

3.2.2 일반 항목

해역이용협의서 작성 기준에서 일반 항목은 해수에서 11개이고 퇴적물에서 세부 평가 항목은 6개가 지정되어 있다. 준설관련 사업이 예정된 해역에서 수질 및 퇴적물에 대한 이화학적 특성을 평가하기 위한 일반 조사 항목의 경우, 대체로 분석 및 측정 비율이 높게 나타났다. 먼저 해양수질 평가항목 중에서, 수온, pH, DO, SS, COD, T-N, T-P 등의 일반 항목에 대한 조사는 평균 95% 이상의 비율을 보여, 대부분의 준설관련 사업에서 평가-조사가 수행된 것으로 파악되었다. 반면, 투명도(Water transparency)에 대한 조사 비율은 13%로 가장 낮았다(Fig. 3).

해수 내 각 일반 항목의 조사 및 분석 현황을 보면, 투명도 조사 비율을 제외하고, 대부분 78% 이상의 조사 비율을 보이고 있다. 투명도는 수중 부유물량에 의한 탁도와 반비

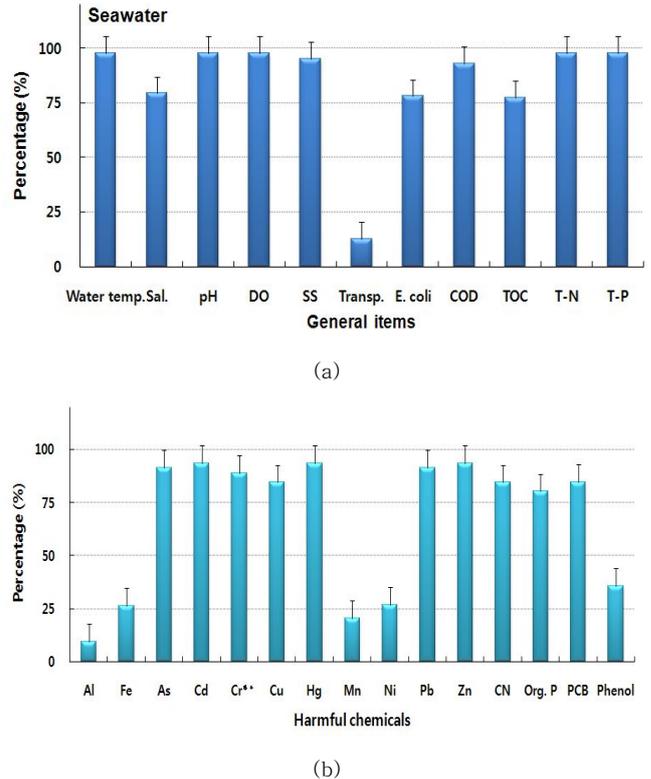


Fig. 3. Analysis percentages by general items (a) and harmful chemicals (b) in seawater with regard to dredging projects.

례적인 상관성을 지니고 있으며(Lim et al., 2007b), 부유 토사의 농도를 산정한 SS 조사가 95%로 높은 비율로 수행되고 있기 때문에 현장 조사 대상 목록에서 누락된 것으로 추측된다. 한편 투명도 심도에 계수 2.7을 곱하면, 수중으로 태양광이 최대 도달하는 유평대(Euphotic zone) 하단의 깊이를 추정할 수 있다(Poole and Atkins, 1929; Heiskanen and Keck, 1996; Park et al., 2002). 이를 통해 식물플랑크톤이나 광합성 해조류의 수직 분포를 간접적으로 유추할 수 있다(Erfemeijer and Lewis III, 2006). 한편 2011년 말에 개정·고시된 해양환경 기준(Notification No. 2011-972 of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)에서는 투명도(As secchi disc depth)를 포함한 5개(DO 포화도, Chl-a 농도, DIN 농도, DIP 농도)의 생태기반 수질인자를 이용하여 해양 수질을 평가하도록 하고 있다(National law information center, 2012). 따라서 현장 조사 시 투명도에 대한 현황을 면밀하게 파악하고, 향후 이를 적극 활용하기 위한 방안이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

퇴적물 내 일반 항목에 대한 분석 현황에서 물리적 성질을 나타내는 입도(Grain size)와 함수율(Water content)의 조사 비율은 각각 84%와 73%였다(Fig. 4).

연안준설 사업에 따른 해양 수질 및 퇴적물 영향평가 개선 방안

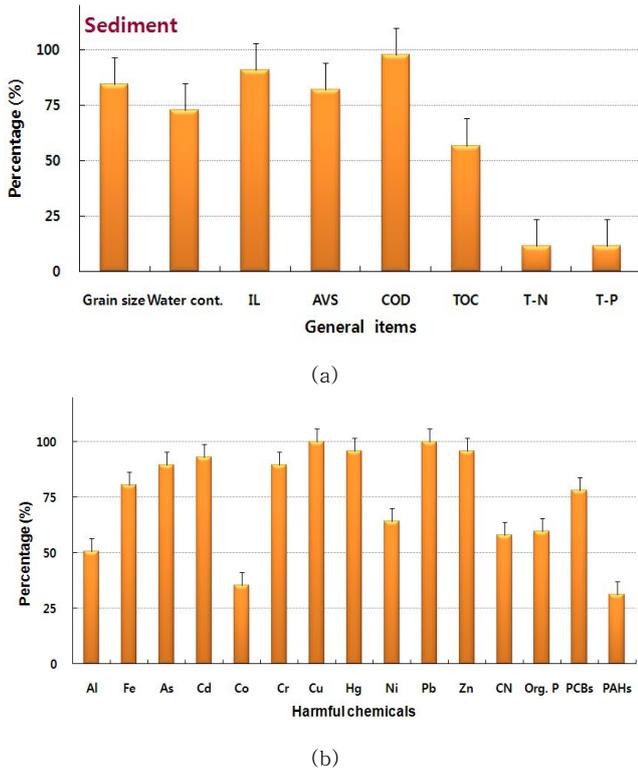


Fig. 4. Analysis percentages by general items (a) and harmful chemicals (b) in sediment with regard to dredging projects.

저서 환경의 유기물 오염 정도를 나타내거나 혐기성 조건을 유발하는 상태를 나타내는 IL(강열감량), AVS(산취발성화물), COD 등의 분석 비율은 각각 91%, 82%, 98%로 높은 값을 나타냈으나, 퇴적물 내 유기탄소량을 나타내는 TOC의 분석 비율은 57%로 저조하게 나타났고, TN, TP는 각각 11%로써 대부분의 퇴적물 환경 조사에서 분석이 이루어지지 않았다.

퇴적물 내 일반 항목에 대한 분석 비율을 보면, TOC, TN, TP를 제외한 대부분의 항목에서 평균 73% 이상의 비교적 높은 분석 비율을 보였다. 퇴적물 내 유기물량의 지표로 활용되는 COD는 난분해성 유기물에 대한 정량이 어렵다는 단점이 있다(Son et al., 2003). 강열감량 방법은 600 °C 이내(550 ± 50 °C)의 상대적으로 낮은 온도에서 퇴적물을 연소하여 감량한 무게를 통해 유기물량을 추정하는 방법으로서, 분석값의 정밀도가 낮고, 퇴적물 내 CaCO₃의 불완전 연소로 인해 분석 오차가 발생하는 등의 단점이 있다(Hirota and Szyper, 1975, Craft et al., 1991). 이에 비해 TOC는 1,000 °C 이상의 고온에서 유기물이 완전히 연소되었을 때 방출되는 CO₂량을 유기탄소로 환산하는 방법으로써, 유기 형태의 탄소 농도를 직접 표현한다는 점에서 다른 유기물 추정 방법에 비해 보다 명확한 농도값을 구할 수 있는 장점이 있다(Kim et al.,

2006). 특히 TOC/TN비를 통해 주변해역 내 유기물의 기원 또는 분해도를 산정하는데 이용되기도 한다(Kang and Choi, 2003; Gonnecta et al., 2004; Covelli et al., 2008). 따라서, 향후 TOC에 대한 분석을 더 많이 수행하여 퇴적물 내 유기물량을 산정하는 것이 필요하다고 사료된다. 한편 퇴적물 내 TN, TP는 수저 준설토사의 유효 활용을 위한 오염도 기준 항목으로서뿐만 아니라, 준설 과정 중에 수중으로 다량 유출될 수 있고, 이중 특히 용존무기질소(DIN = NH₄⁺ + NO₃⁻ + NO₂⁻)와 용존무기인(DIP)은 주변 연안해역의 부영양화를 가중시킬 수 있는 성분이므로, 향후 준설 사업을 위한 협의 시, 충분한 현장 조사가 수행되어야 할 것이다.

3.2.3 중금속 등 유해 화학물질

해역이용협의서 작성 기준에 제시된 중금속에 대해 각 항목별 분석 비율을 정리하였다. 해수 내 중금속 분석 현황에서, As, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Hg, Pb, Zn 등은 평균적으로 높은 분석 비율을 보였다(Fig. 3). 반면, Al, Fe, Mn, Ni 등은 각각 10%, 26%, 20%, 27%로써 매우 저조한 분석 비율을 나타냈다. 퇴적물 내 중금속 분석 현황을 보면, Fe (81%), As (89%), Cd (93%), Cr (89%), Cu (100%), Hg (96%), Pb (100%), Zn (96%) 등에 대해서는 매우 높은 분석 비율을 보였다. 반면, Al, Co, Ni 등은 각각 51%, 35%, 64%로써 저조한 분석 비율을 나타냈다.

해역이용협의 시 해양환경 평가를 위한 해수, 그리고 퇴적물 내 각각의 중금속 분석 항목에는 Al을 비롯하여 11개의 세부 평가항목이 선정되어 있다. 이 중 Al과 Fe은 해수 및 퇴적물 내에서의 자체적인 농도로서보다는 수계 및 저서계 환경의 오염도를 지수화하여 평가하기 위한 인자로서 필수적인 원소이다. 그러나 2011년 해역이용협의서에서 중금속 분석 현황을 정리한 결과, 그 중요성과 활용도에 비해 Al과 Fe에 대한 분석 비율은 상대적으로 저조한 것으로 나타났다(Fig. 3, 4). 해역이용협의서 작성 지침(Notification No. 2009-793 of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)에는 퇴적물 내 중금속의 오염도를 평가하는 방법으로 2가지의 방식이 제시되어 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012a). 첫 번째 방법으로서 국내·외 환경기준 농도에 대해 최종 농도값을 상호 단순 비교하여 평가하는 방법이 있고, 나머지 한 가지는 지각을 구성하는 주요 원소로서 자연적인 풍화 작용에 의해 유입되지만, 인위적인 오염 영향은 상대적으로 낮은 Al을 보존성 기준원소로 정하여 특정 금속 원소가 농축·부화된 정도를 지수화하여 평가하는 방법이다(Lim et al., 2007a; Hong et al., 2007). 이와 같이 협의서 작성 규정에서는 상기 2가지 방법을 통해 퇴적물의 오염도를 평가하도록 하고 있지만, 실제로는 국내·외 환경 기준 농도와

의 단순 비교만을 수행하였다. 그리고 어떠한 준설관련 대상 사업에서도, 각 사업 대상 지역별로 퇴적물 내 특정 성분의 상대적인 지화학적 오염 특성을 나타내는 농축계수 분석 (Analysis of enrichment factor)을 통한 평가는 전혀 이루어지지 않은 것으로 파악되었다.

또한, 해역이용협의서 작성에 관한 규정(Notification No. 2009-793 of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)에서 중금속의 분석에 관한 전반적인 과정과 절차에 대해 ‘해양환경공정시험기준’에 의거하거나 준하여 분석하도록 권고하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012a). 하지만 해수 및 퇴적물 내 중금속 항목의 세부 평가 과정에 대한 기술과 세부 준수사항에 대한 규정은 모호하거나 부실하게 표기되어 있다. 우선 첫 번째로 해수 내 중금속 분석을 위한 구체적인 과정과 방법, 그리고 결과값 정리 등에 대한 세부 지침내용은 모호하게 표기하고 있거나 아예 언급되어 있지 않다. 뿐만 아니라 중금속 분석 자료에 대한 정확도와 객관적인 신뢰도를 평가하는 방법은 아예 누락되어 있는 실정이며, 실제 협의서에서 검출한계 및 회수율 산정과 같은 정도관리를 수행한 사례도 매우 미흡하였다(Table 2). 두 번째로서, 퇴적물 분석에 있어서 “모든 항목은 ‘해양환경공정시험기준’에 따라 분석한다. 특히 유해 화학물질은 ‘총농도’로 표현해야 하므로 완전 분해(Full digestion)시킨 후 측정해야 한다.”라고 명시되어 있다. 따라서 퇴적물 전처리 시 질산, 과염소산(As의 경우, 황산), 불소산 등의 혼합산을 이용한 완전 분해(단, Hg는 예외)를 통해 총농도를 산출하여야 한다. 그러나 실제로는 완전 분해를 수행한 경우는 8건

(27%)에 불과하였고, 부분 분해를 한 경우도 8건으로 나타나 작성 규정을 제대로 준수하고 있지 않은 것으로 파악되었다(Table 2). 또한 전처리 과정이 명확하게 구분되지 않은 사례는 14건으로 나타나, 향후 실험 방법 및 과정에 대한 구체적이고 상세한 설명이 제시되도록 작성 지침에 명시해야 할 것이다. 앞서 언급된 바와 같이 현재 ‘해역이용협의서’ 작성에 관한 규정에는 표준화된 분석 방법(해양환경공정시험기준)이 선정되어 있지만, 분석 결과의 신뢰성 확보를 위한 기기 검출한계(Instrument detection limit, IDL) 또는 분석 검출한계(Method detection limit, MDL) 산정뿐만 아니라, 정밀도(Precision)와 정확도(Accuracy) 체크와 같은 정도관리의 수행의무에 관한 사항이 누락되어 있어, 분석과정을 평가하고 결과값을 검증하기 위한 제도적 근거가 미약한 실정이다. 실제로도 퇴적물 내 중금속 분석 시 회수율을 산정하고, 검출한계를 제시한 경우는 매우 미흡하였다(Table 2).

퇴적물에 대한 전처리 방법으로써 완전 분해를 했는지 또는 부분 분해만을 했는지에 따라 최종 결과에서 중금속 농도값의 범위는 매우 큰 차이를 나타낸다. 기존 연구 사례에서 Um et al.(2003)과 Oh et al.(2011)은 동일한 퇴적물 시료를 대상으로 전처리 방법을 다르게 적용하여 Al, Fe, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn 등의 각 금속 원소를 분석하였다. 이 때 완전 분해 시의 농도값을 기준으로 하여 부분 분해를 통한 농도값의 비율을 산정한 결과, 최소 6%에서 최대 93%에 이르는 극심한 변동 및 차이를 보였으며, 부분 분해에 사용된 산(Acid) 용액의 종류에 의해서도 그 변동폭이 크게 나타난다는 점을 밝혀냈다(Table 3).

Table 2. The implementation status on analysis of metals in seawater and sediment

Sample	Pre-treatment			Equipment Specification				Recovery Efficiency	Detection Limit
	Solvent Extraction*			ICP		AAS			
	Chelate-Solvent Extraction*	Unidentified	Not Analysed	-AES	-MS	Flame	Graphite furnace		
Seawater**	6	22	2	1	8	11	8	1	1

Sample	Pre-treatment			Equipment Specification					Recovery Efficiency	Detection Limit
				ICP		AAS				
	Full Digestion (HNO ₃ -HClO ₄ -HF)	Partial Digestion (HNO ₃ -HClO ₄)	Unidentified	-AES	-MS	Flame	Graphite furnace	Unidentified		
Sediment**	8	8	14	1	12	13	1	3	1	1

* Chelating agent: APDC, Mixed APDC/DDDC solutions; Organic solvent: CHCl₃, DIBK, MIBK, Freon etc.

** Numbers in this table denote the implemented cases of total reviews for the dredging projects.

연안준설 사업에 따른 해양 수질 및 퇴적물 영향평가 개선 방안

Table 3. The ratio of partial digestion to full digestion as pre-treatment

Study area	Unit : %						
	Al	Fe	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn
Yeongil Bay ^a	6.1	41.2	93.3	23.0	-	72.9	83.3
Streams in Yeongsan and Seomjin ^b	-	-	38.4	52.9	69.1	63.4	82.9
Lakes in Yeongsan and Seomjin ^c	-	-	30.7	55.9	58.3	66.6	61.6

a : Um et al.(2003) - Full digestion: HNO₃ + HClO₄ + HF; Partial digestion: HCl

b, c : Oh et al.(2011) - Full digestion: HNO₃ + HClO₄ + HF; Partial digestion: HCl + HNO₃

이러한 사실은 특정 해역에서 준설한 퇴적토에 대해 ‘유효 활용’이나 ‘해역 투기’를 위한 성분 분석 및 평가 시, 작성 지침과 다르게 부분 분해하였을 경우, 일부 중금속 항목이 실제 농도값보다 훨씬 과소평가됨으로써, 적절하지 않은 절차에 의해 매립, 해역 투기 등의 준설토 처리가 이루어질 우려가 있다는 점을 시사하고 있다. 이와 같은 행위가 지속적으로 반복될 경우, 장기적으로는 주변 환경에 대한 가중 영향이 더 크게 작용할 수 있다. 따라서 향후 준설관련 사업뿐만 아니라 해역이용협의 대상 사업에 대한 실제 해양환경영향 평가 시, 사업시행자(또는 평가대행자)로 하여금 분석 전반에 대한 과정을 상세하게 명시하도록 하되, 협의서 작성 규정에 따라 반드시 ‘완전분해법’으로 전처리 방법을 일원화하여, 일관성 있는 분석과 농도값 산출이 이루어지도록 유도해야 할 것이다.

또 한편으로는 준설 퇴적물을 완전 분해한 후 분석한 자료에서, 일부 평가항목의 농도값이 오염도 기준을 초과하는 것으로 조사되었음에도, ‘매립재 및 재하토’로 활용하거나, ‘외해 투기’를 계획하고 있는 것으로 파악되었다(Table 4).

따라서 재차 강조하자면, 해양 퇴적 환경이나 수질 환경에 대해 신뢰할 수 있는 평가를 위해 최우선적으로 정확한 분석값을 확보해야 한다는 선결조건이 충족되어야 한다. 또한 그에 못지않게, 장기적인 계획을 수립하여 오염도가 높은 준설토에 대해 정화처리(Decontamination) 기술을 향상하고자 하는 노력을 기울이는 한편(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2007), 몇몇 특정 성분이 과도하게 높게 축적되었을 경우의 재처리 및 기타 유효활용 방안을 세분화하여, 실용화할 수 있는 실효적 대안을 강구해야 할 것이다.

Table 4. Comparison of the marine environmental criteria and contamination level assessment on dredged sediments

Assessment item	Assessment of contamination level			Dredging projects* **	
	Beneficial use	Ocean dumping		Case A	Case B
		I	II		
As	18	70	20	1.62~15.0	N.D~2.66
Cd	1.5	10	2.5	N.D~0.81	0.34~4.13
Cr	80	370	80	11.7~53.8	28.2~102
Cu	60	270	65	N.D~41.1	20.0~160
Hg	0.25	1.2	0.3	0.02~1.38	N.D~2.06
Ni	35	52	35	11.2~62.0	8.72~36.2
Pb	45	220	50	N.D~18.9	23.4~64.9
Zn	180	410	200	5.20~92.2	106~233
t-PAH	2.64	45	4	-	-
t-PCB	0.023	0.180	0.023	-	-
TN	1,500	-	-	-	-
TP	500	-	-	-	-

* A and B cases are results analysed by the full digestion as a pre-treatment process on dredged sediments.

** N.D (not detected) means concentration level below the detection limit.

해수 내 난분해성 유기화합물을 비롯한 기타 유해화학물질의 분석 현황을 정리해 보면, CN, 유기인, PCB 등은 80% 이상으로써 분석 비율이 높았다. 하지만, 폐놀에 대한 분석 비율은 36%로써 저조한 것으로 나타났다(Fig. 3). 퇴적물 내 기타 유해화학물질의 경우, 분석 비율이 78%인 PCBs를 제외하고, 기타 PAHs, CN, 유기인 등의 분석 비율은 각각 31%, 58%, 60% 등으로써 낮은 것으로 조사되었다(Fig. 4). 이와 같이 다른 평가항목들에 비해 유기 합성물질의 분석 비율은 현저하게 낮은 것으로 파악되었다. 그러나 이들 물질들은 지난 1960년대 이후 육상 및 해안에서의 급속한 산업 활동 증가와 함께 농업 생산 증대를 위한 유기 약제의 살포 등에 의해 극미량 농도라고 하더라도, 연안 해역으로 지속적인 유입이 진행되고 있으므로(Kim et al., 1999; Han et al., 2005; Yim et al., 2007; Moon et al., 2010), 향후 각각의 유기 합성물질에 대한 현장 조사를 확대하고 정확한 분석을 통해 오염도 현황을 면밀하게 파악해야 할 것이다.

3.3 해양환경영향평가 개선 방안

준설관련 사업의 해역이용협의를 위한 해양환경영향 평가 시, 다음의 다섯 가지 개선 방안을 준수함으로써 보다 향상된 해양 수질 및 퇴적물 조사와 분석을 통해 해양 환경을 진단하고 평가할 수 있을 것이다.

첫째, 해수 내 투명도, 퇴적물 내 TOC 등의 일반 항목에 대한 분석 비율을 높여야 한다. 퇴적물 내 중금속의 오염 정도

(Contamination level)를 평가할 때, 환경기준과의 단순 비교뿐만 아니라, Al, Fe 등을 이용한 오염도 지수 산정(i.e., Enrichment factor)을 통해 다각적인 퇴적물 환경 평가가 이루어져야 한다. 기타 유해 화학물질에 대한 조사와 분석도 더욱 확대하여, 해양환경 전반에 대해 종합적인 진단과 평가를 수행하여야 한다.

둘째, 해수 및 퇴적물 환경 인자에 대해 분석 또는 측정 시, 장비의 성능, 전처리 과정, 분석 방법 등을 상세하게 명시해야 한다. 특히 퇴적물 내 중금속을 전처리할 때, 협의서 작성 지침대로 '완전분해법'으로 일원화하여, 사업자(또는 평가대행자)로 하여금 체계적인 분석과 농도값 산출이 이루어지도록 유도해야 한다. 국내의 해양퇴적물 환경기준과의 비교·평가 시에도 동일한 전처리 과정이 적용된 결과값들 간의 비교 및 해석이 이루어져야 한다.

셋째, 분석 결과값의 정확도에 대한 검증 과정이 누락되어 있다면, 객관적이고 신뢰성 있는 분석값을 확보할 수 없으므로, 각 분석 항목별 하한 검출한계값의 산정, 공인된 표준물질(CRMs)을 이용한 회수율의 체크 등을 통해, 분석 자료에 대한 검증과 관리(QA/QC, Quality Assurance/Quality Control)를 보다 엄격하게 적용해야 한다.

넷째, 준설 관련 해역이용협의 시 퇴적물 내 TN, TP 등의 평가항목을 조사 및 분석하고, 최근 개정·고시된 해수 및 퇴적물 해양환경기준 항목에 대해서도 조사·분석 범위를 확대하여, 현실적인 해양환경 평가가 이루어지도록 해야 할 것이다.

다섯째, 실험 및 분석 능력에 관한 숙련도 평가 확대, 공인된 기관의 주도 하에 실험실 간 교차 검증 및 상호 교정 테스트(Inter-calibration exercise)의 시행 및 확대, 기타 평가대행자의 전문성 및 역량 강화 프로그램 개발 및 추진 등의 제도 보완이 필요하다.

더 나아가 중금속과 같은 유해물질의 경우, 생태계 내 생물들의 체내에 오랜 시간 동안 축적되면서 먹이 연쇄를 통해 상위 고등생물들에게 전이되어, 수년에서 몇십년 후에 생리적 부작용이나 질병을 유발하는 특성이 있으므로, 준설 관련 사업과 기타 연안 개발 사업의 초기 단계에서 야기될 수 있는 오염 문제에 대해 보다 장기적인 안목과 관점에서 중금속과 같은 오염물질의 현황을 파악하고, 관리하면서, 적절한 처리를 통해 해양 환경 및 생태계의 건강성을 유지하고 보호하려는 노력이 필요하다.

4. 결론

준설관련 사업에 대해 해역이용협의를 위한 해수 및 퇴적물에 대한 해양환경영향 평가에 있어서 각 계절 특성을 대

표할 수 있는 시기에 현장 조사를 수행하여야 하며, 각 세부 평가항목에 대한 조사·분석이 집중 관리되어야 한다. 한편, 해역이용협의 시 세부 평가항목인 중금속 분석에 있어서, 아직까지 각각의 단계를 통합한 체계적인 관리가 진행되지 못하고 있는 것으로 파악되었다. 따라서 향후 통일된 전처리 방법, 즉 '완전 분해법'이 일괄 적용되어야 한다. 정확한 농도값 확보를 위해 동일한 조건에서 공인된 표준물질과 시료를 함께 분석·비교하여 검출된 중금속 농도의 비율, 즉 회수율을 반드시 산정해야 한다. 또한 분석 장비 및 분석 방법상의 검출한계에 따른 'N.D(Not detected: 불검출)'의 기준 농도 등에 대해 제시하여야 한다. 해양환경영향평가 관련 정부기관에서는 평가대행자에 대한 정기적인 숙련도 테스트, 분석실간 상호 교정 등의 시행 및 확대와 같은 프로그램을 운영하는 한편, 체계적인 지원 제도를 적극적으로 추진해야 한다. 이와 같은 내용을 해역이용협의서 작성 지침에 구체적으로 명시하여, 사업자(또는 사업자로부터 해양환경영향평가 업무를 위임받은 평가대행자)로 하여금 이를 반드시 이행 및 준수하도록 한다면, 해역이용협의서 작성 시의 분석값에 대한 신뢰도가 크게 향상될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원의 지원(RP-2013-ME-015)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Covelli, S., J. Faganeli, C. De Vittor, S. Predonzanani, A. Acquavita and M. Horvat(2008), Benthic fluxes of mercury species in a lagoon environment (Grado Lagoon, Northern Adriatic Sea, Italy). *Applied Geochemistry*, Vol. 23, pp. 529-546.
- [2] Craft, C. B., E. D. Cenecca and S. W. Broome(1991), Loss on ignition and Kjeldahl digestion for estimating organic carbon and total nitrogen in estuarine marsh soils: Calibration with dry combustion. *Estuaries*, Vol. 14, No. 2, pp. 175-179.
- [3] Erftemeijer, P. L. A. and R. R. R. Lewis III(2006), Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 52, pp. 1553-1572.
- [4] Gonnee, M. E., A. Paytan and J. A. Herrera-Silveira(2004), Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 61, pp. 211-227.
- [5] Han, S. K., J. Y. Park and M. H. Lee(2005), A study on

- distribution property of organic pollutants in southwest coastal waters. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 597-603.
- [6] Heiskanen, A. S and A. Keck(1996), Distribution and sinking rates of phytoplankton, detritus, and particulate biogenic silica in the Laptev Sea and Lena River (Arctic Siberia). *Marine Chemistry*, Vol. 53, pp. 229-245.
- [7] Hirota, J. and J. P. Szyper(1975), Separation of total particulate carbon into inorganic and organic components. *Limnology and Oceanography*, Vol. 20, No. 5, pp. 896-900.
- [8] Hong, J. T., B. S. Na, J. Y. Kim, Y. K. Koh, S. T. Youn, S. E. Shin, H. G. Kim, B. C. Moon and K. H. Oh(2007), Sedimentary geochemical characteristics and environmental impact of sediments in Tamjin River and Doam Bay. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 16, No. 6, pp. 393-405.
- [9] Kang, M. G. and Y. C. Choi(2003), The characteristics of suspended particulate matter and surface sediment of C, N in the northern east China Sea in summer. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 13-23.
- [10] Kim, G. Y., D. I. Lee, K. A. Jeon, K. H. Eom and Y. S. Woo(2009), Diagnosis for review of statement and system improvements of consultation on the coastal area utilization in Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 15, No. 4, pp. 345-354.
- [11] Kim, J. H., Y. K. Oh and B. Y. Park(1999), Residue of organophosphorus pesticides in the coastal environment on the Cheju Island. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 8, No. 4, pp. 503-507.
- [12] Kim, K. H., S. K. Son, J. W. Son and S. J. Ju(2006), Methodological comparison of the quantification of total carbon and organic carbon in marine sediment. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 235-242.
- [13] Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2000-2011), Korea Ocean Observing and Forecasting System (KOOFS), <http://www.khoa.go.kr/koofs/>.
- [14] Kwon, Y. T.(2004), Evaluation of heavy metals content in the shellfish and sediment on the dumping site of dredged sediment. *Environmental Research Institute, Kyungnam Univ.*, Vol. 27, pp. 17-32.
- [15] Lee, C. W., Y. T. Kwon and J. H. Yun(2004), Development of Dredging index for the rational remediation of polluted coastal sediments. *Journal of the Korean Society for Environmental Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 70-74.
- [16] Lee, D. I., D. S. Park, K. H. Eom, G. Y. Kim, H. S. Cho, J. K. Kim, Y. K. Seo and G. W. Baek(2009), Improvement of the marine environmental assessment for dredging and ocean disposal of coastal sediment in Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 18, No. 3, pp. 131-141.
- [17] Lee, J. W., J. H. Maeng, K. W. Cho, G. W. Yang and Y. S. Kim(2003), The movement characteristics of suspended solid(SS) in harbor construction(II) - The Landfill construction and the grab dredging construction. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 46-53.
- [18] Lim, D. I., J. Y. Choi, H. S. Jung, H. W. Choi and Y. O. Kim(2007a), National background level analysis of heavy metal concentration in Korean coastal sediments. *Ocean and Polar Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 379-389.
- [19] Lim, D. I., J. Y. Choi, H. S. Jung, K. C. Rho and K. S. Ahn(2007b), Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas. *Progress in Oceanography*, Vol. 73, pp. 145-159.
- [20] Maeng, J. H.(2007), Mitigation plan on adverse environmental impacts due to reclamation and dredging projects in the sea area. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 3, pp. 31-38.
- [21] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012a), Guidelines for Practitioners on the System of Sea Area Utilization Consultations, pp. 177-198.
- [22] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012b), Operation of the Appraisal Authority to Assess Environmental Impacts on the Sea Area Utilization in the Year 2011, pp. 6-40.
- [23] Ministry of Maritime Affairs and Fisheries(2007), Criteria Establishment for Decontamination and Beneficial Use of Dredged Sediments (Final research report), pp. 327-349.
- [24] Moon, H. B., K. Kannan, H. G. Choi, Y. R. An and S. G. Choi(2010), Concentrations and accumulation features of PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs in cetaceans from Korean coastal waters. *Chemosphere*, Vol. 79, pp. 733-739.
- [25] National law information center(2012), Marine Environmental Management Act, <http://www.law.go.kr/>.
- [26] Oh, D. Y., K. K. Choi, I. A. Huh, I. S. Hwang, Y. H. Kim, J. Hur, H. S. Shin, J. E. Oh, W. S. Shin and J. H. Park(2011), Correlation of heavy metal concentrations

- between total digestion and aqua regia digestion for sediments from Yeongsan and Seomjin watersheds. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 32-38.
- [27] Park, J. T.(2008), "A study on compositions for aggregation utilization of marine sediments (dredged material) in major harbors", Master's Thesis, Kwongwoon Univ., Seoul, pp. 23-40.
- [28] Park, M. G., S. R. Yang, J. H. Shim, C. S. Chung, G. H. Hong, S. J. Bae and D. B. Yang(2002), Is nitrogen uptake rate by phytoplankton below the euphotic zone in the Yellow Sea considerable? *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 7, No. 2, pp. 60-67.
- [29] Poole, H. N. and W. R. G. Atkins(1929), Photo-electric measurement of submarine illumination throughout the year. *Journal of the Marine Biological Association of the U.K.*, Vol. 16, pp. 297-324.
- [30] Son, J. W., Y. C. Park and H. J. Lee(2003), Characteristics of total organic carbon and chemical oxygen demand in the coastal waters of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 8, No. 3, pp. 317-326.
- [31] Um, I. K., D. L. Lim, M. K. Lee, S. K. Jeon and H. S. Jung(2003), Spatial variability and contents of metals in the surficial sediments of Youngil Bay, East Coast of Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 24, No. 5, pp. 477-490.
- [32] Yim, U. H., S. H. Hong and W. J. Shim(2007), Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea. *Chemosphere*, Vol. 68, pp. 85-92.
- [33] Yoon, G. L. and W. S. Jeong(2008), Assessment of contamination of Harbor dredged materials for beneficial use. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 5, pp. 15-25.

원고접수일 : 2013년 02월 05일

원고수정일 : 2013년 04월 05일

게재확정일 : 2013년 04월 25일