

준설토사 개량을 통한 건설재료 활용방안

- 해외 사례를 중심으로 -



오 명 학

한국해양과학기술원
연안공학연구본부
책임연구원
(omyhak@kiost.ac)



오 영 민

한국해양과학기술원
연안공학연구본부
책임연구원
(ymoh@kiost.ac)



윤 길 림

한국해양과학기술원
연안공학연구본부
책임연구원
(glyoon@kiost.ac)

1. 서론

준설은 항만과 항행 수로의 개발과 유지관리 및 오염정화와 홍수관리를 위해 필수적이다. 수로의 준설은 많은 양의 준설토를 발생시킨다. 준설토는 소중한 자원으로 활용될 수 있으나 경제적, 물리적, 법률적 및 환경적 제약들로 인해 많은 양이 투기되고 있는 실정이다. 선진국들에서는 준설토사에 대한 다양한 활용 기술을 적극적으로 실용화하여 유효활용 비율을 높이고 있으나, 국내에서의 준설토 활용은 아직까지 미흡한 실정이다. 최근 해양수산부는 매년 항로 및 유지준설로 발생하는 약 480만 m³의 준설토의 활용도를 제고하기 위한 해양환경 개선방안을 마련하여 2016년부터 본격 추진하겠다고 발표하였다.

준설토는 골재로 직접 사용되거나 건축자재(예, 벽

돌)로 변형될 수 있으며 또는 제방, 소단(berm) 또는 양빈 등의 공사에서 직접 사용될 수도 있다. 또한, 침식해안이나 농지 또는 습지를 복원하고 새로운 습지 환경이나 내륙 환경을 조성하기 위해 사용될 수도 있다. 특히, 준설토는 건설산업에서 사용되는 자연자원에 대한 대체재료로서 사용될 수 있다. 준설토로부터 만들어지는 건설재료는 골재, 경량 골재, 벽돌, 인공 현무암, 시멘트 등으로 구분할 수 있다. 이것들은 콘크리트 골재(모래나 자갈), 역청 혼합물 및 모르타르의 생산 또는 대체재료(모래), 벽돌 제조용 원료, 타일(점토)과 같은 세라믹, 격리용 펠릿, 경량 뒤채움재료 또는 골재(점토), 제방과 사면의 침식보호를 위한 호안이나 블록의 생산을 위한 건설재료(암석과 혼합물) 등 다양한 용도로 활용될 수 있다.

준설토는 직접 사용되는 경우도 있고, 채취와 이송

을 위한 특수장비가 사용되는 경우도 있다. 육지에서의 준설토 활용을 위해서는 탈수, 분리공정 또는 더 복잡한 처리가 요구되기도 한다. 준설토를 건설재료로 만들기 위해서 안정화(준설토를 시멘트 및 골재와 같은 첨가물과 혼합하는 것) 및 세라믹 처리(예, 벽돌, 타일)와 같은 처리 기술이 적용될 수도 있다.

본 고에서는 해외사례를 중심으로 안정화 등의 개량을 통해 준설토를 건설재료로 활용하는 방안을 정리하였다.

2. 준설토 활용을 위한 일반적 고려사항

그림 1은 준설토의 수요와 공급을 조화시키기 위한 준설토 활용을 결정하는 단계적 흐름도를 제시한 것이다. 준설토가 대규모 토목공사에서 건설재료로 활용되기 위해서는 준설토의 공급과 준설토의 활용 수요가 연계되는 것이 중요하다.

기술적 측면에서는 준설토의 적절한 유효활용을 위

해서는 준설토의 특성 파악이 필수적이다. 대부분의 경우 분류특성, 일축압축강도, 투수성 등은 준설토의 거동특성 및 관련기준 평가를 위한 기본이 되는 특성 값이며, 특히 분류 특성을 가지고 개략적인 활용가능성을 판단할 수 있다. 표 1은 준설토를 건설재료로 활용함에 있어서의 공학적 기준, 필요한 처리방법 및 환경/공학/비용에 관한 고려사항들을 정리한 것이다.

3. 해외 사례

3.1. 일본 해상공항건설 매립재료로의 활용

일본에서는 해상공항 건설의 매립재료로서 준설토를 활용하고 있다. 준설토는 그대로 매립재료로서 활용되기도 하지만, 경우에 따라서는 고형화/안정화 등의 처리를 통해 활용되기도 한다. Chubu 국제공항은 Ise만의 내부에 인공섬을 조성하여 건설된 공항으로 2001년부터 2003년에 걸쳐 총 매립량은 56,000,000

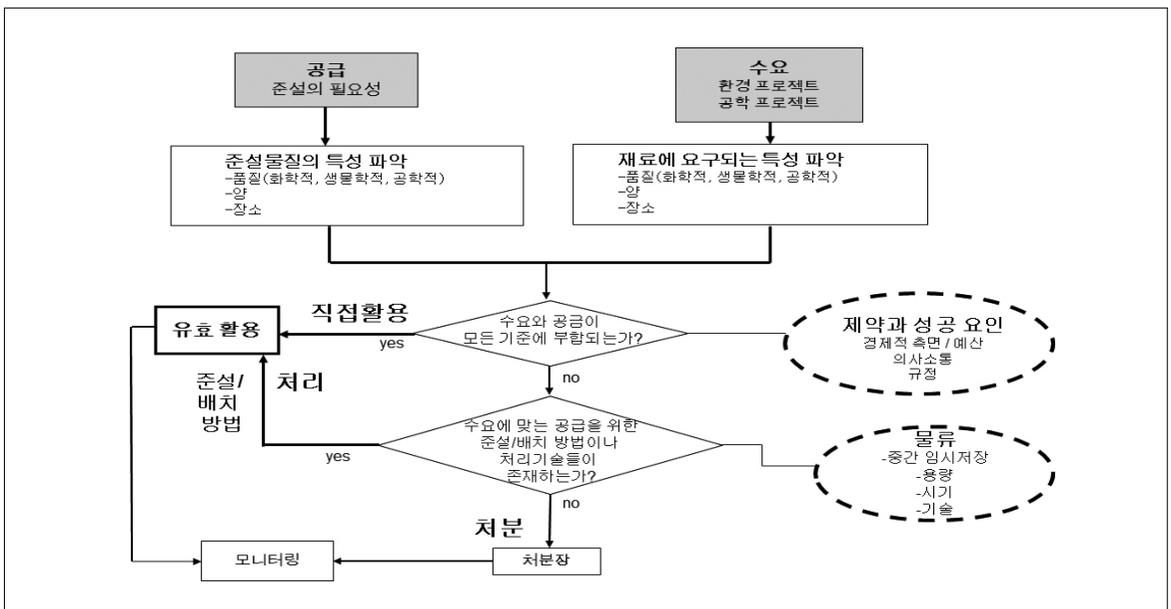


그림 1. 준설토의 활용과 처분의 의사결정체계(PIANC, 2009)

표 1. 준설토의 건설재료 활용을 위한 고려사항(PIANC, 2009)

산물	용도	필요 기술	환경적 고려사항	공학적 고려사항	비용 고려사항
모래 (저급기술)	기초 : • 도로 • 철도 • 주차장 • 건물	라군과 체가름을 통한 모래분리	잔류오염, 염화물/염 함량, 용출 가능성, 기질의 물리적 변화, 지하수 흐름과 서식지에 의 영향	잔존물의 존재 가능성	재래식 토공장비를 사용할 시 비용이 적음. 잔존물의 제거 시 비용이 많이 소요됨. 분석과 관리에 추가적인 비용 필요.
모래 (고급 기술)	• 배수층 • 콘크리트 • 아스팔트	기계적 설치에 의한 모래 분리(하이드로사이클론과 기타 장비)	적은 잔류오염, 염화물/염 함량, 용출 가능성, 기질의 물리적 변화.	석회와 폐각의 존재 가능성	잔존물이 많고 추가적인 처리가 필요한 경우 비용이 많이 소요됨
모래층 및 점토층	상동	모래의 라군 처리와 점토의 속성 처리의 조합	상동	상동	상동
골재 또는 '견고한 지층'	기초: • 도로 • 철도 매립지 캐핑	화학적 고정/안정화(시멘트, 석회석, 점토, 비산회 등)	잔류오염, 사용과 재활용에 대한 용출 가능성	압축강도는 우수하지만 균열 발생이 쉬움	첨가물 비용 (시멘트가 비쌈)
골재(경량)	• 경량 콘크리트 • 경량 기초	열 고정(소결) (1000-1200°C)	잔류 오염 없음, 사용과 재활용에서의 용출 가능성 적음	황산염 환원 박테리아의 긍정적 영향	에너지 비용 및 더욱 비싼 전처리. 간헐적 주입은 에너지 낭비를 의미함
벽돌	• 건축재료 • 도로	열 고정(소결)	잔류 오염 없음, 사용과 재활용에서의 용출 가능성 적음	기본 재료로 만들어진 벽돌에 대한 것과 동일	에너지 비용 및 더욱 비싼 전처리. 간헐적 주입은 에너지 낭비를 의미함. 가스 처리 및 모니터링.
점토	• 제방 커버 • 강둑 보호를 위한 제방 • 도로 기층	숙성, 기계적 탈수	잔류 오염, 염화물 함유량, 용출 가능성, 기질의 물리적 변화	자연점토에 대한 것과 동일	점토에 대한 탈수 공정
인공 현무암	제방, 해안 보호	열 고정 : 용융과 결정화			매우 비쌈. 높은 에너지 소비, 연료가스 정화
시멘트	모르타르	열 고정			매우 비쌈. 높은 에너지 소비, 연료가스 정화

m³의 매립공사가 진행되었다. 공사가 짧은 기간 내에 수행되어야 했기 때문에 경제적이고 효율적인 건설 방법의 하나로 약 8,600,000m³의 준설토를 매립하는 것으로 추진되었다. 이 사업에서는 준설토를 매립하고

안정화시키기 위하여 압축공기 흐름 교반(Pneumatic Flow Mixing) 공법을 사용하였으며, 파이프 내에서 시멘트를 혼합하여 고형화시켰다(그림 2, 그림 3). Nagoya 항에서 그랩 준설선을 이용한 준설하고 바지

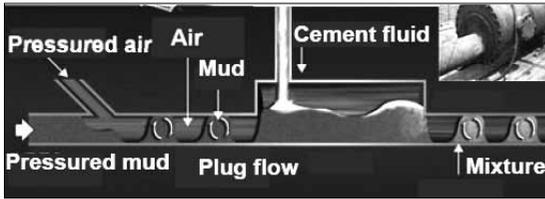


그림 2. 압축공기 흐름 교반 공법 개념도



그림 3. Chubu 공항 건설시 사용된 준설토 이송 파이프 및 펌프 (PIANC 2009)

선을 이용하여 이동한 후 압축공기펌프를 통해 바지선으로부터 매립지로 이송하였다. 이송 과정에서 1m³의 준설토 당 50kg의 시멘트 첨가하여 준설토를 매립하였다.

Kitakyushu 공항의 건설에는 Kanmon 해협의 유지관리 준설토로 인해 발생하는 준설토가 사용되었다. Kanmon 해협은 한국, 중국과 일본을 잇는 항로로 일본에서 해운량이 가장 많은 해협 중 하나이다. 항로

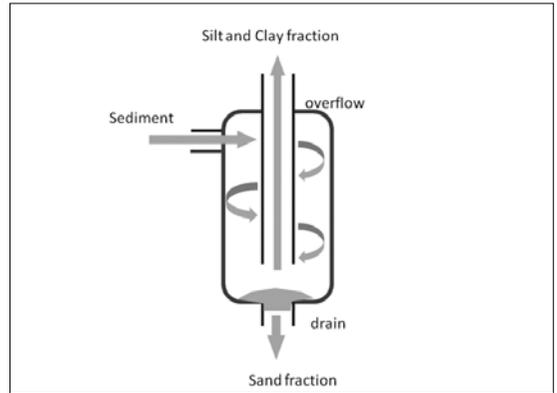


그림 4. 준설토 입자분리기 개념도

의 남동쪽에는 600,000m³의 퇴적량이 발생하는 등 많은 토사 퇴적량으로 항로로 이용하는 데 많은 어려움이 있었다. 이에 Kitakyushu 공항건설에 Kanmon 해협의 준설토를 활용하게 되었다. 준설토는 실트-점토질과 모래질로 구분하여 실트-점토질은 매립을 위한 주재료로 쓰였고, 모래질은 매립지 상부를 덮는 재료로 사용되었다. Kanmon 해협의 준설토에는 약 65~75%가 모래질이었으므로 이를 실트 및 점토질과 분리하기 위하여 원심력을 이용한 입자분리기를 개발하여 사용하였다(그림 4). 개발된 입자분리장치는 시간당 3,000m³을 처리하였다. 2003년과 2004년에 각각 340,000m³과 220,000m³이 준설토되었고, 여기서 227,000m³과 124,000m³의 모래를 분리하였으며, 실트 및 점토질을 매립하고 모래는 매립지 상부 복토에 사용하였다.

3.2 준설토와 슬래그 혼합 활용

준설토에 제강슬래그를 첨가하면 흙이 고화되는 것으로 알려지게 되면서 관련 연구가 수행되고 있다. 제강슬래그에는 석회(CaO)가 많이 포함되어 있으며, 준설토에 포함되는 실리카와 반응하여 칼슘탄화규소계 수화물과 칼슘알루미늄네이트가 형성되어 고화되는 것으로 추정하고 있다. 제강슬래그는 지금까지 노반 재

료와 아스팔트 혼합물용 골재, 샌드컴팩션 파일등에 단편적으로 이용되어 왔지만 내부마찰각이 크고 내마모성이 좋은 특성이 있기 때문에 다양한 용도로의 활용이 검토되고 있다. 제강슬래그 혼합토는 준설토의 이용 확대방법의 하나로 기대되는 지반재료이다.

Malasavage et al.(2012)은 Baltimore 준설토와 제강슬래그 혼합시료의 특성을 분석하고 제방 조성재료로서의 활용성을 검토한 바 있다. 통일분류법상 OH(high-plasticity organic silt)로 분류된 Baltimore 준설토는 제방 조성재료로는 적합하지 않은 상태였으나, 슬래그를 50% 이상 혼합함으로써 SM(silty sand)으로 분류되어 제방 조성에 활용할 수 있는 조건이 되는 것으로 나타났다. 준설토-슬래그 혼합토의 다짐특성을 평가하였는데, 다짐시험결과 슬래그 함량이 증가함에 따라 건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(그림 5). Malasavage et al.(2012)은 준설토-슬래그 혼합토로 제방 조성 현장시험시공을 실시하였다. 현장 시험시공은 준설토 100%, 슬래그를 20%, 50%, 80%로 혼합한 준설토-슬래그 혼합토, 슬래그 100%의 다섯가지 조건으로 이루어졌다. 시험시공된 준설토-슬래그 혼합토 제방에 대해 콘관입시험(CPT)를 실시하여 강도를 확인하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 평균 선단관입저항력은 준설토 100%로 시공된 경

우 1.3MPa이었으나, 슬래그 함량이 20%인 경우에는 2.9 MPa, 슬래그 함량이 50%인 경우에는 6.2 MPa, 슬래그 함량이 80%인 경우에는 11.6 MPa로 슬래그 함량이 증가할수록 강도증가 효과가 뚜렷하게 나타나 슬래그 혼합에 따른 준설토 개량효과가 충분히 발현되는 것으로 나타났다.

준설토-제강슬래그 혼합토에 대한 연구는 강도 특성에 대해 실험적 연구는 많이 수행되어 왔으나 (Wild et al. 1998; Chan et al. 2011; 조민재 등 2012; Kikuchi and Mizutani, 2013), 현장시험에 대한 연구가 충분히 많이 수행되지 않았기 때문에 제강슬래그 혼합토의 현장에서의 품질 관리 방법에 대해서는 계속 검토가 필요한 것으로 생각된다.

3.3. 준설토 매트리스 공법을 이용한 도로건설

네덜란드에서는 매년 항만과 수로 준설에서 대략 30,000,000m³의 준설토가 발생한다. 이 준설토 중 오염도가 높은 경우에는 다른 해역에 투기하거나 재이용하는 것이 불가능하고, 주로 준설토 투기장으로 이용되어 왔다. 만약 준설토가 건설재료로 이용될 수 있다면 준설토 투기장을 설치하기 위한 공간과 사업비가 크게 절감될 수 있다. 이에 네덜란드에서는 오염된 준설토를 도로 하부 또는 주변부에 사용하기 위한 방법

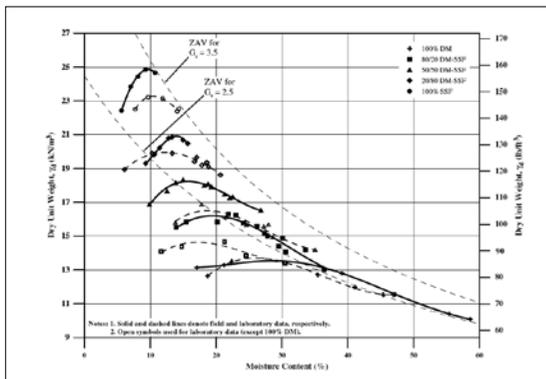


그림 5. 준설토-슬래그 혼합토의 다짐특성 (Malasavage et al. 2012)

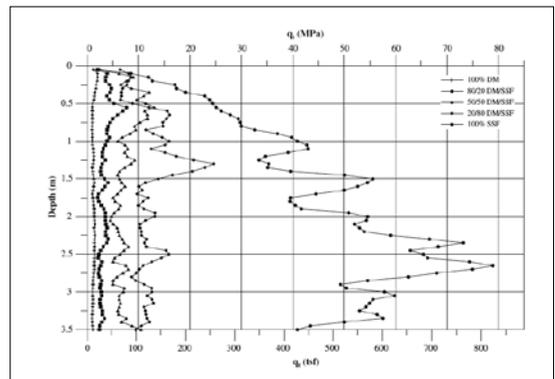


그림 6. 준설토-슬래그 혼합토 조성 시험제방의 CPT 시험 결과 (Malasavage et al. 2012)



그림 7. 준설토 매트리스(PIANC 2009)

으로 'self-cleaning road' 프로젝트를 추진하였으며, 준설토 매트리스 공법이 개발되었다.

준설토 매트리스 공법은 준설토를 내구성과 경량성을 갖춘 주요한 도로 건설재료로 만든 것이다(그림 7). 준설토 매트리스는 기존의 시공 방법을 적용할 수 있는 건설재료이며 오염된 준설토의 정화에 생물학적 원리를 적용하였다. 준설토는 준설토 후 결합제(binder), 감속제(decelerator), 거품제재(foam), 유기질 섬유(organic fiber) 등과 혼합된다. 유기질 섬유(짚, straw)는 거품제재에 의해 형성된 미세간극을 연결하는 역할을 한다. 거품제재를 통해 재료의 무게를 감소시키고 투수성을 좋게 한다. 섬유질을 거품제재와 함께 첨가함으로써 준설토 혼합물의 투수성이 증

가된다. 결합제는 산화칼슘을 기반으로 한 물질이다. 감속제는 표면활성제 화합물로 준설토 혼합물의 취급과 펌프이송을 쉽게 하는 역할을 한다. 첨가물의 양은 혼합제 75~200 kg/m³, 감속제 3~4 kg/m³, 거품제재 500~1000 kg/m³, 유기질 섬유 50~150 kg/m³이다. 혼합 후에는 반응하지 않은 채로 존재하는 산화칼슘을 결합하기 위해 반응개시제를 첨가한다. 반응개시제와 유기질 섬유는 준설토 혼합재 내에서 유출과 확산 제어가 일어나도록 한다. 준설토의 특성에 따라 첨가량을 조절하여 혼합물질의 성질을 필요에 따라 변화시키는 것이 가능하기 때문에 준설토 매트리스 공법은 어떠한 종류의 준설토에도 사용될 수 있고, 준설토의 모래질 함량이 낮고 실트질이 대부분인 경우에도 적용가능한 것으로 제시되고 있다.

2005년에 약 100m 길이와 10m 폭을 가진 제방에 1,000m³의 준설토를 이용하여 파일럿 규모로 시공되었다(그림 8). 시공과정은 준설토 혼합물을 내부에 채우기 위한 제방을 쌓고, 제방의 안쪽에는 오염물질이 주변으로 확산되는 것을 막기 위해 토목섬유 차수막이 설치된다. 토목섬유 차수막의 상부에는 조립질 모래로 구성된 배수층을 설치하였다. 준설토 혼합물은 2~3일이 경과한 후부터 도로공사를 마무리하기에 충분한 강도를 가지게 되었다. 도로는 준설토 노반 위에 배수층, 기층과 일반적인 포장으로 이루어져 있다. 도



(a) 준설토로 시공된 노반



(b) 완공된 도로

그림 8. 준설토 매트리스 공법을 이용한 도로 시험시공 (PIANC 2009)

로를 따라서 침투정이 설치되어 도로의 배수층과 연결된다.

도로의 사용 기간 동안 준설토 매트리스에는 노면에서 유출된 빗물이 흡수된다. 배수층은 노면에서 유출된 빗물을 준설토 매트리스 전체로 분산시킨다. 이렇게 분산된 빗물은 거품 제재와 유기질 섬유에 의해 형성된 간극과 그 사이 통로를 통해 준설토 매트리스 내에 흡수된다. 이러한 준설토 매트리스의 특성으로 오염된 준설토가 정화될 수 있다. 준설토 혼합물 내의 결합제는 높은 pH를 형성하여 용출과 확산을 유발한다. 용출된 오염물질은 준설토 매트리스 내에 흡수된 물에 포집되고 하부 배수층을 따라 길 어깨의 생태 지역으로 이송된다. 이곳에서 용출된 오염물질은 흡수, 고정, 분해되어 최종적으로 정화된 물은 주변의 수계로 배출된다. 이탄질 필터는 pH를 중화시키고 중금속과 탄화수소를 흡수한다. 최종적으로 혐기성 수로와 습지에서는 남은 오염물질이 제거된다. 흡수되지 않은 중금속은 수로의 혐기성 환경에 의해 고정되고, 유기물은 상부 식물에 의해 산화된다.

준설토 매트리스 공법을 적용함으로써 자원(준설토)의 재이용이 가능하고 일차 자원의 사용을 줄일 수 있다. 준설토 매트리스를 적용함으로써 연약지반 구간에서 침하량이 기존의 모래 사용에 비해 25%까지 감소될 수 있었으며, 총 시공기간이 30%까지 단축될 수 있었다.

3.4 뉴질랜드의 mudcrete 매립재

뉴질랜드에서는 DDT와 납, 아연이 검출된 준설토를 머드크리트(mudcrete)로 안정화시키고 이 재료를 매립재로 사용하여 오클랜드의 Viaduct 항구의 안벽 공사에 적용한 사례가 있다.

안벽공사부지는 2m 정도의 비압밀 세립토적토(mud)가 견고한 잔류 점토와 이암/사암으로 구성된 풍화암층의 상부에 분포해 있었다. 세립토적토의 전단강도는 평균 5kPa이고, 깊이가 깊어질수록 약간 증

가하였다. 점토는 평균 전단강도가 50kPa 정도로 비교적 견고한 편이었다. 풍화토는 표준관입시험 결과 N치가 50을 훨씬 상회하였다.

준설토의 강도를 높이고 오염물질과 잘 결합되는 최적의 준설토 안정화제를 선정하기 위해 일반 포트랜드 시멘트, 석회, 플라이애쉬 및 시중에 유통되는 약품들에 대해 평가한 결과 일반 포트랜드 시멘트가 가장 효율적인 것으로 판명되었다. 실내실험 결과 시멘트의 비율을 세립토적토 건조중량의 20%로 하면 100kPa 정도의 전단강도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었으며, 경화 과정에서 안정화된 준설토의 투수성도 아주 낮아지는 것으로 관찰되었다.

여기서 가장 우려되었던 사항은 오염물질이 외부 환경으로 유출될 가능성이었다. 준설토의 고형화 및 안정화는 오염물질의 유출을 줄이는 방안은 용출수 강도(leachate strength)를 낮추거나 매립재의 투수성을 감소시키는 것이다. 해수를 이용한 용출시험을 수행한 결과, 구리는 시멘트에 의해 안정화되지 않은 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위해 용출수를 희석하는 방법으로 유출수에서의 구리 농도를 저감시켰다.

안벽 건설시 뒷채움 매립재로 이용된 머드크리트가 solid mass를 형성했기 때문에 안벽부에 하중을 거의 가하지 않아 안벽은 경량 구조가 될 수 있었다. 1m³의 준설토당 100kg의 시멘트를 섞으면 목표하는 전단강도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

뉴질랜드의 mudcrete 활용사례는 준설토를 시멘트와 혼합하여 준설토의 중금속 및 유기물 등의 오염물질을 효과적으로 고정화시킬 수 있었음을 보여준 사례로 볼 수 있다.

4. 준설토의 건설재료 활용을 위한 기타 고려사항

준설토가 효과적으로 활용되기 위해서는 준설 및 처리 공정관리와 오염준설토의 경제적인 처리기술 확보

가 필요하다. 그러나 기술적 측면 뿐만 아니라 다음과 같은 요인들도 중요하게 고려되어야 한다.

- 인식 제고: 준설토가 귀중한 자원으로 간주되기 위해서는 정부, 일반국민, 기타 이해관계자들로 부터의 이해 및 지지를 얻는 것이 필수적이다.
- 경제성: 준설토를 활용하여 일차 자원을 절약하는 것에 대한 인식을 증가시켜야 하며 비용과 사회적 편익에 대한 평가가 이루어져야 한다
- 법률: 국가 정책이 준설토를 폐기물로 분류하지 않는 것이 중요하다. 준설토를 귀중한 자원으로 규정하고 내용에서의 상충이 없도록 법적인 제도 개선이 필요하다.
- 수요와 공급의 조정: 지역, 광역, 강 유역 차원에서 준설토의 공급과 건설현장에서의 수요가 균형을 이루는 것이 중요하다. 수요와 공급이 맞지 않는 경우에는 공기 문제로 준설토 활용이 배제될 수도 있으며, 때로는 준설토를 임시저장 하는 등의 중간공정이 필요할 수도 있다.
- 환경편익/위해성 이해: 준설토 활용으로 인한 환경개선 효과 등 환경편익을 적극적으로 홍보하여 인식을 제고하고, 준설토 활용의 환경영향을 위해성 기반으로 평가하고 이해할 필요가 있다.

5. 결론 및 제언

본 고에서는 해외사례를 중심으로 안정화 등의 개량을 통해 준설토를 건설재료로 활용하는 방안을 살펴보았다.

준설토는 건설산업에서 사용되는 자연자원들에 대한 대체재료로서 사용될 수 있는 귀중한 자원이다. 준설토는 골재로 직접 사용되거나 건축자재(예, 벽돌)로 변형될 수 있으며 또는 제방, 소단(berm) 또는 양빈 등의 공사에서 직접 사용될 수도 있다. 또한, 침식해안이나 농지 또는 습지를 복원하고 새로운 습지 환경이나

내륙 환경을 조성하기 위해 사용될 수도 있다.

국내에서는 준설토를 건설재료로 활용하기 위하여 역학적 특성을 개량하는 방향에 대한 연구는 일부 수행되고 있다. 그러나, 해외의 사례에서 나타난 바와 같이 준설토에 일부 오염물질이 포함되어 있더라도 이를 고형화/안정화하는 개량 기술을 적용함으로써 성공적으로 현장에 적용한 사례가 보고되고 있다. 이에 준설토 활용도를 제고하기 위해서는 준설토의 물리적 특성에 대한 개량 뿐만 아니라 환경오염을 저감할 수 있는 처리 및 활용기술에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다. 뿐만 아니라 준설토가 건설재료로서 활용도를 높일 수 있도록 법과 제도의 보완도 하루속히 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 오명학, 오영민, 윤길림(2014), "준설토 유효활용 사례 및 시사점", 한국연안방재학회 연례학술대회, pp. 61-62.
2. 윤길림, 김한선 (2011) 준설토 활용공학, 도서출판 씨아이알
3. 조민재, 윤여원, 김재운(2012), 환원슬래그 혼합점토의 일축압축 강도 특성, 한국지반환경공학회 논문집, 13(6), pp. 33-39.
4. Chan, C., Mizutani, T. and Kikuchi, Y. (2011) "Reusing dredged marine clay by solidification with steel slag: A study of compressive strength", International Journal of Civil and Structural Engineering, 2(1), pp.270-279
5. Kikuchi, Y. and Mizutani, T. (2013) "Application of a method to accelerate granulated blast furnace slag solidification", Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp. 3231-3234.
6. Malasavage, N. E., Jagupilla, S., Grubb, D. G., Wazne, M. and Coon, W. P. (2012) "Geotechnical performance of dredged material-steel slag fines blends: laboratory and field evaluation", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

Engineering, 138(8), pp.981-991.

7. PIANC (2009) "Dredged material as a resource options and constraints", Report No. 104.

8. Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. and Higgins, D.D. (1998)

"Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag(GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils", Engineering Geology, 51, pp. 37-53.

