

연구논문

## 정체성 수역 퇴적물 재활용을 위한 고형화 평가

김상현\* · 안태웅\* · 최이송\*\* · 오종민\*\*\*

경희대학교 환경응용과학과\*, 경희대학교 환경연구센터\*\*, 경희대학교 공과대학\*\*\*

(2011년 9월 27일 접수, 2012년 1월 30일 승인)

## The Evaluation on Solidification of Dredged Sediment for Recycle from Stagnant Water Area

Kim, Sang Hyun\* · Ahn, Tae Woong\* · Choi, I Song\*\* · Oh, Jong min\*\*\*

Environmental Application Science, Kyung Hee University, Young-In, Korea\*

Environmental Research Center, Young-In, Korea\*\*

Engineering department, Kyung Hee University, Young-In, Korea\*\*\*

(Manuscript received 27 September 2011; accepted 30 January 2012)

### Abstract

Sediment has been increasingly acknowledged as a carrier in water system and an available contamination. For this reason, dredging of sediment in reservoir to remediate water quality and secure storage capacity is conducted annually. However, disposal of numerous dredged sediment is necessary as a secondary problem. Currently, in Korea, dredged sediment is classified as waste to be reclaimed or recycled into sandy soil, however, they are still in trouble because of spacial and environmental problem. Therefore, rather than simple disposal or reuse into sandy soil, it is necessary to research on method to manage main cause of pollution and increase the value as a resource. In this study, we intend to develop a recycle technology for numerous dredged sediment produced by dredging in deteriorated reservoirs using solidificator (stabilizer). To achieve this, we will consider utilization of dredged sediment and evaluation of use possibility as natural recycle by analysis the characteristics of soil-solidificator mixture in terms of physicochemical properties and the mixing ratio between sediment and solidificator.

Keywords : Solidificator, Dredged Sediment, Reservoir, PSA(Paper sludge Ash), BFS(Blast Furnace Slag)

## 1. 서론

퇴적물은 수체와 함께 수생태계를 구성하는 주요 요소 중 하나이다. 하지만 오염된 퇴적물은 직·간접적으로 수질 및 저서생물에 영향을 미칠 수 있으며(USEPA, 1994) 수체 내부용량을 감소시켜 하천 및 호소의 통수·저수기능을 다하지 못하게 한다(Wang, 2009). 이러한 퇴적물을 관리하기 위하여 준설이 매년 실시되고 있으나, 많은 양의 준설 퇴적물에 대한 최종 처리문제가 발생한다. 현재 우리나라의 수저 퇴적물은 사업장 폐기물로 분류되어 오염정도에 관계없이 일반폐기물 관리규정에 따라 처분되고 있다. 일부 준설토는 그 성상에 따라 골재나 복토, 객토로 활용이 가능하지만(농어촌연구원, 2005) 입자가 가늘고 오염물이 축적되어 있는 경우 그 취급과 재활용이 어렵다. 이러한 퇴적물은 육상 매립 또는 해양매립을 통하여 최종처리 되거나 단순 사토처리하고 있지만 공간적, 환경적인 문제들로 인하여 많은 어려움이 있다. 더욱이 해양매립의 경우 장기적으로 전면 금지화 되어가고 있기 때문에 적절한 대응 방안이 필요한 실정이다. 따라서 준설토를 단순폐기나 사토처리하기보다는 퇴적물의 특성이 고려된 재활용을 통하여 오염발생 요인을 제어하고 자원으로서의 가치를 높일 수 있는 방안

연구가 시급하다고 할 수 있다. 퇴적물 재활용을 위한 여러 가지 방법 중 고형화 반응은 퇴적물의 환경적 안정성을 확보하면서 손쉽게 적용할 수 있는 방법으로 평가되면서 많은 연구가 진행되고 있다(해양수산부, 2002; 이수원, 2010). 김상현 등(2010)에 의하면 준설토 내 오염물질인 중금속을 안정화시키기 위하여 고형화 반응을 사용하였으며 이병원(2007)의 연구에서도 시멘트 고형화를 이용한 준설토의 골재활용 가능성을 확인하였다. 하지만 고화제 이용에 따른 비용문제는 고화반응을 적용하기 위한 제한요소로 작용 될 수 있기 때문에 고화에 쓰이는 재료의 일부를 폐자원으로 대체하는 연구가 필요하다. 이용 가능한 폐자원 중 제철소 발생 부산물인 고로슬래그(Blast Furnace Slag, 이하 BFS), 제지 생산공정 및 부산물로 발생하는 제지슬러지회분(Paper Sludge Ash, 이하 PSA)은 대부분 단순매립으로 낭비되었던 대표적인 폐자원의 하나였으나 고형화 반응 시 첨가물로서 평가 받고 있는 물질이다(이재환, 1998; 이민석, 1999; 김재진, 1999; 문경주, 2001; 주소영, 2003). 따라서 본 연구에서는 석회를 기본으로 하여 BFS와 PSA가 첨가된 고화제를 이용하여 퇴적물을 고형화 하여 퇴적물의 고화특성을 검토하고 토양개량 정도를 고찰해 보았다.

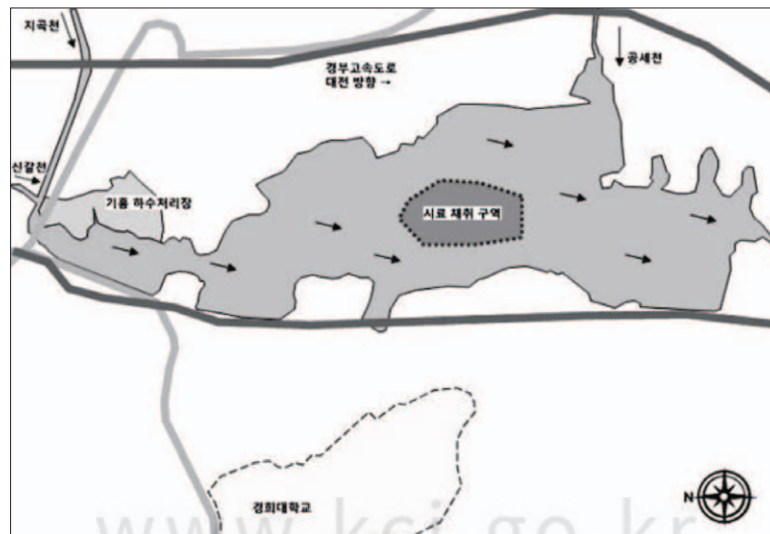


Figure 1. Map of sampling site in Singal reservoir

Table 1. Chemical Composition of PSA and BFS

Unit (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Others
PSA	18.5765	8.331	61.012	1.273	6.156	0.464	0.197	0.919	0.888
BFS	30.17	12.95	45.82	0.4	4.93	0.171	0.343	0.57	5.189

## II. 퇴적물 시료채취 및 특성 분석

본 연구의 대상지는 경기도 용인시 기흥구에 위치한 신갈 저수지이며 조사지점에 대한 위치는 Figure 1에 나타내었다. 시료는 Grap Sampler (lamotte 1097, USA)를 사용하여 채취하였으며, 채취된 시료는 2 L의 등근 폴리에틸렌 통에 2/3정도 채운 뒤 밀폐하여 즉시 실험실로 옮겨 4℃에 냉장 보관하였고, 일부 시료는 풍건 건조한 후 퇴적물의 물성분석 및 오염도 분석에 사용하였다. 퇴적물의 물성분석을 위하여 pH, 함수율, 토성분석을 토양오염공정시험법에 준하여 실시하였고 강열감량, COD, T-N, T-P 분석을 통하여 오염도를 평가하였다. 각각의 측정방법은 해양공정시험법 및 토양오염공정시험법에 준하여 실시하였다.

## III. 실험 방법

### 1. 고화제 Type별 특성

저수지 퇴적물의 고형화를 위한 적정 고화제 설정을 위하여 구성성분 비율에 따른 고화특성을 분석하였다. 고화제의 기본 구성성분인 석고와 석회는 시중에 판매되는 것을 사용하였고 PSA와 BFS는 발생원으로부터 직접 회수하였다. 다음의 Table 1은 XRF를 이용하여 측정된 PSA와 BFS의 무기성분 비율을 나타낸 것이다.

적정 고화제 성분배합비율을 적용하기 위하여 Table 2와 같이 각각의 배합비율이 다른 4가지 Type의 고화제를 설정하였다. JTC-1~3은 석회와 석고의 비율을 1:1로 BFS는 10%로 고정하면서 PSA의 함유율을 단계적으로 늘렸고 JTC-4는 PSA의 함유율은 줄이고 BFS의 비율을 높게 설정하였다. 혼합 공시체의 퇴적물:고화제 비는 10:1로

Table 2. Type of solidificator

Type	Lime (%)	Gypsum (%)	PSA (%)	BFS (%)
JTC-1	20	20	50	10
JTC-2	15	15	60	10
JTC-3	10	10	70	10
JTC-4	20	40	10	30

하였고, 공시체는 직경 6 cm, 높이 12 cm인 원통형 몰드에서 20℃, 7일간 양생하여 제작하였다. 양생된 공시체에 대하여 함수율 변화, 일축압축강도를 측정함으로써 수분저감효과 및 강도증진효과를 평가하였고, 중금속 용출실험(KSLT: Korean Standard Leaching Test)을 통하여 환경위해성을 평가하였다.

### 2. 고화제 혼합 비율에 따른 특성

고형화에 적용되는 고화제의 혼합량은 혼합체의 성능 및 고화반응 시 소요되는 비용에 직접적인 영향을 미치기 때문에 적정 비율을 설정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 고화제 구성 비율검토를 통하여 선정된 최적 고화제(JTC-4)를 이용하여 5%, 7.5%, 10%의 혼합비에 따른 비교실험을 수행하였고, 이에 따른 수분저감 능력, pH 안정화, 강도 특성을 평가하였다. 혼합비에 따른 수분저감 능력은 시간(2hr, 6hr, 12hr, 24hr, 48hr)에 따른 함수율 변화로 평가하였으며, pH 안정화는 일일 간격으로 7일간 실험하였고, 강도 특성은 위에서와 동일한 방법으로 양생된 공시체의 일축압축강도를 통하여 평가하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 퇴적물의 특성 분석 결과

신갈 저수지의 준설 필요성 여부를 판정하기 위하여 퇴적물의 물성 및 오염도 분석을 실시한 후에

Table 3. Characteristics of sediment

pH	Water content(%)	Texture	Ignition loss(%)	COD(mg/kg)	TN(mg/kg)	TP(mg/kg)
5.01	65.1	SiL	11.08	26,170	2,846	537

국내의 준설기준(용인시, 2008)과 비교하였으며 퇴적물 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 신갈호 퇴적물과 국내의 준설기준으로 주로 사용되는 팔당호 준설기준(TN/TP/강열감량/COD = 1,100/800/7/20,000 mg/kg 이상, 3가지 항목 기준 이상 시 준설)을 비교해 본 결과 TP를 제외한 모든 항목에 대하여 기준을 초과하였으며 전체적으로 퇴적물 오염도가 높아 준설이 필요한 상태임을 알 수 있었다. 또한 퇴적물의 물성분석 결과 함수율은 65.1%로 높은 편이었으며, 토성은 SiL로 가는 입자 상태임을 나타내어 준설 후 사토장 적치 및 매립장 이동시 취급성이 어렵거나 강우 시 비점오염원으로서의 위험성을 가지고 있다.

## 2. 고화제 Type별 고화 특성 결과

고형화에 사용된 신갈호 퇴적물은 65.1%의 높은 함수율을 가짐으로 인해 준설 후 퇴적물의 이동 및 적지에 어려움이 예상된다. 이에 흡수성, 수경성을 갖는 고화제를 혼합함으로써 이러한 준설토의 물리·화학적 결점을 개량할 수 있을 것으로 예상되며, 고화제 Type별 시간에 따른 함수율 변화를 다음의 Figure 2에 나타내었다.

고화제를 혼합하지 않은 퇴적물(sed.)의 경우 고화제를 첨가한 퇴적물에 비하여 매우 적은 함수율

변화를 나타내었으며 고화제와 혼합한 시료는 혼합 직후 초기 2시간 내에 급격한 함수율 저감을 보이며 이후에도 지속적으로 낮아졌다. 고화제 Type별로 살펴보면 JTC-2,3은 24시간 이후에 16.2%, 15.79%, 48시간 이후에 20.75%, 19.95%의 비슷한 저감량을 보이며 최대 저감률을 나타냈으며 PSA 구성비율이 상대적으로 적은 JTC-1의 경우 초기에는 비슷한 저감률을 보이다 시간이 지날수록 감소폭이 줄어들었다. 반면 PSA의 비율이 10%인 JTC-4의 경우 초기에 다른 Type들에 비해 적은 함수율 감소를 보여주었으나 시간이 지날수록 감소율이 증가되어 48시간 이후에는 JTC-2,3과 비슷한 감소폭을 나타내었다. 따라서 고화제의 혼합이 퇴적물의 함수율 저감에 상당한 효과가 있으며 고화제 구성 성분 중 PSA 비율이 높을수록 초기 함수율 감소폭이 높았지만 48시간 정도 시간이 지나면 비슷한 감소폭을 보여주었다. 이러한 점으로 미루어 볼 때 고화제에 의한 초기 함수율 저감효과는 준설된 퇴적물의 이동 및 적치함에 있어 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 3은 고화제 Type별 7일 양생 후 일축압축강도 결과를 나타낸다. 고화제를 혼합하지 않은 퇴적토의 경우 7일 양생 후에도 함수율이 높은 오니 형태를 보여 성형이 이루어지지 않아 강도를 측정

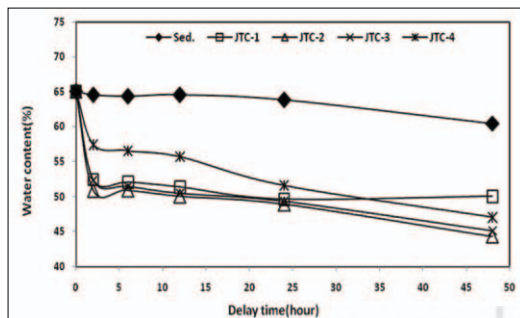


Figure 2. Water content change over the time as different solidifiers

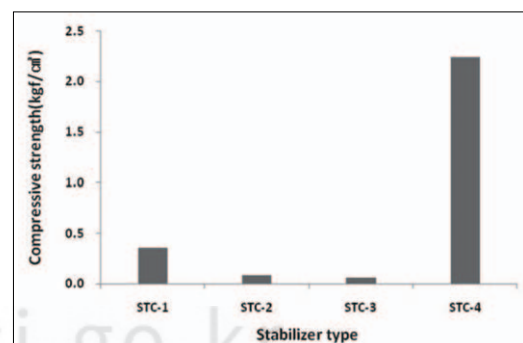


Figure 3. Compressive strength as different solidifiers

할 수 없었다. 고화제별 일축 압축강도 특성을 살펴본 결과 JTC-1,2,3 은 0.36, 0.09, 0.06 kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내며 PSA 함유율이 증가할수록 압축강도 또한 감소함을 알 수 있었다. 반면 PSA의 비율이 10% 이면서 BFS의 비율이 30%로 상대적으로 높은 JTC-4의 경우 2.24 kgf/cm<sup>2</sup>의 높은 강도를 보여주었다. 일반적으로 BFS의 경우 고형화에 사용되는 포졸란 물질이 다량 함유되어 있어 혼합 공시체의 강도를 증진 시키는 효과가 있다고 알려져 있다(이세중, 2008). 이를 통하여 PSA의 성분비가 높은 고화제에 비해 BFS의 비율이 높을 때 혼합 퇴적물의 강도가 더 높다는 것을 알 수 있다.

고화 처리된 준설토는 고형화 반응 중 유리된 Ca(OH)<sub>2</sub>에 의해 알칼리성을 나타내기 때문에 이 상태에서 중금속류는 불용성 수산화물의 안정화 등의 작용에 의해 용출이 억제되어 환경적으로 안정화 된다(김충은, 2011)(박연진, 2010). 따라서 본 연구에서는 KSLT 용출실험방법에 따라 신갈호 퇴적토의 고화 전·후 중금속 용출을 통하여 오염물질의 안정화 정도를 평가하였으며 그 결과는 다음 Table 4에 나타내었다.

고화 후 Cd와 Cr<sup>6+</sup>의 경우 모든 고화제에서 불검출 되었으며, Cu는 평균 93.58 %, Zn는 99.68%, Pb는 75.49%의 매우 높은 용출 저감률을 보였다. 고화제별로는 JTC-4에서 가장 높은 저감률을 보였다. 이는 고화제 압축강도 평가에서와 같이 BFS에 의한 고화강도 증가로 인하여 혼합체의 고정 능력이 향상되어 중금속의 용출을 억제시킨 결과라 할 수 있다. 고화제 Type별 고화특성 검토 결과 함수율은 JTC-2, 3, 4에서 48시간 이후 비슷한 감소폭

을 보여주며 성능의 큰 차이를 보이지 않았지만 압축강도와 중금속 용출의 경우 JTC-4에서 가장 높은 강도 및 고정능력을 보여주었기 때문에 신갈호 퇴적물의 고형화를 위한 대표 고화제로 선정하여 고화제 혼합 비율에 따른 특성분석을 실시하였다.

### 3. 고화제 혼합 비율에 따른 특성분석 결과

신갈호 퇴적물을 대상으로 한 고화제 Type별 고화 특성 실험결과 최적의 고화제 성분비를 도출할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 선정된 JTC-4 고화제를 대상으로 적절한 고화제 투입량을 선정하기 위하여 혼합 비율에 따른 고화 특성을 검토해 보았다. 퇴적토 대비 고화제의 혼합비는 목표 성능 및 경제성을 고려하여 준설토 대비 5% 7.5% 10%로 비교실험 하였고, 이에 따른 함수율, pH, 일축압축강도를 측정하였다. 혼합비에 따른 함수율의 변화를 Figure 4에 나타내었다.

대조군인 퇴적토(Sed.)의 경우 48시간 후에도 62.1%의 높은 함수율을 보인 반면, 고화제 첨가에 따른 함수율은 초기 2시간동안 4.6~6.5%의 급격한 감소를 보인 후 시간에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 혼합비 10%에서 초기 함수율 저감 효과가 가장 컸으며, 5%와 7.5%의 차이는 미미하였다. 하지만 48시간이 지난 후에는 혼합비별 함수율의 차이가 비슷해지는 경향을 보였다.

다음의 Figure 5는 혼합비에 따른 pH 변화를 7일간 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 고화 전 약산성의 퇴적토는 자연양생조건에서 시간에 따라 pH가

Table 4. Heavy metal leaching test of solidified sediment as different solidificators

Type	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr <sup>6+</sup> (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Sediment	0.12	18.33	110.15	0.78	12.79
JTC-1	N/D	1.45	0.60	N/D	4.64
JTC-2	N/D	1.22	0.02	N/D	2.90
JTC-3	N/D	1.45	0.74	N/D	4.06
JTC-4	N/D	0.59	0.05	N/D	0.94

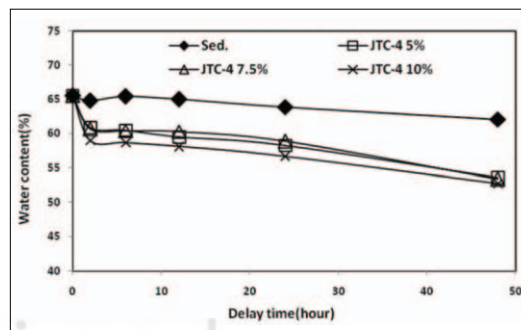


Figure 4. Water content change over the time as different mixing ratio



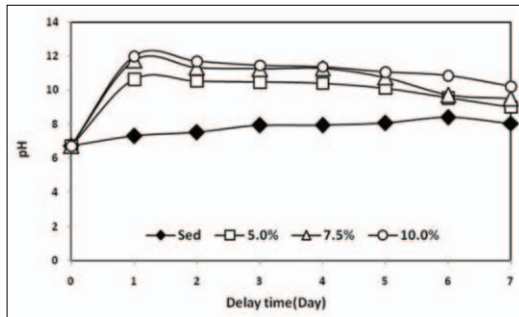


Figure 5. pH change over the time as different mixing ratio

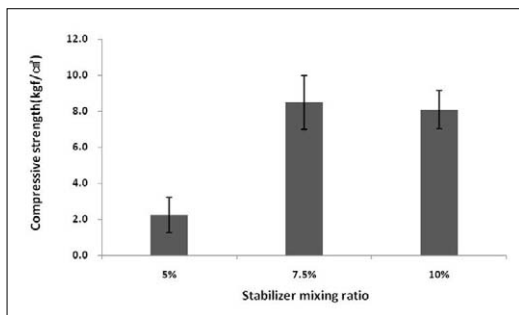


Figure 6. Compressive strength as different solidificator mixing ratio

조금씩 상승하여 7일 후에는 약알칼리성을 나타냈다. 고화제 첨가 후 퇴적토의 pH는 급격히 증가하는데 이러한 증가폭은 혼합비가 클수록 높게 나타났다. 이후 준서 혼합토의 양생시간이 길어질수록 pH는 점차 낮아지는 경향을 보였으며, 7일 후 9.02~10.22의 약알칼리성으로 변하는 것으로 나타났다. 혼합비가 높아질수록 알칼리성의 정도가 높아지는 것으로 보아 활용방안에 따라 추가점가제 등을 통한 pH의 조절이 필요할 것으로 판단된다. 다음은 혼합비에 따른 준서토의 강도개선효과를 알아보기 위하여 준서 혼합토의 압축강도를 측정하였다. 일축압축강도는 실험은 65%~70%의 함수율을 가진 신갈호 퇴적물을 7일간의 양생된 공시체를 가지고 측정하였다. 고화제 혼합비율에 따른 일축압축강도 결과는 Figure 6에 나타내었다.

일축압축강도 실험 결과 7.5%의 혼합비에서 7~9.96 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도가 발견되어 평균 8.48 kgf/cm<sup>2</sup>로 3개의 혼합비율 중 가장 높은 수치를 기록하였으며, 다음으로 10% 혼합비에서 평균 8.08

kgf/cm<sup>2</sup>의 압축강도로 7.5% 때의 압축강도보다 조금 떨어지지만 거의 비슷한 강도를 보여주었다. 반면 5%의 혼합비에서는 평균 2.23 kgf/cm<sup>2</sup>의 낮은 압축강도를 보여주었다. 고화제의 투입량을 늘리면 퇴적물의 강도가 정비례적으로 증가할 것이라는 일반적인 예상과는 달리 적정 투입량 이상이 혼합되면 일정 이상의 강도를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 앞서 실험한 pH, 함수율 변화와 동일하며 7.5%와 10% 혼합비율은 거의 비슷한 결과값을 보여 주었기 때문에 비용적인 측면에서 볼 때 신갈호 퇴적물의 고형화를 위한 고화제 투입비율은 7.5%가 적정하다고 할 수 있다.

## V. 결론

고화제를 이용하여 퇴적물을 고형화하는 과정에서 퇴적물의 개량효과 및 환경 안정성 등을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 적용한 고화제에 의해 처리된 저수지 퇴적물의 경우 고화반응 시 생성되는 수화물에 의해 중금속이 고착되어 퇴적물 내로 고정되기 때문에 용출되지 않거나 매우 적은양의 용출을 보여준다. 또한 초기 함수율의 저감 및 내구성 증가로 인한 강도의 발현은 퇴적물의 활용 가능성을 폭넓게 해주는 인자라 할 수 있다. 이에 최종 처리된 퇴적물은 환경 안정성을 확보하면서 성토재 및 객·복토 또는 기타 건설재료와 같은 방향으로 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 고화제의 재료 구성 비율 중 PSA는 함수율 저감에 영향을 미치며 강도와는 반비례적인 역할을 하는 것으로 나타났다. 하지만 BFS의 경우 투입량이 증가함에 따라 강도가 증가하였으며, 이러한 결과를 토대로 퇴적물에 고화제를 적용할 때 퇴적물의 활용방안에 따라 적정한 고화제 재료 구성비를 설정하여 유연하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 고화제의 적정 혼합비율은 퇴적물의 특성에 따라 다소 차이가 있으며 투입량이 일정 한계량을 넘게 되면 더 이상 토질개량효과가 일어나지 않는

것으로 나타났다. 본 연구에서 적용된 신갈호 퇴적물의 경우 7.5%의 혼합비율이 가장 적절한 혼합 비율로 나타났다.

## 사사

본 연구는 경기지역환경기술개발센터에서 시행한 환경기술연구개발사업(2010-IV-4) 과제로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

김상현, 정재훈, 최이송, 오종민, 2010, 고행화를 이용한 저수지 내 고 유기성 준설토의 토양개량능력 평가, 한국물환경학회 추계학술발표대회.

김재진, 문경주, 노병남, 문성필, 소양섭, 1999, 제지슬러지 소각회의 시멘트 혼화재료로서의 이용 가능성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 11(2).

김충은, 2011, 제철부산물물을 이용하여 중금속으로 오염된 토양의 고행화/안정화, 경북대학교 석사학위청구논문.

농어촌연구원, 2005, 저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구.

문경주, 김재신, 소양섭, 2001, 제지 슬러지 소각재를 이용한 소성 경량골재의 제조, 한국콘크리트학회, 13(2), 114-122.

박연진, 신원식, 최상준, 이훈하, 2010, 매립지 복토 재료의 활용을 위한 하수슬러지 내 중금속

의 고행화/안정화, 대한환경공학회, 32(7), 665-675.

용인시, 2008, 기흥저수지 수질개선 기본계획 보고서.

이민석, 윤철현, 최현국, 1999, 슬래그 시멘트의 수화반응에 미치는 석회석 분말의 영향, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집

이병원, 2007, 하수준설토의 물리·화학적 특성 및 재활용 방안, 강원대학교 석사학위논문.

이세중, 2008, 고강도콘크리트의 특성에 미치는 고로슬래그미분말의 분말도 종류에 따른 영향에 관한 실험적 연구, 한밭대학교 석사학위 청구논문.

이수원, 2010, 고행화/안정화를 이용한 오염 준설토 내 중금속 처리, 부산대학교 석사학위청구 논문.

이재환, 서형남, 김창률, 민경소, 1998, 제지 에쉬를 사용한 고강도 혼화재 개발에 관한 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집.

주소영, 연익준, 이민희, 박준규, 김광렬, 2003, 시멘트 혼화재로서 제지슬러지 소각재의 재활용 특성, 대한위생학회지, 18(2), 34-41.

해양수산부, 2002, 준설토 재활용 방안 연구.경량 혼합토 개발을 중심으로/III.

USEPA, 1994, EPA's Contaminated Sediment Management Strategy.

Zhao-yin WANG and Chunhong HU, 2009, Strategies for Managing Reservoir Sedimentation, International Journal of Sediment Research, 24, 369-384.