

석탄회를 활용한 저강도고유동화재의 공유수면매립현장에 대한 적용성 평가

Evaluation on Field Application of Controlled Low-Strength Materials Made of Coal Ash in Reclamation Site

공진영 ¹	Kong, Jin-Young	정혁상 ²	Jung, Hyuk-Sang
조삼덕 ³	Cho, Sam-Deok	김주형 ⁴	Kim, Ju-Hyong
현재혁 ⁵	Hyun, Jae-Hyuk	천병식 ⁶	Chun, Byung-Sik

Abstract

This paper presented the strength and environmental characteristics of reclaimed-ground filled with controlled low-strength materials (CLSM) made of coal ash, small amounts of cement, and water in a reclamation site and evaluated the possibility of the use of coal ash on reclamation materials for beneficial use. Three-month period of SPT, CPT, environmental effects evaluation etc. were conducted. N values and cone resistances in ground filled with CLSM were greater than or similar to those in dredging sand. In case of land filled with coal ash except cement these values were lower than those in dredging sand. The results of soil and seawater pollution were lower than test criteria without high pH. Also the values of PH test were measured between pH 5.0~9.0, the criteria of industrial water in the Law for the Underground Water of Korea.

요 지

본 연구에서는 석탄회를 주재료로 하고 시멘트와 물을 혼합한 저강도고유동화재(CLSM)를 개발하여 공유수면매립용으로 사용하고자 ○○매립공사현장에서 현장매립실험을 실시하였고, 저강도고유동화재로 매립된 지반의 강도 및 환경적 특성을 분석하였다. 약 3개월에 걸쳐 표준관입시험, 콘관입시험, 환경영향평가 등을 실시하였다. 실험결과 저강도고유동화재 매립지반의 N값, 관입저항력값은 원지반보다 더 크거나 비슷하게 나타났으며, 석탄회 매립지반의 경우 원지반보다 낮았다. 토양 및 해수오염도를 평가한 결과 pH를 제외하고는 토양오염도와 해수오염도에서 요구하는 시험항목의 기준값보다 낮게 나타났다. pH의 경우도 지하수법에서 정하는 공업용수 기준 pH 5.0~9.0 이내를 만족하였다.

Keywords : Coal ash, Controlled low-strength materials (CLSM), SPT, CPT, Environmental effects evaluation

1 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

2 정희원, 한국철도기술연구원 신교통인프라연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Tel: +82-31-910-0236, Fax: +82-31-910-0211, haitink@kict.re.kr, 교신저자)

5 비희원, 충남대학교 환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Environmental Engineering, Chungnam National Univ.)

6 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현재 우리나라 연안에는 새만금 간척지 개발사업과 같은 대규모 간척사업, 부산 신항만공사와 같은 대규모 항만공사가 진행 중이며, 여기에 필요한 토사가 부족하여 수득이 곤란한 실정이다. 새만금토지이용구상(안) (국회국토해양위원회, 2008)에 따르면 새만금 간척공사에 필요한 소요토량을 2020년까지 약 2억 4백만³, 2021년 이후 3억9천만³가 소요될 것으로 추정하였다. 또한 추가용지가 조성될 경우 토량이 총 6억³(방수제 토량 제외)가 소요될 것으로 예측하였다. 한편, 새만금 간척지 개발사업에 공급할 수 있는 토량은 군산항 항로(유지) 준설토, 금강하구둑간~군산항간 퇴적토, 방조제 외해역 해사토를 합쳐 총 4,500만³이 공급가능하며, 수요량에 비하면 10분의 1에도 못 미치는 형편이다. 따라서 네델란드 수면하 매립공법과 같은 토량 저감방안, 기술발달에 따른 인공지반 조성안이 제시되고 있는 형편으로, 매립공사에 사용되는 토사를 대체할 만한 재료의 개발이 요구되는 것이다.

한편, 국내의 경우 10개 화력발전소에서 연간 약 600만톤의 이상의 석탄회가 부산물로 발생되며, 이중 약 350만톤(58%)은 시멘트 대체재로 사용하고 나머지 약 250만톤(42%)은 인근 석탄회 매립장에 매립 처리되고 있는 실정이고, 석탄재중 비회(fly ash)는 재활용되고 있으나 저회(bottom ash)는 활용하기 어려워 전량 매립장에 매립 처리되고 있는 실정이다. 화력발전소 가동 초기부터 매립되어 오던 석탄회 매립장이 용량 한계에 부딪혀 일부 발전소에서는 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓이게 되었다. 따라서 폐기되고 있는 석탄회를 해안매립공사에 일부라도 활용하게 된다면 건설재료난 해소는 물론 산업폐기물의 유효이용 및 회사장의 규모 축소로 인한 국토의 효율적 이용과 환경보호 등의 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

저강도고유동화재(CLSM, Controlled Low-Strength Material)는 다짐이 필요 없고 유동성이 큰 물질로 8.3MPa(1,200psi, 84kg/cm²) 이하의 압축강도를 갖는 물질로, 일반적으로 시멘트, 비회(fly ash), 잔골재, 물을 혼합하여 만들어진 다(ACI committee 229, 1994). CLSM은 향후 재굴착이 필요한 공동부를 채우기 위한 목적으로 개발되었으므로 강도가 클 수 없으며, soil-cement와는 다짐이 필요 없다는 점에서 다르다. 저강도고유동화재는 미국, 캐나다

내에서도 다양한 용어로 불린다. CLSM 외에도 유동성 채움재(flowable fill), flowable mortar, unshrinkable fill, controlled density fill, flowable fly ash, fly ash slurry, plastic soil-cement, soil-cement slurry, K-Krete 등이 사용되었으나, 미국콘크리트학회에서는 CLSM이 가장 적합하다고 제안한 바 있다(TRB, 2008; ACI committee 229, 1994).

저강도고유동화재의 재료특성상 토사보다 공학적 특성이 우수하기 때문에 트렌치, 옹벽, 기초 등의 되메우재, 공동 채움재, 도로노상재 등의 용도로 토사 대신 사용되며 미국 등지에서는 제품화되어 사용되고 있다(ACI committee 229, 1999). 최근 국내에서도 지반 및 도로분야에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(Won et al., 2001; Cho et al., 2000; Park et al., 2004; Lee and Song, 2006; 2007; Lim and Seo, 2009). 그러나 기존의 저강도고유동화재는 잔골재로 모래를 사용하고 있기 때문에 모래가 점점 구하기 어려워지는 현재 우리나라 실정에는 다소 맞지 않는 면이 있다.

따라서 본 연구에서는 해안매립공사, 인공섬 건설 등에 대량으로 쓰여지는 토사의 대체재료로서 공학적 특성이 우수한 저강도고유동화재를 제시하며, 모래대신 매립회(pond ash)를 이용하여 매립회, 비회, 시멘트, 물의 혼합물로 CLSM을 개발하였고, 현장적용성을 평가하기 위하여 ○○매립공사현장에서 현장매립실험을 실시하였고, 저강도고유동화재로 매립된 지반의 강도 및 환경적 특성을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 매립회는 저회와 비회의 혼합회로서 해수 또는 우수에 노출되었기 때문에 비회가 일정부분 혼합되었다 해도 시멘트 대체효과를 기대할 수 없으며, 잔골재로서만 고려하였다. 본 연구를 통하여 회처리장에 매립되어지는 석탄회를 건설재료로 활용함으로써 환경보존 및 국토의 효율적 활용이 기대되어진다.

Kong et al.(2010)과 Kim et al.(2010)은 화력발전소에서 배출되는 석탄회를 대량 사용이 가능한 토목 재료로서 사용하기 위해 석탄회를 주요성분으로 하고 시멘트와 물을 첨가하여 혼합 초기에는 유동성이 높아 슬러리 상태로 타설할 수 있고, 점차 경화되어 일정시간 경과 후에는 다짐이 필요 없는 강도까지 도달하게 되어 관거와 같이 지중 구조물 주변에 다짐이 어려운 경우에 사용할 수 있으며, 추후 재굴착이 필요한 경우, 인력이나 장비로 재굴착이 가능한 저강도고유동화재의 최적배합비를 실내 및 모형시험을 통해 제안한 바 있다. 이 연구에서는 다양한 물/시멘트 배합비를 통해 최소 일축압축강도인

500kPa를 만족하는 배합비로 물 31%, 시멘트 3.1%임을 밝혀낸 바 있다. 본 논문에서는 Kong et al.(2010)과 Kim et al.(2010)이 제안한 최소 일축압축강도 500kPa를 만족하는 저장도고유동화재를 현장에 적용하여 시간 경과에 따른 공학적 특성과 환경적 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 현장실험 개요

본 연구에서 수행한 현장실험에서는 실내시험을 통해 개발한 저장도고유동화재가 현장 시공 후 실내시험에서 얻은 결과와 같이 적절한 강도를 갖는지 여부와 시공법에 따라 강도를 증대시킬 수 있는지 여부, 그리고 저장도고유동화재의 주성분인 석탄회의 사용으로 인한 해역 및 토양 오염에 대한 평가를 주목적으로 하였다. 현장실험 위치는 서해안에 위치한 인천 ○○ 공유수면 매립공사현장으로 시공 1개월, 시공 후 약 3개월 동안 지반의 강성 특성과 시공으로 인한 환경 영향 평가를 수행하였다. Fig. 1은 현장실험 위치의 평면도를 나타낸 것으로 공유수면 매립을 위한 호안 약 50m 폭 내에서 Fig. 2와 같은 시험 구덩이를 굴착하여 시험을 수행하였다. 공유수면 매립현장이므로 호안 외측은 바다이며 호안 내측은 해수가 고여 있는 상태이다. 호안 외측은 조수간만의 차가 약 5m 이상 발생하며, 호안 내측에 고여 있는 해수는 호안외측의 해수 수위보다 약 3m 높으며, 외측 해수 수위변화에 따라 수십 cm 변화하였다.

현장실험에 굴착한 시험 구덩이의 크기는 8m×4m×2m로 총 3개의 시험구덩이를 굴착하였다. <Case 1>은 원지반 지역으로 시험구덩이가 없이 매립 후 다짐시공된 상태인 지역을 선택하였으며, <Case 2>는 시험구덩이 내부를 100% 매립회로 채운 후 다짐공정 없이 그대로 방치하였다. <Case 3>은 석탄회를 주재료로 한 저장도고유동화재를 Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 저장도고유동화재 배출관을 시험구덩이 중앙에 위치시켜 시공하였다. <Case 4>는 <Case 3>과 동일한 성분의 재료를 약 10kg/cm²의 압력으로 Fig. 3(b)에 나타낸 것과 같이 배출관의 위치를 일정하게 변경해 가며 시공하였다. 석탄회 주성분으로 한 저장도고유동화재는 Kong et al.(2010), Kim et al.(2010)이 제안한 것과 같이 최적 배합비인 매립회 45.5%, 비회 19.5%, 물 31.8%, 시멘트 3.2%를 사용하였다.

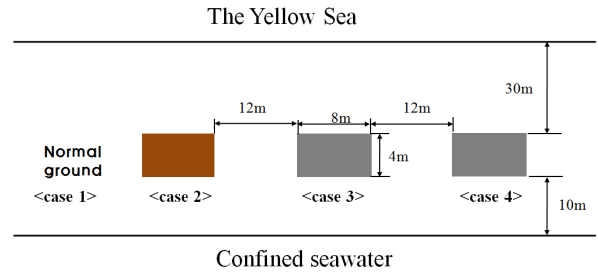


Fig. 1. Plan view of field test

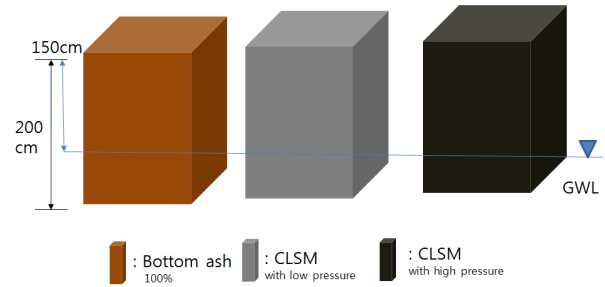
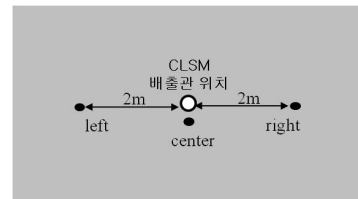
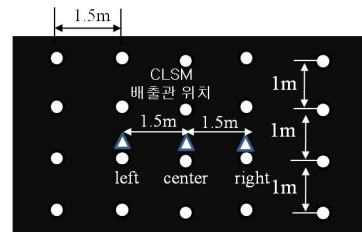


Fig. 2. Vertical view of test cases



(a) Case 3



(b) Case 4

Fig. 3. Discharge pipe position of CLSM



Fig. 4. Mixing system for field test



Fig. 5. Placing CLSM

석탄회는 화력발전소 등에서 석탄을 연소시키는 과정에서 부산물로 발생하는 회로 크게 저회(底灰, bottom ash), 비회(飛灰, fly ash) 등으로 구분된다. 저회는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 바닥에 모이는 입경이 크고 다공성인 부산물이며, 비회는 집진기에서 포집되는 미분말 형태의 부산물로 포졸란성을 지니고 있으며 시멘트혼화제로 다량 재활용된다. 국내 대부분의 화력발전소 회매립장의 경우 재활용되지 못한 비회는 저회와 같이 해수에 혼합되어 매립장에 매립되는 데, 이를 매립회라 한다. 비회는 시멘트 수화물과 반응하여 시멘트의 공학적 특성을 증진시키는 포졸란 반응을 일으키지만, 물 특히 해수와 혼합된 경우는 재차 건조시킨 후에는 포졸란 반응을 기대하기 어렵다. 비회는 물과 직접적인 반응을 일으키지 않는 것으로 알려져 있으나, 실제 물과 혼합하면 효과가 미미하지만 경화 효과가 있다. 요컨대 한번 해수와 접촉한 비회는 포졸란 반응을 기대하기 어렵기 때문에 매립회 속에 비회가 포함되어 있어도 시멘트 혼화제로서의 역할은 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 저회와 비회가 혼합된 매립회를 잔골재로 간주하여 사용하였다. 시멘트량을 최소로 줄이기 위하여 별도로 비회를 사용하였다. 또한, 매립회는 해수와 혼합하여 매립되고 매립장 내로 해수가 드나들기 때문에 발전소에서 갓 부산된 석탄회보다는 매립회의 pH가 다소 낮으며, 해수의 오염도가 매립회의 오염도에도 영향을 미칠 수 있다.

2.2 지반강성도 평가

저강도고유동화재는 채움 또는 매립시 물처럼 자기수평성이 좋고 일정기간 후에는 단단하게 굳기 때문에 따로 다짐공정이 필요 없는 장점이 있다. Kong et al. (2010)이 수행한 실내시험에서는 屈内澄夫(1996)가 경량성토재로서 저강도고유동화재가 가져야 할 최소 일축압축강도로 제안한 500kPa를 만족하는 석탄회를 주재료로 하는 저강도고유동화재 제작 배합비를 제안하였으며, Kim et al.(2010)은 저강도고유동화재를 이용한 모형지반에서 일축압축강도 500kPa에 해당하는 동적콘관입시험(DCP)의 콘관입률이 2.0cm/blow정도인 것을 제안한 바 있다.

본 현장실험에서는 저강도고유동화재의 현장 경화특성을 평가하기 위해 시간 경과에 따라 다양한 현장지반조사 방법을 이용하여 지반의 강성을 평가하였다. 시험구덩이의 깊이가 2.0m에 달해 표층의 강성을 측정할 수 있는 동적콘관입시험(DCP) 뿐만 아니라 최근 도로 노상의 다짐도를 측정하는데 사용하기 시작한 동평판재하시험(LFWD), 그리고 지반의 연속적인 강성을 측정하기 위해 표준관입시험(SPT)와 콘관입시험(CPT)도 함께 수행하였다.

동적콘관입시험(DCP)은 575mm 높이에서 8kg의 추를 낙하시켜 타격에 대한 관입깊이를 기록하여 콘관입률(PR)을 계산하는 시험방법으로 하부의 끝부분이 60°의 직경 20mm의 콘으로 구성되어있다. 콘관입률(PR)은 1회 타격시 관입 깊이이며, 타격당 관입 깊이를 x축, 지반 깊이를 y축에 적용시켜 그래프로 나타내어 관입량을 연속적으로 표현하는 방법이다. 최근 10년 동안 미국에서는 동적콘관입시험 결과가 입상토의 전단강도 및 노상의 탄성계수 등에 효과적으로 널리 쓰이고 있다. 동적콘관입시험으로 구한 콘관입률 (PR)과 평판재하시험으로 구한 지반의 탄성계수 (E_{PLT})간의 관계에 대한 여러 상관식이 제안되어 있으며, Kondard and Lachance (2000)이 제안한 상관식 식 (1)이 대표적이다.

Table 1. Cases of field test

No.	Ground condition	Placing method
Case 1	Normal ground	Compaction after dumping
Case 2	Coal ash	Dumping
Case 3	CLSM	Placing CLSM in the center
Case 4	CLSM	Placing CLSM with moving discharge pipe at 1 m interval

$$\log(E_{PLT}) = (-0.88405)\log(PR) + 2.90625 \quad (1)$$

여기서 E_{PLT} 는 평판재하시험으로 구한 탄성계수(MPa)이며, PR은 평균 콘관입률(mm/blow)이다. 동평판재하시험이라 불리기도 하는 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)는 평판재하시험의 대안으로 사용하는 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 휴대용으로 개발한 것이다. 현재 여러 종류의 LFWD가 시판되고 있는데 재하장치와 재하판, 그리고 중앙부의 처짐을 측정하는 지오폰 센서로 구성되어 있는 등 작동원리는 매우 유사하다. 본 연구에서 사용한 LFWD는 독일에서 개발된 ‘Light Drop Weight Tester ZFG2000’로 10kg 추를 재하판에 자유낙하시켜 변위량(δ_c)을 측정하고 이를 식 (2)을 이용한 소프트웨어를 통해 동평판재하시험의 탄성계수(E_{LFWD} , MPa)로 나타낸다.

$$E_{LFWD} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma \times R}{\delta_c} \quad (2)$$

여기서, σ 는 적용된 응력, R 은 재하판 반경, ν 는 포아송비이다. Yoo et al.(2008)은 노체에 사용하는 흙을 대상으로 동평판재하시험(LFWD)와 동적콘관입시험(DCP)와의 상관관계를 식 (3)과 같이 제안한 바 있다.

$$E_{(PLT \text{ calculated by DCP})} = 1.55 E_{LFWD} + 17.089 \quad (3)$$

여기서, $E_{(PLT \text{ calculated by DCP})}$ 는 콘관입률로 산정한 탄성계수, E_{LFWD} 는 동평판재하시험으로 산정한 탄성계수이다.

2.3 환경성 평가

본 현장 시공에서 사용한 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재는 현행법상 폐기물로 분류되어 있어 폐기물 관리법에 의해 관리되도록 되어 있다. 따라서, 공학적인 성능이 우수하다고 하더라도 환경적으로 유해한 경우에는 실용화가 불가능하다. 따라서, 석탄회에 대한 환경성 평가가 필요하며 시험 매립지반과 주변 지역에서 흙과 해수를 채취하여 환경성 조사를 병행하였다. 이를 위해 토양환경보전법 시행규칙에 의한 토양오염물질 분석과 환경정책기본법 환경기준(해역)에 의한 해수 분석을 수행하였다.

본 현장시공에서 사용한 석탄회를 활용한 저장도고

유동화재의 환경성을 토양 및 해수에 미치는 영향으로 구분하여 분석하였다. 이는 공유수면매립재로 사용될 경우 저장도고유동화재가 지반을 구성하게 되기 때문이며, 또한 매립공사의 특성상 매립재와 혼합된 물이 바다로 흘러들기 때문이다. 본 연구에서 사용한 재료로 조성된 지반의 환경위해성은 ‘토양환경보전법 시행규칙(환경부, 2012)’에서 정한 “토양오염우려기준”을 적용하였고 실험방법은 국내토양공정시험법에 따라 분석하였다. 해수에 미치는 영향은 지하수가 현장실험지반을 통과하여 바다로 흘러가거나 또는 그 반대의 조건을 산정하여 ‘환경정책기본법 시행령 환경기준(환경부, 2009)’에서 정한 “해역”에 대한 기준을 적용하였고 “해양공정시험방법”과 “먹는물수질공정시험방법”에 따라 분석을 실시하였다.

시간경과에 따른 오염도 변화를 보기 위하여 매립지반 조성한 직후인 3~7일, 88일~92일에 토양 및 지하수의 오염도를 분석하였다. 샘플링은 각 Case 별로 매립지반의 중심부에서 실시되었다. 지하수의 경우 각 Case의 중심부에 유공관을 설치하고 유공관 내의 지하수를 채취하여 지하수오염분석에 사용하였고, 토양의 경우 각 Case의 중심부에 설치된 유공관 주변에서 실시하였다.

3. 현장실험 결과 분석

3.1 매립표층의 강성도 평가

3.1.1 동적콘관입시험

Kim et al.(2010)은 실내모형시험을 통해 일축압축강도 500kPa와 동적콘관입시험 결과인 콘관입률약 20mm/blow에 소요되는 기간은 약 10일정도 인 것으로 보고한 바 있다. 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재 시공 지역인 <Case 3>과 원지반의 <Case 1>, 다짐 등의 처리를 하지 않은 매립회로 조성한 <Case 2>지역에서 수행한 동적콘관입시험 결과를 요약하여 Fig. 6으로 나타내었다. Fig. 6에서 매립시 다짐이 되어 있는 원지반 <Case 1>의 경우에는 콘관입률 (PR)이 심도에 따라 0.5~3.0cm/blow로 나타났으며, 일축압축강도 500kPa에 해당하는 콘관입률 2.0cm/blow의 값에는 부분적으로는 근접하고 있으나, 대부분은 2.0cm/blow 이상의 값을 가져 일축압축강도 500kPa에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 석탄회를 덩핑한 후 다짐 공정 없이 그대로 방치한 <Case 2> 경우에는 콘관입률이 5.5~11.0cm/blow

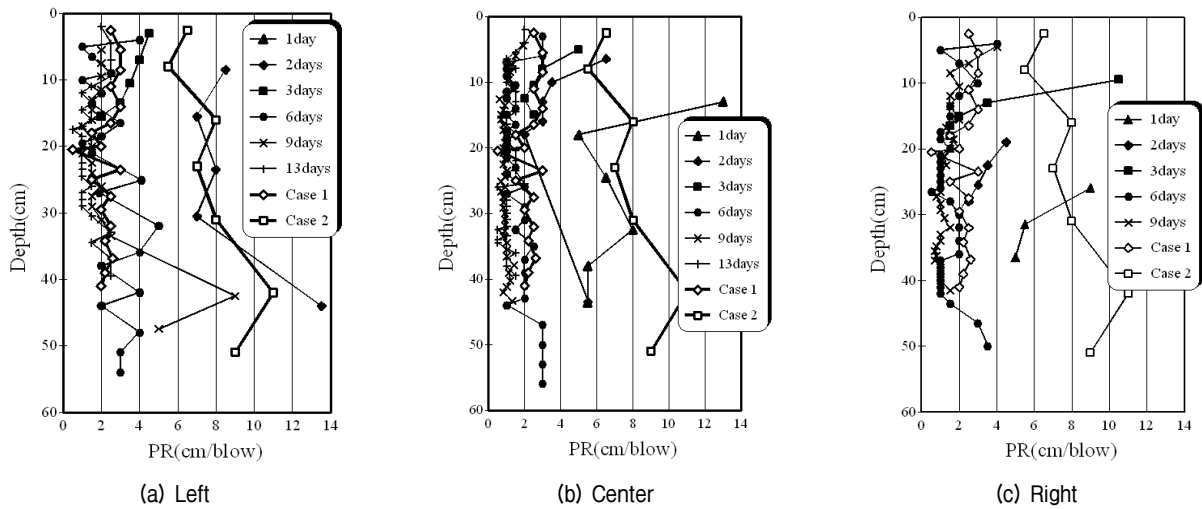


Fig. 6. Dynamic cone penetrometer test result by time-elapsed in Case 3

정도로 나타나 지반이 매우 느슨한 상태인 것으로 나타났다.

그러나 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재 매립지역인 <Case 3>에서는 시공 후 1일 경과 후의 측

정한 동적콘관입시험 결과가 석탄회를 다짐없이 덩핑

한 <Case 2>와 비슷한 결과를 나타내었으나, 시간이 경과함에 따라 콘관입률은 급격히 감소하여 약 3일 정도

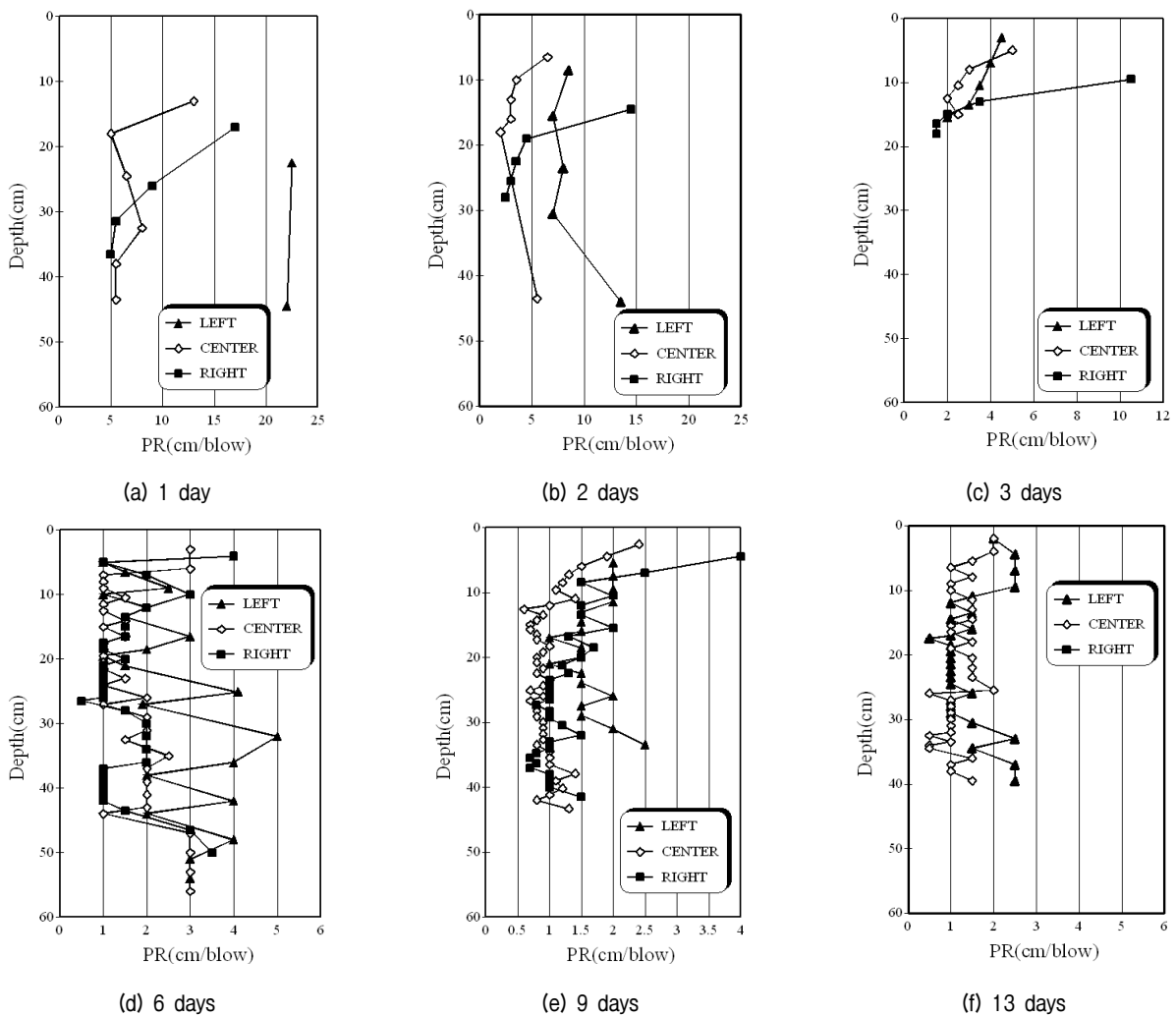


Fig. 7. Dynamic cone penetrometer test result by time-elapsed and position in Case 3

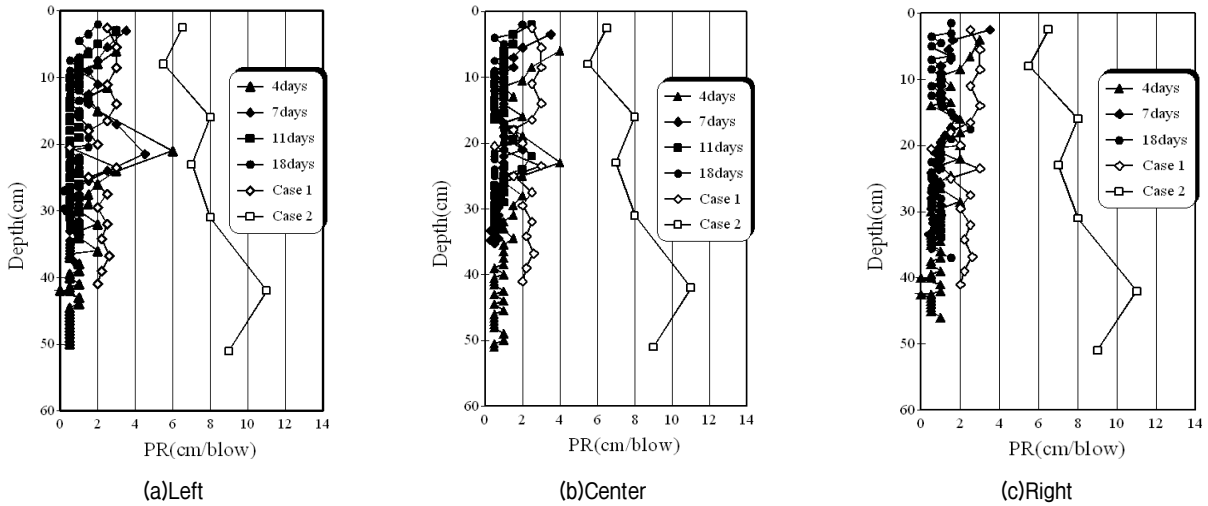


Fig. 8. Dynamic cone penetrometer test result by time-elapsed in Case 4

경과 후에는 원지반과 같은 효과를 나타내고 있다. 이후에도 경화 현상은 계속 발생하여 약 6일정도 후면 모형시험에서 도출한 결과인 일축압축강도 500kPa에 해당하는 콘관입률 20mm/blow 이하의 값을 가지게 되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6에 도시한 <Case 3> 지역에 시험결과를 중앙부와 좌우측부로 구분하여 배출관 위치에 따른 영향을 나타내었다. 시간 경과 및 위치별에 따라 다소 차이는 있으나, 대체적으로 배출관이 위치한 중앙부분에서 수행한 동적콘관입시험의 콘관입률이 주위보다 더 작게 나타나 중앙부분이 더 단단한 강성을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 사실은 배출관을 일정하게 이동하여 저장도고유동화재를 시공한 <Case 4> 지역에서도 동일하게 나타난다.

Fig. 8은 <Case 4> 지역에서 수행한 동적콘관입시험 결과를 나타낸 것으로 일부 심도를 제외하고는 매립 후 4일정도면 목표 일축압축강도인 500kPa에 해당하는 콘관입률 20mm/blow 이하의 값을 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 배출관을 중심부에 위치시켜 저장도고유동화재를 시공한 <Case 3>과 배출관을 이동시켜 저장도고유동화재를 시공한 <Case 4>에 대한 동적콘관입시험 결과를 비교한 것으로 시공법에 따른 특성을 분석하였다. <Case 3>과 <Case 4>에 대한 동적콘관입시험은 동일한 일정으로 수행하였으나, 시공은 2일의 시간차가 있어 경화 소요기간은 <Case 3>이 <Case 4>에 비해 2일 더 길다. 비록 <Case 3>이 <Case 4>에 비해 시공이 더 빨랐지만, 동적콘관입시험 결과를 보면 중앙부에서는 두 지역이 비슷한 콘관입률을 보이고 있으며 중앙을

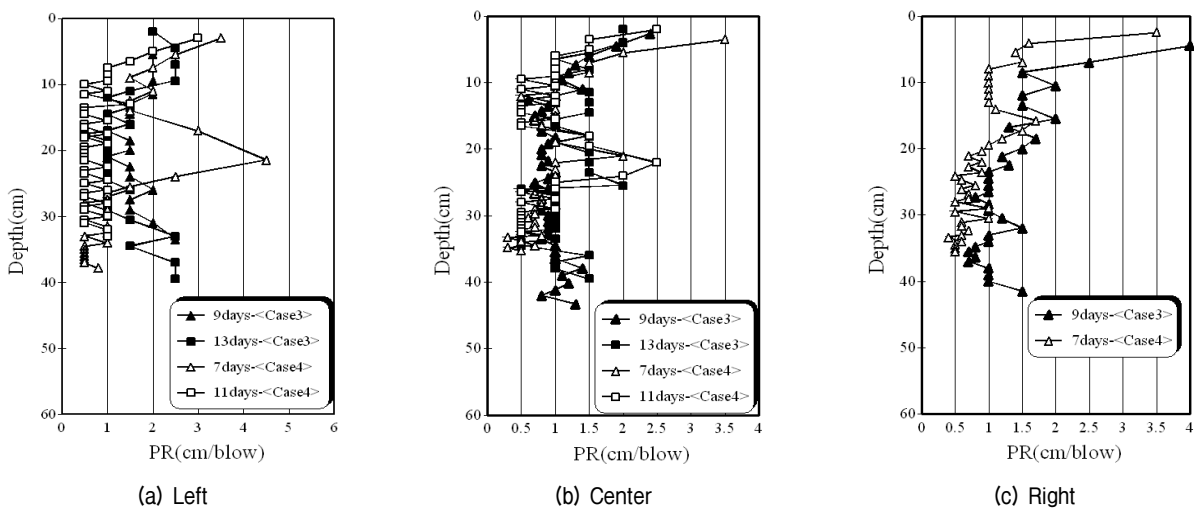


Fig. 9. Dynamic cone penetrometer test results by placing method: Case 3 and Case 4

중심으로 좌측부와 우측부에서는 <Case 3> 지역에서 측정된 콘관입률이 더 <Case 4> 지역에서 측정된 콘관입률에 비해 더 크게 나타나 <Case 3>이 더 작은 강성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 배출관의 위치 이동에 따른 시공방법의 차이도 지반강성크기에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 동평판재하시험

저강도고유동화재에 대한 보다 정확한 강성평가를 위해 지반의 동적탄성계수 평가를 통해 지반의 강성을 편리하게 평가하는 동평판재하시험을 추가로 수행하였다. Fig. 10은 시간 경과별, 위치별에 따른 동평판재하시험 결과를 나타낸 것이다. Figure에서 나타낸 점선은 식 (1)과 식 (3)의 관계를 이용하여 콘관입률 20mm/blow에 해당하는 개략적인 동탄성계수(ELFWD)를 나타낸 것이다. Fig. 10에서 다짐 공정 없이 석탄회만을 매립한 <Case 2>의 동탄성계수(ELFWD)는 목표 기준 값에 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 다짐이 된 원지반은 기준 동탄성계수인 26MPa에 매우 근접한 값을 가지는 것으로 나타났다.

석탄회를 주재료로 하는 저강도고유동화재를 시공한 <Case 3>과 <Case 4> 중, <Case 3>의 경우 9일, <Case 4>의 경우 7일이 경과하면 모두 기준 값 이상의 동탄성계수를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 Fig. 6과 Fig. 7에 나타낸 동적콘관입시험 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 6, Fig. 7에서 배출관의 위치에 따라 위치별 동탄성계수가 달라지는 것을 또한 확인할 수 있는데 <Case 3>의 경우 배출관이 위치되었던 중앙부에서 시공 후 71일 후에 측정했던 최종 동탄성계수는 <Case 4>와 거의 유사하게 나타난 반면,

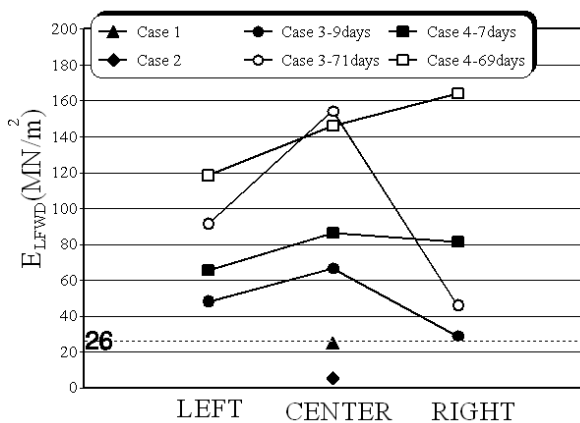


Fig. 10. Results of dynamic plate loading test

<Case 3>의 좌측부와 우측부의 경우에는 중앙부의 최종 동탄성계수의 30~60% 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

반면에, <Case 4> 지역에서 시공 후 7일째에 측정된 동탄성계수는 <Case 3> 지역에서 시공 후 9일째에 측정된 동탄성계수에 비해 중앙부에서는 29%, 좌측부에서는 36% 그리고 우측부에서는 180% 이상의 큰 값을 나타내고 있으며, 이와 같은 현상은 시공 후 약 70여일이 지나 측정된 결과에서도 잘 나타나 있다. 이상과 같은 결과로 판단하면 석탄회를 주재료로 제작한 저강도고유동화재의 배합비 뿐만 아니라 시공방법도 조성한 지반의 강성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 매립층 강성도 평가

3.2.1 표준관입시험

굴착한 시험구덩이 매립층 전체의 강성도를 평가하기 위해 표준관입시험을 각 시험구덩이의 중앙부에서 수행하고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 표준관입시험은 상부 표층을 굴착하여 지표면에서 50cm 하부부터 표준관입시험을 수행하였다. 표준관입시험 결과를 보면, 지표면 50cm 심도에서는 앞서 표층에서 수행한 시험 결과와 같이 배출관을 이동해 가면서 시공한 <Case 4>의 지반이 매우 단단하게 굳어 있으며, 18일 경과 후에는 N값이 28 정도의 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 배출관을 시험 구덩이 중앙에 거치한 후 시공한 <Case 3>의 경우에는 위치별로 N값은 10~21 정도의 값을 나타내고 있으며 기존 다짐이 수행된 원지반과 유사한 N값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

심도 1.0m 지점에서는 표층에 비해 N 값 증가 양상은 감소하는 것으로 나타났으며 <Case 3>의 경우에는 약 70여일이 지난 후에도 뚜렷한 N값 증가 양상은 확인할 수 없었다. 그러나 <Case 4>의 경우에는 시공시 18일 경과시에는 N값이 12로 측정되었으나 70일 경과된 시점에서는 N값이 26으로 증가하는 양상을 확인할 수 있어 배출관을 이동하면서 시공하는 방법이 그렇지 않은 경우에 비해 더 높은 표준관입시험 결과를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 콘관입시험

표준관입시험과 더불어 매립층 전체의 강성도를 평가하기 위해 지반의 연속적인 강성평가가 가능한 콘관

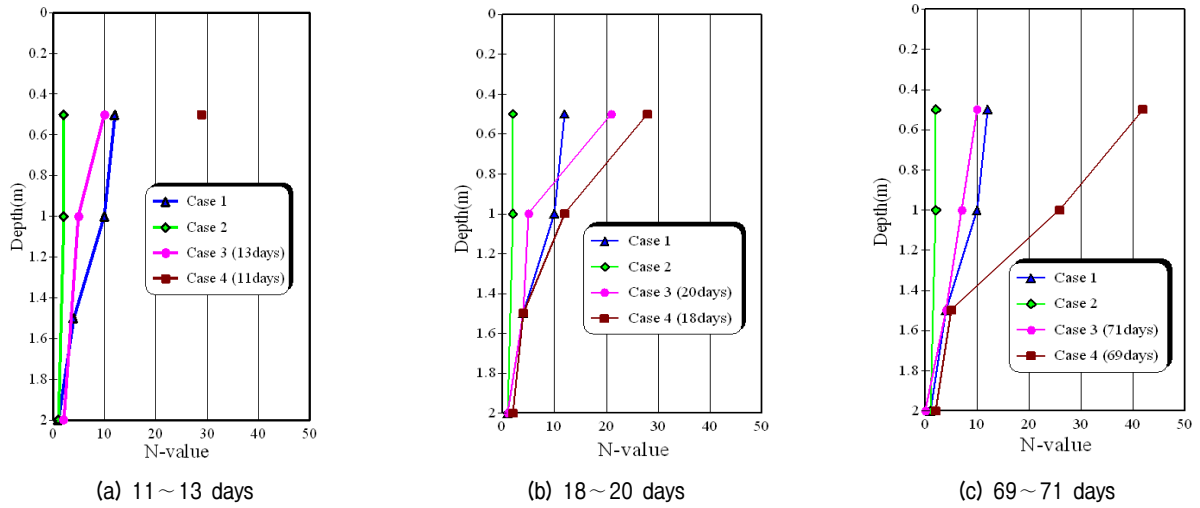


Fig. 11. STP test results by time-elapsed

입시험을 수행하고 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. <Case 3>과 <Case 4>에서는 표층이 단단해 콘관입을 용이하게 하기 위해 지표면에서 1.0m 심도까지 굴착 후 콘관입시험을 수행하였다.

콘관입시험은 표준관입시험과 동일한 일정으로 수행하였으나, 콘관입시험은 표준관입시험과는 달리 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재 시공 후 70일 경과 시에는 표층이 너무 단단해 콘관입이 불가능해 Fig. 12에는 저장도고유동화재 시공 후 11~20일 경과시에 대한 콘관입시험 결과만을 나타내었다. Fig. 12에서는 배출관을 이동하면서 시공한 <Case 4> 지역의 콘관입저항력 q_t 값이 역시 가장 크게 나타나고 있음을 확인할

수 있었다.

또한 <Case 3>의 경우 중앙부와 우측부에서 측정된 최대 콘관입저항력 q_t 값이 2MPa 정도 차이를 나타내고 있음을 확인하였다. 또한 표준관입시험 결과에서도 나타나 있듯이 심도 1.4m 전후로 콘관입저항력은 급격히 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상의 가장 큰 원인으로서는 해수에 포함된 염류에 의한 시멘트 수화물의 열화현상 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 해수에는 각종 염류가 용해되어 있으며 시멘트 수화물의 열화에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 염화물(CL) 및 황산염(SO_4^{2-})이다. 염화물이 시멘트 수화생성물인 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 $CaO \cdot CaCl_2 \cdot 2H_2O$

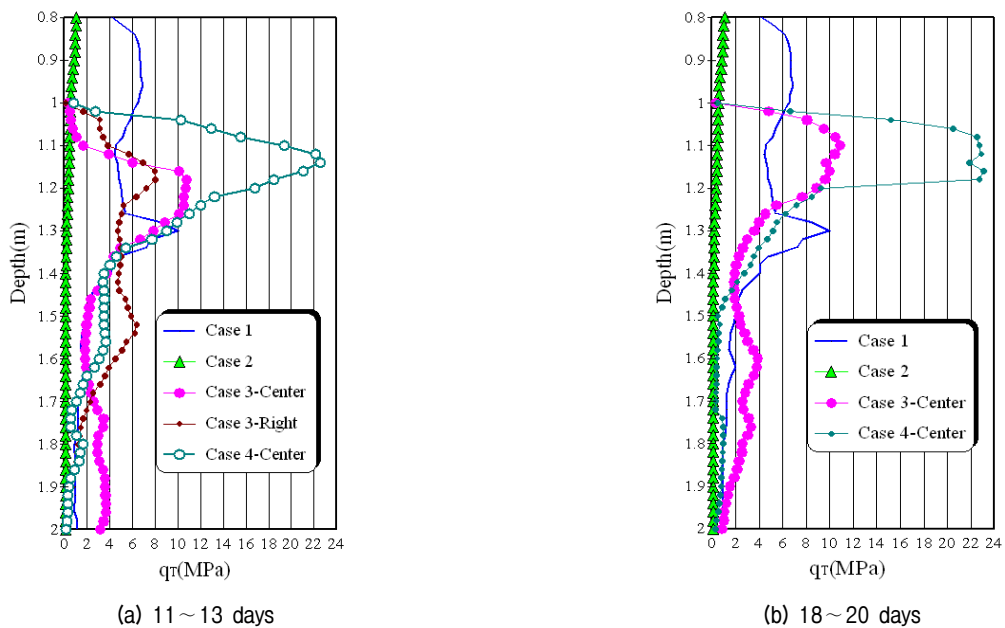


Fig. 12. Cone penetration test results

및 $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 4H_2O$ 와 같은 생성물들을 생성하여 용적이 팽창되고, 일부는 외부로 용출되면서 공극이 증가하여 결국 콘크리트가 열화된다(한국레미콘공업협회, 2011). 즉, 해수의 침식으로 인하여 포틀랜드시멘트계 페이스트는 총공극량이 크게 증가하고, 이는 체적증가 및 길이변화로 나타난다(Moon et al., 2001). Cl^- 이온이나 SO_4^{2-} 이온과 시멘트 수화물인 monosulfate가 반응해 불완전한 결정의 friedel의 염으로 변하고, 재차 시멘트 속의 미반응석고와 반응하거나 해수 속의 황산염과 반응하여 팽창성 에트리자이트로 변화하는 사이클이 순환되면서 수화조직이 파괴된다(Chun, 2011). 또한 해안 부근의 콘크리트는 해수에 의한 영향으로 성능저하를 유발하는 다양한 이차반응생성물을 형성함으로써 종합적인 내구성저하를 유발한다(Lee et al., 2003). 이와 같은 현상으로 인하여 해수면 아래에 타설된 저장도고유동화재는 재령 및 심도 증가에 따라 강도가 증가한 것이 아니라 오히려 저하된 것으로 판단된다.

강도감소가 심도 1.4m 전후에서 급격히 발생한 것은 해수가 심도 1.4m 까지 상승하였기 때문인 것으로 판단된다. 현장실험은 공유수면 매립현장에서 이루어졌으며 호안 외측은 바다이며 호안 내측은 해수가 갇혀 있었기 때문에 약 2m 깊이의 시험구덩이를 굴착하였을 때 바닥면에서 해수가 스며드는 현상이 관찰되었다. 밀물과 썰물의 수위차에 의하여 실제 해수를 포함한 지하수위는 약 1.4~1.5m까지 상승한 것으로 보인다.

3.3 환경성 평가

토양오염도 평가는 저장도고유동화재가 주변지반에 미치는 영향 또는 이를 이용하여 지반을 조성할 경우의 환경위해성을 파악하기 위하여 실시되었다. 토양오염도 시험결과 중 “pH, Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr^{6+} , Zn, Ni, F”의 검출결과를 Table 2로 표기하였고, 그 외 항목 “유기인 화합물, PCBs, CN, 페놀, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, TPH, TCE, PCE”은 검출되지 않아 별도로 표시하지 않았다. pH를 제외한 중금속(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr^{6+} , Zn, Ni, F)은 토양환경보전법 시행규칙(환경부, 2012)에서 정하는 토양오염 우려기준 이내로 검출되었다.

pH는 원지반 <Case 1> 7.79, 매립회지반 <Case 2>는 매립 7일째는 8.16에서 90일째 8.77로 다소 상승하였다. 일반적으로 석탄회는 약 pH 11의 강알칼리성이지만 매립회의 경우 재령초기부터 pH 9 이하의 약알칼리성을 나타내었다. 이는 매립장 주변의 해수가 pH 7.69인 중성으로 나타났고, 매립회가 매립장으로 운송될 때 이미 중성인 해수에 희석되었으며, 그 이후 매립장에서도 해수, 빗물 등에 의하여 희석되었기 때문인 것으로 판단된다.

저장도고유동화재 지반 <Case 3>, <Case 4>의 경우 타설하는 방법만 다르고 재료는 동일하기 때문에 pH, 중금속 등의 검출결과는 거의 동일하였다. <Case 3>, <Case 4>의 경우 타설후 초기인 7일째 pH 11.4에서 90일째 8.91로 감소하였다. 타설완료 후 초기에 높은 알칼

Table 2. Test results of soil contamination

Test items	Unit	Test results										Criteria by law I area*
		Case1	Case 2			Case 3			Case 4			
			7days	28days	90days	7days	28days	90days	7days	28days	90days	
pH		7.79	8.16	8.08	8.77	11.40	11.18	8.91	11.38	11.51	8.91	
Cd	mg/Kg	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	4
Cu	mg/Kg	0.37	0.20	0.10	0.22	<0.01	0.15	<0.01	0.14	0.11	0.32	150
As	mg/Kg	0.13	0.08	0.09	0.06	0.02	0.12	0.02	0.03	0.01	0.08	25
Hg	mg/Kg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.0001	<0.01	<0.01	<0.0001	<0.01	<0.01	<0.0001	4
Pb	mg/Kg	0.76	0.19	0.25	0.17	<0.01	0.01	<0.01	0.43	0.03	0.50	200
Cr^{6+}	mg/Kg	N.D**	N.D.	N.D.	N.D.	0.003	<0.001	N.D.	0.002	0.002	N.D.	5
Zn	mg/Kg	0.82	0.32	0.12	0.48	<0.01	0.05	0.01	<0.01	0.01	0.74	300
Ni	mg/Kg	0.13	0.21	0.11	0.29	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.14	100
F	mg/Kg	1.3	1.3	0.7	1.51	<0.1	0.1	0.44	0.3	0.4	<0.1	400

* |지역: 「지적법」에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대·학교용지·구거(溝渠)·양어장·공원·사적지·묘지인 지역과 「어린이놀이시설 안전관리법」 제2조제2호에 따른 어린이 놀이시설(실외에 설치된 경우에만 적용한다) 부지

** N.D.: 검출하한 (Not Detected)

리성을 보이다 pH가 감소하여 약알칼리성이 나타난 요인으로 해수에 의한 중화와 열화현상이 가장 가능성이 높은 것으로 판단된다. 3.2.2 콘관입시험결과에서 기술한 바와 같이 염화물 및 황산염에 의한 열화현상으로 OH⁻ 이온이 감소하여 pH가 감소한 것으로 볼 수 있다. 매립회 지반 <Case 2>, 저장도고유동화재 지반 <Case 3>, <Case 4>도 모두 pH 8.5를 초과하였으나 타설완료 후 재령 90일경에는 모두 pH 9보다 작은 약알칼리성을 보였다.

지하수 오염도 실험은 저장도고유동화재가 해역에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실시되었다. 시험매립지반 주변에서 채취한 해수 <Case 1>과 매립회 지반 <Case 2>, 저장도고유동화재 지반 <Case 3>, <Case 4>의 중심부 유공관에서 채취한 지하수에 대한 오염도 실험결과를 Table 3으로 나타내었다. 실험결과를 환경정책기본법 환경기준(환경부, 2009)에서 정한 법적기준과 비교하여 기준치를 초과하는 항목은 pH, COD, 총질소(TN), 총인(TP) 항목으로 나타났다.

pH는 <Case 2>, <Case 3>, <Case 4> 모든 시험매립지반의 지하수가 기준치를 초과하였으며, 특히, <Case 3>의 경우에는 초기 pH는 다소 큰 값을 나타내고 있으나 90일 경과 후에는 pH 값이 다소 안정화 되는 양상을 나타내고 있다. 타설완료 후 7일 경과된 시점과 90일 경과시점에서 저장도고유동화재 내부에서 채취한 해수의

화학적 산소요구량(COD)과 총질소와 총인은 시험시공 주변에서 채취한 해수에서 측정된 화학적 산소요구량, 총질소, 총인의 값과 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, COD, 총질소, 총인 항목에서 기준치보다 높은 값이 측정되었으나, 시험매립지반 주변 해수 <Case 1>의 COD, 총질소, 총인이 각각 기준치뿐 아니라 <Case 2>, <Case 3>, <Case 4>보다 높기 때문에 이를 저장도고유동화재의 영향이라고 결론지을 수 없다.

한편, 저장도고유동화재의 재료인 석탄회 2종류, 매립회와 비회의 오염도를 평가하기 위하여 용출시험을 실시하여 Table 4로 나타내었다. 매립회와 비회의 용출시험결과에서도 총질소, 총인이 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 일반적으로 석탄회에 중금속이 아닌 총질소, 총인이 기준치를 초과하는 경우는 드문데, 이는 석탄회가 화력발전소 보일러 내에서 고온으로 연소되고 남은 부산물이기 때문에 총질소, 총인이 석탄회 내에 잔존하기 어렵기 때문이다. 이러한 결과는 매립회가 매립될 때 해수와 같이 혼합되어 운송되며, 매립장 내에서도 해수가 드나들기 때문에 COD, 총질소, 총인이 높은 해수에 의한 영향인 것으로 판단된다.

그 외에 6가크롬, 비소, 카드뮴, 납, 아연, 구리, 시안, 수은은 기준치보다 낮게 나타났으며, PCBs, 다이아진논, 파라티온, 말라티온, 1,1,1-트리클로로에탄, 테트라

Table 3. Test results of underground water contamination

Test items	Unit	Test results										Criteria by law
		Case1*	Case 2			Case 3			Case 4			
			7days	28days	90days	7days	28days	90days	7days	28days	90days	
pH		7.73-7.69	8.52	8.59	8.71	12.24	8.67	8.52	8.99	7.76	8.85	6.5-8.5
COD	mg/L	6.89-7.7	6.2	5.3	5.1	7.0	5.5	4.6	3.6	6.1	3.0	3
DO	mg/L	12.54-13.74	13.90	9.83	12.44	14.10	10.14	12.90	13.03	9.51	13.03	2
E. Coli	mg/L	70	150	150	100	50	100	150	50	50	100	none
SEF	mg/L	N.D.	N.D.	0.003	0.003	N.D.	0.002	0.001	N.D.	0.001	0.002	none
TN	mg/L	1.0-5.9	2.2	2.5	2.1	1.9	1.9	4.5	2.3	2.1	4.3	1.0
TP	mg/L	0.08-0.23	0.18	0.10	0.23	0.10	0.11	0.18	0.20	0.17	0.20	0.09
Cr ⁶⁺	mg/L	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	< 0.0001	0.05
As	mg/L	0.03	0.03	< 0.01	0.01	0.02	0.02	< 0.01	0.03	0.01	< 0.01	0.05
Cd	mg/L	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01
Pb	mg/L	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05
Zn	mg/L	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	< 0.01	0.03	0.1
Cu	mg/L	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
CN	mg/L	N.D.	N.D.	< 0.01	< 0.01	N.D.	< 0.01	< 0.01	N.D.	< 0.01	< 0.01	0.01
Hg	mg/L	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0005

* Seawater around field test

** 환경정책기본법 환경기준(환경부, 2009) 중에서 등급Ⅲ은 공업용 냉각수, 선박의 정박 등 기타 용도로 이용되는 수질

Table 4. Leaching test results of pond and fly ash

Test items	Unit	Criteria by law (III*)	Test results	
			Pond ash	Fly ash
TN	mg/L	1.0	3.53	5.32
TP	mg/L	0.09	0.7	1.2
Cr ⁶⁺	mg/L	0.05	<0.0001	0.0218
As	mg/L	0.05	0.01	0.01
Cd	mg/L	0.01	0.01	<0.01
Pb	mg/L	0.05	0.01	<0.01
Cu	mg/L	0.02	0.01	<0.01
CN	mg/L	0.01	0.01	0.01
Hg	mg/L	0.0005	<0.0001	<0.0001

* 등급III은 공업용 냉각수, 선박의 정박 등 기타 용도로 이용되는 수질

클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 벤젠, 페놀, 음이온계면활성제(ABS)은 검출되지 않았다.

상기 결과를 종합해 보면 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재에 토양오염도 및 해수오염도를 평가한 결과 pH를 제외하고 토양환경보전법(환경부, 2012)과 환경정책기본법(환경부, 2009)에서 정한 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. pH의 경우 환경정책기본법에서 정한 8.5보다는 높았으나 9.0보다는 낮게 나타났다. 지하수법(환경부, 2011)에서 정하는 pH기준을 살펴보면 생활용수(5.8~8.5), 농·어업용수(6.0~8.5) 기준은 만족하지 못하지만, 공업용수 기준(pH 5.0~9.0)은 만족하였기 때문에 공업용수로 사용하기에는 적절한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재의 공유수면매립재로서의 현장적용성을 평가하기 위하여 현장실험을 수행하였으며, 매립지반의 강도, 토양 및 해수오염도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표층부분에서는 시공 후 약 6일 정도면 목표 일축압 축강도인 500kPa정도의 강도가 발현되는 것을 확인하였다.
- (2) 유동화재의 배출관의 위치에 따라 지반의 강성이 차이를 나타내고 있으며 배출관이 위치한 곳과 배출관에서 약 2m 정도 떨어진 위치와의 동탄성계수 차이는 약 30~60% 이상의 차이가 나 시공법에 의해서 지반의 강성에 상당한 영향을 미치는 것으로

나타났다.

- (3) 석탄회와 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재에 토양오염도 및 해수오염도를 평가한 결과 pH 값은 매립 초기에는 다소 높지만 90일 경과 후에는 8.5~9.0 이내로 안정화되었다.
- (4) 토양 및 지하수 오염도를 평가한 결과 원지반 주변 해수의 COD, 총질소, 총인 검사결과가 법적기준치 뿐 아니라 석탄회 및 저장도고유동화재 매립지반의 지하수보다 더 높은 값이 측정되었고, 매립지반의 지하수의 COD, 총질소, 총인 검사결과도 법적 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 매립회가 매립될 때 해수와 같이 혼합되어 운송되며, 매립장 내에서도 해수가 드나들기 때문에 석탄회가 해수의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그 외에 다른 항목들은 기준치보다 낮거나 검출되지 않았다.
- (5) 석탄회를 주재료로 하는 저장도고유동화재가 토양 및 해수에 미치는 오염도를 평가한 결과 pH를 제외하고 토양환경보전법과 환경정책기본법에서 요구하는 시험항목의 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. pH의 경우도 지하수법에서 정하는 공업용수 기준(pH 5.0~9.0)은 만족하였기 때문에 석탄회 및 이를 활용한 저장도고유동화재 매립지반의 지하수를 공업용수로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재(Flowable Fill)제조공정 개발)

참 고 문 헌

1. 국회국토해양위원회 (2008), *새만금토지이용구상(안)*, pp.47-49.
2. 한국레미콘공업협회 (2011), *콘크리트 염해의 원인과 대책*, 한국레미콘공업협회 기술분과 위원회 기술정보, pp.1-8
3. 환경부 (2009), 환경정책기본법 시행령 제2조 환경기준 별표 1, 대통령령 제21621호, 2009.7.7. 일부개정
4. 환경부 (2012), 토양환경보전법 시행규칙 제1조의 5 토양오염우려기준 별표 3, 환경부령 제463호, 2012.7.4. 타법개정
5. 환경부 (2012), 지하수법 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제11조 지하수의 수질기준 별표 4, 환경부령 제476호, 2012.9.24. 일부개정
6. 屈内澄夫 (1996), *石炭灰の水城埋立てへの利用に關する研究*, 茨城大學, 博士學位論文 pp.95.
7. ACI Committee 229 (1994), *Controlled Low-Strength Materials (CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-94. pp.1-12.
8. ACI Committee 229 (1999), *Controlled Low-Strength Materials (CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-99. pp.1-15.
9. Cho, J. Y., Lee, K. H., and Lee, I. M. (2000), "A Study on the Flowable Backfill with Waste Foundry Sand for Retaining Wall", *Journal of KGS*, Vol.16, No.4, pp.17-30.
10. Chun, B. S. (2011), "*Principles and Practice for Chemical Grouting*", GoomiBook, pp.300-350.
11. Kim, J. H., Cho, S. D., Kong, J. Y., Jung, H. S., and Chun, B. S. (2010), "Curing Characteristics of Controlled Low-Strength Material Made with Coal Ashes", *Journal of Korean Geo-Environmental Society(KGES)*, Vol.11, No.11, pp.77-85.
12. Konard, J. M. and Lachance, D. (2000), "Mechanical Properties of Unbound Aggregates from DCP and Plate Load Test", *Proceedings of the Fifth International Conference on Unbound Aggregate in Roads*, Nottingham, United Kingdom
13. Kong, J. Y., Kang, H. N., and Chun, B. S. (2010), "Characteristics of Unconfined Compressive Strength and Flow in Controlled Low-Strength Materials Made with Coal Ash", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.26, No.1, pp.75-83.
14. Lee, H. M., Hwang, J. Y., and Jin, C. S. (2003), "Concrete Deterioration Near Coastal Area and Characteristics of Associated Secondary Mineral Formation", *Journal of Korean Econ. Environ. Geol.*, Vol.38, No.5, pp.365-374.
15. Lee, K. H. and Song, C. S. (2006), "Performance Evaluation of Underground Pipe with In-Situ Recycled Controlled Low-Strength Materials", *Journal of Korean Society of Road Engineering*, Vol.8, No.2, pp.1-12.
16. Lee, K. H., Kim, J. D., Hyun, S. C., Song, Y. S., and Lee, B. S. (2007), "Deformation Behavior of Underground Pipe with Controlled Low-Strength Materials with Marine Dredged Soil", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation(KSHM)*, Vol.7, No.5, pp.129-137.
17. Lim, Y. J. and Seo, C. B. (2009), "Evaluation of Engineering Properties of CLSM using Weathered Granite Soils", *Journal of KSHM*, Vol.9, No.3, pp.19-26.
18. Moon, H. Y., Lee, S. T., and Kim, H. S. (2001), "Evaluation on the Deterioration and Resistance of Cement Matric due to Seawater Attack", *Journal of Korean Concrete Institute(KCI)*, Vol.13, No.2, pp.175-183.
19. Park, J. H., Lee, G. H., Jo, J. Y., and Kim, S. N. (2004), "Deformation Characteristics of Underground Pipe with In-situ Soil CLSM", *Journal of KGS*, Vol.20, No.3, pp.129-139.
20. TRB (2008), "*Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction*", NCHRP Report 597, U.S. Transportation Research Board, pp.3-59.
21. Won, J. P. and Lee, Y. S. (2001), "Properties of Controlled low-strength material containing Bottom Ash", *Journal of KCI*, Vol.13, No.3, pp.294-300.
22. Yoo, W. K., Lim, N. G., Kim, B. I., and Kim, J. H. (2008), "Field Tests for the Application of various Testing Devices for Measuring Degree of Compaction", *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, pp.2045-2048.

(접수일자 2011. 11. 10, 심사완료일 2012. 11. 27)