

교반날개와 개방형 스크류 이송날개를 부착한 혼합교반장치와 강제압입장치를 이용한 심층혼합 지반개량 기둥체 조성공법 (S.R.T.공법) 검토

S.R.T.공법은 토목공학분야의 일반적인 지반개량공법 가운데 심층혼합처리공법(Deep Mixing Method)으로 분류할 수 있으며 기존에 국내에서 적용되는 공법들의 단점을 개량, 개선하여 개발한 교반날개와 개방형 스크류 이송날개를 부착한 혼합교반장치, 대형장비의 대체효과를 위해 개발된 강제압입장치, 그리고 부가적으로 시공유효 심도, 직향도, 그라우트 투입량, 시공소요시간, 모터전류치 등의 시공요소관리기술을 실현한 중앙품질관리제어시스템(CMCS)을 이용하여 지반개량 기둥체를 조성하는 신공법 (건설교통부 신기술 제357호)이다.



* S.R.T.공법 : (Soil cement column for Reinforcement&containment Technique)

1 개요

심층혼합처리공법은 석회, 시멘트 등의 지반개량재(혹은 안정재, 주입재)를 연약층에 공급하여 기계적으로 원지반 흙과 균일하게 혼합하고, 시멘트 수화반응, 포졸란 반응 등의 고결작용으로 기둥체를 형성하여 연약층을 강화하는 화학적 지반개량공법의 일종이다. 해외의 경우 오래 전부터 확하나 시공사, 장비 제작사, 기술 개발사 및 재료 제작사간의 연구회 결성 및 활동을 통해 심층혼합처리공법을 개발하고 시공경험이나 사례, 실제 시공 시 발생하는 문제점, 시공조건, 지반조건에 따른 시공 인자 등에 대한 체계적이고 과학적인 논의가 이루어져 왔다. 특히 오랜 기간 동안 학회, 학계와 시공사간의 산학공동연구 프로그램을 통해 심층혼합처리공법

에 대한 연구를 계속하고 있고, 국립기술연구소, 대형건설사, 전문시공업체, 설계사, 장비업체간의 연합을 통한 공법연구회의 형태로 다양한 공법을 지속적으로 개량, 개발하고 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 국내 심층 혼합 처리 공법의 경우 기술선진국의 사례에서처럼 산학 협동연구단체, 연구회 내지 이종 산업체간의 전략적 제휴와 같은 조직적인 활동이 이루어지지 않고 있으며 기업의 영세성과 선진기술에 대한 이해가 부족한 상태의 기술도입으로 부분적 개발에만 치중하는 결과를 초래하여 종합적인 차원의 기술개발이 도외시되고 있는 경향이 있다.

이러한 가운데 국내에서 최초로 시공 효율성의 증대(혼합교반장치와 강제압입장치)뿐 만 아니라 매 단위개량체 조성에 투입되는 지반개량재의 계량에서부터 그라우트 사용량, 모터 전류치, 굴삭

혼합속도 및 인발혼합속도, 엘리먼트당 총 교반시간은 물론 심도와 수직도까지 모니터링하여 기록, 관리함으로써 시공 영향인자들을 실시간으로 확인할 수 있는 신기술 (S.R.T.공법)이 개발되어 소개하고자 한다.

이러한 신기술의 적용으로 시공영향인자를 지속적으로 계측하여 자료로 축적하면 지반조건이 상이한 타 현장에서의 시공관리에 유용하게 이용될 수 있음은 물론 연관분야의 연구 및 시공 결과의 데이터분석으로 획기적인 품질향상과 기술개발 또한 가속화될 것으로 보인다.

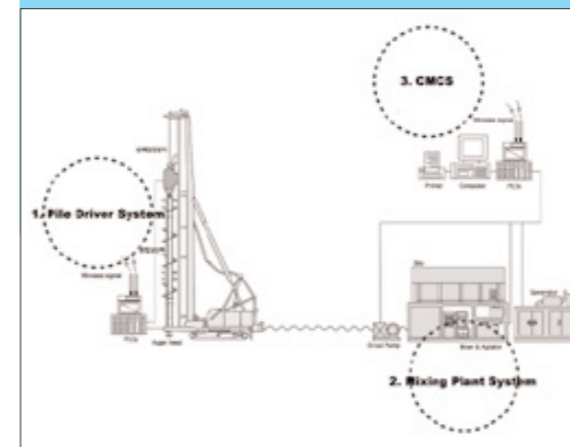
2 시공 시스템

S.R.T.공법은 기존 심층혼합처리공법의 시공품질 개선과 시공효율 향상을 실현시키기 위한 기술로, 혼합효율 향상을 위해 교반날개와 개방형 스크류 이송날개를 부착한 혼합교반축과 대형장비의 대체효과를 위해 개발된 하향굴삭 능력을 증가시킬 수 있는 유압식 강제압입장치, 부가장치로서 시공요소관리기술을 실현한 중앙품질관리제어시스템을 이용한 지반개량기둥체 조성공법이다.

2-1. S.R.T.공법의 장비 구성

S.R.T.공법의 장비의 구성 개념을 살펴보면 그림 1과 같이 기둥체 형성을 위한 직접적인 시공이 이루어지는 Pile Driver System 부, 지반개량재를 보관, 혼합 및 공급이 이루어지는 Mixing Plant System부, 시공 요소 계측, 제어 및 품질 관리가 이루어지는 C.M.C.S.부로 구성되어 있다.

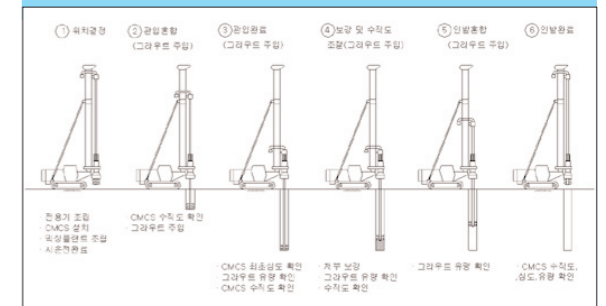
■ 그림 1. S.R.T.공법의 장비 구성



2-2. 시공 방법

준비작업이 완료되면 믹싱 플랜트부에서 배합된 슬러리와 압축공기를 이송하고 파일드라이버의 로트 선단에서 분출상태를 확인 후 관입혼합을 실시한다. 목표심도 도달 후 선단부 보강을 실시하고 최종 인발혼합공정으로 단위개량체의 시공을 완료한다. 전 공정에 걸쳐 중앙품질관리제어시스템(C.M.C.S.)에 의해 조성되는 개량체의 직향도 외 시공요소들을 실시간 제어하고 관리한다.

■ 그림 2. S.R.T.공법의 시공 순서도



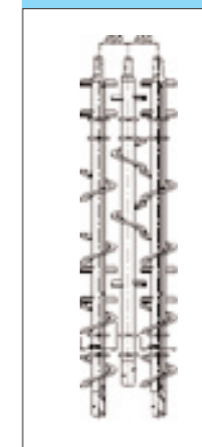
3 핵심기술의 내용

3-1. 혼합교반장치

조성되는 개량기둥체가 최대한 균질한 성상을 갖기 위해서는 굴삭하면서 심층에서 파헤쳐진 흙과 회전축을 통해 선단에서 토출된 지반개량재가 얼마나 잘 혼합되느냐에 달려있다.

기존장비의 날개가 완전 부착형이라면 S.R.T.공법의 혼합교반축 날개는 축과 일정부분의 공간(85mm)을 이격시킴으로써 이송기

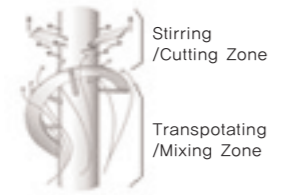
■ 그림 3. 혼합교반축 설계도



능과 함께 이격된 부분으로 인하여 수직분리능이 추가적으로 발휘되도록 하였다. 축에 대해 60°의 각도를 가지고 비스듬하게 용접하였으며 회전방향의 반대쪽에 보조날개를 덧붙여서 마모저항성 및 내구성을 증진시켰을 뿐 아니라 흙의 분쇄 및 혼합효율이 증가되도록 설계되었다.

S.R.T.공법의 교반분쇄용 날개와 이송 혼합용 날개의 형상과 적합한 배치를 갖춘 혼합교반축을 통해 격동적인 혼합유도 및 공기방울효과를 기대할 수 있

■ 그림 4. 흙 - 지반개량재 혼합물의 혼합개념도



으며, 교반혼합 날개의 수량이 타 공법에 사용하는 교반장치와 비교해서 많기 때문에 동일시간에 혼합날개와 흙의 접촉횟수가 많아지게 되어 교반효율이 향상되므로 개량체 품질이 우수하고 소요 강도 및 투수성 확보가 용이하다.

위 그림 3와 같이 교반혼합축은 이송날개와 교반날개는 각각 2단 2조로 총 8단으로 구성하였으며 아래와 같은 효과를 가지고 있다.

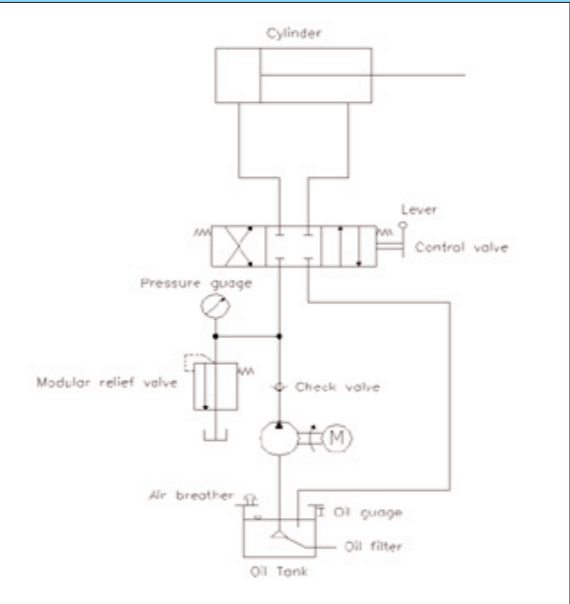
- ① 인발시 형성되는 부압의 영향을 최소화함으로써 공벽의 붕괴를 막을 수 있다.
- ② 2단 리본형 스크류날개와 2단 막대형 교반날개의 구성으로 상하향 이송이 촉진되고 혼합 교반효과가 우수하다.
- ③ 날개 표면에 덩어리상태의 침착을 최대한 방지할 수 있어 미혼합부의 발생을 최소화 할 수 있다.
- ④ 시공 시 삼축을 통해 분출하는 압축공기가 하부에서는 파쇄 및 혼합의 1차 목적을 수행하며, 형성된 공기방울은 단위개량체의 길이만큼 지표면 방향으로 상승하면서 부수적인 공기방울 효과(수축팽창/이합집산)가 있다.

3-2. 강제압입장치

오거 모터(auger motor)는 베이스 머신에 수직으로 장착되어 있는 리더(leader)의 가이드 레일(guide rail)을 따라 상하로 이동되며, 교반축이 지반으로 관입될 때의 회전력은 오거모터의 용량에 의해 결정되고 관입능력은 오거모터 와 교반축의 자중에 의해 결정된다.

심도가 깊어질수록 관입능력 즉, 관입속도가 늦어지게 되며, 더우기 전석층, 자갈층에서는 관입할 수 없는 경우도 발생한다. 이를 해결하기 위한 방법은 축방향의 하중증가로 S.R.T.공법에서는 그러한 문제를 해결하기 위하여 강제 압입 장치라는 추가 장치를 채택하였다.

■ 그림 5. Hydraulic system circuit diagram



모터자중과 축자중 외의 강제 하강력(Max. 43Ton)을 얻게 되므로 기존 장비와 비교하여 약 3~4 배(총 하중 Max 약60Ton) 정도의 굴진력이 향상되어 굴진하기 어려운 지층에서의 굴진관입을

■ 그림 6. 유압분배기

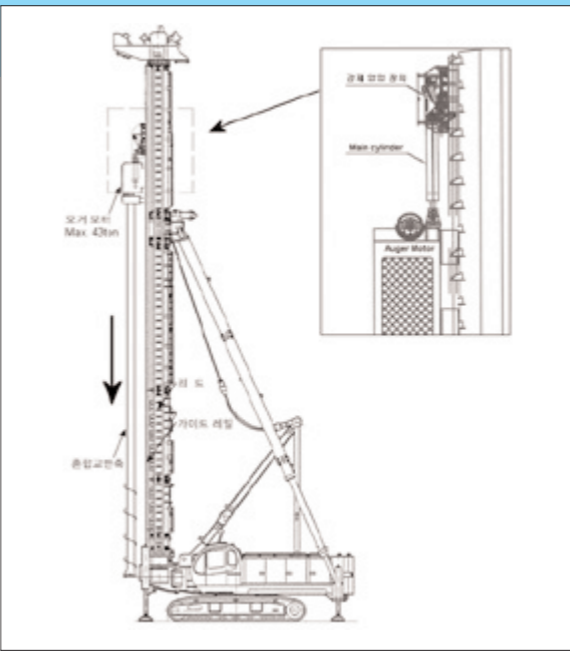


■ 그림 7. 전방 좌우자키



용이하게 한다. 파일드라이버의 위치선정, 지지력확보 및 베이스머신 레벨조절에 사용하는 유압유닛(정격출력140kg/cm²)는 작업시작 전 초기에만 이용되고 작업이 시작되면 사용되지 않는 것에 착안하여 유압 유압라인을 이용하여 라인절환을 실시하였으며, 아래의 그림6과 7에서 보시는 바와 같이 베이스 머신 본체유압 분배 포트에서 전방 좌우자키(right & left front jockey)로 분배되는 유압호스를 빼고 강제압입장치로 연결되는 호스를 포트에 꽂아 동력 전달을 하여 작동함으로써 베이스 머신의 이용률을 높이는 효과를 볼 수 있다.

■ 그림 8. 강제압입장치 장착 모습도



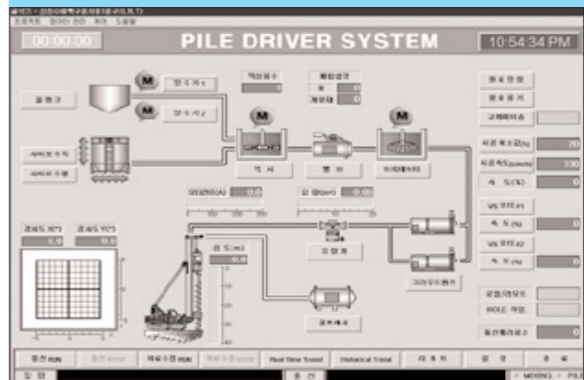
3-3. 중앙품질관리제어시스템(CMCS)

심층혼합처리공법에서 우수한 시공품질을 얻기 위해서는 객관적이고 체계적인 품질관리가 필수적이다. 중요한 품질관리 요소로 단위기동체당 실제 투입된 지반개량재의 량, 그라우트의 물/개량재 비율(W/C ratio), 균질혼합을 위한 혼합교반 소요시간, 기동체의 직향도 및 유효심도를 들 수 있다.

S.R.T.공법은 이러한 심층혼합처리공법에 있어서 체계적이고 과학적인 품질 관리가 가능하도록 중앙품질관리제어시스템(Central Management / monitoring & Control System)기술을 개발,

적용하였다. 이는 모호성을 갖는 각 시공요소에 정밀 센서를 부착하여 매 단위개량체 조성에 대한 지반개량재 투입량, 물/개량재 혼합비, 직향도 및 심도, 작업소요시간 등의 시공정보가 현장에서 직접 측정되며 이를 중앙관리 제어 시스템에 무선으로 전송, 중앙 처리기가 각종의 데이터를 수집, 정리, 연산하고 실시간으로 작업 현황을 모니터링 할 수 있다.

■ 그림 9. CMCS 중앙관리 컴퓨터 모니터 초기화면



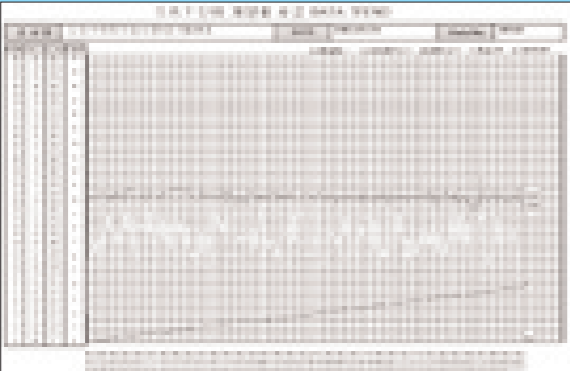
중앙품질관리제어시스템은 개별시공인자에 대한 계측값을 얻기 위하여 심층혼합처리 시공 장비의 각 요소에 고정밀 센서를 부착하고 여기에서 측정된 각종 계측값을 PLCs (Programmable Logic Controllers)로 받은 다음 중앙관리 컴퓨터로 무선송신(wireless signal processing & communicating)하는 방식으로 이루어져 있다.

중앙관리 컴퓨터 시스템에 저장된 각종 계측값은 현장사무실의 컴퓨터 화면 및 파일드라이버 운전실의 운전자 조작반에서 실시간으로 현재의 시공상황을 한눈에 파악할 수 있을 뿐만 아니라 시

■ 그림 10. CMCS 시공보고서 화면



■ 그림 11. 단위개량체 시공Data Trend



공현장별 데이터를 저장하기 때문에 추후 실 시공 자료로서의 활용 가치는 물론 품질보증(quality assurance) 측면 에서도 매우 유용하다.

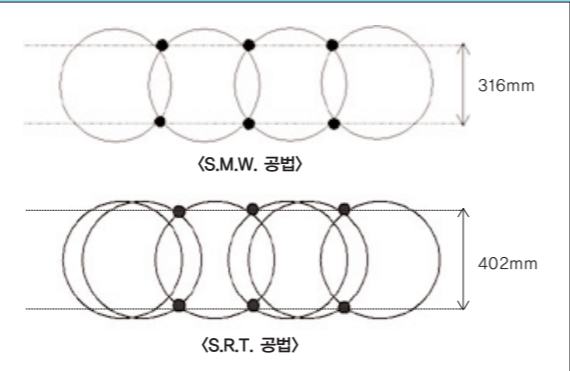
기존 기술에서도 시공요소의 계속 필요성을 충분히 인식하고 있으나 단편적 계속수준에 머무르고 있으며 S.R.T.공법의 CMCS는 이러한 문제를 해결하고 있다.

- ① 시공에 이용되는 모든 장치의 운전 정보를 실시간으로 파악할 수 있다.
- ② 투입되는 지반개량재의 양을 정확하게 측정할 수 있다.
- ③ 단위기동체당 소요된 그라우트의 양을 정확하게 측정할 수 있다.
- ④ 제조된 그라우트가 처리기 본체로 이송되는 토출량을 계속 및 제어함으로써 단위 기동체당 정량의 그라우트 투입과 제어가 가능하다.
- ⑤ 단위기동체의 직향도 관리 및 정확한 위치제어가 가능하다.
- ⑥ 단위기동체의 심도, 굴진 및 인발속도, 정지교반시간등에 대하여 실시간으로 기록, 유지, 관리할 수 있다.
- ⑦ 위의 모든 시공인자에 대하여 객관적인 자료를 출력하여 관리함으로써 시공 품질의 관리가 용이하다.

3-4. 시공순서

심층혼합처리의 원류 기술을 가진 일본의 S.M.W.공법과 국내 일반 심층혼합처리공법에서 실제 시공경은 550mm이나 각 기동체가 중첩되며 시공되기 때문에 유효한 벽폭이 316mm밖에 되지 않는다. S.R.T.공법에서는 S.M.W.공법에서 보다 Overlapping되는 구간이 더 커져 유효벽폭이 402mm로서 S.M.W.공법과 비교해서 약 86mm정도 더 두꺼워지게 된다.

■ 그림 12. 개량체 두께비교



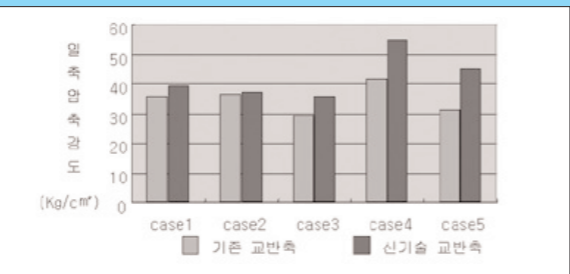
기계중첩거리는 같은 100mm이나 S.R.T.공법 중첩거리는 175mm로서 기존공법의 중첩거리에 비해 약 75mm정도가 크고 유효길이 75mm만큼 짧아짐을 의미한다. SMW 공법에서의 이격거리(350mm)와 S.R.T.공법의 이격거리(200mm)가 상이하게 달라 중복 시공되는 부분이 현격히 커짐을 알 수 있다. 이에 따라 시공신뢰성이 향상되어 안전성을 확보할 수 있으며 유효벽 폭 역시 두터워지게 되어 처수와 강도문제에 보다 효과를 볼 수 있다.

4 S.R.T.공법의 성능 및 품질

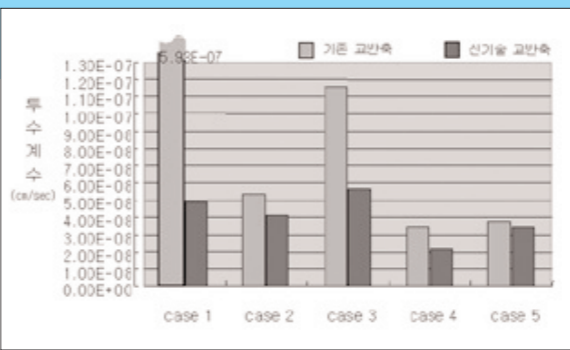
4-1. 기존공법 교반축과의 비교

개방형 스크류 이송날개를 부착한 혼합교반축(신기술 교반축)은 개발 당시 기존공법에서 사용되고 있는 교반축(기존 교반축)과 여러조건으로 시험시공하여 비교 분석한 결과 그림 13과 14에 나타난 바와 같이 여러 시공 조건에 있어 기존의 교반축보다 강도는 평균 약 19%, 투수계수는 평균 약 62% 정도 향상되어 우수한 것으로 연구되었다.

■ 그림 13. 일축압축강도 비교



■ 그림 14. 투수계수 비교



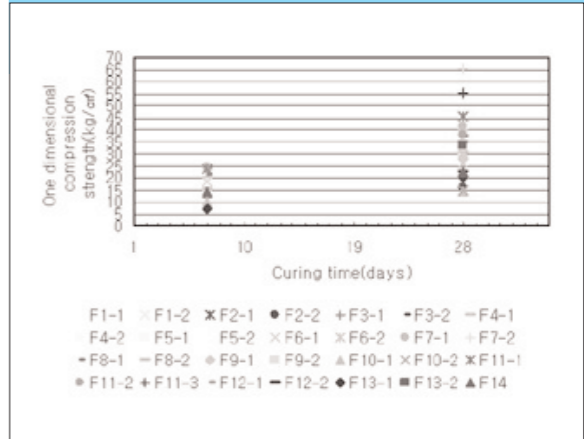
※ 한국건설기술연구원 (2001), "다축교반식 지반개량체 조성에 의한 대심도 연약지반 보강 및 처수벽 조성공법 연구" 보고서 발췌

4-2. 실적사례에서의 성능 및 품질

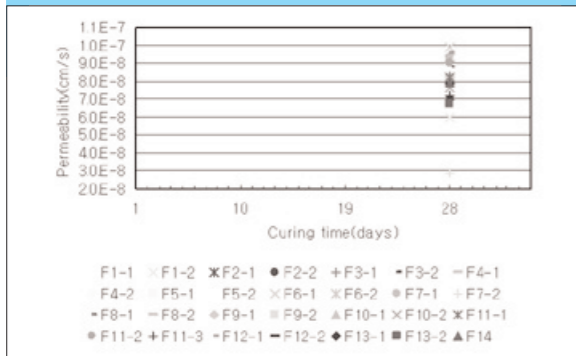
S.R.T.공법 적용 현장의 처수벽 시공 7일, 28일의 양생기간에 따른 강도 및 투수계수의 시험결과 값을 그래프로 나타낸 것으로

모든 현장이 목표 강도(최소 2.5kgf/cm²이상) 및 투수계수(1.0E-7cm/sec이하)를 만족하고 있다. S.R.T.공법이 적용되었던 전 현장의 배합시험성적과 처수벽을 실제 시공 완료한 후 발주처에 제출했던 코어의 시험성적을 분석, 정리한 Data로 다음의 그림 15와 16과 같이 그래프로 나타낼 수 있다.

■ 그림 15. S.R.T.공법 적용현장 강도 시험결과



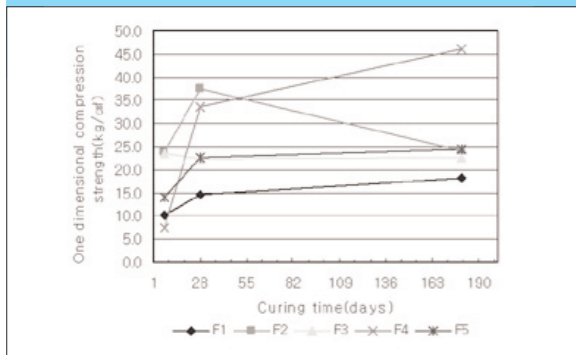
■ 그림 16. S.R.T.공법 적용현장 투수계수 실험결과(28일)



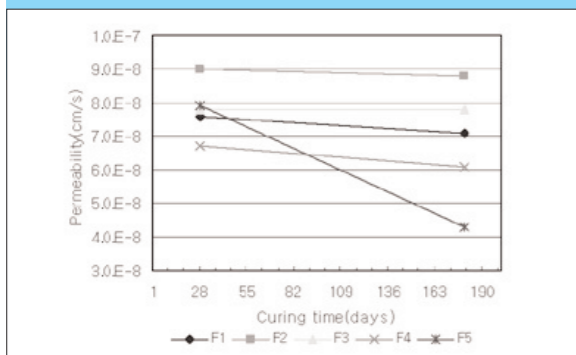
4-3. 장기 성능 및 품질

조성된 개량체의 단기적 성능뿐만 아니라 시간의 경과에 따른 품질변화에 대한 연구의 필요성에 의해 장기적 성능을 검증하는 방법으로 추적조사를 실시하여 시공 당시의 성능검증결과와 장기간 경과 후의 성능 유지 여부 및 변화 추이를 추적 조사하여 비교 분석하였다.

■ 그림 17. S.R.T.공법 적용현장 투수계수 실험결과(28일)



■ 그림 18. S.R.T.공법 적용현장 투수계수 실험결과(28일)



장기강도는 전 현장별로 11.6~46.2 kgf/cm²로 나타났고 현장투수계수 5.2~8.1E-8 cm/sec의 결과로 나왔다. 시공 당시 28일 양생 후의 시험 결과와 비교해 보면 평균적으로 일축압축강도는 약6% 정도 높게 나타났으며 투수계수는 약 13%정도 낮게 나타났다.

※ 창원대학교 산업기술연구원 (2005), "S.R.T.공법의 적용사례에 관한 연구" 보고서 발췌

5 환경에 대한 안전성

본 신기술 공법의 기초 장비(Base machine)인 파일드라이버의 오거모터 회전속도는 17~25rpm의 저속으로 저소음 저진동 장비이고 인접건물과 주변환경에 영향이 거의 없으며, 원지반토를 그대로 이용하는 원위치 교반방식으로 슬라임 발생이 거의 없어 폐기물 발생으로 인한 처리를 별도로 할 필요가 없다.

또한 현재 비위생매립지, 폐광산과 같은 오염원의 유출을 차폐시키는 목적으로 적용되고 있으므로 환경분야에 기여하는 바가 매우 크다.

사용 재료도 폐기물공정시험법에 따른 유해물질 함유기준치를 만족함으로써 환경적으로 유해하지 않음이 검증되었다.

■ 표 1. 지반개량재(SF)의 유해물질유출량 시험결과와 기준

항 목	단 위	지반개량재 성적서	폐기물 공정 시험법 기준
유해물질	Pb	ppm	검출안됨
	Cd	ppm	검출안됨
	Cr6+	ppm	검출안됨
용출량	Cu	ppm	검출안됨
	As	ppm	검출안됨
	Hg	ppm	검출안됨
	CN	ppm	검출안됨
테트라클로로에틸렌	ppm	검출안됨	0.1 mg/l 이하

6 활용 실적

S.R.T.공법은 심층혼합처리 분야에서 시공 및 혼합교반 효율을 향상시킨 장치와 품질관리 문제를 획기적으로 개선한 시스템의 적용으로 개량기동체를 조성하는 공법이다.

적용된 공사의 유형을 보면, 태풍, 집중호우 등의 자연재해로 인한 수해복구공사나 하천 정비사업에서 제방의 Piping현상 방지와 제체의 보강을 위한 차수벽으로 9건, 환경에 대한 인식이 높아지



면서 환경분야의 비위생매립지, 폐광산 등과 같은 침출수 오염 확산 방지를 위한 목적으로 9건이 적용되었다.

또한 심층혼합처리공법의 주열식 흙막이벽체에 대한 연구용역(‘다축교반식 지반개량체 조성공법에 의한 토류벽의 설계 및 시공’-건설기술연구원)을 통해 S.R.T.공법에 맞는 토류벽에 대한 설계와 시공기술의 초석을 마련하였으며, 그 동안 적용 및 활용하지 못했던 분야에서 규모는 작지만 오염토양복원공사에 수직개착에 의한 흙막이와 차수를 목적으로 개량기동체에 응력 부담재인 H형강을 삽입하는 방식의 토류벽으로 적용, 시공함으로써 그 활용성과 시공성을 확인하였다.

최근에는 그 외 대규모 공사의 도로, 항만부두, 주택사업 등 구조물 하부기초의 지반개량과 보강용도로 영업범위가 확대되고 있는 추세이며 다양한 분야에서의 적용이 증가될 것으로 전망하고 있다. S

◎ 참고자료

1. CDM연구회 (1994) 세멘트-깊층혼합처리공법 CDM (Cement Deep Mixing) 설계·시공 매뉴얼.
2. DJM工法研究会 (1999) 粉體噴射攪拌工法(DJM工法)技術マニュアル.
3. SWM協會 (1999), "SMW連續壁(シールドマシン工法) -標準 積算 資料"
4. 한국건설기술연구원 (2001), 다축교반식 지반개량체 조성에 의한 대심도 연약지반 보강 및 차수벽 조성공법 연구
5. 한국건설기술연구원 (2002), 다축교반식 지반개량체 조성공법에 의한 토류벽의 설계 및 시공
6. 창원대학교 산업기술연구원 (2005), S.R.T.공법의 적용사례에 관한 연구
7. (주)대연건설 (2002), 건설 신기술 지정 등록서