

유 · 무기 복합재료를 적용한 친환경 ECG공법



허형석
(주)제이엔티아이엔씨
본부장
(vacuum@lycos.co.kr)



이병재
(주)제이엔티아이엔씨
선임연구원
(lbyae80@daum.net)



노재호
(주)제이엔티아이엔씨
대표이사
(trygeo@empal.com)

1. 그라우팅 현황

건설공사가 다양화되고 지하공간의 활용이 증대됨에 따라 지반내 차수를 위한 공사 및 방법들이 주목받고 있으며, 이중 시멘트를 기반으로 하여 개발된 그라우팅 방식들은 점점 다양화되고 확대됨으로써 그라우팅 기술 분야는 지속적으로 발전하고 있다.

근대의 그라우팅 공법은 1800년대 초에 프랑스에서 기초지반을 보강할 목적으로 사용하기 시작한 이후 건설공사의 여러 분야에서 지반개량과 차수를 목적으로 많이 적용되고 있으며, 특히 댐공사, 터널공사 및 대규모 지반굴착공사에는 반드시 필요한 공정이 되었다. 국내에서는 1960년대 산악터널 및 댐 기초의 그라우팅에 일부 적용된 바 있으며, 1970년대부터 서울지하철 건설공사에 본격적으로 활용되기 시작하면서 그라우팅에 대한 관심이 높아졌고, 현재는 건설현장에 없

어서는 안 될 중요한 공정이 되었다. 그러나, 그라우팅에 대한 전문지식이나 체계적인 연구의 부족으로 일부에서는 아직도 경험에 의존한 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정이며, 그라우팅 재료의 시공 후 지반내 거동은 매우 복잡하여 그라우팅에 의한 지반개량 효과를 예측하는 것은 쉽지 않다. 더구나 지반에 주입시 보이지 않는 주입재가 실제로 어떠한 과정을 거쳐 주입되고 고결되는지 파악하여 이를 정량적으로 표현하는 것은 매우 어렵다.

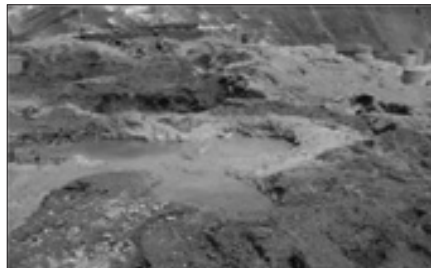
그라우트의 가장 일반적인 형태는 시멘트와 물을 사용하는 방식이다. 최근 들어서는 친환경을 표방하는 재료와 급결 성능이 부여된 그라우트에 대한 연구가 활발히 진행되어 새로운 특성을 갖는 시공기술이 개발되고 있으며, 환경에 대한 관심이 고조되면서 그라우팅 재료의 환경에 대한 위해성을 평가하기 위한 방법과 더불어 개선된 시공방법들이 제시되고 있다.

그라우팅의 주 재료인 시멘트는 물과 반응하여 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)을 용출하여 그라우트의 pH를 증가시킨다. 또한 중금속을 용출시켜 주변 환경에 해로운 영향을 미칠 수 있다. 특히, Cu, Pb, Zn, Cd의 경우, 일반적인 토양의 토양환경 내에서 거의 토양에 흡착되는 반면 Cr의 경우는 토양 간극수 사이로 침출될 가능성이 있으며 이동도 가장 큰 것으로 보고된 바 있다. 그러나, 그라우트 시공에 의해 증가되는 pH는 그라우트 중의 시멘트에서 수산화칼슘이 용출되어 발생되므로, 그라우트에서 수산화칼슘이 외부에 용출되지 않고 그라우트 내에 고정될 수 있으면 pH의 증가를 최소화시킬 수 있을 것이다. Cr^{6+} 의 발생은 기존 연구에서 금속계 환원재를 사용하여 Cr^{3+} 로 환원시키는 기술이 개발되었으나 금속계 환원재의 사용량이 많아 경제성 확보가 어렵고 대기 중에서 금속계 환원재의 성능 유지기간이 짧아 사용에 어려움이 있으므로, 가장 현실적인 방법은 그라우트 내에서 유해 중금속이 지하수 내로 용출되지 않도록 하는 것이라고 할 수 있다.

그라우팅 시공시 발생하는 빈번한 문제로서는 그라우팅 공사에서 주입재료가 지하수

에 의해 유실되어 차수(또는 보강)라는 본연 목적의 기능을 상실하고 성능이 저하됨으로써 재시공 또는 안전사고의 원인이 되는 것과 유실된 재료가 지하수나 지표수 등에 유입되어 주변 수역을 오염시키고 생태계를 교란하는 등의 환경적인 문제와 주변 구조물의 손상을 초래할 수 있다.

본고에서는 그라우팅 공사시 빈번히 발생하는 주입재료의 유실과 환경적인 피해를 개선하여 지반차수 효과를 극대화하고 그라우팅에 의한 환경피해를 저감할



(a) 재료의 유출



(b) 독성물질



(c) pH 및 현탁물질 발생

그림 1. 그라우팅 공사시 발생된 환경문제

수 있는 신공법(ECG공법)을 소개하고자 한다.

2. ECG공법의 개요

2.1 그라우트 재료의 특성

현재, 지반내 차수 목적으로 가장 많이 시공되고 있는 그라우팅 방식은 물유리(규산나트륨계)를 사용하는 것과 광물계급결재(칼슘알루미늄에이트계)를 사용하는 것으로 크게 대별된다. 우선 전자인 물유리계의 장점은 급결을 위한 시간(겔타임)이 매우 빠르다는 것과 초기 형성된 그라우트 겔의 강도가 타 방식에 비해 매우 높다는 것을 들 수 있다. 따라서, 가시설의 긴급차수에 가장 많이 적용되고 있으며 시공범위 또한 가장 폭넓게 이용되는 방식이라고 할 수 있다. 그러나, 규산나트륨과 시멘트의 반응으로 생성되는 규산칼슘수화물은 그 형태가 유리상으로 내구성이 매우 약하고 건조에 의한 체적수축이 크며 수중에서 규산이 유리(용탈)되어 종국에 가서는 그라우트 경화체가 해체되는 현상이 발생된다. 따라서, 긴급차수에는 적합하나 영구적인 차수목적에는 사용이 어렵고, 지하수의 유속이 빠를 경우 그라우팅 재료의 손실이 크게 발생할 수 있는 한계를 나타낸다. 지하수에 유실된 규산나트륨은 강알칼리성 물질로써 부식성이 크고 주변수역의 오

염요인으로써 지하수와 하천생태계에 심각한 문제를 초래할 수 있으므로 식수원이나 하천 등이 가까운 지역에서는 사용에 특히 주의해야 한다.

후자인 광물계는 비정질 칼슘알루미늄에이트와 석고 및 시멘트의 수화반응으로 반응초기에 급격하게 생성되는 에트린자이트를 이용하여 그라우트를 겔화시키는 특징이 있다. 물유리계와 같이 매우 빠른 겔타임을 얻을 수 있고, 광물계 수화물의 내구성이 매우 우수하여 경화체의 체적변화가 적고 용탈현상이 없어 영구적인 차수성능을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 광물계급결재의 가격이 타 기술에 비해 매우 높고 겔화반응이 그라우트의 온도에 민감하는 반응하는 등의 한계점을 나타낸다

그 외에도 물유리계의 단점을 개선한 실리카졸을 이용한 방식과 셀룰로스계 등의 증점제와 광물계급결재를 사용한 방식 등이 개발되어 상용화되고 있다.

본 고에서 소개하는 ECG공법은 그라우팅의 구성요소 중 재료적 측면에서 개발된 기술로써, 주요 재료로써 시멘트와 광물계급결재 및 고분자겔화제를 사용하여 반 영구적인 내구성을 확보하고, 지하수에 의한 유실을 방지하여 그라우팅 효과를 극대화 시켰으며, 그라우팅 공사시 발생될 수 있는 여러 가지 환경문제와 내구성 및 경제성 문제를 만족시킨 새로운 그라우팅 시공기술이다.

표 1. 그라우팅 재료에 따른 특징

항목	ECG	물유리계	광물계
개요	고분자겔화제와 광물계 급결재의 복합 작용에 의한 친환경 그라우팅 시공방법	물유리와 시멘트의 화학반응에 의한 긴급차수용 그라우팅 시공방법	광물계급결재와 시멘트의 화학반응에 의한 친환경 그라우팅 시공방법
재료	시멘트+고분자겔화제+광물계급결재	시멘트+물유리+기타약재	시멘트+광물계급결재+기타약재
특징	내구성이 우수, 용탈 없음 한정 범위내 주입 가능 환경오염 최소화 담수 및 해수중 시공 가능	주입범위 한정 불가능 재료의 용탈 및 환경오염 담수 및 해수 중 시공불가	주입범위 한정 불가능 내구성우수, 용탈 없음 환경영향 최소화 담수 및 해수중 시공어려움

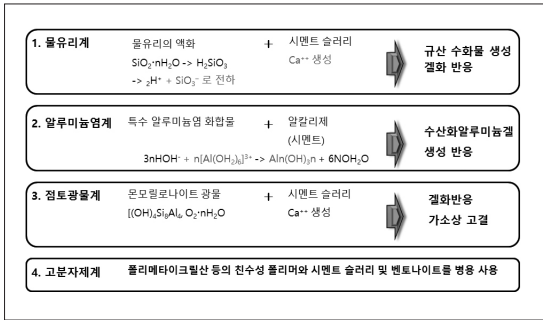


그림 2. 그라우트의 종류와 작용메카니즘

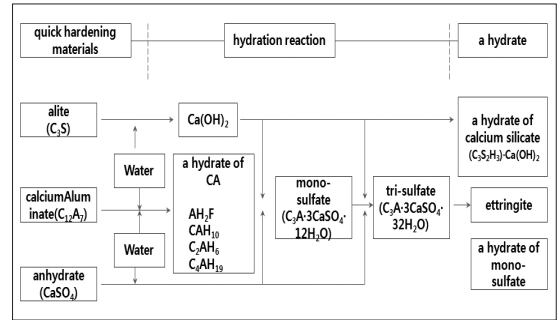


그림 3. 광물계그라우트의 수화메카니즘

그림 3은 광물계 Calcium Aluminate 급결재의 수화과정을 나타내고 있다.

2.2 ECG 특징

(1) 적용범위

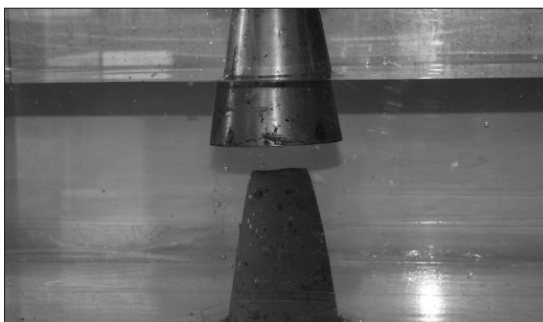
모든 물질은 액체에서 고체로 변화하는 과정에서 젤(점성이 있는 유체)상태와 겔(유동성이 없는 소성체)상태를 거치게 된다. 그라우팅 분야에서 말하는 겔타입은 액체상태에서부터 겔상태까지의 시간을 나타내고 있으며, 물유리의 경우 겔상태가 매우 짧은 시간에 이루어지고 바로 이어 고체로 변화하는 특성을 나타내어 초기 높은 강도를 발현한다.

광물계의 경우는 액체에서 겔단계를 거쳐 고체로 변화하는 것은 유사하나 겔단계가 상당히 길게 나타나고

있으며 장시간에 걸쳐 고체로 변화함으로 초기 겔강도는 물유리에 비해 상대적으로 매우 낮은 결과를 나타낸다.

상기 두가지 방식의 공통점은 액체가 고체로 변화하는 과정에서 졸상태가 매우 짧거나 나타나지 않는다는 것이며, 이는 그라우팅이 지하수 아래에서 진행할 때 그라우팅 재료가 지하수에 의해 유실될 수 있다는 한계를 나타낸다.

ECG공법의 물질 변화 단계를 보면 졸상태에서 겔상태로 변화되는 시간을 타 방식재료에 비해 상대적으로 긴 특징을 갖는다. 따라서 그라우트의 시멘트 밀크부분(시멘트와 물 및 광물계급결재의 혼합물)과 고분자겔화제가 주입루트 선단부에서 혼합됨으로써 그라우트는 점성이 발생되고 이어 수초 후 겔화되는 특징을 나타내어, 지하수에 의한 유실이 발생되지 않고 안



(a) ECG그라우트



(b) 일반그라우트

그림 4. 그라우트의 특성

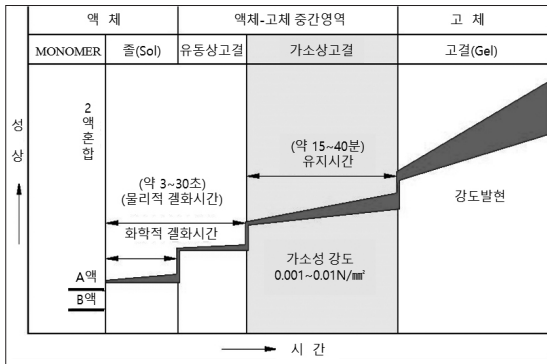


그림 5. 그라우트의 상태변화

정적인 그라우팅 시공이 가능하다.

따라서, ECG공법은 모든 지반의 차수 및 보강에 적합하나 특히 지하수 아래에서 진행되는 그라우팅 공사에 더욱 우수한 성능을 발휘 할 수 있다.

(2) 재료적 특징

ECG공법의 주요 재료의 특징은 표 2와 같다.

2.3 작용기구 및 주입특성

ECG공법은 2액형을 기본으로 하며, 주입 특성상 1.5shot 방식을 채택한다. 주재인 A액은 시멘트와 혼합수 및 광물계 급결재로 구성되고 약재인 B액은 고분자겔화제와 혼합수로 구성되어 각기 다른 펌프에 의해 주입장소로 압송되고 주입장치 선단에서 1.5shot방식

표 2. ECG공법의 구성

항목	재료	성분	특성
A액	시멘트	보통시멘트(OPC)	장기강도 발현 내구성 향상
	급결재	칼슘알루미늄에이트 혼합물	초기 응결을 강도발현 겔화 촉진
B액	겔화제	폴리카본산계 고분자	겔화 촉진 친환경성 발현

으로 지중에 주입된다. 1.5shot방식의 채택은 그라우트 특성상 A액과 B액의 용적이 다르다는 점과 그라우트의 혼합효율을 향상하여 지반차수 효과를 극대화시키기 위해서이다.

2.4 실험결과

그라우팅 시공의 주목적은 지중에 시멘트 현탁액 또는 경화성 약재를 압력 주입하여 지반 내 지지력 증가와 차수목적을 달성하기 위해서이며, 용도에 따라 단기적인 지하수의 차수나 영구적인 차수 및 보강을 목적으로 수행된다. 따라서, 그라우트 재료는 지반내 침투성과 내구성이 우수하고 겔화까지의 시간이 짧아야 하는 등의 성능을 갖추어야 한다. 아래는 ECG재료와 물유리재료의 내구성을 비교하였다.

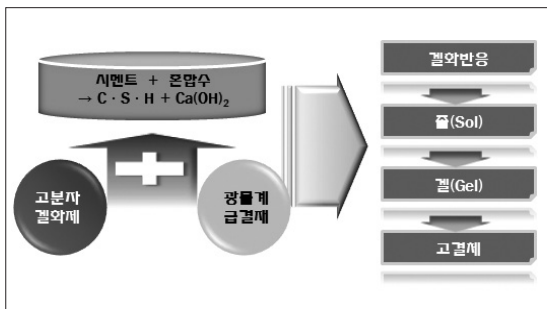


그림 6. ECG공법의 작용기구

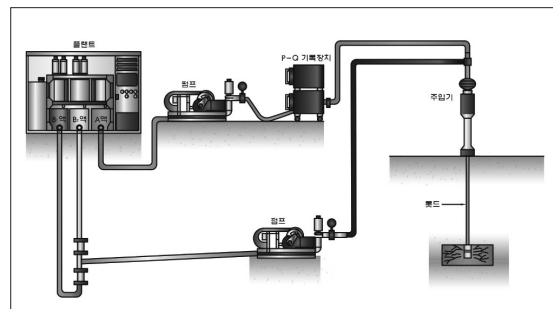
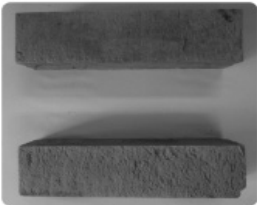


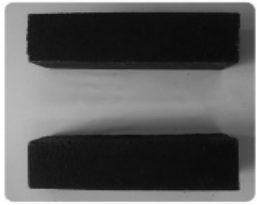
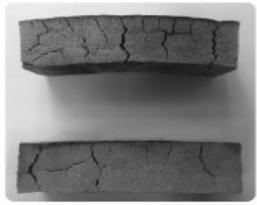
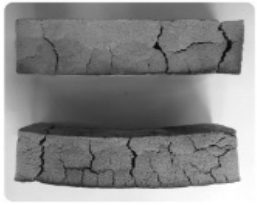


그림 7. ECG공법의 시공절차

표 3. ECG와 물유리계 그라우트의 내구성 비교

구분	길이변화량(대기 중 양생)		
	7일	30일	100일
ECG재료			
	길이 : 16.00cm(100%)	길이 : 15.70cm(98.1%)	길이 : 15.50cm(96.9%)
물유리 재료			
	길이 : 16.00cm(100%)	길이 : 13.90cm(86.9%)	길이 : 13.10cm(81.9%)

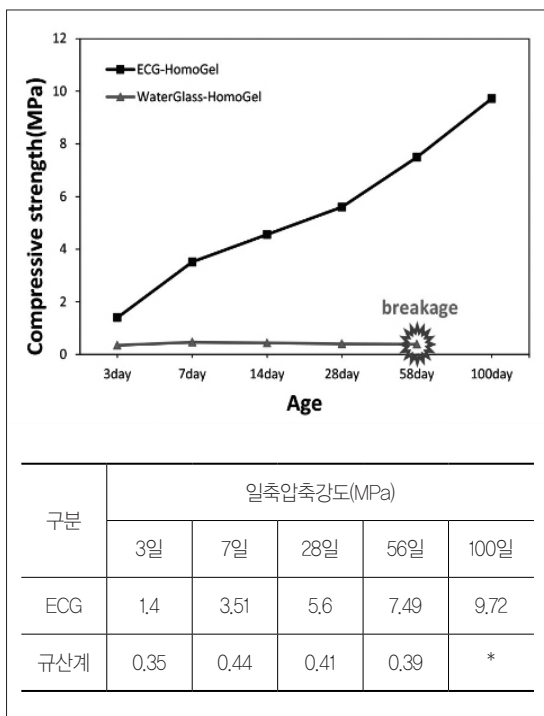


그림 8. ECG와 물유리계 그라우트의 강도비교

ECG의 경우 그라우트 경화체를 대기양생 100일에 서 약 3.1%의 체적변화가 발생하였으나, 물유리계의 경우 18.1%의 체적변화와 경화체에 균열 및 파손이 관찰되었다.

압축강도 측정결과 물유리계의 경우 초기재령부터 28일 까지 강도변화가 크지 않았으나 이후는 시편이 파손되어 측정이 불가능 하였다. ECG의 경우는 광물 계의 작용으로 그라우트의 강도는 양생시간에 따라 지속적으로 상승하는 결과를 나타내었다.

3. 현장적용

3.1 현장개요

본 현장은 부산시 강서지역 전기공급시설 전력구 공사 중 수직구 차수공사로써 수행하였다. 현장 시추 결과 상부는 매립층이며, 이후 퇴적층으로 구성되었으

나 15.5m이후에는 모래자갈층이 퇴적하여 바닷물이 유입되고 있었으며, 조수간만의 차에 의해 약 100cm 정도의 지하수위 변화가 관찰 되었다. 또한, 퇴적 점토 층까지 굴착시 히빙이 예상되어 그라우팅에 의한 차수 및 히빙 방지가 가장 중요한 사항이었다.

현장시추 결과는 아래 그림 9와 같다.

3.2 시공 절차

그라우팅 공사는 2열로 시공하였으며 천공깊이는

표 4. 그라우트 주입설계

항목	천공량(m)	주입율(%)	비고
매립층	3.30	-	공삭공
매립층	3.27	23	
퇴적층(점토)	9.70	16	
퇴적층(모래자갈)	5.00	40	
풍화암층	1.00	9	
합계	22.27		

22.27m이고 주입은 18.97m이며 CTC는 800mm로 설계하였다. 시공계획은 아래와 같다.

표 5. 공당 주입설계

항목	단위	수량	
공당 주입량	m ³	4.36	
공당	시멘트량	kg	2354
	고분자 겔화제량	kg	44
	광물급 겔화제량	kg	196

표 6. 그라우트 배합표

항목	단위	수량
물	kg	780
시멘트	kg	540
고분자 겔화제	kg	10
광물 급결제	kg	45

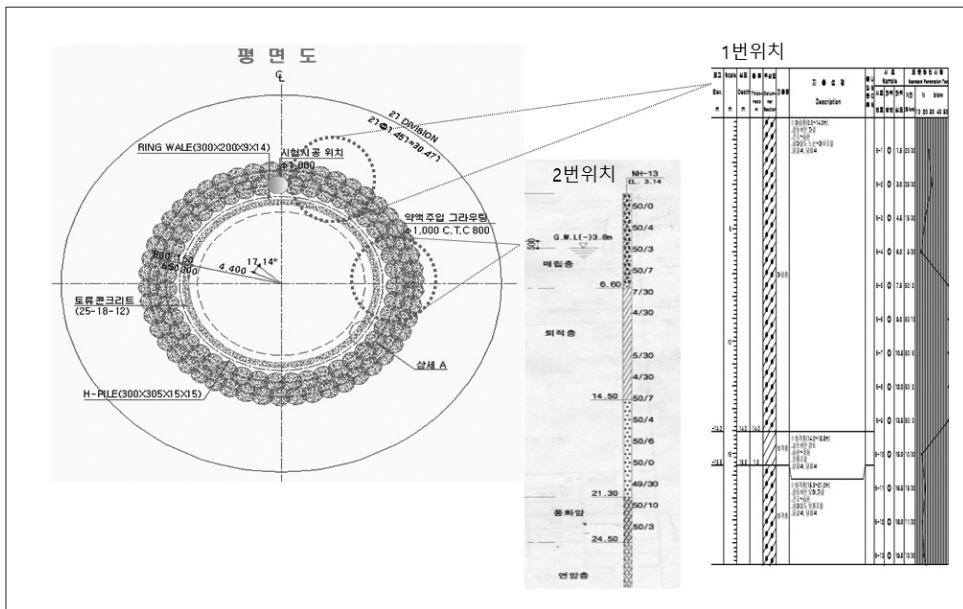


그림 9. 시공개요



(a) 그라우팅 플랜트 설치



(b) 천공



(c) 주입기 설치



(d) 그라우트 주입

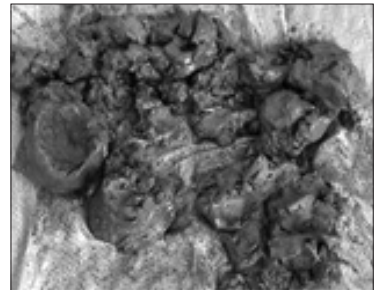
그림 10. 시공절차



(a) 코어채취



(b) 자갈층 코어확인



(c) 점토층 코어확인

그림 11. 시공결과 확인

3.3. 시공결과

그라우트 시공후 시공성과를 평가하기 위하여 시공 부위의 코어를 시추하였고 채취된 코어에 페노프탈레인 용액을 살포하여 적색으로 색상변화를 확인함으로써 그라우트의 주입효과를 검증하였다. 코어는 점토

층과 전석 및 자갈층으로 구성되고 그 간극사이에 그라우트가 침투하여 적색을 나타내었으며, 일부 점토층에는 채취된 점토가 붉은색으로 변화는 하였으나 그라우트 경화체를 회수하기는 어려웠다.

본 현장에서는 문제가 되었던 지하수의 흐름이 많은 자갈층에서 그라우트 코어를 회수할 수 있었으므로 그

라우팅의 성능은 매우 우수하다는 것을 확인 할 수 있었고, 시공 완료 후에도 히빙 등의 문제는 발생되지 않았다.

4. 결론

열악한 지반환경에서 시공되는 건설현장이 점점 증가됨에 따라 지반보강을 위한 다양한 시공방법들이 속속 개발되고 있는 실정이다. 특히, 지반 차수를 위한 그라우팅 분야에서 신기술의 등장은 최근 들어 급속히 증가되고 있는 추세이며, 이는 건설재해 방지와 공사비 절감이라는 면에서 매우 유익한 발전이라고 할 수 있다.

매립지나 재방과 같은 자갈 또는 사석이 산재한 지

반의 차수공사에서는 그라우팅을 위한 재료적인 한계와 적절한 시공방식의 부재로 인해 차수공사에 여전히 어려움을 겪고 있다.

본 고에서 소개하는 ECG공법은 상기의 차수공사에 매우 적합한 시공법으로써, 고분자에 의한 겔화 및 친환경성의 확보와 광물계급결재에 의한 조기강도를 발현하여 기존 방식으로는 시공이 불가능했던 투수량이 높은 자갈층 및 사석층의 그라우팅 시공이 가능한 신공법으로 사료된다. 그러나, 공법개발이 최근에 이루어졌고 다양한 지반조건에서의 시공실적이 많지 않은 것 등은 기존의 지반차수 그라우팅 공법에 비해 앞으로 신기술의 검증을 위한 다양한 노력이 더 필요할 것으로 사료된다.

2015 에너지플랜트기술위원회 세미나

- 일 시 : 2015년 6월 17일(수) 13:30~18:00
- 장 소 : 대우건설 푸르지오밸리 2층 푸르지오홀 (2호선 삼성역 휘문고 방향)
- 주 최 : 한국지반공학회 에너지플랜트 기술위원회
- 등록비 : 정회원 3만원, 학생회원 2만원, 비회원 4만원
- 세미나 프로그램

사회 : 배경태 박사(대우건설)

13:30 ~	등록	
14:00 ~ 14:20	개회사	한국지반공학회 에너지플랜트기술위원회 위원장 최창호
	축사	한국지반공학회 회장 최용규

좌장 : 윤희정 교수(홍익대), 추연욱 교수(공주대)

14:20 ~ 14:50	캐나다 북부지역 플랜트(오일샌드) 건설환경 및 지반공학적 제약사항 / 신동훈 박사 (한국석유공사)	
14:50 ~ 15:20	석션벡트 기상탑 활용 바람자원 조사 / 이용안 박사 (한화건설)	
15:20 ~ 15:40	Coffee Break	
15:40 ~ 16:10	해양오염퇴적물 피복정화 공법 / 이장근 박사 (한국건설기술연구원)	
16:10 ~ 16:40	대변형 수치해석 기법을 활용한 해양 기반 시설물 설치 해석 / 원종화 박사 (대우조선해양)	
16:40 ~ 17:10	부유식 원유생산 저장 하역설비(FPSO) 개요와 건설사례 / 김대학 소장 (유니콘기술연구소)	
17:10 ~ 17:40	질의 및 응답	
17:40 ~ 18:00	폐회사	