

친환경 폴리머 그라우팅의 내구특성 및 환경영향

Durability and environmental impact of eco-friendly polymer grouting



남궁경 Gung-Gyeong Nam
(주)알티캠 기술연구소
연구소장
E-mail : doadsa@naver.com



이태경 Tae-Gyeong Lee
(주)알티캠 기술연구소
차장
E-mail : earss@naver.com

1. 서론

그라우팅이란 지반특성을 목적에 부합하게 개량하기 위해 특별한 성질을 갖는 주입재를 중력이나 펌프를 이용해 침투시키거나, 구조물의 연결부 일체화를 위해 충전하는 것으로 정의된다. 이러한 그라우팅은 사용되는 주입재료에 따라 시멘트계, 철분질계, 아스팔트계, 약액 그라우팅 등으로 구분되며 사용목적에 따라 차수 또는 보강그라우팅 등으로 구별된다.

그라우팅에 대한 국내의 연구로는 물유리계 주입재를 주로 한 지반강도 증대로 국내 약액주입의 연구가 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있으며, 약액주입 공법의 주재료의 하나인 물유리계를 사용하는 공법의 내구성은 흙과 물유리계 주입재의 점착력으로 볼 수 있는데, 지하수 유속이 커질수록 약액의 희석, 유실이 심해져서 점착력이 감소하고 약액의 용출이 커져서 내구성이 떨어진다. 따라서 물유리계를 사용하는 공법을 동수지반에 적용시 고결시간을 짧게 하는 한편 약액의 농도, 주입률, 주입속도를 높여야 효율성이 커진다고 보고된 바 있다.

물유리계를 사용한 그라우팅의 환경영향성에 관한 내용으로서 실험실에서 이상적으로 배합된 물유리계 공시체에 대한 어독성 시험결과 96시간 후 최종 알칼리 농도인 pH 10.9에서 공시어는 모두 치사하였고, 지하수를 오염시킬 수 있다는 시험적 평가를 한 바 있다. 그라우팅 공법의 주재료로 사용되는 물유리계 물질이 주변 토양 및 지하수 환경에 미치는 영향에 대해서도 비교적 많은 연구가 이루어졌다. 건설재료로부터 용출된 중금속의 도심 토양내 거동에 관한 연구에 따르면, 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 카드뮴

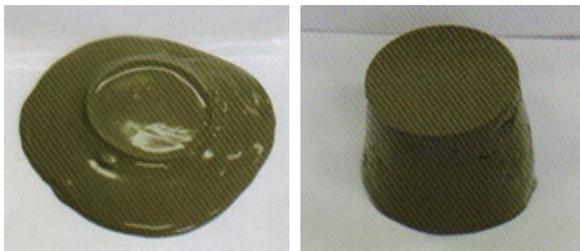
(Cd)은 대부분이 도심토양 내에 흡착되는 반면 6가크롬(Cr^{6+})의 경우는 토양 간극수 사이로 침출 가능성이 있으며 이동도가 장 큰 것으로 보고된 바 있다.

이처럼 물유리계 공법은 내구성, 강도, 용출 등의 문제로 인하여 가시설 차수의 목적으로는 사용이 가능하나 시너시스(Syneresis) 현상 등으로 인해 영구적인 지반 보강이 불가능하고, 차수를 위한 공법으로서의 본질적인 문제점과 균질한 품질의 확인과 시공속도에 대응할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 또한, 평균입경 15~20 μm , 최대입경 80~100 μm 로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적이고, 보통포틀랜드 시멘트를 주재료로 사용하는 각종 교반공법 또는 고압분사주입의 경우 발암물질인 6가크롬(Cr^{6+}) 등의 유해물질이 발생하여 지반을 오염시킬 수 있다. 이에, 물유리계 주입재를 사용할 경우 발생하는 용출현상 및 강도저하를 해결하기 위해 여러 공법들이 개발되고 있다.

본 연구에서는 기존의 물유리를 적용한 그라우트를 대체할 수 있는 친환경 고분자계 그라우트의 내구성능 및 환경영향을 검토하였다.

2. 개요

가소성(Plasticity)이란 물체에 압력 등의 외력을 가하여 변형시키고 외력을 제거하여도 물체가 원래의 형태로 돌아오지 않는 성질을 말한다. 친환경 폴리머 그라우팅(EPG)은 친환경 폴리머(가소제)를 사용하여, 시멘트 수화물에 의해 활성화되어 가소성이 발현되며, 높은 항복치 및 선명성을 가진다.



(a) 가소제 투입 전

(b) 가소제 투입 후

그림 1. 시험체 제조 금형모틀

EPG 공법은 그라우팅 자체의 유동성을 감소시키고, 주입압력에 의한 액체상태의 유동화 겔을 형성하여 높은 유동성을 나타내며, 토립자 공극에 침투 및 주입하는 방식이다. 주입압력 조절에 의해 그라우팅의 침투 및 확산 범위를 조절 가능하고, 주입압력 제거시 유동성이 소멸되고, 그 형태로 그라우팅이 경화된다. 이는 주입과 충전을 위한 유동성을 충분히 확보하면서도, 충전 후 재료의 유실을 방지하여 정량 한정주입이 가능하고, 지반 및 콘크리트 균열로 인한 충전재의 유실이 발생하지 않는다. 또한 시멘트 사용으로 발생하는 중금속(Cr^{6+} , Cd, Pb, Hg 등)의 용출을 방지할 수 있고, 수중 불분리성 특성으로 주변 수역의 pH 증가와 시멘트 현탁물질 발생을 방지할 수 있어 친환경적 그라우팅 공법이다. 비중이 적고 부피가 커서 적은 양으로 큰 체적의 충전이 가능하고, 경화 후에는 수축이 없어 주입 후 충전재의 체적 변화가 발생하지 않아 완전한 충전이 가능한 공법이다.

시멘트 광물계를 근본으로 개발되어 영구적인 내구성 확보가 가능하고, 그라우팅 후 재료의 유실이 없어 시공효과가 향상된다. 재료 용탈 및 변형이 거의 없어 영구적인 구조물 시공이 가능하며, 또한 해수에 대한 높은 저항성을 가지고 있다.

3. 친환경 폴리머 그라우팅 공법(EPG)의 특징

EPG 공법은 침투 깊이를 조절 가능하므로 계획물량의 한정주입이 가능하며 소성 발현에 의해 수중 불분리 특성을 나타내어 지하수(용수)에 의한 재료의 유실과 용출을 최소화할 수 있다. 환경오염의 주요 원인인 알칼리(pH) 증가와 Cr^{6+} 등의 중금속을 그라우팅 내에 흡착 및 고정화함으로써 환경오염을 최소화할 수 있다. 또한, 시공을 위해 간단한 플랜트 장비 구성으로 차량에 탑재가 가능하며, 시공 상황에 맞는 설비의 레이아웃이 가능하다.

친환경 가소성 그라우팅 공법은 배합조건 및 약제 사용량에 따라 저압주입 또는 고압분사 공사에 모두 적용 가능하다.

- 고압분사 : 주입압력(200~600 bar)에 의해 매우 큰 유동성을 나타내어 주변 지반 파쇄 및 고결체 형성에 매우 유리하며, 압력이 제거되면 소성상태의 호모겔을 형성하여 재료의 유실이 없이 경화단계로 된다.

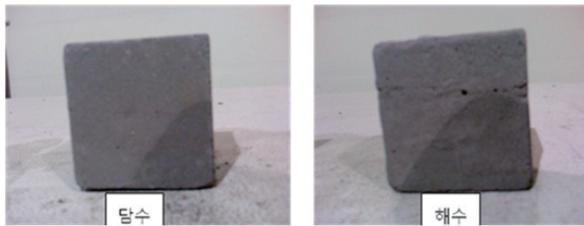
·저압주입 : 주입압력(5~20 bar)에 의해 주입과정 동안 지반공극내로 충전 및 침투가 진행되며, 압력 제거시 소성상태로 전환되어 재료의 유실이 없으며, 지하수 및 지하 공동 존재시에도 한정주입이 가능한 특징을 가진다.

4. 내구성능

내구성을 검토하기 위해, EPG 공법 그라우팅을 제조하고 굳지 않은 상태의 그라우팅과 굳은 후의 EPG 공법 경화체를 해수와 담수 중에 담가 두고 그 상태를 확인하였다. EPG 공법의 해수와 담수 중에 굳은 시료와 굳지 않은 상태의 시료를 침수 후 그 성상을 관찰한 결과, 모든 경우에서 양호한 경화 상태를 확인할 수 있었다. 특히, 굳지 않은 상태의 시료를 시험한 경우에서도 해수와 담수 모든 경우에 매우 양호한 경화 과정을 확인할 수 있었으며, 용탈에 의한 시료의 붕괴 및 황산염 반응에 의한 팽창 파괴 등이 관찰되지 않았다.



(a) 굳지 않은 EPG 그라우팅 시료



(b) 굳은 EPG 그라우팅 시료

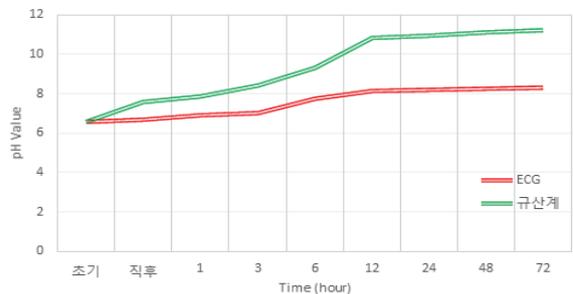
그림 2. 내구성 검토 결과

5. 환경영향평가

그라우팅 약재에 의한 환경오염의 주요인으로는 시멘트에

의한 pH 증가와 Cr⁶⁺의 용출 및 시멘트의 유실에 의한 하천내 이물질(탁도)의 증가를 들 수 있다. EPG 공법 그라우팅은 경화 전 시멘트계 재료로부터 발생하는 중금속 흡착작용 및 필터링 역할로 인해 오염원을 줄일 수 있고 경화 후 용탈현상이 없으며, 주입제의 pH가 약 8.4정도로서 지하에 주입되었을 경우 지하수나 토양을 오염시키지 않을 것으로 판단된다.

또한, 어독성 측정을 위해 KS L ISO 679에 준하여 제작된 그라우트 시험체를 7일간 습윤양생하여 제작하여 준비하고 30L 크기의 수조에 15L의 물을 채우고, pH 7.5 정도로 유지하면서 1일간 정치하여 준비하였다. 시험용 어체는 30~40 mm 정도의 크기로 배합조건별 7마리씩 준비하고, 4일 동안은 먹이를 주고 시험 전 2일은 먹이를 주지 않은 상태로 유지하였으며, 평가는 준비된 수조에 배합조건별로 2개씩의 시험체를 투입하고 6시간 간격으로 어체의 폐사 시점을 측정하였다. 측정 결과, EPG의 경우 2~3일에 1마리씩 폐사하는 것으로 나타났으나, 이는 자연폐사한 것으로서 pH 시험결과를 종합적으로 분석하였을 때 수질에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다. 하지만 시멘트 그라우팅의 경우, 재령 3일째부터 6일째까지 3일동안 7마리 모두 폐사하는 결과를 나타내어 수조내 물의 pH 측정결과와 비교하여 검토하였을 때, 재령 3일 이후 pH값이 11이상의 강알칼리를 나타내어 어류의 서식조건이 악화되었기 때문에 폐사한 것으로 판단된다.



(a) pH 측정결과

구분	Cr ⁶⁺ 검출량 (ppm)	
	수중 1일	수중 5일
EPG 그라우팅	불검출	불검출
시멘트 그라우팅	8.74	8.80

(b) Cr⁶⁺ 검출결과

그림 3. 환경영향 평가결과



(a) 시멘트 그라우팅 (b) EPG 그라우팅

그림 4. 어독성 평가결과

7. 맺음말

친환경 폴리머 그라우팅은 가소성이 부여된 무기계 그라우팅 재료를 사용하여 연약 지반 보강, 차수, 터널 배면 충전, 옹벽 배면 충전 및 제방 차수 등을 목적으로 개발된 친환경 폴리머 그라우팅 공법이다. 이는 2차 환경오염이 없는 환경 친화적 재료로 기존의 약액주입(물유리계) 공법을 대체할 수 있는 차수 및 보강용 그라우팅 공법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

담당 편집위원: 이병재(대전대학교)

6. 국내 현장 적용 사례



(a) 낙동강 30공구 보강



(b) 롯데월드 차수그라우팅



(c) 의령 지하터널 배면 충전



(d) 쌍용건설 차수보강



(e) 제2영동고속도로 지반보강



(f) 영주댐 가물막이 차수보강

그림 5. 친환경 폴리머 그라우팅 공법의 국내 기술 적용 사례