

마이크로시멘트 무기질계 그라우팅 ENG의 적용성 연구

Application of Earth Natural Grouting Using Micro Cement and Inorganic material

정민형¹⁾ 김용식²⁾ 정춘학³⁾ 이송^{4)*}
Jung, Min Hyung Kim, Yong Sik Jung, Chun Hak Lee, Song

Abstract

The Water glass grouting method has been applied frequently to penetration grouting in practice, but some problems, such as decrease of durability with the elapsed time and environmentally adverse effect, are raised recently. Hence, the Earth Natural Grouting method which uses micro cement and inorganic material is developed to overcome those problems of the water glass grouting method, and is aimed for extensive ground injection bound. Volumetric strain test, syneresis test, unconfined compression test, triaxial permeability test, in-situ permeability test and heavy metal analysis were conducted to verify application of the ENG. As the result of tests, volumetric strain, syneresis and unconfined strength of the ENG were superior to those of the Water Glass SGR and ENG was proved to be impermeable. Also it is expected that the ENG would not have an effect on environmental pollution.

Keywords : Micro cement, Water glass, Grouting, Durability, Strength, Impermeability

1. 서론

댐, 도로, 제방 등 지반구조물의 노후화에 따른 문제는 최근 빈번히 발생하고 있으며, 대심도 도심지 굴착공사와 토사터널공사 등 시공여건이 어려운 공사가 증가하고 있다. 이에 따른 강도저하, 침하, 누수 및 과다토압 발생에 대처하기 위해 지반에 주입재를 주입시켜 지반의 공학적 성질을 증대시키는 그라우팅 공법 적용이 활발히 이루어지고 있다.

그라우팅은 보통시멘트의 지반주입시 그 효과가 확인되면서 건설공사에 본격적으로 도입되었지만 시멘트의 평균입경은 15~20 μ m로 입자가 굵어 침투주입 영역이 매우 제한적이었다. 이에 등장한 약액계 그라우팅 재료 중 물유리계는 지반으로의 침투성이 시멘트나 벤토나이트에 비해 월등히 높은 그라우팅 재료로써 각광받게 되어, L.W 및 S.G.R 공법을 대표로하는 물유리계 그라우팅공법은 침투주입 그라우팅이 적용되는 시공현장에 많이 적용되고 있다.

그러나, 물유리계 그라우팅 재료는 강도가 적고 내구성이 낮으며, 용탈현상 또한 상대적으로 크다는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제는 물유리용액이라는 특성상 차수

효과가 크게 나타나지만 장기적인 관점에서 내구성 저하에 따른 차수효과마저 기대하기 어려워 영구적인 지반보강 및 차수 공법으로는 본질적 문제가 있다할 수 있다. 또한, 천병식 등(1998)의 어독성실험 등을 통하여 용탈된 알카리 이온이 환경적 문제를 일으키고 있음이 알려지고 있다.

이러한 물유리계 그라우팅 공법의 문제점을 극복하면서 우수한 침투성을 목표로 하는 순수 시멘트 무기질 재료를 사용하는 E.N.G(Earth Natural Grouting) 공법이 개발되었다. ENG 공법은 순수 무기질계 급결제를 사용하여 용탈 및 환경적인 문제에 대처함으로써 반영구적인 차수효과를 기대하고 있고, 또한 마이크로시멘트를 사용함으로써 기존 SGR 공법 등의 물유리계 그라우팅 공법과 동일한 주입효과를 보이도록 하였다. 김진춘(1999)과 천병식 등(2003)은 주입재로써 이러한 마이크로시멘트의 침투효과를 확인하였다.

이에 본 연구에서는 몰드제작을 통한 실내시험과 현장 시험시공을 통하여 비약액계의 ENG에 대한 차수성, 내구성, 강도 효과 등을 파악하고자 한다. 물유리계와의 비교는 약액계 물유리계 그라우팅을 대표하는 SGR 공시체를 제작하여 비교·분석을 수행하였다.

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정
2) (주)K.S.C Engineering 대표이사
3) (주)조양건설 대표이사
4) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : scugeo@uos.ac.kr 02-2210-2515

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2010년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 투수계수에 기초한 그라우팅재료의 적용범위 (실무그라우팅공법, 2003)

그라우팅 재료		지반 종류	
재료명	조성분의 크기 mm	cm/sec	
시멘트	$2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-1} (60 \sim 70 \mu)$	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	자갈, 거친모래, 균열폭 0.1mm
콜로이드시멘트	$2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-1}$ $50\% < 10 \mu$ 상한이 3×10^{-2} 이상되는 것은 실제적으로 없음. 농도가 비교적 얇은 경우는 표면장력을 내리기 위한 화학제를 첨가	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	모래, 자갈, 다공질의 연약벽 품질이 나쁜 콘크리트 균열폭 0.1mm
벤토나이트 및 점토현탁액	$2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2} (5 \sim 10 \mu)$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$	모래, 모래섞인 자갈
약 액	2×10^{-4}	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	미세사, 다공질 사암 매우 작은 균열을 갖는 암석

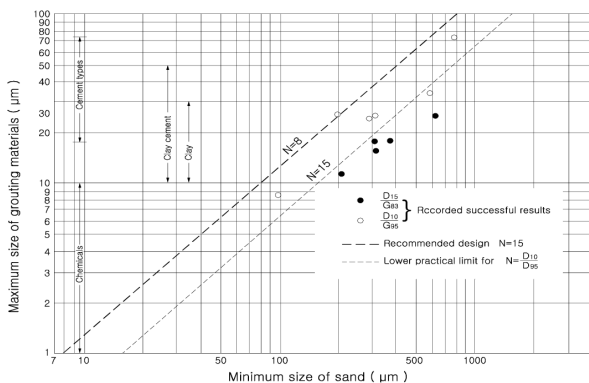


Fig. 1 토립자의 입경과 주입제 입경에 의한 침투한계 분석도 (King et al., 1961)

2. 주입재 특성

2.1 침투성

약액주입의 가능성을 검토하기 위해서 투수계수를 이용하는 것이 실용적인 방법으로 알려져 있으며, R. H. Karol(1990)은 투수성에 관하여 다음과 같은 기준을 제시하였다. 지반의 투수계수가 $k \leq 10^{-6} \text{cm/sec}$ 인 경우는 주입이 불가능하며, $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ 인 경우 점성이 5 cps인 주입재료는 주입이 불가능하다고 하였다.

투수성이 양호한 지반일 경우는 토립자의 간극에 약액을 침투 고결시키기 위해 침투주입을 사용하고 사용하는 약액도 침투성이 좋은 용액형이 좋으나 반대로 투수성이 나쁜 지반에는 침투주입이 어렵기 때문에 호모겔 강도가 높은 약액으로 지반 전체를 개량하는 맥상주입이 오히려 효과적이므로 점성이 큰 현탁액형이 바람직하다. Table 1은 투수계수에 기초하여 그라우팅재료의 지반에 대한 적용성을 각종 문헌 및 실험을 기초로 나타나고 있다.

지반의 투수계수 이외에 그라우팅 재료의 주입성은 지반과 재료의 입자 크기에도 좌우된다. J. C. King 등 (1961)은 침투의 조건을 토립자의 크기와 주입제 입자의 크기로부터 구하는 식을 제시하였다. 다음 식을 만족시키

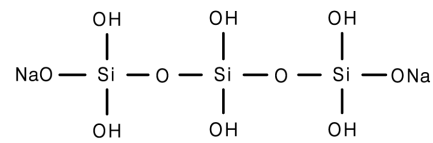


Fig. 2 규산소다계 중합체의 구조도

지 못하면 현탁액의 침투 주입은 불가능하다.

$$\frac{D_{15}}{G_{85}} \geq 15, \frac{D_{10}}{G_{95}} \geq 8 \quad (1)$$

여기서, D_{10} , D_{15} 는 지반의 토립자중 입도분포 곡선의 누적통과율이 10%, 15%때의 입경이며, G_{85} , G_{95} 는 주입제의 입경중 입도분포 곡선의 누적통과율이 85%, 95%의 입경이다.

Fig. 1은 위의 식을 토대로 작성된 토립자의 입경과 주입제 입경에 의한 침투한계 분석도이다.

2.2 내구성

약액주입공법에서 중요한 점의 하나는 내구성으로서 본 공사가 완료되기까지의 기간, 즉 가설 공사기간 동안이나 또는 보수 및 보강의 경우 해당 구조물의 공용기간 동안 약액의 내구성이 유지되어야 한다. 그러나, 물유리계 약액은 용탈현상, 즉 syneresis 현상 등으로 주입 후 그 효과는 시간이 흐를수록 떨어지게 된다.

현재 우리나라 침투주입에 주로 쓰이는 물유리는 염기성 규산소다이며, 규산소다를 주체로한 호모겔 고결체에서 Fig. 2와 같은 'Si-O-Si(시로키산)'과 'Si-OH(시라놀이)'의 중합체가 수중환경에 있을 경우 중합반응의 결합구조에서 Na 이온이 용출되기 때문에 조적이 다공질화 되고 결국 중합체가 분해되는 악순환이 지속된다.

所 武産 등(1989)의 연구에서는 알칼리계 용액형 무기·유기 물유리계 약액의 일축강도가 재령 2~3년 내에 50% 전후가 감소하며, 투수계수가 주입률에 따라 1개월 전후에 102~103배로 증가하기도 한다 하였으며, 檜壇 등

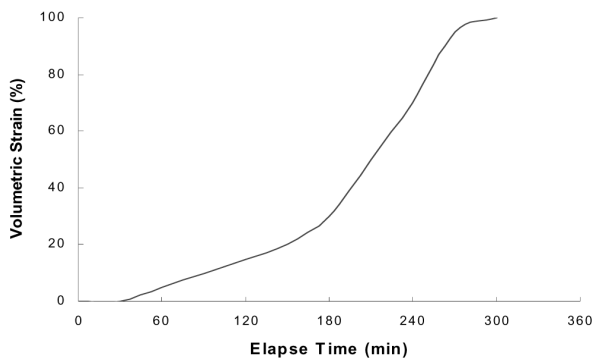


Fig. 3 수침후 규산소다 물유리의 체적변형

(1986) 역시 약액주입된 흡시료의 1년 경과 후 일축압축 강도는 초기강도의 약 50~70% 정도로 저하됨을 밝혔다.

본 연구에서는 물유리의 시간에 따른 체적변형 정도를 살펴보기 위해 선행연구로써 규산소다 물유리만을 양생시킨 후 수침시켜 그 체적변형량을 살펴보았다. Fig. 3은 그 결과를 도시한 것으로써, 39.25cm³의 규산소다 물유리 경화체는 약 300분 만에 완전히 물에 용해되었다.

시멘트계 주입재의 경우, 알카리 용탈은 용액중의 시멘트량이 원인이 아니라 오히려 물-시멘트비의 영향이 크며, 용탈의 시간적 변화는 시멘트량이 적은 시멘트 벤토나이트보다 물-시멘트비가 작고 시멘트량이 많은 모르타르가 시멘트의 경화 발현이 빠르기 때문에 알카리의 용탈량도 적고 시간적 저하율도 크게 되어 경화 후에는 용탈량이 적다.

3. ENG 재료 및 실험 공시체 제작

3.1 주입재의 종류

ENG 주입재는 주재료로 쓰이는 KG-1과 경화제로 쓰이는 KG-2의 두 가지 재료로 이루어진다. KG-1의 경우 물유리계인 규산소다가 사용되지 않는 순수 시멘트계 무기질 급결 주재료로써 용탈 및 체적변형 등의 내구성이 장기간 지속되도록 의도된 재료이다.

그리고 KG-2는 초미립자 마이크로 시멘트로서 분말도가 4,000~9,000m²/g에 해당하여 마이크로 시멘트의 특성을 모두 지니고 있는 재료이다. Fig. 4와 같이 마이크로 시멘트는 보통시멘트와 벤토나이트에 비해 월등한 지반주입 범위를 보이고 있으며, 용액형 그라우팅 재료와 비슷한 세립지반까지의 침투주입범위를 나타내고 있다.

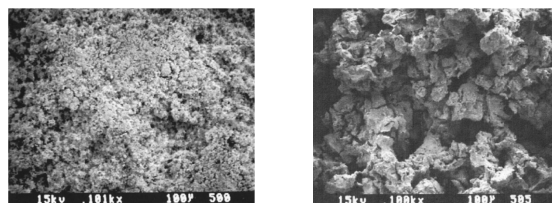
L.W, SGR 등 물유리계 공법은 침투주입의 한계가 모래층으로 나타내고 있으며, 맥상주입에 있어서도 실트층과 점토층까지 주입이 가능하다고 하였다. 마찬가지로 ENG의 재료 역시 비슷한 침투주입 범위에 비슷한 저압주입이므로 맥상주입을 통하여 실트층과 점토층 일부까지 주입이 될 것으로 판단된다.

Table 2 ENG 주입재 종류

구분	제품명	성상	비중	특성
주재료	KG-1	백색분말	2.85	급결 주재료
	KG-2	회백색분말	3.05	초미립자(시멘트대체 사용)

주입재	자갈중	모래중			실트중	점토중
		coarse	medium	fine		
원	마이크로시멘트	[Bar chart showing penetration range]				
탁	보통시멘트	[Bar chart showing penetration range]				
면	벤토나이트	[Bar chart showing penetration range]				
용	리그닌계	[Bar chart showing penetration range]				
액	요소계	[Bar chart showing penetration range]				
형	아크릴아미드계	[Bar chart showing penetration range]				
토립지름도(mm)		2	0.5	0.2	0.074	0.005
투수계수(cm/sec)			10 ²	10 ¹	10 ²	10 ³

Fig. 4 침투성 주입재의 토질별 침투범위 (쌍용양회 중앙연구소 콘크리트 연구실, 1994)



(a) ENG 시편 경화체(×100) (b) 물유리 시편 경화체(×100)

Fig. 5 경화체 전자현미경 사진비교

또한 서론의 연구동향에서 밝힌 바와 같이 마이크로 시멘트의 주입범위가 실트층 일부에 주입이 가능함을 나타내었으며, 비교 공법으로 제시된 L.W와 SGR 공법의 침투주입 범위보다 더 세립한 지반까지 주입이 이루어진 결과를 보였다.

3.2 경화체 확대 사진

Fig. 5는 ENG 시편과 물유리계 시편의 경화체를 근접 촬영한 것이다. ENG 시편은 가는 입자가 조밀하게 형성되어 있음을 볼 수 있으나, 물유리계 시편은 입자 자체는 용액형이기 때문에 입자를 확인할 수 없으나 엉켜 붙어 있는 양상이 매우 불규칙적이며, 많은 공극과 갈라짐을 볼 수 있다. 이는 물유리계 시편이 경화과정 중에 발생한 것으로, 용탈 및 체적변형에 따른 내구성 감소로 물유리계를 적용한 공법에 문제점이 발생할 수 있음을 보이고 있다.

3.3 실험 공시체 제작

본 연구를 수행하기 위한 공시체 제작은 ENG 공시체 뿐만 아니라, ENG와 시공법이 유사하며 물유리계 공법의 대표격인 SGR에 대해서도 비교·분석을 위하여 제작이 이루어졌다. 또한 호모겔과 샌드겔을 동시에 제작하여 지

Table 3 실험 배합비(각 1m³ 기준, 물 온도 25~30°C)

종류	A액(1m ³)	B액(1m ³)
ENG	<ul style="list-style-type: none"> • KG-1 : 90kg • 물 : 970 ℓ 	<ul style="list-style-type: none"> • KG-2 : 325kg • 물 : 895 ℓ
SGR	<ul style="list-style-type: none"> • 규산소다 : 500kg • 물 : 500 ℓ 	<ul style="list-style-type: none"> • 보통 포틀랜드 시멘트 : 300kg • SGR : 120kg • 물 : 840 ℓ

Table 4 샌드겔 모래의 물리적 특성

LL	PI	Cu	Cc	#200 통과율 (%)	Gs	USCS
N.P	N.P	4.01	1.24	5.1	2.66	SP

반에 이상적인 침투주입시에 대해서도 분석하였으며, 양생방법 또한 공기중, 담수 및 해수로 나누어 양생을 하였다.

실험 공시체 제작에 사용된 ENG 및 SGR 호모겔의 기준 배합비는 Table 3과 같다. ENG의 경우 겔타입이 6~7초가 되는 급결배합이 가능하나, 본 연구에서는 물유리계 그라우팅과 유사한 침투그라우팅 목적의 완결배합을 기준으로 하였다. A액, B액을 1:1 비율로 혼합하였으며, 이 때 물의 온도는 기준 배합비의 수온을 유지시켜 공시체 제작을 하였다.

샌드겔 제작은 보통 그라우트 재료가 지반에 침투주입한 것을 가정하여 모래와 그라우트재료를 특정 비율로 섞어 제작한다. 이 때 특정 비율은 주입율이 되고, 느슨 또는 중간 조밀한 모래의 주입율인 35%를 기준으로 하여 샌드겔을 제작하였다.

공시체는 원기둥 공시체와 육면체 공시체 두 종류로 하였다. 원기둥 육면체는 높이가 10cm, 직경이 5cm로써 기존 실험 장치에 적합한 규격을 선택하였고, 육면체 몰드는 체적변형실험에 용이하도록 4cm×4cm×16cm의 규격을 선택했다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 내구성

4.1.1 체적변형실험

양생과정 중의 체적감소는 간극을 메우는데 주된 역할을 하는 주입공법의 성능발휘 여부와 직접적인 관련이 있다. 이에 ENG 공시체의 체적변형 특성을 알아보기 위해 양생일과 양생방법에 따른 체적변형 실험을 실시하였으며, SGR 공시체 또한 같은 방법으로 실험하여 비교분석의 대상으로 하였다.

Fig. 6의 결과와 같이 호모겔과 샌드겔, 그리고 각 양생방법 모두에서 ENG 공시체에 비해 물유리 SGR 공시체의 체적변형률이 상당히 크게 발생하였다. 특히 ENG 공시체는 적은 체적변형을 보이면서도 곧 변형이 수렴하는 형

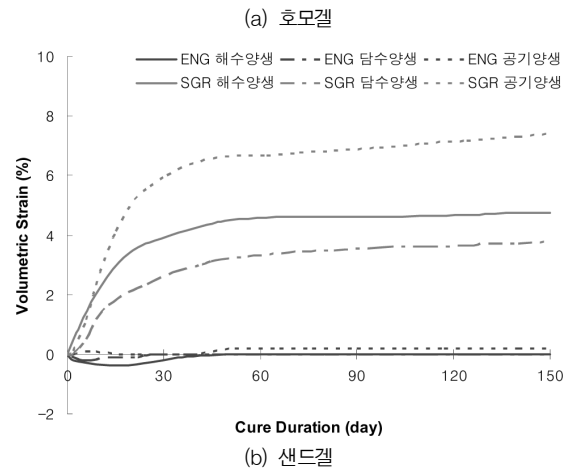
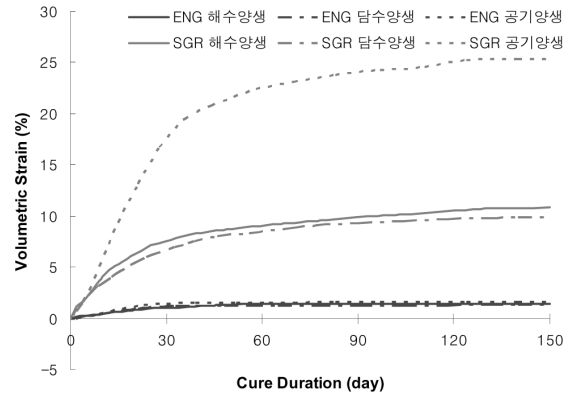


Fig. 6 양생기간에 따른 체적변형

Table 5 50일 양생일 체적변형률

양생 방법	호모겔 체적변형률(%)			샌드겔 체적변형률(%)		
	ENG	SGR	변형량 비교(배율)	ENG	SGR	변형량 비교(배율)
해수 양생	1.40	10.86	7.75	0	4.74	-
담수 양생	1.28	9.91	7.74	0	3.77	-
공기 양생	1.63	25.35	15.55	0.20	7.40	37.00

태를 보이고 있는 반면, SGR 공시체는 큰 체적변형률에도 그 변형량이 계속해서 증가되고 있는 양상을 나타내고 있다.

Table 5는 150일 양생 시점에서 체적변형률을 수치적으로 도시한 것이다. ENG와 SGR 호모겔의 체적변형 차이는 수중양생의 경우 7배 이상, 공기중 양생에서는 15배 이상 차이가 발생하였다. 샌드겔의 경우는 수중양생에서 ENG가 변형량이 극히 미미했기에 배율로써 표현하기 다소 무리가 있었다.

체적변형 결과는 물유리 SGR의 경우와 달리 ENG는 초기 양생과정 동안 약간의 체적변화가 발생하더라도 곧 수렴을 하여 그라우팅 효과를 장기적 관점에서 우수한 양상을 보일 수 있다는 것을 보여준다 할 수 있다.

4.1.2 용탈실험

Table 6 ENG 및 SGR의 양이온 용탈량. (단위 : mg/L(ppm))

원소	K	Mg	Ca	Na	총 용탈량
ENG 공기 양생	40.7	0.05	40.0	67.9	148.65
ENG 담수 양생	7.27	0.03	57.9	26.0	91.2
SGR 공기 양생	13.7	0.03	4.56	1290	1308.29
SGR 담수 양생	17.8	0.06	27.5	174	219.36

지반에 주입된 그라우팅은 유수의 흐름 등에 영향을 받게 되고, 이에 그라우팅 재료 내부에 포함된 이온의 분리가 야기되는 용탈현상이 발생되어 그라우팅의 내구성 저하를 가져오게 된다.

이에 본 연구는 폐기물 공정시험법을 통하여 양이온 용탈실험을 수행하였다. Table 6은 ENG와 SGR의 용탈실험 결과를 나타낸 것이다. K와 Mg에 있어서는 비슷한 용탈량을 보였고, Ca는 ENG가 약간 많은 용탈량을 보였다. 그러나 Na의 경우 SGR이 상당한 양의 용탈량을 보인데 반해 ENG는 K 및 Ca와 비슷한 양의 용탈량을 보였다.

총 용탈량은 공기중 양생의 경우 SGR이 ENG에 비해 약 9배, 담수 양생의 경우는 약 3배 정도 많은 용탈량을 보여 실제 ENG가 용탈에 우수하여 물유리 SGR보다 내구성에서 우수함을 보여주고 있다.

여기서, 담수양생이 공기중 양생에 비해 용탈량이 적은 이유는 수침되어 있는 양생과정 동안 자연적인 용탈이 일어난 것으로 판단된다. 또한 SGR 담수 양생의 경우 초기 양생과정에 있어 같은 과정동안 ENG에 비해 더 많은 양이온이 물에 용탈된 것으로 볼 수 있으며, 실제 실험이 진행된 시점에서 공기 양생의 경우보다 담수 양생에 대하여 ENG에 대한 SGR의 용탈량 비율이 감소한 이유를 유추해 볼 수 있다.

4.1.3 장기적 내구성 관찰

Fig. 7(a)~(b)는 약 7년 9개월 동안 장기적으로 양생시킨 공시체로써 수중양생 호모겔은 ENG 시편의 경우 거의 본모습을 유지하는 반면, 물유리 SGR 시편은 내구성을 잃고 외곽부터 부스러지는 모습을 보이고 있다. 샌드겔에서도 SGR과 상대적으로 ENG 샌드겔 시편은 거의 본 모습을 유지하고 있다.

가장 확실한 그라우팅 효과 판정은 그라우팅이 시공된 지반에 제대로 주입이 되었는지 실제 지반굴착을 하는 방법일 것이다. Fig. 7(c)는 경남 의령군의 A제방에 ENG 공법이 2003년 9월경에 적용된 후, 약 2년 후 굴착이 진행된 단면이고, Fig. 7(d)는 2004년 3월 경 ENG 공법이 착색그라우팅으로 시공되어 약 2년 후 굴착이 진행된 경남 의령군 B제방의 ENG 시공후 지반굴착 단면이다. ENG 주입단면에서 볼 수 있듯이 그라우트재가 맥상으로 여러 줄기가 연속적으로 주입되어 있고, 2년 정도의 시간 경과 후에도 그라우트재의 변형이 거의 없이 장시간 그라우팅 효과를 나타내고 있었다.

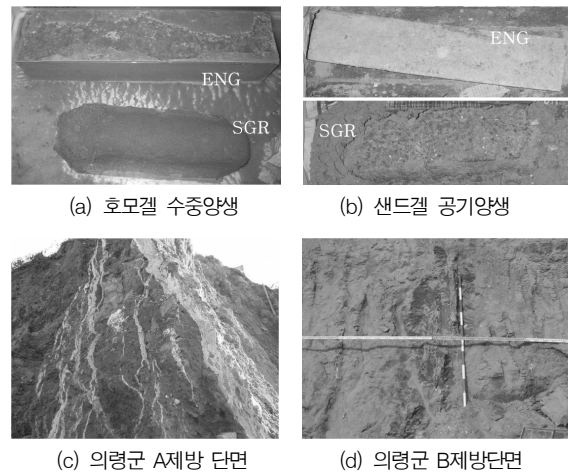


Fig. 7 장기양생에 따른 ENG 내구성 관찰

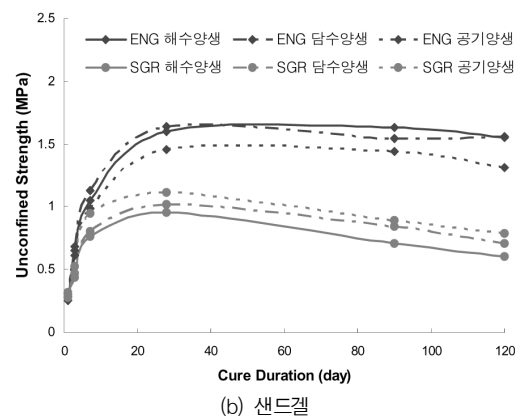
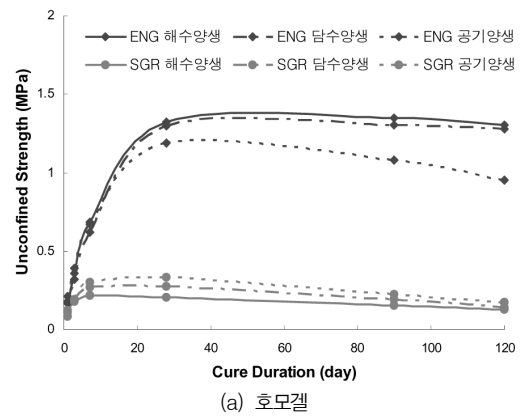


Fig. 8 양생기간에 따른 일축강도

4.2 강도실험

강도실험은 일축압축시험방법을 선택하여 수행되었으며, Fig. 8에 양생기간에 따른 일축압축강도 변화추이를 도시하였다. 대부분의 공시체는 양생 28일에서 최대 강도가 도출되었다.

강도실험 결과를 살펴보면, 모든 양생 방법에서 ENG 공시체의 일축압축강도가 물유리 SGR 공시체의 강도에

Table 7 120일 강도의 28일 강도 대비 감소비율(%)

양생 방법	ENG		SGR	
	호모겔	샌드겔	호모겔	샌드겔
해수 양생	1.66 %	3.18 %	38.05 %	36.92 %
담수 양생	1.39 %	5.23 %	49.08 %	30.06 %
공기 양생	19.56 %	9.80 %	48.50 %	29.54 %

비해 상당히 크게 도출되었다. 호모겔의 경우 ENG가 SGR의 3~7배 정도, 샌드겔의 경우는 ENG가 평균적으로 약 1.5배정도 SGR보다 큰 강도를 보였다. SGR 샌드겔 강도가 높은 원인으로는 호모겔 강도가 워낙 낮음에도 모래자체의 강도가 전체 강도에 많은 부분을 차지한 것으로 보인다. 그러나, 보통 이상적인 완전침투는 실제 이루어지기 어려우므로 샌드겔 결과와 같은 몰유리 SGR의 강도효과 기대는 크지 못할 것이다.

각 그라우팅 재료는 양생 28일에서 최대 강도를 보인 후 점차 내구성 약화로 강도가 감소하는 양상을 보이고 있다. 중요한 문제중 하나는 이러한 강도 저하가 얼마나 발생하느냐 하는 것으로, Table 7에 양생일 120일 강도가 28일 강도에 비하여 감소한 비율을 나타내었다. ENG 공기중 양생은 강도 감소가 비교적 크게 나타났으나 수중양생에서 ENG는 대략 5% 이하에서 강도 감소가 발생한 반면, SGR의 경우 30~50%에 해당하는 강도감소가 나타났다. SGR의 경우 일련의 체적변형 및 용탈작용 등으로 그래프가 계속해서 하강의 경향을 보이나, ENG의 경우 내구성 유지를 통하여 강도감소가 적은 것으로 판단된다.

이러한 강도시험 결과는 ENG가 몰유리와 비슷한 주입 효과를 지니더라도 그 강도발현과 유지의 우수함을 나타내고 있어, 지반강도 증진 목적으로도 사용이 가능함을 나타내고 있다. 실제 급결배합을 고려하면 더 높은 강도 발현에 대한 기대가 가능할 것이다.

4.3 투수실험

침투그라우팅의 주된 목적 중 하나는 차수성이다. 이러한 지수성 평가는 투수실험을 통해 판단해 볼 수 있다. 본 연구는 제작된 공시체에 대한 투수시험과 현장시험을 통해 ENG의 차수성을 살펴보았다.

4.3.1 실내 삼축투수실험

보통 그라우팅은 깊은 심도까지 주입이 요구되는 경우가 많으므로 지중응력에 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 현장의 응력상태를 고려하는 삼축투수실험을 실시하였고, 응력상태는 100kPa으로 가정하여 모든 실험에 구속압을 동일하게 가하였다.

실험 결과 ENG 호모겔의 경우 투수계수가 보통 10^{-6} cm/sec 범위를 보이며, 몰유리의 SGR 호모겔의 경우는

Table 8 실내 삼축투수실험 결과

공시체 종류	양생 방법	양생 일수 (day)	투수계수(cm/sec)	
			ENG	SGR
호모겔	해수양생	7	5.96×10^{-6}	7.37×10^{-8}
		28	7.88×10^{-6}	1.26×10^{-7}
		90	7.64×10^{-6}	2.04×10^{-7}
	담수양생	7	4.64×10^{-6}	6.64×10^{-8}
		28	5.85×10^{-6}	7.31×10^{-8}
		90	6.32×10^{-6}	1.72×10^{-7}
공기양생	7	7.26×10^{-6}	3.26×10^{-7}	
	28	1.01×10^{-5}	※ 변형으로 실험 불가	
	90	1.21×10^{-5}	※ 변형으로 실험 불가	
샌드겔	해수양생	7	2.16×10^{-6}	8.66×10^{-8}
		28	9.69×10^{-7}	1.66×10^{-7}

Table 9 7일 양생대비 90일 양생의 투수계수 증가율

공시체 종류	양생방법	투수계수 증가율(%)	
		ENG	SGR
호모겔	해수양생	28.14	176.12
	담수양생	36.03	159.86
	공기양생	66.78	-
샌드겔	해수양생	-55.23	91.72

$10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec의 값을 보였다. ENG 샌드겔의 경우는 투수계수가 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec 부근의 호모겔보다 약간 낮은 값을 보였고, SGR 샌드겔은 호모겔과 비슷한 값을 보였다. 비록 ENG가 SGR에 비해 투수계수가 크게 도출되기는 하였으나 10^{-6} cm/sec의 투수계수 범위는 ENG가 차수성에 우수함을 나타낸다고 할 수 있다.

Table 9는 7일 양생시의 투수계수와 90일 양생시의 투수계수를 비교하여 시간에 따른 투수계수 변화율을 나타내었다. 그 결과 같은 양생기간 동안 ENG 호모겔 공시체의 투수계수 증가율에 비하여 SGR 호모겔 공시체의 투수계수 증가율이 해수 및 담수조건에서 대략 5배 이상의 차이를 보였다.

또한, ENG는 28일 양생에서 90일 양생의 투수계수 증가폭이 줄어드는 반면, 몰유리의 SGR은 그 증가폭이 이전에 비해 증가하고 있는 양상을 나타내고 있다. 이는 ENG의 경우 체적변형 등의 내구성적 측면이 이미 수렴하여 장기 양생시 투수계수가 점점 수렴해감으로써 장기적으로도 차수성을 나타낸다고 판단할 수 있으나, SGR의 경우 용탈 등의 내구성 감소로 인하여 공시체 내부에 공극이 생기는 등의 문제로 계속해서 투수계수가 계속하여 증가하고 있음을 보여준다 할 수 있다.

이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, 초기 상태에 있어서는 SGR 공법이 그 주재의 용액적 특성으로 인하여 ENG보다 차수성이 우수하게 나타나더라도, 중장기 또는 영구 그라우팅 시공에 있어서는 몰유리게 그라우팅이 용탈과

체적변형 등의 문제로 인하여 차수성 약화가 발생하여 결국 투수계수의 변동성이 적은 ENG 공법이 차수성에서 보다 확실한 결과를 가져온다고 판단할 수 있다.

4.3.2 현장투수실험

현장투수실험은 낙동강 지류인 경남 창원군 남지읍 C 제방에서 이루어졌다. 연구 대상지반은 과거 제방 축조를 위해 점토질 자갈의 퇴적층 상부에 약 7m 가량을 쌓아올린 지층 조건으로써 상부 매립층은 매우 습하며 점토가 다량 함유된 자갈층으로 느슨한 상태를 보였고, 제방자체가 남아 보수 및 보강을 필요로 함으로써 차수그라우팅 시공이 요구되었다.

7개의 공에서 각각 심도 3.0m와 6.0m에 대하여 현장투수실험을 실시하였다. 원지반 투수실험이 이루어진 위치에서 ENG 시공 후에 대한 투수실험을 진행할 수 없으므로, 원지반 공변과 거의 동일한 지역에서 ENG 시공 후의 투수실험을 진행하였다.

현장 시험시공 결과는 한 개소만을 제외하고는 10^{-5} ~ 10^{-6} cm/sec의 투수계수를 나타내어 ENG의 차수성을 보였다. 또한 본 결과는 실내 삼축투수실험과 그 결과가 비슷하게 도출되어, ENG 공법의 그라우트재 배합에 의한 실내실험의 투수성능이 실제 공법 적용에 있어서도 비슷한 양상을 나타냈다.

물유리계 공법의 현장투수계수 실험사례를 살펴보면, 이 해방(1998)의 연구에서는 본 시험시공 대상지반과 비슷한 10^{-2} ~ 10^{-3} cm/sec의 투수계수 지반에서 L.W와 SGR의 물유리계 그라우팅을 실시하여 각각 $a \times 10^{-5}$ cm/sec과 $b \times 10^{-6}$ cm/sec의 현장투수계수 값을 얻었고, 또한 조영웅(2003)은 원지반 투수계수가 본 대상지반보다 약간 투수성이 큰 지반에 L.W 공법을 시공하여 1.96×10^{-5} ~ 4.338

Table 10 현장투수실험 결과

No.	심도(m)	원지반		ENG 시공 후	
		공변	투수계수(cm/sec)	공변	투수계수(cm/sec)
1	3.0	PH-1	5.22×10^{-3}	CH-1	5.87×10^{-6}
	6.0		9.21×10^{-3}		6.56×10^{-6}
2	3.0	PH-2	5.96×10^{-3}	CH-2	6.69×10^{-5}
	6.0		1.12×10^{-2}		9.61×10^{-6}
3	3.0	PH-3	8.95×10^{-3}	CH-3	4.04×10^{-6}
	6.0		1.17×10^{-2}		8.04×10^{-6}
4	3.0	PH-4	5.06×10^{-3}	CH-4	6.35×10^{-6}
	6.0		9.13×10^{-3}		8.18×10^{-6}
5	3.0	PH-5	5.38×10^{-3}	CH-5	6.12×10^{-6}
	6.0		1.20×10^{-2}		8.88×10^{-6}
6	3.0	PH-6	4.77×10^{-3}	CH-6	5.74×10^{-6}
	6.0		9.10×10^{-3}		3.94×10^{-6}
7	3.0	PH-7	5.58×10^{-3}	CH-7	7.18×10^{-6}
	6.0		9.74×10^{-3}		4.40×10^{-6}

Table 11 ENG의 중금속 검출량 (단위 : mg/L(ppm))

원소	Cd	Cu	Pb	Cr6+	Hg	As
ENG 공기양생	ND	ND	ND	0.13	ND	ND
ENG 담수양생	ND	ND	ND	0.08	ND	ND
폐기물 기준	0.3	1.0	3.0	1.5	0.005	1.5

$\times 10^{-6}$ cm/sec의 현장투수계수를 얻었다. 이는 비록 실내 실험에서는 SGR 공시체가 투수계수가 낮게 나오더라도 현장에 적용되었을 경우 ENG와 비슷한 투수계수 값을 보임으로써 ENG의 현장적용성을 나타내는 것이라 할 수 있다.

4.4 중금속검출 실험

물유리계 그라우팅 공법은 경화제로써 보통포틀랜드시멘트를 사용한다. 그러나, 지반속에 주입된 시멘트가 장시간 유수에 노출되었을 경우 환경적 문제가 발생한 다는 것으로 알려져 있다. 특히 Cr^{6+} 에 대한 문제가 대두되고 있는 상황에서 2003년 천병식 등의 연구에서는 Cr^{6+} 함유량이 보통포틀랜드시멘트가 약 20ppm 이상, 고로슬래그시멘트와 일반적인 초미립자시멘트가 약 20ppm 이하 정도의 함유량을 갖고 있다고 하였다.

본 연구에서는 ENG 고결체의 환경적인 영향을 살펴보기 위해 폐기물공정시험법으로 중금속 용탈실험을 실시하였다. Cr^{6+} 를 포함하여 6가지의 중금속을 선택하였고, 실험 결과는 Table 11에 나타내었다. 여기서 ND는 not detected를 의미한다.

실험 결과 Cr^{6+} 항목을 제외하고 ENG는 실험 대상 중금속이 검출되지 않았으며, Cr^{6+} 에 있어서도 폐기물 규제 기준인 1.5ppm보다 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다. ENG의 무기질계 마이크로 시멘트가 환경에 대하여 부정적 영향을 크게 나타내고 있지 않음을 나타내는 결과이다.

5. 결론

본 연구는 침투주입 그라우팅에 주로 쓰이는 물유리계 공법의 내구성 및 환경문제가 대두되고 있는 상황에서 마이크로시멘트 무기질계 그라우팅인 ENG 공법의 적용성을 파악하고자 하였다. ENG 공시체에 대한 실내실험을 수행하였으며 ENG가 시공된 현장에서 실험을 실시하였고, 물유리계 그라우팅의 대표적인 SGR의 공시체 역시 제작하여 비교·분석을 수행한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1) 150일 양생의 체적변형에 있어서 물유리의 SGR이 ENG에 비하여 호모젤의 체적변형 차이는 수중양생의 경우 7배 이상, 공기중 양생에서는 15배 이상 차이가 발생하였고, 샌드젤의 경우 수중양생에서 ENG는 거의 변형이 없었으며 공기중 양생에 있어서는 약 37배 가량의 차이

를 나타내어, ENG의 체적수축이 매우 적은 결과를 보였다.

2) 용탈실험 결과 총 용탈량은 공기중 양생의 경우 SGR이 ENG에 비해 약 9배, 담수 양생의 경우는 약 3배 정도 많은 용탈량을 나타내 ENG의 용탈에 따른 내구성이 상대적으로 강함을 보여주었다.

3) 과거 ENG가 시공된 단면을 조사한 결과 그라우트체의 형상이 뚜렷하게 나타나, ENG의 장기적 내구성이 우수함을 나타내었다.

4) ENG 공시체에 대해 해수, 담수 및 공기중 양생에 대한 일축압축실험 결과, 최대 강도가 발현된 28일 양생에서 대략 호모겔 1~1.5MPa, 샌드겔 1.4~1.7MPa 정도의 값을 나타내었다.

5) ENG 공시체의 28일 양생 강도는 결과는 같은 조건의 SGR 공시체 강도보다 호모겔의 경우 약 3~7배 정도 큰 값을 보였고, 샌드겔의 경우 약 1.5배 정도 큰 값을 보였다. 또한 28일 양생 강도와 120일 양생 강도의 강도 감소비율에 있어서도 물유리 SGR과 달리 ENG는 상당히 작은 강도 감소비율을 나타내었다.

6) 삼축투수실험결과 ENG는 대략 10^{-6} cm/sec 부근의 투수계수를 나타내 그 차수성을 나타내었으며, 시간에 따른 투수계수 증가는 물유리 SGR이 내구성 감소로 인하여 ENG보다도 훨씬 큰 투수계수 증가율을 나타내었다.

7) ENG의 현장투수시험을 수행한 결과 10^{-5} ~ 10^{-6} cm/sec 안의 투수계수 범위를 나타내어 ENG 공법의 현장에 대한 차수능력을 파악할 수 있었으며, 실내실험 결과와도 비슷한 값을 보여주었다.

8) ENG의 중금속 검출시험 결과 Cr^{6+} 항목을 제외하고 실험 대상 중금속이 검출되지 않았으며, Cr^{6+} 에 있어서도 폐기물 규제기준인 1.5ppm보다 훨씬 낮은 값을 나타내고 있어, ENG가 환경에 대한 부정적 영향이 매우 적다고 판단된다.

참고문헌

1. 김진춘, 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구, 한양대학교, 1999.
2. 쌍용양회 중앙연구소 콘크리트 연구실, 마이크로시멘트를 이용한 그라우팅 실험연구, 1994.
3. 이해봉, 그라우팅에 의한 지반보강시의 주입을 산정에 관한 고찰, 조선대학교, 1998.
4. 조영웅, 물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구, 제주대학교, 2003.
5. 천병식, 김진춘, “어독성 시험에 의한 지반주입체의 공해성 평가”, 대한토목학회논문집, 제18권 제III-4호, 1998, pp. 531-538.
6. 천병식, 이재영, 서덕동, “시멘트계 주입재 종류별 주입 특성 및 환경적 영향 연구”, 한국지반공학회논문집, 제19권 2호, 2003, pp. 159-170.
7. 토목공법 연구회, 실무 그라우팅 공법, 건설정보사, 서울, 2003.
8. 所 武産 外, “水がうす系グラウトの耐久性について”, 第24回土質工學研究發表會, 1989.
9. 檜壇 外, “薬液注入材の長期耐久性について”, 第18回土質工學研究發表會, 1983.
10. J. C. King, E. G. W. Bush, “Symposium on Grouting : Grouting of Granular Materials”, ASCE Proceeding, Journal of SMFE, Vol. 87, SM2, 1961, pp. 1-32.
11. R. H. Karol, Chemical Grouting 2nd Ed., Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1990.

(접수일자 : 2009년 7월 27일)

(심사완료일자 : 2009년 11월 18일)

요 지

물유리계 그라우팅 공법은 침투주입 그라우팅으로 자주 적용되고 있으나, 시간경과에 따른 내구성 저하와 환경에 부정적 영향에 대한 문제가 부각되고 있다. 이에 마이크로시멘트계 무기질 재료의 ENG 공법이 이러한 물유리계 그라우팅 공법의 문제점을 극복하면서 우수한 침투성을 목표로 하여 개발되었다. ENG의 적용성을 파악하기 위해 체적변형시험, 용탈실험, 일축압축실험, 실내 투수실험 및 현장투수실험 그리고 중금속검출실험을 실시하였다. 그 결과 체적변형, 용탈량, 일축압축강도는 물유리 공법보다 월등히 우수하였으며, 투수실험에 있어서도 차수효과가 나타났다. 또한 중금속 검출량도 미미하여 환경에 부정적인 효과도 적을 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 마이크로시멘트, 물유리, 그라우팅, 내구성, 강도, 차수성