

가소성그라우트의 배합특성 및 현장 적용성 평가

김학문¹, 장경준^{1*}
¹단국대학교 토목환경공학과

Evaluation of Field Application for the mix properties of the thixotropic grout

Hak-Moon Kim¹ and Kyung-Jun Jang^{1*}

¹Dept of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

요약 최근 환경에 대한 관심이 증대되면서 지반보강 재료의 친환경성이 강조되며, 이에 따라 각종 지반주입 재료가 개발되고 있으나 건설현장에서는 대부분 물유리계 재료가 활용되고 있다. 또한 최근 선진국에서는 물유리계 지반주입재의 단점인 내구성 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 공법을 개발하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기존 그라우트 재료의 문제점을 향상시키기 위하여 친환경적인 무기계 가소성그라우팅 재료에 대한 실내 시험을 통해 그라우팅 재료의 공학적 특성을 파악하고자 하였다. 실내시험에서는 그라우팅 재료의 사용량에 따른 점성, 가소성, 압축강도 및 환경영향평가에 대한 검토를 수행하여 최적 배합에 대한 범위를 설정하고, 설정된 배합의 현장적용을 통해 기존의 그라우팅 재료보다 경제적, 공학적으로 우수한 그라우트 재료에 대하여 평가하고자 한다.

Abstract The advantages of grouting are the simple instrument, the simple procedure of practice and the simple verification of grouting result. but the more grouting practice there is, the more damages of environment from grouting practice and grouting materials there are. so, the grouting materials and methods with the character of environment friendly are introduced in construction field, recently. This paper is to study of the physical characteristics that has thixotropic character and that consists of inorganic and polycarboxylate co-polymer. In study, various testing methods are performed such as a viscosity, a thixotropy, a compressive strength, a heavy metal detection and pH measurement in lab test and a low pressure injection test and a high pressure injection test in field with different soil type. As a result, a optimum mix ratio is proposed by analyzing the result of lab test. the field applicability is verified by checking a injection pressure, a grout volume and a hardened body of grout by excavating the practice site.

Key Words : Plasticity grout, Grouting, Plasticizer, Reinforced grout, Optimum mix ratio

1. 연구 배경 및 목적

연약지반은 구조적으로 자체의 강도가 부족하여 지지력을 발현하기 어렵기 때문에 개량 및 보강처리를 통하여 구조물의 하부지반으로 활용되어야 한다. 이를 위한 가장 경제적이고 효율적인 방법으로는 지반 그라우팅을 통해 연약지반의 안정화를 이룰 수 있다. 이러한 목적으로 시공되는 구조물로는 지반의 강도 증가에 의한 기초

보강, 투수계수 감소에 의한 차수벽, 터널의 안정성 확보를 위한 배면주입 및 폐기물 매립지의 차수보강 등이 수행되고 있다. 환경에 대한 관심이 증가되면서 그라우팅 재료의 환경위해성을 평가하기 위한 방법들이 연구되고 개선된 재료 및 시공방법이 제시되고 있다. 물유리계 공법은 내구성, 강도, 용출 등의 문제로 가시철 차수의 목적으로는 사용이 가능하나(천병식, 1997) 시네레시스(Syneresis)현상 등으로 인해 영구적인 지반 보강이 불가

본 연구는 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

*교신저자 : 장경준(jangkyoungjun@hanmail.net)

접수일 11년 06월 17일

수정일 (1차 11년 07월 20일, 2차 11년 07월 29일)

계재확정일 11년 09월 08일

능하고(천병식, 2005), 차수를 위한 공법으로서의 본질적인 문제점과 균질한 품질의 확인과 시공속도에 대응할 수 없는 문제점(김진춘 등, 2001)을 가지고 있다. 영국의 Aspdin J.(1824)에 의해 포틀랜드 시멘트가 개발되고, Marc Isambard Brunel(1838)에 의해 테임즈 터널건설 주입재로 포틀랜드 시멘트가 최초로 사용되면서 주입공법은 주목할만한 발전을 하는 계기가 되었다(Robert Bowen, 1981). 그리고, 평균입경 15-20 μm , 최대입경 80-100 μm 로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적이고, 보통 포틀랜드시멘트를 주재로 사용하는 각종 교반 공법 또는 고압분사주입의 경우 발암물질인 6가크롬(Cr^{6+}) 등의 유해물질이 발생하여 지반을 오염시킬 수 있다(박주양 등, 2001). 그러나 이러한 특성에도 불구하고 대부분의 건설 현장에서는 물유리계 그라우팅이 수행되고 있으며, 물유리계 재료의 시공 후 지반 강도, 내구성 및 환경위해성(천병식, 2002) 등의 많은 문제점을 나타내고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 국외에서는 광물계를 기본으로 한 그라우팅 재료가 개발되어 적용되고 있다. 광물계 재료는 보통포틀랜드 시멘트 또는 고로슬래그시멘트를 미분쇄한 마이크로시멘트를 사용하고 급결성을 갖는 칼슘알루미네이트 또는 칼슘설퍼알루미네이트계 광물을 혼용함으로써 주입성과 급결성을 얻을 수 있으며, 시공 후 영구적인 구조물을 형성할 수 있다. 본 연구는, 최근에 국내에서 개발된 고분자계 가소성 특성을 갖는 그라우팅재료를 사용하여 실내시험을 통한 가소성그라우트의 배합특성을 파악하고 시공후 내구성 및 강도가 우수하고 영구적인 차수 및 보강에 적합한 친환경적 재료의 적절한 주입특성을 알아보고자 한다.

1.1 가소성그라우트의 정의

일반적으로 일컬어지는 가소성 또는 요변성(搖變性, thixotropy)의 상태를 나타낸 그라우트를 가소성그라우트라고 한다(정경환, 2008). 이러한 특성의 그라우트는 액체와 고체의 중간 영역에 속하며, 그라우트 자체의 유동성은 없지만 약간의 가압에 의해 용이하게 유동화 할 수 있다. 가소성이라는 성질의 특징은 종래의 어떠한 시멘트계 그라우트라도 유동상태에서 압밀에 도달하는 과정에서 반드시 가소성 상태의 압밀 영역을 통과하게 된다. 그러나 가소성 영역에서 그라우트로서 실용화되기 위해서는 가소성 발생시기의 조정이나 충분한 시간의 유지가 필요로 한다(특수건설).

1.2 가소성

가소성은 지반주입재의 한 분류로서 종래에 단순한 일액성의 시멘트 밀크 주입재와는 달리 주입시 완전히 경

화하기 전에 일정 시간 동안 일정 수준의 점도와 강도를 유지하는 장점이 있다. 지하수에 의해 쉽게 희석, 유실이 되지 않음과 동시에 일정시간 동안 가소성을 가져 압력을 가함으로써 미세한 공극까지도 밀실하게 충전시킬 수 있고, 그 이후에는 경화되기 시작하여 일정수준 이상의 강도를 발현하는 주입재의 특성을 말한다(정경환 등, 2008).

2. 가소성그라우트의 종류 및 작용 메카니즘

2.1 물유리계

시멘트 등의 경화 발현재와 물유리의 반응기구는 일반적으로는 다음과 같은 겔화 반응이 고려되고 있다. 콜로이드 화학에 있어서 물유리는 콜로이드입자로서 취급하고 있고, 액중에는 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SiO}_3 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SiO}_3^{2-}$ 로 되고 규산이온(SiO_3^{2-})은 부(-)로 전하하고 있다. 한편, 시멘트를 수중에 현탁시킨 경우, 시멘트의 수화시에 생긴 Ca^{++} 은 정(+)으로 전하하고 있다. 정(+)으로 전하한 시멘트 현탁액과 부(-)로 전하한 물유리 용액을 혼합하면 전하치환이 실행되어 불안정하고 응고하는 반응을 일으킨다. 가소성그라우트에서는 물유리량이 적기 때문에 전하치환반응은 고결력이 매우 약하지만 겔시간은 매우 짧은 특이한 반응을 일으킨다.

2.2 알루미늄염계

알루미늄염계는 종래의 2액성의 에어모르타르(A액)에 가소제(B액)를 추가해서 순간적으로 가소상 고결시키는 공법이다. 이공법의 에어 모르타르가 기포를 발생하는 원리는 물에 기포제를 넣고 교반하면, 기포(공기)의 주위에 2분자막을 형성하고 수분을 포함한 기포입자가 생기는 것이다. 이 기포입자 균중으로 고체입자인 시멘트 및 골재를 분산시켜 재료분리의 방어나 유동성을 갖게 한 것이 A액이 된다.

이 A액에 추가하는 가소제의 주성분은 특수 알루미늄염 화합물이고, 알루미늄 이온 (Al_3^+)은 수용액 중에서는 $[\text{Al}(\text{OH})_2]^{3+}$ 의 형태로 존재하여 있고, 이것에 식 (2.1)과 같이 알칼리제(A액중의 시멘트)를 추가하면, 순간적으로 백색의 교상침전의 수산화알루미늄 겔을 생성한다.



2.3 점토광물계

점토광물계에서 가소제로서 이용가능한 것은 몬모릴

로나이트 점토광물뿐이다. 가소제의 주성분은 몬모릴로나이트 광물 $[(OH)_4Si_8Al_4, O_2 \cdot nH_2O]$ 과 그 외 Fe, Mg, K, Na를 포함이다. 몬모릴로나이트의 특성은 물에 접하면 현저히 팽윤, 분산하여 콜로이드(입자지름 0.001~0.01 μ)로 되고, 현저한 점성과 디스토포피 현상을 가지며 분산 중의 몬모릴로나이트 입자는 양이온 교환성이 크다.

2.4 고분자제계

고분자제계의 대표적인 가소제는 폴리(메타)아크릴산 등의 친수성폴리머의 가교 구조체를 주성분으로 한 특수 흡수성수지(폴리머)와 벤토나이트를 병용한 것이다. 이 흡수성 폴리머는 일반적으로 종이기저귀 등에 사용되고 있는 것으로서, 체적의 10배의 물(자유수)를 급수해서 고정수로 바꾸는 성질이 있다.

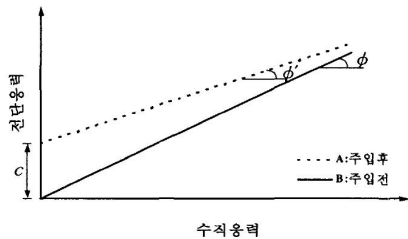
3. 그라우팅 지반보강 효과

3.1 사질토지반

주입공법이 지반개량 목적으로 사용되는 것은 그라우팅에 의해 지반강도 증진이나 차수효과 및 침하 감소효과를 동시에 얻기 때문이다. 그러나 강도증진을 목적으로 주입할 경우 주입재가 지반의 예상 활동 파괴면을 따라 관입된다면 장기적으로는 오히려 강도를 줄이는 일이 될 수 있으므로 주의해야 한다. 특히, 주입대상 지반이 사질토 지반일 때에는 주입전 전단력을 받게 되면 배수상태에서 변형을 하게 되지만 그라우팅을 실시한 후에는 배수 상태로 전단을 받아 이것이 오히려 강도와 변형특성에 불리하게 작용한다.

3.2 전단강도 특성

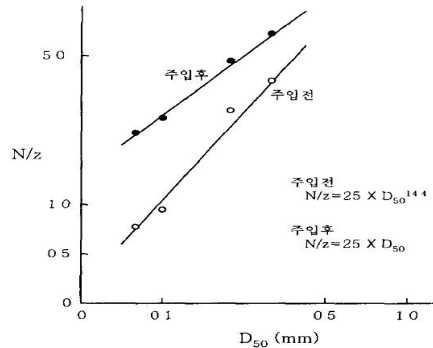
주입에 의해 개량된 지반에서 전단강도가 조밀한 사질토에서는 약간 증가하지만 느슨한 사질토에서는 그림 1과 같이 전단 저항각이 다소 감소하며, 강도증가의 주된 원인은 점착력의 증가에 의한 것이라는 의견이 지배적이라고 Karol(1983)은 제안하였다.



[그림 1] 느슨한 사질토 전단거동(Karol, 1983)
[Fig. 1] Shear behavior of loose Sand(Karol, 1983)

3.3 그라우팅 전·후 N값

사질토 지반에 대한 주입 전·후의 N/z(N값과 심도비)와 D_{50} 의 관계를 파악하기 위하여 주입률 40%인 지반에 약액주입을 2중관 방식으로 실시한 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 입경과 N값이 작은 지반의 지반개량효과가 입경과 N값이 큰 지반보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



[그림 2] 주입전·후 N/z과 D_{50} 의 관계(일본건설기계화협회, 1991)

[Fig. 2] Relationship of N/z and D_{50} Before impregnation and after impregnation(Japan Construction Mechanization Association, 1991)

4. 배합비 특성 시험

4.1 실내시험 개요

가소성그라우트의 배합 특성에 관한 시험을 위해 유사한 겔화 특성을 가지고 있는 규산계 그라우트와 물리적 특성을 비교하였다. 가소성그라우트는 기준배합 표 1을 적용하였으며, 규산계 그라우트는 일반적으로 현장에서 사용하는 배합비로 수행하였다. 기존의 물유리계 그라우팅을 적용하는 경우에는 규산소다 및 물의 혼합체인 A액과 시멘트, 벤토나이트, 물의 혼합체인 B액을 50:50으로 혼합하여 시공하는 경우가 대부분이다. 3일이 경과한 일축압축강도는 $13kg/cm^2$ 전후이고 7일 강도는 $17kg/cm^2$ 정도로 증가하며 겔타임은 150초 정도이다. 그러나 B액의 양을 증가시키고 A액의 양의 감소시키면 일축압축강도 및 겔타임이 증가하는 경향을 나타낸다. 실내 시험의 적용인자로는 시멘트종류 및 사용량, 분말가소제 및 액상가소제 사용량을 변화시켜 특성을 검토하였으며, 시험 항목으로는 그라우트의 점성, 가소성, 일축압축강도, 투수계수를 측정함으로써 2종류의 그라우트 재료 특성을 비교 검토하였다. 또한 환경영향 평가를 위한 중금속 용출량과 pH변화량을 측정하였다.

[표 1] 가소성그라우트 기준배합(허원, 2011)

[Table 1] Standards proportion of plasticity grout(Won Huh, 2011)

w/c (%)	A액(kg)			B액(Liter)	
	물	OPC	분말가소제	물	액상가소제
83.8	637	720	40	94	6

4.2 재료적 특성 검토

4.2.1 시멘트

일반적으로 가장 많이 사용되는 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)와 고로슬래그시멘트(이하 SC)이다. OPC를 사용한 그라우트는 SC에 비해 pH가 상대적으로 높고 초기 겔화가 지연되는 특징이 있는 반면 가장 쉽게 현장에서 사용할 수 있는 그라우트 재료이다. 반면에 SC는 분말도가 OPC에 비해 상대적으로 높아 지반주입에 유리하다고 할 수 있으며, 장기적으로는 더 높은 강도를 얻을 수 있다(노재호 등, 1995). 본 시험에서는 OPC와 SC의 사용량별 특성을 수행하였고, 각 화학조성은 표 2와 같다.

[표 2] OPC와 SC의 화학조성

[Table 2] The chemical composition of OPC and SC

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
OPC	20.8	5.9	62.7	2.8	3.3
SC	28.4	10.8	48.8	5.5	2.1
	SO ₃	K ₂ O	LOI	분말도	
OPC	2.2	0.85	1.4	3260	
SC	1.8	0.48	1.6	3703	

4.2.2 분말가소제

분말가소제는 비정질 칼슘알루미늄에이트계 광물과 칼슘숄퍼알루미늄에이트계 광물의 혼합물로서 일반적으로는 시멘트의 급격한 경화를 촉진하기 위해 사용되는 광물계 미분말이다. OPC는 물과 반응하여 강 알칼리성분(Ca(OH)₂)을 용출하게 되고 분말가소제는 이와 급격하게 반응하고 침상의 결정체인 에트린자이트를 생성하여 그라우트의 체적변화를 줄여주고 조기 응결을 촉진시킨다. 분말가소제의 화학조성은 표 3과 같다.

[표 3] 분말가소제의 화학조성

[Table 3] The chemical composition of the powder plasticizer

CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	LOI	분말도
40.67	21.84	28.59	3.91	1.80	1.15	0.42	5320

4.2.3 액상가소제

액상가소제는 고분자화합물로서 알칼리 환경하에서 점성이 증가되고 중금속을 흡착하는 킬레이트 수지의 한 종류이다. 중성의 상태에서는 안정된 상태로 존재하지만, 가소성그라우트에서 시멘트 혼합물과 혼합시 그라우트에 가소성을 부여하고 시멘트의 수화 반응에서 용출되는 알칼리이온 및 중금속이온을 흡착하여 그라우트 내에 고정화시킨다. 액상가소제의 물리적 특성은 표 4와 같다.

[표 4] 액상가소제의 물리적 특성

[Table 4] The physical characteristics of the liquid plasticizer

항목	단위	결과 값
색상		Milky white liquid
고형분	%	25.2
pH		3.0
점도	cPs	25

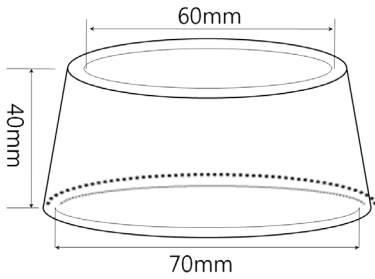
4.3 시험 종류 및 방법

4.3.1 점도

지반 내에 주입된 그라우트의 점도 특성은 그라우트의 침투 거리에 영향을 주며 그라우트의 이송능력과 지반내 침투범위를 결정하는데 중요한 영향요소로 작용한다. 점도 측정은 브룩필드 점도기 #1 spindle를 사용하여 측정하였으며, 그라우트의 이송능력을 평가하기 위한 방법으로는 P-con 유하시험을 통해 검토하였다. 시멘트를 사용하는 그라우팅 재료는 최초 혼합 후 시간이 지날수록 점도가 증가되어 최종적으로는 유동성을 상실하고 경화하게 된다. 따라서 그라우트의 이송 가능시간을 파악하기 위해서는 그라우트의 점성과 더불어 P-con유하시간을 측정하여 판단할 수 있다. P-con유하시간이 빠르면 배관을 통한 압송이 유리하다고 할 수 있으며, 유하 시간이 느리면 압송이 불리하다.

4.3.2 플로우 콘

가소성을 측정하기 위한 방법으로, 혼합된 그라우트를 혼합 직후부터 유동성이 사라지는 시간까지 플로우 테이블을 이용하여 15회 낙하 후 퍼진 거리를 측정하였다. 시험은 KS L 5111규격에 따라 진행하였으며, 플로우 측정을 위한 콘 그림 3은 6×7×4(가로×세로×높이, cm)의 규격을 사용하였다.



[그림 3] 플로우 콘
[Fig. 3] Flow con

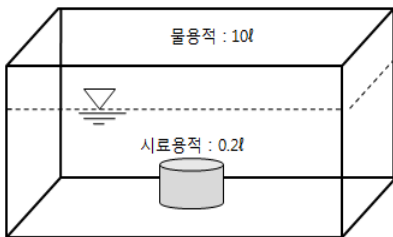
4.3.3 일축압축강도

그라우트의 압축강도는 시편제작 후 7, 28, 91일 간격으로 측정하였으며, 하중 재하속도는 1.0mm/min으로 설정하였다.

4.4 환경영향평가

4.4.1 중금속

가소성그라우트는 시멘트와 분말가소제 및 액상가소제를 각각 혼합 후 별도의 이송호스를 통해 주입 장소로 이송되고 선단장치를 통해 지반내로 주입되며 시공시 그라우트는 지하수의 영향을 받게 되고 투수계수가 높은 경우 재료의 유실을 초래할 수 있다. 그라우트의 환경영향평가를 위한 방법으로, 그림 4와 같이 굳지 않은 상태의 가소성그라우트 0.2리터를 혼합한 후, 물 10리터에 침적 후 1일, 5일이 지난 시점에서 시료수를 채취하고 중금속량을 측정하였다.



[그림 4] 중금속 용출시험
[Fig. 4] Heavy metal elution test

4.4.2 pH측정

그라우트의 알칼리성분의 용출 특성을 파악하기 위해 pH 변화량을 측정하였다. 하천변 지반주입 공사시 그라우팅 재료가 하천으로 유실될 경우, 하천의 갑작스런 pH 증가에 의해 어류는 pH쇼크를 받게 되고 폐사에 이르는 주요인으로 알려져 있다. 양식어류의 pH 변화에 대한 영

향을 표 5에 나타내었다. pH측정은 HANNA HI8424을 사용하였으며, 초기치, 그라우트 투입 직후, 1, 3, 6, 24, 48, 72시간으로 측정하였다.

[표 5] 양식어류에 대한 pH의 영향
[Table 5] The influence of pH on aquaculture

pH	영 향
4 이하	높은 산성으로 죽음에 이름
4~5	번식하지 못함
5~6	성장에 영향을 받음(성장이 느려짐)
6~9	정상적인 상태
9~11	성장에 영향을 받음(성장에 느려짐)
11 이상	높은 알칼리로 인한 죽음에 이름

4.5 시험 결과 및 분석

4.5.1 시험 인자 및 배합표

가소성그라우트의 배합특성을 위한 시험인자로 그라우트 배합, 시멘트 종류, 분말가소제 사용량, 액상가소제 사용량으로 분류하였다. 그라우트 배합비는 가소성그라우트와 규산계 그라우트의 2종류로 하였고, 시멘트는 일반적으로 가장 많이 사용되는 OPC와 SC의 2종류로 하여 각각의 사용량을 조절함으로써 그라우트에서의 특성을 검토하였으며, 분말가소제량을 0kg에서 120kg, 액상가소제량은 0kg에서 12kg까지 적용하여 그라우트의 배합특성을 수행하였다.

가소성그라우트의 물리적 특성 검토를 위한 시험인자는 표 6과 같으며, 시험배합표는 표 7과 같다.

[표 6] 시험인자
[Table 6] Test parameters

항 목	단 위	시험인자수	내 용
비교배합	개	3	가소성,시멘트 규산계그라우트
시멘트종류	개	2	OPC, SC
시멘트량	kg	3	670, 720, 770
분말가소제량	kg	4	0, 40, 80, 120
액상가소제량	kg	5	0, 3, 6, 9, 12

[표 7] 가소성그라우트 배합특성 평가를 위한 시험배합
 [Table 7] Testing mix for mixing characteristic of plasticity grout

순번	구분	w/c (%)	A액(kg)				B액(Liter)			
			물(수도수)	OPC	SC	분말가소제	규산계약재	물(수도수)	액상가소제	규산
1	시멘트계	100	760	760						
2	규산계		420	150			30	250		250
3	가소성그라우트	O	78.6	637	770		40		94	6
4			83.8	637	720		40		94	6
5		P	89.7	637	670		40		94	6
6			78.6	637		770	40		94	6
7		SC	83.8	637	720	40		94	6	
8			89.7	637	670	40		94	6	
9		분말가소제	88.5	637	720	0		94	6	
10			83.8	637	720	40		94	6	
11			79.6	637	720	80		94	6	
12			75.8	637		720	120		94	6
13		액상가소제		637		720	40		100	0
14			637		720	40		97	3	
15	83.8		637		720	40		94	6	
16			637		720	40		91	9	
17			637		720	40		88	12	

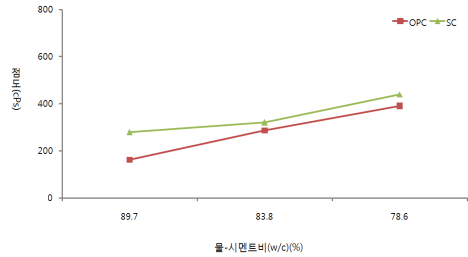
4.5.2 점도측정

가소성그라우트의 배합별 점도를 측정된 결과는 표 8과 같다. 물의 점도를 1 cPs라 할 때, 액상가소제는 25cPs 이고 규산의 점도는 108cPs로 측정되었다. 시멘트계 그라우트의 경우 점도가 81cPs 이고 가소성그라우트의 경우는 모두 200cps이상의 점도를 나타내었다.

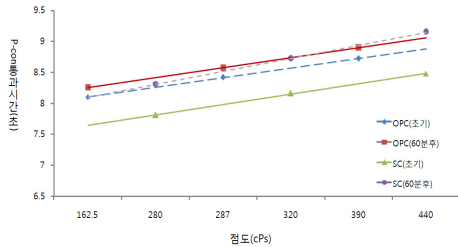
[표 8] 점도 및 P-con 유하시간
 [Table 8] Viscosity and P-con flow time

순번	구분	점도(cPs)		P-con유하시간(sec)			
				초기		60분후	
		A액	B액	A액	B액	A액	B액
1	OPC-100%	81		8.16		8.20	
2	규산계	41	22				
3	OPC-78.6%	390	12.5	8.72	8	8.90	8
4	OPC-83.8%	287		8.42		8.57	
5	OPC-89.7%	162.5		8.10		8.26	
6	SC-78.6%	440		8.48		9.15	
7	SC-83.8%	320		8.16		8.72	
8	SC-89.7%	280		7.81		8.31	
9	분말-88.5%	200		8.30		8.50	
10	분말-83.8%	320		8.16		8.72	
11	분말-79.6%	650		8.42		11.50	
12	분말-75.8%	1,570		9.84		21.50	
13	액상-0kg		10		7.98		-
14	액상-3kg		12.5		8		8
15	액상-6kg		12.5		8		8
16	액상-9kg		14.0		8		8
17	액상-12kg		16.0		8		8

P-con유하시험은 각 재료를 혼합 직후 초기치를 측정하였고, 이후 상온에 방치한 뒤 60분 후 유하시간의 변화량을 재측정하였다. 시험장치의 교정을 위해 P-con에 수도수를 통과시켜 7.98초로 맞추었다. 표 8의 측정결과에서 나타난 바와 같이, A액의 초기 값은 거의 유사한 경향을 보였으나, 점도가 650cPs 이상 일때는 60분 후의 측정값에서 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있었다.



(a) 물-시멘트비와 점도와의 관계
 Rate of water-cement and the relationship between the viscosity

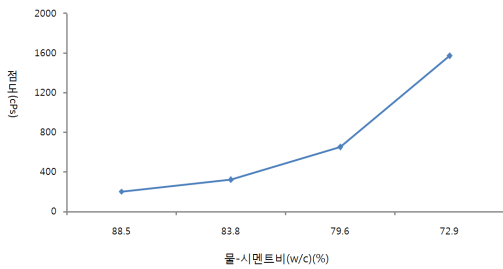


(b) 점도와 P-con통과시간과의 관계
 Relationship between Viscosity and P-con transit time

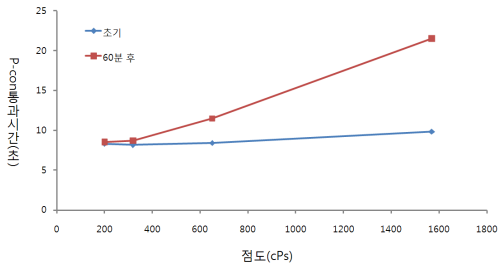
[그림 5] 시멘트 사용량에 따른 점도 및 P-con통과 특성
 [Fig. 5] The characteristic of viscosity and P-con according to the amount of cement used

A액의 시멘트 사용량에 대한 점도결과에서는 그림 5(a)에서와 같이 OPC 사용시에 비해 SC사용시 점도가 약간 증가되는 경향을 나타내었으나 그 결과는 큰 차이는 아닌 것으로 사료된다(성민정, 2010). A액의 점도와 P-con 유하시간의 관계를 나타낸 그림 5(b)에서는 A액의 시멘트량이 증가하여 점도가 높아질수록 P-con 초기 유하시간이 증가하는 경향을 보이며, 고점도 배합(SC, 440cps)에서 60분 후의 P-con 유하시간의 차이는 더 커지는 경향이 나타났다.

또한, 분말가소제 사용량과 점도의 관계를 나타낸 그림 6(a)에서는 분말가소제의 사용량이 증가됨에 따라 점도의 변화가 매우 큰 것으로 나타났다. 특히, 분말가소제 량을 증가시키면서 P-con 유효시간을 측정할 그림 6(b)에서는, 분말가소제 사용량이 늘어나 A액의 점도가 증가할 수록(500cps 이상) 60분 후 P-con 유효시간은 저점도인 경우(500cps이하)에 비해 큰 폭으로 길어졌다. 이로써 P-con 유효 시간이 분말가소제 사용량과 가장 밀접한 관계가 있다는 것을 보여주고 있으며, 분말가소제 사용시 혼합 시간에 따른 A액의 점성 증가 및 압송력 저하에 관한 각별한 주의가 요구된다.



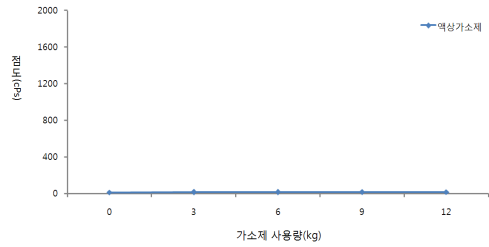
(a) 물-시멘트비와 점도와의 관계
Rate of water-cement and the relationship between the viscosity



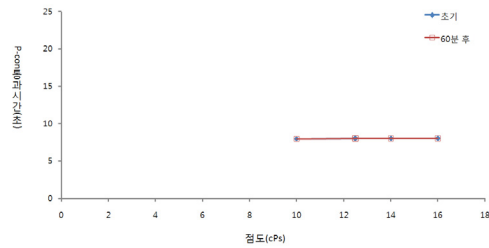
(b) 점도와 P-con통과시간과의 관계
Relationship between Viscosity and P-con transit time

[그림 6] 분말가소제 사용량에 따른 점도 특성
[Fig. 6] The characteristic of viscosity and P-con according to the amount of powder plasticizer used

액상가소제의 경우에는 그림 7(a)에서와 같이 사용량에 따른 약간의 점도 변화는 보였으나 무시할 정도이며, 점도와 P-con 통과시간 간의 관계를 나타낸 그림 7(b)에서도 아무런 변화가 나타나지 않아 액상가소제는 현장에서 사용하는 데 시간적인 제약이 없는 것으로 나타났다.



(a) 가소제 사용량과 점도와의 관계
Relationship between Viscosity and plasticizer



(b) 점도와 P-con통과시간과의 관계
Relationship between Viscosity and P-con transit time

[그림 7] 액상가소제 사용량에 따른 점도 특성
[Fig. 7] The characteristic of viscosity and P-con by liquid plasticizer quantity

시멘트 및 분말가소제의 점도가 증가될수록 P-con 유효시간이 늘어지는 결과를 보이고 있으며, 특히 점도 증가가 클 경우(분말가소제)는 P-con 통과시간 또한 매우 길어지는 관계를 보이고 있다. 그러나 점도의 증가가 상대적으로 매우 적은 액상가소제의 경우에는 P-con통과시간의 변화가 나타나지 않았다.

4.5.3 가소성 측정

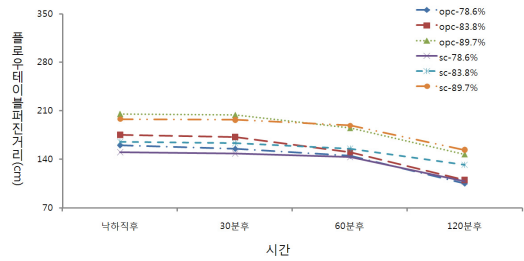
가소성은 유동성과 반대의 상태를 나타내는 개념으로 플로우 테이블 15회 낙하 후 퍼진 거리가 적을수록 가소성이 우수하다고 판정하였다. 타격회수를 15회로 제한함으로써 가소성그라우트를 그 이상으로 타격하여도 퍼진 거리에는 변화가 없는 것으로 나타났으며 최초 타격 후 측정하고 다시 일정 시간이 지난 후 재 혼합하여 플로우 테이블에서 15회 낙하 후 퍼진 거리를 측정하였다. 측정 시간은 최초 이후 120분 까지 30분 단위로 증가하면서 거리를 측정하였다. 측정 결과는 [표 9]에서와 같이 시멘트계 그라우트와 액상가소제를 사용하지 않은 배합에서는 가소성이 나타나지 않아 측정이 불가능 하였으며, 물 유리계 그라우트는 급결에 의해 가소성 측정이 불가능하였다. 그림 8은 시멘트 종류 및 사용량에 따른 가소성 결

과를 나타낸 것이다. 시멘트량이 많은 배합(w/c 78.6%)에서는 그라우트 퍼진 거리 초기 값이 작게 나타났고, 시간이 지난 이후의 퍼진 거리 손실량은 크게 나타났다. OPC와 SC를 비교하면, SC를 사용한 경우에는 초기 퍼진 거리는 OPC에 비해 적으나, 60분 후의 측정에서는 퍼진 거리가 더 크게 나타났다. 이는 시멘트량이 증대될수록 시멘트의 수화가 빨리 진행된 것으로 예상되며, SC가 OPC에 비해 초기 수화가 늦게 진행됨으로써 120분 후의 퍼진 거리가 크게 나타난 것이다.

[표 9] 가소성 측정결과

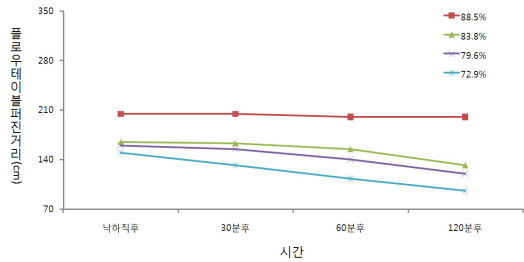
[Table 9] Plasticity measurements result

배합번호		혼합직후 (mm)		경시후(mm)			비고
		초기	15회 낙하후	30분	60분	120분	
1	OPC -100%	300 이상	300 이상	300 이상	300 이상	300 이상	측정불가
2	규산계	70	-	-	-	-	급결에 의해 측정불가
3	OPC -78.6%	78	160	155	145	105	
4	OPC -83.8%	85	175	172	150	110	
5	OPC -89.7%	91	205	204	185	147	
6	SC-78.6%	72	150	148	143	108	
7	SC-83.8%	75	165	163	155	132	
8	SC-89.7%	79	198	197	189	153	
9	분말 -88.5%	105	205	205	200	200	
10	분말 -83.8%	75	165	163	155	132	
11	분말 -79.6%	71	160	155	140	120	
12	분말 -75.8%	70	150	132	113	96	
13	액상 -0kg	300 이상	300 이상	300 이상	300 이상	300 이상	측정불가
14	액상 -3kg	87	185	180	163	145	
15	액상 -6kg	75	165	163	155	132	
16	액상 -9kg	83	181	180	175	168	
17	액상 -12kg	89	187	187	185	180	



[그림 8] 시멘트 특성에 따른 유동 특성
[Fig. 8] The floating characteristics according to characteristics of cement

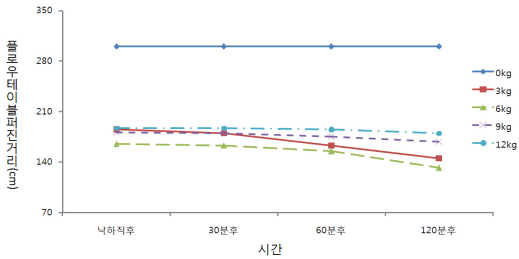
또한, 분말가소제 사용량에 따른 결과 그림 9에서는, 분말가소제 사용량이 증대 될수록(w/c 72.9%) 초기의 퍼진 거리가 줄어드는 경향을 나타내고 있으며, 경시 후에는 퍼진 거리 손실이 가파르게 증가하였다. 분말가소제를 사용하지 않은 배합에서는 초기 퍼진 거리가 가장 컸고 경시 후의 손실량은 거의 발생되지 않았다. 이는, 분말가소제의 사용량이 높을 경우, 시멘트의 수화가 촉진되어 그라우트의 작업성 손실이 빠르게 진행된 것으로 예측할 수 있다. 즉, 분말가소제량은 증대 될수록 가소성이 향상된다고 할 수 있으나 작업성의 손실 또한 빠르게 발생되므로, 현장에서 사용시 사용량에 따른 작업성 손실이 발생한다.



[그림 9] 분말가소제 사용량에 따른 유동특성
[Fig. 9] The floating characteristics according to characteristics of powder plastic-izer quantity

액상가소제의 경우는, 타 시험 인자에 비해 상이한 경향을 나타내었다. 그림 10에서와 같이 가소제를 사용하지 않은 배합(0kg)에서는 가소성이 나타나지 않아 플로우테이블 퍼진 거리 측정이 불가능 하였고, 액상가소제 사용량이 증대된 모든 배합에서 가소성이 발현되어 측정 가능하였다. 그러나 가소제 사용량이 6kg에서 퍼진 거리가 가장 낮게 측정 되었으며, 9kg, 12kg으로 증가되어도 가소성의 향상은 나타나지 않았고 퍼진 거리가 증가되어 가소성이 떨어지는 결과를 보였다. 시간이 경과한 후에도

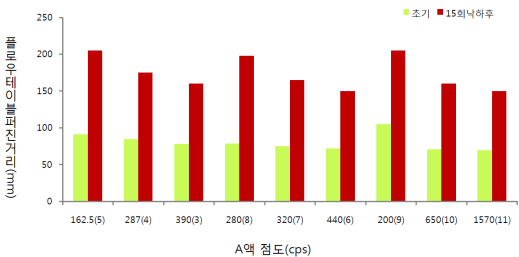
그 결과는 유사하여 사용량이 6kg에서 퍼진 거리가 가장 적어 가소성이 우수하였으며, 액상가소제의 사용량이 높아질 경우 퍼진 거리 손실량은 거의 나타나지 않았다. 이는 고분자 가소제의 사용량 증가에 의해 시멘트에 흡착되는 고분자 가소제량이 증가하면서 시멘트의 수화과정이 고분자 가소제의 입체작용에 의해 방해를 받음으로써 시멘트응결이 지연된 결과이다.



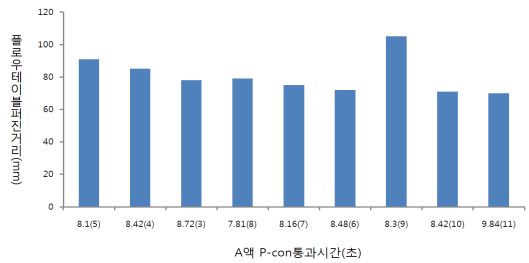
[그림 10] 액상가소제 사용량에 따른 유동특성
[Fig. 10] The floating characteristics according to characteristics of liquid plasticizer quantity

A액의 점성 및 P-con통과시간과 가소성의 관계를 분석한 결과, 그림 11에서 A액의 점도가 증가하면 플로우 테이블의 초기 및 15회 낙하 후 퍼진 거리가 감소되어 가소성이 향상되는 결과를 나타내고 있으며, 그림 12에서는 A액의 P-con통과시간이 길어지는 경우에 그라우트의 플로우 테이블 퍼진 거리가 감소(가소성 향상)하는 관계를 보이고 있다.

따라서 A액 점도의 증가 및 P-con 통과시간의 증가는 그라우트의 가소성을 향상시키는 주요한 요인으로 작용하고 있으며, B액의 경우에는 액상가소제의 사용량과 그라우트의 가소성에는 특수한 관계가 나타나지 않고, 그림 10에서와 같이 특정 사용량에서 최적의 가소성을 보이고 있는 것으로 나타났다.



[그림 11] A액 점도와 가소성(15회 낙하 전,후)의 관계
[Fig. 11] Relationship of A-liquid viscosity and plasticity (15 times drop before and after)



[그림 12] A액P-con 통과시간과 가소성의 관계
[Fig. 12] Relationship between A-liquid and P-con transit time

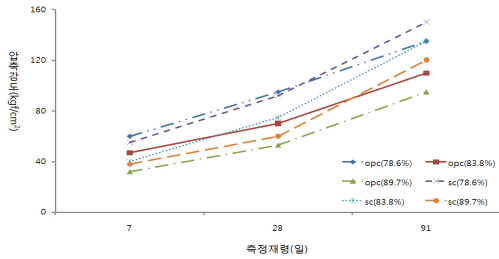
4.5.4 압축강도

그라우팅에 의한 지반 보강효과를 평가하기 위해 각 배합별 일축압축강도를 측정하였다. 측정을 위한 시편은 그라우트 제조 직 후 각 재령당 3개씩 제작하였고, 온도 20℃ 상대습도 60%의 항온항습실에 2일간 보관 후 탈형하여 수중양생조(20±3℃)에서 측정재령까지 보관하였다. 압축강도의 측정 결과, 표 10과 같이 액상가소제가 들어 가지 않은 배합-1과 배합-13에서 그라우트 혼합직후 재료 분리가 발생하여, 총 체적의 약 35% 정도의 블리딩 수가 측정되었다. 따라서 강도측정을 위한 시편 성형이 불가능하였고, 나머지 배합에서는 가능하였다.

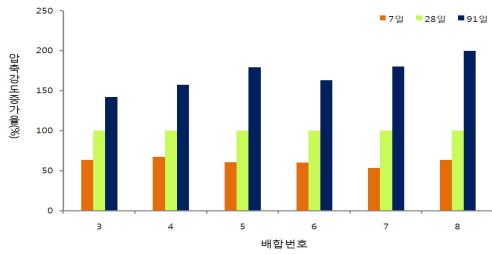
[표 10] 압축강도 측정 결과
[Table 10] Compression strength test results

배합 번호	구분	측정재령(일)			비고
		7일	28일	91일	
1	OPC-100%	시편성형불가 - 시멘트재료분리			
2	규산계	5.3	4	*	
3	OPC-78.6%	60	95	135	
4	OPC-83.8%	47	70	110	
5	OPC-89.7%	32	53	95	
6	SC-78.6%	55	92	150	
7	SC-83.8%	40	75	135	
8	SC-89.7%	38	60	120	
9	분말-88.5%	34	72	132	
10	분말-83.8%	40	75	135	
11	분말-79.6%	53	79	134	
12	분말-75.8%	67	82	141	
13	액상-0kg	시편성형불가 - 시멘트재료분리			
14	액상-3kg	42	78	136	
15	액상-6kg	40	75	135	
16	액상-9kg	36.8	71	128	
17	액상-12kg	32.7	64	126	
					*시편파손

시멘트 종류 및 사용량에 대한 결과는 그림 13(a)와 같이 OPC사용의 경우 SC에 비해 초기 7일 강도는 높게 나타났으나, 28일 및 91일 이후의 장기 강도에서는 낮게 나타났다. 그것은 슬래그시멘트의 잠재 수경성에 의한 경화체의 구조가 치밀해진 결과로 추정된다(콘크리트재료공학, 정재동, pp. 149).



(a) 재령에 따른 강도 특성
Concrete strength properties according to age



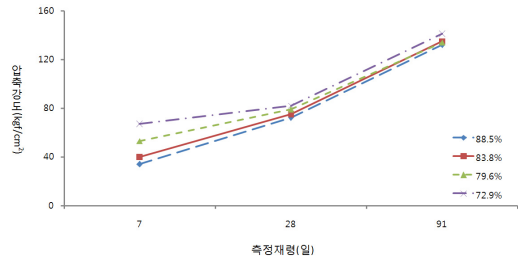
(b) 배합별 강도 증진율
Strength enhance per proportion

[그림 13] 시멘트량에 따른 강도 특성
[Fig. 13] Strength properties according to powder cement

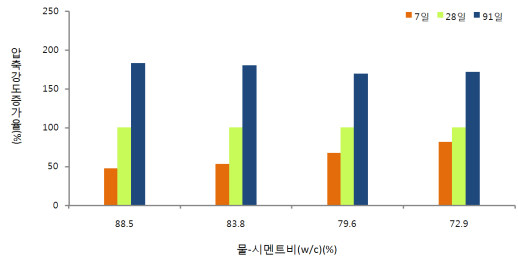
그림 13(b)에서는 재령 28일 강도 대비 재령별 강도 증가율을 검토하였다. 강도 증가율은 28일 강도를 기준으로 7일과 91일을 28일에 대한 비율로써 나타내었다. 초기(7일 재령)에 높은 강도를 발현한 배합 3과 6(OPC-78.6%, SC-78.6%)의 경우는 91일 재령에는 상대적으로 강도 증진율이 낮게 나타났으며, 초기에 낮은 강도를 발현한 배합 5와 8(OPC-89.7%, SC-89.7%)의 경우는 91일 재령에서 높은 강도 증진율을 나타내었다. 이는 초기에 높은 강도를 발현하는 배합의 경우 장기적으로 강도 증가율이 저하되는 일반적인 시멘트의 경향과 일치한다고 할 수 있다.

분말가소제의 사용량 변화에 따른 강도특성에서 그림 14(a) 분말가소제의 사용량이 증가 될수록 초기강도(7일) 증가가 매우 뚜렷하게 나타났으나, 장기 강도(91일) 면에서는 거의 유사한 강도를 나타내고 있다. 따라서 분말가

소제는 초기강도 증진에는 매우 효과적이나, 장기 강도에는 분말가소제의 영향은 크지 않으며 오히려 시멘트 사용량에 따른 강도 변화가 크게 나타났다. 그림 14(b)에서는 재령 28일 강도 대비 재령별 강도 증가율을 보여준다. 강도 증진율에 대한 특성은 그림 13(b)(시멘트량에 따른 강도특성)와 같이 초기에 높은 강도를 발현하는 배합에서 장기적인 강도 증진율이 저하되는 경향을 보이고 있다.



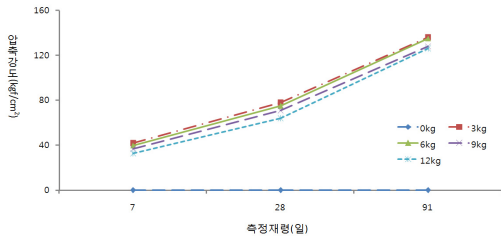
(a) 재령에 따른 강도특성
Concrete strength properties according to age



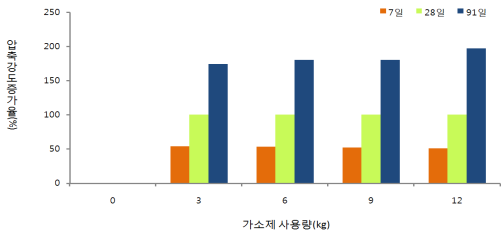
(b) 물-시멘트비에 따른 강도증진율
Ratio of enhance strength according to water-cement rate

[그림 14] 분말가소제 사용량에 따른 강도특성
[Fig. 14] Strength properties according to powder plasticizer

액상가소제의 사용량에 따른 강도 특성은 그림 15(a)에 나타내었다. 액상가소제의 경우는, 사용량이 증가될수록 초기강도 및 장기강도가 저하하는 경향이 나타났다. 또한 액상가소제를 사용하지 않은 경우(0kg)에서는 가소성이 나타나지 않아 시편 성형이 불가능하였고, 반면에 사용량이 가장 높은 12kg에서는 초기강도와 장기강도에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 그림 15(b)에서는 재령 28일 강도 대비 재령별 강도 증가율을 보이며, 강도 증진율에 대한 특성은 그림 14(b) 및 그림 15(b)에서와 같이 초기에 높은 강도를 발현하는 배합에서 장기적으로는 강도 증진율이 저하되는 유사한 경향을 보이고 있다.



(a) 재령에 따른 강도특성
Concrete strength properties according to age

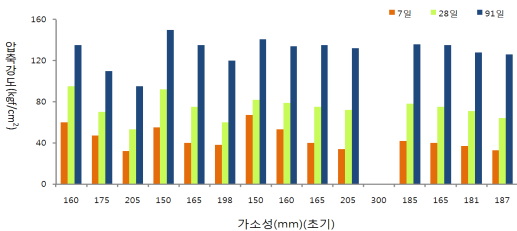


(b) 액상가소제 사용량에 따른 강도증진율
Ratio of enhance strength according to liquid plasticizer quantity

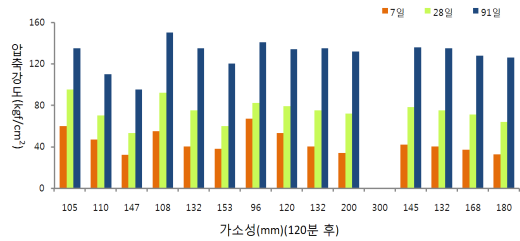
[그림 15] 액상가소제 사용량에 따른 강도특성
[Fig. 15] Strength properties according to liquid plasticizer

시험결과에서 분말가소제는 그라우트의 응결을 촉진시키고 경화체의 내구성을 증대시켜 초기 및 장기강도를 증진시켜주며, 액상가소제의 경우는 고분자가 시멘트에 흡착함으로써 시멘트의 수화를 지연시키는 영향으로 강도가 저하되는 것으로 판단된다. 이는 상기의 액상가소제 사용량에 따른 유동특성 그림 10과 일치한다.

가소성과 압축강도의 관계를 나타낸 그림 16과 그림 17에서 초기 및 경시 후의 가소성이 우수할 경우(15회 낙하 후 퍼진 거리가 적은 경우) 재령별 강도 발현이 높은 것으로 나타났다. 따라서 가소성그라우트에서 압축강도 증가 요인으로는 SC를 사용할 경우, 물-시멘트비가 낮은 경우, 분말가소제량이 많을 경우, 액상가소제량이 적어질 경우인 것으로 판단된다.



[그림 16] 가소성(초기)과 압축강도의 관계
[Fig. 16] Relationship of plasticity (initial) and compressive strength



[그림 17] 가소성(120분후)과 압축강도의 관계
[Fig. 17] Relationship of plasticity (after 120 minutes) and the compressive strength

4.6 투수시험

4.6.1 변수위투수시험

그라우팅 재료의 유실을 방지하고 현장에서의 불투수성에 대한 평가를 위해 투수물드에 수증양생을 시켜 변수위투수시험(KS F 2322-95)을 실시하였다. 투수계수는 다음식과 같이 산출을 하였다.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

여기서, L : 시료길이

A : 시료단면적

a : pipe단면적

H₁, H₂ : pipe 수두차

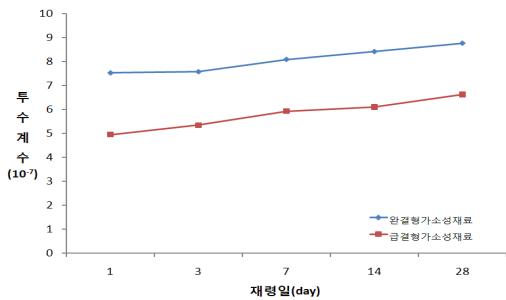
[표 11] 투수시험 측정범위
[Table 11] Permeability test measurement range

배합명	조건	재령(일)	양생
완결형 가소성	시멘트 1종	7, 14, 28	수증
급결형 가소성	시멘트 1종	1, 3, 7, 14, 28	

표 12에서 각각의 투수계수의 차이가 큰 차이를 보이지는 않았지만 강도가 우수한 완결형은 급결형보다는 투수계수가 큰 결과를 확인하였다. 시멘트 혼화물의 투수계수는 공극의 연속성이 지배하게 되므로, 완결형의 재료가 급결형에 비해 경화되는 과정에서 공극의 연속성이 더 큰 것으로 판단된다. 그림 18에서 투수계수는 1×10⁻⁷cm/s로서 불투수성으로 나타났고 시간이 경과함에 따라 서서히 투수계수가 수렴해나가는 것을 알 수 있다. 가소성 그라우트는 시간이 경과함에 따라 투수계수가 수렴되며 우수한 강도발현에 의해 차수의 역할을 지속적으로 유지시킬 것으로 판단된다.

[표 12] 변수위투수시험 결과 (단위 : cm/sec)
 [Table 12] Variable permeability test results
 (unit : cm/sec)

재령	1일	3일	7일	14일	28일
완결형 가소성 재료	7.524 ×10 ⁻⁷	7.574 ×10 ⁻⁷	8.085 ×10 ⁻⁷	8.410× 10 ⁻⁷	8.758× 10 ⁻⁷
급결형 가소성 재료	4.951 ×10 ⁻⁷	5.347 ×10 ⁻⁷	5.931 ×10 ⁻⁷	6.103× 10 ⁻⁷	6.623× 10 ⁻⁷



[그림 18] 변수위투수시험 결과
 [Fig. 18] Variable permeability test results

4.7 환경영향평가

4.7.1 중금속(Cr⁶⁺)

가소성그라우트의 중금속 용출시험을 위한 시험인자는 아래 표 13에 나타내었다. 시료는 굳지 않은 상태에서 5일 동안 수중에 방치한 후 최초 1일과 5일이 경과한 시점에서 시료 샘플을 채취하여 중금속 검출시험을 진행하였다.

[표 13] 중금속 검출 시험 인자
 [Table 13] Heavy metal detection test parameters

항목	단위	시험 인자수	내용
측정항목	종류	2	Cr ⁶⁺ - 1, 5일 pH - 0, 1, 3, 6, 24, 48, 72시간
비교배합	종류	2	가소성그라우트, 시멘트그라우트
시멘트종류	종류	2	OPC, SC
물-시멘트비	%	3	83.8, 100, 200

시험 배합은 표 14와 같이 가소성그라우트 배합과 SC 배합 및 OPC배합을 선정하였으며, 각각 액상가소제를

사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대해 시험을 실시하였다.

[표 14] 가소성그라우트 환경영향평가를 위한 시험배합
 [Table 14] Testing for an environmental impact assessment
 plastic grout mix

시험 순서	w/c	A액(kg)			B액(liter)		
	(%)	물	SC	OPC	분말 가소제	물	액상가 소제
1	83.8	637	720		40	94	6
2	100	760	760				
3	100	760	760				6
4	100	760		760			
5	100	760		760			6
6	200	864		432			

시험은 그라우트를 상기 혼합비율에 맞게 혼합한 후 Cr⁶⁺를 1일과 5일 후 측정하였다. 측정 결과, 표 15와 같이 공통적으로 액상가소제를 사용한 시료(배합 1, 3, 5번)에서는 Cr⁶⁺이 검출되지 않았으나 그 외에는 검출량의 차이가 있으나 모두 검출되었다. 특히, SC에 비해 OPC에서 높은 검출량을 보였고, 물-시멘트비 200%에서는 가장 높은 검출량을 나타냈다. 따라서 그라우트 중의 Cr⁶⁺의 용출형태는, OPC만을 사용함으로써 가장 높은 검출량이 나타났고, 물과 시멘트의 혼합비율이 높을 경우 용출량도 증가한다는 것을 알 수 있었다.

[표 15] Cr⁶⁺ 검출 결과
 [Table 15] Cr⁶⁺ detection result

측정 항목	측정 재령	검출결과(ppm)					
		1	2	3	4	5	6
Cr ⁶⁺	1일	불검출	0.72	불검출	1.05	불검출	8.74
	5일	불검출	0.71	불검출	1.07	불검출	8.8

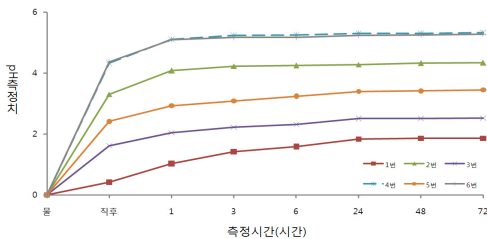
4.7.2 pH측정

그라우트의 pH측정결과 표 16 및 그림 19과 같이 OPC는 SC에 비해 상대적으로 높은 pH 증가를 나타내었고, 반면에 w/c가 높은 경우에는 그렇지 않은 경우와 거의 유사한 pH 증가를 나타내었다. 분말가소제를 사용한 경우에도 그라우트의 가소성 발현이 향상되어 pH증가가 억제된 결과를 보였다. 특히, 액상가소제를 사용한 경우에는 pH증가가 최소한으로 제한된 결과를 보였고, OPC와 SC에서 공통적으로 확인되었다. 따라서 중금속 및 pH의 증가를 방지하기 위한 가장 중요한 요인은 액상가소제인 것으로 평가되었다.

[표 16] pH 측정결과

[Table 16] pH measurement result

시험 순서	pH 측정주기 (시간)						
	직후	1	3	6	24	48	72
수도수	7.6						
1	8.02	8.62	9.02	9.18	9.43	9.46	9.46
2	10.90	11.67	11.82	11.84	11.87	11.92	11.93
3	9.21	9.64	9.82	9.91	10.10	10.11	10.12
4	11.92	12.7	12.83	12.84	12.89	12.89	12.92
5	10.02	10.52	10.68	10.83	10.99	11.02	11.04
6	11.96	12.69	12.76	12.76	12.83	12.85	12.87



[그림 19] 가소제 사용에 따른 pH 변화량
[Fig. 19] Change in pH due to use of plasticizer

4.8 최적배합 산정

최적배합 도출을 위한 실내시험의 분석결과는 아래 표 17과 같으며, 도출된 최적배합을 표 18과 같이 제시하고자 한다.

[표 17] 시험결과 분석표
[Table 17] Analysis of test results table

항 목	시험인자	평가항목	결 과
시멘트	OPC, SC	Cr ⁶⁺ , pH	SC 제안
시멘트량	770, 720, 670	가소성 및 가소성 변화량	720kg 제안
분말 가소제량	0, 40, 80, 120	가소성, 점도, p-con통과시간 및 변화량	40kg 제안
액상 가소제량	0, 3, 6, 9, 12	가소성	6kg 제안

[표 18] 가소성그라우트 최적배합
[Table 18] Optimal plastic grout mix

w/c (%)	A액(kg)			B액(liter)	
	물	SC	분말 가소제	물	액상 가소제
83.8	637	720	40	94	6

5. 현장 적용성 평가

5.1 현장적용성 검토

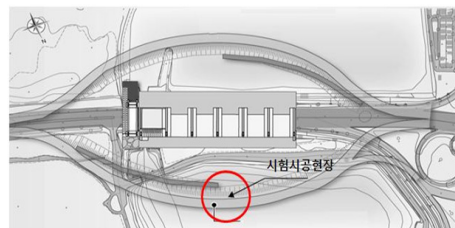
본 논문에서 제시된 가소성 그라우트의 최적 배합비에 대한 검증을 위해 연약지반내의 그라우트 시공을 통해 실제 그라우트 시공의 적용성 여부와 시공된 그라우트 구근에 대한 강도 및 내구성에 대한 실험을 실시하였다.

5.2 현장 소개 및 목적

본 현장의 가물막이 차수 공사는 강을 횡단으로 막고 시트파일을 설치한 후 그라우트로 보강하는 공사로서 그라우팅 중 유해한 일부의 성분이 유출 될 경우, 해양오염 및 수중 생태계 오염 등 심각한 문제를 초래할 수 있다. 이에 현장 시험을 통하여 그라우트의 친환경성 및 내구성 등을 검증하고자 한다.

5.3 현장 배경

시공현장은 낙동강 하구둑에 위치하는 부산시 사하구 하단동 시험시공 현장이며 고분자계 가소성 그라우트 고압시험을 실시하였다. 지층의 하부는 느슨한 점성토이며, 상부는 사질토로 구성되어 있다. 또한 지하수위가 높고 투수계수가 크며, 낙동강과 인접해 있으므로, 일반 시멘트 밀크그라우팅을 수행할 경우 그라우팅 재료의 유실과 더불어 낙동강의 오염을 초래할 수 있으므로, 지하수위에 영향을 받지 않으며 그라우트 재료의 유실시에도 강의 오염을 최소화 시키는 안정적인 내구성 확보가 가능한 친환경적인 재료의 사용이 필수적이다.



[그림 20] 부산시 사하구 하단동
[Fig. 20] Hadan, Saha, Busan

5.3.1 공사목적

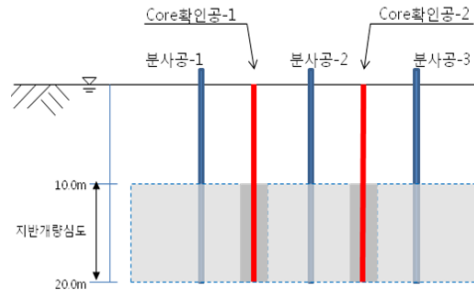
고분자계 가소성 그라우트 고압 시험 시공

5.3.2 공사내용

주열식 그라우팅 시공 후 굴착하여 주입형태 확인하고 Core채취 후 압축강도실험 실시

5.3.3 공법의 특성

고압분사를 이용한 그라우트 주입방식은 고압의 Air 를 도입한 절삭수 또는 그라우트밀크를 $400 \sim 600\text{kgf/cm}^2$ 의 압력으로 지중에 분사하여 지반을 절삭하고 슬라임을 지상으로 배출시킨 후 그라우트 경화체를 형성시키는 공법으로, 시공 후 대상 지반에 대한 지반 형태에 따른 시공의 불확실성을 제거하고 확실한 지반보강 및 차수가 가능한 지반보강 및 차수 공법이다.



[그림 22] 주입공 배치도

[Fig. 22] Grouting plan

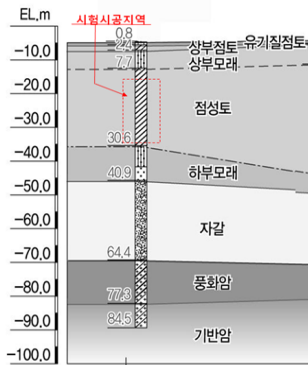
5.4 현장 특성

5.4.1 지층분포 조사

시공현장의 지층 분포는 주입시험공 천공시 지층 조사를 실시하였다. 지역은 낙동강 하류 퇴적층이 널리 분포되어 있으며, 지층 상부는 유기질토와 점토가 지반을 형성하고 있으며, 하부는 모래층, 자갈층, 풍화암 등으로 형성되었음을 알 수 있다. 표층은 유기질 점토층(organic clay layer)와 점토층(clay layer)으로 구성되어 있다. 상부 모래층(sand layer)은 7.7m까지 형성되어 있으며 세사가 혼재된 실트질 지층이다. 점토층(clay layer)는 30m까지 형성되어 있고, 평균적으로 23m의 층후를 보이고 있다.

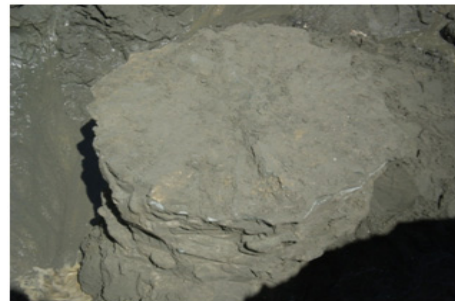
5.5 시공결과

고압분사 후 백호로 분사 구근을 확인하였으며, 그 결과 140cm의 그라우트 경화체가 형성되었고, 코어 시추 후 강도 측정결과 10MPa 이상의 높은 강도를 나타내었다. 현장 시험을 통해 가소성 그라우트의 신뢰성을 평가한 바 실제 계획한 단면에 설계강도의 범위로 구근이 형성되어 연약한 점토층 지반의 강도가 향상됨을 알 수 있었다.



[그림 21] 지반 주상도

[Fig. 21] Soil solumnar



[그림 23] 주입체 확인 전경

[Fig. 23] Check injection views

5.4.2 주입공 배치

시험주입에 필요한 주입공의 수와 배열은 아래 그림 22와 같으며 일반적으로 주입공 간격에 따른 개량효과를 연속적으로 파악하기 위하여 단계별 주입공 배치를 기준으로 하였다. 본 시험에서의 주입구간은 C.T.C=600~800mm와 고압분사 유효경은 800~1200mm로 예상하고, 겹침 거리는 200~400mm로 산정하였다.

[표 19] 코아시료 1축 압축강도 결과

[Table 19] 1-axis compressive strength of core sample results

항 목	결과(MPa)	시험방법
코아-1	11.9	KS F 2426
코아-2	10.5	
코아-3	11.8	

6. 결론

본 연구에서는 고분자계 가소제와 급결성 광물계 가소

제를 사용한 가소성그라우트의 재료적 특성을 검토하고, 최적의 배합을 제시하였으며, 가소성그라우트를 이용한 연약지반의 차수 및 강도보강의 적용여부를 확인하였다. 가소성그라우트의 재료적 특성을 검증하기 위해 재료 사용량에 따른 점도, 가소성, 압축강도의 변화와 투수계수의 범위 및 현장 적용성 검토를 위해 실내시험을 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 가소성그라우트의 배합 특성을 검토한 결과, OPC와 SC모두 가소성에는 양호한 특성을 보였으며, 강도 측면에서 초기에는 OPC가, 장기적으로는 SC가 높은 강도를 발현하였다. 또한 환경적인 측면에서는 SC가 OPC에 비해 pH가 낮게 측정 되었으며, 중금속 검출량에서도 낮은 것으로 나타났다. 따라서 가소성그라우트에서 가소성과 압축강도 발현에는 OPC와 SC가 모두 가능하였으나, 환경적인 측면에서는 SC가 OPC에 비해 안정한 것으로 나타났다.
2. 분말가소제는 그라우트의 가소성과 강도 및 응결에 매우 중요한 작용을 하였으며, 그 사용량이 과다하게 증가될 때는 유동성 손실과 작업성이 저하되었다. 특히, 사용량 40kg이하에서는 가소성이 현저하게 저하되었으며, 80kg이상에서는 시간에 따른 점성증가 및 P-con유하시간이 급격하게 늦어져 장시간 사용에 따른 문제점이 발생 될 수 있을 것으로 예측되었다. 따라서 향후 현장시공 시에는 분말가소제량의 적정사용량에 대한 관리가 필요하며 최적 사용량은 40kg/m³인 것으로 판단된다.
3. 액상가소제는 그라우트에 가소성을 부여하는 작용을 하며, 최적의 가소성을 발휘하기 위한 적절한 범위를 제시하였다. 액상가소제가 6kg/m³에서 적어지거나 초과된 경우는 가소성이 크게 저하되었으며, 특히 6kg을 초과하는 과다한 사용량에서는 응결이 급격히 지연되는 현상이 관찰되었다.
4. 가소제의 사용에 따른 Cr⁶⁺의 용출여부를 검토한 결과, 액상가소제가 사용될 경우는 OPC와 SC의 어떤 경우에서도 Cr⁶⁺이 검출되지 않았으나, 사용하지 않은 경우는 모두 검출 되었다. 특히, 물-시멘트비가 200%로 높아진 경우 100%에 비해 검출량이 증가되었다. pH측정 결과에서도 가소제의 사용시 pH 증가폭이 현저히 줄어들었고, 가소제를 사용하지 않은 OPC만 단독으로 사용시에는 SC에 비해 더 높은 pH증가를 나타내었다. 따라서 환경적인 피해를 줄

이기 위해서는 가소제의 사용이 필수적인 요소이다.

5. 변수위 투수시험 결과 가소성 그라우트 재료의 시편들은 모두 투수계수가 작게 나타나 불투성으로 나타났으며, 급결성 가소성이 완결형보다 강도와 투수계수가 낮은 것으로 확인되었다. 시간이 경과함에 따라 투수가 불투수층에 가까운 범위로 수렴하면서 장기적으로 차수에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
6. 부산지역 낙동강 현장에서 시험시공을 실시하여 평가한 그라우팅의 효과를 분석한 결과, 주입효과는 점성토 지반전체에 구근체가 형성되어 강도 및 불투수효과가 발현된다는 것을 알 수 있었다.
7. 본 연구를 통하여 고분자계 가소성그라우트의 물리적 특성을 파악할 수 있었으며, 가소성그라우트를 이용한 지반보강 및 차수그라우팅 시공시 품질관리 규정을 마련하고 시공결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. 향후, 본 논문에서 분석된 답수에서의 적용과 더불어 일반적으로 그라우팅이 시공되는 해안부근에서의 해수에 대한 영향을 고려한 연구결과도 활용도가 높을 것으로 사료된다.

References

- [1] Seok-hwa Kang, Hang-gil Choi, CHun-sil Park, Jae-ho Noh, "Emergence of instant rigidness ground injection material kind of cement", Korean Society of Civil Engineers, Vol. 50 No. 8, pp. 9-15, 2002.
- [2] Sam-ju Kim, "Field applicability of the soft ground stabilization method by using high-performance grout", Hanyang university, Master's Thesis, 2002.
- [3] Sang-kuy Kim, Engineering behavior of soft clays, pp.5-26, 2010.
- [4] Jin-chun Kim, "Study on the injection properties of ultrafine cement", Hanyang university, Doctoral Thesis, 1999.
- [5] Construction building study for business site, Koomi-books, pp. 180-182.
- [6] Jae-ho Noh, "Study on the application of blast-furnace slag and concrete mix proportion design using blast-furnace slag cement", Korea Concrete Institute, 1995.
- [7] Ju-yang Park, Byoung-sik Cheon, "Soil environmental

- problems caused by cement grouting and Countermeasures*", Korean Geo-Environmental Society, pp. 59-65, 2001.
- [8] Study about the characteristics of minerals NDS Industry using high-performance soil stabilizer, Studies reprot, Changwon university Industrial Technology Institute, pp. 7-39, 2002.
- [9] Byoung-sik Cheon, Jin-chun Kim, "*A Study on the Evaluation of Toxic Effect of Grouting Materials*", Korean Geotechnical Society, pp. 321-326, 1999.
- [10] Byoung-sik Cheon, "*A Study on the Soft Ground Stabilization Method by Using High-Performance Grout*", National Research Foundation of Korea, 2002
- [11] Robert Bowen(1981), "*Grouting in Engineering Practice*", John Wiley & Sons
- [12] Special Construction, Grout injection method plasticity, pp. 11~37.
- [13] Won Huh, "*Practical application for eco-grouting materials*", Dankook university, Master's Theis, 2010.
- [14] Concrete Materials Engineering. pp.149.

장 경 준(Kyung-Jun Jang)

[정회원]



- 2003년 2월 : 단국대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 ~ 2007년 3월 : 청석 Engineering Co. 대리
- 2011년 2월 : 단국대학교 일반대학원 토목환경공학과 (공학박사)

<관심분야>

흙막이구조물, 사면안정, 기초공학, 연약지반

김 학 문(Hak-Moon Kim)

[정회원]



- 1981년 9월 : (영국) Sheffield 대학교 (공학석사)
- 1985년 6월 : (영국) London 대학교 (공학박사)
- 1976년 12월 ~ 1980년 12월 : 대림 Engineering Co. 과장
- 1985년 4월 ~ 1988년 2월 : ICOS - INC.(KOREA) 기술고문
- 1988년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

도심지굴착과 정보화시공, 기초공학, 사면안정, 터널공학