

순결형 그라우트의 초기 전단강도 특성에 대한 연구

A Study on the Initial Shear Strength Characteristics of Sudden Gelation Grout

허 형 석¹ Heo, Hyung-Seok

박 인 준² Park, Inn-Joon

Abstract

In order to analyze the shear strength characteristics of the grout with sudden gelation in the pre-hardening state, the viscosity of the mixture and the indoor vane shear test were performed. The grout was prepared according to the water-cement (w/c) ratio and the shear strength test was conducted. The plastic-state shear strength of grout was affected by the w/c ratio, so the lower the w/c ratio, the higher the initial shear strength was, and the longer the curing time was, the higher the shear strength was. The maximum shear strength occurred at the faster rotation angle as the higher shear strength was developed, and the lower shear strength occurred at the larger rotation angle. In addition, it was confirmed that the pre-hardening grout rapidly decreased in strength after the maximum shear strength was gained, and converged at a certain level after the rotation angle of the vane blade was about 70° to 90°.

요 지

순결 특성을 갖는 그라우트에 대한 경화 전 소성상태의 전단강도 특성을 분석하기 위하여 혼합물의 점도와 실내 베인전단시험을 수행하였다. 그라우트를 물-시멘트비(w/c) 별로 제조하고 전단강도시험을 실시하였다. 그라우트의 소성상태 전단강도는 물-시멘트비에 영향을 많이 받아 물-시멘트비가 낮을수록 초기에 높은 전단강도가 발현되었으며, 양생 시간이 길어질수록 높은 전단강도를 나타내었다. 최대전단강도는 그 값이 클수록 작은 회전각에서 발현되고, 최대전단강도 값이 작을수록 큰 회전각에서 발현되었다. 또한, 겔 상태의 그라우트는 최대 전단강도가 발현 이후 급격히 전단강도가 저하되고 베인날의 회전각이 약 70°~90°이후에는 일정한 수준으로 수렴되는 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : Gout, Pre-hardening state, Shear strength, Sudden gelation, Vane test

1. 서 론

문명화 과정에서 자연훼손을 최소화하면서도 개발과 보존을 동시에 만족할 수 있는 주요한 구조물은 터널로

판단된다. 이런 터널의 굴착 과정은 매우 중요하고 다소 위험한 상황에 노출될 수 있으므로 이를 해결하기 위해 굴착지반을 보강하기 위한 다양한 보조공법들이 개발되어 터널 굴착 시 안정성 확보에 큰 기여를 하고 있다.

1 정회원, 엠엠이앤씨 기술연구소 소장 (Member, Research Director, MM E&C, Tel: +82-31-355-6449)

2 정회원, 한서대학교 인프라시스템학과 공항토목전공 교수 (Member, Prof., Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, geotech@hanseo.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

그 중 NATM방식으로 시공되는 터널에서 강관보강 다단그라우팅 공법은 터널 굴착 초기에 안정성 확보를 위해 매우 중요한 공정으로 시공방법과 시공자재(강관 등) 등을 개발하고 발전시키기 위한 다양한 연구가 학계 및 업계에서 진행되어 왔다(Kim et al., 2020).

강관보강 다단그라우팅의 핵심 기술은 지반보강을 위한 강관의 삽입과 이것을 원지반에 일체화시키기 위한 그라우팅 시공으로 구성된다. 강관은 형태에 따라 소구경과 대구경으로, 주입 공정은 다단주입과 동시주입으로 구분되고 그라우트는 실재와 본주입재로 구성된다. 그라우트는 강관과 주변지반을 일체화시키는 역할과 동시에 굴착 주변지반에 침투하여 차수효과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

강관보강 다단그라우팅의 주입 형태는 (1)천공 (2)강관보강재삽입 (3)코킹 (4)실재주입 (5)양생 (6)주입팩커 설치 (7)본주입재 다단 주입 (8)양생으로 진행되며, 상기 공정에서 실재와 주입재의 양생에 필요한 시간이 각각 소요되어 총 공기가 길어지는 주요 원인으로 고려된다(Ahn and OH, 2018). 상기 요인을 개선하기 위해서 최근에 실재와 본주입재를 동일한 자재로 일시에 주입하는 방식이 도입되어 시공됨으로써 상기 실재의 양생에 필요한 시간을 제거함으로써 공기 단축을 실현하게 되었다.

그라우트는 시멘트를 주재료로 사용하는 시멘트계와 시멘트를 사용하지 않고 우레탄 등의 고분자를 사용하는 고분자계로 대별 될 수 있으며, 일반적으로 시멘트계는 시멘트와 급결재의 조합으로 이루어진다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트나 마이크로시멘트를 사용하고, 급결재는 각 공법별 특성을 나타낼 수 있는 규산계열이나 급결광물계열 또는 아크릴고분자계열 등을 사용할 수 있으며, 겔화 특성에 따라 초급결성, 급결성, 완결성, 순결성을 시공조건에 따라 다양하게 적용 할 수 있다(Heo et al., 2012). 현재는 실재와 본 주입재의 물리적 특성을 확인하기 위한 방법으로는 약재의 겔화 시간과 경화 이후 일축압축강도를 측정하는 것이 보편적으로 사용되고 있으나, 그라우트가 겔화된 이후부터 경화되는 과정인 소성상태의 전단강도 변화는 고려하고 있지 않다. 주입재의 소성상태 전단강도를 알고 있을 경우 상기 강관보강 다단그라우팅 공정을 더욱 효율적으로 관리하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

2. 강관보강 다단그라우팅의 주입재 특성

2.1 기술적 특성

강관보강 다단그라우팅 기술에서 구조적으로 터널의 안정성에 기여하는 요소는 강관의 물리적 특성이며, 그라우트의 구조적 기여도에 대해서는 다양한 의견이 제시되고 있으나 아직까지는 명확히 확립되지 못한 것으로 생각된다. 그러나 실제 현장에서 그라우트의 역할은 매우 중요하게 고려되고 있으며, 그라우트재를 개선하고 적절히 사용함으로써 기술을 보완할 수 있다는 의견들이 제시되고 있다. 터널은 매우 다양한 환경 하에서 건설되고 있으므로 보강재와 원지반 간의 부착, 원지반을 통한 지하수의 유입 감소 및 지반 절리에 대한 보강 등은 그라우트재를 주입함으로써 얻을 수 있는 유리한 효과라 할 수 있다(Kim et al., 2020).

2.2 재료적 특성

그라우트가 겔화되기 위해서는 시멘트(A액)와 특정한 급결재(B액)를 혼합해야 하고, 이것의 효과로 인해 특정 시간이 지난 후 그라우트가 겔화 및 경화 과정에 들어가게 된다. 그라우트의 겔화 특성을 시간에 따라 구별하면 일반적으로 급결형과 완결형이 있으나 경우에 따라서는 초급결형과 순결형을 추가할 수 있다. 초급결형은 급결형을 개선한 형태로써 겔화 시간을 더욱 빠르게 설계된 그라우트이다. 겔화 시간에 대한 명확한 학술적인 기준이 확립된 것은 아니나 일반적으로 초급결형의 겔화 시간은 10초 이내로 고려된다. 급결형은 A액과 B액이 혼합되면 일정 시간 동안 액체 상태를 유지하고 이후 급격히 소성상 겔을 형성한 이후 경화 상태로 진입하게 되어 강도를 발현한다. 급결형이 겔화되는데 소요되는 시간은 대략 30초 이내이며, 이것을 측정함으로써 현장에서 그라우트의 품질을 간편히 평가할 수 있다. 완결형은 급결형과 경화 메커니즘은 동일하나 각 과정이 매우 길게 이루어진다는 차이점을 나타낸다. A액과 B액이 혼합되고 상당 시간 동안(약 60초) 액체 상태를 유지하고, 이후 졸 상태와 유동화 겔 상태(약 30~60초)를 거쳐 소성화 겔로 진행된다. 이후 시간이 경과되면서 강도를 발현하게 되나 급결형보다는 매우 긴 시간 동안에 이루어지게 된다. 순결형은 A액과 B액이 서로 혼합된 직후 겔화 특성을 나타내게 되는데, 혼합직후 짧

은 시간의 줄 형태와 유동화 켈 상태를 거쳐 점차적으로 소성화 켈로 진행되고 이후 전단강도가 증가되면서 경화하게 되는 특성을 나타낸다. 순결형은 다른 형태(초급결, 급결, 완결형)가 액체에서 고체로 변화하는데 반해, 액체-졸(점성체)-(소성)켈-고체로 변화하는 형태를 보인다(Heo, 2011).

2.2 그라우트의 성능측정 방법

현재까지 그라우트의 성능을 평가하는 방법으로는 2가지가 일반적으로 사용되고 있다. 첫째는 켈화 시간이고 나머지 하나는 일축압축강도이다. 반면에 그라우트가 켈화된 이후 압축강도가 발현되기까지의 기간(소성화 켈 상태) 동안의 강도변화에 대해서는 검토한 사례가 미비한 실정으로 조사되었다. 본 연구에서는 상기 그라우트 소성화 켈 상태에서의 전단강도 변화를 측정하기 위하여 실내시험용 베인전단시험기를 개발하였고, 본 시험기를 사용하여 그라우트의 소성 상태에 대한 전단강도를 측정하였다.

3. 시험 내용 및 결과

3.1 시험 개요

본 연구에서 검토한 그라우트는 순결형을 선정하였다. 순결형은 앞 절에서 설명한 바와 같이 급결형 및 완결형과는 다르게 그라우트 A액과 B액이 혼합된 이후 줄 형태와 유동화 켈 및 소성화 켈 상태를 모두 나타내고 있으므로 그라우트의 소성 상태 전단강도 측정에 매우 적합할 것으로 판단된다. 그라우트는 국내에서 개발된 000공법의 약재 E1과 E2를 사용하였으며, 이를 다양한 조합으로 구성한 후 각 시간대별로 전단강도를 측정하였다. 배합의 구성은 켈 상태의 지속시간에 따라 10초

(UHG) 이내, 30초(HG) 이내 및 90초(SG) 이내로 각각 설정하고 전단강도 측정 시간은 혼합직후, 1시간, 3시간, 6시간 그리고 18시간으로 하였다. 순결형 그라우트와 대조군으로써 현장에서 일반적으로 사용되는 시멘트-벤토나이트 혼합물과 벤토나이트 혼합물에 대하여 검토하였다.

베인전단시험은 ASTM D 2573-72 Standard method for FIELD VANE SHEAR TEST IN COHESIVE SOILS (User's Guide, 1978) 규격에 준하여 수행하였고, 시험기 및 규격은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었고, 베인전단날은 아래 Table 2 및 Fig. 2와 같이 제작하고 시험은 AX규격으로 수행하였다.

베인전단시험기는 전단날에 걸리는 최대 회전모멘트 (Torque, kgf·cm)를 이용하여 전단강도를 구할 수 있는데, 전단강도의 계산은 아래 식과 같이 흙을 전단시키는

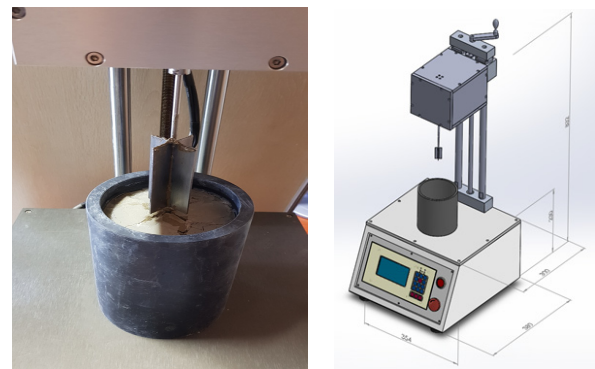


Fig. 1. Vane shear tester

Table 1. Composition of vane shear tester

Date	Unit	2019-08-13 3:28:33
SaveTimeGap	Second	1
Speed	Ang(°)/Min	60
LoadLimit	kgf·cm	20
MMLimit	Angle(°)	360
EndMethod		Displacement limit

Table 2. Recommended specifications for field vanes^a

Casing size	Diameter inch (mm)	Hight inch (mm)	Blade thickness inch (mm)	Diameter of the vane rod inch (mm)	Comment
AX	1 1/2(38.1)	3 (76.2)	1/16 (1.6)	1/7 (3.6)	ASTM D 2573-72
BX	2 (50.8)	4 (101.6)	1/16 (1.6)	1/7 (3.6)	
NX	2 1/2 (63.5)	5 (127.0)	1/8 (3.2)	1/7 (3.6)	
4 inch (101.6 mm) ^b	3 5/8 (92.1)	7 1/4 (184.1)	1/8 (3.2)	1/7 (3.6)	

^a The smaller the consistency (hardness) of the soil to be tested, the larger the vane should be used

^b Inside diameter

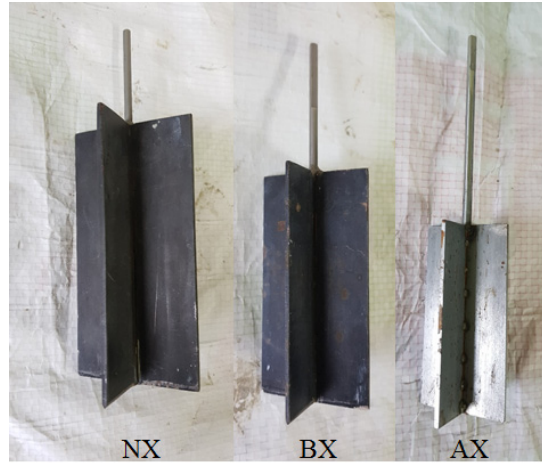
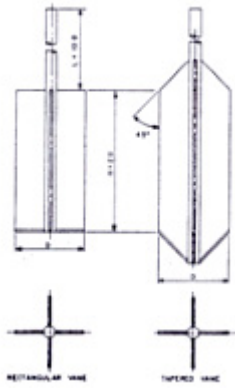


Fig. 2. Vane blade

데 필요한 최대 회전모멘트를 구하는 식에서 얻을 수 있다.

$$T = s \times K \quad (1)$$

여기서, T : 회전력(N·m)

s : 점토의 전단강도(kPa)

K : 베인의 치수와 형태에 따른 상수

시험을 통해 알아내고자 하는 것은 s의 값이므로 위 (식 (1))을 다음과 같이 바꾸어 쓰는 것이 보다 실용적이다.

$$s = T \times \kappa \quad (2)$$

여기서, κ : 1/K

T : 회전력

전단강도가 원주의 양끝까지 균일하게 분포한다는 가정하에 K값은 다음과 같이 계산된다.

$$K = \frac{\pi}{10^6} \times D^2 \frac{H}{2} \times \left(1 + \frac{D}{3H}\right) \quad (3)$$

여기서, D : 베인의 지름(cm)

H : 베인의 높이(cm)

베인의 폭에 대한 길이의 비는 2 : 1 이기 때문에 K값은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$K = 0.00000366D^3 \quad (4)$$

끝이 뾰족한 베인의 K값은 다음과 같은 보정이 이루어져야 한다.

$$K = \frac{1}{10^6} [\pi D^3 + 0.37(2D^3 - d^3)] \quad (5)$$

위 식에서 d는 룯드의 지름이며 mm단위로 표현된다. 예를 들면, 1.27mm의 룯드에서는 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$K = 0.00000388D^3 - 0.00000076 \quad (6)$$

3.2 실험 내용

연구에 사용된 재료는 순결형 특성을 나타내는 000 공법의 E1 및 E2를 사용하였고, 비교군으로 벤토나이트를 사용한 그라우트를 선정하였다. 사용된 재료의 화학적 특성은 Table 3~Table 5에 나타내었다.

배합은 Table 6과 같이 물-시멘트비(w/c)를 기준으로 100%, 125% 및 150%를 선정하였으며, 벤토나이트를 사용한 것은 347%를 선정하였다.

순결형은 시멘트와 E1 및 E2를 일정하게 하고 물량을 조절하여 배합비를 설정하였다. 배합 특성을 상기와 같이 설정한 이유는 w/c 만을 인자로 고려하기 위해서이다. 벤토나이트의 경우는 현장에서 실재(seal재)로 일상적으로 사용되는 배합을 선정하였다.

베인전단강도 측정에 앞서 그라우트의 겔화 시간을

Table 3. Chemical composition of Cement and E2

(%)

Item	Specific gravity	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	Total
Cement	3.15	22.2	5.2	3.1	64.2	1.4	2.1	0.2	0.6	0.7	99.7
E2	2.8	6.8	24.6	1.9	42.6	1.5	20.5	-	-	0.4	98.3

Table 4. Physical Properties of E1

Item	Viscosity (cps)	Specific gravity	pH	Color
E1	5.61	1.055	2.8	Milky white

Table 5. Chemical composition of Bentonite

(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	ig-loss
60~70	15~20	1~5	3~5	1~3	1~5	0.1~1.0	10~15

Table 6. Composition of Grout

Items		w/c	Water	Cement	E2	E1	Bentonite
Sudden gelation	UHG	100%	590	540	50	20	-
	HG	125%	738	540	50	20	-
	SG	150%	885	540	50	20	-
Bentonite	Non hardening	-	910	-	-	-	62.5
	Hardening	347%	910	200	-	-	62.5

측정하였다. 겔화 시간을 측정하기 위한 표준 방법은 제정되어 있지 않으나, 업계에서 관행적으로 겔화 시간을 측정하는 방법은 컵에 의한 혼합측정방법이다. 이것은 그라우트 혼합액 정량을 계량하고 각각 용기에 담은 후 그라우트 혼합액을 상대편 용기에 투입하고 이어서 다른 용기에 투입하는 행위를 반복함으로써 혼합이 되고 이 과정에서 그라우트 혼합액이 흐르지 않는 시간을 측정하여 겔화 시간으로 인정한다. 따라서, 본 연구에서도 배합조건에 맞게 각 재료를 용기에 넣고 충분히 혼합한 후 그라우트 혼합액을 컵에 준비하고 혼합한 후 그라우트가 유동성을 멈추는 시간을 측정하였다.

3.3 실험 결과

그라우트의 특성을 구별하기 위해 겔화 시간을 측정하여 Table 7에 나타내었다. 순결형은 특성상 A, B액이 혼합되면 즉시 졸 상태가 되고 이후 일정 시간이 지나면 겔화되는 특성을 나타내므로 이러한 과정을 거쳐 겔화

Table 7. Test result of grout gel-time

w/c	Gel-time (second)	Symbol
100%	7	UHG
125%	23	HG
150%	77	SG

시간이 10초 이내는 UHG, 30초 이내는 HG 및 90초 이내는 SG로 판정한 후 실험을 진행하였다. 실험 결과 Table 7에 나타난 바와 같이 w/c에 따른 겔화 시간은 각각 7초, 23초 및 77초로 나타났으며, 이를 UHG, HG 및 SG로 표기하였다.

벤토나이트의 경우에는 Table 8 및 Fig. 3과 같이 급결재를 사용하지 않았으므로 겔화 시간을 측정하지 않았고, 대신 점도를 측정하였다. 벤토나이트의 경우는 2종류를 준비하여 1종류(비경화형)는 벤토나이트와 물을 혼합한 후 점도를 시간대별로 측정하였고, 다른 한 종류(경화형)는 벤토나이트와 물을 혼합 후 24시간 동안 밀봉하여 충분히 팽윤될 수 있도록 하고, 이후 시멘트를

Table 8. Result of Bentonite mixture viscosity measurement

Items	Viscosity (cps. spindle S61 Brookfield)					
	Initial	1hour	2hour	6hour	12hour	24hour
Non-hardening	55.7	67.2	73.5	91.1	106.5	126.5
Hardening	0	0	0	0	hardened	hardened

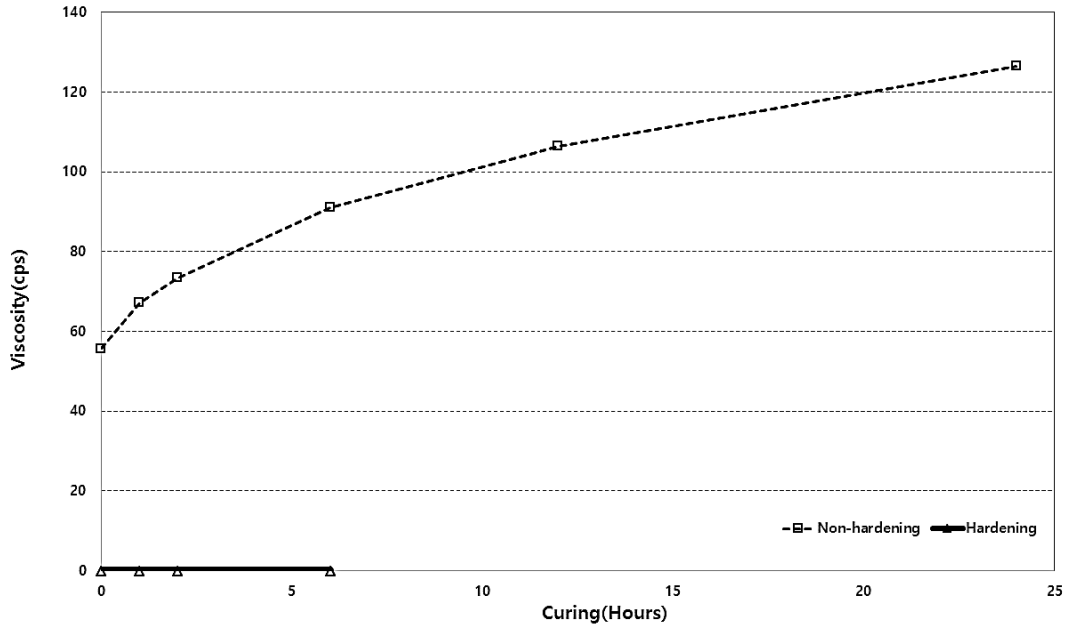


Fig. 3. Result of Bentonite mixture viscosity measurement

추가 혼합하여 시간대별로 점도를 측정하였다. 측정 결과 비경화형은 혼합 초기 점도가 증가하여 24시간 동안 지속적으로 점도 증가를 나타내었으나, 경화형의 경우 시멘트를 혼합한 즉시 점도가 낮아지고 이후 6시간 동안 점도의 증가가 발생되지 않다가 12시간에서는 경화가 이루어졌다. 두 결과의 차이는, 시멘트를 벤토나이트 혼합액에 추가할 경우 벤토나이트가 흡수한 물과 시멘트 중의 양이온간의 이온교환에 의해 발생된 결과로 판단된다.

베인전단시험기를 사용하여 소성 상태의 그라우트에

대해 베인전단시험을 실시하였다. 시험은 그라우트를 배합 비율에 따라 혼합하고 즉시 몰드를 제작한 후 1시간, 3시간, 6시간, 18시간의 간격을 두고 베인전단시험을 실시하였다. 진행은 그라우트를 혼합하고 베인시험용 몰드를 제작한 후 시료에 베인날을 삽입한 다음 베인날을 1초당 1도 단위로 360도 까지 자동 회전하면서 전단날에 걸리는 토크값(torque, kgf·cm)과 이때의 회전각(angle, °)을 기록하도록 설정하였다. 전단강도 측정기의 최대 Torque의 한계로 인해 그라우트의 종류별 전단강도는 아래 Table 9에서 보는 바와 같이 UHG은 초기 1

Table 9. Result of vane shear test

Items		Max Torque (kgf.cm)	Top Angle (°)	Max Angle (°)	Blade
UHG1h	v1	2.215	7.45	360.1	AX
	v2	2.212	8.50	360.2	AX
	v3	2.511	7.39	360.8	AX
HG1h	v1	0.759	18.02	360.1	AX
	v2	0.753	18.04	360.3	AX
	v3	0.797	19.82	360.8	AX
HG6h	v1	1.407	7.95	360.1	AX
	v2	1.451	8.77	360.5	AX
	v3	1.500	7.27	360.7	AX
SG1h	v1	0.621	17.01	360.1	AX
	v2	0.594	19.56	360.5	AX
	v3	0.660	16.84	360.6	AX
SG6h	v1	1.013	7.51	360.1	AX
	v2	0.975	10.01	360.2	AX
	v3	1.108	7.70	360.3	AX

시간에서 만 측정이 가능하였고, HG와 SG는 1시간과 6시간에서 측정이 가능하였다.

Table 9의 Max Torque와 식 (2)를 사용하여 전단강도 (Table 10)를 산출하였다. 모든 경우에서 w/c가 낮을수록 초기 강도가 증가하고 높을수록 감소하며, 양생 시간이 길수록 전단강도는 증가한다. UHG는 1시간 강도가 HG나 SG의 6시간 강도보다 높게 발현되었고, HG와 SG의 1시간 전단강도는 유사한 값을 나타내었다. 각 종류별 세부사항은 아래에 설명하고자 한다.

UHG는 젤타임이 매우 짧은 특성에 맞게 Torque값이 전단날의 회전 초기에 상당히 급격하게 상승하여 최대의 값을 나타내고 이후 가파른 하강을 보인다. 최대 Torque가 발생된 angle은 7~8°범위 이고 이때의 최대 Torque는 평균 2.31kgf·cm(0.225(N·m)) 전단강도는 평균 1,109kPa이었다. Fig. 4에서 전단날이 회전함에 따라 급격히 Torque가 증가하여 최대치에 도달한 직후 급격히 저하되어 약 angle 70° 이후에는 완만한 경사를 두고 저하되는 것으로 나타나, 최대 Torque 이후에 잔류강도

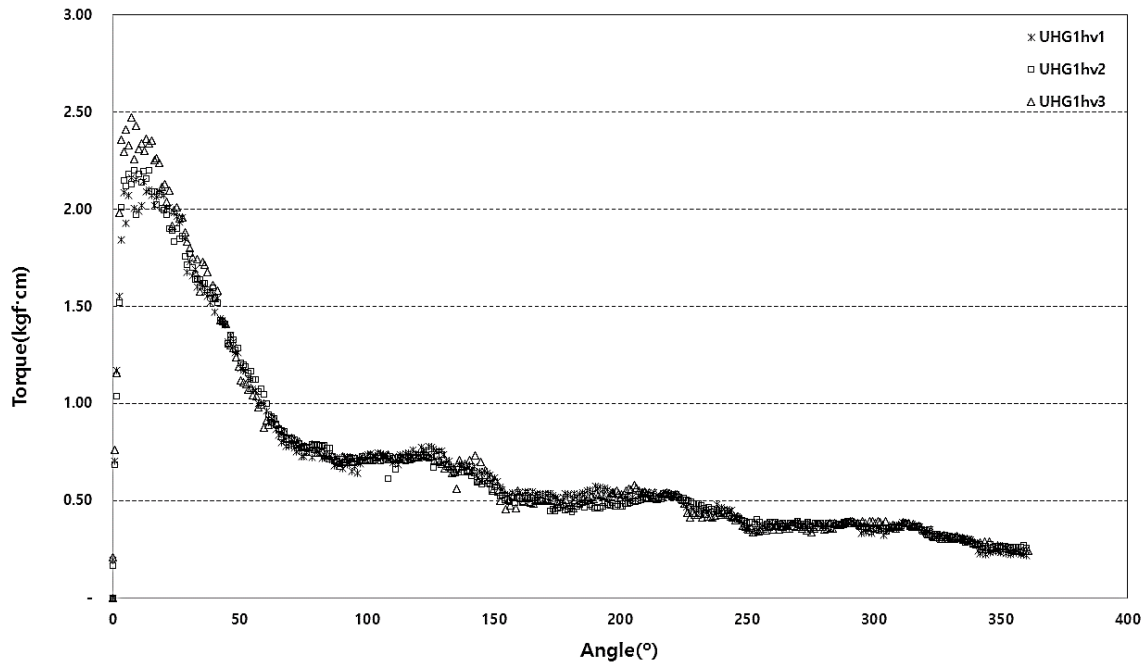


Fig. 4. UHG vane shear graph

Table 10. Shear strength calculation result

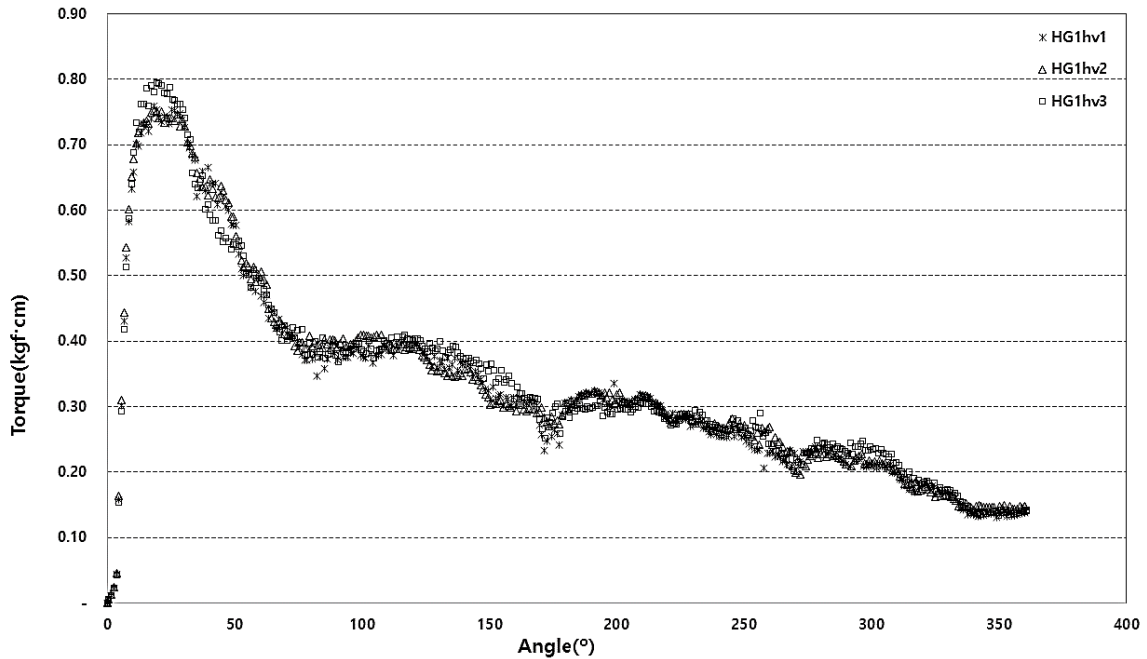
Items	Time	T (N·m)	D (cm)	K	κ	s (kPa)
UHG	1hr	0.211	3.81	0.000202421	4,940	1,041
		0.217	"	"	"	1,071
		0.246	"	"	"	1,215
HG	1hr	0.074	"	"	"	368
		0.074	"	"	"	365
		0.078	"	"	"	386
	6hr	0.138	"	"	"	681
		0.142	"	"	"	703
		0.147	"	"	"	726
SG	1hr	0.061	"	"	"	301
		0.058	"	"	"	288
		0.065	"	"	"	319
	6hr	0.099	"	"	"	491
		0.096	"	"	"	472
		0.109	"	"	"	536

는 매우 낮은 것으로 파악된다. 베인전단시험에서 베인 날이 45°이상 회전하면 시료가 완전히 전단되는 것으로 사료되나 실제 시료는 angle 45°의 약 17~19%(7~8°)에서 최대치를 나타내고 이후에는 급격한 전단값의 저하를 보인다. 이후에는 베인날의 회전 angle이 90°, 180°, 270°에서 약간 증가되는 것을 보여주고 있으나, 이것은 방사형의 전단날이 최초 삽입된 위치에 정확히 도착함

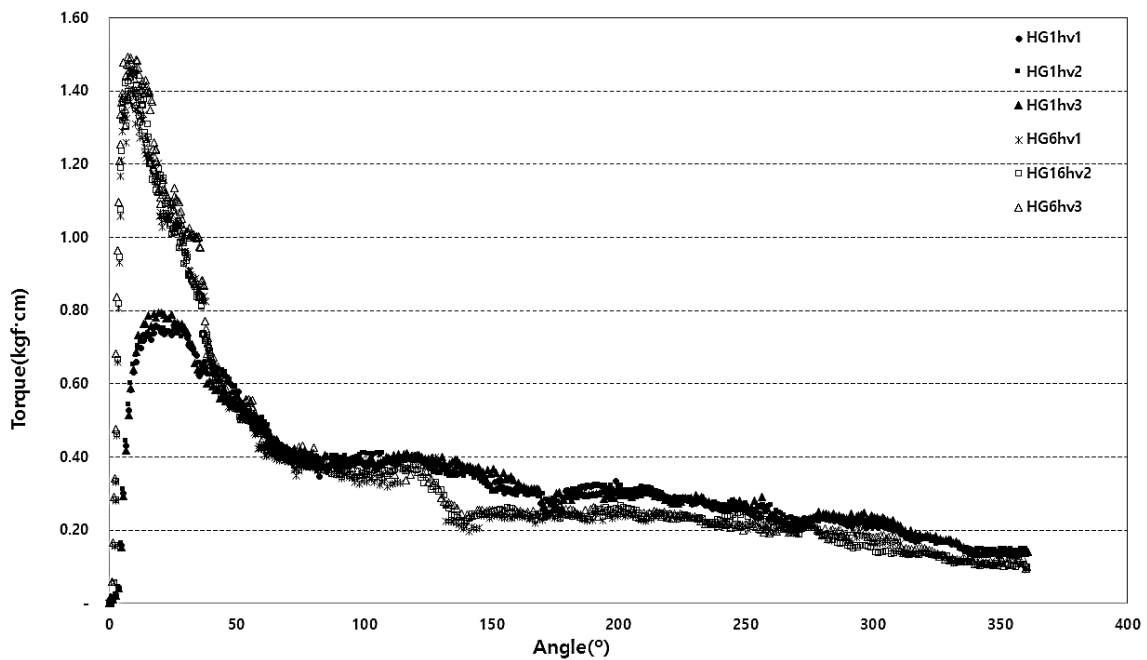
으로써 반복되는 것으로 판단되며, 전단값의 큰 증가가 아니므로 본 연구에서는 심각한 고려를 하지 않았다.

더불어, 6시간 경과 후 전단강도 측정 시 그라우트의 경화 과정이 진행되어 전단날이 시료안으로 관입 되지 않아 이후의 전단시험을 중단하였다.

HG는 시료 제작 후 1시간(Fig. 5(a))과 6시간(Fig. 5(b)) 경과 후 베인전단시험을 실시하였고, 이후 18시간에서



(a) HG vane shear graph (1hr)



(b) HG vane shear graph (1hr, 6hr)

Fig. 5. HG vane shear graph

는 시료가 경화되어 베인날이 삽입되지 않아 진행이 불가능하였다. HG의 1시간(HG1hv1~HG1hv3) 최대전단강도 평균은 373kPa이었고, 6시간(HG6hv1~HG6hv3)은 703kPa로 나타나 1시간 전단강도에 비해 약 89%가 상승한 것을 알 수 있었다. 전단 Torque값은 최대전단강도가 클수록 전단날의 회전 초기에 급격하게 상승하여 최대값을 나타낸 후 급격히 하강하는 경향을 나타낸다. 그래프 형태를 보면 6시간 그래프에서는 1시간 그래프에 비해 상이 언급한 것과 같이 최대 Torque가 나타나는 형상이 더욱 가파르고 좁은 폭을 보이고 있으며, 최대 Torque값은 시료가 완전히 전단되는 45°회전을 기준으로 1시간 측정 시 40~44%(18~20°)에서 이루어졌고 6시간 측정 시 16~18%(7~9°)에서 이루어졌으며 이후 급격히 저하된 전단값은 1시간에 비해 낮게 형성됨으로써 전단이 된 이후 전단면 그라우트의 접착력이 상대적으로 낮다는 것을 잘 보여준다. 또한 전단 이후에는 UHG와 유사하게 완만한 경사로 감소되면서, 베인날 회전 angle이 90°, 180°, 270°에서 약간 증가되는 유사한 경향을 보여준다. Fig. 5는 그라우트가 최초 주입된 이후 경화되는 과정에서 전단강도가 증가되는 것을 잘 보여주고 있으며, 그 단계를 더 촘촘히 측정할 경우 소성화된 그라우트에 대한 더욱 유용한 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

SG에 대한 베인전단시험은 Fig. 6에 나타내었다. 실

험은 시료 제작 후 1시간, 6시간 및 18시간 간격으로 수행하였다. 18시간의 경우 AX로는 실험기의 최대 Torque 값을 초과하여 측정이 불가능하였다. SG의 1시간(SG1hv1~SG1hv3) 최대전단강도는 평균 303kPa이었고 6시간(SG6hv1~SG6hv3)의 경우 500kPa로 발현되었다. 1시간 그래프에서는 최대 전단값에 도달한 이후 잔류 전단강도가 6시간 그래프에 비해 최대값 대비 높은 비율로 형성되는 것을 확인하였다. 6시간 그래프는 1시간에 비해 좀 더 가파르게 최대값에 도달하고 이후 시료가 파괴되어 급격한 강도 저하가 발생되면서 베인날이 약 90°를 회전한 이후에는 큰 하락이 없이 점진적인 감소를 보인다. 최대전단강도를 나타내는 베인날의 회전각도는 1시간의 경우 16~20°에서 발생되었고, 6시간의 경우 7~10°에서 발생되었다. 이것은 베인날 angle 45%의 37~43%와 17~22%에 해당하는 값이다.

UHG와 HG 및 SG의 파괴각 간의 연관성을 검토하면, HG1h의 전단강도와 SG1h의 전단강도는 각각 373kPa와 303kPa이며 이때 최대전단강도가 발생된 회전각은 각각 18.6°와 17.8°이었으며, UHG1h와 HG6h 및 SG6h에서도 유사한 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 전단강도가 근사치에서 유사할 경우 파괴각 또한 근사한 범위에서 발생된다는 것을 추정할 수 있다.

Fig. 7에서는 시간대별 그라우트의 전단그래프를 나타낸다. 1시간 전단실험(Fig. 7(a))에서 HG와 SG는 낮

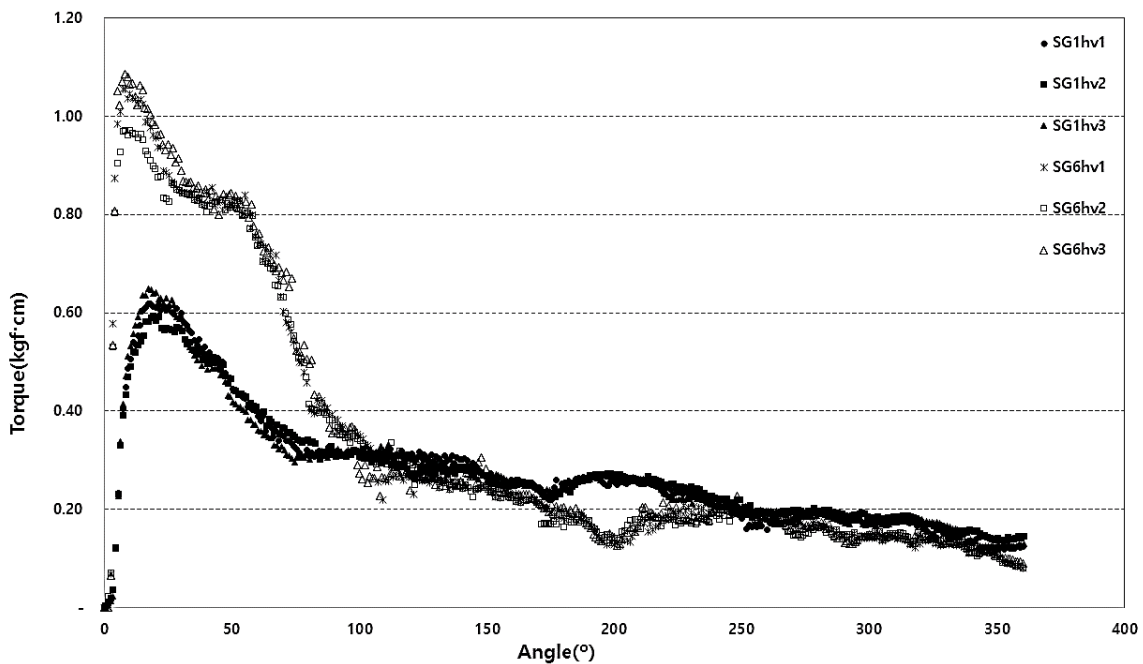
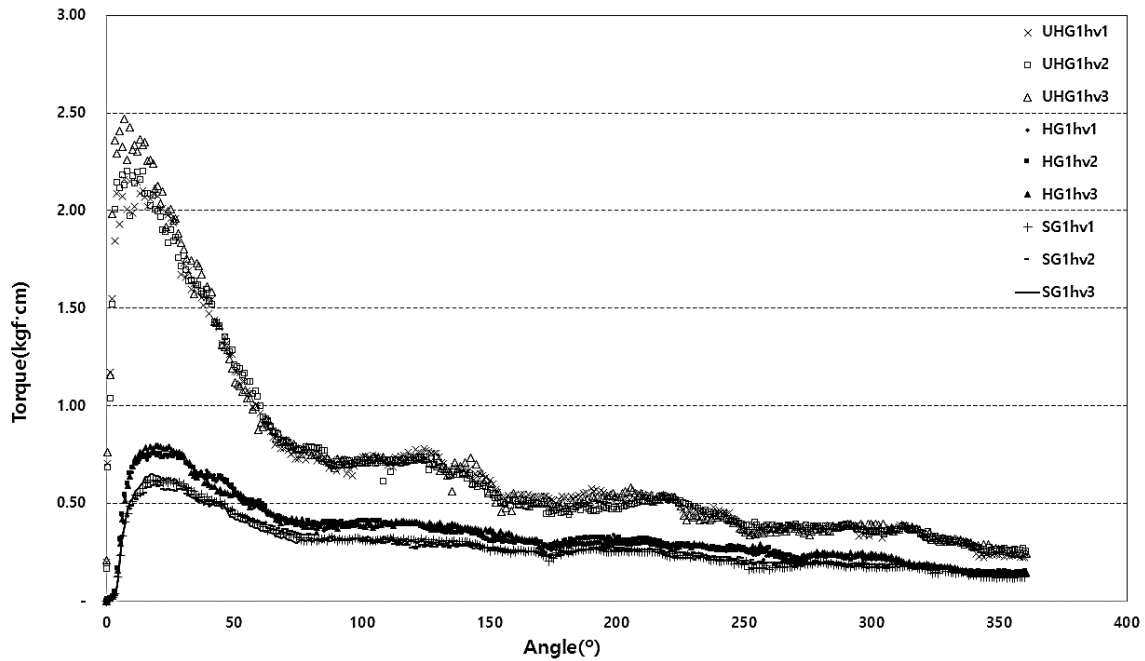


Fig. 6. SG vane shear graph (1hr, 6hr)

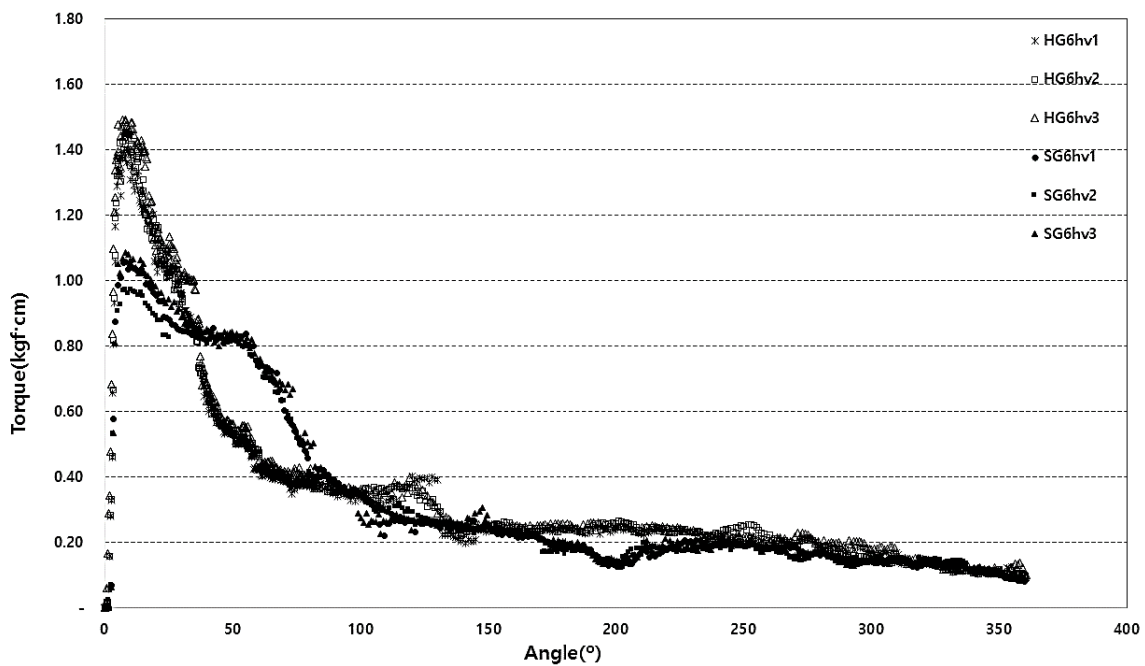
은 최대 Torque값과 유사한 그래프를 보이는 반면 UHG는 상당히 높고 가파른 그래프를 보여준다. Fig. 7(b)에서는 6시간의 베인전단 측정치를 나타내었다. HG와 SG는 1시간과 유사한 경향으로 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 최대 전단값 이후 HG는 전단강도가 급격히 저하되는 반면, SG는 완만한 전단강도의 저하를 나타낸다. 이후 회전 angle 80° 이후에는 큰 변화없이 일정한

형태의 전단강도 저하를 나타낸다. Fig. 7(c)는 양생에 따른 최대 Torque값의 증가를 나타내었다. HG와 SG는 1시간 양생에서 근사한 차이를 보이는 반면 6시간 측정에서는 그 차이가 커지는 형태로 나타나며 시간이 더 경과할 경우 그 차이는 매우 커질 것으로 예상된다.

급결재를 사용한 경화형 그라우트에서 켈화된 그라우트가 시간이 경과되면서 경화 단계로 진행되는데, 이

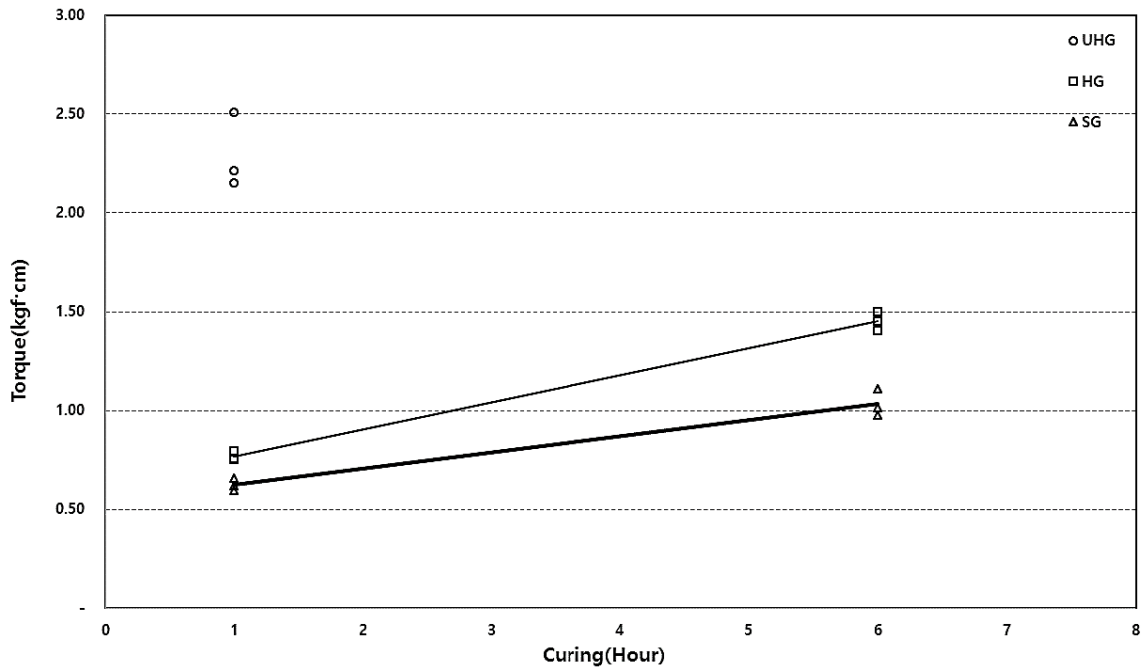


(a) Vane shear test result (1hour)



(b) Vane shear test result (6hour)

Fig. 7. Vane shear test results



(c) Increase of Max Torque according to curing

Fig. 7. Vane shear test results (Continued)

때 특정 시간이 경과하면 이전과는 달리 강도가 급격히 증가되는데, UHG의 경우 1시간에서 6시간 사이에서 발생되고 HG와 SG는 6시간에서 18시간 사이에 발생될 것으로 예상된다. 이 기간을 좀 더 세분하고 확장하여 그라우트의 전단강도를 측정할 경우 현장에서 필요로 하는 그라우트에 대한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

강관보강 다단그라우팅 기술에서 동시주입방식에 적용이 가능한 순결형 그라우트에 대하여 겔화 이후 경화 과정에 들어가기 전까지 그라우트 소성 상태의 전단 특성을 파악하기 위하여 실내용 자동식 베인전단 시험기를 제작하고 이를 이용하여 그라우트 종류별로 전단강도를 측정하였다. 그라우트의 종류는 물시멘트비 및 겔화 시간에 따라 UHG, HG 그리고 SG로 구별하였고, 겔화 이후 1시간과 6시간에 대하여 베인전단시험을 진행하였다. 실험 결과 모든 시료에서 명확한 파괴 형태를 얻을 수 있었고, 파괴 시 최대전단강도와 이때의 회전각을 구할 수 있었다. 본 연구의 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 벤토나이트를 사용할 경우 벤토나이트는 물과 혼합 직후부터 시간이 지날수록 점도가 증가하여 약 24시간 후에는 초기 점도보다 4배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 반면에, 24시간 동안 발포된 벤토나이트에 시멘트를 혼합할 경우 즉시 점도가 저하되어 측정되지 않았으며, 이후 12시간 후에는 경화되었다. 이것은 벤토나이트가 시멘트에서 용해된 양이 온의 이온교환 작용에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 시멘트와 벤토나이트를 혼합하여 사용할 때는 사용량을 증가시키는 등의 조치가 필요하다.
- (2) 순결형 그라우트에 대한 베인전단시험은 UHG, HG 그리고 SG로 구분하여 진행하였고, 실험 결과에서 최대 Torque값을 구한 후 식 (2)를 이용하여 전단강도를 산출하였다. 전단강도 평균값을 살펴보면 UHG는 1시간에 1,109kPa, HG는 1시간에 373kPa, 6시간에 703kPa 그리고 SG는 1시간에 303kPa, 6시간에 500kPa이 발현되었다.
- (3) 전단시험은 ASTM D 2573-72규격을 따랐으며 AX 날을 사용하여 진행하였다. UHG는 1시간 측정 후 6시간 사이에서 경화되었고 HG와 SG는 1시간과 6시간 측정은 가능하였으나, 18시간에는 경화되어 더 이상 측정이 불가능하였다.
- (4) 전단 그래프를 분석한 결과 전단강도가 높을수록 전

단날의 초기회전에서 빠른 파괴가 발생되었고, 강도가 낮을 경우는 상대적으로 늦게 파괴가 발생되었다. 또한, 파괴 이후에도 높은 전단 강도를 보인 시료에서는 빠른 강도저하를 보인 반면, 낮은 전단 강도를 보인 시료에서는 전단 이후에도 상대적으로 높은 잔류강도를 나타내었다.

- (5) 모든 시료에서 전단 angle값이 10~20°사이에서 저항치(Torque)값이 최대로 올라가고 이후 급격히 Torque 값이 감소하여 angle 70° 근처까지 하강한 후 이후에는 점진적인 감소를 나타내었다. 전단 angle과 그라우트의 전단메커니즘과의 연관성에 대해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구에서는 실내 베인전단 시험기를 개발하여 순결형그라우트에 대한 초기 결화 이후 경화 단계에 들어가기 전까지의 전단강도의 변화를 검토하였다. 실험은 그라우트에 한하여 수행하였으나 향후에는 시험기를 활용한 일반 토질에 대한 적용과, 세밀한 전단강도의 측정 및 일축압축강도와의 관계를 추가적으로 연구하여 강관보강 다단그라우팅 기술에 더욱 효율적인 정보를 제공할 계획이다.

참고문헌 (References)

1. Kim, N.S., Choi, G.S., and Kim, S.H. (2020), "Applicability Analysis of an Improved Multistep Steel Pipe Grouting Method in Shallow Depth Railway Tunnels in Considering Safety and Constructability", *the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.40, No.1, pp.97-99.
2. Ahn, J.H. and OH, J.H. (2018), "Evaluation of Construction Management Techniques and Standards for the Umbrella Method in Tunnelling", *the Korean Society for Railway Fall Conference*, pp.1-2.
3. Heo, H.S. (2011), "An Experimental Study on the Mixing Properties of Thixotropic Grout", Dankook university, pp.3-23.
4. Heo, H.S., Yi, S.T., and Noh, J.H. (2012), "Properties and Environmental Effects Estimation of Grout Using Set Accelerating Agent Made from Calcium Aluminate and Viscosity Agent", *Korea Institute for Structural maintenance and Inspection*, Vol.16, No.4, pp.132-126.
5. User's guide, "Standard Method for FIELD VANE SHEAR TEST IN COHESIVE SOILS", ASTM D 2573-72 (reapproved 1978).

Received : August 11th, 2020

Revised : August 29th, 2020

Accepted : August 31st, 2020