

## STPP가 규산계 시멘트 주입재의 강도에 미치는 영향

### The Effect of STPP on Compressive Strength of Sodium Silicate-Cement Grout

천병식<sup>†</sup> · 양형철<sup>\*</sup>

Chun, Byungsik<sup>†</sup> · Yang, Hyungchil<sup>\*</sup>

#### Abstract

Portland cement and sodium silicate are widely used as the main components of the injection, which are used to prevent flow and improve ground condition. The main problem of the injection material is the leaching of the sodium hydroxide and silicate due to the limited reaction with the cement. This paper studies the effect of cement hydration retarder on the compressive strength of the sodium silicate - cement gel. A series of tests, including digital-type testing machine, X-ray diffraction and scanning electron microscope are performed. Results clearly demonstrate that the sodium tripolyphosphate, which is the cement hydration retarder in the test, significantly improves the initial strength of the homogel.

**Keywords** : Sodium silicate-cement grout, Homogel, Sodium tripolyphosphate, Retarder

#### 요 지

차수 및 지반보강용 주입재의 주류를 이루고 있는 보통포틀랜드시멘트와 규산나트륨(3호)은 겔화 반응 후에 규산나트륨(3호)에 포함 되어있는 산화나트륨이 시멘트수화 경화물과 반응하지 않은 미반응 규산과 함께 수중에 용탈되며, 내구성이 결여되는 주입재로 인식되고 있다. 본 연구에서는 시멘트 수화 지연제가 규산나트륨-시멘트 겔의 일축압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 전자현미경촬영, X-선회절분석, 핵자기공명스펙트럼, 일축압축강도시험 등을 실시하였다. 시멘트 수화지연제인 소듐트리포리포스페이트가 포함된 규산나트륨(3호)-시멘트 그라우트의 초기강도가 고강도임을 확인하였다.

**주요어** : 규산나트륨(No.3), 호모겔, 소듐트리포리포스페이트, 지연제

<sup>†</sup> 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

<sup>\*</sup> 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

# 1. 서론

차수 및 지반보강용 주입재의 주류를 이루고 있는 보통포틀랜드시멘트와 규산나트륨(3호)은 겔화 반응후에 규산나트륨(3호)에 포함 되어있는 산화나트륨이 시멘트수화 경화물과 반응하지 않은 미반응 규산과 함께 수중에 용탈된다.(천병식, 2005) 시멘트의 수화생성물(수산화칼슘)과 산화나트륨과의 몰비 (MR = Ca(OH)<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O)가 MR < 1.0인 경우 초기 재령(3일이내)에 호모겔의 강도가 고강도로 발현되지 않는다(천병식 등, 2003). 이 현상은 규산나트륨과 시멘트 수화물(Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H Gel, ettringite)(Lea, 1971; Soroka, 1979; Gani, 1997; Taylor, 1998)과의 결합으로 생성된 실리케이트 겔(Iler, 1979)과 수산화나트륨(NaOH)이 시멘트 입자의 결정성장에 영향을 주어 강도발현이 지연된다. 시멘트 입자의 결정성장을 촉진시키기 위해서 포틀랜드시멘트의 응결(setting)과 경화(hardening)에 관련된 첨가제(Lea, 1971; Birchall et al., 1984)를 사용하여 일련의 강도실험을 수행하였다. Sodium tripolyphosphate (STPP)(Cotton et al., 1999; Oxtoby et al., 2002)를 포함시 초기재령(72시간 이내)에 호모겔의 강도가 고강도로 증진되었다.

이에 본 연구에서는 시멘트량을 고정시키고 규산나트륨(3호)에 첨가제로서 시멘트 지연제(STPP, EDTA, SUGAR)의 포함 유무에 따른 <sup>29</sup>Si-NMR 분석, SEM, XRD, 압축강도시험을 실시하여, 시멘트 수화지연제가 규산나트륨-시멘트그라우트의 초기강도에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 규산나트륨-시멘트의 겔화반응

### 2.1 규산나트륨 수용액의 특성

규산나트륨은 산화나트륨과 무수규산이 여러 가지 비율로 결합되어 있으며, 분자식은 Na<sub>2</sub>O · nSiO<sub>2</sub>(n:몰비)로 표시되며 수용액에서는 식 (1),

(2)과 같이 반응하며, 콜로이드의 화학적 반응은 식 (3)과 그림 1과 같이 대전되는 것으로 고려되어 있다(紫崎 外, 1982; 島田 外, 1982, 1988; 米倉 外, 2000).

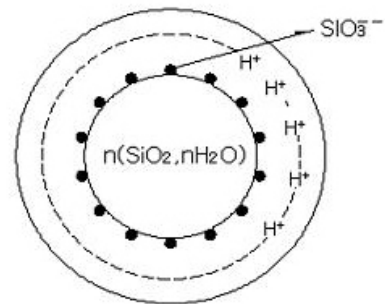
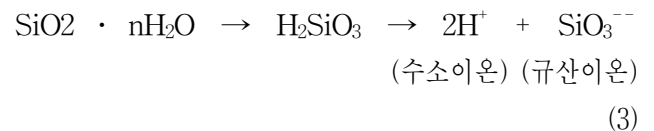
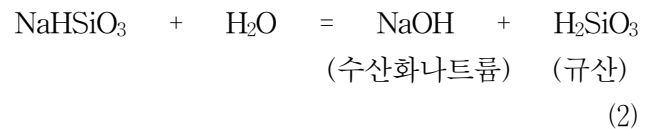
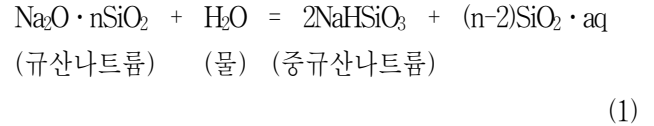


그림 1. 규산나트륨(3호) 용액의 전기적 2중층

### 2.2 석고의 특성

석고는 시멘트의 응결을 늦추기 위해 첨가된다. 알루미늄산3칼슘은 물과 거의 순간적으로 반응하므로 석고가 없으면 전체로서 시멘트의 응결이 급격하게 일어날 것이다. 석고의 지연효과는 알루미늄산3칼슘의 입자 표면에 에트링가이트층이 형성됨으로 기인한다. 이 층이 C<sub>3</sub>A의 다음 수화를 지연시켜 시멘트의 응결이 주로 규산칼슘의 수화에 의해 일어나도록 하고 있다. 그러나 에트링가이트층은 알루미늄산3칼슘의 수화를 완전히 방지하는 것은 아니다. 시간이 흐름에 따라 확산작용에 의해 에트링가이트가 C<sub>3</sub>A

입자표면에서 직접 생성된다. 에트링가이트의 생성에는 고체체적의 증가로부터 생기는 팽창력이 뒤따른다. 이윽고 이 팽창력에 의해 에트링가이트층이 파괴되어 C<sub>3</sub>A의 수화가 다시 진행된다. 그러나 파괴된 부분은 다시 새로운 에트링가이트를 생성되어 회복하므로 수화가 다시 지연된다. 이와 같은 과정은 에트링가이트를 생성하는데 필요한 황산이온이 부족하게 될 때까지 되풀이되어 그 이후의 C<sub>3</sub>A의 수화는 에트링가이트의 생성으로부터 모노설페이트의 생성으로 전환한다(Lea 1917; Soroka, 1979; Gani, 1997; Taylor, 1998).

### 2.3 겔화반응과 호모겔강도

규산나트륨 희석액과 시멘트 현탁액을 혼합하면 시멘트의 주성분인 수산화칼슘과 규산나트륨의 규산 및 전해질과 결합하여 실리케이트-시멘트 겔이 생성되며 겔화 반응의 원리는 식(4), (5), (6), 그림 2와 같이 추정된다. 1976년 이후 일본에서 적용되고 있는 LW주입체의 재령별 강도는 그림 3과 같다(紫崎 外, 1982; Christian Kutzner, 1996; 米倉, 2000).

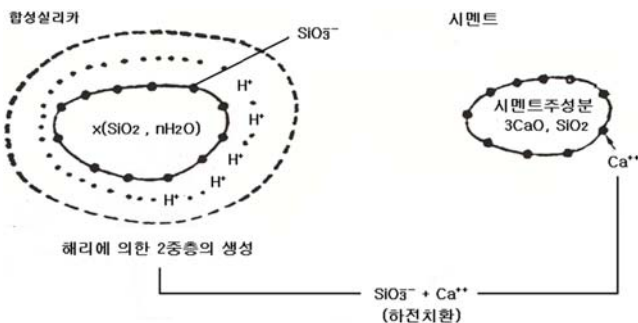


그림 2. 규산나트륨-시멘트계 겔화기구(紫崎 外, 1982)

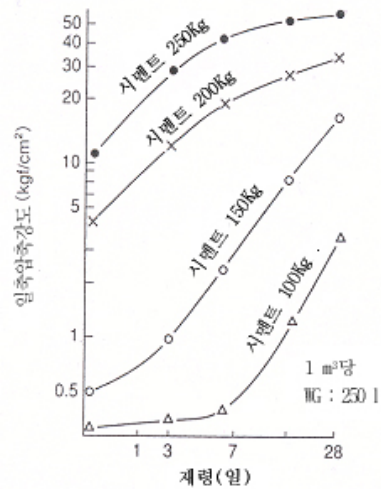


그림 3. LW(Homo Gel) 강도(米倉, 2000)

## 3. 실내시험

### 3.1 사용재료

첨가제로서는 시멘트 지연제인 Sodium triphosphate (STPP), Ethlene Diamine Tetra Acetic acid(EDTA), Sugar 등을 사용하였고, 그라우트 재료로서는 규산나트륨(3호), 마이크로시멘트(MC), 슬래그시멘트(SC) 및 보통포틀랜드시멘트(OPC) 등을 사용하였다(표 1참조).

표 1. 규산나트륨(3호), 시멘트의 성분

1) 규산나트륨(3호)

구분	비 중	이산화 규소 (SiO <sub>2</sub> ) (%)	산화 나트륨 (Na <sub>2</sub> O) (%)	철(Fe) (%)	물 불용분 (%)	pH (20°C)	점도 (20°C) (cp)
규산 나트륨 (3호)	1.384	27.2	9.14	0.0034	0.0026	14	200

2) 시멘트

(1) 화학성분 (단위 %)

종 류	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
보통포틀랜드시멘트	20.4	5.8	3.1	62.6	3.6	0.13	0.77	1.9
고로슬래그시멘트	24.4	9.8	2.4	56.0	4.1	0.14	0.71	2.4
마이크로시멘트	28.1	11.4	2.1	48.9	4.3	0.16	0.60	3.7

(2) 물리적 특성

종 류	비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응결 (사:분)	
			초결	중결
보통포틀랜드시멘트	3.15	3170	250	6:50
고로슬래그시멘트	3.08	3880	290	8:40
마이크로시멘트	3.01	8270	260	7:20

3.2 시료제작

시멘트 지연제 중의 일종인 Sodium tripolyphosphate가 규산나트륨(3호)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 표 2와 같이 시료를 배합하였고, 비교하기 위하여 시멘트 수화 지연제 중에서 EDTA와 SUGAR를 첨가제로 선정하였다. 규산나트륨-시멘트 그라우트의 재령별 호모젤 강도를 측정하기 위하여 표 3과 같이 시료(직경5cm×길이10cm)를 제작하였다.

표 2. 규산나트륨(3호)와 첨가제(STPP)의 <sup>29</sup>Si-NMR 측정용 시료 배합표

성 분	SC	WG	SC	WG
	(100)	(100)	(60)	(60)
규산나트륨(3호) (cc)	100	100	60	60
물 (cc)	100	100	140	140
첨가제(STPP) (g)	3	-	3	-

표 3. 압축강도 측정용 시료 배합표

1) 일반포틀랜드 시멘트

성 분	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	(A) : 규산나트륨(3호) (cc)	60	80	100	100	100
물 (cc)	140	120	100	100	100	100
첨가제(STPP) (g)	-	-	-	3	-	-
첨가제(EDTA) (g)	-	-	-	-	3	-
첨가제(Sugar) (g)	-	-	-	-	-	3
(B) : 일반포틀랜드시멘트 (g)	80	80	80	80	80	80
물 (cc)	175	175	175	175	175	175

\* 시료는 A액과 B액을 각각 배합하여 준비한 후, 1 : 1(체적비)로 혼합하여 제작하였으며, 20±5°C의 물에서 양생.

2) 슬래그 시멘트

성 분	C7	C8	C9	C10
(A) : 규산나트륨(3호) (cc)	100	100	100	100
물 (cc)	100	100	100	100
첨가제(STPP) (g)	-	3	-	-
첨가제(EDTA) (g)	-	-	3	-
첨가제(Sugar) (g)	-	-	-	3
(B) : 슬래그시멘트 (g)	80	80	80	80
물 (cc)	175	175	175	175

\* 시료는 A액과 B액을 각각 배합하여 준비한 후, 1 : 1(체적비)로 혼합하여 제작하였으며, 20±5°C의 물에서 양생.

3) 마이크로 시멘트

성 분	C11	C12	C13	C14
(A) : 규산나트륨(3호) (cc)	100	100	100	100
물 (cc)	100	100	100	100
첨가제(STPP) (g)	-	3	-	-
첨가제(EDTA) (g)	-	-	3	-
첨가제(Sugar) (g)	-	-	-	3
(B) : 마이크로시멘트 (g)	80	80	80	80
물 (cc)	175	175	175	175

\* 시료는 A액과 B액을 각각 배합하여 준비한 후, 1 : 1(체적비)로 혼합하여 제작하였으며, 20±5°C의 물에서 양생.

3.3 시험방법

시험방법으로는 규산나트륨의 가교산소수에 대한 분석은 <sup>29</sup>Si-MAS NMR(400MHz)(Bruker), 점도측정은 LDVⅧ(Brookfield)기를 사용하였으며, 일축압축강도 시험은 디지털형 만능 재료시험기를 이용하여 KS M 3808의 방법에 의거하여 측정하였다. XRD분석은 MXPC(Macscience)기로 40kV에서 30mA로 시행하였고, SEM은 Quest(Noran Instrument Inc.)로 촬영 했다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 Sodium tripolyphosphate가 규산나트륨에 미치는 영향

Sodium tripolyphosphate가 규산나트륨(3호)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 <sup>29</sup>Si-NMR 분석을 수행하였다.

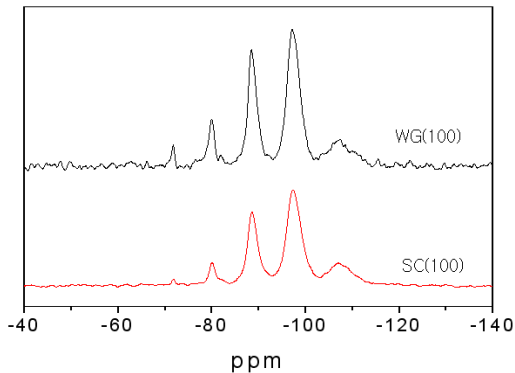


그림 4. SC(100), WG(100)의 <sup>29</sup>Si-NMR 측정도

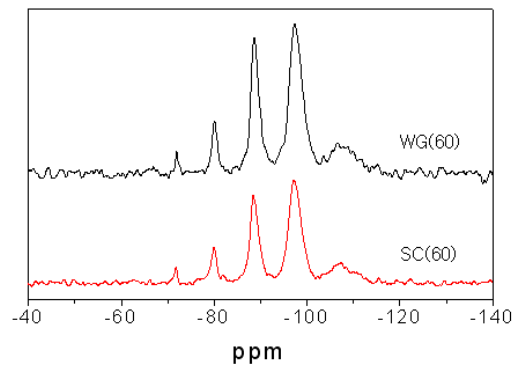


그림 5. SC(60), WG(60)의 <sup>29</sup>Si-NMR 측정도

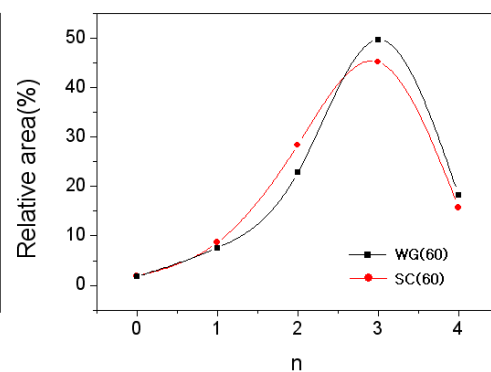
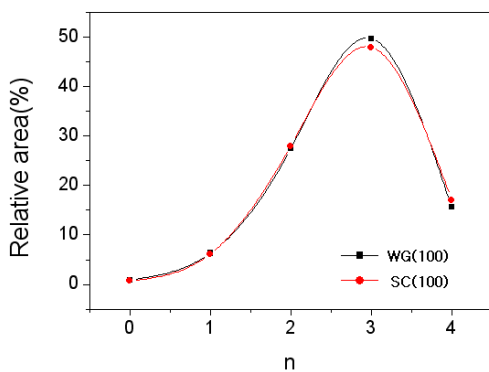


그림 6. 규산나트륨의 <sup>29</sup>Si NMR 분석도

시료 WG(100), SC(100), WG(60), SC(60)의 <sup>29</sup>Si-NMR 측정결과는 그림 4, 그림 5, 그림 6, 표 4와 같으며 Sodium tripolyphosphate가 포함된 규산나트륨(3호)의 가교산소(C-Si-O-Si)수에 대한 차이가 미미하므로 구조상에 변화를 주지 않는 것으로 판단하였다. 따라서, Sodium tripolyphosphate는

규산나트륨(3호)의 입자성장(Iler, 1979)에 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다(시료 WG 및 SC는 표 2 참조).

점도 측정결과는 표 6과 그림 12와 같으며, 규산나트륨(3호)을 물에 희석시 STPP는 규산나트륨의 분산성을 양호하게 하여 점도를 낮추는 특성이 있

표 4. <sup>29</sup>Si-NMR 분석결과표

시료	내용	Q0	Q1	Q2	Q3	Q4	합계	NS
WG(100)	화학적 변화률 (ppm)	-71.752	-80.076	-88.598	-97.339	-106.90		
	범위	0.034	0.23	1.0	1.811	0.567	3.642	4736
	상대범위 (%)	0.93	6.31	27.46	49.73	15.57	100	
SC(100)	화학적 변화률 (ppm)	-71.830	-80.058	-88.564	-97.314	-106.93		
	범위	0.026	0.221	1.0	1.714	0.611	3.572	13716
	상대범위 (%)	0.72	6.19	28.0	47.98	17.11	100	
WG(60)	화학적 변화률 (ppm)	-71.896	-80.033	-88.620	-97.302	-106.53		
	범위	0.23	1.0	3.0	6.54	2.39	13.16	2220
	상대범위 (%)	1.75	7.60	22.80	49.70	18.16	100.01	
SC(60)	화학적 변화률 (ppm)	-71.778	-79.953	-88.427	-97.117	-107.34		
	범위	0.22	1.0	3.28	5.22	1.82	11.54	29046
	상대범위 (%)	1.91	8.67	28.42	45.23	15.77	100	

\* Q0, Q1, Q2, Q3, Q4는 그림. 6의 가교산소(C-Si-O-Si)수(n).

\* 표 4는 그림 6의 Data.

는 것으로 확인되었다.

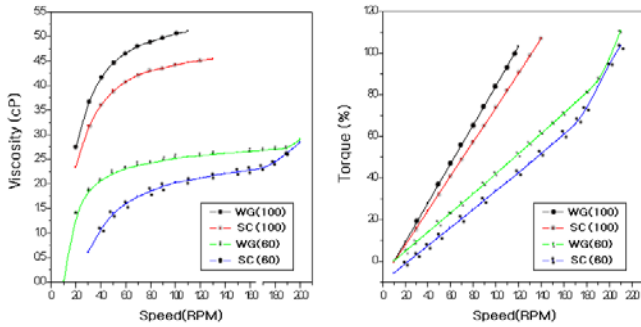


그림 7. 점도측정결과

표 5. 토크(약75%)에 대한 점도

	WG(100)	SC(100)	WG(60)	SC(60)
점도 (cP)	4.97	4.43	2.68	2.48

#### 4.2 첨가제가 석고에 미치는 영향

시멘트 수화 지연제인 석고 성분에 첨가제가 미치는 영향을 첨가제별로 조사하기 위해 재령 2일후의 수중양생상태를 비교한 결과 첨가제가 포함되지 않는 반수석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )는 고결화하여 3차원 결정상태를 유지하고 있으나, 첨가제가 포함된 반수석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )는 단립자형태로 유동성을 갖고 있으며 3차원 결정체를 형성하지 못했다. 첨가제와 석고와의 반응에 대한 XRD, SEM 측정결과는 그림 8 ~ 그림 15와 같다.

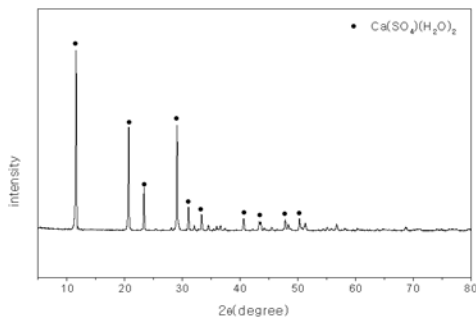
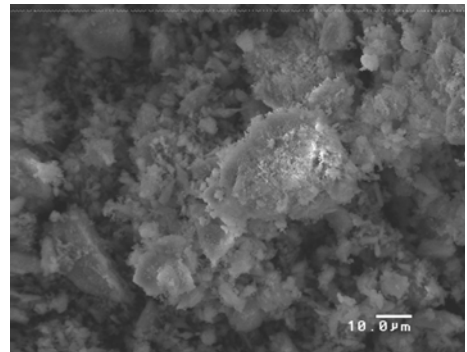
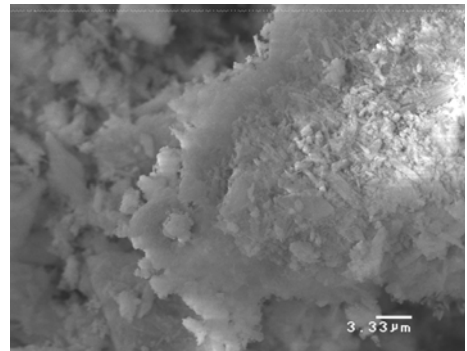


그림 8. B1(석고+물) 시료 2일 재령후 XRD 측정



(a) 1000배



(b) 3000배

그림 9. B1(석고+물) 시료 2일 재령후 SEM 촬영사진

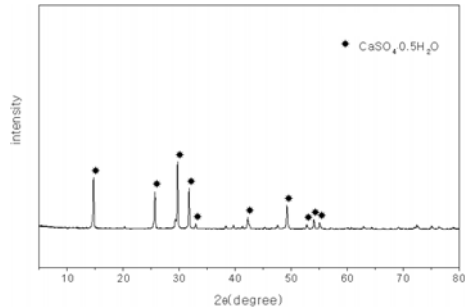
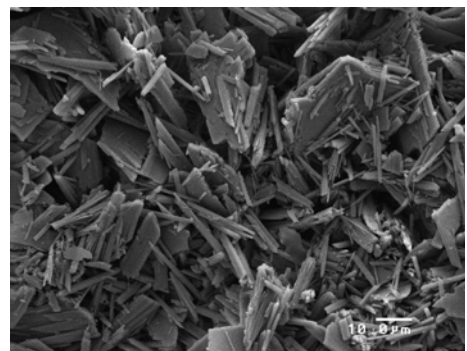
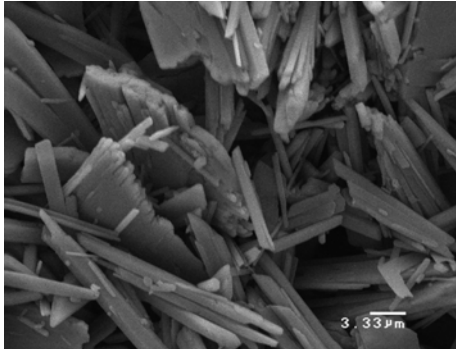


그림 10. B2(석고+STPP+물) 시료 2일 재령후 XRD 측정



(a) 1000배



(b) 3000배

그림 11. B2(석고+STPP+물) 시료 2일 재령 후 SEM 촬영사진

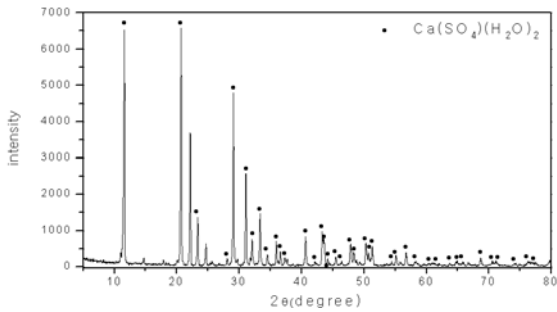
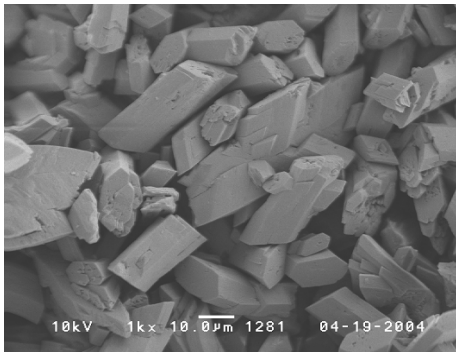
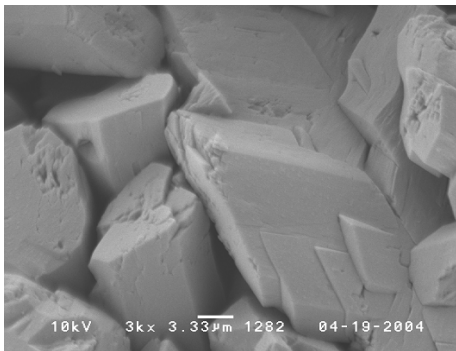


그림 12. B3(석고+EDTA+물) 시료 2일 재령 후 XRD 측정



(a) 1000배



(b) 3000배

그림 13. B3(석고+EDTA+물) 시료 2일 재령 후 SEM 촬영사진

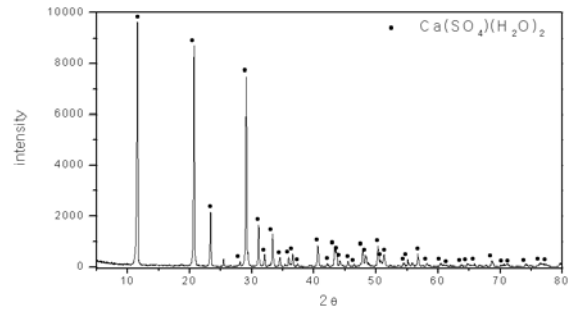
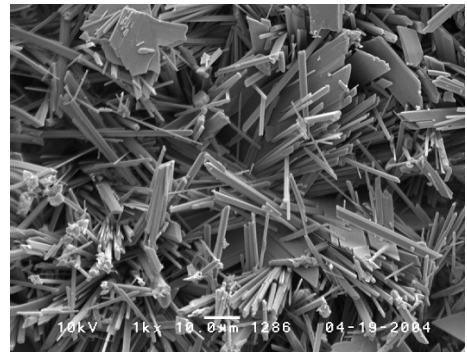


그림 14. B4(석고+Sugar+물) 시료 2일 재령 후 XRD 측정



(a) 1000배



(b) 3000배

그림 15. B4(석고+Sugar+물) 시료 2일 재령 후 SEM 촬영사진

### 4.3 규산나트륨 농도별 일축압축강도 특성

1976년 이후 적용되고 있는 LW주입재의 재령별 강도가 제시된 자료(참조;그림 3)보다 저장도로 파악되었다. 따라서 B액(200ℓ)의 시멘트량을 80kg으로 고정하고 A액(200ℓ) 속의 규산나트륨(3호)의 함량을 60ℓ, 80ℓ, 100ℓ로 변화시켰을 때 규산나트륨 농도가 Homo-gel의 강도 발현에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

규산나트륨 용액의 중화되지 않는 상태의 산화나트륨에 대한 규산나트륨 Homo-gel체내의 보통포틀랜트시멘트 수화물(수산화칼슘) 생성량을 시멘트 중량의 20%로 가정시, 몰당량비 (MR; Molar Ratio= $\text{Ca}(\text{OH})_2 / \text{Na}_2\text{O}$ )가  $\text{MR} < 1.0$  일 때는 Homo-Gel 강도가 초기(3일이내)에  $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 고강도로 되지 않았다.

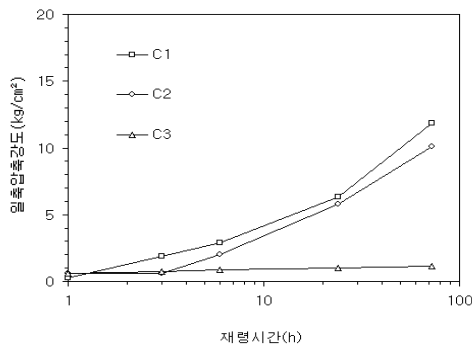


그림 16. 규산나트륨(3호) 함량별 압축강도 특성

표 6. 규산나트륨(3호) 함량별 호모겔의 압축강도

	C1	C2	C3
	WG*(60)	WG(80)	WG(100)
1 hour	0.29	0.58	0.58
3 hour	1.88	0.58	0.72
6 hour	2.88	2.02	0.87
1 day	6.35	5.77	1.01
3 days	11.84	10.11	1.16

\* WG(Water Glass); Sodium Silicate(No.3)

#### 4.4 첨가제와 시멘트의 종류별 일축압축강도 특성

시멘트 종류별(OPC, Slag Cement, Micro Cement)로 첨가제의 영향을 검토한 결과 STPP 포함시 초기강도 편차가 높게 나타났다.

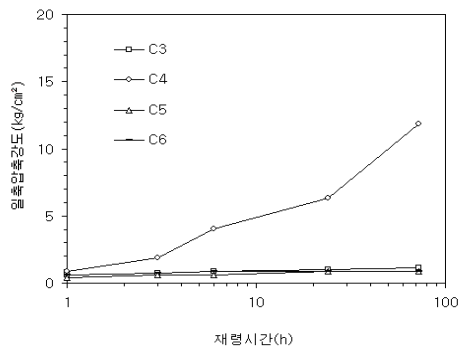


그림 17. 호모겔의 압축강도 특성(OPC)

표 7. 호모겔의 압축강도(OPC)

	C1	C2	C3	C6
	WG*(100)	WG(100)+STPP	WG(100)+EDTA	WG(100)+Sugar
1 hour	0.58	0.87	0.43	0.58
3 hour	0.72	1.88	0.58	0.72
6 hour	0.87	4.04	0.58	0.87
1 day	1.01	6.35	0.87	0.87
3 days	1.16	11.84	0.87	0.87

\* WG(Water Glass); Sodium Silicate(No.3)

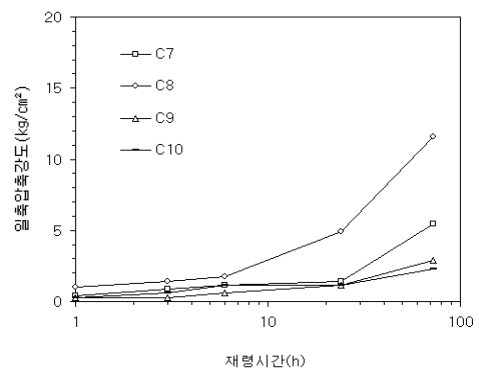


그림 18. 호모겔의 압축강도 특성(Slag Cement)

표 8. 호모겔의 압축강도(Slag Cement)

	C7	C8	C9	C10
	WG*(100)	WG(100)+S TPP	WG(100)+E DTA	WG(100)+S ugar
1 hour	0.43	1.01	0.29	0.29
3 hour	0.87	1.44	0.29	0.58
6 hour	1.16	1.73	0.58	1.16
1 day	1.44	4.91	1.16	1.16
3 days	5.47	11.55	2.89	2.31

\* WG(Water Glass); Sodium Silicate(No.3)

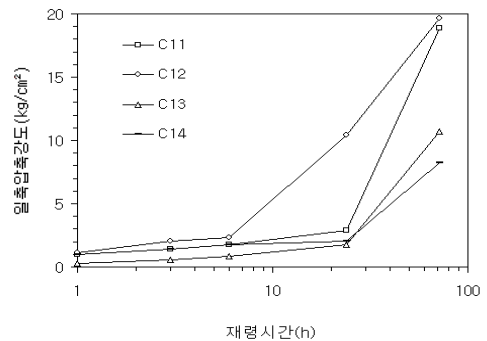


그림 19. 호모겔의 압축강도 특성(Micro Cement)



표 9. 호모겔의 압축강도 (Micro Cement)

	C11	C12	C13	C14
	WG*(100)	WG(100)+STPP	WG(100)+EDTA	WG(100)+Sugar
1 hour	1.01	1.16	0.29	1.01
3 hour	1.44	2.02	0.58	1.44
6 hour	1.73	2.31	0.87	1.73
1 day	2.89	10.39	1.73	2.02
3 days	18.19	19.64	10.68	8.23

\* WG(Water Glass); Sodium Silicate(No.3)

#### 4.5 양생수의 분석결과

- (1) 양생수의 성분을 분석한 결과는 표 10과 같다. 규산나트륨(No.3)수용액의 농도가 높은 WG(100)에서는 미반응 SiO<sub>2</sub>의 용탈량이 Sodium tripolyphosphate가 포함된 희석액의 15배 이상으로 높게 나타났다 따라서, Sodium tripolyphosphate가 포함되지 않는 Homo-Gel의 초기강도는 미반응 규산나트륨의 용탈량이 많아서 적게 나타난 것이다(紫崎 外, 1982).
- (2) 규산나트륨 수용액의 규산나트륨은 시멘트 입자표면에 석고와 함께 복염을 형성하여 시멘트 입자의 수화 및 결정성장에 영향을 주어서 초기강도가 낮게 나타났다. 그러나 Sodium tripolyphosphate를 포함한 겔체는 초기강도가 높게 나타났다. 이것은 규산나트륨수용액에 포함된 Sodium tripolyphosphate가 ettringite와 반응하여 시멘트 수화와 성장을 촉진시켜준 결과에 의한 것이다.

표 10. 용출수 분석 결과

Sample	Si	Na	Ca
WG(100)	312	651	8.5
SC(100)	16.5	625	8.8
WG(60)	6.7	423	0.7
SC(60)	5.3	672	0.8

\* 4일 양생후 1일 침적

## 5. 결론

1976년 이후 적용되고 있는 LW주입재의 재령별 강도자료(그림 3) 와 자료에 근거한 실험 결과가 일치하지 않았다. 따라서 규산나트륨-시멘트 그라우트의 고결특성에 첨가제가 미치는 영향을 파악하기 위하여 규산나트륨의 농도변화 및 첨가제 투입에 따른 일련의 실험을 수행하여 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 규산나트륨시료 [WG(100), SC(100)]의 <sup>29</sup>Si-NMR 측정결과, Sodium tripolyphosphate가 규산나트륨(3호)의 가교산소 (-Si-O-Si)수에 큰 변화를 주지 않음을 확인하였고, Sodium tripolyphosphate는 규산나트륨(3호)의 점도를 낮춰주는 특성이 있음을 확인하였다.
- (2) 규산나트륨-시멘트 그라우트의 초기재령별 압축강도는 규산나트륨과 시멘트 수화물의 몰당량비 (MR = Ca(OH)<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O)에 영향을 받으며, 저몰당량비(MR < 1.0)에서는 Homo-Gel 강도가 초기(3일 이내)에는 5kg/cm<sup>2</sup>이하의 저강도로 나타났다.
- (3) 첨가제와 석고와의 반응에서 첨가제는 반수석고(CaSO<sub>4</sub> · 1/2H<sub>2</sub>O)를 단립화시켜, 반수석고(CaSO<sub>4</sub> · 1/2H<sub>2</sub>O)의 3차원 결정체를 형성하지 못하게 하는 특성이 있는 것으로 확인되었다.
- (4) 시멘트 종류별로 첨가제의 영향을 검토한 결과 Sodium tripolyphosphate를 포함할 때 초기강도 편차가 크게 나타났다. 이는 시멘트 입자의 수화 및 결정성장이 촉진되어, 미반응 규산나트륨 용탈량이 감소된 결과이다.

(5) 현재 천층터널 상부구간에 차수 및 지반 보강에 적용 시공중이며, 동절기 시공결과는 차후 발표예정 이며, 향후 규산나트륨-시멘트 그라우트의 내구성과 관련된 연

구 및 첨가제의 개발은 계속 되어져야 할 것으로 사료된다.

(접수일 : 2005. 11. 9 심사일 : 2005. 11. 29 심사완료일 : 2006. 3. 15)

### 참고문헌

1. 천병식(2005), *최신지반주입-이론과 실제-*, 원기술, pp. 313~317.
2. 천병식, 양형철(2003), 합성실리카 그라우트제의 공학적 특성, *지반공학회논문집*, Vol. 19, No.1, pp. 163~172.
3. 米倉亨三, 島田俊价, 木下吉友(2000), *恒久グラウト注入工法*, 山海堂, pp. 12~27, 103~114.
4. 島田俊价, 兼松 陽(1982), *最新の地盤注入工法*, 理工圖書(株), pp. 91~97, 99~108.
5. 島田俊价, 佐藤 武, 多久 實(1988), *最先端技術の薬液注入工法*, 理工圖書, pp. 12~34, 57~82.
6. 紫崎光弘, 下田一雄, 野上明男(1982), *薬液主入工法の設計と施工*, 山海堂, pp. 30~31, 233~246.
7. Albert Cotton F., Geoffrey Wilkinon, Carlos A. Murillo and Manfred Bochmann(1999), *Advanced Inorganic Chemistry Six Edition*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 123, 258~443.
8. Birchall, J. D. and Thomas N. L.(1984), The Mechanism of Retardation of Setting of OPC by Sugars, *British Ceramic Proceedings*, pp. 305~315.
9. Christian Kutzner(1996), *Grouting of Rock and Soil*, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 154~173.
10. Oxtoby, D. W., Gillis, H. P. and Nachtrieb, N. H.(2002), *Principles of Modern Chemistry Fifth Edition*, Thomson Learning, Inc., pp. 153~191, 317~360, 635~713, 640~614, 648~649, 688~690.
11. Gani, M. S. J.(1997), *Cement and Concrete*, Chapman & Hall, pp. 36~50.
12. Iler, R. K.(1979), *The Chemistry of Silica*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 172~311.
13. Lea, F. M.(1971), *The Chemistry of Cement and Concrete Third edition*, Chemical Publishing Co. Inc., pp. 179~249.
14. Soroka, I.(1979), *Portland Cement Paste and Concrete*, The Macmillan Press LTD., pp. 30~45.
15. Taylor, H. F. W.(1998), *Cement Chemistry 2nd edition*, Thomas Telford, pp. 113~156, 187~260.