

무기질계 주입재의 강도발현 메커니즘

Strength Development Mechanism of Inorganic Injection Material

한 윤 수¹⁾ · 이 중 휘²⁾ · 강 형 남³⁾ · 백 승 인²⁾ · 천 병 식[†]

Han, yunsu · Lee, Jonghwi · Kang, Hyounghnam · Baeg, Seungin · Chun, Byungsik

ABSTRACT : Recently, NDS(Natural and Durable Stabilizer)method and other similar methods are composed of inorganic accelerating agent and the ultra-super fine cement have been studied as the ground improvement material in Korea. However, in the existing research, the chemical changing process of NDS in the strength development mechanism with the elapsed curing time and the principles of strength development did not give an explanation. For the popularization of the inorganic grout material, it determined that the mechanism verifying of the curing process had to be clearly preceded. Therefore, unconfined compression test, SEM and XRD analysis were performed by the elapsed curing time and were analyzed. In addition, the same trial for SGR method, that is the representative example of the water glass grout material, was selected as comparative target in order to distinguish properties of NDS more clearly. The result of experiment, the strength development mechanism of NDS could be investigated through the close correlation of the unconfined compression strength - SEM - XRD analysis, and excellence of a performance was confirmed.

Keywords : Inorganic accelerating agency, NDS, SGR, Unconfined compression test, SEM, XRD

요 지 : 최근 국내에서는 지반개량 재료로 무기질계 급결재와 초미립자 시멘트를 주원료로 하는 NDS(Natural and Durable Stabilizer)공법 등의 개발이 활발하게 연구되어 왔다. 하지만 기존의 연구에서는 NDS의 재령일별 강도발현 과정에 있어서의 화학적인 변화과정 및 강도발현의 원리를 설명해 주지는 못하고 있는 실정이었다. 따라서 무기질계 주입재의 대중화를 위해서는 경화과정의 메커니즘 규명이 확실하게 선행되어야 한다고 판단하였고, 일축압축시험, SEM분석, XRD분석을 재령일 별로 실시하여 각각의 결과값을 분석하였다. 또한 그 특징을 더욱 분명히 구별하기 위하여 물유리계 주입재의 대표적인 예인 SGR 또한 동일한 시험을 실시하여 비교대상으로 하였다. 시험결과 NDS의 강도발현 메커니즘을 일축압축강도-SEM-XRD의 유기적 상관성을 통해 도출할 수 있었고 그 성능의 우수함을 확인하였다.

주요어 : 무기질계 급결재, NDS, SGR, 일축압축시험, SEM, XRD

1. 서 론

지반주입공법이란 지반의 지지력을 증대시키거나 투수성을 감소시킬 목적으로 시멘트 현탁액 및 약액 등의 다양한 재료를 지반에 압입시키고 고결체를 형성하는 공법이다. 국토가 좁은 우리나라의 경우 각종 건설구조물들이 지지력이 약한 지반 위에 설치되는 경우가 빈번하여 여러 종류의 지반보강공법이 실시되고 있으며 댐, 하천제방, 토류구조물, 지하철 및 터널 공사의 차수 목적에도 사용되고 있다.

현재 국내에서 실시되는 주입재료의 대부분은 물유리를 사용하는 SGR(Space Grouting Rocket system)공법 및 LW(Labiles Wasser glass)공법 등의 물유리계 공법이 주류를 이루고 있으나, syneresis현상(겔이 내부의 액체를 방출하여 부피를 감소시키는 현상) 등으로 인해 영구적인 지반 보강이 불가능하고(千柄植, 1998), 차수를 위한 공법으로서의 본

질적인 문제점(천병식, 2002)과 균질한 품질의 확인과 시공 속도에 대응할 수 없는 문제점(김진춘 등, 2001)을 가지고 있다. 또한 강알칼리성과 지속적인 용출문제로 인해 환경오염의 가능성을 내포하고 있다.

물유리계 주입재를 사용할 경우 발생하는 용출현상 및 강도저하를 해결하기 위해 여러 공법들이 연구되어지고 있는데, 최근 국내에서는 지반개량 재료로 무기질계 급결재와 초미립자 시멘트를 주원료로 하는 NDS(Natural and Durable Stabilizer)공법 등의 개발이 천병식 등(2006)에 의해 활발하게 연구되어 왔다. 그러나 기존의 연구에서는 NDS의 강도 특성을 단순히 일축압축시험 결과만으로 설명하고 있으므로 재령일별 강도발현 과정에 있어서의 재료의 화학적인 변화과정 및 강도발현의 원리를 설명해 주지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 무기질계 주입재의 대중화를 위해서는 경화과정의 메커니즘 규명이 확실하게 선행되어야 한다고 판

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

3) 정회원, (주)지스코 대표이사

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

단된다.

그러므로, 본 연구에서는 무기질계 주입재인 NDS의 강도발현 메커니즘의 특성을 분석하여 규명하고자 하였으며 이를 위해, 일축압축시험, SEM촬영, XRD분석을 실시하여 재령일별로 각각의 결과값을 상호 연관하여 분석하였다. 또한 그 특징을 더욱 분명히 구별하기 위하여 물유리계 주입재의 대표적인 예인 SGR 또한 일축압축시험, SEM촬영, XRD분석을 실시하여 비교대상으로 하였다.

2. 주입재 특성

2.1 NDS공법의 재료특성

NDS공법은 물유리계의 수축과 용탈로 인한 내구성 저하와 환경적인 문제를 해결하기 위하여 순수 무기질계 재료만을 사용하는 공법으로, ES(무기질계 급결재)와 UF(초미립자 시멘트)의 두 가지 재료로 구성되어 있다. ES의 양을 많이 배합할수록 gel-time을 감소시킬 수 있고 gel-time에 따라 순결(5~7초), 급결(40~50초), 완결(80~100초)로 구분할 수 있다.

2.1.1 NDS ES(무기질계 급결재)

ES는 석회석, 보크사이트 및 석고를 분쇄, 혼합하여 1,600℃ 이상의 고온에서 제조된 용융 소성물을 급냉시킨 후, 분쇄 및 분급과정을 통하여 양질의 미립자 형태로 얻을 수 있으며 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 유사한 성분인 CaO, Al₂O₃, CaSO₄ 등이 주성분이다(한양대학교, 2011).

표 1에 OPC와 비교한 NDS ES의 화학성분 및 물리적 성능을 나타내었다.

표 1. OPC와 비교한 NDS ES의 화학성분 및 물리적 성능 (한양대학교, 2011)

구분	Ig.loss* (%)	Insol** (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	비중	분말도 (cm ² /g)
NDS ES	0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.6	0.2	28.3	2.9	5,500
OPC	1.9	0.3	20.7	4.2	3.1	63.3	3.9	2.3	3.1	3,200

* Ig.loss : 강열감량

** Insol : 불용잔분(Insoluble Residue)

표 2. OPC와 비교한 NDS UF의 화학성분(한양대학교, 2011)

구분	Ig.loss*	Insol**	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
NDS UF	1.6	0.3	23.9	8.0	3.0	55.5	3.6	3.2
OPC	1.9	0.3	20.7	4.2	3.1	63.3	3.9	2.3

* Ig.loss : 강열감량

** Insol : 불용잔분(Insoluble Residue)

2.1.2 NDS UF(초미립자 시멘트)

UF는 기존의 시멘트 생산방식에 비해 발전된 슈퍼 미크론 분급기를 적용한 다단분급기를 통해 최적의 분말도(약 6,000~9,000cm²/g)와 입도로 제조된 초미립자 시멘트이다(강형남, 2011). 표 2에 OPC와 비교한 NDS UF의 화학성분에 대해 제시되어 있다.

2.1.3 NDS공법의 반응기구

UF는 물과 혼합 시 규산 3 석회(Alite : 3CaO·SiO₂)와 규산 2 석회(Belite : 2CaO·SiO₂)가 수화반응하여 다량의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 생성하며, ES는 수산화칼슘과 석고의 존재하에 물과 반응하는 즉시 수화되어 침상형 결정인 에트링자이트(Ettringite : 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)와 판상형 결정인 모노설페이트(Monosulphate : 3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O)를 형성한다(그림 1 참조). 이러한 결정들이 성장하여 서로 연결되고 이들 수화물이 연쇄반응을 일으켜 최종 형성되는 안정적인 경화체인 칼슘실리케이트수화물(Calcium Silicate Hydrate : C-S-H)이 결정 사이의 공극을 충전하여 고결체의 강도를 높이게 된다.

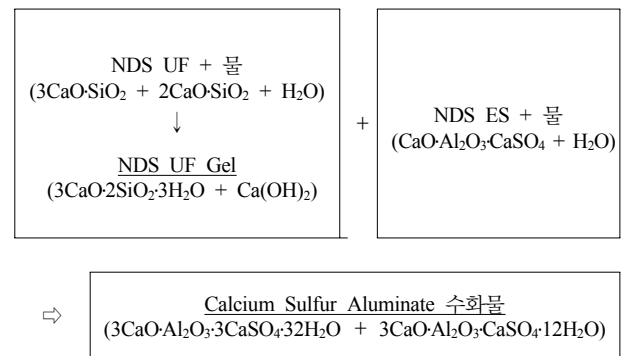


그림 1. NDS공법의 반응기구(한양대학교, 2011)

표 3. SGR 주입재의 종류 예(千柄植,1998)

주입재	형	분류	gel-time	비고
SGR - 1호 SGR - 2호	A형	무기계표준강도처방 (용액형)	short middle	
SGR - 3호 SGR - 4호	B형	유기계고강도처방 (용액형)	short middle	
SGR - 5호 SGR - 6호	C형	유기계초고강도처방 (용액형)	short middle	
SGR - 7호 SGR - 8호	D형	무기계 시멘트 강도 (현탁형)	short middle	
SGR - 9호 SGR - 10호	E형	무기계지수강도 (용액형)	short middle	
SGR - 11호 SGR - 12호	F형	무기계 M.C. 강도 (현탁형)	short middle	3M-1 3M-2

주) short : 6~12초, middle : 50~90초

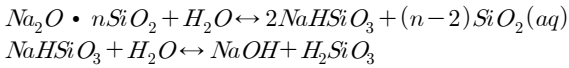


그림 2. SGR공법의 반응기구

2.2 SGR공법의 재료특성

SGR공법은 크게 A액과 B액의 두 재료로 나눌 수 있다. A액은 물유리($Na_2O \cdot nSiO_2$)와 물을 혼합하여 만들고, B액은 시멘트와 표 1의 SGR 주입재 및 물을 혼합하여 사용하는 공법으로 대상지반과 목적에 대응한 여러 종류의 주입재가 있으며, gel-time은 통상 급결형(short) 6~12초, 완결형(middle) 50~90초를 표준으로 한다. 표 3에 SGR에서 사용되는 주입재가 형태별로 정리되어 있다.

2.2.1 SGR공법의 반응기구

SGR 공법의 A액(물유리 용액)은 강한 알칼리성으로 콜로이드상 규산이 부(-)로 대전하고 있고, B액(시멘트 현탁액)은 정(+)으로 대전하고 있기 때문에 두 용액을 혼합할 경우 반응하여 규산젤을 형성하게 된다. 이와 같은 반응은 그림 2와 같이 설명될 수 있다.

3. 실내시험

3.1 시험용 시료제작

3.1.1 사용재료 배합비

NDS시료는 gel-time에 따라 순결(5~7초), 급결(40~50초), 완결(80~100초)로 구분하여 제작하였고, 비교시험에

표 4. NDS공법의 배합비

구분	A액(200L 기준)		B액(200L 기준)	
	NDS ES(kg)	물(L)	NDS UF(kg)	물(L)
순결	60	179.3	160	147.5
급결	40	186.2	120	160.7
완결	20	193.1	100	167.2

표 5. SGR공법의 배합비

A액 (200L 기준)		물유리	100kg
		물	100L
B액 (200L 기준)	급결	SGR-11호	24kg
		물	167L
		시멘트	60kg
	완결	SGR-12호	24kg
		물	167L
		시멘트	60kg

사용된 물유리계 공법인 SGR도 gel-time에 따라 급결(6~12초), 완결(50~90초)로 구분하여 제작하였다. 그리고 SGR 주입재는 표 3의 11호(급결), 12호(완결)를 사용하였다. 그 이유는 NDS UF가 초미립자 시멘트이기 때문에 SGR 주입재도 마이크로 시멘트(M.C)를 사용한 11호, 12호를 선택해야 같은 조건의 실험이 될 수 있기 때문이다. 공시체 제작을 위한 배합비는 표 4, 5와 같다.

3.1.2 시료 제작

NDS와 SGR 시료는 표 4, 5의 배합비에 따라 A액, B액을 각각 배합하여 준비한 후 A액과 B액을 1:1의 체적비로 혼합하여 제작하였다. 시료의 크기는 $\varnothing 5cm \times 10cm$ 원형시편으로 제작하였고, 시료의 양생은 $20 \pm 5^\circ C$ 로 항온수조에서 습윤 양생하였다.

3.2 시험방법

3.2.1 일축압축시험(기술표준원, 2001)

일축압축강도 측정을 위한 시험방법으로 일축압축시험법을 사용하였으며 디지털형 만능 재료시험기를 이용하여 KS F 2314의 방법에 의거하여 측정하였다. 고결체의 일축압축강도시험은 그림 3과 같이 $\varnothing 5cm \times 10cm$ 원형시편으로 제작하였고, 각각의 재료에 대해서 재령 1일, 4일, 7일, 14일, 21일, 28일에 대해서 일축압축강도를 측정하였다. 특히 초기 강도특성을 알아보기 위해 공시체 제작 후 1시간, 3시간, 6시간의 강도를 추가로 측정하였다. 재하 시에는 편심이 작용하기 않도록 capping을 하여 하중이 수직으로 가해지도록 했다(표 6 참조).

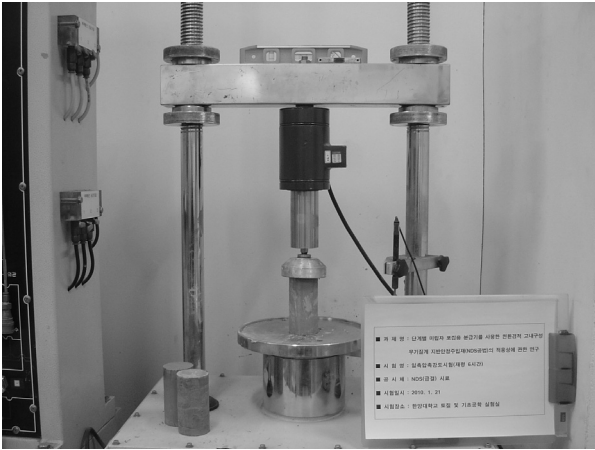


그림 3. 일축압축시험 광경

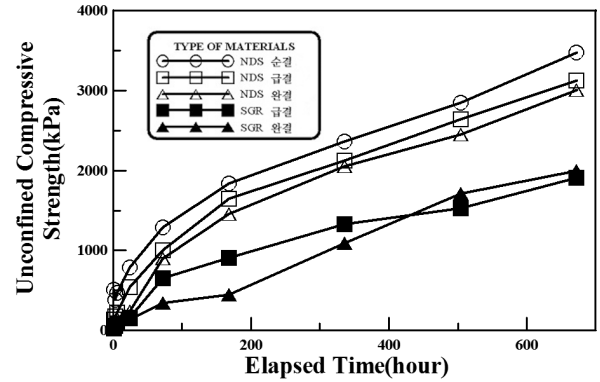


그림 4. 주입재료별 재령일별 일축압축강도

표 6. 일축압축시험 상세표

분류	내용
공시체 크기	∅ 5cm x 10cm
측정회수	최소 3회 이상
전단방식	변형률 제어 방식
로드셀 정확도	0.2kg
변형률 게이지 정확도	0.01mm
전단속도	1mm/mim

3.2.2 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석

재령에 따른 NDS와 SGR 조직구조 및 반응생성물의 직접적인 관찰을 위하여 XL30ESEM(Philips)을 이용하여 시료의 표면부분에 대한 1,500배 확대촬영을 실시하였다. 시편은 초기상태와 장기상태의 특성 파악을 위해 재령 3일, 28일차를 촬영하였다. 이때 시료준비는 일축압축시험을 위해 제작한 공시체에서 신뢰도가 높을 것이라 판단되는 가장 안쪽에 있는 시료군을 선별하여 사용하였고, 재령 3일, 28일 각각에서 수화를 아세트론으로 정지시키고 수화물에 손상을 입지 않도록 약 50℃에서 6시간 이상 건조시킨 후, 경화체의 파단면을 금으로 코팅하여 실험에 사용하였다.

3.2.3 XRD(X-Ray Diffractometer)분석

NDS와 SGR의 재령일별 반응생성물을 관찰하기 위하여 R사의 XRD(D/MAX RINT 2000)를 사용하였다. 측정조건은 전압 40kV, 전류 100mA, scanning speed : 5.00°/min, step : 0.05°, 2θ : 5°~60°의 조건으로 실시하였고 분말법(powder method)를 사용하였다. XRD에 사용된 시료도 일축압축시험을 위해 제작된 공시체에서 신뢰도가 높을 것으로 판단되는 가장 안쪽에서 채취하였다.

4. 시험결과

4.1 일축압축시험

NDS와 SGR 공시체에 대해서 일축압축시험을 실시하였으며, 각각의 경우의 값들은 평균값을 이용하였으며 그 결과는 그림 4와 같다.

NDS의 경우 순결, 급결, 완결 순으로 조기강도가 크게 발현되었고, 재령 7일(168hr)차까지는 강도발현이 크게 증가하였으며 7일 이후에는 완만한 증가경향을 보였다. 28일(672hr)강도 또한 NDS 순결, 급결, 완결 순으로 강도가 크게 측정되었다.

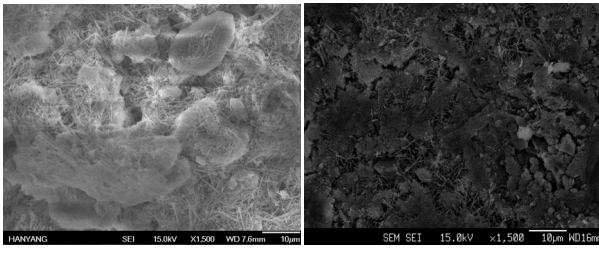
SGR의 경우 급결 재료가 초기 강도 발현이 크게 나타났지만, 재령이 경과할수록 완결보다 강도증가율이 작아지는 것으로 나타났다. 재령 28일 기준으로는 강도가 급결 및 완결과 상관없이 비슷한 값으로 수렴하는 것을 보였다.

4.2 SEM 분석

NDS와 SGR의 공시체 종류에 따른 재령 3일, 28일별 SEM촬영을 실시하였으며, 그 결과는 그림 5, 6과 같다.

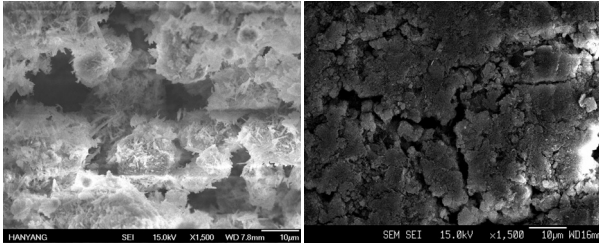
NDS의 경우 재령 3일에는 얇고 긴 침상형 구조를 나타내는 에트링자이트와 판상형의 수산화칼슘이 주로 관찰되었다(그림 5(a),(c),(e)). 한편, NDS 순결재료에서는 재령 3일에 다른 종류의 재료들보다 에트링자이트의 빈도가 많은 것을 확인할 수 있었다(그림 5(a)). 재령 28일에는 두께가 증가한 침상의 조직형태를 확인할 수 있었다(그림 5(b), (d), (f)).

SGR의 경우 재령 3일에는 NDS에 비해 긴 침상의 에트링자이트가 소수 관찰되었고 재령 28일에도 수화물의 응집 현상이 NDS에 비하여 덜 발달되는 것을 관찰할 수가 있었다(그림 6 참조).



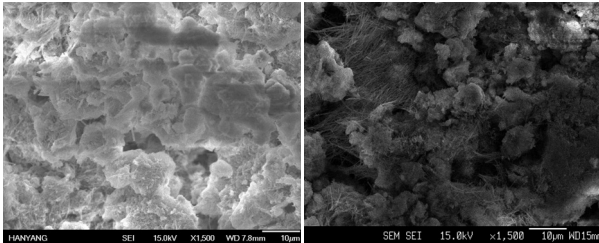
(a) NDS순결 재령 3일차

(b) NDS순결 재령 28일차



(c) NDS급결 재령 3일차

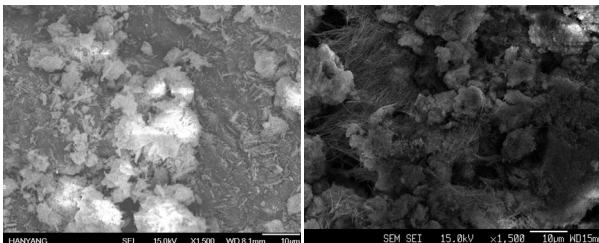
(d) NDS급결 재령 28일차



(e) NDS완결 재령 3일차

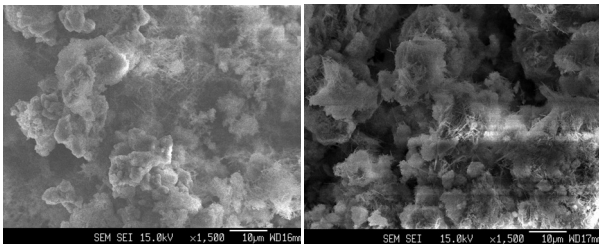
(f) NDS완결 재령 28일차

그림 5. NDS의 타입에 따른 재령일별 SEM촬영 결과



(a) SGR급결 재령 3일차

(b) SGR급결 재령 28일차



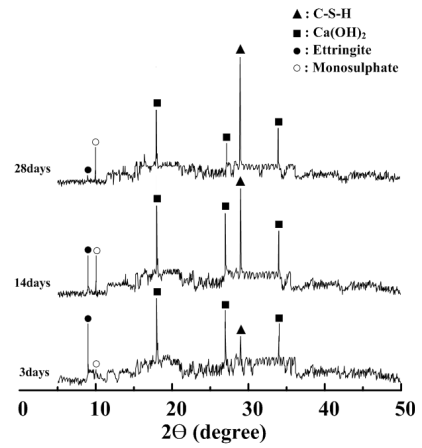
(c) SGR완결 재령 3일차

(d) SGR완결 재령 28일차

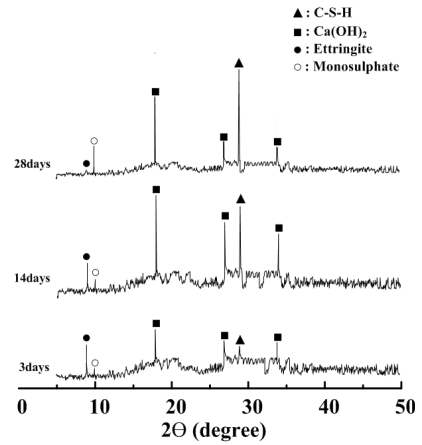
그림 6. SGR의 타입에 따른 재령일별 SEM촬영 결과

4.3 XRD 분석

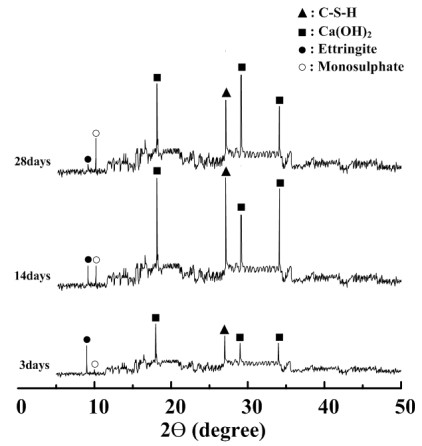
NDS의 경우 순결재료의 3일차와 14일차의 경우 급결과 완결보다 C-S-H(2θ deg. = 29°)의 피크가 높게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 28일차에도 NDS 순결이 NDS 급결과 완결보다 C-S-H의 피크가 더 크게 나타나는 것으로



(a) NDS 순결



(b) NDS 급결



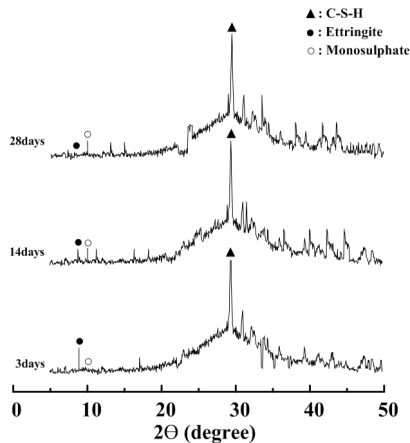
(c) NDS 완결

그림 7. NDS의 재령일별 XRD 분석

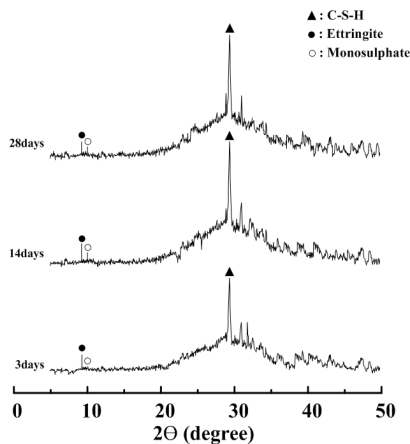
관찰되었다(그림 7 참조).

SGR의 경우도 재령 3일과 14일의 경우, SGR급결이 SGR완결보다 C-S-H의 피크가 더 높게 나왔다. 또한, 재령 28일의 경우 SGR급결과 완결이 거의 동일한 C-S-H 피크를 보였다(그림 8 참조).

한편 NDS는 재령 14일까지는 수산화칼슘의 피크(2θ deg. = 18° , 27° , 34°)가 강하게 나타나다가 28일에는 감소



(a) SGR 급결



(b) SGR 완결

그림 8. SGR의 재령일별 XRD 분석

된 것을 관찰할 수 있었고, SGR에서는 수산화칼슘 피크가 뚜렷히 관찰되지 않았다. NDS와 SGR 모두 에트링자이트 피크(2θ deg. = 9°)는 재령 초기에 나타났다가 점차 소멸되었고 모노설페이트(2θ deg. = 10°)는 재령이 증가할수록 점차 증가하는 경향을 보였다.

5. 분석 및 고찰

5.1 일축압축시험

5.1.1 NDS

NDS의 순결, 급결, 완결의 초기강도 차이는 gel-time의 특성을 잘 반영한 결과로 gel-time이 짧으면 경화속도가 빠르기 때문이라고 사료된다. 28일 강도의 차이발생은 표 4의 배합비에서 알 수 있듯이 순결, 급결, 완결 순으로 NDS UF (초미립자시멘트)의 배합량이 더 많기 때문에 당연한 결과라 할 수 있다.

결과적으로 NDS 순결의 경우, 초기강도와 장기강도 모

두 가장 우수한 결과를 나타냈지만 NDS UF 및 ES가 많이 필요한 배합이므로 경제성을 고려해서 사용목적에 적절하게 고려할 필요가 있다. 또한 NDS 순결의 경우 gel-time이 상당히 짧은 배합이므로 침투주입이 어려워져 지반의 변위, 특히 용기가 발생하기 쉬우므로 주요 지하매설물이 있을 경우에는 신중히 사용해야 된다.

5.1.2 SGR

SGR의 경우 급결과 완결재료가 장기강도는 비슷하고 초기강도만 차이 나는 이유는 표 5의 배합비에서 보면 알 수 있듯이 gel-time을 결정하는 SGR-11호, 12호의 사용만 차이가 있을 뿐 다른 재료의 배합량은 동일하기 때문이다.

5.1.3 NDS와 SGR의 비교분석

NDS와 SGR의 강도특성을 비교해보면 초기강도의 경우 NDS가 SGR보다 더 크게 측정되었다. 이는 SGR의 주성분인 물유리-시멘트의 겔화반응에 의해서 생성될 겔은 시간의 경과와 함께 수화에 의한 시멘트의 침강결정이나 칼슘화합물의 규산칼슘이나 알루미늄 규산칼슘 등의 결정이 되어서 고결화가 되는데 이 결정의 형성에는 시간이 걸리므로 물유리-시멘트계 겔의 강도발현에는 어느정도(적어도 1주일 이상)의 시간 경과가 필요하기 때문이다(米倉 등, 2000).

NDS의 28일 강도가 약 3,000~3,500kPa, SGR은 약 1,900~2,000kPa의 범위로 NDS가 SGR에 비해 강도가 약 1.5배 크게 발현되는 것으로 나타났다. 이는 NDS와 SGR의 재료적 차이에 의한 원인이 가장 큰 이유로 판단이 된다. NDS는 분말도가 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 이상인 마이크로시멘트가 주재이므로 일반시멘트를 주재료로 사용한 SGR보다 더 밀실한 조직을 구성했다고 사료할 수 있다.

5.2 SEM 분석

5.2.1 NDS

NDS의 경우 재령 3일에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 판상 형태를 유지하고 주상형태로는 성장하지 않은 것으로 보아 시멘트에서 용출되어 생성되지 오래되지 않은 것으로 사료된다. 그리고 재령 3일의 NDS 순결에서 특히 에트링자이트의 빈도가 높았는데 이 시기에 집중적으로 관찰된 에트링자이트의 결정은 성장하여 공극을 메꾸게 되며 이 경우 고강도화에 기여할 수 있다(배승훈, 2003). 그러므로 이를 통하여 강도가 초기에 발현되는 것을 확인할 수 있었고 이는 앞서 측정된 일축압축강도 측정 결과와도 일치하는 것으로 판단된다.

그리고 재령 28일에 관찰된 두께가 증가한 침상의 조직

은 C-S-H겔로 판단되는 밀실한 형태의 수화물이며, 이를 뼈대로 한 다수의 에트링자이트가 모여 밀실한 망을 이루는 구조가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 재령이 경과함에 따라 높은 강도가 발현되는 현상을 결정의 변화로부터 확인할 수 있었다. C-S-H의 내부 결정구조는 아직 해명되지 않았지만 그 물질의 성질을 설명하기 위하여 몇 가지 모델이 제안되었다. 파워스(Powers-Brumauer)의 모델에 의하면 이 물질은 대단히 큰 표면적을 가진 층상구조로 되어 있다고 하였다. 또한, 펠드만(Feldman-Sereda)의 모델은 C-S-H를 다른 형태와 크기(5Å~25Å)의 층간 공극을 가진 것처럼 불규칙하고 굴절된 임의의 층으로 이루어진 구조로 설명하였다(Ann 등, 2006).

5.2.2 SGR

SGR의 경우 NDS보다 재령 3일 에트링자이트의 빈도가 낮았으므로 초기강도가 떨어짐을 알 수가 있으며, 재령이 증가할수록 수화물의 발달정도도 NDS에 비해 적었고 이는 일축압축시험 결과와도 일치하는 경향을 나타내었다.

5.2.3 NDS와 SGR의 비교분석

전반적으로 NDS, SGR 모두 재령이 경과함에 따라 수화물이 성장해가는 것을 관찰할 수 있었다. NDS 공법의 수화물은 전체 조직이 치밀하여 공극이 거의 관찰되지 않아 이상적인 경화체 조직을 형성하고 있으나 SGR 경화체는 결정이 상대적으로 크고 느슨한 조직을 형성하고 있어 공극의 크기가 컸다. NDS 공법의 경화체는 SGR공법에 비교하여 상대적으로 치밀하고 견고한 조직을 형성하고 있으므로 차수성능 및 내구성 등의 특성이 우수할 것으로 사료된다.

5.3 XRD 분석

5.3.1 NDS

NDS의 경우 측정된 모든 재령들에서 순결재료의 에트링자이트 및 C-S-H 피크가 가장 강하게 측정이 되었는데, C-S-H는 경화체에 있어서 가장 큰 용적을 차지하는 것으로 강도를 결정짓는 중요한 요소이고, 경화체의 성질을 결정한다. 따라서 NDS 순결이 초기에 더 빨리 강도가 발현된다는 것을 의미하며, 일축압축강도시험 결과 및 SEM분석과도 부합됨을 알 수 있었다.

Cohen(1983)에 의하면 미세한 결정의 에트링자이트의 생성에는 수산화칼슘의 용출량이 매우 중요한 역할을 하는데, 본 XRD 분석에서도 재료의 팽창을 주도하는 미세한 결정의 에트링자이트 피크가 성장 시 수산화칼슘의 피크가 강하게 나타나 에트링자이트의 생성을 촉진키는 것을 확인할

수 있었다. 그리고 수산화칼슘의 피크는 재령 14일 이후 결정성이 약해지는 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 수산화칼슘이 반응하여 소비되었기 때문이라 판단된다.

5.3.2 SGR

SGR의 경우도 C-S-H 피크의 경향과 일축압축강도의 결과 및 SEM분석 결과가 유사한 것으로 나타났다. SGR의 경우 NDS와는 달리 수산화칼슘의 피크가 관찰되지 않았는데 이는 물유리의 겔화에 다량의 수산화칼슘이 소모되었기 때문이다. 따라서 시멘트입자의 결정형상에 필요한 수산화칼슘 양이 상당히 부족하기 때문에 고결강도가 초기에 발현되지 않는 것이라 판단할 수 있다(米倉 등, 2000).

5.3.3 NDS와 SGR의 비교분석

NDS와 SGR의 공통된 성질을 보면 재령이 증가할수록 C-S-H라고 약칭되는 칼슘 실리케이트 수화물이 증가하는 것을 관찰할 수 있었고 각각의 XRD 분석에서 재령 초기에서 에트링자이트 피크가 나타났다가 점차 소멸되어지는 경향이 나타났는데, 이는 강도 발현이 에트링자이트보다 훨씬 작은 모노설페이트로 전환되기 때문이라 사료된다(문경주, 2006). 그리고 재령이 증가할수록 결정들은 더욱 안정한 결합체인 C-S-H가 생성되면서 공극을 충전하여 밀실한 조직을 형성하는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 무기질계 주입재료인 NDS의 강도발현 메커니즘의 특성을 규명하기 위해, 일축압축시험, SEM촬영, XRD분석을 실시하였다. 또한 그 특성을 더욱 분명하게 분석하기 위한 비교대상으로 대표적인 물유리계 주입재료인 SGR을 선택하였고, 동일하게 일축압축시험, SEM촬영, XRD분석을 실시하였다. 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 일축압축시험 결과 NDS의 경우 순결, 급결, 완결 순으로 초기강도가 크게 발현이 되었고 28일 강도 또한 순결, 급결, 완결의 순으로 크게 측정이 되었다. SGR의 경우 급결이 완결보다 초기강도는 높았으나 28일 강도는 비슷하게 측정되었다.
- (2) SEM촬영 결과 NDS의 경우 재령 3일에 에트링자이트 및 수산화칼슘이 관찰되었고 순결에서는 특히 에트링자이트의 빈도가 많았다. 28일에는 두께가 증가한 C-S-H 겔로 판단되는 수화물이 관찰되었다. SGR의 경우 재령

3일에 NDS에 비해 에트링자이트가 소수 관찰되었고, 28일에도 수화물의 응집현상이 덜 발달되는 것으로 관찰되었다.

- (3) XRD 촬영 결과 NDS 순결의 에트링자이트 및 C-S-H 피크가 강하게 측정되었고 이는 일축압축시험 및 SEM 촬영 결과를 뒷받침하였다. SGR의 경우도 C-S-H의 피크 측정결과와 일축압축시험 및 SEM촬영 결과가 일치하는 경향을 보였다.
- (4) 결과적으로, NDS가 SGR보다 강도가 크게 발현이 되는 것으로 측정이 되었고 경화체는 SGR공법에 비교하여 치밀한 조직을 형성하고 있으므로 내구성 및 차수성의 특성이 우수할 것으로 판단된다. 하지만 주재가 마이크로시멘트인만큼 경제성의 고려와 gel-time에 따른 사용 목적을 적절히 파악하여 사용할 필요가 있다. 또한 환경적인 영향도 향후 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 강형남(2011), *다단분급기의 개발 및 지반개량효과 평가*, 박사학위논문, 한양대학교. pp. 30~31.
2. 기술표준원(2001), *흙의 일축압축시험방법*, KS F 2314.

3. 김진춘, 최영철, 정종주, 신상재, 윤남식(2001), 그라우팅기술 동향과 MSG 공법의 특징, *한국지반공학회논문집*, Vol. 17, No.3, pp. 40~49.
4. 문경주(2006), 무기계 산업폐기물을 자극제로 이용한 비소성 시멘트의 수화반응, *한국콘크리트학회 논문집*, Vol. 18, No. 2, pp. 269~270.
5. 배승훈(2003), *팽창재의 조성에 따른 칼슘설포알루미늄이트계 팽창시멘트의 수화특성*, 석사학위논문, 단국대학교. p. 8.
6. 천병식(2002), *S.R.C 공법의 특성 및 현장 적용성에 관한 검토 연구*, 연구보고서, 한양대학교, pp. 1~5.
7. 천병식, 강형남, 도종남, 임주현(2006), 환경 친화적인 무기질계 지반주입제의 내구성 및 차수효과에 관한 연구, *한국지반환경공학회논문집*, Vol. 7, No. 6, pp. 113~119.
8. 한양대학교(2011), *NDS공법의 초미립자 시멘트를 사용한 친환경적이고 내구성이 뛰어난 무기질계 지반주입제의 적용성 연구*, pp. 14~17.
9. 千柄植(1998), *最新 地盤注入-理論과實際*, 圓技術, pp. 199~201, 169~170.
10. 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.
11. Ann, K. Y., Song, H. W., Lee, C. H. and Lee, K. C.(2006), Build-up of Surface Chloride and Its Influence on Corrosion Initiation Time of Steel in Concrete, *EASEC-10, The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Bangkok, August 3~5, pp. 767~772.
12. Cohen, M. D.(1983), Modified Micromechanical Model, *Cement Concrete Research*, Vol. 13, p. 809.

(접수일: 2011. 3. 21 심사일: 2011. 8. 8 심사완료일: 2011. 9. 6)