

자화수를 사용한 주입재의 역학적 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Grout Materials Using a Magnetic Field Treated Water

천 병 식¹ Chun, Byung-Sik

양 형 칠² Yang, Hyung-Chil

이 상 영³ Lee, Sang-Young

Abstract

This study is about the estimation of the mechanical properties of cement grout material using a magnetic field treated water instead of tap water. The water that passed through a magnetic system is called MFTW. Similar research indicates that 5% of cement dosage can be saved by decreasing bleeding of concrete and improving resistance to freezing. The reason why MFTW can improve characteristics of concrete can be explained by molecular structure of water. Magnetic force makes water clusters into single molecule or small ones. Hence, the activity of water is improved by the magnetic force. While hydration of cement particles is on progress, the MFTW can penetrate the core region of cement particles more easily. Therefore, the hydration can be carried out more efficiently and the compression strength of concrete is highly improved. The sample of the sodium silicate cement grout's homogel using the MFTW results in highly compressive strength increases in compressive strength approximately from 20% to 50%.

요 지

본 연구는 배합수를 일반수 대신 자화수로 사용한 시멘트 그라우트재의 역학적 특성을 파악하는 것에 그 목적이 있다. Magnetic field를 통과한 물을 MFTW라 하는데, 이는 시멘트의 Bleeding 감소와 Freezing에 대한 저항을 향상시킴으로써 시멘트 사용량을 5% 절감시킬 수 있다고 알려져 있다. MFTW는 자기력에 의해 물 분자를 좀 더 작게 만들어서 물 분자의 활성도를 증가시켜 좀 더 쉽게 시멘트 분자의 Core Region으로 침투할 수 있게 함으로써 수화를 원활하게 한다. 결과적으로, MFTW는 좀 더 효율적인 수화를 일으키게 함으로써 콘크리트의 일축압축강도를 크게 향상시켰으며, 규산나트륨-시멘트그라우트재에 MFTW를 사용한 결과 일축압축강도가 약 20~50% 증가되었음을 알 수 있었다.

Keywords : Compressive Strength, Grout, Magnetic System, MFTW (Magnetic Field Treated Water)

1. 서 론

일정한 세기의 자성영역을 통과한 물을 MFTW (Magnetic Field Treated Water; 자화수) 또는 Magnetized

water라 부른다. 자화수를 배합수로 사용하였을 경우에 대한 연구는 1962년에 러시아의 Wulachoufuski와 Alnanina에 의해 연구되어지기 시작하였다. 자화수가 콘크리트 강도의 10%이상을 증가시킬 수 있다는 것을

1 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.)

2 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Ph. D, Candidate, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.)

3 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ., darksunide@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

확인하는 유사연구가 일본, 유럽, 중국에서도 보고된 바 있다. 배합수로 자화수를 사용한 경우 시멘트 입자의 수화반응이 진행됨에 따라 자화수는 시멘트 입자들의 중심부에 더욱 쉽게 침투할 수 있다(Nan Su 등, 2002). 시멘트 입자가 동일한 전기적 전하를 가진 자화수와 만날 때, 이러한 미립자는 서로 반발할 것이고, 이에 의해 혼합수의 흐름을 방해하는 시멘트 덩어리는 분산될 것이다. 그리고 수화반응시 시멘트 입자는 다른 물분자가 더 깊이 침투하는 것을 방해하는 시멘트 입자의 외부에 수화층을 형성하게 되는데, 자화수는 일반수에 비해 수화층을 쉽게 통과하여 침투할 수 있으므로 수화반응은 더욱 활발해 진다. 이 원리를 규산나트륨-시멘트그라우트재에 적용하면 수화반응을 촉진시키는 이점을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 자화수를 활용함으로써 시멘트의 양을 5%정도 절약 할 수 있고, 콘크리트의 bleeding을 감소시키며, 결빙에 대한 저항성을 증가 시킬 수 있다(Nan Su 등, 2002).

따라서, 본 연구에서는 자화수가 규산나트륨-시멘트 그라우트재의 시멘트 수화반응에 대한 영향을 분석하기 위해 일련의 강도시험을 실시하였다.

2. 이론적 배경

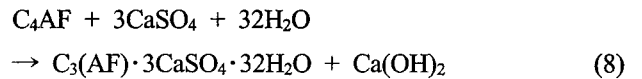
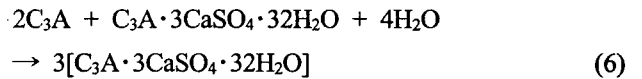
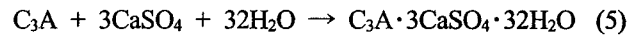
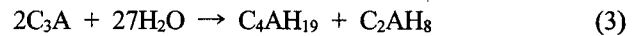
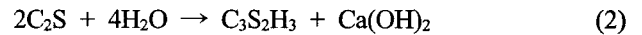
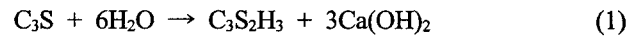
2.1 시멘트의 수화반응

시멘트는 물과 반응하여 수화하면서 응결·경화한다. 시멘트의 수화와 이에 따라 일어나는 현상은 시멘트의 가장 중요한 성질로서 많은 연구가 이루어지고 있다(Taylor, 1998). 시멘트의 수화는 시멘트입자의 표면에서부터 입자 내부로 진행되면서 시멘트 입자 주위에 수화물이 생성되고 시멘트 입자는 이 수화물로 둘러싸이게 되고, 이 수화물이 서로 결합하면서 시멘트 입자 사이가 수화물로 채워지고 굳기 시작한다. 시멘트 입자의 수화는 입자표면에서부터 진행하여 완전히 수화를 하는 데에는 오랜 시일이 걸리므로 그 동안 입자 내부는 수화하지 않은 미수화 상태로 남아 있다. 그러나 시멘트 경화체가 강도를 나타내는 것은 수화층이 3차원적으로 결합한 구조로 되면서 경화하기 때문인 것으로 꼭 완전히 수화를 하지 않아도 된다(천, 1998).

시멘트의 수화반응에 의한 생성물은 대부분 규산석회 수화물(C-S-H)(C.Vipuanandan, 1997)과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이다. C₃S는 보통 28일 만에 약 70%가 수화하

고 1년 만에 모두 수화한다. β-C₂S도 유사하게 반응하지만 약 30%가 28일 만에 반응하고 1년 만에 90%가 반응한다. 물론 반응속도는 입도분포, 온도 등 여러 인자에 의존한다. 보통포틀랜드시멘트가 완전히 수화하면 20~30%의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 생성한다(최, 2000; Taylor, 1998). 아래의 그림 1은 C₃S 수화Model을 나타낸 것이다.

보통포틀랜드시멘트의 수화과정은 극히 복잡하고, 더구나 긴 세월에 걸쳐 변화해 가므로, 단순한 화학반응으로 나타내는 것은 불가능하다. 그러나 시멘트 화합물의 상온에서의 수화반응을 요약하여 화학론적으로 표시하면 다음과 같이 나타난다.



식 (5), (6), (8)은 석고 공존 하에서의 화학반응식이다(荒井康未, 1984). 시멘트의 수화 초기에 시멘트 화합물은 대부분 위에 나타낸 반응식을 따라, 각각 단독으로 반응을 시작하는데, 그 속도는 각각 다르다. 일반적으로 반응속도는 물시멘트비(W/C)가 높을수록, 시멘트 입자가 작을수록, 온도가 높을수록 빨라진다(I. Soroka, 1979). 또, 시멘트 화합물도 순수한 화합물로 존재하지 않고 다소간의 다른 성분을 고용하여 클링커광물로 되어 있어서 그들의 수화반응은 더욱 복잡해지고 수화속도에도

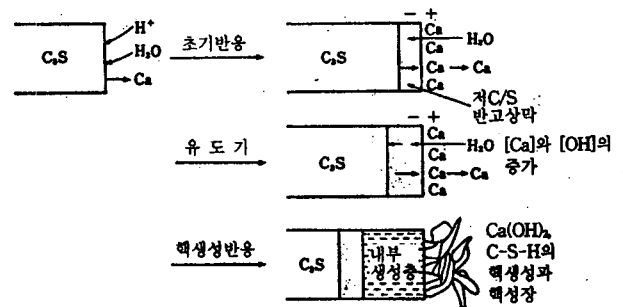
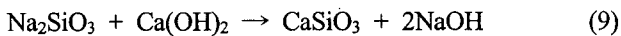


그림 1. C₃S 수화 Model(Taylor, 1979; 荒井康未, 1984)

크게 영향을 미칠 것이다.

2.2 겔화반응과 호모겔강도

규산나트륨 희석액과 시멘트 현탁액을 혼합하면 시멘트의 주성분인 수산화칼슘과 규산나트륨의 규산 및 전해질과 결합하여 실리케이트-시멘트 겔이 생성되며 겔화 반응의 원리는 식 (9), (10), (11), 그림 2와 같이 추정되었다(紫崎 外, 1977). 1976년 이후 일본에서 적용되고 있는 LW주입재의 재령별 강도는 그림 3과 같다(紫崎 外, 1977; 島田 俊价 外, 1989).



2.3 자화수

2.3.1 자화수의 정의

일정한 세기의 자성영역을 통과한 물을 MFTW(자화수) 또는 Magnetized water라고 부른다. 자기장을 벗어난 자화수는 일정 시간이 지나면 원 상태로 되돌아온다. 따라서 자기장을 통과한 물을 Magnetized water라고 명

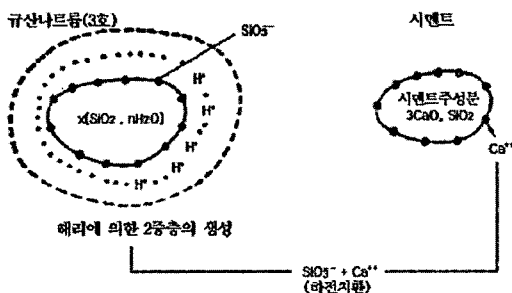


그림 2. 규산나트륨-시멘트계 겔화기구(紫崎 外, 1977)

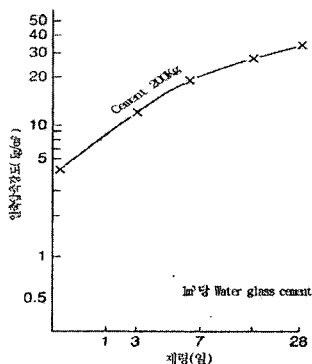


그림 3. LW(Homo Gel) 강도(紫崎 外, 1977)

명하는 것은 부적당하고 MFTW라고 명명되어야 한다(Nan Su 등, 2002). 일반수는 그림 4에서 보이는 것처럼 수소결합에 의해 인력이 작용하는 성향을 가지며, Cluster를 형성하는 극성이 있는 물질이다. 일반적으로 그림 5처럼 각각의 물분자 덩어리는 상온에서 100여개의 물분자를 내포하고 있다. 자기장에서의 자력은 그림 4(b)처럼 Cluster를 각각의 분자나 작은 Cluster상태로 분해시킬 수 있다. 이에 따라 물의 활성도는 증가하게 되고, 위와 같이 일반수가 자성영역을 통과하여 물분자 Cluster가 각각의 분자나 보다 작은 Cluster상태로 된 물을 자화수라 한다.

2.3.2 자화수의 메카니즘

시멘트 입자의 수화반응이 진행됨에 따라 자화수는 시멘트 입자들의 중심부에 더욱 쉽게 침투할 수 있다. 시멘트 입자가 동일한 전기적 전하를 가진 자화수와 만날 때, 이러한 미립자는 서로 반발할 것이고, 이에 의해 혼합수의 흐름을 방해하는 시멘트 덩어리는 분산될 것이다. 게다가, 시멘트 입자는 수화반응시 물분자가 더 깊이 침투하는 것을 방해하는 수화층을 형성한다. 자화수의 분자가 많이 분산되거나 작은 Cluster일수록 자화수는 더욱 쉽게 수화층을 통과하여 침투할 수 있고, 수화반응은 더욱 활발해진다(Nan Su 등, 2002).

2.3.3 자화수의 효과

(1) 강도증가

시멘트를 반죽할 때 자화수를 이용하면 콘크리트의

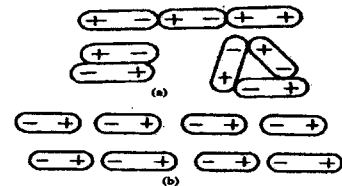


그림 4. 물분자에 대한 자력의 영향 (a) 일반수, (b) 자화수(Nan Su 등, 2002)

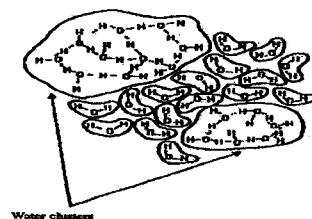


그림 5. 일반수의 물분자구조(Nan Su 등, 2002)

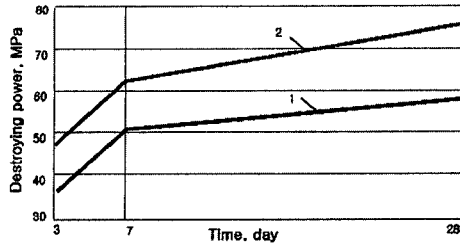
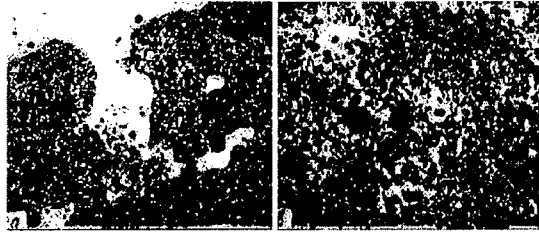
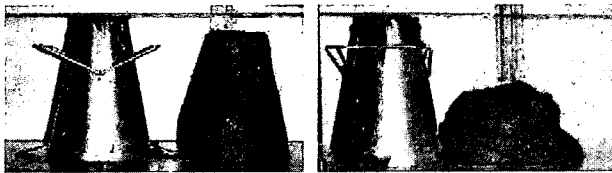


그림 6. 콘크리트의 강도에 미치는 자화수의 영향 (1: 일반수사용, 2: 자화수사용)



일반수 자화수

그림 7. 전자현미경으로 관찰한 3일된 콘크리트 샘플의 구조 (Magnetic Technologies L.L.C., 1995)



일반수사용 자화수사용

그림 8. 시멘트의 가소성 수준 변화(Magnetic Technologies L.L.C., 1995)

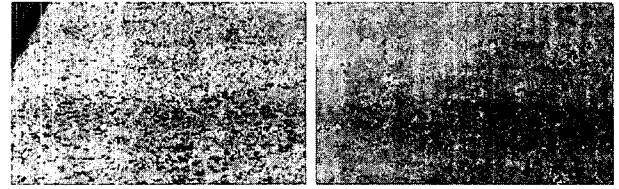
강도를 현저하게 증가시킬 수 있다(그림 6 참조). 콘크리트의 강도는 그것의 구조에 달려있는데, 전자현미경으로 3일된 시멘트 압축을 관찰했을 때 자화수 처리된 콘크리트의 구조가 더 조밀하다는 것을 그림 7에서 보여준다.

(2) 가소성의 증가

시멘트의 가소성은 자화수를 이용했을 때 증가한다. 가소성의 수준은 시멘트 아교의 성질에 의해 영향을 받는데, 자화처리하는 수화반응시 시멘트의 가소성 수준을 변화시키므로 그림 8의 슬럼프 시험에서 보듯이 가소성 수준은 자화수를 배합수로 사용하였을 경우 그 유동성이 1.5배정도 증가하는 것을 보여준다.

(3) 내구성의 증가

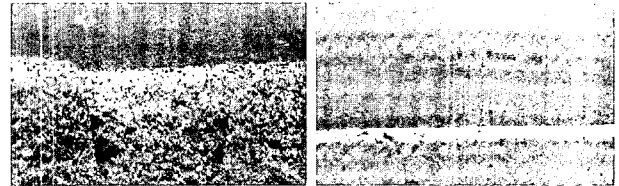
자화수로 처리된 시멘트로 제작된 생산품은 급격한 온도변화, 습기, 염분이 있거나 산성화된 환경, 기계적



일반수사용

자화수사용

그림 9. 광범위한 온도변화에 노출된 슬래브(Magnetic Technologies L.L.C., 1995)



일반수사용

자화수사용

그림 10. 해안 방어벽의 외관변화(Magnetic Technologies L.L.C., 1995)

과부하와 같은 외부적인 힘에 대한 저항력이 보통 시멘트보다 높다(그림 9, 그림 10 참조). 그림 9는 러시아 시베리아에서 건조된 후 1년 동안 40°C ~ -40°C의 광범위한 온도변화에 노출된 슬래브의 사진이다. 그림 10은 러시아 흑해에서 설치 완료 후 5년이 지난 해안 방어벽의 외관변화 보여준다.

(4) 부가적인 이점

시멘트나 다른 건축 재료를 생산할 때 담수가 부족한 경우가 있을 수 있다. 여러 해 동안 관찰과 실습을 통해 자화시스템은 해수에도 응용될 수 있게 되었다. 자화된 해수를 이용할 때 시멘트의 강도는 30~40%까지 증가하며 시멘트를 14%까지 절약할 수 있다(Magnetic Technologies L.L.C., 1995).

3. 실내시험

3.1 시험용 시료제작

3.1.1 사용재료

본 연구에 사용된 첨가제로서는 시멘트 지연제인 STPP (Sodium Tripolyphosphate)를 사용하였고, 그라우트재료로서는 규산나트륨 3호, 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며 화학성분과 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 1. 규산나트륨(3호), OPC의 성분

(1) 규산나트륨(3호)

구 분	규산나트륨 3호
비 중	1.384
이산화규소(SiO ₂) (%)	27.2
산화나트륨(Na ₂ O) (%)	9.14
철(Fe) (%)	0.0034
몰불용분 (%)	0.0026
pH(25℃)	14
점도(25℃) (cp)	200

(2) 화학성분(단위 : %)

종 류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
보통포틀랜드시멘트(OPC)	20.4	5.8	3.1	62.6	3.6	0.13	0.77	1.9
마이크로시멘트(MC)	28.1	11.4	2.1	48.9	4.3	0.16	0.60	3.7

(3) 물리적 특성

종 류	비 중	분말도(cm ² /g)	응 결	
			초결(분)	응결(시:분)
보통포틀랜드시멘트(OPC)	3.15	3,170	250	6:50
마이크로시멘트(MC)	3.01	8,270	260	7:20

표 2. 압축강도 측정용 시료 배합비

성 분		S1	S2	S3
A액	규산나트륨(3호) (cc)	100	100	100
	물 (cc)	100	100	100
	물의 형태	일반수	자화수(2000G)	자화수(4000G)
	첨가제(S) (g)	3	3	3
B액	OPC (g)	80	80	80
	물 (cc)	175	175	175
	물의 형태	일반수	자화수(2000G)	자화수(4000G)
	첨가제(S) (g)	-	-	-

표 3. 일축압축강도시험 상세표

분 류	내 용
공시체 크기	φ5cm×10cm
측 정 횟 수	최소 3회 이상
전 단 방식	변형을 제어 방식
로드셀 정확도	0.2kg
변형을 게이지 정확도	0.01mm
전 단 속 도	1mm/min

3.1.2 시료제작

자화수가 규산나트륨-시멘트그라우트재의 압축강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 표 2와 같이 시료를 배합하였다. 첨가제로는 STPP를 사용하였다. 표 2의 배합비에 따라 A액과 B액을 각각 배합하여 준비한 후 1:1의 체적비로 혼합하여 제작하였다. 시료의 크기는 직경 5cm×길이 10cm로 제작하였고 시료의 양생은 상

온 20±5℃로 항온수조에서 습윤 양생하였다.

3.2 시험방법

일축압축강도시험은 디지털형 만능재료시험기를 이용하여 KSF 2314에 의거하여 일축압축강도를 측정(표 3 참조)하였다(한국표준협회, 2000). 겔타임은 A액, B액

을 각각 200cc컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간을 측정하여 이것을 주입재(A액+B액)의 겔타임으로 측정하였다. 공시체를 제작하여 수중양생 시킨 후 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일 별로 실험을 실시한다. 특히, 초기의 강도특성을 자세히 알아보기 위해 공시체 제작 후 1시간, 3시간, 6시간의 강도를 추가로 측정하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 자화수를 사용한 주입재의 공학적 특성

그림 11과 표 4는 자화수를 사용한 호모겔의 일축압축강도이다. S1은 STPP와 일반수를 사용한 시료이고, S2는 첨가제 STPP와 2000G Magnetic System을 통과한 자화수를 사용하였으며, S3는 첨가제 STPP와 4000G

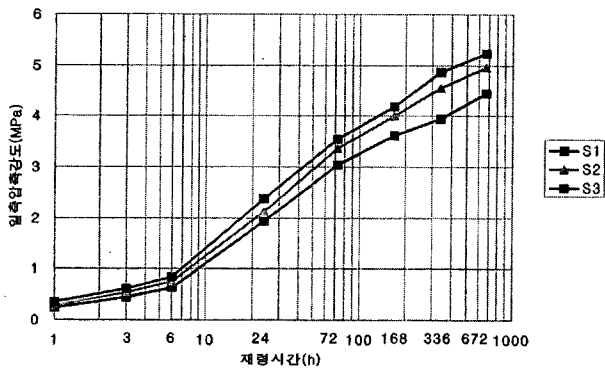


그림 11. 호모겔의 압축강도 특성

표 4. 호모겔의 압축강도(단위 : MPa)

	S1	S2	S3
1 hour	0.230	0.282	0.343
3 hours	0.436	0.528	0.612
6 hours	0.630	0.745	0.841
1 day	1.940	2.130	2.376
3 days	3.030	3.360	3.556
7 days	3.630	4.000	4.198
14 days	3.960	4.560	4.864
28 days	4.440	4.950	5.230

표 5. 재령에 따른 강도증대효과(%)

	1 hour	3 hours	6 hours	1 day	3 days	7 days	14 days	28 days
S1	480	546	637	1393	1430	1312	1218	1269
S2	589	662	753	1529	1586	1446	1403	1415
S3	716	767	851	1706	1679	1517	1496	1495

Magnetic System을 통과한 자화수를 사용하였다. 자기장의 세기에 따른 강도 차이를 알아보기 위해 Magnetic Mixer장치에 들어가는 코일의 양을 조절함으로써 2000G와 4000G의 자기장을 얻을 수 있었다. 또한, 자화수가 강도에 미치는 영향을 확실히 볼 수 있도록 강도를 높일 수 있는 STPP를 첨가하게 되었다(표 2 참조).

측정 결과에서 알 수 있듯이 자화수를 사용한 시료는 일반수를 사용한 시료보다 약 20~50%의 강도증가현상(2.3.3 참조)이 확인되었다. 또한, 2000G보다 4000G에서 더 큰 강도 증가 효과가 있음을 알 수 있었다. 2000G에서는 약 10~30%의 강도증가효과가 확인되었고, 4000G에서는 약 20~50%의 강도증가효과가 확인되었다. 이로서 2000G보다 4000G의 자성영역을 통과한 자화수가 좀 더 큰 강도증가효과가 있음을 알게 되었다.

표 5에서 알 수 있듯이 재령별 강도증가효과는 초기 재령에서 가장 큰 강도증가효과가 있고 시간이 지남에 따라 강도증가효과가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 자화수가 시간이 지나면서 일반수로 변화하는 경향 때문인 것으로 사료된다(그림 12, 표 6 참조). 그림 12는 4000G Magnetic Mixer장치를 통과한 자화수가 시간경과에 따라 어떻게 변화하는지 나타낸다. 결과적으로 자화수는 장치를 통과한지 30분 이내에 배합수로 사용한 경우 가장 큰 강도증가 효과를 나타내었으며, 1시간 이후에는 그 효과가 일반수와 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

S1시료와 S3시료의 초기강도증가를 보면 약 1.5배의 효과를 확인할 수 있고, S3시료가 5.230MPa로 가장 큰

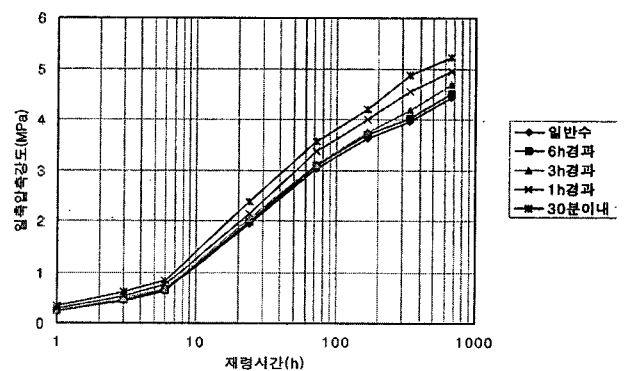


그림 12. 4000G를 통과한 자화수의 시간경과에 따른 강도변화

표 6. 4000G를 통과한 자화수의 시간에 따른 강도(단위 : MPa)

	일반수	6h경과	3h경과	1h경과	30분이내
1 hour	0.23	0.24	0.24	0.282	0.343
3 hours	0.436	0.45	0.491	0.528	0.612
6 hours	0.63	0.65	0.68	0.745	0.841
1 day	1.94	1.98	2.03	2.13	2.376
3 days	3.03	3.09	3.11	3.36	3.556
7 days	3.63	3.7	3.75	4	4.198
14 days	3.96	4.02	4.17	4.56	4.864
28 days	4.44	4.51	4.69	4.95	5.23

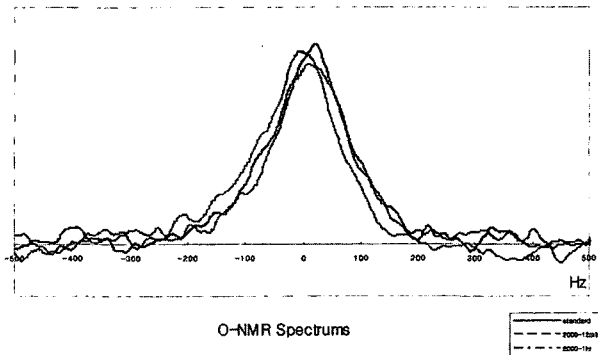


그림 13. 일반수와 자화수(2000Gauss)의 비교

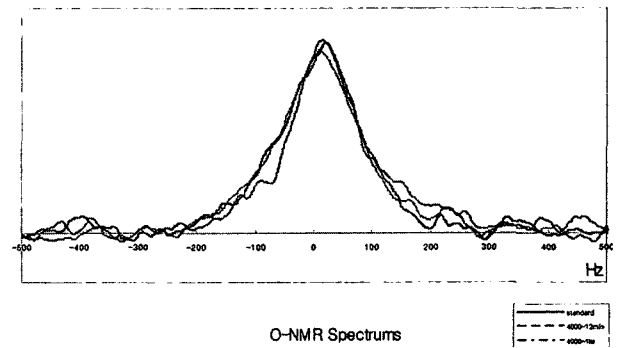


그림 14. 일반수와 자화수(4000Gauss)의 비교

강도를 나타냈다. 가장 강도가 작은 시료는 일반수를 사용한 S1시료이며 그 크기는 4.44MPa이다. 결과적으로 일반수보다 약 18%의 큰 강도증가 현상을 보였다.

4.2 ^{17}O -NMR 시험결과 및 분석

그림 13과 14는 ^{17}O -NMR시험결과를 나타낸다. 본 연구에서는 ^{17}O -NMR시험을 통해 일반수가 자화수로 변화하면서 물분자의 활성도가 증가함으로써 시멘트의 수화를 촉진시켜 그라우트강도 증진에 영향을 미친다는 가정을 좀 더 과학적으로 접근하고자 하였다. ^{17}O -NMR시험은 일반수와 Magnetic Field를 통과한 자화수(2000, 4000 Gauss)의 상태를 시간별 비교하여 나타내었다.

그림 13과 14에서 보듯이, 일반수와 자화수와의 ^{17}O -NMR시험결과 자화수 NMR spectrums의 선폭이 일반수 NMR spectrums보다 좁은 것을 알 수 있다. 따라서 자화수의 분자운동이 일반수보다 더 활성화된 것을 알 수 있었다(L.M. Bull 등, 1998). 그리고 그림 14에서 보듯이, 자화수의 시간에 따른 NMR시험결과 1시간이후에 일반수와 비슷한 폭으로 변화하였다. 즉, Magnetic Mixer통과 후 1시간이 지나면 일반수와 비슷하게 성질이 되돌아 같다는 것을 알 수 있었다. 이는 실내시험결

과(그림 12 참조)와 비슷한 결과를 나타내는 것이다. 그러므로, 자화수는 활성화된 물 분자들에 의해 시멘트그라우트의 강도발현에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그러나 활성화된 물 분자와 강도발현의 관계는 앞으로 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

자화수가 배합수로 사용된 규산나트륨-시멘트그라우트재의 공학적 특성을 파악하기 위해 행하여진 일련의 실험을 수행한 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) MFTW(자화수)를 배합수로 사용한 시료는 일반수를 사용한 시료보다 약 20~50%의 강도증가 현상을 나타내었다. 이는 물 분자Cluster의 크기가 작아 지거나 단분자로 분해되어 시멘트의 수화를 촉진시켰기 때문이라고 사료된다.
- (2) 2000G(Gauss)일 때보다 4000G의 자기장을 통과한 MFTW를 배합수로 사용한 시료의 압축강도 증가특성이 우월한 것으로 확인되었다. 앞으로 다른 자기장영역에 대한 연구가 진행되어 최적의 자기장 크기를 찾을 필요성이 있다고 사료된다.

- (3) 재령별 압축강도에 대한 자화수의 강도증가효과는 초기재령에서 큰 증가효과를 나타내었으며 시간이 지날수록 자화수가 일반수로 변화하려는 경향 때문에 강도증가효과가 저감된다고 사료된다.
- (4) Magnetic Mixer장치를 통과한 자화수와 방치한 시간에 따른 실내시험결과 약 1시간 이후 성질이 일반수와 비슷해지는 현상을 강도실험을 통해 알 수 있었다.
- (5) 자화수가 강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 사용된 STPP는 자화수와 동시에 사용함으로써 증첩적으로 두 가지 효과가 모두 발현되어 강도증가효과를 발생시키는 것으로 판단된다.
- (6) ^{17}O -NMR시험결과 선폭의 변화에 의해 자화수가 일반수보다 활성화된 물 분자들을 형성하고 이 활성화된 물 분자에 의해 강도증가효과를 발생시키는 것으로 판단된다. 또한, 시간에 따른 강도변화를 알아본 실내시험과 비슷하게 자화수는 1시간 이후 일반수와 비슷한 성질로 되돌아간다는 것을 알 수 있었다.
- (7) 향후 그라우트 분야의 연구완성도를 높이기 위해 자화수를 배합수로 사용한 주입재가 최적의 강도증가효과를 나타낼 수 있도록 자기장 처리 System

을 개발하기 위한 연구 및 자화수의 활성화된 물 분자와 강도증가에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 천병식 (1998), "최신지반주입 -이론과 실제-", 원기술, pp.61-64.
2. 최상훈 (2000), "시멘트화학", 한양대학교 시멘트연구소, pp.57-62, 69-72, 167-171.
3. 한국표준협회 (2000), KS F 2314, 흙의 일축압축 시험방법.
4. 島田 俊价, 佐藤 武, 多久 實 (1989), "最先端技術の薬液注入工法", 理工圖書, pp.110-128.
5. 紫崎 光弘, 下田 一雄, 野上 明男 (1977), "薬液注入工法の設計と施工", 山海堂, pp.30-31, 233-246.
6. 荒井康末 (1984), "セメントの 材料化学", 大日本圖書, pp.119-227.
7. C.Vipuanandan (1997), "Grouting Compaction, Remediation and Testing", ASCE, pp.110-128.
8. H.F.W. Taylor (1998), "Cement Chemistry 2nd edition", Thomas Telford, pp.113-156, 187-260.
9. I. Soroka (1979), "Portland Cement Paste and Concrete", Macmillan Press, pp.28-45.
10. L.M. Bull, A.K. Cheetham, T. Anupold, A. Reinhold (1998), "A High-Resolution ^{17}O NMR Study of Siliceous Zeolite Faujasite", American Chemical Society, pp.3510-3511.
11. Magnetic Technologies L.L.C. (1995), <http://www.magneticast.com>.
12. Nan Su, Chea Fang Fu (2002), "Effect of MFTW on mortar and concrete containing fly ash", Department of Construction Engineering, National Yulin University of science and Technology.

(접수일자 2006. 4. 28, 심사완료일 2006. 7. 10)