

## 자화수를 사용한 주입재의 공학적 특성에 관한 연구 A Study on the Engineering Properties of Grout Materials Using a Magnetic Field Treated Water

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 박두희<sup>2)</sup>, Doo-Hee Park, 양형칠<sup>3)</sup>, Hyung-Chil Yang,  
정종주<sup>4)</sup>, Jong-Ju Jung, 이상영<sup>5)</sup>, Sang-Young Lee

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.
- 2) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.
- 3) 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D, Candidate, Dept. of Civil Eng, Hanyang Univ.
- 4) 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D, Candidate, Dept. of Civil Eng, Hanyang Univ.
- 5) 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of civil Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS** : Water that is treated by passing through a magnetic field of certain strength is called Magnetic Field Treated Water(MFTW). Previous research indicate that use of MFTW can save 5% of cement dosage, decrease bleeding of concrete, and improve resistance to freezing. The reason why MFTW can improve characteristics of concrete can be explained by the molecular structure of water. Magnetic force can break apart water clusters into single molecules or smaller ones, therefore, the activity of water is improved. While hydration of cement particles is in progress, the MFTW can penetrate the core region of cement particles more easily. Hence, hydration takes place more efficiently which in turn improves concrete compressive strength. Test results demonstrate that the compressive strength of the sodium silicate cement grout homogel increases by approximately 20 - 50% by using the MFTW.

**Key words** : MFTW(Magnetic Field Treated Water), Magnetic system, Compressive strength, Grout

### 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 확인하는 유사연구가 일본, 유럽, 중국에서도 보고 된바 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 증가시킬 수 있다(Nan Su

등, 2002).

따라서, 본 연구에서는 지하수가 규산나트륨-시멘트그라우트계의 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, 1986 ; Kondo, 1968). 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. 시멘트의 수화반응에 의한 생성물은 대부분 규산석회 수화물(C-S-H)과 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이다. C<sub>3</sub>S는 보통 28일 만에 약 70%가 수화하고 1년 만에 모두 수화한다. β-C<sub>2</sub>S도 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)<sub>2</sub>)을 생성한다(최, 2000; Taylor, 1998). 아래의 그림 2.1은 C<sub>3</sub>S 수화Model을 나타낸 것이다.

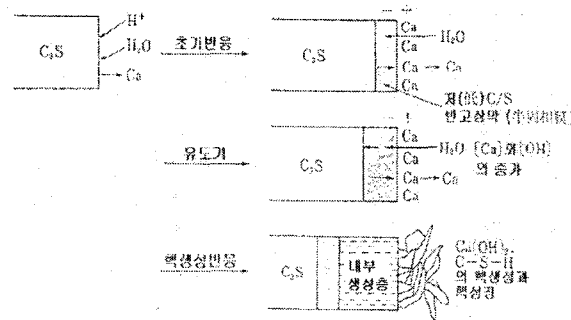
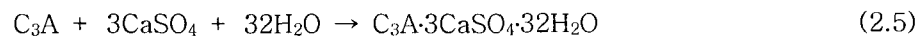
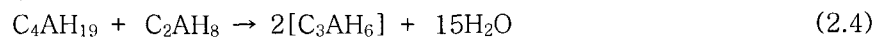
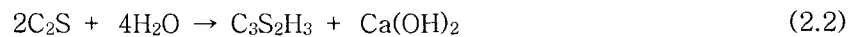
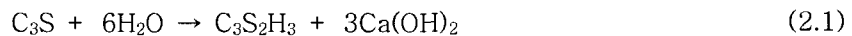
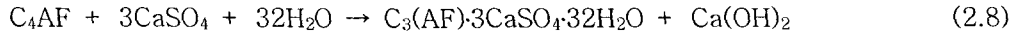
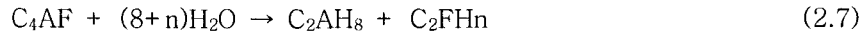
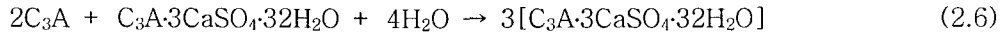


그림 1. C<sub>3</sub>S 수화Model (Taylor, 1979; 荒井康未, 1984)

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





(2.5), (2.6), (2.8)식은 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. 또, 시멘트 화합물도 순수한 화합물로 존재하지 않고 다소간의 다른 성분을 고용하여 클링커 광물로 되어 있어서 그들의 수화반응은 더욱 복잡해지고 수화속도에도 크게 영향을 미칠 것이다.

## 2.2 자화수

### 2.2.1 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 명명하는 것은 부적당하고 MFTW라고 명명되어야 한다(Nan Su 등, 2002).

일반수는 그림 2에서 보이는 것처럼 수소결합에 의해 인력이 작용하는 성향을 가지며, Cluster를 형성하는 극성이 있는 물질이다. 일반적으로 그림 3처럼 각각의 물분자 덩어리는 상온에서 100여개의 물분자를 내포하고 있다. 자기장에서의 자력은 그림 2(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.

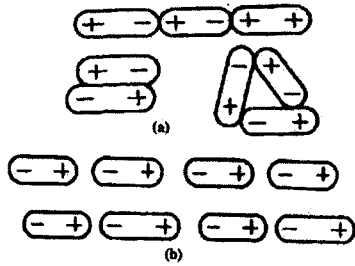


그림 2. 물분자에 대한 자력의 영향  
(a) 일반수, (b) 자화수

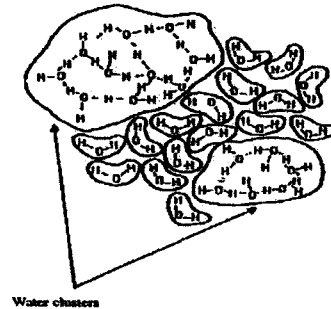


그림 3. 일반수의 물분자구조  
(Nan Su 등, 2002)

### 2.2.2 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 시멘트 외부의 수화층을 형성한다. 자화수의 분자가 많이 분산되거나 작은 Cluster일수록 자화수는 더욱 쉽게 수화층을 통과하여 침투할 수 있고, 수화반응은 더욱 활발해진다(Nan Su 등, 2002).

### 2.2.3 자화수의 효과

#### (1) 강도증가

시멘트를 반죽할 때 자화수를 이용하면 콘크리트의 강도를 현저하게 증가시킬 수 있다(그림 4참조). 콘크리트의 강도는 그것의 구조에 달려있는데, 전자현미경으로 3일된 시멘트 압석을 관찰했을 때 자화수 처리된 콘크리트의 구조가 더 조밀하다는 것을 그림 5에서 보여준다.

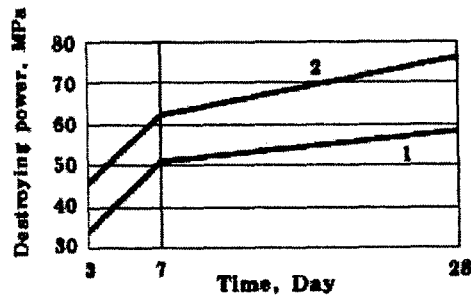
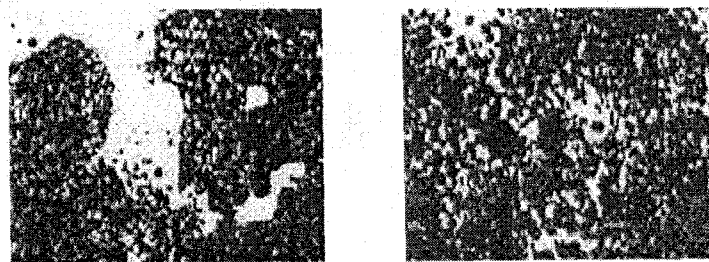


그림 4. 콘크리트의 강도에 미치는 자화수의 영향

(1: 일반수사용, 2: 자화수사용)



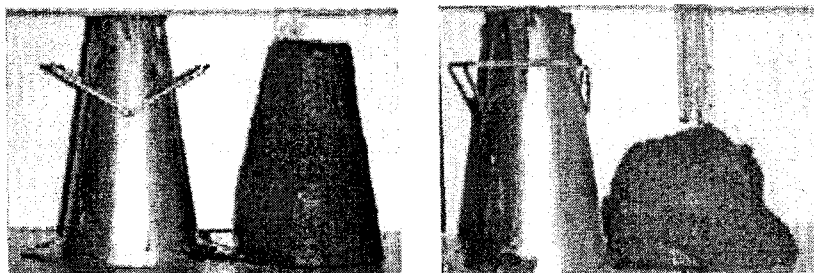
일반수로 Mixing

자화수로 Mixing

그림 5. 전자현미경으로 관찰한 3일된 콘크리트 샘플의 구조

#### (2) 가소성의 증가

시멘트의 가소성(可塑性)은 자화수를 이용했을 때 증가한다. 자화처리는 수화반응에 시멘트의 가소성 수준을 변화시키므로 그림 6에서 보듯이 가소성 수준은 시멘트 수화에 따라 좌우 된다고 할 수 있다.



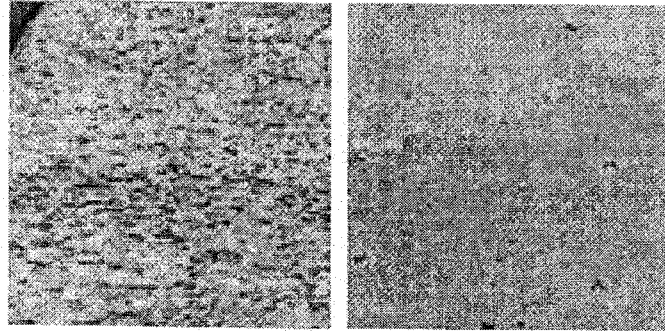
보통물 사용

자화수 사용

그림 6. 시멘트의 가소성 수준 변화

### (3) 내구성의 증가

자화수로 처리된 시멘트로 제작된 생산품은 급격한 온도변화, 습기, 염분이 있거나 산성화된 환경, 기계적 과부하와 같은 외부적인 힘에 대한 높은 저항력을 갖고 있음을 그림 7과 8에서 보여준다.



일반수 사용                      자화수 사용  
그림 7. 광범위한 온도변화에 노출된 슬래브

(여름:40℃까지, 겨울:-40℃까지): 러시아 시베리아에 건조된 후 1년



일반수 사용                      자화수 사용  
그림 8. 설치된 후 5년이 지난 시멘트 해안 방어벽의 외관변화(러시아 흑해)

### (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.

## 3. 실내시험

### 3.1 시험용 시료제작

#### 3.1.1 사용재료

본 연구에 사용된 첨가제로서는 시멘트 지연제인 STPP(Sodium Tripolyphosphate)를 사용하였고, 그 라우트재로서는 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 <sub>2</sub> ) (%)	27.2
산화나트륨(Na <sub>2</sub> O) (%)	9.14
철(Fe) (%)	0.0034
물불용분 (%)	0.0026
pH(25℃)	14
점도(25℃) (cp)	200

(2) 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(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 <sup>3</sup> /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

### 3.1.2 시료제작

자화수가 규산나트륨-시멘트그라우트제의 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 상온 20±5℃로 항온수조에서 습윤 양생하였다.

표 2. 압축강도 측정용 시료 배합비

	성 분	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A액	규산나트륨 (3호) (cc)	100	100	100	100	100	100
	물 (cc)	100	100	100	100	100	100
	물의 형태	일반수	자화수 (2000G)	자화수 (4000G)	일반수	자화수 (2000G)	자화수 (4000G)
	첨가제 (S) (g)	-	-	-	3	3	3
B액	OPC (g)	80	80	80	80	80	80
	물 (cc)	175	175	175	175	175	175
	물의 형태	일반수	자화수 (2000G)	자화수 (4000G)	일반수	자화수 (2000G)	자화수 (4000G)
	첨가제 (S) (g)	-	-	-	-	-	-

### 3.2 시험방법

일축압축강도시험은 디지털형 만능재료시험기를 이용하여 KSF 2314에 의거하여 일축압축강도를 측정(표 3 참조)하였다. 겔타입은 A액, B액을 각각200cc컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간을 측정하여 이것을 주입재(A액+B액)의 겔타입으로 측정하였다. 공시체를 제작하여 수증양생 시킨 후 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일별로 실험을 실시한다. 특히, 초기의 강도특성을 자세히 알아보기 위해 공시체 제작 후 1시간, 3시간, 6시간의 강도를 추가로 측정하였다.

표 3. 일축압축강도시험 상세표

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

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 자화수를 사용한 주입재의 공학적 특성

그림 9와 표 4는 자화수를 사용한 호모겔의 일축압축강도이다. S1은 일반수, S2는 2000G Magnetic System를 통과한 자화수, S3는 4000G의 Magnetic System를 통과한 자화수를 사용하였다. S4는 STPP와 일반수를 사용한 시료이고 S5는 첨가제 STPP와 2000G Magnetic System를 통과한 자화수를 사용하였으며, S6는 첨가제 STPP와 4000G Magnetic System를 통과한 자화수를 사용하였다.

측정 결과에서 알 수 있듯이 STPP를 첨가한 시료는 첨가하지 않은 시료에 비해 3~10배의 고강도를 보였고, 자화수를 사용한 시료는 일반수를 사용한 시료보다 약 20~50%의 강도증가현상이 확인되었다. 또한, 2000G보다 4000G에서 더 큰 강도 증가 효과가 있음을 알 수 있다. 2000G에서는 약 20~30%의 강도증가효과가 확인되었고, 4000G에서는 약 30~50%의 강도증가효과가 확인되었다. 이로서 2000G보다 4000G의 자성영역을 통과한 자화수가 좀더 큰 강도증대효과가 있음을 알게 되었다.

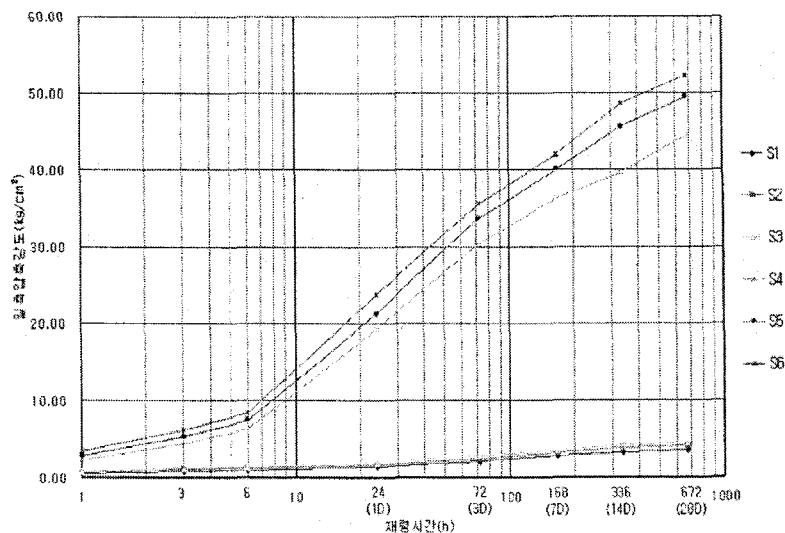


그림 9. 호모겔의 압축강도 특성

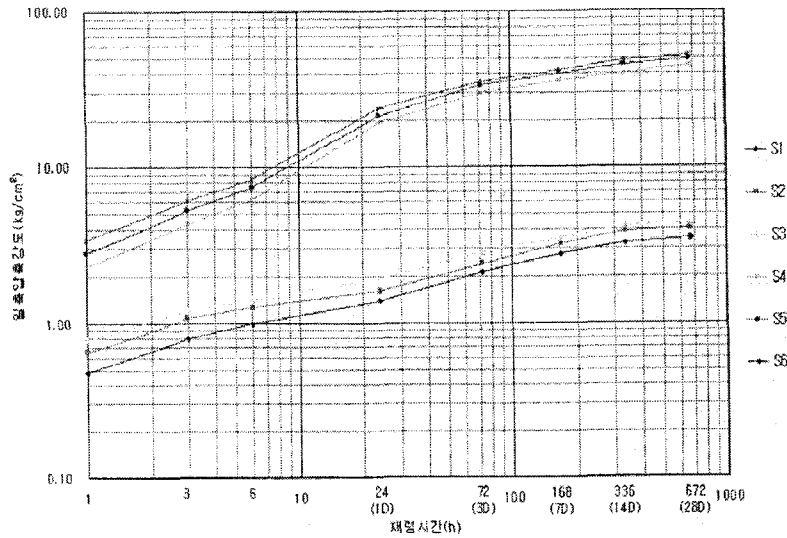


그림 10. 호모젤의 압축강도 특성(Log Scale)

표 4. 호모젤의 압축강도 (단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1 hour	0.48	0.62	0.78	2.30	2.82	3.43
3 hours	0.80	1.08	1.21	4.36	5.28	6.12
6 hours	0.99	1.27	1.41	6.30	7.45	8.41
1 day	1.39	1.61	1.92	19.40	21.30	23.76
3 days	2.12	2.42	2.85	30.30	33.60	35.56
7 days	2.77	3.19	3.52	36.30	40.00	41.98
14 days	3.25	3.88	4.21	39.60	45.60	48.64
28 days	3.50	4.05	4.40	44.40	49.50	52.30

표 5에서 알 수 있듯이 재령별 강도증대효과는 초기재령에서 가장 큰 강도증대효과가 있고 시간이 지남에 따라 강도증대효과가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 자화수가 시간이 지나면서 일반수로 변화하는 경향 때문인 것으로 사료된다.

표 5. 재령에 따른 강도증대효과(%)

	1 hour	3 hours	6 hours	1 day	3 days	7 days	14 days	28 days
S1	100	100	100	100	100	100	100	100
S2	136	135	128	116	114	115	119	116
S3	163	152	143	128	135	127	120	127
S4	480	546	637	1393	1430	1312	1218	1269
S5	589	662	753	1529	1586	1446	1403	1415
S6	716	767	851	1706	1679	1517	1496	1495

S1시료와 S6시료의 강도증가를 보면 7~17배의 효과를 확인할 수 있고, S6시료가 52.30kg/cm<sup>2</sup>의 가장 큰 강도를 나타냈다. 가장 강도가 작은 시료는 일반수를 사용한 S1시료이며 그 크기는 3.50kg/cm<sup>2</sup>이다. 결과적으로 일반수보다 약 15배의 큰 강도증가 현상을 보였다. 따라서 STPP와 자화수를 동시에 사용한 시료의 강도발현은 중첩적으로 두 가지 효과가 모두 발현되어 강도증대효과를 발생시키는 것으로 사료된다.



## 5. 결 론

자화수가 배합수로 사용된 규산나트륨-시멘트그라우트계의 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 작아지거나 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) STPP와 자화수를 동시에 사용한 시료의 압축강도특성을 살펴보면 STPP를 첨가하지 않은 일반수를 배합수로 사용한 시료의 압축강도보다 STPP와 자화수를 사용한 시료가 약 7~17배의 강도증가효과를 나타내었다. 따라서 STPP와 자화수를 동시에 사용함으로써 중첩적으로 두 가지 효과가 모두 발현되어 강도증가효과를 발생시키는 것으로 판단된다.
- 5) 향후 그라우트 분야의 연구완성도를 높이기 위해 자화수를 배합수로 사용한 주입제가 최적의 강도증대효과를 나타낼 수 있도록 자기장 처리 System을 개발하기위한 연구가 지속되어야할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 천병식(1998), **최신지반주입 -이론과 실제-**, 원기술, pp. 313~317.
2. 최상훈(2000), **시멘트화학**, 한양대학교 시멘트연구실, pp. 57~62, 69~72, 167~171.
3. 荒井康未(1984), “セメントの 材料化學”, 大日本圖書, pp. 119~227.
4. 日本分散技術研究會(1976), “分散技術と工業的應用の實際”, 經營開發センター, pp. 358~459.
5. H.F.W. Taylor(1998), “Cement Chemistry 2nd edition”, Thomas Telford, pp. 113~156, 187~260.
6. 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.
7. I.Soroka(1979), "Portland Cement Paste and Concrete", Macmillan Press, pp. 28~45.