

## 고강도 콘크리트의 수화수축과 자기수축의 실험연구

A Study On the Chemical shrinkage and Autogenous Shrinkage  
of High strength Concrete

허우영\*

김화중\*\*

Heo, Woo-Young

Kim, Wha-Jung

## Abstract

The purpose of this study is to investigate the chemical shrinkage and autogenous shrinkage of high strength cement paste and silica fume and fly ash and sand to cement ratio by the method of volumetric tests, and also investigate the autogenous shrinkage of high measurement method, and compare the results of volumetric test and linear length measurement test.

A series of cement paste which have W/C ratio of 25%, 35%, 45% respectively were planed to study the effect of the W/C ratio to the shrinkages, and a series of cement paste which were replaced the cement by the silica fume and fly ash with 5%, 10%, 15% as the mass of cement respectively were planed to investigate the effects of pozzolana to the shrinkages. A series of mortar which have a C/S ratio of 1:1, 1:1.5, 1:2 respectively were planed to investigate the shrinkage resistant effect of aggregate.

키 워 드 : 고강도 콘크리트, 수화수축, 자기수축

Keywords : High Strength Concrete, Chemical Shrinkage, Autogenous Shrinkage

## 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

현대의 구조물이 초고층화, 대형화 되어감에 따라 보다 합리적이고 경제적인 구조시스템이 요구되고 있다. 이에 따라 보다 효율적인 건설재료가 필요로 하게 되었으며, 이를 위한 방안으로 현재까지 가장 보편적으로 사용되고 있는 건설재료인 콘크리트의 고품질화가 적극적으로 추진되고 있다. 이의 일환으로써 고강도콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부는 현장에서 적용되고 있는 실정이다. 콘크리트를 고강도화 하게 되면 콘크리트 부재의 단면을 줄일 수 있어 자중의 감소로 인한 구조물의 경량화, 장대화, 고층화 등의 장점을 얻을 수 있다. 이와 같은 목적을 위해 콘크리트의 성능개선과 신 재료의 개발 등과 더불어 그의 발전을 보상해 줄 수 있는 많은 연구자료 또한 증가되었지만, 고강도 콘크리트가 가지고 있는 이점을 활용하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다. 또한 콘크리트의 품질 향상 및 소요 성능을 개선시키기 위한 방법 중의 하나로서 천연광물 및 혼화재로서 산업부산물인 실리카흄, 고로슬래그, 플라이 애쉬 등의 각종 포졸란 활성 또는 잠재 수경성을 갖는 재료들이 콘크리트의 고강도화를 위하여 그 사용이 검토되고 있다. 그러나 일반적으로 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 높은 시멘트량이

요구되고 있는 반면, 과도한 시멘트 량의 사용은 높은 수화열을 발생시키고 또한 수화수축도 증가시킨다. 이것들은 모두 초기재령에서의 고강도 콘크리트의 균열의 중요한 원인으로 꼽을 수 있다.

이런 균열의 발생은 장기적으로 구조물의 강도를 떨어뜨리고, 내구성의 저하를 야기시키므로 고강도 콘크리트를 구조물에 대량적으로 사용할 시에는 반드시 해결해야할 과제로 되고 있으며 또한 지금까지 많은 연구가 진행되고 있다.

## 1.2 연구의 목적

고강도 콘크리트의 초기재령에서의 균열에 대한 민감성은 고성능 콘크리트의 초기재령에서의 큰 용적의 변화에 많은 관계가 있다는 주장이 있다. 콘크리트의 용적변화는 주로 콘크리트의 결합재인 시멘트의 용적의 변화에서 비롯된다. 용적의 변화를 초래하는 콘크리트의 수축에서는 초기 재령에서의 화학수축이 많은 비중을 차지하고, 또한 고성능 콘크리트에서는 수화수축에 뒤따르는 자기수축도 많은 비중을 차지한다고 지적되고 있다.

본 연구는 실리카흄과 플라이 애쉬를 치환한 고강도 시멘트페이스트 및 잔골재를 함유한 고강도 모르타의 수화수축과 자기수축에 대한 실험적 연구와 고강도 콘크리트의 자기수축 실험을 통하여 고강도 콘크리트의 초기재령에서 균열을 일으키는 중요한 원인으로 주목되고 있는 자기수축 특성 파악에 기초적 자료를 제공하고자 한다.

\* 경북대학교 건축공학과 박사수료, 정희원

\*\* 경북대학교 건축공학과 교수, 정희원

## 2. 실험계획

### 2.1. 실험개요

본 연구에서는 고강도 시멘트페이스트와 콘크리트의 수화수축과 자기수축의 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 계획하고 진행하였다.

단위시멘트 량이 시멘트페이스트의 수화수축과 자기수축에 대한 영향을 파악하고자 물시멘트비를 25%, 35%, 45%로 한 A시리즈의 실험을, 실리카흙의 치환에 따른 고강도 시멘트페이스트의 수화수축과 자기수축의 양상을 파악하고자 물결합재비가 25%인 배합에서 실리카흙의 치환율을 5%, 10%, 15%로 한 B시리즈의 실험을 계획하였으며, 또 다른 포졸란 혼화재인 플라이애쉬 치환율이 각각 5%, 10%, 15%인 C시리즈의 실험을 계획하였다.

수화수축과 자기수축에 대한 골재의 영향을 파악하고자 잔골재로 강모래를 시멘트의 부피에 대한 비가 각각 1:1, 1:1.5, 1:2인 D시리즈의 실험을 계획하였다.

또한 고강도 콘크리트의 자기수축 특성을 파악하기 위하여 물결합재비 25%, 실리카흙을 8%, 플라이애쉬를 15%치환하고 잔골재율이 각각 30%, 35%, 38%, 41%, 45%인 E시리즈의 실험을 계획하였다.

시험체 계획과 배합상황은 표 1에 보여주는 것과 같다.

각 배합은 모두 세 개의 시험체를 제작하였으며, 수화수축과 자기수축 값은 이들의 평균값을 취하는 것으로 하였다.

### 2.2. 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

실험에 사용한 골재와 혼화재 및 고성능 감수제의 물성은 표 2에 나타내었다.

### 2.3. 실험방법

#### 1) 시멘트페이스트의 수화수축의 실험방법

본 연구에서는 시멘트페이스트와 모르타르의 수화수축을 용적변화 측정방법을 사용하여 측정하였다. 실험방법은 다음과 같다. a. 먼저 용적이 50ml인 빈 삼각플라스크의 무게를 최소 눈금이 0.1g인 저울로 측정하여 그 값을 W1로 기록한다. b. 다음 삼각플라스크에 시멘트페이스트를 약 2cm 두께로 넣고 잘 흔들어서 페이스트 내의 공기를 최대한 방출하고, 그 무게를 측정하여 W2로 기록한다. c. 다음 포화 석회수를 난류가 발생하지 않게 삼각플라스크의 벽을 따라 용기 내에 가득 넣는다. d. 그리고 피펫을 관통한 고무마개로 삼각플라스크를 막고 삼각플라스크입구와 피펫과 고무마개의 접촉부를 방수성접착제로 잘 밀봉한다.(여기에서 피펫은 최소눈금이 0.05ml인 것을 사용하였다) e. 다음 주사기로 피펫의 위 끝으로 물을 넣어 기록시작점까지 도달하게 하고 그 눈금을 L0으로 기록한다. 그리고 피펫의 위 끝을 테이프로 밀봉하여 물의 증발을 방지하였다. f. 그 후 삼각플라스크를 온도가 24±2℃인 항온 항생실에 설치하고 측정을 시작한다. 예정된 측정간격인 t 시간이 지난 후 피펫의 눈금을 Lt로 기록한다.

표 1. 실험 배합

시험체	변수	변수명						
		시험체	W/C (B)	S.F	F.A	C/S	S/A	S.P
시멘트 페이스트	A-1	25	-	-	-	-	1	
	A-2	35	-	-	-	-	-	
	A-3	45	-	-	-	-	-	
	B-1	25	5	-	-	-	1	
	B-2		10	-	-	-	1	
	B-3		15	-	-	-	1.5	
	C-1	25	-	5	-	-	1	
	C-2		-	10	-	-	1	
	C-3		-	15	-	-	1	
모르타르	D-1	25	-	-	1/1	-	1	
	D-2				1/1.5		1	
	D-3				1/2		1	
콘크리트	E-1	25	8	15	-		30	2.4
	E-2						35	2.4
	E-3						38	2.4
	E-4						41	2.4
	E-5						45	2.4

(단위:% C/S는 시멘트와 골재의 체적비, S/A는 잔골재율 나머지는 시멘트와의 질량비)

표 2. 골재 및 혼화재료의 재료적 성질

재료	종류 · 산지	물성
잔골재	경기도 안양	표건비중:2.6 흡수율:1.17%, 조립율:2.80 단위용적중량: 1,622kg/m <sup>3</sup>
굵은골재	경기도 안양	표건비중:2.63 흡수율0.62%, 조립율:6.90, 실적율: 60.4 %
실리카흙	체코산	비중: 2.2 분말도:192600(cm <sup>2</sup> /g)
플라이애쉬	충남 보령산	비중: 2.22 분말도:3,850(cm <sup>2</sup> /g)
고성능AE 감수제	FLOWMIN 2000H	감수율:23%

#### 2) 시멘트페이스트의 자기수축의 실험방법

시멘트페이스트의 자기수축을 측정하는 방법은 기본적으로 수화수축을 측정할 때의 방법을 사용하였지만, 순서 b에서 잘 찢어지지 않는 고무 재질의 얇은 주머니로 시멘트페이스트를 담고 끈으로 매어 밀봉하여 삼각플라스크에 넣은 다음 위의 수화수축을 측정하는 순서대로 실험을 진행하였다. 단 W1에 고무 주머니와 끈의 질량을 추가하여 고려하였다.

#### 3) 콘크리트의 자기수축 측정방법

본 연구에서는 콘크리트의 자기수축은 길이변화 선형측정 방법을 택하였다. 콘크리트의 자기수축은 3차원 체적변화이지만 프리즘형의 콘크리트 시험체에서 장축방향에서의 길이변화를 측정하는 것으로서 자기수축을 평가하는 것으로 기존의

연구들에서 많이 적용되었으며, 본 연구에서도 이와 같은 측정방법을 적용하였다. 시험체 사이즈는 10×10×40cm이고, 측정용 쇠몰드의 바닥에 1mm 두께의 테프론시트를 깔고 몰드의 내벽에 0.1mm 두께의 공업용 랩으로 덮음으로 콘크리트와 몰드 사이의 마찰을 최소화 하여 자기수축이 구속을 받지 않도록 설계하였으며, 콘크리트를 타설한 후 그 위에 젖은 물수건을 덮어 외부환경과의 수분 교환을 최대한 차단하였다. 측정은 쇠몰드 양단에서 콘크리트 내부에 삽입된 플러그에 정밀도가 0.001mm인 변형측정기로 길이변화를 일정한 시간 간격으로 기록하였다.

2.4 비빔순서

1) 시멘트페이스트

우선, 시멘트는 모르타르 믹서 용기에서 1분동안 저속 전비빔을 하고, 물을 첨가한다. 그리고 또 1분가량 저속 비빔을 한다. 둘째로, 사발을 타올로 덮고 3분간 대기하고, 나중에 1.5분간 가결을 방지하기 위하여 최종적으로 빠른 비빔을 진행한다. 그리고 배합물 중의 공기를 최소한으로 하기 위하여 바이브 브레딩 테이블이 사용된다. 바이브레이팅은 최대한으로는 5분 최소한으로는 블리딩이 생길 때까지 진행된다.

2) 콘크리트

콘크리트의 자기 수축 실험체 제작 순서는 그림 1과 같다.

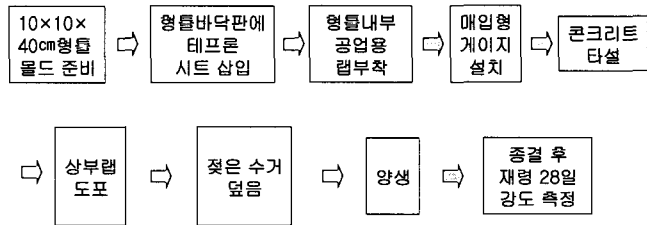


그림 1. 콘크리트 자기 수축 실험체 제작 순서

3. 실험결과 및 분석

3.1. 시멘트페이스트에서의 수화수축과 자기수축

1) A 시리즈 시험체

A시리즈 시멘트페이스트는 각각 물시멘트비가 25, 35, 45%인 배합이다. 각각의 배합으로 수화수축 측정용 시험체 3개와 자기수축 측정용 시험체 3개씩 제작하였다. 여기에서 A-1 배합은 이후의 B, C, D, E 시리즈와 동일한 물시멘트비 25%로서 이들 실험의 기본 배합으로 활용하였다.

아래의 표 3은 동일한 시험체에서의 세 개의 측정결과에서 얻어진 용적 수축율의 평균값이다. 모든 시험체는 재령 7일까지 측정을 진행하였다.

표 3. A시리즈의 수화수축과 자기수축 측정결과

시험체 분류	시험체명	수축율(%)					
		4	16	27	49	82	168
		시간					
수화수축	A-1	0.56	2.79	3.62	4.46	5.02	5.58
	A-2	0.33	1.63	2.61	3.59	4.37	4.89
	A-3	0.32	1.16	1.81	2.52	3.23	4.01
자기수축	A-1e	0.31	0.92	1.53	1.99	2.60	2.91
	A-2e	0.22	0.65	1.09	1.86	2.40	2.62
	A-3e	0.18	0.55	0.83	1.75	2.21	2.39

그림 2는 A시리즈 시험체의 수화수축을 나타내고 있다. 대체적으로 물시멘트비가 증가할수록 수화수축율은 낮아지는 경향을 나타내었다. 물시멘트비가 25%인 A-1시험체가 재령 168시간에서 5.58%로서 가장 많은 화학수축을 나타내고 있다. 이것은 이 시험체가 다른 두 시험체에 비하여 단위시멘트량이 많아 수화가 많이 발생하여 상대적으로 많은 수축을 일으키고 있다는 것을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

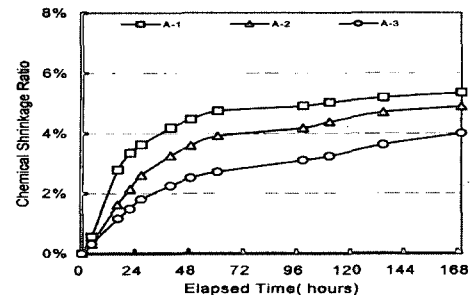


그림 2. A시리즈 수화수축

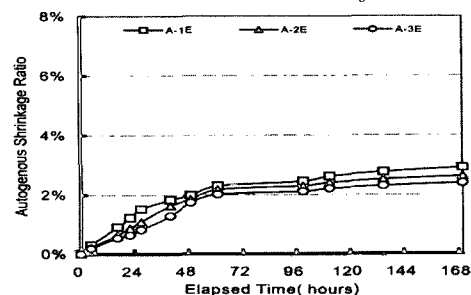


그림 3. A시리즈의 자기수축

그림 3은 A시리즈 시험체의 자기수축을 나타내고 있다. 대체적으로 물시멘트비가 높아짐에 따라 자기수축은 약간 감소하는 경향을 나타냈으며, 물시멘트비가 25%인 A-1e 시험체가 재령 168시간에서 2.91%로서 가장 많은 자기수축을 나타내고 있다. A시리즈 시험체는 재령 48시간까지 상대적으로 높은 수축 증진율을 나타내었고 그 후로는 수축 증진율이 감소하는 경향을 나타내었다.

A시리즈 시험체의 수화수축과 자기수축의 관계를 그림 4에 나타내었다.

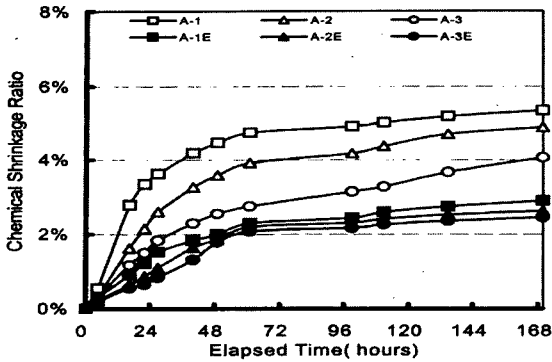


그림 4. A시리즈의 수화수축과 자기수축 비교

2) B시리즈 시험체

표 4는 실리카흙을 각각 5%,10%,15%로 치환한 B시리즈 시험체에서의 수화수축과 자기수축 측정결과를 나타내고 있다.

B시리즈의 시험체는 대체적으로 실리카흙을 치환하지 않은 A-1시험체에 비하여 높은 수화수축율을 나타내었으며, 재령 168시간에서 실리카흙을 15%치환한 B-3시험체가 6.51%의 가장 높은 수화수축율을 나타내었다.

또한 A-1시험체에 비하여 자기수축도 약간 증가되었으며 실리카흙의 치환율이 증가함에 따라 자기수축 값도 증가하는 경향을 나타내었다. 재령 168시간에서 실리카흙을 15%치환한 B-3시험체가 3.67%로서 가장 높은 자기수축율을 나타내었다.

표 4. B시리즈의 수화수축과 자기수축 측정결과

시험체 분류	시험체명	수축율(%)					
		4	16	27	49	82	168
		시간					
수화수축	B-1	0.78	2.73	3.71	4.68	5.33	5.98
	B-2	0.81	3.07	3.82	4.88	5.57	6.20
	B-3	1.14	3.43	4.23	5.14	5.71	6.51
자기수축	B-1e	0.58	1.35	1.74	2.13	2.51	3.09
	B-2e	0.65	1.47	1.79	2.28	2.77	3.42
	B-3e	0.92	1.65	2.02	2.39	3.12	3.67

그림 5는 B시리즈의 수화수축을 나타내고 있다. 기준 배합 A-1에 비하여 B시리즈 시험체는 모두 약간 높은 수화수축율을 나타내었으며, 실리카흙 치환율의 증가와 함께 수화수축율도 증가하는 추세를 나타내었다.

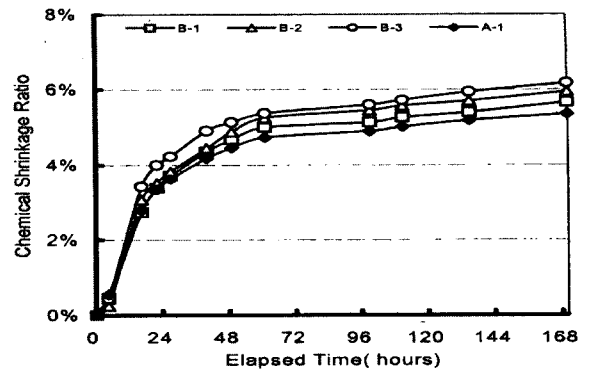


그림 5. B시리즈의 수화수축

그림 6은 B시리즈의 자기수축 그래프를 나타내고 있는데, 자기수축도 실리카흙의 증가와 함께 증가하는 추세를 보여주었으며 B-3시험체가 재령 168시간에서 6.51%의 가장 높은 수화수축율을 보여주었다.

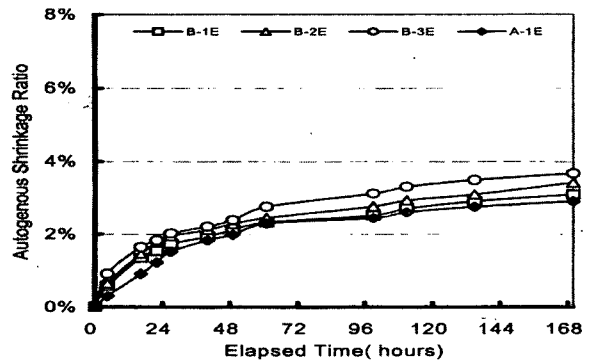


그림 6. B시리즈의 자기수축

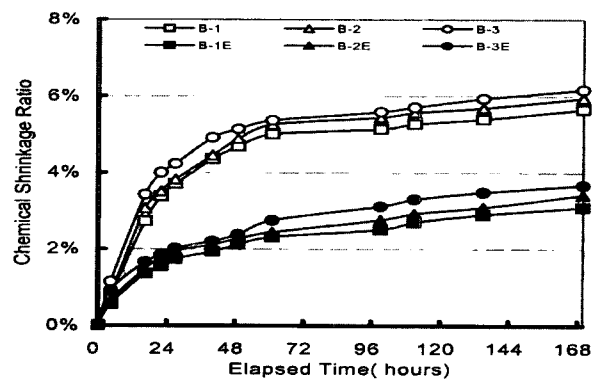


그림 7. B시리즈의 수화수축과 자기수축 비교

그림 7은 B시리즈 시험체의 수화수축과 자기수축의 재령에 따른 증진성상을 비교적으로 나타내고 있다.

3) C시리즈 시험체

C시리즈 시험체는 플라이애쉬를 각각 5%,10%,15% 치환한 배합이다.

표 5. C시리즈의 수화수축과 자기수축 측정결과

시험체 분류	시험체명	수축율(%)					
		4	16	27	49	82	168
수화수축	C-1	3.42	4.17	4.28	4.60	4.92	5.13
	C-2	2.75	3.48	3.62	3.99	4.57	4.78
	C-3	2.49	2.92	3.14	3.46	3.89	4.00
자기수축	C-1e	1.06	1.76	1.94	2.29	2.82	3.00
	C-2e	1.20	2.20	2.40	2.60	3.10	3.30
	C-3e	1.25	2.34	2.50	2.81	3.28	3.43

표 5는 C시리즈 시험체의 수화수축과 자기수축을 재령별로 나타내고 있다. C시리즈의 수화수축은 치환율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬를 15% 치환한 C-3시험체에서 4%로 가장 낮게 나타났다.

그림 8은 C시리즈와 기준배합과의 재령에 따른 수화수축의 비교를 나타내고 있다. 플라이애쉬를 치환함으로써 수화수축이 기준 배합A-1보다 다소 감소하는 것으로 나타났다.

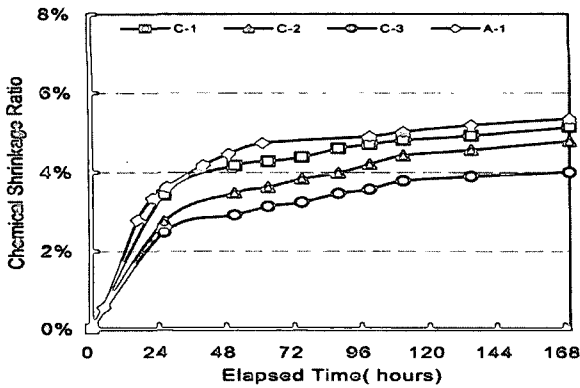


그림 8. C시리즈의 수화수축

그림 9는 C시리즈와 기준배합과의 재령에 따른 자기수축 비교 그래프이다. 플라이애쉬 치환율에 증가에 따라 자기수축도 감소하는 것으로 나타났으며, 기준배합 A-1의 자기수축과 비슷한 수준인 것으로 나타났다.

그림 10는 C시리즈에서의 수화수축과 자기수축간의 비교 그래프이다.

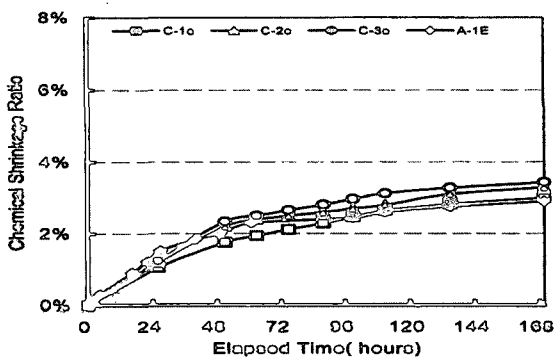


그림 9. C시리즈의 자기수축

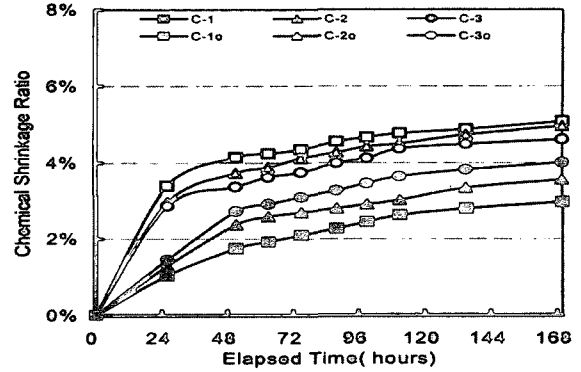


그림 10. C시리즈의 수화수축과 자기수축 비교

3.2. 모르타르의 실험결과

D시리즈는 조립율이 2.8인 강모래를 충전재로 사용한 시멘트 트페이스트 즉 모르타르이다.

표 6은 재령별 D시리즈의 수화수축과 자기수축 측정값을 나타내고 있다. 모래의 함유량이 증가함에 따라 수화수축은 감소하는 경향을 나타내는 반면 자기수축은 증가하는 경향을 나타내었다.

표 6. D시리즈의 수화수축과 자기수축 측정결과

시험체 분류	시험체명	수축율(%)					
		4	16	27	49	82	168
수화수축	C-1	2.13	2.50	2.78	3.05	3.61	4.07
	C-2	1.96	2.14	2.25	2.66	3.12	3.41
	C-3	1.67	1.85	2.09	2.45	2.81	3.05
자기수축	C-1e	0.50	0.83	1.00	1.33	1.83	2.00
	C-2e	0.54	1.08	1.26	1.80	2.35	2.53
	C-3e	0.73	1.62	1.76	2.06	2.50	2.65

그림 11은 D시리즈와 기준배합 A-1과의 수화수축의 비교를 나타내는 그래프이다. 모래를 함유한 D시리즈의 수화수축은 기준배합에 비하여 감소되었으며, 시멘트:모래 비가 1:2인 D-3 배합에서 3.05%로 가장 낮은 수화수축율을 나타내었다.

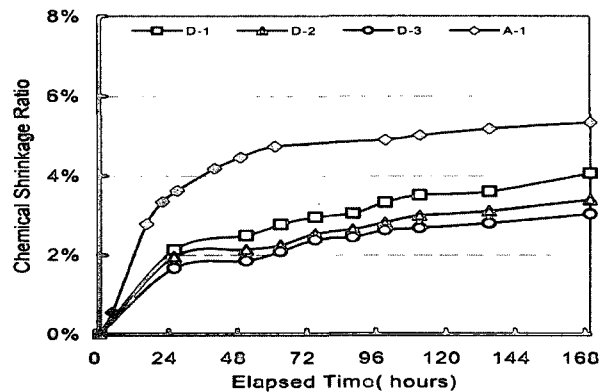


그림 11. D시리즈에서의 수화수축

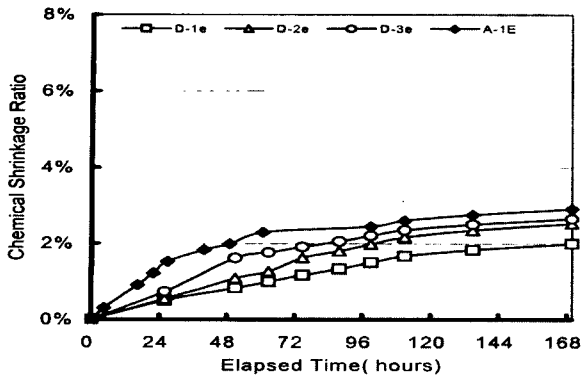


그림 12. D시리즈에서의 자기수축

그림 12는 D시리즈와 기준배합 A-1과의 자기수축의 비교를 나타내는 그래프이다. D시리즈의 자기수축도 기준배합에 비하여 감소하는 경향을 나타내었지만, 모래혼입율의 증가에 비례하여 감소하는 경향은 나타나지 않는 것으로 관찰되었다.

그림 13은 D시리즈에서의 수화수축과 자기수축을 재령에 따라 비교한 그래프이다.

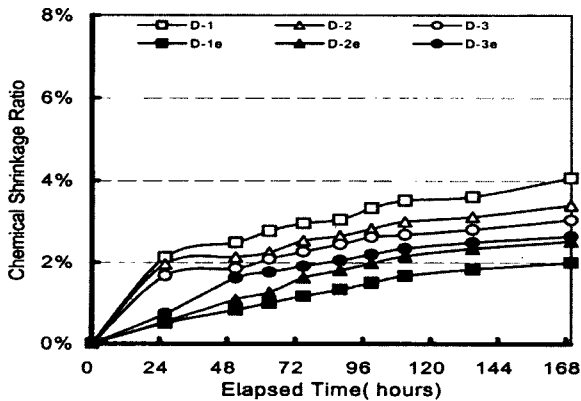


그림 13. D시리즈의 수화수축과 자기수축 비교

### 3.3. 고강도 콘크리트에서의 실험결과

E시리즈는 28일 설계압축강도 700kgf/cm<sup>2</sup>으로 한 고성능 콘크리트이다. 콘크리트의 작업성 확보를 위하여 목표 플로우값을 45±2cm로 설정하였고, 목표공기량은 3%하였다.

표 7은 E시리즈 시험체의 압축강도 일람으로서, 각 재령에서의 압축강도 발현성상을 기록하였다. 28일 압축강도는 평균 716kgf/cm<sup>2</sup>으로서 설계압축강도를 만족하는 것으로 나타났다.

표 7. E시리즈 시험체의 압축강도

시험체 재령	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5
3일	471	491	425	434	425
7일	567	548	514	575	477
14일	651	629	636	665	656
28일	703	696	705	765	710

단위 : kgf/cm<sup>2</sup>

그림 14는 E시리즈 시험체의 재령별 압축강도 변화 그래프이다. 모든 시험체는 평균 450kgf/cm<sup>2</sup>의 높은 3일 강도발현율을 나타내었다.

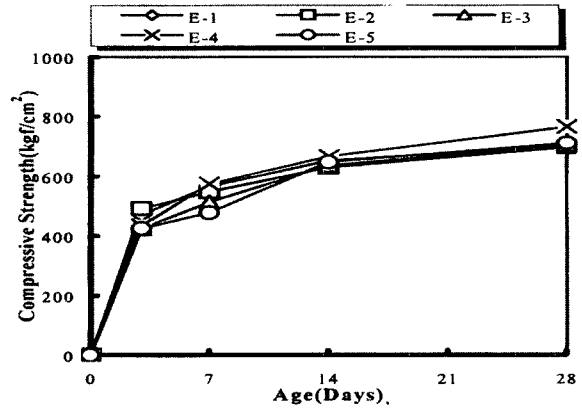


그림 14. E시리즈 시험체의 압축강도 일람표

표 8은 E시리즈 시험체의 자기수축 값을 나타내고 있는데, 이 시험체들은 길이의 선형변화를 재령 48시간까지 일정한 간격으로 측정하였다.

표 8. E시리즈 시험체의 자기수축

시험체 분류	시험체명	수축율(×10 <sup>-6</sup> ) (μm/m)					
		4	8	16	24	36	48
자기수축	E-1e	-15.00	-87.50	-98.00	-113.50	-133.25	-146.25
	E-2e	-2.50	-47.50	-65.00	-120.00	-155.00	-157.50
	E-3e	-55.00	-58.75	-142.50	-158.75	-158.75	-160.00
	E-4e	-120.00	-168.75	-196.25	-193.75	-224.80	-231.30
	E-5e	-111.25	-173.75	-208.75	-212.50	-233.75	-240.00

그림 15는 E시리즈 시험체의 재령에 따른 자기수축 값이다. 잔골재율이 30%인 E-1시험체에서 재령 48시간에 자기수축이 240×10<sup>-6</sup>으로서 가장 큰 것으로 나타내었다.

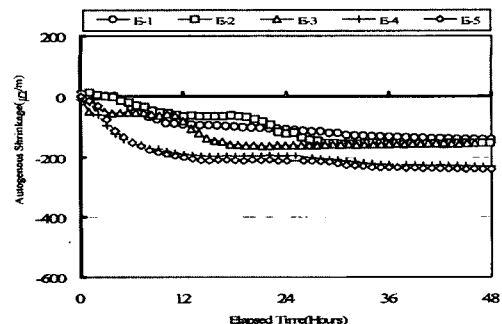


그림 15. E시리즈 시험체의 자기수축

### 3.4. 결과분석

본 연구에서는 시멘트의 수화 정도에 따른 자기수축과 수화수축의 상호관계를 고찰하기 위하여 시멘트가 100% 수화되었을 때의 수축율을 계산하였으며, 이에 따라서 시멘트의 수

화도와 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비율의 관계를 고찰하였다.

표 9는 A시리즈 시험체의 수화도와 자기수축과 수화수축 비율의 변화를 나타낸다. 물시멘트비가 높을수록 동일한 재령에서 수화도가 높은 것으로 나타났으며 물시멘트비가 45%인 A-3 시험체에서 7일 수화도가 23.08%로서 가장 높게 나타났다.

표 9. A시리즈 시험체의 수화도와 자기수축 및 수화수축의 관계

시험체 재령	A-1		A-2		A-3	
	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn
	%					
1일	36.57	10.61	40.84	9.52	43.83	8.56
2일	44.57	14.14	52.08	15.87	70.15	14.52
3일	49.87	15.56	55.28	18.46	69.00	17.87
5일	53.09	16.44	53.82	20.77	64.29	20.84
7일	54.29	16.97	53.91	21.64	60.39	23.08

표 10은 B시리즈에서의 재령별 수화도와 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비율을 나타내고 있다. 실리카흙의 치환율이 증가함에 따라 시멘트페이스트의 수화도는 증가하는 것으로 나타났으며 재령 7일에서 B-3시험체의 수화도는 19.56%로 나타났다. 이것은 기준배합인 A-1시험체의 7일 수화도보다 높은 값으로 실리카흙의 치환에 따르는 포졸란 반응으로 하여 추가적인 수축의 발생에 의한 것으로 사료된다.

표 10. B시리즈 시험체의 수화도와 자기수축 및 수화수축의 관계

시험체 재령	B-1		B-2		B-3	
	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn
	%					
1일	45.75	10.72	51.10	11.12	45.91	12.68
2일	45.43	14.84	46.69	15.48	46.42	16.30
3일	48.93	16.28	50.83	17.27	55.75	17.75
5일	53.74	17.11	54.32	18.06	58.71	18.84
7일	54.68	17.93	57.51	18.86	59.51	19.56

표 11은 C시리즈에서의 재령별 수화도와 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비율을 나타내고 있다. 플라이애쉬의 치환율이 증가함에 따라 시멘트 페이스트의 수화도는 감소하는 경향이 나타났으며, 재령 7일에서 C-3 시험체의 수화도는 14.64%로 나타났다. 이 시리즈가 나타낸 수화도는 기준배합인 A-1 시험체의 7일 수화도보다 낮은 값으로서, 플라이애쉬의 치환은 초기재령에 시멘트의 수화를 억제하는 효과가 있음을 나타내고 있다.

표 11. C시리즈 시험체의 수화도와 자기수축 및 수화수축의 관계

시험체 재령	C-1		C-2		C-3	
	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn
	%					
1일	30.90	10.76	43.83	9.35	50.70	9.10
2일	42.26	13.11	63.62	11.81	80.98	10.68
3일	48.23	13.78	65.48	13.04	82.60	11.87
5일	57.32	15.46	68.30	15.50	85.03	14.25
7일	58.37	16.13	69.40	16.24	86.67	14.64

표 12는 D시리즈에서의 재령별 수화도와 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비율을 나타내고 있다. 골재의 첨가율이 증가함에 따라 모르타르의 수화도는 감소하는 것으로 나타났으며, 재령 7일에서 D-3 시험체의 수화도는 9.66%로 나타났다. 이 시리즈가 나타낸 수화도는 기준배합인 A-1 시험체의 7일 수화도보다 낮은 값으로서, 이것은 골재의 수축저항력이 골재의 함량이 증가함에 따라 커진다는 이론과 맞물리는 결과이다.

표 12. D시리즈 시험체의 수화도와 자기수축 및 수화수축의 관계

시험체 재령	D-1		D-2		D-3	
	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn	Auto/ Chem	DHn
	%					
1일	23.50	6.75	27.57	6.22	43.91	5.31
2일	33.36	7.92	50.68	6.77	87.25	5.87
3일	39.41	9.39	63.92	8.05	84.12	7.20
5일	50.81	11.44	75.23	9.88	88.94	8.91
7일	49.13	12.91	74.15	10.80	86.78	9.66

표 13은 시멘트 페이스트의 자기수축과 콘크리트의 자기수축간의 관계를 나타낸 아래의 Hobb의 식을 이용하여 얻어진 값이다. 표 13에서 콘크리트의 자기수축율  $\epsilon_c$ 은 E시리즈 실험에서 얻어진 콘크리트의 길이선형변화 값으로서 값은 10-6의 범주이다. 그러므로 시멘트 페이스트의 자기 수축도 이에 상응하게 길이의 선형변화 값으로서 역시 10-6의 범주이다.

$$e_c/e_p = 1 - V_a$$

$$e_c/e_p = (1 - V_a) / \{ (E_a/E_p - 1) \cdot V_a + 1 \}$$

$$e_c/e_p = \frac{(1 - V_a) / (K_a/K_p + 1)}{1 + K_a/K_p + V_a (K_a/K_p - 1)}$$

- $e_c$  : 콘크리트의 자기수축
- $e_p$  : 시멘트 페이스트의 자기수축
- $V_a$  : 골재의 용적함량
- $E_a$  : 골재의 탄성계수
- $E_p$  : 시멘트페이스트의 탄성계수
- $K_a$  : 골재의 부피 탄성계수
- $K_p$  : 시멘트페이스트의 부피탄성계수
- $K_a : E_a/3(1-2\mu)$
- $K_p : E_p/3(1-2\mu)$
- $\mu$  : 포아송비

표 13. Hobb의 식에 의한 E시리즈 시험체의 시멘트 페이스트의 자기수축 예측

시험체 변수	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5
Va	0.41	0.38	0.36	0.34	0.31
Ea(GPa)	666.70	666.70	666.70	666.70	666.70
Ep(GPa)	137.50	137.50	137.50	137.50	137.50
Ka(GPa)	370.37	370.37	370.37	370.37	370.37
Kp(GPa)	76.386	76.389	76.389	76.389	76.389
$\mu$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$\epsilon_c$	146.50	150.00	150.00	231.00	240.00
$\epsilon_p(10^{-6})$	313.17	301.06	290.16	428.38	427.04
$L\epsilon_p(\%)$	0.031	0.030	0.029	0.043	0.043

선형측정방법에서는 시험체의 수직방향에서 발생하는 수축을 무시함으로 길이방향에서의 길이변화율은 용적변화율로 가정할 수 있다.

표 13에서의 계산된 값  $L\epsilon_p$ 는 콘크리트와 동일한 모래의 혼입율 1:1을 가진 D-1 배합에서의 재령 48시간에서의 자기수축을 0.83%보다 훨씬 작은 값이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 실리카흙 및 플라이애쉬를 치환한 고강도 시멘트페이스트와 잔골재를 함유한 고강도 모르타르의 수화수축과 자기수축에 대한 실적 연구와 고강도 콘크리트의 자기수축 시험을 행하였으며, 시멘트페이스트와 모르타르에 대하여서는 재령 7일까지 측정하였으며, 콘크리트에서는 재령 2일까지 측정을 진행하였다. 이와 같은 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고강도 시멘트페이스트에서 물시멘트비가 증가함에 따라 수화수축과 자기수축은 모두 감소하며, 자기수축은 전체 수화수축의 55% 정도를 차지하며, 물시멘트비가 증가함에 따라 이 비중도 증가한다.
- 2) 실리카흙을 치환한 고강도 시멘트페이스트에서는 수화수축과 자기수축 모두가 기준배합보다 증가하며, 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비율은 50% 정도로서 기준배합보다 다소 적었다. 자기수축이 전체수화수축에서 차지하는 비중은 수화도 15%까지는 증가하는 추세를 나타내었다.
- 3) 플라이애쉬를 치환한 고강도 시멘트페이스트에서는 수화수축은 기준배합보다 다소 감소하는 것으로 나타났고, 자기수축은 비슷한 수준을 나타내었으며, 자기수축이 수화수축에서 차지하는 비중은 51%~81%로서 기준배합보다 증가한 것으로 나타났으며, 치환율은 증가와 함께 커지는 경향을 나타내었다.
- 4) 고강도 모르타르에서의 수화수축과 자기수축은 모두 기준배합보다 많이 감소되는 것으로 나타났으며, 자기수축이 수

화수축에서 차지하는 비율은 45%~84% 사이로 모래의 혼입율은 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

- 5) 고강도 콘크리트에서의 자기수축은 길이변화의 선형측정방법으로 측정하였다.

재령 48시간에서의 자기수축은  $-146.23 \times 106$ 에서  $-240 \times 106$ 까지의 범위를 나타냈다. 그러나 이 값은 Hobb의 식을 이용하여 계산된 값의 1/25 정도로 많이 적은 것으로 나타났다. 그러므로 용적변화의 실험방법으로 측정된 자기수축과 길이변화의 선형측정방법간의 상호관계를 거명할 수 있는 방법과 이론이 제시되어야 할 것이라고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. A.M Nevile "Properties of concrete" Wiley, Fourth Edition
2. 田澤宋一 外 1人: セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化學組成の影響, 콘크리트工學年次論文集 Vo118, No.1, 1996, pp699~704
3. 佐藤良一 外 2人: 高強度コンクリートの自己収縮の豫測, 콘크리트工學年次論文集 Vo119, No.1, 1997, pp757~762
4. 久保証則 外 3人: 高爐セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する實驗的研究, Vo119, No.1, 1997, pp763~756
5. 橋田佳寛 外 3人: 高強度コンクリートの自己収縮特性に関する研究 콘크리트工學年次論文集 Vo122, No.2, 1998, pp661~666
6. 今本啓一: 超高強度コンクリート質大柱の自己収縮應力に及ぼす水和熱の影響, 日本建築學會構造系論文集 第503号, 1998年1月, pp17~22
7. 宮澤伸吾 外 2人: 콘크리트の自己収縮に及ぼす骨材混入量の影響, 콘크리트工學年次論文集 Vo120, No.2, 1998, pp667~672
8. 橋田佳寛 外 3人: 高強度コンクリートの自己収縮變形に及ぼすクリープ特性の解釋的研究, 콘크리트工學年次論文集 Vo121, No.2, 1999, pp703~708
9. 大野義照外 2人: 콘크리트の自己収縮應力試驗における拘束鐵筋と試驗體長の檢討, 콘크리트工學年次論文集Vo121, No.2, 1999, pp733~738
10. 大下英吉 外 3人: 自己収縮に及ぼすクリープに関する實驗的研究, 콘크리트工學年次論文集 Vo122, No.2, 1999, pp739~744