

# 실험계획법에 의거한 콘크리트의 압축강도 및 건조수축에 대한 실험 연구

## An Experimental Study on the Compressive Strength and Shrinkage of Concrete according to Experimental Planning Method

윤석현\* 정경윤\* 임병호\*\* 김태곤\*\*\* 박정민\*\*\*\* 김화중\*\*\*\*\*

Yun, Suk Hyun Jung, Kyung Yun Lim, Byung Ho Kim, Tae Gon Park, Jung Min Kim, Wha Jung

### ABSTRACT

This paper was to investigate the effect of component material to cause drying shrinkage of concrete. The latin square method was used in analysis of experimental results. The experimental factor was W/C, S/A, F.M and the level was divided into four step and to be analyzed. Compressive strength was mainly dependent on W/C through 90% F-verification. Drying shrinkage was mainly dependent on W/C in early age through the same method, but not in later age. S/A, F.M did not affect compressive strength and drying shrinkage of concrete in all age.

### 1. 서 론

콘크리트에서 건조수축은 필연적으로 일어난다고 해도 과언이 아닐 정도로 인식되고 있는 현상이다. 여러 가지 원인이 작용하고 있지만, 그 중에서도 수분의 증발로 인하여 시멘트의 체적이 줄어드는 것이 주 요인이며, 그 다음으로 시멘트, 골재, 기온 및 새로운 재료의 사용 등에서 그 원인이 제공되고 있다. 이로 인한 콘크리트의 균열발생과 장기적으로는 구조물의 강도를 떨어뜨리고 내구성에 문제를 야기 시키지만, 이에 대한 연구는 일부연구자들에 의해서 행해지고 있어 그 실적은 아직도 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 건조수축의 주 요인으로서 물시멘트비, 잔골재율, 입도를 설정하고 이들의 변화에 따라 콘크리트의 건조수축에 대한 영향을 검토하고자 한다.

실험요인 및 수준은 실험계획법의 분석을 실행하기 위하여 범위를 설정하고, 통계적으로 분산분석 및 검정을 행하여 주영향을 주는 인자에 대해 신뢰구간 및 정량적인 모집단에 대한 신뢰값을 추정하였다.

- \* 정회원, 경북대 건축공학과, 석사과정
- \*\* 정회원, 경북대 건축공학과, 박사과정
- \*\*\* 정회원, 경북전문대 건축과, 전임강사
- \*\*\*\* 정회원, 경북전문대 건축과, 조교수
- \*\*\*\*\* 정회원, 경북대 건축공학과 교수, 공학

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 우선 실험 인자를 3인자로 설정하고 그 수준을 4단계로 나누었다. 원칙적으로 실험의 수는  $4^3$ 의 배합이 수행되어야 하지만, 본 실험에서 사용된 실험계획법 중에서 라틴 방격법에 따라 행할 경우의  $4^{3-1}$ 의 실험을 행하여 그 특성 및 신뢰구간을 추정할 수가 있었다.

물시멘트비, 잔골재율, 조립율을 주 인자로 설정하고, 각 인자를 4단계로 변화시켜서 각각의 수준의 참여를 동일한 수로 조합시켜서 실험배합을 계획하였다.

본 실험에서 공기량의 변동에 대한 영향은 일단 배제하고서 일정한 양의 혼화제를 사용하였으며, 검토하고자 한 각 변수들에 따른 굳지 않은 상태에서의 슬럼프와 경화상태에서의 압축강도 및 건조수축에 대한 영향을 검토하였다. 표1, 2에 실험인자 및 수준과 배합사항을 나타내었다.

표.1 4×4 라틴방격법을 위한 인자 및 수준

인 자	수 준			
물시멘트비(A)(%)	A <sub>1</sub> =45	A <sub>2</sub> =50	A <sub>3</sub> =55	A <sub>4</sub> =60
잔골재율(B)(%)	B <sub>1</sub> =41	B <sub>2</sub> =43	B <sub>3</sub> =45	B <sub>4</sub> =48
조립율(C)	C <sub>1</sub> =2.4	C <sub>2</sub> =2.6	C <sub>3</sub> =2.8	C <sub>4</sub> =3.0
단위수량	180(kg/m <sup>3</sup> )			

표.2 배합표

시 험 체		실험 조건			단위 배합량(kg/m <sup>3</sup> )				
		W/C	S/A	조립율	물	시멘트	모 래	자 갈	혼화제
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	45	41	2.4	180	400.0	674.9	986.4	0.4
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>		43	2.6		400.0	707.8	952.9	
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>		45	2.8		400.0	740.8	919.5	
4	A <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub>		48	3.0		400.0	790.1	869.4	
5	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	50	41	2.6	180	360.0	688.2	1005.9	0.36
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>		43	2.8		360.0	721.8	971.8	
7	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub>		45	3.0		360.0	755.4	937.7	
8	A <sub>2</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub>		48	2.4		360.0	805.7	886.5	
9	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	55	41	2.8	180	327.3	699.1	1021.8	0.33
10	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>4</sub>		43	3.0		327.3	733.2	987.2	
11	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>		45	2.4		327.3	767.4	952.5	
12	A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub>		48	2.6		327.3	818.5	900.6	
13	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	60	41	3.0	180	300.0	708.2	1035.1	0.3
14	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>		43	2.4		300.0	742.8	1000.0	
15	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		45	2.6		300.0	777.3	964.9	
16	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>3</sub>		48	2.8		300.0	829.1	912.3	

\*시험체 A<sub>i</sub>B<sub>j</sub>C<sub>k</sub> : A<sub>i</sub> : 물시멘트비의 수준, B<sub>j</sub> : 잔골재율의 수준, C<sub>k</sub> : 조립율의 수준

### 2.2 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제 팬믹서를 이용하여 혼합하였다. 굳지 않은 콘크리트에서의 슬럼프 시험은 KS F 2402에 따라 실시하였으며, 경화한 콘크리트의 압축강도 시험은 Ø10

×20cm의 공시체를 제작하여 23±2℃의 양생조에서 습윤양생을 하여 재령에 따라 KS F 2405에 따라 측정하였으며, 건조수축은 23±2℃, RH50%의 항온항습실에서 10×10×40cm의 공시체를 다이얼게이지 법에 따라 각 재령별로 측정하였다.

### 2.3 사용재료

본 실험에 사용된 재료의 특성은 표3, 그림1에 나타내었다.

표 3 사용재료

사용재료	특 성
시멘트	H사, 보통포틀랜드, 비중 : 3.15
잔 골재	경북 낙동산 강모래, 비중 2.56
굵은 골재	경북 칠곡산 채석, 비중 : 2.60
혼화제	M사 고성능 감수제, 비중: 1.2

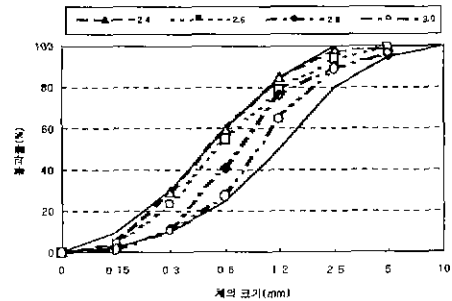


그림 1 잔골재의 입도분포

### 3. 실험 결과 및 분석

표.4 실험결과

시 험 체	실험 조건					실험 결과										
	W/C	S/A	F.M	air	slump	압 축 강 도(kgf/cm <sup>2</sup> )			건조수축 (×10 <sup>-6</sup> )							
						3일	7일	28일	1일	3일	7일	14일	28일	36일	56일	
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	45	41	2.0	1.2	2	119	230	336	2.5	7.5	24.5	34.0	46.5	50.0	53.8
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>		43	2.4	1.4	7.7	105	221	405	0.3	2.8	17.5	27.5	40.0	42.5	46.8
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>		45	2.8	1.5	14	96	235	428	2.8	6.3	21.3	31.3	42.8	46.8	50.3
4	A <sub>1</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub>		48	3.2	2.1	7.6	109	226	427	5.3	8.8	22.5	38.0	50.0	53.3	57.5
5	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	50	41	2.4	2.2	8	87	216	387	6	10.5	31.8	38.8	50.5	54.3	57.5
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>		43	2.8	1.8	12	62	204	358	2.3	9.0	27.5	35.8	47.8	51.3	54.8
7	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub>		45	3.2	1.9	10.5	69	174	331	2.8	3.8	18.5	30.0	42.0	45.8	48.5
8	A <sub>2</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub>		48	2.0	1.7	3	81	222	364	3.0	6.5	21.3	30.8	42.3	45.5	49.0
9	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	55	41	2.8	2.0	15	49	174	300	5.0	7.5	14.2	23.3	35.0	37.5	42.0
10	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>4</sub>		43	3.2	2.5	8	80	230	362	5.0	8.0	18.0	25.3	38.0	42.0	47.3
11	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>		45	2.0	2.2	3	44	183	331	10.0	10.5	21.9	32.0	47.0	50.5	55.5
12	A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub>		48	2.4	2.5	6	43	197	337	17.8	20.5	29.75	40.8	56.5	60.3	64.3
13	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	60	41	3.2	1.9	16	32	139	259	17.5	22.0	38.0	50.5	63.5	65.8	69.5
14	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>		43	2.0	2.7	3	38	163	280	5.0	10.3	28.0	30.8	43.5	45.5	49.5
15	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		45	2.4	2.4	6	41	172	299	16.0	23.0	32.0	42.8	57.3	60.0	63.5
16	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>3</sub>		48	2.8	2.6	9	37	152	273	12.0	12.5	25.3	35.8	48.8	53.5	53.3

#### 3.1 분석방법

측정된 결과를 통계분석의 과정인 가평균, 분산, 표준편차를 구하여 분산분석표를 작성하여 90%의 F-검정을 통하여 유의 인자 및 모집단의 추정구간을 구하고, F<sub>0</sub> ≥ F(0.1)을 만족하는 인자가 각 특성치

에 유의한 영향을 준다. 그리고 모집단에 대한 신뢰값을 오차를 가지면서 추정한다.

### 3.2 슬럼프

그림 2에서는 실험에서 측정된 슬럼프의 결과를 나타내고 있다. 측정된 슬럼프의 값은 2~16cm로 상당한 변화를 나타내고 있다. 본 실험에서는 혼화제의 첨가량이 단위시멘트량에 대해 일괄적으로 동일하게 0.1%를 첨가하였기 때문에 물시멘트비의 증감에 관계없이 조립율의 영향(1, 8, 11, 14번 시험체 참고)을 나타내고 있다. 표 6의 슬럼프 값에 대한 분산분석표에서는 C인자(조립율)가 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이에 따라 C인자(조립율)에 대한 모집단 신뢰구간을 그림3에 나타낸다. 즉 본 실험에서 수행하지 않은 배합에 있어서도 조립율 2.8(C<sub>33</sub>)을 사용한 경우 오차 ±2.45cm의 오차를 가지면서 슬럼프 값이 가장 높게 나오는 것으로 통계적으로 추정된다.

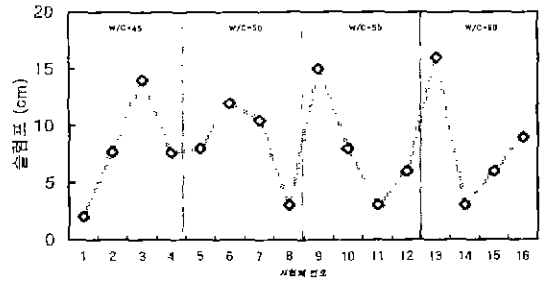


그림 2 슬럼프 측정결과

표5 슬럼프 분산분석표

인자	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	1.20	3	0.40	0.06	3.29
B	30.99	3	13.33	1.63	3.29
C	<b>220.88</b>	<b>3</b>	<b>73.63</b>	<b>11.64*</b>	<b>3.29</b>
E	37.95	6	6.32		
T	291.01	15			

표6 C인자의 수준에서의 90% 신뢰구간

수준	1	2	3	4
$\mu(C_3)$	2.75 ± 2.45	6.93 ± 2.45	12.50 ± 2.45	10.53 ± 2.45

### 3.2 압축강도

그림 3은 측정된 압축강도를 나타내고 있다. 대체적으로 물시멘트비에 따른 압축강도의 값이 증감함을 볼 수가 있다. 압축강도 값에 대한 분산분석표를 작성하여 90%의 F-검정을 한 결과, 표 8, 10에서는 A인자(물시멘트비)가 재령 3일 28일에 압축강도에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이에 따라 A인자(물시멘트비)에 대한 모집단 신뢰구간을 그림4, 5에 나타낸다. 즉 본 실험에서 수행하지 않은 배합을 추정하면 각각의 물시멘트비에 재령 3일의 경우 오차 ±13.13(kgf/cm<sup>2</sup>)의 오차를 가지며, 재령 28일의 경우 ±44.51(kgf/cm<sup>2</sup>)의 오차를 나타내면서 신뢰구간이 통계적으로 추정된다.

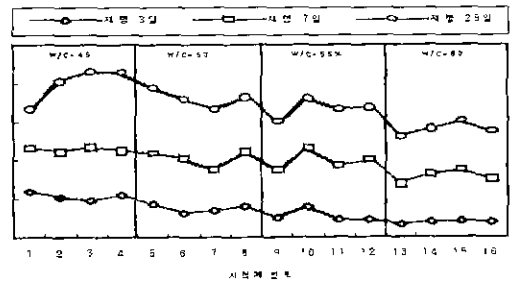


그림3 측정된 압축강도

표7 3일강도 분산분석표

인자	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	<b>10971.50</b>	3	<b>3657.17</b>	20.00	3.29
B	219.50	3	73.17	0.40	3.29
C	305.00	3	101.67	0.56	3.29
E	1097.00	6	182.83		
T	12593.00	15			

표8 A 인자의 각 수준별 90% 추정 3일 압축강도 신뢰구간

수준	1	2	3	4
$\mu(A_1)$	107.25 ± 13.13	74.75 ± 13.13	54.00 ± 13.13	37.00 ± 13.13

표9 28일강도 분산분석표

요인	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	322023.50	3	10734.50	5.11	3.29
B	5473.50	3	1824.50	0.87	3.29
C	1797.50	3	597.17	0.28	3.29
E	12601.50	6	2100.25		
T	52070.00	15			

표10 A 인자의 각 수준별 90%의 추정 28일 압축강도 신뢰구간

수준	1	2	3	4
$\mu(A_i)$	398.92 ± 44.51	370.75 ± 44.51	350.50 ± 44.51	277.75 ± 44.51

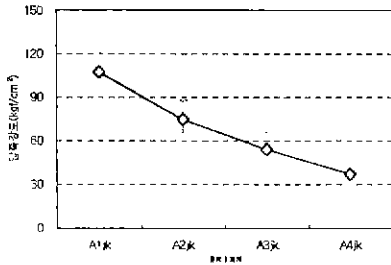


그림4 제령 3일 압축강도 신뢰구간

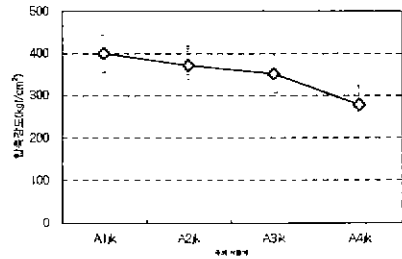


그림5 제령 28일 압축강도 신뢰구간

### 3.4 건조수축

그림 6~9는 W/C 45%~60%의 조건에서 제령의 경과에 따른 길이변화를 나타내고 있다. 전반적인 경향은 초기제령에서 수축이 크게 진행되고 있으며, 제령이 경과할수록 완만해지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 측정결과를 통계분석에 따라 검토한 결과 초기제령 1일, 3일 의 경우에는 물시멘트비가 높을수록 건조수축을 증가시키는 유의한 영향을 주며 잔골재를 빗 조립율은 유의한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 그 이후 제령이 경과할수록 건조수축에 대한 영향은 없었다. 표11~12 에 그 분산분석결과를 나타내었으며, 그림 10. 11에 신뢰구간을 추정하였다.

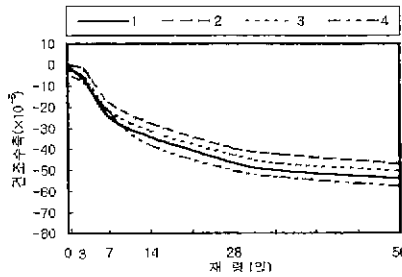


그림6 W/C=45%에 제령에 따른 건조수축

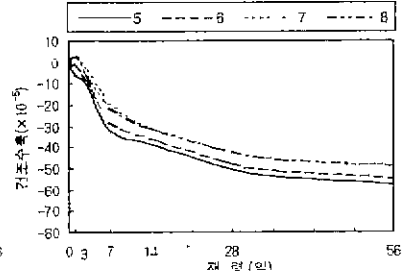


그림7 W/C=50% 제령에 따른 건조수축

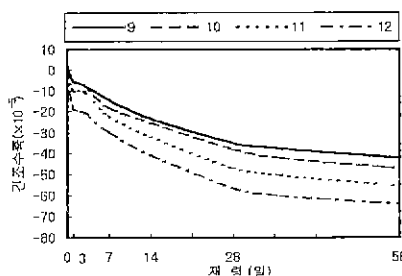


그림8 W/C=55%에서 제령에 따른 건조수축

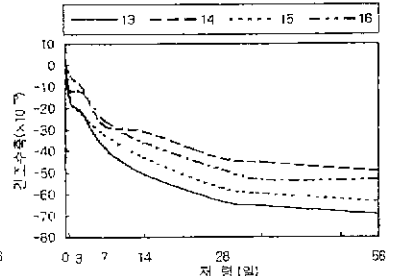


그림9 W/C=60%에서 제령에 따른 건조수축

표11 1일 건조수축율의 분산분석표

요인	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	380.70	3	126.90	6.09	3.29
B	60.59	3	20.20	0.97	3.29
C	86.29	3	28.76	1.38	3.29
E	125.05	6	20.84		
T	652.63	15			

표12 3일 건조수축율의 분산분석표

요인	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F(0.1)
A	278.39	3	92.80	3.70	3.29
B	53.79	3	17.93	0.71	3.29
C	78.89	3	26.30	1.05	3.29
E	150.65	6	25.11		
T	561.71	15			

표13 A인자 수준 재령 1일의 90% 추정신뢰구간

수준	1	2	3	4
$\mu(A_i)$	3.81 ± 4.43	5.88 ± 4.43	3.38 ± 4.43	6.13 ± 4.43

표14 A 인자의 수준 재령3일의 90% 추정신뢰구간

수준	1	2	3	4
$\mu(A_i)$	6.31 ± 4.88	7.44 ± 4.88	11.63 ± 4.88	16.94 ± 4.88

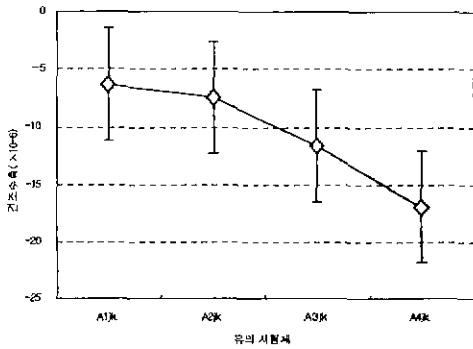


그림10 재령 1일 A인자 건조수축 신뢰구간

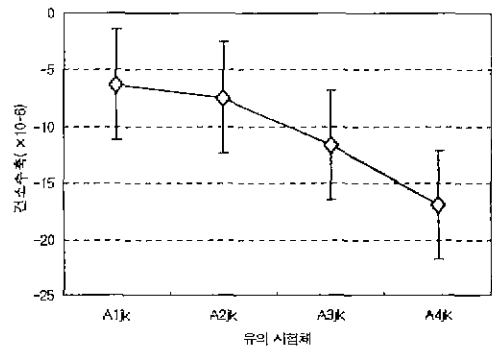


그림11 재령3일 A인자 건조수축 신뢰구간

#### 4. 결 론

콘크리트의 압축강도 및 건조수축에 대한 특성을 검토하기 위하여 실험계획법의 하나인 라틴방격법에 따라 실험과 분석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 90% 신뢰도에서 실험계획법에 의한 통계적인 분석방법은 실험결과에 대한 영향을 주는 유의 인자를 구별할 수 있었다.
- (2) 슬럼프의 분석에서는 잔골재의 조립율이 유의한 영향을 주며 W/C, S/A비는 유의한 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 잔골재의 조립율이 2.8일 경우 가장 높은 슬럼프의 범위를 제시하고 있다.
- (3) 압축강도의 분석에서는 W/C가 높을수록 낮게 나타나는 영향을 주었으며, S/A와 조립율은 유의하지 못한 영향을 주었다.
- (4) 건조수축에서는 초기재령에서 W/C가 높을수록 크게 수축하는 영향을 주었으며, 장기재령에서는 유의하지 못한 영향을 주었고, 잔골재율과 조립율은 건조수축에 유의하지 못한 영향을 주었다.

#### 참 고 문 헌

1. 박성현, 현대실험계획법, 민영사
2. 김진근외 3인, 콘크리트 건조수축에 관한 실험과 통계적 예측, 대한건축학회논문집 4권2호 1988.4 pp131~139
3. 한만엽, 콘크리트 건조수축의 이론적 예측에 관한 연구, 한국콘크리트학회지 제5권1호1993.3 pp157~163
4. 김상식, 콘크리트의 건조수축과 크리어프, 한국콘크리트학회지, 제1권 2호 1989.12 pp23~30
5. 村田一郎 外2人, 콘크리트의 科學と技術, 山海堂