

# 고성능 콘크리트의 Mock-Up 시험에 의한 수축특성 분석

## Analysis on Shrinkage Properties of High Performance Concrete According to Mock-Up Test

고경택\* 김호림\*\* 류금성\*\*\* 황인성\*\*\*\* 김도겸\*\*\*\*\* 한천구\*\*\*\*\*  
Koh, Kyoung Taek Jin, Hu Lin Ryu, Gum Sung Hwang, Yin Seong Kim, Do Gyum Han, Cheon Goo

### ABSTRACT

This paper is to investigate the shrinkage properties of high performance concrete (HPC) with mixture adjustment by using mock-up specimens. HPC with mixture adjustment needed a higher dosage of SP agent due to fluidity reduction and a larger dosage of AE agent due to the reduction of air content. Setting time of HPC with mixture adjustment exhibited earlier than that of control HPC by as much as 6 hours. HPC with mixture adjustment gained more than 70MPa of compressive strength. Autogenous shrinkage of Control HPC was found to be  $-340 \times 10^{-6}$  at 49days when the expansion value by thermal effect was excluded and HPC with mixture adjustment  $-175 \times 10^{-6}$ , which was the half of the value of control HPC. Drying shrinkage of center section of HPC with mixture adjustment showed similar tendency with autogenous shrinkage because of no internal moisture movement, while surface section had larger drying shrinkage. The specimen embedded with reinforcing bar had smaller deformation caused by confinement of reinforcing bar.

### 1. 서 론

고유동, 고강도 및 고내구성을 갖는 고성능 콘크리트는 현대개념에 부응하는 양호한 품질을 가지는 반면에 건조수축, 수화열 및 수화반응 활성화에 의한 자기수축 등 균열이 문제시 되고 있다.<sup>1)</sup> 이에, 본 연구팀에서는 고성능 콘크리트의 수축을 저감하기 위하여 혼화재와 팽창재 및 수축저감재를 사용한 최적배합비를 도출한 일련의 연구를 진행한바 있다<sup>2),3)</sup>.

그러므로, 본 연구에서는 선행연구에서 도출한 최적배합에 대하여 실구조체에 적용하기에 앞서 모의부재 시험체를 대상으로 콘크리트의 기초적 물성 및 수축특성에 대하여 검토하고자 한다.

### 2. 실험계획 및 방법

#### 2.1. 실험계획

- \* 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
- \*\* 정희원, 청주대학교 대학원 석사과정
- \*\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원
- \*\*\*\* 정희원, 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원
- \*\*\*\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
- \*\*\*\*\* 정희원, 청주대학교 건축공학부 교수

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, 실험요인은 플라이 애쉬(FA) 20%와 실리카 폼(SF) 10%를 치환한 물-결합재비 30%의 플레인과 플레인 배합에 팽창재 5%와 수축 저감재 1%를 치환한 최적배합의 2수준으로 하였고, Mock-up 시험체는 기둥부재를 가정하여 800×800×800mm로 제작하였는데, 플레인인 경우 자기수축 시험체 1개, 최적배합은 건조수축 및 자기수축 무근콘크리트 시험체와 철근배근한 건조수축 시험체 각각 1개씩 총 4개의 시험체를 제작하였다. 이때, 플레인 및 최적배합은 목표 슬럼프플로우 600±100mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 배합설계 하였는데, 배합사항은 표 2와 같다.

### 2.2. 사용재료

본 연구의 사용재료로서, 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트(밀도:3.15g/cm<sup>3</sup>, 분말도:3,162cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였고, 골재로서 잔골재는 충남 연기군 강모래(밀도:2.67g/cm<sup>3</sup>, 조립률:2.58), 굵은골재는 충북 옥산산 25mm 부순 굵은골재(밀도:2.67g/cm<sup>3</sup>, 조립률:6.87)를 사용하였다. 혼화제로서, 플라이 애쉬(밀도:2.22g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 3,850cm<sup>2</sup>/g)는 국내산, 실리카 폼(밀도:2.1g/cm<sup>3</sup>, 분말도:240,000cm<sup>2</sup>/g)은 체코산을 사용하였으며, 팽창재(밀도:2.9g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 3,117cm<sup>2</sup>/g)는 일본산 CSA계, 수축저감재(밀도:1.02g/cm<sup>3</sup>, 분말상)는 독일산 글루콜계를 사용하였다. 고성능감수제는 국내산 나프탈렌계(밀도:1.185g/cm<sup>3</sup>)를 사용하였다.

### 2.3. 실험방법

슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였고, 수화열 온도이력은 T타입 열전대를 매설하여 매시간 데이터로거로 저장하여 측정하였다. 강도는 압축강도와 할렐 인장강도를 측정하였으며, 건조수축은 표면 콘택트게이지에 의해 측정하였고, 자기수축은 내부에 매설형 게이지를 설치하여 데이터로거로 측정한 다음, 식 1), 2)에 따라 계산하였다.

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 - \Phi \times \Delta t \quad (\text{식 1})$$

$$\epsilon_2 = C_e \times \epsilon_i + 11.7 \times 10^{-6} \times \Delta t - C_e \times \lambda \quad (\text{식 2})$$

여기서  $\epsilon_3$  : 실 건조수축 또는 자기수축 길이변화율

$\epsilon_2$  : 실 변위

표 1 실험계획

실험요인		실험수준	
실험요인	W/B (%)	1	30
	결합재 구성	2	○ 플레인[C:FA:SF=7:2:1] ○ 최적배합[C:FA:SF=7:2:1, EA 5%, SR 1%]
	슬럼프플로우 (mm)	1	600±100
	공기량 (%)	1	4.5±1.5
실험사항	모의부재	4	○ 플레인 배합 자기수축 (시험체 A) ○ 최적배합 자기수축 (시험체 B) ○ 최적배합 건조수축 (시험체 C) ○ 최적배합 철근배근 건조수축 (시험체 D)
	굳지않은 콘크리트	6	슬럼프, 슬럼프플로우 공기량, 단위용적중량 응결시간
	경화 콘크리트	3	압축강도 (7, 28, 91일) 인장강도 (28일) 수화열 온도이력 건조수축 (1, 3, 7..49일) 자기수축 (초결 시점부터)

표 2 배합사항

W/B (%)	구분	단위 수량 (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	SP (%)	AE (%)	EA (%)	SR (%)	질량배합 (ℓ/m <sup>3</sup> )							
								C	S	G	FA	SF	EA	SR	
30	플레인	175	45	1.75	0.030	0.0	0.0	408	686	839	117	58	0.0	0.0	
	최적 배합			2.20	0.018	5.0	1.0	373	681	832	117	58	29	6	

$C_e$  : 교정계수  
 $\epsilon_i$  : 초기치-i시점에서의 지시치  
 $\phi$  : 선팽창계수( $10.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )  
 $\Delta t$  : 온도차  
 $\lambda$  : 0점 이동량

표 3. 굳지않은 콘크리트의 특성

구분	항목	슬럼프 (mm)	슬럼프플로우 (cm)	공기량 (%)	단위용적질량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	응결시간 (h)	
						초결	종결
	플레인	265	64.3	5.6	2,339	24.2	26.7
	최적배합	250	62.8	4.6	2,327	15.5	18.0

표 4. 압축 및 인장강도 실험결과

구분	강도	압축강도 (MPa)			인장강도 (MPa)
		7일	28일	91일	28일
	플레인 배합	47.3	66.2	70.9	5.14
	최적배합	49.7	68.9	72.7	5.31

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

표 3은 플레인 및 최적배합에 따른 굳지않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다. 전반적인 배합설계 결과는 목표 유동성 및 공기량을 만족하는 것으로 나타났는데, 최적배합의 경우 플레인에 비해 유동성이 저하하여 SP제 사용량이 증가하였고, 공기량은 증가하여 AE제 사용량이 감소하였다. 또한, 응결시간은 CSA계 팽창재의 속경성에 의하여 최적배합 콘크리트의 경우 플레인에 비하여 6시간정도 빠르게 나타났다.

#### 3.2 압축강도 특성

표 4는 플레인 및 최적배합 콘크리트에 따른 압축 및 인장강도를 나타낸 것이다. 압축강도는 재령이 경과할수록 증가하였고, 재령 91일에서 70MPa 이상의 고강도로 나타났다. 또한 최적배합의 압축강도는 플레인 콘크리트와 비교하여 다소 크게 나타났는데, 이는 팽창재의 수화생성물에 의한 조직의 치밀성 증대에 기인된 것으로 사료된다. 인장강도는 압축강도와 유사한 경향으로 최적배합이 플레인 보다 다소 크게 나타났는데, 이때 인장강도는 압축강도의 1/12~1/13 정도임을 알 수 있었다.

#### 3.3 수화열 특성

그림 1은 모의부재 시험체별 재령경과에 따른 수화열 온도이력을 나타낸 것이다.

모의부재 시험체의 수화열은 시험체 종류에 관계없이 급속히 증가하다가 재령 약 1.5일에서 최고온도에 도달하였고, 이후 서서히 저하하는 것으로 나타났다. 이때, 수화열 최고온도는 중심부, 중간부와 단부는 각각 65°C, 64°C, 58°C 정도로 나타났고, 시험체별에 관계없이 중심부와 중간부는 1~2°C 차이밖에 나지 않았다.

#### 3.4 수축특성

그림 2는 모의부재 시험체별 재령 경과에 따른 수축특성을 나타낸 것이다.

먼저, 플레인 배합 자기수축 시험체 A는 수화열로 인한 실변형이 재령 약 1일에서  $150 \times 10^{-6}$ 이었고, 열팽창 성분을 배제한 자기수축변형은 재령 49일에서 약  $-340 \times 10^{-6}$ 로 나타난 것을 알 수 있었다. 최적배합 자기수축 시험체 B에서는 수화열로 인한 실변형이 재령 약 1일

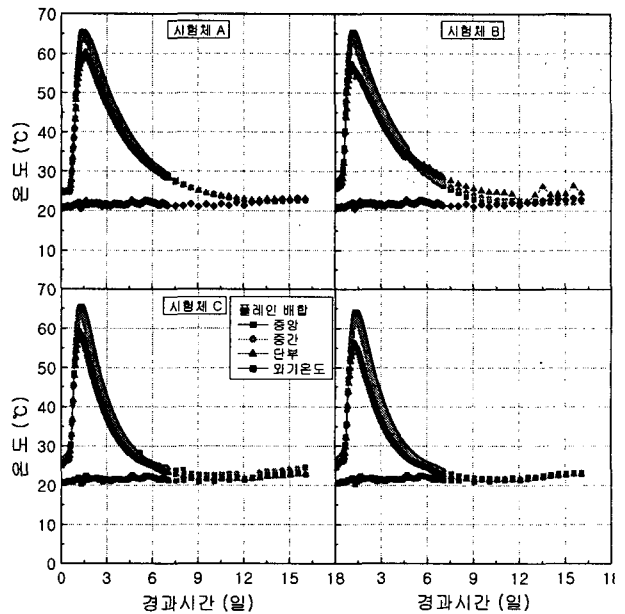


그림 1. 시험체별 재령경과에 따른 건조수축 길이변화율

에서  $200 \times 10^{-6}$  정도 이었고, 열팽창 성분을 배제한 자기수축 변형은 총  $175 \times 10^{-6}$  정도로 시험체 A와 비교하여 50% 정도 저감하는 것으로 나타났다. 또한, 최적배합 건조수축 시험체 C의 중심부 건조수축 변형값은 재령 49일에서 온도보정을 거쳐 열팽창성분을 배제한 결과,  $-150 \times 10^{-6}$  정도로 시험체 B의 자기수축 변형값과 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 Larrad 등의 보고와 같이, 실리카폼을 사용한 고성능 콘크리트에서 내부에서의 수분증발이 거의 일어나지 않는다고 보고된바와 같이 본 연구의 연구결과도 내부에서의 수분 발산은 거의 일어나지 않음에 따라 차이가 미소한 것으로 분석된다. 한편,  $10 \times 10 \times 40$  표준 시험체에 비교해서는 초기에 급속히 수축하는 것으로 나타났는데, 이는 높은 수화열로 인한 결합재의 활성화에 기인한 것으로 분석된다. 또한, 거푸집 탈형이후 콘택트 게이지에 의해 측정된 표면에서의 건조수축량은 탈형 이후 내부 자기수축에 비하여 급속히 증가하는 것으로 나타났다. 시험체 D는 철근의 구속에 의해 C와 비교하여 46% 정도 적게 나타난 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 플레인 및 최적배합 고성능 콘크리트의 모의부재 시험체에 있어서 콘크리트의 기초적 물성과 자기 및 건조수축 등 수축특성에 대하여 검토한 것으로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로 최적배합은 목표 슬럼프플로우 및 목표 공기량을 만족하기 위하여 플레인보다 SP제를 증가시키고, AE제를 감하는 배합보정이 필요하였다. 응결시간은 최적배합이 6시간 정도 빠르게 나타났고, 경화 콘크리트의 압축강도는 70MPa 이상의 고강도로 최적배합에서 플레인 보다 3%정도 크게 나타났다.

2) 수축특성으로 플레인 배합의 자기수축은 열팽창성분을 배제한 결과 재령 49일에서  $-340 \times 10^{-6}$ 으로 나타났고, 최적배합의 자기수축은  $-175 \times 10^{-6}$  정도로 50% 정도 저감하였다.

3) 최적배합의 중심부 건조수축은 수분발산이 없는 것에 기인하여 자기수축과 유사한 경향이었지만, 표면부는 크게 발생하였다. 단, 철근배근 시험체의 변형량은 철근구속에 의해 작게 나타났다.

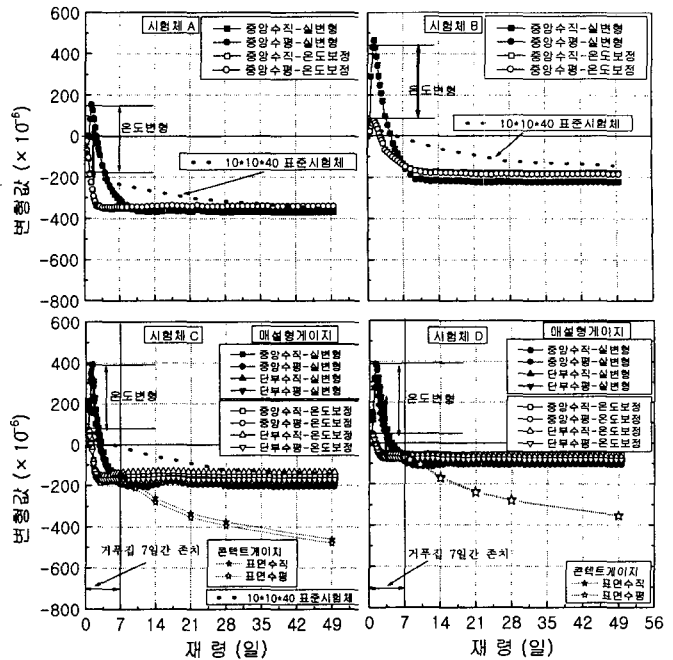


그림 2. 재령경과에 따른 수축특성

#### 참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會：自己收縮研究委員會報告書, 1996
2. 한국건설기술연구원, "콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발", 2003. 12.
3. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, "팽창재 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.6, 2003.