

Mock-Up 시험에 의한 고성능 콘크리트의 수축특성 분석

Evaluation of Shrinkage Properties Based on Mock-Up Test in High Performance Concrete

한 천 구* 강 수 태** 고 경 택*** 한 창 평****
Han, Cheon-Goo Kang, Su-Tae Koh, Kyung-Taek Hann, Chang-Pyung

Abstract

This paper investigates the fundamental properties and shrinkage characteristics of low shrinkage high performance concrete(LSHPC), using mock-up specimens. According to the test results, the most suitable mix proportions of LSHPC need a higher dosage of SP agent and AE agent, in order to obtain the target of slump flow and air content. This is due to reduce fluidity and air content respectively. It also presented earlier setting time than control concrete by 6 hours and exhibited compressive strength of 60MPa at age 28 days. Autogenous shrinkage of LSHPC was the half of the value of control concrete. Drying shrinkage of center section of LSHPC showed similar tendency with autogenous shrinkage, because of no internal moisture movement, while surface section had larger drying shrinkage. The specimen with embedded reinforcing bar had smaller deformation owing to confinement of reinforcing bar.

요 지

본 연구는 개발된 저수축 고성능 콘크리트를 대상으로 모의부재 시험체에 있어서 콘크리트의 기초적 물성과 수축특성에 대하여 검토한 것이다. 실험연구 결과, 콘크리트의 배합특성으로 제안 배합은 목표 슬럼프플로우 및 목표 공기량을 만족하기 위해 SP제량 증가, AE제량 감소의 배합보정이 필요하였다. 응결시간은 제안 배합이 8시간 정도 빠르게 나타났으며, 굳은 콘크리트의 압축강도는 60MPa 이상의 고강도로 나타났다. 수축특성으로 제안 배합 자기수축의 경우 플레인 배합 자기수축에 비해 50% 정도 저감되었고, 제안 배합의 중심부 건조수축은 수분발산이 없는 것에 기인하여 자기수축과 유사한 경향이었으나, 표면부는 크게 수축하였다. 단, 철근배근 시험체인 경우는 철근구속에 의해 내부 및 표면의 수축량이 작게 나타났다.

Keywords : High Performance Concrete, Properties of Shrinkage. Mock-Up Specimen

핵심 용어 : 고성능 콘크리트, 수축특성, 모의부재 시험체

* 정희원, 청주대 건축공학부 교수

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

*** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

**** 정희원, 청주대학교 대학원 박사과정

E-mail : cghan@cju.ac.kr 043-229-8480

•본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근에는 고유동, 고강도 및 고내구성을 동시에 발휘하는 고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고, 또한 사용실적도 점차 증가하는 추세에 있다.

그런데, 이와 같은 고성능 콘크리트의 일반적인 성질은 보통 콘크리트보다 양호한 반면에, 건조수축 및 자기수축에 의한 균열문제는 불량한 것으로 지적되고 있다. 특히 보통 콘크리트에서 자기수축량은 건조수축의 10% 정도로 종래의 균열제어에서 거의 문제시 되지 않았지만, 고성능 콘크리트인 경우는 많은 분체량 및 다량의 고성능감수제 사용에 따른 결합재의 수화활성으로 자기수축만으로도 균열이 발생할 수 있는 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁰⁾ 이와 관련한 선행연구^{(1),(2)}에서는 플라이 애쉬(FA), 실리카 폼(SF), 팽창제(EA) 및

수축저감제(SR)를 일정 비율로 병용하게 되면 고성능 콘크리트의 수축균열 저감에 효과적인 것으로 밝힌 바 있다. 따라서, 본 연구에서는 선행연구⁽²⁾를 토대로 최적 배합을 위한 제안 배합(이하 제안 배합)으로 도출된 고성능 콘크리트의 우수성과 실구조체의 적용성을 분석하기 위해 800×800×800mm의 Mock-Up 시험체를 대상으로 콘크리트의 기초적 물성 및 건조·자기수축 등 수축특성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합비는 Table 2와 같다.

Table 1 실험계획

실험요인		실험수준	
실 험 인 자	W/B (%)	1	30
	결합재 구성	2	· 플레인 배합[C:FA:SF=7:2:1]* · 제안 배합[C:FA:SF=7:2:1, EA 5%, SR 1%]*
	슬럼프 플로우 (mm)	1	600±100
	공기량 (%)	1	4.5±1.5
	모의부재 시험체 종류	4	· 플레인 배합 자기수축 무근 콘크리트 (시험체 A) · 제안 배합 자기수축 무근 콘크리트 (시험체 B) · 제안 배합 수축 무근 콘크리트 (시험체 C)** · 제안 배합 수축 철근 콘크리트 (시험체 D)**
실 험 항 목	굳지 않은 콘크리트	6	· 슬럼프 · 슬럼프플로우 · 굵은 골재 씻기 · U형 충전 · 공기량 · 단위용적질량 · 응결시간
	굳은 콘크리트	5	· 압축강도 (7, 28, 91일) · 쪼갬 인장강도 (28일) · 수화열 온도이력 · 건조수축 (1, 3, 7,, 49일) · 자기수축 (초결 시점부터 1, 3, 7,, 49일)

* 기호 중 C : 시멘트, FA : 플라이 애쉬, SF : 실리카 폼, EA : 팽창제, SR : 수축저감제를 의미함.

** 시험체 C와 D는 건조수축과 자기수축을 모두 포함한 전체수축을 측정하기 위한 시험체임.

Table 2 콘크리트 배합

구분	W/B (%)	S/a (%)	SP (%)	AE (%)	EA (%)	SR (%)	단 위 량 (kg/m ³)							
							W	C	S	G	FA	SF	EA	SR
플레인 배합	30	45	1.75	0.030	0.0	0.0	175	408	686	813	117	58	0.0	0.0
제안 배합			2.20	0.018	5.0	1.0		373	681	807	117	58	29	6

먼저, 실험인자로 결합재구성은 FA 20%와 SF 10%를 치환한 물-결합재비 30%의 플레인 배합 콘크리트와 플레인 배합에 EA 5%와 SR 1%를 치환한 제안 배합 콘크리트의 2수준으로 변화시켜 실험하였고, Mock-Up 시험체는 고성능 콘크리트의 기둥부재를 가정하여 800×800×800mm로 제작하였는데, 플레인 배합은 자기수축 무근 콘크리트 시험체 1개, 제안 배합은 수축 및 자기수축 무근 콘크리트 시험체와 수축 철근 배근 시험체 각각 1개씩 총 4개의 시험체를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 이 때, 플레인 배합 및 제안 배합은 목표 슬럼프 플로우 600±100mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 배합설계 하였고 굳지 않은 콘크리트와 굳은 콘크리트의 실험항목은 Table 1과 같다.

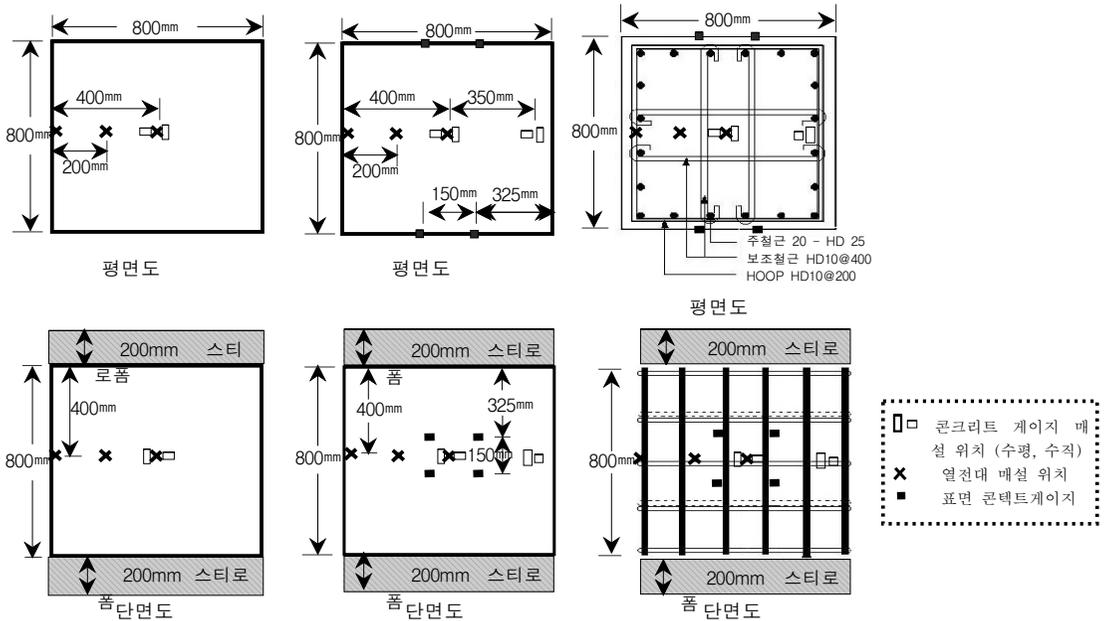
2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로서 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 충남 연기군산 강모래,

굵은골재는 충북 옥산산 25 mm 부순 골재를 사용하였다. 혼화제로서, 플라이 애쉬는 국내 보령 화력산, 실리카 폼은 노르웨이산, 팽창제는 일본산 CSA계, 수축저감제는 독일산 글리콜계를 사용하였는데, 각 재료의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

2.3 실험방법

콘크리트의 혼합은 강제식 팬 타입 믹서를 사용하였다. 굳지 않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프 플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대 직경과 이에 직교하는 직경의 평균값으로 하였으며, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 KS F 2409의 규정에 따라 실시하였고, 재료분리 저항성 시험과 U형충전 시험은 일본 토목학회의 시공지침⁽¹¹⁾에 의거 진행하였다. 굳은 콘크리트의 실험으로 KS F 2403에 따라 공시체를 제작, 양생한 다음 계획된 재령에서 압축강도는 KS F 2405, 인장강도는 KS F 2423에 따라 실시하였다.



(a) 플레인 배합 및 제안 배합 자기수축 무근 콘크리트 시험체 (b) 제안 배합 수축 무근 콘크리트 시험체 (c) 제안 배합 수축 철근 콘크리트 시험체 (게이지 매설위치는 b와 동일함)

Fig. 1 시험체 개요

Table 3 사용재료의 성질

사용재료	기호	물리적 성질
시멘트	C	종류 : 보통 포틀랜드 시멘트 밀도 : 3.15 g/cm ³ , 분말도 : 3,413 cm ³ /g
잔골재	S	종류 : 강모래 밀도 : 2.67 g/cm ³ , 조립률 : 2.58
굵은 골재	G	종류 : 25 mm 부순 굵은골재 밀도 : 2.67 g/cm ³ , 조립률 : 6.87
고성능 감수제	SP	종류 : 나프탈린계
AE 제	AE	종류 : 음이온계
플라이 애쉬	FA	밀도 : 2.22 g/cm ³ , 분말도 : 3,850 cm ³ /g, SiO ₂ : 67.5%, 강열감량 : 4.2%
실리카 폼	SF	밀도 : 2.20 g/cm ³ , 분말도 : 240,000 cm ³ /g SiO ₂ : 96.0%, 강열감량 : 1.5%
팽창재	EA	밀도 : 2.90 g/cm ³ , 분말도 : 3,117 cm ³ /g CaO : 51.35%, SO ₃ : 28.56%, Al ₂ O ₃ : 13.55%, SiO ₂ : 3.8%
수축 저감제	SR	밀도 : 1.02 g/cm ³ , 고형분 : 31%

본 실험에 사용한 거푸집은 치장합판 거푸집을 사용하였고, 자기수축 시험용 거푸집에는 바닥과 측면에 1 mm 두께의 테프론 시트를 깔아서 콘크리트 시험체의 자유로운 변형이 구속되지 않도록 하였고, 콘크리트 타설 후 시험체 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르 필름으로 외기와 격리시켰다. 그리고 탈형 이후 즉시 표면으로부터 수분 증발 및 흡수를 방지하기 위해 폴리에스테르 필름과 알루미늄 은박지로 감싸주었다.

또한, 수화열은 Fig. 1과 같이 각 시험체의 중심부, 중간부 및 단부에 열전대를 설치하여 측정하였다. 길이변화율은 먼저, 자기수축 시험체의 경우는 중심부에 수직, 수평으로 각각 1개씩 설치하였고, 전체수축 시

Table 4 게이지 특징

	특징
측정범위	±5000×10 ⁻⁶
게이지 길이(mm)	100
온도 보정계수	350
온도측정	가능(-20~180°C)
게이지 접속선	4게이지법
적용방식	콘크리트 내부 매설형
사용목적	콘크리트 길이변화율 측정
기타	· 경화과정 및 구조물 이동 거동까지의 광범위한 측정 가능

험체의 경우는 중심부와 단부에 각각 수직, 수평으로 총 4개의 매설형 응력게이지를 설치하여 측정하였으며, 거푸집 탈형 이후 표면부에서의 건조수축 길이변화율은 표면에 부착된 콘택트 게이지에 의거 측정하였다. 길이변화율 측정을 위한 변형게이지의 특징⁽¹⁸⁾은 Table 4와 같고, 게이지 사용 성적서(catalogue)에 제시한 식 (1), (2)에 따라 변형률을 계산하였다.

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 - \Phi \times \Delta t \quad (1)$$

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

여기서 ϵ_3 : 실제 건조·자기수축 길이변화율

ϵ_2 : 실제 변형률

C_e : 교정계수

ϵ_i : 초기치 i시점에서의 지시치

Φ : 선팅창계수(10.0×10⁻⁶/°C)

Δt : 온도차

λ : 0점 이동량

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 5는 플레인 배합 및 제안 배합의 굳지 않은 콘크리트 특성에 대한 실험결과를 나타낸 것이다.

플레인 배합 및 제안 배합 콘크리트의 유동성 및 공기량은 모두 목표 슬럼프 플로우 600±100 mm 및 목표 공기량 4.5±1.5%의 범위를 만족하였다. 다만, 굳지 않은 콘크리트의 특성은 배합설계를 실시하여 얻어진 결과로서, 팽창재 및 수축저감제와 관련하여서는 SP제 및 AE제의 양에 대한 배합 사항으로 분석하였다.

Table 5 굳지 않은 콘크리트의 특성

사항 종류	슬럼프 (mm)	슬럼프 플로우 (mm)	공기 량 (%)	단위용 적질량 (kg/m ³)	충전 높이 (mm)	재료 분리 저항성 (%)	응결 시간 (hr)	
							초결	종결
플레인 배합	265	643	5.6	2,339	320	91	24.2	26.7
제안 배합	260	628	4.6	2,327	310	90	15.5	18.0

Table 6 강도 특성

구분	압축강도 (MPa)			조깅인장강도 (MPa)
	7일	28일	91일	28일
플레인 배합	47.3	66.2	70.9	5.14
제안 배합	49.7	68.9	72.7	5.31

즉, 팽창재와 수축저감제를 병용한 제안 배합 콘크리트인 경우는 플레인 배합과 비교하여 유동성이 저하하므로 SP제량을 증가시켜 배합설계 하였고, 공기량이 증가되어 AE제량을 감소시켜주어야 함을 알 수 있었다.

U형 충전 높이는 비교적 양호한 충전성을 나타내었고, 재료분리 저항률은 모두 90% 이상으로 양호하게 나타났으며, 응결시간은 CSA계 팽창재의 속경성 효과로 인하여 제안 배합 콘크리트의 경우가 플레인 배합과 비교하여 8시간 정도 촉진된 것으로 나타났다.

3.2 강도 특성

Table 6은 재령별 플레인 배합과 제안 배합 콘크리트의 압축강도 및 재령 28일에서의 조깅 인장강도를 나타낸 것이다.

압축강도는 재령 7일에서 40MPa 이상, 재령 28일에서 60MPa 이상, 재령 91일에서 70MPa 이상의 고강도를 나타내었다. 특히, 제안 배합 콘크리트의 압축강도는 플레인 배합에 비해 다소 크게 나타났는데, 이는 팽창재의 수화생성물에 의한 조직의 치밀성 증대에 기인된 것으로 사료된다. 조깅 인장강도는 압축강도와 유사한 경향으로 제안 배합 콘크리트가 플레인 배합보다 다소 크게 나타났는데, 압축강도에 대한 인장강도 비율은 8% 정도로 나타났다.

3.3 수화열 특성

Fig. 2는 모의부재 시험체별 재령경과에 따른 수화열 온도이력을 나타낸 것이다.

모의부재 시험체의 수화열은 시험체 종류에 관계없이 초기에서 급속히 상승하여 재령 약 1.5일에서 최고

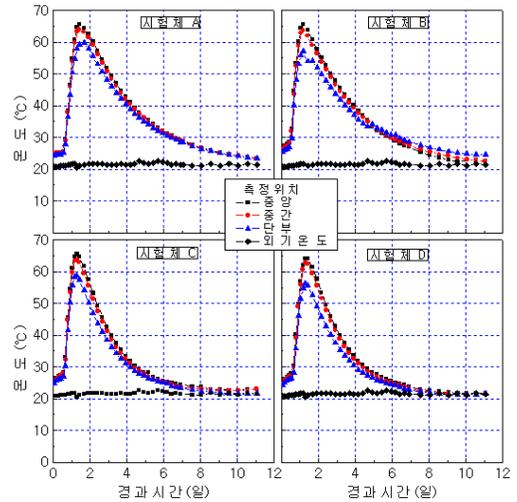


Fig. 2 시험체별 재령경과에 따른 수화열 온도이력

온도에 도달하였고, 이후 서서히 저하하는 것으로 나타났다. 이 때, 수화열 최고 온도는 시험체 종류에 관계없이 중심부, 중간부와 단부는 각각 65°C, 64°C, 58°C 정도로 나타나, 콘크리트 배합에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다.

3.4 수축 특성

Fig. 3은 모의부재 시험체별 재령경과에 따른 실제 변형률을 나타낸 것이고, Fig. 4는 수화열에 의한 팽창성분을 배제한 실제 건조·자기수축 길이변화율을 나타낸 것입니다.

먼저, 시험체 A 즉, 플레인 배합 자기수축 시험체의 자기수축 변형률은 초기에 수화열에 의한 열팽창으로 재령 약 1.5일에서 150×10^{-6} 정도 팽창하였는데, 이때 온도변형률은 약 380×10^{-6} 정도로 나타났다. 따라서 열팽창성분을 배제한 수축변형률은 재령 3일에서 약 -340×10^{-6} 로 나타났으며, 그 이후 재령에서는 완만한 경향으로 재령 49일에서는 약 -350×10^{-6} 이었다. 특히 모의부재 시험체의 경우 높은 수화열로 인한 결합재의 활성화⁽¹²⁾로 초기재령에서의 자기수축이 부재 내부에서 급속하게 발생하였고 그 이후 재령에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 한편, $100 \times 100 \times 400$

mm 표준시험체의 경우는 모의부재 시험체와 비교하여 현저한 차이를 나타내었는데, 비교적 완만하게 장기적으로 지속되는 경향이었지만, 본 실험 재령 49일에서의 자기수축량은 모의부재 시험체와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 게이지 매설 위치에 따라서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

시험체 B 즉, 제안 배합 자기수축 시험체에서는 재령 약 1.5일에서 450×10^{-6} 정도로 팽창하였는데, 이때 온도변형률은 역시 380×10^{-6} 정도로서, 재령 1.5일에서 수화열 온도보정을 한 후의 자기수축 길이변화율은 약 65×10^{-6} 정도 팽창으로 나타났다. 재령 49일

에서는 약 -175×10^{-6} 정도로 플레인 배합에 비하여 50% 정도 저감하는 것을 알 수 있었는데, 이는 제안 배합 콘크리트에 혼입된 팽창제의 에트린자이트 생성에 의한 초기 수축보상⁽¹³⁾과 수축저감제 혼입에 따른 모세관 장력의 감소에 의한 수축저감 효과⁽¹⁴⁾의 복합 작용에 기인한 것으로 사료된다.⁽¹⁵⁾ 한편 $100 \times 100 \times 400$ mm 자기수축 표준시험체와 비교하여서는 역시 초기에 급격한 수축을 보였으나, 재령이 경과할수록 완만한 경향을 나타내어, 궁극적으로 재령 49일에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 게이지 매설 위치에 따라서는 역시 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

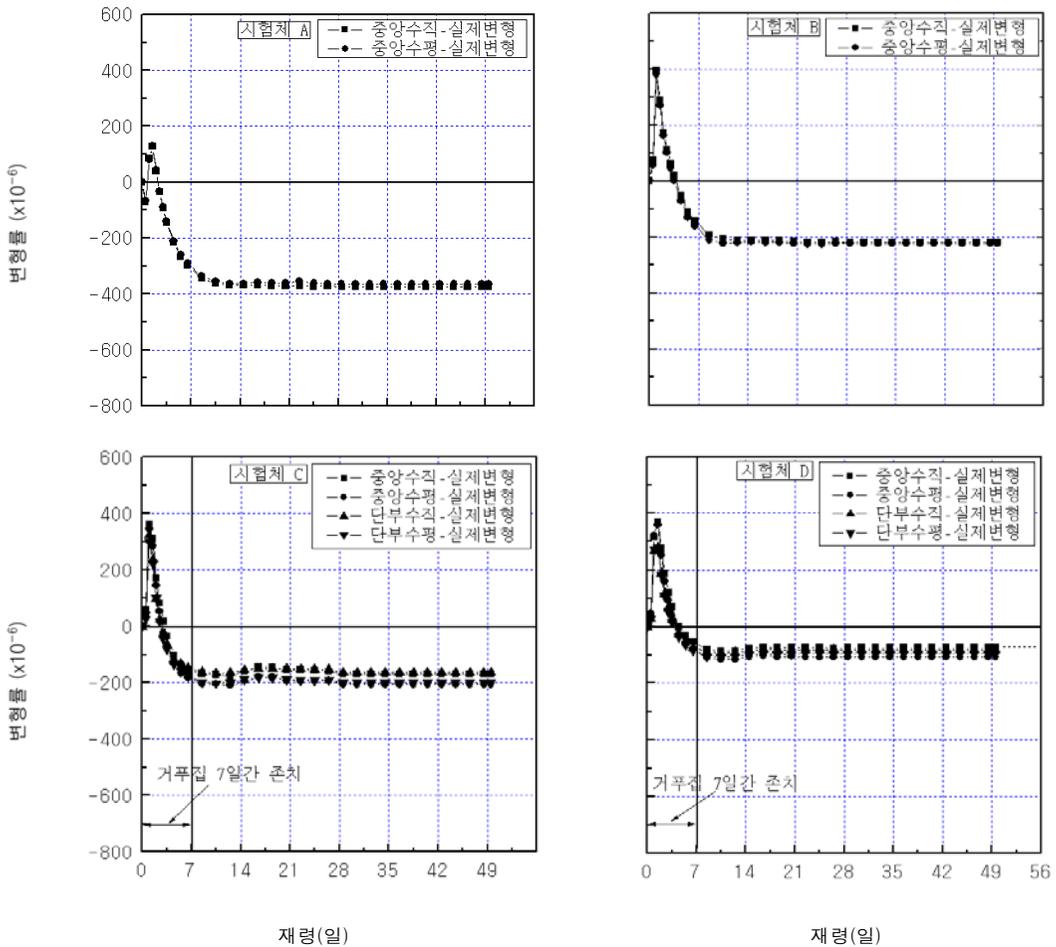


Fig. 3 재령경과에 따른 실제 변형률

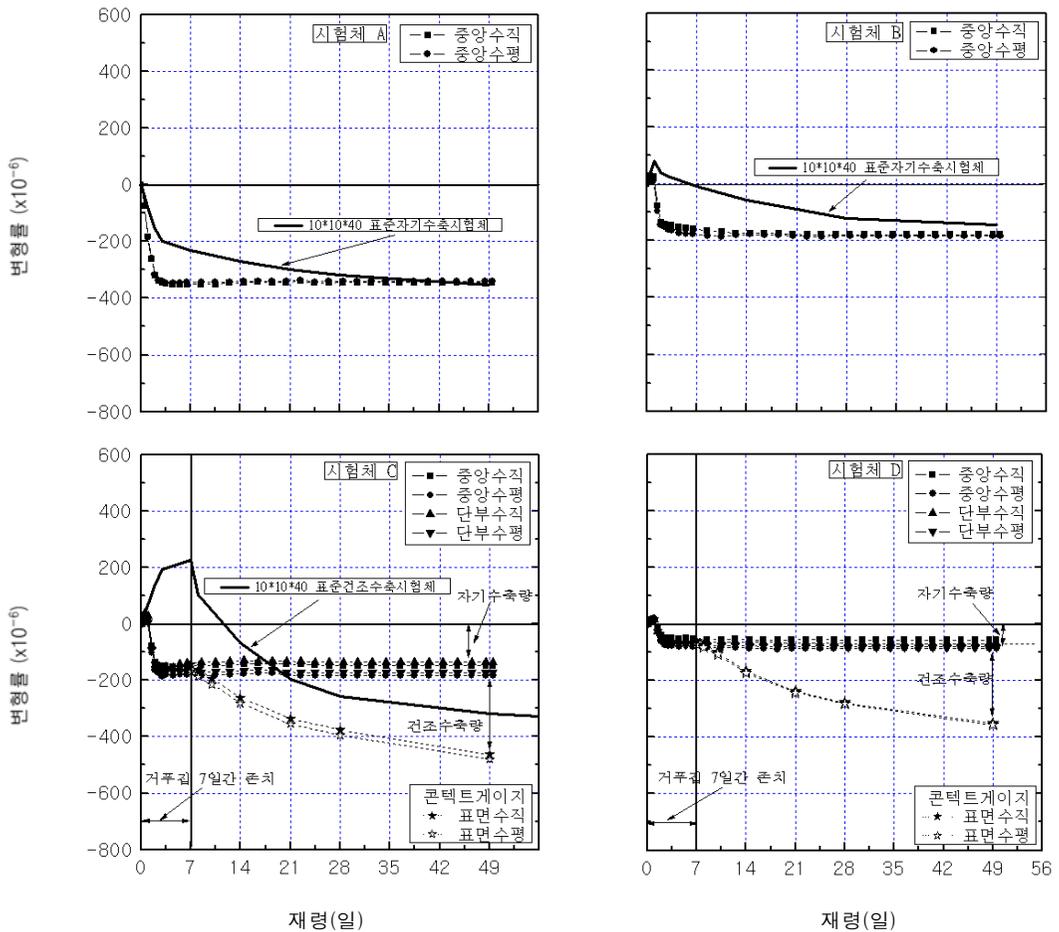


Fig. 4 수화열 온도보정후의 재령경과에 따른 길이변화율

또한, 시험체 C 즉, 제안 배합 수축 시험체의 온도 변형률은 380×10^{-6} 정도로서, 수화열에 의한 열팽창 성분을 배제한 후의 변형률은 재령 49일에서 약 -170×10^{-6} 정도로 자기수축 시험체와 큰 차이가 없게 나타났는데, 이 시험체 내부에서는 크게 자기수축 변형과 건조수축 변형이 고려되지만, 실제적으로 건조수축에 관하여는 Larrard의 연구에서 지적하는 바와 같이 내부에는 건조수축이 발생하지 않음에 기인된 것으로 분석된다.⁽¹⁶⁾ 즉, Larrard 연구에서 실리카 폼을 사용한 고성능 콘크리트의 외부에서 수분 발산 상황을 검토한 결과, 재령 3개월에서 시험체 표면의 약 20 mm부분에서까지만 밖으로 수분의 발산이 발생한다는

(시험체 두께 160 mm) 것을 보고하고 있음에, 본 시험체에서도 단부 게이지매설위치(표면에서 50 mm 정도 철근위치)에서의 수분발산이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 재령 7일간은 치장 합판 거푸집을 존치한 것도 병용하여 고려하면, 이 시점의 내부에서 수분발산은 거의 없었던 것으로 분석된다.

또한, 거푸집 탈형 이후 콘택트 게이지에 의해 측정된 전체수축량은 460×10^{-6} 정도로 내부에서 발생한 총 자기수축량에 비하여 재령 49일에서 약 260×10^{-6} 정도 크게 발생하였는데, 이는 단면 크기가 큰 조직이 치밀한 고성능 콘크리트에서 수분증발에 의한 건조수축은 내부에서 거의 발생하지 않고 표층부에서만 어느

정도 나타나는 부등수축이 발생하는 것을 알 수 있다. 한편 100×100×400mm 건조수축 표준시험체와 비교하여서는 표준시험체 수중양생기간의 습윤팽창으로 모의부재 시험체의 전체수축량이 크게 발생하였고, 내부 게이시 매설 위치에 따라서는 역시 큰 차이가 없는 것으로 분석된다.

시험체 D 즉, 제안 배합 철근배근 시험체에서는 수화열 온도보정을 진행한 내부에서의 변형값은 재령 49일에서 -80×10^{-6} 정도로 제안 배합 무근콘크리트 시험체에 비하여 철근구속의 영향으로 약 60% 정도 저감하는 것으로 나타났고, 콘크리트 게이시에 의해 측정된 전체수축은 재령 49일에서 내부에서 발생한 총 자기수축량에 비하여 200×10^{-6} 정도 크게 발생하였다. 역시 내부 매설형 게이시 매설 위치에 따라서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 플레인 배합 및 제안 배합 고성능 콘크리트의 모의부재 시험체에 있어서 콘크리트의 기초적 물성과 자기 및 건조수축의 수축특성에 대하여 검토한 것으로서, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 배합특성으로 제안 배합은 목표 슬럼프 플로우 및 목표 공기량을 만족하기 위하여 플레인 배합 보다 SP제량을 증가시키고, AE제량을 감하는 배합보정이 필요하였다. 응결시간은 제안 배합이 8시간 정도 빠르게 나타났고, 압축강도는 재령 28일에서 60MPa 이상의 고강도로 제안 배합이 플레인 배합보다 3% 정도 크게 나타났다.
- 2) 수축특성으로 플레인 배합 자기수축 시험체의 자기수축 길이변화율은 재령 49일에서 -340×10^{-6} 정도로 나타났고, 제안 배합 자기수축 시험체의 자기수축은 팽창제와 수축저감제의 작용에 기인해 플레인 배합보다 50% 정도의 저감효과를 나타내었다.
- 3) 제안 배합 전체수축 시험체의 내부 수축량은 수분발산이 거의 없는 것에 기인하여 제안 배합 자기수축 시험체와 유사한 경향이였다. 단, 표면부는 표면건조의 영향으로 전체수축이 내부보다 260×10^{-6} 정도 크게 발생하였다.

- 4) 철근배근 시험체의 변형량은 철근구속에 의해 제안 배합 무근 콘크리트 시험체에 비하여 60% 정도 작게 나타났고, 표면부에서의 건조수축은 역시 내부보다 200×10^{-6} 정도 크게 발생하는 부등수축이 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬 ; “팽창제 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.15, No.5, pp.785~793, 2003.
2. 한천구, 김성욱, 고경택, 한민철, “팽창제와 수축저감제를 조합 사용한 고성능 콘크리트의 기초물성 및 수축특성”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.16, No.5, pp.605~612, 2004.
3. 한국건설기술연구원 ; CSA계 혼화제를 사용한 콘크리트 특성분석에 관한 연구, 연구보고서, 2005. 5.
4. 이병호 ; 실리카흙 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 충남대 대학원 박사학위논문, 1990. 12.
5. 김형태 ; 실리카흙 및 실리카흙 콘크리트의 특성과 이용, 콘크리트학회지, 제3권 3호, pp.23~30, 1991.
6. 한국건설기술연구원 ; 콘크리트 교량의 내구성 향상기술 개발, 연구보고서, 2002.
7. 近松龜一, 竹田宣典, 鎌田文男, 十河茂幸 ; 結合材の種類がコンクリートの硬化収縮に及ぼす影響, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp. 54 3~548, 1993.
8. 日本建築學會 ; フライエッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, 1999.
9. 日本建築學會 ; シリカフェュームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン, 1996.
10. 自己收縮研究委員, “自己收縮研究委員會報告書”, 日本コンクリート工學協會, 2002. 9.
11. 日本土木學會, “高流動コンクリート施工指針”, 콘크리트라이브러리-93. 1998.
12. 今本啓一 ; 超高強度コンクリート實大柱の自己收縮応力に及ぼす水和熱の影響, 日本建築學會論文集, 第503号, 17-22, 1998年 1月.
13. 牧隆輝, 下山善秀, 榮川裕之 ; 収縮低減剤を用いたコンクリートのひび割れ調査, 日本建築學會大會學術講演梗概集, pp.1085~1086, 1998.
14. 加藤淳司, 津崎淳一 ; 發泡劑および膨脹材を用いたコンクリートの膨脹性能および強度特性について, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 2001, pp.203~ 204.

-
15. 田中敏嗣, 杉山彰徳, 小川鑑, 富田六郎 : 混和材料を
組合せて使用したコンクリートの諸特性, コンクリート
工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995, pp.157~
162.
 16. Larrad F.D and Bostvironnios. J.L. : On the
Long-Term Strength Loses of Silica-Fume-
High-Strength Concrete, Magazine of Concrete
Research, vol.35. No.155 pp.109~119, 1991.
 17. Davis. H.E. ; Autogenous Volume Change of
Concrete. Proc. ASTM 40, pp.1103~1110. 1940.
 18. Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. KM- 100B
TEST DATA.

(접수일자 : 2005년 4월 21일)