

# 결합재 구성에 따른 50MPa급 고강도 콘크리트의 수축 변형 특성

## Shrinkage Characteristics of 50MPa High-strength Concrete with Compositions of Cementitious Materials

정 형 철\*                      민 경 환\*\*                      양 준 모\*\*                      윤 영 수\*\*\*  
Jung, Hyung-Chul    Min, Kyung-Hwan    Yang, Jun-Mo    Yoon, Young-Soo

### Abstract

This study forms part of a research project that was carried out on the development and application of high-strength concrete for large underground spaces. In order to develop 50MPa high-strength concrete, eight optimal mixtures with different portions of fly ash and ground granulated blast furnace slag were selected. For assessments of shrinkage characteristics, free shrinkage tests with prismatic specimens and shrinkage crack tests were performed. The compressive strength was more than 30MPa at 7days, and stable design strength was acquired at 28days. High-strength concrete containing blast furnace slag shows large autogenous shrinkage, while large shrinkage deformations and cracks will occur when mixtures are replaced with large volumes of cementitious materials. Hence, for these high-strength concrete mixtures, the curing conditions of initial ages that affect the reaction of hydration and drying effects need to be checked.

### 요 지

본 연구는 대형·대단면 지하공간에 적용하기 위한 고강도 콘크리트의 개발 및 적용을 위한 연구의 일환으로 50MPa급의 고강도 콘크리트의 제조를 위해 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 치환에 따른 최적 배합을 선정하고, 비구속 수축 실험과 수축균열 실험을 통해 정량적으로 평가하였다. 콘크리트의 압축강도는 전 배합이 7일 재령에서 30MPa를 넘었고, 28일 재령에서는 설계강도를 모두 안정적으로 획득하였다. 고강도 콘크리트에 고로슬래그를 사용할 경우 자기수축량이 커지고, 다량 치환할 경우 수축변형이 증가하고 강도발현이 지연되어 수축에 의한 균열 발생의 우려가 있다. 혼화재를 다량 치환한 고강도 콘크리트 배합은 수화반응과 건조 효과에 영향을 주는 초기 재령의 양생 조건에 대한 검토가 필요하다.

**Keywords :** Autogenous shrinkage, Blast furnace slag, Drying shrinkage, Fly ash, High-strength concrete, Mixture

**핵심 용어 :** 자기수축, 고로슬래그미분말, 건조수축, 플라이애쉬, 고강도 콘크리트, 배합

\* 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정

\*\* 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

\*\*\* 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수

E-mail : ysyoon@korea.ac.kr 02-3290-3320

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

대형·대단면의 지하 공간의 창출에 대한 요구는 단순히 지상 공간의 부족에 따라 발생하는 수요뿐만 아니라 경제 규모의 성장과 건설 기술의 발달, 인간의 생활 형태의 변화 등의 복합적인 요소에 따른 새로운 공간의 개발에 대한 필요성에서 비롯한 것이라 할 수 있다. 외국의 경우는 대형·대단면 지하공간 활용을 국가 주요사업의 일환으로 추진하고 있다.<sup>(8)(12)(13)(16)(20)</sup>

반면 지하 공간에 적용되는 콘크리트 구조물은 각 외력에 대한 평형 조건을 만족시켜야 할 뿐만 아니라, 구조물의 공용 수명 내에 소요 내구성을 확보해야 한다. 지하 공간에서 콘크리트 구조물의 내구성의 평가와 내구성의 저하에 따른 보수 보강은 지상에서와 달리 매우 어렵기 때문에 설계 및 시공 시에 소요 성능을 확보할 수 있도록 해야 한다. 또한 일반적으로 지하 공간은 지상보다 안정된 환경 조건을 가지므로 콘크리트 구조물의 공용수명은 콘크리트 자체의 내구성능보다 보강재의 부식이 주요한 요소로 작용한다.<sup>(18)</sup>

균열이 발생한 콘크리트 구조물 내의 철근 부식은 철근의 체적 팽창, 균열 증가, 부식 속도의 증가로 연결되어 콘크리트 구조물의 공용 수명 단축에 큰 영향을 미친다.

콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위해 설계 및 시공 단계에서 균열을 최소화해야 하고, 이에 대해 적절히 검토를 해야 한다. 균열 방지에 관한 국내 시방서의 지침은 단위수량 제한 규정과 허용균열폭 관련 규정이 유일하나 이것도 지하구조물에 대한 일괄적인 적용은 어렵다.<sup>(1)-(5)</sup> 균열 방지 대책에 관한 연구는 1990년 후반부터 최근까지 재료적인 접근보다는 구조적인 접근에 초점을 맞추어 꾸준히 진행되어 왔다. 재료적인 접근에 있어서는 팽창성 재료를 이용하여 무수축 시멘트를 개발하거나, 근본적 원인이라 할 수 있는 모세관수를 저감시키는 방향으로 진행되고 있다. 하지만 팽창성 재료를 혼입할 경우, 품질의 불균일이 발생할 가능성이 있고 모세관수를 저감하는 방법은 사용수량 저감에 따른 워커빌리티의 저하 가능성이 커서 어느 한쪽도 실질적인 대안을 제시해 주지 못하고 있는 실정이다.

1980년대 후반부터 본격적으로 개발된 혼화제로 인해 40MPa급의 콘크리트의 제조는 건설 현장에서도 특별한 품질관리를 하지 않고도 제조되고 있다. 하지만 이를 상회하는 고강도 콘크리트는 그 필요성과 수요에도 불구하고 품질관리의 어려움과 적용 사례의 부족으로 현장에서 보편적으로 사용하지 못하고 있다.<sup>(8)</sup> 또한 고강도 콘크리트는 낮은 물-시멘트비로 인해 자기 수축의 발생량이 커지기 때문에 이를 반영해서 효과적으로 초기 수축균열을 저감할 수 있도록 적절한 평가가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 대형·대단면 지하공간에 적용하기 위한 고강도 콘크리트의 개발 및 적용을 위한 연구의 일환으로 50MPa급의 고강도 콘크리트의 제조를 위해 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 치환에 따른 최적 배합을 선정하고, 비구속 수축 실험과 수축균열 실험을 통해 정량적으로 평가하고자 한다.

## 2. 실험 개요 및 방법

### 2.1 재료 특성 및 배합

대형·대단면 구조물 적용 고강도 콘크리트의 배합은 설계기준강도 50MPa를 안정적으로 획득하면서, 워커빌리티와 내구성을 고려해 물-시멘트 비 36%, 단위수량 170kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율 50%, 슬럼프플로우 500±50mm, 공기량 5.0±1.5%로 결정하였다. 이를 토대로 Table 1과 같은 화학성분을 가진 결합재에 대해 결합재의 구성을 달리하여 Table 2와 같은 8종의 배합을 선정하였다. 여기서 OPC는 보통포틀랜드 시멘트이고, FA는 플라이애쉬, BS는 고로슬래그미분말을 의미하며(3성분계 배합은 각각 F와 S), FA와 BS 뒤의 숫자는 전체 결합재량 중 혼화제로 치환한 양(%)을 의미한다.

실험에 사용된 시멘트는 비중 3.16, 분말도 341m<sup>2</sup>/kg의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 추가로 사용된 결합재는 비중 2.13, 분말도 348m<sup>2</sup>/kg의 플라이애쉬와, 비중 2.91, 분말도 453m<sup>2</sup>/kg의 제3종 고로슬래그미분말이다. 잔골재는 조립률 2.6의 세척사이고, 굵은 골재는 최대치수 20mm, 조립률 6.6의 쇄

Table 1 실험재료의 화학성분

	OPC	FA	BS
SiO <sub>2</sub>	21.3	52.8	34.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	22.5	12.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.1	13.4	0.5
CaO	63.1	4.1	41.3
MgO	2.9	0.8	5.93
SO <sub>3</sub>	2.2	0.4	2.53
K <sub>2</sub> O	-	0.9	0.5
Na <sub>2</sub> O	-	0.4	0.4
Loss on ignition	0.8	3.8	0.48
Specific gravity	3.15	2.13	2.91
Fineness (m <sup>2</sup> /kg)	341	348	453

석을 사용하였다. 또한 혼화제는 폴리카본산제 고성능 AE감수제와 공기연행제를 사용하였다.

## 2.2 압축강도 및 쪼갬인장강도

일반적인 철근콘크리트 구조물의 설계에 있어서 콘크리트의 인장강도는 무시하지만 사용성 측면에서 균열을 저감시키기 위한 노력으로 인장강도의 중요성이 점차 부각되고 있다. 일반강도 영역에서 콘크리트의 압축강도 증가에 따라 인장강도 역시 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있지만 고강도 콘크리트에서는 이러한 경향이 성립하지 않기도 한다.<sup>(10)(14)</sup>

대형·대단면 적용 50MPa급 고성능 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도는 각각 KS F 2405와 KS F 2423에 따라 실험을 실시하였다. 공시체는 제작 1일 후 탈형하고 20±3°C의 항온 수조에서 수중 양생하였고, 압축강도와 쪼갬인장강도는 7, 28, 56일 재령에 각각 측정하였다.

## 2.3 콘크리트의 수축

콘크리트의 수축은 기존의 연구모델을 통해 다음 Eq.(1)과 같이 자기수축(Autogenous shrinkage)과 건조수축(Drying shrinkage)의 합으로 표현할 수 있으며, 고강도 콘크리트에서는 수축식에 건조수축과 함께 자기수축의 영향을 반영하는 것이 필수적이다.<sup>(3)(11)(13)</sup>

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{as}(t) + \epsilon_{ds}(t) \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{sh}$  = 전체수축량

$\epsilon_{as}$  = 자기수축량

$\epsilon_{ds}$  = 건조수축량

콘크리트의 수축에 있어서 물-시멘트 비는 경화 이후 공극 내 모세관수의 양을 결정하므로 수축에 매우 중요한 인자이다. 콘크리트에 일반적으로 사용되는 골재의 수축은 페이스트의 수축에 비해 훨씬 작아 콘크리트의 수축은 골재 함유율이 증가함에 따라 감소한다. 또한 5~30°C 범위에서 건조수축량은 주위 온도와 선형으로 비례하고, 콘크리트를 둘러싼 상대습도는 수축량에 큰 영향을 미친다.<sup>(17)</sup> 그에 비해 시멘트의 성질과 콘크리트 크기는 영향을 거의 미치지 못한다고 확인되고 있으나,<sup>(9)(19)</sup> 결합체의 구성에 따른 고강도 콘크리트의 시간의존적 거동은 차이를 보이고 있어 이에 대해 평가할 필요가 있다.

## 2.4 수축 실험 방법

Table 2 변수별 배합비

Mixture	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )					
			Water	Cement (I)	FA	BS	Fine Agg.	Coarse Agg.
OPC	36	50	170	472	-	-	842	855
FA10				425	47	-	833	846
FA20				378	94	-	825	838
BS30				331	-	142	835	847
BS50				236	-	236	830	843
F10S40				236	47	189	824	836
F15S35					71	165	821	833
F20S30					94	142	818	830

### 2.4.1 비구속 건조수축 및 자기수축 실험

비구속 건조수축과 자기수축 실험은 ASTM 과 JCI 에서 제안하는 방법을 따랐으며, 100×100×400mm 의 각주형 공시체를 제작하고, 콘크리트용 게이지와 열전자쌍(Thermocouple)을 매입을 하여 측정하였다. Photo 1과 같이 콘크리트 타설 전에 철제 빔 몰드 내부에 테프론 시트를 깔아 공시체와 몰드 사이의 마찰을 방지하였고, 자기수축 실험 공시체는 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 즉시 비닐로 표면을 덮고 밀봉하였다. 제작 직후 공시체는 온도 20±1℃, 습도 50±3%의 항온항습실로 이동하여 데이터 로거에 연결하여 변형률과 온도를 측정하였다. 자기수축 공시체는 공시체 제작 24시간 후 탈형하여 알루미늄 테이프로 완전히 밀봉하였고, 건조수축 공시체는 습도 50±3%의 환경에 노출하고 측정하였다.

### 2.4.2 Ring Test

구속되어 있는 콘크리트의 건조수축에 의한 균열 저항성의 상대적인 비교 평가를 위해 Photo 2와 같이 AASHTO PP34-98에 따라 Ring test를 수행하였다. Ring test는 콘크리트의 수축과 균열 발생을 평가할 수 있는 가장 일반적인 방법으로 내부 강관 링은 콘크리트 수축을 제한하여 인장력을 발생시키는 역할을 함과 동시에 균열의 발생과 진전을 모니터링 하는 역할을 한다. 내부 강관 링의 구속으로 인해 발생된 인장력과 크리프에 의한 응력의 차가 콘크리트의 인장강도 이상이 되면 균열이 발생하고, 균열 발생 시점은 내부 강관 링에 부착된 스틸 게이지를 통해 측정한다. 건조수축은 외측 실린더에서만 발생하도록 상부 단면은 밀봉하였다.



Photo 1 비구속 건조수축 및 자기수축 실험

### 2.4.3 콘크리트 건조수축 균열실험

외부 구속을 한 콘크리트의 건조수축 거동을 파악하는 다른 시험 방법으로 KS F 2595에 따라서 건조수축 균열 실험을 실시하였다. Photo 3과 같이 콘크리트를 구속 몰드에 넣은 후 7일 동안 습윤 양생을 한 후 탈형을 하고 건조를 시작하였다. 이때 온도는 20±3℃, 습도는 60±5%로 하는 것을 원칙으로 하나 본 연구에서는 비구속 수축실험과 동일하게 습도를 50±3%로 하였다. 건조수축에 의한 균열 발생 시점은 구속 몰드에 스틸게이지를 부착하여 데이터로거로

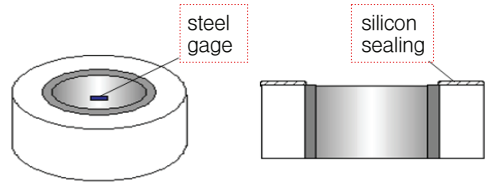


Photo 2 Ring Test

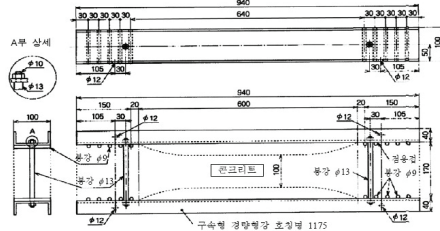


Photo 3 건조수축 균열 실험

변형률을 측정하여, 변형률이 급변하는 시점으로 정하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 압축강도 및 쪼갬인장강도

콘크리트의 압축강도는 Table 3과 같이 전 배합이 7일 재령에서 30MPa를 넘었고, 28일 재령에서는 설계강도를 모두 안정적으로 획득하였다. 초기 재령과 표준 재령의 강도 증가는 거푸집 제거 시기를 앞당겨 시공 속도를 향상시키고, 구조물의 단면 및 자중의 감소와 이에 따른 유연한 설계 대안 효과 등의 장점이 있다. 결합재 구성에 따른 압축강도의 경향은 플라이 애쉬의 경우보다 고로슬래그 미분말로 치환한 경우 강도발현이 더 우수한 것으로 나타났다. 반면 플라이 애쉬로 다량 치환한 경우에는 초기 재령에서 강도 발현이 다소 늦어지는 경향을 보이나, 표준 재령에서는 충분히 강도발현을 하는 것으로 나타났다. 쪼갬인장강도는 기존 연구<sup>(10)(14)</sup>에서와 같이 큰 폭의 변화를 갖지 않았고, 재령에 따라 압축강도가 증가하여도 비례하여 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 반면 정량적으로 측정된 쪼갬인장강도의 값은 대형·대단면 지하공간 적용 콘크리트 구조물의 수화열과 수축 등에 의한 변형에 의해 발생할 수 있는 균열을 저감하는 대안설계에 적용할 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 3.2 비구속 자기수축 및 건조수축

비구속 건조수축 및 자기수축 실험은 81일 재령까지 측정하였고, Fig. 1~4에서 보듯이 측정 기간 내에 자기수축량은 수렴을 한 반면 건조수축은 계속 진행이 되었다. 혼화재의 사용은 2성분계와 3성분계 배합 모두에서 건조수축을 다소 감소시켜 주는 것으로 나타났다. 건조수축의 저감효과는 슬래그를 사용한 배합에서 더 크게 나타났고, BS50 배합의 경우 약 50일 이후부터는 OPC 배합보다 건조수축의 약간 크게 측정되었다. FA 시리즈 배합은 혼화재의 치환량이 BS 시리즈에 비해 작아서 초기에 건조수축 증가 속도가 BS 시리즈보다는 크지만 점차 감소하여 약 20일 이후부터는 BS 시리즈보다 작게 나타나는 경향을 보였다.

일반적으로 고로슬래그미분말이나 플라이애쉬를 쓰는 경우에 건조수축은 단위수량이 같을 경우 큰 차이를 보이지 않지만 본 연구에서와 같이 초기 거동에서는 다소 차이를 보인다. 따라서 건조수축량이 수렴 정도가 판별이 되는 장기 재령에서의 건조 수축 거동에 대한 추가의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

자기수축은 OPC 배합에 비해 혼화재를 치환한 배합이 다소 크게 나타났고, 혼화재의 치환량 증가에 따라서 자기수축량도 증가하였다. 이는 시멘트보다 높은 비표면적을 갖는 혼화재로 치환함에 따라서 수축을 발생시키는 페이스트량이 상대적으로 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 고로슬래그미분말의 사용은 자기수축량을 증가시키는 것과 같은 결과가 실험에서도 나타났다.

Table 3 재령별 강도 측정 결과

Mixture	Compressive Strength(MPa)			Splitting Tensile Strength(MPa)			Tensile/Compressive Strength Ratio(%)
	7day	28day	56day	7day	28day	56day	
OPC	57.90	63.20	67.87	3.30	3.50	3.70	5.45
FA10	56.14	63.79	68.20	3.24	3.59	3.80	5.57
FA20	42.67	58.78	67.20	2.69	3.07	3.40	5.06
BS30	47.87	65.89	70.50	3.30	3.55	4.00	5.67
BS50	42.71	63.57	73.10	2.65	3.82	4.20	5.75
F10S40	31.27	72.10	77.40	3.10	3.90	4.10	5.30
F15S35	39.63	70.62	76.50	3.00	3.96	4.05	5.29
F20S30	39.20	64.48	74.30	2.76	3.46	3.60	4.85



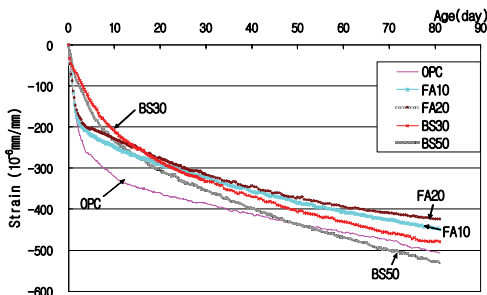


Fig. 1 2성분계 콘크리트의 건조수축

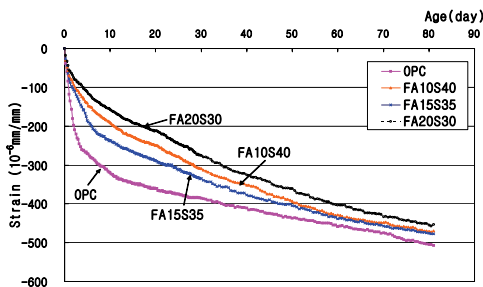


Fig. 2 3성분계 콘크리트의 건조수축

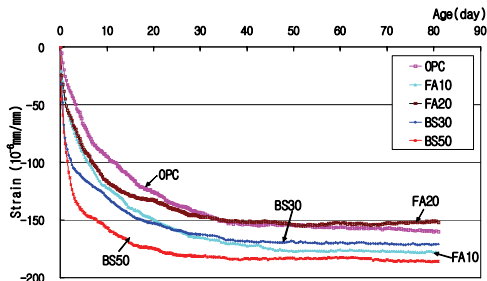


Fig. 3 2성분계 콘크리트의 자기수축

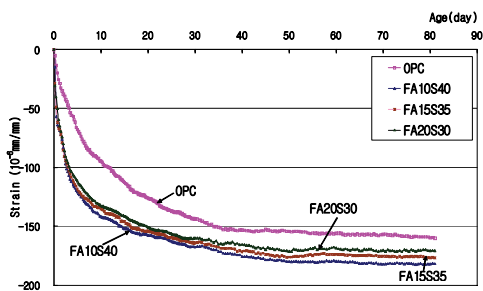


Fig. 4 3성분계 콘크리트의 자기수축

반면 플라이애쉬의 사용은 자기수축을 감소시킨다고 알려져 있으나, 본 연구 결과에서는 FA10 배합에서는

그 영향이 미비한 것으로 나타났다. 반면 FA20 배합은 자기수축 저감 효과가 다소 나타나서 약 35일 이후부터는 OPC의 경우보다 약간 작게 나타났다. 또한 고성능AE감수제의 사용에 따른 혼화재의 수화반응 활동도에 대한 영향도 반영된 것으로 판단된다.

### 3.3 Ring Test

링테스트의 실험결과는 Fig. 5~6과 같다. 링테스트 실험에 부착된 스트레인게이지의 변형률은 모든 실험체에서 균열이 발생하도록 35일까지 측정하였다. 그러나 측정값의 노이즈가 심하여, 배합의 특성을 완전히 반영한다고 보기는 다소 무리가 있으나 혼화재의 치환에 따른 경향이 비교적 잘 나타난 것으로 판단된다. 링테스트의 균열 발생 시점은 건조수축 및 자기수축에 의해 발생하는 변형률이 내측 강제 링에 의해 구속되어 발생하는 인장 응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되는 시점에서 발생한다.

앞서 언급한 바와 같이 플라이애쉬를 사용할 경우 건조수축 저감 효과가 발생하며, 이로 인해 균열 발생 시점의 지연 효과가 나타났다. 반면 고로슬래그미분말을 다량 치환한 배합(BS50, F10S40)은 OPC보다 이른 시기에 균열이 발생하였다. 이는 고로슬래그미분말을 다량 치환하면서 발생하는 수축량 증가와 강도발현 지연에 의한 상승효과로 판단된다.

### 3.4 건조수축 균열 실험 분석

건조수축 균열 실험 결과는 Fig. 7~8과 같다. 스틸게이지의 변형률은 모든 시험체에서 균열이 발생하도록 41일까지 측정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 직접인장 상태에서 콘크리트의 변형은 매우 취성적이고, 실험 자체에서 불확실성을 가질 수밖에 없다. 따라서 건조수축 균열 실험은 앞선 링테스트 실험과 완전히 일치한 결과가 나타나지는 않았지만 고로슬래그미분말의 다량 치환에 따른 수축변형의 증가 및 강도발현의 지연 효과가 반영되어 나타났다.

또한 FA10 배합을 제외한 나머지 모든 배합은 OPC의 경우보다 빨리 균열이 발생하였다.

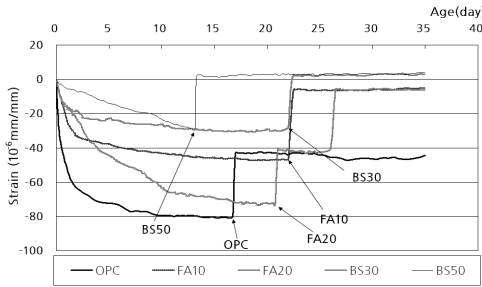


Fig. 5 2성분계 콘크리트의 Ring Test 결과

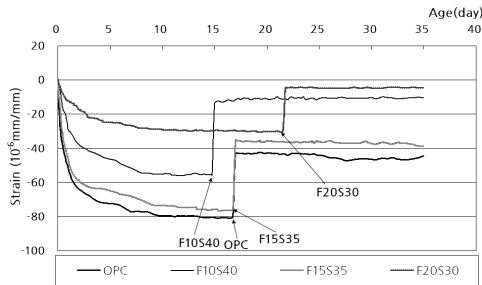


Fig. 6 3성분계 콘크리트의 Ring Test 결과

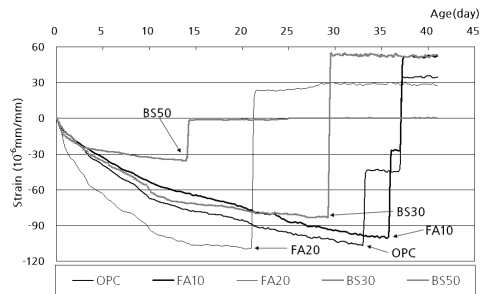


Fig. 7 2성분계 콘크리트의 수축 균열 실험 결과

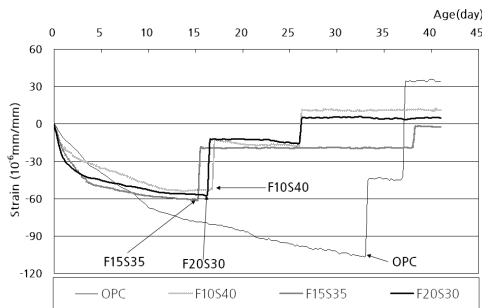


Fig. 8 3성분계 콘크리트의 수축 균열 실험 결과

이는 링테스트가 콘크리트 타설 직후부터 건조환경에 노출되는데 비해 건조수축 균열실험은 7일간 수중양생을

Table 4 배합별 균열발생 시기(day)

Mixture	Ring Test	Drying Shrinkage Crack Test
OPC	17.0	33.25
FA10	22.25	36.0
FA20	26.5	21.25
BS30	22.25	29.50
BS50	13.25	14.25
F10S40	15.0	17.0
F15S35	17.0	15.5
F20S30	21.75	16.5

한데서 비롯한 것이다. 즉 OPC나 혼화재 치환량이 적은 FA10, BS30 배합은 초기의 수화반응, 잠재수경성 반응, 포졸란 반응이 효과적으로 이루어진 반면 혼화재를 다량으로 치환한 배합(FA20, BS50, 3성분계)은 이러한 반응이 상대적으로 적게 진행된 것으로 판단된다. 따라서 고로슬래그미분말을 다량을 치환하여 사용할 경우 수축 변형과 이에 의한 구속응력의 영향을 반드시 고려해야 한다. 또한 혼화재를 다량 치환한 고강도 콘크리트의 배합의 수축에 의한 거동은 반드시 수화반응과 건조 효과에 영향을 주는 초기 재령의 양생 조건에 대한 검토가 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구는 대형·대단면 지하 공간에 적용하기 위한 고강도 콘크리트의 재료 개발과 적용성 향상에 관한 연구의 일환으로, 고강도 콘크리트의 수축 거동에 관한 일련의 실험을 통하여 수축 특성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 압축강도는 전 배합이 7일 재령에서 30MPa을 넘었고, 28일 재령에서는 설계강도를 모두 안정적으로 획득하였다.
- 2) 고강도 콘크리트에서 고로슬래그를 사용할 경우 자기수축량이 커지고, 다량 치환할 경우 수축변형 증가 및 강도발현 지연되어 수축에 의한 균열 발생의 우려가 있다.
- 3) 고강도 콘크리트에서 플라이애쉬를 사용하였을 때 건조수축 저감효과가 발생하며, 이로 인해 균열 발생지점의 지연효과가 나타났다.

4) 대형·대단면 지하 공간 적용 고강도 콘크리트의 적용성 향상을 위해 내구성능 및 수화열 특성에 관한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술개발사업(04핵심기술 C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 터널표준시방서, 건설 교통부, 1996.
2. 건축공사표준시방서, 대한건축학회, 2006.
3. 이회근, 이광명, 김우, 고강도 플라이애쉬 콘크리트의 자기수축 예측 모델, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 15, No. 1, 2003, pp. 133-142.
4. 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007.
5. 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2003.
6. 황인성, 한천구, 레미콘 품질관리 실무, 기문당, 2005, pp. 72-95.
7. AASHTO Designation PP34-98, Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete, AASHTO, 2001, pp. 179-182.
8. Boniface, A., Some Technical Lessons Learnt from Construction of the Lesotho Highlands Water Project Transfer Tunnel, Tunnelling & Underground Space Technology, Vol. 14, No. 1, 1999, pp. 29-35
9. Bouzouzaa, N., and Malhotra, V.M., Performance of Lab-Produced HVFA-Blended Cements in Concrete, Concrete International, Vol. 23, No. 4, 2001, pp. 31-35.
10. Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., and Slate, F.O. Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, ACI Journal Proceedings, Vol. 78, No. 3, 1981, pp. 171-178
11. CEB-FIP Structural Concrete: Textbook on Behavior, Design and Performance, Vol.1, Sprint Druck Stuttgart, 1999, pp. 43-46.
12. Rienzo, F.D., Oreste, P., and Pelizza, S. Sub-surface Geological-Geotechnical Modelling to Sustain Under ground Civil Planning, Engineering Geology, Vol. 96, No. 3-4, 2008, pp. 187-204.
13. JCI Test Method for Autogeneous Shrinkage and Autogeneous Expansion of Cement Paste, Mortar and Concrete, Report by Technical Committee on Autogeneous Shrinkage of Concrete of Japan Concrete Institute, 1996, pp. 195-198.
14. Kovler, K., Schamban, I., Igarashi, S., and Bentur, A. Influence of Mix Proportions and Curing Conditions on Tensile Splitting Strength of High Strength Concretes, Material & Structure, Vol. 32, No. 7, 1999, pp. 500-505.
15. Monnikhof, R.A.H., Edelenbos, J., Hoeven, F.V.D., and Krogt, R.A.A., The New Underground Planning Map of the Netherlands: a Feasibility Study of the Possibilities of the Use of Underground Space, Tunnelling. & Underground Space Technology, Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 341-347.
16. Romer, M., Holzer, L., and Pfiffner, M. Swiss Tunnel Structural: Concrete Damage by Formation of Thaumassite, Cement & Concrete Composites, Vol. 25, No. 8, 2003, pp. 1111-1117.
17. Tazawa, E., Miyazawa, S., and Kasai, T. Chemical Shrinkage and Autogeneous Shrinkage of Cement Paste, Cement & Concrete Research, Vol. 25, No. 2, 1995, pp. 288-292.
18. Tongeren, H.V., and Tonnisen, J.Y. Research on the Structural Behavior of Concrete in Tunnel Structures, Tunnelling & Underground Space Technology, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 375-383.
19. Yoon, Y.-S. Won, J.-P. Woo, S.-K. and Song, Y.-C. Enhanced Durability Performance of Fly Ash Concrete for Concrete-faced Rockfill Dam Application, Cement & Concrete Research, Vol. 32, No. 1, 2002, pp. 23-30.
20. Yuan, Y., Jiang, X., and Lee, C.F. Tunnel Waterproofing Practice in China, Tunnelling & Underground Space Technology, Vol.15, No. 2, 2000, pp. 227-233.

(접수일자 : 2008년 12월 3일)

(심사완료일자 : 2009년 3월 3일)