

초기재령에서 열팽창계수를 고려한 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 자기수축 특성에 관한 실험적 연구

박정준¹, 문재흠¹, 박기준¹, 이장화¹, 김성욱^{*}

¹한국건설기술연구원 구조융합연구소

An Experimental Study on Characteristics of Autogenous Shrinkage of HPRCC considering Early Age Coefficient of Thermal Expansion

Jung-Jun Park¹, Jae-Heum Moon¹, Gi-Joon Park¹, Jang-Hwa Lee¹, Sung-Wook Kim^{*},

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(HPRCC)는 물-결합재비(W/B)가 상당히 낮기 때문에 재령초기에서 자기수축이 크게 나타나는 특성을 지니고 있다. 이러한 자기수축의 영향으로 거푸집 및 보강철근 등에 의해 HPRCC가 구축될 경우 상당히 큰 잔류응력 발생과 수축균열 위험성이 나타나게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 초기재령에서의 수축거동에 따른 균열거동에 대한 평가와 수축을 억제하거나 감소시키기 위한 재료적 검토 등을 포함한 HPRCC의 수축특성에 대한 폭넓은 연구가 반드시 수행되어야 한다. 따라서, 이 논문에서는 팽창제와 수축저감제의 조합사용 여부에 따른 HPRCC의 역학적 특성 평가와 초기 재령에서의 열팽창계수 측정 및 이를 고려한 자기수축 실험을 수행하여 팽창제와 수축저감제가 HPRCC의 자기수축 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

Abstract HPRCC is characterized by a very low water-to-binder ratio which induce extremely large autogenous shrinkage at early age. The restriction of such autogenous shrinkage through the use of forms and reinforcing bars will increase substantially the risk of excessive residual stresses and shrinkage cracking. The exact understanding of the shrinkage behavior and studies on solutions to reduce shrinkage should be imperatively undertaken for further application of HPRCC to real structures. Therefore, this paper investigated the mechanical properties of HPRCC with respect to the eventual introduction of expansive admixture(EA) and shrinkage reducing agent (SRA) in the mixture. Autogenous shrinkage test was conducted considering the coefficient of thermal expansion (CTE) measured at early age so as to examine the effects of EA and SRA on the autogenous shrinkage behavior of HPRCC.

Key Words : Autogenous shrinkage, Coefficient of thermal expansion, Early age, HPRCC

1. 서론

콘크리트는 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로서 경제성 및 역학적 성능, 내구성이 우수하여 가장 보편적으로 사용되어온 건설재료이다[1]. 그러나 콘크리트는 인장강도가 낮고, 취성 거동을 보이는

등 여러 문제점 또한 내포하고 있으며, 최근에는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 물-결합재비(W/B)를 낮추고, 혼화재료와 강섬유를 혼입하여 강도와 인성을 복합적으로 향상시킨 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, 이하 HPRCC)가 개발되었으며, 실용화를 위한 관련 연

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구SO2) 방호·방폭용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Sung-Wook Kim (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-9100-128 email: swkim@kict.re.kr

Received April 16, 2015

Revised May 6, 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

구가 활발히 진행되고 있다[2,3].

그러나 HPRCC는 물-결합제비(W/B)가 상당히 낮고 굵은 골재를 사용하지 않으며, 고분말의 혼화재료를 혼합한다. 따라서 초기재령에서의 자기수축이 상당히 크게 발생하게 되고 최종적으로 약 800 $\mu\epsilon$ 의 자기수축 변형률이 발생하기도 한다[4]. 상기의 수축이 만약 거푸집 및 보강근 등에 의해 구속될 경우 상당히 큰 잔류응력 발생과 수축균열 위험성이 크게 나타나게 된다. 균열은 구조물의 내구성을 저하시키는 주요한 요인일 뿐만 아니라 콘크리트 구조물의 내구성, 안정성, 미관성 등의 측면에서 콘크리트에 발생하는 균열을 억제하거나 최소화 되어야 할 필요가 있다. 이를 위해 초기재령에서의 수축거동에 따른 균열거동에 대한 평가와 수축을 억제하거나 감소시키기 위한 재료적 검토 등을 포함한 HPRCC의 수축특성에 대한 폭넓은 연구가 반드시 수행되어야 한다 [5,6,7,8]. 콘크리트의 수축을 저감시키는 방법으로는 팽창재, 수축저감제 등의 혼화제를 사용하는 방법이 있다 [9]. 팽창재는 C_4A_3S 클링커를 포함하고 있어 재령초기에 다량의 에트링가이트(ettringite)를 생성하여 수화반응을 촉진시키고 부피를 팽창시킨다. 반면, 수축저감제는 시멘트페이스트의 내부공극수의 표면장력을 감소시켜 수축을 저감시킨다[10,11].

한편, 자기수축은 총 수축량에서 건조수축 및 온도변형률을 제외한 수축량으로 정의된다. 여기서 온도변형률은 콘크리트의 내부 온도변화량을 열팽창계수에 곱하여 구하게 된다. 기존의 연구자들에 의하면 콘크리트의 열팽창계수는 재령에 따라 변하며[7], 특히, 초기재령에서 크게 나타나는 경향을 보인다. 따라서 보다 정확한 자기수축을 측정하기 위해서는 재령에 따라 변하는 콘크리트의 열팽창계수를 반영하여 온도보정을 해주어야 한다.

따라서, 이 연구에서는 초기 재령 열팽창계수를 측정하고 이를 고려한 자기수축 실험을 수행하였다. 또한, 팽창재와 수축저감제가 HPRCC의 자기수축 저감 및 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험방법 및 내용

2.1 사용재료 및 배합

본 실험에는 1종 포틀랜드 시멘트 및 입경 0.5 mm 이하의 잔골재, 98 %의 SiO_2 를 포함하고 평균입경이 2 μm 인 충전재, 노르웨이산 실리카퓌름(SF), 일본산 CSA계 팽창재, 독일산 글루콜계의 수축저감제를 사용하였다. 배합에 사용된 재료들의 화학적 구성성분은 Table 1과 같다. 또한 HPRCC의 인성을 향상시키기 위하여 전체 부피의 2 %에 해당하는 강섬유를 혼합하였고 물리적 성질은 Table 2와 같다. Table 3은 이 논문에서 사용된 배합표이며, 팽창재와 수축저감제의 혼합여부에 따라 배합을 구분하였다.

Table 1. Chemical properties of materials

Composition % (mass)	Cement	Silica fume (SF)	Expansive admixture (EA)
CaO	61.33	0.38	13.55
Al_2O_3	6.40	0.25	18.66
SiO_2	21.01	96.00	3.80
Fe_2O_3	3.12	0.12	-
MgO	3.02	0.10	-
SO_3	2.30	-	51.35
K_2O	-	-	0.56
F-CaO	-	-	16.02
Specific surface (cm^2/g)	3,413	200,000	3,117
Density (g/cm^3)	3.15	2.10	2.98

Table 2. Properties of steel fiber

Type of fiber	Density (kg/cm^3)	Tensile strength (MPa)	l_f ¹⁾ (mm)	l_f/d_f ²⁾ (mm/mm)
Straight fiber	7.8	2,500	13	65

Note, 1) l_f : length of fiber, 2) d_f : diameter of fiber

Table 3. Mix proportions of HPRCC (ratio in weight)

Nomenclature	W/B	Cement	SF	Filler	Sand	Superplasticizer	Steel fiber	SRA ¹⁾	EA ²⁾
HPF A	0.2	1	0.25	0.30	1.10	0.012	$V_f=2\%$	-	-
HPF B								0.01	0.075

Note, 1) Shrinkage reducing agent, 2) Expansive admixture

2.2 실험방법

2.2.1 역학적 특성 평가

압축강도(KS F 2405)는 $\phi 100 \times 200$ mm인 원주형 공시체를 변수별로 제작하고 최대용량 3,000 kN의 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 측정하였다. 휨인장강도(KS F 2566)는 $100 \times 100 \times 400$ mm 크기의 시편을 사용하여 4점 휨실험을 수행하였다. 인장강도는 Fig. 1의 Dog-bone 형상을 갖는 시험체를 이용한 직접 인장실험 방법으로 측정하였다. 각각의 강도측정값은 재령별로 공시체 3개에 대한 평균값을 사용하였다.

2.2.2 응결실험

HPFRCC의 응결 특성 평가는 KS F 2436 「관입저항 관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간시험방시험방법」에 준하여 실시하였다. HPFRCC의 경우 낮은 물-결합재(W/B)로 인해서 표면이 짧은 시간 노출되더라도 급격히 건조되는 경향을 보인다.

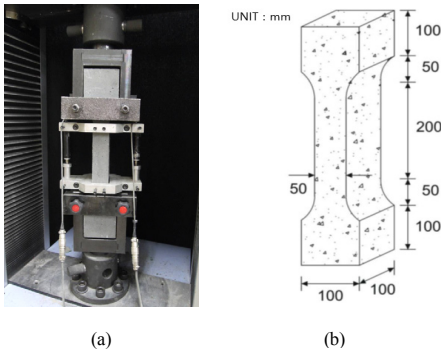


Fig. 1. Test Methods for Direct Tensile Strength
(a) Test Set-Up (b) Geometry of Specimen

이는 초결 및 종결 시간을 앞당기는 결과를 나타낸다 [11]. 따라서 이 연구에서는 표면에 액상형 파라핀오일을 도포하고 응결실험을 수행하였다[8,12]. 실험은 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 인 항온항습실에서 진행하였다.

2.2.3 열팽창계수

열팽창계수(coefficient of thermal expansion, 이하, CTE)를 측정하기 위해 서로 온도가 다른 두 개의 수조를 준비하였다. 여기서, 콘크리트의 열팽창은 부피팽창이므로 거푸집 등에 의해 구속될 경우 실제 값과 오차를

줄 수 있기 때문에 이 연구에서는 종결이후에 거푸집을 탈형하고 실험을 수행하였다. 또한, 시편형상에 따라서 수축 및 팽창 변형은 상이하게 나타나기 때문에 자기수축 시편과 동일한 크기의 시편을 사용하여 CTE를 측정하였다.

거푸집 탈형 이후 시편을 23°C 의 수조에 넣어두고 매립 게이지(concrete embedded gage)와 온도게이지(thermocouple)를 이용하여 온도 및 변형률을 측정하였다. 그 후 1시간에서 2시간 간격으로 60°C 의 수조로 시편을 옮겨 온도와 변형률을 측정하였다. 이 실험방법은 콘크리트의 온도를 급격히 증가시키기 때문에 등가재령을 고려할 필요가 없으며, 실험의 상세는 Fig. 2와 같다.

2.2.4 자기수축

자기수축은 Japan Concrete Institute (JCI) [13]에서 제안하는 방법을 참조하였다. Fig. 3과 같이 $100 \times 100 \times 400$ mm 크기의 각주형 몰드에 매립게이지와 온도게이지를 시편 중앙에 고정시키고 HPFRCC를 타설하였다.

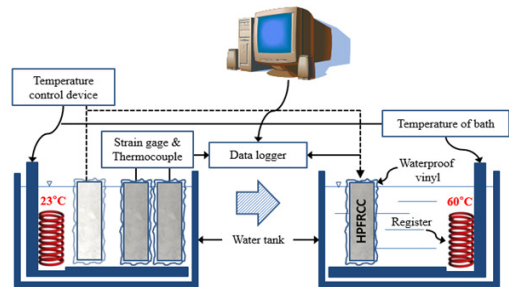


Fig. 2. Schematic description of the experimental system for measurement of CTE

HPFRCC와 몰드의 마찰에 의한 수축 구속력을 제거하기 위하여 테플론 시트(teflon sheet)를 몰드에 깔아주었고, 콘크리트 표면에서의 수분 증발 또는 흡수를 방지하기 위하여 폴리에스터 필름(polyester film)을 사용하였다. 콘크리트 타설 후 24시간 이후에 몰드를 탈형하였고, 탈형 이후에는 수분증발에 의한 부피감소를 방지하기 위하여 알루미늄 테이프를 사용하여 노출면을 모두 밀봉하였다. 실험은 응결실험과 같은 조건을 갖는 항온항습실에서 진행하였다.

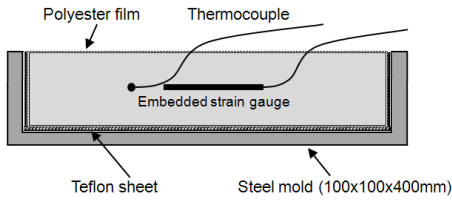


Fig. 3. Schematic description of autogenous shrinkage measurement

3. 실험결과 및 고찰

3.1 HPFRCC의 역학적 특성

재령에 따른 HPFRCC의 평균 압축강도, 휨인장강도, 인장강도는 Fig. 4와 같다. 재령초기에서 팽창재와 수축 저감제를 사용함에 따라 각 강도 값이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 7일 재령 이후에는 이들의 혼입 유무에 대한 차이가 미미한 것으로 나타났다. 실험결과를 바탕으로 HPFRCC의 압축강도, 휨인장강도, 인장강도 예측식을 식 (1),(2),(3)과 같이 나타내었다.

Table 4에 비선형 회귀분석결과를 통해 각 배합에 대한 상수값을 제안하였다.

$$f_c = f_{c,28} \cdot \exp\left(\frac{a}{b-t}\right) \quad (1)$$

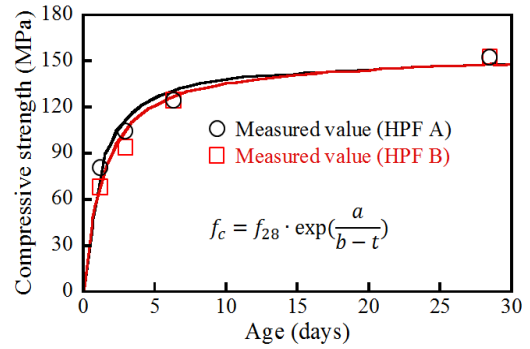
$$f_{ft} = f_{ft,28} \cdot \exp\left(\frac{c}{d-t}\right) \quad (2)$$

$$f_t = f_{t,28} \cdot \exp\left(\frac{e}{f-t}\right) \quad (3)$$

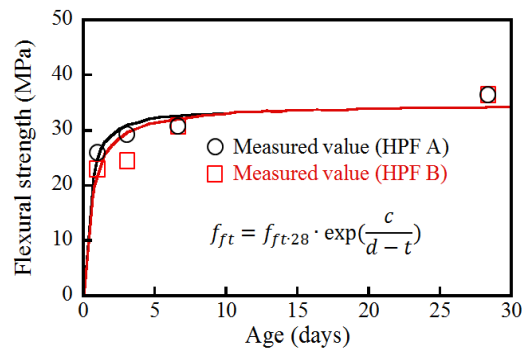
여기서 f_c , f_{ft} , f_t 은 각각 HPFRCC의 압축강도, 휨인장강도, 인장강도이며, $f_{c,28}$, $f_{ft,28}$, $f_{t,28}$ 은 28일 재령에서의 HPFRCC의 압축강도, 휨인장강도, 인장강도이고, a, b, c, d, e, f, g는 회귀상수, t는 재령(day)이다.

Table 4. Regression constant

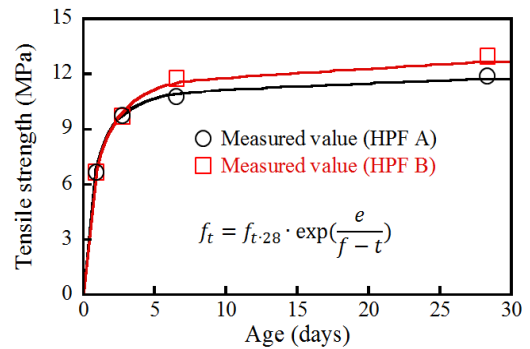
Nomenclature	a	b	c
HPF A	0.971	-0.271	0.303
HPF B	1.162	-0.326	0.436
Nomenclature	d	e	f
HPF A	-0.058	0.052	0.003
HPF B	1.162	-0.326	0.436



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Comparison of predicted value and experimental results

(a) Compressive strength (b) Flexural strength (c) Tensile strength

3.2 HPFRCC의 응결특성

응결실험 결과, HPF A의 경우 초결 및 종결은 약 11시간, 13.5시간으로 나타났다. HPF B는 팽창제 혼입으로 초기 재령에서의 다량의 에트링가이트가 생성되어 초결 및 종결은 약 7.5시간, 11.5시간으로 나타났다.

3.3 HPFRCC의 열팽창계수

Fig. 5에 HPF A의 CTE 측정 결과를 나타내었다. CTE 측정은 종결이후에 시작하였고, 종결 이전의 CTE는 종결시점에서의 값과 일정하게 적용하였다. 타설 후 약 1일 재령 이후에는 2개 배합 모두 CTE가 약 $11 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 로 수렴하는 경향을 보였다. 또한, 기존 연구결과와 동일하게 콘크리트가 경화하기 이전에는 CTE가 상당히 큰 것으로 나타났으며, 지수함수 형태의 거동을 보였다. 따라서 이 연구에서는 기존 연구[14]에서 제안한 식과 동일한 형태로 CTE 예측식을 다음과 같이 제안하였다.

$$CTE(\mu\epsilon/^\circ\text{C}) = 4.0 \times e^{\frac{14-t}{1.7}} + 11.4 \quad (4)$$

$$CTE(\mu\epsilon/^\circ\text{C}) = 7.9 \times e^{\frac{12-t}{4.8}} + 10.3 \quad (5)$$

여기서 CTE ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)는 열팽창계수, t는 재령(hr)이다.

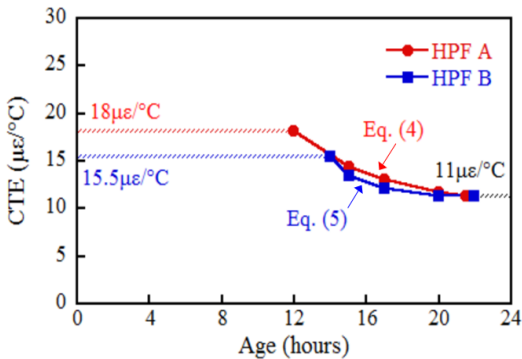


Fig. 5. CTE of HPFRCC at early age

3.4 HPFRCC의 자기수축

3.4.1 자기수축

Fig. 6은 온도보정을 하지 않은 자기수축 변형률과 내부 온도변화 그래프이다. HPF A와 HPF B 모두 타설 후 초기에는 내부 온도가 감소함에 따라 수축하는 경향을 보였다. 이는 콘크리트 맵업게이지의 온도 변화에 따른 변형률이며, HPFRCC의 수축과는 무관한 값이다. 이 연구에서는 JCI [13]에 따라서 초결을 time-zero로 결정하였다. 실험결과 초결 기점으로 측정된 변형률이 내부 온도 변화와는 상이한 거동을 보이기 시작하였다. HPF B의 경우 팽창제와 수축저감제의 혼입에 의해서 타설 후

약 19시간 재령에서 부피가 팽창하는 경향을 보였으며, 수축량을 상당히 저감시키는 것으로 나타났다. 최대 온도는 HPF A의 경우 약 28.4°C 의 최대온도를 나타냈으며, HPF B는 26.7°C 로 나타났다.

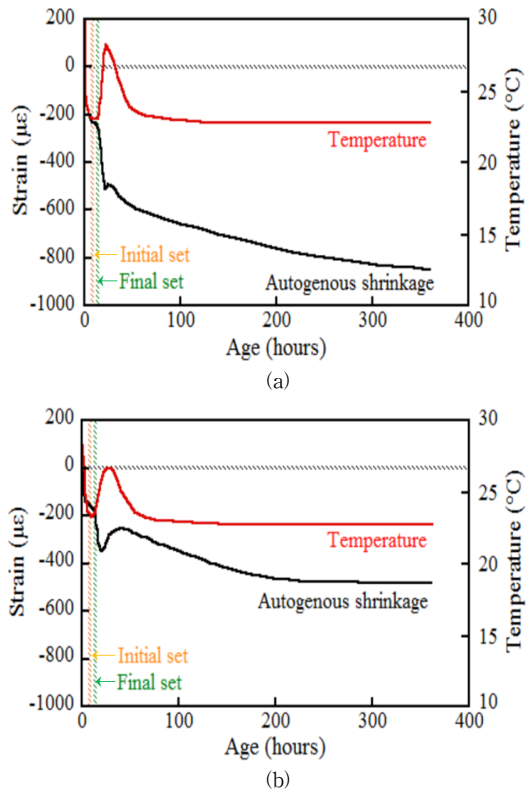


Fig. 6. Measured Autogenous strain and temperature (a) HPF A (b) HPF B

그림에서와 같이, HPF A의 경우에는 타설 후 약 13시간, HPF B는 약 10시간부터 응결하여 수축이 급격히 증가하는 경향을 보였다. HPF A의 경우 약 20시간, HPF B는 약 18시간부터 수축 증가율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 HPFRCC가 경화하면서 화학 수축뿐만 아니라 내부 공극의 부압력에 의한 부피 감소를 저항하기 때문으로 판단된다. HPF B의 경우에는 수축 증가율이 급격히 감소하는 시점부터 팽창제의 화학반응에 의한 에트링가이트의 생성으로 부피가 팽창하는 경향을 보였다.

3.4.2 열팽창계수를 고려한 자기수축

Fig. 7은 CTE를 고려하지 않은 수축 변형률과 측정된

변형률에 CTE를 반영하여 보정한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. HPF A의 경우 타설 후 CTE 고려 유무에 따라 약 1일 재령에서 약 67 $\mu\epsilon$ 의 수축 변형률 차이를 보였다. 이것은, 1일 재령에서 자기수축의 21 %정도에 해당하는 큰 값이다. HPF B의 경우에도 CTE 고려 유무에 따라 타설 후 약 1일 재령에서 약 48 $\mu\epsilon$ 의 수축 변형률 차이를 보였고 이것은 25 %정도에 해당하는 값이다. 시편의 크기가 크지 않기 때문에 장기 재령에서의 자기수축 변형률은 CTE 고려 유무에 따라 차이는 크지 않았다. 그러나, 수화열이 급격히 발현되는 종결부부터 약 2일 재령까지의 초기재령에서는 CTE 고려 유무에 따른 자기수축의 차이가 상당히 큰 것으로 나타났다.

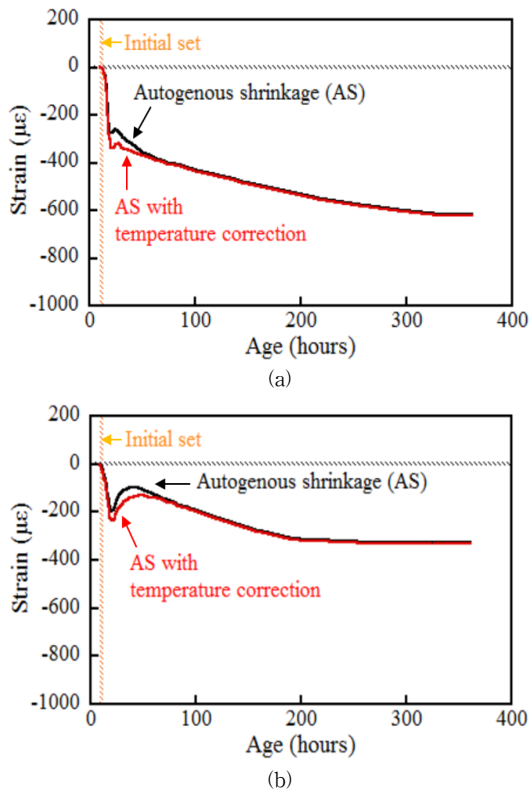


Fig. 7. Comparison of measured strain with autogenous shrinkage (a) HPF A (b) HPF B

한편, CTE를 고려하였을 때 자기수축을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. HPF A의 15일 재령에서의 자기수축은 약 621 $\mu\epsilon$ 을 나타내었다. 팽창제와 수축저감제를 혼합하여 사용한 HPF B의 경우에는 15일 재령에서 약

330 $\mu\epsilon$ 의 자기수축 변형률을 나타내었다. 따라서 팽창제와 수축저감제를 사용함으로 자기수축량의 약 47 %가 감소하는 것으로 나타났다.

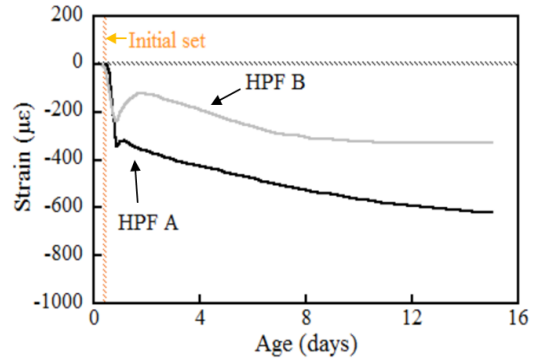


Fig. 8. Comparison of autogenous shrinkage with and without SRA and EA

4. 결론

이 연구는 팽창제와 수축저감제의 혼입 여부에 따른 HPCRCC의 역학적 특성 평가와 초기 재령에서의 열팽창계수 측정 및 이를 고려한 자기수축 실험을 수행하여 팽창제와 수축저감제가 HPCRCC의 자기수축 거동에 미치는 영향을 분석한 것으로 결론은 다음과 같다.

1. 초기 재령에서 HPCRCC의 역학적 특성은 팽창제와 수축저감제의 혼입으로 압축강도, 휨인장강도, 인장강도의 감소가 발생하였으나, 약 7일 재령 이후에는 팽창제와 수축저감제의 혼입에 따른 강도 값의 차이가 미미한 것으로 나타났다. 또한, 이 논문에서는 HPCRCC의 압축강도, 휨인장강도, 인장강도 예측식 및 회귀상수를 제안하였으며, 실험결과와 잘 일치하였다.
2. 종결 시점에서의 열팽창계수는 HPF A의 경우 약 15.5 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$, HPF B의 경우 약 18 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 또한, 재령이 증가함에 따라 열팽창계수는 지수함수 형태로 감소하는 경향을 보였으며, 약 1일 재령에서는 HPF A와 HPF B 모두 약 11 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 의 열팽창계수를 나타내었다.
3. 팽창제와 수축저감제를 조합사용한 HPCRCC의 자기수축은 재령 15일 약 47 % 감소하는 것으로 나타났으며, 초기 재령 열팽창계수를 고려하여 측정

된 변형률을 보정한 경우, 보정하지 않은 수축량에 비해 1일 재령에서 21 %~25 % 정도 큰 값을 나타내었다.

References

- [1] P. C. Aitcin, "Cements of Yesterday and Today Concrete of Tomorrow," Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1349-1359, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [2] P. Richard and M. H. Cheyrezy, "Composition of Reactive Powder Concrete," Cement and Concrete research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [3] J. J. Park, K. T. Koh, S. T. Kang and S. W. Kim, "Influence of Constitute Factor on the Compressive Strength of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composite," Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 1 pp. 35-41, 2005.(in Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2005.17.1.035>
- [4] KICT, Development of Technology to improve the Durability of Concrete Bridges, Report No. KICT 2006-89, Korea Institute of Construction Technology, Korea, 2006.(in Korean)
- [5] S. W. Kim, S. T. Kang and S. M. Han, "Characteristics and Application of Ultra High Performance Cementitious Composite," Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 18, No. 1, pp. 16-21, 2006.(in Korean)
- [6] A. Kamen, E. Denarić, H. Sadouki and E. Brühwiler, "UHPFRCC ARC Tensile Creep at Early Age," Materials and Structures, Vol. 42, No. 1, pp. 113-122, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9371-0>
- [7] D. Y. Yoo, J. J. Park, S. W. Kim and Y. S. Yoon, "Characteristics of Early-Age Restrained Shrinkage and Tensile Creep of Ultra-High Performance Cementitious Composites (UHPCC)," Journal of Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 5, pp. 581-590, 2011.(in Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.5.581>
- [8] KICT, Development of Ultra High Performance Concrete for Hybrid Stayed Cable Bridge, Report No. KICT 2012-083, Korea Institute of Construction Technology, Korea, 2012.(in Korean)
- [9] K. Nam-Gung, M.S. Kang, I. Hur and K. K. Yun, "Early-Age Shrinkage and Durability of Shotcrete with Expansive Agent", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 10 pp. 4884-4890, 2012. (in Korean)
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.10.4884>
- [10] J. J. Park, D. Y. Yoo, S. W. Kim and Y. S. Yoon, "Drying Shrinkage Cracking Characteristics of Ultra-High-Performance Fibre Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents", Magazine of Concrete Research, Vol. 65, No4, pp. 248-256, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/macr.12.00069>
- [11] C. Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli, A. Bravo, T. Cerulli and D. Salvioni, "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No12, pp. 2244-2251, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.021>
- [12] D. Y. Yoo, J. J. Park, S. W. Kim and Y. S. Yoon, "Early Age Setting, Shrinkage and Tensile Characteristics of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete", Construction Building Materials, Vol. 41, pp. 427-438, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015>
- [13] Japan Concrete Institute, Committee Report, Autogenous Shrinkage of Concrete, E. Tazawa Eds., E&FN Spon, pp. 3-62, 1999.
- [14] A. Loukili, D. Chopin, A. Khelidj and JYL Touzo, "A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at an Early Age Considering Temperature History", Cement and Concrete Research, Vol.30 No6, pp. 915-922, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00241-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00241-6)

박 정 준(Jung-Jun Park)

[정회원]



- 1998년 2월 : 계명대학교 토목공학과(공학사)
- 2000년 2월 : 계명대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과(공학박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

문 재 흠(Jae-Heum Moon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 5월 : Purdue University, School of Civil Engineering (공학박사)
- 2007년 2월 ~ 2011년 12월 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원
- 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
토목공학, 건설재료

김 성 옥(Sung-Wook Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 영남대학교 토목공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 영남대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1998년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2003년 12월 ~ 2004년 12월 : 호주 UNSW 객원연구원
- 1989년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원

<관심분야>
방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

박 기 준(Gi-Joon Park)

[정회원]



- 2013년 2월 : 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구원

<관심분야>
방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

이 장 화(Jang-Hwa Lee)

[정회원]



- 1983년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원
- 1998년 9월 ~ 1999년 9월 : 미국 NIST 객원과학자

<관심분야>
방호·방폭용 콘크리트, 원전 콘크리트 품질 및 내구성