

팽창재 및 수축저감제를 사용한 초고성능 콘크리트의 양생조건별 역학 및 자기수축 특성

박천진^{*}, 한민철¹
¹청주대학교 건축공학과

Mechanical Properties and Autogenous Shrinkage of Ultra High Performance Concrete Using Expansive Admixture and Shrinkage Reducing Agent depending on Curing Conditions

Chun-Jin Park^{1*}, Min-Cheol Han¹

¹Department of Architectural Engineering, Cheongju University

요약 본 연구에서는 팽창재 및 수축저감제 사용량 변화에 따른 초고성능 콘크리트(UHPC)의 양생조건별 역학적 특성 및 자기수축 특성에 대해 검토하였다. 그 결과 양생조건에 따른 UHPC의 역학적 특성으로 90℃ 증기양생을 한 시험체는 모두 190 MPa 이상의 압축강도를 나타냈고 20℃ 수중양생을 한 경우에는 제령 91일에서 증기양생을 한 시험체와 동등한 수준으로 발현되었다. 인장강도는 90℃ 증기양생의 경우 23.4 MPa의 높은 수준으로 나타났으며 20℃에서는 다소 저하하였다. 자기수축 특성으로 양생조건에 따른 최종 수축량의 변화는 나타나지 않았다. 팽창재 및 수축저감제 사용에 따른 UHPC의 압축강도는 90℃ 증기양생을 한 경우 190 MPa 이상 발현하였다. 자기수축 특성은 팽창재와 수축저감제를 복합 사용한 경우 약 45% 정도 수축저감 효과가 있는 것으로 나타났고 양생조건에 따른 차이는 발생하지 않았다.

Abstract This paper examines the mechanical and autogenous shrinkage characteristics per curing condition of Ultra High Performance Concrete (UHPC) according to the change in the quantities of expansive admixture and shrinkage-reducing agent. In view of the mechanical properties according to the curing condition, all the UHPC specimens that experienced steam curing at 90℃ developed compressive strength higher than 190 MPa, and the specimens that experienced water curing at 20℃ developed compressive strength comparable to that developed at 91 days by the steam-cured specimens. The specimens steam-cured at 90℃ showed high tensile strength of 23.4 MPa whereas slight loss of the tensile strength was observed in those water-cured at 20. Besides, in view of the autogenous shrinkage according to the curing condition, no particular change could be found in the final shrinkage. The compressive strength developed by UHPC according to the use of expansive and shrinkage-reducing agents reached values higher than 190 MPa in case of steam curing at 90℃. Shrinkage reduced by about 45% when using both expansive and shrinkage-reducing agents without difference according to the curing condition.

Keywords : Autogenous shrinkage, Curing condition, Expansive admixture, Shrinkage reducing agent, UHPC

1. 서론

콘크리트는 경제성 및 내구성이 우수하여 강재와 더불어 가장 광범위하게 사용되는 건설재료이다. 그러나

콘크리트는 인장강도와 휨강도가 작아 균열이 발생하기 쉬운 본질적인 결함을 가지고 있다. 또한 최근 고강도 콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴(brittle failure)가 문제되고 있다. 이런 결함 및

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

^{*}Corresponding Author : Chun-Jin Park(Cheongju Univ.)

Tel: +82-31-910-0398 email: chunwls@gmail.com

Received September 25, 2015

Revised (1st October 16, 2015, 2nd November 2, 2015)

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

문제점을 개선하고자 최근 고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 인성을 향상시킨 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete, 이하 UHPC)에 대한 연구가 진행되고 있다[1].

UHPC는 압축강도가 150 MPa, 휨인장강도가 30 MPa 이상으로 통상의 고강도 콘크리트에 비해 역학적 성능이 뛰어날 뿐만 아니라 수밀성과 내구성능도 현저히 우수한 재료로 향후 차세대 건설재료로 주목을 받고 있다. 그러나 분말도가 큰 실리카폼 등의 혼화재를 다량으로 사용하고 물-결합재비(W/B)가 0.2로 매우 낮은 뿐만 아니라 채령초기에 고온양생을 실시하기 때문에 수화반응이 활성화되어 자기수축(Autogenous shrinkage)이 일반 콘크리트에 비해 더욱 증가하여 구조물에 균열 발생 등이 염려가 된다.

한편 일반적인 현장타설 고강도 콘크리트의 자기수축을 저감시키기 위하여 실무에서는 재료배합적 차원에서 팽창재와 수축저감제를 사용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 UHPC는 일반 고강도 콘크리트와 사용재료, 배합 및 양생 방법에 극명한 차이가 존재하고 있어 압축강도 차원에서는 동일한 고강도 영역이지만 전술한 제조 및 양생방법에 차이가 있어 팽창재와 수축저감제를 사용할 경우 이들의 영향을 보다 명확하게 검토할 필요성이 제기되지만, 현재까지 이와 관련한 연구결과들은 많지 않은 실정이다.

또한 콘크리트는 동일한 배합 및 재료를 사용해도 양생 방법에 따라 강도 및 내구성 등의 품질이 달라지며, 특히 UHPC는 다양한 분체 재료를 다량으로 사용하기 때문에 타설 직후부터의 양생방법이 UHPC의 성능에 많은 영향을 미칠 수 있다. 이와 관련하여 다수의 연구자들이 UHPC의 자기수축에 대하여 검토한 바 있으나 팽창재와 수축저감제를 사용한 UHPC의 자기수축을 양생조건별로 검토한 연구는 미비한 실정이다[2-3].

따라서 본 연구에서는 팽창재 및 수축저감제의 단독 또는 복합 사용이 UHPC의 양생조건별 역학적 특성 및 자기수축 특성에 대해 실험적으로 고찰하므로써 향후 UHPC의 효율적인 수축 저감에 기여하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 배합 및 사용재료

Table 1. Properties of mixture

W/B (%)	Ratio of Mixture				
	C	SF	Filler	Sand	Steel fiber
20	1	0.25	0.3	1.1	2.0 vol.%

Table 2. Experimental parameters

Items			EA contents (%/C)	SRA contents (%/C)
Curing Condition	90℃ Steam Curing	E0S0	0	0
		E5S0	5	0
		E0S1	0	1
		E5S1	5	1
	20℃ Standard curing	E0S0	0	0
		E5S1	5	1
	20℃ Air dry curing	E0S0	0	0

EA: Expansive admixture

SRA: Shrinkage reducing agent

본 연구에서 사용된 배합사항을 Table. 1에 나타내었다. 이 UHPC 배합은 48시간 90℃ 양생을 하였을 때 압축강도 180 MPa, 휨강도 35 MPa 이상이 발현된다[4]. 또한 자기수축 저감을 목적으로 Table. 1에 나타낸 배합에 대해 팽창재 및 수축저감제의 비율을 Table. 2의 비율로 각각 조정하여 사용하였다.

실험요인으로 W/B 20% 1수준에 대하여, 양생조건 변화로 90℃ 증기양생, 20℃ 수중 및 기건양생의 3 수준으로 계획하였다. 팽창재 및 수축저감제에 따른 영향요인을 검토하기 위하여 UHPC의 주된 양생방법인 90℃ 증기양생에 대하여 팽창재 및 수축저감제 미사용, 팽창재 단독사용 5%, 수축저감제 단독사용 1% 및 팽창재와 수축저감제를 각각 5% 및 1% 복합 사용한 4 수준으로 계획하였다. 이 때, 팽창재 및 수축저감제를 사용하지 않은 배합 및 각각 5% 및 1% 복합 사용한 배합은 20℃ 수중양생에 대한 특성을 검토하였다. 실험 사항으로는 굳지않은 콘크리트에서 슬럼프 플로우를 측정하였고, 경화 콘크리트에서 역학적 특성으로 압축강도 및 인장강도를, 수축특성으로 자기수축 길이변화율을 측정하였다.

사용재료로서 시멘트(OPC), 실리카폼(SF)의 물리·화학적 특성을 Table. 3에 나타내었다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, SF는 비표면적 269,000 cm²/g, SiO₂ 성분 95.1%인 것을 사용하였다. 충전제는 평균입자 2 μm를 사용하였고, 그 물리·화학적 성질은 Table. 4와 같다. 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, 평균입경이 0.5 mm

Table 3. Physical properties and chemical compositions of cementitious materials

Type	Item	Density (g/cm ³)	Surface area (cm ² /g)	L.O.I*	Chemical composition (%)				
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
OPC		3.15	3,512	3.3	23.5	5.22	3.1	64.8	3.5
SF		2.10	269,000	1.55	95.1	0.25	0.12	0.38	0.10

OPC: Ordinary Portland Cement, SF: Silica fume

* L.O.I: Loss on Ignition

Table 4. Physical properties and chemical compositions of filler

Grain size(μm)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)			
		SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
2	0.01	99.3	0.004	0.03	0.15

Table 5. Physical properties and chemical compositions of expansive admixture

Density (g/cm ³)	Surface area (cm ² /g)	Chemical composition (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
2.98	3,117	3.80	28.66	13.55	51.35

Table 6. Physical properties of shrinkage reducing agent

Density (g/cm ³)	Solid (%)	Physical properties		
		Type	Color	Solubility
2.98	31	Powder	White	Soluble

이하인 규사를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 고성능감수제는 폴리칼본산계를 사용하였고, 수축저감을 목적으로 Table. 5 및 Table. 6에 나타난 바와 같이 CSA(Calcium Sulfate Aluminate)계 팽창재(EA) 및 글루클게 수축저감제(SRA)를 사용하였다. 또한 UHPC의 인성향상을 위한 강섬유로서 직경이 0.2 mm, 길이가 13 mm인 강섬유를 콘크리트 체적비로 2%를 혼입하여 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 슬럼프 플로우

굳지않은 콘크리트의 유동성 평가로써 슬럼프 플로우 시험은 KS F 2594에 의거하여 실시하였다. 즉, 슬럼프 콘에 콘크리트 시료를 무다짐으로 한 번에 채운 후 슬럼프 콘을 들어 올려 콘크리트 시료의 유동이 중지된 후 최대직경과 이에 직교하는 직경을 측정하였고, 그 평균값을 슬럼프 플로우로 하였다.

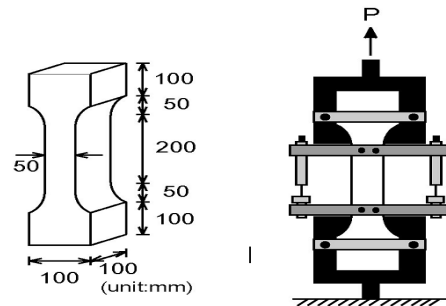


Fig. 1. Specimen for tensile strength measuring

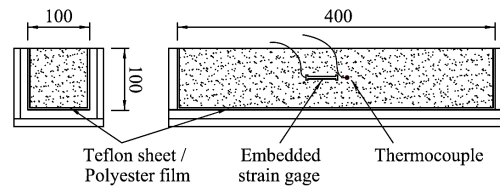


Fig. 2. Specimen preparation for measuring autogenous shrinkage

2.2.2 역학적 특성 및 자기수축

UHPC의 역학적 특성 시험으로 압축강도는 계획된 재령에 KS F 2405 규정에 의거하여 $\phi 100 \times 200$ mm 원주 시험체를 이용하여 최대용량 3,000 kN의 UTM을 사용하여 실험을 수행하였다. 제어방법은 변위제어 방식으로 하였으며, 0.1 mm/sec의 재하속도로 실험을 실시하였다. 직접인장강도 시험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 아령형 공시체를 제작하여 300 kN 용량의 UTM을 사용하였고, 0.4 mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

자기수축 시험은 기본적으로 KS F 2586에 준하여 실시하였고, 시험체는 $100 \times 100 \times 400$ mm의 몰드를 이용하였다. 시험조건은 90℃의 고온양생조건과 20℃의 표준양생조건으로 하였고, 길이변화의 측정은 매립형 게이지 방법에 의해 실시되었다. 이 때 매립형 게이지는 고온양생을 고려하여 허용온도범위 -20℃~+180℃인 게이지를 사용하여 온도변화에 따른 변형을 측정량의 정밀도를

향상시켰다. 자기수축 시험에 사용되는 몰드의 바닥과 양단에는 Fig. 2와 같이 1 mm 두께의 테프론 시트(teflon sheet)를 깔아 시료의 자유로운 변형이 구속되지 않도록 하였고, 콘크리트를 타설한 후 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르필름(polyester film)으로 외기와 격리시켰다. 고온양생은 탈형 전까지 $20\pm1^\circ\text{C}$ 조건에서 1일간 실시한 양생을 실시한 다음 $90\pm3^\circ\text{C}$ 에서 48시간 증기양생을 실시하였고, 그 이후의 재령에서는 온도 $20\pm2^\circ\text{C}$, 습도 $60\pm5\%$ 의 항온항습에서 실시하였으며, 표준양생은 항온항습조건에서 실시하였다. 탈형 이후의 시험체는 수분의 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르필름과 알루미늄 은박지 등으로 2~3층으로 감싸주었다. 자기수축 변형률은 3개 시험체의 길이변화를 측정하여 평균값으로 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬럼프 플로우

Fig. 3은 UHPC의 슬럼프 플로우를 나타낸 것이다. 먼저 팽창재 및 수축저감제를 사용하지 않은 E0S0 배합은 슬럼프 플로우가 590 mm로 나타났다. 전반적으로 팽창재를 사용한 배합은 사용하지 않은 배합에 비하여 슬럼프 플로우가 저하하는 경향이었고, 수축저감제를 사용한 배합은 슬럼프 플로우가 증가하는 경향이었으나 모든 배합에서 슬럼프 플로우 550 mm이상의 고유동 범위를 만족하였다.

3.2 양생조건에 따른 강도발현 및 자기수축

Fig. 4 및 5는 양생조건 변화에 따른 UHPC의 압축강

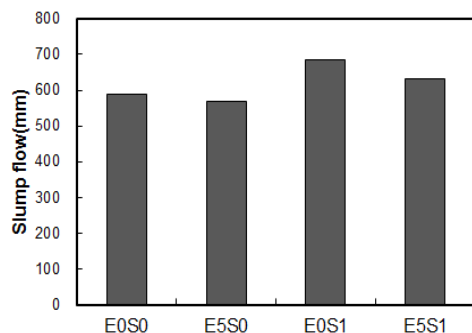


Fig. 3. Slump flow of UHPC according to EA and SRA contents

도 및 강도발현율을 나타낸 것이다. 모든 배합에서 재령 1일에 압축강도 35 MPa 이상으로 높게 나타났다. 고온양생을 실시한 90Steam 시험체는 재령 7일에서 압축강도가 200 MPa에 도달하였고, 그 이후의 재령에서는 강도증진이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 UHPC는 재령초기에 90°C 에서 고온양생을 실시함으로써 재령 7일에서 콘크리트의 강도가 거의 발현되는 것으로 나타났는데, 이처럼 고온양생을 실시한 시멘트 복합체의 강도가 높은 것은 고온양생 과정에서 모세관수와 수화물 층간수가 고온의 영향으로 증발하여 미수화된 시멘트 입자와 반응하게 되고, 실리카폼 등의 포졸란 반응이 활성화되어 모세관 공극에 있던 수분이 제거됨과 동시에 고탄성의 포졸란 수화물인 실리케이트가 공극을 채우기 때문으로 판단된다.

한편 20°C 에서 양생을 실시한 배합의 경우 재령 7일에서 90°C 증기양생에 비하여 강도발현율이 60% 정도였지만 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하여 수중양생

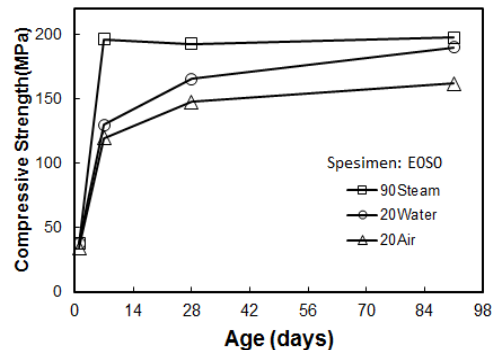


Fig. 4. Compressive strength of UHPC according to curing condition

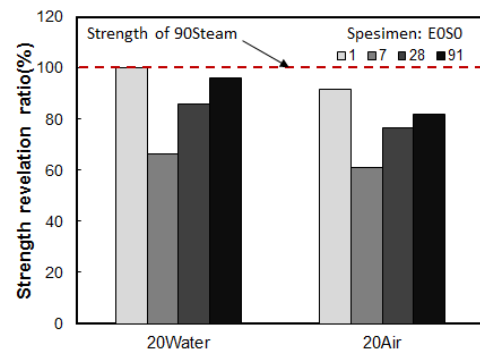


Fig. 5. Compressive strength revelation ratio of UHPC according to curing condition

을 실시한 배합인 20Water는 재령 91일에서 고온양생을 실시한 배합과 거의 동등한 강도를 나타내었다. 그러나 기건양생을 실시한 20Air 배합은 재령이 증가함에 따라 강도발현이 잘 되지 않아 고온양생을 실시한 90Steam의 80% 수준이었다.

Fig. 6은 양생조건 변화에 따른 UHPC의 인장강도를 나타낸 것이다. 먼저 증기양생을 실시한 90Steam 시험체는 재령 7일 이전의 90℃ 고온의 영향으로 22.7 MPa의 높은 인장강도를 나타내었고 28일 재령에서는 23.4 MPa로 나타나 압축강도 결과와 마찬가지로 재령 경과가 강도에 미치는 영향은 미비한 수준이었다. 20℃ 양생조건의 경우 수중양생을 실시한 시험체는 재령 7일에서 18.6 MPa로 나타났고, 28일에서는 21.8 MPa로 고온양생 시험체의 93% 수준으로 강도가 발현되었다. 이는 수화반응 시 강섬유와 시멘트 매트릭스 사이의 공극이 밀실하게 채워짐에 따라 부착강도가 증가했기 때문으로 분석된다.

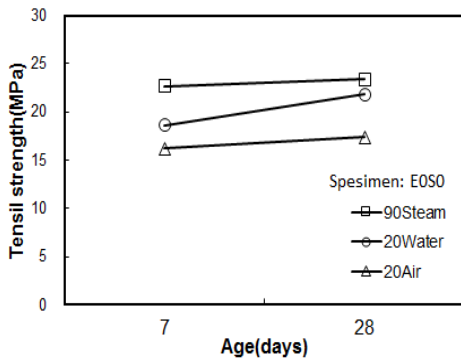


Fig. 6. Tensile strength of UHPC according to curing condition

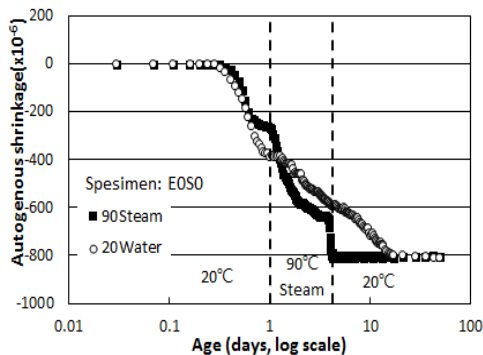


Fig. 7. Autogenous shrinkage of UHPC according to curing condition

Fig. 7은 양생조건이 UHPC의 자기수축에 미치는 영향이다. 90℃에서 고온양생을 실시한 경우에는 고온양생 기간에 수화축진으로 자기수축이 급격히 발생하였으나, 그 후에는 20℃에서 양생을 실시한 경우와 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 UHPC 제조과정에서 포졸란 반응 등을 촉진시키기 위해 실시하는 고온양생은 수화를 촉진시켜 자기수축 진행속도를 빠르게 하나, 최종 변형률에는 영향을 거의 주지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 고온양생이 종료되는 시점인 재령 3일에서 자기수축량이 급격히 증가하는 경향이었는데, 이는 고온조건에서 이루어져있던 UHPC가 고온양생 종료 후 온도저하에 따라 수축이 발생한 것으로 판단된다.

3.3 팽창재 및 수축저감제 사용에 따른 압축강도 및 자기수축

Fig. 8은 팽창재 및 수축저감제의 사용량 별 증기양생 시 압축강도를 나타낸 것이고, Fig. 9는 팽창재와 수축저감제를 사용한 UHPC의 양생조건별 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저 팽창재 및 수축저감제를 사용하지 않은 E0S0의 경우는 90℃에서 증기양생 후 196 MPa 정도로 나타났고, 팽창재 및 수축저감제 사용 유무에 대한 압축강도의 변화는 미비한 수준으로, 모든 배합에서 190 MPa 이상 발현하였다. 그리고 20℃에서 수중양생을 실시한 경우에는 팽창재 및 수축저감제를 사용한 E5S1이 7, 28일 강도는 높게 나타났지만, 재령 91일에서는 182.4 MPa로 나타나 팽창재 및 수축저감제를 사용한 배합에 비하여 다소 낮게 나타났다. 이상의 결과로부터 팽창재 및 수축저감제를 사용하더라도 사용량이 UHPC의 압축강도에 큰 영향이 없는 것으로 분석된다.

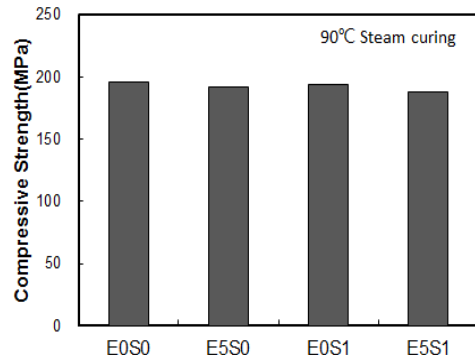


Fig. 8. Compressive strength of UHPC according to content of EA and SRA

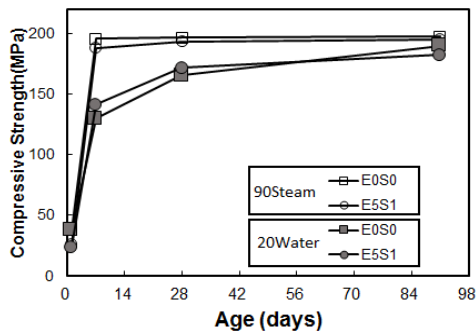


Fig. 9. Compressive strength of UHPC according to content of EA and SRA with curing condition

Fig. 10은 팽창재 및 수축저감제의 사용량 별 증기양생 시 자기수축 길이변화율을 나타낸 것이고, Fig. 11은 팽창재와 수축저감제를 사용한 UHPC의 양생조건별 재령에 따른 자기수축 길이변화율을 나타낸 것이다. 팽창재와 수축저감제를 혼입함으로써 UHPC의 자기수축이 저감되는데, E0S0에 비해 팽창재를 5%를 혼입한 E5S0은 약 22%, 수축저감제 1%를 혼입한 E0S1은 11% 정도 저감되는 것으로 나타났다. 이처럼 팽창재와 수축저감제를 혼입함으로써 자기수축이 저감되는 것은 각각 에트링자이트에 의한 수축보상 효과와 표면장력 저하 등의 작용 때문으로 사료된다[5-7]. 그리고 팽창재 5%와 수축저감제 1%를 조합사용한 E5S1은 E0S0에 비해 자기수축이 43% 정도 저감되어 팽창재와 수축저감제를 각각 단독으로 사용하는 경우보다 10% 정도 수축저감효과가 증가하였다.

팽창재 및 수축저감제를 사용한 UHPC의 양생조건별 자기수축은 90℃에서 고온양생을 실시한 경우에는 고온양생 기간에 수화축진으로 자기수축이 급격히 발생하였으나, 그 후에는 20℃에서 양생을 실시한 경우와 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 UHPC 제조과정에서 포졸란 반응 등을 촉진시키기 위해 실시하는 고온양생은 수화를 촉진시켜 자기수축 진행속도를 빠르게 하나, 최종 변형률에는 영향을 거의 주지 않는 것으로 분석되었다. 또한 팽창재 및 수축저감제를 복합사용한 E5S1은 양생온도에 관계없이 최종 변형률이 약 -450×10^{-6} 으로 나타나 E0S0에 비하여 45% 정도 수축량이 저하하였다. UHPC의 자기수축 저감을 위해서 팽창재와 수축저감제를 복합사용한 경우에 90℃ 고온양생은 UHPC의 품질에 악영향을 미치지 않고 수축 저감에만 기여하는 것으로 판단된다.

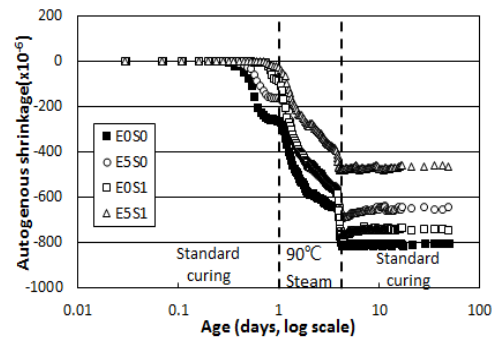


Fig. 10. Autogenous shrinkage of UHPC according to content of EA and SRA

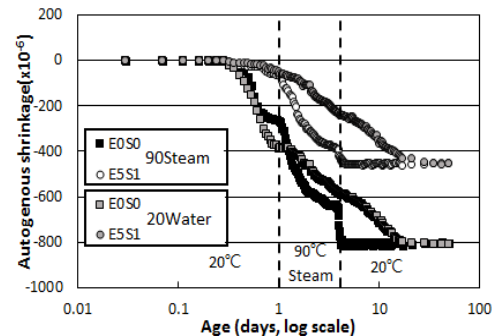


Fig. 11. Autogenous shrinkage of UHPC according to content of EA and SRA with curing condition

4. 결론

본 연구에서는 팽창재 및 수축저감제의 사용량 변화에 따른 UHPC의 양생조건별 역학적 특성 및 자기수축 특성에 대하여 검토하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

양생조건에 따른 UHPC의 역학적 특성으로 90℃ 증기양생을 한 시험체는 모두 190 MPa 이상의 압축강도를 나타냈고 20℃ 수중양생을 한 경우에는 재령 91일에서 증기양생을 한 시험체와 동등한 수준으로 발현되었다. 반면 기건양생의 경우는 증기양생의 약 80% 수준이었다. 인장강도는 90℃ 증기양생의 경우 23.4 MPa의 높은 수준으로 나타났으며 20℃에서는 다소 저하하였다. 자기수축 특성으로 양생조건에 따른 최종 수축량의 변화는 나타나지 않았다.

팽창재 및 수축저감제 사용에 따른 UHPC의 압축강도는 90℃ 증기양생을 한 경우 190 MPa 이상 발현하였

다. 자기수축 특성은 팽창재와 수축저감제를 복합 사용한 E5S1의 경우 E0S0에 비하여 약 45% 정도 수축저감 효과가 있는 것으로 나타났고 양생조건에 따른 차이는 발생하지 않았다.

이상을 종합하면, 팽창재 및 수축저감제를 UHPC에 사용하면 양생 조건에 관계없이 자기수축을 저감할 수 있는 것으로 나타났고 이 때 UHPC의 제반 특성에 큰 영향을 미치지 않았다. 이와 같은 결과는 향후 UHPC의 수축량 제어를 위한 배합설계 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] P. Richard, et al., "Reactive Powder Concrete", Cement and Concrete Research, 25(7), 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [2] S. W. Kim, et al., "Autogeneous Shrinkage Characteristics of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, 23(3), pp. 295-301, June, 2011.
- [3] D. Y. Yeol, et al., "Properties and Prediction Model for Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC): (I) Evaluation of Setting and Shrinkage Characteristics and Tensile Behavior", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, 32(5A), pp.307-315, September, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2012.32.5A.307>
- [4] Korea Institute of Civil and Building Technology, "Development of the Advanced Technology of Toughness in Ultra High Performance Concrete for Hybrid Cable stayed Bridge", 2012.
- [5] S. Nagataki, et al., "Expansive admixture (mainly ettringite)", Cement and Concrete Composites, 20, pp.163-170, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00064-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00064-4)
- [6] C. G. Han, et al., "Properties on the shrinkage of high performance concrete using expansive additive and shrinkage reducing agent", Journal of the Korea Concrete Institute, 15(6), pp.785-793, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2003.15.6.785>
- [7] K. T. Koh, et al., "Shrinkage Properties of High Performance Concrete Used Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent" Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 26(4), pp.787-794, 2006.

박 천 진(Chun-Jin Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 청주대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정

<관심분야>

고성능 콘크리트, 한중 콘크리트

한 민 철(Min-Cheol Han)

[정회원]



- 2001년 2월 : 청주대학교 일반대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 중부대학교 건축공학과 전임강사
- 2004년 3월 ~ 2006년 2월 : ㈜건설과환경 기술개발부 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 건축공학과 부교수

<관심분야>

고성능 콘크리트, 한중 콘크리트