



초고성능 콘크리트의 자기수축 특성

김성욱¹⁾ · 최 성²⁾ · 이광명³⁾ · 박정준^{1)*}

¹⁾한국건설기술연구원 구조교량연구실 ²⁾동양메이저 기술연구소 ³⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과

Autogeneous Shrinkage Characteristics of Ultra High Performance Concrete

Sung-Wook Kim,¹⁾ Sung Choi,²⁾ Kwang-Myong Lee,³⁾ and Jung-Jun Park^{1)*}

¹⁾Structural Engineering & Bridges Research Division Infrastructure Research Dept.,
 Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

²⁾Technology Research Center, Tong Yang Major Corporation, Jincheon 365-843, Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering System, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT Recently, the use of UHPC made of superplasticizers, silica fume, and steel fibers has been increasing worldwide. Although UHPC has a very high strength as well as an excellent durability performance due to its dense microstructures, early-age cracks may occur due to the high heat of hydration and autogenous shrinkage caused by low W/B and high unit cement content. The early-age shrinkage cracking of UHPC can be controlled by using the shrinkage reducers and expansive admixtures having autogenous shrinkage compensation effect. In this paper, ultrasonic pulse velocity of UHPC containing shrinkage reducers and expansive agents was measured to predict its stiffness change. Also, the effect of shrinkage reducers and expansive agents on the autogenous shrinkage of UHPC was investigated through the shrinkage test of UHPC specimens. Furthermore, the material coefficients of autogenous shrinkage prediction model were determined using the autogenous shrinkage values of UHPC with age. Consequently, the test results showed that, by adding shrinkage reducers and expansive agents, the stiffness of UHPC was rapidly developed at early-ages and the autogenous shrinkage was considerably reduced.

Keywords : ultra high performance concrete, autogenous shrinkage, ultrasonic pulse velocity, shrinkage reducer, expansive admixture

1. 서 론

최근 콘크리트 기술 개발을 통하여 W/B가 0.4 이하의 고성능 콘크리트의 제조가 가능해지고 실 구조물의 적용 사례가 증가함에 따라 초기 균열의 원인 중의 하나인 자기수축에 대한 관심이 높아지고 있다.^{1,2)} 자기수축은 W/B가 큰 일반 콘크리트의 경우 수축량이 작기 때문에 보통 무시되어 왔지만 최근 개발된 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete: UHPC)는 낮은 W/B로 인해 자기수축이 많이 발생하게 되며 인장강도가 약한 초기 재령에서는 자기수축으로 인하여 균열이 발생할 수도 있다.³⁾ 이렇게 초기 재령에 발생한 균열은 염소이온, 이산화탄소 등 기타 유해 물질의 침투 경로가 되어 고성능 콘크리트의 요구 성능을 만족하지 못하게 할 뿐만 아니라 구조물에 치명적인 결함을 초래할 수 있다.⁴⁾ 따라서 초고강도 콘크리트를 안정적으로 적용하기 위해서는 자기수축에 대한 올바른 평가와 제어 대책이 모색되어야 할 것이다.

자기수축은 시멘트가 수화 반응에 필요한 배합수를 소비하는 과정에서 자기건조(self-desiccation)가 발생하여 콘크리트의 체적이 수축하는 현상을 말한다.⁵⁾ 초기 양생 시 콘크리트에 충분한 수분 공급이 이루어진다면 자기건조가 발생하지 않게 되어 자기수축이 발생하지 않을 수 있지만 현실적으로 실제 구조물의 양생 시 수분을 충분히 공급하기에는 다소 어려운 것이 사실이다. 한편 수축 저감제 및 팽창재와 같은 팽창 재료는 콘크리트를 팽창시켜 여러 가지 요인에 의해 발생하는 초기 수축을 보상할 수 있다. CSA계 팽창재는 초기에 반응하여 에트링가이트(ettringite)를 생성시켜 콘크리트의 팽창을 유발하며, 수축 저감제는 시멘트 페이스트 경화체에 작용하는 간극수의 표면 장력을 저감시켜 자기수축을 저감시키는 역할을 한다.⁶⁾ 이러한 팽창 재료는 콘크리트에 팽창 균열을 유발할 가능성이 있으나, 사용량을 조절하면 수축을 제어하기 위한 목적으로 사용이 가능하다.⁷⁾

UHPC에 자기수축이 발생하면 콘크리트에 수축 응력이 발생하지만 수축 응력은 콘크리트 강성의 변화에 따라 다르게 나타난다. UHPC의 자기수축은 대부분 초기에 발생하는데 이때 콘크리트의 강성은 매우 낮은 수준이기 때문에 수축량에 따라 수축 응력은 적게 나타난다.

*Corresponding author E-mail: jjpark@kict.re.kr
 Received December 27, 2010, Revised March 24, 2011,
 Accepted March 24, 2011
 ©2011 by Korea Concrete Institute

하지만 UHPC의 강성이 확보된 시점에서 자기수축이 발생하면 수축량에 따라 콘크리트에 큰 응력으로 작용할 수 있으며 이로 인해 콘크리트에 균열을 유발할 수 있다.

UHPC의 수축으로 인한 응력 및 균열 발생 여부를 판단하기 위해서는 강성의 변화와 발견되는 시점을 정확하게 파악해야 한다. 초음파 속도 모니터링은 초음파 속도가 매질을 통과하는 속도를 측정하여 매질의 성질을 파악하며, 주로 매질의 탄성적인 성질과 관련이 깊다.⁸⁾ 초음파 속도는 매질의 탄성계수의 제곱의 역수에 비례하므로 초음파 속도 모니터링을 통해 UHPC의 탄성계수를 간접적으로 추정할 수 있으며 자기수축이 UHPC에 응력을 발생시키는데 유효한 자기수축의 시점을 파악할 수 있다.⁹⁾

이 연구에서는 초음파 속도(ultrasonic pulse velocity : UPV) 모니터링을 이용하여 UPV의 증가 시작 시점을 콘크리트의 강성 발현 시점으로 고려하였으며 이를 시점으로 초고강도 콘크리트의 자기수축을 측정하였다. UHPC의 자기수축을 제어하기 위한 목적으로 수축 저감제와 팽창재를 혼합한 UHPC 배합에 대하여 양생 온도와 재령에 따라 UPV 및 자기수축을 측정하였으며 자기수축 결과로부터 자기수축 예측 모델 상수값을 결정하였다.

2. 실험 연구

2.1 사용 재료 및 배합비

Table 1에는 배합에 사용된 시멘트와 실리카 폼의 화학적 성분을 나타내었다. 이 연구에서는 결합재로 S사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 비표면적이 200,000 cm²/g 이고, 비중이 2.10인 중국산 실리카 폼을 사용하였다. 잔골재는 밀도가 2.65 g/cm³인 호주산 석영사를 사용하였으며, 평균 입경이 2 μm이고, SiO₂ 성분이 98% 이상인 충전재를 사용하였다. 강섬유의 인장강도는 2,500 MPa이며, 형상은 직선형으로 길이가 13 mm이고 직경은 0.2 μm이다. 팽창 재료로 사용된 수축 저감제는 독일산 글루볼계이며, 팽창제는 비중이 2.98인 일본산 CSA계 팽창제이다. 고성능 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제를 사용하였다.

Table 2에는 UHPC의 배합을 시멘트를 기준으로 강섬유를 제외한 다른 재료에 대해서 중량비로 나타내었다. 수축 저감제와 팽창제의 혼합량에 따라 세 종류의 UHPC

Table 1 Chemical composition of cement and silica fume

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Cement	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02
Silica fume	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1

Table 2 Mix proportions of UHPC

Mix type	W/B (%)	C	SF	S	Filler	Steel fiber (Volume)	SP	Shrinkage reducer	Expansive admixture
Mix A	0.2	1	0.25	1.1	0.3	2	0.02	-	-
Mix B								0.01	0.05
Mix C								0.01	0.075

에 대하여 UPV 및 자기수축을 측정하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 초음파 속도 모니터링

UHPC의 UPV를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 초음파 속도 모니터링 장치를 사용하였다. 초음파 속도(V_c)는 시료의 길이(L)를 발진자와 수신자 사이를 통과하는 초음파의 전달 시간(T)으로 나누어 구하였으며, 동탄성계수(E_d), 밀도(ρ)와 다음과 같은 관계가 있다.¹⁰⁾

$$V_c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

Fig. 2는 초음파 속도 발현 곡선을 나타낸 것으로 UPV는 그림과 같이 세 구간으로 변화하였으며 UPV가 변화

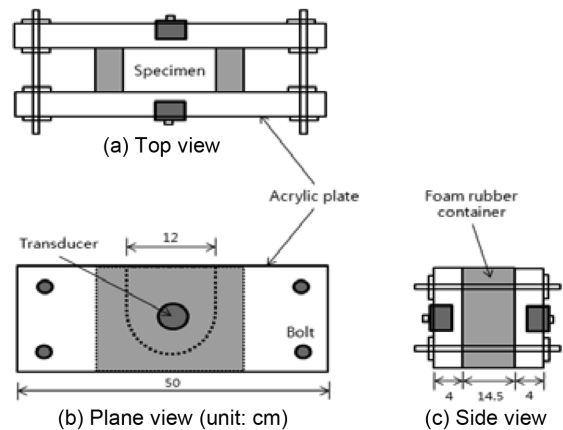


Fig. 1 Schematic of UPV monitoring

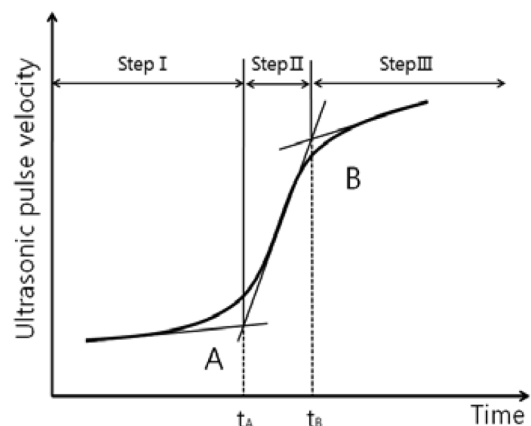


Fig. 2 Typical evolution curve of ultrasonic pulse velocity

하는 시점에 따라 A, B로 나누어 구분하였다.¹³⁾ 그림에서 A점은 초음파 속도가 증가하는 시점이며, B점은 초음파 속도가 둔화되며 일정한 값에 수렴하는 시점이다.

2.2.2 자기수축 실험

Fig. 3은 자기수축 실험을 위한 장치 개략도로서 40 × 40 × 160 mm의 시편의 중앙에 콘크리트 매립형 게이지를 설치하여 자기수축을 측정하였다. 콘크리트를 타설하기 전에 몰드와의 마찰을 최소화하기 위하여 몰드의 바닥면에 테프론 쉬트(teflon sheet)를 깔았으며, 콘크리트 길이 방향의 구속 조건을 최소화하기 위하여 몰드 벽면에 폴리스티렌 보드(polystyrene board)를 설치하였다. 시편 내부의 온도 변화를 모니터링하기 위한 온도 게이지는 콘크리트 매립형 게이지와 함께 몰드의 정중앙에 고정하였다. 콘크리트를 타설한 후 적당한 방법으로 다짐하고 콘크리트 표면의 수분 증발 및 흡수를 방지하기 위하여 폴리에스터 필름(polyester film)으로 외기와의 접촉을 차단하였으며, 온도가 20°C 혹은 30°C이고 상대습도가 60%인 항온항습기에서 자기수축 측정 기간 동안 양생하였다.

자기수축은 초기 재령부터 발생되기 시작하기 때문에 자기수축을 정밀하게 측정하기 위해서는 초결 전에 측정이 이루어져야 한다.¹¹⁾ 따라서 이 실험에서는 UHPC 자기수축을 타설한 직후부터 측정하였으며 몰드를 제거하기에 충분한 강성을 가지는 약 10시간 이후 몰드를 제거하였다. 몰드를 제거한 후 시편은 알루미늄 테이프로 밀봉하여 수분의 증발 및 흡수를 방지하였으며 몰드를 제거하기 전과 동일한 환경 조건에서 양생하였다.

2.3 자기수축 모델

자기수축에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 물-결합재비(W/B)이며, W/B가 낮은 UHPC는 자기수축량이 크고, 발현율도 큰 경향을 나타낸다. 자기수축의 최대값과 자기수축 발현 계수를 이용하여 자기수축을 예측하는 Miyazawa-Tazawa모델은 이러한 UHPC 자기수축의 특성을 잘 나타내며 자기수축을 예측하는 모델로 널리 사용되고 있다.⁵⁾ 이 연구에서는 Miyazawa-Tazawa모델을 수정하여 재령 28일의 자기수축을 기준으로 자기수축을 예측할 수 있도록 제안된 다음과 같은 모델식을 사용하였다.¹²⁾

$$\varepsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{28}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (2)$$

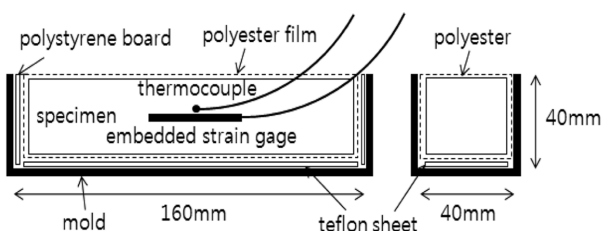


Fig. 3 Measurement of length change

$$\beta(t) = \exp \left\{ a \left[1 - \left(\frac{28-t_i}{t-t_i} \right)^b \right] \right\} \quad (3)$$

여기서, γ 는 시멘트와 혼화재의 영향을 나타내는 계수이며, $\varepsilon_{28}(W/B)$ 는 재령 28일에서 콘크리트의 자기수축 변형률($\times 10^{-6}$)이고, $\beta(t)$ 는 시간에 따른 자기수축의 발현을 나타내는 계수이다. a와 b는 W/B에 따라 결정되는 상수이며, t_i 는 자기수축이 발현되는 시점(day)이고, t는 재령(day)이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 UHPC의 압축강도 및 탄성계수

Table 3에 재령 28일에서 UHPC의 압축강도와 탄성계수가 주어져 있다. 실험 결과 팽창 재료의 혼입률이 증가함에 따라 압축강도와 탄성계수가 감소함을 알 수 있었다. 이는 수축 저감제 및 팽창재가 시멘트량에 대체하여 혼입되었기 때문에 압축강도가 다소 저하된 것으로 사료되며, 탄성계수도 압축강도와 마찬가지로 혼입률에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2 UHPC의 초음파 속도

상대습도 60%인 조건에서 양생 온도에 따라 20°C에서는 Mix A와 Mix C 배합을, 30°C에서는 Mix A, Mix B, Mix C 배합에 대하여 콘크리트를 타설한 직후부터 24시간 동안 초음파 속도를 측정하였다.

일반적인 탄성계수 측정 방법으로는 콘크리트가 경화하지 않은 재령 1일 이전의 탄성계수를 정확하게 측정하기 어렵지만 초음파 속도 모니터링의 경우 타설 직후부터 측정이 가능하다. 식 (1)에서 UPV의 제곱은 UHPC의 탄성계수와 비례 관계에 있으며, 타설 후 24시간의 UPV를 측정하여 UHPC의 강성 변화를 간접적으로 확인할 수 있다.

Figs. 4와 5는 각 배합별 UHPC의 UPV를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 각 배합의 UHPC는 UPV가 초기 재령에서 약 300~500 m/s로 낮게 나타났으며, A점을 기준으로 UPV가 급격히 상승하였다. 이는 타설 직후 UHPC는 거의 유체 상태와 다름이 없으며 수화가 진행됨에 따라 A점 이후 수화 생성물이 증가하면서 초음파의 전달 경로가 짧아져 UPV가 증가하는 것으로 A점 이후 UHPC

Table 3 Compressive strength and modulus of elasticity of UHPC

Mix type	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Mix A	126.88	46,034
Mix B	120.28	43,824
Mix C	116.86	42,443

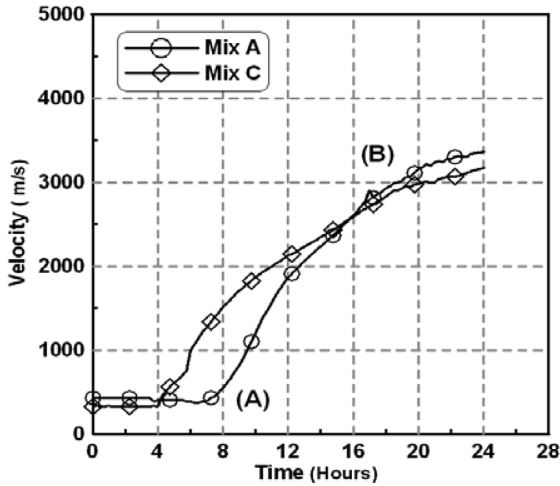


Fig. 4 Ultrasonic of UHPC (Mix A, C) - temp. 20°C

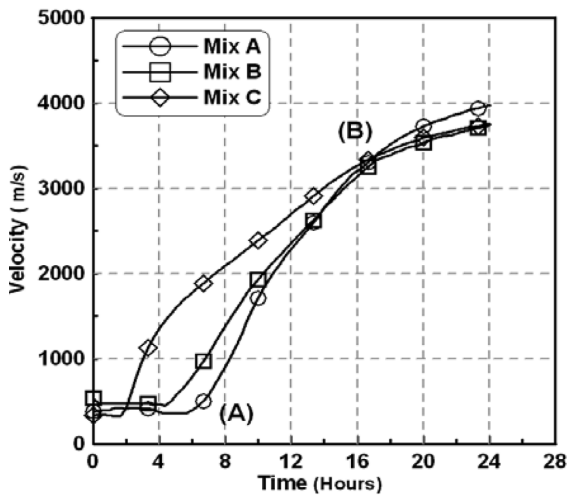


Fig. 5 Ultrasonic of UHPC (Mix A, B, C) - temp. 30°C

는 강성을 가지게 되며 이후 발생하는 수축은 UHPC에 응력으로 작용할 수 있다. UPV가 두 번째로 변화하는 B점은 UHPC UPV의 증가율이 점차 감소하여 강성이 최종값에 근접하는 시점으로 UHPC가 경화되어 이후 강성의 변화가 크지 않게 된다.

UPV 발현 곡선의 A, B점이 나타나는 시간과 속도를 나타낸 Table 4를 보면, 양생 온도와 관계없이 팽창 재료를 혼입하지 않은 Mix A는 A점의 발현이 가장 늦게 발현되었지만 팽창 재료를 가장 많이 혼입한 Mix C는 A점이 상당히 빠르게 발현되었다. 이는 생석회와 석고 및 알루미늄을 조합 소성한 CSA계 팽창제의 혼입으로 수화 반응 초기에 에트린자이트의 생성량이 많아져 초음파가 전달되는 경로가 신속하게 형성되어 UPV가 증가되는 시점이 빠르게 나타난 것으로 판단된다.

자기수축 발현 시점의 기준이 되는 A점은 양생 온도에 따라서도 다르게 나타났다. 외기 온도 30°C에서 양생한 시편은 20°C에서 양생한 시편에 비하여 A점이 빠르게 발현되었으며 팽창 재료의 혼입률이 증가할수록 양생 온도에 따른 A점이 발현 시간은 빠르게 나타났다. 이는

Table 4 Ultrasonic pulse velocity and time at A, B

Temp. (°C)	Mix type	A		B	
		Time (h)	Ultrasonic velocity (m/s)	Time (h)	Ultrasonic velocity (m/s)
20	Mix A	8.0	546.6	20.6	3219.8
	Mix C	4.5	512.3	19.0	2929.4
30	Mix A	6.8	904.6	19.1	3647.2
	Mix B	5.8	441.1	18.4	3300.9
	Mix C	1.9	426.8	17.9	3459.5

양생 온도가 높아짐에 따라 수화 반응이 촉진되어 UPV가 증가한 것으로 양생 온도가 높아짐에 따라 UHPC의 강성이 빠르게 발현되는 것으로 판단된다.

강성의 변화가 둔화되는 B점이 나타나는 시점은 큰 차이를 보이지 않았으나 UPV는 양생 온도가 30°C인 경우 다소 큰 값을 나타냈다.

3.3 UHPC의 양생 온도

UHPC는 상온에서 배합 시 초기 타설 온도가 30°C 내외이므로 양생 온도 30°C의 경우 재료에 별도의 전처리 없이 배합하였으며, 양생 온도 20°C 배합의 경우 초기 수화열에 의한 체적의 변화를 최소화하기 위하여 배합 전에 재료를 저온 처리하여 타설 온도를 20°C로 유지하였다.

Fig. 6은 UHPC의 양생 온도를 측정 한 결과이다. UHPC는 설정된 양생 온도보다 약 1~4°C 상회하였으며 열팽창 계수를 고려하였을 때 이에 대한 팽창률은 약 10~40 με이다. 하지만 각 온도 조건에 따른 UHPC의 자기수축을 상대적으로 비교할 경우 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3.4 UHPC의 자기수축

자기수축 측정은 UPV 측정 결과를 이용하여 강성이

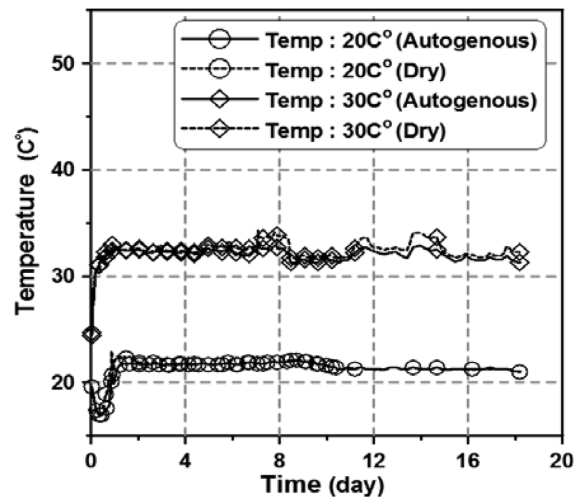
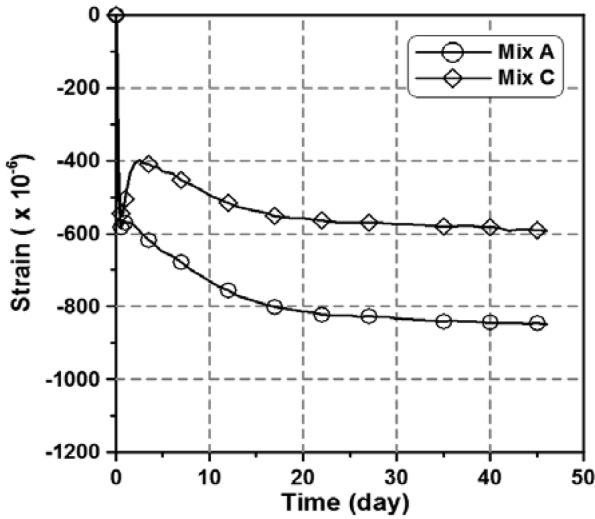
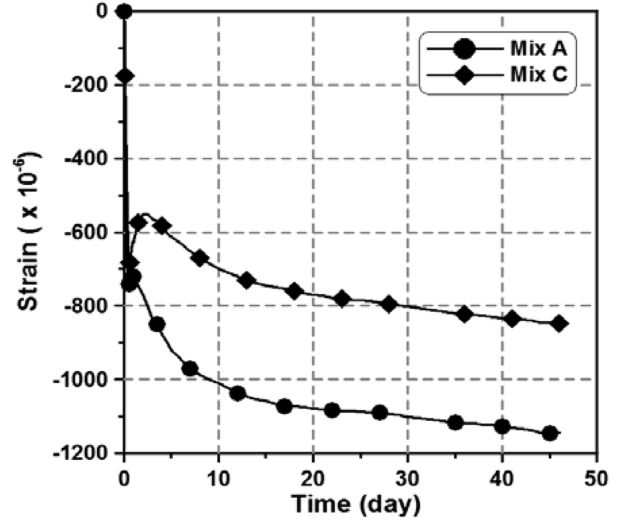


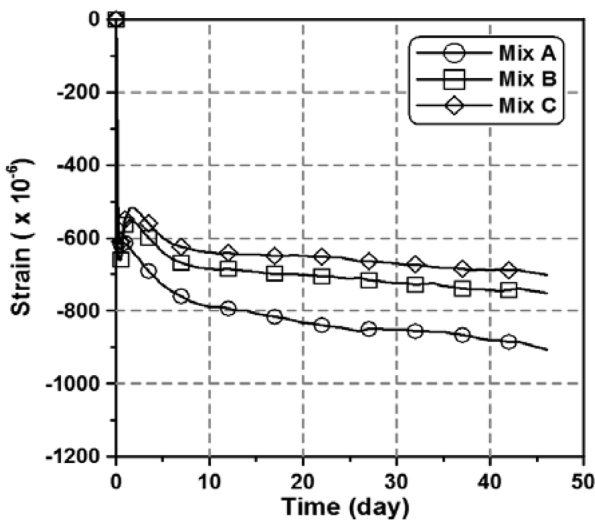
Fig. 6 Curing temperature results for UHPC



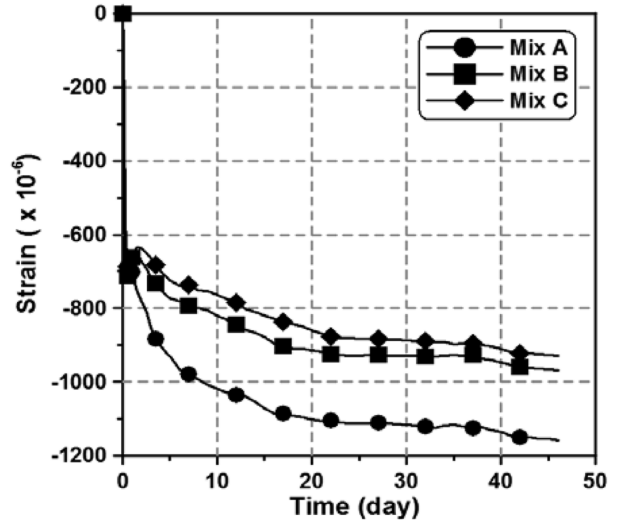
(a) Temp. 20°C



(a) Temp. 20°C



(b) Temp. 30°C



(b) Temp. 30°C

Fig. 7 Autogenous shrinkage results for UHPC

Fig. 8 Total shrinkage results for UHPC

발현되는 A점을 기준으로 46일간 측정하였다. Figs. 7과 8은 양생 온도별 UHPC의 자기수축 및 총 수축량을 그래프로 나타낸 것이다. 총 수축량은 자기수축과 동일한 조건에서 시편을 밀봉하지 않아 자기수축과 건조수축이 모두 발생할 수 있게 한 후 수축을 측정한 결과이다. 총 수축량에서 자기수축을 제외한 나머지가 건조수축에 의한 수축이 되며 배합에 따라 다소 차이가 있으나 건조수축은 총 수축량의 약 20~25% 수준으로 UHPC 수축의 대부분은 자기수축에 의해 발생되었다.

UHPC의 자기수축은 전체적으로 초기에 급격하게 발생하였으며 점차 자기수축의 증가량이 감소하였다. 양생 온도에 따른 자기수축의 변화를 살펴보면 양생 온도가 높은 30°C의 경우가 20°C에 비하여 자기수축이 빠르게 발현되었으며 총 수축도 더 많이 발생하였다. 팽창 재료를 혼입한 Mix B와 C는 약 12시간 이후 팽창이 발생하였는데 팽창 재료의 혼입률에 관계없이 양생 온도가 30°C의 경우 약 1일간 팽창하였으며, 20°C의 경우 약 2일간 팽창하였다. 양생 온도에 따라 팽창하는 시간이 다르게

나타나는 것은 UHPC의 수화 반응과 관련이 있으며, 온도가 높아짐에 따라 팽창 효과가 빠르게 나타남은 물론 자기수축이 일정한 값에 수렴하는 시기도 빠르게 나타남을 알 수 있다.

UHPC 자기수축을 보상하기 위한 목적으로 사용한 팽창 재료인 수축 저감제와 CSA계 팽창제는 그 혼입률에 따라 자기수축의 보상 효과가 다르게 나타났다.¹⁴⁾ 팽창 재료를 혼입하지 않은 Mix A는 팽창하지 않았으며, 수축 저감제 1%와 팽창제 5%를 혼입한 Mix B는 약 110 $\mu\epsilon$ 가 팽창하였으며 수축 저감제 1%와 팽창제 7.5%를 혼입한 Mix C는 150 $\mu\epsilon$ 로 가장 많이 팽창하였다. UHPC의 자기수축은 초기에 급격하게 발생하지만 강성이 높게 발현되지 않은 초기 재령의 자기수축은 UHPC의 균열 발생에 큰 영향을 주지 못한다. UPV 발현 곡선을 보면 A점부터 상승하기 시작하여 B점까지 점차 강성이 증가하였으며, A점에서 B점까지 강성이 발현되는 시간은 팽창 재료의 혼입률에 따라 다소 차이가 있으나 약 12시간 정도 소요된다. B점 이후 발생하는 자기수축은 UHPC의 강

성이 크기 때문에 콘크리트에 균열을 발생시킬 수 있는 높은 수축 응력을 유발하게 된다. 하지만 팽창 재료를 혼입한 UHPC는 타설 12시간 후 팽창이 발생하므로 강성이 큰 시기에 발생하는 자기수축을 보상하며 UHPC에 발생하는 수축 응력을 완화시킬 수 있을 것이라 사료된다.

3.5 UHPC 자기수축 예측 모델링

Fig. 9는 양생 온도에 따른 UHPC의 자기수축 실험값과 식 (2)의 모델식에 의해 예측한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 사용한 모델은 수축 저감제 및 팽창재를 혼입한 경우 발생하는 수축 후 팽창하는 현상을 반영하기엔 다소 어려운 측면이 있다. 이 연구에서는 팽창 전의 자기수축은 무시하고 팽창이 발생한 이후 재령 28일의 자기수축(ϵ_{28})을 모델식에 적용하여 각 배합의 자기수축 특성을 고려하였다. 그 결과 팽창이 발생한 이후의 자기수축과 모델식에 의해 예측한 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Table 5는 식 (2)와 (3)에 사용되는 각 재료 상수를 정

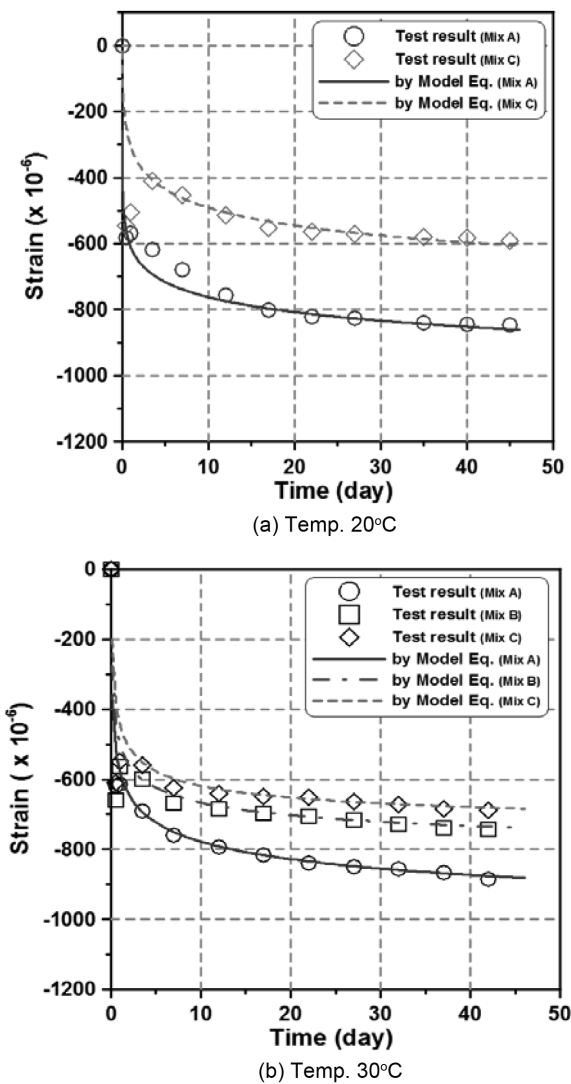


Fig. 9 Autogenous shrinkage modeling using Eq. (2)

Table 5 Material coefficients of Eqs. (2), (3)

Curing temp. (°C)	Mix type	ϵ_{28} ($\mu\epsilon$)	t_i (h)	a	b
20	Mix A	-829	8.0	0.78	0.10
	Mix C	-570	4.5	0.62	0.21
30	Mix A	-850	6.8	0.35	0.22
	Mix B	-718	5.8	0.19	0.32
	Mix C	-666	1.9	0.15	0.39

리한 것이다. γ 는 결합재에 관한 계수로 양생 온도와 수축 저감제 및 팽창재의 혼입률에 관계없이 1로 고정하였다. a와 b는 W/B와 혼화재료에 따른 상수로써 W/B가 동일한 경우 팽창 재료의 혼입률이 증가함에 따라 a는 감소하였으며, b는 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

UHPC의 자기수축 특성 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 속도 모니터링 시스템을 이용하여 배합 직후부터 콘크리트의 UPV를 측정하여 자기수축의 정성적인 평가를 위한 기준으로 활용하였다. 양생 온도와 팽창 재료의 혼입률이 증가함에 따라 UHPC의 강성이 빠르게 발현되는 것을 알 수 있었으며, 추후 초음파 속도 모니터링 시스템을 통하여 UHPC의 응결 및 경화 과정을 간접적으로 파악하고 이를 통한 UHPC의 품질 관리가 가능할 것으로 판단된다.
- 2) UHPC의 수축은 건조수축에 비하여 자기수축이 지배적이었으며, 재령 초기에 자기수축이 급격하게 발생하였으며 수축 저감제 및 팽창재를 혼입한 경우 재령 13일에 팽창이 발생하여 100~150 $\mu\epsilon$ 정도 자기수축 보상이 가능하였다. 또한 자기수축 실험값으로부터 자기수축 예측 모델의 재료 상수를 결정하여 UHPC의 자기수축을 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 추후 팽창 재료의 혼입률에 대한 지속적인 연구를 통하여 UHPC의 자기수축을 효율적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 자기수축에 의한 수축 응력은 UHPC의 강성과 밀접한 관련이 있어 강성이 크게 발현된 이후 발생하는 자기수축이 UHPC의 초기 균열 발생에 많은 영향을 미칠 것으로 사료되며, 실 구조물의 자기수축에 의한 균열을 평가하기 위해서는 UHPC의 자기수축과 더불어 콘크리트의 초기 강성 및 강성의 발현 특성 등을 고려하여야 할 것이라 사료된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 “하이브리드 사장교형 초고성능 콘크리트 개발” 과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 이광명, 이회근, “초기 재령 고강도 콘크리트의 자기수축 예측기술,” 콘크리트학회지, 17권, 4호, 2005 pp. 34~40.
2. Bentz, D. P., Geiker, M. R., and Hansen, K. K., “Shrinkage-Reducing Admixtures and Early-Age Desiccation in Cement Pastes and Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 7, 2001, pp. 1075~1085.
3. Paillere, M., Buil, M., and Serrano, J. J., “Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 2, 1989, pp. 139~144.
4. Mehta, P. K., “Durability of Concrete in Marine Environment a Review,” Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1980, pp. 1~15.
5. Japan Concrete Institute Technical Committee Report on Autogenous Shrinkage, “Autogenous Shrinkage of Concrete,” *Proceedings of the International Workshop*, ed. Tazawa, E&FN Spon London, 1998, pp. 3~63.
6. 이창수, 박종혁, “공극 내 상대습도, 모세관압력, 표면에너지 변화에 따른 콘크리트 자기수축,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 131~138.
7. 유성원, 김도경, 고경택, 정상화, “수축 저감제 및 팽창제가 혼입된 고성능 콘크리트의 자기수축 모델에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 24권, 6A호, 2004, pp. 1301~1307.
8. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., and Bae, D. B., “Ultrasonic in-Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 4, 2004, pp. 631~640.
9. 이회근, 이광명, 김우, “팽창재와 플라이애쉬 콘크리트의 자기수축 예측 모델,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 1호, 2003, pp. 134~142.
10. Kraukramer, J. and Krautkramer, H., *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Ed, Springer-Verlag, New York, 1990.
11. Aitcin, P. C., “Demystifying Autogenous Shrinkage,” *Concrete International*, Vol. 21, No. 11, 1999, pp.
12. Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., and Kim, G. Y., “Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 7, 2006, pp. 1279~1285.
13. Zhang, Y., Zhanga, W., Shea, W., Maa, L., and Zhua, W., “Ultrasound Monitoring of Setting and Hardening Process of Ultra-High Performance Cementitious Materials,” *NDT & E International*, Available Online, 2009.
14. 고경택, 박정준, 류금성, 강수태, “팽창재와 수축 저감제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성,” 대한토목학회 논문집, 26권, 4A호, 2006, pp. 787~794.

요 약 최근 고성능 감수제, 실리카 폼과 강섬유 등을 사용하여 제조한 초고성능 콘크리트(UHPC)의 사용이 전 세계적으로 증가하고 있다. UHPC는 강도가 높을 뿐만 아니라 조직이 치밀하여 내구성 측면에서도 우수한 성능을 갖고 있지만 W/B가 낮고 단위 시멘트량이 많기 때문에 초기 수화열과 자기수축이 많이 발생하여 재령 초기에 균열 발생 위험성이 높아지게 된다. UHPC의 초기 수축균열은 수축 저감제 및 팽창재의 자기수축 보상 효과에 의하여 제어할 수 있다. 이 연구에서는 수축 저감제 및 팽창재를 혼입한 UHPC의 초음파 속도를 측정하여 재령 초기 강성 변화를 추정하였고, 수축 실험을 통하여 수축 저감제 및 팽창재가 UHPC의 자기수축에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 UHPC의 자기수축 실험 결과로부터 자기수축 예측 모델의 재료 상수를 결정하였다. 결론적으로 수축 저감제 및 팽창재를 혼입함에 따라 UHPC 강성이 신속하게 발현되며, 자기수축 저감에 효과가 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 자기수축, 초음파 속도, 수축 저감제, 팽창재