

저열 시멘트 콘크리트의 건조수축 및 크리프 거동 평가

Evaluation of Shrinkage and Creep Behavior of Low-Heat Cement Concrete

문재성¹

양근혁²

김시준^{2*}

Mun, Jae-Sung¹

Yang, Keun-Hyeok²

Kim, Si-Jun^{2*}

Department of Architectural Engineering, Graduate School Kyonggi University, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-760, Korea¹

Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-760, Korea²

Abstract

This study examined the long-term inelastic characteristics, including unrestrained shrinkage and creep, of low-heat cement concrete under different ambient curing temperatures. To achieve the designed compressive strength of 42MPa, water-to-binder ratios were selected to be 27.5, 30, and 32.5% for curing temperatures of 5, 20, and 40°C, respectively. Test results showed that the shrinkage strains of concrete mixtures tended to decrease with the decrease in curing temperature because of the delayed evaporation of internal capillary and gel waters. Meanwhile, creep strains were higher in concrete specimens under lower curing temperature due to the occurrence of the transition temperature creep. The design models of KCI provision gave better accuracy in comparison with test results than those of ACI 209, although a correction factor for low-heat cement needs to be established in the KCI provision.

Keywords : long-term behavior, shrinkage, creep mass concrete, low-heat concrete

1. 서론

매스콘크리트 부재의 설계에서 구조적으로 안전하기 위하여 구조물의 크기를 줄이는 것은 한계를 갖는다. 이러한 이유로 매스콘크리트 부재에서 콘크리트의 수화열을 저감하기 위한 결합재에 대한 연구가 국내·외에서 다양하게 수행되고 있다[1,2,3,4]. 일반적으로 수화열 저감을 목적으로 사용되는 콘크리트 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland Cement, OPC)를 기반으로 산업부산물인 플라이애시(Fly-Ash, FA)와 고로슬래그(Granulated Ground Blast Slag, GGBS) 등을 시멘트에 일정부분 치환하는 혼합시멘트를 사용한다. 플라이애시 혼합시멘트는 수화

열 저감에 효과적이지만, 초기 압축강도 발현율의 저하와 더불어 30% 이상 사용할 경우 강도저하가 심각하게 나타날 수 있다. 고로슬래그는 잠재 수화발열량이 OPC와 비슷한 수준으로서 FA에 비해 OPC 콘크리트 수화열 저감 효율이 크지 않다. 하지만, OPC 대비 40% 이상 치환할 경우 수화열 저감 효과를 갖는 것으로 보고되고 있다[5].

매스콘크리트는 구조물의 크기가 커서 시멘트의 수화열에 의한 체적 변화로 야기되는 균열을 최소화하기 위한 대책이 필요한 구조물로 ACI 207.1R[6]에서 정의하고 있다. 즉, 매스콘크리트 부재의 설계는 체적변화에 영향을 미치는 요소들에 대한 평가가 반드시 수반되어야 한다. 매스콘크리트 부재에서 수화열 및 건조수축과 크리프 등과 같은 장기거동 특성은 체적변화를 일으켜 균열을 발생 시키는 부정적인 인자이다. 건조수축과 크리프는 내·외부 구속조건에 따라서 부재 내부에서 위치에 따른 상이한 체적변화가 발생되고, 이는 인장응력의 발생 및 증가로 이어져 균열 발생의 확률이 증가될 수 있다[7]. 특히, 내부의 원자로를 보호하고 방사선을 차폐해 주어야 하는 원전 구조물(격납

Received : May 12, 2016

Revision received : June 17, 2016

Accepted : August 3, 2016

* Corresponding author : KIm, Si-Jun

[Tel: 82-31-249-9843, E-mail: season@kgu.ac.kr

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

벽)은 체적변화에 따른 균열발생에 민감한 구조물이다. 따라서 매스콘크리트의 배합은 수화열 저감과 함께 건조수축 및 크리프 등의 변화에 대한 평가도 중요하다. 하지만, 수화열 저감 위한 콘크리트 대부분의 연구는 수화 반응에 따른 온도변화에 초점을 맞추고 있어 장기거동의 특성에 대한 연구는 미미하다.

이 연구의 목적은 수화열 저감을 위해 개발된 저열 시멘트 기반 3성분계 콘크리트[8]를 매스 콘크리트에 적용에 있어서 재료의 기초 특성을 평가하는 일환으로 비구속 건조수축 및 크리프 변형 특성을 평가하는 것이다. 콘크리트 공사는 다양한 지역과 계절에 상이하게 적용된다. 이를 고려하여 양생온도는 혹은, 표준, 혹은기를 대표할 수 있는 5, 20 그리고 40℃를 변수로 하였다. 측정결과는 콘크리트 구조설계기준(KCI)[9] 및 ACI 209[10] 설계 모델들과 비교하였다.

2. 실험계획

2.1 배합설계

저열 콘크리트 배합개발을 위한 결합재로서 저열 시멘트 (Low Heat Cement, LHC)를 기반으로 개질 플라이애시 (Modified Fly Ash, MFA)와 석회석 미분말(Lime-Stone Powder, LSP)을 각각 15%와 5% 치환하였다. LHC 기반의 결합재를 사용한 콘크리트에서 배합 변수는 물-결합재 비(W/B)이다(Table 1). 모든 배합에서 콘크리트 설계 압축강도는 42MPa로서 W/B 가 27.5, 30 그리고 32.5% 일 때의 배합은 각각 혹은기, 표준기 및 혹은기를 대표한다. 콘크리트의 28일 설계압축강도는 제안된 콘크리트의 원자력 발전소 격납벽 적용을 고려하여 결정하였다.

Table 1. Mixture proportions of concrete prepared

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight, (kg/m ³)							
			W	OPC	LHC	FA	MFA	LSP	S	G
Control	35		161	368	0	92	0	0	743	912
L-27.5	27.5	45	148	0	432	0	81	27	730	896
L-30	30		162	0	432	0	81	27	715	877
L-32.5	32.5		175	0	432	0	81	27	699	857

Note] W, OPC, LHC, FA, MFA LSP, S and G indicate water, ordinary portland cement, low-heat cement, fly-ash, modified fly-and, lime stone powder, fine aggregates, and coarse aggregates, respectively.

개발된 저열 시멘트 콘크리트와의 비교를 위하여 원전 구조물에서 적용되고 있는 FA 20% 혼입된 OPC 콘크리트도 실험하였다. OPC 기반 콘크리트의 설계압축강도도 42MPa이다. 모든 배합에서 목표 슬럼프는 100mm이며, 잔골재율(S/a)는 45%이다. 목표 슬럼프를 만족시키기 위해 폴리카르본산계 고성능 감수제가 사용되었다.

2.2 사용재료

저열 콘크리트 개발을 위하여 구성된 결합재들의 화학구성비를 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 LHC는 OPC와 비교하여 수화열을 낮추기 위하여 규산삼산화와 알루미늄 산화물의 함량이 낮기 때문에 SiO₂의 함량이 높고 Al₂O₃와 CaO의 함량이 낮다. 이 연구에서 사용된 저열 시멘트는 ASTM C 150[11] 규격에 부합하는 것으로서 OPC 대비 SiO₂의 함량이 약 4.7% 높고 Al₂O₃와 CaO의 함량은 각각 2.0%, 0.3% 낮았다. 저열 포틀랜드 시멘트의 밀도와 분말도는 각각 3.18과 3,440cm²/g이다.

MFA는 FA의 단점 중 하나인 초기 반응성 지연에 대한 문제를 개선한 것으로 기계식 분쇄를 통한 두 가지 메커니즘을 갖는다. 첫 번째는 분말도를 높이는 것이다. 높아진 분말도는 결합수와 반응할 수 있는 비표면적의 증가로 초기 반응성을 개선한다. 두 번째는 유리막 코팅의 제거이다. FA는 입자표면에 유리막 코팅이 결합수와의 수화반응을 지연시키는데, 유리막 코팅을 강제로 제거하면 이를 개선할 수 있다. LSP는 내부공극을 채워주는 필러의 역할로 초기 반응성을 개선한다[8]. 사용된 MFA와 LSP의 밀도는 각각 2.25, 2.81이고, 분말도는 5,510cm²/g, 3,420cm²/g이다.

Table 2. Mixture proportions of concrete prepared

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	LOI
OPC	19.6	5.1	2.9	62.8	3.9	0.89	0.17	0.18	2.5	2.64
LHC	25.3	3.1	3.4	62.5	1.7	0.57	0.10	0.09	1.9	0.8
FA/MFA	64.0	21.9	5.5	3.8	1.2	1.1	1.0	1.5	-	2.23
LP	17.7	8.2	0.6	47.5	2.1	-	-	-	0.3	22.3

2.3 실험방법 및 측정

건조수축 및 크리프에 영향을 미치는 콘크리트 압축강도와 탄성계수를 평가하기 위하여 ϕ 100×200mm 원주형 실험체를 제작하여 각각 KS F 2405[12]와 KS F 2438[12] 규격에 따라 실험을 수행하였다. 콘크리트 건조수축 특성

Table 3. Summary of test results

Specimens	curing temperature, (°C)	S_i (mm)	A_c (%)	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	Unrestrained shrinkage strain, ($\times 10^6$)						Basic creep strain, ($\times 10^6$)					
						days						days					
						1	3	7	28	56	91	1	3	7	28	56	91
Control	5			43.10	31,832	-4	-45	-85	-171	-208	-232						
	20	105	4.7	47.20	32,759	-59	-131	-218	-365	-428	-472						
	40			54.20	34,250	-105	-179	-295	-408	-461	-521						
L-27.5	5			42.20	31,020	-2	-27	-60	-158	-207	-233	783	848	1022	1291	1398	1460
	20	98	4.2	48.90	32,779	-47	-86	-145	-229	-274	-300						
	40			55.20	34,334	-63	-143	-239	-398	-429	-472						
L-30	5			36.64	30,880	-1	-35	-75	-166	-200	-222						
	20	102	4.7	45.40	31,508	-54	-91	-158	-273	-330	-362	724	754	899	1158	1274	1345
	40			54.80	32,982	-71	-158	-242	-400	-431	-481						
L-32.5	5			38.72	28,451	-2	-52	-93	-207	-243	-272						
	20	104	4	41.84	30,651	-92	-134	-204	-350	-419	-474						
	40			48.01	32,841	-64	-150	-261	-419	-482	-527	656	688	721	839	909	969

Note : S_i , A_c , f_{ck} and E_c are initial slump, Air content, compressive strength at 28 days and modulus of elasticity

평가를 위한 실험체의 크기는 100×100×400mm로 하였으며, 타설 시에 실험체 중앙에 전기저항 게이지(Electric Resistance Strain Gauge)를 매립하여 변형률을 측정하였다(Figure 1(a)). 건조수축 및 압축강도 측정을 위한 시험체들은 배합과 함께 91일까지 각각 5°C, 20°C 및 40°C에서 양생하였다. 몰드 탈형은 양생온도 5°C의 경우 재령 2일에 이루어졌으며, 20°C와 40°C 양생에서는 재령 1일에 하였다.



Figure 1. Tests for inelastic strains

크리프 실험은 KS F 2453[12]에 따라 ϕ 150×300mm 원주형 실험체를 이용하여 재령 28일 양생이후 하중을 가력하였다(Figure 1(b)). 크리프 실험은 장비 및 양생실의 한계로 각 배합별 양생온도(즉, L-27.5, L-30, L-32.5는 각각 5°C, 20°C, 40°C에서 양생)에서 28일 양생 후 항온 항습실(20±3°C, 60%)에서 실험을 수행하였다. 자유건조

수축 변형률을 제외한 순수 크리프 변형을 측정하기 위하여 하중재하 직전에 외부에 노출된 면은 폴리에틸렌 수지로 랩핑하여 외기와 차단하였다.

크리프 특성 평가를 위한 재하 하중은 각 실험체의 압축강도 40%로 하였다. 변형을 측정하기 전에 재하 하중의 2%이상 변화 할 때는 하중을 보정하였으며, 가력 시부터 재령 91일 동안 측정하였다.

3. 실험결과

저열 콘크리트의 실험결과 Table 3에 정리하였다. 콘크리트의 장기거동 특성은 압축강도와 탄성계수의 영향을 받는다. 이에 대하여 장기거동 특성은 재령별로 변형률 값을 정리하였다.

3.1 압축강도 및 탄성계수

양생온도에 따른 재령별 압축강도는 Figure 2에 나타내었다. 기준(Control) 배합은 모든 양생온도에서 재령 28일 목표 압축강도(42MPa)를 만족하였다. 반면, LHC 기반 콘크리트의 경우, 혹한기 양생온도인 5°C에서는 L-27.5 배합만 목표 압축강도를 만족하였는데, 이는 의도한바와 같이 낮은 양생온도를 고려하여 W/B 를 낮추었기 때문이다. 표준기(20°C)는 L-27.5와 L-30 배합이 목표값을 만족하였다. 혹서기(40°C)의 경우는 모든 배합이 목표값을 만족하였다.

일반적으로 저열 시멘트를 사용한 콘크리트는 동등 W/B 에서 OPC와 비교하여 낮은 압축강도를 보인다. 이러한 이유로 개발된 LHC는 표준기(20°C) 기준으로 기준(Control) 배합과 비교하여 W/B 를 5% 낮게 하였으며, 5°C 및 40°C 양생에서는 표준기에서 W/B 를 $\pm 2.5\%$ 로 설정하여 기준(Control) 배합과 비교하여 초기 압축강도 발현률 및 재령 28일 압축강도에서 동등 이상의 성능을 갖는 것으로 평가되었다.

탄성계수는 Table 3에 나타낸바와 같이 결합재의 종류와 상관없이 압축강도에 대한 영향이 크게 나타났다. 측정된 탄성계수 값은 OPC 콘크리트 실험결과들로부터 결정된 KCI[9] 기준의 경험식과 잘 일치하였다(Figure 3). 이는 압축강도 40MPa 수준에서 콘크리트의 탄성계수는 결합재 특성보다는 골재 강성에 의해 중요하게 영향 받음을 의미한다.

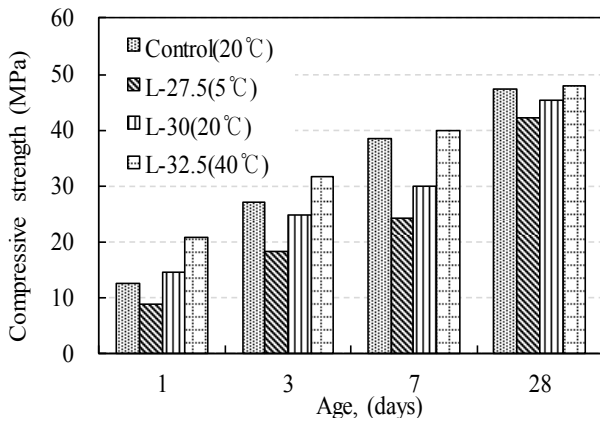


Figure 2. Compressive strength development at different curing temperatures

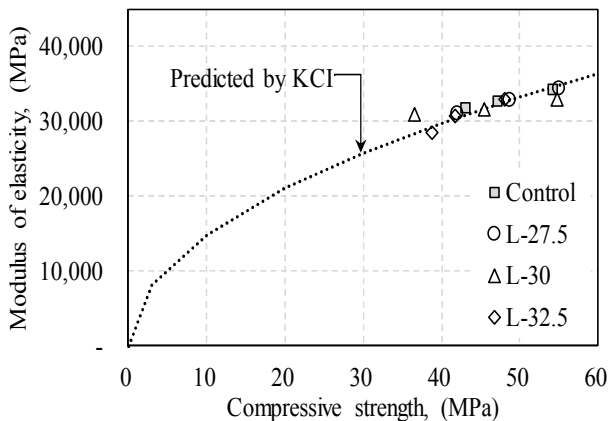


Figure 3. Modulus of elasticity vs compressive strength

3.2 양생온도에 따른 건조수축

Figure 4에는 각 양생온도에 따른 건조수축 변형률 거동을 나타내었다. 흑한기(5°C)의 양생에서 건조수축 변형률은 재령 91일에서 약 220~270 μm 범위에 있었다.

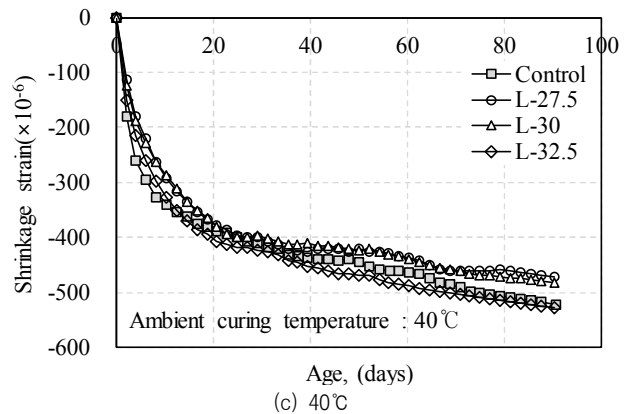
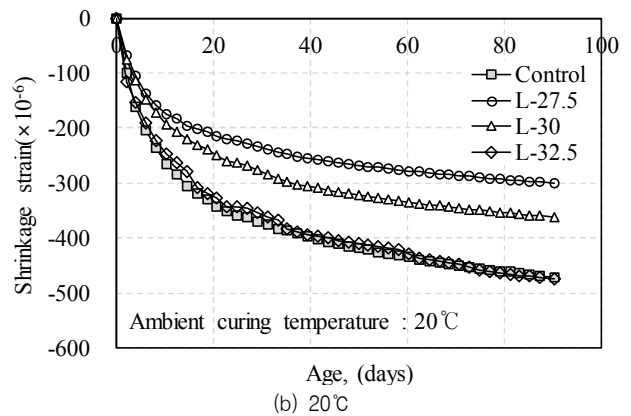
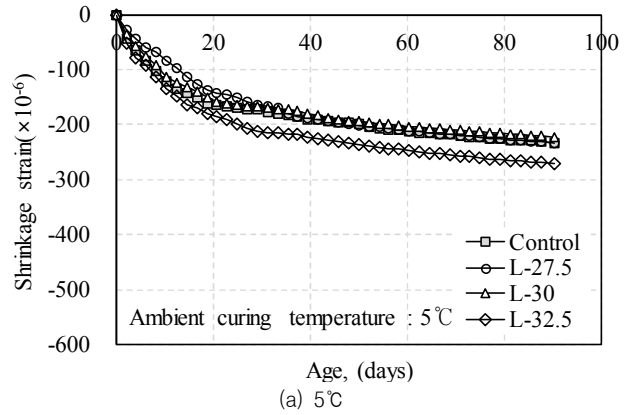


Figure 4. Unrestrained shrinkage strains under different curing temperatures

건조수축 변형률은 결합재의 종류와 상관없이 동일 양생 온도에서 W/B 가 증가할수록 증가하는 경향을 보였지만, 그 차이는 미미하였다. 표준기(20°C) 양생의 경우는 흑한기

양생조건과 마찬가지로 W/B 가 증가할수록 건조수축 변형률이 증가하였다. 하지만, 기준(Control) 배합의 W/B 가 가장 높음에도 불구하고 L-32.5의 배합과 재령별 건조수축 변형률의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 기준(Control) 배합이 비록 W/B 는 높지만, L-32.5 배합과 비교하여 단위 결합재량이 적기 때문으로 판단된다. 혹서기(40℃) 배합의 건조수축 변형률의 범위는 재령 91일에서 약 472~527 μm 에 있었다. 혹서기 건조수축 변형률 값은 혹한기 배합과 마찬가지로 모든 배합이 각 재령에서 서로 비슷한 경향을 가졌다. 혹한기 배합의 경우는 낮은 양생온도로 인하여 초기 시멘트 수화반응이 지연되고 재령의 경과에 따른 모세공극 수 및 겔공극 수의 증발도 지연되었기 때문이라고 판단된다.

반면, 혹서기(40℃) 양생조건에서의 건조수축은 초기 높은 양생온도에 의하여 모세공극 수 및 겔공극 수의 증발이 촉진되며, 이로 인해 초기에 높은 건조수축이 발생하였다.

3.3 건조수축 변형률과 설계모델과의 비교

건조수축 변형률에 대한 ACI 209[10] 예측식은 양생온도에 대한 영향을 고려하고 있지 않아 이 비교에서는 나타내지 않았다. Figure 5에는 KCI[9] 설계모델에 의한 예측값과 측정값의 비교를 나타내었다. 모든 배합에서의 측정값들은 양생온도와 관계없이 초기 재령에서 KCI[9] 예측값에 비해 크게 있는데, 그 차이는 재령의 증가와 함께 감소하는 경향을 보였다. 재령 91일에서 측정값과 예측값의 차이는 20℃에서 양생된 L-32.5 배합을 제외하면 약 10% 이내이다.

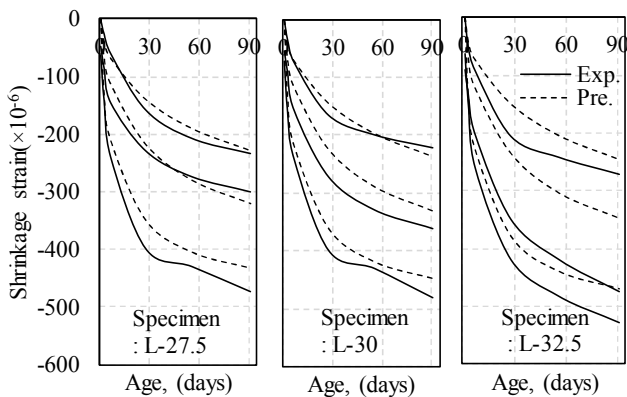


Figure 5. Comparisons of measured shrinkage strains and predictions using KCI model

KCI[9] 예측식을 실험결과와 비교하여 대부분의 배합 및 재령 1, 3, 7, 28, 56 그리고 91일에서 평균적으로 약 15% 낮은 결과를 보였다. KCI[9] 예측식에서는 결합재의 종류를 1~3종 및 5종 시멘트에 대해서 계수 값을 제시하고 있는 반면 다양한 결합재를 치환할 경우에 대한 계수 값을 제시하고 있지 않습니다. 이러한 이유로 KCI[9] 예측식의 적용에서 1종의 계수를 이용한 결과 예측값과 실험값의 차이가 발생하는 경향이 나타났다.

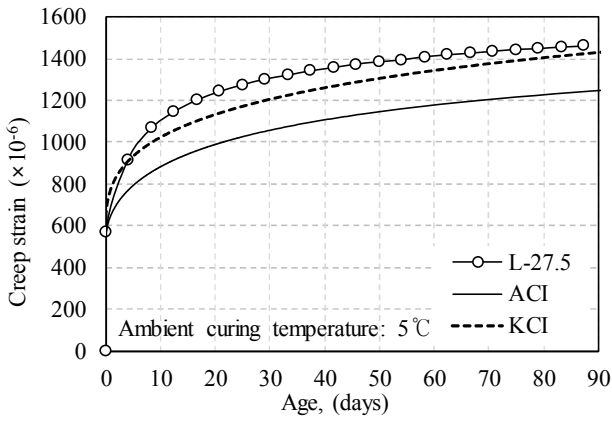
3.4 양생온도에 따른 크리프

LHC의 양생온도에 따른 크리프 변형률은 Figure 6에 나타내었다. 동일한 그림에 KCI[9] 예측식 및 ACI 209[10]을 함께 나타내었다. 크리프는 결합재 조직과 콘크리트 구성 배합에 따른 내적요인과 재하응력, 응력/강도비 등의 외적요인에 의하여 영향을 받는다. 적용된 재하 응력은 압축강도 40%로 하였으며, 초기 탄성계수는 L-27.5, L-30 그리고 L-32.5 실험체가 각각 539 μm , 585 μm 그리고 610 μm 로 하였다.

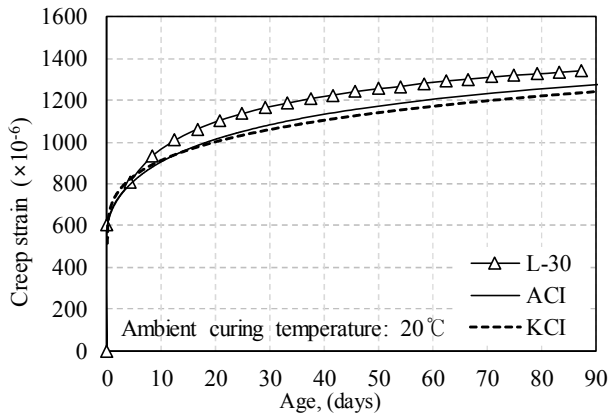
일반적으로 크리프 변형률은 건조수축 변형률과 비슷한 경향을 갖는다. 크리프 변형률은 건조수축 변형률과 기본 크리프 변형률을 합한 것을 전체 크리프 변형률로 정의한다. 건조수축 결과와 비교하면 크리프 변형률은 L-32.5 > L-30 > L-27.5 순으로 크리프의 크기가 도출되어야 하지만 그 반대의 경향을 나타내었다. 이는 크리프 측정 전까지 서로 상이한 양생온도의 영향 때문으로 판단된다. 크리프와 양생온도의 관계는 양생과 측정이 동일한 양생온도에서 실험되면 양생온도가 증가할수록 크리프 양도 증가하지만, 양생온도 보다 측정 시에 온도가 증가하면 추가 크리프가 발생된다. 이를 전이온도 크리프라 한다[13]. 즉 L-27.5 배합의 경우는 크리프 측정 시 온도가 양생온도보다 증가하여 추가 크리프가 발생되었고, 반면 L-32.5는 측정 후 양생온도가 감소하여 크리프가 작아진 것으로 판단된다.

이러한 결과는 예측 모델과의 비교에서도 잘 나타난다. ACI 209[10] 예측식의 경우에는 크리프에 대하여 양생온도를 고려하고 있지 않기 때문에 동일한 크리프 변형률을 나타내어 검토할 수 없다. 하지만, KCI[9] 예측식의 경우는 각 재령에 따른 양생온도의 영향과 전이온도 크리프 영향을 반영하고 있는데, 예측식 결과에 따라서 크리프 변형률의 크기는 L-27.5 > L-30 > L-32.5 순으로 나타났다. 하지만, 건조수축 예측과 마찬가지로 KCI[9] 설계모델에 의한

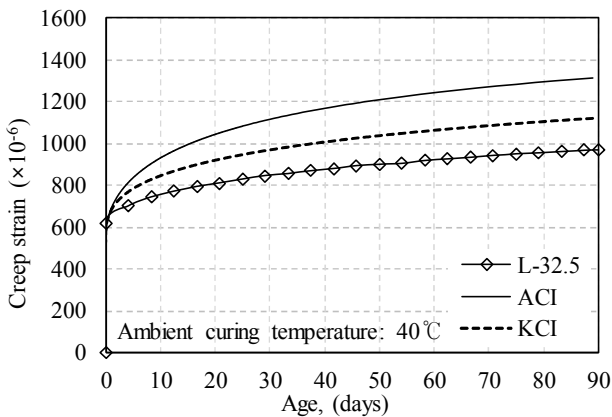
크리프 예측값은 실험결과에 비해 최대 15% 차이를 보였다. 따라서 개발된 저열 시멘트를 사용한 콘크리트의 건조수축 및 크리프 변형률을 비교적 정확하게 평가하기 위해서는 KCI[9] 설계 모델의 결합재 종류에 대한 보정계수에서 개발된 저열 시멘트에 대한 계수 값이 제안될 필요가 있다고 판단된다.



(a) 5°C



(b) 20°C



(c) 40°C

Figure 6. Basic creep strains under different curing temperatures

4. 결 론

콘크리트 수화열 저감을 위하여 저열 시멘트를 기반으로 개질 플라이애쉬와 석회석 미분말을 각각 15와 5% 치환한 결합재를 이용하여 콘크리트를 제작하였다. 양생온도 5°C, 20°C 그리고 40°C에서 콘크리트의 압축강도 발현 및 비구속 건조수축과 크리프 변형률을 측정하고 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제시된 저열 콘크리트 배합의 28일 압축강도는 양생온도가 같다면 보통포틀랜드 시멘트 기반 플라이애쉬 (20%) 혼합 콘크리트와 동등 이상의 수준을 보였다.
- 2) 콘크리트의 건조수축 변형률은 양생온도가 낮을수록 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 크리프 변형률은 전이온도 크리프 발생으로 인하여 재령 28일 까지 혹은 양생조건에 양생된 L-27.5가 1,450 μ m로 가장 크게 나타났다.
- 4) 건조수축 및 크리프 변형률에 대한 KCI 설계모델은 ACI 209 모델에 비해 실험결과와 잘 일치하였지만, 저열 시멘트에 대한 보정계수의 제안이 필요하였다.

요 약

개발된 저열 시멘트 콘크리트의 장기거동 특성인 비구속 건조수축과 크리프가 양생온도를 주요 변수로 측정하였다. 저열 콘크리트의 목표 압축강도인 42MPa를 고려하여 양생온도 5, 20, 40°C에서 물-결합재비는 각각 27.5, 30, 32.5%를 선택하였다. 콘크리트의 건조수축 변형률은 양생온도가 낮을수록 모세관 수 및 겔 공극수의 증발지연으로 인해 감소하는 경향을 보였다. 반면 크리프 변형률은 전이온도 크리프의 발생으로 인하여 초기 양생온도가 낮은 실험체에서 높았다. 콘크리트 구조설계기준(KCI) 예측모델은 ACI 209 예측모델에 비해 실험결과와 잘 일치하였지만 개발된 저열 시멘트에 대한 보정계수의 제안이 필요하였다.

키워드 : 비구속 건조수축, 크리프, 매스콘크리트, 설계기준, 저열 시멘트

Acknowledgement

This work was supported by the Nuclear Power

Core Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. 20131520100750).

Kimoondang Publishing Company; 2001, 932 p..

References

1. Gao PW, Lu X, Lin H, Li XY, Hou J. Effects of Fly Ash on the Properties of Environmentally Friendly Dam Concrete. *Fuel*, 2007 May;86(7):1208–1211
2. Tang SW, Cai XH, He Z, Shao HY, Li ZJ, Chen E. Hydration Process of Fly Ash Blended Cement Pastes by Impedance Measurement. *Construction and Building Materials*, 2016 June;113(15):939–950.
3. Langan BW, Weng K, Ward MA. Effect of Silica Fume and Fly Ash on Heat of Hydration of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 2002 July;32(7):1045–1051.
4. Menéndez G, Bonavetti VL, Irassar EF. Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast–Furnace Slag. *Cement and Concrete Composites*, 2003 January;25(1):57–63.
5. Aashay A, Gaurav S, Narayanan N. Ternary Blends Containing Slag and Intergrround/Blended Limestone: Hydration, Strength, and Pore Structure. *Construction and Building Materials*, 2016 January;102(15):113–124.
6. ACI Committee 207, Guide to Mass Concrete (ACI 207.1R–05). Michigan: American Concrete Institute; 2005. 30 p.
7. Korea Concrete Institute. Mass Concrete Thermal Crack Control. Seoul: Kimoondang Publishing Company; 2010. 166 p.
8. Kim SJ, Yang KH, Moon GD. Hydration Characteristics of Low–Heat Cement Substitute by Fly Ash and Limestone Powder. *Materials*, 2015 September; 8(9):5847–586,1
9. Korea Concrete Institute. Concrete Structure Code. Seoul: Kimoondang Publishing Company; 2012. 342 p.
10. ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures: Reapproved 2008(209R–92). Michigan: American Concrete Institute; 1992. 47 p.
11. ASTM C 150/C150M–16. Standard Specification for Portland Cement. Pennsylvania: ASTM International; 2016. 10 p.
12. KSA. Korea Industrial Standard. Seoul: Korean Standards Service Network; 2015. 1768 p.
13. Korea Concrete Institute. New Concrete Engineering. Seoul: