

초기재령 콘크리트의 역학적 특성 및 온·습도 거동 특성 분석

Mechanical Behavior and Characteristics of Internal Temperature and Relative Humidity of Concrete at Early Age

박철우¹⁾ 이봉학^{2)*} 홍성기³⁾
Park, Cheol Woo Lee, Bong Hak Hong, Seung Ki

Abstract

This study is to analyze the internal temperature and relative humidity of concrete at early age, as well as the mechanical behavior. Three different levels of cement unit content were considered as an experimental variable. In order to measure internal temperature and relative humidity immediately after concrete placement, this study developed a unique measuring device, which provided reliable results. Different cement content did not significantly affected the strengths including compressive, tensile and flexural strength and after 7 days of curing, strengths did not increase noticeably. Internal temperature reached the maximum about 11 hours later the placement and decreased after removal of forms. The internal temperature varied depending on the location and the exposure condition. In addition, the internal relative humidity was more affected by the exposure condition rather than the cement content.

Keywords : Early age, Concrete, Mechanical behavior, Internal temperature, Relative humidity

1. 서론

대형 콘크리트 구조물의 타설 직후 초기 재령 관리 부재는 균열 등의 장기공용기간 동안 발생할 수 있는 많은 문제점을 야기할 수 있다. 콘크리트 구조물의 역학적 및 내구적 특성은 시공환경, 재료조건, 설계조건, 시공 직후 온·습도 조건 등의 외부환경에 의해 크게 좌우된다. 특히, 타설 직후 초기 재령 시 콘크리트 내부의 온도 및 습도의 분포와 변화는 콘크리트 내부의 부등 응력을 유발하게 되며, 발생한 응력의 크기가 콘크리트 인장응력을 초과하게 된다면 콘크리트에 균열이 발생하게 되고, 구조물의 내구성 및 장기공용성 손실에 주된 영향을 미치는 것으로 조사되고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

이러한 역학적 거동은 일반적인 시공 환경에서는 큰 문제를 일으키지 않을 수 있으나 일교차가 큰 경우 또는 혹서기와 같이 높은 외부 온도변화와 증발조건을 가지는 환경조건에 노출된다면 콘크리트의 균열발생 등의 문제를 야기할 가능성이 더욱 증대된다. 또한 콘크리트 포장구조

물과 같은 경우 스포링(spalling)현상, 줄눈부 파손 및 균열부 재료의 이탈 등과 같은 구조체의 파손을 야기할 수 있으며, 그에 따른 공용수명의 단축과 유지보수 및 보강 비용이 발생된다. 이를 제어하기 위해서는 초기재령 시 콘크리트의 거동을 정확히 측정, 분석할 수 있는 측정기법이 또한 요구되고 있지만, 현재 이러한 특성을 분석하기 위해 범용적으로 활용가능한 장비가 부족할 실정이다.

본 연구에서는 이러한 초기재령의 거동을 분석하는 기초 연구의 일환으로서, 콘크리트 초기재령시의 역학적 특성을 분석하고 수화반응 및 발열반응으로 인한 콘크리트 내부에서 발생하는 온도 및 상대습도의 변화에 대한 분석을 실시하고자 하였다. 이를 위하여 콘크리트의 초기 역학적 특성을 분석하고 또한 타설 직후부터 콘크리트 내부의 온도 및 상대습도의 변화를 분석하고자 하였다. 또한 초기재령의 온도 및 상대습도변화를 계측하기 위하여 새로운 계측시스템을 개발하여 활용하였다.

이 연구를 통하여 도출되어진 결과물은 콘크리트 초기 재령 거동을 정량적으로 분석할 수 있는 기초자료를 제시

1) 정희원, 강원대학교 공학대학 토목공학과 교수
2) 정희원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수
3) 정희원, 삼보기술단 구조부 대리

* Corresponding author : bonghak@kangwon.ac.kr 010-5367-9980

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

함으로써 사회기반시설에서 중요한 부분을 차지하는 대형 콘크리트 구조물, 도로포장 및 고성능 콘크리트 구조물의 품질 및 내구성 그리고 장기공용성 증진에 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

2. 온습도 계측 시스템의 개발

기존의 온도 및 습도 계측 시스템의 경우 온도와 습도를 별개로 계측하여 콘크리트 내부의 동일한 위치에서 측정할 수 없는 한계가 있었다. 또한 내부 상대습도 측정의 어려움으로 인하여 다양한 부위에 계측이 가능한 센서가 전무한 상황이었다⁽¹⁾. 따라서 이 연구에서는 콘크리트 구조물의 초기재령의 다양한 부위에 대하여 신뢰성 있는 온도 및 습도 데이터를 편리하며 신속하게 계측할 수 있는 계측시스템을 개발하고자 하였다.

콘크리트 내부 및 외부에 대하여 신뢰성 있는 온도 및 습도 데이터 계측을 위하여 Fig. 1(a)와 같이 S사에서 개발된 고정밀 디지털 온습도센서를 활용하였다. 사용한 센서는 수분과 직접적으로 접촉할 경우 부식 등의 손상이 발생할 수 있으므로 이를 보호하기 위하여 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 보호용 소켓을 활용하였다. 이때 보호소켓은 콘크리트 내부에 즉각적인 수화열 거동 측정을 위하여 비철금속 중 열전도율이 가장 높은 구리관을 활용하였다. 센서가 수분과 직접적인 접촉이 발생할 경우, 부식 등의 손상이 발생할 수 있어 이를 보호하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 수증기는 통과시키나 액체상태의 수분은 차단할 수 있는 특수섬유를 활용하였다⁽⁶⁻⁷⁾.

개발된 센서를 활용하기 위하여 Fig. 2와 같이 총 15개 채널을 동시에 계측할 수 있도록 데이터로거를 제작하고 이의 활용프로그램을 Visual basic 언어를 활용하여 함께 개발하였다. Fig. 2(b)는 컴퓨터에서 나타나는 화면을 보여주고 있다.

개발된 온습도계측시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여

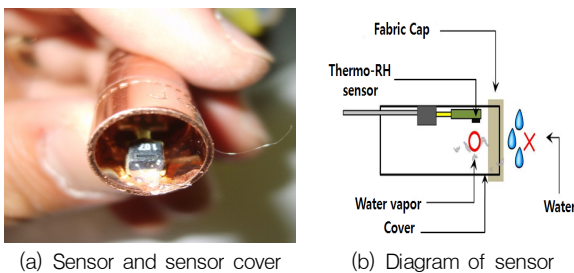
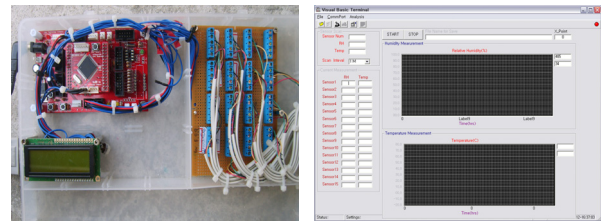


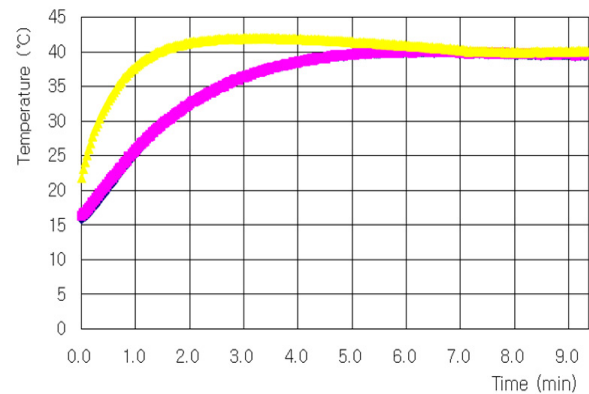
Fig. 1 Diagram of sensor and sensor cover

대기온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 및 상대습도 $50 \pm 2\%$ 의 항온항습실에서 일반적으로 예비계측을 실시하였다. Fig. 3(a)는 일반적으로 많이 사용되는 thermocouple과 비교 실험한 결과로서, 개발된 온습도 센서의 경우 보호소켓의 영향으로 인하여 온도증가율이 다소 늦어졌지만 약 6분경과 후 동일한 온도가 계측됨을 확인할 수 있었다. 이러한 수준의 온도 균형 속도를 고려할 때, 보호소켓의 영향으로 인한 온도변화 계측의 정확도는 무시할 수 있을 것으로 판단되었다.

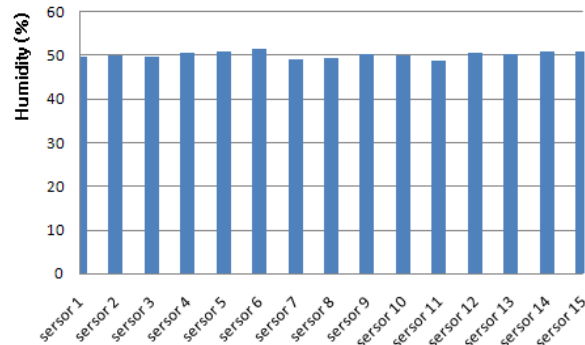


(a) Data logger (b) Application S/W

Fig. 2 Developed data logger and S/W



(a) Measured temperature



(b) Measure relative humidity

Fig. 3 Verification of temperature and relative humidity data measured by developed system

상대습도의 경우 15개의 센서로 동시에 측정을 실시한 결과, Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 센서별 최대 계측오차가 $\pm 1.68\%$ 로 높은 신뢰성을 나타내었다. 이러한 예비 계측을 통하여, 개발된 온습도 계측시스템은 공학적인 신뢰성을 충분히 제공할 수 있는 것으로 검증되었다.

3. 재료 및 실험방법

이 연구에서는 초기재령 콘크리트의 거동을 분석하는 기초 연구의 일환으로서, 콘크리트 초기재령시의 역학적 특성을 분석하고 수화반응 및 발열반응으로 인한 콘크리트 내부의 온도 및 상대습도의 변화에 대한 분석을 실시하고자 하였다.

3.1 실험재료

연구에서 고려한 실험변수는 단위시멘트량을 기준으로 하였으며, 이는 다음의 Table 1에 배합기준을 나타내었다. 기준이 되는 Control배합은 현재 한국도로공사에서 제시한 시멘트콘크리트 포장배합에 해당하는 배합(단위시멘트량 326kg/m^3)을 사용하였으며, 단위시멘트량을 각각 375kg/m^3 및 400kg/m^3 으로 증가시킨 배합을 고려하였다. 이는 시멘트콘크리트 포장의 고성능 및 장수명화를 위해 제시한 유럽형 포장에 대한 배합이다⁽⁸⁻⁹⁾.

시멘트는 강원도 삼척 지역에서 생산되는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 콘크리트 배합에 사용된 골재의 비중은 KS F 2504, KS F 2505을 통하여 결정하였으며 각각 잔골재 2.61, 굵은골재 2.75를 나타내었다.

3.2 역학적 기초특성

콘크리트의 초기 재령에서 기초적인 역학적 특성을 분석하기 위하여 양생기간의 증가에 따라 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 휨강도를 측정하였다.

3.2.1 압축강도 및 탄성계수

콘크리트의 압축 강도 시험방법(KS F 2405)에 따라 각 배합별 초기 물성 분석을 측정하기 위하여 KS F 2403에 따라 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주형 시험체를 제작하여 기건 양생을 통하여 양생하였다. 각 배합별 초기 재령의 강도 및 탄성계수의 변화를 계측하기 위하여 양생 기간이 12hr, 18hr, 24hr, 2day, 3day, 7day, 14day, 28day일 때에 대한 압축강도 시험을 실시하였으며, 이때 최소 3개 이상의 시험편에 대하여 실험을 수행하였다. 동시에 콘크리트 변형률 게이지를 시험체의 표면에 부착하여 배합별 양생기간에 따른 탄성계수를 측정하였다.

3.2.2 인장강도

콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법(KS F 2423)에 따라 시험을 실시하였으며, 시험체는 동일한 원주형 시험체를 활용하였다. 시험은 압축강도 및 탄성계수 측정 시험과 동일한 재령에서 진행하였으며 각각의 재령 시 최소 3개 이상의 시험편에 대하여 실험을 실시하였다.

3.2.3 휨강도

콘크리트의 휨 강도 시험방법(KS F 2408)에 따라 시험을 실시하였으며, 시험체는 KS F 2403에 따라 표준시험체인 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 의 각주형 시험체를 제작하여 양생기간 3day, 7day, 28day에 대하여 휨강도를 측정하였다. 각각의 재령에서 최소 3개의 시험편에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 배합별 역학적 기초 특성을 분석하기 위한 각 실험방법에 따른 실험 전경을 나타내고 있다.

3.3 온도 및 상대습도의 변화 특성

콘크리트 내부에서 시멘트의 수화반응에 따라 발생하는 온도 및 상대습도의 변화 특성을 분석하기 위하여 높이 20cm, 폭 50cm 및 길이 70cm의 시험체(Fig. 5 참조)를 제작하였으며, 연구를 통하여 개발된 온습도 계측 센서를 활용하여 초기재령에서의 콘크리트 내부에서 발

Table 1 Experimental variables and mix design

Specimens	Dmax(mm)	Slump(mm)	Air(%)	W/C	S/a(%)	Unit content (kgf/m ³)				
						W	C	F.A.	C.A.	AEA
Control	25	40	5 \pm 1	0.45	38	147	326	692	1122	0.01%
C-375				0.40	34	150	375	596	1204	0.02%
C-400				0.40	34	160	400	587	1205	0.01%



(a) Compressive strength and elastic modulus (b) Tensile strength (c) Flexural strength

Fig. 4 Experiments for mechanical characteristics

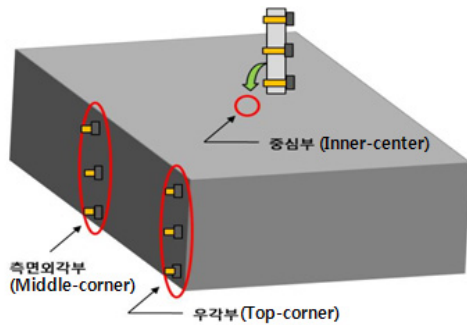


Fig. 5 Locations of embedded temperature and humidity sensors

생하는 온도 및 습도의 변화를 측정하였다. 개발된 온도 습도 측정센서를 Fig. 5와 같이 시험체의 우각부, 측면외각부 및 중심부에 시험체 윗표면으로부터 2cm, 10cm, 18cm에 해당하는 상부, 중부, 하부 지점에 매설하여 양생기간에 따른 거동을 측정 분석하였다.

이때 중심부의 센서 매립을 위하여 아크릴판에 센서를 상부, 중부, 하부별로 부착시켜 매립하였다.



Fig. 6 View of experiments

제작된 시험체는 온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $50 \pm 2\%$ 의 항온항습실에 거치되어 실험을 진행하였다. 이때 거푸집의 탈형은 시험체를 타설한 후 24시간 이후에 실시하였으며, 온습도 측정은 타설 직후부터 10분 간격으로 실시하였다.

Fig. 6은 온도 및 상대습도의 변화 특성분석을 위한 전체적인 실험전경을 나타내고 있다. 이때 각각의 시험체 바닥에는 비닐재질의 계면지를 활용하여 시험체 바닥에서 발생하는 마찰을 최소화하고자 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 역학적 기초 특성분석

역학적 기초특성을 분석하기 위하여 실시한 압축강도 탄성계수, 인장강도 및 휨강도의 실험결과는 다음의 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Test results of mechanical performance of specimens

Strength	Age (day)	0.5	0.75	1	2	3	7	14	28
	Specimen								
Comp. (MPa)	Control	5.46	7.48	8.40	17.34	20.94	35.50	33.66	31.27
	C-375	9.51	13.83	16.96	24.80	26.19	33.50	33.34	34.05
	C-400	7.35	11.41	10.77	18.20	20.53	30.10	33.50	36.64
E (GPa)	Control	0.50	2.02	4.75	9.96	11.28	14.26	16.49	14.61
	C-375	4.13	9.48	9.45	10.00	13.22	16.80	19.57	18.97
	C-400	2.55	7.60	11.71	11.92	14.00	18.40	19.70	23.60
Tensile (MPa)	Control	0.60	1.05	1.48	1.85	2.34	2.38	2.48	3.10
	C-375	1.13	1.59	1.78	2.25	2.64	2.77	2.99	2.82
	C-400	0.80	1.23	1.33	2.26	2.07	3.01	2.81	3.18
Flexural (MPa)	Control	-	-	-	-	5.32	5.04	-	6.17
	C-375	-	-	-	-	4.95	5.06	-	6.01
	C-400	-	-	-	-	5.00	5.04	-	6.21

4.1.1 압축강도 및 탄성계수 특성

Fig. 7은 재령별 압축강도 거동 결과를 변수별로 비교하고 있다. 세 가지 변수의 시험체 모두 재령 28일에서 30MPa 이상의 충분한 강도를 발현하였으며, 단위시멘트량에 따라 높은 강도를 나타내었다. 하지만 재령 7일 이전에서는 단위시멘트량이 가장 높은 C-400변수의 강도가 나머지 변수들에 비하여 다소 낮은 것으로 나타났다. C-375의 경우 초기재령에서도 단위시멘트량이 325kg/m³의 Control 시험체 보다 높은 압축강도를 나타내었다. 하지만 전반적으로 변수별 단위시멘트량에 따른 압축강도 발현에는 크게 차이가 없는 것으로 판단되는데 이는 제작된 시험체들이 온도25±1℃ 및 상대습도 50±3%로 조절되는 항온항습실의 조건에서 양생되어 상대적으로 양호한 강도발현을 하였을 것으로 판단된다. 또한 재령 7일의 강도가 재령 28일에서의 강도와 비교할 때 크게 차이가 나지 않아 조절된 양생조건이 비교적 초기의 강도발현에 긍정적인 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

또한 C-400의 경우 시험체 제작 또는 강도실험 상의 실험오차가 다소 발생하였을 것으로 추정된다. Fig. 8은 측정된 탄성계수를 비교하고 있다.

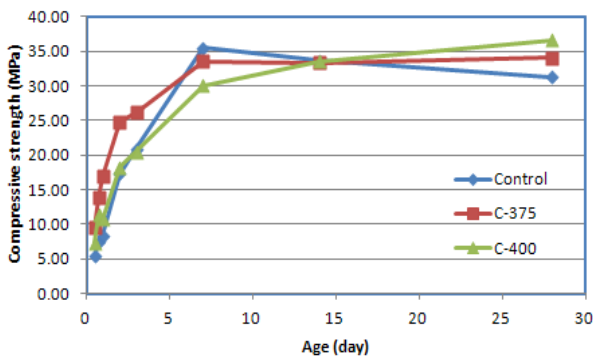


Fig. 7 Comparison of compressive strength

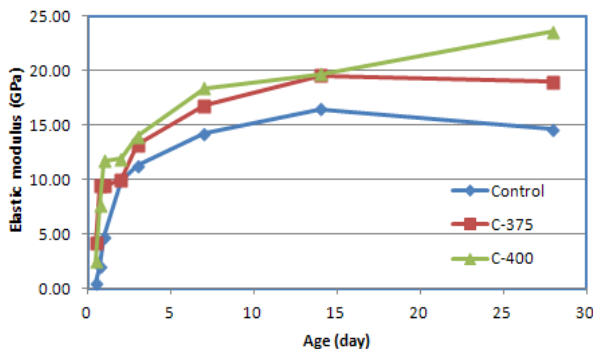


Fig. 8 Comparison of elastic modulus

압축강도에서와 달리 탄성계수의 경우에는 단위시멘트량의 증가에 따라 탄성계수도 함께 증가하는 양상을 나타내었다. 배합별 탄성계수 측정 결과 재령 3일인 경우 C-400 배합에서 14GPa로 가장 높게 측정되었으며, 재령 28일의 경우에서도 C-400에서 23.6GPa로 가장 높게 측정되었다. 압축강도와 마찬가지로 재령 7일 이후 탄성계수도 크게 증가하지 않았으며, 재령 28일에서 Control 시험체의 경우 다소 낮은 탄성계수를 나타내었으나 단위시멘트량이 증가함에 따라 약 20GPa 이상의 일반적인 콘크리트의 수준으로 측정되었다.

4.1.2 인장강도 특성

Fig. 9는 재령별 인장강도 측정결과를 변수별로 비교하고 있다. 재령 3일인 경우 C-375 배합에서 2.6MPa로 강도 발현이 가장 빠른 것으로 나타났으며, 재령 28일의 경우 C-400 배합에서 3.2MPa로 가장 높은 강도가 발현되었다. 그러나 각 변수별 인장강도는 압축강도의 약 1/10수준으로 일반적인 범위를 나타내었으며, 변수별 차이가 0.5MPa 이하로 측정되어 단위시멘트량 증가에 따른 인장강도 증진은 미미한 것으로 나타났다.

초기재령의 균열발생에 가장 중요한 영향을 미치는 재령 1일 이전의 강도는 약 1.5MPa 이하의 작은 값을 나타내었으며, Control 변수의 경우 다른 변수에 비하여 다소 낮은 값을 나타내었다. 인장강도의 발현도 압축강도와 마찬가지로 재령 7일 이후에는 크게 변화하지 않은 것을 알 수 있다.

4.1.3 휨강도 특성

Fig. 10은 재령별 휨강도 측정결과를 변수별로 비교하고 있다. 휨강도는 한국도로공사의 시멘트콘크리트 도로

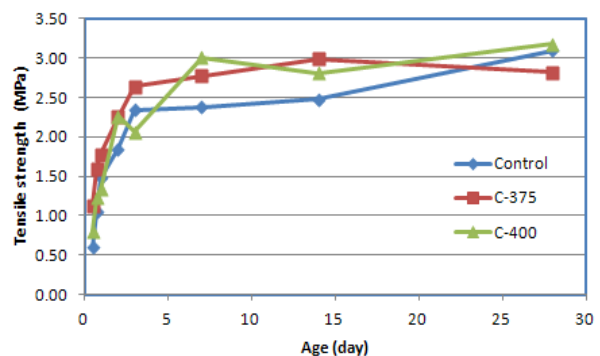


Fig. 9 Comparison of tensile strength

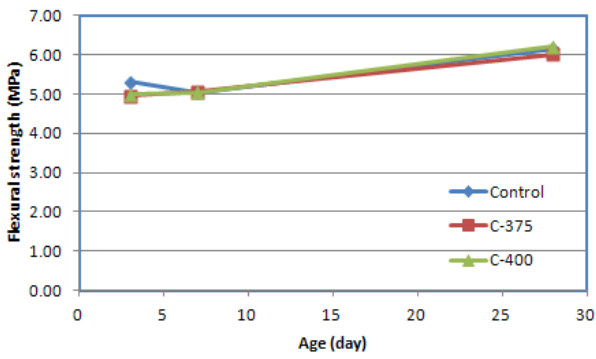


Fig. 10 Comparison of flexural strength

포장의 요구기준에서 요구하는 재령 28일의 4.5MPa를 모두 만족하는 것으로 나타났다⁽¹⁰⁾. 휨강도의 경우에서도 재령 3일의 값이 재령 28일 강도의 약 82%가 발휘되어

초기재령의 균열에 영향을 미치는 인장 및 휨강도의 발현은 3일 이전에 비교적 많이 발현되는 것으로 분석되었다. 또한 각 배합 당 인장강도가 거의 동일하게 측정되어 단위시멘트량 증가에 따른 휨강도 증진은 매우 미미한 것으로 나타났다.

4.2 콘크리트 온도거동 특성 분석

대기온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $50 \pm 2\%$ 의 항온항습실 내부에 타설된 콘크리트 시험체에 대하여 개발된 센서를 활용하여 초기양생에 따른 내부 온도 거동 분석을 실시한 결과를 Figs. 11에서 13에 나타내었다. 그림에서는 온습도 센서가 매립된 위치인 우각부, 측면외각부 및 중심부에 대한 시간에 따른 온도 측정결과를 나타내고 있다.

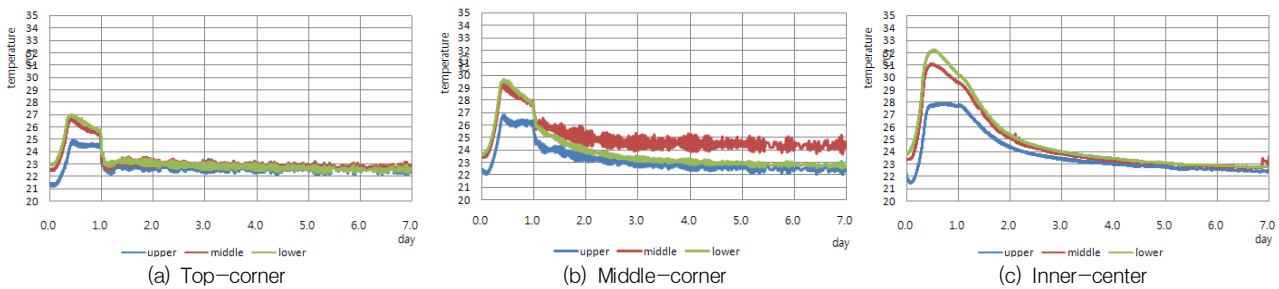


Fig. 11 Measured concrete inner temperature : Control

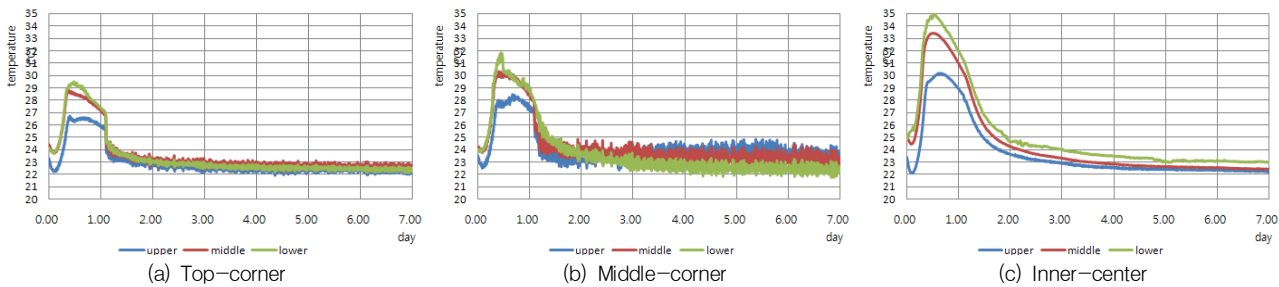


Fig. 12 Measured concrete inner temperature : C-375

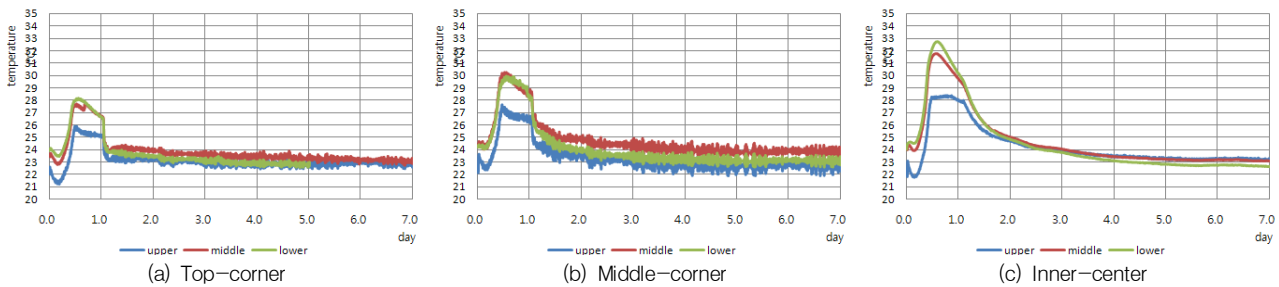


Fig. 13 Measured concrete inner temperature : C-400

내부 온도거동 분석 결과, 각 측정위치에서 공기 중에 노출되는 상부에서 가장 낮은 온도상승이 측정되었으며, 시험체 바닥은 나무거푸집의 재질에 접하고 있어 이의 보온효과에 의하여 하부에서 가장 높은 온도가 측정되었다. 또한 노출면이 가장 많은 우각부에서 내부온도 상승이 가장 낮았으며 노출면이 적은 중심부에서 온도의 상승이 가장 높았다. 각 부위별 최고 온도는 타설 후 약 11시간 정도 경과 시에 발생되었으며 이후 점차 온도가 낮아지다가 양생 1일 경과 후 거푸집 탈형 시 온도가 하강하기 시작했다. 특히 우각부의 경우, 거푸집 탈형과 동시에 급격히 감소하여 대기온도와 같아졌고, 측면외각부의 경우 약 2°C 정도 급격한 하강 이후 서서히 낮아져서 양생 2~3일 이후 대기온도와 같아졌다. 또한 중심부의 경우 탈형 이후 온도 감소 구배가 조금 증가하여 서서히 낮아

지다가 양생 5일 정도에 대기온도에 수렴하는 결과를 나타내었다.

이러한 결과로부터 콘크리트 구조물의 위치 및 노출조건에 따라 온도의 변화가 굉장히 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 과도한 온도차이가 발생할 수 있는 조건에서 콘크리트를 타설할 경우, 콘크리트 내부의 급격한 온도 차이는 균열을 유발할 수 있으므로, 초기균열 거동이 장기공용성에 특히 많은 영향을 미치는 대형 및 고성능콘크리트 구조물에 있어 외부의 온도 및 노출조건을 반드시 중요하게 고려하여야 할 것이다. 또한 실제 현장에서 거푸집제거 시기는 콘크리트 내의 급격한 온도변화를 초래하지 않도록 정량적 기준 하에서 주의하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

Figs. 14에서 16에는 각각의 위치에서 측정된 최고온

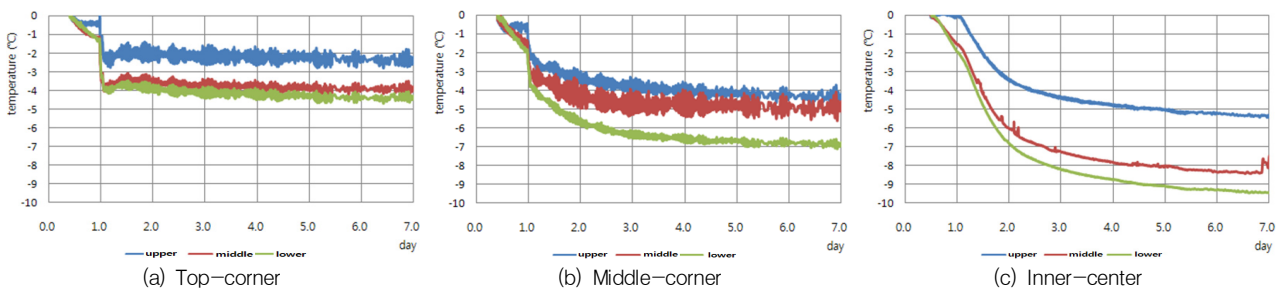


Fig. 14 Temperature drop after final setting : Control

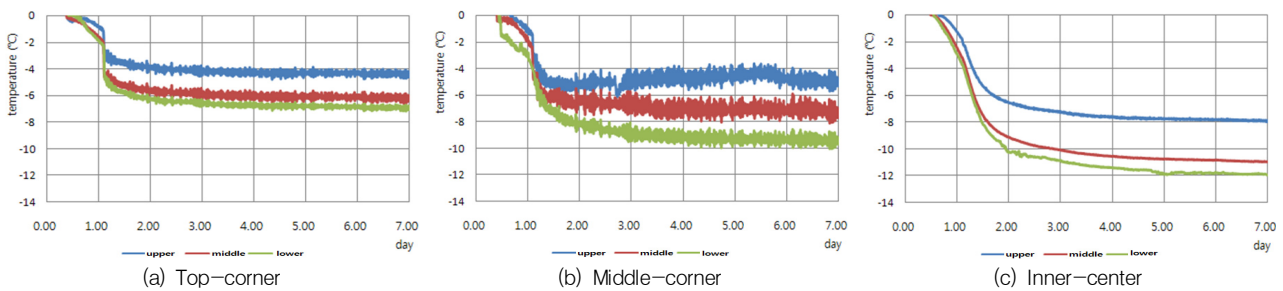


Fig. 15 Temperature drop after final setting : C-375

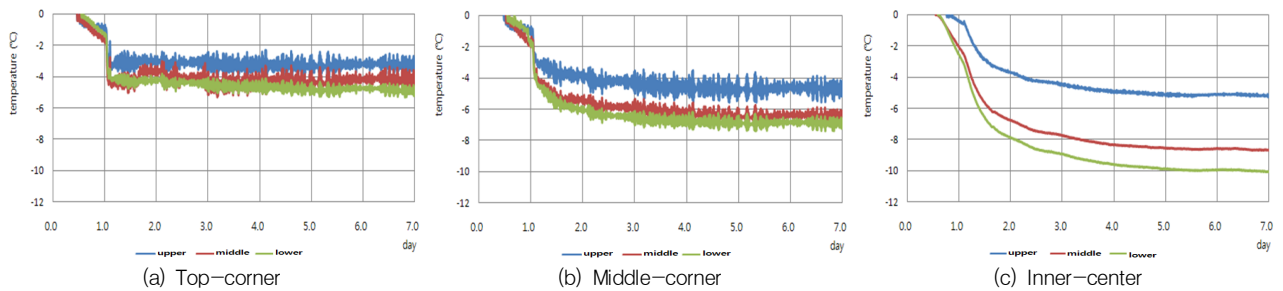


Fig. 16 Temperature drop after final setting : C-400

도 이후 감소하는 온도의 크기를 시간과의 함수로 나타내었다.

Control 시험체의 경우, 우각부에서 측정된 최고온도 발생시간을 기준으로 위치별 하강온도는 상부의 경우 약 2.5°C, 중부의 경우 약 4°C, 하부의 경우 4.5°C로 측정되었다. 측면외각부에서는 상부 약 4.5°C, 중부 약 5°C, 하부 7°C로 측정되었다. 또한 동일한 시간을 기준으로 상부에서는 약 5.5°C, 중부 약 8.5°C, 하부에서는 약 9.5°C 하강하는 것으로 나타났다. 결과로부터 외부와의 노출이 가장 큰 우각부에서 가장 낮은 온도 차이를 나타내었으며, 중심부에서 가장 큰 온도 차이는 나타내었다. 또한 각 위치에서는 상부, 중부, 하부 순서로 온도차이가 증가하였다. 이는 우각부의 경우 노출조건에 따라 최고온도가 낮았으므로 그 차이가 크지 않았으며 또한 거푸집의 탈형과 함께 대기온도와 급격히 평형을 이루었다. 한편 중심부에서는 최고온도와의 차이가 가장 크게 나타났으나, 최고온도 차이가 나타나는 시점은 가장 길었다. 일반적으로 시간에 따른 온도의 차이가 크면 클수록 온도의 부등분포로 인하여 균열발생의 확률이 증가하나 차이가 발생하는 시간이 길어짐에 따라, 즉 재령이 증가함에 따라 균열에 저항하는 콘크리트의 강도가 증가하므로 시험체의 경우 거푸집 탈형과 함께 가장 짧은 시간 변화에 가장 큰 온도의 변화가 발생하고 동시에 강도도 제일 낮은 경우이므로 우각부에서 균열발생 확률이 더 높은 것으로 판단된다. 또한 이러한 균열 발생에 영향을 미치는 또 다른 중요한 요소는 습도의 변화이므로 온도와 습도의 변화 그리고 이에 따른 수축거동과 강도발현 등의 여러 가지 요소를 동시에 고려하여야 초기재령 콘크리트에서의 균열발생확률을 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

C-375 및 C-400 시험체에서도 비슷한 양상의 변화가 나타났으며, 단위시멘트량이 증가할수록 하강온도의 크기가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이는 단위시멘트량의 상승으로 인하여 발생하는 최고온도의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만, 콘크리트 내부의 온도가 대기온도와 평형을 이루는데 까지 걸린 시간은 단위시멘트량에 따라 크게 다르지 않는 것으로 분석되었다.

4.3 콘크리트 습도거동 특성 분석

Figs. 17에서 19에는 항온항습실 내부에서 타설 후 양생된 콘크리트 시험체의 습도변화 측정결과를 재령에 따

라 나타내었다. 이 연구에서 개발된 센서를 사용하였을 타설 이후에는 100%의 결과를 나타내지 못하다가 일정 시간이 지난 후부터 100%의 상대습도 값을 나타냈었다. 이는 타설된 콘크리트의 수분이 개발된 온습도센서의 보호소켓의 특수섬유를 통과하는데 걸린 시간으로 판단된다. 이후 약 100%의 상대습도가 거푸집을 탈형하기 전까지 지속되다가 이후부터 상대습도가 감소하기 시작하는 것으로 나타났다.

온습도센서의 위치에 상관없이 재령이 증가함에 따라 상부, 중부, 하부 순으로 습도가 감소하였다. Control 시험체의 가장 노출조건이 많은 우각부 상부에서 거푸집 제거 후 순간적으로 습도의 감소가 발생하였으나 이후 점차적으로 주위의 습도와 평형을 이루어 나갔다. 단위시멘트량이 증가한 C-375 시험체에서도 비슷한 현상이 관찰되었지만 감소하는 상대습도의 양은 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, C-400 시험체에서는 우각부 상부에서도 이러한 현상이 나타나지 않았다. 이러한 결과로부터 노출조건이 습도의 변화에 많은 영향을 끼칠 수 있는 경우, 단위시멘트량이 작을수록 콘크리트 내부의 습도 변화가 증가할 수 있음을 확인하였다. 노출면이 많은 우각부를 제외한 센서의 위치에서는 단위시멘트량에 따른 콘크리트 내부의 상대습도의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 초기재령에서 콘크리트 내부의 상대습도의 변화는 수화반응에 영향을 미치는 단위시멘트량보다는 외부에 노출된 상태가 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

타설 후 재령 7일까지 중심부에서는 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $50 \pm 2\%$ 의 노출환경에서 콘크리트 표면으로부터 2cm 아래 내부에서 상대습도의 변화가 거의 일어나지 않아 수화반응을 위한 충분한 수분의 공급이 가능한 것으로 분석되었다. 하지만 노출면이 많은 우각부의 상부에서는 재령 2일째 약 95%로 감소하고 재령 7일에서 약 80%이하로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 내부 상대습도가 감소하고 이때 발생하는 수축은 콘크리트구조물의 구속 정도에 따라 인장응력을 유발할 수 있어, 이때의 온도거동 및 응력수준에 따라 균열발생 위험을 초래할 수 있으므로 유의하여야한다. 특히 도로포장 등의 단위체적당 대기 중으로 노출되는 면이 많은 부분을 차지하는 구조물에서 줄눈시공면 등의 우각부에서는 초기재령에서 상대습도의 손실이 많으므로 균열의 발생이 더욱 높아져 이러한 부분에 균열발생을 방지하기 위하여 시공 중에 더욱 세심

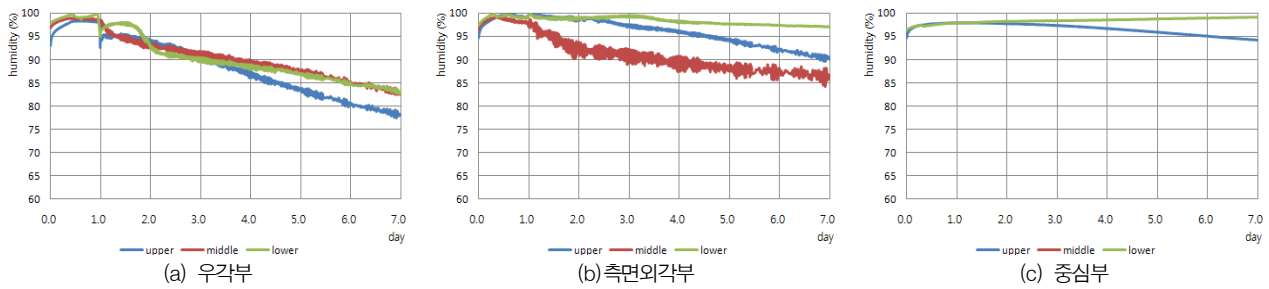


Fig. 17 Measured Inner Concrete Relative Humidity : Control

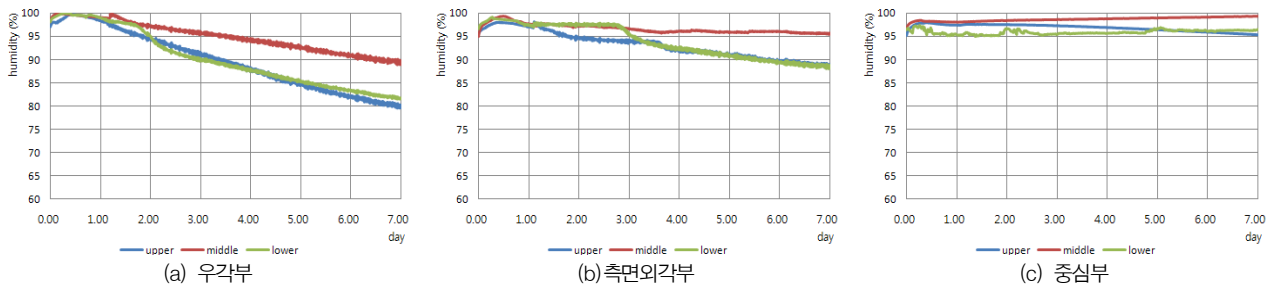


Fig. 18 Measured Inner Concrete Relative Humidity : C-375

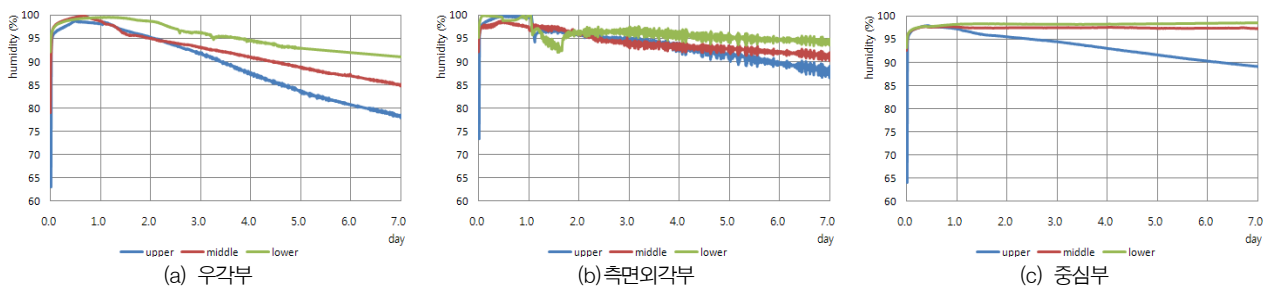


Fig. 19 Measured Inner Concrete Relative Humidity : C-400

한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 콘크리트 초기재령시의 역학적 특성을 분석하고 수화반응 및 발열반응으로 인한 콘크리트 내부에서 발생하는 온도 및 상대습도의 변화에 대한 분석을 실시하고자 하였다. 세 가지의 다른 단위시멘트량을 실험 변수로 하였으며, 타설 직후부터 콘크리트 내부의 온도 및 상대습도의 변화 계속하기 위하여 새로운 계측시스템을 개발하였다. 실험적 연구를 통하여 도출되어진 결론은 다음과 같다.

(1) 콘크리트 내부의 온도변화 및 습윤상태 등을 고려

하여 개발한 매립형 온습도 계측시스템은 타설 직후의 초기재령에서 시간에 따른 온도 및 습도 계측에 있어 공학적으로 충분히 신뢰성 있는 자료를 계측할 수 있는 것으로 판단되었다.

(2) 모든 변수의 시험체에서 재령 28일 강도가 30MPa 이상이었으며, 하지만 단위시멘트량이 증가함에 따라 압축강도의 발현에는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 재령 7일의 강도가 재령 28일에서의 강도와 비교할 때 크게 차이가 나지 않아 조절된 양생조건이 비교적 초기의 강도발현에 긍정적인 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

(3) 탄성계수는 단위시멘트량의 증가에 따라 함께 증가하는 양상을 나타내었다. 압축강도와 마찬가지로 재령 7일 이후 탄성계수도 크게 증가하지 않았다.

- (4) 단위시멘트량 증가에 따른 인장강도 증진은 미미한 것으로 나타났다. 휨강도의 경우, 재령 28일에서 4.5MPa 기준 이상의 값을 나타내었으며, 재령 3일에서 28일 휨강도의 약 82%가 발휘되어 초기 재령의 균열에 영향을 미치는 인장 및 휨강도의 발현은 3일 이전에 비교적 많이 발현되는 것으로 분석되었으며 단위시멘트량 증가에 따른 휨강도 증진은 매우 미미한 것으로 나타났다.
- (5) 내부 온도거동 분석 결과, 각 측정부위별 최고 온도는 타설 후 약 11시간 정도 경과 시에 발생되었으며 이후 점차 온도가 낮아지다가 양생 1일 경과 후 거푸집 탈형 이후부터 온도가 하강하기 시작했다. 각 측정부위별, 온도감소 분석 결과, 콘크리트 구조물의 위치 및 노출조건에 따라 온도의 변화가 굉장히 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- (6) 우각부 및 중심부에서는 최고온도 이후 감소하는 온도의 크기나 시간이 다르게 나타났다. 하지만 재령의 증가에 따라 강도도 증가하므로 낮은 재령에 온도의 변화가 크고 동시에 강도도 낮은 경우에 해당하는 구조물의 우각부 등에는 거푸집 제거 등에 있어 특별한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 콘크리트 내부의 온도가 대기온도와 평형을 이루는데 까지 걸린 시간은 단위시멘트량에 따라 크게 다르지 않는 것으로 분석되었다.
- (7) 개발된 온습도센서를 활용하여 콘크리트 내부의 상대습도를 측정할 결과, 거푸집을 탈형하기 전까지는 약 100%의 상대습도가 지속되다가 이후부터 상대습도가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 노출조건이 습도의 변화에 많은 영향을 끼칠 수 있는 경우, 단위시멘트량이 작을수록 콘크리트 내부의 습도 변화가 증가할 수 있음을 확인하였다. 또한

초기재령에서 콘크리트 내부의 상대습도의 변화는 수화반응에 영향을 미치는 단위시멘트량보다는 외부에 노출된 상태가 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 정진훈, "타설 직후 건조하는 콘크리트의 표면습도 모형", 한국도로학회 논문집, vol. 7, No. 3, 2005, pp.23-30.
2. 강수태, 김진근, "초기재령 콘크리트의 시간 의존적인 수분확산계수 예측에 관한 연구", 한국구조물진단학회 논문집, vol. 9, No. 4, 2005, pp.141-148.
3. 김성민, 남정희, "콘크리트 도로 포장의 초기 온도 분포 분석", 한국도로학회 논문집, vol. 7, No. 3, 2005, pp.79-91.
4. 김성민 등, "도로포장 재료의 상대습도 측정에 의한 수분변화 특성 분석 기초 연구", 한국도로학회 논문집, vol. 8, No. 4, 2006, pp.87-99.
5. 김성민 등, "콘크리트 포장의 습도 측정 방법 개발을 위한 기초 실험 연구", 한국도로학회 학술발표회 논문집, 2006, pp.237-242.
6. 윤경구, 박철우, "시멘트콘크리트 포장의 고강도 고내구성을 위한 기초연구: Part I 최적배합에 관한 연구", 한국도로학회 논문집, vol. 11, No. 3, 2009, pp.41-49.
7. 윤경구 등, "시멘트콘크리트 포장의 고강도 고내구성을 위한 기초연구: Part II 최적배합 콘크리트의 강도 및 내구특성 분석", 한국도로학회 논문집, vol. 11, No. 3, 2009, pp.51-60.
8. 한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서, 2009.
9. Grasley, Z. C. and Lange, D. A., "Modeling Drying Shrinkage Stress Gradients in Concrete for Cement, Concrete and Aggregates", Journal of ASTM, vol. 26, No. 2, 2004, 115-122.
10. Grassley, Z. C., "Measuring and Modeling the Time-Dependent Response of Cementitious Materials to Internal Stresses", Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL USA, 2006.

(접수일자 : 2011년 7월 26일)

(수정일자 : 2011년 10월 5일)

(심사완료일자 : 2011년 10월 10일)

요 지

이 연구에서는 콘크리트 초기재령시의 역학적 특성을 분석하고 수화반응 및 발열반응으로 인한 콘크리트 내부에서 발생하는 온도 및 상대습도의 변화에 대한 분석을 실시하고자 하였다. 세 가지의 다른 단위시멘트량을 실험변수로 하였으며, 타설 직후부터 콘크리트 내부의 온도 및 상대습도의 변화 계측하기 위하여 새로운 계측시스템을 개발하였다. 단위시멘트량에 압축, 인장 및 휨강도의 변화는 크지 않았으며, 재령 7일 이후에는 증가가 많지 않았다. 각 측정부위별 최고 온도는 타설 후 약 11시간 정도 경과 시에 발생되었으며 이후 점차 온도가 낮아지다가 양생 1일 경과 후 거푸집 탈형 이후부터 온도가 하강하기 시작했다. 각 측정부위별, 온도감소 분석 결과, 콘크리트 구조물의 위치 및 노출조건에 따라 온도의 변화가 굉장히 다른 것으로 분석되었으며, 초기재령에서 콘크리트 내부의 상대습도의 변화는 수화반응에 영향을 미치는 단위시멘트량 보다는 외부에 노출된 상태가 더 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심 용어 : 초기재령, 콘크리트, 역학적 거동, 내부온도, 상대습도
