

콘크리트 내부의 수분함유량 측정에 관한 실험적연구

박원섭* · 김홍열* · 김형준**

*한국건설기술연구원 · **(주)종합건축사사무소 광일건축

An Experimental Study on Measure to Moisture Contents of Concrete

Park, Won Sup* · Kim, Heung Youl* · Kim, Hyung Jun**

*Korea Institute of Construction Technology, **Kwang Il Architecture Co. Ltd

요 약

The strength capacity properties of concrete are much influenced by water content which has a significant effect on concrete spalling, especially, in high temperature areas. Therefore, the properties of the material's shall be closely examined first by measuring the water content in each material in order to analyze Concrete Fire Characteristics, and a reliable measuring method shall be presented in order to derive the following influence. The method used to measure the water content within concrete is mainly divided into 4 types; ASTM method, Nuclear Magnetic method, Ultrasonic measurement method, Radio Wave method, etc. It is essential to use a reliable measuring method for each experiment. In this experiment, we measured the water content and humidity of concrete by two methods: Relative/Absolute humidity method using VISALA HM44 measuring equipment which is easily measurable compared with other methods regardless of the shape of the experimental model, and a water content measuring experiment using ASTM C 566. If the aggregates are under the condition that their surface is dry but in saturation, there is no change of water content according to concrete curing methods. However if the aggregates are absolutely dry, the water content is significantly changed according to concrete curing methods.

1. 서론

콘크리트의 폭렬현상 원인은 다양한 관점에서 연구가 진행 중이며 최근 연구 동향은 단순한 한 가지 원인이라기보다는 여러 종류의 이론을 동시에 적용하여 적절한 콘크리트

의 거동을 연구하는 추세이다. 콘크리트 구조는 재료적 특성 관점에서는 낮은 열전도율과 비연소성 특성을 갖고 있기 때문에 일반적으로 내화성을 가지고 있다고 판단하지만 구조물의 화재 대응 설계시 구조적 안정성을 판단하는 기준으로는 논리적이지 못한 접근이다. 그 이유는 화재와 같은 급격한 고온 노출 상황에서 콘크리트 표면에서 발생하는 폭렬로 인한 급격한 구조적 성능 저하 요소에 대한 충분한 검토를 간과하고 있으며, 폭렬 현상에 대한 이론적 고찰 및 원인 분석·관련 메커니즘의 이해가 선행되지 않았기 때문이다. 특히 구조적 성능증진 및 특수한 목적과 용도를 달성하기 위해 최근 사용 빈도가 높아진 고강도 콘크리트(HSC)의 경우에는 보통 강도 콘크리트(NSC)에 비해 폭렬현상이 현저하게 유발되는 특성을 내재하고 있기 때문에 구조물 현장 적용시 사전 분석 및 검토가 선행되어야 한다. 본 연구는 폭렬의 여러 요인들 중에서 주요 원인의 하나인 콘크리트 내부의 수분 함유량 측정에 관한 실험적 연구이다.

2. 콘크리트 폭렬 요인과 영향성

다양한 형태의 폭렬 발생 원인에 관한 이론들에서 제시된 것처럼, 폭렬 발생은 한 가지 변수에 의해 지배되는 것이 아닌 매우 복잡적이고 다양한 원인들의 조합에 의해 결정되기 때문에 체계적인 관점에서의 접근이 필요하다. 또한 콘크리트 재료 자체가 불균질한 특성을 갖고 있기 때문에, 동일한 조건, 변수를 가지고 제작한 실험체의 실험에서도 상이한 거동을 보이기 때문에 폭렬 거동 특성을 명확히 규명하기 위해서는 단계적 접근이 필요하다. 그러므로 콘크리트 폭렬 요인들의 영향성 분석을 수행하여 관련 인자들과 폭렬 특성의 상관관계를 고찰하고자 한다. 콘크리트 폭렬 요인은 콘크리트 자체의 재료적 특성인 골재특성, 투수성, 수분 함유량, 물시멘트비, 재령, 실험체 크기 및 인장강도 등이 있으며, 콘크리트 고온 가열시 유발되는 수증기 압력, 공극 압력 등이 있다. 또한 외부 환경에 의한 영향 특성인 하중제하, 가열비, 열팽창 구속 등으로 분류할 수 있다.

2.1 폭렬에 관한 콘크리트 재료의 영향

콘크리트 배합설계의 주요 요소인 물시멘트비에 의해 재료의 수증기압을 유발하는 수분 함유량이 변화하며, 사용골재 및 시멘트에 의해 콘크리트 재료 자체의 열적특성과 재료적 특성(투수성 및 공극율)의 차이가 발생하게 된다. 이러한 차이는 고온에서의 콘크리트 폭렬 현상에 영향을 주는 주요 인자로 작용하기 때문에 사용 재료의 물리적·역학적 특성에 대한 규명이 선행되어야 하며, 폭렬 현상과의 상관성 분석이 필요하다.

2.2 수분 함유량

수분 함유량은 폭렬 현상의 주원인이며, 콘크리트 내부 수분이 많을수록 폭렬이 더 잘 발생하게 되는데, 이는 수분 함유량이 수증기압과 공극압 상승의 직접적인 원인이 되기 때문이다. 콘크리트 내부의 수분은 자유수와 화학적 결합수로 분류할 수 있고, 약 100℃~

150℃까지는 자유수가 주로 증발하므로 자유수가 폭발 현상의 주원인이 되며, 그 이상의 온도에서는 화학적 결합수가 분해되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 자유수에 의한 폭발 메카니즘은 가열로 인해 콘크리트 내부의 자유수가 가열 표면 부위로 이동하게 되며, 온도 상승으로 인한 기화현상을 동반한다. 이러한 현상은 국부적으로 급격한 공극 압력 증가를 발생하게 하여 결국 콘크리트의 박락과 연결 된다. 만약 수분 함유량이 콘크리트 전체 중량의 3% 이내일 경우에는 폭발이 유발되는 수증기압까지는 증가하지 않는다. 그러나, 콘크리트 재령과 배합비에 따라 수분 함유량이 달라질 수 있기 때문에 정확한 수분 함유량을 알기 위해서는 신뢰성 있는 실험이 요구된다.

3. 수분함유량 실험계획

3.1 실험 조건 분석

화재에 노출된 콘크리트의 거동은 골재 특성 · 콘크리트 배합비 · 수분함유량 · 공극압력 · 재하 하중 · 가열 방법 · 최대 열용량 등 다양한 변수에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 이러한 거동을 설명하기 위해선 콘크리트를 구성하고 있는 구성 재료의 특성에 대한 규명이 선행되어야 한다. 콘크리트는 여러 가지 재료들이 혼합되어 있는 비균질 재료이며 사용재료와 배합 특성에 따라 전혀 다른 열특성이 나타나기 때문에, 사용재료에 대한 물리적 · 화학적 특성에 대한 규명과 배합 설계의 일반화를 통해 실험하고자 하는 콘크리트 시편의 재료적 특성을 명확하게 정의하는 것이 선행되어야 한다. 본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201 포틀랜드 시멘트 규정에 적합한 국내산 조강 포틀랜드 시멘트 3종을 사용하였으며, 그에 따른 재료적 특성은 표 1.과 같다.

표 1. 조강 시멘트의 재료적 특성

비중 (g/cm ²)	분말도 (cm ² /g)	응 결(분)		안정도 (%)	압축강도(N/mm ²)				강열감량 (%)	성분(%)		
		초결	종결		1일	3일	7일	28일		MgO	SO ₃	C ₃ A
3.12	4,846	190	300	0.05	176	304	382	461	1.1	3	4.2	9

콘크리트 배합설계에서 설계기준강도는 40MPa로 설정하였고 배합설계는 콘크리트 표준 시방서를 기준으로 하여 시방배합을 실시하였다. 콘크리트 강도는 매 실험마다 배합 조건 및 기호 · 사용재료의 특성에 따라 편차가 크기 때문에 실험을 실시하기 전 시방배합을 통한 공시체 강도의 표준 편차를 산정하여 배합설계를 하여야 한다. 또한 시편 강도에 가장 직접적인 영향을 주는 물시멘트비의 산정을 위해서는 최적 배합강도를 산정한 이후 적절한 관계식 변수 및 계수를 산정하는 작업을 수행하여야 한다.

3.2 ASTM C 566 시험방법

골재 건조를 통해 얻을 수 있는 자유수 함유량의 표준시험방법으로 실험방법의 범위는 공시체 표면의 수분과 골재 공극안 수분을 증발시켜 측정하는 방법이다. 골재의 최소오차 범위는 0.1% 내외로 시편의 중량을 측정해야 하며 가열방법에 따라 수분의 증발 중량이 아닌 미세 중량 손실이 있을 수 있다. 또한 자유수의 함유량과 골재의 흡수율 양은 이론적으로 동일하며 흡수율 실험 방법은 ASTM C 127과 ASTM C 128에 의하고 건조오븐의 온도는 110±5℃이다. 수분 함유량을 결정하는 ASTM 방법의 절차는 무게변화를 토대로 아래 식에 의해 산출한다.

$$Moisture\ Content(\%) = \frac{w - w_d}{w_d} \times 100$$

전기가열로의 온도를 100~110℃로 산정하여 콘크리트 공시체 시편을 건조시킨 후 수분을 증발시켜서 24시간 가열 후의 중량을 측정하여 콘크리트가 함유하고 있는 수분량을 측정하는 것이 ASTM C 566의 방법이다. ASTM 방법은 콘크리트 내부의 자유수 함유량에 대한 측정방법으로 국한되고 가열 공시체 중량대비 0.1% 이내로 중량을 측정하여야 한다.

3.3 VAISALA를 이용한 상대습도 측정

VAISALA를 이용한 상대습도 측정시 반드시 콘크리트 온도와 대기온도는 일치하여야 하며 반대방향 코팅시 시편의 반대 부분에서 시편두께의 40%를 천공하며 두께는 60mm이다. 측정 3일전 천공 후 내부를 공기로 불어 내거나 진공청소기 등을 이용하여 분진을 빨아들여야 한다. 천공 구멍에는 플라스틱 슬리브를 끼우고, 뚜껑을 설치한다. 또한 프루브를 끼운 후 고무마개를 씌운다. 뚜껑을 씌운 후 30분 정도 경과 후에 습도를 측정한다.

표 2. 수분함유량 측정 및 습도 측정 결과

		조강태명시방배합		중량배합(절건)		중량배합(표건)		
		기중	습윤	기중	습윤	기중	습윤	
ASTM 방법	전	3744g	3797g	3753g	3812g	3685g	3785g	
	후	3678g	3699g	3694g	3747g	3618g	3709g	
시간별 중량	24시간	-	-	3694g	3728g	3596g	-	
	48시간	3605g	-	3670g	3715g	3581g	-	
	72시간		3656g		3707g			
습도 측정	전	절대	-	11.7		9.9		10.8
		습도	44.2	16.1		8.1	45.2	
	후	상대		98.5		92.3		96.7
		습도	12.9	15.6		9.3	13.2	

4. 결론

콘크리트의 강도 성능 특성은 수분함유량에 의해 많은 영향을 받는다. 특히 고온영역에서의 콘크리트 폭렬 현상에 현저한 영향을 준다. 따라서, 콘크리트 화재 성상을 분석하기 위해서 수분함유량 측정을 통한 재료적 특성 규명이 선행되어야 하며, 이에 대한 영향을 도출하기 위해서는 신뢰성 있는 계측 방법의 산정을 제시하여야 한다. 콘크리트 내부의 수분함유량 측정 방법은 ASTM 방법과 핵자기 방법, 초음파 측정 방법, 전자과 방법 등이 있으며, 각 실험에 맞는 신뢰성 있는 측정 방법의 적용이 필요하다. 본 실험에서는 실험체 형상에 관계없이 쉽게 계측이 가능하며, 상대적으로 계측방법이 용이한 VISALA HM44 측정기기를 이용한 상대습도 및 절대습도의 계측방법과 ASTM C 566에 의한 수분함유량 측정실험을 병행하여 콘크리트 내부의 수분함유량 및 습도를 측정하였다. 골재상태가 표건일 경우에는 양생방법에 의한 수분함유량 변화는 없는 것으로 판단되며, 절건상태인 경우에는 양생방법에 따라 수분함유량이 크게 변화하는 것으로 표 3.과 같이 나타났다.

- 수분함유량(Moisture Contents) : ASTM C 566
- 절대습도 및 상대습도 계측: VISALA HM 44

표 3. 골재상태 및 양생방법에 따른 수분함유량측정

측정방법	가열시간	40MPa			
		골재상태: 표건		골재상태: 절건	
		기중양생	습윤양생	기중양생	습윤양생
ASTM	수분증발량	140g	142g	83g	125g
	수분함유량	3.74%	3.73%	2.21%	3.4%
HM 44	절대습도	-	11.7%	-	9.9%
	상대습도	-	98.5%	-	92.3%

향후 연구에서 상대습도 측정 방법은 삼방향 코팅(아스팔틱 에멀전) 조건으로 측정하며, 상대습도 평균값이 깊이 60mm 일 때로 가정할 수 있는지를 확인하여야 할 것으로 사료되며 측정 위치별 평균값을 도출하여, 콘크리트 측정 위치에 따른 상대습도 평균값의 일치를 확인하여 수분 분포를 확인해야 한다. 각 깊이는 측정 위치별로 10mm 씩 천공하여 10~140mm까지 측정하는 실험체를 2개씩 제작하여 재령 7일과 28일에 각각 측정하여, 동일 재령에서의 상대습도 평균값과 수분 분포를 도출할 것이며 또 다른 실험체는 재령별로 각 위치를 천공한 후 측정하여 재령에 따른 상대습도 평균값의 깊이를 도출하며 재령 7일, 28일 실험체를 통해 각 위치별 상대습도 평균값을 도출하여 상대습도 변화를 그래프로 변환하여 비교해야 할 것으로 사료된다.

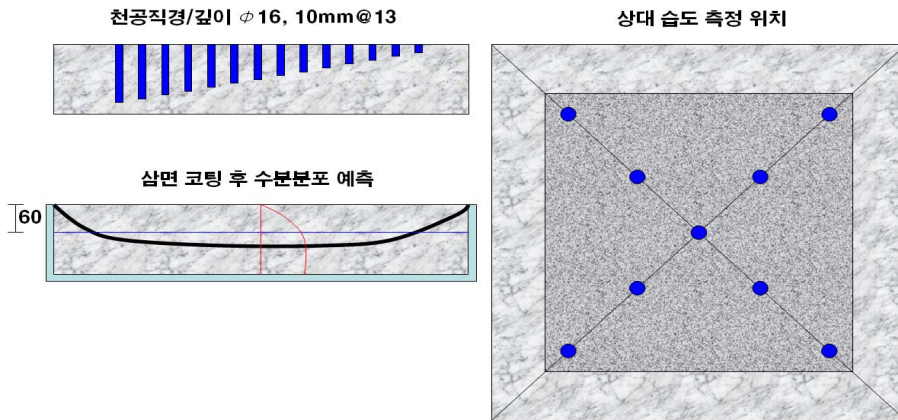


그림 1. 수분함유량 측정 위치

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 2008 미래철도기술사업인 “차량화재 실대형 시험평가 장치 및 시스템개발(과제번호 SR0514A)” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김형준, 한상훈, 최승관, (2007). “화재시 콘크리트 요소 폭렬영향성 고찰” 한국화재소방학회 논문지, 제21권 제2호
2. F. Arita, K. Harada, and K. Miyamoto, “Thermal Spalling of High-performance Concrete during Fire”, 2nd International Workshop on Structures in Fire, Christchurch, March(2002).
3. Y. Sertmehemetoglu, “On the Mechanism of Spalling of Concrete under Fire Conditions”, Ph.D. Thesis, King’s College, University of London, 1997.
4. U. Danielsen, T. A. Hammer, H. Justnes, and S. Smeplas, “Marine Concrete Structures Exposed to Hydrocarbon Fires”, SINTEF-report no STF65 A88064, Trondheim, pp48(1988).
5. H. Justnes and E. A. Hansen, “LWA Concrete for Floaters, SP4 Hydrocarbon Fire Resistance, Report 4.1-A Theoretical Evaluation based on Material Technology”, SINTEF Report no. STF65 F90009, Trondheim, pp4(1990).