

고온에서의 콘크리트 열적 특성의 변화

Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures



박찬규*
Chan-Kyu Park

1. 머리말

콘크리트 부재의 내화 성능을 이해하고 예측하기 위해서는 고온에서의 부재 거동을 결정하는 재료의 특성을 파악하여야 한다. 화재에 노출된 콘크리트 부재의 거동은 부재를 구성하는 재료의 열적, 재료 역학적 및 변형 특성의 함수이다. 콘크리트 부재의 내화 성능을 예측하기 위해서는 먼저 콘크리트 부재 내의 온도를 계산하여야 한다. 이러한 계산을 위해서는, 부재를 구성하고 있는 재료가 고온에서 어떠한 특성을 가지고 있는지에 대한 정확한 열적 특성이 데이터가 필요하다.

이에 본 고에서는 콘크리트의 열적 특성 중 열전도율, 비열, 열변형률 및 중량손실에 대한 기존 모델 식들을 정리하여, 콘크리트 부재의 고온 거동에 대한 해석을 수행할 때 참고가 되도록 하였으며, <표 1>에 자세한 모델 식을 수록하였다.

2. 콘크리트의 열적 특성

2.1 열전도율

고온에서의 콘크리트 열전도율 변화에 대한 모델 식의 비교는 <그림 1>에 나타낸 바와 같다. <그림 1>에서 Kodur & Sultan¹⁾이 시험한 콘크리트의 압축강도는 약 80 MPa로 고강도 콘크리트에 해당하며, 시험 시 콘크리트 내의 상대습도는 약 50%였다. 그리고 Lie²⁾가 제시한 모델 식은 보통강도 콘크리트에 해당한다. 한편 Eurocode 2³⁾에서 제시한 모델 식의 사용 압축강도 범위는 제시되어 있지 않다.

<그림 1>에서 알 수 있는 바와 같이 모든 모델 식에서 온도가 증가할수록 콘크리트의 열전도율 감소하도록 모델링되어 있다.

골재 종류의 영향에 있어서 Lie와 Kodur & Sultan 모두 석회암 골재를 사용한 경우의 열전도율이 실리카질 골재를 사용한 경우보다 낮다고 모델링하였으며, 온도가 증가할수록 열전도율의 차이는 커지는 것으로 나타났다. Eurocode 2에서는 열전도율에 대한 상한 값과 하한 값을 제시하고 있으며, 그 값은 대체적으로 다른 모델 식보다 낮은 것으로 나타나고 있다. 한편 김홍열⁴⁾의 모델 식에서는 낮은 온도에서 고강도 콘크리트의 열전도율이 높지만, 높은 온도에서는 보통강도 콘크리트의 열전도율 높은 것으로 나타나고 있다.

2.2 비열

<그림 2>는 골재 종류에 따른 고온에서의 콘크리트 비열 시험 결과를 바탕으로 제시된 모델 식을 나타낸 것이다. <그림 2>에서 알 수 있는 바와 같이 400°C 이하 및 800°C 이상에서는 골재 종류에 따른 비열의 차이는 없는 것으로 나타나고 있지만, 특히 650 ~ 850°C 구간에서 석회암 골재를 사용한 콘크리트 비열이 실리카질 골재를 사용한 콘크리트보다 매우 높게 모델링 되어 있다.

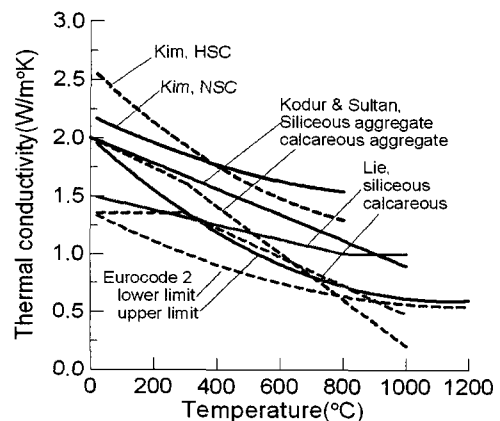


그림 1. 열전도율에 대한 각종 모델 식 비교

* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원
helpme@samsung.com

표 1. 열적 특성에 대한 모델 식

구분	제안자	모델 식	골재	온도범위(°C)		
열전도율 (W/mK)	Kodur & Sultan	$2 - 0.0011T$	실리카질	$0 \leq T \leq 1,000$		
		$2 - 0.0013T$	석회암	$0 \leq T \leq 300$		
		$2.221 - 0.0020T$	석회암	$300 < T \leq 1,000$		
	Eurocode 2	$2 - 0.2451(T/100) + 0.0107(T/100)^2$ (상한 값)	언급 없음		$20 \leq T \leq 1,200$	
		$1.36 - 0.136(T/100) + 0.0057(T/100)^2$ (하한 값)				
	Kim	$2.19 - 0.00128T + 5.81 \times 10^{-7}T^2$ (NSC)	안산암		$20 \leq T \leq 800$	
		$2.6 - 0.00256T + 1.162 \times 10^{-6}T^2$ (HSC)				
	Lie		$1.5 - 6.25 \times 10^{-3}T$	실리카질	$0 \leq T \leq 800$	
			1.0		$800 < T$	
			1.35	석회암		$0 \leq T \leq 293$
			$1.72 - 1.241 \times 10^{-3}T$			
			$2.083T + 708.33$			$0 \leq T \leq 200$
1.125						
		$5.4167T - 1.041.67$	실리카질		$400 < T \leq 500$	
		$-5.4167T + 4.375$				
		1.125			$600 < T \leq 1,000$	
		1020.8				
비열 (J/kgK)	Kodur & Sultan	$-10.833T + 5,354.17$		$400 < T \leq 475$		
		$5.958T - 2,622.92$				
		$78.917T - 5,0045.83$	석회암		$475 < T \leq 650$	
		$-109.583T + 88,500$				
		833.3			$800 < T \leq 1,000$	
		900				
	Eurocode 2	$900 + (T - 100)$	실리카질 및 석회암 모두 적용		$100 < T \leq 200$	
		$1,000 + (T - 200)/2$				
		1.100			$400 < T \leq 1,200$	
		$775.3 + 0.8368T - 8.368 \times 10^{-4}T^2$ (NSC)				
	Kim	$500.4 + 1.6736T - 1.674 \times 10^{-3}T^2$ (HSC)	안산암		$20 \leq T \leq 800$	
		$-0.002 + 0.000011T$				
	$-0.0115 + 0.000036T$	실리카질		$450 < T \leq 650$		
	0.0119					
Kodur & Sultan	$-0.0002 + 0.000008T$			$650 < T \leq 1,000$		
	$-0.0061 + 0.000021T$					
열변형률		$0.0242 - 0.000012T$	석회암	$450 < T \leq 920$		
		$-1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}T + 2.3 \times 10^{-11}T^3$				
Eurocode 2		14×10^{-3}	실리카질	$920 < T \leq 1,000$		
		$-1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6}T + 1.4 \times 10^{-11}T^3$				
		12×10^{-3}	석회암	$700 < T \leq 1,200$		
		$1.0 - 0.00005T$				
	Kodur & Sultan	$1.003 - 0.00006T$	실리카질	$0 \leq T \leq 1,000$		
		$2.551 - 0.00264T$				
중량손실		0.71 - 0.00001T		$0 \leq T \leq 600$		
		1.0				
Eurocode 2		$1 - 0.02(T - 115)/85$	언급 없음	$600 < T \leq 700$		
		$0.98 - 0.03(T - 200)/200$				
		$0.95 - 0.07(T - 400)/800$				

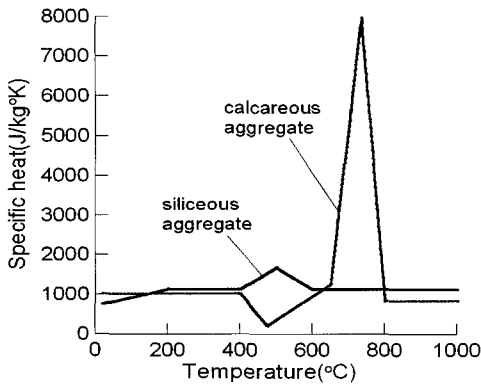


그림 2. 골재 종류에 따른 비열(Kodur & Sultan)

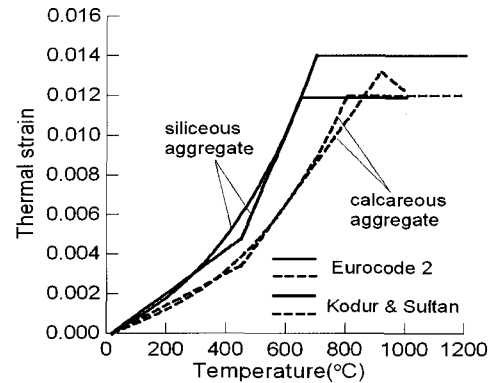


그림 4. 온도에 따른 열변형률

〈그림 3〉은 각종 비열 모델 식을 비교한 것이다. 〈그림 3〉에서 특히 Eurocode 2는 115 ~ 200°C 온도 구간에서 수분 함량에 따른 비열 모델 식을 제시한 것이 특징이라 할 수 있다. 한편 Eurocode 2에서 제시된 모델 식은 석회암 골재 및 실리카질 골재 콘크리트 모두에 적용할 수 있다고 언급되어 있다.

김홍열이 제시한 모델 식에서는 보통강도 콘크리트(NSC)의 비열이 고강도 콘크리트(HSC)의 비열보다 다소 적은 것으로 나타났다. 또한 제시된 비열 값은 전체적으로 압축강도 수준에 관계없이 Eurocode 2와 Kodur & Sultan이 제시한 모델 식의 값보다 적은 경향을 나타냈다.

2.3 열변형률

〈그림 4〉는 실리카질 골재와 석회암 골재를 사용한 콘크리트의 열변형률의 모델 식들을 비교한 것이다. 〈그림 4〉에서 알 수 있는 바와 같이 골재의 종류는 열변형률에 큰 영향을 미칠 수 있다. Eurocode 2와 Kodur & Sultan이 제시한 식 모두 실리카질 골재를 사용한 콘크리트의 열변형률이 석회암 골재를 사용한 콘크리트보다 큰 것으로 나타나고 있다. 실리카질 골재 콘크리트의 경우 650°C, 석회암 골재 콘크리트의 경우 805°C

까지 두 모델식의 값은 거의 비슷한 것으로 나타났지만, 그 이상의 온도에서는 약간의 차이를 나타내었다.

2.4 중량손실

내부에 수분을 포함한 공극을 가지고 있는 콘크리트는 열을 받게 되면 공극 내의 수분은 팽창하여 콘크리트 내부 응력을 급격하게 상승시키거나 증발되며, 증발되지 않는 수분은 내부 공극으로부터 이탈되는 등 역학적 관점에서 치수 불안전을 발생시키게 된다. 따라서 가열된 콘크리트 내부의 수분 이동과 흐름에 따른 중량 손실율은 콘크리트의 열적 특성 변화에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

Kodur & Sultan은 TGA 분석기기를 사용하여 실리카질 골재 콘크리트와 석회암 골재 콘크리트의 온도에 따른 중량 손실 모델 식을 제시하였다. 〈그림 5〉에 나타낸 바와 같이 Kodur & Sultan이 제시한 모델 식들에서 온도 600°C까지는 중량손실이 골재 종류에 따른 영향을 받지 않는 것으로 되어 있지만, 석회암 골재 콘크리트의 경우 600 ~ 700°C 구간에서 급격하게 중량 손실이 발생하는 것으로 모델링되어 있다. 반면, 실리카 골재 콘크리트의 경우 온도가 증가함에 따라 계속해서

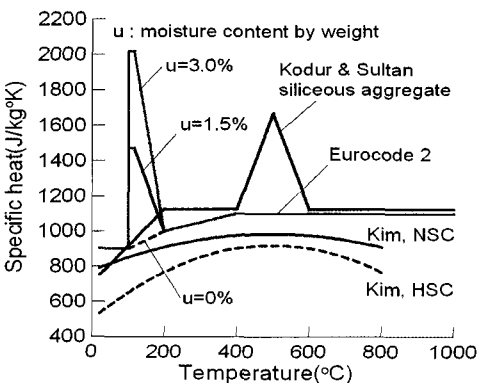


그림 3. 각종 비열 모델 식의 비교

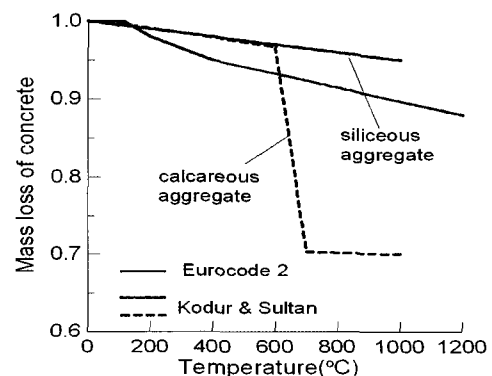


그림 5. 콘크리트의 중량 손실

중량 손실이 선형적으로 발생하는 것으로 모델링되어 있다.

한편, Eurocode 2에서는 골재 종류에 따른 중량 손실 모델 식은 제시되어 있지 않으며, 단지 콘크리트의 중량 손실은 <그림 5>에 나타낸 바와 같이 제시되어 있다. Eurocode 2의 모델 식은 그 경향 상 석회암 골재 콘크리트에 해당되지 않는 것으로 판단된다.

3. 맺음말

지금까지 콘크리트의 열적 특성 중 열전도율, 비열, 열팽창계수 및 중량손실률에 대하여 모델 식의 특성을 알아보았으며, 또한 모델식을 온도의 함수로 정리를 하였다. 이에 본 고가 고온에서의 콘크리트 부재의 거동을 예측하는 프로그램 또는 해석 방법에 참고 자료로 활용될 수 있기를 바란다. □

참고문헌

1. Kodur, V.K.R. and Sultan, M.A., "Effect of temperature on thermal properties of high-strength Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.15, No.2, 2003, pp. 101 ~ 107.
2. Lie, T.T., *Structural Fire Protection, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.78*, American Society of Civil Engineering, New York, 1992.
3. *Eurocode 2 : Design of concrete structures-Part 1-2 : General rules -Structural fire design*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
4. 김홍열, "고온 영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구," 건국대학교 대학원 박사학위 청구논문, 2002, 141pp.

콘크리트 기술 전문도서 소개

1	합성구조 설계기법 및 최근 기술 - 기술강좌 교재 - · 회원 : 21,500원 · 비회원 : 27,000원
2	콘크리트 구조물 거꾸집(동바리)의 설계 및 시공 - 기술강좌 교재 · 회원 : 20,000원 · 비회원 : 25,000원
3	노출 콘크리트 제조, 설계, 시공기술 - 기술강좌 교재 - · 회원 : 13,500원 · 비회원 : 17,000원
4	시설물의 리모델링의 이해와 실제 - 2005년도 제1회 기술강좌 교재 - · 회원 : 16,000원 · 비회원 : 20,000원
5	개정 콘크리트용어집 · 회원 : 9,500원 · 비회원 : 12,000원
6	21세기 콘크리트 기술 · 회원 : 9,500원 · 비회원 : 12,000원
7	레미콘 플랜트 설비와 콘크리트 품질 - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP1 - · 회원 : 8,000원 · 비회원 : 10,000원
8	콘크리트의 재활용 - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP2 - · 회원 : 11,200원 · 비회원 : 14,000원
9	유동화 콘크리트 - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP3 - · 회원 : 8,800원 · 비회원 : 11,000원
10	철근콘크리트구조물의 내화특성 - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP4 - · 회원 : 10,000원 · 비회원 : 12,000원
11	콘크리트의 미학 - 콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP5 - · 회원 : 10,000원 · 비회원 : 12,000원

▶ 도서 구입은 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서 구입 가능하며, 방문 또는 전화로도 구입하실 수 있습니다. 전화로 구입하시고자 하시는 때에는 아래 계좌에 입금을 하시고 학회로 연락 주시기 바랍니다. 우송료는 착불입니다.

씨티은행 : 102-53655-255 (예금주 : 한국콘크리트학회) (TEL 568-5985~7, FAX 568-1918)