

고온시 40~100 MPa 범위의 콘크리트 열적특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Thermal Properties of High Strength Concrete in the Range of 40~100 MPa at High Temperature

김 흥 열* 전 현 규**
Kim, Heung-Youl Jeon, Hyun-Kyu

ABSTRACT

In order to estimate the reduction of loadbearing capacity, followed by the attributive change of heat while high strength concrete structure is revealed on fire it is necessary to evaluate, it is necessary to evaluate the property of material under high temperature such as thermal conductivity, specific heat, compressive strength, modulus of rigidity and diminution figure. Therefore, this study is for the purpose of presenting evaluation data for the analysis of thermal behavior about the high strength concrete material under high temperature, through the experiment by manufacturing concrete(40, 50, 60, 80, 100 MPa) commonly used in the construction field. As a result of the study, in the case of physical attribute, it demonstrates a greater fluctuation of change than the one of 30 MPa concrete. In case of specific heat, the high strength concrete, shown the serious diminution between 500~600°C, presents the thermal change area corresponding to the change of high strength concrete. In compressive strength, regardless of intensity of concrete, all of them show the first intensity loss between normal temperature and 100°C, the dramatic loss beyond 400°C. The concrete weighing above 50 MPa shows a twice lower dramatic intensity loss than the one weighing 30~40 MPa. The concrete ranging from 60~80 MPa, shows the biggest diminution of modulus of elasticity under 400°C, which implies the structural unstability of temperature.

Keywords : Specific heat at High Temperature, Thermal Conductivity at High Temperature, Compressive Strength Reduction factor, Modulus of Elasticity Reduction Factor

1. 서론

고강도 콘크리트 구조물이 화재에 노출되는 동안의 열적 특성 변화에 따른 성능저하를 평가하기 위해서는 고온에서의 열전도율, 비열, 압축강도 저감계수, 탄성계수 저감계수 등의 재료물성 평가가 필요하며, 이를 바탕으로 가열온도, 하중 등 실제 화재성상과 동일한 조건에서 콘크리트 내부온도 상승에 따른 열거동 해석이 요구된다¹⁻²⁾. 따라서 본 연구에서는 현재 ACI에서 35~41 MPa 또는 그 이상의 압축강도를 가지는 콘크리트로 규정하고 있으며, 국내 건축공사표준시방서 및 콘크리트표준시방서에서 40 MPa 이상을 고강도 콘크리트로 규정하고 있어 건설현장에서 적용되고 있는 40, 50, 60, 80, 100 MPa대의 콘크리트 실험을 통해 고강도 콘크리트 구조부재의 고온 가열시 열거동 해석을 위한 평가자료 제시를 목적으로 하였다.

2. 시험개요

2.1 배합인자 및 배합계획 설정

고강도 콘크리트의 경우, 건축공사표준시방서 및 콘크리트표준시방서에서는 물시멘트비 50~55% 이하, 단위수량 180~185kg/m³ 이하로 규정하고 있으며, 고강도 콘크리트 제조를 위한 관련 문헌에서는 압축강도 40~100 MPa를 발현하기 위해서는 물시멘트비 15~35% 수준이 적정하다고 제시하고 있다. 또한 건설현장에서 적용되고 있는 물시멘트비, 단위수량, 잔골재율 및 혼화제 투입량을 고려하여 예비실험을 통해 배합계획을 수립하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 가열장비 및 가열조건

실제 화재조건과 같이 열에 노출되는 동안 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위해서는 콘크리트를 가열하

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, GS건설 과장

면서 목표온도에 도달시 재료물성을 평가할 수 있는 가열장비가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 소형 이동식 가열로를 제작하여 실험을 실시하였다. 가열조건은 KS F 2257-1에서 규정하고 있는 표준가열온도곡선 조건에 따라 가열이 가능하도록 제작하였으며, 가열로의 조건에 따라 90분 이후부터는 로내온도를 1,000℃로 고정하여 실험체를 가열하였다.

표 1 Mixture plan

Specimen	W/C(%)	S/a(%)	Unit content(kg/m ³)				
			W	C	F/A	S/F	AD(%)
I - 25-400-23(F/A:15%)	35	47	163	396	70	-	1.4
II - 25-500-23(F/A:0%)	30	45	163	544	-	-	1.4
III - 25-500-23(F/A:15%)	30	45	163	462	82	-	1.4
IV - 20-600-23(F/A:0%)	27.5	45	163	593	-	-	1.5
V - 20-600-23(F/A:15%)	27.5	45	163	504	89	-	1.5
VI - 20-800-23(F/A:15%)	24.9	41.5	162	500	98	52	1.9
VII - 20-100-23(F/A:10%)	18	33	145	604	81	121	2.9

2.2.2 실험방법

(1) 고온 콘크리트 물리적 특성 실험

고강도 콘크리트의 비열, 열전도율은 콘크리트 내부온도 20℃, 100℃, 200℃, 400℃, 600℃, 800℃에서 측정하였다.

(2) 고온 콘크리트 역학적 특성 실험

본 연구에서는 실험체를 사전제하 없이 목표온도까지 일정 비율로 가열하였으며, 콘크리트 내부가 목표온도에서 열적 정상상태에 도달될 수 있게 5~10분 동안 유지시켰다. 이후 실험체가 붕괴될 때까지 KS F 2405에 따라 매초 당 0.2~0.3 MPa의 속도로 공시체가 파괴될 때까지 하중을 가하였다. 그리고 목표온도(100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 600℃, 800℃)당 3개의 실험체 강도를 평균하여 압축강도를 구하였다. 또한 탄성계수는 콘크리트 파괴시점까지의 측정된 변형을 실험체의 길이로 나누어 변형도를 산정하였다. 그리고 압축강도와 변형도 관계로부터 압축강도의 1/3(0.33 f_c) 지점에서 할선계수에 의하여 탄성계수를 산출하였다.

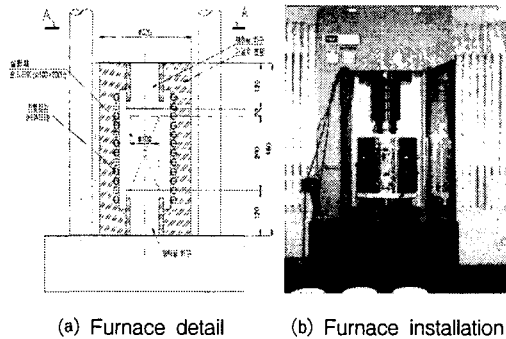


그림 1 High temperature furnace

3. 시험결과 및 분석

3.1 물리적 특성

고온 가열시 40~100 MPa 고강도 콘크리트의 물리적 특성 실험결과는 다음 표 2와 같다.

3.1.1 비열

콘크리트 강도와 상관없이 500℃까지는 비열값이 상승하여 500℃에서 가장 높은 비열값을 나타내고 있지만 500℃ 이후부터는 30 MPa 콘크리트는 비교적 완만하게 감소하고 있지만 40 MPa 이상 고강도 콘크리트는 600℃까지 급격한 감소를 보이고 600℃ 이후부터는 거의 유사한 수준을 보이는 것으로 나타나 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 비열은 500℃ 이전에는 유사한 경향을 보이고 있지만 500℃ 이후에는 서로 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 고강도 콘크리트중 플라이애쉬를 혼입하지 않은 50 MPa 콘크리트가 가장 낮은 비열값을 나타내고 있다.

표 2 Physical properties of high strength concrete

Inner temp.(°C)	Specific heat(J/kg · K)							Thermal conductivity(W/m · K)						
	I	II	III	IV	V	VI	VII	I	II	III	IV	V	VI	VII
25								2.85	2.80	3.50	2.87	3.46	2.90	2.72
100	888	733	838	859	876	888	851	2.54	2.44	2.63	2.45	2.54	2.45	2.45
200	98	725	792	825	842	880	872	2.29	2.10	2.38	1.92	2.33	2.35	2.10
300	859	804	821	872	867	867	913							
400	955	851	892	867	930	918	943	1.56	1.89	2.08	1.29	1.69	1.85	1.70
500	964	934	955	960	972	972	955							
600	850	855	834	838	846	830	830	1.40	1.42	1.80	1.15	1.38	1.40	1.21
700	859	855	830	855	859	830	838							
800	863	851	825	872	867	830	851	1.28	1.22	1.30	1.08	1.29	1.27	1.10

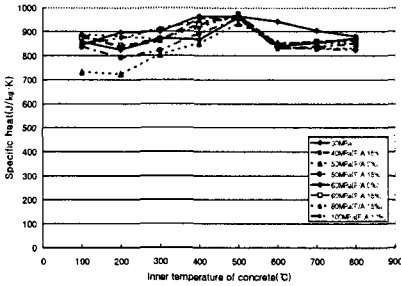


그림 2. Specific heat of concrete

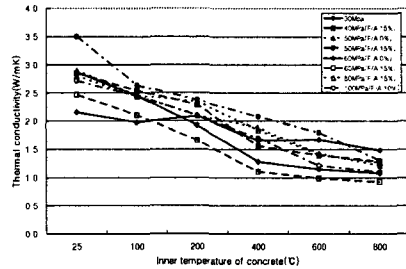


그림 3. Thermal conductivity of concrete

3.1.2 열전도율

40~100 MPa의 고강도 콘크리트의 경우, 모든 온도영역에서 열전도율은 감소하고 있고 상온에서부터 400°C까지는 비교적 급격한 열전도율 감소를 600~800°C까지는 거의 유사한 값으로 감소하고 있다. 따라서 30 MPa 콘크리트가 200°C와 600°C에서 열전도율이 상승하는 것과는 다른 양상을 보이고 있다. 또한 40~100 MPa의 고강도 콘크리트는 30 MPa 콘크리트와 비교하여 200°C 이전에는 높은 열전도율을 보이고 있지만 600°C 이후에는 낮은 열전도율을 나타내고 있다. 그러나 40~100 MPa의 고강도 콘크리트에서 열전도율은 플라이애쉬의 혼입률, 강도 등에 대해서는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 고강도 콘크리트가 30 MPa 콘크리트에 비하여 열전도율의 변화가 크게 나타나고 있는 이유는 이미 콘크리트 내부의 잉여수와 결합수 등이 수분으로 증발된 600°C 이상의 고강도 콘크리트에서 콘크리트의 열전도율에 영향을 미치는 골재, 시멘트페이스트의 팽창, 음해 등이 30 MPa 콘크리트보다 고강도 콘크리트에서 더 심하게 나타나고 있기 때문이라고 판단된다.

3.2 역학적 특성

고온 가열시 40~80 MPa 고강도 콘크리트의 역학적 특성 실험결과는 표 3과 같다.

3.2.1 압축강도

콘크리트 내부온도 400~600°C에서는 콘크리트의 강도에 상관없이 가장 높은 강도저감을 나타내고 있으며, 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트가 30~40 MPa 콘크리트에 비하여 약 2배정도 높은 저감률을 보이는 것으로 나타났다. 또한 600~800°C에서는 400~600°C에 비하여는 다소 낮은 강도 저감률을 보이고 있지만 잔존강도는 상온 압축강도의 6~40% 수준을 보이고 있다. 특히 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트의 잔존강도는 상온 압축강도에 비하여 9~19% 정도를 보이고 있어 30~40 MPa에 비하여 약 2배정도 낮은 잔존 강도를 보이고 있다. 또한 800°C까지의 온도영역에서 30~40 MPa 콘크리트는 상온 압축강도의 60% 이상의 수준을 보이고 있어 구조적으로 안전성을 확보하는 것으로 판단되지만 50 MPa 이상에서는 상온 압축강도의 28~38% 수준을 보여 구조안전성을 상실하는 온도구간으로 나타났다. 고강도 콘크리트 제조를 위해 혼화재로 사용한 플라이애쉬의 혼입률에 따른 변화는 압축강도 감소율에 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

3.2.2 탄성계수

콘크리트 내부온도 100~400°C에서는 감소된 콘크리트 탄성계수가 콘크리트의 강도에 상관없이 증가하고 있지만 고강도 콘크리트는 30 MPa대의 보통강도 콘크리트에 비하여 약 15% 정도 높은 압축강도 증가를 보이고 있으며, 증가된 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 강도에 상관없이 400°C까지 거의 일정한 수준으로 안정화되고 있다. 400~800°C 온도

Inner temp.(°C)	Compressive strength(MPa)							Modulus fo elasticity($\times 10^5$ MPa)						
	30MPa	I	II	III	IV	V	VI	30MPa	I	II	III	IV	V	VI
20	32	39	56	50	64	60	77	0.26	0.28	0.32	0.31	0.34	0.33	0.37
100	28	23	36	25	31	44	53	0.25	0.23	0.28	0.24	0.26	0.30	0.32
200	28	35	46	33	49	59	87	0.25	0.27	0.30	0.27	0.31	0.33	0.39
300	29	38	54	37	54	72	88	0.25	0.28	0.32	0.28	0.32	0.36	0.39
400	27	34	48	30	42	68	77	0.24	0.27	0.31	0.26	0.29	0.35	0.37
600	20	24	21	18	24	22	21	0.21	0.24	0.23	0.22	0.24	0.23	0.23
800	13	15	5	8	12	9	8	0.17	0.20	0.15	0.17	0.19	0.18	0.17

표 3 Mechanical properties of high strength concrete

영역에서 30 MPa 보통강도 콘크리트의 경우, 400°C까지 상승된 탄성계수는 600°C에서는 상온 탄성계수의 79% 수준인 0.21×10^5 MPa를 보이고 있으며, 800°C에서는 상온 탄성계수의 63% 수준인 0.07×10^5 MPa를 나타내고 있다. 또한 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트 역시 600°C에서는 상온 탄성계수의 63~84% 수준을 보임으로서 30 MPa 보통강도 콘크리트와 비교하여 유사한 저감률을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 800°C에서는 30, 40 MPa 콘크리트가 상온 탄성계수의 63~71% 수준인 반면, 50~80 MPa 콘크리트는 0.47~0.57%로 낮은 탄성계수를 나타내고 있다.

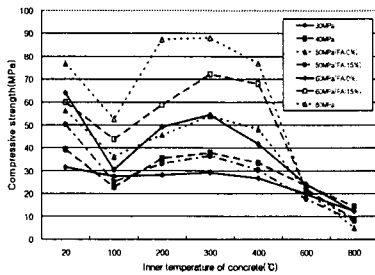


Fig. 4 Compressive strength of concrete at high temperature

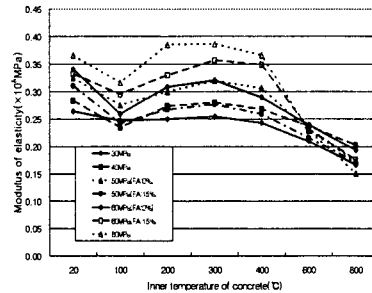


Fig. 5 Modulus of elasticity of concrete at high temperature

4. 결론

화재에 노출되는 동안 40~100 MPa 고강도 콘크리트의 열적 특성 및 재료물성 평가 등 고강도 콘크리트 강도별 화재 안전성 평가에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고강도 콘크리트의 물리적 특성의 경우, 30 MPa 콘크리트에 비하여 변화의 폭이 크게 감소와 증가를 나타내고 있다. 이는 골재, 시멘트 페이스트의 팽창, 응해 등이 고강도 콘크리트에서 더 불리하게 작용하는 것으로 판단된다. 또한 비열의 경우, 고강도 콘크리트는 500~600°C에서 심하게 감소하고 있어 고강도 콘크리트의 특성이 변화하는 온도영역으로 나타나고 있다.
- 2) 400°C 이상의 온도범위에서 급격한 강도손실을 나타내고 있으며, 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트는 30~40 MPa 콘크리트 보다 약 2배 정도 낮은 급격한 강도손실을 보이고 있다. 또한 30~40 MPa 콘크리트는 콘크리트 내부온도 600°C 이상, 50~80 MPa 콘크리트는 400~500°C에서 구조적 안전성을 상실할 수 있는 온도범위로 나타났다. 또한 60~80 MPa 콘크리트는 400°C 이후에 가장 큰 탄성계수 감소 폭을 나타내고 있어 구조적으로 불안정한 온도영역으로 나타났다.

참고문헌

1. Hammer, T. A., HIGH-STRENGTH CONCRETE PHASE 3, Compressive Strength and E-modulus at Elevated Temperatures, SP6 Fire Resistance, Report 6.1, SINTEF Structures and Concrete, 1995
2. 安部武雄 외 4人, "高温度における高強度コンクリートの力學的特性に関する基礎的研究", 日本建築學會構造系論文集, 第515號, 1999