

콘크리트의 고온에서의 특성

태순호*이병곤**

1. 서론

콘크리트 구조물이 고온에 가열되면 그 성질이 변화하여 구조물은 다양한 영향을 받는다. 콘크리트 구조물의 고온에서의 성상은 시멘트의 종류, 골재의 성질, 배합비, 함수율, 재령 등에 의해 다르다. 콘크리트의 열성질에 관한 외국에서의 연구는 다수 보고되었으나 국내에서 연구한 결과는 없으며 특히 시멘트의 종류, 골재의 성질 등에 따라 고온에서의 성상이 다르기 때문에 본 연구에서는 국내에서 생산되는 시멘트, 골재를 대상으로 하였다. 또한 콘크리트 배합을 일반 구조물 및 아파트 현장에서 사용하는 배합비로 시험체를 제작·실험하였다.

콘크리트 구조물에서 화재는 건물마다 화재성상이 복잡하기 때문에 화재로 인한 손상도 다양하게 나타난다. 일반적으로 화재건물의 콘크리트 부재에 나타나는 손상은, 각 부재의 폭열 또는 콘크리트의 박리에 의해 주철근의 노출, 보의 처짐, 기둥의 좌굴, 구조물의 열팽창에 의한 절단 균열 등 2차적인 피해가 발생한다. 따라서 이와같은 콘크리트 부재의 화재로 인한 손상을 검토·진단하기 위해서는, 콘크리트의 고온성상을 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내산 재료로 연구·검토하고 구조물의 화재로 인한 손상을 진단하는데 필요한 정량화된 자료를 얻기위해 연구하였다.

2. 실험 방법

본 실험은 구조용 콘크리트가 화재로 인한 성질이 변화하는 것을 알기 위해서이며, 일반적으로 아파트, 상가 등 시설물에 이용되고 있는 콘크리트를 시험체로 만들어 가열온도 및 가열시간을 변수로 하고 압축강도, 탄성계수, 최대압축 변형, 균열 및 중성화 현상을 분석하였다.

(1) 사용재료

시멘트는 한국산업표준규격의 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

Table 1 Physical character of cement

Cement	Specific gravity	Fineness (cm/gr)	Setting time		Soundness (%)	Compressive strength		
			Initial h-m	Final h-m		3day	7day	28day
Portland cement	3.15	3,000	3시간10분	5시간20분	0.2	173	208	321

잔골재는 구조용으로서 일반적으로 이용되는 한강모래이고 굵은 골재는 요즈음 대부분 건설현장에서 사용하는 쇄석으로 최대지름 20mm을 사용하였다.

* : 충북대학교 대학원 안전공학과

** : 충북대학교 안전공학과

Table 2 Physical test data of aggregate

Aggregate	Specific gravity	Absorption (%)	F.M(%)	Unit weight (kg/m ³)	Solid volume (%)	Porosity (%)
Fine	2.53	3	2.3	1531	59.3	40.7
Coarse	2.61	1.5	6.8	1744	66.8	33.2

(2) 시험체 제작

강도시험용 시험체는 Table 3의 배합비로 혼합하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 실린더형 시험체로 제작하였으며, 24시간 공기중에서 습윤양생을 시킨 후 탈형을 하여 재령 28일간 수온 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 수중양생하였다.

Table 3 Concrete mixing design

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m ³)				
					W	C	G	S	AE
20	8	6.0	54.9	44	190	346	1004	783	0.85

(3) 시험체의 가열 및 냉각

시험체를 양생수조에서 꺼낸 후 capping을 하고 표면의 수분을 닦은 후 무게를 측정하여 100°C 건조로에 넣어 24시간 건조시켰다. 건조시킨 시험체는 무게를 측정한 후 전기로에 넣어 각 조건에 맞게 가열시험을 하였다. 온도상승은 programable controller로 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 상승하였으며 가열온도 조건은 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300로 하고 시간변수는 10분과 1시간으로 하였다. 가열 후 시험체의 무게를 측정하고 24시간동안 충분히 서냉시켜 시험체의 온도가 상온과 같은 온도가 되면 강도실험을 하였다.

(4) 시험방법

강도시험은 K.S F 2405를 따랐으며 탄성계수값을 측정하기 위해 콘크리트용 스트레인 게이지 4매를 부착하여 data logger와 load cell로 측정하였다.

3 실험결과와 고찰

(1) 함수량 변화율

100°C 건조로(oven)에서 공시체의 함수량 변화율을 측정한 결과는 Fig 1과 같으며, 감소량은 4시간 이내에 약 50%가 감소하며, 24시간 이후에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 100°C 에서 물리적으로 혼합된 공극수는 콘크리트에서 증발되는 과정에서 강도는 증가하고 탄성계수는 감소하였다.

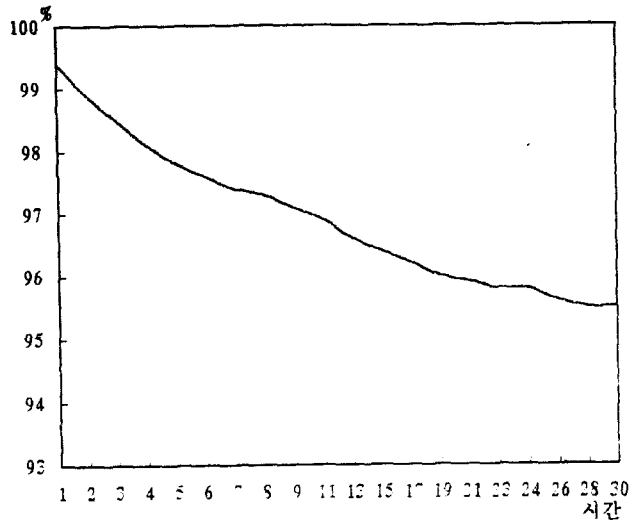


Fig. 1 Free water content of test pieces

(2) 잔존압축강도

100℃에서 24시간 건조된 콘크리트 시험체의 잔존강도비는 상온시보다 약 20%정도 범위내에서 증가하였고, 특히, 가열시간 60분의 잔존강도비가 가장 높았다. 200℃에서, 가열시간 10분의 경우는 약 25%정도 잔존강도비가 증가한 반면 60분은 약 5%정도 감소를 보였다. 가열시간 10분의 경우는 Zoldners, Woolson의 연구와 거의 일치하는 경향을 보였다. 500℃, 60분의 경우는 잔존강도비가 현저하게 떨어져서 기준강도의 약 60%가 되며, 특히, 400℃보다는 30%의 강도차가 생겼다. 가장 큰 강도저하는 700℃로써 상온시 강도에 약 43%이며, 600℃보다 34%정도가 낮아졌다. 따라서, 콘크리트의 경우 700℃이상에서 10분이상 지속되면 현저한 온도 영향을 받으며, 500℃이상에서 60분간만 지속되어도 잔존강도는 치명적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 가열 지속시간과는 관계없이 1000℃이상이 되면 압축강도는 거의 "0"가 됨을 알 수 있으며, 오히려 1100℃에서는 강도가 약 6%정도 증가함을 보였는데 이는 田中弘文의 연구 결과와 같았다. 또한 1200℃에서는 부분적으로 용융현상을 보여 압축강도 실험은 할 수 없었으며, 1300℃에서는 마그마 형태의 완전 용융상태를 보였다.

Table 4 Residual compressive strength ratio

Class	Rm. tem.	100℃	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
10분	100%	118	125	116	110	91	77	43	22	9	0	6
60분	100	118	113	108	91	63	42	26	15	8	0	6

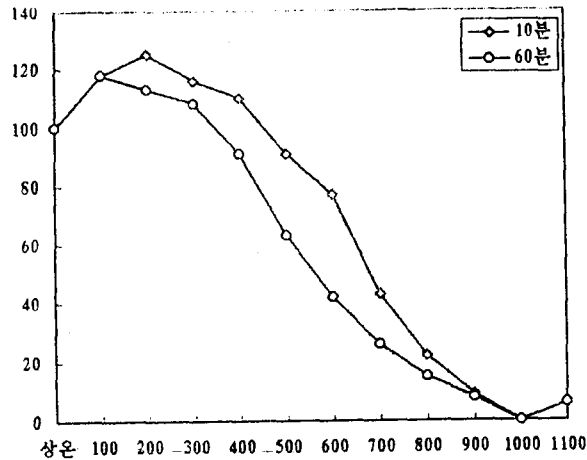


Fig. 2 Residual compressive strength curve

(3) 잔존탄성계수와 최대압축변형

가열온도 100°C(10분, 60분)에서 잔존탄성계수비는 상온보다 약 30%정도 급격하게 감소하였고, 가열시간 10분에서 100°C~200°C는 완만하게 감소(약 4%)하였으나 300°C에서는 약 20%가 감소하여 상온시 탄성계수의 약 50%정도가 되었다. 또한 300°C~500°C에서 완만하게 감소하였다. 700°C에서는 급격히 감소(약 14%)하였으며, 800°C에서는 거의 "0"에 가깝게 나타났다. 가열시간 60분의 경우에서 200~400°C는 약 15%의 완만한 감소를 보이고 400~500°C에서는 급격한 감소경향을 보이고 있다.

Table 5 Reidual elasticity modulus ratio by heating temperature

Class	Rm. tem.	100°C	200	300	400	500	600	700	800
10min	100 %	71.1	67.6	47.9	45.9	35.4	23.8	7.0	2.8
60	100	71.1	56.3	41.4	40.0	15.0	3.4	2.3	1.3

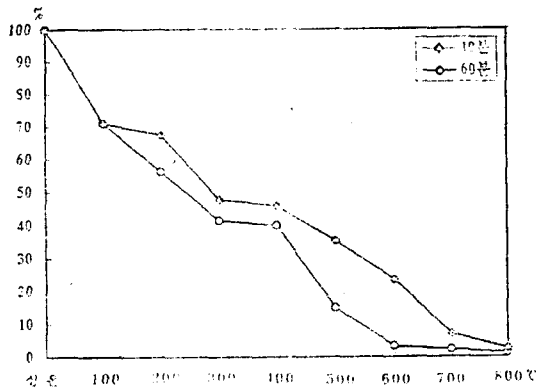


Fig. 3 Reidual elasticity modulus curve by heating temperature

최대압축변형은 온도상승에 따라 증가하며 10분의 경우는 600℃이상에서 급한 증가를 보이며 가열시간 10분의 경우 300℃에서 약 146%의 증가를 나타냈고 500℃에서는 상온시보다 약 2배 이상(218%)의 증가를 나타냈다. 가열시간 60분의 경우는 100~200℃에서는 미세한 증가를 보인 반면 300℃에서는 상온보다 1.8배(188%)의 급격한 증가를 보이고 300~400℃에서는 완만히 증가하고 500~600℃는 약 120%가 증가하였으며 특히, 700~800℃에서는 약 300%나 증가하였다.

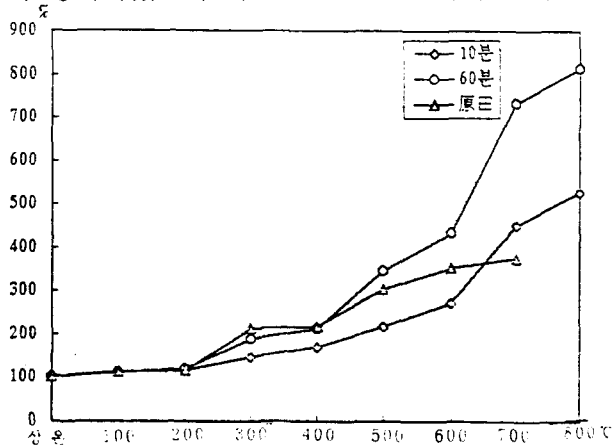


Fig. 4 Maximum compressive deformation VS. room temperature

(4) 균열 및 증성화 현상

① 균열 현상

콘크리트 공시체의 100~200℃에서는 외관상 나타나는 현상은 없으며 300℃, 10분부터 약간의 핑크빛으로 변색하고 가열시간 60분은 부분적으로 핑크빛의 색을 나타내었다. 이것은 표면에 핑크빛의 색이 나타나면 가열로 인한 큰 강도손실의 시작을 알려주는 것으로 매우 중요하며, 핑크빛으로 변색된 콘크리트는 의심할 필요가 있다. 400℃가 되면 핑크색으로 콘크리트 공시체 전면에서 나타나고 450°, 60분이 되면 표면에 미세한 균열현상을 볼 수 있다.

이것은 콘크리트 강도에 가장 많은 영향을 주며 압축강도가 현저하게 떨어지는 원인이 된다. 550℃, 10분에서는 표면 전체에 미세한 균열현상을 보이고,

또한 온도 550℃(60분), 600℃, 700℃(10분)로 가열하면 표면전체에 미세한 균열이 분포하고 부분적으로 큰 균열이 나타난다. 700℃(60분), 800℃로 가열하면 큰 균열이 부분적으로 분포하고 이어서 중간균열과 미세균열이 연이어서 전면에 분포한다. 900℃가 되면 큰 균열(최대 1mm)이 방사상으로 분포하고 중간균열(0.5mm)과 미세균열이 전면에 걸쳐 분포됨을 볼 수 있다.

1,000℃에서는 큰 균열(최대 5mm), 중간균열과 미세한 균열이 혼재하고 표면이 백색의 분말이 퍼져있고 손으로도 부서져서 압축강도는 "0"이 된다.

1,100℃는 큰 균열이 방사상으로 분포하고 특히, 굵은 골재까지도 손으로 부서지며 전면에 엷은 갈색을 띤다.

1,200℃는 표면이 용융되어 균열은 보이지 않으나 부분적으로 함몰이 되고 전

면에 암갈색을 띄며 오히려 압축강도가 조금 증가한다. 1,300℃는 잔골재가 완전 용융되어 마그마 형태가 되며, 굳으면 잔골재의 석영질이 녹아 표면이 보석처럼 반짝인다.

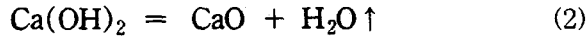
② 중성화 현상

콘크리트속에 공기중의 CO₂(실내 0.03%, 실외 0.15% 정도 함유)가 침투되면 시멘트의 수화생성물인 수산화 칼슘과 반응하여 비활성의 탄산칼슘을 생성하는데 이것을 탄산화 반응이라 한다.



수산화 칼슘의 PH는 12-13의 강알카리성을 나타내고 이에 반해 탄산칼슘의 PH는 8.5-10으로 된다. 즉, 탄산화 반응에 따라 콘크리트는 알카리성을 손실하므로 중성화라 한다.

또한 시멘트 경화체의 수산화칼슘이 가열되면 열분해에 의해 다음과 같이 중성화가 된다.



중성화 실험결과 900~1,100℃에서 골재부분은 중성화되지 않았으나 단면 전체가 중성화가 되어 이 부분에서는 압축강도가 거의 "0"가 된다는 것을 알 수 있었으며, 1,200℃는 완전히 단면 전체가 중성화되었다.

4. 결 론

콘크리트의 고온에서의 특성에 대한 연구·실험한 결과 가열된 콘크리트의 성질은 온도상승 및 가열 지속시간에 따라 다르게 나타났으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 가열된 콘크리트의 잔존강도는 온도상승과 가열지속시간에 따라 다르며 1시간 가열의 경우는 100℃에서 가장 높았으며 10분은 200℃에서 잔존 압축강도가 가장 크게 나타나 약 25%가 증가하였다. 500℃, 60분에서 잔존 압축강도가 상온의 60%의 범위내로 가장 많이 저하되었고, 가열시간 10분의 경우는 700℃에서 약 40%의 강도가 떨어져 상온강도의 약 40%정도를 나타냈다.
2. 가열된 콘크리트의 탄성계수는 온도상승에 따라 감소하며 특히 상온시보다 100℃에서 약 30%의 감소를 보였고, 60분은 100~300℃에서 30%가 감소하였으며, 특히 400℃~500℃에서 25%가 감소하였다.
3. 최대압축변형은 가열지속시간에 따라 많은 차이를 보였고 60분은 500℃에서 2배의 증가를 나타냈고, 10분은 600℃에서 2배가 된다. 특히 60분은 700℃에서 상온시보다 4배나 증가하였다.
4. 콘크리트는 300℃가 되면 표면에 핑크빛으로 변색하고 450℃, 60분에서 미세한 균열을 보여 압축강도가 현저하게 떨어지는 원인이 되었다.
5. 중성화 현상은 800℃에서 표면부터 나타나기 시작하였으며 900℃부터는 단면 전체가 중성화되었으며 압축강도가 "0"이 되었다.