



콘크리트의 고온에서의 거동

Behaviour of Concrete Building with High Temperature

이 병 곤*·태 순 호*

Byung-Kon Lee · Soon-Ho Tae

(1996년 12월 16일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

ABSTRACT

The main purpose of this study is to establish the reliable method for evaluating fire damage of reinforced concrete building, by using the rational procedure, and to develop the rehabilitation methods of fire damaged concrete structures.

Especially, this proposed evaluation method is applied to the fire damaged concrete buildings of domestic, and the rehabilitation methods on the basis of these applied results are proposed and those example are shown.

The proposed rational evaluation method for fire damaged concrete building proceeds is estimating the reduction of the mechanical properties of concrete of fire damaged structural members in comparison with the experimental results which are obtained from the compression tests of heated concrete specimens under various temperatures.

1. 서 론

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. 시멘트 경화체는 약 105°C의 온도에서 유리수나 Gel수를 잃으나¹⁾ 거의 100°C 정도에서 증발 가능한 물(Evaporable water)이 이탈한다²⁾.

$Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 를 함유한 수화물은 200°C~300°C에서는 탈수되어 보유수분의 대부분이 빠져 나가서 내부에 약 2%의 미세한 균열이 생긴다. 500°C~580°C에서는 수산화칼슘이 분해되어 탈수하며 이 경우 $Ca(OH)_2$ 대신 CaO를 함유한 경화체가 생성되고 700°C에서는 경화체 탈수가 거의 끝나며, 전 탈수량²⁾은 시료무게의 12~14% 정도가 된다. 825°C에서는 탄산화칼슘이 분리되어 CaO와 CO_2 를 생성하며, CaO에 물이 가해지는 경우 (소화

*충북대학교 안전공학과

시)체적이 증가하여 붕괴하는 경우가 있다. 1450°C가 되면 경량화, 조직의 치밀화로 단단한 고화물이 생성되며 수축한다.

여기서, 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 하였으며 일반 구조물 및 아파트 현장에서 사용하는 콘크리트의 배합비로 시험체를 제작·실험하였다.

콘크리트 구조물에서 화재는 건물마다 화재성상이 복잡하게 다르고, 콘크리트의 수열조건도 다르기 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.

이와같은 콘크리트 부재의 화재로 인한 손상을

검토·진단하기 위해, 콘크리트의 고온 성상을 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 외국에서의 연구결과를 검토·비교하고 구조물의 화재로 인한 손상을 진단하는데 필요한 정량화된 자료를 얻기위해 연구하였다.

2. 실험과 고찰

2.1 실험개요

본 실험은 구조용 콘크리트가 화재로 인한 역학적 성질이 변화하는 것을 알기 위해서이며, 일반적으로 아파트, 상가 등 시설물에 이용되고 있는 콘크리트 시험체를 만들어 가열온도 및 가열시간을 변수로 하고 압축강도, 탄성계수, 열 팽창율, 최대압축변형, 균열 및 중성화 현상등을 실험하였다.

2.1.1 사용재료

시멘트는 한국산업표준규격^{3~8)}을 사용하였다.

Table 1 Physical character of cement

class	specipic	fineness (cm ³ /gr)	setting					soundness	flow value (nm)	pressure strength		
			Rm. tem (°C)	tem. (°C)	water tem. (°C)	initial (h-m)	final (h-m)			3day	7day	28day
portland	3.15	3,000	25	60	23	3~5	5~20	good	210	173	208	321

잔골재는 구조용으로서 일반적으로 이용되는 한강모래이고 굵은 골재는 요즈음 대부분 건설현장에서 사용하는 쇄석으로 최대지름 19mm를 사용하였다^{9~12)}.

Table 2 Physical character of aggregate

class	specific	absorption (%)	fineness modulus (%)	unit weight (kg/m ³)	solid value (%)	porosity (%)
fineness aggregate	2.53	1~6	2.3	1531	59.3	40.7
coarse aggregate	2.61	0.5~4	6.8	1744	66.8	33.2

2.1.2 시험체 제작

강도시험용 시험체^{13~16)}는 Table 3의 배합비로 한 콘크리트를 $\Phi 10 \times 20$ cm의 실린더형으로 타설하였으며, 24시간 공기중에서 양생을 시킨 후 탈

형을 하여 재령 28일간 수온 20°C에서 수중양생하였다.

Table 3 Cocrete mixing design

Gmax. (mm)	S (cm)	A (%)	W/C (%)	S/A (%)	unit weight (kg/m ³)				
					W	C	G	S	Agent (water-reducing admixture)
19	8	6.0	54.9	44	190	346	1004	783	0.85

2.1.3 시험체의 가열 및 냉각

가열 전기로는 Table 4와 같으며 시험체를 양생 수조에서 꺼낸 후 capping을 하고 표면의 수분을 닦은 후 무게를 측정하여 100°C 건조로에 넣어 24시간 건조시켰다. 여기서 100°C 건조는 각 시험조건을 동일하게 하기 위해서이며 건조시킨 시험체는 무게를 측정후 전기로에 넣어 각 조건에 맞

계 시험을 하였다. 온도상승은 programable controller로 4°C/min로 상승하였으며 가열온도 조건은 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300로 하고 시간변수는 초기 flashover인 10분과 후기 flashover인 1시간으로 하였다¹⁷⁾.

가열 후 시험체의 무게를 측정하고 24시간동안 충분히 서냉시켜 시험체의 온도가 상온과 같은 온도가 되면 실험을 하였다.

Table 4 Heater

voltage	watt	temperature	demension	remark
220V	7.8kW	1500°C	29×20.5×15cm	Programmable controller

2.1.4 시험방법

강도시험은 K. S F 2405를 따랐으며 탄성계수값¹⁸⁾을 측정하기 위해 콘크리트용 케이지를 부착하여 data logger와 load cell로 측정하였다.

2.2 실험결과와 고찰

2.2.1 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. 물리적으로 혼합된 수분(자유수)은 콘크리트에서 방출되며, 그 과정에서 강도는 증가하며 탄성계수는 감소하였다.

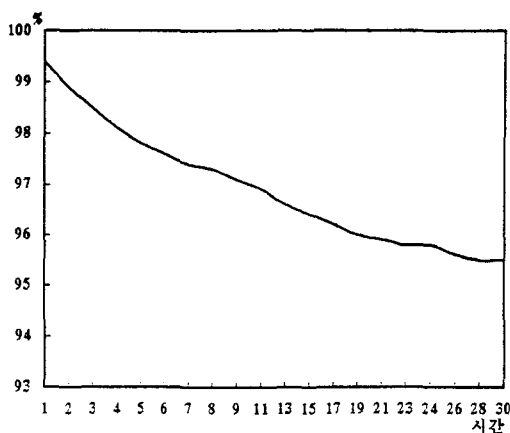


Fig. 1 Moisture content rate of specimens

2.2.2 잔존압축강도

100°C에서 24시간 건조된 콘크리트 공시체의 잔

존강도비는 상온시보다 약 20%정도 범위내에서 증가하였고, 특히, 가열시간 60분의 잔존강도비가 가장 높았다.

200°C에서, 가열시간 10분의 경우는 약 25%정도 잔존강도비가 증가한 반면 60분은 약 5%정도 감소를 보였다. 500°C, 60분의 경우는 잔존강도비가 현저하게 떨어져서 기준강도의 약 60%가 되며, 특히, 400°C보다는 30%의 강도차가 생겼다. 가장 많은 강도의 저하를 보인 곳은 700°C로써 상온시 강도에 약 43%이며, 600°C보다 34% 정도가 낮아졌다.

따라서, 콘크리트의 경우 700°C 이상에서 10분이상 지속되면 가열온도에 현저한 영향을 받으며, 500°C 이상에서 60분간만 가열시간이 지속되면 잔존강도에 치명적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 가열시간과는 관계없이 1000°C 이상이 되면 압축강도는 거의 0이 됨을 알 수 있으며, 오히려 1100°C에서는 강도가 약 6%정도 증가하였다. 또한 1200°C에서는 부분적으로 용융현상을 보여 압축강도실험은 할 수 없었으며, 1300°C에서는 마그마 형태의 완전 용융상태를 보였다.

Table 5 Residual pressure strength ratio

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

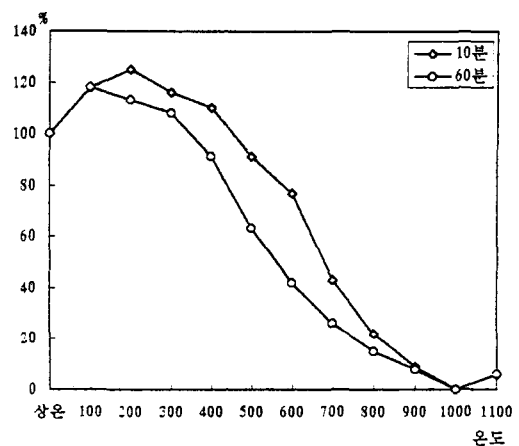


Fig. 2 Heating temperature and residual pressure strength ratio

2.2.3 잔존탄성계수와 최대압축변형

가열온도 100℃(10분, 60분)에서 잔존탄성계수 비는 상온보다 약 30%정도 급격하게 감소하였고, 가열시간 10분에서 100℃~200℃는 완만하게 감소(약 4%)하였으나 300℃에서는 약 20%가 감소하여 상온시 탄성계수의 약 50%정도가 되었다. 또한 300℃~500℃에서 완만하게 감소하였다. 700℃에서는 급격히 감소(약 14%)하였으며, 800℃에서는 거의 Zero에 가깝게 나타났다. 가열시간 60분의 경우에서 200~400℃는 약 15%의 완만한 감소를 보이고 400~500℃에서는 급격한 감소경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 原田¹⁹⁾의 연구결과와 거의 유사하였다.

Table 6 Residual elasticity modulus ratio by heating temperature

class	Rm tem.	100℃	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
60min	100	71.1	56.3	41.4	40.0	15.0	3.4	2.3	1.3

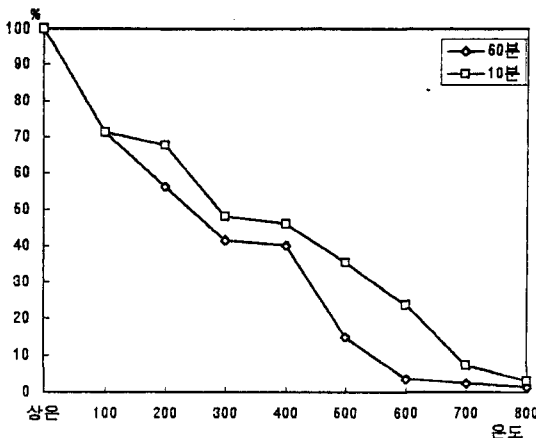


Fig. 3 Residual elasticity modulus ratio by heating temperature

Table 7 Weight reduction ratio of concrete test piece by temperature

class	Rm	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1,000℃	1,100℃	1,200℃
10min	100	95.8	95.6	94.5	93.5	93.1	92.5	91.7	91.4	91.3	91.2	91.1	91.0
60min	100	95.8	94.7	93.5	92.7	92.0	91.0	90.7	90.6	90.7	90.6	90.6	90.6

가열시간 60분의 경우, 200~600℃까지는 직선적으로 감소하고 전감소량의 약 50%가 감소하였으나 600℃이상에서는 중량감소가 거의 없었다.

2.3 균열 및 중산화 현상

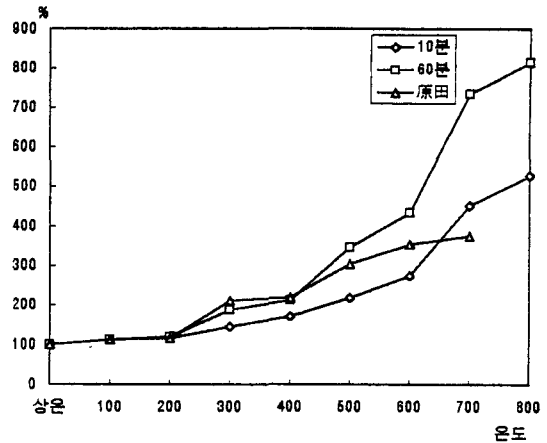


Fig. 4 Maximum pressure strain ratio by heating temperature

최대압축변형은 온도상승에 따라 증가하며 10분의 경우는 600℃이상에서 급격한 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 가장 많이 증가(약 300%)하였다.

2.2.4 온도별 콘크리트 시험체의 중량 감소

시험체의 중량감소는 상온~100℃에서 급격한 감소(4.2%)를 보여 전체 중량감소의 약 50%를 보였다. 이것은 콘크리트 공시체의 자유수가 이탈되는 현상이다. 가열시간 10분의 경우, 200~400℃에서 직선적으로 감소하였으며 400~800℃는 완만히 감소하다 800℃이상에서는 거의 감소하지 않았다.

2.3.1 균열 현상

콘크리트 공시체의 100~200℃에서는 외관상 나타나는 현상은 없으며 300℃, 10분부터 약간의 핑크빛으로 변색하고 가열시간 60분은 부분적으로 핑크빛의 색을 나타내었다. 이것은 표면에 핑크빛

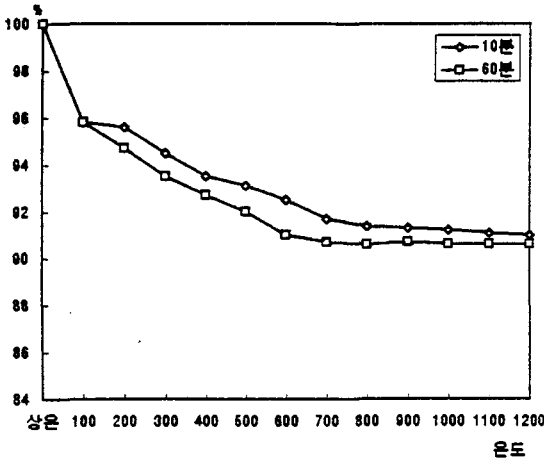


Fig. 5 Weight reduction ratio of concrete specimens by temperature

의 색이 나타나면 가열로 인한 큰 강도손실의 시작을 알려주는 것으로 매우 중요하며, 핑크빛으로 변색된 콘크리트는 의심할 필요가 있다.

400°C가 되면 핑크색으로 콘크리트 공시체 전면에서 나타나고 450°C, 60분이 되면 표면에 미세한 균열현상을 나타냈다.

이것은 콘크리트 강도에 가장 많은 영향을 주며 압축강도가 현저하게 떨어지는 원인이 된다.

550°C, 10분에서는 표면 전체에 미세한 균열현상을 보이고, 또한 온도 550°C(60분), 600°C, 700°C(10분)로 가열하면 표면전체에 미세한 균열이 분포하고 부분적으로 큰 균열이 나타난다.

700°C(60분), 800°C로 가열하면 큰 균열이 부분적으로 분포하고 이어서 중간균열과 미세 균열이 연이어서 전체에 분포한다.

900°C가 되면 큰 균열(최대 1mm)이 방사상으로 분포하고 중간균열(0.5mm)과 미세균열이 전체에 걸쳐 분포됨을 볼 수 있으며, 1,000°C에서는 큰 균열(최대 5mm), 중간균열과 미세한 균열이 혼재하고 표면이 백색의 분말이 퍼져있고 손으로도 부서져서 압축강도는 0이 된다.

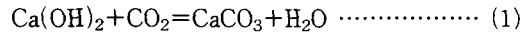
1,100°C는 큰 균열이 방사상으로 분포하고 특히, 굵은 골재까지도 손으로 부서지며 전체에 넓은 갈색을 띤다.

1,200°C는 표면이 용융되어 균열은 보이지 않으나 부분적으로 함몰이 되고 전체에 암갈색을 띄며 오히려 압축강도가 조금 증가하며, 1,300°C가 되

면 잔골재가 완전 용융되어 마그마 형태가 되며, 굳으면 석영질이 녹아 표면이 보석처럼 반짝인다.

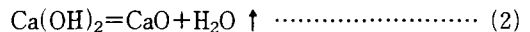
2.3.2 중성화 현상

콘크리트속에 공기중의 이산화 탄소(실내 0.03%, 실외 0.15% 정도 함유)가 침투되면 시멘트의 수화생성물인 수산화 칼슘과 반응하여 비활성의 탄산칼슘을 생성하는데 이것을 탄산화 반응이라 한다²⁰⁾.

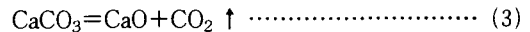


수산화 칼슘의 pH는 12~13의 강알칼리성을 나타내고 이에 반해 탄산칼슘의 pH는 8.5~10으로 된다. 즉, 탄산화 반응에 따라 콘크리트는 알칼리성을 손실하므로 중성화가 된다.

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



콘크리트 모르타르는 보통 약 5%의 CO₂를 함유하고 있으며, 825°C의 열을 받으면 모르타르 중의 CaCO₃는 CO₂를 방출한다²⁾.



따라서 이와같은 콘크리트 성분의 화학작용을 이용하여 시약(phenolphthalein) 1%에탄올 용액(에탄올 90%, 증류수 10%, 페놀프탈레인 1%)을 콘크리트 단면에 분무하여 적색으로 착색되지 않는 부분을 중성화역으로 간주하였다.

또한 중성화 길이와 경과년수와와의 관계식을 이용하여 화재로 인한 중성화 깊이를 측정하여 자연상태에서의 경과연수의 값도 구할 수 있다.

$$x = \frac{1}{b} (w/c - a) \sqrt{t} \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서, x : 평균 중성화 길이(mm)
- t : 경과년수(년)
- w/c : 물시멘트비
- a, b : 상수(포틀랜드시멘트의 w/c=55~75% 콘크리트를 옥외 노출 경우 a=38.4, b=12.0)

실험결과 가열온도 800°C, 60분에서 표면에서 약 10mm정도 중성화가 진행되었음을 볼 수 있었으며, 이 경우 경과년수를 식 (4)에 의해 구하면 b=12, x=10, w/c=55, a=38.4로 t=52가 된다. 따라서 약 50여년의 경과년수가 된다는 것을 알 수 있다.

900~1,100℃에서 골재부분은 중성화되지 않았으나 단면 전체에 중성화가 되어 이 부분에서 압축강도가 거의 없는 상태가 된다는 것을 알 수 있었으며, 1,200℃는 완전히 단면 전체가 중성화되었다.

3. 결 론

콘크리트의 고온에서의 거동에 대한 연구·검토한 결과 수열 콘크리트의 성질은 온도상승 및 가열 시간에 따라 다르게 나타났으며, 그 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수열 콘크리트의 잔존강도는 온도상승과 가열 시간에 따라 다르며 가열시간 변수에서 1시간 가열의 경우는 100℃에서 가장 높았으며 10분은 200℃에서 잔존강도가 가장 크게 나타나 약 25%가 증가하였다. 500℃, 60분에서 잔존강도가 상온의 60%의 범위내로 가장 많이 저하되었고, 가열시간 10분의 경우는 700℃에서 약 40%의 강도가 떨어져 상온강도의 약 40%정도를 나타냈다.
- 2) 수열 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 가열 시간에 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 전체에 중성화를 나타내며 압축강도는 0이 되었다.

참 고 문 헌

- 1) 阪本好史, セメントコンクリートの高温度に

するて抵抗性, コンクリート工學, Vol. 17, No. 11, 1979.

- 2) 田中弘文, セメントコンクリート硬化の耐熱性, 콘크리트工學, Vol. 19, No. 11, 1981.
- 3) KS L 5103, 길모어 침에 의한 시멘트의 응결 시간 시험방법.
- 4) KS L 5105, 수경성 시멘트 모르타르의 인장 강도 시험방법.
- 5) KS L 5105, 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법.
- 6) KS L 5106, 공기투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험방법.
- 7) KS L 5108, 비카 침에 의한 수경성 시멘트의 응결시간 시험방법.
- 8) KS L 5110, 시멘트의 비중시험 방법.
- 9) KS F 2502, 골재의 체가름 시험방법.
- 10) KS F 2503, 굵은 골재의 비중 및 흡수량 시험방법.
- 11) KS F 2504, 잔 골재의 비중 및 흡수량 시험 방법.
- 12) KS F 2505, 골재의 단위 무게 시험방법.
- 13) KS F 2506, 콘크리트용 골재의 빈틈을 시험 방법.
- 14) KS F 2402, 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법.
- 15) KS F 2405, 콘크리트의 압축강도 시험방법.
- 16) KS F 2421, 굳지 않는 콘크리트의 압축강도 시험방법.
- 17) Wei-Tun Chang, Chen-Then Wang, Chin-Wang Hung., "Concrete at Temperatures above 1000°C", Fire Safety Journal, 23 pp. 223~243, 1994.
- 18) 박승범, "변형 및 변위의 측정방법, 최신토목재료실험", 문운당, pp. 283~294, 1996.
- 19) 原田 有, "高温を受けたコンクリートの強度と弾性の變化", 日本建築學會論文報告集, No. 48, 1954.
- 20) 吳昌熙, "鐵筋コンクリート造火建物の火害とその補修に關する研究", 東京工業大學校, 博士論文, p. 197, 1985.