

고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도특성에 관한 연구

An Experimental Study on the Residual Compressive Strength Characteristics of Concrete Exposed to High Temperature

오병환*, 한승환**, 조재열**, 이성규***

ABSTRACT

The influence of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete is important for fire-resistance studies and also for understanding the behavior of containment vessel, such as nuclear reactor pressure vessels, during service and ultimate condition.

The present study is to clarify the damage/deterioration of concrete structures that are subjected to high temperature exposure. To this end, comprehensive experiments are conducted. The major test variables are the peak temperatures, rate of temperature increase, and sustained duration at peak temperature. The results include weight loss, residual compressive strength and stress-strain curve. From those results, residual compressive strength formula and stress-strain relationship are proposed.

1. 개요

콘크리트 구조물의 안전성과 관련된 일화손상을 일으키는 극한환경상태 즉, 화재나 방사능 방사등 매우 높은 온도가 지속적으로 작용할 때 또는 화재등 단 시간 고온에 노출될 때 콘크리트의 하중저항 능력인 강도와 강성에 막대한 영향을 미치게 된다.

이렇듯 고온에 노출된 콘크리트구조물의 거동에 영향을 미치는 요인들을 살펴보면재료성질의 변화, 구조물 부재내의 온도 변화, 철근의 타입, 고온노출기간, 노출의 빈번성등 여러가지가 있다.

그 요인들에 의해 중량손실률, 극한강도의 저하, 탄성계수의 감소, 균열발생 등 콘크리트 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 주게된다. 우리는 재료의 성질변화와 구조물의 손상정도로써 그 구조물의 향후 거동을 예측할 수 있고 이에 앞서 배합강도, 최고온도, 승온속도, 강온속도, 노출지속시간을 변수로 하여 온도에 따른 영향 평가실험을 수행함으로써 그에 따른 콘크리트의 거동 특히 잔류압축강도특성에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 실험변수

가) 배합강도

대체로 배합강도가 높은 경우에 고온에 노출시 잔류압축강도가 양호한 것으로 예측된다. 따라서, 본 실험에서는 단위 시멘트량에 따른 배합

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 대학원

*** 한국원자력안전기술원

강도를 변수로 하여 H-배합과 M-배합으로 구분하였다. 여기서 H-배합은 단위시멘트량이 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 이고 배합강도가 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며 M-배합은 단위시멘트량이 $350\text{kg}/\text{m}^3$ 이고 배합강도가 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

나) 최고노출온도

불의의 화재나 사고시 궁극적으로 콘크리트의 잔류압축강도에 영향을 미치는 최대의 변수는 최고노출온도이다. 실제 사고시를 모사하기 위하여 최고노출온도를 200, 400, 600 그리고 800°C 로 구분하였다.

다) 승강온속도

가열속도 또한 콘크리트내부에 온도구배로 인한 열응력 및 표면에 미세균열을 유발하여 콘크리트의 잔류압축강도 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 요즘들어 $200\text{-}400^\circ\text{C}$ 의 고온에서도 승강온속도를 잘 조절하면 오히려 상당히 높은 압축강도를 낼 수 있다는 보고가 나오고 있어 중요한 변수로 고려하였다. 따라서 본 실험에서는 승온속도를 120 및 $300^\circ\text{C}/\text{hr}$ 로 나누었으며 일반적으로 냉각속도의 제어는 어려우므로 공기중냉각방식과 수중냉각방식으로 구분하였다.

라) 최고온도 노출지속시간

최고온도 노출지속시간 또한 고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 기존문헌에 의하면 대체로 고온에 의한 물리적, 화학적변화는 2시간 내외로 거의 완료된다는 보고가 있으므로 2시간 및 4시간으로 구분하여 실험을 수행하였다.

3. 실험시편의 제작 및 양생

3.1 재료

표1. 골재의 물리적 특성

	종류	비중	흡수율	함수량
세골재	규암질	2.6	1.0%	0.8%
조골재	규암질	2.59	1.3%	0.7%
시멘트	보통포틀랜드시멘트 (Type I)			

최대골재 치수 19mm규암질조골재, 강모래, 보통포틀랜드시멘트(Type 1)를 사용하였고, 혼화제로는 고유동화제(Grace)를 사용하였다.

3.2 배합

변수에 따른 배합은 실험실내의 골재의 비중과 함수량에 따라 다음의 표2와 같은 배합으로 제작하였다. 각 배합에 첨가되는 혼화제는 시멘트량에 따라 조절되어 첨가되었다. (시멘트 중량의 1%)

표2. 배합표

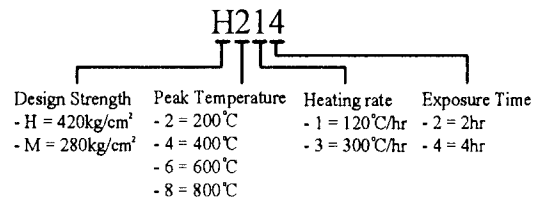
압축강도	배합기준	w/c	시멘트	물	s/a	F.A.	C.A.
420 (kg/cm ²)	중량 (kg)	0.35	500	175	0.43	743.6	984.2
	부피 (m ³)		0.159	0.175		0.286	0.380
280 (kg/cm ²)	중량 (kg)	0.40	350	140	0.39	759.0	1183.6
	부피 (m ³)		0.111	0.140		0.292	0.457

3.3 시편제작

시편은 한 배치당 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 실린더 6개와 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 의 큐브 12개를 제작하여 실린더 6개중 3개는 압축강도(original strength)측정에 사용하였으며, 나머지 3개는 동탄성계수 측정에 사용되었다. 큐브12개중 2개는 압축강도(original strength)측정에 사용되었으며 나머지는 고온노출시험에 사용되었다.

시편의 형태를 큐브로 선택한 것은 고온에 대한 노출조건을 균일하게 하여 시편내에 온도분포를 균등하게 하기위함과 동시에 고로(furnace)의 chamber크기의 제한에 의한 것이다.

시편구분은 표3과 같다. 표3에서 구분한 시편ID는 다음에 의한다.



3.4 양생

타설 후 2시간 후에 오븐에 넣어 양질의 강도 발현을 위하여 24시간 고온양생(105±5℃)시켰다. 그 후 자연냉각 시킨후에 탈형을 하고 수조(25±1℃)에 넣어 28일 양생을 하였다.

표4. 시편구분

변수 시편	강도 (kg/cm ²)	최고 온도 (℃)	승,강온 속도 (℃/hr)	최고온도 지속시간 (hr)
M212	280	200	120	2
M214				4
M232			300	2
M234				4
M412		400	120	2
M414				4
M432			300	2
M434				4
M612		600	120	2
M614				4
M632			300	2
M634				4
M812		800	120	2
M814				4
M832			300	2
M834				4
H212	420	200	120	2
H214				4
H232			300	2
H234				4
H412		400	120	2
H414				4
H432			300	2
H434				4
H612		600	120	2
H614				4
H632			300	2
H634				4
H812		800	120	2
H814				4
H832			300	2
H834				4

4. 실험방법 및 측정

4.1 실험과정 및 방법

개략적인 실험과정은 다음과 같다.

- 1) 수조에서 28일 수중양생한 시편을 꺼낸다.
- 2) 오븐(105±5℃)에 넣어 24시간 건조시킨다.
- 3) 시편의 중량을 잰다
- 4) 목표로 하는 최고온도에 따라 오븐 또는 로(furnace)에 넣는다.
- 5) 1회의 온도 주기를 행한후 꺼내어 중량을 잰다.
- 6) 동탄성계수 측정을 한다.
- 7) 표면색의 변화를 보기위해 사진촬영을 한다.
- 8) 압축강도를 측정한다.

과정(1), (2)에서, 목표로 하는 최고 온도에 따라 200와 400℃를 목표로 하는 시편은 최대용량 500℃의 오븐에서, 600와 800℃를 목표로 하는 시편은 최대용량 1500℃의 로(furnace)에서 동시에 행할 수 있고, 또한 배합강도만 다르고 그밖의 다른 변수는 같은 경우에는(예 : M212 와 H212) 동시에 실험을 행할 수 있으므로 한번에 8개의 시편을 준비한다. 또한 초기함수조건을 맞추기 위하여 원래의 압축강도 측정을 위한 같은 배치에 해당하는 시편, 실린더 6개와 큐브 4개를 동시에 준비한다.

과정(3)에서 중량손실을 조사하기 위하여 정도 1/1000g의 저울을 사용한다.

과정(4)을 수행함과 동시에 실린더 6개와 큐브 4개의 압축강도를 측정한다. 압축강도측정은 MTS(material test system)을 사용한다. 가열에는 코일 발열체를 이용한 오븐과 칸탈발열체를 사용한 로를 사용하였으며 두 장치 모두 디지털 콘트롤러를 장착하고 있어서 프로그램을 이용하여 정확한 실험조건을 부여할 수 있다.

과정(5)에서도 고정(3)과 마찬가지로 정도 1/1000g의 저울을 사용한다.

과정(6)에서는 동탄성계수 측정장치를 사용한다.

4.2 측정 및 계산

가) 압축강도 및 응력변형도 곡선

MTS를 이용하여 극한강도 및 응력-변형도 곡선을 얻고, 그로부터 잔류압축강도 및 탄성계수도 계산한다.

나) 중량손실

고온에 노출시키기 전과 노출시킨후의 중량을 정도 1/1000의 저울을 사용함으로써 고온에

의한 중량손실률을 정확히 측정할 수 있다.

$$\text{중량손실률(\%)} = 1 - \frac{\text{고온노출후중량}}{\text{고온노출전중량}}$$

다) 동탄성계수

동탄성계수측정은 ASTM C 215 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens.에 따른다. 우선 3.5절 1)항 (6)의 과정에서 종진동의 1차 공명 진동수를 얻는다. 동탄성계수의 계산은 다음의 식에 의한다.

$$E_D = C_1 W f_1^2$$

여기서 $C_1 = 408 \times 10^{-5} \frac{L}{A}$
 E_D : 동탄성계수 (kgf/cm²)
 C_1 : (s²/cm²)
 W : 공시체의 무게 (kgf)
 f_1 : 종 진동의 1차 공명 진동수 (Hz)
 L : 공시체의 길이 (cm)
 A : 공시체의 단면적 (cm²)

라) 잔류압축강도

$$\text{잔류압축강도(\%)} = 1 - \frac{\text{고온노출후압축강도}}{\text{고온노출전압축강도}}$$

5. 실험결과

5.1 중량손실(Weight loss)

최고온도, 승·강온속도 및 최고온도 지속시간에 따른 중량손실률을 그림1에 제시하였다. 먼저 최고노출온도가 증가함에 따라 중량 손실이 증가하는 것은 궁극적으로 콘크리트내의 자유수, 결합수의 소멸로 인한 다공성의 증가로 인한 것이다. 대체적인 경향을 볼 때 배합강도 420kg/cm²의 콘크리트가 배합강도 280kg/cm²의 콘크리트보다 모든 경우에 있어서 중량손실률이 보다 큰 것으로 나타났다. 이는 200℃에서의 중량손실이 두 경우가 비슷한 것으로 보아 단순히 자유수의 증발외에 포틀랜드아이트의 분해 (Ca(OH)₂ → CaO + CO₂)와 C-S-H상의 분해 등 화학적 반응에 의한 수분의 소멸이 큰 역할

을 한 것으로 생각된다. 그러므로 자연히 단위 시멘트량이 보다 첨가된 배합강도 420kg/cm²의 중량손실이 크게 된 것으로 사료된다. 그리고 200℃이하에서 비슷한 양상을 보이는 것은 양생 후 실험개시 직전에 오븐에서 24시간 건조시켜 저온역에서 소멸될 수 있는 수분은 이미 대부분 증발 시켰기 때문에 때문에 화학적반응이 거의 일어나지 않는 이 온도영역에선 그다지 큰 중량의 변화가 일어나지 않았기 때문인 것으로 예상된다.

M*12, M*32와 H*12 H*32는 M*14, M*34와 H*14 H*34에 대하여 최고온도지속시간이 상대적으로 짧으므로 물리적, 화학적 반응에 있어서 아직 종결되지 않았다고 볼 수 있으므로(지속시간 4시간의 경우엔 반응이 종료 되었다는 것은 아님.) 당연히 지속시간 2시간의 경우의 중량손실률이 4시간의 경우보다 작게 나타난다. 한편 배합강도 280kg/cm²와 420kg/cm²의 경우 모두 600℃에서 지속시간 2시간의 경우가 상대적으로 큰 손실률을 보인 것은 이해되지 않고 있다. 하지만 기존문헌에 바탕해서 볼 때 실험의 오차로 추정된다. 그리고 H212, M212의 경우 중량의 증가를 보이고 있는데 이것은 단지 실험과정의 착오로 추정된다.

표5. 실험결과 (중량손실 및 잔류압축강도)

시편 ID	중량 손실 (%)	잔류 압축 강도 (%)	시편 ID	중량 손실 (%)	잔류 압축 강도 (%)
M212	-0.02	77.5	H212	-0.04	90.9
M214	0.13	87.2	H214	0.13	105.8
M232	0.14	92.6	H232	0.12	83.0
M234	0.24	94.4	H234	0.16	119.7
M412	0.51	86.8	H412	1.84	74.8
M414	1.41	71.4	H414	2.12	70.9
M432	0.63	74.4	H432	1.86	82.2
M434	0.70	69.9	H434	1.90	72.5
M612	2.32	38.5	H612	3.13	33.6
M614	2.11	36.1	H614	2.75	42.4
M632	2.05	43.1	H632	2.60	57.5
M634	1.57	35.6	H634	2.52	39.6
M812	2.34	21.9	H812	3.12	24.2
M814	2.54	23.3	H814	3.61	29.8
M832	2.34	20.3	H832	3.19	24.7
M834	2.91	18.8	H834	3.78	20.9

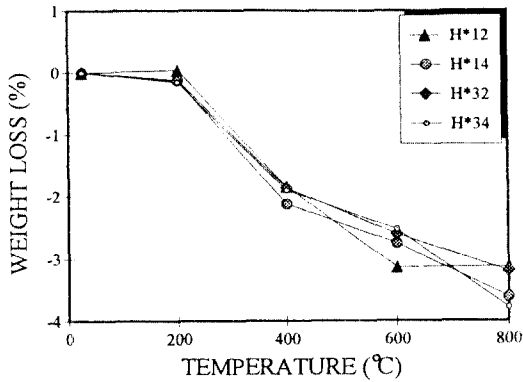


그림1. 중량손실률

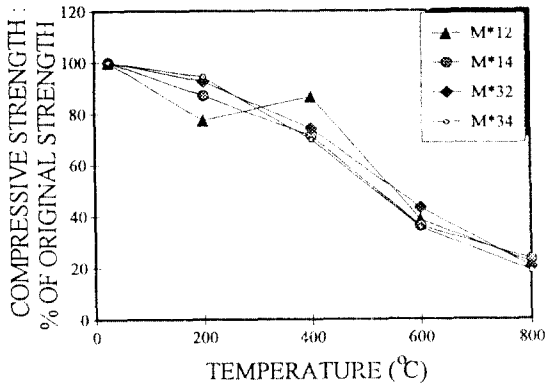


그림2. 잔류압축강도 (280kg/cm²)

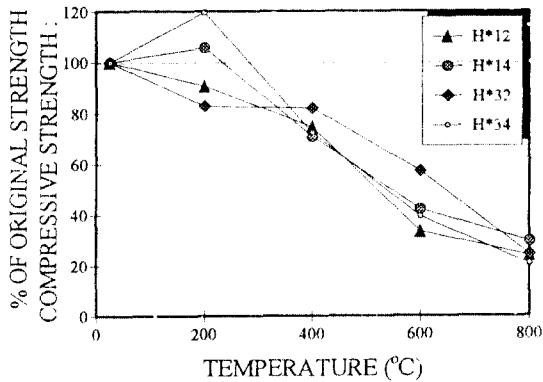


그림3. 잔류압축강도 (420kg/cm²)

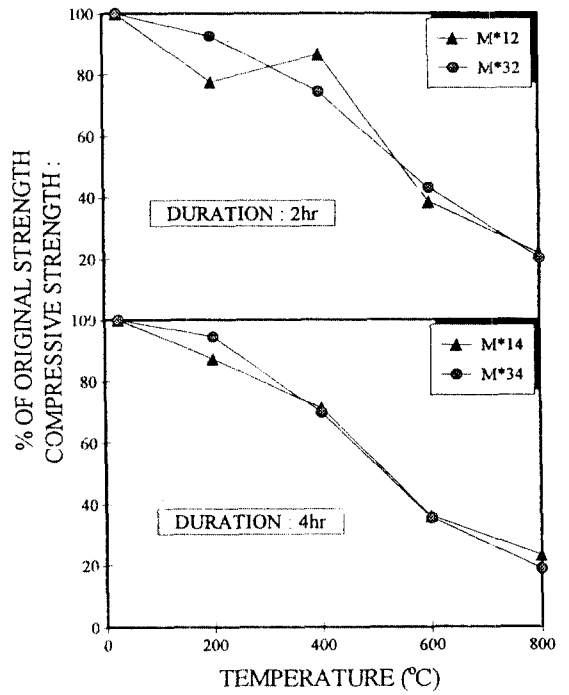


그림4. 승온속도의 영향

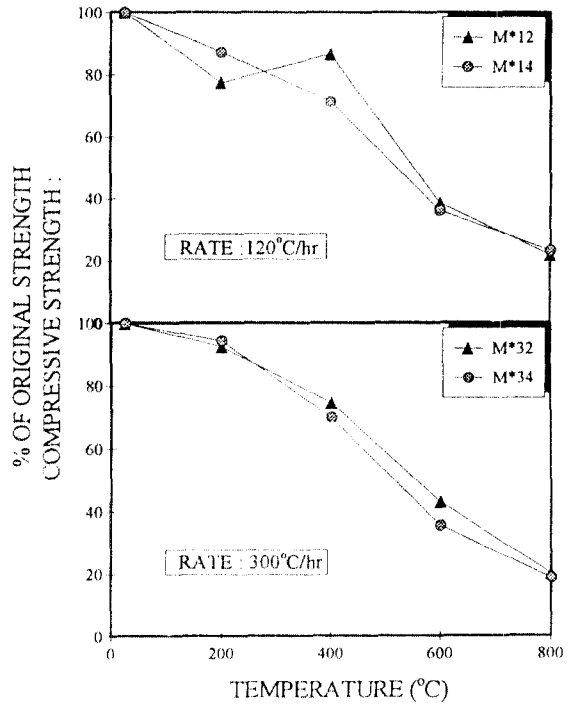


그림5. 노출지속시간의 영향

5.2 잔류압축강도

먼저 그림2와 3에 배합별로 잔류압축강도의 경향을 제시하고 있다. 그리고 거기서 발견할 수 있는 특이 사항에 대해 고찰해 보기위해 그림4와 그림5에서 각 변수에 대한 영향을 검토하고자 한다.

대체로 약 500℃에서 50%정도의 잔류압축강도를 갖고 결국 800℃에서는 약 20%내외의 잔류압축강도를 나타내며 최고노출온도가 높아짐에 따라 현저히 감소함을 볼 수 있다.

가장 특기할 사항은 H214, H234의 경우 작기는 하지만 강도의 증가현상을 나타내고 있다. 이는 여러 측면에서 생각해볼 수 있는데 먼저 M214, M234의 경우엔 강도저하가 나타나는 것으로 보아 단위시멘트량이 결정적인 역할을 한 것으로 보인다. 즉, 압축강도에 유리한 골재-시멘트풀간의 화학반응과 가속화된 화학적 맞물림의 증가 등으로 인한 수화반응, 자유수의 소멸, 또한 C-S-H의 탈수로 부터 그러한 결과가 도출된 것으로 사료된다.

그리고 배합강도가 높을 수록 잔류압축강도가 높은 결과가 나왔다. 이는 고온이 미치는 여러 메카니즘 중 시멘트의 화학적 반응으로 인하여 잔류강도의 손실을 지배하는 것보다 시멘트의 양적 크기로 인하여 득이되는 부착력의 큼 등의 효과가 상대적으로 크게 작용하기 때문인 것으로 추정된다.

기존문헌에 의하면 12℃/hr의 속도로 가열한 것이 60℃/hr로 가열한 것보다 낮은 잔류강도를 갖는다고 나와 있듯이 본 연구의 결과에서도 승온속도가 빠른 경우가 대체로 잔류압축강도가 높은 것으로 나타났다. 하지만 그 양상은 최고 온도 400℃이상에서는 승·강온속도의 영향이 거의 없는 반면에 최고온도 400℃이하에서는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것은 아마도 고온에 노출된 총 노출시간(지속시간외에 승·강온과정 포함)의 지배를 받아 보다 수분손실이 많게 되는 총 지속시간이 긴 경우에 즉, 승·강온속도가 느린경우에 잔류압축강도가 높은 것으로 추정된다.

기존 문헌에 보면 첫가열 단계에서 완전히 끝나지 않은 물리적, 화학적 반응이 거의 끝나기 까지는 최고유지온도에 따라 다르긴 하지만 길게는 5주까지 걸린다는 보고가 있다. 본 연구

의 결과에서도 마찬가지로 어떤 확실한 결론을 끌어내기는 어려우나 대체로 승·강온속도가 120℃/hr의 경우는 최고온도 약 300℃까지는 최고온도지속시간 4시간의 경우가 2시간의 경우보다 높은 잔류강도를 나타냈고 300℃이후에서는 최고온도지속시간 2시간의 경우가 4시간보다 높은 잔류강도를 나타내었다. 이에 대한 원인 분석은 고온이 콘크리트에 미치는 여러 메카니즘의 개개에 대한 연구가 있어야 확실한 결론을 유추해낼 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조가 고온에 노출될 때의 강도 변화를 규명하기 위하여 배합강도, 최고온도, 승온속도, 강온속도, 노출지속시간을 변수로 하였으며 이에 따른 콘크리트의 거동을 연구하였다.

온도의 증가에 따라 콘크리트내의 중량손실이 발생하였는데 콘크리트내의 시멘트 페이스트 양이 많을 수록 고온에 의한 중량손실이 많이 발생하였다.

고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도는 노출온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데, 특히 800℃노출시에는 원 강도의 20%정도의 잔류강도만을 보이고 많은 균열을 유발하는 것으로 결과가 도출되었다. 따라서 고온에 노출된 콘크리트는 노출온도수준에 유의하여 엄격한 검사과정을 통하여 구조적인 전반적인 검토가 수행되어야 한다.

참고문헌

1. S. Mindness and J.J. Young, Concrete, Prantice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981.
2. Dias, Khoury, Sullivan, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700-C (1292-F), ACI Materials Journal, 1990, Vol 87, Iss 2, pp 160-166.
3. Sarshar, Khoury, Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high-temperatures, Magazine of Concrete Research, 1993, Vol 45, Iss 162, pp 51-61.