고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Thermal Properties of High Strength Concrete Exposed to High Temperature

김동준* · 강승구** · 권영진*** · 이재영**** · 原田和典*****

Kim, Dong-Joon · Kang, Seung-Goo · Kwon, Young-Jin · Lee, Jae-Young · Harada Kazunori

Abstract

There is a strong possibility that high strength concrete(HSC) has a serious chance of decreasing efficiency or loss of efficiency in case of exposure to high temperature. It is thought that in fire, the Spalling of High Strength Concrete will more seriously occur because of water tightness. Generally, heat conductivity depend on transition between a object and heat, so a physical and chemical reaction inside concrete has an important role. In this experiment, we measure heat conductivity(W/mK), thermal diffusivity(m^2/s), and specific heat(J/gK) in points at a range of from 200°C to 800°C to review the thermal characteristics of high strength concrete exposed to high temperature. In results, fundamental data, which has experimentally examined and is to achieve fire resistive performance of HSC, is provided.

Key words : Explosive spalling, High strength concrete, Thermal Properties, Fire

요 지

화재 시 고온에 고강도콘크리트가 노출되었을 경우에는 심각한 성능저하 및 손상이 발생할 가능성이 매우 높다. 화재 시 고강도 콘크리트는 수밀성으로 인해 폭발 현상이 더욱 심하게 발생할 것으로 판단되며, 열전도율은 물질의 종류, 온도구배 및 형상에 크게 의존한다. 또한 콘크리트 내부에서 물리·화학적 반응이 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성을 검토하기 위하여 200~800°C의 측정온도에서 열선법에 의해 열전도율(W/mK), 열팽창율(m^2/s), 비열(J/gK)을 측정하였고, 포로시메타를 이용 누적세공량을 측정하여 고강도콘크리트의 내화성능확보를 위한 기초 자료를 제시하였다.

핵심용어 : 폭발, 고강도콘크리트, 열적특성, 화재

1. 서 론

최근 석유화학제품의 증가에 따른 고분자물질의 사용, 연소가 잘되는 가연물의 증가, 편리성 추구에 따른 화재하중의 증가는 화재라는 큰 재앙에 노출되어 있다. 특히 화재에서 고온에 노출된 콘크리트는 조직구조가 변화되며, 심각한 성능저하 및 손상이 발생할 가능성이 높다. 일반적으로 고강도콘크리트(High strength concrete, 이하 HSC)는 플래쉬오버 이후에 따른 콘크리트 내부의 공극압 상승 및 박리에 의한 철

근 노출 등으로 인해 화재시 보통강도콘크리트(Normal strength concrete, 이하 NSC)에 비하여 구조체의 급격한 성능저하를 발생시킬 수 있어 소방대의 진입과 관계인들의 피난에 많은 문제점이 도출되고 있는 실정이다. 건축물이 화재등과 같은 비정상적 온도에 노출되는 경우, 건축물을 이루고 있는 구조재료의 열적 특성 및 고온상태에서의 기계적 성능은 건축물의 화재피해 판정 및 재사용 여부를 결정하는데 중요한 요소가 된다. 더욱이 국내는 물론이고 국외에서 건물, 터널, 지하상가, 지하구등의 대부분을 구성하는 철근철골콘크

*교신저자. 정회원. 호서대학교 대학원 소방방재학과 박사과정(Tel: +82-41-540-5497, Fax: +82-41-540-5738, E-mail:capwns@naver.com)

Corresponding Author. Member. Department of Fire & Disaster Prevention the Doctor's Course, Hoseo University

**호서대학교 대학원 소방방재학과 석사과정

Department of Fire & Disaster Prevention the Master's Course, Hoseo University

***호서대학교 소방방재학과 교수

Professor/Ph.D, Department of Fire & Disaster Prevention, Hoseo University

****교토대학교 건축학과 박사과정

Department of Construction Engineering the Doctor's Course, Kyoto University

*****교토대학교 건축학과 교수

Professor/Ph.D, Department of Construction Engineering, Kyoto University

리트 구조의 재료인 콘크리트는 지금까지 내화재료로 분류되고 있어, 이에 대한 열적·역학적 특성 연구가 목재나 강재와 같은 기타 비내화 구조재료에 비하여 상대적으로 적었던 것이 사실이다(Kodur and Sultan, 2003). 한편 콘크리트의 최신기술은, 건물이 초고층화·대형화 되면서 구조 부재의 단면 감소 및 높은 축력 부담의 필요성 때문에, 빠르게 고강도화 되고 있다. 이미 국내의 기술로 시공된 말레이시아 쿠알라룸푸르 무역센터(KLCC)에 압축강도 80 MPa급, 서울 도곡동 타워펠리스에 50 MPa급의 고강도콘크리트가 저층부 기둥, 벽체 및 기초 등에 적용되었으며, 국내외적으로도 HSC의 사용은 점차 일반화되고 있다. 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트와 비교하여 낮은 물시멘트비, 실리카 흙과 같은 혼화재의 첨가, 유동성 개선을 위한 고성능감수제의 사용, 치밀한 조직 등 많은 차이를 보인다. 기존 연구를 살펴보면, 노출온도가 콘크리트의 강도특성에 끼치는 영향에 대한 연구는 1970년대부터 시작되었으며(Kwon, 2005), 노출온도에 따른 콘크리트의 기계적 특성과 열적특성은 주로 NSC를 중심으로 이루어졌다. 또한 이러한 연구성과는 철근콘크리트 구조부재의 내화기준(Kwon, 2007; Kwon, et al., 2005; Yun, et al., 2002)에 기초자료로 활용되기도 하였다. 그러나 유럽 기준과 같이 현재 각 국에서 규정된 내화설계기준은 다소 제한된 NSC의 내화실험결과를 근거로 하고 있으며, 이를 HSC에 동일하게 적용하기에는 전술한 바와 같이 재료의 특성 측면에서 무리가 있다고 판단된다. 한편 고온에 노출된 HSC의 열적·역학적 특성에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(Phan, 1996; Noumowe, et al., 1996; Swamy, 1987; Harada, 2008). 콘크리트 열적 특성 연구는 크게 단위용적중량, 비열, 중량손실율, 열전도율, 열팽창율 등과 같은 물리적 특성연구와 압축강도, 탄성계수, 공극률등과 같은 역학적 특성 연구를 분류될 수 있다. 고온에 가열된 NSC에 대한 연구는 쉬나이더(1986)에 의하여 시작되었으며, 고온에 가열된 HSC에 대한 연구는 카스틸로와 듀라니(1990)에 의하여 시작되었다. 우리나라의 경우에는 김홍열(2002)년에 고온에 가열된 HSC에 대한 연구가 있었다. 고온에 노출된 HSC의 압축강도, 인

장강도 및 탄성계수 등은 온도가 높아짐에 따라 저하되며, 같은 NSC와는 차이가 보이고 있다. 이러한 차이는 100°C에서 400°C의 온도에서 두드러지게 나타나며, 일반적으로 NSC는 300°C까지 가열될 경우 초기압축강도에 약 10~20%정도, 600°C에서는 60~75% 정도의 강도저하를 나타낸다. 그러나 HSC의 경우는 강도의 감소는 더욱 커서 450°C 미만에서는 초기압축강도에 비하여 40%정도 강도저하가 일어난다고 보고되고 있다(10). 그러나 HSC에 대한 최신연구의 주된 분야는, NSC와의 열적특성에서 가장 큰 차이를 보이는 폭렬의 발생 여부 및 발생메커니즘에 집중하고 있으며, HSC의 열적·역학적 특성에 관한 연구는 매우 미진한 형편이다. HSC가 많은 건축물에 적용되고 있는 현실점에서 HSC의 고온시 열적·역학적 특성, 특히 열전달 특성이나 내화설계 및 화재 진화 후 기존 건축물의 안전성 평가시 요구되는 노출온도에 따른 HSC의 잔여 압축강도 특성은 시급히 규명되어야 할 주된 연구 주제이다. 고인성 복합체(Engineered cementitious composite 이하 ECC)의 경우는 재료개발을 하여 폭렬효과에 탁월한 것으로 들어났다(Kim, 2011). 그러므로 본 연구는 50~100 MPa급 HSC의 노출온도에 따른 열적·역학적 특성을 실험적으로 규명함으로써, 열전도해석 프로세스 열특성모델을 구축하여 철근콘크리트 건축물의 내화설계기준 작성 또는 보통강도 콘크리트를 근거로 규정된 기존 내화설계기준의 개정을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험계획 및 방법

화재 시 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 열적특성을 검토하기 위한 실험방법은 Table 1과 같다. 또한 Table 2와 3에서는 사용재료의 물성치 값과 설계강도에 의한 배합비를 정리하였다. 실험은 한국건설기술연구원에서 온도 21±2°C, 상대습도 27±3%에서 진행되었으며, Fig. 1은 실험에 사용된 시험체로 측정 조건에 맞게 제작을 하였다. 가열조건은 ISO 8894에 의하여 가열하였으며, 시험체는 기건양생을 조건으로

Table 1. Details of experiment

f_{ck} (MPa)	Curing conditions	Heating Condition (°C)	Hardened State
21 50 80 100 ECC	Air curing condition	30~800	- thermal conductivity(W/mK) - thermal expansion rare(m ² /s) - specific heat(J/gK) - Pore size distribution(mL/g)

Table 2. Materials properties

Materials	Density	Size	Note
Water	1.00	-	
Cement	3.15		O.P.C
Fly-ash	2.23		4000Glass
Silica-fume	2.20		200000Glass
Sand	2.54	5mm	Sea sand
Grave	2.59	19mm	Crushed stone-granite

Table 3. Concrete mix proportion

f_{ck} (Mpa)	W/B (wt.)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			Binder	C	FA	SF	S	G
21	0.60	4	287	249	29	9	756	1022
50	0.32	4	516	413	77	26	722	864
80	0.22	4	705	543	106	56	640	797
100	0.18	4	833	625	125	83	552	778

Fig. 1. Test object of the concrete

Fig. 2. The experiment equipment(TCT 426)

한국표준협회 건축구조부재의 내화실험방법으로 온도측정은 평행열선법에 의하여 1개 지점으로 200°C, 400°C, 600°C, 800°C를 설계강도 21, 50, 80, 100 MPa, ECC를 측정하였다. 90분 이후 부터는 1,000°C로 온도를 고정하여 실험체를 가열하도록 하도록 하였다. Fig. 2와 같이 TCT 426로 열전도율(W/mK) 및 열팽창율(m²/s), 비열(J/gK)을 측정하였다. 열전도율, 열팽창율을 분리하여 측정한 이유는 폭발발생메커니즘을 분석하기 위한 실험으로 수증기압설인지 열응력설인지 알아보기 위하여 분리하여 측정하였다. 또한 실험체 크기와 측정방법은 ISO 8894-2에 의했다. 고온 상태에서 수분의 이동이나, 이와 관련된 공극구조는 열적특성 연구에 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 콘크리트 내부의 세공구조를 Fig. 3과 같이 포로시메타를 이용해 측정하였으며, 재료의 물성치는

고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성에 관한 실험적 연구

Fig. 3. The experiment equipment of cumulative pore volume

열전도율, 비열, 열팽창율과 같으며, 가열은 방재시험연구원에서 KS F 2257에 의했다. 압축강도와 함수율이 증가할수록 폭발발생 및 폭발현상이 증대되는 경향이 나타났으며, 압축강도 및 함수율에 따른 폭발발생영역은 압축강도 50~100 MPa의 경우 함수율 3%이하, 100 MPa이상의 경우는 1%이하로 제어할 경우 폭발현상이 발생하지 않을 것으로 판단되었다(Kim, et al., 2011; Han, et al., 2009; Kim, et al., 2007; Ghan, et al., 1999; Kim, et al., 2003). 본 연구에서는 강도에 따른 누적세공량을 비교분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전도율(W/m·K) 실험결과

열전도계수는 온도구배에 대한 열 유동률의 비로서 얼마나 빨리 열을 전달할 수 있는가를 나타내었다. 배합비, 밀도, 골재, 함수율 등에 영향을 받으며 시멘트페이스트의 열전도율 변화가 크지 않으므로 사용 골재의 종류가 열전도율의 주영향 변수이다. 콘크리트의 함수율이 높은 경우, 가열중 물의 증발에 의해, 열전도율의 저하가 크게 나타난다. 골재의 종류는 콘크리트의 열전도율에 중요한 영향이 있다. 이에 따라 골재의 열전도율 증가는 콘크리트의 열전도율의 증가를 가져오게 된다. 고로슬래그시멘트페이스트는 포틀랜드시멘트페이스트보다 높은 온도에서 수분의 방출이 일어난다. 이것은 시멘트의 종류도 열전도율에 영향을 준다는 것을 의미한다.

Fig. 2의 열전도율 실험장비를 이용하여 열전도율을 측정하였으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험 시작과 함께 100°C이내에서 큰 온도차이를 보이지 않던 시험체들은 100~200°C 구간에서 급격한 열전도율 값이 하강하였으며, 이 중 일반콘크리트에 속하는 21 MPa 시험체는 110°C에서 가장

Fig. 4. The result of experiment for the thermal conductivity of concrete

Fig. 5. The result of experiment for the thermal expansion rare of concrete

큰 폭으로 하락하였다. 이후 200~400°C구간에서는 시험체들이 약 0.5(W/mK) 하락하였고, 400~600°C구간에서는 약 0.2(W/mK) 정도 하락하였으며 800°C에 이르러는 열전도율 변화가 거의 없었다.

3.2 열팽창율(m^2/s) 실험결과

Fig. 5와 같이 시험 시작과 동시에 온도가 상승하면서 급격히 수치가 낮아져 400°C에 이르기까지 큰 폭으로 하락하였다. 21 MPa와 50 MPa의 콘크리트의 경우 50%의 하락율을 나타냈으며, 80 MPa와 100 MPa도 이에 근사한 하락율을 나타내며 400~800°C구간에 시험체 NSC와 HSC 모두가 유사하게 하락하는 경향을 나타냈다. ECC의 경우 위 시험체만큼의 하락율은 아니지만 200°C에 이르기까지 약 25%정도 하락하였으며, 200~400°C구간에서 소폭의 하락을 보이며 800°C에 이르기까지 열팽창율 변화가 거의 나타나지 않았다.

3.3 비열($J/g \cdot K$) 실험결과

비열은 단위질량의 온도를 1°C올리는데 필요한 열량으로서

Fig. 6. The result of experiment for the specific heat of concrete

온도변화에 따라 다른 특성을 나타낸다. 상온에서 콘크리트의 비열은 0.8~1.0 kJ/kg·K정도에 있으며, 500°C정도 까지는 화학적 반응과 물의 증발에 따른 잠열의 영향으로 증가하는 경향이 있다. Fig. 6와 같이 콘크리트의 고온 가열시 열용량을 평가하는 인자로서 비열 실험은 최초 100°C에 이르며 21~100 MPa시험체 모두가 20%정도의 상승을 보이며 200°C 구간까지 소폭 상승하였다. 이후로 800°C에 이르기까지 대체로 균일하게 비열 수치가 상승하면서 21 MPa콘크리트에서 100 MPa콘크리트 순으로 압축강도의 수치가 낮은 콘크리트에 비열이 높게 나타났다. 또한, 100 MPa콘크리트의 경우 다른 콘크리트의 성향과 달리 600~800°C구간에서 비열수치가 하락하면서 200°C구간에서의 비열수치와 근사한 값을 나타냈다. ECC의 경우 실험시작과 동시에 급격히 하락과 상승을 반복하며 100~200°C구간에 이르기까지 40%이상의 비열 수치가 하락하였다. 이후 200°C구간에서 소폭 상승하였으나, 400°C구간에서 100~200°C구간의 수치와 근사하게 하락하여 800°C까지 비열 변화가 거의 나타나지 않았다.

3.4 강도에 따른 누적세공량 측정결과

Fig. 7에서 보듯이 21 MPa이 공극률이 가장 크게 나타났으며, NSC에 비하여 HSC의 경우가 공극률이 작게 나타났다. 그러므로 공극이 작을 수록 강도가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 NSC에 비하여 HSC의 경우가 가열 전후의 차이가 큰 것을 알 수 있으며, 가열전 보다는 가열 후에 공극률이 증가하였다. 21 MPa과 50 MPa의 경우에는 1 μm 에서 공극률이 급속히 증가하는 경향을 보였으며, 80 MPa과 100 MPa의 경우에는 0.1 μm 부근의 공극률이 급속히 증가함을 보였다. 이러한 경향은 pp섬유에 의한 영향으로 보인다. 밀폐된 구조에 의한 수화에 필요한 수분 증발이 억제되어서 Fig. 8에서와 같이 저강도에 비해 고강도로 갈수록 누적세공량은 작아지는 경향을 나타내었다.

3.5 콘크리트 강도에 의한 열적 특성치 비교

Fig. 9는 콘크리트 강도에 의한 열적 특성치를 상온 및 200°C로 비교 분석한 결과이다. Fig. 4~6에 보듯이 콘크리트

Fig. 7. Pore size distribution of in four grades of concrete before and after exposure to fire

Fig. 8. Cumulative pore volume of four types of concrete before and after exposure to fire

의 강도 증가에 의한 열적 특성치는 상온 경우와 200°C의 경우가 다르며 상온의 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치는 감소하는 경향이지만, 200°C로 가열한 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치의 변화가 검증되었다. ECC는 200도에서 온도변화가 거의 없으므로 200도 전후의 온도에서는 충분한 안전성이 확보 될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

NSC와 HSC의 콘크리트 열적 특성을 연구를 위해 크게 비열, 열전도율, 열팽창율 등과 같은 물리적 특성연구와 공극률등과 같은 역학적 특성 연구를 수행함으로써 다음과 같은

Fig. 9. Thermal Characteristics

결과를 얻었다.

- 1) 콘크리트의 열적특성(열전도, 열팽창, 비열)은 강도가 고강도화 될수록 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 열전도율과 열확산율의 경우는 200°C까지의 변화가 크고, 비열의 경우는, 200°C이후의 변화가 상대적으로 크게 나타났다.
- 2) ECC의 열적특성은 콘크리트와 다른 특성이 되어 열전도율, 열팽창률 및 비열이 콘크리트와 비교해 낮아졌다.
- 3) 21 MPa의 공극률이 가장 크게 나타났으며, NSC에 비하여 HSC의 경우가 공극률이 작게 나타났다. 그러므로 공극이 작을 수록 강도가 크다는 것을 알 수 있었고, NSC에 비하여 HSC의 경우가 가열 전후의 차이가 큰 것을 알 수 있었다.
- 4) 21 MPa와 50 MPa의 경우에는 1 μm 에서 공극량이 급속히 증가하는 경향을 보였으며, 80 MPa와 100 MPa의 경우에는 0.1 μm 부근의 공극량이 급속히 증가함을 보였다.
- 5) 가열 후에는 공극압력 상승과 더불어 공극량이 증가하여서 폭렬에 미치는 것으로 판단이 되며, 콘크리트의 강도 증가에 의한 열적 특성치는 상온 경우와 200°C의 경우가 다르며 상온의 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치는 감소하는 경향이지만, 200°C로 가열한 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치의 변화가 검증되었고, 200도 전후의 온도에서는 충분한 안전성이 확보 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 이 연구는 2011년도 건설교통기술연구개발사업 11 차년도 C01지원에 의한 것으로, 관계자에게 감사드립니다.

References

- Ghan, Y.N., Peng, G.F., and Anson, M. (1999) Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 23-27.
- Han, C.G. Han, M.C. Kim, W.K., and Lee, J.S. (2009) Effect of Admixture Types and PP Fiber on the Development of Spalling Resistance of High Strength Concrete, *Journal of Korea Architectural Institute*, Vol. 25, No. 11.
- Harada, Kazunori (2008) *PBD & Explosive Spalling of High-Strength Concrete*, Hoseo University Semina.
- Kim, H.Y., Chae, H.C., Jeon, H.K., and Youm, K.S. (2007) Proposal for Characteristics of The Thermal Conductivity and The Model for The High Strength Concrete Mixed with Fiber Cocktail, *Journal of Korea Architectural Institute*, Vol. 27, No.1.
- Kim, D.J., Han, B.C., Lee, J.Y., Harada, Kazunori, and Kwon, Y.J. (2011) The Influence Compressive Strength and Moisture Contents on Explosive Spalling of Concrete, *J. of Korea Institute of Fire Sci & Eng.* Vol. 25. No. 1.
- Kim, J.H. (2011) *A Study on the Development of High Ductile Fire-proof Materials for Improving Fire Resistance Performance of RC Structures*, Hoseo University.
- Kim, Y.Y., Kong, H.J., and Li, V.C. (2003) Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting, *ACI Material Journal*, Vol. 100, No. 6, pp. 511-518.
- Kodur, V.K.R. and Sultan, M.A. (2003) Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, March/April, pp. 101-107.
- Kwon, Y.J. (2005) The Limit Performance of Concrete as a Fire Proof Materials and Fire Performance of Super Tall Residential Building, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 5, pp. 8-13.
- Kwon, Y.J. (2007) Fire Risk Assessment and Safety Design Methods of Super Tall Residential Building, Korea Super Tall Building Symposium.
- Kwon, Y.J., Jang, J.B., Na, C.S., and Kim, M.H. (2005) Research Trends for the Explosive Spalling of High Performance Concrete, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 3, pp. 20-25.
- Noumowe, A.N., Clastres, P., Debicki, G., and Costaz, J.L. (1996) Thermal Stresses and Water Vapor Pressure of High Performance Concrete at High Temperature, *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, Paris, France.
- Phan, L.T. (1996) Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, US Department of Commerce.
- Song, H., Mun, K.J., and Soh, Y.S. (2004) Mechanical Properties and Pore Structure of Cement Matrix at High Temperature, *Journal of Korea Architectural Institute*, Vol. 20, No.1, pp. 107-114.
- Swamy, R.N. (1987) High-strength concrete-material properties and structural behaviors. ACI SP-87, Detroit: American Concrete Institute; p. 110-146.
- Yun, H.D. Kim, G.Y., and Han, B.C. (2002) Strength Properties of High-Strength Concrete Exposed High Temperature, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 5, pp. 698-707.

© 논문접수일 : 2012년 11월 14일

© 심사의뢰일 : 2012년 11월 20일

© 심사완료일 : 2012년 11월 28일