Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 20, No. 3, May 2016, pp.033-041
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.3.033
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

화재 실험에 따른 철근 콘크리트 보의 재료특성 연구

주민관[1], 박철우[2*], 오지현[3], 서상길[4], 심재원[5]

Investigation of Material Characteristics of Reinforced Concrete Beam After Exposure to Fire Test

Min-Kwan Ju[1], Cheol-Woo Park[2*], Ji-Hyun Oh[3], Sang-Gil Seo[4] , Jae-Won Shim[5]

Abstract: Concrete is inherently a good fire-resistance material among all other constrcution materials and protects the reinforcing steel inside. This study investigates the material characteristics of concrete and steel bar inside the full scale reinforced concrete(RC) beam exposed to fire test. The fire test specimen was 4 m long and the test was conducted under no loading condition following KS F 2257. Fire source is simulated by ISO 834 and number of thermocouples were installed to measure temperature variation of surfaces and inside of the beam. The measured compressive strength of cored specimen, which was exposed to fire test, was 11 MPa, about 66% lower than the strength before exposure. The yielding strength of steel bar also decreased about 75 MPa, about 17% lower. The measured temperature of protected steel bar was around 649°C, the critical limit, after 4 hour exposure.

Keywords: Fire test, RC beam, Compressive strength, Yielding strength, Temperature limit

1. 서 론

도로의 화재 피해는 대부분이 터널, 지하도로와 같이 주로 밀폐된 공간에서 차량의 전도, 추돌 등의 사고로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다. 대표적인 터널 화재로는 1999년에 발생한 Mont Blanc Tunnel 화재와 Tauern Tunnel 화재, 2001년에 발생한 Gothard Tunnel 화재가 있으며, 이들 화재로 인해 많은 인명 피해와 구조물의 구조적인 손상이 발생하였다. 국내에서도 2005년에 달성터널에서 발생한 화재에 의해 터널 내부 전기, 송기 설비와 콘크리트 라이닝의 폭렬이 발생한 사례를 들 수 있다(Kim et al., 2009).

최근에는 터널구간뿐만 아니라 교량구간에서도 대형화재가 발생하여 막대한 손해를 초래하는 사례가 증가하고 있다. 화재사고, 특히, 고속도로 교량과 같은 기간 사회간접시설물에서의 화재는 인명 및 개인재산 뿐만 아니라, 사회경제적으로도 매우 큰 손실을 초래하는 매우 중요한 재난 중 하나로 꼽힌다. 최근 수십 년간의 급속한 사회발전에 따른 도시의 거대화로 인해 교통량 증가와 함께 독성 및 화염 원을 동반한 운송물량들의 증가도 이루어져 왔으며 이에 따른 교량구조물에 대한 화재안전성의 관심이 꾸준히 증대되고 있는 실정이다. 미국 뉴욕 주의 조사에 따르면 1990년~2005년 사이에 화재로 인한 교량 붕괴 등의 사고가 지진에 의한 피해보다 약 세 배 이상 발생한 것으로 조사되었다(NYDoT, 2008).

이러한 차량화재에 직접적인 영향을 받을 수 있는 시설물은 교량구조물이며 교량 상부 및 하부 등에 발생한 차량화재는 심각한 사회적 문제를 야기할 수 있다. 특히 교량의 하부공간은 물류저장시설 또는 주차장 등의 목적으로 활용되는 경우가 많은데, 이러한 물류시설 또는 주차장 등으로의 활용은 2010년 부천교가교의 사례에서와 같이 매우 심각한 교량구조물 및 사회 경제적 피해를 야기한다.

2010년 12월에 서울외곽순환도로 송내IC-장수IC 구간에 가설된 부천고가교 하부에 불법 주차된 유조차에서 발생한 화재로 인하여 이 구간에 가설된 강재 거더를 갖는 교량의 상부가 고열로 인해 교량기능을 상실하였다. 하부 콘크리트 교각의 경우, 고온에 노출된 콘크리트 일부가 폭렬 피해를 받았으며 교량 받침장치도 일부 손상되었다. 이 화재로 인하여 국내 최대수준의 일평균교통량(Average Daily Traffic, ADT)을

[1]정회원, 강원대학교 건설시스템공학과 연구교수, 공학박사
[2]정회원, 강원대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사, 교신저자
[3]정회원, 도로교통연구원 안전연구실 연구원, 공학석사
[4]정회원, 한국도로공사 대구지사 차장, 공학박사
[5]정회원, 도로교통연구원 안전연구실 수석연구원, 공학박사
***Corresponding author:** tigerpark@kangwon.ac.kr
Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Samcheok Korea
•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright ⓒ 2016 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1 Bucheon Br, South Korea

(a) Mac Arthur Br, CA, USA (b) Ikebukuro Sen, Tokyo, Japan

(c) Wiehltal Br, Germany (d) SR528, FL, USA

Fig. 2 Bridge fire events caused by underneath fire

나타내는 구간인 송내IC-장수IC 구간(251,131만대, 2009년 기준)이 약3개월간 차단되었고, 그로 인해 직접 복구 공사비 150여억 원 이외에도 총 1,958억 원의 유무형적 손실이 발행하였다. Fig. 1은 부천고가교 화재 발생상황이다(Korea Expressway Corporation, 2011).

유류와 같은 위험물을 운송하는 탱크로리의 전도, 추돌사고로 인해 발생한 대형화재가 교량의 붕괴나 큰 손상을 초래하는 사례가 외국에서도 보고되고 있다. 대표적인 교량 화재로는 2007년 미국 캘리포니아에서는 샌프란시스코 Bay Bridge에 진입하는 고가교에서 유조차의 전복으로 교량 위에서 발생한 화재에 의해 상부교량이 수십 미터 가량 낙교 하는 사건이 발생하였다(Fig. 2(a)). 이 화재로 일평균 28만 명이 이용하는 도로가 폐쇄되어 출·퇴근 시 혼잡을 일으키는 동시에 물류·운송업계에 막대한 피해를 초래하는 등 심각한 사회적 손실이 발생했다. 이후 교량 개통까지는 약 26일이 소요되었으며 그 소요비용만 해도 약 5,000,000달러(약 60억 원)가 투입되었다. 그 외 2008년 일본 동경의 Ikebukuros Sen 고가교 화재(Fig. 2(b)), 2004년 독일의 Wiehltal 교량화재(Fig. 2(c))및 미국 플로리다 주의 State Road 528 연결 고가교(Fig. 2(d)) 등의 교량화재 사고가 교량하부에서의 차량화재 또는 사고로 인한 대표적인 사례이다(Korea Expressway Corporation, 2013).

교량구조물은 건축구조물과 달리 외부로 노출되는 구조물로서 화재위험성이 크게 부각되지는 않았다. 이에 따라 교량구조물의 화재의 위험성에 대해 신중하게 고려되지 못하여 왔다. 하지만 교량의 경우 화재에 의한 직접적 피해보다는 도로기능의 상실이라는 간접피해가 매우 크므로 이러한 구조물의 실화재 노출에 관한 연구와 설계기준 등의 준비가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 또한 실물크기의 교량 등과 같은 건설구조물을 실화재에 노출하는 실험적 연구는 규모 및 비용에 따라 매우 제한적 일수 밖에 없다. 따라서 기존 연구는 수치해석을 통한 화재시뮬레이션을 통한 연구가 많은 수준이다.

본 연구는 콘크리트 교량의 주요부재인 거더가 화재에 노출될 경우 이의 재료적 특성변화를 고찰하였다. 이를 위해, 실물모형의 철근 콘크리트(RC) 보를 제작하여 표준 온도곡선에 의해 가열된 화재 실험을 수행한 후 철근과 콘크리트의 화재에 의한 물리적 역학특성을 분석하고자 하였다.

2. 실물 시험체 설계 및 제작

2.1 시험체 제원 및 제작

화재시험에 적합한 철근 콘크리트(RC) 보 시험 체의 제원은 KS F 2257(Korea Standard Association, 2011; Ministry of land, Infrastructure and Transport, 2012) 건축 부재의 내화실험 보의 성능조건에 따라, 단순 지지되는 시험 체의 최소 가열길이 4 m를 고려하여 총 길이를 4.7 m로 결정하였다(Fig. 3).

본 연구에서의 화재 실험은 열전달 특성만을 검토하기 위한 비재하 실험으로서 화재 실험시 열전달 특성에 영향을 미칠 수 있는 구조적 변수인 균열과 처짐 등의 발생을 방지하여

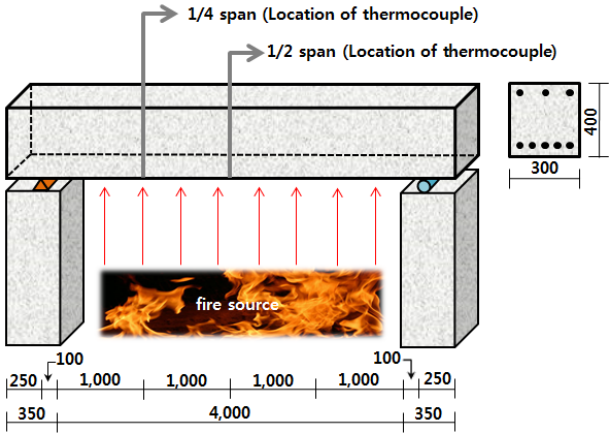


Fig. 3 Dimension of concrete beam to be fire-exposed(unit : mm)

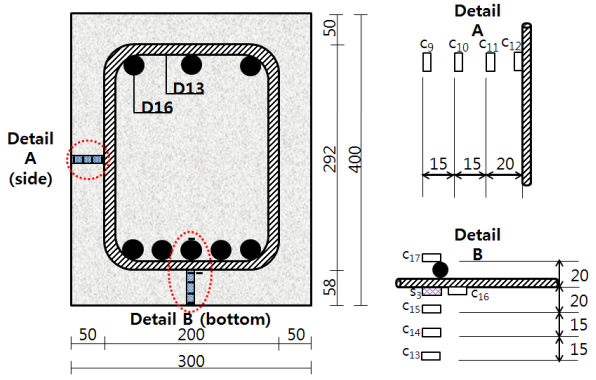
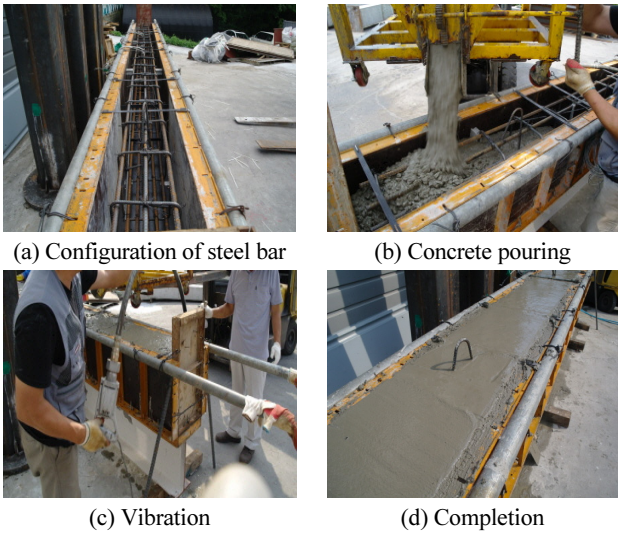


Fig. 4 Cross section of RC beam with thermocouple details at 1/4 span(unit : mm)



(a) Configuration of steel bar (b) Concrete pouring

(c) Vibration (d) Completion

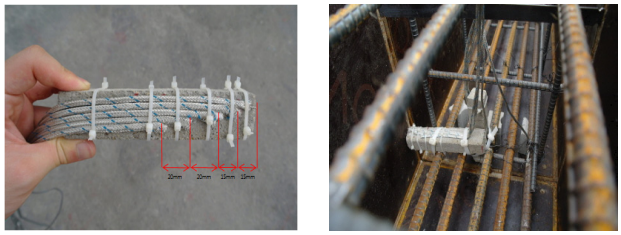
Fig. 5 Fabrication of RC beam

야 한다. 따라서, 설계된 RC 보 시험체가 균열 및 처짐에 대해 충분히 안전한지를 확인할 필요성이 있다. 제작한 시험 체의 상세 단면은 Fig. 4와 같으며, 단면설계를 위하여 처짐 량의 계산은 식 (1)으로 계산된다.

시험체 제작에 사용한 콘크리트는 압축강도 27 MPa, 슬럼프 180 mm의 특성을 가지는 콘크리트를 사용하여 타설하였다. Fig. 5(a)는 거푸집 내부에 철근과 스터럽을 설치한 모습이며, 철근의 배근은 인장철근 D16 철근 5개를 설치하였다. 압축철근은 D16 철근 3개를 설치하였으며 스터럽은 D10 철근을 절곡시켜 250 mm 간격으로 설치하였다.

$$\delta = \frac{5wl^4}{384E_cI_e} \tag{1}$$

여기서, w는 자중(N/m), l은 지간장(m), E_c는 콘크리트 탄성계수(MPa), I_e는 유효단면 2차 모멘트(m^4)이다.



(a) Thermocouples fixed on mortar specimen (b) Installation of thermocouples

Fig. 6 Installment of thermocouples inside of RC beam

구조해석 결과 시험 체의 균열모멘트(M_{cr}) 및 자중에 의한 발생모멘트(M_a)의 값은 각각 27.6 kN·m, 0.037 kN·m로 균열 발생의 가능성은 거의 없는 응력수준인 것으로 검토되었다. 처짐 검토결과, 0.295 mm로 계산되었으며, 콘크리트 구조설계기준(2010)에 명시된 허용처짐값 기준 l/360의 13.1 mm와 비교하면 화재 실험을 위한 RC 보 시험 체는 자중에 의한 처짐 발생을 고려하지 않아도 되는 수준으로 평가되었다.

2.2 시험체 제작

Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)는 콘크리트 타설 과정을 나타내고 있으며 진동다짐기를 이용하여 일정한 간격을 두어 진동다짐을 실시하고, 고무망치를 이용하여 거푸집의 외면으로부터 추가 다짐을 실시하였다. 다짐 작업이 종료된 후 기건 양생을 실시하였으며 Fig. 5(d)는 시험체 제작 완료 사진이다.

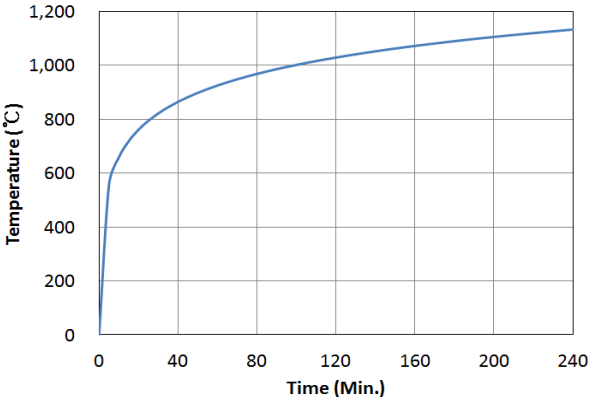
압축강도 측정을 위하여 Φ100×200 mm의 공시체 5개를 제작하였다. 화재가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공시체 2개는 화재실험 시 가열로 내부에 배치하였고, 나머지 공시체 3개는 화재강도 전·후의 콘크리트 압축강도 변화를 직접 비교하고자 표준공시체로서 제작하였다.

화재 실험 중 콘크리트 부재 내에 온도분포를 알아보기 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 지간의 1/4 및 1/2 지점에 열전대를 설치하였다. 열전대 종류는 온도계측 범위가 200~1,250℃인 K 타입 열전대를 사용하였다. 콘크리트 타설 중에 열전대의 위치가 이동하는 제작오차를 사전에 방지하고자 열전대 고정형 모르타르 시편을 제작하여 열전대의 위치별로 구멍을 뚫어 열전대를 고정시킨 후, 콘크리트를 타설하기 전에 열전대의 설계위치에 고정시켰다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 모르타르 시편에 고정시킨 열전대 및 거푸집에 고정시킨 열전대를 각각 나타내었다. 측정하는 위치에 따라 콘크리트의 온도를 측정하는 경우 C로 표기하였고 철근의 위치에서 철근의 온도를 측정하는 경우 S로 표기하였다.

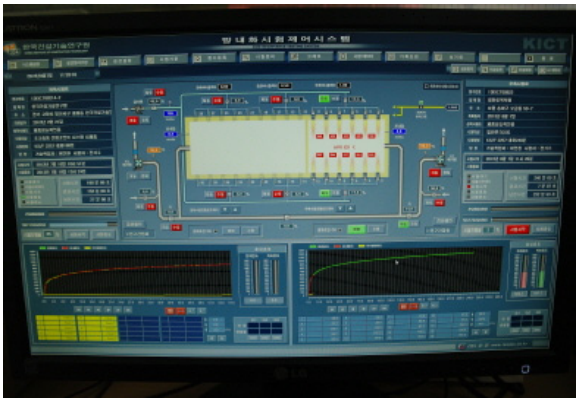
2.3 화재 실험 개요

Fig. 7(a)는 화재실험에서 적용된 온도곡선이며 국제 규격

에 맞는 ISO 834 온도곡선을 사용하였다. 하중가열은 Fig. 7(b)의 자동제어 장치로 수행되었으며 계측된 온도는 실시간으로 저장되었다. 가열 종료 후 상온까지 대기 중에 노출시켜 자연냉각을 실시하였고 이후 콘크리트 코어 및 철근 채취를 완료하였다. Fig. 8은 RC 보의 화재 노출 실험 전경이다. 가열을 위한 열원은 가열챔버 하부 측면에 일정 간격으로 위치하고 있으며 챔버 내부의 공기가 가열되면서 RC 보에 열에너지로 전달되는 가열시스템이다.



(a) ISO 834 Time-Temp. curve



(b) Automatic monitoring system

Fig. 7 ISO 834 Time-Temp. curve and monitoring system

Fig. 8 Experiment test of fire exposure

3. 실험결과 및 분석

3.1 열전대 온도 측정 결과

열전대를 설치한 위치는 1/4지점 및 1/2지점이었으나, 1/2지점에서 측정된 결과는 계측 장비 또는 열전대의 이상으로 인하여 분석에서 제외하였다. 따라서 본 실험결과의 온도분석에서는 1/4지점에서 측정된 결과만 활용하였다. 하지만 가열에 따른 노출조건이 동일하고 보의 길이에 따른 보강근 및 단면의 변화가 없으므로 측정된 결과 값이 측정 위치에 따른 차이는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 ISO 834 온도곡선으로 가열된 보 시험 체에 설치된 열전대의 온도계측 결과이다. 고온챔버 내의 실측 온도는 화재시험 시작 후 약 5,200초(약 87분)에 1,000℃에 도달하였으나, 시험체 표면에 위치한 최대 온도검출 열전대 C-13의 경우 약 5,200초에 800℃를 조금 넘는 수준의 온도분포를 보이며 온도격차가 약 200℃ 발생하였다. 이후 화재시간의 경과에 따라 온도격차가 100℃이내의 수준으로 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 열원과 RC 보 사이의 떨어진 거리가 있기 때문에 가열된 챔버 내부 공기가 콘크리트 하면에 온도하중으로 작용하는 시간차가 존재하기 때문으로 판단된다. 따라서, 적용된 온도곡선일지라도 가열 환경에 따라 콘크리트 부재가 직접 받는 온도하중은 차이가 있을 수 있기 때문에

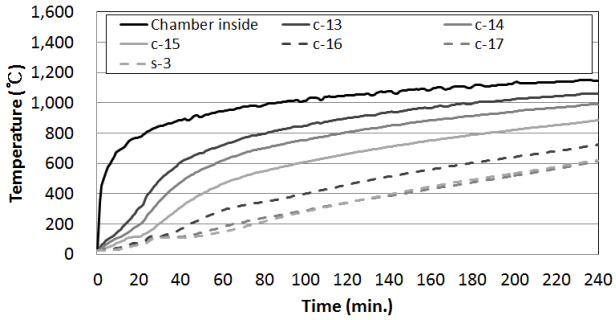


Fig. 9 Temperature of bottom surface at 1/4 span

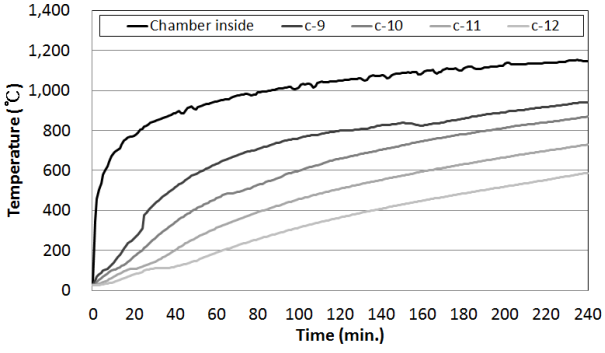


Fig. 10 Temperature of side surface at 1/4 span

열전대와 같은 실제적인 온도계측이 필요하다. 또한, 콘크리트 피복두께에 따른 온도분포는 피복의 두께가 깊어질수록 온도가 저하되는 일반적인 상황을 나타내었으며 깊이별로 그 차이가 커졌으나, 온도증가의 경향은 유사한 것을 확인하였다. 화재 실험 결과, 철근의 경우, 콘크리트 내화피복에 의하여 적절히 보호되어 있기 때문에 4시간의 화재 실험 후 온도는 하면 C-16는 700℃, 측면 C-12는 600℃로 계측되어 내화한계온도의 최댓값인 649℃(Korea Standard Association, 2011) 이내이거나 크게 상회하지 않는 것으로 나타났다.

시험체 하면의 최고온도는 약 1,060℃로 측정되었으나 측면의 경우 최고온도 940℃로 측정되었다. 이는 고온 챔버에 화재가 적용될 경우 전단면에서 유사한 온도분포를 예측하였으나 실제의 경우는 다소 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 경우는 교량 거더 하면의 화재를 예상하였을 때 하면과 측면의 온도차가 더 커질 수 있음을 반증하는 결과이다.

3.2 화재 실험 후 콘크리트의 압축강도 특성

화재실험 결과, 시험 체의 온도가 상승하면서 RC 보 하면에 폭렬이 발생한 것으로 나타났다. 화재 실험 전·후의 콘크리트 압축강도에 따른 열 특성을 파악하기 위하여, 화재 후 비파괴 시험인 슈미트해머 타격과 화재 코어 공시체를 채취했으며 Fig. 11은 그의 위치이다. 슈미트해머 시험을 실시한 위치

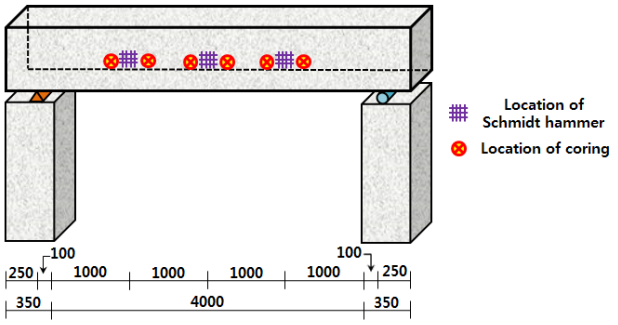


Fig. 11 Location of schmidt hammering and coring for

Fig. 12 Compressive strength specimen exposed in fire chamber

는 1/4지점, 1/2지점, 3/4지점이며 각 지점을 기준으로 RC 보의 상단, 측면, 하면의 3면에 대하여 두 지점씩 총 여섯 지점에 슈미트해머 타격시험을 실시하였다.

화재 코어 공시체는 하면의 폭렬범위, 시험 체의 길이, 코어 시험기의 앵커위치 등을 종합적으로 고려하여 총 6개소에 대하여 채취하였다. 또한, 화재 노출을 받은 콘크리트의 압축강도 특성을 분석하기 위하여 별도로 제작한 공시체를 가열로 내부에 배치하였다. 그러나 Fig. 12와 같이 공시체 표면에서 매우 심한 폭렬 현상이 발생하여 압축강도 측정이 불가하였기 때문에 화재 전후의 압축강도의 변화 특성은 비파괴 시험인 슈미트해머 결과와 화재 코어 공시체와의 비교만을 수행하였다.

RC 보로부터 채취한 화재 코어 공시체의 경우도 화재시험으로 인하여 일부가 부서지는 현상이 발생하여 표면이 거칠게 나타났다. 이에 공시체 양면을 연마기와 절단기로 일부 절단하여 압축강도 실험이 유효한 크기로 제단하여 압축강도 시험을 진행하였다. 또한, 제단 후 짧아진 공시체의 높이에 따른 압축강도 보정을 위해 KS F 2405(Korea Standard Association, 2010)에 따라 보정계수를 적용한 압축강도로 환산하였다.

Fig. 13은 화재 노출 전·후 콘크리트 공시체의 압축강도 변화 이력이다. 화재에 노출되지 않은 공시체의 압축강도의 평균값은 약 32 MPa이었으며 화재 노출 후의 콘크리트 공시체의 경우 압축강도의 평균값은 약 11 MPa로 화재시험 전에 비하여 약 66%정도의 강도저하가 발생함을 확인하였다. 도로교설계기준(2010)에 의한 허용휨압축응력($0.4f_{ck}$)으로 계산된 12.8 MPa과의 비교 결과, 화재 노출 후 시험된 공치세의 압축강도는 11 MPa로서 설계기준상의 허용휨압축응력을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서, 이 실험에서의 화재강도를 받는 콘크리트는 압축강도 안전성을 확보할 수 없는 것으로 판단된다.

반발경도를 이용한 비파괴강도 추정은 가급적 시험 대상 구조 체의 수 개소에 대해서 반발경도를 구하고, 상기 성형 및 코어 표본에 의한 반발경도와 압축강도의 비파괴강도 제안 식

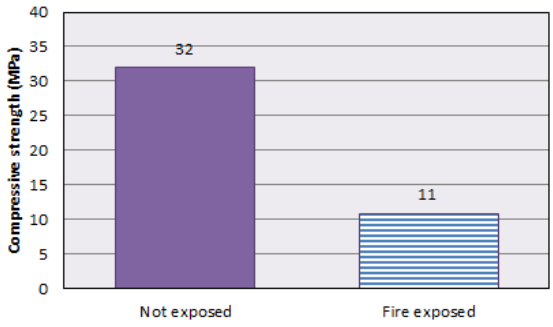


Fig. 13 Comparison of compressive strength of specimens not exposed and fire exposed

을 이용해야 한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011).

추가적인 압축강도 특성 비교를 위한 슈미트해머는 측정지점(경간 1/4, 1/2, 3/4 지점)에서 가로 30 mm 간격 5줄, 세로 30 mm 4줄을 그어 교차점에서 측정한 반발경도 20개의 자료를 활용하였다. 측정허용범위 ±20%의 측정치를 4점 이상 넘지 않게 조사하여 측정한 20지점에 대한 산술평균을 반발경도(R)로 정하며, 반발경도 보정치에 의하여 기준경도(R_o)를 산출, 이를 기초로 한 콘크리트 압축강도(F_c)를 환산 식을 통하여 추정하였으며, 사용된 압축강도 환산 식은 다음과 같다.

$$F_c = -18.0 + 1.27R_o \ (MPa)$$
(일본재료학회에 의한 강도추정식)

$$F_c = 0.098(10R_o - 110) \ (MPa)$$
(동경 건축재료 검사소에 의한 강도추정식) (2)

식 (2) 및 식 (3)에서의 압축강도 추정 식을 사용하여 두 값에 대한 평균값을 재령에 따른 보정치(n)로 각각 보정하여 콘크리트의 평균 압축강도를 산정하였다. Fig. 14~Fig.16은 화재 노출 전·후 슈미트 해머로 측정한 콘크리트 압축강도 변화 이력이다. 슈미트해머에 의해 추정된 1/4지점에서의 화재시험 전 압축강도는 평균 약 28 MPa이였으며 화재시험 후 같은 지점에서 측정한 압축강도는 평균 약 11 MPa로 나타났다.

1/2지점의 경우 화재시험 전 평균 약 30 MPa, 시험 후 평균 약 11 MPa을 나타내었으며 3/4의 경우 역시 화재시험 전 30 MPa, 화재시험 후 11 MPa의 압축강도를 나타내었다. 화재 실험 전·후의 압축강도는 전체적으로 비슷한 수준의 압축강도를 보이는 것으로 나타났다.

하부로부터 가열된 가열로 내에서의 RC 보의 온도하중에 따른 콘크리트 압축강도 특성을 평가하고자 하면, 측면 및 상면에 대해 비파괴 슈미트해머 시험을 실시하였다. 타격위치는 시험 체의 1/4지점, 1/2지점, 3/4 지점이고 이 지점들에서의

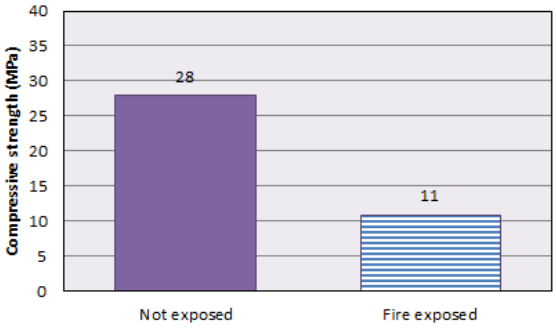


Fig. 14 Expected compressive strength with Schmidt hammer before and after exposure at 1/4 span

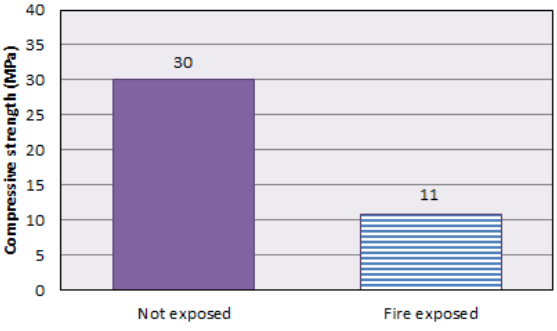


Fig. 15 Expected compressive strength with Schmidt hammer before and after the exposure at 1/2 span

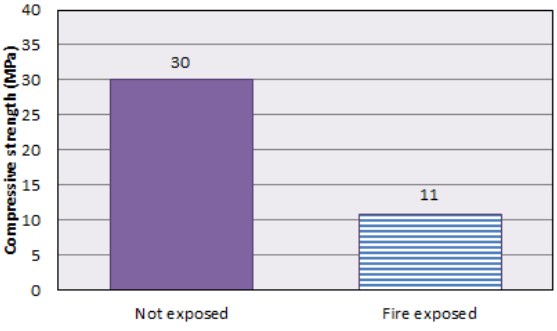


Fig. 16 Expected compressive strength with Schmidt hammer before and after the exposure at 3/4 span

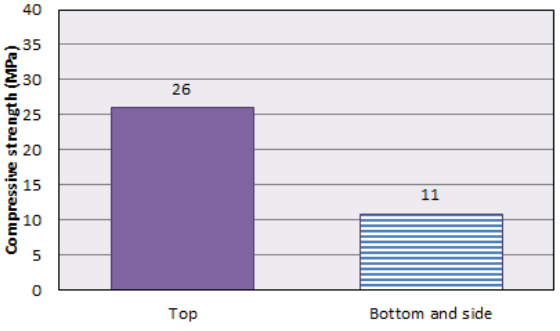


Fig. 17 Expected compressive strength of top and bottom and side surface at 1/4 span

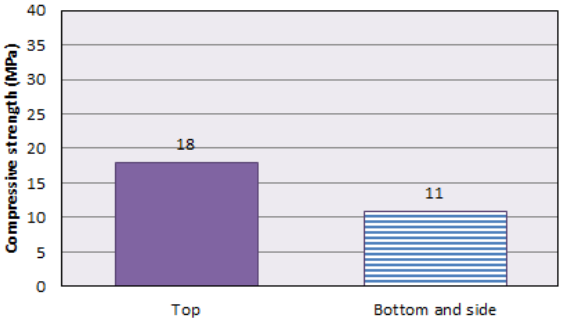


Fig. 18 Expected compressive strength of top and bottom and side surface at 1/2 span

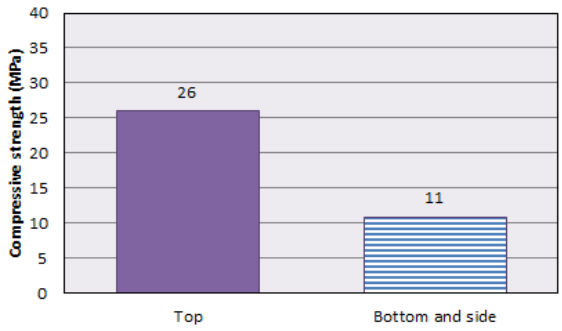


Fig. 19 Expected compressive strength of top and bottom and side surface at 3/4 span

반발경도 측정을 수행하였다. Fig. 17~Fig.19는 슈미트 해머로 측정한 상면과 측면 및 하면의 콘크리트 압축강도 변화 이력이다.

분석 결과, 화재강도를 받지 않은 시험 체의 압축강도는 약 30 MPa이였으며 화재강도를 간접적으로 받은 상면지점의 압축강도는 1/4지점과 3/4지점에서 평균 약 26 MPa로 약 4 MPa의 압축강도 저하를 보인 반면, 1/2지점의 경우 평균 약 18 MPa로 약 12 MPa의 압축강도 저하를 나타냈다. 반면, 화재강도를 직접적으로 받은 측면 및 하면 부분의 압축강도는 평균 약 11 MPa로 화재시험 전에 비하여 약 66%의 압축강도저하를 나타내었다.

3.3 화재 실험 후 철근의 인장강도 특성

구조용 강재는 온도상승과 함께 고온에서의 물성치가 변하게 된다. 특히, 강도저하에 직접적인 영향을 미치는 탄성계수와 항복강도가 고온에서 낮아지는 역학적 특징을 갖는다(Miamis, 2007). 화재 실험 진행 중 시험 체의 온도가 상승하면서 RC 보 하면에 폭렬이 발생함으로써 인장철근의 일부가 화재에 노출되었다. 화재시험 후 시험체에서 채취한 화재에 노출된 철근은 화재에 따라 철근표면 일부가 녹은 흔적이 발견되었으며 이는 철근채취 후 콘크리트 표면에 식별되는 흔적으로 확인되었다(Fig. 20). 화재전·후 철근의 항복강도 특성 변화를 분석하고자 콘크리트 폭렬과 함께 화재에 노출된 철근 2개소와 콘크리트 폭렬이 발생하지 않은 부분에 매립되어 있는 철근 3개소에 대하여 철근을 채취하여 항복강도를 비교 분석하였다. 인장실험 시 인장철근 중에 화재에 노출된 최외각 두 개의 철근과 노출되지 않은 중간부분 3개의 철근을 1 m 길이로 채취한 후 KS B 0802(Korea Standard Association, 2003) 금속재료 인장시험 방법에 따른 크기로 재단하여 철근 인장강도 시험을 실시하였다(Fig. 21).

폭렬이 발생하지 않았던 부분에 매립되었던 철근은 평균 약 453 MPa의 항복강도를 나타내었으며, 폭렬로 인해 화재에

Fig. 20 Exposed steel bars after fire exposure

Fig. 21 Test of tensile strength of fire exposed steel bar

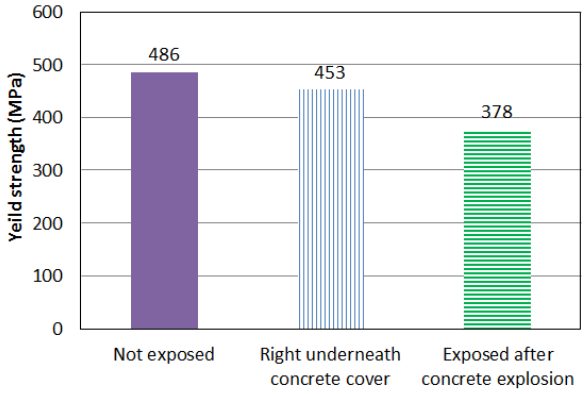


Fig. 22 Measured yield strength of tested steel bar

노출된 철근의 경우 평균 약 378 MPa의 항복강도를 나타내었다.

인장강도 측정 결과 화재에 노출되지 않은 철근에 비하여 약 75 MPa의 강도저하를 나타내었다(Fig. 22). 도로교설계기준(2010)에 의한 SD40 철근의 허용인장응력인 160 MPa 값과의 비교 결과, 화재에 노출된 철근의 경우 378 MPa의 항복강도를 나타내어 최소 인장강도의 안전성은 확보된 것으로 분석되었다. 그러나, 이 실험에서의 인장강도는 화재 후 충분한 냉각기를 거쳐 재료의 탄성복원력이 일정부분 반영된 결과이다. 따라서, 화재를 받는 RC 보의 철근 인장강도 특성에 대해

서는 하중재하 화재실험을 추가적으로 실시하여 인장철근의 물리적 특성을 분석해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

실화재를 받는 RC 보의 재료특성 분석을 위해 표준온도 곡선에 의한 화재실험을 실시하였으며 온도하중에 따른 분석결과는 다음과 같다.

화재 실험전·후에 따른 표준공시체, 화재 코어 공시체 및 화재 철근을 통하여 화재가 콘크리트와 철근에 미치는 영향을 분석하였다. 화재강도를 받지 않은 표준공시체의 경우 약 32 MPa의 압축강도를 나타냈으며, 화재강도를 받은 화재 코어 공시체의 경우 약 11 MPa로 약 66%의 강도저하가 발생하였다. 또한, 비파괴 시험인 슈미트해머를 이용하여 압축강도를 추정한 결과, 1/4지점에서 화재시험 전 압축강도 평균 약 29 MPa, 화재시험 후 평균 약 11 MPa이 측정되었다. 분석결과, 화재시험 전 압축강도 평균 약 30 MPa, 화재시험 후 평균 약 11 MPa로 측정되어 화재시험 후 압축강도가 약 66%정도 저하되는 것으로 나타났다. 단, 공시체의 경우, 온도하중을 모든 부피에서 직접적으로 받은 극한 환경에 노출된 경우이기 때문에 콘크리트 부재의 압축강도 저하를 직접적으로 대표할 수 없을 것으로 사료된다. 향후 실제 화재 환경을 고려한 콘크리트 강도저하 평가의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

철근의 경우, 화재 실험 전·후에 따른 항복강도를 분석하기 위하여 폭렬로 인하여 화재에 노출된 철근과 노출되지 않은 부분의 철근을 채취하여 항복강도를 측정하였다. 콘크리트 폭렬에 의해 화재에 직접 노출된 철근의 경우 노출되지 않은 철근에 비해 약 17%에 해당하는 75 MPa의 인장강도 저하를 나타낸 것으로 분석되었다. 이 실험에서의 인장강도는 화재 후 충분한 냉각기를 거쳐 재료의 탄성복원력이 일정부분 반영된 결과이다. 따라서, 화재를 받는 콘크리트 휨 부재의 철근 인장강도 특성에 대해서는 외력이 가해진 상태에서 화재실험을 추가적으로 실시하여 화재하에서의 인장철근의 역학적 기여도 등을 분석해야 할 것으로 판단된다.

화재 실험 결과, 철근의 경우 콘크리트라는 우수한 내화피복에 의하여 보호되어 극한 온도하중인 약 4시간(240분)의 화재 실험에서도 온도는 한계온도의 최댓값인 649℃를 크게 상회하지 않는 것으로 나타났다. 내화설계기준에서 고려하는 철근의 한계온도를 기준으로 할 때 발생하는 콘크리트의 성능저하로 인하여 전체 구조물의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 향후 내화설계인자 분석을 위해 화원 크기 및 외부하중 작용에 대한 영향이 고려된 실험연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호 · 방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Concrete Structure Design Specification (2012), Korea Concrete Institute.
2. Kim, S.G., Kim, S.J., Kim, D.J., and Kwon, Y.J. (2009), An Investigation on the Tunnel Fire Accident Performance Based Fire Safety Design in Korea and foreign Countries, Proceedings of Korea Institute of Fire Science and Engineering, pp. 341-346.
3. Korea Expressway Corporation (2011), Restoring Design and Construction from Fire Damages for Bucheon High Rise Bridge.
4. Korea Expressway Corporation (2013), Exploring of Fire Resistance Design of Bridge Substructure and Underneath Structure, Research report.
5. Korea Highway Design Specification (2010), Korea Road & Transportation Association.
6. Korean Standard Association (2003), Methods of Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0802).
7. Korean Standard Association (2010), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete (KS F 2405).
8. Korean Standard Association (2011), Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction (KS F 2257-6).
9. Miamis, K. (2007), A Study of the Effects of High Temperature on Structural Steel Framing, Doctoral dissertation.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), Commentary of Diagnosis and In-depth Inspection.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012), Standard for Fire Resistance Structures (No. 2012-625).
12. New York State Department of Transportation (NYDoT) (2008), Bridge Fire Incidents in New York State (Private Correspondence with Prof. M. Garlock), New York State, USA.

Received : 11/25/2015
Revised : 01/19/2016
Accepted : 03/04/2016

요　　지 : 콘크리트는 내화재료로서 우수한 성능을 발휘하지만 화재가 지속됨에 따른 재료특성 변화 또는 성능저하의 위험을 갖는다. 이 연구는 실물모형 철근 콘크리트(RC) 보를 활용하여 비재하 화재 실험을 수행하여 화재노출 전후의 콘크리트 및 보강철근의 재료특성을 실험적으로 분석한 연구이다. 화재실험에 사용된 보는 길이 4 m의 RC 보로서 KS F 2257 화재실험 규격에 따라 시험 체를 제작 및 화재실험을 수행하였다. 화원의 가력은 ISO 834의 표준화재 곡선을 사용하였으며 보 가열부에서의 온도를 계측하고자 하면 및 측면에 열전대를 설치하였다. 실험결과, 화재에 노출된 화재 코어 공시체의 경우 약 11 MPa로 약 66%의 강도저하가 발생하였다. 화재에 직접 노출된 철근의 경우 노출되지 않은 철근에 비해 약 17%에 해당하는 75 MPa의 항복강도 저하를 나타낸 것으로 분석되었다. 철근의 경우 콘크리트라는 내화피복에 의하여 보호되어 약 4시간의 화재 실험에서도 온도는 한계온도의 최댓값인 649°C를 크게 상회하지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 화재실험, 철근콘크리트 보, 압축강도, 항복강도, 한계온도