

화재로 인해 손상 받은 철근콘크리트 구조물의 콘크리트 부착강도 평가

Evaluation of Bond Strength of a Fire-Damaged Reinforced Concrete Structure

심종성*

문도영**

이정환***

Sim, Jong Sung

Moon, Do Young

Lee, Jung Hwan

ABSTRACT

Evaluation of bond strength of a fire-damaged reinforced concrete structure for determining whether to reuse, reinforced, or abandon the structure is very important. Recently, calculating method for changes in bond strength of rebars is proposed by C. Chiang. The equation is relating the ratio of residual bond strength, R , to temperature, T , and exposure time, t . This study presented and verified a general process for evaluating damage to bond strength of RC structure arising from high temperature.

1. 서론

최근의 대구지하철 화재사건은 국내 토목기술자에게 콘크리트 구조물의 내화성능에 대한 큰 관심을 갖도록 하는 계기가 되었다. 화재는 콘크리트내 공기압을 크게 증가시킴으로써 폭발, 박리, 박락 등과 같은 과대한 변형을 발생시킨다. 또한 재료의 급격한 열화를 발생시킴으로써 압축, 인장강도, 부착강도 등 공학적 성능이 크게 저하된다. 따라서 고온에 노출된 철근 콘크리트 구조물은 내화 성능 및 구조적 안전성에 대한 검토가 반드시 필요하며, 결과에 따라 재사용, 보수 및 보강방안을 결정하여야 한다¹⁾.

화재로 손상 받은 콘크리트 구조물의 내화성능 및 안전성을 평가하기 위해서는 고온상태에서의 콘크리트와 철근과의 부착강도에 대한 정량적인 평가가 매우 중요하다. 고온하에서의 철근 및 콘크리트의 역학적 물성과 관련된 기존의 연구결과는 온도에 따른 강도 감소율만을 제시하고 있다. 그러나 화재에 의한 손상을 정량적으로 평가하기 위해서는 화재온도 뿐 아니라 화재지속 시간에 대한 고려가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 최근에 Chiang 등이 제안한 바 있는 철근콘크리트 구조물의 잔존 부착강도 예측식을 고찰하였다²⁻³⁾. 제안된 방법은 기존의 연구결과가 화재 최고온도만의 함수로 재료의 성능을 평가하는 반면 최고온도의 노출시간을 고려함으로써, 정량적인 평가가 가능토록 한 것이 특징이다. 본 연구에서는 상기한 바와 같이 개선·제안된 부착 강도예측방안을 고찰하고, 실제 화재 현장의 자료를 바탕으로 현장의 콘크리트 부착강도를 평가함으로써, 제안된 방법의 실효성을 검증하고자 한다.

* 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수

** 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 대학원 박사수료

*** 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 대학원 석사과정

2. 고온상태에서의 콘크리트 부착강도 평가 모델

Chiang 등²⁻³⁾은 철근이 보강된 몰탈을 여러 가지 온도, 지속시간으로 가열한 후, 인발(Pull-out)시험을 수행하였으며, 이때, 인발력과 온도, 지속시간 등과의 관계를 실험적으로 고찰하였다. 시험결과를 통해 화재온도 및 화재지속시간을 고려한 철근과 콘크리트의 부착강도 평가방안을 다음 식(1)과 같이 제시하였다.

$$R = \frac{(R_m - R_\infty)(1 - R_\infty)}{(R_m - 1)\left(\frac{t + t_o}{t_m} - 1\right)^{2n} + (1 - R_\infty)} + R_\infty \quad \text{식(1)}$$

상기 식에서 R은 잔존 부착강도비로써 대기온도상태의 부착강도비는 1이다. R_m은 R의 최대값, R_∞는 무한 노출시간시 정상상태의 R, t는 화재노출시간, t_m은 최대 R값에 해당하는 화재노출시간, t₀는 냉각시간, n은 실험상수를 의미한다. 또한 상기식은 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$R = 1 \quad \text{at} \quad t = 0; \quad R = R_\infty \quad \text{at} \quad t \rightarrow \infty; \quad R = R_m \quad \text{at} \quad t = t_m$$

상기식의 R_m, R_∞, t_m, n 등은 온도에 의존적인 함수로 정의할 수 있다. 또한 이를 시간에 대하여 미분함으로써, 잔존부착강도 변화율인 식 (2)를 제안하였다.

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{2n}{t_m} \frac{R_m - 1}{(R_m - R_\infty)(1 - R_\infty)} \left[\frac{(R_m - R)(1 - R_\infty)}{(R_m - 1)(R - R_\infty)} \right]^{\frac{2n-1}{2n}} \times (R - R_\infty)^2 \quad \text{식(2)}$$

3. 철근-콘크리트 부착강도 평가

본 연구에서는 실제 화재로 손상 받은 철근 콘크리트 구조물의 안전진단 결과를 상기 제안된 모델에 적용하고, 결과를 비교·검토함으로써, 상기 제시된 부착강도 평가모델의 현장 적용성을 검증하고자 한다.

3.1 화재구조물 안전성 평가 개요⁴⁾

지하 3층 철근콘크리트 구조인 대상구조물은 화재로 인하여 폭열부로 추정되는 구간에는 철근의 노출, 콘크리트의 전면적인 박락 등이 발생하였다. 대상구조물의 안전진단은 화재 현장의 콘크리트 및 철근의 물성시험과 화재에 의한 구조물의 열전달 및 응력해석, 구조안전해석 등으로 나누어 진행되었다. 본 연구에서는 이 중 콘크리트의 물성조사결과와 열전달 해석결과를 통해 철근과 콘크리트간의 부착강도를 평가하고자 한다.

3.1.1 화재시 콘크리트의 온도추정

화재에 의한 콘크리트의 손상을 분석하기 위하여 코아채취를 통한 압축강도 측정, 시차열 분석, X-ray에 의한 반응생성물 분석, SEM 및 EDS에 의한 미세구조분석 등이 수행되었으며, 시험결과는 다음의 그림 1에 나타내었다.

3.1.2 화재시 최고온도 지속시간 및 온도 이력 추정

예기치 않은 화재사고 특성상 구조물에 직접적인 영향을 준 화재의 온도, 지속시간 등 온도 이력을 추정하기가 매우 까다롭다. 고온에서의 콘크리트는 역학적 특성 뿐 아니라 열적특성도 비선형적인 특성을 보인다¹⁾. 따라서 상기 현장시험 결과 제시된 콘크리트 표면의 최고온도(약 700°C)를 바탕으로 콘크리트의 열전달계수, 비열 등을 변수로 열전달 해석을 수행하였으며, 해석결과 가장 손상이 심한 것으로 추정된 2곳의 콘크리트 표면 및 깊이별 온도이력은 그림 1과 같다. 해석에 사용된 제반사항, 즉, 해석모델, 변수 등은 기 발표된바 있는 논문⁵⁾에 제시하였다. 해석결과는 상기 3.1.1의 실험결과와 거의 유사한 결과를 나타냈으며, 이를 바탕으로 콘크리트 표면의 최고온도의 지속은 약 30분인 것으로 추정되었다.

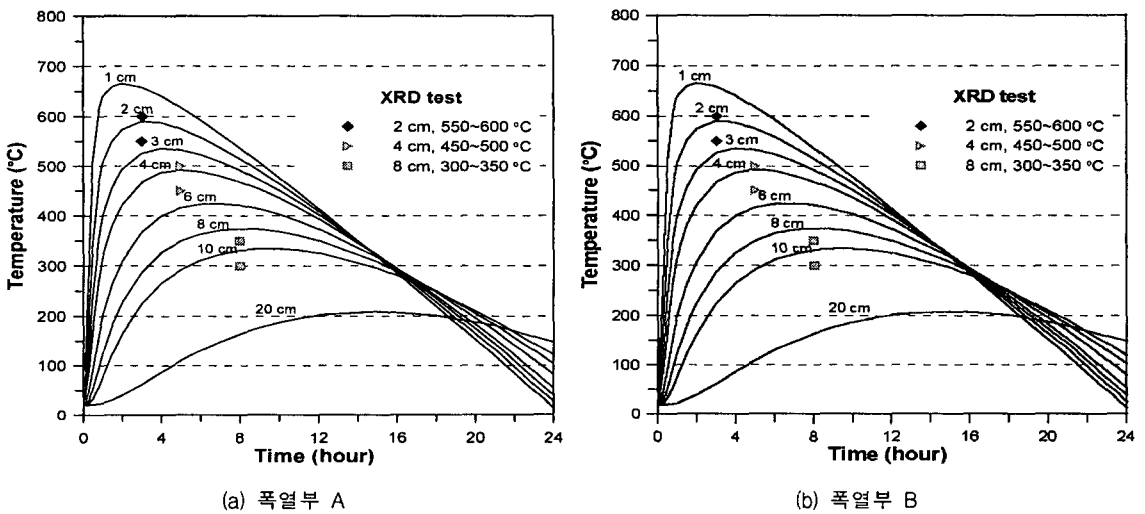


그림 1 시간에 따른 상부 슬래브의 깊이별 온도 분포

3.2 콘크리트의 부착강도 평가

상기의 화재 이력중 철근의 위치인 4cm의 위치의 온도 및 시간을 상기 식 (2)에 적용하여 콘크리트의 잔존 부착강도를 평가하였다.

상기 식 (2)의 적용을 위해 필요한 각 상수(R_m , R_∞ , t_m , n)는 Chiang 등이 실험결과로부터 얻은 결과를 보간하여 본 해석에 적합하도록 하였으며, 결과는 다음의 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석에 사용된 매개변수

Parameters	Temperature (°C)						
	100	200	300	400	500	600	700
R_m	1.2924	1.2324	1.1724	1.1124	1.0524	0.9924	0.9324
R_∞	0.6455	0.5655	0.4855	0.4055	0.3255	0.2455	0.1655
t_m	41.82	41.08	40.34	39.60	38.86	38.12	37.38
n	0.811	0.991	1.171	1.351	1.531	1.711	1.891

상기 식 (2)를 적용하여 의미 있는 값을 도출하기 위해서는 해석간력을 가능한 작게 하여야 한다.

본연구에서는 5분간의 간격으로 3시간까지 해석을 수행하였으며, 먼저 초기 R 값을 1로 하였는데 이는 초기에 화재에 의해 가열되기 전이기 때문이다. 해석과정은 다음의 그림 2와 같으며, 해석결과는 표 2와 같다.

표 2. 부착강도 해석결과

Step	T(°C)	R _i	R _∞	dR/dt/5min	Length of internal
1	22.4064	1	0.707575	-0.00498418	5
:	:	:	:	:	:
9	265.856	0.951065	0.512815	-0.00735421	5
10	287.04	0.943711	0.495868	-0.00743019	5
11	305.408	0.936281	0.481174	-0.00747768	5
:	:	:	:	:	:
21	408.896	0.86118	0.398383	-0.00746274	5
22	415.04	0.853717	0.393468	-0.00744197	5
23	420.736	0.846275	0.388911	-0.00741862	5
24	426.048	0.838857	0.384662	-0.00739266	5
25	431.04	0.831464	0.380668	-0.00736405	5
26	435.712	0.8241	0.37693	-0.00733278	5
27	440.128	0.816767	0.373398	-0.00729882	5
:	:	:	:	:	:
33	462.208	0.773577	0.355734	-0.0070395	5
34	465.344	0.766538	0.353225	-0.00698744	5
35	468.288	0.75955	0.35087	-0.00693305	5
36	471.104	0.752617	0.348617	-0.00687642	5

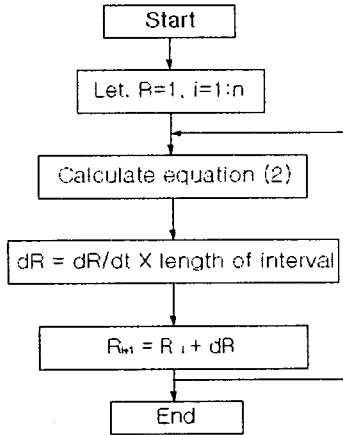


그림 2. 철근 부착력 평가 절차

4. 결과 및 고찰

해석결과 잔존 부착강도가 가열전 부착강도의 75%로 약 25%정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 상기 현장 안전진단 시 폭열부로부터 채취한 코어의 압축강도 시험결과 건전한 부위가 240kgf/cm², 폭열로 손상된 부위가 150kgf/cm²로 나타나, 압축강도의 감소는 약 38%인데 반해, 예측된 부착강도의 감소 정도는 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 철근 위치(표면으로부터 5cm 깊이)에서의 화재에 의한 손상이 다소 적기 때문이며, 예측모델이 이를 잘 반영하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 또한 상기의 부착강도 모델을 이용한 손상평가 방안은 안전진단 과정에서 필수적으로 획득하는 콘크리트 표면의 시간별 온도 자료를 바탕으로 비교적 간편하게 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Andrew H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", Wiley, 2001.
2. C. Chaing and C. -L. Tsai, "Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure", Cement and Concrete Research, 33 (2003), pp. 1651~1654.
3. C. Chaing, C. -L. Tsai, and Y. -C. Kan, "Acoustic inspection of bond strength of steel reinforced mortar after exposure to elevated temperatures", Ultrasonics 38 (2000), pp. 534~536.
4. 심종성 등, "대구지하철 1호선 중앙로역 철근, 콘크리트 물성시험 및 안전성 평가용역", 2003.
5. 심종성 등, "화재로 손상된 지하박스 구조물의 열해석", 한국구조물진단학회, 봄학술발표회는논문집, 2003. 5, pp. 235~240.