

# 화재 피해를 입은 일반 강도 철근콘크리트 휨부재의 구조 거동

## Structural Behavior of Fire-Damaged Reinforced Concrete Beam with Normal Strength Concrete

이 소 진\*    신 영 수\*\*    이 차 돈\*\*\*    홍 성 곁\*\*\*\*  
So-Jin Lee    Yeong-Soo Shin    Cha-Don Lee    Sung-Gul Hong

### ABSTRACT

This paper deals with structural behavior of reinforced concrete beams under fire and fire damaged condition. The main purpose of this study is to investigate the structural behavior of the beams under high temperature condition and to evaluate the remaining strength of flexural members by exposure time to fire. For this purpose, twelve beam specimens are fabricated and experimented. Ten specimens are exposed to the fire for 1 and 2 hours and to the failure. After being cooled in room temperature, the specimens are loaded to the failure. The research result shows that the main variables of the test, concrete cover and exposure time to fire are much influenced on the structural behavior and the remaining strength.

### 1. 서론

화재는 인명 및 재산상 막대한 손상을 준다. 우리나라에서도 1960년대 이후 크고 작은 화재가 발생하였으며 대형건물의 경우 화재 시 발생한 인명 및 재산의 손상뿐만 아니라 화재 후 구조물의 재사용에 대한 논란이 있어 왔다. 철근 콘크리트 구조물의 내화성능에 관한 규정은 적절한 피복을 규정하여 이에 따르도록 규정하고 있다. 즉, 피복에는 철근과 콘크리트의 일체성 및 내구 성능, 화재에 관한 성능 등을 함께 고려하여 피복의 두께를 결정하는 것으로 실제 화재 상태에서 철근 콘크리트 구조물의 성능을 파악하기 위해서는 재료적, 구조적 연구가 필요하다. 철근 콘크리트의 화재에 대한 연구는 외국의 경우 화재에 따른 콘크리트의 재료적 성능 및 특성의 변화와 철근의 변화 등에 대해 많은 연구를 해왔으며 구조체의 경우 화재 후 거동보다는 화재의 발생 시 즉, 고온 하에서 구조물의 거동에 대해 더 많은 연구가 이루어져 왔다. 우리나라에서는 재료적인 측면에서의 화재에 대한 연구는 일부 진행되어 왔으나 구조 부재에 대한 연구는 거의 없는 편이다. 일반적으로, 화재는 화재에 노출되는 시간, 화재시 온도, 구조물의 건조 상태, 구조물의 접합 및 연속성 등에 의해 구조 거동에 영향을 미치는 것

\* 정회원, 이화여자대학교 건축학과 석사과정

\*\* 정회원, 이화여자대학교 건축학과 교수

\*\*\* 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

으로 밝혀져 있다. 우리나라의 화재가 구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 미진한 상태로 우리나라 현실에 적합한 평가 방법과 화재시 안전성 확보를 위해서는 이 분야에 대한 연구가 절실하다. 본 연구에서는 화재가 구조체에 미치는 화재 중 혹은 화재 후 영향을 파악하기 위해, 우리나라 구조물에 일반적으로 사용하고 있는 보통 강도 콘크리트 구조물을 대상으로 휨 부재에 대해 화재 및 화재 후 잔존 강도에 관한 연구를 실험적으로 진행하고자 한다. 실험체의 주요 변수는 화재 노출 시간과 피복 두께로 하였으며, 화재 중 지속하중은 일반적인 사무실에 적용하는 활하중을 사용하여 D+0.25L로 계산하여 적용하였다.

## 2. 실험내용 및 방법

### 2.1 시험체 계획 및 제작

시험체는 건설부 규준인 “극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조 설계 규준”에 의하여 설계하였다. 철근콘크리트 보의 단면 치수 25cm × 40cm, 철근량은 최대철근비( $\rho_{max}=0.75\rho_b=0.01707$ )를 기준으로 주근이 3-D22, 길이 4.7m, 순지간길이 4.5m인 장방형 복근보로 제작하였으며 시험체의 전단 파괴를 방지하기 위하여 전단보강은 D10 철근을 15cm 간격으로 하였다. 시험체 형상은 그림 1과 같다. 시험체 내부의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 부착한 후에 콘크리트를 타설하였고 열전대의 위치는 그림 1과 같다. 시험체는 총 12개를 제작하였으며 시험체 개요는 표 1 과 같다.

표 1 시험체 개요

시험체명	가열시간	지속하중	피복두께	시험체명	가열시간	지속하중	피복두께
T-4	-	8.88tonf	4cm	T-5	-	8.88tonf	5cm
S-4	1시간	8.88tonf		S-5	1시간	8.88tonf	
L-4	2시간	8.88tonf		L-5	2시간	8.88tonf	
SR-4	1시간	8.88tonf		SR-5	1시간	8.88tonf	
LR-4	2시간	8.88tonf		LR-5	2시간	8.88tonf	
F-4	failure	8.88tonf		F-5	failure	8.88tonf	

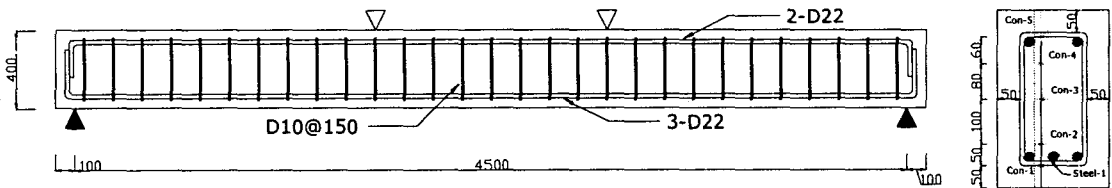


그림 4 시험체 상세 및 열전대 위치

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 가열 실험

가열 실험을 위한 시험체의 설치는 다음 그림 2와 같다. 시험체는 그림 2에서와 같이 수평 가열로에 단순지지 상태로 설치한 후 4점 재하 방식으로 가력하였다. 먼저, 초기 하중 8.88t까지 가력한 후 이 하중을 유지한 상태에서 가열하였다. 가열 전 초기 하중까지 균열의 발생과 수직 변위를 조사하였고

가열 후 고온에 의해 발생한 균열은 그 위치를 시험체에 직접 표시하였다. 가열 온도는 국제 표준인 ISO 834 기준을 따랐다. 이 가열 온도에 따라 보 전체를 시험체 별로 1시간, 2시간 그리고 failure까지 가열하였다. 본 연구에서의 실제 가열온도는 그림 3과 같다. 시험체 제작 시 부착한 열전대에 의하여 온도가 측정되었고 가열 온도에 따른 변위는 보의 중앙 점과 1/4 지점에서 측정하였다.

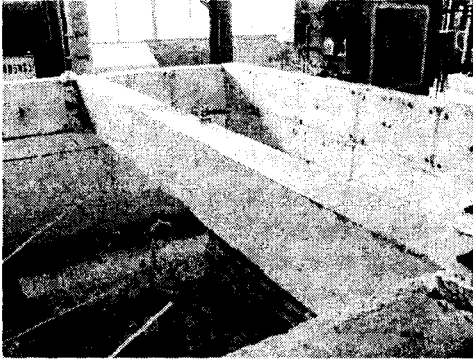


그림 2 가열로 형상

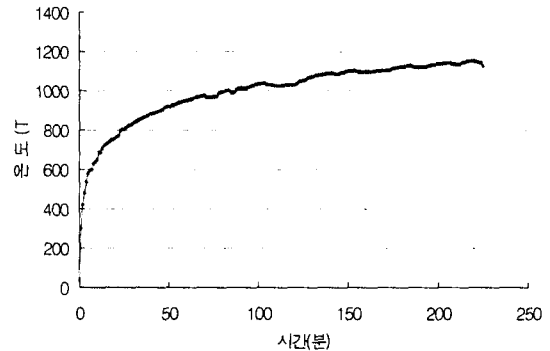


그림 3 실제 가열 곡선

### 2.2.2 잔존 강도 실험

잔존강도 실험은 화재 후 부재의 잔존 강도를 평가하기 위해 가열한 실험체 중 각 변수에 따른 4개에 대해 수행하였다. 본 연구에서는 가열실험과 동일하게 단순지지 상태에서 4점 재하 방식으로 실험하였으며 지간거리는 실험실 여건상 4.0m로 하였다. 하중 점 하부에 로드셀(Load cell)을 설치하여 재하 하중을 측정하였고 시험체의 중앙 및 1/4 지점에 LVDT를 설치하여 부재의 사용성 및 강성의 변화를 분석하고자 하였다. 또한, 콘크리트의 변형율을 측정하기 위하여 실험체 윗면에 1개, 실험체 옆면에 3개의 콘크리트 게이지를 부착하였다. 옆면의 콘크리트 게이지는 5cm간격으로 부착하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 가열실험

#### 3.1.1 온도-시간 곡선에 관한 분석

그림 3의 온도-시간 곡선에 의해 가열한 시험체는 먼저 온도 하중에 의한 파괴가 발생한 시험체를 기준으로 각 시험체에 1시간 혹은 2시간을 가열하였다. 피복 4cm와 피복 5cm의 거동 차이를 보기 위해 파괴시까지 가열한 결과 피복 두께 4cm의 경우 151분 피복두께의 5cm의 경우에는 225분이 소요되었다. 여기서, 파괴의 판정은 국제 표준인 ISO 733 기준에 따라 처짐이  $L^2/400d$ 을 초과하는 경우로 하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 F-5와 F-4 시험체의 온도-시간 곡선을 나타낸 것이다. F-5 시험체의 경우 가열 초기 약 50-60분까지의 내부 온도 변화를 살펴보면 가열 면과 가까운 곳 즉, Con-1, Con-2, 철근의 온도는 초기에 급격히 증가하다가 30분을 기준으로 그 이후부터는 거의 일정한 온도를 유지함을 볼 수 있다. 반면에 가열 면과 먼 곳에 있는 즉, Con-4, Con-5의 온도는 초기에는 거의 변화를 보이지 않다가 30분 이후부터 증가하기 시작하였다. 50-60분 이후부터는 거의 선형으로 온도가 증가하고 그 기울기도 동일함을 보여 준다. 전체적인 경향은 F-5 시험체와 유사하나 동일한 온도에

대해 내부 온도가 상승하는 것을 보여준다.

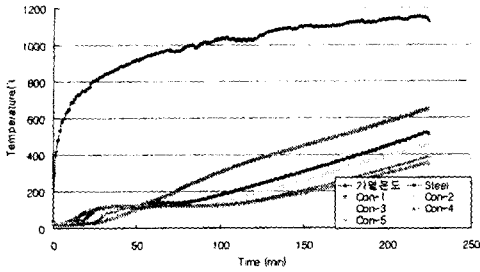


그림 4 F-5 시험체 온도-시간 곡선

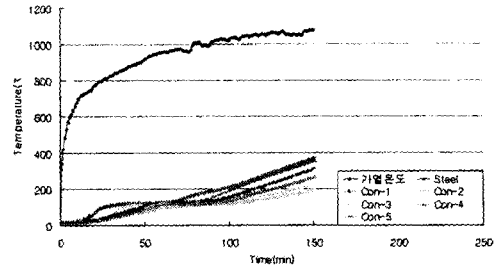


그림 5 F-4 시험체 온도-시간 곡선

### 3.1.2 처짐-시간 곡선에 관한 분석

그림 6과 그림 7은 각각 피복 5cm인 시험체와 피복 4cm인 시험체의 처짐-시간 곡선을 나타낸 것이다. F-5 시험체의 경우를 보면 가열 후 약 25분까지는 처짐이 계속 증가하다가 25분부터 약 100분경까지는 거의 증가하지 않고 일정하게 유지하였다. 이후 100분이 경과한 후 중앙부의 처짐이 16mm 이상이 되면 그 이후부터는 처짐의 증가율이 커짐을 알 수 있다. 이 때의 철근 온도는 약 130°C 정도로 측정되었는데 이 시점까지는 구조물에 큰 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 이후 계속적으로 시간이 경과함에 따라 처짐이 급격히 증가하기 시작하여 파괴점 부근에서는 처짐의 증가폭이 크게 상승하면서 부재가 파괴된다. F-4 시험체의 경우 전반적인 양상은 F-5 시험체의 경우와 유사하지만 F-5의 경우 100분 이후부터 처짐이 급격히 증가하였는데 F-4의 경우는 약 80분 경부터 처짐이 급격히 증가하였다. 즉 피복 두께가 작아 약 16mm 정도 처질 때까지의 시간이 짧아진 것이다. 즉 1cm 정도의 피복 두께 차이가 철근으로의 열 전달과 처짐을 더디게 하여 보다 안전함을 보였다.

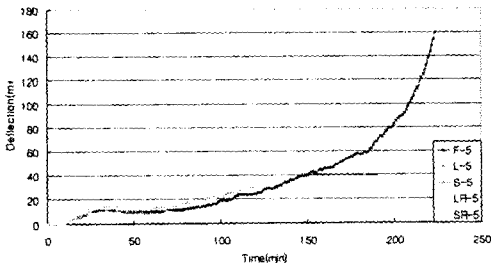


그림 6 피복 5cm 시험체 처짐 곡선

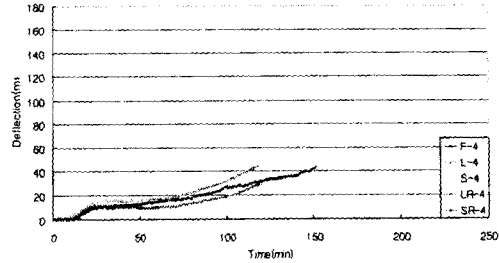


그림 7 피복 4cm 시험체 처짐 곡선

### 3.1.3 누적온도-처짐 곡선에 관한 분석

실제 화재시 어떤 임의의 한 시점에서의 하나의 온도보다는 그때까지 구조물이 받은 총체적인 열이 더 중요하다. 즉, 구조물이 받은 온도를 점차로 누적시켜 그에 따른 변화를 파악하는 것이다. 그림 8은 누적온도와 처짐 곡선을 나타낸 것인데 여기서 세로축에 있는 누적 온도는 매분마다 측정되었던 가열 온도를 차례로 누적시켜서 계산한 것이다. 누적온도가 약 20000°C 정도까지는 처짐이 완만하게 증가하다가 그 이후부터 누적온도가 약 50000°C가 될 때까지는 일정한 수준을 유지하였다. 다시 50000°C 이후부터는 처짐이 급격히 증가하였다. 즉 누적온도가 50000°C 정도가 될 때까지는 구조물에 큰 피해가 없

으나 그 이후부터는 구조물에 손상이 간다고 볼 수 있다.

### 3.1.4 부재 깊이에 따른 온도변화 분석

시험체 내부로 열이 얼마나 전달되는지를 알아보기 위하여 50mm, 100mm, 200mm에서 깊이에 따른 온도 분포를 나타내었다. 그림 9는 F-5 시험체의 깊이에 따른 온도 변화 곡선이다. 가열 초기 약 60분 경까지는 50mm, 100mm, 200mm 각 지점에서 온도의 차이가 30℃ 이하로 미미하였다. 그러나 그 이후부터는 시험체 각 부분에서의 온도차가 증가함을 볼 수 있다. 이는 60분정도까지는 내부로의 열전달이 미미하여 안전하다고 볼 수 있으나 그 이후부터는 내부로의 열전달이 시작되면서 구조적 손상이 간다고 할 수 있다.

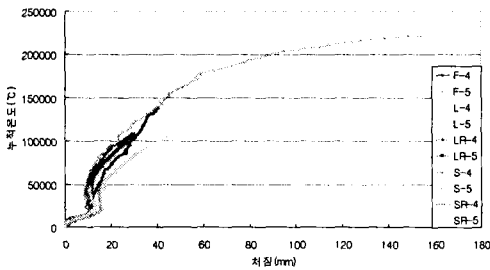


그림 8 누적 온도-치짐 곡선

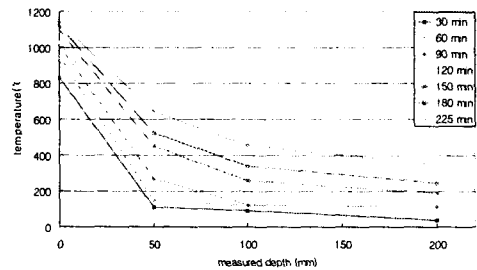


그림 9 F-5 시험체 깊이에 따른 온도 변화 곡선

## 3.2 잔존 강도 실험

### 3.2.1 하중-치짐 곡선에 관한 분석

가열하지 않은 시험체인 T-5, 1시간 가열한 시험체인 S-5 그리고 2시간 가열한 시험체인 L-5 시험체의 하중-치짐 곡선은 그림 10과 같다. 이 세 개의 시험체를 비교해 보면 최대 내력은 20tonf 근처로 모두 비슷하나 T-5, S-5, L-5의 순서로 약간의 차이가 있다. 가력 초기 탄성 구간에서 치짐율을 비교해 보면 T-5는 2.18mm/min, S-5는 2.26mm/min, L-5는 3.09mm/min로 가열하지 않은 시험체인 T-5의 경우가 초기에 치짐율이 가장 적음을 볼 수 있다. 이는 가열하지 않은 시험체는 손상이 없었으므로 다른 시험체에 비하여 강성이 더 커서 치짐율이 작게 측정되어진 것으로 판단된다. 가력 후반에는 세 개의 시험체가 거의 같은 양상을 보인다. T-4, S-4, L-4 시험체의 경우에도 비슷한 양상을 보였다. 표 2는 각 시험체별 최대하중과 치짐율을 나타낸 것이다.

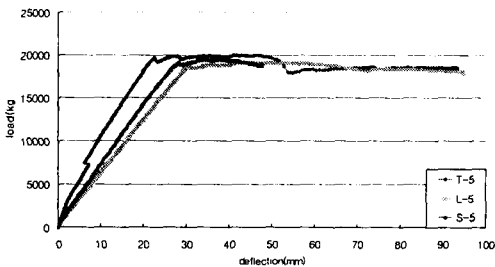


그림 10 피복 5cm 시험체 하중-치짐 곡선

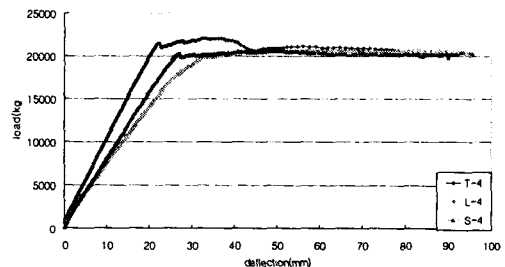


그림 11 피복 4cm 시험체 하중-치짐 곡선

각 시험체별 강성을 비교하기 위하여 곡률 반경( $\rho$ )을 구하였다. 표 3은 각 시험체별 곡률 반경을

구한 값을 나타낸 것이다. 곡률 반경이 클수록 강성이 더 큰 것으로 가열하지 않은 시험체가 강성이 가장 크고 그 다음으로 1시간 가열한 시험체, 그리고 2시간 가열한 시험체가 가장 작았다. 또한 전반적으로 피복이 4cm인 시험체가 5cm인 시험체보다 강성이 더 크게 나타났다. 이는 피복 4cm인 시험체의 d(춤)가 더 크기 때문으로 판단된다.

표 2 시험체별 최대하중 및 처짐율

시험체명	최대하중	하중감소율	처짐율(mm/min)	처짐율 증가율
T-5	19.98tonf	-	2.18	-
S-5	19.44tonf	2.7%	2.26	3.7%
L-5	19.14tonf	4.2%	3.09	41.7%
T-4	22.04tonf	-	1.85	-
S-4	20.54tonf	6.8%	2.83	53.0%
L-4	20.65tonf	6.3%	2.77	49.75%

표 3 시험체별 곡률반경

시험체명	곡률 반경( $\rho$ )	감소율(%)
T-5	77.28m	-
S-5	55.13m	28.6
L-5	31.33m	59.4
T-4	80.64m	-
S-4	69.64m	13.6
L-4	56.05m	30.4

#### 4. 결론

본 연구에서는 화재시 일반강도 철근콘크리트 보의 구조거동에 관하여 실험을 수행하였으면 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 처짐이 16mm 또는 철근의 온도가 약 130℃정도에 이르기까지의 시간이 피복 5cm인 시험체인 경우는 약 100여분, 4cm인 시험체의 경우는 약 80여분정도로 측정되어 피복 5cm인 시험체가 철근으로의 열전달이 더 늦어 보다 우수하였다.
- 2) 누적온도가 50000℃일 때까지 즉 약 60분정도까지는 구조물에 손상을 주지 않지만 그 이상이 되면 구조물에 손상을 주는 것으로 나타났다.
- 3) 잔존 강도 실험에서 가열한 시험체가 가열하지 않은 시험체보다 처짐율이 최대53%까지 증가하는 모습을 보였으며 강성을 나타내는 곡률반경의 경우도 가열한 시험체가 그렇지 않은 시험체에 비하여 최대 53.4%감소하는 양상을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구비 “화재 피해를 입은 고강도 및 일반강도 철근콘크리트 부재의 구조적 성능 규명 및 보수”의 지원으로 수행되었으며 실험체 및 실험진행에 도움을 준 삼성건설, 방재시험연구원에 진심으로 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

1. Xudong Shi, Teng-Hooi Tan, Kang-Hai Tan and Zhenhai Guo(2002), “Effect of Force-Temperature Paths on Behaviors of Reinforced Concrete Flexural Members”, Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 3, pp.365-373.
2. Y. Sakumoto(1999), “Research on Fire-protection Materials and Fire-Safe Design”, Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 12, pp.1415-1422.
3. James A. Milke(1999), “Analytical Methods Evaluate Fire Resistance of Structural Members”, Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 10, pp.1179-1187.