

FEM 해석을 통한 화재를 받은 RC 보의 잔존내력 평가 연구

박원준* · 이한승 · 경제운 강 인 석
<한양대학교> <토탈 인포메이션서비스>

1. 서 론

1.1 연구배경

현대의 건축은 갈수록 고층화, 대규모화, 현대화 및 친환경화를 표명하고 있다. 이러한 건축환경 추세에 따른 변화 속에서 구조물내 발생하는 화재는 결코 간과해서는 안 될 분야이다. 일반적으로 콘크리트가 낮은 열전도율과 열확산율로 인하여 구조물의 방화구획의 자재 및 내화재료로 널리 사용되고 있으며, 구조설계에서도 내화설계의 개념이 통상 적용되는 것도 주지의 사실이다. 하지만, 화재는 화재 발생시 상당한 경제적·인명적 피해를 가져오는 것은 물론이지만, 화재 후 정확한 내력 잔존내력 평가를 실시하지 않을 경우에는 구조물 붕괴와 같은 더욱 커다란 재해를 유발할 수 있는 원인이 된다. 내화성능이 좋은 RC 구조물도 화재시 발열과 균열 등에 의해 재료의 물리·화학적 성분이 변화하여 내구성능이 저하되므로 화재 후 잔존내력의 평가는 반드시 필요하다.

이에 따라, 화재의 피해를 받은 RC구조물에 있어서 화재 진압 이후 재사용 여부를 판단하기 위한 부재 및 재료에 관한 해석적 연구가 다양하게 수행되고 있으며, 본 연구에서는 해석 프로그램을 통해 부재단면내 온도 분포를 가정하고 그에 따른 재료 물성의 변화를 고려한 구조부재의 내력성능을 가능하고자 한다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 잔존내력에 영향을 미치는 재료의 강도와 탄성계수의 관계를 온도해석을 통하여 검토를 하고, FEM 해석을 통하여 고온의 화재 피해를 받은 RC 부재의 잔존내력을 해석적으로 평가하여 화재 후 부재의 잔존내력 평가방법의 정립과 함께 구조적 안전성 파악을 위한 기본 자료를 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 해 석

2.1 해석개요

본 연구의 해석순서는 Fig. 1과 같이 나타낸다. 화재에 노출된 RC 부재의 화재노출 시간에 따른 잔존내력을 구하기 위해 단면위치, 치수, 배근의 형태, 지지조건 및 부재에 사용된 콘크리트와 철근의 강도, 재료모델을 구성한다. 가열조건(가열면, 온도, 가열시간)에 따라 열전도 해석을 수행하여 단면 온도

분포를 산정하고 그에 따른 구성재의 열적특성을 입력하여 화재 후의 부재가 가지는 잔존내력을 평가한다.

압축강도는 온도 및 재하조건에 따라서 UR강도(specimen heated unstressed, tested at Room temperature), UE강도(specimen heated unstressed, tested at elevated temperature), SE강도(specimen heated stressed, tested at elevated temperature)로 나누어지는데, 목표 온도까지 하중을 재하하지 않고 시험체를 가열한 후 실내온도까지 냉각시킨 후 파괴실험을 수행하는 UR강도 측정을 가정한다.¹⁾

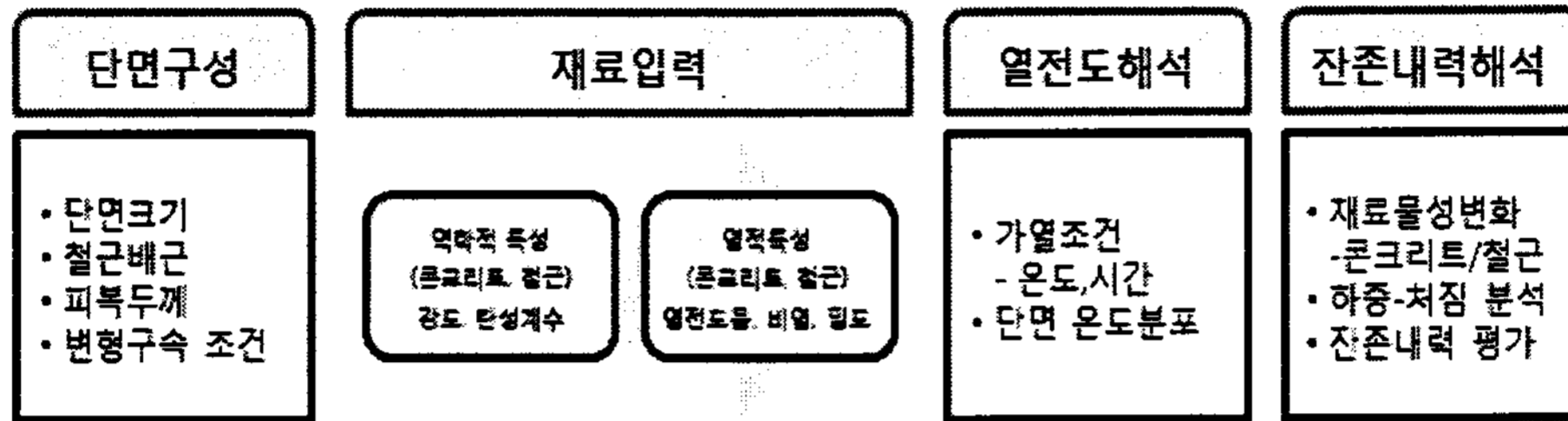


Fig. 1 Outline of Analytical Procedure

2.2 시험체 개요

본 연구에서 FEM에 의한 해석의 대상이 되는 시험체 구성은 아래 Fig. 2와 같다.

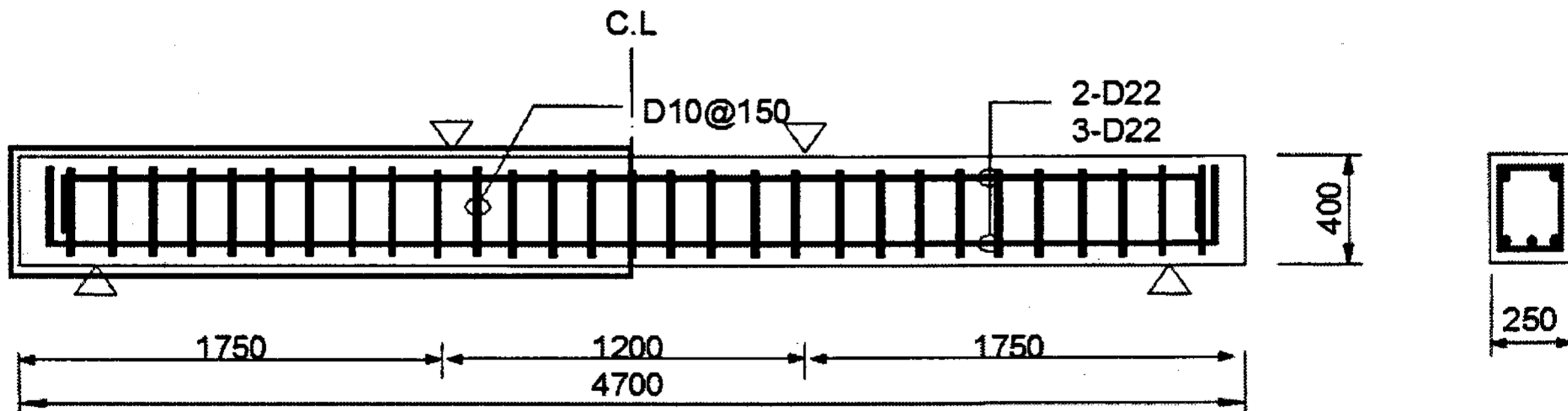


Fig. 2 Geometry of a simply supported beam

또한 대상 시험체의 콘크리트 배합비와 사용된 콘크리트 및 철근의 재료물성은 각각 아래의 Table 1과 2와 같이 정리한다.

Table 1. Concrete mixture ratio

W/C(%)	S/a(%)	단위 중량(kg/m ³)					
		W	OPC	S	G	Fly-ash	A.D
51.2	49.8	140	315	913	893	27	1.71

Table 2. General properties of concrete and steel

구 분	재령(Days)	fc(MPa)	fy(MPa)	Ec/Es(MPa)
콘크리트	28 Days	21.8	2.6	2.29*10 ⁴
철근	-	-	D10, D22 400	1.83*10 ⁵ 1.80*10 ⁵

2.3 열전도해석

Fig. 3은 국제적 시험방법의 표준시간-가열온도 곡선(ISO 834, 식(1))이다. 단, 국부 가열이 아니라 보의 아래 일면에 제한된 가열조건을 가정하여 수행하였다.²⁾³⁾

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

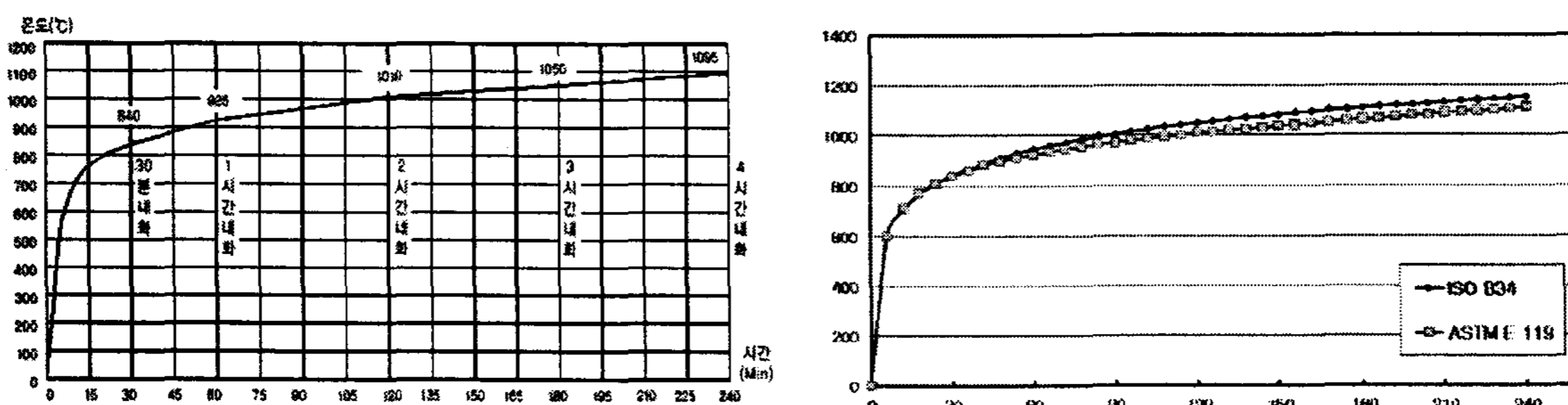


Fig. 3 ISO834 & ASTM E 119 Standard Fire-resistant Curve



Fig. 4 Scene of the testing bench

2.4 잔존내력 평가

Fig. 2에 제시된 시험체를 대상으로 해석모델링과 요소분절 계획은 Fig. 5와 같이 계획되었다. 그리고 앞서 제시된 온도 분포 해석을 바탕으로 각 구획에 해당하는 재료의 물성 변화를 산정, 해당구획의 재료 물성 수치를 입력하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서의 온도해석에는 Total -Temp Program을 사용하였으며, 이후 잔존내력 평가를 위한 구조해석에는 Total-RC Program ver.1.0을 사용하였다. 해석은 전체 보의 절반만 작업하고 중심축을 중심으로 대칭 회전시켜 전체 부재에 대한 해석을 실시하였다.⁴⁾

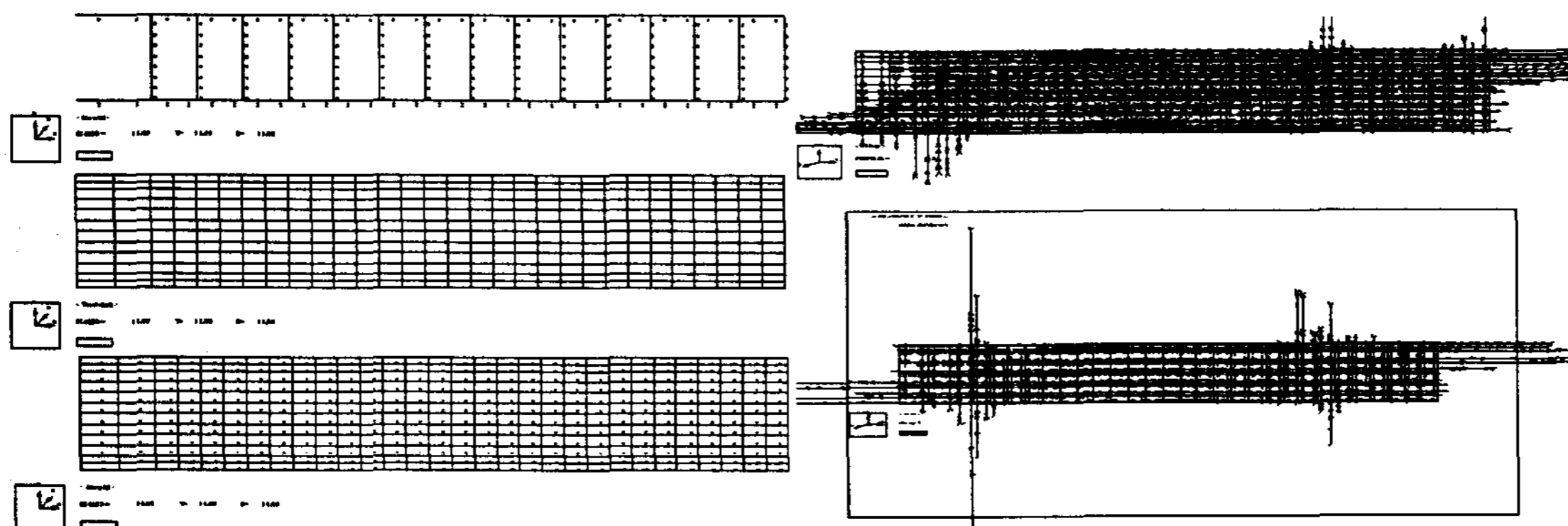


Fig. 5 Elements segmentation of the section & Example of analysis procedure

본 연구에서는 고온에 대한 콘크리트 응력-변형률 관계의 기본 모델은 Lie의 식으로, 그에 따라 제안된 식은 Table. 3과 같고, 콘크리트의 응력-변형률 관계와 온도 구간별 잔존율 관계는 Fig. 6-a, b와 같다. 또한 고온에 대한 철근의 응력-변형률 관계는 Bi-linear의 모델을 토대로 Table. 3과 같이 철근의 온도별 역학적 물성의 잔존율 관계를 설정하였고 철근 응력-변형률 관계와 온도 구간별 잔존율 관계는 Fig. 6-c, d와 같다.³⁵⁾

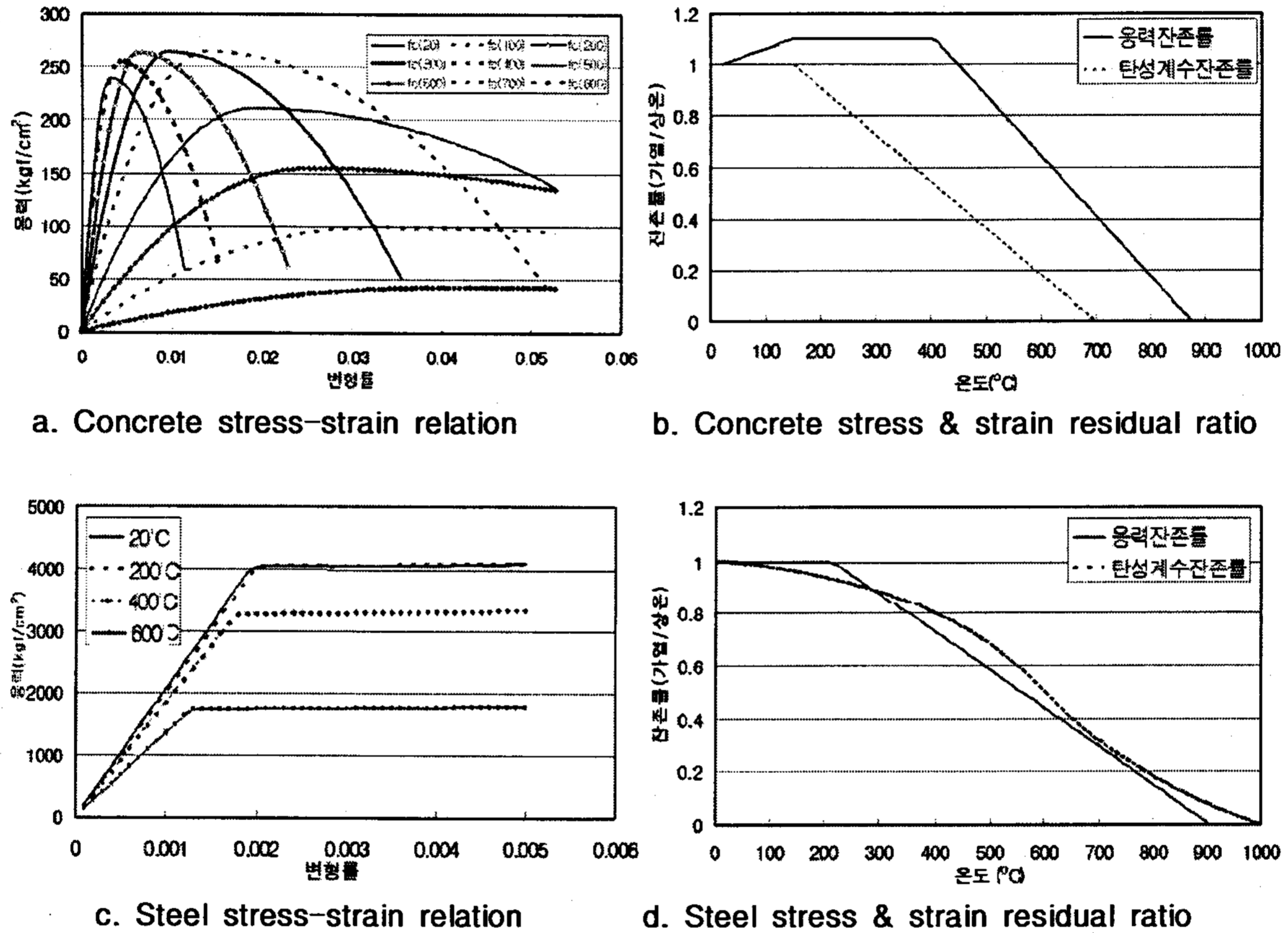


Fig. 6 Material models residual ratio

Table 3. Properties of concrete and steel in high temperature

Concrete		Steel	
f_{ck} 21.8 MPa	E_c $2.29 \cdot 10^4$ MPa	f_y 400 MPa	E_s $1.83 \cdot 10^5$ MPa
$T \leq 150^\circ\text{C}$ $f_c(T) = f_{ck} [1 + 0.000769 \cdot (T - 20)]$ if $150 \leq T \leq 350^\circ\text{C}$ $f_c(T) = 1.1 f_{ck}$ if $400^\circ\text{C} \leq T$ $f_c(T) = f_{ck} [2.011 - 2.353 \cdot (T - 20) / 1000]$ 0 otherwise	$E(T) = 1$ if $T < 150^\circ\text{C}$ if $150 \leq T \leq 650^\circ\text{C}$ $1.27 - \frac{0.9T}{500}$ if $650 \leq T \leq 900^\circ\text{C}$ $0.36 - \frac{0.1T}{250}$	$k_f(T) = 1$ if $T \leq 215^\circ\text{C}$ if $215 \leq T \leq 905^\circ\text{C}$ $k_f(T) = (905 - T) / 690$	$E(T) =$ if $T \leq 600^\circ\text{C}$ $1.0 - \frac{T}{2000 \ln \frac{T}{1100}}$ if $600 \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ $\frac{690(1 - \frac{T}{1100})}{T - 53.5}$

3. 해석결과 및 분석

3.1 온도분포

구조체 해석 전 가정한 사항은 온도와 구조체는 상호 독립적이라는 점이다. 가열시간에 따른 온도 해석을 실시하고 그에 따른 재료 물성의 변화를 고려한 해석을 수행하기 위한 절차로서 ISO834 표준가열 온도곡선의 기준에 따르면 이러한 표준적인 온도 테스트에서 구조체 각각의 내화영역은 앞서 제시한 Fig. 3을 따르는 것을 나타낸다.

본 연구에서 해석의 대상이 되는 기존 연구의 실험은 표준가열 온도곡선에 따라 2시간 가열한 데 반해, 해석은 3시간까지의 잔존내력을 확인하고자 가열시간을 3시간 까지 고려하였다. 이러한 표준가열 온도곡선으로 가정한 화재에 노출된 보통강도 콘크리트 보의 노출 시간별, 가열 표면으로부터 거리별 온도분포는 Fig. 7과 같이 나타난다.

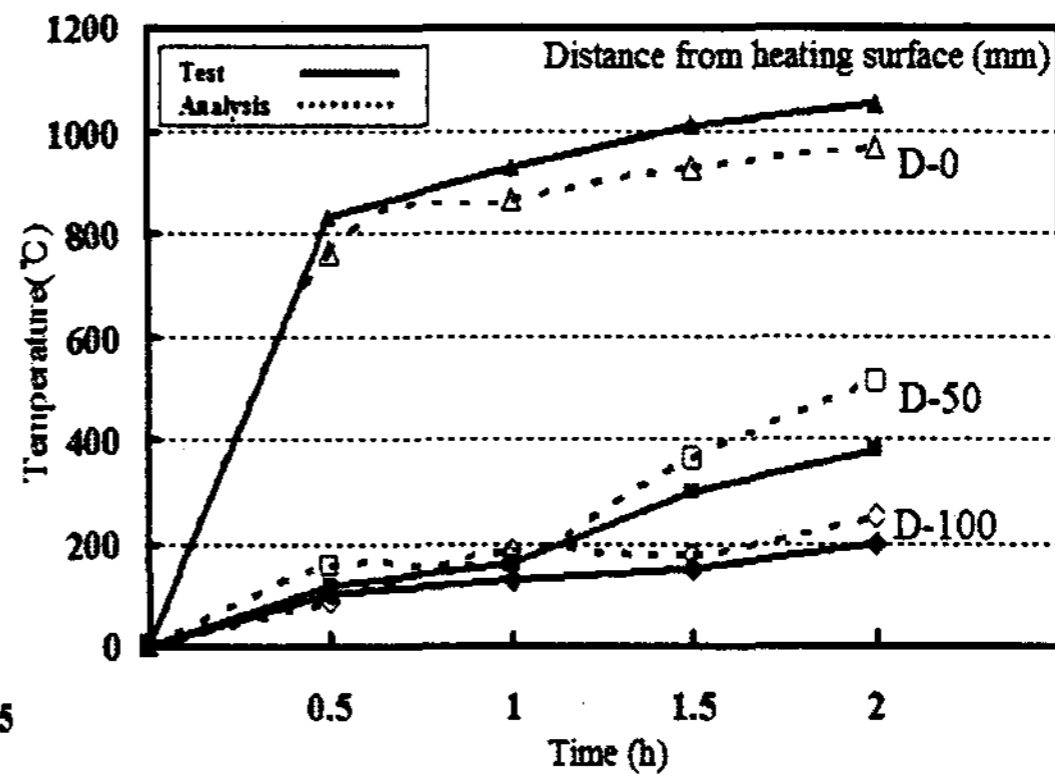
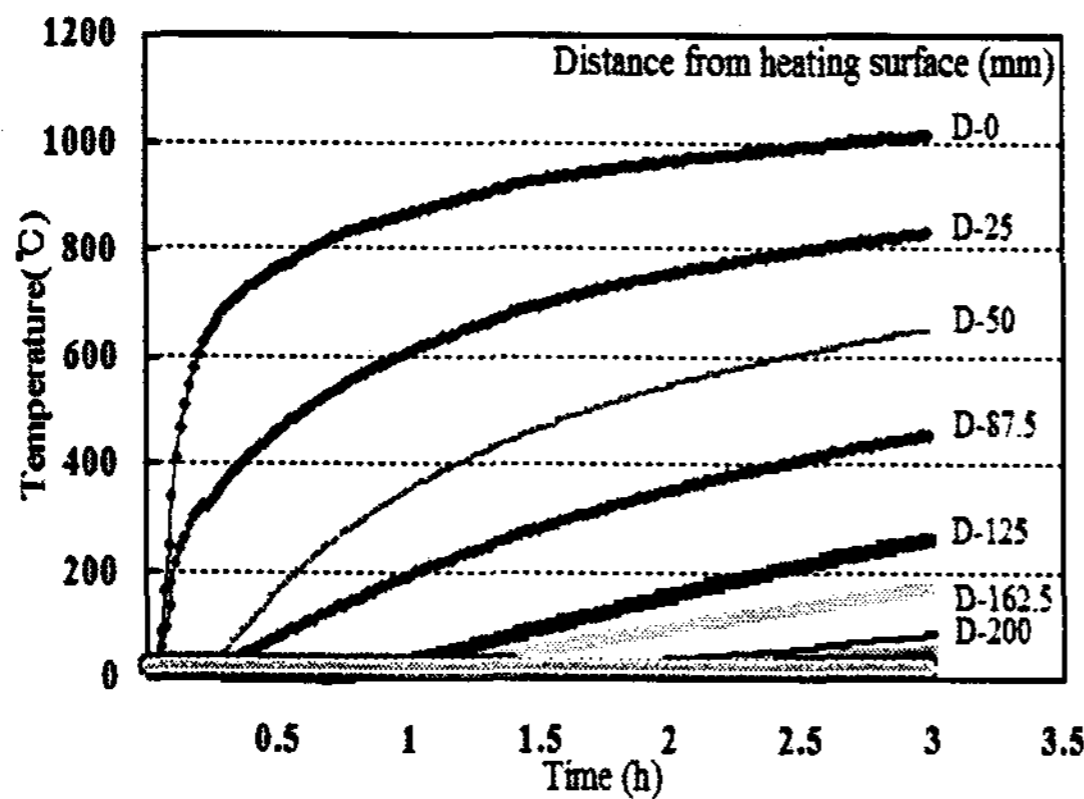


Fig. 7 Temperature distribution at the section Fig. 8 Compare with the existing data

Fig. 8은 온도분포 해석 결과와 실제 실험에서의 측정된 수치와 일부분을 비교한 것이다. 가열 3시간까지의 잔존내력을 확인하려는 가정 때문에 약간의 차이가 발생한다. 아울러 3면 가열이 아닌 1면 가열로서 온도분포 산정에서 재료의 열 정수를 변수로 할 때 열전도율에만 의존하여 단면 내 온도분포를 확인하였기에 차이가 발생한다고 판단된다.

Fig. 9은 가열면부터 단면내 깊이에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 이러한 온도분포를 해석하기 위해서는 실험에 가용된 가열 곡선으로 표준화재곡선(ISO834)을 선택했다. 또한 열전도율(0.72W/m·K)과 밀도(1860kg/m³)를 선택과 함께, 경계상태에서 절단이 없는 연속체로 가정했다.

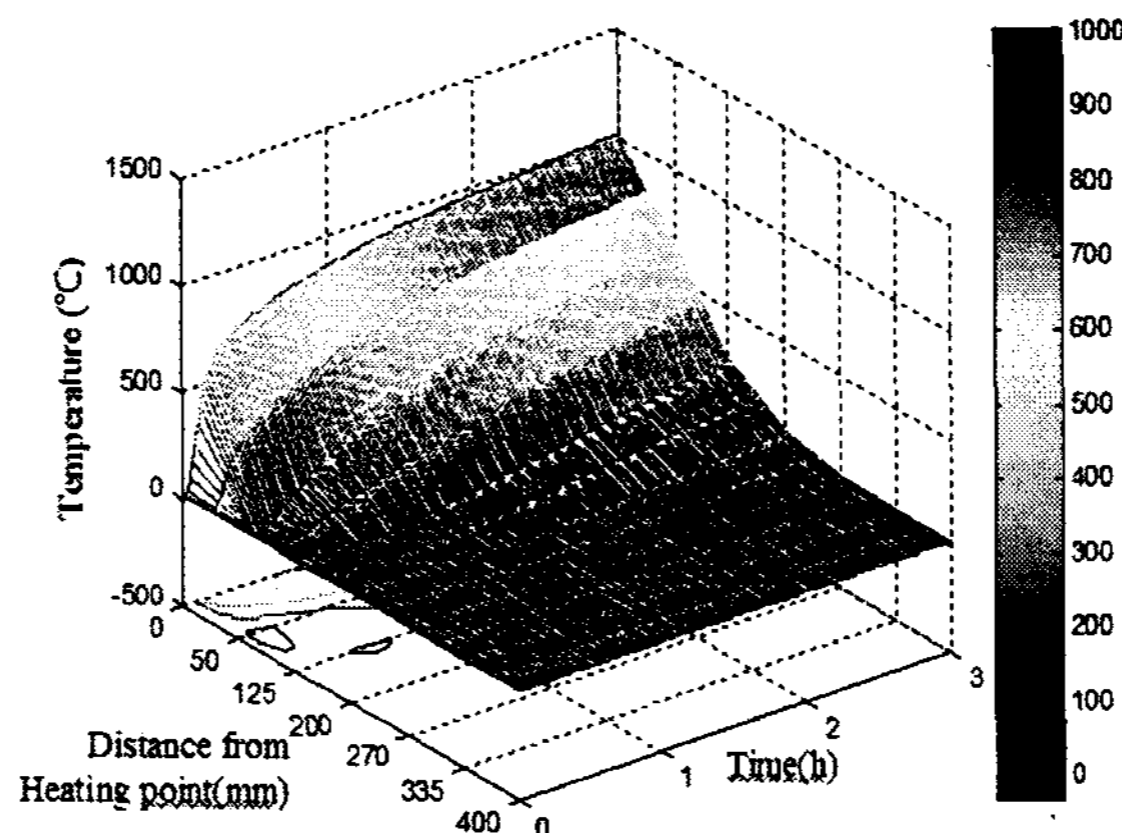


Fig. 9 Temperature distribution at the section according to distance from Con'c cover

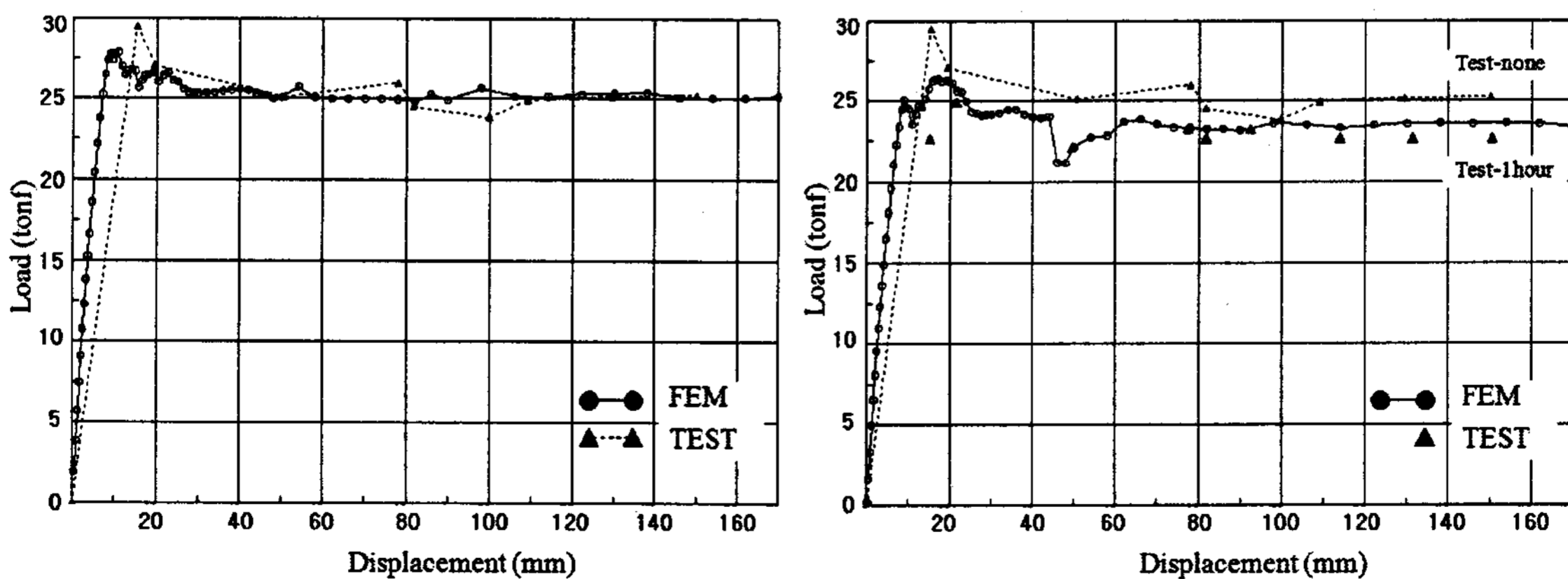
3.2 잔존내력 평가

단면내 온도 분포 해석결과를 바탕으로 Table. 3에 제시된 콘크리트와 철근의 응력-변형률, 저감비율에 관한 식은 화재를 가정한 가열시간을 고려하여 온도별로 도출한다. 단면위의 표를 바탕으로 가열 구간별로 콘크리트와 철근의 변화된 물성과 잔존율을 확인해 보면 다음의 Table. 4와 같다. 화재에 노출된 시간을 1~3시간 까지 고려하여 각각의 단면내 온도분포를 기준으로 해석에 필요한 콘크리트와 철근의 물성값을 프로그램에 대입한 결과는 다음의 Fig. 10의 하중-처짐 곡선과 같이 요약된다.

Table 4. Properties results of concrete and steel in high temperature

Temperature(°C)	Concrete				Steel			
	f_{ck} (MPa)	Residual Ratio (%)	E_c (*10 ⁴ MPa)	Residual Ratio (%)	f_y (MPa)	Residual Ratio (%)	E_s (*10 ⁵ MPa)	Residual Ratio (%)
0	21.8	100	2.29	100	400	100	1.83	100
100	23.1	105	2.29	100	400	100	1.79	97.8
200	24.0	110	2.08	90.8	400	100	1.72	93.9
300	24.0	110	1.67	72.9	350	87.5	1.61	87.9
400	24.0	110	1.25	54.5	292	73.0	1.47	80.3
500	19.2	88.0	0.85	37.1	234	58.5	1.25	68.3
600	14.0	64.2	0.44	19.2	176	44.0	0.92	50.2
700	8.9	40.8	0.18	7.8	118	29.5	0.58	31.6
800	3.8	17.4	0.09	3.9	61	15.3	0.17	38.7

Fig. 10dms 온도에 따른 콘크리트의 강도와 탄성계수 및 철근의 인장강도와 탄성계수를 통해 유한 요소 분석법을 통하여 얻어진 하중-처짐 그래프이다.



a. Normal temperature

b. 1 hour heating

Fig. 10 Residual property analysis

부재해석에 의한 잔존내력 평가는 실험 수치와 어느 정도 유사한 결과를 얻었으며 화재에 노출된 RC 부재의 내력평가에 유용하게 적용할 수 있을 것이라 판단된다. 다만, 온도조건, 가열시간, 콘크리트의 종류, 피복두께, 노출된 부분의 단면 크기 등 차후 좀 더 일반적인 해석적 모델 연구가 수행되어야 하겠다. 또한 추후 실험에서는 보의 절점 구간을 좀 더 세분화하여 보다 명확한 해석 값을 계산하여 좀 더 신뢰성 있고 발전된 연구가 수행되어야 하겠다.

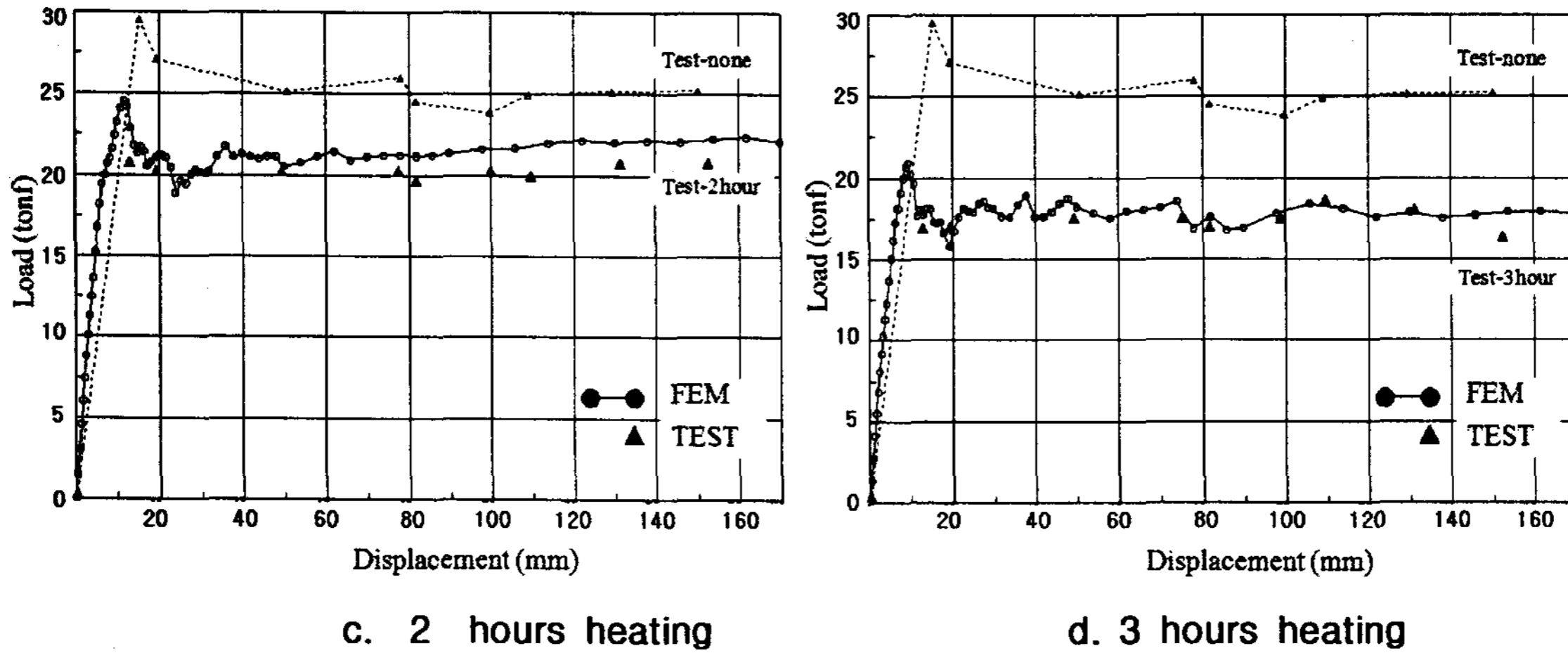


Fig. 10 Residual property analysis

4. 결 론

본 연구는 잔존내력에 영향을 미치는 재료의 강도와 탄성계수의 관계를 온도해석을 통하여 검토를 하고, FEM 해석을 통하여 고온의 피해를 입은 철근 콘크리트 보 부재를 온도분포 해석과정과 잔존내력 해석과정으로 나누어 진행하였고, 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

- 1) 측정된 실험 결과와 유사한 단면내 온도분포 해석값을 얻을 수 있었고, 추후 다른 화재 조건에서의 단면 해석에도 유용하게 적용할 수 있을 것이라 판단된다.
- 2) 해석에 의한 잔존내력 평가는 실험 수치와 어느 정도 유사한 결과를 얻었으며 화재에 노출된 RC 부재의 내력평가에 유용하게 적용할 수 있을 것이라 판단된다.
- 3) 열전도 해석과 더불어 콘크리트의 열적특성과 열응력을 고려한 단면해석 과정에 대한 연구가 이어져 수행되어야 하겠다.
- 4) 실제 실험 조건에서 변형된 조건을 설정하고, 해석상 가정 사항도 많은 점을 고려해야하며 온도조건, 가열시간, 콘크리트의 종류, 피복두께, 노출된 부분의 단면 크기 등 차후 좀 더 일반적인 해석적 모델 연구가 수행되어야 하겠다. 또한 추후 실험에서는 보의 절점 구간을 좀 더 세분화하여 보다 명확한 해석 값을 계산하여 좀 더 신뢰성 있고 발전된 연구가 수행되어야 하겠다.

< 참 고 문 헌 >

- 1) 화재피해를 입은 고강도 및 일반강도 콘크리트 부재의 구조적 성능 규명 및 보수, 한국콘크리트 학회, 2003-03
- 2) ISO834-1, Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1 : General requirements, 1999.
- 3) 한상훈 외 1인, (2004) 열응력을 고려한 철근콘크리트 부재의 고온시 휨강도에 관한 연구, 대한 건축학회 논문집, Vol.20, No.11, 2004
- 4) TOTAL-RC Ver 1.0 & TOTAL-Temp Documentation
- 5) V.K.R Kodur, T.T. Lie, "Fire resistance of circular steel columns filled with fiber reinforced concrete", Journal of structural engineering, Vol.122, No.7, 1996.
- 6) 콘크리트 구조물의 내화 성능, 한국콘크리트 학회. (2005-11)