

# 유한요소해석 프로그램을 사용한 합성보의 내화실험 해석

박수영 방내화팀 연구원

## 1. 서 론

국내 건축법에서는 건물의 규모, 용도 등에 따라서 주요구조부재의 내화성능을 규정하고 있고, 그 중 보인 경우 규모, 용도 등에 따라 1시간, 2시간, 3시간 내화 구조로 나누어 사용하도록 하고 있다. 보의 내화성능은 KS F 2257-1<sup>1)</sup> 및 KS F 2257-6<sup>2)</sup>에 의한 실험을 통하여 확인하고 하중지지력이 기준에 만족하는 경우 사용할 수 있도록 하고 있다.

국외, 특히 유럽에서는 건축구조 부재에 대한 내화성능 기초연구가 계속적으로 진행되었기 때문에 성능이 대부분 규명되어, 강재나 콘크리트의 열정수, 온도상승에 따른 기계적 성질 등이 식으로 제안되어 기준이나 국가표준에 채택되었고, 그에 따라 사양적 내화설계 뿐만이 아니라 화재모델, 열해석 및 온도상승에 따른 구조해석을 통한 해석적 방법으로 성능적 설계를 진행할 수 있는 체계를 갖추고 있다. 이와같이, 국외에서는 주요구조부재의 열전달해석 및 열응력해석을 통한 성능적 내화설계가 일반화되고 있는 추세이고, 현재 국내에서도 점차 그 연구가 진행되고 있지만 시작단계에 있는 실정이다.

본 논문에서는 유한요소해석 프로그램을 사용하여 실제 수행된 합성보의 내화 실험을 재현하고, 그에 따라 성능적 내화설계를 진행하기 위한 기본 절차를 제시하고자 하였다.

## 2 해석절차가 포함된 내화성능평가 현황

영국에서는 BS 5950-8<sup>3)</sup>에서 화재한계상태설계(Fire Limit State Design)를 적용하여 화재시 구조물의 강도와 안정성을 검토하도록 하고 있고, 내화성능의 평가는 실험을 통한 방법과 계산을 통한 방법, 2가지로 제시하고 있다. 후자의 경우 다시 모멘트능력법(Moment capacity method)과 한계온도법(Limiting temperature method)으로 나누고 있는데, 모멘트능력법은 단면계산을 통한 온도분포에 따라 화재시 잔여내력을 계산하는 방법이고, 한계온도법은 부재가 제시된 한계온도를 초과하였을 때 내화성능을 잃는 것으로 판단하는 방법으로, 내화성능을 하중비에 따라

한계온도로 제시하고 있다.

유럽통합기준인 Eurocode 1~6<sup>4)~6)</sup>, 및 Eurocode 9에서는 각각의 Part1-2에서 구조물 화재설계(Structural fire design)에 대한 내용을 언급하고 있다. 강재 및 합성부재의 내화성능평가는 Tabulated data, Simple calculation model, Advanced calculation model의 세 가지 방법을 사용하며, Tabulated data를 사용할 경우는 각 합성구조 단면변수 및 하중비, 내화시간 등에 따라서 표에서 적용하도록 하고 있다. Simple calculation model은 BS5650-8에서 적용하는 방법과 유사하게, 제시된 식에 따라 부재의 내화성능을 평가하며, Advanced calculation model은 해석프로그램을 사용한 성능적 내화설계로써 재료의 열정수, 구조물의 경계조건, 열전달해석 및 열응력해석 등으로 이루어지는 방법이다.

미국의 AISC Manual에서는 화재설계를 제시하고 있지만, 강재의 열정수 및 온도에 따른 기계적 성질 등의 일부만이 추가되어 있다. 하지만, 성능적 설계방법을 표준 및 코드에 추가하려는 연구가 계속적으로 진행되고 있다.

국내에서는 실험을 통해서만 구조부재의 내화성능을 확인하도록 하고 있으며, 특히 KS F 2257-6 및 KS F 2257-7에서는 재하가열 내화시험시 시험하중을 의뢰자가 재료 특성과 구조 기준에서 규정된 방법을 사용하여 제시하도록 되어있다.

### 3. KS F 2257-6에 따른 합성보의 내화시험 해석

주요구조부재의 성능적 내화설계를 위한 기본절차인 열전달해석 및 열응력해석의 유효성을 확인하기 위하여, 내화시험을 수행한 합성보 시험체를 시험조건을 재현하여 해석하고, 그 해석결과를 내화시험 결과와 비교하였다.

#### 3.1 내화시험 조건

내화시험시 시험체는 단순보 조건으로서, 지점거리는 4.2 m, 2지점 집중하중조건이었다. 또한 내화시험시 시간에 따른 단면의 온도측정을 위하여 중앙부와 1/4지점에 20개씩의 열전대를 설치하였다. 표 1에 시험체의 특성 및 하중을 나타내었고, 그림 1에는 경계조건 및 하중조건, 그림 2에는 시험체의 단면형상 및 치수, 그림 3에는 시험모습을 나타내었다.

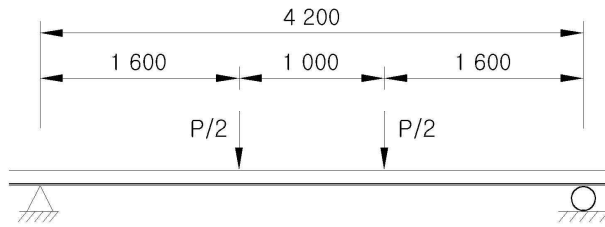


그림 1. 경계조건 및 하중조건

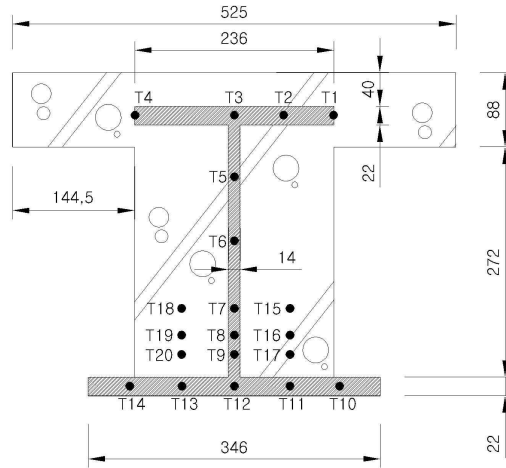


그림 2. 시험체 단면형상 및 온도측정위치

표 1. 시험체 특성 및 적용하중

모델	-
시험체 길이(mm)	4 500
가열 길이(mm)	4 200
비대칭 H형강( $H \times B_t \times B_b \times t_w \times t_f$ )	$320 \times 236 \times 346 \times 14 \times 22$
강재항복강도(MPa)	296
콘크리트압축강도(MPa)	24
소성모멘트(kNm)	718.6
하중비	0.4
하중(kN)	359.3



그림 3. 시험모습

### 3.2 유한요소해석방법

내화시험을 재현하기 위하여 Eurocode의 Advanced calculation model을 적용하고, 비선형 열전달해석 및 구조해석 계산이 가능한 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 11.0<sup>7)</sup>을 사용하여 합성보의 내화성능을 확인하였다. 그 해석절차는 그림 4와 같다.

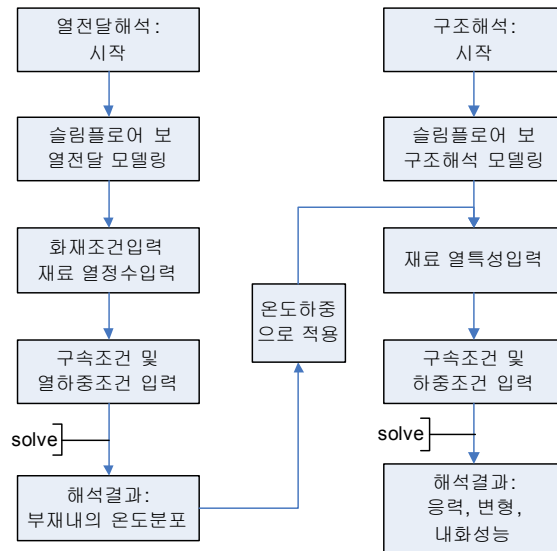


그림 4. 해석절차

내화성능 해석은 3D 모델링으로 진행되었으며, 해석의 효율성을 위하여 대칭부분을 제외한 1/4모델을 선정하였다. 가열조건은 내화시험과 동일하게 3면이 표준화재에 노출된 것으로 가정하였다. 열전달해석은 시간에 따른 화재노출 정도에 따라 부재내부의 온도분포를 계산하기 위하여 사용되었고, 그 결과는 비선형 구조해석에서 각 절점에 온도하중으로 적용되었다.

### 3.2.1 비선형 열전달해석

외부의 가열조건에 따른 부재의 온도상승을 예측하기 위하여 열전달해석을 수행하였다. 재료의 열정수값이 비선형이므로 비선형해석을 수행하였다.

#### 3.2.1.1 열전달해석 모델링

열전달해석을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 해석 진행과정에서 부재의 변형은 단면 내 온도분포에 영향을 미치지 않는다.
- 해석시 보는 길이방향으로 전구간에 걸쳐 화재에 균일하게 노출된다.
- 화재에 노출되는 면 이외의 면은 단열조건을 적용한다.

해석수행을 위한 모델링에는 3차원 열전달 요소인 SOLID70요소와 SURF152 요소를 사용하였다. SOLID70 요소는 한 절점에 한 개의 자유도와 온도항을 가지는 8절점 요소로 3차원 정상상태 열전달해석이나 시간이력 열전달해석에 사용된다.

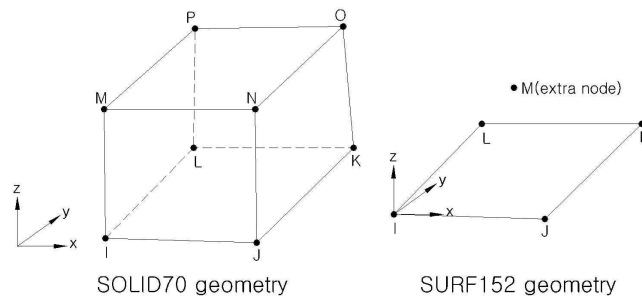


그림 5. 요소형상

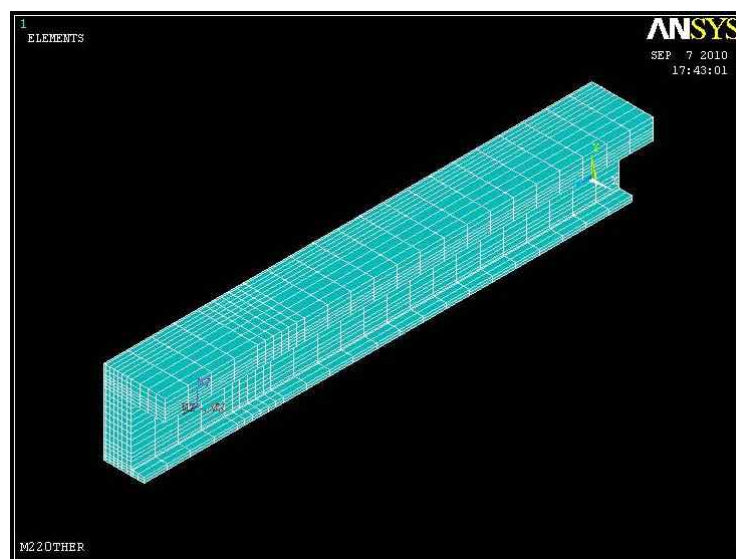


그림 6. 1/4모델 형상

SURF152 요소는 다양한 하중 및 외부효과에 적용되는 요소로써, 여기서는 외부 화재조건으로부터의 복사 및 대류효과를 적용하기 위하여 SOLID70요소 외부면에 썬워졌다.

시험대상 합성보의 강재 및 콘크리트는 SOLID70 요소로 시험시 온도측정위치를 감안하여 요소분할 되었고, 대류 및 복사조건은 표 2와 같이 계수값을 지정하여 적용하였다.

표 2. 열전달해석 적용 계수 및 상수

구분	강재	콘크리트
대류계수(W/m <sup>2</sup> K)	25	25
복사계수	0.7	0.8
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	7840	2400
포아송비	0.3	0.18
스태판-볼츠만상수(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	2.67×10 <sup>-8</sup>	2.67×10 <sup>-8</sup>

시험시 시험체 주위온도는 외부절점을 생성하여 그 외부절점에 시간에 따른 표준 화재시간-온도곡선의 온도를 적용하여 가열조건을 입력하였다.

### 3.2.1.2 강재 및 콘크리트의 열정수

열전달해석을 위해서 각 재료의 열정수(비열, 열전도율, 열팽창율)를 시간에 따라 입력하였다. 열정수값은 온도별로 시험을 수행하여 얻어내는 것이 가장 확실하지만, 온도 특이점이 나타나는 부분이 있어 이를 반영하기 힘들기 때문에 Code에서 제시하는 값을 대부분 사용한다. 여기서는 Eurocode 4 Part 1.2 에서 제시하는 열정수값을 사용하였다. 각각의 열정수값을 100 °C 단위로 입력하였고, 강재 비열에서 나타나는 특이점인 750 °C구간과 콘크리트 비열에서 나타나는 특이점인 115 °C구간은 추가로 입력하였다. 제시된 강재와 콘크리트의 열정수값은 그래프의 형태로 그림 7에서 그림 9와 같이 나타낼 수 있다.

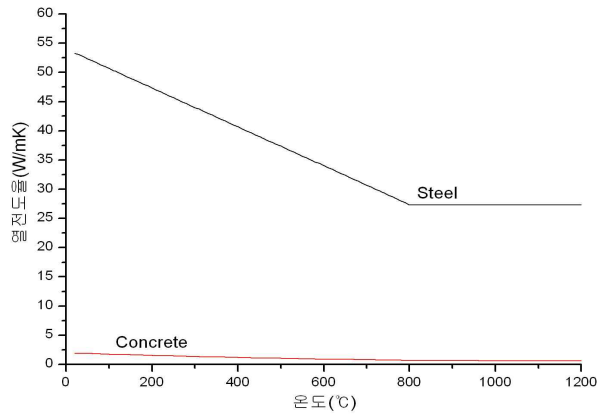


그림 7. 강재 및 콘크리트의 열전도율(Eurocode 4 Part 1.2)

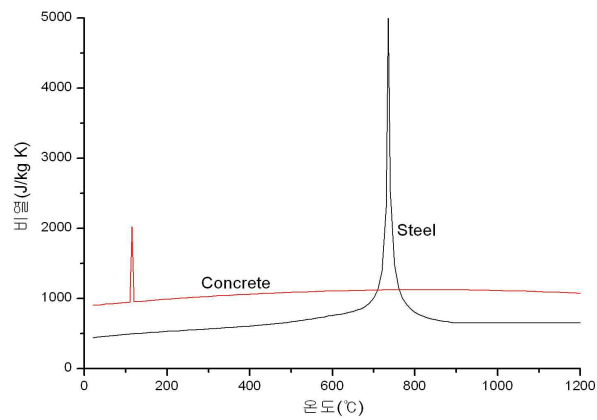


그림 8. 강재 및 콘크리트의 비열(Eurocode 4 Part 1.2)

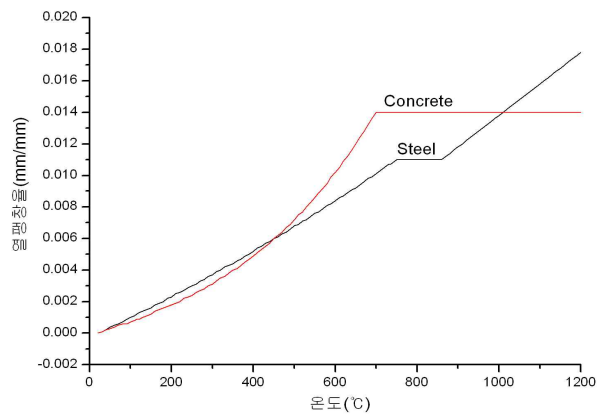


그림 9. 강재 및 콘크리트의 열팽창율(Eurocode 4 Part 1.2)

### 3.2.2 비선형 구조해석

열전달해석 수행 후, 연속하여 구조해석을 진행하였다. 열해석결과를 입력값으로

적용하고, 하중조건 및 재료특성, 지점조건 등을 입력하여 해석을 수행하였다.

### 3.2.2.1 구조해석모델

비선형 구조해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 강재 및 콘크리트는 등방성(Isotropic) 및 등질성(Homogeneous) 재료이다.
- 강재와 콘크리트는 완전합성으로 일체거동을 한다.

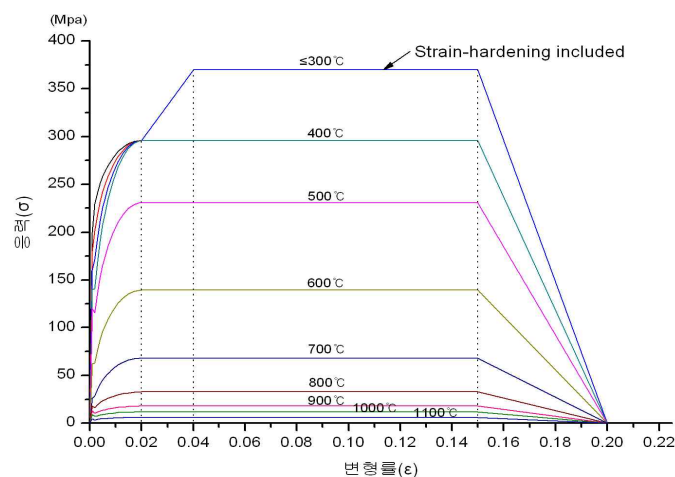
비선형 구조해석 모델링에는 SOLID185요소를 사용하였다. SOLID185요소는 한 절점에 세 개의 자유도를 가지는 8절점 요소로 3차원 소성, 탄소성, 초탄성, 크리프, 대변형 등의 해석에 사용된다.

시험체의 강재 및 콘크리트는 열진달해석에서의 온도분포 결과를 각 절점에 온도 하중으로 입력하기 위해 열해석모델과 동일하게 설정되고, 요소분할 되었다.

내화시험시 경계 및 하중조건과 동일하게 모델링하였고, 강재 및 콘크리트의 등방성(Isotropic) 및 등질성(Homogeneous) 특성을 적용하기 위하여 MISO(Multilinear isotropic hardening) 모델을 적용하였다. 비선형 해석방법은 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)를 사용하였고, 해의 안정성을 유지하기 위하여 LSM(Line search method)를 적용하였다.

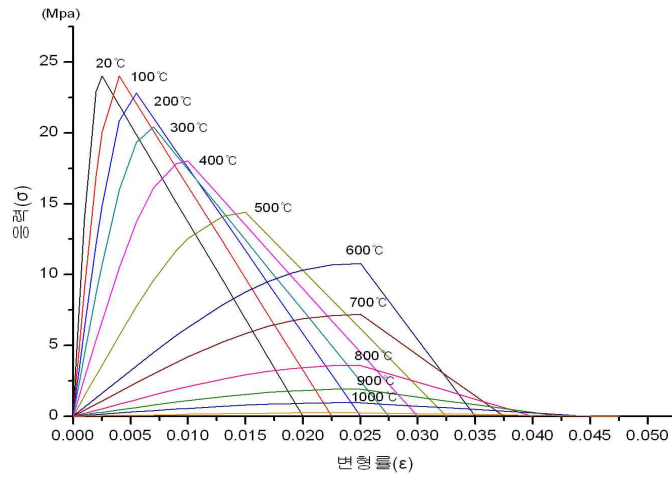
### 3.2.2.2 강재 및 콘크리트의 온도에 따른 기계적특성

강재와 콘크리트는 온도가 상승하면 강도 및 탄성계수등 기계적 특성이 저감되기 때문에, 온도에 따른 특성값을 입력하였다. 온도에 따른 특성값은 Eurocode 4 Part1.2에서 제시하는 값을 사용하였다. 그림 10에 강재 및 콘크리트의 온도에 따른 응력-변형도를 나타내었다. 그림 11에는 온도변화에 따른 강도 및 탄성계수의 감소율을 나타내었으며, 이 값들은 모두 입력값에 반영되었다.



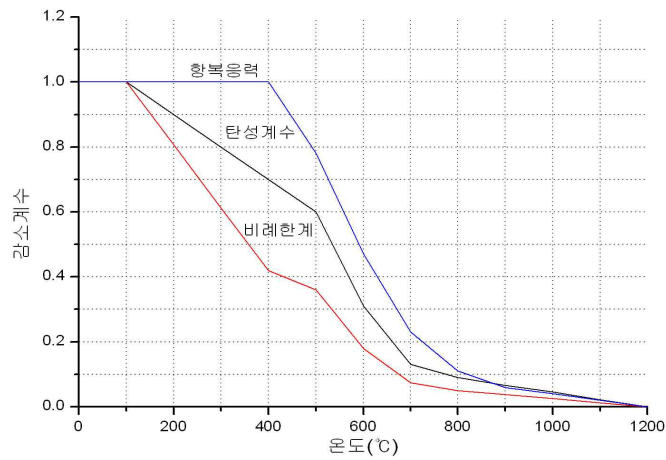
a) 강재



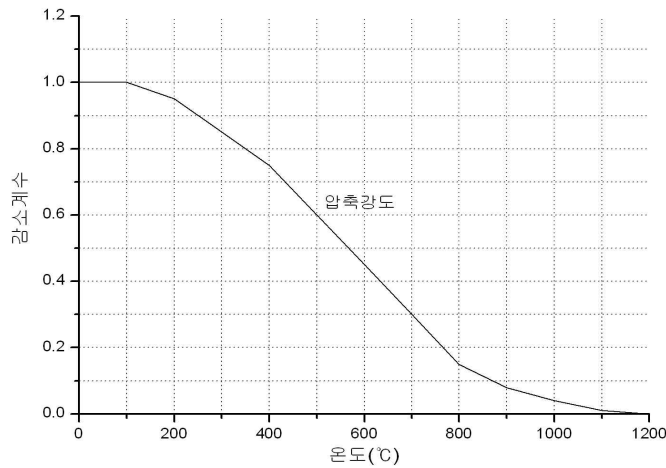


b) 콘크리트

그림 10. 강재 및 콘크리트의 온도에 따른 응력-변형도(Eurocode 4 Part 1.2)



a) 강재



b) 콘크리트

그림 11. 강재 및 콘크리트의 감소계수(Eurocode 4 Part 1.2)

## 4. 해석결과

3절의 유한요소해석방법으로 해석을 수행한 결과를 실험값과 비교하였다.

### 4.1 비선형 열전달해석 결과비교

온도측정위치에서의 실험값과 해석값을 그림 12에 나타내었다.

85분을 기준으로 온도값을 비교하면, T8의 경우 실험에서 662°C, 해석에서 566°C로 최고 96°C의 차이를 보이지만 다른 측정점에서는 모두 60°C이하의 차이를 보인다. 전체적으로 T8, T11 온도측정위치에서의 결과를 제외하면 실험값과 해석값의 경향이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. T8의 경우는 실험에서 T9보다 높은 값을 가지며 시험중 균열과 같은 요인 때문인 것으로 판단되고, T11의 경우는 75분 이후 온도센서 이상인 것으로 판단된다.

대체적으로 실험값과 해석값은 그 크기와 상승곡선의 경향이 일치하는 것으로 나타났다.

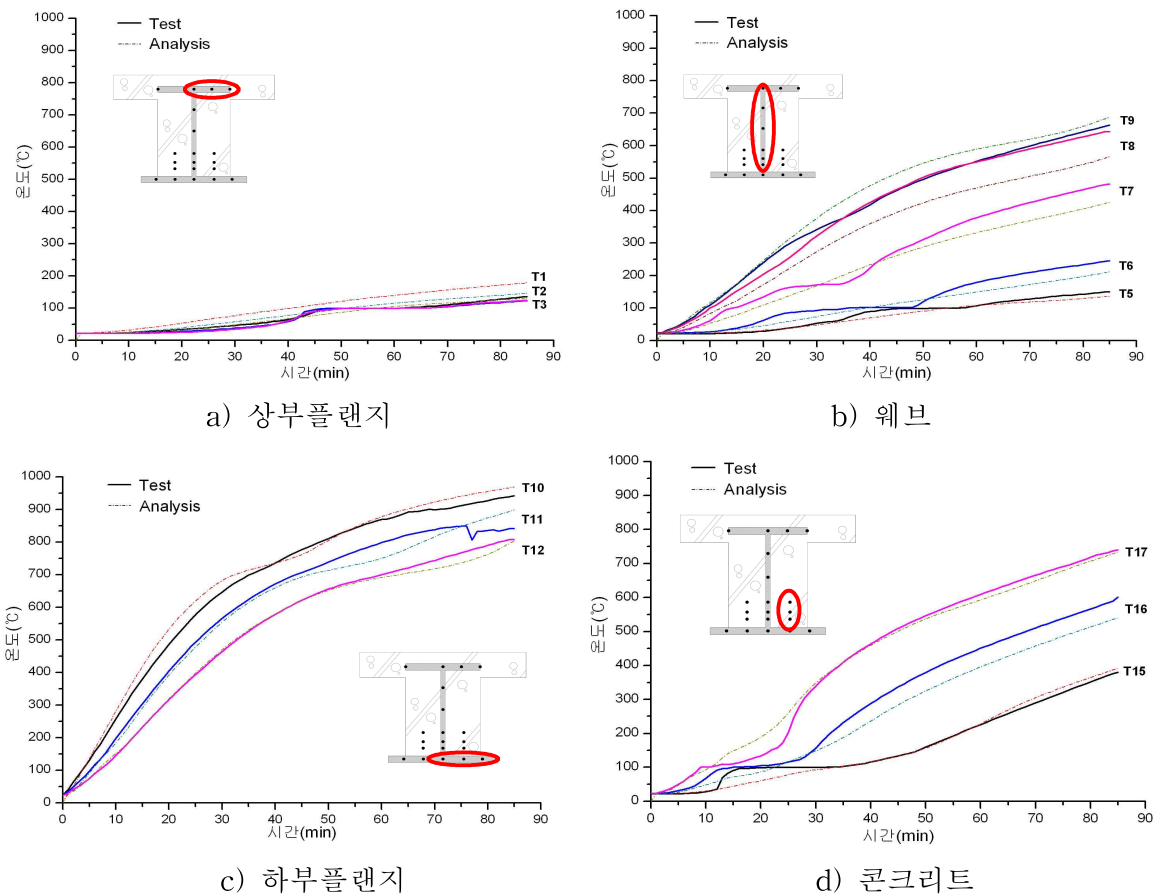
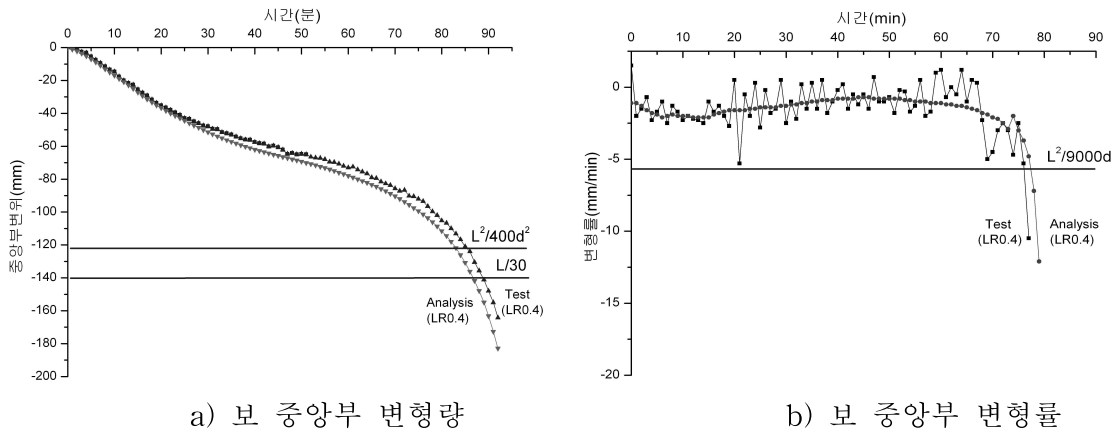


그림 12. 열전달해석 결과 비교

## 4.2 비선형 구조해석 결과비교

구조해석 결과를 실험결과와 비교하여 그림 13에 나타내었다.

실험에서는 89분에 141.2mm, 해석에서는 87분에 141.8mm의 중앙부 변형이 발생하였으며, 그 변형의 추세도 거의 동일하였다. 변형률 결과는 실험에서 변동폭이 심하였지만 그 추세는 비슷하게 나타났다.



a) 보 중앙부 변형량

b) 보 중앙부 변형률

그림 13. 구조해석 결과 비교

## 4.3 결론 및 고찰

그림 12 및 그림 13에서 확인할 수 있듯이, 열해석 결과 시험체 내부온도는 실험값과 거의 유사하였고, 일부 측정점에서의 차이는 전체적인 강성에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다. 이후 열해석 결과를 사용한 구조해석에서도 내화 성능 판단기준인 중앙부 변형에서 실험값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 맺음말

본 연구에서는 주요구조부재의 성능적 내화구조설계의 기본절차가 되는 유한요소해석방법의 유효성 및 적용성을 확인하기 위하여, 해석을 진행하고 실제 실험결과와 비교하였다. 그 결과 해석값은 그 추세 및 크기에서 실험값과 거의 유사한 결과를 가짐을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 진행한 합성보의 내화시험 및 내화성능에 대한 유한요소해석 절차는 적절하고, 그 유효성이 높은 것으로 판단되며, 추후 성능설계를 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

그러나, 국내에서 제작되는 콘크리트나 강재의 온도에 따른 열정수값 및 기계적 성질에 대한 자료가 부족하여 외국의 Code를 인용하여 사용할 수밖에 없으므로, 우선적으로 온도별로 재료의 열정수, 기계적 성질에 관한 기초연구가 절실히 필요한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. KS F 2257-1 : 2006, 건축부재의 내화시험 방법 - 일반 요구 사항, 한국산업 규격
2. KS F 2257-6 : 2006, 건축부재의 내화시험 방법 - 보의 성능 조건, 한국산업 규격
3. BS 5950-8, Structural use of steelwork in building-Part 8:Code of practice for fire resistant design, 2003
4. Eurocode 2 Part1-2, Design of Concrete Structures - Part 1.2 General rules -Structural fire design, 1996
5. Eurocode 3 Part1-2, Design of Steel Structures - Part 1.2 General rules -Structural fire design, 2005
6. Eurocode 4 Part1-2, Design of Composit Steel and Concrete Structures - Part 1.2 General rules -Structural fire design, 2005
7. ANSYS Multiphysics(version 11.0) Manual