

# 할로우코어 슬래브의 내화성능에 대한 수치해석 연구

## Numerical Study on Fire Performance of Hollowcore Slabs

민 정 기\*  
Min, Jeong-Ki

우 영 제\*\*  
Woo, Young-Je

### Abstract

Numerical model on precast prestressed concrete (PC) hollowcore slabs using 11.3 mm diameter 7-wire stand was developed based on finite element analysis. In order to validate the modelling, previous experiment results with respect to prestressed solid concrete slabs were used and compared throughout the course of fire exposure. In addition to, the fire performance of hollowcore slabs with different aggregate types, moisture contents and compressive strength of concrete was investigated. As a result, it can be seen that the type of aggregates and moisture contents used in hollowcore slabs can affect the fire performance as well as temperature developments.

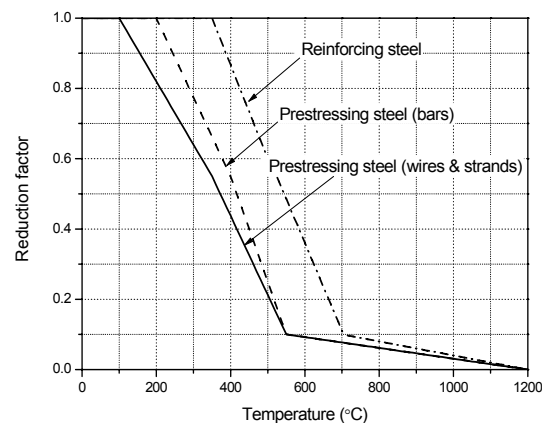
**Keywords :** Hollowcore slab, Fire performance, Aggregate types, Moisture contents, Compressive strength of concrete

### 1. 서 론

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트(PC) 할로우코어 슬래브는 장경간이 가능하고 강도나 강성의 심각한 감소 없이 자중을 줄일 수 있어 구조적으로 효율적인 장점이 있어 쇼핑몰, 주차장 등에 적용이 증가하고 있다. 그러나 PC 할로우코어 슬래브는 일반적인 철근 콘크리트 슬래브와 달리 중공(Hollow core)이 존재하고 강연선을 사용함에 따라 화재에 노출했을 때 중공 사이의 웨브를 따라 온도가 급격히 상승하고, 철근이 550°C에서 상온에서의 항복강도의 50%에 이르는데 반해 강연선은 350°C에서 상온에서의 항복강도의 50%에 도달해 화재에 취약할 수 있다<sup>1)</sup>(Fig. 1). 또한, 각각의 할로우코어 슬래브는 공급업체에 따라 중공의 형상이 다양한데 반해, 솔리드

콘크리트 슬래브와 같이 내화시험을 통해 강연선의 피복두께에 따라 내화성능을 결정하고 있다. 이에 반해 콘크리트의 압축강도, 골재의 종류, 수분함유량, 구속조건 등 할로우코어 슬래브의 내화성능에 영향을 미치는 요소들에 연구는 아직까지 많이 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 PC 슬래브를 모델링하여 기존에 수행된 실험결과를 통해 검증한 후 할로우코어 슬래브의 내화성능에 영향을 미치는 요인들에 대해 수치해석을 통해 비교, 분석하고자 하였다.



(Fig. 1) Reference curves for critical temperature of reinforcing and prestressing steel<sup>1)</sup>

\* 교신저자, 정희원, 한국건설생활환경시험연구원 방재기술평가센터 선임연구원  
Fire and Safety Evaluation Technology Center,  
Korea Conformity Laboratories  
Tel: 043-210-8958 Fax: 043-210-8985  
E-mail: jkm927@kcl.re.kr

\*\* 정희원, 한국건설생활환경시험연구원 방재기술평가센터 책임연구원  
Fire and Safety Evaluation Technology Center,  
Korea Conformity Laboratories

## 2. PC 슬래브의 내화기준

### 2.1 국내

국내는 콘크리트구조기준<sup>2)</sup>에서 프리캐스트 콘크리트에 대해 최소 피복두께를 규정하고 있으며, 내화를 필요로 하는 구조물의 피복 두께는 화열의 온도, 지속시간, 사용골재의 성질 등을 고려하여 정하도록 하고 있다. 이와 함께 가열로의 내화시험을 통해 부재의 내화시간을 결정하고 있다. 가열로의 시험결과에 바탕을 둔 슬래브의 내화시간은 보통 세 가지 기준(하중 지지력, 차열성, 차열성)에 의해 결정된다<sup>3)</sup>. 그 중 하중 지지력은 시험체가 시험 하중에 견디는 시간으로 아래 두 가지 기준을 모두 초과하였을 때 부적합한 것으로 간주한다.

$$\text{변형량 } D = \frac{L^2}{400d} \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$\text{변형률 } \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

L: 시험체의 경간(mm)

d: 구조 단면의 최대 압축력을 받도록 설계된 위치에서 최대 인장력을 받도록 설계된 위치까지의 거리(mm)

차열성은 화염의 확산을 막기 위한 것으로 균열 등으로 인한 비가열면에서의 화염이 10초 이상 지속되지 않는 것을 기준으로 한다. 또한, 차열성은 비가열면의 온도를 규정하는 것으로 초기 온도보다 180K를 초과하지 않는 것을 기준으로 한다.

### 2.2 미국

미국은 두 가지 기준에서 PC 슬래브의 내화기준을 규정하고 있다(ACI 216.1<sup>4)</sup>과 PCI design handbook<sup>5)</sup>). ACI 216.1 기준은 기본적으로 PCI design handbook과 유사하다. 이 기준들은 피복두께를 기준으로 단부조건, 골재종류에 따라 내화시간을 1시간, 1.5시간, 2시간, 3시간, 4시간으로 규정하고 있다.

### 2.3 유럽

유로코드 EN 1992-1-2<sup>1)</sup>는 PC 슬래브에 대해 표를 이용하는 방법을 제시하고 있다. 그 중 가장 빠른 방법은 표를 이용하는 것으로 내화시험 결과를 바탕으로 슬래브의 최소 두께, 강연선까지의 콘크리트의 피복 두께 및 지지 조건에 따라 30분, 1시간, 1.5시간, 2시간, 3시간, 4시간으로 규정하고 있다.

〈Table 1〉 A summary of fire resistance ratings for prestressed concrete slabs

| FIRE RESISTANCE RATING          | 0.5 hour   |                 | 1.0 hour   |                 | 1.5 hours  |                 | 2.0 hours  |                 | 3.0 hours  |                 | 4.0 hours   |                 | NOTES  |
|---------------------------------|--|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|--|
|                                 | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm) | Axis dist. (mm) | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm)         | Axis dist. (mm) | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm)         | Axis dist. (mm) | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm)         | Axis dist. (mm) | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm)         | Axis dist. (mm) | Width <sup>1)</sup> or Slab depth <sup>2)</sup> (mm)        | Axis dist. (mm) |  |
| DOCUMENT, STANDARD OR CODE      |  |                 |  |                 |  |                 |  |                 |  |                 |   |                 |  |
| EN 1992-1-2:2004 -Ribbed slabs  | 80 <sup>1)</sup>                                     | 30              | 100 <sup>1)</sup><br>120 <sup>1)</sup><br>≥200 <sup>1)</sup> | 50<br>40<br>30  | 120 <sup>1)</sup><br>160 <sup>1)</sup><br>≥250 <sup>1)</sup> | 60<br>55<br>45  | 160 <sup>1)</sup><br>190 <sup>1)</sup><br>≥300 <sup>1)</sup> | 750<br>70<br>55 | 220 <sup>1)</sup><br>260 <sup>1)</sup><br>≥410 <sup>1)</sup> | 90<br>85<br>75  | 280 <sup>1)</sup><br>350 <sup>1)</sup><br>500 <sup>1)</sup> | 115<br>90<br>85 | normal-weight<br>1-way and 2-way<br>simply supported |
|                                 | 80 <sup>1)</sup>                                     | 25              | 100 <sup>1)</sup><br>120 <sup>1)</sup><br>≥200 <sup>1)</sup> | 40<br>30<br>25  | 120 <sup>1)</sup><br>160 <sup>1)</sup><br>≥250 <sup>1)</sup> | 50<br>40<br>30  | 160 <sup>1)</sup><br>190 <sup>1)</sup><br>≥300 <sup>1)</sup> | 60<br>55<br>45  | 310 <sup>1)</sup><br>600 <sup>1)</sup>                       | 75<br>65        | 450 <sup>1)</sup><br>700 <sup>1)</sup>                      | 85<br>75        | normal-weight<br>1-way and 2-way<br>continuous       |
| EN 1992-1-2:2004 -Flat slabs    | 150 <sup>2)</sup>                                    | 25              | 180 <sup>2)</sup>  | 30              | 200 <sup>2)</sup>  | 40              | 200 <sup>2)</sup>  | 50              | 200 <sup>2)</sup>  | 60              | 200 <sup>2)</sup>   | 75              | normal-weight  |
| EN 1992-1-2:2004 -Solid slabs   | 60 <sup>2)</sup>                                     | 25              | 80 <sup>2)</sup>   | 35              | 100 <sup>2)</sup>  | 45              | 120 <sup>2)</sup>  | 55              | 150 <sup>2)</sup>  | 70              | 175 <sup>2)</sup>   | 80              | normal-weight<br>1-way simply supported              |
| ACI 216.1-07: 2007 -Floor slabs | -  | -               | -  | 28              | -  | 38              | -  | 44              | -  | 60              | -   | 69              | Siliceous,<br>unrestrained                           |
| ACI 216.1-07: 2007 -Floor slabs | -  | -               | -  | 19              | -  | 19              | -  | 19              | -  | 19              | -   | 19              | Siliceous, restrained                                |

### 3. 수치해석 모델

#### 3.1 SAFIR 프로그램<sup>6)</sup>

본 연구에서는 PC 할로우코어 슬래브의 열해석과 구조해석을 수행하기 위해 특수목적 유한요소 소프트웨어인 SAFIR를 이용하였다. SAFIR 프로그램은 화재의 영향을 받는 구조물의 거동을 모델링할 수 있는 프로그램으로 고온 재료 특성, 다양한 하중과 구속, 재료 및 기하학적 비선형을 고려할 수 있어 많은 나라에서 내화구조 관련 연구 및 설계실무에 폭넓게 활용되고 있다<sup>7)</sup>.

#### 3.2 기존 내화실험

수치해석 모델을 검증하기 위해서 Gustafferro<sup>8)</sup>에 의해 수행된 PC 슬래브 실험 결과를 선택하였다. PC 슬래브에 대한 내화시험은 대부분 연구보다는 내화성 확인을 목적으로 부재의 파괴 이전에 시험이 종료되기 때문에 화재 시 부재거동에 대한 자세한 실험 결과를 찾는 데 어려움이 있기 때문이다.

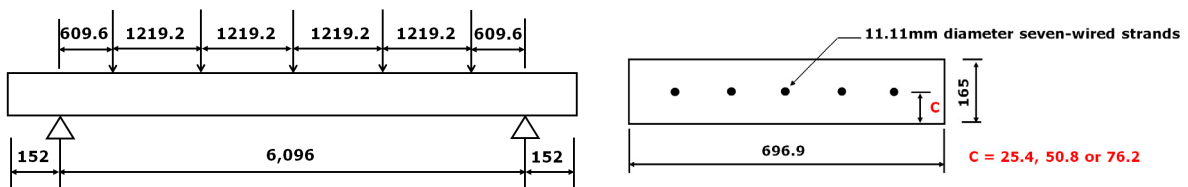
총 11개의 PC 슬래브 실험체가 ASTM E 119 화재곡선<sup>9)</sup>에 따라 가열로에서 실험되었다. 6개의 실험체는 보통 중량 콘크리트로 만들어졌으며 나머지는 경량 콘크리트로 만들어졌다. 이 논문에서는 중량 콘크리트로 만들어진 6개 실험체가 검증에 사용되

었다. <Figs. 2(a) & 3(a)>는 실험체의 하중재하 배치를 나타낸다. 총 6개의 실험체 중 3개의 실험체는 <Fig. 2(a)>에서 보이는 것처럼 6,096 mm의 길이에 5개의 11.1 mm 직경의 강연선이 배열되었다. 다른 3개의 실험체에는 3661.6 mm의 길이에 15개의 6.35 mm 직경의 강연선이 배열되었다. 각각의 슬래브는 <Figs. 2(b) & 3(b)>와 같이 696.6 mm의 동일한 폭과 165 mm의 두께를 가졌다. 피복 두께는 각각 25.4 mm, 50.8 mm, 76.2 mm가 사용되었다.

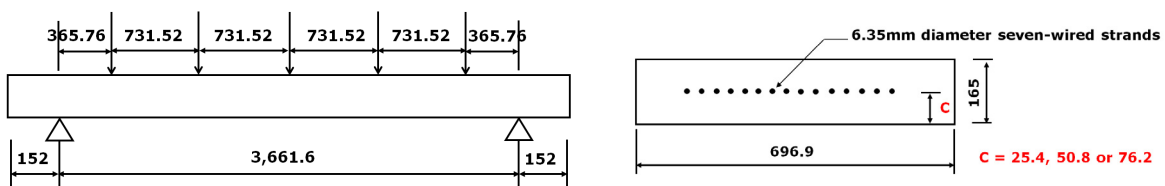
<Table 2>는 각각의 실험체에 대한 콘크리트 및 하중 상세를 보여준다. 11.1 mm 직경의 강연선에 대한 측정된 인장강도는 1,806 MPa이고 6.35 mm 직경의 강연선에 대해서는 1,896 MPa이었다.

#### 3.3 온도 분포

PC 슬래브의 온도분포를 살펴보기 위해 열해석을 수행하였다. <Fig. 4>는 수치해석 결과에 대한 결과를 보여준다. 내화시험에 사용된 ASTM E 119와 ISO 834<sup>10)</sup>곡선사이의 차이를 확인하기 위해 함께 나타내었다. ISO 834곡선은 KS F 2257에서 사용하고 있는 화재곡선과 동일하다. 인용된 참고문헌에서는 온도 측정값이 포함되어 있지 않았기 때문에 노출된 면과 노출되지 않은 면의 수치해석 결과만 나타낸다. 그 결과 비노출면은 사용된 화재 곡선과



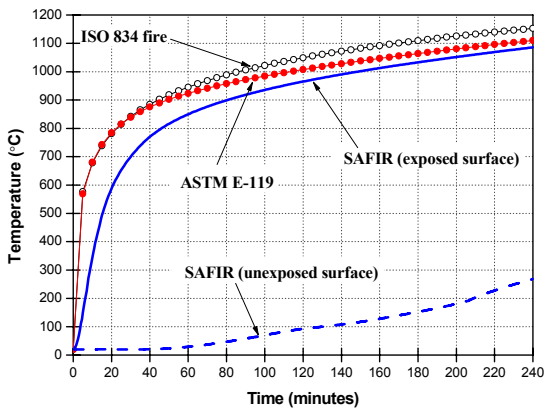
(a) Loading arrangement  
(b) Cross section of specimen  
<Fig. 2> Specimen details for slabs with five-11.1 mm diameter tendons



(a) Loading arrangement  
(b) Cross section of specimen  
<Fig. 3> Specimen details for slabs with fifteen-6.35 mm diameter tendons

〈Table 2〉 Specimen strength and loading details

| Slab Type | Concrete cover, mm | Concrete strength, MPa | Number and size of strands | Applied load, P (kN) |
|-----------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| NWSLAB1   | 25.4               | 37.5                   | 5-11.1 mm                  | 5.77                 |
| NWSLAB2   | 50.8               | 34.7                   | 5-11.1 mm                  | 4.35                 |
| NWSLAB3   | 76.2               | 43.7                   | 5-11.1 mm                  | 2.86                 |
| NWSLAB7   | 25.4               | 35.7                   | 15-6.35 mm                 | 11.43                |
| NWSLAB8   | 50.8               | 53.3                   | 15-6.35 mm                 | 9.05                 |
| NWSLAB9   | 76.2               | 37.4                   | 15-6.35 mm                 | 6.7                  |



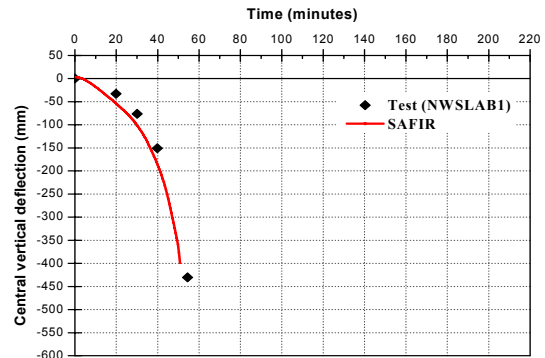
〈Fig. 4〉 Temperature development of PC slabs exposed to ASTM E 119

유사하게 4시간에 도달해서 1100°C에 근접했으며, 비노출된 면은 4시간에 도달해서도 300°C를 넘지 않았다. 온도해석 결과로부터 화재에 노출된 면과 노출되지 않은 면 사이에는 60분 이후부터 800°C 이상의 상당한 온도차가 있음을 확인할 수 있다.

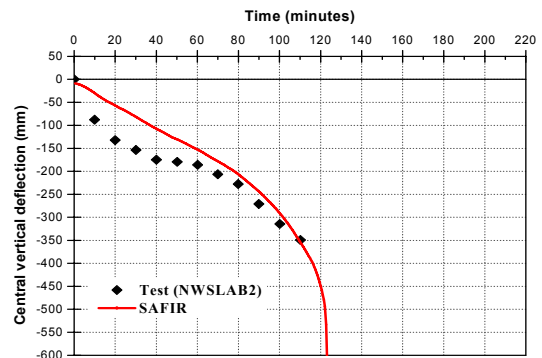
### 3.4 수치해석결과와 내화실험결과의 비교

〈Figs. 5-7〉은 5개의 11.1 mm 직경의 강연선을 가진 실험체에 대한 내화실험과 수치해석의 중앙부 처짐에 대한 비교를 나타낸다. 15개의 6.35 mm 직경의 강연선에 대한 결과는 〈Figs. 8-10〉에서 보여 준다. 모든 내화실험 결과는 급격한 처짐에 의해 슬래브가 파괴될 때 까지 진행되었다.

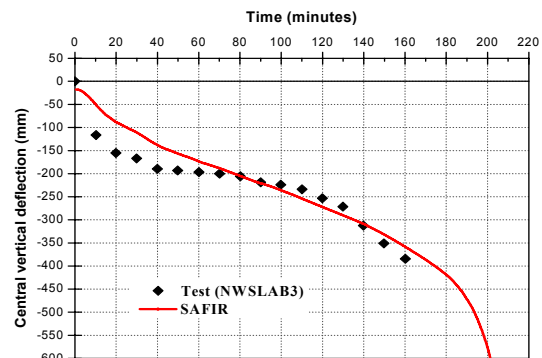
5개의 11.1 mm 직경의 강연선과 25.4 mm 피복 두께를 가진 실험체에 대한 비교결과는 수치해석의 처짐 값이 더 큰 것을 알 수 있다. 반면에 50.8 mm와 76.2 mm의 피복두께를 가진 실험체의 비교결과는 수치해석결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 80분 이전의 결과들은 수치해석 모델이 좀 더 작은



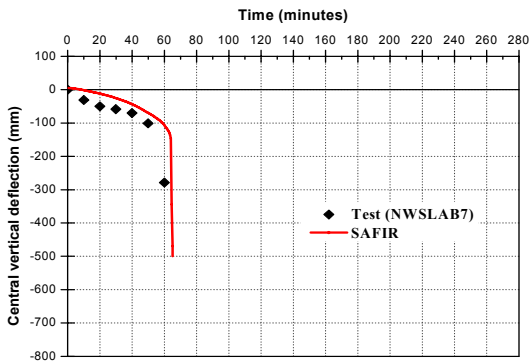
〈Fig. 5〉 NWSLAB1



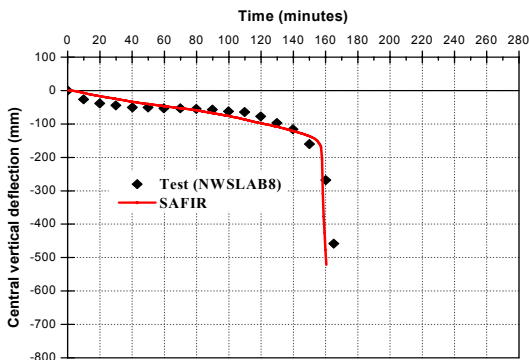
〈Fig. 6〉 NWSLAB2



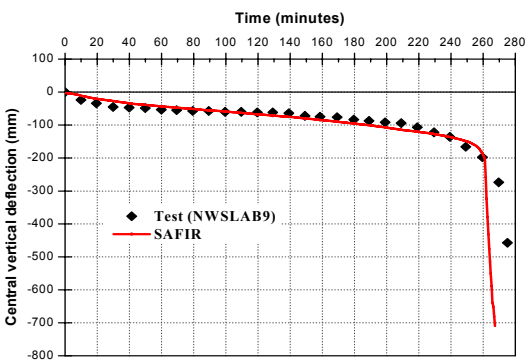
〈Fig. 7〉 NWSLAB3



〈Fig. 8〉 NWSLAB7



〈Fig. 9〉 NWSLAB8



〈Fig. 10〉 NWSLAB9

처짐 값을 나타냈다. 이러한 차이는 해석모델은 화재 노출 초기에 발생할 수 있는 PC 슬래브의 전단 변형을 고려할 수 없기 때문이라고 판단된다.

15개의 6.35 mm 직경의 강연선 실험체에 대한 실험결과는 5개의 11.1 mm 직경의 강연선 실험체에 비해 화재노출 동안에 좀 더 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 할로우코어 슬래브 변수 해석

이 절에서는 연구에 사용된 할로우코어 슬래브 모델에 대해 설명하고 선택된 모델에 대한 변수해석 결과를 비교, 분석한다.

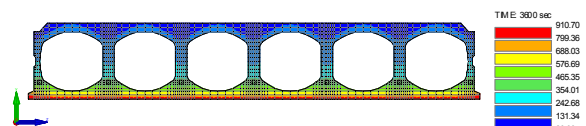
### 4.1 할로우코어 슬래브 모델

본 연구에서는 가장 일반적인 형태인 200 mm 깊이에 6개의 중공과 함께 7개의 강연선을 포함하는 할로우코어 슬래브가 선택되어 모델링되었다. 할로우코어 슬래브의 폭은 1.2 m, 경간의 길이는 10 m에 피복두께는 40 mm로 가정하였다. 또한, 강연선의 직경은 11.3 mm, 인장강도는 1,360 MPa로 가정하였다. 또한, 콘크리트의 압축강도는 40 MPa이 사용되었다.

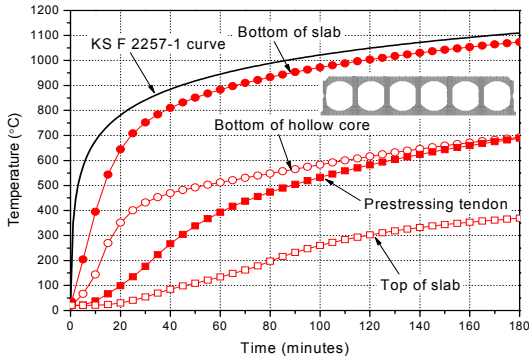
열해석과 구조해석에 있어서 고온에서의 재료 특성은 유로코드 EN 1992-1-2에 제시된 값들이 적용되었다. 화재에 노출된 면과 노출되지 않은 면의 대류열전달계수는 각각 25 W/m<sup>2</sup>K와 9 W/m<sup>2</sup>K를 적용하였다. 또한, 복사 경계조건으로 방사율( $\epsilon$ ) 0.7, 스테판-볼츠만 상수( $\sigma$ )는 5.67×10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>로 적용하였다. 열해석에서 삼각형과 사각형 솔리드 요소를 이용해 모델은 분할되었다. 구조해석에서는 보(Beam) 요소가 사용되었고, 강연선과 콘크리트 사이는 완전하게 부착되어 슬립(Slip)이 일어나지 않는 것으로 가정되었다.

### 4.2 열해석 결과

〈Fig. 11〉은 KS F 2257-1의 표준화재에서 1시간 노출된 후 할로우코어 슬래브의 온도 분포를 나타낸다. 할로우코어 슬래브는 하부면에서 화재에 노출되며 중공은 대류와 복사에 의해 열전달이 일어나



〈Fig. 11〉 Temperature distribution after 60 minutes



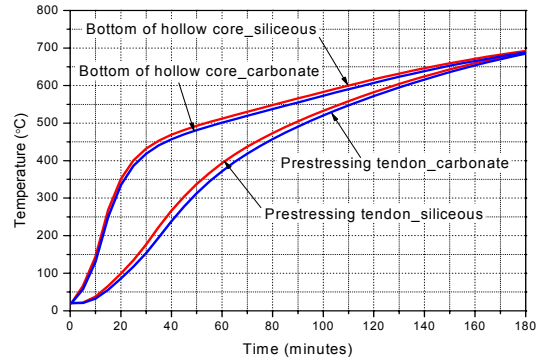
<Fig. 12> Temperature development

고, 중공과 중공 사이의 할로우코어 슬래브의 웨브는 전도에 의한 열전달이 주로 일어난다.

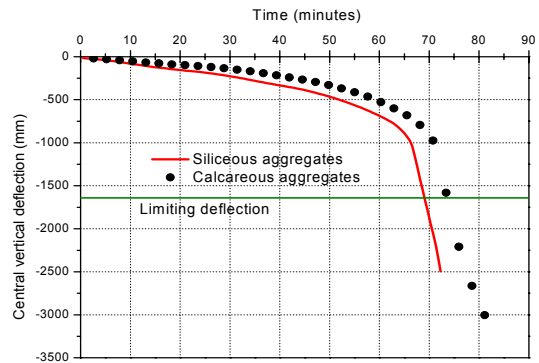
각각의 지점에서의 온도는 <Fig. 12>에서 확인할 수 있다. 화재의 영향을 직접 받는 슬래브의 하부면은 노출 화재온도와 큰 차이 없이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 중공의 맨 하단면은 화재 노출 초기에는 급격한 온도 상승을 나타내었으나 40분 이후에는 안정화되어 온도의 상승 속도가 느려지는 것을 알 수 있다. 중공의 하단면 보다 위에 위치한 강연선의 경우, 60분에 도달했을 때 400°C로 강연선의 임계온도인 350°C를 상회하는 것을 알 수 있다. 또한, 슬래브의 최상부는 온도 증가가 느리게 일어나 60분 화재 노출 이후에도 125°C에 머물렀다. 결과적으로 본 연구에 사용된 할로우코어 슬래브의 강연선은 60분 이후에 상온에서의 인장강도의 50% 미만의 강도를 가질 것으로 예측할 수 있다.

### 4.3 골재의 영향

PC 슬래브에 있어서 콘크리트의 두께와 골재 종류는 온도증가에 영향을 미친다고 알려져 있다<sup>5)</sup>. 경량골재를 제외하고 보통 골재의 종류는 크게 규암, 화강암, 현무암과 같은 단단한 암석으로 이루어진 규산질 골재와 석회석과 백운석을 포함하는 탄산화 골재로 구분할 수 있다. <Fig. 13>은 골재의 차이에 따른 중공의 맨 하단면과 강연선의 온도 차이를 나타낸다. 전반적으로 규산질 골재는 탄산화 골재에 비해 온도 상승이 조금 빠르게 증가하였다. 이는 탄산화 골재에 비해 규산질 골재의 결정체가 큰 수준



<Fig. 13> Comparison of temperature development for different aggregates



<Fig. 14> Effect of aggregate types

을 나타내기 때문이다.

<Fig. 14>는 골재의 차이에 따른 할로우코어 슬래브의 거동 차이를 나타낸다. <Fig. 13>에서 나타난 온도차에 따라 탄산화 골재를 사용한 할로우코어 슬래브는 규산질 골재보다 더 큰 강성을 나타냈다. 내화성능과 관련해서 변형량 및 변형률을 비교한 결과 규산질 골재와 탄산화 골재를 사용한 할로우코어 슬래브의 변형률(71.6 mm)은 각각 65분과 69분에서 초과하였으며, 한계 변형률(1,612 mm)에 도달한 시간은 규산질 골재와 탄산화 골재를 사용한 할로우코어 슬래브에서 각각 68분과 73분이었다.

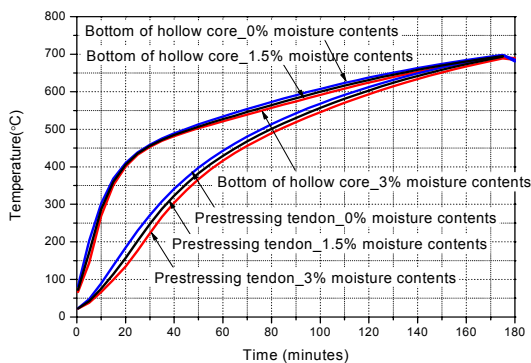
### 4.4 함수율의 영향

할로우코어 슬래브는 보통 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하여 제작되기 때문에, 폭발 발생의 가능성은 항상 존재한다. SAFIR 프로그램의 열해석에서 수분이동은 모델화할 수 없기 때문에

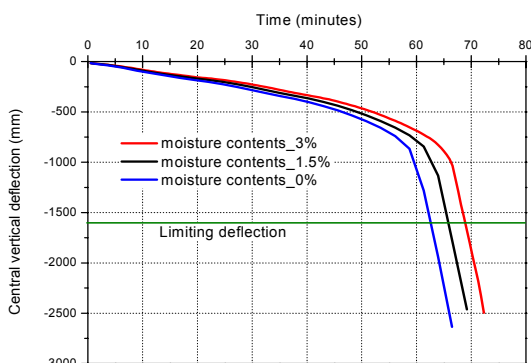


폭렬현상의 모사는 불가능하다. 하지만, 유로코드의 적절한 열특성을 사용하여 온도분포에 대해 함수율의 영향을 확인할 수 있다. 따라서, 이 절에서는 폭렬 가능성이 적은 0%, 1.5%, 3%의 함수율에 대한 할로우코어 슬래브의 거동 특성을 확인하였다.

<Fig. 15>는 함수율 변화에 따른 할로우코어 슬래브의 중공 하단면과 강연선의 온도 상승 결과를 나타낸다. 그 결과 함수율이 낮을수록 온도 상승이 더 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있었다. <Fig. 16>은 온도 결과에 따른 구조해석 결과를 나타낸다. 할로우코어 슬래브의 최대 처짐에 도달한 시간은 함수율이 적을수록 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 내화성능과 관련해서 변형량 및 변형률을 비교한 결과 0%, 1.5%, 3%의 함수율을 가지는 할로우코어 슬래브의 변형률은 각각 58분, 62분과 65분에서 초과하였으며, 한계 변형량에 도달한 시간은 각각 62분, 66분과 68분이었다.



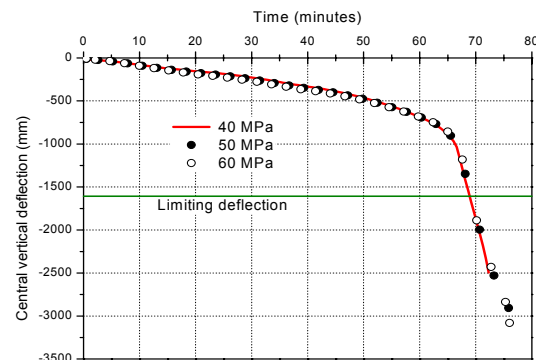
<Fig. 15> Comparison of temperature development for various moisture contents



<Fig. 16> Effect of moisture contents

#### 4.5 콘크리트 압축강도의 영향

가열로에서 수행하는 내화시험은 단순지지 형태로 대부분의 파괴모드는 휨파괴이다. 할로우코어 슬래브는 보통 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하고 있어 화재 시 폭렬이 발생할 수 있으나 수치해석적인 한계로 폭렬을 제외한 내화성능에 있어서 콘크리트 압축강도의 영향을 확인하였다.



<Fig. 17> Effect of concrete strength

<Fig. 17>은 세 가지 콘크리트 압축강도(40, 50, 60 MPa)에 대한 할로우코어 슬래브 거동 차이를 나타낸다. 심각한 폭렬이 발생하지 않았다고 가정했을 때, 각각의 할로우코어 슬래브의 거동은 큰 차이를 보이지 않았다. 앞서와 같이 변형률은 65분에서 기준을 초과하였고 한계 변형량은 68분에서 기준을 초과해서 내화시간은 68분으로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 일반적인 구조물과 달리 중공을 포함하여 온도특성을 쉽게 확인하기 어려운 할로우코어 슬래브에 대해서 수치해석 모델링을 통해 온도 분포를 파악하고 온도 분포에 따른 구조 거동에 대해 살펴보았다.

1. PC 슬래브에 대한 국내 기준의 경우 내화시험을 통해 성능을 판단하도록 되어 있으며, 국외에서 사용되고 있는 표를 이용한 내화성능 평가 방법은 다양한 PC 슬래브에 대해 포함하고 있으나 할로우코어 슬래브에 대해서는 포함하고 있지 않다.

2. 중공이 없는 PC 슬래브에 대해 과거의 실험결

과와 비교를 통해 수치해석 모델은 실험결과와 대체적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 할로우코어의 내화성능에 영향을 미칠 수 있는 골재의 종류, 함수율과 콘크리트 압축강도에 대한 해석은 골재의 종류와 함수율이 내화성능에 좀 더 영향을 미치는 것으로 판단되었으며, 콘크리트 압축강도는 가열로와 같은 휨파괴가 예상되는 곳에서는 그 영향이 미미한 것으로 판단되었다.

4. 다양한 조건에 대한 할로우코어 슬래브 내화실험결과에 대한 모델 검증과 함께 다양한 파괴모드에 대한 연구도 추후 수행될 필요가 있다고 판단된다.

### References

1. EC2, "Eurocode 2 : Design of Concrete Structures. EN1992-1-1: General Rules and Rules for Buildings", European Committee for Standardization, Brussels, 2003
2. KCI, "Structural Concrete Code", Korea Concrete Institute, 2013 (in Korean)
3. KSA, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements (KS F 2257-1)", Korean Standard Association, 2014 (in Korean)
4. ACI 216.1, "Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2007
5. PCI, "PCI Design Handbook 6th Edition: Precast and Prestressed Concrete", Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, USA, 2004
6. J.M. Franssen, "User's Manual for SAFIR 2007: A Computer Program for Analysis of Structures Subjected to Fire", Liège: University of Liège, Belgium, 2007
7. [http://www.facsa.ulg.ac.be/cms/c\\_1584048/en/safir-references](http://www.facsa.ulg.ac.be/cms/c_1584048/en/safir-references), Accessed September 9 2015

8. A.H. Gustaferro, "Fire Endurance of Simply Supported Prestressed Concrete Slabs", PCI Journal, Vol.12, No.1, pp.37-52, 1967
9. ASTM E 119, "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials", American Society for Testing and Materials International, 1998
10. ISO 834, "Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements", International Standard Organization, 1975

- Received : August 25, 2015
- Revised : September 09, 2015
- Accepted : September 09, 2015