

## 도로터널 라이닝 화재손상 평가를 위한 가열로 개발에 관한 연구

박경훈 · 김홍열\* · 김형준\*\*

한국건설기술연구원\* (주)종합건축사사무소 광일건축\*\*

### A Study on Development of Furnance for Road Tunnel Lining Fire Damage Evaluation

Park, Kyung Hoon · Kim, Heung Youl\* · Kim Hyung Jun\*\*

Korea Institute of Construction Technology\*, Kwang Il Architure Co. Ltd\*\*

#### Abstract

There are no International Standards or Criteria pertaining to fires inside tunnels at the moment, but there are some fire-related regulations in some advanced countries such as Germany and the Netherlands where some fire-related studies have been expedited. Germany has established regulations related to the safety of structures by stipulating Fire Curves of RABT and EBA Tunnels. Also, the Netherlands has established the resistance capacity of structures by stipulating RWS curve so that they can prevent the adjacent area from being damaged due to a tunnel collapse. Hydrocarbon Fire Curve is the standard assessing the behaviour of a structure in a serious fire, by increasing the heating speed and the maximum temperature of ISO 834 Curve, while MHC Fire Curve, which was established in France, realizes more serious fire conditions. In this study, we aimed to develop the basis of full-sized experiments, with which you can assess the fire-resisting capacity against the fire strength of concrete PC panel lining, through the realization of various tunnel fire curves as mentioned above, by developing the heating furnace suitable for the requirements of Fire-Resisting Standards, with which you can assess the fire damage of tunnel concrete lining. We have developed various conditions of the heating furnace and the method to install a thermo couple within the furnace based on EFNARC and KS F 2257-1. We have also conducted a calibrating experiment in order to secure its reliability.

#### 1. 서론

콘크리트 구조물에 화재가 발생하였을 때 구조물 측면에서 가장 중요한 것은 내부에

시공된 콘크리트 구조체에 고온이 미치는 영향이다. 콘크리트의 구조적 피해로는 철근이 직접적인 고온에 노출되어 유효단면의 결손을 야기시켜 화재시 구조물의 붕괴의 한 원인이 되는 폭렬현상이 있다. 고온에 노출된 콘크리트는 표면이 박리되거나 비산하여 단면결손이 발생하게 되는데 이러한 현상을 폭렬현상이라고 한다. 이러한 폭렬현상은 콘크리트 내부의 수분이 고열에 의해 수증기가 되어 팽창함에 따라 형성되는 수증기압이 주원인으로 발생된다. NRC(National Research Council of Canada)의 IRC(Institute for Research in Construction)에서는 콘크리트 폭렬은 콘크리트 강도, 수분함유량, 밀도, 가열속도, 시험체의 형상, 하중 재하 조건, 골재의 종류에 따라 그 경향이 달라질 수 있다고 제시하고 있다. 본 연구에서는 화재시 터널 부재의 구조적인 손실을 야기하는 폭렬현상 등 콘크리트의 고온성상을 명확히 규명하기 위해 실험변수별 화재온도 곡선을 정확히 구현할 수 있도록 내화규격 조건에 맞춰 가열로를 개발하였다.

## 2. 내화규격 조건에 부합하는 가열로의 교정수행

<그림 1>은 본 연구에 사용된 가열로로써, 콘크리트 실험시료의 고온성상을 분석하기 위하여 가열로의 온도 오차범위를 KS기준에 적합하게 성능을 향상시켜 화재강도 조정이 가능하며, 시편의 효율적인 장착을 목적으로 하였으며 노내의 열전대를 R-TYPE으로 설치하였다. 열전대의 구조는 연속 실험으로 인한 열전대의 오차범위 증가로 인한 문제 해결을 위해 열전대를 피복하고 보호 파이프와의 이격을 통한 신뢰성 및 내구성 확보 방안을 검토할 수 있도록 하였다. 또한 노내 온도의 급격한 상승에 대한 반응시간을 고려하여 적절한 피복두께를 확보하였다.

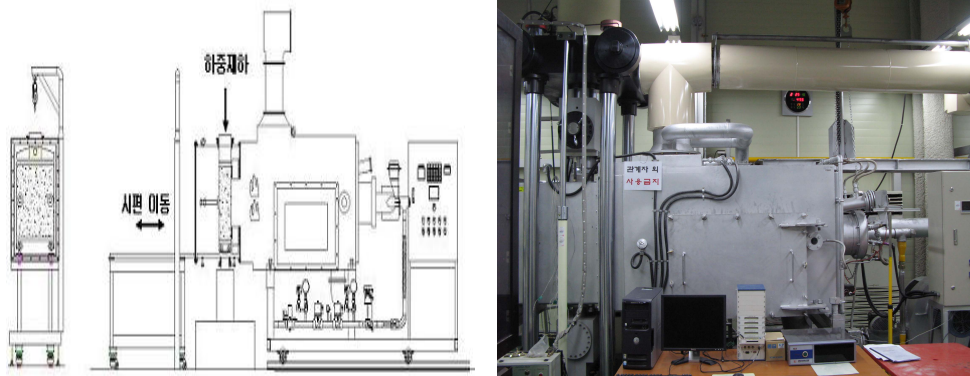


그림 1. 콘크리트 라이닝 폭렬실험 가열로

### 2.1 노내 열전대 설치방법

노내 온도를 측정하기 위해 사용되는 노내 열전대는 KS 2257-1 기준에 적합하게 시험체 근처의 평균온도를 적절히 나타낼 수 있도록 균등하게 설치하였으며 노내 열전대가 가

열로 불꽃에 직접 닿지 않도록 하고 가열로의 벽, 바닥, 지붕으로부터 최소 450mm 이상 떨어지도록 하였으며 열전대가 시험체 가열면에서 100mm 떨어지도록 하였다.

### 2.2 가열로 성능구현 오차범위

표준시간-가열온도곡선 면적대비 규정된 노내 열전대로 기록된 평균온도 곡선면적의 백분율 편차  $de$ 는 다음의 범위 내에 있어야 한다.

- a)  $t < 5$ 분에서  $de < 1\%$
- b)  $5 < t < 10$ 에서  $de < 15\%$
- c)  $10 < t < 30$ 에서  $de < \{15 - 0.5(t - 10)\}\%$
- d)  $30 < t < 60$ 에서  $de < \{5 - 0.083(t - 30)\}\%$
- e)  $60 < t$ 에서  $de < 2.5\%$

$$de = \{(A - A_s) / A_s\} * 100$$

$de$ : 백분율편차

$A$ : 가열로 가열 평균시간-가열온도 곡선면적

$A_s$ : 가열로 표준시간-가열온도곡선면적

$t$ : 시간(분)

모든 면적은 a)의 경우 1분 간격, b), c) 및 d)의 경우 5분 간격을 초과하지 않는 간격으로 면적을 합산하여 계산하며 시간은 0부터 계산한다. 또한 시험의 첫 10분 이후 열전대로 입은 개별온도는 표준시간-가열온도곡선의 온도와 100°C 이상 차이가 나지 않도록 해야 한다.

### 2.3 가열로의 실험 변수별 화재 곡선의 구현

실험 변수별 가열 곡선의 구현에 대한 신뢰성 확보를 위하여 <그림 2>에 제시된 화재 곡선(ISO 표준화재, Hydrocarb one 화재, Modified Hydrocarb one 화재, 네덜란드 RWS for immersed road tunnel 화재, 독일 RABT railway tunnel 화재, 독일 ZTV road tunnel 화재)의 온도 조건을 구현(최고 온도 1350°C)하며 그 이하의 조건에서도 노 내부의 온도 조절이 가능하도록 제작하였다. 열 손실을 막기 위하여 시편의 가열로와의 정확한 밀착 여부와 후단부로부터의 구속 조건을 고려하였다.

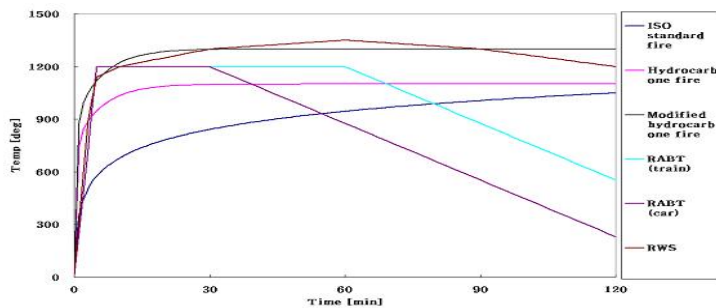


그림 2. 개발된 가열로에서 구현 가능한 화재 곡선

## 2.4 EFNARC 내화시험 규격에 부합하는 가열로의 교정수행

본 가열로는 KS 내화규격 뿐 아니라 유럽통합규격인 EFNARC(European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures)의 터널 화재에 대한 콘크리트 라이닝의 효과적인 수동형(passive) 내화성능을 측정하기 위한 내화시험 규격에 대해서도 교정수행을 실시하였다. EFNARC 규격에서 정한 가열로의 열전대 위치는 시험체 가열면에서  $100 \pm 5\text{mm}$  이격시키는 것으로 본 가열로의 열전대 위치 범위에 만족하였다. (KS 규격:  $100 \pm 50\text{mm}$ ) 화재시험에 사용된 화재하중곡선에 대한 가열로의 성능을 평가하기 위해 EFNARC 규격에서는, KS 규격에서의 오차 범위 평가 방법과 유사하게 화재시험에 사용된 화재하중곡선과 가열로가 구현하는 화재하중곡선의 온도편차를 면적에 대한 오차범위를 토대로 하는 최대 온도편차 계산방법을 적용하고 있다. 백분율 온도편차(100-(실제 가열로 가열 평균시간-가열온도 곡선면적을 가열로 표준시간-가열온도곡선면적으로 나눈[%])는 시험 시작 최대 5분까지는 편차에 대한 제한이 없고 화재 시험 후 5분에서 10분 사이에는  $\pm 15\%$  이내의 편차, 10분에서 30분 사이에는 허용편차가 10%로 제한되며 시험 시간 30분 후에는 5% 이내의 편차범위 이내로 유지되어야 한다.

## 3. 가열로의 교정 수행 결과

현재까지는 터널 화재와 관련된 국제 규준이나 표준은 제정되지 않은 상태이나 화재관련한 연구가 진행된 독일이나 네덜란드 등의 몇몇 선진국은 자체적인 규정을 정해 놓고 있다. 그중 독일은 RABT 와 EBA 터널화재곡선을 규정하여 구조물의 안정성에 관한 기준을 제정하였으며, 네덜란드의 경우엔 터널붕괴로 인한 주변 지역의 피해를 방지하기 위하여 RWS 곡선을 제정하여 구조물의 저항 능력을 규준으로 정해 놓고 있다. Hydrocarbon fire 곡선은 ISO 834 곡선의 가열 속도를 증가시키고 최고 온도를 상승시켜서 심각한 화재 상황에서의 구조물의 거동을 평가하기 위한 기준이며, MHC 화재곡선은 보다 심각한 화재상황을 구현하기 위하여 프랑스에서 제정하였다. 이에 본 연구에서는 내화규격 조건에 부합하는 터널 콘크리트 라이닝의 화재손상평가를 위한 가열로를 개발하였고 이에 대한 신뢰성 검증을 위해 교정실험을 수행한 결과 KS F 2257-1의 가열로 성능조건 및 유럽 EFNARC 내화규정의 콘크리트 터널라이닝 내화시험 가열로 성능조건에 부합하였다.

1. 도로터널의 라이닝 화재손상범위를 평가하기 위해 개발된 가열로는 KS규격 및 EN 규정을 준용하여 콘크리트 터널라이닝의 내화시험방법을 제공하는 EFNARC의 내화시험 규격을 기초로 교정 수행을 실시하여 가열로의 성능을 검증하였다.

2. 콘크리트 재료의 고온 화재성상을 분석하기 위하여 가열로의 온도 오차범위를 KS F 2257-1 기준에 적합하게 성능을 향상시켜 화재강도 조정이 가능하며, 실제 구조물의 설치조건을 고려하여 하중재하와 병행하여 콘크리트 구조요소의 재하조건 고온화재실험이 가능하게 하는 가열 실험장비를 구축하였다.

3. 가열로의 온도편차는 오차범위가  $\pm 3\%$  이내에 들도록 정밀도를 조정하여 콘크리트 터널라이닝에 정밀한 가열이 가능하게 되었으며, 터널화재곡선(Modified Hydrocarbon, Hydrocarbon, RWS Tunnel Fire Curve)·표준화재곡선(ISO Standard Fire)를 구현할 수 있다. 또한 가열로의 구현 가능한 화재곡선을 99POINT로 입력기능을 통해 다양한 화재강도 조정이 가능하므로, 터널화재시 발생할 수 있는 다양한 열역학적 특성조건에서의 콘크리트 라이닝 화재손상특성을 실험할 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 국가 R&D로 수행되고 있는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 “표준화재모델에 따른 화재 확대방지 및 피난 안전 설계 기술 개발(2008)”과제와 관련하여 지식경제부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Specificationa and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for concrete Tunnels Linings, EFNARC, 2006, pp.15~27
2. 건축 구조 부재의 내화 시험 방법 - 일반 요구 사항(KS F 2257-1), 한국산업규격, 1999, pp.3~13
3. Harmarthy, T. Z., "Design of Fire Test Furnance", Fire Technology, Vol.5, No.2, 1969, pp.140~150