

A-02

## 다중차량 화재전파모델을 이용한 대구지하철 화재 열방출율 및 화재지속시간 추정

윤명오, 박경환, 유지오\*, 현성호\*\*  
서울시립대, 신홍대학교\*, 경민대학교\*\*

### Estimate to Heat Release Rate and Fire Duration of Dai-gu Subway Using fire spread Process in a tunnel with Multiple coaches

Myung-O Yoon, Kyungwham Park, Ji-O Lew\*, Seong-Ho Hyun\*\*  
University of Seoul, Shinheung University\*, Kyungmin College\*\*

#### 1. 서론

2002년도 2월에 우리는 터널화재의 참혹함을 대구에서 경험하게 되었다. 작지 않은 시간이 지났지만 그 아픔은 가시지 않았다. 이후 객차의 불연화, 제연설비 개선, 도어스크린 설치가 추진되고 있다. 그러나 아직까지 그 화재는 단순 정신이상자의 방화에 의한 사회 병리학적인 관점에서 이해되고, 의식개혁 운동 등 캠페인을 통해 극복하고자 하는 시도들이 목격된다. 영국에서 조사한 지하철화재 원인은 45건 중 17건이 방화였다. 이것은 이런 사고가 일회성에 그치지 않고, 계속될 수 있다는 것을 암시하는 것이다. 2005년 1월 3일 광명역에서 또다시 방화로 화재가 발생했고, 초기 진화 후 이동하던 차량에서 재발화로 객차 3량이 전소되는 사고를 겪었다.

이런 참사는 우리만의 문제가 아니다. 독일, 영국, 이탈리아, 미국 등 다수의 국가에서 지하철을 포함한 도로터널, 철도터널에서 대형 화재사고를 경험하였다. 이 화재사고의 경험은 면밀하게 연구되고, 신중하게 접근해야만 반복되는 상황을 차단할 수 있을 것이다. 대구지하철 사고는 신중하게 조사되지 못했다. 중앙역은 사고 2일만에 철저히 청소되었고, 차량은 현장에서 이동되었다. 많은 증거들이 훼손됨으로 인해 화재에 대한 과학적인 재구성을 통한 안전대책의 수립은 어렵게 되었다. 화재조사의 한계를 여실히 보여준 사례일 것이다. 대구지하철 화재에서 경험한 것은 다중차량으로 화염이 연속적으로 전파된 것이다. 이것은 단일차량 화재시나리오에 기초한 평가와 다른 측면에서 분석될 필요를 제기한다.

이에 본 연구는 대구지하철 화재의 재구성을 통해 발생화재의 크기를 추정하고, 이를 통해 향후 어떤 대책이 요구되는지에 대한 접근을 시도하고자 한다.

## 2. 다중차량 화재전파 모델

지하철터널 내 열차의 연속적인 화염전파를 설명하기 위한 모델로 Ingason이 제시한 다중차량 화재전파 모델을 사용한다.

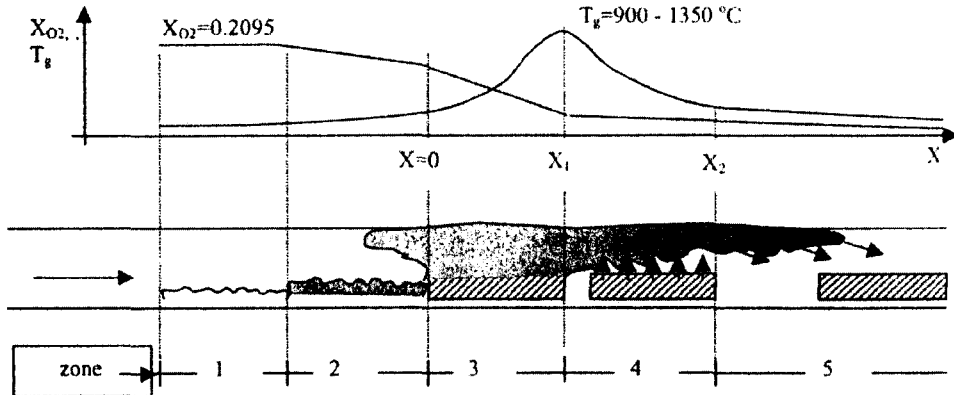


그림 1 다중차량 화재전파 모델 개념도

이 모델은 가연물의 화염전파 모델과 같은 원리에서 접근된다. 먼저 연속전파 화재사고는 최초의 연소 차량의 옆과 앞과 뒤에 위치한 차량으로 열전달(주로 화염의 복사)에 의해 전파된다. 이런 진행은 다음과 같은 영역으로 구분될 수 있다.

- ① 타버린 냉각(cooling)구역 : 화재로 완전히 타버린 차량
- ② 잔화(glowing ember)구역 : 감쇄기의 마지막 단계의 차량
- ③ 연소(combustion)구역 : 격렬하게 타는 차량, 불꽃연소가 나타나는 지역
- ④ 연료과잉(excess fuel)구역 : 연료가 가스화 되어 연소영역에 제공되는 지역
- ⑤ 예열(preheating)구역 : 연료의 증발이 없이 예열하는 지역

## 3. 대구지하철 화재 추정

### 3.1 시나리오 구성

09:53분(화재발생)에 1079호 1호 객차 후미(2호와 연결 통로 앞)객차에서 휘발유(가연성 액체)에 착화된 화재는 의자 및 넓은 바닥에 순간적으로 큰 화염을 발생시켰을 것이다. 이 넓은 면적의 액체누설화재는 국부적인 flashover와 비슷한 양상이고, 1호 객차의 중심과 후미를 향해 전파되었을 것이다. [그림2]는 이런 화염전파의 과정을 보여준다. 1호차의 기관실과 객차의 모든 문은 개방된 상태여서 신선한 공기는 차량 내부로 충분히 공급되었을 것이므로, 5-10(10:00 경)분 내에 최대열방출율에 도달하였을 것이다. 초기 화재성장

이 매우 빨랐다는 것은 약 09:54분(화재 후 1분)에 CCTV가 작동불능 상태가 되었고, 09:56(화재 후 3분)에 중앙로 지하1층에 있는 상가와 역사와 연결부분의 방화셔터가 작동된 것으로 추정할 수 있다. 09:56분 1079호 1호 객차가 최대열방출율에 도달하기 직전에 1080호는 중앙로역에 도착했다. 이때 기관사는 1079호로부터 화염 분출을 목격했다. 이후 09:59(화재 후 6분)분에 1080호는 전기가 끊기게 된다. 따라서 이 시간에 1079호 1호차는 최대열방출율에 도달하였을 것이고, 화염에 노출된 전원은 문제를 발생시키며 완전히 꺼지게 되었을 것이다. 그리고 1080호가 역에 들어온 시간에 1079호 2호 객차는 점화되었을 것이다. 10시 이후 1079호 2호 객차는 급격한 화재 성장 상태였고, 1079호와 마주보고 있던 1080호 5호 및 6호 열차는 점화되어 성장을 시작하였을 것이다. 따라서 10시 이후에 최소 2량이 최대열방출을 기록하였을 것이고, 2량으로 이어지는 연속적인 화염전파가 있었을 것이다.

여기서 우리는 다음과 같은 가정을 세울 수 있을 것이다. 10시 이후에 화재는 2개의 차량에서 최대열방출을 기록하였고, 나머지 2대는 점화되어 각각 최대방출열의 1/2 정도의 열방출을 상태에 있었을 것으로 추정할 수 있을 것이다. 또한 이런 추정은 12량 전체가 연소되는 동안 비슷한 양상으로 전개되었을 것이다.

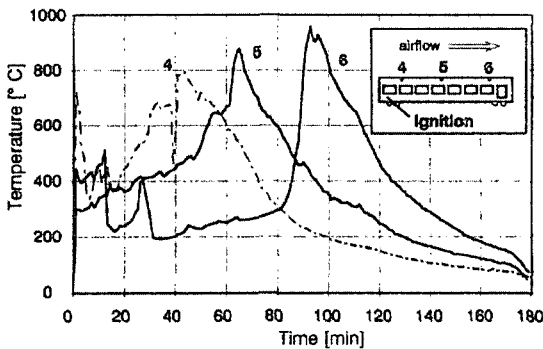


Fig. 1. 승객용 열차의 화재전파 상황

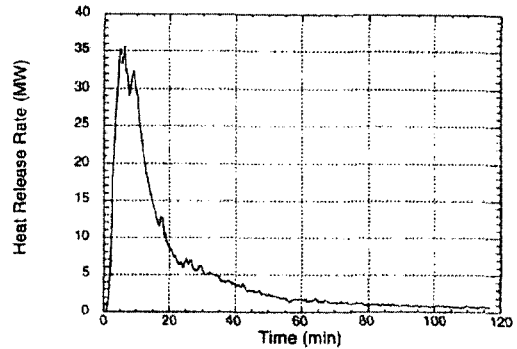


Fig. 2. 지하철차량의 열방출율

### 3.2 열방출율 및 지속시간 추정

먼저 대구지하철 차량의 총열량에 대한 자료가 존재하지 않기 때문에 전체열량은 EUREKA499 시험에서 측정된 최소한 독일지하철 객차와 같은 매 객차마다 40-50[GJ]로 추정한다. 다음으로  $Q_{max}$ 는 Ingason이 터널 내 steel body의 열차 화재의 추정식 (1)을 이용한다.

$$Q_{max} = 1.67 \times 1500 \times A \times \sqrt{h} \quad (1)$$

열차의 창과 문 면적에 대한 제원은 부정확하지만 대략 총면적은 12~15m<sup>2</sup>, 창문의 높

이는 약1m, 문의 높이는 약 2m일 것이다. 따라서 평균적인 개구부의 높이는 1.4m로 추정할 수 있을 것이다. 이 재료를 식(1)에 대입하면  $Q_{max}=1.67 \times 1500 \times 12 \sim 15 \times \sqrt{1.4} = 35 \sim 45[\text{MW}]$ 가 된다. 이 결과는 Ingason이 Baku 지하철화재 사고에서 추정한 45[MW]와 EUREKA 시험에서 측정된 [Fig.3]의 35[MW] 사이의 값이다. 2대가 포함되면 약 70~90[MW]가 될 것이다. 앞의 가정에서 화재는 2대가 최대열방출율, 2대는 최대방출열의 1/2이라고 하였으므로  $Q_{max}=105 \sim 135[\text{MW}]$ 가 된다. 평균적인 열방출율도 최대값과는 다소 차이는 있었겠지만 연속적인 화재의 전파로 100[MW] 이상의 정상상태를 계속 유지하였을 것이다.

화재지속시간은 식(2)을 이용한다.

$$t_2 = 2.03 \times \frac{E_{tot}}{Q_{max}} \quad (2)$$

여기서 화재지속시간은 최대방출열량의 3%가 될 때까지의 시간으로 정의되었다. 차량의 총열량  $E_{tot}$ 는 차량마다 40-50[GJ]이므로 총 12량은 480-600[GJ]이고, 화재지속시간은  $t_2 = 2.03 \times (480 \sim 600) / (105 \sim 135) = 3.6 \sim 5.7[\text{h}]$ 가 계산된다. 이 결과는 최초로 지하 3층 화재지점에 도착한 대원의 인터뷰와도 잘 일치한다.

“지하 3층에 진입하였을 당시의 상황은? 1080호 전동차는 이미 상당히 많이 탄 상태이고, 1079호 전동차는 전동차 상부 부분에 불꽃이 붙어 옮겨 다니고 있었다. 공급한 것은 발화가 시작된 1079호 전동차 보다 1080호 전동차가 더 많이 연소해 있었다는 것이다.”

최초로 소방대가 지하3층 화재지역에 도착한 시간이 화재 후 약 3시간 정도였을 것으로 추정되고, 이때 1079호의 일부가 연소되었으므로 화재지속시간은 3.6~5.7[h]중 높은 열방출율을 반영하는 4시간 정도였을 것으로 추정된다.

또한 1079호보다 1080호가 더 많이 연소한 것은 객차간의 문의 개방되었기 때문일 것이다. 따라서 대구지하철 화재에서 발생한 최대열방출율은 105~135[MW]에 도달하였을 것이고, 화재지속시간은 소방대가 개입하지 않았다면 4시간 정도가 소요되었을 것으로 추정된다.

만약 최대열방출율과 화재지속시간에 대한 추론이 근거가 있는 것이라면 최대열방출율 105~135[MW]에 필요한 공기공급은 어떻게 이루어졌는지가 해명되어야 할 것이다.

일반적으로 공기 1kg이 소모되면 약 13.1MJ의 열량을 발생시킨다. 따라서 105~135MW에 필요한 공기량은  $Q_{air} = (105 \sim 135) / (13.1 \times 0.23) = 34.8 \sim 44.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 다. 신선한 공기가 지상의 계단이나 환기구를 통해 들어갔다고 보기는 어려우므로, 주로 지하 3층 터널의 양쪽에서 공급되었을 것이다. 이것은 화재와 관련된 보도나 보고서에서 역과 역 사이에 있는 본선환기가 어떻게 작동하였는지에 대해 언급이 없기 때문에 화재 시 본선환기는 작동하지 않았을 것이라고 추정되었다. 양쪽의 터널 단면적을 25m<sup>2</sup>이라고 하면, 전체는 50m<sup>2</sup>이 된다. 따라서 단면을 통과하는 공기량은 0.7~1[m/s]가 된다. 따라서 위의 예상은 자연환기 상태에서도 현실적인 값이다. 분출하는 연기는 굴뚝의 원리와 같이 계단과 환기구로 이동하고, 터널 양쪽에서 신선공기가 들어왔을 것이다. 결국 연소는 터널의 양쪽에서 들어오는

공기량에 의해 조절되는 환기배형 화재로 추정할 수 있다. 만약 강제환기 상태였다면, 화재는 연료지배형 연소 특성을 보이며 더 심각해졌을 것이다.

결과로부터 100[MW] 이상의 화재조건에 장시간 노출된 천정, 벽의 구조체는 심각하게 손상되었을 것이다. 일반적으로 100[MW]이상의 열방출은 1,000℃ 이상의 고온을 유지한다. 결국 구조체는 3시간 이상 고온에 노출되고, 붕괴의 위험에 직면하게 될 것이다. 따라서 다중차량의 연속전파를 차단할 대책이 필요할 것이다. 또 소방전술상의 관점에서 보면, 소방대의 진입이 인근 역사를 통한 터널을 통해 진행되고, 터널내에 소방대의 소화활동을 보조하는 연결송수관이 설치되었다면 좀 더 효과적이었을 것이다. 또한 터널 내부에 방수구동이 설치되었다면 화재초기에 다른 역에서 터널을 통해 화재지점에 쉽게 도달하여 소화활동을 할 수 있었을 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

Ingson의 다중차량 화염전파모델을 이용해서 대구지하철 화재의 열방출율과 화재지속시간을 추정해서 다음의 결론을 얻었다.

1. 화재 기간 중 최대 열방출율은 105~135[MW]로 추정되었고, 상당시간 동안 100[MW] 이상의 정상상태를 유지하였을 것이다.
2. 화재지속시간은 소방대의 개입이 없었다면 3.6~5.7[h] 중 4[h] 정도였을 것이다. 따라서 연속전파를 차단하기 위한 대책이 필요하다.
3. 연소에 필요한 공기는 터널의 양쪽에서 연소차량에 공급되었을 것이며,
4. 소방전술상 화재 인근 역을 통한 접근이 유리하며, 터널을 통해 접근한 소방대의 활동을 원조하기 위해 연결송수관이 터널에 설치되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 대구광역시소방본부, "2·18 대구지하철 화재사고 소방활동백서" 2004.
2. 이관섭, "대구지하철 사고에 따른 차량안전대책 연구"
3. H. Ingason, Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires, 1st International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, Sweden, 2003.
4. G. Blume, "Smoke and Heat Production in Tunnel Fires-Smoke and Hot Gas Hazards", Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, Boras, Sweden, 1994.
5. E. Richter "Propagation and Development of Temperature from Tests with Railway and Road Vehicles" Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, Boras, Sweden, 1994.
6. H. Ingason "Fire Dynamic in Tunnel, Chapter 13 in the Handbook of Tunnel Fire Safety" 2004.