

## FDS를 사용한 터널구조물 내부 열역학적 특성예측에 관한 연구

이영재\* · 안찬솔\* · 김홍열\* · 김형준\*\*  
한국건설기술연구원 · (주)광일건축

### A Study on Thermodynamics Specific Estimation of Inner Part of Tunnel Structure used FDS

Lee, Young Jae\* · Ahn, Chan Sole\* · Kim, Heung Yeol\* · Kim, Hyung Jun\*\*  
Korea Institute of Construction Technology · Kwang Il Architecture Co. Ltd

#### 요 약

국내도로터널 화재안전성을 확보하기 위하여 FDS를 이용하여 ISO, 도로터널 방재시설기준, Runner Hammer 터널기준의 시나리오에 따라 콘크리트 터널구조물의 내부 열역학적 특성을 예측하였다. 화재로 인한 터널내부의 온도분포를 측정하기 위하여 화염원으로부터 터널입구 방향으로 5m 마다 터널 단면의 온도분포를 추출하였고, 터널의 중심을 지나는 길이 방향 단면의 온도분포를 해석하였다. 해석결과 온도는 500~950℃까지의 분포를 나타내었고 가장 높은 온도영향을 받은 Runner Hammer 터널기준의 내부 열환경 조건에서는 터널 단면이 모두 화염에 직접적으로 노출 때문에 단면전체가 800~950℃까지 상승하였다. 특히 상부부분은 900℃ 이상의 고온에 장시간 노출되고 있어 깊이 50mm 지점의 온도가 250℃까지 상승하였다.

#### 1. 서 론

우리나라의 경우 산지가 국토의 70%를 차지하고 있으며 도로선형을 직선화하고 절개지를 최소화하는 등 환경 친화적인 터널의 건설이 증가하고 있는 동시에 차량의 대형화, 위험물 다량적재 및 주행속도 증가에 따라 터널내 교통사고로 인한 대형화재가 발생하여 엄청난 경제적 손실을 초래하는 예가 있다. 즉 콘크리트 터널은 밀폐된 공간이라는 특성상 5분내 1,000℃ 이상으로 온도가 급상승 할 수 있어 인명피해 뿐만 아니라 콘크리트 구조체의 폭렬에 의한 강도저하 및 붕괴에까지도 이르는 등 사회기반시설에 커다란 장애를 야기할 수도 있다. 이에 본 연구에서는 터널 화재에 의한 기류분포 및 화재 해석을 위한 실제규모 화재 전산 해석(FDS, Fire Dynamics Skmulator)을 한 후 연구결과를 토대로 온도이력 등콘크리트 구조물의 손상범위를 제공하여, 터널 설계시 사전에 방지할 수 있는 기술자료를 제공하여 터널화재안전을 위한 초석을 마련하고자 한다.

## 2. 연구계획 및 범위

### 2.1 FDS (Fire Dynamics Simulator) 특성

본 연구에서 사용한 Fire Dynamics Simulator(FDS)는 미국 NIST의 BFRL그룹에서 개발한 공개용 프로그램으로써, 화재에 의해 유도된 유동현상, 유체 및 고체 내부의 열전달 현상, 가연물의 연소현상을 해석하는데 주로 사용 된다. 현재 방화공학 분야에서 화재 문제를 해석하는 목적으로 널리 사용하고 있으며 기초적인 화재역학 및 연소를 연구하는 tool로도 사용되고 있다.

#### (1) Hydrodynamic Model

FDS는 화재로부터 유도되는 매연과 열전달 현상에 주안점을 두고 있기 때문에 열적으로 유도되는 유동의 흐름을 저속의 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치적으로 해석한다. 핵심 알고리즘으로는 공간 및 시간에 대해 Second Order의 Explicit predictor-collector scheme을 사용하고 있으며 난류는 Large Eddy Simulation(LES)을 Smagorinsky 형태로 처리하여 해석한다.

#### (2) Combustion Model

FDS는 혼합분율 연소모델을 이용한다. 이 모델은 연료와 산소의 혼합반응이 무한대로 빠르게 진행된다고 가정하고 있으며 모든 주요 반응물질 및 생산물질의 질량분율은 상태 관계(State relation)에 따른 혼합 분율로부터 유도되어질 수 있다고 가정하고 있다.

#### (3) Radiation Transport

복사열전달은 비분산 회색가스(Non-scattering gray gas)에 대한 복사전달 방식을 모델로 하고 있으며 유한체적법과 유사한 방법에 의해 해석이 된다. 대략 100 discrete angle 까지 계산할 수 있으나 계산에 필요한 CPU 시간이 15%정도 증가하게 된다. 복사열전달 모델은 연무(mist) 스프링클러에서 분산된 물방울이 열에너지를 흡수하는 과정에서 중요하게 사용된다.

### 2.2 실제규모 화재 전산해석 수행조건

차량종별 화재강도는 터널내 구조물의 손상정도 및 거동을 파악하기 위한 화재해석의 가장 기본적인 사항으로, 화재시 구조물의 물리적·화학적 성향에 영향을 미쳐 구조물의 안전도 산정을 위한 매우 중요한 인자가 된다. 터널 화재시 화재강도는 다수의 실험결과를 기초로 하여 정리된 각종 설계자료 및 PIARC에서 제시된 화재강도를 기본으로 하였다. 승용차에 대한 화재강도는 2.5~5 MW정도이며, 버스의 화재강도는 20~35 MW정도이며, 20 MW가 대부분인 것을 알 수 있다. 또한 대형차의 화재강도는 15~30 MW까지 폭넓게 분포하고 있다. 최대 화재강도까지 성장하는 시간은 승용차의 경우에는 최소 8분에서 55분이며, 버스의 경우에는 자료가 부족하나 7~8분 정도이다. 따라서, 본 연구에서는 일반적인 승용차 화재에 해당되는 6MW급 화재를 그 대상으로 하여 수행하였다.

본 연구에서 차량화재실험을 위하여 제작한 실규모의 터널모형은 폭 12m, 높이 약 9m, 길이 40m로 제작되었으며 실제 터널제작과정과 동일한 조건으로 만들어졌다. 터널의 양쪽 끝단은 완전 개방 형태로서 화재실험시 외부공기가 자유로이 유입될 수 있도록 되어있으며, 화원은 터널의 정 중앙부에 위치한 것으로 그림과 같이 가정하였다.

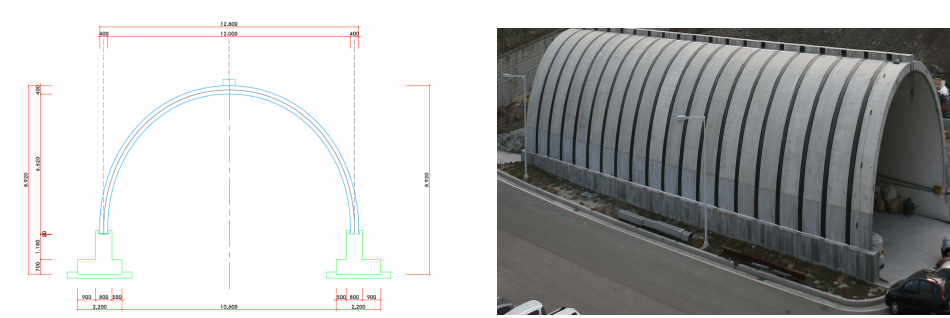


그림1. 수치해석 대상의 터널 단면도 및 터널 전경

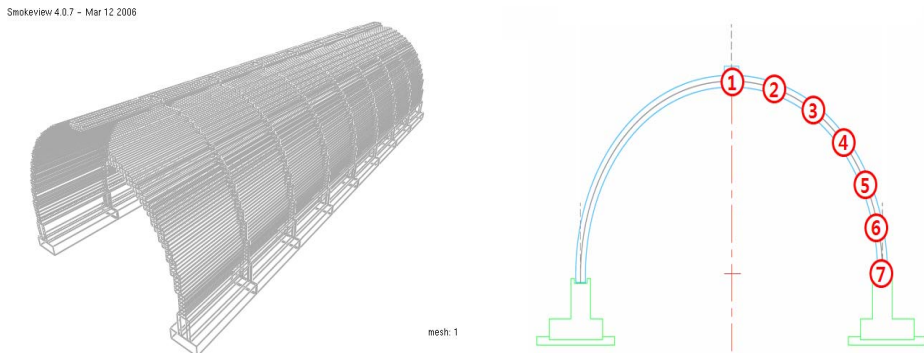


그림2. 수치해석용 터널 격자생성 및 측정위치

수치해석을 위하여 사용된 격자는 실물모형의 규모를 그대로 적용하였으며 폭 280격자, 높이 180격자, 길이 800격자로 구성하였으며 터널의 끝단으로부터 20m 지점에 가로 1m, 세로 1m의 정사각형 풀파이어 버너(pool-fire burner)를 구성하였다. 구조물의 물성치는 일반적인 구조용 콘크리트의 데이터를 적용하였으며, 터널 내부로의 유동현상은 화재로 인한 자연대류 외의 강제대류현상은 없는 것으로 하였다. 풀파이어에서 발생하는 연소현상은 헵탄(heptane)의 발화현상을 적용하였으며 최고 6MW, 20MW, 200MW의 열량을 방출하도록 설정하였다.

터널 내부의 가스온도를 해석하기 위하여 버너를 기준으로 바닥에서부터 천정면까지 9개, 터널 입구 방향으로 5m마다 설정하여 총 45개의 위치에 대한 온도정보를 수집하도록 하였다. 또한 터널의 천정면상에서 풀파이어의 수직상승 위치로부터 터널의 입구 방향으

로 1열의 콘크리트 온도를 수집하도록 20개의 위치를 설정하였다.

20MW와 200MW 화재의 경우 콘크리트 내부의 온도가 구조적인 위험수준까지 상승할 것이 예상되므로, 터널 콘크리트 벽면 및 내부의 온도를 해석하기 위하여 터널의 최상부를 기점으로 7개 구역으로 나누어 각 구역의 표면온도 및 10mm, 30mm, 50mm, 100mm 깊이의 온도변화를 해석하도록 하였다.

### 3. 해석수행

#### 1. 자동차 화염원에 의한 내부 열환경 예측(6MW)

열 방출율은 일반승용차를 가정하여 최대 6MW로 설정하였으며 시간당 변화율은 초기 0초에서 0MW로 시작해서 점차 선형으로 증가하여 300초에는 6MW에 이르게 되며, 이 상태가 600초까지 지속되다가 이후 서서히 감소하여 1800초에는 0MW로 자연 소화되도록 그림3.과 같이 설정하였다.

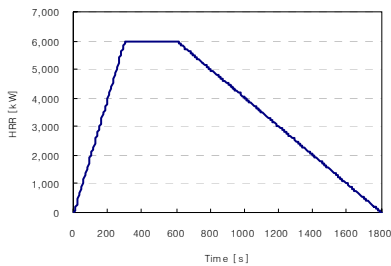


그림3. 시간당 열방출율

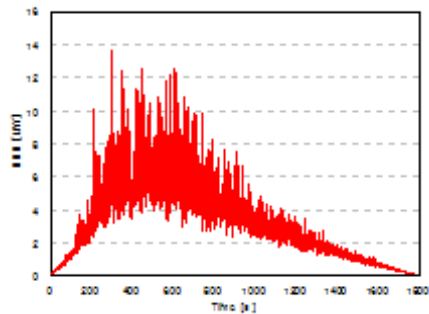


그림4. 시간당 열방출율의 해석결과

수치해석 결과는 터널의 중앙부분에서 발생한 화염이 양쪽으로부터 충분히 공급되는 신선한 외기에 의해 충분한 산소조건으로 연소하고 부력에 의해 수직상승하여 터널의 천장까지 올라간 후 터널의 상층부를 따라 끝단을 향해 흘러가고 대기 중으로 방출되는 과정을 거치게 된다. 이 과정 중에 연소가스의 재 유입현상은 나타나지 않았으며 주요 원인으로서는 터널의 길이가 충분히 길지 않아 연소가스의 냉각으로 인한 침강현상이 발생되기 전에 대기 중으로 방출되기 때문이라 판단된다. 시간당 열 방출율은 주어진 조건에 맞추어 적절하게 진행이 되었으며 그림 4와 같이 해석되었다.

연소가스의 대류현상과 벽면에 접한 가스와의 전도현상으로 인해 연소가스가 갖고있는 열에너지는 벽면으로 전달이 되고 이로 인해 구조물은 서서히 가열되어 열적 변화를 일으키게 된다. 특히 화염의 강도가 커질수록 화염으로부터 직접 방사되는 복사열에 의해서 급속하게 가열되고 심할 경우 구조적인 파괴현상이 발생하기 때문에 화염원으로부터 벽면으로 전달되는 에너지의 양을 알아내는 일은 매우 중요하다고 할 수 있다. 연소가스의 최고온도는 화염원의 상단 천장근처에서 발생하였으며 온도는 약 700~800℃ 까지 상승하였

다. 천장까지 상승한 연소가스는 양쪽으로 분할되어 약 1~1.5m의 연소가스 층을 이루며 터널의 양 끝단을 향해 유동하게 되는데 이때의 가스온도는 약 200~300℃ 로 형성되었다.

화염원으로부터 발생하는 시간당 열방출율은 위 그래프에서 볼 수 있듯이 300~600초일 때 최대값을 갖지만, 구조물의 온도상승율은 열전달 과정으로 인한 시간적 차이로 인해 최고온도에 도달하는 시간이 500~800초 사이로 늦추어진다. 그림 5는 터널 내벽면의 온도분포를 측정된 결과이다.

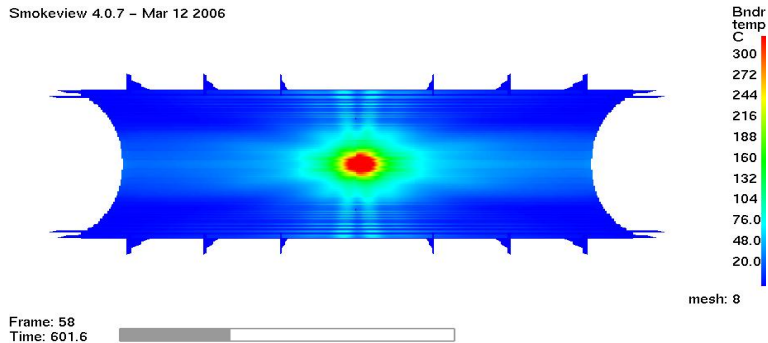


그림5. 터널 내벽면의 온도분포

## 2. 도로터널 방재시설기준에 의한 내부 열환경 예측 (20MW)

20MW급 화재가 터널의 중앙에서 발생한 경우를 가정하여 버너를 터널의 정 중앙에 위치시켰고, 열 방출은 화재발생 후 6분동안 2MW/min로 급격히 상승하면서 20분까지 20MW로 상승하였다가 이후 40분까지 점차 감소하여 40분 이후로는 화재가 소강상태로 그림6과 같이 진행되었다. 최대 열량을 방출하는 1200초에서는 화염이 버너로부터 수직 상승하여 터널의 천장부까지 도달하였다.

버너로부터 방출된 화염은 수직으로 상승하고 최대 열방출이 발생하는 1200초에서 천장 근처의 연소가스 온도는 최고 700℃까지 상승하였다. 전체적인 연소가스의 온도는 200~400℃에 분포하였고 상층부를 따라 연소가스의 배출이 진행되었다. 연소가스의 배출이 빠른 속도로 진행되었기 때문에 터널 끝단까지 연소가스가 이동하는 동안 온도변화는 거의 없었으며 터널의 하단으로 외부 공기가 지속적으로 유입되어 상단과 하단의 유동층이 뚜렷이 구분되었다.

터널 상층부에서 화염이 직접 닿는 부분은 국소적으로 600℃ 까지 상승하지만, 대부분의 벽면온도는 최고 200℃ 정도에 분포한다. Point 1과 2의 경우 각각 600℃, 500℃ 까지 측정이 되었는데 이것은 연소가스가 직접 닿는 지점이기 때문인 것으로 판단된다. 특히 point 1의 경우 약 20분간 고온에 노출되어 깊이 50mm 지점의 온도가 200℃까지 상승하였다.

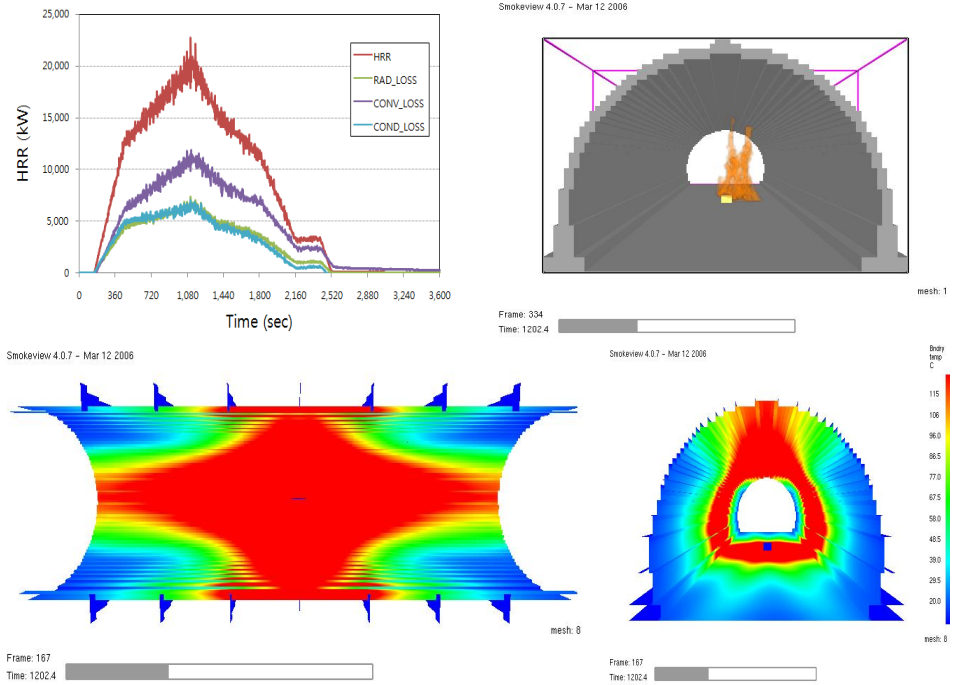


그림6. 시간당 열방출율과 시간당 열방출율의 해석결과

#### 다. Runner Hammer 터널기준 내부 열환경 예측(200MW급)

200MW급 화재가 터널의 중앙에서 발생한 경우를 가정하여 버너를 터널의 정 중앙에 위치시켰고, 열 방출은 화재발생 후 6분동안 20MW/min로 급격히 상승하면서 20분까지 200MW로 상승하였다가 이후 40분까지 점차 감소하여 40분 이후로는 화재가 소강상태로 진행되었다. 또한 최대 열량을 방출하는 1200초에서는 버너로부터 방출된 화염이 확산하여 터널의 전 단면에 닿는 것을 확인하였다.

버너로부터 방출된 화염은 터널 단면을 가득 채워서 터널의 모든 단면이 화염에 닿게 되는데, 최대 열방출이 발생하는 1200초에서 천장 근처의 연소가스 온도는 최고 1100℃까지 상승하였다. 전체적인 연소가스의 온도는 900~1,000℃에 분포하였고 상층부를 따라 연소가스의 배출이 진행되었다. 연소가스의 배출이 매우 빠른 속도로 진행되었기 때문에 터널 끝단까지 연소가스가 이동하는 동안 온도변화는 거의 없었으며 터널의 하단으로 외부 공기가 지속적으로 유입되어 상단과 하단의 유동층이 뚜렷이 구분되었다.

또한 터널 단면이 모두 화염에 직접 닿기 때문에 단면 전체가 800~950℃ 까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 대부분의 벽면온도 또한 최고 850℃ 정도에 분포하는 것으로 분석되었다. Point 1~7 까지 각각 600~900℃ 의 온도상승을 측정하고 있으므로 터널 단면 전체에 걸쳐 고온의 화염이 접촉되고 있음을 확인할 수 있다. 특히 point 1의 경우 900℃ 이상의 고온에 장시간 노출되고 있어 깊이 50mm 지점의 온도가 250℃까지 상승하였다.

## 라. Runner Hammer 터널기준 우측편심 열환경 예측(200MW급)

실제로 차량이 터널을 주행할 때 우측으로 통행하는 것을 고려하여 200MW급 화재가 터널의 우측에서 발생하도록 버너를 터널의 우측에 위치시켰다. 열 방출은 화재발생 후 6분동안 20MW/min로 급격히 상승하면서 20분까지 200MW로 상승하였다가 이후 40분까지 점차 감소하여 40분 이후로는 화재가 소강상태로 진행되었다. 최대 열량을 방출하는 1200초에서는 버너로부터 방출된 화염이 확산하여 터널의 전 단면에 닿는 것을 확인하였다. 우측으로 편심된 버너로부터 방출된 화염은 터널 단면을 가득 채워서 중앙에 버너가 위치한 경우와 흡사하게 터널의 모든 단면이 화염에 닿게 되는 것을 확인할 수 있다. 최대 열 방출이 발생하는 1200초에서도 천장 근처의 연소가스 온도가 최고 1100℃까지 상승하였고 전체적인 연소가스의 온도도 900~1,000℃에 분포하고 있어 중앙에 버너가 설치된 경우와 유사하게 온도분포가 이루어 진다. 연소가스의 배출이 매우 빠른 속도로 진행되었기 때문에 터널 끝단까지 연소가스가 이동하는 동안 온도변화는 거의 없었으며 터널의 하단으로 외부 공기가 지속적으로 유입되어 상단과 하단의 유동층이 뚜렷이 구분되었다.

또한 편심된 버너에 의한 화재 상황에서도 터널 단면이 모두 화염에 직접 닿기 때문에 단면 전체가 800~950℃ 까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 대부분의 벽면온도 또한 최고 850℃ 정도에 분포하는 것으로 분석되었다. Point 1~7 까지 각각 700~900℃ 의 온도상승을 측정하고 있으므로 터널 단면 전체에 걸쳐 고온의 화염이 접촉되고 있음을 확인할 수 있다. 이번 경우에서도 point 1이 900℃ 이상의 고온에 장시간 노출되고 있어 깊이 50mm 지점의 온도가 250℃까지 상승하고 있음을 확인하였다.

## 3. 결 론

화재 전산 해석을 통한 터널화재시나리오에서, 화재시 터널 콘크리트의 안전성 확보를 목적으로 터널내부의 화재손상범위를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) ISO 화재조건에 노출된 콘크리트 터널에서, 연소가스의 최고온도는 화염원의 상단 천장근처에서 발생하며, 온도는 약 700~800℃까지 상승한다. 천장까지 상승한 연소가스는 양쪽으로 분할되어 1~1.5m의 연소가스 층을 이루며 이때 가스온도는 200~300℃를 형성한다.

2) HMC 화재조건에 노출된 콘크리트 터널에서, 상층부에서 화염이 직접 닿는 부분은 국소적으로 600℃까지 상승하지만 최고 벽면온도는 200℃이다. 터널 중앙 상부의 경우에는 각각 500~600℃까지 상승하며, 화염에 직접적으로 노출되기 때문에 철근 피복지점인 깊이 50mm 지점의 온도가 200℃까지 상승한다.

3) RWS 화재조건에 노출된 콘크리트 터널에서, 터널 단면이 모두 화염에 직접적으로 노출되어 단면 전체가 800~950℃까지 상승하는 것으로 나타났으며 최고 벽면온도 또한 850℃정도에 분포되는 것으로 분석되었다. 터널 전 단면에서 각각 600~900℃의 온도상승이 발생하였고, 특히 상부부분은 900℃ 이상의 고온에 장시간 노출되어 깊이 50mm 지점의 온도가 250℃까지 상승하는 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 “(09기분) 구조물 성능 기반 화재거동 해석 및 설계기술 연구”의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김홍열 (2002). “고온가열시 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구” 대한건축학회논문집
2. 김홍열, 박경훈, 김형준 (2008). “터널 화재시나리오에 따른 콘크리트 PC패널라이닝의 열적손상에 관한 실험적 연구” 한국콘크리트학회 2008년 가을 학술대회 논문집
3. 배장춘 외 5 (2008). “온도가열곡선 변화에 따른 콘크리트 내화특성” 한국콘크리트학회 2008년도 봄 학술발표회 논문집
4. A, Leithner (2001). “The Fire catastrophe in the tauern tunnel : Experence and conclusions for the Austrian guidelines”, Tunnelling and Underground Space Technology 16 217-223