

## 도로터널 화재성상 시뮬레이션을 위한 워터스크린 효과 모델개발 및 적용사례

한정철\* · 김세종\* · 김동은\* · 栗岡 均\*\* · 大槻真人\*\*\* · 권영진\*  
호서대학교\* · 카지마 건설기술 연구소\*\* · CAE Solutions\*\*\*

### A Study on the Development of Model and Application Case of Water Screen Effect for Fire Behavior Simulation in Road Tunnel

Han, Jung Chul\* · Kim, Se Jong\* · Kim, Dong Eun\*  
Hitishi KURIOKA\*\* · Masato OOTUKI\*\*\* · Kwon, Young Jin\*  
HOSEO Univ\* · Kajima Institute of Construction Technology\*\*  
CAE Solutions\*\*\*

#### 요 약

워터스크린(이하 W/S)에 의한 화재방화시스템은 도로터널에 화재가 발생시, 공간에 수막을 사용하여 구획화하고, 열·연기의 확산을 억제하며 유해 부유입자를 세정함으로써 인간의 안전을 확보 및 구조물의 피해를 극소화 하는 시스템이다. 이 W/S에 의한 구획의 성능을 평가하기 위해, 1/2의 터널 모형에 의한 공간 내 열 성장 파악을 위한 화재 실험을 분석하였고, 그 결과, 천정 근방 온도 및 방사수열량으로서는 발열 속도의 크기, 풍속의 대소에 의하지 않고 약 80%의 저감율을 나타냈다. 또, 발생한 유해 부유입자 농도에 대해서는 약 60%, 화원 성질과 상태로서 발열 속도는 약30%의 W/S에 의한 저감 효과를 나타내었다.

#### 1. 서 론

최근 도로터널 증가로 인해 화재시 피해상황에 대하여 관심도가 높아지고 있다. 그로 인하여 2009년 도로터널 방재시설설치 및 관리지침서<sup>1)</sup>에 정량적 위험성평가(QRA)의 도입을 하면서 도로터널 화재 안정성에 대하여 연구가 활발하게 진행되고 있다. W/S의 활용과, CFD를 이용한 화재 안전설계가 적용되고 있으며, 대표적으로 NIST의 Building and Fire Research Laboratory가 개발한 Fire Dynamics Simulator(이하, FDS)가 있다.

따라서 본 연구는 W/S의 영향성을 확인하기 위해 1/2축소 실험을 통하여 모델화하였고, 시뮬레이션을 활용한 W/S의 차연성능 및 세정효과를 분석하는 것에 그 목적이 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장비 및 도로터널 모형<sup>2)3)</sup>

실험은 그림1에 나타난 바와 같이, 실험장내에 그림2와같은 높이 2.7 m×폭 5.4 m×연장 18.2 m의 모형을 사용하여 수행하였다. 화재 실험중 터널 모형으로부터 발생한 유해 부유입자가 모형이 설치되어 있는 실험 장내에 확산하는 것과, 모형 근방에서 발생한 수증기 가스가 실험장에서 소멸하는 것을 이용해, 실험 장내에 광전식 분리형 감지 농도계(이하 광농도계로 표기)를 설치, W/S설비에 의한 유해 부유입자를 포착·세정하는 효과에 대하여 검토를 수행하였다. 열전대는 모형의 천정밑 50mm의 위치에 1m간격으로 설치하였다.

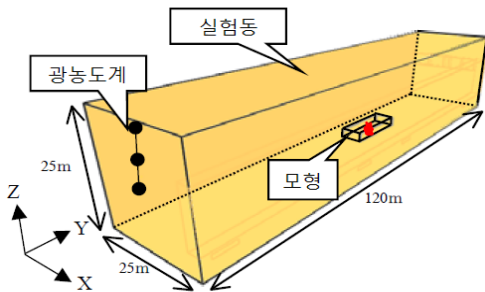


그림1. 실험장의 모형설치 위치와 광농도 측정위치

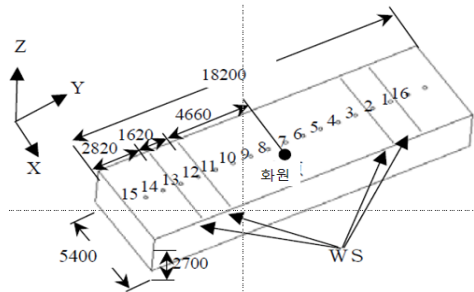


그림2. 시험에 이용한 모형과 온도측정 위치

### 2.2 화원의 설정

모형으로의 화원은 모형축척비를 고려하여 식(1)<sup>4)</sup>을 통하여 발열속도( $Q_{model}$ )를 1.5MW로 했다.

$$\frac{Q_{model}}{Q_{full}} = \left(\frac{H_{model}}{H_{full}}\right)^{5/2} \quad \text{식(1)}$$

### 2.3 실험 Case

실험 Case는 W/S비작동, W/S작동으로 구분하여 실시하였고, W/S사양은 유량 10(l/min), 작동 압력은 1.0 MPa, 분무초속도는 20m/s, 분무각은 170~180도, 분무입자 평균은 200 $\mu$ m이다.

### 2.4 발열속도 및 유해 부유입자 발생률

발열 속도는 그림3과 같이 발열속도를 구하여 수치 시뮬레이션에 이용하였고, 유해 부유입자 발생률 $\beta$ 은 식(2)<sup>5)</sup>를 통하여, 0.83 $\times 10^{-6}$ [kg/kJ]로 하였다.

$$\beta = Y_C / \Delta H \quad \text{식(2)}$$

## 3. 수치 시뮬레이션

수치 시뮬레이션은 모형실험의 공간 조건, 발열 속도, W/S의 사양을 실험과 동일 조건으로 주어 NIST의 FDS를 사용하여 수행하였다.

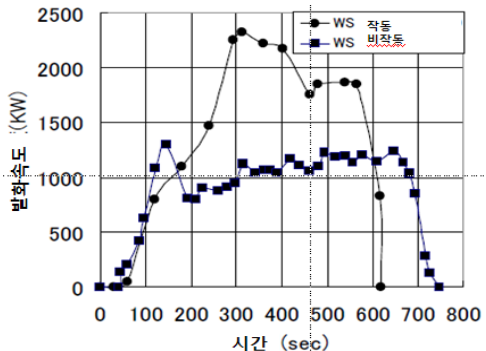


그림3. 발열속도의 시간변화

### 3.1 유해 부유입자의 세정 해석모델

FDS에는 W/S의 유해 부유입자에 대한 세정효과 해석 모델이 없기 때문에, 혼합분율을 도입하여 계산, 그림 4와같이 비례관계가 된다. 유해 부유입자의 세정효과 해석 모델을 제안한다. 유해 부유입자의 소멸항 계수  $a'$  는<sup>6)</sup>  $ZC > ZF$  라면  $a' = 0$ 에 멀고, 물방울의 비적은, 식(3)~식(4)에 따르는 것으로 한다. 그림5는 세정계수  $K$ 를 1~90까지 변화시켰을 때 집진율과 세정계수의 관계를 나타낸 것이다.

$$\frac{d}{dt}(m_a \mathbf{u}_a) = m_a \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho_a C_D m_a^2 (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}| \quad \text{식(3)}$$

$$C_D = \begin{cases} 24/\text{Re} & \text{Re} < 1 \\ 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687})/\text{Re} & 1 < \text{Re} < 1000 \\ 0.44 & 1000 < \text{Re} \end{cases} \quad \text{식(4)}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_a |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}| 2r_a}{\mu} \quad \text{식(5)}$$

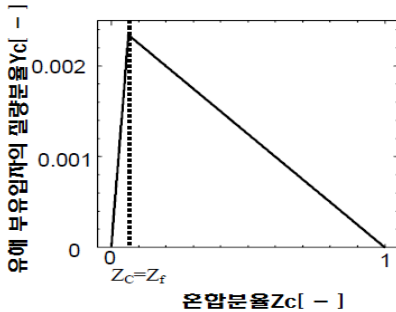


그림4. 혼합분율과 유해부유입자의 질량분율 관계식

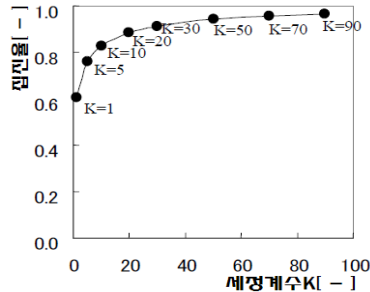


그림5. 실험장 유해 부유입자 농도 측정위치에서의 집진율과 세정계수의 관계

### 3.2 세정계수의 측정

터널 실험 결과로부터, W/S작동시의 실험장 유해 부유입자 농도 측정점에 있어서의 유해 부유입자 집진율은, 0.83으로<sup>7)</sup> 보고되고 있으므로,  $K=10$ 으로 하였다.

### 3.3 해석 조건

해석 조건을 표1과 같이 나타냈다. 실험장은 5개의 영역(mesh1~5)으로 나누고 그림6과 같이 분할했다. 모형은 mesh2의 메쉬 분할에 따르고, 모형 근방에서는 온도등의 변화가 격렬하기 때문에 메쉬를 세밀하게 하고 모형으로부터 멀어지면 X방향으로 분할수를 넓게 했다. 실험장 및 모형의 속도 벽면 조건은 Half-slip, 온도 벽면 조건은 단열로 했다. 모형의 갭구에서는, 실험장과의 질량 보존이 만족하도록 운동 방정식, 에너지 보존식, 화학종의 질량 보존식을 계산한다.

표1. 해석 조건

항목	조건
초기조건	속도 : 0 m/s, 온도 : 14℃(측정시의 실온)
속도벽면조건	Half-Slip
온도벽면조건	단열
막 경계조건	통로 : 대기압 고정 높이 : 3.5m~4.5m
화원 조건	·면적 : 1.0m×0.8 m. ·위치 : 모형 중앙 바닥의 면 ·연료 : n헤프탄
mesh 분할 (X×Y×Z)	그림3-3에 나타내는 5개의 영역에 분할 모형은 mesh2의 영역에 포함된다. ·mesh1: 25×160×50 ·mesh2: 36×160×50 ·mesh3: 8×160×50 ·mesh4: 8×160×50 ·mesh5: 8×160×50

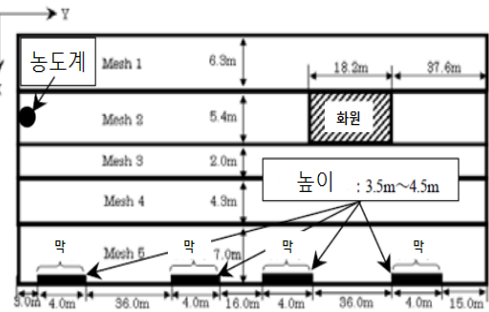


그림6. 실험장 X-Y평면도

## 4. 해석결과

### 4.1 실험의 재현성

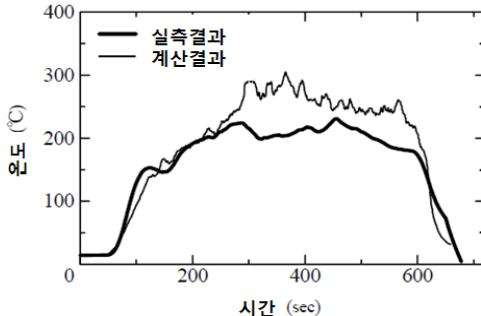


그림7. 실측치와 계산치의 온도변화(No.11)  
(W/S비사용)

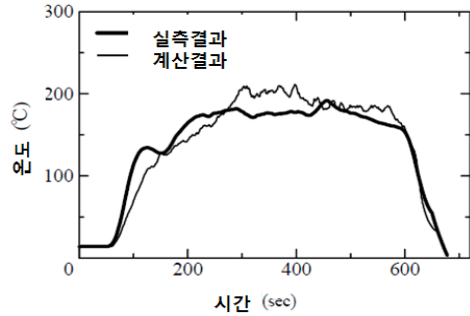


그림8. 실측치와 계산치의 온도변화(No.14)  
(W/S비사용)

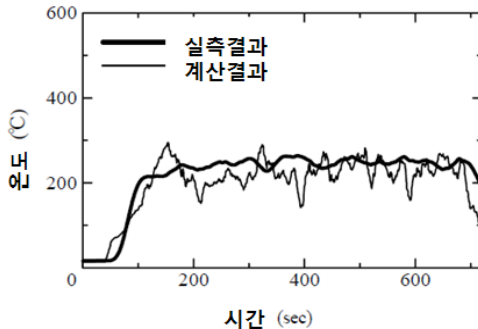


그림9. W/S통과전의 실측치와 계산치의  
온도변화(No.11) (W/S작동시)

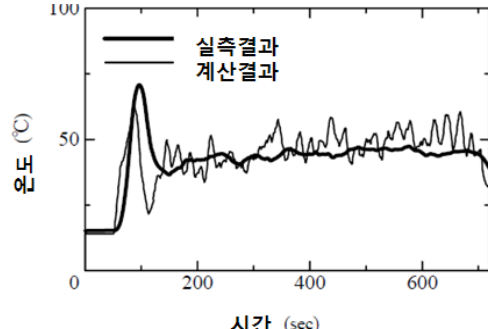


그림10. W/S통과전의 실측치와 계산치의  
온도변화(No.14) (W/S작동시)

그림7은 그림2에 나타내는 W/S비작동시의 모형내 No.11의 온도변화 이며, 그림 8은 No.14의 온도변화이다. 양쪽 모두 실측치와 계산치가 유사하게 일치하였다.

또한, W/S작동시 모형내 온도의 시각력을 그림9, 그림10에 나타내었다. 양쪽 모두 유사하게 일치 하였고, W/S통과후의 온도는 W/S통과전의 온도에 비해 75% 낮아졌다.

### 4.2 W/S의 차연성능과 세정 효과

그림11은 모형 갱구에 있어서의 Y방향 속도  $V$ 에 의한 질량 유량과 높이의 관계를 나타낸 것이다. 모형 갱구 출구측에게의 질량 유량이 차연성능의 하나의 평가 척도와 생각 비교하면, W/S작동시는 비작동시에 비해, 질량 유량은 25%감소하게 된다.

그림12는 모형 갱구의 집진율과 세정 계수  $K$ 의 관계를 나타낸 것이다. W/S작동시는 W/S로부터의 아래로 향한 물방울에 의해서 유해 부유입자의 움직임이 높이 방향에도 흐트러지므로, 갱구의 유해 부유입자 농도는 X-Z단면 전체의 적분치로 했다. 그림12를 보면,  $K=10$ 때 W/S통과 직후의 갱구 전체로의 집진율은 약 60%가 된다. 모형 갱구에서의 체적 유량의 유출입관계와 세정 효과가 고온의 유출의 연기 입자에 작용해 저온의 유입 공기에 작용하지 않는 것을 생각하면 타당한 집진율이다.

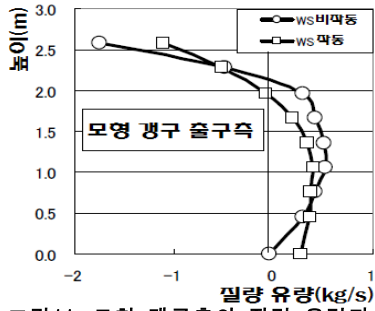


그림 11. 모형 갱구측의 질량 유량과 높이의 관계(300~360 sec)

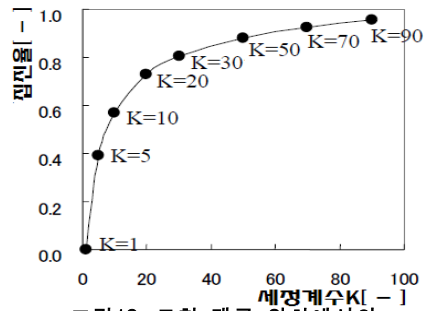


그림 12. 모형 갱구 위치에서의 집진율과 세정계수의 관계(300~360sec)

#### 4.3 모형내 기류성상 및 연기농도 분포

화원으로부터 발생한 상승 기류가 천정에 충돌 후, 천정 제트가 되어 갱구로 향하다가 W/S의 천정에서 바닥으로 향하는 물방울에 의하여 기류는 아래쪽으로 방향을 바꾸고, 화원에 의해 말려들게 되어서 다시 화원으로 향하게 돼서 기류는 W/S에 통과하기 전에 대류가 발생하고 있는 것이 그림13에서 확인할 수 있다. W/S통과 후의 기류는, 갱구 천정부로부터 실험 공간에 유출해 갱구 하부에서는 신선한 공기가 유입되고 W/S를 경계로 대류현상을 볼 수 있고, 이것으로부터도 W/S에 의한 차연효과를 확인할 수 있다.

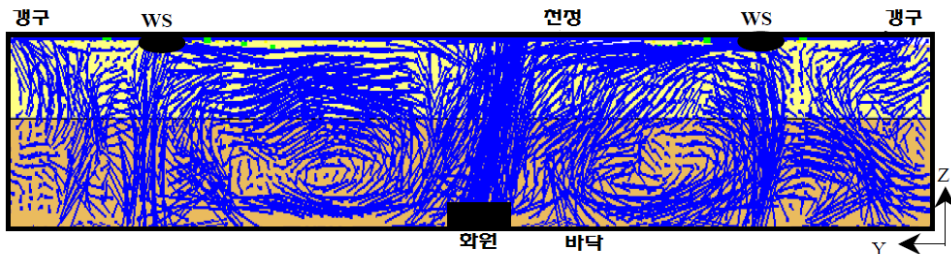


그림 13. W/S작동시 모형내 기류분포(시간 =360sec)

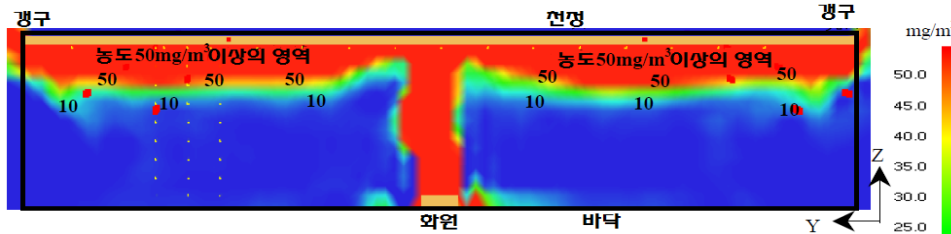


그림 14. W/S비작동시 모형내 유해 부유입자 농도 분포(시간 =360sec)

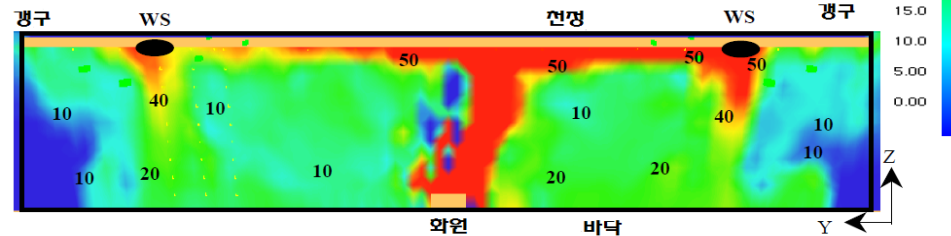


그림 15. W/S작동시 모형내 유해 부유입자 농도 분포(시간 =360sec)

360초 후의 W/S비작동시와 W/S작동시 모형내의 유해 부유입자 농도 분포를 그림14, 그림15에 나타냈다. 세정 효과와 차연효과에 의해 W/S형성 구획내의 천정 근방의 고농도층 영역이 감소하여 저농도로 W/S형성 구획내에 유해 부유입자가 확산하는 결과가 되었다.

## 5. 결론

W/S의 영향성과 모델화를 통한 W/S의 차연성능 및 세정효과에 대한 연구를 한 결과는 다음과 같다.

- 1) W/S의 물방울 입자에 의한 세정효과의 해석 모델의 세정계수(K)는 실험 결과로 약 10이 타당한 것으로 추정하였으며, 모형 천정밑 50 mm의 온도의 계산치는, W/S비작동, 작동 모두 실측치의 거동을 재현하고 있는 것을 확인하였다.
- 2) 실험장에서의 W/S비작동시에 대한 W/S작동시의 유해 부유입자 집진율 측정 결과가 약 80%였지만, 유해 부유입자 세정 효과의 해석 모델을 이용한 계산 결과는, 비율 및 실험 장내의 유해 부유입자 실험시의 시간적 거동을 잘 재현하고 있는 것을 확인하였다.
- 3) 모형의 열기류 성질과 상태로서는 모형 갱구 천정으로부터 실험 공간에 고온의 공기가 유출해, 저온 공기가 유입한다. W/S작동시는 W/S의 물방울에 의해 W/S주위의 기류는 하향이 되어, W/S의 차연효과를 볼 수 있다. 실험장의 천정 근방에는 고온연층이 축적되지만, W/S작동시는 세정효과에 의해 유해 부유입자의 고농도 영역이 감소해 전체적으로 저농도가 되는 것이 확인되었고, 모형 갱구에서의 W/S차연성능은, 질량 유량 환산으로 약 25%로, 모형 갱구 전체로의 유해 부유입자의 집진율은 60%였다.
- 4) 본 연구를 통하여 분석한 결과 W/S의 시뮬레이션 모델 개발을 통하여, 도로터널 화재 안전성을 높이기 위해 도입된 QRA와 향후 연계하여 연구 개발이 계속적으로 진행되면 효율성이 높을 것으로 판단하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국 중소기업청 “건축 구조물의 가연물 및 개구부 조건에 대한 화재 성장 예측 시뮬레이션 개발”에 의한 것으로 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 국토해양부, 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침. p92~p103. 2009. 04
- 2) 今岡 修, 栗岡 均, 天野 玲子. Performance for preventing smoke propagation and washing soot particle off. Monthly journal of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo 58(3), 134-138, 2006-05
- 3) 栗岡 均, 今岡 修, 天野 玲子[他]. ウォータースクリーンの煤洗落し効果と遮煙性能. Proceedings of the Symposium on Underground Space 11, 51-60, 2006-01
- 4) 佐藤博臣, 栗岡均, 今岡修, 田中太: CFDによる散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測, 地下空間シンポジウム論文・h報告集, 第9巻h, pp.69-78, 2004
- 5) Kevin B. McGrattan et al. : "Fire Dynamics Simulator(Version3) Technical Reference Guide," NISTIR6783, 2002 Ed.
- 6) 化学8工学8協會8編, 改定4版化学8工学8便覧8, 丸善, pp.1250, 昭和53年10月
- 7) 出石陽一, 橋本和記, 天野玲子, 栗岡均, 佐藤博臣: 火災區畫化技術としてのウォータースクリーンの特性, 土木學會年次學術講演會梗概集, pp723-724, 2003