

터널 화재 시 연기전파에 대한 실물실험 및 수치해석적 연구 Experimental and Numerical Study of Smoke Movement in Tunnel Fires

이승철¹⁾, Seung-Chul Lee, 이승호²⁾, Seung-Ho Lee, 김남영³⁾, Nam-Young Kim

¹⁾ 국립삼척대학교 제2공과대학 소방방재학부 교수, Professor, School of Fire & Disaster Prevention, Samcheok National Univ.

²⁾ 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Sangji Univ.

³⁾ (주)삼보기술단 기전부 이사, Executive Director, Sambo Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : 본 논문은 터널에서 화재 발생 시, 시간에 따른 연기거동에 대해 실물실험과 3차원 수치해석을 수행하고 각각의 결과를 비교·검토하였다. 실물실험을 위하여 8.8 kW의 열원과 90liter/h의 연기 발생이 가능한 연기발생장치를 자체 제작하였으며, 대상터널은 길이 570m, 단면적 64.6m², 그리고 약 2%의 구배를 가지고 있다. 실험은 외풍의 영향을 줄이기 위해 터널 입·출구에 차단막을 설치하였으며 연기발생장치로부터 20m 간격의 위치에서 20초 간격으로 연기전파, 속도 그리고 온도를 측정하였다. 연기는 60초 경과 후, 연기발생장치로부터 20m 떨어진 위치에 도달하였으며 140초, 180초 및 260초 경과 후, 각각 40m, 60m 및 80m 위치에 도달하였다. 3차원 수치해석의 결과는 터널벽면을 매끈한 표면으로 처리하였을 때, 26.3~49.5%정도 과대 예측하였다. 또한 터널벽면을 일정 조도를 갖는 거친 표면으로 처리한 경우는 -2.7~17.6% 오차로 실험결과에 보다 근접하는 결과를 보였다. 따라서 터널 내 연기거동에 대한 3차원 수치해석을 수행할 때에는 벽면조도에 대한 고려가 필요하리라 판단된다.

Key words : smoke movement, tunnel fires, computational fluid dynamics

1. 서 론

국내의 경우 국토가 좁고 산악지형이 많은 지리적 특성으로 인하여 터널의 건설과 이의 활용성이 더욱 더 증대되고 있다. 그러나 터널은 건축물 특성상 타 공간과 격리되어 있는 폐쇄적인 공간이므로 화재 발생시 인명과 재산의 피해가 크게 발생한다.

1994년 화재통계연보에 의하면 화재 발생 시 사망의 원인 중 질식사가 47.5%로 가장 높게 나타나고 있다. 사망의 큰 원인인 질식사는 유해가스에 의한 직접적인 피해 이외에도 화재 시 발생한 연기가 탑승자의 시정을 저해하여 피난로를 찾지 못함으로써 유발된다. 따라서 터널 내 화재발생시 승객의 안전을 확보하고 피난구조활동 및 화재진압활동을 펼 수 있도록 하기 위해서는, 고온의 유해가스와 연기가 피난로에 침투하지 못하도록 적절한 유속을 유지해 주는 환기가 필요하다.

이미 각 선진국에서는 이미 '70년대부터 터널 환기에 대한 연구의 필요성이 대두됨에 따라 터널화재에 대하여 실제 터널에서의 화재실험 및 수치해석과 같은 다양한 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 최근에 들어서 일부 연구되고 있지만 아직 미미한 상태이다.

터널 내 화재 시, 연기 거동이나 확산을 해석하기 위해서는 실물실험을 통해 직접 측정하는 방법, 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기법을 도입하여 3차원 Navier-Stokes 방정식을 푸는 방법 및 1차원 기법을 도입하는 단순해석방법 등이 있다. 실험에 의한 방법은 실제 값을 얻을 수 있어

가장 신뢰할 수 있지만 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 3차원 CFD에 의한 방법은 실험보다 적은 시간과 비용으로 상세한 정보를 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 아직까지 터널과 같은 대형 공간에서 일어날 수 있는 실제 상황과는 약간의 차이를 지니고 있다. 1차원 단순해석방법은 가장 적은 시간과 노력으로 해석결과를 얻을 수 있으나 실제와의 결과 차이로 인해 많이 사용되지는 않는다.

그러므로 터널 내 화재 시, 연기 거동이나 확산을 적절하게 해석하기 위해서는 실물실험을 수행하여 3차원 CFD의 결과를 비교·검증하는 단계가 필요하다. 또한 3차원 CFD 계산 시, 실제와 차이가 있는 경계조건(벽면 조도, 터널 입출구 조건 등)의 사용으로 인해 결과의 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 터널 내 연기발생 시, 침강시간 및 전파거리를 실험하고 이와 관련된 벽면조도를 달리하는 CFD계산을 수행하여 각 결과를 비교 검토하고자 한다.

2. 실물실험

2.1 대상터널

본 연구에서 선택한 실물실험 터널은 강원도 삼척시에 소재한 H터널로써 터널길이 570m, 단면적 64.6m² 그리고 2%의 구배를 가지고 있다. 그림 1에는 본 연구의 대상터널인 H터널의 내부 및 외부전경을 나타내었다.



그림 1 터널 내부 및 외부전경

2.2 실험장치 및 방법

본 연기전파실험은 2004년 11월 6일부터 11월 9일까지 4일동안 수행되었으며, 실험대상터널이 바다와 인접되어 있어 해풍으로 인한 터널내 풍속이 5~6 m/s로 크게 유지되었다. 따라서 본 실험을 위해 터널 입·출구에 차단막을 설치하여 외풍의 영향을 줄였다.

그림 2에는 본 실험을 나타내는 개요도로써, 연기발생장치로부터 가열된 연기가 배출되면 20초 간격으로 각 측정위치(연기발생장치를 기점으로 하여 근덕방향으로 20m, 40m, 60m, 80m, 및 130m 지점)에서 연기전파거리를 측정하였다.

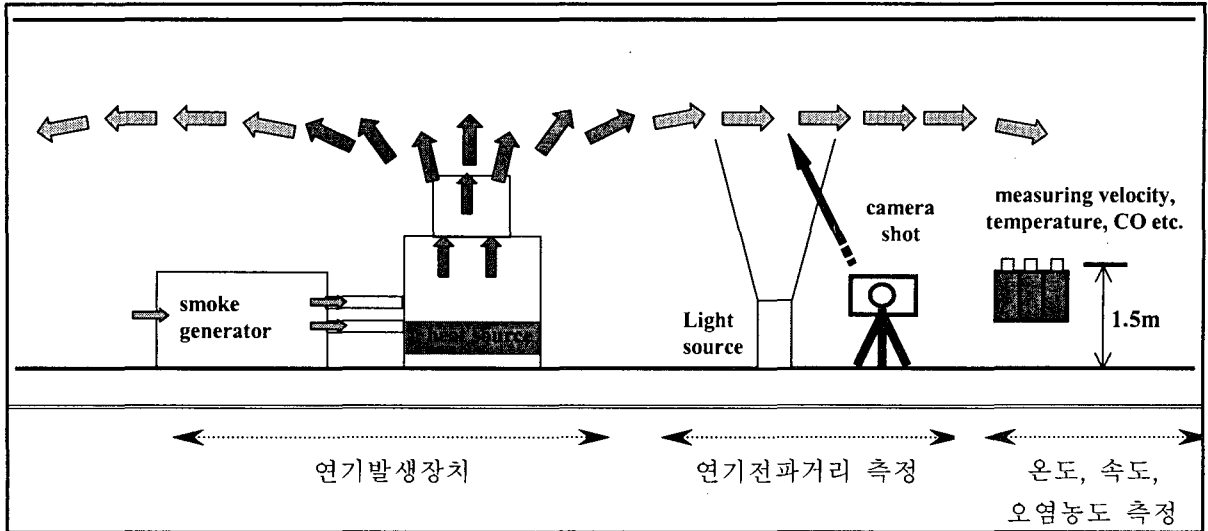


그림 2 실험개요도

본 실험에서는 열발생부가 포함된 연기발생장치를 제작하였으며 연기전과거리 측정을 위해 5대의 디지털카메라와 고휘도 조명을 사용하였다. 또한 연기발생장치는 연기를 발생시키는 연기발생부와 열을 공급하는 열발생부로 구성되며 연기발생량은 약 90 liter/hour이고 열발생량은 8.8 kW이다. 그림 3에는 본 실험에 사용된 연기발생장치를 나타내었다.

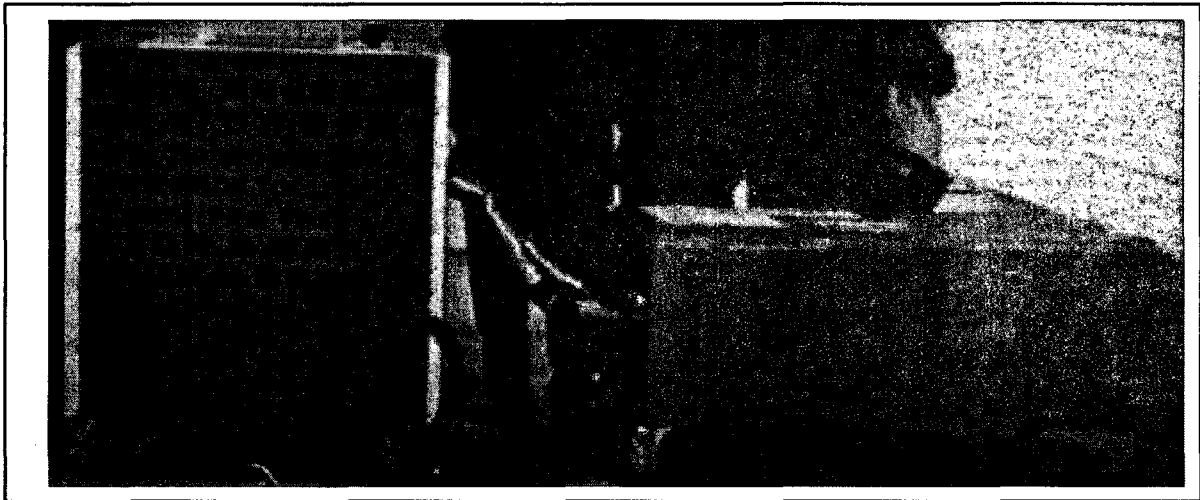


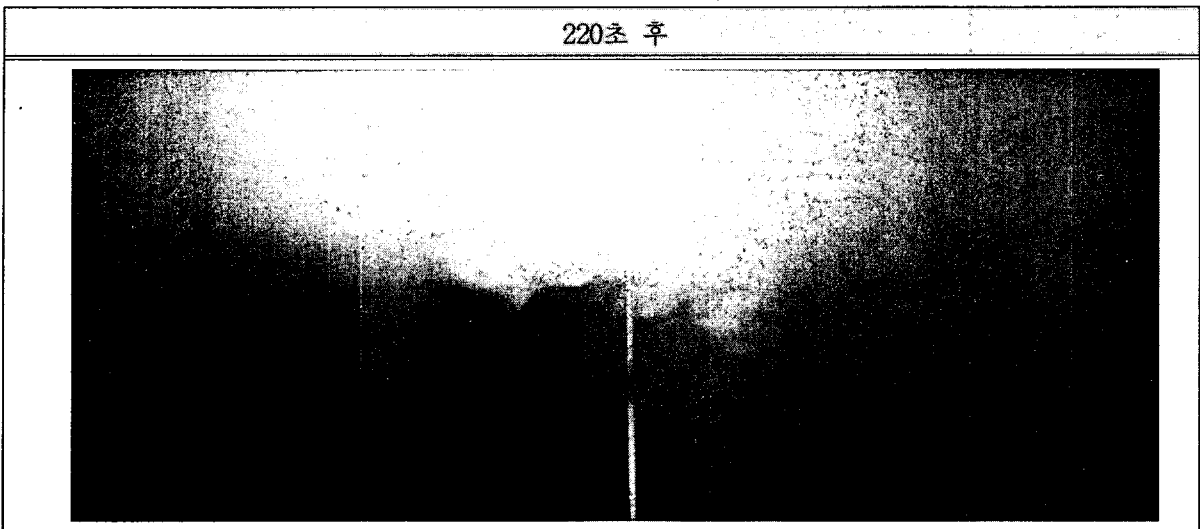
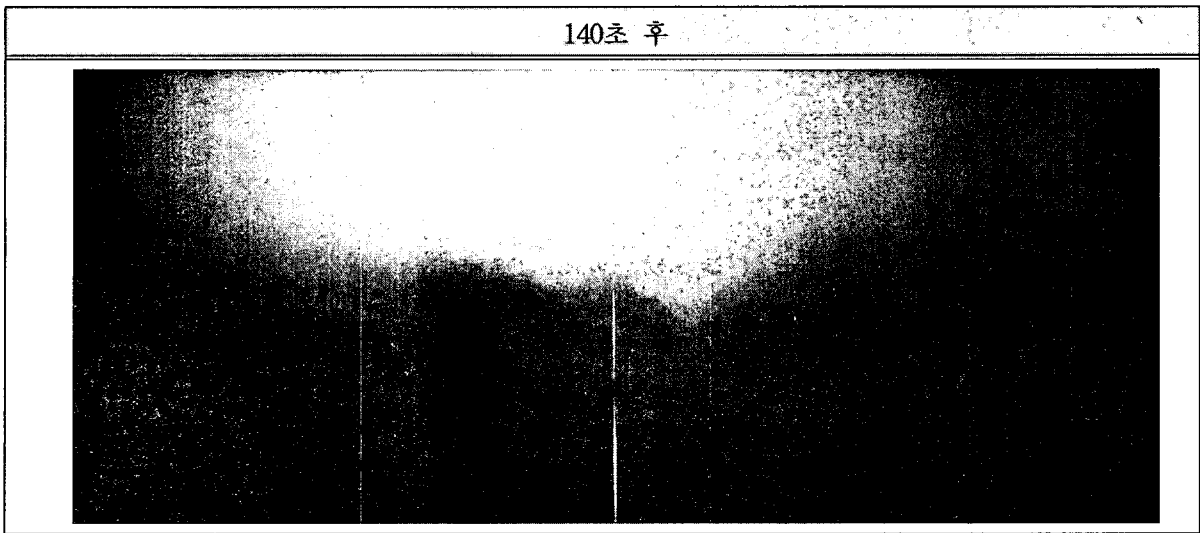
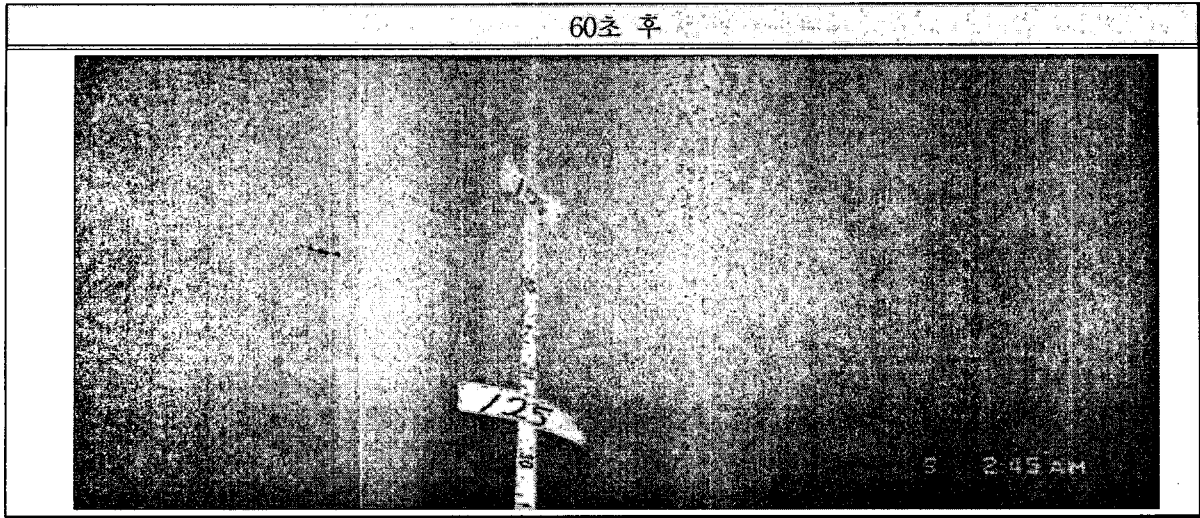
그림 3 터널내 연기발생장치

2.3 실물실험결과 및 검토

본 연구에서 수행한 연기전과실험 결과는 연기발생 60초 경과 후에 약 20m 위치에 연기가 도달하였으며 140초 경과 후에는 40m 위치에 도달하였다. 또한 연기발생 180초 경과 후에는 60m 위치에 도달하였으며 260초 경과 후 80m 위치에 도달하였다. 시간이 지날수록 각 위치에서의 연기는 점차적으로 하강하는 것을 알 수 있었다.

그림 4에는 연기발생장치로부터 20m 떨어진 지점에서의 시간에 따른 연기거동 사진을 나타내었다. 그림에서 줄자에 매달린 숫자는 터널천정부로부터의 거리를 나타내며 단위는 cm이다. 연기발생 60초 경과 후의 연기는 천정으로부터 약 1m 정도 아래로 진행하고 있으며 140~220초 경과 후에 터널의 중간부까지 하강하여 300초 경과 후에 터널 바닥면까지 하강한다. 이러한 결과는 앞서 2.2 실험장치 및 방법에서

도 언급한 바와 같이 터널 입·출구에 차단막을 설치하여 외풍의 영향을 줄였기 때문에 일반적인 상황보다 빠르게 하강하는 것으로 판단된다.



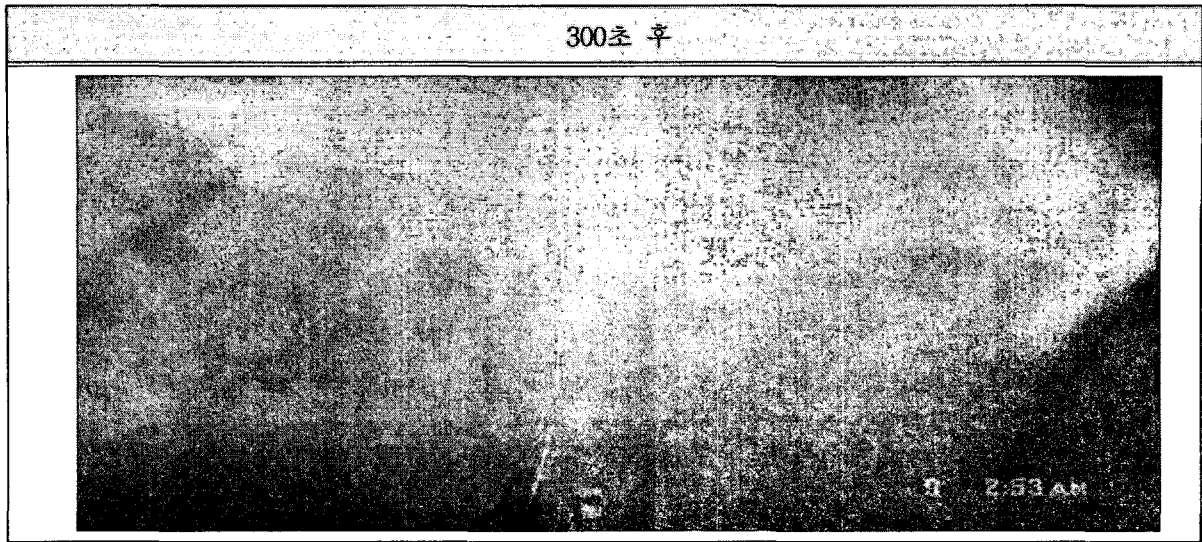


그림 4 20m 지점에서의 연기거동 사진

3. 3차원 CFD 해석

3.1 지배방정식 및 경계조건

터널 내 열·유동 및 연기거동특성을 기술하는 비정상상태, 난류유동의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식, 에너지방정식 및 농도방정식이며 각 방정식에 대한 수식적 표현은 지면관계상 생략하였다. 본 CFD 계산에 사용된 기본가정, 입력경계조건 및 계산격자를 각각 표 1, 2 및 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타낸 계산격자는 약 380,000개가 소요되었다.

표 1 시뮬레이션 기본가정

검토항목	적 용
연산상태	시간에 따른 (비정상상태-Unsteady State) 분석
유동상태	비압축성 이상기체 (Incompressible Ideal Gas)
독성가스농도	자연확산 스칼라량으로 취급 - Species 방정식 사용.
난류모델	표준 k-ε모델 사용 (Standard k-ε model)

표 2 입력경계조건

입력항목	적 용	비 고
터널 입·출구	벽면	벽함수 적용(조도: smooth wall, rough wall)
	온도	등온조건
중력가속도	-	9.81[m/s]
터널내 기본공기온도	-	20[°C]
유입경계조건	속도	연기발생장치에서 0.94m/s로 연기가 발생됨.
열발생량	사용자정의함수	연기발생장치에서 발생하는 열발생량 8.8kW 적용

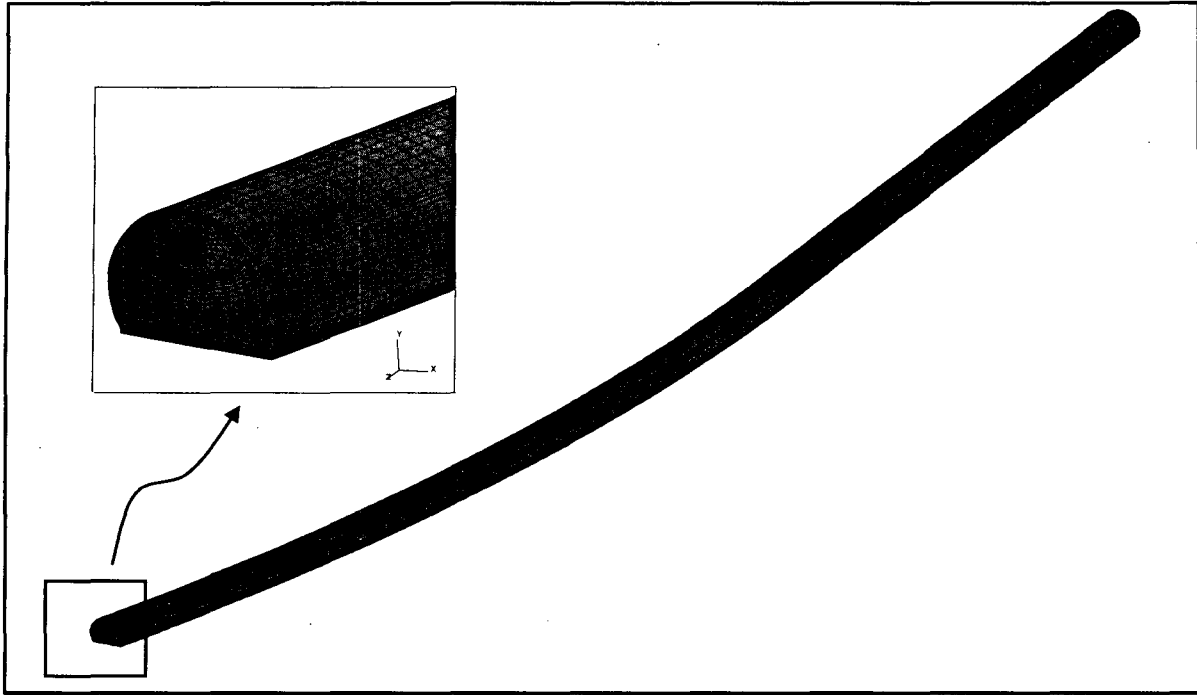


그림 5 계산격자 (380,000개)

3.2 수치해석 방법

본 연구에서는 앞서 나열된 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD코드인 STAR-CD⁽¹⁾를 사용하였다. 지배방정식의 대류항을 수치적으로 계산하기 위해서 상류차분도식(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 비정상상태의 속도장, 농도장을 얻기 위하여 PISO 알고리즘을 사용하였다.⁽¹⁾ 계산시 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하일 때로 정하였다.

또한 벽면의 조도의 계산을 위하여 다음과 같은 수정된 대수 벽법칙을 사용하였다.

$$u^+ = A + \frac{1}{\kappa} \log \frac{y^+ - D^+}{B + CR^+} \quad (1)$$

여기서 $D^+ = \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} D / \mu$, $R^+ = \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y_0 / \mu$ 이며 A, B, C는 상수이다. 또한 벽면조도 y_0 의 값은 기존 연구⁽²⁾에서 사용된 값을 사용하였다.

4. 결과 비교 · 검토

그림 6에는 시간에 따른 연기전과거리에 대한 실물실험 결과 및 터널 벽면조도에 따른 CFD 결과값을 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 3차원 CFD를 이용하여 시간에 따른 연기전과거리를 산정한 결과에서 터널 벽면을 매끈한 벽면으로 가정하였을 때 실물실험값을 기준으로 26.3~49.5%의 오차를 보였으며 거친 벽면으로 가정하여 수정된 벽법칙을 이용하였을 때는 실물실험 결과와 -2.7~17.6% 오차 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 실제 터널벽면이 매끈하지 않고 거친벽면으로 일정조도를 지니고 있기 때문이다. 따라서 향후 3차원 CFD를 이용하여 터널 내 수치해석을 수행할 경우에 적절한 벽면조도의 선택이 필요하리라 판단된다.

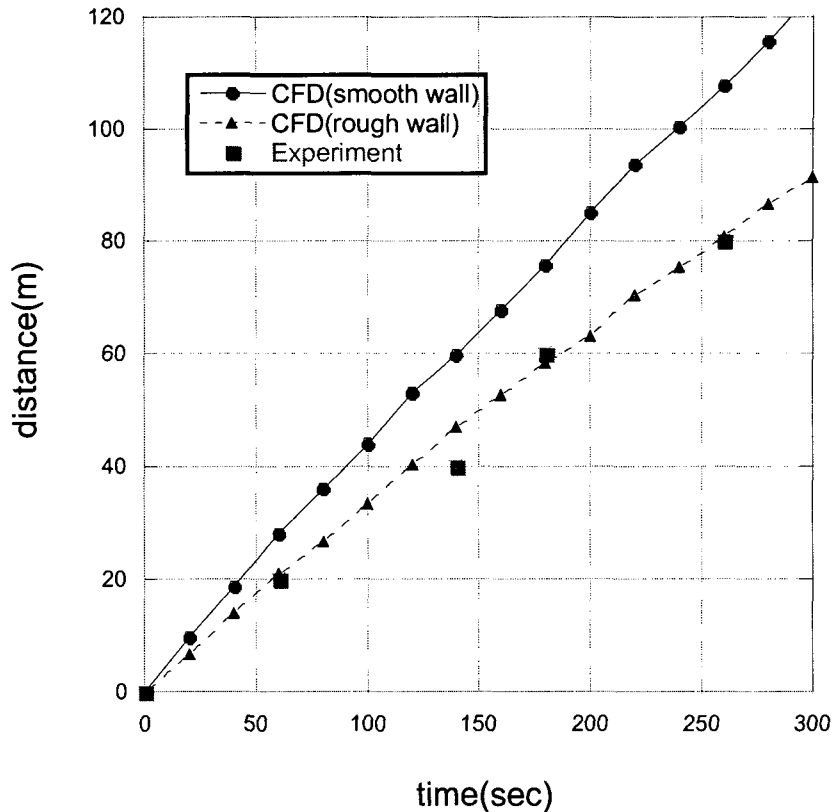


그림 6 연기전파거리의 결과 비교

5. 결 론

본 연구에서는 터널 화재 시 연기전파거리에 대한 실물실험 및 터널 벽면조도에 따른 3차원 CFD 계산을 수행하여 각각의 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연기전파거리에 대한 실물실험 결과, 연기발생 60초 경과 후에 약 20m 위치에 연기가 도달하였으며 140초 경과 후, 40m 위치, 180초 경과 후 60m 위치 그리고 260초 경과 후 80m 위치에 도달하였다. 또한 연기의 하강은 일반적인 경우 보다 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

2) 3차원 CFD를 이용하여 시간에 따른 연기전파거리를 산정한 결과, 터널 벽면을 매끈한 벽면으로 가정하였을 때 실험과 최대 49.5%의 오차를 보였으며 수정된 벽법칙을 이용하였을 때는 17.6% 오차 이내로 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 향후 3차원 CFD를 이용하여 터널 내 수치해석을 수행할 경우에 적절한 벽면조도의 선택이 필요하리라 판단된다.

참고문헌

1. Computational Dynamics Ltd., STAR-CD Version 3.15 User Manual, 2002, Computational Dynamics Ltd.
2. 김사량 외 3인, 제트 환 방식 환기시스템을 사용하는 터널의 환기량에 영향을 주는 인자에 대한 수치 해석 검토, 설비공학논문집, 제14권, 제7호, 2002, pp. 567-574.