

터널화재시 온도 분포 CFD 분석 연구

서기윤¹⁾, 김정욱¹⁾, 이창우²⁾

1. 서론

최근 유럽에서 발생한 대형 터널화재로 인한 인명 및 시설피해 사례는 터널 설계시 터널화재 확산 분석의 필요성을 분명하게 보여주고 있다. 인명피해는 일반적으로 화재연에 의하여 발생하는 경우가 많으며 구조물이나 설비 등의 피해는 고온의 화재열에 의하여 발생한다. 따라서 화재온도 분포의 분석은 시설 피해를 최소화할 수 있는 방안을 강구하기 위하여 반드시 필요하다. 본 연구에서는 고속도로 터널 1개소를 대상으로 한 화재 시뮬레이션 결과를 온도중심으로 정리하였다.

2. 화재확산 시뮬레이션

사용한 CFD분석 모델은 COMPACT-3D를 기초로 한 공기 부양력을 고려한 $\kappa-\epsilon$ 난류유동해석 프로그램(buoyancy-augmented $\kappa-\epsilon$ turbulence model)인 SOLVENT ver 1.0 (2000. 11) 이다. SOLVENT는 1988~1999 10여년간에 걸쳐 수행된 미국 Memorial 터널 화재시험 프로그램인 MTFVTP의 결과를 통하여 광범위하고 체계적으로 검증이 되었다.

PIARC제안 설계 화재규모는 승용차 5MW, 버스/트럭 20MW, 석유탱크로리 100MW이다. 본 분석에서는 탱크로리를 제외한 일반적인 차량 화재를 고려하여 20MW를 화재크기로 가정하였으며 화재 발생 후 제트팬을 가동하여 배연을 할 경우 유입된 공기는 연소율을 2배정도 증가시키며 대류를 통한 열에너지손실이 약 70% 정도임에 따라 실제 화재크기는 28MW정도가 되므로 화재크기는 28MW(Heating value: 4.26e+07 J/kg, Fuel consumption rate: 0.6573 kg/s)를 적용하였다.

Table1. Tunnel characteristics and input data for fire simulation

터널특성		
길이	3,599m	
차선수	일방향 2차선	
구배	100m 0.7400%, 3,499m 0.5008%	
차도단면적	75.453m ²	
환기방식	종류식 (제트팬 ϕ 1250 24대, 방재용 10대)	
시뮬레이션 조건		
화재발생위치	입구로부터 1,810m	
화재규모	28MW	화재크기(L 5m,W 2.8m, H 3.5m)
Radiation loss factor	0.3	
시뮬레이션 시간	900 sec	$\Delta t=10$ sec
터널내 초기온도	12.8 °C	
제트팬 가동대수 (ϕ 1250)	0	10
정체차량길이	입구로부터 1,760m	출구방향 차량은 모두 이동 가정
K _{blockage}	0.2387	차량정체구간의 마찰저항계수
자연환기속도	2.5m/s	
		역풍가정

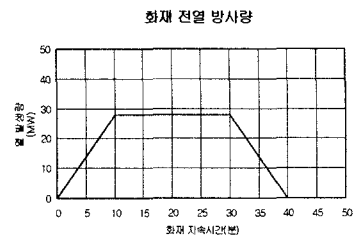
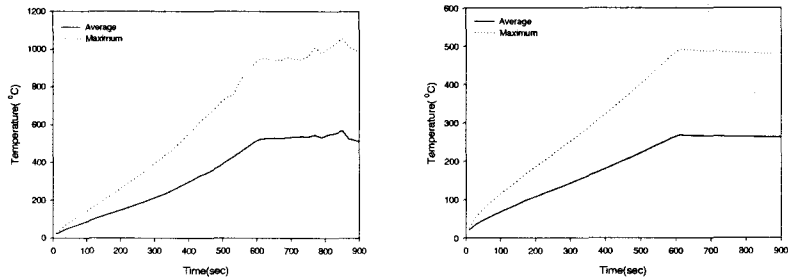


Figure 1. Heat release rate

3. 시뮬레이션 결과

Figure 2는 화재원의 온도변화 결과를 보여준다. 제트팬을 가동하지 않은 경우 화재원 최대 및 평균 온도의 최고점은 850초 경과 후 각각 1058℃, 570℃까지 상승하며 화재발생 후 신속한 제트팬 작동이 이루어진 경우의 최고점은 600초 후 488℃, 266℃이다. 따라서 제트팬의 작동으로 인한 화재원의 온도 강하 효과가 최대 및 평균온도를 기준으로 하여 각각 570℃, 313℃ 정도임을 알 수 있다.



(a) without jet fan operation

(b) with jet fan operation

Figure 2. Temperature profiles at the fire location

Table 2. Temporal variation of the maximum temperature at the ceiling and the sidewall

시간	fan 미가동시							fan 가동시						
	거리(m)	천정 최대온도			측벽 최대온도			거리(m)	천정 최대온도			측벽 최대온도		
		지점(m)		온도(°C)	지점(m)		온도(°C)		지점(m)		온도(°C)	지점(m)		온도(°C)
		Y	Z		Y	Z			Y	Z		Y	Z	
60초	1813	4.5	7.2	72.2	9.7	5.6	14.9	1843	4.5	7	33.2	9.8	5.6	13.2
	2298	4.5	7.2	12.8	9.7	5.6	12.8	2298	4.5	7	12.8	9.8	5.6	12.8
	2778	4.5	7.2	12.8	9.7	5.6	12.8	2778	4.5	7	12.8	9.8	5.6	12.8
	3272	4.5	7.2	12.8	9.7	5.6	12.8	3272	4.5	7	12.8	9.8	5.6	12.8
300초	1813	4.5	7.2	238.4	9.6	5.5	32	1868	4.5	7.1	48.2	9.8	5.6	12.8
	2298	4.5	7.6	12.9	9.6	5.5	12.8	2298	4.5	7.2	25.3	9.7	4	16.8
	2778	4.5	7.6	12.8	9.6	5.5	12.8	2778	4.5	7.3	13.7	9.7	4.1	12.9
	3272	4.5	7.6	12.8	9.6	5.5	12.8	3272	4.5	7.3	12.8	9.7	4.1	12.8
600초	1813	4.5	7.2	712.7	9.8	5.4	83.5	1876	4.5	7.3	73.4	9.7	4.1	12.8
	2298	4.5	7.3	29.9	9.8	3.8	15.7	2298	4.5	7.2	41.1	9.8	3.7	20.8
	2778	4.5	7.3	12.8	9.8	3.8	12.8	2778	4.5	7.2	25.3	9.8	3.6	16.3
	3272	4.5	7.3	12.8	9.8	3.8	12.8	3272	4.5	7.2	14.1	9.8	3.6	13
900초	1813	4.5	7.2	713.2	9.8	4.7	92.4	1941	4.5	7.2	70.8	9.8	3.6	12.8
	2298	4.5	7.2	58.2	9.7	4.1	24.4	2298	4.5	7.2	48.5	9.7	4.2	25.8
	2778	4.5	7.3	17.2	9.7	4.1	14.3	2778	4.5	7.2	33	9.8	4.2	18.6
	3272	4.5	7.3	12.8	9.7	3.8	12.8	3272	4.5	7.2	21.2	9.8	4	15.4

제트팬 미가동시의 경우 화재원은 약 300초 경과시까지 양 출구방향으로 이동하나 이후 600초 경과시 0.4~0.6m/s, 900초 경과시는 0.8~1.2m/s의 속도로 출구편으로 이동한다. 화재발생점 바로 위 천정부 최대온도는 화재발생 후부터 지속적으로 증가하여 850초 경과 후 715℃에 이르며 최대점은 분석대상인 본 터널의 높이가 8m임을 고려할 경우, 천정부로부터 0.4~0.8m 하부에 위치하고 있다. 측벽부의 경우는 850초 경과 후 95℃로 최대가 되며 위치는 10m폭 터널 측벽으로부터 0.3~1.2m 떨어

진 지점이다. 제트팬 가동시는 환기방향은 출구편으로 형성되어 60초, 300초, 600초, 900초 경과시 각각 1.2~1.3m/s, 3.2~3.4m/s, 3.7~3.9m/s, 3.8~3.9m/s의 범위를 보인다. 이에 따라 천정부의 최대온도는 화재위치로부터 배기쪽으로 30~128m 후방에서 관찰되며 600초 경과 후 화재위치로부터 63m 후방에서 73℃로 최대가 된다. 화재연의 횡방향 온도분포의 분산이 출구쪽으로 유동함에 따라 점진적으로 감소하므로 측벽부의 최대온도는 횡방향 단면상의 최대온도와는 큰 차이를 보이며 천정부의 최대온도 위치 보다 후방에 위치하고 있음을 알 수 있다. 900초 경과 후 26℃정도가 측벽부 최대온도가 되며 측벽으로부터 0.8m 떨어진 지점에 위치한다.

콘크리트 구조물의 내화성은 강도, 골재 성분특성에 큰 영향을 받으나 응력하에서의 내화성이 상대적으로 크게 나타난다. 그러나 응력하의 경우에도 콘크리트 종류에 관계없이 약 649℃이상에서는 급격하게 강도가 약화된다. 따라서 본 분석대상 터널의 경우, 제트팬을 가동하지 않을 경우 600초 경과시부터 천정부의 최고온도가 700℃를 상회하므로 구조물에 심각한 피해가 예상되므로 신속한 제트팬의 가동이 요구되며 제트팬의 최대허용 운전온도가 250℃임을 고려할때 환기설비의 피해 전 작동을 위한 설비제어가 중요하다.

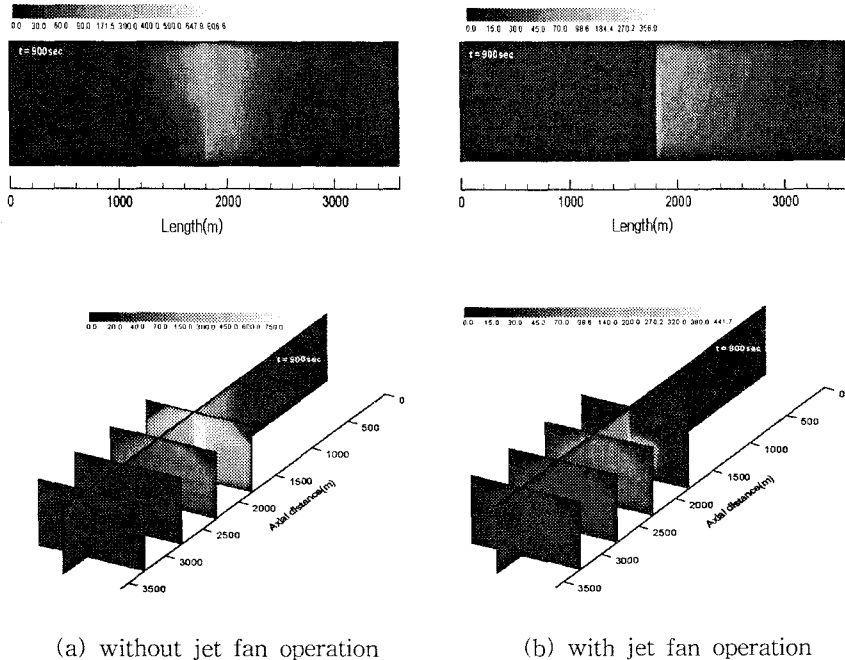


Figure 3. Temperature contours along the axes and over the cross-sections (at 900 seconds)

4. 결론

길이 3599m, 내공단면 75.453m², 2차선 고속도로터널을 대상으로 화재확산 CFD 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- 제트팬 미가동시의 화재원온도는 850초 경과후 1058℃로 최대가 되며 이때 천정부의 경우천정 0.7m 하부에서 715℃로 최대이며 측벽부는 0.3m 떨어진 지점에서 95℃로 최대가 된다.
- 제트팬을 가동한 경우 온도분포는 급격히 낮아져 화재지점 최고온도는 600초 경과시 488℃이다. 천정부의 최대온도는 600초 경과시 화재위치로부터 63m 후방에서 73℃로 최대가 되며 900초 경과 후

26℃정도가 측벽부 최대온도이다.

-제트팬을 가동하지 않을 경우 600초 경과시부터 천정부의 최고온도가 700℃를 상회하므로 콘크리트 구조물에 심각한 피해가 예상되므로 신속한 환기설비의 가동이 요구된다.

주요어 : 터널화재, 화재시뮬레이션, CFD 분석

- 1) 동아대학교 자원공학과 대학원 석사과정
- 2) 동아대학교 지구환경공학부 교수