

터널의 기하학적 형태 및 캐노피 설치가 터널 환기 및 화재 확산에 미치는 영향 분석

The Effects of Tunnel Geometrical Characteristics and Canopy Installation on the Ventilation and Fire Propagation

이창우*¹, 서기윤², 김정욱²

Lee, Chang-Woo·Suh, Ki-Yoon·Kim, Jung-Wook

Abstract

Understanding the airflow characteristics within the canopy structure installed between closely adjacent tunnels either for light adaptation or for protection from snow hazards is required for the normal ventilation as well as safety system design. Grade, horizontal alignment, cross-sectional area and shape are known to substantially influence the fire smoke behavior and their influences raise great concern for the safety design. This paper aims at studying the effects of tunnel geometrical characteristics and canopy installation on the ventilation and fire propagation through CFD analysis.

In the case of 145m long canopy, 50% opening ratio is preferred with respect to the airflow pattern and ventilation efficiency. When a 20MW fire occurs in a 1.8km-long tunnel and four 1250mm reversible jet fans are instantly turned on, smoke concentration at 40m downstream of the fire decrease 13% for the upgrade tunnel with 2% gradient and increases 20% for -2% gradient, compared to the standard horizontal tunnel. Backlayering is observed within 45m-long segment toward the entrance in 2% down-graded tunnel. In a rectangular tunnel, there is no significant difference of smoke concentration as well as velocity profile from the standard crown tunnel. Three-laned tunnel shows lower level of both profiles and backlayering is detected up to 50m upstream of the fire, while the risky situation rapidly disappears thereafter.

Keywords : Canopy, tunnel fire, ventilation, safety system, fire smoke

요 지

시계조절이나 설해방지 목적으로 설치되는 캐노피 구간 내에서의 기류유동특성의 이해는 정상환기 뿐만 아니라 비상시 대처방안 강구를 위한 요건이다. 또한 터널 방재시스템 설계를 위하여서는 종단구배, 평면선형, 단면크기 및 형태 등과 같은 터널의 다양한 특성이 화재확산에 미치는 영향에 대한 정량적인 이해가 필요하다. 본 연구에서는 국내도로터널의 전형적인 특성을 적용한 터널에 캐노피가 된 경우와 종단 및 선형구배, 단면적 및 형태, 곡선구간이 환기 및 화재확산에 미치는 영향을 CFD분석함을 목적으로 하였다.

분석결과 145m길이의 캐노피인 경우 50%정도의 개구율이 기류유동 패턴 및 환기효과면에서 가장 바람직하였다. 1.8km 터널내에서 20MW 화재발생시 종단구배는 풍속분포와 화재연 확산에 큰 영향을 미치며 제트팬(∅ 1250) 4대를 가동한 경우 화재발생 후 5분 경과시 하류 40m지점 부근에서의 화재연 농도는 +2% 구배에서는

*1 정희원, 동아대학교 지구환경공학부 교수 (cwlee@dau.ac.kr)

2 동아대학교 자원공학과 석사수료

13% 감소, -2% 구배의 경우에는 20%정도 증가하며 또한 backlayering 거리가 45m정도에 달한다. 직사각형 단면터널의 경우, 화재연 농도 및 풍속분포는 말굽형 터널과 비교하여 현저한 차이가 관찰되지 않는다. 3차선 터널에서는 이들 변수는 모두 감소하며 100초 경과시 50m 정도의 backlayering을 보이며 이후 서서히 감소한다. 곡선터널인 경우는 화재연의 확산이 느리며 100초 경과시 50m에 달하던 backlayering 현상은 급격히 사라진다.

주요어: 캐노피, 터널화재, 환기, 방재시스템, 화재연

1. 서론

중단구배, 평면선형, 단면 크기 및 형태등과 같은 터널의 기하학적 특성은 열기류 유동에 직접적인 영향을 미치게 되어 터널내 화재 확산에 직접적인 영향을 끼치게 되므로 터널의 안전성 평가에 중요한 변수이다. 또한 산악지형이 많은 국내에서는 최근 2개 이상의 터널이 인접 건설되는 경우가 많아져 1개 터널에서의 화재는 근거리 에 위치한 인접터널에도 영향을 미치게 된다. 특히 인접 터널사이 공간에 설해방지 또는 시계 조절 목적의 canopy와 같은 구조물이 설치되는 경우에는 터널 갱구와 갱구사이 공간에서의 기류유동에 대한 이해가 캐노피 구간에서의 환기효율 뿐만 아니라 인접터널로 화재연이 확산되는 것을 방지하기 위하여 반드시 필요하다.

본 연구에서는 터널의 기하학적 특성 중 중단구배, 평면선형, 단면 크기 및 형태가 화재확산에 미치는 영향과 캐노피가 설치된 공간에서의 기류유동을 분석함으로써

터널의 위험도 평가의 기초자료를 제공함을 목적으로 한다.

2. 기하학적 특성의 영향

2.1 분석대상 터널 및 CFD 모델 개요

표 1에 기하학적 특성 영향 분석 대상인 국내 도로터널의 전형적인 2차선 및 3차선 터널과 캐노피 설치터널의 주요제원을 정리하였다. 기하학적 특성변화에 따른 화재 확산 분석은 구배 0%의 말굽형 2차선 직선터널을 기본 터널로 하여 중단 및 선형구배, 내공단면 및 단면이 각각 다른 터널을 대상으로 하였다.

CFD분석은 미국 Memorial 터널 화재시험 프로그램인 MTFVTP의 결과에 따라 COMPACT 3-D 모델을 터널 환기 및 방재분석 전용 프로그램으로 개편한 Inres사

표 1. 연구대상 터널 특성

구 분		특 성 값	비 고	
기하학적 특성 영향	길이	1800m		
	중단구배	0%, +2%, -2%		
	평면선형	직선, R=900m		
	내공 단면적	73.2m ² (2차선), 97.23m ² (3차선)		
	단면형태	말굽형, 직사각형		
캐노피 설치	터널	I	L=500m	A=20mx8m 일방향 통행
		II	L=355m	
	제트팬	대수	2 (Ø1250)	환기력 우세방향 결정을 위하여 설치
		위치	터널 I 입구 160m 지점	
	캐노피	형태	좌우측 하부 및 상부 중앙을 직사각형으로 개방	터널 I 및 II를 직접 연결
		개구율	30, 50, 70, 100%	

의 SOLVENT ver 1.0을 이용하였다.

2.2 캐노피설치에 따른 영향 분석

그림 1에서 보는 바와 같이 총 1000m의 분석 대상공간은 터널 I 500m, 캐노피 145m, 터널 II 355m 구간으로 구성되며 캐노피는 좌우측 하단부분 및 천정부의 중앙부분이 개방되어 있다. 한편, 터널의 사양은 표 1과

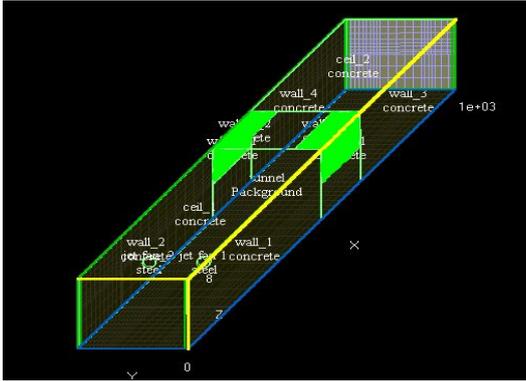


그림 1. 캐노피 및 인접터널 모델

표 2. 개구율별 속도분포 범위

개구율 (%)	속도분포 (m/s)		
	U	V	W
30	-7.3~15.1	-16.6~84.1	-1.2~42.2
50	-1.1~15.0	-0.3~0.4	-0.2~1.3
70	-1.7~13.1	-0.5~0.5	-0.3~1.5
100	-2.1~25.8	-6.5~5.0	-5.1~4.2

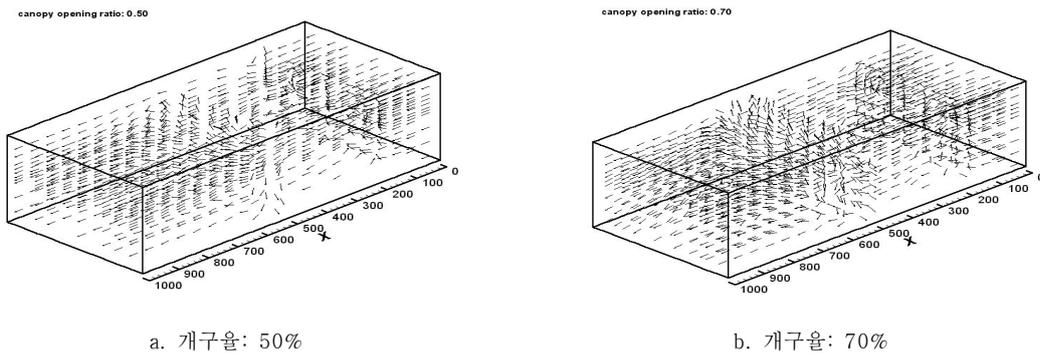
같다.

2.2.1 캐노피 개구율별 환기속도 분포

개구율 30, 50, 70, 100% 경우의 캐노피 구간에서의 U, V, W 속도 분포는 표 2와 같다. 개구율이 30%로 낮은 경우 개구부 시작부분에서의 횡기류의 유동 속도가 현저히 높아지며 50% 및 70%의 개구율의 경우에는 상대적으로 측방향 기류유동이 우세하므로 환기효율 측면에서 상대적으로 많은 장점을 보이고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 개구율 50% 및 70%의 경우의 측방향 유동의 유사하며 터널 입출구 부근에서의 형태는 70%인 경우가 상대적으로 큰 난기류를 보이고 있어 인접터널로의 환기력 전달 효율은 떨어지므로 50% 보다 환기효율은 상대적으로 낮다. 한편 개구율 100%인 경우, 즉 캐노피가 설치되지 않은 경우에는 측방향 뿐만 아니라 횡방향 풍속의 분산 범위가 상대적으로 크게 나타난다.

2.2.2 개구율별 bulk 풍속 분포변화

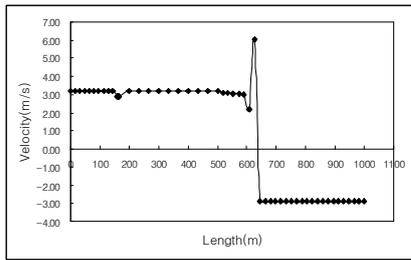
단면상의 평균 측방향 풍속분포를 도시하면 그림 3과 같다. 개구율 30%의 경우에는 터널 I에 설치된 제트팬에



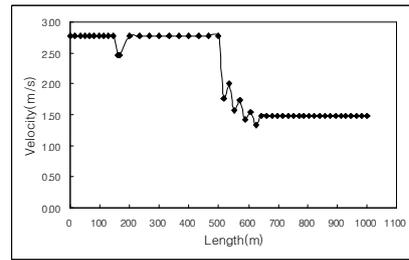
a. 개구율: 50%

b. 개구율: 70%

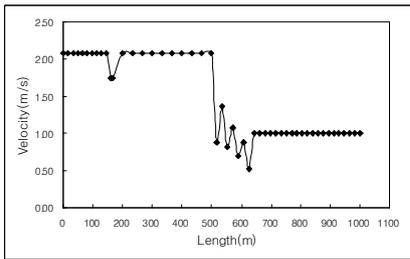
그림 2. 개구율 변화에 따른 기류 분포 차이



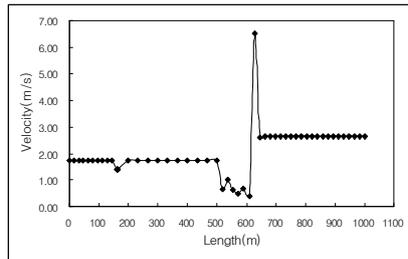
a. Opening ratio: 30%



b. Opening ratio: 50%



c. Opening ratio: 70%



d. Opening ratio: 100%

그림 3. 개구율별 풍속분포

Location	Opening ratio: 50%	Opening ratio: 70%
90m		
127m		

그림 4. 개구율별 횡방향 풍속분포

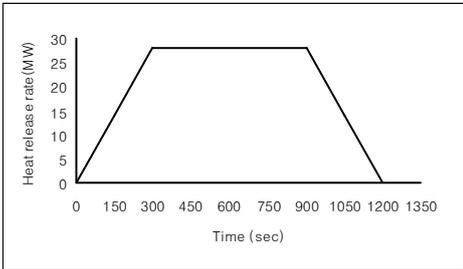
의하여 3.2m/s로 출구개구를 빠져나간 기류는 좁은 개구부를 통하여 최대 24m/s로 유출되어 터널 II에서는 별도의 환기력이 없는 경우 기류가 역류하며 역류풍속이 3.2m/s에 달하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 개구율 50, 70%의 경우에는 관찰되지 않으며 캐노피 내에서의 풍속 분산범위는 개구율 50% 및 70%의 경우 각각 0.3m/s 및 0.5m/s로 50%인 경우가 원활한 축방향

유동이 이루어짐을 알 수 있다. 한편 캐노피 입구부에서의 풍속이 각기 다른 것은 터널 I, 캐노피구간, 터널 II 전체 1000m 구간에 동일한 환기력(제트팬 $\varnothing 1250$ 2대)을 가정하였기 때문이다.

2.2.3 횡방향 기류 유동 분석

그림 4는 개구율 50% 및 70%인 경우의 횡방향 기류유

표 3. 화재 시뮬레이션 조건

구 분	사 양
화재 발생지점	입구로부터 900m
화재규모	20MW(5mx8mx3.5m)
복사손실계수	0.3
발열량	4.26e+07 J/kg
연료소모율	0.470 kg/s
분석시간	400seconds($\Delta t=10\text{sec}$)
터널내 초기온도	12.8℃
제트팬 대수(∅1250)	4
mesh cell 수	600x50x30
전열방사량	

동 형태를 보여준다. 두 경우의 유동 형태 차이는 현저하지 않으나 측면 개구부를 통하여 유입된 기류가 상부 개구부로 유출되는 풍속은 표 2에서와 같이 70%인 경우가 동일한 환기력 하에서도 약간 큰 것을 알 수 있다.

2.2.4 결과검토

개구율이 30%인 경우 캐노피 구간에서의 개구부를 통한 높은 유출풍속으로 인접터널의 기류가 역전되는 현상이 관찰되며, 개구율 50% 및 70%의 경우 모두 축방향 및 횡방향 기류유동이 원활하며 기류 유동 형태 또한 흡사하나 캐노피 구간에서의 축방향 풍속의 분산은 70%의 경우가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 인접터널로의 유도 풍속으로 판단한 환기력 전달 효율면에서 50%의 경우가 우위를 보임에 따라 canopy의 설치에 따른 환기 효율 분석결과 50%정도가 적절한 것으로 판단된다.

2.3 기하학적 특성과 화재확산형태 분석

표 3에서처럼 길이 1800m 터널의 갱구 900m 지점에 소형버스의 화재 규모인 20MW서 발생한 것으로 가정하였고 복사손실계수는 0.3을 적용하였다. 입구로부터 160m, 320m 지점에 제트팬 ∅1250를 2대씩 설치하였으며 입구갱구로부터 850m지점까지를 차량정체구간으로 설정하였으며 정체구간의 마찰저항계수 Kblock-age는 0.2387로, 자연환기속도는 역풍 2.5m/s를 가정하였다.

2.3.1 화재확산 분석

본 연구의 분석대상 시나리오 6가지 경우에서 전열방사량이 최대가 되는 화재발생 300초경과 후의 터널내 풍속 및 화재연 농도 및 화재발생점으로부터 150m 하류지

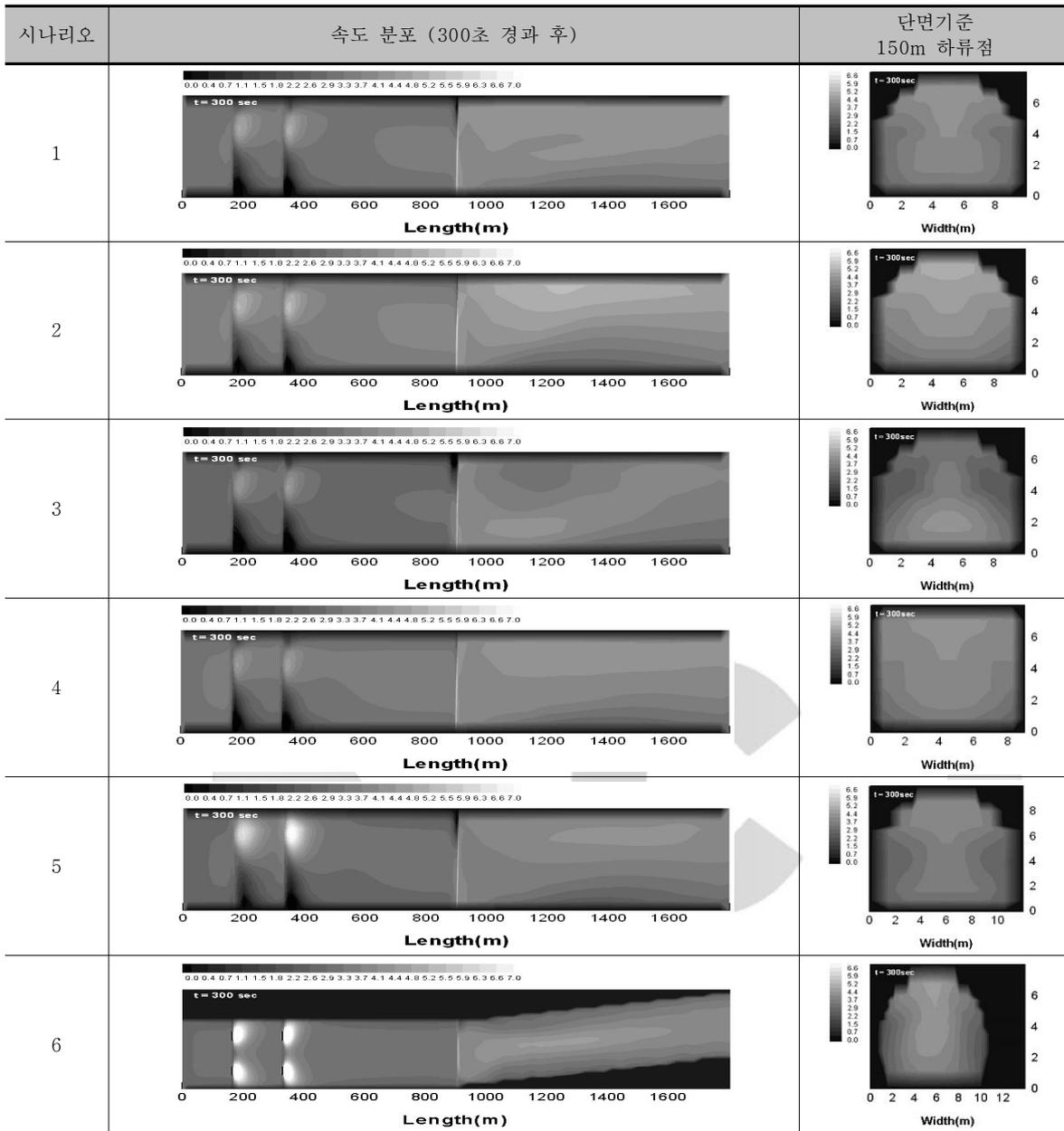


그림 5. 300초 경과후의 풍속분포

점 단면상 풍속 및 화재연 농도 분포를 그림 5 및 6에 도시하였다. 각 경우별 풍속 및 화재연 농도 분포의 특징을 요약하면 다음과 같다. 한편, 화재연 농도는 kg smoke/kg mixture로 soot를 포함한 연소 가스의 중

량과 연소가스 및 공기의 합계 총중량의 비로 정의한다.

- (1) 시나리오 1
300초 경과 후 화재발생점 40m 하류지점에서 화재연

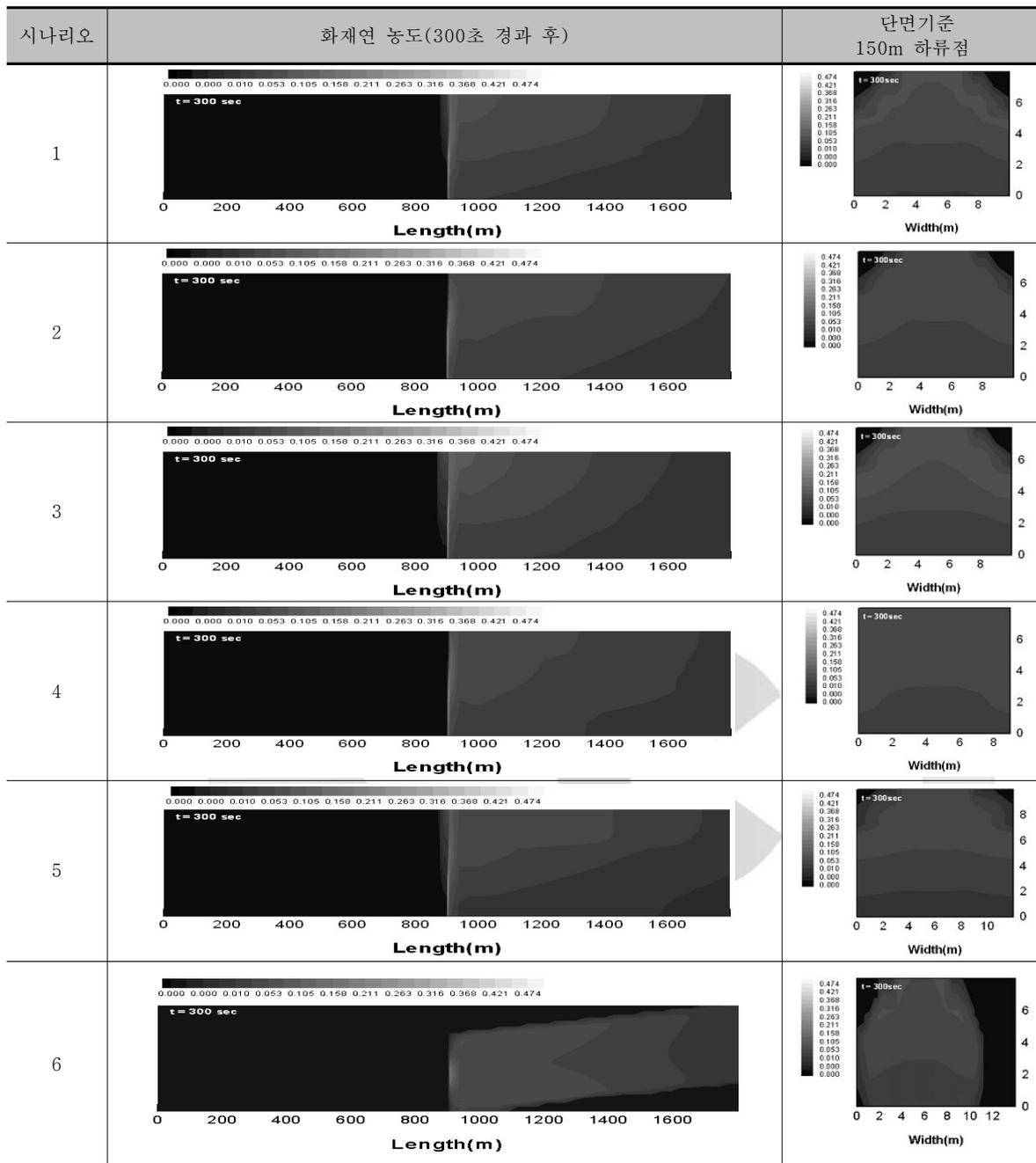


그림 6. 300초 경과 후의 화재연 농도분포

농도가 최대가 된 후 최대농도는 이후 증가하지 않으나 하류지점에서 농도는 점증하며 환기속도 또한 동시에 증

가하여 동일 지점에서 300초 경과시 2.8m/s, 400초 경과시 3.0m/s로 증가하고 있다.

화재연이 입구쪽으로 역류하는 backlayering 현상은 300초 경과시 약 20m거리 정도에서 관찰되나 400초 경과시에는 더 이상 발견되지 않는다.

단면상 분포는 화재발생지점 직상부 약 3m지점에서 최대풍속 및 화재연 농도를 보이다가 출구쪽으로 갈수록 천정부근으로 확산되어 소멸하는 형태를 나타내고 있다.

(2) 시나리오 2

중단구배가 2%인 경우로 40m 하류지점에서의 화재연 농도는 시나리오 1에 비하여 87%정도이나 풍속은 112%로 상대적으로 크게 나타난다. 300초 경과시 화재발생 지점의 풍속이 3.2m/s 정도로 나타나며 backlayering은 전혀 관찰되지 않고 있다. 300초 경과시의 단면상 풍속 분포는 시나리오 1보다 천정부의 풍속이 상대적으로 크게 나타나 4.4m/s 달한다.

(3) 시나리오 3

중단구배 -2%인 시나리오 3에서는 300초 경과후 화재발생점 40m 하류에서의 단면상 평균 화재연 농도는 시나리오 1의 120%로 증가하며 400초 경과시에는 145%정도로 상대적으로 크게 나타나며 이는 풍속이 동일 지점에서 각각 86% 및 75%로 감소하는데 기인한다. backlayering거리는 100초 경과시 40m, 300초 경과시 45m, 400초 경과시 50m 정도로 서서히 증가하고 있다. 300초 경과시 40m 하류점의 천정부근에서의 농도는 시나리오 1의 78%정도로 감소하고 있으며 단면상 최대 풍속은 시나리오 1의 경우 단면 상부에서 관찰되나 시나리오 3에서는 하부에서 관찰되고 있다.

(4) 시나리오 4

직사각형 단면을 가진 시나리오 4의 경우 시나리오 1에 비하여 풍속은 증가하고 화재연 농도는 화재발생지점에서 약간 감소하고 다른 지점에서는 거의 차이가 없었다. 단면상 분포는 100초 경과후 40m 하류지점에서는 천정부에서의 풍속이 고루 크게 나타나 단면상 화재연 농도 분포가 거의 일정하다. 하류 150m까지는 풍속분포가 층을 이루나 그 이외의 지점에서 사각형의 분포특성을 보이고 있다. 300초 경과시에는 높이 4m이상에서는 풍속이 거의 일정하며 화재연 농도는 시나리오 1에 비하

여 전단면에 걸쳐 비교적 균일한 분포를 보인다.

(5) 시나리오 5

내공단면이 시나리오 1의 133%인 시나리오 3의 경우 동일한 화재규모로 인하여 풍속 및 화재연 농도가 동시에 감소하고 있다. 300초 경과 후 40m 하류점에서의 화재연 농도는 시나리오 1의 72%정도로 관찰되었다. backlayering 거리는 100초, 300초, 400초 경과시 각각 50m, 25m, 20m 정도로 감소하고 있다. 단면상에서의 분포형태는 시나리오 1과 거의 유사하다.

(6) 시나리오 6

곡률반경 900m인 경우로 곡선부근에서의 저항력에 인하여 시간이 경과할수록 출구편으로의 화재연 확산이 느려지는 현상이 더욱 명확해진다. 곡선구간의 시작점에서 출구사이에 양측벽쪽으로의 화재연 확산이 이루어지고 있으며 곡선구간에서는 풍속 및 화재연 농도의 분포가 불규칙적이다. backlayering거리는 100초 경과시 50m정도이나 이후에는 급격히 감소하여 더 이상 관찰되지 않는다.

2.3.2 결과검토

(1) 20MW 화재발생시 전형적인 2차선 터널에서 제트 팬(Ø1250) 4대를 화재발생과 동시에 가동할 경우 300초 경과시의 터널내 풍속은 2.8m/s로 backlayering은 전혀 관찰되지 않으나 중단구배가 2%인 경우 하류 40m 지점에서의 풍속은 112% 증가, 화재연 농도는 87% 감소를 초래하였다. 그러나 중단구배가 -2%인 경우는 300초 및 400초 경과시 120%, 145% 정도 증가하였으며 backlayering거리는 100초, 300초, 400초 각각 40m, 45m, 50m 정도로 점진적으로 증가하였다.

(2) 단면이 직사각형인 경우는 단면상 분포 특성은 상부층의 풍속 및 화재연 농도가 거의 균일하며 풍속은 말굽형에 비하여 약간 증가하였으나 화재발생 지점 부근에서의 농도는 약간 감소하나 여타 지역에서는 거의 변화가 없었다.

(3) 3차선 터널의 경우는 2차선터널에 비하여 300초 경과시 40m 하류지점에서 화재연 농도는 72%정도로 감소하였으며 유도풍속의 감소로 관찰되는 backlayering

은 시간이 경과할수록 감소하여 100초, 300초, 400초 경과시 50m, 25m, 20m 정도로 나타났다.

(4) 곡선터널인 경우는 곡선부에서의 풍속 및 화재연 농도가 달라 출구측으로의 화재연 확산이 느리게 진행되어 backlayering은 100초 경과시 50m구간 정도에서 관찰되었으나 그 이후 급격히 감소하고 있다.

3. 결론

본 연구에서는 인접터널 사이에 설치된 canopy에 의한 환기효과와 터널의 기하학적 특성 특히 구배, 단면형태 및 곡선부에 의한 화재연 확산형태의 차이를 분석하였다. 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 캐노피 개구율이 30% 경우는 개구부를 통한 높은 기류의 배출은 인접터널의 환기력에 부정적인 영향을 미치며, 캐노피 구간에서의 기류 유동 형태의 큰 차이가 없는 개구율 50% 및 70%중, 70%의 경우는 축방향 풍속의 변동이 상대적으로 크게 나타나 환기효율 측면에서 50%의 경우가 적정 개구율로 판단된다.
- (2) 20MW 화재발생시 중단구배는 풍속분포와 화재연 확산에 큰 영향을 미치며 체트팬(Ø1250) 4대를 가동한 경우 화재발생 후 300초 경과시 하류 40m 지점을 기준으로 +2% 구배는 화재연 농도 87% 감소, -2% 구배는 120%정도 증가하고 현저한 backlayering 현상도 45m길이 구간에서 관찰되었으며 시간경과에 따라 점증하고 있다.
- (3) 직사각형 단면터널의 경우, 화재연 농도 및 풍속분포는 말굽형 터널과 비교하여 현저한 차이가 관찰되지 않는다.
- (4) 3차선 터널은 2차선의 경우에 비하여 300초 경과시 40m 하류지점에서 화재연 농도는 72%정도 감소하였으며 100초 경과시 50m거리 구간에서 관찰된 backlayering은 시간이 경과할수록 감소한다.
- (5) 곡선터널인 경우는 곡선부 저항의 증가에 따라 화재연의 확산이 느리며 100초 경과시 50m거리 구

간 정도에서 관찰된 backlayering은 급격히 감소한다.

- (6) 본 연구결과는 국내 도로터널의 전형적인 특성을 가진 터널을 대상으로 한 것이며 여타 특성이 동시에 연관이 되는 경우는 본 연구에서 수행한 방법의 단계적 적용에 따른 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2003학년도 동아대학교 학술연구조성비(국외장기연구과건)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 김영섭, 김정욱, 이창우 (2002), "인접터널간 canopy 설치에 따른 오염물질 재유입연구", 한국암반공학회 추계학술발표대회 논문집, pp. 93-130.
2. 김정욱 (2002), 터널특성이 화재확산에 미치는 영향 분석, 석사논문, 동아대학교.
3. 서기윤, 김정욱, 이창우 (2001), "인접터널간 canopy 설치에 따른 환기효과 분석", 한국자원공학회 추계학술발표대회 논문집, pp. 205-210.
4. 이상은, 이창우 (2005), "대면교행터널에서 배연시스템 구축과 화재모형실험에 의한 적정성평가", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 15, No. 6, pp. 452-461.
5. Modic, J. (2006), "Air flow simulation and testing in Kastelec Tunnel", Proc. of the 12th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Potoroz, Slovenia, pp. 5-16.
6. Sturn, P. J. (2005), "Safety features in the 10km long Plabutsch Tunnel", Proc. of Int. Symp. on Design, Construction and Operation of Long Tunnels, Taipei, Taiwan, pp. 635-642.
7. West, A. and Pope, C. (1997), "The effect of wind on the ventilation of a road tunnel occupying an exposed position", Proc. of the 9th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, pp. 3-23.



이창우

동아대학교 지구환경공학부 교수
cwlee@dau.ac.kr



서기윤

참한통신(주)
동아대학교 자원공학과 석사수료
saseo@hanmail.net



김정욱

경상남도 창원시청
동아대학교 자원공학과 석사수료
bbonbboo@hanmail.net

K C I