

중규모터널 방재용 제트팬 초기 가동시간에 관한 연구

김두영¹⁾, 이창우^{1)*}

A Study on Jet Fan Start Time in Medium-Length Tunnel Fires

Doo-Young Kim, Chang-Woo Lee

Abstract Although the number of medium-length road tunnels, less than 1 km in length, has increased recently more than 30 percent each year, their ventilation and fire safety system design guidelines have not been established yet. The guidelines for long tunnel design are adopted even for the medium-length road tunnels. Therefore the necessity is brought up to optimize the ventilation and fire safety systems based on their own design guidelines. This study aims at determining the optimal start time of jet fan in case of 20 MW fires by analyzing smoke backlayering range, temperature distribution, range of poor visibility, evacuation time and critical velocity. The CFD study results are expected to contribute to propose the optimal fan operation mode.

Key words Medium-length tunnels, CFD, Smoke backlayering distance, Emergency ventilation system

초 록 중규모 터널(연장 1 km 이내) 건설은 최근 매년 30% 이상의 증가율을 보이고 있으나 환기 및 방재시설 설치기준은 제정되어 있지 않은 상태라 장대터널을 대상으로 한 설치기준을 따르고 있다. 이에 따라 중규모터널 환기 및 방재시설의 최적화 노력이 요구되고 있다. 본 연구에서는 중규모 터널 내 20 MW 규모의 화재 시 발생하는 화재연 역류거리, 고온 열기류 확산범위, 가시거리 20 m 이하(상류) 구간분포, 임계풍속 확보여부, 대피시간 등을 CFD 분석을 통해 방재팬의 적정 초기 가동시간을 도출하여 방재시스템의 최적운전 방안의 제시를 목적으로 한다.

핵심어 중규모터널, 터널 화재, CFD, 화재연 역류 거리, 방재시스템

1. 서 론

국내 도로터널은 최근 물류량증가로 인한 교통량의 증대와 산지가 많은 지형특성으로 1998년 312개소에서 2009년에 1287개소로 10년 사이에 4배 정도로 급증하고 있다. 이에 따라 도로 터널 내 차량사고 등으로 인한 대형화재의 발생 건수 및 가능성도 점점 증가되고 있다. 화재발생은 주로 과속, 차선변경, 운전부주의, 차량결함 등에 의한 교통사고로 발생하며 특히 차량의 터널벽면 충돌 시 화재가 많이 발생한다. 도로터널은 구조상 반 밀폐 형태로 기류의 유동이 제한되어 화재 발생 시 유독성 가스 및 고온 열기류, 가시거리 미확보 등으로 인

하여 대피가 어려우며 이로 인하여 대형 인명피해로 이어질 수 있다. 따라서 터널 화재 시 안전 확보를 위한 유기적인 방재설비구축이 요구되며 특히 화재발생 초기의 신속한 인명 대피환경 확보를 위해서는 제연설비가 체계적으로 운영되어야한다.

연장이 500~1000 m인 국내 중규모터널이 356개소로 전체의 33%에 달하고 있지만 상시감시 및 관리가 불가능한 실정이며 또한 환기 및 방재시설 설치기준이 마련되어 있지 않아 장대터널의 기준을 적용하고 있는 상황이며 이에 대한 연구도 미미한 실정이다(한국건설기술연구원, 2008). 이에, 본 연구에서는 중규모터널 화재 시 방재용 제트팬 초기 가동시간분석을 위하여 (1) 중규모 터널 내 20 MW 규모의 화재발생시 화재연의 역류거리, 고온의 열기류 역류거리, 대피 속도에 영향을 미치는 가시거리분포 분석, (2) 화재 시 적정 임계풍속 산정과 임계풍속 확보여부 분석 (3) 대피 시뮬레이션을 통한 피난 가능시간분석 (4) 초기 대피환경 형성에 중요한 방재팬

¹⁾ 동아대학교

* 교신저자 : cwlee@dau.ac.kr

접수일 : 2010년 12월 10일

심사 완료일 : 2010년 12월 22일

게재 확정일 : 2010년 12월 24일

초기 가동시간에 따른 안전성분석을 수행함으로써 결론적으로는 방재용 제트팬의 최적 초기 가동시간 도출을 목적으로 한다. 향후, 연구결과는 중규모터널의 방재기준 정비 및 방재시스템 운영에 기여할 것으로 기대된다.

2. 중규모터널 화재 시 방재용 제트팬 최적 가동개시 시간 분석

중규모 터널 내 화재발생시 화재연 및 온도 확산 CFD 분석은 미국 Memorial 터널 실물화재실험의 결과(FHA, 1996)를 토대로 만들어진, 터널화재 및 환기전용 해석

틀인 SOLVENT를 이용하였으며 CFD 분석은 비정상 k-e 난류모델, Radiation에 의한 열손실을 고려하여 수행하였다.

2.1 중규모터널 화재 확산분석

분석대상 터널은 길이 1000 m, 단면적 73.74 m²의 중규모터널이며 화재 규모는 20 MW를 가정하였다. 중규모터널 내 화재분석 시나리오는 표 1에 나타내며, 각 시나리오별 총 30 경우를 분석하였다.

화재발생시 사고차량에 따라서 화재규모가 달라지며, 국내 도로터널 방재시설 설치지침에서는 소형차량 및

표 1. 중규모 터널 내 화재 분석 시나리오

구분	화재발생 지점 (3경우)	방재팬 가동 모드 (5경우)	방재팬 설치방법 (2경우)
분석대상 시나리오	입구 갱구기준 - 250 m - 500 m - 750 m	- 가동 안함 - 화재발생 0분후 가동 - 화재발생 2분후 가동 - 화재발생 4분후 가동 - 화재발생 6분후 가동	- 입구 2개소 4대 - 출구 2개소 4대 (병렬 2대 1조, 이격거리 140 m)

화재 발생후 2분		<table border="1"> <tr><td>확산 거리(m)</td><td>96</td></tr> <tr><td>역류 거리(m)</td><td>98</td></tr> <tr><td>확산 높이(m)</td><td>4.3</td></tr> <tr><td>최대화재연 농도(ppm)</td><td>350</td></tr> </table>	확산 거리(m)	96	역류 거리(m)	98	확산 높이(m)	4.3	최대화재연 농도(ppm)	350
확산 거리(m)	96									
역류 거리(m)	98									
확산 높이(m)	4.3									
최대화재연 농도(ppm)	350									
화재 발생후 4분		<table border="1"> <tr><td>확산 거리(m)</td><td>178</td></tr> <tr><td>역류 거리(m)</td><td>164</td></tr> <tr><td>확산 높이(m)</td><td>3.6</td></tr> <tr><td>최대화재연 농도(ppm)</td><td>690</td></tr> </table>	확산 거리(m)	178	역류 거리(m)	164	확산 높이(m)	3.6	최대화재연 농도(ppm)	690
확산 거리(m)	178									
역류 거리(m)	164									
확산 높이(m)	3.6									
최대화재연 농도(ppm)	690									
화재 발생후 6분		<table border="1"> <tr><td>확산 거리(m)</td><td>261</td></tr> <tr><td>역류 거리(m)</td><td>226</td></tr> <tr><td>확산 높이(m)</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>최대화재연 농도(ppm)</td><td>1000</td></tr> </table>	확산 거리(m)	261	역류 거리(m)	226	확산 높이(m)	2.5	최대화재연 농도(ppm)	1000
확산 거리(m)	261									
역류 거리(m)	226									
확산 높이(m)	2.5									
최대화재연 농도(ppm)	1000									

그림 1. 터널 내 500 m 지점, 화재발생 후 화재연 역류거리(방재팬 가동 안함)

대형차량 화재규모를 각각 10 MW, 20 MW로 규정하고 있다. WRA(국토도로협회)의 보고서에서 도로터널 내 사고 차량의 80% 정도가 강도 20 MW급, 19% 정도가 40 MW급, 1% 정도가 40 MW 이상으로 화재가 발생된다고 한다. 본 연구에서는 대형버스의 화재강도인 20 MW급 화재를 적용하였다. 일반적인 차량화재의 발열량 변화 추이는, 화재발생 후 1분 내에 최대 발열량에 도달하고, 약 25분 후에는 점진적으로 감소하여 진화가 되는 형태이다(국토해양부, 2009). 본 분석에서는 화재 발생 후 1분경과 후 최대 규모에 도달한 후 최대 발열량이 지속되는 화재성장 곡선을 적용하였으며 CFD 분석 시간은 10분으로 설정하였다.

그림 1~3은 각각 중규모 터널 내 중간지점인 500 m 지점에서 화재발생 시에 방재팬을 가동하지 않은 경우 화재발생 후 6분까지의 화재연, 고온 열기류(외기온도보다 1.5°C 높은 범위) 역류거리, 가시거리가 20 m 이하(상류) 변화를 2분 간격으로 보여주고 있으며 시간 경과에 따라 고온 고농도의 화재연이 급속히 확산됨을 알 수

있다. 터널 내 화재 시 가장 많은 양이 생성되는 CO의 터널 내 설계허용 농도는 100 ppm(국토해양부, 2010)이며 터널 내 가시거리가 20 m이하일 경우에는 안전한 대피가 불가능한 것으로 알려져 있다(Shirmer Engineering, 2008). 그림 1에서와 같이 화재지점을 기준으로 대피방향으로 화재연 층이 넘어오는 것을 역류(backlayering)라고 한다. 그림 3에서 흰색으로 표시되는 부분이 화재연에 의해 가시거리가 20 m 이하로 감소한 범위를 나타낸다.

화재발생 후 방재팬을 가동하지 않을 경우에는, 화재 발생 1분후에는 고온 열기류의 역류거리가 66 m로 가장 길고, 2분후부터는 가시거리가 20 m 이내로 대피가 어려운 터널구간의 길이가 가장 길어지는 것을 알 수 있다. 화재발생 6분후에는 무려 272 m에 달하고 있다. 터널 내 화재발생시 가시거리 악화에 따른 위험도가 가장 큰 것을 알 수 있으며, 피난 시 가시거리에는 어둠에 대한 두려움, 심리적 압박감, 그리고 시각에 미치는 영향으로 대피 속도가 현저하게 감소되어 더 큰 피해가

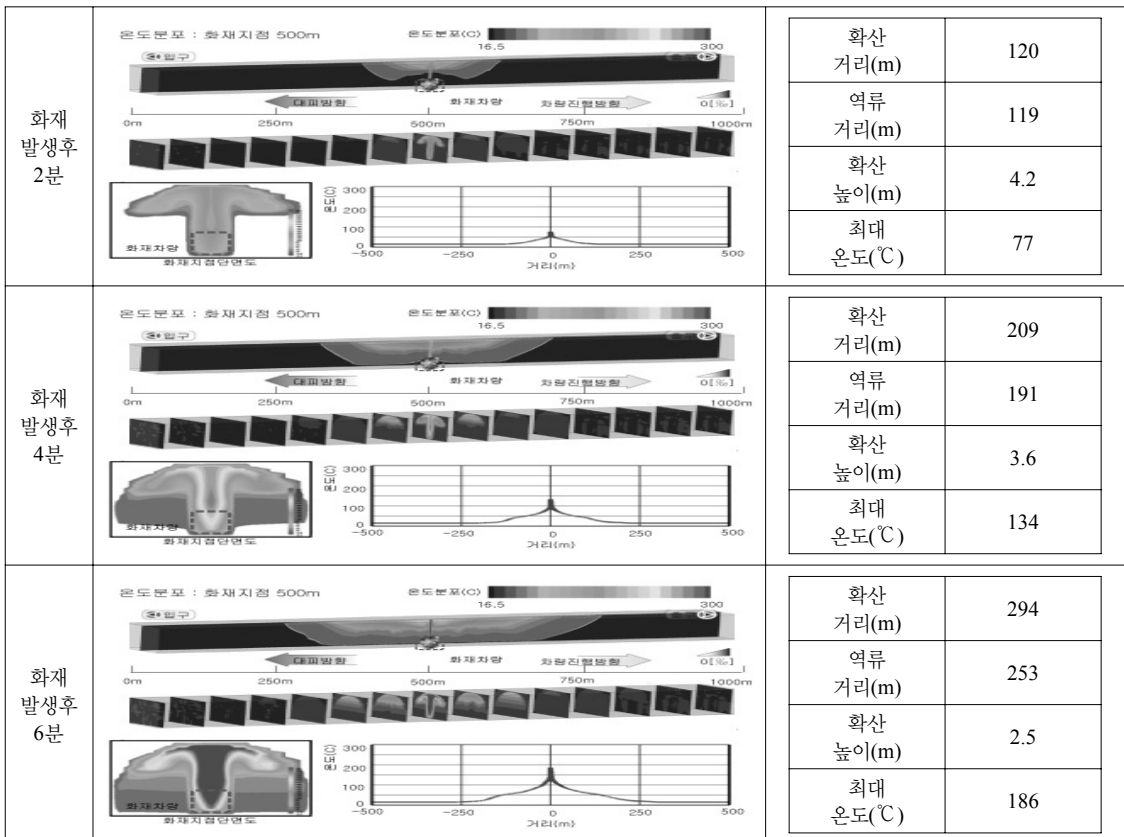


그림 2. 터널 내 500 m 지점, 화재발생 후 고온 열기류 역류거리(방재팬 가동 안함)

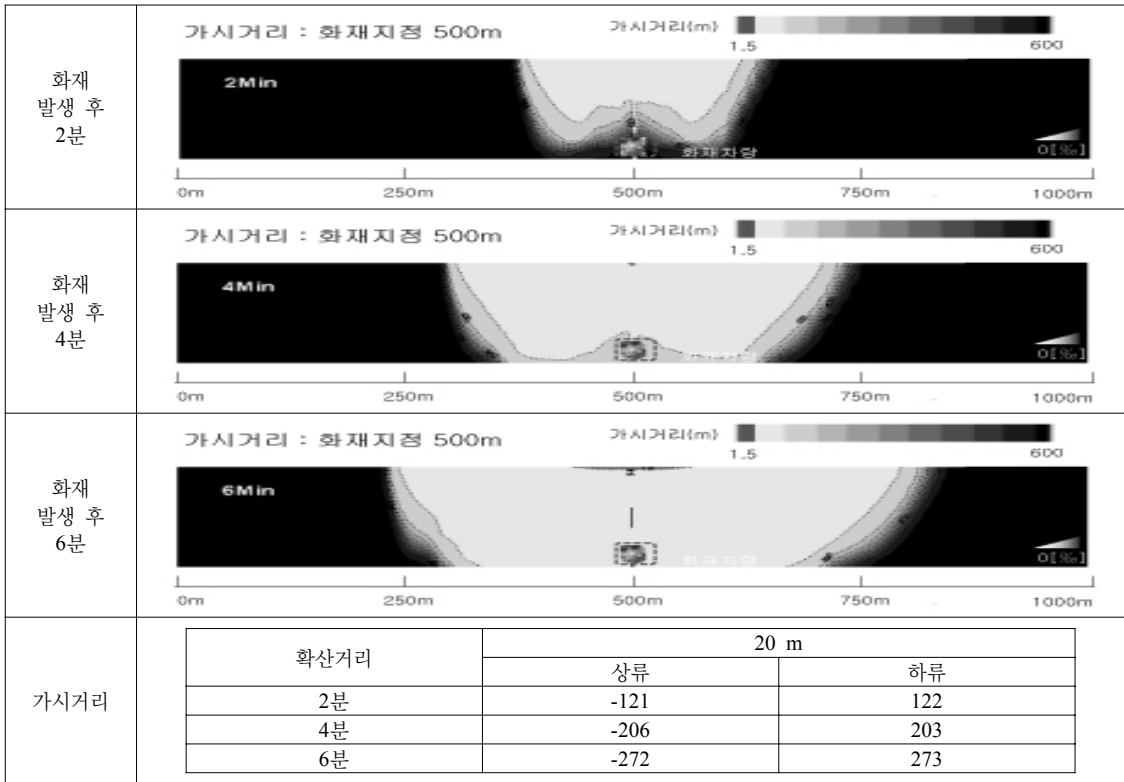


그림 3. 터널 내 500 m 지점, 화재발생 후 가시거리가 20 m 이하(상류) 구간분포(방재팬 가동 안함)

표 2. 중규모 터널 내 화재 분석 결과(방재팬 가동 안함)

시간	화재연 역류거리	고온 열기류 역류거리	가시거리가 20 m 이하(상류) 범위
화재발생 1분후	47 m	66 m	62 m
화재발생 2분후	98 m	119 m	121 m
화재발생 3분후	132 m	155 m	165 m
화재발생 4분후	164 m	191 m	206 m
화재발생 5분후	195 m	222 m	237 m
화재발생 6분후	226 m	253 m	272 m

발생할 수 있다.

2.2 대피 시뮬레이션 분석

터널 내 화재발생시 초기에 신속한 대피환경을 형성하여 대피하는 것이 인명피해를 줄이기 위한 가장 중요한 과제이다. 대피가능성을 결정하는 주요 변수는 대피자의 보행속도, 화재 인지시간, 피난연락경의 길이, 병목현상 등이다. 대피하는 데 걸리는 시간은 주위에 대한 관찰과 경계로 소요되는 시간, 반응시간, 차에서 떠나는 시간, 안전한 곳으로 대피하는 시간 등의 합이다.

일반적으로 알려진 대피 속도는 0.7~1.5 m/s 사이이며 대략적으로 평균 1 m/s로 적용하고 있으며, 화재 인지 시간은 1~2분 사이로 보통의 시뮬레이션의 경우, 평균 1분을 적용하여 분석하고 있다(이인모, 2004).

터널 내 화재 시 대피자의 거동 및 대피에 소요되는 시간을 산출하기 위해서 영국 LES사의 SIMULEX를 이용하여 시간별 대피인원 및 대피거리를 분석하였다. SIMULEX는 피난시뮬레이션 전용프로그램으로 터널 내 피난상황을 시뮬레이션 할 수 있으며, 인간의 심리 인자 및 행동특성을 감안한 2차원 피난시뮬레이션 모델

이다.

시간별 대피자의 피난대피거리를 분석하기 위해서 화재발생지점을 500 m로 가정하여 피난대피 시뮬레이션을 수행하였다. 화재규모 20 MW인 대형버스에서 화재가 발생한 시나리오로 분석을 하였으며, 터널입구로 대피자들이 대피를 하게 가정하였으며, 단순 대피거리를 분석하기 위하여 피난연락경은 설치하지 않은 경우를

대상으로 하였다.

대피시뮬레이션 분석결과, 그림 4는 대피가 완료되기까지 5초 간격으로 대피인원을, 그림 5는 피난완료시간까지의 누적대피인원을 보여준다. 초기 대피시간이 감소하며, 90%이상 대피한 후에 단위시간당 대피인원이 급격히 감소하여, 10%미만의 소수의 인원이 대피하는데 많은 시간이 요구된다. 분석결과 총 대피 인원 586

표 3. 피난대피 검토조건

구분	조건	비고																				
터널길이	1000 m	중규모터널																				
터널 내 총 차량대수	250대	화재발생 후 3분간 터널 내로 진입한 차량수 포함 화재직전의 주행속도를 60 km/h로 가정 $n = \frac{N \cdot L}{V_t} + N \cdot \frac{3}{60}$ n : 터널 내 차량대수 [대], V_t : 차량 주행속도 [km/hr] L : 터널 연장 [km] N : 시간 교통량 [대/hr]																				
총 대피인원	586명	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">승용차</th> <th colspan="2">버 스</th> <th colspan="4">트 렉</th> </tr> <tr> <th>소형</th> <th>대형</th> <th>소형</th> <th>중형</th> <th>대형</th> <th>특수</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>16</td> <td>45</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	승용차	버 스		트 렉				소형	대형	소형	중형	대형	특수	3	16	45	2	1	1	1
승용차	버 스			트 렉																		
	소형	대형	소형	중형	대형	특수																
3	16	45	2	1	1	1																

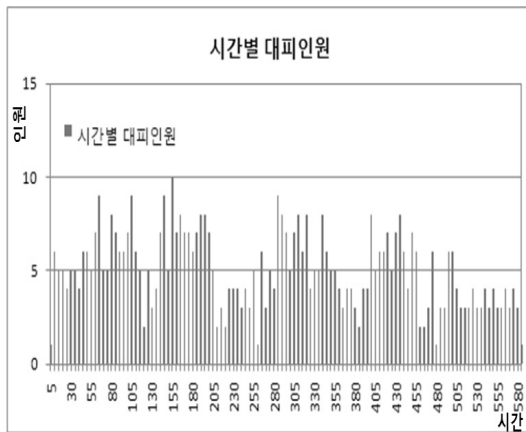


그림 4. 시간별 대피인원

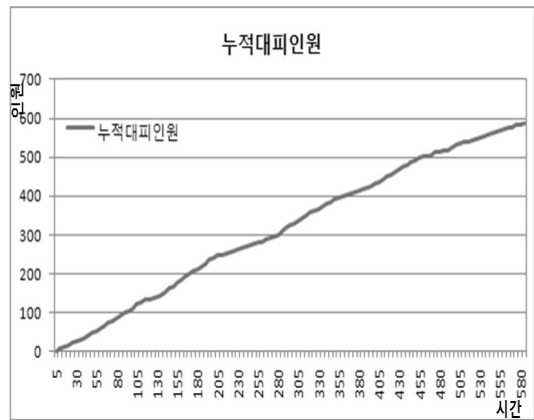


그림 5. 누적 대피인원

표 4. 대피시뮬레이션 분석결과 시간별 대피거리

시간	대피거리	시간	대피거리
화재발생 1분후	0 m	화재발생 6분후	224 m
화재발생 2분후	5 m	화재발생 7분후	232 m
화재발생 3분후	55 m	화재발생 8분후	341 m
화재발생 4분후	111 m	화재발생 9분후	400 m
화재발생 5분후	166 m	화재발생 10분후	460 m

명이 대피 완료한 시간은 9분 41초이며, 누적대피인원은 약 9분까지는 시간에 따라서 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

대피거리는 화재발생지점에서부터 대피방향을 기준으로 가장 마지막 대피자까지의 거리로 나타내며, 화재 발생 1분후에 화재를 인지한 후 피난 개시하여, 총 대피 인원 586명이 피난완료시간은 10분이다. 국내 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침에 따라 250 m 간격으로 피난연락경이 설치된 경우에는 최악의 경우, 즉 인접 피난연락경 입구에서 화재가 발생하고 피난연락경으로의 대피가 불가능한 경우에 7분 내에 대피 가능하다(국토해양부, 2009).

2.3 임계풍속 확보여부 분석

방재용 제트팬은 도로터널에서 화재가 발생하는 경우, 화재연과 열기류를 대피방향의 반대방향으로 제어하여 초기 대피환경 조성에 반드시 필요한 임계풍속을 확보하여 대피공간을 확보할 수 있도록 하는 제어개념의 방재시스템이다. 터널 내 화재 시 성층화를 유지하면서 화재연과 온도의 역류현상을 억제하기 위한 최소풍속을 임계풍속(Critical Velocity)이라 한다.

우리나라 도로터널 방재시설 설치지침에서는 Kennedy가 제시한 경험식(Kennedy, W.D., 1996)과 Y. Wu에 의해서 제시된 구배보정계수(Y. Wu, 2003)의 적용을 원칙으로 하며, Tetzner가 제시한 β 값(D. Tetzner, 1999)을

고려하여 CFD해석하여 결정한다(국토해양부, 2009). 임계풍속에 민감한 영향을 미치는 β 값은 김효규 등(2004)이 발표한 ‘임계속도와 방재팬 용량의 상관관계 연구 - 도로터널의 방재팬 특성도 연구’의 논문에서 제시한 값 0.5로 적용하였다(김효규, 2004). 이에 따른 본 연구의 분석 대상터널에서의 임계풍속은 도로터널 방재시설 설치지침의 임계풍속 계산식을 적용한 결과 2.48 m/s이다. 터널 내 각 구간에서의 임계풍속 확보여부를 분석하기 위하여 화원의 상류지점, 화원 및 하류지점 3개 지점에서의 임계풍속 분석결과를 그림 6에 나타내었다. 화재 발생 후 가동시작 시간, 팬 설치 위치에 관계없이 방재용 제트팬 가동 후 1분 이후에는 임계풍속이 발현됨을 알 수 있다(김두영, 2008).

2.4 방재용 제트팬 가동 효과 분석

그림 7~9는 터널 내 화재지점 500 m에서 화재가 발생한 경우, 각각 0분, 2분, 4분, 6분 경과 시에 방재팬을 가동한 후, 화재연 역류거리, 고온 열기류 역류거리 및 가시거리가 20 m 이하(상류) 분포를 나타낸다. 확산거리가 점차적으로 증가하다가 방재팬 가동 후, 기류속도가 점차 증가함에 따라 확산거리가 감소한다. 팬 가동 후 1분 후에는 초기가동시간에 관계없이 임계풍속이 확보되므로 화재에 의해 발생한 화재연 및 온도 제어가 가능한 것으로 나타난다.

화재발생 지점이 입구갱구로부터 각각 250 m, 500

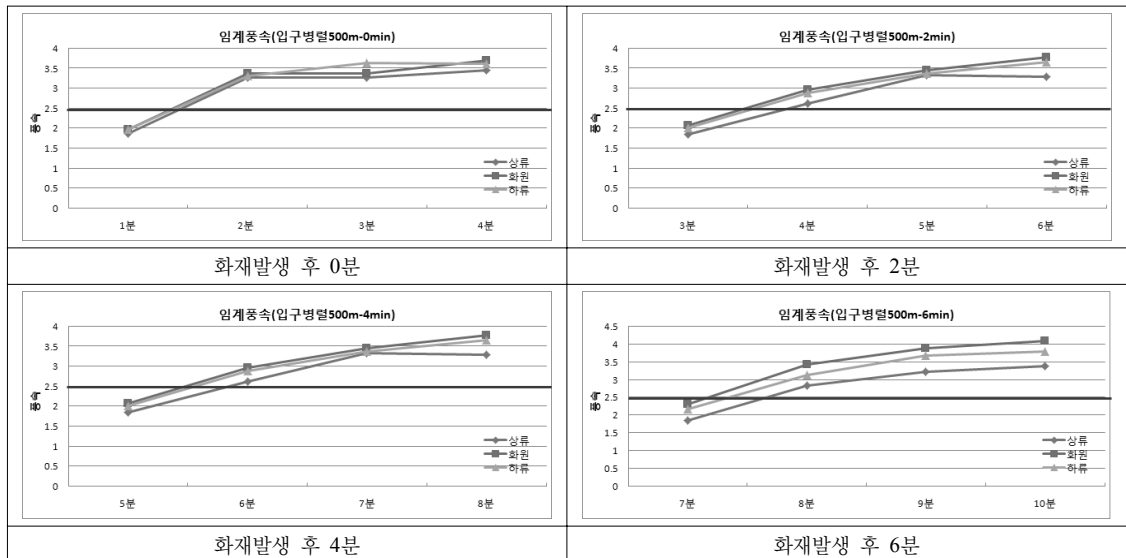


그림 6. 터널 내 화재지점 500 m, 화재발생 후 방재팬 가동시의 임계풍속 확보 여부(임계풍속 2.48 m/s, 방재팬 입구 4대 설치)

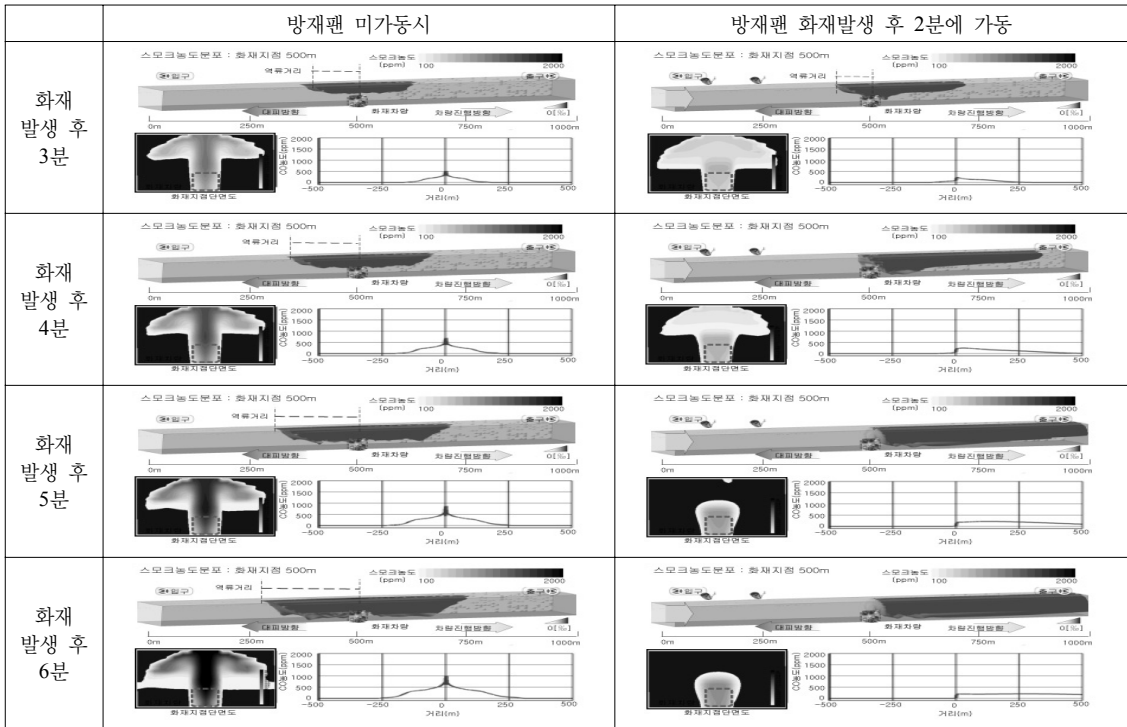


그림 7. 화재지점 500 m, 화재발생 2분후 가동시 화재연 역류거리(방재팬 입구 4대 설치)

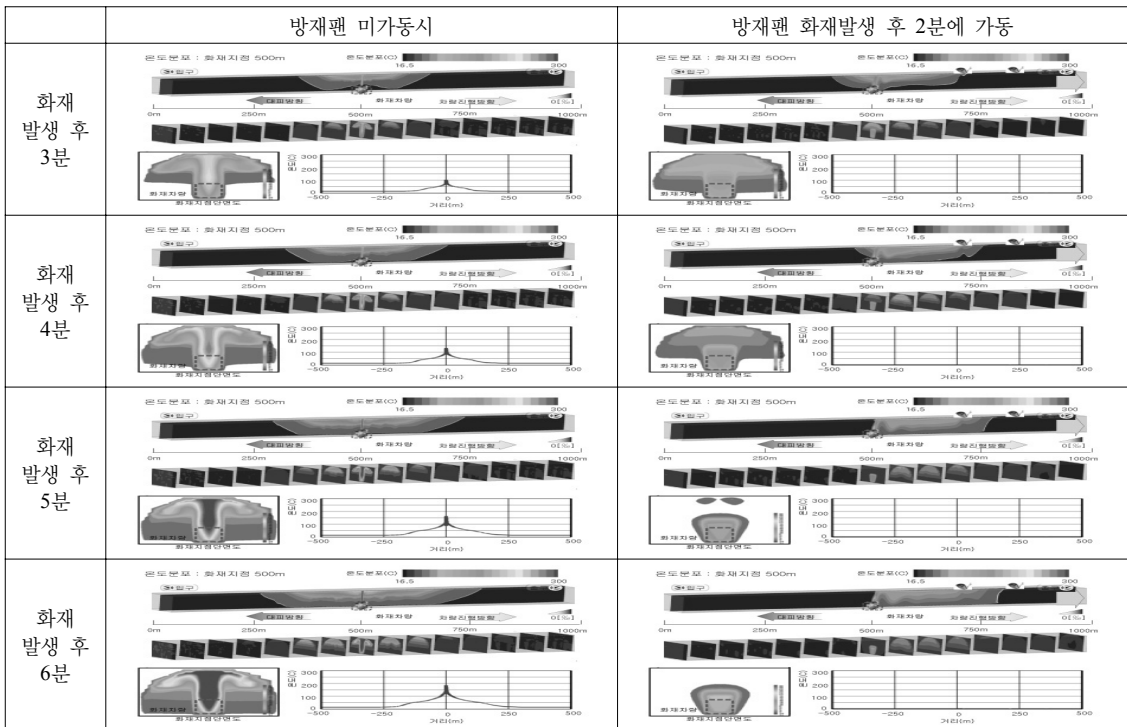


그림 8. 화재지점 500 m, 화재발생 2분후 가동시 열기류 역류거리(방재팬 출구 4대 설치)

m, 750 m일 경우의 피난거리와 화재연 역류거리, 열기류 역류거리, 가시거리가 20 m 이하(상류) 구간 분포 및 임계풍속 확보여부를 분석하여 대피시 가장 중요한 영향을 미치는 변수를 분석하였다.

표 5에서는 화재지점 500 m에서 방재팬을 가동하지 않은 경우의 결과이며, 표 6에서는 입구 갱구부근에 4대의 방재팬을 화재발생 2분 후 가동한 결과를 나타낸

다. 방재팬을 가동하지 않은 경우에는 화재연 역류거리, 고온 열기류 역류거리 및 가시거리가 20 m 이하(상류) 구간의 길이 모두 피난거리보다 길므로 대피경로상의 환경이 안전하지 못하다. 그러나 방재팬을 2분 후에 가동한 경우에는 터널 전 구간에서 임계풍속이 확보되며 대피가능거리 보다 화재연, 열기류, 가시거리 악화구간 확산 거리가 짧으므로 안전한 대피경로의 확보가 가능



그림 9. 화재지점 500 m, 화재발생 2분후 가동시 가시거리가 20 m 이하(상류) 구간분포(방재팬 입구 4대 설치)

표 5. 방재용 제트팬 가동하지 않을 경우(화재지점 500 m)

화재 발생 시간	피난 거리 (m)	화재연 역류 거리 (m)	고온 열기류 확산거리 (m)	가시거리가 20 m 이하(상류) 범위(m)	풍속 (m/s)	임계풍속 확보여부	안전 여부	안전성 결정변수
1분	0	47	66	62	0	No	No	열기류 확산
2분	5	98	119	121	0	No	No	가시거리 악화
3분	55	132	155	165	0	No	No	가시거리 악화
4분	111	164	191	206	0	No	No	가시거리 악화
5분	166	195	222	237	0	No	No	가시거리 악화
6분	224	226	253	272	0	No	No	가시거리 악화

표 6. 화재발생 2분 후 방재팬 가동한 경우(화재지점 500 m)

화재 발생 시간	피난 거리 (m)	화재연 역류 거리 (m)	고온 열기류 확산거리 (m)	가시거리가 20 m 이하(상류) 범위(m)	풍속 (m/s)	임계풍속 확보여부	안전 여부	안전성 결정변수
3분	55	82	94	92	2.01	No	No	열기류 확산
4분	111	25	54	45	2.88	Yes	Yes	열기류 확산
5분	166	0	0	4	3.37	Yes	Yes	가시거리 악화
6분	224	0	0	3	3.65	Yes	Yes	가시거리 악화

해진다.

중규모터널 내 화재시 방재용 제트팬을 가동한 경우에 화재연 역류거리와 열기류 역류거리, 가시거리 악화 구간길이 및 임계풍속 확보여부 등에 의한 위험도를 분석한 결과 화재발생시 평균 화재연 역류속도는 0.63 m/s, 평균 열기류 확산속도 0.7 m/s, 평균 가시거리의 전파 속도 0.76 m/s로 나타났으며, 이에 따라 안전 대피측면에서 가시거리 악화에 따른 위험도가 가장 큰 것으로 추정된다. 방재팬을 가동하였을 경우, 가동 후 1분 경과 시부터 임계풍속이 확보가 되므로 화원으로부터 입구 갱구 방향으로의 안전한 대피가 가능하다.

3. 결론

터널 내 화재발생시 신속한 방재팬의 가동은 초기의 안전한 대피환경 조성 및 대피를 위하여 가장 중요한 과제이다. 중규모터널 내 20 MW규모의 화재발생시 방재팬의 초기 가동 지체시간에 따른 화재연 역류거리, 고온 열기류 역류범위, 가시거리 분포, 임계풍속 확보여부, 대피시간 등을 CFD 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 화재발생시 평균 화재연 역류속도는 0.63 m/s, 평균 온도 역류속도 0.7 m/s이며, 평균 가시거리 20 m 이하구간의 확산속도는 0.76 m/s로 터널 내에서 가시거리 악화에 따른 위험도가 가장 큰 것으로 추정된다.
- (2) 임계풍속은 2.48 m/s이며, 방재팬을 가동할 경우는 화재발생지점, 방재팬 설치 위치에 관계없이 1분 이후에는 모든 경우 임계풍속을 확보되므로 안전대피가 가능하다.
- (3) 분석대상 터널에서 방재팬을 가동하지 않은 경우에는 대피가능거리보다 화재연, 열기류, 가시거리 악화 구간 거리등이 상대적으로 길므로 안전한 대피가 불가능하다.

- (4) 방재팬을 화재발생 후 2분 이내에 가동한 경우에는 임계풍속을 확보하며 안전한 대피환경이 조성된다. 따라서 본 연구결과 중규모터널에서 20 MW 규모의 화재발생시 방재팬의 초기 가동시간은 2분으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. 김효규, 김은수, 김남영, 이창우(2004), “임계속도와 방재팬 용량의 상관관계 연구-도로터널의 방재팬 특성도 연구”, 터널기술 제6권 4호, pp. 269-278.
2. 이인모 등(2004), “도로터널 방재시설(비상시설) 설치기준 개정 작성을 위한 연구”, 건설교통부 학술정보.
3. 김두영, 김상현, 최판규, 이창우(2008), “중규모 터널 방재팬 최적가동시간 결정연구”, 한국지구시스템공학회 2008 추계학술발표회, pp. 205-208.
4. 한국건설기술연구원(2008), “중규모 터널 방재시설 설치 및 운영 개선방안연구 최종보고서”, 한국도로공사.
5. 국토해양부(2009), 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침.
6. 김두영(2009), “중규모 도로터널내 방재팬 적정가동시간 연구”, 동아대학교 에너지자원공학과 석사학위논문.
7. 국토해양부(2010), 도로설계편람(터널편).
8. Federal Highway Administration, US DOT(1995), The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program.
9. Kenndy, W.D. and Parsons Brinckerhoff(1996), “Critical velocity: Past, Present and Future”, paper presented in the One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels.
10. D. Tetzner, R. Pollak and M. sippel(1999), “Critical Velocity - Comparative assesment of test results and CFD simulation”, International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, s, pp. 181-190.
11. Y. Wu and M. Z. Abu Bakar(2000), “Control and smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity”, 10th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle s, pp. 639-647.

12. Y. Wu(2003), "Smoke control in tunnels with slope using longitudinal ventilation effect of tunnel slope on critical velocity", 11th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle s, pp. 77-86.
13. Michaux, G., and Vauquelin, O.(2006), "Analysis of the Smoke Plume Behavior Downstream a Fire in a Longitudinally Ventilated", 12th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle s, pp .47-60.
14. Schirmer Engineering Co.(2008), Minimum Performance Requirements for Smoke Alarm Detection Technology, Task Group Report, pp. 9-12.



이 창우

1978년도 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1983년도 미국 펜실베니아주립대학교 대학원 자원환경공학 및 OR 공학석사
1986년도 미국 펜실베니아주립대학교 대학원 자원환경공학 및 OR 공학박사

Tel: 051-200-7769

E-mail: cwlee@dau.ac.kr

현재 동아대학교 지구환경공학부 교수



김 두 영

2008년도 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사

2010년도 동아대학교 대학원 에너지자원공학과 공학석사

Tel: 051-200-7764

E-mail: rlaendud02@daum.net

현재 동아대학교 지구환경공학부 박사과정