

철도장대터널의 대피통로 최적간격에 관한 연구

A Study of Proper Space between the Escape Tunnels in the Long Railway Tunnel

김동기* 박병은** 나상주*** 박종관****
Kim, Dong Gi Park, Byung Eun Rha, Sang Ju Park, Jong Kwaun

ABSTRACT

When a fire takes place, the escape tunnel which could prevent passengers and the crew from disasters would be most important facility among railway tunnel facilities for prevention of disaster. A shorter space between the escape tunnels is much better for safety because of short escape time. The establishment of short space escape tunnels(driftways) in the single track parallel tunnel is much easier. The establishment of long space escape tunnels(inclined shafts, vertical shafts) in the double track is much more advantageous economically. We, therefore, compared the movement time of smog originated from fire with the escape time of the crew and passengers for setting up the best space between the escape tunnels in the double track tunnel. We could calculate the best space between the escape tunnels in the double track tunnel properly by computer simulation.

1. 서론

산업이 급성장하고 지역간 교류가 활발해지면서 여객 및 화물을 정기적으로 수송할 수 있는 열차의 수요가 세계적으로 증가해왔다. 특히, 고속철도가 등장하면서 지형적인 특성으로 인한 장대철도 터널이 많이 증가하여 열차 운행에 따른 사고발생 가능성도 커지고 있다.

터널내 사고는 크게 탈선, 충돌, 화재의 세가지 유형으로 분류될 수 있다. 그중, 터널내 화재발생 사고는 환경면 폐쇄공간에서 대형 인명사고로 이어질 가능성이 높기 때문에 화재에 대한 적정 수준의 방제시설 및 설비가 요구되었다. 특히 터널내 화재 발생시 폐쇄된 공간에서 체난을 최소화하기 위해서는 열차에 탑승한 승객 및 승무원의 안전을 확보하는 것이 가장 중요한 안전대책이다. 일반적인 방제대책은 열차를 터널 밖으로 탈출 시킨 후 탑승한 승객을 안전한 지역으로 대피시킨 후 소화작업을 하는것이 효율적인 방제대책이라 생각된다. 그러나 화재시 열차가 터널내에서 정지한 사고가 발생하였을 경우에는 승객을 터널내에서 하차시켜 신속하게 대피시킬수 있는 대피통

- * 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, 유신코퍼레이션 전부, 정회원
- ** 한국철도시설공단 부장, 정회원
- *** 코오롱건설주식회사 T/K팀장, 정회원
- **** 서울산업대학교 교수, 정회원

로가 필요하다. 이 경우에는 터널내 어떠한 장소에서 화재사고가 발생하더라도 연기의 유동시간보다 더 빠르게 승객들이 피난 할 수 있도록 대피통로가 적절한 간격으로 설치되어야 한다.

장대 철도터널에서의 적절한 대피통로의 간격 산정방법은 우선 터널연장이 15km 이상의 초장대터널의 경우 반드시 단선병렬터널로 계획하여 단선터널 사이마다 대피통로(횡갱)를 필요한 간격으로 설치 할 수 있도록 한다. 5km이하의 터널에는 터널 입출구로 쉽게 피난 할 수 있도록 안내하는 기본적인 시설만 하고 있다. 5km에서 15km까지의 장대터널은 단선병렬 터널로 계획하면 방재적인 측면에서는 확실하게 유리하다. 그러나 터널 계획과정에서 환경훼손, 지장물, 민원, 경제성 등의 여러 가지 제반요소를 고려할 경우 적절한 방재수준만 확보 할 수 있다면 복선터널로 계획하는 것이 유리할 경우가 있다. 이 경우 적절한 방재수준이란 대피통로(사갱, 수직갱)의 간격을 얼마로 할 것인지가 중요한 관건이다.

대피통로의 적절한 간격에 대한 연구방법은 단선병렬 터널의 경우 문헌을 중심으로, 복선터널의 경우 컴퓨터 가상시abf레이션과 실험을 통하여 연기의 발생현황, 연기의 유동속도, 승객의 피난속도 등 여러 가지 상황을 비교 분석 하였다.

2. 선진외국의 방재 사례

철도터널 방재시설의 수준은 수송물질, 터널 연장, 동력, 설치위치 등에 따라 달라지게 되는데 일반적으로 선진국들의 예를 살펴보면, UIC (International Union of Railways, 국제 철도 연맹)에서와 독일 연방 철도청 기준(1997년)에서는 객화 혼용을 기준으로 하고 있으며, 프랑스 철도 기준(1998년)에서는 도심지, 객화 혼용, 여객 전용으로 구분하고 있다. 일본의 경우에는 지형적 여건으로 인해 장대터널(5 km 이상)이 프랑스나 독일보다 훨씬 많이 존재하는데 비하여 기본사항(비상연락, 소화기, 비상조명 및 전력, 운행수칙)만 규정하고 있으며 세이칸 터널(연장 54 km)과 같이 특수한 경우에는 해당 터널에 대한 방재위원회를 구성하여 터널 안전에 대한 추가 대책을 마련하고 있다. 이는 터널내에서 열차화재가 발생하였을 경우 정차하여 대피 및 구조활동을 기본 개념으로 하는 유럽과는 달리 열차를 터널 밖으로 유도하여 승객을 대피시키고 초기 소화를 하는 시스템을 도입하고 있을 뿐 아니라 수십개에 이르는 장대터널마다 방재 설비를 강화할 경우 발생하는 시설비 및 유지관리비 등이 막대하게 지출되기 때문이다.

어떤 시설물이든 나라에 따라 차이는 있지만 그 나라의 경제 수준, 시설물의 투자비용 및 효과 등을 고려하지 않을 수 없기 때문에 안정성의 수준은 높으면 높을수록 좋겠지만 경제성이 불리하므로 유사 국가의 기준을 토대로 하여 적절하게 수립하는 것이 바람직 할 것이라 생각된다. 따라서, 우리나라의 경우 일본과 마찬가지로 산악지형의 비중이 높아 장대터널이 많이 발생하기 때문에 방재의 기본 방향은 사고 발생시 터널 밖으로 열차를 끌어낸 후 승객을 대피시키는 시스템으로 하는 것 적절하다고 생각된다.

3. 외국의 장대터널 대피통로 간격 사례

본문에서는 화재안전대책 중 대피촉진에 필요한 대피통로에 대하여 기술하고자 한다. 대피통로는 복선터널과 단선병렬터널의 경우에 따라 간격이 상이하다. 외국의 주요터널의 대피통로 현황은 [표1]에 정리하였다. Simplon 터널 횡갱간격의 설정근거는 화재안전 문제가 아닌 터널환기효율의 필요성 때문이다. 요즘에는 주로 안전관점에서 횡갱간격을 설정하고 있다. 세계각국의 25 km 이상의 초장대 철도터널의 경우는 {표}1에서와 같이 횡갱 간격은 325 m에서 400 m로 매우 가깝게 한다. 5 km 이상의 장대터널중 Vereina 철도터널과 Firenzuola 철도터널은 탈출 사갱을 설치한 복선터널이다.

[표2] 장대 철도터널의 횡갱간격 사례

터널	길이	국가	개통년도	횡갱간격	비고
Simplon	20 km	스위스	1906	500 m	불규칙 횡갱간격(터널내 환기효율을 높이기 위해 횡갱설치)
Channel	50 km	영국	1994	375 m	3번째 터널(비상터널), 종류식 환기
Vereina	19 km	스위스	1999	-	단굴터널, 협궤(승객탈출용 사개의 연장 합이 약 10 km)
Firenzuola	14 km	이탈리아	2006	-	복선터널(승객탈출용 사개의 연장 합이 약 7 km)
Gotthard Base	57 km	스위스	2013	325 m	구난역 2개소
Lötschberg Base	35 km	스위스	2007	333 m	구난역 1개소

4. 단선병렬 터널의 적정 대피통로 간격

스위스 GRUNER사에서 제시한 '위험도 및 횡갱 설치간격 계산법'이란 도표를 이용해서 위험도 등급에 따라 장대터널의 횡갱 설치간격을 적절하게 설정 할 수 있다. 이 경우 장대터널의 유효길이와 일일 교통량을 이용하여 대피통로의 간격을 설정 할 수 있으며 장대 터널 내에 종류식 등의 기계적 환기장치를 설치 하게 되면 한 단계 아래의 위험도를 적용 할 수도 있다. 일반적으로 500m 정도를 권장 하고 있다.

5. 복선 터널의 적정 대피통로 간격

5.1 터널 화재 방제 시뮬레이션

1) 화재상황에 따른 연기 및 피난자의 이동

터널내로 확산되는 연기유동은 일반적인 외부환경에서의 연기유동과 다른 거동을 보인다. 부력 효과에 의하여 이동된 공기는 고도가 높은 방향으로 이동하며, 이러한 열 유동은 대피중인 승객에게 직접적인 영향을 미치게 된다. 터널 내에서의 화재성상은 [표2] 에서와 같이 화재열차의 진행 방향과 종단경사에 의하여 대략적으로 파악할 수 있다.

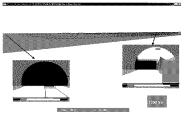
[표2] 화재상황에 따른 연기 및 피난자의 이동

열차진행방향	초기연기방향	승객대피방향	비고
오르막방향(↗)	열차진행방향	가까운 대피통로방향	역류발생가능성 적음
내리막방향(↘)			역류발생가능성 큼
기류방향(→)	열차진행방향	열차진행과 무관한 기류역방향	기류의 세기에 따라 역류발생가능성 있음
기류역방향(←)	교통환기력이 기류풍력 초과시 열차진행방향		교통 환기력 해제시 열차진행반대방향으로 역류가능
	교통환기력이 기류풍력 미달시 열차진행반대방향	열차진행반대방향으로 역류가능	

2) 연기유동 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 결과를 요약하면 기류가 형성되지 않은 상황에서 30분경에 하강하며 50분경에는

양방향으로 500m까지 확산되고, 고속열도차량의 최대발열량 45MW까지 도달하는 45분경 까지 500m정도 확산되므로 화재발생후 50분경까지는 터널내 연기의 확산이 비교적 빠르지 않게 진행하는 것으로 예측된다. 기류의 임계속도가 2.9m/초 이상이 되어야 연기의 역류를 발생시키지 않고 기류방향으로 연기를 유도할 수 있는 것으로 예측된다.



[그림1] 연기유동 시뮬레이션



[그림2] 연기 유동 실험

3) 피난시간과 연기오염시간과 비교

피난시간과 연기유동 시뮬레이션 결과에 의한 예측결과를 비교시 승객대피방향은 터널내 환경에 따라 기류 미발생시에는 가까운 쪽에 있는 대피통로방향을 선택하여야 하며, 기류 발생시에는 기류방향과 반대방향을 위치한 대피통로로 피난방향을 설정해야 한다. 그러나 최악의 경우인 기류방향으로 피난방향을 설정한 경우는 산정해서 안전성을 평가하여야 의미가 크다. 최악의 대피시나 리오는 화재발생열차가 2개의 인접 대피통로간 위치한 선로의 2/3 지점에 정차하고 기류가 2.9m/초의 세기로 가까운 거리 대피방향으로 형성될 경우이다. [표3] 에서 피난속도시간과 연기유동 예측시간 대비에 의한 대피안전성 평가 내용을 요약하면

[표3] 피난시간 대 연기유동예측시간 대비에 의한 대피안전성 평가

시간	대피위치 (화재 이격거리)	연기(80℃) 유동상태(연기선도위치)				대피안전성 평가
		기류 미발생		기류 2.9m/s 발생		
		연기 확산방향	선도연기위치	연기 확산방향	선도연기위치	
0초경	화재발생인지	순방향과 역방향 양방향	연기차량내 충전	기류 방향으로 연류	연기차량내 충전	안전함
30초경	반응개시		연기차량내 충전		연기차량내 충전	안전함
5분경	하차완료		연기차량내 충전		연기차량내 충전	안전함
6분경	200m (열차를 벗어남)		연기차량내 충전		연기차량내 충전	안전함
10분경	330m		연기차량내 충전		연기차량내 충전	안전함
11분경	376m		연기유출시작		연기차량내 충전	안전함
12분경	422m		25m		연기유출시작	1.688% (안전함)
15분경	560m		90m		2m	622% (안전함)
17분경	652m		130m		50m	502% (안전함)
20분경	790m		190m		180m	416% (안전함)
25분경	1,020m		250m		460m	237% (안전함)
30분경	1,250m		310m		660m	203% (안전함)
35분경	1,480m		370m		900m	164% (안전함)
40분경	1,510m		430m		1200m	125% (안전취함)
57분경	2,000m		600m		2,000m	100% (대피불가능 할 초래)

터널내 기류가 없는 상태에서 화재발생시 선도연기(80℃기준)는 약 1m/s 의 속도로 확산되는 형태로서 1시간후 600m정도를 이동한 반면에 열차에서 하차한 승객은 후미 탑승객 중 노약자를 기준으로 하여도 발화점에서 약 2km의 이동을 끝마쳤을 것으로 예측된다. 터널내 기류가 2.9m/s 의 속도로 발생한 상태에서 화재발생시 선도연기(80℃기준)는 30분경에 660m, 한 시간 후에는 약 2,000m 정도 확산된다. 따라서 200%의 안전율을 감안한 경우라면 어떠한 조건에서도 승객의 안전하게 대피할수 있다고 생각된다. 이 경우 대피시간은 30분, 대피거리는 1,250m로서 대피통로의 간격을 2,500m로 정할 수 있다.

5.2 고속철도의 대피통로

경부고속철도의 복선 터널단면을 기준으로 연장 15km의 터널을 가정하였고, 터널내 운행하는 열차는 여객 차량의 모든 부재가 불연성으로 처리되었음을 감안하여 화재시물레이션을 수행하였다. 그 결과에 따라 대피 가능한 시간을 산정하고 그 범위내에서 대피 통로간 간격이 설정되도록 하는 것이 타당하나 절대적인 대피안전성을 확보하기 위해 운행열차의 화재시 특성을 고려하여 다음과 같은 계산식을 적용하여 고속철도 설계기준에서는 복선터널의 간격을 결정 하도록 하였다.

1) 대피통로간 중앙부에서 화재열차 정차시 일방향 탈출시간 산정식은 다음과 같다.

① 운행열차의 터널내 화재발생시 피해예상시간을 60분으로 산정

- 열차의 차량전체길이(380m) 내 선도연기가 확산되는 시간 : 10분
- 열차의 내부 착화시 차량외부로 연기가 분출되는 시간 : 15분
- 발화점으로부터 양방향으로 선도연기가 60분경에 도달하는 거리 :
연기시물레이션 결과에 의하여 터널내 기류가 없을 경우 0.6km이내,
터널내 기류가 2.9m/s 발생시는 1.5km.

② 터널내 피난 보행속도를 국제기준에 따라 성인을 1.0m/s, 노약자를 0.7m/s로 가정한다.

③ 피난가능시간을 인명위해 가능한 연기가 도달거리 1,250m를 노약자의 기준으로 탈출하는데 소요되는 시간 : 30분 (1250m ÷ 0.7m/s = 30분)

④ 소요피난시간은 아래와 같이 산정 가능함

열차정차소요시간(3분) + 피난행동개시시간(1분) + 열차하차시간(3분) + 터널보행이동시간(30분) + 여유시간(3분) = 소요피난시간 (40분)

따라서 대피통로간 이격거리는 일방향 탈출소요거리의 2배 이내에서 결정 : 2.5km

터널내 화재열차 정차시 피해예상시간 : 60분

승객의 대피통로의 탈출시간 : 40분

안전율(a) = 1.5 로 적정함(60분/40분 = 1.5)

이에따라 일반적인 장대터널은 대피통로 간격을 2.5 km 이내로 제한 하는것이 안전하다.

그러나 산악지형으로서 부득이하게 대피통로를 2.5km 간격으로 설치하지 못하는 터널은 최대 5 km간격 이내에서 대피통로가 설치되도록 규정하고 연기로부터 일정시간동안 대피할 수 있는 임시대피소를 500m 마다 추가하도록 기준에 설정하였다.

임시대피소를 추가 설치한 이유는 터널내 성인의 평균보행속도를 1.0 m/sec 로 가정하고 2.5km에 설치된 대피통로로의 피난보행시간을 측정해 보면 약 40 분이 소요되어 어느정도 안전성은 확보되나 노약자나 등 대피속도가 느린 승객들은 상대적으로 보행속도가 감소되기 때문에 터널 중간에 500 m 마다 임시대피소(기재갱)를 설치하였다.

6. 고찰

터널을 계획할 경우에는 지형적 여건, 시공조건, 방재 대책, 경제성, 민원 등 여러가지 요소를 종합적으로 검토하여 가장 적합한 형식을 선택하여야 한다. 이렇게 결정된 터널 형식이 단선 병렬 터널이나 서비스 터널이 있는 복선 터널의 경우에는 두 병설된 터널 사이로 연결통로를 설치함으로써 화재지점으로 부터 대피할 수 있는 거리를 최소화하기 용이하지만, 우리나라와 같이 복선터널만으로 이루어진 경우에는 대피통로 간격을 축소시키는 것이 쉬운 일이 아닐 것이다. 특히, 표고차가 큰 산악지형에서는 환경훼손, 경제성, 민원 등의 제약요소가 클 것으로 생각된다.

유럽에서도 철도터널의 대피통로간격을 줄일 수 없는 경우에는 대피통로 간격을 늘여주는 대신에 이에 상응하는 사고경감 방안을 추가로 설치하여 안전에 대비토록 하고 있다. 이 경우에는 가상 시뮬레이션 등을 통하여 대피가 가능한지를 판단하며 인명피해가 최소화될 수 있도록 시설물을 보완하는 것이다. 프랑스 마르세이유(Marseille) 터널의 경우 산악지형에 연장이 7.8 km에 달하는 복선 장대터널임에도 불구하고 대피통로적인 수직갱이 한 개밖에 설치되어 있지 않은 대신 소화설비나 구조용 장비 등으로 안전에 대비하고 있다.

우리나라 경부 고속철도의 경우에도 환경훼손, 지장물, 민원, 경제성 등 여러 가지 제약요소로 인하여 복선터널로 건설되어 있으며 대부분 5 km이상의 장대터널에는 시공성을 향상시키고 공사 기간을 단축시키기 위해 5 km 이하의 간격으로 공사용 터널인 사갱을 설치하였고 공사 후에는 이 사갱을 대피통로로 활용하고있다. 대피통로간 간격이 5 km 인 경우 터널 내 대피 속도를 2.0 m/sec로 가정하고 중앙으로부터 대피시간을 측정해 보면 약 20분이 소요되어 UREKA 열차 화재 실험에 의한 자구행동시간인 20분에 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 노약자나 어린이 등 대피 속도가 느린 승객들은 2.0 m/sec로 대피하기 어렵기 때문에 터널 중간에 500m 마다 일시적인 대피가 가능한 임시대피소(기재갱)을 설치하는 것이 안전측면에서 유리하다.

7. 결론

철도장대터널의 대피통로간격에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 통한 자료를 이용하여 분석 비교한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- 1) 15km이상의 초장대 터널의 경우는 단선병렬 터널에 의한 대피통로(횡갱)를 계획하여야 하며, 그 간격은 터널의 연장과 열차 통과량을 감안하여 정할 수 있다.
- 2) 5km 이상 15km이하의 장대 터널의 경우 가능한 단선병렬로 계획하되 지형적 특성, 환경문제, 민원, 경제성 등을 고려하여 복선으로 계획 할 경우에는 현지실정에 맞는 시뮬레이션을 통하여 대피통로(사갱, 수직갱)의 간격을 정하는 것이 적절하다고 생각된다..
- 3). 5km 이내의 터널은 승객이 터널 시 종점을 으로 신속하게 대피할 수 있는 기본적인 시설만 하는 것이 적절하다.

참고문헌

- [1] 한국고속철도건설공단 (2003). 고속철도 터널방재기준 작성 보고서.
- [2] 건설교통부 한국건설교통기술평가원(2003). 장대 철도터널 화재방재기술 및 환기공조시스템개발.
- [3] 김 동기, 박 병은 외 (2004. 4). 고속철도 터널 방재기준 제정 배경및 해설, 한국철도학회 춘계학술대회논문집.
- [4] 김 동기외. (2003. 12)고속철도 터널에서의 화재열차 정차시 피난및 연기확산 시뮬레이션을 통한 대피안전성 평가, 대한토목학회 제3회 터널시공기술 향상 대토론회 논문집.
- [5] UIC 779-9 Safety in Railway Tunnels