

수도권 광역 급행철도의 환기구 간격 검토

김 남 영^{*†}, 이 항^{*}, 반정준^{*}

삼보기술단 상무^{**}, 삼보기술단 부장^{*}, 삼보기술단 대리^{*}

Verification of distance between ventilation shafts in the GTX (Great Train Express) project.

Nam Young Kim^{*†}, Harnng Lee^{*}, Jung Jun Ban.

Department of Mechanical & Electrical, Managing Director, Sambo Engineering CO., LTD^{†}*

Department of Mechanical & Electrical, General Manager, Sambo Engineering CO., LTD^{}*

Department of Mechanical & Electrical, Engineer, Sambo Engineering CO., LTD^{}*

1. 서론

대심도 장대 철도터널의 탄생 배경은 수도권급행철도사업이다. 그 사업은 자동차나 기존 광역철도 보다 빠른 교통서비스를 목표로 계획되고 있다. 열차의 표정속도를 증가시키기 위해 대부분의 노선은 지하 40 m 이상의 대심도이며, 정거장간의 거리가 10 km 이상의 장대터널로 구성되었고, 준고속 열차(180 km/h)가 운행될 예정이다. 이러한 조건은 화재시 대피 및 제연 등 안전측면에서 불리하고, 평상시에도 원활한 환기를 위해 적정한 환기구 간격은 아주 중요하다.

따라서, 본 고는 장대 터널의 환기구 간격에 대한 최적 설계안을 제시하고자 한다.

2. 터널 환기구 계획

2.1 개요

지하철의 터널 환기구는 평소 운행하는 열차의 발열량을 제거하는 환기구 역할과 공사용 장비반입, 유지관리요원의 출입, 유사시 지상으로의 대피를 위한 대피통로로 이용될 수 있다. 특히 정거장 간의 거리가 긴 장대터널이므로 화재차량이 터널 내부에 정차할 확률이 높아 지상으로 피난할 수 있는 대피통로가 안전상 필수적이다.

정거장간 거리가 짧은 도심 지하철 또는 기존의 광역철도에 적용된 일반철도의 기준 및 사례를 본 터널구간에 적용하는 것은 적절하지 않다. 그러므로 환기구 간격을 대피통로 측면은 QRA 방법으로 검토하고, 환기측면은 환기·제연모드성능·공기유동 및 압력저감 시뮬레이션을 통해 분석하여 적절한 거리를 도출한다.

2.2 설계제원

본선 환기구(대피통로)간격을 설정하기 위한 터널구조물 및 열차운영에 관한 설계제원은 다음의 Table 1과 같다.

2.3 대피통로 간격 검토

Table 1 Design specification of tunnel structure and rolling stock management

2.3.1 개요

대심도 장대 철도 터널이므로 화재시 지상으로의 대피시간이 길고, 화재차량이 터널 내부에 정차할 확률이 높아 위험하므로 관련 사고사례와 설계기준을 분석 검토하여 적절한 간격을 도출하고자 한다.

구분	설계제원	비고		
구조물	본선연장	50 km		
	역간평균거리	10 km		
	최급기울기	25 ‰		
	평균심도	50 m		
	환기구 간격	2.5 km		
	터널둘레	30 m		
	대표직경	8 m		
운영	터널내공단면	60 m ²	터널양측	
	유지보수통로	80 cm×2개소		
	철도차량	전동차 (EMU)		2 M 2 T
	최고운행속도	180 km/h		준고속
	최소운전시각	4.5 분		
	승차인원	474 명/편성		

2.3.2 검토방향

현재 국내에는 본 사업에 정확하게 부합되는 설계기준이 없는 것으로 조사되었다. 영국과 프랑스 사이의 유로터널과 같이 단선병렬터널과 함께 별도의 서비스터널을 계획하거나, 일본 세이칸 터널처럼 별도의 구난대피소를 계획한다면 방재상 안전도는 향상되지만, 반대로 경제성측면에서 바람직하지 못하다. 그러므로 본 고에서는 정량적 위험도 분석(QRA)을 통하여 적절한 환구의 간격을 검토 한다.

2.3.3 정량적 위험도 분석 (QRA)

정의

정량적 위험도 분석 QRA(Quantitative Risk Analysis)란 사고발생확률(F)과 사망수(N)의 곱으로 정의되며 통계학적 방법에 입각하여 정량적으로 산출하는 기법이다. 구조물에 대한 방재설계를 수행하는 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 기준과 같이 방재기준 및 관련법규를 적용하는 방법이고 다른 하나는 시뮬레이션을 통하여 화재를 재현해 보고, 여기에 알맞은 설계를 수행하는 것이다. 전자를 법규위주의 설계(Prescriptive Design)라하고, 후자를 성능위주의 설계(PBD)라고 한다. 현재 선진국에서는 법규위주의 설계보다는 PBD를 선호하고 있으며, PBD 수행시에는 정량적위험도 분석(QRA)에 의한 설계가 주도적이다.

QRA기법은 지난 20여년에 걸쳐 주로 항공우주, 전자, 원자력발전소 등의 산업분야에서 발달해 왔다.

● 설계기준 (F-N curve)

F-N curve란 Fig. 1에 제시된 ETA에 의한 모든 시나리오에 관하여 사고발생 확률(F)과 위험수준(N)을 도시한 그래프를 의미한다. 현재 정확한 국내의 법적기준은 없으므로, 검토된 기준 중에 상대적으로 가장 엄격한 홍콩기준($10^{-6} \sim 10^{-4}$)을 적용하여 검토한다.

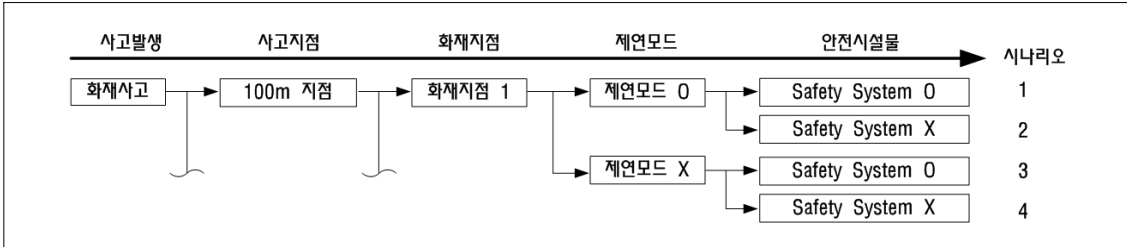


Fig.1 : Event Tree Analysis

● 분석기준 및 조건

현재 국내 지하철 관련 화재규모의 설계기준이 없을 뿐만 아니라 관련된 연소실험 데이터가 없으므로 정확한 화재규모의 추정은 곤란하다. 그러므로 쟁점사항이 될 수 있는 화재규모에 관련하여 싱가포르 CCL 사례, 1995년 수행된 Eureka Tunnel Full Scale 화재 테스트 데이터 그리고 국내 철도터널 설계편람을 참조하여 10MW로 가정하였다. 실제적으로는 향후 불연성 및 난연성의 재질로 인하여 화재규모가 낮을 것으로 판단된다. 그 외 분석기준 및 조건은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2 Analysis standard and condition

구 분	내 용
화재규모	· 화재발열량 10MW에 대한 본선 내 화재위험 분석
제연방식	· 제연모드에 의한 제연팬 가동
화재지점	· 4량기준 열차의 각 지점별 화재특성을 고려하기 위하여 열차 지점별(5지점) 화재 적용
피난방법	· 화재발생 지점에 따른 가장 근접한 피난구역(정거장, 환기구)으로 대피 · 본선부 화재시 모든 피난인원은 Walkway를 통하여 피난 수행 · 초기진화 실패를 고려한 화재특성적용으로 피난은 정차와 동시에 진행되는 것으로 가정
안전설비	· 제연모드에 의한 제연팬 작동 · Way Finding System(비상조명등, 유도표지판 등을 포함한 피난용 시설물) 구축
화재발생	· 본선부 100m 간격으로 화재발생 시나리오를 선정하여 분석 (위치별 최악상황 적용) · 다양하게 발생할 수 있는 화재 지점에 따른 위험도를 포괄적으로 분석

● 시나리오

화재발생 가능구간을 100 m범위로 세분화하여 Table 3과 같이 총 3가지 경우의 3,280개의 시나리오에 관하여 검토하였다.

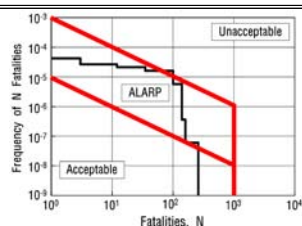
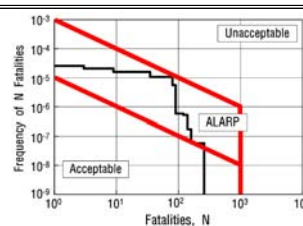
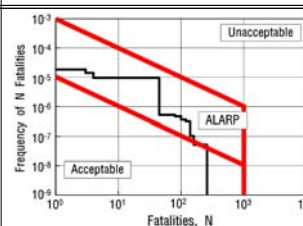
Table 3 : Analysis case

구 분	Case1	Case2	Case3	계
환기구(대피통로)간 거리	3.0 km	2.9 km	2.6 km	-
시나리오	1,160개	1,120개	1,000개	3,280개

● 위험도 분석결과

Case1, 2, 3에 대하여 QRA 수행한 결과는 Table 4와 같다. ALARP는 'As Low As Reasonably Practicable'의 약자로서 경제성에 입각하여 '실행할 수 있는 한 위험도를 낮게'라는 의미이다.

Table 4 QRA result

구분	Case1 (3.0km)	Case2 (2.9km)	Case3 (2.6km)
F-N curve			
리스크 영역	Unacceptable	ALARP	ALARP
리스크(ΣR)	1.2942E-03	8.6040E-04	4.5486E-04
만족 여부	× (Unacceptable)	◎ (ALARP)	◎ (ALARP)

2.3.7 검토의견

진술한 2.2 설계조건을 기준으로 제연팬, 비상조명등, 유도표지판 등을 고려하여 QRA를 수행결과 환기구(대피통로)간격은 최대 2.9 km까지 가능한 것으로 판단되지만, 안전율을 감안하여 2.5 km가 타당할 것으로 판단된다.

향후 승차인원, 노선기울기, 차량시스템 등의 기본가정이 현재보다 악조건으로 계획되면 환기구 최대간격은 감소될 수 있지만, 방화문, 전실, 구난대피소 등의 보다 적극적인 방재시설을 고려한다면 환기구(대피통로) 간격 2.5 km는 합리적인 것으로 판단된다.

2.4 환기 및 제연 측면의 간격 검토

2.4.1 개요

방재측면의 안전성 분석을 통하여 계획된 환기구(대피통로) 간격 2.5 km에 관하여 환기 및 제연측면에서도 적합한지 검토한다.

2.4.2 설계기준

환기적 측면의 터널내 온도는 34.5℃로 유지하여 여름철 최고 설계외기온도 30.5℃ 보다 4℃를 초과하지 않도록 한다. 제연측면은 도시철도건설규칙기준 (국토해양부, 2008. 03. 14)의 제연풍속인 2.5 m/s를 준수한다. 제연팬 선정시 역회전 풍량은 정회전 풍량의 효율 80%를 적용하고, 제연구간은 제연모드 수 4개 (급기2+배기2)을 기준으로 하였다.

2.4.3 환기구 간격검토

● 환기설비 용량

환기(열환경)측면의 환기풍량보다 제연기준풍속 2.5 m/s를 만족시킬 수 있는 제연풍량이 크므로, Table 5와 같이 제연풍량에 의하여 환기설비용량이 선정된다.

Table 5 Review of air flow amount for ventilation

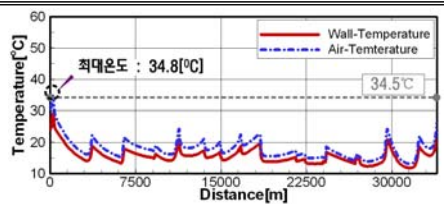
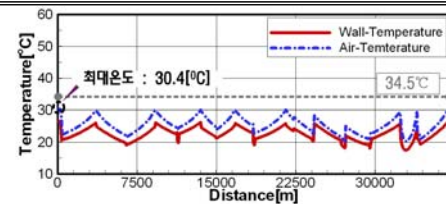
환기 모드	설계 풍량		환기설비 팬 풍량 [m³/s]	환기설비 팬 대수 [EA]	선정
	열환경 기준 [m³/s]	제연 기준 [m³/s]			
배기	6,150	8,200	2,050	4	제연
급기	9,230	12,300	3,075	4	제연
배기	6,150	8,200	2,050	4	제연
급기	9,230	12,300	3,075	4	제연
배기	6,150	8,200	2,050	4	제연

● 환기시물레이션

상하행열차가 정차되는 정거장부근에서 자연환기시 다음의 Table 2과 같이 교통환기력에 의

한 피스톤 환기효과감소뿐만 아니라 가·감속으로 인한 차량의 발열량으로 인하여 기준온도를 초과한다. 그렇지만, 기계환기 시에는 기준온도 34.5°C 만족하는 것으로 검토되었다.

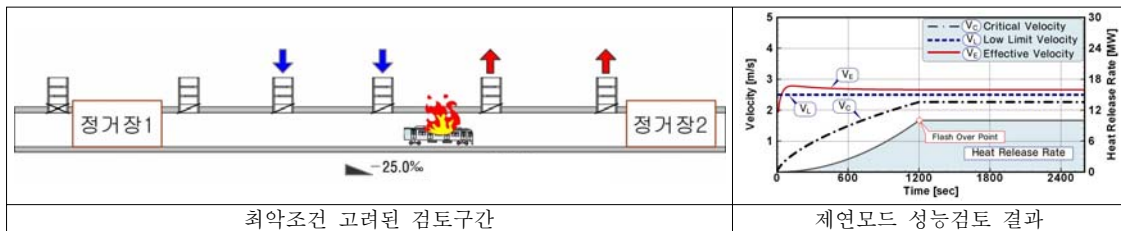
Table 2 Result of ventilation simulation in the station section

구 분	자 연 환 기	기 계 환 기
결과 그래프		
기준온도	34.5°C	34.5°C
최대온도	34.8°C	30.4°C
기준만족	×	◎

● 제연모드 성능검토

Fig. 2와 같은 최급경사 구간을 하방향으로 주행하는 차량에서 화재가 발생되어, 열부력의 진행방향으로 승객이 피난하는 가장 악조건을 검토대상으로 한다.

Fig. 2 Evaluation of smoke mode

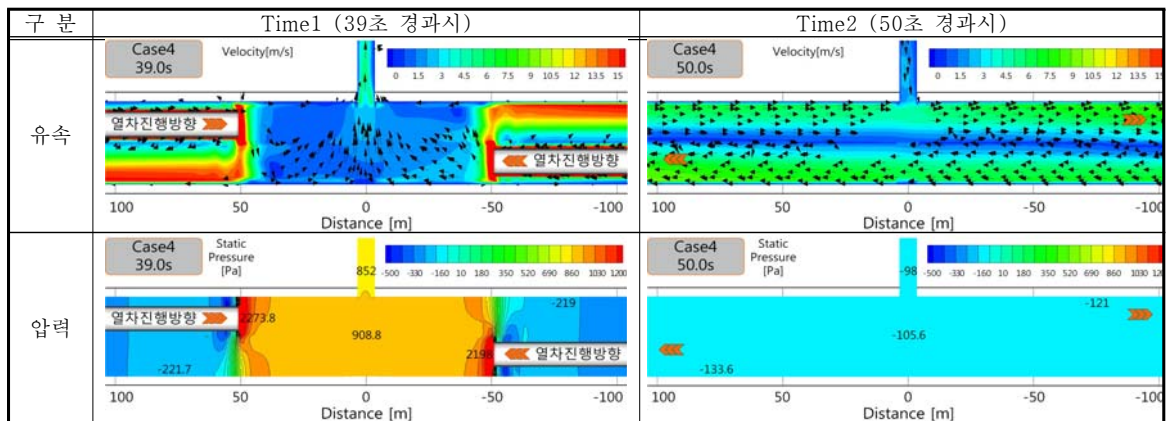


이 경우 제연속도는 2.65 m/s로서 임계속도 2.26 m/s와 기준속도 2.5 m/s를 만족하므로, 환기구(대피통로) 간격 2.5 km 기준은 타당한 것으로 판단된다. 만일 2.5 km 기준 이상으로 환기구 간격이 증가되어질 경우, 환기구 개수가 감소되므로 환기구별 환기 풍량 및 최대배연거리가 증가하여 비효율적일 것으로 예상된다.

● 공기유동 및 압력저감 시뮬레이션 검토

Table 7은 교차 주행할 경우 본선터널내 환기구 ±100 m구간에서의 자연환기시의 공기유동 및 압력저감에 관한 시뮬레이션 결과로서 환기구 간격 2.5 km에 관하여 원활한 공기흐름 및 압력이 형성됨을 보여준다.

Table 7 Simulation of air flow and pressure decrease in the ventilation shaft ±100m section in case of natural ventilation



* 터널내 풍속 15 [m/s]이상, 압력 1200 [Pa]이상 및 -500 [Pa]이하의 영역은 각각 동일한 색상으로 표현

2.4.4 검토의견

환기적 측면을 검토한 결과 준고속 차량운행으로 인한 본선내 교통환기력 효과가 우수하여 정거장 일부 부근 이외에는 자연환기로도 환기가 가능하다. 또한, 제연 풍량이 환기풍량 보다 크므로 제연 풍량 기준으로 본선 환기팬의 용량을 선정하는 것이 바람직한 것으로 검토되었다. 본 고와 같이 정거장간 거리 10 km인 터널인 경우의 환기구 간격은 환기측면보다 방재측면에서 결정된다.

3. 결론

방재 및 환기측면에서 본선터널의 환기구(대피통로) 간격을 검토한 결과 2.5 km 간격이 적정한 것으로 판단된다. 그렇지만, 향후 터널구조물, 차량제원, 운영조건 등의 세부적인 설계조건이 확정되면, 환기구 간격뿐만 아니라 환기구 크기, 관련 방재설비 등에 대한 종합적인 검토가 필요하다. 또한 밀폐된 공간에서 준고속 열차의 운행시 공기저항과의 관계, 이명감, 구조물 내압 측면에서의 검토도 추가되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부, 2005, “철도시설 안전기준에 관한 규칙”
2. 국토해양부, 2008, “도시철도 건설규칙”
3. 국토해양부, 2006, “철도시설 안전세부기준”
4. 국토해양부, 2005, “고속철도 터널방재기준”
5. An International Codes and Standards Organization, 2007, "NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems"
6. Bäckman , Johan., 2002, “Railway Safety - Risks and Economics”, Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Planning.
7. 전덕찬 외, 2004, “정량적 화재위험성평가(QRA) 기법을 적용한 터널방재 설계사례”, 한국지반공학회 창립 20주년 기념 지반구조물 설계·시공사례집
8. 김원국, 2003, “터널 방재설계 최적화에 관한 연구”, 대한토목학회, 터널시공기술향상 대토론회 논문집
9. ISO/TS 13571, 2002, "Life-threatening components of fire Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data"
10. 김도식 외, 2005, “QRA분석을 이용한 철도터널 방재설계 사례” 한국암반공학회, 학술발표회
11. 김동현 외, 2006, “QRA에 의한 철도터널 방재 안전성 평가” 한국철도학회, 학술발표회
12. 이항 외, 2008, “대심도·장대터널의 방재 및 환기계획” 한국터널공학회, 학회지