

Tunnelling Technology

철도터널의 이명감 및 미기압 평가에 관한 연구



조형제
(주)범창종합기술
상무



한 철
현대산업개발(주)
부장



서성한
현대산업개발(주)
과장



신인섭
(주)단우기술단
이사



김종원
(주)범창종합기술
차장

1. 서론

철도운송은 타 운송수단 보다 에너지 효율성, 친환경성, 안전성 등의 측면에서 일반적으로 우수한 것으로 알려져 있으며, 최근 부각되고 있는 그린에너지 운송수단으로 각광 받고 있다. 현재 국내에서는 경부고속철도의 2단계 구간 개통, 호남고속철도의 설계 및 건설, 기존철도노선에 대한 선형개량 사업이 활발히 진행되고 있으며, 특히 KTX 및 KTX 산천 등 고속열차 노선의 증가가 주목할 만 하다.

이러한 고속열차의 터널내 진입시 터널에는 압축파, 팽창파 등의 복잡한 압력 전파 양상이 전개되며, 일부의 압력은 차량의 기밀도에 따라 내부로 전파되어, 승객의 귀에 불편함을 일으키게 되고, 일부는 터널 외부로 방사되어 미기압 문제를 일으키게 된다.

따라서, 터널내 고속열차의 운행시에 열차내부의 이명

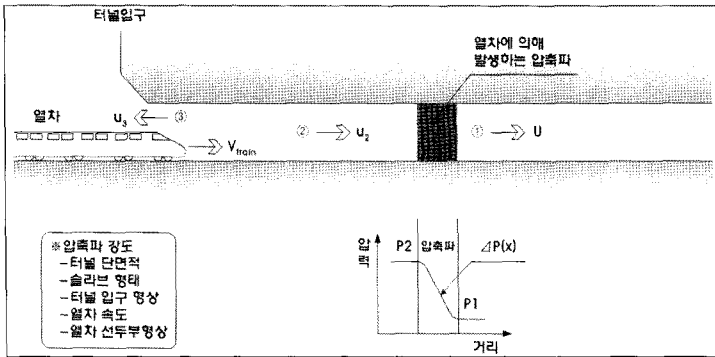
현상 및 터널외부의 미기압 전파를 분석하여 적절한 대책을 강구하는 것이 필요하므로, 본 연구에서는 이러한 주요 이슈에 대한 분석절차 및 결과를 특정 터널을 대상으로 소개하고자 한다.

2. 터널내 공기압 변화

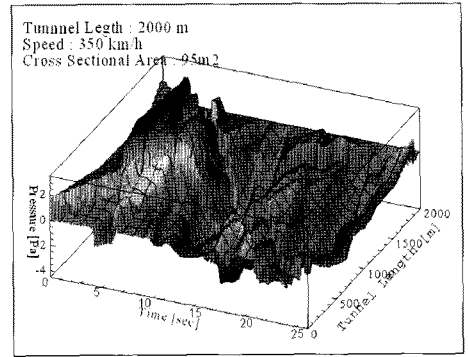
열차가 고속으로 터널에 진입할 때 터널 내부의 공기는 순간적으로 압축되어 압력파가 발생하며, 압력파는 압축파의 형태로 음속으로 터널 출구로 진행하여 일부는 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파의 형태로 반사되어 터널내부로 전파된다. 이러한 압력파는 열차가 터널을 통과하는 동안 반복적으로 발생하여 터널 내부의 급격한 압력변화를 유발시켜 객차내 승객에게 이명현상을 일으키게 된다.

이러한 터널에서의 압력변동은 열차의 주행속도, 열차

철도터널의 이명감 및 미기압 평가에 관한 연구



(a) 고속열차 진입시의 압축파 발생 및 전파 개요



(b) 복잡한 터널 압력양상

그림 1. 고속열차 터널에서의 압력변동

의 선두부 형상, 열차/터널의 단면적 비율, 터널 입출구의 형상, 터널내부의 단면적 변화 및 열차의 교행여부 등에 따라 영향을 받는다. 또한 터널 출구에서 외부로 방출되는 충격성 압축파는 터널 주변에서 환경소음 및 진동문제를 야기하게 되는데 이를 미기압파(Micro Pressure Wave)라 한다. 따라서 터널내부의 압력변동과 터널출구의 압력파를 분석함으로써 열차 승객의 이명감과 미기압 문제가 발생하는 지를 검토하여 필요한 대책을 강구할 필요가 있다.

그림 1-(a)는 열차가 고속으로 터널에 진입할 때의 압축파 발생을 표현한 것이다. 이러한 터널내 고속열차 진입으로 발생한 압축파 및 터널 끝단에서 반사되는 팽창파와 열차 거동에 의한 복합적인 압력변화는 그림 1-(b)와 같다.

적용된 기준이 있다. 이명감에 대한 국내의 설계기준은 표 1과 같다.

3.2 차량의 기밀도

객차 내에 전파되는 압력의 크기는 차량별 특성값인 기밀도에 의해 영향을 받게 되므로, 차량 기밀도에 대한 조사 및 적용은 신중하게 접근되어야 된다. UIC에서는 이러한 차량 기밀도 산정과 관련한 식을 제시하고 있으며, 국내의 경우, “경부고속철도 차량 제작기준(한국고속철도)” 및 “철도차량 안전기준에 관한 지침(국토해양부 고시 제 2010-637호)”에서 제작차량이 준수해야 할 기밀도 기준을 제시하고 있다. UIC의 기밀도식을 이용하여 상기 기준에서 제시한 값을 적용한 결과 KTX 열차의 기밀도는 11, KTX 산천 열차의 기밀도는 18로 평가되었으며, 이 기밀도 값을 해석에 적용하였다(표 2 참조).

3. 터널내 공기압 설계기준

3.1 이명감 설계기준

고속열차 주행시 터널내 이명감 발생 기준은 국가별로 상이하며, 국내에서는 경부고속철도 및 호남고속철도에

3.3 미기압 설계기준

터널 내로 전파되는 압력파 중 일부는 터널 출구를 통해 외부로 방사되어, 미기압 문제를 야기할 수 있으며, 일부국가에서 적용하고 있는 고속열차에 대한 미기압 설계 기준은 표 3과 같다.

철도터널의 이명감 및 미기압 평가에 관한 연구

표 1. 국가별 이명감 적용기준

국가	노선	최대 압력변화	최대 압력 변화율	열차 및 터널 조건			비고
				열차속도 [km/h]	기밀도	터널형식	
일본	신간선	1,000 Pa	200 Pa/s	210,240,270	sealed	tight bore	
영국	inter city	3,000 Pa/3s	-	160, 200	unsealed	tight bore	
		4,000 Pa/4s					
	Channel tunnel	2,000 Pa/4s	-	225~300	unsealed	large bore	단선
		3,500 Pa/4s					
미국	UTMA	700 Pa/1.7s	410 Pa/s	80~100	unsealed	tight bore	
독일	Neubaustrecken	500 Pa/1s	-	240, 280	sealed	large bore	열차1대 운행조건 (교행제외)
		800 Pa/3s					
		1,000 Pa/10s					
이탈리아	FS	1,500 Pa	500 Pa/s	high speed	sealed	moderate-size bore	
프랑스 (SNCF)	Atlantique 고속선	5,000 Pa/3s	-	-	-	-	열차2대 교행조건
UIC	Base line	4,500 Pa/4s	-	-	unsealed	-	복선
		3,000 Pa/4s					
		1,000 Pa/1s	-	-	sealed	-	열차2대 교행조건
		1,600 Pa/4s					
		2,000 Pa/10s					
한국	경부 및 호남 고속철도	800 Pa/3s	-	300	sealed	-	Normal case
		1,250 Pa/3s					

표 2. 차량 기밀도 적용기준

구분	기준	비고
UIC 779-11	$\tau = \frac{\Delta p(t)}{dp_f/dt}$ 여기서, $\Delta p(t)$: t 시간에서의 압력변화(= $p_{ext} - p_f$) p_{ext} : 열차 외부압력 ($p_{ext}(t)$) p_f : 열차 내부압력 ($p_f(t)$)	차량 기밀도 계산식
경부고속철도 차량 제작기준	•초기압력 3,000 Pa에서 100 Pa로 강압되는데 소요되는 시간 40초 이상	KTX : $\tau=11s$
철도차량 안전기준에 관한 지침	•초기압력 3,000 Pa에서 1,100 Pa로 강압되는데 소요되는 시간 18초 이상	KTX산천 : $\tau=18s$

국내의 경우 제시된 20 Pa 기준은 (사)대한터널협회에서 경부고속철도 공기압 해석에 적용한 값이며, 호남고속

철도에서도 국내의 기준을 분석하여 피해가 예상되는 목 적대상물 위치에서 20 Pa을 미기압 기준으로 적용하였다.

표 3. 각국의 미기압 기준

국가	노선	미기압 크기	적용기준
일본	신간선	50 Pa	• 추정되는 미기압의 최대치가 터널중심으로부터 20 m 지점에서 50 Pa 이상일 때 파열을 대책 강구
		20 Pa	• 터널주변 민가 등의 피해가 예상되는 대상물 위치에서 기준 초과시 문짝 등의 진동대책 수립
독일	DB	20 Pa	• 50 m • 추가 연구 진행중
한국	경부 및 호남고속철도	20 Pa	• 터널주변 민가 등의 피해가 예상되는 대상물 위치에서 기준 초과시 미기압 저감대책 수립

4. 해석방법

열차내 이명감 및 터널외부 미기압 검토를 위한 방법은 수치해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통해 그 해석방법의 신뢰성을 검토하였다.

4.1 이명감 해석

고속철도 터널에서의 압력변화를 해석하는 프로그램은 고속철도 상용 운전 국가에서 개발된 프로그램들이 있다. 본 연구에서는 영국 DUNDEE 대학의 Alan E Vardy 교수가 개발한 ThermoTun 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 30년 이상의 개발 역사를 갖고 있으며, 현재 전 세계적으로 수많은 고속철도 터널 설계에 적용되고 있는 그 적용성이 검증된 프로그램이다. 이명감 해석을 위한 과정은 크게 다음과 같이 구분할 수 있다. : 터널 지오메트리 모델링, 열차 모델링, 시뮬레이션 및 결과분석.

터널 지오메트리 모델링은 해석 터널의 단면적 변화, 종단경사 변화, 주행 노선의 변화 등을 입력하는 과정이며, 열차 모델링은 해석 터널을 주행하는 열차의 길이, 단면적, 주행속도 및 기밀도 등의 변수들을 입력하는 과정이다. 이러한 변수들의 입력이 완료되면, 시뮬레이션을 통해 터널 내의 압력변화를 예측하고, 그 해석결과를 분석하게 된다.

4.2 미기압 해석

미기압 해석을 위한 절차는 크게 다음과 같이 구분할 수 있다. : 터널입구 압력기울기 산정, 해석터널의 압력전파 해석, 터널 출구 목적대상물 위치의 미기압 분석.

터널입구의 압력기울기는 열차의 주행속도 및 터널 단면적을 기반으로 Hara의 이론식을 사용하여 터널입구에서의 압력크기 및 기울기 변화를 산정하는 과정이며, 적용식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{EV_{max}} = \frac{1}{2} \rho \frac{U_t^3}{\pi k D} \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M_t)M_t + (1-R)^2} \quad (1)$$

- 여기서, ρ : 공기 밀도
- U_t : 열차 속도
- k : 열차의 전두부 형상에 따른 경험상수
- D : 수력직경
- R : 패색율
- M_t : 열차속도에 대한 마하수
(Mach Number : U_t/a_1)

터널출구에서의 압력기울기 해석을 위해, 공기역학 해석에 많이 사용하고 있는 Fluent 프로그램을 이용하였다. 이때 사용된 수치해석은 2차원 축대칭, 비점성 유동 (2D-axisymmetric, segregated, inviscid) 모델을 적용

철도터널의 이명감 및 미기압 평가에 관한 연구

하였으며, Hara의 이론식을 바탕으로 구한 터널입구 압력특성을 경계조건으로 수치해석을 수행하여, 터널 출구 지점의 압력기울기를 평가한다.

그 후, 시물레이션을 통해 구해진 터널출구 압력기울기 및 목적대상물 위치까지의 거리를 바탕으로 다음 식 (2)를 사용하여 미기압 발생 크기를 계산한다.

$$\Delta p_{pluse, \max(r)} = \frac{\Delta p^* D^2}{4\pi r \Delta l} \tan^{-1} \left(\frac{\pi \Delta l}{Lw} \right) \quad (2)$$

여기서, Δp^* : 터널출구의 압력기울기

r : 터널출구에서 대상 위치까지의 거리 [m]

Δl : 터널출구에서의 수정된 거리

Lw : 압축파의 폭

5. 터널내 공기압 분석결과

특정터널에 대해 단면조건을 다르게 하여 고속열차에 의한 공기압 영향을 분석하였다. 열차속도는 300 km/h

와 350 km/h 의 2가지 조건을 비교하였다.

5.1 터널조건

호남고속철도 터널의 표준단면을 기준으로 터널 입출구의 일정구간에 대해 단면을 확대하는 경우와 전 구간의 단면을 확대하는 경우를 비교하였으며, 구체적인 제원은 표 4와 같다.

5.2 이명감 분석결과

이명감은 터널조건 기준안에 대해서 분석하였으며, 분석결과서는 표 5와 같다.

열차 주행속도별 최대 압력변동율은 교행시에 486.6 Pa/3s로 분석되어, 교행시 압력변동율 기준인 1250 Pa/3s를 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서, 해당 터널을 이동하는 열차에 탑승한 승객들은 급격한 압력변동에 따른 이명현상이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

표 4. 터널별 단면 설계안

구분	단면적용계획	목적대상물 위치
기준안		<ul style="list-style-type: none"> •시점부 : 198 m •종점부 : 55 m
비교1안		
비교2안		
비교3안		

표 5. 객차내 압력변동을 변화 예측

구분	열차 1대 주행시	열차 2대 교행시
300 km/h 주행시		
객차내 압력변동	293.8 Pa/3s	476.6 Pa/3s
350 km/h 주행시		
객차내 압력변동	270.9 Pa/3s	486.6 Pa/3s

5.3 미기압 분석 결과

미기압은 터널조건 기준안에 대해 터널단면 변화에 대한 영향을 분석하였으며, 분석결과는 표 6과 같다.

터널출구 목적대상물 위치에서의 열차주행속도별 미기압 크기를 검토한 결과 열차속도 300 km/h 조건에서는 모든 검토안에서 미기압 허용기준을 만족하나, 350 km/h 주행시에는 기준안의 경우 종점부에서 미기압 설계기준을 초과하는 것으로 분석되었으며, 나머지 비교안은 미기압 문제가 발생하지 않을 것으로 분석되었다.

열차가 300 km/h 주행시, 시점부의 미기압 크기는 비교1안, 2안, 3안 모두 동일한 미기압 저감효과를 나타내었으나(2.9 Pa에서 2.7 Pa로 감소), 종점부에서의 미기압

크기는 비교 1안이 11.6 Pa로 제일 낮은 것으로 분석되었으며, 기준안 대비 89.9%로 나타나 약 10.1%의 미기압 저감효과가 있는 것으로 분석되었다.

열차가 350 km/h 주행시, 시점부의 미기압 크기는 300 km/h 주행시와 동일하게, 비교1안, 2안, 3안 모두 동일한 미기압 저감효과를 나타내었으나(4.8 Pa에서 4.4 Pa로 감소), 종점부의 미기압 크기는 비교 1안이 18.9 Pa로 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 기준안 대비 90.0%로 나타나 약 10%의 미기압 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

분석결과를 바탕으로 미기압 저감을 위해서는 터널 전체구간의 단면적을 확대하는 것보다는 비교1안과 같이 터널 입구와 출구의 일정구간만 확대하는 것이 가장 바람직

철도터널의 이명감 및 미기압 평가에 관한 연구

표 6. 터널출구 발생 미기압 크기

구분		기준인		비교인	
미기압 분포 곡선					
열차속도		300 km/h	350 km/h	300 km/h	350 km/h
미기압 [Pa]	시점부	2.9	4.8	2.7	4.4
	중점부	12.9	21.0	11.6	18.9

구분		비교2인		비교3인	
미기압 분포 곡선					
열차속도		300 km/h	350 km/h	300 km/h	350 km/h
미기압 [Pa]	시점부	2.7	4.4	2.7	4.4
	중점부	11.8	19.3	11.9	19.3

할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 철도터널에 대한 고속열차 주행시의 터널내 복잡한 압력변동에 따른 객차내 승객의 이명현상 분석 및 터널외부 방사 미기압 분석에 관한 절차를 소개하고 특정터널을 대상으로 이명감 및 미기압 분석 결과를

소개하였다.

미기압과 저감 방안으로는 터널 입구부 압력기울기 저감방안으로 갭문 경사 완화, 갭구 후드 설치, 터널 단면 확대, 기류형성 송풍기 설치 등이 있으며, 터널내부 전파 압력기울기 저감 방안으로 통풍공 설치, 바닥/내벽 흡음재 설치, 터널내 워터컷튼 설치, 물방울 분사 등이 있으나, 본 연구에서는 압력 저감에 큰 영향이 있는 터널단면 변화에 대해서 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 이 논문을 통해 철도터널내의 이명감 및 미기압 설계 기준에 대한 소개 및 이명현상과 방사 미기압 분석과정을 정리하였으며,
- 미기압 문제를 해결하기 위해서는 터널 전체구간의 단면을 확대하는 것보다는 입출구의 일정구간만 확대하는 것이 미기압 저감 효과가 있는 것으로 분석되었으며, 경제적인 이점과 환경문제를 동시에 만족할 수 있는 최적의 설계안을 도출하였다.

참고문헌

1. Thermotun User Guide
2. Fluent User Guide
3. UIC CODE 779-11 2nd Edition, February 2005
4. 경부고속철도 차량 제작기준, 한국고속철도
5. 철도차량 안전기준에 관한 지침(국토해양부 고시 제2010-637호)
6. G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드개발, 한국철도기술연구원
7. 호남고속철도 건설사업 기본설계 터널단면기준 수립 검증 보고서, 한국철도시설공단, 2007