

Tunnelling Technology

공기역학을 고려한 철도터널 최적설계



김동현
한국철도기술연구원 궤도토목연구본부
공기유동연구그룹 책임연구원

1. 철도터널의 공기역학적 최적설계의 배경

열차가 약 180km/h 이상의 속도로 터널 내부에서 운행하면 열차 터널의 단면적 크기에 따라 공기역학적 압력장애를 유발시킨다. 열차가 터널을 통과할 경우 갑작스런 압력의 변화가 발생한다. 이런 압력 변화는 열차 승객들에게 귀울림(이명감, ear-discomfort)을 주며, 압력변화의 크기에 의존하는 귀울림은 청각적으로 승객에게 현저한 불편함을 준다. 터널내에 발생하는 압력파의 크기는 많은 변수에 의존하는데, 예를 들면 열차의 속도, 열차와 터널의 길이, 열차와 터널의 단면적이며 압력 쾌적도 기준을 적용하여 제어할 수 있다.

신선의 철도노선에 터널을 설계할 계획이 있으면, 터널의 건설비용 및 승객의 편안함을 고려하여 터널의 단면적을 최적화시킬 필요성이 있다. 터널의 크기는 불필요한 건설비용을 부담하지 않으면서 압력변동에 의한 승객의 불편함을 피할 수 있도록 크게 설계하여야 한다. 터널의 단면적은 최악의 운행시나리오에서 나오는 최대압력변화의 평가에 의해서 구해진다. 일반적으로, 실제 터널을 설계할 경우에 예측되는 최대압력변화에 대한 평가는 주로 1차원적인 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 얻어진다.

터널 건설비용은 주로 토석의 운반량에 의존하므로 예산집행의 정부와 터널 건설업체는 예산의 최적화에 관심을 갖게된다. 1차원 시뮬레이션 해법은 노선의 목표 운행 속도에 따라 압력 쾌적도 기준을 만족시키는 터널 단면적을 제시해준다. 이 방법은 UIC Leaflet 779-11(세계철도연맹)에 포함되어 있다. 본 글에서는 터널 단면적 최적설계 뿐만 아니라 복선터널 궤도중심간격, 터널내 시설물에 미치는 풍하중, 터널내 열차풍, 터널출구 미기압파, 온도 상승과 메탄가스 영향 검토 등도 부가적으로 다루었다. 그러나 디젤열차의 오염물질 배출문제와 터널내 환기시스템, 화재안전에 대한 시설물대책 설계에 대해서는 다음 기회에 다루기로 한다.

2. 철도터널 단면적의 공기역학적 설계에 대한 기준

2.1 UIC Leaflet 779-11 코드의 기능

UIC Leaflet 779-11(1995년)의 기능은 공기역학적 고려를 기본으로 하여 열차 단면적에 대한 터널 단면적의

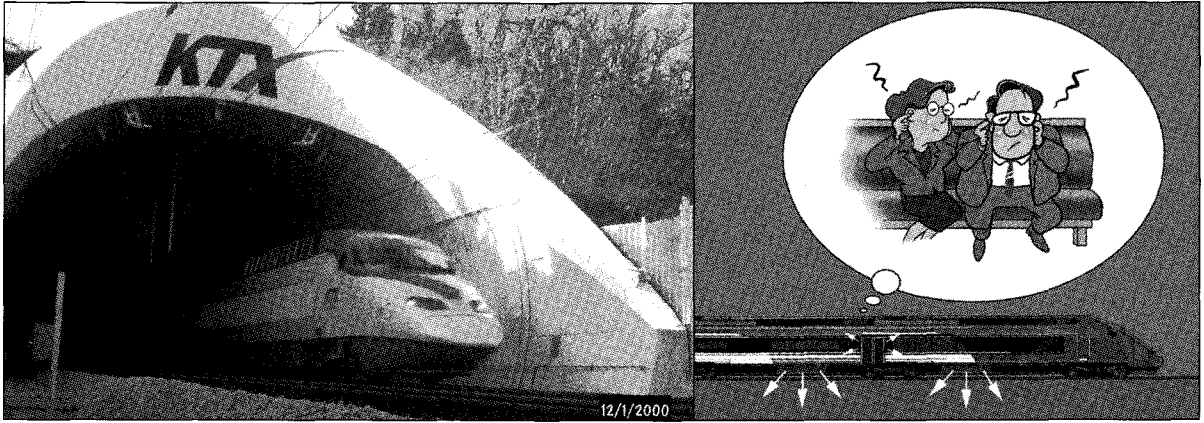


그림 1. 고속열차의 터널 통과 시의 귀울림 현상

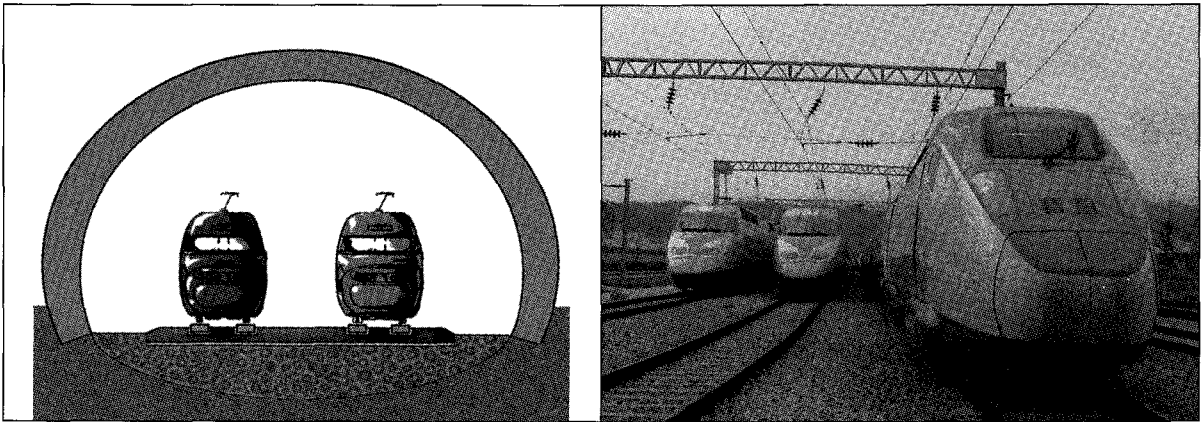


그림 2. 경부고속철도 터널(내공 단면적: 107m²)과 고속전철(KTX열차, G7열차)

크기를 제시한다. UIC Leaflet의 사용자는 터널의 알려진 기하학적 형상, 터널을 통과하고 있는 열차의 기하학적 형상 및 운행형태, 노선을 따라 선택된 압력 쾌적도 기준을 기초로 하여 터널 단면적 크기를 결정할 수 있다. UIC Leaflet 779-11의 압력 쾌적도 기준은 단선 및 복선 터널을 통과하는 비기밀 열차의 운행에 적용한다. 만약 객실 내에 공기압 여압장치가 장착된 기밀차량만 운행되는 노선이라면 압력 쾌적도 기준의 의미는 2차적인 검토사항일 뿐이며, 터널 단면적을 매우 작게 최적화할 수 있다. 예를 들어 한국형 차세대 G7 고속열차와 일본 MAGLEV 초고속열차(표 5 참조)가 이 범주에 들어갈 수 있다. UIC

Leaflet 779-11은 영국철도연구소(BR Research)에 의하여 고안되고, Dundee 대학과 공동으로 제작되었다.

2.2 철도터널 내공 단면적 설계

UIC Leaflet 779-11은 터널 단면적 기본설계에 있어서 상대적으로 쉬우면서 간단하다. 철도운송의 주요한 시나리오를 적용할 수 있도록 영향인자들의 넓은 범위를 다 포함하고 있다(터널 길이, 터널 면적, 열차 종류, 열차 길이, 열차 속도, 열차의 단면적 등).

UIC Leaflet 779-11은 터널내의 최대 압력변화 기준

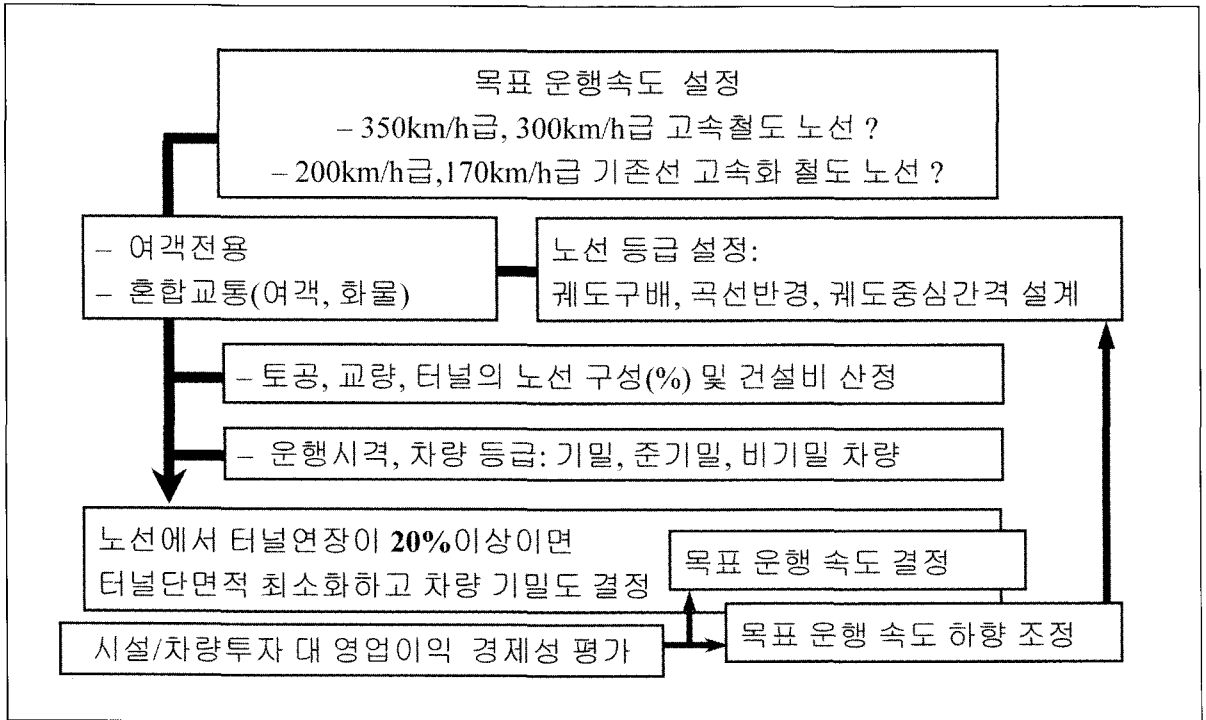


그림 3. 고속선 철도시스템 최적설계 엔지니어링

에 대하여 신규터널의 운행환경을 선택하기 때문에 영향 인자들의 조합에 대하여 발생하는 최악의 최대 압력변화를 평가할 수 있다. 영국 Dundee 대학의 Alan Vardy에 의해 개발된 THERMOTUN/4 프로그램이 유럽 내의 다양한 철도터널 건설 프로젝트에 사용되었으며, 국내와 일본에서 단면적 설계를 수행할 수 있는 기본적인 프로그램을 보유하고 있다.

2.3 UIC Leaflet 779-11 기준의 사용

UIC Leaflet 779-11의 사용은 엄격하게 터널의 크기 결정에만 국한된 것이 아니다. 터널을 통과하는 모든 운행시나리오를 고려해 볼 경우에 압력 쾌적도 기준을 만족하는 열차의 허용 최대 속도가 얻어 질 수 있다. 터널의 단면적 크기가 고정되어 있고 압력 쾌적도 기준이 정해져

있다면 터널 내부로 운행하는 열차가 압력 쾌적도 기준을 초과하는지의 여부와 객실내 공기압 여압장치의 설치여부를 결정할 수 있다. 또한, 터널 단면적 최적설계(송객 귀울림 예측) 프로그램의 계산에서 임의의 영향변수들을 조금씩 변화시킬 때-예를 들어, 열차길이- 나타내는 최대 압력변화를 제시할 때 사용될 수 있다.

3. 고속선 터널의 공기역학적 설계

3.1 고속선 전체 철도시스템의 최적설계

기존선과 달리 고속선에서는 궤도구배와 곡선반경 문제로 터널이 차지하는 비중은 매우 크게 된다. 따라서 운전자 입장에서는 그림 3과 같이 전체 시스템의 최적설계

표 1. 각국에서 적용하고 있는 객차내 승객의 압력 쾌적도 기준

구분 운영국	열차 종류	승객 이명감 기준	운행 속도 (km/h)	차량 기밀	터널	비고
일본	신간선	1000 Pa 200 Pa/s	고속 (210,240,270)	기밀	소단면 복선	300~400 Pa/s로 완화될 예정
영국	Inter-city (도시간 노선)	1986년 초 - 3초 간격 3000 Pa 1986년 후 - 4초 간격 4000 Pa	고속 (160, 200)	비기밀	소단면 복선	복선터널에서 열차가 교행하는 최악의 상황 포함
	Rail Link (런던~채널 터널 노선)	단선 터널 - 4초 간격 2000Pa 복선 터널 - 4초 간격 3500Pa	고속 (225~300)	비기밀	대단면 단선/복선	-
미국	UMTA (지하철 급행열차 시스템)	1.7초 간격 700Pa 410Pa/s (1.7초 보다 긴시간)	저속 (80~100)	비기밀	소단면	정기 통근 승객용
독일	Neubaustrecken (신선)	1초 간격 500 Pa 3초 간격 800 Pa 10초 간격 1000 Pa	고속 (240, 280)	기밀	대단면	열차 교행시에는 적용하지 않으며 단독열차에 대한 기준
이태리	FS	1500Pa 500Pa/s	고속	기밀	보통 단면	-
프랑스	SNCF (아틀란티크 노선)	5000Pa/3s	고속	기밀	-	현재 약 500 Pa/s의 구배 제한을 포함한 새로운 기준을 연구/검토
유럽	Euro tunnel 운행 노선	3초 간격 3000Pa 450Pa	-	-	압력 경감 덕트 (Pressure Relief Ducts)	주행시 발생하는 압력펄스를 대처하는 압력 쾌적도 기준과 영국철도(BR)의 기준을 채택

엔지니어링 검토가 필요하다. 단, 장대터널의 경우 화재 안전과 승객대피를 위한 추가적인 시설(터널내 보행통로의 너비 등)에 대해서는 추가설계 사항으로 한다.

3.2 터널 단면적의 공기역학적 설계기준

3.2.1 각국에서 적용하고 있는 승객의 압력 쾌적도 기준

선진국의 몇몇 나라에서만 철도 터널운행에서의 압력 쾌적도 기준(객차내 승객 귀울림 기준)을 가지고 있으며, 그들 국가의 운행조건에서 올바른 기준인지 확실성을 가지고 있지 않았다. 표 1은 연대순으로 각국의 철도 운행기관이 운행조건에 따라 기준을 채택한 사례이다. 국제적으

로 통합되거나 일반적 기준이 없기 때문에 다음과 같이 자세히 살펴보기로 한다.

3.2.2 기준에 대한 사례선택 - 비기밀차량

공기 압력에 대한 승객의 압력 쾌적도 기준은 모든 상황, 모든 사람에 의하여 모든 시간 때에 적절히 국제적으로 통용될 수 있다. 다른 철도운행 환경에서 또 다른 사람들이 쾌적도의 다른 기준에 대한 요구가 나타난다. 그럼에도 불구하고, 운행의 특별한 형태에 대하여 통계조사에 의한 기준이 가정될 수 있다는 건 중요하다.

참고문헌 [Gloeckle, 1991]에 보고된 이전의 연구는 4가지 다른 열차운행 환경이 있으며 각기 달리 고려된 쾌적도 기준이 요구된다. 표 2의 4가지 분류는 다음의 3가

지 운행상황에 따라 차별화 되도록 시도되었다.

- 1) 운행의 다른 형태(예를 들어, 장거리/단거리 도시간 통근)
- 2) 여정에서 겪는 압력 펄스의 수(예를 들어, 1시간에 4개의 터널통과/1시간에 4 터널 이상)
- 3) 운행서비스에 대한 쾌적도의 다른 기준(재래철도/상급철도). 압력 쾌적도에 대한 범위 내에서 “비기밀” 차량 및 “기밀” 차량으로 두 기준으로 가정한다.

“기밀” 차량은 열차 외부의 압력변화를 객실에 전달되지 않도록 막아준다. 이러한 기밀차량 운행은 일본의 신간선, 독일철도(DB) Neubaustrecken 노선의 ICE 열차 운행, 경부고속철도의 KTX 열차운행, 한국형 차세대 G7

표 2. 영국철도의 압력 쾌적도 기준 분류

타입 A	1시간에 4터널까지 통과하는 기존의 도시간(Inter-City, I-C)철도와 지역철도 서비스(노선 길이에서 터널이 10% 미만). 보통의 “비기밀” 차량
타입 B	많은 수의 터널을 가진 도시간 철도서비스(터널이 노선 길이의 30%이상). “비기밀” 차량
타입 C	기밀열차 운행
타입 D	많은 수의 정차역과 중간 터널부분을 가진 급행열차(Rapid transit), 도시철도, 지하철 서비스(Metro, Urban). 보통의 “비기밀” 차량

표 3. 4초간의 시간간격에서 최대 압력변화

구분	최대 압력 변화(Pa)
타입 A	4000
타입 B	3000
타입 D	1000

표 4. 4초간의 시간간격에서 최대 압력변화

구분	최대 압력 변화
타입 A	2500 Pa
타입 B	2000 Pa
타입 D	700 Pa

고속전철 등이다.

영국철도(BR)의 조사연구에서 제안한 4가지 승객 쾌적도 기준의 분류는 다음과 같다.

표 2의 타입 A와 타입 B의 차이는 단순히 터널 수나 노선에서 차지하는 터널연장이다. 터널내의 압력변동이 타입 B에서는 상대적으로 크고 승객 귀울림이 클 것이다. 따라서 보다 엄격한 압력 쾌적도 기준이 요구된다.

3.3.3 극한조건의 기준 - 복선터널

참고문헌 [UIC Report C149/RP101, 1985]은 운행의

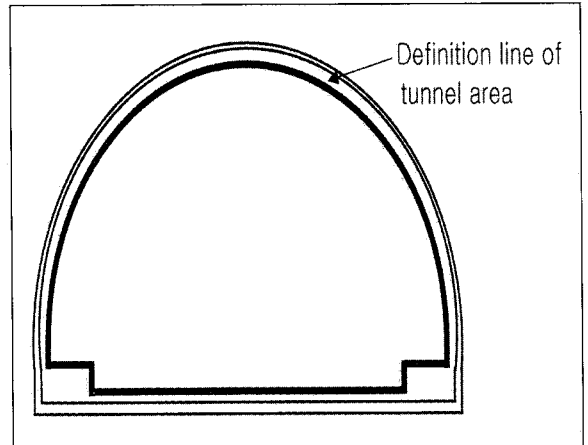


그림 4. 정상적인 터널에서의 단면적 정의(굵은 실선)

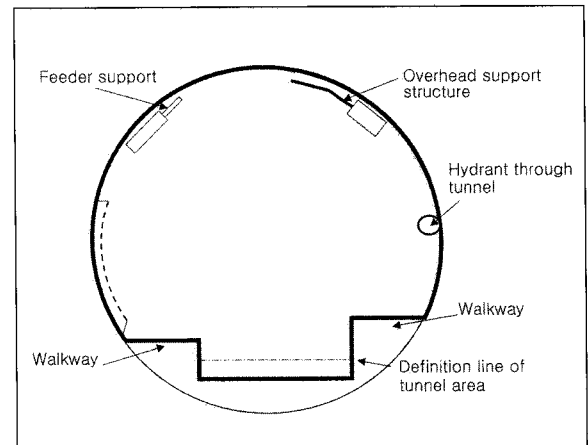


그림 5. 전차선 시스템을 갖는 터널에서의 단면적 정의(굵은 실선)

기술강좌

공기역학을 고려한 철도터널 최적설계

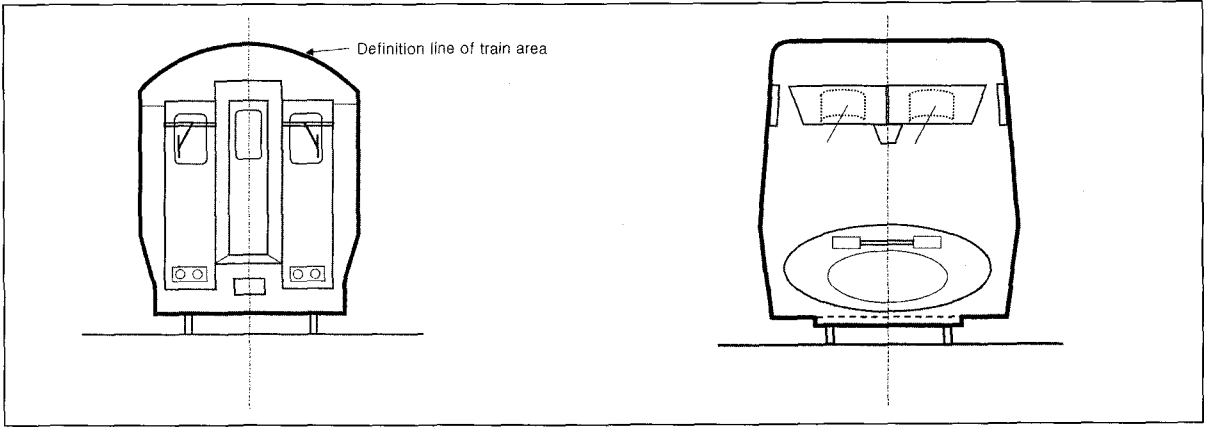


그림 6. 열차 단면적 정의(굵은 실선)

3가지 형태에 대하여 4초간의 시간간격에서 압력 쾌적도 기준을 표 3과 같이 제안한다.

이 기준들은 타입 A, B, C 터널에서 “보통” 겪는 낮은 압력변화로부터 매우 드문 최악의 경우로 만들어졌다.

3.3.4 정상조건의 기준 - 단선터널

표 3의 극한조건의 압력 쾌적도 기준의 정의는 최악의 상황이 고려된 것으로 이러한 최악조건은 극히 드물 것이다(예를 들어, 터널에서 두 열차가 교행하는 복선터널에 대한 것이다). 이 희소성에 기인하여, 정의된 압력변화 제한은 엄밀해야 하는 것이 타당하다. 터널을 통한 대부분의 운행에서 발생하는 터널내 정상조건의 압력변화로써 표 4와 같이 해당되는 항목에 따라 선택할 수 있다.

주어진 시간간격에서 객실내 압력의 최대 peak-to-peak 변화를 분석하는 압력 쾌적도 기준이 추천된다. 3초 또는 4초간의 시간간격에서의 평가가 참고문헌[UIC Report C149/RP101, 1985], [Gloeckle, 1991], [Gawthorpe, 1991]에 서술된 시험평가와 비기밀 차량의 운행경험으로 적당한 것으로 판명되었다.

• 터널 단면적 정의

- 터널 정면도에서 터널 내부에서 공기와 맞닿는 공

간단면의 면적으로 레일, 가선장치나 방재 설비를 장착하지 않은 순수 단면을 나타냄. 자갈도상이나 콘크리트 도상 위의 영역임(그림 4, 그림 5 참조).

• 열차 단면적 정의

- 열차 정면도에서 지붕 위로 돌출된 판도그래프나 냉난방장치의 면적을 제외하고 또한 레일 상면의 바퀴와 열차 하부면이 만나는 위치까지 바퀴영역을 제외한 순수 단면을 나타냄. 동력차와 객차 중에 단면이 큰 경우를 열차 단면적으로 선택함(그림 6 참조).

3.3 궤도 중심간격 최적설계

- 실시설계 터널 단면적 조건에서 개활지보다 터널내의 한정된 공간에서의 열차교행은 궤도 중심간격 설정에 따라 풍압충격이 객실로 전파된다. 복선터널 설계의 경우 터널 내에서 열차 교행시의 충격 풍압력에 대한 검토가 필요하다. 단, 궤도 중심간격이 너무 넓으면 터널 단면적을 과도하게 크게하는 영향을 미친다. 표 5에서와 같이 경부고속철도의 경우 궤도중심간격은 5m가 적용되어 있다.

표 5. 고속 및 자기부상 철도운행 주요국가의 건설현황

구분 설계인자	한국경부고속철도 KTX	일본신간선 500계	프랑스 TGV	독일 ICE 신선	일본 MAGLEV
최고속도 (km/h)	300	300	320	300	500
궤도중심간격 (m)	5.0	4.3	4.5	4.7	5.8
복선터널 내공단면적, $A_t(m^2)$	107	63.4	100	92	77.7
차량단면적, $A_v(m^2)$	9.5	10.2	11.54 (9.5)	10	8.9
Blockage Ratio, $R(A_v/A_t)$	0.0880	0.1609	0.1154	0.1087 (0.095)	0.1145
차체기밀도 요구조건	$\Delta P + 5 \text{sec} \cdot \frac{dP}{dt} \leq 2000 \text{Pa}$ $\frac{dP}{dt} \leq 200 \text{Pa/sec}$	$\Delta P \leq 1000 \text{Pa}$, $\frac{dP}{dt} \leq 300 \sim 400 \text{Pa/sec}$	$\frac{dP}{dt} \leq 5000 \text{Pa/3sec}$ $\left[\frac{dP}{dt} \leq 500 \text{Pa/sec} \right]$	$dP/dt \leq 500 \text{Pa/sec}$ $dP/dt \leq 800 \text{Pa/3sec}$ $dP/dt \leq 1000 \text{Pa/10sec}$	-

3.4 터널내 시설물 및 차체에 영향을 주는 변동 풍하중

- 실시설계 터널 단면적 조건에서 터널내 열차 주행시의 차체 및 터널 시설물에 미치는 풍압 변동량에 대한 검토가 필요하다. 특히 신설 노선의 운행차량의 동력차 전면창 및 객실 유리창에 미치는 허용압력을 설정하여 파열 가능성에 대한 검토가 필요하다. 복선 터널인 경우는 열차 교행조건으로 분석이 수행되어야 한다. 최근에 한국철도기술연구원에서는 운행속도 350km/h의 차세대 한국형 고속전철 개발에서 터널내 동적 풍하중 최대치를 7000Pa로 설정하였다.

3.5 터널내 열차풍 영향

- 열차 운행중에 터널내 보선원이 들어가서 작업이 이루어지는 노선인 경우는 열차에 의한 열차풍이 보선원의 안전에 영향을 주는지 검토가 필요하다. 복선터널인 경우는 열차 교행조건으로 분석이 수행되어야 한다.

터널내 환기설비에 의한 터널내 풍속제한(10m/s)과 열차풍에 의한 피크 값 풍속의 검토기준은 구분하여야 한다.

3.6 터널 입·출구 미기압과 환경 소음/진동

- 실시설계 터널 단면적 조건에서 열차가 터널 진입시 압력파에 의한 터널 입출구에서 방사되는 충격성 소음인 미기압파가 주변 근접민가에 영향을 미칠 것인지에 대한 검토가 필요하다. 터널 중심에서 45도 각도로 20m 거리 레일상면 1.2m 높이에서 미기압파 크기를 측정했을 때 20Pa 이하가 되도록 한다. 20Pa 이상이 되면 터널 입·출구에 구조물(슬랫 및 슬랫커버 후드 등) 대책을 세우도록 한다. 1.5km 이상의 터널에서 발라스트 궤도인 경우는 미기압파가 터널 길이가 증가할수록 감소하나, 슬라브 궤도인 경우는 터널연장이 길어질수록 상당히 증가한다. 그러나 추후의 유지보수나 시공비에서 슬라브 궤도가 많은 장점을 가지고 있기 때문에 터널 입·출구에만 적

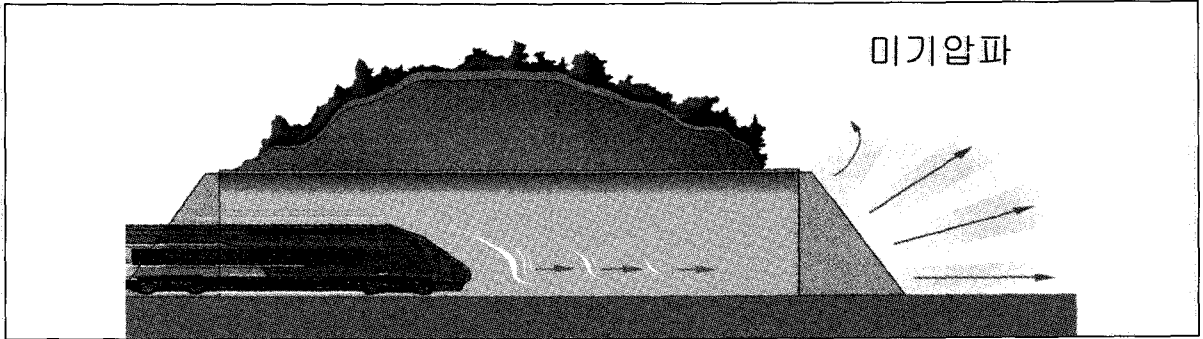


그림 7. 고속열차의 터널 진입시 미기압파 방사 현상

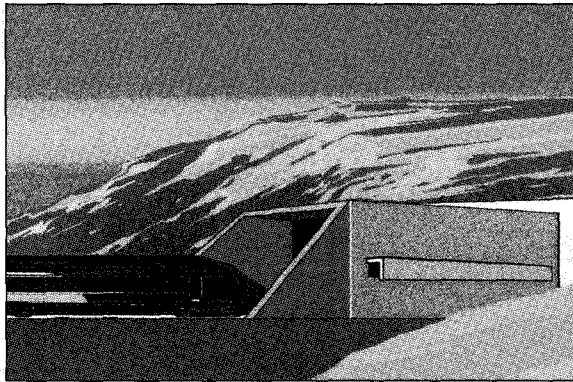


그림 8. 터널 미기압파 저감대책: 슬릿 및 슬릿커버 후드

용할 수 있는 매우 저렴한 미기압파 저감대책으로 해결이 가능하다.

3.7 장대터널 온도상승과 메탄가스 영향

- 장대 철도터널에서 “터널내의 온도”가 과도하게 올라가지 않도록 검토되어야 한다. 철도 보선원의 작업 환경과 연관되며, 디젤 기관차 운행 노선의 경우 온도 상승 문제는 기관차 내연기관의 고장을 초래하지 않는지 등의 검토이다.
- 실시설계 장대 철도터널에서 지역에 따라 터널 내벽과 바닥을 통해 메탄가스가 지속적으로 생성될 수 있는데 이에 대한 환기문제를 검토해야 한다.

4. 결 언

철도터널을 공기역학적으로 최적설계하기 위하여, 열차운행에 의해서 발생하는 풍압변동을 고려한 철도터널 단면적의 크기를 결정하는 방법과 복선터널 궤도중심간격, 터널내 시설물에 영향을 주는 풍하중, 터널내 열차풍, 터널출구 미기압파, 온도상승과 메탄가스 영향 검토 등도 부가적으로 다루었다. 국내에서는 기존선 고속화와 더불어 고속철도의 운행이 2004년도에 시작되었다. 따라서 앞으로 노선등급별로 공기역학적인 최적설계를 적용한 터널 표준도의 개정과 터널 연장별로 터널 단면적을 차등설계하는 지침이 필요하다. 이와 같이 신설철도에서 터널 건설비를 최적화할 수 있는 방안이 꾸준히 모색되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. 김동현 등, “고속철도 터널 공력설계 및 터널후드 개발,” 건설교통부 G7 고속전철기술개발사업, 2단계 3차년도 보고서, 2002.
2. UIC Code 779-11 OR, “Determination of Railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations,” international Union of Railways, 1st edition, 1995.

3. Teests for the evaluation of the subjective effects on the human ear caused by trains running at high speed in tunnels", Report C149/RP10, Office for Research and Experimentation(ORE) of the International Union of Railways(UIC), Utrecht, Holland, Sept 1985.
4. Groeckle, H & Pfretzschner, P "High speed tests with ICE/V passing through tunnels, and the effects of sealed coaches on passenger comfort", Proc 6th Int symp on the aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA Fluid Engrg, Durham UK, pp 23-44, 1988.
5. Gloeckle, H, "Comfort investigations for tunnel runs on the new line Wuerzburg-Fulda" In : Proc 7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels(Brighton, England, 27-29 Nov 1991). BHR Group Ltd, Elsevier, pp 155-172, 1991.
6. Gawthorpe, R. G. "Pressure comfort criteria for rail tunnel operations" In: Proc 7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels(Brighton, England, 27-29 Nov 1991), BHR Group Ltd, Elsevier, pp 173-188, 1991.
7. Vardy, A. E. "Approximating unsteady friction at high Reynolds Numbers", Proc Int Conf on Unsteady Flow and Flow Transients, Durham UK, HR Wallingford, Balkema, 21-29, 1992.
8. Shultz, M & Sockel, H "Pressure transients in short tunnels". Proc 7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA group, Brighton UK, 221-238, 1991.
9. Maeda T., Matsumura, T. and etc, "Countermeasures against Micro-pressure Waves Radiated from Tunnel Exit under Speed-up of Shinkansen," RTRI REPORT, Vol. 4, No. 1, 1990, 1.(in Japanese)
10. Rahn, T., Hochbruck, H. and Moeller, F.W., "ICE High-tech on Rails," Hestra-Verlag.