

공기역학적 고찰을 통한 고속철도터널 단선구간 단면선정방법 연구



이용율
비엔텍아이엔씨
SCA-1 과장



박민호
비엔텍아이엔씨
SCA-1 대리



김상철
서현기술단
지반사업본부 이사



정병률
서현기술단 부사장



박주용
서현기술단
지반사업본부 과장



정운기
서현기술단
지반사업본부 전무



김성용
한국철도시설공단
호남지역본부 차장

1. 서론

1.1 연구의 필요성

철도는 일반철도라 불리는 새마을호 이하(약 150km/h 이하)의 열차와 KTX로 대변되는 고속철도로 명확히 구분되었으나 고속화 요구의 증대 및 전철화로 인하여 기존의 디젤동차 및 전기기관차를 대체하는 150~200km/h 이상의 고속으로 운행되는 광역고속철도(GTX) 및 신형 전기

동차(신형 EMU)와 같은 열차의 수요가 증가되는 추세이다. 일반적으로 단선터널의 특징은 복선터널에 비해 축소된 단면적으로 인하여 공기역학적 영향을 크게 받는다는 것이다. 열차가 고속화됨에 따라 기존 일반 열차에서는 고려하지 않았던 여러가지 공기역학적인 문제가 발생한다. 특히, 터널 내의 급격한 압력변동으로 인한 객차 내 승객의 이명감 발생 및 터널 출구에서의 미기압과 발생 등에 관한 추가적인 고찰이 필요하다.

단면적 설계 및 수치해석 작업 수행시, 단면적 선정 노

력을 경감하여 효율성을 향상시키고 최소단면적 선정을 통해 경제성 증진을 도모하는데 본 연구의 목적이 있다. 이에 본 연구에서는 경제성과 안정성을 동시에 고려한 단면적 선정방법 및 선정과정의 적정성을 검토하는 연구를 수행하였다.

1.2 연구 수행 방법

본 연구의 공기역학적인 주요 검토사항은 이명감, 미기압파, 열차에 의한 오염물질 환기를 위한 교통환기력(운영 중 환기)이며, 세가지 검토사항을 Table 1의 process-model을 따라 검토하여 최적의 결과를 도출하였다. 단면을 선정하는 가장 효율적인 접근법은 검토사항별 분석결과를 다음 분석에 반영하여 세가지 검토사항에 대한 기준을 만족하는 단면을 선정하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 선행 분석 사항을 고려하여 순차적으로 의사결정을 진행하는 model을 결정하였고 Table 1과 같이 도식화 하였다.

본 연구 수행 중, 의사결정과정상의 세가지 검토사항에 대하여 분석 TOOL로 각각 전용프로그램인 PITS-1.0(이명감), TR 2.0(미기압파)과 범용프로그램인 FLUENT(미기압파)를 사용하였다.

1.3 연구 적용 사례

본 연구의 사례인 보성~임성리 철도사업의 단면선정

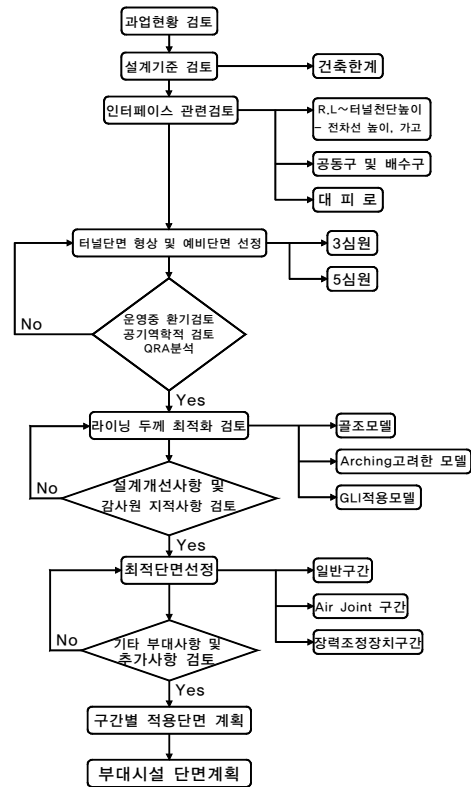


Fig. 1. 철도 터널의 단면선정 절차

Table 1. 최적 단면 선정 process-model

도식화	의사결정과정 선정
	<ul style="list-style-type: none"> • 이명감 : 비교적 단면적의 영향이 크므로 첫 번째 검토사항으로 선정 • 미기압 : 단면적에 비례하는 경향을 보이지만 연장에 따라 결과가 바뀌므로 이명감보다는 단면적의 영향이 상대적으로 작아 두 번째 검토사항으로 선정 • 운영 중 환기 : 단면적 변화에 따라 농도와 교통환기력이 반비례하여 서로 상쇄되므로 단면적 영향력이 가장 작다. 따라서 세 번째 분석사항으로 선정

Table 2. 단선 철도터널의 단면선정 결과(V=200km/hr)

단선터널 표준단면	검토항목	적용내용	관련기준 검토
	①건축한계	• 폭×높이:4,200mm×6,450mm	• 철도건설규칙 제14조(2009)
	②전차선	⑦전차선 높이:5,000mm ⑧가고(전차선~조가선):710mm ⑨절연이격거리:300mm ⑩급전선~지지점:해당 없음	• 철도건설규칙 제37조(2009) • 철도전철전력설비설계지침(2011)
	③공동구	• 폭×높이:500mm×150mm	• 철도표준도(단선, 2009)
	④배수구	• 폭×높이:200mm×500mm	• 철도표준도(단선, 2009)
	⑤대피로	• 편측:1,000mm 적용	• 철도시설 안전 세부기준(2013) • 철도전기설비표준도(2009)

은 Fig. 1과 같이 세분화된 절차를 거쳐 설계속도 200km/h를 만족하는 최소내공단면은 39.97m²로 Table 2와 같이 검토되었다.

2. 터널설계인자와 공기역학의 상관관계

철도터널의 차량 특성상 도로터널의 연속성과 다르게 비연속성을 갖고 있다. 최근 철도의 추세는 차량의 고속화에 있고 이러한 고속화와 함께 비연속성이 증가되고 있다. 고속화로 인해 특히 공기압(이명감, 미기압파) 문제가 증가하고 비연속성으로 인해 운영 중 환기 문제가 증가한다. 고속열차 통과시 발생하는 공기압 영향은 이용자 및 터널주변 환경적 측면에서 문제로 대두되고 있어 지역 민원발생 등의 문제로 제기될 수 있다. 이러한 공기역학적 측면에서 공기압과 오염물질환기로 나누어 이론적 바탕을 다음과 같이 기술하였다.

2.1 공기압(이명감 및 미기압파)

열차가 터널을 진입하면서 터널 내부의 공기는 순간적으로 압축되어 압력파가 형성되며, 압력파는 압축파의 특

성을 띠고 음속과 유사한 속도로 진행하게 되며, 압축파의 일부는 터널 출구에서 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파의 형태로 반사되어 터널내부로 다시 전파된다.

출구에서 반사되는 팽창파와 주행시 발생하는 난류 등의 영향으로 열차외부에 압력변화가 유발된다. 이때 열차 내에서는 열차의 기밀도(Pressure Tightness, τ)에 반비례하여 열차내부 압력변화가 유발되어 승객에게 귀막힘 또는 통증 등의 이명현상(Ear Discomfort)을 발생시켜 불쾌감을 유발한다.

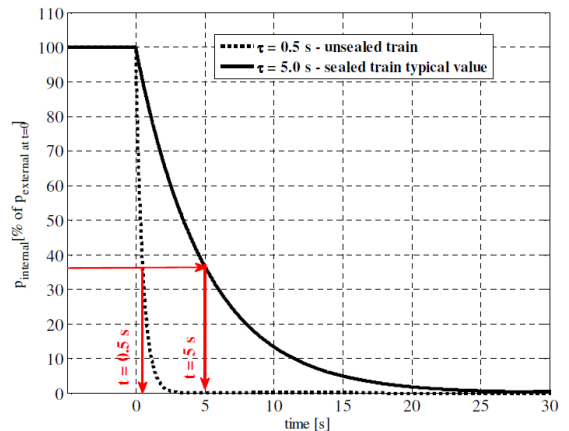


Fig. 2. 열차기밀도별 압력vs시간 변화구배

열차의 기밀도는 열차의 고유 제원으로 시간단위(s)로 표현되며 값이 클수록 외부압력변화에 대한 내부변화율이 줄어들어 이명감을 방지하는 주요 인자가 된다. 주행 중 승객이 느끼는 이명감은 동압 기밀계수(τ_{dyn})에 직접적으로 연관이 있으나 실험 실험을 통해서만 측정되고 터널 및 열차제원 등에 따라 가변적이므로, 일반적으로는 쉽게 측정 가능한 준정압 기밀계수(τ_{stat})를 기밀도로 사용한다. 준정압 기밀계수는 초기압력에서 약 37%까지 떨어지는 시간으로 정의되고 기본방정식은 다음 식 (1)과 같다. 일반적으로 동압 기밀계수의 약 3배 정도의 값을 가진다.

$$\tau_{stat} = - \frac{t}{\ln\left(\frac{P(t)}{P_I}\right)} \quad (1)$$

여기서, t : 일정 경과 시간

$P(t)$: 일정 경과 시간에서의 압력

P_I : 초기압력

상기 식 (1)로 산출되는 열차의 기밀도에 따른 열차내 부압력변화 양상은 다음 Fig. 2와 같다.

열차가 진입하면서 생긴 압축파로 인하여 생성되는 미기압파(MPW:Micro-Pressure Wave)는 터널입구에서 ①생성, ②터널을 따라 진행(성장), ③터널 출구에서 방사

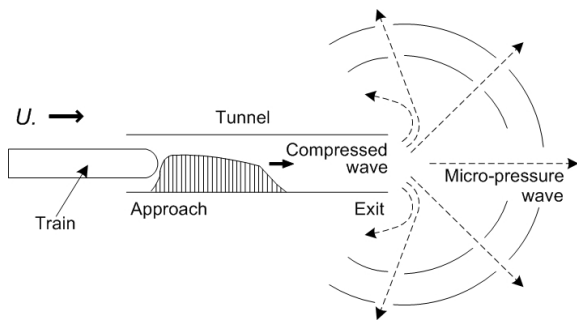


Fig. 3. 미기압파의 방사까지의 과정

되는 3단계 과정을 거치며 이 과정은 Fig. 3과 같다.

미기압을 예측하는 알려진 방법 중 CFD를 이용하는 방법에서 터널 출구부의 미기압과 강도 계산식은 (2)로서 본 연구에 적용하였다.

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

여기서, Δp^* : 입구발생압력

D : 수력직경

Δl : 터널개구부의 보정계수

L_w : 압축파의 폭

2.2 운영 중 환기

별도의 환기설비가 없는 터널의 경우 환기는 열차의 피스톤작용에 의한 교通风력에 의존할 수 밖에 없다. 열차 주행시 발생하는 교通风력에 의하여 신선공기가 터널내로 유입되며 열차에서 발생된 오염물질(CO, NOx, 매연)은 터널 내를 흐르면서 일부 희석되고, 일부 출구로 배출된다. 열차의 통과 후에도 터널을 빠져나가지 못한 오염공기 중 일부는 후속 열차 진입시 배출 오염물질과 중첩되므로 자연환기력에 대한 고찰은 터널제원의 적정성에 대한 중요한 판단 근거로 적용될 수 있다.

3. 분석 조건 및 적용 기준

3.1 분석 조건

공기역학적 분석시, 주요인자들을 가능한 많이 적용하여야 결과에 대한 변수가 최소화된다. 본 연구에서는 열차의 속도, 연장을 각각의 단면에 적용하여 변수를 최소화하였다. 단면은 건축한계, 전차선 높이, 가고 등을 고려

하여 36.36~50.35m² 단면적을 분석조건으로 수립하였다. 본 연구의 사례에 따라 터널연장 1~6km, 열차속도 4 cases를 적용하였고 최대 Case 수는 Table 3과 같다. 선정예비단면은 Fig. 4와 같다.

3.2 이명감 적용 기준

이명감의 중요한 지표는 열차의 주행조건 및 차량의 기밀도 등이다. 본 연구가 단선에 관한 것이므로 교차주행 조건은 선정조건에서 제외하였다. 차량의 경우, 무궁화 및 새마을호 등에 해당하는 열차를 비기밀 또는 준기밀의 일반열차로 분류할 수 있고, 200km/h 이상의 EMU는 기밀의 고속열차로 분류하여 상대적으로 엄격한 기준을 적

용하였다. 국내의 주요기준은 Fig. 5와 같이 UIC 660 기준을 준용하고 있다. 본 연구에 적용한 기준은 Table 4와 같다.

3.3 미기압파 적용 기준

비교적 터널단면적이 작은 일본에서 미기압파에 대한 문제점이 대두되어 기준이 정립되었다. 현재 국제기준은 존재하지 않으며 독일에서 미기압파에 대한 연구가 진행되고 있으나 현재는 2008년 일본의 “산악터널 설계시공 표준 및 동해설(철도운수시설 정비지원기구)”에서 변경한 기준에 따라 변경기준을 변형하여 준용하고 있는 실정이다. 변형된 독일 기준인 50m 지점에서 20Pa은 식 (2)를

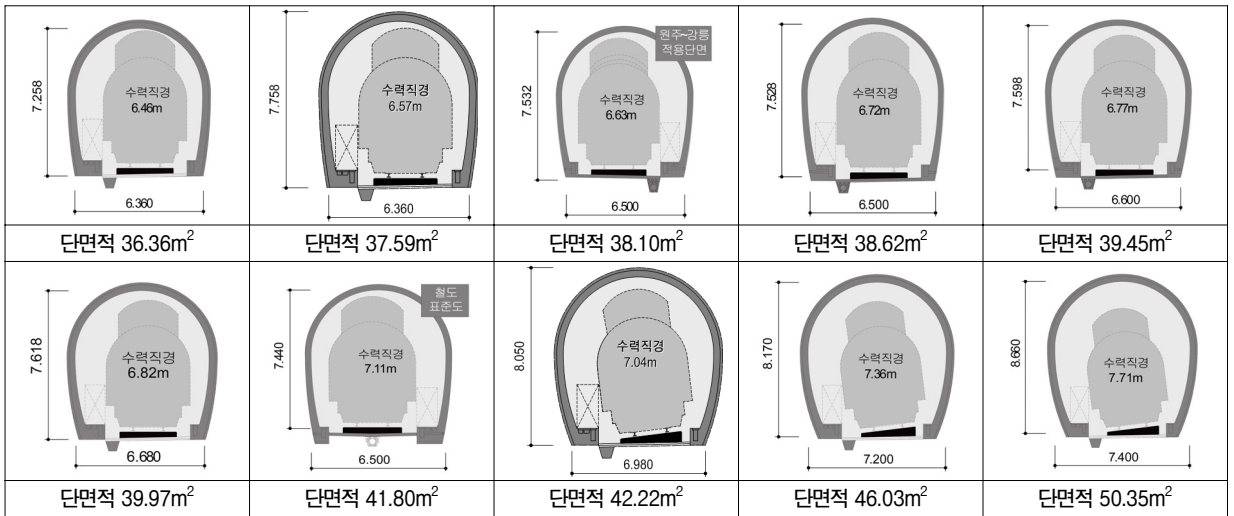


Fig. 4. 선정 예비 단면

Table 3. 내공단면적, 터널연장, 차속에 대한 분석 Case

구분	분석 제원										Case 수
	36.36	37.59	38.10	38.62	39.45	39.97	41.80	42.22	46.03	50.35	
내공단면적(m ²)	36.36	37.59	38.10	38.62	39.45	39.97	41.80	42.22	46.03	50.35	10 cases
터널연장(m)	1000		2000		3000		4000		6000		6 cases
열차속도(km/h)	120			150			200		230		4 cases
총계	-										최대 240 cases

적용하면 일본기준과 동일하다.

현재 유럽과 중국 등을 포함하여 전세계적으로 터널 미기압과 기준은 일본 기준을 준용하고 있는 것으로 파악되고 있다. 국내의 경우, 경부고속철에서 명문화된 미기압 적용기준은 없었으나 1995년 (사)대한터널협회에서 수행한 공기압 해석보고서에서 당시 일본기준을 준용하였다. 따라서 본 연구에서는 일본 기준을 적용하여 분석결과에 적용하였다. 단, 본 연구에서는 20m 지점의 50Pa 기준만을 적용하여 단면선정의 기준으로 삼았다.

3.4 운영 중 환기 적용기준

터널내 오염물질 배출열차가 운행되는 경우에는 『철도 설계기준』상 호흡과 관련된 일산화탄소, 질소산화물, 분진을 환기대상 오염물질로 하여 환기설비 계획을 하여야 한다. 철도기준에 구체적인 오염물질 농도 기준이 명시되어 있지 않아 『터널설계기준』에 의해 WRA(구 PIARC) 권고치를 고려하여 그에 해당하는 국내 기준인 ‘도로설계편람(2010)’ 상의 설계농도 Table 5와 같이 본 연구에 환기 분석기준으로 선정하였다.

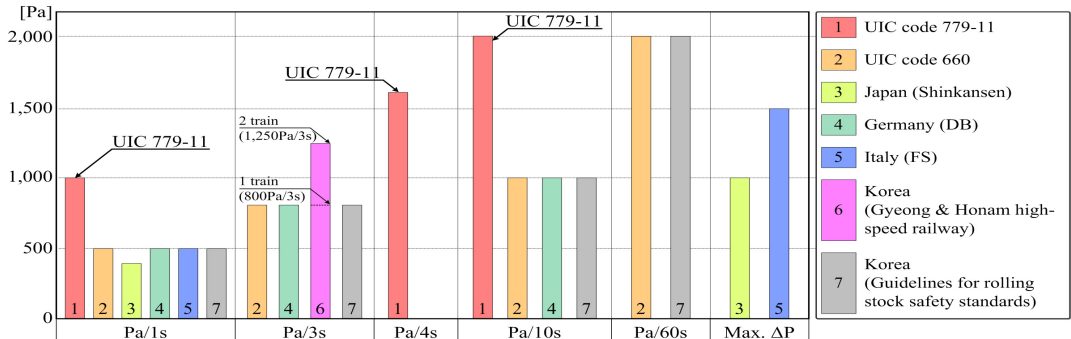


Fig. 5. 열차내 이명감의 국내외 기준 비교

Table 4. 이명감 적용기준

적용 열차		적용기준	객차내 압력변동 기준
일반열차 200km/h 이하	무궁화 새마을	UIC 779-11 상 기밀열차 ($\tau_{dyn} > 0.5s$)	<ul style="list-style-type: none"> 1초간의 압력변화율 : 1,000 [Pa/s] 이하 4초간의 최대압력변화 : 1,600 [Pa/4s] 이하 10초간의 최대압력변화 : 2,000 [Pa/10s] 이하
고속열차 200km/h 이상	KTX (EMU)	철도차량 안전기준에 관한 지침(UIC 660) “철도차량 제작기준”	<ul style="list-style-type: none"> 1초간의 압력변화율 : 500 [Pa/s] 이하 3초간의 최대압력변화 : 800 [Pa/3s] 이하 10초간의 최대압력변화 : 1,000 [Pa/10s] 이하 60초 이상에서의 최대압력변화 : 2,000 [Pa/60s] 이하

Table 5. 국내 도로 차속별 설계농도(도로설계편람)

교통형태	5~10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h
매연(m^{-1})	0.009	0.007			0.005			
CO(ppm)				100 (2010년 이후 70ppm)				
NOx(ppm)				25 (2010년 이후 20ppm)				

4. 연구결과

4.1 이명감 검토결과

열차의 기밀도는 앞서 언급한 바와 같이 국내차량제작 기준에 의해서 각 열차별 기밀도를 적용하였으며, 선정된 단면에서 검토 단면이 이명감 기준을 만족하지 못하는 경우 최소단면부터 한단계씩 단면적을 증대시켜서 적정 단면을 선정하는 분석을 수행하였다. 철도터널의 최적 단면 선정을 위한 이명감 분석은 다음과 같은 조건을 적용하여 검토하였다.

- (1) 각 열차별 속도 및 기밀도 적용
- (2) 1~6km 연장의 터널을 1km 간격으로 검토

Table 6. 터널연장 6km의 이명감 검토결과

내공 단면적	일반열차		고속열차	
	기준 : 1600Pa/4s		기준 : 1000Pa/10s	
	120km/h	150km/h	200km/h	230km/h
36.36m ²	937	1,085	1,102	1,275
38.10m ²	913	1,061	1,052	1,222
38.62m ²	897	1,055	1,038	1,207
39.45m ²	875	1,023	1,016	1,184
39.97m ²	867	1,003	996	1,171
41.80m ²	842	975	960	1,125
46.03m ²	774	897	874	1,033
50.35m ²	720	842	801	954

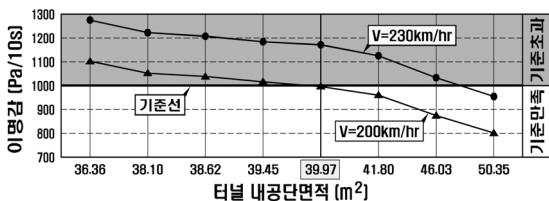


Fig. 6. EMU차속별 단면적에 따른 이명감 분포

이명감은 총 3개 차량의 4개 차속에 대하여 분석하였다. 200km/h 이하의 무궁화호(120km/h)와 새마을호(150km/h)의 분석결과는 모두 기준치 이하를 기록하였다. 낮은 차속과 높은 기준치에 기인한 결과인 것으로 분석되었다. EMU는 향후 고속화를 대비하여 200km/h (EMU200으로 지칭함) 및 230km/h(EMU230으로 지칭함)에 대한 분석을 수행하였다. 연장별 분석결과, 6km에서 최대값이 도출되었다. 분석 결과는 Table 6 과 Fig. 6에 나타내었고, EMU200은 39.97m² 이상일 때 이명감 기준을 만족하며 EMU230은 50.35m² 이상일 때 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2 미기압과 검토결과

이명감에서 검토된 단면적 39.97m² 및 50.35m²에 대한 적정성을 판단하기 위해 Table 1의 Process-model을 따라서 연장 1~6km에 대한 미기압파를 Fig. 7의 산출과정을 거쳐 검토하였다. 또한 이명감에서 선정되지 않은 단면에 대한 검토를 수행하여 단면적별 경향을 파악하여 검토결과와 오류발생 여부를 추가로 검토하였다.

검토결과는 단면적별로 일정 연장 이하일 때, 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 설계속도 200km/h에서 단면적 39.97m² 이상일 때, 전체 연장(6km 이하)에서 기준을 모두 만족하였다(Fig. 8). 설계속도 230km/h 결과는 Fig. 9과 같다. Table 7에 정리된 대로 단면 증가에 따라 기준 만족 연장도 증가하므로 분석과정 및 결과도출상의 오류는 없는 것으로 판단된다.

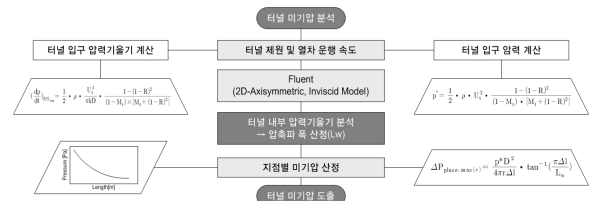


Fig. 7. 수치해석을 이용한 미기압파 산출과정

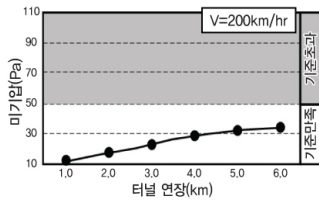


Fig. 8. EMU200(39.97m²)의 연장별 미기압 분포

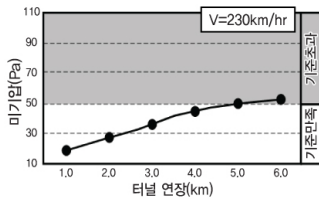


Fig. 9. EMU230(50.35m²)의 연장별 미기압 분포

이명감 및 미기압 분석결과에 따라 200km/h에서는 단면적 39.97m², 230km/h에서는 단면적 50.35m²로 선정하여 운영 중 환기에 적용하였다.

4.3 운영중 환기 검토결과

철도터널의 비연속적인 특성 및 디젤열차 운행 조건에

Table 7. EMU의 미기압 기준 충족 터널연장

내공 단면적	미기압 검토결과 기준 : 20m지점, 50Pa	
	200km/h	230km/h
36.36m ²	연장 2.5km 이하	연장 1.5km 이하
38.10m ²	연장 3.0km 이하	연장 2.0km 이하
38.62m ²	연장 5.0km 이하	연장 2.0km 이하
39.45m ²	연장 5.5km 이하	연장 2.5km 이하
39.97m ²	연장 6.0km 이하	연장 2.5km 이하
41.80m ²	연장 6.0km 이하	연장 3.0km 이하
46.03m ²	연장 6.0km 이하	연장 3.0km 이하
50.35m ²	연장 6.0km 이하	연장 4.5km 이하

따라 수치해석을 통하여 터널내 오염물질(일산화탄소, 질소산화물, 매연) 영향검토를 수행하였다. 이명감 및 미기압 분석결과를 토대로 선정된 39.97m² 및 50.35m²의 단면적에 대해 검토를 수행하였다. 적용한 조건은 다음과 같다.

- (1) “보성~임성리” 열차 운행스케줄 적용
- (2) 1~6km 연장의 터널을 1km 간격으로 검토

운영 중 환기 시 농도분석 결과는 서론에서 이미 기술

Table 8. 선정단면에 대한 연장별 오염물질 농도분포

단면적	일산화탄소 (CO)	질소산화물 (NOx)	매연 (Soot)
39.97m ²			
50.35m ²			

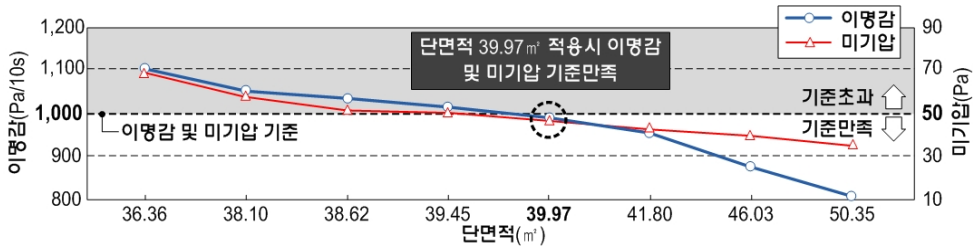


Fig. 10. 이명감 및 미기압과 기준 만족 단면적(6km)

한대로 단면적의 영향이 적게 나타나 분석결과로 오염물질 농도 저감시설이 필요한 연장을 선정하였다. 선정 단면적 39.97m²과 50.35m²의 터널 연장 1~6km에 대한 오염물질 농도 분석결과는 Table 8과 같다. 두 단면 모두 3.0km 이하일 때 NOx의 농도기준을 만족하여 단면적별 차이가 매우 적은 것으로 나타났다.

4.4 단면선정 결과

설계속도 200~230km/h에 대하여 검토연장 6km 까지 고려시 설계속도230km/h의 선정 단면적인 50.35m²의 경우, 4.5km를 초과시 미기압 기준을 초과하였다. 이명감 및 미기압과의 결과를 동시에 만족하는 단면적으로 39.97m²(설계속도 200km/h)을 최종 선정하였고 그 결과를 Fig. 10에 도해하였다.

5. 결론

최적단면적 선정을 위해 1~6km 연장에서, 10개 단면에 대한 공기역학적 분석을 수행한 결과, 최종 선정된 단면은 150km/h 이하의 일반철도에서 36.36m², 200km/h에서 39.97m², 230km/h에서 50.35m²로 열차의 속도 증가에 따라 선형적 증가가 아닌, 비선형적으로 점증적 증가율을 보였다. 본 연구에서 얻어진 최종적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 일반철도: 최고 150km/h 주행조건 적용시, 이명감은 최소단면적 36.36m²에서 기준을 만족하였다. 운영 중 환기 분석결과, 터널 단면적에 증대에 따른 효과가 가장 적어 3.5km 이상 터널에서는 단면적 50.35m²를 적용하여도 기준을 초과하나 3km 이하에서는 최소단면적인 36.36m²에서도 기준을 만족하였다.
- (2) 설계속도를 200km/h로 적용할 경우, 이명감과 미기압 모두 단면적 39.97m²에서 기준을 모두 만족(연장 6km 이하)하였다.
- (3) 설계속도 230km/h의 경우, 이명감 분석결과는 단면적 50.35m² 이상을 적용하여야 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 미기압의 경우, 50.35m² 단면적을 적용하였을 때 터널연장 4.5km 이하에서 기준을 만족시켰다.
- (4) 검토연장 1~6km 까지 결과를 모두 고려시 최종적으로 설계속도 200km/h를 적용하여 단면적 39.97m²로 선정되었다.
- (5) 선정 단면적 39.97m²에도 연장 3km를 초과하는 구간에 대한 별도의 오염물질 저감시설이 필요하였다. 또한, 설계속도 230km/h를 선정하여도 4.5km 초과연장에 대한 오염물질 및 미기압 저감시설이 동시에 필요한 것으로 검토되었다.
- (6) 본 연구에서는 철도터널 해석 수행시 단면 최소화를 통해 경제성 및 효율성 향상을 위하여 공기역학적 분석을 통한 단면 선정방법의 최적화를 제안하였다. 제안된 과정을 통하여 단면적을 선정하였고 선정과정에

서의 변수를 체크하기 위하여 선정과정 이외의 Case도 분석을 하여 발생할 수 있는 변수를 확인하였다. 단면선정 process-model을 따라 단면적을 선정 및 최종적으로 저감시설(환기구) 설치 연장을 결정하는 과정을 최종적으로 검토한 결과, 과정상 문제점이 없는 것으로 검토되었다.

(7) 끝으로 향후 본 연구 범위 이상의 연장 및 차속 등에 대하여 최적단면선정방법에 대한 Feed-back 등을 통한 논의 및 미기압 저감시설 설치 필요연장과 오염물질 저감시설 설치 필요연장에 관한 연구와 저감률에 관한 연구를 추가적으로 수행하여 결과의 Database화 등의 작업이 요구된다.

참고문헌

1. UIC CODE 779-11 2nd edition, Original(2005), "Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations", pp. 11~25.
2. UIC CODE 660 2nd edition, Translation(2002), "Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains", pp. 11~25.
3. Rudolf Bopp, Bernd Hagenah, "Aerodynamics, ventilation and tunnel safety for high speed rail tunnels".
4. 한국철도시설공단(2010), "수서~평택 고속철도 궤도중심간격 및 터널 단면적 검토 보고서".
5. 한국철도시설공단(2012), 원주~강릉 철도건설 "터널 공기압 영향 분석 보고서".
6. 한국철도시설공단(2013), 보성-임성리 철도건설 "QRA, 환기 및 공기역학적 검토 보고서".
7. 한국철도시설공단(2013), 보성-임성리 철도건설 "단면 최적화 검토 보고서".
8. 한국철도시설공단(2013), 동두천-연천 복선전철 기본 및 실시설계 "단면 최적화 검토 보고서".
9. 이호근, 강현욱, 김현수, 김홍문(2013), "TBM 철도터널 단면 선정을 위한 공기역학적 특성 분석".
10. 김선홍, 문연오, 석진호, 김기림, 김찬동, 유호식(2008), "호남 고속철도 터널 단면선정을 위한 미기압파 특성 분석에 관한 연구".
11. 남성원(2010), "철도 터널 단면적 결정에 고려할 공력 요소에 관한 연구".