

TBM 철도터널 단면선정을 위한 공기역학적 특성 분석

이호근^{1*} · 강현욱² · 김현수³ · 김홍문⁴

¹정회원, (주)비엔텍아이엔씨 기술기획실 팀장

²정회원, (주)비엔텍아이엔씨 기술기획실 실장

³정회원, (주)평화엔지니어링 부장

⁴정회원, (주)평화엔지니어링 상무

Analysis of aerodynamic characteristics for the selection of cross-section to the TBM railway tunnels

Ho-Keun Lee^{1*}, Hyun-Wook Kang², Hyun-Soo Kim³, Hong-Moon Kim⁴

¹Bnttek Inc, Team manager

²Bnttek Inc, Director

³Pyunghwa Engineering Consultants Ltd., General manager

⁴Pyunghwa Engineering Consultants Ltd., Managing Director

ABSTRACT: Although the TBM method is mainly adopted in overseas market including the Europe, etc, the method scarcely adopted in domestic market. For highly enhancing applications of the TBM method for railway, It is needed to select the optimal cross-section considering design elements of civil engineering and aerodynamic effects. Also, it is needed to establish plan of proper section as well as reviewing aerodynamic effects and consideration about civil engineering elements such as length of tunnel, speed of railway, height of whole lines and size of utility tunnel, etc. Even though it should be recently considered high-speed railway tunnels and required to be standard establishments in aerodynamic reviews, it is being applied to be criteria of inconsistent pneumatic analysis owing to be not related with domestic standards. In this study, therefore, we are willing to establishment of domestic and foreign aerodynamic standards and investigate correlation between optimal cross-section and aerodynamic effects of TBM railway tunnels.

Keywords: TBM railway tunnel, tunnel cross-section, pressure comfort, micro pressure wave

초 록: 유럽 등 해외에서는 TBM 굴착방식을 이용한 터널이 다수 건설되고 있지만, 국내에서는 거의 적용되고 있지 않다. TBM 철도터널의 적용성을 높이기 위해서는 토목적 설계요소와 공기역학적 영향을 고려한 최적단면을 선정할 필요가 있다. 이러한 최적단면의 선정시에는 터널 연장, 열차 속도, 전차선 높이, 공동규 규격 등 토목적인 설계요소에 대한 고려와 함께 공기역학적 영향을 검토하여 적정 단면 계획의 수립이 필요하다. 공기역학적 검토시에는 최근 철도터널의 고속화를 고려하고 적절한 분석기준의 수립이 필요하지만 현재 국내에서는 관련기준이 없어 터널마다 상이한 공기압 분석기준이 적용되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내외 이명감 및 미기압 분석기준에 대하여 검토하고, TBM 터널단면별 공기역학적 분석을 통해서 TBM 철도터널의 단면선정시 공기역학적 영향과의 상관관계에 대해 분석하였다.

주요어: TBM 철도터널, 터널단면, 이명감, 미기압

*Corresponding author: Ho-Keun Lee

E-mail: hokuni@bnttek.co.kr

Received November 15, 2013; Revised November 22, 2013;

Accepted November 25, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근의 철도터널은 대부분 200 km/h 이상의 속도로 운행하는 것을 목표로 하는 고속선으로 계획되고 있다. 철도터널의 고속화는 2002년 경부고속철도를 운행하는 300 km/h 급 KTX-I 차량의 보급 이후 350 km/h의 운행을 목표로 하는 KTX-II(산천)차량과 250 km/h 이상의 속도로 개발중인 EMU 차량 등을 통해 수송의 신속성을 확보하여 철도교통의 경쟁력을 강화하고자 하는 목적이다.

고속열차가 터널구간을 통과할 때에는 여러 가지 공기역학적인 문제가 발생한다. 터널에 진입하는 열차에 의해 발생하는 압축파 등에 의한 열차 객실내 승객의 이명현상과 고속열차가 터널에 진입할 때 터널의 출구부로 방출되는 미기압파의 영향이 대표적이다(Kwon, H.B., 2009). 이러한 문제는 해외에서도 이슈화 되고 있으며, 문제 해결을 위한 연구가 다수 진행되고 있다.

본 연구는 열차의 기밀도와 국내외 공기압 분석 기준에 대한 연구를 통해 검토 기준을 수립하고 고속열차가 운행하는 TBM 철도터널의 단면 선정시 공기역학적 특성을 반영하기 위한 상관관계에 대하여 분석하고자 한다.

이명감 및 미기압파의 수치해석을 통한 분석은 Table 1과 같이 터널형식, 열차종류, 속도에 따라 터널 연장별로 분석하였다.

Table 1. The cases of aerodynamic analysis

Tunnel type	Train type	Train speed	Tunnel length
Double-track / Single-track tunnel	KTX 350	350 km/h	2~10 km
	EMU 250	250 km/h	
	EMU 200	200 km/h	

2. 열차의 기밀도

고속철도차량이 터널에 진입하게 되면 압축파가 생성되고 터널 끝단에서 반사되어 열차주위 압력이

급격히 변동하게 되며, 객실내 압력 변동이 발생하여 승객들은 이명현상을 느끼게 된다. 이럴 경우, 열차내부의 압력변동은 열차의 종류마다 다르게 나타나게 되는데 이는 열차의 기밀도(Pressure tightness coefficient, τ) 차이에 의한 영향이다.

국내에서는 “철도차량안전기준에 관한 지침(2011. 국토교통부 별표5)”의 “객차 등의 기압변화 세부기준”에서 객실내 압력변동의 기준을 제시하고 있다.

초기에 도입된 고속철도차량인 KTX-I의 경우에는 3,000 Pa의 압력에서 100 Pa의 압력으로 하강하는데 소요되는 시간을 40초이상으로 규정하였으나, 최근의 객차등의 기압변화 세부기준에서는 3,000 Pa의 압력에서 1,100 Pa의 압력으로 하강하는데 소요되는 시간을 18초 이상으로 규정하고 있다. 이를 바탕으로 열차의 기밀도를 산정하면 Table 2와 같이 KTX-I 차량의 경우 $\tau=11$, KTX-II 차량의 경우 $\tau=18$ 의 기밀도로 제작된다. 또한 신규로 제작되는 200 km/h 이상 고속차량의 경우 $\tau=18$ 기준을 만족하도록 제작되므로 본 연구에서는 200 km/h 이상 고속열차의 기밀도를 $\tau=18$ 로 적용하였다.

Table 2. Coefficient, τ of pressure tightness

Train Type	Pressure tightness coefficient, τ
KTX-I	$\tau = \frac{40}{\ln\left(\frac{3,000}{100}\right)} = 11$
KTX-II	$\tau = \frac{18}{\ln\left(\frac{3,000}{1,100}\right)} = 18$

3. 공기압 기준

3.1 이명감 기준

(1) UIC code 779-11 (R), UIC code 660 (OR) 국제철도연맹의 UIC 779-11 (Recommendatory - Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations)에 따르면

기밀차량(sealed train)과 비기밀차량(unsealed train)의 이명감 기준에 대해 Table 3과 같이 기본적인 값(Base-line)을 제시하고 있다.

Table 3. Base-line pressure comfort criteria (UIC 779-11)

Train Type	Pressure tightness coefficient, τ
Unsealed train ($\tau_{dyn} < 0.5s$)	4.5 kPa/4s : two trains passing in a double-track tunnel
	3.0 kPa/4s : single-track tunnel
Sealed train ($\tau_{dyn} > 0.5s$)	1,000 kPa/1s
	1,600 kPa/4s
	2,000 kPa/10s - single-track & double-track tunnel

Table 3. 의 UIC 779-11에 제시된 압력쾌적성 기준은 강제규정이 아닌 권고치(Recommendatory)로 철

도터널의 단면을 계획하기위한 기초적인 자료를 제공하기 위한 기본적인 값(Base-Line)을 나타낸 수치로 판단할 수 있다.

또한, 같은 UIC에서 제시한 UIC code 660 (Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains)에서는 Table 4와 같이 객실내 압력변화기준으로 제시되어 있다.

Table 4. Pressure variation in the vehicle interior (UIC 660)

Period	Maximum variation
One second	500 Pa/s
3 seconds	800 Pa/3s
10 seconds	1,000 Pa/10s
60 seconds	2,000 Pa/60s

Table 5. Existing pressure comfort criteria (international)

Country	Route	Pressure comfort criteria	Operating conditions
Japan	Shinkansen	- Max. change of pressure : 1,000 Pa (no time period given but suspected to be a few seconds) - Max. rate of change of pressure : 200 Pa/s - The latter rate of pressure change criterion is thought to have recently been relaxed to 300-400 Pa/s.	- high-speed operations : 210, 240, 270 km/h - sealed rolling stock - tight bore double-track
UK	Inter-City Route	- Pre-1986 Max. change of pressure : 3,000 Pa/3s - After 1986 Max. change of pressure : 4,000 Pa/4s	- moderate to high-speed operations : 160, 200 km/h - unsealed rolling stock - tight bore double-track
	Rail Link (London to Channel Tunnel)	- Single-track tunnels Max. change of pressure : 2,000 Pa/4s - Double-track tunnels Max. change of pressure : 3,500 Pa/4s	- high-speed operations : 225-300 km/h - unsealed rolling stock - large bore single/double
USA	U.S.UMTA - Underground rapid transit system	- Max. change of pressure : 700 Pa/1.7s - Max. rate of change of pressure : 410 Pa/1.7s (as an average rate over longer periods than 1.7 second)	- low-speed operations : 80-100 km/h - unsealed rolling stock - tight bore tunnels - regular commuter customers
Germany	German Railways "Neubaustrecken" (new line)	- Until recently, criteria similar to those of the Japanese Shinkansen services have been used. However, German Railways (DB) now use criteria which are defined by the following three components, all of which have to be complied with ; - Max. change of pressure : 500 Pa/s and : 800 Pa/3s and : 1,000 Pa/10s - However, these maximum changes refer to single-train operation only, not to the two train passing situations that can arise in double-track tunnels.	- high-speed operations : 240-280 km/h - sealed rolling stock - large bore tunnels
Italy	Italian Railways (FS)	- Max. change of pressure : 1,500 Pa/s (no time period stated) - Max. rate of change of pressure : 500 Pa/s	- high-speed operations - sealed rolling stock - moderate-size bore tunnels

(2) 해외의 압력변동 기준

각국의 기준은 UIC 779-11보다 강화된 기준을 적용하고 있으며 대체적으로 UIC 660과 유사한 수준의 쾌적도 기준을 적용하고 있다. 또한 최근 까지 일본의 신칸센과 유사한 수준의 기준을 적용하던 독일에서는 UIC 660의 기준과 유사한 1초, 3초, 10초간 압력변화 기준을 적용하고 있지만 60초에 대한 검토기준은 적용하고 있지 않다(Table 5).

영국과 미국의 압력쾌적도 기준은 상대적으로 미기밀 차량의 저속열차 주행을 고려한 기준으로 본 연구를 통해 검토하고자 하는 고속열차의 압력쾌적도 기준과는 비교가 어려우므로 일본, 독일, 이탈리아의 기밀고속차량에 대한 객실내 압력쾌적도 기준에 대해 비교 검토하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

(3) 국내 기준

국내에서는 법령화된 이명감 기준이 없으며 “철도 차량안전기준에 관한 지침(2011.국토교통부 별표5)”의 “객차등의 기압변화 세부기준”에서 객실내 압력변동의 기준을 제시하고 있다(Table 6).

Table 6. Pressure variation in the vehicle interior

Period	Maximum variation
One second	500 Pa/s
3 seconds	800 Pa/3s
10 seconds	1,000 Pa/10s
60 seconds	2,000 Pa/60s

이 기준은 UIC 660기준(Table 4)과 동일한 값으로 고속열차 차량 제작시 객실내 승객의 압력쾌적도 지표로 사용할 수 있다.

또한 현재까지 경부 및 호남고속철도의 터널 설계시 적용된 이명감 기준은 Table 7과 같으며(공기역학 측면에서의 철도터널 내공단면 결정에 관한 연구, 2012) 이 기준은 독일에서 수행한 압력변화에 대해 승객의 안락감을 통계적으로 분석한 자료와 UIC 779-11의 기준을 바탕으로 적용된 기준이다.

Table 7. Pressure variation in the vehicle interior (Gyeongbu & Honam high-speed railway tunnel)

Single-track tunnels (1 train)	Double-track tunnels (2 train)
800 Pa/3sec	1,250 Pa/3sec

단독운행시 기준은 독일에서 사용되고 있는 기준 중 3초간 압력변화 수치와 동일하나 교행시 기준은 UIC 779-11의 4초간 압력변화 1,600 Pa/4sec 기준을 보간한 것으로 판단된다.

(4) 이명감 기준 선정

고속으로 운행하는 열차내에서 승객이 느끼는 이명 현상은 개인차가 크기 때문에 각국마다 상이한 기준을 적용하고 있는 추세이며 이러한 기준을 비교하면 Fig. 1와 Table 8과 같다.

국제철도연맹의 UIC 779-11에서 제시하는 압력쾌적성 기준은 권고자료(Recommendatory)로서 최소기준의 성격이 강하다. 이에 따라 해외 각국의 기준보다 2배정도로 완화된 것으로 판단되며 기밀차량을 운행하는 해외에서는 UIC 779-11보다 엄격한 기준을 적용하고 있으며 오히려 UIC 660에서 제시하는 압력쾌적성 기준과 유사한 수준의 값을 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 해외 기준과 유사한 수치의 압력쾌적도 기준을 제시하고 있는 “철도차량안전기준에 관한 지침(2011.국토교통부 별표5)”의 “객차등의 기압변화 세부기준”(Table 6)을 적용하고자 한다.

3.2 미기압 기준

(1) 일본 신칸센(新幹線)

일본의 경우 고속열차인 신칸센이 다수 운영되고 있으며 터널 단면이 63.4 m²정도로 비교적 작다. 입출구 부근 주택의 창이나 문이 갑자기 움직이면서 소음을 발생시키는 미기압에 대한 문제가 오래전부터 발생됨에 따라 미기압 기준에 대한 연구가 지속적으로 이뤄져 왔다.

일본의 산요신칸센(山陽新幹線) 건설당시 출구 20 m

지점에서 20 Pa의 기준이 제시되어 2007년까지 이 기준이 준용되어 왔다.

2008년에 일본의 “산악터널 설계시공 표준 및 동해설(철도운수시설 정비지원기구, 2008)”에서는 ① 갱구 중심 20 m지점에서 50 Pa 이상인 경우, ② 입출구부민가에서 20 Pa 이상으로 추정되는 경우, ③ 터널 갱구부근에 병원, 학교 등 기타 조용한 환경을 필요로 하는 시설이 있는 경우 파열을 대책을 수립하도록 제시하고 있다.

현재 유럽과 중국 등을 포함하여 전세계적으로 터널 미기압과 대책 기준은 일본 기준을 준용하고 있는 것으로 파악되고 있다.

(2) 독일 DB (Deutschebahn)

독일국영철도(DB)에서는 아직 미기압과에 대한 기준이 정해져 있지 않지만 연구를 진행중이며 현재 터널 갱구 중심에서 외부로 50 m 지점에서 측정된 미기압과 피크값이 20 Pa 이하로 정하고 있다.

실제 터널 미기압과 해석결과 20 m 지점에서 50 Pa 수준의 미기압과는 50 m 지점에서 약 20 Pa의 값이 도출된다. 따라서 독일의 미기압과 허용기준은 일본 신칸센의 미기압과 허용기준인 20 m지점 50 Pa 기준과 유사한 수치로 판단할 수 있다(Micro-pressure Waves KOREA for DB International, 2007).

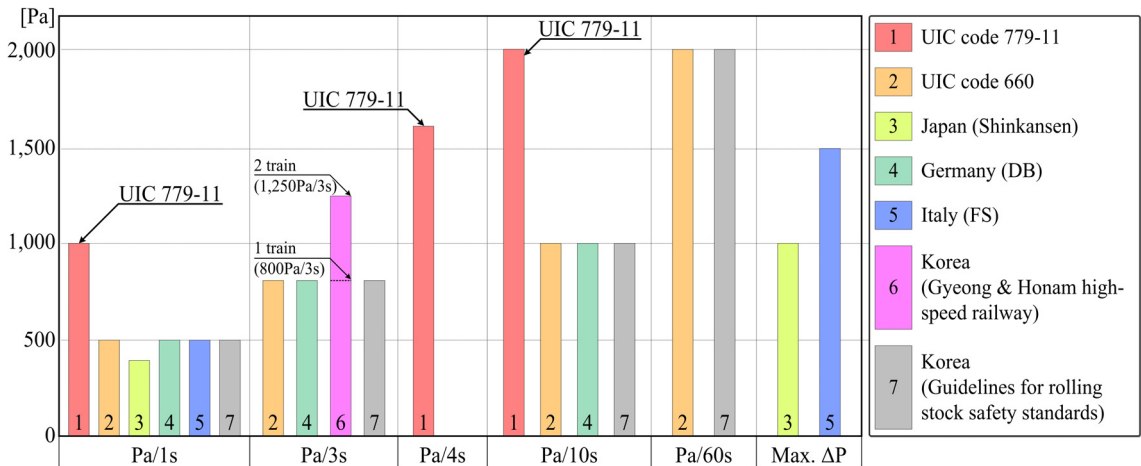


Fig. 1. Comparison of pressure variation in the vehicle interior

Table 8. Comparison of pressure variation in the vehicle interior criteria

Period	① UIC 779-11	② UIC 660	③ Japan	④ Germany	⑤ Italy	⑥ Korea (Gyeongbu & Honam High-Speed Railway)	⑦ Korea (Guidelines for rolling stock safety standards)
One second	1,000 Pa/s	500 Pa/s	400 Pa/s	500 Pa/s	500 Pa/s	-	500 Pa/s
3 seconds	-	800 Pa/3s	-	800 Pa/3s	-	800 Pa/3s (1train) 1,250 Pa/3s (2train)	800 Pa/3s
4 seconds	1,600 Pa/4s	-	-	-	-	-	-
10 seconds	2,000 Pa/10s	1,000 Pa/10s	-	1,000 Pa/10s	-	-	1,000 Pa/10s
60 seconds	-	2,000 Pa/60s	-	-	-	-	2,000 Pa/60s
Max. ΔP	-	-	1,000 Pa	-	1,500 Pa	-	-

(3) 국내기준

국내의 미기압 검토는 경부고속철도, 호남고속철도 및 기타 고속열차 운행이 계획된 장대터널의 미기압영향 검토 기준은 Table 9와 같다.

Table 9. Criteria of MPW (Micro Pressure Wave) in Korea

Project	Criteria of MPW
Gyeongbu high-speed railway	20 Pa at 20 m distance to portal or 20 Pa at object of target
Honam high-speed railway	20 Pa at 20 m distance to portal or 20 Pa at object of target
Wonju-Gangneung railway	20 Pa at object of target
Suseo-Pyeongtaek high-speed railway	50 Pa at 20 m distance to portal

경부고속철도와 호남고속철도는 2008년 이전의 일본의 산요신칸센 기준인 20 m 지점에서 20 Pa 또는 보안물건이 있는 경우 보안물건에서 20 Pa 이하의 기준을 준용한 것으로 판단된다. 2008년 이후에 계획된 원주~강릉 복선전철 및 수도권 고속철도 등의 장대터널 구간에서는 변경된 일본기준(산악터널 설계시공 표준 및 동해설, 2008)을 적용한 것으로 보인다. 원주~강릉 복선전철에서는 20 m 지점 50 Pa 기준을 준용하여 적용한 것으로 판단되며 2008년 일본의 기준이 20 m 지점 50 Pa 기준으로 변경되면서 수서평택 고속철도 건설당시 기준은 20 m 지점 50 Pa로 변경 적용한 것으로 판단된다.

(4) 미기압 기준 적용

국내에는 아직까지 규정된 미기압 검토기준이 없으며 경부 및 호남 고속철도와 수서~평택간 고속철도, 원주~강릉 장대터널 설계시 마다 다소 상이한 미기압 기준을 적용하였다. 본 연구에서는 최근 적용된 수서~평택간 고속철도의 검토기준인 20 m 지점에서 50 Pa 기준을 적용하였다.

4. TBM 철도터널의 공기압 분석

4.1 검토단면

공기압영향 분석을 위한 TBM 터널단면은 열차의 제원, 전차선 높이, 공동구 규격 등 토목적인 설계요소를 반영하여 Table. 10과 같은 단면을 선정하여 검토하였다.

Table 10. Cross-section type

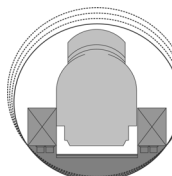
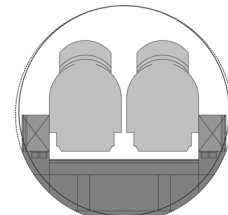

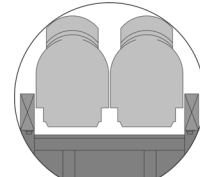
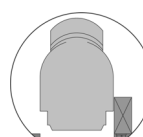
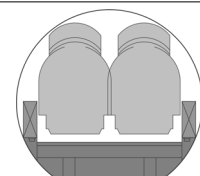
Train	Single-track tunnel	Double-track tunnel
EMU 200		
	Ar = 46.24 m ²	Ar = 67.04 m ²
EMU 250		
	Ar = 45.23 m ²	Ar = 68.17 m ²
KTX 350		
	Ar = 49.59 m ²	Ar = 87.04 m ²

Table 10의 가정단면에 대해 이명감 및 미기압영향을 분석하였으며 앞절에서 언급한 공기압 기준을 만족하지 못하는 경우 단면의 증대를 통해서 공기압 기준이 만족 가능한 단면을 검토하여 최적 단면에 대해 제시하였다.

4.2 이명감 분석

(1) 분석조건

TBM 철도터널의 최적 단면선정을 위한 이명감 분석은 다음과 같은 조건을 적용하여 검토하였다.

- ① $\tau = 18$
- ② 3 km 마다 통풍공 환기구 설치(3 km 이상 터널)
- ③ 순차적으로 5%씩 단면적을 증가시켜 적정단면 검토

열차의 기밀도(τ)는 앞서 언급한 바와 같이 국내 차량제작 기준에 의해서 18이상의 기밀도를 지닌 차량으로 검토하였으며 3 km 이상 장대터널의 경우 3 km 마다 압력저감이 가능한 환기구가 설치된 것으로 가정하여 분석하였다. 또한, 검토단면이 이명감 기준을 만족하지 못하는 경우 약 5%씩 단면을 증대시켜서 적정단면을 선정하는 추가 분석을 수행하였다.

(2) 이명감 분석결과

TBM 철도터널의 최적단면을 선정하기 위한 이명감 영향 검토 결과는 Table 11~13과 같다. 분석결과 기밀차량인 고속열차 객실내 승객이 느끼는 이명현상은 시설한계를 만족하는 철도터널 단면으로 기준치 이내의 값을 만족할 수 있는 것으로 검토되었다. 다만 350 km/h 이상의 고속으로 주행하는 열차가 터널내에서 교행을 하게 되는 경우에는 기준을 초과하였다.

이러한 경우 이명감 기준을 만족하기 위해서는 10 m²이상의 단면증대와 함께 경사터널, 수직구 등을 이용한 통풍공 설치가 필요한 것으로 분석되었다.

또한, 고속열차 운행시 객실내 승객의 이명감은 승객마다 느끼는 정도의 차이 등이 발생할 수 있으므로 열차 운행계획을 조절하여 터널내 고속열차의 교행이 이뤄지지 않도록 하는 등 합리적인 열차운행계획을 수립하면 터널 단면적 증대를 통한 공기압 저감

방안을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 미기압 검토

(1) 미기압 분석조건

고속의 열차가 터널을 진입할 때 발생하는 압력과 터널 출구로 방출되어 소음 및 진동의 피해를 야기하는 것으로 알려져 있다. 출구부에서 발생하는 미기압파는 터널 입출구 및 터널 내부의 압력기울기 변화, 열차속도 및 터널연장 등이 중요한 요소이며 이러한 요소들을 반영할 수 있는 범용 유체해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 분석하였다.

또한 TBM 철도터널의 표준단면 선정을 위한 미기압 분석은 다음과 같은 조건을 적용하였다.

- ① 3 km 마다 통풍공 환기구 설치(3 km 이상 터널)
- ② 약 5%정도의 단면 증대를 통해 적정단면 검토
- ③ 45도 경사갱문 적용
- ④ 2~10 km 연장의 터널을 2 km 간격으로 검토

이명감 분석과 마찬가지로 미기압 분석시에도 3 km간격의 환기구를 고려하고 5%씩 단계별 단면증대를 통해서 적정단면을 분석하였다.

또한 일반적으로 터널 갱문형식에 많이 쓰이는 45도 경사갱문을 적용하였으며 단면에 따른 미기압영향 분석을 위해 별도의 압력저감 시설물은 적용하지 않았다.

(2) 미기압 분석결과

TBM 철도터널의 운행열차에 따른 미기압 영향은 Table 14~16과 같이 검토되었다.

EMU 200차량의 경우 모든 경우에 대해 20 m 지점 미기압이 50 Pa 이내로 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 11. Analysis results of pessure inside train (EMU200)

Train type	Tunnel type	Cross section area (m ²)	Tunnel length (m)	Pressure comfot				
				500 Pa/s	800 Pa/3s	1,000 Pa/10s	2,000 Pa/60s	
EMU 200	Single-track tunnel (1 train)	46.24	2	73.28	203.94	429.50	854.29	O.K
			6	73.28	173.85	326.28	614.83	O.K
			10	67.39	132.61	272.97	761.03	O.K
	Double-track tunnel (1 train)	67.04	2	67.68	196.85	443.56	976.59	O.K
			6	67.39	144.92	322.13	701.73	O.K
			10	67.39	132.61	272.97	761.03	O.K
	Double-track tunnel (2 train)	67.04	2	80.23	235.10	504.82	903.43	O.K
			6	85.47	186.94	535.56	778.21	O.K
			10	129.72	247.70	567.65	1,157.63	O.K

Table 12. Analysis results of pessure inside train (EMU250)

Train type	Tunnel type	Cross section area (m ²)	Tunnel length (m)	Pressure change				
				500 Pa/s	800 Pa/3s	1,000 Pa/10s	2,000 Pa/60s	
EMU 250	Single-track tunnel (1 train)	45.23	2	101.99	282.61	597.83	1100.25	O.K
			6	85.28	198.19	513.04	1229.65	O.K
			10	91.58	173.85	438.81	1383.08	O.K
	Double-track tunnel (1 train)	68.17	2	87.78	253.02	512.68	917.47	O.K
			6	74.71	215.42	619.36	1092.96	O.K
			10	73.24	198.67	566.15	1285.82	O.K
	Double-track tunnel (2 train)	68.17	2	114.57	317.85	830.91	1346.45	O.K
			6	88.50	227.41	494.26	1529.38	O.K
			10	88.50	217.07	535.06	889.21	O.K

Table 13. Analysis results of pessure inside train (KTX350)

Train type	Tunnel type	Cross section area (m ²)	Tunnel length (m)	Pressure change				
				500 Pa/s	800 Pa/3s	1,000 Pa/10s	2,000 Pa/60s	
KTX 350	Single-track tunnel (1 train)	49.59	2	104.98	283.79	730.13	1038.60	O.K
			6	99.38	205.75	512.37	1541.32	O.K
			10	99.38	205.75	457.29	1611.21	O.K
	Double-track tunnel (1 train)	87.04	2	107.23	284.32	740.62	968.41	O.K
			6	107.23	215.63	577.33	1640.46	O.K
			10	107.23	212.83	519.51	1631.45	O.K
	Double-track tunnel (2 train)	87.04	2	146.33	402.89	765.38	765.39	O.K
			6	240.21	490.03	1352.90	2414.81	N.G
		97.54	10	224.72	459.12	1207.40	2826.77	N.G
			6	135.96	315.06	998.53	1737.57	O.K
			10	151.86	312.44	884.59	1978.34	O.K

Table 14. Analysis results of MPW (EMU200)

Cross sectional area (m ²)	Tunnel length (m)	MPW at 20 m distance to portal	
46.24	2	18.3	O.K
	4	20.7	O.K
	6	28.6	O.K
	8	24.7	O.K
	10	17.9	O.K
67.04	2	12.9	O.K
	4	16.4	O.K
	6	22.7	O.K
	8	21.8	O.K
	10	17.7	O.K

250 km/h의 고속으로 운행하는 EMU250차량의 경우 환기구가 1개소 적용된 6 km 연장에서 미기압 기준을 초과하고 환기구가 2개소 계획된 8 km 연장에서는 만족하는 결과가 나타났다.

Table 15. Analysis results of MPW (EMU 250)

Cross sectional area (m ²)	Tunnel length (m)	MPW at 20 m distance to portal	
45.23	2	35.8	O.K
	4	40.2	O.K
	6	55.2	N.G
	8	47.3	O.K
	10	34.1	O.K
68.17	2	24.8	O.K
	4	31.6	O.K
	6	43.4	O.K
	8	42.0	O.K
	10	34.3	O.K

EMU 250열차 운행시 단선터널인 45.23 m²의 단면은 약 52 m²정도의 단면이 요구되는 것으로 분석되었다. 이는 250 km/h 속도로 운행하는 터널의 경우 비교적 적은 단면 증대를 통해서 미기압 기준을 만족할 수 있음을 보여준다.

350 km/h의 고속열차가 운행하는 경우는 단선 및 복선터널의 모든 단면에 대해서 미기압기준을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다(Table 16).

Table 16. Analysis results of MPW (KTX 350)

Cross section area (m ²)	Tunnel length (m)	MPW at 20 m distance to portal	
49.59	2	91.0	N.G
	4	105.2	N.G
	6	142.3	N.G
	8	127.1	N.G
	10	95.9	N.G
87.04	2	59.5	N.G
	4	79.2	N.G
	6	107.7	N.G
	8	109.3	N.G
	10	94.6	N.G

미기압 기준 50 Pa을 2배이상 초과하는 경우가 발생하며 단면의 증대를 통해서 미기압 기준을 만족하기 위해서는 약 200 m²이상의 대단면이 요구되는 것으로 분석되었다.

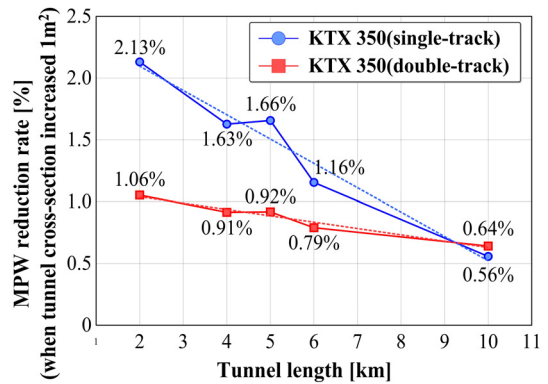


Fig. 2. MPW reduction rate (when tunnel cross-section increased 1 m²)

이러한 결과는 Fig. 2에서 보듯이 단면증대에 따른 미기압 저감율이 현저히 낮아 현실적으로 반영하기 곤란한 크기의 터널단면이 필요하게 된다.

따라서 단면의 증대를 통해 미기압 영향을 최소화하는 것보다 기타 공기압 저감 시설물 계획을 통해 해결하는 것이 합리적인 방법으로 판단된다(Kim, D.H., 2000).

5. 결론

TBM 철도터널의 공기역학적 특성을 고려한 최적 단면에 대한 선정방법에 관한 연구를 위해 철도터널 내 공기역학적 분석 기준에 대한 연구와 토목적 시설 한계를 만족하는 TBM 철도터널 단면에 대한 공기역학적 영향을 검토를 통해 TBM 철도터널의 최적 단면 계획 방향을 도출 하였다. 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 이명감 분석 기준은 해외 각국마다 차이를 보이며 UIC 779-11의 경우 각국의 기준보다 완화된 기준으로 판단되며 해외 각국의 이명감 기준과 유사한 수준인 국토교통부의 철도차량 안전기준에 관한 지침에서 제시하고 있는 객차등의 기압변화 세부 기준을 준용하는 것이 적절한 것으로 판단되었다.
2. 미기압 영향에 대해 많은 연구 및 실측이 진행되어 온 일본의 신칸센 기준은 국내 및 해외에서 다수 인용되어 활용하고 있으므로 일본의 미기압 기준을 준용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 민가의 영향을 고려할 수 없는 본 연구에서는 20 m 지점에서 50 Pa 기준을 적용하였다.
3. 이명감 영향 분석결과 토목적인 설계기준을 만족하는 최적 단면 계획시 350 km/h의 고속으로 주행하는 열차의 교차주행시 87 m² 단면적에서는 이명감 기준을 초과하며 약 10 m²의 단면증대를 통해서 이명감 기준 만족이 가능한 것으로 분석되었다.
4. 미기압 영향 분석결과 200~250 km/h로 주행하는 고속열차의 운행시 큰 문제는 발생하지 않는 것으로 나타났지만 350 km/h이상의 고속으로 주행하는 경우 20 m 지점에서 미기압 기준 50 Pa을 2배 이상 초과하는 높은 수치를 나타내는 것으로 분석되었다.
5. 미기압 기준 만족을 위해서는 200 m²이상의 비현실적인 단면증대가 필요한 것으로 나타났으며, 터널 단면 1 m² 증대시 미기압 저감률은 최대 2.13~

0.56%로 미기압 저감효과가 작아 10%이상의 미기압 저감이 필요한 경우 단면의 증대를 통한 미기압 저감은 비효율 적인 것으로 판단된다.

6. TBM 철도터널의 최적 단면 선정을 위해서는 공기역학적 검토를 통해 공기압 저감 필요성이 작은 경우에는 단면의 증대를 통해서 공기압 저감이 가능하지만 20%이상의 공기압 저감이 필요한 경우 단면의 증대와 함께 환기구 통풍공, 입출구부 후드 등 공기압 저감시설물에 대한 검토를 통해 경제성을 확보할 수 있는 터널단면 계획이 필요한 것으로 검토되었다.
7. 본 연구 결과는 3 km마다 수직구를 설치하는 조건으로 터널 연장별, 단면별 이명감 및 미기압 영향을 고려한 연구결과로 수직구 간격변화에 따라 결과값의 차이가 나타날 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술 개발(과제번호 : 10기술혁신E09)” 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kwon, H.B., Nam, S.W., Kwak, J.H. (2009), “Assessment of the pressure transient inside the passenger cabin of high-speed train using computational fluid dynamics”, Journal of The Korean Society for Railway, Vol. 12-1, pp. 65-71.
2. Kim, S.H., Moon, Y.O., Kim, G.L., Jo, H.J., Lee, S.W. (2012), “A study on the determination of railway tunnel cross-section areas in the aerodynamic aspect”, 2012 Annual Conference of Korean Tunnelling and Underground Space Association, pp. 109-117.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), “Guidelines for rolling stock safety standards”.

4. UIC code 779-11, "Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations" 2nd edition, February 2005, International Union of Railways.
5. UIC code 660, "Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains" 2nd edition, August 2002, International Union of Railways
6. Kim, D.H., Shin, M.H., Han, M.S. (2000), "Experimental study on the slit cover hood for reducing the micro pressure waves in high-speed train-tunnel interfaces", TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 2, No. 3, pp. 3-10.
7. Report 07-P-5256-TZF 13-T2-E (2007), "Micro-pressure Waves KOREA for DB International", Deutsche Bahn AG.
8. 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (2008), "山岳トンネル設計施工標準・同解説", pp. 119.