이명감 특성을 고려한 호남고속철도 터널단면 설정에 관한 연구

A study on the optimum cross-section design that satisfies the criteria of aural discomfort in Honam high speed railway tunnel

김선홍, 문연오, 석진호, 김기림, 김찬동, 유호식

abstract

When the trains runs at a high speed in the tunnel, passengers feel a pain in the ear that fast pressure fluctuation inside the tunnel being delivered with pressure fluctuation inside the passenger car. These phenomena are called "aural discomfort".

Aural discomfort increase the passengers' uncomfort so that it is decreased a service level and serious case, it is able to damage the ear of the passenger. therefore aural discomfort must be considered the high-speed railroad tunnel cross-section design.

To solve the problem of aural discomfort in a railway tunnel, some countries have standards on aural discomfort. It has been studied that different countries have different standards on aural discomfort.

For that reason, the criteria of aural discomfort was reviewed through the standards of Kyungbu HSR line and different countries in this paper. And then Numerical Analysis of the Characteristics with tunnel cross-section change has been used for the selection of the optimum cross-section of Honam

The numerical analysis results were compared to field test results in order to verifying the reliability of the numerical analysis

Key words : aural discomfort, the criteria of aural discomfort, tunnel

초록

열차가 고속으로 터널을 주행하는 경우, 터널내부의 압력변동은 곧 차량내부의 압력변동으로 전달되어 승객의 귀를 아프게 하는 경우가 있다. 이러한 현상을 이명감이라 하며, 이명감은 승객의 불쾌감을 증가시켜 서비스 수준을 저하시키고, 심할 경우 승객의 귀를 손상시킬수 있으므로 고속철도 터널설계시 반드시 고려해야 한다.

이에, 국내 및 해외 고속철도의 경우, 이명감 기준을 수립하여 적용하고 있으나, 개인의 주관적 차이 및 승객에 대한 서비스 수준의 차이 등에 따라 서로 상이한 기준이 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내·외 이명감 기준을 조사·분석하였으며, 이를 토대로 수치 시뮬레이션을 수행하여 호남고속철도의 터널단면을 검토하였다.

또한, 경부고속철도를 운행하는 열차의 터널통과시 압력변동량을 측정하여, 수치시뮬레이션 입력조건으로 사용된 각종 매개변수 등의 적정성을 비교·검증하였다.

핵심어 : 이명감, 이명감 기준, 터널

1. 서론

열차가 고속으로 터널에 진입하면 터널 내부에는 압력파가 발생하며, 압력파는 압축파의 형태로 음속으로 터널출구로 진행하여 일부는 외부로 방출되고, 나머지는 팽창파의 형태로 반사되어 터널내부로 전파된다.

이러한 압력파는 열차가 터널을 통과하는 동안 반복적으로 발생하여 터널내부로 전파되며 내부압력의 급격한 변화를 유발시킨다. 터널내부 압력변동은 곧 차량내부의 압력변동으로 전달되어 승객의 귀를 아프게 하는 경우가 있다. 이러한 현상을 이명감(이명현상)이라 하며, 터널내 급격한 압력변동은 승객의 귀를 손상시킬 수 있으므로 고속철도 터널설계시 반드시 고려해야 한다.

이에, 국내 및 해외 고속철도의 경우 이명감 기준을 수립하여 적용하고 있으나, 개인의 주관적 차이 및 승객의 쾌적성 확보를 위한 서비스 수준의 차이 등에 따라 서로 상이한 기준이 적용하고 있다.

이명감은 열차의 주행속도 및 밀폐도, 터널 및 열차의 단면적, 터널내부의 단면적변화, 열차와 터널의 길이, 터널내 열차의 교행여부 등 많은 변수들에 영향을 받으며, 특히 객차내부의 압력변동과 밀접한 관계가 있는 열차성능과 터널내부의 압력변동과 밀접한 관계가 있는 터널내공단면적이 가장 중요한 변수로 알려져 있다.

열차성능은 차량기밀도로 표현되며, 차량의 기밀이 우수한 경우에는 터널의 압력변동이 차량 내부까지 전달되는데 상당한 시간이 소요되므로 승객이 느끼는 이명감은 매우 미미하지만, 기밀이 떨어지는 경우에는 터널의 압력변동이 바로 승객에게 전달되어 이명감 문제를 유발시킨다. 국내의 경우, KTX Ⅰ은 경부고속철도 차량 제작기준에 의거하여 차량의 기밀도 τ = 11로 제작되었으며, 최근 개발된 KTXⅡ는 철도차량 안전기준에 관한 지침에 의거하여 기밀도 τ = 18 이상으로 제작되었다.

터널의 내공단면적은 열차운행의 안정성 및 승객의 쾌적성(이명감 감소) 측면에서 크게 건설하는 것이 좋으나, 상대적으로 많은 공사비가 요구되므로 안정성과 쾌적성, 그리고 경제성을 모두 만족시킬 수 있는 가능한 최소의 단면이 요구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 국내·외 이명감 기준을 조사·분석하였으며, 이를 토대로 수치시뮬레이션을 수행하여 호남고속철도의 터널단면을 검토하였다.

수치 시뮬레이션은 1차원해석 프로그램인 ThermoTun을 사용하였으며, KTX Ⅰ, KTXⅡ 차량운행시 터널 및 객차에서의 압력변동을 검토하였다.

또한, 경부고속철도를 운행하는 열차의 터널통과시 압력변동량을 측정하여, 수치시뮬레이션 입력조건으로 사용된 각종 매개변수 등의 적정성을 비교·검증하였다.

2. 이명감 기준 선정

일반적으로 사람은 외이(外耳)와 중이(中耳)의 압력차가 커지면 불쾌감을 느끼는 것으로 알려져 있다. 열차가 터널을 통과하는 동안 승객이 느끼는 이명감은 객차 내부의 압력변동으로 인해 유발되며, 이것은 터널 내부의 압력변동이 차량의 틈새를 통해 객차 내부로 전달되면서 발생하게 된다.

2.1 이명감에 대한 연구동향

가. 영국철도(BR)의 연구내용

영국에서는 1970년대 이후 이명감 문제에 대해 기밀실 실험과 현장시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 이명감은 개인차가 크고, 동일인이어도 건강상태, 기분, 평가상황에 따라 느끼는 정도가 크게 변한다.
- 기밀실 실험결과에 의하면 압력이 상승하는 경우가 하강하는 경우보다 불쾌감을 많이 느끼지만, 터널을 통과하는 것처럼 압력상승과 하강을 짧은 시간에 반복하는 경우에는 양자간의 차이가 명확하지 않다.
- 급격한 압력변동이 발생하는 터널에서의 이명감은 압력변동율 보다는 일정시간동안의 압력차(peak to peak)가 더 큰 영향을 미친다.
- 압력변동의 반복으로 인한 영향으로 터널구간이 많은 경우에는 평가기준이 강화된다.

나. 독일의 이명감 통계자료

그림 1. 은 독일 DB Würzburg-Fulda간 ICE 노선에서 약 18,000명을 대상으로 실시한 통계자료로서 승객들의 안락도를 1에서 7까지 구분하고, 최대 압력변동값을 5가지 범위로 분류하여 각각에 대한 평균 안락도를 산출한 자료이다.

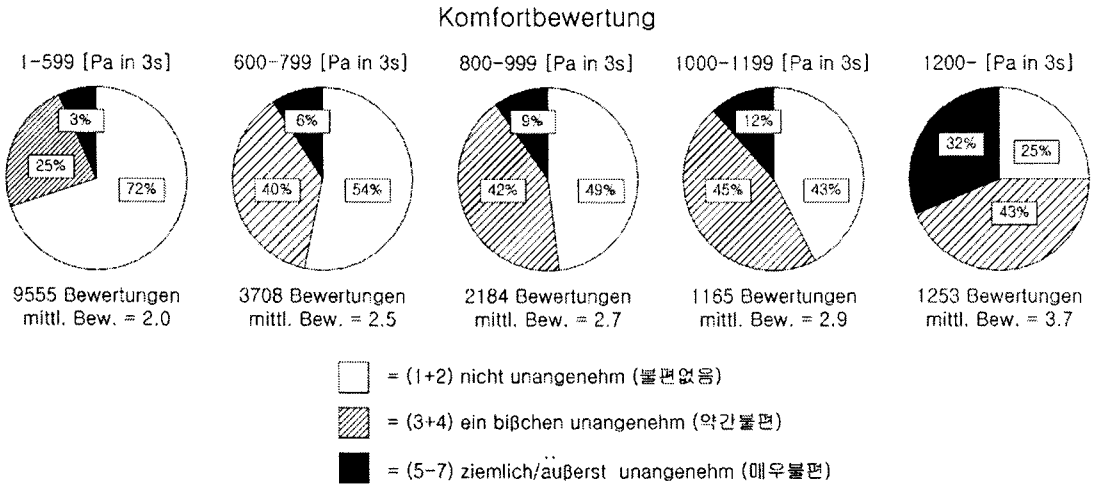


그림 1 승객의 안락도 (Glöckle)

압력변화 600 ~ 1,200 Pa/3s 에서는 안락도가 2.5 ~ 2.9로 유사한 양상을 보이고 있으며, 800 Pa/3s 이하에서는 승객의 54%가 안락감을 나타내는 것으로 조사되었다.

다. 일본의 현장 평가실험

일본은 1954년 신간선 개통 이후 차량의 기밀화를 통해 터널 주행시 차내 압력변동을 1 kPa/4s를 만족하는 수준으로 확보하여 이명감에 대한 문제를 해결하였다. 그러나 최근에 기존선 열차의 속도향상에 따라 단면적이 작은 단선터널을 통과하는 비기밀 차량에서의 이명감 문제가 발생하여, 이를 해결하기 위해 기존선의 특급열차내에서 이명감의 평가실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 공공수송에 대한 승객의 기대치, 시험의 실시 구간, 터널의 물리적 특성, 평가에 이용된 용어 등의 차이의 영향을 고려할 필요가 있지만, 일본의 被驗者 쪽이 기압변동에 의한 불쾌감을 보다 엄격하게 평가하고 있다. 다시 말해서, 철도에 대한 요구수준이 높다.
- 해외의 경우와 같이, 이명감에 영향을 미치는 기압변동 특성은 최대압력변동값에 의한 영향이 크고, 기압변동 속도의 영향은 작다.
- 따라서 일정시간당의 최대압 변동으로 허용한도를 나타내는 것도 가능하지만, 그 산출 대상시간에 대해서는 해외의 풍부한 검토 예를 활용하여 4초로 정한다.
- 결과적으로 비기밀 차량의 고속주행 시의 차내압 변동 가이드라인은 4초당 2.0kPa 이하 정도로 한다.

2.2 각 국의 이명감 기준

철도터널에서의 이명감 문제를 해결하기 위하여 각 국에서는 이명감 기준을 수립하여 적용하고 있으며, 표 1. 은 UIC 779-11에 제시된 각 국의 이명감 기준을 정리한 것으로, 국가별로 이명감 기준은 서로 상이한 것으로 나타나고 있다.

또한, 표 1.은 정상적인 상태에 대한 기준이며, 가능성은 낮지만 급격한 압력변동이 승객의 귀에 손상을 일으킬 가능성을 고려할 필요가 있다. 이와 같은 의학적인 건강기준으로써 UIC 에서는 터널내 압력변동값을 10 kPa 이내로 제한하고 있다.

UIC 기준은 비기밀 차량과 기밀차량 모두에 적용되며, 기밀차량의 경우 열차가 터널을 통과하는 동안 창문이 깨지는 것처럼 기밀상태가 없어지는 경우에도 만족해야 하는 값으로, 열차가 터널을 운행하는 동안 터널 내부의 압력은 10 kPa을 초과하면 안되는 것으로 규정하고 있다.

이명감 기준을 가능성 있는 모든 상황과 모든 승객에게 만족할 수 있도록 정하는 것은 불가능 하다. 즉, 운행환경에 따라서 승객이 요구하는 이명감 기준은 각기 다른 것으로 나타나고 있다. 그렇지만 열차운행의 특별한 유형에 대해 하나의 일치된 기준을 제시할 필요가 있다.

표 1. 각 국의 이명감 기준

국가	노선	Max. change of pressure	Max. rate of change of pressure	열차 및 터널조건			비고
				열차속도	기밀도	터널형식	
일본	신간선	1,000 Pa	200 Pa/s	210, 240, 270 km/h	sealed	tight bore	
영국	Inter City	3,000 Pa/3sec		160, 200 km/h	unsealed	tight bore	열차 2대 교행 조건
		4,000 Pa/4sec					
	Channel tunnel	2,000 Pa/4sec		225-300 km/h	unsealed	large bore	single-track
		3,500 Pa/4sec				large bore	double-track
미국	UTMA	700 Pa/1.7sec	410 Pa/s	80-100 km/h	unsealed	tight bore	
독일	Neubaust -recken	500 Pa/1sec		240, 280 km/h	sealed	large bore	열차 1대 운행 조건 (교행 제외)
		800 Pa/3sec					
		1,000 Pa/10sec					
이탈리아	FS	1,500 Pa	500 Pa/s	high speed	sealed	moderate-size bore	
프랑스(1) (SNCF)	Atlantique high-speed line	5,000 Pa/3sec					열차 2대 교행 조건
UIC	Base-line	4,500 Pa/4sec			unsealed		double-track
		3,000 Pa/4sec					single-track
		1,000 Pa/1sec			sealed		열차 2대 교행 조건
		1,600 Pa/4sec					
		2,000 Pa/10sec					
한국(2)	경부고속철도	800 Pa/3sec		300 km/h	sealed		Normal case
		1,250 Pa/3sec					Extreme case

㈜ 1. 현재 500 Pa/s의 압력조건을 포함하는 새로운 압력기준을 연구 중에 있음.
2. ㈔대한터널협회에서 경부고속철도 공기압 해석에 적용한 기준임.

2.3 차량 종류별 기밀도

객차 내부의 압력변동은 차량 자체의 기밀도와 밀접한 관련이 있으며, 차량의 기밀이 우수한 경우에는 터널의 압력변동이 차량 내부까지 전달되는 데 상당한 시간이 소요되므로 승객이 느끼는 이명감은 매우 미미하지만, 기밀이 떨어지는 경우에는 터널의 압력변동이 바로 승객에게 전달되어 이명감 문제를 유발시킨다.

기밀도(the pressure tightness coefficient τ)는 일반적으로 차량의 기밀정도를 나타내는 계수로 정의되며, 차량 외부압력을 100%로 하였을 경우에 대하여 내부압력이 약 38%까지 떨어지는데 소요되는 시간으로 정의하고 있다.

경부고속철도 KTX I 차량의 제작기준은 초기 3,000 Pa의 압력에서 100 Pa의 압력으로 하강하는 데 소요되는 시간을 40 s이상으로 요구하고 있으며, 철도차량 안전기준에 관한 지침의 고속철도 차량 제작기준은 초기 3,000 Pa의 압력에서 1,100 Pa의 압력으로 강하하는 데 소요되는 시간을 18 s 이상으로 규정하고 있다.

이러한 기준으로 계산한 경부고속철도 차량 KTX I 의 기밀도는 τ= 11 이며, KTX II는 철도차량 안전기준에 관한 지침에 따라 기밀도는 τ= 18 이상으로 설정되어있어 KTX I 의 기밀도보다 더 높은 기밀도를 유지할 것으로 기대된다. 세계 각국의 차량 종류별 기밀도는 표 2. 와 같다.

표 2. 차량 종류별 기밀도

Train Type	Pressure tightness coeffient τ
unsealed train (e.g. regional transport)	$\tau < 0.5$ s
poorly sealed train (e.g. Eurocity)	$0.5 \text{ s} < \tau < 6$ s
well sealed train (e.g. ICE1, TGV)	$6 \text{ s} < \tau < 15$ s
excellently sealed train (e.g. ICE3)	$15 \text{ s} < \tau$

㈜ 참고문헌 : Effectiveness of pressure relief shafts - full scale assessment, B Hagenah, P Reinke, A Vardy, 2006, AVVT 12th, p.381

2.4 이명감 기준 선정

새로운 철도노선의 터널 내 이명감 기준은 운영자가 승객의 쾌적성 확보를 위한 서비스 수준의 문제이므로 철도운영자가 최종 결정하여야 하나, 본 논문에서는 터널 단면결정을 위한 목적을 달성하기 위해 적절한 이명감 기준을 제시하고자 한다.

경부고속철도의 경우 KTX I 차량으로 운행되고 있으며, 추후 건설된 호남고속철도에는 KTX I 및 KTX II도 운행될 예정이므로 경부고속철도에 적용한 이명감 기준을 만족할 필요가 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 KTX I 의 기밀도는 독일의 ICE와 프랑스의 TGV 수준에 해당된다. 이러한 기밀도 수준을 고려할 때, 호남고속철도의 이명감 기준은 독일 및 프랑스 등의 이명감 기준과 동등한 수준을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

경부고속철도의 이명감 기준은 독일에서 수행한 압력변화에 대해 승객의 안락감을 통계적으로 분석한 자료를 적용한 것이므로 독일의 이명감 기준을 비교하여 검토할 필요가 있을

것이다. 또한 경부고속철도의 기준이 열차가 단독으로 주행하는 조건과 교행하는 조건으로 구분되어 있으므로 열차가 단독으로 주행하는 조건으로 규정된 독일의 기준과 열차가 교행하는 조건으로 규정된 UIC의 기준도 함께 검토하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

따라서 이명감 기준은 현재 경부고속철도에서 운행 중인 KTX I 차량이 호남고속철도에도 운행되는 점을 고려하여 표 3. 과 같이 경부고속철도의 기준을 적용하고, 참고로 독일 및 UIC의 기준에 대해 비교·검토하고자 한다.

표 3. 호남고속철도 이명감 기준

구분	열차 단독주행시	열차 교행시	비고
경부고속철도	800 Pa/3sec	1,250 Pa/3sec	적용기준
독일	500 Pa/1sec 800 Pa/3sec 1,000 Pa/10sec	-	참고기준
UIC779-11	1,000 Pa/1sec 1,600 Pa/4sec 2,000 Pa/10sec	1,000 Pa/1sec 1,600 Pa/4sec 2,000 Pa/10sec	

3. 터널 및 객차내 압력변동 해석

현재 고속철도 터널내 압력변동을 해석하기 위한 프로그램은 독일, 일본, 프랑스 등 고속철도를 개발하여 상용화하고 있는 몇몇 국가에서 개발된 프로그램이 있으며, 본 연구에서 사용된 해석프로그램은 영국 DUNDEE대학의 ALAN E VARDY 교수에 의해 개발된 1차원 컴퓨터 프로그램인 ThermoTun을 사용하였다. 이 프로그램은 30년 이상의 개발 역사를 가지고 세계적으로 수많은 고속철도 터널설계에 적용되고 있으며, 현재까지도 해석결과의 신뢰성 향상을 위해서 실측 데이터와 비교·검토하여 신뢰도를 높이고 있다.

ThermoTun은 단순굴착부터 분기(junction), 포탈(portal), 환기구(ventilation shaft) 및 젯트팬(fan) 등을 갖는 다양한 형태의 터널을 네트워크이론을 적용하여 모델링하며, 열차의 주행으로 인해 발생하는 비정상상태(unsteady state)유동을 1차원 특성해법(one-dimensional method of characteristics)을 적용하여 시뮬레이션 함으로서 시스템 전체의 공기압, 풍속, 온도 및 오염농도를 예측할 수 있다.

본 연구에서는 터널단면 최적화와 관련하여 터널 내 고속열차의 주행시 객차내 승객의 안락감(이명현상) 평가를 ThermoTun 프로그램을 적용하여 수행하였다.

3.1 해석프로그램의 신뢰성 평가

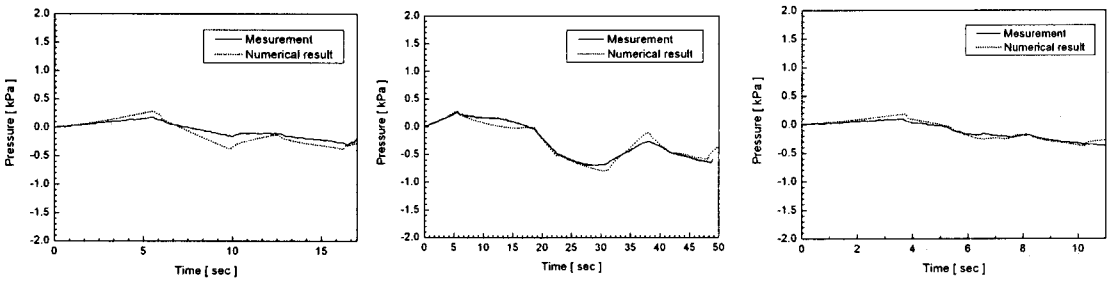
수치해석에 의한 결과는 입력조건 및 변수에 영향을 받기 때문에 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 해석조건에 따른 적합한 입력조건 및 변수에 대한 정확한 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 현재 운영중인 경부고속철도를 대상으로 현장측정(서봉1터널, 운주터

널, 궁현터널)을 수행하여, 동일한 조건에 대한 수치해석결과와 비교·검토하여 입력조건 및 변수에 대한 신뢰성을 평가하였다. 현장측정은 한국철도공사의 협조를 받아 열차내부와 터널내부의 압력을 측정하였으며, 열차내부의 압력은 열차의 선두, 중간 및 후미 객차에서 동시에 측정하였다. 수치해석은 서봉1터널, 운주터널, 궁현터널의 압력변동에 대하여 수행하였으며, 수치해석결과를 현장측정 결과와 비교, 분석하여 수치해석 수행내용이 적정한 지를 검증하였다.

표 4. 터널제원 및 열차속도

터널명	터널연장	경사	열차속도	진행방향
서봉1터널	1,349 m	+11‰(1,279m) -13‰(70m)	290 km/h	부산방향
운주터널	4,030 m	+8‰	296 km/h	서울방향
궁현터널	930 m	+2‰	304 km/h	서울방향

그림 2.에서 보는 바와 같이 수치해석 결과를 현장측정 결과와 비교한 결과, 객차내 압력변동경향 및 압력변동값이 거의 일치하는 것으로 보아 수치해석에 적용한 각종 입력계수는 적절한 것으로 판단된다. 따라서 터널제원 및 열차속도 등의 입력조건을 변경하여 수행한 다양한 수치해석결과도 충분히 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.



(a)서봉1터널(부산방향) (b) 운주터널(서울방향) (c) 궁현터널(서울방향)

그림 2. 객차내부 압력 비교

3.2 수치해석 조건

터널을 주행하는 열차에 의한 압력변동 해석을 위한 주요 해석변수들은 터널연장, 터널단면적, 열차구성, 열차속도, 차량기밀도, 열차주행조건 등이며, 본 해석의 해석조건은 표 5. 에 나타낸 바와 같으며, 열차가 교행하는 경우에는 2대의 열차가 동시에 입출구부에서 진입하는 것으로 하였다.

해석조건에 대한 수치해석은 개별 입력파일을 생성하여 수행하였으며 입력파일의 변수가 정확하게 설정되는지를 확인하기 위해서 프로그램 개발자인 Alan Vardy 교수에게 개별적으로 자문을 수행하였다.

표 5. 해석조건

항목		해석종류	해석조건			
터널제원	연 장	12	200 m	400 m	600 m	800 m
			1000 m	2000 m	3000 m	4000 m
			5000 m	6000 m	7000 m	8000 m
	단면적 (둘레길이)	4	107.9 ㎡ (40.7 m)	100.1 ㎡ (38.8 m)	95.1 ㎡ (37.3 m)	90.3 ㎡ (36.2 m)
	수직구(샤프트)	1	수직구(샤프트) 없음			
	벽면마찰계수	1	0.00625			
	입구손실계수	1	0.6			
	출구손실계수	1	1.0			
열차제원	편 성	1	20량 1편성 (1P+18T+1P)			
	길 이	1	약 400 m			
	단면적	1	9.765 m (KTX Ⅰ)		9.638 m (KTXⅡ)	
	둘레길이	1	11.78 m (KTX Ⅰ)		11.67 m (KTXⅡ)	
	기밀도	1	τ = 11 (KTX Ⅰ)		τ = 18 (KTXⅡ)	
	표면마찰계수	1	0.003			
운행조건	운행속도	2	300 km/h (KTX Ⅰ)		350 km/h (KTXⅡ)	
	교행조건	2	열차 1대 운행		열차 2대 교행	

3.3 이명감 평가기준에 따른 검토

이명감 평가를 위해서 터널단면적(90.3, 95.1, 100.1, 107.9 ㎡), 터널연장(200 ~ 8,000 m), 열차의 주행속도(300, 350 km/h), 기밀도(11, 18), 열차의 운행특성(교행, 미교행)을 변수로 하여 경부고속철도 적용기준인 3초간 최대 압력변동(peak to peak)을 검토하였다.

그림 3. (a) 는 열차의 기밀도가 11인 경우, 1대의 열차가 300 km/h로 주행하는 경우에 단면적별로 터널연장에 따른 3초간의 최대압력변동을 나타낸 것이다. 압력변동의 최대치는 단면적에 관계없이 터널연장이 증가하면 급격하게 증가하여 1,000 ~ 2,000 m범위에서 최대값을 보인 후에 8,000 m까지 서서히 감소하는 경향을 보이며, 또한 터널연장이 동일한 경우에 압력변동의 최대값은 단면적이 감소하면 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 경우 압력변동의 최대값은 이명감기준인 0.8 kPa/3s를 초과하지 않는 것으로 나타나고 있다.

그림 3. (b) 는 열차의 기밀도가 11이고 주행속도가 300 km/h인 경우에 2대의 열차가 터널에서 교행할 때 압력변동의 최대값을 나타낸 것이다. 이 경우에도 터널연장이 1,000 ~ 2,000 m범위에서 압력변동의 최대치가 발생하고 있으며, 터널연장이 3,000 m이상인 경우에는 최대압력 변동치는 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 이 경우 압력변동의 최대치는 교행시 이명감에 대한 허용기준인 1.25 kPa/3s이하로 나타나고 있다.

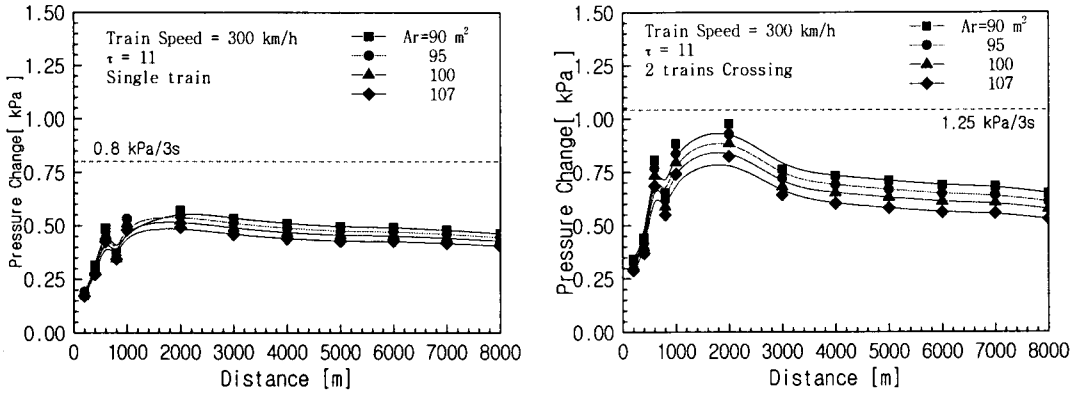
그림 3. (a) 와 (b) 에서 최대 압력변동은 열차가 교행하는 경우가 미교행하는 경우보다 크고, 증가비는 터널단면적이 감소할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 검토범위에서 단면적이 가장 작은 90.3 ㎡인 경우에 증가비는 1.95 ~1.40으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 열차의 설계속도를 300 km/h로 하는 경우에는 KTX I(객차의 기밀도 : 11)은 검토범위의 모든 단면적 및 교행조건에 대해서 이명감 허용기준을 만족하는 것으로 평가된다.

그림 4. (a) 와 (b)는 기밀도가 11인 열차가 350 km/h로 주행하는 경우에 압력변동의 최대값을 나타낸 것으로 각각 미교행하는 경우와 교행하는 경우이다. 이 경우에도 터널연장이 1,000 ~ 2,000 m범위에서 최대 압력변동이 발생하고 있으며, 터널연장이 2,000 m이상에서는 연장이 증가할수록 최대압력 변동값은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 경우 최대압력 변동값은 미교행시 단면적이 90.3 ㎡ 인 경우, 이명감에 대한 허용기준을 초과하고 있으며, 교행시에는 단면적에 따라서 차이가 있으나 터널연장이 1,000 ~ 3,000 m범위에서 허용기준을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

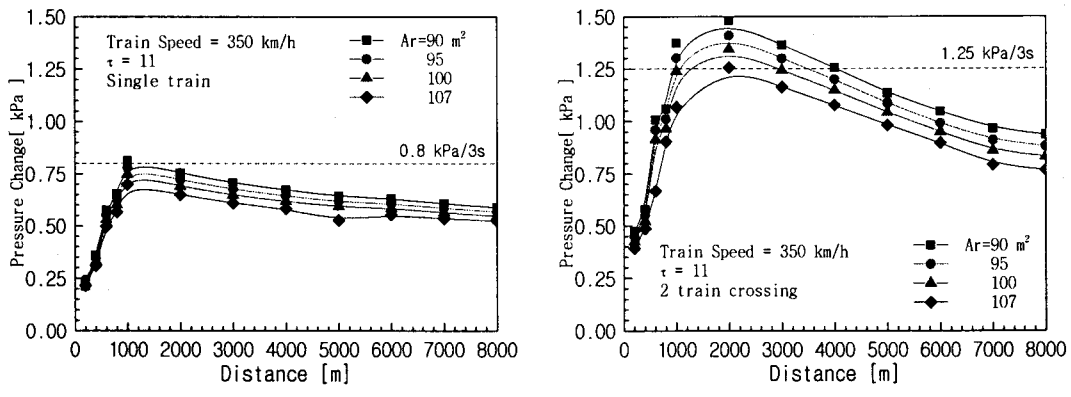
그림 5 (a) 와 (b) 는 주행속도가 350 km/h이고 기밀도를 18로 하는 경우에 최대압력변동을 나타낸 것이다. 이 경우에는 그림에서 알 수 있는 바와 같이 교행시나 미교행시 모두 이명감에 대한 허용기준을 만족하는 것으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 설계속도를 350 km/h로 하는 기밀도가 18인 KTX II를 운영하는 경우에는 터널단면적을 90.3 ㎡ 까지 축소하여도 이명감 기준을 만족할 것으로 판단된다.



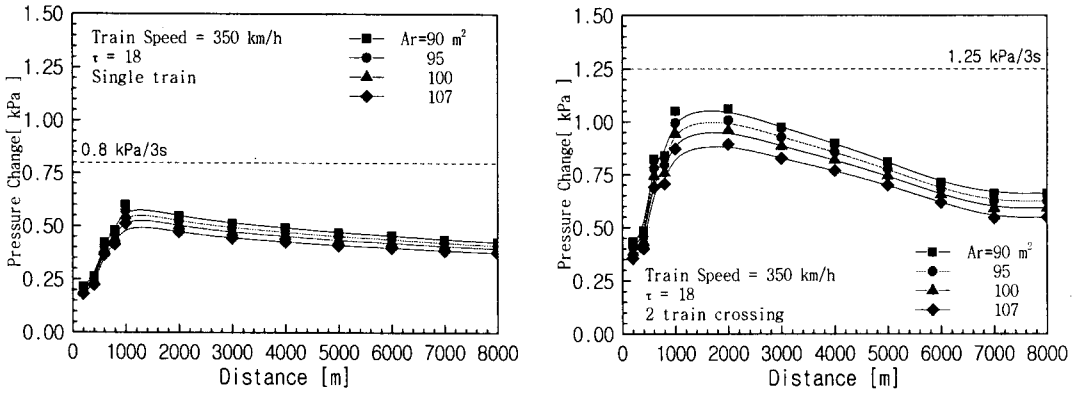
(a) 1대 운행시 (b) 2대 교행운행시

그림 3. 터널단면적별 연장에 따른 3s간 최대압력변화 (주행속도 300km/h, τ=11)



(a) 1대 운행시 (b) 2대 교행운행시

그림 4. 터널단면적별 연장에 따른 3s간 최대압력변화(주행속도 350km/h, τ=11)



(a) 1대 운행시 (b) 2대 교행운행시

그림 5. 터널단면적별 연장에 따른 3s간 최대압력변화 (주행속도 350 km/h, τ=18)

터널연장, 주행속도, 교행여부 및 차량단면적에 따른 이명감 허용기준의 만족여부를 정리하면 표 6. ~ 표 11. 과 같다.

표 6. ~ 표 7. 은 이명감 기준을 경부고속철도와 동일한 기준(미교행 ; 0.8kPa/3s, 교행 ; 1.25 kPa/3s)을 적용하여 평가한 결과이다. 표 6. 은 주행속도 350 km/h, 기밀도 18로 하여 호남고속철도 기준을 적용한 경우로 표에서 알 수 있는 바와 같이 검토대상의 터널단면적(90.3, 95.1, 100.1, 107.9 ㎡)에서 터널연장별로 이명감 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 표 7. 은 주행속도를 300 km/h로 하는 경우로, 기밀도는 11이며, 터널연장별로 이명감 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

표 6. 이명감 해석결과 (경부고속철도 이명감 기준 적용, 열차속도 350 km/h, τ=18)

터널연장	열차 1대 운행시 (800 Pa/3sec)				열차 2대 교행시 (1250 Pa/3sec)			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
2000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
3000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
4000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
5000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
6000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
7000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
8000 m	○	○	○	○	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

표 7. 이명감 해석결과 (경부고속철도 이명감 기준 적용, 열차속도 300 km/h, τ=11)

터널연장	열차 1대 운행시 (800 Pa/3sec)				열차 2대 교행시 (1250 Pa/3sec)			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
2000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
3000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
4000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
5000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
6000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
7000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
8000 m	○	○	○	○	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

표 8. 과 표 9. 는 UIC 및 독일기준에 따른 검토결과를 나타낸 것으로, 검토대상의 터널 단면적에서 설계속도 및 터널연장별로 UIC 기준은 모두 만족하였으나, 독일기준은 일부 조건에서 만족하지 않는 것으로 나타났다.

표 8. 이명감 해석결과 (UIC 이명감 기준 적용 – 열차2대 교행시)

터널연장	350 km/h (τ=18)				300 km/h (τ=11)			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
2000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
3000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
4000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
5000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
6000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
7000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
8000 m	○	○	○	○	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

표 9. 이명감 해석결과 (독일 이명감 기준 적용 - 열차1대 운행시)

터널연장	350 km/h (τ=18)				300 km/h (τ=11)			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
2000 m	○	×(1047.19)	×(1093.89)	×(1145.49)	×(1101.2)	×(1173.0)	×(1224.7)	×(1281.7)
3000 m	○	○	○	×(1014.42)	○	○	○	×(1012.7)
4000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
5000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
6000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
7000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
8000 m	○	○	○	○	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

참고로 표 10. 은 주행속도 350 km/h에서 기밀도 11을 적용한 경우로써 경부고속철도 기준으로 검토한 결과이며, 1대 운행시(미교행)에는 터널연장이 1,000 m인 경우에 이명감 기준을 초과하고, 교행하는 경우에는 터널단면적 별로 차이가 있으나 터널연장이 1,000 ~ 4,000 m정도에서 이명감 기준을 초과하는 것으로 나타나고 있다.

표 10. 이명감 해석결과 (경부고속철도 이명감 기준 적용, 열차속도 350 km/h, τ=11)

터널연장	열차 1대 운행시 (800 Pa/3sec)				열차 2대 교행시 (1250 Pa/3sec)			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	×(813.0)	○	○	×(1300.6)	×(1371.9)
2000 m	○	○	○	○	×(1255.6)	×(1343.8)	×(1408.5)	×(1480.1)
3000 m	○	○	○	○	○	○	×(1299.4)	×(1363.3)
4000 m	○	○	○	○	○	○	○	×(1254.8)
5000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
6000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
7000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
8000 m	○	○	○	○	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

또한, 표 11. 는 주행속도 350 km/h에서 기밀도 11을 적용하여 UIC기준에 따른 검토결과를 나타낸 것으로써, 검토범위의 단면적에 대해서 터널연장이 2,000 ~ 3,000 m이상이 되는 경우에 이명감 기준을 만족하지 않은 것으로 나타나고 있다.

표 11. 이명감 해석결과 (UIC 이명감 기준 적용 - 열차2대 교행시, τ=11)

터널연장	350 km/h				300 km/h			
	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡	107.9 ㎡	100.1 ㎡	95.1 ㎡	90.3 ㎡
200 m	○	○	○	○	○	○	○	○
400 m	○	○	○	○	○	○	○	○
600 m	○	○	○	○	○	○	○	○
800 m	○	○	○	○	○	○	○	○
1000 m	○	○	○	○	○	○	○	○
2000 m	○	○	×(2086.4)	×(2196.4)	○	○	○	○
3000 m	×(2164.9)	×(2318.7)	×(2431.3)	×(2556.4)	○	○	○	○
4000 m	×(2299.4)	×(2461.6)	×(2581.2)	×(2714.4)	○	○	○	○
5000 m	×(2229.2)	×(2396.3)	×(2520.6)	×(2659.0)	○	○	○	○
6000 m	×(2191.9)	×(2353.3)	×(2473.4)	×(2607.6)	○	○	○	○
7000 m	×(2136.5)	×(2295.3)	×(2413.4)	×(2544.4)	○	○	○	○
8000 m	×(2058.1)	×(2207.7)	×(2318.2)	×(2441.5)	○	○	○	○

㈜ 범례 : ○(기준 만족), ×(기준 초과)

이상의 검토에서 현재 설계속도인 350 km/h를 적용하는 경우, 기밀도가 18인 차량을 대상으로 하는 경우에는 검토범위의 모든 조건에서 이명감 기준을 만족할 수 있으나, 기밀도가 11인 차량에 대해서는 미교행시에는 단면적이 95.1 ㎡ 이상이면 이명감 기준을 만족하며, 터널에서 교행운전을 고려하는 경우에는 단면적에 따라서 차이는 있으나 1,000 ~ 4,000 m의 범위의 터널에 대해서 압력변동을 완화하기 위한 대책이 필요한 것으로 평가된다.

따라서 현 설계기준(열차의 주행속도 350 km/h, 기밀도 18)을 적용하는 경우, 터널단면적은 90.3 ㎡ 로 축소하여도 터널연장이 200 ~ 8,000 m 범위에서는 경부고속철도의 이명감 기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 이에 터널내공단면적을 90.3 ㎡ 까지 축소하여도 이명감에 의한 문제는 없을 것으로 평가되나, 실제 터널내공단면적은 전차선 및 신호·통신 분야 등의 인터페이스 조건을 충족시키는 범위에서 결정하여야 한다.

4. 결론 및 고찰

고속철도터널은 일반철도터널과는 달리 열차가 터널구간을 통과시 급격한 압력변동이 발생하여 객차내 승객에게 이명감 문제를 유발시킬 수 있으며, 국내 및 해외의 경우, 이명감 기준을 수립하여 적용하고 있다.

이에, 본 논문에서는 국내외 이명감 기준을 검토하였으며, 수치해석을 이용하여 터널내공단면적별로 경부고속철도에서 적용한 이명감 허용기준을 검토하였다. 또한, 외국의 이명감 기준으로 독일과 국제철도연맹(UIC 779-11)에서 제안하고 있는 기준도 비교 검토하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 이명감은 특성상 개인의 주관적 차이가 크고 동일인이어도 건강상태, 기분 등에 따라 느끼는 정도가 크게 변하므로 철도운영시 승객의 쾌적성 확보를 위한 서비스 수준의 문제이므로 국가마다 서로 상이한 기준을 적용한다. 경부고속철도의 경우는 독일에서

수행한 압력변화에 대해 승객의 안락감을 통계적으로 분석한 자료를 적용한 것이므로 비교적 엄격한 기준이 적용되고 있다.

2) 수치해석 결과, 객차내 압력변동은 교행시가 미교행시보다 크게 나타났으며 미교행시는 1,000 m에서 최대값을 보인 후에 3,000 m 이후에는 압력변동값의 차이가 적은 것으로 나타났다. 또한, 교행시는 터널연장 1,000 ~ 2,000 m 범위에서 최대값을 보인 후에 점차 감소하는 것으로 나타났다.

3) 현재 운영중인 경부고속철도의 현장측정(상봉2터널, 화신5터널)결과와 동일 조건의 수치해석결과의 비교·검토를 통하여 신뢰성을 검증하였으며, 객차내 압력변동경향 및 압력변동값이 거의 일치하는 것으로 보아 수치해석에 적용한 각종 입력계수는 적절한 것으로 판단된다.

4) 객차내 압력변동을 해석한 결과 90.3 ㎡ 까지 200 ~ 8,000 m 터널에서 경부고속철도의 이명감 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 전차선 및 신호통신 분야에서 요구하는 조건을 만족하는 범위에서 터널단면적은 90.3 ㎡ 를 적용하여도 이명감에 의한 문제는 없을 것으로 판단된다.

5) 끝으로, 사회가 발전함에 따라 철도이용객들의 철도서비스에 대한 기대수준은 점점 더 높아질 것으로 예상된다. 따라서 향후 이러한 사회적 추세를 반영한 국내 이명감 기준 정립을 위한 국내 철도승객에 대한 설문조사 및 분석 등을 포함한 연구가 활발히 이루어지기를 기대한다.

참고문헌

1. 김동현, 2000, "경춘선 1급 신설터널에서 열차승객의 이명감 없이 주행 가능한 열차속도에 대한연구", 한국철도학회 춘계학술대회, pp 495-502
2. 김동현, 2004, 공기역학을 고려한 철도터널 최적설계, 기술강좌 vol 6. No.2 한국터널공학회
3. 남성원, 홍현주, 2003, "KTX 차량 객실내외의 압력변동특성에 관한실험적 연구", 한국철도학회 추계학술대회, pp 281-286
4. (사)대한터널협회, 1995, 경부고속철도 제8공구 터널내 공기압 해석보고서
5. 문경호, 김재철, 이찬우, 2003, "KTX 객차의 실내소음 평가 및 분석", 한국철도학회 추계학술대회, pp 114-119
6. 박춘수, 서승일, 이억재, 목진용, 김기환, 2003, "한국형 고속전철 터널 주행시의압력변동 및 빈도의 분석", 한국철도학회 추계학술대회, pp 181-186
7. (주) 유신코퍼레이션, 호남고속철도 철도시설 기본계획, 제10장
8. 유원희, "열차이명감 평가기준에 관한 연구동향", 한국철도기술 연구원
9. 최강윤, 기호철, 김상영, 이진헌, 2003, "기존선 구간에서의 KTX 차량진동 및 소음측정결과", 한국철도학회 추계학술대회, pp 120-125

10. 한국고속철도, 1996, 고속철도 실무기술
11. 한국고속철도, 1996, 고속철도 차량시스템 엔지니어링 제1권, 2권
12. 한국철도시설공단, 2007.3, 경부고속철도 대전대구 도심구간 노반 실시설계 기타설계 기준
13. Alan E Vardy, Thermotun 6.1 User manual
14. UIC code 779-11, 2005, Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aero-dynamic considerations
15. K.Matsubayashi, J.Brown and A.E. Vardy, 2000, Sonic booms - Do I have a problem?, BHRGroup AVVT 10, pp 185-202
16. T.Johnson, T.Prevezer and G.I.Figura-Hardy, 2000, "Tunnel pressure comfort limits examined using passenger comfort ratings", BHRGroup AVVT 10, pp 221-239
17. R.G.Gawthorpe, 2000, "Tunnel aerodynamic design within the European high speed rail network", BHRGroup AVVT 10, pp 203-219
18. J.Wormstall-Reitschuster, G.Matschke and C.Heine, 2000, "Parametrical investigations on aerodynamic effects in tunnels - prediction and validation", BHR Group AVVT 10, pp 171-183
19. M.Sima, 2003, "New unifying procedure for working with pressure tightness of rail passenger vehicles", BHRGroup AVVT 11, pp 743-757
20. C.W Pope, D.A.Henson, 1999, "Alleviation of pressure transients for high speed train transits through very long tunnels", First International Conference Long Road and Rails Tunnels, pp 61-70
21. M.Sima, 2006, "Friction pressure variation along a streamlined train in a tunnel", BHRGroup AVVT 12, pp 245-259
22. D.H.Kim and H-B.Kwon, 2006, "Field tests on the pressure transients in train tunnel interfaces on the Korean railway", BHRGroup AVVT 12, pp 597-61
23. J.Temple, 2006, "West coast main line upgrade : railway tunnel pressure relief in practice", BHRGroup AVVT 12, pp 613-622
24. S.Saito, T.Miyachi, T.Fukuda, H.Takami, M.Lida and H.Kajiyama, 2006, "Pressure changes generated inside and outside a tunnel with a shaft in high-speed railway", BHRGroup AVVT 12, pp 763-775
25. E.A.Demmenie, A.C. de Bruin and E.Klaver, "Experimental pressure wave research at NLR for high-speed rail tunnels", National Aerospace Laboratory NLR, NLR TP 98375
26. Stig Ravin and Peter Reinke, 2006, "Tunnel aerodynamics of the magnetic leviation high-speed link in Munich(Maglev) -consequences for pressure comfort, micro - pressure waves, traction power and pressure loads", Tunnel management International Journal Vol 19
27. H Sockel, 2003, "Formulae for the calculation of pressure effects in railway tunnels", 11th international Symposium on AVVT, pp 581-595
28. D Wu, T Chiu, 2003, "Aerodynamic aspects of a high-speed railway station with

adjoining tunnels", 11th international Symposium on AVVT, pp 715-725
29. C W Pope, 1991, "THE SIMULATION FLOWS IN RAILWAY TUNNELS USING A 1/25 TH SCALE MOVING MODEL FACILITY", 7th international Symposium on AVVT, pp 709-737
30. JEAN-LUC PETERS, 1991, "MEASUREMENT OF THE INFLUENCE OF TUNNEL LENGTH ON THE TUNNEL DRAG OF THE ICE/V TRAIN", 7th international Symposium on AVVT, pp 739-756
31. Bain Dayman, Alan Vardy, 1991, "A gun-fried 0.5% Scale Facility for Pressure Transients Tests of Very High Speed Trains in Tunnels", 7th international Symposium on AVVT, pp 757-787
32. wiirzburg-Fulda, 1991, "Comfort investigation for tunnel runs on the new line", 7th international Symposium on AVVT, pp 155-171
33. R G GAWTHORPE, 1991, "PRESSURE COMFORT CRITERIA FOR RAIL TUNNEL OPERATIONS", 7th international Symposium on AVVT, pp 173-188
34. Alan Vardy, Alex Haerter, "PRESSURE FLUCTUATIONS AND COMFORT CRITERIA ON NEW RAILWAYS", 7th international Symposium on AVVT, pp 189-204
35. M. Kobayashi, Y. Suzuki, K. Akutsu, M. Iida, T. Meada, 1991, "NEW VENTILA TING SYSTEM OF SHINKANSEN CARS FOR ALLEVIATING AURAL DISCOMFORT OF PASSENGERS", 7th international Symposium on AVVT, pp 205-218
36. MICHAEL SCHULTZ, HELMUT SOCKEL, 1991, "PRESSURE TRANSIENTS IN SHORT TUNNELS", 7th international Symposium on AVVT, pp 221-237
37. G FIGURA-HARDY, R G GAWTHORPE, A E VARDY, 1997, "Guidance for aero dynamically sizing the cross-section of railway tunnels", 9th international Symposium on AVVT, pp 319-329
38. A V GUDZOVSKY, 1997, "Computation of incompressible flow in air network", 9th international Symposium on AVVT, pp 331-339
39. D A HENSON and C W POPE, 1997, "The alleviation of pressure transients in a main line railway tunnel", 9th international Symposium on AVVT, pp 849-862
40. P DEEG, D FRANCK, G MATSCHKE, B SCHULTE-WERNING, 2000, " Prediction of the aerodynamic environment in subterranean railway station", 10th international Symposium on AVVT, pp 719-736
41. E C KLAVER, E KASSIES, 2000, "Dimensioning of tunnels for passenger comfort in the Netherlands", 10th international Symposium on AVVT, pp 737-7
42. R G GAWTHORPE, 2000, "Tunnel aerodynamic design within the European high speed rail network", 10th international Symposium on AVVT, pp 203-219
43. I, Cockram, 1994, "Determining Comfort Limits with Regard to Pressure Changes and Operational Experiences with Pressure Tight Vehicles", 8th international conference on AVVT, pp 95-150

44. Peiffer A, Ottitsch F, Sockel H, 1994, "Experimental and theoretical investigation of two and three dimensional pressure waves propagating inside a tunnel due to a train passage", 8th international conference on AVVT, pp 151-174
56. R G Gawthorpe, G I Figura, N Robertson, 1994, "PRESSURE CHANBER TESTS OF PASSENGER COMFORT IN TUNNELS", 8th international conference on AVVT, pp 227-243