

# 경춘선 1급 신설터널에서 열차승객의 이명감(耳鳴感) 없이 주행 가능한 열차속도에 대한 연구

## Aerodynamic analysis for train operation without the effect of the passenger ear-discomfort in tunnel of new Seoul-Chunchon line

김 동 현 1)  
Dong-Hyeon Kim

### ABSTRACT

For the tunnel design of the first class on new Seoul-Chunchon railway, we investigated for train speeds to run through tunnels without ear-discomfort of passenger in cabin by application of numerical analysis. Also we analyzed the effect of the wind speed induced by train in tunnel that is very harmful to the workers on railroad and the effect of the air-pressure fluctuations which get the fatigue to the tunnel lining and the car body.

### 1. 서 론

기존 철도노선의 현대화 및 경쟁력 향상을 위해 취약선구에 대한 개량 또는 이설 사업이 추진 중에 있다. 이러한 현대화는 기존철도에 대한 안전운행과 속도향상에 있으며, 특히 선로구축물체에 대한 등급향상은 안전운행과 운행시간 단축에 필수적이다.

현재, 터널의 등급향상 요구에 따라 열차의 터널주행 설계속도가 높아지고 그에 수반되는 여러 가지 공기역학적인 문제를 검토할 필요가 있다. 현재 기존철도에서 새마을호 열차조차 기존 4종의 터널 진입시 90 km/h ~ 110 km/h 정도로 제한을 두고 있다. 이는 선로구축물상의 여타 문제뿐만 아니라 기존철도 터널 단면적이 작기 때문에 승객이 심한 이명감(耳鳴感)을 느끼기 때문이고, 선로보수원의 열차풍에 대한 안전문제 등이 있다. 또한 열차의 개활지 주행보다 터널 진입시 열차 주행저항은 약 1.5배 이상 증가되며, 터널내벽(라이닝)에 미치는 풍하중도 고속운행 터널에서 구조설계에 고려되어야 할 사항이다<sup>(1)</sup>. 기존철도 차량의 차체 기밀도는 매우 낮기 때문에 속도향상에서 승객에 대한 이명감을 줄이기 위해서는 터널의 단면적을 크게 하거나 터널에 통풍공(air-shaft) 등을 설치하는 방법이 있다. 그러나 터널 건설비는 굴착시 나오는 흙과 암반의 양에 비례하기 때문에 최적화된 터널 단면적 설계는 터널건설비 저감에 필수적이다.

열차가 터널을 통과할 경우 갑작스런 풍압 변화가 발생한다. 이런 압력 변화는 열차 승객들에게 이명감을 주며, 압력변화의 크기에 의존하는 이명감은 청각적으로 승객에게 현저한 불편함을 준다. 압력파의 크기는 많은 변수에 의존하는데, 예를 들면 열차의 속도, 열차와 터널의 길이, 열차와 터널의 단면적 비이며, 이는 안락한 압력기준(pressure comfort criteria)을 적용하여 터널 설계

1) 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정희원

단계에서 제어할 수 있다.

터널의 단면적은 최악의 운행시나리오에서 나오는 최대 풍압변화 평가에 의해서 구해진다. 일반적으로, 실제 터널을 설계할 경우에 예측되는 최대 압력변화에 대한 평가는 실험적 기술과 반대되는 1차원적인 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 얻어진다<sup>(2)</sup>.

## 2. 해석대상 터널 및 차량

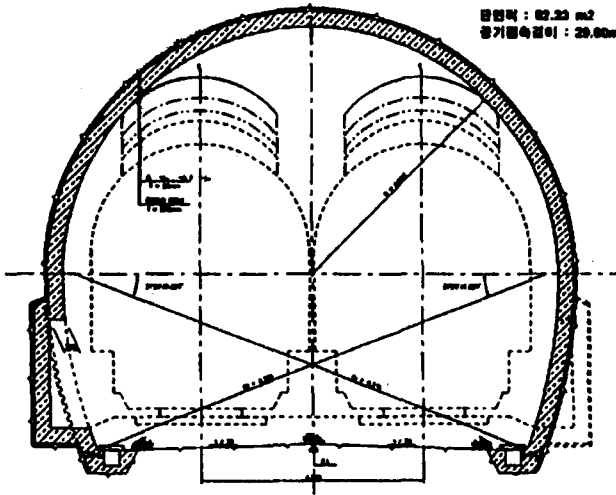


그림1. 경춘선 1급 신설터널 기본설계 단면도

본 연구는 그림 1과 같은 철도 이설 복선전철 건설공사 터널설계에 대해서 수치해석적 방법에 의해 터널내 공기압 변동, 객실내 승객이 느끼는 이명감, 선로보수원의 안전문제와 관련된 터널내의 열차풍, 터널 라이닝에 미치는 풍하중 등의 영향을 검토하는 것이다. 궤도는 표준궤간이며, 복선의 궤도중심간격은 4.3 m이고 시설개은 공사가 끝난 뒤 입구를 막는다는 가정으로 수치해석에 고려치 않았다.

해석범위는 평면 곡률반경이  $R \geq 3000$  m 구간은 열차속도 110 km/h, 150 km/h, 200 km/h 및 주어진 터널길이에 대하여 실시 설계 터널 내공단면적의 적정성

을 판단하는 것이다. 그러나,  $R = 800$  m 구간은 최대 캔트량이 제한되어 있으므로 최고 열차속도를 최고 설계속도인 150 km/h만을 적용하였다(도표 1 참조).

도표 1. 검토대상 터널 제원

터널 구분	단면적(m <sup>2</sup> )	윤변길이(m)	터널 연장 (m)	터널 주행속도
기본 설계	62.23	29.80	2,450 (교행)	- 110 km/h - 150 km/h - 200 km/h
실시 설계	68.64	31.75	355 (교행) 860 (교행)	- 150 km/h
			2,625 (단독) 2,625 (교행)	- 110 km/h - 150 km/h - 200 km/h
비교안	64.97	30.68	2,625 (교행)	- 110 km/h - 150 km/h - 200 km/h

경춘선의 운행차량은 전동열차로서 6량, 8량, 10량 3가지 편성으로 운행될 계획이며 최고속도 110 km/h이다. 본 연구에서는 공기압 검토에서 가장 열악한 상황인 10량 1편성일 경우 각각의 터널에서 열차 교행시의 공기압 변동을 분석한다. 터널의 설계속도 적정성을 판단하고, 추후 경춘선

속도향상시 가능한 속도향상을 분별할 수 있다.

기밀차량 또는 비기밀차량이 운행되느냐에 따라 터널 단면크기 결정이 달라지나 본 연구에서는 주어진 터널 단면적에서 준기밀차량과 비기밀차량의 승객 쾌적도 영향을 분석하기로 한다. 어떤 특정노선에서 비기밀 차량만 운행된다면 터널 단면적은 매우 커져야 하고, 기밀차량이 운행된다면 터널 단면적은 작게 설계될 수 있다. 그러나 기존철도가 대부분 다양한 등급의 열차가 운행되기 때문에, 터널에서 저속 운전계획의 차량은 비기밀 차량이며, 고속 운행의 차량은 차체의 기밀도가 어느 정도 요구될 것이다. 대상차량을 준고속 운행까지 고려하여 그림 2와 도표 2와 같이 새마을호 제원으로 선정하였으며, 차체 기밀도는 비교적 열악한 조건인 준기밀차량까지만 고려하였다.

도표 2. 검토차량 제원

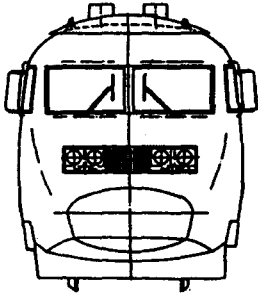


그림2. 검토대상 차량

항 목	제 원
열차 유효 단면적	10 m <sup>2</sup>
열차 둘레	12.08 m
차량 편성	10량 1편성(2M + 8T)
차량 길이	235.5 m
내부 체적 / 1량	112 m <sup>3</sup>
차체의부 누기면적/1량	100 cm <sup>2</sup> (준기밀 차량) 999 cm <sup>2</sup> (비기밀 차량)

터널 내공단면적 크기 및 궤도중심간격은 열차 운행시 터널내의 압력변동이 차체 및 승객, 주변 환경(미기압과 방사)에 미치는 영향에 따라 공기역학적으로 설계된다. 속도가 증가하면 터널단면적의 증가도 필요하다. 프랑스 철도국(SNCF)의 복선터널에 대한 터널 내공단면적 실시설계 기준은 열차 운행속도  $V = 200 \text{ km/h}$ 에 대해 터널 단면적  $55\text{m}^2$ 를 제시하고 있고<sup>(3)</sup>, 독일 THYSEN AG Transrapid System 회사는  $58 \text{ m}^2$ 로 제시하며<sup>(4)</sup>, 터널 공력해석으로 터널 연장별로 내공 단면적에 차등을 둔다. 국내는 도표 1에서와 같이 약  $68 \text{ m}^2$ 로 선진국에 비해 15% ~ 20% 크게 설계하고 있다.

선진국의 경우, 객실내 이명감 뿐만 아니라 공력저항을 줄이기 위한 노력은 차단비(Blockage Ratio),  $B = A_v/A_t = (\text{차량 단면적})/(\text{터널 내공단면적})$ 를 줄이는 방향으로 만들어졌다. B 비율의 과도한 저감은 터널 단면적을 터무니없이 크게하고, 터널건설비를 크게 증가시킨다.

또한, 열차가 고속( $160 \text{ km/h}$  이상)으로 터널에 진입시 발생하는 또 다른 문제는 터널출구에서의 미기압파이다. 이 미기압파는 충격성 소음으로 변환되어 발파음과 저주파 진동으로 주변민가에 환경소음을 야기한다. 이에 대한 효과적인 대책은 터널 단면적을 크게 하는 것보다는 저렴한 대책인 터널입구 후드의 적용이 있다<sup>(9),(10)</sup>. 궤도중심간격은 열차가 서로 고속으로 교행시 공기 압력파의 영향을 최소로 하기 위하여 충분한 거리를 유지해야 한다. 이에 대한 영향으로는 승객에게 급작스러운 충격을 느끼게 하거나, 차량내부 느슨한 결합체의 연결부위에 부딪치는 소음을 야기한다.

### 3. 승객 이명감 기준

열차가 터널에 진입하면, 열차 전방의 대부분의 공기는 열차측면과 터널벽면과의 간격을 통해서 터널 외부로 방출되지만, 일부의 공기는 압축되어 압축파로 터널내를 전파하고 터널 끝단에서 팽창파로 다시 반사한다. 이러한 터널내부의 압력변동은 곧 차량내부의 압력변동으로 전달되어 승객

의 귀를 아프게 하는 경우가 있다. 우리들은 이러한 현상을 이명감이라 부른다. 이명감은 차내의 압력변동에 의해서 발생하기 때문에 엘리베이터, 항공기 등 고도변화를 동반하는 승차기구에서도 기압변동에 따라서 일반적으로 이명감이 발생한다. 터널내 압력변동은 열차속도의 2승에 비례하기 때문에 열차가 고속으로 주행하면 이명감이 발생하기 쉽다. 일본에서는 동해도(東海道) 신간선(新幹線)이 운행을 시작하면서 문제되었다<sup>(5)</sup>. 이명현상의 불편감(ear discomfort)을 일으키는 인자로는 압력변화의 절대치  $|dp|$ , 압력변동속도 ( $dp/dt$ ), 지속시간, 압력변화의 부호 등으로 알려졌다. 터널내의 압력변동에 따른 이명현상은 차량의 기밀설계로 해결한다. 사람에게 따라 정도의 차이는 있지만 귀의 고막을 중심으로 내/외부 압력차이가 약 4,000 Pa, 압력변동율이 400 Pa/sec 이상이 되면 불편함을 느낀다(어린이의 경우 500 Pa). 또한 터널내의 압력변동은 차체의 대한 반복적인 하중, 터널내의 작업환경의 문제 등에도 관계가 있다.

몇몇 나라에서만 철도 터널운행에서의 이명감에 대한 압력 쾌적도 기준을 세우고 있으며, 그들 국가의 운행조건에서 올바른 기준인지 아직 확실성을 가지고 있지 않다. UIC Code의 LEAFLET 779 - 11을 중심으로 경춘선 터널내 승객 압력 쾌적도 설계기준을 작성하였다<sup>(2),(6),(7),(8)</sup>. 경춘선은 터널이 전체 노선의 30%이상이고, 수송수요에 의해 빈번한 열차 교행이 터널 내에서 예상된다면 도표 3과 같이 타당한 기준을 세울 수 있다. 이는 곧, 열차 승객들이 이명감을 느끼지 않는 압력변화에 대한 기준이다.

도표 3. 경춘선 복선터널에 대한 압력 쾌적도 기준제안 (비기밀 차량)

열차운행 형태	압력 기준 제안
경춘선 : 많은 수의 터널을 가진 도시간 철도서비스(터널이 노선 길이의 30%이상). "비기밀" 차량	열차교행 고려할 경우 : 4초간의 시간간격에서 3000 Pa

#### 4. 수치해석 및 결과도의

본 연구에서는 특성곡선 방정식에 의한 비정상해법으로 터널 및 객실내의 압력 및 유동해석을 수행한다. 이 방법은 현재까지 현차시험 결과와 가장 잘 일치하며, 터널 설계에 이용되고 있다<sup>(2)</sup>. 본 시뮬레이션 프로그램은 1/60축척 터널주행 시험에서도 잘 검증되었다<sup>(1)</sup>.

$R \geq 3000$  m인 구간은 기본설계안, 비교안, 실시설계안에 대하여 주어진 터널길이에서 주행속도 110 km/h, 150 km/h, 200 km/h인 경우,  $R=800$  m인 구간은 최대 설계속도인 150 km/h를 실시설계안에 대해서 공기압변동 해석을 수행하였다.

본 연구의 터널에서  $R \geq 3000$  m인 구간의 주행해석에서는 같은 주행속도로 서로 마주보며 교행시 110 km/h와 150 km/h의 경우는 열차 1이 출발 후 열차 2가 반대편 터널입구에서 20초 후에 출발시켰으며 200 km/h의 경우는 열차 1이 출발 후 반대편 터널입구에서 3초 후에 출발시켰다.  $R=800$  m인 구간은 주행해석에서는 같은 주행속도로 서로 마주보며 교행시 150 km/h의 경우는 열차 1이 출발후 열차 2가 반대편 터널입구에서 동시에(교행시차 0초)에 출발시켰다.

수치해석에서 열차 교행의 시차 차등은 일련의 수치해석 후에 터널내 압력변동 값이 최대 값이 갖는 경우를 취하였다. 단독열차 보다 교행열차 수치해석이 터널내의 압력변동이 크기 때문에 교행시의 결과로 터널내의 각종 현상을 파악하고 분석하였다. 도표 5와 도표 6에서 단독열차 결과는 참고치로 활용한다.

##### 4.1 터널내 풍압변동 해석결과

다음의 도표 4 결과는 터널 내공단면적과 터널 연장에 따른 주행속도별 터널내 최대 압력변화이다. 같은 주행속도로 서로 마주보며 교행시의 결과이다. 터널 내공단면적이 커지면 터널내의 압

력변동 최고값이 작아지며, 터널길이가 짧은 경우에 압력변동 최고값이 커지는 경향을 볼 수 있다. 도표 4는 터널 내벽 라인ینگ에 미치는 순간변동 압력하중이며 구조해석을 수행할 경우에 도표 4의 최고 압력변화값의 50%를 설계치로 적용하면 된다.

도표 4. 경춘선 터널내 최대압력변화 (열차 교행)

터널구분	터널길이	같은 속도로 교행時, 주행속도별 압력하중		
		110 km/h	150 km/h	200 km/h
기본 설계	2450 m	±750 Pa	±1200 Pa	±2700 Pa
실시 설계	355 m	-	±1400 Pa	-
	860 m	-	±1290 Pa	-
	2625 m	±750 Pa	±1100 Pa	±2400 Pa
비교안	2625 m	±790 Pa	±1200 Pa	±2500 Pa

4.2 차량내의 풍압변동 및 승객 이명감 해석결과

도표 5. 준기밀차량 : 4초간격 열차내부 최대압력변화량 (  $\Delta P_{max}$  )

터널구분	기본 설계			실시 설계									비교안				
	열차 교행			단독 열차			열차 교행						열차 교행				
터널연장 (m)	2450			2625			355	860	2625						2625		
주행속도 (km/h)	110	150	200	110	150	200	150	150	110	150	200	110	150	200			
최대 압력 변화량 (Pa)	405	838	1701	402	667	1113	655	445	477	879	1616	501	911	1666			

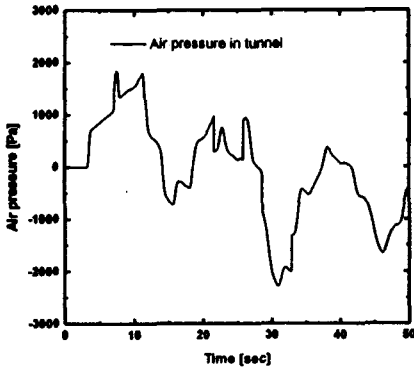
도표 6. 비기밀차량 : 4초간격 열차외부 최대압력변화량 (  $\Delta P_{max}$  )

터널구분	기본 설계			실시 설계									비교안				
	열차 교행			단독 열차			열차 교행						열차 교행				
터널연장 (m)	2450			2625			355	860	2625						2625		
주행속도 (km/h)	110	150	200	110	150	200	150	150	110	150	200	110	150	200			
최대 압력 변화량 (Pa)	527	914	2794	405	749	1591	1409	709	538	1215	2453	571	1282	2589			

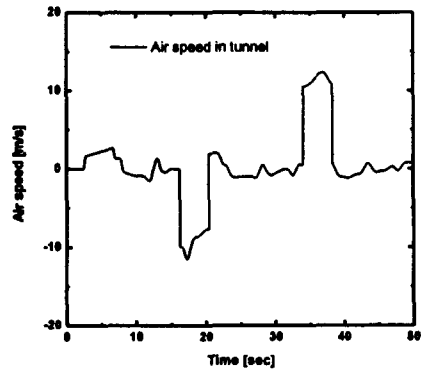
도표 6은 열차외부의 공기 압력변화이지만 국내 기존철도 차량이 비기밀 차량이므로 비기밀 차

량에 대한 객실내 압력변화로 바로 적용된다. 따라서 검토한 모든 터널 내공단면적과 터널연장에 대하여 4초간의 압력변화가 3000 Pa 미만으로 나타난다. 즉, 비기밀 차량으로 운행하여도 주행속도 200 km/h 영역까지 승객들이 이명감을 느끼지 않을 것이다.

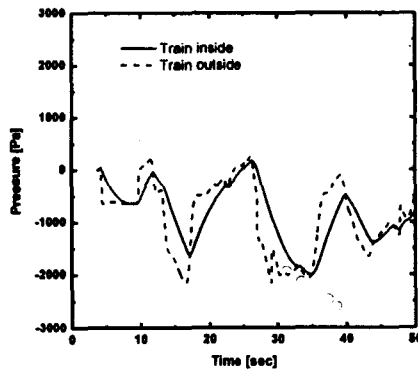
도표 5는 앞으로 준기밀 차량을 노선에 투입하게 될 상황을 준비하여 열차내의 압력변화를 해석하였다. 이 경우는 차량 1량당 풍압에 대한 누기면적을 100 cm<sup>2</sup>를 적용하였다(준기밀차량). 주행속도 200 km/h까지 4초간의 시간간격에서 모든 경우가 1700 Pa 이내이다. 즉 준기밀 차량을 이 노선에 투입할 경우는 200 km/h 이상까지 속도향상이 가능하다. 단, 궤도조건이 상용하게 따라 주어야 한다.



(a) 시간에 따른 터널내의 공기압 변동(터널내 1200 m 지점)



(b) 시간에 따른 터널내 열차풍 크기변화 (터널내 900 m 지점)



(c) 시간에 따른 객실내외의 압력변화 (1열차의 전두부에서 210 m 지점)

그림3. 최대 값 위치에서 객실내의 풍압 및 열차풍 크기변화 (열차주행속도 200 km/h, 터널길이 2625 m, 터널단면적 68.84 m<sup>2</sup>)

그림 3은 실시설계 터널단면적(68.84 m<sup>2</sup>)에서 터널길이 2625 m, 열차주행속도 200 km/h인 경우 터널내 풍압변화, 객실내의 풍압변화, 열차풍 크기변화를 도시하였다. 그림 3(a)의 경우 터널 입구로부터 1200 m 지점에서 압력변동 최고 절대값 2200 Pa을 나타내고 있다. 그림 3(b)의 경우는 열

차가 통과하는 지점에서 열차풍 최대 값을 나타내고 있다. 여기서 부호는 열차풍의 방향이다. 그림 3(c)의 경우는 주기밀 차량의 차량내의 풍압변동이며 이 경우 누기면적 100 cm<sup>2</sup>이 승객 이명 감 저감에 크게 기여는 못하고 있음을 알 수 있다.

도표 7. 경춘선 터널내 열차풍 최대값 크기 (열차 교행)

터널 구분	터널길이	주행 속도		
		110 km/h	150km/h	200km/h
기본 설계	2450m	7.01 m/s	10.8 m/s	15.2 m/s
실시 설계	355m	-	8.92 m/s	-
	860m	-	8.46 m/s	-
	2625m	6.79 m/s	9.44 m/s	12.7 m/s
비교안	2625m	7.18 m/s	10.0 m/s	14.4 m/s

#### 4.3 터널내 열차풍 해석결과

압력변동과는 달리 터널내 공기유동은 사람에게 영향을 미치는 심각한 현상이다. 도표 7은 열차 교행시 터널내의 열차풍 최대 값 크기를 수치해석한 결과이다. 터널 내공단면적이 커지면 터널내의 열차풍 최고 값이 작아지며, 터널길이가 짧은 경우 열차풍 최고 값이 커지는 경향을 볼 수 있다.

실시설계 단면의 경우 200 km/h로 서로 교행하는 경우조차 12.7 m/s 이하의 열차풍 크기를 가지며 이는 사람이 서있기 힘든 20 m/s 보다 작기 때문에 철도 유지보수를 하는 선로종사원들에게 큰 위험은 없을 것이다. 150 km/h로 교행시의 최대 값은 9.44 m/s이다. 그래도 열차통과시 유지보수원은 터널 벽에 붙어 서 있든지 대피소로 피신하는 것이 바람직하다. 이는 열차의 부착물(고드름 등)이나 그 외의 것이 터널 진입시 비교적 강한 주행저항을 받기 때문에 떨어져 열차풍과 함께 날아올 수 있다.

#### 5. 결 론

현재 국내에 철도터널 운행시 승객들이 느끼는 공기압 변동에 대한 귀울림(이명, 耳鳴)의 쾌적도 기준(풍압변동 허용기준)이 마련되어 있지 않다. 따라서 적절한 압력변동 기준을 제시하여 특정 노선에서 터널 단면적 및 터널길이에 대한 승객 쾌적도를 평가해야한다. 본 연구에서는 UIC 779-11 기준과 접목하여 타당한 승객 쾌적도 기준을 제시하였다. 경춘선은 1급 선로(150 km/h급)이며, 비기밀 차량이 주로 운행되며, 복선터널로 전체노선에서 1시간에 5 터널이상 통과하는 노선으로 고려시 객실내의 압력변동이 4초간에 3000 Pa이내이면 승객들이 쾌적함을 느끼는 것으로 제시하였다. 이 기준은 추후 철도청과 관련연구기관, 차량 제작사 등의 긴밀한 협의 및 현차 시험으로 국내기준을 마련함이 바람직하다.

경춘선 제 4 공구 터널에 대하여 열차 주행속도 110 km/h, 150 km/h, 200 km/h의 단독 및 교행 열차에 대한 터널내 공기압변동, 열차풍 크기, 객실내 압력변동을 수치해석 하였다. 기본설계안, 비교안, 실시설계안의 터널 내공단면적에 따른 터널 길이별로 해석하였다. 비기밀 차량 및 주기밀 차량으로 해석한 결과, 모든 터널에 대하여 200 km/h까지 운행하여도 열차 객실내 압력변동 허용기준(승객 쾌적도 기준)을 만족하였다. 단 선로 궤도조건이 200 km/h 운행을 포용할 경우이다. 주기밀 차량의 경우는 향후 철도청에서 차량 기밀도를 개선할 계획에 따른 선행 분석수행으로서, 주기밀 차량을 투입할 경우는 열차운행속도 200 km/h에서 10 ~ 20 km/h 정도 초과한 속도향상이 가능하다. 또한 본 연구는 터널내의 최대 압력변동량을 산출하여 차량 차체 및 터널내벽과

이닝 구조해석의 입력 데이터로 활용할 수 있도록 하였다.

해석대상의 모든 터널의 경우 200 km/h로 서로 교행하는 경우조차 16.8 m/s 이하의 열차풍 크기를 가지며 이는 사람이 서있기 힘든 20 m/s 보다 작기 때문에 철도 유지보수를 하는 선로종사원들에게 열차풍에 의한 위험은 없을 것이다. 그래도 열차통과時 유지보수원은 터널 벽에 붙어 서있든지 대피소로 피신하는 것이 바람직하다. 이는 열차의 부착물(고드름 등)이나 그외의 것이 터널 진입시 비교적 강한 주행저항을 받기 때문에 떨어져 열차풍과 함께 날아올 수 있다.

경춘선 4공구 터널의 비교안, 실시설계안의 내풍단면적은 본 기술검토에서 주어진 터널길이에서 발라스트 캐도를 적용하기 때문에 추가적인 미기압파 시험 및 저감대책을 열차 영업속도 160 km/h까지는 마련할 필요가 없다.

#### 감사의 글

본 연구는 경춘선 신설터널 제 4공구, 제 6공구 설계검토 연구결과 중 일부이며 (주) 에스코 컨설턴트의 지원에 감사 드린다.

#### 참고문헌

1. 김동현, "고속철도 터널의 공력학적 설계기술개발", 제 3회 철도기술 연구성과 발표논문집, pp. 285 ~ 293, 1999. a
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, 1. 1. 1995.
3. Profillidis, V. A., "Railway Engineering", Avebury Technical, 1995
4. THYSSEN AG Internet Home Page, 1998.
5. Ozawa, S., "Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in Tunnel-Train Systems," RTRI REPORT, Vol. 4, No. 8, 1990. 8.(in Japanese)
6. "Tests 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.
7. Gawthorpe, R G. "Pressure comfort criteria for rail tunnel operations" In: Proc 7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (Brighton, UK 27-29 November 1991). BHR Group Ltd, Elsevier, pp. 173 ~ 188, 1991.
8. 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, Elsevierpp 155 ~ 172, 1991.
9. 김동현, "터널 미기압파 저감을 위한 강제후드 개발연구", 한국철도기술연구원 수탁연구 보고서, 1999. b
10. 김동현, "고속철도 터널 공력설계 및 터널입구 후드 개발", G7 고속전철기술개발사업 보고서, 1999. c