

# 공기 압력 제어 덕트를 이용한 철도 터널 내 공기 압력 저감에 대한 수치해석 연구

서상연, 하희상\*, 이상필

## A Numerical Study on the Pressure Relief in a Tunnel Using a Pressure Relief Duct

Sang Yeon Seo, Heesang Ha\*, Sangpil Lee

**Abstract** High-speed trains have been developed widely in many countries in order to transport a large quantity of people and commodities rapidly. When a high speed train enters a tunnel, aerodynamic resistance is generated suddenly. This resistance causes micro pressure wave and discomfort to passengers. Therefore, it is essential to incorporate a pressure relief system in a tunnel and streamlined shape of a train in order to reduce aerodynamic resistance caused by a high-speed train. Additionally, the cross-sectional area of a tunnel should be carefully determined to reduce discomfort of passengers. A pressure relief duct and a vertical shaft are representative measures in a tunnel. This study represents the effect of pressure relief ducts in order to alleviate pressure changes within a time period in a tunnel. One-dimensional network numerical simulations were carried out in order to estimate the effect of pressure relief systems.

**Key words** Air pressure in a tunnel, One-dimensional network numerical analysis, Pressure change within a time period, Pressure relief duct, Aural discomfort

**초 록** 최근에는 세계 여러 나라에서 고속철도 건설에 대한 계획이 증가하고 있으며, 국내의 경우 수도권 광역 급행철도(GTX)와 같은 도심도 지하 교통망의 건설이 추진되고 있다. 열차가 고속으로 주행할 경우 발생하는 공기 저항을 최소화하기 위하여 열차의 선두부는 유선형으로 설계된다. 열차가 터널 내로 진입할 때, 터널 내에서 발생하는 공기 저항으로 인하여 열차 내 승객은 이명감과 같은 불편함을 느끼게 된다. 이러한 이명감을 감소시키기 위해서는 터널 내에서 발생하는 공기역학적 특성을 고려하여 터널의 단면적을 선정하여야 한다. 이 연구에서는 터널 내에서 열차의 고속 주행을 위해 필요한 공기 압력 제어 시스템이 이명감 감소에 미치는 효과를 분석하기 위하여 1차원 네트워크 모델링 프로그램인 THERMOTUN을 이용하여 공기압 분포에 대한 1차원 네트워크 수치해석을 수행하였다.

**핵심어** 터널 공기 압력, 1차원 네트워크 수치해석, 공기 압력 제어 덕트, 이명감

### 1. 서 론

최근 열차 차량 기술이 발달되고 빠른 운송 수단에

**Received:** Aug. 23, 2016

**Revised:** Oct. 19, 2016

**Accepted:** Oct. 19, 2016

**\*Corresponding Author:** Heesang Ha

Tel) +82313294612, Fax) +82313294660

E-Mail) hsha@gsconst.co.kr

GS E&C, Jongro 33, Jongro-gu, Seoul, Korea

대한 요구가 증가하면서 많은 고속 철도 프로젝트가 계획되고 있다. 특히 고속철도는 차량에 비해 친환경적이며 많은 수의 승객과 물류를 빠르게 운송할 수 있기 때문에 국내는 물론 해외에서도 효과적인 운송수단으로 각광을 받고 있다. 고속 열차와 관련된 인프라가 발전된 유럽과 일본을 비롯하여 미국과 중국에서도 고속철도 건설 계획이 증가하고 있다. 국내의 경우 수도권 광역 급행철도(GTX)와 같은 도심도 지하 교통망의 건설이 추진되고 있다.

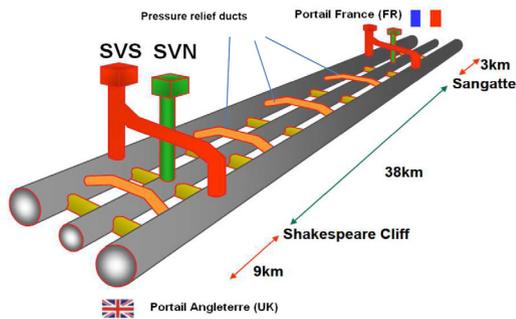


Fig. 1. Pressure relief ducts installed in the Channel Tunnel (Reinke, 2011)

국내에서 개발된 KTX-I 차량의 경우 시속 300 km/h로 운행이 가능하며 KTX-II 산천 차량은 350 km/h로 주행할 수 있다. 이러한 고속열차는 빠른 속도로 인하여 철도 노선의 선형이 제한되므로 고속철도 구간은 일반 철도 노선에 비하여 많은 교량과 터널의 건설이 필요하다. 개활지를 주행하던 고속열차가 터널 구간을 통과하는 경우 터널 내에서 여러 공기역학적인 문제가 발생한다. 터널 진입 시 발생하는 공기 저항을 최소화하기 위하여 열차의 형상을 유선형으로 설계하고 터널의 출입구 형상을 개선하기도 한다(Barthès et al., 1994). 그러나 최적 형상으로 설계된 고속열차도 터널 내부를 고속으로 주행할 때 열차의 주변으로 매우 복잡한 형상의 공기 압력 분포의 변화가 발생한다(Fairbairn, 1995). 이렇게 터널에 진입하는 고속열차는 열차에 작용하는 공기 압력의 변동으로 인하여 이명감과 미기압과 같은 문제점이 발생한다(UIC, 2002). 이명감의 경우 차량 자체의 기밀도를 높여 열차 외부와 내부의 압력 차이를 감소시켜 문제를 해결할 수 있고, 미기압과의 경우 실험 및 수치해석 등 여러가지 방안을 통하여 미기압과를 감소시키는 연구가 수행되고 있다(UIC, 2005).

이러한 이명감 및 미기압과와 같은 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다. 터널 내 공기 압력으로 인한 문제를 해결하는 데 있어 가장 효과적인 방법은 터널의 내공 단면적을 증가시키는 것이지만 이는 터널의 시공비와 직접적인 연관이 있기 때문에 최적의 터널 단면적 및 공기 압력 제어 방법을 고려해야 한다. 영국과 프랑스를 연결하는 영불 해저 터널의 경우 열차 주행으로 발생하는 공기 압력을 감소시키기 위하여 상행선과 하행선 터널을 연결하는 공기 압력 제어 덕트(Pressure relief duct)를 설치하였다(Southwood, 1994). 영불 해저 터널에 적용된 공기 압력 제어 덕트는 단면

적 3.14 m<sup>2</sup>의 원형 덕트이며 본선 터널 사이에 250 m 간격으로 설치되었다(Fig. 1). 본선 터널 사이에 설치된 공기압력 덕트는 열차가 터널 내부에서 주행할 때 발생하는 공기저항을 교행 터널로 전달하여 본선 터널 내부의 공기압력을 감소시키는 역할을 한다. 이 연구에서는 터널 내에서 열차의 고속 주행에 필수적인 공기 압력 제어 시스템의 효과를 평가하기 위하여 공기 압력 제어 덕트가 열차 주행으로 인한 공기 압력 변동량에 미치는 영향을 분석하였다(서상연, 하희상, 2016). 특히 고속열차 터널의 단면적과 공기 압력 제어 덕트의 단면적 및 배치 간격, 열차의 주행속력으로 인한 공기역학적 특성을 분석하기 위하여 1차원 네트워크 수치해석을 수행하였다.

## 2. 터널 내 공기 압력

개활지를 고속으로 주행 중인 열차가 터널로 진입할 때 열차의 전두부에 급격한 공기 압력 증가가 발생한다. 이 증가된 공기 압력 중 일부는 열차 주변을 따라 열차 후미부로 이동하며 터널 입구 밖으로 배출된다(Henson, 1995). 이러한 압력파는 터널 내부를 따라 음속으로 전파된다(Atkins, 1999). 열차의 후미부가 터널에 진입하면 열차 뒤쪽에서는 압력 감소가 발생한다. 이러한 터널 내 공기 압력의 증가 및 감소로 인하여 터널 내부에 독특한 압력 분포(characteristic pressure distribution)가 형성된다. 열차의 전두부가 터널 내의 어느 특정한 지점에 도달할 때 압력 감소가 발생한다. 열차가 특정 지점을 지나면서 열차 주변의 공기 마찰로 인하여 압력이 더욱 감소하는 반면 열차 후미의 뒷부분에서는 압력이 증가한다. 이러한 공기 압력 변동 양상은 열차가 터널 내를 주행할 때 지속적으로 변화한다.

열차 주행으로 인하여 발생한 압력파는 음속으로 터널 내부를 이동한 후 일부는 터널 출구로 빠져나가고 나머지는 반사되어 터널 내부로 되돌아온다. 압력파가 압축파로 터널 외부로 방출되면 팽창파로 반사되고, 팽창파의 경우는 압축파로 반사된다(Reinke and Busslinger, 2011). 이러한 압력파 반사의 양상은 터널과 열차의 단면적에 의하여 다양하게 변화한다(Fig. 2, 서상연, 하희상, 2016). 압력파의 크기는 열차의 표면과 공기와의 마찰로 인하여 시간이 지나면서 진폭이 감소하며, 터널 내에 피난연결통로, 궤도 등 시설물들의 영향으로 인하여 압력이 줄어들게 된다. 열차가 터널 내 진입하면서 발생하는 압력파와 정압과 부압의 압력 차이는 열차 자체뿐만 아니라 터널의 벽면과 터널 내부의 여러 시설물에도 영향을 미친다. 또한 이 압력차는 열차 내 승객이

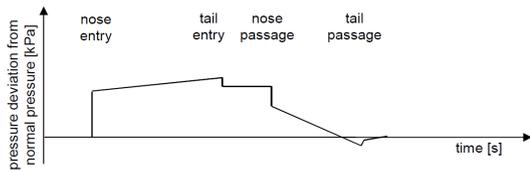


Fig. 2. Pressure deviation from normal pressure in a tunnel with train passage

나 정거장에서 대기 중인 승객, 터널 내 작업자들에게 신체적인 영향을 미치기도 한다(UIC, 2002). 따라서 이러한 압력 차이를 설계 단계에서 예측하여 터널의 단면의 크기를 포함하여 압력 해소 방법을 정하는 것이 필요하다. 열차 주행으로 인하여 발생하는 정압 및 부압으로 인한 압력 차이를 예측하기 위하여 수치해석 방법이 주로 사용된다(Reinke and Busslinger, 2011). 터널을 1차원 네트워크로 모델링하는 1차원 수치해석으로도 충분히 신뢰할만한 압력차 해석이 가능하며, 이 연구에서 1차원 네트워크 수치해석 모델링 프로그램인 THERMOTUN을 이용하여 고속열차 주행 시 터널 내부에 발생하는 압력차를 계산하였다.

### 3. 단면 설계를 위한 공기 압력 기준

세계 각국에서는 고속철도 터널 내에서 발생하는 공기 압력으로 인한 이명감과 미기압파에 대한 기준을 제시하고 있다. 국제철도연맹(UIC, Union of railway)에서는 열차 승객이 느끼는 이명감에 대한 기준을 제안하였으며 UIC 779-11(Recommendatory - Determination of railway tunnel cross-sectional area on the basis of aerodynamic considerations)와 UIC 660(Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains)를 통하여 터널 내의 압력 변동량에 대한 기준을 제시하고 있다(Table 1). UIC에서 제시하고 있는 압력 변동량 기준은 일정한 시간 안에 발생하는 압력 변동량의

허용치이다. 터널 내 압력 변화로 인하여 열차의 승객이 느끼는 이명감 및 불편함은 개인적으로 차이를 보일 수 있으므로 아직 국제적으로 획일화된 압력 변동 기준이 제시되지는 못하고 있다.

UIC 779-11에서는 1초간 압력 변동량이 1.0 kPa 이하여야 하며 10초간 압력 변동량은 2.0 kPa 이하여야 한다고 규정하고 있다. 이에 반해 UIC 660에서는 1초간 압력 변동량이 0.5 kPa, 10초간 압력 변동량이 1.0 kPa으로 UIC 779-11보다 더 엄격한 기준을 제시하고 있다. 따라서 UIC 779-11에서 제시하는 공기 압력 변동량 기준은 최소한의 권고치에 가까우며 세계 각국에서는 UIC 779-11보다 엄격한 UIC 660을 기준으로 압력 변동량 기준을 적용하고 있다. UIC 660은 독일에서 고속 철도망에 적용하기 위하여 제안한 규정으로 열차 내 승객으로부터 이명감으로 인한 민원을 발생시키지 않는 수준의 압력 변동량을 제시하고 있다. UIC 660에서는 60초간 발생하는 압력 변동량의 기준(2.0 kPa in 60 seconds)도 제시하고 있다. 그러나 입출구의 압력 차이가 심한 터널의 경우 60초간 압력 변동량 기준을 적용하는 것은 비현실적이므로 주로 1초와 3초, 10초간 압력 변동량 기준을 터널 단면적 설계에 반영하고 있다. 김선홍 외(2016)에 따르면 UIC 660의 60초 압력 기준인 2.0 kPa 미만을 만족하는 것이 매우 어렵기 때문에 UIC 660 기준을 고속철도 사업에 적용하기가 힘든 실정이다. 따라서 김선홍 외(2016)은 경부 고속철도 및 호남 고속철도의 공기압력 기준인 3초간 압력변동량 0.8 kPa 이하(단독 주행 시), 1.25 kPa 이하(교행 주행 시)와 UIC 779-11을 함께 고려하는 것이 타당하다고 판단하였다.

국내의 경우 국토교통부의 철도차량 안전기준에 관한 지침에서 열차 객실 내 압력 변동에 관한 기준을 제시하고 있으며(Table 2) 이는 UIC 660과 동일한 수준이다. 경부고속철도에 적용된 기준에 의하면 승객의 이명감을 방지하기 위하여 열차 1대 운행 시 800 Pa/3s, 열차 2대 교행 시 1,250 Pa/3s 이내가 되어야 한다. 또한

Table 1. Maximum pressure change (kPa) within a time interval

Time interval (s)	UIC 660	UIC 779-11	경부 및 호남고속철도
1	0.5	1.0	
3	0.8	-	0.8 (단독주행) 1.25 (교행주행)
4	-	1.6	
10	1.0	2.0	
60	2.0	-	

**Table 2.** Maximum pressure change (kPa) within a time interval

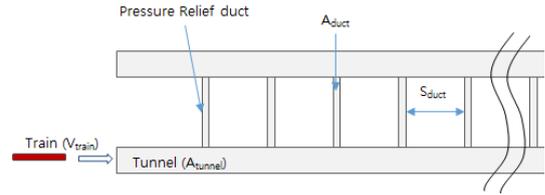
Time interval(s)	Korea
1	0.5
3	0.8
4	-
10	1.0
60	2.0

미기압과의 경우 터널 출구 20 m 위치에서 20 Pa 이하가 되어야 한다고 제시하고 있다.

#### 4. 수치 해석

##### 4.1 수치해석 모델 및 해석조건

터널 안에서 열차의 고속주행으로 인하여 발생하는 공기 압력의 크기 및 변동량을 수치해석을 통하여 분석하기 위하여 호남-제주 해저 터널 가상 설계안을 바탕으로 터널을 모델링하였다. 호남-제주 해저 터널은 터널에서 위험요소 발생 시 승객의 대피로 및 안전성을 확보하기 위하여 단선 병렬 터널로 계획되었다. 또한

**Fig. 3.** Schematic diagram for numerical modelling

공기 압력 감소 및 환기를 위한 수직구를 설치하기가 힘든 해저 터널의 특성을 고려하여 두 단선 병렬 터널 사이에 공기 압력 제어 덕트를 설치하도록 계획되었다. 수치해석의 대상 터널은 쉴드 TBM으로 굴착된 단면적 57.25 m<sup>2</sup>의 원형 터널이며 수치해석을 위한 터널의 길이는 35 km로 설정하였다. 터널 내 열차는 KTX 산천 차량을 대상으로 하였으며 터널 및 열차에 관한 상세 모델링 정보는 Table 3에 나타내었다. Fig. 3과 Table 3의 모델링 정보는 1차원 네트워크 수치해석 프로그램인 THERMOTUN에 사용된 각종 변수들을 나타내었다. THERMOTUN은 철도 터널에서 발생하는 공기 압력 변동사항을 수치적으로 해석하기 위하여 DTR(Dundee

**Table 3.** Parameters for numerical simulation

	Parameter	Value
Train	Shape of a head	Hypothetical
	Length	$L_{train}=201$ m
	Cross-sectional area	$A_{train}=9.34$ m <sup>2</sup>
	Perimeter	$P_{train}=11.67$ m
	Maximum speed	$V_{train}=350$ km/h
	Time constant of pressure tightness	$\tau = 18$ sec
	Longitudinal friction factor	$f_{train}=0.003$
	Nose and tail loss coefficients	$k_{nose}=0.05, k_{tail}=0.07$
Tunnel	Length	$L_{tun}=35,000$ m
	Type	Twin tube, single track
	Cross-sectional area	$A_{tun}=57.25$ m <sup>2</sup>
	Perimeter	$P_{tun}=31.5$ m
	Tunnel friction factor (D'arcy-Weisbach definition)	$\lambda_{tun} = 0.024$
	Tunnel friction factor	$f_{tun}=0.06$
	Length of pressure relief duct	$L_{rd}=30$ m
	Inclination	$i = 0\%$
	Ambient, tunnel air, ground, tunnel wall, and train wall temperature	15°C
Normal pressure at sea level	101,300 Pa	

Table 4. Simulation case from 1 to 21

Simulation case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
$V_{train}$ : 350 km/h	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
$V_{train}$ : 300 km/h																						
$A_{tunnel}$ : 42.59 m <sup>2</sup>	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O										
$A_{tunnel}$ : 57.25 m <sup>2</sup>													O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
$A_{tunnel}$ : 0.70 m <sup>2</sup>	O	O	O										O	O	O							
$A_{duct}$ : 1.00 m <sup>2</sup>				O	O	O										O	O	O				
$A_{duct}$ : 2.00 m <sup>2</sup>							O	O	O										O	O	O	
$A_{duct}$ : 3.14 m <sup>2</sup>										O	O	O										
$S_{duct}$ : 250 m	O			O			O			O			O			O			O			
$S_{duct}$ : 275 m		O			O			O			O			O			O				O	
$S_{duct}$ : 300 m			O			O			O			O			O			O				O

Table 5. Simulation case from 22 to 42

Simulation case	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	
$V_{train}$ : 350 km/h	O	O	O																			
$V_{train}$ : 300 km/h				O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
$A_{tunnel}$ : 42.59 m <sup>2</sup>				O	O	O	O	O	O													
$A_{tunnel}$ : 57.25 m <sup>2</sup>	O	O	O							O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
$A_{tunnel}$ : 0.70 m <sup>2</sup>				O	O	O				O	O	O										
$A_{duct}$ : 1.00 m <sup>2</sup>													O	O	O							
$A_{duct}$ : 2.00 m <sup>2</sup>							O	O	O							O	O	O				
$A_{duct}$ : 3.14 m <sup>2</sup>	O	O	O																	O	O	O
$S_{duct}$ : 250 m	O			O			O			O			O			O			O			
$S_{duct}$ : 275 m		O			O			O			O			O			O				O	
$S_{duct}$ : 300 m			O			O			O			O			O			O				O

Tunnel Research)에서 개발된 1차원 네트워크 수치 해석 프로그램이며 여러 철도터널 설계 및 문헌을 통하여 검증받은 프로그램이다(Reinke and Busslinger, 2011). 이 프로그램은 터널을 선으로 표현하는 1차원 네트워크 모델링을 사용하며, 터널 내에서 발생하는 공기의 유동 속도, 주행 중 열차에 작용하는 공기 압력, 정압과 부압으로 인한 압력차이, 열차 주행에 필요한 동력비 등을 계산할 수 있다.

THERMOTUN을 이용하여 터널 내에 발생하는 공기 압력의 변동량을 살펴보고 터널의 단면적 및 덕트의 단면적, 배치 간격, 열차의 주행속도에 의한 영향을 분석하기 위하여 총 42개의 수치해석 케이스를 설정하였다(Table 4, Table 5). 시뮬레이션에 사용된 터널의 길이는 35 km이며 단선병렬 터널에서 두 열차가 같은 속력으로 교행하는 경우를 가정하였다. 케이스 1부터 24에

서는 열차가 터널 내를 350 km/h로 주행하며 케이스 25부터 42에서는 열차가 300 km/h로 주행하는 경우를 가정하였다. 본선 터널의 단면적( $A_{tunnel}$ )은 42.59 m<sup>2</sup>과 57.25 m<sup>2</sup>의 두 경우로 하였는데, 단면적 42.59 m<sup>2</sup>는 영불 해저 터널의 단면을 모사한 것이며, 단면적 57.25 m<sup>2</sup>는 호남-제주 해저 터널 가상설계에서 적용된 단면적이다. 상행선과 하행선 터널 사이에 설치된 공기 압력 제어 덕트의 단면적( $A_{duct}$ )은 0.70 m<sup>2</sup>, 1 m<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup>, 3.14 m<sup>2</sup>로 나뉘었으며, 이 중 0.70 m<sup>2</sup>은 호남-제주 해저 터널 가상설계의 덕트 단면적이고 3.14 m<sup>2</sup>는 영불 해저 터널에 적용된 공기 압력 저감 덕트의 단면적이다. 또한 공기 압력 제어 덕트의 간격에 따른 공기 압력 감소 효과를 분석하기 위하여 덕트 사이의 간격 250 m, 275 m, 300 m에 대해 수치해석을 수행하였다. KTX 산천 차량의 경우 기밀도( $\tau$ )는 18 이상으로 제작되므로 이 해석

**Table 6.** Pressure changes in time periods of 1 second and 10 seconds

case	Pressure change in time period of 1 second (kPa in s)	Pressure change in time period of 10 seconds (kPa in s)	case	Pressure change in time period of 1 second (kPa in s)	Pressure change in time period of 10 seconds (kPa in s)
1	0.284	2.071	22	0.175	1.290
2	0.286	2.086	23	0.176	1.296
3	0.288	2.098	24	0.176	1.304
4	0.276	2.013	25	0.176	1.490
5	0.278	2.027	26	0.203	1.501
6	0.279	2.038	27	0.206	1.512
7	0.262	1.917	28	0.187	1.376
8	0.264	1.929	29	0.189	1.385
9	0.265	1.938	30	0.190	1.394
10	0.255	1.860	31	0.139	0.984
11	0.256	1.873	32	0.140	0.990
12	0.257	1.883	33	0.141	0.997
13	0.193	1.421	34	0.136	0.960
14	0.194	1.430	35	0.137	0.965
15	0.195	1.437	36	0.138	0.972
16	0.188	1.386	37	0.130	0.917
17	0.189	1.394	38	0.131	0.922
18	0.190	1.401	39	0.131	0.927
19	0.180	1.326	40	0.126	0.890
20	0.181	1.333	41	0.127	0.895
21	0.181	1.340	42	0.128	0.902

에서도 열차 전두부, 중앙부, 후미부의 기밀도를 18로 설정하였다.

#### 4.2 해석 결과

터널 내에서 열차 주행으로 인하여 발생하는 공기압력 변동량은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시간에 따라 급격하게 변화한다. Fig. 4는 시뮬레이션 케이스 1에서 분석된 1초간 및 10초간의 공기압력 변동량을 열차의 전두부, 중간, 후미부에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 4를 살펴보면 열차가 터널 입구에 진입할 때 공기압력 변동량이 크게 발생하며 열차가 터널 내부를 주행할 때 공기압력 변동량이 증가 혹은 감소하는 양상을 보인다. 그리고 열차가 터널의 출구로 빠져나올 때 가장 큰 공기압력 변동량이 발생하는 것을 알 수 있다. 모든 시뮬레이션 케이스의 공기 압력 변동량의 결과를 Table 6과 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 붉은 실선은 UIC 779-11의 10초간 압력 변동량 기준(2 kPa in 10s)을 나타내며 주황색 실선은 UIC 779-11의 1초간 압력 변동량 기준

(1 kPa in 1s)을 나타낸다. 하늘색 실선은 UIC 660의 10초간 압력 변동량 기준(1 kPa in 10s)을 나타내며 파란색 실선은 UIC 660의 1초간 압력 변동량 기준(0.5 kPa in 1s)을 나타낸다. Table 6과 Fig. 1에 나타난 바와 같이 터널 내 공기 압력 변동량은 열차의 주행속도 및 터널의 단면적, 덕트의 단면적, 덕트의 간격 등에 영향을 크게 받는다. 1초간 압력 변동량의 경우 모든 경우에 있어 UIC 779-11의 기준(1 kPa in 1s)과 UIC 660의 기준(0.5 kPa in 1s)을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 10초간 압력 변동량은 터널 및 덕트의 조건에 따라 UIC 660 기준을 만족시키지 못하는 경우가 발생하였다.

영불 해저 터널의 단면에서 열차가 350 km/h로 주행하는 케이스 1부터 케이스 12의 경우 10초간 압력 변동량이 매우 크게 나타났다. 특히 덕트의 단면적이 0.7 m<sup>2</sup>(케이스 1 - 3)와 1.0 m<sup>2</sup>(케이스 4 - 6)인 경우 UIC 779-11의 10초간 압력 변동량 기준을 넘어서는 공기압력 변화가 발생하였다. 덕트의 단면적이 2.0 m<sup>2</sup>과 3.14 m<sup>2</sup>로 증가하였을 경우 UIC 779-11의 10초간 압

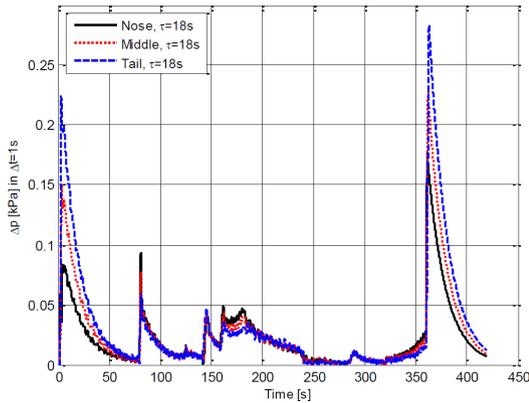


Fig. 4. Pressure change in time period of 1 s and 10 s (case 1)

력 변동 기준은 만족하나 UIC 660의 10초간 압력 변동량 기준인 1 kPa in s보다는 훨씬 큰 압력 변동량이 발생하였다. 이는 영불 해저 터널의 경우 열차가 350 km/h로 주행할 때 최소 2.0 m<sup>2</sup> 이상의 덕트를 설치해야 UIC 779-11의 기준을 만족시킬 수 있음을 나타낸다.

본선 터널의 단면적을 호남-제주 해저 터널의 단면적인 57.25 m<sup>2</sup>로 증가시켰을 경우 10초간 공기 압력 변동량은 단면적이 42.59 m<sup>2</sup>인 경우에 비해 28~31% 가량 감소하여 UIC 779-11 기준을 모두 만족한다. 그러나 덕트의 단면적을 증가시키고 배치 간격을 좁히더라도 UIC 660 기준은 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 터널 내에서 열차가 350 km/h의 속력으로 주행할 경우 본선 터널의 단면적을 증가시키거나 공기 압력 제어 덕트를 설치함으로써 UIC 779-11의 공기 압력 변동량 기준을 만족시킬 수 있으나, UIC 660의 기준은 만족시키지 못하므로 다른 방안이 필요할 것으로 판단된다.

케이스 25부터 케이스 42까지는 터널 내에서 열차가 300 km/h로 주행하는 경우를 나타낸다. 케이스 25부터 케이스 30까지에 나타난 바와 같이 단면적 42.59 m<sup>2</sup>인 터널에서 열차가 300 km/h로 주행할 경우 10초간 공기 압력 변동량은 열차속도 350 km/h일 때와 비교하여 28% 감소하였다. 그러나 열차 속도가 300 km/h로 감소하였음에도 불구하고 10초간 발생한 압력 변동량은 1.376 kPa~1.512 kPa 사이로 UIC 660의 10초간 압력 변동량 기준인 1 kPa를 상회한다. 따라서 UIC 660의 기준을 만족하기 위해서는 열차의 속도 감소와 더불어 본선 터널 단면적의 증가가 요구되는 것으로 분석된다.

케이스 31부터 케이스 42에서는 열차가 단면적 57.25 m<sup>2</sup>의 터널을 300 km/h로 주행하는 경우의 공기 압력 변동량을 나타낸다. 덕트 단면적 0.7 m<sup>2</sup> 및 덕트 간격

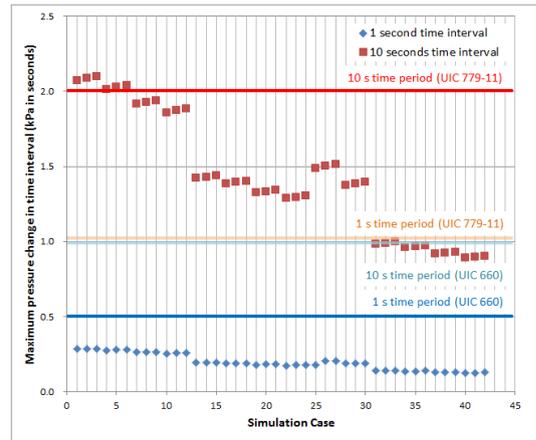


Fig. 5. Pressure changes in time period of 1 second and 10 seconds

300 m인 경우 10초간 공기 압력 변동량은 0.997 kPa로 UIC 660의 10초간 공기 압력 변동량 기준을 만족한다. 덕트의 면적이 증가하거나 덕트 간 설치 간격이 감소할 경우 공기 압력 변동량의 크기는 감소한다. 따라서 UIC 660 및 국내의 압력 변동 기준을 만족시키기 위해서는 고속 열차가 터널 안에서 300 km/h로 주행 시 터널의 단면적은 57.25 m<sup>2</sup> 이상이어야 하며, 단면적 0.7 m<sup>2</sup> 이상의 공기 압력 제어 덕트를 300 m 이하의 간격으로 배치하는 것이 합리적 것으로인 판단된다. 덕트의 단면적과 배치 간격은 터널 시공비에 직접적인 영향을 미치므로 최적 단면적 및 간격은 열차 주행에 필요한 동력비 및 운영비용, 시공비용 등을 고려하여 종합적으로 판단되어야 한다.

## 5. 결론

고속열차 주행을 위한 철도 터널의 최적 단면적을 선정하고 공기 압력 제어 덕트의 압력 저감 효과를 분석하기 위하여 THERMOTUN을 이용한 1차원 네트워크 수치해석을 수행하였다. 터널 내에서 열차가 주행 시 발생하는 공기 압력의 변동량은 터널의 단면적 결정에 큰 영향을 미치므로 국내외 공기 압력 변동량 기준을 만족시킬 수 있는 터널 단면에 대한 공기 역학적 분석을 수행하였다. 이 분석을 토대로 철도 터널 내에서 열차가 300 km/h로 주행할 수 있는 터널의 단면적과 공기 압력 제어 덕트의 최적 단면적 및 배치 간격을 도출하였다. 이를 통하여 공기압력 제어덕트가 터널 내의 공기 압력 변동에 미치는 영향을 분석하였고, UIC 660 및 UIC 779-11 기준을 만족할 수 있는 공기압력제어 덕트

의 최적 배치안을 도출하였다. 이 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 열차 주행 시 1초 및 10초간 발생하는 공기 압력 변동량은 열차의 주행속도 및 본선 터널의 단면적, 공기 압력 제어 덕트의 단면적 및 배치 간격에 따라 큰 변화를 보인다. 모든 해석 케이스에서 UIC 779-11과 UIC 660의 1초간 공기압력 변동량 기준을 만족시켰다. 그러나 열차의 주행속도가 350 km/h인 경우 UIC 660의 10초간 압력 변동량 기준을 만족시키지 못하였다. 열차의 속도를 300 km/h로 감속시키더라도 본선 터널의 단면적이 42.59 m<sup>2</sup>인 경우에는 UIC 660기준을 만족시키지 못하기 때문에 본선 터널 단면적을 57.25 m<sup>2</sup>로 증가시키는 것이 합리적으로 판단된다.
2. 영불 해저 터널의 단면(42.59 m<sup>2</sup>)에서 열차가 350 km/h로 주행할 경우 10초간 압력 변동량이 2 kPa 이상 발생하여 UIC 779-11 기준을 만족하지 못한다. 이 경우 공기 압력 제어 덕트를 설치하더라도 압력 감소량이 크지 않아 열차 주행에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 공기 압력 제어 덕트를 영불 해저 터널에서 사용된 단면적 3.14 m<sup>2</sup>과 배치 간격 250 m로 설치하면 UIC 779-11의 10초간 압력 변동 기준은 만족하지만, UIC 660 기준을 크게 상회한다. 그러므로 본선터널 단면적 42.59 m<sup>2</sup>에 단면적 3.14 m<sup>2</sup>의 원형 덕트를 250 m 간격으로 배치한 영불 해저터에서는 고속열차가 300 km/h 이상으로 주행할 수 없는 환경이라고 판단된다.
3. 단면적이 57.25 m<sup>2</sup>인 호남-제주 해저 터널의 경우 열차가 350 km/h로 주행하더라도 UIC 779-11의 10초간 공기 압력 변동량 기준을 만족시킨다. 그러나 열차의 주행속도가 350 km/h인 경우 공기 압력 제어 덕트의 단면적을 증가시키고 배치 간격을 좁히더라도 UIC 660의 10초간 변동량 기준은 만족시킬 수 없는 것으로 분석되었다.

국내 공기 압력 변동 기준과 동일한 UIC 660 기준을 만족시키기 위해서는 본선 터널의 단면적 57.25 m<sup>2</sup>의 경우 열차의 주행 속력을 300 km/h 이하로 낮추고 단면적 0.70 m<sup>2</sup> 이상의 공기 압력 제어 덕트를 배치간격 300 m 이하로 설치하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

이 연구에서는 고속 열차가 터널 내에서 주행 시 발생하는 1초 및 10초간의 공기 압력 변동량을 중심으로 분석을 수행하였다. 본선 터널의 단면적 및 공기 압력

제어 덕트의 단면적, 배치 간격은 터널 시공비에 직접적인 영향을 미치므로 최적 단면적 및 간격은 열차 주행에 필요한 동력비 및 운영비용, 시공비용 등을 고려하여 종합적으로 판단되어야 하며 추후 이에 관련된 추가 연구가 필요하다.

## 사 사

이 논문은 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2015년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저 터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술개발(16SCIP-B066321-04)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## References

1. 김선홍 외, 2015, 철도터널 설계를 위한 최신기준 및 방침 사항에 대한 고찰, 유신기술회보, 21, pp. 151-152.
2. 서상연, 하희상, 2016, 호남-제주 해저터널 가상설계의 공기압력 제어 덕트가 열차 주행에 미치는 영향에 대한 수치 해석 연구, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 17(8), pp. 17-27
3. Atkins, W. S., 1999, Piston relief ducts for AlpTransit Gotthard, The Channel Tunnel Experience, Institution of Engineering and Technology, Conference Publication (Book 433), pp. 20-23.
4. Barthes, H., Bordas, A. and Bouillot, D. (1994), "Tunnels - special works", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, The Institution of Civil Engineers, Engineering Channel Tunnel, Part 3: French Sectoin, pp. 63-75.
5. Fairbairn, A. G. (1995), Tunnel ventilation, including aerodynamic", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, The Institution of Civil Engineers, Engineering Channel Tunnel, Part 4: Transport Systems, pp. 32-41.
6. Henson, D. (1995), Aerodynamics, Ventilation and Cooling the tunnel, "Engineering the Channel Tunnel, Kirkland, J., E&FN SPON/EUROTUNNEL, pp. 217-220.
7. Reinke, P., and Busslinger, A. (2011), Improvement of aero and thermodynamics of rail tunnels by cross-connections with shut-off devices, Research 2011, HBI Haerter Ltd., Swiss, pp. 38-43.
8. Southwood, A. J., (1994), The Channel Tunnel : A Designer's Perspective, A. J., Mott MacDonald, pp. 11-13.
9. UIC. (2002), Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains, Technical document, Railway Technical Publications UIC leaflet 660, pp. 28-29.
10. UIC. (2005), Determination of railway tunnel cross-sectional area on the basis of aerodynamic considerations, Technical document, Railway Technical Publications UIC leaflet 779-11, pp. 13-15.



**서 상 연**

2006년 한양대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
2008년 The University of Texas at  
Austin 대학원 Geotechnical Engineering  
공학석사  
2010년 The University of Texas at Austin  
대학원 Geotechnical Engineering 공학  
박사

Tel: 02-2154-2384  
E-mail: syseo01@gsenc.com  
현재 GS건설 기술연구소 선임연구원



**하 희 상**

1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 031-329-4612  
E-mail: hsha@gsenc.com  
현재 GS건설 기술연구소 수석연구원



**이 상 필**

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2006년 서울대학교 대학원 지구시스템  
공학부 공학박사

Tel: 02-2154-2400  
E-mail: splee@gsenc.com  
현재 GS건설 기초기술담당 상무