

호남-제주 해저터널 가상설계의 공기압력 제어 덕트가 열차 주행에 미치는 영향에 대한 수치해석 연구

A Numerical Study on the Effect of Pressure Relief Ducts on the Normal Pressure in a Preliminary Design of Honam-Jeju Subsea Tunnel

서 상 연¹⁾ · 하 희 상[†]

Sangyeon Seo · Heesang Ha

Received: April 26th, 2016; Revised: May 2nd, 2016; Accepted: June 13rd, 2016

ABSTRACT : High-speed trains have been developed widely in European countries and Japan in order to transport large quantity of people and commodities in short time. Additionally, a high speed train is one of the most desirable and environmentally friendly transportation methods. When a high speed train enters a tunnel, aerodynamic resistance is generated suddenly. This resistance causes micro pressure wave and discomfort to passengers. Due to this aerodynamic pressure against the train, a large amount of traction is required for the operation of a train in a tunnel. Therefore, it is essential to incorporate a pressure relief system in a tunnel in order to reduce aerodynamic resistance caused by a high-speed train. 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 positive and negative normal pressures acting on a train. One-dimensional numerical simulations were carried out in order to estimate the effect of pressure relief systems.

Keywords : High-speed train, Air pressure in a tunnel, One-dimensional numerical analysis, Pressure relief duct, Positive and negative pressure

요 지 : 최근에는 고속 열차와 관련된 인프라가 발전한 유럽, 일본 같은 고속철도 선진국뿐만 아니라 미국과 중국에서도 고속철도 건설에 대한 구체적인 계획이 증가하고 있으며, 국내의 경우 수도권 광역급행철도(GTX)와 같은 대심도 지하 교통망의 건설이 추진되고 있다. 열차가 고속으로 주행할 경우 발생하는 공기저항을 최대한 감소시키기 위하여 열차의 선두부는 유선형으로 설계된다. 열차가 터널 내로 진입할 때, 터널 내에서 발생하는 공기저항으로 인하여 열차가 터널을 주행할 때 개활지에서 주행하는 경우보다 훨씬 큰 동력이 요구된다. 따라서 일반적으로 열차가 터널로 진입할 때 공기저항 저감을 위하여 열차의 주행속도를 감소시킨다. 이렇게 열차의 속도를 감소시킬 경우 고속 열차의 운송 능력 및 장점이 감소되기 때문에 터널 내에서 열차의 주행 시에 발생하는 공기저항을 감소시키는 설비가 필수적이다. 이 연구에서는 터널 내에서 열차의 고속 주행을 위해 필요한 공기압력 제어 시스템의 효과를 분석하기 위하여 터널의 단면적 및 공기압력 제어 덕트의 단면적과 덕트의 간격이 열차 주행으로 인한 공기저항에 미치는 영향을 1차원 네트워크 수치해석 프로그램을 이용하여 분석하였다.

주요어 : 고속 열차 주행, 터널 공기압력, 1차원 수치해석, 공기압력 제어 덕트, 정압력 및 부압력

1. 서 론

빠르고 안전한 운송 수단에 대한 요구가 증가하면서 고속 열차 및 이를 위한 인프라 투자가 꾸준히 증가하고 있다. 이에 전 세계적으로 친환경적이며 많은 수의 승객과 물류를 신속하게 운송할 수 있는 고속철도가 효과적인 운송 수단으로 각광받고 있다. 최근에는 고속 열차와 관련된 인프라가 발전한 유럽, 일본 같은 고속철도 선진국을 비롯하여 미국과 중국에서도 고속철도 건설에 대한 구체적인 계획이 증가

하고 있다. 국내의 경우 수도권 광역급행철도(GTX)와 같은 대심도 지하 교통망의 건설이 추진되고 있다.

주행속도가 일반열차에 비해 빠른 고속 열차의 경우 빠른 속도로 인하여 철도 노선의 선형이 제한되며, 이로 인하여 고속철도 구간은 일반 철도 노선에 비하여 교량과 터널이 많이 계획된다. 열차가 고속으로 주행할 경우 발생하는 공기저항을 최대한 감소시키기 위하여 선두부의 형상은 유선형인 경우가 많다(Barthes et al., 1994). 그러나 열차의 공기저항계수를 고려하여 최적으로 설계된 형상의 고속 열차도

1) GS E&C

† GS E&C (Corresponding Author : hsha@gsconst.co.kr)

고속으로 주행 시 열차의 주변으로 공기압력이 매우 복잡한 형상으로 분포하게 된다. 특히 개활지에서 주행 중인 열차가 터널 내로 진입할 때 개활지와 터널 내부 공간의 면적 변화로 인하여 공기압력의 분포가 더욱 복잡한 양상을 띠게 된다. 이렇게 터널에 진입하는 고속 열차는 열차에 작용하는 공기압력의 변동으로 인하여 이명감과 미기압파 같은 문제점을 발생시킨다(UIC, 2002). 이명감은 열차 외부와 내부의 압력 차이로 인하여 열차 안의 승객이 귀에서 느끼는 불편감을 말하며, 미기압파는 열차가 터널에 진입하면서 터널의 출구부에서 발생하는 압력파를 뜻한다. 이명감의 경우 차량 자체의 기밀도를 높여 열차의 외부와 내부의 압력 차이를 감소시켜 문제를 해결할 수 있고 미기압파의 경우 실험 및 수치해석 등 여러 가지 방안을 통하여 미기압파를 감소시키는 연구가 수행되고 있다(UIC, 2005).

세계 각국에서는 고속철도 터널 내에서 발생하는 공기압력으로 인한 이명감과 미기압파에 대한 기준을 제시하고 있다. UIC 779에서는 터널에서 발생하는 압력변동으로 인하여 열차 탑승객의 건강을 보호할 수 있는 의학적 기준으로 승객이 겪는 최대 압력변화가 10kPa 이하여야 한다는 기준을 제시하고 있다(UIC, 2005). 또한, 차량의 기밀도에 따라 다른 기준을 적용하여 비기밀 차량의 경우 4.5kPa/4s(복선 터널 교행 포함)와 3.0kPa/4s(단선터널) 이내를 만족시켜야 하며, 기밀 차량의 경우 1.0kPa/1s(단선 및 복선터널 교행 포함), 1.6kPa/4s(단선 및 복선터널 교행 포함), 2.0kPa/10s(단선 및 복선터널 교행 포함) 이내를 만족시켜야 한다. 국내의 경우 경부고속철도의 기준을 따르며 이명감을 방지하기 위하여 열차 1대 운행 시 800Pa/3s, 열차 2대 교행 시 1,250Pa/3s 이내가 되어야 한다. 또한, 미기압파의 경우 터널 출구 20m 위치에서 20Pa 이하가 되어야 한다고 제시하고 있다.

열차가 터널 내부로 진입할 때 발생하는 공기저항은 이명감이나 미기압파 이외에도 열차의 주행 동력 소모에 큰 영향을 미친다(Fairbairn, 1995). 열차가 터널을 주행할 때에는 터널 내에서 발생한 공기저항으로 인하여 개활지에서 주행하는 경우보다 훨씬 큰 동력이 요구된다. 따라서 일반적으로 공기저항 감소 및 동력 소모 저감을 위하여 열차가 개활지에서 터널로 진입할 때 열차의 주행속도를 감소시킨다(Atkins, 1999). 그러나 공기저항을 줄이기 위하여 열차의 속도를 줄이게 되면 고속 열차의 운송 능력 및 빠른 이동이라는 장점이 감소되기 때문에 터널 내에서 발생하는 공기저항을 감소시키는 설비가 필수적이다. 영국과 프랑스를 연결하는 길이 50km의 영불 해저터널(Channel tunnel)의 경우 두 개의 본선 터널 사이에 직경 2m의 원형 덕트를 250m 간격마다 설치하여 열차 주행 시 발생하는 공기저항을 감소시켰다(Barthes et al., 1994). 이 공기압력 제어 덕트(Pressure

relief duct)는 본선 터널 사이에 설치된 서비스 터널과의 간섭을 피하기 위하여 곡선 모양의 아치 형태로 설치되었다(Southwood, 1994). 스위스의 The New Rail Link Mattstetten-Rothrist 노선의 경우 터널 구간에 두 개의 수직구를 설치하여 터널 내에서 발생하는 공기저항을 감소시켰으며, 이로 인하여 터널 내 열차가 200km/h로 주행할 수 있도록 설계되었다(Reinke & Busslinger, 2011). 이 연구에서는 터널 내에서 열차의 고속 주행에 필수적인 공기압력 제어 시스템의 효과를 평가하기 위하여 공기압력 제어 덕트가 열차 주행으로 인한 공기저항에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 열차 주행 시 발생하는 정압 및 부압

개활지를 고속으로 주행 중인 열차가 터널로 진입할 때 열차의 전두부에 급격한 공기압력 증가가 발생한다(Fig. 1). 이 증가된 공기압력 중 일부는 열차 주변을 따라 열차 후미부로 이동하며 터널 입구 밖으로 배출된다(Henson, 1995). 이러한 압력파는 터널 내부를 따라 음속의 속도로 전파된다. 열차의 후미부가 터널에 진입하면 열차 뒤쪽에서는 압력 감소가 발생한다(Fig. 2). 이 압력 감소를 발생시키는 압력파도 터널의 길이 방향을 따라 음속의 속도로 전파된다. 터널 내를 주행하는 열차에 작용하는 공기압력 저항으로 인하여

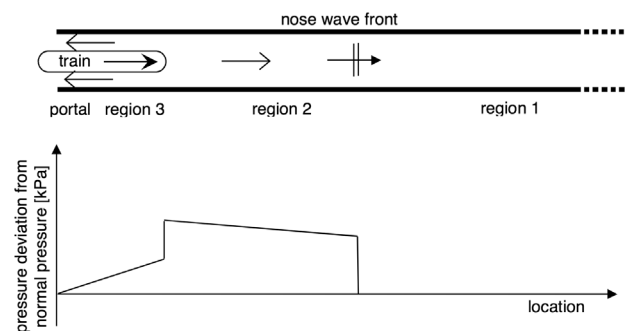


Fig. 1. Pressure deviation from normal pressure along tunnel during entry of a train

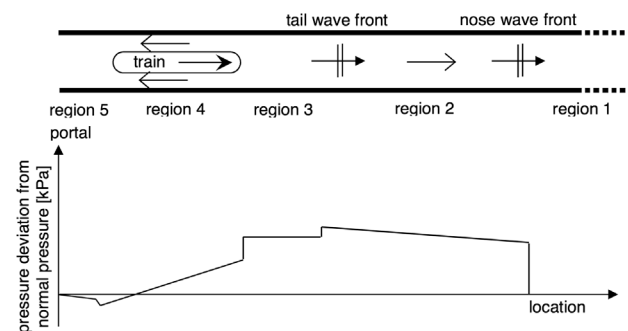


Fig. 2. Pressure deviation from normal pressure along tunnel during passage of train in a tunnel

터널 내부의 공기압력이 증가하거나 감소하게 되고 이러한 압력의 증감은 터널 내부에 독특한 압력 분포(Characteristic pressure distribution)를 형성하게 된다. 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 공기압력 변동 양상은 열차가 터널 내를 주행할 때 지속적으로 변화하며 Fig. 3은 열차가 터널 내의 어느 한 지점을 통과할 때 발생하는 압력 변동 양상을 나타낸다.

열차 주행으로 인하여 발생한 압력파는 음속으로 터널 내부를 이동한 후 일부는 터널 출구로 빠져나가게 되고 압력파의 일부는 반사되어 터널 내부로 되돌아온다. 압력파가 압축파로 터널 외부로 방출되면 팽창파로 반사되고, 팽창파의 경우는 압축파로 반사된다(Reinke & Busslinger, 2011). 이러한 압력파 반사의 양상은 터널과 열차의 단면적에 의하여 다양하게 변화한다. 압력파의 크기는 열차의 표면과 공

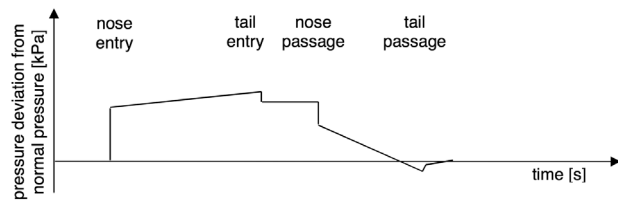


Fig. 3. Pressure deviation from normal pressure at certain point in a tunnel starting with train entry till complete passage of train

기와의 마찰로 인하여 시간이 지나면서 진폭이 감소하며 터널 내에 피난연결통로, 궤도 등 시설물들의 영향으로 인하여 압력이 줄어들게 된다. 열차가 터널 내로 진입하면서 발생하는 압력파와 정압과 부압의 압력 차이는 열차 차체뿐만 아니라 터널의 벽면과 터널 내부의 여러 시설물에도 영향을 미친다. 또한, 이 압력차는 열차 내 승객이나 정거장에서 대기 중인 승객, 터널 내 작업자들에게 신체적인 영향을 미치기도 한다(UIC, 2002). 따라서 이러한 압력 차이를 설계 단계에서 예측하여 터널의 단면 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 & Busslinger, 2011). 터널을 1차원 네트워크로 모델링 하는 1차원 수치해석으로도 충분히 신뢰할만한 압력차 해석이 가능하며, 이 연구에서 1차원 수치해석 프로그램인 THERMOTUN을 이용하여 고속 열차 주행 시 터널 내부에 발생하는 압력차를 계산하였다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델

이 연구에서는 호남-제주 해저터널 가상설계안을 바탕으로 터널을 모델링 하였다. 호남-제주 해저터널은 현재 고속 압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술 개발 연구단에서 진행하고 있는 가상설계가 진행 중이다. 터널 내

Table 1. Parameters for numerical simulations

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

에서 위험요소가 발생할 경우 안전성을 확보하기 위하여 복선 터널이 아닌 단선 병렬 터널로 계획되고 있으며, 공기압력 감소 및 환기를 위한 수직구를 설치하기가 힘든 해저터널의 특성상 공기압력 감소를 위하여 단선 터널 사이에 공기압력 제어 덕트의 설치가 계획되고 있다. 대상 터널은 쉴드 TBM으로 굴착한 원형 단면의 터널로 터널의 단면적은 57.25m²이며 터널의 길이는 35km로 설정하였다. 이 터널은 단선 병렬 터널이며 상행선 및 하행선 터널은 35m 간격으로 평행하게 굴착되었다고 가정하였다. 터널 내 열차는 KTX 산천 차량을 대상으로 하였으며 터널 및 열차에 관한 상세 모델링 정보는 Table 1에 나타내었다. Table 1의 모델링 정보는 일차원 수치해석 프로그램인 THERMOTUN에 사용된 각종 수치들을 나타낸다. THERMOTUN은 철도 터널에서 발생하는 공기압력 변동사항을 수치적으로 해석하기 위하여 DTR(Dundee Tunnel Research)에서 개발된 1차원 수치해석

프로그램이며, 여러 철도 터널 설계 및 문헌을 통하여 정밀한 해석으로 검증받은 프로그램이다(Reinke & Busslinger, 2011). 이 프로그램은 터널을 선으로 표현하는 1차원 네트워크 모델링을 사용하며 터널 내에서 발생하는 공기의 유동 속도, 주행 중 열차에 작용하는 공기압력, 정압과 부압으로 인한 압력 차이, 열차 주행에 필요한 동력비 등을 계산할 수 있다. 또한, 터널 내에 설치된 팬이나 댐퍼의 성능을 고려한 모델링을 적용할 수 있으며, 터널 내에서 공기 마찰로 인하여 발생하는 열의 영향 또한 계산이 가능하다.

3.2 해석 조건 및 시나리오

THERMOTUN을 이용하여 터널 내에 발생하는 공기압력의 영향을 살펴보기 위하여 터널의 단면적, 덕트의 단면적 및 간격 등을 달리하여 총 25개의 수치해석 Case를 설정하였다(Table 2, Table 3). 모든 Case는 길이 35km의 터널을

Table 2. THERMOTUN simulation cases (1)

Parameters / Simulation cases	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
One train in upline and one in downline (Total 2 trains)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
One train in a single tunnel without relief ducts (Total 1 train)												
Train velocity : 350 km/h	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cross-sectional area of a tunnel : 42.59 m ²	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cross-sectional area of a tunnel : 57.25 m ²												
Cross-sectional area of relief ducts : 0.7 m ²	O	O	O									
Cross-sectional area of relief ducts : 1 m ²				O	O	O						
Cross-sectional area of relief ducts : 2 m ²							O	O	O			
Cross-sectional area of relief ducts : 3.14 m ²										O	O	O
Spacing of pressure relief ducts : 250 m	O			O			O			O		
Spacing of pressure relief ducts : 275 m		O				O			O			O
Spacing of pressure relief ducts : 300 m			O				O			O		O
Maximum positive and negative pressure deviations from normal pressure along tunnel during complete train passage for a tunnel (Pa)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Table 3. THERMOTUN simulation cases (2)

Parameters / Simulation cases	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
One train in upline and one in downline (Total 2 trains)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
One train in a single tunnel (Total 1 train)													O
Train velocity : 350 km/h	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
Cross-sectional area of a tunnel : 42.59 m ²													
Cross-sectional area of a tunnel : 57.25 m ²	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cross-sectional area of relief ducts : 0.7 m ²	O	O	O										
Cross-sectional area of relief ducts : 1 m ²				O	O	O							
Cross-sectional area of relief ducts : 2 m ²							O	O	O				
Cross-sectional area of relief ducts : 3.14 m ²										O	O	O	
Spacing of pressure relief ducts : 250 m	O			O			O			O			
Spacing of pressure relief ducts : 275 m		O			O			O			O		
Spacing of pressure relief ducts : 300 m			O			O			O			O	
Maximum positive and negative pressure deviations from normal pressure along tunnel during complete train passage for a tunnel (Pa)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

KTX 산천 열차가 속력 350km/h로 주행하는 경우를 가정하였다. 공기압력 덕트가 없을 때의 압력변화를 살펴보기 위한 Case 25를 제외한 나머지 모든 경우에는 단선 병렬 터널 내 열차가 교행하는 경우를 가정하였다. Case 1~12까지는 터널의 내공 단면적이 42.59m²이며 이는 Channel tunnel의 단면적과 같은 크기이다. Case 13~24의 12 Case는 터널의 단면적이 57.25m²인 경우를 나타내며 이 면적은 호남-제주 해저터널 가상설계에서 적용된 면적이다. 따라서 Case 1~12와 13~24의 결과를 비교하면 터널 단면적에 따른 영향을 분석할 수 있다. 30m 간격의 두 병렬 터널 사이에 설치된 압력 제어 덕트의 면적이 터널 내 공기압력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공기압력 제어 덕트의 면적 0.7m², 1.0m², 2.0m², 3.14m²의 각 경우에 대한 시뮬레이션 Case를 설정하였다. 또한, 덕트의 간격에 따른 영향을 분석하기 위하여 간격 250m, 275m, 300m에 따른 수치해석을 수행하였다.

4. 결 과

THERMOTUN을 이용하여 도출된 공기압력 변동량을 Table 1과 Fig. 4~Fig. 13에 나타내었다. Fig. 5~Fig. 13은 열차가

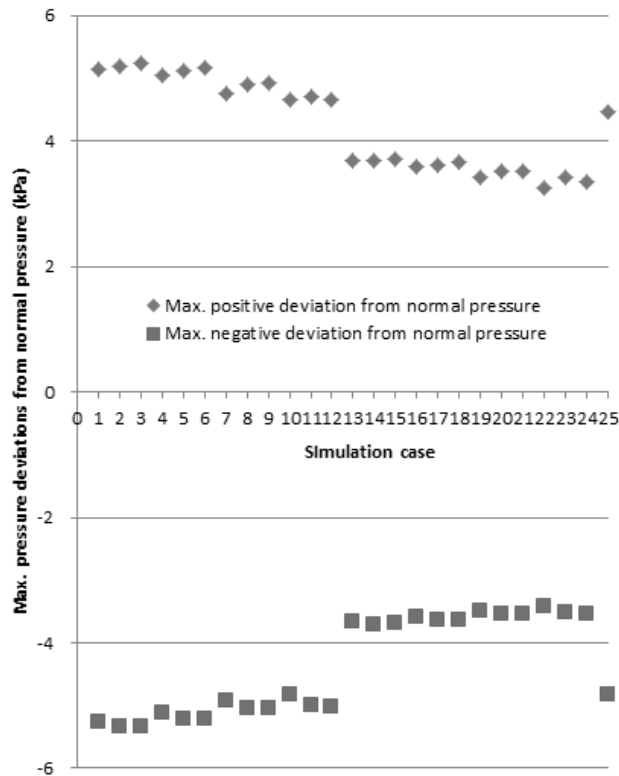
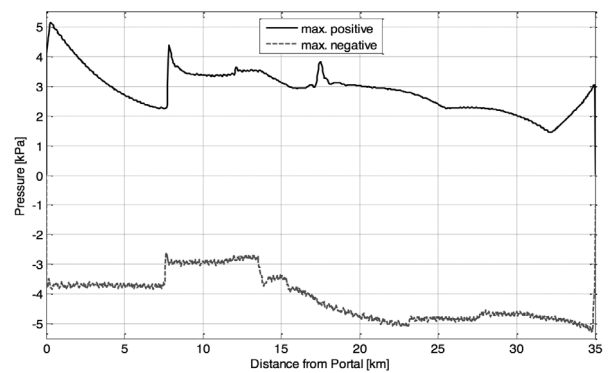


Fig. 4. Maximum positive and negative pressure deviations from normal pressure along the tunnel during complete train passage

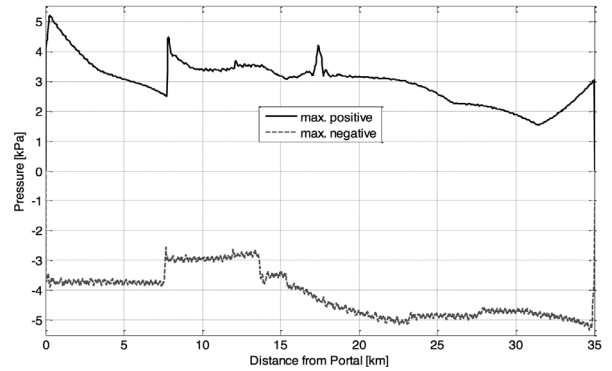
35km 길이의 터널을 통과하면서 공기저항으로 인하여 발생한 정압(Positive normal pressure)과 부압(Negative normal pressure)의 변동 양상을 나타내었다. 이 압력 변동 양상에서 최대 정압(Maximum positive normal pressure)과 최대 부압(Maximum negative normal pressure)의 수치를 Table 4와 Fig. 4에 도시하였다.

4.1 덕트의 면적 및 간격의 영향

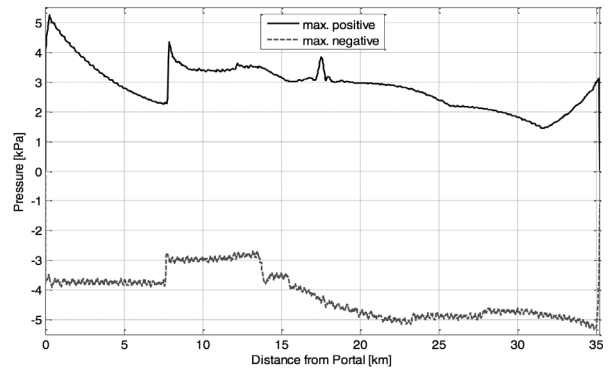
Case 1과 Case 2, Case 3은 터널의 단면적이 42.59m², 덕트의 단면적이 0.70m²일 때 덕트 사이의 간격(250m, 275m, 300m)에 따른 압력 분포 양상을 나타낸다. Fig. 4에 나타난



(a) Case 1



(b) Case 2



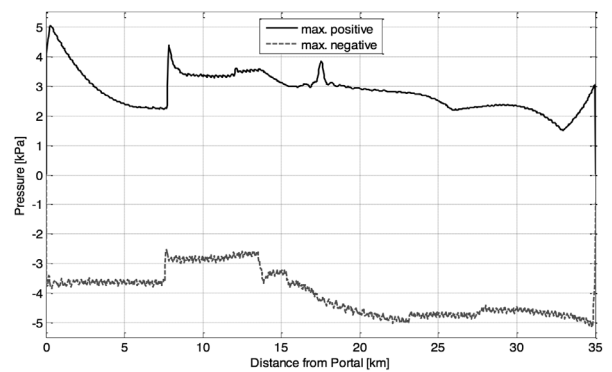
(c) Case 3

Fig. 5. Maximum positive and negative pressure deviations

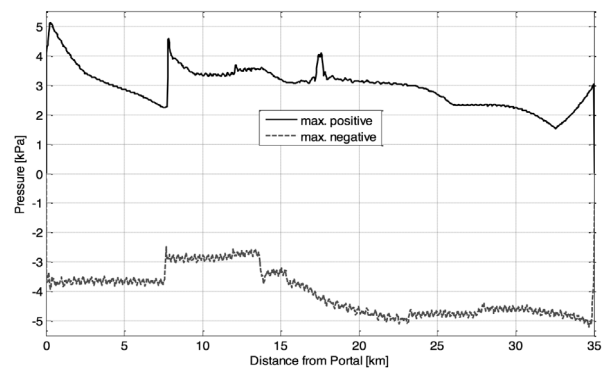
Table 4. Maximum positive and negative deviation from normal pressure

Case	Max. positive deviation from normal pressure (kPa)	Max. negative deviation from normal pressure (kPa)	Case	Max. positive deviation from normal pressure (kPa)	Max. negative deviation from normal pressure (kPa)
1	5.15	-5.27	13	4.67	-5.02
2	5.20	-5.34	14	3.68	-3.66
3	5.25	-5.33	15	3.69	-3.70
4	5.06	-5.12	16	3.71	-3.69
5	5.12	-5.21	17	3.60	-3.60
6	5.16	-5.21	18	3.61	-3.64
7	4.77	-4.93	19	3.66	-3.64
8	4.91	-5.04	20	3.43	-3.48
9	4.93	-5.04	21	3.53	-3.54
10	4.67	-4.83	22	3.51	-3.54
11	4.72	-4.99	23	3.26	-3.43
12	5.15	-5.27	24	3.42	-3.51
			25	3.36	-3.53

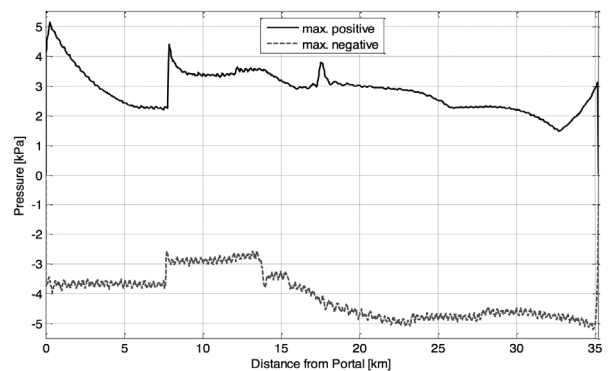
바와 같이 덕트의 면적이 증가할수록 최대 정압이 감소하고 최대 부압이 증가한다. 또한, 덕트 사이의 간격이 증가할수록 최대 정압이 증가하고 최대 부압이 감소한다. 이는 덕트의 면적이 증가할수록 열차 주행 시 발생하는 공기압력이 덕트를 통과하면서 소산되는 양이 증가하기 때문이며, 덕트의 간격이 짧을수록 동일 터널 길이당 덕트의 개수가 증가하기 때문에 공기저항이 감소하게 된다. Fig. 5에는 터널의 단면적이 42.59m², 덕트의 단면적이 0.7m²이고 덕트가 250m, 275m, 300m 간격으로 배치되어 있을 때의 공기압력 변동량을 나타낸다. 덕트의 면적이 0.7m²로 일정하고 덕트의 간격이 25m씩 증가할 때 최대 정압은 1.0%(덕트 간격 275m), 1.9%(덕트 간격 300m) 증가한다. 최대 부압의 경우도 덕트의 간격이 증가할수록 1.3%와 1.1%씩 증가한다. 덕트의 간격이 25m씩 증가할 때 최대 정압은 1.0%(덕트 간격 275m), 1.9%(덕트 간격 300m) 증가한다. 최대 부압의 경우도 덕트의 간격이 증가하면 1.8% 증가한다(Fig. 6). 최대 정압 및 최대 부압의 크기는 덕트 간격에 따라 증가 혹은 감소하지만, 압력 변동 양상은 서로 유사한 형태를 보인다. 덕트의 면적이 0.7m²와 1.0m²인 경우(Fig. 5, Fig. 6)에는 덕트의 간격에 따른 최대 정압 및 부압의 크기 증가가 1~2%였으나, 덕트의 면적이 2.0m²로 증가하게 되면 Fig. 7에 나타난 바와 같이 최대 정압은 덕트 간격이 증가할 때 2.9%(275m)와 3.4%(300m)씩 증가하며, 최대 부압은 2.2%(275m, 300m)씩 증가하였다. 반면에 터널 단면적이 3.14m²일 때, 최대 정압은 덕트 간격이 275m일 때 250m인 경우보다 1.1% 증가하였고, 300m일 때는 250m일 때와 동일한 수치를 나타내었다(Fig. 8). 최대 정압의 변화와는 달리 최대 부압은 덕트 간격에 따라 다소 큰 변화를 보였다. 덕트 간격이 275m인 경우 최대 부압은 250m의 경우보다 3.3% 증가하였으며 300m인 경우에는 3.9% 증가하였다.



(a) Case 4

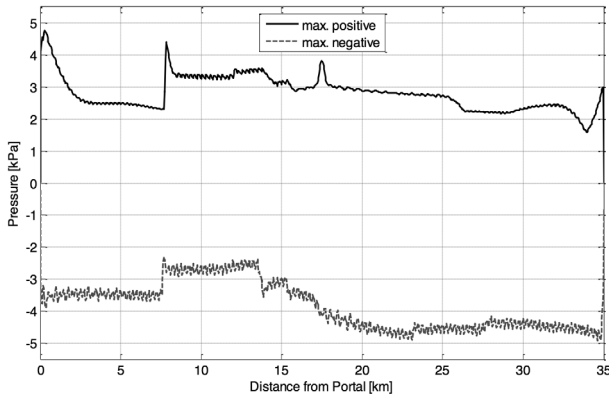


(b) Case 5

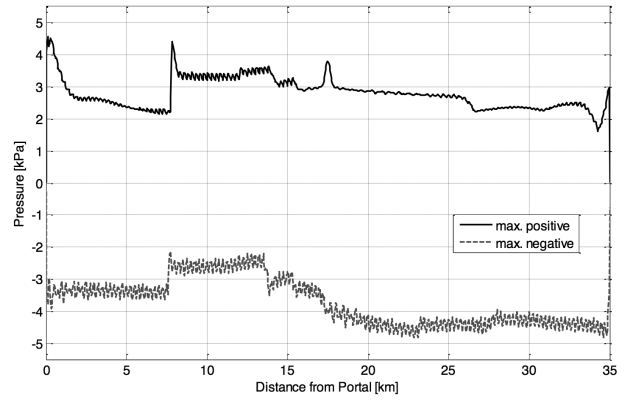


(c) Case 6

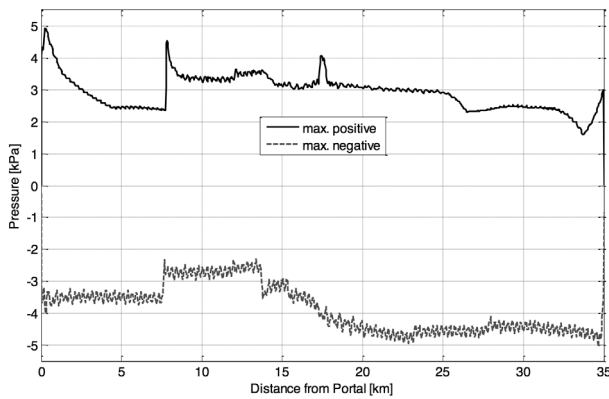
Fig. 6. Maximum positive and negative pressure deviations



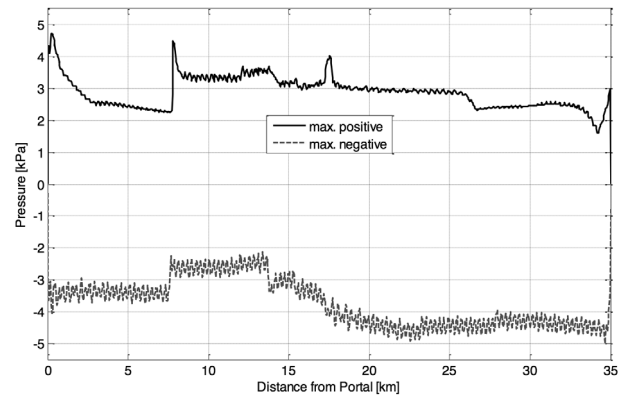
(a) Case 7



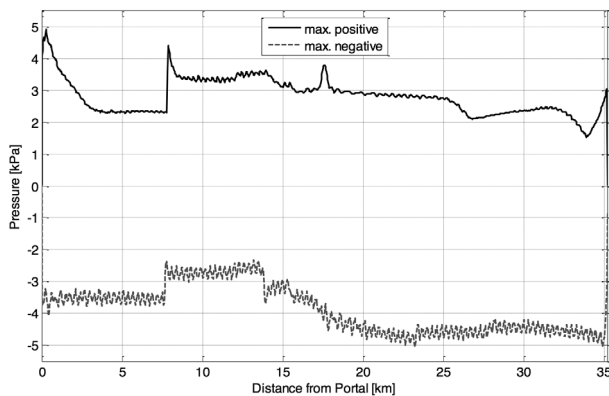
(a) Case 10



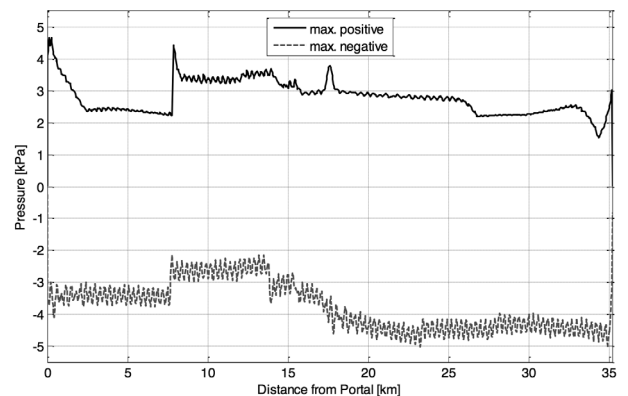
(b) Case 8



(b) Case 11



(c) Case 9



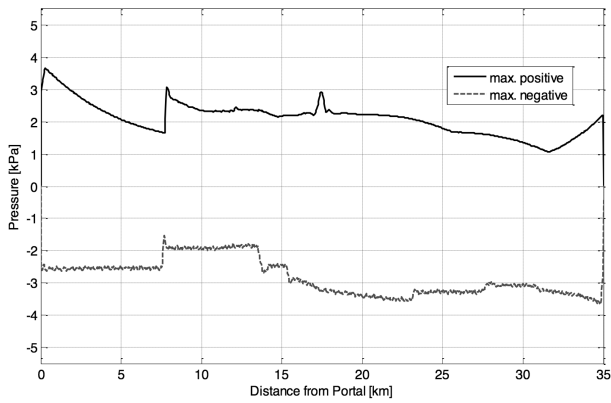
(c) Case 12

Fig. 7. Maximum positive and negative pressure deviations

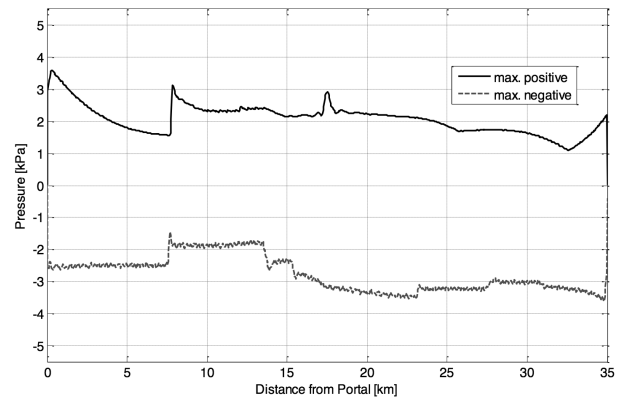
Fig. 8. Maximum positive and negative pressure deviations

Fig. 9~Fig. 13까지는 터널의 단면적이 57.25m²인 경우의 압력 변화 양상을 나타내었다. 덕트의 단면적 및 간격이 변화할 때 위에서 언급된 터널 단면적 42.59m²의 경우와 비슷하게 덕트의 간격이 증가함에 따라 최대 정압 및 최대 부압의 크기가 증가하였다. 덕트의 단면적이 0.7m²인 경우 덕트 간격이 증가할 때 최대 정압의 크기가 0.3%, 0.8% 증가하였고 최대 부압은 1.1%와 0.8%씩 증가하였다(Fig. 9). 덕트의 면적이 1.0m²로 증가하였을 경우에도 최대 정압 및 최대 부압의 크기가 각각 0.3%, 1.7%와 1.1%, 1.1%씩 증가하였다(Fig. 10). Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이 덕트의

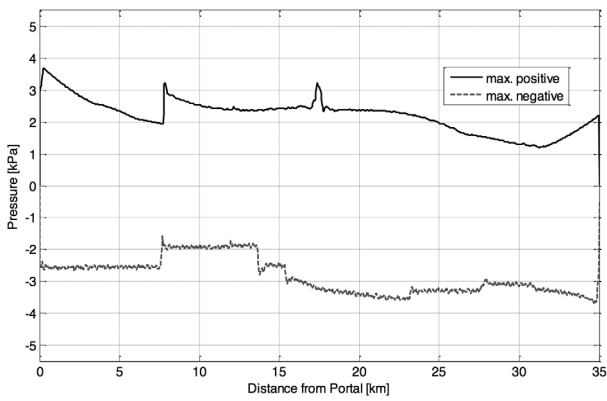
단면적이 0.7m²와 1.0m²인 경우에는 덕트의 간격이 증가하더라도 최대 정압 및 최대 부압의 크기가 크게 증가하지 않는 양상을 보인다. 그러나 덕트의 단면적이 2m²로 증가하였을 경우 덕트 간격에 따른 최대 정압은 275m일 때 2.9%, 300m일 때 2.3% 증가했으며 최대 부압은 275m일 때와 300m일 때 모두 1.7%씩 증가하였다(Fig. 11). 덕트의 단면적이 3.14m²일 때는 최대 정압 및 부압의 크기 변화가 더욱 증가하였다(Fig. 12). 최대 정압의 경우 275m 간격에서는 4.9% 가량 증가하였고 300m 간격에서는 3.1% 증가하였으며, 최대 부압은 275m 간격에서 2.3%, 300m 간격에서 2.9% 증가하



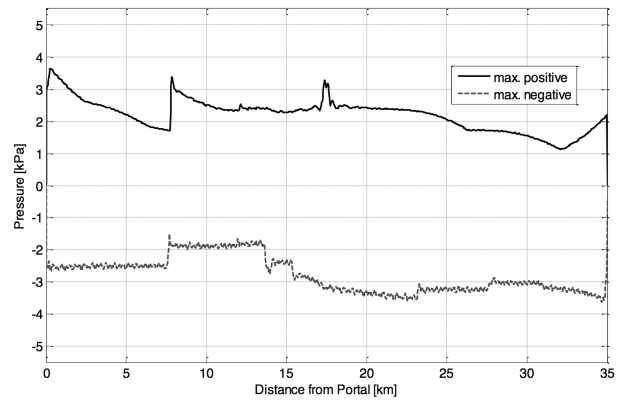
(a) Case 13



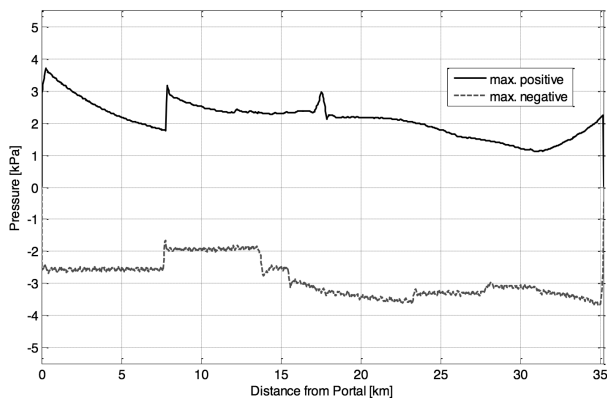
(a) Case 16



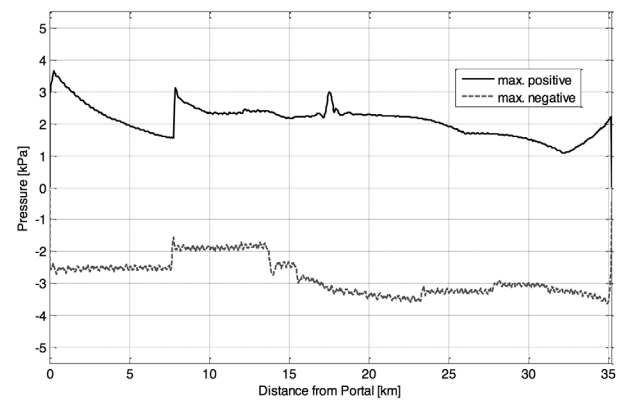
(b) Case 14



(b) Case 17



(c) Case 15



(c) Case 18

Fig. 9. Maximum positive and negative pressure deviations

Fig. 10. Maximum positive and negative pressure deviations

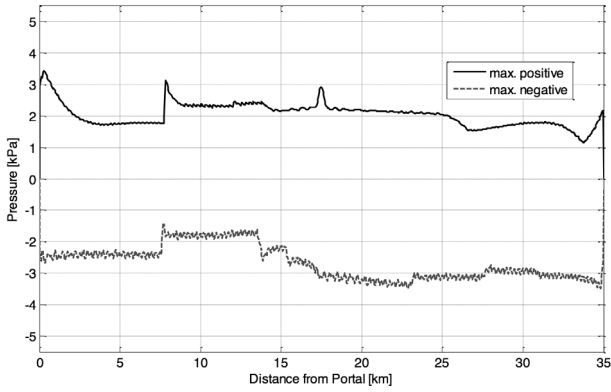
였다.

Fig. 5~Fig. 12까지의 압력 변동 양상에서 나타난 바와 같이 열차가 주행하는 두 본선 터널을 공기압력 제어 덕트를 연결할 경우 덕트를 통하여 공기저항이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 공기저항 감소는 덕트의 단면적 및 간격에 큰 영향을 받는다. 본선 터널 사이에 설치된 덕트를 통하여 열차 주행 시 발생하는 정압 및 부압이 감소할 때, Fig. 5에서 Fig. 12까지의 압력변화양상에 나타난 것과 같은 진폭이 발생한다. 그러나 압력제어 덕트가 본선 터널 사이에 설치되지 않은 경우 Fig. 13에 나타난 바와 같이 진폭이 없

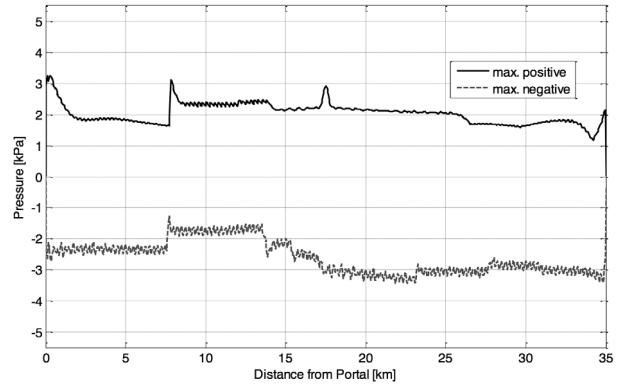
는 매끄러운 정압 및 부압의 분포가 나타난다. 이는 주행 중인 열차의 전두부 및 후미부에 발생하는 공기저항이 덕트를 통하여 소산될 경우 덕트의 영향으로 인하여 압력 변동 진폭이 발생하기 때문이다.

4.2 터널 단면적의 영향

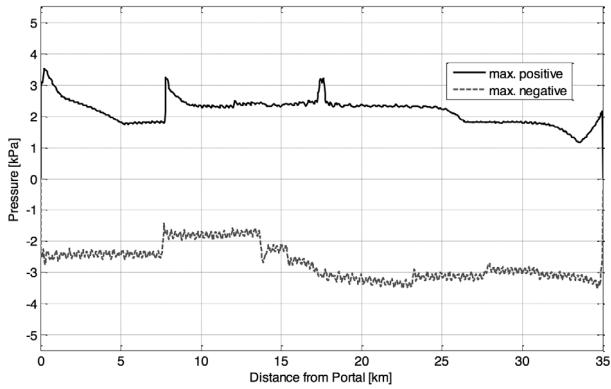
THERMOTUN 시뮬레이션 Case 중 Case 1~Case 12까지는 본선 터널의 단면적이 42.59m²일 때의 공기압력 변동량을 분석하였고, Case 13~Case 24까지는 본선 터널의 단면적이 59.25m²일 때의 공기압력 변동량을 수치해석으로 계



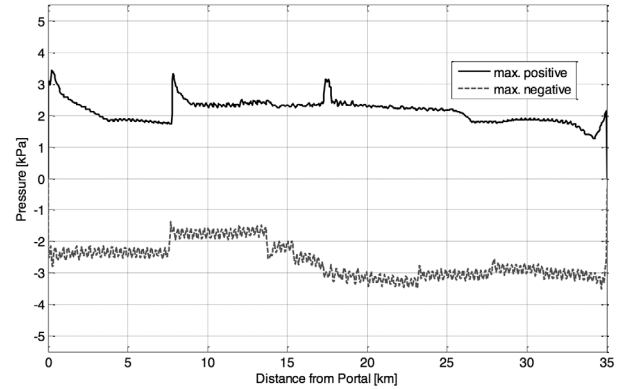
(a) Case 19



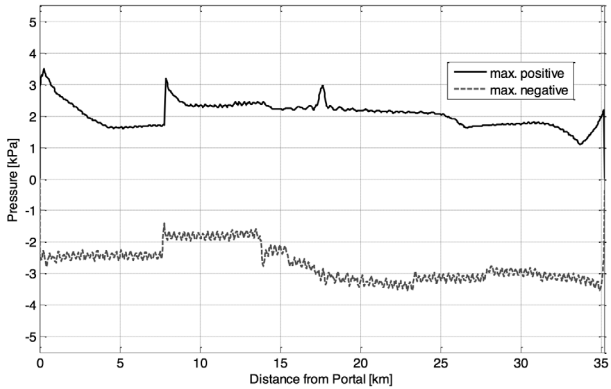
(a) Case 22



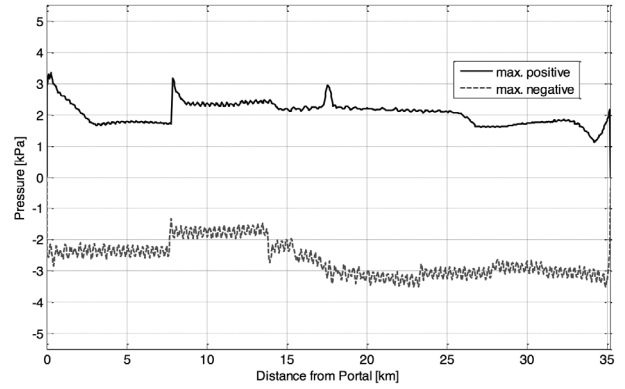
(b) Case 20



(b) Case 23



(c) Case 21



(c) Case 24

Fig. 11. Maximum positive and negative pressure deviations

Fig. 12. Maximum positive and negative pressure deviations

산하였다. 따라서 Case 1과 Case 13을 비교하면 동일 덕트 면적과 간격일 경우 본선 터널의 단면적이 열차에 작용하는 공기압력의 크기에 미치는 영향을 비교할 수 있다. Table 5에 나타난 바와 같이 터널의 단면적이 42.59m^2 에서 57.25m^2 로 증가할 경우 최대 정압력은 최소 27.5%에서 최대 30.2%까지 평균 28.8% 감소하였고, 최대 부압력은 최소 29%, 최대 30.8% 감소하여 평균 30.8% 감소하였다. 덕트의 단면적 및 간격에 의하여 열차에 작용하는 공기압력의 크기가 0%~4.9%까지의 변동 폭을 보인 것과 대비하여 터널 단면적의 증감이 공기압력의 크기에 미치는 영향은 변동 폭이 작다.

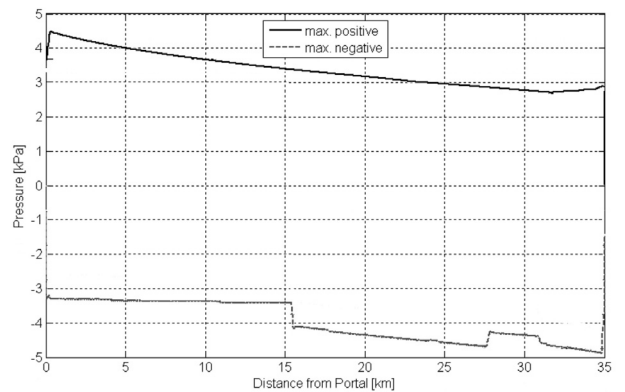


Fig. 13. Maximum positive and negative pressure deviations (Case 25)

Table 5. Effect of the cross-sectional area of a tunnel on normal pressure

Simulation cases	Difference of Max. positive normal pressure (%)	Difference of Max. negative normal pressure (%)
Case 1 & Case 13	-28.5%	-30.6%
Case 2 & Case 14	-29.0%	-30.7%
Case 3 & Case 15	-29.3%	-30.8%
Case 4 & Case 16	-28.9%	-29.7%
Case 5 & Case 17	-29.5%	-30.1%
Case 6 & Case 18	-29.1%	-30.1%
Case 7 & Case 19	-28.1%	-29.4%
Case 8 & Case 20	-28.1%	-29.8%
Case 9 & Case 21	-28.8%	-29.8%
Case 10 & Case 22	-30.2%	-29.0%
Case 11 & Case 23	-27.5%	-29.7%
Case 12 & Case 24	-28.1%	-29.7%

즉 터널을 주행하는 열차의 공기압력을 감소시키기 위한 방안 중 덕트의 면적 및 간격을 조절하는 것보다 터널 본선의 단면을 증가시키는 것이 압력 제어 효과가 더 큼을 알 수 있다. 그러나 터널 단면적을 증가시키는 것은 터널 공사의 시공비에 지대한 영향을 미치며, 터널의 노선이나 심도 등 여러 가지 관련된 제약 조건들이 많이 존재한다. 따라서 이러한 경우 터널 본선의 단면적이 아닌 공기압력 제어 덕트의 단면과 간격을 조절하여 열차에 작용하는 공기저항을 감소시키는 것이 중요하다.

5. 결 론

이 연구에서는 공기압력 제어 덕트가 터널 내 열차에 작용하는 공기저항에 미치는 영향을 분석하기 위하여 THERMOTUN을 이용한 1차원 수치해석을 수행하였다. 열차가 주행하는 두 본선 터널 사이를 연결하는 공기압력 제어 덕트의 단면적 및 간격, 그리고 본선 터널의 단면적 변화에 따라 열차에 작용하는 정압력 및 부압력을 분석하였다. 수치해석 결과, 터널 본선의 단면적과 공기압력 제어 덕트의 단면적 및 간격은 터널을 주행하는 열차의 공기저항에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 공기압력 제어 덕트의 면적이 증가할수록 열차에 작용하는 최대 정압력(Max. Positive normal pressure)이 감소하고 최대 부압력(Max. Negative normal pressure)이 증가한다. 또한, 덕트가 배치된 간격이 짧을수록 덕트를 통하여 소산되는 공기압력의 양이 증가하고 이로 인하여

덕트의 간격이 증가할수록 최대 정압력이 증가하며 최대 부압력이 감소한다. 따라서 덕트의 단면적 및 간격은 터널 내 열차에 작용하는 정압력 및 부압력의 변동에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

- (2) 열차가 터널에 진입할 때 터널의 입구 부근에서 열차에 작용하는 정압력이 크게 증가하고 이후 열차가 터널을 주행하면서 정압력이 점차 감소한다. 본선 터널 사이에 공기압력 제어 덕트가 설치되지 않은 경우 정압과 부압이 매끄러운 형상으로 분포하게 된다. 그러나 본선 터널 사이에 설치된 덕트로 인하여 정압력과 부압력이 감소될 경우 압력 변동량에 진폭이 발생하게 된다.
- (3) 터널 본선의 단면적이 변화할 경우 열차에 작용하는 공기저항이 크게 변동된다. 터널의 본선 단면적을 42.59m²에서 57.25m²로 증가시켰을 경우 최대 정압력은 평균 28.8% 감소하였고, 최대 부압력은 평균 30.8% 감소하였다. 터널 본선 단면적의 증가는 공기압력 제어 덕트의 단면적 및 간격을 변화시켰을 경우보다 압력 제어의 효과가 더 크지만, 터널의 단면적을 증가시키는 것은 터널 시공에 지대한 영향을 미치기 때문에 보다 신중한 검토가 필요하다.
- (4) 터널 내에서 발생하는 공기압력 저항은 터널 단면적 결정 및 터널의 배치, 형상에 있어 중요한 역할을 하므로 터널 설계 시 공기압력에 의한 영향을 면밀히 분석하여야 한다. 터널 내 열차 주행을 통한 공기저항을 감소시키기 위하여 터널의 단면적을 증가시키기 용이하지 않을 경우 단선 터널 사이를 연결하는 공기압력 제어 덕트를 통하여 공기저항을 감소시킬 수 있으며, 공기압력 제어 덕트의 단면적 및 설치 간격에 따른 공기압력 제어 효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2015년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(15SCIP-B066321-03)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

References

1. 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.
2. 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 Section, pp. 63~75.
3. 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.
 4. Henson, D. (1995), Aerodynamics, ventilation and cooling the tunnel, Engineering the Channel Tunnel, Kirkland, J., E&FN SPON/EUROTUNNEL, pp. 217~220.
 5. 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.
 6. Southwood, A. J. (1994), The channel tunnel : A designer's perspective, A. J., Mott MacDonald, pp. 11~13.
 7. UIC (2002), Measures to ensure the technical compatibility of high-speed trains, Technical document, Railway Technical Publications UIC leaflet 660, pp. 28~29.
 8. 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.