

기존선 터널 출구 미기압파 저감을 위한 터널 후드의 수치 해석적 연구

Numerical Study of Tunnel Hood to Reduce Micro-Pressure Wave on Conventional Railways

김병열* · 권혁빈** · 윤수환* · 구요천* · 고태환** · 이동호†

Byeong-Yeol Kim · Hyeok-Bin Kwon · Su-Hwan Yun · Yo-Cheon Ku · Tae-Hwan Ko · Dong-Ho Lee

Abstract

The Korean Tilting Train eXpress may produce a strong micro-pressure wave in tunnel exit because of large train/tunnel area ratio of conventional railways. This micro-pressure wave causes an impulsive noise which is a serious environmental noise pollution near tunnel exit. Tunnel hood can be the method of reducing the micro-pressure wave in tunnel exit. Therefore, parametric studies for tunnel hood are performed with respect to the hood length and size to investigate the effects of the tunnel hood. Also, axi-symmetric unsteady compressible flow solver was used to analyze train-tunnel relative motion. According to the result of numerical analysis, the maximum micro-pressure wave in tunnel exit is reduced by 56% throughout the hood establishment on conventional railways.

Keywords : Tunnel hood(터널 후드), Micro-pressure wave(미기압파), Pressure gradient(압력구배)

1. 서론

열차가 고속으로 터널로 진입할 때 터널 내부에서는 강한 압축파가 발생하게 되고, 이러한 압축파는 음속에 가까운 속도로 터널 출구로 전파된다. 이때 터널 출구로 전파된 압축파의 일부는 팽창파의 형태로 터널 입구방향으로 반사되고, 일부는 미기압파의 형태로 터널 출구로 방출되면서, 강한 충격성 소음(sonic boom)을 발생시킨다[1]. 이러한 미기압파의 크기는 터널내부에서의 압력 구배에 비례하기 때문에 미기압파를 줄이기 위해서는 터널내부 압력 구배를 줄이는 것이 중요하다[2].

터널 출구에서 발생하는 미기압파의 크기는 열차/터널 단면적비, 열차의 속도, 열차 전두부 형상과 터널 내 트랙의 종류, 터널에 길이 등에 의해 복합적으로 영향을 받는다. 그 중에서 터널 내부 압력 구배에 영향을 주는 열차/터널 단면적비와 열차의 속도가 미기압파의 크기를 결정하는 가장 큰 요소가 된다.

현재 개발 중인 한국형 틸팅 차량의 주행 목표 속도는 180km/h이다. 하지만, 현재 기존선에 있는 터널은 단면적이 약 60m²로, 경부고속철도에 설치된 터널 면적 107m²의 약 55%에 해당하는 협소한 터널이다. 따라서 한국형 틸팅 차량이 180km/h로 터널에 진입 시에는 기존차량에서 문제시 되지 않았던 현상들, 즉 터널 내부의 높은 압력 상승과 터널 출구에서의 충격성 소음과 같은 문제들이 발생할 것으로 예상된다.

터널 출구에서 발생하는 미기압파를 저감시키기 위한 방안으로는 전두부 형상 최적화, 터널에 후드를 설치하는 방법, 터널 입구가 기울어진 경사갱구를 만드는 방법, 터널 내부 지갱 또는 분지갱을 이용하는 방법 등 여러 가지가 있다. 이와 같은 방법 중에서, 본 연구에서는 미기압파 저감을 위해 기존 터널에 쉽게 설치할 수 있는 터널 후드에 대한 수치해석을 실시하였다.

터널 출구 미기압파 저감을 위하여 Bellenou[3] 등은 후드를 설치한 비정상 축소모형장치 실험을 통하여 후드를 통한 미기압파 저감 가능성을 확인하였으며, 김동현[4] 등은 1/60 축척의 비정상 축소모형 실험을 통해 슬릿커버 후드를 설치하면, 최대 약 48%의 미기압파 저감 효과가 있는 것을 보였다. 또한 김희동[5] 등은 특성 곡선법을 이용하여

† 책임저자, 정회원, 서울대학교, 기계항공공학부

E-mail : donghlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1900 FAX : (02)880-1910

* 서울대학교 기계항공공학부

** 철도기술연구원

여러 가지 모양의 후드에 대하여 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 열차 터널 상호작용을 해석하기 위하여, 한국형 탈팅 차량의 단면적 변화율을 고려한 축대칭 Euler/Navier-Stokes 방정식을 사용하여 계산을 수행하였다. 축대칭 기법은 실제 열차의 형상을 정확하게 고려할 수는 없지만, 열차의 단면적 변화율을 고려함으로써 만족스러운 결과를 얻을 수 있으며, 3차원 기법에 비하여 계산 시간과 계산 용량을 줄일 수 있는 장점이 있다[1]. 따라서 축대칭 기법을 이용하여 후드의 크기와 길이를 변화시켜가면서 터널 출구 미기압파의 크기를 계산하였다. 이를 통하여 기존선 터널에서 터널 후드를 통한 터널 출구 미기압파의 저감 가능성을 확인하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식 및 수치해법

수치해석을 위해서 일반 곡면 좌표계에서 유도된 축대칭 비정상 압축성 Euler/Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H = \frac{1}{Re_c} \left[\frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v \right] \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T$$

$$E = [\rho, \rho u^2 + p, \rho uv, (\rho e + p)v]^T$$

$$F = [\rho, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T$$

$$H = \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T e = \frac{p}{\rho(\gamma-1)} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

여기에서, Q 는 보존량 벡터, F, E 는 플럭스 벡터, H 소스 항을 나타낸다. ρ 는 밀도, 그리고 u, v 는 각각 x, y 방향의 속도 성분을 나타낸다.

공간 변수들은 터널 직경으로 무차원화 하였으며, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화 하였다. 대류항의 플럭스는 Roe의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL기법을 그리고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다.

초기조건에서 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 터널 입구에서 충분한 거리에 열차를 위치시켜, 열차와 터널의 상호 작용을 계산하기 전에 미리 정상 유동장 상태를 올바르게 구현해야 한다. 따라서 본 연구에서는 권혁빈[1]이 제안한 완만한 출발(Smooth start)을 사용하였다. 이 방법은 식 (2)와 같이 속도의 2차 미분까지 연속되도록 하는 5차 다항식을 이용하여 열차를 정지 상태에서 주행속도까지 가속시키는 것으로서 수치적 파동을 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 속도 변화

가 완만하고, 짧은 거리에서도 출발이 가능하므로 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다.

$$V(t) = \frac{a}{20}t^5 - \frac{at_1}{8}t^4 + \frac{at_1^2}{12}, \quad a = 120 \frac{V_t}{t_1^5} \quad (2)$$

터널 벽면에서 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직인 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고 무반사 조건을 부여하였다.

2.1.1 영역분할 기법

전산유체역학에서 풀기 힘든 문제 중 하나는 상대적 운동이 있는 물리 영역을 하나의 계산 영역으로 이산화하기가 힘들다는 것이다. 이에 대한 대안으로 Patched 기법, Chimera 격자계, DRAGON 격자계 등이 제시되었다.

본 연구에서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체와 각각의 영역이 H-type인 격자계에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자 경계면에서 빠르고 정확하게 유동 정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법을 이용하였다[6].

3. 축대칭 해석 격자 및 검증

3.1 축대칭 해석 격자 구성

본 해석을 위한 격자는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 Entrance, Train, Tunnel, Exit 영역으로 총 4개의 격자로 구성 되어 있다. Entrance 영역은 열차가 터널 입구에 진입하기 직전까지의 영역으로 터널 진입 후 나타나는 비정상 결과 값을 얻기 위한 정상 상태에 도달하기 위한 영역이다. 그리고 Train 영역은 열차가 진행하면서 열차 주위에 나타나는 결과 값들을 보유함과 동시에 주위 영역으로 그 값들을 전달하는 역할을 한다. Tunnel 영역에서는 정상 상태로 진입한 Train 영역과의 상호 작용을 통하여 열차/터널 상호 작용으로 인해 나타나는 압력 변동, 압력 구배 등의 값을 계산한다. Exit 영역에서는 열차의 터널 진입으로 인한 압축파, 팽

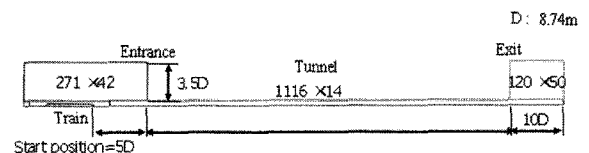


Fig. 1. Grid system for numerical analysis

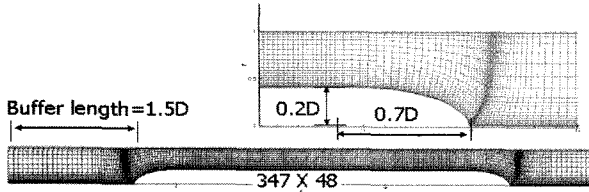


Fig. 2. Grid configuration at the train zone

창과 등의 일부가 방출되어 나타나는 미기압파의 크기를 산출할 수 있다. 각각에 대한 해석 격자수는 Fig. 1에 구체적으로 나타내었다. 여기에서 특성 길이 D 는 기존선 터널 단면적 60m^2 의 지름에 해당되는 8.74m 이다. Fig. 2에서는 열차 주변의 해석격자를 보면, 압력변화가 큰 열차 전두부에 많은 격자가 있는 것을 볼 수 있으며, Patched 격자 기법은 이용 전체 격자를 정렬 격자로 구성하였다.

3.2 해석결과 검증

터널에 후드를 설치하였을 때 해석 프로그램을 검증하기 위하여, Bellenoue[2] 등이 수행한 실험결과를 이용하였다. 실험장치 및 실험 조건은 Table 1과 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 4는 실험값과 수치해석을 통하여 얻은 터널 내부 압력과 압력구배 결과를 비교한 그림이다. Fig. 4에서 열차가 후드 입구를 통과하면서 후드에 의해서 첫 번째 압력상승(a)이 발생하고, 터널 입구를 통과하면서 두 번째 압력상승(b)이 발생한다. 이러한 두 번의 압력 상승의 결과 압력 변화율에서도 두 번의 최대값이 나타난다. 전체적으로 수치해석 결과가 실험에 의한 결과와 서로 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

이 때 N-S 방정식을 이용한 결과는 열차 표면의 점성을 고려하기 때문에 경계층에 의해서 열차 단면적이 커지는 효과가 있다. 따라서 N-S 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행할 경우에는 압력 상승값이 Euler 방정식을 이용한 결과보다 크게 나타난다. 하지만 그 값의 차이는 크게 나지 않기 때문에 해석 시간의 단축을 위해서 계산 시간이 빠른 Euler

Table 1. Experimental conditions of Bellenoue

터널 지름	44mm
열차/터널 단면적 비	0.32
열차 지름	25mm
열차 속도	154.8 km/h(43 m/s)
열차 전두부 길이(L)	40mm
후드 길이(Lh)	80mm
후드 지름(Dh)	57.4mm
측정 위치(Lm)	264mm

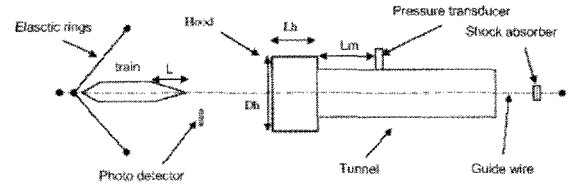


Fig. 3. Experimental apparatus of Bellenoue

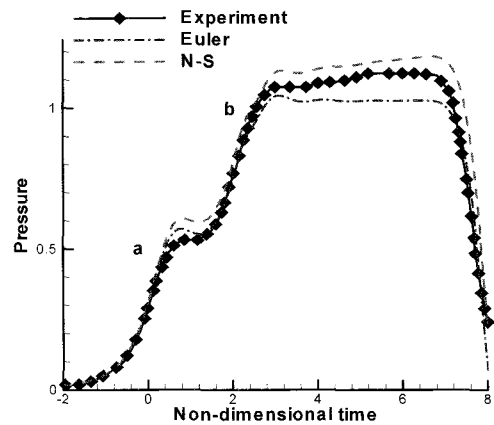


Fig. 4. Pressure and Pressure gradient validation

방정식을 이용하여 기존선 터널 해석을 수행하였다.

4. 터널 후드 해석

4.1 해석 조건

기존선의 열차/터널의 단면적 비는 16%로서, 경부고속전철 단면적비 8.1%에 비해 다소 높은 값을 가진다. 해석에 사용된 열차의 길이는 40m, 터널의 길이는 300m이며, 한국형 틸팅 차량의 목표 주행속도 180km/h에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 압력은 터널 입구에서 150m 떨어진 지점에

Table 2. Numerical analysis conditions

열차/터널 단면적 비	0.16
터널 길이	300m
열차 길이	40m
열차 속도	180km/h(50m/s)
열차 전두부 길이(L)	5.40m
측정 위치	150m

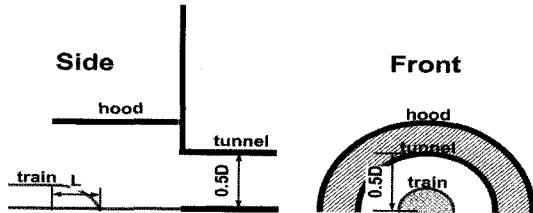


Fig. 5. Concept of tunnel hood

서 측정하였으며, 자세한 해석조건은 Table 2에 나타나 있다. 다음의 Fig. 5의 그림과 같이 터널과 동심원을 이루는 터널 입구 후드에 대하여, 후드의 지름과 길이를 변화시켜가면서 해석을 실시하였다. 이 때 후드의 지름은 터널의 지름(D)의 1.2배에서 1.6배로 변화시켰으며, 후드의 길이는 열차 전두부 길이(L)의 1배에서 3배로 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

4.2 해석 결과

4.2.1 열차가 터널 진입 시 압력분포

Fig. 6은 후드가 없는 터널에서 열차가 터널로 진입할 때 압력분포와 유선을 나타낸 그림이다. 열차가 진행할 때 열차 전두부에서 고압의 정체영역이 생기고, 열차 전두부가 끝나는 지점에서 압력이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 열차가 터널로 진입함에 따라 터널내부에서 압력이 상승하고 있으며, 열차 전두부의 유동의 일부는 터널 안쪽으로, 빠져나가고 나머지 일부는 터널 바깥쪽으로 빠져나가고 있다.

Fig. 7은 열차가 후드로 진입 시의 압력분포와 유선을 나타낸 그림이다. 열차/후드 단면적비가 열차/터널 단면적비보다 상대적으로 크기 때문에 후드진입시의 압력상승 값이 터널진입시보다 작은 것을 볼 수 있다. 또한 고압의 정체영역인 열차 전두부에서, 유동이 터널 안쪽과 바깥쪽으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다.

4.2.2 후드 단면적에 변화에 따른 해석 결과

후드/터널의 단면적비가 터널 내부의 압력변동과 출구 미

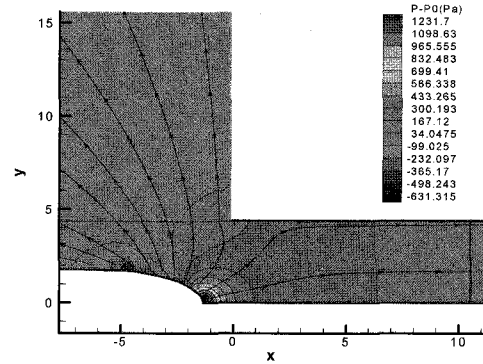


Fig. 6. Pressure contour and streamline of the train passing a tunnel (without hood)

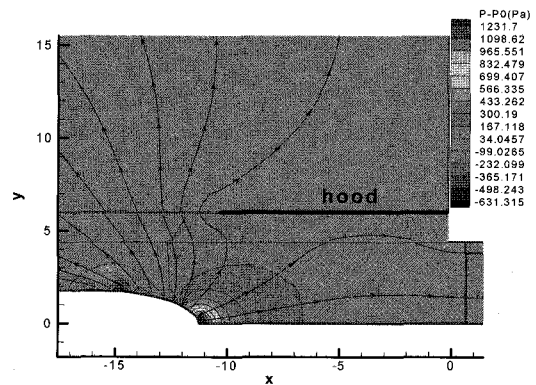


Fig. 7. Pressure contour and streamline of the train passing a tunnel (with hood)

기압파에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 우선 터널 후드의 지름을 터널 지름(D)의 1.2에서 1.6배로 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 이때 후드의 길이는 열차 전두부 길이(L)의 2배로 고정 시켰다. 시간은 열차가 터널 입구를 통과할 때를 기준으로 하였기 때문에, 후드를 설치할 경우에는 압력상승은 시간 $t < 0$ 일 때 나타난다.

Fig. 8은 터널 후드의 지름을 변화시키면서 터널 내부에서 발생하는 압축파에 의한 압력 변동을 시간에 따라 나타낸 그림이다. 압력 상승이 a-1, b-1의 두 번 일어나며 압력 하강도 a-2, b-2 구간에서 두 번 일어나고 있다. a-1은 열차가 후드를 통과할 때 생기는 압축파에 의한 압력 상승이며, b-1은 열차가 터널을 통과할 때 생기는 압력 상승이다. 또한 a-2는 열차의 후미부가 후드를 통과하면서 생기는 팽창파에 의해 생기는 압력 하강이고, b-2는 후미부가 터널 입구를 통과하면서 생기는 압력 하강이다. 후드의 크기가 클수록 열차/후드 단면적비가 작기 때문에 초기에 상승하는 압력상승 값이 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 후드크기가 달라지더라도 열차/터널 단면적비가 변함 없기 때문에,

최대 압력값(p)의 크기는 일정하게 나타나고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 후드 크기에 따른 터널 내부의 압력구배와 터널 출구에서의 미기압파의 크기를 시간에 대

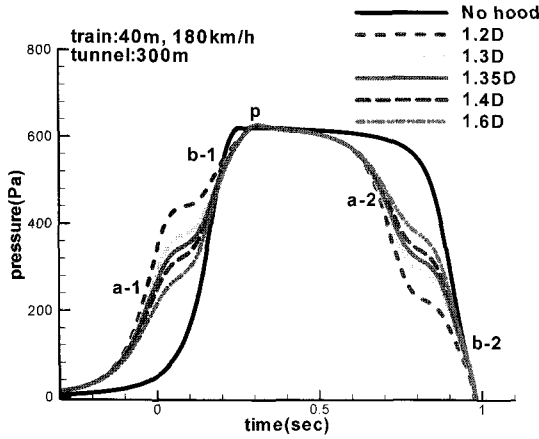


Fig. 8. Pressure of various hood size

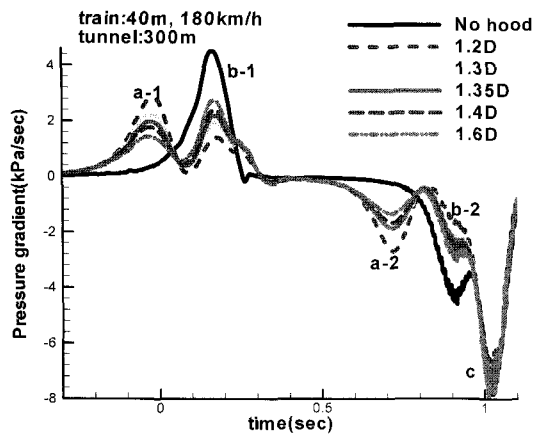


Fig. 9. Pressure gradient of various hood size

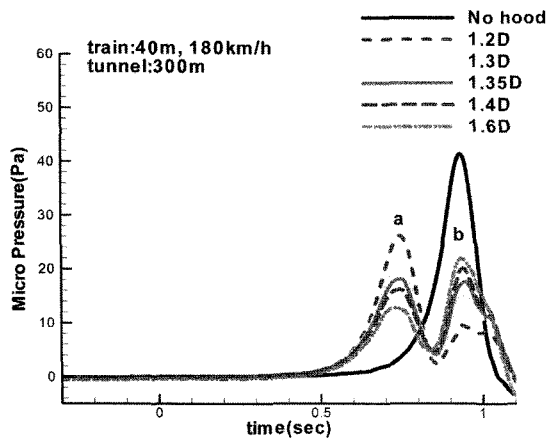


Fig. 10. Micro-pressure wave of various hood size

해 나타낸 그림이다. 출구 미기압파는 터널 내부 압력변화에 영향을 받기 때문에, 그림에서 초기 압력구배와 미기압파의 경향이 서로 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서는 후드를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 압력 상승값의 차이는 거의 나타나지 않았지만, 압력구배(Fig. 9)와 미기압파(Fig. 10)의 최대값은 후드 설치 시, 그 값이 기존 터널에 비해서 약 1/2로 떨어져 후드의 효과가 확실하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서 압력구배가 최저가 되는 지점(c)은 열차 후미부에 의한 터널 입구에서의 팽창파(b-2)와 초기 압축파(a-1)가 터널 출구에서 반사되어 생기는 팽창파가 겹치는 효과로 발생하게 된다.

후드가 없는 경우에는 압력구배와 미기압파가 한 번에 최대값까지 상승하게 되고, 그 값 또한 후드가 있는 경우에 비해 크다. 후드를 설치한 경우에는 열차가 후드와 터널을 통과하면서 후드에 의한 압력상승(a-1)과 터널에 의한 압력상승(b-1)의 두 단계로 나누어지게 된다. 크기가 작은 후드를 설치하였을 경우에는 후드에 의해, 큰 후드를 설치한 경우에는 터널에 의해 압력구배와 미기압파의 최대값이 발생한다. 중간크기인 터널의 1.35D의 후드에서 가장 작은 최대값을 갖기 때문에, 터널 지름의 약 1.35배의 후드를 설치하는 것이 터널 출구 미기압파를 줄이는데 가장 큰 효과가 있을 것이다.

4.2.3 후드 길이에 따른 해석 결과

다음으로 후드의 지름을 터널 지름의 1.4배로 고정시킨 후, 후드의 길이를 열차 전두부 길이(L)의 1배에서 3배까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 11은 후드 길이에 따른 압력 변동이다. 이때 초기압력 상승값(a-1)은 터널 입구를 기준으로 시간을 표시하였기 때문에 후드의 길이가 길수록 빨리 나타나지만, 최대 압력값은 후드의 크기가 같기 때문에 큰 차이가 나지 않는다.

Fig. 12와 13은 각각 후드 길이에 따른 압력구배와 터널 출구 미기압파를 나타낸 그림이다. 후드의 길이가 1L 일 때에 비해 2L나 3L 일 때 보다 큰 감소 효과를 얻을 수 있지만, 후드의 길이가 2L일 때와 3L일 때는 큰 차이가 없다. 따라서 후드의 길이가 열차 전두부 길이의 2L 정도인 후드를 설치하는 것이 가장 효율적으로 미기압파를 줄일 수 있는 대책이 될 것이다.

Table 3는 터널 후드 크기 및 길이에 따른 터널 출구 미기압파 해석 결과를 정리한 표이다. 후드 길이가 2L이고 후드 반지름이 약 1.35D인 후드를 기존선 터널 입구에 설치하면, 기존 터널에 비해 터널 출구 미기압파를 약 56% 줄일 수 있게 된다.

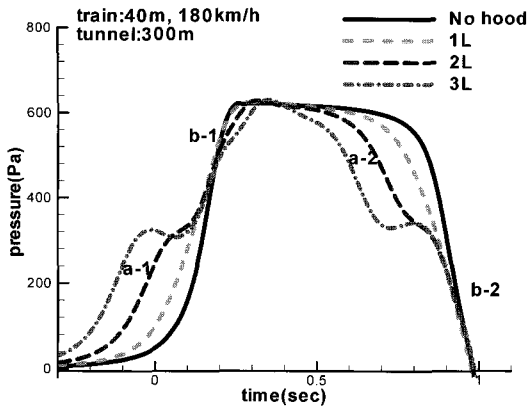


Fig. 11. Pressure of various hood length

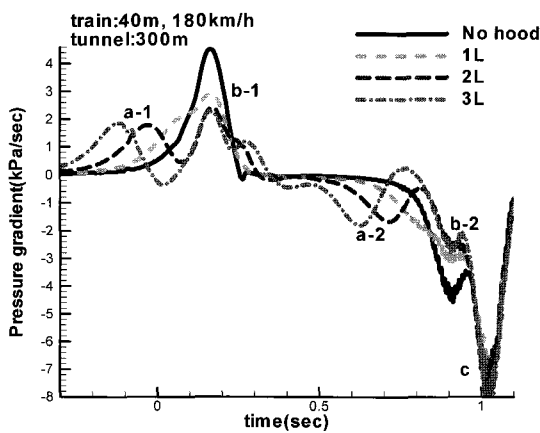


Fig. 12. Pressure gradient of various hood length

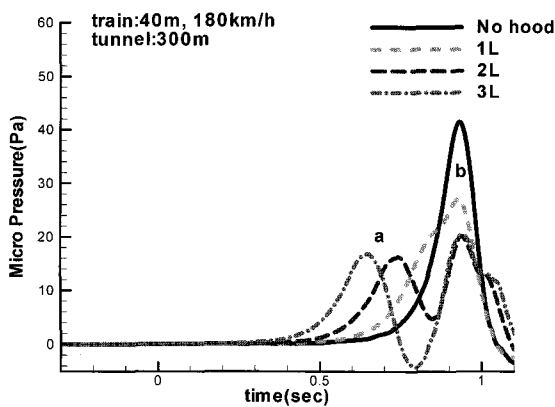


Fig. 13. Micro-pressure wave of various hood length

4. 결론

단면적이 작은 기존선 터널에 출구 미기압파를 감소시키기 위하여, 터널 입구 후드를 설치하여 후드의 크기와 길이

Table 3. Micro-pressure wave comparison of various hood

후드길이	후드크기	출구 미기압파		
		크기(Pa)	강도(dB)	감소율(%)
No hood				
1L	1.4D	41.4	126	
	1.2D	27.2	123	34.3
	1.3D	20.5	120	50.5
2L	1.35D	18.2	119	56.0
	1.4D	20.2	120	51.2
	1.6D	22	121	46.9
3L	1.4D	20.4	120	50.7

를 변화시키면서 비정상 수치 해석을 실시하였다.

터널입구에서 일반터널과 후드를 설치한 터널의 압력분포 그래프를 비교하면, 후드 설치 시 낮은 열차/후드 단면적 비로 인하여, 초기 압력 상승 값이 작아지지만, 열차/터널의 단면적비의 변화가 없기 때문에 최대 압력값은 차이가 없는 것을 알 수 있다. 후드를 설치하면 압력구배가 두 개로 나누어지게 되는데, 후드의 크기가 커질수록 첫 번째 압력구배가 작아지고, 두 번째 압력구배가 커진다. 또한 이러한 경향은 압력 구배에 영향을 받는 터널 출구 미기압파에서도 볼 수 있다. 후드 길이에 따른 압력구배 및 미기압파 분포를 통해서 열차 전두부의 2배 이상의 후드에서는 후드의 효과가 크게 변화하지 않는다는 것을 확인하였다.

기존선 터널에서 터널 출구 미기압파를 줄이기 위해 후드 지름 1.35D, 후드길이 2L의 후드를 설치하면, 약 56%의 미기압파 저감효과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 철도기술연구원에서 실행된 "틸팅 차량의 공기역학적 성능 향상 및 기술개발" 결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 권혁빈, 김태운, 권재현, 김문상, 이동호 (2002). "G7 시제 차량의 터널 내부 압력파에 대한 수치 해석," 한국철도학회지, 제5권, 제4호, pp.260-266.
2. 김희동, Kazuyasu Matsuo (1994). "고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(1) - 압축파의 특성에 대하여," 대한 기계학회 논문집, 제18권, 10호, pp.2686-2697.
3. Marc Bellenoue, Bruno Auvity, Tadashi Kageyama (2001). "Blind hood effects on the compression wave generated by a train entering a tunnel," Experimental Thermal and Fluid Science Vol.25, pp.397-407.

4. 김동현, 민동호 (2001). “고속철도에서 슬릿커버 완충공의 터널 미기압파 저감성능,” 대한 기계학회 논문집 B권, 제25권, 제9호, pp.758-765.
5. 김희동, 김태호, 김동현 (1998). “입구후드가 고속철도 터널입구의 압축 파에 미치는 영향,” 대한 기계학회 논문집 B권 23권 제1호, pp.58-68.
6. 권혁빈, 이동호 (1998). “고속전철 터널 진입해석을 위한 가상경계면을 이용한 Patched격자기법의 연구,” 한국항공우주학회 춘계 학술대회 발표 논문집.