

고속철도 터널에서의 미기압파 저감을 위한 모형실험

The High-speed train model for reducing the micro-pressure wave in railway tunnel

장용준**
Jang, Yong-Jun

김승태*
Kim, Seung-Tae

박원희**
Park, Won-Hee

ABSTRACT

The purpose of the study was to verify deduction of each coefficient necessary to analysis on micro-pressure waves and reliability of the analysis result. The tunnel running train model testing device used in the test was manufactured by scale of 1:60 and the study used a train model with ten cars long according to specifications of KTX model. The study applied tunnels with cross sections of 107.9m³ and 95.1m³ and applied tunnel extensions with 1km, 0.75km and 0.5km. Also, the study tested train speed by changing it into 275, 300, 325 and 350km/h. The test device was a hydraulic launch system composed of a train model, a hydraulic launcher, a tunnel model and a brake. The study measured speed of a model train by a speed sensor installed in the point of each 1.2m from the front of tunnel entrance and a pithead of tunnel exit and measured pressure change of internal tunnel continuously by installing pressure sensors in the entrance part of tunnel, in the middle part of tunnel and in the exit part of tunnel. As the result of the measurement, it was known that pressure slope of pressure wave happened in the entrance part of tunnel was increased by a nonlinear effect while spreading the tunnel or its pressure slope was reduced by diffusion. Also, the study compared and analyzed micro-pressure waves happened in the exit part of the tunnel by installing each kind of hoods in the entrance part of the tunnel to prevent reduction of micro-pressure waves.

국문요약

본 연구는 미기압파 해석에 필요한 각종계수의 도출 및 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위한 목적이 있다. 본 실험에 사용된 터널 주행 열차모형 실험 장치는 1/60축척으로 제작 되었으며, 열차는 KTX 차량 모델의 제원에 맞추어 10량 1편성으로 제작된 모형을 사용하였다. 터널의 단면적은 107.9m³ 와 95.1m³를 적용하고, 터널연장은 1km, 0.75km, 0.5km를 적용하였고, 열차속도는 275, 300, 325, 350km/h로 변화시켜 실험 하였다. 실험 장치는 유압발사 시스템으로 열차모델 유압 발사기터널모델 제동장치로 구성된다. 모형열차의 속도는 터널입구 전방 및 출구 부 갱구에서 각각 1.2 m지점에서 설치한 속도 감지기에 의해서 측정되며, 터널 내부의 압력변동은 압력센서를 터널의 입구, 중앙, 출구부에 설치하여 연속적으로 측정 하였다. 측정결과 터널입구에서 발생한 압력파의 압력기울기는 터널을 전파하면서 비선형효과에 의해서 증가하거나 확산작용에 의해서 압력기울기가 감소하는 것을 알 수 있었고, 미기압파 저감 대책을 위해 터널입구에 종류별 후드를 각각 설치하여 출구부에서 발생하는 미기압파를 비교분석하여보았다.

*책임저자, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

E-mail : kim7993@krii.re.kr

TEL : (031)460-5536 FAX : (031)460-5319

**정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

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[1]. 이러한 압력파는 열차가 터널을 통과하는 동안 반복적으로 발생하여 터널내부로 전파되며 터널 내부압력의 급격한 변화를 유발시켜, 객차 내 승객에게 이명 현상을 일으키게 한다[2,3]. 또한 터널출구에서 방사되는 충격성 압축파는 주변 환경에 대한 환경소음 및 진동 문제를 야기하게 되는데 이를 미기압파라 한다. 따라서 고속철도터널의 내공단면적 검토를 위해서는 상기 인자가 터널내 압력변동에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하며, 특히 내공단면적에 따른 터널내 압력변화와 이것이 객차내부의 압력에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 터널 및 객차에서 압력변동은 3차원 비정상 압축성유동이나, 일반적으로 1차원 유동으로 모델링하여 수치해석에 의한 해를 구하고 있다. 본연구에서는 터널열차모형 시험기 터널 내에서의 압력 변동 및 터널입구의 종류별 후드에 따른 터널출구에서 발생하는 미기압을 예측하고 비교분석해 보았다.

2. 본론

2.1 모형터널 내부압력 및 출구 미기압 측정 실험

1. 실험장치 개요

터널 주행 열차모형 실험장치는 1/60 축척으로 제작되었으며, KTX 차량모델의 제원에 맞추어 10 량 1 편성으로 제작된 모형을 사용하였다[2]. 열차모형의 전두부 형상은 차량 모델의 제원에 맞추어 축대칭 단면으로 전환하여 제작하였다. 열차모형이 터널벽면에 부딪치거나 다른 방향으로 진행하지 못하도록 하기 위하여 발사튜브의 시작부에서 모델터널 출구까지 열차의 진행을 안내하기 위한 1개의 피아노선을 설치하였으며, 모델열차의 중심에는 지름 1.2 mm 구멍을 부싱 처리하여 피아노선을 따라 낮은 마찰력으로 열차가 움직이도록 하였다. 열차모형이 발사튜브 내부에서 가속 되는 동안에 열차 앞쪽에 공기가 압축되고 공기 제트는 발사튜브의 개구부로 부터 분출된다. 이 제트류는 터널모델 내부의 압력에 영향을 미치게 되고, 열차의 후두부가 발사튜브를 벗어날때 튜브의 잔여배압이 대기압보다 더 크면 브라스트파가 발생된다. 고속의 제트류인 브라스트파는 구형의 충격파로 전파하여 실험터널입구를 강타하게 되며, 실험터널 내부 압력에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 1.과 같이 덤프탱크를 설치하여 배압으로 생기는 제트류를 대기압 이하가 되도록 잔여배압을 줄임으로서 브라스트파의 발생을 완전히 제거할 수 있도록 하였다[3]

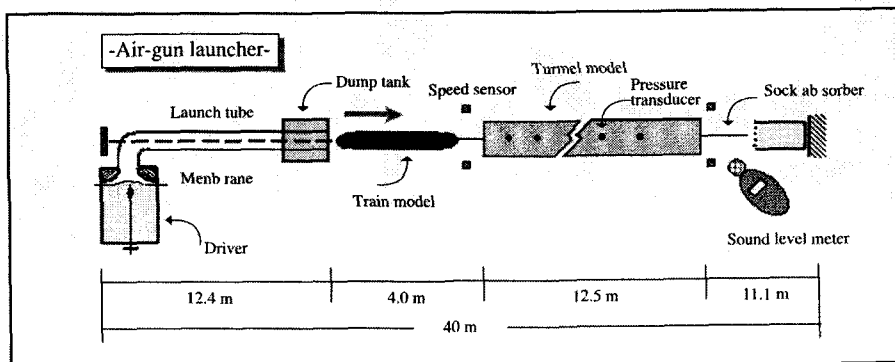


그림 1. 열차모형 실험장치 개요도

표 1. 실험장치 주요제원

항목	주요제원	비고
방식	축대칭, 피아노선 가이드	
축척	1/60	
발사기구	Air-gun type, 2 drivers	
최대발사속도	90~600 km/h	
열차모형	car body (Aluminum), Nose (MC material))	
터널모형	Arch type, PVC material	
장치길이	약 40 m	
측정시스템	미기압과계, 열전대, 압력변환기, 데이터취득시스템, 콘트롤 컴퓨터	

2.2 실험 및 측정방법

실험조건은 터널단면적 107.9 m² 와 95.1 m² 을 적용하고 터널연장은 1 km, 0.75 km 0.5 km를 적용하고 열차 속도는 275, 300, 325, 350 km/h로 변화시켜 실험하였고 실험측정방법은 유압발사 시스템으로 열차모형, 유압 발사기, 터널모형, 제동장치로 구성된다. 유압발사기는 공기총과 같은 원리로 작동되며, 유압발사기의 공기압 실린더의 마일러 막이 파열되면서 가압된 공기가 발사 튜브에 있는 축대칭 열차모형을 가속시킨다. 실험은 터널 단면적 107.9 m², 95.1 m², 터널길이 1km, 0.75km, 0.5km에 대하여 열차속도를 275, 300, 325, 350 km/h로 변화시켜서 각각의 단면적에 대하여 12회씩 총 24의 측정을 실시하였다.

모형열차의 속도는 터널입구 전방 및 출구부 갱구에서 각각 1.2m 지점에서 설치한 속도 감지기에 의해서 측정되며, 터널 내부의 압력변동은 압력센서를 터널의 입구, 중앙, 출구부 설치하여 연속적으로 측정하였으며, 터널 출구 미기압과의 강도는 압력센서를 터널 축에 대해 45도 각도에서 지면판위에 20mm 높이와 출구로부터 333mm에 설치하여 측정하였다.

표 2. 객차내부 압력측정 계측시스템 제원

기자재명	주요사양	수량	비고
압력측정시스템	Notebook computer -CPU : 2.0 GHZ -Memory : 1.0 GB	4	
	DAQ -8 Module slot -Bridge :24 Bit, 4ch 50 ks/s/ch	4	NI사 제품
압력계	Model NO :8510B-1 -Rang : 6 kPa -Sensitivity :100+55/-25 mv/psi	5	ENDEVCO사 제품
대기압 탱크	형식 : 원통입형 재질 : Aluminium	3	

2.3 모형실험 사진

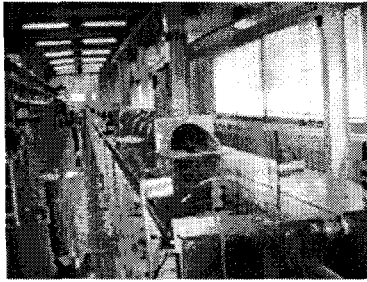


그림 2.a 모형터널 전경

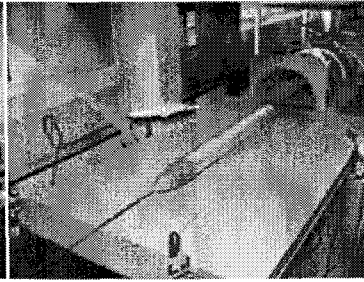


그림 2.b 열차모형

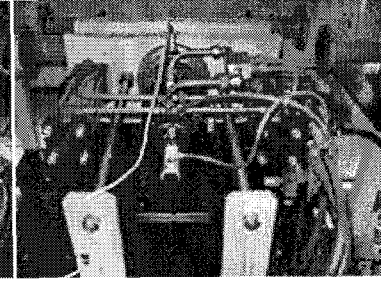


그림 2.c 발사장치

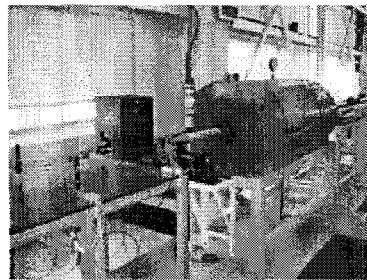


그림 2.d 댐프탱크

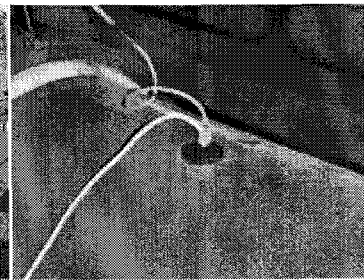


그림 2.e 터널내부 압력
계측기



그림 2.f 터널출구 미기압
계측기

2.4 실험결과

터널 단면적 95.1 m^2 , 터널길이 1 km 에 대한 열차속도별 터널내부 압력의 모형실험 측정결과는 아래 그림 3.a ~ 3.d 와 같다.

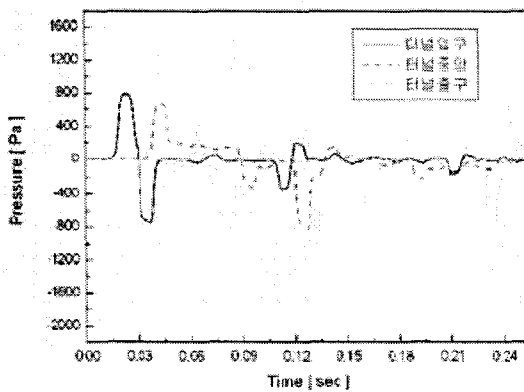


그림 3.a 터널내부 압력변동 실험결과
(면적 95.1 m^2 , 길이 1 km , 275 km/h)

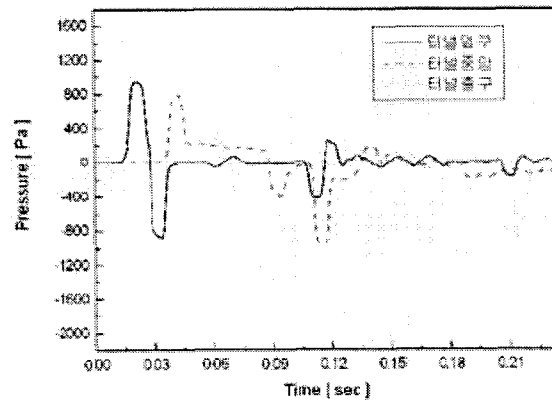


그림 3.b 터널내부 압력변동 실험결과
(면적 95.1 m^2 , 길이 1 km , 300 km/h)

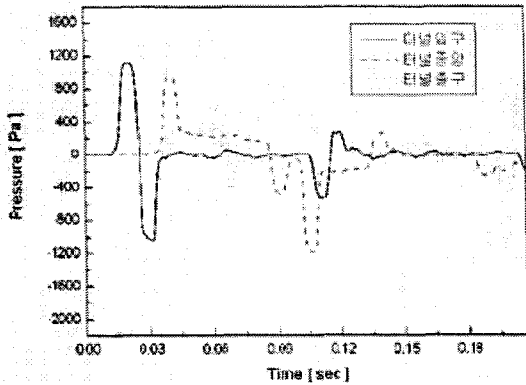


그림 3.c 터널내부 압력변동 실험결과
(면적 95.1 m², 길이 1 km, 325 km/h)

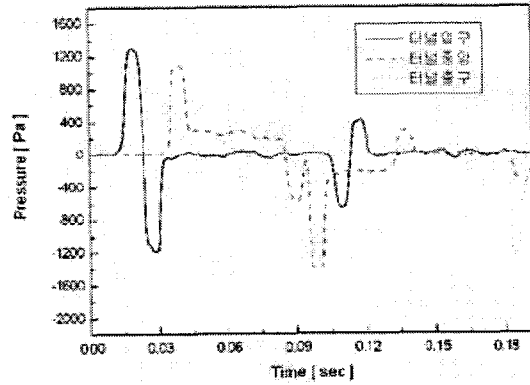


그림 3.d 터널내부 압력변동 실험결과
(면적 95.1 m², 길이 1 km, 350 km/h)

2.5 터널 출구 미기압

갱구부 미기압과 강도 예측을 위해 필요한 계수의 도출을 위한 터널출구의 미기압과의 강도측정을 위한 실험은 터널단면적 : 107.9 m², 갱구형상 45도 경사갱구, 95.1 m², 갱구형상 면벽형, 95.1 m² 갱구형상 45도 경사갱구를 적용하는 조건에 대해서 수행하였다. 미기압과 강도에 따른 측정결과는 아래 표 3 ~ 표 5, 그림 4.a ~ 4.c와 같다.

표 3 열차속도별 미기압 측정결과(터널단면적 107.9 m² -45도 경사갱구)

구분	1 km			0.75 km			0.5 km		
	1회	2회	3회	1회	2회	3회	1회	2회	3회
275km/h	14.11	13.50	14.23	12.58	11.83	11.82	12.84	12.54	13.73
	278.2	277.7	278.8	276.5	276.5	276.5	278.8	277.7	276.5
300km/h	17.93	16.76	18.65	15.44	17.35	17.17	16.39	17.06	16.74
	299.5	299.5	300.1	300.8	299.5	300.8	302.1	302.8	302.8
325km/h	24.75	25.42	22.46	22.18	23.21	21.86	20.38	21.87	21.62
	326.6	327.4	351.7	326.6	326.6	326.6	323.5	328.1	328.1
350km/h	30.60	32.63	31.64	27.03	29.67	28.88	27.98	28.78	29.98
	351.7	351.7	349.9	350.8	350.8	350.8	353.6	352.6	352.6

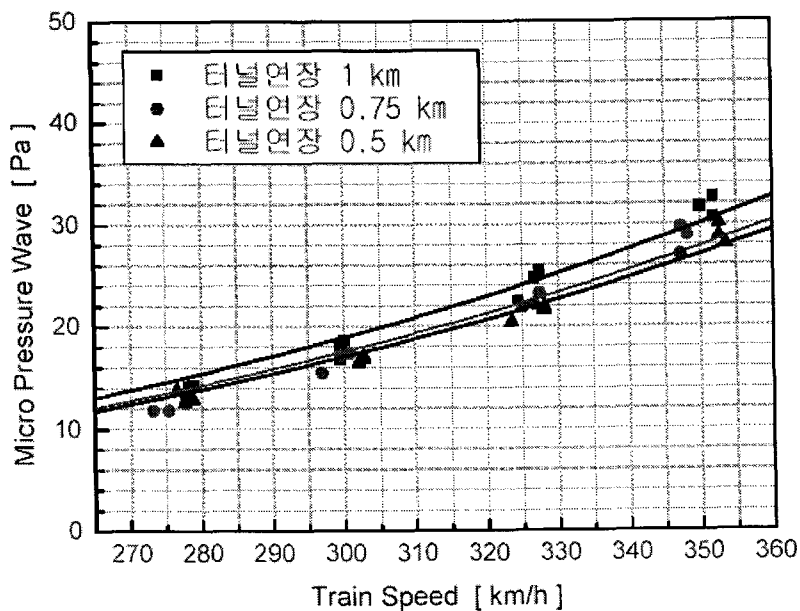


그림 4.a 열차속도별 미기압 크기
(터널단면적 107.9 m² 45도 경사갱구)

표 4 열차속도별 미기압 측정결과(터널단면적 95.1 m² -면벽형)

구분	1 km			0.75 km			0.5 km		
	1회	2회	3회	1회	2회	3회	1회	2회	3회
275km/h	16.85	17.56	16.95	17.75	17.12	17.97	17.96	17.16	17.02
	276.0	277.1	273.8	276.5	276.5	276.5	277.1	275.4	274.3
300km/h	22.55	23.17	24.55	25.01	22.89	24.55	22.46	23.57	23.25
	299.5	301.5	300.8	300.8	299.5	300.8	301.5	300.8	299.5
325km/h	29.68	31.13	29.94	31.86	33.22	33.92	29.77	29.34	30.54
	326.6	325.8	325.8	326.6	326.6	326.6	323.5	322.7	38.31
350km/h	41.86	40.52	40.98	40.64	42.23	42.66	38.12	37.74	38.31
	348.1	349.0	349.0	350.8	350.8	350.8	349.9	349.0	350.8

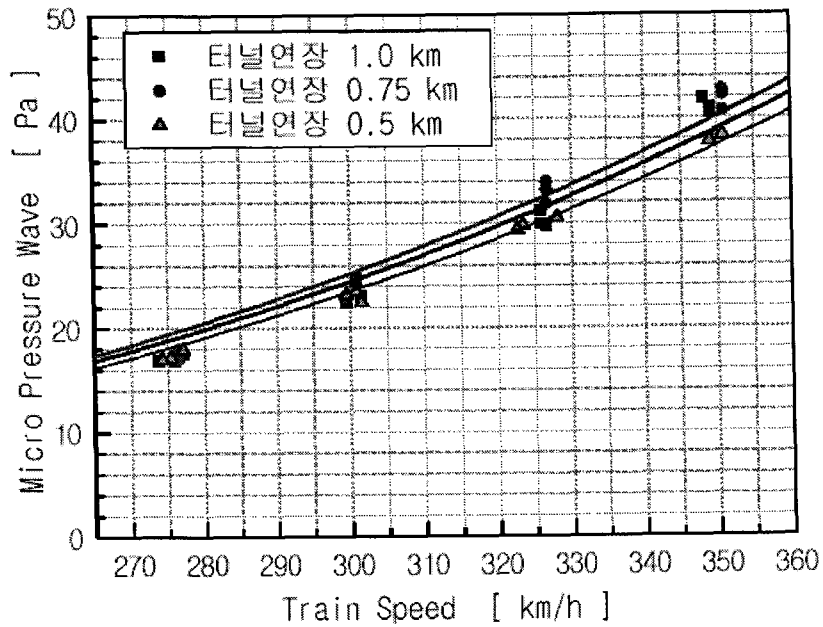


그림 4.b 열차속도별 미기압 크기
(터널단면적 95.1 m² -면벽형 갱구)

표 5 열차속도별 미기압 측정결과(터널단면적 95.1 m² -45도경사갱구)

구분	1 km			0.75 km			0.5 km		
	1회	2회	3회	1회	2회	3회	1회	2회	3회
275km/h	14.29	14.69	13.28	16.05	16.00	14.51	14.56	15.26	14.65
	275.4	276.5	274.9	277.1	277.7	274.9	273.2	276.0	274.3
300km/h	19.46	20.44	21.73	21.25	20.39	21.87	20.24	19.83	20.15
	298.8	298.2	301.5	300.1	300.1	302.1	300.8	302.1	300.8
325km/h	28.44	29.59	29.19	28.76	29.05	29.57	25.75	25.90	26.26
	327.4	325.8	328.1	328.1	327.4	327.4	326.6	325.87	326.6
350km/h	36.38	36.57	34.00	34.26	37.08	36.04	35.24	34.85	34.88
	352.6	349.0	348.1	348.1	352.6	353.5	349.0	349.0	349.0

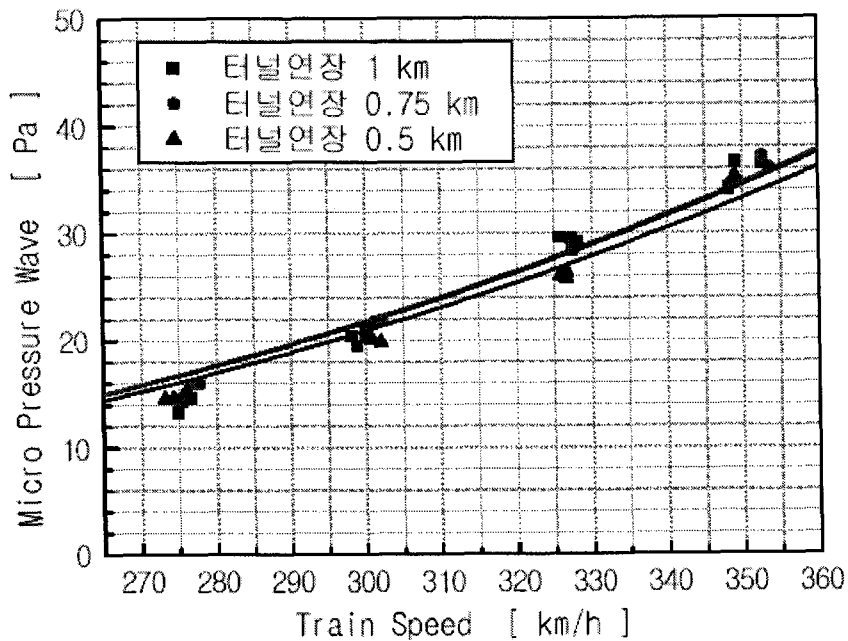


그림 4.c 열차속도별 미기압 크기
(터널단면적 95.1 m² 45도경사형갱구)

위 표 3 및 그림 4.a 는 터널단면적이 107.9 m² 이고 갱구형상은 45도 경사갱구를 적용한 경우로 터널 연장이 증가하면 미기압파가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 500 m기준으로 750 m인 경우에는 평균 4.6%, 1000 m인 경우에서는 10.5%증가하고 있다. 이와 같이 터널연장이 증가하면 동일한 주행속도에서 미기압파가 증가하는 것은 본 모형터널이 슬라브터널 모형으로 터널연장이 증가하면 출구의 압력기울기가 증가하기 때문이다. 이와 같은 경향은 단면적이 95.1 m² 인 경우에서도 동일하게 나타나고 있으나, 이 경우 터널연장 증가에 따른 미기압의 증가 경향이 분명하게 나타나지는 않고 있다

3. 결론

터널입구에서 발생한 압력파의 압력기울기는 터널을 전파하면서 비선형효과에 의해서 증가하거나 확산작용에 의해서 압력기울기가 감소하는 것으로 보였다. 또한 압력기울기의 증가 기울기는 터널입구압축파의 압력기울기에 영향을 받는 것으로 나왔다. 따라서 미기압파에 직접영향을 미치는 터널출구부의 압력기울기를 감소시키는 것이 효과적이다. 압축파의 압력기울기는 터널의 단면적이 증가하면 저감 되지만, 터널의 단면적을 작게 하면서 압축파의 압력기울기를 저감하는 낮은 비용의 미기압파 저감대책의 수립이 요구되며, 일반적으로 미기압파 저감대책으로 터널입구부에 후드를 설치하여 열차진입시 압축파의 압력기울기를 감소하기 위한 대책을 적용하고 있다.

이에 본 연구에서는 미기압파 저감 후드의 최적화를 목표로 후드에 대한 미기압 저감성능을 측정하여 고속철도에 적용할 수 있는지의 여부를 조사하였다.

4. 참고문헌

1. 한국철도기술 연구원, 1999, "터널 미기압파 저감을 위한 강제후드 개발 연구"
2. 한국철도기술 연구원, 1999, "G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발 1단계 3차년도"
3. 한국철도기술 연구원, 2000, "G7 고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발 2단계 1차년도"