

420km/h급 고속철도에서 통풍관 면적변화에 따른 후드의 미기압파 저감성능에 관한 연구

Cross-sectional area effects of air shafts on hood for reducing tunnel micro-pressure waves in 420km/h high-speed railway

김동현*[†], 서용철**

Dong-Hyeon Kim*[†], Yong-Cheol Seo**

Abstract Although domestic high-speed railway haven't needed a hood for reducing the micro-pressure wave due to large cross-sectional area of a tunnel and ballast track, recently the necessity of countermeasure for reducing the micro-pressure wave is increased as the design guideline of high-speed railway started to apply the optimum cross-sectional area of the tunnel and concrete slab track. This study investigates the effects of cross-sectional area of the air shafts mounted on top of the hood to reduce the micro-pressure wave radiating from tunnel exit. The experiment in 1/59 reduced scale was conducted for optimum design of the air shafts hood in 420km/h high-speed railway.

Keywords : Tunnel, Micro-pressure wave, Hood, air shaft, Aerodynamics, High-speed railway

초 록 국내 고속철도에서는 그 동안 비교적 큰 터널내공단면적과 발라스트궤도 적용으로 터널갱구 미기압파 저감 후드가 필요치 않았으나, 최근에 고속철도의 설계방향이 최적 터널내공단면적과 콘크리트궤도를 적용하기 시작하면서 미기압파 저감대책의 필요성이 크게 대두되었다. 본 연구에서는 420km/h급 고속철도의 터널 미기압파를 보다 효과적으로 저감시키고, 통풍관형 후드의 최대 성능을 파악하고자 후드 상부에 장착되는 통풍관의 면적변화에 따른 미기압파 저감성능을 연구하였다.

주요어 : 터널, 미기압파, 후드, 통풍관, 공기역학, 고속철도

1. 서론

고속열차가 터널에 진입할 때 압력파가 생성되어 터널의 끝을 향하여 음속으로 전파된다. 이러한 압력파의 일부분은 충격성 소음/진동의 형태로 터널 출구로부터 외부로 방사되는데 이를 미기압파(micro-pressure wave)라고 부르며, 터널 근처의 민가에 폭발음의 환경소음과 함께 심한 저주파 진동을 전달한다[1]. 본 연구에서는 420km/h급 고속철도의 터널 출구의 미기압파를 보다 효과적으로 저감시키고, 통풍관형 후드[2]의 최대 성능을 파악하고자 후드 천정에 장착되는 통풍관(air shaft)의 면적변화에 따른 미기압파 저감성능을 연구하였다. 최근에 2홀 통풍관형 후드를 초고속 열차모델 터널주행 실험장치를 이용하여 최적설계 개발하여

Table 1 Specification for experimental model

Tunnel & hood model		Train model	
Reduced scale	1/59	Nose of train	HEMU-430X
Tunnel cross-sectional area(A_T)	27,779mm ² (full scale : 96.7m ²)	Reduced scale	1/59
Tunnel length	9,322mm (full scale : 550m)	Train cross-sectional area(A_{tr})	2,642mm ²
Hood cross-sectional area(A_H)	41,669mm ² (full scale : 145.05m ²)	Train length	1,100mm
Hood length	520mm (full scale : 30.7m)	Train weight	583g
A_H/A_T	1.5	Blockage ratio, A_{tr}/A_T	0.095

*† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 초고속공기역학연구단(dhkim@krri.re.kr)

** 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 초고속공기역학연구단(syc17532@krri.re.kr)

호남고속철도 우산터널 시점에 설치 완료하였다(Fig. 1).

2. 본론

2.1 실험 모델

본 연구에서는 운행속도가 300km/h인 호남고속철도의 420km/h급 증속구간의 터널출구에 대한 미기압파 저감대책을 마련하기 위하여 터널개구에 설치되는 통풍관형 후드의 상부 통풍관의 내공단면적 변화에 따른 미기압파 저감성능을 실험적 방법으로 분석/평가하였다. 이와 관련하여 호남고속철도 터널의 제원을 1/59축척으로 축소하여 터널 및 열차모델을 제작하였으며, 특히 열차모델은 차세대 고속열차인 HEMU-430X 전두부 형상에 대하여 축방향 면적변화를 축대칭으로 전환하여 제작하였다. 열차모델과 터널모델의 단면적 비율은 0.095이다.

후드모델(Fig. 1, Fig. 2)은 터널 단면적의 1.5배이고, 후드의 천장에 통풍관 2홀을 내경 61mm로 제작하였다. 이 통풍관은 인서트가 삽입될 수 있어서 내공단면적을 축소 시킬 수 있도록 제작하였으며, 통풍관의 높이는 21mm로 고정하였는데 이는 선행연구인 통풍관 높이 변화에 따른 저감을 분석실험 연구를 통하여 결정되었다[3]. 터널모델 및 후드모델 그리고 열차모델의 상세 제원은 Table 1에 정리하였다.

2.2 실험 조건

Table 2 Specification for hood model with 2 air shafts hood

CASE	Hood length		Air shaft height (mm)	Hood surface area, A_S (mm ²)	Cross-sectional area of air shaft, A_C (mm ²)	Opening ratio, A_C/A_S (%)
	1:59 scale (mm)	Full scale (m)				
Hood A	520	30.7	21	92,937.8	2,922.5	3.14
Hood B					3,302.6	3.55
Hood C					4,374.7	4.71
Hood D					4,885.9	5.26
Hood E					5,844.9	6.29

후드모델의 통풍관 내공단면적 변화에 따른 터널출구 미기압과 저감성능을 측정하기 위하여(Fig. 3), 본 연구에서는 후드의 표면에 대한 통풍관 단면적 비에 따라 실험 케이스를 Hood A, B, C, D, E의 5가지로 나누어 실험을 수행하였다. 이때 후드모델의 표면적은 후드 앞의



Fig.1 Hood at Woosan tunnel



Fig.2 Hood model in test rig

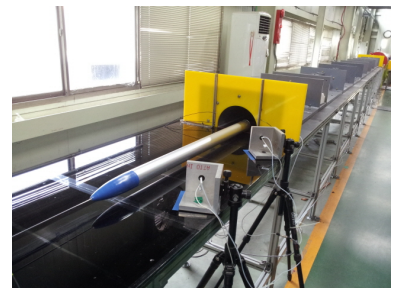


Fig.3 Measurements at tunnel exit in test rig

45도 경사부분을 제외한 면적이다. Table 2에 후드모델들의 세부 제원을 정리하였다. Hemu-430X 열차모델의 터널 진입속도는 300km/h, 360km/h, 420km/h에서 각각 3번씩 수행하였으며, 목표한 열차모델 속도의 오차가 1%이내인 실험 데이터만 취득하였다.

2.3 초고속 열차모델 터널주행 실험장치

초고속 열차모델 터널주행 실험장치[4]는 에어건(air gun) 방식으로 열차모델을 발사시킨다(Fig. 4). 열차모델은 가속과정을 거쳐서 실험부로 이동하게 되는데, 터널내부 압력변동과 터널 출구의 미기압과를 측정하기 위하여 응답속도가 매우 높고 저주파 대역에서 주파수 특성이 우수한 미세압력센서(Endevco 8510B-1)를 사용하였다(Fig. 3). 모든 압력센서의 계측데이터는 랩뷰(LabVIEW) 프로그램으로 제어되고 데이터취득장치(NI cDAQ-9172, NI9237, NI9215)를 통해 취득하였다.

2.4 터널 미기압과 특성

터널출구에서 터널외부로 방사되는 터널 미기압과의 크기 P_{MAX} 는 저주파 근사에 의해서, 터널 출구에 도달한 압축파의 파면의 압력구배에 거의 비례하고 갱구(터널출구)에서부터 거리 r 에 반비례하며, 갱구 바깥의 지형 즉, 입체각 Ω 에 의존하는 것으로 알려져 있다[5].

$$P_{MAX} = \frac{2A_T}{\Omega cr} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{exit.MAX} \quad (1)$$

여기서 A_T 는 터널 내공단면적, c 는 음속, p 는 터널 내부 공기압력, t 는 시간을 나타낸다. 결국 터널에서 음속으로 전파하는 압축파 파면의 압력구배를 저감시키면, 터널 출구에서 외부로 방사되는 미기압과도 식 (1)에서와 같이 줄어든다. 터널 입구에 통풍관형 후드를 설치하여 고속열차가 터널 진입 시에 압축파 파면의 압력구배를 크게 줄일 수 있다.

3. 실험결과 및 토의

본 연구는 호남고속철도의 420km/h급 증속구간의 터널출구 미기압과 저감대책을 마련하기

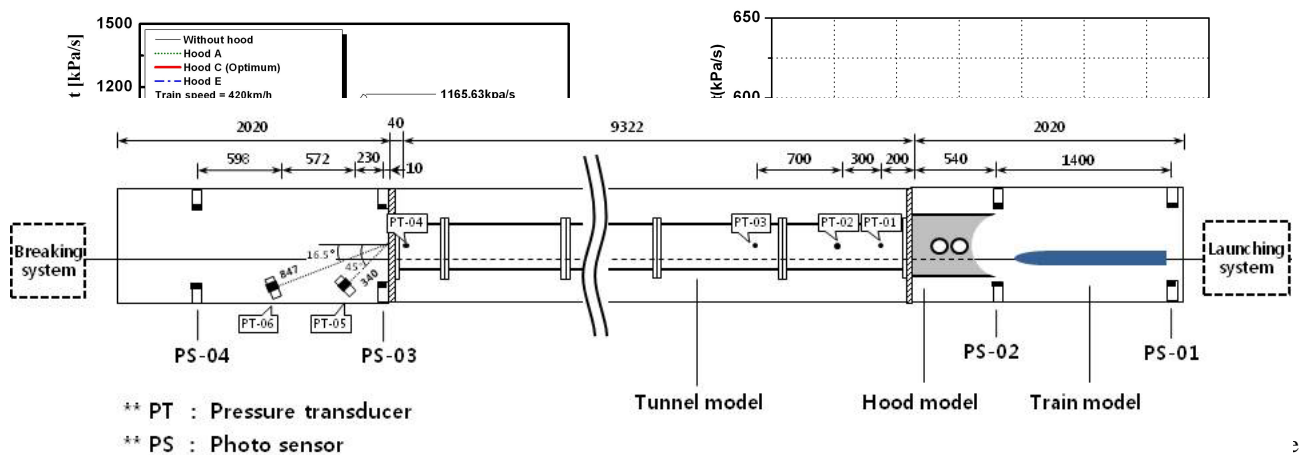


Fig. 4 Moving model test rig in Korea Railroad Research Institute

위하여 통풍관형 후드의 통풍관의 내공단면적 변화에 따른 미기압과 저감성능을 실험적 방법으로 평가하였다. Fig. 5는 열차모델이 터널 진입 시에 터널 축방향 내부 1.2m 위치(Fig. 4의 PT-03)에서의 압력구배 변화를 측정하여 Hood A, C, E 그리고 후드가 적용되지 않은 면벽형 터널입구인 경우와 비교하였다. 터널입구에 후드가 적용되지 않은 면벽형 터널입구의 경우에 비하여, 통풍관 2홀 후드모델을 적용하였을 때 압력구배가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig 5에서 후드를 적용하지 않은 면벽형 터널입구인 경우는 압력구배 최대 피크 값이 한 개로 나타나는 반면에 2홀 통풍관 후드를 터널입구에 적용하면 압력구배 최대 피크 값이 두 개로 나누어지고 작아진다. 이 때 첫 번째 압력구배 피크 값을 형성하는 시간 구간에서는 통풍관 개방율이 증가할수록 압력구배 피크 값은 줄어들었으나 두 번째 피크 값 구간에서는 통풍관 개방율이 증가할수록 압력구배가 오히려 증가하였다. 즉, 최적의 통풍관 개방율이

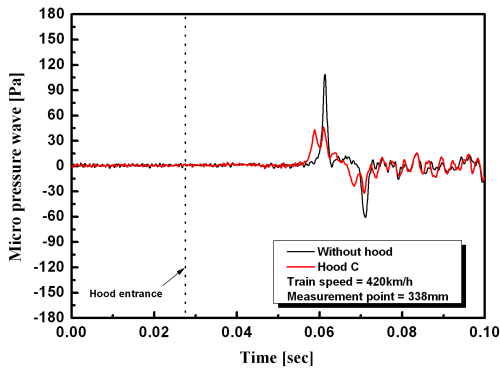


Fig. 7 Reduction of the micro-pressure wave by Hood C

존재하며 Hood C의 경우가 첫 번째와 두 번째 압력구배 피크 값이 균형 있게 저감되어, 전체 압력구배 저감율을 상승시켰다. 면벽형 터널입구의 경우 압력구배 최대 피크 값은 1165.63kPa/s이고, Hood C의 압력구배 최대 피크 값은 537.27kPa/s으로 측정되었다. Fig. 6은 2홀 통풍관 후드의 표면적에 대한 통풍관의 개방율에 따른 압력구배 변화를 나타낸 것이다. 통풍관 개방율이 4.71%인 경우까지 압력구배가 지속적으로 감소하다가 그 이후 점차 증가함을 확인 할 수 있다. 이 것은 후드 표면적에 대한 통풍관 개방율을 일정수준 이상 증가시키면 오히려 압력구배의 저감에 반대작용을 일으키는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Hemu-430X 고속열차 모델이 터널에 420km/h로 진입할 때, 터널출구면 중앙에서 338mm(실척: 20m 해당) 떨어진 위치에서 측정한 미기압과 크기이다. 터널입구에 Hood C를 장착하였을 때 후드를 장착하지 않을 때보다 미기압과 피크 값이 매우 작아짐을 볼 수 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 터널내부의 압력구배와 터널출구 미기압과는 비례하므로 터널내부 압력구배의 저감이 터널 출구 미기압과를 저감시키는 효과를 가져온다. Table 3은 Hemu-430X 열차모델의 터널진입속도에 대한 Hood C의 미기압과 저감성능을 정리한 것으로서 열차진입속도가 420km/h일 때 터널출구 미기압과 저감율은 약 55.7%로 나타난다.

Table 3 Reduction ratio of the micro-pressure wave

V_{IN} (km/h)	Without hood	Hood C	Reduction ratio(%)
300	32.44 Pa	16.01 Pa	50.6
360	61.08 Pa	29.64 Pa	51.5
420	108.06 Pa	47.83 Pa	55.7

4. 결론

본 연구에서는 초고속 열차모델 주행실험장치에 호남고속철도 증속구간의 터널을 1/59축척으로 축소하여 터널진입속도 300km/h, 360km/h, 420km/h에서 통풍관형 후드의 통풍관 내공 단면적 변화에 따른 미기압과 저감성능을 실험적 방법으로 평가하였다. 통풍관형 후드는 통풍관의 내공단면적 조정에 따라 터널내 압력구배를 효율적으로 저감시킬 수 있는 최적 설계치를 갖는다. 통풍관의 개방율을 최적 설계치 이상으로 증가시키면 터널내 압력구배는 다시 커져서 터널 출구 미기압과 강도도 다시 상승한다.

후 기

본 연구는 2013년도 한국철도기술연구원의 주요사업인 철도 친환경 향상기술 개발사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 관계자에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] T. Maeda(1996), Review of Micro-pressure Wave Radiating from Tunnel Portal and Pressure Variation under Train Passage, *RTRI report*, Vol. 10, No. 2, pp. 5~10 (In Japanese).
- [2] D.H. Kim(1999)Hood by train tunnel , Korean Patent No. 1003319550000.
- [3] D.H. Kim, Y.C. Seo (2013), Height effect of air-shaft on hood for reducing micro-pressure waves from tunnel portals in 420km/h high-speed railway, *Proceedings of 2013 Civil Expo & Conference*, Jeongseon , Kangwondo, Korea, September 23-25, (In Korean).
- [4] D.H. Kim, I.G. Oh(2001), Development of 1/60th scale moving model rig using the compressed air launcher and one-wire guidance system of train model, *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Part B, Vol.25, No.5, pp.634-644, (In Korean).
- [5] A. Yamamoto(1977), Micro-pressure wave radiated from tunnel exit, *Preprint of the spring meeting of physical society of Japan* (In Japanese).