

고속철도의 HVAC시스템

고속 철도 차량의 냉난방 환기 여압 시스템을 소개하고자 한다.

남성원

한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 (swnam@krti.re.kr)

시속 200 km/h 이상으로 주행할 수 있는 고속 철도 차량의 HVAC(Heating, Ventilating, Air-Conditioning) 장치는 기존의 일반 철도차량과는 달리 고도의 기술적 과제를 담고 있다. 우선, 고속 주행으로 야기되는 차량 진동에 견딜 수 있게 내진동 설계가 되어야 하고, 철도의 궤도(軌道) 노반(路盤)의 손상에 직접적인 영향을 끼치는 철도차량의 축(軸) 중량을 줄이기 위하여 소형 경량화 되어야 한다. 또한, 열차가 고속으로 터널을 통과할 때에 발생하는 압력 변동으로 인한 승객 귀울림 현상 및 압력과 대책을 위한 기밀 및 여압 대책을 필요로 한다.

각국의 철도차량 차체 기밀 설계 기준

철도 터널 건설시, 차량의 차체 기밀도를 고려하여 각국에서는 표 1과 같이 열차 압력 변동 설계를 적용하고 있다. 일본의 경우, 기존선 중저속 차량(최고 160 km/h 이하)에 대하여는 별도의 규정이 없으나, 신간선 차량(최고 300 km/h)에 대하여는, 터널내 최대 압력 변화값(ΔP_{max})과 최대압력 변화율($\Delta P_{max}/\Delta t$)을 변수로 하여 규정하고 있다. 미국의 경우, 일반적으로 말하는 고속철도(최고 200 km/h 이상)를 아직 운행하고 있지 않아서 압력이 문제시 될 만한 지하 철도에 대하여만 규정하고 있기 때문에 기준이 비교적 완화하여 적용하고 있다. 영국의 경우는 자국 내에서만 운행하는 열차(최고 200 km/h 이하)

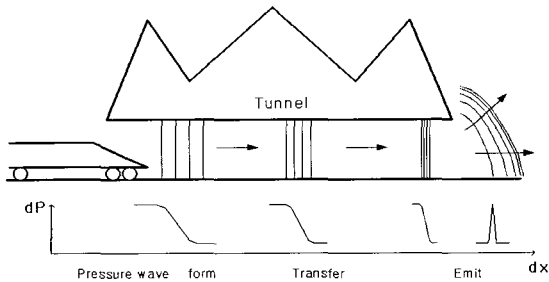
<표 1> 각국의 철도차량 압력 변동 설계 기준

국명	철도차량 압력 설계 기준
일본	(1) 신간선 (차량속도 270 km/h) - 최대 압력 변화 = 1000 Pa - 최대 압력 변화율 = 200 Pa/s (최근에 300~400 Pa/s 로 완화됨) (2) 기존선 비기밀 차량 - 공포된 기준없음
미국	(1) 지하 도시철도 (차량속도 80~100 km/h, 비기밀 차량) - 최대 압력 변화율 = 700 Pa (1.7초 이내) - 최대 압력 변화율 = 410 Pa/s (1.7초 이상의 경우 평균값)
영국	(1) Inter-city 노선 - 최대 압력 변화율 = 4000 Pa/4s (차량속도 200km/h, 비기밀 차량) (2) 런던-영불 터널 노선 (차량속도 225~300 km/h, 비기밀 차량) - 최대 압력 변화율 = 2000 Pa/4s (단선 터널) - 최대 압력 변화율 = 3500 Pa/4s (복선 터널)
독일	- 최대 압력 변화율 = 500 Pa (1초 이내) - 최대 압력 변화율 = 800 Pa (3초 이내) - 최대 압력 변화율 = 1000 Pa (10초 이내) * 차량속도 280 km/h, 기밀차량, 단독운행 조건
이태리	- 최대 압력 변화 = 1500 Pa (시간 규정 없음) - 최대 압력 변화율 = 500 Pa/s * 고속 기밀차량
프랑스	- 최대 압력 변화율 = 500 Pa/s (SNCF 고려중)
한국 (KTX)	(1) $ \Delta P + 5 \times dP/dt \leq 2000$ (터널길이 5km이하) $ \Delta P + 5 \times dP/dt \leq 2500$ and $\Delta P \leq 2000$ (모든 터널) (2) $dP/dt \leq 400$ (운전실) 혹은 200 (객실)

보다도 英-佛 해협 구간을 운행하는 열차(최고 300 km/h)의 속도가 더 빠르기 때문에 각각의 구간을 구별하여 압력변동 기준을 정하고 있다. 독일(최고 280 km/h)과 프랑스(최고 300 km/h)의 경우는, 고속운행 구간에 터널이 거의 없기 때문에 일본 규정보다 상당히 완화되어 있으며, 이태리(최고 250 km/h)의 경우도 주변국과의 연계 노선 부분을 제외하곤 장대 터널이 우리나라나 일본처럼 많지 않으므로 완화된 규정을 적용하고 있다. 우리나라의 경우, KTX(최고 300 km/h)가 프랑스의 TGV에 모태를 두고 있기는 하지만 노선 특성상 터널 구간이 많아서, 이 보다 훨씬 더 엄격한 규정을 적용하고 있으며, 터널 길이별로, 차량 형태별로 각각 다른 기준값을 사용하고 있다.

승객 이명 현상 저감 대책

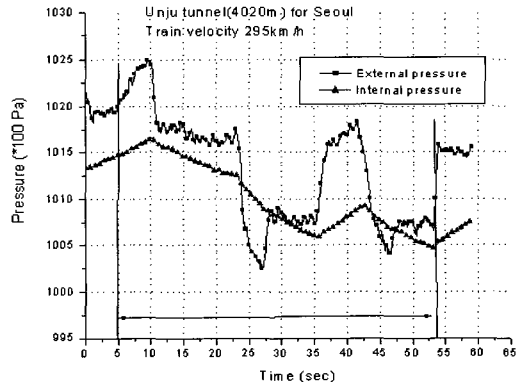
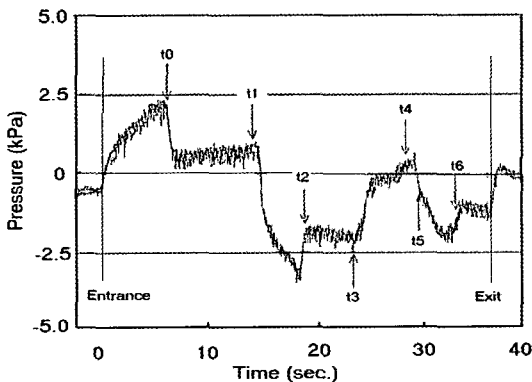
고속철도 차량이 터널에 고속으로 통과할 때에 발



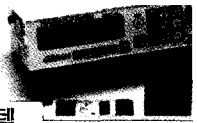
[그림 1] 터널에서의 압력상승 메카니즘

생하는 승객 이명 현상은 차량-터널 단면적의 급격한 축소로 인한 압력 상승과 압력파에 기인한다. 고속철도 터널에서 발생하는 압력파에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다. 열차가 터널에 고속으로 진입할 때에 발생하는 압력변동은 다음과 같은 3가지 원인에 기인하는 것으로 알려져 있다. 열차 전두부의 진입에 의한 압축파의 전파, 열차 후미부의 진입시에 발생하는 팽창파의 전파, 열차가 터널에 돌입할 때에 받는 압력 상승이다. 각각에 대한 메카니즘은 다음과 같다. 열차 전두부가 터널에 진입할 때에 열차 전면에는 압축파가 형성된다. 이 압축파는 음속으로 터널 출구로 전파되어 터널 출구에서 펄스상의 압력파가 되어 외부로 방사되며 이를 미기압파라 한다. 그 때에 터널 출구에서는 팽창파가 되어 반사되어 터널 입구 방향으로 진행되며, 터널입구에서 다시 반사되어 압축파가 되어 터널 출구 방향으로 진행되는 것을 반복하게 된다. 열차의 후미부가 터널에 진입할 때에는 열차 후면에서는 압력이 저하하여 팽창파가 형성된다. 이 팽창파도 음속으로 터널 출구 방향으로 진행하여 위와 같은 과정을 반복하게 된다. 한편, 열차가 터널에 진입할 때에 열차의 외부 압력이 증가하는 압력 상승은 열차 진행과 더불어 구배가 점점 급격하게 되며, 터널 주행 저항 증가와 공력 소음 증가의 원인이 된다.

그림 2에 신간선과 KTX에 대하여 터널내 압력 변화를 측정된 실험 결과를 비교하였다. 좌측의 그래프는 신간선 500계 열차가 속도 300 km/h로 3000 m

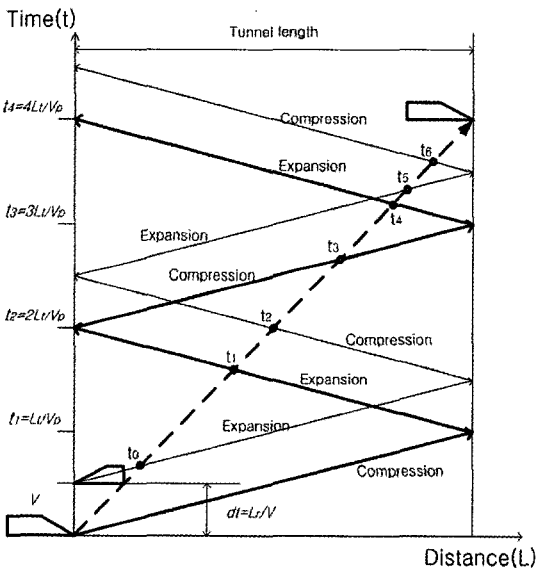


[그림 2] 터널내 압력변화 곡선(좌:신간선, 우:KTX)



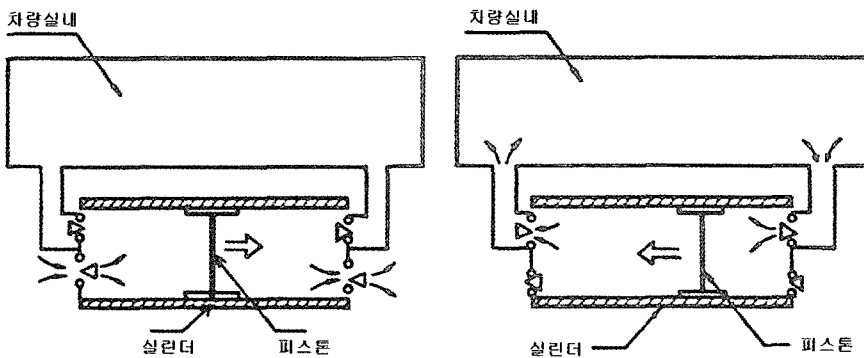
의 터널을 통과할 때의 압력 변화를 나타낸 것이며, 우측의 그래프는 KTX차량이 평균속도 295 km/h로 길이 4020 m의 터널을 통과할 때에 압력 변화를 각각 나타내었다. 두 그래프의 비교로부터 열차-터널 단면적비(KTX의 경우, 단면적비=9.5 m², 터널단면적=107 m², 신간선의 경우, 차량단면적=10.2 m², 터널단면적=63.4 m²)와 차량 형상이 다소 달라도 정성적인 차량 외부 압력 변화 패턴은 유사함을 알 수 있으며, 객실내 압력의 변화는 외부와의 차단으로 인하여 비교적 완만하게 변화됨을 보여준다. 그림 2

에서 압력값이 급변하는 지점 $t_0 \sim t_6$ 은 그림 3에서 나타낸바와 같이 압력파와 차량이 만나는 지점에 각각 해당된다. 즉, 차량 전두부가 터널에 진입한 후, 후미부 진입으로 생성된 팽창파를 만나는 시간 t_0 까지는 압력상승이 일어나며, 팽창파와 만나는 t_0 에서 압력하강이 일어난다. 터널출구에서 반사되어 오는 팽창파와 만나는 시간 t_1 에서 압력하강, 압축파와 만나는 시간 t_2 에서 압력상승이 일어나며, 이러한 압력 변화는 열차가 터널내를 주행하는 동안 시간 t_6 까지 압축파 및 팽창파를 만날 때마다 압력상승과 하강을 반복하게 된다.

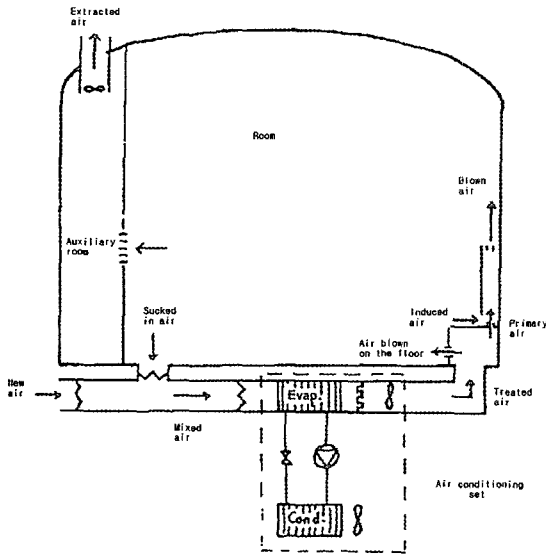


[그림 3] 열차 진입에 의해 야기되는 압력파의 x-t선도

따라서, 터널내 압력 변동에 의한 승객의 이명감을 줄이기 위하여는 차량의 터널 진입에 따른 압력 상승을 최대한 억제시키는 방안, 발생된 압력파를 소산시키는 방안 및 차체를 기밀 구조로 하는 방안을 고려할 수 있다. 압력 상승을 억제시키기 위한 방안으로는 터널 단면적을 크게 하거나 차량 단면적을 작게 하는 방법과 터널 입구에 후드 등을 설치하여 압력 상승률을 완만하게 하는 방법이 있다. 또한, 터널내에 발생된 압력파를 소산시키는 방안으로는 터널 내부에 사갱(斜坑) 또는 지갱(枝坑)을 설치하여 압력파를 분산시키든가 궤도를 발라스트 구조로 하여 압력파의 전파가 감쇄되도록 하는 방법이 있다. 차체의 기밀은 차간 연결부의 일체화 및 출입문의 플러그 도어화 그리고 공조 장치의 외부 신선 공기 취입부에 연속 환기 장치를 사용하는 방법 등이 고속 철도 차량에 적용되고 있다(그림 4).



[그림 4] 연속 환기 장치의 공기 순환 원리



[그림 5] KTX의 공조 기류 경로

각국 고속 철도의 HVAC 시스템

신간선의 공조 시스템

일본 신간선(노조미) 차량 공조 시스템의 특징은 경량화와 저소음의 실현이라고 할 수 있다. 또한 곡선 통과 성능의 향상을 위하여 차량의 중심을 저하시켰으며, 일체 집중형 차체 하부 탑재 방식을 채택하고 있다. 1량당 최대 정원 100명, 차체 내부 용적 150 m³ 기준으로 냉방 용량은 50,000 kcal/h, 난방용량은 34,000 kcal/h이며, 환기량은 30 m³/min, 환기 부하는 환기장치에 의한 온도 상승을 10℃ 이내로 하고 있다. 노조미 차량이 운행되는 도카이도 구간에서의 터널 비율은 전체의 13% 정도이며 터널 앞 200 m의 위치에서 터널을 인지하여 이 위를 열차가 통과하면 흡기, 배기구를 모두 닫고 있다. 산요 구간은 터널 비율이 신오오사카~오카야마 구간에는

36%이고 오카야마~하카타 구간은 56%이므로 연속 환기가 가능하도록 하기 위하여 별도의 급배기 장치를 구비하였으며 급기장치와 배기장치를 차체 하부에 장착하므로, 양측 전동기의 양측단에 2개의 원심 다익팬을 장치한 급배기 일체형으로하여 소형 경량화를 실현하였다. 압력완화장치는 연속환기방식으로 원심형 급기 및 배기 송풍기의 정압이 3.72 kPa, 풍량 30 m³/min이다. 기밀장치는 높은 정압팬에 의해 외기의 압력에 큰 영향을 받지 않고 급기가 가능한 방식을 사용하고 있다.

TGV의 공조 시스템

프랑스 고속열차인 TGV는 열차 전후부에 동력차가 배치되어 있으며, 중간에는 동력장치가 없는 객차로 편성되어 있다. 따라서, 공조장치도 객차용과 동력차용으로 나누어져 있다. 객차의 경우, 외부 흡입구를 통하여 1200 m³/h의 신선 공기와 1500 m³/h의 내부 순환 공기가 혼합되며 필요에 따라 공조 유니트에서 냉방 또는 난방 처리된 후 총 2700 m³/h의 공기가 객실 내부로 토출된다. 객실 내부로 유입된 순환공기는 객실 내부 측벽 하단부의 순환공기 흡입구를 통해 재순환된다. 냉동방식은 증기 압축식으로 왕복동형 6기통 압축기를 사용한다. 응축풍량은 13,500 m³/h이며, 난방시스템은 30~34 kW의 전기 히터 방식을 채택하였다. 터널 내부에서의 연속환기를 위한 연속환기 시스템이나 압력변동을 최소화시키는 여압장치를 별도로 채택하지 않고 터널 내부로 차량이 진입할 때는 급배기구 플랩을 완전히 닫아 실내를 밀폐시키는 체절밸브 방식을 사용한다.

KTX의 공조 시스템

우리나라 KTX의 공조 시스템(그림 5 참조)은 TGV의 사양과 거의 동일하며, 재순환량과 급기량이 각각 2100 m³/h, 3300 m³/h으로 차이가 난다. ㉔