

콘크리트 궤도 터널 내 KTX 차량의 실내소음 특성 분석

Analysis of Interior Noise of KTX in Tunnel with Concreted Track

김재철* · 이찬우*

Jae Chul Kim and Chan Woo Lee

(2007년 6월 19일 접수 ; 2007년 10월 15일 심사완료)

Key Words : KTX(한국형고속철도), Interior Noise(실내소음), Concreted Track(콘크리트 궤도), Aerodynamic Noise(공력소음), Rolling Noise(전동음)

ABSTRACT

KTX trains show a high interior noise level in tunnel with concreted track at 300 km/h. Generally, the concreted track has higher sound emissions compared with ballasted track due to the reduced absorption and the major sources of interior noise for KTX are known as the aerodynamic noise and rolling noise. Therefore, It is necessary to find out noise source and noise components to affect interior noise in tunnel with concreted track. In this study, we measure the noise and vibration inside KTX in tunnel in order to find the cause of the interior noise of KTX. The analysis results show that the interior noise of KTX in tunnel with concreted track is increased sharply by a low frequency below 80 Hz. We know that the low frequency noise inside KTX in tunnel with concreted track is generated at the natural frequency of carbody by aerodynamic noise outside gangway and rolling noise. In order to reduce the noise level at 80 Hz, modification of mud-flap length between carbodys is suggested and the effect of noise reduction is examined in tunnel with concreted track.

1. 서론

2004년 4월 1일 KTX가 성공적으로 개통되면서 전국이 반나절 여행권으로 접어들었다. 그러나 점차 KTX를 이용하는 승객이 많아짐에 따라 KTX차량의 역방향 의자 배치와 함께 터널 주행 시 차량의 실내소음에 대한 민원이 제기 되었다. 이러한 현상을 파악하기 위해서 KTX에 대한 실내소음의 측정 및 원인분석에 대한 기초적 연구가 진행 되었으며⁽¹⁾, 측정 결과 경부고속철구간 가운데 콘크리트 궤도로 부설

된 터널 통과 시 실내소음이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 콘크리트 궤도는 자갈궤도에 비해 소음을 흡수하지 못하기 때문에 국외에서는 소음/진동 대책에 대한 연구가 여러 방면으로 수행되고 있으나⁽²⁾, 국내에서는 콘크리트궤도에 대한 소음/진동 연구가 아직 미미한 단계에 있어, 소음/진동 문제가 발생하면 해결방안이 어려운 상황이다. 따라서, 이 연구에서는 콘크리트 궤도 터널 통과 시 KTX차량의 실내소음의 발생 원인을 파악하기 위해서 터널 주행 시 차체진동과 실내외 소음의 측정결과를 분석하였으며, 콘크리트 궤도 터널 통과 시 실내소음을 저감시키기 위한 차량측면의 대책방안에 대한 효과시험을 수행하였다.

† 교신저자: 정희원, 한국철도기술연구원 철도시스템연구본부
E-mail : jckim@krii.re.kr

Tel : (031)461-5206, Fax : (031)460-5299

* 한국철도기술연구원 철도시스템연구본부

2. 터널 내 소음 및 진동 측정결과

2.1 터널 내 KTX차량의 소음 측정결과

경부고속철도 구간에서 KTX차량의 소음/진동을 측정하기 위해서 차량실내, 갱웨이(차량과 차량사이의 통로), 차량사이의 하부 및 차량사이(갱웨이 외부)에 4개의 소음계를 설치하고, 실내중앙의 바닥, 측벽 및 창문에 가속도계를 부착하였다. Fig. 1은 콘크리트케도로 부설된 터널구간과 자갈케도로 부설된 터널구간을 약 300 km/h의 속도로 통과 시 일반객차의 실내소음 결과이다. 이 결과에서 콘크리트케도 터널 통과 시 차량의 실내소음이 자갈케도 터널 통과 시보다 상당히 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 콘크리트케도 터널과 자갈케도 터널 주행 시 차량속도에 따른 실내소음의 비교결과이다. 대체적으로 자갈케도 터널에 비해서 콘크리트케도

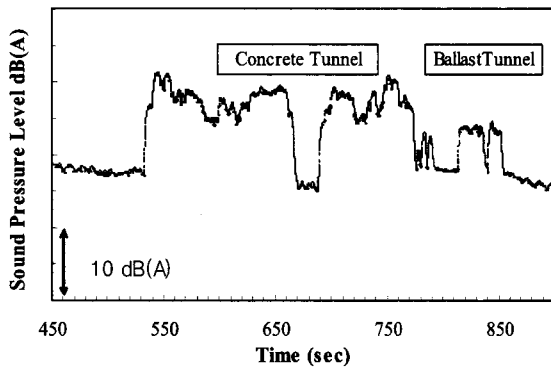


Fig. 1 Interior noise of KTX on high speed line at 300 km/h

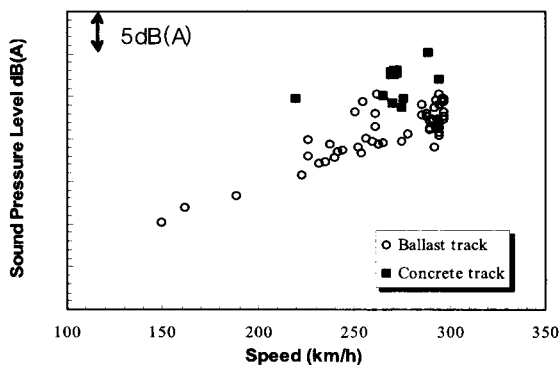


Fig. 2 Comparison of interior noise in tunnel with ballast and concrete track

터널 통과 시에 약 4~5 dB(A)정도 높은 것을 알 수 있다. 이러한 원인을 분석하기위해서 Fig. 3과 같이 개활지 및 두 터널구간에 대한 실내소음의 주파수특성을 비교하였다. 개활지에 비해서 터널 통과 시 80 Hz와 250 Hz의 저주파 소음성분이 크게 증가하였으며, 특히 콘크리트 케도 터널 통과 시에는 80 Hz 성분의 주파수가 급격히 증가하여 차량실내에 커다란 영향을 미치는 것으로 알 수 있다.

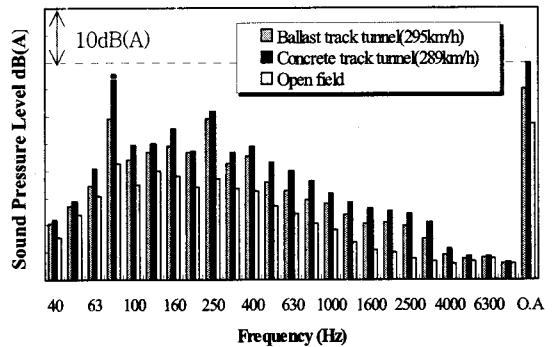


Fig. 3 Frequency analysis of interior noise of KTX

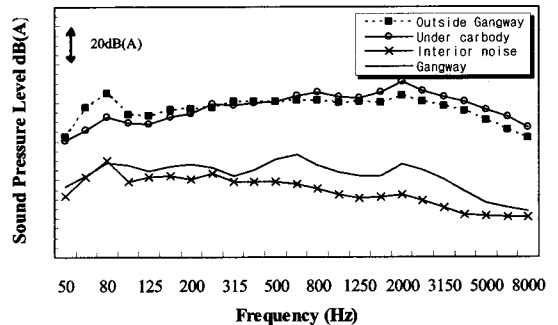


Fig. 4 Noise level of KTX in tunnel with concreted track at 300 km/h

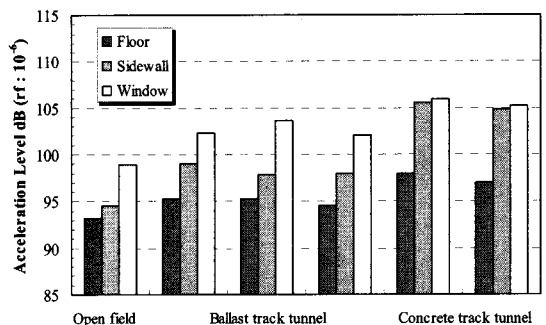


Fig. 5 Acceleration level of carbody for KTX

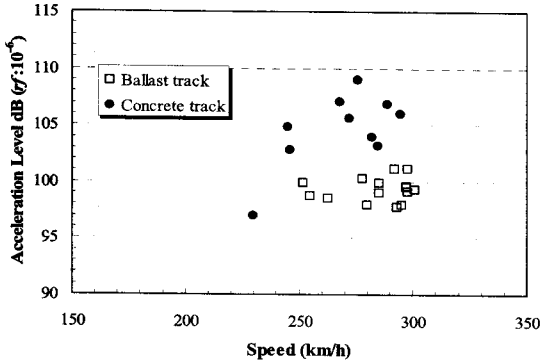


Fig. 6 Acceleration level of sidewall on ballasted track and concreted track

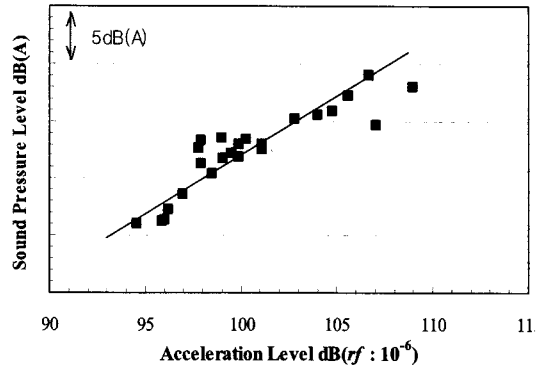


Fig. 7 Comparison of vibration level and interior noise

Fig.4는 KTX차량이 300 km/h의 속도로 콘크리트 레도 터널 통과 시 차량의 실내소음과 외부소음과의 상관관계를 파악하기위해서 비교한 결과이다. 이 결과에서 차량사이의 소음과 실내소음에서 80 Hz 성분의 소음이 크게 증가하지만, 차량사이의 하부와 갱웨이에서는 80 Hz 성분의 소음이 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

일반적으로 차량사이의 하부소음은 차륜과 레일의 접촉에 의한 전동음, 차량하부의 공력소음 및 콘크리트 레도에서 발생하는 소음의 기여가 크기 때문에 이 소음의 주파수 분석결과에서 80 Hz 성분이 크지 않는 것을 고려하면, 80 Hz 성분의 실내소음은 고속 주행 시 차량과 차량사이의 공력소음과 관계가 있는 것으로 판단된다.

2.2 KTX차량의 차체진동 측정결과

KTX 차체의 진동특성과 실내소음의 관계를 파악하기 위해서 KTX차량의 바닥, 측벽 및 창문의 진동을 분석하여, 실내소음과 비교 검토하였다.

Fig. 5는 KTX차량 통과 시 개활지(1개소), 자갈레도 터널 (3개소) 및 콘크리트레도 터널 (2개소)에 대한 차체의 진동레벨을 분석한 결과이다.

대체적으로 바닥이 가장 적게 나타나고 창문이 가장 커다란 진동레벨을 나타내고 있으며, 특히 콘크리트 레도 터널 통과 시에는 차체의 진동이 커지는 현상을 파악할 수 있다.

Fig. 6은 차량의 속도에 따른 차량 측벽의 진동레벨을 나타낸 결과로서 자갈도상 레도에 비해서 콘크리트레도 터널 통과 시 측벽의 진동레벨이 약 5~6 dB정도 큰 것을 알 수 있다. Fig. 7은 실내소음과 차

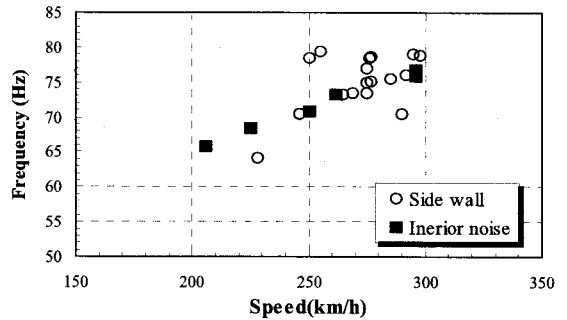


Fig. 8 Dominant frequency of interior noise and vibration level of sidewall

체 측벽의 진동레벨과의 관계를 나타낸 결과이다. 차체의 진동레벨이 증가함에 따라서 실내소음도 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 차체 측벽과 실내소음의 탁월 주파수의 관계를 나타내고 있다. 대체적으로 차체측벽의 탁월 주파수와 실내소음에서 문제가 되는 주파수가 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 KTX차량이 콘크리트레도 터널구간을 주행하면, 차체의 저주파수 영역의 진동레벨이 커지면서, 실내소음이 발생하는 것으로 판단된다.

2.3 레도특성에 따른 터널 내 소음 측정결과

터널의 레도특성에 따른 터널 내 소음의 특성을 파악하기 위하여 KTX차량 통과 시 자갈레도 터널과 콘크리트레도 터널 내에서 측정된 소음을 분석하였다. 측정방법은 레도가 상행선과 하행선으로 구분되는 복선이기 때문에 상행선의 레도중심과 레도에서 약 4 m 떨어진 측벽 지점에 마이크로폰을 바닥에 설치하여 KTX차량이 상하행선 통과 시 각각의 소음레

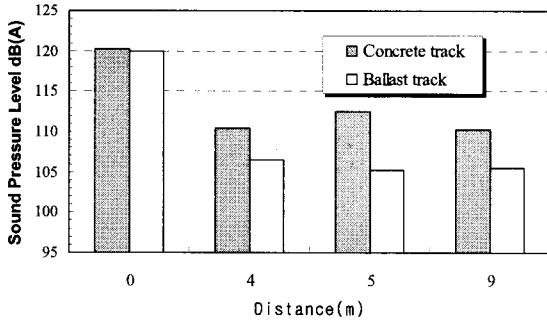


Fig. 9 Noise level in tunnel with concreted track and ballasted track

벨을 레코더(SONY SIR-1000)에 기록하였다. 분석 방법은 상하행선 궤도의 중심간격이 5m이므로 차량이 상하행선을 통과하면 4종류의 거리에 대한 소음레벨을 비교할 수 있다. Fig. 9는 KTX차량 통과 시 궤도중심으로부터 측정지점까지의 거리와 터널구조에 따른 소음레벨을 분석한 결과이다. 이 결과로부터 자갈궤도 터널보다 콘크리트궤도 터널의 소음레벨이 약 4~6 dB(A)정도 높게 나타났다.

3. 터널 내 실내소음 분포도 및 차체 주파수 응답 측정결과

전절에서 분석한 소음/진동의 측정결과로부터 콘크리트궤도 터널 통과 시 실내소음이 급격히 증가하는 원인은 80Hz성분의 소음레벨이며, 이 소음레벨은 차체 측벽의 진동과 관련이 있는 것으로 나타났다. 따라서 이 절에서는 차량의 실내 음향모드와 차체의 고유진동수에 대한 시험을 실시하였다.

3.1 터널 내 실내소음 분포도 측정결과

KTX차량이 콘크리트궤도 터널 통과 시 차량 실내에서 발생하는 80 Hz 소음성분의 분포를 확인하기 위해서 격자판을 이용하여 실내소음을 측정하였다. 측정방법은 차량의 구조가 대칭적 형상을 가지고 있기 때문에 좌석 뒤편에 상하 좌우 30 cm 간격(150 cm × 150 cm)으로 25개의 마이크로폰을 설치하여 한쪽 면에 대한 실내소음을 측정하였으며, 차량의 길이방향에 대한 소음분포는 차량의 길이가 약 20 m에 해당하기 때문에 측정 시스템 여건상 측정이 불가능하였다.

Fig. 10은 콘크리트궤도 터널 통과 시 측정된 실

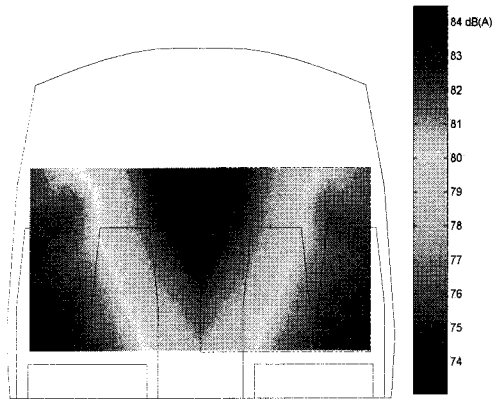
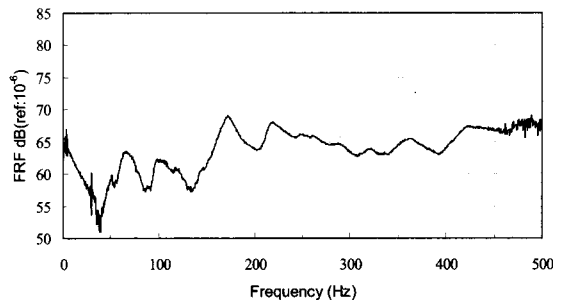
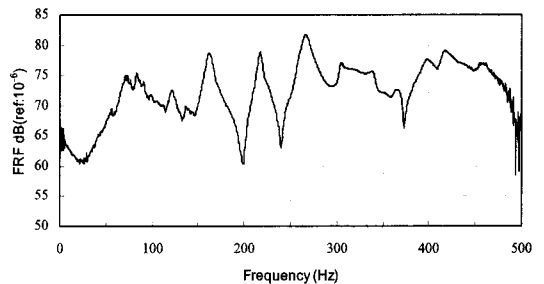


Fig. 10 Interior noise characteristic of KTX in tunnel with concreted track at 80 Hz



(a) Window



(b) Sidewall

Fig. 11 Frequency response function of sidewall and window of carbody for KTX

내소음의 80 Hz 성분(1/3 옥타브 분석)에 대한 결과로서 창문아래에서 실내소음레벨이 가장 크게 나타나고, 점차 중앙으로 이동할수록 소음레벨이 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 음압분포는 KTX차량의 실내공간 음향모드와 관련이 있으며, KTX차량과 동일한 실내공간을 갖는 한국형고속열차(KHST) 차량의 실내 음향공간에 대한 공명주파수를 계산한 결과 78 Hz가 얻어졌다⁽³⁾. 따라서 이러한 공명주파수에

의한 영향으로 80 Hz성분의 실내음압이 더욱 증가되는 것으로 생각된다.

3.2 차체의 주파수 응답측정 측정결과

KTX차량의 고유진동수를 파악하기 위해서 임팩트해머와 진동가속도계를 이용하여 객차의 측벽과 창문에 대한 주파수 응답함수를 측정하였다. Fig. 11(a)는 창문에 대한 주파수 응답함수 측정결과이다. 약 65 Hz와 100 Hz 영역에서 고유진동수가 존재하는 것을 알 수 있으며, Fig. 11(b)는 객차 측벽과에 대한 주파수 응답함수를 나타내고 있다. 객차 측벽에는 75 Hz~85 Hz사이에서 두 개의 고유진동수가 존재하고 있다. 이러한 창문과 측벽의 고유진동수에 의해서 80 Hz 성분의 차체 진동과 실내소음이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 콘크리트 궤도 터널 주행 시 KTX 차량의 실내소음 발생원인 분석 및 검토

콘크리트 궤도 터널 주행 시 KTX차량의 실내소음에서 80 Hz 성분(1/3 옥타브 분석)의 저주파가 급격히 증가하여 커다란 문제가 되었다. 이 80 Hz 성분의 발생 메카니즘은 다음과 같이 생각할 수 있다.

일반적으로 콘크리트궤도 통과 시 콘크리트 도상에서 발생하는 소음은 자갈궤도보다 큰 것으로 알려져 있다⁽²⁾.

따라서 콘크리트 궤도 터널 통과 시 차륜과 레일에 의한 전동음을 궤도구조가 흡수하지 못할 뿐 아니라 콘크리트 도상의 진동에 의한 소음 때문에 자갈궤도 터널에 비해서 콘크리트궤도 터널내부의 소음이 증가하고, 이 소음에 의한 가진력과 함께 차량 사이에서 발생하는 80 Hz의 공력소음에 의한 가진력이 차체를 가진하여, 이 주파수 영역에서 차체 공진 주파수와 실내 음향모드가 일치하여 80 Hz 영역부근에서 저주파 소음이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 80 Hz 성분의 소음을 저감시키기 위한 방법은 첫 번째 콘크리트 도상의 진동에 의한 소음과 차량사이에서 발생하는 80 Hz 성분의 공력소음을 저감시키는 방법, 두 번째 80 Hz 성분의 차체 공진 주파수를 제거하는 방법 등을 생각 할 수 있다. 그러나 차체 공진주파수의 제거와 콘크리트 도상의 진동소음 저감방법은 현실적으로 불가능한 경우가 많

기 때문에 다음과 같이 차체간의 공력소음을 저감시켜 실내소음을 향상시키는 방안이 검토되었다.

5. 공력소음의 저감방안 및 효과 분석

Fig. 4에서 KTX차량이 고속주행 시 차량사이에서 발생하는 80 H 성분의 공력소음은 차량사이의 불연

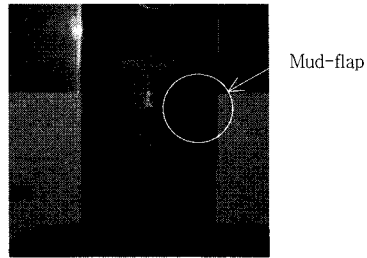


Fig. 12 Shape of mud-flap

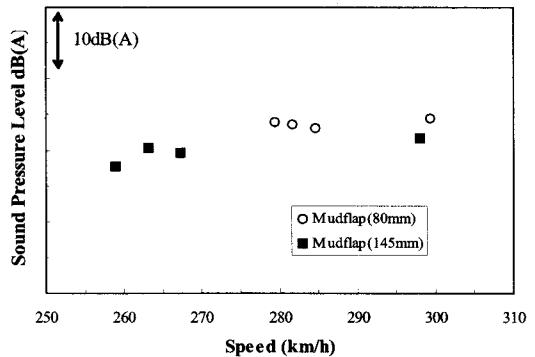


Fig. 13 Reduction effect of interior noise on modification of mud-flap length in tunnel with concreted track

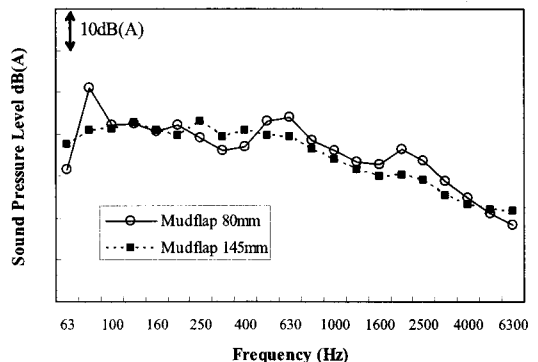


Fig. 14 Frequency analysis of interior noise in tunnel with concreted track

속면에서 차량의 주위를 따라 흐르는 유동의 변화에 의해서 발생하는 소음으로 이렇게 발생된 공력소음이 차체를 가진하여 실내소음을 증가시킬 수 있다. 따라서 Fig. 12와 같이 차량사이에 부속장치를 보호하기 위해서 설치한 머드플랩(mud-flap)의 길이변화가 공력소음에 영향을 미칠 것으로 판단하여 KTX제작자인 프랑스 알스톰(Alstom)사의 제안에 따라 길이변화에 대한 실내소음을 측정된 결과 머드플랩의 길이가 80H 성분의 실내소음에 영향을 미치는 것을 확인하였다⁽⁴⁾. 그 결과 콘크리트 궤도 터널 주행 시 실내소음 저감 대책방안 가운데 차체간의 공력소음의 80 Hz 성분을 저감시키기 위해 머드플랩의 길이를 80 mm에서 145 mm로 변경하여 동일한 차량에 대해서 소음저감 효과시험을 실시하였다. Fig. 13은 콘크리트 궤도 터널 구간 주행 시 속도에 대한 머드플랩 길이 변화에 따른 실내소음 저감효과를 나타내며, Fig. 14는 약 300 km/h 주행 시 Fig. 13의 측정 결과를 주파수 분석한 결과이다. 이 결과로부터 머드플랩의 길이변화에 의해서 80 Hz 성분의 소음레벨이 감소를 하며, 전체적으로 약 3 dB(A)의 실내소음 저감효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 경부고속철도 구간의 콘크리트궤도 터널 통과 시 발생하는 KTX차량의 실내소음의 특성을 분석하여 발생 원인을 검토한 결과 다음과 같다.

- (1) 자갈궤도 터널보다 콘크리트궤도 터널에서 KTX 차량의 실내소음이 약 4~5 dB(A) 높게 나타났으며, 이러한 원인은 80 Hz의 주파수 성분의 소음이 급격히 증가하기 때문이다.
- (2) 콘크리트궤도 터널 통과 시 차량 부위별 소음을 측정된 결과 차량사이에서 발생하는 소음이 실내소음과 유사하게 80 Hz의 주파수 성분이 높게 나타났다.
- (3) 터널 내 차량통과 시 차체의 진동레벨을 측정된 결과 차체 바닥, 측벽, 창문의 순서로 진동레벨이 높았으며, 자갈궤도보다 콘크리트궤도에서 측벽의 진동레벨이 약 5~6 dB정도 높게 나타났다.
- (4) 콘크리트 터널 통과 시 KTX 실내소음은 창문

아래에서 실내소음레벨이 가장 크게 나타나고, 점차 중앙으로 이동할수록 소음레벨이 작아지며, 이러한 분포는 차량의 실내 음향모드와 관계가 있는 것으로 생각된다.

(5) KTX차량의 측벽에 대한 주파수 응답함수를 측정된 결과 측벽은 약 75~85 Hz, 창문은 약 65 Hz 영역에서 공진주파수가 나타났다.

(6) KTX주행 시 터널 내 차량 외부소음 레벨은 자갈궤도터널보다 콘크리트궤도터널에서 약 4~6 dB(A)정도 높게 나타났다.

(7) 콘크리트궤도 터널 주행 시 KTX차량에 대한 실내소음의 발생원인은 차륜과 레일에 의한 전동음과 차량사이에서 발생하는 공력소음이 차체를 가진하여 차체의 측벽과 창문의 고유진동수영역에서 진동이 증가하면서 이 진동에 의해서 발생된 소음이 실내 음향모드의 공명주파수와 일치하여 80 Hz의 저주파영역에서 소음이 발생하는 것으로 판단된다.

(8) 차량사이의 공력소음에 의해서 발생하는 80 Hz성분의 소음레벨을 저감시켜 실내소음을 저감시키기 위하여 차량사이에 설치한 머드플랩의 길이를 80 mm에서 145 mm로 변경한 결과 실내소음의 80 Hz 성분의 소음레벨이 감소하였으며, 전체적으로 약 3 dB(A) 정도의 실내소음 저감효과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, J. C., 2004, "Basic Research to Find out Reduction Method of Interior Noise for KTX in Tunnel", Research Report, Korea Railroad Research Institute.
- (2) Kouichi. Kubomura, 1997, "Development of Noise Absorbing Material for Track", WCRR' 97, pp. 307~313.
- (3) Park, C. H., 1998, "Development of Reduction Technology and Analysis for Noise/Vibration", Research Report, InHa University.
- (4) Kim, J. C., 2005, "Analysis of Interior Noise for KTX in Tunnel with Concreted Track", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 25~28.