

고속철도 소음원의 위치규명에 관한 고찰

Investigation of noise source localization on High speed train

고효인* 유원희** 이준석**
Koh, Hyo-In You, Won-Hee Lee, Jun-Seok

ABSTRACT

This paper deals with the noise source localization of the Korean High Speed Train (KTX) at the speed of 300 km/h. Using Microfonarray system and beamforming technology typical pass-by noise sources and their frequency characteristics are investigated. It is primarily aimed at investigating the location and characteristics of the high speed train emission. The results from the microphone array tests are also analyzed in relation to the remarks from analytic studies and experimental investigations on the high speed train that have been done with the intention of understanding the interior noise mechanism. The acoustical image shows the low frequency noise sources mainly at the position of the under part of the train at high speeds and the related source mechanism are discussed.

1. 서 론

본 논문에서는 경부고속철도 구간에서의 KTX 운행소음의 위치규명을 위해 시도되었던 마이크로폰 어레이 시험결과를 중심으로 고속철도 소음원의 위치규명 방법과 그 결과에 대해 분석하였다.

일반적으로 철도차량의 운행 시 방사되는 소음에 관한 측정과 모델링, 해석하는 기술 등은 이미 연구 개발되어 상용화되어 있으며, 이는 차륜과 레일의 접촉, 차량 및 궤도의 동역학적 행동을 고려하여 계산되고 있다. 최근에는 곡선부 및 제동 시의 발생하는 고주파수 영역의 소음 발생역학을 모델링하고 예측하기 위해 차륜과 레일의 접촉과 마모, 상대적 변위로 인해 야기되는 역학적 계산이 모델 및 해석 Tool에 추가, 향상되고 있다.

열차의 고속 운행시의 소음원은 그 위치가 산재해 있고, 공력에 기인하는 소음원들로 인해 측정 및 분석이 복잡하므로 다수의 마이크로 이루어진 어레이와 이를 분석하고 시각화하는 기술이 적용되고 있다. 이는 고속철도의 소음 특성을 고려한 정확한 예측기준과 이를 근거로 한 저감 시뮬레이션 등에 요구되는 핵심적인 자료이며, 독일을 비롯한 고속철도 국가에서는 수년간의 축적된 자료를 이용하여 보다 정확한 고속철도 소음의 예측과 기준보완, 저감 시뮬레이션 Tool 에 계속적으로 개선중에 있다.

마이크로폰 어레이를 이용한 기술은 속도별 주파수별 세부 소음원을 시각화하는 것을 가능하게 하지만 운행속도와 분석하고자 하는 주파수 해상도 관련하여 제한이 있다. 본문에서는 300 km/h 로 운행하는 KTX 차량의 소음원을 측정된 결과를 소개하며, 다른 고속열차에 관한 측정 결과 및 KTX 차량의 진동 측정 결과등과 관련하여 분석하였다.

* 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부, 정희원

E-mail : hikoh@krri.re.kr

TEL : (031)460-5207 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

2. 본 문

2.1 유럽 고속철도 운행 시 방사 소음

차륜과 레일의 접촉과 진동으로 인해 방사되고, 속도에 따라서 증가하는 전동 소음에 관해서는 속도 S 에 대해 그 주요 속도영역이 $30\log(S/S_{ref})$ 로 특성지어진다고 알려져 있으며, 주요방사 소음원이 전동소음에서 공력소음으로 전이하는 속도 영역은 그 증가 기울기가 $70\log(S/S_{ref})$ 로 변화하는 지점으로 보고 있고, 이는 270 km/h ~320 km/h 로 분석되어진다 [1]. 그러나 최근에는 350 km/h ~450 km/h급의 고속열차가 개발완료 되는 시점으로, 소음의 예측과 저감기술 개발을 위해서 속도에 따른 추가적 연구가 진행되고 있으며, 200 km/h, 300 km/h, 350 km/h 열차의 연구 결과[2] 300 km/h 이상의 속도 범주까지 전동소음 기울기 경향이 유지되는가 하면 차륜의 (답면 제동)상태등의 운행조건에 따라서 기준법칙보다 더 상당히 낮은 저속에서 공력소음이 주도적으로 방사하는 속도구간이 시작되기도 함을 밝혔다. 그 오차범위는 25 % 에 달하고 이는 차량 및 제동, 차륜 등의 기술개발에 따른 소음방사 측정 및 예측 기술이 지속적으로 세분화되고 향상되어야 함을 말한다고 할 수 있다.

최근 유럽의 고속열차에 관한 측정 결과 330 km/h 이상 운행 시 전두부 차량에서 방사하는 소음은 나머지 여러 량의 객차가 방사하는 소음보다 높아지고 TGV 차량의 경우 첫 번째 대차에서 250 km/h 이상 350 km/h 까지의 속도에서 발생하는 400 Hz~800 Hz, 1000 Hz ~ 1600 Hz 영역의 공력소음으로 분석되어 지고 있다. 300 km/h 이상 운행 시 전두부 파워차량에서 방사하는 소음은 63 Hz ~ 200 Hz 사이, 250 Hz 영역이 특별히 부각된다.

객차 부분의 주요 소음원은 두 개의 피크로 특성지어지며, 이 중 레도방사 소음이 주를 이루는 800 Hz ~ 1000 Hz 소음은 280 km/h 이상이 되면서 공력소음과 중첩이 되어 광역주파수 특성으로 혼합되어 나타나며, 차륜의 방사 소음이 주가 되는 2000 Hz ~2500 Hz 는 300 km/h ~ 350 km/h 속도하에서도 특별히 변화가 없이 높게 방사되는 것으로 나타났다. 63~80 Hz 영역은 후두부 차량을 포함하여 전 차량에 대해 가장 높은 레벨의 소음원으로 작용하며, 속도에 의존하여 다른 주파수 영역보다 큰 폭으로 증가함을 나타냈다.

차량별로 350 km/h 속도 운행 시 나타나는 소음의 특성을 요약하면 전두부 차량에서 1 kHz~2 kHz, 객차에서 2 kHz~4 kHz 의 소음이, 동력객차에서 2 kHz 영역의 소음, 200 Hz 이하 저주파수 소음은 모든 객차에서 발생하는 것으로 나타났다[2].

고속열차 의 운행 시 방사하는 소음을 다수의 마이크로폰 어레이로 측정된 사례를 분석하여 보면, 다음의 표와 같다.

도표 1. 마이크로폰 어레이를 이용한 고속철도 차량 방사 소음의 측정 예

차량	운행속도(km/h)	마이크 갯수	주파수 범위(Hz)	비고
TGV-Duplex	300	29	200~4000	전반적 소음원
ICE		90	200~3400	전반적 소음원
ICE 1	277.6	29	280~4500	집전계 소음원
ICE 1	200	15	500~4500	방음차륜의 소음방사 저감 검증
ICE/V	280	29	560~710	후두부 차량과 동력객차 영역

2.2 KTX 차량 소음원 위치 및 특성

2.2.1 측정방법

300 km/h 로 운행하는 국내 고속차량(KTX, 한국형 고속열차 G7)의 소음원 위치 규명 계측은 본원의 고속철도 사업단과 (주)SM인스트루먼트와의 공동 작업으로 이루어졌으며, 측정방법의 개요는 다음과 같다.

다수의 어레이로 이루어진 마이크로부터 측정면을 통과하는 열차로 인한 음압이 측정되며, 빔형성 방법에 의해 각각의 위치에서의 음원의 크기가 계산된다. 빔형성 방법은 일정한 형태로 가정한 소음원을 근거리 특정 위치에 소음원이 있다고 전제하고, 이 소음원이 형성하는 음장을 실제 소음원이 형성한 음장과 비교, 소음원을 이동시켜 가며 반복을 하였을 때, 실제 소음원에 의해 형성되는 음장과 제일 유사한 경우에 가상의 소음원의 위치를 실제 소음원의 위치라고 추정한다. 다수의 마이크로폰은 음원이 이동 중일 때 위치별 음원을 계산하며, 이 음원의 크기는 음원과 마이크로폰과의 거리, 시간, 음원의 이동속도에 의존하여 구해진다. 해상도는 근접한 음원을 분리할 수 있는 능력을 의미하며, 빔의 폭 (beam width)으로 정의할 수 있다. 빔 폭 b (m)는 다음(식 (1))과 같이 표현된다.

$$b = r_0 \frac{\lambda/2}{D} \quad (1)$$

여기에서 λ 는 음의 파장을 나타낸다. 음원이 최소 $2b$ 이상은 떨어져 있어야지 구분이 가능하다.



그림 1 방사형 마이크로폰 어레이

시험에 사용된 마이크로폰 어레이(Microphone Array)는 방사형 어레이로 48개의 마이크로폰을 장착하였다(그림 1). 어레이의 직경은 2.4m이고 마이크로폰의 간격은 0.1~0.2m의 간격을 유지하고 있으며 안쪽의 간격은 넓고 바깥쪽은 좁다. 어레이는 측정하고자 하는 대상의 높이에 맞게 비계에 설치하였다. 어레이는 선로로부터 5m 떨어진 곳에 설치되었다. 높이는 객차의 높이 약 2.8m와 전동차의 높이 약 3.5m를 고려하여 선로로부터 약 2m와 1.6m 높이 두 종류에 비계를 이용하여 설치하였다. 시험 장소는 오송역 부근에서 수행되었고 경부선 하행 방향으로 통과하는 여섯 차량에 대해 분석하였다(도표 2).

도표 2. 측정된 차량의 현황

NO	Time	Train Name	Speed(km/h)	File Name
1	10:45 AM	KTX	294.0	Train01
2	10:57 AM	KTX	289.1	Train02
3	11:08 AM	KTX	-	Train03
4	11:44 AM	KTX	290.2	Train04
5	12:04 PM	KTX	290.8	Train05
6	12:08 PM	KTX	287.3	Train06

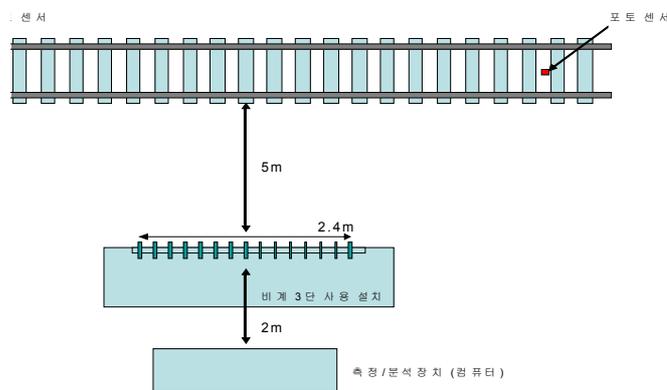


그림 3 방사형 마이크로폰 어레이 위치도

2.2.2 주파수별 특성

1) 70 Hz ~ 90 Hz, 최소레벨~최대레벨 간격 : 10 dB

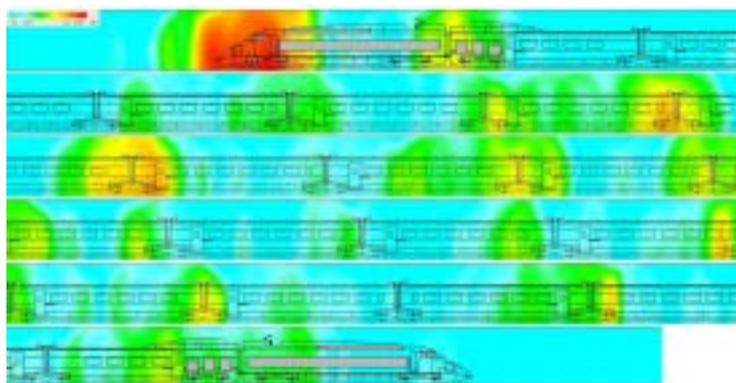


그림 4 KTX 290.2 km/h 운행 시의 70 Hz ~ 90 Hz 영역의 소음원 위치

여섯 차량의 70 Hz ~ 90 Hz 분석 결과 소음원은 전두부 차량과 동력객차의 대차 부분과 연결부, 후두부 차량과 동력객차와의 연결부 및 대차에서 공통적으로 높게 나타나며, 객차 부분에서는 주로 차륜이나 대차를 중심으로 주변 차체까지 소음을 방사하는 것으로 볼 수 있다. 이 현상은 각 단위차량 별로 차이가 있으며, 이는 공력소음과 전동소음의 중첩으로 보나, 전동소음인 경우 차륜의 마모나 삭정상태에 의한 차이일 수도 있다. 이보다 소음레벨은 적으나 또한 최고 소음레벨보다 10 dB 낮은 범위내에서 나타나는 소음원으로는 차륜 부분의 방사 소음레벨이 높은 차량 차체를 생각할 수 있다. 그러나 70

Hz ~ 90 Hz 범위 내에서 마이크로폰 어레이로 측정되고 분석되어지는 소음의 분해능은 식 (1)과 그림 3 에 따르면 4 m ~ 5 m 이므로 KTX 열차의 한 량이 19.8 m 정도인 것을 고려할 때에 이 주파수 영역의 경우 소음원 위치에 오차가 포함되어 있을 수 있고, 이보다 더 구체적인 위치의 규명은 의미가 없다고 본다.

2) 120 Hz ~ 130 Hz, 최소레벨~최대레벨 간격 : 12 dB

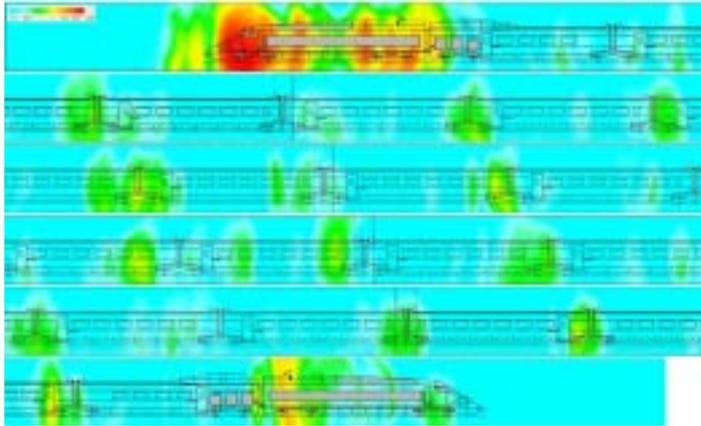


그림 5 KTX 289.1 km/h 운행 시의 120 Hz ~ 130 Hz 영역의 소음원 위치

6 개의 차량별로 차이가 있으나, 전반적으로 120 Hz ~ 130 Hz 주파수 영역에서는 전두부 차량의 머리 부분과 대차 및 차륜 영역, 전두부 및 후두부 차량의 판토티그래프 부분이 가장 높은 레벨을 나타내고 있으며, 객차 부분은 객차 연결부와 대차 부분, 후두부 차량의 대차 부분이 그 다음으로 소음을 방사하는 부분으로 분석되었다. 이 주파수 영역에서 식(1)에 따른 분해능은 2.7 m ~ 2.9 m 이다.

3) 240 Hz ~ 260 Hz, 최소레벨~최대레벨 간격 : 12 dB

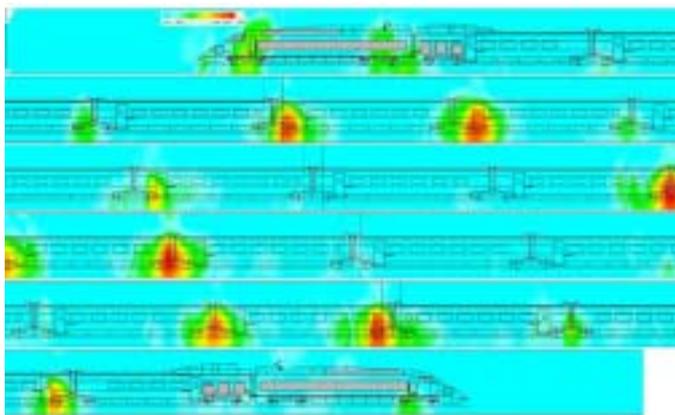


그림 6 KTX 294 km/h 운행 시의 240 Hz ~ 260 Hz 영역의 소음원 위치

240 Hz ~ 260 Hz 주파수 영역의 경우 본 어레이 시험을 통한 분해능은 1.3 m ~ 1.5 m 사이이며, 그림 6에서 보는 바와 같이 전두부, 객차, 후두부에 이르기까지 속도 294 km/h 로 운행 시 소음원이 최고 12 dB 범위 내에서는 대차와 윤축 부분에 집중되어 있음을 볼 수 있다.

4) 1 kHz ~ 2.5 kHz, 최소레벨~최대레벨 간격 : 12 dB

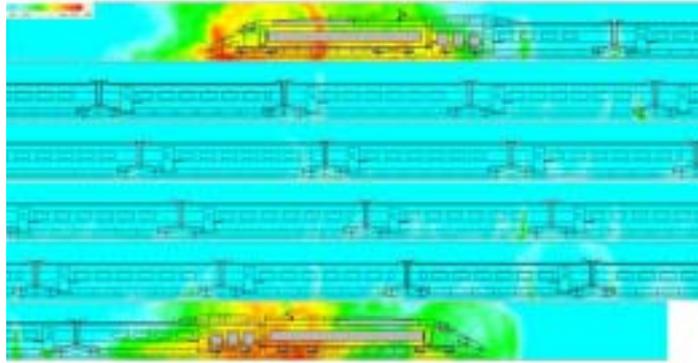


그림 7 KTX 290.2 km/h 운행 시의 1 kHz ~ 2.5 kHz 영역의 소음원 위치

1 kHz ~ 2.5 kHz 영역은 290 km/h 운행 시 주로 전두부 차량과 후두부 차량에서 발생하는 공력소음이 주요 소음원임을 나타내며, 이 주파수 영역 분해능은 28 cm ~ 35 cm 로구체적으로는 전두부의 가장 앞부분의 하부와 후두부 차량과 동력객차 연결부의 하부 그리고 후두부의 판토틀라프 영역으로 집약하여 볼 수 있으며, 이는 분석한 6 개의 편성에서 거의 동일하게 나타났다.

5) 2.5 kHz ~ 4.5 kHz, 최소레벨~최대레벨 간격 : 12 dB

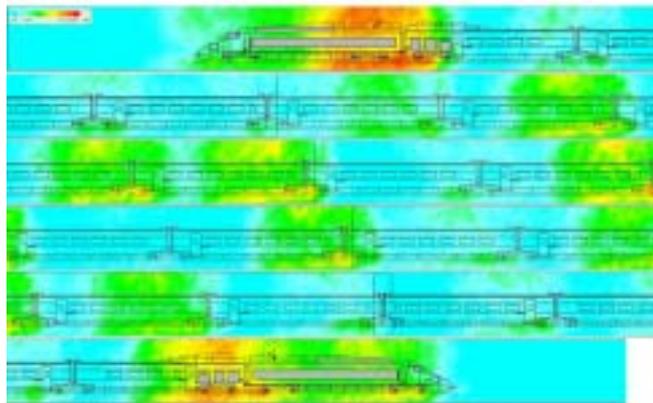


그림 8 KTX 289.1 km/h 운행 시의 2.5 kHz ~ 4.5 kHz 영역의 소음원 위치

그림 8에서 보듯이 2.5 kHz ~ 4.5 kHz 사이에서 방사하는 주요 소음원은 크게 전두부와 동력객차 부분, 후두부쪽의 동력객차 부분의 차량하부와 차체 지붕부분에 위치해 있음을 볼 수 있다. 그 다음으로 높은 소음 레벨은 각 객차간의 대차 및 차륜부와 연결부 상부를 중심으로 위쪽으로 방사되고 있음을 볼 수 있다. 편성 별로 그림 8 과는 달리 후두부 동력객차쪽에서 가장 높은 레벨을 나타내는 경우도 있으며, 분석된 6 개의 편성사이의 공통된 것은 하부(대차와 윤축 부분) 소음레벨이 높게 나타나는 부분은 연결부를 지나 지붕 위쪽 방향으로도 높은 소음을 방사한다는 현상이다. 이 주파수 영역은 통상적으로 철도차량의 차륜의 특성 방사 모드로 인한 소음으로 알려져 있는데, 이와 아울러 289 km/h 로 운행 시 차량의 상부 불연속면에 의한 공력소음이 또한 지배적인 주파수 영역임을 알 수 있다.

2.3 실내소음의 영향 관련

그림 9 에서는 231km/h 로 개활지를 운행하는 KTX 차량 실차시험 결과 중 일부를 나타내었다. 우선 위에서 기술한 마이크론 어레이 시험과는 측정 장소가 다르고, 운행속도가 상이하므로, 직접적으로 그 경향을 비교할 수 없다. 또한 소음 및 진동 측정을 통해 소음원 및 전달경로를 규명하고자 한다면 다수의 센서와 다수의 측정결과를 통해 결론을 내는 것이 합리적이므로 본 결과는 위의 결과와 관련하여 하나의 참고자료로 분석하고자 한다. 객차 실내 소음은 객차 중앙에서 소음을 측정하였으며, 대차 및 윤축의 측정 위치는 그림 9에 나타내었다. 그림 10 에는 객차실내 소음 및 차량 진동값의 주파수 특성을 나타내었다.

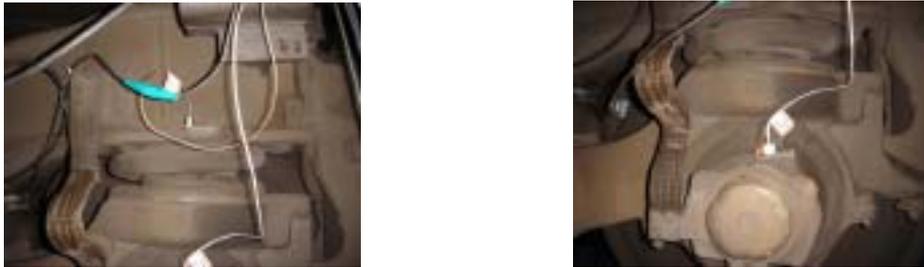


그림 9 KTX 윤축 및 대차 진동 측정 위치

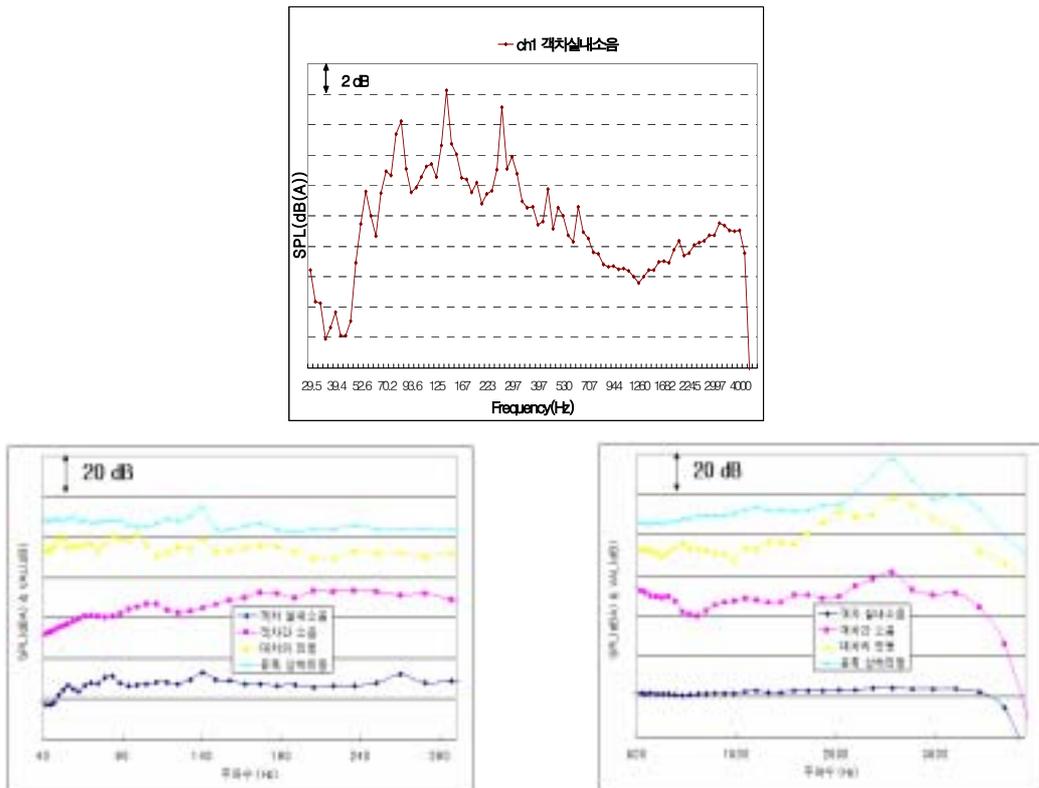


그림 10 231km/h 로 개활지 운행하는 KTX 의 소음 및 진동 특성

그림 10에서 개활지 운행 실내소음의 주파수 특성을 보면 1/12 옥타브 분석의 경우 크게 83 Hz, 140 Hz, 264 Hz 영역이며, 83 Hz 영역은 대차의 진동이, 140 Hz 영역은 윤축의 상하진동이 주위의 영역보다 높음을 볼 수 있다. 이는 위에서 마이크로폰 어레이로 측정하여 규명한 소음원 영역과도 연관성이 있음을 볼 수 있다. 그림 6에서 260 Hz 부근의 소음원 역시 윤축 혹은 대차 영역에 집중되어 있음을 관찰하였으나, 그림 10에서 측정한 윤축이나 대차의 위치에서는 나타나지 않았다. 그림 7 과 그림

10에서 모두 1 kHz~ 2 kHz 영역의 소음은 객차 부분보다는 전두부나 후두부 동력객차의 하부와 상부로 방사하는 것을 볼 수 있고, 3 kHz 영역의 소음은 실내소음에는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보이나, 그림 7에서 나타나는 공력소음 외에 윤축과 대차의 진동, 객차 간 공간의 소음에서 나타남을 확인할 수 있다(그림 10).

3. 결론

고속차량의 속도는 300 km/h 를 넘어 450 km/h 까지의 목표로 개발되고 시험되는 추세에 있다. 300 km/h 이상으로 열차가 운행하면 차량 외부의 각종 불연속면에 의한 공력소음이 두드러져 차내 및 차량 외부로의 소음방사 저감을 위 진동소음과 공력소음의 정확한 기여도 규명과 예측을 위한 전문적 소음원 연구가 추가되어야 한다. 이미 400 km/h 급 열차를 개발한 국가들에서는 속도의 증감과 차량기술이 다양화됨에 따라서 통상적으로 이해되었던 속도에 대한 진동소음과 공력소음의 전이구간에 대한 재고찰 및 다양한 추가 연구가 진행되어 예측 기준과 시뮬레이션 자료로 활용하고 있다. 본 논문에서는 300 km/h 로 통과하는 KTX 의 방사소음원의 위치를 마이크로폰 어레이와 빔형성 방법을 활용하여 규명하였고, 특히 지금까지 해외에서 흔히 시도되지 않았던 200 Hz 이하의 주파수 영역까지 소음원의 특성을 규명하고자 하였다. KTX 상업운행 직후 높은 소음 레벨을 보였던 실내소음의 300 Hz 이하의 주요 소음 영역은 본 차외소음 방사시험에서는 주로 객차 간 연결부와 관절대차 영역에 집중되어 있음을 볼 수 있었으며, 고속 운행 시 공력소음의 주요 발원인 전두부와 후두부의 주파수 별 소음원의 위치를 규명할 수 있었다. 또한 고속 운행 시 공력소음과 진동소음이 함께 나타나는 주파수 영역에서는 각각의 기여도를 구분하는 연구가 추후에 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Federal railroad administration, (1998), "High speed ground transportation Noise and vibration impact assessment"
 2. C. Mellet, F. Letourneaux, F. Poisson, C. Talotte, (2006), "High speed train noise emission : latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution", Journal of Sound and Vibration 293 (2006) 535-546
- Vol.20.No.1,pp.1-8