

고속철도 차량의 실내소음 해석: SEA 응용

Analysis of Interior Noise of High-Speed Train via SEA

김태민†
Kim, Tae-Min

김정태*
Kim, Jung-Tae

김정수**
Kim, Jung-Soo

ABSTRACT

The interior noise of the High Speed Train(HST) is analyzed by applying the statistical energy analysis (SEA) method. The interior of each vehicle is divided lengthwise into nine cavities. Since the rolling noise and aerodynamics noise are expected to be dominant noise sources, they are treated as the noise sources in the model. To further simplify the model, curtains and seats are excluded. The simulation runs involving one-car, three-car and five-car trains are conducted. The maximum predicted noise level is 98.4dB. The results also show that the predicted noise levels are within 0.23% of each other. The results imply that it is not necessary to estimate the interior noise of the train by constructing multiple-car train models. The noise estimate based on just one-car train can be optimal with respect to the computational effort and modeling time.

Key words : SEA(통계적에너지해석법), High Speed Train, Rolling Noise

1. 서 론

현재 개발 중인 고속 철도는 시속 400km를 목표로 연구되고 있으며 고속 철도의 실내소음은 주행 속도가 증가 될수록 급격하게 증가될 것으로 예상된다. 따라서 고속철도 차량의 실내소음에 대한 연구는 매우 중요하게 연구되고 있다.

차량의 실내 소음은 고속주행 시 차량표면에서 발생하는 난류의 경계층 소음원이 차체의 벽을 통과 한 후 나타나는 공력 소음 (aerodynamic noise), 차륜/레일의 접촉 시 발생하는 기계적 음원이 차체 외부 표면에 분포되면서 차체의 벽체를 통과한 후 나타나는 공기기인소음 (air-borne noise)과 차륜/레일 간의 접촉 시 발생하는 진동에너지가 차량바닥을 가진시킨 후 음향방사에 의해 나타나는 구조기인소음 (structure-bone noise)으로 분류되어 진다. 본 연구에서는 크게 세가지로 분류 되는 소음원 중에서 차륜/레일의 접촉 시 발생하는 구조기인소음은 저주파수대역에서 영향이 크고 상대적으로 전체 소음도에 미치는 영향이 작기 때문에 생략하고 상대적으로 영향이 큰 공기기인소음과 공력소음에 대한 영향만을 고려하기로 하였다.^(1,7)

본 연구에서는 통계적 에너지 해석법(Statistical Energy Analysis : SEA)을 사용하여 고속철도 차량을 모델링 하고 실내소음을 분석하였다.⁽⁵⁾ 또한 1개 차량, 3개 차량과 5개 차량으로 편성된 시제차를 각각 모델링 하여 해석하고 결과를 비교 분석하였다. 이 결과를 통하여 외부 소음 유입 기여도가 큰 부분을 찾아 재질변경 및 구조변경을 통하여 소음 저감 대책을 제시하고자 하였다. 또한 단일 차량과

† 홍익대학교 대학원 기계공학과, 정회원
E-mail : wowbranden@hotmail.com
TEL : (02)320-1113 FAX : (02)320-1113

* 홍익대학교 기계시스템디자인 공학과
** 홍익대학교 기계시스템디자인 공학과

복수 차량의 실내 소음도 해석 값과 차량 실내의 소음분포도를 비교 분석하여 고속철도 차량의 효율적인 실내소음 해석 방법을 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 SEA 해석을 위한 모델링

고속철도차량의 모델은 통계적 에너지 해석법을 적용한 상용 소프트웨어인 VA one(구 Auto SEA)를 이용하여 열차 내부에 5개의 sub-system으로 구성되도록 모델링하였다.⁽²⁾ 그림 1은 VA one을 통하여 모델링 된 고속철도차량을 나타낸다. 본 연구에는 상대적으로 영향이 적은 구조기인소음을 무시하고 공기기인소음과 공력소음만을 열차의 소음원으로 고려하였다. 따라서 열차 하단과 열차를 둘러싸는 cavity를 만들어 소음원을 넣을 수 있도록 모델링 하였다. 공력소음은 열차를 길이 방향으로 둘러싸는 cavity에 입력하였고 공기기인소음은 열차 하부에 모델링 된 cavity에 입력하여 외부 소음을 구연하도록 하였다.⁽⁸⁾(그림 3)

단일 차량과 복수 차량의 내부 소음도를 비교하기 위하여 한 개의 차량 외에 세 개의 차량, 다섯 개의 차량을 추가적으로 모델링 하였으며 세부 모델은 Appendix A에 나타나 있다. 이 때 열차와 열차 간격은 열차 크기에 비해 매우 작기 때문에 생략하여 모델링 하였다. 소음 저감 효과가 예상되나 모델링을 간단하게 하기 위하여 시트 및 커튼 등은 생략하였다.

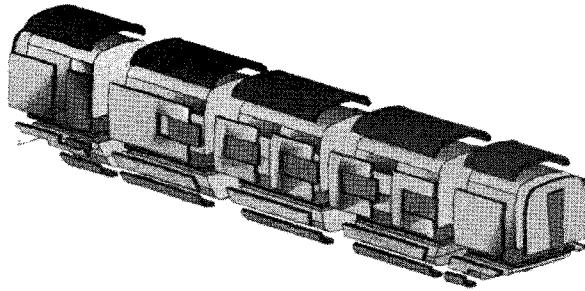


그림1. SEA analysis model of a high speed train

본 연구에는 고속철도차량의 coupling loss factor와 damping loss factor를 실험적으로 구하지 않고 동일한 열차를 대상으로 저자가 참여한 선행 연구에서 이미 구해진 열차의 Transmission Loss(TL)를 사용하였다.⁽¹⁾ 그림 2에서 볼 수 있듯이 고속철도차량은 벽면, 천장, 바닥면, 유리창으로 나누어서 각각의 TL값을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$TL_R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_R} \right) \quad (1)$$

$$\tau_R = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[2 \int_0^{\pi/2} \tau_{\theta\phi} \cos\theta \sin\theta d\theta \right] d\phi \quad (2)$$

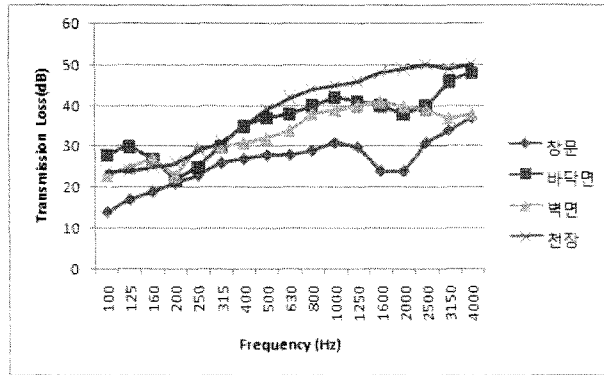


그림2. Transmission Loss of High Speed Train

2.2 소음원 파악

고속철도의 실내소음은 크게 구조기인소음, 공력소음, 공기기인소음원으로 부터 소음이 유입되어 이루어진다. 본 연구에는 저주파수대역에 분포하고 상대적으로 전체 소음도에 미치는 영향이 적은 구조기인소음을 무시하고 공기기인소음과 공력소음을 열차의 소음원으로 고려하였다.⁽¹⁾ 그림 3에서 볼 수 있듯이 공력소음은 열차의 길이 방향으로 둘러싸는 3개의 cavity에 위치하도록 하였고 공기기인소음은 열차 하부에 구성되는 cavity에 위치하도록 하여 고속철도차량의 외부소음원을 구현하도록 하였다. 그림 4의 소음원은 선행 연구에서 계산된 차량이 300km/h 주행 시 발생하는 공기기인소음 계산 값⁽³⁾과 공력소음 계산 값⁽⁴⁾을 사용하였다.

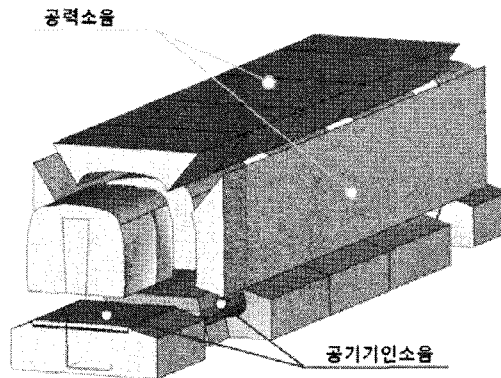


그림3. Noise source modeling of High Speed Train

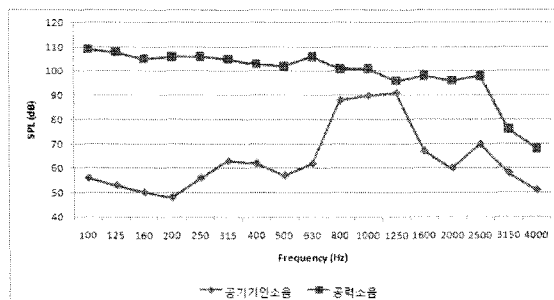


그림4. Estimated Sound pressure level of noise sources

2.3 실내소음 해석

고속철도차량의 실내 소음도를 SEA 기법을 이용하여 해석하였다. 그림 5는 단일 차량으로 해석을 수행하였을 때의 각 내부 cavity의 소음도를 비교한 것이다. 다섯 개의 내부 공간이 대체적으로 비슷한 경향을 갖는 것을 볼 수 있으며 일반적으로 저주파 영역이 고주파 영역보다 높은 소음 레벨을 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 고려한 소음원 중에서는 공기기인소음보다 공력소음이 실내소음에 지배적인 영향을 갖는다고 볼 수 있다. 공력소음은 모든 주파수 영역에서 공기기인소음보다 소음 레벨이 높으며 특히 저주파대역에서 약 55 dB만큼 높다. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 내부 소음도는 지배적인 소음원인 공력소음과 이 소음에 의한 창문의 투과손실에 의하여 결정된다. 이렇듯 주 소음원인 공력소음이 창문을 통해서 들어가기 때문에 소음저감을 위해서는 창문의 재질 및 구조를 우선적으로 개선하여야 한다.

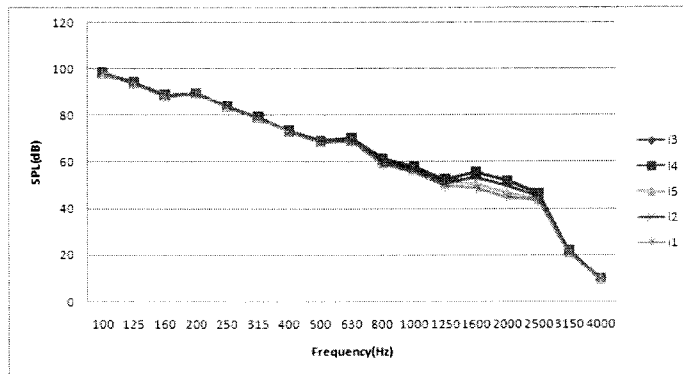


그림5. Simulated interior noise of High Speed Train

Appendix B에 세 가지 경우의 각 주파수 별 내부소음도 SPL 값과 1250 Hz 일 때의 thermogram을 나타내고 있다. Thermogram으로 표현 된 결과는 세 가지 경우 모두 동일한 패턴을 보이고 있다. 그림 6은 Case 1를 기준으로 Case 2와 Case 3의 가운데 차량의 내부 소음도를 비교한 결과이다. 세 가지 경우의 내부 소음도 차이는 3150, 4000 Hz 영역에서의 가장 크다. 모든 주파수 영역에서 매우 근소한 차이를 보이며 최대 0.23% (0.02dB) 차이를 보인다. 즉, 단일 차량과 복수 차량의 SEA해석 결과는 매우 유사하였다. 따라서 단일 차량의 해석 결과는 복수 차량의 결과와 큰 차이가 없기 때문에 실제 차량의 내부 소음도 예측에 단일차량 모델에 기반한 해석 결과를 사용할 수 있다고 판단된다.

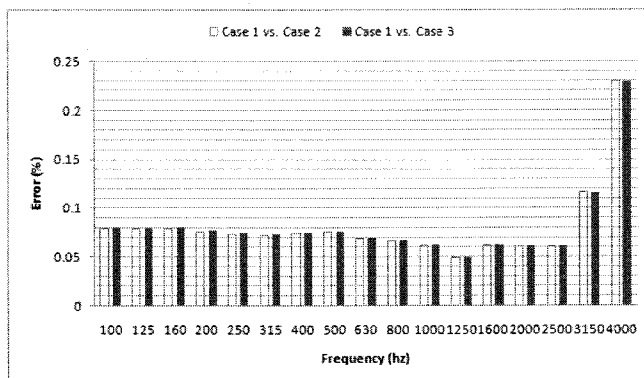


그림6. Single-car compare interior noise with multiple-car

3. 결론

SEA 기법을 이용한 고속철도차량의 내부소음 해석을 통하여 다음의 결론이 도출 되었다.

- 최대 내부 소음도는 98.4dB로 해석되었다. 이 소음도는 탑승자에게 매우 시끄럽게 느껴지며 불편함을 느끼게 하기 때문에 실내소음을 줄이기 위한 대책이 필요하다. 또한 저주파영역에서 높은 소음도를 갖으며 고주파 영역은 상대적으로 적은 소음도를 갖는 것을 관찰할 수 있었다.
- 창문을 통하여 들어오는 외부 소음이 가장 많다. 따라서 내부소음도 저감을 위해서는 우선적으로 창문의 투과손실을 증가시켜 내부소음도를 낮춰야 한다.
- 세 가지 차량 편성의 소음도 결과는 최대 0.23% (0.02dB)정도의 차이를 보이며 매우 유사하였다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 단일 차량으로 구성된 해석 모델 사용이 복수 차량의 결과를 대표하며 단일 차량으로 구성된 해석 모델 사용이 가능하다.
- 실제 고속 차량 내부에는 소음 감쇠에 영향을 미칠 것으로 예상되는 커튼, 의자, 카펫 등 여러 인자들이 존재하기 때문에 이를 고려하여 모델링 하는 것이 보다 정확한 결과가 나올 것으로 예상된다. 하지만 본 연구에는 모델링을 단순화시키기 위하여 이를 생략하였다. 추후 연구에는 이를 보완할 수 있는 방법이 필요하다고 판단되며 이 인자들은 실내소음도를 어느 정도 낮출 것으로 예상된다.

감사의 글

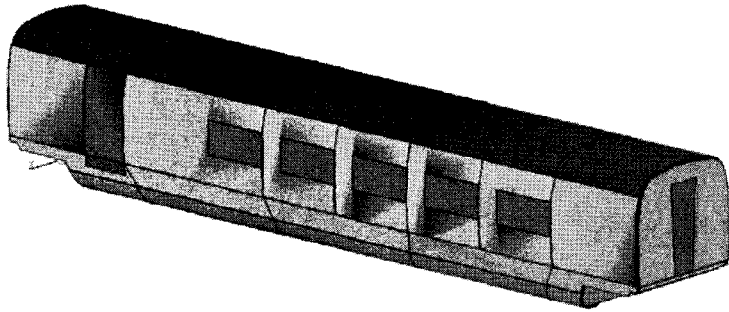
본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(차세대고속철도기술개발, 실내의 소음저감 기술 과제)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

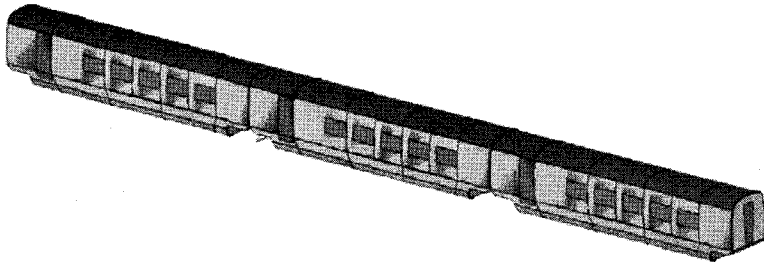
1. 박철휘, 이우식, 김정태 외 (1998), “진동소음해석 및 저감기술개발, 2차년도 연차보고서”, 건설교통부, “제5장 고속전철 차량 실내소음 I : 실험해석기법 개발”
2. 김재철, 이찬우 (2004), “통계적 에너지 해석법을 이용한 KTX차량의 실내소음 해석”, 한국철도학회, 춘계학술대회논문집, pp.23-28.
3. 김관주, 양윤석 (1999), “한국형 고속전철의 진동소음 예측에 관한 연구”, 과학기술연구논문집 10(A)('99.12) pp.661-677
4. 김태호, 박준홍 (2006), “풍동을 이용한 고속철의 차간 공간에서의 공력 소음 측정 및 특성 분석”, 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, 단일호
5. Lyon, R. H. (1975), “Statistical Energy Analysis of Dynamical System : Theory and Application.”, MIT press, Chap. 4
6. 윤태중 (2002), “통계적 에너지 해석법을 이용한 한국형 고속철도 차량 벽면의 투과손실 값 예측 및 실험적 검증 연구”, 석사학위논문, 홍익대학교
7. 김정태, 전형욱 (1998), “고속철도의 실내소음 : 최대값과 최소값”, 한국철도학회, 춘계학술대회논문집, pp.241-248.
8. ESI, “AUTOSEA2 User's Guide Rev.4”

Appendix A - 고속철도 SEA 해석 모델

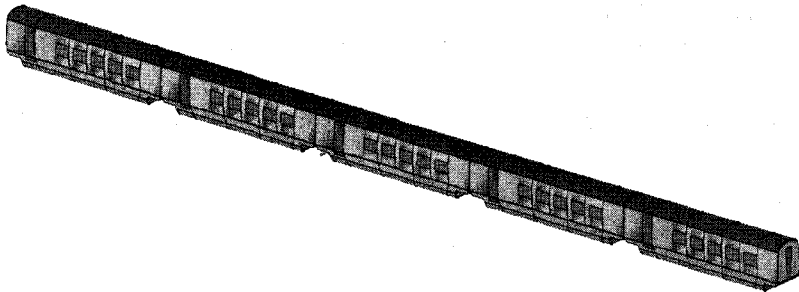
VA one에서 모델링 된 세 가지 case의 SEA 해석 모델로서 (a) 단일 차량(single-vehicle unit) 편성, (b) 세 차량(three-vehicle unit) 편성, (c) 다섯 차량(five-vehicle unit) 편성으로 분류된다.



(a) Case 1: Single-vehicle unit



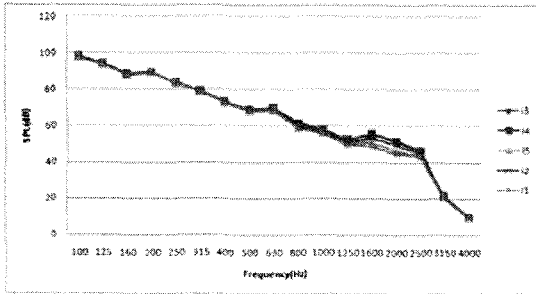
(b) Case 2: Three-vehicle unit



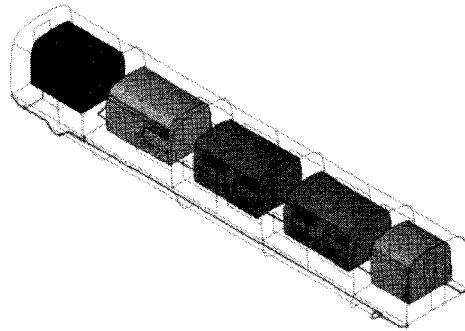
(c) Case 3: Five-vehicle unit

Appendix B - 고속철도 차량의 내부 소음도 결과

통계적 에너지 해석 기법(SEA)을 이용하여 해석된 결과는 아래와 같다. 주파수 별 내부소음도 SPL 값과 1250 Hz 일 때의 thermogram으로 구성되어있다. Thermogram으로 표현 된 결과는 세 가지 경우 모두 동일한 소음도 패턴을 보이고 있다.

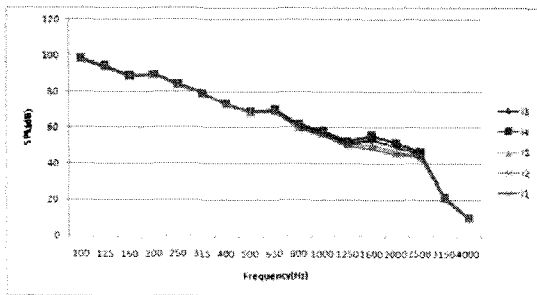


a.1 Sound Pressure Level

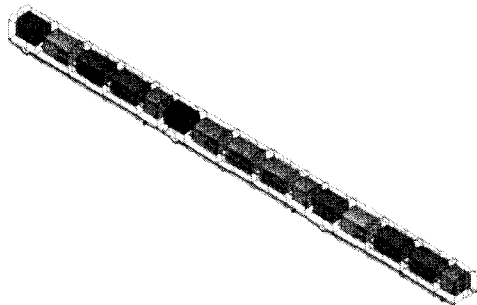


a.2 Contour of results at 1250Hz

(a) Case 1: Single-vehicle unit

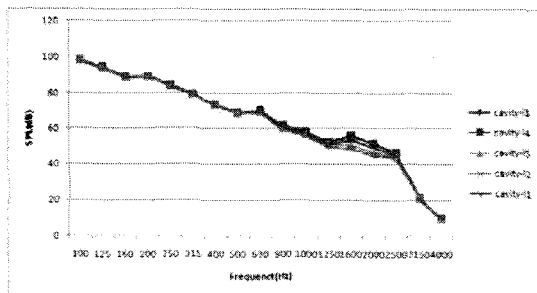


b.1 Sound Pressure Level

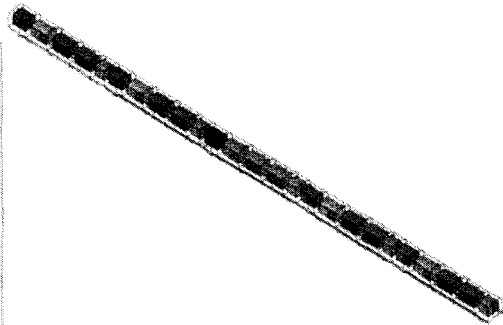


b.2 Contour of results at 1250Hz

(b) Case 2: Three-vehicle unit



c.1 Sound Pressure Level



c.2 Contour of results at 1250Hz

(c) Case 3: Five-vehicle unit