

동력 분산형 고속철도 차량의 실내소음 해석 : SEA 응용

Analysis of Interior Noise of High Speed EMU by using SEA

김태민†
Kim Tae-Min

김정태*
Kim Jeung-Tae

김정수**
Kim Jung-Soo

ABSTRACT

In this study, interior noise of the high speed EMU was estimated by statistical energy analysis (SEA) method. Based on the data measured at a distance of 25m from a running train, exterior noise of the running train was calculated. And then it was designed as noise sources in VA ONE, a commercial software of SEA. coupling and damping loss factor of high speed EMU studied in previous studies is used. The interior noise of the train was estimated for a open-land section. The analysis of interior noise of HST in the tunnel section will be estimated through same method.

1. 서론

현재 철도 기술은 철도차량의 고속화, 경량화와 함께 승객의 승차감과 쾌적성을 고려한 승객의 편의성 차원에서도 많은 연구가 진행되고 있다. 우리나라의 고속철도 차량의 실내소음 기준은 시속 350 km 로 주행 시 개활지에서 71 dB(A), 터널 통과 시 75 dB(A)인데 이는 미국의 American Public Transit Association이 제시한 시속 300 km 주행 시 개활지에서는 70 dB(A), 터널 통과 시 80 dB(A) 기준에 비해 더 엄격한 수준이다. 현재 개발 중인 분산형 차량의 경우 각 객차마다 동력원이 분산 배치되어 있으며 기존 차량과는 달리 열차 차체 구조물이 철에서 알루미늄 재질로 변경되었기 때문에 열차의 실내 소음도는 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 고속철도 차량의 실내소음을 저감시킬 수 있는 방안을 시급히 강구할 필요가 있다.⁽¹⁾

차량의 실내 소음은 고속주행 시 차량표면에서 발생하는 난류의 경계층 소음원이 차체의 벽을 통과한 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/레일간의 접촉 시 발생하는 진동에너지가 차량바닥을 가진시킨 후 음향방사에 의해 나타나는 구조기인소음 (structure-bone noise)로 분류되어 진다.⁽²⁾ 본 연구에서는 크게 세가지로 분류되는 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.

본 연구에서는 통계적 에너지 해석법(Statistical Energy Analysis : SEA)을 사용하여 동력 분산형 고속철도 차량을 모델링 하고 실내소음을 분석하였다. 이 결과를 통하여 외부 소음 유입 기여도가 큰 부분을 찾아 재질변경 및 구조변경을 통하여 소음 저감 대책을 제시하고자 하였다.⁽³⁾

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

* 홍익대학교 기계시스템디자인 공학과

** 홍익대학교 기계시스템디자인 공학과

2. 본 론

2.1 실외 소음 및 열차 표면 소음 분석을 위한 음원 연구

2.1.1 보기(Bogie)와 차량 간극의 공력기인 소음

동력 분산식 고속철도 차량의 보기와 차량간극에서의 공력기인 소음원은 선행 연구에서 수행된 연구 결과를 사용하였다.⁽⁴⁾ 이 데이터는 주행 중인 열차의 전체 공력 소음의 각 주파수별 소음도와 3점 음원으로 가정된 각 파트의 보기와 차량간극 각 소음원 위치에서 공력 소음을 측정하여 각 소음원 위치에서의 주파수별 소음을 산출하도록 하였다. 그림 1과 같이 총 6개의 위치에서 소음을 측정한 후 350km/h 속도로 환산 하였다. 환산된 Total acoustic power 값과 SPL 값을 이용하여 식 1에 대입하여 시뮬레이션 해석 시 사용할 수 있는 음원별 Acoustic power level을 계산하였다. 표 1은 동력 분산식 고속철도 차량의 보기와 차량간극의 각 주파수별 전체 소음도를 나타내며, 표 2는 각 소음원 위치에서 측정된 SPL을 나타낸다.

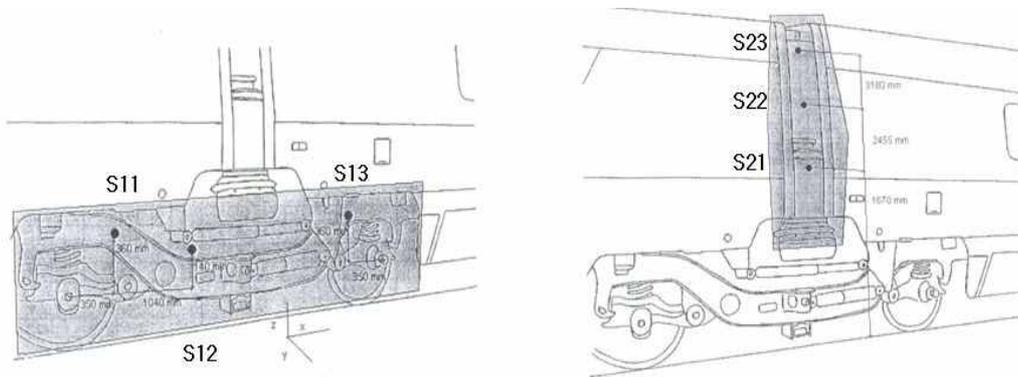


그림 1 Three point noise sources model of bogie and gap

각 음원의 Acoustic power 산출 식은 다음과 같다.

$$\text{Power} = \text{Total acoustic power level} - 10\log[a/b] \quad (1)$$

a = 기준 SPL 대비 각 지점별 소음 크기 비의 합

b = 기준 SPL 대비 각 지점의 소음 크기 비

표 1 Total acoustic power of bogie and gap

Octave	125	250	500	1000	2000	4000	total
Acoustic power dB (lin)	118	115	113	112	109	108	121

표 2 SPL Level of noise source points

	S11	S12	S13	S21	S22	S23(기준)
SPL	110	110	115	100	103	97
SPL 비	20	20	64	2	4	1

350km/h 급 열차는 대차 사이의 보기가 동력 집중식이나 본 연구에서는 대차 1대당 보기가 2개씩 배치되어 있는 동력 분산형 고속철도 차량을 고려하기 위하여 보기부분의 소음원에 대하여 보기 2개를 1대로 등가 하였고 이를 위하여 위의 식에서 산출된 소음도에서 3 dB을 추가하였다. 표 3은 식 1을 토대로 하여 산출된 보기와 간극에서의 옥타브 별 PWL 값을 나타낸다.

표 3 1/1 octave PWL Level of sound source points

Octave 소음원	125	250	500	1000	2000	4000
S11	113.6	110.6	108.6	107.6	104.6	103.6
S12	113.6	110.6	108.6	107.6	104.6	103.6
S13	118.6	115.6	113.6	112.6	109.6	108.6
S21	100.6	97.6	95.6	94.6	91.6	90.6
S22	103.6	100.6	98.6	97.6	94.6	93.6
S23	97.6	94.6	92.6	91.6	88.6	87.6

2.1.2 차륜-레일의 기계기인 소음

차량 보기와 간극에서의 공력기인 소음원과 더불어 본 연구에서는 차륜과 레일 사이에서 방사되어 나타나는 소음에 대한 소음원을 추가적으로 연구하였다. 차륜-레일 소음은 기존 300 km/h 속도로 주행하는 열차의 SPL 측정 자료를 토대로 하여 350 km/h로 주행할 경우의 소음원을 계산하였다. 그림 2는 300 km/h로 주행하는 열차의 외부측정소음의 계략도이며 측정된 차륜 소음은 표 4에 정리되어 있다.

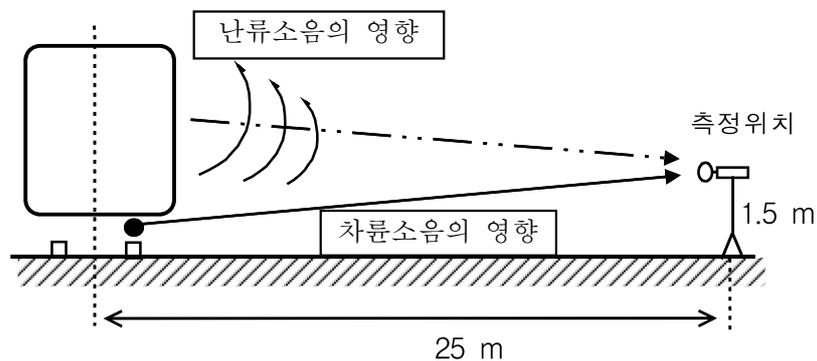


그림 2 Measurement of outer noise

표 4 A Comparative table of noise sources to the 25m point

	63	125	250	500	1k	2k	4k	O/A (dB)	O/A (dBA)
외부 측정소음	92.8	86.9	83	85.2	85.6	85.9	81.6	95.8	91
차륜소음	92.51	84.4	82.2	82.2	77.8	84.6	81	94.5	88.3

위의 데이터를 기초로 하여 350km/h에서의 차륜-레일 소음을 계산하는 방법은 다음과 같다.

1. 차륜-레일 소음의 속도 증가 시 소음도 환산식을 이용하여 350km/h 속도에서의 SPL 값을 1/1 옥타브 별로 환산

$$\text{속도 증가에 따른 차륜소음 예측 식 : } SPL \propto 10\log v^3$$

2. 단위 길이당 음향파워레벨 산출 방법을 이용하여 1m 당 PWL을 1/1 옥타브 별로 산출

$$\text{단위길이당 음향파워레벨 산출 식 : } PWL = SPL + 10\log(h) - 10\log \Delta\theta$$

h : 열차와 측정지점 사이의 거리

$\Delta\theta$: 측정지점과 열차의 시작점, 끝점 사이의 각도 차이

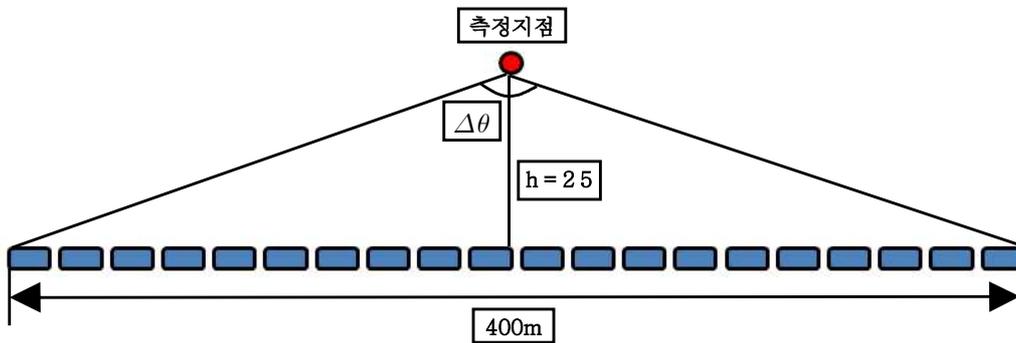


그림 3 Analysis method of PWL by unit length

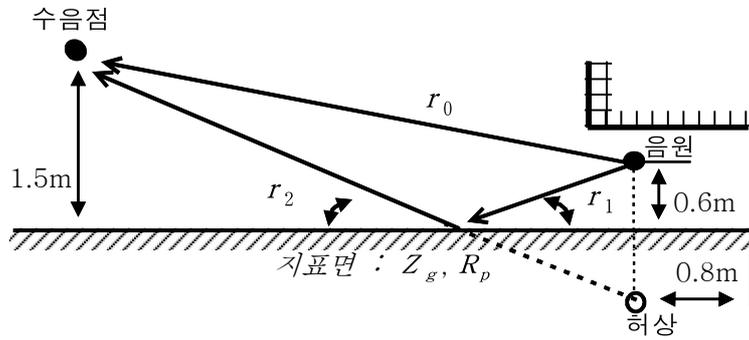
3. 대차 길이를 고려하여 10m 길이에서의 PWL을 산출

표 5는 위의 방법을 토대로 계산된 차륜-레일의 기계기인 소음에 대한 PWL값이다.

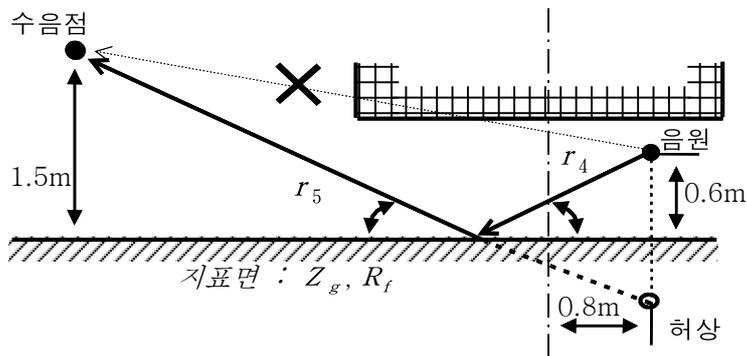
표 5 1/1 octave PWL Level of wheel-rail noise

PWL	125	250	500	1000	2000	4000
차륜-레일소음	113.2	110.9	110.9	106.4	113.4	109.7

그림 4와 같이 소음원의 위치는 대차의 각 보기부분 중앙에 위치하였으며 높이는 지상에서 0.6m로 지정하였다. 산출된 PWL 값은 각각의 소음원에 대하여 동일하게 지정하였다.



a) near noise source point from measure point



b) far sound noise point from measure point

그림 4 Modeling of noise source (Cross section)

위의 과정을 통해 계산된 각각의 음원은 공력기인 소음에 대하여 선행연구에서 연구된 자료를 바탕으로 하여 보기 부분에 3점 음원으로 그리고 차량과 차량 사이 간극에 대하여 3점 음원으로 좌표를 선정하여 배치하였으며 2량 1편성 열차인 관계로 열차와 열차가 만나는 부분에서는 보기, 간극 부분에 모든 음원을 배치하였다. 그러나 각 열차의 끝 부분에서는 보기 부분의 음원 위치를 고려하여 보기에서 발생하는 공력기인 소음의 음원을 2개 혹은 1개로 배치하였으며 간극의 음원은 그대로 사용하였다. 기계기인 소음원은 각 보기 부분에 등가된 음원을 각각 1개씩 점음원으로 배치하였다. 또한 열차의 양단 부분으로 모든 방향에서의 음원을 고려하였다.

2.2 SEA 해석을 위한 모델링

분산형 고속철도차량의 실내소음을 예측하기 위하여 통계적 에너지 해석기법 상용 소프트웨어인 VA ONE상에서 모델링 하였다.⁽⁵⁾ VA ONE에서 모델링 된 열차는 열차의 편의 시설이나 열차 출입구 및 통로가 존재하는 Interior-1, Interior-4와 승객이 탑승하는 공간을 동일한 길이로 나눈 Interior-2, Interior-3로, 총 열차 내부를 4개의 cavity로 구성되도록 모델링하였다.⁽⁶⁾ 그림 5는 VA ONE에서 모델링 된 동력 분산형 고속철도차량을 보여준다.

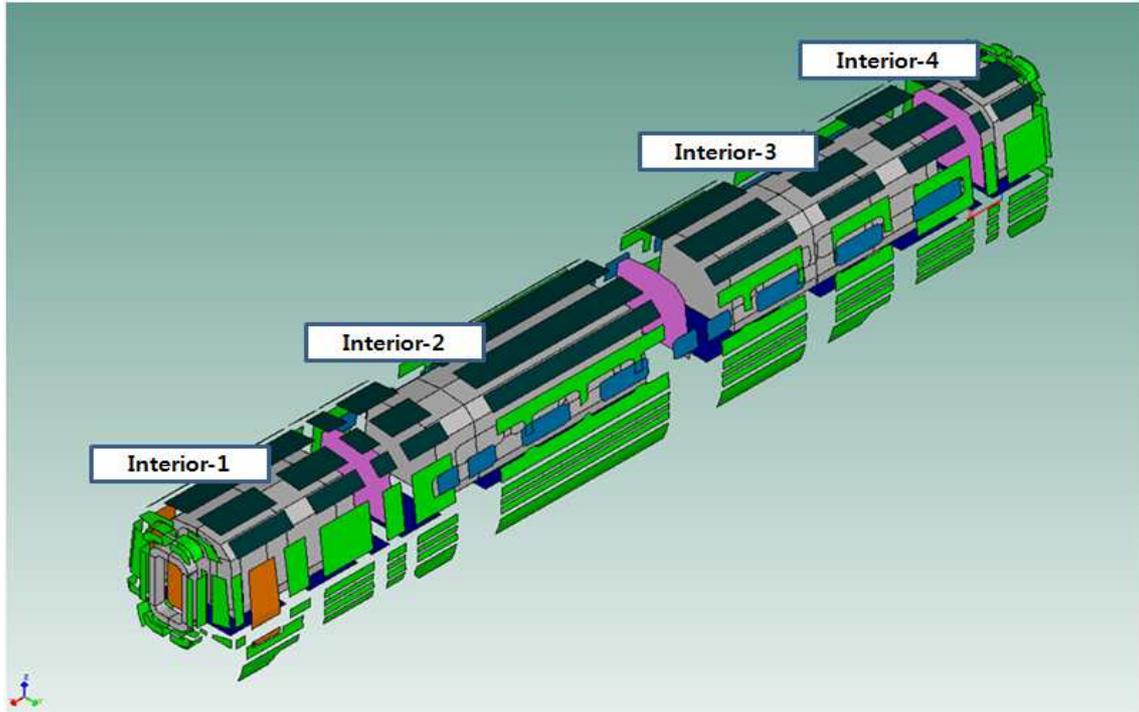


그림 5. SEA analysis model of a high speed train

동력 분산식 고속철도차량의 coupling loss factor와 damping loss factor는 선행 연구에서 연구한 결과를 사용하였다. coupling loss factor는 로템사에서 제공 받은 도면을 이용하여 전산해석을 통한 결과를 사용하였고, damping loss factor는 KHST 열차에서 측정된 잔향 시간을 이용하여 계산한 결과를 사용하였다. 그림 6은 동력 분산식 고속철도 차량 실내 소음 해석 시 사용한 coupling loss factor(TL)을 보여주며⁽⁷⁾ 그림 7은 측정하여 잔향 시간법을 이용하여 계산한 damping loss factor를 보여준다.⁽²⁾

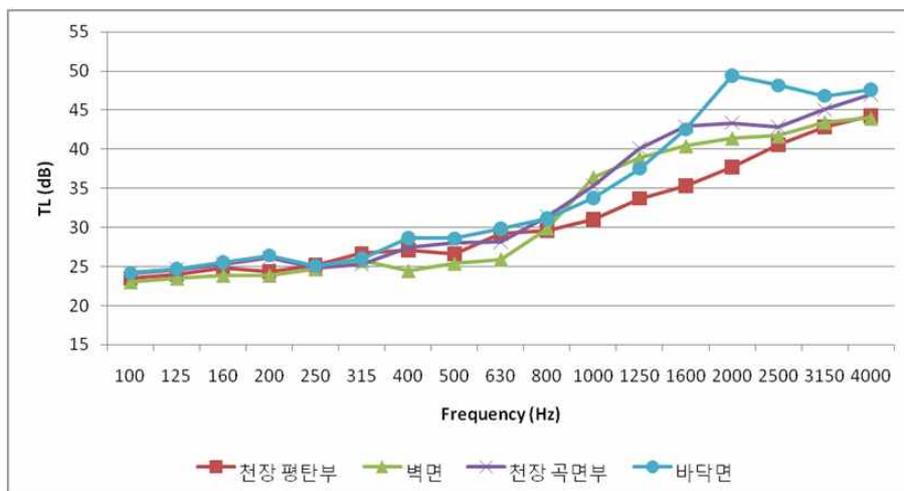


그림 6 Transmission loss of HST

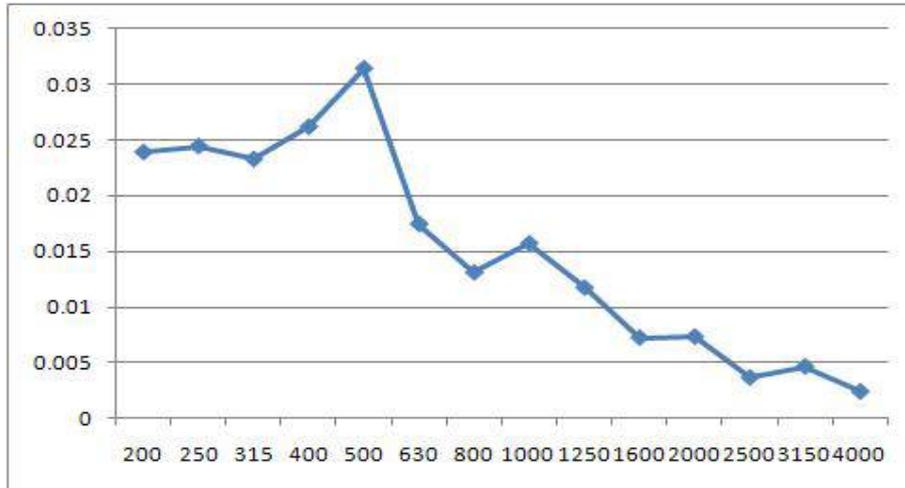


그림 7 Damping loss factor of high speed train

2.3 실내소음 해석

동력 분산형 고속철도차량의 실내 소음도를 통계적 에너지 해석 기법을 이용하여 해석하였다. 그림 8은 각 내부 cavity의 주파수 별 소음도를 나타낸다. 모든 내부 공간이 대체적으로 비슷한 경향을 갖는 것을 볼 수 있으며 일반적으로 저주파 영역이 고주파 영역보다 높은 소음 레벨을 갖고 있는 것을 볼 수 있다.

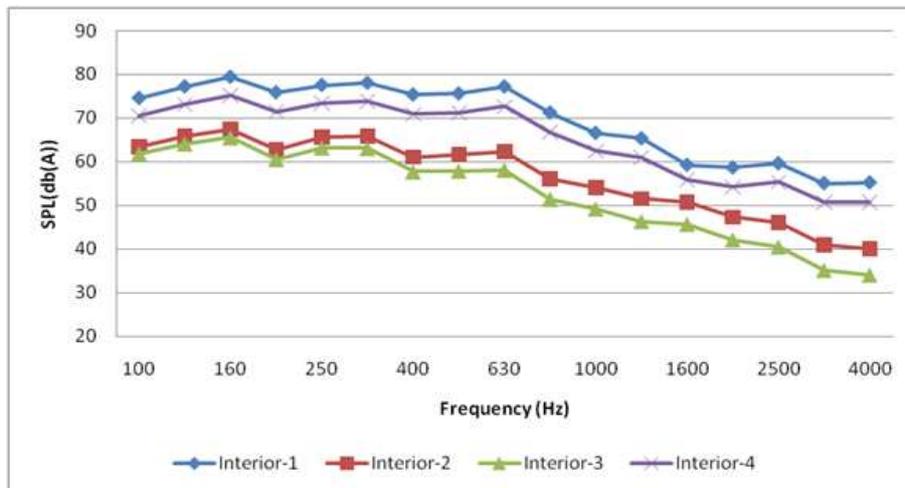


그림 8. Result of interior noise of high speed train

그림 9에서 볼 수 있듯이 열차와 열차 사이에 해당하는 소음이 다른 영역보다 상대적으로 크기 때문에 열차 내부의 끝부분의 내부 소음도가 가운데 부분의 소음도 보다 큰 것을 볼 수 있다. 하지만 실제로 탑승자가 위치하게 되는 공간은 Interior-2, Interior-3에 해당하는 공간이기 때문에 본 연구에서는 소음도가 상대적으로 높게 해석되지만 각 차량에 화장실 및 통로가 위치하는 Interior-1과 Interior-4의 해석 결과를 제외하고 탑승자가 위치하게 되는 Interior-2와 Interior-3의 cavity의 소음도를 중점적으로 연구하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 탑승자가 위치하는 Interior-2와 Interior-3은 우리나라의 고속철도 차량의 실내소음 기준은 시속 350 km 로 주행 시 개활지에서 71 dB(A)을 만족 하는 것을 볼 수 있다.

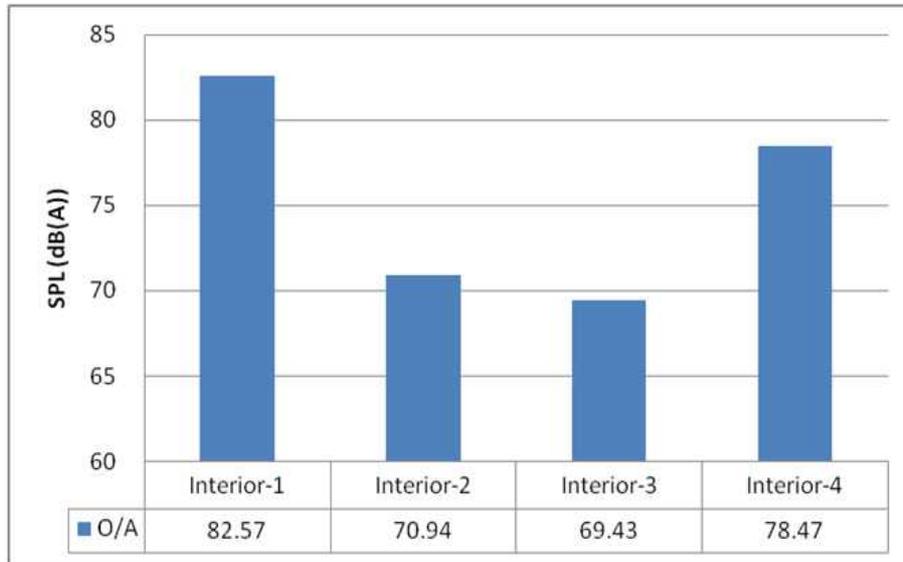


그림 9. Overall sound pressure level: single-vehicle unit

3. 결론

일반적으로 고속철도 차량의 실내소음 연구는 설계단계부터 시제품 제작을 통한 시험적 예측이 쉽지 않다. 본 연구에서는 경제적으로 용이한 전산해석을 통해 현재 연구 진행 중인 최고속도 시속 400 km 급 동력 분산식 고속철도 차량의 실내 소음을 예측하기 위하여 수행되었다.

동력 분산형 고속철도 차량의 최대 내부 소음도는 70.94 dB로 해석되었다. 이 소음도는 우리나라 기준 71 dB(A)를 만족하는 것을 알 수 있다. 동력 분산형 고속철도 실내 소음 해석 결과 저주파영역에서 높은 소음도를 갖으며 고주파 영역은 상대적으로 적은 소음도를 갖는 것으로 해석 되었다. 따라서 저주파 대역의 소음을 저감 시킬 수 있는 저감방안이 수립되어야 할 것이다.

추후 연구에서는 동일한 연구 방법을 사용하여 터널 주행 중인 동력 분산형 고속철도 차량의 실내소음 해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 김관주, 양윤석, “한국형 고속전철의 전동소음 예측에 관한 연구”, 과학기술연구논문집 10(A)(’99.12) pp. 661-677, 1999.
- [2] 김정태, 박철휘, 이우식 외, “진동소음해석 및 저감기술개발, 2차년도 연차보고서”, “제5장 고속전철 차량 실내소음 I : 실험해석기법 개발”, 건설교통부, 1998.
- [3] Lyon, R. H. , “Statistical Energy Analysis of Dynamical System: Theory and Application.”, MIT Press, Chap. 4, 1975.
- [4] Pallas, M. A., Schmitz, K. P., Barsikow, B., Fodiman, P., and Holzl, G., “DEUFRAKO: Localized Sound Sources on the High-Speed Vehicles ICE, TGV-A, and TR07,” WCRR’94, Paris, pp. 377-383, 1994.

[5] ESI, "AUTOSEA2 User's Guide Rev. 4"

[6] 김재철, 이찬우, "통계적 에너지 해석법을 이용한 KTX차량의 실내소음 해석", 한국철도학회, 춘계 학술대회논문집, pp. 23-28, 2004.

[7] 김태민, 김정태, 김정수, 김수영, "전산해석을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 투과 손실 예측", 한국소음진동학회논문집, 2010.