

한국형 고속전철 차량소음 예측 및 부품 소음관리방안

Noise Prediction of Korea High Speed Train (KHST) and Specification of Sub-components

정경렬* · 김경택* · 이병현* · H.W. Thrane**

Kyung-Ryul Chung, Kyung-Teak Kim, Byung-Hyun Lee, H. W. Thrane

Key Words : Noise Prediction (소음예측), KHST (한국형 고속전철), Internal Noise (실내소음), External Noise (실외소음), Noise specification (소음사양)

ABSTRACT

KITECH and ODS performed a study of internal and external noise prediction of the KHST test train. The object of this study was 3 kind of cars; trailer car(TT2), motorized car(TM1) and power car(TP1) and the predicted noise was calculated for the two different driving speeds in free field and tunnel conditions.

Data of carbody design and noise sources were delivered from each manufactures. Some of noise sources which were not available in project team, were chosen by experiences of ODS. Internal noise level of each car were predicted for two cases i.e, at 300 km/h and 350 km/h. In addition sound transmission path and dominant noise sources were also investigated of each section of car, which is circular shell typed part of whole carbody.

In case of TT2, the dominating sound transmission path is floor in terms of structure-borne noise and air-borne noise. The main noise sources are structure-borne noise from the yaw-damper and air-borne noise from the wheel/rail contact, whereas the dominating sound transmission path of TM1 are floor and sidewall below the window in terms of structure-borne noise. The main noise sources of TM1 are structure-borne noise from motor/gear unit and the yaw-damper in the free field, and air-borne noise from the wheel/rail contact and structure-borne noise from motor/gear unit in the tunnel. Through the external noise prediction for the KHST test train formation, the noise from the wheel/rail contact is estimated as one of the major sources.

In addition, the noise specification of sub-component was proposed for managing each sub-supplier to reach the KHST noise requirement. The specification provide the sound power of machinery part and transmission loss of component of carbody structure.

The predicted noise level in each case exceeded the required limit. Through this study, the noise characteristics of the test train were investigated by simulation, and then the actual test will be performed in near future. Both measured and calculated data will be compared and further work for noise reduction will be continued.

1. 서론

고속전철의 객실내의 실내소음은 승객의 승차감과 직결되는 문제로 세계 각국의 고속철도들은 각기 저마다의 기준을 정하여 엄격히 관리하고 있는 상황이다.

통상 제품개발과정에서 설계과정이 진행되어감에 따라

지속적으로 성능검증 해석이 수반되어야 하고 이를 통해 중대한 문제점은 사전에 예방조치를 취할 수 있도록 해야 한다. 한국형 고속전철의 경우에도 개발주행시와 터널내 주행시를 구분하여 66 dB(A)와 73 dB(A)로 실내 소음기준치를 두어 규제하고 있으며^[1] 현재의 차량 설계내용이 이 기준을 만족시킬 수 있는지에 대하여 국내의 여러 기관에서 다양한 연구를 수행하여 왔다. 그러나 이전에 수행된 연구내용은 차량설계 확정 및 제작 이전단계에서의 검토로서 연구를 위해 제공되었던 자료들이 제한적이었다. 이러한 이유로 해석을 위한 모델 작성시에 실제 제작될 차량의 특성을 충분히 반영하지 못하는 경우가 많았으며 해석에 사용된 데이

* 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
E-mail : chungkr@kitech.re.kr
Tel: (041) 588-251, Fax: (041) 588-230

** ODS사 (덴마크) 철도차량팀

터들에 많은 가정이 도입되었던 것이 사실이다.^[2,3]

본 연구에서는 덴마크의 소음관련 자문업체 ODS사와 함께 제작될 차량과 관련된 최종 설계자료를 확보/반영하여 시험은행될 한국형 고속전철 시제차량의 소음도를 예측하였다. 병행해서 주어진 또한 실내 소음기준치를 만족시키기 위한 주요 전장품 및 부품의 소음사양을 도출하였다. 지금까지는 차량의 실내소음 규제치만을 규정하고 있고 차량을 구성하고 있는 각 부품사양이 구체적으로 제안되어 있지 않고 있다. 향후 소음측정 시험을 통해서 소음 성능이 실제로 확인되고, 규정치를 초과할 경우 대안을 강구하고 소음원 관리를 위한 근거자료를 확보하기 위한 작업이었다.

2. 차량편성과 소음원의 구성

2.1 주요 소음원의 구성

소음예측을 위하여 사용되는 시제차량은 Fig.1에서 나타내는 바와 같이 양 끝에 2대의 동력차와 2대의 동력객차가 있으며 가운데 3대의 객차로 구성되어 전체길이는 131 m가 된다. 7량의 시제차량에는 10개의 대차가 있으며 이중 6개는 동력대차이고 4개는 부수대차이다. 동력대차는 2개의 견인전동기와 2개의 기어박스를 갖는다. 각 차량에는 바닥에 냉방장치와 여압장치를 갖는다

2.2 소음해석 모델 및 해석조건

7량의 시제차량중 실내소음 해석을 위해 각 차종을 대표 할수 있도록 동력차 (TP1), 동력객차 (TM1), 객차 (TT2) 를 해석대상으로 선정하였다. 소음해석은 덴마크의 ODS사에서 개발한 TRAINNOISE를 이용하여 수행하였으며 소음 해석을 위한 수치모델은 Fig. 2와 같이 고속전철 차량개발 과정의 4차년도 연구성과^[4,5,6,7]를 활용하여 차량별로 차량의 길이방향과 단면방향의 각 해석 영역별로 나뉘어 작성하

였다 Table 1은 본 해석에서 고려된 해석조건 및 해석대상을 보여주고 있다.

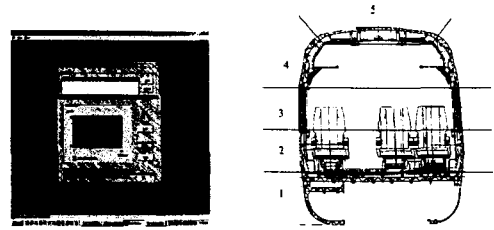


Fig. 2 Analysis program (Trainnoise) and example of noise prediction model (trailer car: section view)

Table 1 Prediction scenarios and conditions

Type of car	Open land		Tunnel
	Internal	External	Internal
Power car	○	○	○
Motorized car	○	○	○
Intermediate Motorized car	×	○	○
Trailer car	○	○	○
Train speed (km/h)	Internal	External	-
300	○	○	
350	○	○	

해석에 사용된 기본 데이터는^[8,9] 각 소음원의 음압레벨과 바닥, 벽면, 천정 등의 치음량, 차량의 설계데이터 들이며 해석조건으로는 300 km/h, 350 km/h 주행시 속도별로 개활지 및 터널주행조건을 적용하여 해석하였다. 국내에서 개발된 부품 및 서브시스템의 소음원 특성은 각 연구기관으로부터 제공되었고^[10~18] 구할 수 없는 부분적으로 미흡한 사항은 ODS사의 경험치^[19]를 이용하였다. 개발된 부품에 대한

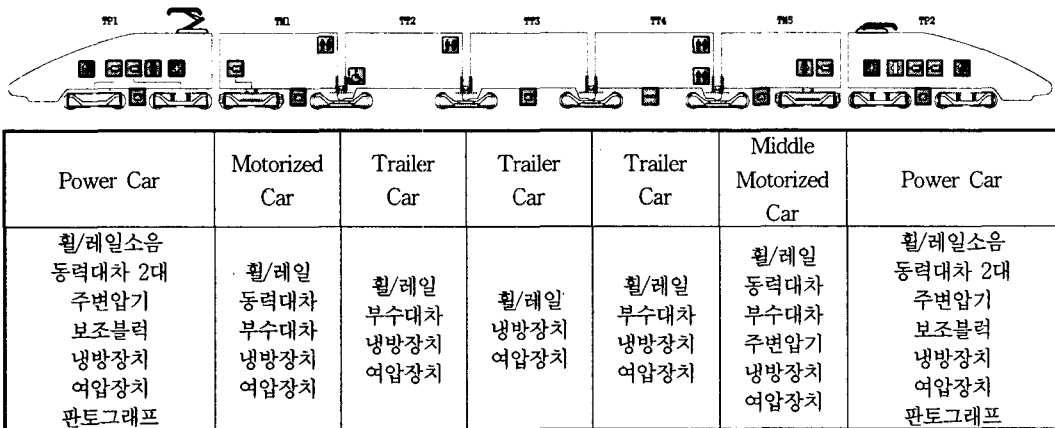


Fig.1 Foramtion of KHST7 and main noise sources

구체적인 소음 특성이 실제와 차이가 있을 경우에는 예측된 소음치에 미치는 영향을 무시할 수 없을 것으로 판단되며, 이는 최종 시험후 보완해야 할 것으로 본다.

3. 시제차량 실내의 소음예측

3.1 실내소음

(1) 객차

본 기술개발사업에서 개발될 차량의 소음기준은 차량속도 300 km/h에서 주어지고 있기 때문에 본 연구에서는 차량속도 300 km/h에 대한 소음치 예측에 중점을 두고 수행하였다. 뿐만아니라 시제차량의 최고 운행속도가 350 km/h인 점을 감안하여 차량속도 350 km/h인 경우의 소음도 예측하였다. Fig. 3은 객실 실내소음 예측결과를 보여주는 세 종류의 그림인데 상단의 그림은 객실을 길이방향으로 나누어 모델링한 내역을 보여주고 있고, 소음예측은 각 길이방향 부위별로 수행하였고, 하단그림은 각 길이방향 부위별 예측 소음치를 기준치와 비교하여 보여주고 있다. TBL(Turbulent Boundary Layer) 영향을 점검하기 위해 별도로 구분하여 정리 하였다. Fig. 3의 객차 모델에서 부위 10은 대차와 가장 가까운 실내공간을 포함하는 영역으로서 차량속도 300 km/h에서 실제 소음이 71 dB까지 예측되고 있다. Fig 4는 차량의 길이방향 해당부위에서 예측된 소음치에 대해서 소음전달경로별로 기여하는 정도를 보여주는 한 예이다. Fig. 4에서 보면 부위 10에서의 소음예측치가 71 dB인데 차량 바닥을 통해서 구체적으로 전달되는 소음(구조기인소음: Structure-borne noise) 기여도가 67 dB로 가장 크고, 순차적으로 네 번째까지 큰 경로를 나타내고 있다.

바닥을 통해 전달되는 공기기인소음(Air-borne noise)은 무시할 수 있을 정도이며 이러한 분석결과를 활용할 경우 향후 소음설계시 소음개선 노력 및 효과를 극대화 할 수 있을 것이다.

본 연구에서 수행한 예측치에 의하면 부위 5를 제외하고는 모든 부위에서 기준치를 초과하고 있는 것으로 예측되었으며, 이는 추후 측정시험을 통해 확인되어야 하고 최종적으로 규제치가 초과되면 분석된 근거자료를 활용하여 보완작업을 수행할 예정이다.

마지막으로 객실소음 예측작업에서 정리한 분석자료는 Fig. 5에서 보여주고 있는 소음원별 기여도이다. Fig. 4와 마찬가지로 Fig. 3의 부위 10에서의 소음 예측치에 미치는 기여도 측면에서 검토해 보면 요댐퍼를 통해 전달되는 구조기인 소음이 가장 지배적이고 차례로 휠/레일, 안티롤바, 센터피봇 순으로 영향을 미치는 것으로 분석 되었다. Table 2는 해석대상 차량별로 각 해석조건에서의 실내 예측치를 보여주고 있다. 350 km/h로 주행할 경우에는 대체적으로 1~2 dB 상승하는 것으로 나타났으며, 특히 여압장치의 영향이 터널주행시에는 크게 나타나고 있다.

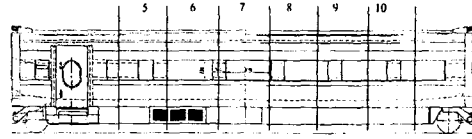


Fig. 3 Noise distribution in trailer car compartment during free-field driving at 300 km/h (HVAC and pressurization unit noise is not included)

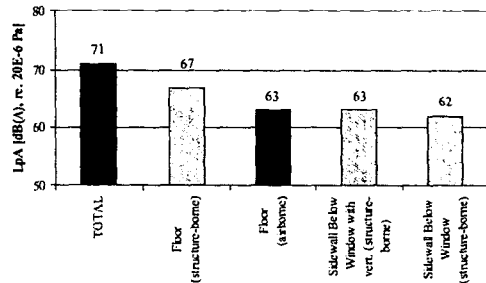


Fig. 4 Comparison of transmission path for section 10 above the compartment trailer car while driving at 300 km/h in free field. (HVAC and pressurization unit noise is not included)

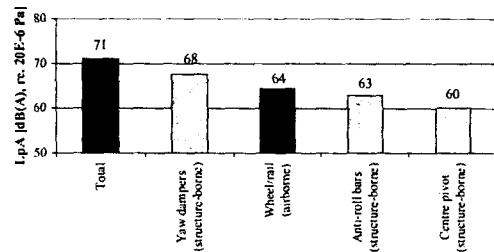


Fig. 5 Comparison of noise source for section 10 above the compartment trailer car while driving at 300 km/h in free field. (HVAC and pressurization unit noise is not included)

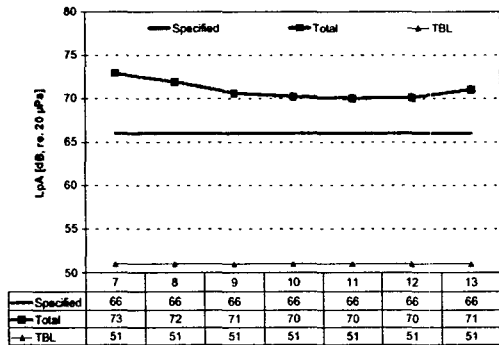
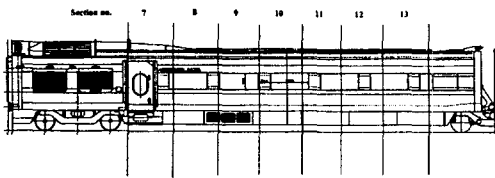


Fig. 6 Noise distribution in motorized car compartment during free-field driving at 300 km/h (HVAC and pressurization unit noise is not included)

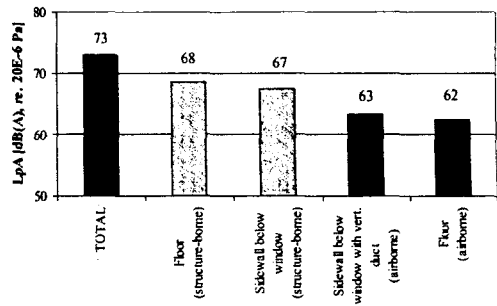


Fig. 7 Comparison of transmission path for section 7 above the compartment motorized car while driving at 300 km/h in free field. (HVAC and pressurization unit noise is not included)

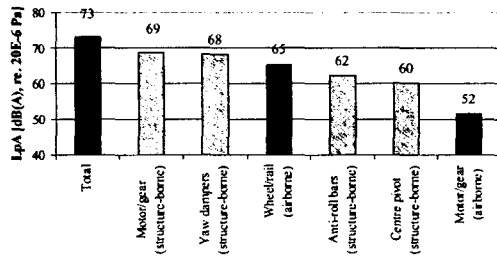


Fig. 8 Comparison of noise source for section 7 above the compartment motorized car while driving at 300 km/h in free field. (HVAC and pressurization unit noise is not included)

Table 2 Overview of main prediction result for internal noise

Prediction Condition	Driving Condition		Predicted levels disregarding HVAC/PU contribution		Including HVAC/PU contribution	Requirement
	Condition	Speed km/h	Worst case dB(A)	Middle of compartment dB(A)	Middle of room incl. HVAC/PU dB(A)	Limit dB(A)
Trailer car	Free field	300	71	66	73	66
	Free field	350	72	68	74	-
	Tunnel	300	74	72	84	73
	Tunnel	350	75	73	84	-
Motorized car	Free field	300	73	70	74	66
	Free field	350	75	72	75	-
	Tunnel	300	75	72	84	73
	Tunnel	350	77	74	84	-
Power car	Free field	300	81	81	82	78
	Free field	350	84	84	84	-
	Tunnel	300	82	82	83	80
	Tunnel	350	85	85	86	-

(2) 동력객차

Fig. 6는 차량속도 300 km/h로 개활지를 주행할 경우의 객실내 소음도를 나타내는 것으로 동력대차에서 가장 가까운 부위 7에서 최대소음 73 dB, 반대쪽인 부수대차에서 가장 가까운 부위 13번에서 71 dB의 높은 소음이 예측되었으며 상대적으로 객실중앙부의 소음은 객실 끝단에 비하여 적은 것으로 나타났다. Fig. 7은 최대 소음도를 나타내는 부위 7번의 실내소음 주요 전달경로를 분석한 결과로서 주로 바닥과 객실창문 하부의 차체벽면을 통하여 구조기인소음이, 객실 측벽의 환기구와 바닥을 통해 공기기인 소음이 전달되는 것을 보여준다. 소음원별 기여도를 나타낸 Fig. 8을 보면 객차에는 없는 견인전동기/기어박스가 구조기인소음, 공기기인소음 양쪽에 영향을 미치고 있음을 알 수 있는데 특히 견인전동기/기어박스의 구조기인소음의 경우에는 69 dB로서 동력객차의 소음원중 가장 지배적인 것으로 나타났으며 기타 소음원은 객차와 마찬가지로 휠/레일, 요댐퍼, 안티롤바, 샌티피트 스푼으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

350 km/h 주행시의 소음도는 객차와 마찬가지로 300 km/h 주행시보다 1~2 dB 증가하는 것으로 예측되었으며 이 경우에도 여압장치의 영향이 역시 큰 것으로 나타났다.

(3) 동력차

차량속도 300 km/h로 개활지를 주행할 경우에는 경우 81 dB, 350 km/h 주행시에는 84 dB의 최대소음이 예측되었다. 소음전달경로를 보면 주로 운전실 바닥과 측벽을 통하여 구조기인소음이 전달되었으며 동력객차와 마찬가지로 견인전동기/기어박스와 대차 요댐퍼에서 발생하는 구조기인소음이 주요 소음원인 것으로 예측되었다. 또한 300 km/h, 350 km/h 주행시 모두 여압장치의 영향이 앞선 두차종보다는 적어서 여압장치 작동시 약 1 dB의 소음도 증가만을 나타내는 것으로 나타났다.

(4) 실내소음 저감방안

소음치가 대체적으로 규정치를 초과하는 것으로 예측되었지만 최종적으로 시험을 통해서 확인되어야 하고 소음사양 만족을 위한 실내소음 저감방안으로 다음과 같은 사항들을 검토해볼 수 있겠다.

① 에어콘과 여압장치에 저소음 팬 적용 ② 실내 덕트내에 흡음재 설치 ③ 바닥 상부와 하부사이의 연결부의 강성감소를 위한 탄성요소 도입 ④ 차체와 모터/기어박스 연결부위에 탄성요소 도입 ⑤ 대차의 요댐퍼의 동적 강성도 조절 ⑥ 객실내 고성능 흡음재 설치등을 고려해 볼수 있고, 세부적인 대안은 주어진 여건 하에서 현실적인 방향으로 조치될 수 밖에 없을 것이다. 또한, 단품과 관련한 사례로 모터의 냉각공기의 유동을 최적설계 할 경우 모터의 자체소음이 크게 저감될 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 실외소음

해석조건으로 차량정차시, 300 km/h, 350 km/h 주행의 3가지 속도별로 개활지에서 차량의 가·감속없이 정속주행하는 경우 선로 중심으로부터 선로 직각방향으로 25 m, 레일 상면으로부터 1.2 m 높이의 선로변 소음도를 해석하였다. 실외소음해석은 독일의 Akustik-data사의 AD-PRO를 이용하였으며 이를 위해 시제차량의 해석모델을 Fig. 9와 같이 구성하였다.

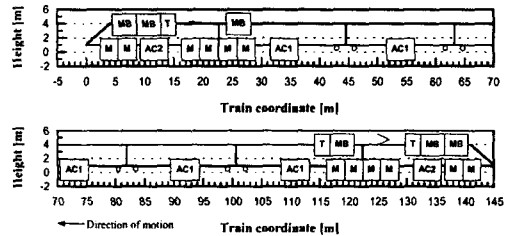


Fig. 9 Sketch of sound source used for the prognoses representing machinery and fan noise

사용된 기호는 아래와 같다.

- AC1 = 객실용 에어컨
- AC2 = 운전실용 에어컨
- M = 모터/기어박스
- MB = 모터블럭
- T = 변압기

Fig. 10은 차량이 300 km/h로 주행할때의 시간변화에 따른 음압레벨을, Table 3은 주요 소음원별 기여도를 보여준다. 차량속도 300 km/h인 경우의 해석결과를 보면 소음사양인 91 dB를 3.8 dB 초과하는 것으로 나타났으며 휠/레일 접촉에 의해 방사되는 구름소음(Rolling noise)이 전체소음 에너지의 68 %로 다른 소음원에 비하여 상대적으로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 예측되었다.

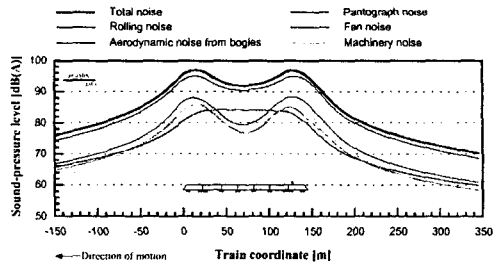


Fig. 10 Predicted time histories of the A-weighted sound-pressure level at 300 km/h (current design)

Table 4는 실외소음의 저감을 위한 대안으로 제시된 동력

차의 블록디스크의 최적화 (Level A), 동력객차 및 객차의 비 구동차륜에 흡입재 도입 (Level B), 동력차와 동력객차의 동력차축의 중량감소 (Level C)등을 고려하여 각각의 경우에 대하여 해석한 결과이며 이 경우에도 소음사양을 만족시키기 어려운 것으로 나타났다. 해석결과를 통해서 고려된 대안을 통한 실질적인 실외소음의 저감에는 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3 Value of the pass-by level for the wayside noise at 300 km/h

	Pass-by level $L_{Aeq,P}$ [dB(A)]	Percent of total energy
Total noise	94.8	100 %
Rolling noise	93.1	68 %
Aerodynamic noise from bogie	83.5	7 %
Pantograph noise	82.7	6 %
Fan noise	85.3	11 %
Machinery noise	83.3	7 %

Table 4 Value of the pass-by level for the wayside noise

	Pass-by level $L_{Aeq,P}$ [dB(A)]	
	300 km/h	350 km/h
Current design	94.8	97.5
Optimization level A	93.2	96.1
Optimization level B	92.9	95.9
Optimization level C	92.4	95.4
Limit	91.0	-

그러나 시제차량 주행시 소음사양을 초과하는 이러한 소음도가 발생하는 원인은 차량 편성길이에 비하여 상대적으로 구동축이 많은 시제차량 7량의 경우이기 때문이며 일반 편성 20량의 경우에는 현재 해석된 7량의 실외 소음도 보다는 낮은 소음도를 나타낼 것으로 예상된다.

정차시의 실외 소음도는 설계사양이 아직 규정되지 않아 비교가 불가능하며 예측된 소음도는 72.2 dB로 나타났다. 이 경우에는 동력차의 에어컨 팬 소음이 지배적인 것으로 나타났다.

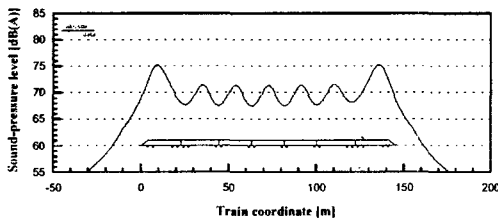


Fig. 11 Predicted A-weighted sound-pressure level at stationary (current design)

3.3 전장품 소음도 규제치 및 사양제시

한국형 고속전철의 소음사양을 만족시키기 위한 주요 전장품의 소음원 및 관련부품의 사양을 제안하였다. 각 부품의 전체 소음치에 대한 기여도 분석과 병행하여 주어진 규제치를 만족시키기 위한 주요부품별 소음특성치에 대한 기본안은 향후 시험결과에 따른 대책검토시나 별도의 추후 개발사업에도 중요한 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

(1) 주요 전장품별 소음사양 안

제시된 주요 전장품의 소음도 규제치는 Table 5와 같다. 현재 소음 규제치가 존재하는 에어컨/여압장치와 판토틀라프에서 에어컨/여압장치는 현재의 소음규제치를 더욱 강화해야만 실내소음기준을 만족시킬 수 있을것으로 추정된다.

Table 5 Specification of sound power (A-weighted)

Item	Limit	Suggested specification [dB(A)]
Motor	-	107 dB
Gear box	1st & 2nd (set)	-
	TP car	93 dB
Bogie	TM car	-
	TT car	94 dB
HVAC/PU (TP car)	85 dB	76 dB
HVAC/PU (TM & TT car)	72 dB,	69 dB
Pantograph	91 dB	97 dB
Transformer	-	100 dB

(2) 주요 부품별 소음사양 안

객실내 실내소음도를 만족시키기 위해서는 소음원의 소음도 규제와 병행하여 차체를 구성하는 주요 구성품의 차음 성능도 관리되어야 한다. 이를 위하여 차체 주요 구성품의 차음성능이 각 주파수 별로 Table 6에 제시되었다.

Table. 6 Specification of sound transmission loss [TL, dB(A)]

Frequency (Hz)	Window	Gang way	door	Front window	Front body
31.5	27	22	14	32	20
63	27	21	18	28	20
125	27	23	23	30	26
250	34	37	26	31	41
500	42	50	26	38	50
1000	44	56	32	43	55
2000	45	60	36	41	60
4000	46	60	41	40	60
8000	46	60	47	47	60

4. 결론

본 연구에서는 시제차량의 설계종료 시점에서 최종적으로 차량의 소음특성을 예측하는 작업을 수행하였다. 대상차량은 동력차, 동력객차, 객차의 3종류로 하였으며, 주행조건은 정차시, 300 km/h 및 350 km/h 주행시로 하였다. 개활지와 터널 주행조건을 비교하였으며 소음의 예측뿐만 아니라 전달경로 및 소음원별 기여도 분석도 동시에 검토하였다. 해석결과의 신뢰성 확보와 현실성 있는 문제해결을 위한 대안검토를 위해 외국의 전문기관과 공동으로 수행하였으며 이를 통해 국내에서 구하기 어려운 소음원 자료를 보완했으며 각 분야별 성과평가의 객관성을 확보 하였고 축적된 경험을 향후 설계개선 과정에서 활용할 수 있는 기반을 구축하였다. 해석을 통해 예측된 값은 대체적으로 규정치를 초과하고 있기는 하지만 모델의 제약조건 때문에 구체적인 결과의 검증은 측정시험을 통해서 확인될 예정이고, 분석된 경로 및 소음원 기여도 자료를 활용하여 설계개선 대안들을 마련할 예정이다. 또한 소음측면에서 부품별 기여분석 작업과 병행해서 수행된 규정치를 만족시키기 위한 소음사양안은 향후 철도차량 소음관리 과정에서의 전형적인 응용사례로 활용될 수 있을 것이다. 보다 구체적인 성능검증 결과는 차량 제작 완료후 측정시험 결과와 비교/분석 될 예정이고 이와 함께 설계보완 대책도 동시에 검토될 것이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 "차량시스템엔지니어링기술 개발"과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 한국철도기술연구원, 1998, "고속전철 시스템 기본사양", 설계자료
- (2) 김상현, 정경렬, Christian Hoffman, 2000, "한국형 고속전철의 실내외 소음설계 검토" 한국소음진동공학회지 제10권 제4호, pp636-641
- (3) 정경렬 외, 2000, "차량시스템엔지니어링기술 개발", 한국생산기술연구원
- (4) 정인대 외, 2000, "동력차 개발", 한국철도차량(주)
- (5) 정인대 외, 2000, "동력객차 개발", 한국철도차량(주)
- (6) 정인대 외, 2000, "객차 개발", 한국철도차량(주)
- (7) 정인대 외, 2000, "대차 개발", 한국철도차량(주)

- (8) 한국생산기술연구원, 2001, "Technical Data for Noise Control Eng. Service", 내부기술자료

- (9) 한국생산기술연구원, 2001, "Drawings for Noise Control Eng. Service", 내부기술자료

- (10) 대원강업(주), 2001, "Characteristics of Suspension System", 설계자료

- (11) 한국철도차량(주), 2001, "Design Synopsis of Bogie Connection", 설계자료

- (12) 한국철도차량(주), 2001, "Design Synopsis of Ventilation Duct System", 설계자료

- (13) 한국DTS(주), 2001, "Noise Measuring Data of Gear Box", 시험자료

- (14) 캐리어(주), 2001, "Design Synopsis of HVAC & Pressurization Unit", 설계자료

- (15) 한국철도차량(주), 2001, "Specification of Cooling Fans", 설계자료

- (16) 한국철도차량(주), 2001, "Specification of Noise Absorbntion Materials", 설계자료

- (16) 한국생산기술연구원, 2001, "Design Synopsis of Pantograph", 설계자료

- (17) 유진기공산업(주), 2001, "Specification of block brake", 설계자료

- (18) 정경렬 외, 2001, "차량시스템엔지니어링기술 개발", 한국생산기술연구원

- (19) ODS, 2001, "Korea High Speed Train Conceptual Prediction of Internal and External Noise during Free-Field and Tunnel Driving Final Report", Technical Report