

〈논 문〉

한국형 고속전철의 실내외 소음설계 검토

Review of Acoustic Design of KHST(Korea High Speed Train)

정경렬* · 김상헌** · Christian Hoffman***

Kyung Ryul Chung, Sang Hun Kim and Christian Hoffman

(2000년 3월 7일 접수 ; 2000년 6월 10일 심사완료)

Key Words : Korean High Speed Train(KHST: 한국형 고속전철), Noise Insulation Value(차음량), Acoustic Design(소음설계), Noise Prognosis(소음예측), Noise Reduction(소음저감)

ABSTRACT

KHST(Korean High Speed Train) project plans to design and to build a high speed train. There are noise requirements in passenger room for the standing and running condition, which should be reached. Predicted noise is calculated for the standing and running TM5(Motorized car) and TT4(Trailer car) train ($v=300$ km/h and $v=350$ km/h) to find out critical areas in or around the train. From the estimation in DWA IfS, actions of noise reduction are proposed to reach the requirements. This paper takes the review of the calculated results in DWA IfS to propose a new design of inner wall.

1. 서 론

1996년 선도기술개발과제의 일환으로 시작된 G7 고속전철기술개발사업과 더불어 고속전철의 여러 주요분야들에 대한 연구가 진행되어 왔다. 특히 소음문제는 성능과 더불어 한국형 고속전철의 품질을 대표하는 중요한 평가 척도의 하나로 작용하기 때문에 매우 민감하게 다루어지고 있다.

초창기 기술개발 단계에서는 기존의 철도차량에서 얻어진 기술을 바탕으로 주행열차의 방사소음을 예측하고 실제 측정을 통하여 예측 결과를 검증하는 등, 고속주행에서의 소음예측을 위한 기초 연구를 주로 수행하였다. 또한 휠/레일 접촉소음, 판트그래프 소음 등 고속화에 따른 공력소음에 대한 연구도 활기를 띠기 시작하였다. 이 때의 소음에 대한 연구들은 주행차량을 소음원으로 하여 철로 연변으로 방사되어 가는 음의 특성분석에 관한 연구가 주를 이루었다.⁽¹⁻³⁾

루었다.⁽¹⁻³⁾

최근 들어서는 주행차량의 연변에서의 소음 특성에 관한 연구 뿐 아니라 대책방안에 중점을 두고 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 고속전철의 설계사양들이 제시되면서 주요 소음원들로 부터의 소음이 차체의 외벽을 통과하여 실내소음에 미치는 영향에 대한 연구도 시작되고 있다. 우수식⁽⁴⁾과 김석현^(5,6) 등은 고속전철의 외벽에 적용되는 알루미늄 주름패널의 음향투과손실에 대한 연구를 통하여 소음저감대책에 노력하고 있으며 실제적으로도 설계에 적용할 수 있는 데이터를 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 고속전철이 정차 중인 경우와 300 km/h로 주행중인 경우에 차량의 실내외 소음을 예측하고 현재까지의 차량의 설계 데이터를 바탕으로 수정이 필요한 부위를 규명하는 것이며 수정을 요하는 부위에 대해서는 차량의 소음요구량에 부합할 수 있도록 저감방안을 제시하고자 한다. 또한 350 km/h의 속도에 대하여도 실내외 소음을 예측하고 저감방안을 제시하고자 한다.

G7 고속전철기술개발사업으로 개발중인 한국형 고속전철의 소음설계를 위하여 독일에서 제시한 주요 소음원들 바탕으로 정차시 및 주행중의 차량 내외부의 소음을 개

* 정희원, 한국생산기술연구원

** 정희원, 산업기술시험원

*** DWA IfS

적으로 예측하여 독일에서의 설계검토결과와 상호 비교하면서 재검토하고 차음벽의 성능향상을 위한 대안을 제시하고자 한다.

2. 차량의 편성과 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 냉방장치를 갖는다. 동력객차의 측면에는 여러개의 환기 그릴이 있는데 해석을 위해 하나의 큰 그릴로 계산하였다. 천장에도 여러개의 환기팬이 있으며 이것도 계산을 위해 하나의 큰 팬으로 고려하였다. 또한 동력객차에는 1개의 주변압기가 사용되며 동력차의 천정에는 판토그래프가 있다.

2.2 고속전철 주요 소음원에서의 음향파워레벨

현 단계에서는 차량의 주요 전장품에 대한 설계 사양이 아직 확정되어 있지 않기 때문에 국내에서 적용되는 주요 시스템들의 음향방사파워를 알 수 없었으며 따라서 독일의 DWA IFS에서 사용하는 소음값을 적용하여 계산을 수행하였다. 각각의 소음원의 음향파워레벨은 Table 1과 같다.

모든 소음 레벨은 최대 주행하중에 대하여 계산하였으며 차량이 정차중인 경우는 환기그릴, 환기팬, 주변압기들은 무부하로 운전하고 있는 것으로 가정하였다. 객실의 환기

Table 1 주요 소음원의 음향파워레벨[dB(A)]

소음원	개수	300km/h	350km/h
축+휠/레일 소음	20	113.4	115.0
기어박스	12	113.0	115.0
전동기 환기그릴	6×2	100/115	100/115
전동기 환기팬	6	105/120	105/120
판토그래프	2	119.0	123.0
공력소음			
대차공력소음	10	110.0	114.0
냉각장치	5	94.0	94.0
견인전동기	12	125.0	127.0
주변압기	3	90/100	90/100

및 냉방장치에 의한 실내 음압레벨은 독일의 ICE-V 열차에서 측정된 55 dB(A)를 사용하였다.⁽⁷⁾

2.3 속도 증가에 따른 소음의 변화

차량의 주행속도가 300 km/h에서 350 km/h로 향상됨에 따라 주요 소음원에서의 음향파워가 증가하게 되며, 이러한 경우 속도 증가에 따른 소음의 증가 원인은 휠-레일 접촉소음의 증가와 고속에서의 공력소음의 증가를 원인으로 들 수 있다.

휠-레일 접촉소음의 음압레벨은 차량의 속도에 따라 변한다. 휠-레일 접촉소음의 증가량 ΔL_p 는 다음과 같이 계산된다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \Delta L_p &= 2.5 \cdot 10 \log(v_1/v_0) \text{ dB(A)} \\ &= 2.5 \cdot 10 \log(350/300) \text{ dB(A)} \\ &= 1.7 \text{ dB(A)} \approx 2.0 \text{ dB(A)} \end{aligned}$$

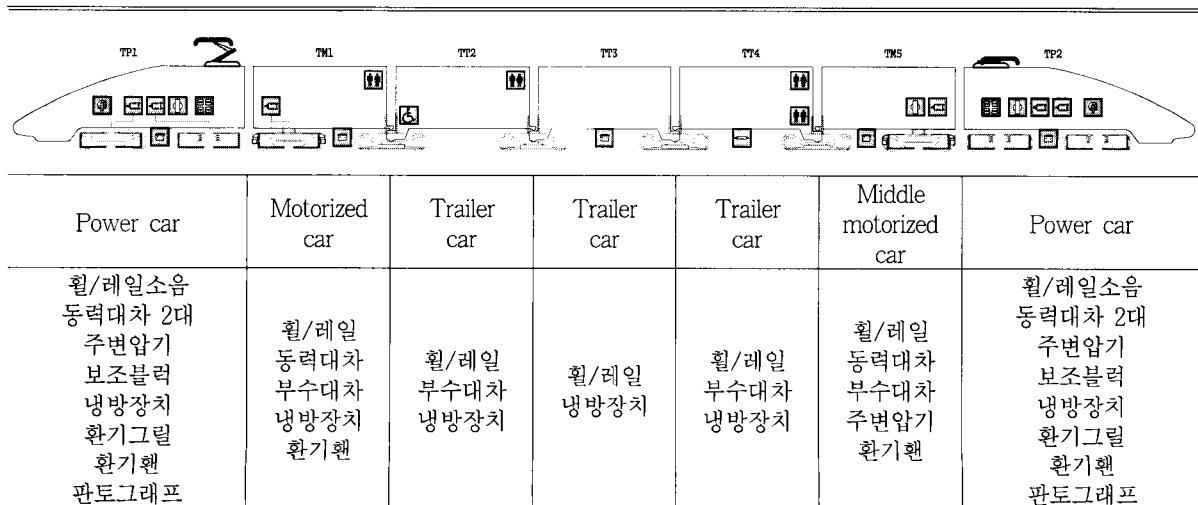


Fig. 1 시제차량의 편성과 주요 소음원의 구성

공력소음에 의한 음압레벨도 차량의 속도에 의존한다. 공력소음의 증가량 ΔL_p 는 다음과 같이 계산된다.⁽⁷⁾

$$\Delta L_p = 6 \cdot 10 \log (v_1/v_0) \text{ dB(A)}$$

$$= 4 \text{ dB(A)}$$

객실의 환기 및 냉각장치의 실내 음압레벨은 변화가 없다.

3 해외협력을 통한 실내외 소음의 예측

3.1 실내외 소음의 예측

한국형 고속전철의 실내외 소음을 정차중인 경우와 300 km/h, 350 km/h로 주행중인 경우에 대하여 예측하였으며 Table 3에서는 소음요구량과 예측된 음압레벨을 비교하여 보여주고 있다. 계산은 주요 소음원과 차량 구조의 주 소음경로에 대하여 수행하였다. 계산에 사용된 기본 데이터는 주요 소음원의 음압레벨과 바닥, 벽면, 천정 등의 차음량, 차량의 설계데이터 들이다.

Table 2를 보면 정차중인 경우와 300 km/h로 주행중인 경우의 차량의 실내외 소음의 음압레벨은 대체적으로 요구 사양을 만족할 수 있는 것으로 나타난다. 그러나 350 km/h에서 예측한 음압레벨은 주행중에 요구사양을 초과하는 것을 볼 수 있다. 이와같이 몇가지의 경우에는 소음저감방안이 필요하며 특히 동력객차의 동력실과 객실사이의 소음은 매우 민감하게 작용하며 따라서 이를 차단하기 위한 저감방안이 필수적으로 요구된다.

본 연구의 경우에 기본적인 입력데이터(각 소음원의 음향파워)는 독일의 경우를 사용한 것으로써 국내 개발품의 소음값과 다를 수 있기 때문에 계산오차는 예상오차를 초

과할 수 있다. 따라서 각각의 소음원의 음향파워를 측정값을 사용한다면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다.

Table 3 각 벽면의 초기 설계데이터

분류	재질구성	두께 [mm]	차음량 [dB]
1등객실 바닥	Carpet	7.5	46.5
	Cloth underlay	6.0	
	Floor panel	22.0	
	Air	11.5	
	Glass wool	50.0	
	Sound proof sealer	2.5	
	Al profile	70.0	
2등객실 바닥	Elastic rubber	4.0	46.7
	Wood panel	22.0	
	Air	11.5	
	Glass wool	50.0	
	Sound proof sealer	2.5	
	Al profile	70.0	
측벽	Nomex honey-comb	11.0	46.0
	Air	4.0	
	Mineral	50.0	
	Sound proof sealer	2.5	
	Al profile	40.0	
천정	Nomex honey-comb	11.0	47.3
	Glass wool	25.0	
	Air	100.0	
	Glass wool	40.0	
	Sound proof sealer	2.5	
	Al profile	30.0	

Table 2 고속전철의 소음요구량과 예측된 음압레벨

		소음요구량 300 km/h	동력객차(TM5) 300 km/h	객차(TT4) 300 km/h	동력객차(TM5) 350 km/h	객차(TT4) 350 km/h
외부소음	정차중 7.5 m		79 dB(A)	70 dB(A)	79 dB(A)	70 dB(A)
	주행중 25 m	91dB(A)	91 dB(A)	91 dB(A)	93 dB(A)	93 dB(A)
실내소음	정차중	60dB(A)	56 dB(A)	55 dB(A)	56 dB(A)	55 dB(A)
	주행중 (개활지)	66dB(A)	65 dB(A) center 66 dB(A) bogie	55 dB(A) center 66 dB(A) bogie	67 dB(A) center 69 dB(A) bogie	55 dB(A) center 69 dB(A) bogie
	주행중 (터널)	73dB(A)	72 dB(A) center 73 dB(A) bogie	62 dB(A) center 73 dB(A) bogie	74 dB(A) center 76 dB(A) bogie	62 dB(A) center 76 dB(A) bogie

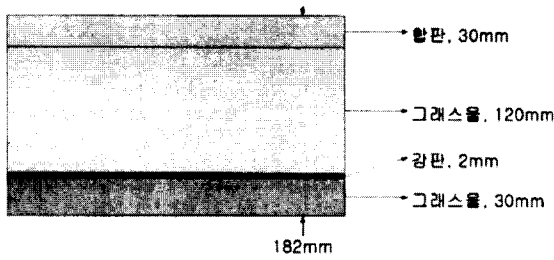


Fig. 2 독일에서 제안한 동력객차 내벽

3.2 실내의 소음예측결과

설계 데이터를 바탕으로 소음문제를 예측한 결과, 가장 민감한 부분으로 나타난 동력객차의 동력실과 객실사이의 차음벽의 경우에는 국내에서 제시된 설계사양이 근본적으로 차음량이 부족한 것으로 나타났으며 이에 대한 적절한 대책으로 새로운 차음설계를 제안하였다.

Table 2에 나타난 결과와 같이 동력객차의 객실과 동력실 사이의 내부 벽에서의 차음이 중요한 과제로 대두되었으며 이에 따라 독일측의 협력결과 Fig. 2와 같은 설계데이터를 제안하고 있다.

4. 실내외 소음예측결과의 재검토

4.1 벽면의 투과손실

차량의 벽면의 초기 설계데이터는 Table 3과 같다. 국내에서 설계된 바닥, 벽면, 천정의 도면을 바탕으로 벽면의 차음량을 계산하였으며 차음량 계산은 Table 4에서 보여주는 바와 같이 일본에서 사용되고 있는 실험식⁽⁸⁾을 적용하였다. Table 4의 방정식은 많은 실험을 통하여 구한 실험식으로서 매우 높은 신뢰도를 가지고 있으나 일부 고주파 영역에서 다소 큰 오차를 가지고 있다. Fig. 3은 Table 4의 실험식을 이용하여 구한 한국형 고속전철의 벽면의 투과손실의 예상치를 보여준다.

Table 4 투과손실과 면밀도의 관계식⁽⁸⁾

옥타브밴드 중심주파수	음향투과손실 [dB]	신뢰도
125 Hz	14.8 log M + 0.7	0.94
250 Hz	15.2 log M + 2.7	0.98
500 Hz	13.0 log M + 6.6	0.95
1000 Hz	13.9 log M + 11.3	0.91
2000 Hz	10.4 log M + 18.8	0.7
4000 Hz	5.1 log M + 25.4	0.41
8000 Hz	4.1 log M + 31.6	0.37
Overall	14.2 log M + 5.5	0.98

공기층효과 : 100 mm 미만 3~4 dB, 여기서는 4 dB
100 mm 이상 5~10 dB, 여기서는 7 dB

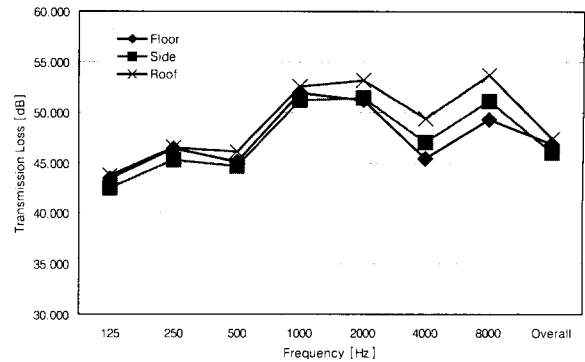


Fig. 3 벽면의 설계데이터에 의한 투과손실

Table 5 소음요구량과 예측된 음압레벨

		소음요구량 300 km/h	객차(TT4) 300 km/h	객차(TT4) 350 km/h
외부 소음	정차중 7.5 m		67.7 dB(A)	70 dB(A)
	주행중 25 m	91 dB(A)	91.2 dB(A)	93 dB(A)
실내 소음	정차중	60 dB(A)	55.3 dB(A)	55.3 dB(A)
	주행중 (개활지)	66 dB(A)	57.7 dB(A) center 64.7 dB(A) bogies	58.8 dB(A) center 66.8 dB(A) bogies

4.2 차량 실내외 소음의 예측

차량의 외벽의 초기설계 데이터의 타당성을 검증하기 위하여 차량주행시의 소음원의 크기와 차음량을 사용하여 객차(TT4)에서의 실내외 소음을 예측하였다.

차량이 정차중인 경우 객차의 내부소음에 영향을 미치는 소음원은 차량하부의 냉각장치만이 존재한다. 주행중(300, 350 km/h)인 경우에는 휠/레일 접촉소음, 대차공력소음 및 냉각장치의 소음이 차량의 벽면을 통하여 실내에 전달된다. 각 벽면에 입사하는 소음의 크기는 각각의 소음원에서 음향파워와 소음원으로부터 벽면까지의 거리별 감쇠를 고려하여 계산하였다. 벽면에서 투과된 소음은 벽면의 구조적 소음(structure borne sound)을 동반하게 되는데 차실 내부 벽면에서의 구조적 소음은 독일에서 계산한 것과 같이 벽면에서 투과된 소음의 량과 동일한 정도의 크기를 내는 것으로 가정하였다.⁽⁷⁾

Table 5에서는 벽면의 설계데이터를 바탕으로 계산된 차량의 실내외 소음레벨을 보여주고 있다. Table 5를 보면 정차중인 경우에는 실내소음은 소음요구량을 만족하는 것으로 볼 수 있다. 300 km/h로 주행중인 경우에 객차의 실

내소음은 소음요구량을 만족하는 반면에 350 km/h로 주행하는 경우, 대차상부에서는 소음요구량을 약간 초과하는 것을 볼 수 있다.

4.3 동력객차 실내벽의 차음량설계

객차의 실내소음을 예측한 결과 각 벽면의 설계데이터는 사용가능할 것으로 판단되었다. 동력객차의 객실내벽을 설계검토하기 위하여 외벽의 소음설계 데이터를 동력객차(TM5)에 적용하여 정차중 및 주행중의 실내의 소음을 예측하였다.

정차중인 경우 동력객차의 객실내부에 영향을 미치는 소음원은 냉각장치와 천장의 환기팬, 측벽의 환기그릴이며 주행중인 경우에는 휠/레일접촉소음, 대차공력소음, 기어박스, 환기팬, 환기그릴, 냉각장치, 판토공력소음, 건인전동기 소음 등이 작용한다.

객차에서의 차실내소음의 예측방법과 마찬가지로 계산한 결과 동력객차의 객실내에서의 소음량은 Fig. 4와 같이 나타났다.

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 차실내의 소음이 소음요구량인 66 dB(A)를 만족하기 위해서는 동력객차 내벽의 차음량은 약 36 dB를 초과하여야 한다. 동력객차에서 소음에 크게 영향을 주는 건인전동기의 경우에 소음특성은 200 Hz 이상에서 두드러진 주파수 특성을 보인다. 반면에 차음량은 주파수가 낮아질수록 떨어진다. 그러므로 소음 차음량은 200 Hz이상의 주파수 범위에서 36 dB이상이 되어야 한다.

본 연구에서는 독일에서 제시된 소음설계데이터를 기초로 200 Hz이상에서 36 dB이상의 투과손실을 보일 수 있는 벽면으로 Fig. 5와 같은 벽면을 제시하고자 한다. 독일에서 제시된 내벽의 경우에 객실쪽 면에는 패널을 사용하여 마감처리 하였으나 동력실쪽에는 covered glass wool로 마감처리하여 동력실내부의 열 및 바람에 약하게 설계되어있다. 따라서 본 연구에서는 객실쪽 면과 같이 패널을 사용하여

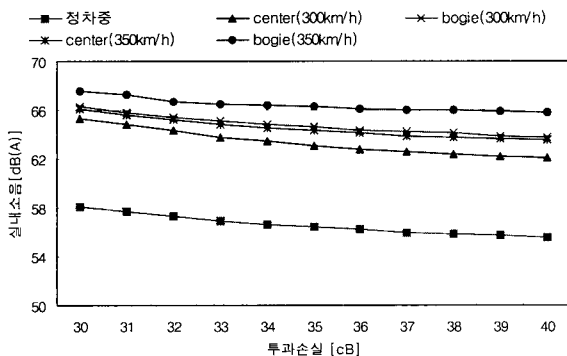


Fig. 4 내벽의 투과손실에 따른 실내소음 예측

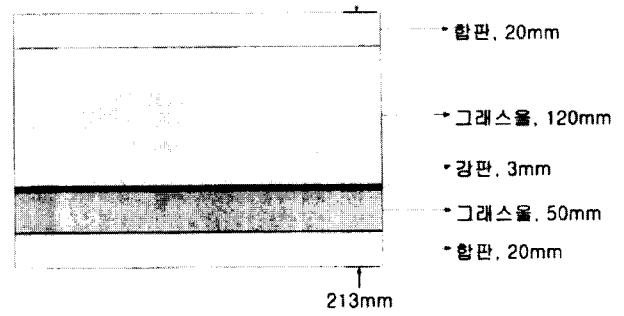


Fig. 5 동력객차 내벽의 설계제안

마감처리함으로써 면을 경한 재질로 변경하고 약 2 dB의 저감효과를 추가적으로 얻고자 한다. 또한 현상태에서 내벽에 출입문을 다는 것은 소음차단에 악영향을 미칠 우려가 있으므로 틈새의 마감설계에 세심한 주의가 필요하다. Fig. 6에서는 독일에서 설계된 내벽과 새로 제시하고자 하는 내벽의 투과손실량을 비교하고 있다.

부가적으로 정차중인 경우와 주행중인 경우의 소음 요구량을 만족시키기 위한 소음저감방안에는 여러 가지 방안이 제시될 수 있다. 지금까지의 설계 데이터를 바탕으로 지적하면 동력차 및 동력객차의 경우에는 ①건인 전동기, 기어박스, 변압기에 대한 진동절연, ②전동기 그릴, 환기그릴에 tube damper 사용, ③수평 전동기 환기 그릴의 사용, ④2중 절연된 바닥의 사용, ⑤객실과 동력실 사이에 문을 제거하고 2중벽 사용, ⑥벽면 내부에 흡음재 사용 등을 제안할 수 있다. 또한 대차의 경우에는 Wheel absorber나 공기스프링을 사용하는 면에서 최적한 감쇠장치의 설계가 필요한 것으로 판단된다. 이러한 것들은 제작을 위한 상세설계 단계에서 충분히 고려되어야 한다.

4.4 부품 개발사를 위한 소음요구량의 제안

소음요구사항을 만족시키기 위하여 각각의 주요 시스템의 실제 음향 파워레벨은 계산에 사용된 음향파워레벨보다

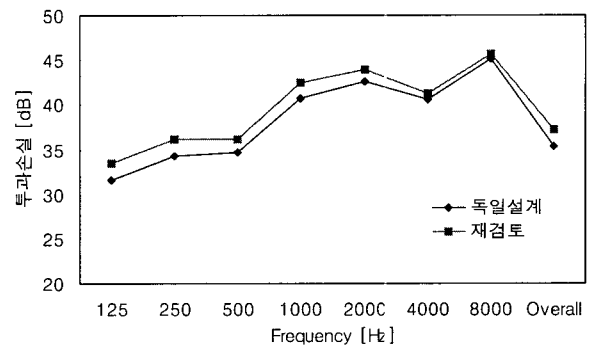


Fig. 6 동력객차 내벽의 투과손실비교

Table 6 주요부품의 소음요구량

소음원	음향과위레벨	
	무부하상태	300 km/h 주행시
견인전동기	---	125 dB(A)
주변압기	90 dB(A)	100 dB(A)
기어박스	---	113 dB(A)
환기그릴	100 dB(A)	115 dB(A)
환기팬	105 dB(A)	120 dB(A)
냉각장치	---	94 dB(A)
판토그래프	---	119 dB(A)

높아서는 안된다. 그러므로 각각의 주요시스템에 대하여 Table 6과 같은 소음량을 만족시킬 수 있어야 한다. 또한 부품사와의 계약에는 각각의 장치에 대한 음향과위레벨을 명기할 수 있는 사항을 포함할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 앞으로 설계 제작될 한국형 고속전철의 정차중 및 주행중의 소음요구량에 대하여 우선 개략적으로 검토하였다. 독일에서의 국제협력을 통하여 정차중 및 주행중의 실내외 소음을 예측하였으며 국내에서 재검토하여 새로운 설계안을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 정차중 및 300 km/h, 350 km/h로 주행 중인 동력객차 및 객차 차량에 대하여 소음을 예측하였으며 실내소음의 취약부위인 동력객차의 내벽에 대하여 소음 요구량을 만족할 수 있는 소음설계안을 제시하였다.

현재 설계 사양을 기준으로 볼 때, 제안된 소음저감 방안을 적용하면 한국형 고속전철은 300km/h의 속도에 대한 주행중 및 정차중의 소음사양을 만족시킬 수 있는 가능성이 충분한 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 "차량시스템 엔지니어링기술 개발"과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김정태, 1996, "고속철도 소음의 전파특성", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, pp. 73~79.
- (2) Gautier, P.E. and Guccia, L. 1996, "Designing high-speed Railway System: Noise Challenges", Proceedings of Internoise 96, pp. 289~293.
- (3) Morikawa, T. 1996, "Simulation of Wayside Time-Dependent Noise Level on Shinkansen and Aanalysis of Noise Sources for Their Contribution to the Noise Level", Proceedings of Internoise 96, pp. 281~284.
- (4) 이상윤, 이우식, 1999, "평판형 주름판넬에 대한 등가 연속체 평판 모델링 기법", 대한기계학회 동역학 및 제어 부문 하계학술대회논문집, pp. 177~184.
- (5) 김석현, 박정철, 박정모, 김종년, 1999, "철도차량용 주름패널의 투과손실", 대한기계학회 동역학 및 제어부문 하계학술대회논문집, pp. 185~191.
- (6) 김석현, 박정철, 김종년, 1999, "철도차량용 알루미늄 압출재의 투과손실", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 81~86.
- (7) DWA IfS, 1999, "Korean High Speed Train", Technical Library 2,99.52.
- (8) Ito Dakeshi, "騒音制御工學", コロナ社, 1973.
- (9) Standard VDI 1714, 1988, "Noise Radiation in Free Fields".
- (10) 한국생산기술연구원, 1999, "한국형 고속전철 시제 차량 기본사양".
- (11) 한국생산기술연구원, 1999, "고속전철기술개발사업 3차년도(분기) 연구결과 발표자료(차량시스템 /부품 개발 분야)".