

한국형 고속전철(KHST) 실내소음 설계기준을 위한 주요 소음원의 허용소음도

The allowable sound levels of major noise sources for the indoor-noise requirements of KHST

조국래¹, 이우식²
Kook-Lae Cho and Usik Lee

Key Words : KHST (한국형 고속전철), KTX (경부고속전철), Indoor-Noise (실내소음),
Transmission Loss (투과손실), Acoustic Design Requirements (소음설계기준)

Abstract

It is required that the indoor-noise level of KHST (Korean High Speed Train) should be lower than 66 dB(A) at 300 km/h. In this study, the indoor-noise level of KHST has been predicted to determine the maximum allowable sound power levels of major noise sources. It is found that the indoor-noise requirements for KHST can be met by increasing the transmission losses of the floor and side-wall structures as well as by lowering the sound power levels of the major noise sources.

1. 서론

고속전철 실내소음은 쾌적한 승차환경을 결정짓는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 고속전철 기술개발 사업에서 개발하고자하는 한국형 고속전철(KHST)은 경량화를 위하여 차체구조를 알루미늄 압출재로 설계하고 있다. 따라서, KHST의 실내소음 여건은 경부고속전철(KTX)에 비해 불리해진 입장이다. 본 연구에서는 기존의 연구[1]에 이어, KHST의 실내소음도가 Table 1에 보인 실내소음을 만족하도록 하기 위하여 실내소음에 영향을 미치는 주요 소음원을 조사·파악하여 객차와 동력객차를 대상으로 실내소음을 예측하고, 실내소음도 예측결과를 바탕으로 하여 실내소음 설계기준을 만족하기 위해 규제되어야할 주요 소음원을 설정한 후, 주요 소음원의 한계 허용소음도를 산정함으로써 소음원 규제에 대한 가이드라인을 제시하였다.

2. 실내소음 예측기법

Bombardier사의 'Korean High Speed Train (KHST): Final Report 1999'는 KHST 초기설계 도면을 근거로 하여 객차와 동력객차의 실내소음을 예측한 내용을 다루고 있다[4].

Table 1 Indoor noise requirements for KTX and KHST [2,3]

운행 조건	KTX (계약조건)			KHST (시스템 기본사양)		
	위치	개활지	터널내	위치	개활지	터널내
300 km/h	객차 객실	66	7dB(A) 상승	객실	66	73
	동력 객차 객실	70			78	80
	운전 실	78			78	80
정차중	객실	60	-	객실	60	-

1 인하대학교 기계공학과 대학원

2 인하대학교 기계공학과 교수

본 연구에서는 Bombardier사의 실내소음 예측기법을 먼저 평가한 후, KHST의 실내소음 예측에 적용하였다. Bombardier사의 실내소음 예측기법에서는 (1) 외부 airborne 소음원에 의한 실내소음, (2) 내부 airborne 소음원에 의한 실내소음, 그리고 (3) 외부 structure borne 소음원에 의한 실내소음을 각각 산출한 후 이들을 대수적으로 합하여 전체 실내소음을 예측하였다. Table 2는 외부 airborne 소음원에 의한 실내소음을 예측하는 과정을 보여주는 예이다.

Table 2 An example of indoor-noise prediction by Bombardier [4]

Sources	Sound Power Lwa [dB(A)] ①	Outdoor Level La [dB(A)] ②	Noise Insulation Rw [dB] ③	Separation Area S [m ²] ④	Eq. Absorption Area A [m ²] ⑤	Indoor Level Li[dB(A)] ⑥
1 Air-Con	94.0	86.0	61	12.00	9.00	23.2
1 Motor Venti Fan	105.0	100.0	57	9.00	9.00	40.0
1 Traction T/F	90.0	85.0	57	9.00	9.00	25.0
Indoor Airborne Noise Level						40

Bombardier사의 실내소음 예측기법을 살펴보면, 외부 소음원의 소음도가 PWL (sound power level)로 주어질 때 (Table 2의 ①) 먼저 외부벽면 부위에서의 소음 SPLout 는 다음 식을 이용하여 계산한다 (Table 2의 ②).

$$SPL_{out} = PWL + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (dBA) \quad (1)$$

식 (1)에서 Q는 directivity, r은 소음원에서 외부 벽면까지의 거리, R은 room constants이다. 위 식은 외부 점음원의 소음도가 PWL로 주어질 때 (Table 2의 ①), 외부벽면 근처 (5~10 mm)에서의 SPL값 (Table 2의 ②)을 나타낸다. 그리고 소음원 데이터가 SPL로 주어지는 경우, 해당 소음원의 PWL 값은 다음 식을 이용하여 구한다.

$$PWL = SPL + 10 \log r^2 + 8 \quad (dBA) \quad (2)$$

실내소음 SPLin (dBA)는 투과하는 벽체 구조의 투과 손실(sound reduction index) Rw (Table 2의 ③), 투과면의 면적(separation area) S (Table 2의 ④), 차실 내부의 등가흡음면적 (equivalent absorption area) A (Table 2의 ⑤)를 고려하여 다음 식으로부터 구한다

(Table 2의 ⑥).

$$SPL_{in} = SPL_{out} - R_w - 10 \log \left(\frac{A}{S} \right) - 3 \quad (3)$$

식 (3)은 독일공업규격 DIN 52210 (Part 5)에 근거하며, 마지막 상수항인 -3 dB는 반사음향소음 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

Bombardier사의 실내소음 예측기법에서는 경험적으로 외부 structure borne 소음원에 의한 실내소음이 외부 airborne 소음원에 의한 실내소음과 같다고 보았다.

각 소음원에 의한 실내소음이 계산되면 즉, SPL1in, SPL2in ...이들 소음의 총합은 식(4)와 같이 대수합에 의하여 계산된다[11].

$$10 \log \left(10^{SPL_{in}/10} + 10^{SPL_{in}^2/10} \dots \right) \quad (4)$$

Table 3 Noise sources of KHST (T: 객차, M: 동력객차)

대분류	소분류	소음도		차량종류	출처	
		[dB(A), 300km/h]				
기계소음	Traction Motor	125	-	M	[6]	
	Inverter	78	70.0 (1m)	T	[5]	
	Motor Block	90	-	M	[6]	
	Aux Block	98	90.0 (1m)	M	[5]	
	Motor Vent Fan	114	92.2 (5m)	M	[5]	
	Gear Box	123	-	M	[6]	
	Motor Vent Grid	115	-	M	[4]	
	Traction T/F	100	-	M	[6]	
	Air-Con	Condenser	102	80.0 (5m)	M,T	[7]
		Evaporator	94	72.0 (5m)	M,T	[7]
	감속구동장치	1 차	125	117.0 (1m)	M	[6]
		2 차	125	117.0 (1m)	M	[6]
	여압장치	Blower	86	64 (5m, 개활지)	M,T	[7]
			95	73 (5m, 터널내)		
	구름소음	창문투과구름소음	-	89.0	M,T	[1]
바닥투과구름소음		-	97.0	M,T	[1]	
공력소음	Pantograph	127	91.0(25m)	M	[6]	
	Bogie 공력소음	111	89.4 (5m)	M,T	[8]	
	차체 공력소음	-	98.0	M,T	[1]	
실내소음	HVAC 실내소음	-	55.0	M,T	[5]	
	여압장치실내소음	N/A	N/A	M,T	-	
구조소음		≅ 기계소음		M,T	[4]	

3. KHST 실내소음 데이터

객차 및 동력객차 실내소음과 관련된 소음원을 다양한 출처로부터 수집·조사하여 기계소음, 구름소음, 공력소음 및 구조소음 등으로 분류하였으며 수집된 대부분의 소음원 데이터의 경우 소음도와 측정거리 정도만 출처에 명시되었을 뿐 소음도의 측정조건에 대하여는 명확히 밝히지 않고 있어 소음원 데이터의 모호성이 다소 존재하는 것으로 판단한다.

KHST 객차(TT4) 및 동력객차(TM5)의 실내소음 예측에 사용된 소음원 데이터만을 Table 3에 요약하였다.

Table 4 The surface areas of noise transmission and the equivalent absorption areas of KHST

차 부	종 위	객 차		동 력 객 차	
		객실중앙	대차상부	객실중앙	대차상부
투과 면적 S(m ²)	바 닷	34.6	7.0	20.8	7.0
	창 문	7.4	3.0	3.7	3.0
	천 정	34.6	7.0	20.8	7.0
	격 벽	5.9	5.9	5.9	5.9
등가흡음면적 A (m ²)		9.0	1.2	9.0	1.2

Table 5 Distances from noise sources to the centers of bounding elements [14]

대 분 류	소 분 류	측 정 거 리 r (m)				
		객 차		동 력 객 차		
		객실 중앙	대차 상부	객실 중앙	대차 상부	
기 계 소 음	Traction Motor	-	-	11.0	15.0	
	Motor Block	-	-	7.5	7.5	
	Inverter	3.0	9.5	-	-	
	Aux Block	-	-	1.5	1.5	
	Motor Ventil. Fan	-	-	6.0	6.0	
	Gear Box	-	-	11.0	15.0	
	Motor Ventil. Grid	-	-	9.0	13.0	
	Traction T/F	-	-	3.5	3.5	
	Air- Cond	Condenser	3.5	2.5	1.0	3.0
		Evaporator	1.5	5.0	1.5	5.0
		감속구동장치 1/2차	-	-	11.0	15.0
		여압장치	1.0	7.0	3.0	7.0
공 력 소 음	Panto-공력소음	-	-	18.0	22.0	
	Bogie 공력소음	9.0	1.5	5.5/11	1.5/15	

음이 투과하는 투과면의 면적(S)과 차실의 등가 흡음면적(A)은 Table 4에 나타내었고, 소음원으로부터 투과면 중심까지의 거리(r)는 Table 5에 나타내었다. 소음원 가운데 여압장치 관련 소음은 데이터가 없는 관계로 본 실내소음 예측에서 제외되었다.

고속전철의 외부에서 실내로 유입되는 소음도의 크기는 차량구조 (바닥, 벽면, 창문, 천장 등)의 투과손실에 크게 좌우된다. Table 6은 KTX의 투과손실(STC) [1], Bombardier사가 사용한 KHST의 투과손실(Rw) [4], 본 연구과제에서 사용한 KHST의 투과손실(STC)을 보여주고 있다. ASTM E90 내지는 ISO 140-3에 근거하는 STC는 독일 DIN 52210에 근거하는 Rw와 대동소이하다. 현장에서 측정되는 실제적인 투과손실 값은 잔향실법에 근거하여 측정하거나 해석적으로 예측한 투과손실 값에 비하여 경험적으로 약 5 dB 또는 그 이상 작은 것으로 알려져 있다. [4,10] 따라서, Table 6에 표기된 본 연구의 STC값은 잔향실법에 근거하여 해석적으로 산출한 STC값에서 5dB를 감(-)하여 결정한 값이며, 이 값들을 본 연구의 실내소음도 예측에 사용하였다.

Table 6 Transmission losses(STC) for various structure parts [1,4]

차체 부위	KTX	KHST	
		Bombardier사	본 연구
바 닷	40	61	42 (객실 중앙부)
			47 (대 차 상 부)
측 면	36	49	42 (객실 중앙부)
			33 (대 차 상 부)
천 정	40	57	40 (객실 중앙부)
			N/A (대차상부)
유리창	30	N/A	31
격 벽	-	57	38(동력객차 격벽)

350 km/h에서의 실내소음 예측을 위하여 속도 증가에 따른 소음원별 소음도의 증가량은 아래의 실험식 (5)에 의해 결정하였다 [4,15].

$$\Delta L_p = \alpha \times 10 \text{Log} \left(\frac{V_1}{V_0} \right) \text{ dBA} \quad (5)$$

식 (5)에서 V0는 기준속도로서 300km/h이고 V1은 350km/h이다. α는 소음지수로서 기계소음의 경우 1, 구름소음은 3, 공력소음은 6, 판토그래프 소음은 7을 사용하였다. KTX의 실내소음 기준[2]에 따르면 터널

내 실내소음이 개활지보다 7 dB(A) 큰 것으로 되어 있다. 따라서, 본 연구에서도 개활지에서의 실내소음에 7 dB(A)을 더하여 터널내 실내소음을 예측하였다.

4. KHST 실내소음 예측결과

Table 7은 객차(TT4)와 동력객차(TM5)의 실내소음 예측결과이며, 이 결과에는 여압장치 관련소음의 영향이 포함되어 있지 않다.

Table 7 Indoor-noises predicted for KHST

소음원	예측 소음도 [dB(A)]											
	정 차 중		300 Km/h				350 Km/h					
	객 차	동력 객차	객 차	동력 객차	객 차	동력 객차	객 차	동력 객차	객 차	동력 객차		
	객실 중앙	대차상부	객실 중앙	대차상부	객실 중앙	대차상부	객실 중앙	대차상부	객실 중앙	대차상부		
개활지	56	56	61	60	65	69	72	73	69	73	74	75
터널내	-	-	-	-	73	76	79	80	76	80	81	82

Table 8 Indoor-noise requirements for various high speed trains

차 량	위 치	객 차		동력객차		
		객실 중앙	대차상부	객실 중앙	대차상부	
개활지	정차중	KTX	60	-	(60)	-
		KHST	60	-	(60)	-
	300 km/h	TGV-A	66	-	-	-
		KTX	66	-	70	-
		KHST	66	-	(66)	-
		본 연구	67	71	-	-
360 km/h	TGV-A	71	-	-	-	
터널내	300 km/h	KTX	73	-	77	-
		KHST	73	-	(73)	-
	350 km/h	KHST	-	-	-	-

본 연구에서 예측된 결과와의 비교를 위하여 TGV-A의 실내소음 (실측치) [13], KTX의 실내소음 [2], KHST의 실내소음 (고속전철 기본사양) [3], G-7 보고서에서 예측된 KTX의 실내소음 [1]을 Table 8에 첨부하였다. Table 7의 실내소음 예측결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

4.1 정차시

정차시에는 KHST의 실내소음 기본사양을 대체로 만족하고 있다.

4.2 300 km/h 주행시

(1) 객차 객실중앙부의 경우

예측된 실내소음은 65 dB(A)로서 TGV-A의 66 dB(A), KTX의 66 dB(A)와 거의 비슷한 수치이며, KHST의 실내소음 기본사양 66 dB(A)을 대체로 만족하고 있다.

(2) 동력객차 객실중앙부의 경우

예측된 실내소음은 72 dB(A)로서 KTX의 70 dB(A)에 비해 약 2 dB(A)가 높다. KHST의 경우 Motor Ventilation Fan 소음이 지배적임을 알 수 있다.

(3) 객차 대차상부의 경우

예측된 실내소음은 69 dB(A)로서 기존의 G-7연구[1]에서 예측한 KTX의 실내소음보다 약 2 dB(A)가 작다. 이는 기계소음의 영향이 작고 상대적으로 창문과 바닥으로 투과하는 구름소음과 공력소음의 영향이 큰 객차의 경우 KHST의 투과손실값이 KTX에 비하여 상대적으로 향상되었기 때문이다.

(4) 동력객차 대차상부의 경우

예측치가 73 dB(A)로서 동력객차 객실중앙부의 예측치 72 dB(A)와 거의 비슷한 수치이다. 객실중앙부의 경우 기계소음이 지배적인 반면, 대차상부에서는 출입문 부위로 투과되는 공력소음의 영향이 크게 지배적이다.

4.3 350 km/h 주행시

객실중앙부에서 69 dB(A)의 실내소음이 예측되었다. 이는 TGV-A의 실측치인 약 70 dB(A)와 유사한 수치이다. 주행속도가 300 km/h에서 350 km/h로 증가함

에 따라, 객차의 경우 약 4 dBA 정도의 실내소음이 증가하고 동력객차의 경우에는 약 2 dBA 정도의 실내소음이 증가하고 있다. 객차의 경우 공력소음의 비중이 가장 지배적이기 때문에 소음지수 $\alpha=6$ 에 따른 공력소음의 증가가 곧바로 4 dBA 정도의 전체소음 증가효과를 가져다 주었고, 동력객차의 경우에는 기계소음 등의 비중도 상대적으로 크기 때문에 전체적으로는 2 dBA 정도만의 실내소음 증가를 가져온 것으로 판단된다.

4.4 300 km/h 터널내 주행시

300 km/h로 터널내 주행시, 객차 객실중앙부에서의 예측치는 73 dB(A)로서 KHST 실내소음 기본사양인 73 dB(A)을 만족하고 있다. 동력객차 객실중앙부에서는 예측치가 79 dB(A)로서 KTX의 기준인 77 dB(A)보다 약 2 dB(A) 초과하고 있다. 터널내에서 가동되는 여압장치에 의한 소음의 영향을 반영할 경우 실내소음 예측치는 Table 7에 비하여 상당량 증가할 것으로 예상되어 적극적인 실내소음 저감대책이 필요할 것으로 판단된다.

5. 주요 소음원의 최대허용소음도

KHST 실내소음 기본사양에 따르면 실내소음 설계기준 (Table 1)은 객차와 동력객차와의 구별없이 객실에 대하여 정차시(개활지)에는 60 dB(A)로 정하고, 300km/h 주행시에는 개활지에서 66 dB(A), 터널내에서 73 dB(A)로 정하고 있다. 여기에서는 Table 7에 보인 실내소음 예측결과를 바탕으로 하여 실내소음 설계기준을 만족시키기 위하여 주요 소음원의 소음도를 어느 정도로 규제해야 하는가를 검토하였다. 먼저, Table 7의 예측결과에는 여압장치 유발소음(인버터 장치소음과 실내유입소음)이 포함되어 있지 않다.

5.1 정차시

정차시 객차 객실중앙부의 실내소음 예측치는 실내소음 설계기준을 만족하고 있다. 동력객차의 경우 1 dB(A) 정도 설계기준을 초과하고 있다.

5.2 300km/h 주행시

(1) 객차 (TT4)

객실중앙부에서의 실내소음 예측치가 대체적으로 설계기준을 만족하고 있으나, 여압장치의 가동으로 인하여 실내소음 증가가 예상된다. 이 경우, 실내소음도를 좌우하는 주요 소음원은 공력소음(63 dB)과 여압장치 유발소음이다.

공력소음이 63 dB(A)로 유지되는 경우, 개활지에서의 여압장치 유발소음은 59 dB(A)이하로 규제해야 한다. 공력소음이 거의 창문을 통해 유입되고 있음을 감안할 때 창문의 투과손실을 +4 dB 정도로 향상시키는 경우 (예로, Saflex 접착기법 사용)에는 개활지에서의 여압장치 유발소음 규제치를 64 dB(A)이하로 조정할 수 있다.

(2) 동력객차 (TM5)

KHST 실내소음 설계기준을 6dB(A) 초과하고 있다. 그러나, KTX의 설계기준 (개활지 70, 터널내 77)과 비교할 때 2 dB(A) 초과한다. 여기에서는 두 가지 설계기준 즉, 현재 수준의 투과손실과 + 4 dB(A) 개선된 투과손실의 두 경우에 대하여 주요소음원에 대한 최대허용소음도를 Table 9에 정리하였다.

Table 9 Allowable maximum sound levels of the major noise sources of KHST

설계 기준	현재의 투과손실		+ 4dB 개선된 투과손실	
	예 측 실내소음	주요소음원 허용소음도	예 측 실내소음	주요소음원 허용소음도
KHST 66dB(A)	72	Table 10 참조	68	Table 11 참조
KTX 70dB(A)	72	Table 12 참조	68	여압장치 유발소음 ≤ 64 dB(A)

현재의 KHST 투과손실값 (Table 2)을 유지하면서 설계기준을 만족하기 위해서는 Table 10에 보인 예와 같이 측정위치에서 상대적으로 소음 기여도가 높은 주요 기계소음원의 소음도를 규제해야 한다.

Table 10 A noise reduction plan for the major machinery noise sources (PWL, dB)

기계장치 소음원명	현재 소음도	허용 소음도	기계장치 소음원명	현재 소음도	허용 소음도
Traction Motor	125	118	감속구동장치 1차	125	118
Motor Fan	114	99	감속구동장치 2차	125	118
Gear Box	123	118	Condenser	102	100
Motor Grid	115	113	Traction T/F	100	99

KHST 차체구조의 투과손실을 품재의 충전을 통하여 4 dB(A) 정도 향상시킬 수 있는 경우, Table 11에 보인 것처럼 KHST 설계기준을 만족하기 위하여 Motor Fan 소음도를 최소한 107 dB(A) 이하로 규제하고 동시에 여압장치 실내소음은 57 dB(A) 이하로 규제해야 한다.

반면에, KTX 설계기준을 만족해도 되는 경우에는 Table 12에 보인 것처럼 Motor Fan 소음도를 109 dB(A) 이하로 규제하고 동시에 여압장치 실내소음은 61 dB(A) 이하로 규제해야 한다.

Table 11 Allowable maximum sound levels of major two sound sources to satisfy the acoustic design requirements of KHST with 4dB improved TL

Motor Fan PWL (dB)	114	68	68	69	69	69	69	69
	113	68	68	68	68	68	68	69
	112	68	68	68	68	68	68	68
	111	67	67	67	67	68	68	68
	110	67	67	67	67	67	68	68
	109	67	67	67	67	67	67	68
	108	67	67	67	67	67	67	67
	107	66	66	67	67	67	67	67
	106			66	67	67	67	67
소음원 소음도	55	56	57	58	59	60	61	
여압장치 실내소음 [SPL, dB(A)]								

Table 12 Allowable maximum sound levels of major two sound sources to satisfy the acoustic design requirements of KTX with the present TL

Motor Fan PWL (dB)	114	72	72	72	72	72	72	72
	113	72	72	72	72	72	72	72
	112	71	71	71	71	71	71	71
	111	71	71	71	71	71	71	71
	110	71	71	71	71	71	71	71
	109	70	70	70	70	71	71	71
	108					70	70	71
	107							70
	106							
소음원 소음도	55	56	57	58	59	60	61	
여압장치 실내소음 [SPL, dB(A)]								

6. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Bombardier사의 실내소음 예측기법의 내용을 분석하고 신뢰성을 검증한 후, 이 기법을 KHST 객차 및 동력객차의 실내소음 예측에 사용하였다.
- (2) KHST 실내소음 설계기준을 만족하기 위해서는 각 차음구조의 투과손실 값을 현 수준보다 향상시켜야 하고, 동시에 Motor Fan을 포함하는 기계소음과 여압장치 유발소음이 적절히 규제되어야 한다. 이들 주요 소음원에 대한 최대 허용소음도 규제에 대한 가이드-라인을 제시하였다.

후기

본 연구는 1999년도 건설교통부/과학기술부/산업자원부가 지원하는 “고속전철기술개발사업”의 일환으로 수행된 위탁연구결과의 일부이다.

참고문헌

1. 인하대학교, 1998, 진동소음해석 및 저감기술개발, G7 연차보고서
2. Korea High Speed Rail Construction Authority and Korea TGV Consortium, Contract: Seoul-Pusan

High-Speed Rail Project

3. 한국철도연구원, 1998.3, 고속전철 시스템 기본사양
4. Bombardier Transportation, DWA-IFS, 1999, Korean High Speed Train: Final Report 1999, Report No. Technical Library 2.99.52.
5. 한국철도차량(주) 제공자료
6. 한국생산기술연구원 제공자료
7. 대우캐리어주식회사 제공자료
8. Pallas, M. A., Schmitz, K. P., Barsikow, B., Fodiman, P., and Holz, G., 1994, "DEUFRAKO: Localized Sound Sources on the High-Speed Vehicles ICE, TGV-A, and TR07," WCCR'94, Paris, pp. 377-383.
9. 한국고속철도건설공단, 1995, 고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구 : 환경기준 및 방음대책편
10. Pelton, H. K., 1993, Noise Control Management, Van Nostrand Reinhold, N.Y.
11. Irwin, J.D. and Graf, E.R., 1979, Industrial Noise and Vibration Control, Prentice-Hall, Inc., N.J.
12. DIN 52 210, Part 5, Airborne and Impact Sound Insulation
13. Mauclair, M. B., 1990, "Noise Generated by High Speed Train: New Information Acquired by SNCF in the Field of Acoustics Owing to the High Speed Test Programme," InterNoise'90, pp. 371-374.
14. 한국철도차량(주) 제공 KHST 설계도면
15. Barsikow, B. and Muller, B., 1993, "Relevant Sound Sources Generated by the High-Speed Railway Train ICE of the Deutsche Bundesbahn and How They Are Accounted for in Model Calculation of Wayside Noise Prediction," Proc. Int. Conf. Speedup Tech. Railway Maglev Vehicles, Yokohama, Japan, pp. 49-54.