

## 초전도 선형동기전동기 추진 휠-레일 고속열차의 동특성 분석

이진호\*, 이창영<sup>1</sup>, 조정민<sup>1</sup>, 한영재<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국철도기술연구원 고속철도연구본부

### Dynamic Analysis of Wheel-Rail High Speed Train Propelled by Superconducting Linear Synchronous Motor

Jin-Ho Lee<sup>\*</sup>, Chang-Young Lee<sup>1</sup>, Jeong-Min Jo<sup>1</sup>, Young-Jae Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup>High-speed Railroad Systems Research Center Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 논문에서는 기존 휠-레일 고속열차에 자기부상열차의 추진방법을 적용한 하이브리드 방식의 고속열차의 주행 동특성에 대해서 연구하였다. 초전도 선형동기전동기를 추진 동력으로 하는 휠-레일 방식의 고속열차는 강력한 추진력을 지니면서도 자기부상열차에 비해 기존 선로와의 호환성 및 경제성 측면에서 유리할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 초전도 선형동기전동기를 기존의 휠-레일 고속철도에 적용하는 두 가지 방안에 대해서, 초전도 선형동기전동기 추진이 휠-레일 고속열차의 동특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자의 상호 작용을 검토하고 이를 포함한 차량의 동특성 모델을 구축하였다. 구축된 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자의 상호 작용이 주행 중 고속 안정성, 승차감 및 가이드웨이 불규칙도에 미치는 영향을 분석하였다.

**Abstract** This study examined the running dynamic characteristics of a hybrid type wheel-rail high speed train, in which the propulsion method of maglev is applied. A wheel-rail high speed train propelled by a superconducting linear synchronous motor (SC-LSM) is expected to be superior to a maglev train regarding economical and interoperable aspects, still having powerful thrust force as maglev. In this paper, regarding the two methods of applying the SC-LSM to an existing wheel-rail train, to investigate the influences of SC-LSM propulsion on the dynamic characteristics of wheel-rail high speed train, the dynamic model of train including interaction between the rotor and stator of SC-LSM is established. Through the simulation using the model, the influence of the interaction between the rotor and stator of SC-LSM on stability, ride comfort and the effect of guideway irregularity are investigated.

**Keywords** : Wheel-Rail High Speed Train, Superconducting electromagnet, Linear Synchronous Motor, Dynamic Analysis

### 1. 서론

전 세계적으로 열차의 고속화를 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 우리나라의 경우 휠-레일 방식의 차세대 고속열차로 개발 중인 HEMU가 2013년 3월 421km/h의 최고속도를 달성함으로써 휠-레일 방식의 열차로는 세계 4위의 기록을 수립하였으며, 일본의 자기부상열차인

MLX는 2015년 4월 603km/h의 속도를 달성함으로써 지상교통수단으로는 가장 빠른 기록을 보유하게 되었다. 자기부상열차는 선형동기전동기를 사용함으로써 회전형 견인전동기 기반의 점착 구동방식을 사용하는 휠-레일 열차에 비해 고속화에 유리하다. 또한 추진력을 발생히는 선형동기전동기가 차상이 아닌 궤도에 설치되기 때문에 대용량 급전이 가능하고, 추진 장치가 없는 차량을 가

본 연구는 한국철도기술연구원본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1501A)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Jin-Ho Lee(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5235 email: jinholee@krri.re.kr

Received September 16, 2015

Revised November 24, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

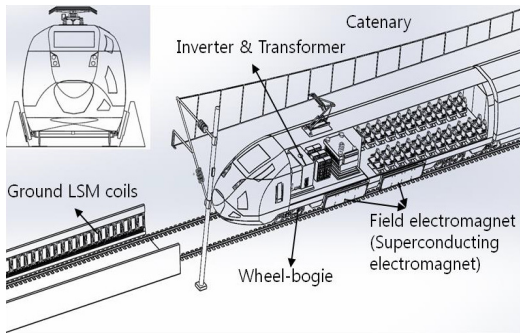


Fig. 1. Concept of high speed train propelled by SC-LSM[1]

볍게 만들 수 있는 것도 고속화에 유리한 점이다. 그러나 자기부상열차의 경우 부상을 위해서 기존의 휠-레일 방식과는 다른 T자형, 또는 U자형 레일이 필요한데, 이러한 레일은 막대한 건설비가 필요하고 기존 레일과 호환이 되지 않는 문제가 있다. 이로 인해 자기부상열차는 고속화에 유리한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 실용화에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 이창영[1] 등은 자기부상열차의 추진 장치인 초전도 선형동기전동기를 기존의 휠-레일 열차에 적용한 하이브리드 방식의 고속열차 개념을 제시하였다. 이 개념은 Fig. 1과 같이 휠-레일 열차에 초전도 전자석(회전자)을 설치하고 3상 공심형 코일(고정자)을 궤도에 설치하여 회전자와 고정자간의 상호 작용으로 추진력을 발생시키도록 하는 것이다. 이럴 경우 호환성 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 고정자가 설치되는 궤도 구조물을 기존의 자기부상열차보다 간단하게 건설 할 수 있으므로 경제성 측면에서도 유리할 것으로 예상된다.

이러한 개념 하에 이창영 등은 600km/h를 주행하기 위한 초전도 선형동기전동기 모델을 설계하고 초전도 전자석의 사양을 제시하였으며[1], 박찬배[2] 등은 1/5 크기의 축소모델에 대한 초전도 선형동기전동기의 설계에 관한 기술을 검토하였다. 그러나 이러한 연구는 요구 추력을 달성하기 위한 초전도 선형동기전동기의 전자석 및 코일 설계에 그 범위가 국한되었을 뿐, 운행 시 발생하는 선형동기전동기의 회전자와 고정자의 상호 작용이 차량의 주행 동특성에 미치는 영향에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자를 휠-레일 열차에 실질적으로 적용하기 위한

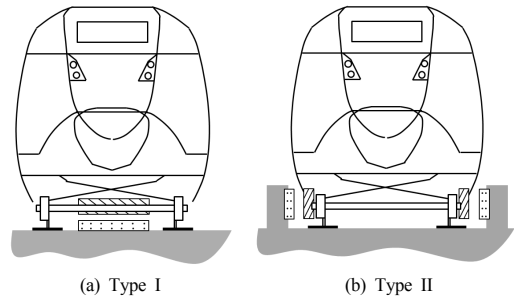


Fig. 2. Application methods of SC-LSM to wheel-rail system (comb pattern: rotor, dot pattern: stator)

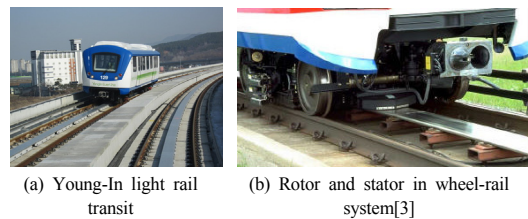




Fig. 3. Application example of linear induction motor in wheel-rail system

두 가지 방법을 제안한 후, 각각의 경우에 대해서 추진 시 발생하는 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자의 상호 작용을 검토하고 이를 포함한 열차의 동특성 모델을 구축하였다. 그리고 구축된 모델을 이용하여 이러한 상호작용이 열차의 고속 안정성 및 승차감에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 본론

### 2.1 선형동기전동기의 휠-레일 열차 적용 방법

초전도 선형동기전동기를 휠-레일 열차에 적용하는 방법은 Fig. 2와 같이 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째는 Fig. 2(a)와 같이 초전도 전자석(회전자,  표시)이 차량 하부에 부착되는 경우로, 대향면인 공심형 3상 코일(고정자,  표시)은 기존 레일 사이의 지상에 설치된다. 이와 같은 경우에는 회전자 및 고정자를 설치하는 공간이 협소한 단점이 있지만 기존의 휠-레일 시스템의 변경을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 이와 비슷한 예는 우리나라의 용인 경전철을 포함해서 선형유도전동기가 적용된 경량전철에서 찾아 볼 수 있다.(Fig. 3)

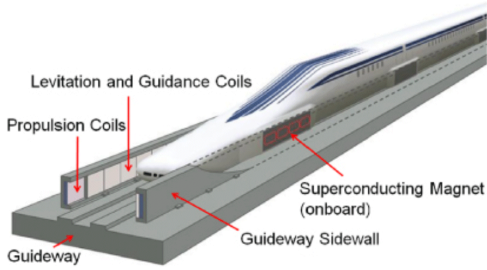


Fig. 4. Guideway of Japanese Maglev[4]

두 번째 방법은 Fig. 2(b)와 같이 회전자를 차량 측면에 부착하고 대항면인 고정자를 측벽 구조물(가이드웨이)에 부착하는 방법으로 일본의 자기부상열차(Fig. 4)와 유사하나 부상이 필요없기 때문에 가이드웨이를 이보다 훨씬 작게 만들 수 있다. 이상 살펴본 두 가지 방법에 대한 특징을 Table 1에 비교하여 정리하였다.

### 2.2 회전자와 고정자 간 상호작용

일반적인 선형동기전동기의 고정자는 자속 밀도 향상을 위해 3상 코일이 철심을 둘러싸는 형태의 ‘철심형’인데 반해, 초전도 선형동기전동기의 경우는 강력한 자속 밀도의 생성이 가능하기 때문에 별도의 철심이 필요 없는 ‘공심형’을 사용한다. 철심형 선형동기전동기의 경우 추력이 발생함에 따라 회전자와 고정자 사이에 흡입력만이 발생하는데 비해, 공심형의 경우는 Fig. 5와 같이 회전자 전자석과 고정자 코일 사이의 자기장 각도에 따라 추력의 수직방향으로 흡입력 또는 반발력이 발생한다 [5]. 자기장 각도( $\delta$ )에 따른 추력( $F_{thrust}$ )과 수직력( $F_{normal}$ )은 다음식과 같이 표현되며, 자기장 각도는 선형동기전동기의 추진 제어 시 조절이 가능하다.

$$F_{thrust} = -F_{max} \sin \delta \quad (1)$$

$$F_{normal} = -F_{max} \cos \delta \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $F_{max}$ 는 초전도 선형동기전동기 설계인자에 의해 결정되는 최대 추력으로 다음식과 같다.

$$F_{max} = 4\mu_0 m_a p \sqrt{2} N_a I_a k_{w1} N_f I_f k_{wf} \frac{L_i}{\tau} e^{-\frac{\pi}{\tau} g} \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있듯이  $F_{max}$ 는 회전자와 고정자 사

이의 공극( $g$ )에 대한 지수 함수이므로 특정 자기장 각도에서 공극에 따른 수직력 역시 Fig. 6과 같이 지수 함수가 된다. 그러나 실제 열차 주행 시 공극 변화량은 작기 때문에 공극과 수직력은 선형 관계라고 가정할 수 있다. 따라서 초전도 선형동기전동기 회전자와 고정자 사이의 스프링 상수는 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$K_m = -\frac{\Delta F_{normal}}{\Delta g} \quad (4)$$

Table 1. Relative comparison of characteristics between proposed methods

	Type I	Type II
Easiness of rotor/stator attachment	Difficult	Easy
Cost of construction	Low	High
Need of magnetic shield	High	Low

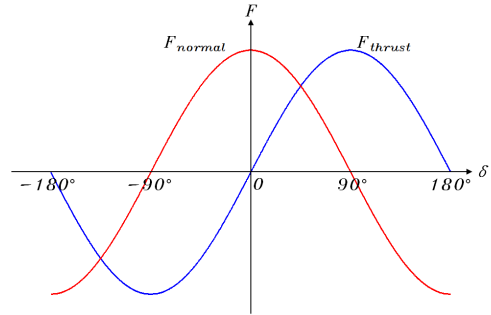


Fig. 5. Typical thrust and normal force as function of magnetic field angle between rotor|electromagnet and stator coil

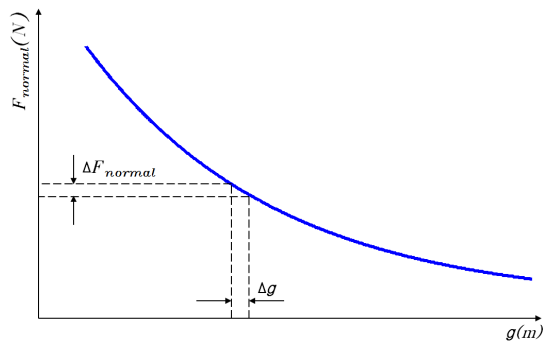


Fig. 6. Normal force as function of gap between rotor and stator in SC-LSM

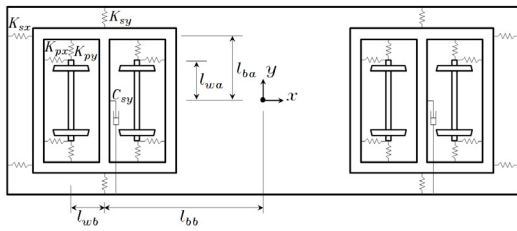


Fig. 7. Schematic diagram of traditional wheel-rail train model

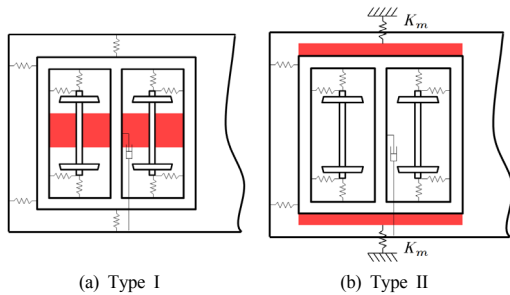


Fig. 8. Half-schematic diagram of wheel-rail train with superconducting magnets which is shown shaded

### 2.3 동특성 해석 모델

일반적인 휠-레일 열차는 Fig. 7과 같이 차량 1량에 2개의 대차와 4개의 윤축으로 이루어져 있으며, 윤축과 대차사이에는 일차현가장치(Primary suspension)가, 대차와 차체사이에는 이차현가장치(Secondary suspension)가 존재한다. 여기에 2.1절에서 살펴본 각 Type별로 초전도 전자석을 적용한 모습을 Fig. 8에 나타내었다. 해석상 편의를 위해 초전도 전자석은 기존의 윤축 및 현가장치와 간섭 없이 대차에 부착 가능한 것으로 가정하였다.

휠-레일 열차의 고속주행에 있어서 열차의 횡방향( $y$ ) 및 요잉 방향( $\psi$ )으로의 고속 안정성 및 승차감이 중요하므로[6] 본 논문에서는 이 두 방향에 대한 열차의 동특성 해석을 수행하였다. 이와 같은 경우 Type I에서 회전자와 고정자 사이에 발생하는 수직력은  $z$  방향으로 작용하여 수직력이 흡입력일 경우에는 차량의 축하중을 증가시키고, 반발력일 경우에는 축하중을 감소시키게 된다. Type II에서는 수직력이 흡입력일 경우에는 공극이 변동이 생기면 Fig. 6과 같이 공극이 작아지는 쪽으로 흡입력이 급격하게 증가하여 횡방향으로 불안정해지기 때문에 사용할 수가 없다. 반면에 수직력이 반발력일 경우에는 공극 변동이 생겨도 양쪽 반발력이 평형을 이루는 상

태로 공극이 유지되기 때문에 안정적이다. 이러한 반발력은 식 (4)를 통해 도출한 스프링 상수( $K_m$ )를 이용하여 모델에 구현이 가능하다.(Fig. 8(b))

휠-레일 열차의 윤축( $w$ ), 대차( $b$ ) 및 차체( $v$ )에 대한 횡방향 및 요잉 방향으로의 14 자유도 상태변수는 다음과 같다

$$x = [y_{wj}, \psi_{wj}, y_{bi}, \psi_{bi}, y_v, \psi_v, \dot{y}_{wj}, \dot{\psi}_{wj}, \dot{y}_{bi}, \dot{\psi}_{bi}, \dot{y}_v, \dot{\psi}_v] \quad (5)$$

$$\text{for } j = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2,$$

이에 대한 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ z &= Cx \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $A$ 는 시스템 행렬,  $B$ 는 입력 행렬,  $C$ 는 출력 행렬을 나타내고,  $u$ 와  $z$ 는 각각 입력과 출력 변수를 나타낸다. 시스템 특성을 나타내는  $A$  행렬은 Fig. 7과 8에서 살펴본 모델의 운동 방정식을 통해 결정되는데 여기에는 차륜과 레일 사이의 접촉에 의해 발생하는 크립력(creep force)이 포함된다. 크립력은 접촉 이론에 따라 여러 가지 방법으로 계산할 수 있는데 본 논문에서는 Kalker가 제안한 선형화를 통해 계산된 크립력을 사용하였다[7].

해석을 위하여 사용한 수치는 Table 2와 같다. 기존 휠-레일 열차와 관련된 수치는 참고문헌 [6]을 참고하였으며, 초전도 전자석의 모듈당 최대 추력은 참고문헌 [1]에서 도출된 값을 이용하여 각 Type별로 계산하였다.

Table 2. Parameter values for simulation

$m_w$	1400 kg	$K_{py}$	4.4×10 <sup>5</sup> N/m
$m_b$	3800 kg	$K_{sx}$	167000 N/m
$m_v$	28000 kg	$K_{sy}$	167000 N/m
$I_{wz}$	965 kg·m <sup>2</sup>	$l_{ba}$	1.125 m
$I_{wy}$	134 kg·m <sup>2</sup>	$l_{bb}$	6.9 m
$I_{bz}$	3800 kg·m <sup>2</sup>	$l_{wa}$	1 m
$I_v$	9×10 <sup>5</sup> kg·m <sup>2</sup>	$l_{wb}$	1.05 m
$C_{sy}$	96000 Ns/m	$F_{max}$	23 kN (Type I)
$K_{px}$	6.6×10 <sup>5</sup> N/m		11.5 kN (Type II)

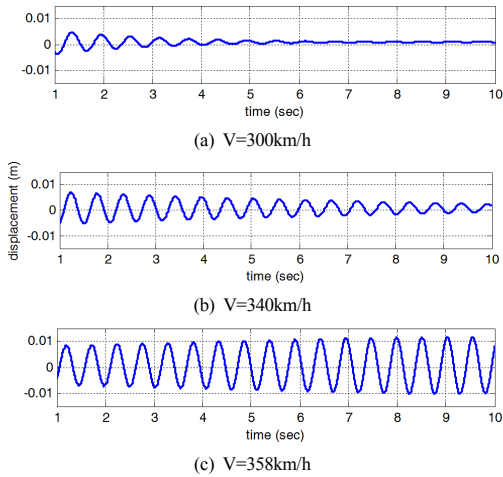


Fig. 9. Lateral displacement of first wheel set in traditional wheel-rail train as velocity increase

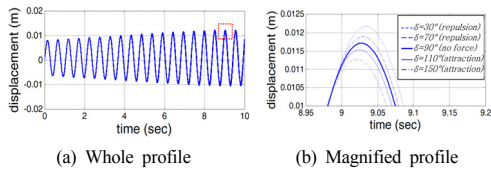


Fig. 10. Lateral displacement of first wheel set in Type I train as magnetic field angle variation ( $V=358\text{km/h}$ )

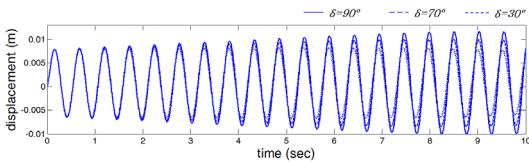


Fig. 11. Lateral displacement of first wheel set in Type II train as magnetic field angle variation ( $V=358\text{km/h}$ )

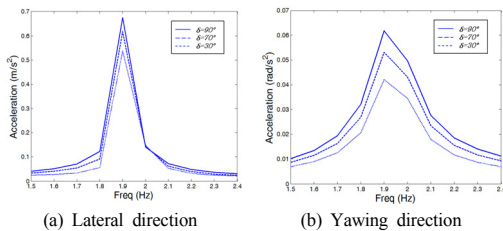


Fig. 12. Acceleration of car body in Type II train as magnetic field angle variation ( $V=358\text{km/h}$ )

## 2.4 해석 결과

휠-레일 열차의 경우 속도 증가에 따라 윤축에 횡방향으로 입력되는 외란에 대한 불안정성이 증가하여 임계속도 이상이 되면 윤축의 변위가 발산하게 된다. 이를 확인하기 위해 Fig. 7과 같은 기존 휠-레일 열차 모델에서 4개의 윤축에 각각 1mm 크기의 스텝입력 형태의 외란이 가해졌을 때 속도에 따른 한 개 윤축의 변위를 살펴보았다. 그 결과, Fig. 9와 같이 속도가 증가함에 따라 윤축의 변위가 증가하여 358km/h 이상의 속도에서는 발산함을 알 수 있다.

Type I에서 자기장 각도에 따른 수직력이 윤축 횡방향 변위에 미치는 영향을 파악하기 위하여 변위가 발산하기 시작하는 속도에서 자기장 각도를 변화시키면서 횡방향 변위를 살펴보았다. 그 결과, Fig. 10과 같이 수직력 중 반발력( $\delta=70^\circ, 30^\circ$ )은 변위를 증가시키고 흡입력( $\delta=110^\circ, 150^\circ$ )은 변위를 감소시킴을 알 수 있는데, 이는 축중이 커질수록 윤축의 변위가 제한을 받기 때문에 판단된다. 그러나 결과에서 볼 수 있듯이 그 변화량은 1mm 내외로 크지 않기 때문에 Type I에서 수직력이 차량의 횡방향 동적특성에 미치는 영향은 작다고 볼 수 있다.

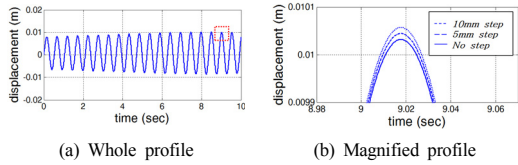
Type II에서 자기장 각도에 따른 반발력에 의해 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자 사이에 발생하는 스프링 요소( $K_m$ )가 윤축의 횡방향 변위에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 11과 같이 반발력이 커질수록 횡방향 변위가 감소하여 주행 안정성이 향상됨을 확인할 수 있고 이에 따라 임계속도가 증가할 것으로 예상된다. 이러한 반발력이 승차감에 미치는 영향을 확인하기 위하여 5mm의 진폭과 10m의 주기를 갖는 사인함수를 윤축에 외란으로 작용시켰을 때의 횡방향 및 요잉 방향의 가속도에 대해서 살펴보았다. 그 결과, Fig. 12와 같이 반발력에 의한 승차감 역시 향상됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 Type II 열차에 있어서 주행 안정성과 승차감이 향상하는 이유는 스프링 요소인  $K_m$ 이 대차와 지면에 고정된 가이드웨이 사이에 작용함으로써 대차의 안정성을 향상시켰기 때문이다.

자기장 각도에 따른 반발력이 Type II 열차의 임계속도 및 승차감에 미치는 영향을 Table 3에 정량적으로 정리하였다.

앞서 살펴본 것과 같이 차량의 동적특성을 향상시키는 스프링 요소인  $K_m$ 은 대차와 가이드웨이 사이에 존재하기 때문에 가이드웨이가 불규칙할 경우 차량의 운행

**Table 3.** Magnetic field angle effect on critical speed and ride comfort in Type II train

$\delta$	Critical speed (km/h)	Peak acceleration	
		Lateral(m/s <sup>2</sup> )	Yawing(rad/s <sup>2</sup> )
90°	358	0.6752	0.0617
70°	360	0.6171	0.0531
30°	363	0.5376	0.0420



**Fig. 13.** Lateral displacement of first wheel set in Type II train as guideway step variation ( $V=358\text{km/h}$ ,  $\delta=70^\circ$ )

동특성에 악영향을 미칠 수 있다. 이를 파악하기 위하여 가이드웨이의 불규칙도를 5mm와 10mm 크기의 스텝형태로 가정했을 때 윤축의 변위를 살펴보았다. 그 결과, Fig. 13과 같이 가이드웨이의 불규칙도가 커짐에 따라 횡방향 변위가 증가하여 동특성이 악화되나 그 영향은 미비함을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 기존 자기부상열차의 단점인 호환성 및 경제성 문제를 극복함과 동시에 고속화를 달성하기 위하여 새롭게 제안된 초전도 선형동기전동기 추진 방식의 휠-레일 고속열차에 있어서 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자 사이의 상호작용이 차량의 고속주행 안정성 및 승차감에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 제안된 두 가지 Type의 모델에 대해 동특성 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 초전도 전자석이 대차 하부에 부착되는 Type I 열차의 경우, 회전자와 고정자 사이의 흡입력은 차량의 안정성을 향상시키는 반면 반발력은 그 반대로 작용하나 그 영향정도는 크지 않다.

둘째, 초전도 전자석이 대차 양옆에 부착되는 Type II 열차의 경우, 회전자와 고정자 사이에 작용하는 반발력은 대차와 가이드웨이 사이에 스프링 요소로 작용하여 차량의 주행 안정성 및 승차감을 향상시킨다.

셋째, Type II 열차의 경우 가이드웨이의 불규칙도가 열차의 주행 안정성에 미치는 영향은 무시할 만한 수준이므로 가이드웨이 정밀 시공에 대한 부담을 경감시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이는 가이드웨이 정밀 시공에 따른 대규모 건설비가 문제점으로 지적되는 기존 자기부상열차에 비해 유리한 점이라 할 수 있다.

이상 살펴본 결과를 종합하여 Type I과 II를 비교해 보면 다음과 같다. Type II 열차의 경우 Type I에 비해 차량의 동특성 측면에서 유리하다. 건설비 측면에서는 Type II 열차가 Type I에 비해 가이드웨이 추가 건설에 따른 비용 상승 요인이 있으나, 기존 자기부상열차 보다는 가이드웨이 규모를 작게 하고 정밀 시공의 부담을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

### 기호 설명

- $F_{max}$  : 초전도 전자석 모듈당 최대 추력
- $\delta$  : 회전자와 고정자 사이의 자기장 각도
- $\mu_0$  : 진공 투자율
- $m_a$  : 초전도 선형동기전동기의 상 개수
- $p$  : 초전도 선형동기전동기의 극 개수
- $N_a$  : 고정자 코일 회전수
- $I_a$  : 고정자 코일 전류
- $k_{w1}$  : 고정자 코일 형상 계수
- $N_f$  : 회전자 코일 회전수
- $I_f$  : 회전자 코일 전류
- $k_{wf}$  : 회전자 코일 형상 계수
- $L_i$  : 회전자 코일 길이
- $\tau$  : 초전도 선형동기전동기의 극 피치
- $g$  : 회전자와 고정자 사이 공극
- $m_w$  : 윤축 무게
- $m_b$  : 대차 무게
- $m_v$  : 차체 무게
- $I_{wz}$  : 윤축 z축 방향 관성 모멘트
- $I_{wy}$  : 윤축 y축 방향 관성 모멘트
- $I_{bz}$  : 대차 z축 방향 관성 모멘트
- $I_v$  : 차체 z축 방향 관성 모멘트
- $C_{px}$  : 1차 현가장치 x 방향 감쇠 계수
- $C_{py}$  : 1차 현가장치 y 방향 감쇠 계수
- $C_{sx}$  : 2차 현가장치 x 방향 감쇠 계수
- $C_{sy}$  : 2차 현가장치 y 방향 감쇠 계수
- $K_{px}$  : 1차 현가장치 x 방향 스프링 상수
- $K_{py}$  : 1차 현가장치 y 방향 스프링 상수
- $K_{sx}$  : 2차 현가장치 x 방향 스프링 상수
- $K_{sy}$  : 2차 현가장치 y 방향 스프링 상수
- $K_m$  : 회전자-고정자 간 y 방향 스프링 상수



- $l_{ba}$  : 대차내 2차 현가장치 사이 거리의 반
- $l_{bb}$  : 대차와 대차사이 거리의 반
- $l_{wa}$  : 윤축내 1차 현가장치 사이 거리의 반
- $l_{wb}$  : 대차내 윤축과 윤축사이 거리의 반
- $V$  : 주행 속도

References

- [1] C. Lee, J. Lee, J. Jo, C. Park, W. Rue, Y. Chung, Y. Hwang, T. Ko, S. Oh, J. Lee, "Conceptual Design of Superconducting Linear Synchronous Motor for 600 km/h Wheel-Type Railway", Applied Superconductivity, IEEE Transaction, Vol.24, Issue 3, 2014.
- [2] C. Park, J. Kim, B. Lee, "Design of a Small-scaled Superconducting LSM for the Very High Speed Railway Vehicle," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 11, pp. 1602-1607, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.11.1602>
- [3] K. Vollenwyder, "Linear Motor Propulsion for Urban Transit," Converter Technology & Electric Traction, 5, 010, 2006.
- [4] S. Nishijima, S. Eckroad, A. Marian, K. Choi, W. Kim, M. Terai, Z. Deng, J. Zheng, J. Wang, K. Umamoto, J. Du, P. Febvre, S. Keenan, O. Mukhanov, L. Cooley, C. Foley, W. Hassenzahl, M. Izumi, "Superconductivity and the environment: a Roadmap," Supercond. Sci. Technol. 26 113001, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/26/11/113001>
- [5] J. Gieras, Z. Piech, "Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems," New York, NY, USA: CRC Press, pp. 103 - 107, 2000.
- [6] J. Park, H. Koh, N. Kim, "Parametric study of lateral stability for a railway vehicle," Journal of mechanical science and technology, 25(7), 1657-1666, 2011.
- [7] R. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems," Academic Press, pp. 103-134, 1984.

이진호(Jin-Ho Lee) [정회원]



- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학학사)
- 2000년 2월 : 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
- 2005년 12월 : University of Florida 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 2009년 12월 : 삼성코닝정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>  
기계제어, 열차시스템

이창영(Chang-Young Lee) [정회원]



- 1993년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학학사)
- 1995년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 1994년 12월 ~ 2005년 12월 : LS (前LG)전선, 전력연구소 선임연구원
- 2006년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>  
초전도기기, 열차추진시스템, 철도차량정밀진단

조정민(Jeong-Min Jo) [정회원]



- 1999년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2009년 3월 : 현대로템 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>  
전력변환시스템, 철도차량시스템

한영재(Young-Jae Han) [정회원]



- 1994년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학학사)
- 1996년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 홍익대학교 전기정보제어공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 : 성균관대학교 경영학과 (경영학학사)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>  
추진제어시스템, 전기철도