

# 초전도 선형동기전동기 추진에 기인한 자기강성에 따른 주행 동특성 분석

## Analysis of Running Dynamics due to Magnetic Stiffness in Superconducting Linear Synchronous Motor

이진호<sup>\*†</sup>, 이창영<sup>\*</sup>, 이관섭<sup>\*</sup>

Jin-Ho Lee<sup>\*†</sup>, Chang-Young Lee<sup>\*</sup>, Gwan-Sup Lee<sup>\*</sup>

**Abstract** In this study, the effect of magnetic stiffness on running dynamics in superconducting linear synchronous motor(SC-LSM) driven train is analyzed. In SC-LSM, due to coreless stator, by adjusting force angle, proper magnetic stiffness can be generated and this magnetic stiffness could influence on system running dynamics. In this paper, to investigate the influences of SC-LSM propulsion on dynamic characteristics of wheel-rail high speed train, the dynamic model of train including magnetic stiffness resulted from the interaction between rotor and stator of SC-LSM is established. Through the simulation by using model, the magnetic stiffness between rotor and stator of SC-LSM on stability, ride comfort and the effect of guideway irregularity are investigated.

**Keywords** : Magnetic Stiffness, Superconductor, Linear Synchronous Motor, Dynamic Analysis

**초 록** 본 논문에서는 초전도 선형동기전동기를 이용한 추진시스템에 있어서 발생하는 자기강성이 고속 주행시스템의 동특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 초전도를 이용한 선형동기전동기의 경우 공심형 권선이 가능하기 때문에 적절한 제어각도의 선택을 통해 원하는 자기강성을 생성할 수 있고, 이러한 자기강성은 고속으로 주행하는 시스템의 주행 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 초전도 선형동기전동기 추진에 기인한 자기강성이 고속 주행 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 고정자 사이의 자기강성이 주행 중 고속 안정성, 승차감 및 가이드웨이 불규칙도에 미치는 영향을 분석하였다.

**주요어** : 자기 강성, 초전도, 선형동기전동기, 동특성 분석

## 1. 서 론

전 세계적으로 열차의 고속화를 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 우리나라의 경우 휠-레일 방식의 차세대 고속열차로 개발 중인 HEMU가 2013년 3월 421km/h의 최고속도를 달성

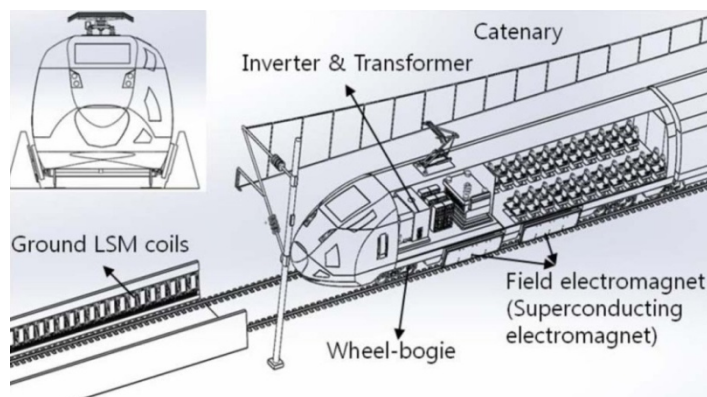
† 교신저자: 한국철도기술연구원(jinholee@krri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원

함으로써 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 발생하는 선형동기전동기가 차상이 아닌 궤도에 설치되기 때문에 대용량 급전이 가능하고, 추진장치가 없는 차량을 가볍게 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 추진장치인 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 건설할 수 있으므로 경제성 측면에서도 유리할 것으로 예상된다.

초전도 전자석은 강력한 추력 발생이 가능하기 때문에 공심형 코어 형태의 지상 고정자가 가능하다. 이 경우에 Fig. 2와 같이 고정자와 회전자 사이의 자기장각도 조절을 통해 추력에 수직방향으로 힘 발생이 가능하게 되고[2], 이러한 수직방향의 힘으로 인해 차량과 가이드웨이 사이에 자기강성이 발생하게 되며, 이러한 자기강성은 차량의 동적 특성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 초전도 선형동기전동기의 회전자와 고정자 사이의 상호작용을 분석, 검토하고 이를 포함한 열차의 동특성 모델을 구축하였다. 그리고 구축된 모델을 이용하여 이러한 상호작용이 열차의 고속 안정성 및 승차감에 미치는 영향을 살펴보았다.



**Fig. 1** Hybrid type wheel-rail train[1]

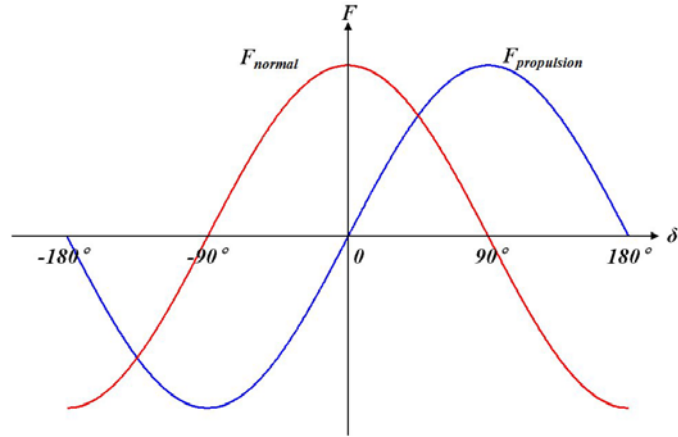


Fig. 2 Typical relation between propulsion and normal force in air-core LSM[2]

## 2. 본 론

### 2.1 회전자와 고정자 간 상호작용

Fig. 2에서 살펴본 것과 같이 공심형 선형동기전동기에서 자기장 각도( $\delta$ )에 따른 추력과 수직력은 다음식과 같이 표현되며, 자기장 각도는 선형동기전동기의 추진 제어 시 조절이 가능하다.

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

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

여기서  $F_{max}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$F_{max} = 4\mu_0 m_1 p \sqrt{2} N_{1p} k_{w1} N_{fp} k_{wf} \frac{L_i}{\tau} I_a I_f e^{-\frac{\pi}{\tau} g} \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있듯이  $F_{max}$ 는 회전자와 고정자 사이의 공극( $g$ )에 대한 지수 함수이므로 특정 자기장 각도에서 공극에 따른 수직력 역시 Fig. 3과 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.

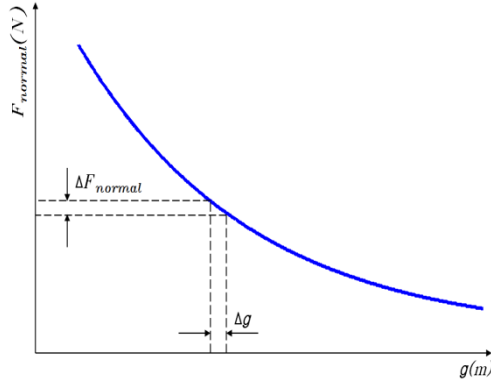


Fig. 3 Normal force as function of gap between rotor and stator in SC-LSM

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

## 2.2 동특성 해석 모델

일반적인 휠-레일 열차는 Fig. 4와 같이 차량 1량에 2개의 대차와 4개의 윤축으로 이루어져 있으며, 윤축과 대차사이에는 일차현가장치(Primary suspension)가, 대차와 차체사이에는 이차현가장치(Secondary suspension)가 존재한다. 여기에 초전도 전자석이 대차에 붙는 형태를 Fig. 5에 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, 본 논문에서는 이 두 방향에 대한 열차의 동특성 해석을 수행하였다. 이와 같은 경우 Type I에서 회전자와 고정자사이에서 발생하는 수직력은  $z$  방향으로 작용하여 수직력이 흡입력일 경우에는 차량의 축하중을 증가시키고, 반발력일 경우에는 축하중을 감소시키게 된다. Type II에서는 수직력이 흡입력일 경우에는 공극에 변동이 생기면 Fig. 3과 같이 공극이 작아지는 쪽으로 흡입력이 급격하게 증가하여 횡방향으로 불안정해지기 때문에 사용할 수가 없다. 반면에 수직력이 반발력일 경우에는 공극 변동이 생겨도 양쪽 반발력이 평형을 이루는 상태로 공극이 유지되기 때문에 안정적이다. 이러한 반발력은 식 (4)를 통해 도출한 스프링 상수를 이용하여 모델에 구현이 가능하다.(Fig. 5(b))

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

$$x = [y_{wj}, \psi_{wj}, y_{bi}, \psi_{bi}, y_v, \psi_v, \dot{y}_{wj}, \dot{\psi}_{wj}, \dot{y}_{bi}, \dot{\psi}_{bi}, \dot{y}_v, \dot{\psi}_v]^T$$

$$\text{For } j=1,2,3,4; i=1,2 \quad (5)$$

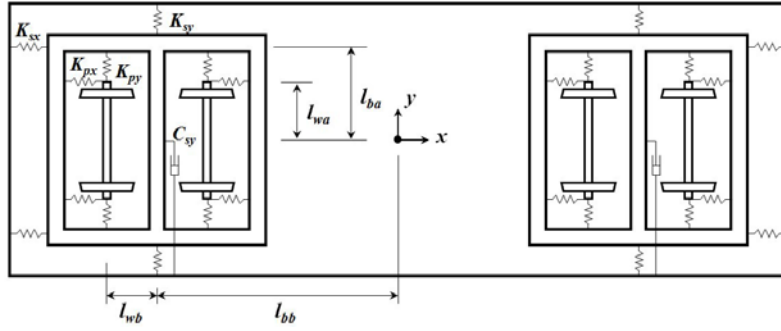
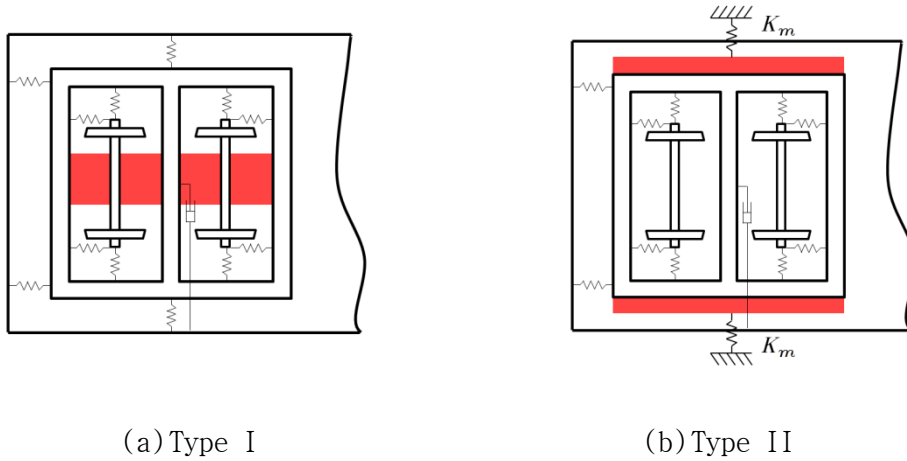


Fig. 4 Schematic diagram of traditional wheel-rail train model



(a) Type I

(b) Type II

Fig. 5 Half-schematic diagram of wheel-rail train with superconducting magnets which is shown shaded

이에 대한 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$z = Cx \quad (6)$$

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. 4와 5에서 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[3]. 해석을 위하여 기존 휠-레일 열차와 관련된 수치는 참고문헌 [4]을 참고하였으며, 초전도 전자석의 모듈당 최대 추력은 참고문헌 [1]에서 도출된 값을 이용하여 각 Type별로 계산하였다.

### 2.3 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. 4와 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. 6과 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. 7과 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 때문으로 판단된다. 그러나 결과에서 볼 수 있듯이 그 변화량은

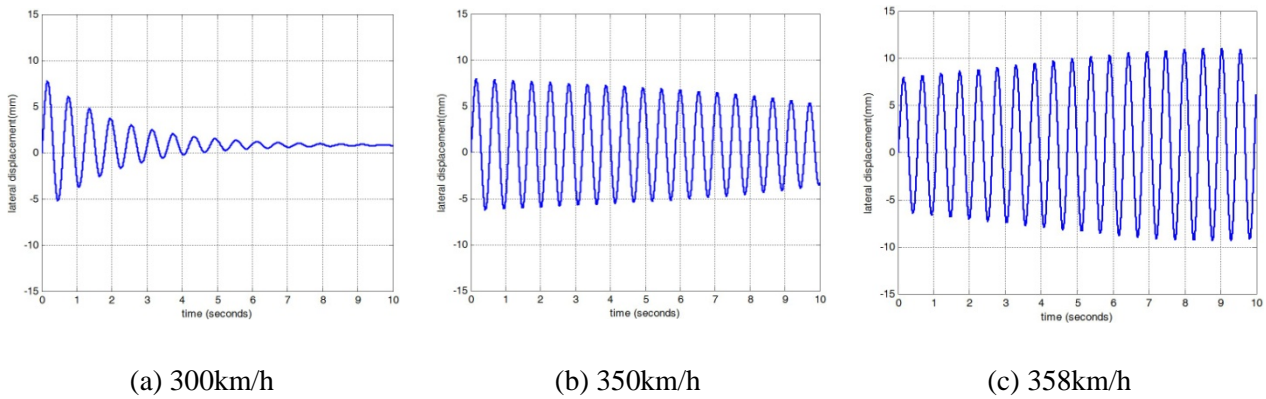


Fig. 6 Lateral displacement of first wheel set in traditional wheel-rail train as velocity increase

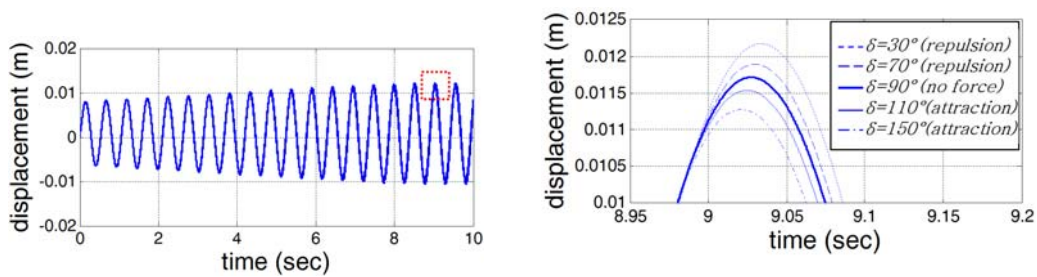


Fig. 7 Lateral displacement of first wheel set in Type I train as magnetic field angle variation (V=358km/h)

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 요소가 윤축의 횡방향 변위에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 8과 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. 9와 같이 반발력에 의한 승차감 역시 향상됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 Type II 열차에 있어서 주행 안정성과 승차감이 향상하는 이유는 스프링 요소가 대차와 지면에 고정된 가이드웨이 사이에 작용함으로써 대차의 안정성을 향상시켰기 때문이다.

앞서 살펴본 것과 같이 차량의 동적특성을 향상시키는 스프링 요소인 자기 강성은 대차와 가이드웨이 사이에 존재하기 때문에 가이드웨이가 불규칙할 경우 차량의 운행 동특성에 악영향을 미칠 수 있다. 이를 파악하기 위하여 가이드웨이의 불규칙도를 5mm와 10mm 크기의 스텝형태로 가정했을 때 윤축의 변위를 살펴보았다. 그 결과, Fig. 10과 같이 가이드웨이의 불규칙도가 커짐에 따라 횡방향 변위가 증가하여 동특성이 악화되나 그 영향은 미비함을 확인할 수 있다.

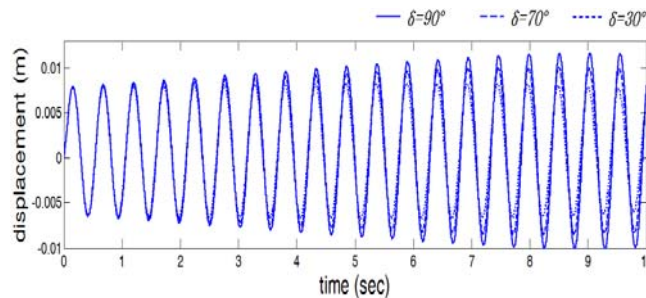


Fig. 8 Lateral displacement of first wheel set in Type II train as magnetic field angle variation (V=358km/h)

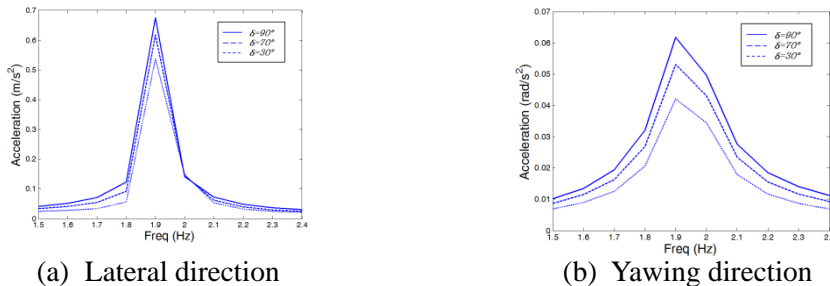


Fig. 9 Acceleration of car body in Type II train as magnetic field angle variation (V=358km/h)

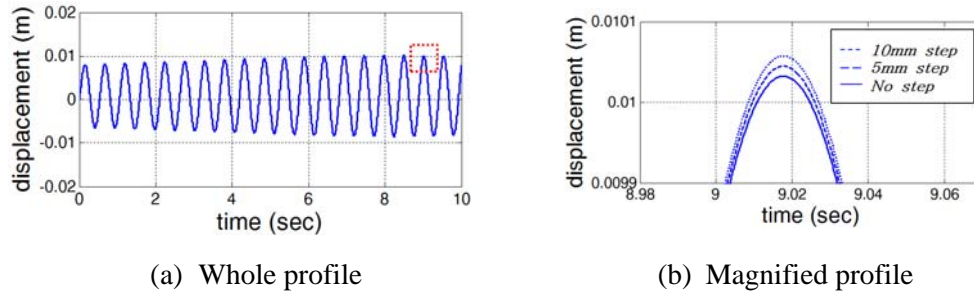


Fig. 10 Lateral displacement of first wheel set in Type II train as guideway step variation ( $V=358\text{km/h}$ ,  $\text{angle}=70^\circ$ )

### 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 종합하면, Type II 열차의 경우 Type I에 비해 차량의 동특성 측면에서 유리하고, 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.

### 참고문헌

- [1] C. Lee, J. Lee, J. Jo, C. Park, W. Rue, Y. Chung, Y. Hwang, T. Ko, S. Oh, J. Lee (2014) Conceptual Design of Superconducting Linear Synchronous Motor for 600 km/h Wheel-Type Railway, *Applied Superconductivity, IEEE Transaction*, Vol. 24, Issue 3.
- [2] J. Gieras, Z. Piech (2000) *Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems*, New York, NY, USA: CRC Press, pp. 103-107.
- [3] R. Dukkipati (1984) *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, pp. 103-134.
- [4] J. Park, H. Koh, N. Kim (2011) Parametric study of lateral stability for a railway vehicle, *Journal of mechanical science and technology*, 25(7), 1657-1666.