

자기부상열차 차량과 분기기 동적상호작용 시험 평가

이종민¹, 한중부^{2*}, 김성수²

¹한국기계연구원, ²충남대학교 메카트로닉스 공학과

Dynamic Interaction Evaluation of Maglev Vehicle and the Segmented Switching System

Jong-Min Lee¹, Jong-Boo Han^{2*}, Sung-Soo Kim²

¹Korea Institute of Machinery and Materials

²Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

요약 자기부상열차의 분기기는 차량의 진행방향에 따라 노선을 변경해 주는 장치로서 차량의 분기기 통과시 차량의 주행 안전성을 보장해야만 한다. 일반 바퀴식 열차의 분기기기와는 달리 자기부상열차의 분기기는 대차가 궤도를 감싸고 주행하므로 분기기를 지지하는 구조물은 거더 형태로 구성된다. 이러한 분기기 구조는 거더 자체가 움직여 작은 반경의 곡선을 생성하기 위하여 단지 3-4개의 관절만을 이용하기 때문에 비연속적 선형레일을 만들게 된다. 이로 인하여 비연속적 선형 레일은 거더 사이에 변곡점이 생기고, 이를 통과하는 차량의 진동을 발생시킬 수 있다. 그로인해 해당 지점에서 대차와 레일의 접촉이 발생할 수 있다. 또한 분기기 전체가 강 구조물로 구성되어 있어 진동 측면에서도 일반적인 콘크리트 구조물에 비해 취약한 구조를 가지고 있다. 본 논문에서는 인천공항 시범노선에서 운행 중인 차량의 분기기 통과 시 동적상호작용에 의한 분기기의 진동 및 처짐 등을 측정하고, 차량의 진동 및 부상안정성 등을 측정하여 분기기의 설계 타당성과 안전성을 평가하고 향후 성능 개선에 도움을 주고자 한다. 본 연구의 결과를 통해서 차량의 25km/h 속도에서 부상 및 횡공극의 안정성을 확인하였고, 차량의 승차감이 UIC 513 기준에서 “편안함” 결과를 확인하였다.

Abstract The switching system in a maglev train is an indispensable element for distributing train routes, and it should be designed to ensure safe operation. Unlike conventional wheels on rails, the switching track in EMS-type maglev is supported by a group of 3 to 4 steel girders. When the vehicle changes its route, the segmented track allows the girders to change from a straight position to a curved one with a small radius of curvature. Hence, the structural characteristics of the segmented switching system may affect the levitation stability of the maglev vehicle. This study experimentally evaluates the dynamic interaction between maglev vehicles and a segmented switching system. The results may be helpful for improving the switching system. The measured levitation and lateral air gaps were evaluated at a vehicle speed of 25 km/h, and the ride quality of the Maglev vehicle was determined to be "comfortable" according to the UIC 513 standard.

Keywords : Dynamic interaction, Maglev vehicle, Running safety, Switching system, Vibration

1. 서론

바퀴 없이 자석의 흡인력으로 레일로부터 부상하여

주행하는 자기부상열차 (Maglev)는 저소음, 저진동 및 시스템 유지보수 비용이 낮아 친환경적 및 경제적인 철도시스템이다. 국내에는 2016년 2월부터 인천공항 자기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(16RTRP-B070544-04)에 의해 수행되었음

*Corresponding Author : Jong-Boo Han(Chungnam National Univ.)

Tel: +82-42-821-7782 email: jbhan83@gmail.com

Received January 5, 2017

Revised February 2, 2017

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

부상열차 시범노선 이 개통되어 현재 도시형 즉 경전철 용으로 복선 6.1 km 구간의 선로 구조물이 건설되어 운행 중에 있다. 선로 구조물은 고가로 건설되어 있으며, 대부분은 콘크리트 거더 (Girder) 구조물이지만 차량의 진로변경과 차량기지 내에서 차량의 입출고 등을 위한 분기기는 Fig. 1에 보이는 것처럼 강재 거더 구조물로서 상대적으로 진동에 취약한 동특성을 가지고 있다. 또한 설치된 분기기 시스템은 관절식으로 분기 후 비연속성 곡선이 생성되기 때문에, 차량 주행 중에 변곡점 부분에서 차량과 레일의 접촉으로 인한 부상안정성에 영향을 줄 수 있다. 이러한 관절식 분기기 (Segmented switching system)는 주로 중저속 도시형 자기부상열차 (Urban Transit Maglev)에 한정되어 적용되며 일본, 중국 그리고 국내만이 이 시스템을 보유하고 있어 관련 연구 사례는 많이 부족한 실정이다. 또한, 자기부상열차와 궤도와의 동적 상호작용에 대한 연구는 주로 콘크리트 거더와 강재 거더 구간인 곡선구간의 주행에 한정되어 이루어지고 있는 실정이다[1-2]. 국내에서는 본 논문의 저자들이 시뮬레이션을 통해 관절식 분기기의 궤도 길이와 각도와 같은 설계변수의 변경에 의한 자기부상열차 주행안정성 해석을 수행하였다[3].

본 논문에서는 인천공항에 설치된 중저속형 자기부상열차용 관절식 3방향 분기기와 차량의 동적상호작용에 대한 시험 결과를 통해 분기의 성능 평가를 수행하고자 한다. 시험은 차량의 주행 안전성을 평가하기 위해 부상공극 (Vertical air gap) 및 횡공극 (Lateral air gap)을 측정하고, 차량의 승차감을 평가하기 위해 수직가속도를 측정하고 분석하였다. 또한 분기기 시스템의 진동특성과 처짐을 측정하여 구조적 안정성을 검토하였다.



Fig. 1. Segmented switching system for Maglev

2. 자기부상열차와 분기기

2.1 상전도흡인식 자기부상열차

본 논문의 대상으로 하는 상전도흡인식 (Electromagnetic Suspension) 자기부상열차는 차량을 부상시키기 위하여 전자석이 부상레일을 잡아당기는 흡인력 (Attraction or Levitation force)을 이용하며, 부상공극을 일정하게 유지하기 위하여 전류를 제어한다. 이러한 능동제어 방식의 자기부상시스템은 궤도와 부상시스템 사이에 공진 또는 부상제어 불안정성이 발생할 수 있으며, 별도의 안내 전자석을 채택하고 있지 않은 관계로 곡선 주행 시 안내력 (Guidance force) 부족으로 Fig. 2와 같이 대차의 측면에 부착된 횡방향 한계 설정용 스키드나 브레이크 슈가 레일과 접촉할 수 있다[4]. 이러한 특성으로 인해 곡선의 반경이 작은 곡선 궤도나 분기기 주행 시 주행안정성에 대한 검토가 반드시 요구되어 진다.

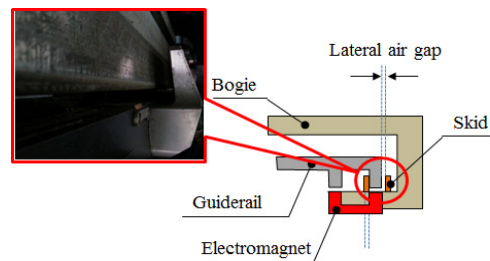


Fig. 2. Definition of lateral air gap

2.2 관절식 분기기

관절식 분기기는 구동장치가 동작함에 따라 힌지로 연결된 각 거더의 연결부가 인접한 고정거더 및 이동거더와 상대적인 굴절각을 이루며 횡방향으로 회전 이동을 수행하게 되고 이에 따라 분기기 구조물은 곡선형상을 이루게 된다. Fig. 3은 분기기의 기구적 구조를 도식적으로 나타내고 있다[4]. 현재 인천공항 시범노선에 설치 운영 중인 관절식 분기기는 강재박스 형태의 구조물 하부에 구동장치와 이송장치, 잠금장치 등이 적용되고, 상부에는 부상/추진 레일이 설치되어 있다. 분기기에는 시작단과 끝단에 고정거더 (Fixed girder)가 각각 위치하고 중간에 단경간 이동거더 (Short span moving girder) 2개와 장경간 이동거더 (Long span moving girder) 1개가 위치되며, 각각의 거더가 상대적으로 2.3°씩의 각을 이루며 굴절이 된다. 가장 마지막 장경간거더는 시작단

과 6.9 °의 각을 이루고 이동시 끝단 고정 거더와 연결된다. 거더 상부에 설치된 부상레일은 거더와 거더가 만나는 위치에 각도완화장치 (Angle relieving device)를 적용하고 있다. 각도완화장치는 거더의 굴절각을 절반으로 줄여주는 기능을 수행하는 장치로 이동거더의 수량이 3개인 데 비해 상부 부상레일을 6 조각으로 이루어지게 하고 거더 굴절각을 반분하는 기능을 수행토록 되어 있다.

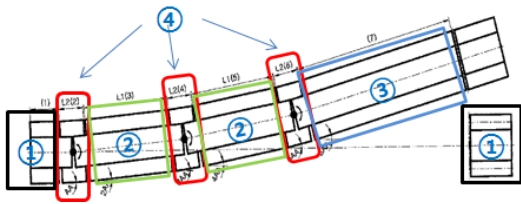


Fig. 3. Geometry of segmented switching system

Table 1. Specification of segmented switching system

Symbol	Item name	Spec.
①	Fixed girder	1.6 m, 2 ea.
②	Short span girder	4.3 m, 2 ea.
③	Long span girder	17.5 m
④	Angle relieving device	1.15 deg, 3 ea.

3. 동적상호작용 평가

3.1 차량 주행 성능 평가

전자석과 레일의 수직방향, 횡방향 공극의 변화 크기의 제한은 매우 중요하다. 수직방향 부상공극의 크기는 주로 제어기에 의해 결정되지만 횡방향 공극은 수동적으로 결정된다. 이 두 공극이 제한치를 초과하면 전자석과 레일이 물리적 접촉하게 되어 부상안정성에 영향을 주게 되므로 이에 대한 평가가 필요하다. 또한, 진동가속도에 의한 승차감 평가도 차량 주행성능 기준에 중요한 지표이므로 이에 대한 평가도 수행하였다.

3.1.1 부상공극 측정

실제 자기부상열차의 공극 제어를 위해서 각 대체와 레일 사이의 간격을 측정해야 한다. 열차에서는 각 대차에 설치된 공극센서(gap sensor)를 활용한다. 따라서 부상공극을 측정 시에는 추가적인 센서를 활용하기 보다는 제어기에 활용되는 입력값을 받아서 분석하였다.

Table 2 에는 분기 후 차량 통과 시 측정된 부상공극 결과에서 기준 공극 값을 기준으로 편차를 분석하였다. Table 2 에 제시한 바와 같이 속도가 증가할수록 부상공극의 변위크기가 커진다. 분기 후 곡선구간에 대해서도 분기기 곡선 주행 설계 최고속도 25 km/h 까지 공극 변위가 ±0.65 mm으로 부상 제어가 가능한 ±3 mm를 만족하고 있다.

Table 2. Peak vertical airgap

Speed (km/h)	5	10	15	20	25
Deviation of vertical airgap (mm)	±0.25	±0.4	±0.55	±0.65	±0.65

3.1.2 횡공극 측정

부상공극과는 달리 횡공극은 별도의 계측 시스템이 없으며, 따라서 본 논문에서는 횡 방향 변위를 측정하기 위해서 레이저 센서를 설치하여 간접적으로 계측하였다. 특히 횡 스키드 위치는 실제 접촉이 발생할 수 있으므로 센서를 부착하기 어려운 환경적 요인이 있으므로 Fig. 4 와 같이 진행방향기준으로 앞 대차의 양쪽 사이트에 센서를 부착하였다. 첫 번째 대차는 메커니즘에 의해 가장 큰 변위가 발생하는 지점이다.

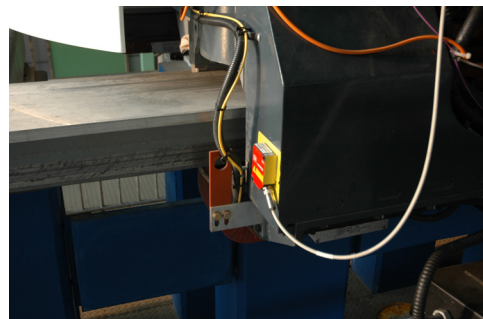


Fig. 4. Installation of laser sensor for measuring lateral gap variation

횡공극 측정은 직선구간에서 분기기로 진입한 경우에 대하여 측정하였다. 측정 결과 부상공극이 불연속되는 부상레일 이음매 구간을 고려할 때 횡방향 공극 역시 부상레일이 불연속 구조로 되어있는 각도완화장치 구간의 진출입시에 Fig. 5와 같이 가장 큰 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 6과 같이 속도별 최대 횡공극

그래프를 보면 5 ~ 15 km/h 까지는 약 10 mm의 횡 공극이 측정되었고 15 km/h 이상의 속도에서 급격히 그 값이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 최고 속도 25 km/h 에서 약 15.5 mm으로 최대 횡공극이 발생하였지만 이 값으로 스키드와 접촉이 일어나는 것을 의미하지는 않지만 실험 중에 간헐적으로 접촉이 일어남을 약간의 충격음과 진동으로 알 수 있었다. 하지만 이것이 부상실패와 같은 부상안정성에는 영향을 주지 않음을 부상공극 그래프에서 볼 수 있다.

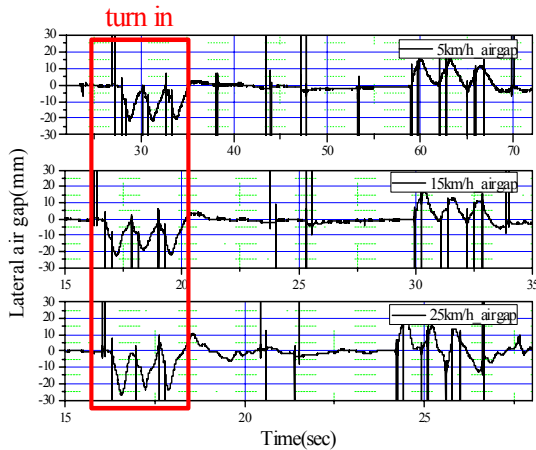


Fig. 5. Lateral air gap response

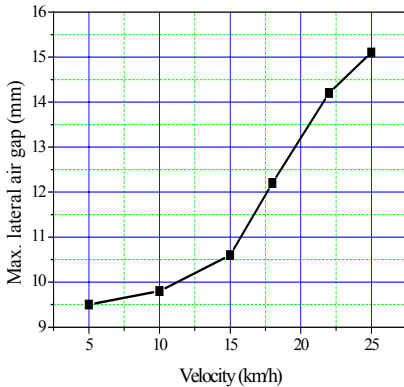


Fig. 6. Maximum lateral air gap with respect to velocity

3.1.3 가속도 응답 및 승차감 평가

일반적으로 진동 가속도에 의한 승차감은 수직, 횡, 종 방향 가속도를 이용하여 평가하다. 본 논문에서는 분기기 통과 시 속도별 차량의 진동을 파악하기 위하여 차

량의 앞, 중간, 뒤 부분에 3축 가속도 센서를 부착하였다. 차량의 진동을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 승차감 분석이므로 3축 가속도 센서를 활용하였다. Fig. 7 은 최고속도 25 km/h 에서의 3방향 가속도 응답을 보여 주고 있으며 Y축 방향 응답이 가장 크게 반응을 하였다. 횡공극 응답과 마찬가지로 각도완화장치 구간의 진출입 시 그래프 상 17 s 근방에서 가장 큰 진동을 보이고 있으며 이때 레일과 간헐적으로 접촉이 발생할 가능성이 크다고 볼 수 있다.

가속도를 이용한 승차감 평가는 일반 철도차량의 경우 UIC 513이나 ISO 2631에 의하여 평가할 수 있으며, 현재 자기부상열차를 위한 승차감 평가 절차나 방법이 대한 규정은 없다. 따라서 본 논문에서는 UIC 513 에 의해 승차감을 평가하고자 한다.

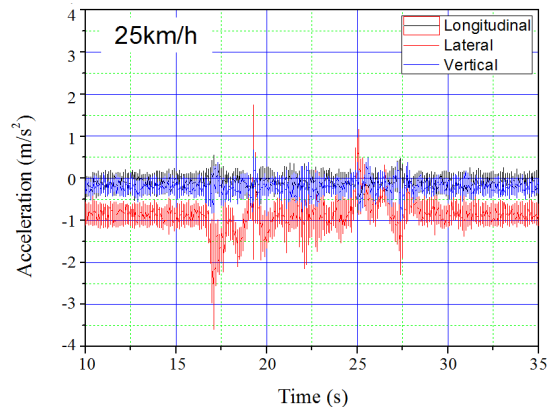


Fig. 7. Acceleration of cabin

UIC 513 은 전후(X), 좌우(Y), 상하(Z) 방향의 진동 가속도 신호를 인체가 느끼는 감도로 보정하여 승차감 산출식에 의해 지수로 표현한 값이다. 이 승차감 지수를 계산하기 위하여 식 (1)과 같이 UIC 513 R 의 가중필터를 통과시킨 각 축의 가속도 데이터(Ax, Ay, Az)의 누적 분포 95%에 해당되는 Ax95, Ay95, Az95 계산하여 승차감 지수 N을 계산하였다. 승차감 지수는 Table. 3과 같이 각 지수 당 Very comfortable부터 Very uncomfortable 까지 구별되며 도시철도차량의 기준은 N < 2.5으로 Medium을 만족해야 한다.

$$N = 6\sqrt{(Ax_{95})^2 + (Ay_{95})^2 + (Az_{95})^2} \quad (1)$$

Table 3. UIC evaluation scale

Ride index (N_{mv})	Ride confort
~ 1	Very comfortable
1 ~ 2	Comfortable
2 ~ 3	Medium
3 ~ 4	Uncomfortable
5 ~	Very uncomfortable

분기기 주행 시 차량의 승차감을 평가하기 위해 측정된 차량 3축 가속도 값을 이용하여 식 (1)을 이용하여 지수로 환산하였다. Fig. 8의 결과를 살펴보면, 5 ~ 10 km/h 구간에서는 차량 뒤쪽에서 영향도가 크고, 15 km/h 이상구간에서는 열차 앞쪽의 영향이 크게 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 차량속도 18 km/h 이상에서 승차감 지수가 1을 초과하는 것으로 승차감이 ‘매우 좋음’에서 ‘좋음’으로 변화하였다. 또한 최고속도 25 km/h에서도 승차감 지수가 약 1.6으로 도시철도 기준(2.5미만)에 만족하는 것을 확인하였다.

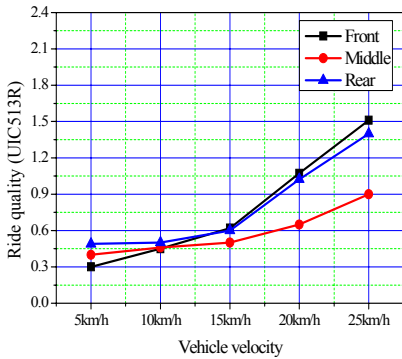


Fig. 8. Ride Quality

3.2 분기기 동특성 응답

3.2.1 진동 특성

3.1 절에서는 차량의 동특성 응답을 분석하였으며, 본 절에서는 분기의 동특성 응답 결과를 분석하였다. 분기 후 곡선 구간에서 측정결과 Table 4와 같이 최대 수직가속도가 측정되었다. 차속이 약 5 ~ 15 km/h까지는 약 0.1 m/s^2 이하의 수직방향 가속도가 측정되었고 Fig. 9와 같이 속도 25 km/h에서 0.3 m/s^2 으로 최대값이 측정되었다.

Table 4. Peak vertical airgap

Speed (km/h)	5	10	15	20	25
Peak of vertical acceleration (m/s^2)	± 0.05	± 0.05	± 0.08	± 0.15	± 0.3

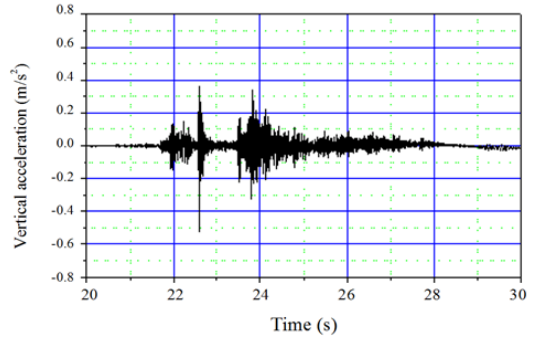


Fig. 9. Vertical acceleration, 25 km/h

측정된 가속도를 통해 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 수행하였다. 속도별 분석에서 모두 14 Hz 근처에서 가장 큰 응답을 보였으며, 이는 장경간 이동 거더의 1차 고유진동수와 일치한다.

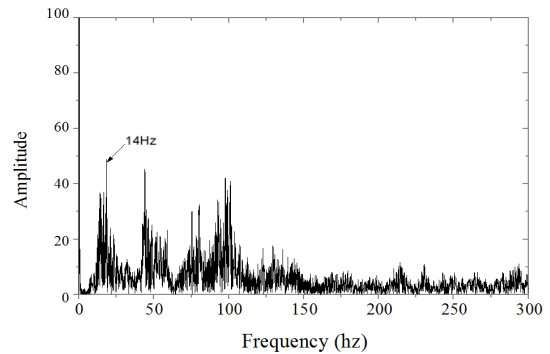


Fig. 10. Frequency analysis of vertical acceleration

3.2.2 처짐 측정

분기기의 장경간 거더는 17.5 m로 구성되어 있으며, 일반 거더의 거더 처짐 비율이 $L/3000$ 일 때 최대 처짐이 약 5.83 mm의 기준을 만족해야한다. 따라서 차량의 주행 중 장경간 거더의 최대 처짐을 측정하고 분석하였다. 거더의 처짐을 측정하기 위하여, 적외선 센서를 거더의 중앙부에 설치하고, 그 측정된 변위를 분석하고자 하였다. 측정결과 Fig. 11과 같이 최대 처짐이 약 3.47 mm

로 설계기준 ($L/3000 = 5.83 \text{ mm}$)를 만족하는 것을 확인하였다. 또한 최대 처짐의 경우 차량의 통과 속도에 관계가 없음을 확인 하였다.

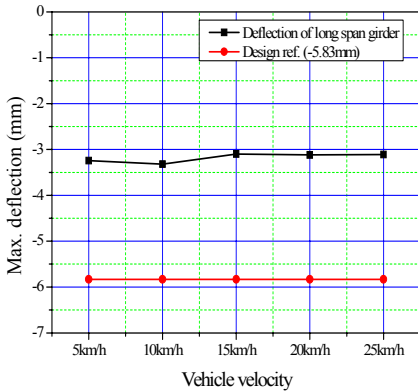


Fig. 11. Vertical deflection with respect to speed

4. 결론

본 논문의 목적은 상전도 흡인식 부상 전자석을 사용하는 중저속형 자기부상열차가 관절식 분기기를 통과할 때 차량과 분기기 시스템의 동적상호작용을 시험을 통해 평가하는 것이다. 시험은 차량의 부상안정성과 승차감, 분기기는 수직가속도와 처짐을 통해 평가하였다. 그 결과는 아래와 같다.

- 부상공극은 최대속도인 25 km/h에서 제어가 충분히 가능함을 보임
- 회공극 시험 중 25 km/h에서 간헐적으로 레일과 접촉이 발생하였지만 부상실패와 같은 부상안정성에는 큰 영향은 없었음
- 차량의 승차감 평가는 횡방향 가속도 응답이 다른 속도에 비해 급속도로 커지는 것을 알 수 있었음
- UIC 513 승차감 지수에서 Comfortable을 보임
- 분기기의 최대 처짐이 약 3.47 mm으로 설계기준 ($L/3000 = 5.83 \text{ mm}$)을 만족 확인

References

[1] K. J. Kim, J. B. Han, H. S. Han, S. J. Yang, "Coupled vibration analysis of Maglev vehicle-guideway while

standing still or moving at low speeds", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 53, No. 4, pp. 587-601, 2015
DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1013039>

- [2] K. J. Kim, H. S. Han, S. J. Yang, "Analysis of Dynamic Interaction between Maglev Vehicle and Guideway", *KSME-A*, Vol. 37, No. 12, pp. 1559-1565, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2013.37.12.1559>
- [3] J. B. Han, J. M. Lee, H. S. Han, S. S. Kim, S. J. Yang, K. J. Kim, "Study on Running Safety of EMS-Type Maglev Vehicle Traveling over a Switching System", *KSME-A*, Vol. 38, No. 11, pp. 1309-1315, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2014.38.11.1309>
- [4] J. B. Han, J. W. Park, H. S. Han, J. M. Lee, S. S. Kim, "Study on the Levitation Stability of Maglev Vehicle considering the Vibration of Steel Switch Track", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 18, No 3, pp. 175-185, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.3.175>

이 종 민(Jong-Min Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 충남대학교 기계설계 공학과 (공학학사)
- 1993년 2월 : 충남대학교 대학원 기계설계공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 충남대학교 대학원 기계설계공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 책임연구원

<관심분야>

역학 및 설계, 철도 차량 및 궤도

한 종 부(Jong-Boo Han)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 기계.기 설.메카트로닉스 공학과 졸업 (공학 학사)
- 2011년 2월 : 동 대학원 메카트로 닉스 공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 동 대학원 박사과정

<관심분야>

동역학, 제어

김 성 수(Sung-Soo Kim)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 농공학 (공학학사)
- 1983년 2월 : Mechanical Engineering from Univ. of Iowa (공학석사)
- 1988년 2월 : Mechanical Engineering from Univ. of Iowa (공학박사)

- 1992년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 메카트로닉스 공학과 (교수)

<관심분야>

다물체 동역학, 지능로봇