

# 하이퍼튜브 주행안정성 분석 및 향상에 관한 연구

## Analysis and Improvement of Stability for Hypertube

장지만\*, 이진호\*<sup>†</sup>, 전효찬\*\*, 이관섭\*

Jiman Jang\*, Jinho Lee\*<sup>†</sup>, Hyochan Jun\*\*, Kwansup Lee\*

**Abstract.** Hypertube is considered as future high speed transportation method. Hypertube can overcome the limit of adhesion between wheel and rail and reduce air resistance by running within sub-vacuum tube. In this study the concept of Hypertube whose levitation and guidance is operated simultaneously is presented, different from maglev system, the levitation and guidance of Hypertube are possible at the same time, which reduced construction cost. And regarding to stability, the comparison between traditional maglev and Hypertube is investigated. And the dynamic stability simulation using multy-body dynamics program is analyzed to improve the stability of Hypertube.

**Keywords :** Hypertube, Driving stability, Maglev train

**초 록** 바퀴식 열차의 점착력 구동 한계를 극복할 수 있고, 아진공 튜브 내 주행을 통해 주행저항 감소가 가능한 하이퍼튜브는 미래 초고속 교통수단의 대안으로 평가받고 있다. 본 연구에서는 기존의 자기부상열차와 달리 부상 및 안내가 동시에 이루어지고, 건설비 저감이 가능한 하이퍼튜브 개념을 제시하고, 주행 안정성 측면에서 기존 자기부상 열차와 하이퍼튜브의 특징을 비교하였다. 그리고 다물체 동역학 프로그램을 이용한 동특성 시뮬레이션을 통해 주행 안정성 향상 방안에 대해 분석하였다.

**주요어 :** 하이퍼튜브, 주행안정성, 자기부상열차

## 1. 서 론

현재 대도시간 이동이 빈번해지고 생활영역이 빠른 속도로 확대되면서 고속철도 승객수요가 가파르게 상승하였다. 수송량 포화에 대처하고 신규 초고속 열차건설 필요성이 증가함에 따라 혁신적인 대중교통수단인 초고속 자기부상열차에 관심이 증대되고 있다. 초고속 자기부상열차는 구조상 탈선의 위험이 없고 바퀴식 열차의 단점인 초고속 주행시 전차선에 의한 판토틀라프 집전 문제, 점착성능 저하에 따른 가감속 성능 저하 측면이 있다. 또한 휠 레일 마모가 없으므로 유지보수비 측면에서 유리하다. 본 연구에서는 새로운 방식의 자기부상열차인 하이퍼튜브를 소개하고 주행안정성 측면에서 분석을 수행하였다. 하이퍼튜브는 아진공튜브내 주행을 통해 주행저항 감소가 가능하며 부상 및 안내가 동시에 이루어지고, 건설비 저감이 가능한 특징이 있으나, 구조적으로 차량의 rolling 방향 동특성에 취약할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 먼저 주행 안정성 측면에서 기존 자기부상열차와 하이퍼튜브와 동특성을 비교하고 다물체 동역학 해석이 가능한 DAFUL 시뮬레이션을 통해 하이퍼튜브의 주행안정성 향상 방안에 대해 분석하였다.

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

\* 한국철도기술연구원 하이퍼튜브연구팀

\*\* VirtualMotion Inc

## 2. 본 론

## 2.1 하이퍼튜브 시스템 개요

최고 1000Km/h 이상의 주행 속도가 목표인 하이퍼튜브는 전기, 전자, 기계, 토목 및 건설 등 기술이 종합적으로 연계된 거대 복합 시스템이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 하이퍼튜브 시스템은 원형 가이드웨이 튜브와 캡슐 차량, 초전도 전자석, 추진/부상/안내코일로 구성된다. 튜브내 주행 공기저항을 최소화하기 위해 아진공상태로 유지되며, 튜브는 아진공 기밀 유지, 내부기압과 외부기압 차를 감당하고 힘 발생에 저항할 수 있는 고강도 경량 신소재로 제작된다. 튜브를 받치고 있는 가이드웨이에는 추진/부상/안내를 위한 코일이 매설되어 있어, 차량 초전도 전자석과의 상호작용에 의해 추진력, 부상력과 안내력을 발생시키게 된다. 차량 하부에는 EDS(Electro-Dynamic Suspension) 부상을 위한 초전도 전자석이 부착되어 있고, 전두부에는 주행저항 감소를 위한 컴프레서가 설치된다. 또한 주행안정성 향상을 위한 보조날개가 양 옆으로 다수 부착되어 있다. 하이퍼튜브는 기존 자기부상열차에 비해 크기 및 중량이 작아서 인프라 비용이 절감되고, 초고속, 저저항 주행을 통해 운영 및 유지보수비 또한 절감될 것으로 예상된다.

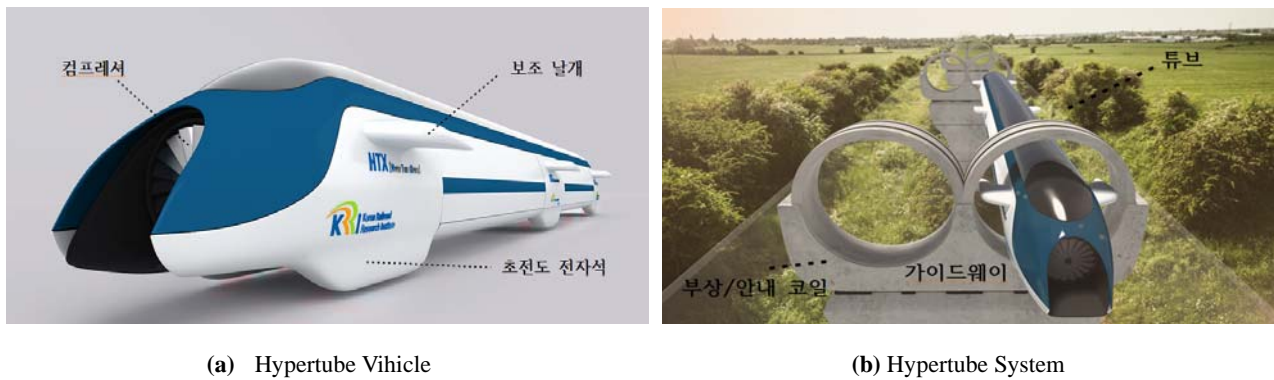


Fig. 1 Conceptual Design of Hypertube

부상/안내시스템은 차상 초전도 전자석 시스템, 지상 도전판(대향판)으로 구성된다[1]. Fig. 2에서 보는 바와 같이 초전도 전자석은 부상과 안내의 역할을 겸하도록 설계하였다. 부상시스템은 저속에서 바퀴로 주행하며 부상하며 100km/h 이상시 100mm 부상을 한다. 안내시스템은 반발식으로 한쪽으로 열차가 편향하면 편향하는 쪽의 공극이 작아짐에 따라 반발력이 증가하여 열차를 밀어내므로 언제나 튜브의 중앙에 열차를 안전하게 위치시킨다[1].

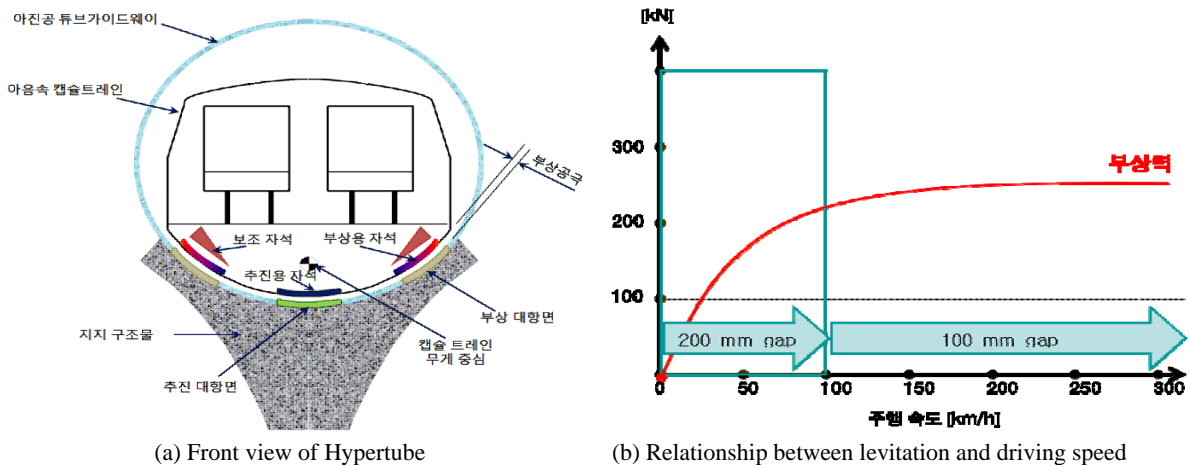


Fig. 2 Levitation system

## 2.2 기존 자기부상열차와의 동특성 비교

본 절에서는 기존 자기부상열차와 제안된 하이퍼튜브와의 기본적인 동특성 비교를 수행하였다. 하이퍼튜브의 경우 앞서 설명한 바와 같이 부상과 안내가 하나의 자석에 의해서 이루어지므로 차량의 rolling 방향 동특성이 특히 중요할 것으로 판단된다. 따라서 이 방향에 대한 동특성 분석을 분석하고 비교하였다. 동특성 해석을 위한 자기부상열차와 하이퍼튜브 모델은 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, Table 1에 표시한 인자 외에는 조건이 동일하다고 가정하였다.

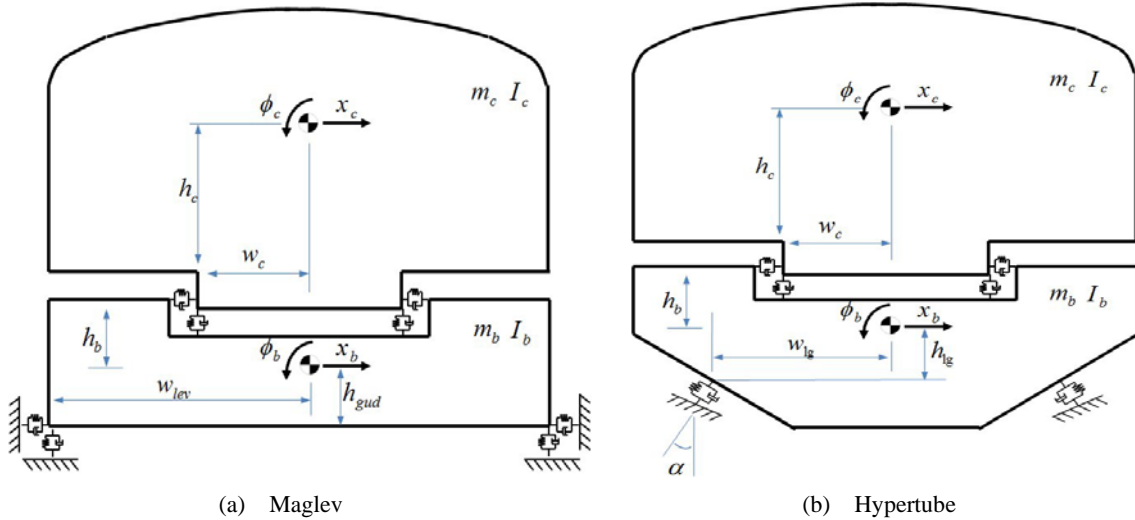
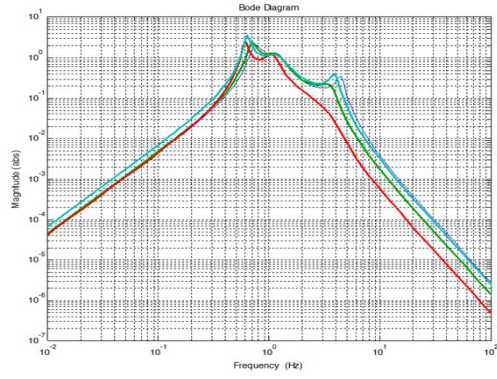


Fig. 3 Schematic diagram of maglev and hypertube model

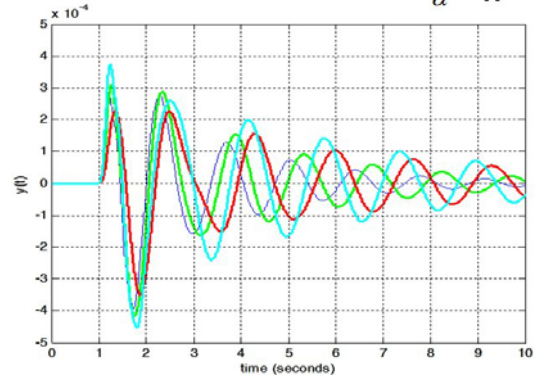
Table. 1 Different parameter between maglev and hypertube model

	Maglev	Hypertube
Magnet attachment angle	-	$\alpha$
Horizontal distance between mass center and magnet	$w_{lev}$	$w_{lg}$
Vertical distance between mass center and magnet	$h_{gud}$	$h_{lg}$

전자석 부착각도 변화에 따른 해석 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 전자석 부착각도가 너무 작거나 과도할 경우 동특성이 악화됨을 확인 할 수 있다. 대차무게중심과 전자석간의 수평 거리에 따른 동특성 비교 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 하이퍼튜브의 경우 구조상 대차 무게 중심과 전자석간의 수평거리가 기존의 자기부상열차에 비해 줄어들 수 밖에 없는데 이 거리가 짧아질수록 롤링방향의 동특성이 크게 악화됨을 알 수 있다. 마지막으로 대차무게중심과 전자석간의 수직거리에 따른 동특성을 비교하였고 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 수직거리가 커질수록 동특성이 악화됨을 확인할 수 있었다.

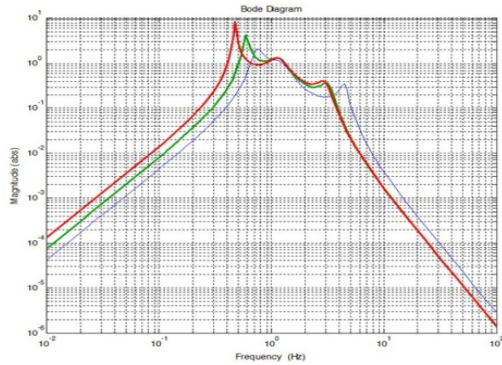


(a) Bode plot

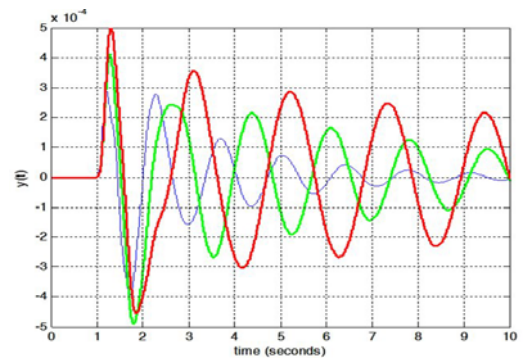


(b) Time reponse

**Fig. 4** Comparison of dynamics according to magnet attachment angle (black: maglev, green:  $30^\circ$ , red:  $10^\circ$ , blue:  $60^\circ$ )



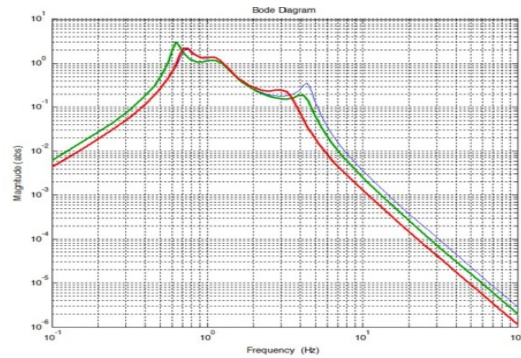
(a) Bode plot



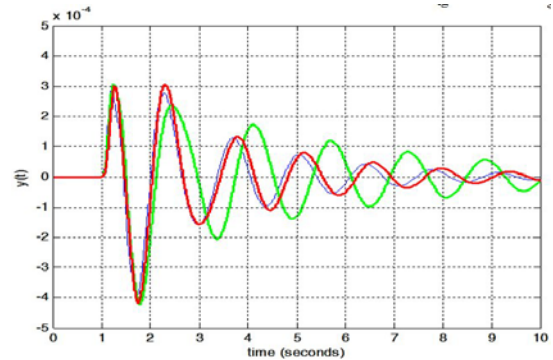
(b) Time reponse

**Fig. 5** Comparison of dynamics according to horizontal distance (black: maglev, green:

$w_{TLx} \times 0.7$ , red:  $w_{TLx} \times 0.5$ )



(a) Bode plot



(b) Time reponse

**Fig. 6** Comparison of dynamics according to vertical distance (black: maglev, green:

$k_{aud} \times 2$ , red:  $k_{aud} \times 0.5$ )

### 2.3 Rolling 방향 주행안정성 향상 방안

하이퍼튜브의 경우 rolling 방향의 동특성이 상대적으로 취약하므로 본 절에서는 제안된 하이퍼튜브의 rolling 주행안정성 향상 방안을 살펴보았다. 차량 동특성 모델 수립에 있어서 초전도 반발 부상에 의해 발생하는 반발력, 부상력, 전자기적 강성과 댐핑값은 기존 문헌을 참고하였다 [1].

#### 2.3.1 무게중심에 의한 영향

캡슐 트레인의 무게중심이 rolling 방향 동특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 대차의 무게중심을 상단, 중단 및 하단에 이동시키면서 해석하였다. Fig.7 (b) 결과에서 알 수 있듯이, 무게중심을 낮출수록 rolling 안정성이 향상됨을 확인할 수 있다.

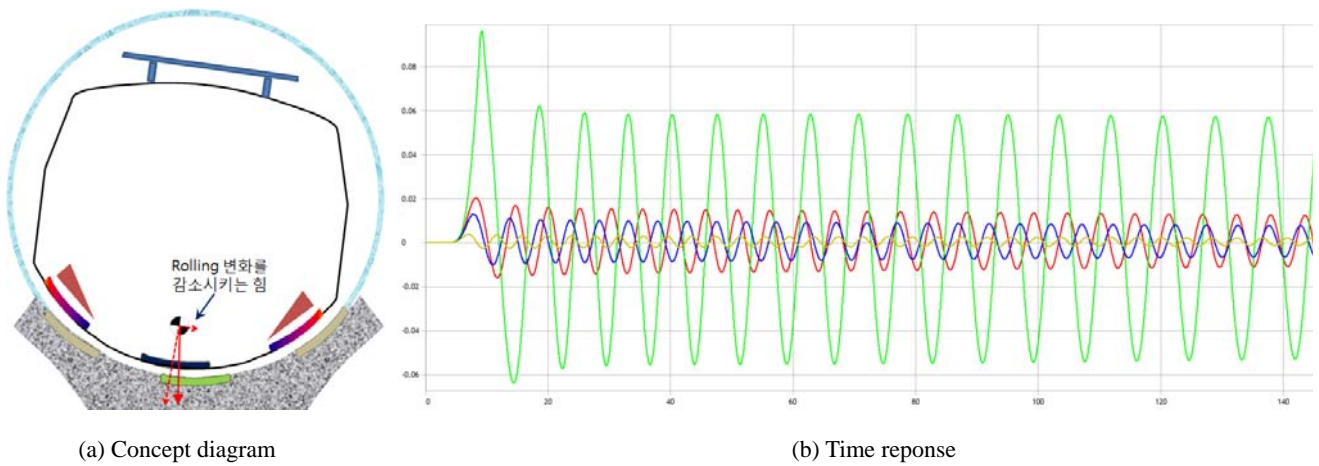


Fig.7 Influence of center of gravity on rolling

#### 2.3.2 보조 날개에 의한 영향

보조 날개는 Fig.8 (a)에 나타난 것처럼 차량 상면에 설치되며 주행시 날개 상부와 하부의 압력차에 의하여 down force를 생성한다. 보조 날개는 뒤, 앞 뒤, 앞 중간 뒤, 이렇게 나누어 해석하였다. Fig. 8 (b) 결과에서 알 수 있듯이, 꼬리 날개를 설치할수록 rolling 진폭 변위가 작아짐을 확인할 수 있다.

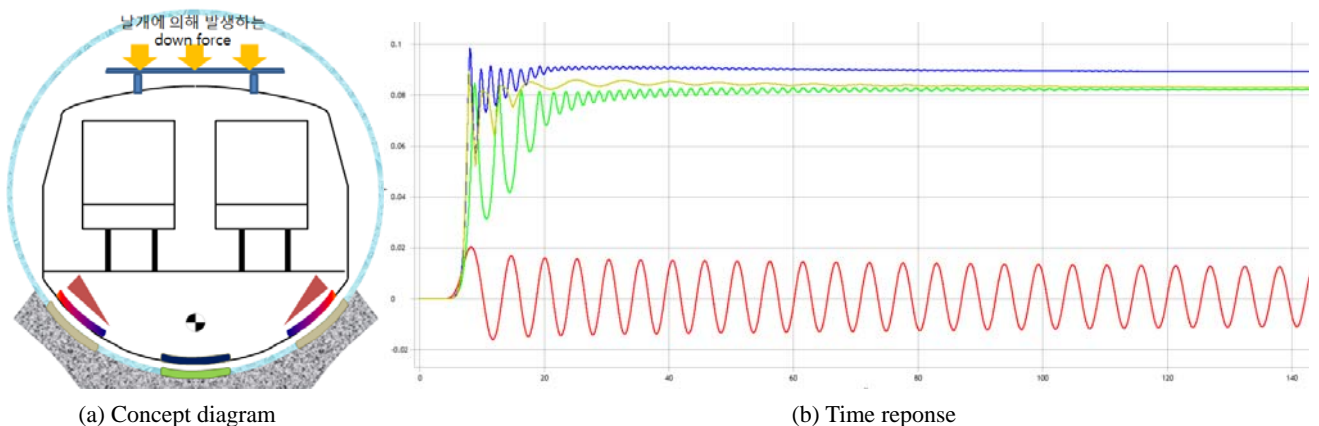


Fig.8 Influence of auxiliary wing on rolling

### 2.3.3 추진용 자석에 의한 영향

캡슐트레인의 추진용 자석과 튜브가이드웨이의 대항면 사이에는 추진제어각도 조절을 통하여 흡입력을 발생시킬 수 있다. Fig.9 (a)와 같이 Rolling 발생시 추진용 자석과 대항면사이 흡입력을 500N, 1500N, 3000N 을 주어 해석하였다. Fig.9 (b)결과에서 알 수 있듯이 흡입력이 커질수록 동특성이 안정화됨을 확인할 수 있다.

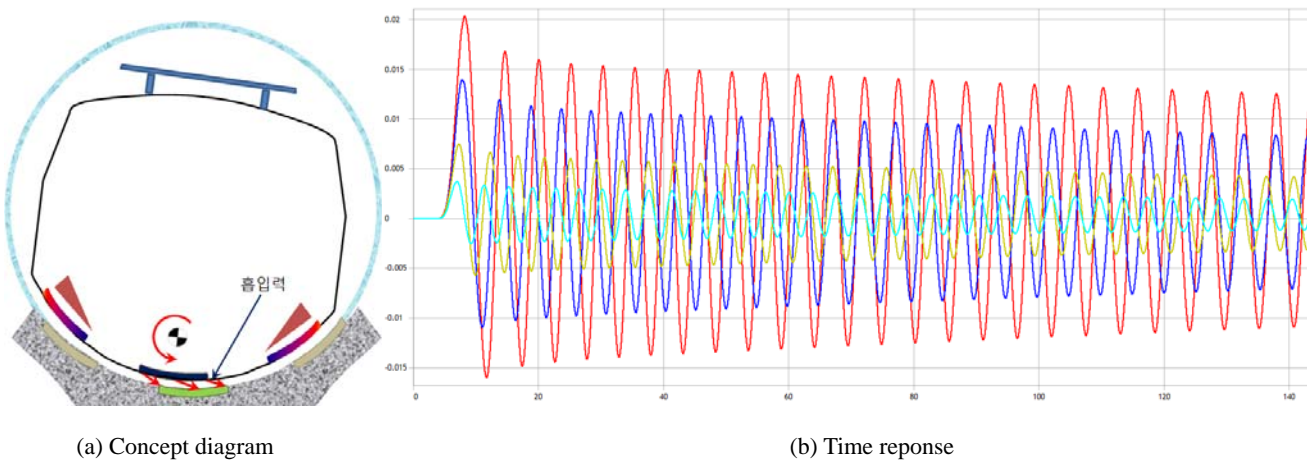


Fig.9 Influence of propulsion magnet attraction on rolling

## 3. 결 론

본 연구에서는 시속 1000km이상의 속도로 주행하는 새로운 개념의 교통수단인 하이퍼튜브에 대해 소개하고 주행 안정성에 대해서 분석하였다. 하이퍼튜브는 원형 가이드웨이 튜브와 캡슐차량, 초전도 전자석, 추진/부상/안내 코일로 구성되며 아진공상태의 튜브를 주행하는 초고속 자기부상열차이다. 하이퍼튜브는 고속 및 건설비 저감이 가능한 장점이 있으나, 부상과 안내를 동시에 수행하는 차량의 구조상 rolling 방향의 동특성은 취약할 것으로 예상된다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서 제시한 3가지 방안은 rolling 동특성 안정화에 도움됨을 확인하였다. 무게중심을 아래로 이동할 경우 기존 대비 rolling 진폭변위가 33% 감소하고, 다운포스를 생성하는 보조날개를 설치했을 경우 rolling 변위 자체는 감소하나, 다운포스의 불균형으로 인해 차량의 초기 rolling offset이 생김을 확인하였다. 그리고 추진용 전자석의 흡입력을 이용할 경우 흡입력이 커질수록 안정성이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문은 직선 주행시 rolling 동특성 향상을 연구하였지만 차후 곡선 주행시, 단차 발생시, 주기적으로 외란 발생 할 경우 rolling 동특성 향상 등에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 자체사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

[1] K.S. Lee, et al. (2016) Core technology development of subsonic capsule train, KRRI, Final Report