

도시형 자기부상열차의 곡선 가이드웨이 매개변수 연구

한종부* · 김기정* · 한형석**† · 김성수**†

*충남대학교 메카트로닉스공학과, **한국기계연구원

Parametric Study of Curved Guideways for Urban Maglev Vehicle

Jong-Boo Han^{*}, Ki-Jung Kim^{*}, Hyung-Suk Han^{**†} and Sung-Soo Kim^{**†}

^{*} Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,

^{**} Korea Institute of Machinery and Materials

(Received September 16, 2013 ; Revised November 12, 2013 ; Accepted November 28, 2013)

Key Words: Maglev Vehicle(자기부상열차), Multibody Dynamics(다물체동역학), Curved Guideway(곡선가이드웨이), Transition Curve(완화곡선), Cant Angle(캔트각)

초록: U 자형 전자석 하나로 부상력과 안내력을 동시에 얻는 중·저속 자기부상열차는 안내제어 없이 곡선을 주행한다. 때문에 곡선, 특히 곡률반경이 매우 작은 곡선 주행 시에 차량이 레일과 물리적 접촉을 방지하기 위해서는 곡선형상의 결정이 세심하게 이루어져야 한다. 특히 완화곡선의 형상이 중요하다. 본 논문에서는 완화곡선 선로를 구성하는 형상 매개변수들의 차량 안내 성능에의 영향도를 분석하는데 목적이 있다. 이를 위하여 차량, 전자석, 부상제어기, 곡선가이드웨이가 통합된 3 차원 자기부상열차 다물체 동역학 모델을 개발하였고, 개발된 모델을 이용하여 곡선형상을 구성하는 매개변수 연구를 수행하였다. 연구 결과는 곡선형상의 결정이나 차량의 대차구조를 설계하는데 이용이 가능하다고 할 수 있다.

Abstract: A maglev vehicle of middle-low speed subjected to both a lift force and a guidance force by a U-shaped single electromagnet is operated over a curved guideway without a guidance controller. Therefore, it is required to carefully decide the curve shape for preventing contact between the vehicle and the guiderail for the case that a Maglev vehicle is operated over a curved guideway with a small radius. Specifically, the shape of the transition curve is very important from the stability viewpoint. This study analyzes the influence of curve shape on maglev stability through parametric composition of the transition curve during vehicle guidance. To this end, a multibody dynamics-based three-dimensional Maglev vehicle model was developed. The model was integrated with the vehicle, curved guideway, electromagnets, and their controllers. Using this model, a realistic parametric study including the curved guideway was carried out. The results of research should be considered usefully in the design of bogies and the curve shape.

1. 서 론

U 자형 형상의 전자석 현가 시스템으로 부상하는 상전도 흡입식 자기부상열차는 안내제어 없이 곡선을 주행한다. Fig. 1 과 같이 U 자형의 전자석과 가이드레일은 어긋난 정도에 따라 전자석 힘이 부상력과 안내력으로 나뉘진다. 이때 발생된 안내력은 전자석을 가이드레일과 나란한 위치로 되돌려 놓아 제어가 필요 없게 된다.^(1,2)

하지만 곡선 가이드웨이의 반경과 차량속도 등

곡선주행 시 발생하는 과도한 원심력은 Fig. 1 의 대차와 가이드레일과의 접촉을 유발시킬 수 있다. 특히 도시형 자기부상열차는 일반 철도와는 달리 60m, 180m 등의 작은 곡선반경의 가이드웨이를 주행하므로 가이드웨이 설계, 차량 속도 등이 매우 중요한 요인이 된다. 과도한 속도나 곡선 가이드웨이 설계는 대차와 가이드레일 사이의 접촉 발생하고, Fig. 2, 3 과 같이 부상공극 및 가속도에 영향을 미친다. 따라서 자기부상열차의 곡선 주행 안전성 연구가 필요하다.

기존의 선행 연구 중에서 3 대차 자기부상열차의 곡선 주행의 안전성 평가 연구가 수행되었다.⁽¹⁾

† Corresponding Author, hshan@kimm.re.kr, sskim@cnu.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

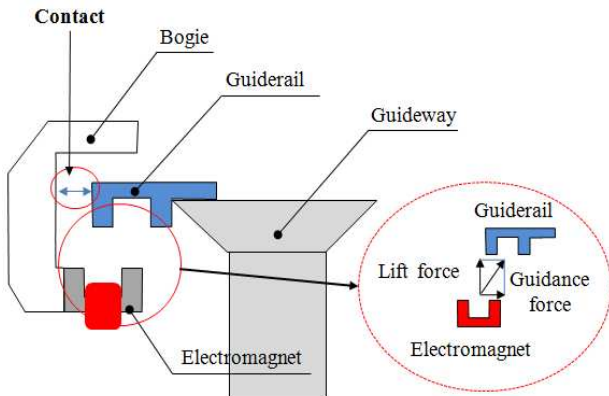


Fig. 1 Principle of component of a electromagnet force



Fig. 4 Curved guideway

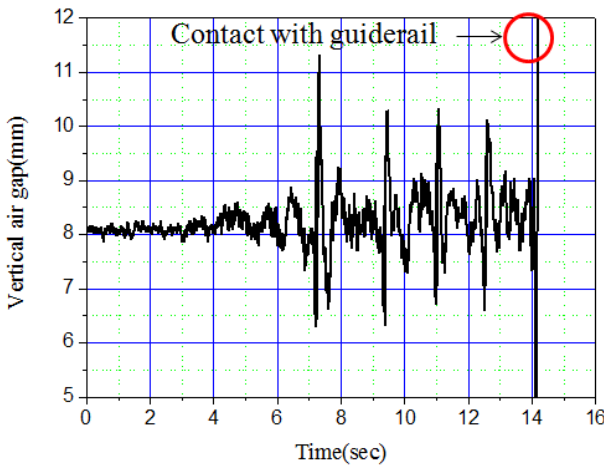


Fig. 2 Acceleration response in the event of contact

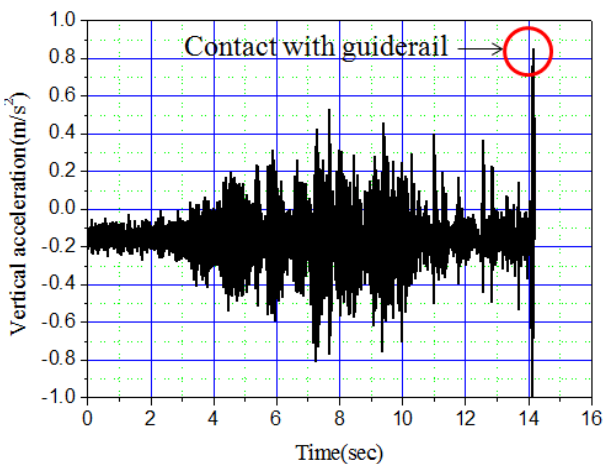


Fig. 3 Air gap response in the event of contact

이 연구에서는 곡선주행 시 대차의 횡 공극을 줄이기 위한 횡댐퍼 특성에 관한 연구이다. 그리고 곡선 추종성에 관한 연구로 곡선 주행 시 부상공극의 변화를 예측하는 안정성 측면에서의 연구가 주로 수행되어 왔다.⁽²⁾ 또는 설치된 가이드웨이의 표면조도 특성에 따른 부상 안정성 등에 관한 연

구가 수행되었다.^(3,4) 위 연구들은 주로 차량의 안정성에 초점을 맞춘 연구로 가이드웨이의 설계 선형조건에 대한 자기부상열차의 주행 안전성에 관한 연구는 수행된 적이 없다.

본 논문에서는 곡선 가이드웨이 형상과 차량 속도가 자기부상열차의 곡선주행 안정성에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 곡선 가이드웨이의 선형을 결정짓는 완화구간(transition curve), 캔트각 (cant angles), 원곡선 반경(circular curve radius)의 파라미터들과 차량속도(vehicle speed)에 초점을 두어 연구를 수행하였다. 이를 위하여 곡선 가이드웨이는 Fig. 4 과 같이 기계연구원에 설치된 곡선 가이드웨이를 이용하여 모델링 하였고, 자기부상열차는 다물체 동역학을 이용한 가상시제 기반 모델을 개발하였다.

개발된 다물체 동역학 모델은 실측된 데이터와 비교를 통하여 모델 검증과정을 수행하였고, 검증된 모델을 이용한 곡선 선로 매개변수에 따른 민감도 연구를 수행하였다. 본 논문의 결과를 통해서 곡선주행의 안정적 통과속도를 제안하고 나아가 곡선 가이드웨이 설계에 참고가 될 것이다.

2. 모델링

본 논문의 곡선주행 평가를 위해서 실제 자기부상차량의 동적 특성을 갖는 차량 및 대차, 전자석, 제어기, 가이드웨이 등이 고려된 통합 해석모델 개발이 필요하다.

2.1 차량 및 대차

실제적이고 정확한 동특성 해석을 위해 자기부상열차에 대한 다물체 동역학을 이용한 3 차원 해석 모델을 개발하였다.⁽³⁾

개발한 도시형 자기부상열차는 Fig. 5 와 같이 2 량 1 편성으로 2 개의 차량과 8 개의 대차로 구성

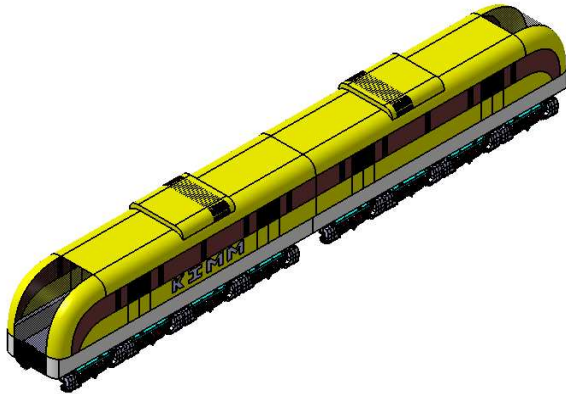


Fig. 5 Maglev train multibody dynamics model

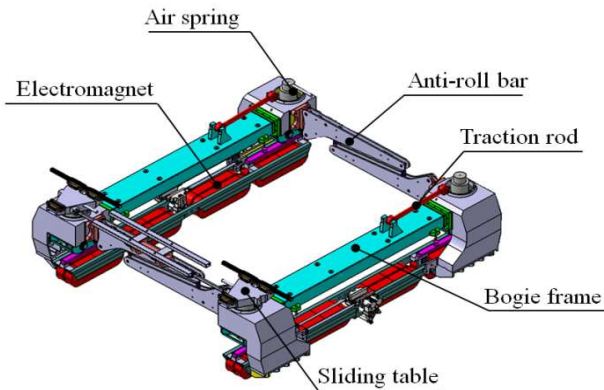


Fig. 6 Configuration of bogie system

되어 있다. 하나의 대차 모듈은 Fig. 6 과 같이 2 개의 대차 사이드 프레임(bogie frame)과 8 개의 전자석(electromagnet), 안티롤바(anti-roll bar)로 구성되어 있고, 차량과 연결된 슬라이딩 테이블(sliding table), 공기 스프링(air spring)으로 구성되어 있다. 또한 대차와 연결된 견인바(traction rod)는 슬라이딩 테이블과 연결되어 차체와 대차를 연결시켜준다.⁽³⁾

2.2 전자석

자기부상열차에서 일반적으로 자석과 자성체(가이드레일)와의 관계가 Fig. 7 과 같을 때 자석에 전류(i)를 인가하면 가이드레일에 붙으려는 흡인력이 발생되고 이때 이상적인 전자석의 흡인력은 식 (1)과 같이 정의된다.⁽⁴⁾

$$F = \mu_0 A \left(\frac{Ni}{2c} \right)^2 = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{c} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,

- A : 코어의 단면적(m^2), i : 전자석의 전류(A),
- μ_0 : 공기 투자율(H/m), N : 코일 턴 수,
- c : 가이드레일과 전자석 사이의 공극(m)

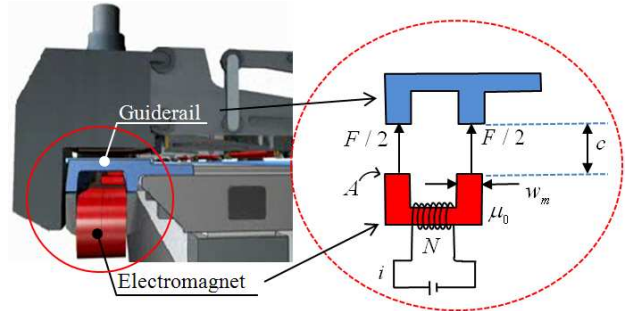


Fig. 7 EMS(Electromagnetic suspension)

식 (1)의 전자석의 힘은 전류의 세기와 공극에 따라서 힘의 변화가 일어나는데, 일정한 공극에서 전류의 크기가 커지면 포화상태가 되는 비선형 특성을 갖고 있다.⁽⁵⁾ 본 논문에서는 전자석의 힘을 자기부상열차의 정지부상을 위한 공칭 전류(i_0) 약 25A 와 공칭 공극(c_0) 8mm 을 기준으로 선형화된 함수를 사용하였다.⁽⁵⁾

자기부상열차의 공칭점에 대한 부상력 ($F_0(i_0, c_0)$)과 제어 전자석 힘(F_m)으로 식 (2)와 같이 전체 힘을 표현할 수 있다.

$$F = F_0 + \Delta F_m = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i_0}{c_0} \right)^2 + k_z \Delta c(t) - k_i \Delta i(t) \quad (2)$$

식 (3)의 전압방정식에서 공칭점에 해당하는 전압 ($v = v_0 + \Delta v$), 전류 ($i = i_0 + \Delta i$), 공극 ($c = c_0 + \Delta c$)에 대한 Taylor 급수를 이용하여 전개하면 식 (4)의 전류미분 방정식으로 유도 할 수 있다.⁽⁶⁾

$$v = Ri + L \frac{d}{dt} i \quad (3)$$

$$\Delta \dot{i}(t) = \frac{k_c}{k_i} \Delta \dot{c}(t) - \frac{R}{L_0} \Delta i(t) + \frac{1}{L_0} \Delta v(t) \quad (4)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2c_0}, \quad k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^2}, \quad k_c = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$$

- F_0 : 이상적인 부상력 (N)
- ΔF_m : 제어 전자석 힘(N)
- i_0 : 공칭점 전류 (A)
- c_0 : 공칭점 공극 (m)

식 (2)의 전체 부상력은 Fig. 1 의 가이드레일과 전자석의 위치에 따라 부상방향과 횡방향의 분력을 식 (5), (6)와 같이 계산할 수 있다.⁽⁶⁾

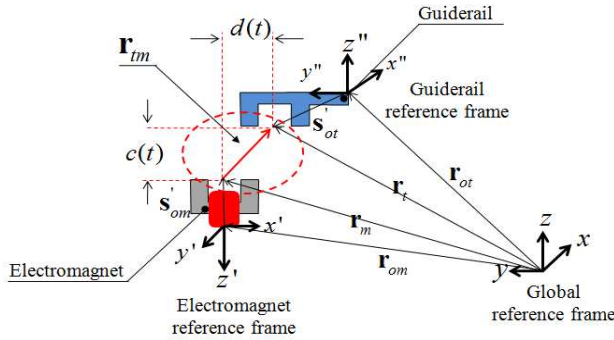


Fig. 8 Coordinate definition

$$F_y = F \times \left[-\frac{2c}{\pi\omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{d}{c} \right) \right] \quad (5)$$

$$F_z = F \times \left[1 + \frac{2c}{\pi\omega_m} + \frac{2d}{\pi\omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{c}{d} \right) \right] \quad (6)$$

여기서,

F_y : 안내력(N), c : 부상공극(m), F_z : 부상력(N),
 d : 횡공극(m), ω_m : 전자석 폭(m)

식 (5), (6)에서의 부상공극 c , d 을 계산하기 위해 Fig. 8 과 같이 전자석과 가이드레일 좌표를 설정 하였다. 정의된 벡터에 의해 식 (7)과 같은 부상 공극을 계산할 수 있는 기구학식을 정의할 수 있다.^(6,7)

$$\mathbf{r}_{tm} = \mathbf{r}_t - \mathbf{r}_m = \mathbf{r}_{ot} + \mathbf{A}_t \mathbf{s}'_{ot} - \mathbf{r}_{om} - \mathbf{A}_m \mathbf{s}'_{om} \quad (7)$$

또한 식 (4)를 계산하기 위해 필요한 부상 및 횡공극 속도 $\dot{c}(t)$ 는 식 (7)에 미분을 적용하여 식 (8)을 유도할 수 있다.^(6,7)

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_{tm} &= \dot{\mathbf{r}}_t - \dot{\mathbf{r}}_m = \dot{\mathbf{r}}_{ot} + \dot{\mathbf{A}}_t \mathbf{s}'_{ot} - \dot{\mathbf{r}}_{om} - \dot{\mathbf{A}}_m \mathbf{s}'_{om} \\ &= \dot{\mathbf{r}}_{ot} + \mathbf{A}_t \dot{\boldsymbol{\omega}}_t \mathbf{s}'_{ot} - \dot{\mathbf{r}}_{om} - \mathbf{A}_m \dot{\boldsymbol{\omega}}_m \mathbf{s}'_{om} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 \mathbf{A}_t , \mathbf{A}_m 은 각각 가이드웨이 좌표계와 전자석 좌표계에서 기준좌표계로의 변환 행렬을 의미한다. 위에서 표현된 가이드웨이의 좌표변환행렬 \mathbf{A}_t 는 식 (9)와 같이 Euler 각으로 계산하였다. 이때 사용되는 Euler 각 ϕ , ψ 를 이용하여 곡선과, 캔트각을 정의할 수 있다.

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \cos\psi & -\sin\phi \\ \sin\phi \sin\psi & \sin\phi \cos\psi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

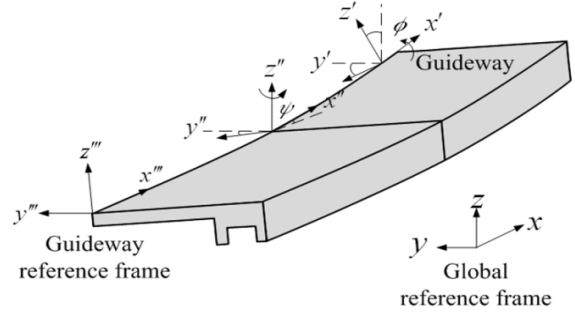


Fig. 9 Track coordinates definition

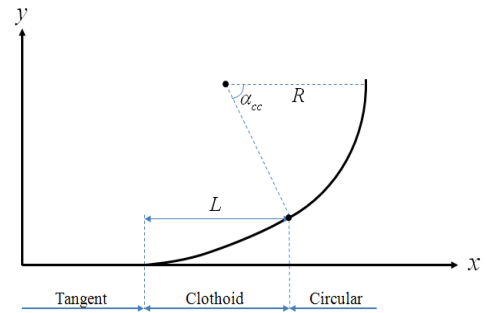


Fig. 10 Geometry of curved guideway

전자석의 좌표 변환 행렬 \mathbf{A}_m 는 Euler parameter 방법을 이용하여 식 (10)과 같이 정의 하였다.^(6,7)

$$\mathbf{A}_m = 2 \begin{bmatrix} e_0^2 + e_1^2 - 0.5 & e_1 e_2 - e_0 e_3 & e_1 e_3 + e_0 e_2 \\ e_1 e_2 + e_0 e_3 & e_0^2 + e_1^2 - 0.5 & e_2 e_3 - e_0 e_1 \\ e_1 e_3 - e_0 e_2 & e_2 e_3 + e_0 e_1 & e_0^2 + e_1^2 - 0.5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 가이드웨이

자기부상열차의 곡선 가이드웨이는 Fig. 10 과 같이 직선, 완화곡선, 원 곡선으로 이루어져있다. 완화 곡선은 일반적으로 원곡선부와 직선부 사이에 설치되며, 직선부의에서 곡선부로 진입 시에 갑자기 발생하는 원심력에 의한 위험을 줄이기 위해 곡률을 순차적으로 변화시키는 연속성 곡선부이다.⁽⁷⁾ 여기서 R 은 곡선선로의 곡선반경을 타나 태고, L 은 완화곡선의 길이를 의미한다.

일본 HSST 의 경우 완화곡선으로는 회전선, 코 사인선, 사인선을 비교한 후 사인곡선을 선택하였고, 중국의 경우 3 차 포물선 형을 채택하였다.^(8,9) 한국은 완화곡선을 clothoid 곡선으로 사용한다.⁽⁷⁾ 완화 곡선의 x , y 의 좌표는 clothoid 급수 전개 첫 번째 항만으로 이루어진 식 (11)과 식 (12)로 표현 된다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{1}{r} = \frac{x}{RL} \tag{11}$$

$$y = \frac{x^3}{6RL} \tag{12}$$

여기서,

- r : 완화 곡선 반지름 (m)
- R : 원곡선 반지름 (m)
- L : 완화 곡선 길이(m)

3. 해 석

3.1 모델검증

2 장에서 소개된 자기부상열차의 다물체 동역학 모델 및 곡선 가이드웨이 모델링을 검증하기 위하여 기계연구원에 설치된 시범 노선을 이용하여 수행하였다.

실험에 사용된 곡선 가이드웨이는 Table 1 과 같이 곡선 반경이 180m, 완화구간 길이가 25m, 두 레일 사이의 캔트각이 약 2.5° 이다. 이 구간에서 자기부상 차량을 20km/h 의 속도로 운행 시켰을 때 Fig. 11 과 같이 대차와 가이드레일 사이의 횡공극을 측정하였다.

자기부상 열차의 대차 구조상 곡선진입의 첫 번째 대차에서 가장 높은 횡공극이 발생되기 때문에 첫 번째 대차에 대해 해석 및 실험을 수행하였다.

동역학 해석 및 실험 결과 Fig. 12, 13 와 같은 결과를 얻었다. Fig. 12, 13 은 각각 20km/h 와 30km/h 으로 주행했을 때 해석모델과 실험의 횡공극 결과

Table 1 Configurations of the curved guideway

| | |
|--------------------------|-----|
| Radius(m) | 180 |
| Cant angle(degree) | 2.5 |
| Clothoid curve length(m) | 25 |
| Vehicle velocity(Km/h) | 20 |

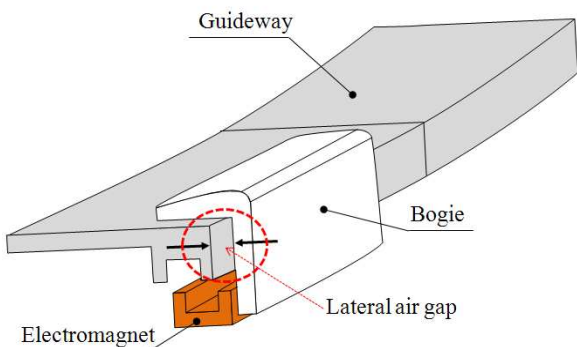


Fig. 11 Geometry of curved guideway

를 비교한 그래프이다. Fig 12 에서는 횡공극의 최대 진폭이 약 11mm 로 유사한 경향을 보이며, 변동하는 범위도 비슷한 경향을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13 은 최대 공극값이 약 14mm 정도로 비슷한 경향을 보인다. 정상상태의 횡공극 결과는 다소 차이가 발생하는데, 가이드레일의 불규칙 표면 조도에 의한 영향으로 간주된다.

실험 및 해석에서 결과로 제시하는 횡 방향의 최대 변위, 즉 그림 11 과 같은 횡공극의 최대값은 자기부상 열차의 곡선 주행 안전성을 판단하는 척도라고 할 수 있다. 따라서 직선 구간과 완화구간의 진입 부분에서, 즉 20km/h 실험은 약 5 ~ 10 초 사이, 30km/h 실험은 약 3 ~ 6 초 사이에서 최대 진폭의 값이 실험과 해석이 유사하게 발생하므로, 개발된 자기부상열차 동역학 모델을 곡선 매개변수 연구에 이용함이 합당하다고 판단하였다.

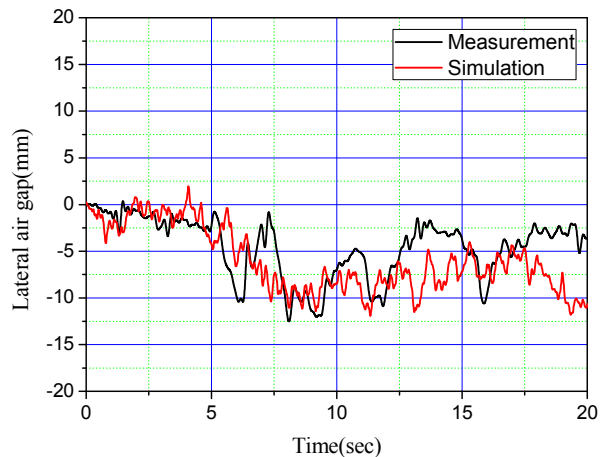


Fig. 12 Lateral air gap response at 20km/h

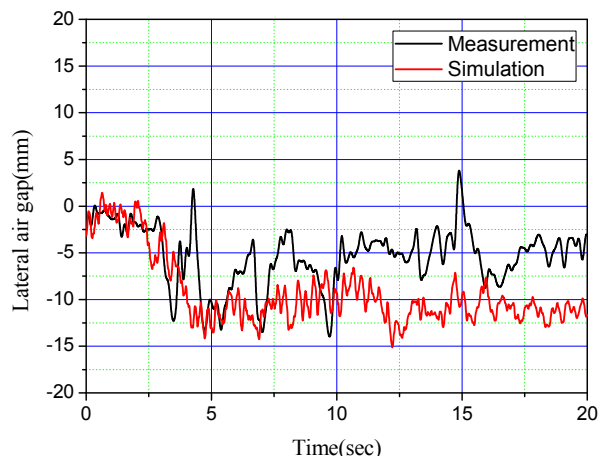


Fig. 13 Lateral air gap response at 30km/h

Table 2 Parameters of curved guideway

| Radius(m) | 60 | 110 | 180 |
|--------------------------|----------------|----------------|--------------------|
| Cant angle (degree) | 3, 3.5, 4, 4.5 | 2, 2.5, 3, 3.5 | 1.5, 2, 2.5, 3 |
| Clothoid curve length(m) | 20, 25, 30, 35 | 20, 25, 30, 35 | 20, 25, 30, 35 |
| Vehicle velocity (Km/h) | 10, 15, 20, 25 | 10, 20, 30, 40 | 10, 20, 30, 40, 50 |

3.2 매개변수에 따른 해석결과

곡선가이드웨이의 물성치는 Table 2 와 같이 60m, 110m, 180m 곡선반경의 세 가지 타입에 대하여 각각 캔트각, 완화곡선 길이, 차량속도를 정의 하였다. 60m 의 곡선의 경우 캔트각을 3 ~ 4.5° 까지 0.5° 간격으로 설정하고, 차량속도는 최대 25km/h 까지 5km/h 간격으로 증가시켜 가며 해석하였다. 110m 곡선은 캔트각을 2.0 ~ 3.5° 까지 0.5° 간격으로 설정하고, 차량 속도를 최대 40km/h 까지 증가시켜 해석하였다. 180m 의 곡선은 캔트각을 1.5 ~ 3° 까지 설정하였고, 차량 속도는 10 ~ 50km/h 까지 10km/h 간격으로 증가 시켜가며 해석하였다.

개발된 해석모델을 이용하여 180m 곡선 주행해석의 속도 별 최대 횡공극 결과를 Fig. 14 에서 나타내고 있다. 속도에 상관없이 캔트각이 클수록 더 작은 횡공극이 발생하는 경향이 나타났다. 이 경향은 10 ~ 30km/h 구간 에서는 큰 차이를 보이지 않지만, 속도가 증가 할수록 차이가 커졌다. 40km/h 이상의 속도에서는 2° 이하에서 횡공극 값이 약 25 ~ 30mm 가 발생 하였다. 또한 차량속도가 10 ~ 30 km/h 의 구간에서는 완화곡선의 길이에 대하여 차이가 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 완화곡선의 길이의 영향이 미비하다고 볼 수 있다.

결과적으로 180m 곡선을 주행 할 경우 45km/h 이하의 속도가 적당하며, 곡선의 캔트각은 2.5° 이상이 좋은 것을 알 수 있다.

Fig 15 는 110m 곡선주행에 대한 최대 횡공극 결과이다. 속도가 증가할수록 횡공극값이 증가하고, 캔트각이 증가할수록 횡공극값이 작아지는 경향을 보인다. 마찬가지로 이러한 경향은 속도가 증가할수록 두드러지게 나타난다. 그리고 완화구간의 길에 대하여 횡공극의 차이는 미비하지만, 완화곡선길이가 30m 일 때 가장 적은 횡공극 값을

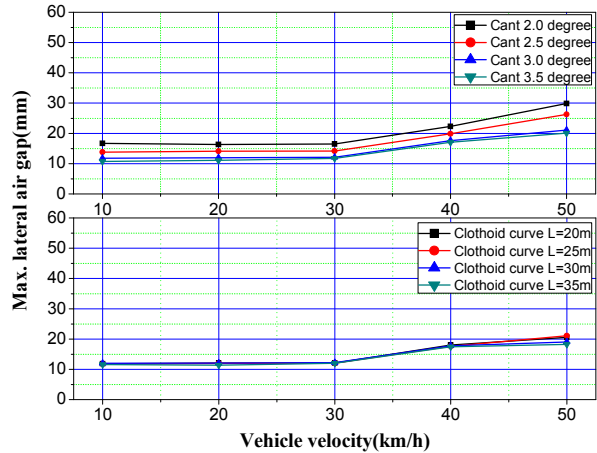


Fig. 14 Maximum lateral air gap response at 180mR

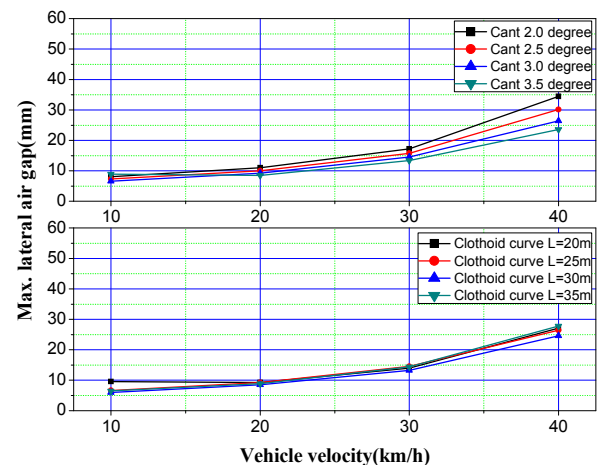


Fig. 15 Maximum lateral air gap response at 110mR

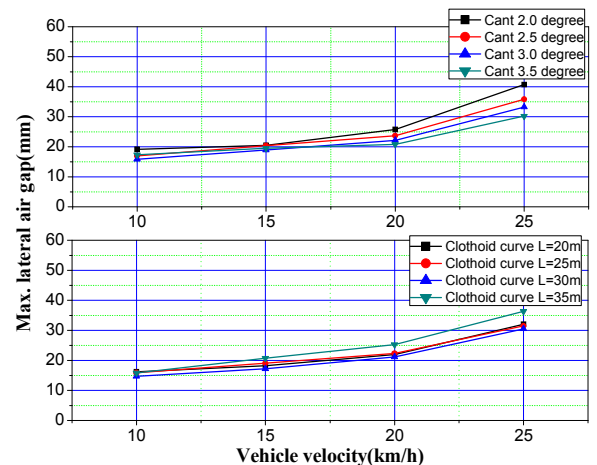


Fig. 16 Maximum lateral air gap response at 60mR

보였다. 40km/h 에서 횡공극 값이 캔트각에 따라 22~35mm 정도에 분포하는 것으로 접촉이 발생할 수 있다. 따라서 110m 의 곡선을 주행할 경우 35km/h 미만의 속도가 적당하며, 이때 곡선의 캔트각은 3° 이상이 적당한 것을 알 수 있다.

끝으로 60m 곡선 주행 해석 결과를 Fig. 16 에서 나타내었다. 앞선 결과와 마찬가지로, 차량 속도가 증가하면 횡공극 값은 커지는데 캔트각이 커질수록 최대 횡공극 값이 작아지는 경향을 보였다. 또한 완화구간의 길이의 영향은 미비하게 나타났다. 20km/h 의 속도에서 횡공극 결과가 20mm 를 초과하는 것으로 보아서, 60m 의 곡선에서 안정적인 주행을 위해 20km/h 이하에서 속도가 적당하다고 판단된다. 또한 캔트각은 3.5° 이상이 적당한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자기부상열차의 곡선 주행 시 차량 주행안정성을 확보하기 위한 적절한 곡선형상 및 차량 속도를 도출하기 위해 곡선을 결정짓는 여러 가지 매개변수에 대한 영향을 분석하였다. 특히 완화곡선의 길이와 곡선반경, 캔트각, 차량속도에 초점을 두어 분석하였다. 이러한 곡선 선형 매개변수 연구를 위해 차량, 대차, 전자석, 곡선 가이드웨이, 제어기가 포함된 다물체 동역학 기반의 3 차원 자기부상열차 모델을 개발하여 실제 환경과 유사한 해석을 수행할 수 있었다.

논문의 해석 결과를 살펴 보면 아래와 같이 분석되었다.

(1) 캔트각이 증가할수록 횡공극 값이 작아지는 경향을 보인다. 이때 속도가 높아질수록 그 특징이 뚜렷하게 나타난다.

(2) 곡선의 반경이 작을 때 속도에 대한 횡공극 변화가 캔트각에 대해서 크게 작용하는 경향을 보인다.

(3) 완화구간의 길이는 횡공극의 변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 분석되었다.

본 논문에서 결과를 이용하여 추후 자기부상열차의 곡선형상에 대한 설계기준에 이용할 수 있을 것이다.

참고문헌

(References)

(1) Yim, B. H., Han, H. S., Lee, J. K. and Kim, S. S., 2009, "Curving Performance Simulation of an EMS-Type Maglev Vehicle" *Vehicle System Dynamics*,

Vol.47, No.10, pp. 1287~1304.

(2) Yim, B. H. and Han, H. S., 2008, "Curve Negotiation Analysis of a Maglev Vehicle Utilizing Electromagnetic Suspension System," *Asian Conference on Multibody Dynamics*.

(3) Han, J. B., Kim, K. J., Kim, C. H. and Han H. S., 2011, "Curve Negotiation Analysis of a Maglev Vehicle Running over a Guideway with Irregularities," *KSAE*, pp. 2480~2484.

(4) Han, H. S., Yim, B. H., Lee, J. K., Hur, Y. C. and Kim S. S., 2009, "Effects of Guideway's Vibration Characteristics on the Dynamics of a Maglev Vehicle," *Vehicle System Dynamics*, Vol.47, No.3, pp. 309~234.

(5) Sinha, P. K., 1987, *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom.

(6) Han, H. S., 2003, "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," *JSME International*, Vol. 46, No. 4, pp. 1497~1501.

(7) Yim, B. H., Han, H. S., Lee, J. K. and Kim, S. S., 2009, "Curving Performance Simulation of an EMS-Type Maglev Vehicle," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 10, pp. 1287~1304.

(8) Yoshihide, Y., Masaaki, F. Masao, T. and Syunzo, I., 2004, "The First HSST Maglev Commercial Train in Japan," *MAGLEV 2004 proceedings*, Vol. 1, pp. 76~85

(9) ZHAO, C., ZHAI, W. and WANG, K., 2004, "Dynamic Responses of the Low-Speed Maglev Vehicle on the Curved Guideway," *MAGLEV 2004 proceedings*, Vol. 2, pp. 567~574.

(10) Coenraad, E., 2001, *Modern Railway Track Second Edition*, C. Esveld, Netherlands.

(11) Lee, J. S., Lim, D. J. and Kim, M.Y., 2009, "Moving Urban Maglev-Vehicle Analysis Considering Non-Linear Magnetic Levitational Force Effect," *COSEIK*.

(12) Han, H. S., Yim, B. H., Lee, N. J., Kim, Y. J. and Kim, B. H., 2008, "Prediction of Ride Quality of a Maglev Vehicle Using a Full Vehicle Multi-Body Dynamic Model," *Vehicle System Dynamics*, *Submitted for Publication*.

(13) LMS Virtual.lab Motion Users Manual, LMS International.

(14) Shabana, A. A., 2007, *Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach*, Taylor & Francis Group, USA.