

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1161>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

가이드웨이 횡변형의 자기부상열차 안내특성에의 영향 분석

김기정*, 이재경**, 한형석**†, 양석조*†
* 충남대학교 메카트로닉스공학과, ** 한국기계연구원

Effect of Lateral Deformations of Guideway on Guidance Characteristics of Maglev Train

Ki-Jung Kim*, Jae-Kyoung Lee**, Hyung-Suk Han**† and Seok-Jo Yang*†
* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.,
** KIMM

(Received September 1, 2014 ; Revised August 7, 2015 ; Accepted September 7, 2015)

Key Words: Urban Maglev Train(도시형 자기부상열차), U-shaped electromagnet(U 자형 전자석), Guidance characteristics (안내특성), Guideway lateral deformation(가이드웨이 횡변형)

초록: 자기부상철도에서 전체 투자비의 약 70%를 차지하는 가이드웨이의 건설비를 줄이고 미관을 향상 시키기 위하여 가이드웨이의 경량화가 요구된다. 그에 따라서 가이드웨이의 변형이 증가하며 그 변형에 의한 부상안정성과 안내성능 영향을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 가이드웨이의 구조물의 횡변형과 레일의 수평불규칙도에 의한 차량의 안내 특성에의 영향성 분석에 목적을 두고 있다. 이를 위하여 가이드웨이 횡변형을 포함하는 3 차원 모델의 이용이 제안된다. 제안된 가이드웨이와 차량이 통합된 동적 해석 모델을 이용하여 가이드웨이 횡변형에 의한 차량의 안내특성 분석을 수행하였다. 해석 결과 가이드웨이 거더의 횡변형에 의한 효과는 미비하지만 가이드웨이 레일의 횡방향 불규칙도에 대해서는 속도에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 따라서 타당한 레일의 횡 불규칙도 설계 공차의 제한이 필요함을 알 수 있다.

Abstract: A slender guideway is essential in improving aesthetically and reducing its construction cost which accounts for about 70% of overall investment for maglev system. As the slender guideway, however, may increase its deformation, its effect on levitation stability and guidance performance needs to be analyzed. The purpose of this study is to analyze the effect on guidance characteristics of maglev due to the lateral deformation of the guideway girder and lateral irregularity of guiderail. For doing this, 3D model considering lateral deformation of girder and irregularity of rail of the guideway is developed. Using the dynamic interaction model integrated with the proposed guideway and maglev vehicle including electromagnetics and its controller, guidance characteristics of maglev are analyzed. It is analyzed that the effect on lateral deformation of girder is relatively small compared to deformation on the lateral irregularities of guiderail.

- 기호설명 -

F_z : 부상력 (N)
 F_y : 안내력 (N)
 i : 전류 (A)
 c : 레일과 전자석 사이의 수직공극 (mm)

d : 레일과 전자석 사이의 횡공극 (mm)
 μ_0 : 공기투자율
 N : 코일의 턴수 (turn)
 A : 코어의 단면적 (m²)
 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 : 제어 계인
 $\Delta \ddot{z}, \Delta \dot{z}, \Delta z$: 관측상태(가속도, 속도, 변위)변수
 u : 가이드웨이 변형 (mm)
 M, C, K : 모드 질량, 감쇠, 강성

† Corresponding Author, hshan@kimm.re.kr and sjyang@cnu.ac.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

자기부상열차와 가이드웨이의 동적상호작용 해석은 자기부상열차의 주행성능 향상과 고가가이드웨이 건설비 절감에 있어서 필수적으로 연구가 요구되는 분야이다. 이에 대한 연구는 독일의 K. Popp 과 R. Meisinger 가 시작하였다고 할 수 있다.^(1,2) 이후 여러 연구자들에 의해 70-80 년대까지 활발한 연구활동으로 동 분야의 기반을 확립하였으나 90 년대 중반 이후부터는 미국에서 연구를 수행한 학자들이 중국으로 넘어와 지속적인 연구를 수행하고 있다. 자기부상열차와 가이드웨이 동적상호작용 해석 모델에 대한 연구는 1 자유도 모델에서부터 다자유도로 확장하는 연구가 수행되었다. 초기연구에서는 2 차 현가장치를 고려한 2 자유도 차량과 1 차원 Euler-Benoulli 빔 모델을 적용한 유연궤도 해석 모델이 주로 사용되었다.^(3,4) 부상력은 등가의 강성과 감쇠로 단순화하였지만, 이 모델은 차량, 제어기 및 궤도의 주요 설계변수의 영향을 신속히 평가할 수 있는 장점을 가지며, 이를 통하여 자기부상열차의 동역학 해석에 있어서 제어기의 사실적 모델링이 필요함을 알 수 있었다.

이후에는 heave, sway, pitch, yaw 와 roll 운동을 고려한 5 자유도 차량 모델, 자기부상열차의 곡선 통과성능에 대한 연구 수행을 위한 자유도 35 개의 자기부상열차 공간모델 그리고 최근에 컴퓨터 기술의 발달로 인한 가상시제 모델과 FE 방법을 이용한 차량모델에 이르기까지 점점 정교한 모델로 확장하는 연구가 이루어지고 있다.^(5,6) 하지만 차량의 정교한 모델과는 달리 가이드웨이의 경우 수직방향 변형만을 고려한 모델에만 머물러 있다.^(7,8) 상전도흡인식 자기부상열차의 경우 전자석의 수직 부상력은 능동적으로 제어를 하고 있으나 횡방향 안내력은 부상력에 비례하여 사용하고 있다. 그러므로 가이드웨이 횡 변형과 궤도의 횡방향 불규칙성은 자기부상열차의 횡방향 승차감과 대차의 횡 운동에 불안정성을 초래할 수 있다. 따라서 자기부상열차와 가이드웨이의 횡방향 동특성에 엄밀한 해석이 요구된다. 이에 본 논문에서는 가이드웨이의 수직방향 변형뿐만 아니라 횡방향 변형을 고려한 모델을 제시하고 동적상호작용 해석을 통하여 차량의 안내력, 횡공극 그리고 가이드웨이의 횡변형 등을 분석하고자 한다.

2. 모델링

2.1 자기부상열차 시스템 모델

본 논문의 저자들의 이전연구에서는 실제적이고

정확한 동특성 해석을 위해 자기부상열차 시스템에 대한 다물체 동역학 모델을 개발하여 가이드웨이의 수직방향만을 고려한 연구를 다수 수행하였다.^(7,8) 본 논문에서는 횡변형을 고려한 가이드웨이를 3 차원으로 확장하여 기존 연성모델에 통합하는 모델을 제안하고자 한다. 제안한 3 차원 자기부상열차와 가이드웨이 그리고 제어기의 통합모델을 Fig. 3 에서 보여주고 있다. 여기서 다물체 동역학 해석 프로그램은 Virtual Lab. Motion 프로그램을 이용하였으며, 모드중첩법을 이용한 3 차원 가이드웨이 모델, 전자석 모델, 제어기 모델을 별도의 사용자 정의 서브루틴(user define subroutine)로 수식화하고 차량모델과 연성으로 해석을 수행하게 된다. 해석 과정은 각각의 전자석의 위치, 속도, 가속도 값을 센싱하고 이를 사용자 정의 서브루틴에서 전자석과 레일간의 공극을 계산하게 된다. 그 다음은 부상제어기와 전자석 계산 식을 이용하여 제어 전류 및 제어 전자석 힘(ΔF_z)를 추정하고 차량과 가이드웨이 모델에 인가하여 운동방정식을 계산하게 된다.

2.2 차량

본 연구에서 대상으로 하는 자기부상열차는 2 량 1 편성($l=1,2$) 전체차량이며, 8 대차($k=1\sim 8$) 그리고 대차당 4 개의 전자석($j=1\sim 4$)으로 이루어진 3 차원 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 한 개의 차량에 대한 구조는 Fig. 4 와 같으며, 보다 정밀한 해석을 위하여 전자석 하나 당 21 개($i=1\sim 21$)로 이산화하여 부상력과 안내력을 표현하고자 모델링을 하였다. 차량의 운동방정식은 구속다물체계 동역학 운동방정식을 이용한다. 자세한 내용은 본 저자들의 이전연구를 참조하기 바란다.⁽⁷⁾

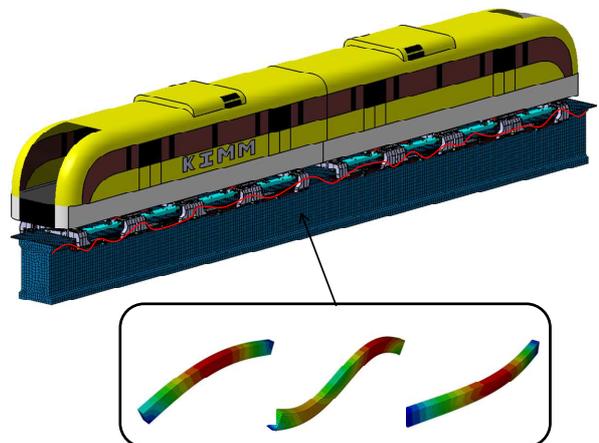


Fig. 1 The proposed maglev system dynamic model considering deformation of guideway

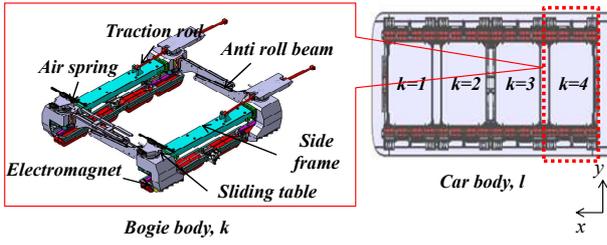


Fig. 2 Arrangement of carbody, bogie and electromagnet

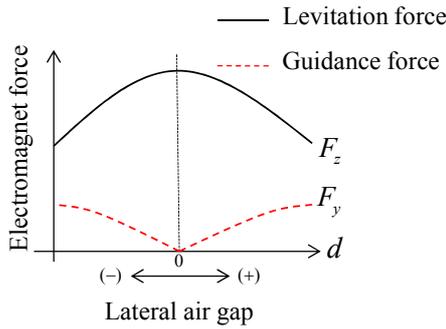


Fig. 3 Levitation force Vs. Guidance force

2.3 전자석

본 논문에서 다루고 있는 상전도흡인식 자기부상열차의 전자석은 Fig. 3 에 보이는 것과 같이 횡공극이 발생하면 안내력이 발생하고 부상력은 줄어드는 특성을 보이고 있다. 본 논문에서는 자기부상열차의 정지 부상을 위한 초기 전류, i_0 와 공극, c_0 을 기준으로 선형화된 함수를 사용하였다.^(7,8)

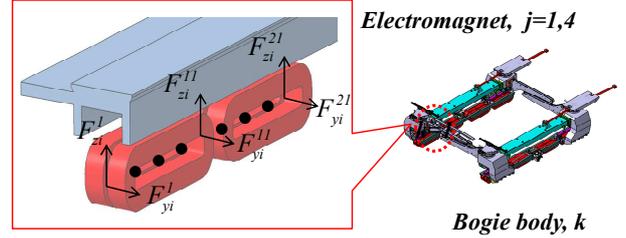
자기부상열차를 제어하기 위한 k 번째 대차의 j 번째 전자석의 부상력 $F_{z,jk}(t)$ 은 식 (1)과 같이 정지 부상시의 힘, $F_{0,jk}(i_0, c_0)$ 와 변화된 공극을 제어하기 위한 힘, $\Delta F_{z,jk}(\Delta i(t), \Delta c(t))$ 의 합으로 표현할 수 있다. 또한 Kirchhoff law 에 의해 제어입력 전압의 변화량, Δv_{jk} 의 식을 $\Delta \dot{i}_{jk}(t)$ 으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^(8,9)

$$F_{z,jk}(t) = F_{0,jk} + \Delta F_{z,jk} = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i_{0,jk}}{c_{0,jk}} \right)^2 + k_{c,jk} \Delta c_{jk}(t) - k_{i,jk} \Delta i_{jk}(t) \quad (1)$$

$$\Delta \dot{i}_{jk}(t) = \frac{k_{c,jk}}{k_{i,jk}} \Delta \dot{c}_{jk}(t) - \frac{R_{jk}}{L_{0,jk}} \Delta i_{jk}(t) + \frac{1}{L_{0,jk}} \Delta v_{jk}(t) \quad (2)$$

여기서,

$$L_{0,jk} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2c_{0,jk}}, k_{i,jk} = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_{0,jk}^2}, k_{c,jk} = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_{0,jk}^3}$$



Discretized electromagnet force, $i=1,2,1$

Fig. 4 Discretized levitation and guidance force

식 (1)에서 계산한 전자석 부상력과 안내력은 정확한 힘 계산을 위하여 Fig. 4 의 그림과 같이 전자석 모듈당 21 개로 이산화하여 부상력, F_{zi} 과 안내력, F_{yi} 을 표현하였다. 각각의 좌표에 대응되는 가이드웨이와의 공극 차이에 따라 k 번째 대차의 j 번째 전자석의 부상력과 안내력은 식 (3), (4)와 같은 비례식으로 유도할 수 있다.^(7,8)

$$F_{y,jk}(x,t) = F_{z,jk} \times \left[-\frac{2c_{jk}(t)}{\pi\omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{c_{jk}(t)}{d_{jk}(t)} \right) \right] \quad (3)$$

$$F_{z,jk}(x,t) = F_{z,jk} \times \left[1 + \frac{2c_{jk}(t)}{\pi\omega_m} + \frac{2d_{jk}(t)}{\pi\omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{c_{jk}(t)}{d_{jk}(t)} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 $c_{jk}(t)$, $d_{jk}(t)$ 는 각각 수직공극과 횡공극을 의미 한다. 식 (3), (4)에서의 $c_{jk}(t)$, $d_{jk}(t)$ 를 계산하기 위하여 사용자 정의 서브루틴에 가이드웨이와 전자석 좌표를 설정하고 기구학식을 정의하였다.

부상제어를 위해 식 (5)와 같은 제어전압 변화량 $\Delta v_{jk}(t)$ 의 계산을 5 개의 상태관측변수를 이용한다.^(7,8)

$$\Delta v_{jk}(t) = k_1 \Delta \ddot{z}_{jk}(t) + k_2 \Delta \dot{z}_{jk}(t) + k_3 \Delta z_{jk}(t) + k_4 \Delta \dot{c}_{jk}(t) + k_5 \Delta c_{jk}(t) \quad (5)$$

상태 제환에 이용되는 5 개의 관측 상태 변수 즉, $\Delta \ddot{z}_{jk}(t), \Delta \dot{z}_{jk}(t), \Delta z_{jk}(t), \Delta \dot{c}_{jk}(t), \Delta c_{jk}(t)$ 는 실측 가속도 $\Delta \ddot{z}_{jk}$ 와 부상 공극 Δc_{jk} 을 이용하는 필터에 의하여 추정하게 된다.

2.4 가이드웨이 모델

본 논문의 저자들은 기존연구에서 25m 길이의 콘크리트 가이드웨이 구조물의 수직방향 모드시험과 해석을 통해 모달 파라미터들을 추출하고, 모드중첩법을 이용하여 유도된 가이드웨이 운동방정

식에 적용하여 차량과 가이드웨이의 수직방향의 동적상호작용 해석을 수행하여 연구결과를 보고하였다.⁽⁸⁾ 본 논문에서는 차량과 가이드웨이의 횡방향 동적상호작용 분석이 연구목적이므로 대상 가이드웨이의 횡방향 모드시험 결과만 제시한다. 측정된 가이드웨이의 가속도 스펙트럼과 모드형상을 Fig. 5 와 Fig. 6 에 보여주고 있으며 수평 1 차 고유진동수는 10.45Hz 로 측정되었다.

가이드웨이의 수직과 횡 운동방정식을 유도하기 위하여 가이드웨이의 k 번째 대차의 j 번째 전자석 그리고 21 개로 이산화된 전자석 i 위치에서의 수직 및 횡 변위는 식 (6)과 같이 일반좌표계, $q_n(t)$ 과 진동 모드, $\phi_n(x_{ijk})$ 의 곱으로 표현하였다. 이때 가이드웨이와 차량과의 수직과 수평의 동적상호작용을 고려한 가이드웨이의 운동방정식은 식 (7)과 같다.

$$u(x_{ijk}, t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \phi_n(x_{ijk}) \quad (6)$$

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = \sum_{l=1}^{Near} \sum_{k=1}^{Nbside} \sum_{j=1}^{Nems} \sum_{i=1}^{NatsretForce} \phi_{zn}^T(x_{ijk}) F_{z,ijkl}(x_{ijk}, t) + \sum_{l=1}^{Near} \sum_{k=1}^{Nbside} \sum_{j=1}^{Nems} \sum_{i=1}^{NatsretForce} \phi_{ym}^T(x_{ijk}) F_{y,ijkl}(x_{ijk}, t) \quad (7)$$

유도된 가이드웨이 운동방정식은 식 (8)과 같은 상태공간방정식으로 변화되어 시스템 통합모델에

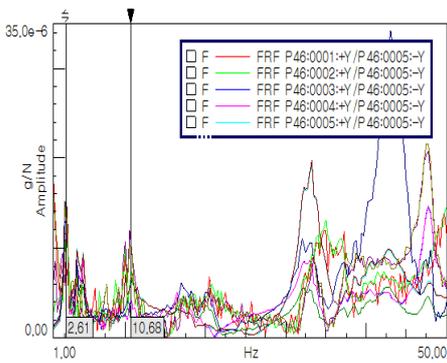


Fig. 5 Measured acceleration spectrum of guideway, lateral direction

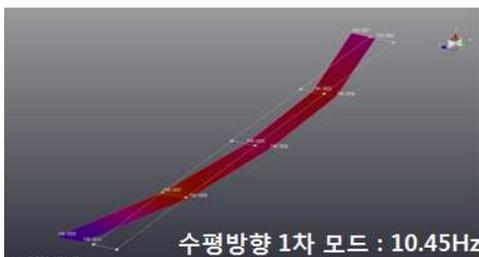


Fig. 6 Lateral mode shape for 1st natural frequency

적용되어 차량의 진행에 따른 가이드웨이의 중앙부의 처짐, 속도 및 가속도 등을 계산하게 된다. 각 모드에 따라 계산된 값은 모드중첩법을 사용하여 특정시간에서의 각각의 전자석에 대응되는 위치에서의 가이드웨이의 수직과 횡 변위를 계산하고 이는 차량의 주행 외란으로 작용하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + BP(x,t) \\ y(x,t) &= Cx(t) + DP(x,t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $P(x,t)$ 는 식 (7)의 우변항으로 임의의 시간과 위치에서의 모드와 힘의 곱의 총합을 의미한다. $x = [q_n(t), \dot{q}_n(t)]^T$ 는 가이드웨이의 일반화된 좌표의 위치 및 속도이며, $y = [u_n, \dot{u}_n, \ddot{u}_n]^T$ 는 각 모드에 따른 가이드웨이의 중앙부 처짐, 속도, 가속도를 의미한다.

A, B, C, D 는 각각 다음의 행렬을 의미하며, M 은 각 모드 별 질량행렬, K 는 각 모드 별 강성행렬 그리고 C 는 각 모드 별 감쇠행렬을 나타낸다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M_n^{-1}K_n & -M_n^{-1}C_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ M_n^{-1} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} \phi_n & 0 \\ 0 & \phi_n \\ -\phi_n M_n^{-1}K_n & -\phi_n M_n^{-1}C_n \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_n M_n^{-1} \end{pmatrix}$$

3. 해 석

3.1 가이드웨이 횡 불규칙도

가이드웨이는 차량을 지지하는 구조로 거더구조물과 레일로 구성되며, 거더의 변형과 레일의 불규칙도는 차량의 부상안정성과 승차감에 중대한 영향을 미치는 요소이다. 본 논문에서는 차량과 가이드웨이 횡방향 동적상호작용의 특성을 분석하는 것이 목적이지만, 수직방향과의 변형의 차이를 비교하고자 수직과 횡 모두 거더의 변형과 불규칙

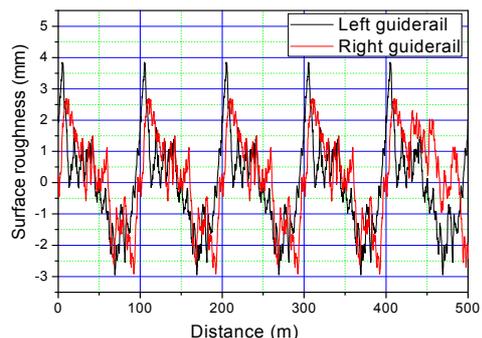


Fig. 7 Lateral surface roughness

도를 고려하였다. 참고문헌[7]에서 수직 불규칙도 프로파일은 이미 제시하였으므로 본 논문에서는 Fig. 7 과 같은 레일의 횡방향 불규칙도 프로파일을 제시하였다. 외란으로 입력된 프로파일은 가이드웨이 궤도의 불규칙도 설치 공차기준이 $\pm 3\text{mm}$ 이내인 점을 감안하였으며 좌우의 편차를 달리하여 왼쪽 가이드웨이의 경우 $-3\text{mm}\sim 4\text{mm}$, 오른쪽의 경우는 $-3\text{mm}\sim 3\text{mm}$ 의 최대편차를 적용하였다.

3.2 가이드웨이 응답

본 논문에서 제안한 모델은 가이드웨이의 진동 모드를 수직 1 차, 2 차 모드와 수평 1 차 모드를 적용하였다. 차량이 가이드웨이를 주행하였을 때 가이드웨이의 각 모드별 변형을 비교해 보았다. 차량의 속도는 60km/h 이며 차량의 중심부가 가이드웨이 중앙부를 지나는 순간에 가이드웨이의 수직 1 차의 변형은 3.6mm , 수직 2 차의 경우 0.2mm 그리고 수평 1 차는 0.015mm 로 수직 1 차 대비 수직 2 차에 의한 변형의 크기는 5.5% 이며, 수평 1 차는 0.4% 로 나타났다. 결론적으로 수직 1 차에 의한 변형이 가장 크며 수평모드의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 한 개의 25m 가이드웨이를 주행하는데 있어서 수직모드만 고려한 경우와 수평모드까지 고려해보았을 때 총 CPU time 이 약 2 배 이상차이가 났으며, 2 개의 유연 가이드웨이를 주행하는 경우에는 약 4 배 차이가 나는 결과를 보인다. 따라서, 수평모드에 의한 가이드웨이의 변형은 상대적으로 아주 작고 계산 시간이 길어지는 단점을 보이므로 직선 주행 해석에서는 거더의 수평모드를 고려하지 않고 가이드웨이 레일의 수평 불규칙도만을 외란으로 적용해도 충분한 해석을 할 수 있다고 판단된다. 그러나 곡선

주행 시뮬레이션을 위해서는 제안된 모델에 수평 모드뿐만 아니라 비틀림모드까지 고려하여 시뮬레이션을 수행함이 타당하다고 본다.

3.3 차량의 응답

속도에 따른 차량의 횡 운동 즉 횡공극 응답을 평가하고자 속도 별 횡공극 시간이력을 Fig. 9 에 제시하였다. 속도가 증가함에 따라 횡공극 변동이 증가함을 알 수 있다. 이는 불규칙도 형상은 일정 하지만 차량의 속도가 증가함에 따라 외란에 의한 차량의 가속도 성분이 커지므로 횡공극 응답도 커짐을 알 수 있다.

좀더 구체적으로 분석하고자 횡공극 변동 최대 값을 취하여 Fig 10 에 나타내었다. 10km/h 에서는 약 1mm 의 최대 변동을 보이고, 최고 속도인 110km/h 에서는 약 5mm 의 변동을 보여 약 5 배정도 커지는 것을 알 수 있다. 가이드웨이의 횡변형에 의한 차량의 영향성은 미비하기 때문에 오로지 궤도의 수평 불규칙도에 의해 영향을 받는다고 판단된다.

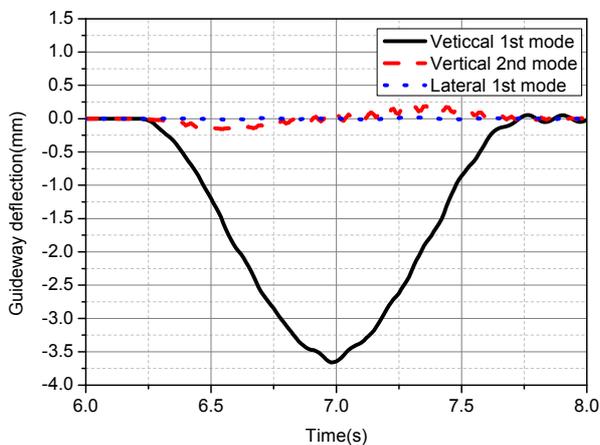


Fig. 8 Comparison of guideway deflection by 3 vibration modes

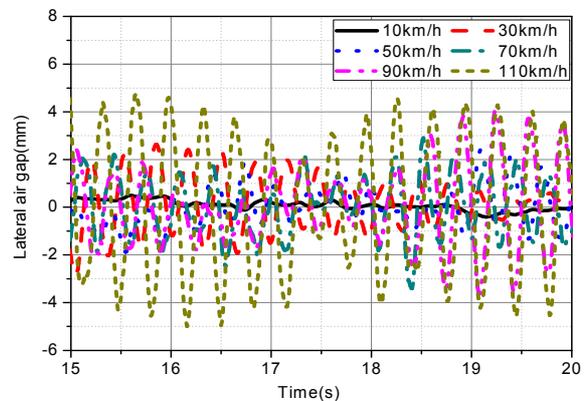


Fig. 9 Lateral air gap time history with different velocities

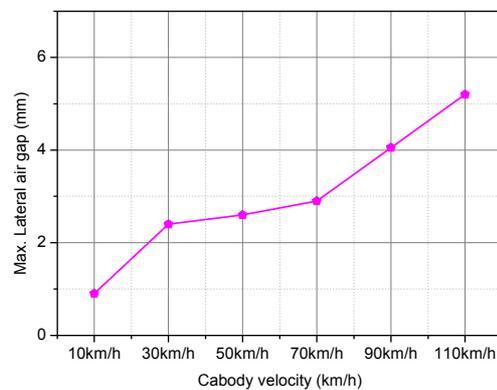


Fig. 10 Max. lateral air gap with different velocities

안내력의 변동을 속도에 따라 분석하기 위하여 안내력의 변동 시간이력을 Fig. 11 에서 보여주고 있다. 횡공극과 마찬가지로 속도에 따라 증가하고 있으며 최고속도 110km/h 에서의 안내력의 최대 크기는 약 980N 정도를 나타내고 있다.

한편, 자기부상열차의 횡 변위가 발생하였을 경우 전자석의 부상력 및 안내력과 변위 특성을 계측하고자 Fig. 12 와 같이 실험을 통해 계측을 수행하였다. 본 논문에서는 안내특성을 분석하는데 목적이 있으므로, 부상력 결과는 배제하고 안내력의 계측 결과를 Fig. 13 에 제시하였다. 전자석의

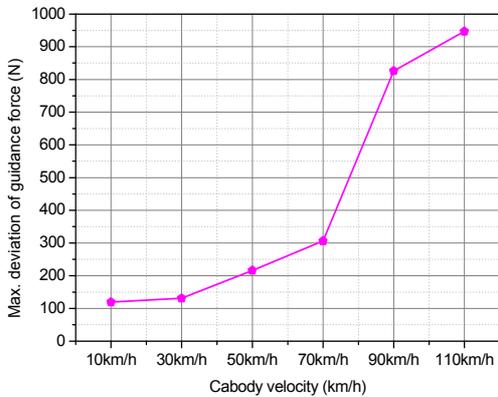


Fig. 11 Max. guidance force with different velocities



Fig. 12 Measurement of electromagnetic force

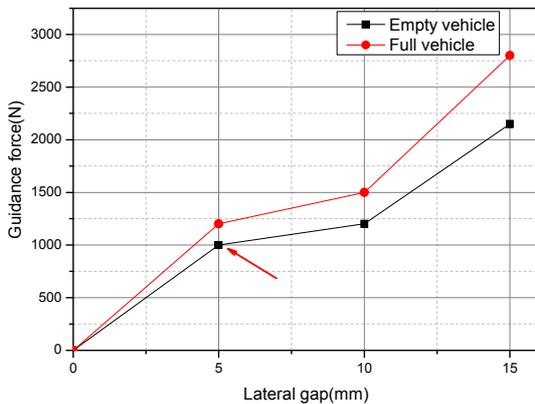


Fig. 13 Measured lateral force according to lateral gap

횡공극이 5mm 발행한 경우 안내력은 차량이 공차 (19ton)인 경우 1000N, 만차(26ton)의 경우 1300N 의 값을 보이고 있다. 본 논문은 차량 의 공차인 경우를 대상으로 하고 있으므로 Fig. 10 과 11 에 제시한 대로 차량 속도 100km/h 에서 횡공극은 5mm 에 안내력은 약 980N 값을 보이므로 해석 결과값과 상당히 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서 제안한 모델은 기존의 수직 운동만 고려한 해석 모델에 수직과 수평모드를 모두 고려한 연성 모델이다. 제안된 모델을 이용하여 가이드웨이 횡변형에 의한 차량의 안내특성에의 영향을 분석해보았다. 그 결과 가이드웨이 거더의 횡 변형은 수직변형 대비 크기가 0.5%로 아주 작았으며, 레일의 수평 불규칙도에 대한 차량의 응답은 속도에 따라 영향성이 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 자기부상열차의 직선구간 주행에서 가이드웨이 거더의 횡변형 보다는 레일의 수평 불규칙도에 대한 영향이 큰 만큼 향후 직선 가이드웨이 설계 및 유지보수 시 불규칙도 설계공차를 합리적으로 제한할 필요가 있다. 해석결과의 타당성을 검토하고자 전자석의 변위에 따른 부상력 및 안내력 값을 측정하였으며, 차량의 공차 중량 기준으로 5mm 의 횡공극이 발생한 경우 계측값은 1000N, 해석값은 980N 으로 상당한 유사함을 보였다. 한편 곡선구간에서의 자기부상열차와 가이드웨이 의 동적상호작용 해석 연구가 아직까지 보고된 바가 없으므로 본 논문의 연구를 바탕으로 향후 곡선 가이드웨이의 수직모드뿐만 아니라, 횡과 뒤틀림 모드까지 고려하여 그에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제 15RTRP-B070556-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Meisinger, R., 1979, "Simulation of Maglev Vehicles Riding over Single and Double Span Guideways," *Mathematics and Computers in Simulation*, XXI, pp. 197~206.
- (2) Popp, K., 1981, "Mathematical Modeling and Control

- System Design of Maglev Vehicles," *Conference on Dynamics of High Speed Vehicles*, pp. 333~363.
- (3) Cai. Y., Chen. S.S., Rote. D.M. and Coffey., H.T., 1994, "Vehicle/Guideway Interaction for High Speed Vehicles on a Flexible Guideway," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 175, No 5, 625~646.
- (4) Dai, H.G., 2005, "Dynamic Behavior of Maglev Vehicle /Guideway System with Control," Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve University.
- (5) Han, H.S., 2003, "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," *JSME International*, Vol. 46, No. 4, pp. 1497~1501.
- (6) Kim, K.J., Han, H.S., Kim, C.H. and Yang, S.J., "Effect of the Damper Between Maglev Vehicles on Curve Negotiation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng A*, Vol.37, No 4, pp 581-587, 2013
- (7) Kim, K.J., Han, H.S. and Yang, S.J., "Analysis of Dynamic Interaction Between Maglev Vehicle and Guideway," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng A*, Vol.37, No 12, pp 1559-1565, 2013
- (8) Han, H.S., Yim, B.H., Lee, N.J., Kim, Y.J. and Kim, B.H., 2009, "Prediction of Ride Quality of a Maglev Vehicle Using a Full Vehicle Multi-Body Dynamic Model," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 10, pp. 1~16.
- (8) Sinha, P. K., 1987, *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom.