



## 자기부상철도 일체형 궤도시스템 적용을 위한 해석적 연구

함준수<sup>1</sup> · 정섭<sup>2</sup> · 황원섭<sup>3</sup>

인하대학교 토목공학과 박사과정<sup>1</sup>, 인하대학교 토목공학과 석사과정<sup>2</sup>, 인하대학교 사회인프라공학과 교수<sup>3</sup>

### A Numerical Study on Application of the Integrated Track System for a Magnetic Railway

Ham, Junsu<sup>1</sup> · Jung, Sub<sup>2</sup> · Hwang, Won-Sup<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

<sup>2</sup>Master. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**Abstract:** The load of a maglev train, which is being considered a future transportation, is uniformly loaded on a levitated surface of a rail unlike a typical train because the maglev train is magnetically levitated and propelled. In addition, the driving performance is superior since the maglev train doesn't directly contact the railway. A integrated track system, to which a sleeper is installed toward a longitudinal direction instead of a perpendicular direction, is suggested, considering this loading characteristic. The longitudinal sleeper of this system is expected to contribute to stiffness increase of a bridge and weight-reduction of a girder. In this study, the structural characteristics of proposed and typical systems have been numerically compared and analyzed. In addition, the improvement of the integrated system has been proposed.

**Key Words:** maglev train, integrated track system, longitudinal sleeper, stiffness increase, weight-reduction

#### 1. 서론

자기부상열차는 차량이 궤도를 감싸고 주행하는 방식으로 탈선의 위험이 거의 없으며, 전자기력으로 차량을 부상, 추진하게 된다. 따라서 차량의 소음은 65DB 이하로 소음이 거의 없고, 또한 진동 및 분진 등의 환경 문제를 거의 발생시키지 않아 도심지에 적용할 수 있는 미래형 교통수단으로 인식되고 있다.

이와 같은 자기부상열차의 성능 및 적용성을 높이기 위해서는 차량의 성능을 높이는 연구뿐만 아니라 선로구조물에 대한 연구도 중요하게 다루어져야 한다. 그럼에도 불구하고 기존 기계연구원의 시험선이나 엑스포 과학공원의 시험선은 해외사례를 참조하여 설치

하였을 뿐 현재 국내의 자기부상철도에 대한 연구는 차량의 연구에 비해 선로구조물에 대한 연구는 없었다고 할 수 있다(Yeo et al., 2009).

또한 도시형 자기부상철도가 도심지에 건설되는 특성상 미래형 교통수단으로 진입하기 위해서는 도시미관에 순응할 수 있도록 선로구조물을 경량화 및 슬림화할 필요가 있다.

기존 자기부상철도의 선로구조물에 대한 연구는 Yeo 등(2009)이 LIM 방식의 자기부상철도에 적용하는 Twin 블록 궤도시스템을 기계연구원 시험선 시공을 통해 시공성을 평가하였다. 또한 Kim 등(2014)은 기존 철도와 달리 하중이 부상면을 따라 등분포로 재하되는 자기부상열차의 특성을 고려하여 침목을 통상적인 교축직각방향이 아닌 교축방향으로 설치하는 개념의 일체형 궤도시스템을 제안하고, 교축방향 침목의

**주요어:** 자기부상열차, 교축방향 침목, 침목 간격, 일체형 궤도시스템

**Corresponding author:** Hwang, Won-Sup

Department of Civil Engineering, Inha University, Inha-ro 100, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea.  
 Tel: +82-32-860-7570, Fax: +82-32-873-7560, E-mail: hws@inha.ac.kr

Received May 15, 2015 / Revised May 27, 2015 / Accepted May 29, 2015

강성기여효과를 해석적으로 연구하였다.

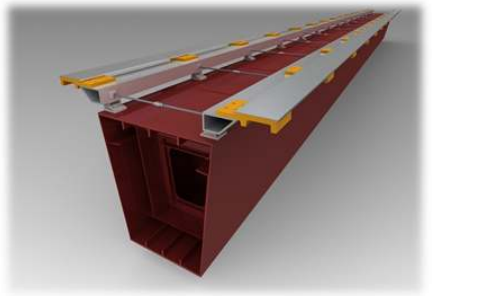
본 연구에서는 Kim 등(2014)이 제안한 교축방향 침목을 적용하는 일체형 궤도시스템의 경량화 검토를 위해 유한요소해석을 통하여 기존 궤도시스템과 비교 분석하고, 일체형 궤도시스템의 시공성 및 유지보수성 향상을 위한 체결간격에 대한 영향을 검토한다.

또한, 일체형 궤도시스템의 거동 특징을 수치적으로 분석하여 문제점에 대한 개선안을 제안하고자 한다.

## 2. 일체형 궤도시스템의 구조적 특징

### 2.1 일체형 궤도시스템(1안)의 개념

자기부상열차는 전자기력으로 차량을 부상, 추진하기 때문에 차량의 하중은 집중하중이 아닌 등분포하중으로 레일의 부상면에 재하된다. 이러한 하중 특성을 고려하여 Kim 등(2014)은 교축방향으로 침목을 설치하는 개념인 일체형 궤도시스템(1안)을 제안하였다. Fig. 1은 각 궤도시스템의 개념도로 Fig. 1(a)와 같이 일체형 궤도시스템은 기존 mono block과 twin block과 달리 교축방향 침목인 sub 레일을 설치함으로써 침목의 단면력을 활용하여 선로구조물의 구조적 강성을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 증가된 강성으로 인해 거더의 형고를 낮추어 도시 미관에 순응하고 경량화를 꾀할 수 있으며, 체결간격을 증가시켜 레일의 단차 조절 등의 시공성 및 유지보수성의 향상을 기대할 수 있다.



(a) Integrated Track System



(b) Mono Block

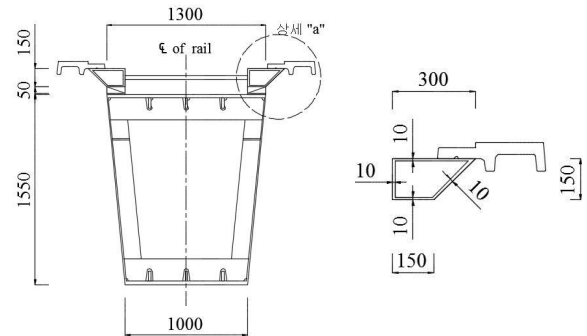


(c) Twin Block

Fig. 1 Concept of Track Systems

### 2.2 해석 방법

일체형 궤도시스템(1안)과 기존의 mono block, twin block 궤도시스템의 구조적 특징을 비교하기 위해 상용유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용하여 정적해석을 수행하였으며, 일체형 궤도시스템 해석모델의 제원은 Fig. 2에 나타내었다. 거더와 침목은 shell 요소(S4R)를 사용하였고, 부상레일은 beam 요소를 사용하여 모델링하였다. 각 궤도시스템의 거더는 총 길이 25m 단경간으로 모델링하였으며, 일체형 궤도시스템의 교축방향 침목인 sub 레일을 설치하기 위해 추가되는 장치인 브라켓은 기존 mono block, twin block과 같은 1.15m 간격으로 하여 직접적인 비교를 가능하게 하였다. 또한 거더와 침목, 침목과 부상 레일 간의 연결은 완전 고정으로 가정하여 tie 요소를 사용하여 rigid로 완전 구속하였다. full 모델로 모델링한 각 궤도시스템의 경계조건은 단순지지로 하였으며, 작용하중은 궤도시스템의 자중과 차량의 활하중(28kN/m)을 재하하였다. 거더 및 침목의 강종은 SM520B, 부상레일의 강종은 SS400을 사용하였으며, 각각의 재료특성은 Table 1에 나타내었다.



(a) Girder + Sub Rail (b) Sub Rail(Sleeper)

Fig. 2 Sectional View of the Integrated Track System

Table 1. Material Properties

구분	강종	항복강도 (MPa)	탄성계수 (N/mm <sup>2</sup> )
거더	SM520B	355	2.05×10 <sup>5</sup>
침목			
부상레일	SS400	275	

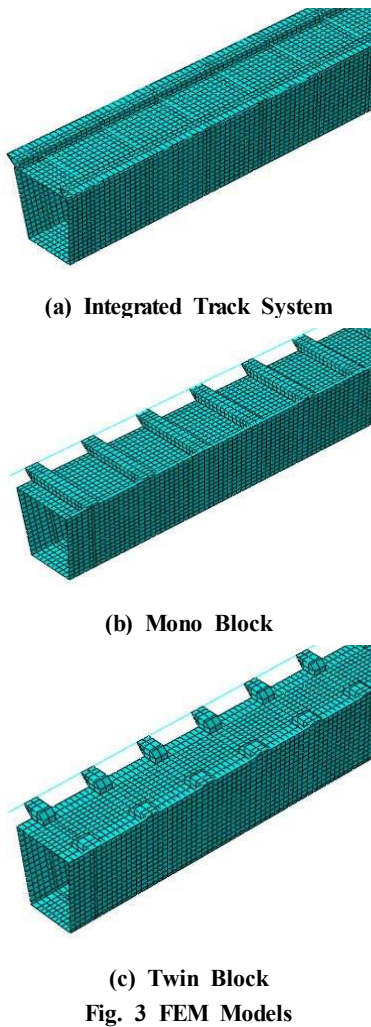


Fig. 3 FEM Models

### 2.3 처짐 및 중량 검토

자중과 활하중이 작용하는 궤도시스템의 거더 하단 중앙부에서 처짐과 각 궤도시스템의 중량을 검토하였다. Fig. 4는 일체형(1안)과 mono block, twin block 궤도시스템의 처짐과 중량을 각각 나타낸 것이다. 각 궤도시스템의 중량은 mono block이 26.85ton, twin block이 25.66ton, 일체형(1안)이 27.73ton이며, 그 차이는 1%내로 거의 일정하다.

그러나 각 궤도시스템의 처짐은 mono block이 15.36mm, twin block이 15.20mm, 일체형(1안)이 13.90mm가 발생하였다. 이때 일체형 궤도시스템(1안)의 처짐은 mono block에 비해 약 10.50%, twin block에 비해 약 9.35%가 작게 발생하였다.

기존 궤도시스템의 중량은 침목설치를 위한 콘크리트 슬래브를 제외한 순수강재만의 중량으로 슬래브를 포함할 경우 일체형 궤도시스템(1안)의 경량화를 부각할 수 있다. 또한 중량이 유사할 때 각 궤도시스템의 처짐 비교를 통해 일체형 궤도시스템의 경량화에 대한 타당성을 확인할 수 있다.

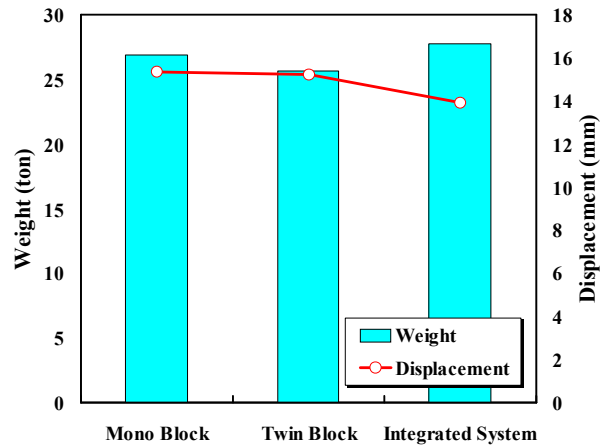


Fig. 4 Displacement and Weight of Track Systems

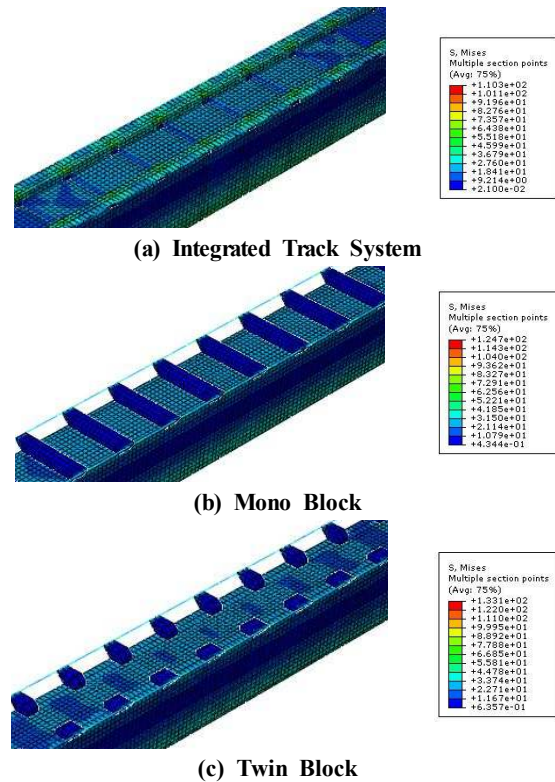


Fig. 5 Deformation Shapes (Center of Girder)

### 2.4 체결간격에 따른 영향

일체형 궤도시스템의 침목은 교축방향으로 설치함으로써 선로구조물의 구조적 강성을 증가시킬 수 있다. 이를 통해 거더와의 체결간격을 증가시켜 시공성 및 유지보수성을 향상시킬 수 있다. 본 절에서는 기존 침목 간격인 1.15m를 기준으로 하여 체결간격에 따른 영향을 검토하였다. 거더는 단순지지원 25m 단경간이며, 하중은 자중과 활하중(28kN/m)을 재하하였다.

Fig. 6은 체결간격에 따른 거더 하부 플랜지 중앙부에서의 처짐을 나타낸다. Fig. 6에서와 같이 간격이

증가함에 따라 처짐 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 처짐은 1.15m 간격에서는 13.90mm, 4m에서는 14.18mm가 발생하였으며, 그 차이가 약 3.17%로 크지 않음을 확인하였다.

Fig. 7는 체결간격에 따른 교축방향 침목인 sub 레일의 처짐을 나타낸다. 체결간격이 3m와 4m의 경우 sub 레일의 처짐이 각각 1.77mm와 3.29mm가 발생하였으며, 그 크기는 미미하나 제작 및 시공 오차 등에 따른 부상레일의 단차를 고려하면 자기부상열차의 주행안정성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 일체형 궤도시스템의 문제점을 고려한 개선안이 제안되었다.

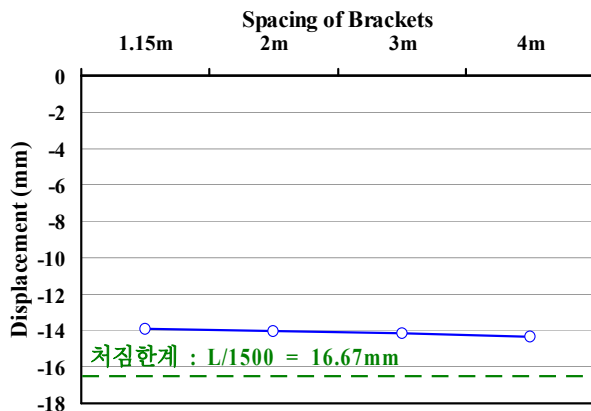


Fig. 6 Displacement of Girder

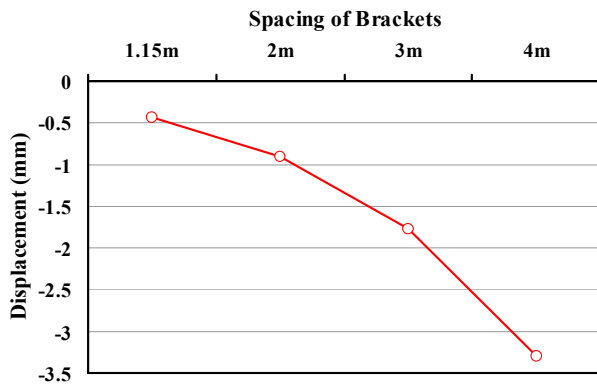


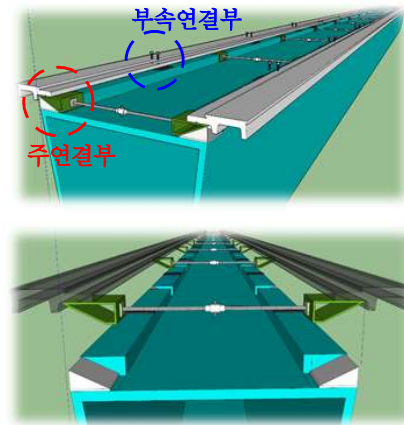
Fig. 7 Displacement of Sub Rail

### 3. 개선된 일체형 궤도시스템의 구조적 특징

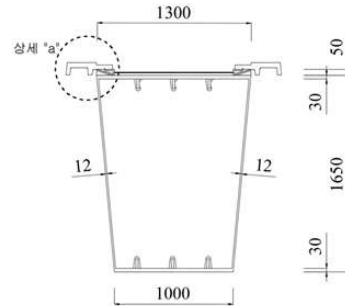
#### 3.1. 개선된 일체형 궤도시스템(2안)의 개념

개선된 일체형 궤도시스템(2안)은 교축방향 침목인 sub 레일의 처짐으로 인해 발생할 수 있는 자기부상열차의 주행안정성을 향상시키고, 체결간격을 증가시

켜 시공성과 유지보수성의 향상을 기대할 수 있다. 개선된 일체형 궤도시스템(2안)은 sub 레일을 대체하도록 거더 제작 단계에서 레일 지지부를 제작하는 형상으로 Fig. 8과 같다. 또한 주연결부 이외에 레일 지지부에 부속연결부를 설치하여 부상레일의 처짐을 방지한다.



(a) Improved Integrated Track System



(b) Sectional View

Fig. 8 Concept of Improved Integrated Track System

#### 3.2 개선안(2안)의 구조적 장점

개선된 일체형 궤도시스템의 구조적 특징을 검토하기 위해 거더 중앙 처짐을 교축방향 침목이 없는 단독 거더와 일체형 궤도시스템(1안)의 처짐과 비교하였다. 단독 거더의 처짐은 20.63mm, 일체형 궤도시스템(1안)의 처짐은 13.90mm, 개선안(2안)의 처짐은 13.55mm가 발생하였으며, 식 (1)을 적용하여 단순보에 등분포 하중이 작용할 때 거더 중앙부의 최대 처짐을 단면 2차 모멘트로 환산하였으며, 이는 Table 2와 같다. 이 결과로부터 일체형 궤도시스템(1안)과 개선안(2안)의 단면2차모멘트가 단독 거더에 비해 약 25.55%, 27.42% 증가하는 것으로 나타났으며, 축방향 침목의 거더 강성기여효과를 확인할 수 있다.



$$y_{\max} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (1)$$

여기서,  $w$  : 거더에 작용하는 등분포 하중  
 ( $w = 28kN/m$ )  
 $L$  : 경간 길이 ( $L = 25m$ )  
 $E$  : 탄성계수  
 $I$  : 단면2차모멘트

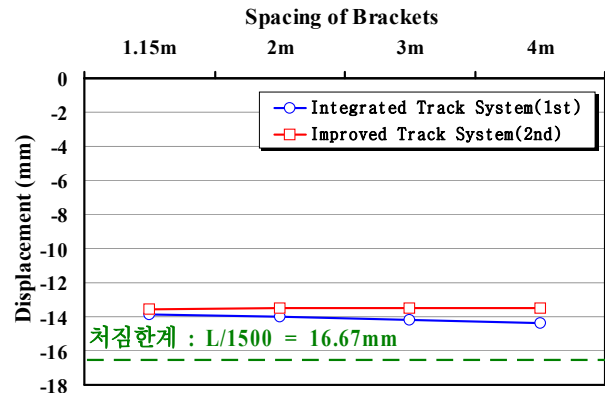
**Table 2. Moment of Inertia and Ratio of Increase in Stiffness**

구 분	단면2차모멘트 ( $mm^4$ )	강성증가율 (%)
거 더	$3.36 \times 10^{10}$	-
일체형 궤도시스템 (1안)	$4.99 \times 10^{10}$	25.55
개선안 (2안)	$5.12 \times 10^{10}$	27.42

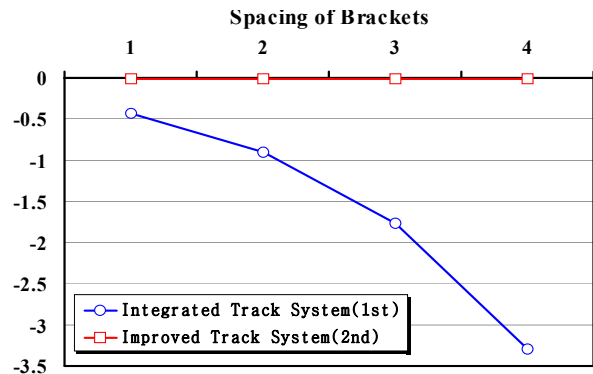
### 3.3 개선안(2안)의 체결간격에 따른 영향

개선된 일체형 궤도시스템(2안)의 체결간격에 대한 영향을 검토하기 위해 체결간격 1.15m, 2m, 3m, 4m에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9는 일체형 궤도시스템과 개선안(2안)의 체결간격에 따른 처짐을 나타낸 그래프로, 개선안(2안)의 처짐은 최소 간격인 1.15m와 최대 간격인 4m일 때, 각각 13.55mm, 13.51mm가 발생하였다. 개선안(2안)은 일체형 궤도시스템(1안)과 달리 체결간격이 증가함에 따른 처짐의 차이가 거의 발생하지 않고, 간격에 따른 강성이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 체결간격에 따른 레일의 처짐을 나타낸 그래프로, 개선안(2안)의 경우 체결간격에 따른 레일의 처짐이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 체결간격 증가시켜 시공성 및 유지보수성을 향상시키고, 자기부상열차의 주행안정성을 향상시킬 것으로 판단된다.



**Fig. 9 Displacement of Girder**



**Fig. 10 Displacement of Rail**

## 4. 결 론

본 연구에서는 수치적 방법을 통하여 제안된 일체형 궤도시스템의 구조적 특징을 기존 궤도시스템과 비교·분석하였다. 이를 통하여 일체형 궤도시스템에 발생할 수 있는 문제점을 예측, 개선된 일체형 궤도시스템을 제안하였다. 이를 통한 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 일체형 궤도시스템(1안)과 mono block, twin block과의 처짐 및 중량을 비교·분석하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 중량이 1%내로 유사할 경우 일체형 궤도시스템의 처짐은 mono block과 twin block에 비해 10.50%, 9.35% 작게 발생하였다. 이를 통해 일체형 궤도시스템의 경량화에 대한 타당성을 확인하였다.

(2) 일체형 궤도시스템(1안)의 체결간격에 따른 영향을 검토하였다. 기존 침목 간격인 1.15m와 4m의 처짐은 각각 13.90mm와 14.34mm로 그 차이가 약

3.17% 미미하였다. 그러나 간격이 넓어짐에 따라 sub 레일의 처짐이 4m 간격에서 최대 3.29mm 발생하였으며, 이는 제작 및 시공오차 등을 고려하였을 때, 자기부상열차의 주행 안정성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

(3) 레일의 처짐을 방지하여 자기부상열차의 주행 안정성을 향상시키기 위한 개선된 일체형 궤도시스템(2안)에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 개선안(2안)은 일체형 궤도시스템(1안)과 거의 유사한 강성증가율을 확보하고 있으며, 체결간격에 따른 강성이 일정하게 유지되고 있는 것을 확인하였다. 또한 부속연결부의 연결부의 설치로 인하여 레일의 처짐이 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다.

이상에서 서술한 연구 결과는 도시형 자기부상철도 일체형 궤도시스템 적용을 위한 기초 연구로서 향후 경량화를 위한 일체형 궤도시스템 개발 및 일체형 궤도시스템의 취약부 분석에 활용될 수 있을 것을 사료된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업의 연구비지원(과제 14RTRP-A0609839-2)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

Center for Urban Maglev Program (2013), Guideway Evaluation of the Incheon International Airport Maglev Railway, R&D Report, 06-B01, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Hong, Y. N., Chung, W. S., and Yeo, I. H. (2009), "Analysis of Dynamic Responses of Urban Maglev Guideway," *Journal of the Korean Society For Railway*, Vol. 12, No. 1, pp. 115-121. (in Korean).

Jung, S., Ham, J. S., Hwang, W. S., and Ho, J. H., (2015), "A Numerical Study on Bracket Spacing for the Development of the Integrated Track System of Magnetic Railway," 2015 KOSAC Annual Conference, Jeju, Korea, pp. 90-92. (in Korean).

Kim, K. W. (2012), A Study on Optimum Cross-Section of Straight Guideway Girder for Urban Maglev Train considering Static/Dynamic Stability, *Master Thesis*, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea. (in Korean).

Kim, S. I., Kim, H. M., and Ham, J. S. (2014), "A Development of the Integrated Track System for a Magnetic Railway," *2014 KIBSE Annual Meeting and Conference*, Ilsan, Korea. (in Korean).

Song, M. K., and Kim, K. H. (2005), "Development of Dynamic Analysis System for Guideway Structures by considering Ultra High-speed Maglev Train-Guideway Interaction," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 5A, pp. 823-835. (in Korean).

Yeo, I. H., Kim, D. S., Jang, S. Y., and Hwang, S. H. (2009), "Development of the Track System for a LIM Type Maglev," *Journal of the Korean Society For Railway*, Vol. 12, No. 5, pp. 800-805. (in Korean).

Yim, B. H., Han, H. S., Jung, J. H., Kim, Y. J., and Kim, B. H. (2007), "Study on Effects of Natural Frequency of a Guideway on Running Behaviour of Maglev Vehicle," *2007 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp. 54-59. (in Korean).