

동적영향변수를 통한 자기부상열차용 철도교의 해석적 연구

유이슬¹, 박원찬², 임성순^{1*}

¹서울시립대학교 토목공학과, ²대한전기협회

Analytical Study of Railroad Bridge for Maglev Propulsion Train with Dynamical Influence Variable

Yi-Seul Yoo¹, Won-Chan Park², Sung-Soon Yhim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul

²Korea Electric Association, Researcher

요약 자기부상열차는 비접촉자기부상과 안내 및 추진 시스템을 이용하므로 안전한 고속주행이 가능할 뿐만 아니라 진동이 적으므로 주행안정성에도 탁월하다. 최근 우리나라도 자기부상열차개발을 국가성장산업으로 지정하면서 자기부상열차의 시범제작과 시범운행을 시도하였으며 이에 대한 연구와 투자가 진행되고 있다. 본 연구는 고속주행으로 발생하는 각 모듈의 동적 응답의 상호관계를 분석하는 것이 연구목적이므로 주행속도, 노면조도, 현가장치의 물성치, 교량거더의 강성비 등 동적 효과에 영향을 주는 주요변수들의 변화에 따라 동적응답들의 상호관계를 연구범위로 선택하였다. 따라서 콘크리트 박스거더 교를 교량모델로 선택하였고 국내 생산중인 부상열차와 레일형식을 각각 이동열차하중과 가이드웨이 해석모델로 선택하였다. 해석결과 처짐 제한을 2000분의 L로 제시한 단면을 가진 자기부상열차용 교량의 고유진동수는 일반교량에 비해 높다는 것을 알 수 있다. 일반교량구조에서와 같이 자기부상열차용 철도교도 이동속도에 따른 거더의 동적응답은 속도에 비례하여 크게 증가함을 알 수 있다. 설계기준은 이동속도와 관계없이 10%의 충격계수로 동적효과를 나타내므로 설계기준의 값과 적용범위는 검증이 요구된다. 거더의 동적응답은 시속 240km/h에서 극대 값을 가지며 이후 속도증가에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다. 본 연구의 해석결과들은 자기부상열차용 철도교 설계에 적용할 수 있으며 설계기준을 확인하거나 검증할 때 기본 자료를 제공해 줄 수 있다.

Abstract Because maglev trains have a propulsion and absorption force without contact with the rails, they can drive safely at high-speed with little oscillation. Recently, test model of a maglev propulsion train was produced and operated, and has since been chosen as a national growth industry in South Korea; there have been many studies and considerable investment in these fields. This study examined the dynamic responses due to bridge-maglev train interaction and basic material to design bridges for maglev trains travelling at high-speed. Depending on the major factors affecting the dynamic effects, the scope of this study was restricted to the relationship between dynamic responses. A concrete box girder was chosen as a bridge model and injured train and rail types in domestic production were selected as the moving train load and guideway analysis model, respectively. From the analysis results, the natural frequency of a bridge for a maglev train, which has a deflection limit L/2000, was higher than those of bridges for general trains. The dynamic responses of the girder of the bridge for a maglev train showed a substantial increase in proportion to the velocities of the moving train like other general bridge cases. Maximum dynamic response of the girder is shown at a moving velocity of 240km/h and increased with increasing moving velocity of train. These results can be used to design a bridge for maglev propulsion trains and provide the basic data to confirm the validity and verification of the design code.

Keywords : Guideway, Maglev propulsion train, Moving Train Load, Railway Bridge, Vehicle-Bridge Interaction

*Corresponding Author : Sung-Soon Yhim(University of Seoul)

Tel: +82-2-6490-2428 email: yhimss@uos.ac.kr

Received March 8, 2018

Revised (1st April 4, 2018, 2nd April 5, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

철도발명 이후 자기부상열차는 기존 교통수단과 비교하여 안전한 고속이동수단이라는 점에서 높이 평가받고 있다. 최근 우리나라도 자기부상열차개발을 국가성장산업으로 지정하면서부터 자기부상열차의 시범제작과 시범운행을 시도하였으며 이에 대한 연구와 투자가 활발히 진행되고 있다[1-4].

자기부상열차와 관련된 국외연구로는 주로 전자기력에 의한 현가장치의 해석모델링을 제시하는 논문이 발표되었다[5-10]. 국내연구는 자기부상열차의 실험과 관련된 논문 및 제어관련 부분이 생략된 해석논문을 발표하였다. 또한 운영 장치와 같은 기계 및 전기적인 부분에 국한되어 있으며, 최근 들어 2004년 권순덕의 기초연구와 2008년 이준석의 교량진동을 포함하는 연구결과를 발표하였다[1,11-12]. 기존연구들은 자기부상열차에 대한 전자기력과 열차차체의 기계적 힘의 전달관계에 대한 제한적 연구가 주종을 이루고 있으며 최근까지 동적상호작용의 관점에서 직접적으로 교량의 영향을 고려한 연구는 전무하다. 고속의 자기부상열차는 교량구조의 매우 큰 진동응답을 야기하므로 주행안정성뿐만 아니라 철도교의 구조안정성 분석도 설계기술력확보에 중요한 설계요인으로 평가되고 있음에도 불구하고, 대부분의 연구가 차량의 관점에서 교량의 영향을 부분적으로 고려하거나 교량진동과의 상호관계를 전혀 고려하지 않았다[2,4].

따라서 본 연구는 고속으로 주행하는 자기부상열차와 철도교의 상호관계에 의한 진동을 분석하는 것이 연구목적이다. 이를 위하여 자기부상열차를 이동열차하중으로 모사하고 진동발생 원인이 되는 주행속도와 같은 동적영향변수 변화에 따른 동적응답을 중점적으로 분석하였다. 철도교 해석은 유한요소해석을 적용하고 자기부상열차는 이동열차하중, 전자석과 거더 및 모듈에 작용하는 전자기력은 Runge Kutta 방법을 적용한 상태방정식을 유도하여 정적해석, 자유진동과 이동하중에 따른 시간이력 해석과정을 전산화하였다.

본 연구에서 작성한 열차-교량 상호작용해석을 위한 프로그램은 일반 프로그램과 같이 입력, 해석, 출력 등 3단계 연산과정으로 구성되어 있다. 입력단계는 단면특성치 계산과 교량제원 및 하중 값을 입력하는 입력과정을 의미한다. 해석단계는 정적하중이 작용할 때 정적해석, 부영역반복법에 의한 자유진동해석 그리고 자기부상열차에 의한 이동하중이 작용할 때 Newmark- β 방법 및

Wilson, 모드중첩법에 의한 강제진동해석이 포함되어 있다. 출력단계는 연산결과를 Text 파일로 출력하는 하드카피 출력과 동적응답의 시간이력곡선을 출력하기 위한 외부파일 작성으로 구성되어 있다.

2. 유한요소해석 및 결과

2.1 해석모델

자기부상열차는 비접촉식 부상과 주행을 위한 동력을 전달하는 전자기력 부분으로 구성된다. 자기부상열차의 주행 동력은 부상력과 전혀 관계없이 독립적으로 작동하는 전자기력을 이용하고 있으며 추진력의 전자기력 제어를 통해 동일한 주행속도를 유지할 수 있다. 그러므로 본 연구는 동일한 속도를 가진 주행속도로 가정하고 부상간극의 한계치와 허용치내에서 제어되는 부상력을 열차하중으로 재하 하였다. 열차하중은 교량진동에 따른 부상간극 변화로 발생하는 부상력을 연직하중으로 가정한 일정 속도의 열차 이동하중으로 이상화하였다[13-16]. 부상력을 계산할 때 만차상태인 부상열차를 적용하였고 간극의 허용치는 $8\pm 3\text{mm}$ 를 사용하였다.

자기부상열차와 철도교는 Fig. 1과 같이 레일, 침목, 거더는 박벽보요소, 자기부상열차는 전자기력에 의해 부상하는 강체모델로 이상화하였다. 해석모델은 단순교로 거더의 양단 조건을 가정하였으며 레일은 장대레일로 가설하므로 고정단으로 가정하였다. 교량길이 30m, 25개 침목을 설치하였고 침목간 거리는 1.25m로 설계되어 있다. 절점수는 197, 요소수는 269개로 이상화하였다. Bogie의 제원은 Table 1과 같다[2,4].

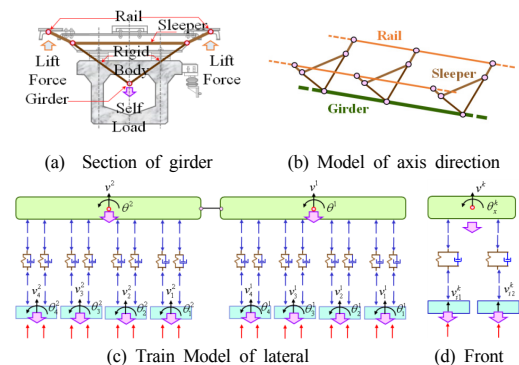


Fig. 1. Analysis Model of Maglev Propulsion Train

Table 1. Magnetic properties of Bogie

Classification	Unit	Unit data	Symbol
magnet area	m^2	0.036	A
nominal current	A	30.5	I_0
total resistance	Ω	6.0	R
cycle of coil	time	400	N
nominal interstice	m	0.008	z_0
penetration rate of magnetic flux	N/A^2	$4\pi \times 10^{-7}$	μ_0

2.2 정적해석결과분석

국내외 자기부상열차용 철도교설계기준은 동적하중을 등가 정적하중으로 치환한 정적 해석결과로부터 동적응답을 결정하도록 규정하고 있다. 설계기준에서 제시된 대표하중은 Table 2와 같다[2,4]. 모든 설계기준처럼 철도교의 동적응답은 동적하중을 등가정적하중으로 치환하여 작용시키도록 제시하고 있다. 이러한 등가정적하중들은 최대 동적응답을 포함한 해석결과가 허용치 범위를 넘지 못하도록 규정되고 있다. 이러한 이유로 시방규정에 의한 해석결과를 본 연구의 동적해석결과와 절대적으로 비교할 수 없어 활하중에 의한 거더의 해석결과만을 동적응답과 비교하기로 한다.

Table 2. representative load of Design Criteria

Division	Load	
Dead Load	Self Load	
	Empty Car	1.3 tonf/m
Live Load	Full Loaded Car	2.1 tonf/m
	Considering 10% of Live Load	
Lateral Load	Lateral Force	$2.1 \times 20\% = 0.420$ tonf/m
	Moment	$0.420 \times 1.398 = 0.587$ tonf·m/m

Table 3. Member force of a girder (Unit: tonf, tonf·m)

Self Load	Point	Shearing Force	Bending Moment	Torsion
	End	7.04E+01	9.66E+00	-1.46E-06
Mid	-2.57E-01	3.51E+02	1.11E-05	
Live Load	Point	Shearing Force	Bending Moment	Torsion
	End	7.04E+01	9.66E+00	-1.46E-06
Mid	-2.57E-01	3.51E+02	1.11E-05	
Lateral Load	Point	Shearing Force	Bending Moment	Torsion
	End	7.04E+01	9.66E+00	-1.46E-06
Mid	-2.57E-01	3.51E+02	1.11E-05	

대표하중을 재하한 정적 해석결과인 최대단면력과 최대처짐을 Tables 3~4에 정리하였다. 국내 설계기준은 부상열차의 주행속도를 100km/h로 제시하고 있으며 이러한 속도로 주행하는 자기부상열차의 활하중은 충격계수

를 적용한 등가정적하중으로 이상화하고 있다. 정적해석 결과 레일과 거더의 최대연직변위는 각각 7.98, 7.91mm이며 거더의 최대 정 모멘트는 121.1tonf·m로 계산되었다. 100km/h로 주행하고 부상력만을 고려한 동적해석 결과로부터 레일과 거더의 최대연직변위는 각각 2.47mm, 2.45mm, 부상력과 노면조도를 고려할 때 레일과 거더의 최대연직변위는 각각 3.69mm, 3.03mm이고 거더의 휨모멘트는 51.94tonf·m이다. 설계기준에 의한 해석결과는 본 연구의 동적해석결과와 비교하여 변위는 약 2.7배, 휨모멘트는 약 2.3배를 나타낸다. 따라서 설계기준은 진동에 대하여 매우 높은 안전율을 적용하고 있음을 알 수 있다. 설계기준에 의한 활하중효과는 부상력과 노면조도를 무시하고 이동차량의 2차 현가장치만을 고려한 경우와 유사하다.

Table 4. Maximum displacement (Unit: mm, rad)

Self Load	Division	x Dis.	y Dis.	z Dis.
	Location	3	98	11, 186
	Dis.	3.081	-22.898	0.059
	Division	Roatation Angle x	Roatation Angle y	Roatation Angle z
Live Load	Location	11, 186	11, 186	11, 186
	Dis.	6.584E-04	2.141E-04	2.700E-03
	Division	x Dis.	y Dis.	z Dis.
Lateral Load	Location	2, 3	96, 103	79, 119
	Dis.	1.054	-7.977	0.050
	Division	Roatation Angle x	Roatation Angle y	Roatation Angle z
	Location	43, 154	11, 186	11, 186
Lateral Load	Dis.	5.570E-04	6.709E-05	9.187E-04
	Division	x Dis.	y Dis.	z Dis.
	Location	43, 155	87, 111	96, 103
	Dis.	0.094	-0.388	1.566
Lateral Load	Division	Roatation Angle x	Roatation Angle y	Roatation Angle z
	Location	83, 114	32	34, 163
	Dis.	6.362E-04	-1.777E-04	-1.000E-04

2.3 자유진동해석결과분석

자기부상열차용 철도교는 비접촉식으로 부상 주행하는 열차와 열차주행을 위한 철도교로 구분된다. 열차모델은 차체, 현가장치, 모듈로 구성되어 있으며 철도교는 레일, 침목, 거더로 구성되어 있다. 교량모델의 지점조건은 힌지와 롤러로 구성된 단순보이며 고유진동모드는 진동에 직접적인 영향을 나타낸다.

해석모델에 대한 고유진동수는 Table 5와 같고 철도교의 진동모드는 Fig. 2와 같다. 첫 번째 고유진동수는 연직방향 모드로서 4.681Hz, 2번째 고유진동수는 횡방향 모드로서 7.327Hz를 나타내고 있다. 3번째 고유진동수는 연직방향 모드로서 18.092Hz, 4번째 고유진동수는

횡방향 모드로서 19.901Hz, 그리고 5번째 고유진동수는 비틀림 방향의 진동모드로서 25.734Hz를 나타내고 있다.

일반적인 교량구조에서 나타나는 고유진동수보다 다소 큰 기본진동수를 나타내고 있으며 이는 자기부상열차에 의한 구조진동안정성과 주행안정성을 확보하는 방법으로 높은 고유진동수를 가진 교량설계를 유도하기 때문이다. 횡방향 첫번째 모드가 기본진동수의 약 1.56배를 나타내고 비틀림방향 모드는 기본진동수의 5.5배를 나타냄으로서 횡방향과 비틀림 방향 진동응답이 발생할 확률이 낮다는 것을 의미한다. 두 번째 연직모드의 18.092Hz는 기본진동수의 3.85배이며 이는 두 번째 연직모드보다 기본적인 연직모드가 지배하고 있음을 의미한다[2,4,13,16].

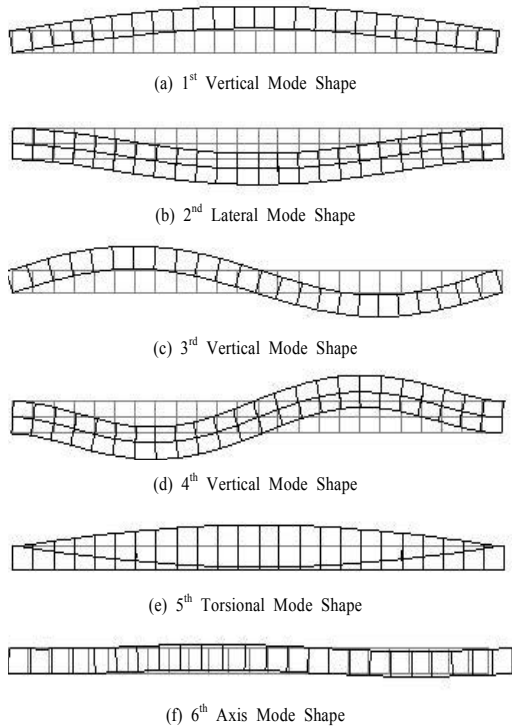


Fig. 2. Mode shape of railroad bridge

Table 5. Frequency and Mode of Railroad Bridge

no.	Frequency(Hz)	Period(sec)	Direction
1	4.681	0.2136	Vertical
2	7.327	0.1365	Lateral
3	18.092	0.0553	vertical
4	19.901	0.0503	Lateral
5	25.734	0.0389	Torsion
6	28.428	0.0352	Axis

2.4 자기부상열차에 의한 동적해석결과분석

자기부상열차는 주행 중 속도의 변화에 따른 가이드 웨이의 처짐 변화, 조도 및 풍하중등의 영향으로 부상간극의 변화로 발생하는 부상력의 변동으로 인해 교량과 마그네틱 현가장치의 상호작용을 고려하여 해석되어야 한다. 본 연구는 이러한 자기부상열차의 특성을 고려한 동적 상호작용 해석결과를 분석하기 위하여 부상력과 노면조도를 고려할 수 있도록 전산화하였다.

거더의 중앙점 연직변위에 대한 속도별 동적응답은 Fig. 3과 같다. 여기서 x축은 열차의 이동거리를 의미하며, 부상력과 조도의 유무에 따라 3가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에도 해당되는 내용이다. 이동속도 400km/h 이하의 속도에서 부상력의 효과로 인해 처짐량이 줄어들고 400km/h이상의 속도에서 처짐량은 증가됨을 나타낸다. 이는 고속주행으로 인한 부상간극의 변화가 증가함으로 이에 따른 부상력이 증가하기 때문이다. 노면조도의 영향을 고속일 때보다 저속일 때 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

거더의 중앙점 휨모멘트에 대한 동적응답은 Fig. 4와 같다. 일반적으로 휨모멘트의 동적 응답은 연직변위의 동적응답에 따라 변하므로 면외거동이라는 점에서 공통적인 현상을 나타낸다. 연직 변위에서와 같이 초고속 주행속도 400km/h이상에서 부상력을 고려한 휨모멘트의 동적 응답은 부상력을 고려하지 않은 휨모멘트의 동적응답과 큰 차이를 나타내지 않는다. 이는 부상력의 변동량으로 인하여 발생하는 휨모멘트는 크지 않다는 것을 나타낸다.

거더의 중앙점 전단력에 대한 속도별 동적 응답은 Fig. 5와 같다. 저속에서 부상력을 고려하지 않은 경우와 부상력을 고려한 전단력의 동적 응답의 차이는 크지만 이동속도가 증가하면 그 차이가 감소함을 알 수 있다. 500km/h이상의 초고속 주행속도인 경우 부상력의 효과는 적어지며 크기는 다소 차이가 발생하지만 두 가지 경우의 그래프가 거의 유사한 형상을 나타낸다.

노면조도는 미국의 FRA의 class 4를 이용하여 시뮬레이션하여 적용하였으며 최대 노면조도 크기가 3.8mm 정도이므로 동적응답에 미치는 효과가 적지 않음을 알 수 있다[2,4].

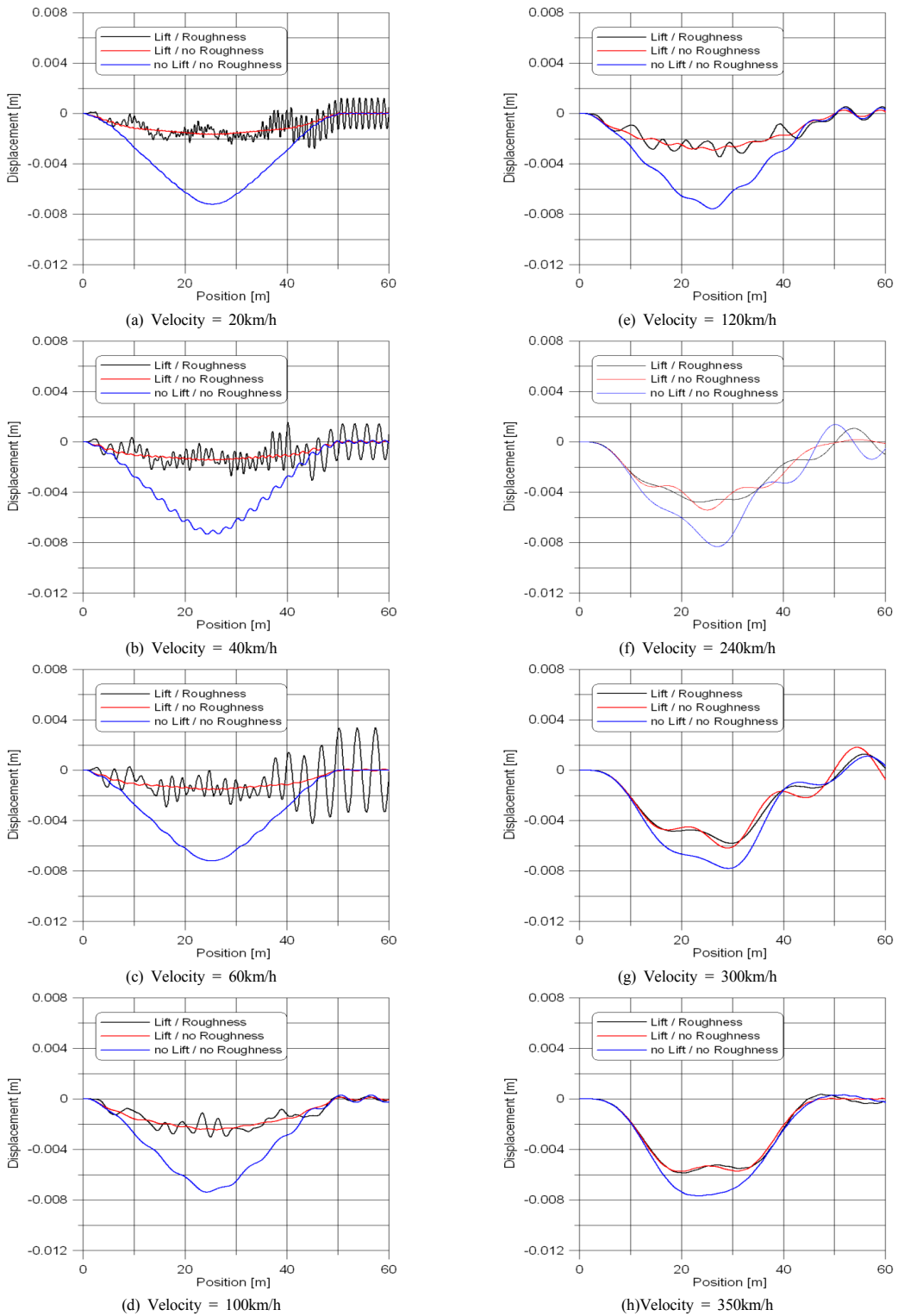
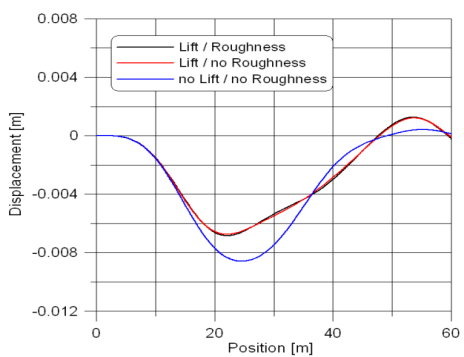
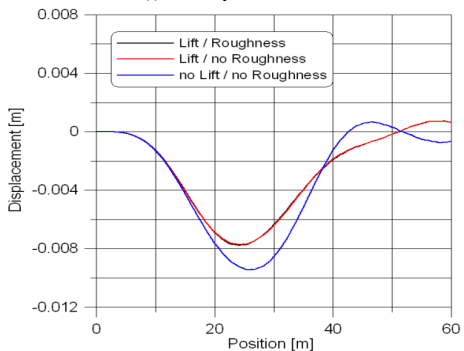


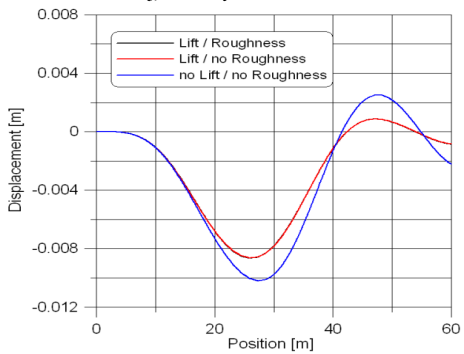
Fig. 3. Dynamic response of vertical displacement of a girder by magnetic propulsion train



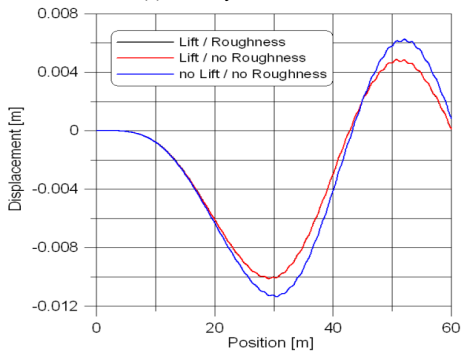
(i) Velocity = 400km/h



(j) Velocity = 450km/h

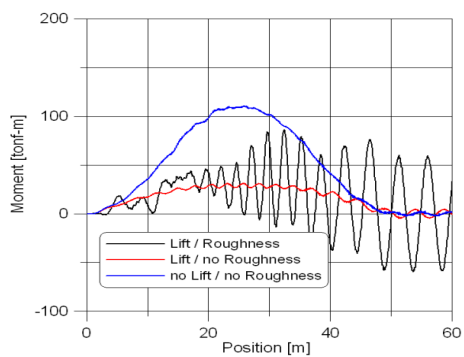


(k) Velocity = 500km/h

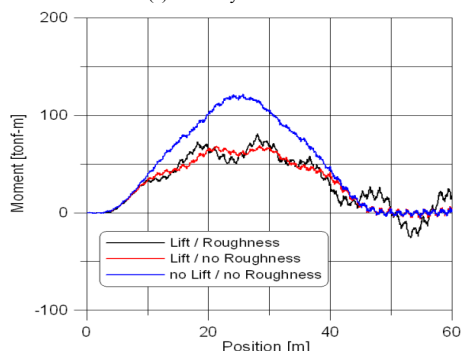


(l) Velocity = 600km/h

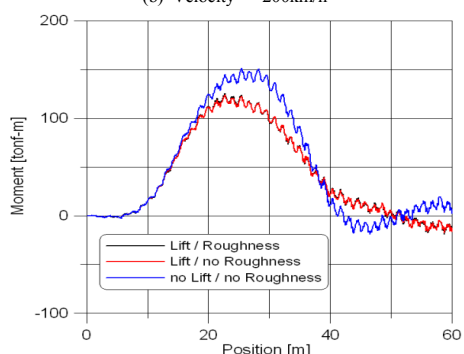
Fig. 3. Dynamic response of vertical displacement of a girder by magnetic propulsion train



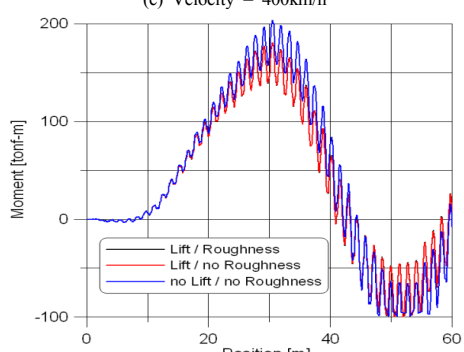
(a) Velocity = 80km/h



(b) Velocity = 200km/h



(c) Velocity = 400km/h



(d) Velocity = 600km/h

Fig. 4. Dynamic response of moment in the middle point of a girder by magnetic propulsion train

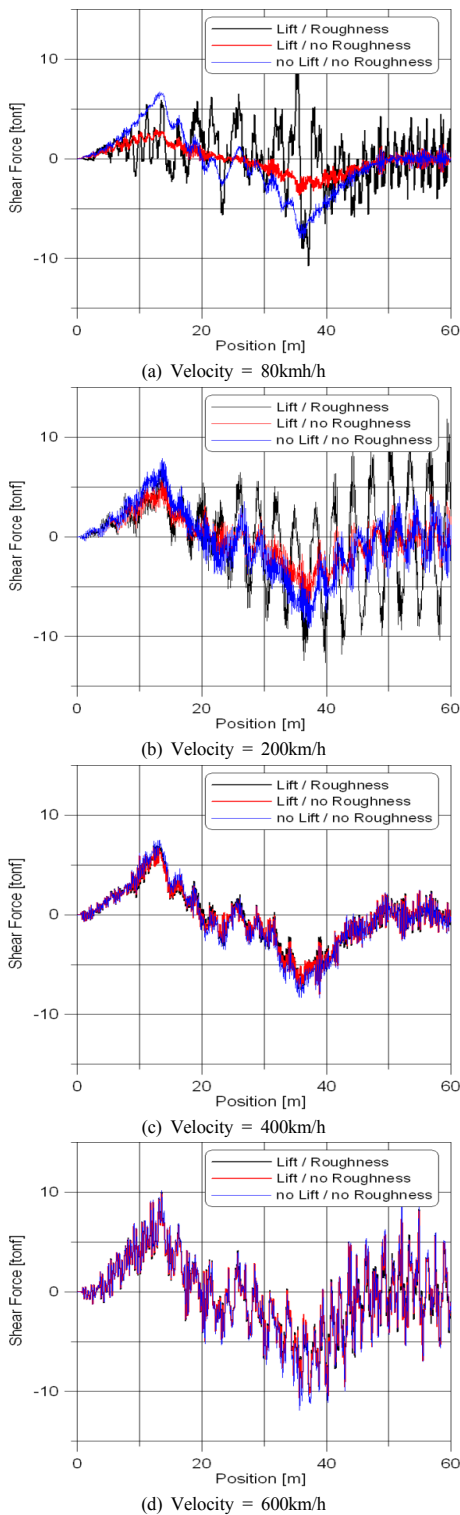


Fig. 5. Dynamic response of shearing force in the middle point of a girder by maglev propulsion train

2.5 거더의 강성변화에 따른 동적해석

자기부상열차용 철도교 설계기준은 가이드웨이의 최대연직처짐을 $L/2000$ 으로 제한하고 있다[2,4]. 연직 처짐의 증가는 가이드웨이의 강성도를 감소시킴과 처짐증가에 따른 속도 및 가속도의 증가로 진동이 발산하여 부상력 확보가 어렵기 때문이다. 그러므로 본 연구는 최대연직변위의 허용치를 변화시켜 Table 6과 같은 단면 특성치를 적용하였다. 수정된 단면을 적용할 경우 고유진동수는 Table 7과 같다.

Table 6. Section property according to the displacement limit

Limit of Vertical Displacement	$A(m^2)$	$I_y(m^4)$	$I_z(m^4)$	$J(m^4)$
$L/2000$	1.140	0.282	0.504	0.463
$L/2500$	1.168	0.251	0.594	0.528
$L/3000$	1.228	0.268	0.713	0.586

Table 7. Natural frequency (Unit: Hz)

Limit	$L/2000$		$L/2500$		$L/3000$	
	Fre.	Dir.	Fre.	Dir.	Fre.	Dir.
1	4.681	Vertical	4.879	Vertical	5.078	Vertical
2	7.327	Lateral	6.952	Lateral	6.955	Lateral
3	18.092	Vertical	18.864	Lateral	18.885	Lateral
4	19.901	Lateral	18.915	Vertical	19.743	Vertical
5	25.734	Torsion	24.873	Torsion	24.761	Torsion
6	28.428	Axis	28.436	Axis	28.426	Axis

가이드웨이 거더의 강성변화에 따른 거더 중앙점 연직변위의 동적응답과 부상간극 변화량은 Figs. 6~7과 같다. 거더의 강성변화에 따른 고유진동수의 변화가 발생하며 고유진동수 변화는 동적상호작용에서 부상간극변화를 야기하므로 연직변위의 변화로 나타난다. 이동속도가 증가하면 부상간극의 변화도 증가하며 초고속일 경우 상대적인 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 속도 120km/h에서 $L/2000$ 의 대응하는 강성을 가진 거더의 부상간극 최대 변화량은 2.5mm로 나타난다. 그러므로 $\pm 3\text{mm}$ 의 허용부상간극으로 제한할 경우 차량의 속도는 160km/h이상으로 주행할 수 없음을 알 수 있다. 부상력과 부상전류의 변화는 Figs. 8~9와 같다. 부상력 변화는 이동속도에 따라 거더의 변위속도가 변하며 변위속도는 부상간극에 적은 영향을 나타낸다. 부상전류변화는 부상력과 직접적인 관계가 있으므로 부상력 분포와 유사한 특성을 나타낸다. 주행속도가 증가하면 부상전류변화가 감소하며, 거더 강성이 증가하면 부상전류의 변화도 감소하는 것을 알 수 있다.

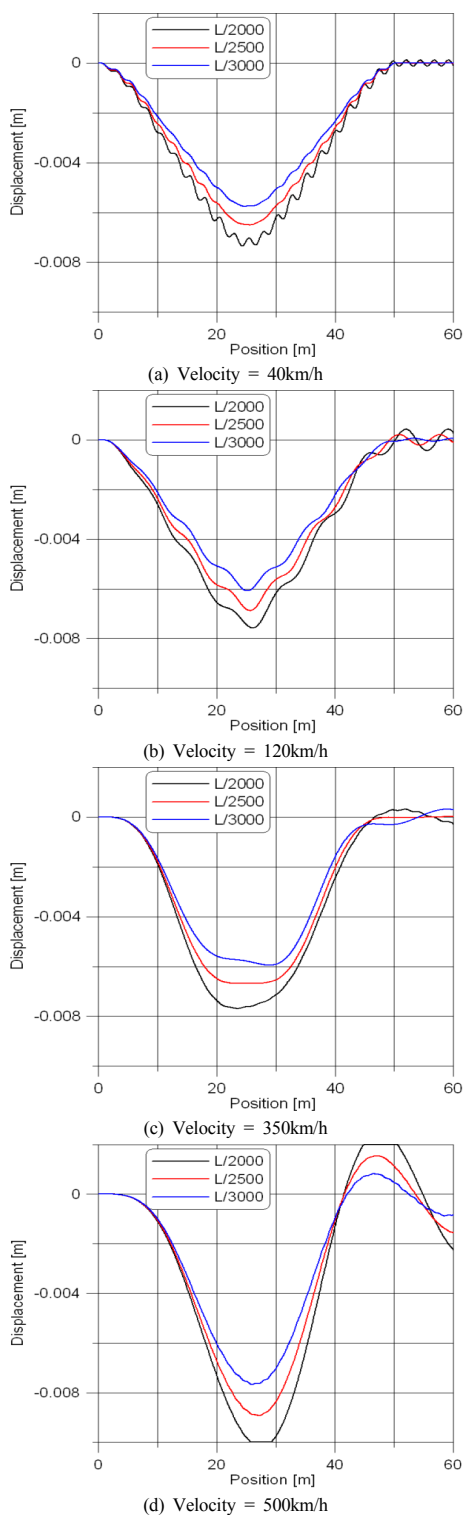


Fig. 6. Dynamic response of vertical displacement in the middle point of a girder with change of stiffness

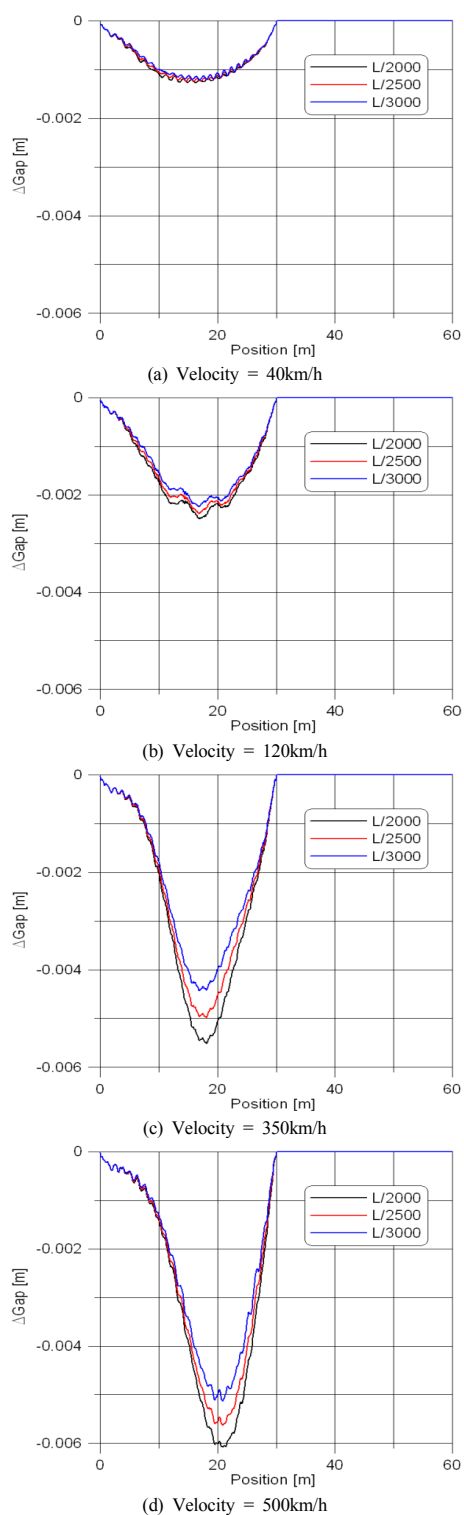
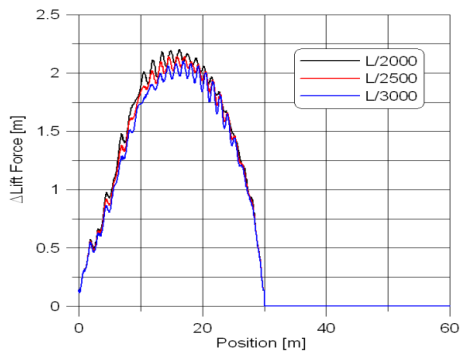
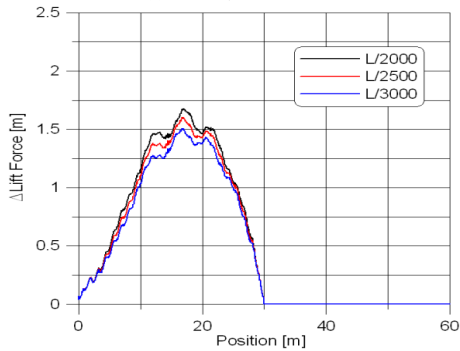


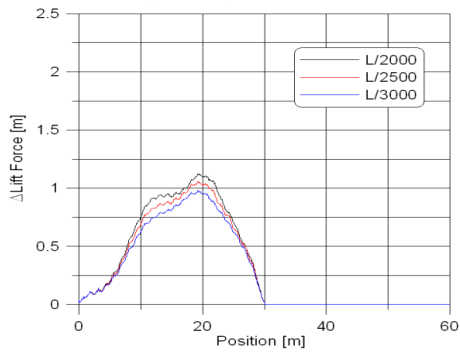
Fig. 7. Propulsion gap variation by velocity with change of stiffness



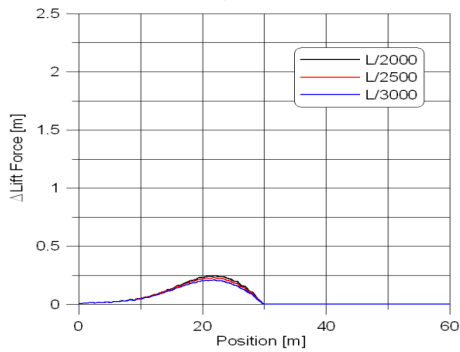
(a) Velocity = 40km/h



(b) Velocity = 120km/h

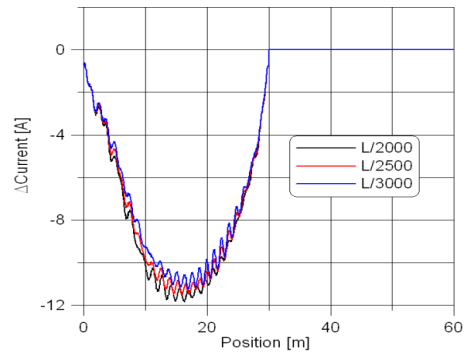


(c) Velocity = 200km/h

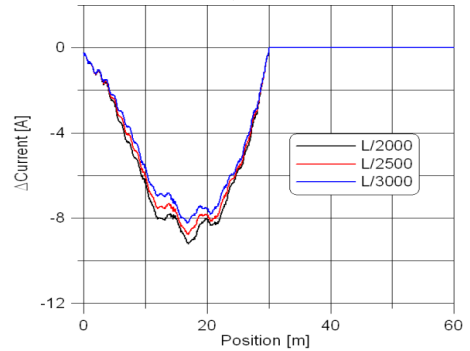


(d) Velocity = 600km/h

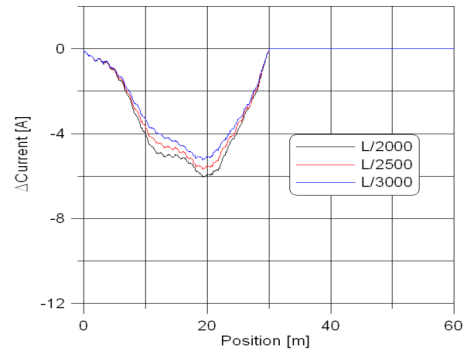
Fig. 8. Propulsion force by velocity with change of stiffness



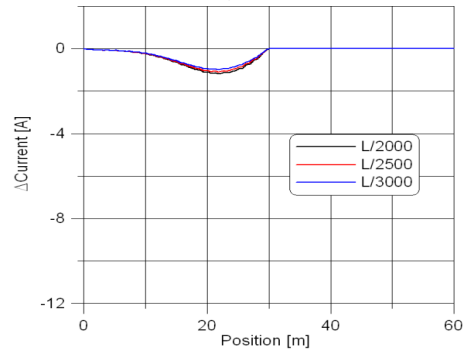
(a) Velocity = 40km/h



(b) Velocity = 120km/h



(c) Velocity = 200km/h



(d) Velocity = 600km/h

Fig. 9. Propulsion current change by velocity with change of stiffness

3. 결론

본 연구는 고속의 자기부상열차의 안전한 주행을 위한 전용철도교량의 구조안정성을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 자유진동 해석결과로부터 자기부상열차용 철도교는 처짐 제한을 L/2000로 제시한 단면일 때 일반교량에 비해 높은 연직방향 고유진동수를 나타낸다. 횡방향 모드와 비틀림 방향 모드는 각각 2번째, 5번째 모드로 나타나지만 고유진동수의 비를 고려하면 횡방향 및 비틀림 거동은 발생확률이 낮다는 것을 알 수 있다.

둘째, 열차이동속도에 따른 거더의 연직변위는 속도 60km/h가 100km/h보다 크며 200km/h이상인 속도인 경우 속도에 비례하여 크게 증가함을 알 수 있다. 주행속도 60km/h는 교량의 저주파 고유진동수와 일치하기 때문이다.

셋째, 거더의 최대변위는 시속 240km/h에서 극대값을 가지며 이후 340km/h 까지 감소하며 600km/h까지 속도에 따라 증가함을 알 수 있다. 열차의 주행속도 240km/h에서 극대값을 나타내는 이유는 교량의 고주파 고유진동수와 일치하기 때문이다.

넷째, 거더 강성이 감소하면 거더의 연직변위와 부상간극은 이동속도에 따라 증가하고 이와는 반대로 부상력과 부상전류의 변화량은 이동속도에 따라 감소한다. 또한, 거더강성이 증가하면 그 변화량 크기는 감소한다는 것을 알 수 있다.

다섯째, 차량속도 120km/h에서 L/2000의 대응하는 강성을 가진 거더의 부상간극 최대 변화량은 2.5mm이며 부상간극변화량의 허용한계를 ±3mm로 제한할 경우 차량의 제한속도는 160km/h임을 알 수 있다.

이상과 같은 해석결과로 자기부상열차와 가이드웨이 교량의 동적상호거동 특성을 보다 정확하게 확인할 수 있다. 또 이 결과들은 자기부상열차의 안전성과 승차감을 높일 수 있는 가이드웨이 구조물의 설계기준을 확립할 때 기초자료로 활용할 수 있다.

References

[1] H. J. Cho, Performance Test of the Urban Transit Maglev Vehicle (UTM-01) in Korea, *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 1998, no. 6, pp. 102~107, 1998.

[2] Korea Institute of Machinery and Materials,

Development of Test and Performance Evaluation Technology for the Urban Transit Maglev System, pp. 1-225, *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, 1999.

[3] H. J. Cho, M. H. Yoo, J. M. Lee, Status of Maglev Development in Korea, *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 2001, no. 4, pp. 362~365, 2001.

[4] H. J. Cho, Development of Key Technologies of the Urban Transit Maglev Train, *Korea Institute of Machinery and Materials*, pp. 1~1867, 2003.

[5] A. R. Wheeler, Aspects of the Design and Construction of D.C. Magnetic Suspension Systems, Ph. D. thesis, University of Sussex., 1975.

[6] B. V. Jayawant, et. al., Development of 1-ton Magnetically Suspended Vehicle using Controlled D.C. Electromagnets, *Proc. IEE*, 123, pp. 941-948, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0203>

[7] D. G. Aylwin, The Design of Controlled D.C. Magnetic Suspension Systems., M. Phil thesis, University of Sussex, 1977.

[8] J. P. Bullock, Analysis and Design of an Electromagnetic Suspension System, Internal Report, University of Warwick, 1985.

[9] P. K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1987.

[10] C. F. Zhao, and Zhai, W. M., Maglev Vehicle/Guideway vertical random response and ride quality, *Vehicle System Dynamics*, vol. 38, no. 3, pp. 185~210, 2002.

[11] S. D. Kwon, Bridge-Vehicle interaction Analysis of Suspension Bridges Considering the Effects of the Shear Deformation, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, vol. 8 no. 6, pp. 1~11, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2004.8.6.001>

[12] J. S. Lee, Dynamic Interaction Analysis between Actively Controlled Maglev and Guideway, Ph. D. thesis, Sungkyunkwan University, 2008.

[13] M. S. Kong, S. S. Yhim, Dynamic Analysis of Structures under Moving Loads in Time and Frequency Domain, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 11, no. 3, pp. 87~94, 2007.

[14] S. D. Kwon, Effectiveness of TMDs for Control of Traffic Induced Bridge Vibrations, *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 1-4, pp. 457-467, 1998.

[15] S. C. Yang, Evaluation of Dynamic Force Subjected to Substructure Considering Train and Track Interaction, vol. 17, no. 1-4, pp. 79-88, 1997.

[16] Y. N. Hong, Won-Seok Chung, In-Ho Yeo, Analysis of Dynamic Responses of Urban Maglev Guideway, *International journal of railway*, vol. 12, no. 1, pp. 115-121, 2009.

유 이 슬(Yi-Seul Yoo)

[정회원]



- 2010년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
구조진동, 토목구조

박 원 찬(Won-Chan Park)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2015년 9월 : 한국전력기술(주) 토목건축기술그룹 책임기술원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 대한전기협회 연구위원

<관심분야>
구조진동, 토목구조

임 성 순(Sung-Soon Yhim)

[정회원]



- 1987년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 3월 : 서울시립대학교 토목공학과 조교수
- 1999년 4월 ~ 2004년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 부교수
- 2004년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
구조진동, 토목구조