

# 초고속 자기부상열차의 가이드웨이 구조를 동적해석시스템 개발

## Development of Dynamic Analysis System for Guideway Structures of Ultra-high speed Maglev Train



승 명 관\*



김 선 훈\*\*

\*두산중공업(주) 기술연구원 신재생에너지개발팀 선임연구원 공학박사  
\*\*영동대학교 토목환경공학과 부교수 공학박사

### 1. 서 론

초고속 교통수단으로서의 자기부상열차(Maglev train, magnetic levitation train)의 가능성에 대한 관심이 세계적으로 증대하고 있는 실정이다. 일본에서는 1979년 미야자키 시험선에서 무인 시험차량 ML500으로 517km/h의 속도를 기록하였으며, 1997년부터는 야마나시 시험선(YMTL, Yamanashi Maglev Test Line)을 신설하여 주행시험을 시행하고 있다(그림 1). 그리고, 1999년에는 영업운전을 가정한 유인 5차량 편성 MLX-01에 의해 552km/h의 속도기록을 달성하였다. 또한, 2003년에는 유인 3차량 편성

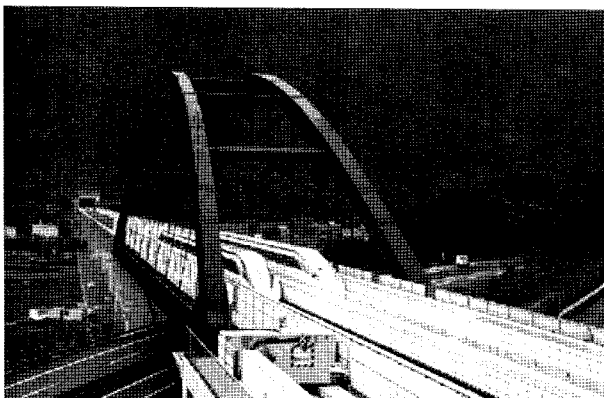


그림 1 야마나시 시험선(YMTL, Yamanashi Maglev Test Line)

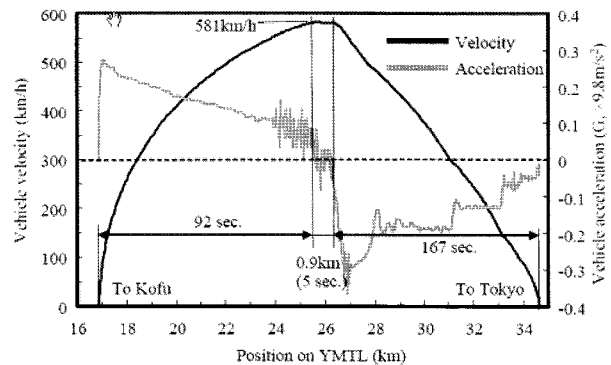


그림 2 MLX-01 열차의 581km/h 속도 이력

MLX-01에 의해 581km/h의 최고속도를 기록하였다 (Seino 등, 2006, Sogabe 등, 2003)(그림 2, 3).

초고속 Maglev 열차의 운영을 위해서는 토목기술자, 전기기술자, 기계기술자에 의해서 가이드웨이 구조물(guideway structures), Maglev 열차, 초전도체(superconducting magnet)에 대한 설계, 제작, 시공을 완전하게 수행하여야 한다. 이 중에서 가이드웨이 구조물의 설계 시에는 활하중, 풍하중, 지진하중, 온도하중 등에 대한 조합하중에 대해서 안전하게 설계되어야 하며 특히, Maglev 열차의 운행시 진동에 대한 동적안정성이 확보되어야 한다. 이를 위한 수치해석의 객관적인 결과를 확보하기 위해서는 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호작용을 고려하여 수치적으로 정확한 가이드웨



그림 3 MLX-01 열차의 탑승자들

이구조물의 수치해석모델을 개발하여야 한다.

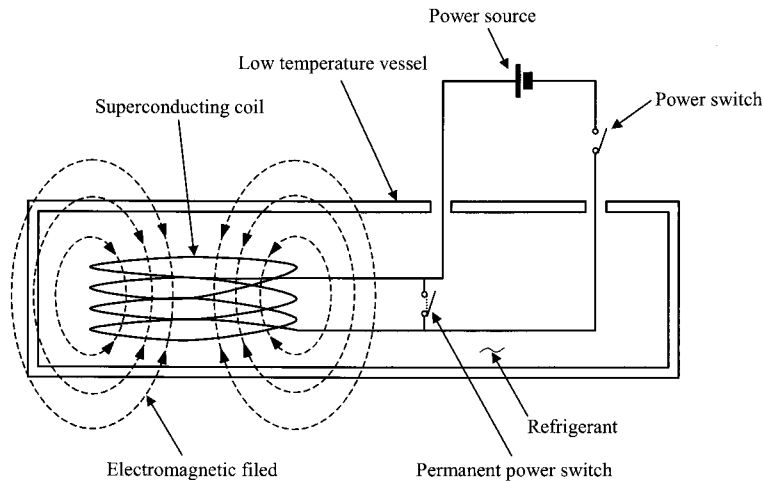
본 연구에서는 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호 작용력을 고려하고, 새로운 3차원 Maglev 열차모델 및 가이드웨이 구조물의 모형을 통한 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호작용해석모델을 제안하고, 이를 이용하여 관련 유한요소해석프로그램을 개발하고 수치예제해석

에 적용한다. 기존에 개발된 Nonconforming Flat Shell (NFS) 유한요소를 사용하여 교량 상부구조를 모형화함으로써 교량상판의 정확한 유한요소해석이 가능하며 특히, 박스거더와 같이 절판구조물의 모형화에 있어서 절점 당 6자유도를 갖는 NFS 쉘요소를 유용하게 사용할 수 있다. 3차원 공간보유한요소를 이용하여 가이드웨이 구조물의 측벽구조물을 모형화하며, 측벽구조물과 교량구조와의 연결부는 스프링 연결요소를 사용하여 모델링한다. 그리고, Maglev 열차와 측벽구조물간의 지지력과 안내력은 등가 스프링모델을 이용하여 모형화한다.

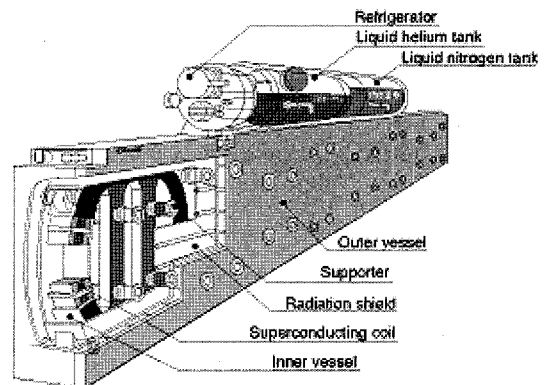
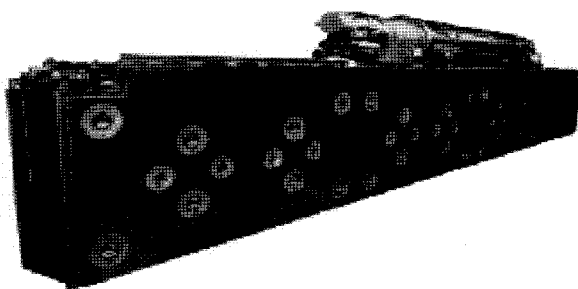
## 2. 초고속 Maglev 열차의 작동원리

### 2.1 초전도체(superconducting magnet)

초전도현상을 이용한 초전도체를 이용하여 강력한 자장을 만들어 차량을 부상시킬 수 있다. 초전도현상이란 어떤 종류의 특수한 금속을 매우 낮은 온도로 냉각시키면 어느



(a) 초전도자석의 원리



(b) MLX-01의 초전도체(superconducting magnet)

그림 4 초전도자석의 원리

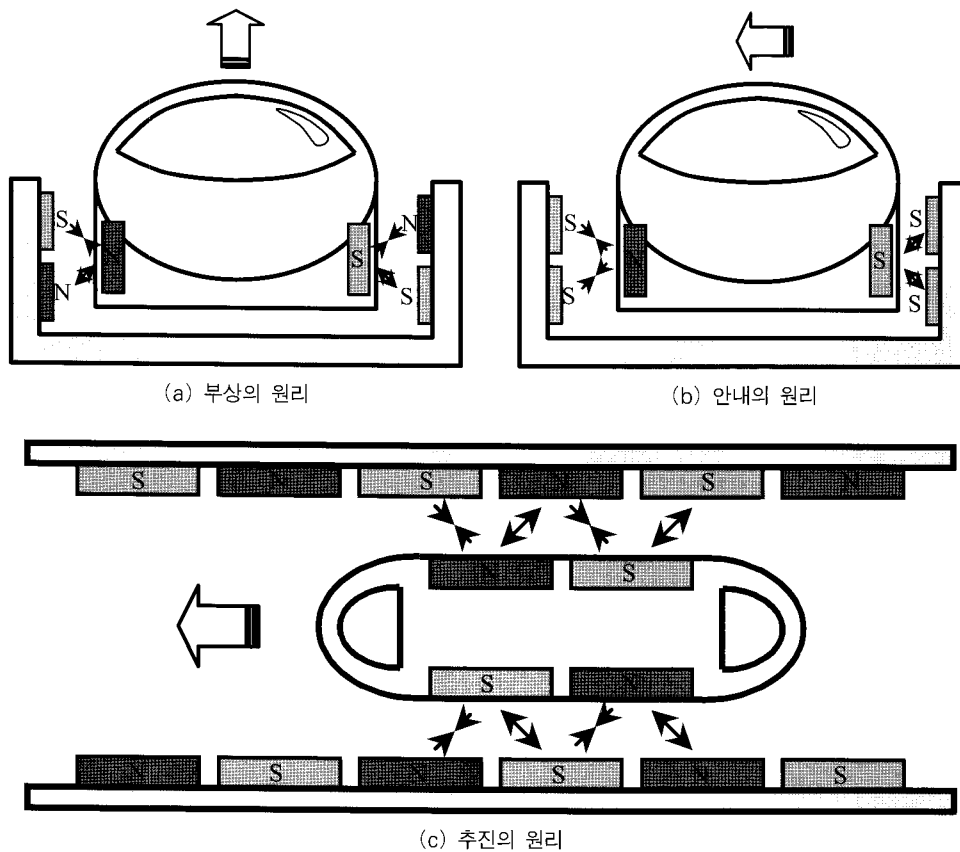


그림 5 Maglev 열차 추진, 부상, 안내의 원리

일정 온도에서 그 금속의 직류전기저항이 급격히 0으로 되는 현상을 말한다. 이러한 현상을 구현한 전도체를 초전도체라고 한다. 이와 같이 냉각된 상태에서 이러한 금속으로 만든 코일에 한차례 전류를 흘려주면, 전기저항이 0이므로 발열 및 기타의 에너지 손실이 없어서, 전원을 제거하더라도 코일내에 전류는 계속 흐르게 되어 강력한 전자기장을 얻을 수 있다(김선호, 1997).

일본의 초전도자기부상식철도는 니옴티탄( $Nb_3Ti$ ) 합금의 코일을  $-269^{\circ}C$ 의 액체 헬륨으로 냉각하여 자기저항을 거의 0인 강력한 초전도체를 차상에 탑재하고, 이런 차량 탑재 자석과 지상의 설치된 초일과의 반발력, 흡인력을 이용하고, 차량을 부상·안내·추진하는 운송시스템이다. 이러한 JR 방식은 1966년에 미국, 브루클린 국립연구소의 J.R. 파웰박사와 G.R. 단비 박사에 의해 고안되어, 일본국철기술평구소 및 일본철도종합기술평구소에서 실용화를 위한 연구가 진행되었다(Sogabe 등, 2003).

## 2.2 Maglev 열차의 추진, 부상, 안내의 원리

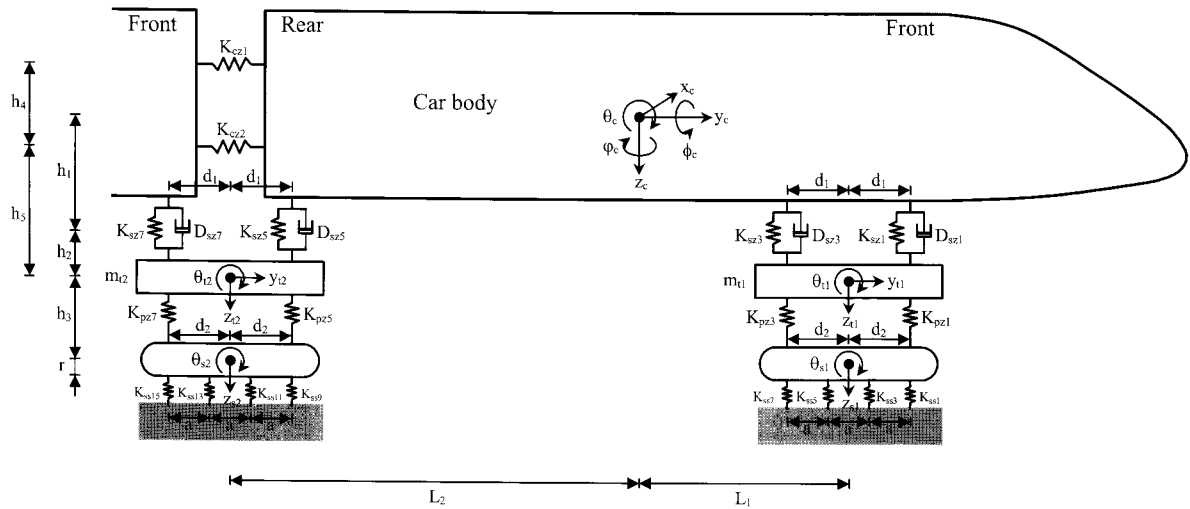
지상의 추진코일에 전류를 흘려주면 자계(N극, S극)가 만들어지고, 차량의 초전도체와의 사이에서 서로 다른 극

사이에서는 인력(attraction)이, 같은 극에서는 반발력(repulsion)이 발생하여, 열차는 진진하게 된다. 차량의 초전도체가 고속으로 통과하면 지상의 부상 및 안내코일에 유도전류가 흘러서 전자석이 되어, 부상력과 안내력을 발생하게 된다. 물론, 일정한 속도까지는 차량 하부에 설치된 바퀴에 의해 전진한다. 좌우의 부상 안내 코일은 전력 케이블에 의해 서로 연결되어 있어 차량이 중심으로부터 어느 한쪽으로 기울어지면 차량이 떨어진 쪽에는 인력이 가까워진 쪽에는 반발력이 작용하여 항상 가이드웨이 중앙으로 돌아오도록 되어 있다(그림 5).

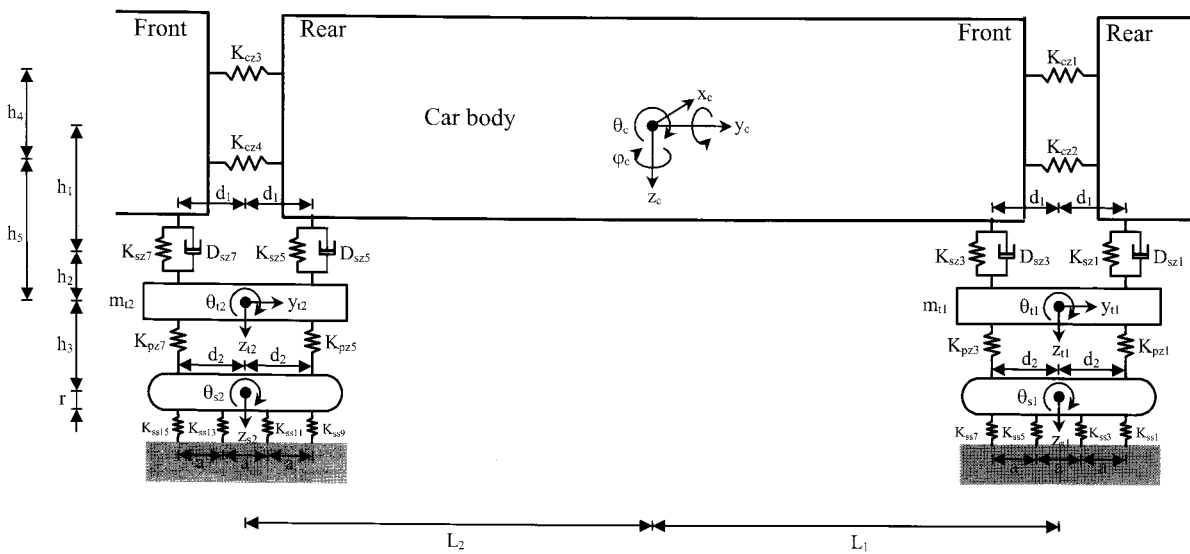
## 3. Maglev 열차 모델

일본에서 개발된 초고속 Maglev 열차 MLX-01의 제1편성 차량은 3량 편성으로서, 3량의 차체와 4량의 대차의 연결방식이다(그림 6). 차량은 최고속도 500km/h(시험최고속도 550km/h)의 부상주행이 가능하다. 제동장치는 전력 회생제동을 상용제동장치로 하고 있으며, 긴급시 백업 제동장치로서 차륜디스크제동장치 및 공력제동장치가 설비되어 있다. 최고속도 500km/h이상의 부상주행과 터널구간

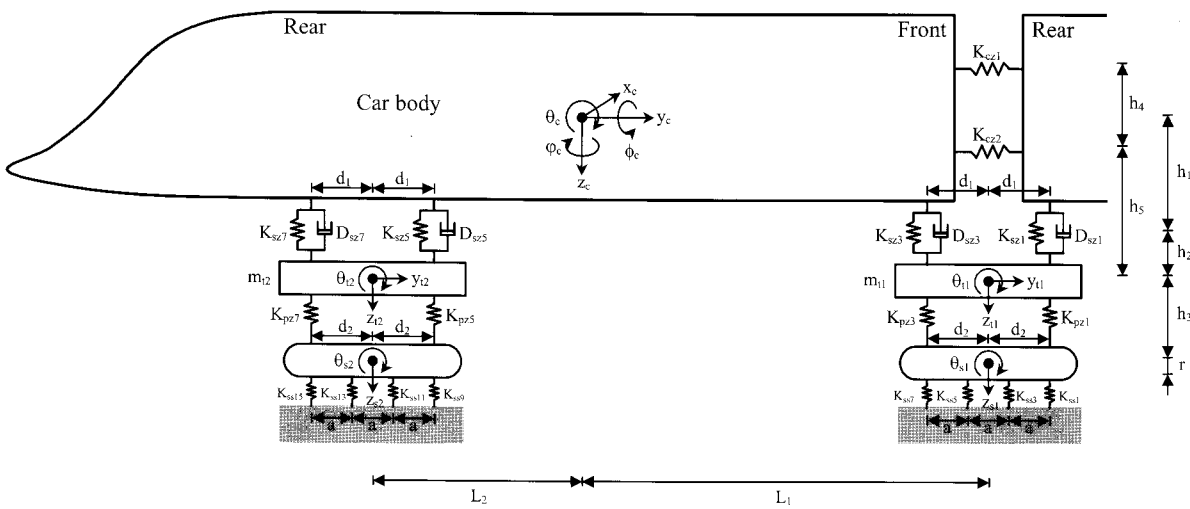




(a) 선두차



(b) 표준중간차



(c) 후미차

그림 8 초고속 Maglev 열차의 3차원 모형

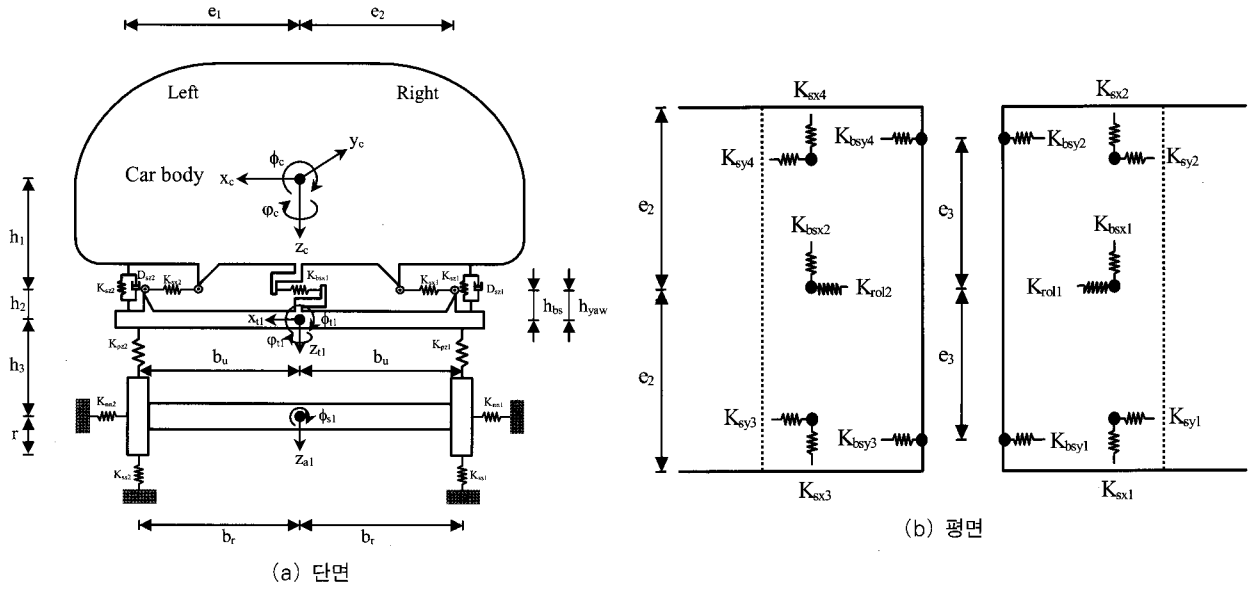


그림 9 초고속 Maglev 열차의 대차 모형

표 1 역학모델이 사용되는 초고속 Maglev 열차의 동적특성치

명칭	기호	단위	값
차체질량	$m_B$	kg	$1.37 \times 10^4$
차체관성 모멘트	롤링	$I_{B\phi}$	$1.977 \times 10^4$
	피칭	$I_{B\theta}$	$9.351 \times 10^5$
	요잉	$I_{B\psi}$	$15.85 \times 10^5$
대차질량	$m_T$	kg	$6.3 \times 10^3$
대차관성모멘트	롤링	$I_{T\phi}$	$1.634 \times 10^3$
	피칭	$I_{T\theta}$	$1.480 \times 10^3$
	요잉	$I_{T\psi}$	$1.785 \times 10^3$
SCM 질량	$m_S$	kg	$2.8 \times 10^3$
SCM 관성모멘트	피칭	$I_{S\theta}$	$5.103 \times 10^3$
	롤링	$I_{S\psi}$	$1.16 \times 10^4$
공기스프링	Y	$K_{sy}$	$2.25 \times 10^5$
	X	$K_{sx}$	$1.96 \times 10^5$
대차 상하 댐퍼 감쇠정수	$D_{sz}$	N · s/m	$2.45 \times 10^3$
안티롤링스프링	$K_{rol}$	N/m	$3.8 \times 10^4$
볼스터 횡방향 스톱퍼 스프링	$K_{bsx}$	N · s/m	$3.107 \times 10^5$
볼스터 종방향 앵커 스프링	$K_{bsy}$	N/m	$4.9 \times 10^5$
SCM 상하 스프링	$K_{pz}$	N/m	$1.225 \times 10^5$
차체간 연결 스프링	$K_{cz}$	N/m	$4.9 \times 10^5$

표 2 역학모델에 사용되는 초고속 Maglev 열차의 치수

명칭	기호	단위	값	
차체	앞차	$L_1, L_2$	m	10.8, 10.8
	중간차	$L_1, L_2$	m	10.8, 10.8
	뒷차	$L_1, L_2$	m	10.8, 10.8
대차		$d_1$	m	2.025
		$d_2$	m	2.025
		$e_1$	m	1.95
		$e_2$	m	1.75
		$e_3$	m	1.75
		$b_u$	m	2.035
		$h_1$	m	1.4
		$h_2$	m	0.48
		$h_3$	m	0.1
		$h_4$	m	1.3
		$h_5$	m	0.8
		$r$	m	0.35
		$h_{bs}$	m	0.4
		$h_{yaw}$	m	0.4
SCM		$b_r$	m	2.98/2
		$a$	m	1.35
차체 사이 간격	$g$	m	0.6	

이 많다는 조건 때문에 고속화로의 대응과 차량의 경량화를 중심으로 기술개발을 진행하여 그 성과를 실차에 적용하였다(Yoshioka 등, 1998). 공기저항 및 터널주행시 공기압파를 저감하기 위하여 선두부를 9.1m로 길게 단면적변화를 적게 하였다. 여러가지 선두형상보정에 대하여 항풍기분야에서 실적이 있는 CFD(전산유체역학) 해석을 이용한 시뮬레이션과 풍동실험을 행하여 공기저항, 압력 소음, 터널공기압파의 저감에 유효한 선두형상을 선정하였으며, 저항계수  $C_d$ 는 0.1이하이다. 더블커스프(double-cusp) 형상은 최후미부의 경계층박리의 억제에 주안점을 두었고, 에어로웨지(aero-wedge)형상은 공기압파의 저감과 의장품설치 공간을 고려한 것이다. 초전도자석의 자계로부터 객실을 보호하기 위하여 차체에 자기철드를 설치하였다(Takao 등, 1996).

그림 7은 초고속 Maglev 열차 운송시스템 단면도 및 부상 코일의 연결을 보이고 있다. 가이드웨이의 측벽의 내측과 외측에 LSM(linear synchronous motor)의 3가지 형태의 주요 코일이 설치된다. 양쪽 부상 코일을 연결하는데에는 Null-flux연결을 이용하여 연결한다(Higashi 등, 1999; Ohashi 등, 2000). 이러한 Null-flux 연결에 의해서 SCM의 위치와 속도에 따른 전자기력이 발생되며, 전류가 코일에 발생하게 된다. SCM이 상부 부상코일의 중앙보다 낮은 위치를 주행하게 되면, SC(superconducting coil) 코일과 하부의 부상코일 사이에 반발력이 발생하고, SC(superconducting coil) 코일과 상부의 부상코일사이에는 인력이 발생하게 된다. 따라서, 부상력이 발생하게 된다.

안내력도 부상력과 유사한 방식으로 열차의 위치를 유지할 수 있도록 발생하게 된다. SCM의 SC 코일은 2차적인 LSM으로 사용되며, 동시에 부상과 안내시스템의 전자기체로 사용된다. 대차당 8개의 SCM이 설치되며, N극과 S극을 만들게 된다.

### 3.1 초고속 Maglev 열차 모델

제안하는 초고속 Maglev 열차의 해석모델은 차체의 6자유도, 대차의 6자유도, SCM의 3자유도로서, 총 24자유도를 갖는 해석모델이다(그림 8, 9) (Yoshioka, 1988). 차체의 6자유도는 각각, 차체의 슬라이딩, 스웨이, 바운싱, 피칭, 롤링, 요잉( $x_c, y_c, z_c, \theta_c, \phi_c, \varphi_c$ )에 대한 자유도이며, 대차의 6자유도는 각각 대차의 슬라이딩, 스웨이, 바운싱, 피칭, 롤링, 요잉( $x_t, y_t, z_t, \theta_t, \phi_t, \varphi_t$ )에 대한 자유도이며, SCM의 3자유도는 양쪽 SCM과 프레임 결합체의 바운싱, 피칭, 롤링( $z_s, \theta_s, \phi_s$ )에 대한 자유도이다. 따라서, Lagrange의 운동방정식을 적용하여 열차 차량 1대에 대한 운동방정식의 유도가능하고, 이를 이용하여 다련열차(multi-link train)의 운동방정식의 유도가 가능하다. 수치해석에 적용되는 Maglev 열차의 동적특성치와 치수는 표 1, 2와 같다(Azakami, 1996; Higashi 등, 1999; Matsudaira 등, 1994; Ohashi 등, 1998; Ohashi 등, 2000; Takao 등, 1996).

### 3.2 초고속 Maglev 열차의 운동방정식

초고속 Maglev 열차 차량의 운동방정식을 유도하기 위해서 앞에서 모형화한 선두차, 표준중간차, 후미차에 대한 각각의 운동에너지, 포텐셜에너지, 감쇠에너지에 대한 식을 Lagrange의 운동방정식에 대입한다. 일반적으로 복잡한 시스템의 운동방정식을 유도할 경우 해석동역학에 기초한 다음과 같은 Lagrange의 운동방정식을 이용한다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_v} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_v} + \frac{\partial E_p}{\partial q_v} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_v} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\{q_v\}$ 는 초고속 Maglev 열차 차량의 자유도이다. 따라서, 차량의 운동방정식이 차량, 대차, SCM의 자유도, 교량의 자유도에 의해 표현된다.

초고속 Maglev 열차는 앞 차량과 뒷 차량 사이에 대차가 연결된 다련 열차이다. 따라서, 대차의 거동은 앞뒤 차량의 거동에 영향을 받게 된다. 선두차, 표준중간차, 후미차에 대한 운동방정식을 이용하여 다련열차의 시스템행렬

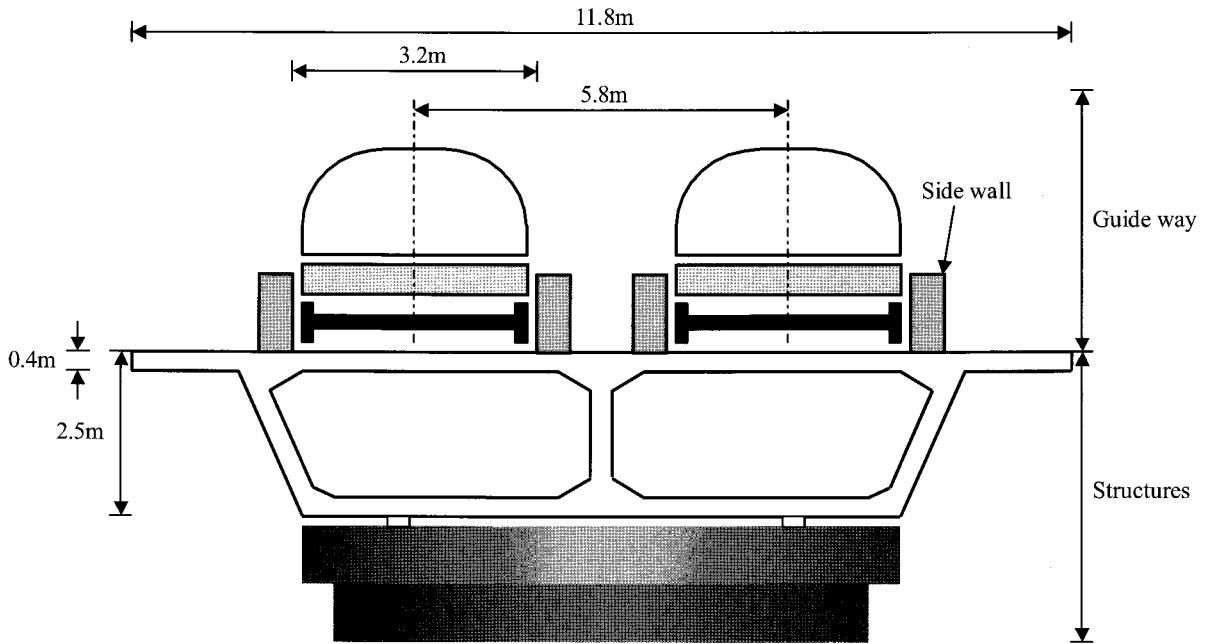


그림 10 가이드웨이 구조물의 구성

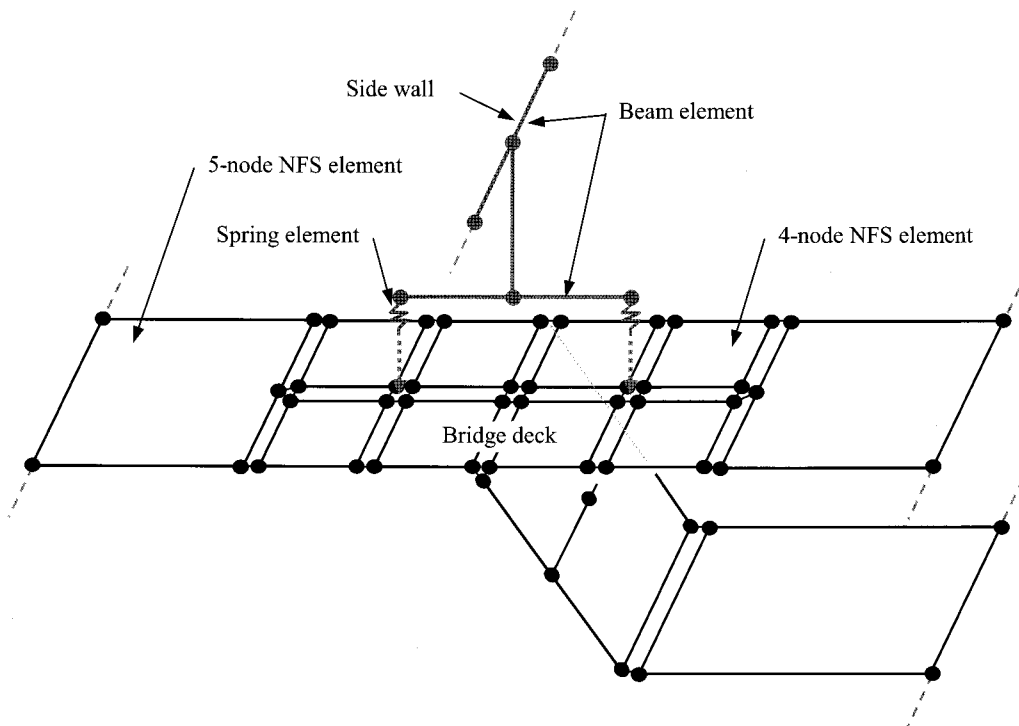


그림 11 가이드웨이 구조물의 3차원 모형화

(질량행렬, 강성행렬, 감쇠행렬, 하중벡터)의 구성이 가능하다.

#### 4. 가이드웨이 구조물(guideway structure) 모델

##### 4.1 3차원 가이드웨이구조물 모델

초고속 Maglev 열차의 가이드웨이 구조물은 그림 10과

같이 구조물과 가이드웨이로 구성된다. 이러한 가이드웨이 각 구조요소들에 대한 정확한 동적거동의 분석을 위해서는 3차원 초고속 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호작용을 고려한 동적 해석시스템을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 그림 11과 같이 가이드웨이 구조물의 3차원 모형화를 위해서 교량과 측벽구조물을 구성하는 측벽보, 스프링 등 가이드웨이 구조물의 각 구조요소들을 모형화



할 수 있는 유한요소를 사용한다.

### 4.2 교량상판의 모형화

본 연구에서는 변절점요소로서 적응적 체분화(adaptive meshing)가 가능하며, 절점 당 6자유도를 가지고 있어서 박스거더 등의 절판구조물(folded plate structure)과 같이 면내변형과 면외변형이 연관될(coupled) 때 유용하게 사용될 수 있으며, 다른 유한요소와의 연결에 있어서 5자유도의 평면셸요소에 적용하는 부가적인 제한조건이 필요없는 NFS (Nonconforming Flat Shell) 유한요소를 사용한다. 이러한 NFS 요소는 비적합모드의 추가와 동시에 직접수정법(Direct Modification Method)을 적용하여 조각시험(patch test)을 통과시킴으로써 요소 거동의 개선을 도모하였다(이대열 2002). 평면셸요소(flat shell finite element)는 모든 절점이 한 평면에 있으므로 평판의 자유도와 평면응력요소의 자유도가 서로 독립적이다. 그러므로 강성행렬은 평판요소의 강성행렬과 평면응력요소의 강성행렬의 독립적인 결합에 의하여 구성될 수 있다. 이와 같이 구성한 강성행렬을 뒤늦어진 기하형상(warped geometry)에도 적용할 수 있도록 하기 위하여 강결수정법(rigid link correction)으로 수정하였다. NFS 요소의 질량행렬은 HRZ lumping 방법을 사용하여 구성하며, 회전자유도에 대한 질량관성은 고려되지 않는다.

### 4.3 측벽구조물의 모형화

그림 12와 같이 측벽구조물은 측벽, 강결보, 고무받침으로 구성되며, 이러한 각 구조요소들을 유한요소를 이용하여 구체적으로 모형화한다. 측벽 및 강결보의 모형화에 있어서는 3차원 보요소를 사용하여 모형화하며, 고무받침은 스프링요소를 이용하여 모형화한다. Maglev 열차 운행시, SCM이 측벽을 통과하는 높이는 Maglev 열차의 속도에 따른 부상력의 변화에 따라서 변화하게 된다. 실제 모형화에 있어서, SCM의 통과지점이 측벽보 단면의 도심과 높이 차이가 있을 경우에는 측벽보를 SCM의 통과지점에서 기하학적으로 모형화하고, 이 지점에서의 단면2차모멘트를 산정하여 이러한 영향의 고려가 가능하다. 본 연구에서는 측벽보 단면의 도심 높이로 SCM이 통과한다고 가정한다.

### 4.4 궤도 불규칙성분(track irregularities)의 산출

본 연구에서는 SCM과 측벽보 사이의 조도성분을 고려

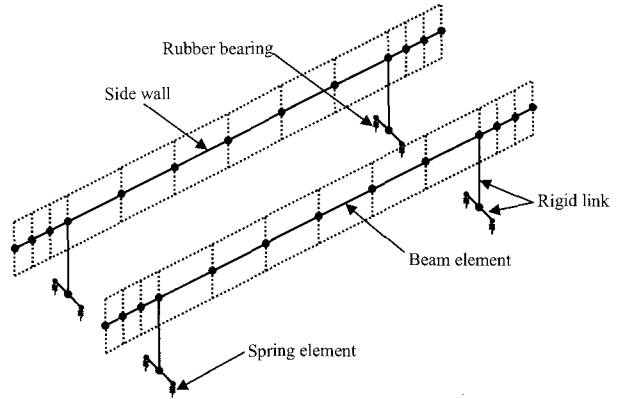


그림 12 측벽구조물의 모형화

한다. 조도성분에 대한 공간 분포의 산출을 위해서는 적절한 PSD 함수(power spectral density function)의 가정과 랜덤수 산출(random number generation) 과정이 필요하다. 조도성분은 공간상의 정상 에르고딕 과정(stationary and ergodic process), 즉, 궤도방향 x축으로의 랜덤함수(random function)로 고려될 수 있으며, 주로 PSD함수에 의해서 특성화된다. PSD함수는 파수(wave number,  $r$ )의 함수이며, 이때 파수는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{l}{\lambda} = \frac{l}{VT} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$ 는 파장(wave length),  $T$ 는 파의 주기(period),  $V$ 는 차량의 속도(speed),  $w$ 는 파의 각진동수(circular frequency)이다.

일본의 철도종합기술연구소(RTRI)에서는 실제 건설된 야마나시 시험선의 선형측량을 통해서 조도산정을 위한 그림 13과 같은 PSD함수를 제안하였다(Matsuura 등, 1994). 본 연구에서는 이러한 PSD함수를 이용하여 조도성분을 산정하여 해석에 적용한다. 0의 평균값을 갖는 정상 가우스랜덤과정(stationary Gaussian random process)에 의한 다음 식 (3)을 사용하여 연직방향 및 횡방향 조도성분의 산출이 가능하다.

$$z(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S_z(\gamma_i)} \Delta\gamma \cos(2\pi\gamma_i x - \beta_i) \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 궤도방향 좌표,  $N$ 은 고려하는 스펙트럼의 수,  $\beta$ 는 랜덤수 산출 과정에 의해서 산정되는 값으로서 0에서  $2\pi$  사이의 값을 갖는다. 본 연구에서  $N$ 은 1024이고,  $\lambda$ 의 범위는 최소 1.8m에서 최대 1000m로 가정한다(Garg 등,

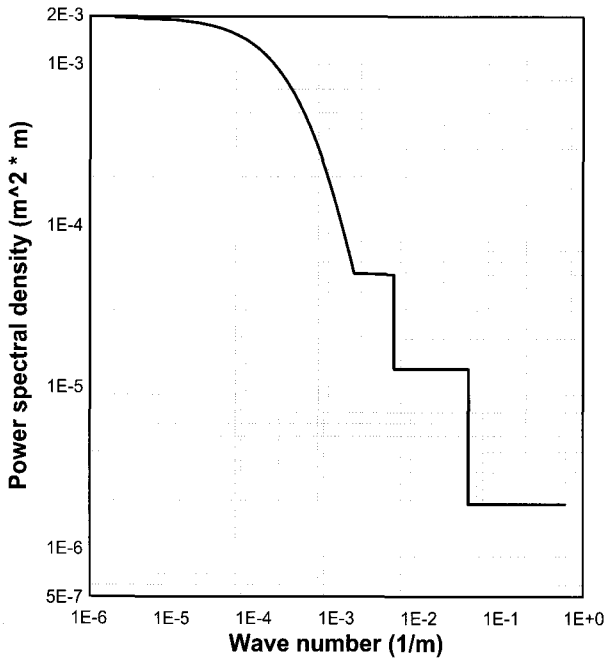


그림 13 측벽 조도성분의 산출을 위한 PSD 함수

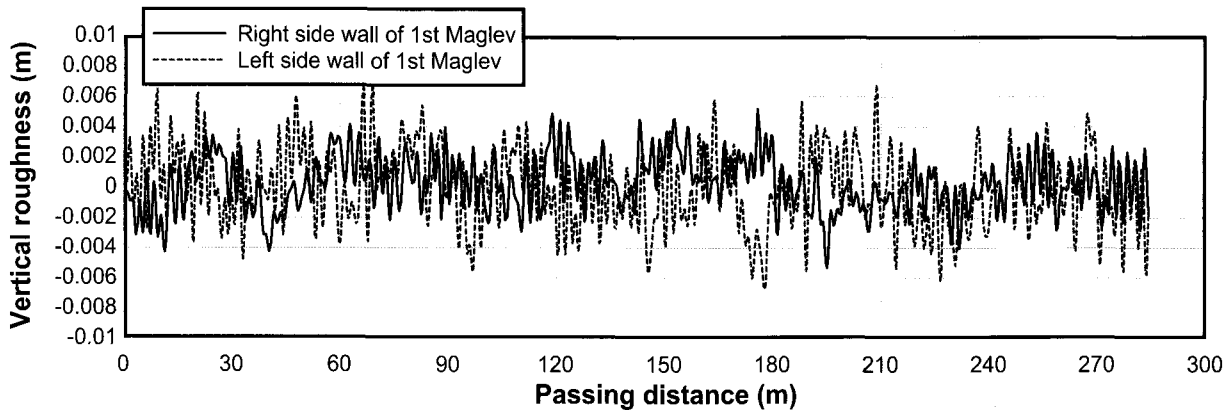
1984).

그림 14에서는 전술한 방법에 의해 산정된 연직방향과 횡방향의 조도를 도시하고 있다. 각 측벽마다 궤도 불규칙 성분이 다르므로, 각 측벽에 대해서 각각 산정하여 해석에 적용한다.

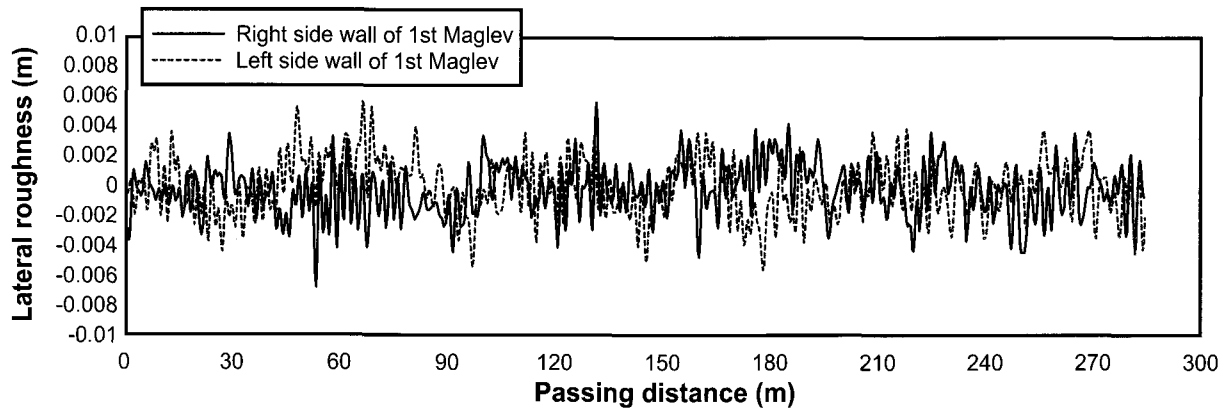
### 5. Maglev 열차-가이드웨이 상호작용

초고속열차가 가이드웨이 상을 통과할 시에 SCM과 가이드웨이의 상호작용에 의해서 SCM과 가이드웨이 사이에서는 초고속열차의 정적하중에 추가하여 부상력 및 안내력의 복원력에 의한 상호작용력이 발생하게 된다. 이러한 복원력은 전술한 부상력 및 안내력의 스프링계수에 의한 반발력을 상호작용력으로 고려함으로써 초고속열차-가이드웨이 시스템행렬의 정식화에서 초고속열차와 가이드웨이의 자유도의 연관항(coupling terms)이 구성된다.

1대의 대차에는 한쪽에 4개씩의 SCM가 연결되어 있다.



연직방향 조도성분



횡방향 조도성분

그림 14 측벽 조도성분의 공간분포

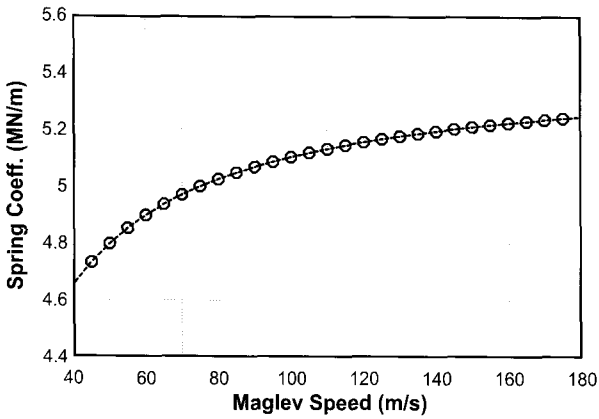


그림 15 초고속 Maglev 열차속도에 따른 연직방향 등가스프링계수  $f_z(V)$

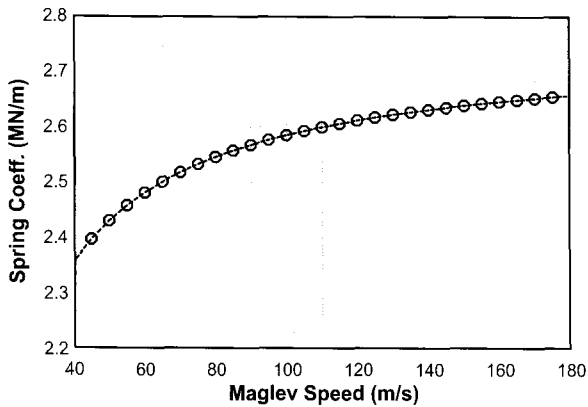


그림 16 초고속 Maglev 열차속도에 따른 수평방향 등가스프링계수  $f_x(V)$

$j$ -대차에 연결된 첫번째 SCM(첨자  $j$ )과 가이드웨이 사이의 상호작용력은 다음 식과 같이 주어진다.

$$F_{bz}^{jl} = \frac{1}{16} M_s^{jl} g + K_{ss} R_{rz}^{jl} \quad (4)$$

$$F_{bx}^{jl} = K_{mn} R_{rx}^{jl} \quad (5)$$

여기서,  $M_s^{jl}$ 는 하나의 SCM에 대한 스프링상 질량을 표시하고,  $R_{rx}$ ,  $R_{rz}$ 는 SCM과 가이드웨이 자유도 간의 횡방향, 연직방향의 상대변형이다. 그리고,  $K_{ss}$ 와  $K_{mn}$ 는 가이드웨이의 부상력과 복원력에 대한  $x$ ,  $z$  방향의 등가스프링계수로서 다음 식 (6)과 식 (7)과 같이 초고속 Maglev 열차의 속도( $V$ )에 따라 변화하는 등가스프링계수 값으로  $K_{xx} = f_z(V)$ ,  $K_m = f_x(V)$ 이다(Ohashi 등, 1998) (그림 15, 16).

$$f_z(V) = 5.43 \times \text{EXP}(-6.18/V) \quad (\text{MN/m}) \quad (6)$$

$$f_x(V) = 2.75 \times \text{EXP}(-14.5/V) \quad (\text{MN/m}) \quad (7)$$

여기서,  $\text{EXP}(\cdot)$ 는 엑스포넨셜 함수이다.

교량을 유한요소로 모형화 할 때에 식 (4)와 식 (5)로 주어지는 상호작용력을 유한요소의 절점에 가해지는 상호작용력으로 보간할 수 있으며, 절점에 가해지는 상호작용력에 대한 식으로부터 차량, 대차, SCM, 가이드웨이구조물의 자유도에 가해지는 하중,  $\{P_b(t)\}$ 에 의한 운동방정식을 구성할 수 있다. 따라서, 교량-열차 상호작용에 의한 교량의 운동방정식이 다음 식 (8)과 같이 구성된다.

$$[M_b]\{\ddot{q}_b(t)\} + [C_b]\{\dot{q}_b(t)\} + [L_b]\{q_b(t)\} = \{F_b(t)\} \quad (8)$$

여기서,  $[M_b]$ ,  $[C_b]$ ,  $[K_b]$ ,  $\{q_b(t)\}$ 는 각각 교량의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬, 변위벡터이고,  $\{F_b(t)\}$ 는 가이드웨이의 절점으로 전달되는 하중벡터이다.

위의 식 (4)~(8)로부터 3차원 해석모델에 대한 초고속 열차-가이드웨이 구조물 시스템의 운동방정식이 식 (9)와 같이 유도된다.

$$[M_{total}(t)]\{\ddot{q}(t)\} + [C_{total}(t)]\{\dot{q}(t)\} + [K_{total}(t)]\{q(t)\} = \{P_{total}(t)\} \quad (9)$$

풀어 쓰면,

$$\begin{bmatrix} M_b & 0 \\ O^T & M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_b(t) \\ \ddot{q}_v(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ O & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_b(t) \\ \dot{q}_v(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_p(t) & K_c(t) \\ K_c^T(t) & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_b(t) \\ q_v(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_b(t) \\ P_v(t) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $[M_{total}(t)]$ ,  $[C_{total}(t)]$ ,  $[K_{total}(t)]$ 는 각각 시간 경과에 따른 SCM의 위치에 따라 변화하는 초고속열차-가이드웨이 시스템의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며,  $\{P_{total}(t)\}$ 는 하중 벡터이고,  $\{q(t)\}$ 는  $\langle q_b(t) \ q_v(t) \rangle^T$  가이드웨이구조물의 자유도와 SCM, 대차, 열차 차량의 자유도의 합으로 구성되는 벡터이다.  $[M_{total}(t)]$ 는 가이드웨이 구조물에 대한 질량행렬( $[M_b]$ )과 초고속열차의 자유도에 대한 질량행렬( $[M_v]$ )로 구성된다.  $[C_{total}(t)]$ 는 교량에 대한 감쇠행렬( $[C_b]$ )과 열차에 대한 감쇠행렬( $[C_v]$ )로 구성된다.  $[K_{total}(t)]$ 는 마찬가지로 교량에 대한 강성행렬( $[K_b]$ ), 초고속열차에 대한 강성행렬( $[K_v]$ ), 부상력 및 안내력 등가스

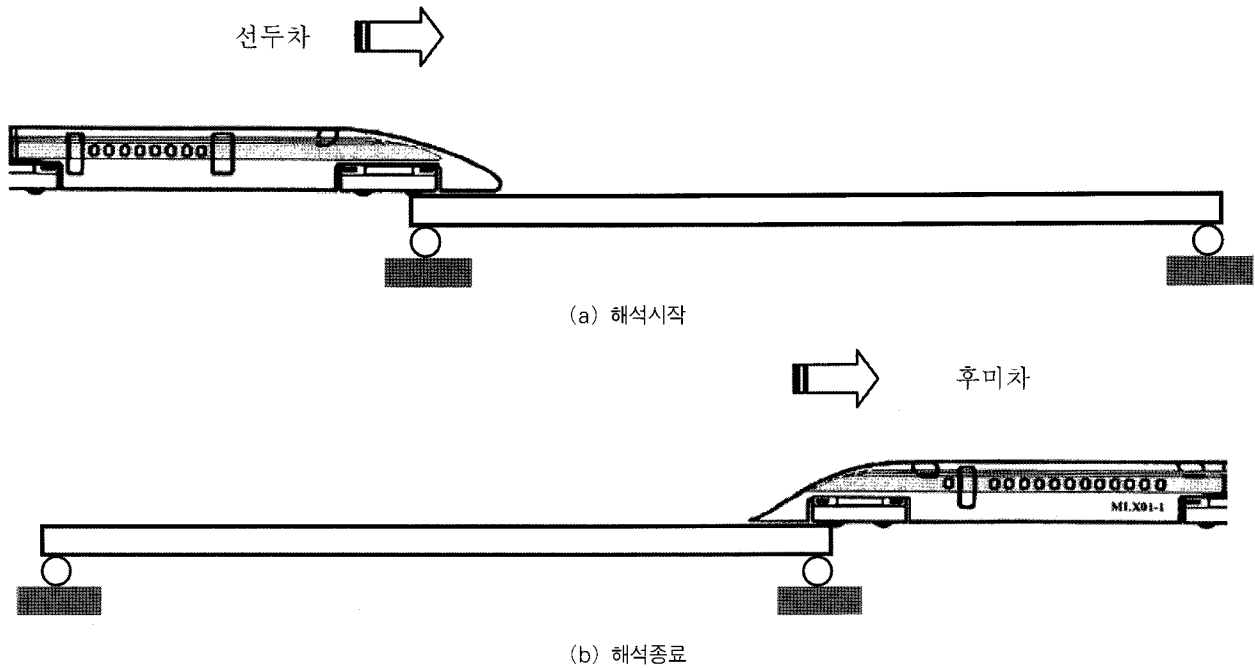


그림 17 총해석 수행시간

프링에 대한 강성행렬( $[K_p(t)]$ )로 구성된다. 그리고, 하중 벡터  $\{P_{total}(t)\}$ 는 가이드웨이에 대한 하중벡터( $[P_b(t)]$ )와 초고속열차에 대한 하중벡터( $[P_v(t)]$ )로 구성된다. SMC의 자유도와 가이드웨이 구조물의 자유도 간의 상관관계로부터  $[K_c(t)]$ 가 구성되어 전체 초고속열차-가이드웨이 구조물의 시스템 행렬의 구성이 완성된다.

본 연구에서는 식 (10)에서와 같이 가이드웨이 구조물의 자유도와 초고속열차의 자유도의 연관성이 존재하는 시스템행렬을 직접 구성하여 해석한다. 따라서, 기존의 방법에서의 반복해석 과정이 필요없고, 이러한 연관성은 각 시간단계에서 대차의 위치에 따라서 다르게 구성되므로, 구성되는 시스템행렬을 컴퓨터의 기억장치에 효율적으로 저장하기 위해서 스카이라인 알고리즘(skyline algorithm)을 적용한다. 수치해를 얻기 위해서 본 연구에서는 직접적 분법의 하나인 Newmark의  $\beta$ 방법을 사용한다. 해의 무조건 안정(unconditionally stable)을 확보할 수 있는 평균 가속도법(average acceleration method,  $r=1/2, \beta=1/4$ )을 사용한다. 총 해석 수행시간은 그림 17과 같이 Maglev 열차의 선두차의 통과 시작부터 후미차가 통과 종료까지로 한다.

## 6. 수치예제해석

본 연구에서 제안하는 3차원 초고속 Maglev 열차-가이드웨이 구조물 해석시스템을 이용하여 실제 가이드웨이

구조물을 해석하고 적용성의 검증 및 고찰을 수행한다.

실제 일본에 건설된 가이드웨이 구조물에서의 교량구조물은 37.8m의 단순지지 PC 박스거더교량으로 구성되어 있으며, 이러한 단순지지 교량구조물을 연속적으로 연결하여 전체 교량부분을 구성하게 된다. 그리고, 이러한 교량구조물 상에 가이드웨이가 구성되는데, 일본에서는 역 T형 방식의 측벽을 가설하고 측벽에 초고속 Maglev 열차

표 3 해석대상 교량의 재료물성치

구분	단위	값	
콘크리트	탄성계수	kN/m <sup>2</sup>	3×10 <sup>7</sup>
	포와송비	-	0.15
	단위중량	t/m <sup>3</sup>	2.5
감쇠비	%	2.4	

표 4 측벽보의 구조제원

항목	단위	값
탄성계수	kN/m <sup>2</sup>	3.3×10 <sup>7</sup>
단면적	m <sup>2</sup>	0.4461
수평방향 단면2차모멘트	m <sup>4</sup>	0.0172
연직방향 단면2차모멘트	m <sup>4</sup>	0.0710
코일 등 부가사하중	kN/m	2.533

표 5 모드별 공진임계속도

Mode 번호	공진임계속도(km/h)
1	255
2	316
3	764
4	779
5	863

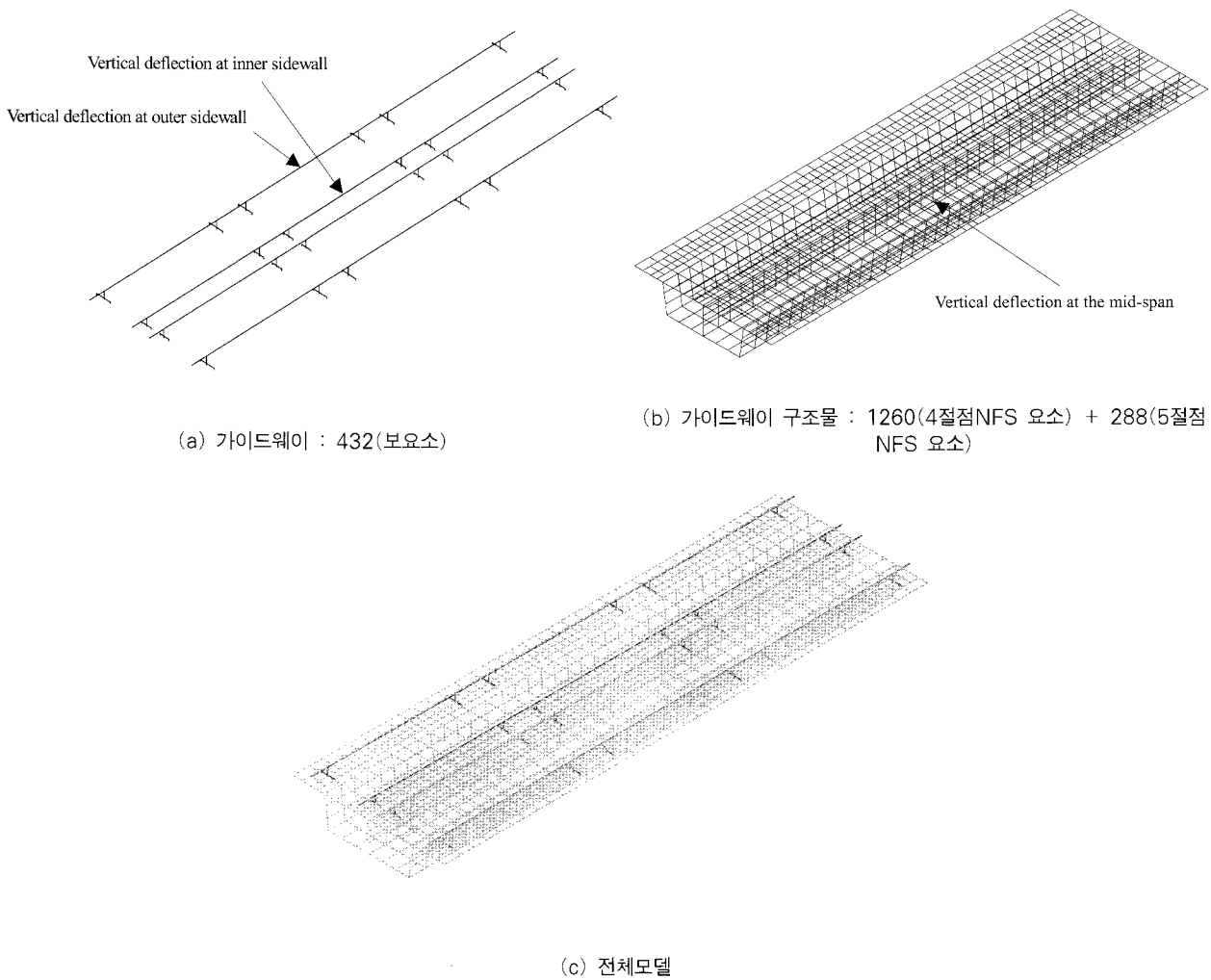


그림 18 가이드웨이 구조물의 유한요소 모형 및 해석결과 산출 위치

의 부상, 안내, 추진에 이용되는 코일들을 설치하도록 하고 있다. 본 수치예제해석에서는 교량구조물 상에 12.6m의 측벽을 종방향으로 3개 배치한다. 해석에 이용되는 가이드웨이 교량구조물의 제원과 측벽보의 구성제원은 표 3, 표 4와 같다(Sogabe 등, 2003). 초고속 Maglev 열차는 앞에서 설명한 일본의 MLX-01 열차로서 3대 편성, 5대 편

성 구성이 있는데, 본 수치예제해석에서는 5대 편성 열차에 대하여 해석을 수행한다.

해석 결과로서는 교량구조물의 경간 중앙부, 그리고 열차가 통과하는 가이드웨이의 중앙부에 위치하는 내외측 측벽의 경간 중앙부에서의 연직변위를 각각 추출한다(그림 18). 그림 19에서는 해석프로그램을 이용하여 구한 가

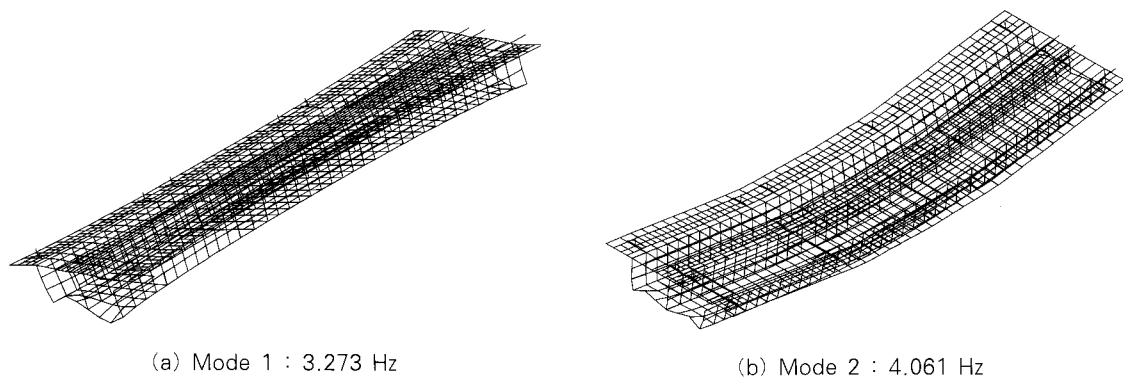


그림 19 가이드웨이 구조물의 고유진동모드와 고유진동수(계속)

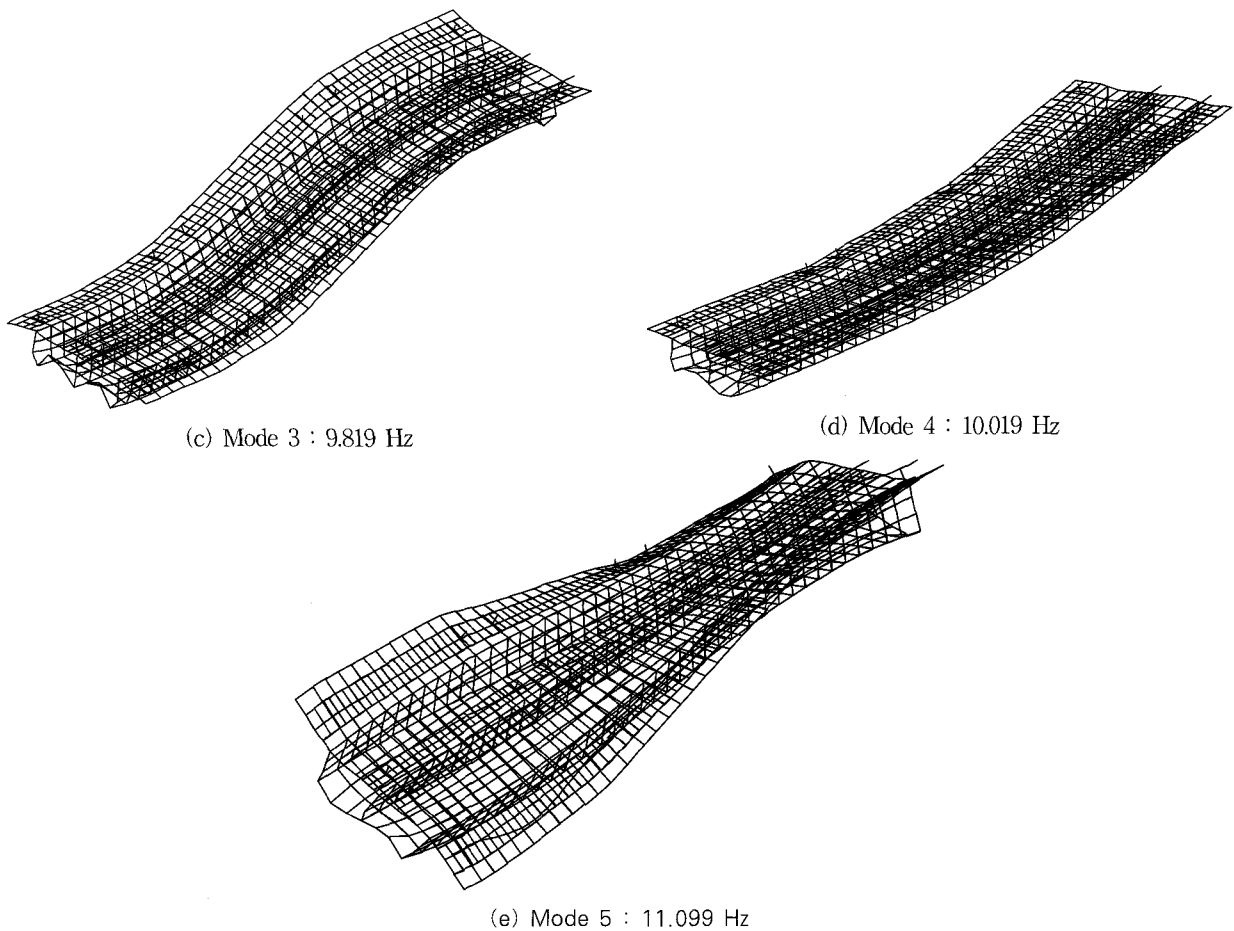


그림 19 가이드웨이 구조물의 고유진동모드와 고유진동수

이드웨이 구조물의 고유진동모드 및 고유진동수를 보이고 있다. 이러한 가이드웨이 구조물의 고유진동수는 초고속 Maglev 열차 통과시의 공진문제와 관련되는데, 가이드웨이 구조물의 공진을 일으키는 열차속도, 즉, 공진임계속도 ( $V_{cr}$ )와 구조물의 고유진동수의 관계는 다음 식과 같다.

$$V_{cr} = 3.6 \times \omega \times d \quad (\text{km/h}) \quad (11)$$

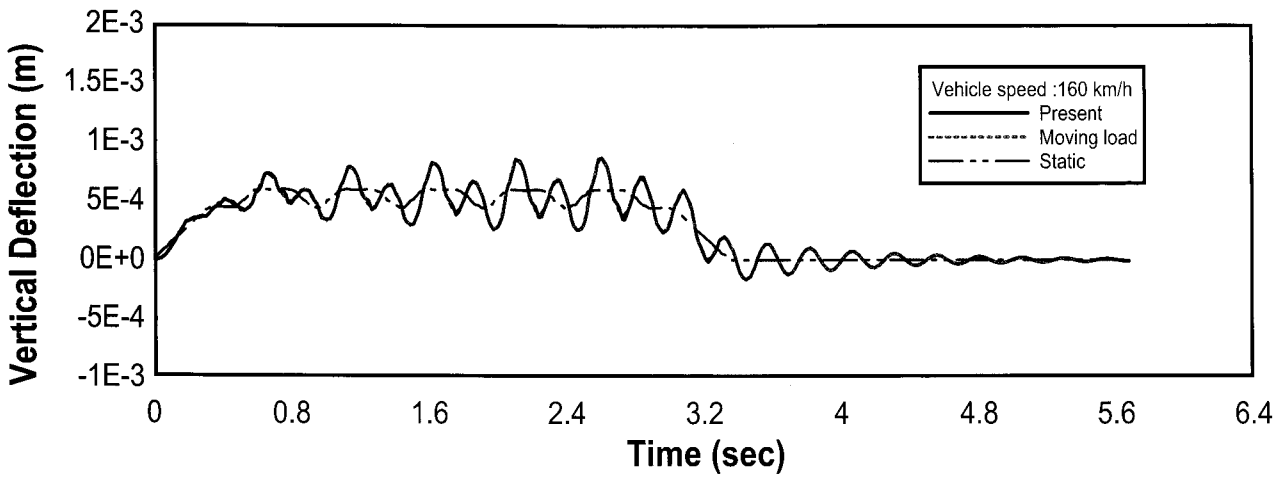
여기서,  $\omega$ 는 구조물의 고유진동수(Hz)이고,  $d$ 는 유효 하중 타중간격(m)으로서 본 해석에서는 21.6m이다. 위의 식에 의한 구한 모드별공진임계속도는 표 5와 같다.

초고속 Maglev 열차는 출발에서부터 160km/h의 속도까지는 차륜으로 구동하며, 160km/h 이상의 속도부터는 자기부상력을 얻어서 자기력에 의해서 구동하게 된다. 따라서, 해석 대상이 되는 초고속열차의 속도는 160, 300, 550km/h으로 한다. 각 열차속도에 대해서 해석을 수행하여 이동하중해석, 정적해석 결과와 비교하며, 그림 20에서 22까지는 이러한 해석결과를 비교하고 있다.

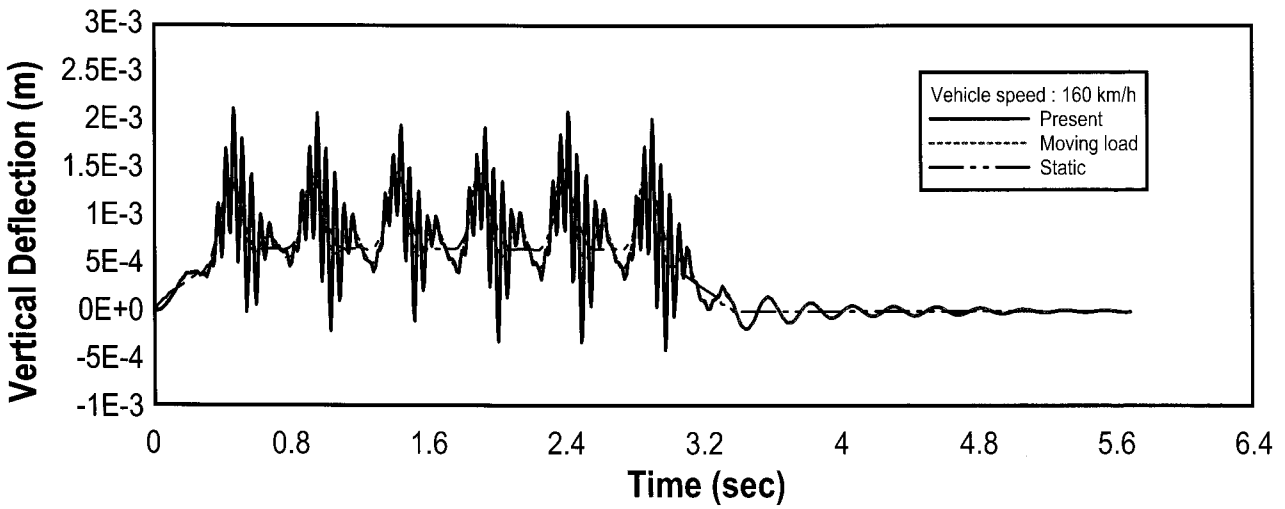
열차속도 160km/h의 해석결과와 경우에는 일반적인 기

존의 열차에 의한 경우와 유사하게 측벽의 조도, 열차 진동 등에 의해 민감한 진동현상이 발생하고 있음을 알 수 있다(그림 20). 열차속도 300km/h의 해석결과와 경우에는 열차속도가 Mode 2에 대한 공진임계속도 316km/h에 근접하여 있기 때문에 공진현상이 발생하고 있음을 교량 공간 중앙부의 해석결과를 통하여 알 수 있다(그림 21). 그리고, 초고속열차의 최고속도라고 할 수 있는 550km/h의 해석결과와 경우에는 본 연구의 해석결과와 이동하중해석의 결과의 차이가 나타남을 알 수 있다(그림 22).

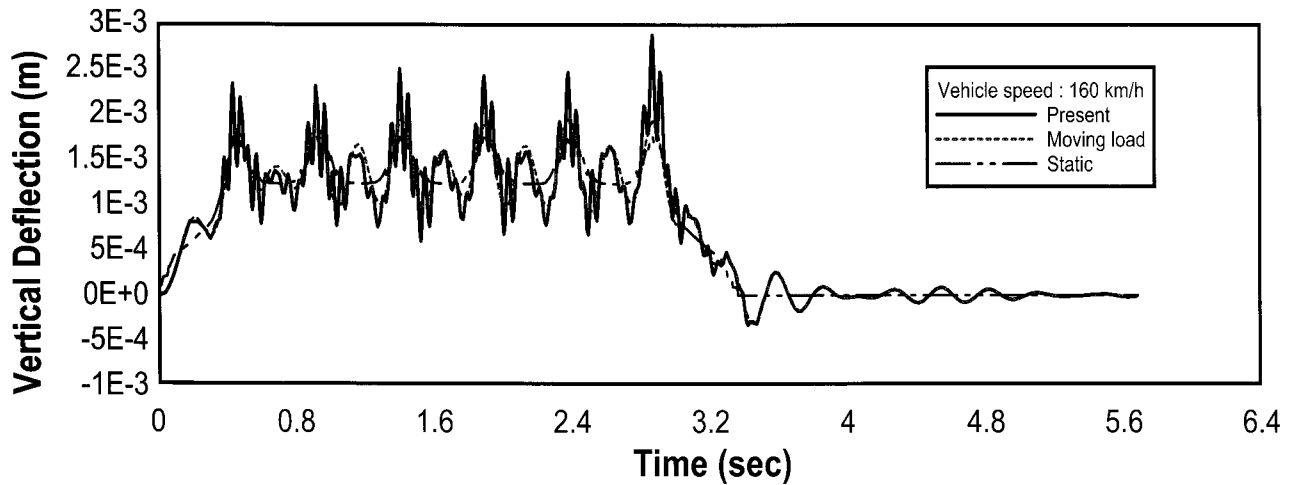
전체적으로 해석결과를 비교하여 볼 때, 본 연구의 해석결과와 이동하중해석에 의한 해석결과는 정적해석에 의한 해석결과와는 뚜렷한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 교량 공간 중앙부에서의 해석결과는 본 연구의 해석결과와 이동하중에 의한 해석결과는 크게 차이가 발생하지 않는다. 그러나, 내외측 측벽보의 공간 중앙부에서는 두 해석결과와의 차이가 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에 의해서 가이드웨이의 중요한 구조물인 측벽보의 정확한 동적거동의 해석이 가능함을 알 수 있다.



(a) 교량 경간의 중간부

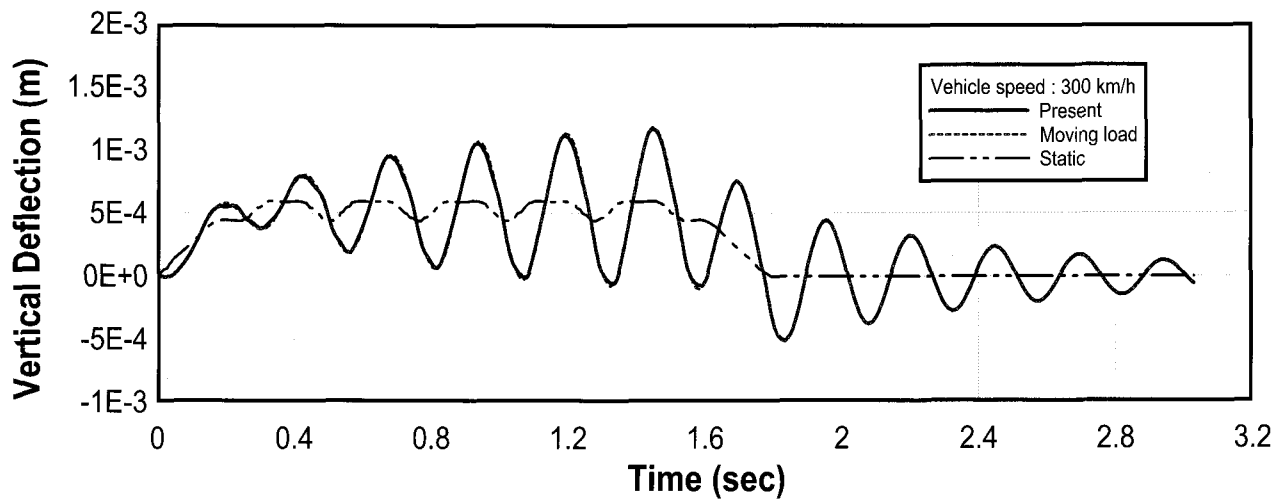


(b) 내측 측벽보의 경간 중간부

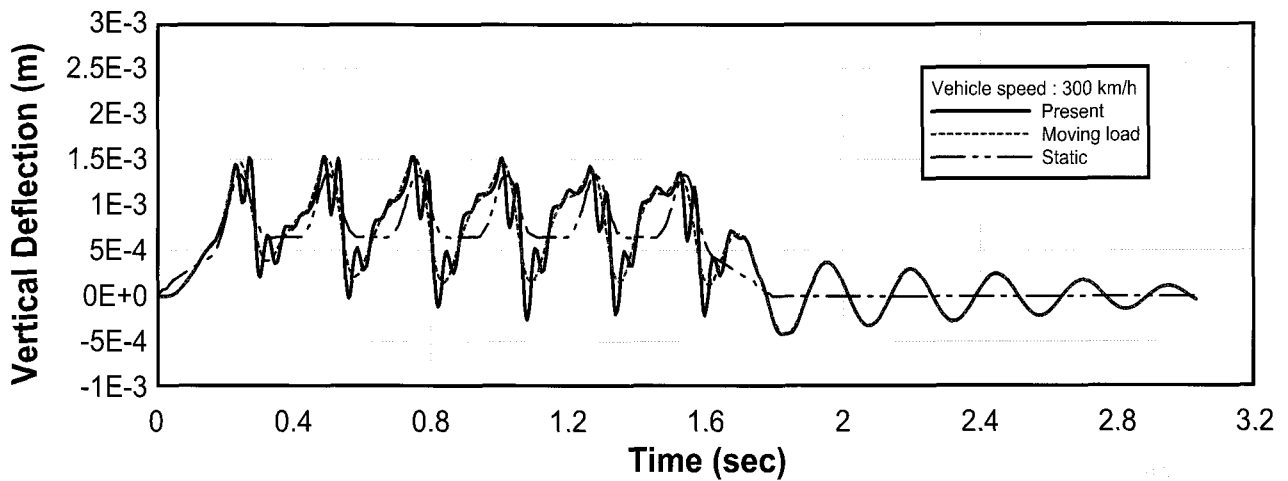


(c) 외측 측벽보의 경간 중간부

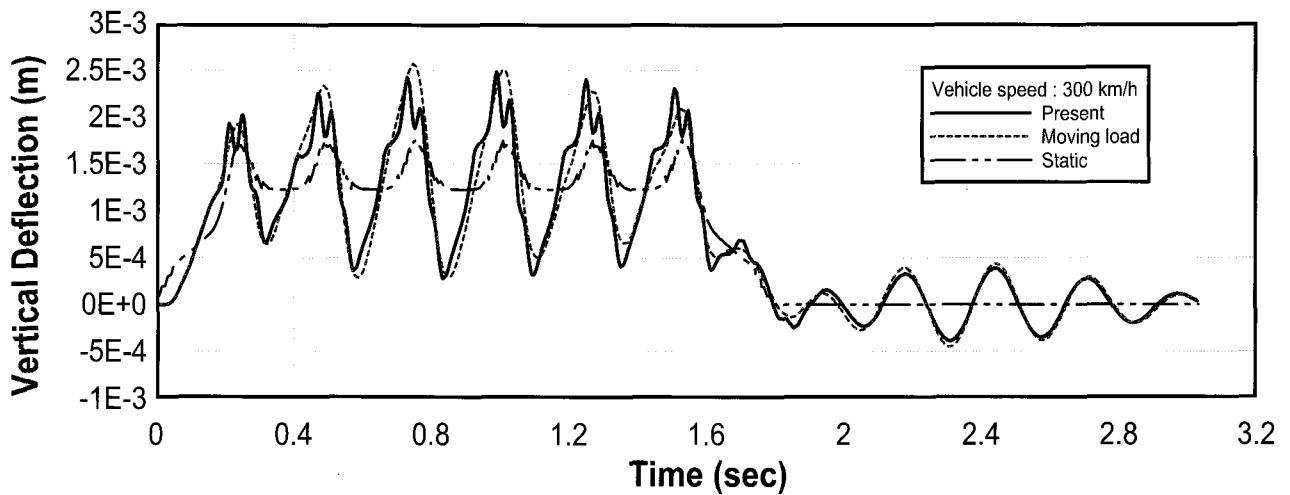
그림 20 연직변위의 시간이력(V=160km/h)



(a) 교량 경간의 중간부



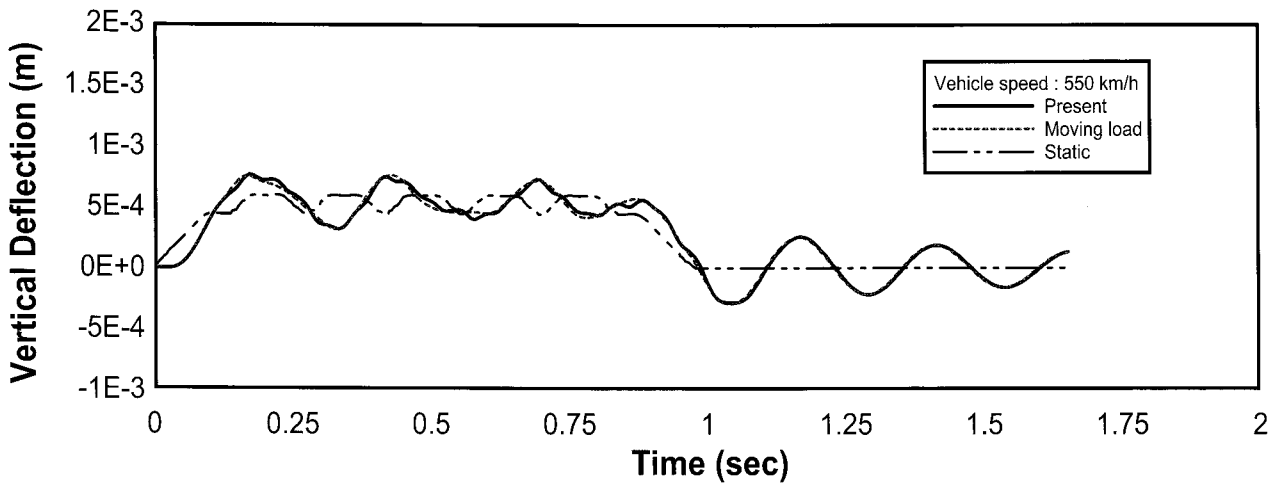
(b) 내측 축벽보의 경간 중간부



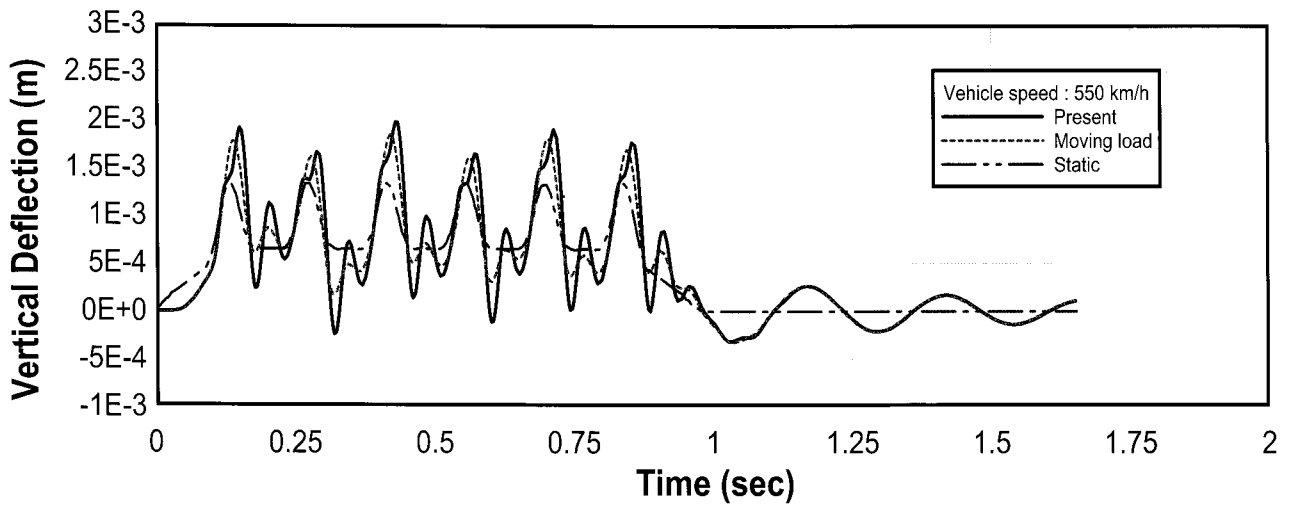
(c) 외측 축벽보의 경간 중간부

그림 21 연직변위의 시간이력(V=300km/h)

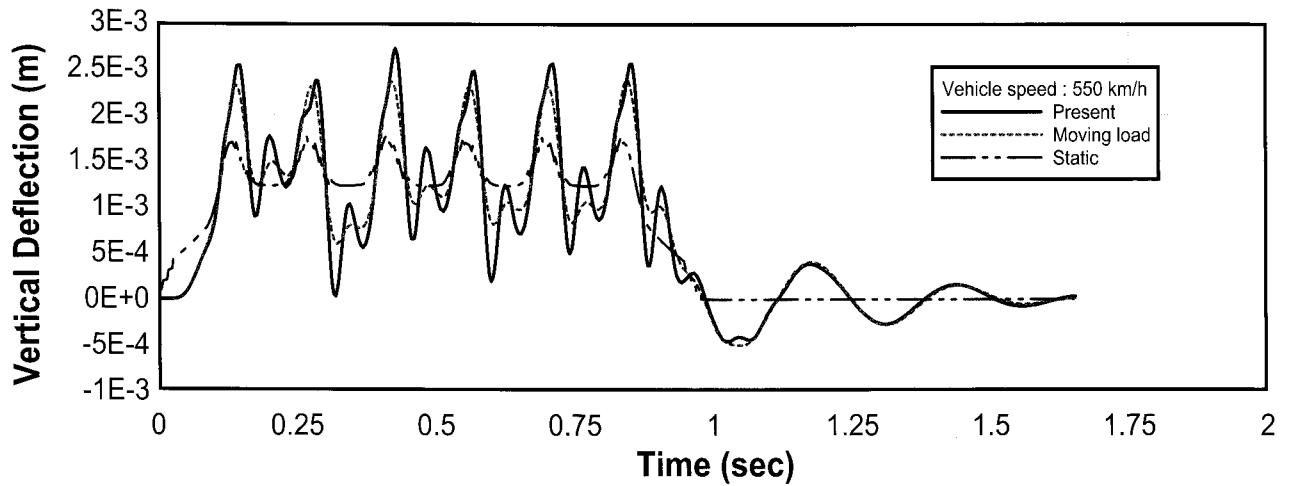




(a) 교량 경간의 중간부



(b) 내측 측벽보의 경간 중간부



(c) 외측 측벽보의 경간 중간부

그림 22 연속변위의 시간이력(V=550km/h)

## 7. 결 론

본 연구에서는 초고속 Maglev 열차-가이드웨이 상호작용을 고려한 새로운 완전 3차원 유한요소해석모델을 제안하였으며, 이를 적용한 동적구조해석 시스템을 개발하였다. 수치예제해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 3차원 교량의 모형화 입력 및 컴퓨터에 의한 계산에 있어서 많은 시간을 필요로 하지만, 구체적인 구조부재의 동적거동 분석이 가능하다. 변절점 NFS셀요소를 사용하여 모형화 함으로써 가이드웨이의 측벽보와 하부구조물과의 연결부에 대한 효율적인 모형화가 가능하게 되었으며, 가이드웨이 구조물을 구성하는 구체적인 구조요소들의 동적거동에 대한 정확한 유한요소해석이 가능하게 되었다.
- (2) 단순지지 PC 박스거더교량의 해석결과를 통해서 볼 때, 이동하중에 의한 해석결과와 열차-교량 상호작용을 고려한 해석결과는 가시적으로 차이가 발생하므로, 정확한 가이드웨이 구조물의 동적거동 해석을 위해서는 본 연구에서 제안하는 3차원 유한요소해석 시스템을 적용하여야 한다.

일본이나 독일에서는 초고속 Maglev 열차 운송 시스템이 상용화 단계 이전까지 개발이 이루어진 상태로서 가이드웨이 구조물의 시험적인 구간이 건설된 바 있으며, 국내에서도 관련 연구가 진행되어 시험적인 건설이 이루어질 전망으로 있다. 따라서, 향후, 국내에서의 초고속 Maglev 열차의 가이드웨이 구조물의 가설시에, 본 연구에서 개발된 유한요소해석 시스템을 적용하면 가설하는 교량의 동적거동의 특성 파악, 사용성 및 안정성 등의 분석, 피로수명 분석 등을 수행할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김선호 (1997) 철도시스템의 이해, 자작아카데미.
2. 이태열(2002), 직접수정된 비적합모드를 가진 평면셀 요소의 개발 및 셀구조물의 해석, 박사학위 논문, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과.
3. Azakami, M. (1996) The Development of Maglev Bogie System on the First Train Set for Yamanashi Test Line, *RTRI Report*, Vol.10, No.1, pp.11-16.
4. Garg, V.K. and Dukkipati, R.V. (1984), *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, Canada.
5. Higashi, K., Ohashi, S., Ohsaki, H., and Masada, E. (1999) Magnetic Damping of the Electrodynamic Suspension-Type Superconducting Levitation System, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.127, No.2, pp.49-60.
6. Seino, H. and Miyamoto, S. (2006) Long Term Durability and Special Running Tests on the Yamanashi Maglev Test Line, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.47, No.1, pp.1-5.
7. Matsudaira, Y. and Takao, K. (1994) Development of Bodies and Nose-shape of Head Cone for Vehicles on Yamanashi Test Line, *RTRI Report*, Vol.8, No.10, pp.7-12.
8. Matsuura, A., Hashimoto, S., and Furukawa, A. (1994) Relation between Riding Quality of Maglev Vehicle and Guideway Construction Accuracy, *Journal of Civil Engineers (JSCE)*, No.482/IV-22, pp.67-76.
9. Ohashi, S., Ohsaki, H., and Masada, E. (1998) Equivalent Model of the Side Wall Electrodynamic Suspension System, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.124, No.2, pp.95-105.
10. Ohashi, S., Ohsaki, H., and Masada, E. (2000) Running Characteristics of the Superconducting Magnetically Levitated Train in the Case of Superconducting Coil Quenching, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.130, No.1, pp.63-73.
11. Sogabe, M., Matsumoto, N., Tanabe, M., Fujino, Y., Wakui, H., and Ueno, M. (2003) A Study on Dynamic Interaction Analysis for Maglev vehicle and Guideway Structures, *Journal of Civil Engineers (JSCE)*, No.731/I-63, pp.119-134.
12. Takao, K., Yoshimura, M., Tagawa, N., Matsudaira, Y., Nagano, K., and Inoue, A. (1996) Development of the Superconducting Maglev Vehicles on the Yamanashi Test Line, *RTRI Report*, Vol.10, No.1, pp.5-10.
13. Yoshioka, H. (1988) Dynamic Model of Maglev Vehicle, *RTRI Report*, Vol.2, No.6, pp.17-22.
14. Yoshioka, H., Suzuki, E., Seino, H., Azakami, M., Oshima, H., and Nakanishi, T. (1998) Characteristics of the Dynamics of the MLX01 Yamanashi Maglev Test Line Vehicles, *RTRI Report*, Vol.12, No.8, pp.21-34. 