

Special Theme

초고속 자기부상열차 가이드웨이구조물의 동적해석시스템 개발

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



| 송 명 관 |

(주)유신코퍼레이션 구조본부 기술개발실 차장, 공학박사

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.

1. 서론

초고속교통수단으로서의 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 가정 한 유인 5차량 편성 MLX-01에 의해 552km/h의 속도기록을 달성하였다. 또한, 2003년에는 유인 3차량 편성 MLX-01에 의해 581km/h의 최고속도를 기록하였다(Seino 등, 2006, Sogabe 등, 2003)(그림 2).

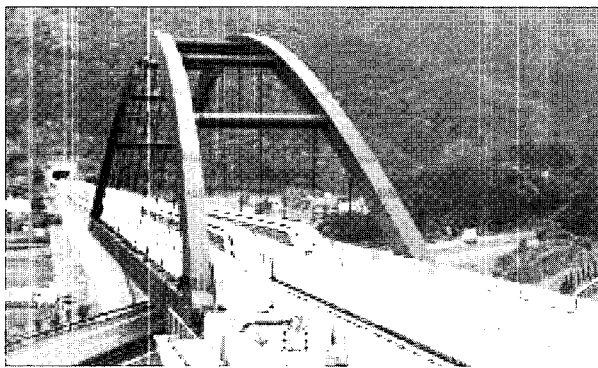


그림 1. 야마나시 시험선

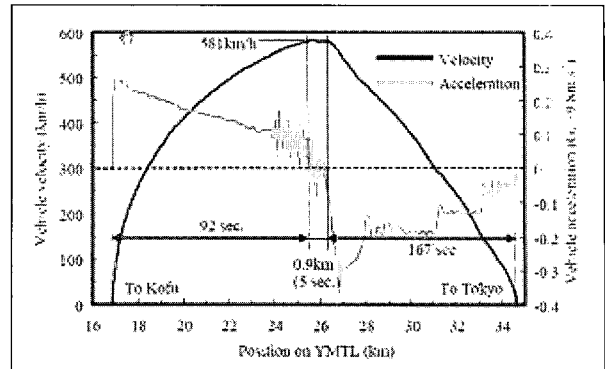
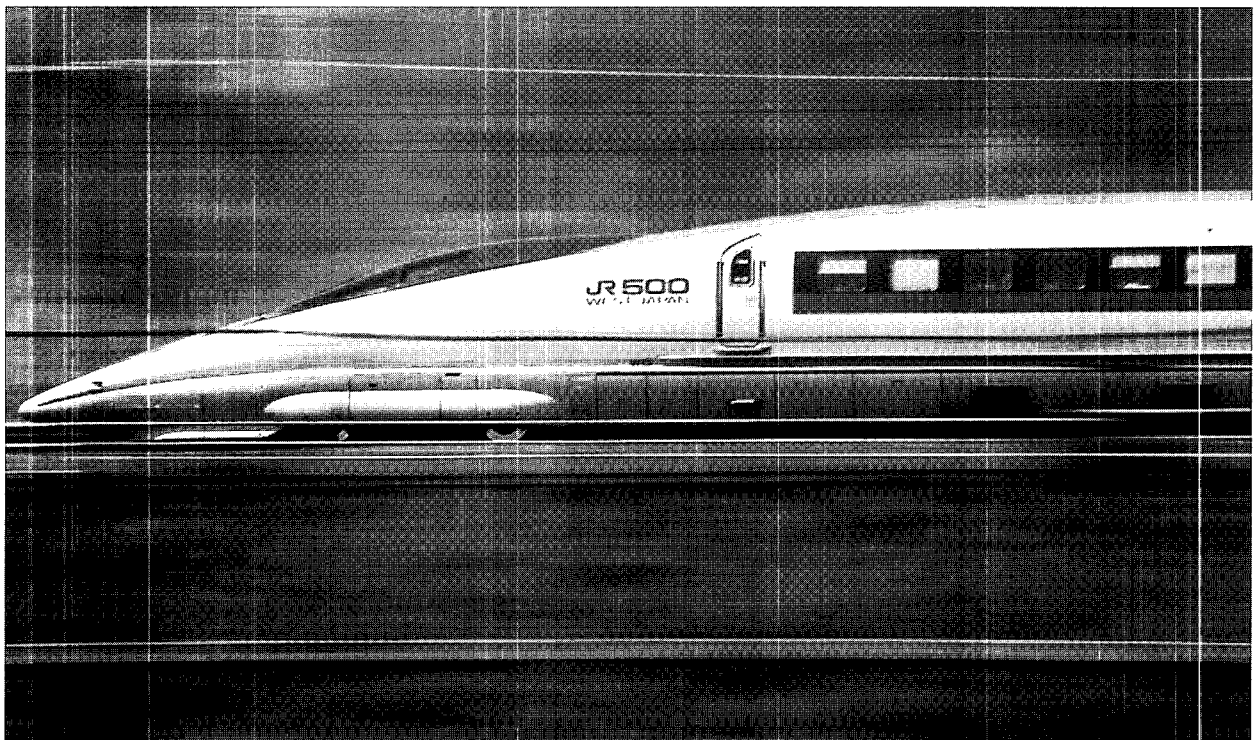


그림 2. MLX-01 열차의 581km/h 속도 이력

본 연구에서는 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호작용력을 고려하고, 새로운 3차원 Maglev 열차모델 및 가이드웨이 구조물의 모형화를 통한 Maglev 열차-가이드웨이 구조물의 상호작용해석모델을 제안하여 유한요소해석프로그램을 개발하고 수치예제해석에 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 등가스프링모델을 이용하여 모형화한다.

2. Maglev 열차 모델

일본에서 개발된 초고속 Maglev 열차 MLX-01의 제1편성 차량은 3량 편성으로서, 3량의 차체와 4량의 대차의 연결 방식이다(그림 3). 여러가지 선두형상보정에 대하여 항공기 분야에서 실적이 있는 CFD(전산유체역학) 해석을 이용하여 시뮬레이션과 풍속실험을 행하여 공기저항, 압력 소음, 터널 공기압파의 저감에 유효한 선두형상을 선정하였으며, 저항 계수 Cd는 0.1이하이다. 더블커스프(double-cusp) 형상은 최후미부의 경계층박리의 억제에 주안점을 두었고, 에어로 웨지(aero-wedge)형상은 공기압파의 저감과 의장품설치 공간을 고려한 것이다. 초전도자석의 자계로부터 객실을 보호하기 위하여 차체에 자기실드를 설치하였다 (Takao 등, 1996).

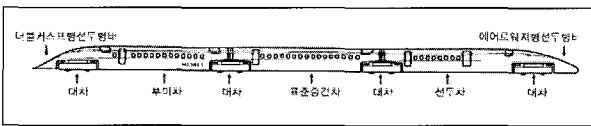
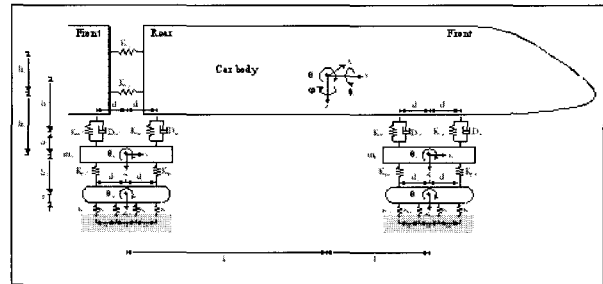


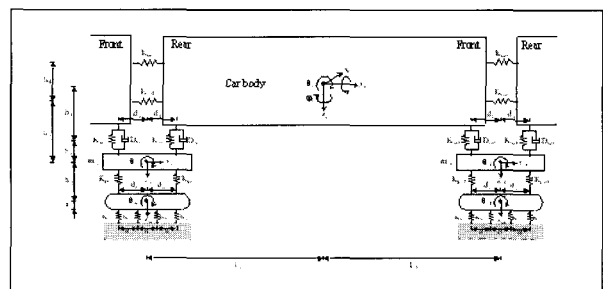
그림 3. 초고속 Maglev 열차 MLX-01

제안하는 초고속 Maglev 열차의 해석모델은 차체의 6자유도, 대차의 6자유도, SCM의 3자유도로서, 총 24자유도를 갖는 해석모델이다(그림 4) (Yoshioka, 1988). 차체의 6자유도는 각각, 차체의 슬라이딩, 스웨잉, 바운싱, 피칭, 롤링, 요잉($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)에 대한 자유도이며, 대차의 6자유도는 각각 대차의 슬라이딩, 스웨잉, 바운싱, 피칭, 롤링, 요잉($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)에 대한 자유도이며, SCM의 3자유도는 양쪽 SCM과 프레임 결합체의 바운싱, 피칭, 롤링(z, θ_x, θ_y)에 대한 자유도이다. 따라서, Lagrange의 운동방정식을 적용하여 열차 차량 1대에 대한 운동방정식의 유도가 가능하고, 이를 이용하여 다련열차(multi-link train)의 운동방정식의 유도가 가능하다(Matsudaira 등, 1994; Ohashi 등, 1998; Ohashi 등, 2000; Takao 등, 1996).

(a) 선두차



(b) 표준중간차



(c) 후미차

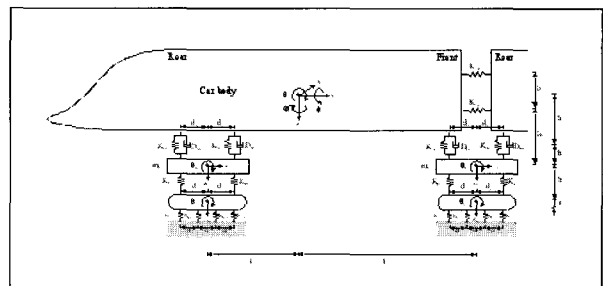


그림 4. 초고속 Maglev 열차의 3차원 모형

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 앞차량과 뒷 차량 사이에 대차가 연결된 다련 열차이다. 따라서, 대차의 거동은 앞뒤 차량의 거동에 영향을 받게 된다. 선두차, 표준중간차, 후미차에 대한 운동방정식을 이용하여 다련열차의 시스템행렬(질량행렬, 강성행렬, 감쇠행렬, 하중벡터)의 구성이 가능하다.

3. 가이드웨이 구조물(guideway structure) 모델

초고속 Maglev 열차의 가이드웨이 구조물은 그림 5와 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 6과 같이 가이드웨이 구조물의 3차원 모형을 위해 교량과 측벽구조물을 구성하는 측벽보, 스프링 등 가이드웨이 구조물의 각 구조요소들을 모형화 할 수 있는 유한요소를 사용한다. 본 연구에서는 SCM과 측벽보 사이의 조도성분을 고려한다. 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 에르고딕과정(stationary and ergodic process), 즉, 궤도방향 x축으로의 랜덤함수(random function)로 고려될 수 있으며, 주로 PSD 함수에 의해서 특성화된다. PSD함수는 파수(wave number, γ)의 함수이며, 이 때, 파수는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{VT} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

여기서, λ 는 파장(wave length), T는 파의 주기(period), V는 차량의 속도(speed), ω 는 파의 각진동수(circular frequency)이다.

일본의 철도종합기술연구소(RTRI)에서는 실제 건설된 야마나시 시험선의 선형측량을 통해서 조도산정을 위한 PSD 함수를 제안하였다 (Matsuura 등, 1994). 본 연구에서는 이러한 PSD함수를 이용하여 조도성분을 산정하여 해석에 적용한다. 0의 평균값을 갖는 정상가우스랜덤과정(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, x는 궤도방향 좌표, N은 고려하는 스펙트럼의 수, β 는 랜덤수 산출 과정에 의해서 산정되는 값으로서 0에서 2π 사이의 값을 갖는다. 본 연구에서 N은 1024이고, λ 의 범위는 최소 1.8m에서 최대 1000m로 가정한다 (Garg 등, 1984).

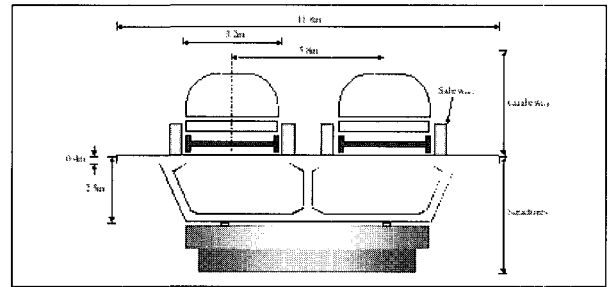


그림 5. 가이드웨이 구조물의 구성

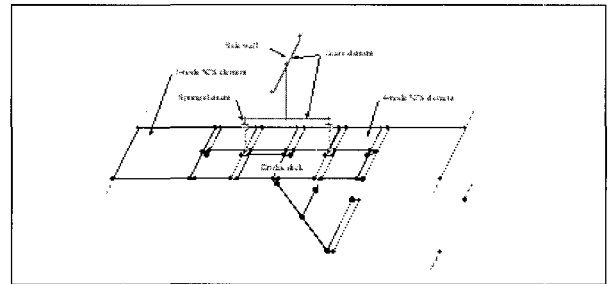


그림 6. 가이드웨이 구조물의 3차원 모형화

4. Maglev 열차-가이드웨이 상호작용

초고속열차가 가이드웨이 상을 통과할 시에 SCM과 가이드웨이의 상호작용에 의해서 SCM과 가이드웨이 사이에서는 초고속열차의 정적하중에 부가하여 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 SCM이 연결되어 있다. j-대차에 연결된 첫번째 SCM(첨자 j)과 가이드웨이 사이의 상호작용력은 다음 식과 같이 주어진다.



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

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

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

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

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

여기서, EXP는 엑스포넨셜 함수이다.

교량을 유한요소로 모형화 할 때에 식 (4)와 (5)로 주어지는 상호작용력을 유한요소의 절점에 가해지는 상호작용력으로

로 보간할 수 있으며, 절점에 가해지는 상호작용력에 대한 식으로부터 차량, 대차, SCM, 가이드웨이구조물의 자유도에 가해지는 하중, $\{F_b(t)\}$ 에 의한 운동방정식을 구성할 수 있다. 따라서, 교량-열차 상호작용에 의한 교량의 운동방정식이 다음 식 (8)과 같이 구성된다.

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

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 초고속열차-가이드웨이 구조물 시스템의 운동방정식이 식 (9)와 같이 유도된다.

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

5. 수치예제해석

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

조물을 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. 본 수치예제해석에서는 교량구조물 상에 12.6m의 측벽을 종방향으로 3개 배치한다. 해석에 이용되는 가이드웨이 교량구조물의 제원과 측벽보의 구성재원은 표 1, 표 2와 같다(Sogabe 등, 2003). 초고속 Maglev 열차는 앞에서 설명한 일본의 MLX-01 열차로서 3대 편성, 5대 편성 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 7). 열차속도 550km/h에 대해서 해석을 수행하여 이동하중해석, 정적해석 결과와 비교하였으며, 그림 8에 이러한 해석결과를 비교하고 있다. 이러한 해석결과를 볼 때, 이동하중해석의 결과와 차이가 나타남을 알 수 있다. 전체적으로 해석결과를 비교하여 볼 때, 본 연구의 해석결과와 이동하중해석에 의한 해석결과는 정적해석에 의한 해석결과와는 뚜렷한 차이가 발생하고 있음

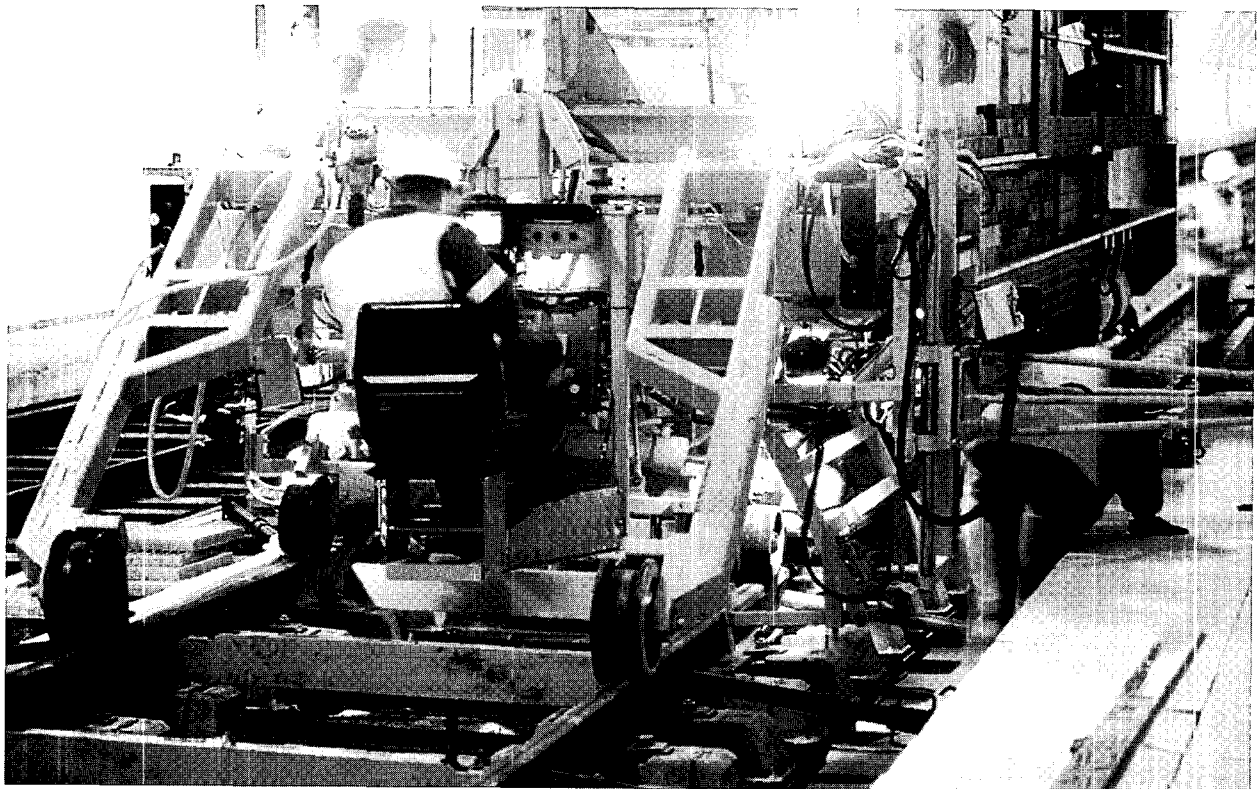
을 알 수 있다. 그리고, 교량 경간 중앙부에서의 해석결과는 본 연구의 해석결과와 이동하중에 의한 해석결과는 크게 차이가 발생하지 않는다. 그러나, 내외측 측벽보의 경간 중앙부에서는 두 해석결과의 차이가 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에 의해서 가이드웨이의 중요한 구조물인 측벽보의 정확한 동적거동의 해석이 가능함을 알 수 있다.

표 1. 해석대상 교량의 재료물성치

구 분		단 위	값
콘크리트	탄성계수	kN/m ²	3×10 ⁷
	포와송비	-	0.15
	단위중량	t/m ³	2.5
감쇠비		%	2.4

표 2. 측벽보의 구조제원

항 목	단 위	값
탄성계수	kN/m ²	3.3×10 ⁷
단면적	m ²	0.4461
수평방향 단면2차모멘트	m ⁴	0.0172
연직방향 단면2차모멘트	m ⁴	0.0710
코일 등 부가사하중	kN/m	2533



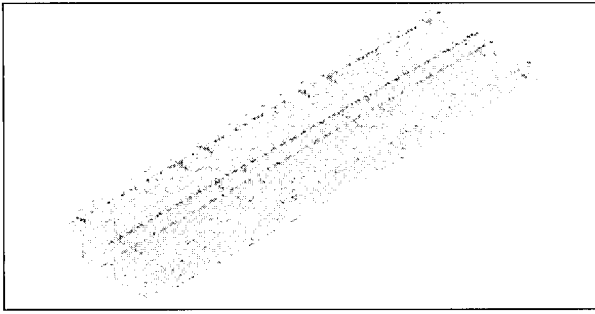
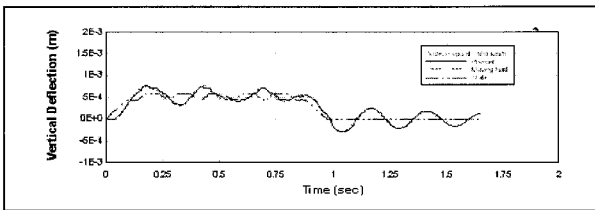


그림 7. 해석모델

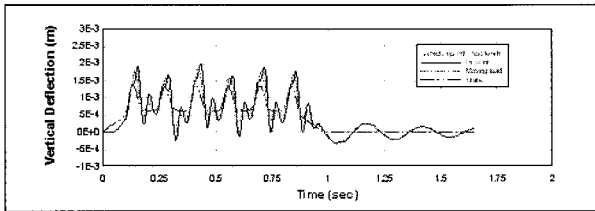
6. 결론

본 연구에서는 초고속 Maglev 열차-가이드웨이 상호작용을 고려한 새로운 완전 3차원 유한요소해석모델을 제안하였으며, 이를 적용한 동적구조해석 시스템을 개발하였다. 단순지 PC 박스거더교량의 해석결과를 통해서 볼 때, 이동하중에 의한 해석결과와 열차-교량 상호작용을 고려한 해석 결과는 가시적으로 차이가 발생하므로, 정확한 가이드웨이 구조물의 동적거동 해석을 위해서는 본 연구에서 제안하는

(a) 교량 경간의 중간부



(b) 내측 측벽보의 경간 중간부



(c) 외측 측벽보의 경간 중간부

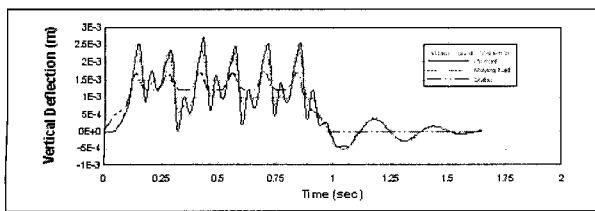


그림 8. 연직변위의 시간이력(V=550km/h)

3차원 유한요소해석 시스템을 적용하여야 한다. 향후, 국내에서의 초고속 Maglev 열차의 가이드웨이 구조물의 가설 시에, 본 연구에서 개발된 유한요소해석 시스템을 적용하면 가설하는 교량의 동적거동의 특성 파악, 사용성 및 안정성 등의 분석, 피로수명 분석 등을 수행할 수 있을 것이다. ☞

■ 참고문헌

Garg, V.K. and Dukkipati, R.V. (1984), Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, Canada.

Seino, H. and Miyamoto, S. (2006) Long Term Durability and Special Running Tests on the Yamanashi Maglev Test Line, Quartely Report of RTRI, Vol.47, No.1, pp.1-5.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Yoshioka, H. (1988) Dynamic Model of Maglev Vehicle, RTRI Report, Vol.2, No.6, pp.17-22.