침목 간격에 따른 자기부상 시험선로 가이드웨이의 동적응답분석 및 충격계수산정

Impact factor and Dynamic response of Daejon Maglev Guideway under the Sleeper Conditions

홍유나* 정원석** 여인호***
Hong, Yu-Na Chung, Won-Seok Yeo, In-Ho

ABSTRACT

Maglev System is expected to be a new public transportation for future because of its special characteristics. Sleepers of railway role on transferring the lateral load to guideway for Maglev and controlling the distance between rails. Variation of distance of sleepers can affect dynamic responses for maglev guideway. In this paper, Daejon maglev guideway is analyzed to find proper tie spacing of a maglev system. The analysis included using a maglev trainload and also the dead load as the primary forces on bridges. Not only the dynamic behavior of bridges is investigated under sleeper conditions, but also impact factor about vertical displacement on the guideway is produced. This guideway is analyzed in four cases followed by changing spacing of sleeper and then obtained dynamic characteristics such as displacements, acceleration and impact factor by Finite Element Analysis.

1. 서 론

자기부상열차는 전자기력으로 부상하고 추진하는 시스템으로써 일반 철도와 달리 차량과 궤도사이에 기계적 접촉이 없어 친환경적이고 주행성능의 우수성 때문에 장래의 대중교통수단으로 세계적으로 각광받고 있다. 이러한 장점 때문에 국내에서도 1989년부터 자기부상열차에 대한 연구가 시작되어 대전과학관에 시험노선을 구축하였으며 도시형 자기부상열차 실용화사업을 통해 자기부상교량의 구조에 대한 연구를 진행하고 있다.

자기부상 전용 가이드웨이는 일반철도와 달리 분포하중형태로 차량하중이 재하 되며 상대적으로 경량이다. 그러나 일정궤도를 따라 주행하고 열차가 통과할 때의 동적하중으로 인해 차량하중효과보다 큰 동적하중효과가 발생하는 점은 일반철도 가이드웨이와 흡사하다.

철도교의 동적응답분석에 관한 연구는 대부분 기존선과 고속철도선 가이드웨이를 대상으로 이루어져 왔다. (엄주환 외, 2003년)[1]은 기존선의 속도향상을 목적으로 개발되어 현재 시운전단계인 틸팅차량(TTX)을 대상으로 기존선로의 동적응답을 산출하였으며 (안예준 외, 2000)[2]에서는 고속철도(TGV-K)주행 시 고속철도 선로의 동적응답변화를 연구 한 바 있다. 그러나 현재 국내에서 실용화사업단계에 있는 자기부상 가이드웨이에 대한 동적응답분석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

뿐만 아니라 가이드웨이 길이와 수직방향인 횡방향 부재가 이동하중발생 시 동적하중 횡분배에 영향을 미친다는 연구결과(정철헌, 1998)[3]가 보고된 바 있음에도 불구하고 가이

* 홍유나 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, UST 석사과정
E-mail : ynhong@krri.re.kr
TEL : (031)460-5262 FAX : (031)460-5359
** 정원석: 정회원, 경희대학교, 토목공학과 ,조교수
*** 여인호: 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

드웨이의 동적거동에 영향을 미치는 여러 요인 중 횡방향 강성과 관련이 있는 횡 부재에 대한 연구 또한 미흡한 실정이다.

자기부상 가이드웨이 구조 중 횡방향 부재인 침목은 거더 위에 일정 간격으로 나열되어 레일간격을 유지하는 역할을 할 뿐 아니라 부상레일에 가해지는 하중을 거더에 횡 분배한다. 자기부상 시험선로 가이드웨이의 침목은 현재 1.25m 간격으로 일본의 도시형 자기부상 열차인 HSST 전용 가이드웨이 1.2m를 참고하여 건설되어 있다. 그러나 현재 실용화사업에서 새로이 제안되는 도시형 자기부상 가이드웨이의 단면구성을 위해 동해석을 통한 침목간격에 따른 교량의 동특성과 충격계수변화를 분석할 필요가 있다.

자기부상 시험선로 가이드웨이의 침목간격에 따른 동특성변화를 검토하기위해 본 연구에서는 침목간격을 0.625, 1, 1.25, 1.5625m로 변화시켜가며 4개 유한요소모델을 구성하였다. 이 4개의 모델의 동적해석 결과를 비교하여 침목간격에 따른 가이드웨이의 수직처짐과 연직가속도, 충격계수를 산출하였다.

2. 유한요소 모델링

2.1 유한요소 모델

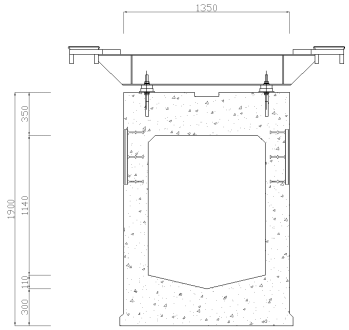
자기부상 시험선로 가이드웨이의 교량길이는 25m, 폭은 1.35m로 거더 단면은 그림 1(a)와 같다. 부상레일과 침목은 강재이고 거더와 격벽부는 철근콘크리트구조이며 그림1(c)와 같이 거더의 끝단에 1.5m 두께의 격벽과 거더의 1/3와 2/3 지점에 0.7m 두께의 격벽을 구성하였다.

유한요소 해석을 위한 모델 동해석 solver는 상용 ABAQUS 프로그램으로 사용하였다. 그림 2와 같이 교량길이방향을 x축, 침목의 축방향을 y축으로 놓았을 때 지점부분은 좌측 끝단에서 0.75m인 지점을 고정단, 우측 끝단에서 0.75m 지점은 이동단으로 하였다.

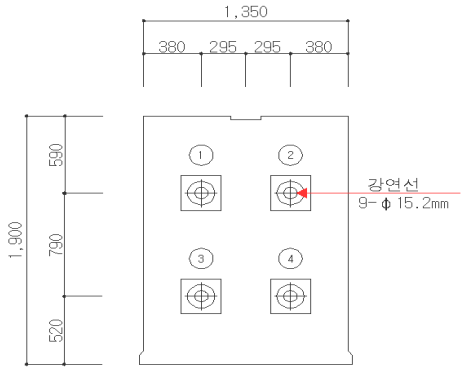
이러한 조건 하에 침목을 양 끝단에서 시작하여 일정간격으로 배치하기 위해 가이드웨이 길이 25m의 인수인 0.625, 1, 1.25, 1.5625m 로 바꾸어 가며 4개의 모델을 구성하였다. 각각의 요소는 도표 1에서 나타난 것과 같이 쉘과 보를 사용하였으며 거더와 격벽을 쉘 요소, 부상레일과 침목은 보 요소로 구성하였다. 강연선은 그림 1(b)와 같이 거더의 양끝 격벽부와 바닥판 중앙을 연결하는 형태로 총 4개이며 트러스요소를 사용하였다. 그림 2와 같이 각각의 구조물 요소는 그림 2와 같이 강접합(Rigid Link)으로 연결하여 하나의 구조로 일체화하였다.

도표 1. 유한요소 모델 구성요소

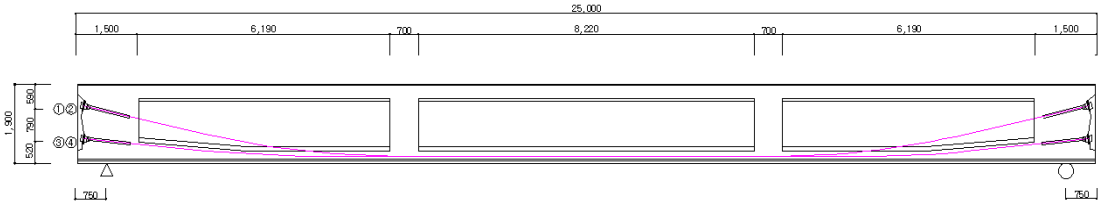
구 성	사용 재료	요 소
거 더	콘크리트	Mindlin shell element(ABAQUS S4R)
격 벽 부		
침 목	H 형강	Euler-Bernouii beam element(ABAQUS B33)
부 상 레 일	강 재	Euler-Bernouii beam element(ABAQUS B33)
강 연 선		Truss element (ABAQUS T32D)



(a) 시험선로 가이드웨이 횡단면



(b) 시험선로 가이드웨이 강연선 배치단면



(c) 시험선로 가이드웨이 종단면

그림 1. 자기부상 시험선로 가이드웨이 단면

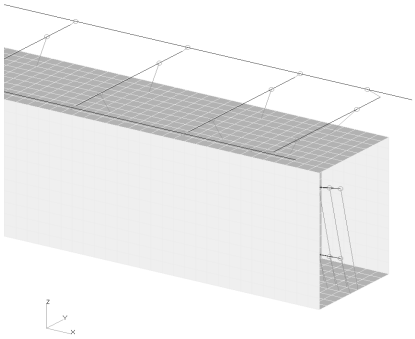


그림 2. 유한요소 해석모델

2.2 유한요소 해석

자기부상 시험선로 가이드웨이의 동해석을 위해 사용된 자기부상열차는 UTM 02이다. UTM 02는 그림 3과 같이 2량 1편성으로 구성되었으며 자세한 차량 제원은 도표 2 에 제시 하였다. 이동하중해석을 위해 UTM02 차량이 자기부상 시험선로 가이드웨이를 등속 운동한다고 가정하며 그 속도는 10km/hr 에서 110km/hr까지 10km/hr 씩 증속하였다.
유한요소 해석을 위해 분포하중의 형태인 자기부상열차 하중을 다수의 집중하중으로 이산화한 후 각각의 집중하중을 등가절점하중으로 환산하여 자기부상레일에 작용하는 것으로 모사하였다. 이동하중 해석은 구조물의 변형이 선형영역에서 발생하는 것으로 가정하여 모드중첩법으로 수행하였다.

도표 2. UTM02 차량 제원[4]

구 분		사 양
차 량 편 성		2량 1편성
차량 치수	길 이	13.5m
	폭	2.85m
	높 이	3.50m
차 량 간 격		0.5m
차량중량(만차)		28.5ton
최대 설계속도		110km/hr
최대 운행속도		80km/hr

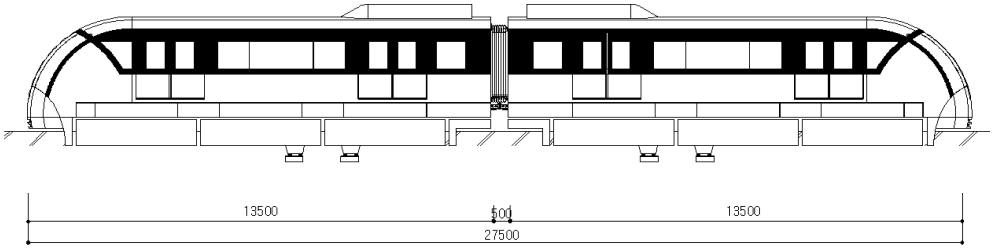


그림 3. 자기부상열차 UTM02[4]

3. 유한요소 모델의 검증

3.1 현장실험 대상 가이드웨이

위와 같은 방법으로 유한요소모델을 구성하여 동특성을 산출하기 위해서는 우선 유한요소 모델의 신뢰성에 대해 검증해야할 필요가 있다. 유한요소모델의 검증을 위해 실제 건설되어있는 자기부상 시험선로 가이드웨이의 동적실험 결과와 비교검증을 수행하였다.

실험의 대상 교량은 자기부상 시험선로 가이드웨이로 하였으며 제원은 앞서 설명한 유한요소 모델의 대상 가이드웨이와 동일하게 하였다. 이동하중 실험은 가이드웨이의 수직처짐 변화를 측정하기 위해 UTM02가 가이드웨이를 10km/h에서 현재 최고 운행속도인 50km/h의 속도로 10km/h 씩 증속하여 주행할 때의 수직 처짐과 고유진동수를 계측하였다.

3.2 현장실험과 유한요소해석의 결과

현장실험결과와 앞서 언급한 유한요소모델을 사용하여 산출한 유한요소해석결과를 비교하였다. 그 결과 시험선로 가이드웨이 속도별 최대 수직 처짐은 도표 3과 같이 현장실험 계측 값과 유한요소 해석 값이 오차율 3%내외로 나타났다.

또한 그림 4는 현장시험에서 UTM02열차가 30km/h로 주행 시 자유진동부분을 추출하여 주파수 분석을 실시한 결과이다. 유한요소 해석결과 고유진동수는 6.58Hz로 그림 4에서 나타난 현장시험 고유진동수 6.45Hz와 오차율 2%로 나타났다.

고유진동수와 처짐의 비교를 통하여 현장시험과 유한요소해석의 결과의 우수한 상관관계를 확인함에 따라 이러한 유한요소 모델을 이용하여 가이드웨이 침목간격이 충격계수에 미치는 영향을 수치적으로 연구하였다.

도표 3. 해석과 계측 최대 수직처짐 비교

Speed(km/h)	해석치	계측치	오차율(%)
10	4.345	4.519	1.02%
20	4.343	4.503	0.68%
30	4.347	4.563	2.88%
40	4.488	4.584	3.24%
50	4.470	4.606	2.96%

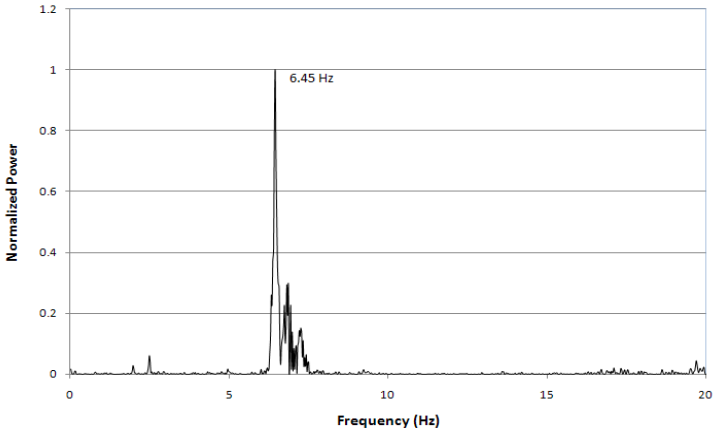


그림 4. 시험선로 가이드웨이 고유진동수 (계측)

4. 침목 간격에 따른 유한요소 해석결과

4.1 고유진동수

국내의 철도관련 설계기준(철도설계기준(1999))[5]은 기존선과 고속선의 일반철도를 그 대상으로 하며 UIC 기준을 채택하고 있다. UIC 776-1[6]과 776-3R[7]에서 제시된 고유진동수와 처짐 관련 식을 연계해 계산된 진동수 한계식에 따라 25m 경간 일반 철도 가이드웨이의 경우 고유진동수 허용범위는 약 3.51Hz에서 8.53Hz 이다.

앞서 검증한 유한요소 모델을 통한 4가지 침목간격에 따른 수치해석 결과 도표 4와 같이 고유진동수는 6Hz 대역이고 4가지 경우 모두 1차, 4차 5차 8차에서 휨이 발생하였다. 2차 휨모드 부터는 침목간격이 커질수록 고유진동수가 감소하였으나 1차 휨모드에서는 도표 4에서 나타난 것과 같이 침목 간격이 0.625m 일 때의 고유진동수가 1m일 때 보다 작았고 1.25m 일 때 고유진동수는 1.5625m일 때 보다 작은 값을 나타내었다. 그러나 네 경우의 고유진동수 차이는 최대 0.2%으로 나타났다

도표 4. 침목간격에 따른 고유진동수 변화

MODE	FREQUENCY			
	0.625m	1 m	1.25 m	1.5625m
1	6.962	6.964	6.949	6.953
2	7.158	7.122	7.077	7.070
3	21.853	21.507	21.288	21.123
4	23.166	23.031	22.907	22.837
5	32.056	31.975	31.883	31.894
6	34.762	34.387	34.225	33.914
7	43.988	43.200	42.485	42.362
8	53.746	53.076	52.519	52.302
9	65.177	64.000	63.286	62.849
10	71.980	70.839	70.305	69.617

4.2 최대 수직 처짐

국내에서는 경간에 따른 처짐 한계를 우리나라 철도설계기준(1999)에서 명시하고 있다. 철도설계기준에서는 콘크리트 거더교의 경우 주거더의 허용 처짐값을 지간길이와 열차속도로 규정하고 있다. 지간길이50m 이하 열차속도 120km/h 미만인 경우 허용 처짐값은 L/800으로 하며 경간길이 25m인 경우 31.25mm, 30m인 경우 37.5mm로 규정하고 있다. 자기부상 시험선로 가이드웨이의 이동하중 해석결과 최대 수직 처짐은 그림 5와 같이 3mm 이하의 값을 나타냈다. 침목간격이 0.625m일 때 최대 수직 처짐이 가장 낮게 나타났으며 침목간격이 늘어날수록 최대 수직 처짐도 증가하였다. 이는 침목간격이 감소할수록 중량증가 보다 부상레일과 거더의 긴결을 통한 강성의 증가의 영향이 커지기 때문으로 생각된다. 또한 최대 수직 처짐량이 철도설계기준의 31.25mm의 10%보다 작게 나타났다. 이는 철도설계기준이 일반 철도를 기준으로 하여 대상 차량의 규격과 중량이 자기부상열차보다 크기 때문으로 판단된다. 따라서 자기부상열차 전용 가이드웨이의 최대 수직 처짐 평가에 현 철도설계기준을 적용하는 것은 다소 과도한 것으로 생각된다.

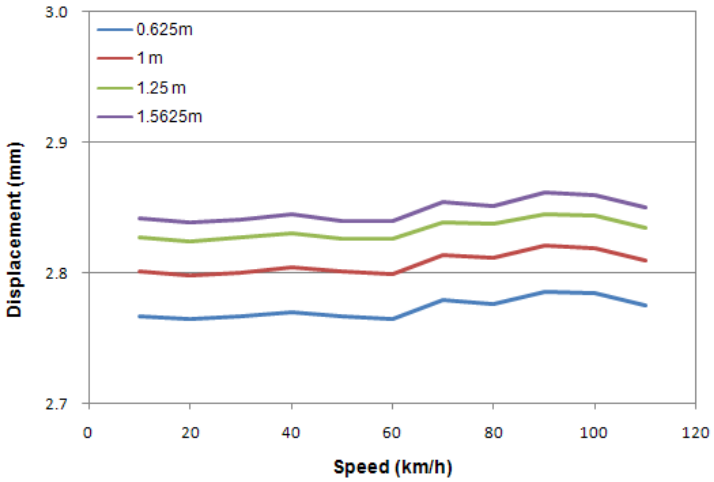


그림 5. 속도와 침목간격에 따른 최대 수직 처짐 변화

4.3 연직 가속도

연직가속도에 대한 규정은 국내 고속철도설계기준(2005)[8]에 나타나있다. 이 규정에서 220km/h이상의 고속주행 시 연직가속도는 필수적으로 검토되어야하며 0.35g 이내로 규정하고 있다. 또한 프랑스 규정에서는 유도상궤도일 때는 0.35g이하 무도상 궤도일 때는 0.5g 내로 제한하고 있다[9]. 시험선로 가이드웨이의 동해석 결과 속도에 따른 연직가속도 변화는 그림 6과 같이 0.06g이하로 나타났다.

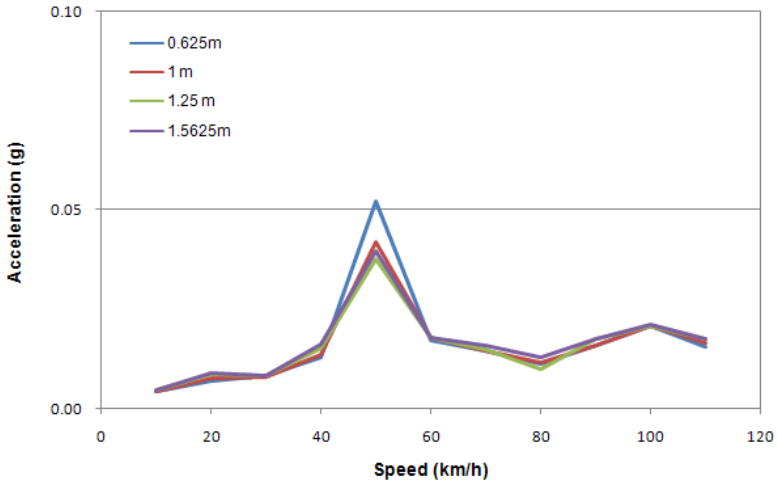


그림 6. 속도와 침목간격에 따른 연직가속도 변화

4.4 충격계수

충격계수는 열차의 주행 시 여러 원인에 의해 발생하는 차량의 동적하중으로 인하여 정적하중 작용시보다 더 크게 발생하는 동적응답을 정적 응답에 대한 상대 값으로 표현하는 것이다. 우리나라에서는 일반 철도의 경우 경간 길이가 L일 때 철근콘크리트 및 PSC 철도교에서는 아래 식과 같이 충격계수한계를 정하고 있다(철도설계기준(1999)). 이를 통해 25m 경간의 일반철도교의 충격계수 한계는 약 0.14임을 알 수 있다.

$$L \le 18m \qquad i = 45 - \frac{L^2}{45}$$

$$L > 18m \qquad i = 24 - \frac{240}{L - 0.6}$$

또한 경량철도(K-AGT)를 대상으로 하는 우리나라 경량철도 충격계수 한계는 아래 와 같이 고무차륜과 철제차륜의 두 가지 경우로 나누어 제한하고 있다[10]. 경량철도 규정에 따르면 25m 경간의 PSC 가이드웨이인 경우의 충격계수 한계는 0.2이다.

(고무차륜) $$i = \frac{10}{25 + L}$$

(철제차륜) $$L \le 18m \ , \quad i = 45 - \frac{L^2}{45}$$

$$L > 18m \ , \quad i = \frac{240}{L - 0.6} + 24$$

반면에 일본 LINIMO의 충격계수 한계는 콘크리트거더의 경우 0.1, 강거더의 경우는 0.15로 규정하고 있다. 그림 7은 침목간격에 따른 속도별 충격계수변화를 나타낸 것이다. 그림 7에 나타난 것과 같이 충격계수는 0.01미만으로 동적하중에 의한 증폭효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 자기부상 시험선로 가이드웨이의 충격계수는 일본 LINIMO의 콘크리트거더 한계인 0.1보다 매우 낮은 수치로 동적 충격에 안전 측인 것으로 나타났다. 또한 국내의 일반철도규정은 자기부상 가이드웨이에 적용하기에 과다한 값이라고 판단된다.

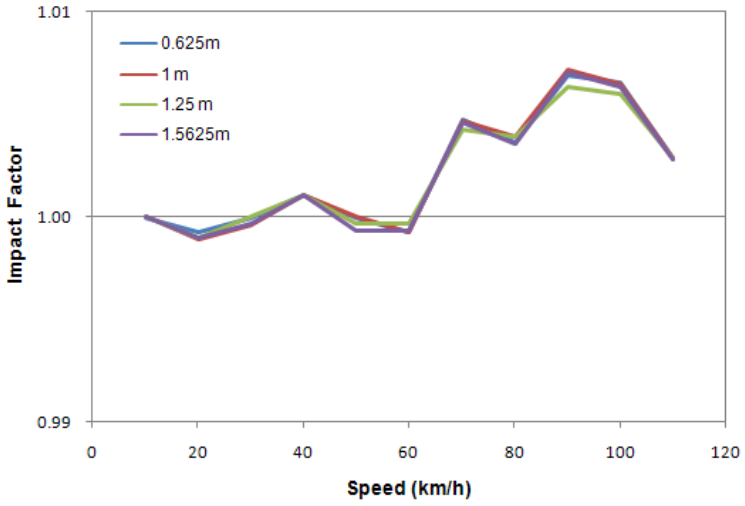


그림 7 . 속도와 침목간격에 따른 충격계수변화

5. 결론

본 연구에서는 대전 과학관에 건설된 자기부상 시험선로 가이드웨이와 UTM 02를 대상으로 이동하중해석을 수행하여 가이드웨이의 침목간격에 따른 동특성과 충격계수를 분석하였다.

본 연구에서 유한요소 해석결과 단면과 교량 길이, 재료값 등의 동일 조건 하에서 침목간격에 따른 가이드웨이의 속도별 충격계수와 연직가속도는 근사한 값을 나타냈다. 그러나 침목간격에 따른 속도별 최대 수직처짐은 침목간격이 좁아질수록 증가하였다.

이러한 결과는 자기부상 가이드웨이의 침목간격이 작아질수록 강성이 증가하기 때문으로 보인다. 그러나 침목간격의 변화로 인한 충격계수와 고유진동수의 차이가 거의 없고 최대 수직 처짐 차이 또한 최대 0.1mm 정도로 나타나 25m 경간 자기부상 가이드웨이에서 침목간격변화는 전체 동적응답에 상대적으로 영향이 작은 것으로 판단된다.

또한 현재 국내 철도관련 설계기준은 기준선과 고속철도선에 관련한 동적성능검증관련 한계기준을 제시하고 있으며 자기부상 시스템에 대한 동적성능검증관련 기준규정이 필요한 실정이다. 본 연구 결과 수직처짐과 연직가속도 및 충격계수에서 철도설계기준은 자기부상 가이드웨이에 적용하기에 과도한 것으로 생각되며 자기부상 가이드웨이의 동적성능검증기준 마련을 위해 다양한 조건에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 향후 가이드웨이의 매개변수 해석을 통한 동적응답과 충격계수에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 엄주환, 유영화, 엄기영 (2003), “기존선 궤도의 충격계수 산정에 관한 연구”, 철도학회 논문집6권 4호
2. 안예준, 김성재, 신영석 (2000), “고속철도 교량의 동적거동”, 대한토목학회지 20권 3-A
3. 정철헌 (1998), “횡단면 강성이 교량의 충격계수에 미치는 영향”, 대한토목학회지 18권
4. 건설교통부 (2006), 도시형 자기부상열차 실용화사업 기술분야 타당성조사
5. 철도청 (1999), 철도설계기준(철도교편)
6. UIC 776-1 (2006), Loads to be considered in railway bridge design ,5th edition
7. UIC 776-3 (2006), Deformation of bridges ,1st edition
8. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도설계기준(노반편)
9. 최진유, 오지택 (2002), “철도교 설계기준에 대한 비교 · 고찰”, 전산구조공학회지 제 15권 제 4호
10. 이희업, 오지택, 최일윤 (2003), "경량전철 고무차륜 AGT 시스템의 구조물 설계기준", 한국철도학회 추계학술대회 논문집.