

17CTAP
-C133353
-02

초안정성 평가를 위한 전자기-구조 연성 해석
기술 개발 및 안정성 평가기술 개발 최종보고서

600 km/h 이상 초고속 자기부상열차용

2019 국토교통과학기술진흥원
R & D 사업본부

보안 과제(), 일반 과제(☒) / 공개(☒), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 17CTAP-C133353-02

600 km/h 이상 초고속 자기부상열차용 초안정성 평가를 위한 전자기-구조 연성 해석 기술 개발 및 안정성 평가기술 개발 최종보고서

2019. 02. 13.

주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단
공동연구기관 / 가천대학교 산학협력단

R&D사업본부
국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘600 km/h 이상 초고속 자기부상열차용 초안정성 평가를 위한 전자기-구조 연성 해석 기술 개발 및 안정성 평가기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종 보고서 2부를 제출합니다.

2019. 02. 13.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이원용 (인)
공동연구기관명 : 가천대학교 산학협력단 (대표자) 황보택균 (인)

주관연구기관책임자: 박 노 철
공동연구기관책임자: 박 경 수

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C133 353-02	해당 단계 연구 기간	2017. 06. 30 ~ 2018. 12. 31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	600 km/h 이상 초고속 자기부상열차용 초안정성 평가를 위한 전자기-구조 연성 해석 기술 개발 및 안정성 평가기술 개발			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	600 km/h 이상 초고속 자기부상열차용 초안정성 평가를 위한 전자기-구조 연성 해석 기술 개발 및 안정성 평가기술 개발			
연구책임자	박 노 철	해당단계 참여연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000천원 계: 220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 20 명 내부: 20 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000천원 계: 370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	연세대 학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

- 전자기-구조-다물체 동역학 연성해석을 통한 자기부상열차의 진동 예측 프레임 워크 구축
- Analytical 모델 작성을 통한 전자기 해석시간의 96배 해석 시간 감소
- 전자기 회로 개선을 통한 대차의 수직/수평 방향 최대 변위 55.0%/63.7% 감소
- 전자기 댐퍼의 설계 및 도입을 통한 열차의 수직/수평 방향 최대 변위 70.4%/55.3% 감소
- 기존 사용 현자장치의 설계변수 최적화를 통한 수직/수평 방향 승차감 최대 6 dB /8 dB 감소
- 연구개발성과의 SCI(E) 논문 3건, 일반 학술지 2건, 국내 특허출원 3건 달성

보고서 면수

99 쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	초고속 자기부상열차를 구현하기 위한 추진 방법인 LSM(Linear synchronous motor) 방식으로 인해 발생하는 구조적인 특성인 수직/수평 진동을 규명하고, 자기부상열차의 동특성 및 승차감, 주행 안정성에 미치는 영향을 분석한다. 이를 바탕으로, 자기부상열차의 승차감을 향상 시킬 수 있는 부상력 및 가이드력 발생 장치의 전자기 댐퍼의 설계를 한다. 또한 열차의 속도, 선로의 곡률, 자기장의 불균일도를 고려하여 열차에 들어오는 가진을 최소화하여 승차감을 향상한다. 최종적으로, 곡선주로에서 기존 승차감과 안정성을 확보하는 수준에서 최대속도 대비 80%의 속도를 낼 수 있는 개선안을 도출한다.				
연구개발성과	자기부상열차의 시간 이력 전자기력 예측이 가능한 3D 전자기 해석 모델을 구축 및 검증하였고, 이를 기존의 연구(참고문헌)을 통해 검증하였다. 검증한 전자기 해석 모델의 해석 시간을 단축할 수 있는 Analytical 모델을 작성하여 96 배의 해석 시간 감소를 달성하였다. Analytical 모델을 구조 해석을 포함한 다물체 동역학 시뮬레이션 모델과 two-way로 연성해석 하여 자기부상열차의 진동과 승차감을 예측할 수 있는 프레임워크를 구축하였다. 최종적으로 강체객차와 유연객차의 특성을 모두 포함한 자기부상열차의 진동 및 승차감 예측 프레임워크를 구축하였고 해석 시간 감소 또한 달성하였다. 구축된 프레임워크를 통하여 실 개선안은 곡률, 속도, 자기장의 불균일도를 고려하여 전자기 회로 개선을 하여 대차의 수직/수평 방향 최대 변위를 55.0%/ 63.7% 감소시켰다. 다른 개선 방안으로 대차 자체의 진동량을 줄일 수 있는 전자기 댐퍼를 설계하여 모델을 개선하였을 때 열차의 수직/수평 방향 최대 변위를 70.4%/ 55.3% 감소시켰다. 또한 기존에 사용되는 헨가장치의 설계변수를 최적화하여 수직/수평 방향 승차감을 최대 6 dB 와 8 dB 개선하였다. 본 연구팀은 이들 분야에서 오랫동안 연구해온 경험을 토대로 국외학술지(SCI) 3 건과 일반 학술지 2 건을 포함하여 국내 3 건의 특허를 출원하였다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	현재 경부선은 기존 철도 차량으로 포화된 상태이기 때문에 새로운 철도 인프라가 요구된다. 본 연구를 통해 자기부상열차의 상용화가 가능하면 기존 열차 대비 고속화에서 유리한 자기부상열차를 활용할 수 있다고 예상된다. 또한 더 나아가 비행기를 대체하여 유라시아 대륙을 1일 생활권으로 가능케 하는 인프라로서도 구축 가능하다. 기대효과로서 초고속 자기부상열차의 수직 및 수평 진동을 감소시키는 방안을 제시할 수 있어 자기부상열차의 최대 속도를 증가시키는데 매우 중요한 의미를 지닌다. 또한 자기부상열차에 대하여 전자기-다물체 연동 해석 모델을 제시할 수 있어 운행 중인 차체의 진동을 파악할 수 있다. 또한 자기부상열차 뿐만 아니라 하이퍼루프와 자기부상 물류 이송 장치 등 모든 자기부상 시스템의 수직 및 수평 진동 감소가 가능하기 때문에 그 적용성의 범위가 매우 넓다.				
국문핵심어 (5개 이내)	전자기-구조 연성해석	다물체 동역학 해석	진동량 평가	전자기 댐퍼	추진체 개선
영문핵심어 (5개 이내)	EM-Structure Coupled Analysis	Multi-body Dynamic Analysis	Vibration Evaluation	EM Damper	Propulsion System Improvement

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
가. 개요	6
나. 연구개발 대상의 국내외 현황	7
다. 연구개발의 중요성	9
라. 연구개발의 최종 목표	10
2. 연구수행내용 및 성과	11
가. 수행체계	11
나. 연구 수행내용	12
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	92
가. 목표	92
나. 목표 달성여부	93
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	95
가. 추가 연구의 필요성	95
나. 타 연구의 응용	95
붙임. 참고 문헌	98

1. 연구개발과제의 개요

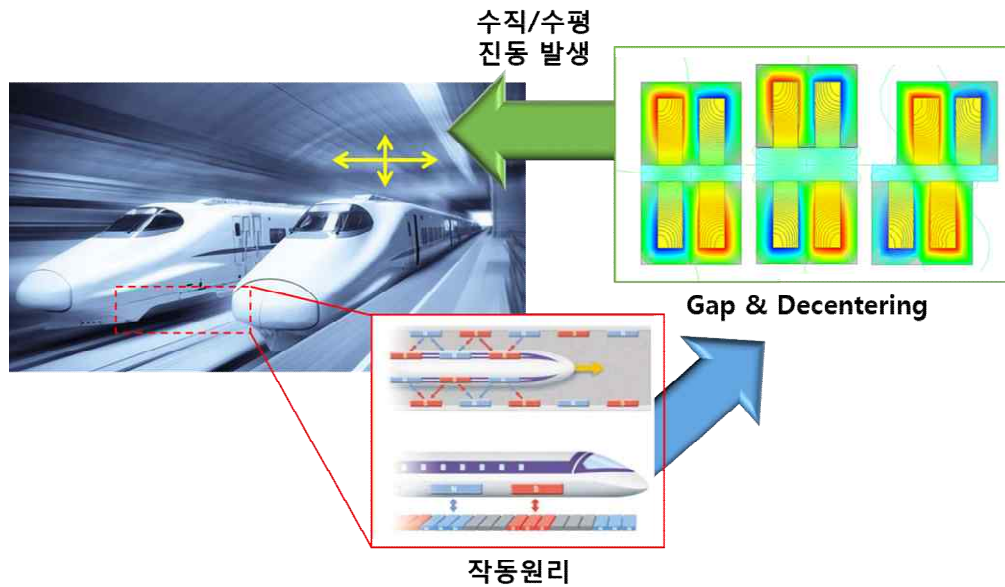
가. 개요

최근 친환경 운송수단인 철도차량이 가장 적합한 미래 운송수단으로 부각되고 있으며, 세계화로 인한 수송거리 및 컨테이너 운송량의 증가, 원료가격과 통행료 상승에 따른 복합수송 개발비에 대한 우호적 환경 조성, 각국 철도의 통합으로 단일 운송 경쟁력을 확보 등으로 인해 철도차량 수요는 더욱 증가하고 있다.(2017철도물류 국제세미나 中)

도심과의 접근성 등의 이유로 운행시간 외의 시간 소모가 많고 고비용인 항공 운송에 비해 철도의 경우 2030년 전 세계 당일 생활권을 위한 최적의 솔루션으로 꼽히고 있고, 2020년 전 세계 물류의 약 30%가 동북아에서 이루어 질 것으로 예상되고 있어 철도차량 산업 발전은 더욱 가속화 될 것으로 예상된다.

이와 같은 발전상황 속에서 최근에는 초고속/초안전 철도차량의 수요가 증가하고 있어 자기부상열차에 대한 관심이 높아지고 있다. 자기부상열차의 경우 소음과 진동이 적어 초고속화 및 고안전성 확보에 장점을 가지고 있다. 선진국에서는 이러한 장점을 살린 자기부상열차에 대한 꾸준한 연구를 이루고 있어 관련 분야의 기술이 높은 수준에 올라와 있으나 아직 초고속 자기부상열차의 상업화를 위해서는 부상열차의 안정성 확보, 승차감 개선 등을 위한 추가 연구가 필요한 시점이다. 고속자기부상열차의 경우 고속화로 인해 수직/수평 방향의 진동이 증가하고, 열차의 승차감과 안전성에 큰 문제를 야기할 수 있기 때문에 초고속화 자기부상열차에 대한 진동 저감 연구가 절실히 요구된다.

최근 초고속화 자기부상열차로 가장 적합한 시스템은 그림 1과 같이 Electrodynamic suspension (EDS) 방식의 자기회로를 가진 열차이다. 그러나 이러한 EDS 방식의 경우 속도증가 측면에서는 큰 장점을 가지고 있지만 외부 환경에 의한 외란 영향의 증가로 진동이 증가하며, 이러한 시스템의 경우 작은 양의 진동이라도 초고속 시스템의 안정성에 큰 문제를 야기할 수 있기 때문에 이러한 초고속 자기부상열차의 수평 및 수직 방향의 진동에 대한 해석을 위한 연구가 필요하며, 자기부상열차의 경우 실제 실험에 의한 연구는 비용이 크게 발생하고 많은 시간적 소모가 발생하기 때문에 정확하고 다양한 설계인자에 대한 분석이 가능한 통합 해석 툴 개발이 필요하다. 이러한 해석검증 툴 확보를 통하여 다양한 설계 인자들에 의한 진동 특성을 조사하여 최적의 수직 및 수평 진동 특성을 갖는 자기부상열차의 설계를 이룰 수 있는 연구를 수행하고자 한다.



[그림 1] EDS 방식 초고속 자기부상열차의 진동발생 메커니즘

나. 연구개발 대상의 국내외 현황

(1) 국내 현황

- 2016년 2월, 일본 나고야에 이어 인천공항 자기부상열차가 세계 두 번째로 상용화 되었다. 이는 도심형 자기부상열차로, Electromagnetic suspension (EMS) 부상방식을 채택하고 있으며, 최고속도 110 km/h 이고 실제 운행속도는 약 80 km/h 이나 바람이 15 m/s 이상인 경우 이보다 감속 운행하고 있는 실정이다.

- 또한, 한국철도기술연구원은 한국기계연구원 등과 함께 최고 550 km/h 를 낼 수 있는 초고속 자기부상열차 ‘수마(SUMA·개발명)’ 를 개발하는 데 성공하였고, 수마를 테스트하기 위해 충북 오송에 150 m 길이의 간이 시험노선을 구축 중이다.

- 2017년 2월부터 한국철도기술연구원, 한국기계연구원, 한국건설기술연구원 등이 EDS 방식의 자기부상열차인 ‘아음속 캡슐 트레인’ 공동 연구를 위한 업무협약을 체결하였다(표 1참고).

(2) 국외 현황

- 표1은 국내외 자기부상열차의 비교를 나타내고 있다. 표1에서 확인할 수 있듯이, 초고속 자기부상열차 중 상용화에 성공한 것은, 독일 Siemens 社에서 제작하여 2004년 중국 상하이에서 상업운행을 시작한 ‘Transrapid’ 가 유일하며, 최고속도는 430 km/h 에 이른다. 이 자기부상열차의 부상방식은 EMS로 차세대 초고속 자기부상열차를 위한 EDS 부상 방식과는 다르다는 차이가 있다.

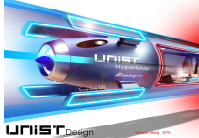
- 일본의 차세대 초고속열차인 ‘Chuo Shinkansen’은 시험코스에서 실시한 시험주행에서 최고속도 603 km/h를 기록하며 세계에서 가장 빠른 초고속 열차에 등극하였다. 하지만, 미세한 변화가 있는 구간에서 진동/소음 문제가 발생하여 일반 주행에서는 400 km/h 수준으로 운행하고 있다.

- 중국은 독일로부터 도입된 자기부상열차 기술을 바탕으로, 최근 이루어진 대대적인 투자와 철도사업을 중점 국책사업으로 추진하면서 빠르게 기술이 발전하고 있다. 또한 방대한 운영 및 건설 규모를 자랑하는 철도 시스템을 보유하고 있으며 이를 바탕으로 초고속 자기부상열차의 개발을 추진하고 있다.

- 미국의 경우 엘런머스크의 주도하에 Hyperloop의 개발이 진행 중이며 2017년 7월에 두 번째 중요단계 시험을 실시하여 310 km/h 속도 목표를 달성하였고, 가능성을 인정받아 Russia hyperloop-one과 새로운 프로젝트 협약을 체결하였으며 두바이에 Hyperloop 건설허가를 받았다.

이처럼 국내외적으로 최근 철도 고속화의 최적의 솔루션으로 EDS 방식의 자기부상열차가 주목받고 있고, 안정성과 승차감을 극대화 시키는 노력을 지속하고 있다.

[표 1] 국내외 자기부상열차 비교 (Review of maglev train technologies 中)

Type	Classification				
	Korea		Foreign Country		
System	UTM (in operation) 	U-Loop (Project) 	Transpraidd (Germany) 	MLU, MLX (Japan) 	Inductrack (USA) 
Levitation	EMS	EDS	EMS	EDS	PM EDS
Propulsion	SP-LIM	LSM	LP-LSM	LP-LSM	LP-LSM
Air gap	8~12 [mm]	-	8~12 [mm]	80~150 [mm]	80~150 [mm]
Max. speed	110 [km/h]	1200 [km/h]	500 [km/h]	500 [km/h]	500 [km/h]
Service	Low-med, Speed, Short distance	-	High speed, Long distance	High speed, Long distance	High speed, Long distance
Characteristic	Levitation/ Guide integrated	-	Levitation/ Guide separated	Cooling for SCM	Halbach Magnet Array

(3) 기술개발 성숙도

현재 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있으나, 대부분 저속의 안정성 측면에 초점을 맞춘 EMS 방식의 자기부상열차에 대한 것들이고, 초고속(> 600 km/h) 기록 중인 EDS 방식의 자기부상열차에 대한 다양한 해석 검증 및 최적화는 이루어진 적이 없다. 이는 현재 Hyperloop를 개발하는 엘런머스크 팀의 경우도 마찬가지이다. 즉, 현재는 EDS 방식의 초고속 자기부상열차의 진동유발 특성 및 다양한 설계인자들에 대한 조사 단계이고, 해석 톨의 정확성을 높이고 다양한 설계인자의 영향도를 분석하기 위해서 다양한 연성해석을 이용하여 접근하고 있는 단계로 기술개발 단계로 보면 TRL 1~2수준이다. 그러나 실제적인 코일의 전자기력을 평가하기 위한 실험 부분이 포함되는 연구이므로 최종적으로 TRL 3수준의 연구 성숙도를 갖는다.

[표 2] 본 과제의 TRL 구분

구분	연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1 ☐	☐	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2 ☒	☐	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3 ☐	☒	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4 ☐	☐	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5 ☐	☐	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6 ☐	☐	TRL 6 유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7 ☐	☐	TRL 7 실제환경 시작품 대모 단계
	TRL 8 ☐	☐	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9 ☐	☐	TRL 9 현장적용/사업화 단계

다. 연구개발의 중요성

2016년 2월, 일본 나고야에 이어 인천공항 자기부상열차가 세계 두 번째로 상용화 되었으나, 초고속 자기부상열차에 대한 연구는 다른 독일, 일본 등의 다른 국가에 비해 크게 미미한 실정이다.

초고속 자기부상열차의 경우 EMS와 EDS 두 방식으로 나누어지는데 도심용 자기부상열차의 경우 가이드웨이의 구조가 비교적 간단하고 상대적으로 승차감이 우수한 EMS 방식을 많이 채택하고 있으며, 인천공항 내에 상용화된 자기부상열차도 EMS 방식을 사용한다. 초고속 자기부상열차로 상용화된 Transrapid의 경우 역시 EMS 방식을 사용한다.

그러나, 초고속 자기부상열차의 상용화를 위해 대부분의 국가에서는 EDS 방식을 채택하여 연구를 수행하고 있으며, 최대속도 약 500 km/h 급으로 상용화를 준비하고 있다. EDS 방식의 경우 비교적 간단한 구조에 제어가 필요 없으며 분기기의 구조가 비교적 간단하여 장거리 운행에 적합하다는 장점이 있으나 EDS 방식의 경우 EMS 방식에 비해 수평/수직 진동이 심해 승차감이 나쁘다는 단점이 있어 500 km/h 이상의 고속 상용화를 위해서는 수직/수평 진동 저감을 위한 검토가 절대적으로 필요하고, 진동 저감을 위한 연구 토대가 필요하여 본 연구가 중요하다고 사료된다.

또한, 일본의 초고속 자기부상열차의 경우 최고속도 603 km/h를 기록하였지만, 진동 등의 문제로 실제 운행속도는 400 km/h 정도에 그치고 있으며, 독일에서는 자기부상열차의 진동문제로 인하여 보수차량과 충돌하여 23명이 사망한 사례가 보고되는 등, 초고속 자기부상열차의 운행에 있어 진동은 매우 중요한 문제이다.

라. 연구개발의 최종 목표

[표 3] 연구개발의 최종 및 세부 목표

구분	내용
최종 목표	초고속 자기부상열차를 구현하기 위한 EDS 방식의 자기부상열차의 수직/수평 진동 원인을 규명하고, 이것이 자기부상열차의 동특성 및 승차감에 미치는 영향을 분석하기 위한 구조-자기 연성해석 프레임워크를 구축한다. 이를 바탕으로, 자기부상열차의 안정성 및 승차감에 영향을 미칠 수 있는 다양한 설계 매개변수들의 영향도를 조사한다. 이를 바탕으로 최종적으로, 곡선주로에서 기존 승차감과 안정성을 확보하는 수준에서 최대속도(600 km/h)의 80%의 속도를 낼 수 있는 개선안을 내고자 한다.
세부 목표	- EMS 방식의 자기부상열차에 대한 자기-구조 연성해석 모델을 바탕으로, 열차의 수직/수평 방향의 진동을 해석할 수 있는 프레임워크를 구축한다. - 구축된 해석 프레임워크를 이용하여 다양한 설계인자들에 대한 진동특성 및 승차감에 대한 조사를 수행한다. - 안정성 및 진동 저감을 위한 전자기 회로의 설계를 통하여 대차에서 객차로 전달되는 또는 객차들 사이의 상호작용에 의한 진동 전달 등을 저감시키는 시스템을 구축한다. - 제안된 최적 시스템을 바탕으로 최고속도 600 km/h 의 80%수준의 속도에서도 객차에서 기존과 같은 진동 특성 및 승차감을 유지하는지를 확인한다.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 수행체계

(1) 1차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(연세대학교 산학협력단): 자기-구조 연성해석 시간 단축 방법 제시
- 공동연구기관(가천대학교 산학협력단): 전자기-구조 연성해석 모델 구축

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(연세대학교 산학협력단):
 - 대상 모델의 선정 및 기준 치수 확보
 - 3D 전자기 해석 모델의 신뢰성 확보 및 격자수 감소를 통한 해석시간 감소
 - 3D 전자기 해석 모델의 해석 시간 단축을 위한 수학적 모델 구축
- 공동연구기관(가천대학교 산학협력단)
 - 객차의 구조적 특성 및 형상을 고려한 구조 해석 모델 구축
 - 객차의 구조적 특성을 포함한 다물체 동역학 모델 구축
 - 구축된 전자기 및 다물체 동역학 모델을 이용하여 Look-up table 및 two-way 방식의 전자기-다물체 동역학 연성해석 모델 구축 및 검증

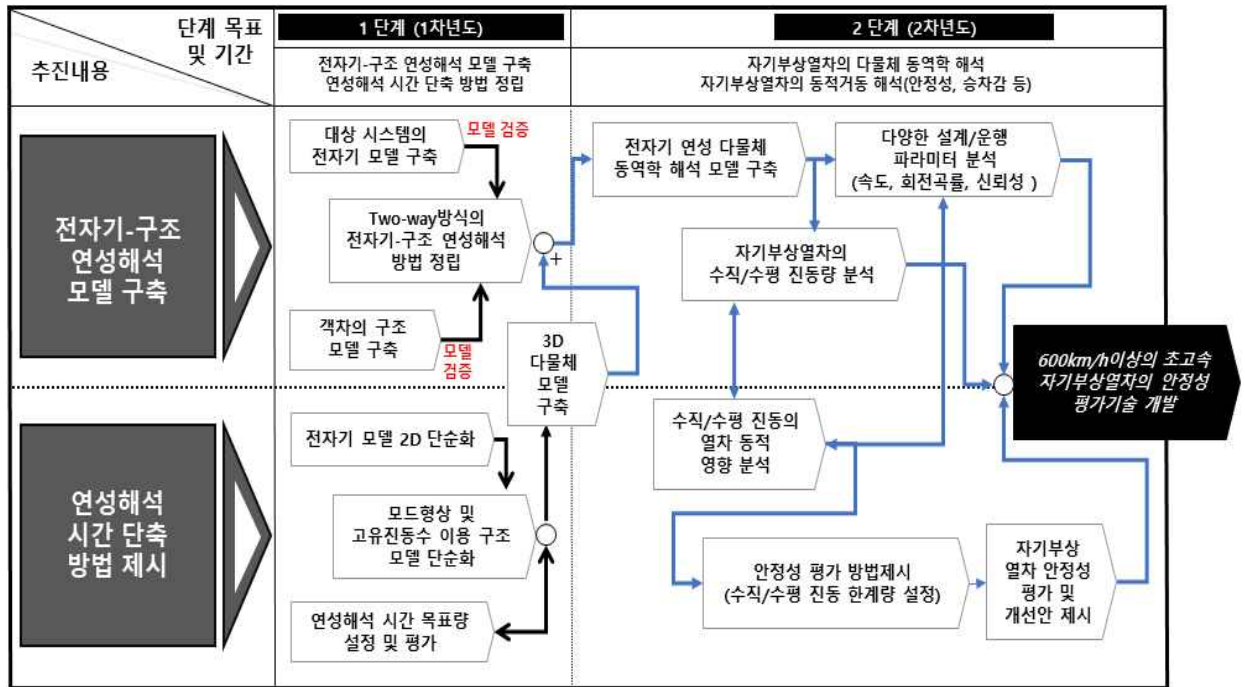
(2) 2차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(연세대학교 산학협력단): 자기부상열차의 진동 분석 및 개선안 도출
- 공동연구기관(가천대학교 산학협력단): 자기부상열차의 안정성 평가

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(연세대학교 산학협력단):
 - 다물체 동역학 해석 결과를 통한 수직/수평 진동에 따른 열차 동적 영향 분석
 - 다양한 전자기 회로 변경을 통한 대차의 수직/수평 진동 감소
 - 전자기 댐퍼 설계 및 도입을 통한 객차의 수직/수평 진동 감소
 - 개선된 모델을 통한 운행속도 수준 향상안 도출
- 공동연구기관(가천대학교 산학협력단):
 - 속도 및 회전 곡률 등 수직/수평 진동에 영향을 미치는 변수 선정 및 다물체 동역학 해석 진행
 - 다양한 설계 변수에 따른 자기부상열차의 수직/수평 진동량 분석
 - 자기부상열차의 안정성 평가 및 개선 방안 제시



[그림 2] 연도별 연구수행 내용 및 수행체계

나. 연구 수행내용

(1) 대상 시스템 선정

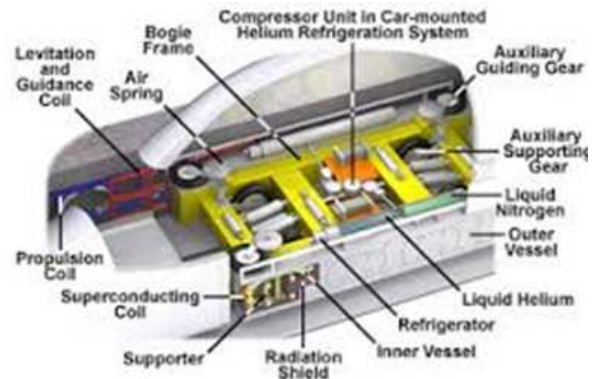
본 연구에서 목표로 하고 있는 기록속도 600 km/h 이상의 속도를 내기 위해서는 안정적인 부상이 유지되어야 한다. 이러한 점에서는 시스템이 불안정하여 부상 공극을 계속 제어를 하여야 해주는 EMS 방식보다는 별도의 부상제어가 필요 없는 EDS 방식이 유리하다. 또한 EDS 방식은 EMS 방식에 비해서 분기가 쉬운 편이라 장거리 고속 주행에 더 유리하다.

이와 가장 유사한 시스템은 일본의 JR Central社에서 운영 중인 L0 series이다. 현재 도쿄-오사카 구간의 Chuo Shinkansen(건설 중) 구간에서 운영을 목표로 시험 운행 중이며, 5~12개의 차량으로 구성되어 최대속도 505 km/h의 속도로 운영될 예정이다. 2015년 4월 21일에 7차량으로 편성된 시험 열차가 기록속도 603 km/h의 속도를 내어 세계 최고 속도 기록을 가지고 있다[1].

최고속도 500 km/h의 EDS 방식의 자기부상열차 해석 프레임워크 개발을 위해 위에서 언급한 일본의 Chuo Shinkansen L0 series를 기반으로 해석모델을 구축하고, 이를 개선하기 위한 연구를 수행한다. 또한 객차의 수는 3개의 연결 객차로 한다. 이는 객차 간의 진동 전달성 및 사행운동 등의 다양한 진동 특성 파악을 위해 결정되었다.



(a)



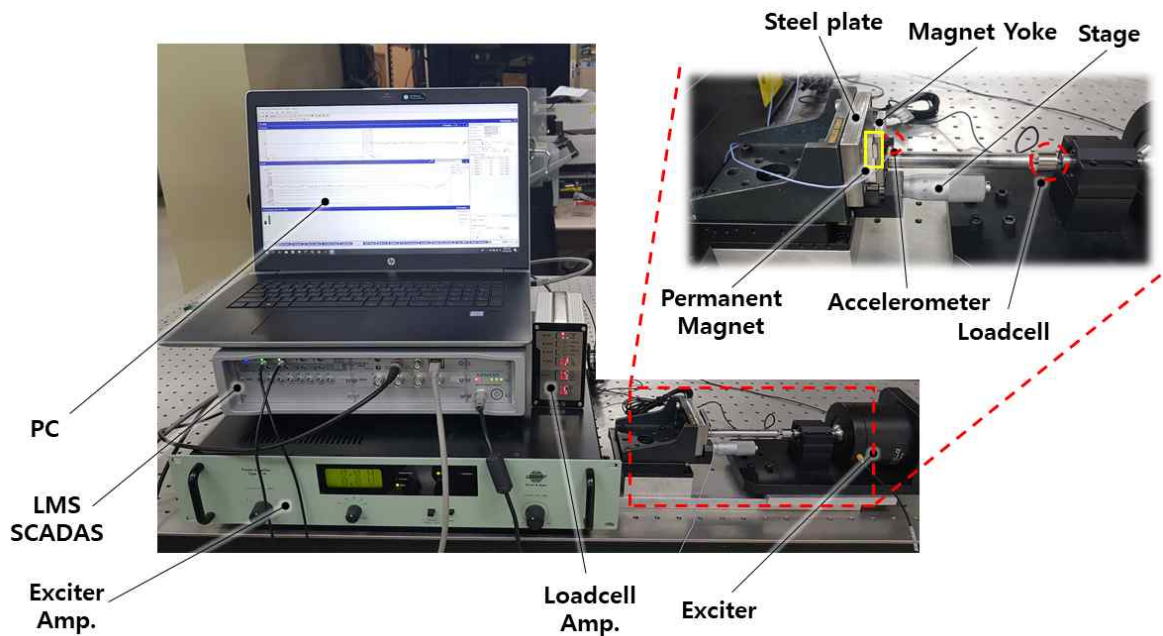
(b)

[그림 3] (a) L0 series 선두 차량 [2], (b) L0 series 대차 내부 구성 [3]

(2) 전자기 힘(Levitation, Guidance Force) 해석 모델 구축

① 전자기 해석 모델 타당성 검증

A. 전자기 모델 타당성 검증을 위한 실험 모델



[그림 4] 전자기해석 모델 검증을 위한 실험 셋업

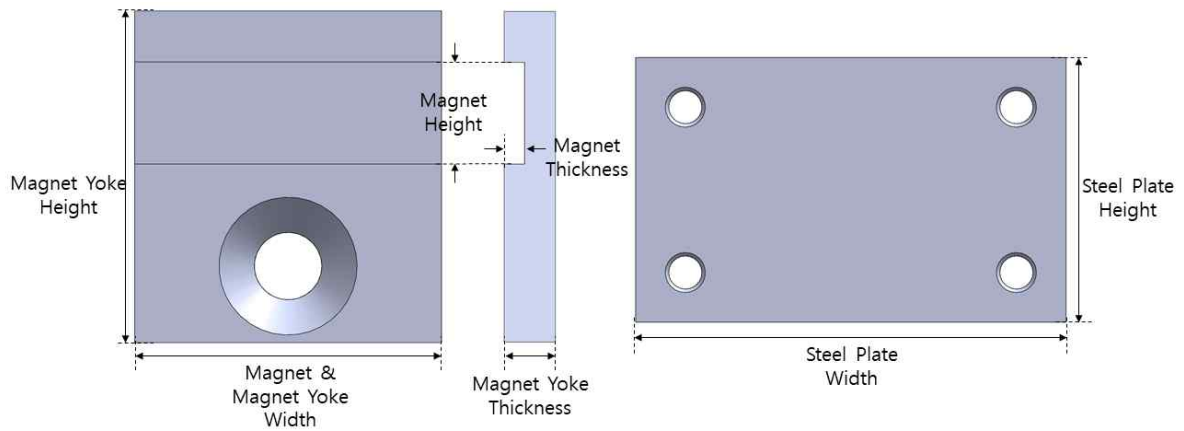
자기부상열차의 시뮬레이션 모델을 구축하기에 앞서 실제 진동하는 전자기체에 따른 발생 힘과 시뮬레이션 모델에서 예측한 힘을 검증하기 위해 그림 4와 같은 실험 장치를 구성하였다. 기본적인 구성은 진동하는 영구자석과 고정된 철판의 인력을 측정하는 것이다. 정확한 가진을 위해서 소형 가진기인 B&K 社の Type 4810 가진기와 Type 2817 앰프를 사용하였다.

가진기와 영구자석은 2개의 스팅어와 발생하는 인력을 측정하기 위한 로드셀으로 연결되어 있다. 첫 번째 스팅어는 가진기와 로드셀을 연결하는 역할을 하고 가진기에 걸리는 모멘트를 상쇄시키기 위해 리니어 부쉬로 지지하였다. 두 번째 스팅어는 공간적 제약으로 인해 로드셀과 영구자석을 직접 연결하지 못하여 길이를 연장하는 역할이다.

사용된 영구자석은 NdFe 50이고, 영구자석은 철판으로 이루어진 자석 요크에 부착되어 있고 이 자석 요크를 두 번째 스팅어와 볼트로 연결하였다. 영구자석의 정확한 진동량을 생성하기 위해 자석 요크에 가속도계를 연결하여 실제 가속도를 측정 및 피드백하였다. 진동 신호를 생성하고 가속도계의 데이터를 측정하는 장비로는 Siemens 社の LMS SCADAS를 이용하였다. 정확한 공극의 설정을 위해서 고정된 철판의 위치를 변경할 수 있는 선형 1축 마이크로 스테이지를 사용하였다. 실험에 사용된 치수와 조건은 표 3과 그림 5와 같다.

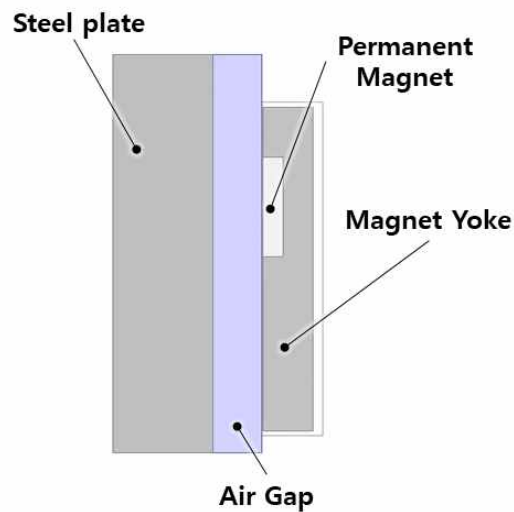
[표 3] 실험 셋업의 치수 및 조건

Parameter	Value
Magnet Width	30 mm
Magnet Height	10 mm
Magnet Thickness	2 mm
Magnet Yoke Width	30 mm
Magnet Yoke Height	32.5 mm
Magnet Yoke Thickness	5 mm
Steel Plate Width	65 mm
Steel Plate Height	40 mm
Steel Plate Thickness	10 mm
Air Gap	5 mm
Frequency of Excitation	100Hz fixed sine
Amplitude of Excitation	0.05 mm



[그림 5] 자석, 자석 요크, 철판의 형상 및 치수

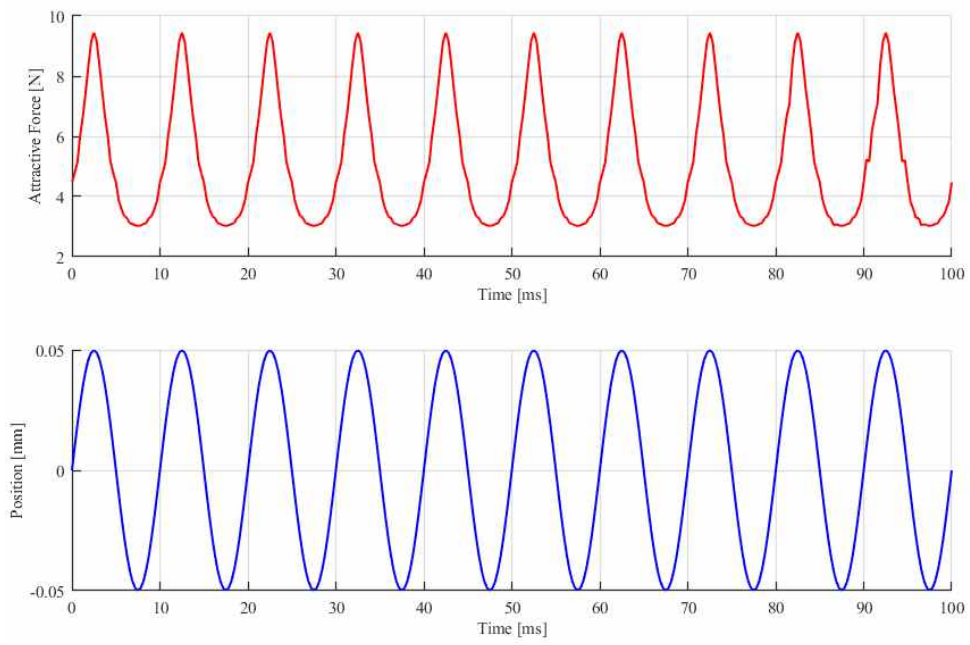
B. 전자기 힘 검증 시뮬레이션 모델



[그림 6] 작성된 검증용 시뮬레이션 모델

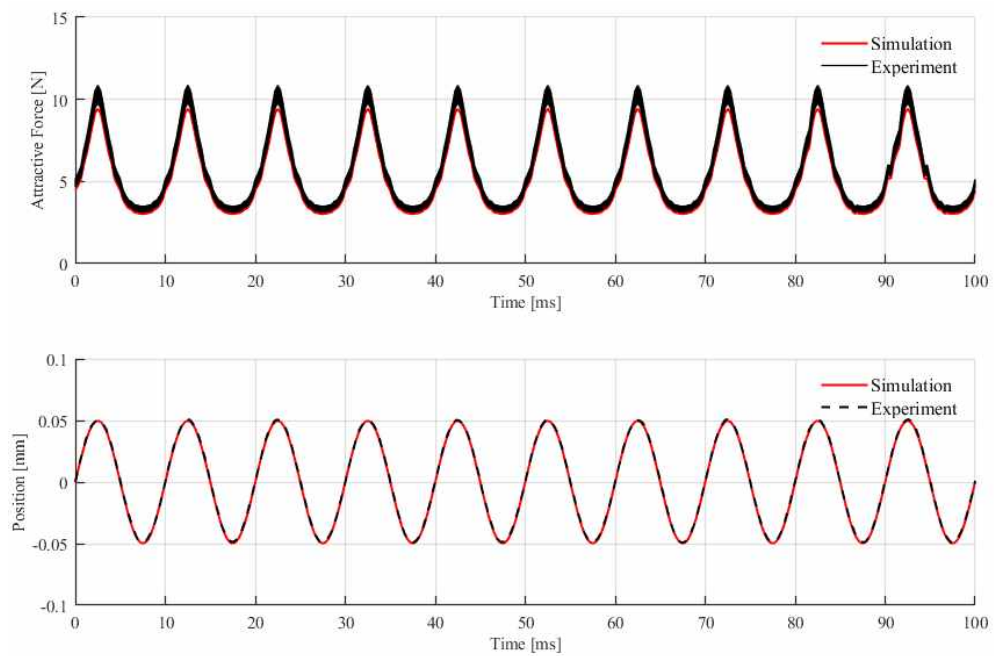
시뮬레이션 모델은 그림 4의 구성된 실험 셋업을 바탕으로 나사 탭을 생략하여 작성하였다. 실제로 진동하는 영구자석과 자석 요크는 이동영역을 설정하였고 실험 조건과 같이 100 Hz, 0.05 mm 진폭으로 진동하게 설정하였다.

시뮬레이션의 결과는 양의 위치에 있을 때 공극이 줄어들고 음의 위치에 있을 때 공극이 늘어나는 형태로 그림 7과 같다. 공극이 줄어들 때 급격하게 힘이 증가하고 공극이 늘어날 때 완만하게 힘이 감소하는 형태로서 자기 흡착력의 성질에 잘 부합한다.

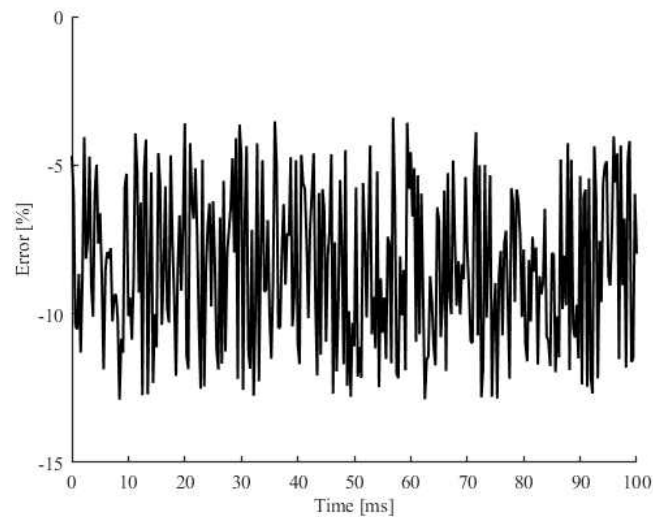


[그림 7] 시뮬레이션 모델 결과

C. 실험 & 시뮬레이션 결과 비교



[그림 8] 실험 & 시뮬레이션 결과



[그림 9] 실험 & 시뮬레이션 결과

실험결과와 시뮬레이션은 그림 8과 같이 모양과 크기는 비교적 잘 일치하였다. 그러나 전체적으로 실험의 데이터가 큰 경향을 보였는데 이는 자석의 두께가 2 mm보다 조금 두꺼워 공극이 줄고 발생시키는 자화력이 더 크기 때문이다. 또한 약간의 위치 오차가 발생하기 때문에 이 또한 흡착력의 오차로 작용하였다. 실험을 기준으로 설정하였을 때 시뮬레이션의 최대 오차는 -12.9%이다. 시뮬레이션의 결과는 양의 위치에 있을 때 공극이 줄어들고 음의 위치에 있을 때 공극이 늘어나는 형태로 그림 7과 같다. 공극이 줄어들 때 급격하게 힘이 증가하고 공극이 늘어날 때 완만하게 힘이 감소하는 형태로서 자기 흡착력의 성질에 잘 부합한다.

② 3D 전자기 힘 해석 모델 구축

A. 대상 시스템의 전자기 회로 구성

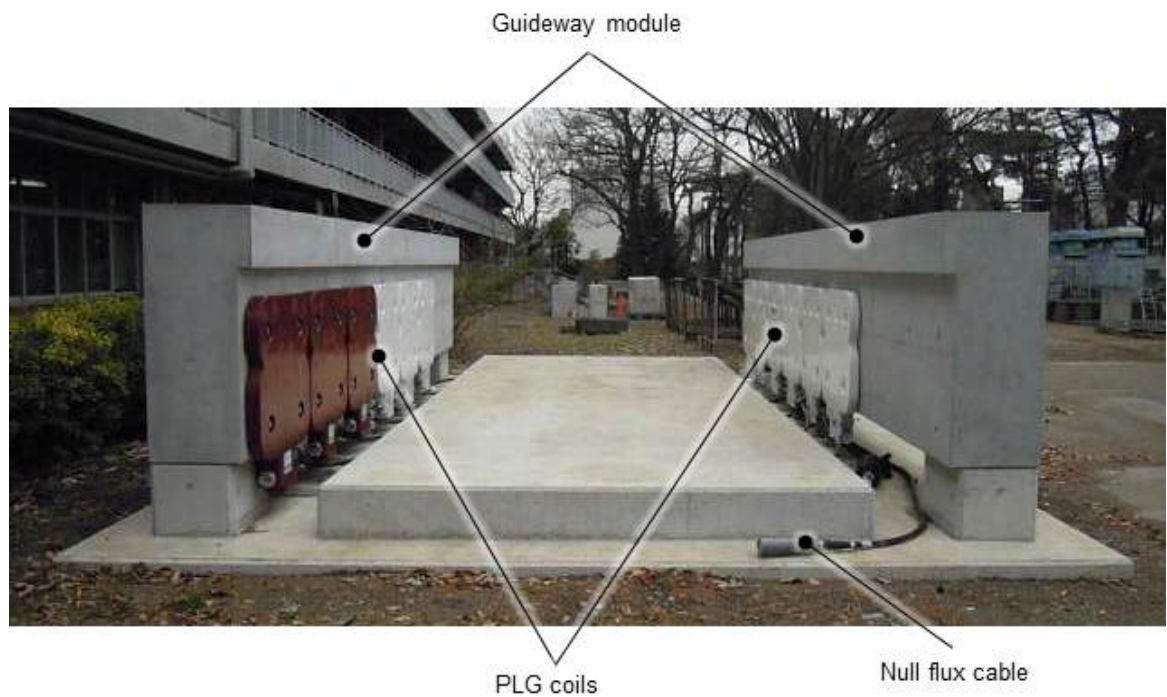
초고속 자기부상열차의 동특성에 영향을 주는 외력 중 가장 큰 영향을 미치는 전자기력(Levitation, Guidance Force)의 정확한 해석을 위해서 유한요소 해석 프로그램을 통한 3D 모델 구축 및 정확한 전자기력 해석을 수행했다. 초고속 자기부상열차의 전자기력을 발생시키는 부분은 차량 전체에 골고루 분포하지 않고 대차에 집중되어 있다. 중간 차체의 경우, 전면부와 후면부 모두 반개의 대차에 연결되어 차체 간의 연결이 되어 있다. 하나의 대차에는 각 측면에 2쌍의 초전도 코일(4개의 초전도 코일)이 존재한다. 초전도체는 냉각을 위하여 크라이오스탯(Cryostat) 내부에 설치된다.

자기부상열차는 차량의 측면에 해당되는 궤도 부분에 추진/부상/안내력을 발생시키기 위한 지상 유도코일 및 추진코일이 설치된다. 부상/안내력을 발생시키는 지상 유도코일은 8자 모양의 널 플럭스(Null Flux) 코일이 설치되어 있다. 이는 차량이 진행하면서 궤도에서의 자속 밀도가 변화하여 지상코일에 전류가 유도되면서 차량의 초전도

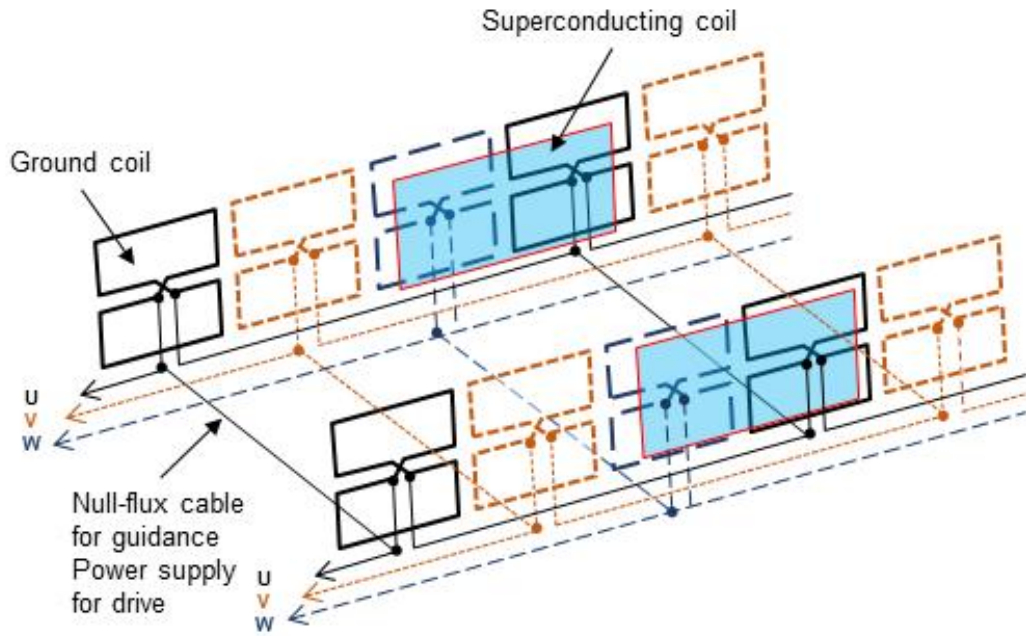
자석에 반발력을 발생시키는 원리이다.

그림 11과 같이 자속의 변화에 의해 발생하는 유도전류는 8자 코일이 교차하는 중앙점에서 0이 되게 되어 차량의 처짐이 발생할 때 차량이 중앙점에 위치하도록 전자기력이 작용한다. 자기부상열차가 중력에 의해 지상 유도코일보다 아래에 위치하게 되면 앞서 설명한 효과에 의해 부상력을 얻는다. 궤도의 양측의 지상 유도코일은 널 플럭스 케이블(Null Flux Cable)로 연결이 되어 안내력을 최대화 하도록 구성되어 있다.

최근에는 궤도 코일의 건설비 감소를 위해 추진코일과 지상 유도코일을 결합한 PLG 코일(propulsion, levitation and guidance type-ground coil)이 연구되고 있다. 대상 시스템이 운영될 Chuo Shinkansen 구간은 PLG 코일로 건설 중이다. 따라서 본 연구에서도 PLG 코일을 사용하고자 한다. 대상 시스템의 구성은 그림 10, 11과 같다.



[그림 10] PLG 코일이 설치된 궤도 모델 [4]

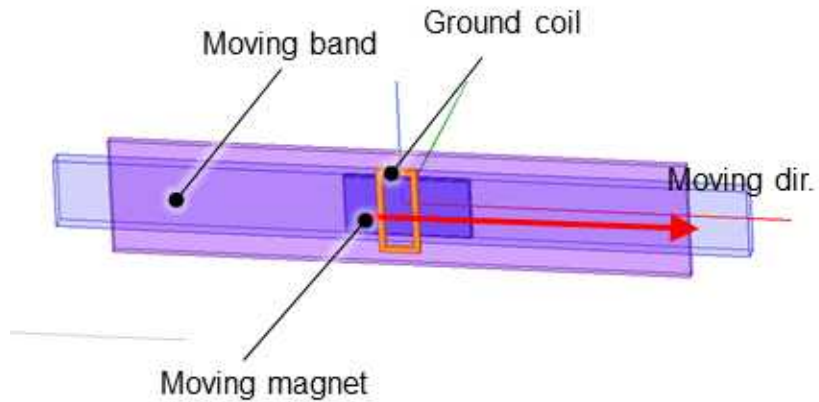


[그림 11] L0 series 가이드웨이 회로도

B. Patch test 모델 구축

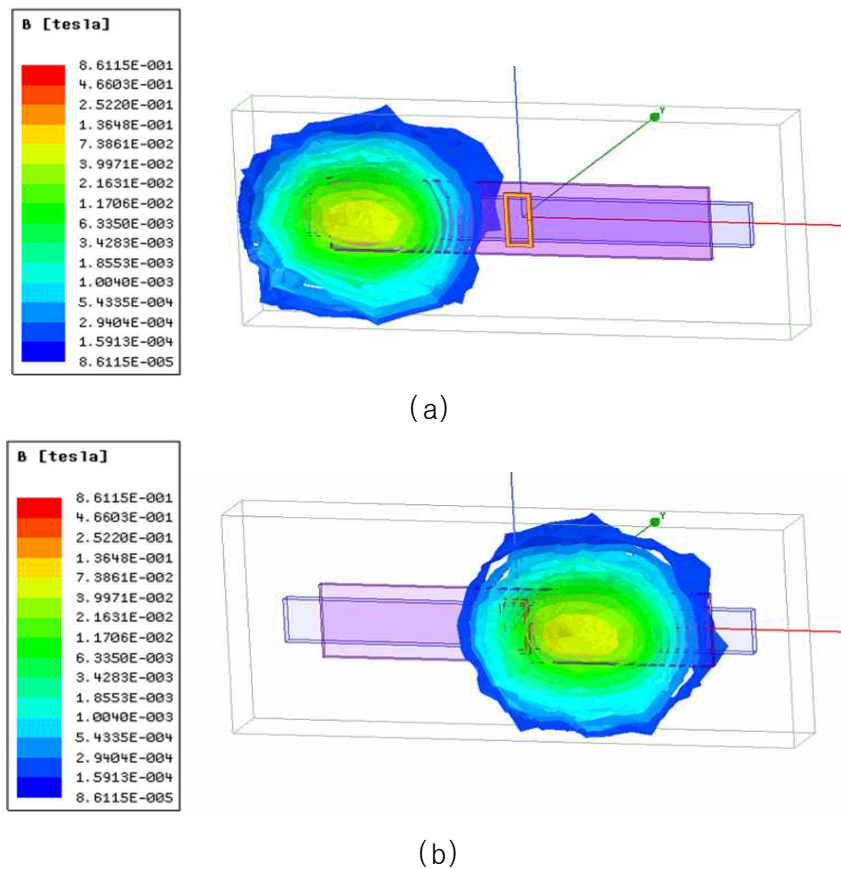
전자기 회로를 모사하기 위한 해석 모델을 작성하려면 차량의 진행에 따른 자속 밀도의 변화와 이에 따라 지상코일에서의 전류가 유도되는 유한요소 모델을 구축해야 한다. 이를 확인하기 위해 그림 12와 같은 시간 이력 테스트 모델을 작성하였다.

테스트 모델은 고정되어 있는 지상코일에 영구자석이 시간에 따라 이동하면서 지상코일 내부에 유도전류를 발생시키는 것을 모사하였다. 자기부상열차에서 자기장을 발생시키는 초전도 코일은 해석 시간을 줄이기 위해 자기장을 발생시키고 단순한 구조를 갖는 영구자석으로 교체하였다. 시간 이력 전자기 해석에서는 이동하는 물체의 경로에 맞추어 Moving band가 설정되어 매 time step마다 격자가 형성되는 방법을 사용한다. 이 영역은 움직이는 물체와 접촉하지 않게 이동하는 영구자석보다 조금 큰 폭과 높이를 갖도록 설정하였다. Moving band와 지상코일 사이에는 공극 영역을 설정하였다. 공극 영역의 격자는 해석의 정확성을 위해 4개 층 이상의 격자가 들어갈 수 있도록 설정하였다.

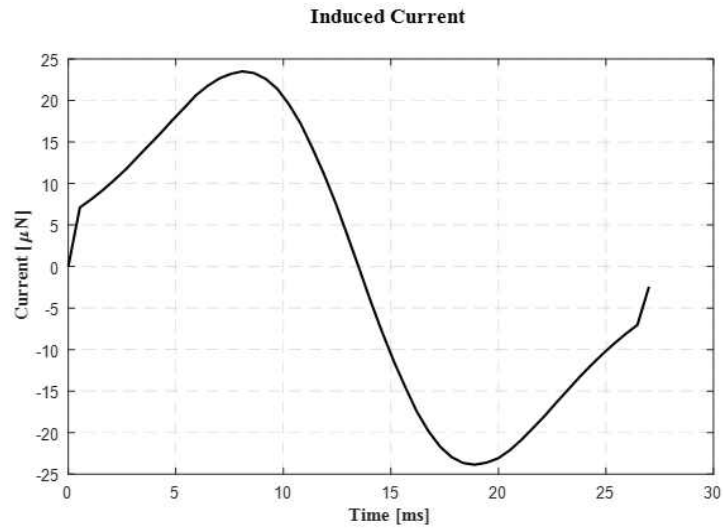


[그림 12] 자속 밀도 변화 및 유도전류 확인 모델

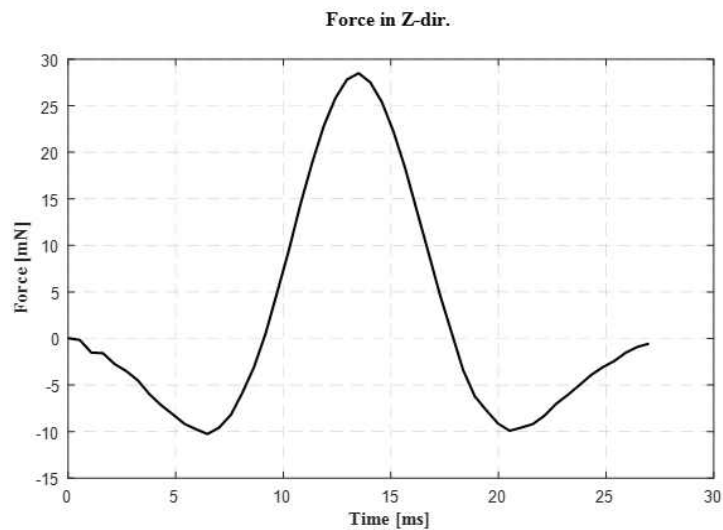
해석 결과, 자속 밀도는 그림 13과 같이 영구자석이 이동함에 따라 변화하였다. 정지한 코일에서는 그림 14와 같이 전류가 유도되었는데, 이는 자속 밀도가 변화하면 이를 저항하는 방향으로 전류가 유도되는 렌츠의 법칙에 의한 것이다. 전류 이에 따른 부상력은 그림 15와 같이 발생하였다. 본 Patch test 모델은 방법론적 접근이기 때문에 자속 밀도의 변화나 유도된 전류의 크기, 부상력의 크기에 대해서는 별도의 분석을 하지 않았다.



[그림 13] 발생 자속 밀도 분포 (a) $t = 0\text{sec}$, (b) $t = 0.015\text{sec}$



[그림 14] 자석 진행에 따른 유도전류



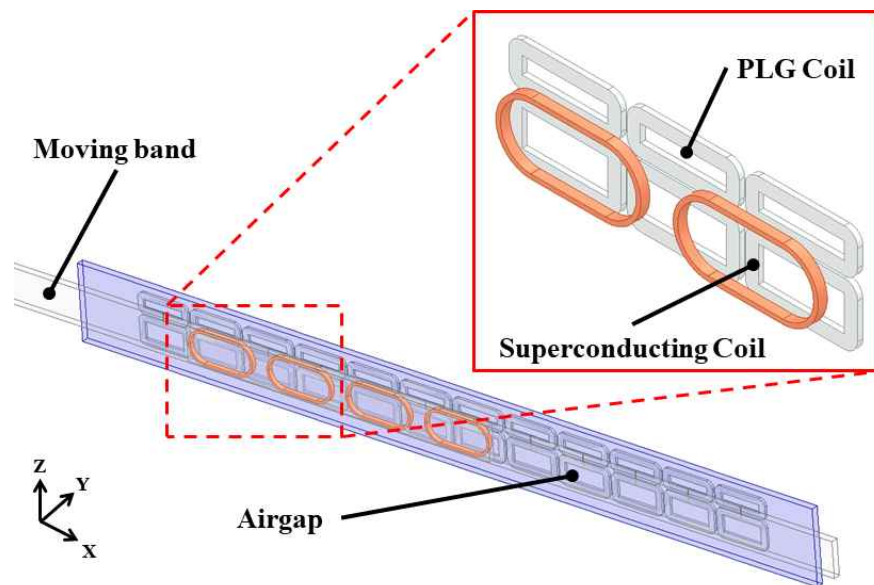
[그림 15] 자석 진행에 따른 발생 부상력

C. 전자기 힘 해석 범위 선정

전자기 해석에 있어서 자기부상열차는 구조물의 크기와 빠른 주행 속도로 인하여 큰 해석영역을 갖는다. 자기부상열차 전체를 시간이력 해석하기에는 해석범위가 광범위하기 때문에 해석 모델의 단순화를 통해 해석시간을 단축하였다. 작성된 해석 모델의 범위는 대차의 한 측면에 설치된 초전도 코일과 이와 상호작용하는 지상코일로 선정되었다.

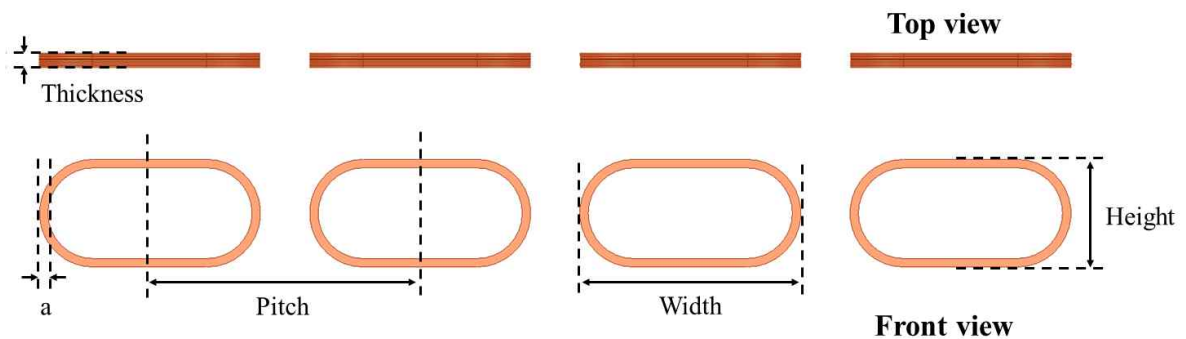
전자기 모델 구축을 위해 실제 Chuo Shinkansen L0의 초전도 코일과 PLG 코일의 매개변수들을 조사하였다. 문헌의 매개변수를 기반으로 초전도 코일 및 PLG 코일은 단순화를 거쳐 작성된 전자기 해석 모델은 그림 16에 나타나있다. 작성된 모델은 자

기장을 발생시키는 초전도 코일과 추진/부상/안내력을 발생시키는 지상코일이다. 이외에는 앞서 테스트 모델에서 적용한 moving band와 공극을 모델링하였다. 차이점으로는 여러 개의 초전도 코일의 움직임 모사하기 위해 코일들을 감싸는 가상의 Simply connected region(Inner)을 만들어 초전도 코일을 내부에 위치시켰다. 실제 모델과 다른 점으로는 냉각을 위한 크라이오스탯과 자기장 차폐를 위한 차폐 장비, 지상코일을 보호하기 위한 벽 및 보강재가 없기 때문에 실제 결과와는 약간의 오차를 가질 수 있다.



[그림 16] 1/4 축소 전자기 해석 모델

D. 초전도 코일 모델 단순화



[그림 17] 초전도 코일 모델

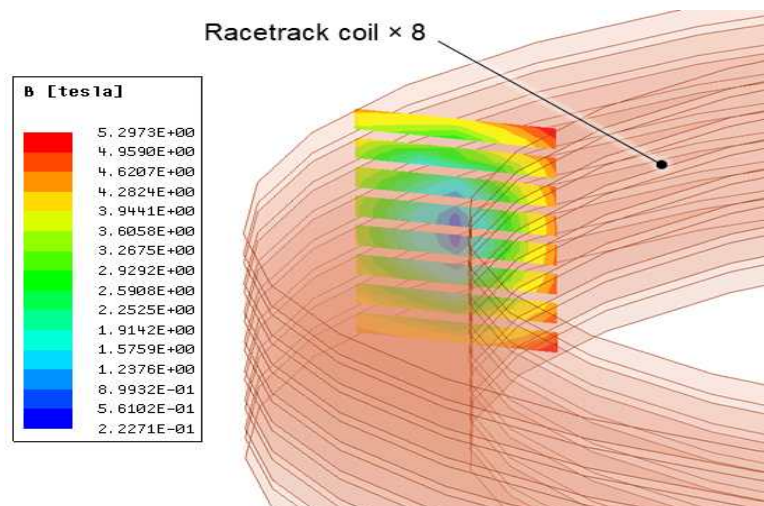
작성된 모델의 초전도 코일 쌍은 그림 17과 같다. 각 초전도 코일간의 거리는 자극

피치를 기반으로 1.35 m의 간격으로 모델링 되었으며, 인접한 초전도 코일은 서로 반대 방향으로 전류를 인가하여 N극과 S극이 번갈아 위치하도록 하였다. 작성된 초전도 코일에 대한 치수와 입력 항은 표 4와 같다.

[표 4] 초전도 코일 모델 치수 및 입력항 [5]

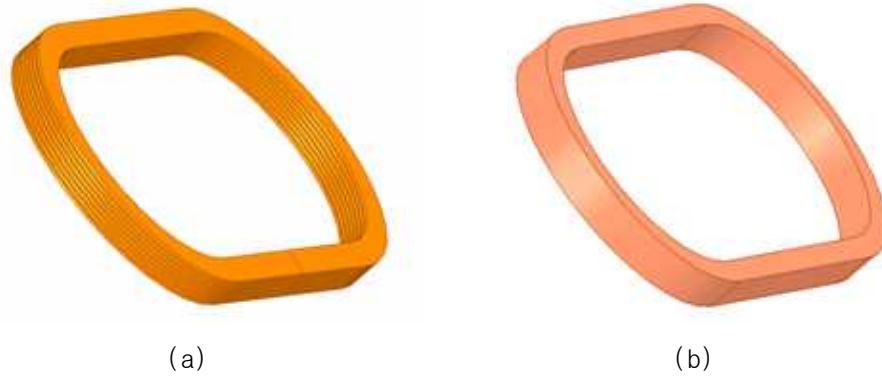
Parameter	Value
너비	1120 mm
높이	550 mm
두께	78 mm
길이 a	50 mm
극 간격	1350 mm
Racetrack 개수	8 개
track당 턴수	350 turns
총 턴수	2800 turns
작동 전류	250 A
기자력	700 kA

실제 초전도 코일은 하나의 권선이 아니라 8개의 Racetrack 코일이 병렬로 연결되어 있다. Racetrack 당 두께는 6 mm이며 그 간격은 8.5 mm로 설정하여 총 두께는 65.5 mm이다. 실제 초전도 코일과 동일하게 작성한 모델의 해석 결과는 그림 18에 나타나 있다. 참고 문헌[5]에 따르면 코일의 모서리에서 발생하는 자속 밀도 5.1 T가 발생하고 동일한 해석 모델의 자속 밀도는 5.07 T로 약 0.6%의 오차를 갖는 것으로 검증하였다.



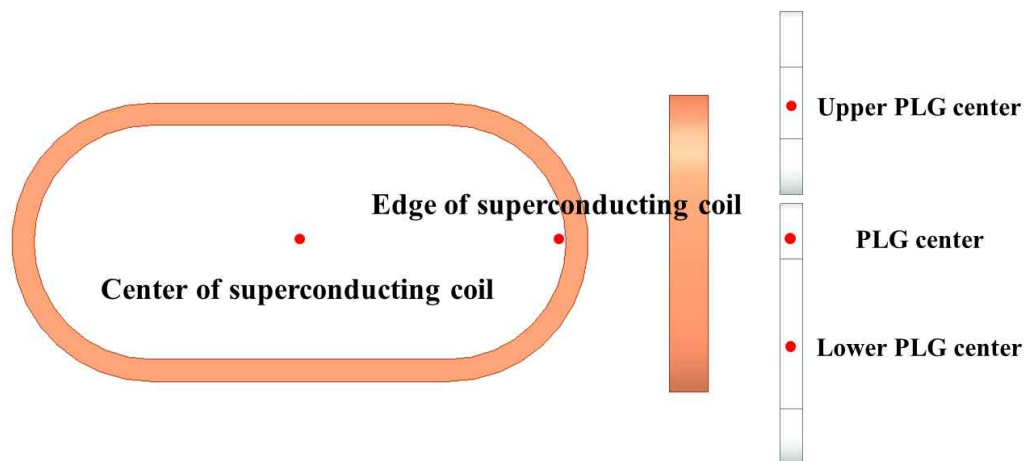
[그림 18] 초전도 코일 모델에 의해 발생한 자속 밀도 분포

유한요소모델의 격자수를 줄이기 위해 8개의 Racetrack을 갖는 초전도 코일이 아닌 하나의 권선으로 이루어진 초전도 코일을 모델로 작성하였다. 실제 초전도 코일과 단순화된 초전도 코일은 그림 19에 나타나 있다. Racetrack 초전도 코일을 단순화하면 전류밀도가 변화하여 코일 외부에서의 자속이 변한다. 따라서 초전도 코일의 두께를 지상코일의 위치에서 발생하는 자속 밀도가 동일하도록 Parametric study를 통해 78 mm로 설정하였다.



[그림 19] (a) REBCO 초전도 코일, (b) 단순화 초전도 코일

두 초전도 코일에서 발생하는 자속 밀도의 수치와 주요 지점에서의 자속 밀도의 값은 그림 20과 표 5에 나타나 있다. 3D 시간 이력 해석 결과에 영향을 미치는 주요 지점은 초전도 코일의 모서리와 중앙, 유도전류가 발생하는 지상코일의 상부, 하부, 그리고 전체 지상코일의 중앙으로 선정하였고 각 지점의 위치는 그림 20에 나타나 있다.



[그림 20] 자속 밀도 비교 위치

표 5는 기본 REBCO 초전도 코일 모델에서 발생하는 자속 밀도와 단순화된 초전도 코일에서 발생하는 자속 밀도의 해석 결과를 비교한 표이다. 초전도 코일의 모서리에서 발생하는 자속 밀도는 4.84 T로 기존 논문과 4.62%의 오차를 갖는다. 코일의 두께가 증가하여 코일 내부의 전류밀도가 감소하여 발생한 오차라고 할 수 있다. 하지만

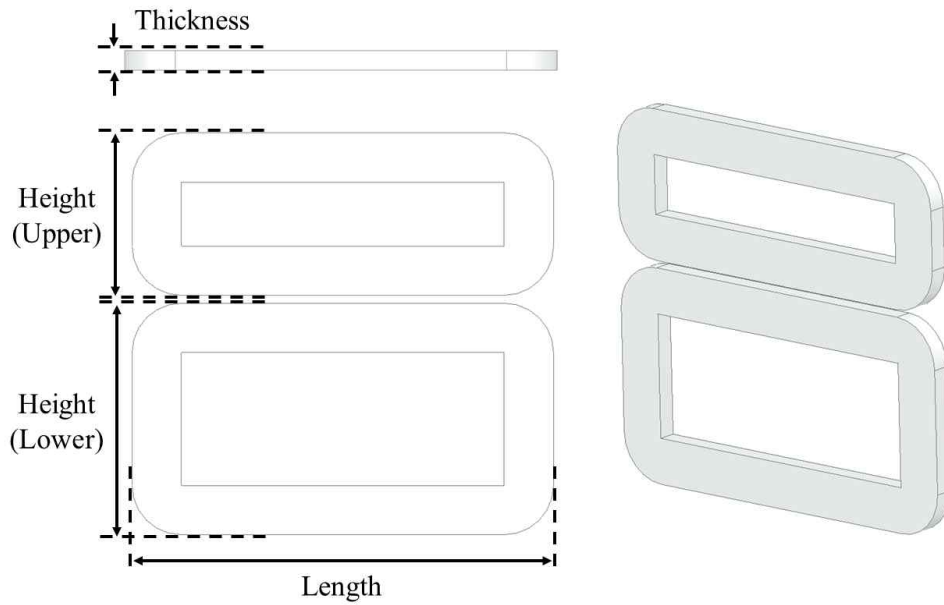
지상코일의 위치에서 발생하는 자속 밀도의 최대 오차는 1.05%로 시간 이력 해석에서 실제 코일과 동일한 자속을 발생시킨다.

[표 5] REBCO 코일과 단순화 초전도 코일 자속 밀도 비교

Parameter	REBCO 모델 자속 밀도	단순화 초전도 코일 자속 밀도	오차 [%]
초전도 코일 중심	1.3033 T	1.2789 T	1.87
초전도 코일 모서리	5.0707 T	4.8363 T	4.62
PLG 코일 중심	1.0143 T	1.0079 T	0.61
상부 PLG 코일 중심	0.7557 T	0.7586 T	-0.38
하부 PLG 코일 중심	0.8462 T	0.8551 T	-1.05

D. 지상코일 모델 구축

궤도에 설치되는 지상코일은 추진코일과 지상 유도코일을 결합한 PLG 코일로 작성하였다. 작성된 PLG 코일은 참고 문헌 [6]을 기반으로 그림 21과 같이 구축하였다 작성에 사용된 치수는 표 6에 나타나 있다. PLG 코일간의 거리는 0.9 m의 간격으로 모델링 되었다. 이는 자극 피치의 1/3에 해당하여 3개의 PLG 코일은 하나의 자극 피치를 형성한다. 상부 코일과 하부 코일은 비대칭 형상을 이뤄 대칭 형상보다 큰 부상력을 발생시킨다.



[그림 21] 지상 PLG 코일 모델

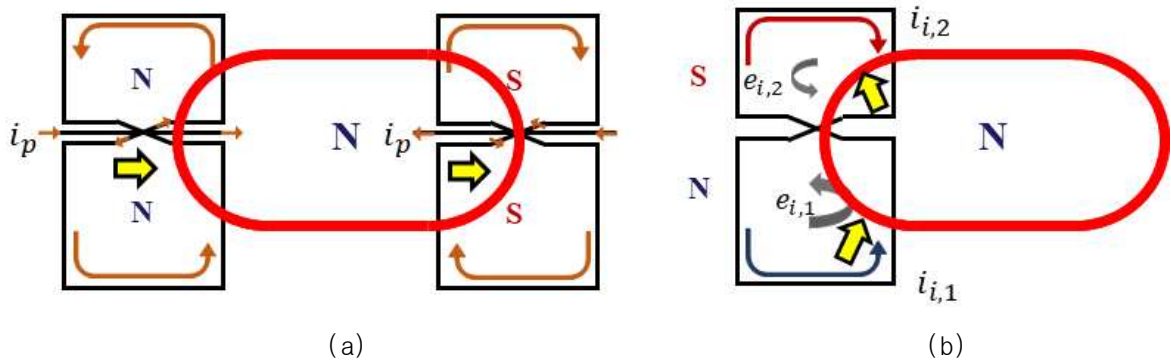
[표 6] 지상 PLG 코일 모델 치수 및 입력항 [6]

Parameter	value
Thickness	40 mm
Height_upper	330 mm
Height_lower	470 mm
Length	855 mm
Pitch	900 mm
Cross section of coil conductor	100 mm × 40 mm
Gap between superconducting coil	185 mm

PLG 코일 내부의 전류는 그림 22와 같이 외부에서 인가되는 추진전류와 자속의 변화로 인한 유도전류로 구분된다. 인가되는 추진전류는 참고 문헌[6]에 따라 390 A의 크기와 속도를 자극 피치로 나눈 51.44 Hz의 주파수를 갖는다. 3상으로 인가되는 추진전류는 그림 22 (a)와 같이 코일 내부에서 PLG 코일의 상부와 하부에 같은 방향의 자속을 발생시켜 대차에 추진력을 발생시킨다.

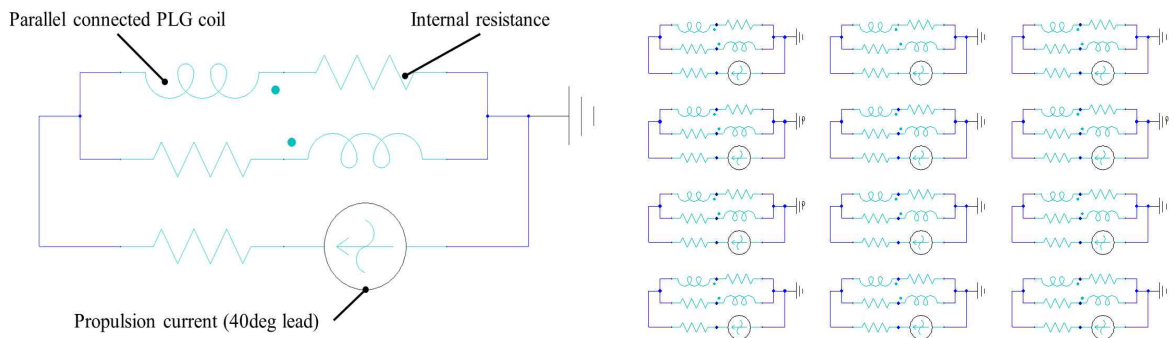
PLG 코일의 유도전류는 널 플럭스 코일 효과로 상부 코일과 하부 코일의 유도기전력의 차이로 인해 발생한다. 널 플럭스 코일은 두 개의 권선이 8자 형태로 연결되어 있어 회로 내에서 발생하는 유도기전력을 상쇄시킨다. PLG 코일 내부에 발생하는 기전력과 유도전류의 방향은 그림 22 (b)에 나타나 있다. 초전도 코일이 수직 방향으로

치우치면 하부 코일에 더 큰 유도기전력이 발생되어 PLG 코일에서는 유도기전력이 큰 방향으로 전류가 발생한다. 유도전류에 의해 상부 코일과 하부 코일은 서로 반대 극성의 자속을 가지어 대차에 부상/안내력이 가해진다.



[그림 22] (a) 추진전류와 (b) 유도전류에 의해 발생하는 전자기력

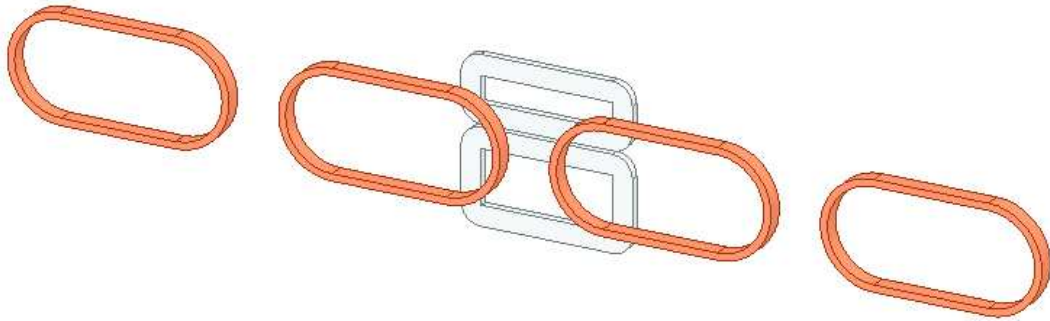
이 원리에 따라 지상코일의 연결은 그림 23과 같이 구성을 하였다. 지상코일의 상부 코일과 하부 코일의 방향을 반대로 하여 유도기전력이 상쇄되는 널 플럭스 효과가 발생하게 하였다. 추진전류의 인가를 위해 코일의 저항은 코일의 비저항과 코일 단면 및 턴 수 정보를 이용하여 입력하여 회로 모델을 작성하였다. 각각의 코일에는 390 A의 크기를 갖는 추진전류가 인접한 코일과 120°의 위상 차이를 갖고 인가된다.



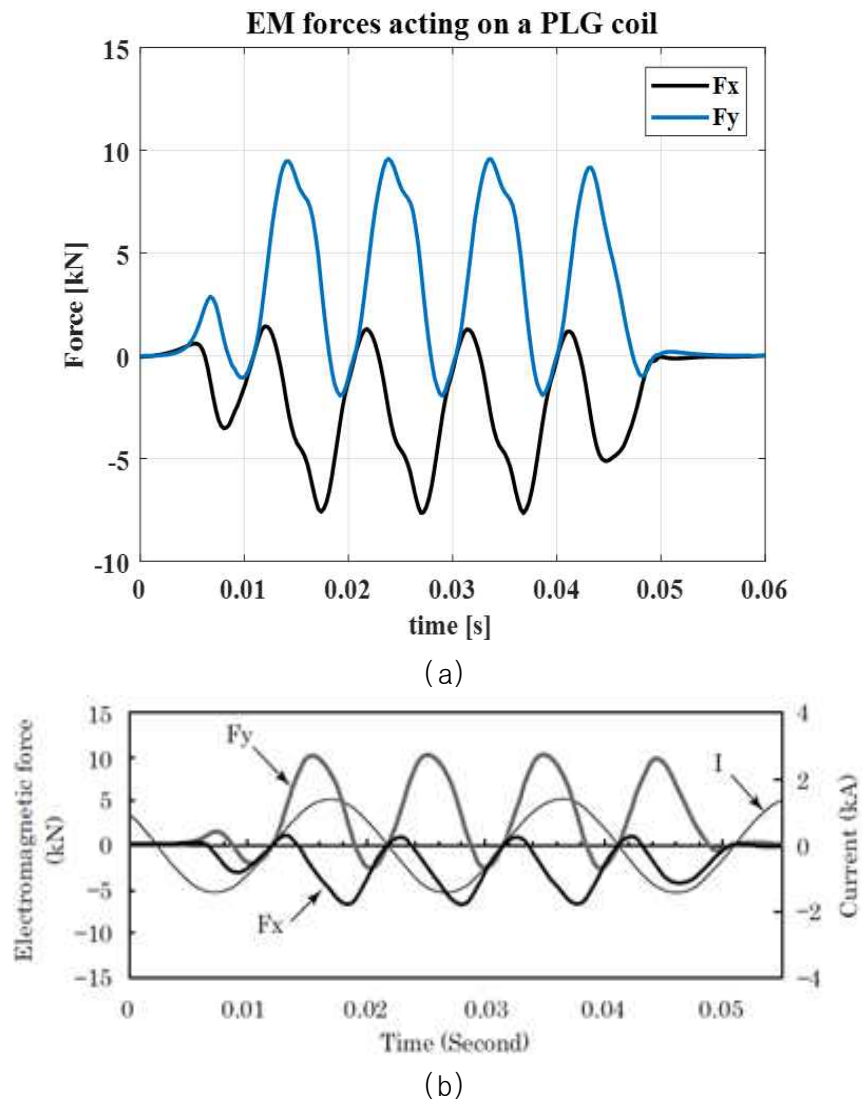
[그림 23] 지상 PLG 코일 회로도

E. 1 PLG - 4 초전도 코일 모델 검증

작성된 모델을 검증하기 위해 기존 문헌 [7]과 동일한 조건을 갖는 1개의 PLG 코일에 4개의 초전도 코일이 진행되는 모델을 그림 24와 같이 작성하였다. 초전도 코일과 PLG 코일 사이의 공극은 185 mm이고 초전도 코일의 속력은 138.8 m/s(500 km/h)이다. 해석 결과와 기존 논문의 실험 결과와 비교한 결과는 그림 25에 나타나 있다.



[그림 24] 1 PLG - 4 초전도 coils 모식도

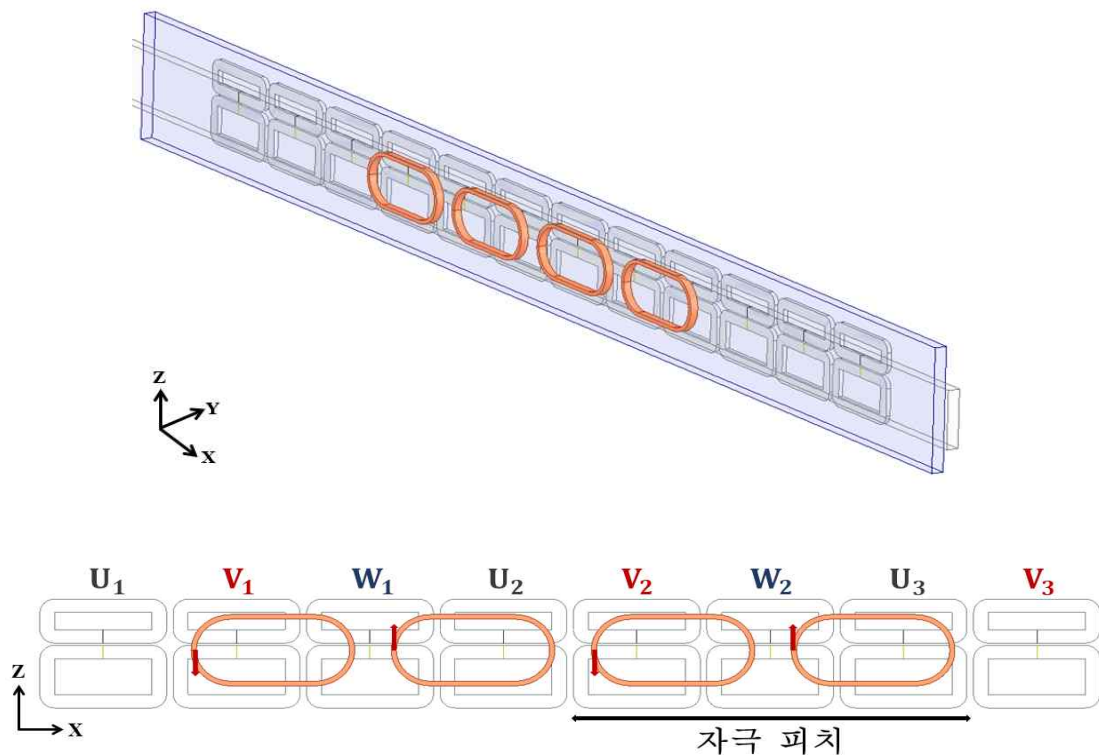


[그림 25] 1 PLG - 4 초전도 모델의 전자기력
(a) 해석 결과 (b) 실험 결과[7]

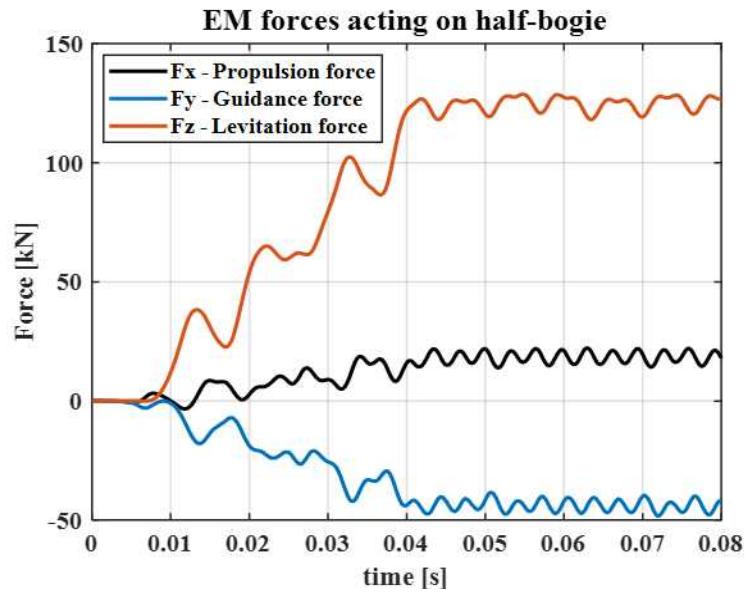
F. Half - 대차 모델 구축

앞서 검증한 1 PLG - 4 초전도 코일 해석 모델을 기반으로 대차가 궤도를 진행할 때 대차의 한 면에 발생하는 전자기력 계산 모델을 작성하였고 이는 그림 26에 나타나 있다. 차량이 주행할 때 1개의 대차는 6개의 초전도 코일을 동시에 지나가기 때문에 해석 모델은 자극 피치의 길이를 고려하여 4개의 초전도 코일과 12개의 PLG 코일을 작성하였다. 초전도 코일에 인가한 전류는 그림 26 (b)와 같이 초전도 코일 간의 자기력선이 서로 상쇄되지 않도록 인접한 코일과 반대되도록 설정하였다. 대차가 이동하는 속도는 기존 문헌에 따라 500 km/h이고, 외부 자기장의 해석 범위를 정하는 범위는 충분히 크게 만들어 자기력선이 왜곡되지 않도록 설정하였다.

그림 27은 차량이 수직 방향으로 50 mm만큼 처진 상태에서 500 km/h로 주행할 때 발생하는 전자기력이 나타나 있다. 차량이 진행할 때 대차에 한 면에 발생하는 부상력은 한 자극 피치 동안 움직일 때 평균 124.87 kN의 크기와 PLG 코일의 자극 피치를 속도로 나눈 154 Hz의 주파수를 가진다. 안내력은 렌츠의 법칙에 의해 자속 변화의 반대 방향으로 유도전류가 발생해 척력이 발생하고 한 자극 피치 동안 평균 44.03 kN의 크기와 308 Hz의 주기를 갖는다.



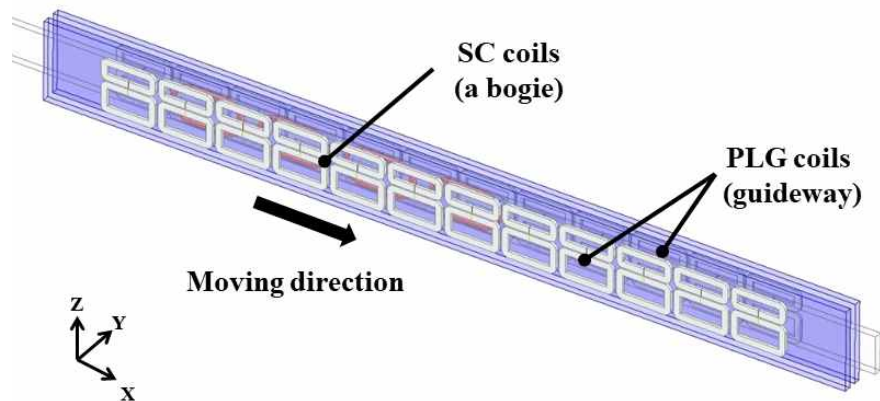
[그림 26] Half 대차 전자기 해석 모델 모식도



[그림 27] Half 대차 모델에서 대차에 발생하는 전자기력

G. Full-대차 모델 구축

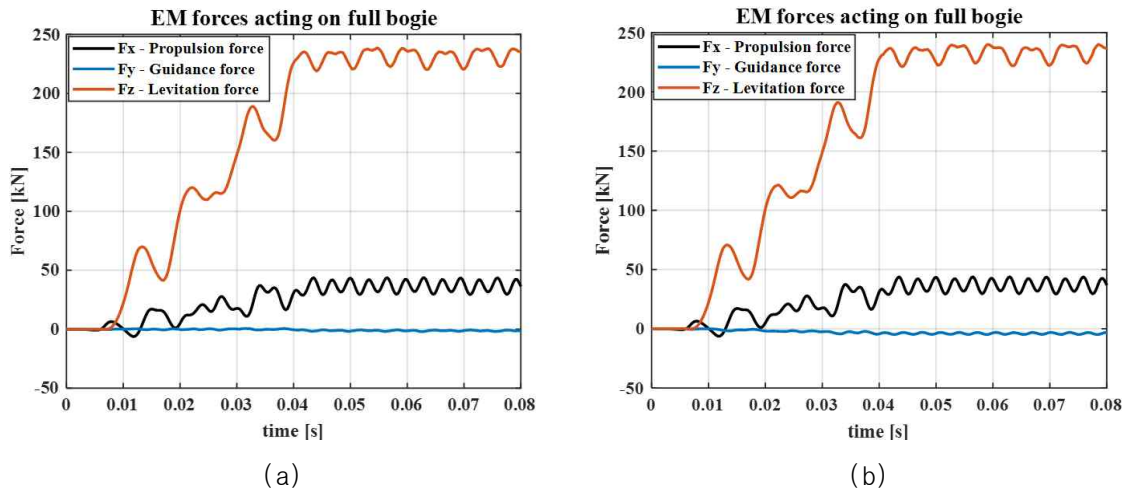
하나의 대차에서 발생하는 전자기력을 확인하기 위해 그림 28과 같이 4개의 초전도 코일이 두 쌍의 12개의 PLG 코일 사이를 지나가는 모델을 작성하였다. 전자기력은 초전도 코일과 PLG 코일사이의 공극에 의해 지배적인 영향을 받기 때문에 오른쪽의 PLG 코일은 왼쪽의 PLG 코일에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러므로 full 대차 모델은 4개의 초전도 코일과 24개의 PLG 코일로 구성된 모델로 단순화하였다.



[그림 28] Full 대차 모델 모식도

그림 29는 수직 방향으로 50 mm으로 초전도 코일이 처진 상태에서 수평 방향으로 차량의 처짐이 발생하지 않았을 때와 10 mm 발생했을 때의 해석 결과이다. 수평 방향의 처짐이 없기 때문에 차량에 발생하는 안내력은 양쪽의 지상코일에서 발생한 반

발력의 합력은 0이다. 차량이 오른쪽으로 10 mm 처짐이 발생하였을 때에는 그림 29 (b)와 같이 처짐이 더 가까이 발생하는 안내력이 증가하여 처짐의 반대 방향으로 힘이 발생하는 것을 확인할 수 있다.



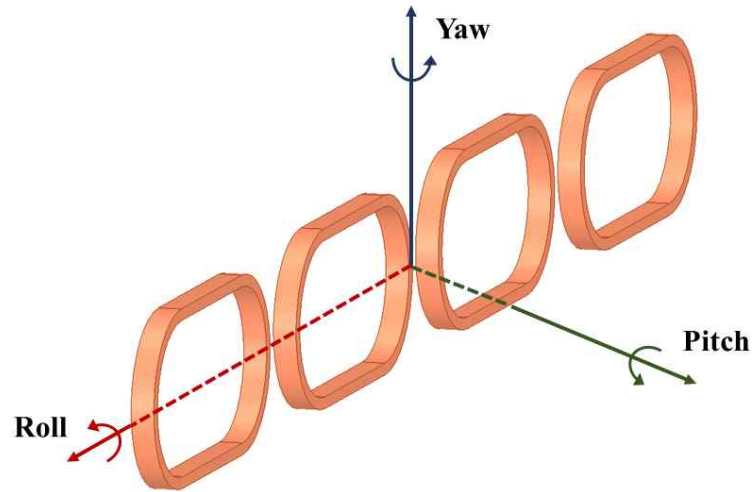
[그림 29] 수평 방향으로 처짐이 (a) 0 mm, (b) 10 mm 있을 때 대차에서 발생하는 전자기력

③ 3D 모델의 가정 검증

A. Roll, Yaw, Pitch 영향도 분석

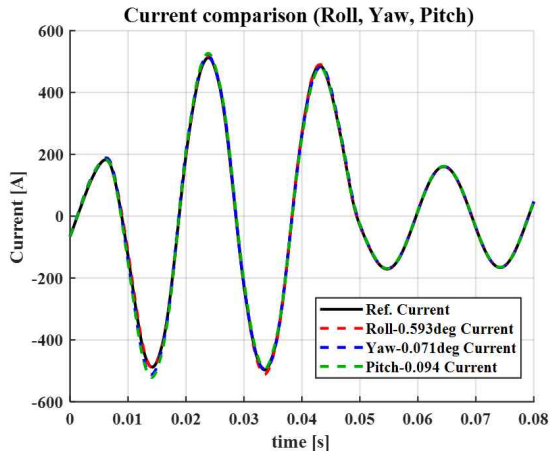
기존 모델에서는 대차가 평행하게 진행하는 것을 가정하여 전자기력을 추출하였다. 하지만 실제 차량은 6 자유도 운동을 하며 진행하면서 Roll, Yaw와 Pitch가 발생하게 되기 때문에 차량의 회전 영향을 확인하기 위한 해석을 진행하였다.

실제 차량이 회전하면 차량의 길이와 폭에 의해 지상코일과 대차 사이의 상대 위치의 변화가 일어난다. 이 영향을 제외하고 회전 각도에 의한 영향을 확인하기 위해 그림 30와 같이 초전도 코일을 중심으로 회전하여 기존 해석 결과와 비교하였다. 회전 각도는 본 연구에서 제시한 수직 방향 20 mm, 수평 방향 15 mm를 기준으로 차량이 회전하였을 때의 각도를 계산하여 해석을 진행하였다.

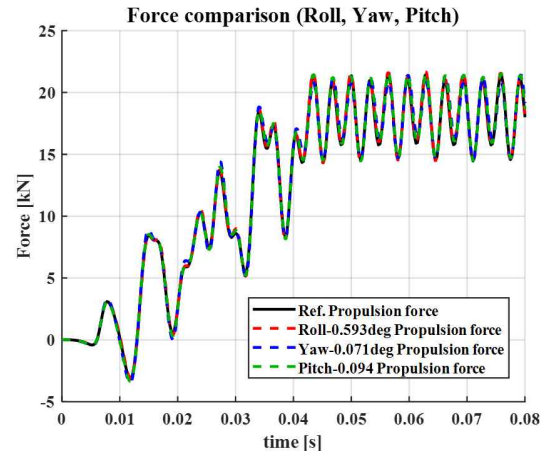


[그림 30] 초전도 코일의 회전 축 좌표

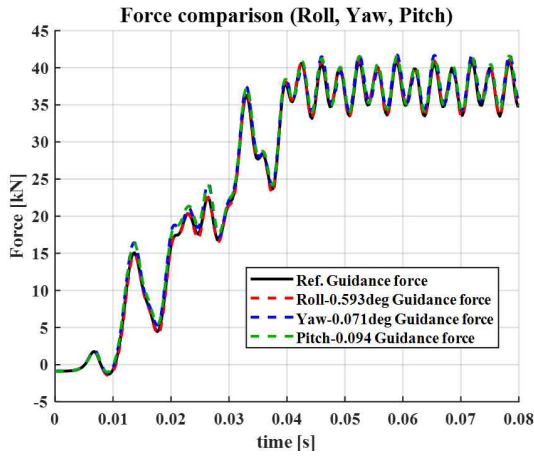
그림 31 (a)는 지상코일에서 발생하는 유도전류, 그림 31 (b), (c), (d)는 초전도 코일이 Roll, Yaw, Pitch 방향으로 회전이 발생한 경우 대차에서 발생하는 전자기력을 비교한 도표이다. 비교 데이터는 초전도 코일이 지상코일 대비 수직 방향 45 mm 처짐이 발생하고, 수평 방향으로 처짐 0 mm인 상태에서 회전이 없는 경우의 해석 결과이다. 차량의 Roll과 Pitch는 초전도 코일과 PLG 코일의 상대거리의 수직 방향으로 주로 영향을 미치기 때문에 차량에 Roll이 발생하는 수직 방향으로 초전도 코일이 20 mm 처짐이 발생하는 각도 0.593° 를 회전각도로 설정하였다. 이와 마찬가지로 Pitch 회전 각도는 0.094° 로 설정하였고 Yaw 회전 각도는 차량이 회전할 때 수평 방향으로 15 mm 추가 공극이 발생하는 0.071° 로 설정하였다. 해석 결과를 통해 차량이 진동하는 범위 내에서 발생하는 회전에 대한 전자기력의 영향은 초전도 코일과 PLG 코일 사이의 상대 위치의 변화에 대한 영향은 거의 없다고 판단하였다.



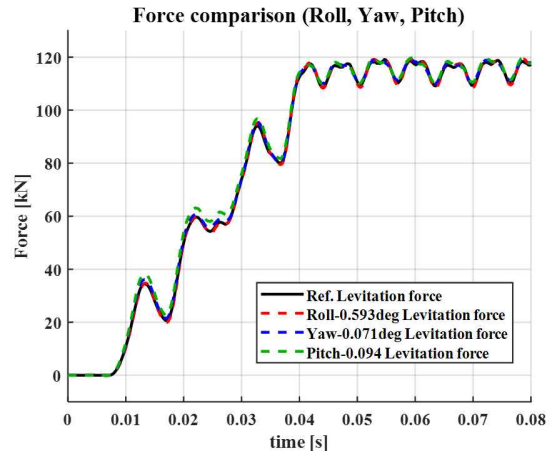
(a)



(b)



(c)



(d)

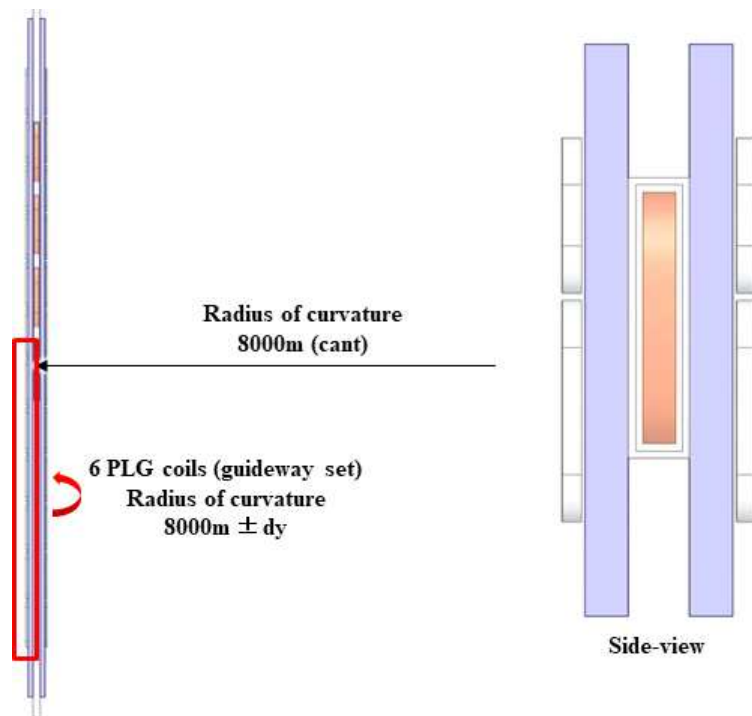
[그림 31] 회전 발생 해석 결과 비교

(a) PLG 코일 전류, (b) 추진력, (c) 안내력, (d) 부상력

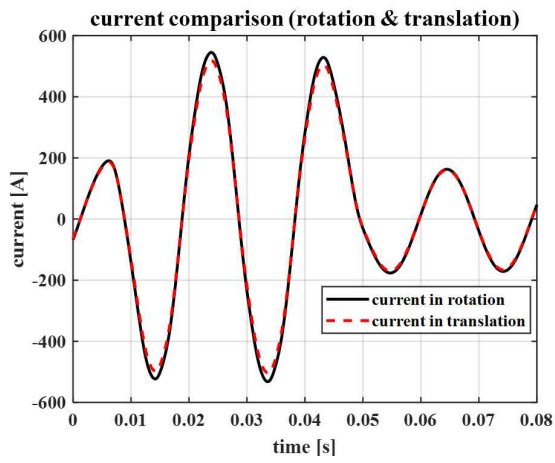
B. 곡선 주로 영향도 분석

동역학 모델에서 사용할 차량이 500 km/h로 곡선 주행을 하는 경우 전자기력의 미치는 영향을 확인하기 위한 해석을 진행하였다. 그림 32는 곡선 주로에서의 전자기 해석 모델이다. 주행 궤도의 기본 구성단위는 6개의 PLG 코일 단위로 이루어지기 때문에 그림 32와 같이 6개의 PLG 코일을 단위로 회전해 곡선 주로를 모사하였다. PLG 코일의 회전 각도는 참고 논문 [8]에 나와 있듯이 최소 곡률 반경 8000 m를 중심으로 공극을 고려하여 회전 각도를 설정하였다.

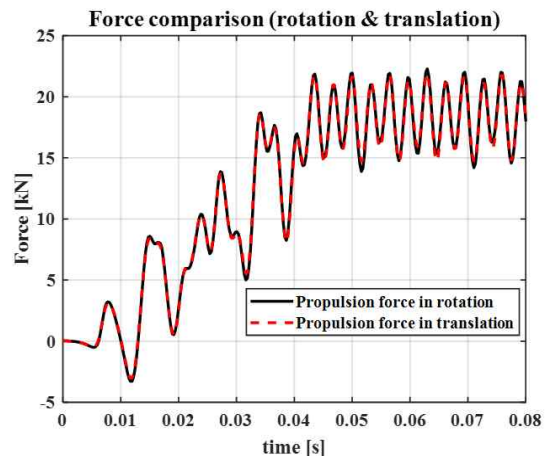
곡선 주로와 직선 주로를 비교한 해석 결과는 그림 33에 나타나 있다. 그림 33 (a)는 지상코일에서 발생하는 유도전류, 그림 33 (b), (c), (d)는 곡선 주로를 진행할 때 대차에서 발생하는 전자기력이다. 해석 결과를 비교해 보면 곡선 주로에서 대차에 발생하는 전자기력은 곡률 반경이 커(≥ 8000 m) 직선 주행과 거의 유사함을 확인할 수 있다.



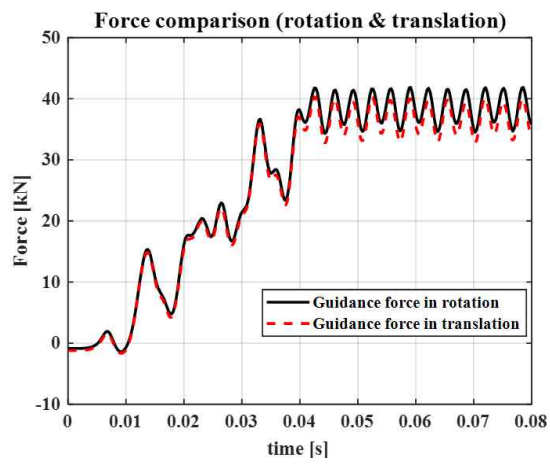
[그림 32] 곡선 주로 진행 모델 모식도



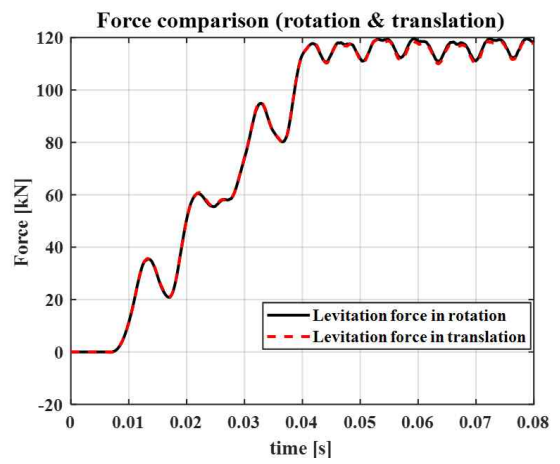
(a)



(b)



(c)



(d)

[그림 33] 곡선 주로 해석 결과 비교

(a) PLG 코일 전류, (b) 추진력, (c) 안내력, (d) 부상력

④ 최적 전자기 힘 계산을 위한 Analytical 모델 작성

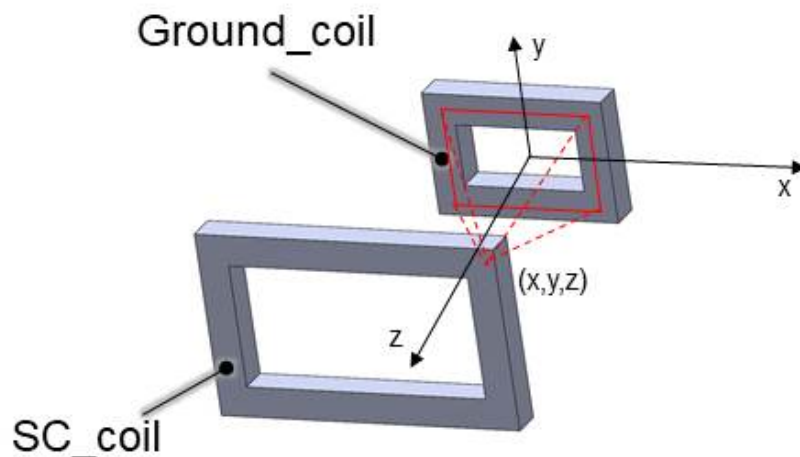
로렌츠 힘(Lorentz force)은 자기장 내에 존재하는 전류에 따른 전자기력 발생 원리로서 자기부상열차에서 발생하는 힘 또한 로렌츠 힘으로 계산할 수 있다. 자기부상열차의 대차의 한쪽 측면에는 4개의 초전도 코일이 존재하고, 이 4개의 코일은 가이드 웨이에 존재하는 지상코일이 발생시키는 자기장에 의해 전자기력이 발생한다.

지상코일이 발생시키는 자기장은 추진을 위해 인가하는 전류와 초전도 코일이 이동함에 따라 발생하는 유도전류의 합으로 결정이 된다. 지상코일에 입력되는 전류의 파형을 파악하면 별도의 복잡한 해석 없이 자기부상열차에 가해지는 전자기력을 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 예측하기 힘든 유도전류에 대해서는 전자기 해석을 통해 추출을 하고 이에 따른 전자기력을 빠르게 예측할 수 있는 analytical 모델을 구축하였다.

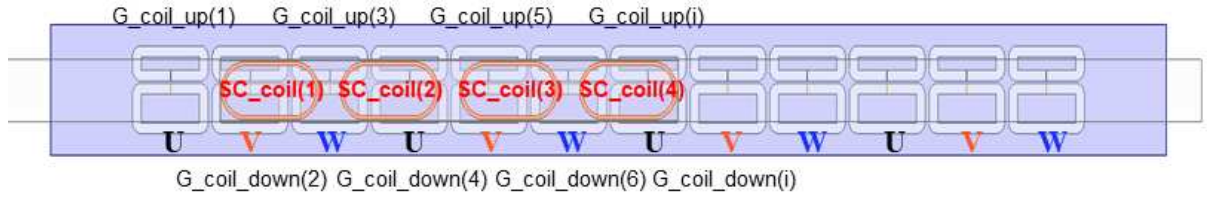
A. Analytical 모델 원리

지상코일에서 발생하는 자기장이 열차 내 초전도 코일에 작용하는 자기장은 그림 34와 같다. 초전도 코일의 한 점에서 발생하는 자기장은 비오사바르 법칙에 의해 결정된다. 따라서 초전도 코일의 미소체적에서 발생하는 힘은 미소 체적의 자속 밀도와 전류밀도의 외적으로 계산할 수 있고 초전도 코일 전체에서 발생하는 전자기력은 이를 적분하여 얻을 수 있다.

Analytical 모델은 그림 35와 같은 3D 전자기 해석 모델과 같이 대차의 한 측면을 기준으로 작성하여 4개의 초전도 코일과 12개의 지상코일로 이뤄진다. 하나의 지상코일은 널 플럭스 코일로 이뤄지는데 이를 두 개의 사각형 코일의 합으로 단순화하였다. 따라서 Analytical 모델에는 지상코일 상단 12개와 지상코일 하단 12개 초전도 코일 4개로 이루어져 있다.

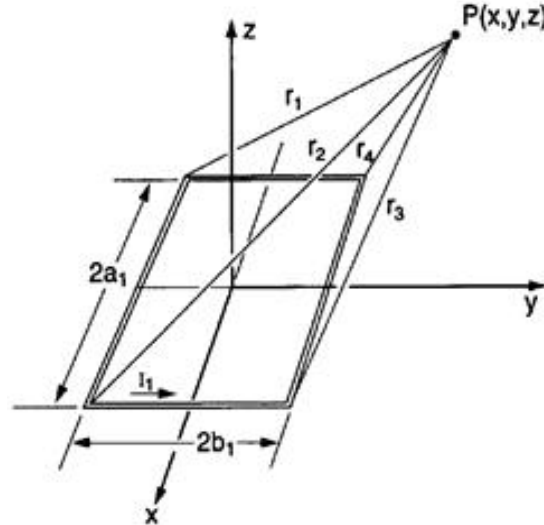


[그림 34] 지상코일과 초전도 코일 간에 발생하는 자기장



[그림 35] Analytical 모델 적용 방법

하나의 지상코일과 하나의 초전도 코일에서 발생하는 전자기력의 계산 방법은 앞서 설명한 미소 체적의 자속 밀도와 전류밀도를 통해 얻을 수 있다. 이에 대한 자세한 수식은 먼저 직사각형 형태의 코일에서 발생하는 임의의 지점에 대한 자속 밀도를 구하는 수식을 바탕으로 생성된다. 그림 36과 같이 중심이 원점이 폭이 $2a$, 높이가 $2b$ 인 직사각형에 I_1 의 전류가 흐를 때 임의의 지점 $P(x, y, z)$ 에서의 방향별 자속 밀도는 아래의 수식과 같다.



[그림 36] 직사각형 코일의 임의의 지점에 대한 자속 밀도

$$B_x = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^{\alpha+1} z}{r_{\alpha} [r_{\alpha} + d_{\alpha}]} \right]$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^{\alpha+1} z}{r_{\alpha} [r_{\alpha} + (-1)^{\alpha+1} C_{\alpha}]} \right]$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^{\alpha} d_{\alpha}}{r_{\alpha} [r_{\alpha} + (-1)^{\alpha+1} C_{\alpha}]} - \frac{C_{\alpha}}{r_{\alpha} [r_{\alpha} + d_{\alpha}]} \right]$$

$$C_1 = -C_4 = a_1 + x \quad C_2 = -C_3 = a_1 - x \quad d_1 = d_2 = y + b_1 \quad d_3 = d_4 = y - b_1$$

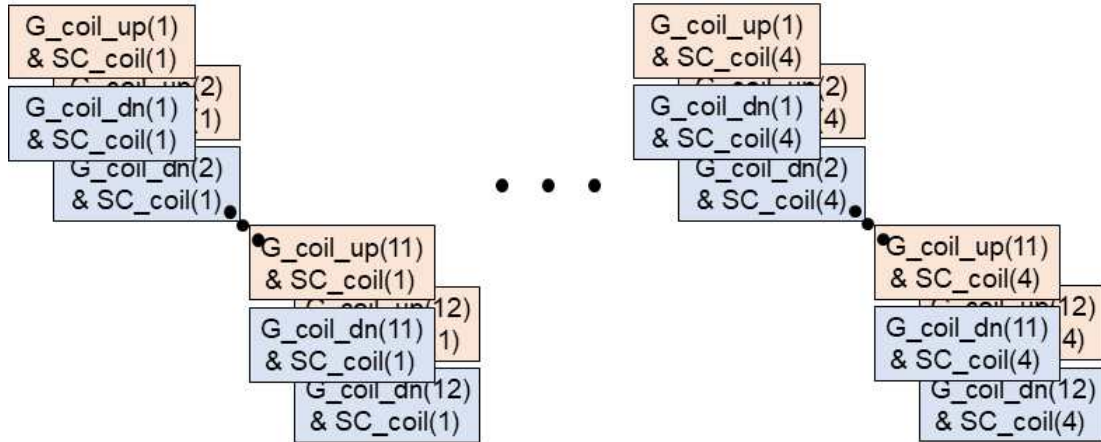
$$r_1 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad r_2 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad r_3 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2}$$

$$r_4 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2}$$

위의 수식에서 구한 임의의 지점에 대한 자속 밀도 공식을 이용하여 초전도 코일이 위치한 구간에 대해 초전도 코일에 흐르는 전류를 외적을 하여 적분을 하면 두 코일 사이에 로렌츠 힘을 구할 수 있다. 단, 두 코일은 계산의 편의를 위해 직선으로 이루어졌다고 가정을 하였고 이에 따른 안내력과 부상력은 아래의 식들과 같다.

$$F_y = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^{\alpha+1} d_{\alpha}}{r_{\alpha} + (-1)^{\alpha+1} C_{\alpha}} + (-1)^{\alpha} \ln(r_{\alpha} + d_{\alpha}) \right]_{x_1}^{x_2}$$

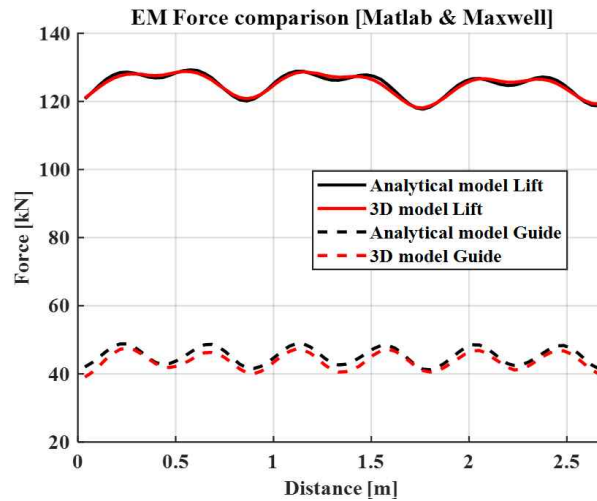
$$F_z = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^{\alpha} z}{r_{\alpha} + (-1)^{\alpha+1} C_{\alpha}} \right]_{x_1}^{x_2} + \left[\frac{(-1)^{\alpha} z}{r_{\alpha} + d_{\alpha}} \right]_{y_1}^{y_2}$$



[그림 37] 대차의 측면에서 발생하는 전자기력의 조합

구축한 모델의 전자기력은 하나의 지상코일과 하나의 초전도 코일 간에 발생하는 힘의 조합임으로 대차의 한 측면에서 발생하는 전자기력은 그림 37과 같이 모든 지상코일과 초전도 코일의 조합에서 발생하는 전자기력의 총합과 같다. 앞서 설명하였듯 초전도 코일의 전류는 일정하고 지상코일의 전류는 자기부상열차의 진행거리와 연동되어 변하게 된다. 지상코일의 전류는 정확한 예측이 힘들기 때문에, 3D 전자기 해석에서 지상코일과 초전도 코일의 한 주기인 2.7 m의 진행에 따른 12개의 지상코일 전류를 추출하여 사용하였다.

이를 바탕으로 작성한 analytical 모델을 이용하여 전자기력을 계산하여 3D 전자기 해석과 비교를 하였고 그 결과는 그림 38에 나타나 있다. 최대 오차는 부상력 1.08%, 안내력 7.65% 내에서 일치하는 것을 확인하였다. 표 7은 전자기 해석 모델과 analytical 모델 계산 결과의 평균값과 최대값이 나타나있다. 해석 결과를 평균 안내력은 3.5%, 부상력은 0.7%의 오차로 analytical 모델이 3D 전자기 해석 모델의 해석 결과와 유사함을 확인할 수 있다.



[그림 38] 전자기 해석 모델과 Analytical 모델 전자기력 계산 결과 비교

[표 7] 전자기력 계산 결과 비교

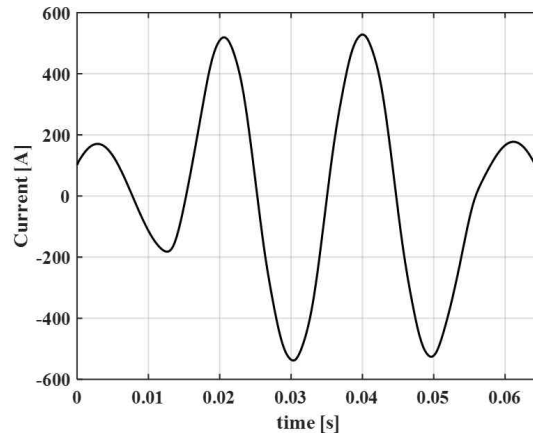
	3D 전자기 모델	Analytical 모델	Error [%]
평균 안내력	43.76 kN	45.29 kN	3.50
최대 안내력	47.57 kN	48.90 kN	2.80
평균 부상력	124.85 kN	124.94 kN	0.07
최대 안내력	128.79 kN	129.24 kN	0.35
해석 시간	74 s	0.20 s	370 배 ↑

⑤ 유도전류 추정 모델 구축

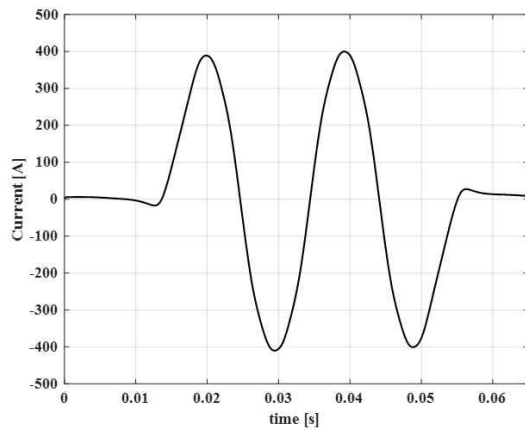
앞선 Analytical 모델에서 지상코일의 전류를 알면 별도의 복잡한 해석 없이도 자기 부상열차에 가해지는 전자기력을 빠른 시간에 정확하게 계산할 수 있음을 확인하였다. 앞서 언급했듯이 정확한 전자기력을 계산하기 위해서는 전자기력 계산에 사용되는 해당 시간에 대응되는 지상코일의 전류를 알아야 한다. 따라서 특정 위치에서의 유도전류를 3D 시간 이력 전자기 해석을 통해 추출하고 모든 상대 위치에서의 유도전류를 예측할 수 있는 유도전류 추정 모델을 구축하고자 한다.

A. 3D 시간이력 모델을 통한 유도전류

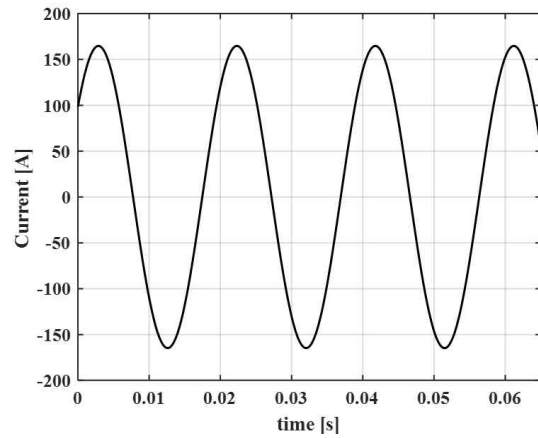
PLG 코일에서 발생하는 유도기전력은 그림 22와 같이 널 플럭스 코일의 상부 코일과 하부 코일에서 반대 방향으로 발생하여 서로 상쇄된다. 이 때, 서로 상쇄되지 않는 유도기전력은 회로 내부에서 유도전류를 발생시킨다. 따라서 지상코일에서 발생하는 전체 전류의 값은 그림 39와 같이 추진전류와 유도전류의 합으로 나타낼 수 있다.



(a)



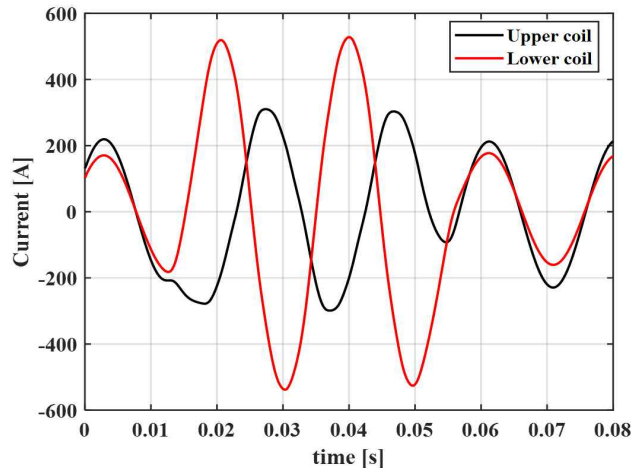
(b)



(c)

[그림 39] PLG 코일 내부 (a) 전류, (b) 유도전류, (c) 추진전류

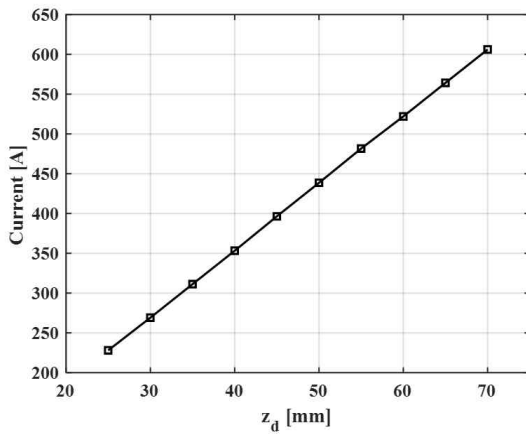
그림 40은 PLG 코일 내부에서 발생하는 전류의 해석 결과를 보여준다. 그림 22와 같이 지상코일에 인가된 추진전류는 상부 코일과 하부 코일로 나뉘고 차량이 해당 지상코일을 지나가는 순간인 0.01 ~ 0.06 초에서 유도전류가 발생하게 된다. 발생하는 유도전류의 주파수는 51.44 Hz로 자극 피치를 속도로 나눈 값과 해석 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.



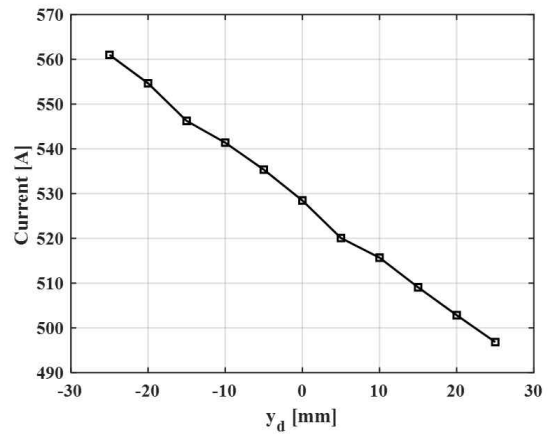
[그림 40] PLG 코일 해석 결과

B. 상대 위치에 따른 유도전류의 선형성

초전도 코일과 PLG 코일의 상대위치와 유도전류의 관계를 알면 별도의 해석 없이도 유도전류를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 해석 결과를 기반으로 상대 위치와 유도전류의 선형성을 확인하여 유도전류를 예측하였다. 그림 41은 수직 방향의 상대 위치에 따른 유도전류의 Peak 값 (a)와 수평 방향의 상대 위치에 따른 유도전류의 Peak 값 (b)를 나타낸 도표이다. 그림 41 (a)는 기준 수평 방향 위치에서 수직 방향으로 5 mm 단위로 치짐이 발생했을 때 유도전류의 peak 값이다. 반면 그림 41 (b)는 기준 수직 방향 위치에서 수평 방향으로 5 mm 단위로 치우침이 발생했을 때의 유도전류의 Peak 값이다. 이를 통해 PLG 코일에서 발생하는 유도기전력은 수직 방향과 수평 방향으로 치짐이 발생함에 따라 선형적인 관계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 회귀분석을 통해 선형성을 확인한 결과 수직 방향으로 결정계수(R^2)는 수직 방향 0.99, 수평 방향 0.93으로 충분한 선형성을 갖는 것을 확인하였다.



(a)



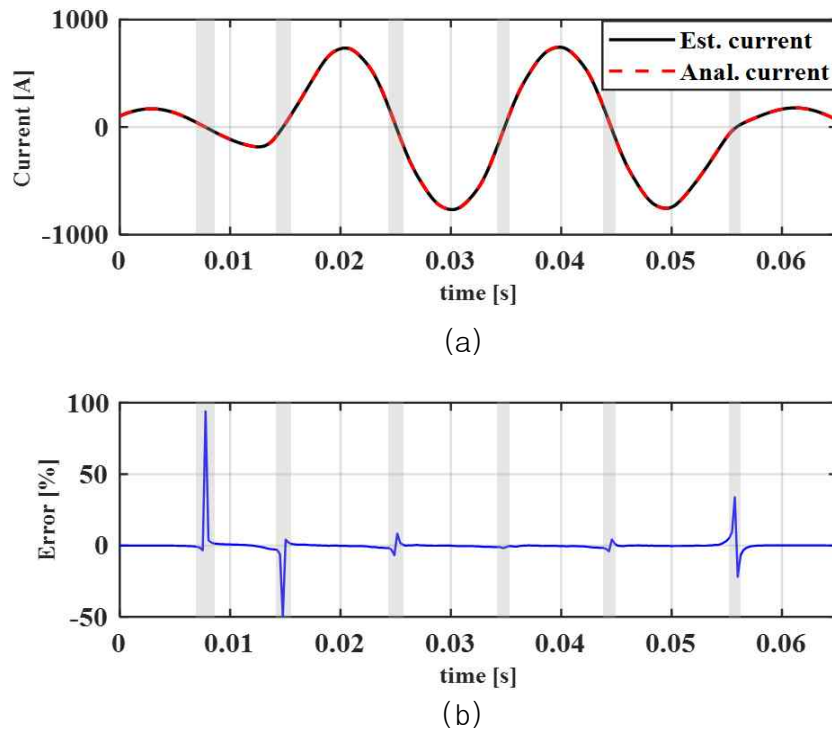
(b)

[그림 41] (a) 수직 방향과 (b) 수평 방향에 따른 유도전류의 peak 값

C. 회귀모델을 이용한 유도전류 추정

지상코일에서 발생한 유도전류의 선형성을 이용하여 2차 다변수 회귀모델을 사용하여 유도전류를 추정할 수 있다. 임의의 상대 위치에서 발생하는 유도전류는 기준 위치에서 발생한 유도전류에서 간격 당 변하는 유도전류의 변화량을 더함으로써 계산할 수 있다.

그림 42는 3D 해석 모델에서의 하부 지상코일의 유도전류 해석 결과와 회귀모델을 기반으로 추정한 유도전류 계산 값을 비교한 그래프이다. 그래프에 나타난 유도전류의 값은 수직 방향으로 65 mm, 수평 방향으로 -20 mm 치우쳐 있을 때의 해석 결과이다. 두 그래프의 오차는 그림 42 (b)에 나타나 있다. 오차는 분모가 0에 수렴하는 음영 부분을 제외하고 평균 0.54% 으로 회귀모델을 통해 계산한 유도전류가 3D 시간 이력 해석 모델을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

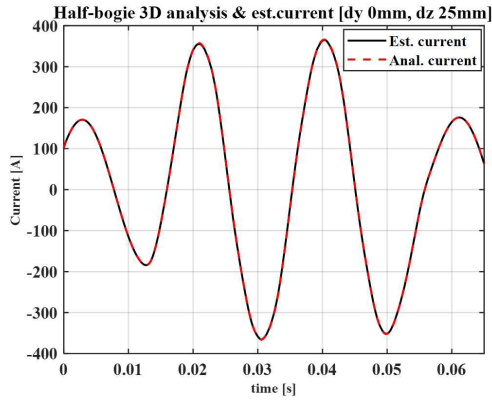


[그림 42] 전자기 모델 해석과 유도전류 추정 모델 (a) 하부 코일 전류와 (b) 오차

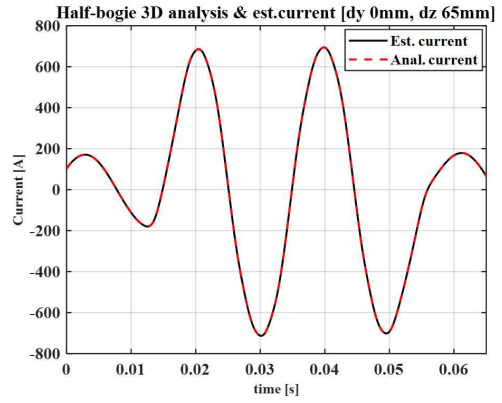
[표 8] PLG 코일 내 전류 계산 결과 비교

	Value
평균 오차	0.54%
최대 오차	4.27%
해석 시간	0.03 s

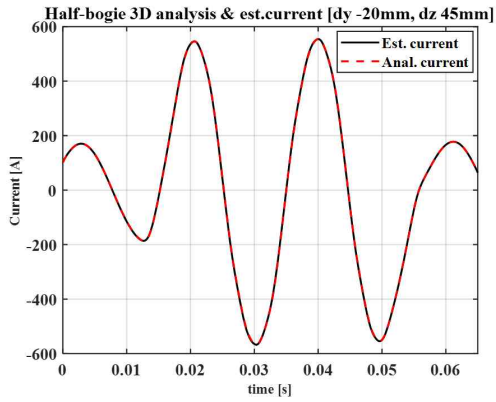
그림 43은 3D 과도해석을 통해 계산한 유도전류와 대차의 처짐과의 선형성을 이용해 추정한 유도전류를 비교한 그래프이다. 유도전류 추정에 사용된 데이터는 수평 방향 처짐에 따른 유도전류의 변화 값과 수직 방향 처짐에 따른 유도전류의 변화 값을 사용하였다. 그림 43 (a), (b)는 수직 방향으로 대차가 25 mm 처짐이 발생했을 때와 65 mm 처짐이 발생했을 때의 유도전류와 추정 전류의 비교를 하였다. 그림 43 (c), (d)에서는 수직 방향 45 mm 처진 상태에서 수평 방향으로 -20 mm, 20 mm 처짐이 발생했을 때의 유도전류와 추정 전류의 비교를 하였다. 그림 43 (e), (f)는 수직 방향과 수평 방향에서 벗어난 수직 방향으로 65 mm, 수평 방향으로 -25 mm이 처짐이 발생했을 때와 수직 방향으로 25 mm, 수평 방향으로 25 mm이 처짐이 발생했을 때의 유도전류와 추정 전류의 비교한 그래프이다. 각 그래프를 확인해 보면 초전도 코일과 PLG 코일의 모든 상대 위치에서 추정된 유도전류가 3D 전자기 해석 결과와 부합하는 것을 확인할 수 있다.



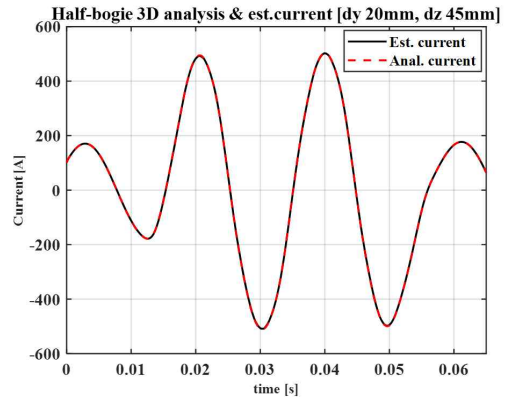
(a)



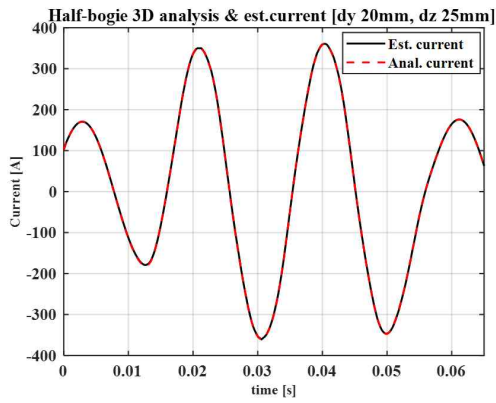
(b)



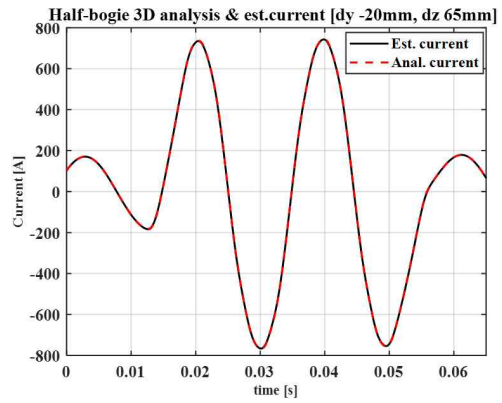
(c)



(d)



(e)



(f)

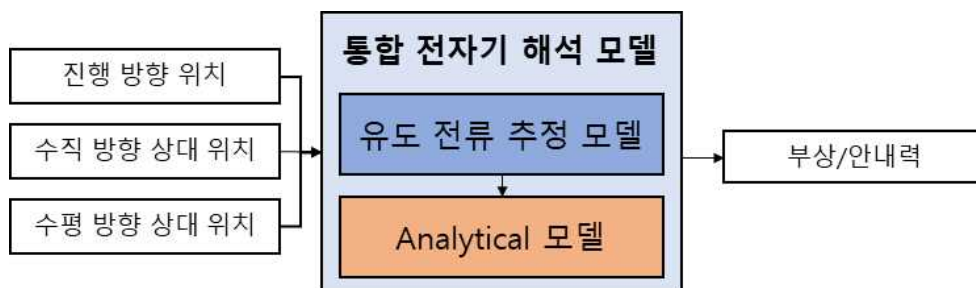
[그림 43] 전자기 해석 모델과 유도전류 추정 모델 결과 비교

⑥ 유도전류 - Analytical 모델 구축

로렌츠 힘을 기반으로 PLG 코일에 의해 발생하는 자속 밀도를 초전도 코일의 전류의 외적으로 계산하는 Analytical 모델을 작성하였다. 또한 자속 밀도 계산에 필요한 PLG 코일 내부에서 발생하는 유도전류를 계산하는 유도전류 추정 모델을 작성하였다. 두 모델은 연계하여 별도의 3D 전자기 해석 없이도 자기부상열차에 가해지는 전자기력을 계산하는 통합된 모델을 작성하였다.

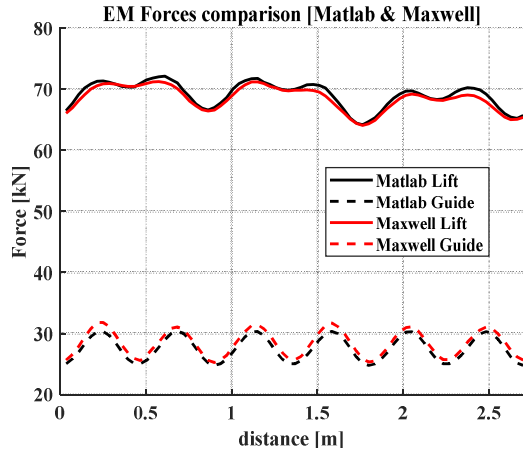
A. 전자기력 계산 과정

유도전류 추정 모델과 Analytical 모델을 사용한 전자기력 계산 알고리즘은 그림 44와 같다. 동역학 모델에서 진행한 거리와, 수직 방향의 처짐, 수평 방향의 상대 위치가 입력 변수로 사용된다. 입력된 위치를 통해 유도전류 추정 모델에서는 상대 위치와 진행 방향을 고려하여 PLG 코일에 입력될 전류를 계산한다. 이후 PLG 코일에 입력된 전류를 이용하여 Analytical 모델에서는 자기부상열차의 대차에 발생하는 전자기력을 계산한다.

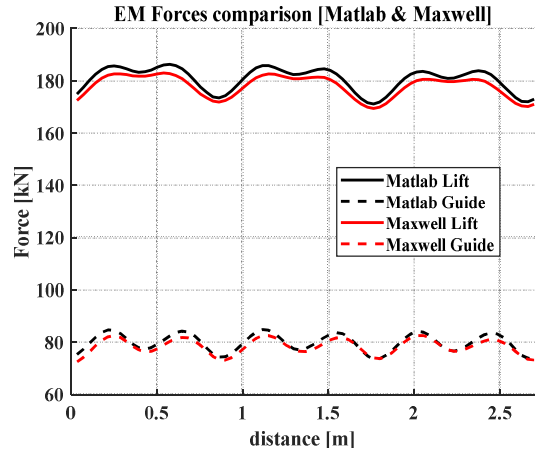


[그림 44] 전자기력 계산 프로세스

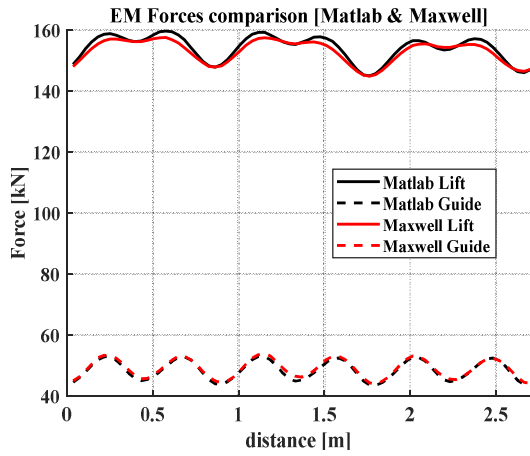
이를 통해 계산된 결과는 그림 45에 나타나 있다. 그림 45는 차량이 자극 피치(2.7 m)를 지나는 동안 발생하는 전자기력의 전자기 모델 해석결과와 유도전류 - Analytical 모델을 통한 계산 결과를 비교한 그래프이다. 그림 45 (a), (b)는 수평 방향 처짐 0 mm에서 수직 방향으로 대차가 25 mm 처짐이 발생했을 때와 65 mm 처짐이 발생했을 때 대차에 발생하는 3D 시간 이력 해석 결과와 유도전류 - Analytical 전자기력 계산 결과를 비교하였다. 그림 45 (c), (d)에서는 수직 방향 45 mm 처진 상태에서 수평 방향으로 -20 mm, 20 mm 처짐이 발생했을 때의 전자기력 계산 결과를 비교하였다. 그림 45 (e), (f)는 수직 방향과 수평 방향에서 벗어난 수직 방향으로 65 mm, 수평 방향으로 -20 mm이 처짐이 발생했을 때와 수직 방향으로 20 mm, 수평 방향으로 25 mm이 처짐이 발생했을 때 전자기력 비교이다. 각 그래프를 확인해 보면 전자기력 해석 결과와 3D 해석 모델이 부합하는 것을 확인할 수 있다. 이 모델을 통해 별도의 복잡한 해석 없이도 모든 상대 위치에서 차량에 발생하는 전자기력을 계산할 수 있음을 확인할 수 있다.



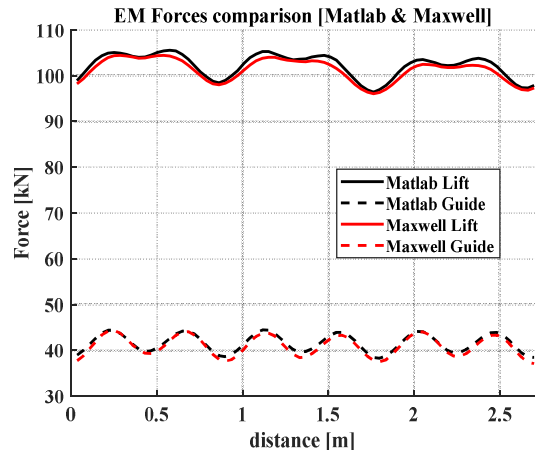
(a)



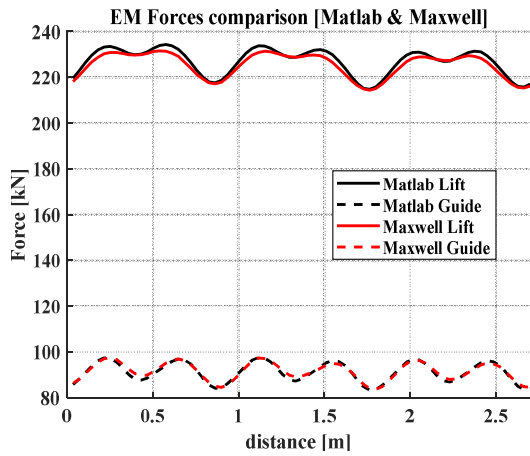
(b)



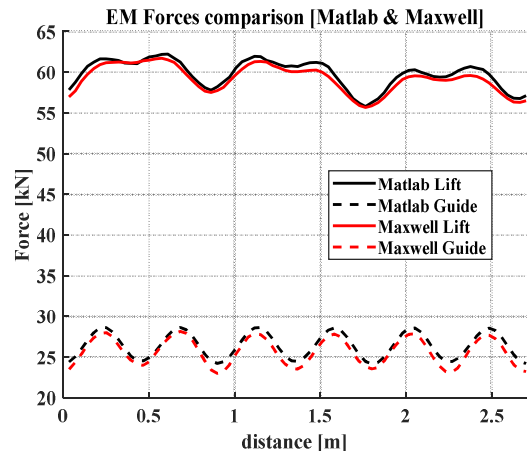
(c)



(d)

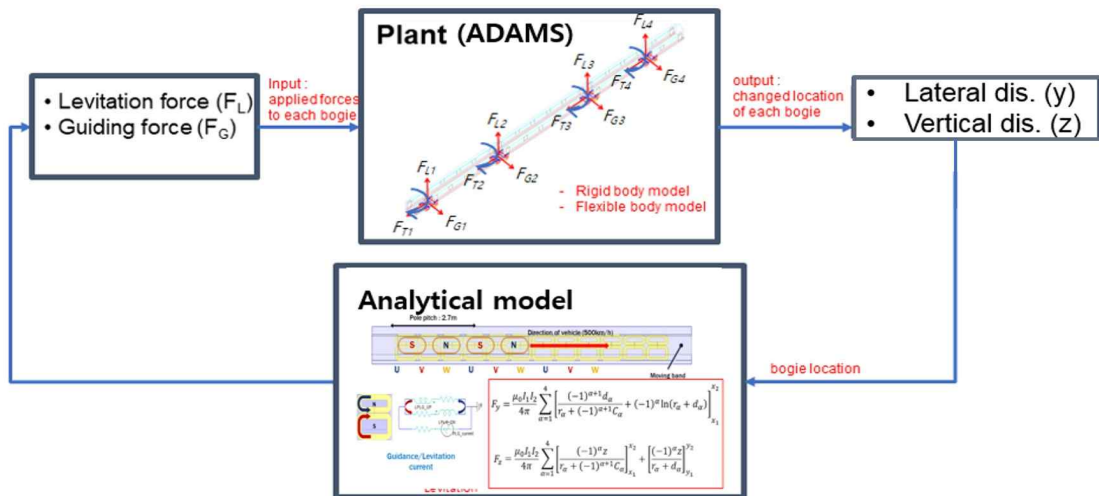


(e)



(f)

[그림 45] 전자기 해석 모델 해석 결과와 유도전류 - Analytical 모델 계산 결과 비교



[그림 47] 시간 이력 전자기-다물체 동역학 연성해석 프레임워크 (Two-way 해석)

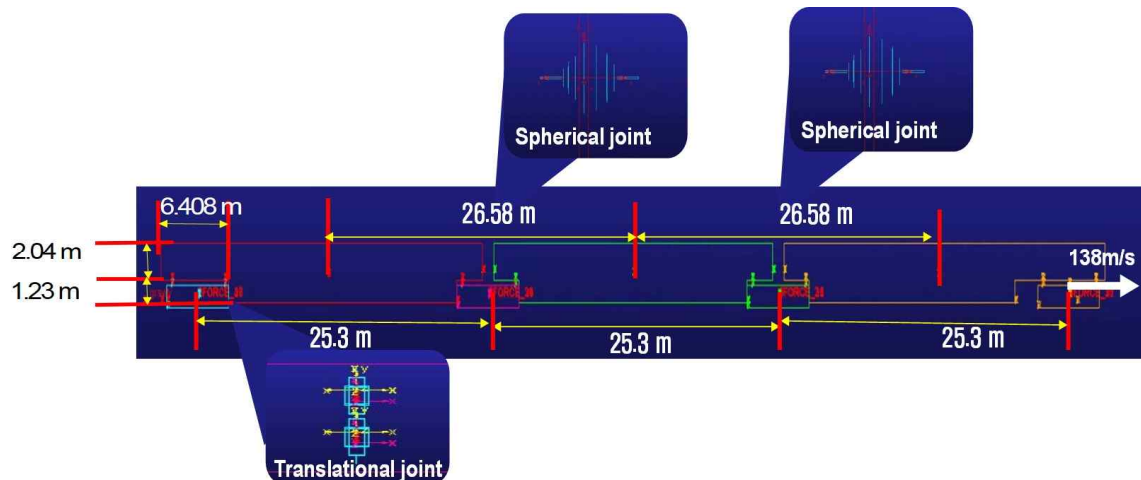
② 강체 다물체 동역학 모델

자기 부상 열차 모델 구축을 위해 실제 Chuo Shinkansen L0 모델의 매개변수들을 조사하였다. 해석에 필요한 차량은 3개의 차량 모델로 앞/뒤(leading and ending) 차체는 같은 설계 모델로 32톤의 무게를 갖고 있으며 가운데(middle) 차체는 23톤을 갖는 모델로 구축하였으며, 이에 사용된 초전도 코일들은 문헌 [9,10,11,13,14]를 참고하였다. 또한, 회전 동특성에 영향을 끼치는 관성모멘트들도 표 9와 같이 사용하였다.

[표 9] 자기 부상 열차 모델 치수 및 입력항

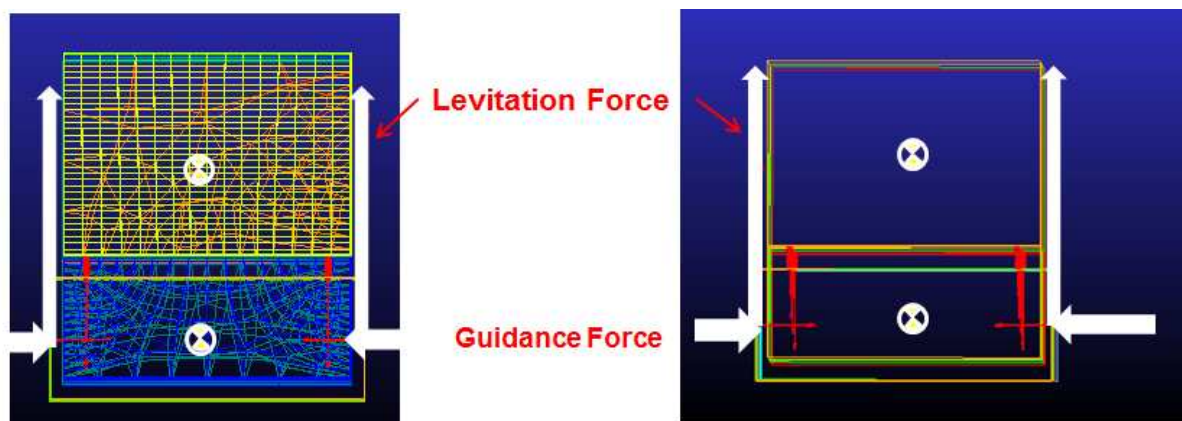
Parameter	value
차체 길이 (leading car)	28 m
차체 길이 (middle car)	24.3 m
차체 무게 (leading/middle car)	32 / 23 tons
차체 높이/ 폭	3.27 / 2.9 m
대차 길이 / 폭	5.4 / 3.15 m
대차 무게	6 tons
Air spring 상수	0.36 MN/m
Vertical damper	10 kNs/m
차체 (leading car) moment of inertia	$\begin{bmatrix} 2.18e^5 & & \\ 6.69e^5 & 7.93e^6 & \\ 6.36e^5 & 6.97e^4 & 7.94e6 \end{bmatrix}$
차체 (middle car) moment of inertia	$\begin{bmatrix} 1.62e^5 & & \\ 4.28e^5 & 4.53e^6 & \\ 4.04e^5 & 5.11e^4 & 4.54e6 \end{bmatrix}$

다물체 동역학 해석 모델에서 강체 모델은 그림 48과 같이 구축되었다. 각 차체간의 거리는 균등하게 26.58 m의 간격으로 모델링 되었으며, 무게중심은 각 강체 차체 모델의 중간에 위치하는 것으로 가정하였다. 또한 대차들 사이의 거리는 25.3 m로 균등하게 모델링하였다. 최고속도는 138 m/s (= 500 km/h)로 직선 주행의 경우 등속도 운동을 인가하여 속도를 유지 시켰다. 전체 EDS 방식 자기부상열차 모델은 차체 3개와 대차 4개로 articulated 대차를 사용하였다. 대차의 코너에는 4개의 수직 스프링과 4개의 수직 댐퍼가 모델링 되었으며, Air spring의 길이와 차체와 대차간의 간격은 0.3 m이다. Air spring 은 대차의 중심으로부터 길이 방향 2.3106 m, 폭 방향 1.2125 m 떨어진 곳에 위치하고 있다. 차체와 대차 사이에는 translation joint를 사용하여 상하 운동이 가능하게 하였고 차체 간은 spherical joint를 사용하여 차체간의 추진방향의 운동을 제외하고는 차체가 자유롭게 운동할 수 있게 모델링하였다. 차체와 대차를 연결하는 요소로 air spring과 댐퍼는 같은 위치에 적용된다.



[그림 48] 다물체 동역학 강체 차체 모델

본 연구에서는 대차를 그림 49와 같이 모델링하였다. 대차 모델링의 경우 다물체 동역학 해석 프로그램 내에서 강체로 적용하여 해석을 수행했다. 대차는 차체와 달리 승객이 탑승하지 않아 승차감을 분석할 필요가 없음에 따라 강체 해석을 진행하였다. 대차의 길이 및 무게는 Chuo Shinkansen L0모델을 참고하여 길이 5.4 m, 높이, 1.23 m 그리고 폭은 3.15 m로 설정하였다. 대차의 무게중심에서 힘을 받는 것이 아니라 EDS 방식의 특성을 최대한 반영하여 자기 코일이 있는 대차의 양 끝단 위치에서 수직 방향으로 부상력이 들어가게 되고 수평 방향으로 안내력이 입력으로 들어가게 모델링 하였다. 또한 각 위치에서 대차의 롤링(rolling)에 의한 힘의 변화까지도 포함하는 모델링 하였다.



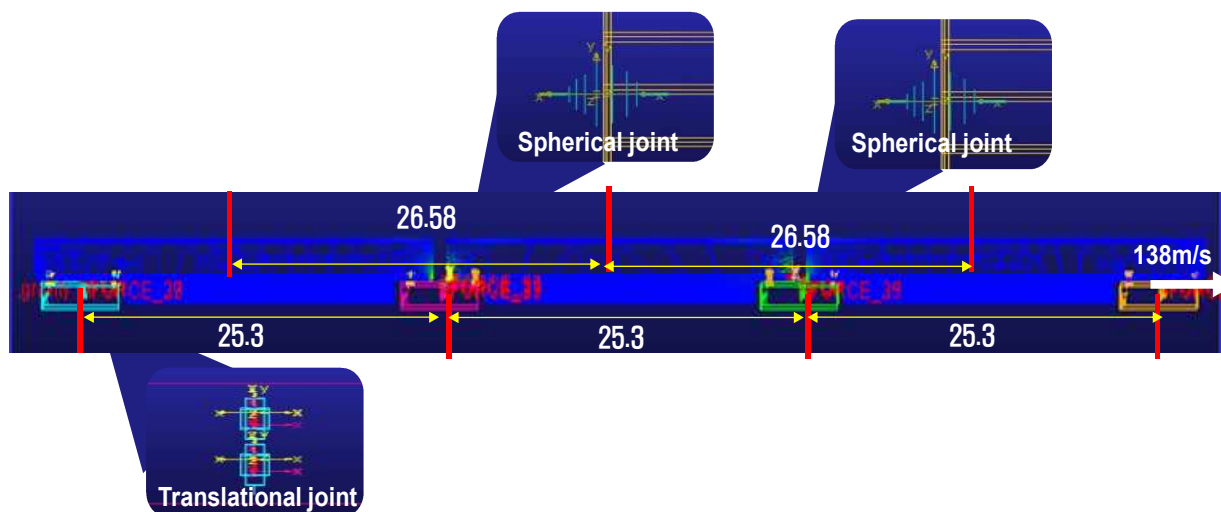
[그림 49] 대차 force input 모델링

③ 유연 다물체 동역학 모델

실제 자기부상열차의 외부에는 불규칙도와 같은 다양한 외란이 존재하여 유연 모드에 대한 진동 영향이 있는데 강체 차체 모델의 경우에는 강체 모드만을 고려하기 때

문에 이들에 의한 승차감 변화 등을 고려하기 어렵다. 그러므로 더욱 정확한 해석 모델을 구축하기 위해서는 유연 차체 모델이 필요하여 본 연구에서는 유연 차체 모델 구성을 위해서 유한요소 해석 툴인 ANSYS APDL을 이용하였다. 그림 50은 유연차체 모델이 포함된 다물체 동역학 모델을 보여준다. 다른 부분은 기존 강체 모델과 같으나, 차체 부분은 ANSYS를 이용한 유연차체 모델로 변경하여 구축되었다.

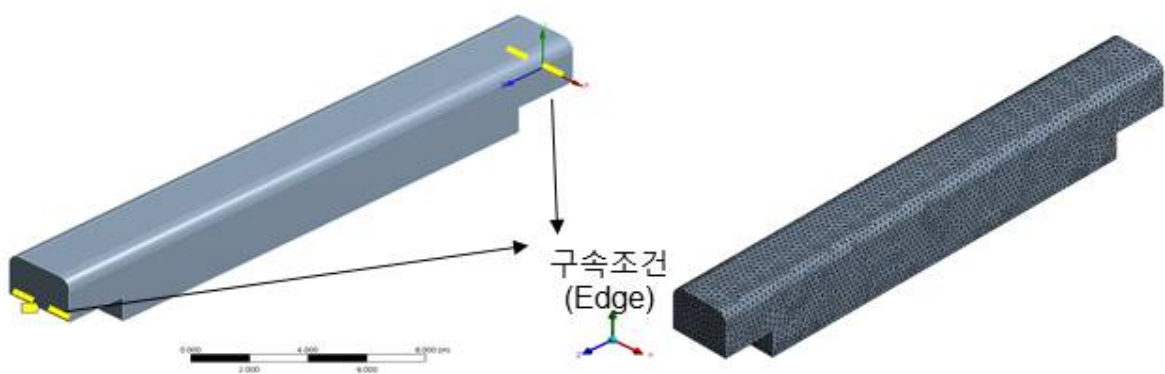
유연 차체의 모델은 solid 185로 요소를 정하였으며 mild steel 재질을 사용하였다. 차체의 길이 및 무게 등은 기존에 사용한 강체 모델과 같게 하였으며 밀도, Poisson ratio, Young' s modulus 등은 아래의 초전도 코일을 가지고 구축하였다. 구축한 유연차체의 모드 특성은 다양한 주파수에서 나타날 수 있지만, 실질적 자기부상열차의 구동 환경을 고려하여 50 Hz 이하의 주파수 대역 중 수직/수평 방향 진동성분에 영향을 주는 모드들은 그림 52에 보는 것과 같다. 그 결과는 참고문헌[15,16]에 나와 있는 자료와 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다.



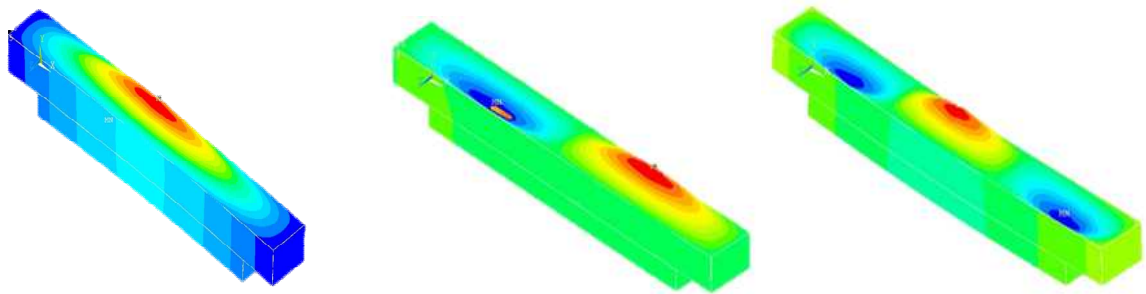
[그림 50] 다물체 동역학 유연 차체 모델

[표 10] 유연 차체의 초전도 코일 (mild steel)

Parameter	value
Young's modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.3
밀도	7,700 kg/m ³
Roof 두께 leading 차체 (middle 차체)	0.008 m (0.008 m)
Floor 두께 leading 차체 (middle 차체)	0.016 m (0.011 m)
Bottom 두께 leading 차체 (middle 차체)	0.016 m (0.011 m)
Wall 두께 leading 차체 (middle 차체)	0.008 m (0.008 m)
Leading 차체 요소수	7,719 개
middle 차체 요소수	9,693 개



[그림 51] 중간 객차 유연 요소 모델링 및 구속조건

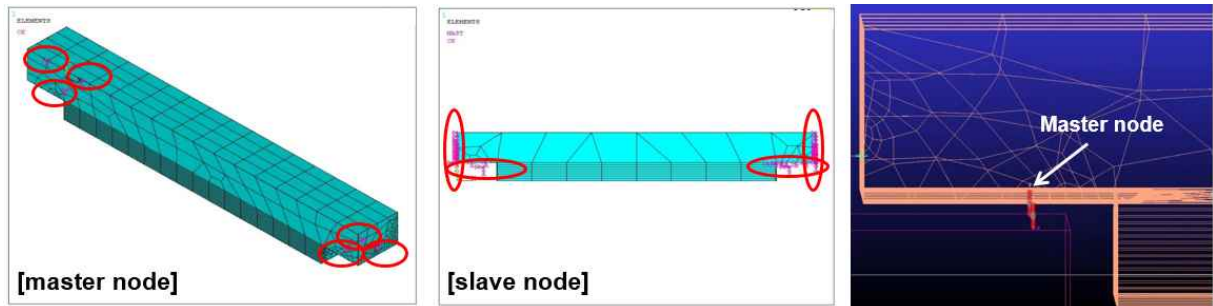


[그림 52] 1차, 2차, 3차 굽힘 모드 및 모드형상

[표 11] 객차의 모달해석 결과 및 문헌 실험값과의 비교 [15]

Mode	Exp. [Hz]	Sim. [Hz]	Error [%]
1 st bending Mode	10.1 ~ 11	10.03	0.7
2 nd bending Mode	14.1	12.54	11.1
3 rd bending Mode	16.2	15.36	5.2

유연 차체 모델에 사용한 mild steel의 물성치는 탄성 계수 200 GPa, 푸아송 비 0.3, 밀도 $7,700 \text{ kg/m}^3$ 로 설정하였다. 다물체 동역학 해석 프로그램 ADAMS에 유연체 차체를 적용하여 해석하기 위하여 RBE2 (Rigid Body Element) 요소를 생성하였다. ANSYS APDL을 사용하여 유연 차체 모델을 작성하고 주파수 해석을 진행하였다. 유연체 차체와 대차를 연결해야 하는 조인트나 힘 요소들은 ANSYS 내에서 마스터 노드를 생성한 후 ADAMS 내에서 적용하였다. 이와 같은 방법으로 마스터 노드를 생성하여 대차와의 연결부를 생성하였다. 차체간의 연결 부에 각 1개씩 전체 4개가 생성되었다. 슬레이브 노드의 영향을 받아야하는 부분으로 폭 1.45 m 길이 2.708 m 면적을 슬레이브 노드로 지정하였다. 마스터 노드의 영향을 받는 부분들을 슬레이브 노드로 선정해서 ADAMS로 내보내면 ANSYS MNF (Modal Neutral File) 파일이 생성된다. 형성된 MNF 파일을 ADAMS 내에서 불러오기 하여 조인트와 힘 요소들을 적용하였다.

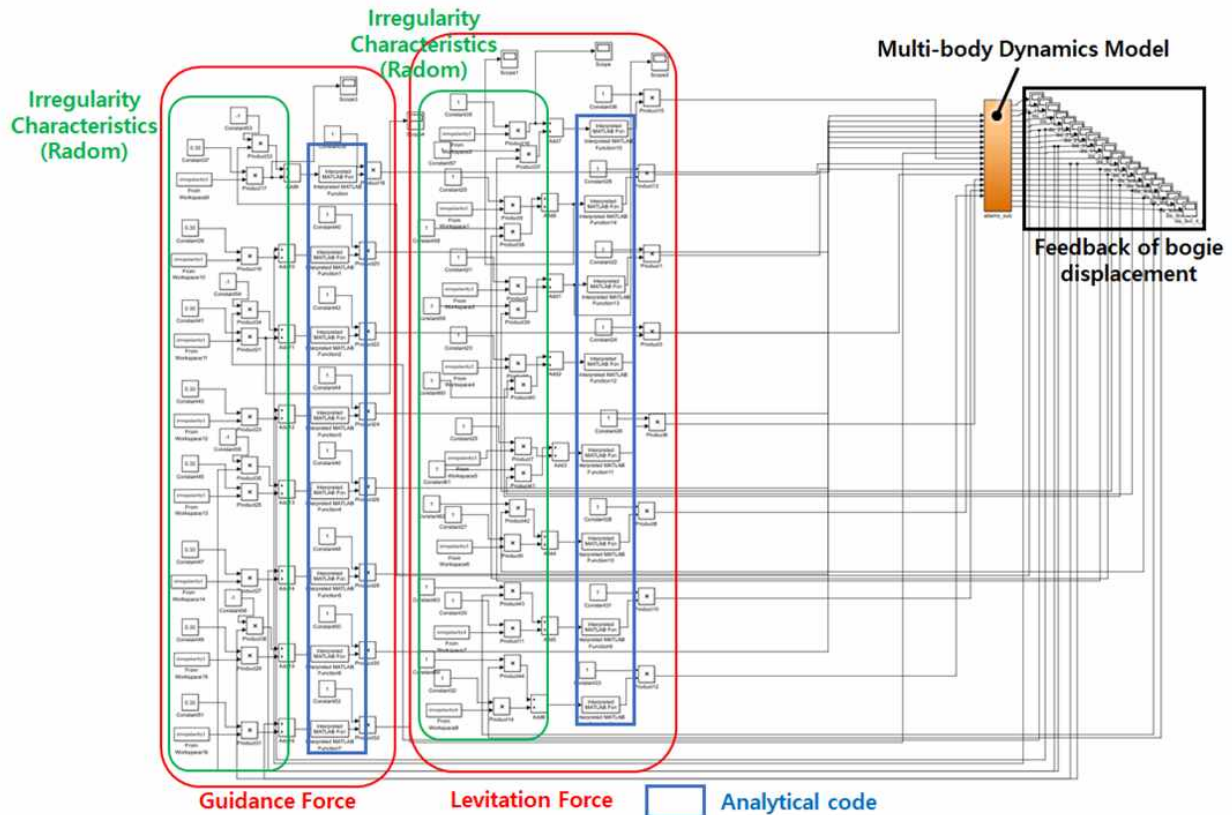


[그림 53] 유연 차체 모델링 및 MNF 파일 형성

④ 직선주행 해석 프레임워크 구축

직선 주행모델의 해석을 진행하기 위하여 진행 방향으로 등속 운동을 인가하여야 한다. 이를 위해서 1번 대차에 138 m/s ($=500 \text{ km/h}$)의 등속 운동을 모델링하였으며 공기 저항은 무시하였다. 부상력과 안내력은 MATLAB Simulink를 통하여 거리에 따라 힘이 계산되도록 프레임워크를 그림 54와 같이 구축하였다. 그림에서 Multi-body dynamic 모델 부분은 본 연구에서는 두 가지 모델을 사용하였다. 하나는 강체 모델이고 다른 하나는 유연 차체 모델을 사용하였다. 다물체 동역학 해석 후 계산된 대차들의 변위를 받아 자기회로에 그 값을 입력하고 그 변화에 따른 자기력 변화를 계산하고 대차에 입력하는 방식인 two-way 방식을 구축하였다. 또한 각 대차는 직선 주행 중에 발생하는 불규칙도의 특성을 참고문헌[17,18]을 통해 반영할 수 있도록 구축되었다. 부상력과 안내력은 대차의 위치에 불규칙도를 더한 대차의 상대좌표에서의 전자기력으로 적용하였다.

본 연구에서는 우선 두 가지 불규칙도를 이용하여 그 특성을 분석하고 그 중 가장 실제와 유사한 PSD 불규칙도 특성을 가지고 최종 분석 등에 사용하였다. 두 가지의 불규칙도 특성은 Random 신호와 PSD 신호를 이용하였다. 불규칙도의 입력은 각 대차간의 간격 및 자기부상열차의 속도에 따른 시간 간격을 고려하여 위상을 각각 0 , 0.02 , 0.03 , 0.05 rad 으로 다르게 하였으며, 이로 인해 각 대차들은 동 시간에 다른 외란을 받는 시스템으로 구축되었다. 이는 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향에도 같이 적용되었다.



[그림 54] 초고속 자기부상열차의 직선주행 해석을 위한 프레임워크 구축

⑤ 곡선주행 해석 프레임워크 구축

곡선 주행의 해석을 위해서는 직선주행과 조금 다른 프레임워크 구축이 필요하여 두 가지를 분리하여 구축하였다. 곡선 주행 프레임워크의 구축을 위한 프로세스는 그림 55에 정리된 것과 같다 먼저 차량 모델은 직선 모델로 만들고 각 대차가 같은 원궤적을 움직이도록 모션 및 힘을 시간에 따라 조절하여 8000 m 궤적 운동을 다음과 같이 만든다. 각각의 차체에 x 방향으로는 impulse force를 이용하여 translation velocity를 모델링하였다. 속도는 반지름이 8000 m 인 원운동의 접선방향이고 크기는 제안한 속도 (480 km/h)가 되도록 모델링하였다. 아래 식을 이용하여 impulse force를 계산하였다.

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

대차에 적용되는 힘은 원의 궤도에서 보았을 때 x 방향과 y 방향으로 분해되어 적용되어야함에 각각 x 와 y 를 반지름 R 에 대해서 아래 식과 같이 분해하였다.

$$x = R \sin(\theta)$$

$$y = R - R \cos(\theta)$$

위 식을 시간에 대하여 미분하였을 때 아래 식과 같이 나타난다.

$$\dot{x} = R\dot{\theta}\cos(\theta) = R\omega\cos(\omega t)$$

$$\dot{y} = R\dot{\theta}\sin(\theta) = R\omega\sin(\omega t)$$

위 식을 아래식의 속도 자리에 대입한다.

$$F = ma = m\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

대입하게 되면 아래 식과 같이 나타난다.

$$\Delta F_x = mR\omega \frac{\cos(\omega t_2) - \cos(\omega t_1)}{\Delta t}$$

$$\Delta F_y = mR\omega \frac{\sin(\omega t_2) - \sin(\omega t_1)}{\Delta t}$$

이때 t_1 은 한 step 이후의 시간이고 t_2 는 t_1 과 time step 을 더한 값이다. 전진 후 x 방향으로 ΔF_x 만큼 빼주고, y 방향으로는 ΔF_y 만큼 더해서 곡선 궤도를 돌게 하였다.

추가적으로 모델링의 회전을 위해 아래 식에서 유도된 토크 ΔT 를 넣었다. 첫 번째 차체와 세 번째 차체는 두 번째와의 거리를 계산하여 각속도와 곱해서 회전을 적용하였다. 이때 궤도에 적용되는 힘들은 모두 절대좌표 기준으로 적용된다.

$$T = \frac{I\omega}{\Delta t}, 2\pi = \text{time} \times \omega$$

그 후 부상력과 안내력을 인가하여 해석 모델을 구축하고 기존의 PSD 불규칙도를 원궤도에 맞게 각 회전시의 접선각도에 수직한 방향으로 작용하도록 변환하여 곡선 모델에 입력해준다. 안내력의 경우는 대차의 양쪽 방향으로 항상 작용하도록 ADAMS 에서 상대좌표로 설정하여 시간에 따라 변화하는 힘을 인가하며, 그 크기는 해석 후의 위치인 (x , y)와 기설정된 원궤도의 중심좌표인 (0, 8000)사이의 차이인 곡선궤도 이탈변위(그림 56)를 고려하여 계산한다. 이탈변위를 계산하는 식은 아래와 같다. 안내력의 경우 원 궤도 운동 시 대차의 수직하게 입력하도록 상대 좌표 설정 모델링을 진행하였다.

$$d = \sqrt{(x)^2 + (y - 8000)^2} - 8000$$

또한 회전 속도에 따라서 패널 간의 간격에 의한 규칙적인 외란이 존재하는데, 이는 패널 간격이 12.5 m 라고 가정하고 회전속도에 따른 sine함수 형태의 외란특성으로 추가한다. 8,000 m 회전 시 기움각(cant angle)이 존재함으로 곡선 주행 시 발생하는 원심력에 대응하는 힘 및 안정성 향상을 위해 기움 각 12.7° 를 적용하였다. 본 해석에서 기움 각을 적용하기 위하여 모델링의 무게와 원심력을 부상력과 안내력 방향으로 분해하여 그림 57과 같이 적용하였다. 모델링의 무게는 기움 각 θ 를 고려하여 아래의 식과 같이 분해하여 수평 방향과 수직 방향으로 적용하였다.

$$mg\sin(\theta)$$

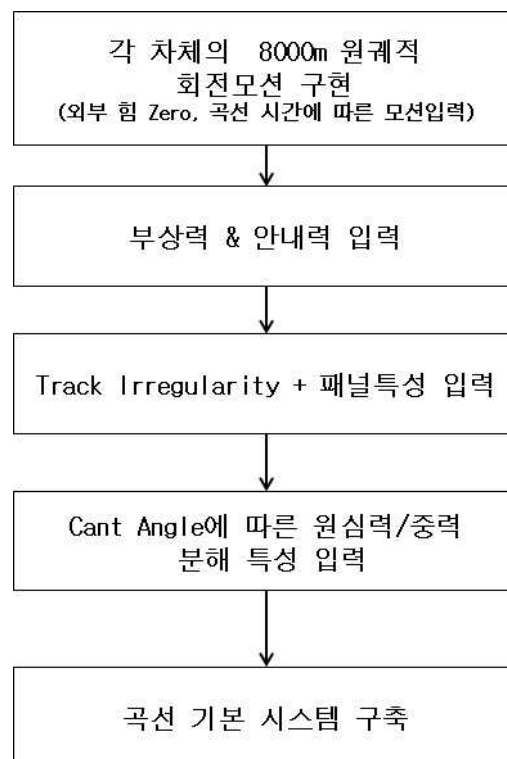
$$mg\cos(\theta)$$

마찬가지로 원심력은 아래의 식을 수평 방향과 수직 방향으로 분해하여 적용하였다.

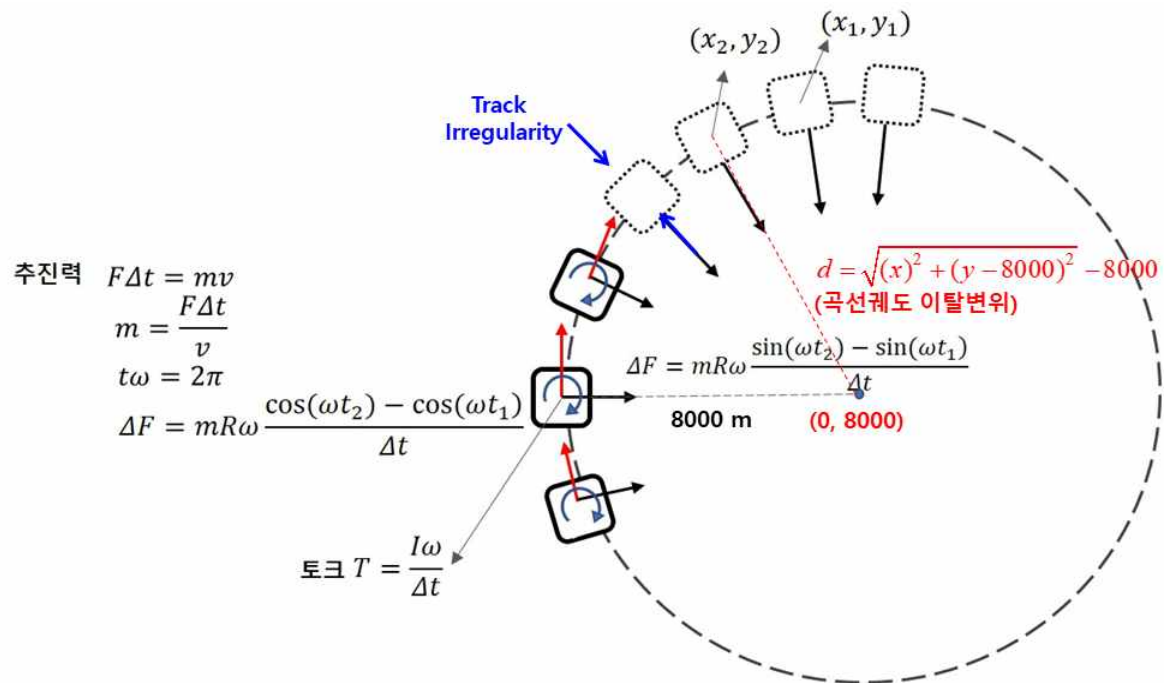
$$-\frac{mv^2\cos(\theta)}{r}$$

$$\frac{mv^2\sin(\theta)}{r}$$

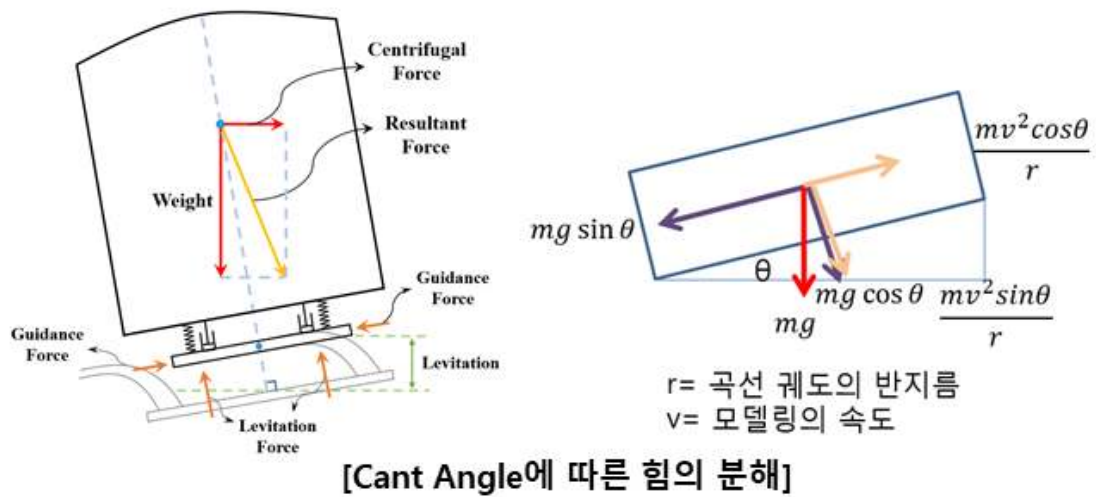
이를 통해 그림 58과 같이 기본 곡선 주행을 하는 시스템을 구축하였다.



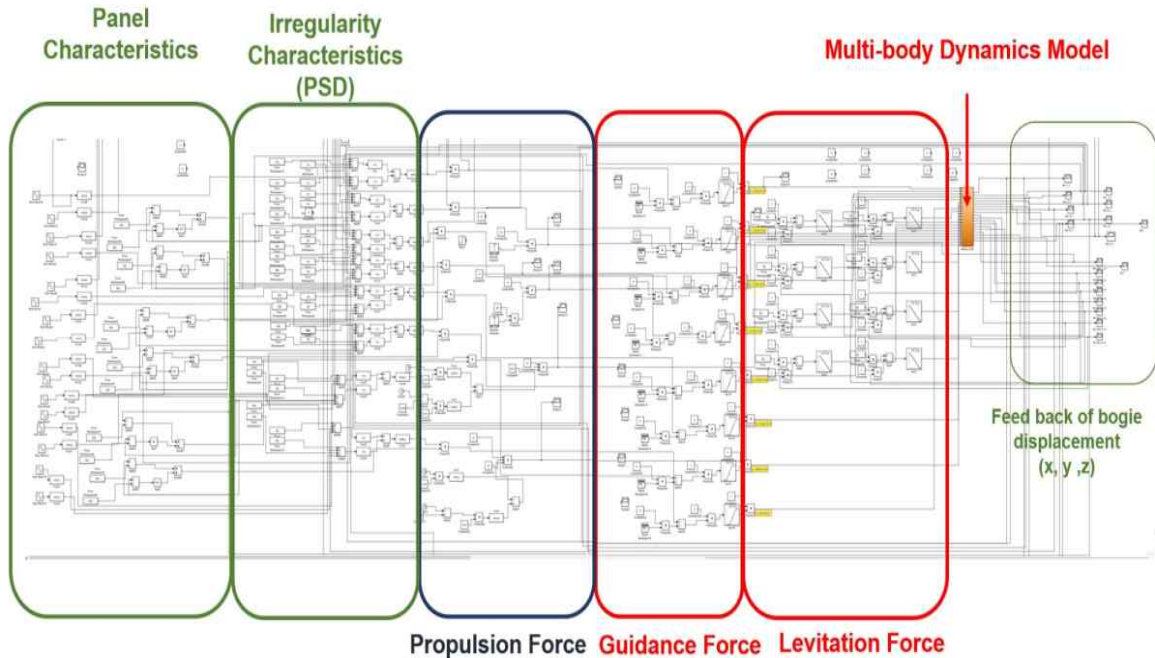
[그림 55] 곡선주로 해석 프로세스



[그림 56] 직선주행 해석을 위한 원궤도 구축



[그림 57] 곡선 주행 시 기움각에 따른 힘 분해도



[그림 58] Matlab Simulink로 구현한 직선주행의 해석 프레임웍

(4) 해석 모델의 동특성 결과 분석

① 다물체 동역학 해석 방법

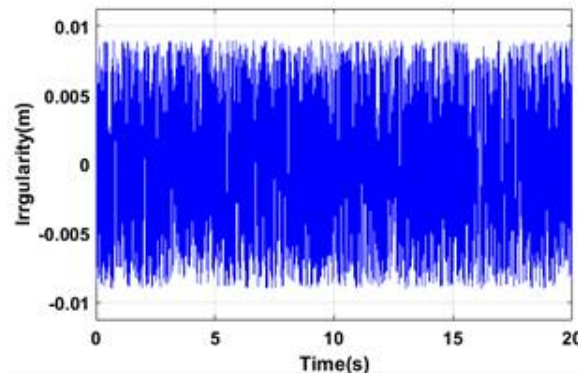
해석 진행에 있어 ADAMS 내부의 solver를 사용하였고, 해석 시간은 0 ~ 50초로 하였다. 해석의 수렴성을 고려하여 분석 데이터는 마지막 구간인 45 ~ 50초 사이의 5초를 얻었으며, 해석 time step은 0.005초를 사용하였다. ADAMS subsystem 은 non-linear 해석으로 solver는 C++을 사용하였다. ADAMS 내의 유연차체 관성력 해석으로는 partial coupling 기법을 사용하였다.

② Track 불규칙도 (자기코일의 불규칙성) 입력(Random, PSD)

EDS 방식의 자기부상열차는 정상상태에 도달하게 되면 EMS보다 안정화를 이루게 된다. 하지만, 트랙 불규칙도나 다른 외란에 의해 부의 감쇠(negative damping) 현상이 나타나 시스템의 안정성을 떨어트린다는 기존 연구가 있다[19]. EDS 방식은 EMS 방식처럼 I beam 형태의 트랙만큼은 아니지만 불규칙도에 의한 영향이 있어 고려해야 한다. 트랙 불규칙도에 의해 EDS 방식의 시스템 안정성이 낮아지는 것을 방지하기 위하여 EMS 방식에서 사용되는 트랙 불규칙도 만큼의 진동량을 본 연구에 적용하여 승차감 개선을 진행하였다. 본 연구에서 수직 방향으로의 참고문헌[20]에 나타난 수직 방향 불규칙도 PSD를 적용하였다. 참고문헌[20]에 400 km/h 속도에서의 수직 방향 불규칙도를 PSD 그래프로 나타내었다. 이를 활용하여 본 연구에서 제시한 속도로 PSD를 변환하여 적용하였다. 변환한 결과 수직 방향으로 ± 10 mm이다. 수평 방향의

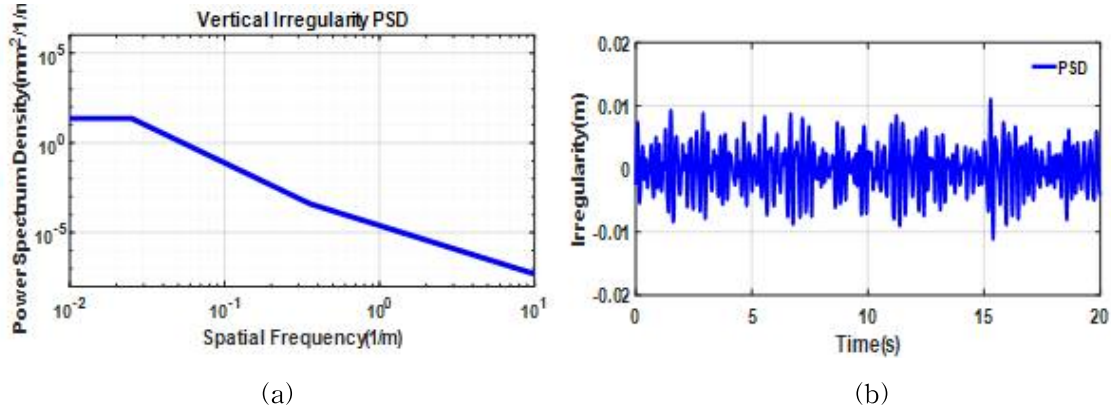
트랙 불규칙도 적용은 KIMM에서 실제 실험한 결과인 참고문헌[21]에서 최대 ± 4 mm 불규칙도가 나타났다. 또한 참고문헌[22]에서도 최대 ± 4 mm의 수평 방향 트랙 불규칙도가 나타났다. 이를 바탕으로 수직 방향에는 ± 10 mm를 적용하였고 수평 방향에는 ± 4 mm를 적용하였다.

본 연구에서는 자기코일의 불규칙성에 따른 부상력과 안내력의 영향도를 조사하기 위해 두 가지 불규칙성에 대해서 검토하였다. 하나는 random 불규칙도와 다른 하나는 기존 철도차량 및 자기부상열차에서 많이 사용하는 저주파 특성에 특화된 PSD 신호로 이루어진 불규칙도이다. 그림 59는 동특성 검증을 위해 사용된 random신호로 이루어진 불규칙성의 시간데이터를 보여준다. 불규칙성은 0 ~ 50 Hz사이의 주파수특성을 가지고 있으며, 크기는 수직 방향으로 ± 10 mm과 수평 방향으로 ± 4.0 mm를 보여준다.



[그림 59] Random신호로 이루어진 불규칙성

PSD 불규칙성은 Blackman-Tukey기반으로 한 numerical time-frequency transfer방법과 Discrete Fast Fourier Transform(DFFT)방법을 사용하여 시간 데이터로 변환 후 사용하였다. 이는 참고문헌[20]을 참고하여 수행하였다. 그림 60 (a)는 PSD 신호에 따른 track 불규칙도를 보여주고, 그림 60 (b)는 PSD 신호를 시간 데이터로 변환한 결과를 보여준다. PSD의 경우 random 불규칙도보다 저주파 (~ 10 Hz) 대역의 진동특성이 강하게 나타나며 시간 데이터의 크기는 ± 11 mm 정도의 특성을 보여 준다. 또한 수평 방향의 불규칙도의 경우는 random과 같은 ± 4.0 mm를 사용하였다.



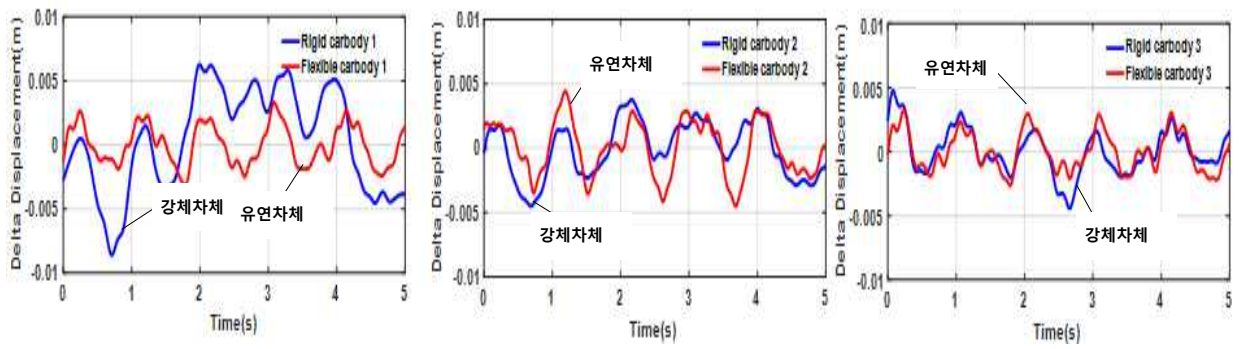
[그림 60] PSD 신호로 이루어진 불규칙성 (a) PSD (b) Time data

③ 직선 주행 시 진동특성 분석

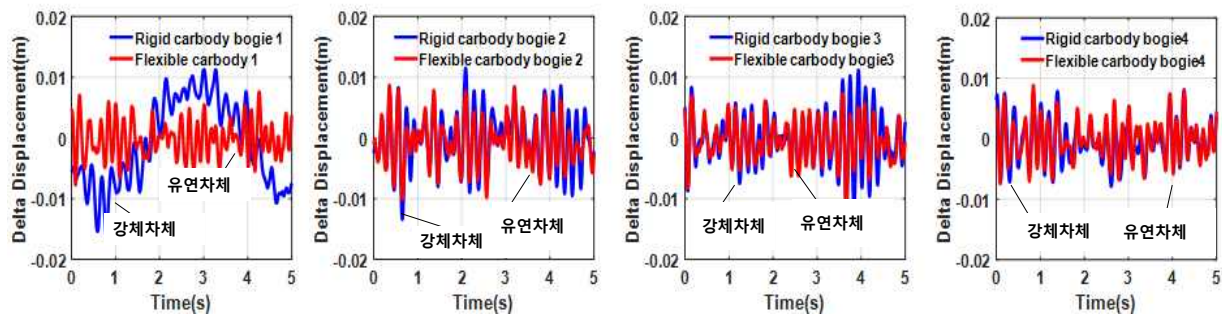
직선주행의 진동 분석은 최고 속도 500 km/h에 대해서 수행하였다. 직선주행의 경우 강체 차체 모델과 유연차체 모델을 비교하기 위해 두 가지 모델에 대한 특성분석을 수행하였고, 추가적으로 track 불규칙도에 대한 것도 random인 경우와 PSD인 경우 두 가지에 대한 진동 특성 분석을 수행하였다.

A. 수직 방향의 진동 특성 (강체 & 유연 차체 모델, random 불규칙도)

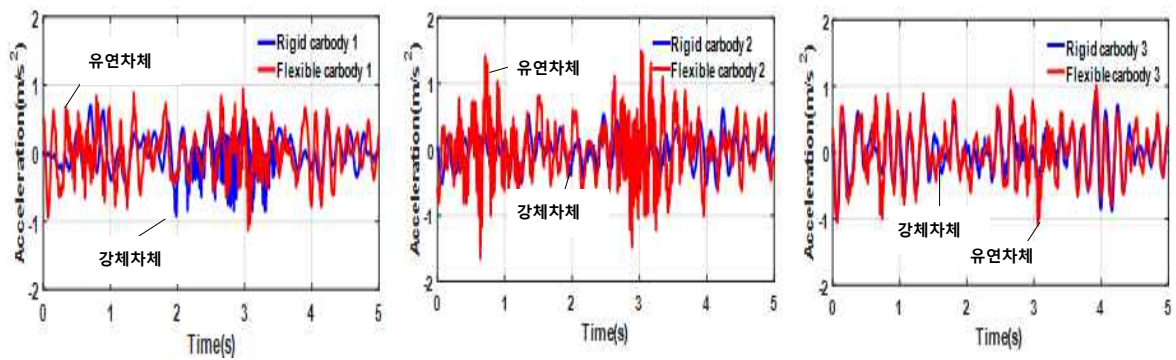
Random 불규칙도에 대한 수직 방향의 진동특성 해석 결과는 아래 그림 61 ~ 64에 나타나 있다. 해석 결과에서 강체 모델에 대한 결과는 파란색 선으로 유연차체에 대한 결과는 붉은색 선으로 도식화 하였다. 차체 및 대차의 변위는 표 10에 정리되어 있다. 표 10에 보는 것과 같이 전체적으로 강체 차체의 수직 방향 진동의 경우는 약 $\pm 4.2 \sim 5.9$ mm이고 대차의 경우는 차체의 약 2배 정도인 $\pm 9.9 \sim 14.2$ mm 수준의 진동을 함을 알 수 있다. 반면에 유연차체 모델의 경우는 강체 모델의 경우보다 변위측면에서 약간 증가하여 5.8 mm ~ 6.7 mm의 경향을 보인다. 이는 유연체 모델의 굽힘 모드들의 영향에 의해서 더욱 증가하는 것으로 해석된다. 그림 63 ~ 64는 초고속자기부상열차가 500 km/h의 속도로 직선 주행 중에 차체에 가해지는 가속도 특성을 보여주는데 그림에서 보듯이 6 Hz 이하의 진동성분들이 주로 발생하며 이들은 철도차량의 강체 모드들이고 유연 차체 모델의 경우 종종 9 Hz, 19 Hz, 33 Hz의 유연 모드들이 영향을 끼침을 알 수 있다.



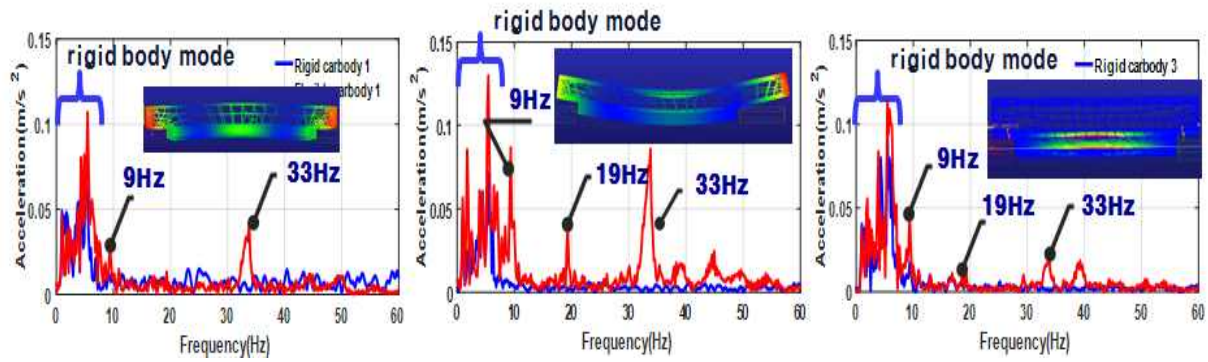
[그림 61] Random 불규칙도에 따른 차체 변위



[그림 62] Random 불규칙도에 따른 대차 변위



[그림 63] Random 불규칙도에 따른 차체의 가속도

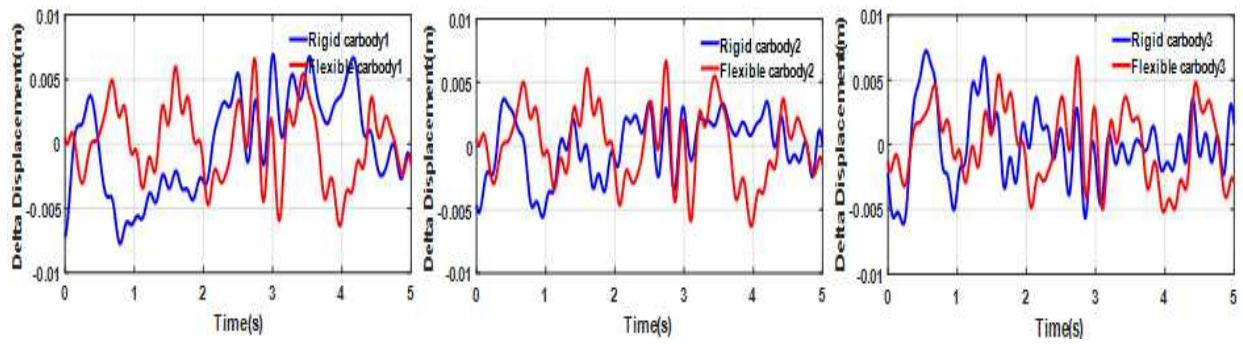


[그림 64] Random 불규칙도 차체의 가속도 FFT 및 관련 모드

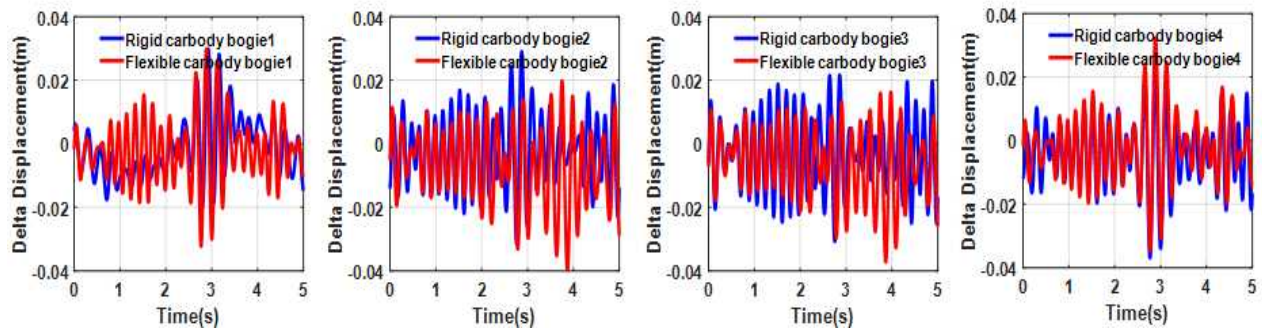
B. 수직 방향의 진동 특성(강체 & 유연 차체 모델, PSD)

PSD 불규칙도에 대한 해석 결과는 아래 그림 65 ~ 68에 나타나 있다. 해석 결과에서 강체 모델에 대한 결과는 파란색 선으로 유연차체에 대한 결과는 붉은색 선으로 도식화 하였다. 차체 및 대차의 변위는 표 12에 정리되어있다. 표 12에 보는 것과 같이 전체적으로 강체 차체의 경우는 약 $\pm 3.3 \sim 5.6$ mm이고 대차의 경우는 차체의 약 3배 정도의 변위인 $\pm 11.6 \text{ mm} \sim 14.2 \text{ mm}$ 수준으로 random 불규칙도에 비해 대차의 진동이 증가하였음을 알 수 있다. 반면에 유연차체 모델의 경우는 강체 모델의 경우보다 변위측면에서 약간 증가하여 6.0 mm ~ 10.0 mm의 경향을 보인다. 이는 PSD가 유연체 모델의 1차 굽힘 모드 등에 영향을 주어 진동특성이 더욱 증가하는 것으로 해석된다. 또한 이는 저주파의 가진 특성을 가지고 있는 PSD의 경우에 더욱 두드러지게 보인다.

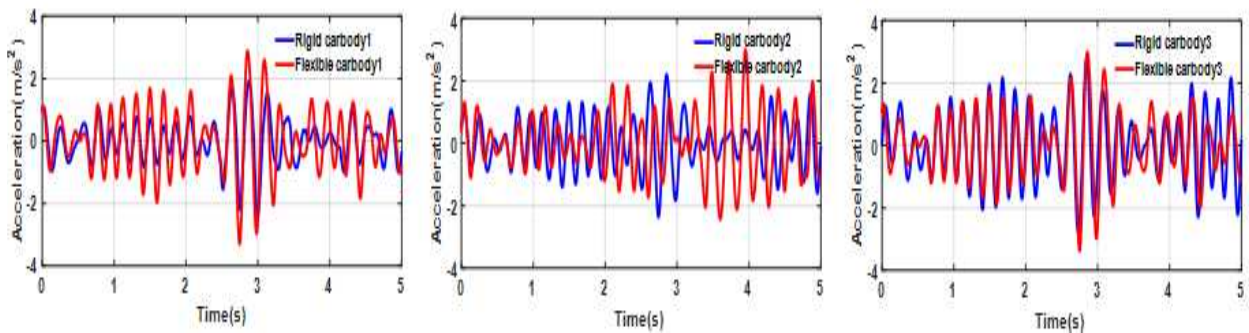
그림 67 ~ 68은 차체에 가해지는 가속도 특성을 보여주는데 그림에서 보듯이 앞선 random 불규칙도와 유사하게 6 Hz 이하의 강체 모드들의 영향도가 크다. 하지만, PSD의 특성이 저주파를 더욱 가진시킨다는 점에서 진동은 앞선 random 불규칙도의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 random 불규칙도와 유사하게 유연 차체 모델의 경우 종종 9 Hz 유연 모드들이 영향을 끼침을 알 수 있다. 그러나 PSD의 경우 10 Hz이하의 저주파 특성이 대부분이어서 10 Hz 이상의 유연모드의 특성을 잘 나타나지 않는 결과를 보였다.



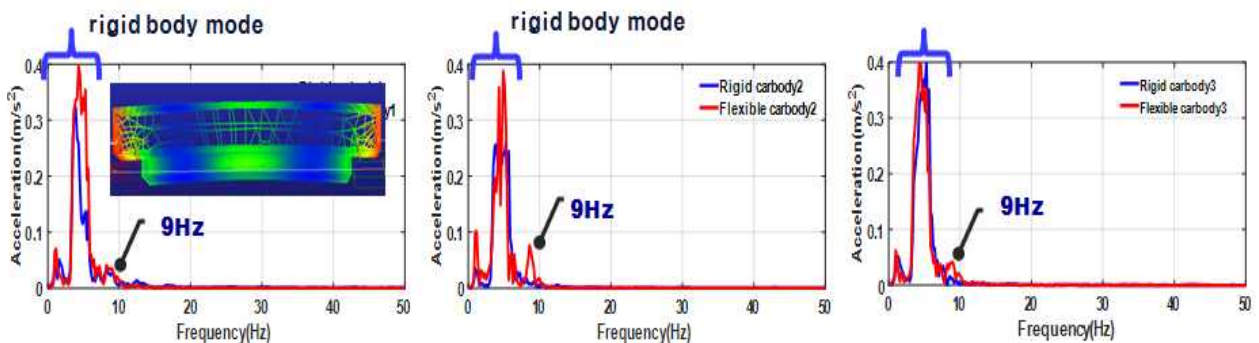
[그림 65] PSD 불규칙도에 따른 차체 변위



[그림 66] PSD 불규칙도에 따른 대차 변위



[그림 67] PSD 불규칙도에 따른 차체의 가속도



[그림 68] PSD 불규칙도 차체의 가속도 FFT 및 관련 모드

[표 12] Random 및 PSD 불규칙도에 대한 수직 방향 변위

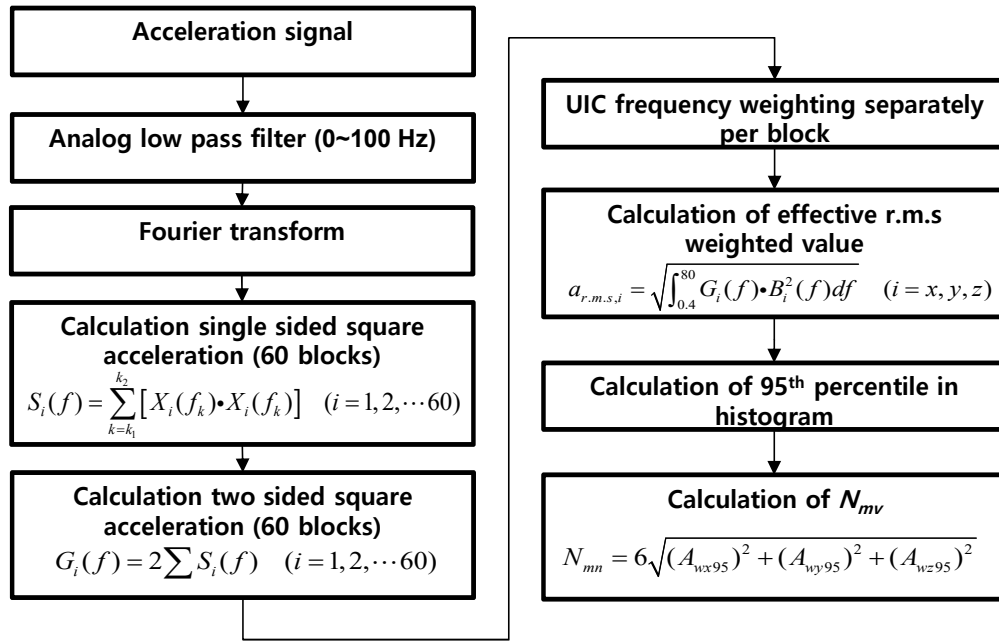
	차체 #1	차체 #2	차체 #3	대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
강체 차체 모델 @random [mm]	±5.2	±4.7	±5.9	±14.2	±11.8	±13.8	±9.9
유연 차체 모델 @random [mm]	±6.1	±5.8	±6.7	±14.4	±25.0	±22.4	±14.5
강체 차체 모델 @PSD [mm]	±5.6	±3.3	±4.4	±14.2	±13.0	±12.5	±11.6
유연 차체 모델 @PSD [mm]	±6.5	±10.0	±6.0	±31.1	±29.9	±26.8	±33.4

C. 수직 방향의 승차감 분석

자체의 가속도 성분을 바탕으로 승차감 분석을 수행한 방법은 그림 69에 나타난 것과 같은 과정을 통하여 이루어진다. 이 승차감 평가는 KS R9160, UIC 513R, UIC 518R, ISO 2631, CEN Draft prENV 12299의 평가법과 Continuous comfort 방법을 이용한 기존 참고문헌[23]에 따라 수행되었다.

표 13에 보는 것과 같이 수직 방향의 승차감의 경우 random 불규칙도보다 PSD의 경우가 더욱 더 크게 발생하였고, 이는 열차 차량의 특성상 저주파 특성에 민감하게 반응하기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 또한 이 결과는 앞선 차체 가속도의 FFT를 한 결과를 통해서도 알 수 있다. 또한 실제 차량과 흡사한 유연 차체 모델의 경우 유연 모드들이 주행 시 가진 되는 현상을 보여 강체 차체 모델에 비해 승차감이 더욱 안 좋게 나오는 경향을 보였다.

앞선 결과들을 바탕으로 추후 연구에서는 입력 외란으로는 실제 외란특성과 유사한 PSD 만을 사용하고 실제 차체의 특성을 더욱 더 잘 분석하기 위해서 유연차체 모델을 사용하여 연구를 수행하였다.



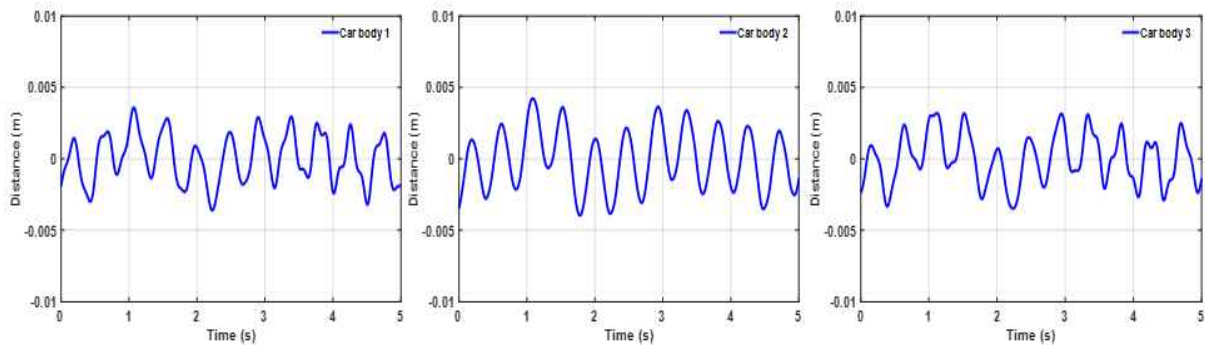
[그림 69] 승차감 평가 방법론

[표 13] 수직 방향의 승차감 분석

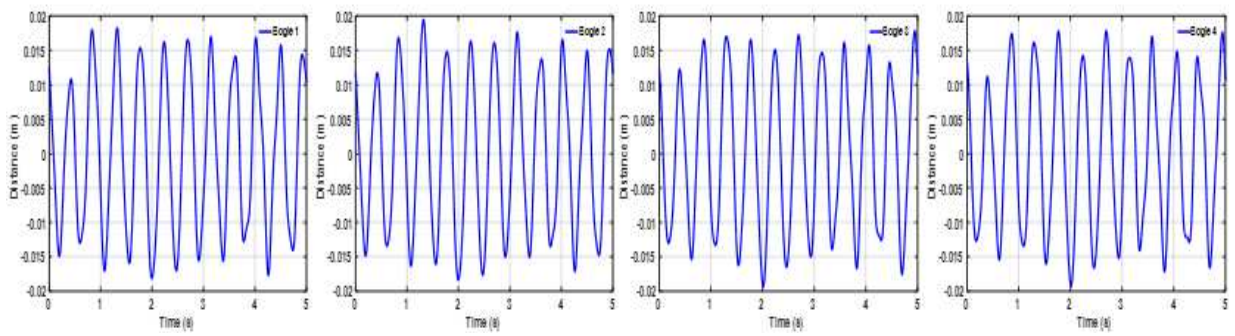
	Random 불규칙도 [dB]			PSD 불규칙도 [dB]		
	차체 #1	차체 #2	차체 #3	차체 #1	차체 #2	차체 #3
강체 차체 모델	107	106	109	109	113	114
유연 차체 모델	110	111	111	114	112	114

D. 수평 방향 진동 특성 (유연 차체 모델, PSD)

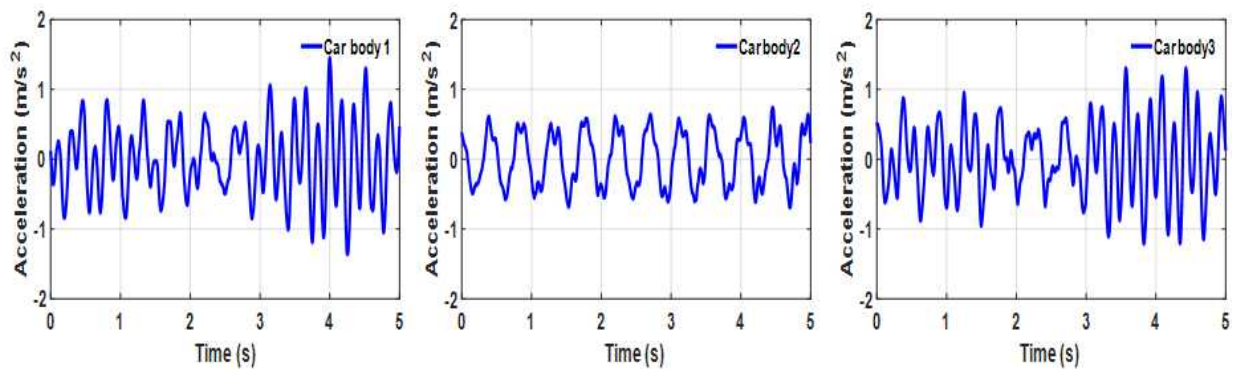
직선주행에 대한 수평 방향의 진동 특성 분석은 그림 70 ~ 73에 정리되었다. 그림 70에서 보는 것과 같이 차체의 변위는 수평 방향으로 약 ± 4 mm 정도의 진동함을 알 수 있었고, 대차의 경우는 ± 17 mm 정도의 수평 방향으로 진동함을 알 수 있었다. 그림 73에서 보는 것과 같이 수평 방향 진동의 경우 3 ~ 5 Hz의 강체모드들이 주로 나타나고 있으며 유연 모드로는 9 Hz인 1차 굽힘 모드가 나타남을 알 수 있었다. 이는 직선주행 중 1차 굽힘 모드로 진동하면서 롤링 특성을 같이 보이기 때문에 수평 방향의 진동성분에서도 1차 굽힘 모드 특성이 나타난다고 판단하였다.



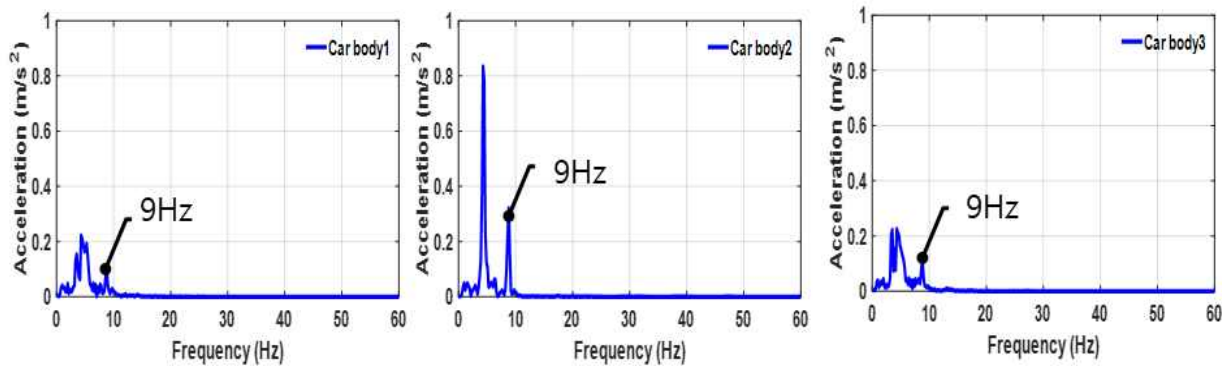
[그림 70] 수평 방향의 차체 변위



[그림 71] 수평 방향의 대차 변위



[그림 72] 수평 방향 차체의 가속도



[그림 73] 수평 방향의 차체의 가속도 FFT 및 관련 모드

E. 수평 방향의 승차감 분석

표 14에서 보는 것은 초고속자기부상열차가 500 km/h로 직선 주행 시 발생하는 수평 방향의 진동 가속도에 대해서 승차감을 분석을 한 데이터이다. 수직 방향의 승차감 특성이 110 ~ 114 dB 인 것과 비교했을 때 수평 방향의 승차감은 100 dB 정도로 직선 주행 시에는 승차감에는 불편한 점이 없다고 결론 내릴 수 있다.

[표 14] 수평 방향의 승차감 분석

	PSD 불규칙도 [dB]		
	차체 #1	차체 #2	차체 #3
유연 차체 모델	99	100	98

④ 곡선 주행 시 진동특성 분석

곡선주행의 기본 속도는 직선 최대속도(=500 km/h)와 비슷한 118m/s(=425 km/h)에 기울각 10° 로 하여 해석을 수행하였다. 이는 실제 목표로 하는 600 km/h 의 약 70% 수준으로 실제 운행하는 속도인 360 km/h보다는 높고, 최종 80% 인 133 m/s(=480 km/h)보다는 약간 작은 속도로 선정하였다. 곡선 주행 시 영향을 주는 패널의 영향도 분석을 위해 패널 효과 유무에 따른 해석을 수행하였다. 패널 효과는 패널 간격에 의해서 발생하는 주기적인 수평 방향의 진동으로 본 연구에서는 수평 방향으로 그 외란을 추가하는 방식으로 모델링하였다. 패널의 간격은 12.5 m로 하였으며 외란은 아래의 식과 같이 정의하였다.

$$0.5 \text{ mm} \times \sin(2\pi \times vel./12.5 \text{ m} \times time)$$

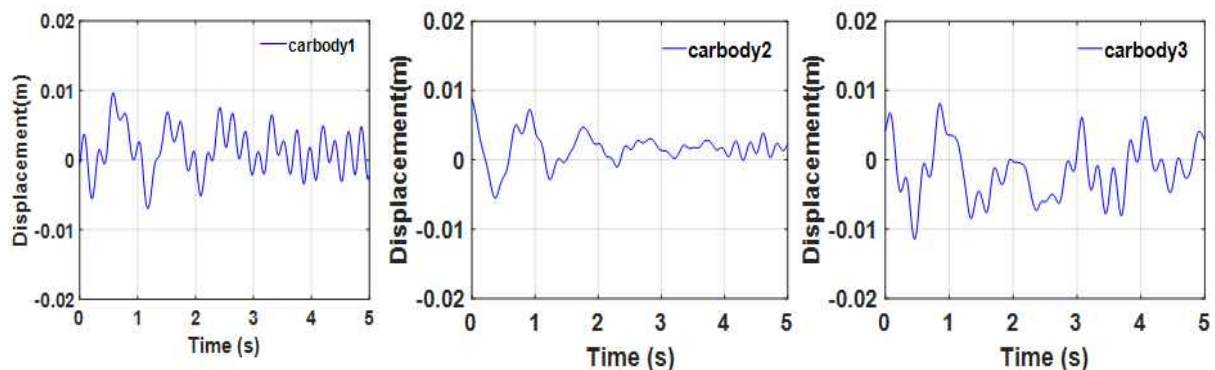
윗 식에서 0.5 mm는 패널에 의한 진동크기이고, *vel.*은 자기부상열차의 속도로 기준 속도 500 km/h로 계산하면 약 11 Hz, 곡선 425 km/h로 계산하면 9.44 Hz의 외란이 추가된다.

그림 74 ~ 77은 패널 효과가 없는 경우에 대한 수직 방향 진동특성을 정리한 것이

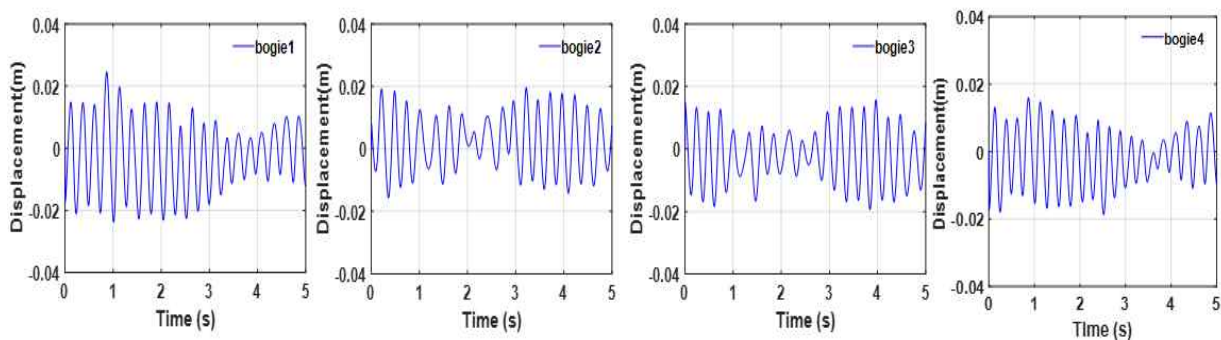
고, 그림 78 ~ 81은 같은 조건에 대한 수평 방향 진동특성을 비교 정리한 것이다. 그리고 정량적인 변위 및 승차감은 표 15와 16에 정리되어 있다. 패널 효과가 없는 경우 118 m/s로 곡선 주행을 하는 경우에 대차의 경우 약 17 ~ 20 mm의 수직 방향 진동을 하게 되고 수평 방향으로 약 14 ~ 16 mm 수준의 진동을 하게 된다. 또한 승차감의 경우는 수직 방향으로 약 120 dB 수준이고, 수평 방향으로 약 102 dB 수준으로 기존 직선 운동에 비해서 승차감이 나빠졌음을 알 수 있다. 이는 곡선 주행 시 적용되는 원심력과 중력의 분해력에 의한 영향으로 판단된다.

또한 패널 효과를 고려한다면 그 진동특성은 더욱 나쁜 모습을 보여준다. 그림 82 ~ 88에 보여지는 것처럼 118 m/s의 곡선 주행 시 발생하는 9.4 Hz의 패널 효과를 고려하면 대차의 수직 방향 진동은 36.5 mm까지 증가하게 되고, 수평 방향으로도 약 30 mm까지 증가하는 특성을 보여준다. 이는 9 Hz 부근에 있는 유연 모드로 인한 진동의 유발에 기인한 것으로 판단된다.

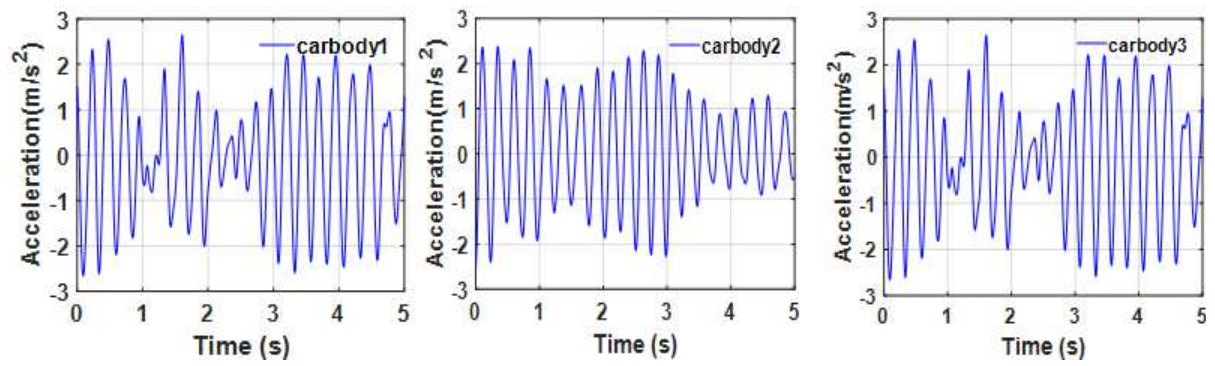
A. 수직 방향의 진동특성 (118 m/s @ 10° w/o 패널효과)



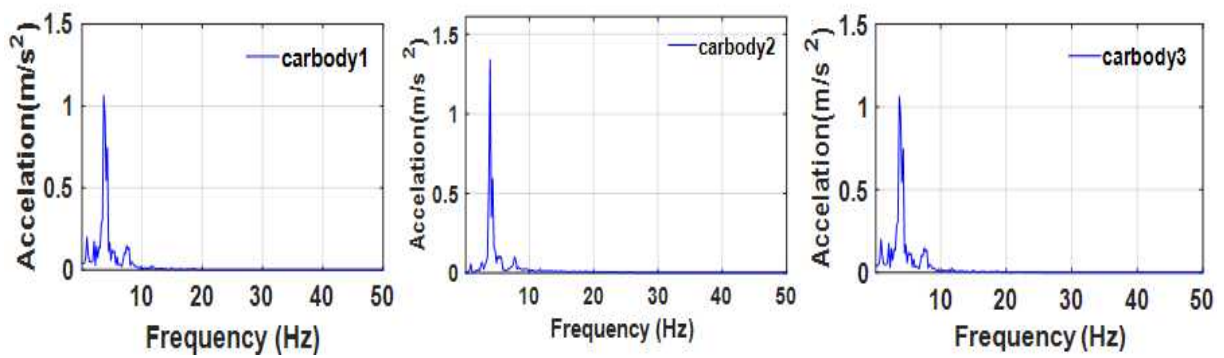
[그림 74] 수직 방향의 차체 변위



[그림 75] 수직 방향의 대차 변위

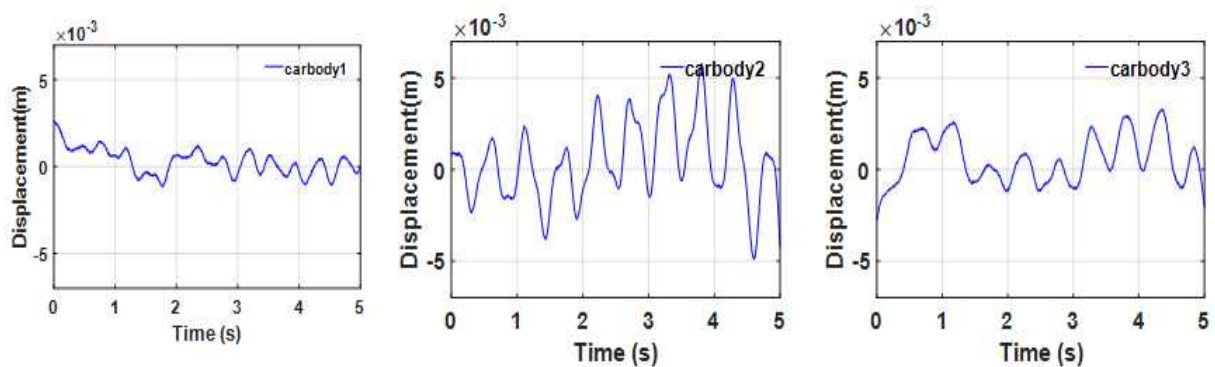


[그림 76] 수직 방향의 차체의 가속도

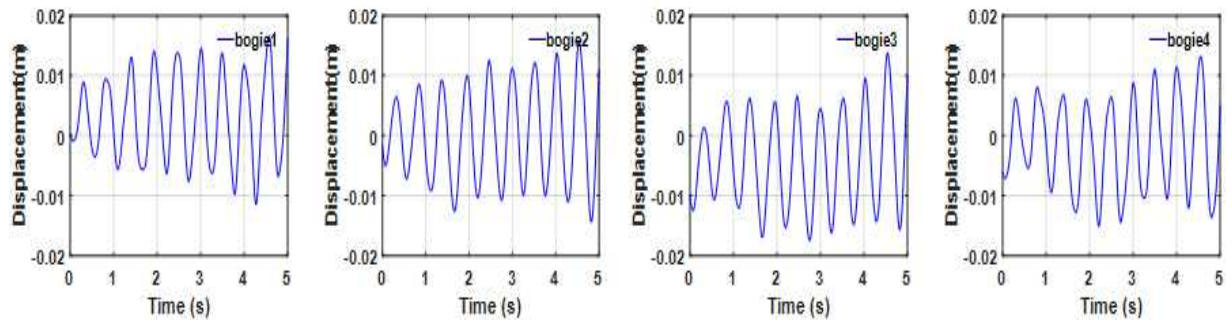


[그림 77] 수직 방향의 차체의 가속도의 FFT 및 관련 모드

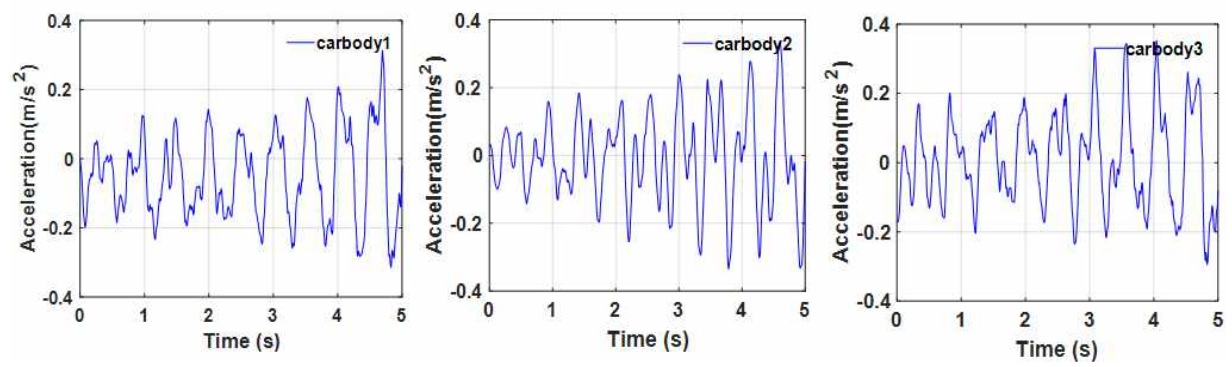
B. 수평 방향의 진동특성 (118 m/s @ 10° w/o 패널효과)



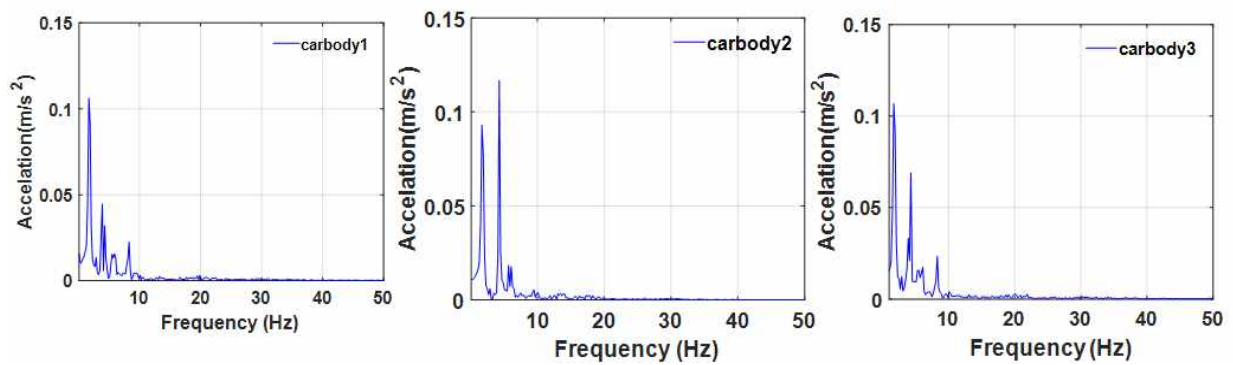
[그림 78] 수평 방향의 차체 변위



[그림 79] 수평 방향의 대차 변위

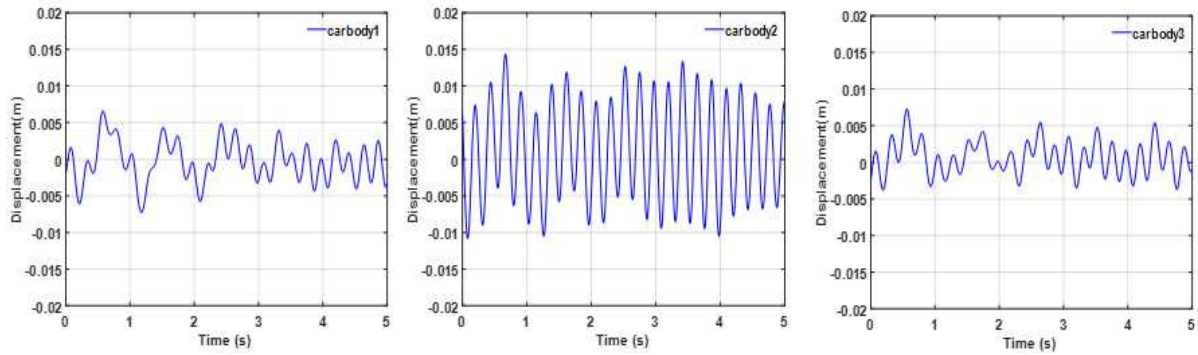


[그림 80] 수평 방향의 차체의 가속도

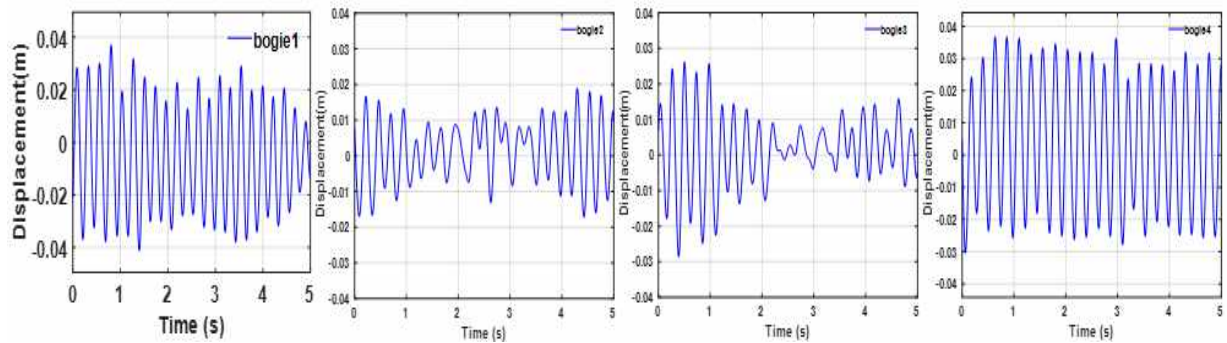


[그림 81] 수평 방향의 차체의 가속도의 FFT 및 관련 모드

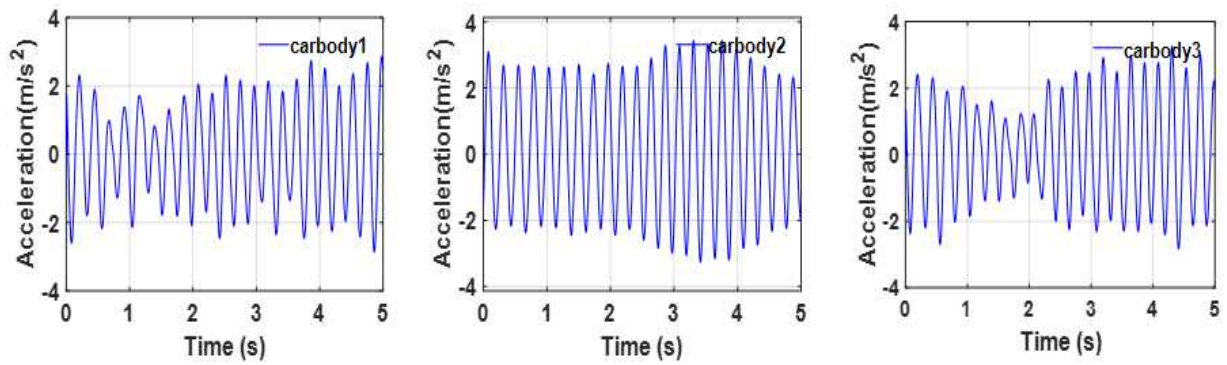
C. 수직 방향의 진동특성 (118 m/s @ 10° w/ 패널효과)



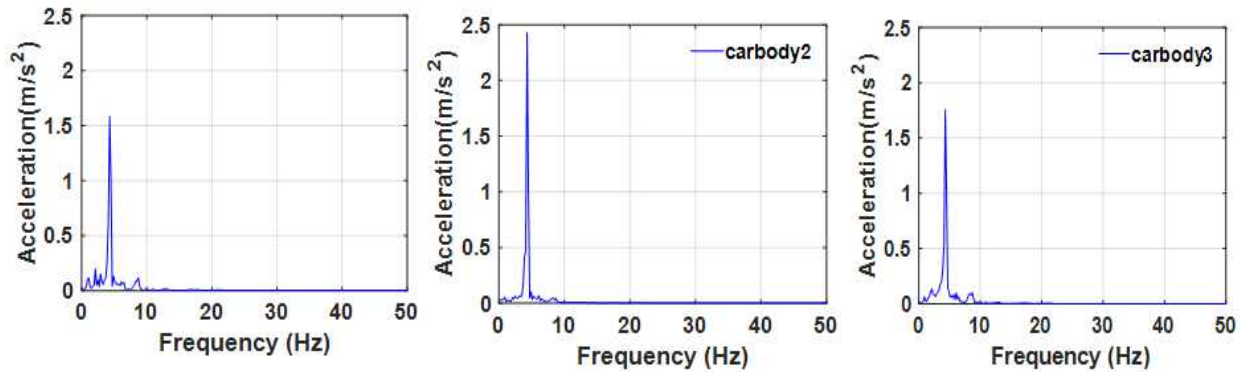
[그림 82] 수직 방향의 차체 변위



[그림 83] 수직 방향의 대차 변위

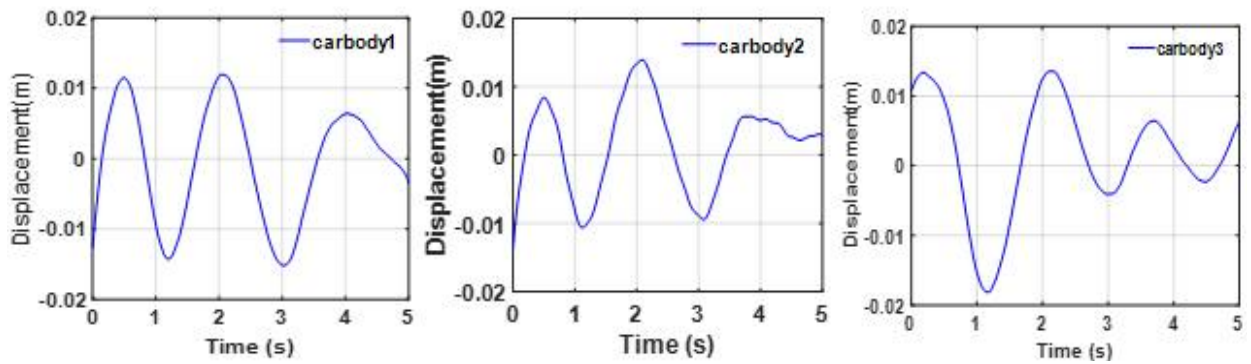


[그림 84] 수직 방향의 차체 가속도

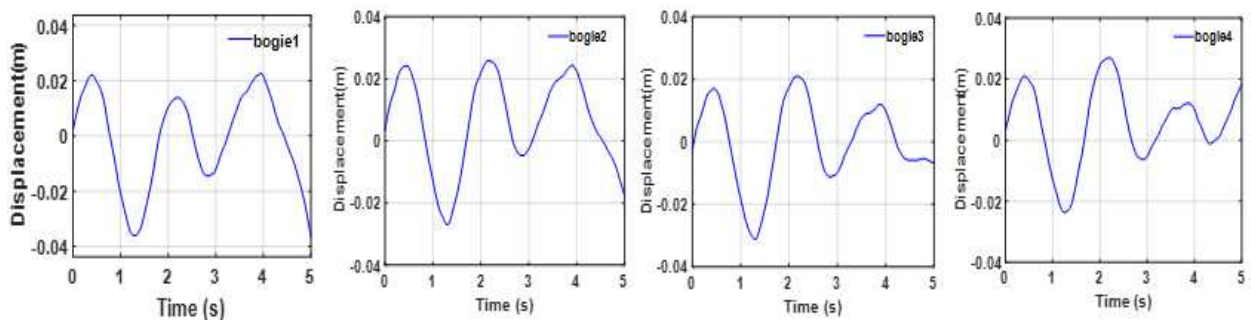


[그림 85] 수직 방향의 차체의 가속도 FFT 및 관련 모드

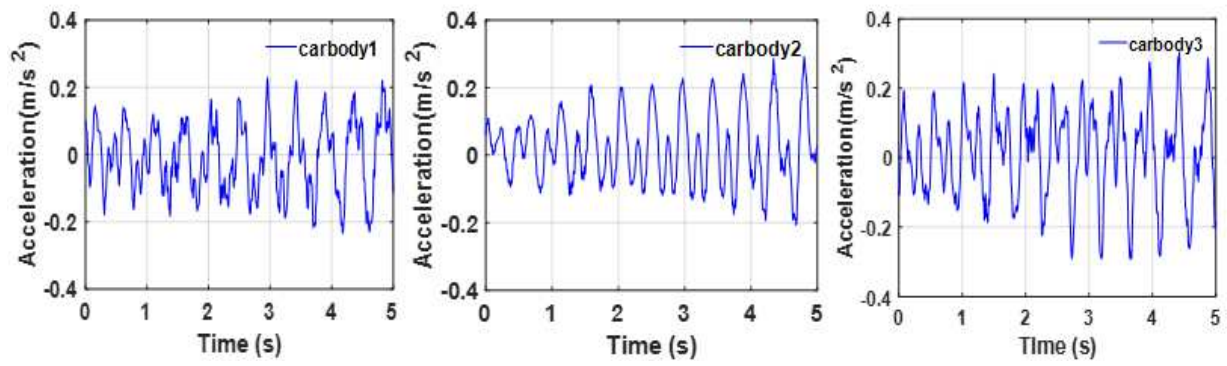
D. 수평 방향의 진동특성 (118 m/s @ 10° w/ 패널효과)



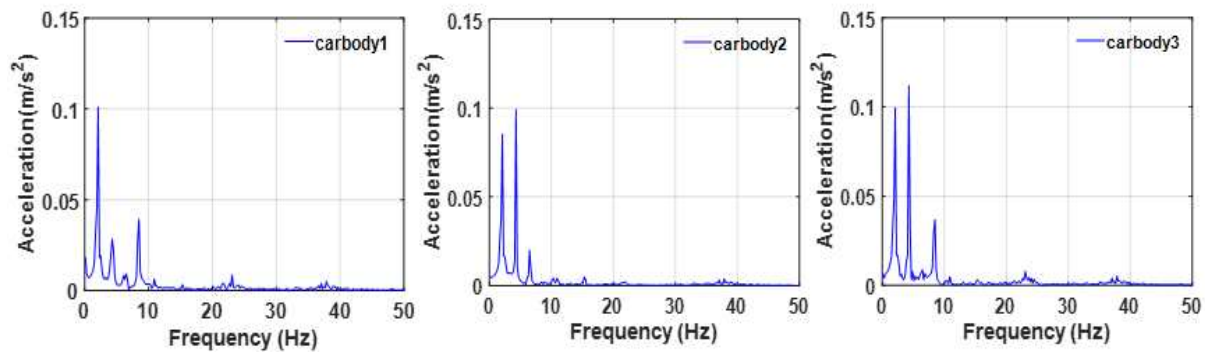
[그림 86] 수평 방향의 차체 변위



[그림 87] 수평 방향의 대차 변위



[그림 88] 수평 방향의 차체 가속도



[그림 89] 수평 방향의 차체의 가속도 FFT 및 관련 모드

[표 15] 118 m/s의 곡선주행에서 패널 효과에 따른 변위 비교

		차체 #1	차체 #2	차체 #3	대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
118 m/s@ 10° w/o panel	Levitation [mm]	±7.8	±7.2	±9.8	±24.0	±17.0	±17.0	±18.0
	Guidance [mm]	±1.9	±5.4	±3.1	±14.0	±15.0	±15.6	±14.0
118 m/s@ 10° w/ panel	Levitation [mm]	±8.3	±15	±6.6	±36.5	±18.0	±27.4	±33.5
	Guidance [mm]	±13.6	±14.3	±15.3	±29.5	±26.4	±26.1	±25.3

[표 16] 118 m/s의 곡선주행에서 패널효과에 따른 승차감 비교

	수직 방향 진동 [dB]			수평 방향 진동 [dB]		
	차체 #1	차체 #2	차체 #3	차체 #1	차체 #2	차체 #3
118 m/s@ 10° w/o panel	122	121	122	102	103	102
118 m/s@ 10° w/ panel	123	125	124	103	104	102

(5) 추진체 및 설계 개선을 통한 대차의 진동 저감

해석 기본 모델(=직선 500 km/s 직선, 곡선 480 km/s @ 10°)을 바탕으로 다양한 시스템 초전도 코일들의 변화, 차체의 구조형상 변화 및 다양한 설계 조건들에 대한 초전도 코일 연구 및 진동 저감 연구를 수행하였다. 이 초전도 코일 스터디 모델에는 주행 속도에 따라 변화하는 패널 간격의 효과를 추가하였고, PSD 불규칙도 특성을 앞의 경우와 동일하게 적용하여 해석을 수행하였다. 많은 초전도 코일 스터디를 수행하였으나 그 특성이 미비한 경우가 많아 본 보고서에는 진동 저감에 큰 영향을 끼치는 초전도 코일들의 해석 결과를 보여준다.

① Air Spring 강성 변화

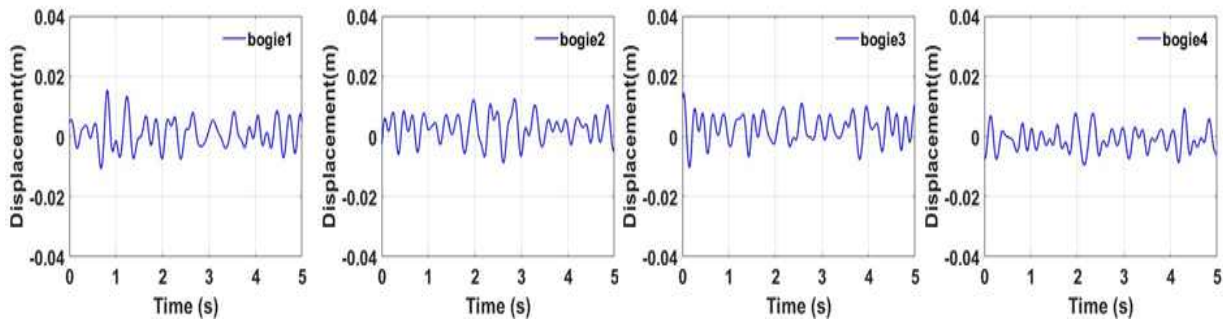
앞선 연구 결과에서 보듯 속도가 증가함에 따라서 변위의 증가 및 승차감 즉 가속도의 크기가 커지게 되는데, 이러한 진동에 영향을 주는 것이 대부분은 6 Hz이하에 존재하는 강체 모드들에 의한 것이다. 이 강체 모드의 경우 차량의 무게와 air spring의 강성 및 댐핑 특성, 무게중심의 위치 등에 의해서 결정된다.

이에 본 연구에서는 air spring 강성 변화에 따른 강체 모드의 영향 변화에 의한 힘/변위 전달률 변화영향을 조사하였다. 이 결과를 바탕으로 추후 2차 강성을 조절하여 힘 전달률 및 변위 전달률을 낮게 설계하여 진동 저감을 수행하는 접근법을 사용하였다. 적용한 air spring 강성 변화는 표 17과 같은 두 가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. Case 1의 경우는 전체 air spring의 강성을 반으로 줄여서 해석을 수행한 것이고, case 2의 경우는 중간 차체와 연결된 air spring만의 강성을 반으로 줄여서 해석을 수행한 것이다. 이는 중간 차체를 통해서 진동이 차체 간에 서로 전달되기 때문에 해석을 고려하였다.

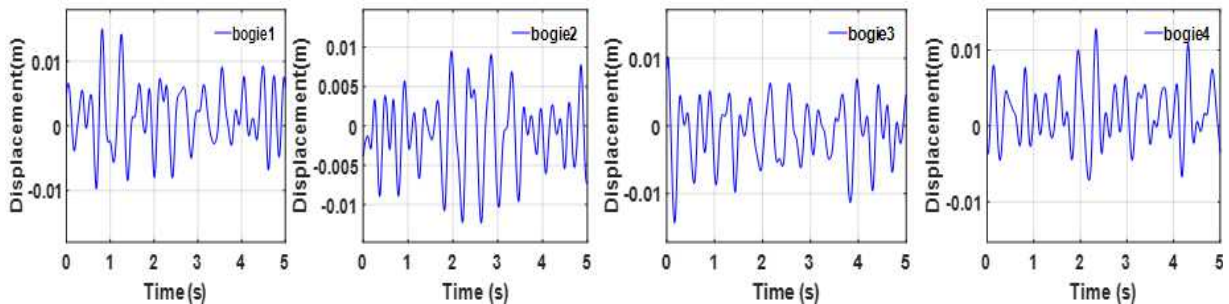
[표 17] Air spring 강성변화

	Case 1 기존 damping + 1/2 전체 강성	Case 2 기존 damping+1/2 강성(middle)
Stiffness	$3.6 \times 10^5 \text{ Nm/s} \rightarrow 1.8 \times 10^5 \text{ Nm/s}$	$3.6 \times 10^5 \text{ Nm/s} \rightarrow 1.8 \times 10^5 \text{ Nm/s(middle)}$
Damping	$1.0 \times 10^4 \text{ Nm/s}$	$1.0 \times 10^4 \text{ Nm/s}$

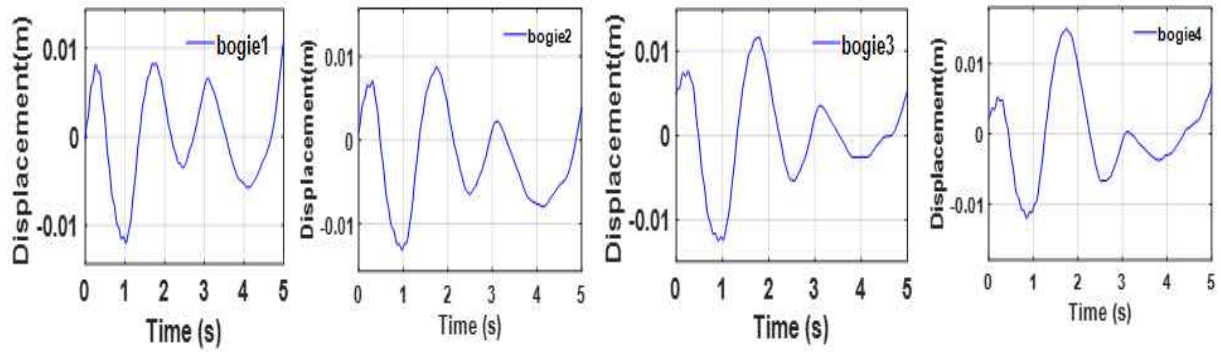
Case 1과 같이 초고속자기부상열차의 전체 air spring강성을 작게 가져감에 따라서 대차의 크게 감소하였다(그림 90, 92). 그림 91과 93에 보는 것과 같이 중간 차체와 연결된 air spring의 강성만을 줄인 경우도 비슷한 진동 저감 현상을 보여주고 있다. 또한 이 경우가 수직 방향에 대해서는 더욱더 많은 진동 저감 특성을 보여줄 수 있다. 이는 차체끼리 연결된 동특성 때문에 진동이 추가적으로 가진되거나 소멸되는 경우가 있어 articulated 대차를 이용하는 경우에는 이 부분에 대한 강성을 잘 설계할 필요가 있음을 알 수 있다.



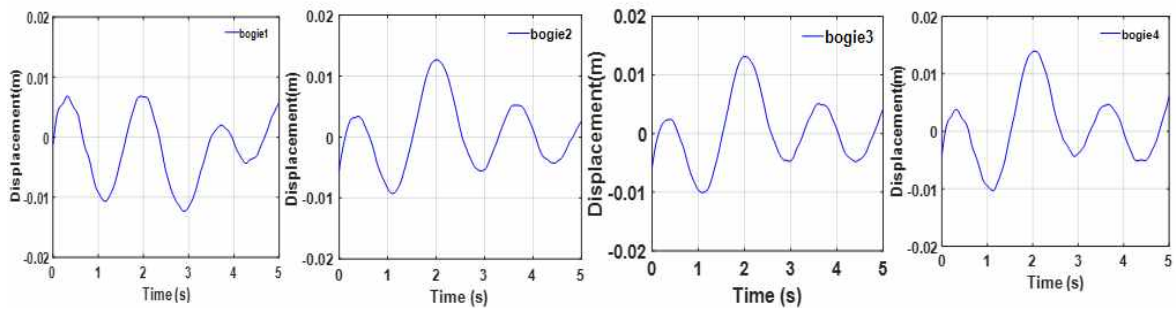
[그림 90] 수직 방향의 대차 변위 (Case 1)



[그림 91] 수직 방향의 대차 변위 (Case 2)



[그림 92] 수평 방향의 대차 변위 (Case 1)



[그림 93] 수평 방향의 대차 변위 (Case 2)

[표 18] Air Spring 강성변화에 따른 대차의 진동 저감

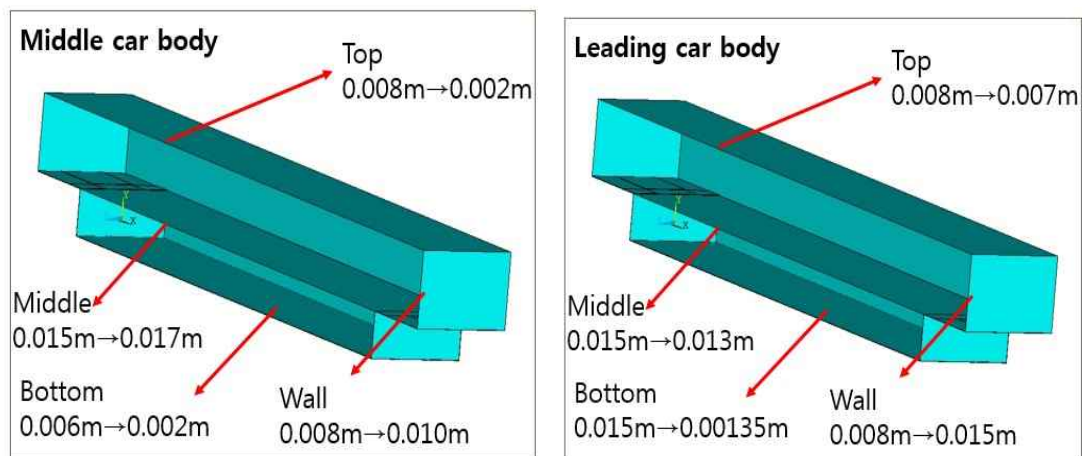
		대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
Case 1	Levitation[mm]	± 13.0 (64.4% ↓)	± 10.7 (40.5% ↓)	± 12.4 (54.7% ↓)	± 9.4 (71.9% ↓)
	Guidance[mm]	± 11.4 (61.3% ↓)	± 11.2 (57.5% ↓)	± 11.0 (57.8% ↓)	± 13.0 (48.6% ↓)
Case 2	Levitation[mm]	± 11.2 (69.3% ↓)	± 10.4 (42.2% ↓)	± 10.5 (61.6% ↓)	± 9.3 (72.2% ↓)
	Guidance[mm]	± 11.7 (60.3% ↓)	± 12.8 (51.5% ↓)	± 12.6 (51.7% ↓)	± 12.1 (52.2% ↓)

② 철도차량의 wall 및 layer thickness 변화

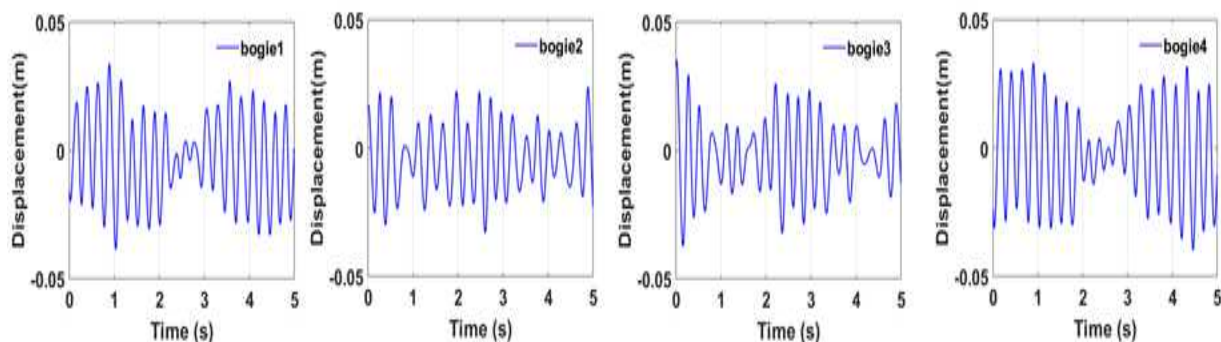
앞서 언급한 것과 같이 초고속자기부상열차의 진동성분 중에서 대부분은 아니지만, 무시할 수 없는 수준의 영향을 보여준 것이 10 Hz 근방의 유연 모드의 영향도이다. 이에 대한 조사를 위해서 1차 굽힘 모드에 영향을 줄 수 있는 각 layer의 두께 및 외

벽의 thickness에 대한 초전도 코일 연구를 수행하였다. 그러나 강체 모드의 변화가 없어야하기 때문에 무게에 대한 것은 같도록 경계조건으로 놓고 몇 가지 경우에 대한 수직/수평 진동 변화에 대한 해석을 수행하였다.

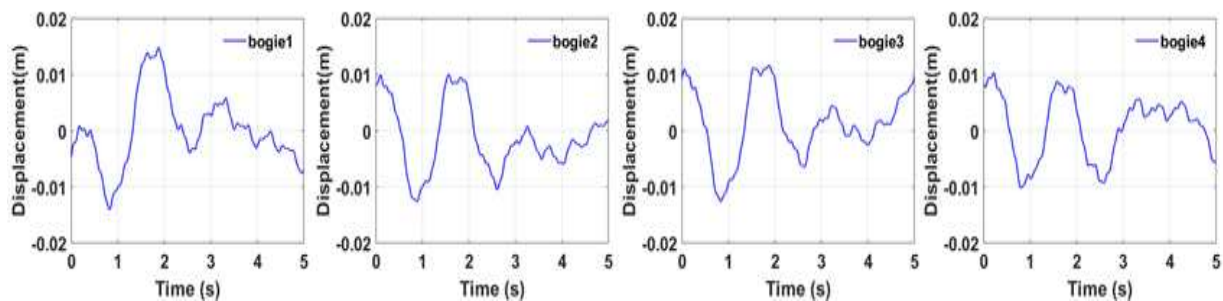
해석결과인 그림 95와 96에서 보듯이 thickness변화는 대차의 수직/수평 진동변화를 줄이기에는 부족하였다. 이는 철도차량의 wall 및 layer의 두께 변화 모델을 선정할 때 무게를 같게 한다는 제약조건이 있어 무게 변화는 없었고, 실제 철도차량과 유사한 형태인 좌우 대칭 형태의 모델을 구축하는 제약조건이 있어 실제적인 진동 저감 효과를 얻지 못한 것으로 판단하였다. 또한 앞선 해석 결과에서 보았듯이 PSD 입력 불규칙도의 경우 9 Hz 이상의 유연모드를 크게 가진 하지 않는 것으로 보여 큰 효과를 얻지 못하였다.



[그림 94] 철도차량 thickness 변화 모델



[그림 95] 수직 방향의 대차 변위



[그림 96] 수평 방향의 대차 변위

[표 19] Thickness 변화에 따른 대차의 진동 저감

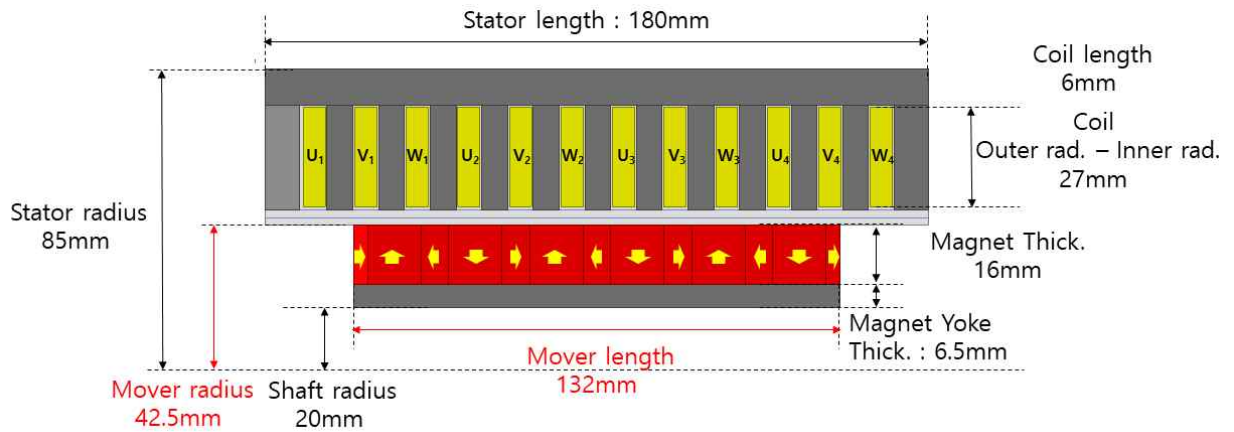
		대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
Thickness 변화	Levitation[mm]	± 36.2 (0.82% ↓)	± 28.4 (57.8% ↑)	± 36.2 (32.1% ↑)	± 36.5 (8.9% ↑)
	Guidance[mm]	± 14.4 (51.2% ↓)	± 11.3 (57.2% ↓)	± 12.1 (53.6% ↓)	± 10.2 (59.7% ↓)

③ 전자기댐퍼 적용

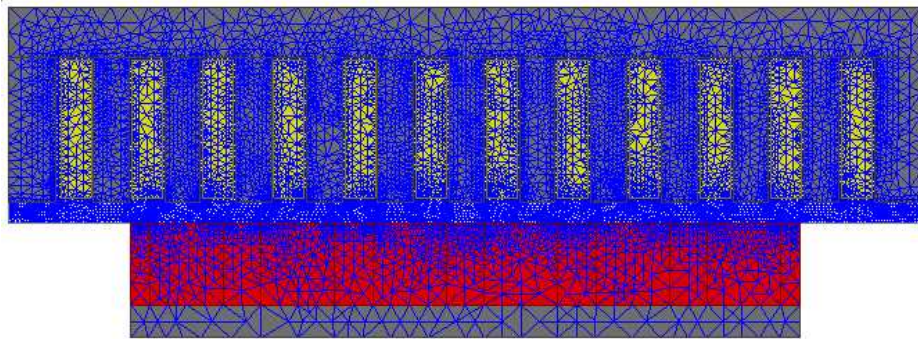
대차의 진동이 객차로 전달되는 양을 감소시키기 위해 2차 현가장치가 연결되어 있다. 하지만 기존의 현가장치는 수동형 현가장치로서 여러 주파수 대역의 대차의 진동을 효과적으로 저감할 수 없다. 능동형 현가장치를 도입 시 기존 수동형 현가장치 대비 넓은 주파수 대역에서 큰 진동 저감 할 수 있다. 기존의 대차와 객차 사이에 연결되는 서스펜션은 좁은 공간 하에 설치되기 때문에 비교적 작은 크기가 요구되고 설치 및 유지보수를 위해서 탈부착이 용이하여야 한다. 따라서 도입하고자 하는 능동형 현가장치는 높은 추력밀도를 필요로 한다. 또한 비교적 넓은 주파수 대역을 가지기 위해서는 빠른 제어 응답이 필요한데 이러한 능동형 현가장치로서는 전자기 선형 액추에이터가 적합하다.

기본적 설계 방안은 열차에서 발생하는 진동의 진폭에 대응하는 작동 거리를 가지고 배선이 편한 영구자석 이동자 형식을 선택하였다. 또한 축에 가해지는 하중은 액추에이터 고정자뿐이기 때문에 길이 축소를 위해 별도의 베어링을 사용하지 않고 테프론 코팅이 된 SUS 파이프 마찰 구동방식으로 선정하였다.

A. 소형 전자기 선형 액추에이터 전자기 설계



[그림 97] 원통형 2차원 전자기 유한요소 해석 모델



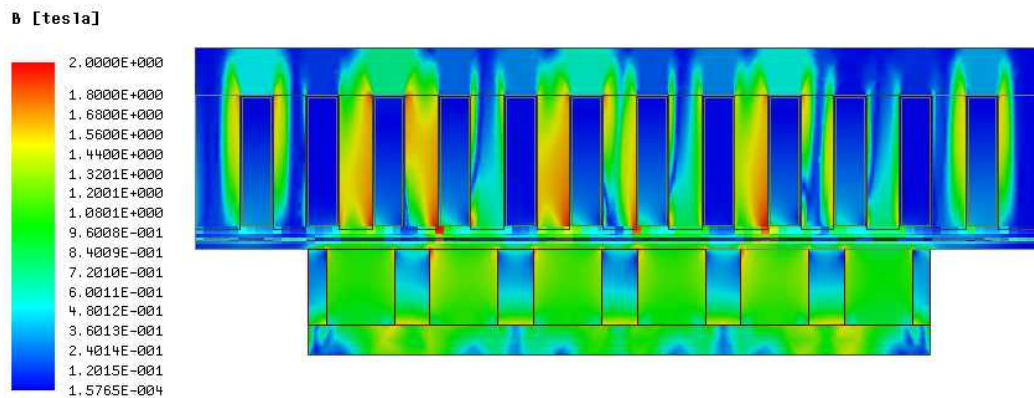
[그림 98] 전자기 해석 모델의 요소 분포

기본적인 전자기 회로 설계는 자속 밀도를 높이기 위한 할바 배열의 영구자석 모델링과 슬롯을 포함한 3상의 코일을 선정하였다. 전자기 선형 액추에이터는 원형 대칭 모델이기 때문에 3D 전체 모델링을 하지 않고 단면의 2D 모델을 적용하여 해석 시간을 줄이는 것이 타당하다. 2D 모델링을 진행할 시 고려할 사항으로는 와류 전류를 줄이기 위한 전자기 강판의 적층 인자와 강판 자체의 비선형 물성 등이 있다. 본 설계에서는 시판중인 전자기 강판 중 가장 얇은 0.5 mm 제품을 기준으로 적층 인자와 비선형 물성을 입력하였다. 또한 해석시간을 줄이면서 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위한 효율적인 요소 나누기 등을 고려하여야 한다. 또한 강자성체가 아닌 물체는 투자율이 공기와 유사하기 때문에 모두 공기라 가정하였다. 이에 따른 초기 구축된 2D 전자기 해석 모델은 그림 97과 같고 이의 요소 분포는 그림 98과 같다. 자속 밀도가 가장 큰 부분에서 조밀하게 요소를 구성하여야 하기 때문에 공극 부분과 슬롯에서 요소의 수를 늘리도록 설정하였다. 각 부품의 재질과 특성은 표 20과 같다.

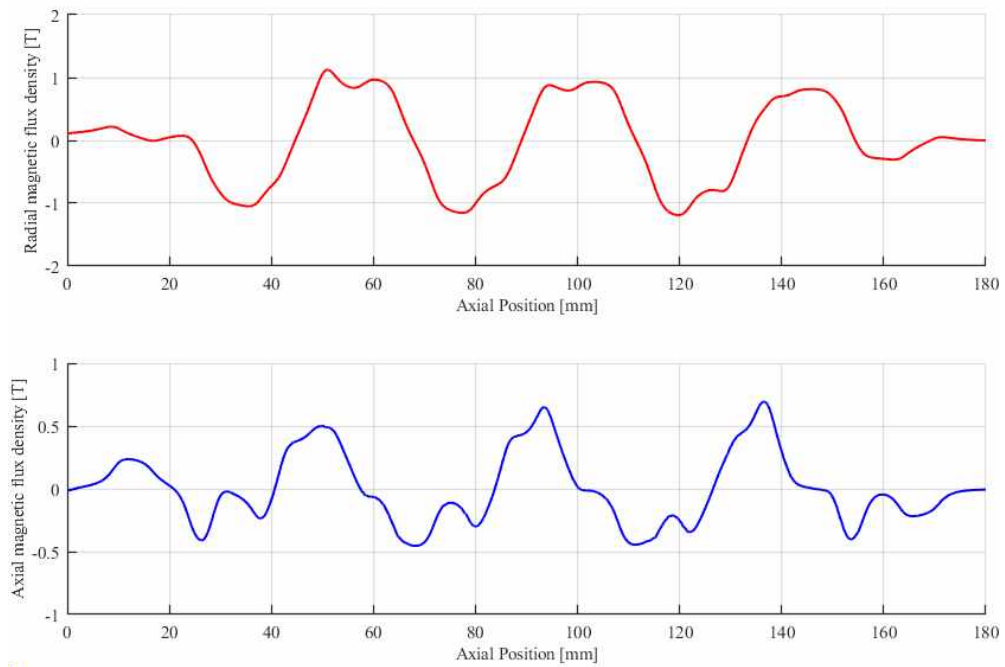
[표 20] 전자기 해석 모델 재질 및 특성

부품	특성 및 명칭
Magnet	NdFe 50
Magnet Yoke	Laminated Posco 50PN250
Core	Laminated Posco 50PN250
Coil	Copper
Coil characteristics	3Phase X 4

본 전자기해석 모델에서 생략한 부분은 고정자의 외경부분의 하우징이자 히트싱크, 고정자와 대차/객차와 연결하기 위한 탄성 조인트, 이동자의 위치를 측정하기 위한 센서 및 기타 상세 설계에 필요한 부품들이 있다. 기존의 존재하는 철도 차량용 댐퍼를 고려하여 상세 설계안을 예측하면 최종적인 액추에이터의 치수 조건은 직경 200 mm, 길이 250 mm와 같다. 액추에이터의 길이를 축소하기 위해 이동자를 지지하기 위한 베어링을 제외하고 마찰 구동을 하도록 하였고 이에 따라 이동자와 고정자의 길이 차이인 48 mm 중 stopper 등의 여유를 두어 40 mm를 이동하도록 하여 ± 20 mm를 구동할 수 있게 하였다.

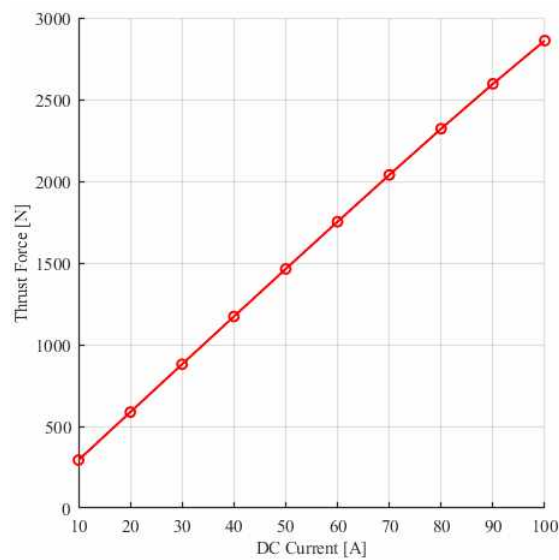


[그림 99] 전자기 해석 모델의 자기장 분포



[그림 100] 공극에서의 자기장 분포

구축된 전자기 해석 모델의 코일에 인가하는 전류에 따라 설계한 액추에이터의 추력을 얻을 수 있다. 기존 DC 전원 공급 장치와 인버터의 성능을 고려하여 100 A의 DC 전원 공급이 가능하다고 가정하였다. 그림 99는 100 A의 직류 전류를 3상에 나누어 공급하였을 때 액추에이터의 자속 밀도 분포이다. 전자기 강판에서의 자기 포화가 이뤄지지 않는 것을 확인하였고 추력에 직접적으로 영향을 미치는 공극에서 높은 자속 밀도를 확인하였다. 공극의 중앙에서의 반경/축 방향 자속 밀도는 그림 100과 같다.

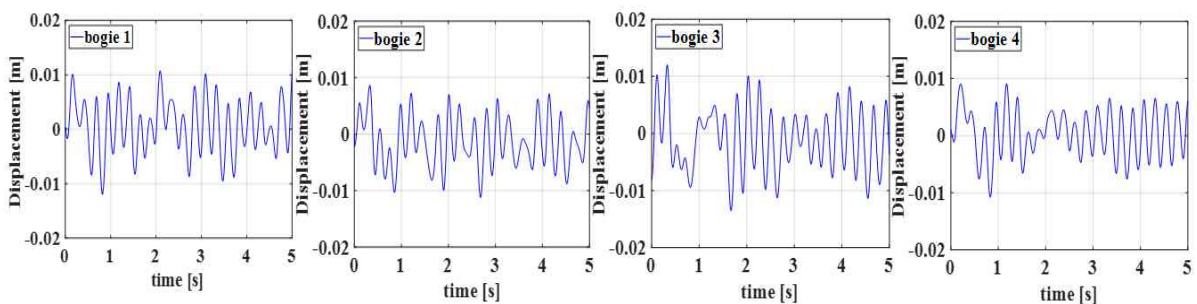


[그림 101] DC 입력에 따른 추력

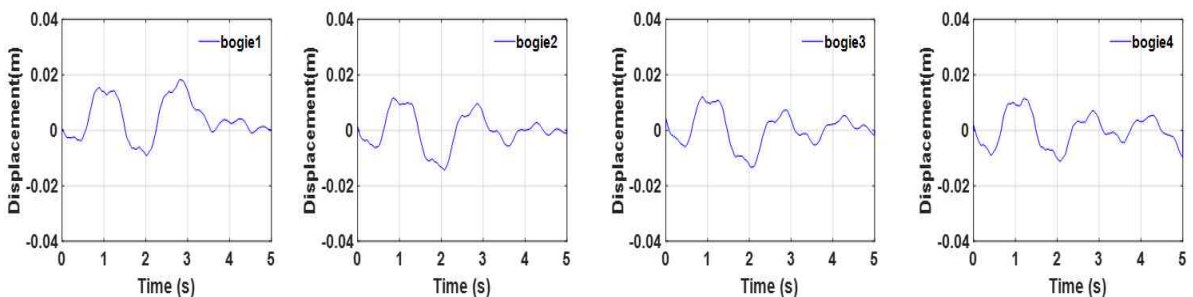
그림 101은 DC 입력에 따른 액추에이터의 추력의 변화로 두 물리량의 관계가 선형적이므로 제어가 용이함을 확인하였다. 추력과 이동자의 질량 등을 고려하여 본 액추에이터의 대역은 cutoff 주파수 기준 50 Hz로 객차의 승차감을 증감하기 위해 충분한 대역이다. 또한 본 액추에이터의 최대 추력은 입력 전류에 의해 결정되는데 이는 액추에이터의 냉각 성능에 따라 변화한다. 자기부상열차는 고속으로 운행하기 때문에 하부의 풍동속도 또한 빠르고, 이는 액추에이터의 공랭에 도움이 된다. 기존의 장치를 참고하여 판단하면 본 액추에이터는 70 A의 DC 전류를 연속적으로 입력하여도 임계온도 문제는 없을 것으로 판단되며 최대 연속 추력 2 kN 급의 액추에이터로 설정하였다.

B. 전자기댐퍼 적용 진동특성 분석

전자기댐퍼의 경우 시스템에 댐핑 특성을 추가하는 역할을 하기 때문에 진동변위의 감소에 탁월한 효과를 보여준다. 그림 102와 103은 118 m/s의 곡선 주행 시 전자기댐퍼를 포함한 시스템의 진동특성을 보여준다. 표 21에 정리된 것처럼 전자기 댐퍼의 사용으로 인하여 진동의 크기는 기존 모델 대비 거의 50% 이하로 저감되었음을 알 수 있었고, 이는 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향에서도 그 효과가 나타남을 알 수 있었다.



[그림 102] 수직 방향의 대차 변위



[그림 103] 수평 방향의 대차 변위

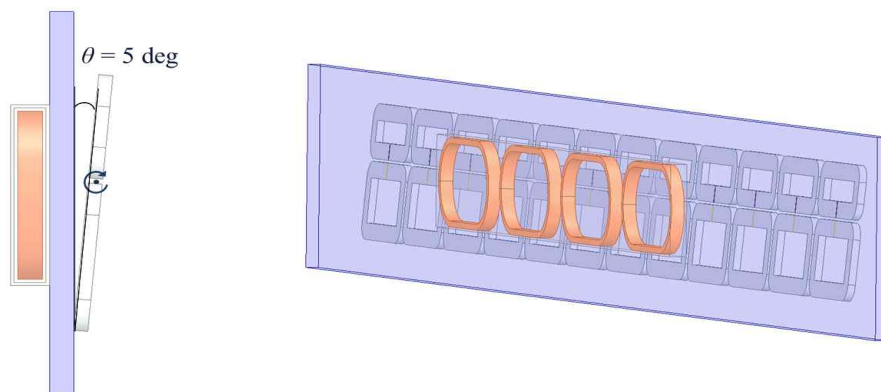
[표 21] 전자기댐퍼 적용에 따른 대차의 진동 감소

		대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
전자기댐퍼	Levitation[mm]	± 12.4 (66% ↓)	± 10.9 (39.4% ↓)	± 12.3 (55.1% ↓)	± 9.9 (70.4% ↓)
	Guidance[mm]	± 13.6 (53.8% ↓)	± 13.0 (50.7% ↓)	± 12.6 (51.7% ↓)	± 11.3 (55.3% ↓)

④ 전자기회로의 췌기 모델 작성

앞서 언급한대로 PLG 코일 내부 전류에 의해 발생하는 자기장은 추진전류와 유도전류로 나누어 생각할 수 있다. 추진전류는 3상으로 인가되어 자기부상열차에 추진력을 발생시키고 유도전류는 상부 코일과 하부 코일에 반대 극성을 발생시켜 차량에 부상/안내력을 발생시킨다.

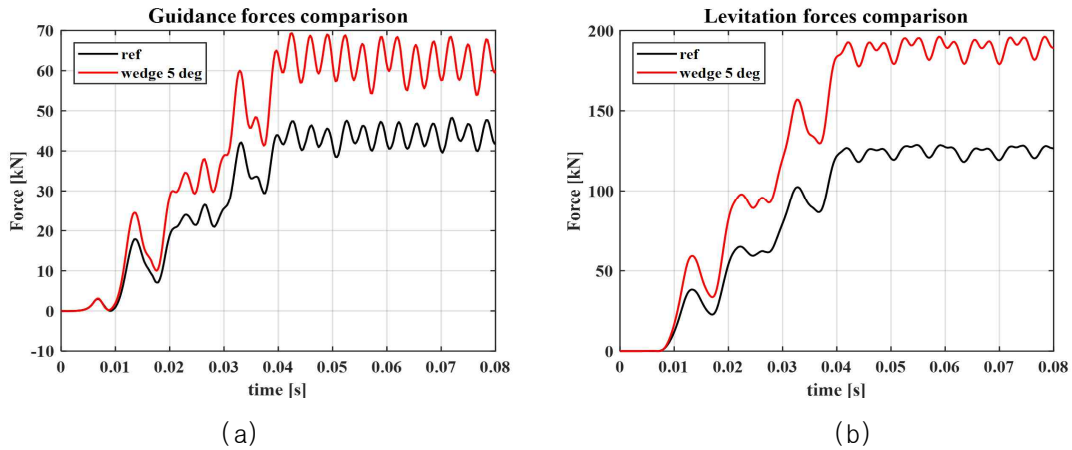
그 중 자기부상열차에 부상력과 안내력을 발생시키는 유도전류는 상부 코일과 하부 코일의 유도기전력의 차이에 의해 결정된다. 이러한 이유로 해석 모델로 선정한 PLG 코일은 상부 코일과 하부 코일의 크기를 달리하여 유도기전력의 차이를 증가시키도록 설계되었다. 유도전류를 증가시키는 것은 궤도에서 대차에 발생하는 자기 스프링 상수가 증가함을 의미한다. 진동에서 스프링 상수가 증가하면 진폭이 줄어드는 원리를 이용해서 유도전류를 증가시켜 차량의 진동을 저감하는 전자기 추진체 개선 방안을 제시하고자 한다.



[그림 104] 췌기 모델 모식도

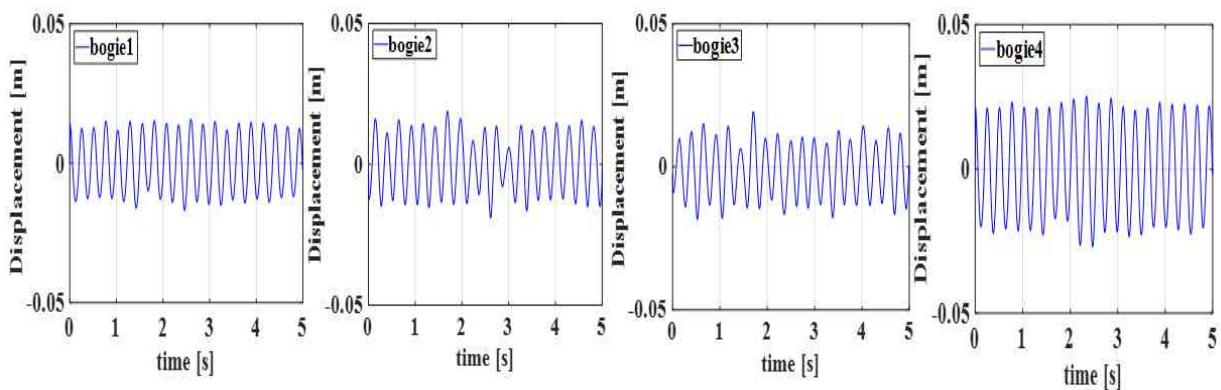
초전도 코일이 지나감에 따라 발생하는 유도전류의 크기는 공극이 작아질수록 선형적으로 증가한다. 본 연구에서는 상부 코일과 하부 코일의 공극의 차이를 늘려 유도기전력의 차이를 증가하고자 하였다. 이에 따라 궤도에 설치된 PLG 코일을 회전시켜 상부 코일에 발생하는 유도기전력은 감소시키고 상부 코일에 발생하는 유도기전력을 증가시켜 PLG 코일 내부에 발생하는 유도전류를 증가시켰다.

그림 105는 PLG 코일에 각도에 따라 발생하는 전자기력을 기존 모델과 비교한 해석 결과이다. 그림 105 (a)와 그림 105 (b)는 각각 차량에서 발생하는 안내력/부상력의 변화를 나타낸다. 해석 결과를 비교하면 상부 코일과 하부 코일의 공극의 차이를 주어 유도전류가 증가하여 차량에 발생하는 안내력/부상력 모두 증가하는 것을 확인하였고 이는 곧 자기 스프링 상수의 증가를 의미한다.

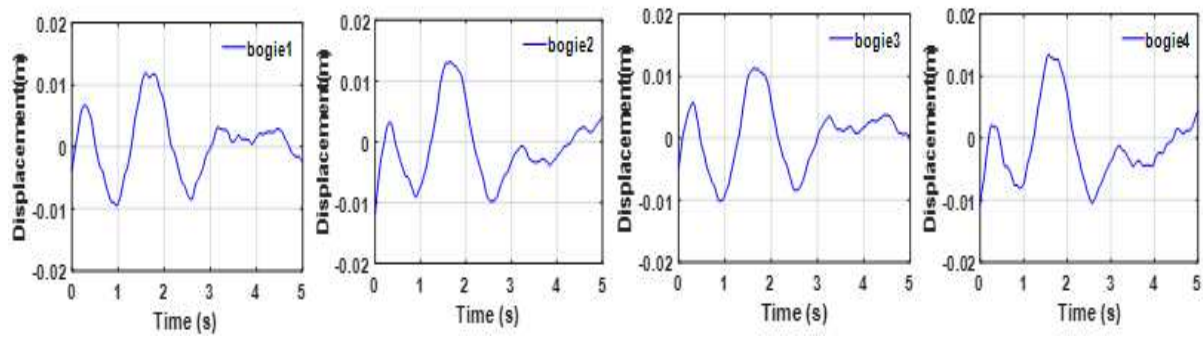


[그림 105] 기존 모델과 썰기모델 (a) 안내력과 (b) 부상력 비교

전자기 모델의 변경에 따른 대차의 진동변위를 조사하기 위해 해석을 수행하였다. 그림 106과 107은 5° 회전한 썰기형태의 전자기 회로 적용에 대한 해석을 통해서 얻는 대차의 levitation 및 수평 방향의 진동 크기를 보여준다. 전체적으로 힘이 50%이상 증가하였기 때문에 이로 인한 자기 스프링의 크기 증가로 인하여 진동 저감 효과를 보여주고 있다. 수직 방향에서는 약 30%의 진동 감소를 보여주고 있으며, 수평 방향에서는 약 60%의 진동 저감 효과를 보여준다.



[그림 106] 수직 방향의 대차 변위



[그림 107] 수평 방향의 대차 변위

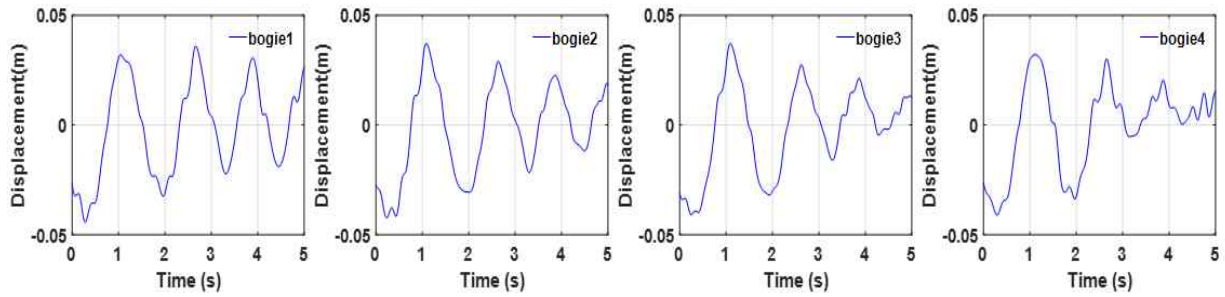
[표 22] 전자기 썰기 모델에 대한 대차의 진동 감소

		대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
썰기 모델	Levitation[mm]	± 16.4 (55% ↓)	± 18.7 (3.9% ↑)	± 18.6 (32.1% ↓)	± 26.1 (22% ↓)
	Guidance[mm]	± 10.7 (63.7% ↓)	± 12.1 (54.1% ↓)	± 10.7 (59% ↓)	± 12.0 (52.5% ↓)

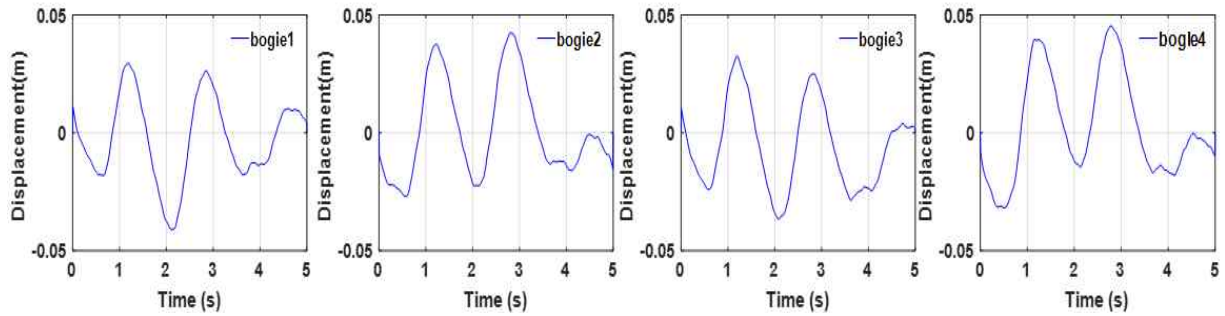
(6) 600 km/h의 80% 속도(=133 m/s)에서 열차내부의 진동 저감

앞선 초전도 코일 스테디를 통해서 얻는 결과를 바탕으로 최적의 진동 저감 및 승차감 개선모델을 다음과 같이 선정하였다. 중간 차체의 air spring 강성을 지금의 반으로 설정하여 힘 전달률을 낮춰 승차감을 높이고, 2,000 N급 전자기 댐퍼를 통한 차체와 대차의 변위 감소 효과를 이용하고, 최종적으로 썰기 모델을 통하여 자기 강성을 높여 대차의 변위를 줄이는 최종안을 제시한다. 그림 108 ~ 111의 경우는 기존 개선전의 설계에 의한 해석 결과를 보여주고 있고, 그림 112 ~ 115의 경우는 개선 모델을 적용한 경우의 진동 저감 특성을 보여주는 해석 결과이다. 또한 이 결과를 표 23과 24에 정량적으로 정리하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 세 가지의 진동 저감 설계를 동시에 적용한 경우에 약 70% 수준의 진동 저감 특성을 보였으며, 승차감 측면에서도 약 8 dB 까지 저감하는 특성을 보여 추후 초고속자기부상열차의 실용화에 더욱 다가갈 수 있을 것으로 사료된다.

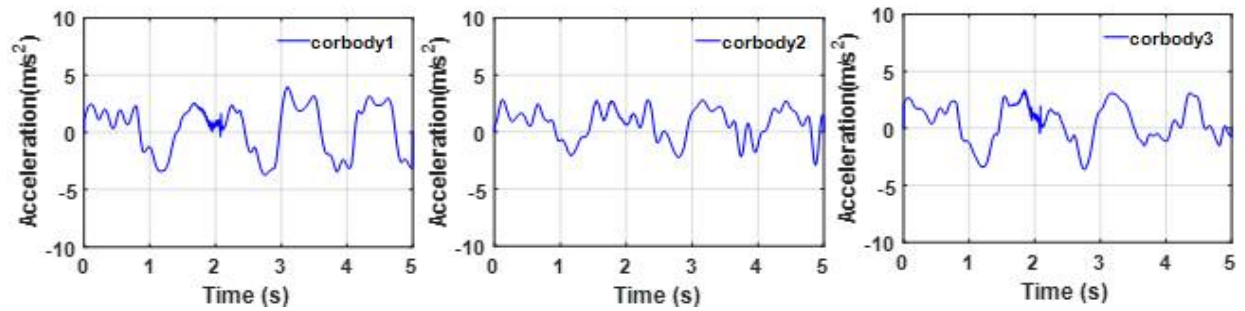
A. 480 km/h 곡선주행 진동 특성 분석



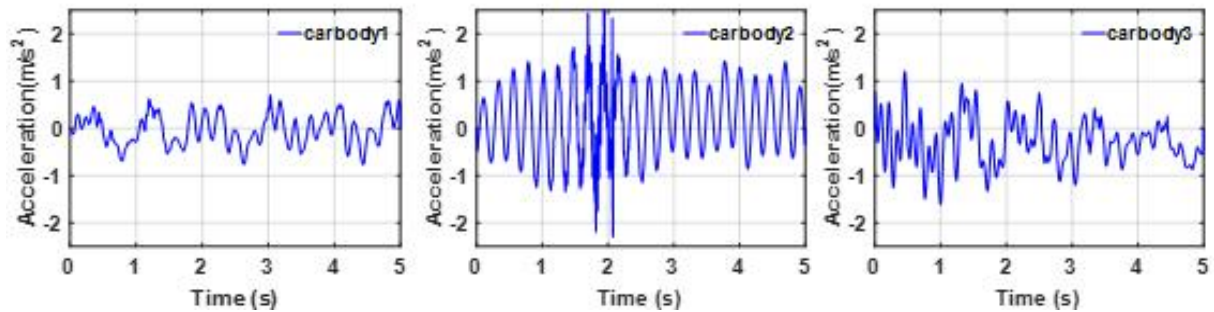
[그림 108] 수직 방향의 대차 변위



[그림 109] 수평 방향의 대차 변위

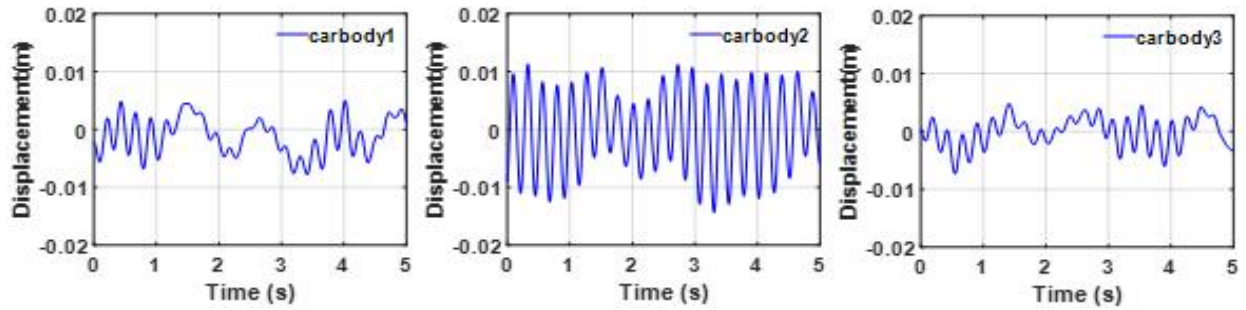


[그림 110] 수직 방향의 차체 가속도

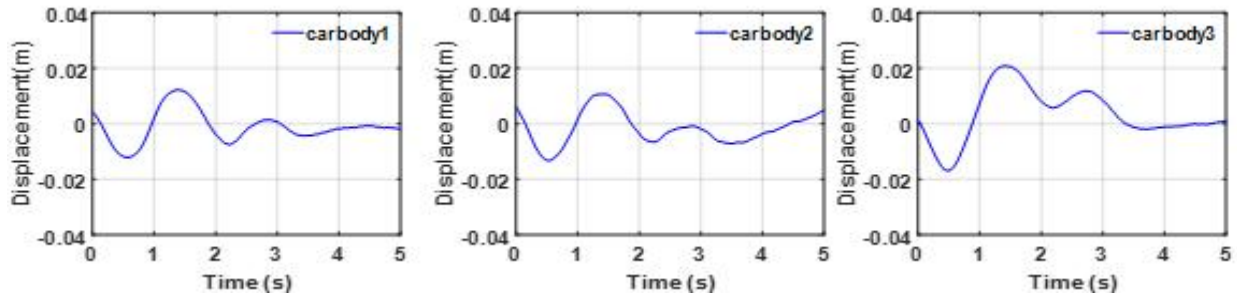


[그림 111] 수평 방향의 차체 가속도

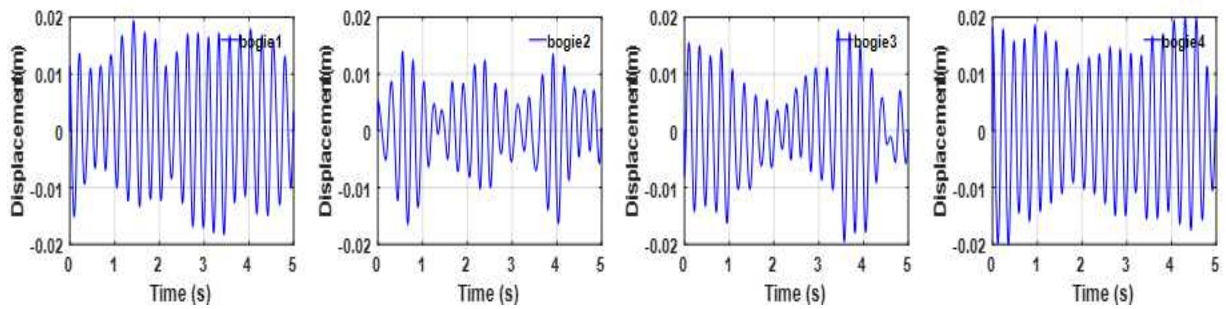
B. 480 km/h 곡선주행 진동 특성 분석 (개선모델)



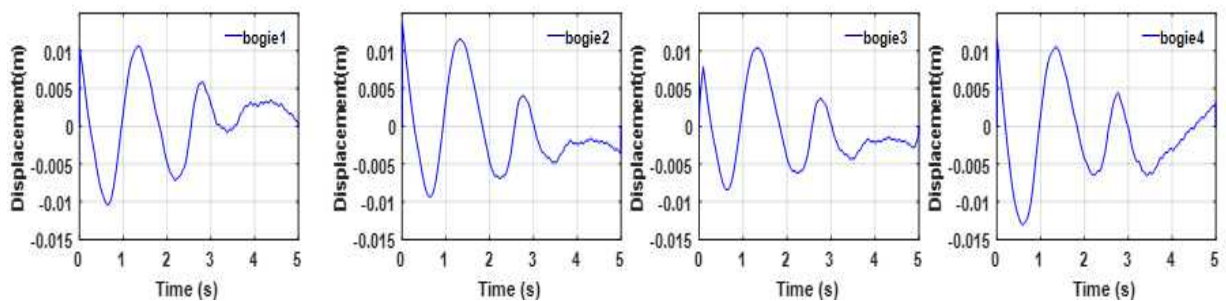
[그림 112] 수직 방향의 차체 변위



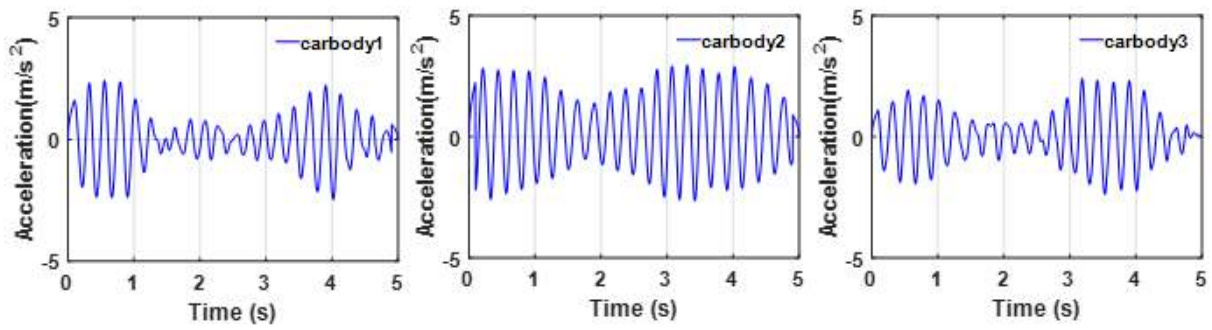
[그림 113] 수평 방향의 차체 변위



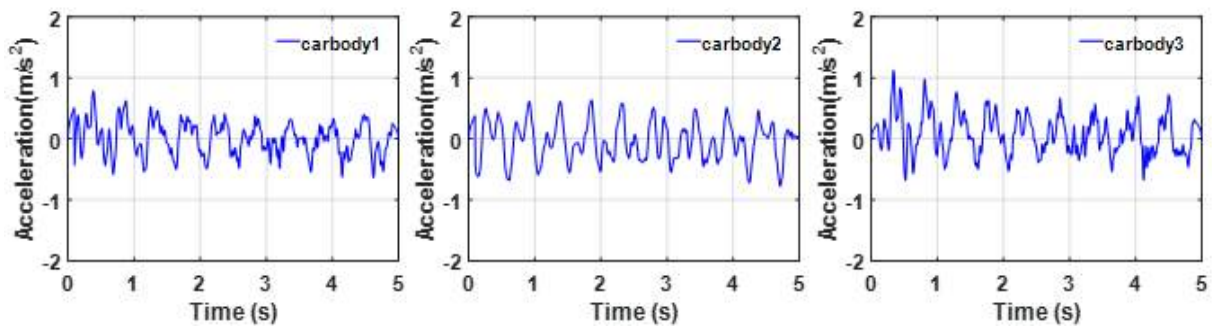
[그림 114] 수직 방향의 대차 변위



[그림 115] 수평 방향의 대차 변위



[그림 116] 수직 방향의 차체 가속도



[그림 117] 수평 방향의 차체 가속도

[표 23] 600 km/h 급 개선 모델의 대차 변위 비교

		대차 #1	대차 #2	대차 #3	대차 #4
곡선 480km/h	Levitation[mm]	± 39.0	± 39.0	± 39.0	± 36.1
	Guidance[mm]	± 35.1	± 34.7	± 34.5	± 38.6
곡선(개선) 480km/h	Levitation[mm]	± 18.7 (52.1% ↓)	± 15.2 (61% ↓)	± 18.5 (52.7% ↓)	± 18.2 (49.6% ↓)
	Guidance[mm]	± 10.5 (70.1% ↓)	± 11.5 (66.7% ↓)	± 9.3 (73% ↓)	± 12.2 (68.3% ↓)

[표 24] 600 km/h 급 개선 모델의 승차감 비교

	수직 방향 진동 [dB]			수평 방향 진동 [dB]		
	차체 #1	차체 #2	차체 #3	차체 #1	차체 #2	차체 #3
곡선 480km/h	126	123	125	110	118	115
곡선(개선) 480km/h	120(-6 dB)	120(-3 dB)	121(-4 dB)	107(-3 dB)	110(-8 dB)	110(-5 dB)

C. 곡선 주행 안전성 평가

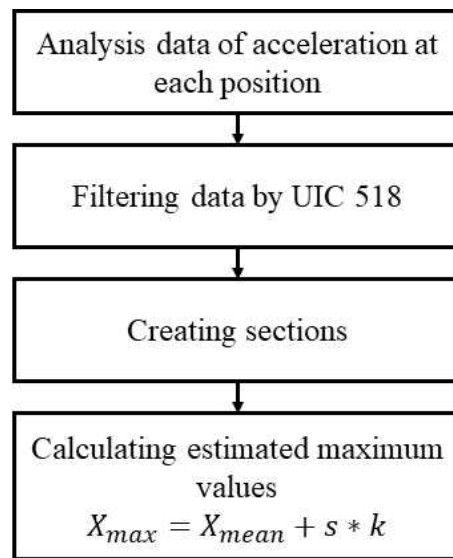
본 연구에서 제시한 안전성 평가법 이외의 기존 철도 차량에서 적용되는 국제철도 연맹에서 제정한 UIC 518[24] 주행 안전성에 대한 평가법에 따라 안전성을 평가하였다. UIC 518은 휠과 레일의 작용하는 힘을 계측하여 평가하는 Normal method와 대차와 차체의 가속도를 이용하여 동적 안정성을 평가하는 Simplified Method에 대한 실험 및 분석 방법론을 제시하고 있다. 본 연구 주제인 자기부상열차에는 휠과 레일이 없기 때문에 대차에서 발생하는 가속도를 기준으로 안전성을 평가하는 것이 타당하여 Simplified Method를 통해 평가를 진행하였다.

UIC 518 Simplified method에서는 차체가속도 및 횡 및 상하방향 가속도의 데이터 수집 방법을 500m, 25개 이상의 section을 적용하도록 되어있다. 본 연구에서 사용한 데이터는 실제 UIC 518에서 제시한 기준에 미치지 못하지만 480 km/h 속도에서 해석이 진행되었기 때문에 해석을 진행한 거리는 충분히 긴 구간이라고 판단하여 해석 결과를 한 section으로 선정하여 계산하였다.

그림 118과 표 25에는 UIC 518에서 제시하는 데이터의 처리 방법과 안전성 평가 평가 결과가 나타나 있다. 해석 조건이 주행 속도 220 km/h와 곡선 주행 반지름 500 m 이상이므로 객차의 진동가속도 한계값은 3.0 m/s^2 으로 적용하였다. 객차 해석 결과를 바탕으로 계산한 통계값은 전체 시험구간에서 취합된 값의 평균값(X_{mean})과 표준편차(s)를 이용하여 예측 최대값(X_{max})을 아래 식과 같이 계산하였다.

$$X_{max} = X_{mean} + s \cdot k$$

계산된 차체의 수직 방향 최대 가속도는 한계값의 91% 수준, 수평 방향의 최대 가속도는 45% 수준으로 수직, 수평 방향 모두 한계값 이하의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 수평 방향 가속도에 비교하여 수직 방향 가속도가 다소 낮은 안전성을 갖는 이유는 기존 철도 차량과 달리 자기부상열차는 일정 높이로 부상하여 진동하는 자기부상열차의 특성으로 추후 연구에서는 수평 방향의 진동보다 수직 방향의 진동 저감에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.



[그림 118] UIC CODE 518 안전성 평가 데이터 처리 프로세스

[표 25] 600 km/h 급 개선 모델 안전성 평가 결과

	한계값 [m/s^2]	수직 방향 예측 최대 가속도 [m/s^2]		
		차체 #1	차체 #2	차체 #3
차체 수직 가속도	3	2.69	2.67	2.72
차체 수평 가속도	3	1.34	0.85	1.33

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과	성과점검기준						양적 성과 건수
				질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치	
주관 & 공동	1	전자기-구조 연성해석 Framework 구축	1-1 전자기-구조 연성해석 Framework 구축	① 전자기/구조 연성해석 시간 단축	기존 대비 50%감소	(3D모델 대비) 8분 → 5초 (96배 감소)	전자기/구조 연성해석 모델	전자기/ 구조 연성해석 모델	10	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
			전자기-구조 연성해석 Framework 구축	② 전자기/구조 연성해석 모델 구축	전자기/구조 연성해석 모델	-	전자기/구조 연성해석 모델	선행 및 관련 연구	10	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
	2	Parameter study 통한 자기부상 열차의 안정성 확보	2-1 추진체 개선을 통한 진동 저감	① 대차의 수직/ 수평 방향 진동 크기	기존 대비 50% 감소 (3dB)	(수직변위) Max. 55.0% 감소 (수평변위) Max. 63.7% 감소	전자기/구조 연성해석 모델	추진체 개선안	20	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
			2-2 전자기 댐퍼를 통한 진동 저감	② 대차의 수직/ 수평 방향 진동 크기	기존 대비 50% 감소 (3dB)	(수직변위) Max. 70.4% (수평변위) Max. 55.3%	전자기/구조 연성해석 모델	전자기 댐퍼 적용	20	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
	3	최대 속도 대비 운행속도를 현재의 60% 수준에서 80%으로 이상 향상	열차 내부의 진동 감소 (곡선)	① 열차 내부의 수직/수평 방향 진동 크기	기존 대비 50% 감소 (3dB)	(수직승차감) Max. 6 dB 감소 (수평승차감) Max. 8 dB 감소	다물체 동역학 해석 모델	기존대비 개선된 진동 크기	40	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
계									100	특허: 출원 3 건 등록 3 건 논문: 5 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건

나. 목표 달성여부

아래 표는 연구 제안서에 기재된 연구의 정량적 및 정성적 목표를 정리한 것이다. 정량적 성과인 특허 출원 및 논문 제출 실적은 아래와 같이 정리하였고, 달성을 완료 하였으며, 추가적으로 2019년 1월에 특허가 2건 출원되었다.

번호	논문 및 특허명	저자 및 IF	저널명 또는 출원번호	환원 점수
1	Investigation of the thermal effect of a tubular permanent magnet actuator with a water cooling channel for active lateral suspension of a high-speed train	Dongwook Kim, Jung-HyunWoo. Kyoung-Su Park	Advance in Mechanical Engineering (SCIE)	1
2	Construction of simulation framework for dynamic analysis of a superconducting magnetic levitation train with flexible car bodies (2019년 3월 volume 33, 3호 게재 예정)	Hue Ha, Kyoung-Su Park	Journal of Mechanical Science and Technology (SCIE)	1
3	자기부상열차의 동특성 해석을 위한 시뮬레이션 방법	박경수, 하휘	10-2018-0131122(출원)	1
4	자기부상열차의 안정성 평가를 위한 곡선궤도 시뮬레이션 방법	박경수, 하휘	10-2019-0012628 (출원, 19 1월)	1
5	공간적 제한 하의 전자기-열 연성 해석을 통한 철도차량 2차 현가장치용 선형 전자기식 액추에이터의 설계	김동욱, 윤준호, 박노철	대한기계학회 논문집 A권	1
6	Investigation of slider dynamics considering bias voltage and lubricant charge in the unsteady proximity condition	Jonghak Choi, No-Cheol Park Young-Pil Park	Tribology Transactions	1
7	반발식 자기부상열차의 시간이력 전자기 해석을 통한 열차 주행 안정성 예측 방법론	박노철, 임선빈, 김동욱, 유준선	10-2018-0157059(출원)	1
8	EDS 방식 자기부상열차 해석 단순화를 위한 유도전류 추출 방법 (2019년 4월 volume 43, 4호 게재 예정)	임선빈, 김동욱, 유준선, 박노철	대한기계학회 논문집 A권	1
총합	SCI(E) 3편, 국내논문 2편, 특허(출원)3건			8점

○ 전자기-구조 연성해석 framework 구축

- 앞선 연구 결과와 같이 2D의 간략한 이론 모델을 구축하고 이에 대한 검증 완료
- 기 구축된 전자기 해석 모델과 유연 차체 모델링 및 MATLAB Simulink와 다물체 동역학 해석툴(ADAMS)를 연동하여 초고속 자기부상열차의 직선, 곡선에 대한 해석 프레임워크를 구축 완료 (**특허 3건 및 논문 1건 보유**)

○ Parameter study 통한 자기부상열차의 안정성 확보

- 추진체 개선을 통한 진동 저감 : 자기부상열차의 진동에 영향을 주는 인자들에 대한 검토를 통한 개선책 제안.
 - ▶ 자기코일의 특성변화를 통한 진동 저감
- 켈기모델 이용, 수직 방향 Max. 55% 감소, 수평 방향 63.7% 감소
 - ▶ 열차 차체의 모드특성 변화를 통한 진동 저감
- Air spring 강성변화, 수직 방향 Max. 71.9%, 수평 방향 61.3% 감소
 - ▶ 전체 시스템의 진동특성을 고려한 강성 및 댐핑 변화를 통한 진동 저감
- 전자기 댐퍼 설계적용, 수직 방향 Max. 70.4%, 수평 방향 55.3%
- 전자기 댐퍼를 통한 진동 저감 (**논문 2건 보유**)

○ 최대속도 대비 운행속도를 현재의 60% 수준에서 80%로 향상

- 열차 내부의 수직/수평 방향 진동 크기 저감 : 위의 parameter study를 통해 얻은 최적 설계 모델을 이용하여 곡선 8,000 m 에 대한 곡선주행 해석 결과는 아래와 같음. EDS 방식 자기부상열차 최고속도 600 km/h의 현 60% 수준을 80% 수준인 480 km/h에서도 같은 변위 수준 및 같은 승차감 수준 확보

	수직 방향 진동 [dB]			수평 방향 진동 [dB]		
	차체 #1	차체 #2	차체 #3	차체 #1	차체 #2	차체 #3
곡선 480km/h	126	123	125	110	118	115
곡선(개선) 480km/h	120(-6dB)	120(-3dB)	121(-4dB)	107(-3dB)	110(-8dB)	110(-5dB)

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

본 연구는 EDS 방식의 자기부상특성을 갖는 시스템의 설계 및 분석 시 꼭 필요한 프레임워크로 직접 관련 분야인 초고속 자기부상열차의 설계 또는 Hyperloop의 상용화 등에 적용 가능하며, 최근 많이 사용되고 있는 반도체 설비 사업과 관련하여 활용 계획을 검토 중

(가) 추가 연구의 필요성

- 최근 Hyperloop 연구가 선진국을 중심으로 확대 발전되고 있고, 미국 및 두바이 등지에서 실제적인 개발 및 건설이 이루어지고 있는 시점에서 기존 해석 틀 보다 월등한 성능의 해석 프레임워크를 개발하였으므로 이를 확대 발전시킬 필요가 있음.
- 이를 통해 빠른 기술 선점(특허 등)을 할 수 있고, 다양한 국내외 연구 공조를 이룰 수 있음.
- 다만, 1년 반의 짧은 시간에 많은 기술 획득을 하였지만, 아직 추가적인 연구 분야가 남아있어 이 부분에 대한 추가 연구가 필요하고, 이를 완료한다면 본 연구는 자기부상열차 연구의 선도적 수준이 될 것이며, 국가적 자원이 될 것임.
- 추가 연구 분야로는
 - ① 공기 저항력을 고려한 EDS 방식의 자기부상열차 해석 프레임워크 구축 및 인자분석 (Fluid-Structure Interaction + Electro-Magnetic Effect)
 - ② Hyperloop의 경제성 확보를 위해 2 또는 3개 차량에 대한 EDS 방식의 진동해석
 - ③ 추가적 경제성 확보를 위한 알루미늄 차체 또는 복합소재 차체로 인한 진동 증가 저감을 위한 Active Control기술 대책 검토
 - ④ 직선, 곡선, 분기 등 다양한 혼합 궤도에 따른 진동 및 안정성 평가
 - ⑤ 1300 km/h에서 급제동시의 안정성 평가 및 최적의 급제동 방법론 제시 (역기전력)

(나) 타 연구에의 응용

- 전자기-구조 연성해석 프레임워크는 자기부상열차뿐만 아니라 하이퍼루프와 자기부상물류 이송 장치 등 모든 자기부상 시스템에 적용 가능함.
- 본 연구결과를 통해 전자기-구조 연성해석을 기반으로 고속자기부상열차의 동적 거동을 해석할 수 있고, 이는 안정성 및 차량 승차감 등 다양한 연구 분야로 확장 가능함.
- 국내외 연구기관에서 진행 중인 튜브트레인 연구에 직접적으로 응용 가능한 연구임. 본 연구에서는 3개 객차 이상(유연차체모델, 전자기해석모델, 동역학해석)의 전체

연성 해석 수행한 유일한 연구이며 전자기 3D Full Model을 통해 2D해석 모델의 Induced current 유도 모델을 최초로 적용함. 이에 따라 획기적으로 시간을 단축하는 framework를 구축함. 고속 곡선 주행 시 진동 저감 방법을 제공하고 불규칙도, 패널효과, 기움각 효과 등 다양한 설계요소를 검증할 수 있어 철도 차량 건설 시 안정성 가이드라인 및 설계 기준 값 제시 제공이 가능함.

- 본 연구는 기존 해석 모델들 보다 더욱 더 정확한 해석이 가능하며 설계나 건설시 오차를 최소화하여 경제적 이익 실현이 가능함. 실제 high-speed maglev나 하이퍼루프 건설 시 불규칙도, 패널 효과, 기움각의 효과 검증이 가능하며 최적 비용의 건설이 가능함. 또한 국제적 기술 선도, 국내외 그룹과 기술 교류를 통한 경제적 이익 실현이 가능함.
- 초고속 자기부상열차의 상용화에 따라 국내는 기존 KTX의 반나절 생활권에서 1시간 내 생활권으로 변화 가능하고, 국가의 균형 발전과 집값하락 등 유도 가능함. 또한 물리적 초연결 실현으로 물류 기술의 획기적 패러다임 변화가 가능함. 그리고 국내 외로 친환경 수송 기술의 상용화로 인한 환경 개선 또한 가능함.
- 현재 국내에는 UNIST에서 개발 중인 하이퍼루프와 철기연에서 개발 중인 튜브트레인이 있음. 위 열차들은 EDS 방식의 반발식 자기부상을 이용하기에 연계 가능함. 하이퍼루프와 튜브트레인 연구하는 관련 기관과 빠른 전자기 해석 기술 공유, 다양한 설계 파라미터의 영향도 제시, 유연 차체의 진동 연계성 메커니즘 공유, 상용화 기술 확보를 위한 진동 저감 solution 공유가 가능함.
- 본 연구 성과인 전자기-구조 연동해석 framework와 유동 해석을 추가하여 정규 세미나 및 포럼 개최 추진 등 다방면 협업이 가능함. 이는 2018년 9월에 한국철도기술원에서 세미나 개최 시 관련 연구원들과 협의를 통해 연구 응용에 대한 가능성을 타진함.



[그림 113] 전문가 초청(유원희 박사) 세미나 (2017년 9월 20일)



[그림 114] 전문가 초청(유원희 박사) 세미나 (2018년 8월 16일)



[그림 115] 튜브트레인 팀과 협력 세미나 (2018년 9월 14일)

붙임. 참고문헌

- [1] Uno M., 2016, "Chuo Shinkansen Project using Superconducting Maglev System", *Japan Railway & Transport Review*, Vol. 68, pp. 14~25.
- [2] <https://www.japantimes.co.jp/news/2015/11/08/business/transportation-department-funds-27-million-maglev-study-maryland/#.Wg7Hd5hrwaU>
- [3] <http://electrical-engineering-portal.com/innovative-approach-to-maglev-trains-solar-energy>
- [4] Takahashi, N., Suzuki, M., & Aiba, M. (2011, October). "Development of ground coil type of PLG for maglev", In Proc. of the 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives
- [5] Katsutoshi Mizuno, Motohiko Sugino, Minoru Tanaka, Masafumi Ogata. "Experimental Production of a Real-Scale REBCO Magnet Aimed at Its Application to Maglev", IEEE Transaction on Applied Superconductivity. 2017, 28(4)
- [6] Masayuki AIBA, Toshiaki Murai, Masao SUZUKI, Noriyuki TAKAHASHI, Keizo YOSHIKAWA. "Development of the Ground Coil for Practical Use by the Combined Propulsion, Levitation and Guidance System", Proc MAGLEV'2004. 2004, 849-855
- [7] M. Tanaka, et al. "Development of Electromagnetic Vibration Test Apparatus for Ground Coils Applied to Maglev System", Quarterly Report of RTRI. 2007, 48(2): 110-114
- [8] K. Morishita, M. Hirakawa, T. Nakashima, "Train traffic control system on the Yamana shi Maglev test line" Computers in Railways VII, 2000, WIT press: 641-649
- [9] E. Suzuki, J. Shirasaki, K. Watanabe, H. Hoshino, M. Nagai, "Comparison of Methods to Reduce Vibrations in Superconducting Maglev Vehicles by Primary Suspension Control", J. Mechanical systems for transportation and logistics (2008)
- [10] H. Hoshino, E. Suzuki, T. Yonezu, K. Watanabe, "Examination of Vehicle Motion Characteristics of a Maglev Train Set Using a Reduced-scale Model Experiment Apparature", QR of RTRI, Vol. 53, No. 1 (2012)
- [11] Watanabe, Ken, et al. "A study of vibration control systems for superconducting maglev vehicles." *Journal of System Design and Dynamics* 1.3 (2007): 593-604.
- [12] K. Yamamoto, Y. Kozuma, N. Tagawa, "Improving Maglev Vehicle Characteristics for the Yamanashi Test Line", QR of RTRI, Vol. 45, No. 1 (2004)
- [13] N. Shirakuni, Y. Endo, K. Takhashi, K. Yamamoto, "Overview of new vehicles for the Yamanashi Maglev Test Line", <http://www.maglev.ir/eng/>
- [14] 이재익, "자기부상열차 현수장치용 공기스프링의 설계와 성능시험." 한국철도학회 학술 발표 대회 논문집(2004): 6-11.
- [15] T. Tomika, Y. Suzuki, T. Takigami, "Three-dimensional Flexural Vibration of Lightweight Railway Vehicle Carbody and a New Analytical Method for Flexural Vibration", QR of RTRI, Vol. 44, No. 1 (2003)
- [16] H. Ohsaki & S. Bando, "Numerical analysis of elastic vibration of superconducting maglev vehicles", MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (2006)
- [17] Yau, J. D. "Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions." *Journal of Sound and Vibration* 329.10 (2010): 1743-1759.
- [18] H. Hoshino, E. Suzuki and K. Watanabe, "Reduction of vibration in Maglev Vehicles using Active Primary and Secondary Suspension Control", QR of RTRI, Vol. 49, No. 2 (2008)
- [19] Ham, Chan, et al. "Study of a Hybrid magnet array for an electrodynamic maglev control." *Journal of Magnetism* 18.3 (2013): 370-374.
- [20] Zhao, C. F., and W. M. Zhai. "Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality." *Vehicle system dynamics* 38.3 (2002): 185-210.
- [21] 공은호, 강부병, and 나성수. "자기부상열차-가이드웨이 통합 시스템의 동적 특성." 한국소음진동공학회논문집 21.2 (2011): 137-145.
- [22] Guangwei, Shu, Reinhold Meisinger, and Shen Gang. "Modeling and simulation of Shanghai maglev train transrapid with random track irregularities." (2007).
- [23] 최일윤, 엄주환, 이준석, 최민지, "곡선부 주행시 차량 승차감 분석" 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집(2014): KSR2014S177
- [24] UIC CODE 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Running behaviour, International Union of Railways

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통과학기술진흥원 R&D사업본부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원 R&D사업본부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.