

Global Report

센서 위치를 고려한 자기부상 시스템의 동적 성능 최적화 연구

1. 개요
2. 모듈 부상 시스템의 모델링 및 분석
3. 센서 위치를 고려한 동적성능 최적화 방안
4. 시뮬레이션 및 검토
5. 결론

1. 개요

자기부상 열차는 전자기력을 이용하여 부상과 안내력을 발생시켜 열차의 비접촉 구동을 구현한다. 따라서 자기부상 열차는 저 소음, 강한 상승 능력, 적은 기계적 마모와 낮은 유지비의 장점을 가지게 된다. 이러한 비접촉 구동을 위해 자기부상 열차의 부상 시스템은 차량과 가이드 웨이 사이의 부상 간격을 8~10mm로 유지할 수 있도록 제어한다. 하지만 가이드 웨이 제작 기술, 설치오차, 탄성으로 인한 변형, 열 팽창, 교각의 침하 등의 문제로 인해 가이드 웨이의 불규칙성은 불가피한 요소이다. 이러한 요소로 인해 자기부상 시스템의 부상 간격은 설정된 8~10mm를 벗어나게 되는 문제가 발생한다. 일반적으로 부상 간격의 안전 편차범위는 +4mm~-4mm정도 이지만 극단적인 가이드 웨이 조건일 경우 차량이 가이드 웨이와 충돌하여 큰 소음이 발생하고 부상에 실패하는 문제가 발생할 수 있어 승차감에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 또한 자기부상 열차의 운행 속도가 증가함에 따라서 이러한 부상 격차의 편차 범위는 더욱이 증대되어 가이드 웨이의 불규칙성은 큰 영향을 끼칠 수 있다.

이러한 부상 간격의 편차 범위를 줄이는 방법에는 두 가지의 방법이 존재한다.

1. 가이드 웨이의 불규칙성을 개선하는 방법
2. 부상 제어 시스템을 최적화 하는 방법

첫 번째 방법의 경우 가이드 웨이 개선을 위한 선로 공사비가 자기부상 열차 공사 전체 비용의 6~80%를 차지하므로 가이드 웨이 공사는 비경제적인 방법이다. 따라서 두 번째 방법을 이용하여 불규칙한 가이드 웨이의 조건에서 부상 갭의 동적 응답을 분석하고 동적 성능의 최적화 전략을 수립해야 한다. 불규칙한 가이드 웨이의 조건에서 부상 시스템의 동적 응답 성능문제는 차량과 가이드 웨이의 동적 진동 문제에 속한다. 따라서 이러한 문제를 가이드 웨이의 불규칙성 모델, 차량 모델, 부상 제어 방식의 세 가지 주요 측면을 고려하여 분석해 볼 수 있다.

자기부상 가이드 웨이는 F - 레일, 침목, 대들보로 구성된 다층 구조로서 가이드 웨이의 불규칙성을 유발시킨다. 선행 연구에 따르면 가이드 웨이의 불규칙성은 침목의 간격, F - 레일의 단면 및 거더 공간장에 해당하는 주기적인 불규칙성의 요인이 있음을 확인하였다. 주기성에 있어 장파주기는 거더의 처짐과 관련이 있고, F - 레일은 단파주기를 발생시켜 불규칙성 요인이 될 확률이 높다고 판단하였다. 또한 불규칙한 주기를 가지는 경우 불규칙성 데이터를 PSD(Power Spectrum Density)함수의 역 푸리에 변환 방법 또는 가이드 웨이 검사 장비에 의해 측정을 통해 계산이 가능하다.

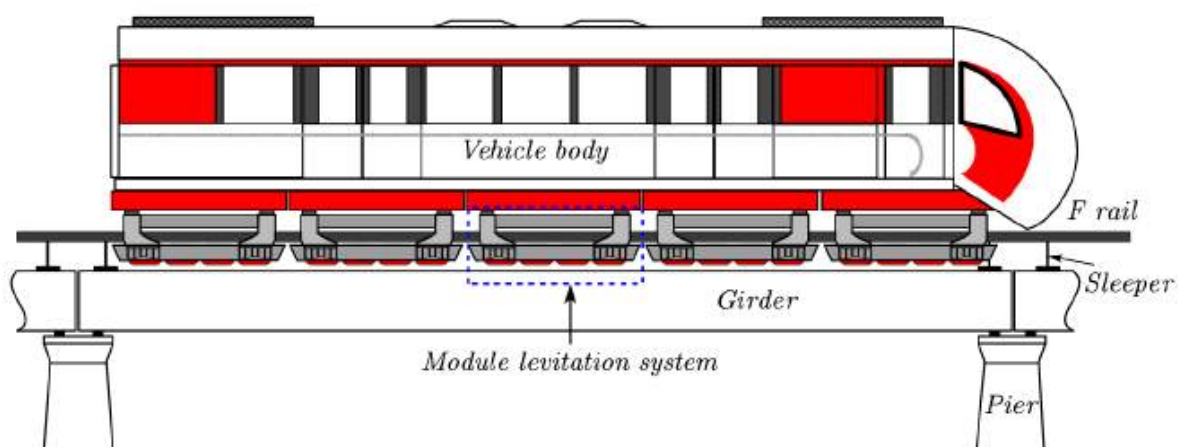
자기부상 열차의 차량 모델의 경우 초기 2자유도의 강체 모델로 연구되었지만 10, 34, 93, 110, 210 자유도 모델과 같은 복잡한 차량 모델로 모델링하는 선행 연구가 진행되었고, 이러한 모델은 교량의 탄성을 고려한 차량과 교량의 결합 동적 문제 해석에 유리하지만 가이드 웨이의 불균형성에 대한 해석에는 필요하지 않는다. 더욱이 본 연구에서는 부상간격의 동적 응답특성의 차이를 고려하지 않는다. 하지만 실제로 부상 시스템의 모듈 양단의 부상 갭의 진폭 차이는 일정 부상제어 간격보다 크기 때문에 이 차이는 고려하여 수행되었다.

마지막으로 부상 제어 방식에 있어 부상 간격의 편차 진폭을 약화시키기 위해 선형 2입력, 2출력(TITO) 모듈 부상 시스템의 진폭 응답을 분석하고 적응 제어 방식을 사용하여 후방 부상 간격의 진폭을 제어 방식, 자속 피드백 제어를 이용하여 모듈 부상 시스템을 분리하는 방식, 또한 안내로 불규칙성으로 발생하는 부상 간격의 편차 범위를 억제하기 위한 PNP 제어 전략, 피드백 선형화 방법, 센서 위치를 이동하는 방안과 같이 다양한 방법을 통하여 편차 진폭 약화를 위한 방안을 선행연구로써 활발히 진행되었다.

본 연구는 앞서 설명한 선행연구를 바탕으로 부상 갭의 동적 응답 차이를 반영 할 수 있는 수학적 모델을 설정한다. 또한 이산 주파수 가진(excitation) 방법을 이용하여 가이드 웨이의 불규칙성 조건에서 부상 간격의 진폭 스펙트럼을 얻는데 사용한다. 이를 바탕으로 부상 간격의 진폭 정도를 줄이기 위해 최적의 센서 위치를 도출한다.

2. 모듈 부상 시스템의 모델링 및 분석

저속 자기부상 열차는 그림 1과 같이 5대의 독립된 대차가 에어 스프링을 통해 차체와 연결되어있는 구조를 지니고 있다. 또한 높은 가이드 웨이 구조는 F - 레일, 침목, 거더 및 교각으로 구성된다. 또한 자기부상 열차의 자기부상 시스템은 총 10개의 모듈 부상시스템으로 나눌 수 있다. 모듈 부상 시스템은 그림 2와 같이 차체와 2개의 에어 스프링, 부상 모듈, 가이드 웨이로 구성되어 있다.

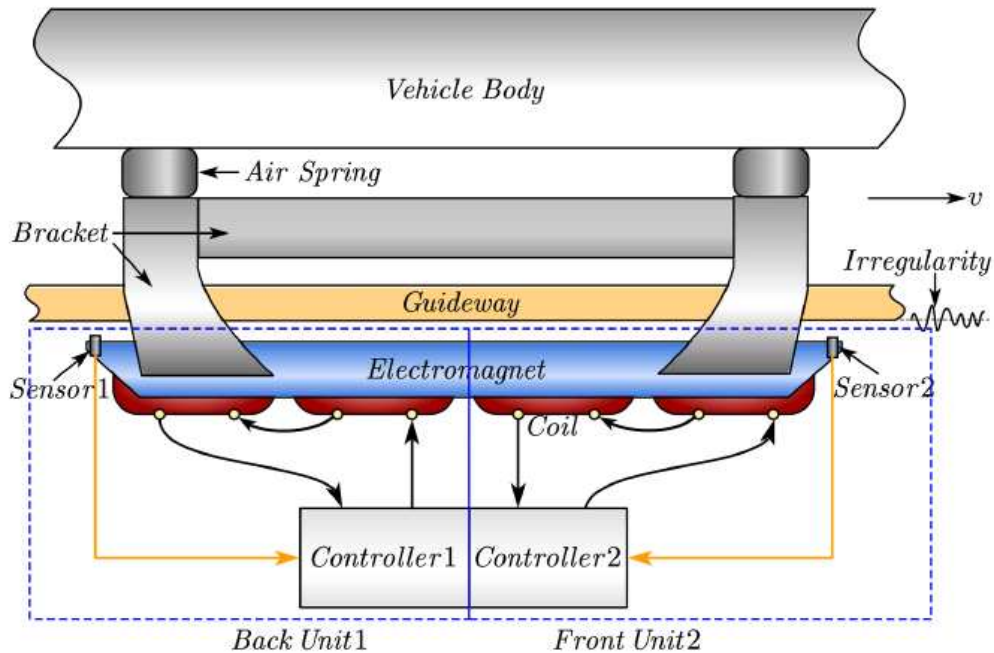


< 그림1. 고가 가이드 웨이에서 움직이는 저속 자기부상 열차의 측면도 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

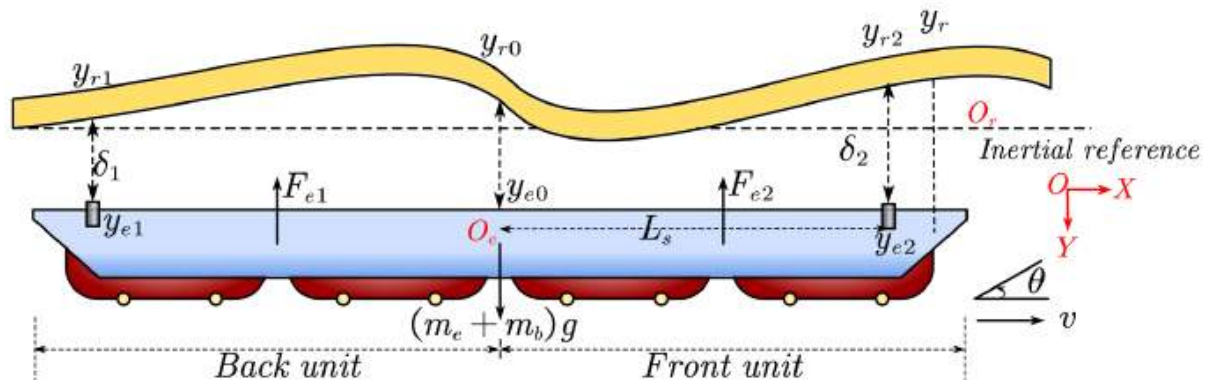
부상 모듈 구조는 기계식 브라킷, 부상 제어기, 부상 센서 및 전자석으로 구성 되어있다. 전자석은 4개의 코일이 직렬로 연결되고 2개의 독립 제어 장치로 나눌 수 있다. 두 개의 부상 간격 센서가 전자석의 양쪽 단자에 배치되어있다. 각 부상 제어기는 센서로부터 데이터를 수신하고 코일의 전류를 제어함으로써 전자기력을 제어하여 안정적인 공극 제어를 만족하도록 구동된다. 따라서 기본적으로 모듈 부상 시스템은 두 개의 제어 장치로 분할되고 두 개의 SISO(1입력 1출력, Single Input Single output) 부상 시스템으로 나눌 수 있다. 그러나 이 두 제어 장치는 서로 연결되어 있어 두 장치의 동적 특성은 분명한 차이를 보인다. 따라서 본 연구는 두 부상 갭 간의 동적 성능 차이를 평가하기 위해 모듈 부상 시스템의 TITO 시스템을 구축한다.

전자석의 동적 진동에 비해 에어 스프링을 통해 전달된 차체 부하의 진동 주파수는 매우 낮다. 따라서 분산된 차체 중력은 일정한 힘으로 간주할 수 있다. 이를 단순화 하여 그림 3과 같이 모듈 부상 시스템의 모델로 나타낼 수 있다. 또한 그림 3에는 전자석의 관성 좌표계를 표시하였고, 전자석의 기하학적 중심은 O_e 로 중앙에 위치한다. 가이드 웨이의 관성 좌표계는 관성 기준선과 일치하며 전자석의 오른쪽 끝에 원점 O_r 이 위치한다. 이 전자석에는 Y축의 수직 병진 운동, X-Y평면에 수직인 Z축의 회전 운동이 가능하여 총 2가지의 자유도를 가지고 있다.



< 그림2. 모듈 부상 시스템의 구조 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)



< 그림3. 단순화된 모듈 부상 시스템의 다이어그램 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

그림3과 같이 다이어그램을 완성한 후에 다음과 같이 조건을 가정한다.

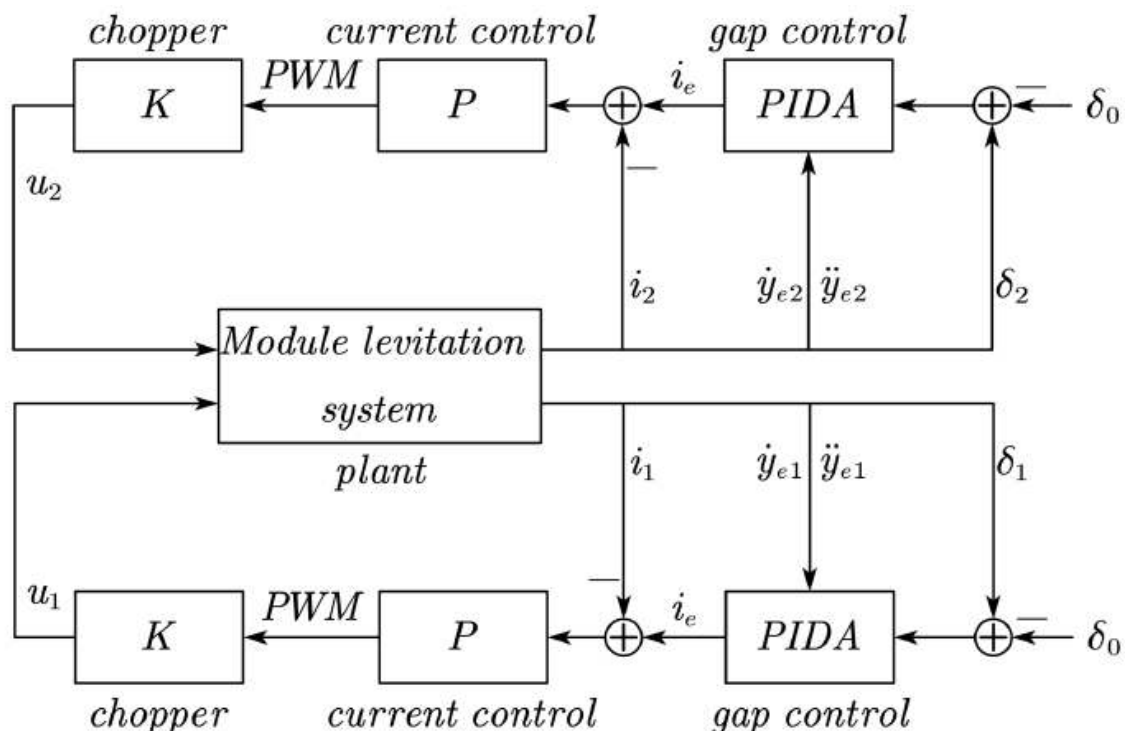
1. 자기누설은 무시한다.
2. 철심 및 F - 레일의 자기 저항은 고려하지 않는다.
3. F - 레일과 전자석은 탄성을 고려하지 않고 강체로 간주한다.
4. 전자석의 질량 분포는 균일하고 질량 중심은 기하학적 중심에 위치한다.
5. 전자기력은 극의 면을 따라 균일하게 분포한다.

다음과 같은 가정을 전제로 가이드 웨이 모델을 모델링한다. 첫 번째로 가이드 웨이 모델이 모듈 부상

제어 시스템에 영향을 미치는 두 가지 접근 방식이 있다. 하나는 부상 센서에 의해 감지된 상대 공극이고, 다른 하나는 전자기력 계산과 관련된 평균 공극이다. 이 두 가지 접근 방식을 고려하여 가이드 웨이 모델의 최종 수식 모델을 도출할 수 있다.

강제 운동 방정식은 에어스프링 아래 위치한 모듈 부상 시스템의 질량, 차체의 질량, 교란력(disturbance force)으로 모델링할 수 있고, 회전에 대한 운동 방정식은 전자석의 관성모멘트를 포함하여 모델링을 도출할 수 있다.

자기부상 컨트롤러는 상태 피드백 제어 및 PID제어와 같은 고전적인 제어 알고리즘을 통해 자기부상 제어 시스템을 사용하는 것이 일반적이다. 이 자기부상 제어 시스템의 경우 부상 갭의 신호, 관성 속도 신호, 관성 가속도 신호를 이용하여 PIDA제어 알고리즘을 구성한다. 내부 루프로 전류 제어, 외부 루프로 부상 간격 제어를 사용한 케스케이드 제어는 자기부상 제어 시스템에서 널리 사용되고 있는 부상 알고리즘이고 이는 그림 4와 같이 제어 블록도를 통해 확인할 수 있다. 그림 4에서와 같이 최종 부상 제어 알고리즘의 출력은 전압으로 자기부상 컨트롤러의 모델링은 전압제어 방식을 통해 모델링한다.



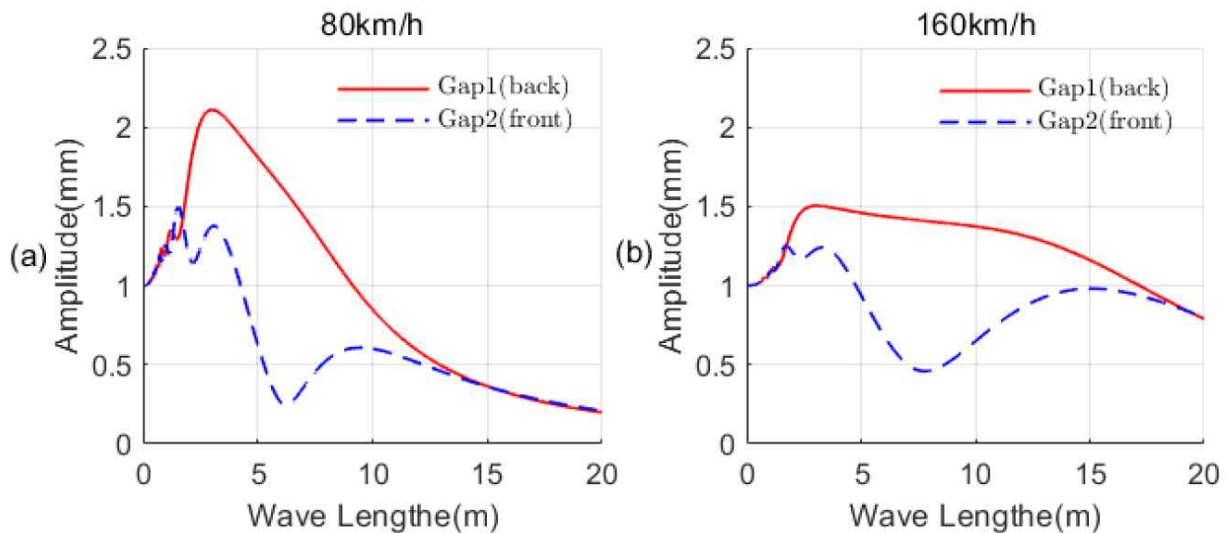
< 그림4. 자기부상 제어기의 제어 블록도 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

제어기 모델링에 전류 응답속도를 높이고 인덕턴스로 인한 지연을 줄이기 위해 PI제어기를 내부 루프인 전류 제어기에 사용하는데 이 전류 제어기의 응답속도는 외부 부상 간격 제어보다 약 10배 빠르게 설계된다. 따라서 전류 제어기의 시간상수(time constant)는 약 10ms이고 부상 간격 제어의 시간상수는 약 100ms로 설정하여 자기부상 컨트롤러를 모델링한다.

모듈 부상 시스템의 선형모델링의 경우 부상 시스템은 비선형이지만 앞서 그림4에서 설명한 케스케이드 제어 하에서는 평형 지점 근처에서 부상제어는 비교적 안정적이다. 따라서 모듈 부상 제어 시스템은 분석을 단순화하기 위해 평형 지점에서 선형화 모델링을 진행한다.

앞서 소개한 고려부분을 통해 설계한 모델링은 최종적으로 모듈 부상 시스템의 완전한 선형 모델이라고 할 수 있다. 또한 가이드 웨이의 불규칙성으로 인해 발생하는 주기적인 파장은 일정한 길이를 가지는 파장과 일정속도에서의 특정 주파수의 정현파 신호로 추론하여 모델링에 입력하여 결과를 확인 할 수 있다. 본 연구는 앞서 설계한 모델링에 실제 자기부상 철도차량의 파라미터를 적용시킨 후 앞서 설명한 주기적인 파장을 입력하여 부상 제어시스템의 두 센서의 부상 갭 진폭 응답을 확인하였다. 실제로 자기 부상 열차 속도가 증가하면 일반적으로 부상 간격의 편차 범위가 증가한다. 중속 자기부상 열차의 최대 속도는 200km/h이므로 일반적인 속도 값으로 80~160km/h로 속도 값을 설정 한 후 이에 맞는 주기적인 파장을 입력하였을 때의 진폭응답을 그림 5에 표기하였다.



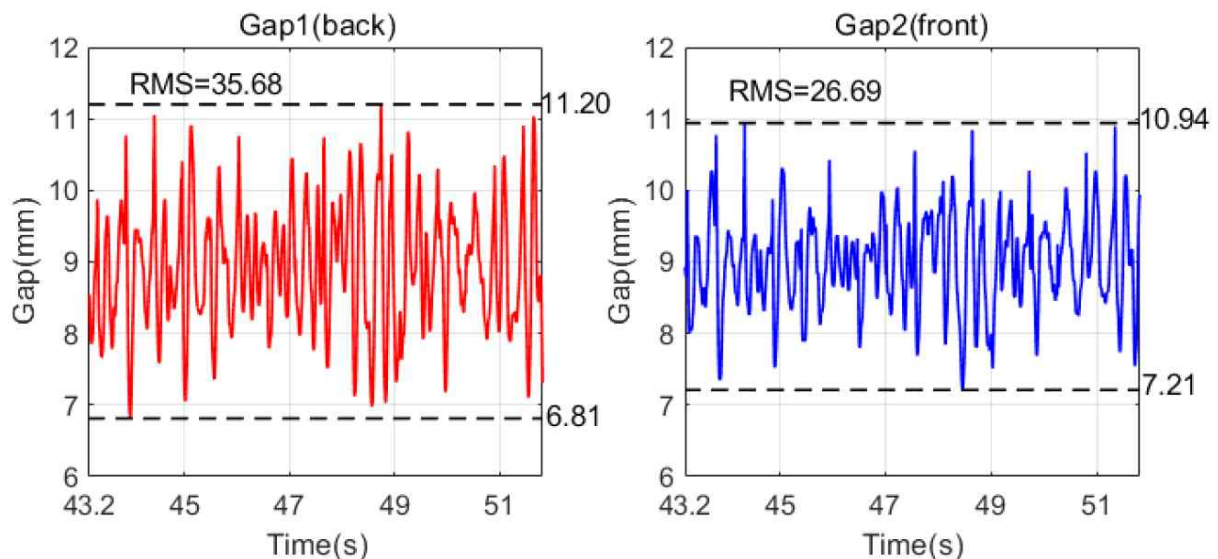
< 그림5. 가이드 웨이에서 발생하는 주기적인 파장으로 인한 두 센서의 부상 갭 진폭 응답 >
(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

부상 간격의 편차 진폭은 부상 제어 시스템의 추적능력을 반영한다. 진폭이 작을수록 제어의 추적능력은 강해진다. 따라서 그림 5의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 부상 갭 진폭은 가이드 웨이 파장과 밀접한 관련이 있다. 파장이 증가함에 따라 부상 간격 진폭이 1에서 0에 가까워져서 추적 능력이 향상됨을 확인할 수 있다. 이 결론은 부상 시스템이 저주파 신호(장파 가이드 웨이)를 추적하고 고주파 신호(단파 가이드웨이)를 무시한다는 사실과 일치한다.
2. 그림 5의 (a)에서 파장 3.01m에서 후면 최대 진폭 값은 2.109mm가 나타나고 전면은 1.498까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 6.23m에서 최소값 0.2454mm가 나타나는 구간도 확인할 수 있다. (a)에서 (b)로 속도가 증가하면 큰 값의 가이드 웨이의 진폭이 상승하여 열차의 속도 또한 중요한 요소임을 확인할 수 있다.
3. 넓은 범위의 파장에서 후방 부상 갭의 진폭 값은 전방 부상 갭의 진폭 값 보다 더 중요하다. 그러나 파장이 0으로 감소하면 두 갭 사이의 진폭 관계가 변갈아 나타난다. 결과적으로 파장이 클 때 양단의 두 부상 갭의 진폭 값은 동일하다.

이러한 분석의 정확성을 검증하기 위해 본 연구는 베이징의 지하철 S1선에서 현장테스트를 진행하였다. 테스트에서 자기부상 열차는 80km/h의 일정한 속도로 달리고 있었고, 모듈 부상 시스템의 두 부상 간격은 200Hz의 샘플링 속도로 기록하였다. 그림 6은 실험을 통해 얻은 두 개의 부상 간격 신호이다. 실험에서의 신호 편차 정도를 측정하기 위해 신호 오류의 평균 제곱근(rms)함수를 사용하여 확인해보면

두 부상 간격 신호의 rms값은 각각 후면 35.68, 전면 26.69이고 이는 후면 부상 간격 신호의 편차 정도가 더 크다는 것을 나타낸다. 그림 6에서 극단적인 부분을 통해서도 동일한 경향을 볼 수 있다. 부상 간격의 범위는 각각 후면이 6.81~11.20mm, 전면이 7.21~10.94mm이다. 이 분석을 통해 두 개의 부상 갭 신호가 뚜렷한 차이를 보이며 갈수록 더 편차 정도가 크게 나올 것이라는 결론을 내릴 수 있다. 이 데이터를 그림 7과 같이 이산 고속 푸리에 변환을 통하여 신호를 시간영역에서 주파수 영역으로 변환해 보았다. 그림 7에서도 두 부상 갭의 편차 진폭 차이는 2.5~10m의 범위에 주로 있음을 확인할 수 있다. 두 부상 간격의 편차 진폭은 가이드 웨이 파장이 10m보다 클 때 기본적으로 동일하다. 이러한 결론은 그림 5에 표시된 부분과는 일치 하지 않는다. 그러나 가이드 웨이의 파장이 2.5m보다 작은 상황에서 가이드 웨이 입력 진폭이 상당히 작기 때문에 가이드 웨이 파장이 부상 간격 편차에 기여했다고 보기는 어렵다. 반대로 가이드 웨이 파장이 10m보다 큰 경우에도 부상 시스템의 강력한 추적 능력으로 인해 부상 간격의 편차 진폭에 변화의 요인을 확인하기에는 어렵다. 마지막으로 전자기력은 전자석의 극면에 고르게 분포되어있고, 센서가 전자석의 두 단자 위에 위치하기 때문에 모듈 부상시스템의 두 가지 센서는 서로 다른 역학 성능을 보여준다.



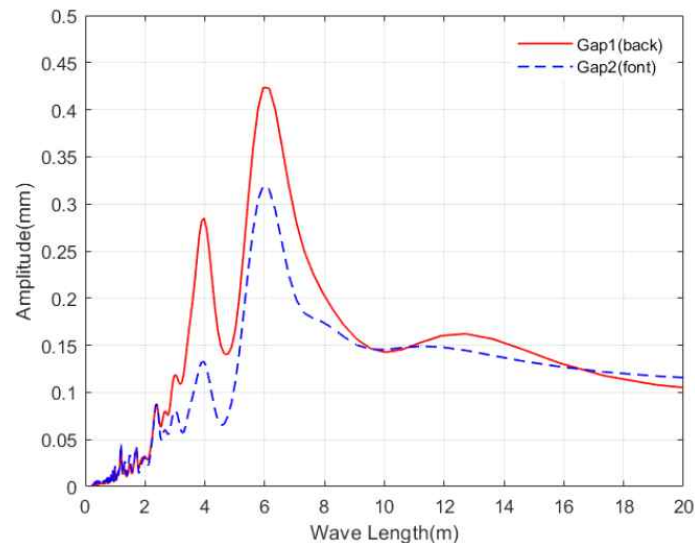
< 그림6. 80km/h로 달리는 자기부상 열차의 두 센서의 부상 간격 신호 측정 (Gap1)후방, (Gap2)전방 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electromagnet levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

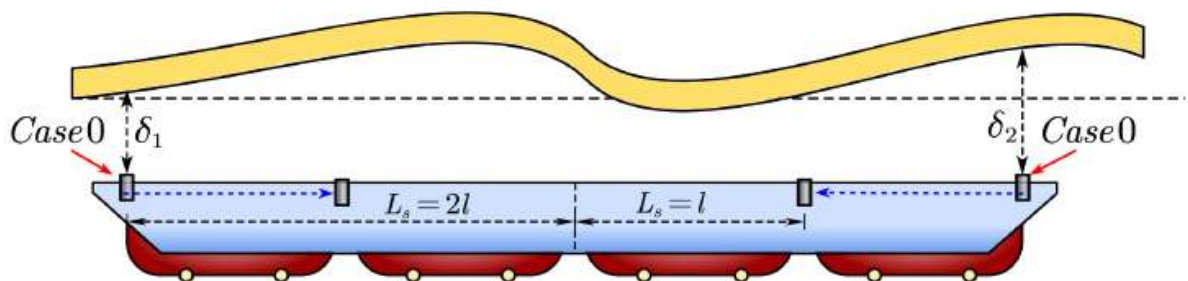
따라서 본 연구는 두 부상 간격의 편차를 줄이기 위해 센서의 위치를 고려한 동적 성능 최적화 방안을 제시한다.

3. 센서 위치를 고려한 동적 성능 최적화 방안

센서 위치 최적화 전략은 그림 8과 같으며 센서 부착 위치는 기존의 전자석 두 양단에서 각 장치를 두 코일의 중심부로 이동하는 것이다. 자기부상 열차의 이동속도를 80km/h의 값으로 설정하고 최적화를 진행하면 결과는 그림 9와 같다. 그림 7에서 후면부 센서의 가이드웨이 파장이 3m에서 10m까지 이기 때문에 부상 갭의 평균 진폭 계산이 이 범위 내에서 고려되어야 한다. 따라서 이 그림 9와 같은 결과를 통해 다음 결론을 도출할 수 있다.



< 그림7. 80km/h로 달리는 자기부상 열차의 부상 간격 신호 진폭 스펙트럼 >
 (Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

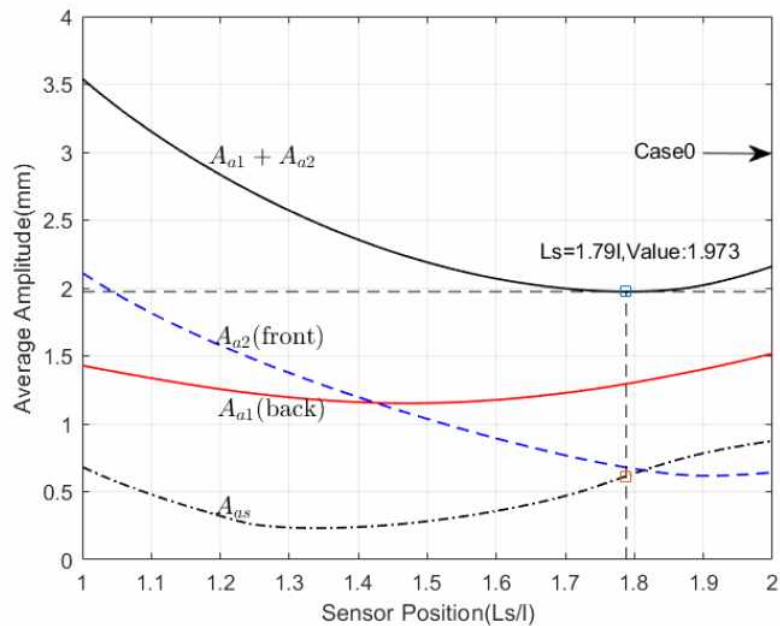


< 그림8. 전자석의 센서 위치 최적화 방안 >
 (Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

1. 센서의 부착위치가 안쪽으로 변경됨에 따라 후면 부상 갭의 평균 진폭이 먼저 감소한 다음 상승하고 시작점의 값이 끝점의 값에 가까워진다. 그러나 전면 부상 갭의 평균 진폭은 전 과정에서 증가한다.
2. 그림 8의 L_s 의 값이 1.424일 때 두 부상 간격의 평균 진폭은 동일하다. 이때 부상 갭의 차는 가장 최소가 된다.
3. 총 평균 진폭은 L_s 가 1.79에서 최소인 1.973mm에 도달한다. case0의 2.16mm에 비해 전·후면 부진폭의 감소율은 17.13%이고 case0의 0.874mm에 비해 두 진폭의 차 감소율은 29.6%이다.

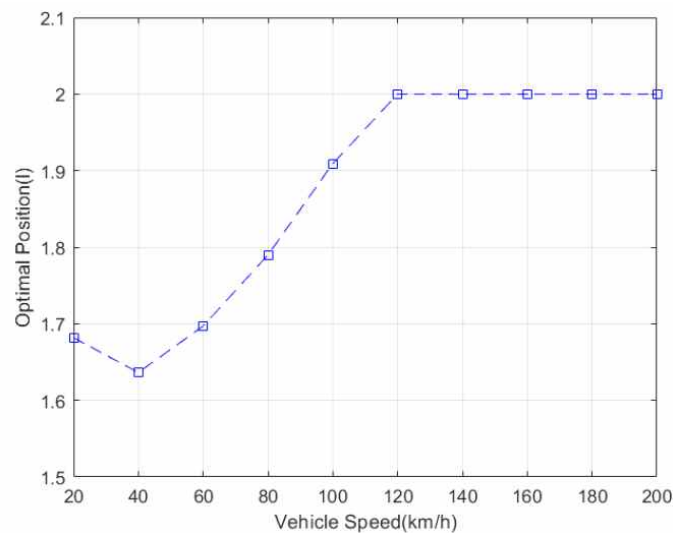
결과적으로 L_s 가 80km/h에서 1.79의 값을 가질 때 두 갭의 총 평균 진폭이 최소가 되는 최적 센서 위치임을 확인 할 수 있다.

또한 차량 속도를 고려할 경우 최적의 센서 위치를 확인해 본다면 그림 10을 통해 확인 할 수 있다. 총 평균 진폭 계산을 위한 가이드 웨이 파장 범위는 3~10m이다. 그림10에서도 확인할 수 있듯이 최적의 센서 위치는 점차 차량 속도가 증가함에 따라 점차적으로 전자석의 외각 양 끝으로 접근한다는 것을 확인 할 수 있다. 차량 속도가 120km/h보다 크면 최적의 센서의 위치는 전자석의 양 끝단이므로 고속 조건에서는 기존 센서 위치를 이동할 필요가 없음을 확인 할 수 있다.



< 그림9. 80km/h에서 평균 진폭과 센서의 위치 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electromagnet levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

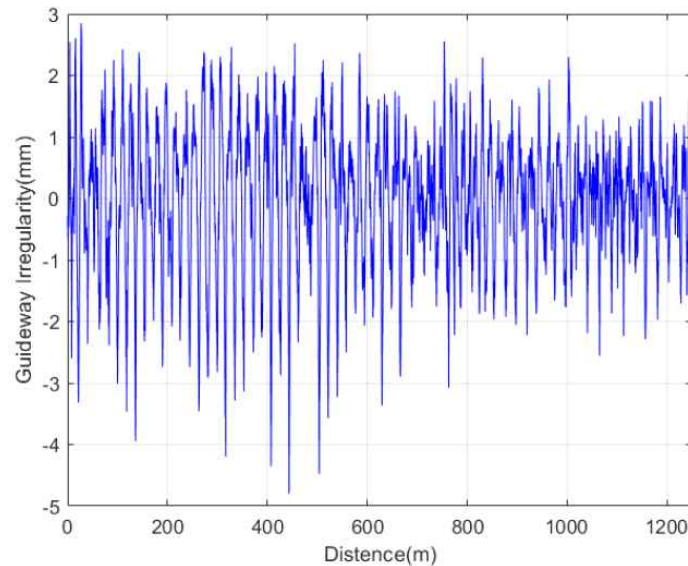


< 그림10. 최적의 센서 위치와 차량 속도 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electromagnet levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

4. 시뮬레이션 및 검토

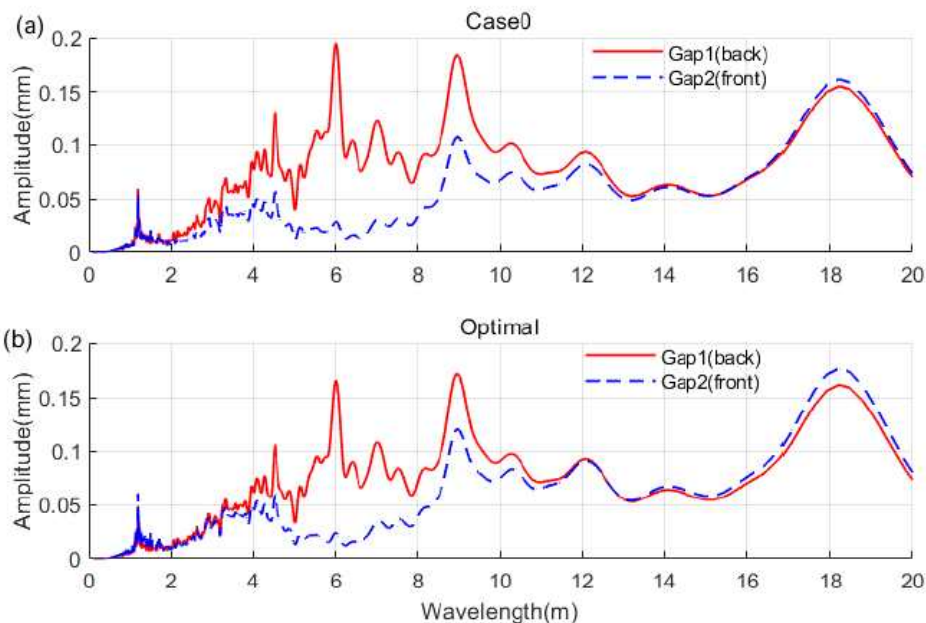
임의의 불규칙성 데이터가 각 주파수에서 시스템에 작용할 수 있다는 점을 고려하여 자기부상 모델링에 그림 11과 같은 불규칙성 데이터를 시뮬레이션에 입력 소스로 사용하였다. 적용한 자기부상 열차의 가이드 웨이의 시험모델의 길이는 1.25km이고 샘플링 단계는 24mm, 해당 공간 주파수는 $41.67m^{-1}$ 이다. 데이터의 범위는 4.8mm~2.85mm까지이다. 시뮬레이션은 Matlab 소프트웨어를 통하여 진행하였고 이 시뮬레이션을 통해 두 부상 간격의 동적 응답에 대한 진폭 스펙트럼을 확인해보았다.



< 그림 11. 시뮬레이션에 사용된 가이드웨이의 불규칙성 데이터 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

그림 12는 80km/h에서의 센서 위치가 다른 부상 간격의 진폭 스펙트럼을 나타낸 것으로 제안한 최적화된 센서의 배치의 경우 case0에 비해 후면부의 부상 갭의 진폭은 넓은 범위의 가이드 웨이 파장에서 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 후면부의 주요 진폭은 case0일 경우 6m에서 0.195mm, 8.96m에서 0.1846mm, 18.22m에서 0.1553mm임을 확인 할 수 있고, case0에 비해 제안된 최적 기법의 후방 부상 갭 진폭은 6m에서 14.87%, 8.96m에서 6.72% 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 넓은 파장 범위에서 부상 갭 사이의 차이는 전면의 부상 갭의 진폭이 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다.



< 그림 12. (80km/h) 센서 위치가 다른 두 경우의 부상 간격의 진폭 스펙트럼 (a)case0, (b) 최적위치 >

(Yajian Li et. al, "Dynamic Performance optimization of electronmagnetic levitation system considering Sensor position, IEEE Trans. Magn. Vol. 8)

5. 결론

차량과 가이드 웨이의 상호 동적 역학은 자기부상 열차의 작동 안정성과 승차감에 영향을 미치는 핵심 문제이다. 따라서 본 연구는 가이드 웨이 불규칙성으로 인한 모듈 부상 시스템의 동적 진동을 연구하였다. 모듈 부상 시스템의 수학적 모델링을 통해 두 부상 간격 간의 동적 응답특성 차이를 반영할 수 있도록 하였고 이산 주파수 가진 방법을 이용하여 서로 다른 파장과 속도에서 두 부상 간격의 진폭 응답을 얻었다. 진폭 응답 분석을 기반으로 두 부상 갭의 간격의 평균 진폭을 계산하여 서로 다른 차량 속도에서 최적의 센서 위치를 결정할 수 있었다. 이를 통해 두 부상 간격의 총 편차 범위와 그 차이를 줄일 수 있고 이 연구 방법을 통해 전자기 부상 제어 시스템의 최적화 설계를 위한 참고 자료로서 전자기 부상 시스템의 안정성과 자기부상 열차의 승차감을 향상시키는데 도움이 될 것이다.

<원문제목>

Dynamic Performance Optimization of Electromagnetic Levitation System Considering Sensor Position

<원문출처>

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology