

# 도시형 자기부상열차 부상제어를 위한 궤도 이음매 검출 및 공극 신호의 보상 방법

## The Methods of Rail Joint Detection and Gap Signal Compensation for Levitation Control of Urban Maglev

김행구\*      이종민\*\*      강병관\*\*      김국진\*\*      김춘경\*\*\*  
Kim, Haeng-Koo   Lee, Jong-Min   Kang, Byung-Kwan   Kim, Kuk-Jin   Kim, Chun-Kyung

### ABSTRACT

The present urban maglev which has been developed in Korea is controlled by 4-edge control method over each bogie. The control output which is derived from two gap sensors and one vertical acceleration sensor controls magnet to maintain a nominal gap. But, the gap signal acts as a big disturbance in rail joint though two gap sensors are used and finally result in unstable response and poor ride comfort.

This paper treats of a method to compensate the gap signal in rail joint for the levitation control of urban maglev. The physically abnormal change of gap is detected when one gap sensor passes a rail joint, the disturbance of gap in rail joint is estimated. Finally the disturbance in gap signal is eliminated by processing the information of vehicle speed and estimated disturbance in when the other gap sensor passes a rail joint.

### 1. 서 론

현재 국내에서 개발한 중저속 도시형 자기부상열차는 궤도와 전자석의 일정한 공극을 유지하기 위하여 2개의 공극 센서와 1개의 가속도 센서를 사용하여 전자석에 흐르는 전류를 제어한다. 센서 신호는 여러 가지의 외란 요소를 포함하고 있기 때문에 부상 시스템은 외란에 강인하게 설계되어야 한다. 여러 가지 외란의 요소 중 안정성이나 승차감에 가장 큰 영향을 주는 요소는 궤도의 이음매이다. 이음매에서의 공극 신호 처리를 위하여 여러 가지 방법이 논의되어 왔으나, 현재는 효율적인 측면이나 성능면에 있어서 수직방향으로 2개의 공극 센서를 일정 간격을 두고 장착하여 두 개의 신호 중에서 작은 값을 선택하여 사용하고 있다[1]. 하지만, 이 방법은 정지 부상 상태에서 두 공극 신호의 레벨이 차이가 나지 않도록 옵셋을 조정하여야 하고, 주행 중인 경우 궤도와 차량이 동특성을 갖기 때문에 두 신호의 레벨 차이가 발생한 상태에서 이음매를 통과하는 경우가 있다. 즉, 상호 전환 시간이 늦어지거나 두 신호의 레벨 차이가 클 경우 부상 성능의 불안정을 초래하게 된다.

본 논문은 도시형 자기부상열차의 부상제어를 위한 이음매 구간에서의 공극 신호의 보상 방법에 관한 것이다. 이음매 구간을 먼저 통과하는 하나의 공극 센서 신호에 대하여 물리적으로 비정상적인 공극의 변화를 검출하고, 이음매의 외란의 크기를 추정한다. 최종적으로 차량의 이동속도 정보와 추정된 외란을 기반으로 이후에 이음매를 통과하는 공극 센서의 신호에서 외란을 제거하는 방법을 제안한다.

\* (주)로템, 기술연구소 선행차량개발팀, 비회원

E-mail : hengus@rotem.co.kr

TEL: (031)460-1178 FAX: (031)460-1787

\*\* \*\*\* \*\*\*\* (주)로템, 기술연구소 선행차량개발팀

\*\*\*\*\* 한국전기연구원 전력연구단

## 2. 궤도 이음매 검출 및 공극 신호의 보상

### 2.1 부상 시스템 개요

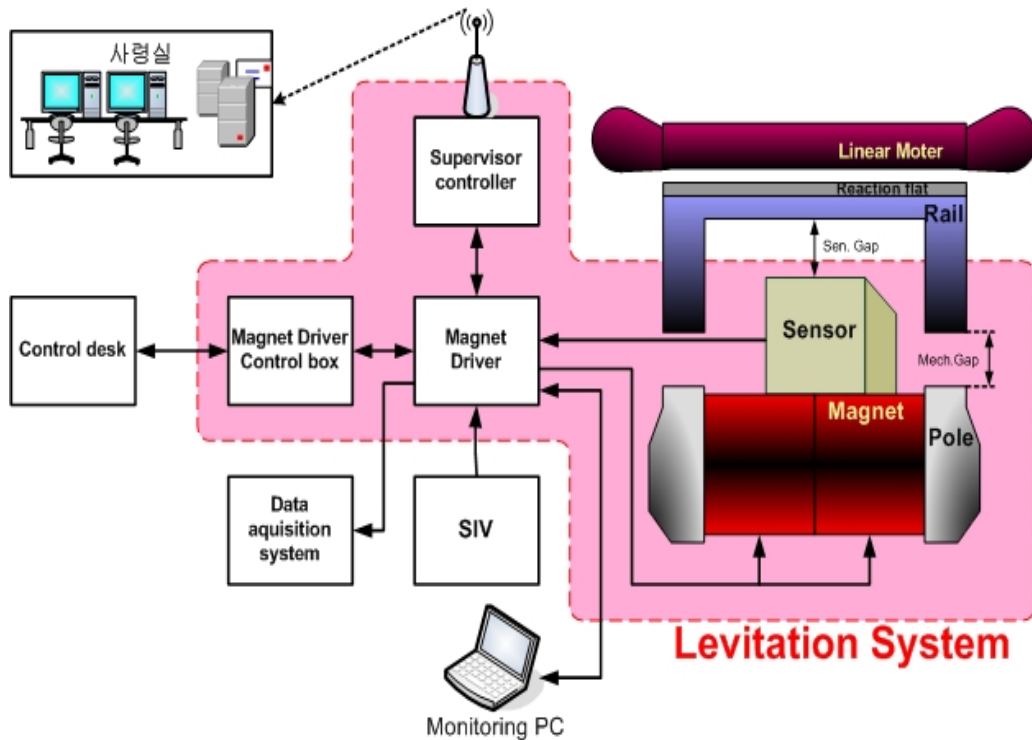


그림 1. 도시형 자기부상열차 부상시스템의 구성도

국내에서 개발한 도시형 자기부상열차는 상전도 흡입식(EMS: Electromagnetic Suspension) 방식으로 레일과 전자석의 상호 흡인력을 이용하여 일정한 공극을 유지한다. 그러나 센서가 측정하는 공극은 센서로부터 레일의 대향면과의 공극을 측정한다. 그림 1은 도시형 자기부상열차 부상시스템의 구성도이다. 본 논문에서는 궤도의 불규칙성, 차량 및 궤도의 동특성, 그리고 이음매의 수직 또는 수평 단차로 인한 실제 부상력의 변화 등을 고려하지 않는다.

### 2.2 이음매 구간의 공극 신호

도시형 자기부상열차의 공극 센서는 원통형 Eddy Current 형태의 센서를 사용한다. 이 센서는 한 지점을 측정하지 않고 일정 영역의 평균적인 상대 거리를 측정하기 때문에 이음매 구간에서 그림 2와 같은 신호를 발생한다. 즉, 실제 전자석과 레일의 간격이 멀어지지 않음에도 불구하고 이음매 구간의 공극 신호는 상대 거리가 커지는 것으로 인식이 되므로 이음매 구간의 공극 신호가 적절하게 처리되지 않는다면 전자석은 레일에 흡착이 될 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 2와 같이 일정간격을 두고 두 개의 공극 센서를 배치하고(단, 이음매에서의 레일 간격이 두 센서가 측정하는 영역보다 작아야 한다), 두 신호 중 작은 값을 선택하는 방법을 일반적으로 사용해왔다.

그림 2는 이음매를 통과할 때 공극 신호 파형의 한 예이다. 이 예에서는 두 공극 신호의 값 중에 작은 값을 선택하므로 첫 번째 센서가 이음매를 통과할 때는 신호값이 크기 때문에 제어에 사용되지 않지만, 두 번째 센서가 통과하면서 공극 신호의 값이 급격히 증가하는 상태에서 작은 값으로 전환이 이루어진다. 이 경우 전환 시점에 제어 출력의 큰 변화가 발생하고 결과적으로 추종 공극을 벗어나게 된다. 이음매 구간에서의 파형은 이음매의 간격, 연결 형태, 차량의 속도에 따라서 다르게 나타난다.

보통 상전도 흡입식 자기부상열차의 전자석은 약 1~7Hz 사이의 주파수에 대해서 입력에 비해 보다

큰 출력을 발생한다. 레일 이음매 구간의 센서 신호가 그에 해당하는 주파수로 작용할 경우 이음매 구간에서의 공극의 변동이 매우 커지므로 승차감과 안정성에 악영향을 주게 된다.

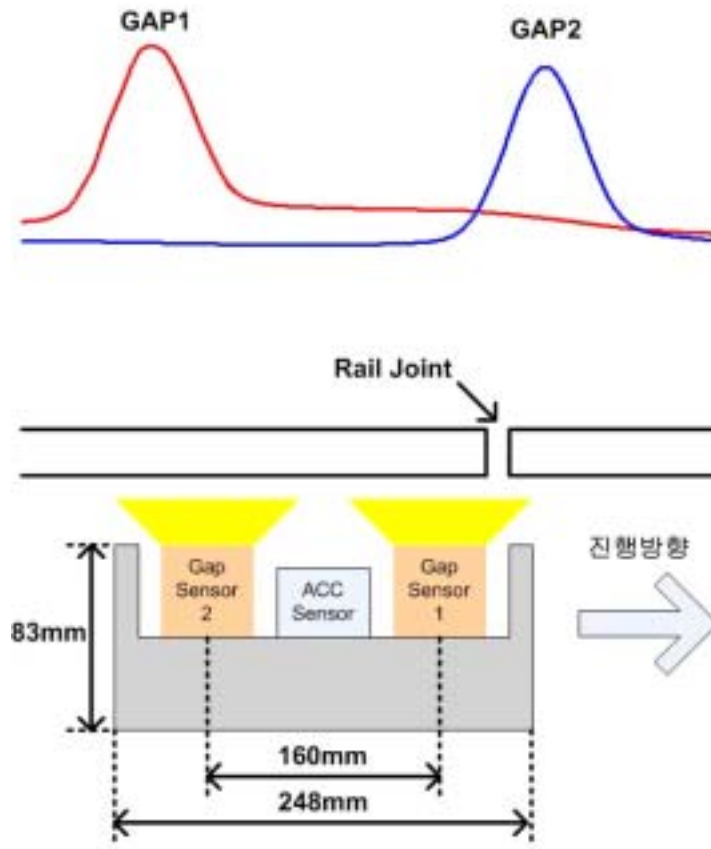


그림 2. 이음매 구간에서의 공극 신호

### 2.3 이음매 구간의 검출

부상 제어에 사용하는 센서 신호를 사용하여 이음매 구간을 검출하는 방법을 생각해 보자. 가속도 센서는 전자석의 절대적인 가속도, 속도, 변위에 대한 정보를 제공해 줄 수 있지만, 이음매의 정보를 제공할 수는 없다. 단, 센서의 위치상 전자석이 항상 이음매 구간을 먼저 통과한다. 그러므로, 이음매에서의 부상력의 변화가 발생하고, 다른 구간과 다른 특성을 가지게 된다면 이음매 검출이 가능할 것이다. 하지만, 본 논문은 이음매 구간에서 부상력의 변화가 없을 것을 가정하므로 공극 센서의 신호로부터 이음매를 검출한다. 가이드 레일이나 거더의 공진이 발생할 경우를 제외한다면, 이음매 구간에서의 공극 신호의 비정상적인 증가를 검사하여 쉽게 이음매 검출이 가능하다. 또한, 작은 측정 범위를 가진 원통형 Eddy Current 형태의 공극 센서를 사용한다면 이음매의 검출이 보다 용이할 것이다.

이음매 구간에서 공극 신호의 변화율은 차량의 속도와 관계되며, 최대값은 이음매의 간격과 관계가 있다. 그림 4는 차량의 속도에 따른 공극 신호의 변화율을 나타낸 것이다. 순간적으로 큰 변화가 있는 구간은 이음매 구간을 나타낸다. 이음매 검출을 위하여 적절한 임계값(Threshold)을 정하는 것은 이음매의 형태와 차량의 속도, 그리고 공극 센서의 특성에 의하여 경험적으로 산출을 하여야 한다. 먼저, 기본적인 임계값을 결정한 후에 속도에 비례하여 임계값을 변경하도록 한다.

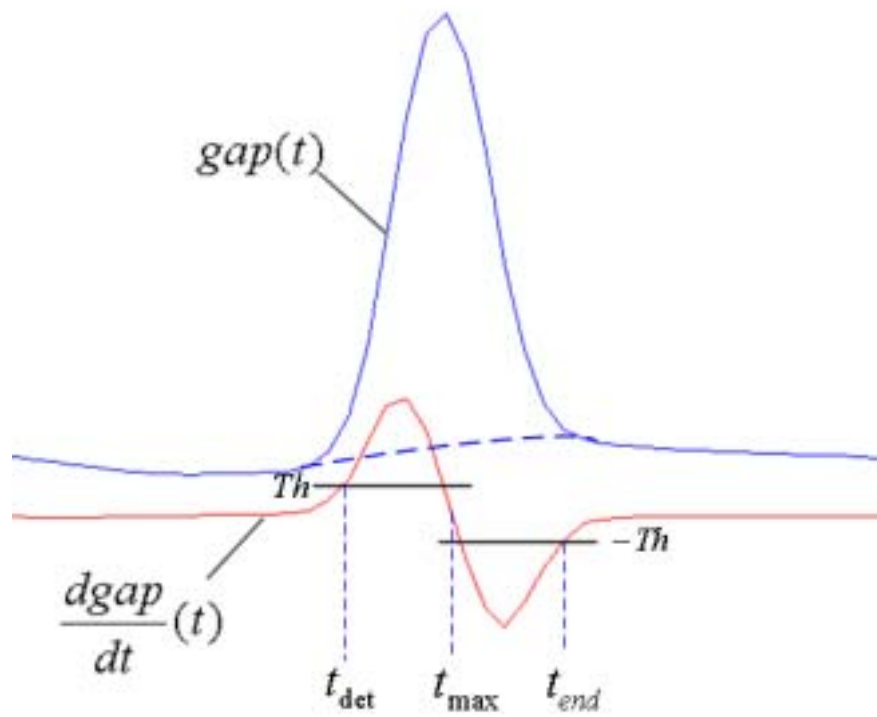


그림 3. 공극 신호와 공극 신호 변화율을 이용한 이음매의 검출

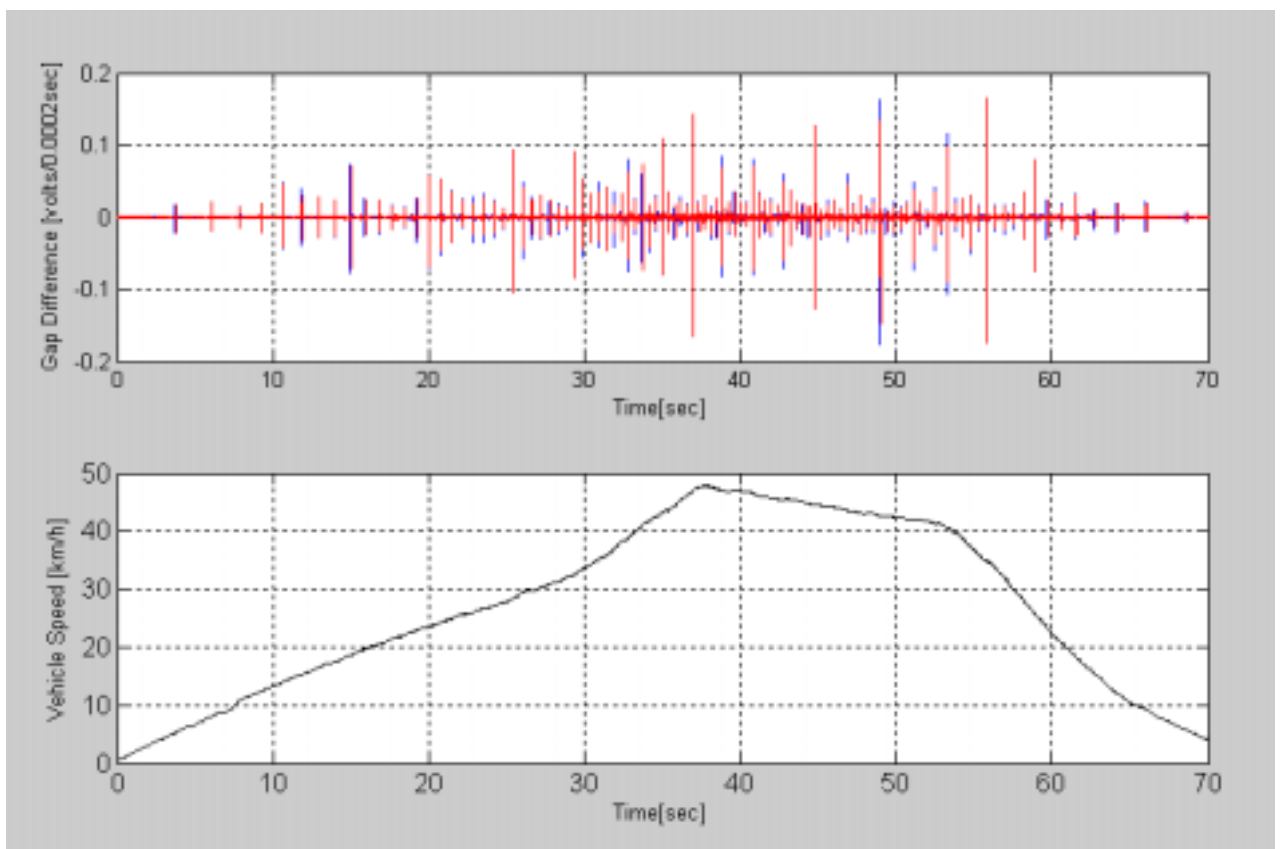


그림 4. 차량 속도에 따른 공극 신호의 변화율 (기계연 시험 선로)

## 2.4 차량 속도를 이용한 공극 신호의 보상

이음매 구간에서 공극 신호를 보상하기 위해서는 열차의 이동 방향과 이동 속도에 대한 정보를 참조해야 한다. 자기부상열차는 부상시스템과 추진시스템의 상호 영향이 큰 시스템이므로 장래에는 각각의 시스템의 특성을 고려한 제어가 수행되어야 한다.

본 논문에서 제안한 공극 신호의 보상 방법을 설명하기 위해서 다음과 같은 조건을 가정한다.

- 두 개의 공극 센서의 간격은 160mm이다.
- 데이터의 샘플링 주기 및 제어 주기는 200  $\mu$ sec이다.
- 이음매 구간 사이의 차량의 이동 속도가 동일하다.
- 같은 이음매에서는 두 개의 공극 센서에 동일한 이음매 외란이 관측된다.

차량의 이동 방향에 대하여 앞쪽에 위치한 공극 센서 신호를  $gap_1(t)$ , 뒤쪽에 위치한 공극 센서 신호를  $gap_2(t)$ 라고 가정하면, 공극 신호의 변화량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$dgap_1(k) = \frac{\Delta gap_1}{\Delta t} = gap_1(k) - gap_1(k-1), t = kT_s$$

$$dgap_2(k) = \frac{\Delta gap_2}{\Delta t} = gap_2(k) - gap_2(k-1)$$

$$ddgap_1(k) = \frac{\Delta dgap_1}{\Delta t} = dgap_1(k) - dgap_1(k-1)$$

$$ddgap_2(k) = \frac{\Delta dgap_2}{\Delta t} = dgap_2(k) - dgap_2(k-1)$$

이음매 구간의 시작 시점(step)을  $n$ ,  $dgap_1$ 이 검출 레벨 이상이 되는 시점을  $n_{det}$ ,  $gap_1$ 이 최대가 되는 시점은  $n_{max}$ , 이음매 구간의 종료 검출 시점을  $n_{end}$ 로 가정하면, 다음 식을 바탕으로 이음매의 각 구간을 나눌 수 있다.

$$dgap_1(n_{det}) = gap_1(n_{det}) - gap_1(n_{det}-1) \geq Th$$

$$dgap_1(n_{max}) = gap_1(n_{max}) - gap_1(n_{max}-1) = 0$$

$$dgap_1(n_{end}) = gap_1(n_{end}) - gap_1(n_{end}-1) \leq -Th, ddgap_1(n_{end}) \geq 0$$

이음매 구간의 총 간격은  $n_{total} = n_{end} - n_{det} + 2x$ 와 같으며, 여기서 이음매 시작 시점과 이음매 검출 시점의 차이,  $x (= n - n_{det})$ 는 검출 레벨 및 차량의 속도와 관계가 있으며 경험적으로 산출한다. 또한, 차량의 이동 속도가 증가할수록 궤도(가이드레일)의 불규칙성에 의한 외란의 주파수가 높아지므로 검출 레벨(Th)이 외란에 민감하지 않도록 변경이 되어야 한다. 하지만, 운행 궤도의 외란이 무시할 만큼 작다면, 적정 레벨을 실험적으로 구하여 고정 가능하다.

이음매의 정확한 외란을 구하기 위하여 순수 대차의 운동을 빼주면(궤도의 외란은 무시한다) 이음매 외란의 파형을 다음과 같이 구할 수 있다(순수 대차의 운동과 궤도의 외란의 크기는 이음매 외란에 비하여 매우 작으므로 무시할 수도 있다).

$$Joint\_gap(k) = Joint\_gap(k-1) + dgap_1(k) - dgap_2(k), k = n, \dots, (n_{end} + x)$$

또한  $gap_2$ 가 이음매를 통과하는 시작 시점,  $n_{start}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$n_{start} = \left\lceil n + 0.16m \times \frac{1}{speed(n_{end})} \times \frac{1}{0.0002sec} \right\rceil,$$

여기서,  $\lceil x \rceil$ 는  $x$ 를 넘지 않는 최대 정수이고,  $speed(n_{end})$ 는 이음매 종료 검출 시점의 열차의 속도 (m/sec)이다.

최종적으로  $n_{start}$  시점부터  $n_{total}$  동안  $gap_2$ 은 다음과 같이 보상이 된다.

$$new\_gap_2(k) = gap_2(k) - Joint\_gap(k - n_{start} + n), k = n_{start}, \dots, (n_{start} + n_{total})$$

위 방법은 이음매 검출 종료 시점에서의 차량 속도를 기준으로 한다. 하지만, 열차가 0.16m를 이동하는 동안 이동 속도의 변화가 생길 수 있다. 표 1은 차량이 최대가감속으로 이동할 때 이음매 보상 시

작 시점(지연시간)의 최대 오차를 계산한 것이다. 차량의 속도가 20km/h이하일 경우에는 제어주기 1step 이상의 오차를 가질 수 있다. 이 경우에는 속도에 따라서 좀더 정확한 거리의 계산을 할 필요가 있다. 또한 차량이 정지 상태일 경우(1km/h이하) 또는 정지부상 및 착지를 수행할 경우에는 부상제어에 사용되는 센서의 신호가 이음매 구간에 걸쳐있을 수도 있으므로 두 개의 신호값 중에서 작은 값을 선택하도록 한다.

표 1. 센서의 이음매 통과 간격 및 오차 (속도별)

Train Speed [km/h]	Delay Time [msec]	Speed change at 4.5km/h/sec for delayed time[km/h]	Delay Time Error [msec]
5	115.20	0.518	13.33
10	57.60	0.259	1.53
20	28.80	0.130	0.19
25	23.04	0.104	0.10
30	19.20	0.086	0.06
40	14.40	0.065	0.02
50	11.52	0.052	0.01
60	9.60	0.043	0.01
70	8.23	0.037	0.00
80	7.20	0.032	0.00
90	6.40	0.029	0.00
100	5.76	0.026	0.00
110	5.24	0.024	0.00

### 3. 결론

본 논문은 두 개의 공극 센서를 이용하여, 이음매 구간을 검출하고 이음매의 외란의 크기를 추정하여 최종적으로 이음매 구간에서의 공극 신호를 보상하는 방법을 제안하였다. 하지만, 실제의 도시형 자기부상열차에 적용되기 위해서는 부상시스템이 추진계의 신호를 실시간으로 참조할 수 있는 네트워크가 구현이 되어야 한다. 또한, 공극 신호는 궤도의 불규칙성, 궤도의 특성, 차량의 동특성 등의 정보를 포함하고 있기 때문에 외란의 요소로 작용하는 신호를 분리하여 제거하는 것은 쉬운 일이 아니다. 보통의 경우, 이음매 구간에서 공극 신호의 처리가 적절하게 이루어질 경우에도 그 외의 요소에 의하여 여전히 불안정한 부상이 이루어지는 경우가 많다. 향후의 과제로서 이음매 구간에서의 부상력의 변화에 대한 평가와 공극 신호의 특성에 대한 연구가 더 필요할 것이다.

### 참고문헌

1. 산업자원부(2006년), “자기부상열차 실용화를 위한 모델 개발”, 중기거점 1단계 완료보고서.
2. P.K. Sinha(1987), “Electromagnetic Suspension: Dynamics and Control,” Peter Peregrinus Ltd.
3. Simon Haykin(1996), “Adaptive Filter Theory”, 3rd Edition, Prentice Hall
4. Louis L. Scharf(1991), “Statistical Signal Processing - Detection, Estimation, and Time Series Analysis”, Addison-Wesley.