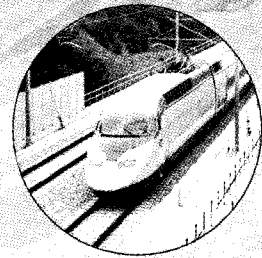


특별Session

클러스터링에 기초한 자기부상시스템의 퍼지제어기 모델링

김민수 _ 한국철도기술연구원



클러스터링에 기초한 자기부상시스템의 퍼지제어기 모델링

Fuzzy Controller Modeling for Electromagnetic Levitation Systems based on Clustering Algorithm

김민수*
Kim, Min Soo

변운섭**
Byun, Yeun Sub

이관섭**
Lee, Kwan Sup

ABSTRACT

This paper describes the development of a clustering based fuzzy controller of an electromagnetic suspension vehicle using gain scheduling method and Kalman filter for a simplified single magnet system. Electromagnetic suspension vehicle systems are highly nonlinear and essentially unstable systems. For achieving the levitation control of the DC electromagnetic suspension system, we considered a fuzzy system modeling method based on clustering algorithm which a set of input/output data is collected from the well defined Linear Quadratic Gaussian(LQG) controller. Simulation results show that the proposed clustering based fuzzy controller methodology robustly yields uniform performance with adequate gap response over the mass variation range.

1. 서론

자기부상 철도는 새로운 교통수단으로서 안전하고 승차감이 좋은 대체 수송수단으로서 개발되어 지금까지 계속적인 성능향상이 이루어져 왔다. 이러한 자기부상시스템은 전자기력에 기초한 지지, 추진, 그리고 안내시스템으로 구성되어있으며, DC 전원으로 제어되는 상전도 자기 부상시스템은 본질적으로 높은 비선형성과 불안정한 특징으로 인해 다양한 외부환경에 대해 강인한 특성을 갖도록 부상제어기를 설계하는 것은 매우 어려운 일이다[1]~[6].

세계최초로 자기부상철도는 영국의 피플무버(People Mover)로서 1984년부터 1995년까지 영국 버밍햄 공항-철도역사 사이의 600m 노선에서 저속으로 운행되었으며, 3량으로 구성되어 최고속도 40km/h로 운행되었다. 부상방법은 상전도 흡인식이고, 추진시스템은 선형유도전 동기식으로 구성되어 있었다. 독일에서는 1970년대부터 자기부상철도에 관한 연구를 활발히 진행하여 중저속용인 M-Bahn과 초고속용인 Transrapid를 개발하였다. 70년대부터 현재까지의 초고속 자기부상철도에 대한 정부와 민간의 일관적인 투자와 노력으로 인하여, 세계최초로 중국 상하이에서 상용화에 성공한 기술을 보유하게 되었다. 일본은 1970년대부터 자기부상열차에 대한 연구를 시작하여 중저속용의 HSST와 고속용의 MLX 두 가지 시스템을 개발하였으며, HSST는 2005년 3월부터 나고야지역에서 Linimo 상업운행을 하고 있다.

* 정회원, 한국철도기술연구원, 자기부상철도연구팀
E-mail : ms_kim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5205 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 자기부상철도연구팀

퍼지시스템은 전문가의 경험이나 지식을 IF <condition> - THEN <action> 형태의 언어 규칙을 이용하여 동작을 취하게 하는 비선형 시스템으로 다양한 응용 분야에서 성공 사례를 보이고 있다. 퍼지시스템에 영향을 주는 많은 요인들 중에서 퍼지규칙은 전문가의 경험이나 지식을 토대로 구할 수 있다. 그러나 많은 실제적인 경우에는 전문가의 지식체계를 명확하게 언어적으로 나타내기 어려운 대신 입력과 출력의 데이터쌍으로 얻을 수 있는 경우가 많이 존재한다. 이와 같은 경우에는 입출력 공간에서의 데이터를 클러스터링하거나 신경회로망이나 다른 적응 알고리즘을 이용하여 학습함으로써 퍼지시스템을 모델링할 수 있다[7][8].

퍼지규칙을 생성하는 방법 중 클러스터링 방법은 패턴 분류나 시스템 모델링에 이용되는 K-means이나 FCM(Fuzzy C-Means) 알고리즘에 기초하고 있다. 그러나 이러한 클러스터링 알고리즘은 계산이 복잡하며 클러스터 중심 개수를 미리 결정해야 하는 문제를 갖는다. 본 논문에서는 계산이 간단하고 초기 클러스터 중심 개수의 선정이 필요 없는 Subtractive 클러스터링 알고리즘을 사용하였다[9].

본 논문에서는 자기부상철도 시스템 중에서 중저속 상전도 흡인식의 간략화된 모델에 대한 부상 제어시스템에 대해 연구하였다. 부상제어에 대한 연구는 주로 한 동작점에서 선형근사 모델을 선에 근거하여 설계된 선형제어기 구조를 갖는다. 그런데 이러한 방식은 주행 시 발생하는 각종 외란과 내적 비선형성으로 인하여 안정도 및 각종 제어 성능기준을 만족시키기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 자기부상철도시스템의 핵심기술로서 강인성과 안정성이 보장되는 부상제어기를 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 구조에 의한 이득계획 제어기 설계 방법으로 설계하고[10][11], 또한 이러한 제어기의 입출력 데이터를 클러스터링하여 보다 간단한 형태의 퍼지제어기를 설계하는 것이 목적이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 간략화된 단일전자석 부상시스템에 대한 모델링 및 제안된 퍼지제어기를 갖는 부상제어시스템의 구조에 대해 살펴본다. 3절에서는 클러스터링에 기초하여 퍼지제어시스템을 모델링하는 과정에 대해 살펴보고, 4절에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 시스템의 성능을 분석한다.

2. 단일 전자석의 부상시스템

2.1 단일전자석 부상시스템의 모델링

단일전자석 자기부상시스템은 자기부상철도 차량의 가장 기본적인 시스템으로 제어를 하지 않을 경우 불안정한 특성을 보인다. 그림 1에는 역 U자 모양의 부상레일과 U자 모양의 전자석을 갖는 단일전자석 자기부상시스템을 나타내었으며, 이때의 전자석 흡인력은 식 (1)로 표현된다.

$$F(i, z) = \frac{\mu_0 N^2 A i^2(t)}{4z^2(t)} \quad (1)$$

단, μ_0 는 유전율을, $i(t)$ 는 코일에 흐르는 전류를, A 는 전자석의 단면적을, $z(t)$ 는 전자석과 부상 레일사이의 공극을 그리고 N 은 코일의 회전수를 나타낸다.

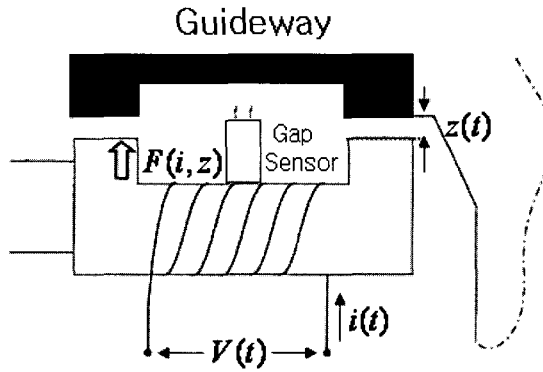


그림 1. 단일전자석 자기부상시스템

만약 R 이 전자석회로의 전체저항이고 전자석 코일에 인가된 전압이 $v(t)$ 라면, 전류와의 관계를 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$v(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2z^2(t)} \frac{dz(t)}{dt} \quad (2)$$

또한, 누설자속과 자석코어의 리럭턴스를 무시하면 전기적, 기계적 운동의 평형관계로부터 식(3)과 같은 비선형 동특성 모델관계식을 얻을 수 있다.

$$m\ddot{z}(t) = -F(i, z) + f_d(t) + mg \quad (3)$$

$$\dot{i}(t) = \frac{\dot{z}(t)i(t)}{z(t) + \frac{2z(t)}{\mu_0 N^2 A}} (v(t) - Ri(t)) \quad (4)$$

단, $f_d(t)$ 는 외란입력이고, g 는 중력가속도, m 은 전자석의 무게를 각각 의미한다.

$z(t)$, $\dot{z}(t)$, $i(t)$ 를 상태변수로 선택하면, 비선형 상태방정식은 식 (5)와 (6)으로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), f_d(t)] \quad (5)$$

$$y(t) = h[x(t)] \quad (6)$$

여기에서 $\dot{x}_1(t) = x_2(t)$, $\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{m} \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \frac{x_3(t)^2}{x_1(t)^2} + g + \frac{1}{m} f_d(t)$,

$$\dot{x}_3(t) = \frac{x_2(t)x_3(t)}{x_1(t)} + \frac{2x_1(t)}{\mu_0 N^2 A} (u(t) - R x_3(t)) \quad \text{이고,}$$

$y(t) = x_1(t)$, $x^T(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)] = [z(t), \dot{z}(t), i(t)]$, $u(t) = v(t)$ 를 의미한다.

2.2 제안된 단일전자석 부상제어시스템의 구조

제안된 단일전자석 부상제어시스템의 구성도를 그림 2에 나타내었다.

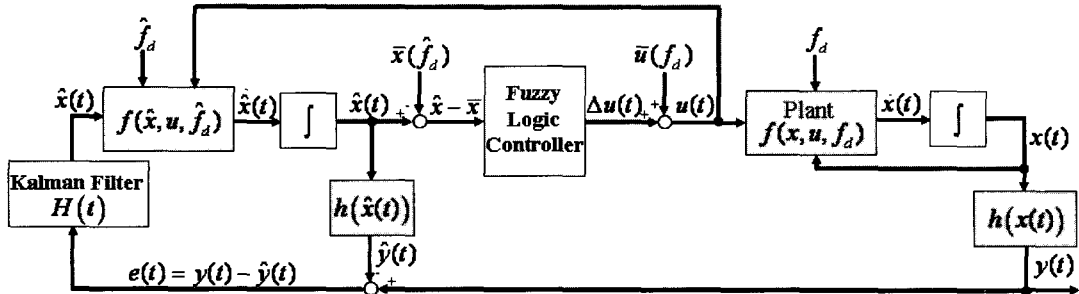


그림 2. 제안된 단일전자석 부상제어시스템의 구성도

제안된 부상제어시스템은 LQG 구조에 의한 이득계획 제어에 기초하여 설계된 제어기로부터 입출력 데이터를 수집하고 수집된 데이터를 클러스터링함으로써 부상제어기를 모델링한다. 우선, 입출력 데이터를 얻기 위한 이득계획 제어기법에 대해 살펴보면 다음과 같이 세 단계로 요약된다.

첫 번째 단계로서, $F_d := \{f_d(t) | f_d(t) \in [f_d^-, f_d^+, t \geq 0]\}$ 의 범위를 갖는 외란 $f_d(t)$ 을 계획 변수로 선정한다. 동작점 $\bar{x}(f_d)$ 에서의 상태벡터는 식 (7)로 표현된다.

$$\bar{x}(f_d) = [z_0 \quad 0 \quad i_0] \quad (7)$$

여기에서 $i_0 = z_0 \sqrt{\frac{4(mg + f_d)}{\mu_0 N^2 A}}$ 이고, $f_d \in F_d$ 이다.

최적 페루프 이득행렬 K 로부터 상태변수와 계획변수로 구성되는 제어법칙은 다음식과 같다.

$$u(t) = K(x(t), f_d(t)) \quad (8)$$

여기에서 $K(\cdot)$ 는 평활함수로서 일정한 f_d 에 대해 페루프 시스템이 일정한 $\bar{x}(f_d)$ 를 갖도록 하고, 선형화된 페루프 시스템이 근사적으로 안정하도록 해준다.

페루프 시스템에서 동작점 $\bar{x}(f_d)$ 의 존재는 평활함수가 다음식을 만족함을 의미한다.

$$\bar{u}(f_d) = K(\bar{x}(f_d), \bar{f}_d) = Rz_0 \sqrt{\frac{4(mg + f_d)}{c}}, \quad c = \mu_0 N^2 A \quad (9)$$

$$y(f_d) = z_0 \quad (10)$$

두 번째 단계는 비선형 상태방정식을 계획변수에 대해 선형화된 페루프 시스템으로 근사화한다.

$$\Delta \dot{x}(t) = A(\bar{f}_d) \Delta x(t) + B \Delta u(t) + D \Delta f_d(t) \quad (11)$$

$$\Delta u(t) = K_1^T(\bar{f}_d) \Delta x(t) + K_2^T(\bar{f}_d) \Delta f_d(t) \quad (12)$$

$$\Delta \hat{y}(t) = C \Delta x(t) \quad (13)$$

단, $\Delta x(t) = x(t) - \bar{x}(f_d)$, $\Delta u(t) = u(t) - \bar{u}(f_d)$, $\Delta f_d(t) = f_d(t) - \bar{f}_d$ 이다.

이때의 A, B, C, D행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} A(\bar{f}_d) &= \frac{\partial f}{\partial x} \bar{x}(f_d), \bar{u}(f_d), \bar{f}_d \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2(mg + f_d)}{mz_0} & 0 & \sqrt{\frac{c(mg + f_d)}{mz_0}} \\ 0 & \sqrt{\frac{4(mg + f_d)}{c}} & -\frac{2Rz_0}{c} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} B^T &= \frac{\partial f}{\partial x} \bar{x}(f_d), \bar{u}(f_d), \bar{f}_d \\ &= [0 \ 0 \ \frac{2z_0}{c}] \end{aligned} \quad (15)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} D^T &= \frac{\partial f}{\partial x} \bar{x}(f_d), \bar{u}(f_d), \bar{f}_d \\ &= [0 \ \frac{1}{m} \ 0] \end{aligned} \quad (17)$$

세 번째 단계는 제어법칙 $u(t)$ 를 계산하는 과정으로서 Rugh의 방식[12] 및 식 (11)에 의해 식 (17)로 계산된다.

$$u(t) = K_1^T(\hat{f}_d(t))[x(t) - \bar{x}(\hat{f}_d(t))] + \bar{u}(\hat{f}_d(t)) \quad (18)$$

계획변수를 포함하는 외란신호는 식 (18)을 이용하여 표현하였다.

$$\hat{f}_d(t) = m_0 \ddot{z}(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i(t)}{z(t)} \right)^2 - m_0 g \quad (19)$$

퍼지제어기는 평활함수 $K(\cdot)$ 의 입출력 데이터를 클러스터링하여 모델링하였으며, 출력으로부터 상태변수를 추정하고 계획변수의 변화에 대해 상태변수가 안정하도록 하기 위해 연속 칼만필터 $H(\cdot)$ 를 사용하였다.

3. 클러스터링에 기초한 퍼지시스템 모델링

3.1 퍼지시스템 모델링

Takagi와 Sugeno가 제안한 혼합 퍼지추론 방법에서 i 번째 퍼지규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{ni} \text{ THEN } y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$$

여기에서 x_1, x_2, \dots, x_n 은 n 개의 입력을, A_{ji} 는 퍼지 입력 변수를, y_i 는 i 번째 규칙의 출력을 나타내며 $f_i(\cdot)$ 는 입력 변수들과 상수들의 선형 함수로서 식 (20)과 (21)처럼 표현된다.

$$A_{ji}(x_j) = \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x_j - c_{ji}}{w_{ji}}\right)^2\right) \quad (20)$$

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = a_{0i} + a_{1i}x_1 + \dots + a_{ni}x_n \quad (21)$$

이때 c_{ji} 는 멤버십 함수의 중심을, w_{ji} 는 멤버십 함수의 폭을 나타내는 변수이며 $a_{0i}, a_{1i}, \dots, a_{ni}$ 는 데이터에 의해 결정되어야 하는 상수이다.

n 개의 입력과 M 개의 규칙, 그리고 max-product 추론 방법을 사용하였을 때, i 번째 전건부 규칙의 정규화한 적합도 μ_i 는 식(22)과 같이 표현되며 퍼지시스템의 최종 추론값 y^* 는 식 (23)과 같이 표현된다.

$$\mu_i = \frac{\prod_{j=1}^n A_{ji}(x_j)}{\sum_{k=1}^M \left(\prod_{j=1}^n A_{jk}(x_j) \right)} \quad (22)$$

$$y^* = \sum_{i=1}^M \mu_i \cdot f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (23)$$

3.2 클러스터링 알고리즘

퍼지규칙 생성 방법인 데이터 클러스터링 알고리즘은 Mountain 클러스터링 방법의 변형된 형태인 Subtractive 클러스터링 알고리즘을 사용하였다.

Subtractive 클러스터링 알고리즘은 데이터간의 거리의 함수로 주어지는 포텐셜 값이 최대인 점을 첫번째 클러스터 중심으로 선정하고, 첫번째 클러스터 중심의 영향을 제거한 상태에서 최대 포텐셜 값을 갖는 데이터가 다음 클러스터 중심이 된다. 입력이 n차원이고 출력이 1차원 공간을 이루고 있는 (n+1)차원 입출력 공간상에서 N개의 데이터 {X₁, X₂, X₃, ..., X_N}가 주어졌을 때 데이터 클러스터링은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

첫째, 주어진 데이터를 [0, 1]로 정규화 한다.

둘째, 데이터 간의 거리를 구한다. i번째 데이터에서 각 데이터 간의 거리는 식 (24)와 같이 함수 P로 표현되며 P_i를 포텐셜 값이라 한다.

$$P_i = \sum_{j=1}^N \exp(-a \cdot \|X_i - X_j\|^2) \quad (24)$$

여기에서 a는 4/r_a²로 주어지며, r_a는 양의 상수로서 r_a밖의 데이터는 포텐셜값에 영향을 거의 주지 못한다.

셋째, 첫번째 클러스터 중심을 구한다. N개의 포텐셜 값 중 가장 높은 값을 P₁^{*}라 놓고 이 때의 데이터가 첫 번째 클러스터 중심 X₁^{*}이 된다.

넷째, 첫번째 클러스터 중심의 영향을 제거한다. 첫번째 클러스터 중심 근처에는 많은 데이터가 존재하기 때문에 그 영향을 제거하지 않으면, 두 번째 클러스터 중심 또한 첫번째 클러스터 중심 근처에 존재할 가능성이 높기 때문에 식 (25)와 같이 첫번째 클러스터 중심의 영향을 제거한 포텐셜 값을 구한다.

$$P_i' = P_i - P_1^* \cdot \exp(-\beta \cdot \|X_i - X_1^*\|^2) \quad (25)$$

여기에서 β는 4/r_b²로 주어지며, r_b는 양의 상수로서 r_a보다 큰 값을 취해 클러스터 중심 근처에 다음 클러스터 중심이 나타나지 않도록 한다.

다섯째, 두 번째 클러스터 중심을 구한다. 첫번째 클러스터 중심의 영향을 제거한 N개의 포텐셜 값 P_i' 중 가장 높은 값을 P₂^{*}라 놓고 이 때의 데이터가 두 번째 클러스터 중심 X₂^{*}가 된다. k번째 클러스터 중심 X_k^{*}가 구해졌을 때, k번째 클러스터 중심의 영향을 제거한 포텐셜 값은 식 (26)으로 표현할 수 있으며 (k+1)번째 클러스터 중심을 구하게 된다.

$$P_i' = P_i - P_k^* \cdot \exp(-\beta \cdot \|X_i - X_k^*\|^2) \quad (26)$$

여섯째, d_{\min} 을 $(X_1^*, X_2^*, \dots, X_{k-1}^*)$ 과 X_k^* 의 거리 중에서 가장 짧은 거리로 정의하였을 때, $P_k^* \geq \bar{\varepsilon} \cdot P_1^*$ 이면 클러스터 중심으로 채택하고 위의 과정을 반복한다. $P_k^* \geq \underline{\varepsilon} \cdot P_1^*$ 이고 $\frac{d_{\min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{P_1^*} \geq 1$ 이면 클러스터 중심으로 채택하고, $P_k^* > \underline{\varepsilon} \cdot P_1^*$ 이고 $\frac{d_{\min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{P_1^*} < 1$ 이면 그때의 X_k^* 를 0으로 하고 다음으로 높은 포텐셜 값을 선정한 후, d_{\min} 을 구하여 $\frac{d_{\min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{P_1^*} \geq 1$ 이면 새로운 클러스터 중심으로 채택한다. $P_k^* < \underline{\varepsilon} \cdot P_1^*$ 이면 위의 반복을 중단한다. 이때 $\bar{\varepsilon}$ 와 $\underline{\varepsilon}$ 은 클러스터 중심 선정의 상하 기준이 되는 상수이다.

$$d_{\min}(k) = \min_i \{ \sqrt{(\|X_i^* - X_k^*\|^2)} \} \quad i=1, 2, \dots, k-1 \quad (27)$$

위와 같은 방법으로 구한 $(n+1)$ 차원인 M개의 클러스터 중심 $\{X_1^*, X_2^*, \dots, X_M^*\}$ 을 입력공간으로 나누었을 때 X_i^* 의 입력공간은 n차원의 x_i^* 로, 출력공간은 1차원의 z_i^* 이 된다.

여기에서 x_i^* 는 퍼지규칙이 되며 퍼지 규칙에 의한 적합도 μ_i 및 최종 출력값 y^* 를 구하기 위해서 z_i^* 를 $G_i \cdot x + h_i$ 로 나누어 식 (21) 형태를 만든 후 선형최소사승법(linear least-squares estimation) 알고리즘을 이용하여 변수 G_i , h_i 값을 구한다. 적합도 μ_i 는 식 (28)을 통해서 그리고 최종 출력값 y^* 은 식 (29)를 통해 구해지며 이는 식 (22), (23)과 동일한 결과를 얻게 된다.

$$\mu_i = \exp(-a \cdot \|x - x_i^*\|^2) \quad (28)$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_i \cdot (G_i \cdot x + h_i)}{\sum_{i=1}^M \mu_i} \quad (29)$$

여기에서 x 는 입력 벡터를 나타내며 a 는 식 (24)에서와 동일한 값이다.

4. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 3개의 대차로 구성된 차량으로서 각 대차에는 8개의 전자석이 탑재된 자기 부상철도 차량모델(공차 시 22 [ton], 만차 시 28 [ton])을 사용하여 제안한 부상제어기의 성능을 분석하였다. 선형 근사 모델의 모델링에 사용된 기준 공극은 10 [mm]이고, 차량의 기준 무게는 1,041.7 [kg] (=26 [ton] / 24) 을 사용하였으며, 기준 공극의 5% 임의의 측정 잡음을 고려하였다.

페루프 시스템은 초기 공극 17[mm]에서 기준 공극 10 [mm]에 도달하도록 하였으며, 0.5 [sec]에 그림 3으로 주어지는 단위계단 외란입력을 인가하여 외란에 대한 응답특성을 살펴보았다.

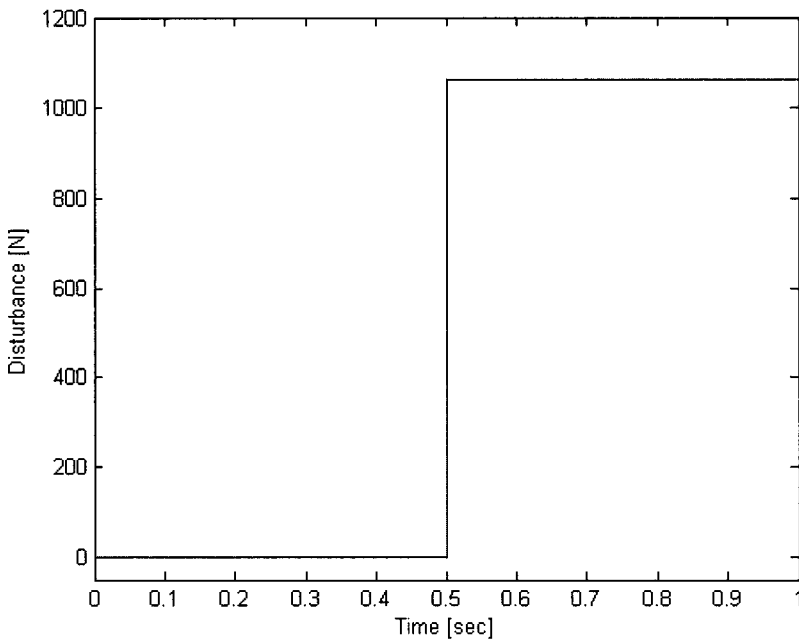


그림 3. 단위계단 외란입력

그림 4는 기준점에서의 퍼지제어기(FLC; Fuzzy Logic Controller)를 갖는 비선형시스템의 응답을, 그림 5에서는 제어입력의 변화를 각각 나타내었다.

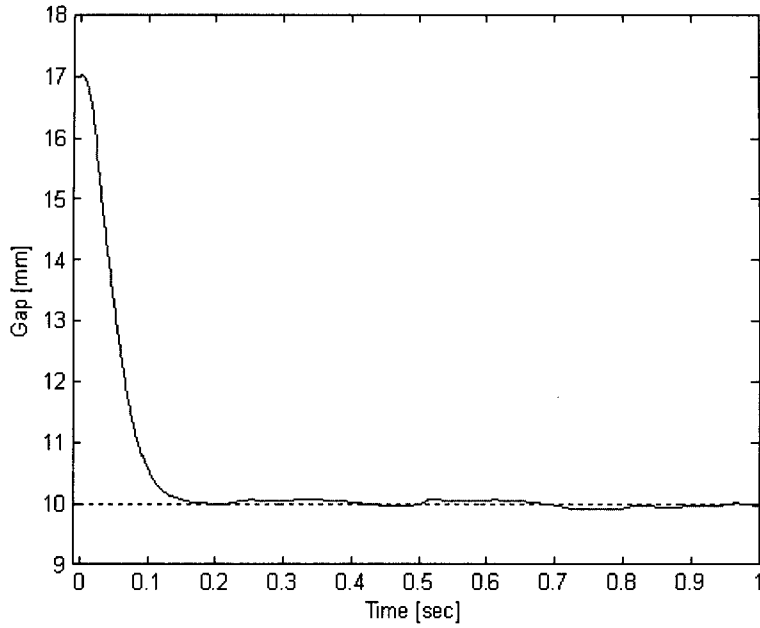


그림 4. 기준점에서의 비선형시스템의 응답

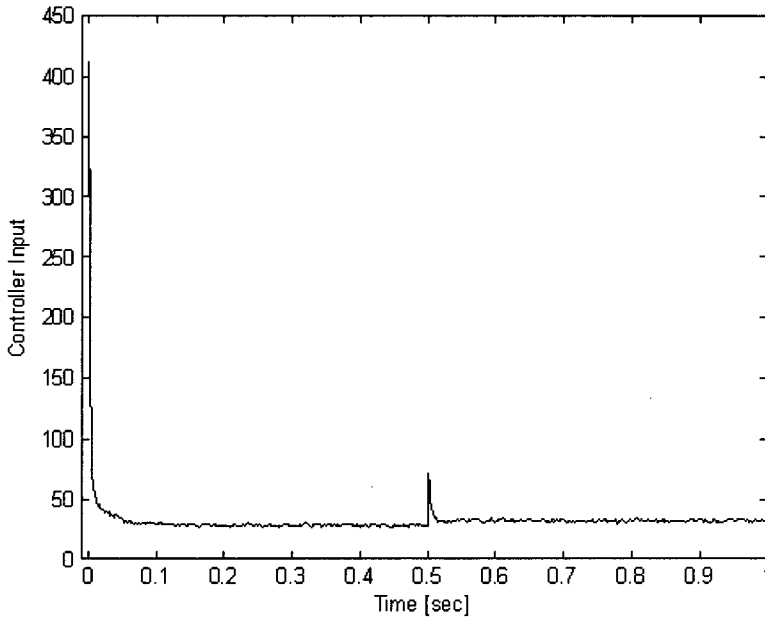


그림 5. 기준점에서의 제어입력

그림 6과 그림 7에는 자기부상 차량의 무게 변화(기준점, 공차 시, 만차 시)에 따른 시간응답 및 제어 입력을 비교하여 나타내었으며, RMS(Root Mean Square)값을 산술적으로 비교하여 표1에 나타내었다.

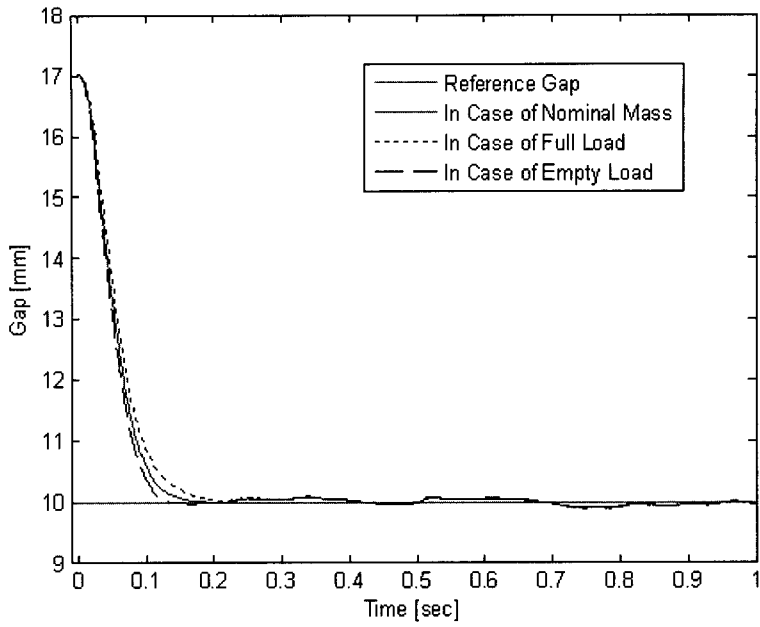


그림 6. 차량의 무게 변화에 따른 비선형시스템의 응답 비교

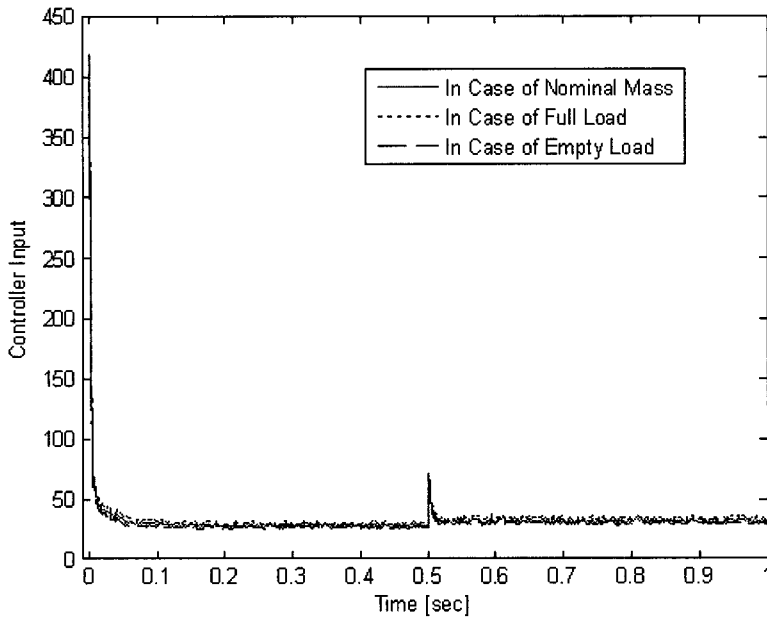


그림 7. 차량의 무게 변화에 따른 제어입력 비교

표 1: 응답의 RMS에 의한 성능비교

	LQG Controller			Fuzzy Logic Controller		
	nominal	Empty load	Full load	nominal	Empty load	Full load
RMS for response	1,3613	1,3168	1,4056	1,3643	1,4167	1,3252
RMS for control input	35,45	37,81	33,29	35,71	37,89	33,71

5. 결론

상전도 자기부상시스템의 부상제어에서 주요한 문제 중의 하나는 선형전동기와 레일의 불규칙성으로 인해 발생하는 외란과 유동적인 승객변화에 의한 차량 무게 변화에 대해 강인한 제어를 설계하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 요구조건을 만족시키도록 이득계획 제어기법(LQG)을 이용하여 제어를 설계하였으며, 복잡한 제어를 보다 간단한 형태의 제어기인 퍼지제어를 설계하기 위해 LQG로부터 수집된 데이터를 클러스터링함으로써 퍼지제어기(FLC)를 모델링하였다. 모델링된 퍼지제어기의 성능을 차량의 무게 변화에 따른 시간응답을 통해 살펴보았으며, LQG 제어기와 RMS값을 비교함으로써 제안된 퍼지제어기의 모델링 성능이 비교적 우수함을 확인하였다.

참고문헌

1. Sinha, P. K.: Electromagnetic suspension: dynamics and control, Peter Peregrinus Ltd, Lon-don, 1997.
2. Jayawant, B. V.: Electromagnetic suspension and levitation, Proceedings of the IEE, Vol. 129, Pt. A, No. 8, pp. 549-581, 1992.
3. Bohn, G. and Steinmetz, G.: The electromagnetic levitation and guidance technology of the TRANSRAPID test facility emsland, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-20, No. 5, pp. 1666-1671, 1984.
4. Glatzel, K., Khurdok G. and Rogg, D.: The development of the magnetically suspended transportation system in the federal republic of germany, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-29, No. 1, pp. 3-16, 1980.
5. Meins, J., Miller, L. and Mayer, W. J.: The high speed MAGLEV transportation system TRANSRAPID, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-24, No. 2, pp. 808-811, 1988.
6. Moon, F. C.: Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation, John Wiley and Sons 1994.
7. M. Sugeno, Industrial Applications of Fuzzy Control, Elsevier Science Pub., 1985.

- 8 E. H. Mamdani, and S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," Int. J. of Man Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp.1-13, 1975.
- 9 Chiu S.: Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 3, 1994.
10. Athans, M.: The role and use of the stochastic linear-quadratic-gaussian problem in control system design, IEEE Trans. on AC, Vol. AC16. No. 6, 1971.
11. Athans, M., A tutorial on the LQG/LTR Method, Proc. ACC. 1986.
12. Rugh, W. J.: Analytical framework for gain scheduling, IEEE control systems Vol. 11, No. 1, pp. 79-84, 1991.

