

고속 팬터그래프의 새로운 동적 모형 및 외란관측기를 이용한 제어기 설계

論 文

56-12-29

Modelling of High-Speed Pantograph and Controller Design Using Disturbance Observer

趙南熏[†] · 李鋼泓^{*}
(Nam-Hoon Jo · Kang-Hyun Lee)

Abstract - The pantograph-catenary system is one of important components for high-speed rail system that are powered electrically. Electrical power is delivered from a catenary structure to the train via a pantograph and thus it is very important to regulate the contact force between catenary and pantograph. Although a lot of research results for active pantograph have been reported, most of them have made an unrealistic assumption that the catenary displacement is constant with respect to the time. In this paper, we present a new pantograph model that regards the catenary displacement as an unknown disturbance input. Moreover, a disturbance observer based controller is proposed to remove the effect of disturbance, i.e., the catenary displacement variation. The computer simulation result shows that the substantial improvement in regulating the contact force can be achieved by the proposed controller.

Key Words : Pantograph, Catenary System, Disturbance Observer, Q Filter

1. 서 론

환경 친화적이며 안전하고 편안한 대중교통수단으로서 전기철도는 교통문제 해결의 대안으로 제시되어 1970년대 이후 대표적인 교통수단이 되었고 현재 고속 철도시대에 이르렀다. 하지만 전기철도의 고속화는 이선현상 및 공력 소음 증가 등 여러 가지 문제점을 야기했다. 그림 1은 실제 전차가 운행 중에 팬터그래프(pantograph)가 가선(catenary)의 전력선과 접촉하는 모습을 보여주고 있다. 전차의 속도가 빨라질수록 가선의 변위 변동 범위가 증가하게 되고 이것은 팬터그래프와 가선사이에서 이선현상을 발생하게 한다. 이선현상이란 전차의 팬터그래프와 가선 사이에서 수직 진동이 발생하여 팬터그래프의 집전판(current collector)이 가선으로부터 일시적으로 분리되는 것을 말한다. 이선현상이 발생하면 전차에 연속적인 전력공급이 불가능하여 안전주행에 장애가 되며, 아크방전(arcing)에 의한 집전판의 마모증대 및 통신유도장해를 일으키게 된다. 따라서 전차의 안전한 주행을 위해 연속적인 전력을 공급하기 위해서는 팬터그래프의 안정한 집전성능, 즉, 가선계와 팬터그래프의 접촉력(contact force)을 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 일정한 접촉력을 유지하기 위해서는 고속에 적합한 가선으로 대체하거나 팬터그래프에 액추레이터(actuator)를 설치하여 팬터그래프의 헤드(head)가 접촉선(contact

wire)으로부터 이선하지 않도록 해주어야 한다. 이러한 집전 기술은 전기철도분야의 고유기술로서 전기, 기계, 재료기술이 복합적으로 결합된 기술이며 국내는 물론 국외에도 관련 자료가 부족한 실정인여서 관련 연구 개발이 시급하다고 할 수 있다.

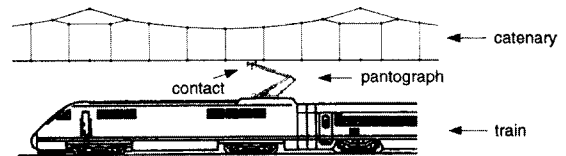


그림 1 고속 철도 시스템의 가선과 팬터그래프
Fig 1 Catenary and pantograph of high-speed train

본 논문에서는 고속 전차에 안정적인 전력공급을 위해 일정한 접촉력을 유지할 수 있는 새로운 능동 팬터그래프 시스템을 제시하고자 한다. 최근 10 여년간, 팬터그래프에 일정한 접촉력을 유지하기 위한 능동 팬터그래프에 대한 연구가 많은 연구자에 의하여 수행되었다 [1]-[8]. 하지만, 가선의 높이를 측정하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문에, 기존의 연구결과는 가선의 높이가 일정하다는 가정을 필요로 하였다. 이에 대해서, 본 논문의 핵심은 가선의 높이를 외란으로 간주한 새로운 가선-팬터그래프 모델을 제시하고, 이 모델을 기초로 접촉력의 변동을 최소로 하는 제어기 설계기법을 제시하는 것이다. 즉, 본 논문에서는 새로 제시된 가선-팬터그래프 모델에 기반한 능동 제어기를 설계한 후, 외란 관측기를 추가하여 기존의 연구결과보다 접촉력의 변

[†] 교신저자, 正會員 : 崇實大 工大 電氣工學部 助教授 · 工博
E-mail : nhjo@ssu.ac.kr

^{*} 正會員 : 효성중공업
接受日字 : 2007年 9月 3日
最終完了 : 2007年 10月 16日

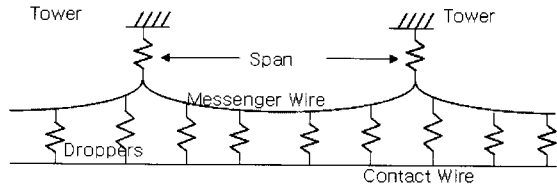


그림 2 가선계
Fig 2 Catenary system

동을 더 많이 줄일 수 있다는 것을 보이고자 한다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 제어기법을 실용화시킬 경우, 기존의 고속 전철 시스템보다 더욱 안정된 집전성능을 가지도록 할 수 있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가선계와 팬터그래프를 보다 자세히 소개하고, 팬터그래프-가선계의 문제점을 알아본다. 3장에서는 기존의 팬터그래프 동적모델에 대해서 살펴보고, 이들의 문제점을 해결하기 위하여 새로운 팬터그래프 모델을 제시한다. 새로운 팬터그래프 모델은 가선의 변위를 외란으로 규정하였으며, 이러한 외란의 효과를 차단하기 위해서 4장에서는 외란 관측기(DOB)를 소개한다. 5장에서는 제시된 외란관측기 제어기의 성능을 검증하기 위하여 기존의 수동 팬터그래프, 능동 팬터그래프와의 성능을 비교하였다. 6장에서는 도출된 연구결과에 대한 결론을 제시하고 향후 연구방향을 논의한다.

2. 가선계와 팬터그래프

2.1.1 가선계(Catenary system)

가선계는 그림 2와 같이 보통 조가선(messenger wire or support wire)과 접촉선(contact wire)으로 구성된다. 접촉선은 실제 전차가 운행하기 위해 필요한 전력을 팬터그래프에 공급해주므로 전력선(power line)이라고도 한다. 또한, 조가선과 접촉선 사이의 수직 연결선을 드로퍼(dropper)라고 하는데, 접촉선이 가능한 수평이 되도록 조정하는 역할을 한다. 고속 철도 시스템에는 단순형(simple type), 스티치형(stitch type), 복합형(compound type) 등의 가선이 주로 사용된다 [2],[3]. 일반적으로 복합형은 단순형보다 낮은 강성(stiffness)을 갖고 있어 고속 철도 시스템에 더 적합하지만, 건설 비용이 비싸기 때문에 보통 단순형이 많이 사용된다.

2.1.2 팬터그래프

팬터그래프는 접촉선으로부터 전류를 흡수하여 전차가 고속으로 운행할 수 있도록 전력을 공급하는 장치이다. 그림 3은 고속 전철에 주로 사용되는 싱글 암 팬터그래프(single arm pantograph)를 나타낸다. 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼, 팬터그래프는 크게 팬 헤드(panhead), 플런저(plunger), 프레임(frame)으로 구성된다. 팬헤드는 부드러운 스프링을 가지는 두 개의 집진 막대기를 가지고 있으며 프레임은 일반적으로 하부암(lower arm), 상부암(upper arm)으로 나눌 수 있다. 하부암과 상부암으로 구분되는 프레임은 수직상에

서 자유롭게 움직일 수 있어 전차 지붕위에서 선의 높이에 상관없이 팬터그래프의 헤드가 접촉선으로부터 일정한 접촉력을 가질 수 있도록 한다. 플런저는 피스톤 등과 같이 유체를 압축하거나 내보내기 위하여 왕복운동을 하는 기계부분을 말한다.

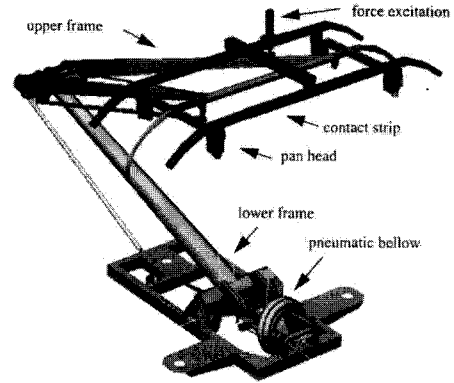


그림 3 싱글 암 팬터그래프 모양 [2]
Fig 3 Single arm pantograph [2]

팬터그래프의 신뢰성은 고속 주행에 필수 조건이며 전력선으로부터 어떠한 요소에도 방해받지 않고 꾸준히 전기를 공급받기 위해서는 팬터그래프의 빠른 반응 능력이 필요하다. 현재 우리나라뿐만 아니라 여러 나라들이 자국의 실정에 맞는 팬터그래프를 개발해 사용 중에 있다.

2.1.3 팬터그래프-가선계의 문제점

열차가 주행함에 따라, 철탑주위에서 팬터그래프는 빠르게 아래로 힘을 받게 되고 접촉력의 감소 현상이 나타난다. 또한 전차의 속도가 점점 높아지면 접촉선과 팬터그래프 사이에서 원치 않는 진동이 발생하게 되고 가선과 팬터그래프가 분리되어 전력 손실과 함께 아크현상이 발생된다. 이와 같이 이선현상이 발생되어 전차에 안정적인 전력공급이 어려워지면 고속 철도 시스템에 많은 문제를 야기할 수 있다.

따라서, 이선현상을 방지하기 위해서는 가선과 팬터그래프 사이의 접촉력을 고르게 유지하는 것이 필요한데, 고속에서는 접촉선과 팬터그래프 사이의 진동 때문에 쉽지 않은 문제이다. 보통 200km/h를 넘어가면 고속이라 할 수 있는데, 프랑스 TGV의 평균시속은 360km/h이며 우리나라의 KTX는 최고 운전속도가 350km/h 정도이다.

만약 접촉력이 0이하로 내려가면 이는 이선현상을 의미하며, 불꽃으로 인한 전자기적인 외란이 발생하게 된다. 반대로, 만약 접촉력이 너무 커지면 접촉선의 업리프트(uplift)가 허용한계를 초과할 수 있어 접촉선을 상하게 할 수 있으며, 접촉선과 집진 막대기의 마모가 접촉력에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 접촉선의 손상을 방지하기 위해서는 접촉력은 너무 크지 않아야 하며, 반대로 이선현상과 아크현상을 방지하기 위해서는 접촉력이 적절한 값 이상으로 커야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 팬터그래프 동적모델

3.1 기존의 팬터그래프 모델

최초의 팬터그래프-가선계 모델은 O'Conor에 의해 제안되었으며, 그림 4와 같은 2자유도 모델을 사용하였다 [1].

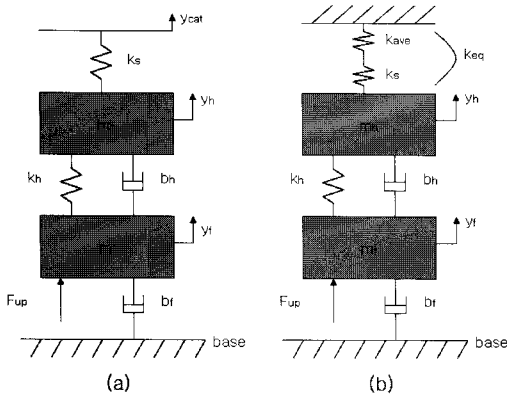


그림 4 O'Conor가 제시한 팬터그래프 모델
Fig 4 Pantograph model proposed by O'Conor

그림 4 (a)에서 m_h 는 팬터그래프 헤드의 질량, m_f 는 팬터그래프 프레임의 질량을 나타낸다. 또한, k_s 는 팬터그래프의 팬 헤드와 가선계 사이의 강성(stiffness), k_h 는 헤드와 프레임 사이의 강성, b_h 는 헤드와 프레임 사이의 댐핑(damping), b_f 는 프레임과 베이스 사이의 댐핑을 나타내며, F_{up} 은 업리프트(uplift) 힘을 의미한다. 업리프트 힘은 프레임에 장착된 액츄에이터에 의해 제공되는데, 일반적으로 유압 실린더가 사용된다. 또한 y_h 는 팬터그래프 헤드의 변위, y_{cat} 는 가선의 변위, y_f 는 프레임의 변위를 의미한다.

한편, 가선의 변위 y_{cat} 은 실제로 측정할 수 없기 때문에 그림 4 (a)를 이용하여 모델을 유도하는 것이 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, O'Conor는 그림 4 (b)와 같이 가선의 변위는 일정하다고 가정하고, 평균 가선 강성 k_{ave} 를 도입하여 가선과 팬터그래프 헤드 사이에 작용하는 힘을 $F = -k_{ave} y_h$ 로 가정하였다. 이러한 가정하에, O'Conor는 팬터그래프 동적 모델로 다음을 제시하였다.

$$\begin{aligned} m_h \ddot{y}_h + b_h (\dot{y}_h - \dot{y}_f) + k_h (y_h - y_f) + k_{ave} y_h &= 0 \quad (1) \\ m_f \ddot{y}_f + b_f (\dot{y}_f - \dot{y}_h) + b_f y_f + k_h (y_f - y_h) &= F_{up} \end{aligned}$$

O'Conor의 모델은 최초의 팬터그래프 모델로서 LQR기법을 사용한 능동 팬터그래프가 수동 팬터그래프에 비해 접촉력의 변동을 감소시킬 수 있음을 보이는데 사용되기도 하였다 [1].

한편, O'Conor의 모델을 좀 더 개선한 모델이 Wu에 의해 제시되었다 [3]. Wu는 팬터그래프의 팬 헤드와 가선계 사이의 강성 (그림 4 (b)의 k_{eq})을 시간에 따라 변하는 값 $K(t)$ 으로 가정하였다. 그림 5는 하나의 span이 45m일 때의 강성을 나타내는데, 이러한 시변 강성(stiffness)을 나타내기 위하여 Wu는 다음을 가정하였다.

$$K(t) = K_0 \left(1 + \alpha \cos \frac{2\pi V}{L} t \right)$$

여기서 $K_0 = \frac{1}{2}(K_{max} + K_{min})$ 이고 $\alpha = \frac{K_{max} - K_{min}}{K_{max} + K_{min}}$ 이며, K_{max} 와 K_{min} 는 각각 한 span에서 접촉선 강성의 최대값과 최소값을 의미한다. 결과적으로 가선과 팬터그래프 사이의 접촉력을 F_c 로 나타내면, $F_c = -K(t)y_h$ 이 되고, 전체 시스템의 동적 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_h \ddot{y}_h + b_h (\dot{y}_h - \dot{y}_f) + k_h (y_h - y_f) + K(t) y_h &= 0 \\ m_f \ddot{y}_f + b_f (\dot{y}_f - \dot{y}_h) + b_f y_f + k_h (y_f - y_h) &= F_{up} \end{aligned}$$

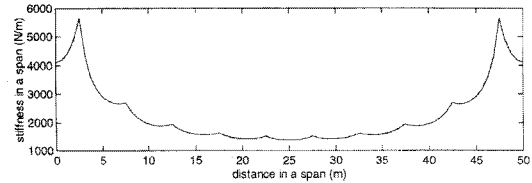


그림 5 한 span안에서 접촉선의 강성의 변화
Fig 5 Stiffness of contact wire in a span

O'Conor나 Wu는 위에서 제시한 모델에 근거하여 수동 팬터그래프와 능동 팬터그래프를 비교하였으며, 능동 팬터그래프가 수동 팬터그래프보다 접촉력 변동을 작게 할 수 있다는 것을 보고하였다. 하지만, O'Conor나 Wu의 모델은 측정할 수 없는 가선의 변위 y_{cat} 를 완벽히 고려하지 못했기 때문에 그 정확성에는 한계가 있다.

3.2 본 논문에서 제안하는 새로운 모델

본 논문에서는 가선의 변위 y_{cat} 가 시간에 따라 변할 수 있는 특징을 갖는 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 가선의 변위를 O'Conor나 Wu의 모델처럼 고정된 값이 아니라, 시스템의 외란입력(disturbance input)으로 간주하였다.

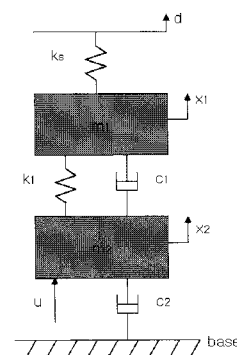


그림 6 본 논문에서 제안하는 팬터그래프 모델
Fig 6 The proposed pantograph model

그림 6은 본 논문에서 제안하는 팬터그래프 모델로서, x_1 은 팬터그래프 헤드의 변위, x_2 는 프레임의 변위를 나타내며, 가선의 높이는 시스템의 외란입력으로 간주하여 d 로 나타내었다. 또한, m_1 는 헤드 질량, m_2 는 프레임 질량, k_s 는

팬터그래프 헤드와 가선계 사이의 강성, k_1 는 프레임과 헤드 사이의 강성, k_2 는 프레임과 베이스 사이의 강성, c_1 는 헤드와 프레임사이의 댐핑, c_2 는 프레임과 베이스 사이의 댐핑을 나타낸다. 또한, 많은 팬터그래프가 베이스에 유압실린더를 설치하여 업리프트 힘을 제공하는데, u 는 이처럼 구동기에 의한 업리프트 힘을 나타낸다. 그림 6으로부터 새로운 모델의 운동방정식은 다음과 같고,

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_s(x_1 - d) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= u - k_1(x_2 - x_1) - c_1(x_2 - x_1) - c_2 \dot{x}_2 \end{aligned}$$

이를 정리하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= -\frac{k_1}{m_1}(x_1 - x_2) - \frac{c_1}{m_1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{k_s}{m_1}(x_1 - d) \\ \ddot{x}_2 &= \frac{u}{m_2} - \frac{k_1}{m_2}(x_2 - x_1) - \frac{c_1}{m_2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 팬터그래프 제어 목적은 팬터그래프와 가선계 사이의 접촉력을 고르게 유지하는 것이기 때문에, 이를 시스템 출력으로 정하는 것이 타당하다. 따라서, 시스템 출력은 그림 6으로부터 다음과 같다.

$$y = k_s(x_1 - d) \quad (3)$$

한편, 상태방정식을 얻기 위해서 $X = [x_1 \ \dot{x}_1 \ x_2 \ \dot{x}_2]^T$, $U = [u \ d]^T$ 를 정의하면, 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ y &= CX + DU \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 각각의 시스템 행렬은 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 + k_s}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} & -\frac{k_1}{m_2} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_s}{m_1} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [k_s \ 0 \ 0 \ 0], \quad D = [0 \ -k_s].$$

4. 외란 관측기

본 논문에서 제시한 팬터그래프 모델 (2), (3)에서는 가선의 변위를 외란으로 간주하였기 때문에, 외란에 매우 효과적으로 대처할 수 있는 제어기의 사용이 필요하다. 하지만, 전통적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차, 시스템의 시간에 따른 변화를 다루기 어렵다. 따라서 적응 제어, 최적제어와 같은 현대 제어 이론들을 적절히 도입할 필요가 생기지만, 이러한 이론들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있기 때문에, 저 가격으로 고급 제어사양을 만족하는 제어 시스템을 구현하기는 쉽지 않다. 이에 비해서 외란 관측기는 그 구조가 간단하고 일반적으로 외란 제거에 뛰어난 성능을 보이고 있음이 알려져 있다 [9], [10].

외란 관측기(Disturbance Observer; DOB)는 관측된 외란을 피드백에 의해서 효과적으로 보상해주는 특징을 갖고 있다. 그림 7은 외란 관측기에 기초한 제어 시스템 구조를 보여주고 있다.

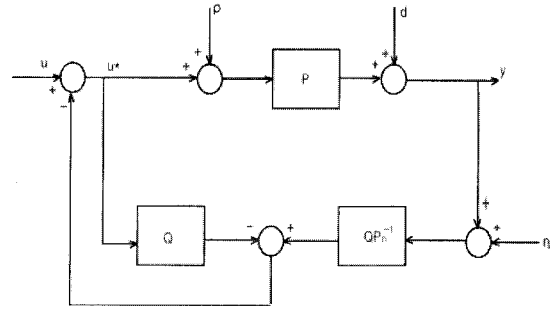


그림 7 외란 관측기 구조

Fig 7 The structure of disturbance observer

여기서 P 는 실제 플랜트, P_n 은 플랜트의 공칭 모델, Q 는 저역 통과 필터인데, 외란관측기 연구자들은 이를 Q 필터라고 부른다. 신호 u, ρ, d, η 는 각각 시스템에 인가되는 제어 입력, 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음을 나타내며 y 는 시스템의 출력을 나타낸다. 그림 7에서 전체 시스템의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$y(s) = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} u + \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} \rho + \frac{P_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d + \frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q} \eta \quad (5)$$

(5)식을 이용하면 외란관측기의 중요한 특징을 알 수 있다. 만약, $Q(s) \approx 1$ 이면, $\frac{y(s)}{u(s)} \approx P_n$, $\frac{y(s)}{\rho(s)} \approx 0$, $\frac{y(s)}{d(s)} \approx 0$,

$\frac{y(s)}{\eta(s)} \approx -1$ 이고, 따라서

$$y(s) \approx P_n u(s) + (-1)\eta(s) \quad (6)$$

를 얻을 수 있다. 반대로, $Q(s) \approx 0$ 이면 $\frac{y(s)}{u(s)} \approx P$,

$\frac{y(s)}{\rho(s)} \approx P$, $\frac{y(s)}{d(s)} \approx 1$, $\frac{y(s)}{\eta(s)} \approx 0$ 이기 때문에

$$y(s) \approx Pu(s) + P\rho(s) + d(s)$$

이다. 한편, Q 필터는 저역통과필터이기 때문에 $Q(s) \approx 1$ 인 저주파 영역은 저주파 영역이다. 또한, 일반적으로 측정잡음 η 는 고주파 잡음이기 때문에, 저주파 영역에서는 거의 0에 가깝다. 따라서, 저주파 영역에서는 (6)식을 다시 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$y(s) \approx P_n u(s)$$

위 식으로부터, 외란관측기를 사용하는 경우 1) 외란 d, ρ 가 시스템 출력에 전혀 영향을 주지 않으며, 2) 시스템 출력은 공칭모델 P_n 에 의해 결정되며, 불확실한 실제 플랜트 P 의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 본 논문에서 고려하는 팬터그래프 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 본 논문에서는 팬터그래프 제어를 위해서 외란관측기 기반 제어기를 사용할 것을 제안한다.

5. 모의실험

본 장에서는 모의실험을 통하여 외란관측기 기반 제어기

가 팬터그래프 제어에 우수한 성능을 가짐을 검증해 보도록 한다. 고속에서 전차가 운행시 가선의 변위는 그림 8과 같이 점선으로 나타난 모양으로 변하게 된다. 본 논문에서는 이러한 가선의 변위를 sin함수로 근사하여 시스템의 외란 d 로 간주하였으며, 가선의 최대 변동폭은 0.2m, 한 span당 거리는 65.5m로 가정하였다. 따라서, 전차의 속도를 v (m/sec)라고 하면 $d = 0.2 \left| \sin \left(\frac{\pi}{65.5/v} t \right) \right|$ (m)로 계산된다.

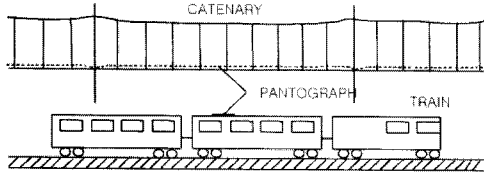


그림 8 가선의 변동
Fig 8 Variation of catenary

전술한 바와 같이 팬터그래프 제어 목적은 가선과 팬터그래프 사이의 접촉력을 일정한 값에 가깝게 유지하는 것이다. 본 논문에서는 이러한 기준입력을 90N으로 설정하여 모의실험을 수행하였다.

한편, 제안하는 제어기의 성능을 비교하기 위하여, 기존의 수동 팬터그래프, 기존의 능동 팬터그래프, 제안된 DOB 제어기 세 가지를 비교하도록 한다. 먼저, 참고문헌 [1]에서 사용한 파라미터 값, 즉 $m_1 = 9.1\text{kg}$, $m_2 = 17.2\text{kg}$, $k_s = 5.4\text{ kN/m}$, $k_1 = 7.0\text{kN/m}$, $c_1 = 130\text{Ns/m}$, $c_2 = 30\text{Ns/m}$ 을 사용하여 본 논문에서 제시한 모델 (2)의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{4485s + 2.415 \times 10^5}{s^4 + 23.59s^3 + 1795s^2 + 6862s + 2.415 \times 10^5} \quad (7)$$

시스템 (7)을 제어하기 위한 기존의 능동 팬터그래프로는 PI제어기 $1.23 \frac{(s+0.1)}{s}$ 를 선정하였는데, 이 제어기를 사용할 경우 정상상태오차는 0, 계단함수 입력에 대한 오버슈트는 23.1%인 것을 확인할 수 있다.

이제, 본 논문에서 제시한 DOB기반 제어기를 구성하기 위해서는 그림 7에서 표시된 $P_n(s)$ 와 $Q(s)$ 를 구하여야 한다. 본 논문에서는 팬터그래프의 불확실성은 고려하지 않기 때문에 $P_n(s)$ 는 (7)식과 동일하게 선정하였다. 또한, Q 필터는 저역통과 필터로서 $Q(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^3}$ 가 주로 사용되는데, 시정수 τ 의 값이 작을수록 외란제거 성능이 우수하다는 것이 알려져 있다[9]. 본 논문에서는 $\tau = 0.01$ 와 $\tau = 0.005$ 두 가지 경우를 고려하도록 한다.

5.1. 전차의 속도가 100km/h인 경우

전차의 속도가 100km/h인 경우 세 가지 제어기의 성능을 비교하여 보았다. 모의실험 결과를 그림 9, 그림10, 그림11에서 볼 수 있는데, 수동 팬터그래프나 기존 능동 팬터그래프에 비해서 제안한 DOB 제어기를 사용한 경우, 접촉력이 기준입력(90N)에 훨씬 가깝게 유지되고 있음을 알 수 있다.

또한, Q 필터의 시정수가 $\tau = 0.005$ 인 경우 ($\tau = 0.01$ 인 경우와 비교할 때) 접촉력 변동은 작아지지만 제어입력이 훨씬 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서, DOB 제어기 사용시

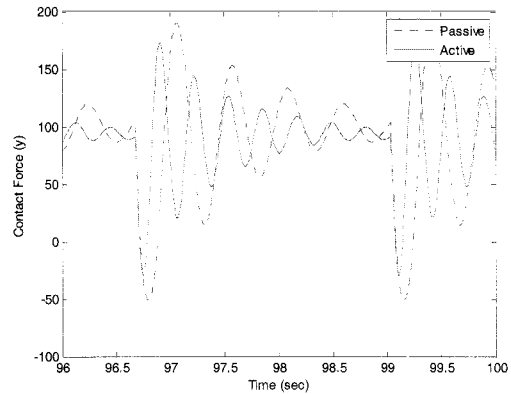


그림 9 수동/능동 팬터그래프 모의실험 결과 (100km): 접촉력
Fig 9 Simulation results of passive/active pantograph (100km): contact force

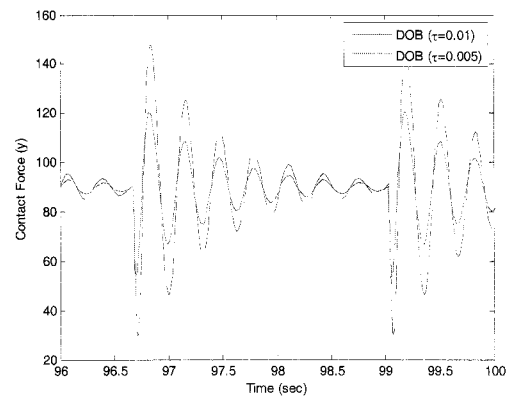


그림 10 DOB 팬터그래프 모의실험 결과 (100km): 접촉력
Fig 10 Simulation results of DOB pantograph (100km): contact force

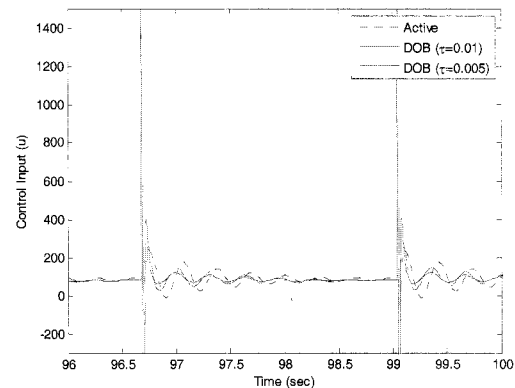


그림 11 모의실험 결과 (100km): 제어입력
Fig 11 Simulation results (100km): control input

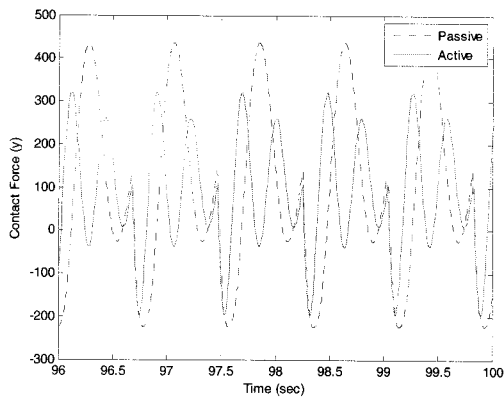


그림 12 수동/능동 팬터그래프 모의실험 결과 (300km): 접촉력

Fig 12 Simulation results of passive/active pantograph (300km): contact force

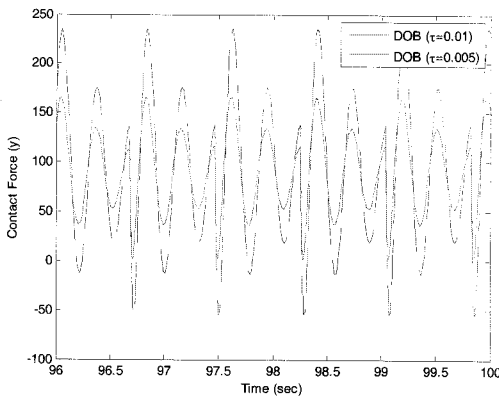


그림 13 DOB 팬터그래프 모의실험 결과 (300km): 접촉력

Fig 13 Simulation results of DOB pantograph (300km): contact force

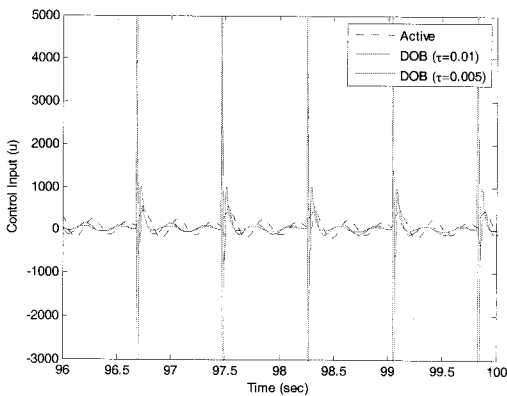


그림 14 모의실험 결과 (300km): 제어입력

Fig 14 Simulation results (300km): control input

시정수 τ 가 커질수록 접촉력 변동은 작아지지만, 필요로 하는 제어입력은 커진다는 것을 알 수 있다.

5.2. 전차의 속도가 300km/h인 경우

고속 전차의 경우 속도가 300km/h이상으로 운행되는 경우가 대부분이다. 이러한 상황을 모의실험하기 위하여 전차의 속도가 300km/h인 경우 세 가지 제어기의 성능을 비교하여 보았으며, 그 결과를 그림 12, 그림13, 그림14에서 볼 수 있다.

5.3. 모의실험 결과 토의

표 1은 속도가 100km/h 와 300km/h인 경우 모두의 모의 실험 결과를 정리한 것이다. 실제 상황에서 접촉력이 음의 값을 가질 수는 없기 때문에, 표 1에서 음의 접촉력이 의미하는 것은 팬터그래프와 가선사이에 이선현상이 발생했음을 의미한다.

표 1 접촉력 비교

Table 1 Comparison of contact force

전차 속도 (km/h)	접촉력 (N)					
	수동 팬터그래프		능동 팬터그래프		DOB ($\tau=0.005$)	
	최소	최대	최소	최대	최소	최대
100	-50	180	-30	160	53	121
300	-210	420	-200	310	3	165

표 1로부터 수동 팬터그래프와 능동 팬터그래프를 비교해 보면 수동 팬터그래프에 비해 능동 팬터그래프의 접촉력의 변동이 줄어들었지만 만족스럽지는 않음을 알 수 있다. 이는 가선의 변위, 즉 외란입력에 대한 영향을 고려하지 않고 제어기를 설계했기 때문이다. 하지만 제안된 DOB 기반 팬터그래프에서는 접촉력의 변동이 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 외란입력에 대한 영향이 외란 관측기에 의해 대부분 제거되었기 때문이다.

6. 결 론

본 논문에서는 가선계와 팬터그래프사이의 접촉력 변동을 최소화하기 위한 새로운 동적 모델을 제시하고 이 모델을 기초로 DOB 제어기를 사용할 것을 제안하였다. 고속으로 운행되는 열차에 안정적인 전력공급을 위해서나, 접촉선과 집전막대기의 손상을 방지하기 위해서는 일정한 접촉력 유지가 반드시 필요하다. 기존의 논문에서는 가선의 변위를 제대로 고려하지 못한 반면에, 본 논문에서 제시한 새로운 모델은 가선의 변위를 미지의 외란으로 간주하여 보다 정확한 모델을 제시하였다. 또한, 제시된 모델에 기초하여, 가선의 변위 변동 영향을 최소화하기 위하여 외란관측기 기반 제어기를 사용할 것을 제안하였다. 모의실험 결과, 제안된 제어기의 성능이 수동 팬터그래프 및 기존의 능동 팬터그래프에 비해서 매우 우수하다는 것을 입증하였다. 향후 연구 분야로는 보다 최적의 Q필터를 설계하여 접촉력의 변동을 줄이고 좋은 성능을 낼 수 있는 외란 관측기를 설계하는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한, 모

의실험결과, 제어 입력의 크기와 변화율이 상당히 큰데, 이를 해결하기 위한 연구도 병행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] D. N. O'Connor, S. D. Eppinger, W. P. Seering, and D. N. Wormley, "Active Control of High-Speed Pantograph," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 119, pp. 1-4, Mar., 1997

[2] G. Poetsch, J. Evans, R. Meisinger, W. Kortum, W. Baldauf, A. Veitl, and J. Wallaschek, "Pantograph /Catenary Dynamics and Control," *Vehicle System Dynamics*, vol. 28, pp. 159-195, 1997

[3] T. X. Wu and M. J. Brennan, "Basic analytical study of pantograph-catenary system dynamics," *Vehicle System Dynamics*, vol. 30, pp. 443-456, 1998

[4] Teruo Kobayasi, Yoshihiro Fujihasi, Tetsuo Tsuburaya, Jyun-Ihi Satoh, Yasu Oura, and Yasukazu Fujii, "Current Collecting Performance of Overhead Contact Line-Pantograph System at 425 km/h," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 124, no. 3, 1998

[5] Aldo Balestrino, Ottorino Bruno, Alberto Landi, and Luca Sani, "Innovative Solutions for Overhead Catenary- Pantograph System: Wire Actuated Control and Observed Contact Force," *Vehicle System Dynamics*, vol. 33, pp. 69-89, 2000

[6] Arie Levant, Alessandro Pisano, and Elio Usai, "Output-Feedback Control of the Contact-Force in High-Speed-Train Pantographs," *proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Dec., 2001

[7] Tong Jin Park, Byung Jin Kim, and Young Yong Wang, "A Catenary System Analysis for Studing the Dynamic Characteristics of a High Speed Rail Pantograph," *KSME International Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 436-447, 2002

[8] Benedetto Allotta, Alessandro Pisano, Luca Pugi, and Elio Usai, "VSC of a servo-actuated ATR90-type pantograph," *proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Seville, Spain, Dec., 2005

[9] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim, and I.H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 48, pp. 315-320, 2003

[10] M.T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 2, pp. 63-76, 1997

저 자 소 개



조 남 훈 (趙南熏)

1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2001년 서울대 자동화시스템공동연구소 연구원. 2001년~2002년 삼성전자 DVS사업부 책임연구원. 2002년~현재 숭실대학교 전기공학부 조교수. 2006년~현재 대한전기학회 영문논문지 편집위원, 2004년~현재 제어자동화시스템공학회 국문논문지 편집위원
Tel : 02-820-0643
E-mail : nhjo@ssu.ac.kr, professor.jo@gmail.com
Homepage : http://ee.ssu.ac.kr/~nhjo



이 강 현 (李綱法)

2005년 숭실대 공대 전기제어시스템 공학부 졸업. 2007년, 숭실대 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 2004년 전기제어시스템공학부 최우수 장학생 선정. 2007년~현재 효성중공업 근무. 연구분야는 비선형 제어, 외란관측기