

퍼지제어를 이용한 현수형 케이블의 정장력 유지제어에 관한 연구

윤정환, 홍순일, 이요섭
부경대학교

A Study on Maintaining Control of Tension for a Catenary's Cable with using Fuzzy Control

Jung-hwan Yoon, Soon-ill Hong, Y.Sub Lee
Pukyong University
E-mail: sihong@mail.pknu.ac.kr

요약 - 현재 로프제조 공정, 전차 트롤리선 가설공사는 장력의 제어가 필요하지만 거의 수동으로 행하고 있는 실정이고 제품의 균질성과 생산성 향상을 위하여 제조 공정의 자동화가 필요하다. 따라서 전차의 트롤리선 가설공사는 드럼에 감긴 케이블을 풀어주고 양단의 장력을 일정히 유지하도록 조절할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 현수형 가선 케이블 가설장치의 자동화이다. 본 논문은 제어대상인 현수형 케이블의 수학적 모델을 작성하고 이것에 장력을 발생하는 교류서보 전동기의 수학적 모델을 구하였다.

제어 방법은 제어대상의 동적 모델이 비선형인 동시에 시변계이기 때문에 강인성이 있는 퍼지제어를 적용하여 시스템을 구성하고 시뮬레이션 실험에 의해 그 유효성을 평가하였다.

I. 현수형 케이블의 정장력 제어 시스템

1. 현수형 케이블의 운동방정식

일정한 질량을 가지고 가선 되는 케이블에 힘을 가해 당기면 공기중의 중력에 의해 현수곡선(Catenary curve)의 형상은 그림1과 같이 되고 운동방정식은 식(1)과 같다.

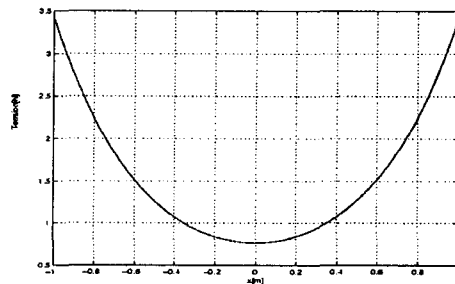


그림 1. 현수곡선의 형상

Fig.1 Catenary curve

$$y = \cosh(x/a) + n \quad (1)$$

케이블에 걸리는 장력 및 풀린 길이는 식(2), 식(3)이 된다.

$$T = l \rho g \frac{\sqrt{1 + y^2}}{2y} \quad (2)$$

$$= a \rho g \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)}$$

$$l = \int_{-x}^x \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)} dx \quad (3)$$

$$= 2 a \sinh(x/a)$$

여기서, ρ 는 케이블의 선밀도, g 는 중력가속도, $a > 0$, n 는 현수선형을 결정하는 파라미터이다.

$$G(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{90}s} \quad (4)$$

2. 퍼지제어기의 설계

퍼지제어는 케이블의 장력과 목표값의 편차 e 와 미분량 de 를 입력으로 하고 출력은 조작량 v 이다. 추론 방법은 대수곱-가산-중심법을 사용하고 후건부는 퍼지 싱글톤형 추론법으로 하여 연산시간이 짧게 한다.

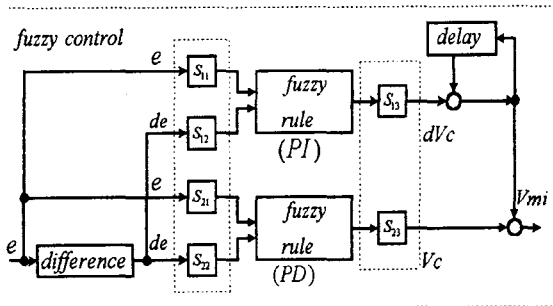
퍼지제어기의 입출력 관계가 $e, de \rightarrow v$ 를 추론하는 위치형(PD)퍼지제어와 $e, de \rightarrow dv$ 를 추론하는 속도형(PI)퍼지제어를 조합하여 구성한다. 그림 2는 퍼지제어 추론부의 구성을 나타낸다.

식(2)에서 장력과 차대의 진행거리의 관계는

$$T_f = a(t)\rho g \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{\Delta x}{a(t)}\right)} \quad (5)$$

가 된다. 식(3)에서 케이블의 길이와 차대의 진행거리의 관계는 식(6)이 된다.

$$l = 2a(t)\sinh\left(\frac{\Delta x}{a(t)}\right) \quad (6)$$



여기서, Δx 는 차대의 진행거리, T_f 는 케이블 양단에 걸리는 장력을 나타내고 $a(t)$ 는 현수선의 모양을 결정하는 파라미터로 케이블이 풀릴 때 시간에 따라 변한다.

토오크 발생용 전동기와 부하의 운동방정식은 식(7)이 된다.

$$T_m(t) = (J_m + k_r J_L) \frac{d}{dt} \omega_m(t) + k_r R T_f(t) + k_r R k_f \omega_m(t) \quad (7)$$

그림 2. 제안한 퍼지추론부의 구성

Fig.2 Proposed the composition of a fuzzy reasoning

3. 제어시스템의 구성

케이블의 장력제어는 교류 전동기의 토오크로 제어하고 장력을 측정하여 측정값에 따라 전동기의 토오크를 조정한다.

제어방법은 검출한 장력을 피드백하고 속응성과 정상특성을 개선하기 위해서 퍼지제어를 한다.

전동기의 전달함수는 식(4)이 된다.

여기서, k_s 는 스프링 정수, k_f 는 피드백 정수, k_r 는 치차비, J_m 는 전동기 관성 모우먼트이다.

그림 3은 식(4), 식(5), 식(6) 및 식(7)으로 구성된 시스템의 블록선도이다.

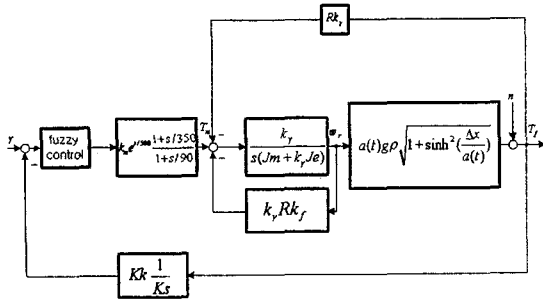


그림 3. 제안한 장력제어 시스템

Fig.3 Proposed tension control system

II. 시뮬레이션에 의한 정장력제어의 평가

1. 시뮬레이션 방법

퍼지추론에서 전진부의 소속함수는 삼각형 방법으로 하고 각각 NB, NS, ZO, PS, PB의 5부분으로 나눈다. 후진부 소속함수는 막대형으로 하고 각각 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7부분으로 나눈다. 퍼지제어 규칙은 입력의 e 와 de 에 따라 25개의 제어규칙이 설정된다.

초기값은 케이블의 폭은 1[m], 덩 길이 0.01[m]으로 하였고 양단에 걸린 장력은 20.8[N]이다. 또 장력의 목표값을 40[N]으로 하고 샘플링 시간은 10[ms]로 한다.

표 1. 시뮬레이션에 대한 각 정수

Table 1. parameters for simulation

J_m	$3.5 \times 10^5 [\text{kgm}^2]$	J_e	$J_m/10 [\text{kgm}^2]$
R	0.02[m]	k_r	0.1
Dip	0.01[m]	k_s	200[N/m]
k_f	200[A/m]	k_k	200[Nsec]
폭	1[m]	반경	2.5[mm] 동선

여기서는 Table 1에 나타난 각 정수를 이용하여 시뮬레이션하고 시스템의 유효성을 조사한다.

2. 퍼지제어 실험

[1] 위치형 퍼지제어 장력응답에 대한 실험

그림 4는 위와 같은 초기조건을 가지고 퍼지추론을 위치형 퍼지제어만 행하여 장력응답을 나타낸 것이다. 이때의 스캘링팩터는 $S_{11}=0.01$, $S_{12}=0.0001$, $S_{13}=3.0$, $S_{21}=0.01$, $S_{22}=0.0001$, $S_{23}=8.5$ 이다. 그림 4에서 알 수 있는 것과 같이 위치형 퍼지제어만 하였을 경우 PD제어에 상당하기 때문에 입상시간은 짧지만 큰 정상오차가 발생되므로 제어사양을 만족시키지 못한다.

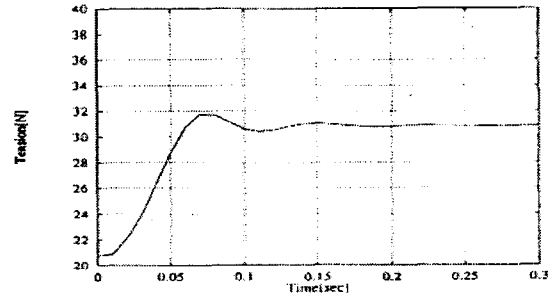


그림 4. 위치형 퍼지제어 장력응답

Fig.4 Tension response for PD fuzzy control

[2] 속도형 퍼지제어 장력응답에 대한 실험

그림 5에서는 퍼지추론은 속도형의 제어만을 행한 경우 응답특성을 나타낸 것이다.

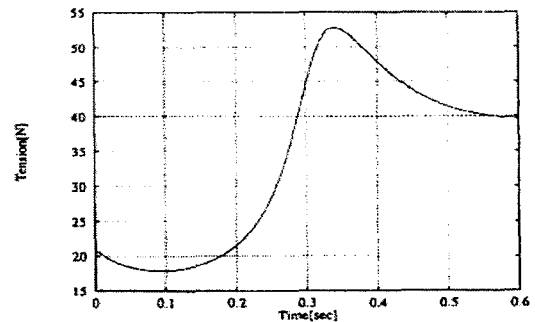


그림 5. 속도형 퍼지제어 장력 응답

Fig.5 Tension response for PI fuzzy control

이때 스케일링팩터는 $S_{11}=0.01$, $S_{12}=0.0001$, $S_{13}=3.0$, $S_{21}=0.01$, $S_{22}=0.0001$, $S_{23}=2500$ 이다. 그림 5에서 알 수 있는 것과 같이 속도형의 제어가 PI제어에 상당하기 때문에 입상 시간이 길고 큰 오버슈트가 발생하지만 정상오차가 없는 결과를 얻을 수 있다.

[3] 위치형과 속도형을 조합한 퍼지제어의 장력응답에 관한 실험

그림 6은 위와 같은 조건에서 속도형과 위치형 퍼지제어를 조합하여 실험한 응답특성을 나타낸 것이다. 이때의 스케일링팩터는 $S_{11}=0.01$, $S_{12}=0.0001$, $S_{13}=3.0$, $S_{21}=0.01$, $S_{22}=0.0001$, $S_{23}=4000.0$ 으로 설정하였으며 이것은 시행착오로 얻은 결과이다. 이 실험의 경우 입상 시간은 0.3초이고 오버슈트는 발생하지 않고 정상오차도 없는 결과가 얻어졌다.

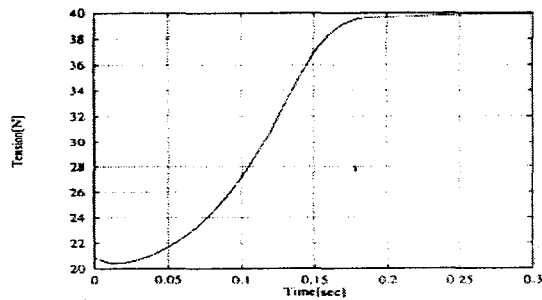


그림 6. 위치형과 속도형을 조합한 퍼지제어의 장력 응답

Fig.6 Tension responses for fuzzy control combined PD and PI

III. 결론

본 논문에서는 먼저 케이블의 장력특성에 기초하여 동적 모델을 만들어, 장력제어시스템을 구성했다. 동적 모델은 비선형 시변계가 되기 때문에 제어장치는 강인성이 있는 퍼지제어를 사용하였다. 퍼지제어에 있어서는 위치형과 속도형의 조합에 의해 입상 시간이 짧고 정상오차가 없는 제어방법을 제안하였으며 시뮬레이션에 의해 장력의 조절을 행하는 것이 가능하고 시스템이 이 오버슈트를 억제할 수

있는 것도 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1]坂本 鐵三 “ウェブの 張力制御系の 解析 と 制御”, TIEE Japan, Vol.117_D, No.3 pp. 274~281, 1997.

[2]村上慶一, “30年もつ 電車線”, JR East R&D Symposium, pp.176-186, 1993.

[3]M.H. Raibert and J.J.Craig, “Hybrid position/force control of manipulators,” Transaction of the ASEM, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol.102, pp.126 -133, 1981.

[4] Norbert A. Ebler, Gerd Michaelis, and Noel D'Sa, “Tension Control : Dancer Rolls or Load Cells,” IEEE Transaction Industry Application Vol.29, No.4, pp.101-107, 1993.