

현수형 가선 케이블의 장력계측과 제어시스템의 구성에 관한 연구

박성수*, 홍순일, 이정민
부경대학교

A Study on the Measurement of Tension and the Tension Control Method for a Catenary's Cable

Sung-soo Park*, Soon-ill Hong, Jeong-min Lee
Pukyong University

Abstract - 현재, 전차선의 트롤리선을 설치하는 것은 수작업에 의해 행해지고 있어 작업의 효율화와 함께 최적의 장력제어가 필요하다. 케이블을 새롭게 가설하는 장치는 케이블을 릴에 감아 올릴 필요성은 거의 없기 때문에 케이블을 풀어주는 속도와 로드셀에 의해 장력을 검출하고 장력을 발생하는 하드웨어 구성방법을 연구하는 것이다

본 연구는 현수형 케이블(Catenary Cable)의 동적 모델링을 작성한다. 이 시스템에 대하여 교류서보 전동기를 이용한 장력 발생장치를 모델링한다.

현수형 시스템의 장력계측 장치는 하중변환기(load cell)를 사용하고 수학적 모델링을 행한다. 장력계측 장치에 관해서 스프링 저울을 이용해 출력을 비교 검토한 결과, 인장력을 계측하는 장치로서의 유효성을 확인하였다.

1. 현수형 케이블의 운동방정식과 장력

일정한 질량을 갖는 가선 케이블은 현수 곡선(Catenary Curve)의 형상이고 케이블은 Y축에 대칭 할 때 식(1)과 같은 방정식으로 기술할 수 있다.

$$y = \cosh(x/a) + n \tag{1}$$

여기서, a>0이고 x, y는 각각 X, Y축 좌표 변수 값이므로 a, n은 각각 현수케이블의 형을 결정하는 파라미터이다.

현수형 케이블의 양단에 걸리는 장력 T는 식(2)이 된다.

$$T = l \rho g \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{2y} \tag{2}$$

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

또한 케이블의 길이 l는 식(3)가 된다.

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

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

따라서, 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 케이블의 장력 T는

$$T_f = a \rho g \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)} \tag{4}$$

이 얻어진다. 여기서 a=0.46, 동선 케이블(반경=2.5[mm])일 때 선밀도 ρ = 0.17[kg/m]이다.

그림 1은 얻은 케이블 각 점의 장력을 나타낸다. 계산 결과 그래프에서 케이블의 양단에 걸려 있는 장력이 가장 큰 것을 확실히 알 수 있다.

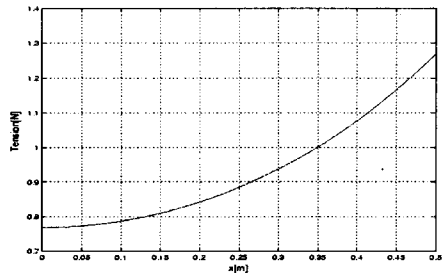


그림 1. 케이블의 각 점의 장력

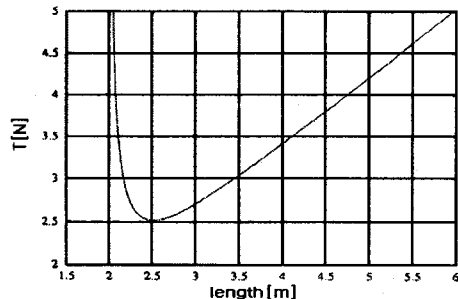


그림 2. 케이블의 길이와 장력의 관계도

그림 2는 케이블의 가설 폭과 덩의 관계를 계산한 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 임의의 일정한 장력 값에 대해서 길이 그림 2와 같이 최소점의 좌측 장력점에서 일정 장력의 제어를 행하여야 함을 알 수 있다.

2. 토오크제어 시스템 모델링

장력제어에서 사용한 토오크제어 시스템은 AC서보 전동기와 제어기로 구성한다.

AC서보 전동기에서 출력 토오크 $T_{q_{out}}$ 와 모니터의 출력전압 $V_{q_{out}}$ 관계는 식(5)으로 나타낼 수 있다.

$$T_{q_{out}} = \frac{V_{q_{out}}}{V_{q_{max}}} \cdot T_{q_{max}} \quad (5)$$

토오크 제어 시스템은 지령전압을 가하여 실제 출력 토오크를 토오크 계측한 결과 선형적인 특성을 갖는다.

모델로 한 토오크 제어시스템은 시스템 전체를 하나의 블록으로 생각하여 전달함수를 결정하고 시스템의 동특성을 조사한다. 그 결과, 그림 3에 표시한 주파수특성을 얻었다. 그림 3은 이득특성을 측정된 것이고 그림 내에서 graph.1 ~ graph.3은 아래와 같이 그린 곡선이다.

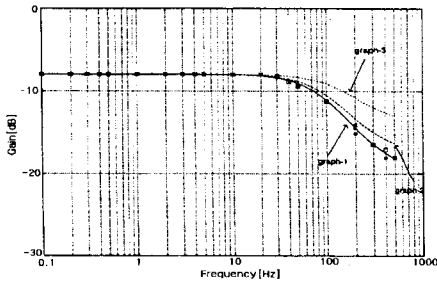


그림 3. 토오크 제어시스템의 이득특성

이득특성에서 graph.1 이 오차가 적고 가장 좋은 근사 식을 얻을 수 있다. 그리고 graph.3은 이득특성에서 큰 오차가 발생하고 graph.2는 graph.3보다 오차가 적게 발생하지만 고주파영역에서는 1[m/sec]의 시간오차에 해당하는 위상오차가 발생한다.

따라서 이득특성이 좋은 근사 전달함수를 얻을 수 있는 graph.1의 쪽이 적당하다고 판단되기 때문에 graph.1을 전달함수로 나타내면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$G_i(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{90}s} \quad (6)$$

그림 4는 이상과 같이 결정된 전달함수 $G_i(s)$ 에서 조사한 토오크 지령에 대한 출력의 스텝응답을 나타낸다.

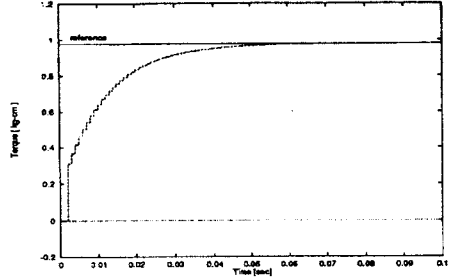


그림 4. 스텝응답(토오크지령 - 토오크출력)

3. 장력의 계측과 실험

3.1 장력계측요소의 모델링

그림 5는 동활차에 취부한 로드셀과 로드셀에서 검출한 장력 신호를 증폭하여 A/D변환하여 제어용 컴퓨터에 데이터를 전송하는 구조를 나타낸다.

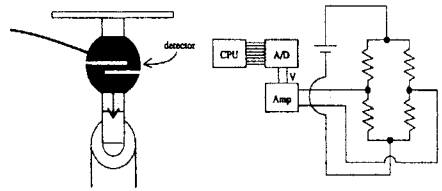


그림 5. 장력 검출기

하중변환기는 구하는 장력 T_f 는 검출되는 전압에 대해서 다음 식으로 나타낸다.

$$T_f = \frac{C_l}{V_{H}} \cdot V_{l_0} \quad (7)$$

여기서, V_H : 브리지 인가전압[V].

V_{l_0} : 출력전압[V].

C_l : 교정정수 0.016656 [$kg \cdot f \cdot V / \mu V$]

이번 측정에서는 브리지 인가전압 $V_H = 11.0[V]$ 로 행하였기 때문에 장력 T_f 는 식(8)과 같이 구해진다.

$$T_f = C'_l \cdot V_b \quad (8)$$

$$C'_l = 1.5141 \times 10^{-3} [kg \cdot / \mu V]$$

3.2 하중변환기에 의한 측정시험

3.2.1 용수철 저울에 의한 측정

동작원리는 용수철 저울에 의해 끌어당기는 장

력을 걸면 Load cell에 검출된 전압은 프리앰프에 의해 증폭된 후 장력에 대응하는 전압이 출력한다. 여기서 사용한 용수철 저울은 2Kg과 20Kg 이다.

그림 6~7은 외부에서 인가한 토크 T_f 와 하중변환기에서 증폭된 출력전압 V_{fo} 의 측정결과를 나타낸다.

그림에서 실선은 이론값을 나타내고 연직 방향으로 잡아당기는 경우에는 실제로 가한 장력 T_f 는 용수철저울의 지시값에 용수철저울 무게를 더한 것이다.

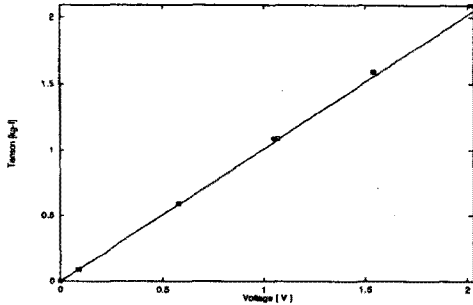


그림 6. 로드셀의 출력특성 (연직방향 인장, 2(kg) 용수철 저울 사용)

또한, 측정결과를 나타낸 그림에서 하중변환기는 장력측정에 있어서 오차 $\pm 0.01 [kg \cdot f]$ 의 범위에서 유효한 것을 확인 할 수 있다.

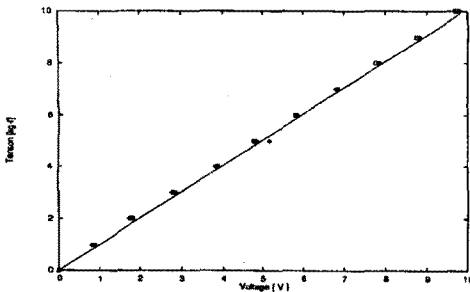


그림 7. 로드셀의 출력특성 (연직방향 인장 20(kg) 용수철 사용)

3.2.2 토크제어 시스템에 의한 장력 측정

그림 8, 9는 토크 제어시스템으로 토크를 발생시켜 측정된 입력전압과 장력과의 관계를 나타낸 곡선이다.

이것으로부터 토크제어 시스템에서 출력된 토크에 대응한 장력이 측정되는지를 확인하였고 장력시스템에 본 계측장치가 유효한 것을 알 수 있다.

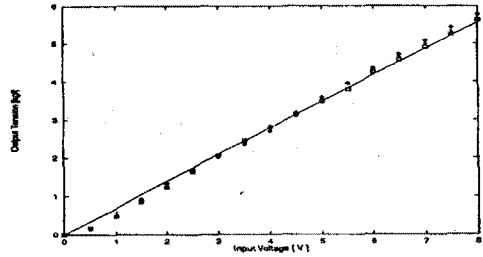


그림 8. 입력전압이 증가할 때의 장력

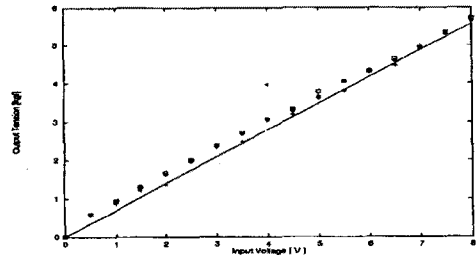


그림 9. 입력전압이 하강할 때의 장력

5. 결론

본 연구에는 현수형 케이블을 모델링하고 이것의 장력제어를 위한 방법에 나타내었으며 토크 제어시스템과 장력검출 요소를 모델링하였다. 가선 케이블의 장력을 조절하기 위한 장치를 하드웨어적으로 구성 방법을 연구하는 것이다.

제작한 장력측정 장치는 단독으로 사용할 때 장력측정은 $\pm 0.01 [kg \cdot f]$ 의 오차를 허용할 수 있는 용도에는 충분히 유효성이 있는 것을 알 수 있다. 또한 이 계측요소 및 토크 제어시스템을 이용하여 현수형 케이블의 장력제어 시스템을 실현하기 위한 기초자료가 된다.

[참고 문헌]

- [1] Spyros Tzafestas, Nikolaos P. "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions industrial electronics, Vol.37, No.5 october 1990.
- [2] Tomoyoshi Takeuchi, et., "Fuzzy Control a Mobile Robot for Obstacle Avoidance." Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1988.
- [3] 홍순일 등, "서보제어용 퍼지추론 TOOL의 개발에 관한 연구", ISEM-Seoul, W P-60, pp. 134, June 22-24, 1994.
- [4] 竹内芳美, "メカトロニクスの基礎技術と應用", 機械の研究 第39卷 第1號 pp. 67-pp.70 1987
- [5] 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.