

두 시스템간의 편차 최소화를 적용한 상대적 동작제어 방법

Relative Motion Control Methodology Using the Minimum Relative Error Between Two Systems

김 성 권*
(Sungkwun Kim)

Abstract : A new relative motion control methodology of a following system to an independent leading system is proposed for controlling relative position, velocity, and tension etc. It is based on maintaining minimum relative error between two independent systems. The control command of the following system to a leading system is generated by adding the current command and the output of the relative error compensation. The proposed control method is implemented on the experimental equipment which is a wire winding-unwinding system to control the tension of the line. The results show the unwinding system(follower) following the independent motion of the winding system(leader) to control the constant tension of the line in order to keep the roller dancer in reference position. The relative motion control method proposed in this paper can be applied to high precision equipment for unwinding and winding fine wire, fine fiber, and tape etc.

Keywords : relative motion control, Tension control, unwinding, winding

I. 서론

최근 디지털 기술의 발달에 따라 한 제품에 여러 제품이 복합화 되고, 여러 개의 개별 시스템들을 하나의 시스템으로 구성하는 연구가 진행되어 오고 있다. 복합화된 시스템은 각 구성 단위별의 상호 작용에 의존하는 시스템을 제어하는 것이 중요한 연구 분야이다. 그 동안 단위기계의 제어연구는 많이 연구되어 모터, 로봇, 자동차, 비행기, 하드 디스크 드라이브, 카메라, 에어컨, 자동제조장비 등에 적용되고 있다[1-3]. 다른 시스템 간의 상호 작용하는 시스템을 제어하는 분야는 다양하다. 이동물체를 추적하거나 파괴하기 위한 군사용의 미사일, 산업용에서도 테이프, 와이어, 실 등을 감거나 풀 때 두 축의 속도를 제어하는 분야, 발전소, 화학공장 같은 설비에서 각 공정간 상호동작이 필요한 분야에서 시스템을 최적화로 제어해야 할 분야가 많다[4-10]. 특히 최근에는 수 마이크로 직경의 와이어 인발기(drawing machine)나 권선기(winding machine)에서 정밀한 제어가 가능한 해선기(unwinding machine) 사용이 증가 되고 있다. 해선기는 독립된 시스템으로 인발기나 권선기에서 당기는 장력에 따라 능동적으로 와이어를 풀어 주는 제어가 필요하다.

두 독립된 시스템간의 상호 의존하는 시스템의 연구는 단위시스템 내에서 절대제어 방식으로 상대 물체의 입력이나 출력정보를 사용하여 추종하는 시스템의 제어방법이 대부분이다[4]. 이 제어방법은 일반적으로 두 시스템 간의 정보를 이용한 복잡한 계산이 필요하다. 두 시스템 간의 상대적 동작 차이에 비례하여 추종하는 시스템 제어방법은 산업 현장

장에서 널리 사용되고 있다. 이 방법은 주로 댄서롤러(상하 이동롤러)의 상하 이동거리를 상대적 동작차이로 측정하므로, 상하 이동롤러의 위치의 변화가 장력에 영향을 줄 수 있다. 초 미세선의 장력을 $\pm 0.1g$ 이하로 제어하기 위해 상하 이동롤러 위치의 변화를 최소화하면서 해선 속도를 제어할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 상기의 제어방법의 문제를 보완하기 위해 독립적으로 동작하는 시스템을 자동적으로 간단하게 추종할 수 있는 두 시스템간의 상대적 편차(error) 최소화를 적용한 상대적인 동작제어 방법(relative motion control method)을 제안하고 분석한다. 제안된 제어방법을 와이어 권선-해선 장치(Winding-Unwinding machine)에 적용하여, 상하 이동롤러의 위치변화가 최소화된 상태에서 해선기가 권선기의 속도의 추종을 실험으로 증명한다.

II. 상대 동작 관계

그림 1과 같이 어떤 이동 물체 A가 독립적으로 동작하고, 다른 물체 B는 물체 A를 일정한 거리 또는 속도로 추종하는 시스템을 고려해 보자. 물체 A는 독립적인 제어 시스템에 의해 제어되고 있고, 물체 B는 물체 A에서 물체 A와의 상대적인 거리, 속도, 또는 힘 등을 일정한 관계 d 를 유지하기 위한 제어 시스템에 제어되도록 구성할 수 있다. 물체 A를 추종하기 위해 물체 B가 상대적 동작 관계를 유지하는 일반적으로 물체 B를 기준으로 물체 A와의 상대 동작 관계의 정보를 이용한다. 상대적 동작 관계 d 는 물체 A와 물체 B의 함수 $d = f(A, B)$ 로 나타낼 수 있다.

일반적으로 물체 B와 같은 단위 시스템의 제어는 그림 2와 같이 구성한다. P는 물체 B와 같은 플랜트, C_p 는 플랜트 제어기, r 은 제어기에 대한 지령, y 는 플랜트의 출력이다. 출력 y 는 되먹임 되는 폐회로 제어기를 일반적으로 적용한다.

플랜트의 출력 y 는 지령 r 를 잘 추종하도록 제어기 C_p 를 설계하여사용한다[11-13]. 그러므로 추종하는 물체가 독립적으로

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 6. 3., 채택확정 : 2003. 7. 31.

김성권 : 한국산업기술대학교 제어계측공학과(skim@kpu.ac.kr)

※ This research was funded by MKE Electronics Co. The author appreciates the research support of Mr. IlTae Kim, president of MKE, and Mr. Jin Lee, Managing Director. My special thanks are expressed to Mr. JinYong Kim and Mr. Hur for testing the experiment equipment developed in this research.

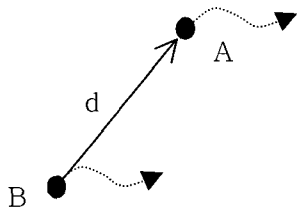


그림 1. 공간에서 물체 A와 물체B 사이의 상대적 동작.
Fig. 1. Relative Motion between Object A and Object B in Space.

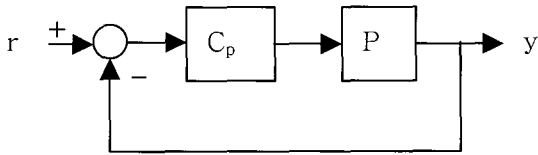


그림 2. 폐회로 제어 시스템의 블록다이아그램.
Fig. 2. Block Diagram of Closed Loop Control System.

동작하는 물체를 잘 추종하기 위한 제어 지령을 주는 방법이 상대적 동작 제어기의 연구 대상이다.

본 연구에서 물체 B의 출력 y는 지령 r에 잘 따른다고 가정하고, 물체 B는 물체 A와의 상대적인 관계 d를 유지하기 위해 물체 A에 대한 상대적으로 동작하고 있는 시스템이다.

본 논문에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

정의 1: 상대적 동작 제어기는 물체 B가 자유 운동을 하는 어떤 물체 A를 추종하기 위한 물체 B의 지령을 생성하는 제어기이다.

정의 2: 상대 동작 기준은 물체 A와 물체 B 사이의 상대적 동작 관계를 유지하기 위한 기준이다. 물체 A에 대한 정보는 물체 B를 기준으로 물체 A의 상대적인 관계이다. 두 물체 사이의 거리, 속도, 힘 등의 기준 값이 상대 동작 기준이 될 수 있다.

정의 3: 상대적 차이 제어(Relative Difference Control)는 두 물체 A와 물체 B 사이의 상대적 동작 결과의 출력과 상대 동작 기준과의 차이에 비례하여 물체 B의 지령을 생성하는 제어기이다.

정의 4: 상대적 편차 최소화 제어(Minimum Relative Error Control)는 두 물체 A와 물체 B 사이의 상대적 동작 결과의 출력을 상대적 동작기준에 근접하도록 물체 B의 지령을 생성하는 제어기이다. 즉, 상대적 동작 결과의 출력이 상대적 동작기준에 대한 차이를 편차(error)로 고려하여 편차를 최소화하기 위한 제어이다.

III. 상대적 동작 제어모델

상대적 동작제어 방법은 물체 B가 어떤 물체 A를 추종하기 위한 물체 A에 대한 상대 동작 기준으로 물체 B를 제어하는 방법이다. 상대적 제어모델은 상대적 차이 제어모델과 상대적 편차 최소화 제어모델을 고려할 수 있다. 상대적 차이 제어모델은 산업계에 적용되고 있는 모델로서 두 시스템간의 상호 작용에 의한 상대적 차이가 지령이 되는 모델이다. 상대적 편

차 최소화 제어모델은 본 연구에서 제안하는 모델로서 두 시스템간의 편차를 최소화하는 제어모델이다.

1. 상대적 차이 제어모델

(Relative Difference Control Model)

상대적 차이 제어모델은 두 시스템 간의 상대 관계에서 발생하는 결과의 출력과 상대적 기준과의 차이에 비례하여 추종하는 시스템의 지령이 되는 모델로서 기본 구성은 그림3과 같다. 이 모델은 산업 현장에서 일부 사용되는 상대적 차이 제어모델의 기본 구성이다. $S_A(s)$ 와 $S_B(s)$ 는 물체 A와 물체 B의 제어기를 포함한 시스템들이다. $d_r(s)$ 는 상대 동작 기준이며, $T(s)$ 는 시스템 $S_A(s)$ 의 출력 $y_A(s)$ 와 시스템 $S_B(s)$ 의 출력 $y_B(s)$ 의 상호 관계에서 상대 동작 기준 $d_r(s)$ 과 동일한 단위로 전환해 주는 전환기(Transformer)이다. $d_m(s)$ 는 전환기 $T(s)$ 의 출력이며, $d(s)$ 는 상대 동작 기준 $d_r(s)$ 과 전환기 $T(s)$ 의 출력 $d_m(s)$ 과의 차이(difference) $d(s)$ 로서 상대적 동작 제어기의 지령이다. $C_d(s)$ 는 상대적 동작 제어기이다. $X_B(s)$ 는 상대적 동작 제어기의 출력으로 시스템 $S_B(s)$ 에 대한 지령이다. 상대적 동작 제어기 $C_d(s)$ 는 차이 $d(s)$ 에 대한 시스템 $S_B(s)$ 의 지령 $X_B(s)$ 를 생성해주는 제어기이다. 시스템 $S_B(s)$ 의 지령 $X_B(s)$ 는 차이 $d(s)$ 에 비례하는 구조이다.

이 모델의 상대적 동작 제어기의 출력 즉, 시스템 $S_B(s)$ 의 지령 $X_B(s)$ 는 다음 식과 같다.

$$X_B(s) = C_d(s)d(s) \quad (a \leq X_B(s) \leq b) \quad (1)$$

여기서 $C_d(s)$ 는 제어법이며, 지령 $X_B(s)$ 는 시스템 $S_B(s)$ 를 제어할 수 있는 최소 a 와 최대 b 범위 내에 있어야 한다. 상대적 차이 $d(s)$ 는 다음과 같다.

$$d(s) = d_m(s) - d_r(s) \quad (2)$$

여기서 $d_r(s)$ 는 상대 동작 기준으로 사용자가 임의로 정하는 기준치이다. $d_m(s)$ 은 전환기의 출력으로 시스템 $S_A(s)$ 의 출력 $y_A(s)$ 와 시스템 $S_B(s)$ 의 출력 $y_B(s)$ 의 상대적 작용에 의해 결정되므로 다음과 같이 함수로 나타낼 수 있다.

$$d_m(s) = T(y_A, y_B) \quad (3)$$

여기서 $d_m(s)$ 는 전환기의 구조에 따라 장력, 거리, 속도 등 다양한 출력이 된다.

(2)와 (3)을 (1)에 대입하면 상대적 차이 제어모델에서 추종하는 시스템의 지령 $X_B(s)$ 는 다음 식과 같다.

$$X_B(s) = C_d(s)(T(y_A, y_B) - d_r(s)) \quad (a \leq X_B(s) \leq b) \quad (4)$$

여기서 $d_r(s)$ 을 0으로 정하면 (4)는 다음과 같은 시스템의 모델이 된다.

$$X_B(s) = C_d(s)T(y_A, y_B) \quad (a \leq X_B(s) \leq b) \quad (5)$$

이 모델에서 추종하는 시스템의 지령 $X_B(s)$ 는 전환기 $T(s)$ 의 출력 $d_m(s)$ 와 상대 동작 기준 $d_r(s)$ 과의 차이 $d(s)$ 에 비례하는

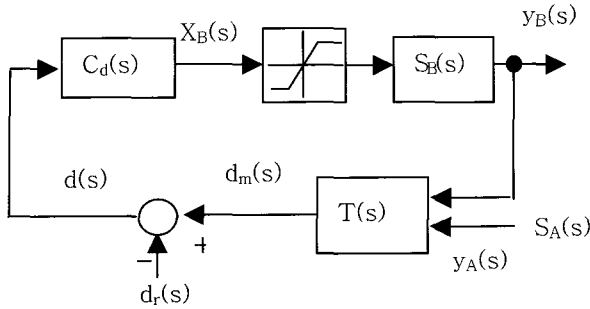


그림 3. 상대적 차이 제어모델을 적용한 상대적 동작제어 시스템의 블록다이어그램.

Fig. 3. Block Diagram of Relative Motion Control System with Relative Difference Control Model.

시스템이다.

이 제어기의 응용은 해선기, 권선기 또는 방직기(weaving machine)등에서는 와이어나 실의 장력을 제어하는데 많이 사용되고 있다. 이와 같은 기계에서 장력은 상하 이동롤러에 작용되는 무게와 위치에 의해 변화된다. 상하 이동롤러 위치의 변화는 전환기 T(s)의 출력 d_m(s)이다. 따라서 미세한 와이어의 정밀한 장력 (2 ± 0.1g 이하)을 제어하기 위해서는 상하 이동롤러의 위치의 변화를 최소화하여 상하 이동롤러의 위치의 변화에 따른 장력의 변화를 초소화할 필요가 있다. 상하 이동롤러의 위치 변화를 최소화하면서 추종 시스템을 제어하기 위해 다음의 상대적 편차 제어모델이 제안된다.

2. 상대적 편차 최소화 제어모델(Minimum Relative Error Control Model)

상대적 편차 최소화 제어모델은 두 시스템 간의 상대 관계에서 발생하는 출력과 상대 동작 기준과의 차이인 편차(error)를 최소화하는 제어모델이다. 이 제어모델은 물체 B가 물체 A를 추종하기 위해 물체 B를 제어하는 방법으로, 현재 물체 B의 지령에 물체 B와 물체 A와의 관계의 변화에 따른 편차를 최소화하기 위해 물체 B의 새로운 지령을 생성해 주는 제어기이다.

본 연구에서 제안하는 상대적 편차 최소화 제어모델의 기본 구성은 그림 4와 같다. S_A(s)와 S_B(s)는 물체 A와 물체 B의 제어기를 포함한 시스템들을 나타내고, C는 시스템 S_B(s)의 지령을 생성하는 상대적 동작 제어기이다. T(s)는 시스템 S_A(s)와 시스템 S_B(s)의 출력 y_A(s)과 y_B(s)의 상호 관계에서 발생하는 결과의 출력을 상대 동작 기준 d(s)과 동일한 단위로 전환해주는 전환기(Transformer)이다. d_m(s)는 전환기 T(s)의 출력이며, e(s)는 상대 동작 기준 d(s)과 전환기 T(s)의 출력 d_m(s)과의 편차(error)이다. C_e(s)는 상대적 편차를 최소화하기 위한 편차 보완 제어기이고, r_e(s)는 편차 보완 제어기의 출력이다. X_B(s)는 상대적 동작 제어기의 출력이며 동시에 시스템 S_B(s)의 지령이다.

시스템 S_A(s)가 변화하면 T(s)의 출력 d_m(s)이 변화하여 상대적 편차 e(s)가 발생한다. 상대적 편차 최소화 제어모델은 시스템 S_B(s)의 현재 지령 X_B(s)에 편차 e(s)를 보상하는 편차 보완 제어기 C_e(s)의 출력 r_e(s)를 합산하여 새로운 출력 X_B(s)

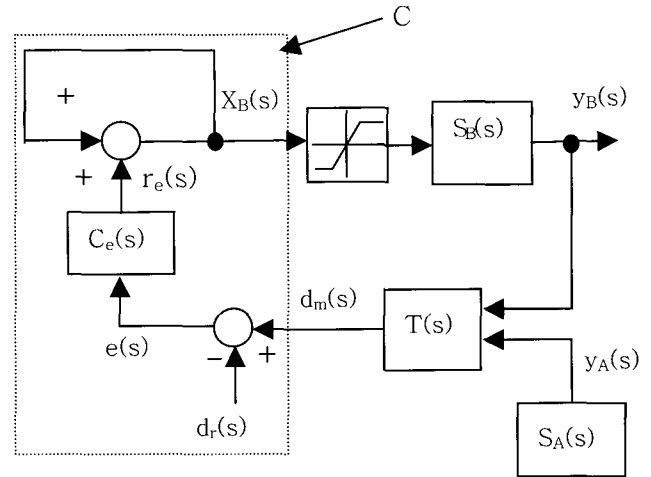


그림 4. 상대적 편차 최소화 제어모델을 적용한 상대적 동작 제어 시스템의 블록다이어그램.

Fig. 4. Block Diagram of Relative Motion Control System with Minimum Relative Error Control Model.

을 생성하는 상대적 동작제어 시스템이다.

상대적 편차 최소화 제어모델의 상대적 동작 제어기의 출력 X_B(s)는 (6)과 같다.

$$X_B(s) = X_B(s) + r_e(s) \quad (a \leq X_B(s) \leq b) \quad (6)$$

여기서 시스템 S_B(s)의 현재 지령 X_B(s)을 일반적으로 사용하는 네가티브 피드백(negative feedback)형태 대신 포지티브 피드백(positive feedback) 형태를 사용하였다. 이것은 시스템 S_B(s)는 지령 X_B(s)을 잘 추종하는 시스템으로 가정하고 있으므로 현재 지령을 Feedforward하는 구조이다. 시스템 S_A(s)의 변화에 의해 두 시스템 간의 상대적 동작 결과에 발생하는 상대적 편차 e(s)를 보완하기 위해 시스템 S_B(s)에 대한 새로운 지령 X_B(s)을 생성하는 제어 구조이다. 여기서 편차 e(s)는 시스템 S_B(s)의 자체적인 편차가 아니며, 시스템 S_A(s)의 변화에 의해 발생하는 편차이다.

편차 보완 제어기 C_e(s)의 출력 r_e(s)는

$$r_e(s) = C_e(s)e(s) \quad (7)$$

상대적 편차 e(s)는 (8)과 같다.

$$e(s) = d(s) - d_m(s) \quad (8)$$

여기서 d(s)는 상대 동작 기준이며, d_m(s) = T(y_A, y_B)이다.

(7)을 (6)에 대입하면 상대적 편차 최소화 모델을 적용한 상대적 동작 제어기 모델에서 추종 시스템의 지령 X_B(s)는 (9)와 같다.

$$X_B(s) = X_B(s) + C_e(s)e(s) \quad (a \leq X_B(s) \leq b) \quad (9)$$

(9)을 정리하면 (10)과 같이 간단한 식으로 표현되며, 편차 공간 제어법을 적용하여 안정된 제어기를 설계할 수 있다.

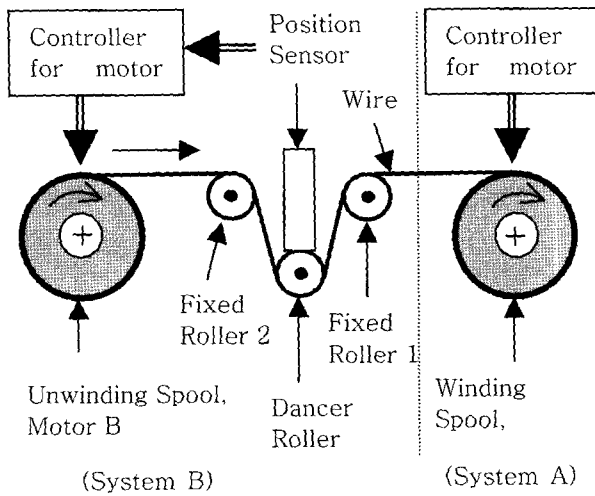


그림 5. 권선기와 해선기 구성도
Fig. 5. Winding and Unwinding Machine Structure.

$$C_d(s)e(s) = 0 \tag{10}$$

여기서 지령 $X_B(s)$ 는 시스템 $S_B(s)$ 를 제어할 수 있는 최소 a 와 최대 b 범위 내에서 적용되어야 한다.

여기서 $e(s) = d(s) - d_m(s)$ 이다.

이 모델은 편차를 최소화하기 위해 시스템 $S_B(s)$ 의 동작을 제어하는 모델이며, 시스템 $S_B(s)$ 는 안정된 시스템으로 가정하고 분석한다. 이 모델의 전체 안정성 분석은 시스템 $S_A(s)$ 의 동작이 시스템 $S_B(s)$ 에 대해 외란(disturbance)으로 작용되며, 시스템 $S_B(s)$ 는 시스템 $S_A(s)$ 에 의존하는 시스템이다. 시스템 $S_A(s)$ 의 모델링과 동작에 대한 불확실성이 크기 때문에 본 시스템 전체의 안정성 분석은 별도의 연구 과제이다.

상대적 편차 최소화 제어모델을 적용한 상대적 동작 제어기는 현재의 추종시스템의 지령에 두 시스템 간의 편차를 최소화하는 제어로서, 시스템들의 동작을 고려하지 않고 단순히 전환기의 출력과 상대적 동작 기준과의 편차를 최소화하여 두 시스템간의 관계를 일정하게 유지할 수 있는 제어 시스템이다. 이 제어를 해선기에 적용하면 장력 조정용 상하 이동롤러의 위치의 변화를 최소화하면서 추종 시스템인 해선기의 속도를 제어할 수 있다. 그러므로 정밀한 장력($2 \pm 0.1g$)의 제어가 필요한 장치에는 상하 이동롤러의 위치 변화가 적어 정밀한 제어가 가능하다.

IV. 실험장치 및 결과

1. 전체 시스템 구성

상대적 동작제어 방법을 실험하기 위한 권선기-해선기 시스템의 구성은 그림 5와 같이 구성하였다. 그림 6는 실험 장치 사진이다. 시스템 A는 독립적으로 모터 A에 연결된 스펴(spool)에 와이어를 감고, 시스템 B는 모터 B에 연결된 스펴(spool)에서 와이어를 풀어주는 역할을 한다. 두 스펴 사이에 고정롤러 1(Fixed roller)과 고정 롤러 2는 고정 위치에서 롤러들만 회전을 하고, 상하 이동롤러(dancer roller)는 상하 이동하면서 롤러가 회전하는 장치이다. 상하 이동롤러는 회전형의 포텐서미터(potentiometer)의 축에 연결된 외팔보의 끝 부분에 연결되어

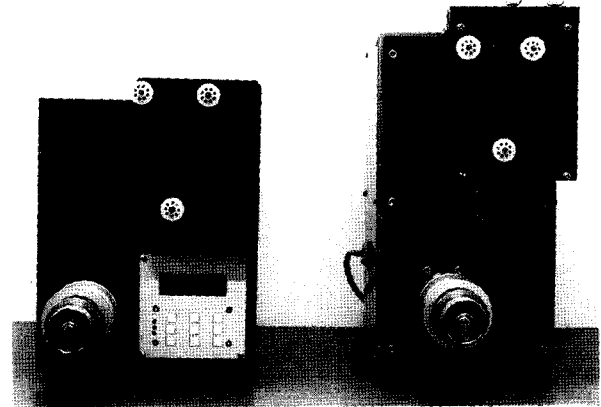


그림 6. 권기와 해선기 장비 사진.
Fig. 6. Winding and Unwinding Equipment.

있다. 동롤러의 위치가 변화하면 포텐서미터의 축이 회전하게 되어 포텐서미터의 출력이 변화한다. 포텐서미터가 상하 이동롤러의 위치 센서(position sensor)이다. 상하 이동롤러의 위치 변화는 모터 A의 속도와 모터 B의 속도의 차이에 의해 발생하는 전환기 $T(s)$ 이다. 장력은 상하 이동롤러의 무게 조정이나 부하 조정장치에 의해 조정이 가능하다. 제어기는 포텐서미터의 출력을 상하 이동롤러 위치로 전환하고, 모터 B의 속도를 제어하고, 장력 부하 조정 기능을 가지고 있다.

이 시스템에서 모터 A에 연결된 스펴(spool)의 회전 속도가 일정하더라도 스펴에 감긴 와이어의 량에 따라 와이어 이동속도는 변화한다. 또한 모터 B에 연결된 스펴(spool)에 감긴 와이어의 량과 모터 A에 연결된 스펴(spool)에서 감는속도에 따라 와이어 이동속도는 변화한다. 와이어의 장력은 모터 A에 연결된 스펴(spool)과 모터 B에 연결된 스펴(spool) 사이의 상하 이동롤러의 위치에 따라 변하게 된다. 그러므로 와이어의 장력을 일정하게 유지하기 위해서 상하 이동롤러의 위치가 일정하게 유지되도록 와이어의 감는 속도에 따라 모터 B에 연결된 스펴(spool)의 속도를 자동적으로 제어하는 시스템으로 구성되었다.

2. 제어기 구성

그림 5의 시스템을 제어하기 위한 상대적 동작 제어기의 편차 보완 제어기 $C_d(s)$ 는 비례-적분-미분 제어법을 (11)과 같이 적용하였다[11-13].

$$e C_d(s) = \alpha(K_p + K_d s + K_i/s) = 0 \tag{11}$$

여기서 K_p 는 비례이득(proportional gain) K_d 미분 이득(derivative gain) K_i 는 적분 이득(integral gain), s 는 미분 연산자(derivative operator)이다. 실제 시스템에서 적분 이득은 오차의 부호가 바뀌면 오차 누적을 영으로 재 세팅하도록 구성하고, (11)에서 비례 이득과 미분 이득의 단순 관계 K_p/K_d 를 최소화하기 위해 PD 제어에서 일반적 조건인 $K_d * K_i \gg 4 * K_p$ 적용할 수 있다.

(11)을 상대적 편차 최소화 제어모델인 (9)에 대입한 상대 동작 제어기는 (12)와 같다.

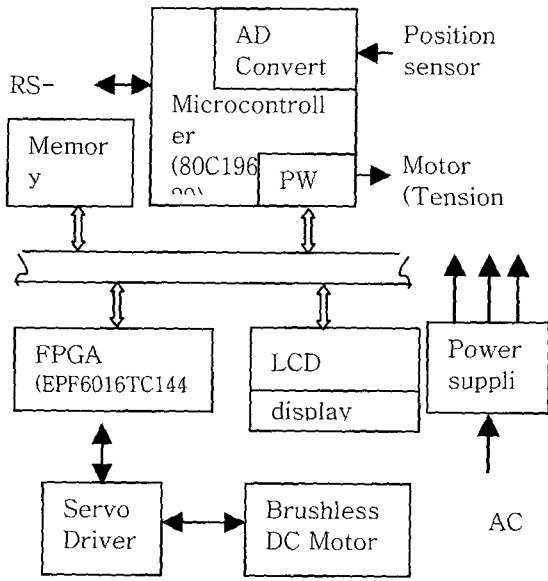


그림 7. 해선기 제어 시스템의 블록 다이어그램.
Fig. 7. Block Diagram for Unwinding Control System.

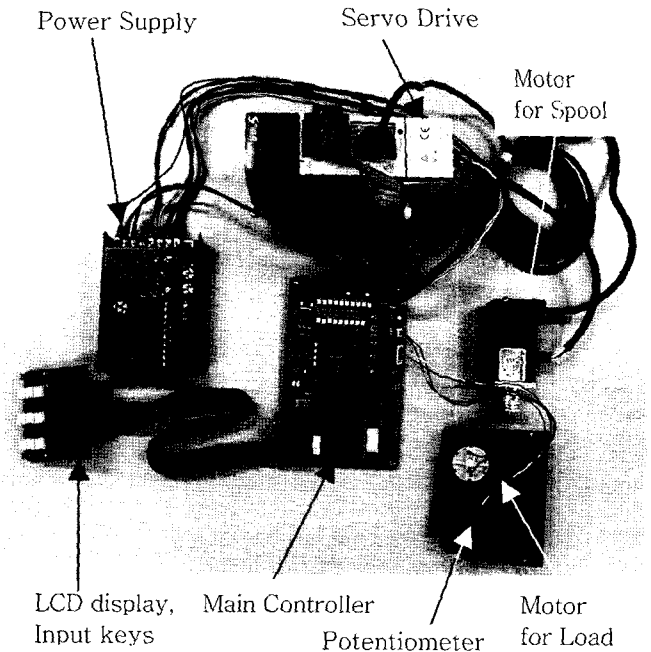


그림 8. 해선기 제어기 부품 사진.
Fig. 8. Subassembly of Unwinding Machine Controller.

$$X_B(s) = X_B(s) + e(K_p + K_d s + K_i/s) \quad (12)$$

$(a \leq X_B(s) \leq b)$

(12)의 상대적 동작 제어를 안정할 수 있는 이득들은 실험을 통하여 구할 수 있다[3]. 지령 $X_B(s)$ 는 항상 시스템 $S_B(s)$ 의 동작 범위(반응 범위) 내에 있어야 한다. 또한 시스템 $S_B(s)$ 는 시스템 $S_A(s)$ 의 동작을 추종할 수 있는 반응속도를 가지고 있어야 한다.

설계된 제어를 구현하기 위한 시스템 B의 제어기는 그림 7과 같이 구성하였으며, 그림 8은 제어 시스템의 사진이다. 제어 시스템은 주 제어기로 마이크로컨트롤러 80C196을 사용하고, 위치 센서로서 포텐서미터(모델: Copal JT22-120-C00), 스푼 구동용 브러쉬리스 DC 모터(80W)와 제어기, 장력 부하용 모터, LCD 디스플레이 등으로 구성하였다. 위치 센서인 포텐서미터의 신호는 마이크로 컨트롤러의 A/D 변환기를 통해 입력된다. 포텐서미터의 분해능(resolution)은 12비트/회전 이다. 모터 최대 회전속도 3000 rpm에서 스푼의 회전속도는 1320 rpm로 감속장치에 의해 조정된다. 마이크로컨트롤러에서 상대 동작 제어기에서 계산된 지령 $X_B(s)$ 를 FPGA에서 위치 지령으로 전환하여 모터 제어기로 신호를 내 보낸다. 모터 제어기가 스푼 구동용 모터에 단위시간에 이동 위치를 명령하여 속도(위치량/시간)를 제어한다. LCD 디스플레이와 사용자 입력 모듈에서 입력 부분은 PID 이득, 장력 부하, 제어 기준 셋팅 등을 입력키로 조정할 수 있도록 구성하였다. LCD 디스플레이는 현재의 모터 속도, 이득, 부하 등을 표시한다. 장력 부하는 모터의 전압으로 전환하여 마이크로컨트롤러의 PWM(Pulse Width Module)를 통해 장력 부하용 모터에 전달 된다. 원 공급 장치는 AC 220 V 교류를 입력되어 AC 70V, DC12V, DC5V전환되어 제어기와 모터 제어기에 공급된다. RS -232을 통해서 상위 컴퓨터와 연결하여 제어 시스템을 모니터링을

할 수 있다.

3. 시험 결과 및 분석

본 실험에서 권선기의 스푼(winding spool)을 구동하는 모터 A의 회전 속도 변화에 따른 해선기의 스푼(unwinding spool)을 구동한 모터 B의 회전 속도의 추종 관계를 상대적 동작 제어법을 적용하여 실험하였다. 상대적 차이 제어모델과 상대적 편차 최소화 제어모델에 대한 실험은 상하 이동롤러의 상하 이동과 해선기의 스푼의 속도관계에 대한 실험을 하였다. 실험에는 미세한 와이어 대신 재봉용 실을 사용하였다.

그림 9는 권선기 스푼과 해선기 스푼의 회전 속도 측정장치를 구성한 사진이다. 스푼의 회전 속도 측정은 광학식 속도 측정 장치(Hioki 3404)의 출력을 증폭시켜 저주파 통과 회로를 거쳐 오실로스코프를 사용하여 측정하였다. 그리고 상하 이동롤러의 위치 센서인 포텐서미터의 출력은 오실로스코프로 직접 측정하였다. 속도측정기의 측정 주기가 약 0.1초의 디지털 신호로 처리되는 장비이어서 측정 결과가 계단으로 나타나서 정밀한 측정 결과는 보장되지 않았다. 본 실험 장치에서 스푼의 회전속도와 전압의 관계는 100 rpm/volt 이고, 포텐서미터에 연결된 상하 이동롤러의 이동거리와 포텐서미터의 출력 전압 변동은 2mm/volt 으로 조정하여 실험하였다.

그림 10은 임의의 속도로 회전하는 권선기의 스푼에 대응하여 이를 추종하는 해선기 스푼의 회전 속도이다. 권선기 스푼의 회전 속도(권선기 속도)의 변화에 따라 해선기 스푼의 회전 속도(해선기 속도)가 잘 추종하고 하고 있음을 보여 준다. 속도는 두 스푼 간의 회전 속도 차이는 스푼에 감긴 실의 양에 따라 발생되며, 또한 스푼에 감긴 실은 수동으로 감아 상태가 양호하지 못하여서 두 스푼 간의 회전 속도 변화가 나타나는 것으로 판단된다. 해선기 스푼의 회전 속도 파형에서 시간 지연은 권선기 스푼의 회전 속도 변화가 상하 이동롤러의

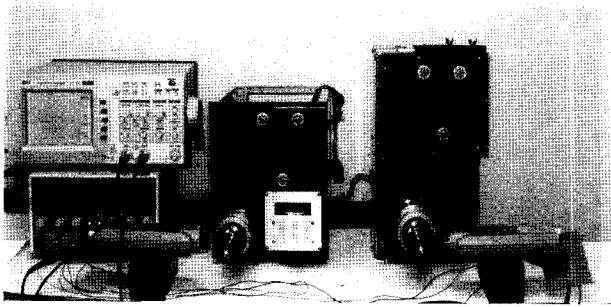


그림 9. 실험 장치 사진.
Fig. 9. Experimental set up.

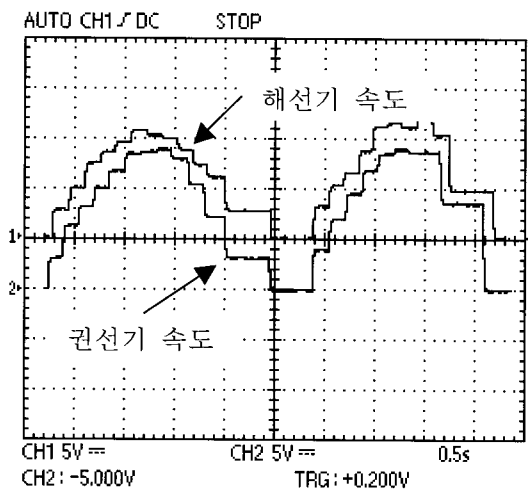


그림 10. 권선기의 스펴과 해선기의 스펴 속도 곡선.
Fig. 10. Speed Curves of Winding Spool and Unwinding Spool.

위치변화를 주게 되고 해선기 스펴의 위치 변화가 해선기 스펴의 회전 속도를 제어하게 되는 시간 차이에 의해 발생된다. 두 스펴 사이의 시간 지연은 상하 이동롤러의 상하 미세 위치 변화에 의해 두 스펴간 실의 장력은 최소한의 범위 내에서 유지할 수 있다.

그림 11은 산업 현장에서 사용하는 상대적 차이 제어모형을 적용한 상하 이동롤러 위치의 변화에 따른 해선기의 스펴 회전 속도 변화이다. 해선기의 속도는 상하 이동롤러 위치에 비례한다. 상하 이동롤러의 위치를 나타내는 출력은 포텐서미터의 출력으로 단위 구간이 5volt이고, 상하 이동롤러의 위치와 출력 전압의 관계는 2mm/volt 이다. 상하 이동롤러의 기준 위치에서 위치 변화는 약 38mm로 상하 이동롤러의 위치 변화가 크다. 상하 이동롤러의 위치 변화가 큰 경우에는 와이어 장력에 영향을 줄 수 있다. 그림 11에서 상하 이동롤러의 기준 위치와 오실로스코프의 채널 2의 기준과의 차이는 포텐서미터의 고정 위치에 따라 다르지만 상하 이동롤러의 기준 위치에서 현재의 상하 이동롤러 간의 상대적 차이는 항상 일정하다.

그림 12는 상대적 편차 최소화 제어모형을 적용한 상대적 동작 제어기의 실험 결과이다. 그림은 상하 이동롤러 위치와 해선기의 속도 관계이다. 해선기의 속도를 나타내는 채널1의 단위 구간은 5volt(100 rpm/volt) 이고, 상하 이동롤러의 위치를

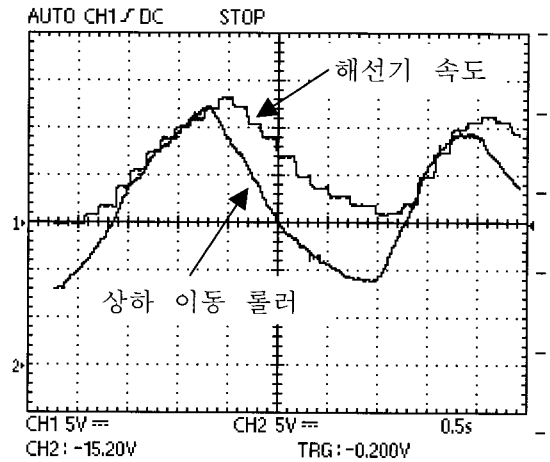


그림 11. 상대적 차이 제어모형을 적용한 해선기 스펴의 속도와 상하 이동롤러의 위치.
Fig. 11. Speed of Unwinding Spool and Position of Roller Dancer for Relative Difference Control Model.

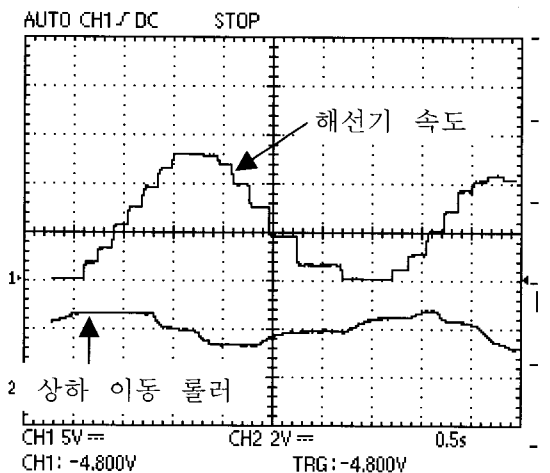


그림 12. 상대적 편차 최소화 제어모형을 적용한 해선기 스펴의 속도와 상하 이동롤러의 위치.
Fig. 12. Speed of Unwinding Spool and Position of Roller Dancer for Minimum Relative Error Control Model.

나타내는 채널2의 단위 구간은 2volt(2mm/volt)이다. 그림 12에서 해선기의 스펴의 속도의 변화가 큰 경우에도 상하 이동롤러 위치의 전압 변화는 약 ± 0.8 volt이므로 롤러 위치 변화는 약 ± 1.6 mm이다. 이 결과는 상대적 차이 제어모형의 위치 변화 38mm와 비교하여 상대적으로 상하 이동롤러의 위치 변화가 1/10 이하임을 보여 주고 있다.

상하 이동롤러의 위치가 허용 편차 범위 내에서는 해선 스펴의 회전속도는 현재의 속도를 유지하고, 상하 이동롤러의 위치가 + 편차를 유지할 때는 해선 스펴의 회전 속도는 증가하고, - 편차를 유지할 때에는 해선 스펴의 회전 속도가 감소하는 관계를 나타내고 있다. 이는 상대적 동작 제어기의 이론에서 시스템의 지령은 현재의 지령에 두 시스템 간의 관계에서 발생하는 상하 이동롤러의 위치 편차를 최소화하는 상대적 동작제어 방법이 실험으로 증명되었다. 상하 이동롤러 위

치의 최소한의 변화에서 해선기 스펙의 회전 속도는 독립적으로 권선기 스펙의 회전 속도를 잘 추종하는 것을 보여 주고 있다. 이 제어방법은 두 시스템 간의 상대 동작 기준을 유지할 수 있도록 추종하는 시스템이 제어되고 있어 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

V. 결론

본 연구는 독립적으로 동작하는 단위 시스템과 이를 추종하는 단위 시스템으로 구성된 하나의 시스템에서 추종하는 단위 시스템을 제어하기 위한 상대적인 동작제어 방법(relative motion control method)의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 연구에서 제안하는 상대적 편차를 최소화하는 상대적 동작제어 방법은 현재의 지령 $X_B(s)$ 에 두 시스템 간의 상대 편차 $e(s)$ 를 보완 하기 위한 편차 보완기 $C_e(s)$ 의 출력을 합산하여 추종하는 시스템의 새로운 지령($X_B(s)$)을 생성하는 다음과 같은 제어 모델이다.

$$X_B(s) = X_B(s) + C_e(s)e(s) \quad (a \leq X_B(s) \leq b)$$

상대적 편차 최소화를 적용한 상대적 동작제어 방법을 권선기(Winding Machine)의 권선속도에 따라 이를 추종하는 해선기(Unwinding machine)에 적용한 실험을 하였다. 두 시스템 간의 상대 편차를 측정하는 상하 이동롤러의 위치 변화를 최소로 유지하면서 추종 시스템인 해선기가 독립적으로 동작하는 권선기의 권선속도를 잘 추종하는 것이 증명되었다.

이 상대적 동작제어 방법은 상대 위치 제어, 상대 속도 제어, 또는 상대 반응 제어 등에 응용될 수 있고, 특히 와이어 신선기(wire drawing machine), 섬세한 섬유기계, 테이프 생산 장비 등의 정밀 장력 제어가 요구되는 시스템에 적용될 수 있다.

본 연구에서 제안한 상대적 편차 최소화 제어모델을 적용한 상대적 동작제어 방법은 단순한 두 시스템간의 상대적 동작 제어의 기본 모델에 적용하였으나, 추후 여러 시스템들 간의 상대적 제어방법에 대한 구체적인 방법의 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] D. Neculescu, "Mechatronics", Prentice Hall, 2002.
- [2] Bishop, "Mechatronics handbook", CRC press, 2002.
- [3] K. Okada, "System dynamics", Prentice-Hall, 1998.
- [4] Infranor, "Operation manual series SMTBDI", 1998.
- [5] S. H. Jeon, J.-M. Kim, K.-C. Jung, S. K. Sul, and J.-Y. Choi, "Decoupling control of bridle rolls for speed mill drive system", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, Jan./Feb. 1999.
- [6] N. A. Ebler, R. Arnason, G. Michaelis, and N. D'Sa, "Tension control: dancer rolls or load cells," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 29, pp. 727-739, July/Aug. 1993.
- [7] D. Jouve and D. Bui, "Digital servo drives for material tension control and winding/unwinding applications," in *Proc. PCIM Conf.*, pp. 71-78, 1996.
- [8] W. Wolfemann, "Tension control of webs - a review of the problems and solutions in the present and future", *Proceedings of the Third International Conference on Web Handling*, Stillwater, Oklahoma, pp 198-228, 1995.
- [9] P. Lin and M. S. Lan, "Effects of PID gains for controller with dancer mechanism on web tension", *Proceedings of the Second International Conference on Web Handling*, Stillwater, Oklahoma, pp. 66-76, 1993.
- [10] B. T. Boulter and Zhiqiang Gao, "A novel approach for on-line self-tuning web tension regulation", *IEEE Conference on Control Applications - Proceedings*, pp. 91-98, 1995.
- [11] N. S. Nise, "Control systems engineering" 2nd edition, Addison-Wesley Publishing co., 1995.
- [12] K. Okada, "Modern control engineering", Prentice-Hall, 1990.
- [13] 권옥현, 권오규, 홍금식, 이준화 "제어시스템 공학", 청문각, 1999.



김 성 권

1949년 8월 1일생. 1972년 동아대학교 기계공학과. 1986년 미국, Univ. of Minnesota 기계공학과(석사). 1988년 Univ. of Minnesota (박사). 1974년~1976년 LG전자 근무, 1976년~1984년 국방 과학 연구소 선임연구원, 1988년~2001년 삼성전자

자동화연구소장, 생산기술센터장, 메카트로닉스 센터장(부사장), 2001년 9월 ~ 한국산업기술대학교 제어계측공학과 교수, 지능메카트로닉스 시스템 연구소장. 관심분야는 메카트로닉스 시스템, 로보틱스, 시스템제어, 동작 제어 등.