

LCD 반사필름의 접합 와인딩 공정을 위한 장력 제어

황정호*, 노지훈*, 박기홍#

Tension Control for Coating Winding Process of LCD Reflective Film

Jungho Hwang*, Jihoon Roh* and Kihong Park#

ABSTRACT

The demand for the metal coil coated with reflective film is rapidly increasing with the increasing demand of notebook PCs and LCD monitors. During the coating process, it is very important to regulate tension of the coil metal since fluctuation of the tension can significantly degrade quality of the product. In this study, a tension controller has been developed for winding process of LCD reflective film coating. The controller has been tested on the existing coating facilities, and the results are to be given in this paper.

Key Words : Coating winding process (접합 와인딩 공정), LCD Reflective film (LCD 반사필름), Tension control (장력 제어)

기호설명

x, y = longitudinal & vertical directions

$()_1, ()_2$ = subscripts for winder and unwinder

$()_d$ = desired quantity

ϵ = coil thickness

r = roll radius

s = length of coil catenary

\hat{s} = Laplace variable

v_0 = coil speed in coating process

ω = angular velocity of roll

u = input inverter voltage

T = coil tension

a, b, L = geometric parameters of catenary

1. 서론

최근, 노트북과 모니터 등에서의 액정디스플레이(LCD) 수요가 증가함에 따라 접착 반사막판의 수요도 급격히 증가하고 있다. 반사막판에 대한 기술은 반사용 박막재료에 대한 기술과 반사막을 금속판에 신뢰성 있게 접착하는 기술로 나뉘어진다. 본 연구는 후자의 기술개발에 해당된다.

Fig. 1은 현장에서 사용되고 있는 LCD 반사필름 접착용 와인딩 장치를 보여준다. 사진의 왼쪽에 보이는 둥근 회전통이 달린 기계가 와인더로서, 반사막이 접착되고 난 금속코일을 롤에 감아주는 역

접수일: 2006년 6월 27일; 게재승인일: 2007년 3월 16일

* 한국생산기술연구원 e가공공정팀

교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail: kpark@kookmin.ac.kr Tel. (02) 910-4689

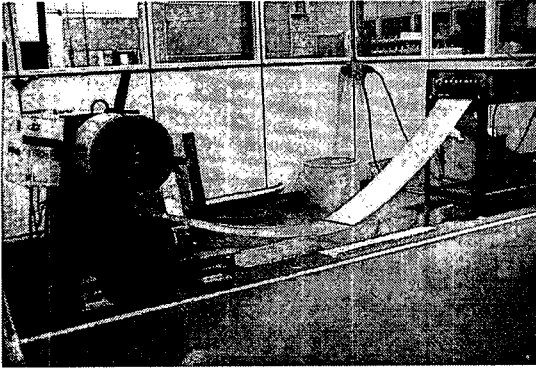


Fig. 1 Coating winding process of LCD reflective film

할을 한다. 사진의 오른쪽에 보이는 사각 형상의 기계는 금속코일에 반사필름을 접착시키는 코팅장치이다. 사진에는 보이지 않으나, 코팅장치의 오른쪽에 와인더와 같은 형상의 풀림장치인 언와인더가 연결되어, 롤 형태의 금속코일을 코팅장치에 공급해준다.

기존의 LCD 반사필름 접착 시스템의 작동원리를 살펴보면 다음과 같다. 언와인더측의 풀림롤에서 금속코일이 나와 코팅장치로 들어가면, 코팅장치 내부에서 금속코일에 반사막이 코팅되고, 코팅이 된 금속코일은 코팅장치를 빠져나와 와인더의 감김롤로 감겨져 들어간다. 코팅장치 내부에서 금속코일이 이송되는 속도는 일정하지 않으며, 이 속도는 또한 풀림롤의 풀림속도나 감김롤의 감김속도와 동기화되어 있지 않다.

와인더와 코팅장치 사이의 금속코일에는 레버가 걸쳐져 있고, 이 레버에는 리미트 스위치가 연결되어 있다. 금속코일의 현의 높이가 일정한 범위 내에서 유지될 수 있도록 와인더 모터는 회전과 멈춤 작업을 반복한다. 이러한 작업은 코팅장치와 언와인더 사이에서도 수행되며, 금속코일 현의 높이는 이러한 on/off 제어로 인해 짧은 시간에 큰 폭으로 변하게 된다. 이로 인해 금속코일에 진동이 발생되며 코팅장치의 전, 후 부분에 걸쳐있는 금속코일에는 큰 장력의 변화가 발생하게 된다. 이런 현상은 기포나 주름, 늘어남과 같은 코팅면의 불량요인이 되고, 와인더측의 코일 감김상태에도 좋지 않은 영향을 주게 된다.

이러한 원인을 제거하기 위해서는 진동을 줄이고, 코팅의 질을 저하하는 장력의 변화를 제거하는

것이 무엇보다 중요하다. 먼저 진동을 제거하기 위해서는 on/off 스위치에 의한 단속적인 공정을 연속적인 공정으로 바꾸어야 한다. 둘째, 코팅면의 접착상태의 불량을 줄이기 위해서는 장력의 변화를 최소화해야 한다. 장력의 변화를 줄이고 장력을 일정하게 유지하기 위해 와인더와 코팅장치 사이의 코일을 팽팽하게 유지시킬 수도 있지만 지나친 장력은 오히려 코팅공정에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 금속코일의 장력을 적절한 값에서 일정하게 제어하는 것이 중요하다.

2. 시스템 모델

2.1 하드웨어 구성

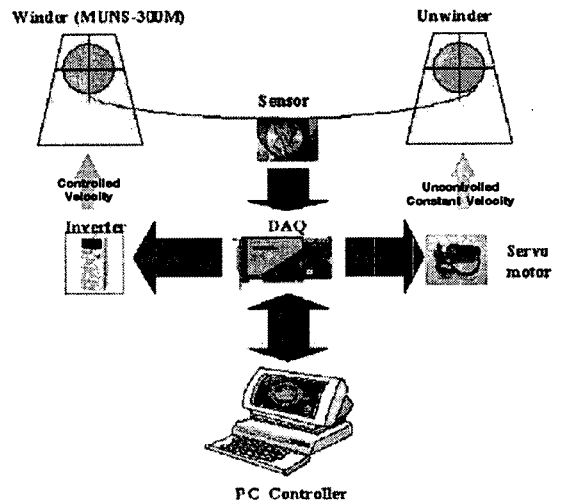


Fig. 2 Overview of system hardware

Fig. 2는 본 연구를 수행하기 위해 구성한 와인딩 시스템이다. 와인더로는 무송엔지니어링사의 MUNS-300M 모델이 사용되었다. 이 장치에는 기본적으로 높이 측정용 리미트 스위치가 장착되어 나오지만, 본 연구에서는 연속제어를 위해 이를 포토셔미터로 교체하였다. 여기에 피드백 제어로 AC모터를 제어하기 위해 범용 인버터를 추가적으로 장착하였다.

2.2 와인딩 시스템의 모델

금속코일에 반사막을 코팅하기 위한 와인딩 시스템은 Fig. 3과 같이 언와인더, 코팅장치, 와인더로 구성된다.

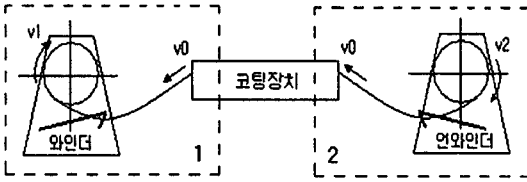


Fig. 3 Configuration of film coating system

본 연구에서는 이 시스템을 크게 와인더부와 언와인더부의 두 부분으로 구분하였다. 와인더부는 코팅장치에서 v_0 의 선속도로 나오는 코일을 일정하게 높이를 유지하면서 v_1 의 선속도로 감김틀에 감는 역할을 하고, 언와인더부는 코팅장치 속도 v_0 에 맞춰 일정한 높이를 유지할 수 있도록 v_2 의 선속도로 코일을 롤에서 풀어주는 역할을 한다. 코팅장치의 이송속도 v_0 는 변화할 수 있다. 이러한 시스템의 수학적 모델을 유도하기 위해 먼저 다음과 같은 가정을 하였다.

- 양측의 폴림롤과 감김틀이 금속코일과 접하는 부분의 높이는 일정하다.
- 코일의 재질과 폭은 균일하다.
- 코일의 처짐은 오직 자중에 의한 것이고 현수선(catenary)의 모양을 유지한다.¹
- 모터의 시상수는 코일이 감겨 있을 때나 없을 때나 같은 값을 가진다.

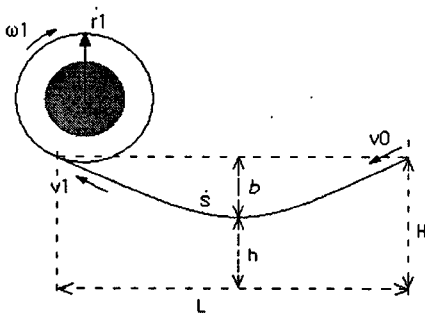


Fig. 4 System variables in winding process

Fig. 4는 와인딩 시스템에서 롤의 반경 변화와 현수선의 변화를 고려하기 위한 그림이다. 감김틀과 폴림롤에서는 작업 진행에 따라 금속코일이 각각 감기고 풀리기 때문에 반경의 변화가 생기는데 이를 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{r}_1 = \frac{\varepsilon \omega_1}{2\pi} \quad (1a)$$

$$\dot{r}_2 = -\frac{\varepsilon \omega_2}{2\pi} \quad (1b)$$

위 식에서 \dot{r}_1 은 감김틀의 반경 변화로 양의 값을 가지고, \dot{r}_2 는 폴림롤의 반경 변화로 음의 값을 가진다. Fig. 3에서 1로 표시된 와인더부에서, 코팅장치와 롤 사이에 있는 현의 길이의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 감김틀의 속도가 코팅장치 출구에서의 속도보다 빠르면 현의 길이는 짧아지고, 반대의 경우라면 길어진다. Fig. 3에서 2로 표시된 언와인더부에서는 이와 반대의 현상이 생긴다. 와인더부와 언와인더부의 현수선 길이를 각각 s_1 , s_2 라고 하면, 현수선 길이의 변화율은 다음과 같다.

$$\dot{s}_1 = -v_1 + v_0 = -r_1\omega_1 + v_0 \quad (2a)$$

$$\dot{s}_2 = v_2 - v_0 = r_2\omega_2 - v_0 \quad (2b)$$

와인더부와 언와인더부의 인버터/모터 시스템에서 입력으로 인가되는 전류 u 와 출력으로 나오는 회전속도 ω 사이의 관계는 다음과 같은 일차식으로 모델링하였다.

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{\tau}\omega + \frac{A}{\tau}u \quad (3)$$

위의 식에서 τ 와 A 는 각각 모터의 시상수, 모터의 DC게인으로, 이들 값은 모터의 전기적 특성과 모터축에 연결되는 부하의 관성 및 점성마찰 계수에 따라 결정된다.² 본 연구에서는 이들 값을 실험적으로 구하였다.

2.3 현수선의 모델

금속코일이 처진 상태에서 일정한 장력을 유지하도록 제어를 설계하기 위해서는 먼저 처진 금속코일에 대한 모델이 필요하다. 그리고 장력제어를 위해서 현에 걸려있는 장력을 알아야 하는데 현재 금속코일에 걸려있는 장력은 속도차나 양쪽에서 코일을 잡아당기는 토크의 차이에 의한 장력이 아니고 자중에 의한 장력만이 있으므로 로드셀이나 기타 센서로 장력을 측정하기는 매우 힘들다. 이에 따라 본 연구에서는 금속코일에 대한 수학적식을 이용하여 장력을 계산하였다.

금속코일에 걸리는 장력을 계산하기 위해서 먼저 Fig. 5와 같은 장력분해를 고려한다.

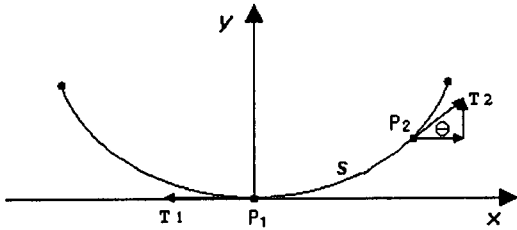


Fig. 5 Decomposition of catenary tension

Fig. 5에서 현의 가장 낮은 점 P_1 과 다른 임의의 점 P_2 사이에는 금속코일 무게와 장력 T_1 과 T_2 의 세가지 힘이 작용한다. P_1 과 P_2 사이의 코일의 길이를 s_x 라 하고 선밀도를 ρ 라 하면 P_1 과 P_2 사이의 코일의 무게는 ρs_x 가 된다. P_2 에서 현수선의 접선 각도를 θ 라고 하면 장력과 자중 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$T_1 = T_2 \cos\theta \quad (4a)$$

$$\rho s_x = T_2 \sin\theta \quad (4b)$$

식 (4)에 의해 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{\rho s_x}{T_1} = \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

P_1 과 P_2 사이의 현 길이 s_x 는 다음과 같다.

$$s_x = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (6)$$

위 식을 x 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{ds_x}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (7)$$

식(5) ~ 식(7)으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{\rho}{T_1} \left(\frac{ds_x}{dx} \right) = \frac{\rho}{T_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (8)$$

위 식으로부터, x 와 y 의 기하학적 관계가 주어지

면 장력 T_1 을 구할 수 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 현수선의 기하학적 관계를 보여준다.

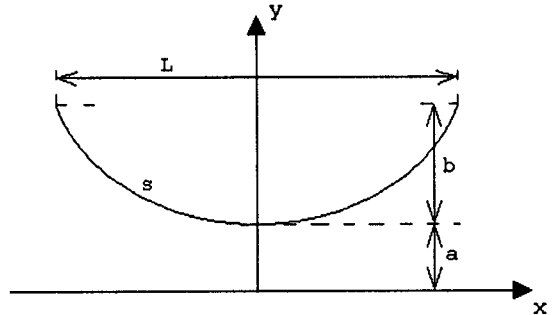


Fig. 6 Configuration of catenary

현수선의 수학적식은 다음과 같다.³

$$y = \frac{a}{2}(e^{x/a} + e^{-x/a}) \quad (9)$$

위 식에서 현수선은 a 로써 표현됨을 알 수 있으며 이 값은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 바닥으로부터 현수선 최저점과의 길이를 의미한다. 하지만 이 길이는 동일한 현수선일지라도 현수선 양끝단의 수직 위치에 따라 값이 다를 수 있으므로 이 값을 현재 현수선의 형상을 판단하는 기준으로는 사용할 수 없음을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 현수선의 처짐량 b 를 현수선의 형상을 판단하는 기준으로 삼았으며 이에 대한 내용은 3.4절에 설명되어 있다.

Fig. 7과 Fig. 8는 현수선의 넓이 L 이 주어졌을 때, 파라미터 a 의 값에 따른 현수선의 형상을 보여준다. Fig. 7은 L 이 1 m 이고, a 가 0.2, 0.4, 0.6, 0.8인 경우 식 (9)가 나타내는 현수선의 절대형상을 나타낸다. a 는 곧 현수선 최저점의 y 값과 같음을 확인할 수 있다. Fig. 8는 L 이 3 m, a 가 1.0, 1.3, 2.0, 4.0일 때의 현수선의 형상을 보여준다. 여기서는 처짐량을 보다 잘 비교하기 위해 현수선 양끝단을 동일하게 위치시켰다.

식 (8)과 식 (9)를 이용하면 Fig. 6의 현의 총길이 s 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$s = a(e^{L/2a} - e^{-L/2a}) \quad (10)$$

식 (5)에 $x=L/2$ 를 대입하면 다음을 얻는다.

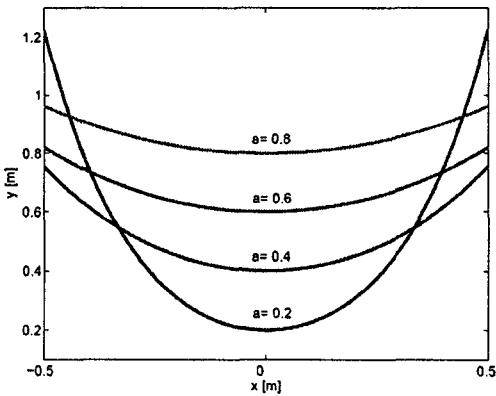


Fig. 7 Catenary shape when $L = 1\text{ m}$

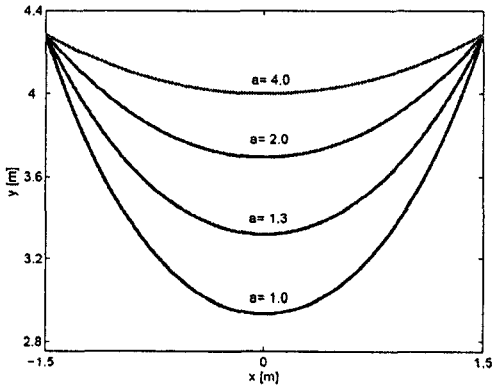


Fig. 8 Catenary shape when $L = 3\text{ m}$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=L/2} = \frac{\rho(s_x)_{x=L/2}}{T_1} = \frac{\rho s}{2T_1} \quad (11)$$

여기에 식 (9)와 식 (10)을 대입하면 식 (12)를 얻는다. 식 (12)는 파라미터 a 가 물리적으로 하중과 장력에 관계가 있음을 보여준다.

$$a = \frac{T_1}{\rho} \quad (12)$$

식 (9)와 식 (12)를 이용하면 코일의 처짐량 b 로부터 장력 T 를 계산할 수 있다.

$$T = \frac{L^2 \rho}{8b} \quad (13)$$

코팅 시스템에서, 와인딩과 언와인딩 공정의 L

은 기계들의 배치에 따라 정해지고, 선밀도 ρ 는 코일의 재질에 의해 결정되므로, 장력 T 는 처짐량 b 만의 함수가 된다. 그러므로 처짐량 b 를 일정하게 유지한다면 장력 또한 일정한 값으로 유지됨을 알 수 있다.

3. 제어기 설계

3.1 제어기의 구조

본 연구에서 제어기는 와인더부와 언와인더부에 대해 별도로 설계가 되었으나, 그 기본 구조는 동일하므로 여기서는 와인더부의 제어기만을 살펴볼 것이다

식 (2a)은 와인더부의 운동방정식을 보여주며, 이 식에서 롤 반경 r_1 은 식 (1a)에서 보는 것과 같이 시변(time-dependent) 비선형의 성질을 가진다. 그러나 본 연구의 경우 코일의 접힘을 막기 위해 롤을 감지않은 드럼의 크기가 상대적으로 크며, 코팅공정으로 인해 롤의 이송속도가 빠르지 않기 때문에, 롤 반경이 r_0 로 일정하다는 가정 하에 제어기를 설계하였다. 만약 롤 반경의 변화가 빠르거나 변화범위가 큰 경우에는 적응식 제어기를 사용하는 것이 바람직하다.⁴

위와 같은 가정에 따라 식 (2a)는 다음과 같이 선형화될 수 있다. 편의상 와인더부를 나타내는 첨자 1을 생략한다.

$$\dot{s} = -r_0 \omega + v_0 \quad (14)$$

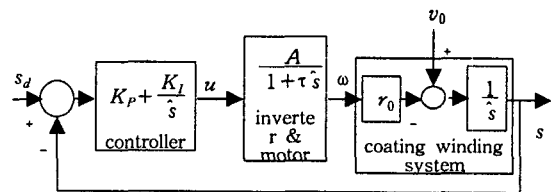


Fig. 9 Block diagram of controlled system

Fig. 9는 와인더부를 위한 제어시스템의 구조를 보여준다. 그림에서 보듯이 이 시스템에는 두 개의 입력과 하나의 출력이 있다. 두 개의 입력은, 기준 입력인 코일의 원하는 길이 s_d 와 외란입력에 해당하는 코팅장치의 속도 v_0 로 구성되며, 출력은 실제 현수선의 길이 s 가 된다.

비례적분(PI) 제어기를 사용한 와인더부의 폐루

프 제어시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{S}{S_d}(\hat{s}) = \frac{-AK_P r_0 \hat{s} - AK_I r_0}{\tau \hat{s}^3 + \hat{s}^2 - AK_P r_0 \hat{s} - AK_I r_0} \quad (15a)$$

$$\frac{S}{V_0}(\hat{s}) = \frac{\tau \hat{s}^2 + \hat{s}}{\tau \hat{s}^3 + \hat{s}^2 - AK_P r_0 \hat{s} - AK_I r_0} \quad (15b)$$

위 식에서 A 와 r_0 는 양의 상수이다. 식 (15)에서 시스템이 안정화되는 계인의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$K_I < 0, \quad K_P < K_I \tau \quad (16)$$

위에서 본 것과 같은 방법으로 언와인더부의 페루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{S}{S_d}(\hat{s}) = \frac{AK_P r_0 \hat{s} + AK_I r_0}{\tau \hat{s}^3 + \hat{s}^2 + AK_P r_0 \hat{s} + AK_I r_0} \quad (17a)$$

$$\frac{S}{V_0}(\hat{s}) = \frac{-\tau \hat{s}^2 - \hat{s}}{\tau \hat{s}^3 + \hat{s}^2 + AK_P r_0 \hat{s} + AK_I r_0} \quad (17b)$$

언와인더부에서 시스템이 안정하기 위한 계인의 범위는 다음과 같다.

$$K_I > 0, \quad K_P > K_I \tau \quad (18)$$

3.2 반와인드업(Anti-windup) 제어기

Fig. 10은 포화영역을 가지는 구동기가 포함된 비례적분제어 시스템을 나타낸다. 큰 기준 계단 입력으로 인해 구동기가 u_{max} 에 포화된다고 가정하면 적분기는 오차 e 를 계속 적분하고 신호 u_c 가 계속 커지게 된다. 그렇지만, 플랜트의 입력은 여전히 최대값, 즉 $u = u_{max}$ 에 있게 되어 오차는 크게 존재하게 된다.

플랜트에 대한 입력이 변하지 않으므로 u_c 의 증가는 아무런 도움을 주지 못한다. 포화가 오랫동안 지속되면 적분기의 출력은 상당히 커질 것이며, 이후에 적분기 출력 u_c 를 제어기가 포화되지 않고 적절한 작동을 할 수 있는 비례범위 내로 돌아오게 하는 것은 상당한 양의 반대방향의 오차 e 를 발생하게 할 것이다.

본 연구에서 모터를 구동하는 인버터는 0과 +5V에서 포화된다. 시스템이 정지되어 있을 때, 크기

가 5인 입력 r 은 크기 5의 오차 e 를 발생시키며, 제어는 포화가 되고, 적분 작용은 시작된다. 적분기의 출력 u_c 는 플랜트 출력이 기준 입력을 초과할 때까지 즉 $e < 0$ 까지 증가하게 된다.

이러한 문제의 해결법은 구동기가 포화되자마자 적분 작용을 차단하는 것인데 이를 적분기 반와인드업(anti-windup)이라 한다. 이 방법은 구동기가 포화되면, PI 제어기의 출력 u_c 가 피드백되어 적분기의 입력 e 가 빨리 0이 되도록 하고, 구동기가 포화되지 않으면 피드백 루프에 의한 신호가 발생되지 않도록 하여 정상적인 PI제어기가 되도록 하는 것이다.⁵ 이러한 배경에서 본 연구에서는 반와인드업 로직이 추가된 비례적분 제어기를 설계하였다.

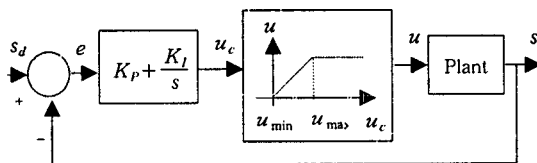


Fig. 10 Controlled system with actuator saturation

3.3 제어기 계인

와인더부의 경우 제어 계인값을 찾기 위한 조건으로 감김롤의 초기 반경은 $r_0 = 0.215 m$, 입력전압대 모터회전수와의 비례계수는 $A = \pi/10$, 인버터 모터의 시상수는 $\tau = 0.2 sec$, 풀림롤의 속도는 $v_0 = 1/6 m/s$, 초기 시간에서 $s = 0$ 이고 현의 길이의 기준입력값은 $s_d = 1$ 로 하였다. 적절한 오버슈트와 빠른 응답시간을 위해 계인으로 $K_P = -20$, $K_I = -5$ 를 선정하였고, 이때 페루프 시스템의 극점은 -2.8105, -1.8679, -0.3217에 위치한다.

Fig. 11는 반와인드업을 장착하지 않고 제어한 경우의 결과로, 위쪽에 있는 그래프는 현수선의 길이 변화를 나타내고, 아래쪽의 그래프는 제어기 출력을 나타낸 것이다. Fig. 12은 언와인더부에 대한 결과로, 초기 풀림롤의 반경 $r_0 = 0.260 m$ 를 제외한 나머지조건은 Fig. 11의 와인더의 조건과 같다. 이 때 계인 값은 $K_P = 20$, $K_I = 5$ 이다. Fig. 11과 Fig. 12는 모두 반와인드업 로직이 없는 상태의 결과이다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 보는 바와 같이 제어기 출력이 구동기의 한계인 0과 5를 넘어서고 있는 것을 볼 수 있다.

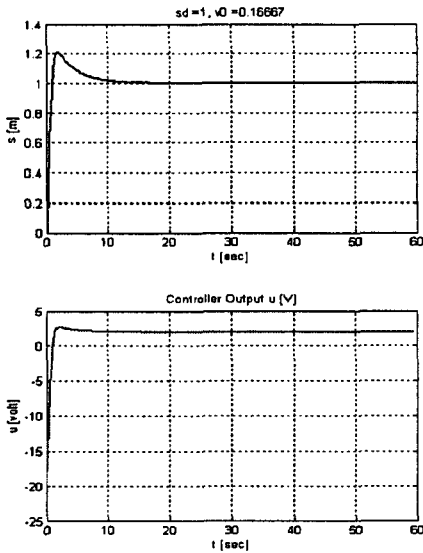


Fig. 11 Controlled results of winder (no anti-windup)

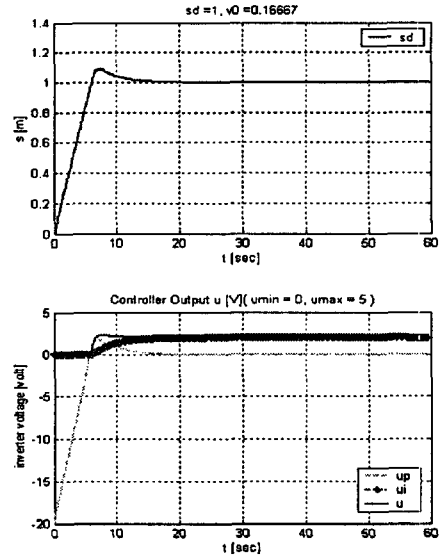


Fig. 13 Controlled results of winder (anti-windup)

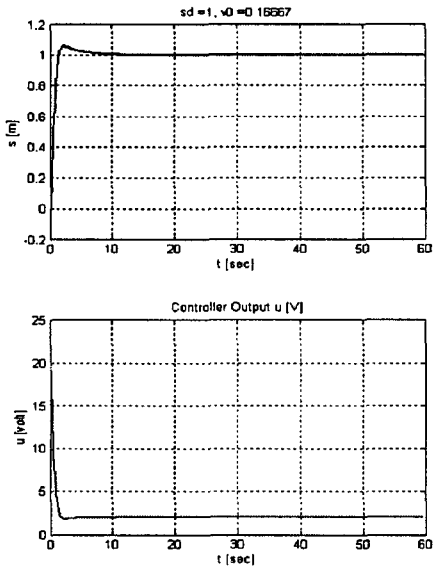


Fig. 12 Controlled results of unwinder (no anti-windup)

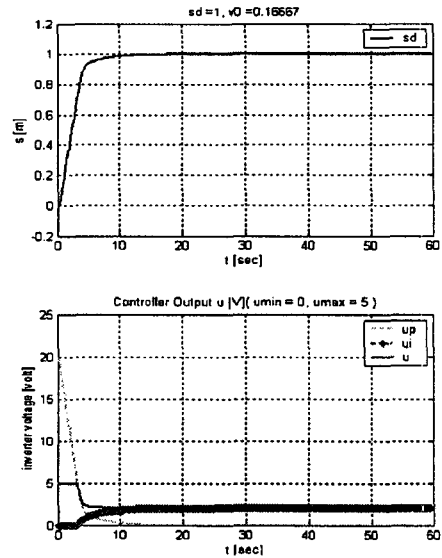


Fig. 14 Controlled results of unwinder (anti-windup)

Fig. 13과 Fig. 14는 앞서의 제어기에 적분기 반와인드업 로직을 추가한 것이다. 제어기 출력은 구동기의 출력범위 내에 있는 것을 볼 수 있으며 성능도 향상되었음을 볼 수 있다. 그림의 아래쪽 그래프에서 up로 표시된 곡선은 제어기에서 비례계

인에 의한 제어값이고, ui 곡선은 적분제어에 의한 제어값이며, u 곡선은 이들 두 값의 합을 나타낸다.

3.4 현수선의 근사화

Fig. 9의 페루프시스템 블록선도를 살펴보면, 원하는 현수선의 길이 s_d 가 입력으로 들어가서 실제 현수선의 길이 s 가 출력으로 나오는 것을 볼 수

있다. 그러나 실제로 이 시스템을 구현할 때는 입력과 출력으로 다른 물리량을 사용하는 것이 효과적이다. 우선 입력으로는 현수선의 길이보다 육안으로 쉽게 볼 수 있는 현수선의 처짐 b 를 선택하는 것이 좋다. 출력의 경우 또한 현수선의 길이보다 모터축에 장착된 포텐서미터와 코일에 걸쳐진 레버의 기하학적 관계를 이용하여 손쉽게 구할 수 있는 h (Fig. 4 참조)를 사용하는 것이 좋다. Fig. 15는 이와 같은 새로운 물리량을 입력과 출력으로 사용할 때 필요한 신호변화를 보여준다.

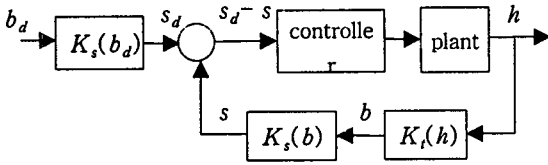


Fig. 15 Signal conversion in controlled system

$K_s()$ 는 현수선의 처짐량 b 를 길이 s 로 바꿔주는 함수이고, $K_r()$ 는 현수선의 지면으로부터의 높이 h 를 처짐량 b 로 바꿔주는 함수이며, 이들 함수들은 비선형이다.

전체시스템의 입력은 원하는 처짐량 b_d 로 주어지고 변환함수 $K_s()$ 에 의해 원하는 현수선의 길이 s_d 로 변환된다. 출력단의 경우 간접적으로 측정된 높이 h 는 변환 함수 $K_r()$ 와 $K_s()$ 에 의해 s 로 변환된다. 기준입력 b_d 가 현의 길이 s_d 로 변환되는 것은 시스템이 구동할 초기에 한번만 수행되지만 s 는 시스템이 구동되는 동안 실시간으로 계속해서 h 로부터 계산되어야 한다.

파라미터 a 는 장치의 배치에 의해 결정되는 L 과 현수선의 처짐량 b 와 식 (9)를 이용하여 얻을 수 있다. 여기서 얻은 a 와 L 을 식 (10)에 대입하면 현수선의 길이 s 를 구할 수 있다. 그런데 식 (9)는 $a=f(y)$ 의 형태로 변환되지 않기 때문에 파라미터 a 를 구하기 위해서는 수치적인 방법을 사용해야만 한다. 이는 실시간 제어에 있어 장애가 될 수 있으므로 본 연구에서는 제어기의 구현부에서 현수선의 길이 s 를 계산할 때는 식 (9) 대신 현수선의 2차 근사식을 이용하였다.

현수선을 2차 포물선으로 근사화하면 다음과 같다.

$$y = px^2 \quad (19)$$

$L=2\ell$ 이라 할 때, x 가 ℓ 이면 $y=b$ 이므로 p 를 구할 수 있다.

$$p = \frac{2b}{\ell^2} x \quad (20)$$

식 (6)과 식 (20)을 이용하면 현수선의 길이 s 를 구할 수 있다.

$$\text{where } c = \frac{\ell^2}{2b} \quad (21)$$

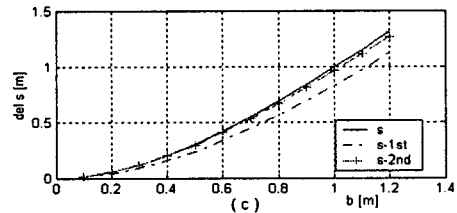
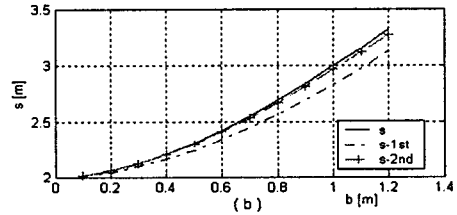
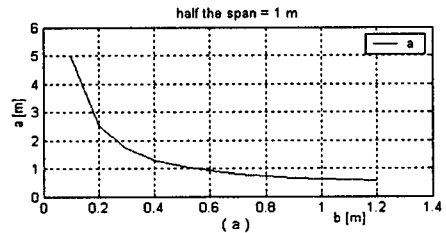


Fig. 16 Curve fitting of sag at $L=2m$

Fig. 16은 식 (10)과 위의 2차 근사식을 이용한 s 를 비교한 것이다. $L = 2m$ 이며 각 그래프에서 처짐량 b 의 범위는 0.1에서 1.2이다. Fig. 16의 (a), (b), (c)는 각각 a , s , ds/dx 의 값을 나타낸다. 그림으로부터 2차 근사식을 이용한 s 값이 본래의 s 값에 거의 일치함을 볼 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

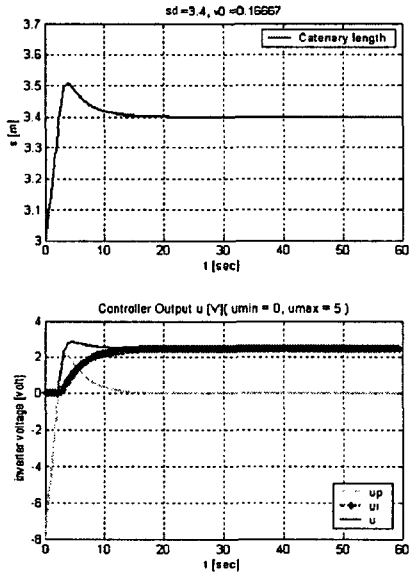


Fig. 17 Simulation results of controlled system (winder)

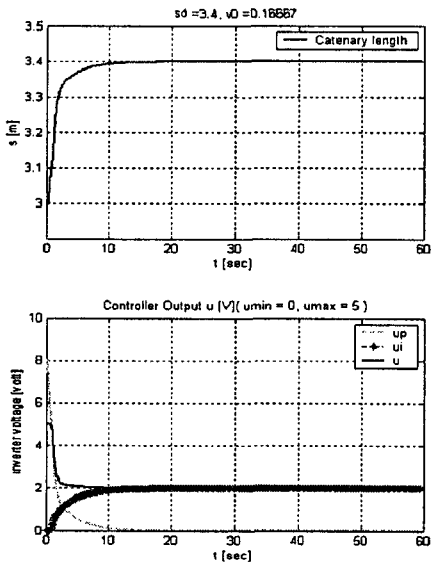


Fig. 18 Simulation results of controlled system (unwinder)

Fig. 17은 Fig. 4의 조건을 이용해서 수행한 와인더부 시뮬레이션의 결과를 보여준다. Fig. 4에서 b 는 현의 처짐량이며 기준입력값이다. 하지만 실제의 기준 입력은 현의 길이인 s_d 가 된다. 기준 입력 b_d 는 0.7 m 이고(실제 기준입력 s_d 는 3.4 m),

스팬의 길이 L 은 3 m , 높이 H 는 1 m 이며 속도 v_0 는 10 rpm 초기 현의 길이는 3 m 로 주었다. Fig. 17에서 초기값이 기준값인 3.4 보다 작으므로 처음에는 제어기의 출력이 0 이 되어 모터가 회전하지 않고 3.4 를 넘어서는 순간부터 0 이 아닌 값이 출력되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 18는 언와인더부에 대한 시뮬레이션 결과이고, 위쪽의 그래프는 현수선의 길이에 대한 것이고 아래의 그래프는 제어기 출력에 대한 것이며 진하고 얇은 실선이 제어기 출력 u 이다. 언와인더부에서는 와인더부와 달리 현의 길이가 초기부터 줄어들기 시작하므로 작동 초기부터 모터가 작동하는 것을 볼 수 있다.

4.2 모델의 검증

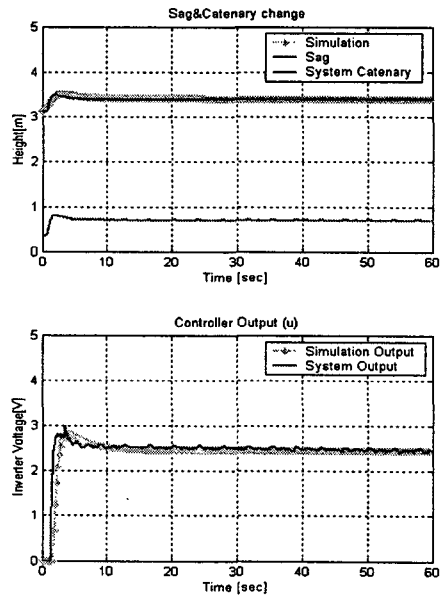


Fig. 19 Test results for model validation (winder)

Fig. 19은 와인더부에 대한 실험 결과이다.

와인더에서 기준 입력 b_d 는 0.7 m 이고, 초기조건은 스팬의 길이 L 이 3 m , 높이 H 는 1 m , 풀럼롤의 속도 v_0 는 8 rpm 초기 현의 길이는 3.1 m 이다. 이 그림에서 진한 실선은 실험값이고, 별 표시가 있는 그래프는 같은 조건의 시뮬레이션값이다.

위의 그래프에서 아래쪽 흐린 실선은 현수선의 처짐량 b 를 나타낸다. 이들 실험 결과는 기준입력

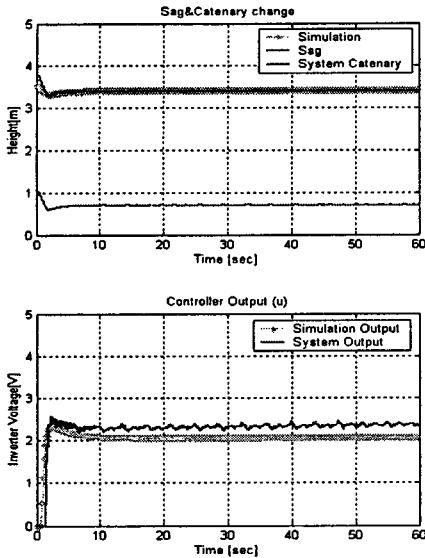


Fig. 20 Test results for model validation (unwinder)

즉 원하는 처짐량 b_d 가 0.7 m 일 때 현의 길이가 약 3.4 m 로 시스템의 기준입력을 잘 따라가며 시뮬레이션과도 거의 일치함을 볼 수 있다. 아래쪽의 그래프에서 제어기 출력도 시뮬레이션과 거의 일치한다. Fig. 20는 언와인더에 대한 그래프이다. 이때 초기 현의 길이는 3.54 m 이다.

4.3 제어기 성능 검증

Fig. 21는 와인더부에 대한 시험결과로 초기조건은 $L = 2.2\text{ m}$, $H = 0.6\text{ m}$ 이고 기준입력인 b_d 가 0.5 m 일 때의 결과이다. Fig. 22은 언와인더부에 대한 시험결과로 실험조건은 $L = 2.1\text{ m}$, $H = 0.6\text{ m}$ 이며 기준입력인 처짐량 b_d 는 0.4 m 이다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 실험에서도 기준입력을 매우 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션과 실험 및 실제 현장에서의 시험결과들로부터 설계된 제어기가 원하는 목표를 만족시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 23는 제어로 인한 감김롤의 상태 변화를 보여준다. 사진으로부터 제어로 인해 감김상태가 매우 개선된 것을 볼 수 있다.

5. 결론

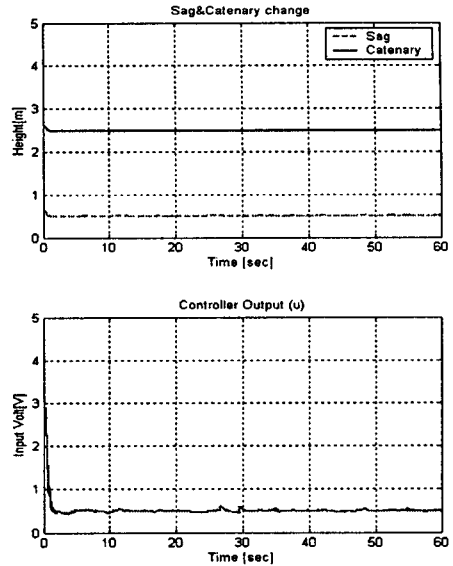


Fig. 21 Test results of controlled system (winder)

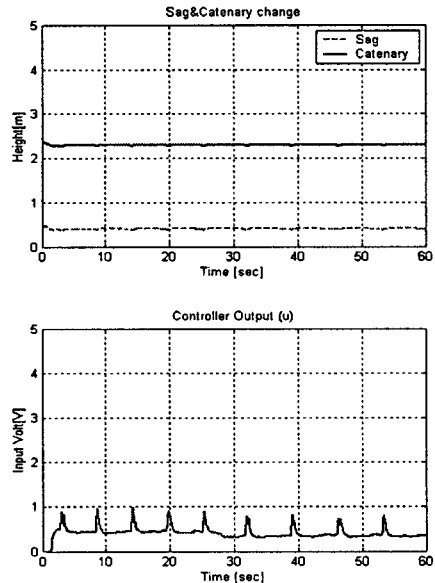
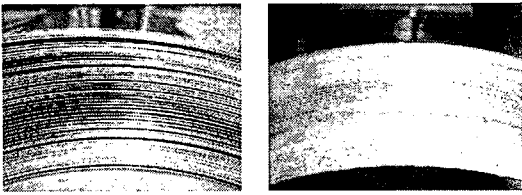


Fig. 22 Test results of controlled system (unwinder)

본 연구에서는 LCD용 반사필름의 코팅 와인딩 공정을 위한 제어기를 설계하였다. 이 공정에 있어 중요한 것은 반사필름이 코팅되기 전과 후의 금속 코일의 장력을 일정하게 유지시키는 것이다. 본 연



(a) without control (b) with control

Fig. 23 Comparison of roll quality due to control

구에서는 금속코일의 처짐을 이용하여 금속코일의 장력을 간접적으로 계산하고, 이 값이 기준입력을 추종하도록 PI제어기를 설계하였다. 적분제어에 의한 과도한 오버슈트를 방지하기 위해 반와인드업 로직을 추가하였다. 실험 결과 본 연구에서 설계된 제어기로 금속코일의 처짐을 일정한 높이에 유지함으로써 금속코일의 장력이 일정하게 유지되고 진동도 거의 발생하지 않는 것을 관찰하였다. 또한 장력을 균일하게 제어함으로써 코일의 감김상태도 현저하게 향상되는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

1. Rodium, D. R., "The Mechanics of Winding," TAPPI, 1994.
2. Dorf, R. C. and Bishop, R. H., "Modern Control Systems," 10th Ed., pp. 58-67, 2004.
3. Roisum, D. R., "The Mechanics of Rollers," TAPPI Press, 1996.
4. Park, K. and Heo, S. J., "Controller Design for Web Winding Process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 99-107, 2003.
5. Franklin, G. F., "Feedback Control of Dynamic Systems," Addison Wesley, 1994.