

인쇄전자를 위한 롤투롤 시스템의 필름 정밀제어에 관한 연구

김동민*, 최종근⁺, 김형선⁺⁺

(논문접수일 2010. 4. 20, 심사완료일 2010. 10. 01)

Precision Film Control of Roll to Roll System for RFID Printing

Dong-Min Kim*, Jong-Guen Choi⁺, Hyung-Sun Kim⁺⁺

Abstract

RFID printing technology has emerged recently as an important tool for leading future IT. Therefore, many manufacturers concerning on low cost and mass production of the related products pay close attention to the printing technology. In order to realize printed electronics, the technologies for fine line-width/gap printing and registration are essential work. This study proposes a precise Roll to Roll control system that is capable of tilting two posts. Two controllable tilting posts can adjust film position at traverse direction for the precision registration. A mathematical model for representing the geometric features of each posts in Roll to Roll printing system is established first. Then an operating program is built to implement the system and to control film movement. For experimental test, a hardware system is fabricated which is consisted of two AC servo motors, two posts tilting mechanisms, several guide rolls, and so on. The test results show the proposed system can control the film position precisely at traverse direction.

Key Words : RFID(전파식별), Roll to Roll(롤투롤), Tilting posts(경사포스트), Traverse direction(횡방향)

1. 서론

최근 사물에 태그를 부착하여 무선으로 사물의 정보를 확인하는 전파식별(RFID, Radio Frequency Identification)기술이 등장하여 미래 IT의 선도할 기술로 주목받고 있다. 인

쇄전자 연구에서 고가의 재료와 장비, 복잡한 공정으로 인하여 단순용도의 값싼 제품을 만드는 것에 종래의 생산방식의 한계를 극복 할 수 있는 대체 기술로서 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다⁽¹⁾. 현재 연구가 집중되고 있는 대체 기술로 메탈젯(metal jet), 롤투롤(Roll to Roll), 미세접촉프린트

* 순천대학교 대학원 기계공학과
+ 교신저자, 순천대학교 기계우주항공 공학부 (jgchoi@sunchon.ac.kr)
주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315번지
++ 한국폴리텍V대학 순천캠퍼스 컴퓨터응용기계과

(micro contact printing) 등의 방식이 있다. 이들 방식의 주된 특징은 정밀도는 떨어지지만 생산성이 높은 기법으로써 현재 이를 이용하는 공정, 장비, 재료, 소자 등이 연구개발되고 있다^(2,3). 이러한 대체 기술 중 롤투롤 인쇄전자 방식은 대량의 저가 생산율이 우수한 방식으로서 많은 연구가 진행되고 있다. 롤투롤 인쇄 방식의 기본원리는 인쇄 매체가 되는 필름을 롤의 안내에 따라 이동시키고 여러 개의 롤 중에 회로가 새겨진 롤에 금속잉크를 묻혀서 필름 위에 전사하는 방식이다. 인쇄전자의 회로기판은 두께 70 μm 의 PET 필름으로 코로나 처리되어 있다. 인쇄전자에서 대부분의 경우 2도 이상의 인쇄가 필요하며, 이때 필름의 이동방향을 기준으로 종방향과 횡방향의 정밀한 중첩(registration)이 요구된다. 지금까지의 롤투롤관련 연구들을 보면, Shin⁽⁴⁾ 등은 디스플레이의 대량생산장비 개발을 위한 실시간분산제어, 레지스터제어, 시스템설계, 공정 설계 등등 복합적 연구결과를 선보이고 있다. Kim⁽⁵⁾ 등은 장비본체, 모니터링부, 제어부가 서로 연계되어 작동하는 시스템을 구성하였다. Shankar⁽⁶⁾ 등은 비전시스템(vision system)을 이용하여 실시간으로 웹(web)의 오프셋(offset) 프린팅에 관한 연구를 하였으며, Brandenburg⁽⁷⁾ 등은 다중 모터드라이브를 통해서 축의 진동을 줄이고 각각의 드라이브를 통해서 빠르게 중첩을 맞추는 연구를 하였다. Ramamurthy⁽⁸⁾ 등은 필름의 중첩과 장력을 맞추는 방법인 댄서(dancer)의 능동식과 수동식의 차이를 비교하였다.

본 연구는 롤투롤 인쇄전자에서 회로의 중첩을 맞추는 필름의 정밀제어의 한 방안으로서 필름위치를 제어하고자 하였다. 포스트(post)의 경사 각도를 변화시켜 필름 위치를 제어하게 된다. 이를 위해 포스트의 역할을 수학적 모델로 정의하고 이를 구현하는 하드웨어시스템을 개발하였다.

2. 롤투롤 포스트 모델

2.1 포스트 수학적 모델

인쇄매체가 되는 필름이 지나 갈 때는 각 포스트를 Fig. 1 같이 원통에 필름이 감기는 형태를 취하게 되므로 이를 이용하여 각 포스트에 대한 필름의 거동을 표현하는 식을 유도한다⁽⁹⁾. Fig. 1의 포스트모델을 참조하여 필름의 중심선이 가리는 궤적의 벡터는 다음 식(1)과 같다.

$$\vec{r}(\omega) = r_0 \cos(\omega)i + r_0 \sin(\omega)j + (r_0 \omega \tan \alpha + h)k \quad (1)$$

또한 Fig. 1에서 필름의 중심선이 향하는 단위 벡터(unit tangent vector)는 식(2)로 나타낸다.

$$\vec{u}(\omega) = \cos \alpha(-\sin \omega i + \cos \omega j + \tan \alpha k) \quad (2)$$

필름의 면에 수직인 단위 벡터 (unit normal vector)는 식(3)으로 정의 된다.

$$\vec{v}(\omega) = \cos \omega i + \sin \omega j + 0k \quad (3)$$

그리고 벡터 $\vec{u}(\omega)$ 와 $\vec{v}(\omega)$ 에 각각 수직인 벡터 $\vec{w}(\omega)$ 는 식(4)로 정의 된다.

$$\vec{w}(\omega) = \vec{u}(\omega) \times \vec{v}(\omega) \quad (4)$$

여기서 α 는 리드각(lead angle), ω 는 감김각(wrapping angle)이다.

하나의 글로벌(global coordinate)을 통하여 시스템에 적용되는 모든 포스트에 각각의 국부좌표(local coordinate)를 부여한다. 이를 위해 포스트에서 국부좌표로 표현된 수식을 전체좌표로 또는 그 역으로 좌표변환을 한다⁽¹⁰⁾. Fig. 2는 인접하고 있는 두 포스트 사이를 필름이 꼬임 없이 이동할 때 기하학적 관계를 나타내는 그림이다.

Fig. 2에서 (n)번째 포스트 국부좌표 (x_n, y_n, z_n) 에 대해서 (n)번째 포스트 국부좌표가 좌표 이동된 양 $\vec{R}_0^{(n)}$, (n)번

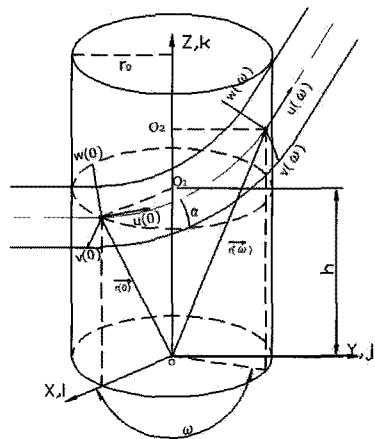


Fig. 1 Post mathematical modeling

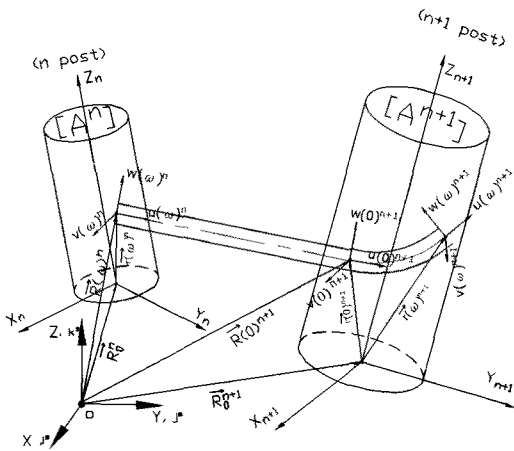


Fig. 2 Two post relation

째 포스트에서 필름이 출사 할 때 필름방향벡터 $\vec{U}(\omega)^{(n)}$, 필름 면벡터 $\vec{V}(\omega)^{(n)}$ 그리고 이 두 벡터에 수직인 벡터 $\vec{W}(\omega)^{(n)}$ 는 국부좌표 $\vec{r}(\omega), \vec{u}(\omega), \vec{v}(\omega), \vec{w}(\omega)$ 관계에서 (n) 번째 포스트 변환행렬 $[A^{(n)}]$ 을 통해 전체좌표벡터로

$$\vec{U}(\omega)^{(n)} = [A^{(n)}]^{-1} \cdot \vec{u}(\omega)^{(n)} \tag{5}$$

$$\vec{V}(\omega)^{(n)} = [A^{(n)}]^{-1} \cdot \vec{v}(\omega)^{(n)} \tag{6}$$

$$\vec{W}(\omega)^{(n)} = [A^{(n)}]^{-1} \cdot \vec{w}(\omega)^{(n)} \tag{7}$$

$$\vec{R}(\omega)^{(n)} = [A^{(n)}]^{-1} \cdot \vec{r}(\omega)^{(n)} \tag{8}$$

와 같이 정의된다. 이때, 필름이 꼬이지 않고 (n+1) 번째 포스트에 입사하기 위해서는

$$\vec{V}(\omega)^{(n)} = \vec{V}(0)^{(n+1)} \tag{9}$$

$$\vec{U}(\omega)^{(n)} = \vec{U}(0)^{(n+1)} \tag{10}$$

$$\vec{W}(\omega)^{(n)} = \vec{W}(0)^{(n+1)} \tag{11}$$

의 조건이 성립되어야 한다.

여기서 $\vec{V}(\omega)^{(n)}, \vec{U}(\omega)^{(n)}, \vec{W}(\omega)^{(n)}$ 은 단위벡터이므로 (n+1) 번째 포스트의 국부좌표 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 축의 단위벡터를

$$i_{(n+1)} = \vec{V}(\omega)^{(n)} \tag{12}$$

$$j_{(n+1)} = \vec{U}(\omega)^{(n)} \tag{13}$$

$$k_{(n+1)} = \vec{W}(\omega)^{(n)} \tag{14}$$

로 놓으면 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 좌표계는 (n+1) 번째 포스트가 필름에 수직이 되는 리드각이 0인 국부좌표가 된다. (n+1) 번째 포스트와 필름 사이의 리드각(α)을 고려하면, $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 좌표계를 x_{n+1} 축에 대하여 리드각 만큼 회전하게 된다. 생성된 새로운 좌표계 $(x'_{n+1}, y'_{n+1}, z'_{n+1})$ 는 (n+1) 번째 포스트의 필름과 리드각으로 정의된 일반국부좌표가 된다. 이때의 변환행렬은 식(15)와 같이 일반변환행렬로 정의된다.

$$[A^{(n+1)}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\alpha) & \sin(-\alpha) \\ 0 & -\sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x^{(n)} & V_y^{(n)} & V_z^{(n)} \\ U_x^{(n)} & U_y^{(n)} & U_z^{(n)} \\ W_x^{(n)} & W_y^{(n)} & W_z^{(n)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} V_x^{(n)} & V_y^{(n)} \\ (U_x^{(n)} \cos \alpha - W_x^{(n)} \sin \alpha) & (U_y^{(n)} \cos \alpha - W_y^{(n)} \sin \alpha) \\ (U_x^{(n)} \sin \alpha + W_x^{(n)} \cos \alpha) & (U_y^{(n)} \sin \alpha + W_y^{(n)} \cos \alpha) \\ V_z^{(n)} \\ (U_z^{(n)} \cos \alpha - W_z^{(n)} \sin \alpha) \\ (U_z^{(n)} \sin \alpha + W_z^{(n)} \cos \alpha) \end{bmatrix} \tag{15}$$

일반변환행렬은 (n+1) 포스트의 국부좌표가 전체좌표에 대하여 회전된 정보를 가지고 있는 행렬이다. 행렬의 요소 중 3행의 성분인 $A_{31}^{(n+1)}, A_{32}^{(n+1)}, A_{33}^{(n+1)}$ 는 Fig. 3과 같이 (n+1) 포스트의 중심축이 향하는 벡터성분이다. 따라서 (n+1) 번째 포스트의 방향각(direction angle) θ 와 경사각(slant angle) ϕ 는 식(16), (17)로 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_{32}^{(n+1)}}{A_{31}^{(n+1)}} \right) \tag{16}$$

$$\phi = \cos^{-1} (A_{33}^{(n+1)}) \tag{17}$$

또한 필름이 각 포스트를 진행할 때, (n) 포스트와 (n+1) 포스트에서 필름이 감고 도는 방향이 시계방향이면, $\vec{V}(\omega)^{(n)}, \vec{U}(\omega)^{(n)}$ 에 마이너스 부호를 붙여 주어야한다.

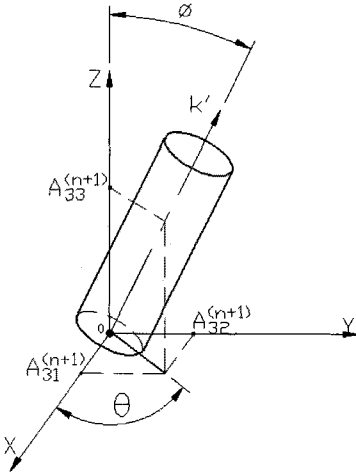


Fig. 3 Defined post slant angle and direction angle

2.2 필름의 이동조건 정의

롤투롤 인쇄시스템에서 필름 공급 포스트(unwind post)에서 출발한 필름은 시스템의 여러 롤들을 통과하여서 필름 되감기 포스트(rewind post)에 도착할 때까지 다음의 3가지 필름이동조건을 만족하여야 한다.

높이조건: 첫 번째 포스트에서 출발한 필름높이와 포스트를 통과하고 난 후의 필름높이가 같아야하는 조건, 평형조건: 첫 번째 포스트에서 기준면과 평행으로 진행하면서 출발하여, 마지막 포스트에 기준면과 평행하게 진행하면서 도착해야 하는 조건, 수직조건: 시스템을 출발한 필름은 진행 중 어느 부분에서도 필름의 꼬임이 일어나지 않고 주행계를 통과하여 마지막 포스트에 도착 하여야 하는 조건.

임의의 위치와 방향으로 출사하는 필름을 3가지 필름이동조건을 만족시키도록 하는 포스트의 결정이 필요하다. 이런 경우 주행계 최초 시작점에서의 필름높이를 h_0 라고 하고, 3가지 필름이동조건을 만족시키는 포스트를 (s)번째 포스트라고 하겠다. 평행조건과 수직조건을 만족 하는 포스트의 리드각과 감김각 식을 구하기 위해서 평행조건 $U_z(0)=0$, 수직조건 $V_z(0)=0$ 을 만족하는 필름이 특정 리드각과 감김각으로 포스트에 입사점을 지나 출사한다. 식(15)에 조건들을 대입하고 $\vec{u}(\omega), \vec{v}(\omega)$ 를 일반변환행렬과 계산하면 식(18), (19)로 출사를 하게 된다.

$$U_z(\omega) = \cos \alpha \sin \alpha [1 - \cos \omega] \tag{18}$$

$$W_z(\omega) = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos \omega \tag{19}$$

(s)포스트에 출사벡터 값이 $U_z(\omega)^{(s)}=0, V_z(\omega)^{(s)}=0$ 이 되도록 식(18), (19)로 입사하면 (s)포스트에서 평행조건과 수직조건을 만족 하게 된다. 롤의 관점에서 동일한 경로를 역방향 이동시키기 때문에 필름은 식(20), (21)로 정의된다.

$$U_z(\omega)^{(s-1)} = \cos \alpha \sin \alpha [1 - \cos \omega] \tag{20}$$

$$W_z(\omega)^{(s-1)} = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos \omega \tag{21}$$

식(20), (21)의 연립을 통해서 리드각과 감김각 식(22), (23)을 구하게 된다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1 - W_z(\omega)^{(s-1)}}{U_z(\omega)^{(s-1)}} \right) \tag{22}$$

$$\omega = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2U_z(\omega)^{(s-1)}}{\sin 2\alpha} \right) \tag{23}$$

3. 경사포스트 프로그램개발

3.1 경사포스트 조건의 정의

Fig. 4는 임의의 위치에 떨어진 경사포스트 사이로 필름이 이동하는 형상을 나타낸다. 경사 포스트는 필름의 횡 방향제어에 핵심부분이다. 필름은 첫 번째 롤에 입사하여 두 경사포스트를 지나 마지막 롤에서 특정 높이로 출사하게 된다. 3가지 조건 중 높이조건을 변화를 주게 된다. 필름의 벡터 방향은 첫 번째 롤을 통과하여 $\vec{U}_1(\omega)$ 로 첫 번째 경사포스트에 입사된다. 포스트를 지나면 포스트의 조건에 의해 특정한 방향으로 필름은 $\vec{U}_2(\omega)$ 출사를 하게 된다. 두 번째 경사포스트에 입사되는 $\vec{U}_2(\omega)$ 는 $\vec{U}_3(\omega) = \vec{U}_1(\omega)$ 으로 출사 되도록 포스트의 리드각(α_3)과 감김각(ω_3)을 설정해야한다. 따라서 두 경사포스트들의 리드각, 감김각은 크기는 같고, 필름은 두 번째 경사포스트에서 시계방향으로 필름이 감기게 된다.

3.2 원하는 위치(H)에 입사하기위한 리드각(α)계산

경사포스트를 지나는 필름이 다음 포스트에 원하는 위치로 입사하도록 경사포스트 리드각의 변화를 통해서 $f(\alpha)$

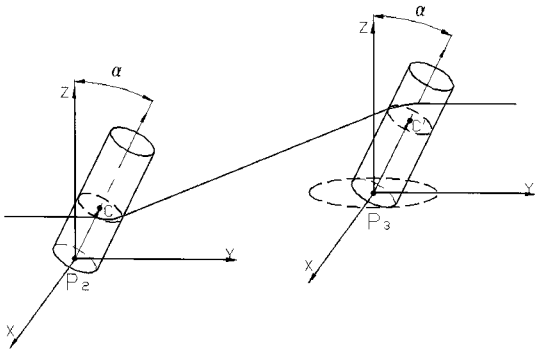


Fig. 4 Film motion on the tilting post

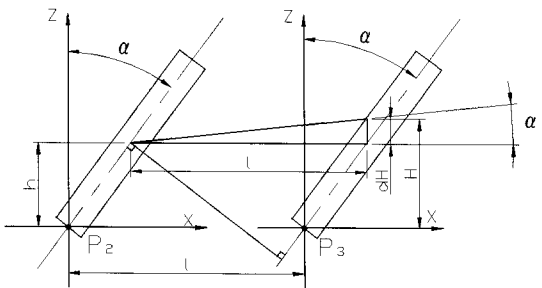


Fig. 5 Defined α' on tilting post

= H에서 높이를 결정하게 된다. 경사각 제어를 위해 원하는 높이 H값에서 경사 각도가 요구되어진다. 경사 각도를 구하기 위해서는 복잡한 $f^{-1}(H) = \alpha$ 의 관계를 정리하여 풀어야 하지만, Fig. 5에서 α 와 α' 의 관계를 통해서 식(14)을 정의하게 되어 α 을 쉽게 구하게 된다.

$$\alpha = K\alpha' = K \tan^{-1} \left(\frac{dH}{l} \right) \quad (14)$$

식을 응용하기 위해서 초기에 입의의 리드각을 입력하여 K값을 구한 뒤 시행오차법(trial and error method)으로 정확한 K값을 구하여 H에 원하는 리드각을 구하게 된다.

4. 하드웨어 구성 및 설계

장치는 포스트와 롤로 총 6개로 구성되어지고 각각의 지름은 40mm이다. 경사제어 포스트 2개, 일반 롤 2개, 필름을 감고 푸는 포스트 2개로 구성된다. 각 포스트와 롤 사이에

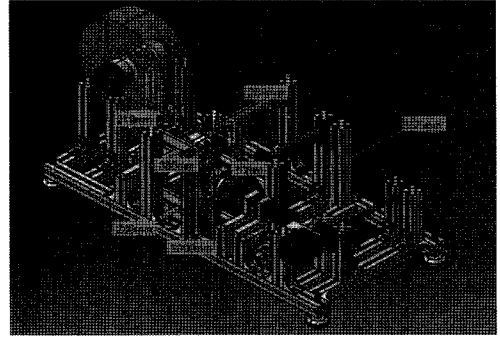


Fig. 6 Designed tilting posts equipment

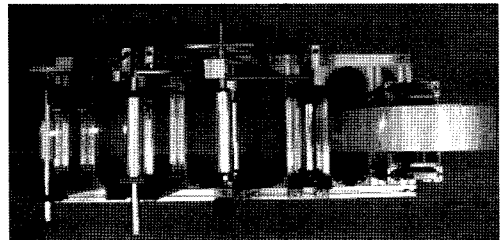
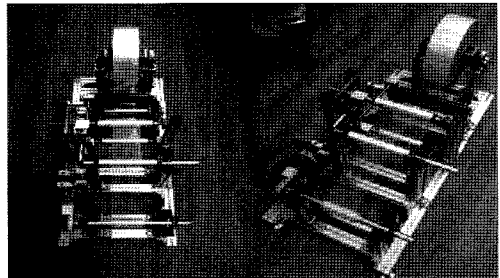


Fig. 7 Developed tilting posts equipment

떨어진 거리는 200mm이고 각 포스트와 롤의 위치는 전체 좌표 X, Y, Z를 기준으로(0, 0, 0), (0, 200, 0), (-200, 200, 0), (-200, 400, 0)위치로 설정하였다. Fig. 6에서 CATIA V5로 설계된 장치를 바탕으로 실제 장치 Fig. 7을 제작하였다. 필름제어장치 크기는 길이1000mm, 폭465mm, 높이 289mm이다. Fig. 8에서 장치시스템은 오프셋거리를 측정할 레이저 간섭계(laser interferometer), 컴퓨터, 필름제어장치 등으로 구성되어진다. 경사포스트의 제어는 Visual C++로 프로그램을 작성하여 경사를 제어하게 된다.

Fig. 9의 개략도는 장치 시스템의 전체적인 흐름을 설명하고 있다⁽¹¹⁾. 정해진 위치로 필름의 횡방향 이동을 하기위해 입력되어진 프로그램은 컴퓨터에서 경사각도를 계산하여 경

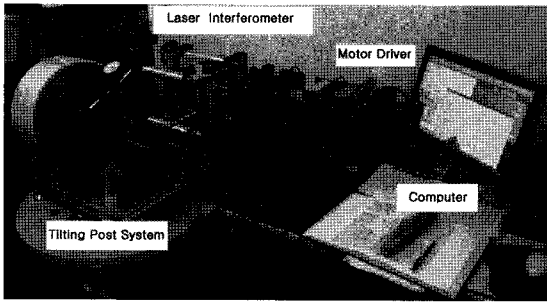


Fig. 8 Post tilting system

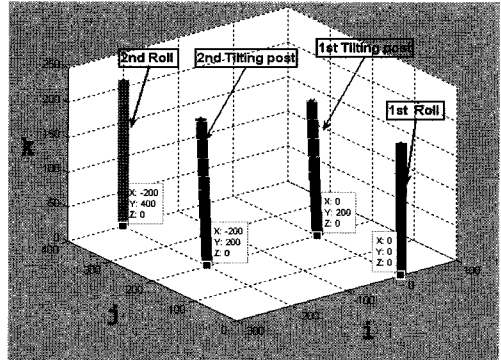


Fig. 10 Posts position

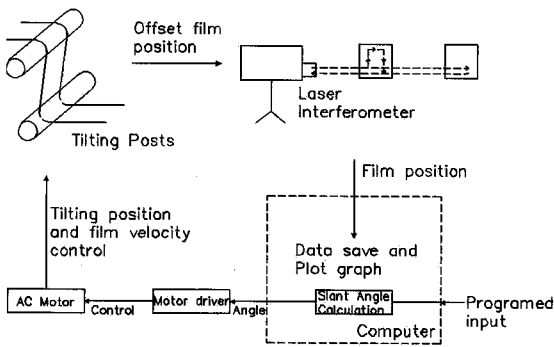


Fig. 9 Configuration of tilting posts system

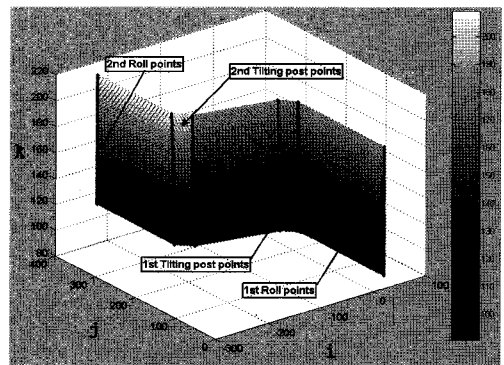


Fig. 11 Film offset resultant

사포스트 제어를 하게 된다. 이동된 필름의 위치는 레이저 간섭계를 통해서 측정되어진다.

5. 실험 및 고찰

5.1 장치 해석 및 결과

필름이동해석을 위해 포스트와 롤의 위치 등 여러 기본 데이터를 Matlab에 입력하여 필름의 20mm오프셋이동 시 물레이션을 하였다. 계산 결과는 포스트위치 Fig. 10, 필름의 이동경로 Fig. 11로 나타내었다.

그리고 Table 1의 데이터는 Matlab에서 계산된 필름의 특정위치의 값으로 경사포스트를 지나는 입사점과 출사점의 위치들을 나타낸다. Table 1의 Z방향 데이터에서 필름이 20mm 만큼 오프셋 이동 된 것을 확인 할 수 있다. 이때 경사 포스트의 경사가 -4.30도로 계산되어졌다.

5.2 실험 및 결과

필름이동에 대한 수치해석결과를 바탕으로 필름의 횡방

Table 1 Resultant points on each posts at experiment

X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
20.0	0	140
20.0	0	140
20.0	210.5	140
-4.00	230.2	141.1
-196	192.2	158.8
-220	212.0	160
-220	400	160
-220	400	160

향 오프셋에 대한 실험을 하였다. 횡방향 오프셋거리리는 1 mm, 3 mm, 5 mm, -1 mm, -3 mm, -5 mm로 놓고 실험을 수행 하였다. 각각의 오프셋 거리에 대한 경사각도 Table 2 를 계산하였고, 모터에 입력신호 10000 pulses/sec 하에 필

를 이송을 1.6 cm/s로 하였다. 경사 각도를 프로그램에 입력하여 실제 필름이 움직인 결과데이터를 레이저 간섭계로 측정하여 Fig. 12의 그래프를 얻었다.

Fig. 12의 실험결과는 30초 동안 필름이동에 대한 데이터 25000개를 측정하여 나타낸 그래프이다. 처음 필름이 주행을 이동하는 동안 경사포스트의 제어에 의해 필름이 계획된 이동경로를 따라 최종적으로 원하는 위치로 이동되었다. 평균적으로 $\pm 80\mu\text{m}$ 주기적 오차가 발생하였는데 오차의 원인으로는 초기 감겨있는 필름상태 오차, 기계장치 오차 그리고 주변 환경 오차이다. 이 오차들은 경사제어를 통해서 생기는 오차가 아니므로 차후 더 많은 연구가 필요한 부분이다.

6. 결론

본 연구는 RFID의 대량생산 기술 중 하나인 롤투롤 회로 인쇄에서 발생하는 중첩 오차를 줄이기 위한 필름 정밀위치 제어에 관하여 진행하였다. 고안된 롤투롤 시스템에서 필름의 횡방향 거동은 경사 포스트의 제어에 의해 이루어지며,

이를 위해 경사포스트의 수학적모델을 제시하였다. 또한 제시된 수학적모델을 이용하여 시스템을 구성하였으며 이를 이용한 시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 롤투롤 시스템에서 포스트의 기하학적 위치에 따른 필름위치관계를 수학적 모델로 정의하여 필름의 횡방향 제어 관계식을 유도함으로써 포스트의 기하학적 상태와 필름사이의 관계를 얻을 수 있었다.
- (2) 두개의 경사제어가 가능한 포스트로 구성된 필름이송장치로부터 포스트의 경사제어로 필름의 횡방향 정밀위치 제어가 가능함을 확인하였다.

본 연구를 통해서 개발된 롤투롤 포스트 경사제어 시스템은 인쇄전자 분야에서 인쇄의 중첩정밀도를 향상시키는데, 유용하게 적용 될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Kim, D. S. and Lee, T. M., 2006, "Printed Electro-Mechanical System," *Journal of the KSME*, Vol. 46, No. 12, pp. 38~44.
- (2) Yoon, S. C., Lim, J. S., and Lee, C. J., 2007, "Printed Electronics: High Resolution Printing Technology," *Polymer Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 238~245.
- (3) Shin, J. K. and Choi, J. H., 2008, "Development of Printed Electronics," *KIEEME*, Vol. 21, No. 6, pp. 11~19.
- (4) Shin, K. H., 2006, "Roll to Roll Technology for Display Manufacturing," *Journal of the KSME*, Vol. 46, No. 12, pp. 62~66.
- (5) Kim, C. H., Choi, B. O., Lee, T. M., and Kim, D. S., 2007, "Roll to Roll printing process," *KSMTE Spring Conference*, pp. 120~123.
- (6) Shankar, N. G., Ravi, N., and Zhong, Z. W., 2008, "A Real-Time Print-Defect Detection System for Web Offset Printing," *Measurement*, Vol. 1083, pp. 1~11.
- (7) Brandenburg, G., Geißenberger, S., Kink, C., Schall, N. H., and Schramm, M., 1999, "Multimotor Electronic Line Shafts for Rotary Offset Printing Presses: A Revolution in Printing Machine Techniques," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4,

Table 2 Tilting angles were calculated from each offset length

Offset length	Tilting angle
1 mm	-0.21°
3 mm	-0.64°
5 mm	-1.07°
-1 mm	0.21°
-3 mm	0.64°
-5 mm	1.07°

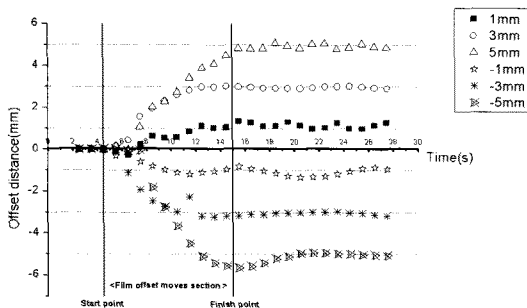


Fig. 12 Resultant graph of offset distance

- No. 1, pp. 25~31.
- (8) Ramamurthy, V. D., Zhu, Y., and Prabhakar, R. P., 2006, "Characteristics of active and passive dancers: A comparative study," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, pp. 409~423.
- (9) Kreyszig, E., 2006, *Advanced Engineering Mathematics*, 9th edition, Wiley, New Jersey, pp. 383~397.
- (10) John, J. C., 2005, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 3rd edition, Pearson, New Jersey, pp.19~61.
- (11) Groover, M. P., 2007, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 3rd edition, Wiley, New Jersey, pp. 391~398.