

# ATM기 2매 검지부의 동적 해석

## Dynamic Analysis of ATM Double Bill Detector

정 중 기\* · 서 준 호\* · 백 윤 길\*\* · 최 연 선†

Joong-Ki Jeong, Jun-Ho Suh, Yoon-Kil Baek and Yeon-Sun Choi

(2006년 6월 1일 접수 ; 2006년 11월 27일 심사완료)

Key Words : ATM(automated teller machine), DBD(double bill detector), FEM(유한 요소 해석), SAMCEF(삼세프), Vector Equation(벡터방정식)

### ABSTRACT

ATM(automated-teller machine) is a machine that receives and pays money directly. The double bill detector (DBD) module of an ATM detects double bills from its thickness. In this paper, the dynamic behavior of the DBD was analyzed, which cannot be simulated correctly by a package program of SAMCEF. And the displacements of the lever was measured for various bills experimentally. The measured dynamic behaviors were analyzed kinematically using a vector equation and simulated dynamically by the derivation of equation of motion with consideration of damping and stiffness of the DBD and bills. The analysis showed that the spring constant of the system is not so influential, instead, the contact angle between the lever and bill needs to be larger than the existing DBD in order to be faster and reliable DBD.

### 1. 서 론

자동 지폐 입출금기(ATM)는 화폐를 직접 입출금 처리하는 금융자동화 기기로서 각 요소 부품의 신뢰성이 높아야 한다. 특히 ATM기기 내 지폐 인식 모듈은 은행권의 권종 구분, 진위 식별, 상태 확인하는 핵심 부품이며 크게 센서모듈, 구동장치, 내장프로그램으로 구성되어 있다. 구동장치 중 하나인 게이트 모듈은 지폐가 연속적으로 이송되는 과정에서 위폐를 걸러내고, 지폐의 이송방향을 바꾸는 장치로서 고속운전 상황에서도 확실히 작동하여야 한다<sup>(1,2)</sup>.

센서모듈인 2매 검지부(double bill detector)는 지폐의 두께를 검지하는 슬릿(slit)이 있어서 레버

디텍터(lever detector)로 지폐 이송 시 회전각도로 2매가 동시에 통과하는지 여부를 검지한다. 회전각도는 지폐의 종류 및 상태, 이송속도, 지폐와 이송벨트 사이의 마찰, 레버 디텍터의 형상 등에 따라 달라지며 적절한 설계변수 선정으로 2매 통과 시 오류 없이 정확히 검지해 내는 것이 중요하다. 이를 위하여 이 연구에서는 2매 검지부 모듈의 동특성을 실험적으로 측정하고, 해석 모델의 벡터방정식<sup>(3)</sup> 및 운동방정식을 유도하여 설계변수에 따른 운동 특성을 이해하고자 하였다.

### 2. 구동실험

#### 2.1 작동원리

2매 검지부의 작동원리는 Fig. 1과 같다. 지폐가 화살표 방향으로 이동하면서 2매 검지 레버(double bill lever)와 접촉하면 레버가 회전축을 중심으로 회전한다. 이때 회전중심부에 달려있는 슬릿센서(slit sensor)에서 회전 변위를 측정하여 2매 여부

† 책임저자; 정희원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

\* 정희원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

\*\* 노틸러스효성(주)

를 판단하게 된다.

Fig. 2는 슬릿센서에서 측정된 레버의 회전변위를 나타낸다. Fig. 2에서  $a$  구간은 레버가 지폐의 충격에 의해 튀어 오른 후 복원 스프링 힘에 의해 복귀하는 구간이며,  $b$  구간은 레버가 지폐와 맞닿으며 이동하는 구간이다. 이때 지폐의 두께를 감지하는 부분은  $b$  구간이며 지폐의 두께에 따라  $b$  구간에서의 회전 각변위가 변한다. 회전 각변위를 통해 지폐의 두께를 감지하며  $b$  구간이 길수록 두께를 판단하는 성능이 우수해진다.

### 2.2 구동 실험

2매 검지부의 응답 특성을 알기 위해 Fig. 1과 같이 ATM기에 지폐를 통과시키면서 ATM기에 부착된 슬릿센서의 신호를 측정하였다. 이때 지폐의 이송속도는 실제 운전 상황인 916 mm/sec로 운전하였다. 지폐의 두께에 따른 2매 검지부의 동특성을 해석하고자 Table 1과 같이 6가지의 두께를 지닌 실험용 지폐를 제작하여 실험하였다. Fig. 3은 지폐의 두께에 따른 실험결과를 나타낸다. 지폐의 두께가 두꺼울수록  $a$  구간의 길이가 길어지며  $a$  구간의 회전변위가 증가한다. 이로 인해 지폐의 두께를 판단하는  $b$  구간

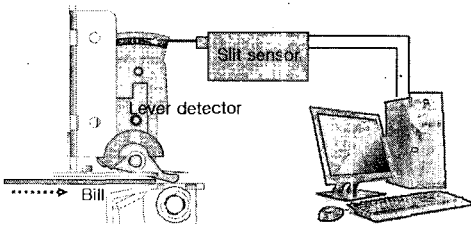


Fig. 1 Experimental set-up for the DBD

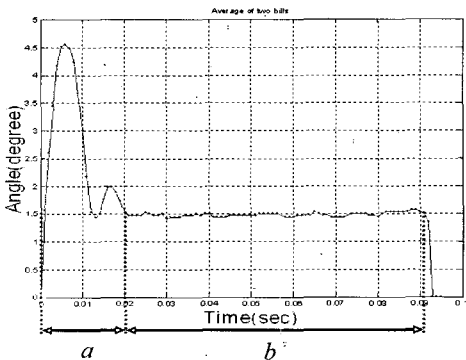


Fig. 2 Slit sensor signal

의 길이가 짧아지는 것을 알 수 있으며 지폐의 두께에 따른 정상상태 변위를 알 수 있다.

### 2.3 전산 해석

Fig. 4와 같이 기구학 해석과 유한요소 전산해석이 동시에 가능한 상용 프로그램 SAMCEF [4]를 이용해 2매 검지부의 운전상황을 해석하였다. Fig. 5는 레버의 회전변위 해석결과를 나타낸다. Fig. 3의 실험 결과와 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 정확한 해석을 위해서는 지폐와 레버간의 마찰계수, 레버의 회전운동에 관한 마찰력, 지폐 이송 벨트의 지지 강성, 지폐

Table 1 Bills for the DBL experiments

Bills	Thickness of the bill (mm)
case 1	0.09
case 2	0.11
case 3	0.145
case 4	0.16
case 5	0.18
case 6	0.22

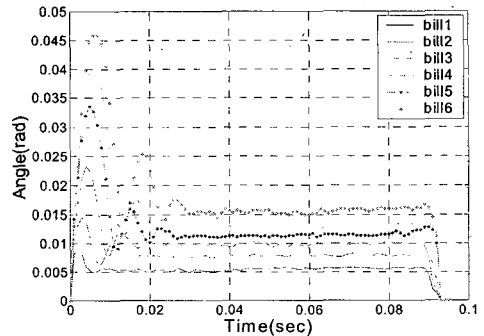


Fig. 3 Slit sensor signals of various bills

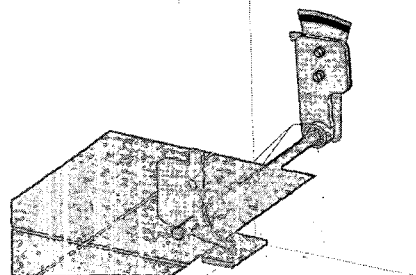


Fig. 4 SAMCEF

등을 파악해야한다. 그러나 실제 정확한 물성치를 알 수 없으므로 실험 결과에 근접하는 전산해석 결과를 얻기 위해 다양한 값의 물성치를 시행착오적으로 입력해보았으나 실험 결과에 근접시키기는 어려웠다. 따라서 실험을 바탕으로 해석 모델을 만들어 2매 검지부의 동특성을 파악하여야 한다.

### 3. 운동 해석

#### 3.1 기구학 모델

지폐와 레버 접촉 시 레버의 회전 변위를 계산하기 위해 Fig. 6과 같이 지폐와 레버간 접촉부위와 레버를 벡터로 표현하였다. 식 (1)은 Fig. 6의 각 벡터를 이용하여 만든 벡터방정식이다<sup>(3)</sup>.

$$\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d} = 0 \quad (1)$$

$$Re: b + c \cos \theta_3 + d \cos \theta_4 = 0 \quad (2)$$

$$Im: -a + c \sin \theta_3 + d \sin \theta_4 = 0$$

$$b = \frac{-a + d \sin \theta_4}{\tan(\pi - \theta_3)} - d \cos \theta_4 \quad (3)$$

$\vec{a}$ 는 레버의 회전 중심으로부터 지폐까지 수직으로 내려오는 벡터로서 크기와 방향이 모두 고정된다.  $\vec{b}$ 는 지폐의 이송길이를 나타내는 벡터로서  $\vec{a}$ 의

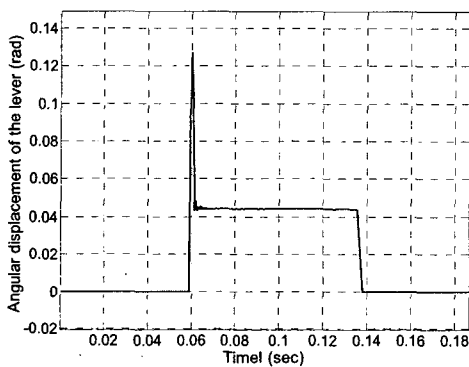


Fig. 5 Lever rotation by SAMCEF

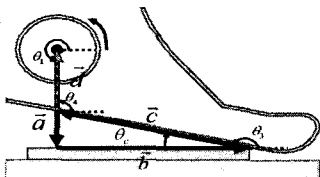


Fig. 6 Kinematic model of the DBL

끝으로부터 지폐가 레버와 닿는 부분까지 방향은 고정되어 있지만 크기는 지폐 이송 변위에 따라 달라진다. 지폐 이송속도를 나타내는  $\vec{b}$ 는 일정하다.  $\vec{c}$ 는 레버의 회전과 지폐와의 접촉에 따라 그 크기와 각도가 동시에 변하며  $\vec{d}$ 는 레버의 회전에 따라 그 크기는 변하지 않고 각도만 변한다. 지폐와 레버를 강체로 가정하였으며 접촉 직후 지폐는 레버의 표면에서 마찰없이 미끄러진다고 가정하였다.

식 (2)에서 미지수는  $\vec{d}$ 의 방향  $\theta_4$ ,  $\vec{b}$ 의 길이  $b$ ,  $\vec{c}$ 의 길이  $c$ 이며 식 (2)를 정리하면 실수부와 허수부가 0인 연립방정식이 성립된다. 이때  $c$ 를 소거하면  $\theta_4$ 와  $b$ 의 관계식 (3)이 성립된다. 식 (3)으로부터 지폐 이송거리에 따른 레버의 각변위를 알 수 있으며 미분하여 속도, 가속도의 관계를 구할 수 있다.

#### 3.2 동적 해석 모델

2매 검지부의 운동을 해석하기 위해 Fig. 7과 같은 동적 해석 모델을 구성하였다. 레버의 회전에 따른 스프링 상수와 점성 감쇠를 고려하였다. 기구학 해석과는 달리 지폐를 강체가 아닌 레버의 압축에 의한 변형을 고려하여 스프링 상수와 댐퍼로 모델링하였다. 레버는 회전축에 대한 질량관성 모멘트를 가지며 지폐는 레버에 의한 압축 전 일정한 두께를 가진다. 그러나 레버 통과 시 지폐의 압축에 의한 변위를 고려하여 지폐의 강성 및 레버 충격 시 레버의 초기속도를 계산하였다.

#### 3.3 설계변수

2매 검지부의 운동해석을 위해서는 설계변수를 해석하여야 한다. 레버의 질량관성 모멘트를 측정하기 위해서 비틀림 진자법을 이용하였다.

레버에 부착된 스프링의 강성은 스프링의 끝단에 여러 무게의 추를 매단 후 각변위를 측정하여 구하였다.

레버의 회전운동에 점성 감쇠가 있다고 모델링 하였으며 운동방정식은 식 (4)와 같다. Fig. 8(a)의 점선은

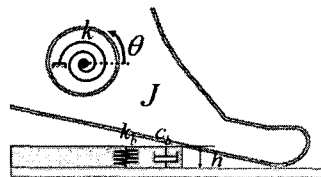


Fig. 7 Analytical model of the DBL

실험으로 측정한 레버의 각변위이며, 실선은 기구학 모델에 의한 벡터방정식으로 해석한 지폐 이송거리에 따른 레버 각변위를 나타낸다. Fig. 8(b)는 레버가 튀어 오르는 부분을 확대한 부분이다. 최대 변위 ( $\theta_p$ )로 부터 지폐 충돌 직전까지의 변위 ( $\theta_s$ )까지 이동하는데 걸리는 시간( $t_2 - t_m$ )을 측정하여 식 (4)와 비교 후 점성 감쇠계수( $c$ )를 구하였다.

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k(\theta + \theta_0) = 0 \quad (4)$$

$$\theta = \theta_p, \quad \dot{\theta}_0 = 0$$

Fig. 6의 기구학 모델에서 지폐는 탄성을 가지지 않는다고 가정하였으나, Fig. 8의 실험결과는 지폐가 탄성을 가지고 있음을 보여준다. 실선은 지폐가 탄성을 가지지 않는 경우, 지폐의 속도를 무시한 정적 상태에서의 레버 각변위 해석결과( $\theta_s = 0.00906$  rad)를 나타내며, 점선은 실험으로 측정한 레버의 각변위

( $\theta_{st} = 0.00777$  rad)를 나타낸다. 정상상태에서의 레버 각변위는 지폐의 두께에 따라 달라진다. 실험결과에서의 각변위가 벡터방정식 해석결과 값보다 작다는 사실로부터 지폐가 압축되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 지폐의 두께에 따른 레버의 정상상태 각변위에 대한 실험결과와 벡터방정식 해석결과를 나타낸다. 지폐의 두께가 커짐에 따라서 변형량이 약간 증가함을 알 수 있다.

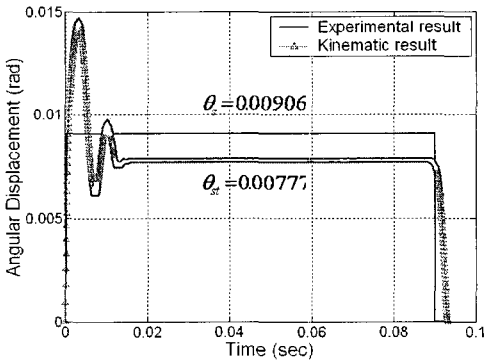
따라서 Fig. 7과 같이 지폐 탄성을 고려한 모델이 필요하다. 지폐는 2매 검지부 통과 후 정상상태에서 레버의 스프링력에 의해 압축되어 지폐를 강체로 가정한 두께( $\theta_s$ )보다 작은 값을 가진다. 지폐의 강성  $k_b$ 는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$k\theta_{st} + T_0 = k_b(\theta_s - \theta_{st}) \quad (5)$$

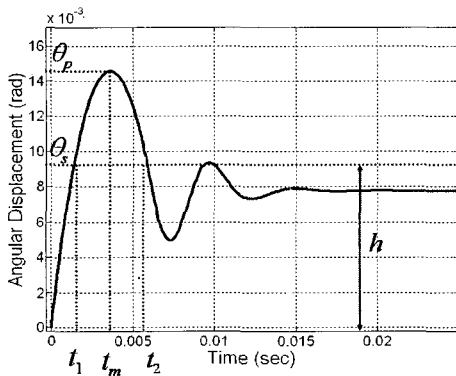
$$k_b = \frac{k\theta_{st} + T_0}{\theta_s - \theta_{st}}$$

여기서  $\theta_s$ 는 벡터방정식으로 계산한 값으로서 지폐 두께에 의한 레버의 각변위이며,  $\theta_{st}$ 는 레버에 의해 지폐가 압축되었을 때의 각변위를 나타낸다.  $T_0$ 는 레버의 변위가 0일 때에 레버의 초기변위에 의한 스프링력을 나타낸다. 앞에서의 실험 및 해석으로부터 구한 2매 검지부의 설계 변수는 Table 2와 같다.

2매 검지부의 운동을 Fig. 7의 모델로 해석하였다. 레버는 초기 각변위 0을 가지며 지폐에 의한 충격으로 튀어 오르게 된다. 스프링힘에 의해 레버가 복귀하는 과정에서 레버는 지폐와 접촉하여 일정 변위를 유지한다. 이때에 레버가 회전스프링 강성뿐 아니라 지폐의 강성에도 영향을 받는다. 식 (6)은 지폐가



(a) Comparison between kinematic and experimental results



(b) Transient response

Fig. 8 Response of the DBD

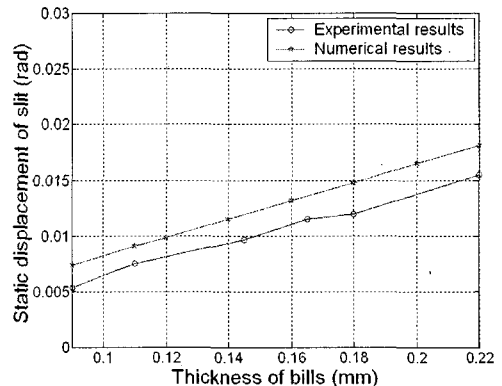


Fig. 9 Static displacements of the slit

접촉을 시작할 때 레버의 각속도( $\dot{x} = v_0$ )를 가지는 운동을 나타내며, 여기서 초기속도  $\dot{\theta}_0$ 는 실험결과로부터 추정된 값을 사용하였다. 레버가 스프링 힘에 의해 지폐를 눌러 지폐두께( $\theta_s$ )보다 작은 변위를 가지는 경우로써 지폐강성을 고려한 운동을 나타낸다. 또한 지폐의 탄성에 의해 레버가 튀어 올라 지폐두께( $\theta_s$ )보다 큰 변위를 가지는 경우는 식 (7)이 된다. 이러한 운동을 한 번 더 반복한 후 레버는 더 이상 튀어 오르지 않고 지폐와 함께 일정 변위를 가지게 된다. 이상의 해석이 실험과 일치하기 위해서는 적절한 지폐의 점성 감쇠 값이 주어져야 하며 반복 실험과 수치해석으로  $c_b$ 는 0.002임을 알았다. 실험과 수치해석결과를 비교하면 Fig. 10과 같이 잘 일치하였다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \theta < \theta_s \text{ and } \dot{\theta} > 0 \\ J\ddot{\theta} + (c + c_b)\dot{\theta} + (k + k_b)\theta &= T_0 \quad (6) \\ \theta_0 &= 0, \dot{\theta} = \dot{\theta}_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{if } \theta > \theta_s \\ J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta &= T_0 \quad (7) \\ \theta_0 &= \theta_s, \dot{\theta} = \dot{\theta}_1 \end{aligned}$$

Table 2 Parameters of the DBD

Constant	Value
$J$	5.399 kg·m <sup>2</sup>
$c$	0.0002 kg/sec
$k$	0.0075 N·m/rad
$k_b$	8.9098 N·m/rad
$F_0$	0.01148 Nm

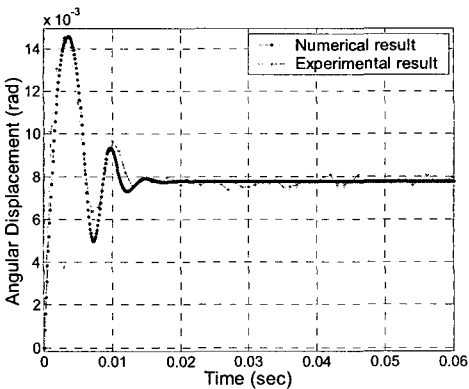


Fig. 10 Experimental and numerical results

### 3.4 초기속도 해석

지폐와 레버가 처음 충돌 시 지폐이송 속도, 레버의 접촉각, 지폐의 불평형 등에 따라 레버의 초기속도와 과도구간의 길이가 결정된다. Fig. 11은 실험적으로 구한 레버의 초기속도와 벡터방정식으로 해석한 레버의 초기속도를 나타낸다. 지폐의 두께가 얇을수록 큰 차이를 보이며 두꺼울수록 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 지폐와 레버 충돌 시 지폐의 탄성이 고려되어야 함을 의미한다.

$$J\ddot{\theta} + (c + c_b)\dot{\theta} + (k + k_b)\theta = k_b\phi + c_b\dot{\phi} - F_{init} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 지폐의 탄성을 고려한 초기속도를 해석하였다. 벡터방정식을 이용하여 해석한 지폐의 이동에 따른 레버 각변위를  $\phi$ 로 표현하였으며 실제 레버의 각변위를  $\theta$ 로 나타내었다. 벡터방정식으로 해석한 각변위( $\phi$ )와 각속도( $\dot{\phi}$ )를 식 (8)에 대입하여

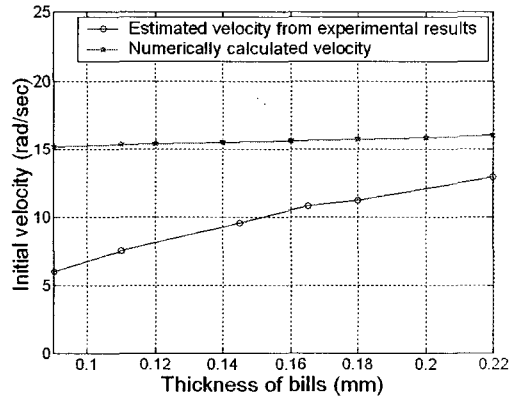


Fig. 11 Initial velocity of lever

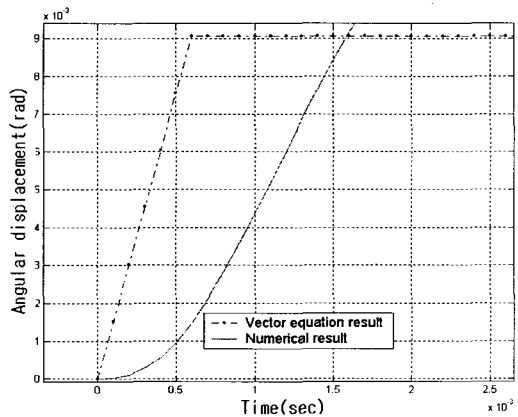


Fig. 12 Displacements of the lever

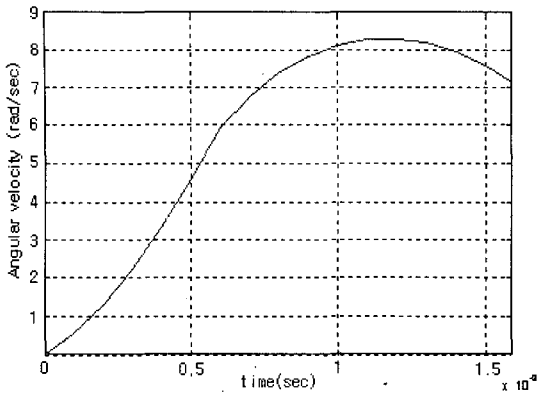


Fig. 13 Angular velocity of the lever

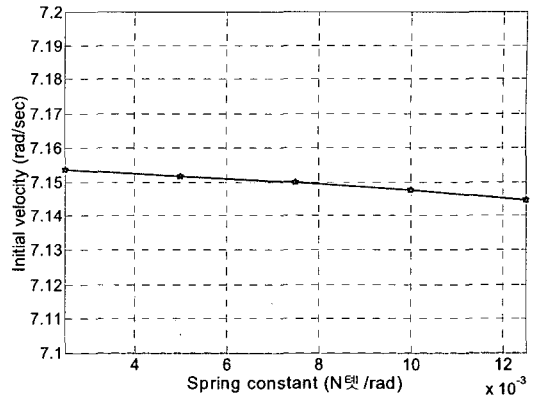


Fig. 14 Initial velocity vs the spring constant

지폐의 탄성을 고려한 레버의 변위( $\theta$ )와 속도( $\dot{\theta}$ )를 해석하였다. 지폐의 탄성계수( $k_b$ )와 점성 감쇠계수( $c_b$ )는 앞 절의 해석 결과를 이용하였다.

Fig. 12는 지폐의 탄성을 고려한 레버의 변위 해석결과와 벡터방정식으로 해석한 레버의 변위를 나타낸다. 지폐의 탄성에 의해 지폐의 변위보다 작게 레버의 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 식 (8)로 해석한 초기속도에 대한 결과로서 지폐와 레버가 떨어지기 시작하는 시간  $1.587 \times 10^{-3}$  sec에서의 속도는 7.15 rad/sec이다. Fig. 11의 실험으로 해석한 레버 초기속도 7.50 rad/sac와 유사한 결과를 보인다. 이는 앞에서 구한 지폐의 탄성계수가 실제 지폐의 특성과 잘 일치함을 말해주며 지폐의 탄성을 고려한 레버 변위 해석이 타당함을 말한다.

#### 4. 설계변수 영향

##### 4.1 스프링 상수 변화에 따른 동특성 해석

ATM기에서 지폐를 고속으로 처리하기 위해서는 지폐의 이송속도가 커도 확실히 2매 여부를 검지하도록 2매 검지부가 설계되어야 한다. Fig. 2에서 과도응답 구간(a)의 길이는 지폐의 이송속도가 증가함에 따라 길어진다. 이는 정상상태 구간(b)의 길이를 짧게 만들어 2매 여부를 판단하기 어렵게 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 지폐와 레버 간 충돌 시 초기속도를 감소시켜야 한다. 초기속도에 영향을 주는 인자로는 레버 회전 스프링상수와 접촉각이 있다.

Fig. 14는 벡터방정식으로 해석한 스프링 상수에 따른 초기속도 변화를 나타낸다. 스프링의 초기 압

축력이 일정한 상태에서 스프링 상수만을 변화시켜 해석한 결과로서 스프링 상수의 변화에 따라 초기속도의 감소 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 즉 레버 회전스프링 변경은 속도 증가와 크게 관련이 없음을 알 수 있다.

##### 4.2 접촉각 변화에 따른 동특성 해석

Fig. 15는 레버의 접촉각과 지폐의 두께 변화에 따른 초기속도 변화를 나타낸다. Fig. 6의 기구학 모델에서  $\vec{a}$ ,  $\vec{d}$ 의 길이는 일정하며  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ 의 길이를 조절하여 접촉각,  $\theta_c$ 을 변화시켰다. 지폐의 두께에 따른 초기속도 영향이 작은 반면 접촉각 변화에 따른 초기속도 변화가 큼을 알 수 있다. 이는 접촉각 증가가 과도응답 구간을 증가시켜 정상상태 구간을 짧게 하는 것을 의미한다.

정상상태에서 레버 각변위는 지폐의 두께를 판단하는 중요한 요소이다. 지폐의 두께에 따른 레버 각변위의 변화량, 즉 Fig. 9에서의 그래프 기울기가 증가할수록 미세 지폐두께의 변화를 확실시 판단할 수 있다. 이러한 성능을 높이기 위해서는 레버의 형상이 변해야 하며 Fig. 16은 벡터방정식으로 해석한 접촉각과 지폐두께에 따른 정상상태 레버 각변위를 나타낸다. 접촉각은 앞에서의 과도응답 해석과 같은 방법으로 변화시켰다. 접촉각이 커질수록 지폐의 두께에 따른 기울기가 증가하여 지폐의 두께 감지 성능이 우수해짐을 알 수 있다.

지폐와 레버간의 접촉각이 커질수록 레버의 초기 각속도가 증가해 2매 여부를 판단하는 구간이 감소하는 반면 지폐두께를 감지하는 성능이 우수해짐을 확인할 수 있다. 즉 레버의 접촉각을 크게 하면 초기

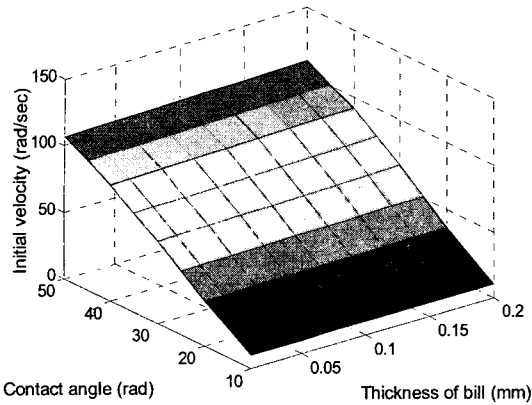


Fig. 15 Initial velocities vs contact angle and thickness of bill

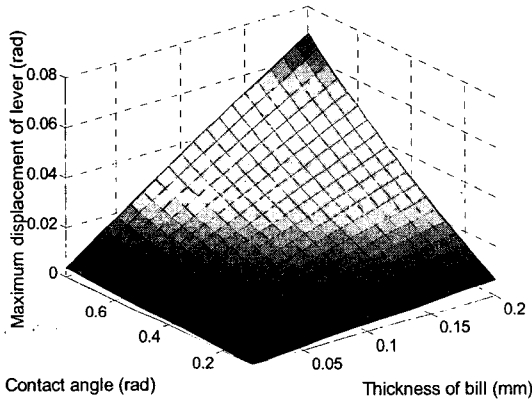


Fig. 16 Maximum displacement vs contact angle and thickness of bill

속도가 커져 정상구간이 짧아지나 지폐두께는 보다 확실히 알아 낼 수 있어 적절한 접촉각 선정이 중요해짐을 알 수 있다.

### 5. 고찰 및 결론

고속으로 지폐가 이송되는 ATM에서 2매 검지부의 신뢰성을 높이고 속도를 높이기 위해서는 동적 특성을 정확히 파악해야 한다. 이 연구에서는 ATM 2매 검지부에 대하여 실험결과를 바탕으로 운동을 해석하여 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 2매 검지부에 대한 구동실험을 통해 지폐의 두께에 따른 응답특성을 알았다.
- (2) 2매 검지부 작동 상황에 대한 전산 시뮬레이

션은 실험결과와 많은 차이를 보였다.

(3) 지폐와 레버 접촉 시 레버의 회전 변위를 계산하기 위해 기구학적 해석을 위한 벡터방정식을 도출하여 해석하였으나 실험결과와 차이가 있었다.

(4) 실험결과를 바탕으로 해석 모델을 구성하여 레버의 점성감쇠, 지폐의 탄성과 점성감쇠값을 추정하였다.

(5) 고속 ATM기 개발을 위해서는 지폐의 이송속도를 증가시켜야 하며, 이때 2매 여부를 확실히 검지하기 위해 설계변수 변화를 검토한 결과 스프링 상수의 영향은 작음을 알 수 있었다. 또한 지폐와 레버간의 접촉각이 커질수록 레버의 초기 각속도가 증가해 2매 여부를 판단하는 구간이 감소하는 반면 지폐두께를 감지하는 성능이 우수함을 알았다.

### 후 기

이 연구는 산업자원부 부품소재기술개발사업(0302-DD2-034)으로 지원, 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Suh, J.-H., Choi, Y.-S., Jeong, J.-K., Baek, Y.-K. and Yoon, J.-H., 2005, "Dynamic Analysis of ATM Gate Module", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 232~235.
- (2) Hwang, J. W., Kal, H. J., Park, J. K. and Chae, J. O., 1999, "A Numerical Study for the Design of Fast Solenoid", Journal of the KSAE, Vol. 7, No. 3, pp. 94~102.
- (3) Erdman, G., Sandor, N., Kota, S., 2002, "Mechanism Design", pp. 133~221.
- (4) Gollee, R., Roschke, Th. and Gerlach, G., 1999, "A Finite Element Method Based Dynamic Analysis of a Long-stroke Linear Actuator", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 196~197, pp. 934~945.
- (5) "SAMCEF User Manual-10.1", Samtech International Inc., 2003.