

비선형 마찰과 강성을 이용한 자동화 시스템 개발

이정욱[†] · 조용희^{*} · 장용훈^{**} · 김정하^{***}

(2003년 12월 31일 접수, 2004년 5월 15일 심사완료)

Automatic System Development by Using Friction Force and Stiffness with Nonlinear Characteristic

Jeong-Wook Lee, Yong-Hee Cho, Yong-Hoon Chang and Jung-Ha Kim

Key Words : Nonlinear Friction(비선형 마찰), Nonlinear Stiffness(비선형 강성), Sliding Friction(미끄럼 마찰), Rolling Friction(구름 마찰)

Abstract

In this study, we developed an automatic veneer sorting system controlled by nonlinear friction and nonlinear stiffness. With these nonlinear characteristics, it was difficult to analysis and to control the system in the fast. However it is necessary to consider nonlinear characteristics to satisfy accurate and rapid control demand in these days. We used not only nonlinear friction but also nonlinear stiffness and combined both to control the system. An experimental device was designed with 4 AC servo-motors and 2 Sensors. Through a series of experiment, we found nonlinear friction characteristics among roller versus veneer and veneer versus veneer and nonlinear stiffness characteristics with stacked veneers. Finally, we showed that the proposed control algorithm was very effective for veneer sorting system with nonlinear friction and stiffness.

기호설명

k_a : 거친 면 접촉에서의 스프링 강성
 k_{eq} : 쌓여있는 베니어의 전체 스프링 강성
 k : 쌓여있는 베니어 각각의 스프링 강성
 F_{ext} : 외력(external force)
 F_R : 구동력(driven force, rolling friction)
 F_s : 정지 마찰력(static friction)
 F : 베니어를 분류하기 위해 필요한 힘
 x : 변위(displacement)
 P^*, P : 수직항력

R : 롤러의 반경(radius of roller)
 T_m : 모터에 인가된 토크

1. 서 론

지구상의 모든 움직임에는 마찰력이 존재한다. 사람의 몸을 포함한 셀 수 없이 많은 기계 요소들의 성공적인 동작을 위해서는 마찰이 필수 요소이지만, 또한 다른 측면에서 마찰은 기계시스템에서 저항의 요소로서 간주되고 제어적인 측면에서는 외란(disturbance)으로서 제거의 대상이 된다.^(1, 2) 이러한 마찰은 비선형 특성을 갖고 있기 때문에 시스템 해석뿐만 아니라 제어하기도 상당히 까다로운 것으로 여겨지고 있다. 하지만 최근 정확한 제어와 빠른 공정을 위해서 마찰력의 제어에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 마찰력은 옛날 이집트 시대부터 연구되어 왔고, Leonardo Da Vinci 와 Coulomb 과 같은 학자들에 의해서 최초로 실험되고 연구되어 세계 곳곳의 여러 학자들에 의해서 발전되어 오늘날의 마찰력에 대한 기본원리가 만들어졌다. 그리고 현대 컴퓨터의 발달과 유

[†] 책임저자, 회원, 국민대학교 대학원 자동차공학
 E-mail : jwlcc26@kookmin.ac.kr
 TEL : (02)910-5143 FAX : (02)916-0991

^{*} 국민대학교 대학원 자동차공학

^{**} 회원, 인덕대학 기계시스템전공

^{***} 회원, 국민대학교 자동차공학과



Fig. 1 Conformal contact

한 요소법에 의한 해석방법을 통해 마찰력을 해석하는 연구가 1950 년 후반부터 시작되었으며, Wilson and Parsons(1970)과 Chan and Tuba(1971)에 의해 기하학적 선형이론을 통해 접촉의 문제를 다루었으며, 최근의 실험적인 방법으로 마찰력을 연구하여 적용한 것은 Jonathan E. Luntz, William Messner 와 Howie Choset(1997)에 의해 개발되고 발표되었다.^(3, 8)

본 논문에서는 마찰에 관한 일반적인 특성 및 모델링과 쌓여져 있는 물체사이의 간격을 스프링의 비선형적인 강성을 이용하여 고찰하였으며, 이러한 비선형성을 이용하여 여러 가지 실험을 수행하였고 그 결과로서 비선형 마찰 및 스프링의 비선형 강성을 이용하여 마찰력을 구동력으로 하는 자동공정 시스템을 개발하고 여러 가지 자동화 공정에 적용하고자 한다.

2. 시스템의 구성(System Configuration)

2.1 마찰

2.1.1 표면과의 접촉

마찰은 일반적으로 두 물체의 접촉에 의해서 다른 물체와의 상대적인 운동에 관한 현상이기 때문에 마찰에 관해 고찰하기 위해서는 접촉에 관한 문제를 선형하여 고찰하여야 한다.

Fig. 1 은 Part A 가 Part B 에 올려져 있는 일반적인 평평한 물체 사이의 접촉에 관한 그림이다. 기구학적으로 이러한 접촉은 면 접촉으로 정의되어 있다. 접촉은 각 물체들의 크기에 의해서 결정이 된다.

곡선을 가진 부분과의 접촉은 물체들이 만나는 점이 원의 반경의 크기와 같아야 한다. 기구학적으로 이러한 접촉을 점 접촉 또는 선 접촉이라고 한다. 하지만 이러한 것은 이상적인 것 뿐 실제로는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 수직항력에 의해서 찌그러져 그 접촉하는 부분이 점 또는 선이 아닌 면으로 접촉을 하게 된다.

접촉면들이 아주 부드럽고, 정밀하게 가공이 되었다 하더라도 현미경으로 자세히 관찰하면 그 접촉부분에서 이상적으로 접촉을 하고 있지 않고 거친 면(asperity)을 가지고 있음을 알 수 있다. 실

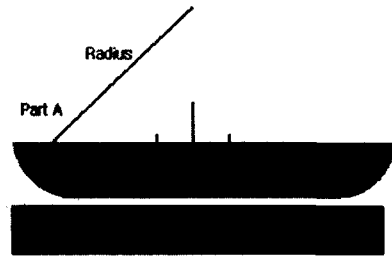


Fig. 2 Non-conformal contact

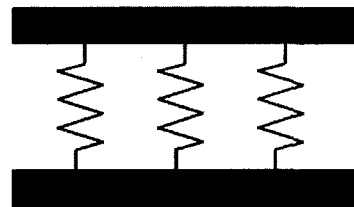


Fig. 3 Asperity junctions

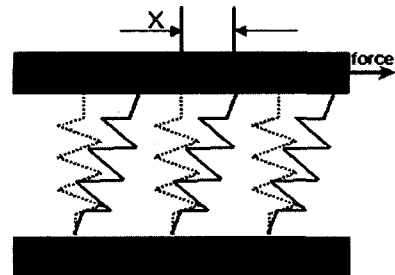


Fig. 4 Spring behavior

제 접촉(real contact)은 이러한 거친 부분들이 만나는 점들에서 접촉이 일어난다고 할 수 있다. 이러한 이유로 실제 접촉한 면(real contact)은 실제로 보이는 접촉면(appearance contact)보다 훨씬 작아짐을 알 수 있다.

2.1.2 마찰의 특성

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 두 물체가 서로 접촉하고 있을 때 물체의 거친 면들에 의해서 두 물체가 정확하게 일치하여 접촉하지 않고 그림과 같이 물체 사이에 가상의 스프링이 존재하는 접촉을 이루게 된다.

일반적인 마찰을 자세하게 관찰하기 위해 몇 가지 가정이 필요하다.

- 정지마찰상태에서는 변위가 발생하지 않아야 된다.
- 정지마찰상태에서의 결합은 스프링과 같은 특성과 행동을 가진다.

즉, sliding 이 일어나지 않으면 움직임은 발생하지

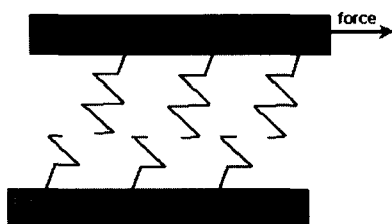


Fig. 5 Break away

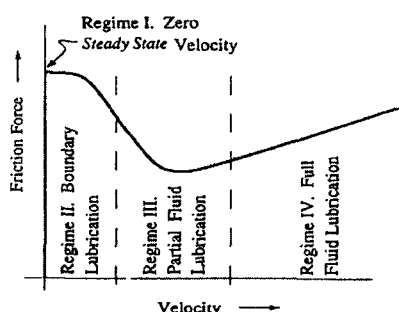


Fig. 6 Friction as a function of velocity [From reference (1)]

- Static Friction (No sliding, Elastic Deformation) (Fig. 4)
- Boundary Lubrication (pure sliding)
- Partial Fluid Lubrication (Stribeck 효과)
- Full Fluid Lubrication(점성 마찰력)⁽¹⁾

않고, 힘은 어떤 특정한 변위(break-away가 일어나기까지의 변위)까지는 변위에 대한 선형적인 함수이다.

정지상태에서 힘(break-away를 일으키지 않는 범위의 힘)이 가해지면 물체의 움직임은 발생하지 않지만 내부적으로 스프링과 같은 특성을 가진 정지마찰이기 때문에 약간의 변화가 생긴다. 하지만 그 힘을 제거했을 때는 스프링과 같이 제자리로 돌아온다. 이 영역에서의 마찰력은 다음과 같이 표현된다.

$$F(x) = -k_a x$$

k_a 는 거친 면 접촉에 의한 스프링 강성이고, x 는 스프링의 변위이다.

하지만, 정지마찰의 범위를 벗어나는 힘이 가해지면 break-away가 발생하여 그 결합은 깨어지고 드디어 순수한 sliding이 시작된다.

이에 대한 개략적인 그림이 Fig. 5에 나타나 있다.

2.1.3 마찰 모델링

마찰력은 물체가 움직일 때 두 물체사이의 접촉점의 성질, 속도 등에 의해서 결정이 되는데 일반

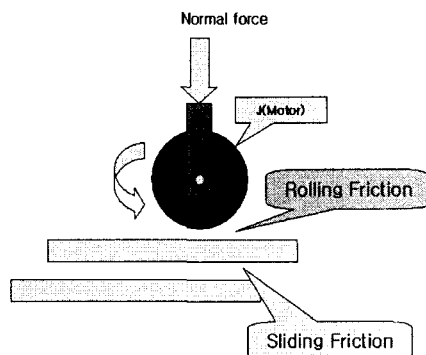


Fig. 7 Friction in the system (rolling friction between roller and veneer, sliding friction between veneer and veneer)

적으로 수직방향의 힘이 증가하게 되면 두 물체 사이의 거친 면의 접촉면이 증가하게 되어 움직임을 방해하는 힘이 증가하게 된다. 그리고 속도가 일정하게 유지되는 경우 속도에 따라 정성적인 값으로 볼 수 있지만 물체 사이의 윤활 특성에 따라 4가지의 다른 특성을 갖는다. Fig. 6은 마찰력의 4가지 동적 특성에 관한 그림이다.

본 시스템은 아무런 윤활도 적용되지 않는 건조 마찰상태이므로 위에서 설명한 4가지 동적 특성 중 a)와 b)의 두 가지에 대해서만 적용이 된다. 즉 특성 1에서의 스틱 영역에서 마찰력의 크기가 점차 증가하여 최대 정지 마찰력을 넘어서게 되면 특성 b)에 해당하는 슬립영역으로 전환되어 슬라이딩이 일어나게 된다.⁽⁴⁾

2.2 시스템에 적용되는 마찰의 종류

마찰은 그 형태에 따라서 크게 미끄럼 마찰, 구름 마찰, 정지 마찰 등으로 나눌 수 있다. 본 장에서는 이러한 여러 종류의 마찰 중에서 베니어와 롤러 사이에서 발생하는 구름 마찰(Rolling friction)과 베니어와 베니어 사이에서 발생하는 미끄럼 마찰(Sliding friction)에 대해서 알아본다.

2.2.1 Sliding 마찰

마찰력은 물체의 움직임에 대해서 평행하게 발생하는 것이다. 그리고 마찰은 미끄러지는 방향과 그 미끄러지는 양에 의해서 표현되고 일반적인 표면에서의 마찰은 물체의 움직임에 대해서 평행하게 작용한다고 가정할 수 있다.⁽⁵⁾

두 물체를 미끄러지게 하기 위해서는 물체를 미는 힘이 다른 하나의 거친 면을 넘어가거나 아니면 다른 하나의 거친 면을 변형시켜서라도 미끄러지는 방향과 병행하게 작용하는 반력보다 커야 한다.

두 물체를 접선방향으로 움직이게 하기 위해 요구되는 힘은 어떤 힘이든 두 물체의 표면을 잡고 있는 힘을 극복해야만 한다.



Fig. 8 Sliding friction

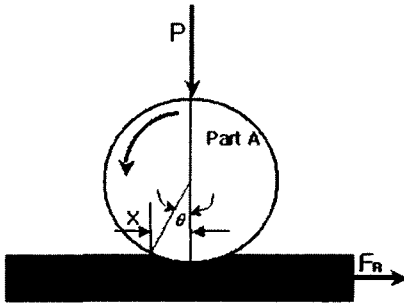


Fig. 9 Rolling friction

강한 접착력을 가진 다른 두 물체의 경우, 두 면간의 경계에서의 전단력은 두 물체 중 약한 전단력을 넘어서나. 그리고 정지마찰력(F_s)은 약한 쪽 재료의 전단력(τ_m)과 접촉면(A)에 의해서 결정된다.

$$F_s = \mu_s P^* = \tau_m A \quad (1)$$

또는

$$\mu_s = \left(\frac{\tau_m}{P^*} \right) A$$

여기서 P^* 는 외부에서 주어지는 하중 뿐만 아니라 두 표면사이에서 작용하는 접착력까지도 포함하는 수직 항력이다. 여기서 μ_s 는 정지 마찰 계수이다.

2.2.2 Rolling 마찰

만약 반지름이 R 인 원통이 고정되어 판 위에서 축을 중심으로 각 θ 만큼 회전 하였을 경우, 그 판이 움직인 거리가 $R\theta$ 와 같을 경우 이를 순수한 롤링(Pure rolling)이라고 한다.

만약 실린더와 판이 완벽한 강체(rigid body)이고 공기 중에 마찰이 존재하지 않는다면, 실린더는 무한정 회전하고 아래쪽 판의 움직임을 없앨 것이다. 그러나, Fig. 9에서 보는 바와 같이 접촉점이 하나의 점이 아니다. 그리고 접촉압력의 분배는 약간 골이 져 있으며 그 방향은 실린더의 회전 방향쪽에 발달하여 있다.

판을 계속해서 움직여 주기 위해서는 구동력

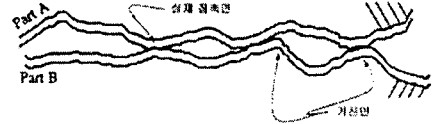


Fig. 10 Asperities with microscopic view

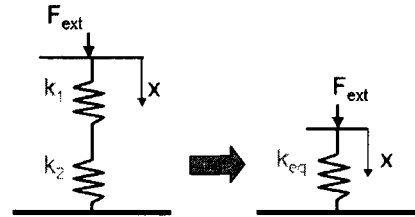


Fig. 11 Spring characteristic of stacked veneers

F_R 는 계속해서 주어져야 한다. 표면에서의 압력분포는 수직항력(Normal force, P)과 실린더 중심으로부터의 수직에 대한 offset 거리의 작용점 x 와의 합력에 의해서 표현된다. 만약 계속되는 롤링 모션 동안의 힘의 평형에 대해서 가정하면, 점에 대한 모멘트의 합으로 나타낼 수 있다.

즉,

$$Px = F_R(R \cos \theta) \quad (2)$$

여기서 $R \gg x$ 이면 식 (2)는 대략 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Px = F_R R$$

$$F_R = \frac{Px}{R \cos \theta} \approx \frac{Px}{R} \quad (3)$$

여기서 거리 x 는 롤링저항의 계수로서 정의 되기도 한다.⁽²⁾

2.3 스프링 특성을 가진 베니어

물체와 물체 사이에서는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 거친 면의 접촉에 의해 그 표면에 약간의 간격이 생길 수가 있다. 그리고 특히 베니어와 같은 표면이 특히 거친 원자재에서는 여러 장이 겹쳐져 있을 경우 그 영향이 크게 작용하므로 그 특성에 관한 고찰이 필요하다. 그래서 본 논문에서는 그 형상을 스프링의 직렬 연결과 같은 형상으로 보고 모델링 하였다.

Fig. 11은 쌓여있는 베니어의 형상을 스프링을 이용한 간략한 모형으로 만든 것이다.

외력 F_{ext} 에 대한 변위 x 를 이용하여 전체 스프링의 강성인 k_{eq} 를 구할 수 있다.

즉,

$$F_{ext} = k_{eq} x \quad (4)$$

여기서 필요한 외력은 실험값에 의해서 구하였

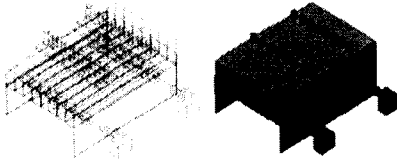


Fig. 12 Sorting mechanism

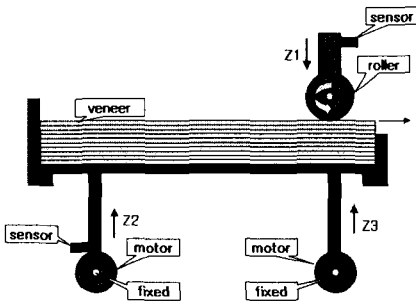


Fig. 13 Sorting mechanism

다. 실험은 제 5 장 실험 및 결과에서 설명하였다.

3. 시스템 구조

3.1 Sorting 시스템의 개념

현장에서 사용 가능한 시스템을 구성하기 위해서는 먼저 베니어를 쌓아서 적재할 수 있는 카트리지가 필요하며 또 적절한 수직항력을 만들기 위한 기구부 그리고 베니어의 초기 위치를 잡아줄 기구부 등이 필요하다. Fig. 12 는 이러한 하나의 시스템이 8 개가 한 조가 된 모듈화 된 현장 적용 가능한 시스템을 초기 디자인한 것이다.

3.2 장치의 개념

Fig. 13 은 실험을 위해 제작한 시작품을 개략적으로 작성한 것이다. 위쪽에 설치한 모터는 롤러의 상하 움직임을 만들어 적절한 수직항력을 만들 수 있게 하였다.

그리고 롤러는 베니어와 접촉하여 베니어를 밀어내는 마찰력을 만들기 위해서 모터를 이용하여 적절한 속도를 만들어주며, 베니어가 빠져나감에 따라 달라지는 베니어의 초기 위치를 일정하게 유지하기 위하여 아래쪽에서부터 베니어를 밀어올려 주는 모터를 장착하여 베니어의 초기 위치를 항상 일정하게 유지 할 수 있는 구조를 고안하였다. 위쪽에서부터 작동하는 모터의 축을 z_1 축 이라고 하고, 베니어의 초기값을 설정하기 위해서 밑에서부터 작동하는 모터의 축을 $z_{2,3}$ 축 이라고 정의한다.

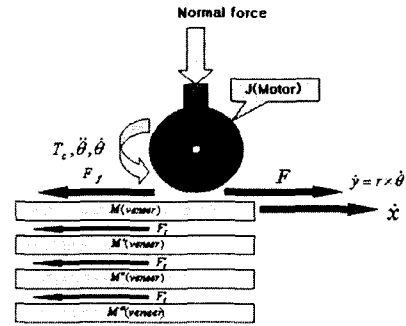


Fig. 14 Schematic of sorting analysis

4. 시스템 해석

4.1 Sorting system 에서의 마찰해석과 모델링

Fig. 14 는 sorting system 을 단순화하여 나타낸 그림이다. 적절한 마찰력을 발생 시키기 위해서 z_1 의 이동량을 적절하게 조절하여 일정한 수직항력(0.6kgf)을 만들고 베니어에 마찰력을 발생 할 수 있는 롤러로 구성되어 있으며 롤러가 모터에 의해 회전함(360rpm)으로써 베니어를 배출 할 수 있는 마찰력을 발생시킨다. Fig. 14 에서 보는 바와 같이 베니어를 배출시키는 힘 F 는 롤러와 첫번째 접하는 베니어 사이에서의 롤링 마찰력에 의해 발생하며, 베니어가 배출됨으로 해서 그 다음의 베니어에 첫번째 베니어의 배출을 방해하는 마찰력 F'_f 이 발생한다. 그리고 두 번째 베니어에 의해 세 번째 베니어에서도 같은 마찰력 F'_f 이 발생하게 된다.

베니어를 한 장씩 배출하기 위한 적절한 마찰력은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$F'_f < F < F'_f + F''_f \quad (5)$$

그리고 $F'_f = F''_f$ 이면,

$$F'_f < F < 2F'_f \quad (6)$$

따라서 첫번째 베니어가 배출되기 위해서는 두 번째 베니어에 의해 발생하는 마찰력보다는 커야 하고, 두 번째, 세 번째의 베니어를 제자리에 정지해 있어야 함으로 두 번째 베니어가 배출되지 않기 위해서는 두 번째 베니어에 발생하는 마찰력의 두 배보다 작아야 한다.

Sorting 시스템을 모델링 하는데 있어서 적재된 베니어의 양 또는 롤러의 재질과 베니어의 재질 등 여러 가지 조건들에 의한 마찰력의 변화가 심하기 때문에 이를 몇 가지 가정들을 통해 단순화하여 모델링을 한다.

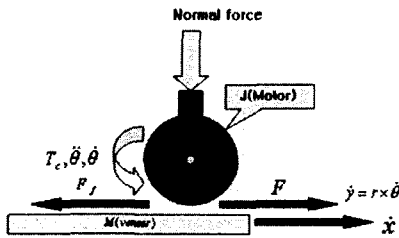


Fig. 15 Schematic of sorting modeling

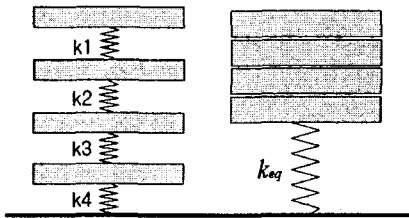


Fig. 16 Schematic of stacked veneers with spring characteristic

- Normal force is constant.
- There is a line contact between roller and veneer.
- There is no elastic deformation on roller caused by veneers.
- There is a totally dry friction without any lubrication between roller and veneer, and among veneers.
- Roller velocity is constant.

Fig. 15 는 이러한 가정들을 바탕으로 간략화 하여 나타낸 그림이다.

롤러의 운동방정식은 뉴턴의 제 2 법칙을 기본으로 하여 나타낼 수 있다.

$$J\ddot{\theta} = T_m - RF \quad (7)$$

$$V = R\dot{\theta}, \quad \dot{\theta} = \frac{V}{R}$$

$$\frac{J}{R}\dot{v} = T_m - RF \quad (8)$$

여기서 \dot{v} 는 베니어의 선속도 성분이며 T_m 은 모터에 인가되는 토크이다.⁽⁶⁻⁷⁾

또한 베니어의 운동방정식을 살펴보면,

$$F - F_f = m\dot{v} \quad (9)$$

이러한 마찰력에 관한 모델은 복잡하고 비선형적 특성을 가지므로 이론식보다는 주로 실험에 의해 적절한 수직하중(0.6kgf)과 롤러의 회전속도(360rpm)를 산출하여 해석 및 실험을 수행하였다.

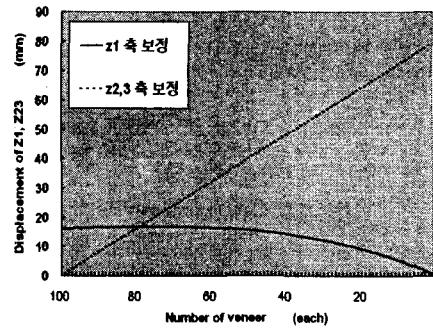


Fig. 17 Simulation with nonlinear characteristic

4.2 스프링의 비선형 강성 특성

Fig. 16 은 쌓여있는 베니어의 모양을 간략화 하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 베니어와 베니어 사이의 간격은 스프링의 시리얼의 형상으로 표시하였는데 각각의 스프링의 연결은 하나의 스프링 강성(k_{eq})으로 표현 할 수 있다.

즉,

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

$$k_{eq} = \frac{k_1 k_2 k_3 \dots k_n}{k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n}$$

여기서, $k_1 = k_2 = k_3 \dots = k_n = k$ 일 경우

$$k_{eq} = \frac{k^n}{nk} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다.

각각의 스프링의 강성을 이용하여 하나의 강성을 만들 수 있다. 이 강성을 이용하여 각각의 강성을 역으로 산출 할 수 있다.

식 (4)와 식 (10)을 이용하여 베니어 사이에서의 강성 k 값을 구할 수 있다.

$$k = (k_{eq} n)^{\frac{1}{n-1}} \quad (11)$$

식(4)에서 계산한 k_{eq} 를 이용하여 베니어 사이에서의 강성 k 값을 구할 수 있으며 이 값은 베니어의 수 n 에 대해서 비선형적으로 변하는 것을 알 수 있다.

4.3 비선형 강성을 이용한 simulation 결과

Fig. 17 은 베니어를 배출하기 적절한 일정한 수직하중을 만들기 위해서 식 (4)와 식 (11)을 이용하여 Z_1 의 높이를 남은 베니어의 개수에 따라 적절하게 조절하는 데이터를 구하기 위한 시뮬레이션 결과이다.

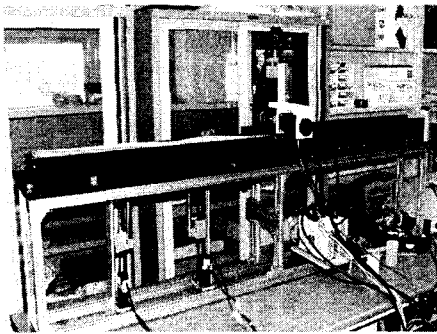


Fig. 18 Prototype of sorting system

즉 식 (4)를 통해 베니어가 모두 적재된 상태에서의 적재된 베니어가 갖는 스프링의 강성(k_{eq})을 구한다. 여기서 외부하중(F_{ext})을 0.6kgf 로 주었으며, 변위(x)를 16mm 로 설정하였다. 이를 바탕으로 식 (11)을 이용하여 베니어가 한 장씩 sorting 됨에 따라 달라지는 적재된 베니어의 수에 따른 스프링 강성(k)을 계산하여 베니어의 수가 달라짐에 따라 변하는 강성을 이용하여 균일한 수직항력을 만들기 위한 Z_1 과 $Z_{2,3}$ 의 변화량을 계산한 것이다.

Fig. 17 에서 보는 바와 같이 베니어가 적재되어 분류되기 시작하면 처음에는 Z_1 이 약간 상승하다가 차츰 베니어의 양의 줄어들면서 베니어사이의 가상 스프링의 강성의 변화에 의해 일정한 수직항력을 만들기 위한 Z_1 의 높이가 급격하게 변함을 알 수 있다. 차후 실험 및 결과에서 스프링의 비선형 강성을 고려한 실험에 시뮬레이션의 결과를 이용한다.

5. 실험 및 결과

5.1 실험장치

Fig. 18 은 실제 제작한 시제품을 보여주고 있다. 4 개의 AC Servo motor 와 1 개의 롤러 그리고 2 개의 포토 커플러와 하나의 옵티컬 센서로 구성되어 있다. 위쪽에 설치된 모터는 롤러를 아래위로 움직이게 하여 베니어를 밀어내는데 적절한 수직항력을 만들고, 롤러와 함께 설치된 모터는 롤러를 일정한 속도로 회전하게 한다. 그리고 아래쪽에 설치된 두 개의 모터는 베니어의 초기위치를 설정하고, 베니어가 빠져나가면서 베니어의 위치가 변하는 것을 베니어가 쌓여있는 카트리지를 밀어올려 베니어의 초기위치를 잡는 역할을 한다.

그리고 Fig. 19 는 전체적인 구성을 간략하게 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3 가지를 컨트롤 하는데 첫번째 롤러의 속도, 두 번째 롤러

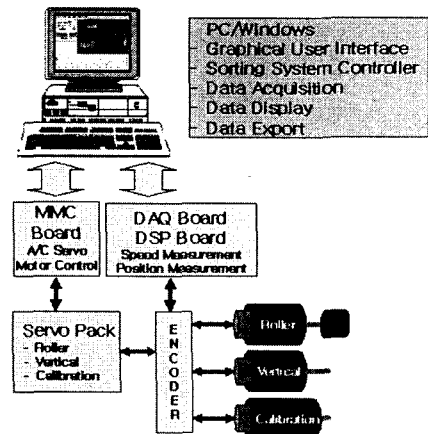


Fig. 19 Diagram of computer based control

의 수직방향의 위치 그리고 마지막으로 베니어의 초기값 조정을 위한 보정을 하였으며, 모두 엔코드를 통해 데이터를 받아 Servo-pack 을 거쳐 MMC 보드를 통해 컴퓨터로 컨트롤을 하게 되고 그 중에 엔코드에서 나온 신호를 DAQ/ DSP 보드를 이용하여 데이터를 수집하고 표시하고 다시 보내는 구조를 가지고 있다.

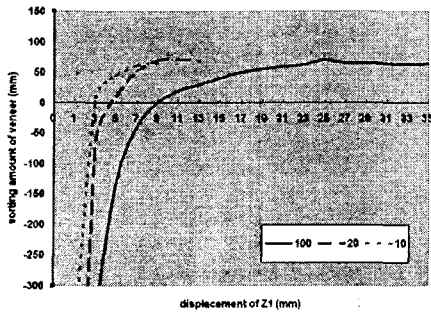
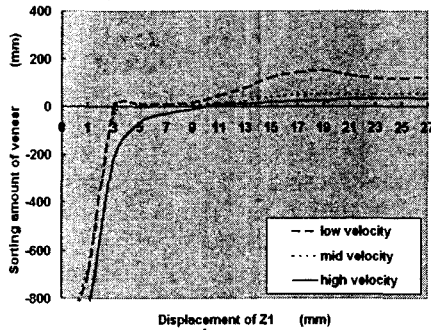
5.2 실험방법

실험은 크게 3 가지에 중점을 두고 시행하였다. 첫째 베니어를 sorting 하기 위해 필요한 수직항력은 얼마나 되는가? 본 논문에서는 수직항력을 직접 측정 하지 않아 Z_1 의 이동량으로 대신하였다. 둘째 롤러의 속도에 따른 베니어가 배출되는 양은 어떤 차이를 보이는가? 즉 적절한 롤러의 속도는 어느 정도인가? 마지막 세 번째는 위에서 실시한 시뮬레이션의 결과를 적용한 실험과 적용하지 않은 실험을 비교하였다. 즉 각 요소들의 비선형성을 무시하고 한 실험(시뮬레이션의 결과를 적용하지 않은 실험)과 각 요소들의 비선형성 즉 마찰력 및 강성의 비선형성을 고려하여 보정하면서 실험(시뮬레이션의 결과를 적용한 실험)한 값들을 비교 하였다.

5.3 결과 및 고찰

첫 번째로 시행한 실험은 적절한 수직항력은 어느 정도 인가를 알아보기 위한 실험으로 Fig. 20 은 그 결과를 나타낸다.

처음 실험을 실시할 때 베니어의 수에 따라 Sorting 에 필요한 수직항력은 일정하다고 생각하였다. 즉 베니어의 수가 적어도 일정한 수직항력을 위한 롤러의 수직방향 변화량은 변함이 없을 것으로 생각하였으나, 그림에서 보는 바와 같이 베니어의 수가 적어 질수록 일정한 수직항력을 만들기 위한 롤러의 수직방향의 변화가 점점 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 20 Result of 1st case of experimentFig. 21 Result of 2nd case of experiment

y 축은 베니어의 이동량 즉 배출량을 나타낸다. 즉 베니어가 완전히 배출 된 경우를 0 으로 나타내었으며, 0 이하인 경우는 수직항력이 적절한 수직항력보다 적은 양이 가해졌기 때문에 슬립이 생겨 베니어가 완전히 배출되지 못한 경우를 말하며, 0 이상인 부분은 베니어가 배출되고 다음 장까지 같이 배출 된 경우로 지나친 수직항력이 가해진 경우이다. x 축은 Z_1 축의 수직방향 이동량을 나타내고 있다.

여기서 100 장의 베니어가 적재되어 있을 경우 (실선) 첫 번째 베니어를 분류하기에 적합한 Z_1 축의 이동량은 9mm 이고, 이를 이용하여 간접적으로 수직항력을 측정 한 결과 수직항력이 0.6kgf 임을 확인하였다. 이 결과는 위의 시뮬레이션에서 외력(F_{ext})으로 사용하였다.

그리고 차츰 베니어의 수가 적어지면 일정한 수직항력을 만들기 위한 Z_1 의 이동량이 줄어 베니어가 10 장 정도 남아있을 경우(점선)는 Z_1 의 이동량이 3mm 까지 줄어 들을 알 수 있다.

두 번째 실험에서는 롤러의 속도에 따른 베니어의 배출량의 관계를 알아보기 위해서 롤러의 속도를 변화시키면서 베니어의 배출량을 측정을 하였다.

Fig. 21 은 그 결과를 보여주는 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일정한 수직항력 하에서 롤러의 속도가 느리면(굵은 점선) 3mm 의 Z_1 의 이동으로

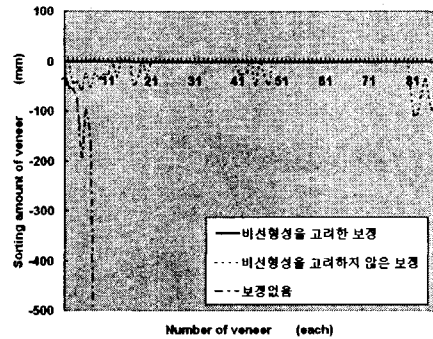


Fig. 22 Comparison of three type of contributions

도 베니어가 완전히 분류 되는데 속도가 빨라지면서(실선) 9mm 를 이동하여야만 sorting 이 완전히 됨을 알 수 있다. 이처럼 롤러의 속도가 빨라지면서 베니어의 배출량이 줄어드는데 이는 롤러의 속도가 빨라짐으로 인해 롤러와 베니어 사이에 슬립이 생기면서 롤러와 베니어 사이의 마찰력이 줄어들어 생긴 결과로 생각된다.

롤러의 적절한 속도를 제품의 생산량과 후 공정과의 연관성을 고려하여 360rpm 으로 설정을 하였다.

Fig. 22 는 스프링 강성의 비선형성을 고려하지 않고 보정한 실험 결과와 비선형성을 고려하고 보정한 실험결과 그리고 어떠한 보정도 하지 않고 실험한 결과의 세가지 경우에 대해서 보여주고 있다. 그림에서 실선은 비선형성을 고려하여 시뮬레이션 결과를 바탕으로 Z_1 과 Z_{23} 축을 이동하여 실험한 결과이고 가는 점선은 비선형성을 고려하지 않고 평균값을 이용하여 Z_1 과 Z_{23} 축을 이동하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 마지막으로 일점쇄선은 아무런 보정도 하지 않고 실험한 결과이다.

그림에서 y 축은 베니어의 배출량의 표시한 것이고 x 축은 베니어의 수를 나타낸 것이다. 여기서 1 은 100 장을 의미하며 이후 베니어가 한 장씩 배출됨에 따라 숫자는 하나씩 1 씩 증가를 하게 된다. 즉 1 은 카트리지에 베니어가 100 장이 적재되었음을 의미하고 81 은 20 장이 적재되었음을 의미한다.

그림에서 보는 바와 같이 아무것도 고려하지 않고(일점쇄선) 보정을 하지 않은 것은 거의 한 두 장도 제대로 배출하지 못하였으며, 비선형성을 고려하지 않은 보정(점선)을 한 시뮬레이션을 적용한 경우 첫 부분과 끝부분에서 약간의 불안정성을 발견하게 되었다. 그리고 마지막으로 스프링 강성의 비선형성을 고려한 시뮬레이션을 적용하여 보정(실선)하고 실험한 결과 비선형성을 고려하지 않고 실험한 결과 중 처음과 끝부분의 불안정성이 해소 되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

참고문헌

본 논문에서는 베니어를 배출하기에 적절한 마찰력을 직접 구하지 않고 베니어와 롤러, 베니어와 베니어 사이의 마찰계수를 정확하게 측정할 수 없고 실시간의 수직하중을 측정하지 않기 때문에 실험을 통해서 Z_1 및 $Z_{2,3}$ 축의 이동량과 적절한 롤러의 회전속도를 이용하여 식 (6)을 만족하는 경향을 보이게 하였다.

또한 본 시스템의 특징은 기본적인 메커니즘의 변형 없이(크기 및 모양의 변형은 있을 수 있으나) 어떠한 재질에서도 사용이 가능하다는 것이다. 즉 각 요소간의 마찰계수에 관한 정확한 데이터만 있으면 Z_1 및 $Z_{2,3}$ 축의 이동량의 제어만으로도 추출이 가능하다.

본 논문에서 고찰하고 실험한 결과 베니어를 한 장씩 배출하는데 적합한 수직항력을 만들기 위해서는 롤러의 속도, 베니어를 누르는 수직항력 뿐만 아니라 쌓여져 있는 베니어들의 특성, 즉 베니어 사이의 간격들에 대한 비선형 강성 그리고 베니어와 롤러 사이에서 발생하는 마찰력, 베니어와 베니어 사이에서 발생하는 마찰력 등 비선형 요소들을 고려하고, 이를 바탕으로 실험한 결과 비선형성을 고려하지 않은 것보다 좋은 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

한가지 특이한 점은 베니어의 수가 적어질 경우, 몇 장 정도 남은 경우, 새로운 비선형적인 현상이 발견 되었으며, 이는 앞으로 계속해서 연구해야 할 과제로 본다.

- (1) Brian Armstrong-Helouvry, 1991, "Control of Machines with Friction," *Kluwer Academic Publishers*, Massachusetts, pp. 11~17.
- (2) Peter J. Blau, 1996, "Friction Science and Technology," *Marcel Dekker, Inc.* New York, pp. 38~39, pp. 109~110.
- (3) Wriggers P., 2002, "Computational Contact Mechanics," *John Wiley & Sons, LTD.*, West Sussex, pp. 13~20.
- (4) Sang-Chae Kim, Soo-Hyun Kim, Kyihwan Park, and Yoon Yeoun Kwak, 1996, "Modeling and Analysis of a Friction Drive Type Precise Actuator," *Transactions of the KSME*, Vol. 20, Seoul, pp. 1421~1423.
- (5) Goryacheva I. G., 1998, "Contact Mechanics in Tribology," *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Netherland, pp. 73~74.
- (6) Ko M. S., 2002, "Research about Development of an Automatic Sorting System Driven by Control of Friction," *Kookmin University*, Seoul, pp. 30~32.
- (7) Richard C. Dorf and Robert H. Bishop, 2001, "Modern Control Systems," *Prentice Hall*, New Jersey, pp. 52~56.
- (8) Luntz J., Messner W., and Choset H., 1997, "Parcel Manipulation and Dynamics with a Distributed Actuator Array: The virtual vehicle," In processing, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1541~1546.