

롤러 위를 주행하는 벨트의 거동

Behavior of Belt Running over the Rollers

윤여훈* · 윤준현**

You-Hoon YOON, Joon-Hyun YOON

Key Words : Flat belt, FE Analysis, Multi-body dynamics, Skew, Misalignment, Loose side, Tight side, Cylindrical roller, Tension roller

ABSTRACT

Development of color printer, postal classification machine, ATM and so on requires higher moving performance of the flat belt. Skew of the flat belt running over misaligned roller has a bad effect on performances of media transport. The vibration of loose side of belt causes the escape of the belt from roller and the drop of velocity of driven roller after the start of driving roller revolution. The skew of flat belt is investigated by FEM and dynamic simulation. FEM results show parameters which affect the skew of belt and match with dynamic results qualitatively. The shape of loose side of belt can be found by dynamic simulation. Increase of the acceleration time and initial tension have diminished the unstable movement of the loose side of belt.

1. 서 론

1.1 연구배경

사무자동화기기, 우편물 구분기, 역무자동화기기, 금융자동화기기와 같은 사회자동화기기에서 종이, 우편물, 티켓, 지폐와 같은 유연매체의 안정된 이송은 벨트이송방식에 의해 구현된다. 따라서 벨트의 주행방향으로의 슬립(slip)이나 스큐(skew) 및 벨트의 진동 등은 매체의 고속 이송 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히, 금융자동화기기의 경우 지폐감별장치로의 안정된 이송은 안정된 감별을 위한 필수 요소이다.

국외의 관련 연구로는 Gerbert[5]가 콘(cone)형상의 롤러와 벨트와의 거동을 벨트의 강성 및 장력등과 같은 요소와 콘 형상 요소의 영향을 고찰하였다. Hukusima[6]등은 콘 형상 롤러와 강철띠의 거동을 롤러 지름, 마찰계수 및 주행속도의 관점에서 해석 및 실험을 실시하였다. Oyama[7]등은

크라운 형상의 롤러와 필름 벨트의 거동에 대한 연구를 실시하였다. 한편 Yanabe[1][2][3][4]등은 다양한 롤러 형상에 따른 벨트 거동을 가장 다양한 관점에서 연구하였다.

국내의 자동화기기의 개발에 있어 상당 부분이 실제기기를 제작한 후 많은 실험을 통하여 기기의 형상, 재질, 치수 등을 결정하는 시행착오법에 의한 개발을 행하여 온 것이 현실이다.

본 논문에서는 Yanabe등이 발표한 유한요소해석에 의한 벨트 거동 결과와 다물체 동역학해석에 의한 벨트 거동 결과의 고찰을 실시하여 향후 개발에 적용을 목적으로 수행하였다.

2. 정해석

2.1 시뮬레이션 개요

FEM 시뮬레이션을 통해 원통 롤러(cylindrical roller)가 편각(misalignment angle)을 가질 때 그 위를 주행하는 벨트의 거동에 영향을 미치는 파라미터를 조사한다. 또한 텐션(tension) 롤러의 설치 위치가 벨트 스큐에 미치는 영향을 확인해 본다.

유한요소해석 프로그램인 MARC를 사용하여 롤러 사이를 주행하는 평벨트의 거동을 시뮬레이션한다. 롤러-벨트계는 그림 1과 같이 구동 롤러

* Nautilus Hyosung
E-mail : yyh5150@hyosung.com
TEL : (031)428-1515 FAX : (031)428-1594

** Nautilus Hyosung
E-mail : jhyoon@hyosung.com
TEL : (031)428-1580 FAX : (031)428-1594

(driving roller), 종동 롤러(driven roller) 그리고 평벨트로 구성되어 있다. 점 A와 점 B 두 점에서 벨트의 롤러 축방향으로의 변위, 즉 스큐(skew)를 측정한다. 해석에서는 벨트 재료의 비선형성은 고려하지 않았다.

2.2 편각을 갖는 원통 롤러

2.2.1 벨트 스큐와 편각

그림 2는 원통 롤러에 편각을 가한 다음에 초기 상태에서 10회전 후의 상태를 나타내고 있다. 벨트가 Z 방향으로 이동한 것이 명백히 드러난다. 그림 3은 편각의 크기에 따른 벨트의 스큐량을 나타낸다. 벨트의 스큐량은 편각의 크기에 비례하는 것을 알 수 있다. 벨트는 초기에는 정현파형으로 거동하는 과도 스큐 현상을 보이지만, 회전이 거듭됨에 따라 스큐 rate이 일정해지는 정상 스큐 영역으로 천이됨을 알 수 있다.

2.2.2 초기 벨트장력의 영향

그림 4에 벨트의 초기장력이 스큐에 미치는 영향을 나타낸다. 초기 장력에 따른 스큐량과 스큐 rate에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. Yanabe의 결과에서는 초기장력에 따라 스큐량이 비례하는 것으로 보고하였다.

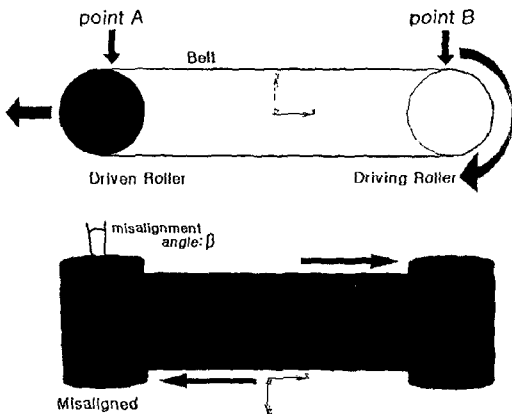


Fig. 1 FEM model

2.2.3 마찰계수의 영향

그림 5에 롤러와 벨트 사이의 마찰계수를 변화시켜 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 마찰계수에 따른 스큐 크기는 약간 커지지만 스큐 rate의 변화는 거의 없다.

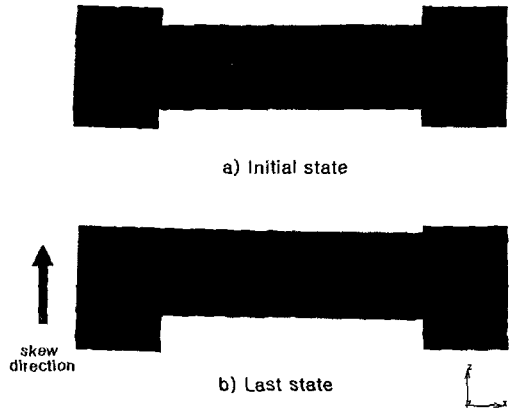


Fig. 2 Change of belt position (Skew)

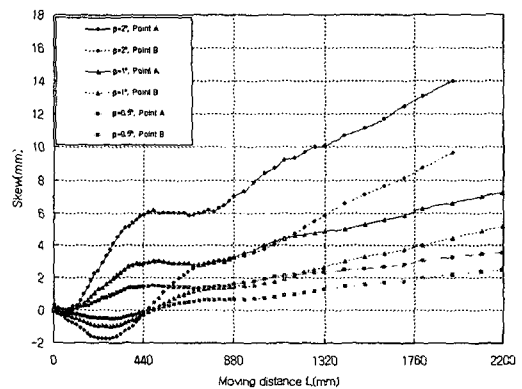


Fig. 3 Amount of belt-skew w.r.t misalignment β

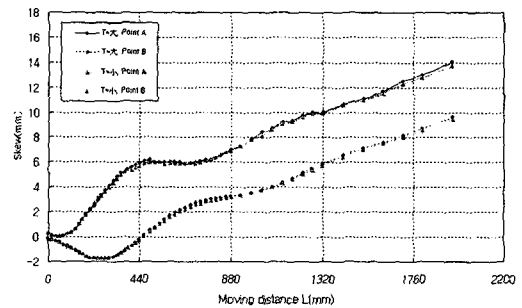


Fig. 4 Amount of belt-skew w.r.t initial belt tension

2.2.4 벨트 폭과 길이의 영향

그림 6에 기존 벨트의 폭과 길이에 대해서 각각 폭이 1/2(35mm)인 경우, 길이 증가(1180mm)의 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 스큐량은 벨트 폭에 반비례하고 벨트 길이에는 비례한다. 그리고 벨트의 길이가 긴 쪽이 과도 스큐 구간이 길다는

것을 알 수 있다. Yanabe가 검토한 결과는 본 시뮬레이션의 결과는 반대로 벨트 폭이 좁은 쪽이 과도 스큐 구간이 길고, 스큐량도 크다고 보고하고 있다.

2.2.5 롤러 지름과 벨트 탄성계수의 영향

롤러의 지름과 벨트 탄성계수의 변화에 따른 스큐량을 각각 그림 7과 그림 8에 나타낸다. 롤러 지름이 작을수록 스큐량이 커지고 과도 스큐 구간이 짧다. 벨트 탄성계수가 작을수록 스큐량은 비례하는 것을 알 수 있지만, 그 차이가 그리 크지 않다. Yanabe가 제안한 결과와 비교하면, 그 경향은 일치하지만 정량적인 결과에는 많은 차이를 보였다.

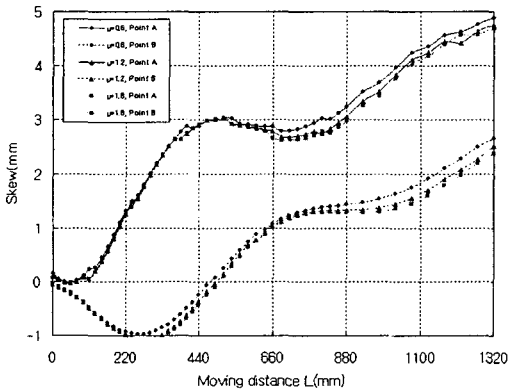


Fig. 5 Amount of belt-skew w.r.t friction coefficient between belt and roller

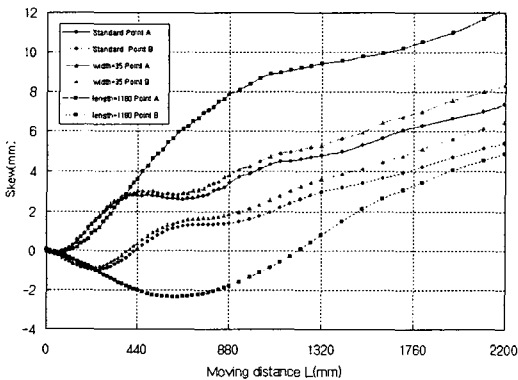


Fig. 6 Amount of belt-skew w.r.t width and length of belt

2.2.6 스큐 시의 응력변화

그림 9에 벨트가 구동 롤러의 회전으로 운동을 시작하여 벨트가 스큐됨에 따라 인장응력의 변화를 나타낸 그림이다. 편각이 없다면 벨트의 중심과 양단 끝에서의 인장응력이 동일하겠지만, 중동

롤러의 편각으로 인하여 인장응력이 균일하지 못하기 때문에 그림과 같이 나타난다. 과도 스큐 시

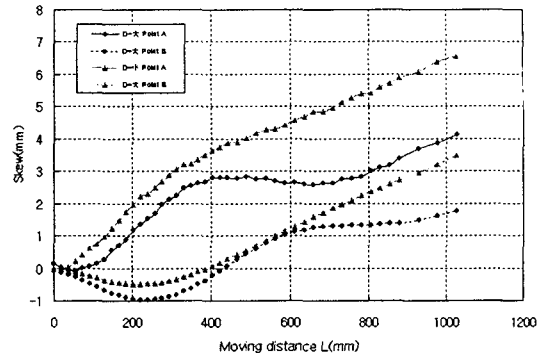


Fig. 7 Amount of belt-skew w.r.t diameter of roller

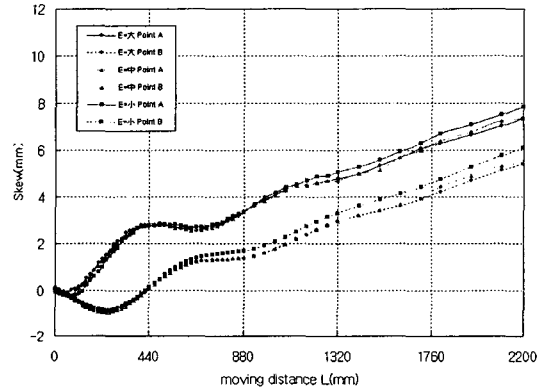


Fig. 8 Amount of belt-skew w.r.t elastic modulus of belt

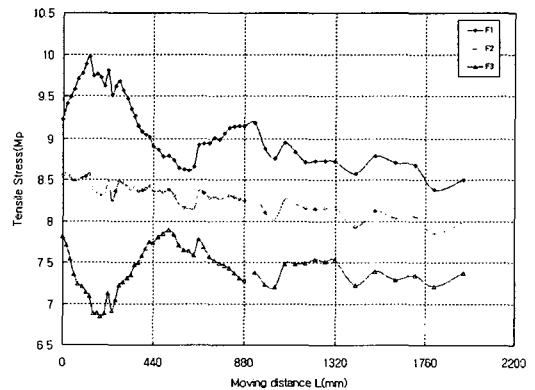


Fig. 9 Change of belt tensile stress

에는 각 노드(node)에서의 인장응력의 변화가 다르지만 정상 스큐 상태로 진입하게 되면, 인장응력의 불균일성을 유지한 상태에서 서로 비슷한 형태로 점점 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 따라서 벨트는 인장응력을 작게 하는 방향으로 거동한다는

것을 알 수 있다.

2.3 텐션 롤러(Tension roller)를 설치한 경우

벨트-롤러계를 설계하는데 있어서, 벨트에 텐션을 주거나, 매체의 이송공간확보등을 위해서 구동롤러와 종동 롤러 이외에 텐션 롤러를 설치하는 경우가 많다. 따라서 텐션 롤러가 벨트의 스큐에 미치는 영향을 알아본다.

2.3.1 텐션 롤러의 설치 위치의 영향

그림10에 각 case별로 텐션 롤러의 설치 위치를 나타낸다.

그림11에 5개의 위치(case1~5)에 회전이 자유로운 텐션 롤러를 설치한 경우의 벨트 skew의 결과를 나타낸다. 여기서 비교를 용이하게 하기 위해서 텐션 롤러가 없는 경우(case0)의 결과를 함께 나타낸다.

텐션 롤러의 설치 위치는 벨트 스큐에 특히 큰 영향을 주는데, 그 영향을 다음과 같이 정리할 수 있다.

-텐션 롤러를 이완측 중앙에 설치한 경우(case1,2), 스큐 저감효과가 크고, 양자의 차이는 크지 않고, 벨트의 거동은 과도 스큐를 지나 정상 스큐가 일정한 값으로 수렴한다.

-텐션 롤러를 이완측 종동 롤러 쪽(case3)에 설치한 경우에는 오히려 롤러가 편각과 반대 방향으로의 거동을 보인다.

-텐션 롤러를 긴장측에 설치한 경우(case5)에는 case0 보다 스큐량과 스큐 rate 모두 커지게 되어 벨트 거동에 나쁜 결과를 가져온다

3. 동적해석

3.1 시뮬레이션 개요

동적 해석을 통해서 편각을 갖는 원통 롤러 위를 주행하는 벨트의 거동을 알아본다. 특히 롤러의 회전속도 변화에 따른 벨트 스큐의 특성을 유한요소해석과 비교할 수 있었다.

다물체 동역학해석 프로그램인 RecurDyn을 사용하여 시뮬레이션 결과를 얻었다. RecurDyn에서

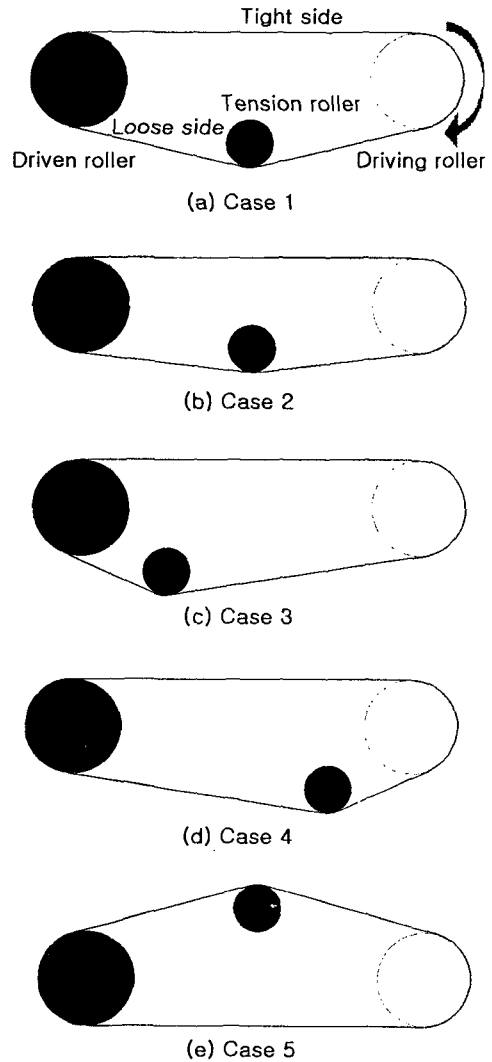


Fig. 10 Position of tension roller

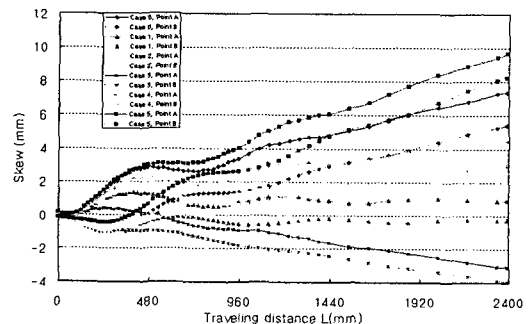


Fig. 11 Effect of tension roller position on belt-skew ($\beta = 1^\circ$)

는 그림12와 같이 벨트를 빔(beam) 요소로 가정하여 모델링하였다. 요소와 요소의 연결은 인장 스프링과 토션 스프링으로 구성된다.

각 빔 요소 사이에 작용하는 힘은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. K 행렬은 빔 요소의 강성행렬로부터 식(2)를 얻을 수 있다.

식(2)에서 A는 벨트의 단면적, I_y, I_z은 면적관성모멘트, J는 면적 극관성모멘트, E는 벨트의 종탄성계수이고 G는 횡탄성계수이다.

3.2 유한요소해석결과와 비교

중동 롤러의 편각 β=2° 이고, 구동 롤러를 600rpm, 1200rpm으로 각각 회전시켰을 때 벨트 스큐를 그림 14에 나타낸다. 또한 비교를 위해 유한요소해석에 의한 벨트 스큐의 결과를 함께 나타낸다. 그림 13의 점 C에 위치한 요소가 이동하면서 롤러 축방향으로의 거동, 즉 스큐를 지표로 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 동적 해석과 유한요소해석 결과는 정성적으로 일치하지만 동적 해석에서 벨트의 스큐량이 더 많은 것을 알 수 있다. 이것은 벨트의 관성(inertia)를 고려했기 때문에 중동 롤러에서 유한요소해석 보다 슬립(slip)이 더 많이 생긴 것으로 보여진다. 롤러의 회전속도가 빨라지면 벨트 스큐량이 작아지는 것은 동일한 회전을 하는데 걸리는 시간이 1200rpm쪽이 작기 때문에 Z 방향으로의 슬립이 600rpm 쪽 보다 작다고 예상할 수 있다.

3.3 이완측과 긴장측

구동 롤러에 의해 벨트가 움직이기 시작하면 벨트에 걸리는 장력이 다르기 때문에 구동 롤러를 지나기 전과 후에 벨트의 거동이 다르다. 특히 구동 롤러가 운동하기 시작하여 가속되면, 순간적으로 벨트에 많은 힘이 작용하기 때문에 벨트의 이완측은 불안정한 거동을 하게 된다. 이러한 거동은 벨트를 롤러로부터 이탈시키거나, 중동 롤러에 원하는 속도를 전달하지 못하는 현상이 발생한다. 그림 13에 롤러가 운동을 시작한 후 벨트의 긴장

$$\begin{bmatrix} F_{\partial x} \\ F_{\partial y} \\ F_{\partial z} \\ T_{\partial x} \\ T_{\partial y} \\ T_{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \\ \theta_x-\theta_{x0} \\ \theta_y-\theta_{y0} \\ \theta_z-\theta_{z0} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \dots (1)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \dots (2)$$

측과 이완측의 거동을 나타낸다. 구동 롤러가 회전을 시작하게 되면 점 C의 벨트 요소는 Y방향으로 변위 되어 중동 롤러쪽으로 진행하게 된다. 그리고 결국에는 (d)와 같은 형태로 벨트는 변형되어 운동하게 된다. 따라서 중동 롤러와 슬립될 가능성이 높아진다고 볼 수 있다.

그림 15에 구동 롤러의 가속구간을 변화시킨 결과와 초기 장력을 다르게 한 결과를 각각 나타낸다. 기동 후, 구동 롤러와 중동 롤러 사이에서의 점 C에 위치한 벨트 요소의 Y방향 변위를 비교하였다. 두 결과에 의해 벨트의 이완측에 생기는 Y방향 변위는 가속구간을 길게 하면, 즉 완만한 가속을 하게 되면 줄어 들지만, 초기 장력이 작으면 커지게 된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

유한요소해석을 통하여 롤러 위를 주행하는 벨트 스큐에 영향을 주는 파라미터들에 대해 검토하였다. Yanabe등이 제안한 결과와 비교하면, 롤러의 편각과 벨트와 롤러 사이의 마찰계수의 영향 이외에는 전혀 다른 해석 결과를 얻었다. Yanabe등은

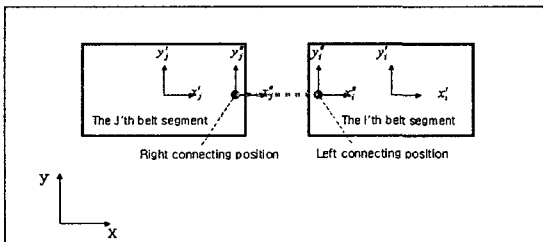


Fig. 12 Belt model

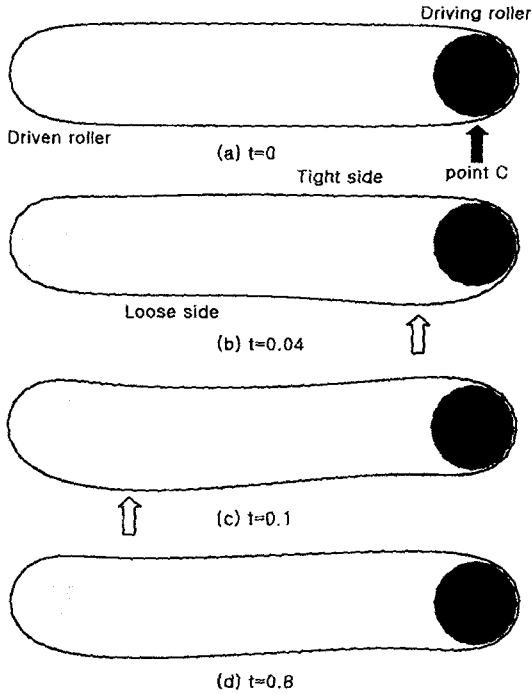


Fig. 13 Belt shapes

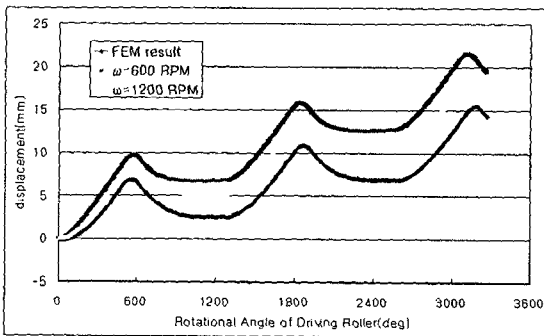


Fig. 14 Belt Skew w.r.t angular velocity of roller ($\beta = 2^\circ$)

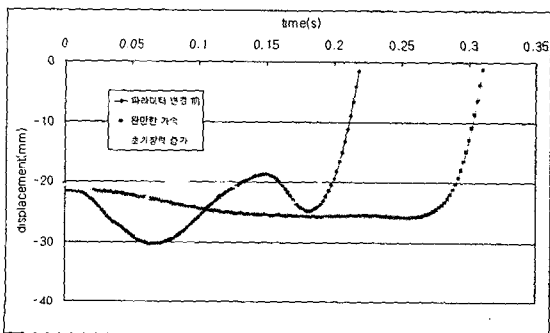


Fig. 15 Amount of belt-skew w.r.t initial belt tension

초기장력과 벨트탄성계수가 벨트 스큐에 큰 영향이 있다고 보고했지만, 본 시뮬레이션의 결과에서는 위의 파라미터들은 벨트 스큐에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판명되었다. 그리고 롤러의 지름, 벨트의 폭과 길이가 주는 영향에 대해서는 Yanabe 등이 보고한 결과와는 완전히 반대의 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 또, 텐션 롤러가 설치된 경우, 벨트 스큐를 확인함으로써 최적의 설치위치를 찾아 낼 수 있었다. 특히 벨트의 이완측에 설치된 경우에는 벨트 스큐의 저감효과가 명백히 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

다물체 동역학해석을 이용하여 벨트 스큐를 유한요소해석과 비교하였고, 그 결과는 정성적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있었고, 롤러 회전 시에 구동 롤러의 가속구간과 벨트의 가해지는 초기장력이 벨트의 이완측에서 발생하는 진동에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 따라서 위의 파라미터들에 대한 동역학적 검토를 통해 얻은 벨트 이완측 진동을 저감시킬 수 있는 최적값을 실제 설계에 적용할 수 있다.

향후에는 유한요소해석과 다물체동역학 해석을 보다 폭 넓게 비교하고 그 결과를 실험으로써 검증하고, 벨트재료의 비선형성을 고려한 해석과 다양한 롤러 형상에서의 벨트 거동 대한 동역학적 검토가 남은 과제이다.

참 고 문 헌

- (1) 失鍋重夫·程輝·野沢泉, 機論, 66-647, C(2000), 2128-2134
- (2) 失鍋重夫·程輝·野沢泉, 機論, 67-658, C(2001), 1749-1755
- (3) 程輝·失鍋重夫, 機論, 67-664, C(2001), 3715-3721
- (4) 程輝·失鍋重夫, 岩田佳雄, 機論, 68-674, C(2002), 2911-2917
- (5) Gerbert, G., Trans. ASME, Power Transmission and Gearing Conference, DE-Vol.88(1996), 443-452.
- (6) 福島才雄, 三菱重工技報, 30-5(1993-9)
- (7) 小山富夫, 機講論, No. 974-1(1997-3), 16-20
- (8) D. S. Bae· J. M. Han· H. H. Yoo, 1999, Mech. Struct. And Machines, Vol.27, No, pp 293-315
- (9) Lankarani H. M· Nikravesch P.E., 1994, Journal of Nonlinear Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Vol.5, pp193-207