

# 벨트 이송 시스템의 결함 진단을 위한 시뮬레이션

## Simulation for Defect Diagnosis in Belt Transport System

이 남 훈\* · 유 상 현\* · 인 용 석\* · 구 자 춘† · 최 연 선\*\*  
Nam-Hoon Lee, Sang-Heon Lyu, Yong-Seok Ihn, J. C. Koo  
and Yeon-Sun Choi

(2005년 11월 16일 접수 ; 2006년 3월 10일 심사완료)

Key Words : Media Transport(유연매체 이송), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Misalignment(정렬 불량), Tension(장력), Defect(결함)

### ABSTRACT

As functional requirements of automatic office machines like printers, Automatic Tellex Machines(ATMs), copying machines, are on a trend for the higher speed and precision, extensive technical advances are being developed and implemented in the industry. Media transport system is a device to convey a sheet of paper in ATMs and printers. The stability of media transport system is a matter of concern as their operating throughput rapidly increases. And defects of belts or rollers in a transport system directly affect the level of stability of the system. Therefore an automatic diagnostic system for predicting various defects is necessary for the stable operation of the media transport system. A simulation based on multi-body dynamics has been done for a feasibility study of a system design for the defect anticipation.

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경

유연매체 이송 시스템(media transport)은 복사기, 프린터, 카메라, ATM(automatic tellex machines)등과 같은 사무 자동화 기기들에서 시트(sheet)를 이송하기 위한 도구로 사용되고 있다. 유연 매체의 안정된 이송은 벨트 이송 방식에 의해 구현되며, 사무용 기기들의 발전에 따라 이송 시스템 역시 점차 고속화 정밀화 추세에 있다.

유연매체 이송 시스템에서 매체의 반송 시에 발생할 수 있는 체류와 잼과 같은 문제들은 벨트(belt)

의 슬립(slip)이나 스큐(skew)등에 의해 야기될 수 있으며 이러한 현상들은 벨트 구동축의 정렬 불량(misalignment)이나 벨트의 마모 등과 같은 기계요소의 결함에 의해 발생할 수 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 유연매체 이송 시스템의 안정적인 작동을 위해서는 위와 같은 기계요소의 결함을 탐지하고 기기의 이상 유무를 사전에 판별할 수 있어야 한다.

따라서 이 연구에서는 이송 시스템에서 잼(jam)과 같은 문제가 발생할 때 벨트의 구동축을 대상으로 하여 진동 신호를 검출하고 이를 정상 작동 시의 신호와 비교하여 문제가 되는 신호들을 통해 기기의 이상 유무와 결함의 종류에 대해 예측할 수 있는 고장 진단 방법을 시뮬레이션(simulation)하고자 한다.<sup>(5)</sup>

## 2. 벨트의 동적해석

### 2.1 고장 원인

유연매체 이송 시스템에서 벨트의 스큐나 사행

† 책임저자; 정회원, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : jckoo@skku.edu

Tel : (031) 290-7454, Fax : (031) 290-5849

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 성균관대학교 기계공학부

(蛇行)은 시트 이송 시 잼이나 시트의 비틀림과 같은 문제들을 일으키며 이러한 현상은 시스템의 고속화나 신뢰성에 큰 영향을 미치게 된다.

벨트의 스큐나 사행은 주로 벨트나 롤러(roller)의 결합에 기인하며 벨트 결합의 경우 벨트의 마모에 의한 마찰계수의 변화나 벨트 강성의 변화 또는 초기 장력의 변화 등에 의해 발생되고, 롤러 결합의 경우 롤러 축의 정렬 불량 또는 베어링의 결합 등에 의해 발생된다.<sup>(2)</sup>

### 2.2 다물체 동역학 해석

스큐가 발생하는 원인들에 대해 기존에 많은 연구들이 진행되었다. Gerbert<sup>(3)</sup>는 콘(corn)형 롤러에서 벨트의 장력, 형상, 마찰 계수 등에 의해 그리고 롤러 형상에 의해 스큐의 변화 폭이 결정된다고 기술하고 있으며 Yanabe<sup>(2)</sup>등은 원통형 롤러에서 스큐 현상의 원인을 실험과 유한요소 해석을 통해 설명하고 있다.

이상의 연구에서는 주로 벨트의 거동에 대한 해석만이 이루어져 왔다. 따라서 이 논문에서는 Fig. 1과 같이 실제 벨트 사이에서 유연 매체가 이송될 때 유연매체의 거동을 다물체 동역학 해석을 통해 시뮬레이션해 보려 한다.

벨트 사이를 지나는 유연매체의 움직임을 시뮬레이션 하기위해 다물체 동역학 프로그램인 Recurdyn을 사용하였다. 두개의 원통형 롤러와 하나의 벨트로 구성된 Fig. 2와 같은 모델에 대한 Recurdyn 해석은 이미 Y. H. Yoon<sup>(1)</sup> 등에 의해

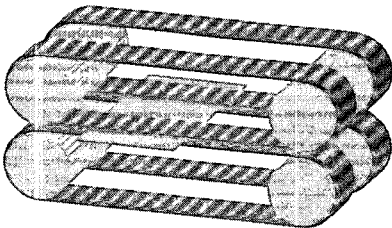


Fig. 1 Belt model (4 set)

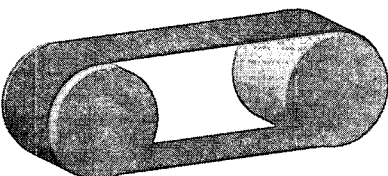


Fig. 2 Belt model (1 set)

수행되었다. Yoon 등은 벨트의 거동에 대해 유한요소 해석과 다물체 동역학 해석을 수행하였으며 두 결과가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 이를 통해 Recurdyn을 이용한 벨트 해석 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

### 2.3 시뮬레이션 개요

#### (1) 벨트 모델

Recurdyn에서 벨트는 Fig. 3과 같이 빔 요소 (beam element)로 가정하였으며, 요소에 대한 힘 행렬은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 기준 좌표(base marker)에 대한 이동 좌표(action marker)의 변위(translational & rotational displacement)를,  $v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$ 는 기준 좌표에 대한 이동 좌표의 속도(translational & rotational velocity)를, 그리고  $x_0, y_0, z_0, \theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0}$ 는 기준 좌표와 이동 좌표 사이의 초기 변위 값을 나타낸다. 또한  $F_1, F_2, F_3, T_1, T_2, T_3$ 은 이동 좌표에 작용하는 초기 부하(preloads)를 나타낸다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{bmatrix} F_{\theta x} \\ F_{\theta y} \\ F_{\theta z} \\ T_{\theta x} \\ T_{\theta y} \\ T_{\theta z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ \theta_x - \theta_{x0} \\ \theta_y - \theta_{y0} \\ \theta_z - \theta_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 강성 행렬은 빔 요소의 강성 행렬로부터 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

(2) 장치 구성

이 논문에서 해석에 사용한 모델은 Fig. 4와 같이 네 개의 원통롤러와 두개의 평벨트로 이루어진 두 쌍의 벨트 모델 사이를 유연매체가 통과하는 유연매체 이송 장치이다.

유연매체 이송 시스템의 시뮬레이션을 위한 가정은 다음과 같다.

- 롤러의 회전축은 벨트의 가진에 의해서만 진동하게 된다.
- 롤러 회전축의 베어링에 의한 진동은 무시한다.
- 롤러의 회전 속도는 두 쌍의 벨트 모델 모두 6 rad/sec이다.
- 두 쌍의 벨트 모델은 정확히 같은 형상이며 비교 모델의 경우 아래 벨트 모델에 대해서만 변형을 가하였다.

(3) 시뮬레이션 개요

유연매체 이송 시스템의 이상 유무와 원인을 알아내기 위해 하나의 기본 모델(reference model)과 고장 원인들에 따른 비교 모델을 각각 시뮬레이션해 보았다. 고장의 원인은 롤러의 결함과 벨트의 결함으로 구분되며 롤러의 결함에 의한 비교 모델은 회전축이 편심 되었을 경우에 대하여, 그리고 벨트의 결함에 의한 비교 모델은 벨트의 초기 장력의 변화

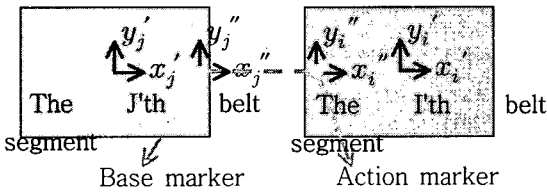


Fig. 3 Beam element model (belt)

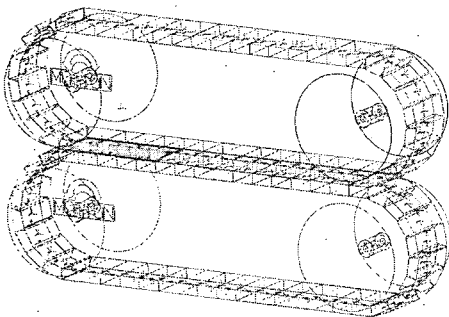


Fig. 4 Simulation model (Recurdyn)

의 경우에 대해 각각 시뮬레이션 해 보았다. 이와 같이 하나의 기본 모델과 벨트와 롤러의 결함에 의한 두 가지 비교 모델의 시뮬레이션 해석 결과를 비교하여 고장의 원인에 따른 신호의 변화를 통해 시스템의 고장 유무와 원인의 관계에 대해 밝혀보려 한다.

3. 시뮬레이션 해석 결과

3.1 기본 모델

기본 모델에 대한 구동 특성을 알아보기 위해 Fig. 4의 벨트 모델에서 종동축(從動軸)의 조인트(revolute joint) 부분에 대한 반력 및 가속도에 대해 살펴보았다.

Fig. 5는 벨트 모델의 위, 아래 종동축의 조인트부에 걸리는 반력을 측정된 것으로 아래 종동축(RevJoint 3)보다 위 종동축(RevJoint 5)에 더 작

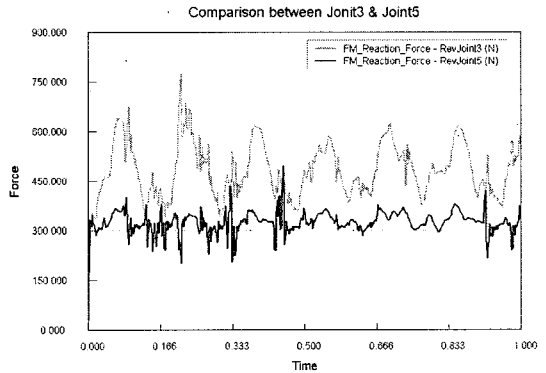


Fig. 5 Reaction force on a follow shaft (gravity included)

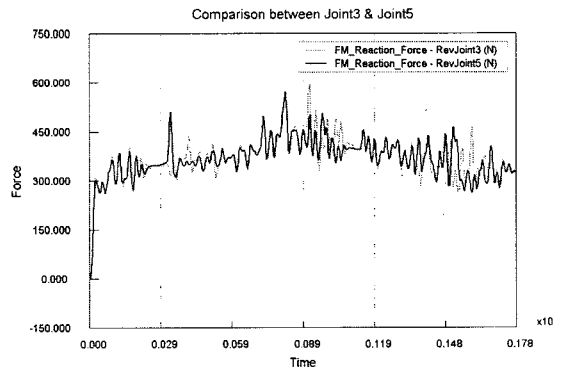


Fig. 6 Reaction force on a follow shaft (except gravity)

은 양의 반력이 작용함을 볼 수 있다. 이것은 중력에 의해 위 벨트 모델의 벨트 무게가 아래 벨트 모델에 더해지면서 작용하기 때문이며 이를 검증하기 위해 중력의 효과를 무시하고 시뮬레이션 한 결과, 두 반력의 크기가 Fig. 6과 같이 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다.

기본 모델을 통해 비교 모델의 고장 여부를 판단하기 위해 기본 모델과 비교 모델의 중동축에서 축에 가해지는 가진 주파수들을 비교해 볼 것이다.

이를 위해 우선 기본 모델에서 아래 중동축의 반력에 대한 FFT를 해 보았다. 그 결과는 Fig. 7과 같으며 그래프에서와 같이 6.34 Hz 부근의 피크(peak)만이 나타날 뿐 다른 주파수들이 잘 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 벨트의 질량이 커서(벨트의 두께가 20 mm로 두꺼우므로 벨트의 질량이 커지게 된다.) 벨트의 가진 주파수에 의한 영향이 지배적이기 때문이다. 따라서 좀 더 민감한 센싱(sensing)을 위해서 중동축에서 반력이 아닌 가속도에 대한 정보를 얻어 그 결과를 비교해 볼 것이다. Fig. 8은 아래

중동축에 대한 가속도를 FFT한 결과이다.

### 3.2 회전축의 편심

회전축이 편심되었을 때, 유연매체 이송 시스템의 거동에 대해 살펴보기 위해 Fig. 9와 같이 아래쪽 벨트 모델의 구동축에 0.5 mm의 편심을 주었다. (롤러 지름 : 200 mm)

시뮬레이션 해석 결과에 대해 살펴보면, 가속도 정보를 센싱하는 아래 중동축(RevJoint3)에서 Fig. 10과 같이 6.34 Hz에서 피크가 나타남을 볼 수 있다. 또한 기본 모델과 비교해 보면 16.96 Hz의 피크 값이 감소했음을 알 수 있다.

Fig.1과 같은 유연매체 이송장치에서 4개의 구동축 중 하나의 구동축에서 이와 같은 현상이 발생했을 경우 유연매체의 거동에 대해 살펴보기 위해 Fig. 15에서와 같이 두 쌍의 해석 모델을 통해 각 해석 모델에서 각각의 매체의 변위를 구하고 이를 이용해 Fig. 1과 같은 전체 시스템에서 매체의 대략적인 거동에 대해 예측해 보았다. 여기서는 앞쪽의 벨트 모델을 정상 모델로 가정하여 정상 모델에서 매체의 벨트 진행 방향의 변위를 구하고, 뒤쪽의 벨트 모델을 이상(異狀) 모델로 가정하여 이상 모델에서

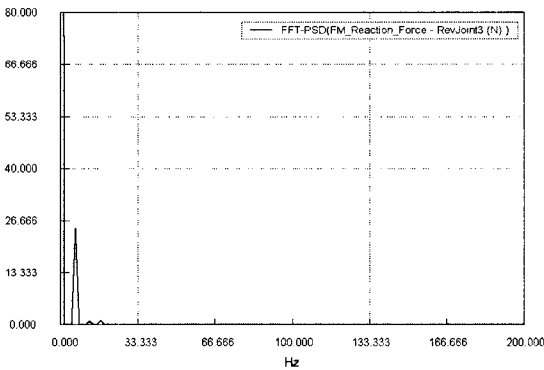


Fig. 7 Reaction force on a follow shaft (FFT)

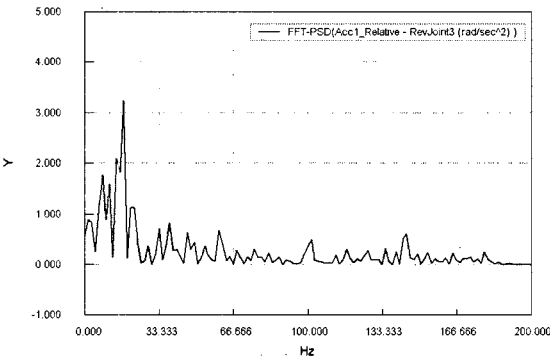


Fig. 8 Acceleration of a follow shaft (FFT)

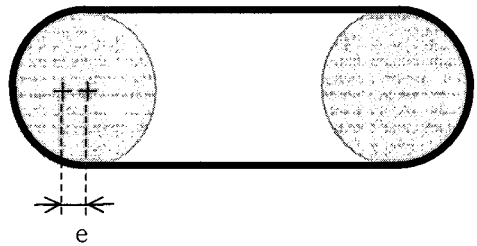


Fig. 9 Eccentric roller

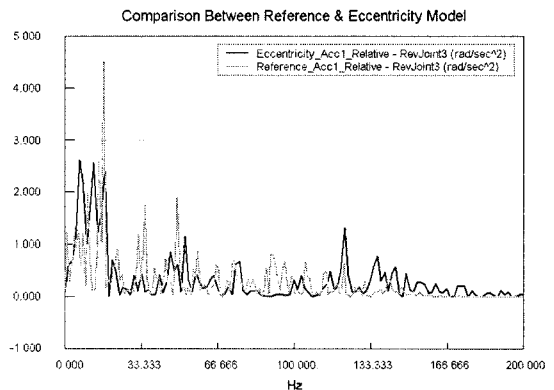


Fig. 10 Signal comparison of eccentric model

매체의 변위를 구하였다. 그리고 이 두 값을 이용하여 Fig. 17과 같이 매체의 거동에 대해 예측해 보았다. Fig. 16에서 두 그래프의  $x$  변위(벨트진행 방향) 차는 정상 모델과 이상 모델에서 매체의 변위 차를 나타내며 이를 통해 매체의 비틀림을 예상할 수 있다. 매체의 너비가 400 mm라고 가정했을 때

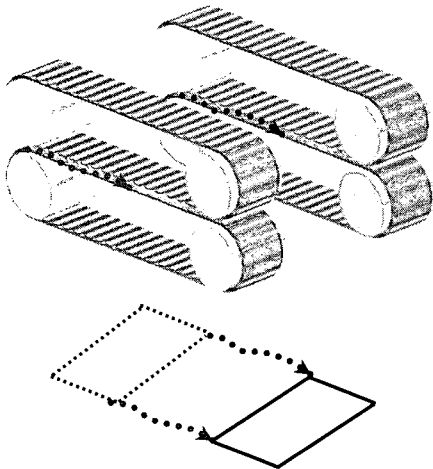


Fig. 15 Simulation model for behave of media

매체가 경로를 이탈해 Fig. 17과 같이 비틀어짐을 예상할 수 있다.

### 3.3 초기 장력의 변화

벨트 모델 중 하나의 벨트가 초기 장력이 감소했을 때, 유연매체 이송 시스템의 거동에 대해 알아보았다. 아래 벨트의 장력을 감소시키고 유연매체를 이송했을 때 중동축(RevJoint3)에서 가속도 정보를

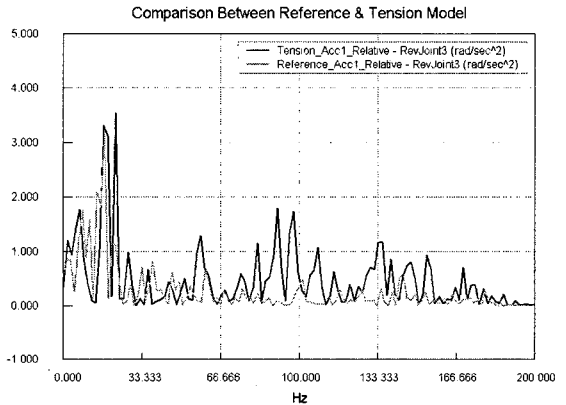


Fig. 18 Signal comparison of various initial tension

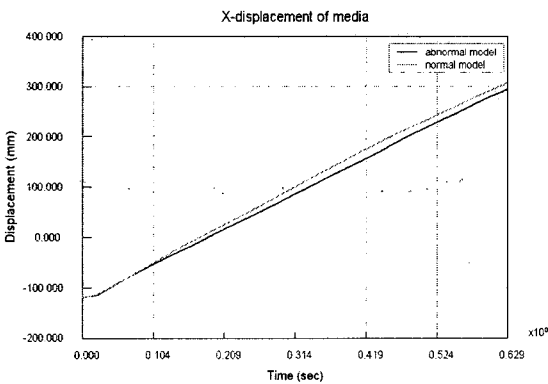


Fig. 16 Behavior of media (eccentricity of shaft)

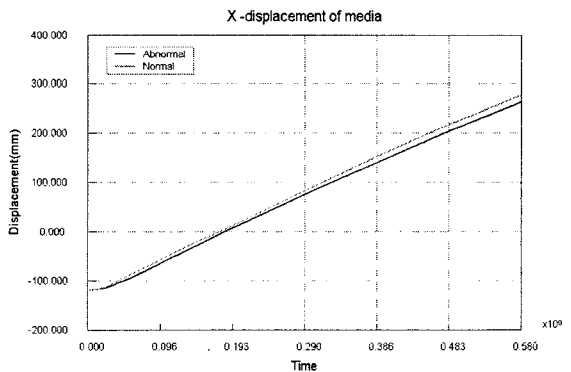


Fig. 19 Behavior of media (variation of initial tension)

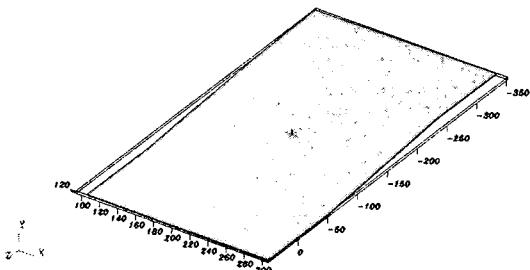


Fig. 17 Torsion of media (eccentricity of shaft)

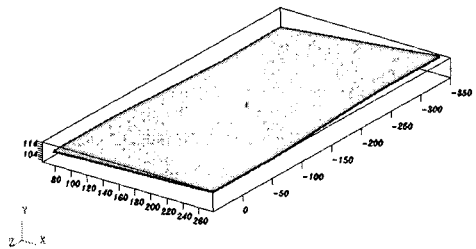


Fig. 20 Torsion of media (variation of initial tension)

언어 주파수 비교를 해보았다. 그 결과는 Fig. 18과 같으며 기본 모델과 비교 시 22.28 Hz에서 피크 값이 나타남을 알 수 있다.

또한 초기 장력의 변화로 인한 매체의 거동에 대해 살펴보기 위해 앞의 방법과 같이 각각의 매체의 변위를 구하고 그 값을 이용하여 초기장력 변화 시 매체의 대략적인 거동에 대해 Fig. 19와 같이 살펴 보았으며 그래프에서 보는 바와 같이  $x$  변위 차가 약 13.60 mm 정도 나타남을 볼 수 있다. 또한 매체의 너비가 400 mm 라고 가정했을 때 매체는 Fig. 20과 같이 비틀어진 형상을 나타냄을 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

벨트 자체의 거동에 대한 해석은 실험이나 유한해석과 같은 여러 방법들을 통해 시도되어 왔다. 그리고 벨트 이송 시스템에서 발생할 수 있는 여러 고장 원인들에 대해서도 수학적 해석과 함께 유한요소 해석 프로그램 등을 통한 시뮬레이션 등이 행해지고 있다. 그러나 벨트에 의해 매체가 이송되는 실제 유연매체 이송 시스템에 대한 해석과 고장 발생시에 매체의 거동 등에 대한 해석은 많은 부분 이루어지지 않고 있다.

따라서 이 연구에서는 다물체 동역학 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 벨트 사이를 통과하는 유연매체의 거동에 대해 해석하고 시스템의 문제가 발생했을 때 사전에 문제를 감지할 수 있는 자동 진단 시뮬레이터를 개발하기 위해 고장 시와 정상일 때의 회전축 조인트 부의 가속도 신호를 비교해 고장 신호를 추출할 수 있도록 하였다.

그리고 이를 토대로 유연매체 이송 시스템의 다른 여러 고장 원인들에 대한 시뮬레이션과 함께 실제 시스템과 같은 여러 외부 가진 요소들이 작용하는 상황에 대한 해석 등이 계속해서 이루어질 예정이다.

#### 후 기

이 연구는 산업자원부 성장동력 중기거점/차세대 신기술 개발사업으로 지원, 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Yoon, Y. H. and Yoon, J. H., 2004, "Behavior of Belt Running over the Rollers," Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring Conference, pp. 900~905.
- (2) Yanabe, S., Cheng, H. and Nozawa, I., 2000, "Study on Belt Skew", 日本機械學會論文漢, pp. 14~20.
- (3) Gerbert, G., 1996, "Flat belt axial motion" Trans. ASME, Power Transmission Gearing Conf., DE-Vol. 88, pp. 443~452.
- (4) 2005, "Recurdyn Manual", Functionbay.
- (5) Yoo, J. H., Yoon, J. H., Kim, S. K. and Lee, J. M. 1995, "Automatic Diagnosis of Defects in Roller Element Bearings," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 353~360.