

〈論 文〉

스텝핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 전동오차 해석

김현수* · 위 혁**

(1991년 10월 1일 접수)

Analysis of Transmission Error for Stepping Motor Drive Timing Belt System

Hyunsoo Kim and Hyuk Wee

Key Words: Timing Belt(타이밍벨트), Bondgraph Model(본드그래프 모델), Stepping Motor(스텝핑 모터), Transmission Error(전동오차)

Abstract

Transmission error for a stepping motor-timing belt drive system is investigated experimentally and analytically. From FFT analysis of the experimental results, it is found that the transmission error consists of three periodic errors : (1) error by the stepping motor per one resolution angle (θ_m), (2) error by the pulley eccentricity per one revolution (θ_e), and (3) error by the meshing effect between the belt and the pulley teeth per one pitch revolution (θ_p). In order to investigate the effects of some design parameters on the transmission error, the dynamic models of the stepping motor-timing belt drive system are derived by Bondgraph. According to the simulation results, as the belt total tension increases, θ_m and θ_e decrease due to the nonlinearity of the belt. In addition, the numerical and experimental results show that θ_m and θ_e of the loaded case are larger than those of the unloaded case. The analytical results are in good accordance with the experimental results.

기 호 설 명

b_i : 선형 베어링의 감쇠계수
 b_N, b_R : 종동 및 구동축 베어링의 감쇠계수
 b_s, b_t : 이완 및 인장축 벨트의 감쇠계수
 h_N, h_R : 종동 및 구동 풀리의 각운동량
 J_N, J_R : 종동 및 구동 풀리의 관성 모멘트
 K_C : 스텝핑 모터 축의 탄성계수
 K_N : 장력센서의 탄성계수
 M : 종동축의 등가질량
 P : 종동축의 선형운동량
 r : 풀리 평균반경
 R_1, R_2 : 편심 풀리의 맞물림 시작과 끝의 반경

$T(t)$: 스텝핑 모터의 토크
 T_a : 입력토크의 진폭
 T_i : 벨트 초기장력
 T_L : 부하토크
 T_m : 평균토크
 T_s, T_t : 이완축과 인장축 장력
 X_N : 장력센서 스프링변위
 X_s, X_t : 이완 및 인장축 벨트의 변형량
 ω_R : 스텝핑 모터 회전속도
 $\omega(t)$: 풀리 편심 동적모델의 입력속도

1. 서 론

*정회원, 성균관대학교 기계공학과

**정회원, 성균관대학교 기계공학과 대학원

타이밍벨트는 물체를 원하는 시간에 원하는 장소

에 움직일 수 있는 동력전달장치로서 스위칭 (switching), 타이밍 (timing), 핸들링 (handling) 등 다양한 기능을 가지고 있다. 타이밍벨트는 팩시밀리, 프린터, 복사기 등과 같이 전달 하중은 작지만 전달 오차의 극소화가 요구되는 정밀 사무자동화기 기동에 주로 사용되어져 왔으며, 타이밍벨트의 장점인 구동의 정확도와 정속성, 재질의 강화 등으로 인하여 정밀 기계요소로서 그 수요와 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 그러나 타이밍벨트 시스템은 전동오차 (transmission error)가 발생하며 이 오차는 정확한 위치조절 능력과 정밀도에 영향을 미친다.

타이밍벨트 구동 시스템의 전동오차는 구동축 회전각에 대한 중동축 회전각의 리이드 (lead) 또는 래그 (lag)로 정의될 수 있으며, 이것은 복사기에서 글자의 번짐 (smearing) 또는 프린터에서 수직선을 프린트할 경우 수직선의 정렬이 똑바로 일치하지 않는 등의 결과를 가져온다. 정밀기기에서 전동오차는 기기의 정밀도를 떨어뜨려 성능에 치명적인 영향을 미치며 성능개선을 위해서는 전동오차 특성에 대한 연구가 시급한 실정이다.

타이밍벨트 시스템의 전동오차에 대해서는 일본의 Kagotani와 Koyama^(1~6)의 연구를 제외하고는 보고된 연구결과가 거의 없다. Kagotani와 Koyama는 초기장력하에서 벨트의 탄성변형과 풀리의 다각형 운동 (polygonal action)에 의한 전동오차를 구하였고^(1,2,3,5,6), 풀리 이와 벨트 이 사이의 맞물림 간섭에 의한 벨트 한 피치 회전당 전동오차를 해석하였다^(2,3). 또한 정·역회전시 발생하는 전동오차⁽⁴⁾ 등에 관하여 해석하고 실험적으로 원인을 규명하였다. 이들의 연구는 타이밍벨트 시스템의 동력원이 되는 모터의 토크 변화는 전혀 고려하지 않았으며, 얼라인먼트 (alignment)가 완전하다는 가정하에 이루어졌다. 그러나 실제로 타이밍벨트 구동 OA, FA기기 등 정밀기기 동력원으로 널리 사용되고 있는 스텝핑모터는 1분해도 회전시 토크변동특성을 보이며⁽⁷⁾, 완전한 얼라인먼트는 폴리펀심, 제작오차등에 의해 얻기가 거의 불가능하다.

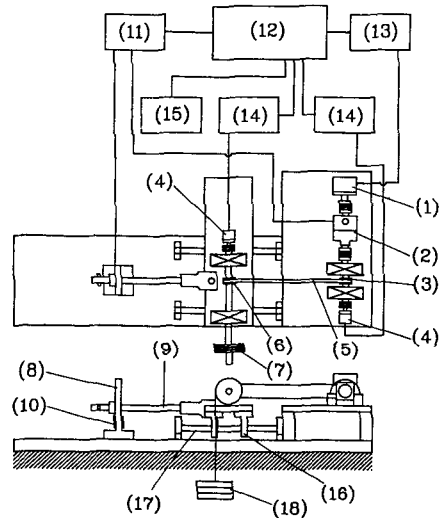
따라서 본 연구에서는 스텝핑 모터의 토크특성과 전동시스템의 미스얼라인먼트에 의한 폴리펀심을 고려하여 스텝핑 모터 구동 타이밍벨트 전동시스템의 전동오차에 관한 이론 및 실험적 연구를 수행하고, 전동오차 감소를 위한 설계 개선 기초자료를 얻고자 한다.

2. 실험적 연구

본 연구에서 해석하고자하는 스텝핑 모터의 토크 변동특성과 폴리펀심에 의한 전동오차에 관하여는 보고된 연구가 거의 없으므로 먼저 예비실험을 수행하여 발생하는 전동오차의 특성을 조사하기로 한다.

2.1 실험장치

Fig. 1은 스텝핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 실험장치이다. 스텝핑 모터 (1)의 토크는 구동풀리 (3)를 회전시키고 타이밍벨트 (5)에 의해 중동풀리 (6)에 동력을 전달하며 전달된 동력은 중동풀리의 부하와 균형을 이룬다. 중동 풀리의 부하는 부하디스크 (7)에 무게추 (18)를 코드로 연결하여 항상 일정한 부하토크를 공급하도록 하였다. 부하토크의 크기는 추의 무게를 조정함으로써 변화시킬 수 있다. 중동풀리와 부하디스크는 선형베어링 (linear bearing)⁽¹⁶⁾이 장착된 평판위에 고정되어 있다.



- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| (1) Stepping motor | (10) Strain gauge |
| (2) Torque Sensor | (11) Amplifier, A/D Converter |
| (3) Driver pulley | (12) Computer |
| (4) Encoder | (13) Drive circuit |
| (5) Timing belt | (14) Signal converting circuit |
| (6) Driven pulley | (15) Pulse generator |
| (7) Torque disk | (16) Linear bearing |
| (8) Tension transducer | (17) Linear bearing rail |
| (9) Lead screw | (18) Dead weight |

Fig. 1 Experimental apparatus for stepping motor drive timing belt system

스테핑 모터의 구동은 구동 프로그램과 구동회로 (13)에 의해 이루어진다. 스텝핑 모터는 분해능이 1.8°이고 구동방식은 2상 여자 구동방식을 사용하였다. 스텝핑 모터의 출력토크는 토크센서(2)에서 검출된다. 타이밍벨트의 장력은 벨트 장력센서로 측정된다. 벨트 장력센서는 리이드 스크류(9)와 스트레인 게이지(10)가 부착된 외팔보(8)로 구성되어 있으며 리이드 스크류를 조정하여 장력을 공급하고 벨트의 장력은 스트레인 게이지로 검출된다.

전동오차는 구동 및 중동축에 부착한 엔코더(encoder) (4)에 의해서 측정된다. 엔코더는 2000 PPR(pulse per revolution)의 분해능을 가지고 있으나 포스트 프로세싱 프로그램에서 분해능을 평균 10,000PPR로 증가시켜 사용하였다. 각 엔코더는 구동폴리와 중동폴리의 회전각도를 측정하고 측정된 검출신호는 신호변환 회로(14)에서 회전각도에 해당하는 펄스의 갯수로 계산된다. 신호획득시의 실제시간(real time)을 알기 위하여 퍼스발생기(15)를 사용하였으며 이는 회전시간 및 회전각도의 기준이 된다. 전동오차는 측정된 펄스수, 기준시간을 이용하여 포스트 프로세싱 프로그램에서 계산된다.

실험에 사용한 폴리는 피치 5.08mm, 잇수 18개, 폭 9.5mm인 18XL037이고 벨트는 잇수 160개인 320XL037을 사용하였다. 타이밍벨트 전동시스템은 얼라인먼트를 완전히 맞추고 폴리편심만을 허용하여 폴리편심에 의한 전동오차만을 발생하도록 하였다. 전동오차에 대한 실험은 벨트 초기장력 $T_i=100N, 200N, 300N, 400N$ 에 대하여 무부하인 경우와 부하가 있는 경우에 대해 수행하였다. 실험에 사용된 벨트장력은 정밀 사무기의 타이밍벨트 시스템에 통상 사용되는 장력범위이다. 회전속도는 36rpm, 전동비는 1:1이고 전동오차 데이터의 샘플링은 0.0001667 sec마다 수행하였다.

2.2 예비실험 결과

Fig. 2(a)는 $T_i=100N, T_L=0$ 즉 무부하인 경우의 전동오차에 대한 실험결과이다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 전동오차는 여러 개의 주파수 성분으로 구성되어 있다. 전동오차를 구성하고 있는 각 주파수를 해석하기 위하여 시간역의 실험데이터를 주파수역(frequency domain)으로 Fourier 변환한 결과가 Fig. 2(b)에 도시되어 있다. Fig. 2(b)에서 전동오차는 $f=0.6Hz, f=10.8Hz, f=120Hz$ 에서

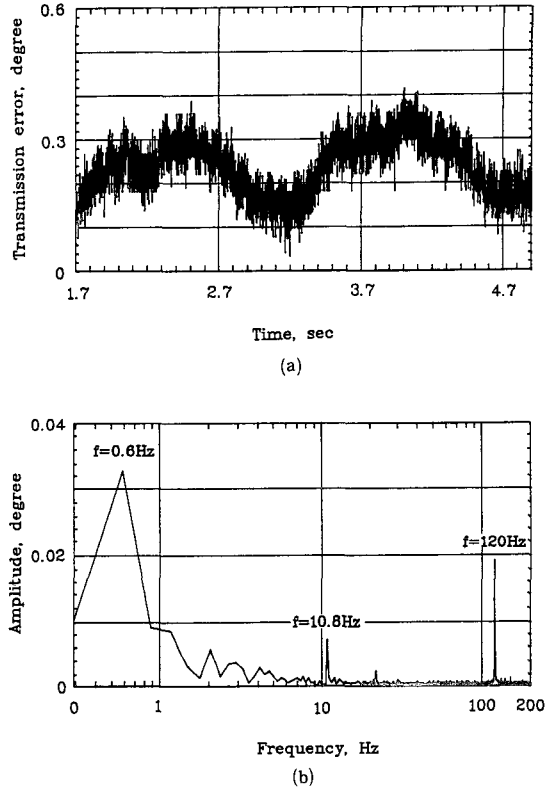


Fig. 2 (a) Transmission error for $T_i=100N, T_L=0$
(b) Transmission error in frequency domain

피크를 보이며 따라서 이 3개의 주파수 성분이 전동오차의 주요 구성요소임을 알 수 있다. $f=0.6Hz$ 는 실험속도 36rpm에서 폴리의 1회전 주기와 일치한다. $f=10.8Hz$ 는 실험속도 36rpm에서 폴리의 1회전 주기와 일치한다. $f=10.8Hz$ 는 폴리 1회전 주파수의 18배로서 18은 폴리 잇수와 일치하며 따라서 폴리 이와 벨트 이가 맞물림할 때 1피치 회전주기에 해당하는 주파수임을 알 수 있다. $f=120Hz$ 는 스텝핑 모터의 1분해도(1.8°) 회전주기, 즉 폴리 1회전 주파수의 200배에 해당하는 주파수와 일치한다.

Fig. 3은 벨트 초기장력 $T_i=300N, T_L=0.52N \cdot m$ 인 경우의 장력변동을 도시한 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 벨트장력은 폴리 1회전당의 주기 $T=1.6667sec$ 를 가지고 변화한다. 폴리 1회전당 발생하는 장력변동은 폴리 편심에 의한 것이다. 폴리 1회전당 장력변동을 자세히 살펴보면 장력이 18번 변화함을 알 수 있는데 이것은 폴리의 잇수 18개와 일치한다. 즉 벨트와 폴리의 1피치 회전시

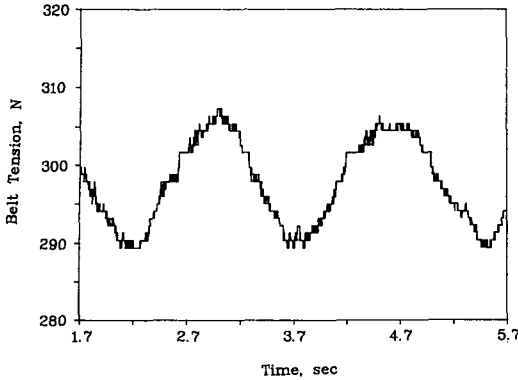


Fig. 3 Tension fluctuation for $T_i=300\text{N}$, $T_L=0.52\text{N}\cdot\text{m}$

맞물림 간섭에 의해 장력변동이 발생한다. 이와같은 장력 변동은 벨트의 변형을 일으키고 전동오차의 원인이 된다.

Fig. 2, Fig. 3의 예비실험 결과로부터 알 수 있듯이 스텝핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 전동오차는 스텝핑 모터의 1분해도 회전당 발생오차(θ_m), 폴리펀심에 의한 폴리 1회전당 발생오차(θ_e) 그리고 벨트 1피치 회전당 맞물림 간섭에 의한 발생오차(θ_p)의 세가지 요소로 구성된다. 벨트와 폴리의 맞물림 간섭에 의한 영향은 Kagotani^(2,3)에 의해 상세히 연구되었으며 운전범위 내에서 맞물림 간섭에 의한 전동오차는 $200\mu\text{rad}(0.01^\circ)$ 정도로 무시할 만한 크기라고 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 스텝핑 모터에 의한 전동오차와 폴리펀심에 의한 전동오차에 관해 연구를 수행하였다.

3. 본드그래프 모델(Bondgraph model)

3.1 스텝핑 모터에 의한 전동오차

스텝핑 모터는 1분해도 회전시 토크 변동이 있으며, 이와같은 토크변동은 1분해도 회전시 벨트장력을 변화시킨다. 본 연구에서는 스텝핑 모터 내부의 전기적 특성을 무시하고 스텝핑 모터 출력 축의 토크특성만을 고려하기로 한다. 스텝핑 모터 출력 토크 $T(t)$ 는 다음식과 같이 표시될 수 있다.

$$T(t) = T_m + T_a \sin(200\omega_r t) \quad (1)$$

Fig. 4에 스텝핑 모터의 전동특성을 해석하기 위한 본드 그래프 모델이 도시되어 있다. Fig. 4에서 시스템의 입력은 토크 $T(t)$ 가 되며 점선 (1)로 표시

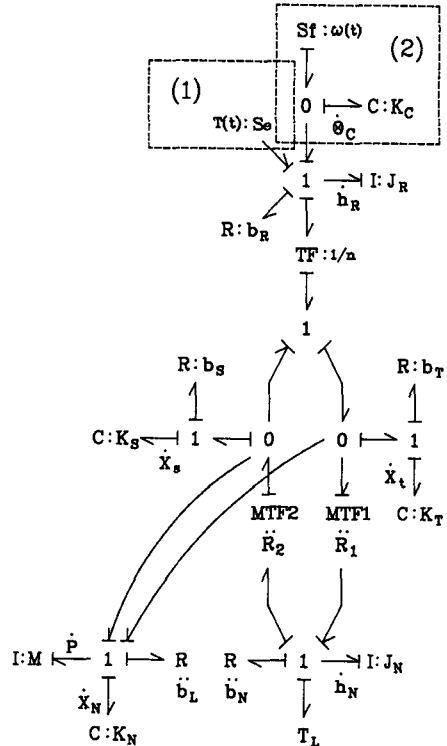


Fig. 4 Bondgraph model for a stepping motor drive timing belt system

된다. 스텝핑 모터 토크변동에 의한 전동오차만을 해석하기 위하여 폴리 펀심은 없다고 가정하면 벨트가 폴리에 들어가고 나오는 지점은 TF(transformer)로 모델링 된다. TF의 계수 n 은 폴리의 회전반경이며 벨트는 TF에서 회전(직선)운동이 직선(회전) 운동으로 변환된다. 종동폴리의 MTF(modulated transformer)는 폴리의 펀심이 없는 경우 이므로 계수는 $R_1=R_2=n$ 으로 TF가 된다.

실험에 사용된 스텝핑 모터 구동 타이밍벨트 전동시스템은 고정장력식(fixed tension)이지만 벨트 장력측정을 위해 사용된 장력센서는 외팔보(cantilever) 형태의 스프링으로 생각할 수 있다. 따라서 종동폴리, 부하 디스크 및 평판은 질량 M 이 스프링 상수 K_M 을 가지고 선형베어링 위에서 직선운동을 하고 이것은 선형운동량(linear momentum) P 를 갖는 1-교점(junction)으로 모델 되었다.

이제 타이밍벨트의 비선형 특성을 고려해보자. 타이밍벨트의 장력은 구동 및 종동폴리에서 고무로 된 벨트 이와 유리섬유(glassfiber cord) 또는 철심

(wire cord)으로 되어있는 하중전달선(load carrying cord)의 두가지가 나누어 받기 때무네 벨트의 장력과 변형량의 관계는 반드시 선형적이라고 말할 수 없다. 따라서 벨트장력 T 를 벨트의 변형량 X 의 3차 다항식으로 다음과 같이 가정한다.

$$T = C_1 X^3 + C_2 X^2 + C_3 X + C_4 \quad (2)$$

계수 $C_1 \sim C_4$ 는 실험에서 구할 수 있다. 비선형 벨트는 Fig. 4의 본드그래프에서 비선형 스프링요소 C 로 표시되어 있다.

Fig. 4의 본드그래프에서 상태방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{h}_R = T(t) - b_R \frac{h_R}{J_R} - n \left[b_t \left[n \frac{h_R}{J_R} - n \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] - b_s \left[-n \frac{h_R}{J_R} + n \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] + T_t - T_s \right] \quad (3)$$

$$\dot{X}_t = n \frac{h_R}{J_R} - R_1 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \quad (4)$$

$$\dot{X}_s = -n \frac{h_R}{J_R} + R_2 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \quad (5)$$

$$\dot{h}_N = -b_R \frac{h_R}{J_R} - T_L + R_1 \left[b_t \left[n \frac{h_R}{J_R} - R_1 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] + T_t \right] - R_2 \left[b_s \left[-n \frac{h_R}{J_R} + R_2 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] - T_s \right] \quad (6)$$

$$\dot{P} = \left[b_t \left[n \frac{h_R}{J_R} - R_1 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] + b_s \left[-n \frac{h_R}{J_R} + R_2 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] + T_t + T_s \right] - b_1 \frac{P}{M} - K_N X_N \quad (7)$$

$$\dot{X}_N = \frac{P}{M} \quad (8)$$

상태방정식 (3)~(8)의 수치해석에서 얻어진 구동 및 중동풀리의 각속도를 시간에 대해 적분하여 구동풀리 및 중동풀리의 회전각을 구하고 이 회전각의 차이에서 전동오차를 구한다.

3.2 풀리의 편심에 의한 전동오차

Fig. 5는 풀리 편심을 도시한 그림이다. O 는 진중심(real center)이고 O' 는 편심된 중심(eccentric center)이다. 이때 풀리의 평균반경이 r 이고 풀리의 중심이 ϵ 만큼 편심되어 있다면 풀리반경 R 은 다음식으로 표시된다.

$$R = r + \epsilon \cos \theta \quad (9)$$

풀리편심에 의한 전동특성해석을 위한 본드 그래프 모델은 Fig. 4의 본드그래프와 기본적으로 동일하다. 단지 시스템의 입력으로서 스테핑 모터의 토

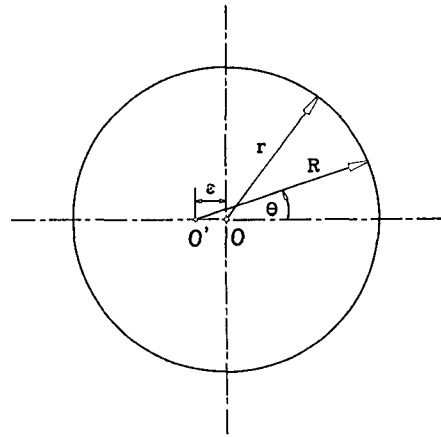


Fig. 5 Eccentric pulley

크입력 $T(t)$ 대신에 구동축 회전속도 $\omega(t)$ 를 사용하였고, $\omega(t)$ 가 구동풀리를 구동하도록 하였다. 이때 수치해석상의 어려움을 피하기 위하여 커패시턴스(K_c)로 모델되는 축을 $\omega(t)$ 와 구동풀리 사이에 첨가하였다⁽⁸⁾. 이 부분은 Fig. 4에서 점선 (2)로 표시되어 있다. 풀리편심이 중동풀리에만 있다고 가정하면 편심에 의한 중동풀리 반경변화는 MTF(modulated transformer)로 모델된다. 이때 최대 및 최소 반경은 위상차가 180° 이므로 벨트와 풀리의 맞물림 시작과 끝에서 각각 다음식으로 표시할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= r + \epsilon \cos(\theta_N + \phi) \\ R_2 &= r + \epsilon \cos(\theta_N + \phi + \pi) \end{aligned} \right] \quad (10)$$

여기서 θ_N 은 중동축의 회전각도이며, ϕ 는 최대 및 최소반경이 발생하는 초기위상각이다.

풀리 편심에 대한 전동오차 해석에 대한 상태방정식은 스테핑 모터 전동오차 해석의 상태방정식과 기본적으로 동일하며 식 (3) 대신에, $\omega(t)$ 가 구동축에 입력되어 구동풀리를 회전시키는 식 (11), (12)가 사용되고 구동축 비틀림 각변위 θ_c 가 상태변수로 추가된다.

$$\dot{\theta}_c = \omega(t) - \frac{h_R}{J_R} \quad (11)$$

$$\dot{h}_R = \theta_c K_c - b_R \frac{h_R}{J_R} - n \left[b_t \left[n \frac{h_R}{J_R} - R_1 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] - b_s \left[-n \frac{h_R}{J_R} + R_2 \frac{h_N}{J_N} - \frac{P}{M} \right] + T_t - T_s \right] \quad (12)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 스테핑 모터에 의한 전동오차(θ_m)

Fig. 6은 부하시 $T_i=100N, 200N, 300N, 400N$ 인 경우에 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m 의 수치해석 결과를 도시한 것이다. 벨트의 비선형 특성을 조사하기 위하여 벨트의 비선형 모델과 선형모델에 대한 수치해석을 수행하였다. 비선형 모델의 계수는 식 (2)와 실험에서 구한 $C_1=8.8561, C_2=7.7009, C_3=33.2417, C_4=0$ 을 사용하였고, 선형 모델은 실험구간내의 벨트장력과 변위관계를 선형적으로 가정한 $C_1=C_2=C_4=0, C_3=100$ 을 사용하였다. 입력토크 $T(t)$ 는 식 (1)에서 $T_m=0.52N \cdot m, T_a=0.1557N \cdot m$ 을 사용하였다. T_m 및 T_a 는 토크센서에서 측정된 값이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 비선형모델인 경우 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m 은 벨트 초기장력이 증가할수록 오차의 진폭이 감소하지만 선형모델의 경우에는 벨트장력이 증가해도 오차의 평균값 및 진폭이 일정하며 변화하지 않는다.

Fig. 7(a)는 무부하시 $T_i=100N$ 인 경우 전동오차에 대한 실험결과를 $t=0.3sec$ 에서 $t=0.6sec$ 부분만 확대도시한 그림이다. Fig. 7(a)에서 전동오차가 스테핑 모터의 1분해도 회전각에 대한 주기 $T=0.00833sec$ 를 가지고 주기적으로 발생함을 알 수 있다. 하지만 Fig. 7(a)의 실험결과는 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m , 폴리편심에 의한 전동오차 θ_e 그리고 벨트 한 피치 회전당 발생하는 전동

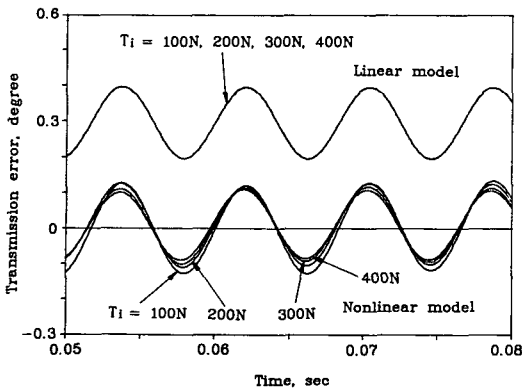
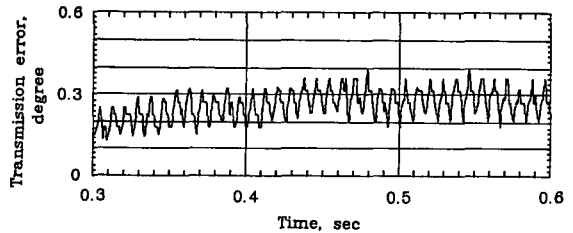


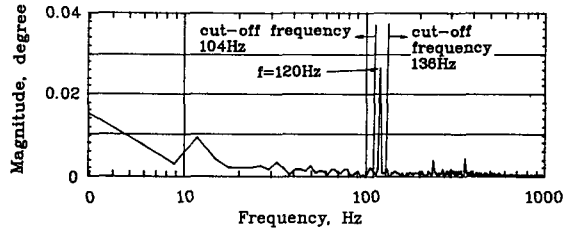
Fig. 6 Numerical results of θ_m for linear and non-linear belt model

오차 θ_b 가 조합된 것이다. 따라서 스테핑 모터에 의한 전동 오차 θ_m 만을 보기 위하여 FFT 해석을 수행하였다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 실험결과를 Fourier 변환하여 주파수 영역에서 도시한 그림이다. 스테핑 모터 1분해도 회전 주파수 $f=120Hz$ 부근의 피크가 스테핑 모터에 의한 전동오차이다. 스테핑 모터에 의한 전동오차만을 보기위하여 차단 주파수(cut-off frequency)를 106Hz, 134Hz로 정하고 106Hz 이하와 134Hz 이상을 차단하여 남은 주파수 성분을 Fourier 역변환(inverse transformation)하면 시간역에서의 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m 을 Fig. 7(c)와 같이 구할 수 있다.

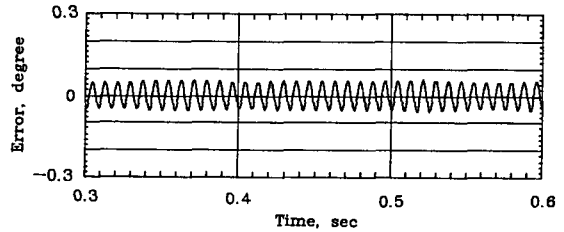
Fig. 8은 $T_i=100N, 200N, 300N, 400N$, 무부하 및 부하에 대한 실험 결과를 FFT 해석하여 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m 을 이론결과와 비교도



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) Experimental results of transmission error for $T_i=100N, T_L=0$
 (b) Transmission error in frequency domain
 (c) Modified transmission error for θ_m

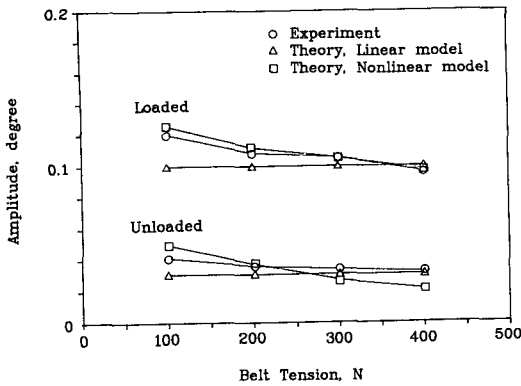


Fig. 8 Comparison of experimental and numerical results for θ_m

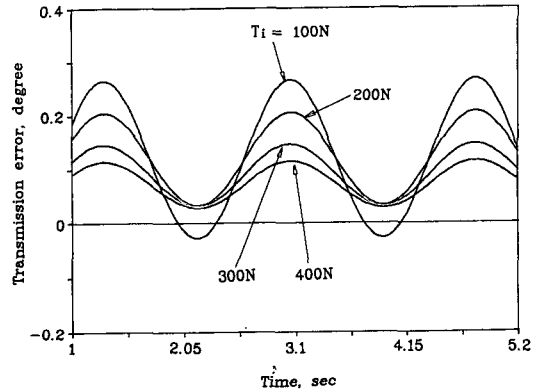


Fig. 9 Numerical results of θ_e for various tensions

시한 것이다. 이론결과는 벨트의 선형 및 비선형 모델에 대한 θ_m 을 시뮬레이션으로 구하고 θ_m 의 진폭을 실험해석결과와 비교하였다. 실험결과는 다섯 번의 실험에 대한 FFT 해석결과를 평균한 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 실험결과는 무부하 및 부하의 모든 경우에 벨트 초기장력이 증가할수록 θ_m 이 감소한다. 비선형 모델에 대한 이론 결과는 벨트장력이 증가할수록 전동오차가 감소하여 그 경향이 실험결과와 일치하지만 선형모델은 벨트 초기장력에 관계없이 전동오차가 일정하다. 따라서 운전범위 내에서 비선형 벨트모델이 전동오차의 특성을 잘 설명하고 있음을 알 수 있다.

벨트 초기장력이 증가할수록 전동오차가 감소하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 장력이 증가하면 인장 및 이완측 장력도 증가하고, 인장 및 이완측 장력차에 의한 벨트 변형량은 벨트의 비선형 특성에 의해 낮은 초기장력의 벨트 변형량에 비해 감소한다. 구동 및 종동풀리는 벨트 변형량에 의하여 회전각의 차이를 보임으로 전동오차는 감소한다. 벨트 초기장력이 증가할수록 스테핑 모터에 의한 전동오차 θ_m 은 감소하므로 벨트초기장력을 크게 설정하는 것이 전동오차의 감소를 위하여 유리하지만 과도한 벨트장력은 벨트 수명을 단축시키고 베어링 및 정밀구동요소에 과대하중에 의한 마모 및 영구변형을 일으키므로 적절한 벨트장력의 선정이 요구된다.

4.2 폴리편심에 의한 전동오차(θ_e)

Fig. 9는 부하시 $T_i=100N, 200N, 300N, 400N$ 인

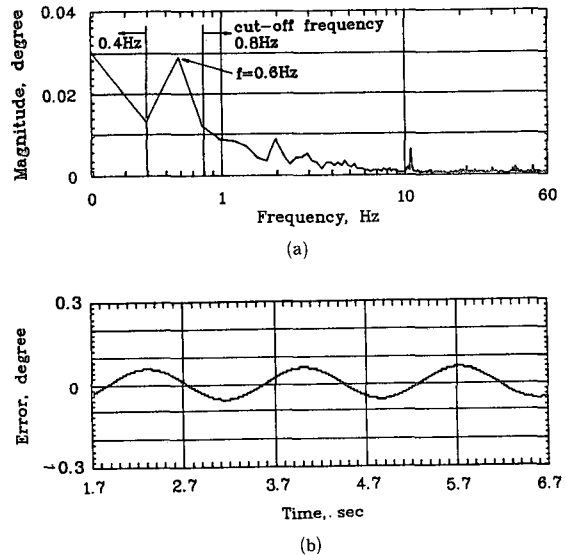


Fig. 10 (a) Transmission error in frequency domain (b) Modified transmission error for θ_e'

경우 폴리 편심에 의한 전동오차 θ_e 의 수치해석 결과를 도시한 것이다. 수치해석에서 벨트는 비선형 모델을 사용하였으며 폴리편심량은 실험에 사용된 풀리의 편심량인 $\epsilon=0.08mm$ 를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 계단입력 $\omega(t)=36rpm$ 에 대하여 정상상태의 전동오차를 도시하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 폴리편심에 의한 전동오차는 벨트장력이 증가할수록 θ_e 의 평균값 및 진폭이 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 10(a)는 실험결과를 FFT 변환 하여 주파수 영역에서 도시한 그림이다. 폴리 1 회전의 주기는

$T=1.6667\text{sec}$ 이므로 $f=0.6\text{Hz}$ 부근의 피크가 폴리 1회전당 발생하는 전동오차에 의한 것이다. 폴리편심에 의한 전동오차만을 보기위하여 차단주파수를 0.4Hz, 0.8Hz로 정하고 0.4Hz이하와 0.8Hz 이상을 차단시켜 남은 주파수 성분을 Fourier 역변환하면 시간역에서의 θ_e 를 Fig. 10(b)와 같이 구할 수 있다.

Fig. 11는 $T_i=100\text{N}, 200\text{N}, 300\text{N}, 400\text{N}$, 무부하 및 부하에 대한 실험 결과를 FFT 해석하여 폴리편심에 의한 전동오차 θ_e 를 이론결과와 비교도시한 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 이론결과는 무부하 및 부하의 모든 경우에 벨트 초기장력이 증가할수록 θ_e 가 감소하여 그 경향이 실험결과와 일치한다. 스테핑 모터에 의한 전동오차와 마찬가지로 벨트 초기장력이 증가할수록 폴리 편심에 의한 전동오차 θ_e 는 감소하는데 이것은 4.1절에서 전술한 바와같이 벨트의 비선형 특성에 의한 벨트 변형량의 차이로 설명할 수 있다. 따라서 벨트 초기장력을 크게 설정하는 것이 전동오차의 감소를 위하여 유리하다.

4.3 벨트 장력변동

Fig. 12은 $T_i=300\text{N}$, 부하가 가해진 경우 벨트 장력변동에 대한 이론 및 실험결과를 도시한 것이다. 실험결과는 스테핑 모터, 폴리편심 및 벨트와 폴리의 1피치 회전에 의한 장력변동이 조합된 것이나 스테핑 모터에 의한 장력변동은 진폭이 0.2N으로 상대적으로 작아서 뚜렷이 보이지는 않는다. 이론치는 스테핑모터에 의한 장력변동과 폴리편심에 의한 장력변동을 중첩한 것이다. 수치해석에서 벨트의 맞물림간섭에 의한 영향은 고려되지 않았으므로 이에 의한 장력변동은 이론곡선에 포함되어 있지 않다. 이론결과는 실험치에서 볼 수 있는 벨트 1피치 회전당의 장력변동을 제외하면 그 경향이 실험결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 12의 벨트 장력변동은 인장축과 이완축 벨트장력에 주기적인 변화를 일으키고 장력변화에 의한 벨트변형을 일으켜 전동오차의 원인이 된다.

4.4 $\theta_m, \theta_e, \theta_p$ 의 비교

Fig. 13는 $T_i=100\text{N}$, 무부하 및 부하의 경우 스테핑 모터에 의한 전동 오차 θ_m , 폴리편심에 의한 전동오차 θ_e 그리고 벨트 한 피치 회전당 발생하는 전동오차 θ_p 의 실험치를 FFT 해석한 결과를 비교

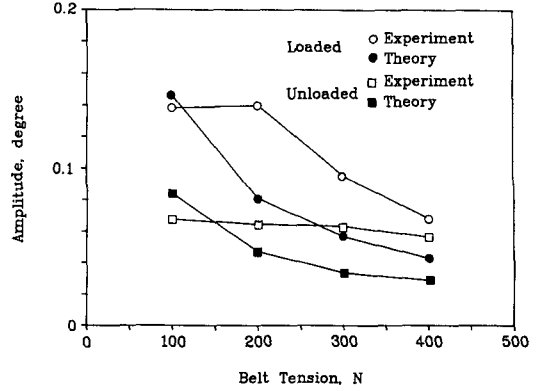


Fig. 11 Comparison of experimental and numerical results for θ_e

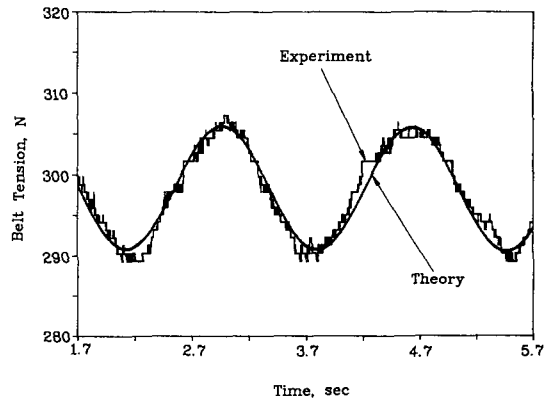


Fig. 12 Comparison of experimental and numerical results for belt tension

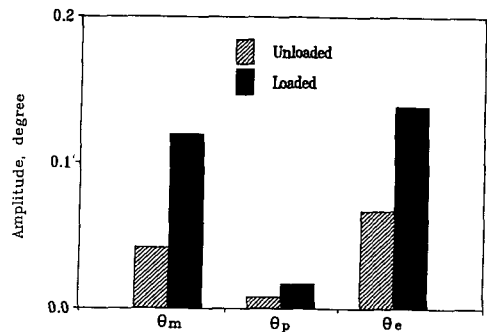


Fig. 13 Comparison of experimental results for $\theta_m, \theta_e, \theta_p$

도시한 것이다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 본 연구에서 사용된 스테핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 전동오차를 비교해 보면 벨트 한 피치 회전당

발생오차 θ_p 의 크기는 θ_m, θ_e 에 비해 무시할 만큼 작다. 따라서 전동오차감소를 위해서는 θ_m, θ_e 를 감소시켜야 한다. 그러나 θ_m 의 감소는 스테핑 모터 고유의 토크특성에 관련되므로 기계적인 요소의 개선 만으로는 제한이 있다. 폴리편심에 의한 전동오차 θ_e 를 감소시키기 위해서는 폴리편심량 줄이는 방법과 벨트 초기장력을 증가시키는 방법이 있다. 폴리편심은 보다 정밀한 가공에 의해 감소시킬 수 있지만 폴리편심을 피할 수 없는 경우에는 벨트 초기장력을 증가시켜야 한다. 그러나 과도한 벨트장력은 벨트 수명을 단축시키고 베어링 및 정밀구동 요소에 과대하중에 의한 마모 및 영구변형을 일으키므로 적절한 벨트장력의 선정이 요구된다.

5. 결 론

스테핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 전동오차에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스테핑 모터 구동 타이밍벨트 시스템의 전동오차는 ① 스테핑 모터의 1분해도 회전당 발생오차 (θ_m), ② 폴리편심에 의한 폴리 1회전당 발생오차 (θ_e) ③ 벨트 한 피치 회전당 발생오차(θ_p)의 세가지 요소로 구성된다.
- (2) θ_m, θ_e 는 벨트의 비선형 특성에 의해 초기장력이 증가할수록 감소한다.
- (3) θ_m, θ_e 는 무부하 일때 보다 부하가 가해졌을 때 더욱 증가한다.
- (4) 본드그래프에 의한 이론결과는 실험결과와 그 경향이 일치한다.

참고문헌

(1) Kagotani, M., Aida, T., Koyama, T. and 1982, "A Study on Transmission Characteristics of Toothed Belt Drives, 1th report, Effect of Initial Tension on Tight side and Slack side Tensions,"

Bulletin of the JSME, Vol. 25, pp. 459~466.

(2) Kagotani, M., Aida, T. and Koyama, T., 1983, "A Study on Transmission Characteristics of Toothed Belt Drives, 2nd report, Transmission Error under a State of Applied Initial Tension, Theoretical Analysis," Bulletin of the JSME, Vol. 26, pp. 132~139.

(3) Kagotani, M., Aida, T. and Koyama, T., 1983, "A Study on Transmission Characteristics of Toothed Belt Drives, 3rd report, Transmission Error under a State of Applied Initial Tension, Experimental Results," Bulletin of the JSME, Vol. 26, pp. 1238~1244.

(4) Kagotani, M., Aida, T. and Koyama, T., 1984, "A Study on Transmission Characteristics of Toothed Belt Drives, 4th report, Transmission Error at Normal and Reverse Revolution under a State of Initial Tension," Bulletin of the JSME, Vol. 27, pp. 2553~2559.

(5) Kagotani, M., Aida, T. and Koyama, T., 1984, "Load Distribution on Toothed Belt Drives under a State of Initial Tension," Bulletin of JSME, Vol. 27, pp. 1780~1787.

(6) Kagotani, M., Aida, T. and Koyama, T., 1986, "A Study on Transmission Characteristics of Toothed Belt Drives, 5th report, Relative Shifting between Belt and Pulley in Normal and Reverse Revolutions under a State of Initial Tension," Bulletin of JSME, Vol. 29, pp. 609~616.

(7) Kuo, B., 1974, "Step Motors," West Publishing.

(8) Rosenberg, R.C. and Karnopp, D.C., 1983, "Introduction to Physical System Dynamics," McGraw-Hill.