

적응시스템과 가속도정보를 이용한 이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정

朴太植, 李竣昊, 申垠澈, 柳志潤, 李廷旭, 金成煥

Parameter Estimation of Two-mass System using Adaptive System and Acceleration Information

Tae-Sik Park, Jun-Ho Lee, Eun-Chul Shin, Ji-Yoon Yoo,
Jeong-Uk Lee, Seong-Hwan Kim

요 약

본 논문에서는 이관성 시스템의 기계계 파라미터의 새로운 추정 알고리즘을 제안한다. RLS(Recursive Least Square) 알고리즘과 가속도정보를 이용하여 이관성 시스템의 부하의 관성, 전동기 관성 그리고 축강성을 추정하고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법의 유효성을 검증한다.

ABSTRACT

In this paper, a novel estimation algorithm of mechanical parameters in two-mass system is proposed. The inertia of a load and a motor and the stiffness are estimated by using RLS(Recursive Least Square) algorithm and acceleration information of motor. The effectiveness of the proposed scheme is verified with simulation and experiments results.

Key Words : two-mass, parameter, estimation, RLS, acceleration

1. 서 론

이관성 시스템은 구동축과 부하축이 작은 강성의 축으로 연결되어 있어 갑작스런 부하 변동이나 속도 지령치 변화 등의 과도 상태에서 구동축과 부하축의 속도차로 인해 진동(oscillation)이 발생하는 시스템이다.

대표적인 시스템으로는 철강 압연 시스템, 운송 시스템, 엘리베이터 구동시스템 등이 있으며 과도 상태에서 발생하는 진동은 축을 손상시키거나 생산되는 제품의 품질을 저하시켜 생산 설비의 이용률을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

과도 상태에서 발생하는 진동을 억제하고 높은 제어 특성을 얻기 위해 여러 가지 속도제어기가 제안되었으며 정확한 제어기의 설계를 위해서는 기계계 파라미터의 정보가 필수적이다. 따라서 기계계 파라미터 정보

를 획득하기 위한 방식이 다양하게 연구되어 왔다.^{[1]-[6]}

1992년 Ichiro는 외관 관측기와 단일관성 시스템 모델을 사용하여 관성을 추정해 내었다.^[1] 이 방식은 연산량이 작고 구현이 간단하나 노이즈에 민감하고 수렴 특성을 해석할 수 없다는 단점이 있다.

1993년 Hori는 적응 이론을 이용해서 관성을 추정하였는데 이 방식은 구현이 간단하고 수렴 특성이 우수하지만 축강성 추정에서는 그 효과를 보지 못하고 있는 실정이다.^[2]

1997년 Schutte는 칼만 필터 방식을 적용하여 기계계 파라미터를 추정하였다.^[3] 이 방식은 노이즈에 강할 뿐만 아니라 파라미터 정보와 더불어 상태 정보를 동시에 추정할 수 있는 장점이 있으나, 연산량이 많고 각종 이득 행렬의 선정에 어려움이 있어 실제 산업 현장에서는 응용이 어렵다.

1997년 Schutte는 신경망 이론을 이용하여 기계계 파라미터를 추정하였다.^[4] 이 방식은 전동기 관성과 부하관성, 축의 댐핑과 축강성의 모든 파라미터 정보를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 각각의 시스템에 대해 특징량을 추출하여 지식 기반(Knowledge Base)을 구축하여야 하므로 다양한 시스템에 적용하기 어려움이 있으며 연산량이 많은 단점이 있다. 또한 많은 방법들이 마찰이나 댐핑이 무시할 수 있을 정도로 작은 시스템에만 적용할 수 있다는 제한을 가지고 있다.

본 논문에서는 1차측의 가속도 정보를 이용함으로써 이관성 시스템의 특성으로부터 1차측의 관성을 직접 추정하며 가속도 정보에 진동성분이 명확히 나타남을 이용해 공진주파수를 추정하는 기법을 제안한다. 2차측 관성은 구현이 간편하고 추정 특성이 우수한 RLS 알고리즘을 단일관성 시스템에 적용해 전체관성을 추정하고 이로부터 1차측 관성을 빼냄으로써 2차측 관성을 추정하였다. 축강성은 추정된 1차측 관성, 2차측 관성 그리고 공진주파수로부터 계산해 낼 수 있다. 본 방식은 노이즈에 강인하고 작은 연산량을 사용하며 마찰과 댐핑의 비선형성에 의한 모델링 오차에도 강인하고 우수한 추정성능을 가짐을 시뮬레이션과 이관성 시스템의 등가 실험 장치를 통해 검증하고자 한다.

본 논문에 사용된 변수들은 다음과 같다.

- ω_M : 전동기 속도 [rad/s]
- ω'_M : 전동기 가속도 [rad/s²]
- T_M : 전동기 토크 [N·m]
- J_M : 전동기 관성 [kg·m²]
- J_R : 롤 관성 [kg·m²]
- K_{SH} : 전동기와 롤 사이의 축강성 [N·m/rad]
- D_{SH} : 축의 댐핑계수
- B : 마찰계수
- T_L : 부하 토크 [N·m]

2. 이관성 시스템의 모델링

이관성 시스템은 구동측과 부하측이 작은 강성의 축으로 연결되어 있는 시스템이다. 이관성 시스템을 블록도로 나타내면 그림 1과 같다. 이 모델은 1차측과 2차측 관성 (J_M, J_R), 축강성 (K_{SH}), 축댐핑 (D_{SH}) 그리고 1차측과 2차측 마찰계수 (B_M, B_R)를 포함하고 있다. 그림 1에서와 같이 축의 비틀림 토크 (T_{SH})가

존재하며 이 비틀림 토크로 인해 속도 응답 상에 진동이 발생하게 된다. 이 진동은 축을 손상시키거나 시스템의 성능을 저하시키는 결과를 가져온다.

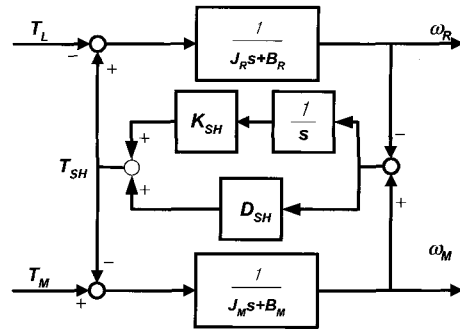


그림 1 이관성 시스템의 블록도
Fig. 1 Block diagram of two-mass system

3. 이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정

3.1 가속도 정보를 이용한 1차측 관성의 추정

서론에서 언급한 바와 같이 1차측과 2차측을 물리적으로 분리하지 않고 1차측의 관성을 추정하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 1차측과 2차측의 분리 없이 1차측의 가속도를 이용해서 1차측의 관성을 추정하는 새로운 방식을 다음과 같이 제안한다.

그림 1의 블록도로부터 이관성 시스템의 식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_M &= \frac{1}{J_M s + B_M} (T_M - T_{SH}) \\ \omega_R &= \frac{1}{J_R s + B_R} (T_{SH} - T_L) \\ T_{SH} &= \left(\frac{K_{SH}}{s} + D_{SH} \right) (\omega_M - \omega_R) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)로부터 유도된 입력토크와 1차측 가속도의 전달함수는 해석적인 형태를 가지지 않는다. 따라서 처음에는 마찰손실을 무시하고 전달함수를 유도하고 시뮬레이션을 통해 마찰손실이 시스템에 미치는 영향을 고찰한 뒤 유도된 전달함수를 수정한 뒤 시뮬레이션을 통해 유도된 식의 타당성을 검증하였다.

마찰손실과 축의 댐핑(Damping)을 고려한 이관성 시스템의 입력 토크에 대한 가속도의 전달함수는 식 (2)와 같다.

식 (2)에서 T_M 의 계단 입력에 대한 응답을 식 (3)과 같이 유도해 낼 수 있다.

$$\frac{\omega'_M(s)}{T_M(s)} = \frac{1}{J_M} \left[\left(\frac{J_M}{J_M + J_R} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{B}{J_M + J_R}} \right) + \left(\frac{J_R}{J_M + J_R} \right) \left(\frac{s}{s^2 + D_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) s + K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)} \right) \right] \quad (2)$$

$$\omega'(t) = \frac{T_M}{J_M} \left\{ \left(\frac{J_M}{J_M + J_R} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\frac{J_R}{J_M + J_R} \right) \left(\cos \omega_r t - \frac{1}{\tau \omega_r} \sin \omega_r t \right) \right\} \quad (3)$$

여기서

$$\tau_1 = \frac{J_M + J_R}{B}, \tau_2 = \frac{1}{\frac{D_{SH}}{2} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)}$$

$$\omega_r = \sqrt{K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) - \frac{D_{SH}^2}{4} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)^2}$$

가속도 $\omega'(t)$ 는 $J_M/(J_M+J_R)$ 의 크기로부터 시정수 τ_1 으로 감소하는 성분과 $J_R/(J_M+J_R)$ 의 크기로부터 ω_r 주파수로 진동하며 시정수 τ_2 로 감소하는 성분의 합을 T_M/J_M 배한 파형이다. 진동하는 성분에는 $\cos \omega_r t$ 와 $\sin \omega_r t$ 성분이 있다.

$1/\gamma \omega \ll 1$ 이며 $\cos \omega_r t = 1$ 일 때의 값을 추정에 사용하며 이때 $\sin \omega_r t = 0$ 이므로 $\sin \omega_r$ 성분은 무시 가능하다.

식 (3)으로부터 $t=0$ 인 순간의 가속도를 구해 보면

$$\omega'(0) = \frac{T_M}{J_M} \left(\frac{J_M}{J_M + J_R} + \frac{J_R}{J_M + J_R} \right) = \frac{T_M}{J_M}$$

$$\Rightarrow J_M = \frac{T_M}{\omega'(0)} \quad (4)$$

$t=0$ 인 순간의 가속도로부터 1차측의 관성을 계산해 낼 수 있다. 하지만 실제 실험에서는 $t=0$ 인 순간의 값이 편차를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 $t=0$ 인 순간의 값은 0에서 $\omega'(0)$ 로 계단형태로 바뀐다. 따라서 잡음(noise)을 제거하기 위한 저역통과필터를 통과하면서 값이 작아짐을 확인할 수 있었다. 하지만 두 번째 최고점과 세 번째 최고점은 정현파 형태로 변화한다.

따라서 적절히 필터를 설계하면 저역통과필터의 영향을 무시할 수 있을 정도로 최소화시킬 수 있다. 두 번째 최고점과 세 번째 최고점의 시간과 값을 측정하여 시정수를 계산하면 첫 번째 값을 추정할 수 있다.

3.2 RLS를 이용한 전체 관성 추정

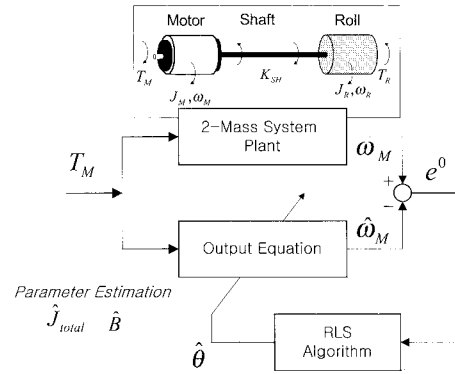


그림 2 RLS 방식을 이용한 이관성 시스템의 관성 추정
Fig. 2 Parameter estimation of two mass system using RLS

그림 2는 RLS 알고리즘의 전체 블록도이다. 실제 시스템에 인가되는 입력을 시스템의 수학적 모델에 동일하게 입력하고 그 결과값의 오차에 RLS알고리즘을 적용하여 오차를 감소시키는 방향으로 수학적 모델의 파라미터를 변화시켜감으로써 결국에 수학적 모델과 실제 시스템을 일치시켜 파라미터를 추정해 내는 방식이 RLS를 이용한 파라미터 추정기법이다.

본 논문에서는 이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 등가하여 RLS방식을 적용하여 이관성 시스템의 전체 관성을 추정하고 가속도 정보로부터 얻어낸 1차측 관성값과 RLS 방식을 이용하여 추정된 전체 관성값을 통해 2차측 관성값을 추정하였다. 식 (5)는 등가화된 단일관성 시스템의 상태 방정식이다.

$$J \frac{d\omega_M(t)}{dt} = -B\omega_M(t) + T_M(t) - T_L(t) \quad (5)$$

여기서 J : 전체 관성

B : 전체 마찰 계수

$T_L = 0$ 으로 가정하였을 때 식 (5)로부터 식 (6)의 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{\omega(s)}{T_M(s)} = \frac{1/J}{s + B/J} \quad (6)$$

식 (6)의 전달함수를 영차유지기(ZOH)를 이용하여

Z 변환하면 다음과 같다.

$$Z \left\{ \frac{1-e^{-T_s}}{s} \frac{1/J}{s+B/J} \right\} = \frac{b_1 z^{-1}}{1-a_1 z^{-1}} \quad (7)$$

여기서

$$a_1 = e^{-\frac{B T_s}{J}}, \quad b_1 = \frac{1}{B} \left(1 - e^{-\frac{B T_s}{J}} \right),$$

T_s = 샘플링주기

식 (7)을 정리하면 단일관성 시스템의 이산치 모델은 식 (8)과 같아진다.

$$\omega_M(k+1) = a_1 \omega_M(k) + b_1 T_M(k) \quad (8)$$

시스템의 출력을 전동기 속도로 하면 퀘환 (Regressor) 벡터와 파라미터 벡터는 각각 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} C(k) &= [\omega_M(k) \ T_M(k)] \\ \theta(k) &= [a_1 \ b_1] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $C(k)$: 퀘환(Regressor) 벡터
 $\theta(k)$: 파라미터 벡터

평가 함수 식 (10)이 최소가 되도록 식 (11)을 반복 연산하여 기계계 파라미터를 추정한다.

$$V(\theta, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda(i)^{k-i} (y(i) - C(i-1)\hat{\theta}(k))^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K(k) &= \frac{P(k-1)C(k-1)^T}{1 + C(k-1)P(k-1)C(k-1)} \\ \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)[\omega_m(k) - C(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ P(k) &= \frac{1}{\lambda} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)C(k-1)^T C(k-1)P(k-1)}{\lambda + C(k-1)P(k-1)C(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 λ : forgetting factor

$\hat{\theta}(k)$: 추정된 파라미터 벡터

$P(k), L(k)$: adaptation gain

따라서 식 (11)로부터 이산치 모델에서의 a_1, b_1 을 추정할 수 있으며 식 (7)의 이산치 모델과 연속치 모델 사이의 관계를 이용하여 전체 시스템의 관성과 마찰계수를 추정할 수 있다. 또한 이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 근사화하기 위해서는 동일한 응답 특성을 보이는 입력 주파수를 선택하여야 한다.

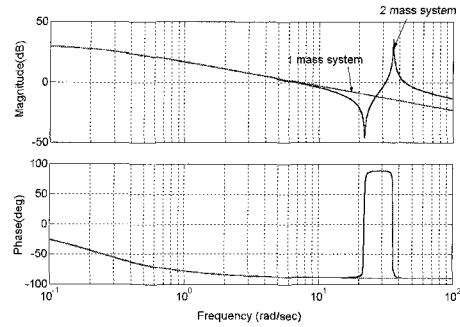


그림 3 단일관성 시스템과 이관성 시스템의 입력토크에 대한 1차측 속도의 보드선도

Fig. 3 Bode diagram of the 1st side speed vs. input torque in one-mass and two-mass system

그림 3을 보면 반공진점 이하의 저역주파수에서 동일한 주파수 응답 특성을 보임을 알 수 있으며 따라서 이 영역의 주파수를 입력 신호의 주파수로 한다면 이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 등가 할 수 있다.

3.3 축강성 계산

가속도 정보로부터 공진주파수를 알아낼 수 있기 때문에 식 (3)의 ω_r 에 대한 식 (12)로부터 축강성값을 계산할 수 있다. 여기서 D_{SH}^2 의 값은 아주 작으므로 D_{SH}^2 가 포함된 항을 무시하면 K_{SH} 를 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

$$\omega_r = \sqrt{K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) - \frac{D_{SH}^2}{4} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)^2} \quad (12)$$

$$K_{SH} = \frac{\omega_r^2}{\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)} \quad (13)$$

4. Simulation을 통한 검증

4.1 가속도 정보를 이용한 1차측 관성 추정

그림 4는 Simulink를 이용한 시뮬레이션 블록이다.

그림 5는 시뮬레이션에 의한 실제 이관성 시스템의 1차측의 속도와 가속도의 파형이다. t=1인 순간에 계단입력토크를 인가하였으며 그때의 속도파형에서는 시스템의 진동성분을 명확히 구분해내기 어렵지만 가속도파형에서는 그 진동성분이 명확히 보이므로 공진주파수의 측정이 용이하다.

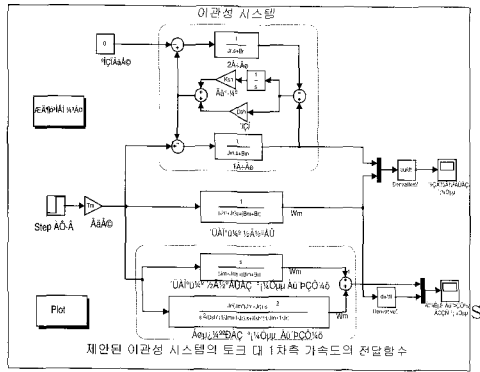
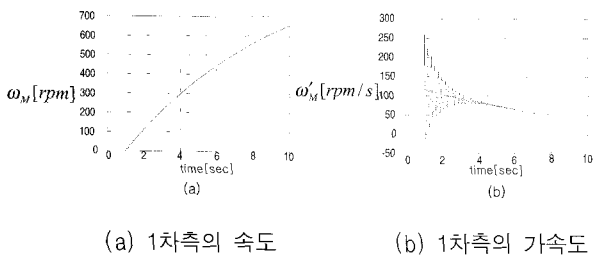
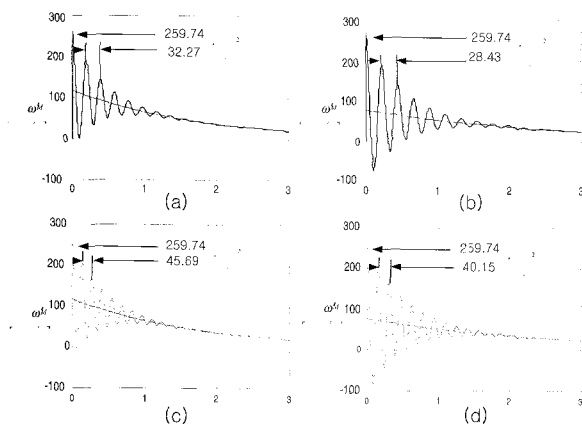


그림 4 1차측 관성 추정 시뮬레이션을 위한 블록도
Fig. 4 Block diagram of the 1st side inertia estimation



(a) 1차측의 속도 (b) 1차측의 가속도
그림 5 1차측의 속도와 가속도의 파형
Fig. 5 Waveform of speed and acceleration of 1st side in two-mass system



(a) 1차측관성 = 0.077, 2차측관성 = 0.093, 축강성 = 44
(b) 1차측관성 = 0.077, 2차측관성 = 0.186, 축강성 = 44
(c) 1차측관성 = 0.077, 2차측관성 = 0.093, 축강성 = 88
(d) 1차측관성 = 0.077, 2차측관성 = 0.196, 축강성 = 88
그림 6 가속도 정보를 이용한 1차측관성추정 시뮬레이션
Fig. 6 Simulation of 1st inertia estimation using acceleration

그림 6은 다양한 파라미터에 대한 1차측의 가속도

파형이다.

1차측 가속도 파형으로부터 추정된 1차측 관성값은 모두 $0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 으로 정확한 추정 특성을 얻을 수 있었다.

인가한 계단 입력 토크의 크기는 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 이다.

$$J_M = \frac{T_M}{\omega'(0)} = \frac{20}{259.74} = 0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.2 RLS방식을 통한 전체관성의 추정

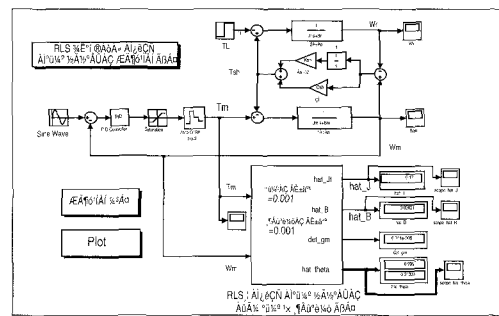


그림 7 RLS를 이용한 전체 관성 추정 시뮬레이션 블록도
Fig. 7 Block diagram of total inertia estimation using RLS algorithm

그림 7은 RLS를 이용한 전체 관성 추정을 위한 Simulink 블록도이다.

그림 8은 전체관성(원판 1개)을 추정된 것으로서 설정한 1차측관성은 $0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 원판의 관성은 $0.093 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이며 추정된 값은 $0.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이다.

그림 9는 전체관성(원판 2개)을 추정된 것으로서 추정된 $0.263 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 으로서 추가된 원판의 관성값은 $0.093 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 을 얻음으로써 100% 정확한 값을 추정할 수 있었다.

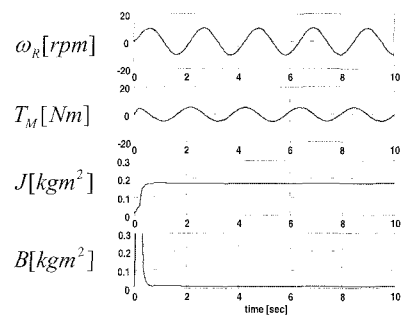


그림 8 전체관성(원판 1개)추정 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulation of total inertia(Roll x 1) estimation

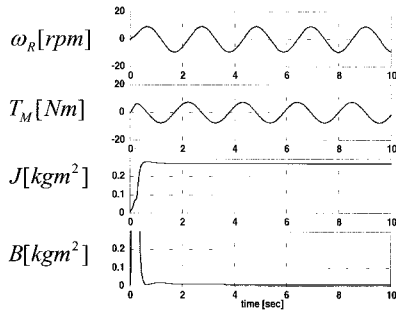


그림 9 전체관성(원판 2개) 추정 시뮬레이션 파형
Fig. 9 Simulation of total inertia(Roll x 2) estimation

4.3 축강성의 계산

앞의 가속도 정보 시뮬레이션과 RLS 전체관성 추정 시뮬레이션으로부터 추정된 1차축 관성, 2차축 관성, 공진점을 식 (14)에 대입하여 그림 8의 (a), (b), (c), (d)에 대해 축강성을 계산하였다.

계산 결과는 각각 45.04 Nm/rad, 44.01 Nm/rad, 89.94 Nm/rad, 87.78 Nm/rad로 계산되었으며 시뮬레이션에 사용된 44 Nm/rad, 88 Nm/rad에 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 이때 발생하는 오차는 댐핑을 무시한 것과 모델링 오차에 기인한다. 하지만 이 오차는 실제로 적용하기에 지장이 없을 정도로 작음을 확인할 수 있었다.

표 1 축강성 추정
Table 1 Estimation of Stiffness

	1차축관성 $kg \cdot m^2$	2차축관성 $kg \cdot m^2$	공진점 rad/s	추정된 축강성 Nm/rad
(a)	0.077	0.093	32.27	45.04
(b)	0.077	0.093x2	28.43	44.01
(c)	0.077	0.093	45.69	89.94
(d)	0.077	0.093x2	40.15	87.78

5. 실험 결과

5.1 이관성 시스템 실험 장치

그림 10은 이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 등가된 실험 장치이다. 주전동기는 5.5kW 유도전동기를 사용하였고 비틀림축을 실제로 구현함에 있어 직경이 작고 긴축을 사용할 경우 실험 장치가 길어지고 파손의 위험도 있으므로 이를 방지하기 위하여 스프링강 재질의 4개의 비틀림 판으로 구성된 비틀림축을 사용하였으며 또한 비틀

림 판의 갯수를 조정함으로써 원하는 축강성으로 가변이 가능하도록 제작하였다.

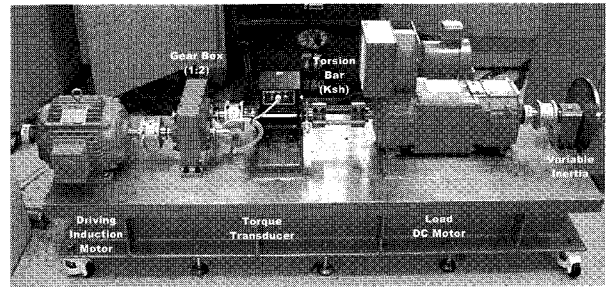


그림 10 이관성 시스템 실험장치
Fig. 10 Experimental setup of two-mass system

또한 부하관성의 가변이 가능하도록 하기 위하여 직류전동기의 뒷단에 관성 원판을 가감할 수 있도록 설계하였다. 실험 장치에 사용된 토크미터의 내부에도 비틀림 특성이 있지만 이의 축강성은 실험영역에 비해 아주 큰 값이므로 무시 가능하다.

그림 11은 유도전동기의 구동시스템의 구성도이다. 디지털 신호 처리 전용의 프로세서인 Texas Instruments 社의 DSP TMS320C31을 시스템의 주제어기로 하였고, 전력변화부로서 IGBT 모듈을 사용하였다. 또한 PWM발생 전용칩인 ADMC281을 사용하여 회로를 간략화하였고 또한 EPLD를 사용하여 회로를 집적화시켰다. Host PC와 디지털 보드와의 통신은 RS232를 이용한 직렬 통신을 행하였다.

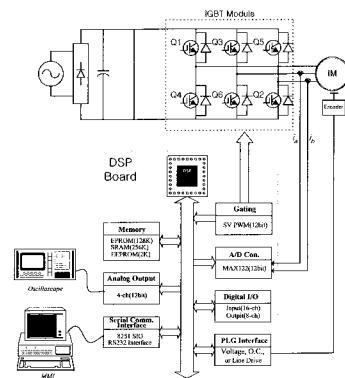


그림 11 유도전동기 구동시스템의 구성
Fig. 11 Induction motor driving system setup

5.2 가속도 정보를 이용한 1차축 관성 추정

그림 12는 관성원판을 1개 달았을 때의 가속도 정보를 이용하여 1차축 관성을 추정한 실험 파형이며 그림 13은 계단 토크를 인가하는 순간의 속도와 가속도의

확대 파형이다. 그림 14는 관성원판을 2개 달았을 때의 실험 파형이며 그림 15는 확대 파형이다. 실험은 다음과 같이 행하였다.

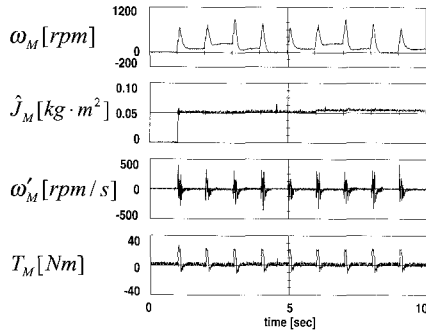


그림 12 가속도 정보를 이용한 1차측 관성 추정 실험 파형 (관성 원판 1개)
 Fig. 12 1st part inertia estimation using acceleration (1 Round inertia)

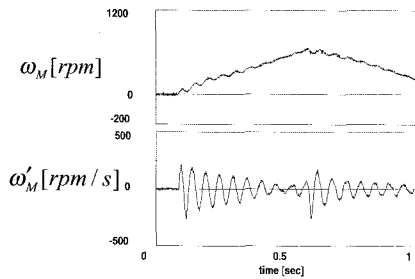


그림 13 계단 토크를 인가하는 순간의 속도와 가속도 파형 (관성 원판 1개)
 Fig. 13 Speed and acceleration waveform with step input (1 Round inertia)

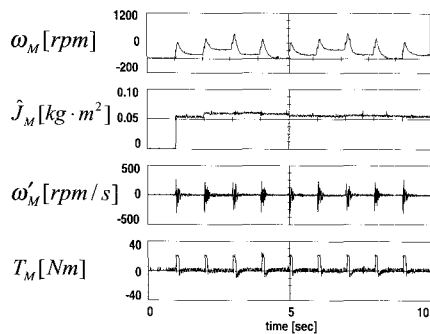


그림 14 가속도 정보를 이용한 1차측 관성 추정 (관성 원판 2개)
 Fig. 14 1st part inertia estimation using acceleration (2 Round inertia)

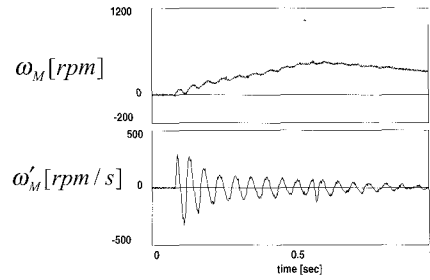


그림 15 계단 토크를 인가하는 순간의 속도와 가속도 (관성 원판 2개)
 Fig. 15 Speed and acceleration waveform with step input (2 Round inertia)

속도 제어기를 통해 전동기의 속도를 유지하다가 계단 토크 입력의 인가 전에 속도 제어기를 정지시키고 토크를 0으로 잠시 인가한 후 20 Nm의 단위 계단 토크를 1초 동안 인가하여 그 동안의 가속도 파형의 진동을 관측하고 다시 속도제어기를 동작시키는 방식으로 실험을 반복하여 추정되는 1차측의 관성의 평균을 계산하였다.

여러 속도 영역에서 실험하여 비선형성에 의한 오차를 줄이도록 하였다. 추정된 1차측 관성값은 0.054 kg·m²로써 오차율 5% 이내로 우수한 성능을 보였다.

5.3 RLS방식을 이용한 전체 관성 추정

그림 16과 17은 RLS를 이용하여 전체 관성을 추정 한 실험 파형이다. 실험 장치의 각 부분을 순차적으로 결합하며 관성을 추정하였다.

시뮬레이션과 동일하게 속도지령치를 정현파의 저역 주파수로 인가하였고 이에 의해 토크도 정현파로 인가됨을 확인할 수 있었다.

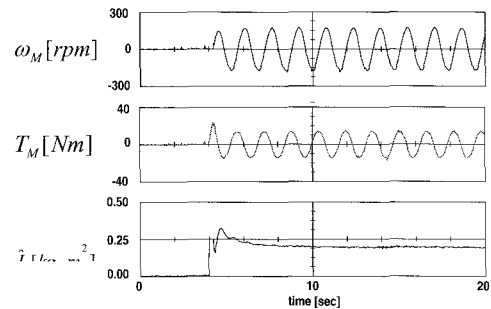


그림 16 RLS를 이용한 전체 관성 추정 (관성 원판 1개)
 Fig. 16 Inertia estimation using RLS (1 Round inertia)

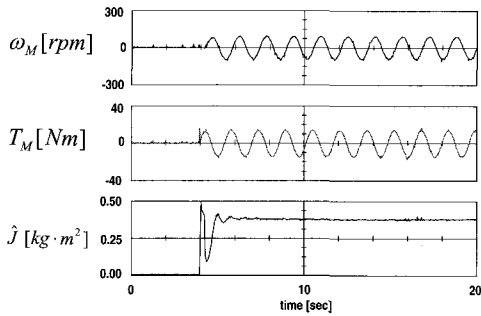


그림 17 RLS를 이용한 전체 관성 추정 (관성 원판 2개)
Fig. 17 Inertia estimation using RLS (2 Round inertia)

추정된 관성의 정확성을 판단하기 위한 실험 장치의 실제 관성 다음과 같이 구하였다. 전동기의 관성은 제조 회사에서 제시한 값이며 원판의 관성은 재질과 물리적인 값으로부터 계산을 통해 구하였다.

실험결과 RLS 알고리즘은 우수한 수렴특성을 가지며 추정된 관성의 오차 범위는 5% 이내로서 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 오차의 원인은 입력토크의 지연과 이관성 시스템을 단일 관성 시스템으로 등가화로 인한 오차로 추정된다.

속도 지령치의 주파수를 낮춤으로써 이관성 시스템과 단일 관성 시스템을 더욱 등가화 할 수 있지만 입력토크가 너무 작아져서 노이즈의 영향을 받게 된다.

표 2에 실험장치의 설계치와 가속도 정보를 이용한 1차측 관성추정 실험과 RLS를 이용한 전체관성추정 실험의 결과값을 정리하고 그 오차를 정리하였다.

표 2 구조물의 설계값과 추정된 관성값
Table. 2 Designed and estimated inertia of structures

구조물	추정값 $kg \cdot m^2$	설계값 $kg \cdot m^2$	오차 (%)
1차측 관성 (유도전동기+기어)	0.054	0.057	5.0
2차측 관성 (직류전동기)	0.039	0.040	2.5
관성 원판	0.093	0.094	1.1

5.4 축강성 계산

관성 원판을 1개, 2개 달았을 경우에 대하여 식 (13)에 의해 축강성을 계산하였고 그 평균을 취한 값이 47 Nm/rad로써 설계치 44 Nm/rad에 대해 10%이내의 오차율을 가지는 값이 나왔다.

설계 값보다 큰 값이 추정된 것은 본 실험에 사용된

실험장치의 구조적 문제에 기인한다.

축으로 사용된 비틀림 판의 축강성 계산은 판의 비틀림 강성만을 고려하여 계산되었지만 실제 실험에선 토크가 인가되어 축이 비틀리면 판의 인장에 기인하는 탄성도 축강성으로 포함되어 추정되기 때문에 이점을 고려한다면 설계 값으로 제시한 44 Nm/rad보다 다소 높은 값이 추정되는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

5.5 축진동 억제 제어

추정된 파라미터를 이용하여 일반적으로 사용하는 PI 제어기와 상태궤환 제어기를 구성하고 축진동 억제 제어 실험을 하였다.

실험은 100 rpm으로 구동하고 정상 상태에서 정방향 부하와 역방향 부하를 인가하여 진동억제 특성을 파악하였다. 여기서 인가된 부하는 9 Nm이다.

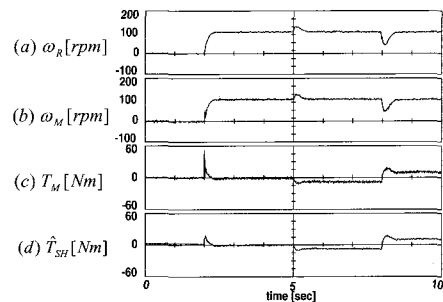


그림 18 축소차원 상태궤환 제어시 속도 및 부하 응답 특성
Fig. 18 Speed and load response characteristic with reduced order state feedback control

그림 18은 축소차원 상태궤환 제어를 통한 축진동 억제제어 실험의 결과파형이다. 우수한 축진동 억제 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

즉, 추정된 파라미터를 이용한 상태 관측기의 성능이 우수함을 보여주는 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 RLS 방식과 전동기의 가속도 정보를 이용하여 압연기 구동시스템의 관성과 축강성을 추정하기 위한 기계계 파라미터 추정방식을 제안하였다.

시뮬레이션과 이관성 시스템의 등가 실험장치를 통해 제안한 방식이 작은 연산량을 사용하면서 넓은 영역에서 적용이 가능하며 우수한 재현성과 우수한 추정 성능을 가짐을 증명하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ichiro Awaya, Yoshiki Kato, Iwao Miyake, and Masami Ito, "New Motion Control with Inertia Identification Function Using Disturbance Observer", IECON Proc., pp.77, 1992
- [2] Yoichi Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor using Low Precision Shaft Encoder", IECON Proc., pp.73, 1993
- [3] F.Schutte, S.Beineke, A.Rolfsmeier, and H.Grotstollen "Online Identification of Mechanical Parameter Using Extended Kalman filters", IAS Proc., pp501, 1997
- [4] F.Schutte, S.Beineke, and H.Grotstollen "Structure and Parameter Identification for a Two-Mass System with Backlash and Friction Using a Self-Organizing Map", EPE Proc., pp3.358, 1997
- [5] Chiharu Ohsawa, Takashi Nakanishi, Satoshi Kai and Satoru Ozaki, "Parameter Identification of 2-Mass System and Suppression of Torsional Vibration", IPEC-Tokyo Proc., pp. 428, 1992.
- [6] Makoto Iwasaki and nubuyuki Matsui, "Mechanical Parameter Measurement of 2-Mass Resonant System", IPEC-Yokohama Proc., pp. 453, 1995.



유지윤(柳志潤)

1955년 2월 25일 생. 1977년 고려대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다 대학 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1991년 창원대 전기공학과 교수. 현재 고려대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.



이정욱(李廷旭)

1968년 4월 3일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 (주)포스콘 기술연구소 선임연구원.



김성환(金成煥)

1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 목포대학교 제어계측공학과 교수.

저 자 소 개



박태식(朴太植)

1971년 1월 19일생. 1994년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 삼성전자 중앙연구소 근무.



이준호(李竣昊)

1973년 1월 15일생. 1999년 고려대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



신은철(申垠澈)

1997년 고려대 제어계측공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.