

## 전동식 안전벨트 시스템의 선형 상태 관측기 설계

이 강 석<sup>1)</sup> · 최 진 철<sup>1)</sup> · 이 우 택<sup>\*2)</sup>

창원대학교 대학원 제어계측공학과<sup>1)</sup> · 창원대학교 제어계측공학과<sup>2)</sup>

## A Design of Linear State Observers for Motorized Seat Belt System

Kangseok Lee<sup>1)</sup> · Chinchul Choi<sup>1)</sup> · Wootaik Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Control & Instrumentation Engineering Graduate School, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea

<sup>2)</sup>Department of Control & Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea  
 (Received 21 March 2011 / Revised 5 July 2011 / Accepted 28 September 2011)

**Abstract** : This paper describes a design and a verification of linear state observers for a motorized seat belt system to estimate state information such as angular velocity and load torque. The motorized seat belt system provides functions to protect passengers and improve passenger's convenience. To realize these functions, sensors which can measure an angular velocity and load torque are needed. By use of the linear state observer, state information can be estimated without sensors. The motorized seat belt system is analysed and represented as a state space model which contains load torque as an augmented state. By the developed state space model, a full and reduced order observer are designed and verified by experiments. The full and reduced order observer are also compared from points of view of execution time and noise robustness.

**Key words** : MSB(Motorized Seat Belt, 전동식 안전벨트), State observer(상태 관측기), Full-order observer(전차수 관측기), Reduced-order observer(축소차수 관측기), System model(시스템 모델)

### Nomenclature

$V_a$ : motor input voltage, V	$\tau_M$ : load torque of MSB mechanical part, Nm
$i_a$ : motor input current, A	$\tau_d$ : disturbance torque, Nm
$L_a$ : motor inductance, H	$\tau_R$ : assist torque of return spring, Nm
$R_a$ : motor resistance, $\Omega$	$F_m$ : effect force of MSB retract part, N
$e_a$ : electro-motive force (EMF), V	$F_b$ : effect force of MSB, shoulder part, N
$K$ : back EMF / torque constant, V/(rad/sec), Nm/A	$\omega_m$ : angular velocity of motor, rad/sec
$\tau_e$ : electronic torque, Nm	$\omega_M$ : angular velocity of mechanical part, rad/sec
$J$ : moment of inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$\theta_M$ : angle of mechanical part, rad
$B$ : viscous friction coefficient, Nm/(rad/sec)	$\gamma$ : Initial angle of mechanical part, rad
$\tau_m$ : load torque of motor, Nm	$K_s$ : return spring coefficient, Nm/rad
	$\eta$ : efficiency of MSB System
	$r$ : radius of reel

\*Corresponding author, E-mail: wootaik@changwon.ac.kr

# 1. 서론

## 1.1 전동식 안전벨트 시스템

차량 안전장치 중 하나인 안전벨트 시스템(Seat Belt System)은 사고시 승객의 안전을 보장하는 장치이다.

기존의 안전벨트 시스템은 수동 안전시스템(Passive safety system)으로 기계적인 장치에 의해서 사고시점 혹은 사고시점 이후에 승객을 보호한다. 따라서 사고 직전의 승객의 자세 및 안전벨트의 인장력에 따라 그 효과의 차이가 커지며 이는 안전에 부정적인 요인으로 작용하게 된다.<sup>1)</sup>

이러한 기존의 안전벨트 시스템을 사고 전에 승객에게 경고하여 승객을 보호하거나 승객의 편의를 위한 동작을 하는 능동 안전시스템(Active safety system)으로의 개선하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.<sup>2,3)</sup>

Table 1 Operating and effect of motorized seat belt system

기능	프리텐션 (Pretension)	주행 보조 (Dynamic Support)	촉각 경보 (Haptic Alarm)	슬랙 제거 (Slack Removal)	벨트 파킹 (Belt Parking)
작동 조건	사고 직전의 상황으로 판단될 경우	평방향 가속도가 크거나, 중방향 감속도가 큰 제동시	차량 위험 상황 판단, 혹은 차량이 일정 속도 이상일 경우	안전 벨트 버클 착용 후 작동	안전 벨트 버클 해제 후 작동
작동 내용	안전 벨트를 강하게 잡아 승객의 움직임을 구속	안전 벨트를 잡아 승객의 움직임을 구속	안전 벨트를 한 번 혹은 여러 번 가볍게 더잡아 위험을 알림	안전 벨트를 잡아 안전 벨트와 승객 사이의 슬랙 제거	안전 벨트의 복원 불량 방지
효과	사고 직전에 승객을 좌석에 구속하여 사고시 추가적인 상해를 방지	운전자의 전방 및 측면 돌림을 방지하여 차량의 안전 운행 지원	운전 중인 운전자에게 촉각에 의한 경보로 주의 환기	안전 벨트 슬랙 제거에 의한 출동 후 성능 저하 방지	안전 벨트 복원 불량에 대한 문제 해결

전동식 안전벨트 시스템(Motorized Seat Belt System, MSB System)은 기존의 안전벨트 시스템에 전동식 안전벨트 ECU, 전동 모터를 추가하여 능동 안전시스템으로의 개선을 이룬 대표적인 시스템이다. 기존에 개발된 전동식 안전벨트는 Table 1과 같이 차량의 주행 상태를 파악하여 안전벨트의 동작 모드를 결정하고 결정된 동작 모드에 맞는 동작을 수행한다.<sup>3)</sup>

## 1.2 문제 및 개선 가능성

전동식 안전벨트의 정확한 동작 구현을 위해서 모터 인가 전류, 모터 회전각, 각속도 등의 상태 정

보를 파악해야 한다. 예를 들어 전동식 안전벨트에서 작용하는 부하 토크의 차이로 인해서 안전벨트를 착용한 승객에게 전달되는 느낌과 정보 전달 효과의 차이가 발생하게 된다.<sup>4)</sup> 또한, 전동식 안전벨트의 한 부하 토크를 이용하여 안전벨트를 구동하는 알고리즘,<sup>5)</sup> 가속도와 부하 토크를 이용한 안전벨트 구동 알고리즘<sup>6)</sup> 등과 같이 전동식 안전벨트 동작 구현에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>7)</sup> 이와 같이 전동식 안전벨트의 여러 기능 구현을 위해서는 모터 인가 전류, 모터 회전각, 각속도, 부하 토크 등의 전동식 안전벨트 상태 정보를 파악하는 것이 중요하다.

이 논문에서는 센서의 장착이 불가능하거나 비용의 절감을 위해 센서를 장착하지 않고 내부 상태, 특히 전동 모터의 외란을 모델링하여 전동식 안전벨트의 부하 토크를 추정할 수 있는 상태 관측기를 구성한다. 전동식 안전벨트 시스템 분석을 통해 시스템을 모델링 하였으며, 실제 시스템을 모사한 테스트 벤치에서의 실험으로 구성된 상태 관측기를 검증하였다. 상태 관측기는 전차수 관측기와 축소차수 관측기 두 가지 형태의 상태 관측기를 구성하였으며, 입력 상태의 오차에 대한 상태 추정 결과와 상태 관측기 수행시간을 비교하였다.

# 2. 시스템 상태 변수 모델

## 2.1 전동식 안전벨트 시스템 모델

전동식 안전벨트 시스템은 Fig. 1과 같다. 전동식 안전벨트 시스템은 전동 모터의 전기부(Electrical

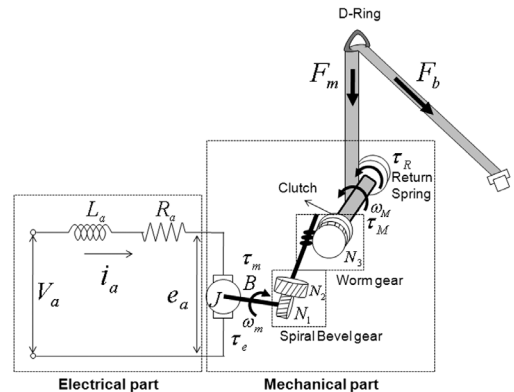


Fig. 1 Motorized seat belt system

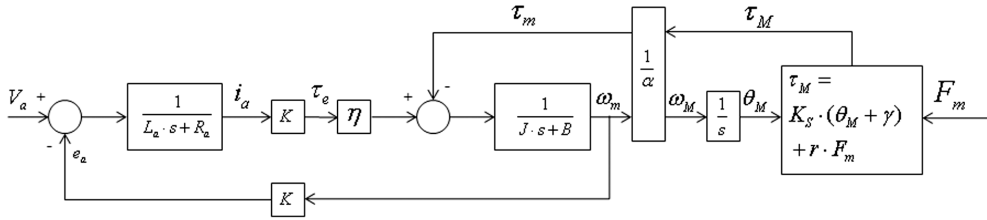


Fig. 2 Motorized seat belt system model

Part) 와 내부 기어, 클러치, 스프링 등으로 구성된 기구부(Mechanical Part) 로 구분이 가능하다.

전동식 안전벨트 시스템은 Fig. 2의 블록선도로 표현이 가능하다. 이에 대한 부분별 설명은 다음 절에서 설명한다.

2.1.1 전기부 모델링

전동식 안전벨트 시스템의 전기부는 전동 모터로 구성이 되어 있으며 식 (1), (2)와 같이 표현할 수 있다.<sup>8,9)</sup>

$$V_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a + e_a \tag{1}$$

$$e_a = K \cdot \omega_m \tag{2}$$

2.1.2 기구부 모델링

전동식 안전벨트 시스템의 기구부는 내부에 기어와 리턴 스프링을 포함하고 있다. 전동 모터로부터의 전기적 토크  $\tau_e$  는 식 (3), (4)와 같이 표현할 수 있다.<sup>8,10)</sup>

$$\tau_e = K \cdot i_a \tag{3}$$

$$\tau_e \cdot \eta = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m + \tau_m \tag{4}$$

MSB의 기구부에 작용하는 토크  $\tau_M$  은 전동 모터에 작용하는 토크  $\tau_m$  와 기어비  $\alpha$  의 관계로 표현할 수 있으며 식 (5)와 같다.

$$\tau_m = \frac{1}{\alpha} \cdot \tau_M \tag{5}$$

MSB의 기구부에 작용하는 토크  $\tau_M$  은 MSB 기구부 내부에 존재하는 리턴 스프링과 벨트에서 발생하는 토크만을 고려하였으며 식 (6)과 같다. 또한,

리턴 스프링과 안전벨트에서 발생하는 토크는 각각 식 (7), (8)과 같이 표현할 수 있다.<sup>10)</sup>

$$\tau_M = \tau_R + \tau_L \tag{6}$$

$$\tau_R = K_s \cdot (\theta_M + \gamma) \tag{7}$$

$$\tau_L = r \cdot F_m \tag{8}$$

2.1.3 파라미터

앞서 사용된 파라미터들을 실험을 통해 구하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Parameters

Symbol	Value	Unit
$R_a$	0.224	$\Omega$
$L_a$	180	$\mu\text{H}$
$K$	0.0078	$\text{V}/(\text{rad}/\text{sec})$
$J$	$3.92 \times 10^{-6}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$B$	$3.10 \times 10^{-5}$	$\text{Nm}/(\text{rad}/\text{sec})$
$r$	0.025	m
$K_s$	$4.56 \times 10^{-3}$	$\text{Nm}/(\text{rad}/\text{sec})$
$\eta$	0.45	-
$\alpha$	48.46	-

2.2 시스템 상태 변수 모델

앞서 구한 전동식 안전벨트 시스템 모델을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K}{L_a} \omega_m + \frac{1}{L_a} V_a \tag{9}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K \cdot \eta}{J} i_a - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{1}{J} \tau_m \tag{10}$$

위의 식을 상태 변수 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$u(t) = V_a \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) + \mathbf{T} \cdot \tau_m \quad (13)$$

$$y(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} - \frac{K}{L_a} & \\ \frac{K \cdot \eta}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0] \quad (16)$$

### 3. 상태 관측기 설계

이 장에서는 앞서 구한 상태 모델을 이용하여 상태 관측기를 설계한다. 전차수 관측기와 축소차수 관측기를 설계하였다. 전차수 관측기의 경우, 측정 가능한 상태 정보를 포함한 모든 상태정보를 추정한다.

반면 축소차수 관측기의 경우, 측정 가능한 상태 정보를 다시 추정하지 않고 추정 대상이 되는 상태 정보만을 추정하는 상태 관측기이다. 따라서 전차수 관측기의 경우 측정 가능한 상태 정보의 오차에 보다 강인한 상태 추정이 가능하며, 축소차수 관측기의 경우 상태 정보의 오차가 추정되는 상태 정보에 크게 영향을 미치나 구현 시 연산 수행 시간이 짧은 이점이 있다.<sup>11)</sup>

#### 3.1 전차수 관측기 설계

##### 3.1.1 상태 정의

전차수 관측기의 구성을 위해서 상태를 정의하고 상태 변수 모델을 구성하였다.<sup>12)</sup>

2장에서 모델링 한 전동 모터에 작용하는 토크  $\tau_m$  을 전동 모터에 작용하는 모든 외란 토크  $\tau_d$ 와 같으며, 이 외란 토크의 시간에 따른 변화는 인가전류  $i_a$ , 각속도  $\omega_m$ 와 같은 상태 변수의 변화에 비해 상대적

으로 느리기 때문에 식 (17), (18)과 같이 가정하였다.<sup>13,14)</sup>

$$\tau_d = \tau_m \quad (17)$$

$$\dot{\tau}_d = 0 \quad (18)$$

이를 이용하여 시스템 상태 변수 모델의 상태 정보  $\mathbf{x}(t)$ 에 전동 모터의 외란 토크  $\tau_d$ 를 포함하여 확장된 상태 정보  $\mathbf{x}'(t)$ 를 식 (19)과 같이 정의하였고 이에 따른 상태 변수 모델은 다음의 식 (20)~(23)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}'(t) = \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \tau_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d\mathbf{x}'(t)}{dt} = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{x}'(t) + \mathbf{B}' \cdot u(t) \quad (20)$$

$$y(t) = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{x}'(t) \quad (21)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} - \frac{K}{L_a} & 0 \\ \frac{K \cdot \eta}{J} - \frac{B}{J} - \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{C}' = [1 \ 0 \ 0] \quad (23)$$

##### 3.1.2 가관측성 파악

시스템의 관측 가능성을 파악하기 위해서 가관측 행렬  $\mathbf{L}_o$ 를 구하고 가관측성을 파악하였다. 식 (25)의 결과에 따라 이 시스템은 관측 가능하다.

$$\mathbf{L}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{C}' \\ \mathbf{C}'\mathbf{A}' \\ \mathbf{C}'\mathbf{A}'^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\det(\mathbf{L}_o) = -\frac{K^2}{L_a^3} \cdot \frac{1}{J} \neq 0 \quad (25)$$

##### 3.1.3 전차수 관측기 설계

관측기를 설계하는 방법으로서 시스템의 안정성 해석을 통하여 관측기를 설계하는 방법<sup>15)</sup>과 LQR (Linear Quadratic Regulator) 등의 최적제어 기법을 통하여 관측기를 설계하는 방법,<sup>16)</sup> 퍼지 알고리즘을

이용하여 관측기 이득을 결정하는 방법<sup>17)</sup> 등이 알려져 있다. 이 논문에서는 안정성과 목표 성능을 만족하는 관측기 설계를 위하여 극배치법을 이용하여 관측기를 설계하였다.

앞서 도출한 시스템의 상태 변수 모델을 이용하여 전차수 관측기를 구성한다. 구성된 전차수 관측기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)}{dt} = \mathbf{A}' \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}' \cdot u(t) - \mathbf{L}_f \{ \mathbf{C}' \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) - y(t) \} \quad (26)$$

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)}{dt} = (\mathbf{A}' - \mathbf{L}_f \mathbf{C}') \cdot \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}_f \cdot y(t) + \mathbf{B}' \cdot u(t) \quad (27)$$

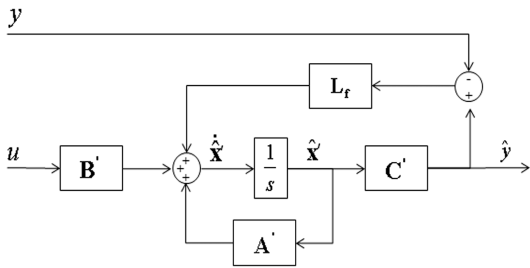


Fig. 3 Full-order observer

설계된 전차수 관측기의 오차는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A}' \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}' u(t) - \mathbf{A}' \mathbf{x}'(t) - \mathbf{B}' u(t) - \mathbf{L}_f \{ \mathbf{C}' \hat{\mathbf{x}}(t) - y(t) \} \quad (28)$$

이때 오차의 특성 방정식은 식 (29)과 같으며, 극배치기법을 활용하여 전차수 관측기 피드백 게인  $\mathbf{L}_f$  을 구한다.

$$\det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A}' - \mathbf{L}_f \mathbf{C}')) = 0 \quad (29)$$

극배치기법으로써 응답 특성의 파라미터인 감쇠율  $\zeta$ 와 주파수  $\omega_n$ 을 결정할 수 있다. 오차의 특성방정식은 3차 시스템 응답을 보이고 극점은 3개가 존재하며 Fig. 4와 같이 표현이 가능하다. 설계 목표를 다음과 같이 설정하고 설계 목표에 따라 설계 파라미터인 감쇠율  $\zeta$ 와 주파수  $\omega_n$ 을 결정하였다.

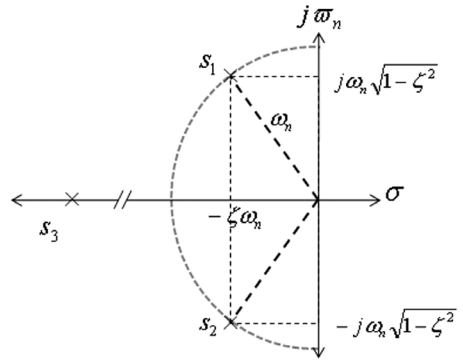


Fig. 4 Pole placement on s-plane

Table 3 Observer design parameters

Symbol	Value	Unit
목표 정착시간 $T_s$	< 0.2	sec
목표 백분율 오버슈트 P.O.	< 10	%
감쇠율 $\zeta$	0.6	-
주파수 $\omega_n$	38.373	rad/sec
설계 정착시간 $T_s$	$\cong 0.174$	sec
설계 백분율 오버슈트 P.O.	$\cong 9.48$	%
극점 S1	-23.0+30.7i	-
극점 S2	-23.0-30.7i	-
극점 S3	-1189.9	-

### 3.2 축소차수 관측기 설계

#### 3.2.1 상태 정의

축소차수 관측기의 구성을 위해서 전차수 관측기의 상태를 측정 가능한 상태  $\mathbf{x}_m(t)$ 과 측정 불가능한 상태  $\mathbf{x}_u(t)$ 로 정의하였다.

$$\mathbf{x}'(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) \\ \mathbf{x}_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \tau_d \end{bmatrix} \quad (30)$$

이에 따라 정의된 상태 변수 모델은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) \\ \mathbf{x}_u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{aa} & \mathbf{A}_{ab} \\ \mathbf{A}_{ba} & \mathbf{A}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) \\ \mathbf{x}_u(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ \mathbf{B}_b \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad (31)$$

$$y(t) = \mathbf{C}' \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) \\ \mathbf{x}_u(t) \end{bmatrix} \quad (32)$$

### 3.2.2 가관측성 파악

전차수 관측기의 방법과 동일한 방법으로 시스템의 가관측성을 파악하였다. 축소차수 관측기의 가관측 행렬  $L_o'$ 은 다음과 같다.

$$L_o' = \begin{bmatrix} A_{ob} \\ A_{ob}A_{bb} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\det(L_o') = \left(-\frac{K}{L_a}\right)^2 \cdot \frac{1}{J} \neq 0 \quad (34)$$

식 (34)의 결과에 따라 이 시스템은 관측 가능하다.

### 3.2.3 축소차수 관측기 설계

앞서 도출한 시스템의 상태 변수 모델을 이용하여 축소차수 관측기를 구성한다. 구성된 축소차수 관측기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

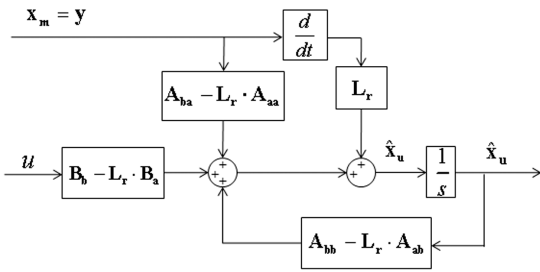


Fig. 5 Reduced-order observer

$$\frac{d\hat{x}_u}{dt} = A_{bb} \cdot \hat{x}_u + (A_{ba} \cdot x_m + B_b \cdot u) \quad (35)$$

$$\frac{dx_m}{dt} - A_{aa} \cdot x_m - B_a \cdot u = A_{ob} \cdot x_u \quad (36)$$

$$\frac{d\hat{x}_u}{dt} = (A_{bb} - L_r A_{ab}) \cdot \hat{x}_u + L_r \cdot \dot{x}_m + (A_{ba} - L_r A_{aa}) \cdot x_m + (B_b - L_r B_a) \cdot u \quad (37)$$

또한 축소차수 관측기 피드백 게인  $L_r$ 은 전차수 관측기와 같이 설계하였으며 전차수 관측기와 비교를 위하여 전차수 관측기의 두 개의 우세극점 S1, S2를 이용하여 피드백 게인  $L_r$ 을 구하였다.

## 4. 실험 및 검증

### 4.1 실험 환경

상태 관측기를 검증하고 구성된 상태 관측기의 비교를 위하여 테스트벤치에서 실험을 수행하였다. 테스트 벤치의 구성은 Fig. 6과 같다.

전동식 안전벨트 ECU는 크게 마이크로 컨트롤러, H-브리지 인버터로 구성된다. 마이크로 컨트롤러는 H-브리지 인버터의 전류 측정용 셉트저항 및 연산 증폭기 출력 값을 ADC 모듈을 통해 측정한다.

구현된 관측기는 측정된 전류 정보를 이용하여 전류, 각속도, 부하토크를 추정한다. 이 상태 추정값을 검증하기 위해 측정된 실제값과 비교하였다.

실제값을 측정하기 위해 전동식 안전벨트 ECU내부의 전류 측정 회로를 이용해 모터 인가 전류  $i_a$ 를 측정하였고, 전동 모터 각속도  $\omega_m$ 는 전동 모터 회전축에 엔코더를 설치하여 측정하였다. 또한, D-링 단에 로드셀을 장착하여 전동식 안전벨트 시스템의 리트랙터에 작용하는 장력  $F_m$ 을 측정하고 식 (6), (7), (8)을 이용하여 전동 모터에 작용하는 부하토크  $\tau_m$ 을 구하였다.

위의 테스트 벤치를 이용해 전동 모터에 8V크기의 계단 전압을 입력하여 전동식 안전벨트를 구동시켰고 그 결과를 확인하였다. Fig. 7은 전동식 안전벨트 구동 시 인가 전류  $i_a$ 의 측정치와 전차수 관측기를 사용한 추정치를 나타내었다.

또한 Fig. 8은 각속도  $\omega_m$ , 부하 토크  $\tau_m$ 의 측정치

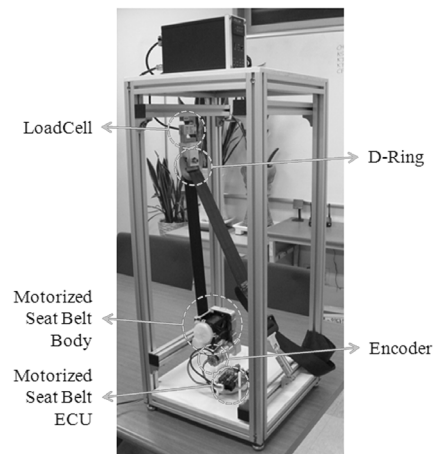


Fig. 6 Test bench

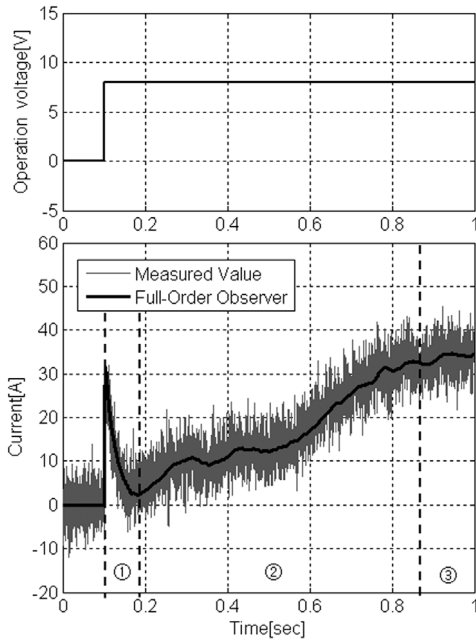


Fig. 7 Experiment result (Current)

와 설계된 상태 관측기의 상태 추정된 결과를 나타내며, (a)는 전상태 관측기의 결과를, (b)는 축소차수 관측기의 상태 추정 결과를 타나낸다.

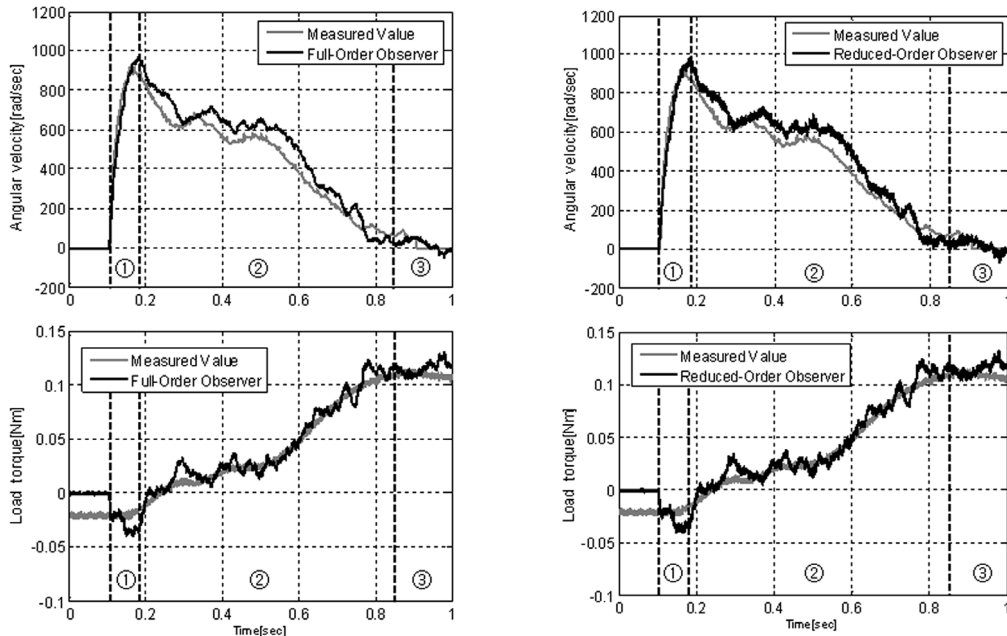


Fig. 8 Experiment result (Angular velocity, Load torque)

## 4.2 상태 관측기 성능 확인

### 4.2.1 인가 전류 $i_a$

전동식 안전벨트 구동은 ①, ②, ③ 세 구간으로 나눌 수 있다. ① 구간은 전동 모터가 회전하기 시작하는 초기 기동 구간이다. 전동 모터가 회전을 시작하는 순간 전류량이 급격히 증가하였다가 전동 모터의 회전 속도가 빨라짐에 따라 전류량이 감소하며 부하 토크가 증가하기 시작한다. 이 구간에서는 식 (7)에서 나타낸 것과 같이 리턴 스프링의 영향으로 인해서 부하 토크와 반대방향의 초기 토크가 존재하게 되며 이것은 Fig. 8에서 확인할 수 있다. ② 구간은 전동 모터가 회전함에 따라 토크가 증가하는 구간이며 벨트가 조여짐에 따라서 인가 전류량이 증가하고 각속도는 감소하게 된다.

③ 구간은 벨트가 완전히 조여지게 되어 발생하는 토크와 부하가 평형을 이루어 더 이상 모터가 회전하지 않는 상태이며 전류와 부하토크는 일정하게 유지된다.

Fig. 7에서 인가 전류  $i_a$ 의 측정치는 전동식 안전벨트 ECU의 전류 측정용 센트저항 및 연산 증폭기 출력 값을 ADC 모듈을 통해 측정된 값으로서, 회로에서 나타나는 전기적 노이즈 및 아날로그 신호를 측정하

는데 발생하는 샘플링 오차 등을 포함한다. 반면 이러한 전기적 노이즈 및 샘플링 오차를 Fig. 7에서 전차수 관측기를 사용한 결과와 같이 감소시킬 수 있다.

4.2.2 각속도  $\omega_m$ , 부하토크  $\tau_m$

Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 전차수 관측기와 축소차수 관측기의 상태 추정 결과를 나타낸다. 두 관측기의 각속도  $\omega_m$ 의 상태 추정 결과는 ②구간에서 ①, ③구간에 대비하여 상대적으로 오차가 크게 나타난다. 초기 기동구간인 ①구간과 힘의 평형을 이루는 ③구간에서 상태 추정 양상은 그 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 부하토크  $\tau_m$ 의 상태 추정 결과는 각속도  $\omega_m$ 의 상태 추정 결과와 마찬가지로 각 구간별 오차가 발생하지만 전반적으로 측정치와 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8의 실험 결과는 전차수 관측기와 축소차수 관측기를 이용하여 추정된 상태정보가 측정치와 유사하게 추정되는 것을 확인할 수 있으며 이 결과는 설계된 두 상태 관측기를 이용하여 추정한 상태 정보를 활용 가능하다는 것을 보여준다.

4.3 전차수, 축소차수 관측기 비교

전차수 관측기와 축소차수 관측기는 3장에서 언급한 것과 같이 상태 추정 시 노이즈의 영향과 연산 수행 시간에서 차이를 보인다. 전차수 관측기가 Fig. 7에서 나타나는 인가 전류  $i_a$ 의 추정치를 활용하여 상태를 추정하는 반면, 축소차수 관측기는 인가 전류  $i_a$ 의 추정치를 활용하여 상태를 추정하게 된다. 따라서 축소차수 관측기의 상태 추정 양상은 전차수 관측기와 유사하지만 인가 전류  $i_a$ 의 추정치에 포함되어 있는 노이즈 성분이 상태 추정 결과에 반영되게 되며 Fig. 9, Table 4와 같은 차이를 보이게 된다.

Table 4는 상태 추정기가 수행되는 0.1초 ~ 1초 사이의 상태 추정 결과의 실효치, 순시치 오차를 나타내며 0.6 ~ 0.7초 사이의 상태 추정 결과를 확대하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 결과와 같이 축소차수 관측기는 추정된 상태에 노이즈 성분이 포함되어 나타나게 된다. 이는 축소차수 관측기에서 사용하는 측정 가능한 상태 정보에 노이즈 성분이 증가하는 경우 추정하는

Table 4 Experiment result analysis

오차	전차수 관측기	축소차수 관측기	
실효치	$\omega_m$	79.71 rad/sec	80.31 rad/sec
	$\tau_m$	0.0060 Nm	0.0064 Nm
최대 순시치	$\omega_m$	84.62 rad/sec	92.30 rad/sec
	$\tau_m$	0.0127 Nm	0.0147 Nm
수행시간	480.0 uSec	288.8 uSec	

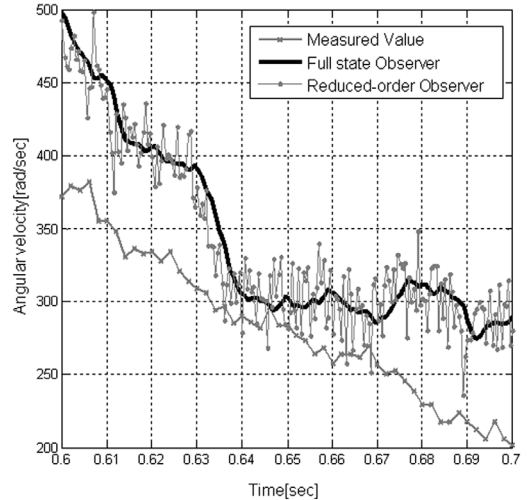


Fig. 9 Experiment result (0.6 ~ 0.7 sec)

상태 정보에도 노이즈 성분이 증가할 것이라는 결론을 얻을 수 있다.

상태 추정기가 추정하는 상태 개수가 많아지면 상태 추정 알고리즘의 수행시간은 길어진다. 축소차수 관측기의 경우 전차수 관측기에 비해 측정 가능한 상태에 대한 상태 추정을 하지 않으므로 측정 가능한 상태의 개수가 많아짐에 따라 상태 추정 알고리즘의 수행시간이 짧아진다. 이 실험에서 각 상태 추정기의 1회 수행 시간은 전차수 관측기의 경우 약 480.0 uSec, 축소차수 관측기의 경우 약 288.8 uSec로 축소차수 관측기의 수행시간이 전차수 관측기의 수행시간에 비해 짧게 나타남을 확인하였다.

5. 결론

이 논문에서는 센서의 장착이 불가능하거나 비용의 절감을 위해서 센서를 장착하지 않고 전동식 안전벨트 시스템 내부 상태, 특히 센서로 측정하기 힘



든 부하 토크를 추정할 수 있는 상태 관측기를 구성하였다. 상태 관측기는 전차수 상태 관측기와 축소차수 상태 관측기의 두 가지 형태로 구성하였으며, 전동식 안전벨트 ECU에 구현하고 테스트벤치에서 실험을 수행하여 검증하였다.

또한 전차수 관측기와 축소차수 관측기의 노이즈에 대한 응답특성과 관측기 수행 시간을 비교하였다. 측정 가능한 상태의 개수에 따라 전차수 관측기와 축소차수 관측기의 상태 추정 알고리즘 수행 시간에 차이가 발생하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 또한 노이즈가 커짐에 따라 두 관측기의 상태 추정 오차의 차이는 커질 것임을 예상할 수 있다. 이러한 결과를 활용하여 구현하는 시스템에서 측정 상태의 요구 정밀도, 관측기의 수행 시간에 따라 관측기를 선택할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2011~2012년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

## References

- 1) S. K. Min, J. K. Lee and B. S. Kim, "Development of Pre-crash Safety System Using Motorized Seat Belt," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.4, pp.1219-1224, 2004.
- 2) J. S. Park, T. O. Tak, I. H. Kim, M. G. Kuk, D. H. Kim, S. E. Sin, J. H. Kim, D. S. Lee and S. M. Kim, "Driving Mechanism Design of a Motorized Seatbelt Retractor," KSME Conference Proceedings, KSME, pp.2951-2956, 2006.
- 3) K. S. Lee and W. T. Lee, "Development of Motorized Seat Belt Control System Using Development-process Model," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.4, pp.1832-1837, 2008.
- 4) M. Aldeen and H. Trinh, "Reduced-order Linear Functional Observer for Linear Systems," Control Theory and Applications, IEE Proceedings, Vol.146, pp.399-405, 1999.
- 5) B. Bauer, Seat Belt System with Confort Control, United States Patent, No.5181739, 1993.
- 6) T. Maekawa, Seat Belt Retractor Employing Ultrasonic Motor, United States Patent, No. 5765774, 1998.
- 7) D. Caveney, "Cooperative Vehicular Safety Applications," Control Systems Magazine, IEEE Vol.30, pp.38-53, 2010.
- 8) D.-S. Choi, I.-H. Kim and Y.-I. Son, "Design of a Back-EMF Observer for Current Control of DC Motor," KIPE Conference Proceedings, KIPE, pp.294-295, 2010.
- 9) M. Kim, W. Moon, D. Bae, I. Park and I. Choi, "Development of a Dynamics Analysis Model of Mechanical System Driven by DC Motors," KSPE Conference Proceedings, KSPE, pp.497-500, 2002.
- 10) S. T. Jin, J. J. Kang and W. T. Lee, "Electronic Throttle Body Model Allowing for Non-linearity of DC Motor Driver," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.71-77, 2008.
- 11) D. G. Luenberger, "Observing the State of a Linear System," IEEE Transactions on Military Electronics, pp.74-80, 1964.
- 12) S. H. Lee, S. B. Lee and C. H. Park, "A Study on the Signal Processing Method for the Hall Sensorless Position Control of ETC System Using a BLDC Motor," Transactions of KSAE, Vol.16, No.5, pp.92-99, 2008.
- 13) K. T. Bae, C. C. Choi and W. T. Lee, "Design of Linear Disturbance State Estimator of Motorized Seat Belt System," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.1993-1998, 2010.
- 14) G. S. Buja, R. Menis and M. I. Valla, "Disturbance Torque Estimation in a Sensorless DC Drive," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.43, No.4, 1995.
- 15) J. C. Jung and K. S. Huh, "Robust Adaptive Observer Design for a Class of Nonlinear System via an Optimization Method," Transactions of KSME, Vol.30, No.10, pp.1249-1254, 2006.
- 16) S.-J. Kim, I.-H. Kim, G.-J. Jeong, S.-N. Ju, M.-S. Kim and Y.-I. Son, "Experiments for Current Estimation of a DC/DC Boost Converter Using Luenberger Observer," CICS Conference, pp.385-386, 2009.
- 17) G.-J. Ban and L.-K. Kim, "Speed Control of AC Servo Motor Using Neural Network," Transactions of KIEE, Vol.55D, No.4, pp.158-160, 2006.