

DC 모터 드라이버의 비선형성을 고려한 전자식 스로틀 바디 모델

진 성 태¹⁾ · 강 종 진²⁾ · 이 우 택^{*3)}

창원대학교 제어계측공학과 대학원¹⁾ · 델파이파워트레인(주) 기술부²⁾ · 창원대학교 제어계측공학과³⁾

Electronic Throttle Body Model Allowing for Non-linearity of DC Motor Driver

Sungtae Jin¹⁾ · Jongjin Kang²⁾ · Wootaik Lee^{*3)}

¹⁾Graduate school, Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea

²⁾Department of Engineering, Delphi Powertrain Systems Korea Ltd., 851-2 Oe-dong, Changwon-si, Gyeongnam 641-020, Korea

³⁾Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea
(Received 19 April 2007 / Accepted 14 August 2007)

Abstract : This paper proposes an Electronic Throttle Body (ETB) model considering a non-linearity of DC motor driver which is integrated with a H-bridge and a gate driver. A propagation delay and reverse recovery time of switching components cause non-linear characteristic of DC motor driver. This non-linearity affects not only the armature voltage of DC motor, but also entire behaviour and parameters of ETB. In order to analyze the behavior of ETB more accurately, this non-linear effect of DC motor driver is modeled. The developed ETB model is validated by use of the step response and ramp response experiments, and it shows relatively accurate results compared with linear DC motor driver model.

Key words : Electronic throttle body(ETB : 전자식 스로틀 바디), Static friction(정지마찰력), Coulomb friction(운동 마찰력), Return spring(리턴 스프링), Non-linearity(비선형성)

Nomenclature

| | |
|---|------------------------------------|
| R_a : armature resistance | J_m : rotation inertia |
| e_a : armature voltage | T_m : motor torque |
| e_v : back electro magnetic force (e.m.f) | T_{sp} : return spring torque |
| i_a : armature current | T_{sf} : static friction torque |
| K_t : torque constant | T_{cf} : coulomb friction torque |
| K_v : back emf constant | K_{sp} : spring constant |
| θ_m : angular position of shaft | V_c : supply voltage of DC motor |
| ω_m : angular velocity of shaft | V_d : voltage drop |

1. 서론

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

최근 강화되어진 배기가스 규제에 대응하고 운

전자에게 좋은 응답특성과 운전 용이성을 제공하기 위하여 공기와 연료의 정밀한 제어가 요구된다. 전자식 스로틀 시스템(ETS)은 자동차 전장시스템의 구성요소 중 하나이며 엔진 실린더에 흡입되는 공기량을 조절하는 장치이다. ETS는 크게 제어 알고리즘을 수행하는 전자식 스로틀 제어기(ETC)와 스로틀의 밸브를 열고 닫는 전자식 스로틀 바디(ETB)로 구성되어 있다. ETC는 효과적인 위치 제어 알고리즘을 마이크로프로세서에 내장함으로써 정밀한 공기량의 조절을 가능하게 할 뿐만 아니라 여러 가지 모드에 따른 공기량을 조절함으로써 연비를 절감시킬 수 있다. 효과적인 ETC를 개발하기 위해서는 시스템의 특성을 잘 반영할 수 있는 정밀한 ETB 모델이 필요하다. 그리고 모델기반의 설계를 통해 효과적이고 좋은 성능의 ETC를 개발할 수 있다.^{1,2)}

ETB는 DC 모터 드라이버, DC 모터, 기구부, 위치 센서부로 구성되며 각 구성요소들은 스로틀의 기구적인 동작 제한, 정지 마찰력, 운동 마찰력, 리턴 스프링의 효과와 같은 비선형 특성을 가진다. 이러한 비선형 특성은 ETB를 정확하게 모델링하기 위해서 반드시 고려되어야 하며 이전의 논문에서 이미 실험적으로 검증되었다.³⁾ 본 논문에서는 이미 언급된 요소들 외에 비선형적인 입출력 특성을 가지는 DC 모터 드라이버를 포함한다. DC 모터 드라이버의 비선형 특성은 PWM신호의 듀티 입출력 실험을 통해 검증하였으며 정확한 ETB의 모델링을 위해서는 이러한 현상을 보상할 수 있는 모델링이 필요하다.

이 논문에서는 DC 모터 드라이버의 비선형 특성을 반영한 정밀한 ETB 모델링을 수행하였으며 실험데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교하여 ETB 모델을 검증하였다.

2. ETB의 수학적 모델

Fig. 1은 ETS의 개략도이며 ETB는 ETC의 출력신호인 PWM신호를 입력받아 DC 모터를 구동한다. 실제 DC 모터를 구동하기 위해서는 DC 모터드라이버를 사용하여 PWM 신호를 증폭시켜야 한다. 따라서 실제 ETC의 PWM신호를 평균전압으로 환산하여 ETB의 응답특성 실험을 수행하였다.

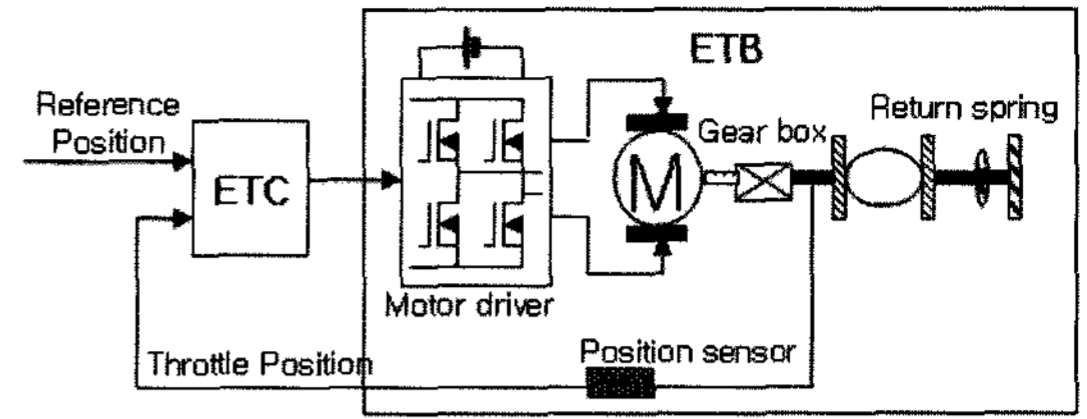


Fig. 1 The schematic of ETS

2.1 DC 모터 드라이버와 DC 모터

DC 모터 드라이버는 양방향 구동이 가능하도록 H-bridge로 구성되었으며 ETC의 PWM 신호에 따라 스위칭 소자를 구동할 수 있도록 게이트 드라이버를 포함한다. DC 모터에 인가되는 DC 모터 드라이버의 출력 전압(e_a)은 PWM 신호의 듀티를 평균전압으로 환산하여 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$e_a = D \times V_c \quad (1)$$

여기서 D 는 ETC의 출력신호인 PWM의 duty ratio이며 -100% ~ 100%까지의 범위를 가진다. V_c 는 DC 모터에 인가되는 전원 전압으로 12volt이다.

DC 모터는 Kirchhoff 전압 법칙으로부터, 식 (2)와 같이 표현되며 이를 통해 얻어진 아마추어 전류(i_a)를 이용하여 식 (3)의 모터 토크(T_m)를 얻어낸다.

$$e_a = R_a i_a + L_a \dot{i}_a - e_v \quad (e_v = K_v \omega) \quad (2)$$

$$T_m = K_t i_a \quad (3)$$

2.2 기구부

기구부는 ETB 모델의 가장 큰 비중을 차지하는 부분으로서 마찰력 및 리턴 스프링 토크와 같은 ETB의 비선형 특성을 반영하는 부분이다.

리턴 스프링에 의한 토크는 일정한 크기를 가지는 부하토크가 아니라 스로틀 밸브의 운동 방향에 따라 ETB에 작용하는 영향이 달라진다. 스로틀 밸브를 닫는 방향으로의 운동을 방해하는 방향으로, 스로틀 밸브를 여는 방향으로의 운동을 도와주는 방향으로 작용하며 그 크기는 리턴 스프링의 회전 각도에 비례하여 달라진다. 마찰력은 스로틀 밸브의 운동을 방해하는 방향으로 항상 작용하며 ETB의 모델링을 어렵게 하는 요소이다.^{4,5)} 또한 기구적

인 백래시 현상은 스톱 밸브의 운동 방향이 바뀌는 때 순간 발생하지만 ETB에 항상 작용하는 리턴 스프링의 효과에 의해 그 영향을 무시하였다.

2.2.1 리턴 스프링

리턴 스프링은 ETS의 전자 시스템에 문제가 발생하여 DC 모터가 구동되지 않을 때 ETS를 안전하게 보호하기 위하여 스톱 밸브를 공회전 위치로 복귀시키는 역할을 한다. 이로 인해 일반적인 스프링 모델과는 다르게 미리 기구적으로 설정된 위치로 복귀시키는 pre-tension 토크 T_{sp0} 가 존재하며 스프링 토크는 식 (4)와 같이 정의된다.⁶⁾

$$T_{sp} = k_{sp}\theta + T_{sp0} \quad (4)$$

2.2.2 마찰력

마찰력은 스톱 밸브의 움직임을 방해하는 방향으로 작용하며 일반적으로 정지 마찰력, 운동 마찰력, 점성 마찰력 등이 존재한다. 정지 마찰력의 경우 기구적으로 스톱 밸브의 위치가 포화된 비선형 구간에서 작용하며 실험적으로 측정하기가 어렵다. 따라서 운동 마찰력과 동일한 값을 가지도록 정지 마찰력 모델을 정의하며 상대적으로 영향이 적은 점성 마찰력은 무시하였다.³⁾ 그러므로 ETB에 작용하는 전체 마찰력은 식 (5)와 같다.

$$T_f = \begin{cases} T_m & \text{if } \omega = 0 \text{ and } |T_m| < T_{sf} \\ T_{sf} \text{sgn}(\omega) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, sgn 은 부호를 결정하는 함수이다.⁶⁾

2.3 토크 방정식

ETB에 작용하는 전체 토크는 앞의 수식들을 이용하여 식 (6)과 같이 유도할 수 있으며 이로부터 각 속도(ω)를 계산 하였다. 부하 토크(T_L)는 스톱 밸브를 통해 엔진으로 유입되는 공기의 유량이나 압력에 의해 발생하며 ETB의 모델링과정에서는 직접적인 영향이 없으므로 무시하였다.

$$T_{th} = T_m - T_f - T_{sp} - T_L \quad (6)$$

$$\omega_m = \frac{T_{th}}{J_m}$$

식 (6)을 통해 계산된 DC 모터의 각속도는 모터의 회전축과 스톱 밸브 사이에 연결된 기어를 통해 스톱

밸브의 각속도($\dot{\theta}$)를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\theta} = \frac{\omega_m}{g_r} \quad (7)$$

여기서 기어비(g_r)는 DC모터와 스톱 밸브 간에 전달되는 토크 비로써 36.3이다.

3. 비선형 DC 모터 드라이버의 모델링

DC 모터 드라이버는 ETC로부터 인가된 PWM의 듀티 신호를 증폭하여 DC 모터를 구동 할 수 있는 아마추어 전압을 발생시킨다. 이 논문에서 적용한 DC 모터 드라이버는 4개의 스위칭 소자로 구성된 H-bridge회로와 이를 구동하기 위한 게이트 회로를 포함하며 최대 10Khz의 PWM 주파수에서 구동하도록 구성 하였다.

스위칭 구동 방식의 DC 모터 드라이버는 최대 PWM 주파수에서 구동 할 경우 DC 모터에 인가되는 아마추어 전류의 리플을 개선하여 토크 리플을 감소시키지만 비선형적인 입출력 특성을 발생 시킨다. DC 모터 드라이버의 특성은 임의의 PWM신호의 듀티를 인가하여 발생하는 DC 모터 드라이버의 출력을 통해 정의할 수 있으며 Fig. 2는 DC 모터를 DC 모터 드라이버에 연결하여 무부하 상태로 실험한 결과이다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 15%의 듀티를 인가한 경우 DC 모터 드라이버의 출력은 1%로 거의 발생되지 않으며 80%의 듀티를 인가한 경우 68%의 출력

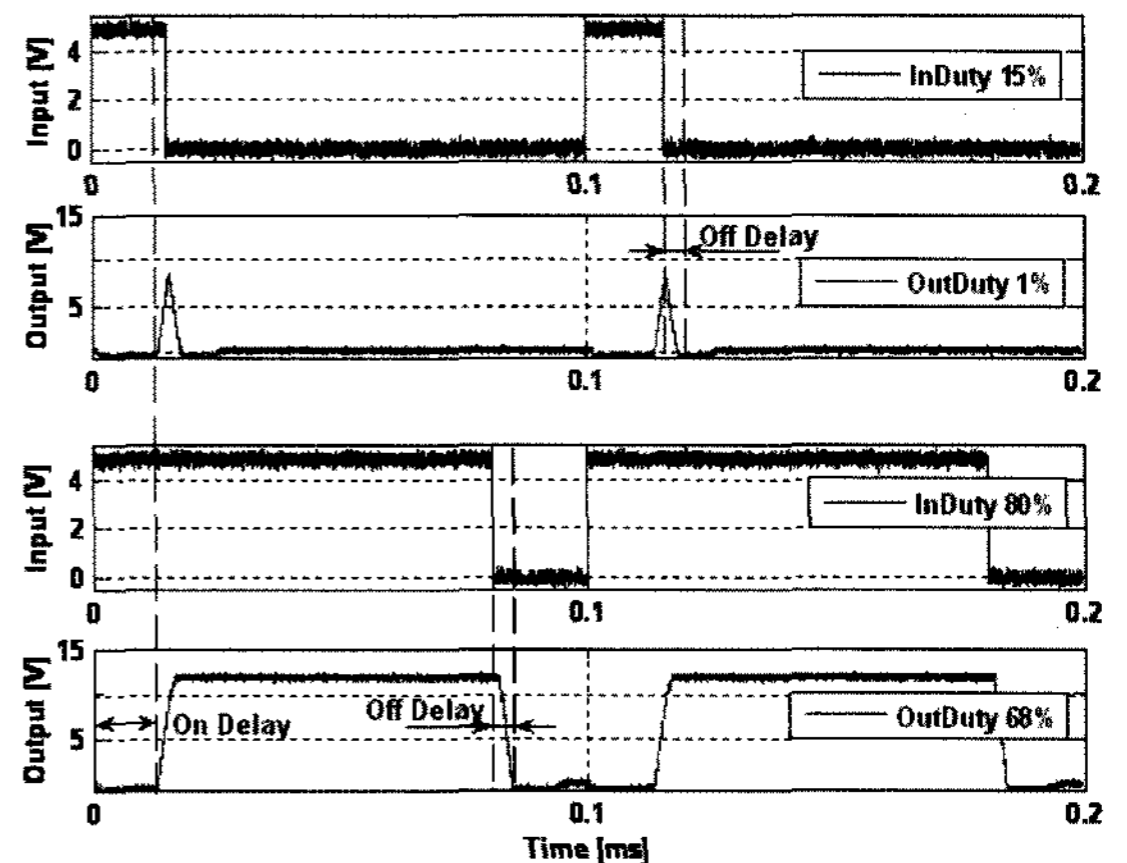


Fig. 2 Results of input-output experiment on DC motor driver

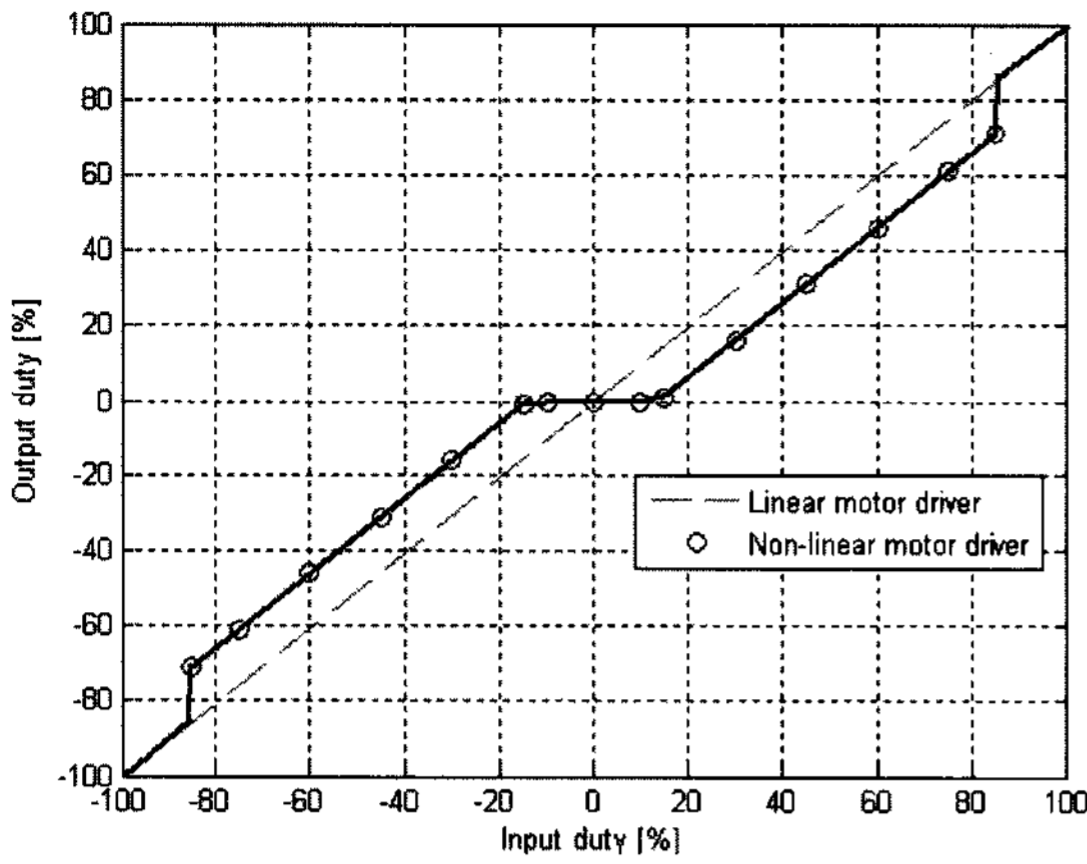


Fig. 3 Non-linearity of DC motor driver

을 발생 시킨다. 이러한 현상은 게이트 회로의 전파 지연에 의한 On Delay time(14us)과 스위칭 소자의 역방향회복시간에 의한 Off Delay time(4.4us)에 의해 발생하며 그 영향은 DC 모터 드라이버의 입력전압에 대한 출력전압의 강하로 나타난다.

Fig. 3은 DC 모터 드라이버에 입력되는 PWM 신호의 전 듀티 구간(-100%~100%)에 대한 DC 모터 드라이버의 출력 특성을 나타낸다. 입력된 PWM 신호의 듀티 0~84%의 구간에서 비선형적인 입출력 특성을 발생 시키며 그 크기는 0~14%의 듀티 구간에서는 0%의 출력을, 듀티 15~84% 구간에서는 1~70%의 듀티를 출력함을 확인할 수 있다.

3.1 DC 모터 드라이버의 비선형 효과

DC 모터 드라이버의 비선형적인 입출력 특성은 Fig. 3에서 실험적으로 정의하였으며 이 결과를 통해 발생하는 전압 강하의 크기(V_d)는 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$V_d = \begin{cases} V_c & D < 15\% \\ V_c \times (t_d/t_s) & 15\% \leq D < 85\% \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

여기서 t_d 및 t_s 는 DC 모터 드라이버의 지연시간 및 PWM 스위칭 주기를 나타낸다.

DC 모터 드라이버의 비선형적인 출력은 DC 모터에 인가되는 아마추어 전압을 감소시킨다. 따라서 아마추어 전압(e_a)은 DC 모터 드라이버의 전압 강하(V_d)를 고려하여 식 (9)와 같이 다시 정의 된다.

$$e_a = (D \times V_c) - V_d \quad (9)$$

3.2 비선형 DC 모터 드라이버의 구현

DC 모터 드라이버 모델은 ETC의 출력 신호인 PWM 신호를 입력받아 DC 모터에 인가되는 아마추어 전압을 생성한다. 여기서는 3.1절의 식 (8)에서 정의한 DC 모터 드라이버의 전압 강하를 구현 하였으며 식 (9)를 이용하여 Fig. 4와 같이 모델링 되었다.

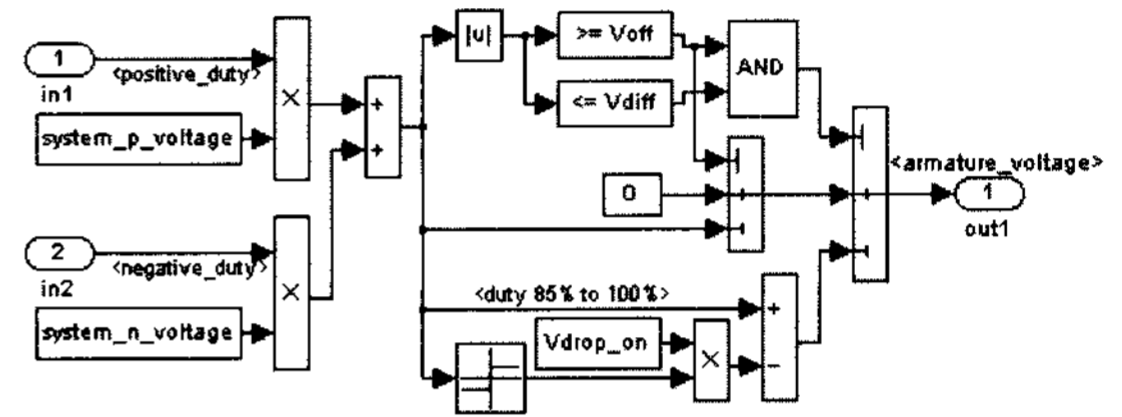


Fig. 4 DC motor driver model

4. 파라미터 획득

ETB모델의 파라미터는 ETB에 미치는 영향을 고려하여 전기적인 파라미터와 기계적인 파라미터로 분류된다.

4.1 전기적인 파라미터

전기적인 파라미터에는 모터 저항(R_a), 모터 인덕턴스(L_a), 역기전력 상수(K_v)가 있으며 사양서와 계측기를 통해 획득하였다.

4.2 기계적인 파라미터

기계적인 파라미터에는 기어 비(g_r), 모터 관성(J_m), 토크 상수(K_t), 정지 마찰력(T_{sf}), 운동 마찰력(T_{cf}), 리턴 스프링 토크(T_{sp})가 있다. 이들 중 마찰력과 리턴 스프링 토크를 제외한 나머지 파라미터는 전기적인 파라미터와 마찬가지로 사양서와 계측기를 통해 획득하였다.

마찰력과 리턴 스프링 토크는 개루프 램프 응답 실험을 통해 측정 하였으며 그 크기는 전압의 형태로 얻어진다. Fig. 5는 DC 모터 드라이버에 인가되는 전압에 대한 스톱 밸브의 운동 범위를 나타내며 히스테리시스 곡선의 특성을 가진다. 운동 마찰

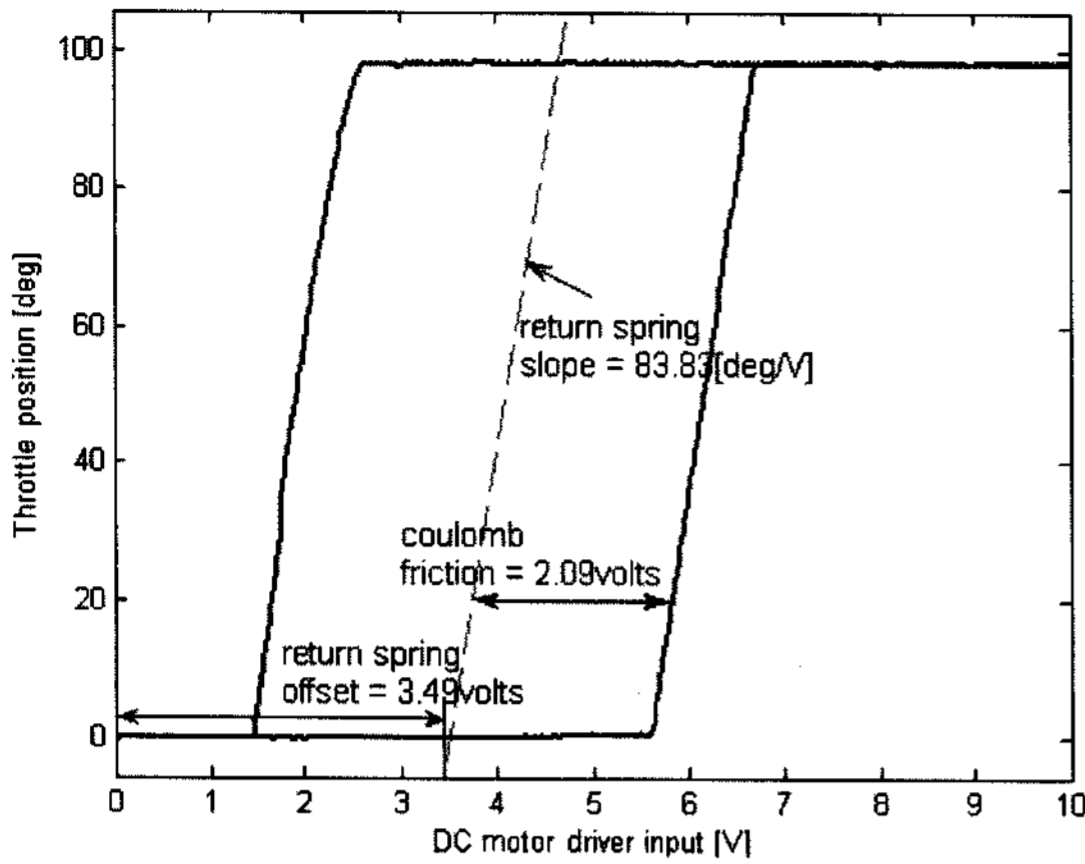


Fig. 5 Ramp response in open-loop experiment

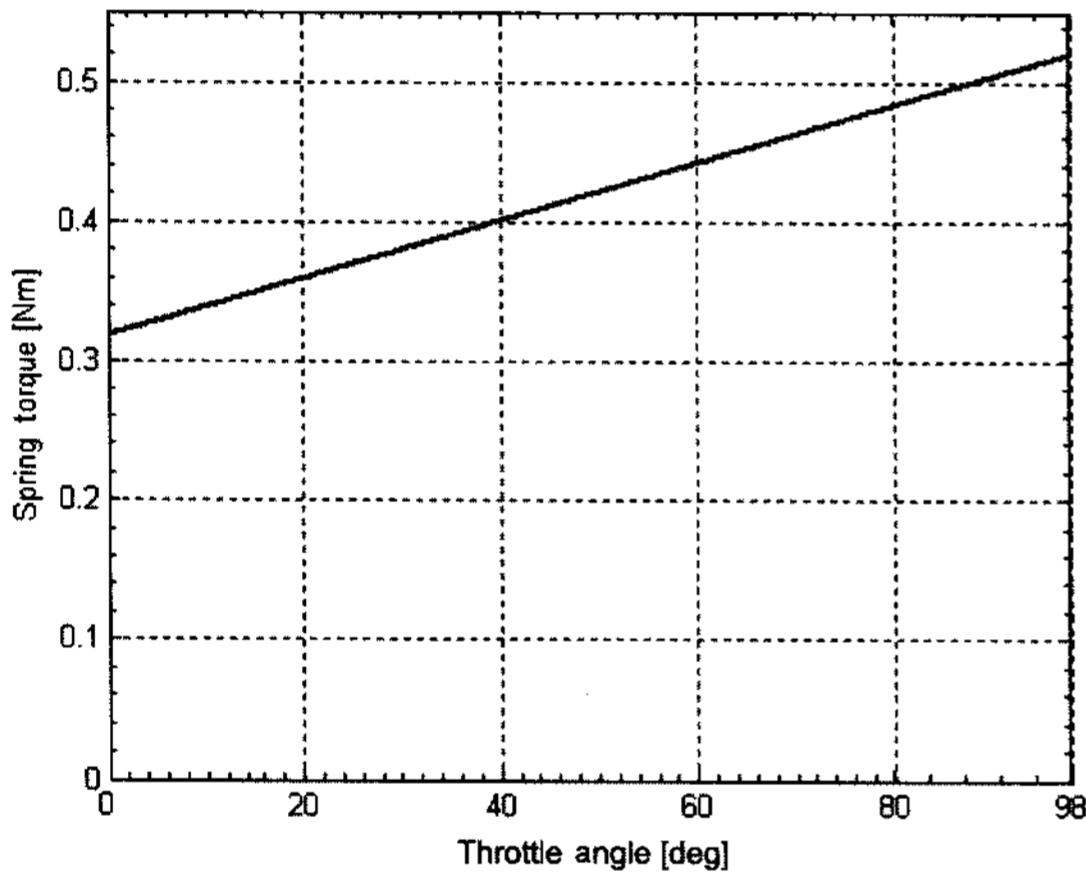


Fig. 6 Return spring torque

력은 스톱들이 회전하는 동안 발생하는 토크로서 히스테리시스 곡선의 폭을 측정하여 획득하였다.³⁾ 또한 인가되는 DC 모터드라이버의 전압에서 마찰력을 제외한 나머지 토크 성분은 리턴스프링의 효과에 의한 토크로써 히스테리시스 곡선의 중심선의 크기로 나타나며 이로부터 pre-tension 토크 및 리턴스프링의 기울기를 획득하였다.³⁾

3.1절의 식 (8)에서 정의한 DC 모터 드라이버의 입출력 특성은 식 (9)와 같이 DC 모터에 인가되는 아마추어 전압을 감소시키며 그 크기만큼 리턴스프링토크의 효과로 반영된다. 이렇게 획득한 리턴스프링의 파라미터는 DC 모터 드라이버의 전압강하 성분을 포함하므로 정확한 파라미터라 할 수 없다.

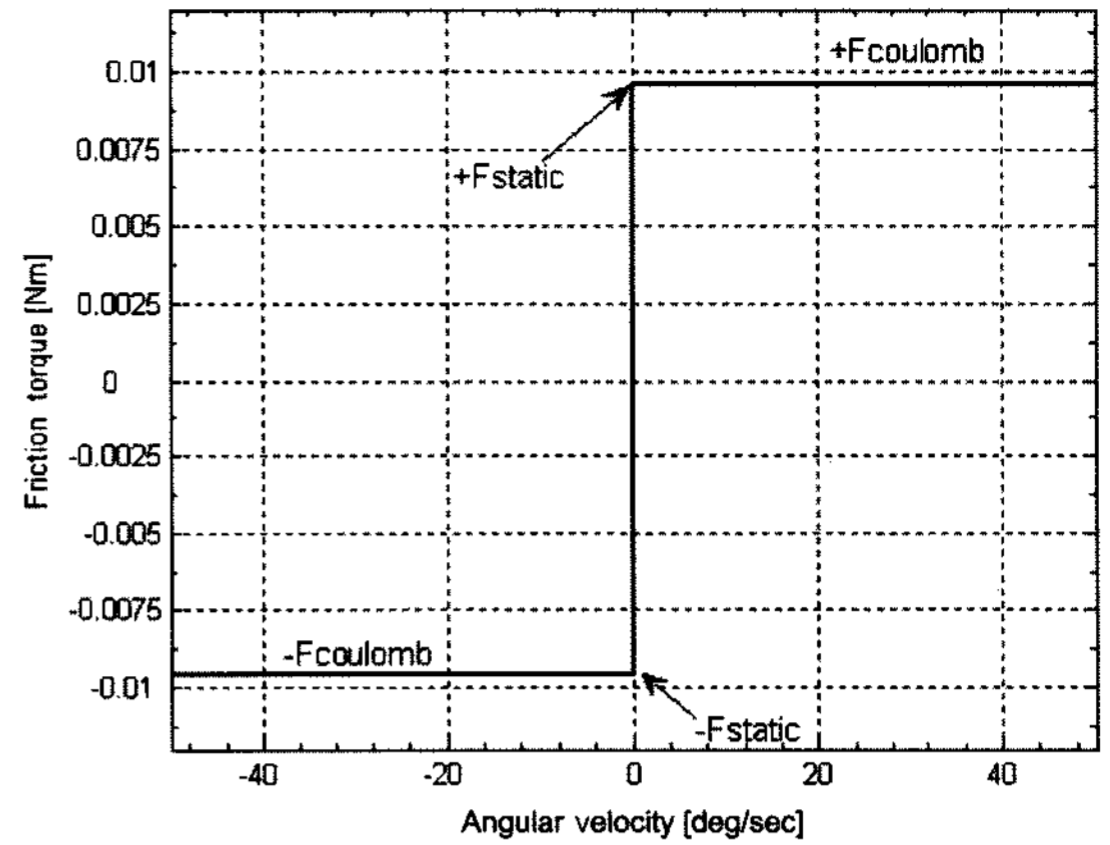


Fig. 7 Friction torque ($T_{cf} = T_{sf}$)

따라서 이 논문에서는 Fig. 5의 실험을 통해 획득한 리턴 스프링 토크로부터 DC 모터 드라이버의 전압강하만큼 보상하여 Fig. 6과 같은 리턴 스프링 토크를 획득하였다.

Fig. 5와 같이 개루프 램프 실험을 통해 정지 마찰력과 운동 마찰력을 획득하였으며 Fig. 7은 ETB 모델의 전체 마찰력 특성을 보여준다.

5. ETB모델의 검증

DC 모터 드라이버의 비선형 특성을 보정한 ETB 모델의 검증을 위하여 실제 ETB 시스템의 실험 데이터와 ETB 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 실험은 크게 DC 모터 드라이버를 포함하는 ETB와 스텝 및 램프 신호를 생성하는 알고리즘이 포함된 제어기로 구성된다. 시뮬레이션은 데스크탑 환경에서 시뮬링크 툴을 이용하여 선형 특성을 가지는 기존의 DC 모터 드라이버 모델과 이 논문에서 제안하는 비선형 특성을 보정한 DC 모터 드라이버 모델을 ETB 모델에 각각 적용하여 실험과 동일한 파라미터 및 입력조건에서 시뮬레이션되었다.

5.1 개루프 램프 응답 실험

Fig. 8은 개루프 램프 응답 실험에 대한 결과를 보여주며 ETB 모델의 마찰력 및 리턴스프링의 모델이 얼마나 정확히 모델링 되었는지 검증할 수 있다.

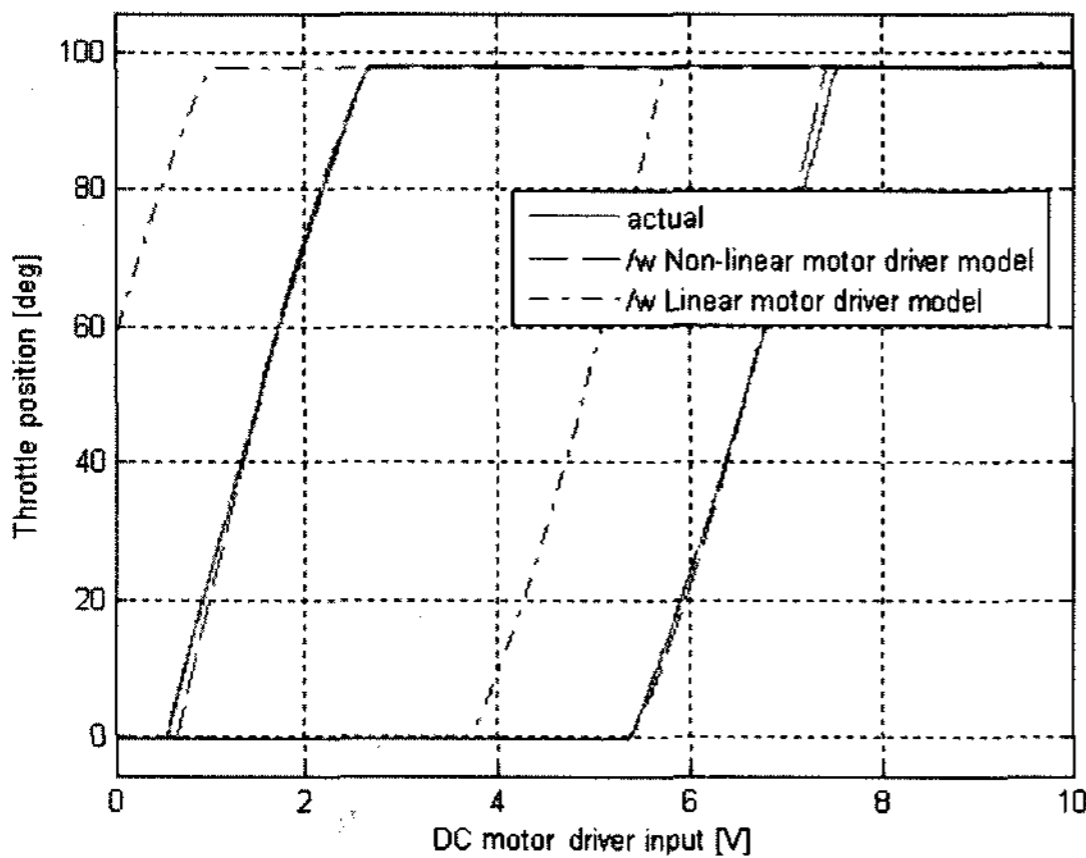


Fig. 8 Ramp response on open-loop simulation

Fig. 5에서 DC 모터 드라이버의 비선형적인 전압 강하를 보상하여 리턴 스프링 토크를 획득하였다. 따라서 기존의 선형 DC 모터 드라이버 모델을 적용하여 시뮬레이션 한 경우 그 전압 강하만큼의 차이가 스로틀 밸브의 응답 특성에 나타난다.

비선형 DC 모터 드라이버 모델은 3.1절의 식 (9)와 같이 입력되는 PWM신호의 듀티에 대한 비선형적인 전압 강하 현상이 모델링 되었다. 따라서 Fig. 8과 같이 실험데이터와 거의 일치하는 응답 특성을 가지며 이로부터 리턴 스프링 및 마찰력 모델을 실험데이터와 비교하여 검증하였다.

5.2 개루프 스텝 응답 실험

ETB의 모델을 검증하기 위하여 ETB에 80% 듀티의 스텝입력을 인가하여 ETB의 특성을 확인하였다. 실제 100% 듀티를 인가하면 ETB 기구부의 파손이 발생할 수도 있기 때문에 기구부에 무리를 주지 않는 80%의 듀티를 인가하였다.

Fig. 9는 ETB 모델과 개루프 스텝 응답 실험의 결과를 보여준다. 기존의 선형 DC 모터 드라이버 모델을 적용한 경우 실험데이터와 3.1절의 식 (8)에서 정의한 전압 강하 만큼의 응답 특성의 차이를 보인다. 하지만 비선형 DC 모터 드라이버 모델을 적용한 ETB 모델의 경우 스로틀의 위치가 Top에 도달하는 시간이 실험데이터와 약간의 차이는 있지만 ETB의 응답 특성을 검증하기에는 만족할 수 있는 결과이다.

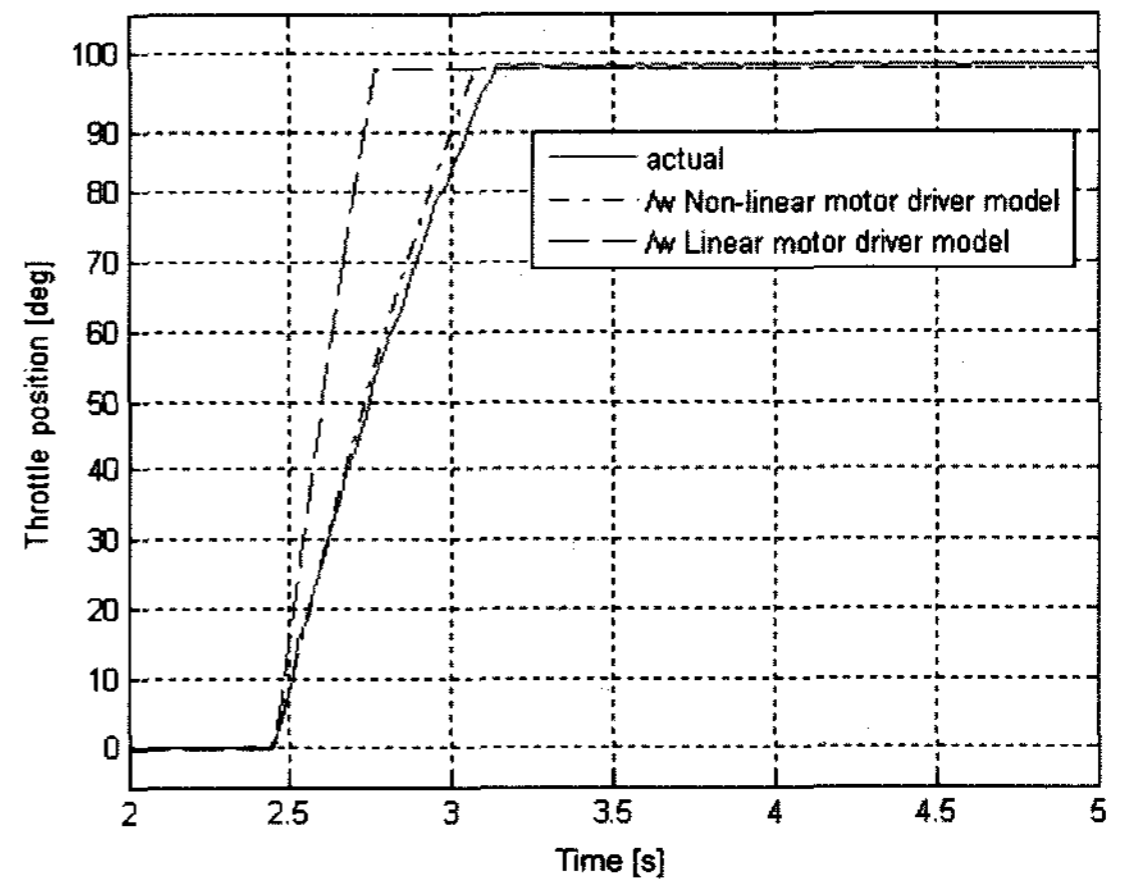


Fig. 9 Step response on open-loop simulation

6. 결론

이 논문에서는 DC 모터 드라이버의 비선형적인 전압강하를 고려하여 정밀한 ETB 모델링을 수행하고 실험을 통해 검증하였다.

DC 모터드라이버는 스위칭 과정에서 여러 지연 요소에 의한 비선형적인 특성을 가진다. 이 논문에서는 정밀한 ETB 모델링을 위하여 비선형 DC 모터 드라이버를 모델링하고 파라미터를 획득하는 과정에서 이러한 특성의 차이를 보상하여 ETB 모델에 반영 하였다.

ETB 모델은 비선형 DC 모터 드라이버를 적용한 모델과 기존의 선형 DC 모터 드라이버를 적용한 모델로 구분하여 램프 및 스텝 응답 시뮬레이션을 통해 실제 실험 데이터와 비교 검증하였다.

후 기

이 논문은 2007년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J.-J. Kang and W.-T. Lee, "A Case Study to Design Electronic Throttle Controller using Rapid Control Prototyping," Spring Conference Proceedings, Vol.III, KSAE, pp.1516-1521, 2006.
- 2) W. T. Lee and J. J. Kang, "Development of A

- Simple Control Algorithm for Swirl Motor Controller,” Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.3, pp.369-375, 2006.
- 3) R. Pursifull and H. Keener, “Motorized Throttle Positioning Simulation Model,” SAE 2003-01-0222, 2003.
 - 4) L. Eriksson and L. Nielsen, “Non-Linear Model-Based Throttle Control,” SAE 2000-01-0261, 2000.
 - 5) J. B. Song, H. J. Kim and D. I. Min, “Control System of Throttle Actuator for TCS,” Transactions of KSAE, Vol.5, No.3, pp.191-201, 1997.
 - 6) S. Al-Assadi, J. Breitingger and M. Traver, “Electronic Throttle Simulation Using Non-linear Hammerstein Model,” SAE 2006-01-0112, 2006.