확장 칼만 필터를 이용한 자동변속기 차량의 구동토크 관측기 설계

한경석¹⁾·최세범²⁾

한국과학기술원 기계공학과1),2)

Design of observers for the shaft torque of automatic transmission system using extended kalman filter

Kyoungseok Han¹⁾ · Seibum Choi²⁾

¹⁾²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, daejeon 305-701, Republic of Korea

Abstract : Ride quality of vehicles is very closely concerned with smooth clutch control and it has been improved by accurate estimation of clutch torque or output shaft torque. Unfortunately, Torque sensors or high precision encoders for rotating shafts are seldom used in production cars because of their costs, maintenances and installations. So, it is required to estimate drive shaft torque with accessible values such as wheel rotate speed, engine rotate speed. In this paper, Extended Kalman Filter(EKF) is used to estimate shaft torque because of applicable to nonlinear systems and characteristics of its robustness to model uncertainties. Well known driveline model was used to construct observers and then observers are validated with Carsim and Matlab/Simulink which is well known as a vehicle dynamic simulator.

Key words : Extended kalman filter(확장 칼만 필터), Drive shaft torque(구동 토크), Torque observer(토크 관측기), Driveline model(구동계 모델), Wheel dynamics(휠 동역학)

| | Nomenclature | m_{fi} | commanded fuel, kg |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| α | normalized throttle angle, 0~1 | | |
| $T_{e,p,t}$ | engine/pump/turbine torque, Nm | r_{eff} | effective radius of wheel, 0.33m |
| C(q) | capacity factor | K _{rr} | rolling resistance coefficient, 0.004 |
| $T_r(q)$ | torque ratio | <i>i</i> , '' | current transmission gear ratio, |
| T_s | sampling time, 0.001sec | l | (3.538/2.06/1.404/1/0713/.582) |
| m_a | intake manifold air mass, kg | i_f | final gear ratio, 4.1 |
| | | J_{cr} | carrier inertia, kgm2 |
| * 한경석, E-mail: hks8804@kaist.ac.kr. | | | (0.037/0.037/0.042/0.04/0.04/0.04) |

 M_{ν} vehicle mass, 1370kg

- ρ air density, 1.206kg/m3
- C_d aerodynamics friction coeffcient, 0.28
- A_F vehicle frontal area, 2.51m2
- *K* spring stiffness, 80Nm/deg.
- D torsional damping, 0.8Nms/deg

1. 서 론

양산 자동차에서 가장 많이 사용 되는 자동변속 기는 변속시 조작을 운전자대신에 자동변속기 컨 트롤 장치(transmission control unit)가 조작하 는 편의성을 지니는 대신에, 동력 전달과정에서의 에너지 손실이 수동 변속기보다 더 많다.

유체를 동력 전달 매개체로 사용하는 토크컨버 터가 이러한 에너지 손실의 주원인이 되는데, 비 선형성이 강해서 물리적/수학적으로 정의된 모델 이 아직 까지 증명 된 바 없다. 따라서 실험을 통 해서 구해낸 맵으로부터 입력/출력 토크 간의 관 계를 도출해 낸다.¹⁾ 최초로 토크 컨버터로 동력 을 전달하는 엔진출력 또한 비선형성을 띄고 있어 서 실험으로부터 얻어낸 관계식으로부터 맵을 얻 어 내서 사용한다.

본 논문에서는 "엔진-토크컨버터-변속기-디퍼렌 셜-휠"로 구성되어 있는 자동변속기 장착 구동계 모델²⁾ (driveline model)을 기반으로 센서로부터 직접적으로 측정 불가능한 구동토크(drive shaft torque)에 대한 관측기를 설계한다.

시스템의 비선형성에 대응하기 위해서 Sliding mode observer를 이용하여 구동 출력 토크 및 토 크컨버터 출력 토크를 추정한 연구가 진행된 바 있다.^{3),4)}

또한 모델에 포함된 비선형성을 특정구간에서 선형화 하여서 선형시스템에 대한 Luenberger observer나 Kalman filter를 적용한 연구도 진행 되었다. ^{5),6)}

기어 변속시에는 능동적 엔진제어를 통해서 출력 토크를 저하시키고(torque phase), 다시 출력을 상승 시키는(inertia phase)가 존재 한다.⁷⁾

이러한 과도구간에서의 클러치 제어가 중요한데, 맵을 나타냈다. 관측기 설계로부터 정확한 구동토크 추정이 가능 하다면 구동토크 기반 클러치 제어를 통해서 부드 러운 기어 변속, 클러치 내구도 향상, 승차감 향 상, 연비 향상 효과를 볼 수 있다.

만약 적절한 클러치 제어가 이루어지지 않는다면 불필요한 진동이 구동계에 전달되고, 클러치 슬립, 마모 및 내구성에 문제를 일으키게 된다.

즉, 최적의 클러치 제어를 위한 기반으로써 구동 토크를 하나의 지표로 활용 할 수 있다.

본 논문에서는 모델의 비선형성에 대응할 수 있 는 확장형 칼만 필터(extended kalman filter)를 사용하였고, 공정 잡음 및 측정 잡음의 값을 튜닝 하여 측정 정보 및 모델 불확실성에 대응하도록 관 측기를 설계 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관 측기 설계에 사용되는 파워트레인 모델 및 파라미 터 들간의 관계에 대해서 서술하고, 3장에서는 확 장형 칼만필터 이론에 대해서 간단히 정리한 후에, 4장에서 이를 적용하여서 구동토크를 추정한다. 5 장에서는 설계된 알고리즘을 Carsim 및 Simlunk를 통해서 검증하고, 6장에서 결과 해석 및 한계점에 대해서 논의를 한다.

2. 구동계 모델

구동계 모델을 8개의 state를 사용한 연구가 진 행된 바 있고²⁾, 또한 클러치 체결 분리를 위한 모 델에 대한 연구⁹⁾또한 진행 되었다. 본 논문에서는 그 중에서 구동 토크추정에 필요한 state들 간의 관계에 대해서 기술한다.

2.1 **엔진**

엔진은 아래 식(1)과 같이 throttle angle과 rpm 간의 비선형 관계로부터 출력토크를 계산해낼 수 있다.

$$T_e = f(a, \omega_e) \tag{1}$$

이는 Dynamomter를 사용하여서 여러 번 실험을 거쳐서 얻어낸 정상상태의 엔진 토크 값이다.

Fig. 1 에 실험으로부터 얻어진 정상 상태 엔진 맵을 나타냈다.



Fig. 1 Static engine map

2.2 토크컨버터

토크컨버터에 대한 모델은 아래와 같이 실험으 로부터 파라미터들 간의 관계를 도출해낸다.

$$T_p = C(q)\omega_e^2 \tag{2}$$

$$T_t = T_r(q) T_p \tag{3}$$

여기서 $q = \omega_t / \omega_e \approx \omega_p$ 로 토크컨버터 입/출 력 속도비를 나타내고 여러 번의 실험으로부터 속 도비에 따른 capacity factor와 torque ratio 를 맵핑한 값으로부터 토크컨버터의 입/출력단의 토 크를 추출 해 낼 수 있다.

즉 여기서 나온 터빈토크 값이 변속기의 입력 토 크가 되고, 차량에서 접근 가능한 값인 엔진 속도 로부터 터빈 토크를 얻을 수 있다.

토크컨버터의 효율에 관한 식은 (4)와 같이 나 타 낼 수 있는데. Fig.2 를 보면 락-업 클러치가 체결된 이후에는 토크컨버터 입력 측 토크(펌프 토크)가 그대로 출력 측(터빈 토크)으로 전달되는 데, 체결 되기 전까지는 효율이 떨어지는 것을 확 인 할 수 있다.



2.3 변속기 / 디퍼렌셜

토크컨버터로부터 나오는 출력 터빈토크가 변 속기-디퍼렌셜을 지나면서 전달되는 토크는 아래 와 같이 각종 기어비를 고려한 상태 방정식으로 나타 낼 수 있다.

Fig. 3은 파워트레인모델에 대해 전체적으로 표 현이 되어 있다.



Fig. 3 Diagram of vehicle driveline

자동변속기는 유성기어 세트로 이루어져 있는데 출력 측에는 carrier가 위치하고 있으며, 출력 측 속도는 아래(5)와 같이 모델링 가능하다.

$$\dot{\omega}_{cr} = \frac{1}{J_{cr}} \left[i_t T_t - \frac{T_s}{i_f} \right] \tag{5}$$

Fig. 4를 보면 변속기로 입력되는 입력토크(터빈 토크)와 입력속도(터빈 속도)에 따른 모멘트 평형 식이 식 (5)-(7)에 적용된다.



Fig. 4 Torque delivery process

휠 다이나믹스(wheel dynamics)는 (6)와 같이 표 현 된다.

$$\dot{\omega}_{\omega} = \frac{1}{I_{v}} \left[T_{s} - T_{load} \right] \tag{6}$$

여기서 T_{load} 는 차량에 작용하는 부하로써, 구 름저항, 경사각, 공기저항을 포함한다. 즉 아래 와 같이 표현 가능하다.

$$T_{load} = r_{eff} \left(K_{rr} M_{\nu} g \cos \theta_r + M_{\nu} g \sin \theta_r + \frac{1}{2} \rho C_d A_F \omega_{\omega}^2 \right)$$

그리고 샤프트는 Fig. 5와 같이 스프링-댐 퍼 시스템으로 표현할 수 있는데, 댐퍼에 관 련된 항은 매우 작기 때문에 무시 가능하다.



Fig. 5 Torsional compliance of driveline

3. 확장형 칼만 필터 이론

이 장에서는 확장형 칼만 필터 이론⁸⁾에 대해서 간략하게 언급한다. 기본 칼만필터는 선형화된 모 델에만 적용 될 수 있으나 필터링을 하면서 선형 화를 해 나가는 확장형 칼만 필터를 사용한다면 비선형 시스템에도 적용 가능 하다.

비선형 시스템을 이산화(discretization)하여서 아래와 같이 표현 가능하다.

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k), \quad w_k \sim N(0, Q_k)$$
 (8)

$$z_k = h_k(x_k, v_k), \qquad v_k \sim N(0, R_k) \quad (9)$$

여기서 w_k, v_k 는 각각 공정 잡음(process noise) 과 측정 잡음(measurement noise)을 나타내며 백 색잡음(white noise)이라고 가정 한다.

확장형 칼만 필터의 Time update, Measurement update 및 Kalman gain을 구하는 방법은 아래와 같다.

<Time Update>

$$\hat{x}_{k}(-) = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}(+), u_{k-1}, 0)$$

$$P_{k}(-) = F_{k-1}P_{k-1}(+)F_{k-1}^{T} + L_{k-1}Q_{k-1}L_{k-1}^{T} \quad (10)$$
where, $F_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x}\Big|_{\hat{x}_{k-1}^{+}}, L_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w}\Big|_{\hat{x}_{k-1}^{+}}$

Time update란, 현재 시점(k번째)의 측정값

(measurement)를 고려하지 않고, 이전 시점까지 측 정된 값(1~k-1번째)으로부터 상태 값을 알아내고 식 (10)을 보면 (8)식을 선형화 과정이 들어가는 것을 알 수 있다. 그 선형화 시킨 값들이 오차 공분 산(error covariance)를 구하는데 쓰인다.

(P=error covariance)

<Measurement Update>

$$K_{k} = P_{k}(-)H_{k}^{T} \left[H_{k}P_{k}(-)H_{k}^{T} + M_{k}R_{k}M_{k}^{T}\right]^{-1}$$

$$\hat{x}_{k}(+) = \hat{x}_{k}(-) + K_{k} \left[z_{k} - h_{k}(\hat{x}_{k}(-), 0)\right] \quad (11)$$

$$P_{k}(+) = \left[I - K_{k}H_{k}\right]P_{k}(-)$$
where $H_{k} = \frac{\partial h_{k}}{\partial x}\Big|_{\hat{x}_{k}^{-}}, M_{k} = \frac{\partial h_{k}}{\partial v}\Big|_{\hat{x}_{k}^{-}}$

k번째 측정 값을 고려한 measurement update 과정은 식 (11)과 같다. 여기서도 measument에 대한 (9)식을 선형화 하는 과정 이 들어가는 것을 확인 할 수 있고, 매 샘플 타임 마다 선형화 과정이 수반되어야 하는 구 조이다.

4.구동 토크 추정 관측기 설계

2.3절에서 (5)-(7)에 해당하는 식들을 확장형칼 만필터에 적용하려면 이를 이산화(discretization) 하는 과정이 필요하다. 먼저 3개의 State에 관한 식들을 다시 표현하면 아래와 같다.

$$(x_1 = \omega_{cr}, x_2 = \omega_{\omega}, x_3 = T_s)$$

$$\dot{x}_{1} = -\frac{1}{J_{cr}i_{f}}x_{3} + \frac{i_{r}T_{t}}{J_{cr}}$$
(12)

$$\dot{x}_{2} = -\frac{r_{eff}\rho C_{d}A_{F}}{2I_{v}}x_{2}^{2} + \frac{1}{I_{v}}x_{3} - \frac{r_{eff}K_{rr}M_{v}g}{I_{v}} \quad (13)$$

$$\dot{x}_{3} = \frac{K}{i_{f}} x_{1} - K x_{2} \tag{14}$$

Approximation 기법 중 하나인 Forward rectangular approximation(FRA)을 사용하여서 (12)-(14)식을 아래와 같이 나타 낼 수 있다.

$$x_1(k+1) = x_1(k) - \frac{1}{J_{cr}i_f} x_3(k) + \frac{i_t T_t}{J_{cr}} T_s$$
(15)

$$x_{2}(k+1) = x_{2}(k) - \frac{r_{eff}\rho C_{d}A}{2I_{v}}T_{s}x_{2}^{2}(k) + \cdots$$

$$\cdots \frac{1}{L_{v}}T_{s}x_{3}(k) - \frac{r_{eff}K_{rr}M_{v}g}{L_{v}}T_{s}$$
(16)

$$x_{3}(k+1) = \frac{K}{i_{f}}T_{s}x_{1}(k) - KT_{s}x_{2}(k) + x_{3}(k)$$
(17)

현재 양산차에서 접근 가능한 $x_1, x_2 두$ 개의 측 정값을 이용하여서 샤프트 토크 x_3 를 추정 하는 것이 목표이고, 공정 잡음과 측정 잡음 에 대한 공분산 정보는 아래와 같이 가정 하 였다.

$$Q = diag[4 4 4], R = [0.1 0.1]$$

5. 시뮬레이션

시뮬레이션은 차량 동역학 전용 프로그램인 Carsim과 Matlab/Simulink를 함께 연동하여서 실 시하였다. 공정잡음과 측정잡음의 공분산을 적절 하게 개별 state에 대한 가중치를 고려하여서 튜 닝하여서, 플랜트(plant)로부터 나오는 구동 토크 (실제 값)과 관측기를 통해서 추정한 값을 비교해 보았다. 차량은 실제 차량에 유사하게 모델 된, carsim에 내장된 D-Class, Sedan 이고 6단 기어를 사용하는 변속기를 사용하였다. 각종 inertia 및 기어비에 대한 정보는 nomenclature에 명시되어있 다.

Fig. 6,7을 보면 변속기 출력속도와 휠 속도는 거의 정확하게 관측된다고 가정하였고 따라서 이 에 관련된 측정잡음의 공분산을 작은 값으로 설정 하였다.



Fig. 6 actual carrier speed and estimated carrier speed



Fig. 7 actual wheel speed and estimated wheel speed

현재 차량은 직선주행 상황이고 정지 상태에서 엔 진 throttle을 25%까지 개도하여서 1단부터 4단까 지 가속하고 있는 상황이다.



Fig. 8 normalized throttle angle

Fig.8 을 보면 0.1초만에 throttle angle이 25% 개도하고 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.



Fig. 9 actual shaft torque and estimated shaft torque

Fig. 9는 확장형 칼만필터 이론을 적용하여 구동 토크를 추정한 결과이다. 실제 값의 경향을 따라 가고 있는 것을 확인 할 수 있으나, 최초 출발시에 는 비선형 구간이 심하고, carsim에 내장된 엔진 데이터가 dynamic한 상황까지 묘사하기 힘들어서 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

모델 불확실성(model uncertainty)에 대해 대응하 기 위해서 Q, R값을 아래와 같이 변경 해보았다.

$$Q = diag[7 7 5], R = [5 5]$$

그 결과 fig.8 보다 과도 구간에서 토크 추정이 실제값에 더 가까운 것을 fig. 9에서 확인 가능하 다.



Fig. 10 actual shaft torque and estimated shaft torque

6. 결 론

본 논문에서는 직선 가속 주행 중인 차량의 속도 정보로부터 구동 토크를 추정했다. 그 결과 실제 개별 바퀴의 구동 토크 실제 값과 비슷한 경향을 보이긴 하지만 기어 변속시, 즉 과도 구간에 있어 서 변속에 개입하는 클러치들에 대한 물리적 정보 가 고려되지 않았다.

이에 대한 정밀 추정을 위해서는 자동 변속기 컨 트롤 장치에 대한 정보와, 클러치 슬립 시 압력, 마찰계수 등에 대한 정보가 필요하다.

하지만 모델의 비선형성에도 불구하고, 확장형 칼만필터를 이용하여 이에 대한 대응이 가능하고 모델 불확실성 또한 상태(state)에 따라 공분산에 가중치를 주어서 대응이 가능한 것을 시뮬레이션 결과로부터 확인 할 수 있었다.

후 기

"이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연 구임(No.2010-0028680). 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0401-13-1008)"

References

- K. J. Yang, K. S. Hong, D. I. Cho, "A Robust Control for Engine and transmission Systems : Enhancement of Shift Quality", JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No.3, 2001
- 2) D. I. Cho, "Nonlinear Control Methods for Automotive powertrain systems", PH.D. Thesis
- R.A. Masmoudi, J. K. Hedrick, "Estimation of Vehicle Shaft Torque Using Nonlinear Observers, Transactions of the ASME, 394/ Vol. 114, 1992
- K.S. Yi, B.K. Shin, K. I. Lee, "Estimation of Turbine Torque of Automatic Transmissions using Nonlinear Observers", Transactions of the ASME, 276/ Vol. 122, 2000
- 5) K. S. Yi, K. Hedrick, S. C. Lee, "Estimation of tire-road friction using observer based identifiers", Vehicle system Dynamics, 233-261, 1999
- M. Pettersson, Nielsen L, Gear shifting by engine control", IEEE Trans Control System Technology, 495,2000
- Hong Chen, Bingzhao Gao, "Nonlinear Estimation and Control of Automotive Drive trains", Springer
- Ban Simon, "Optimal State Estimation", WILEY-INTERSCIENCE, 2006
- 9) J. S. Kim, S. B. Choi, "Vehicle Driveline Modeling and Dynamic Simulation Method", KSAE 2009 Annual Conference