

모터 토크리플에 기인하는 전동식 조향장치 시스템의 조향감 해석에 대한 연구

A study on Analysis of Steering Feel for Electric Power Steering System Due to Motor Torque Ripple

김찬목[†] · 한정훈*

Chan-Mook Kim and Jeong-Hun Han

Key Words : Electric Power Steering System(전동식 조향장치), Motor Torque Ripple(모터 토크리플),
Steering Feel(조향감)

ABSTRACT

This paper presents the effects of an assisting motor torque ripple on a driver's steering feeling using a simulink. The EPS(Electric Power Steering) System is modeled as a 5 degrees of freedom for simulation. To find out the influence of a torque ripple on a driver's steering feeling, which is the purpose of this study, we observed the assisting torque in various different speeds, when the torque ripple increased by 0%~40%. The torque ripple had a small but definite influence on the assisting torque, and it had a greater influence in low speeds rather than high speeds.

기 호 설 명

- J_{sw} : 스티어링 휠의 관성모멘트
- J_{ss} : 칼럼의 관성모멘트
- J_m : 보조 모터의 관성모멘트
- M_r : 랙의 질량
- J_{fw} : 전륜휠의 관성모멘트
- T_a : 모터의 보조토크
- T_r : 로드 토크

1. 서 론

자동차에서 조향장치는 운전자가 원하는 방향으로 차를 이동시키기 위해 사용하는 장치이다. 전자제어 장치의 발전과 더불어 차량의 성능을 향상 시키기 위한 기술이 급속도로 발전하고 있다. 이들 중에서 차량의 선회를 담당하고 있는 조향장치는 운전자에게 가장 직접적으로 느낌을 주는 부분이므로 다른 장치들에 비하여 감각적인 고려가 더욱 요구되는

[†] 교신저자; 정희원, 국민대학교 기계자동차공학과

E-mail : cmkim@kookmin.ac.kr

Tel : (02)919-0514 , Fax : (02)901-4718

* 국민대학교 기계자동차공학과

장치이다. 본 논문에서는 조향시스템을 수학적으로 5 개 자유도로 모델링하고 모델링 한 조향시스템의 전달함수를 통해 조향장치의 특성을 알아보고 조향 시스템과 차량 동역학 모델인 집중 질량 2 자유도 모델을 적용한 Simulink 를 이용하여 시뮬레이션 한 것을 상용 프로그램인 Carsim 과 비교하여 검증한 후 모터의 토크리플이 운전자의 조향에 영향을 미치는지 여부를 알아보는데 목적이 있다. 본 논문은 모터의 토크리플이 운전자의 조향감에 미치는 영향을 Simulink 를 이용한 시뮬레이션을 통하여 알아보는 것을 목적으로 한다.

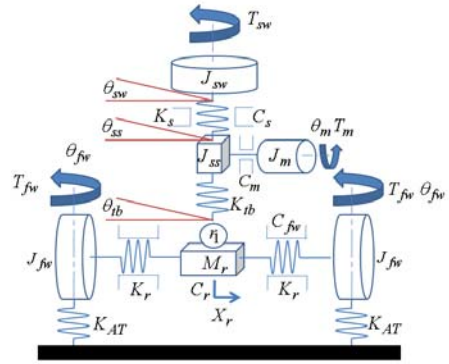


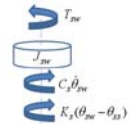
Fig.2.1 Linear lumped parameter modelling

2.조향계의 모델링

2.1 조향계의 역학모델과 운동방정식

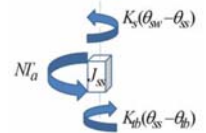
조향계란 운전자가 임의로 차량의 진행 방향을 바꿀 때에 조작되는 전륜휠에서 조향휠까지의 모든 기구를 말한다.[1] 기계학적 관점에서 보면 조향 시스템은 많은 질량, 스프링 그리고 댐퍼 요소로 이루어져 있다. 시스템의 자유도를 줄일 수 있다면 굳이 많은 자유도를 생각하지 않아도 되므로 랙과 타이로드 연결과 같이 단단한 볼조인트의 강성은 낮은 주파수에서 기본 시스템 거동에 영향을 미치지 않으므로 볼조인트 강성을 무시할 수 있고 하나의 질량으로 묶어서 생각 할 수 있다.[2] 본 논문에서는 EPS시스템을 스티어링 휠의 관성모멘트(J_{sw}), 칼럼의 관성모멘트(J_{ss}), 보조 모터의 관성모멘트(J_m), 랙의 질량(M_r) 그리고 전륜휠의 관성모멘트(J_{fw})를 고려하여 5자유도 시스템으로 모델링 하였고 뉴턴법칙으로 운동 방정식을 유도 하였다. 조향 시스템을 질량 요소가 5개인 선형 시스템으로 모델링하면 Fig.2.1와 같이 나타낼 수 있고 질량 요소 5개를 Part.1~5로 나누어서 표현하면 아래 식과 같다.

Part.1



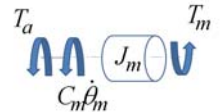
$$J_{sw}\ddot{\theta}_{sw} + C_s\dot{\theta}_{sw} + K_s(\theta_{sw} - \theta_{ss}) = T_{sw} \quad (2.1)$$

Part.2



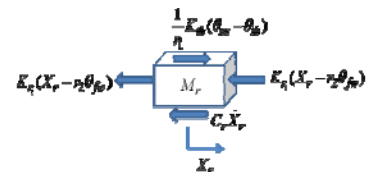
$$K_s(\theta_{sw} - \theta_{ss}) + N_a - K_{tb}(\theta_{ss} - \theta_{tb}) = J_{ss}\ddot{\theta}_{ss} \quad (2.2)$$

Part.3



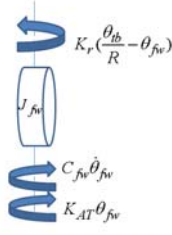
$$J_m\ddot{\theta}_m + C_m\dot{\theta}_m = T_m - T_a \quad (2.3)$$

Part.4



$$M_r\ddot{X}_r + C_r\dot{X}_r - \frac{1}{r_1}K_{tb}(\theta_{ss} - \theta_{tb}) + 2K_r(X_r - r_2\theta_{fw}) = 0 \quad (2.4)$$

Part.5



$$J_{fw}\ddot{\theta}_{fw} + C_{fw}\dot{\theta}_{fw} + K_r\left(\theta_{fw} - \frac{Xr}{r_2}\right) = -K_{AT}\theta_{fw} \quad (2.5)$$

Fig.2.1에 대해서 식(2.1)~(2.5)까지의 운동 방정식을 라플라스 변환시키면 아래와 같다.

2.2 조향계의 전달함수

Laplace Transform

$$(J_{sw}s^2 + C_s s + K_s)\Theta_{sw}(s) = T_{sw}(s) + K_s\Theta_{ss}(s) \quad (2.6)$$

$$(J_{ss}s^2 + K_s + K_{tb})\Theta_{ss}(s) = K_s\Theta_{sw}(s) + NT_a(s) + K_{tb}\Theta_{tb}(s) \quad (2.7)$$

$$(J_m s^2 + C_m s)\Theta_m(s) = T_m(s) - T_a(s) \quad (2.8)$$

$$(M_r s^2 + C_r s)X_r(s) + \frac{1}{\eta_1}K_{tb}\Theta_{tb}(s) - \frac{1}{\eta_1}K_{tb}\Theta_{ss}(s) + 2K_r X_r(s) - 2r_2 K_r \Theta_{fw}(s) = 0 \quad (2.9)$$

$$(J_{fw}s^2 + C_{fw}s + K_r + K_{AT})\Theta_{fw}(s) = \frac{K_r}{r_2}X_r(s) \quad (2.10)$$

$$\Theta_{tb}(s) = \frac{X_r(s)}{\eta_1} \quad (2.11)$$

$$\Theta_m = N\Theta_{ss}(s) \quad (2.12)$$

식(2.6)~(2.12)을 이용하여 EPS 시스템의 주파수영역에서의 특성을 알아보기 위해 전달함수를 구하면 아래와 같이 식(2.13), (2.14)와

같다.

$$\frac{\Theta_{sw}(s)}{T_{sw}(s)} = \frac{A(s)}{(J_s s^2 + C_s s + K_s)A(s) - \frac{K_s^2}{N^2}B(s)} \quad (2.13)$$

$$A(s) = B(s) \left\{ (J_m s^2 + C_m s) + \frac{J_{ss}s^2 + K_s + K_{tb}}{N^2} \right\} - \frac{K_{tb}^2}{\eta_1 \eta_1 N^2} (J_{fw}s^2 + C_{fw}s + K_r + K_{AT})$$

$$B(s) = (M_r s^2 + C_r s + \frac{1}{\eta_1 \eta_1} K_{tb} + 2K_r)(J_{fw}s^2 + C_{fw}s + K_r + K_{AT}) - 2K_r K_r$$

$$\frac{\Theta_{sw}(s)}{T_m(s)} = \frac{NK_s B(s)}{N^2 (J_{sw}s^2 + C_s s + K_s)A(s) - K_s^2 B(s)} \quad (2.14)$$

$$A(s) = B(s) \left\{ (J_m s^2 + C_m s) + \frac{J_{ss}s^2 + K_s + K_{tb}}{N^2} \right\} - \frac{K_{tb}^2}{\eta_1 \eta_1 N^2} (J_{fw}s^2 + C_{fw}s + K_r + K_{AT})$$

$$B(s) = (M_r s^2 + C_r s + \frac{1}{\eta_1 \eta_1} K_{tb} + 2K_r)(J_{fw}s^2 + C_{fw}s + K_r + K_{AT}) - 2K_r K_r$$

식(2.13)과 식(2.14)의 보드선도를 보면 4개 주파수에 대해 피크값이 존재하는데 이는 웜기어와 보조모터가 기어로 연결된 퇴화된(degenerated system) 5개 자유도계로서 4개의 고유진동수를 구할 수 있다.식(2.13)의 전달함수를 주파수 영역에서 보면 Fig.2.5와 같다 Fig.2.5는 조향토크 대 조향각에 대한 값으로서 0.401Hz부근에서는 첫번째 공진 주파수가 나타나고, 두번째 공진 주파수는 9.88Hz라고 사료된다.

식(2.14)를 주파수 영역에서 보면 Fig.2.6과 같고 Fig.2.5와 비교했을 때 모터토크에 영향을 받는 조향계의 공진 주파수는 38.4Hz 와 99.7ZHz 임을 알수 있다. 모터는 정격회전수가 900RPM으로 15Hz이므로 공진에는 아무런 영향을 미치지 않는것을 알 수 있지만 토크리플이 조향감에 영향을 미칠지 여부는 알 수 없다고 생각 되므로 조향계와 차량을 시뮬링크로 모델링 하여 보조 모터의 토크리플이 조향감에 미치는 영향을 알아 보려고 한다.

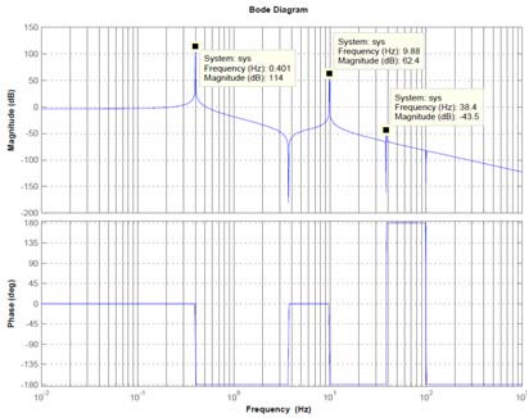


Fig.2.5 Frequency response (Input:steering wheel torque, Output:steering wheel angle)

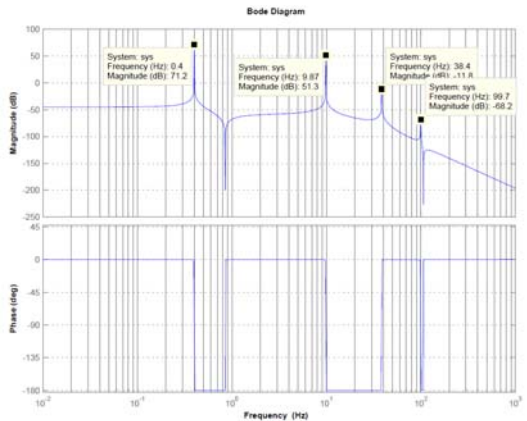


Fig.2.6 Frequency response (Input:motor torque, Output:steering wheel angle)

3.시스템의 모델링 및 검증

3.1 시스템의 블록선도

EPS System에서 보조 모터는 간단하게 DC모터로 모델링 하였고, 모터 부하는 조향 칼럼에 작용하는 보조 토크(T_a)로 나타내었다. 보조 토크는 조향계의 Part.2의 식(2.2)로부터 구할 수 있고 토션바에서 걸리는 토크는 로드 토크(T_r)로 다음식으로 나타내었으며 Fig.3.1은 이를 바탕으로 구성된 시뮬레이션 모델의 블록선도 이다.

$$T_a = \frac{1}{N} \{ J_{ss} \ddot{\theta}_{ss} - K_s (\theta_{sw} - \theta_{ss}) + K_{tb} (\theta_{ss} - \theta_{tb}) \} \quad (3.1)$$

$$= \frac{1}{N} \{ J_{ss} \ddot{\theta}_{ss} - K_s (\theta_{sw} - \theta_{ss}) + T_r \}$$

$$J_m N \ddot{\theta}_{ss} + C_m N \dot{\theta}_{ss} = T_m - T_a \quad (3.2)$$

$$T_{sw} = K_s (\theta_{sw} - \theta_{ss}) + C_s \dot{\theta}_{sw} \quad (3.3)$$

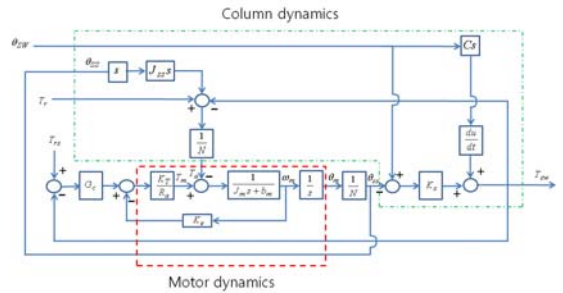


Fig.3.1 Block diagram model of an EPS system

Fig.3.2는 차량 주행 시 보조모터가 특정속도, 특정 조향각에서 만들어야 할 조향 토크를 나타내고 있으며 본 논문에서 사용한 토크맵이다.

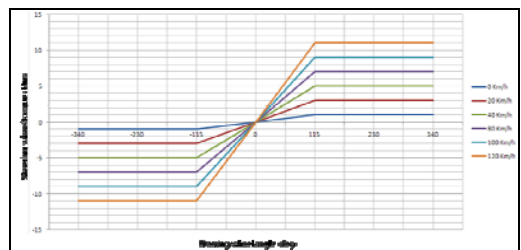


Fig.3.2 The magnitude of reference torque according to vehicle speed

3.2 전동식 조향장치 차량의 시뮬레이션 모델링 및 검증

Simulink를 이용한 시뮬레이션이 실차와 비슷한 거동을 보인다는 것을 참고 논문[3]에서 확인 하였다. Fig.3.1의 블록선도와 시스템 방정식, 2자유도 평면 자전거 모델을 이용하여 Fig.3.3과 같이 차량의 시뮬레이션 모델링을 하였으며 상용 프로그램인 Carsim과 비교하여 Simulink 모델이 실차와 유사한 경향을 가진다는 것을 Fig.3.4~3.9에서와 같이 확인 하였다.

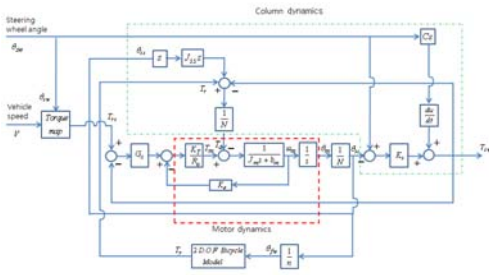


Fig.3.3 Block diagram of an EPS system with torque map

4.1 모터 토크 리플 적용

모터의 토크 리플은 모터에 인가되는 전류 주파수인 회전수와 pole 수의 함수로 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 토크리플을 나타내었다.

$$T_{ripple} = A \cos(pole \times polepair \times \theta_m)$$

A 는 토크리플의 퍼센트로 0%~40%까지 적용하였다. Pole 수는 모터에서 가장 많이 사용되는 6 Pole 로 하였고 토크리플을 적용한 Simulink model 은 Fig.4.1 과 같다.

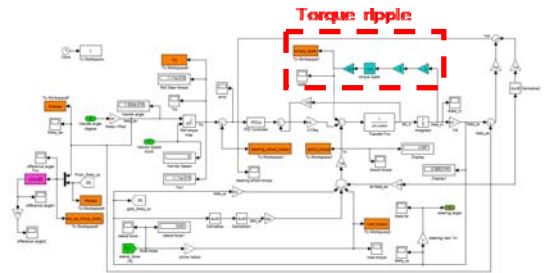


Fig.4.1 Simulink model of EPS system applied torque ripple



Fig.3.4 Yaw rate at carsim

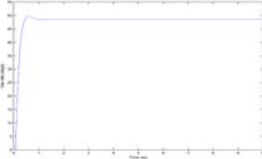


Fig.3.5 Yaw rate at simulink

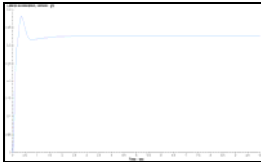


Fig.3.6 Lateral acceleration at carsim

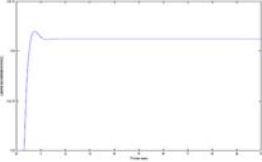


Fig.3.7 Lateral acceleration at simulink

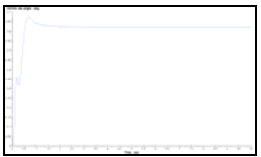


Fig.3.8 Vehicle slip angle at carsim

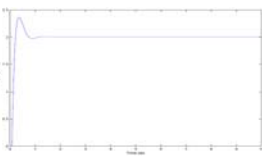


Fig.3.9 Vehicle slip angle at simulink

4.시뮬레이션

3 장에서 검증된 simulink 모델을 기반으로 하여 전동식 조향장치에서 보조모터의 진동이 조향토크에 미치는 영향을 알아 보려고 한다. 전동기에서의 진동은 크게 기계요인에 의한 것과 전자기적 요인에 의한 진동으로 분류할 수 있다.[4] 기계적인 요인에서는 거의 손댈 곳이 없으며 전동기의 스테이터(stator) 구조를 변경하여 진동을 줄인 경우가 있었다.[5] 전동기 진동에 대한 요인은 주로 전자기적 요인인 전동기 코깅 토크(Cogging torque)이다. Simulink 를 이용한 시뮬레이션에서는 모터 토크 리플을 인가하여 조향토크에 영향을 미치는 여부를 알아 보았다.

4.2 시뮬레이션 결과

조향각과 조향토크의 관계에서 토크리플의 영향을 보려고 한다. 속력 0km/h, 20km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h 일 때 토크리플 0% 와 토크리플 40%의 두가지 경우를 비교해 보면 Fig.4.2~Fig.4.11과 같고 고속 주행 시보다 저속 주행 시에 보조 모터에 의해 보조 토크가 더 많이 인가 되므로 보조 모터의 토크 리플이 미치는 영향은 고속 주행시 보다 저속 주행 시에 더 많은 것을 볼 수 있다.

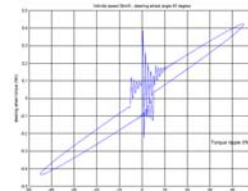


Fig.4.2 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 0 km/h, Torque ripple 0%)

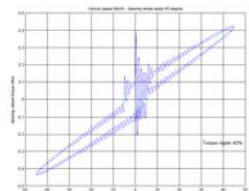


Fig.4.3 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 0km/h, Torque ripple 40%)

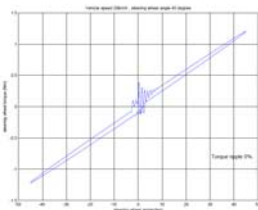


Fig.4.4 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 20 km/h, Torque ripple 0%)

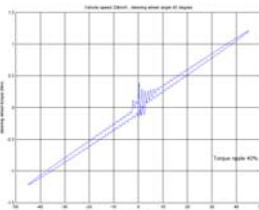


Fig.4.5 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 20km/h, Torque ripple 40%)

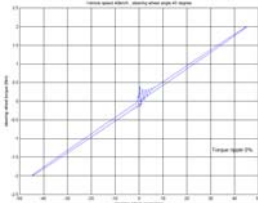


Fig.4.6 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 40 km/h, Torque ripple 0%)

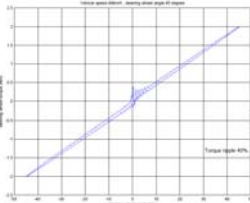


Fig.4.7 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 40 km/h, Torque ripple 40%)

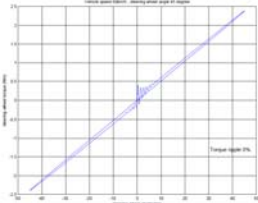


Fig.4.8 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 60 km/h, Torque ripple 0%)

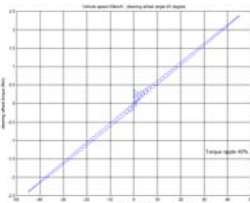


Fig.4.9 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 60 km/h, Torque ripple 40%)

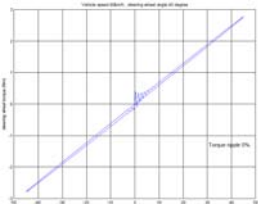


Fig.4.10 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 80 km/h, Torque ripple 0%)

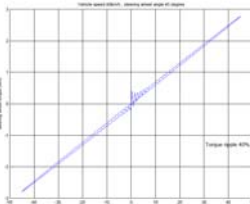


Fig.4.11 Steering wheel angle VS Steering wheel torque (Speed 80 km/h, Torque ripple 40%)

5. 결 론

본 논문은 보조모터의 토크리플이 운전자의 조향감에 미치는 영향을 Simulink를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알아보는데 목적이 있다. 전동식 조향장치 시스템과 2 D.O.F Bicycle 동역학 모델을 이용하여 조향칼럼에 걸리는 토크를 확인 할 수 있었고 상용 프로그램인 Carsim과 비교/검증을 통하여 제안된 조향계 모델의 타당성을 확인 하였다.

본 논문에서의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 토크 리플 시뮬레이션을 위해서 5개 자유도 조향계로 모델링을 하고, 차량 동역학 모델의 Simulink를 이용한 제어 알고리즘을 개발 하였다.
2. 차량속도가 클수록 보조모터가 가한 보상토크에 의한 비틀림 에너지량은 작아진다.
3. 동일 차량속도, 동일 조향각에서 토크리플이 있을 때와 없을 때 보상토크의 차와 진동의 영향은 미미하다.
4. 보드선도로부터 4개의 고유진동수를 확인 할 수 있었고 보조모터의 강제진동수가 공진영역 밖에 있음을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] 박진국, "On-Center Handling 해석을 위한 조향계 및 차량 모델에 대한 연구", 국민대학교, 2003
- [2] Aly Badawy, Jeff Zuraski, Farhad Bolourchi and Ashok Chandy, " Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System", SAE 1999-01-0399
- [3] Y.Gene Lial, H. Isaac Du, "Modelling and analysis of electric power steering system and its effect on vehicle dynamic behaviour", Int. J. of Vehicle Autonomous Systems(IJVAS), Vol. 1, No. 2, 2003
- [4] 조준제, 최연선, "전동기의 진동 및 소음원에 대한 실험적 고찰", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 37-42, 1996
- [5] Kyung-Ha, Young-Kyoun Kim, Geun-Ho Lee and Jung-Pyo Hong, "Influence of Stator Structure on Vibration of Switched Reluctance Motor", KIEE International Transactions on EMECS, Vol. 2-B, No. 3, 95-99, 2002