

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0080

토크맵을 이용한 칼럼형 전기식 동력조향 시스템의 제어로직

Control Logic Using Torque Map for a Column-Type Electric Power Steering System

김 지 훈*, 송 재 복**
Jihoon Kim, Jae-Bok Song

ABSTRACT

EPS (Electric Power Steering) systems have many advantages over traditional hydraulic power steering systems in space efficiency, engine efficiency and environmental compatibility. In this paper, an EPS system control logic using a torque map is proposed. The main function of the EPS system is to reduce the steering torque exerted by a driver by assist of an electric motor. Vehicle speed, steering torque and steering wheel angle are measured and fed back to the EPS control system, where appropriate assist torque is generated to assist the operator's steering effort. Another capability of the EPS system for easy adaptation to different steering feels via simple tuning is demonstrated by the experiments. It will be also verified that the EPS system can also improve damping and return performance of the steering wheel by control of the assist motor.

주요기술용어: Electric Power Steering(전기식 동력조향), Steering torque(조향토크), Active damping(능동감쇠), Return capability (복귀능력), Torque sensor(토크센서)

Nomenclature

T_s : Steering torque, N/m
 T_{rs} : Reference steering torque, N/m
 T_a : Assist torque, N/m

* 회원, 고려대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 고려대학교 기계공학과

1. 서 론

기존의 유압식 동력조향(hydraulic power steering) 시스템은, 엔진에서 동력을 전달받아 구동하므로 엔진의 효율을 감소시키며, 펌프, 호스, 드라이브 벨트, 풀리 등으로 인하여 구조적으로 복잡하였다.¹⁾ 이에 비하여, 전기식 동력조향(electric power steering, EPS) 시스템은 조향을 위해 독립적인 모터를 사용하여 엔진에 부담을

주지 않으며, 기구부가 단순해지는 등의 장점이 있어서 기존의 조향시스템을 대체시킬 것으로 주목받고 있다. 또한, 보조모터(assist motor)의 제어를 통해 여러 조향감(steering feel)을 재현해 낼 수 있다.

운전 중에 운전자가 조향을 위해서 조향핸들(steering wheel)을 회전시키는 데 소요되는 토크를 조향토크(steering torque) 또는 운전자토크라 한다. 이 때, 조향토크와 같은 방향으로 보조토크를 조향칼럼에 가해 주면 운전자가 부담하는 조향토크는 감소하게 된다. 또한, 이 보조토크의 특성을 조절함으로써 운전자는 다양한 조향감을 느낄 수 있게 된다.

EPS 시스템에서는 차량의 속도, 조향토크, 그리고 조향핸들의 회전각 등을 입력신호로 사용한다. 이 때, 차량의 속도가 입력신호로 사용되는 이유는 차속에 따라 제공되어야 할 보조토크의 크기가 다르기 때문이다. 예를 들어, 주차 시와 같은 저속주행에서 운전자는 조향토크의 대부분을 조향시스템에서 보조받아 쉽게 운전하기를 원할 것이며, 고속주행 시에는 안정상의 이유로 조향핸들에 묵직한 느낌을 받아 조향핸들이 쉽게 돌아가지 않기를 원할 것이다. 한편, 조향토크와 조향핸들의 회전각은 보조모터 제어에 있어서 중요한 변수가 된다.

이러한 EPS 시스템의 개발 동향을 살펴 보면, Delphi Automotive사와 TRW Automotive사가 EPS시스템을 이미 개발하여 모듈화하였으며, 일본에서는 Honda사가 Acura NSX에 EPS 시스템을 장착한 사례가 있다.²⁾ Delphi Automotive사에서 개발한 EPS시스템은 칼럼형으로서, E-Tune이라는 소프트웨어로 시스템을 쉽게 튜닝할 수 있도록 하였으며, TRW Automotive사는 보조모터를 랙에 부착하는 형태의 시스템을 상용화하였다. 이에 반해, 국내에서는 노 등이 이와 관련된 논문을 발표하였으나³⁾, EPS 시스템에 대한 연구 사례는 아직 많지 않은 실정이다.

한편, 기존의 EPS 시스템의 제어로직은 주로 Fig. 1과 같은 방식을 취하고 있다.⁴⁵⁾ 목표전류

설정부는 차량의 주행 상황에 따라 보조모터에 입력되는 전류의 목표값을 적절하게 결정하며, 제어기에서는 보조모터의 전류를 제어하여 보조모터가 원하는 토크를 생성하도록 한다. 그러나 이 방식은 최종적으로 보조토크의 크기를 제어하기 때문에, 운전자가 실제로 부담하여야 하는 조향토크를 직접 조절하는 것이 어렵다는 단점이 있다.

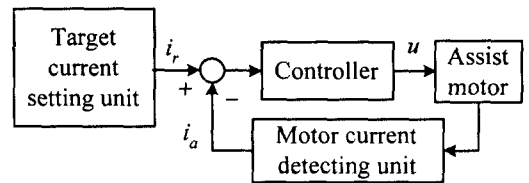


Fig. 1 Block diagram of typical EPS control system

본 연구의 주 목적은 EPS 시스템에 사용되는 제어 로직의 개발이다. 여기서는 Fig. 1과 같이 보조 모터의 전류를 피드백하는 방식과는 달리, 운전자의 조향토크를 피드백하여 미리 설정된 토크맵에서 결정되는 기준 조향토크를 추종하게 하는 방식을 제시하고자 한다. 이 방식은 모터 전류 측정부가 따로 필요 없는 대신에, 조향토크를 측정하기 위한 조향토크센서가 필요하게 된다. 그러나 운전자가 최종적으로 감지하는 조향토크를 직접 제어할 수 있으며, 기준토크의 변화를 통해서 다양한 조향감을 제시할 수 있다는 장점이 있다.

2. 조향토크의 측정과 제어 경로

2.1 조향토크의 측정

Fig. 2는 실험에서 사용될 토크 측정장치의 구조를 나타낸다. 이 장치는 조향토크로 인해 토션바에서 발생하는 비틀림을 벨트-풀리 구조를 통해 증폭한 후, 두 개의 엔코더로 읽어들이는 방식을 취하는데, 측정된 비틀림 ($\Delta\theta$)은 다음의 식에 의해 토크로 환산될 수 있다.⁶⁾ 여기서, k_m 은 비틀림 강성을 나타낸다.

$$T = k_m \cdot \Delta\theta$$

(1)

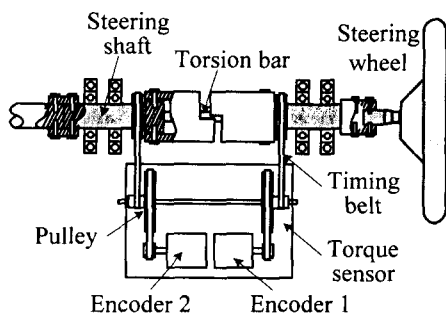


Fig. 2 Structure of a steering column

2.2 조향칼럼의 토크제어

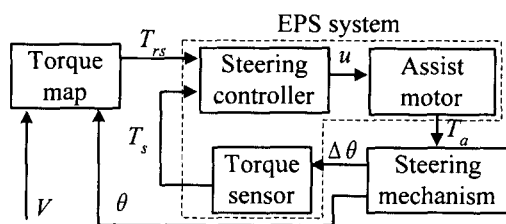


Fig. 3 Concept of a proposed EPS system

제안된 EPS 시스템은 Fig. 3에서 제시된 경로를 통해 운전자에게 적절한 토크(reference steering torque) T_{rs} 를 제공하게 된다. 1장에서 전술했듯이 차량의 주행상황(차속 등)에 따라 요구되는 조향토크는 달라지게 되는데, 토크 맵은 차량의 주행상황에 따라 적절한 T_{rs} 값에 대한 정보를 저장하고 있다. 여기서, T_s 는 운전자가 운전 중에 부담하는 실제 조향토크를 나타낸다. 조향제어기(steering controller)는 T_s 와 T_{rs} 의 차이를 감소시키도록 적절한 제어신호 u 를 발생시키는데, 이 신호가 보조모터를 제어하게 된다. 보조모터는 운전자의 실제 조향토크 T_s 와 같은 방향으로 보조토크 T_a 를 발생시켜, T_s 와 T_{rs} 간의 오차를 감소시키게 된다. 한편, Fig. 3에서 θ 는 조향핸들의 각도를 나타낸다.

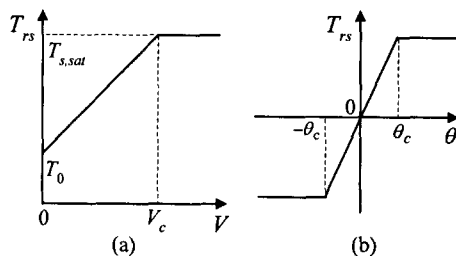


Fig. 4 Determination of reference steering torque depending on (a) vehicle speed V , and (b) steering wheel angle θ

Fig. 4는 EPS 시스템의 실험을 수행하기 위하여 선정된 토크맵을 나타낸다. Fig. 4(a)에서는 저속주행에서의 운전 용이성과, 고속주행에서의 조향 안정성을 확보하기 위해 속도가 증가함에 따라 기준 조향토크 T_{rs} 도 같이 증가하도록 토크맵을 구상하였다. 따라서, 운전자는 속도가 커질수록 조향핸들이 점점 더 묵직해짐을 느끼게 된다. 이 때, T_0 는 차량의 정지 상태에서의 기준 조향토크를 나타낸다. 이러한 토크맵의 정보는 운전 상황이나 운전자의 요구에 따라서 쉽게 수정될 수 있다. 차속이 V_c 를 초과하는 영역에서는 T_{rs} 이 $T_{s,sat}$ 로 포화되도록 하여 운전의 안정성을 확보하면서도, 포화값 이상을 초과하지 않도록 하여 어느 정도의 운전 용이성도 만족하도록 하였다.

Fig. 4(b)는 조향핸들각에 따른 T_{rs} 을 나타내는데, 운전자가 중앙 위치를 중심으로 좌우로 조향을 하더라도 T_{rs} 가 양과 음 사이에서 크기가 갑자기 전환되지 않고 점진적으로 변화하도록 하기 위한 것이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 개념에 기초하여 작성한, $T_{s,sat}=10\text{Nm}$, $T_0=2\text{Nm}$, $V_c=100\text{km/h}$, $\theta_c=5^\circ/\text{sec}$ 일 때의 토크맵을 나타낸다. 토크맵을 yz 평면과 xz 평면에 각각 투영하면, Fig. 4(a)과 (b)의 형태를 가진다. 한편, 위의 네 변수 $T_{s,sat}$, T_0 , V_c , θ_c 를 튜닝함으로써, 각기 성능이 다른 토크맵을 작성할 수 있다.

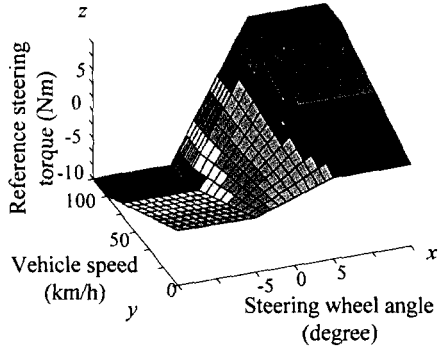


Fig. 5 Torque map for the EPS system

3. 실험장치 및 제어로직

3.1 실험장치

Fig. 6의 EPS 시스템의 실험장치는 크게 3개의 부분으로 나누어진다. 첫째는 운전 중에 발생하는 부하를 생성해 주기 위한 부하모터와 기존의 유압식 동력조향 시스템의 기능을 대체할 보조 모터이다. 둘째 부분은 조향핸들의 회전각과 조향핸들에 발생하는 조향토크를 측정하는 센서인데, 이에 대해서는 2.1절에서 전술한 바 있다. 셋째 부분은 모터 제어장치인데, 이는 크게 PC, 인터페이스 카드, 모터 드라이버로 나눌 수 있다. 인터페이스 카드는 엔코더 신호를 받아들이는 디지털 입력부와, PC에서 계산된 모터 제어신호를 D/A 변환기를 통해 모터 드라이버로 내보내는 아날로그 출력부로 구성된다.

토크센서를 통해 발생하는 엔코더 1과 엔코더 2의 펄스는 인터페이스 카드의 디지털 포트를 통해 PC로 입력되는데, 엔코더 1의 신호를 통해 조향 핸들의 회전 각도를 측정하는 한편, 이 두 엔코더 사이에 발생하는 펄스의 차이를 통해서 조향토크를 측정한다.

한편, 노면으로부터 타이어에 전해지는 노면 토크는 Dugoff 타이어 모델에 기초하여 산출하였다⁷⁾ 이 때, 노면 토크는 조향각, 즉 조향핸들각에 따라 거의 비례적으로 변화하게 된다. Fig. 7은 운전자가 정현파의 조향입력을 가할 때 발생

되는 노면토크를 부하모터를 통하여 구현한 실험 결과를 나타낸 것이다.

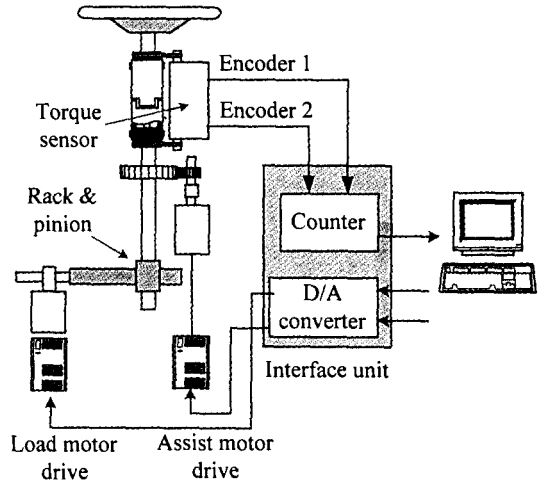


Fig. 6 Experimental setup for the EPS system

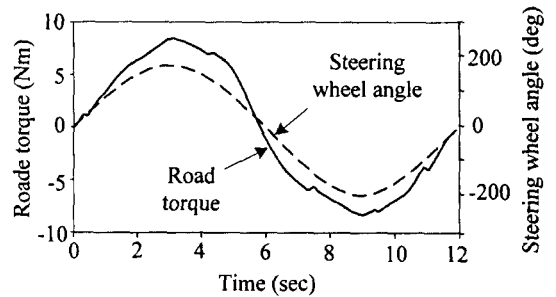


Fig. 7 Road torque versus steering wheel angle (Experimental results)

3.2 제어 로직

EPS 시스템에서 보조모터의 주 기능은 조향 토크의 부담을 줄이는 것이다. 또한, 고속주행에서의 셀프알라이닝 토크(self-aligning torque)로 인해 발생하는 조향핸들의 과도한 오버슈트를 감소시키는 기능도 수행하는데, 이는 조향핸들의 중앙 복귀시에 감쇠기능을 부여함으로써 수행하게 된다. 일반적으로, 감쇠기능을 부여하면 조향핸들의 오버슈트는 감소하지만, 조향핸들의 복원력

에 역방향의 힘을 가하는 것이므로 핸들의 중앙 복귀 시간을 지연시켜서 복귀 성능을 감소시키게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 조향핸들의 오버슈트를 줄이는 동시에 중앙 복귀 시간을 단축할 수 있도록 제어항을 추가하였다. 제안된 제어 로직은 다음과 같다.

$$u = a \cdot u_1(T_{rs}, T_s) + r \cdot u_2(\theta, \dot{\theta}, V) \quad (2)$$

여기서 u_1 은 조향토크의 부담을 줄여 주기 위한 보조 토크의 발생과 관련된 제어 신호로서, 기준 조향 토크 및 실제 조향토크의 함수로 표현된다. 또한, u_2 는 조향핸들의 감쇠기능과 중앙으로의 복귀기능을 만족시키기 위한 제어 신호인데, 이는 조향핸들의 회전각 θ 와 회전속도 $d\theta/dt$, 그리고 차속 V 의 함수로 구현된다. 이러한 2개의 제어 신호의 적절한 조합으로, EPS 시스템은 조향토크의 경감과 조향핸들의 감쇠 및 중앙복귀 성능의 향상을 도모할 수 있다.

그런데, 이 두 가지의 기능은 동시에 요구되지는 않으며, 상황별로 어느 한 기능만이 요구된다. 예를 들어, 직선차로에서 곡선차로로 진입하는 상황을 고려해 보자. 일단 운전자는 조향핸들을 곡선차로에 맞도록 회전하게 되는데(즉, 조향핸들을 중앙에서 멀어지도록 회전하게 되는데), 이 때는 조향토크의 보조기능이 지배적이게 된다. 이 때, 조향핸들에 감쇠 기능이 추가되거나 중앙 복귀력이 발생한다면 운전자가 부담하여야 하는 조향토크가 증가하게 되므로, 이 기능은 동작하지 말아야 한다. 잠시 후, 운전자는 다시 직선차로에 접어들게 되는데, 이 때는 조향핸들이 부드럽게 중앙으로 복귀하여야 하며, 복귀력과 감쇠력이 적절히 발생되어 조향핸들의 오버슈트와 복귀 시간이 단축되는 것이 바람직하다.

파라미터 a 와 r 는 이러한 상황에 있어서 두 함수 u_1 과 u_2 중 지배적인 제어항을 선택하며, 특히 r 은 차속에 따른 u_2 의 크기를 조절하는 역할도 하게 된다. Fig. 8은 a 와 r 의 값을 적절히 선택하고 속도에 대한 u_2 의 가중치를 제어하는 알고

리즘을 나타낸다.

u_1 과 u_2 중 어떤 제어를 수행할 것인가를 선택하는 가장 큰 기준은 조향토크의 크기이다. 보조토크를 제어하는 u_1 항은 조향칼럼을 통해 운전자가 어떤 값 이상의 노면토크를 느끼기 시작할 때부터 활성화되고, 조향핸들의 복귀기능을 제어하는 u_2 항은 조향칼럼에 작용하는 부하가 거의 없을 때 활성화되기 때문이다. 예를 들어, 주행 중에 조향핸들을 중앙에서 벗어나게 회전시키면 조향토크가 증가하는데, 이 때는 보조토크를 제어하는 u_1 항이 활성화되어야 한다. 또한, 조향핸들이 중앙으로 복귀할 때는 운전자가 조향핸들을 살며시 잡거나 조향핸들에 적극적인 토크를 가하지 않으므로 조향칼럼에 걸리는 토크는 미미하게 되는데, 이 때 u_2 항이 활성화된다. Fig. 8(a)는 이러한 상황의 선택기준을 나타낸다. 이 때, T_c 는 u_1 과 u_2 의 경계가 되는 토크값을 나타낸다. 즉, 조향토크가 T_c 보다 작을 때는 u_1 항을 제거시킴으로써, 결과적으로 u_2 만이 활성화항으로 남아 있도록 하였다. 한편, (b)는 u_2 의 활성화영역을 좀더 확실하고 정확하게 정의하기 위한 항이다. u_2 는 조향핸들이 셸프얼라이닝 토크로 인하여 회전하고 있을 때 활성화되어야 한다.

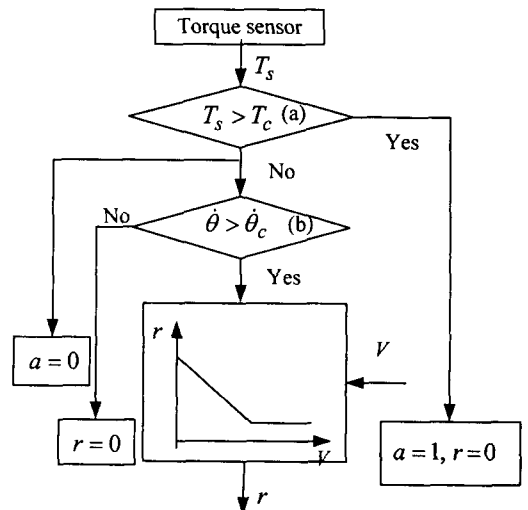


Fig. 8 Flowchart for decision of weight a & r

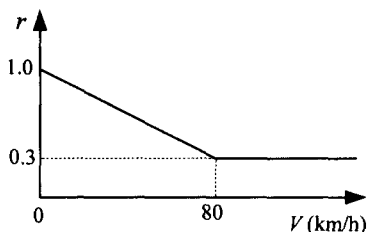


Fig. 9 Weight r as a function of vehicle speed

Fig. 9는 u_2 의 속도에 대한 가중치를 제어하는 맵이다. 고속에서는 노면토크의 크기가 감소하므로, 제어를 수행하기 위해 필요한 u_2 값의 크기도 줄어들어야 한다. 만약, 이 값이 줄어들지 않으면 오히려 더 큰 오버슛을 초래하여 차량의 안정성을 저해할 수도 있다. 결론적으로, 제안된 로직에 사용된 u 는 다음과 같다.

$$u = a \left\{ K_1 (T_{rs} - T_s) + K_2 \int (T_{rs} - T_s) dt \right\} + r \left\{ \frac{(K_3 \theta + K_4 \int \theta dt)}{K_d} + K_5 \dot{\theta} \right\} \quad (3)$$

여기서, K_1, K_2, K_3, K_4 와 K_5 는 각각의 이득을 나타낸다. u_1 은 PI제어를 통해 구현하였고, u_2 는 PID 제어를 통해 구현하였다. 여기서, K_d 는 신호 전환 시에 안정성을 향상시키기 위해서 도입한 파라미터이다. 예를 들어, 운전자가 조향핸들을 중앙에서 시계방향으로 돌리다가 회전방향을 바꾸어 다시 중앙으로 복귀할 때, 제어신호는 u_1 에서 u_2 로 전환하게 되는데, 이 때 u_2 로의 갑작스런 전환으로 조향핸들이 다소 불안정하게 흔들리는 경향이 나타나게 된다. K_d 는 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소함으로써, u_2 의 값을 점진적으로 증가시키는 역할을 하기 때문에 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 조향토크의 경감기능

Fig. 10은 동적 조향 패턴에 대한 결과인데, 차량이 곡선차로에 접어드는 상황을 재현하였다.

운전자는 5초를 주기로 하여 180° 크기를 갖는 정현파 패턴으로 조향핸들을 회전하게 된다. 이때, 타이어와 지면의 마찰력 등에서 기인하는 노면토크는 Dugoff 타이어모델에 기초하여 부하모터를 통해 재현하였다. 이 때, 편의상 시계방향으로의 조향토크를 양(+)으로 표시하기로 한다.

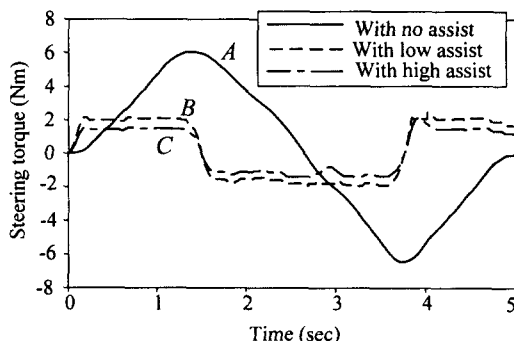


Fig. 10 Steering torque with sinusoidal steering input

만약, 보조모터가 보조토크를 발생시키지 않는다면 이러한 노면토크는 그대로 운전자가 부담하여야 한다 (곡선 A에 해당). 하지만, 운전자는 보조모터의 제어를 통하여 경감된 조향토크로 운전이 가능하게 되는데, 이 때 Fig. 10의 곡선 B, C에서 볼 수 있듯이 기준 조향토크(T_{rs})를 조정함으로써 비교적 다양한 조향감을 만들어 낼 수 있다. 즉, 기준 조향토크를 조향감을 차별화하는 파라미터로 사용하는 것이 가능하다.

4.2 복귀성능의 향상

운전자가 곡선차로에서 직선차로로 진입할 때, 조향핸들은 중앙으로 복귀하게 된다. 이 때, 조향핸들은 셀프얼라이닝 토크에 의해서 스스로 중앙으로 복귀하게 되는데, EPS 시스템은 이러한 중앙복귀력을 적절히 조절하여 중앙으로 복귀하는 시간을 감소시킬 수 있게 한다. 기존의 수동식 차량이나 유압동력식 차량은 이러한 복귀시간을 적극적으로 조절할 수 없는데 비해서, EPS 시스템에서는 보조모터의 제어를 통해서 이를 조정하는

것이 가능하다.

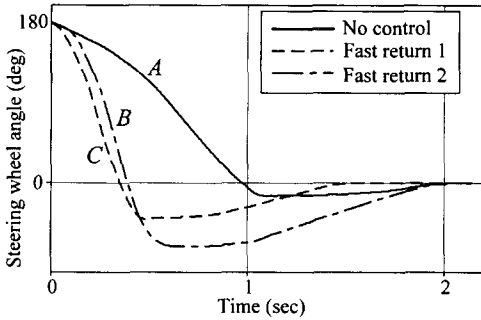


Fig. 11 Improved return-to-center performance with an EPS system

Fig. 11에서 A는 보조모터의 제어가 개입하지 않았을 때, 순수한 복귀력이 만들어 내는 조향핸들의 궤적을 나타낸다. 이 때는 조향핸들이 중앙 위치(0°)까지 도달하는 데 약 1sec 정도의 시간이 소요된다. Fig. 11에서 B와 C는 보조 모터 제어를 통해 중앙복귀력을 증가시킨 결과를 나타내는 것으로, 이 때의 복귀시간은 약 0.4sec와 0.35sec 정도가 된다. 여기서도 볼 수 있듯이, 보조모터의 제어신호 u_2 의 가중치 r 를 조절함으로써 다양한 복귀성능을 재현할 수 있다. 그러나 복귀시간은 단축되었지만, 과도한 오버슈트가 발생하게 된다.

4.3 감쇠성능의 향상

셀프얼라이닝 토크는 조향핸들을 복귀시켜서 자연스럽게 조향핸들을 원점으로 돌아가게 하지만, 과도한 오버슈트가 발생할 수도 있다. 기존의 유압동력식 시스템은 조향시스템 자체의 관성으로 인하여 어느 정도의 감쇠성능을 제공하는 것이 가능하나, EPS 시스템은 이러한 감쇠에 적극적으로 관계할 수 없는 단점이 있다. EPS시스템은 이러한 감쇠성능을 보조모터를 통해 적극적으로 제어할 수 있기 때문에, 유압동력식 시스템 보다 우수한 감쇠보정 성능을 보여준다.

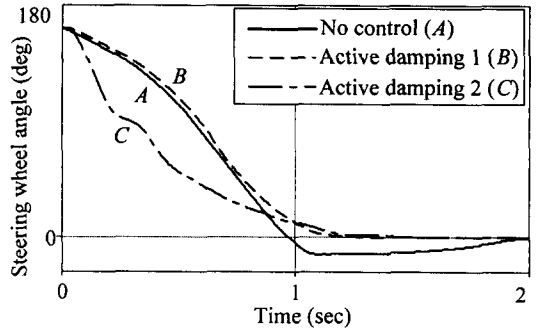


Fig. 12 Improved damping performance with an EPS system

Fig. 12에서 A는 보조모터의 제어가 개입하지 않았을 때 조향핸들의 회전 궤적으로, 조향핸들이 원점으로 복귀하면서 약 20°의 오버슈트를 보이고 있다. 그림에서 B와 C는 보조모터의 제어를 통해 감쇠성능을 향상시킨 궤적을 나타내는데, 조향핸들의 오버슈트가 전혀 발생하지 않음을 볼 수 있다. 하지만 조향핸들의 중앙복귀 시간이 약 0.2sec 정도 지연되는 단점을 초래하게 된다. 이는 감쇠력이 셀프얼라이닝 토크와 반대 방향으로 작용함으로써 복귀력을 감소시켰기 때문이다.

4.4 복귀성능과 감쇠성능의 향상

4.2절과 4.3절에서 보조모터의 제어를 통해 복귀성능과 감쇠성능이 각기 향상될 수 있지만, 각각 오버슈트와 중앙복귀 시간이 증가하는 단점도 발생한다는 것을 살펴보았다. 그러나, 이 두 가지의 단점은 복귀성능과 감쇠성능을 동시에 구현함으로써 극복될 수 있음을 살펴보고자 한다.

Fig. 13과 같이, 보조모터의 제어를 통해서 중앙복귀성능과 감쇠성능이 모두 향상되었음을 알 수 있다. 조향핸들의 오버슈트가 제거되었을 뿐만 아니라, 중앙으로 복귀하는 시간이 약 0.2 sec 정도 단축되었다.

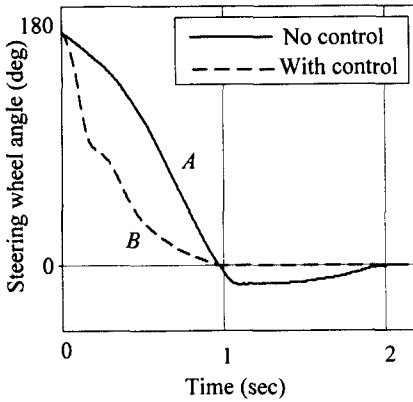


Fig. 13 Improved return and damping capabilities

5. 결 론

이 논문에서는 운전자에게 적절한 조향토크를 제공하고, 조향핸들의 복귀 성능과 감쇠 성능을 동시에 향상시킬 수 있는 제어로직을 제안하였다. 또한, 제안된 제어로직을 통해 조향시스템의 하드웨어적인 튜닝을 거치지 않고, 소프트웨어적으로 제어 파라미터를 교정함으로써 조향감을 쉽게 변화시킬 수 있다는 것을 보였다. 또한, 제어로직의 검증에 위해 차량의 주행상황에 따른 노면 토크와 복귀력을 재현해 주는 하드웨어 시뮬레이터를 제작하였는데, 이는 EPS 시스템의 제어로직 개발시에 로직의 타당성 및 성능을 간단히 시험해 볼 수 있는 실험장치로 사용될 수 있다.

후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Badawy, A. A., Bolourchi, F. and Gaut, S.K., "ESteer system redefines steering technology", Automotive Engineering, SAE International, pp.15~18, 1997.
- 2) SAE International, Automotive Engineering, pp.39~40, 1997.
- 3) Noh, K. H., "A HILS system for testing electronic power steering systems," International Pacific Conference on Automotive Engineering, 971390, 1997.
- 4) Shuji, Endo, "Control apparatus with stability compensator for electric power steering system," United State patent, 5732373, 1998.
- 5) Yoshinobu, Mukai, "Electric power steering device", United State patent, 5844387, 1998.
- 6) Crandall, S. H., *An introduction to the mechanics of solids*, McGraw-Hill, pp. 372-374, 1978.
- 7) Wong, J. Y., *Theory of Ground Vehicles*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1993.