한국자동차공학회논문집 제 10 권 제 4 호, pp.166-174

승용차용 전자제어식 파워스티어링 콘트롤러의 설계 및 개발에 관한 연구

A Study on Design and Development of the Electronically Controlled Power Steering Controller for a Passenger Car

김 광 열*, 김 태 훈*
Gwangyull Kim, Taehun Kim

ABSTRACT

Power steering systems for automobile are becoming ever more popular because they reduce steering efforts of the drivers, especially during parking lot maneuver. In this paper, the controller of the motor driven hydraulic power steering(MDHPS) has been designed and developed. This system uses a power source of DC motor instead of engine power source for power steering drive oil pump. The developed MDHPS system is accomplished a highly sensitive power steering resulted from electronic control under variable driving condition. Furthermore, this system is more improvement than type of engine driving for fuel economy.

주요기술용어 : MDHPS(모터구동 유량 제어식 동력 조향장치), Power current controller (대 전류 제어기), Power steering system(동력 조향장치), ECU(전자제어 장치), PWM(펄스 폭 변조), Moving average method(이동 평균법)

1. 서 론

최근 급속한 사회발전에 따라 에너지의 소비가 증가하고 그에 따른 환경문제가 사회적인 문제로 대두되고 있다. 이러한 영향으로 자동차 업계는 에너지 절약형 및 최적의 제어가 가능한 전자화된 자동차 개발을 경쟁적으로 하고 있다.[1-4] 이러한 시대적 조류에 발맞추어 전자 제어식 파워 스티어링(power steering) 개발에 나서게 되었으며, 그 목적은 기존의 파워 스티어링 시스템에 부가하여 차량의 주행상태에 따른 최적의 조향감을 제공해주는 전자제어장치(control unit)의 개발에 있다.

현재까지의 전자제어 파워 스티어링 시스템의 연구동향을 보면 제어기(controller)를 이용하여 차속에 따라 스티어링의 공급유량을 조절하는 SSPS(speed sensing power steering), 오일펌프 대신 모터만으로 운전자의 조타력을 경감시키는 EPS(electric power steering),[5-7] 4륜 조향장치인 4WS(4 wheel steering), DC모터로 오일펌프를 구동하여 차속과 조타 빈도에 따라 조타력을 제어하는 EHPS(electric hydraulic power steering)[8,9] 등으로 연구와 상품화가 병행되고 있다.

SSPS시스템은 조타력 경감을 제어하는 인자가 차속 1개라는 단점을 가지고 있어 제어에 한

* 회원, 마산대학 기계자동차계열

계가 있다.

한편 국내 연구동향을 보면 조향 시스템을 위한 시뮬레이터 개발[10]이나 전기구동 차량의 성능해석[11] 또는 전동식 동력 조향장치 시험을 위한 시스템개발[12] 등에 국한되어 있으며 조향장치용 ECU의 제작단계부터 실차 시험까지 수행한 발표는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모터와 차속센서, 오일펌프등을 이용한 SSPS 시스템과 모터와 감속기구, 토오크센서등을 이용한 EPS 시스템[1-4,12]과는 달리 모터와 오일펌프가 일체화된 모터펌프, 차속센서와 스티어링휠센서(steering wheel sensor)등으로 시스템을 구성하였고, 각각의 센서에서 출력되는 2개의 신호를 이용하여 보다 향상된 조타감을 확보할 수 있는 방법을 제안하고자한다.

본 논문에서는 MDHPS(motor driven hydraulic power steering)용 ECU(electronic cont- rol unit)의 설계, 제작 단계부터 국내 주행모드 선정을 위한 신호처리기법, 벤치시험, 실차시험, 평가 순으로 기술하고자한다.

2. 시스템의 구성

MDHPS 시스템은 엔진동력을 이용하여 파워스티어링에 유량을 공급하던 종래의 방식과는 다르게 모터로 유량을 공급하는 특징을 가지고 있다. 또한 본 시스템의 구성은 각종센서로부터 입력된 데이터를 토대로 최적의 유량을 파워 스티어링에 공급하기 위한 ECU, 운행중인 차량의 정보를 수집하기 위한 각종 입, 출력센서, 운행조건 및 도로조건에 적합한 토출 유량을 계산하기 위한 소프트웨어, 그리고 최종 구동부인 모터펌프 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용된 차속 계산방법은 차속 센서에서 간헐적으로 입력되는 불규칙한 차속을 보다 안정화하기 위해 이동평균법을 사용함으로써 실제 저역통과 필터링을 취한 것과 동일한 효과가 나도록 소프트웨어를 설계하였다.

2.1 MDHPS 시스템의 구성 및 특징

MDHPS 시스템은 파워 스티어링에 공급되는 유량을 모터로 제어하는 시스템으로 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있다. 본 연구에 사용된 모터의 사양은 DC 12V70A, 400W, 2800rpm의 것을 사용하였으며 베인타입(vane type)의 오일펌프를 사용하였다. 시스템의 구성은 Fig. 2에서 처럼 차량의 다양한 변화를 감지하여 ECU로 전달하는 센서(sensor)부, 각종도로와 주행상태에 따라 조향감각을 종합적으로 판단하는 ECU, ECU의 출력신호를 기초로 직류모터를 구동하는 대전류 제어기(power current controller), 그리고 유압을 발생시키는 모터펌프(motor pump)등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 적용된 시스템은 파워 스티어링 구동용 오일펌프를 작동시키는 동력원을 엔진 동력 대신 직류모터를 사용함으로써, 종래의 파워 스티어링 시스템에 비해 연비절감을 도모하였다. 또한 ECU에 의해 파워 스티어링의 공급 유량을 조절하여 변화하는 운전 상태 하에서 저속영역에서는 가볍게, 고속영역에서는 무겁게 하는 등 전자제어로 최적의 조향감을 확보할 수 있도록 하였다. 한편 자유로운 펌프 레이아웃(pump layout)변경으로 차량설계의 유연성을 도모할 수 있으며 Fig. 3과 같이 차속과 조타빈도에 따라 파워 스티어링의 출력 특성곡선을 임의조정할 수 있는 특징 등을 가지고 있다.

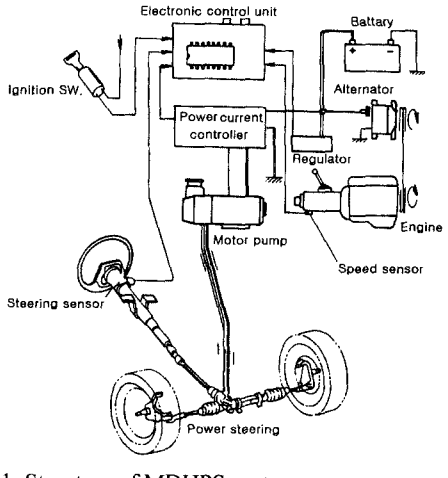


Fig. 1 Structure of MDHPS system

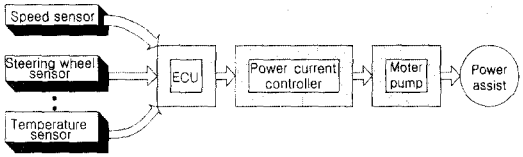


Fig. 2 Control block diagram of MDHPS system

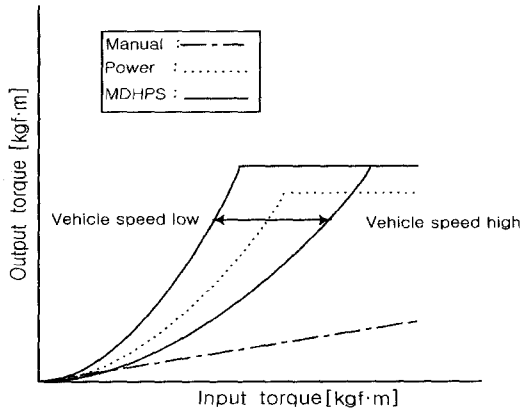


Fig. 3 Input-output characteristic curve of MDHPS system

2.2 하드웨어의 설계

본 연구에서 설계 및 시 제작한 ECU는 Fig. 4와 같이 8개의 기본 모듈로 구성하였다. DC모터를 제어하기 위한 PWM(pulse width modulation) 제어출력[14], 상위 컴퓨터와의 정보교환을 위한 통신 회로[15], 동작 상황을 확인할 수 있는 선택 스위치, 각종 정보표시를 위한 7세그멘트 LED등으로 구성하였다. 또한 유압 및 온도상황을 입력하기 위한 센서 구동회로와 A/D변환기, 그리고 모터의 구동전류를 항상 감시하여 과 전류 유입

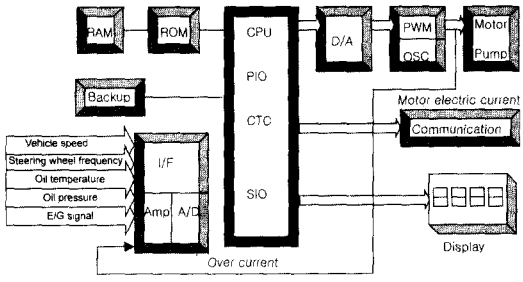


Fig. 4 Block diagram of ECU

시, 출력 드라이버 회로를 보호하기 위한 회로도 추가하였다.

중앙처리장치로는 8bit 마이크로프로세서를 사용하여 각종 센서로 입력된 정보의 처리 및 PWM제어를 수행하도록 하였다. 여기서 PWM의 궁극적 역할은 DC모터의 속도제어 인자로 작용하게 되는데 D/A 변환된 출력과 삼각파의 조합으로 이루어진 듀티 사이클(duty cycle)을 제어하게 하였다.

여기서 듀티 사이클 D는

$$D = \frac{T_{High}}{T_{High} + T_{Low}} \quad (1)$$

로 결정되어 진다.

시 제작된 ECU의 기억장치로는 구동 프로그램을 저장하기 위한 EPROM(32K)과 변수 데이터 저장을 위한 RAM(32K)으로 구성하였고, 단전시(power off) 정보 보관을 위하여 충전용 배터리로 백업(backup)처리 하였다. 또한 차속, 조타빈도, 유온, 엔진구동 유, 무 모터의 과 전류 흐름 등은 입력변수로, 모터 제어용 PWM 제어신호 및 LED정보, 릴레이(relay), 팬(fan), 램프(lamp), 부저(buzzer) 등은 출력변수로 정의하였다. 본 연구에서 제작한 ECU의 하드웨어는 Fig. 5와 같다.

2.3 소프트웨어의 구성

ECU에서 구동되는 전체 프로그램의 흐름은 Fig. 6과 같다. 주요 신호처리 알고리즘은 다음과 같다.

Fig. 5 Photograph of the ECU

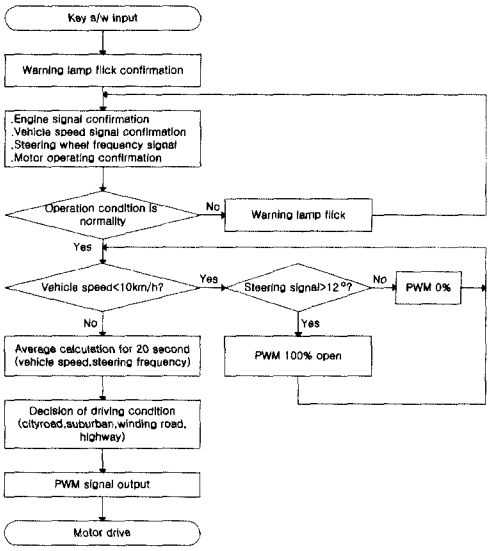


Fig. 6 Driving algorithm flowchart

먼저, 키 스위치 신호가 입력되면 ECU는 경고등(warning lamp)을 점멸시켜 경고등의 이상유, 무를 확인하도록 하였다. 상기 동작이 완료되면 초기진단 과정인 엔진신호, 차속신호, 조타빈도 신호, 모터 동작등을 점검하여 작동상태의 정상여, 부를 점검한다.

초기진단이 완료되면 차속센서와 스티어링휠 센서로부터 입력된 신호를 바탕으로 차속이 10km/h 이하인지, 조타각이 12° 이상인지를 가지고 현재 운전자가 차량을 주차시키고 있는 상태인지, 저속운행 상태인지를 판단하여 PWM량과 모터의 구동속도를 결정한다. 즉 차속이 10km/h 이하이고, 조타각이 12° 이상이면 저속에서 조타각이 큰 상태임으로 ECU는 운전자가 주차 상태임을 인지하고 PWM량을 최대로 개방하여 조향휠을 가볍게 한다.

한편, 차속이 10km/h 이상으로 판정되면 이때부터는 이미 정해진 4가지 주행모드 중 하나가 선택되어 PWM량을 결정, 모터를 구동하는 알고리즘으로 되어있다.

여기서 사용된 스티어링휠 센서는 포토인터럽트(photo interrupter)와 원판에 60개의 슬릿(slit)이 가공된 간이 엔코더(encoder)로 스티어링 컬럼(steering column)에 장착하여 조타빈도를 측정하였다.

차속을 계산하기 위한 프로그램은 차속 센서의 펄스출력을 CTC의 CLK/TRG 단자에 연결하여 펄스가 발생할 때마다 CPU에 인터럽트를 요구하며, 이때 CPU는 해당 펄스 수를 계수하고, 그 값은 단위시간으로 나누어진 후, 디지털 필터를 통과하여 차속을 계산하도록 하였다.

이때 사용된 필터는 FIR(finite impulse response) 필터로서 이동평균법(moving average method)으로 구현하였다. 이동평균법의 장점은 여러 단위시간의 값을 시간에 대해 연속적인 평균을 취함으로써 정확한 값을 측정할 수 있으며, 일종의 저역통과 필터링(low pass filtering)을 취한 것과 같은 효과가 나타난다. 이동평균법의 구현은 먼저 메모리에 순환버퍼(circulating buffer)를 두고, CTC에서 0.1초의 단위시간을 만든 후 단위시간마다 순환버퍼를 채워나가는 동시에 평균하는 피젯수의 합을 0.1초 단위로 이동한다. 이때 피젯수의 개수는 10개로 하였으므로 누적시간(cumulative time)은 1초이다. 따라서 전체평균의 갱신시간(update time)은 0.1초이며, 평균의 전시간은 1초가 된다. 결국 1초에 대한 펄스수가 주파수이므로 주파수와 속도의 관계에서 속도를 환산해 낼 수 있는 것이다. 이것을 수식화 하면

$$\frac{\text{1초간 누적 펄스수}}{\text{경과된 시간 1초}} = \text{평균 주파수} \tag{2}$$

1초 후 다음 단의 평균 주파수 계산은
전단의 1초간 누적 펄스 수 = Acc
0.1초경과 후 0.1초간 펄스 수 = New
0.1초 전의 0.1초간 펄스 수 = Old
라고 했을 때

$$\frac{\text{Acc} + \text{New} - \text{Old}}{\text{새로운 경과시간 1초}} = \text{이동된 평균 주파수} \tag{3}$$

이러한 과정을 도식화하면 Fig. 7과 같다.

조타빈도는 스티어링 컬럼부에 부착한 스티어링휠 센서로부터 입력된 펄스를 마이크로프로세서의 CTC를 통해 CPU에 인터럽트를 걸어,

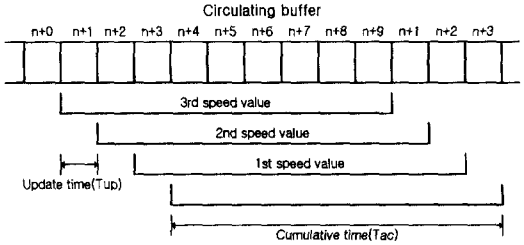


Fig. 7 Vehicle speed calculation for circulating buffer

차속를 측정하는 알고리즘으로 조타빈도를 계산하게 하였다. 조타빈도를 계산하기 위한 갱신시간은 1초를, 누적시간은 20초를 설정하였는데 이는 20초 동안의 조타빈도를 이용하여 주행모드를 결정하기 위함이고, 갱신시간은 약 1초 동안의 펄스숫자를 누적하여 사용하였다. 여기서 차속이나 조타빈도를 얻어내기 위한 알고리즘에서 사용된 이동평균법은 주파수 영역에서 볼 때는 저역통과 필터에 해당하기 때문에 고주파 잡음을 해소할 수 있었다.

PWM 발생장치는 삼각파 발진기와 D/A변환기 출력을 비교하여 트랜지스터를 구동시킬 것인가 아니면 차단시킬 것인가를 결정하게 되는데 이는 하드웨어적으로 구현되어 있다. 단지 프로그램에서는 차속과 조타빈도에 따라 D/A 변환기의 출력값을 변화시킨다. 이렇게 변화된 출력값은 삼각파와 비교되어 단위시간당 트랜지스터의 통전시간으로 만들어진 PWM량으로 DC모터의 속도를 변화시키게 된다.

또한 차속이나 조타빈도의 급격한 변화로 인한 DC모터의 급격한 회전수 변화가 스티어링 휠에 그대로 전달되어 운전자에게 갑작스런 충격을 주게되므로 DC모터의 속도를 점차적으로 변화시킬 필요가 있다. 따라서 한 개의 D/A 출력 값에서 다른 출력 값으로의 변화할 때 적절한 기울기를 갖도록 하기 위하여 본 연구에서는 이러한 변화율을 실시간 개념을 갖는 타이머를 구동시켜, 일정 시간마다 정해진 값 만큼씩만 출력 값을 갱신하도록 하였다.

개발된 제품은 프로토 타입(prototype)인 만큼 여러 가지 부수적인 기능을 갖도록 설계하였고, 이러한 부수적인 기능으로는 상위 컴퓨터와의 정보 교환을 위한 직렬통신 회선인 RS-232C를 통해 ECU자체의 현 정보를 상위 컴퓨터에 전송하고, 역으로 상위 컴퓨터의 명령에 의하여 ECU의 동작모드를 변환시킬 수 있도록 프로그램 하였다. 또한 자체적으로도 디스플레이 장치를 구동시켜 원하는 정보를 출력시켜 동작상황을 감시 및 확인할 수 있고, 스위치의 선택에 따라 그 정보의 종류를 선택할 수 있게 하였다.

MDHPS용 ECU는 어떠한 상황과 환경에서도 정상적인 기능을 발휘해야 하는 보안부품이기 때문에 프로그램에서 소프트웨어의 동작상황을 항상 감시하여야 한다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 워치독(watchdog) 기능을 이용하여 프로그램에서 일정시간 마다 이 타이머를 리셋(reset) 시킴으로서 프로그램의 폭주현상을 방지할 수 있도록 하였다.

3. 시험 및 결과

제작된 ECU가 변화하는 각종 도로 및 운행조건에서 설계자의 의도와 같이 작동하는지를 검증하기 위해 먼저, Fig. 9, 10과 같이 시뮬레이션과 벤치시험을 한 후, 발생된 문제점들을 수정 · 보완하여 최종적으로 실차에 탑재하여 그 성능을 비교 · 분석하였다.

3.1 벤치시험 장치 및 방법

ECU가 목적하는 기능을 발휘하는지를 확인하기 위해 먼저 Fig. 8, 9와 같은 방법으로 실험실에서 모의환경을 구축하고 각종의 가상 데이터를 컴퓨터로 제공하여 ECU의 각종 성능을 평가하였다. 평가에서 발생된 미비점을 수정, 보완한 후 Fig. 10와 같은 MDHPS전용 벤치 시험기를 이용하여 ECU의 완벽한 동작을 확인한 다음 실차시험을 행하였다.

모의실험에서 사용된 데이터는 국내도로 주행모드 수집을 위해 설계, 제작한 조타력계 신호

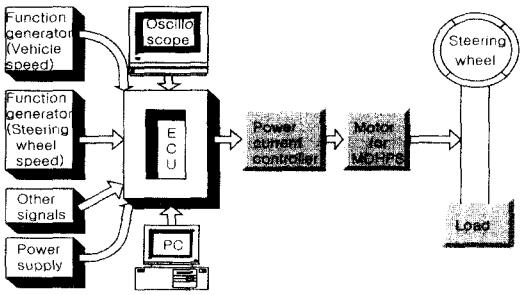


Fig. 8 Block diagram of MDHPS

Fig. 9 Simulator for the MDHPS

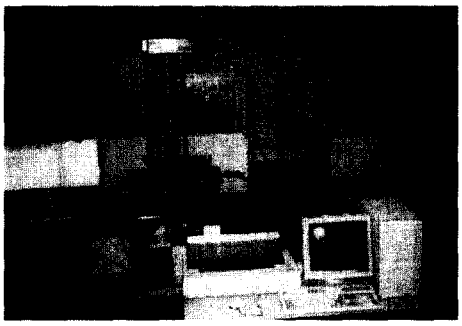


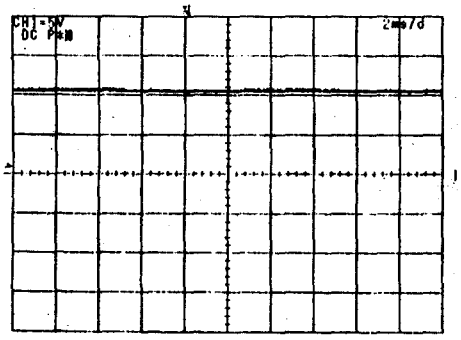
Fig. 10 Bench tester for a power steering

처리 시스템을 이용하여 추출한 차속, 조타빈도, 조향각 등의 각종 데이터 (국내 도심지도로, 2차선 국도, 굴곡로, 고속도로)를 사용하였다.

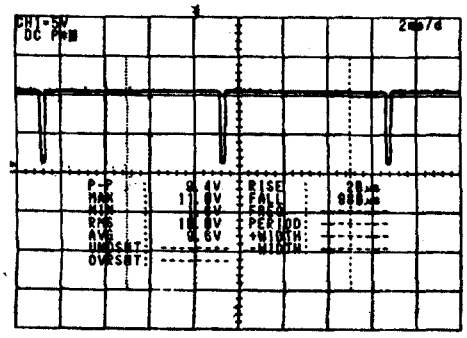
컴퓨터가 ECU에 제공하는 데이터의 속도는 컴퓨터에서 발진기의 주파수를 변경하도록 하였다. 매 0.1초마다 i8253의 클럭 타이머 IC의 발진주기를 갱신하게 하여 차속은 0.1초마다 갱신되어 실제 상황과 같은 속도 조건으로 실험할 수 있도록 하였다. 조타빈도 데이터도 0.1초마다 입력하여 놓은 핸들의 각도를 이용하여 매 0.1초당 증분 숫자에 해당하는 펄스를 발생시켜 ECU의 조타빈도 입력단자에 제공하였다. 그 외의 입력신호는 컴퓨터에서 키(key)입력을 통해 수시로 변경할 수 있도록 하였다. 그리고 ECU의 응답은 PWM의 주기비를 조정하는 D/A 변환기의 출력 데이터 값을 RS-232C 통신을 이용하여 컴퓨터에 입력하였다.

3.2 벤치시험 결과

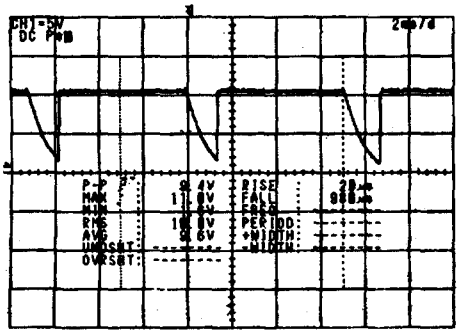
본 연구에서 설계, 제작한 전자제어식 파워스티어링용 ECU를 탑재한 벤치시험 장치에서의 조향 성능의 실험결과, 차속과 조타빈도에 따른 PWM신호는 Fig. 11과 같다. 이것은 정지 시, 5km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h, 100km/h에 해당하는 차속을 각각 입력 시켰을 때의 PWM폭을 나타낸 것이다. 벤치 시험결과 정지 시와 저속영역에서는 PWM의 폭을 최대한 개방시켜 스티어링 시스



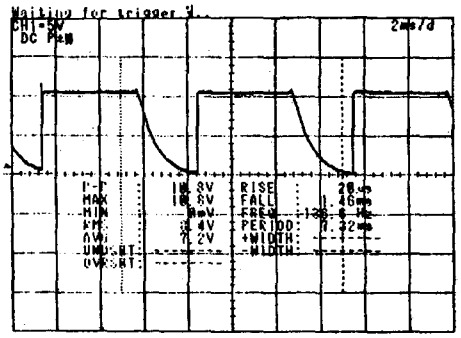
(a) Vehicle speed(0km/h)



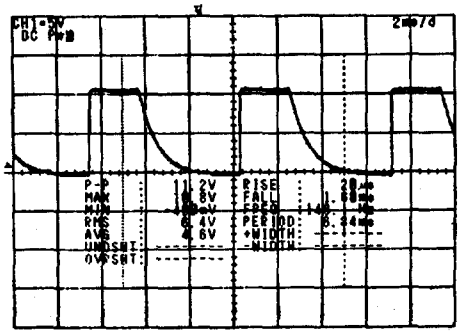
(b) Vehicle speed(5km/h)



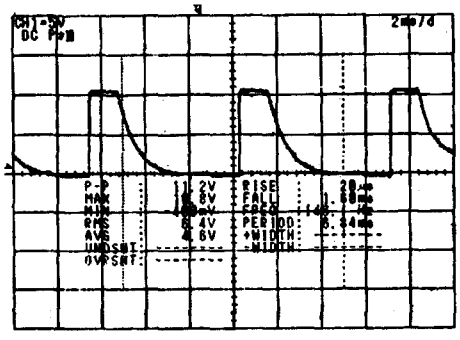
(c) Vehicle speed(40km/h)



(d) Vehicle speed(60km/h)



(e) Vehicle speed(80km/h)



(f) Vehicle speed(100km/h)

Fig. 11 PWM output wave with vehicle speed

템에 공급되는 유량을 최대로 공급하여 운전자의 조타력을 최소한으로 감소시킴을 알 수 있고, 또한 차속이 증가함에 따라 PWM의 개방 폭을 최소화시켜 스티어링 시스템에 공급되는 유량을 점차로 감소시켜 조타감을 무겁게 하여 운전 안정성을 도모할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 도로조건에 적합한 조타력은 Table 1의 MDHPS 목표와 같이 얻었으며, Table 1에서 알 수 있듯이 고속영역(고속도로 모드)에서는 운전 안정성을 도모하기 위해 최소의 조타력을 발휘하도록 되어있는데, 이는 도심지 조타력의 약 30%를 나타내도록 하였다.

Table 1 Steering force with road condition

도로 조건	차속	조타 빈도	조타력		PWM 주기비 Duty Cycle
			기존 시스템	MDHPS 목표	
도심지	낮음	적음-많음	가벼움	가벼운 조타력	100%
2차선 국도	중간	적음	적정함	적정함	43～100%
굴곡로	중간	중간-많음	가벼움 (불안)	조향 안정성 유지	32～100%
고속 도로	높음	적음	가벼움	무거움	32% 이하

3.3 실차시험 결과

벤치에서 시험한 데이터와 안정성을 토대로 Fig. 12와 같이 A社 S차량에 실차용 각종센서(차속센서, 스티어링휠 센서등)와 계측장비를 탑재하여 실차시험을 행하였다. 1차로 프로빙 그라운드(proving ground)와 도심지도로, 2차선 국도, 굴곡로, 고속도로등을 실차 시험한 결과 Fig. 13에 나타난 그래프와 같이 차속과 조타빈도에 따라 각 도로 상황에 따른 주행 모드변환이 발생하였고 각 모드별로 그래프의 궤적을 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 시험구간 별 PWM량 및 조향감은 Table 2와 같다.

차속이 높아지면 PWM량이 감소하고 차속이

낮아지면 PWM량이 높아지는 MDHPS 시스템의 작동여부를 실차 시험에서 확인한 결과, Fig. 13과 Table 2에 나타난 결과와 같이 벤치시험과 유사한 결과를 볼 수 있다. 저속영역인 도심지도로에서는 ECU에서 모터의 작동시간을 결정하는 PWM량을 최대로 출력(53)하는 것을 볼 수 있다.

그리고, 고속영역으로 갈수록 PWM량이 감소(17이하)하는 것을 볼 수 있으며, 고속도로구간에서 도심지구간 조타력의 32%(고속도로 : 17, 도심지 도로 : 53)가 나타나 벤치시험 목표와 비슷한 결과가 나타남을 알 수 있다.

또한 조타빈도와 관련한 인자를 보면 특정차속(0～40km/h, 80～160km/h)에서는 조타빈도와 무관하게 차속에만 의존하여 저속(0～40km/h)에서는 PWM량을 최대로, 고속영역(80～160km/h)에서는 최대로 출력하는 현상을 볼 수 있고, 동일 차속에서는 조타빈도가 클수록 MDHPS 시스템이 PWM량을 감소시켜 조타감을 무겁게 하여 운전의 안정성을 도모한 결과를 볼 수 있다.

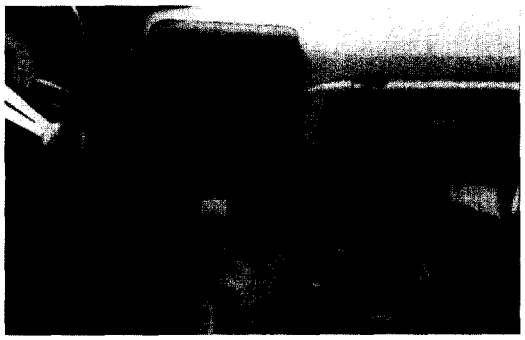


Fig. 12 View of mounted ECU in vehicle

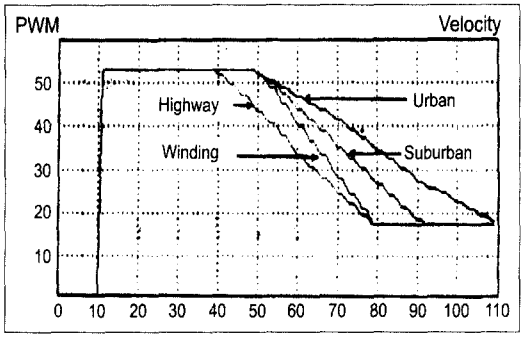


Fig. 13 Control graph of PWM with vehicle speed and steering frequency

Table 2의 전문 드라이버의 조향감각 평가 기준은 SAE (society of automotive engineers)가 규정한 실차 감각평가를 기준으로 하였으며, 평가점수는 일반 운전자들이 용이하게 평가할 수 있도록 Table 3과 같이 총 9등급으로 나누어 평가하였다.

Table 2 PWM and steering sensitivity with test road

실험 구간	차속 (km/h)	조타빈도 (rev/min)	PWM량	조향감(전문 드라이버)
도심지 도로	0～40	조타빈도 와 무관 (4 이상)	53	가벼움(3^0)
2차선 국도	40～80	2이하	23～53	적정함(2^+)
굴곡로	40～80	3이상	17～53	국도보다 무거움(3^0)
고속 도로	80～160	조타빈도 와 무관 (1)	17 이하	무거움 [안정감 : (3^0)]

Table 3 Grade steering sensitivity with test

점 수	첨자	주석	평가항목
3	+	매우 우수	- 가벼움 - 적정함 - 국도보다 무거움
	0	우수	
	-	약간우수	
2	+	양호	
	0	보통	
	-	개선요	
1	+	미달	
	0	불량	
	-	사용불가	

4. 결 론

본 논문은 승용차용 전자제어식 동력 조향장치의 콘트롤러 설계 및 개발에 관한 연구로 ECU를 탑재한 차량의 조향성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 벤치 시험결과와 같이 저속영역에서는 PWM의 폭을 최대한 개방시켜 스티어링 시스템에 공급되는 유량을 최대로 공급하여 운전자의 조타력을 최소화하였다. 또한 차

속이 증가함에 따라 PWM의 개방 폭을 순차적으로 감소시켜 스티어링 시스템에 공급되는 유량을 점차로 감소시킴으로써 운전자의 조타력을 증가시켜 조타감을 무겁게 함을 알 수 있었다. 한편 실차 시험에서도 벤치시험과 유사한 결과를 볼 수 있는데 저속영역에서는 ECU에서 PWM량을 최대로 출력하는 것을 볼 수 있었고, 고속영역으로 갈수록 PWM량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 조타빈도와 관련한 인자를 보면 특정 차속(0～40km/h, 80～160km/h)에서는 조타빈도와 무관하게 차속에만 의존하는 현상을 볼 수 있었고, 동일속도에서는 조타빈도가 클수록 PWM량을 감소시켜 조타감을 무겁게 하여 운전의 안정성을 도모한 결과를 볼 수 있었다.

이상과 같은 본 연구로 MDHPS용 ECU의 설계기법과 시뮬레이션 방법의 발전을 가져왔고, 파생된 연구결과는 국내 주행모드 선정을 위한 조타력계의 설계, 제작 기술의 확보와 동시에 ECU에 탑재 가능한 국내도로 주행모드 데이터를 추출할 수 있었다. 한편, 향후 과제로는 일부 불감대 영역 및 노이즈 제거로 신뢰성을 확보하고 소형화하여 상품성을 가진 보다 진보된 ECU를 제작하기 위해 현재 시제품 크기의 1/3로 축소 제작 중에 있다.

참 고 문 헌

1) S. Oshita, T. Mouri, T. Takahashi, S. Ito, "All Electric Power Steering System," Automotive Technology, Vol.41, No.10, pp.12-16, 1987.
2) Y. Shimizu, T. Kawai, "Development of Electric Power Steering," SAE 910015, 1991.
3) N. Hiwa, M. Takada, I. Ohmura, "The Current Status of Failsafe Design for Electronic Control Systems," Journal of the Society Automotive Engineers of Japan, Vol.46, pp.98-106, 1992.
4) M. Nishimoto, A. IGO, "Pinion Type Electric Power Steering Improvement Through On-Vehicle Evaluations," KOYO Engineering Jour-nal, No.148, 1995.
5) 박동진, 한창수, "전동식 동력 조향 장치 연구를 위한 HILS 시스템개발," 대한기계학회 논문집A, Vol.24, No.12, pp.2883-2890, 2000.
6) H. Shiga, S. Mizutani, Car Electronics, Nippon Denso, 1988.
7) S. Shimada, K. Moroyama, A. Kobayashi, "Development of Power Unit for Electric Power Steering," Journal of the Society Automotive Engineers of Japan, Vol.46, pp.12-16, 1992.
8) Subaru, ALCYONE Service Manual, 1987.
9) J. E. Forbes, S. M. Baird, T. W. Weisgerber, "Electro-hydraulic Power Steering," SAE 870574, 1987.
10) 황정호, 허건수, "차량 조향 제어 시스 템을 위한 조향 시뮬레이터 개발," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제3호, pp.205-213, 1999.
11) 박건선, 김준영, 허건수, 장경영, 오재응, "전기구동 특수차량의 제동 조향 성능 해석," 한국자동차공학회논문집, 제5권 제4호, pp. 29-38, 1997.
12) 류제하, 노기한, 김종협, 김희수, "전동식 동력 조향 시험을 위한HILS(Hard -In -the-Loop simulation)시스템 개발," 한국자동차공학회 논문집, 제7권 제9호, pp.105-111, 1999.
13) 진희수, 정대종, 김용학, 노희동, 김성 주, "전동식 파워 스티어링 시스템 개발" 중기거점 기술논문집, Vol.1, pp.219-226, 1998.
14) M. Mano, Digital Design, Prentice-Hall, 1981.
15) IBM, Personal Computer XT Hardware Reference Library, 1983.
16) J. B. Peatman, Microprocessor Based Design, Mcgraw-Hill, 1992.