

승용차용 전자제어식 조향장치의 개발

홍 예 선

한국과학기술연구원 로보트용용 및 유공압 연구실

Development of an Electronically-controlled Power Steering for passenger cars

Yeh-Sun Hong

Robotics and Fluid Power Control Lab.

Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

This paper describes an Electronically-controlled Power Steering system which is developed by the modification of a conventional power steering based on so called rotary valve technology. The steering effort is influenced by the electrohydraulic flow rate control of the pressurized oil to rotary valve. The vehicle speed and the steering angular velocity are used to calculate and output a signal to proportional flow rate control valve by the Electronic Control Unit. The improvement of the steering feel was satisfactory compared with that of the original conventional power steering.

1. 서론

승용차용 전자제어식 조향장치(Electronically-controlled power steering)는 조향 핸들의 각변위를 전륜의 조향각으로 변환시켜 주는 기본 기능을 발휘함에 있어서 차속과 횡가속도의 변화에 따라 전자제어기가 조향반력을 적절히 변화시켜 주는 기능이 갖추어진 조향장치이다. 따라서 주차 및 저속 주행시에는 조향장치의 조향반력이 작아져야 하고 반대로 고속 주행시에는 조향반력이 증가해야 하는 상반된 요구조건을 효과적으로 충족시킬 수 있다.

유압식으로 작동되는 파워 스티어링(Power Steering)에 기초하는 전자제어식 조향장치는 조향반력을 변화시키는 방식에 따라서 여러 유형이 개발되어 있다(1,2,3,4). 본 논문에서 소개하고자 하는 전자제어 조향장치는 유압식 파워 스티어링에 공급되는 작동유체의 유량을 비례제어식 압력보상 유량제어밸브에 의해 조절함으로써 조향반력에 영향을 주는 방식에 해당된다. 공급 유량을 결정하기 위한 입력변수는 조향 핸들의 각속도와 차속도로서, 마이크로 컴퓨터를 응용한 전자제어기는 이들 입력변수들로부터 자동차의 주행조건을 판단하여 유량비례제어밸브에 가해져야 하는 전기적 신호량을 결정하게 된다.

본 논문에서는 국내에서 생산되고 있는 유압식 파워 스티어링을 전자제어식 조향장치로 간단하게 개선할 수 있도록 개발한 비례제어식 압력보상 유량제어 밸브와 전자제어기의 구성 및 성능 그리고 전체 조향장치의 성능실험 결과에 관하여 소개하고자 한다.

2. 전자제어식 조향장치의 구성

본 논문의 대상인 전자제어식 조향장치는 가장 보편화된 로터리 밸브(rotary valve)를 이용한 유압식 파워 스티어링에 기초를 둔 것으로서 그 구성은 그림 1과 같다.

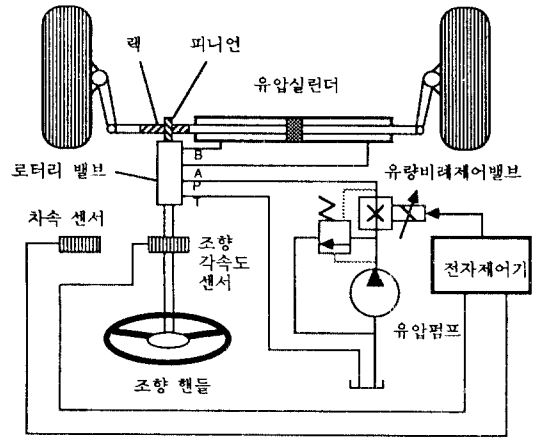


그림 1 : 전자제어식 조향장치의 구성

여기에서 로터리 밸브의 구조를 보다 구체적으로 나타내면 그림 2와 같다. 로터리 밸브 내 스톱과 슬리브 간의 상대 각변위는 조향핸들과 연결된 torsion bar가 비틀림으로써 발생한다. 그림 1에서 조향핸들을 시계방향으로 회전시키면 로터리밸브의 P-포트와 A-포트가 연결되고 B-포트는 T-포트와 연결되므로 유압실린더의 피스톤은 왼쪽으로 이동하면서 전륜을 시계회전 방향으로 조향시키게 된다. 피스톤 로드와 연결된 랙(rack)과 피니언(pinion)을 통해 로터리 밸브의 슬리브를 시계방향으로 회전시키면서 로터리 밸브를 다시 중립상태로 복원시키게 되는데, 이때 피스톤 로드와 작용하는 조향반력을 유지하기 위한 압력차를 피스톤의 전후에 발생시키는 데 요구되는 로터리 밸브의 개도 만큼 남기고 피스톤 로드와 정지한다. 운전자는 이 개도를 유지하기 위하여 토션 바를 계속 비틀고 있어야 하므로 조향핸들에 힘을 주고 있어야 하는데, 이 힘이 유압식 조향장치의 정적인 조향반력에 해당된다. 이러한 과정에서 조향핸들을 돌린 각도와 피스톤 로드와 랙과 맞물려 회전하는 피니언의 회전각도, 즉 전륜의 조향각은 1:1로 상치하게 된다.

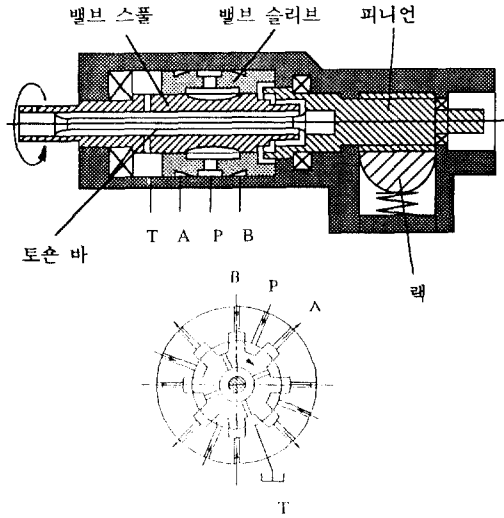


그림 2 : 로터리 밸브의 구조

따라서 조향장치의 조향반력은 전륜에 작용하는 조향 복원력 외에 로터리 밸브내 토슨 바의 스프링 계수, 로터리 밸브의 압력증폭계수 (pressure gain) 그리고 로터리밸브로 공급되는 유량에 의해 영향을 받는다.

로터리 밸브의 실제 입력 토오크-압력 특성선도(그림 3)를 보면 압력증폭계수는 로터리 밸브의 언더랩(underlap)에 의해 기하학적으로 결정되고 로터리 밸브에 공급되는 유량의 함수로서, 유량이 클수록 증가한다. 따라서 공급유량이 작을수록 같은 부하 압력차에 대하여 조향핸들을 더 많이 돌려야 하므로 토슨 바를 비틀어 조향핸들에 가해야 하는 조향력이 증가하게 되고, 또한 토슨 바의 스프링 계수가 클수록 조향반력이 증가한다.

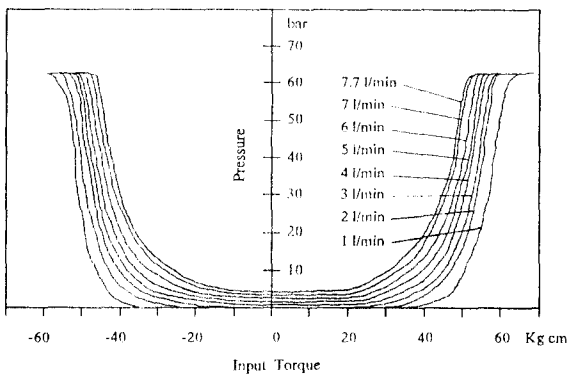


그림 3 : 로터리 밸브의 입력 토오크-압력 특성선도

로터리밸브의 언더랩과 토슨 바의 스프링 계수에 의해 로터리밸브의 입력 토오크- 압력 특성이 기계적으로 일단 결정되면 유압식 조향장치에서 차속에 따라 조향반력을 변화시킬 수 있는 방법은 로터리 밸브로 공급되는 유량을 조절해 주는 방법 밖에 없다.

전자제어식 조향장치는 전자제어기가 차속을 감지하여 저속에서는 로터리밸브로 공급되는 작동유의 유량을 크게 하여 조향반력이 작아지게 하고 차속이 증가할수록 공급유량을 감소시켜 조향반력이 증가하도록 해준다. 이때에 고속에서 공급유량이 감소되면 조향반력은 증가되나 조향용 유압실린더의 반응속도가 느려지게 되므로 직진주행을 하다가 위급히 조향을 해야 할 때에는 순간적으로 충분한 유량이 로터리밸브에 공급되어야 한다.

이것을 위하여 전자제어기는 조향핸들의 회전속도를 추가로 감지하여 조향각속도에 비례하는 유량만큼을 주행조건에 따라 적절히 증가시켜 주게 된다. 전자제어기의 명령에 따라 로터리밸브로 공급되는 유량을 정확히 제어하기 위하여는 병렬 압력보상형 유량비례제어밸브가 유압펌프에 내장되게 된다.

기존의 유압식 파워 스티어링에서는 유압펌프를 구동하는 엔진의 회전속도가 증가함에 따라 로터리밸브로 공급되는 유량을 단계적으로 감소시켜 주는 기능만 갖추고 있다. 따라서 고속주행시에 조향장치의 반응속도가 느려지는 점을 고려할 때 차속에 따른 공급유량의 감소비를 임의로 크게 할 수 없기 때문에 차속에 따른 조향반력의 변화에 있어서 현저한 효과를 얻지 못하는 취약점이 있다.

### 3. 로터리 밸브의 입력 토오크-압력 특성선도

그림 3의 입력 토오크-압력 특성선도를 보면 로터리 밸브의 양쪽 출력 포트 간에 일정한 압력차를 발생시키기 위한 로터리 밸브의 입력 토오크 (또는 회전각도)가 공급유량의 변화에 의해 별로 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 차량의 속도 변화에 따른 조향반력의 변화량을 크게 넓힐 수 없는 주된 원인이 된다. 따라서 로터리 밸브의 압력특성 선도는 소폭의 공급 유량 변화에 의해서도 압력의 변화가 크도록 설계가 개선되어야 한다.

원래의 유압식 파워 스티어링에서는 유량 조절범위를 4,7 l/min 에서 7,7 l/min로 설정 하였는데, 전자제어식 조향장치에서는 1,5 l/min 에서 8,5 l/min로 범위를 확장함으로써 그림에서 알수 있듯이 조향반력의 변화비가 배가 되도록 하였다.

### 4. 유량 제어밸브의 설계, 제작 및 성능실험

그림 4는 유량제어밸브가 내장된 유압펌프의 원래 구조이다. 이 유량제어밸브는 펌프를 구동하는 회전속도가 1000 r.p.m. 에서 1500 r.p.m의 범위에 있을 때는 유량을 7,7 l/min로 제어하다가 1500 r.p.m.에서 2500 r.p.m.까지는 유량을 4,7 l/min까지 점진적으로 감소시키고 2500 r.p.m. 이상에서는 4,7 l/min로 유량을 일정하게 제어해 주도록 되어 있다.

그림 5 는 그림 4의 구조를 개조한 비례제어식 유량제어 밸브의 구조로서

- 1) 압력보상 스펴에 부착된 계량 오리피스를 제거하였고
- 2) 본래의 출구 니플(outlet nipple)대신에 비례전자석으로 작동되는 계량밸브를 장착하였다.
- 3) 이 계량밸브는 교축 부위의 전후에 발생하는 압력차가 압력보상 스펴의 양단에 까지 전달되도록 유로를 내장하고 있고 몸체에의 장착 방향을 임의로 고정시킬 수 있도록 설계하였다.

따라서 기존의 유량제어밸브를 비례제어식으로 개조하는 작업은 계량 오리피스의 제거와 계량밸브의 장착에 의해 손쉽게 이루어 지게 된다.

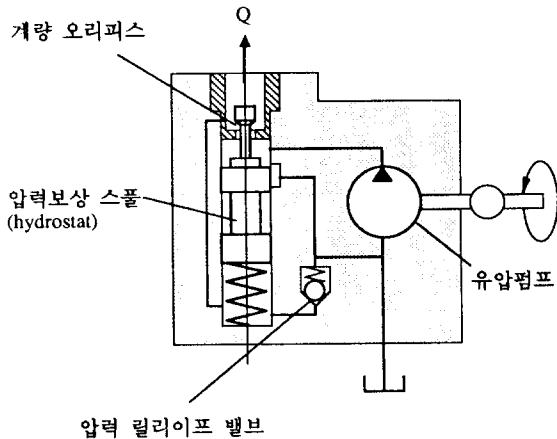


그림 4 : 유량제어밸브의 원래 구조

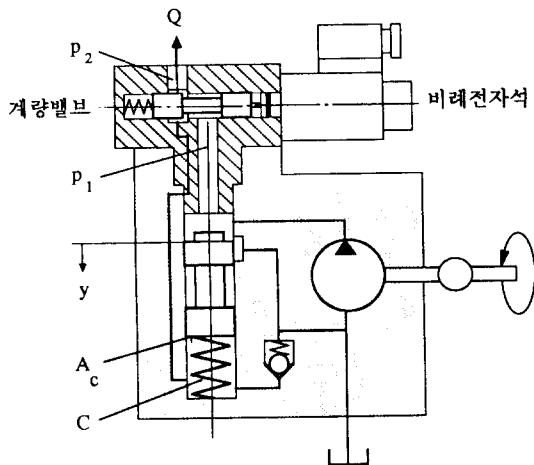


그림 5 : 개조된 비례제어식 유량제어밸브의 구조

계량밸브의 설계는 압력보상 스펴에 의해 계량밸브에 작용하는 압력차가

$$P_1 - P_2 = \frac{C \cdot Y_0}{A_c} \quad (1)$$

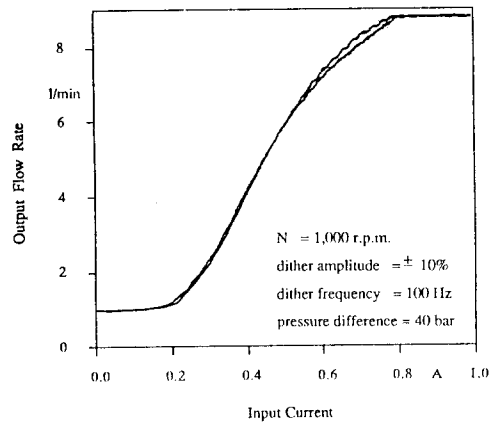
- $P_1$  = 계량밸브의 입력측 압력 (bar)
- $P_2$  = 계량밸브의 출력측 압력 (bar)
- $C$  = 압력차 설정 스프링의 탄성 계수(N/mm)
- $Y_0$  = 압력차 설정 스프링의 초기 압축변위 (mm)
- $A_c$  = 압력보상 스펴의 유효 단면적(mm<sup>2</sup>)

의 관계에 의해 약 1,5 bar로 유지되도록 하였다. 그리고

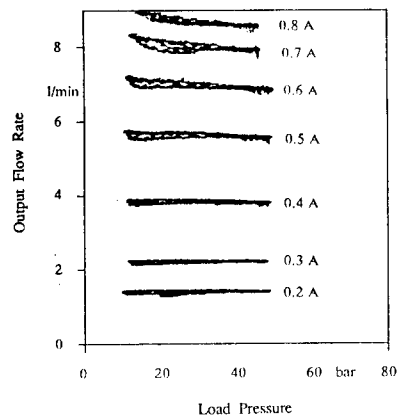
$$Q = B \cdot A_m \cdot \sqrt{P_1 - P_2} \quad (2)$$

- $B$  = 유량계수 ( $\sqrt{m^3/Kg}$ )
- $A_m$  = 계량밸브의 교축 단면적 (mm<sup>2</sup>)

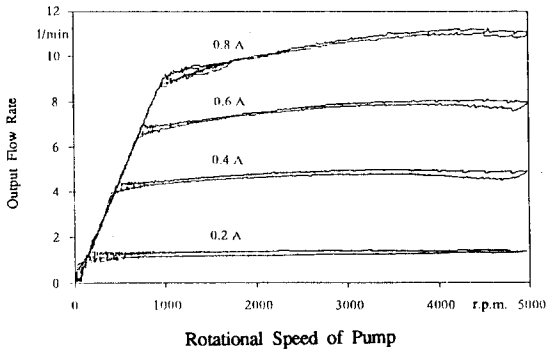
의 유량 방정식을 이용하여 최대 유량이 9 l/min 가 되는 계량밸브의 최대 교축면적  $A_m$  을 구하였다. 이를 기준으로 비례전자석의 구동변위를 1 mm 로 정하고 계량 스펴의 직경을 8 mm 로 할 경우 충분한 면적이 확보되었다.



(a) 입력전류- 유량 특성선도



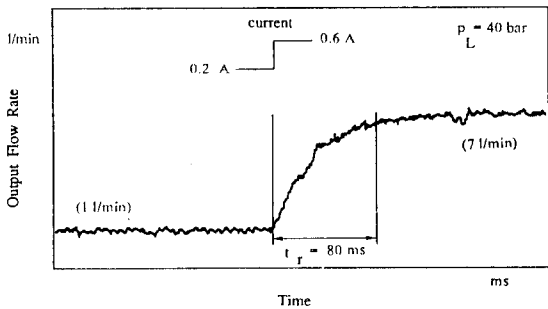
(b) 부하압력- 유량 특성선도



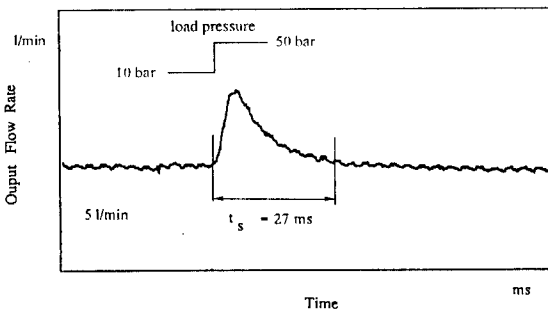
(c) 펌프 구동회전속도-유량 특성선도

그림 6 : 유량비례제어밸브의 정특성

그림 6 은 유량비례제어밸브의 정특성을 측정 한 것이고 그림 7 은 동특성을 측정 한 것이다. 그림 6.a의 입력전류-유량 특성선도에서 보면 입력전류에 디저 신호(dither signal)를 중첩시킴으로써 히스테리시스(hysteresis)가  $\pm 2.5\%$  정도로 감소되었다. 선형오차가 비교적 작은 편이나 전자제어기에서 소프트웨어적으로 비선형성 보상을 시키게 되므로 큰 의미는 없다.



(a) 입력전류의 변화에 대한 유량제어 응답특성



(b) 부하압력의 변화에 대한 유량제어 응답특성

그림 7 : 유량비례제어밸브의 동특성

그림 7.a의 선도는 부하압력을 40 bar로 유지하면서 입력전류를 0.2A 에서 0.6A 로 step 형태로 증가시켰을

때 유량제어밸브의 동적인 응답특성을 측정 한 것이다. 그림 7.b의 선도는 입력전류를 약 0.45 A로 유지하면서 부하압력을 10 bar 에서 50 bar 로 갑자기 증가시켰을 때 유량제어밸브의 응답특성을 측정 한 것이다. 조향장치 전체의 응답특성을 고려할 때 유량제어밸브의 응답특성은 충분히 빠른 것으로 평가되었다.

### 5. 전자제어기(Electronic Control Unit)의 구성

전자제어기의 역할은 차속도와 조향 각속도의 신호를 입력받아서 주행조건에 적합한 조향반력이 조향 핸들에 발생하도록 유량비례제어밸브로 출력되는 전류의 크기를 산출하는 것이다. 유량 산출의 관계식은

$$Q = f(V) + g(\dot{\theta}) - h(\alpha) \quad (3)$$

여기에서  $V$  = 차속도 (km/h)  
 $\dot{\theta}$  = 조향각속도 (deg/s)  
 $\alpha$  = 횡가속도 (m/s<sup>2</sup>)

으로 나타낼 수 있다. 함수  $f(V)$ 는 그림 8에 나타난 것과 같이 차속에 따라서 유량을 얼마나 감소시킬 것인가를 결정한다.

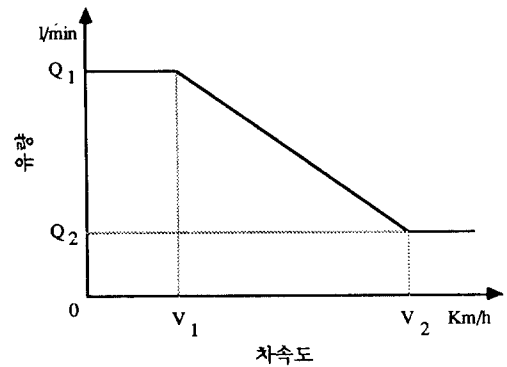


그림 8 : 차속에 대한 유량 함수  $f(V)$

함수  $g(\dot{\theta})$ 는 운전자가 조향핸들을 돌리는 속도에 비례하는 유량을 로터리 밸브에 추가로 공급함으로써 조향용 유압실린더의 반응속도가 보장되도록 해 주는 함수로서

$$g(\dot{\theta}) = K_w \cdot \dot{\theta} \quad (4)$$

의 식으로 표시할 수 있다. 여기에서 상수  $K_w$ 는 유압실린더의 유효단면적과 랙 앤드 피니언의 변속비에 의해 결정된다.

함수  $g(\dot{\theta})$ 에 의해서 고속 주행시에도 위급한 조향을 해야 할 때 조향장치의 반응속도를 보장할 수 있으나 횡가속도가 지나치게 높은 주행 조건에서는 오히려 공급유량을 제한하여 조향반력을 증가시키는 것이

주행안전 측면에서 필요하다. 이것을 고려한 것이 함수  $h(\alpha)$ 이다. 횡가속도  $\alpha$  를 정확히 측정하려면 별도의 센서를 사용해야 하겠으나 차속도와 조향각속도의 정보만으로 횡가속도를 근사적으로 산출한다면 함수  $h(\alpha)$ 는

$$h(\alpha) = K_a V \cdot \dot{\theta} \quad (5)$$

의 식으로 나타낼 수 있다. 여기에서 상수  $K_a$ 는 차체의 기하학적인 변수에 의해 결정된다.

전자제어기는 (3)식에 의해 산출된 유량을 모터리밸브에 공급하기 위하여 유량비례제어 밸브에 가해야 하는 전류량을 그림 6의 특성선도에서 결정하여 D/A-변환기와 전류 증폭회로를 통해 출력시킨다. 그림 9는 전자제어기의 구성을 개념적으로 도시한 것이다. 여기에서 single-chip 마이크로 컴퓨터로는 INTEL 8051을 사용하였고 전자제어기 전체의 회로는 160mm x 100mm 크기의 인쇄기판에 수용하였다.

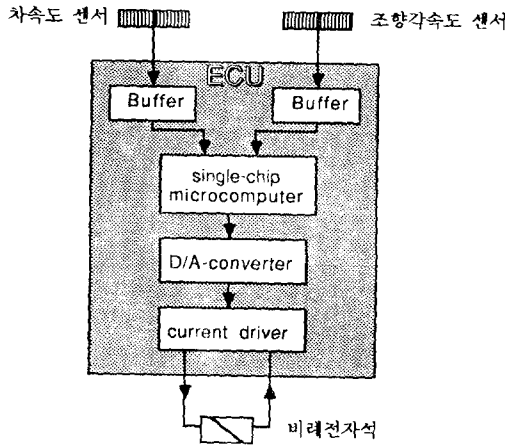


그림 9 : 전자제어기의 기본 구성

## 6. 전자제어 조향장치(EPS)의 성능시험 및 결과

EPS를 실제로 자동차에 장착하여 조향장치의 성능을 평가하는 데에는 조향장치에 작용하는 부하력이 차체의 동역학적 특성과 주행조건에 따라 비선형적으로 변하기 때문에 많은 변수들을 고려하여야 한다. EPS 자체의 특성 만을 분리하여 차속에 대한 유량제어 기능을 확인하면 그림 10과 같다. 여기에서 L-모드와 H-모드는 운전자의 취향에 따라 선택할 수 있도록 추가로 프로그램한 유량변화 곡선이다.

그림 11.a는 로터리 밸브로 공급되는 유량을 일정하게 유지했을 때 조향각속도에 대한 조향반력의 변화를 실측한 것이고 그림 11.b는 로타리 밸브로 공급되는 일정 유량에 조향 각속도에 비례하는 유량을 증첩시켰을 때의 조향반력의 변화를 측정한 것으로서 조향각속도의 보상이 전자제어기에 의해 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다.

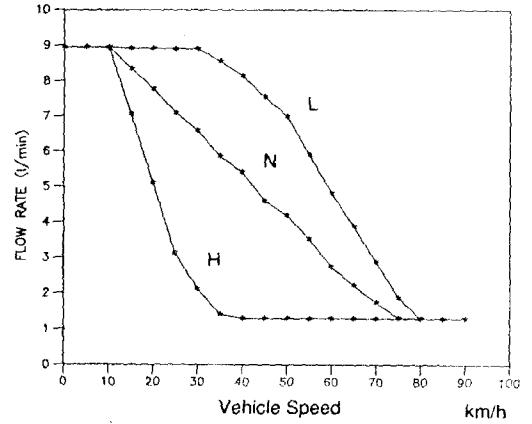


그림 10 : 차속에 따른 유량의 변화 측정 결과

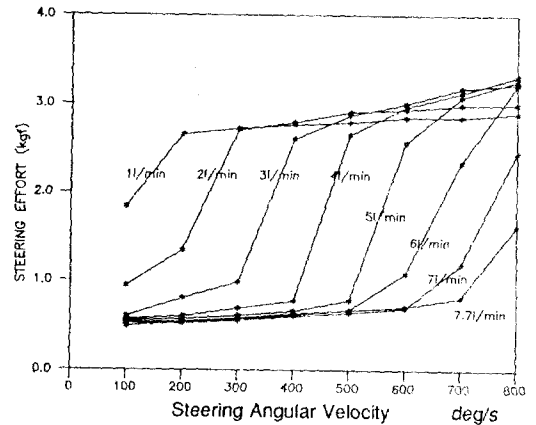


그림 11.a : 공급유량이 일정할 때 조향각속도에 대한 조향반력의 변화

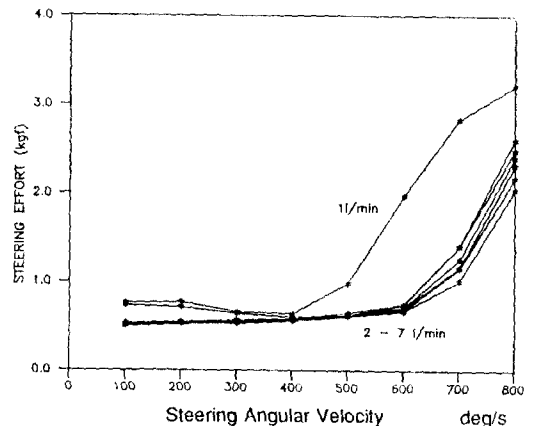


그림 11.b : 조향각속도에 비례하는 유량을 보상하였을 때 조향각속도에 대한 조향반력의 변화

차속도의 변화에 따라서 EPS가 조향핸들에 가해지는 힘을 얼마나 증폭하여 전륜에 전달하는 지를 평가하기 위하여 그림 12 와 같은 특성선도를 측정할 수 있다. 이 그림에서 percent assist를 다음과 같이/2/

$$\frac{(\text{hyd. steering force}) \times 100 (\%)}{(\text{hyd. steering force} + \text{manual steering force})}$$

으로 정의하여 차속도에 따라서 유압에 의한 조향력 증폭이 얼마나 이루어지는 가를 그림으로 다시 정리하면 그림 13 과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 점선은 percent assist의 등고선에 해당한다.

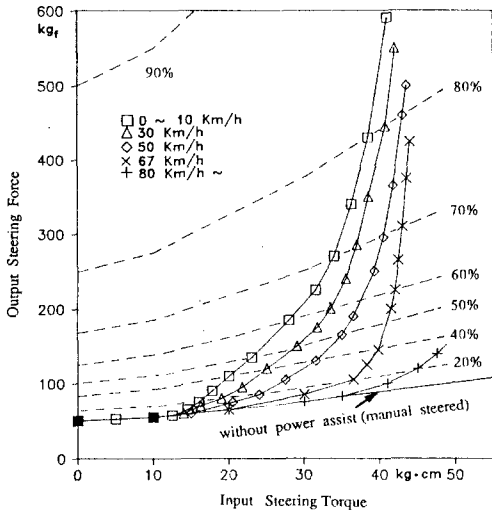


그림 12 : EPS의 입력 토크-출력 조향력 특성선도

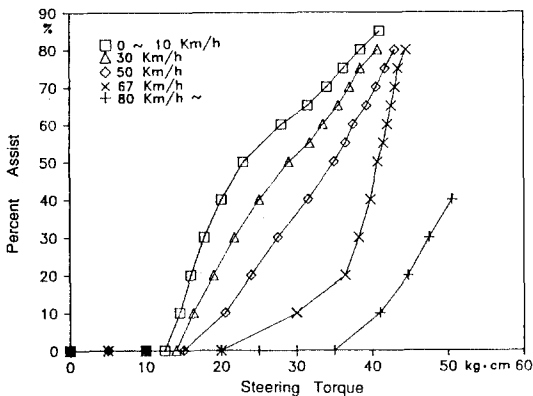


그림 13 : EPS의 입력 토크-percent assist 특성선도

그림 13 에서 보면 유압에 의한 power assist가 일부 속도 범위를 제외하고는 입력 토크에 거의 비례하게 변하는 것을 볼 수 있다. 전체적으로는 만족할 만하나 로터리 밸브의 압력특성선도가 개선될 필요가 있음을 알 수 있다.

그림 14 는 본 논문의 전자제어 조향장치를 실제로 자동차에 장착하여 주행시험을 한 결과이다. 기존의 유압식 조향장치에 비하여 저속에서는 조향반력이 감소하였고 고속에서는 조향반력이 현저하게 증가하는 성능개선이 이루어진 것을 알 수 있다.

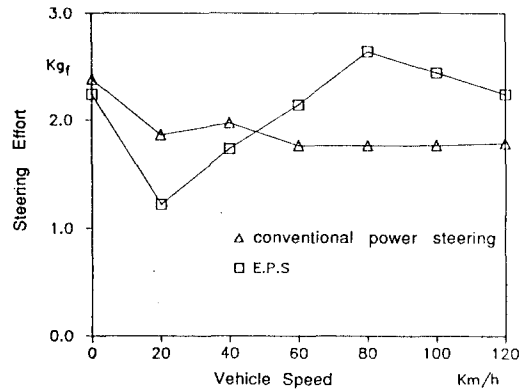


그림 14 : EPS의 차속에 대한 조향반력의 실측선도

## 7. 검토

본 논문에서 소개한 전자제어식 조향장치는 기존의 유압식 조향장치에 바탕을 두고 일부 부품을 수정 및 보완함으로써 이루어 지는데 현저한 성능 개선이 가능함을 확인할 수 있었다. 로터리 밸브의 언더랩을 수정하여 유량변화에 의한 압력변화의 폭이 넓어지도록 개선하면 유량제어에 의한 조향성능의 향상 효과를 더욱 증대시킬 수 있을 것이다. 유량제어식 전자제어 조향장치는 반력제어식 전자제어 조향장치에/4/ 비하여 조향반력의 변화 폭이 좁은 것은 사실이나/2/ 개발기간이 짧고 부품수가 적다는 점에서 국산화 개발에 유리하였다.

개발된 전자제어 조향장치를 실차에 장착하여 실험조건 별로 객관적인 주행시험을 통한 성능평가시험을 실시하는 것은 국내여건상 불가능하였다. 이점은 국내의 자동차부품 개발 관련 단체들이 시급히 해결하여야 할 과제이다.

## 참고문헌

- 1) Duffy, J.J., "1988 Lincoln Continental Variable-Assist Power Steering System", S.A.E. Journal Nr.880707, 1988
- 2) Baxter, J., Dyer, P.D., "Bishop VARIATRONIC Power Steering System", S.A.E. Journal Nr.880708, 1988
- 3) Yamaguchi, H., et al., "Development of an Electronically-controlled Power Steering System", S.A.E. Journal Nr.841198, 1984
- 4) Ito, H., et al., "Electronic-controlled Power Steering", S.A.E. Journal Nr.841197, 1984