

<논 문> SAE NO. 96370072

승용차용 파워 스티어링 시스템의 설계변수 변화에 따른 차량의 조향특성 해석

Effects of Design Parameters of Power Steering System for Passenger Cars on the Vehicle Steering Characteristics

황 성 호, 김 홍 석, 허 승 진*
S. H.Hwang, H. S. Kim, S. J. Heo

ABSTRACT

Power steering systems play an important role for the vehicle handling characteristics and driver's steering center feeling during straightforward driving situation. In this paper, the rotary valve, the main component of power steering systems, is modeled and analyzed, and is combined with a 3-DOF(degree of freedom) lateral dynamics model of passenger cars to examine the effects of design parameters on the vehicle steering characteristics. The results can be applied to the development of advanced power steering systems for passenger cars such as electronically-controlled power steering system.

주요기술용어 : steering system(조향 시스템), rotary valve(로타리 밸브), vehicle lateral dynamics (차량 횡동역학), steering characteristics(조향 특성)

1. 서 론

파워 스티어링 시스템은 운전자가 차량 조향시 가해야 하는 토크의 일부를 보조 동력원을 사용하여 제공함으로써 조향을 용이하게 하는 장치로, 차량의 거동이나 운전자의 조향 감각을 결정짓는데 중요한 역할을 한다.

최근 들어 전자제어식 파워 스티어링 시스템과

4륜 조향 시스템의 개발이 활발히 진행되면서 각 부품의 해석 및 특성 파악을 위하여 보다 상세한 조향 시스템의 모델이 요구되고 있다. Wohnhaas는 기어의 비선형성을 고려한 조향 시스템 모델링을 수행하였고¹⁾, Baxter는 랙-피니언 형식의 파워 스티어링 시스템에 대하여 해석하였으며²⁾, 파워 스티어링 시스템의 핵심 부품인 로타리 밸브에 대하여도 연구된 바 있다³⁾. 그러나, 지금까지의 연구는 파워스티어링 시스템 자체만의 특성 파악에 중점을 둔 것으로, 조향 시스템이 차량과 결합되었을때 차량 동역학에 미치는 영향 등에 대한 연구로는 미흡하였다. 따라서, 본 논문에서

* 정회원, 생산기술연구원, 생산시스템 개발센터

** 정회원, 생산기술연구원, 생산시스템 개발센터

*** 정회원, 국민대학교 자동차공학과

는 파워 스티어링 시스템의 설계변수 변화시 차량의 주행 특성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 이를 위하여, 파워 스티어링 시스템의 핵심 유압 부품인 로타리 밸브를 모델링하고 해석하였으며, 횡방향 미끄럼(side slip), 요(yaw) 및 롤(roll)운동을 고려한 3자유도 차량 횡동역학 모델링을 수행하였다. 또한, 이를 간략화시킨 조향시스템과 결합시켜 파워 스티어링의 설계 변수-토션바의 강성, 공급 유량, 밸브 챔퍼의 치수 등-가 변화되었을 때 운전자의 조향작동일과 center-point feeling, 커브 주행시의 동적 조향 복원성 등의 관점에서 그 영향을 살펴보았다.

2. 파워 스티어링용 로타리 밸브의 해석

파워 스티어링용 로타리 밸브는 유압 펌프와 실린더 사이에서 작동유의 방향과 유량을 조절함으로써 전체 조향시스템의 성능을 좌우하는 핵심 부품 중의 하나이다. 따라서 새로운 조향 시스템을 개발하기 위해서는 우선 이 로타리 밸브의 설계가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 참고문헌 (3)을 참고하여 로타리 밸브에 적용되는 지배 방정식을 찾아 여러 가지 설계 변수를 설정한 다음, 이들 설계 변수의 변화에 따른 전체 조향 시스템의 성능 변화를 예측할 수 있는 수학적 모델링 작업을 수행하였다. 또한 밸브 특성 해석을 위한 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 이용하여 파워 스티어링 설계의 타당성을 검토함과 동시에 요구되는 특성 곡선을 만족시킬 수 있는 파워 스티어링의 설계 방법을 모색하였다.

2.1 로타리 밸브의 모델링

그림 2.1은 로타리 밸브와 유압 실린더와의 연결상태를 나타낸다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 파워 스티어링 시스템은 랙-피니언(rack and pinion) 형식으로서 슬리브(sleeve)는 랙-피니언을 통해 바퀴로 연결되고 로터(rotor)는 조향 핸들에 연결되어 있다.

2.1.1 지배 방정식

직진 주행시 즉, 밸브 스프에 조향각 입력이

주어지지 않을 때는 4개의 오리피스 유로 면적 a, b, c, d 가 동일하므로, 실린더 양 측면에 동일한 압력이 걸리고, 공급된 오일은 a, b 를 거치거나 c, d 를 거쳐 오일 탱크로 유입된다. 그러나 그림 2.1과 같이 입력축에 시계 방향의 조향각 입력이 주어지면 b, d 부분의 유로가 좁아져서 유동을 방해하는 저항이 커지는데, 이에 따라 오른쪽 실린더 챔버(3)의 압력이 상승하여 파워 실린더가 좌측으로 이동함으로써, 바퀴의 조향작동을 돕게 된다.

조향장치의 밸브 특성은, 공급유량이 주어졌을 때 조향각 입력에 대한 발생압력($\theta-P$ 특성 곡선)이나 작용 토크에 대한 발생압력($T-P$ 특성 곡선), 또는 입력토크에 대한 출력 토크($T_{in}-T_{out}$ 특성 곡선) 등을 살펴봄으로써 얻을 수 있다. 이러한 특성은 밸브스풀과 밸브 바디 사이에 형성된 오리피스에서의 유량방정식으로 해석될 수 있는데, 오리피스를 통과하는 비압축성 유체의 압력 강하는

$$\Delta P = \frac{\rho}{2C_d^2} \frac{Q^2}{A_{min}^2} \tag{2.1}$$

로 주어진다. 여기서, Q 는 통과 유량, A_{min} 은 오

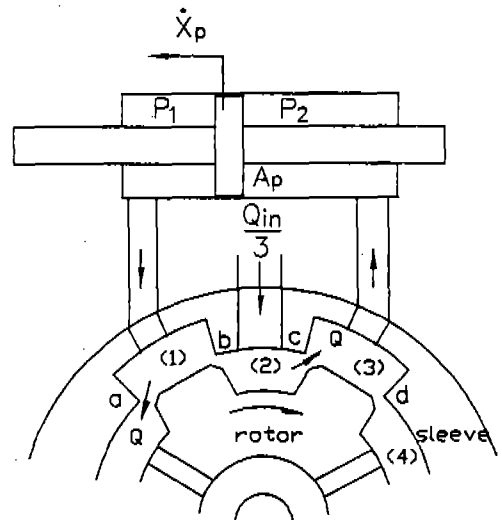


Fig.2.1 Rotary valve and hydraulic cylinder

리피스의 단면적이며, ρ 와 C_d 는 각각 오일의 밀도와 유량 계수이다.

2.1.2 오리피스를 통과하는 유량 계산

그림 2.1에서, 조향 작동상태와 파워 실린더의 속도에 따라 각 오리피스를 통과하는 유량은

$$Q = \frac{1}{6} \{ Q_{in} \pm A_p \dot{X}_p \pm C_{ip} (P_2 - P_1) \} \quad (2.2)$$

이다. 여기서, Q_{in} 은 펌프로부터 토출되는 유량을 나타내는데, 이는 일반적으로 엔진 회전수의 함수로 주어진다. A_p 와 \dot{X}_p 는 각각 로드 단면적을 뺀 피스톤의 단면적과 피스톤의 속도이며, C_{ip} 는 실린더 내부 누설계수(internal leakage coefficient)이다. 식 (2.2)에서, 복부호는 조향 작동상태 즉, 중립에서 오른쪽이나 왼쪽으로 조향을 했을 때와 조향된 상태에서 다시 중립상태로 되돌릴 때의 4가지 상태에 따라 결정되며, 3개의 밸브에는 각각 2개의 오리피스가 있으므로 6으로 나누어주었다.

2.1.3 오리피스의 유로 면적 계산

밸브의 교축은 그림 2.2에서와 같이 슬리브면(metering edge)과 로터의 모서리면(chamfer) 사이에서 이루어진다. 실제 파워 스티어링에서 밸브의 교축은 로터가 슬리브에 대하여 각도 θ 만큼 기울어진 상태에서 이루어지지만 밸브의 모서리 부위 형상 및 치수의 변경에 따른 시뮬레이션이 용이하도록 로터의 설계 변수 입력

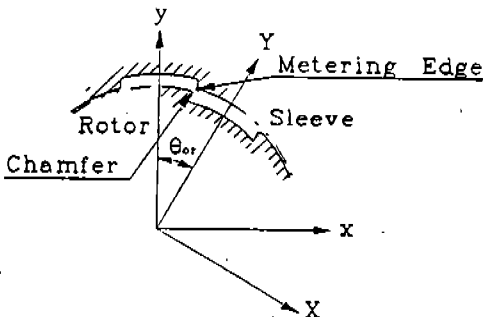


Fig.2.2 Valve section

은 도면치수 상태와 동일하도록 하였다.

오리피스에서 조향각 입력 변화에 따른 유로의 면적을 구하기 위해서는 우선 유로의 최소폭을 구해야 한다. 3단 모서리를 갖는 로타리 밸브가 회전할 때 밸브 모서리부와 로터간의 최소 거리 Z_{min} 은 그림 2.3과 같이 8개의 구간으로 나누어 계산할 수 있다. 이때, 슬리브면 면의 축 좌표와 점 $P_0, P_5 \sim P_{11}$ 의 x축 좌표값 x_{p_i} 를 비교하면, 각 구간의 판정이 가능하다.

따라서, 오리피스의 폭을 L 이라 하면 오리피스 단면적 A_{min} 은

$$A_{min} = Z_{min} L \quad (2.3)$$

이다.

2.1.4 유량 계수 C_d 의 결정

유량계수 C_d 는 유동의 레이놀즈수(Re)와 오리피스 형상의 함수로서, 일반적인 경우는 실험적으로 결정된다. 그러나 특수한 경우에는 해석적으로 구할 수 있는데, 본 연구에서는 정상, 비회전, 2차원 비압축성 유체에서 점성 효과를 무시했을 경우에 대한 von Mises의 해석 결과를 근사화하여 사용하였다.⁴⁾

2.2 밸브 특성 해석

이상과 같은 모델링 작업을 토대로 하여 컴퓨터 시뮬레이션용 소프트웨어를 작성하였으며, 구해진 밸브의 특성 곡선은 그림 2.4와 같다. 여기

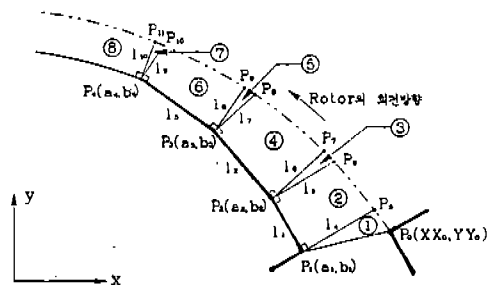
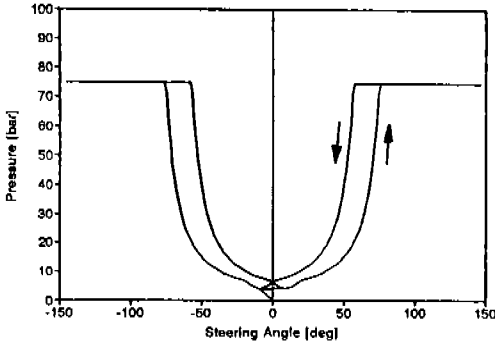
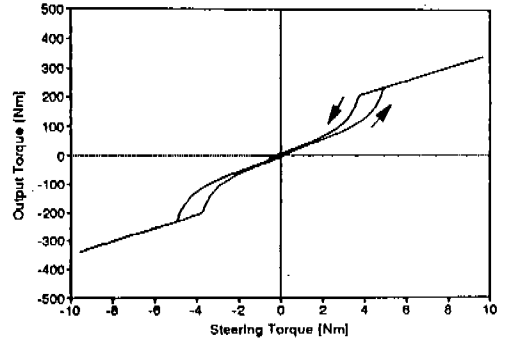


Fig.2.3 Segmentation for the orifice area calculation



(a) $\theta-P$ Characteristics curve



(b) $T_{in}-T_{out}$ Characteristics curve

Fig.2.4 Simulation results of rotary valve characteristics

에서, 토션바의 강성 k_t 는 1.6Nm/deg, 랙-피니언의 강성 k_r 은 7.0Nm/deg, 펌프의 토출유량 Q_{in} 은 6.0 l/min이다.

그림 2.4로 부터 유압펌프의 조정압력은 75 kgf/cm²이므로, 최대압력은 그 이상을 넘지 않음을 알 수 있다. 또한, 상승과 하강시의 이력현상(hysteresis)은 로타리 밸브의 언더랩(underlap)과 기어의 백래시나 베어링과의 축방향 틈새 등의 기계적 유격에 의한 현상으로서, 본 논문에서는 그 영향을 설계 변수로서 고려하였다.

3. 차량 횡동역학 모델링 및 조향 특성의 해석

3.1 차량 횡동역학 모델링⁵⁾

초기 설계 단계에서 커브 주행시 차량의 주행 특성을 파악하기 위해서는 차량의 횡동역학적 선형 모델이 효과적으로 사용된다. 커브 주행시 차량은 요잉 운동뿐만 아니라 롤링 운동도 수반되며, 좌, 우측 타이어에 각기 다른 횡하중을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 요잉과 횡방향 미끄럼, 그리고 롤링 운동을 고려하여 단순화된 선형 모델을 정립하였다. 이 모델은 스프링상 질량(sprung mass)과 전, 후의 스프링하 질량(unsprung mass) 등 3개의 질량부를 포함하고 있으며, 롤링시 좌우 바퀴 하중 배분(weight transfer)의 변화에 따른 등가 코너링 강성(equivalent cornering stiffness)의 차이를 고려하였다.

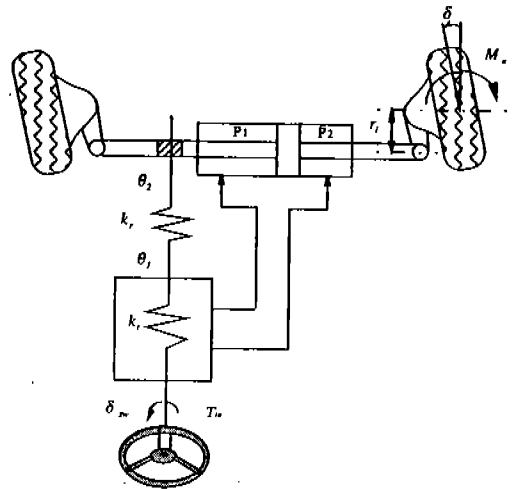


Fig.3.1 Simplified model of steering system

3.2 조향 시스템의 모델링

조향각 입력에 대한 조향 시스템의 특성을 살펴보기 위해서는 조향시스템의 강성을 고려한 모델링이 필요한데, 그림 3.1은 토션바의 강성 k_t 와 랙-피니언부의 강성 k_r 을 고려하여 간략화된 조향시스템 모델을 나타낸다.

운전자가 핸들을 조향각 입력 δ_w 만큼 돌리기 위하여 필요한 토크는 조향 걸림과 토션바를 거쳐 랙-피니언부에 전달되며, 이 힘은 실린더 양단의 압력차로 인해 발생한 힘과 합쳐져서 타이

로드에 전달되어 바퀴를 조향시킨다. 또 바퀴의 조향에 대한 반작용으로 타이어에서는 정렬 모멘트(aligning moment) M_a 가 발생한다.

조향 입력 δ_{sw} 와 피니언의 회전각 θ_2 의 관계로부터 운전자의 조향 토크(steering torque) T_{in} 은

$$T_{in} = \frac{k_l k_r}{k_l + k_r} (\delta_{sw} - \theta_2) \quad (3.5)$$

으로 표현할 수 있다.

랙-피니언 기어의 비를 G 라 하고 타이어의 조향각을 δ 라 하면 θ_2 는

$$\theta_2 = G\delta \quad (3.6)$$

이다.

또한, 그림 3.1의 조향 시스템 모델로부터 얻은 회전 중심에서의 모멘트 평형 방정식은

$$I_{tire}(\ddot{\delta} + \dot{r}) = \left(A_p(P_1 - P_2) + \frac{T_{in}}{r_p} \right) r_i - M_a \quad (3.7)$$

이다. 여기서, I_{tire} 는 타이어의 관성 모멘트이며, r_p 는 피니언 기어의 피치원 지름이다.

3.3 차량 조향 특성 해석

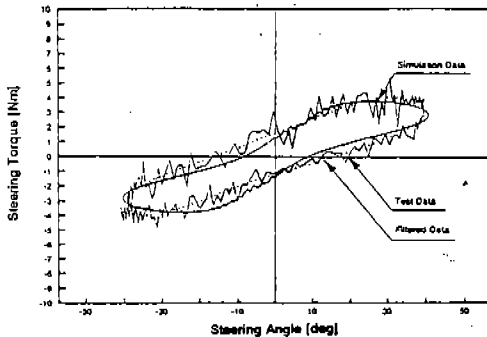
이상의 파워 스티어링용 로타리 밸브 모델, 조향 시스템 모델, 그리고 차량 횡동역학 모델을

결합시켜 시뮬레이션을 수행함으로써, 조향 시스템의 설계 인자가 고려된 차량 조향 특성을 살펴볼 수 있다. 그림 3.2는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타내며, 검증용 위하여 실험결과와 비교하였다. 정상상태에서의 차량 조향 특성을 살펴보기 위하여 차속이 60km/h일때, 진폭 36deg, 주기 1/6Hz의 정현파(sine wave) 조향 입력을 주었으며, 조향 입력각에 대한 조향 토크, 횡가속도에 대한 조향토크 곡선을 나타내었다. 차량 총중량 1,230kg의 승용차를 실험 대상으로 하였으며, 실험 결과의 토크 측에 나타난 미세한 상하 진폭 편차는 타이어와 노면과의 접지 마찰에 따른 노이즈, 토크 센서의 감도 및 샘플링 타임 등에 기인한 것으로 분석된다. 이 성분을 제거하기 위하여 차단 주파수 4Hz의 저주파 통과 필터(low pass filter)를 사용한 실험 결과와 비교하였을 때 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

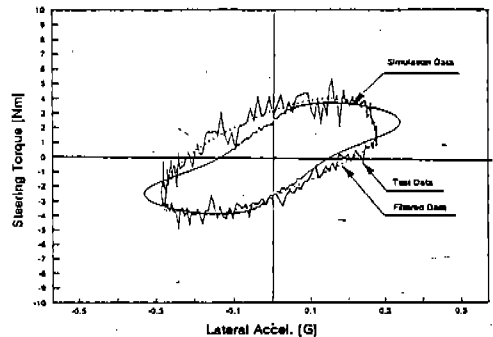
4. 설계 변수 변화에 따른 조향 특성의 해석

4.1 토션바의 강성 k_t 의 변화

그림 4.1은 k_r 을 7.0 Nm/deg로 고정시키고, k_l 을 1.0, 2.0, 3.0 Nm/deg로 변화시켰을 경우로, k_l 가 증가할수록 밸브 특성 곡선이 좌우로 넓어지는 경향이 있음을 알 수 있다. k_l 의 값이 지나치게 작을 경우 조향 핸들의 미소한 입력 토크에 대해서도 파워 스티어링의 출력토크가 크게

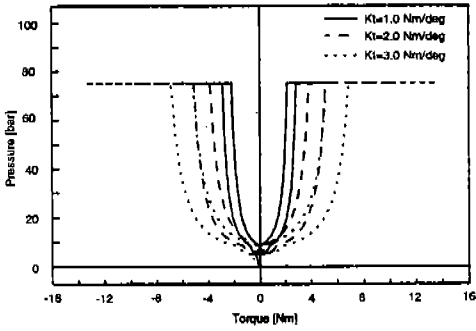


(a) Steering torque w.r.t. steering angle

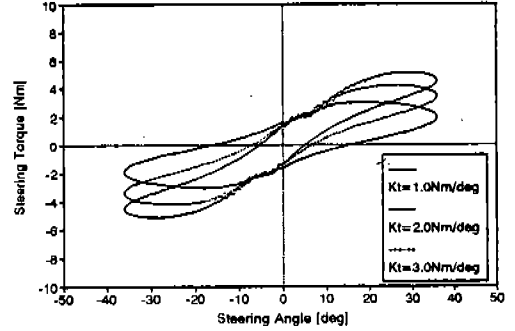


(b) Lateral accel. w.r.t. steering torque

Fig.3.2 Comparisons of simulation results and experimental results

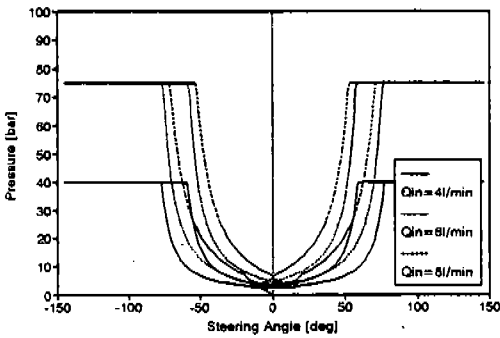


(a) Valve characteristics w.r.t k_t

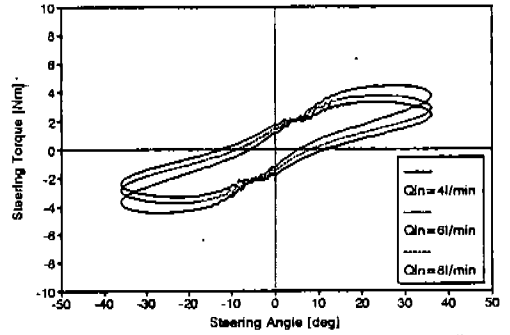


(b) Steering torque w.r.t. steering angle

Fig.4.1 Effect of torsion bar stiffness on the valve and steering characteristics

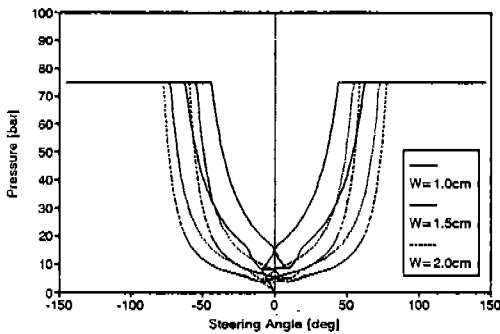


(a) Valve characteristics w.r.t. Q_{in}

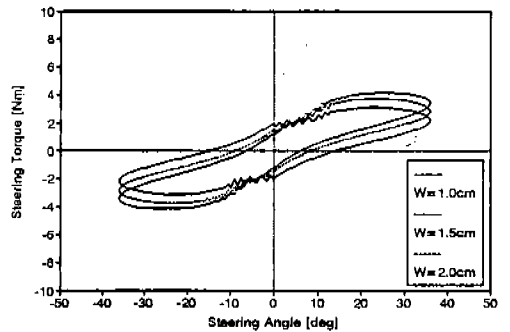


(b) Steering torque w.r.t. steering angle

Fig. 4.2 Effect of input flow rate on the valve and steering characteristics



(a) Valve characteristics w.r.t. W



(b) Steering torque w.r.t steering angle

Fig.4.3 Effect of chamfer length on the valve and steering characteristics

나타나므로 운전자의 조향 작동일(steering effort)은 크게 줄일 수 있으나, 중립 조향각 주위에서의 center-point feeling에 매우 나쁜 영향을 미친다. 이는 조향각-조향토크 선도에서 중립 조향각 부근의 완만한 커브 기울기를 통해서도 확인할 수 있다. 반면, k_s 의 값이 지나치게 클 경우, 중립 조향각 주위에서의 급한 조향 토크 기울기를 나타내므로, 직진 주행시의 우수한 center-point feeling을 제공하며, 커브 주행시의 동적 조향 복원성능이 향상될 수 있으나, 운전자에게 과도한 조향 작동일을 요구한다. 따라서, k_s 의 값은 운전자의 조향 작동일, 동적 조향 복원성, center-point feeling 측면 등을 고려하여 선정되어야 한다.

4.2 공급 유량 Q_m 의 영향

그림 4.2는, k_s 와 P_s 는 각각 1.6Nm/deg와 75 kgf/cm²로 고정시키고, Q_m 을 4.0, 6.0, 8.0 l/min로 변화시켰을 때의 (θ - P) 특성과 조향 특성을 나타낸다. 식 (2.1)로부터, 동일한 조향각에 대하여 Q 가 증가하면 ΔP 가 증가함을 알 수 있는데, 이는 공급 유량이 증가함에 따라 특성곡선이 점차로 좁아지게 되어, 운전자가 핸들이 가벼워짐을 느끼게 되는 것을 의미한다. 그러나, 유량이 지나치게 작을 경우에는 발생압력 P 가 설정압력까지 도달하지 못하고 그보다 작은 임의의 값이 되는 조향 휠 걸림(steering wheel lock) 현상이 발생한다. 일반적으로, 운전자의 조향 작동일과 최대 도달 밸브 압력을 고려하여 공급유량을 적절하게 선정한다.

4.3 밸브 챔퍼(chamfer) 치수 w 의 영향

그림 4.3은 밸브 챔퍼의 길이 즉, 오리피스 면적 변화에 대한 특성 곡선의 변화를 보이는데, 그림에서 챔퍼의 길이가 증가됨에 따라서 밸브 특성 곡선은 유량 Q 를 변화시켰을 때와 유사하게 좌우로 넓게 벌어지는 것을 알 수 있다. 따라서, 챔퍼의 길이는 토션바의 강성, 공급 유량 등의 설계변수가 주어질 때, 조향 시스템의 center-point feeling 측면의 밸브 특성곡선 설계에 고려될 수 있다. 실제적으로 밸브 설계시 챔퍼 길

이는 밸브 조립 간극(clearance)과 함께 고려하여 상호 보완적으로 결정하는 것이 좋으나, 조립 간극쪽의 조정이 어려우므로 조립 간극의 설계치를 결정한 후 이에 따라 챔퍼 길이를 결정하는 것이 용이하다.

5. 결 론

본 논문에서의 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 파워 스티어링 시스템의 핵심 부분인 로타리 밸브를 수학적으로 모델링하여 설계 변수화 하였으며, 해석용 S/W를 개발하여 밸브 특성을 살펴보았다.
- 2) 요잉, 롤링 및 횡방향 미끄럼 운동을 고려한 3자유도 차량 선형 모델을 세웠으며, 조향 시스템의 수학적 모델과 결합하여 조향 시스템이 직진 주행시의 center-point feeling 및 커브 주행시의 handling 특성에 미치는 영향을 해석할 수 있도록 하였다.
- 3) 토션바의 강성, 공급유량, 밸브의 형상 및 치수 등의 설계 변수가 차량과 결합된 조향 시스템의 특성에 미치는 영향을 살펴봄으로써, 운전자의 조향 작동일, center-point feeling, 커브 주행시의 동적 조향 복원성 등과 관련된 주요 설계 변수의 선정에 응용될 수 있음을 보였다.

이상의 연구 결과는 전자제어식 조향 장치 개발에 있어 제어로직의 검증 및 차량의 조향 특성에 미치는 영향 등을 살펴보는 데 효과적으로 사용될 수 있으며, 추후 조향 시스템의 비선형 모델 및 3자유도 차량 비선형 모델을 결합시켜 해석한다면 보다 정확한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

1. A. Wohnhaas, U. Essers, "Nonlinear modeling and simulation of a rack and pinion steering," *AVEC '92*, 1992.
2. John Baxter, "Analysis of stiffness and

- feel for a power-assisted rack and pinion steering gear," *SAE 880706*, 1989.
3. John Baxter, Geoffrey P. Dyer, "Bishop VARIATRONIC power steering system," *SAE 880708*, 1989.
 4. D. McCloy and H. R. Martin, *Control of fluid power*, Ellis Horwood Ltd., 1980.
 5. Andrezej G. Nalecz, "Investigation into the effects of suspension design on stability of light vehicles," *SAE 870497*, 1988.
 6. H. Sato, H. Osawa and T. Haraguchi, "The quantitative analysis of steering feeling," *JSAE Review*, vol. 12, no. 2, 1991.