

## 베인 펌프용 유량 제어부의 전산설계에 관한 연구

# A Study on the computer aided design for flow control valve of vane pump

이윤태 · 김진한((주)기아정기) · 김수태(창원대학교)

Youn-Tae Lee, Jin-Han Kim, Soo-Tae Kim

### ABSTRACT

The modeling and the numerical analysis are done so as to develop the Computer Aided Design program for the design of flow control valve attached to the vane pump.

The factors affecting the flow rate characteristics, are analyzed by the experiments and the numerical methods. It is shown that the main factor affecting to the first control flow is the diameter of small rod of the spool, the main factor affecting to the second control flow is the diameter of big rod of the spool, the main factors affecting to the cut off are the main spring constant, the initial displacement of main spring and small diameter of the spool, and the dropping slope characteristics of flow rate are decided by the chamfer of spool and the dynamic characteristics of the spool.

### 제1장 서론

차량의 파워 스티어링 시스템에서는 엔진을 사용하여 펌프를 구동하기 때문에 고정 용량형 베인 펌프를 사용하므로 엔진 회전수의 변화에 따라 펌프에서의 토출 유량은 항상 가변된다. 즉 엔진 회전수가 증가하면 유량이 증가하여 조향성은 가벼워져서 운전시 조향 안정성이 나쁘다. 따라서 일정의 엔진 회전수 이상에서는 토출 유량을 제어하여 조향력을 적절히 조절할 필요가 있다. 파워 스티어링 장치에서 이러한 유량 특성을 만들어 낼 수 있도록 제어하는 것이 유량 제어부의 역할이며, 조향에서 유량 특성 제어는 중요한 기능이므로, 이것을 제어하는 유량 제어부는 중

요한 장치의 하나이다.

현재, 차량용 파워 스티어링에 사용되고 있는 유량 제어부의 설계, 제작은 시행 착오법을 사용하여 요구하는 제품을 완성하는 실정이므로 제작과 실험에 많은 시간이 소요되고 개발비용도 증가한다.

따라서 본 연구에서는 유량 제어부를 시뮬레이션하여 유량 특성을 해석하고, 이것을 이용하여 유량 제어부를 설계하는 전산화 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

### 제2장 유량 제어부의 특성

자동차용 파워 스티어링 장치에서 사용되고 있는 펌프는 정용량 압력 평형형 베인 펌프이기 때문에, 엔진의 회전수의 변화에 따라 펌프 토출 유량은 가변된다. 엔진 회전수가 증가하면 펌프 토출 유량이 증가하여 큰 조향력을 발생시키는 데, 이것은 차량이 고속으로 주행시 핸들 조향 특성을 나쁘게 한다. 그래서 유량 조절 밸브를 설치하여 Fig. 1과 같이 요구하는 유량 특성에 만족하는 일정유량 특성 및 유량 강하 특성으로 제어한다. 그림에서 a를 절점, a-b를 1차 제어유량, b-c를 유량 강하, c이상을 2차 제어유량이라 한다.

회전수의 증가에 따라 유량 제어 밸브에서 토출되는 유량 특성 곡선에 따라 분류해 보면 일정유량형과 유량강하형으로 구분할 수 있고 다시 유량강하형은 압력감응형과 압력미감응형으로 구분할 수 있다.

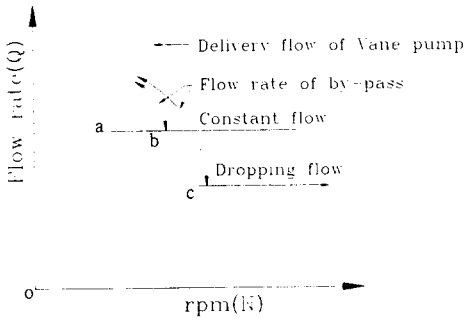


Fig. 1 Characteristics of flow rate according to rpm<sup>3)</sup>

압력감응형은 토출측 부하에 따라 2차 제어 유량에 변화를 발생시키는 단점이 있지만 구조가 비교적 간단하여 제작비용이 적게 들어 경제적이고, 사용상에 무리가 따르지 않으므로 일반적으로 가장 많이 통용되고 있다.

### 제3장 유량 제어부의 모델링 및 수치 해석

#### 3.1 모델링

본 연구에 사용된 유량 제어부의 내부 구조 및 개략도는 Fig. 2와 같다.

스풀에 작용하는 힘의 평형을 해석해 보면,

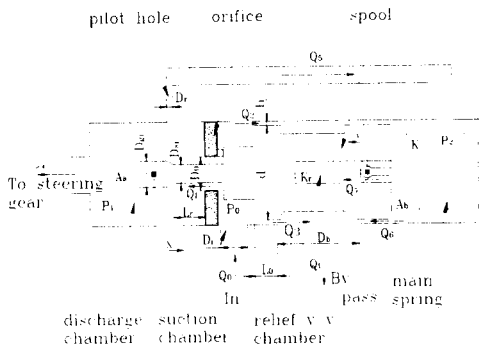


Fig. 2 Schematic diagram of flow control valve

$$A_o p_0 + A_a p_1 = (A_o + A_a) p_2 + kx \quad (1)$$

$$p_1 = p_2 \text{라고 가정하면, } p_0 - p_1 = \frac{kx}{A_o} \quad (2)$$

즉, 오리피스 전후의 차압은 스프링 상수  $k$ 와

스풀의 단면적  $A_o$ 에 의해 결정된다. 이 항은 일정한 상수값이므로 오리피스 전후의 차압( $\Delta p$ )은 항상 일정한 값을 유지하게 됨을 알 수 있다. 따라서 일정한 유량을 유지할 수 있다.

관로나 오리피스, 틸새 등을 통하여 흐르는 유체의 유량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{유압 발생부인 베인 펌프로부터 흡입실로의 유입유량은 } Q_0 = Q_p \times \frac{N}{60} \quad (3)$$

흡입실로부터 토출부로 흐르는 유량 즉, 오리피스를 통해서 흐르는 유량은

$$Q_1 = C_1 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - p_1)} \quad (4)$$

흡입실에서 스�풀 틸새를 통해 바이패스 관로를 흐르는 누설 유량<sup>4)</sup>

$$Q_2 = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} (p_0 - p_1) \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{e}{h} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

스풀 이동에 따라 흡입실로부터 바이 패스 포트 로 흐르는 바이 패스 유량은

$$Q_3 = C_3 A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - p_1)} \quad (6)$$

제어 유량부의 토출실에서 스티어링 기어로의 토출 유량은

$$Q_4 = C_4 A_4 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_4 - p_{sw})} \quad (7)$$

토출실에서 파일럿 관로를 통해서 주 스프링실로 흐르는 유량은

$$Q_5 = C_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} |p_1 - p_2| \quad (8)$$

주 스프링실에서 스�풀 틸새를 통해 바이 패스 관 로로 흐르는 누설 유량은

$$Q_6 = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} (p_2 - p_1) \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{e}{h} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

릴리프 밸브 이동에 따라 바이패스 포트 로 흐 르는 유량은

$$Q_7 = C_7 A_7 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_1)} \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다.<sup>5)</sup>

기계적인 운동을 하는 물체의 변위, 속도, 가속도를 계산하기 위한 운동방정식은 다음과 같다.

스풀의 운동방정식은

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = (A_b - A_a) p_0 + A_a p_1 - A_b p_2 - kx_{s0} \quad (11)$$

릴리프 밸브의 운동방정식은

$$m_r \ddot{y} + c_r \dot{y} + k_r y = A_d p_2 - k_r y_{r0} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다.

흡입실내에서의 압력 변화는 식(3)~식(6) 및 식(11)에서 다음과 같이 주어지며,

$$\dot{p}_0 = -\frac{K_f}{V_0} (Q_0 - Q_1 - Q_2 - Q_3 - A_o \dot{x}) \quad (13)$$

토출실의 압력 변화는 식(4), 식(7), 식(8) 및 식(11)에서 다음 식과 같이 주어진다.

$$\dot{p}_1 = -\frac{K_f}{V_1} (Q_1 - Q_4 - Q_5 - A_a \dot{x}) \quad (14)$$

주 스프링실에서의 압력 변화는 식(8)~식(10) 및 식(11)에서

$$\dot{p}_2 = -\frac{K_f}{V_2} (Q_5 - Q_6 - Q_7 + A_b \dot{x}) \quad (15)$$

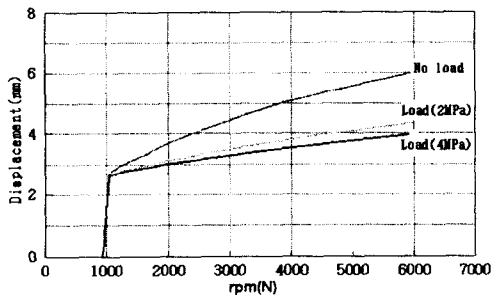
으로 나타낼 수 있다.

이와 같은 식을 이용하여 수치 해석하면 유량, 변위, 속도, 가속도 및 압력 변화에 대한 해를 구할 수 있다.

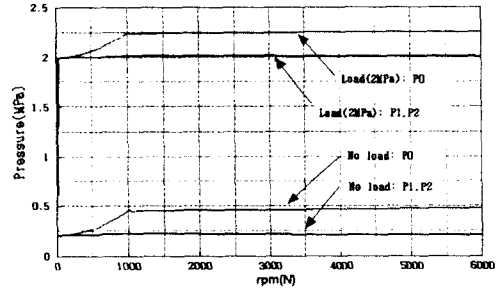
### 3.2 수치해석 및 시뮬레이션

3.1절에 주어진 식을 이용하여 보다 정확한 해에 근접하기 위해 Runge-Kutta 5-order method를 이용하여 수치해석을 하였다.

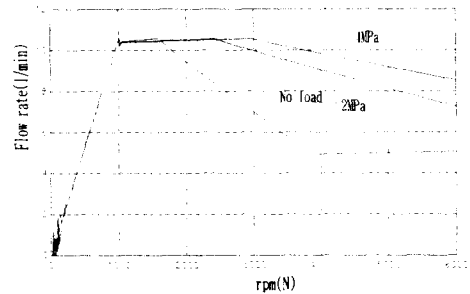
본 연구의 파워 스티어링용 베인펌프 유량제어부의 시뮬레이션 프로그램은 BC3.0을 사용하였으며, 화면구성은 Pop-up 메뉴 방식을 사용하였다.



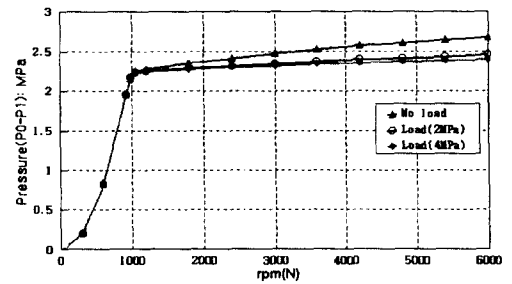
(a) Displacement of spool according to rpm



(b) Pressure of the each chamber according to rpm



(c) N-Q curves



(d) Pressure difference according to rpm

Fig. 3 Characteristic curves of flow control valve

Fig. 3은 유량 제어부에서의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 기본 토출량이 10.5cc/rev 펌프에서 회전수가 0~6000rpm까지 변할 때 무부하 및 부하 상태에서 유량 제어부에 대한 N-Q 특성과 펌프 회전수에 따라 흡입실( $p_0$ ), 토출실( $p_1$ ) 및 주 스프링실( $p_2$ )의 각 압력 특성변화와 스톱의 변위를 보여주고 있다.

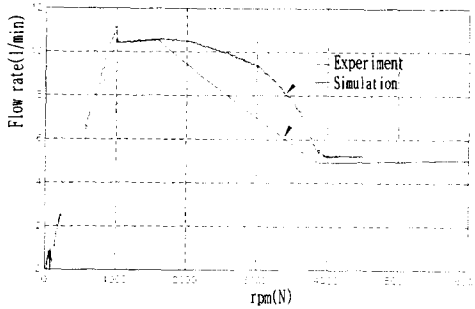


Fig. 4 N-Q curves of the test and the simulation

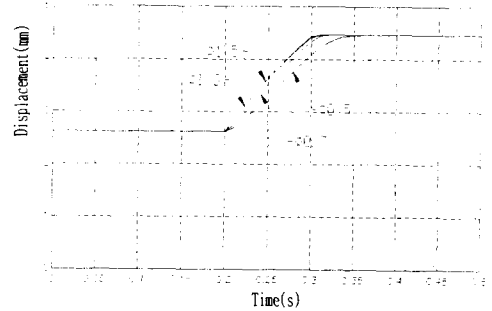
Fig. 4는 기본 토출량이 10.5 cc/rev와 9.6 cc/rev인 펌프에서 회전수를 6000 rpm까지 변화시켰을 때, 무부하 상태에서의 N-Q 특성도이며, 실험과 시뮬레이션에서 N-Q 특성의 절점과 강하 시작점, 완료점은 매우 유사함을 알 수 있다

### 3.3 유량 제어부 인자의 영향

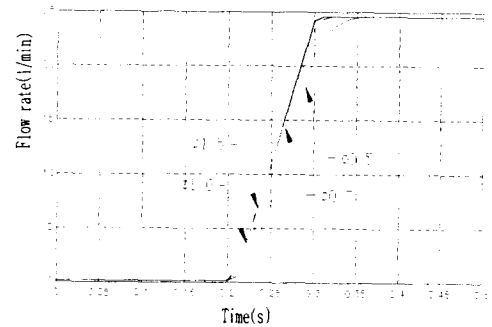
설계해석 프로그램을 작성하기 위한 기초 자료로 활용하기 위하여, 유량 제어부에서 토출 유량에 영향을 미칠 수 있는 각 인자들을 추출하여 그 인자의 변화에 따른 유량 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 스펴과 바이 패스 유출구 간의 거리가 길어질수록 강하 시작점과 강하 완료 점이 빨라지는 것을 알 수 있었으나, 2차 유량 제어에 미치는 영향은 없었다.
- 2) 주스프링 상수의 값이 적을수록 펌프의 낮은 회전수에서 절점, 강하 시작점, 강하 완료점이 이루어지고, 1차, 2차 제어 유량 특성에 영향을 미치고 있었다.
- 3) 스펴의 작은 로드 직경의 변화에 따라 1차 제어 유량의 변화가 발생을 하지만 2차 제어 유량은 로드 직경의 변화에 큰 영향을 받지 않는다.
- 4) 스펴의 큰 로드 직경의 변화에 따라 절점이나 강하 시작점은 동일하나 강하 완료점은 상이하다. 즉 1차 제어 유량은 일정하지만 2차 제어 유량은 스펴의 큰 로드 직경이 적을수록 큰 유량을 토출하는 특성을 보여 준다.
- 5) 스펴 동특성 및 유량 특성 변화는 Fig. 5에서와 같이 파일럿 직경이 클 경우에는 응답성은 유리하나 맥동특성에서 불리하고 반면 파일럿 직경

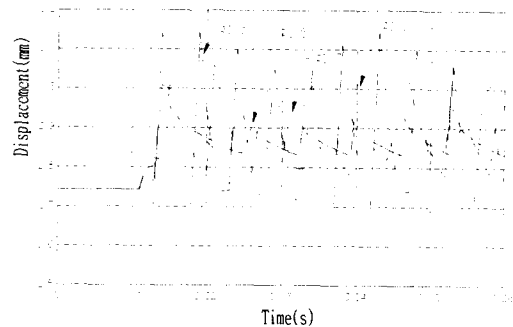
이 작을 경우에는 스펴의 동적 응답성은 떨어지거나 유량맥동 특성에는 유리하기 때문에 유량 제어부에서 실제 적용 때에는 주변 인자의 특성과의 상관 관계를 고려하여 파일럿 직경을 선정할 필요가 있다.



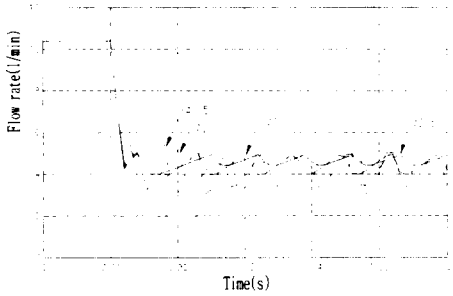
(a) Characteristics of the spool



(b) characteristics of the flow rate



(c) Dynamic characteristics of the spool



(d) Dynamic characteristics of the flow rate  
Fig. 5 Characteristics of the spool and the flow rate according to time

#### 제4장 설계해석 프로그램

유량 제어 밸브 설계는 Fig. 6과 같이 요구하는 설계 조건 즉, 1차 제어 유량, 강하 시작점의 회전수, 강하 완료점의 회전수 및 2차 제어 유량의 값이 주어지면, 다음과 같은 수식을 사용하여 설계해석 프로그램에 의해 계산한다.

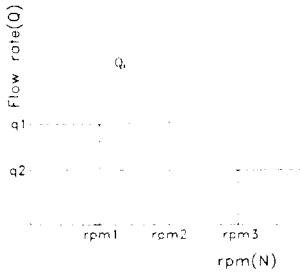


Fig. 6 Characteristic of N-Q curve required by vehicle

##### 4.1 작은 로드 직경(D<sub>sr</sub>)의 설계

$$q_1 = Q_p \times \text{rpm} \quad (16)$$

$$q_1 = C a_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P_2)}$$

$$a_1^2 = \frac{\rho q_1^2}{2C^2 (P_0 - P_2)} \quad (17)$$

스풀의 평형 방정식에서

$$P_0 - P_2 = \frac{k}{A_0} (x + x_u) \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_{sr}^2) \quad (19)$$

$$D_{sr} = \sqrt{D_0^2 - \frac{4 a_1}{\pi}} \quad (20)$$

식(18)에서 계산된 압력 차를 식(17)에 대입하여  $a_1$ 을 구하면 식(20)에서 작은 로드 직경(D<sub>sr</sub>)을 구할 수 있다.

##### 4.2 스풀단에서 작은 로드 끝단까지의 거리(L<sub>1</sub>)

설계 스풀 로드 직경을 작은 로드(D<sub>sr</sub>)로 고정하고, 흡입실 유입 유량과 설계조건 입력값을 이용하고 3-2절 수학적 모델링의 N-Q 특성도의 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 스풀 로드단에서 작은 로드 끝단까지의 거리(L<sub>1</sub>)를 계산한다.

##### 4.3 큰 로드 직경(D<sub>gr</sub>)의 설계

$$q_2 = C a_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_0 - p_2)}$$

$$a_2^2 = \frac{\rho q_2^2}{2C^2 (p_0 - p_2)} \quad (21)$$

스풀의 평형 방정식에서

$$p_0 - p_2 = \frac{k}{A_0} (x + x_b) \quad (22)$$

$$a_2 = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_{gr}^2) \quad (23)$$

$$D_{gr} = \sqrt{D_0^2 - \frac{4 a_2}{\pi}} \quad (24)$$

식(22)에서 계산된 압력 차를 식(21)에 대입하여  $a_2$ 를 구하면 식(24)에서 큰 로드 직경(D<sub>gr</sub>)을 구할 수 있다.

4.4 스풀단에서 큰 로드단까지의 거리(L<sub>2</sub>) 설계 스풀 로드 직경을 큰 로드 직경(D<sub>gr</sub>)으로 고정하고, 설계 조건 입력값 rpm3과 2차 제어 유량을 이용하고 3-2절 수학적 모델링의 N-Q 특성도의 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 스풀 로드단에서 큰 로드 시작단까지의 거리(L<sub>2</sub>)를 계산한다.

##### 4.5 프로그램 분석 및 결과

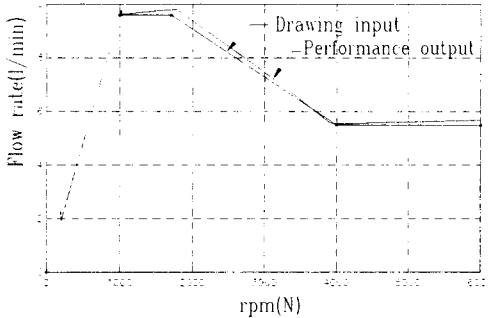
설계 전산 프로그램에서 결과치 검증을 위해 사용한 유량제어밸브는 펌프 기본 토출유량이 9.6 cc/rev, 1차 제어 유량이 9.6 l/min, 2차 제어 유량이 5.5 l/min인 것을 사용하였다.

Fig. 7은 설계시 초기 요구하는 유량 특성도와 설계 전산 프로그램에서 구한 인자의 값으로 다시 유량 특성곡선을 출력한 것이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 설계해석 프로그램에서 설정한 값과 입력값의 유량 특성이 유사하다

는 것을 알 수 있다.

강하 시작점에서 다소 차이가 나타나는 현상은 오리피스 유로 면적의 변화가 발생하는 시점까지의 작은 로드 길이(L<sub>1</sub>) 설정시 발생하는 차이이다.



(a) 9.6cc rev

Fig. 7 Input/output diagram of the N-Q curves for flow control v/v design

Table 1은 설계값과 실 제품값을 비교한 것으로 두값의 오차 15% 이하로 매우 작다는 것을 알 수 있기 때문에 본 논문에서 작성한 전산 프로그램을 이용하여 설계를 하는데 문제가 없다.

### 제5장 결론

베인 펌프의 유량 제어부를 설계하는 전산 설계 프로그램을 개발하기 위해 유량 제어부에 대한 모델링과 수치 해석을 수행하였으며, 수치해석결과를 실험결과와 비교·검토한 결과 해석결과가 실험결과를 잘 예측함을 확인하였다. 이를 기초로 각 인자가 미치는 특성을 분석하기 위해 실험과 수치 해석을 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1차 제어 유량에 영향을 가장 많이 미치는 인자는 스펴의 작은 로드 직경이다. 즉, 오리피스를 통과하는 유로 면적이다.
- 2차 제어 유량에 영향을 가장 많이 미치는 인자는 스펴의 큰 로드 직경이다
3. 절점에 영향을 미치는 주요 인자들은 주 스펴링 상수, 주 스펴링 초기 압축량 및 스펴의 작은 로드 직경이다.
4. 강하 시작점에서 강하 완료점에서의 유량 감소 구배는 스펴의 작은 로드 직경에서 스펴의

큰 로드 직경으로 변화하는 모따기 구배에 의해 결정된다.

5. 강하 시작점은 스펴과 바이패스 유출구 간의 거리, 오리피스단과 작은 로드 끝단까지의 거리 및 스펴의 모따기 크기에 의해 영향을 받는다.

6. 토출실에서 주 스펴링실로의 파일릿 구멍은 스펴과 유량의 동특성에 영향을 미친다.

Table 1. Comparison the design value of the flow control v/v program with the actual value

Item	Discahrge flow rate(9.6cc/rev)			Discahrge flow rate(6.6cc/rev)		
	design value	actual value	error (%)	design value	actual value	error (%)
Small rod dia.(mm)	3.475	3.49	0.43	4.03	4.01	0.5
Big rod dia.(mm)	4.247	4.3	1.23	4.62	4.62	0
Small rod length(mm)	8.746	8.7	0.53	8.97	9.0	0.33
Big rod length(mm)	10.41	10.39	0.2	9.26	9.2	0.6

### 후기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작 기계기술연구 센터의 지원에 의한 것입니다.

### 참고 문헌

1. 中村 京市 外, 1992, "平衡形 베인펌프의 壓力 脈動에 關する 研究", 日本機械學會 論文集(B編), Vol 58 547號, pp. 799~803.
2. 宇野 高明, 1995, Power Steering System, 車輛運動性能 と シャシーメカニズム, pp.222~230.
3. オーム社, 1989, 油空壓 便覽, p.644.
4. Oscar Pinkus, Beno Sternlicht, 1961, Theory of Hydrodynamic Lubrication, pp. 24~56.
5. John Watton, 1989, Fluid power system, pp. 15~70.
6. 안 정기, 1994, 自動車 工學과 整備, pp.756~757.
7. 河 在賢, 1997, 최신 유압 공학, pp. 250~251.