

유압모터의 전효율 측정 자동화 시스템 개발

김형의, 함영복, 정동수, 김진욱
한국기계연구소 유공압기기실

이일영, 김명환
부산수산대학교 기관학과

Development of Overall Efficiency Measurement Automation System for Hydraulic Motor

Hyoung-Eui Kim, Young-Bog Ham, Dong-Su Jung, Jin-Uk Kim

Ill-Yeong Lee, Myung-Hwan Kim

Hydraulic & Pneumatic Lab., Korea Institute of Machinery and Metals. Dept. of Marine Engineering National Fisheries
University of Busan.

ABSTRACT

In this study, the authors developed a hydraulic motor performance test system which automatically accomplishes the procedure of basic performance test and represents the data obtained in the test as performance curves. The software is made as conversation style between a computer and a user, so even to novices it is very easy to use. The most important point of this study is to get desirable isoefficiency curves. As some defined number of data are obtained at actual test, additional data necessary for desirable isoefficiency curves are generated numerically by interpolation. Basis spline function is used to get more smooth representative performance curves.

1. 서론

한국의 산업과 함께 발전해온 국산 유압기기 분야에서 현재 건설경기의 호황과 군 장비의 현대화에 따른 급격한 수요증가에 의해서 생산 및 개발이 점차적으로 가속화 되고 있다. 그러나 유압기기의 생산제품에 뒷바침 되어야 할 제품의 성능, 효율등의 품질분석은 등한시 되어왔다. 앞으로는 국제시장의 진출을 위하여 제품의 가격이나 품질에서 국제경쟁력을 갖추어야 한다. 따라서 품질면의 경쟁력을 갖추는데는 무엇보다도 선결되어야 할 것은 제품의 성능이 쉽게 분석되어서 저성능제품은 개선 연구에 힘써야 하고 보다 좋은 성능을 가진 제품은 확고한 품질 보증을 가지는 잇점을 갖게 될 것이다. 그러나 유압모터나 펌프에서는 전효율을 나타내는 선도를 구하려면 각 경우의 계기(압력, 유량, 토크, 회전수등)들을 동시에 측정해야 하는데 필요한 다수의 인력과 각 경우에 대한

데이터에 의해서 하나의 좌표상에 한점 한점을 수동으로 그려나가는데 따른 시간의 소모와 실험의 어려움은 성능분석의 장애 요인이 되고 있다. 본 연구팀은 이런 점들을 개선하고자 유압모터의 성능시험을 하드웨어와 소프트웨어로 구성된 자동화 시스템으로 만들었다. 하드웨어는 유압발생부, 압력 및 유량제어장치, 부하발생장치, 센서장치, 데이터 전송부, 데이터 처리부 및 출력부로 구성하고, 특히 부하 발생장치와 유량제어 장치는 PC의 명령에 의하여 부하와 유량이 조절 되겠끔 하였다. 소프트웨어 부에서는 사용자가 쉽게 시험해 볼 수 있게 대화식으로 프로그래밍 하였으며 데이터 취득의 신뢰성을 위해서 A/D변환기를 통하여 들어온 정보를 각각에 대하여 몇번을 중복하여 읽어들이 평균값을 취하고, PC에 의하여 부하와 유량이 조절된 후 과도 응답 시간을 0.1sec로 주고, 정상상태에서 관측되도록 하였다. 본 연구팀에 의한 유압모터의 성능시험의 자동화시스템은 데이터의 취득에서 부터 성능곡선의 출력에 이르기까지 완전 자동화 하여 얻고자 하는 데이터나 전효율 선도등을 신속하고 쉽게 구할 수 있겠끔 하는 목적하에서 연구되었다.

2. 기초 방정식

유압모터의 성능에 관련된 물리적인자들은 그림 1과 같이 나타낸다.

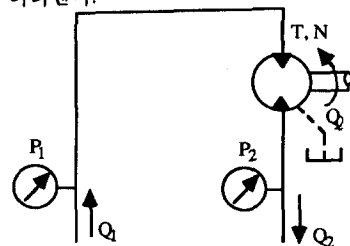


그림 1 유압모터의 성능과 관련된 인자

그림에서 P₁, Q₁는 유압모터에 공급되는 압력과 유입 유량을 나타내고, P₂, Q₂는 모터의 배압과 유출유량을 나타낸다. Q₁은 모터에서의 누설유량으로 Q₁-Q₂를 의미한다. 또 T, N는 모터로부터 발생하는 토크 및 모터의 회전수이다. 유압모터의 성능을 나타내는 척도로는 용적효율(η_v), 기계효율(η_m), 전효율(η_t = η_v × η_m)이 사용되며, 이들은 다음과 같이 정의된다.

(1) 용적효율 (volumetric efficiency)

$$\eta_v = \frac{\text{실제 회전에 사용된 유량}}{\text{모터 유입유량}} \times 100 [\%]$$

으로 정의되며, 여기서 실제 회전에 사용된 유량은 모터 회전수와 유압모터의 배재용적(1회전당 필요한 유량)과의 곱으로 표시된다. 모터 유입유량은 모터 유출유량, 케이스 드레인량 및 외부 누유량의 합이다. 여기서 외부 누유량은 없는것으로 가정하면 용적효율을 다시쓰면,

$$\eta_v = \frac{q \times N}{Q_1 \times 1000} \times 100 [\%] \text{ ----- ①}$$

이다.

여기서, Q₁[l/m], q[cc/rev], N[rpm]의 단위를 갖는다.

(2) 기계효율 (mechanical efficiency)

$$\eta_m = \frac{\text{실제 토크}(T)}{\text{이론토크}(T_{th})} \times 100 [\%]$$

으로 정의되며, 따라서 실제 토크는 토크 미터에 의해 측정되는 값이며 이론토크는

$$\begin{aligned} \text{이론토크}(T_{th}) &= \frac{\Delta P \times Q_2}{2\pi N} \\ &= \frac{\Delta P \times q}{200\pi} \text{ [kg}\cdot\text{m}] \text{ ----- ②} \end{aligned}$$

이므로, 기계효율은

$$\eta_m = \frac{200\pi \times T}{\Delta P \times q} \times 100 [\%] \text{ ----- ③}$$

이며, 여기서 ΔP[kgf/cm²] = (P₁-P₂), T[kgf.m], q[cc/rev], Q₂[l/min]의 단위를 갖는다.

(3) 전효율 (overall efficiency)

전효율은 용적효율과 기계효율과 기계효율의 곱으로 정의되며, 다음식으로 표시된다.

$$\eta_t = \eta_v \times \eta_m / 100 [\%] \text{ ----- ④}$$

3. 알고리즘

3.1 모터의 성능시험 범위의 결정

(1) 시험모터의 최대출력, L_{max}를 결정한다.

L_{max}: 시험모터의 최대출력 [kgf·cm / min]

N: 시험모터의 회전수 [rpm]

T: 시험모터의 토크 [kgf·cm / min]

(2) 최대회전수, N_{max}를 결정한다.

그림1에서 유입유량, Q₁을 조절하기 위하여 유량 제어 밸브를 사용할때 밸브의 최대 개방시의 유량을 최대유량 Q_{1max}이라 하고, 시험모터의 용적효율이 100%이면 N_{max} = Q_{1max} / q로 최대 회전수가 결정된다.

(3) 최대 토크 T_{max}를 결정한다.

① 모터의 입구에 가해지는 압력, P₁에 의한 결정 모터의 출구압력, P₂을 0 kgf/cm²이라 하고 모터의 효율이 100%라고 가정하면

$$T_{max} = \frac{q}{2\pi} P_{1max}$$

이 된다. P_{1max}은 모터의 입구에 가해질 수 있는 최대 압력이다.

② 부하펌프의 출구 압력, P_{1'}에 의한 결정 부하펌프 입구 압력, P_{0'}이 0 kgf/cm²라 하고 1/η_v'm이 1이라고 하면

$$T_{max} = \frac{q'}{2\pi} P_{1max}$$

q': 펌프의 1회전당의 이론 배재량 [cm³ / rev]

η_v': 펌프의 기계효율

P_{1max}: 출구에 형성되는 최대압력 [kgf/cm²]

이 된다.

식 ⑥과 ⑦에서 최소가 되는 T_{max}을 선정한다. L_{max}, T_{max}, N_{max}가 구해지면 그림 2에서 보는 바와 같이 성능시험의 범위를 결정한다.

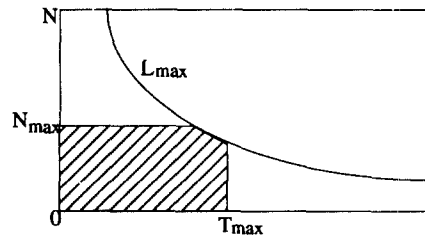


그림 2 성능시험의 범위

3.2 성능시험을 위한 T와 N의 좌표 고정 (Setting)

(1) 일정한 상황, 즉 토크가 T₀, 회전수가 N₀인 조건 아래서 모터의 성능을 시험코자 할때, 실험에서 허용할 수 있을 만큼 가까운 T₀'와 N₀'를 만들어 내어야 하는데, 이것을 T와 N의 좌표고정이라 한다.

(2) T좌표의 고정

① 토크 T의 제어이론

그림 7의 ①에 설치된 압력비례제어 밸브의 입력 전류, i에 의하여 부하부의 토출압력 P₁이 제어된다.

$$i = f_1(P_1) \text{ ----- ⑤}$$

P₁' = P₁ - P₀'라고 할때 T와 ΔP는

$$T = f_2(P_1') \text{ ----- ⑥}$$

로 놓을 수 있고, 식 ⑥과 ⑨에서

$$T = f(i, P_o) \text{ ----- ⑩}$$

가 되며, T의 변화에 비하여 P_o'의 변화가 거의 0이라고 가정하면

$$T = f(i) \text{ ----- ⑪}$$

가 되고, T는 Δi에 의하여 제어 가능하다.

② PC제어기를 이용한 토크 제어

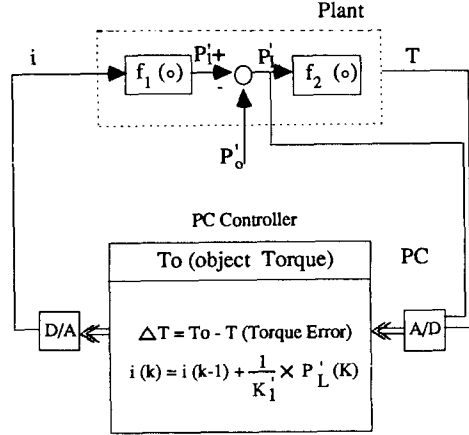


그림 3. 토크 제어를 위한 블록 다이어그램

펌프 회전축의 토크, T,와 펌프 전후의 압력차, ΔP',와의 관계식은

$$P_L' = \eta_m \frac{2\pi}{q} T \text{ ----- ⑫}$$

이고

식 ⑫를 미분하면

$$\Delta P_L' = \frac{2\pi}{q} (T \Delta \eta_m + \eta_m \Delta T) \text{ ----- ⑬}$$

이 되고 목표치 T_o가 형성되는 곳과 현재 측정되어지는 것 사이를 구간 Δ로 잡으면 식 ⑬은

$$\Delta P_L' = P_{Lo}' \frac{T}{T_o} - P_L' + \frac{q' P_L'}{2\pi T} (T_o - T) \text{ ----- ⑭}$$

가 되고

$$P_{Lo}'(k-1) = P_L'(k-1) + \Delta P_L'(k-1) \text{ ----- ⑮}$$

이면 식 ⑭는

$$\begin{aligned} \Delta P_L'(k) = & P_L'(k-1) \times \left(\frac{T(k-1)}{T_o} - 1 \right) + \Delta P_L'(k-1) \\ & + \frac{q' \times P_L'(k-1)}{2\pi \times T(k-1)} \times (T_o - T(k-1)) \text{ ----- ⑯} \end{aligned}$$

이 된다.

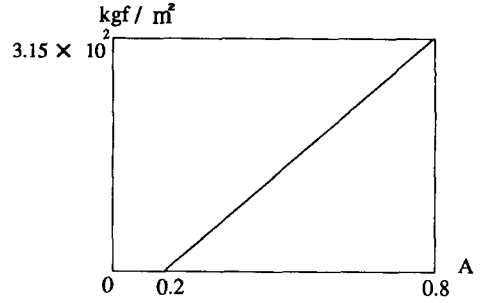


그림 4. 압력비례제어 밸브의 특성 곡선

그림 7의 ⑩부위에 그림 4.와 같은 특성을 가진 압력 제어 밸브를 사용한다면 P와 i에 대한 근사식을 구할 수 있다.

$$P = K_1' i - K_2', 0.2 \leq i \leq 0.8 [A] \text{ ----- ⑰}$$

$$K_1' = 5.25 \times 10^2 \text{ [kgf/cm}^2 \cdot \text{A]}$$

$$K_2' = 1.05 \times 10^2 \text{ [kgf/cm}^2 \text{]}$$

미소변위 Δi에 대하여

$$\Delta i = \frac{1}{K_1} \Delta P_L' \text{ ----- ⑱}$$

가 되며, ΔT는 목표치에 대한 오차를 나타낸다.

식 18를 PC상의 프로그래밍으로 표시할때

$$i(k) = i(k-1) + \frac{1}{K_1} \times \Delta P_L'(k) \text{ ----- ⑲}$$

이 성립된다.

(3) N좌표의 고정

① 회전수, N의 제어이론

그림 7의 ⑫ 설치된 유량 제어밸브의 입력전압, e,에 의하여 시험모터의 공급유량, Q₁,이 제어된다.

$$Q_1 = f_3(e)$$

Q₁에 의하여 모터의 회전수, N,가 제어된다면

$$N = f_4(Q_1)$$

이 되므로 e에 의하여 N을 충분히 제어 가능하다.

② PC제어기를 이용한 회전수 제어

모터의 공급유량과 회전수의 관계식은

$$Q_1 = \frac{1}{\eta_m} qN \text{ ----- ⑳}$$

이 되고, 식 20를 미분하면

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 = & q(N \log \eta_2 \Delta \eta_2 + \frac{1}{\eta_v} \Delta N) \\ = & q^2 N \log \left(\frac{qN}{Q_1} \right) \cdot \left(\frac{No}{Q_{10}} - \frac{N}{Q_1} \right) + \frac{Q_1}{N} (No - N) \text{ ----- ㉑} \end{aligned}$$

이 되고, 프로그래밍할때

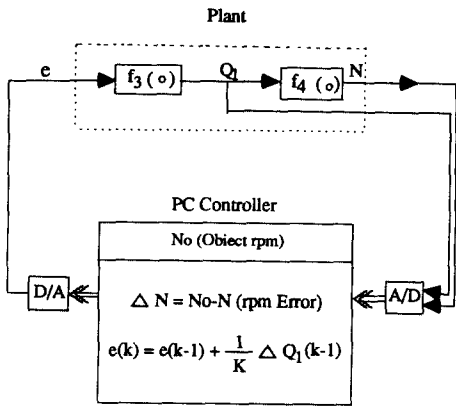


그림 5. 회전수 제어를 위한 블록 다이어그램

$$\Delta Q_1(k-1) = q^2 \times N(k-1) \times \left[\frac{N_0}{Q_{10}(k-1)} - \frac{N(k-1)}{Q_1(k-1)} \right] \times \log \left(\frac{q \times N(k-1)}{Q_1(k-1)} + \frac{Q_1(k-1)}{N(k-1)} (N_0 - N(k-1)) \right) \quad \text{--- ㉔}$$

가 된다.

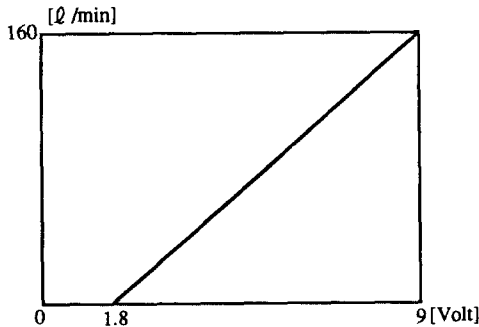


그림 6. 유량 비례제어 밸브의 특성곡선

그림 7의 ㉔부위에 그림 6과 같은 압력제어 밸브를 사용한다면

$$Q_1 = K_1 e - K_2, \quad 1.8 \leq e \leq 9 \text{ [Volt]} \quad \text{--- ㉔}$$

$$K_1 = 2 \text{ [ℓ / Volt} \cdot \text{min]}$$

$$K_2 = 40 \text{ [ℓ / min]}$$

이 되고

$$\Delta e = \frac{1}{K_1} \Delta Q_1 \quad \text{--- ㉔}$$

이 되는데, 이것을 프로그래밍 하면

$$e(k) = e(k-1) + \frac{1}{K} \Delta Q_1(k-1) \quad \text{--- ㉔}$$

이 된다.

4. 자동 계측 시스템의 구성 및 실험 방법

4.1 시스템의 구성

그림 7는 유압모터의 성능시험 자동화를 위한 시스템의 구성을 나타낸다. 이 시스템의 주요구성은 A) 유압 발생부, B) 부하 발생부, C) 유량 및 압력 설정부, D) 데이터 지시부, E) 데이터 변환부, F) 데이터 처리부, G) 시험결과 출력부로 이루어진다.

(1) 유압 발생부의 구성

유압 발생부의 주요 구성은 다음과 같다.

- ① 유압펌프 : 최대 사용 압력 350kgf/cm² 사축식 고정용량형 펌프
- ② 릴리프 밸브(Relief Valve) : 시스템의 안전을 위해 최대압을 규제한다.
- ③ 압력 라인 필터(line filter) : 비례 밸브의 오염으로부터의 보호를 위해서 필터링 정도 10μm 필터 엘리먼트(filter element)를 사용한다.
- ④ 리턴 필터(return filter) : 25μm 필터 엘리먼트를 사용한다.
- ⑤ 유 냉각기 : 시험중 일정 온도를 유지하기 위하여 온도조절장치 결합하여 사용한다.

(2) 부하 발생부의 구성

테스터하고자 하는 유압모터의 회전에 저항하여 부하 토크를 걸어주기 위한 장치로 다이내모메타(dynamometer), 브레이크장치(braking device)등을 사용할수 있으나 본 연구에서는 유압을 사용하기로 하며, 테스트모터의 용량과 동일 용량의 모터를 사용하여 펌프로 작용되게 한다. 여기서 토출되는 압력을 비례 전자 압력제어 밸브로 조절함으로써 결국 시험모터 출력측에 부하를 걸어주었다. 또한 체크밸브(Check Valve)를 조합하여 양방향에 대해서도 시험가능하게 하였다.

(3) 유량 및 압력 설정부의 구성

시험모터의 입구유량을 여러단계로 조절하여, 시험하고자 하는 회전속도를 얻기위해 사용되는 밸브로 비례전자 유량제어밸브를 사용하였다. 이때 유량제어 밸브는 밸브 내부에 조합된 스펴 포지션 피드백(spool position feedback) 장치와 밸브 제어기(proportional valve controller)내의 PID회로에 의해 비교적 정확한 유량을 제어하도록 되어있다. 압력은 부하의 양에 의존하므로 부하 발생부에 비례전자 압력제어 밸브를 설치하여 전기적으로 시험모터의 입구압력을 제어하게 구성하였다.

(4) 데이터 지시부 구성

그림.2에서 ㉑~㉔까지는 각종 센서(sensor)부착위치

및 종류를 나타내며 ①은 시험 모터 입구압력, ②는 시험모터 출구 압력, ③은 시험모터 입구측 유량, ④는 시험모터 출구측 유량, ⑤는 시험 모터의 외부 누설유량 또는 케이스 드레인(case drain)유량 ⑥은 회전수, ⑦은 토오르크, ⑧은 시험모터 입구 유온, ⑨는 시험모터 출구유온, ⑩은 부하모터측의 출구유온 등을 각각 측정하기 위해 설치된다. 본 연구에서는 이들 각종 센서(sensor)들로 부터 출력되는 값을 단순히 지시해 보기위해 각각의 센서 형식에 맞는 인디케이터(indicator)들을 설치하여 랙(rack)에 장착하여 순간적인 지시부를 구성하였다.

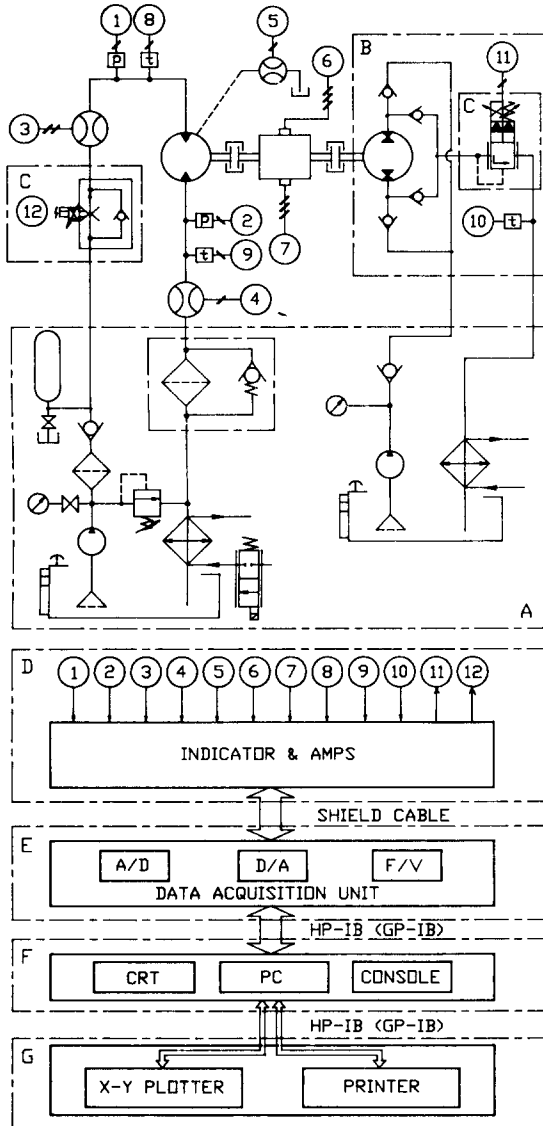


그림 7 유압모터의 성능시험 자동화를 위한 시스템 구성도

(5) 데이터 변환부의 구성

데이터 변환부는 각종 인디케이터(indicator)들로 부터 출력되는 아날로그 신호를 컴퓨터에서의 데이터 처리를 위한 디지털 값으로 바꾸는 A/D변환부와 비례 전자 밸브의 제어를 위한 D/A변환부 및 펄스(fulse) 신호 변화를 위해 F/V변환부로 구성된다.

(6) 데이터 처리부

데이터 처리부는 16비트 HP PC-315CN (i80386CPU, 25MHz, 103MB H.D.D. 80387 Coprocessor 25MHz) 으로 하였다.

(7) 시험결과 출력부

C.T.R과 X-Y플로터로 구성한다.

4. 실험방법

(1) 용어의 정의

유압모터의 시험을 위해서 컴퓨터에서 선행 입력 값을 요구하며 그들값에 대한 정의는 다음과 같다.

1) MAX. DISPLACENT :

시제품 모터의 설계시 주어진 값으로 최대 배제 용적(max. volumetric displacement) [cc/rev]

2) MAX. PRESSURE :

시험할 유압 모터의 최고 압력(사용자가 시험하고자 하는 최고압력) [kgf/cm²]

3) MAX. R.P.M : 시험할 유압 모터의 최고 회전수 (사용자가 시험을 원하는 최고 회전수) [rev/min]

4) MAX. OUTPUT TORQUE :

시제품 모터의 설계시 이론적으로 계산되는 최대 토오르크 값 [kgf.m]

5) NO. OF TEST (ON PRESSURE) :

압력 0 와 MAX. PRESSURE 사이에서 테스트하고자 하는 횟수 (10회 이하) [회]

6) NO. OF TEST (ON RPM) :

회전수 Zero와 MAX. RPM사이에서 테스트하고자 하는 횟수 (10회 이하) [회]

7) OIL TEMPERATURE :

시험시 유지되어야 할 유압유의 온도

8) OIL VISCOSITY :

시험에 사용되는 작동유의 점도 [cSt]

(2) 시험의 선행 조건

1) 유압유의 선정

2) 시험 작동유 온도 :

최대 정격 온도 또는 사용자가 희망하는 온도를 결정한다.

(3) 시험 방법

- 1) 시험할 유압 모터를 스탠드에 설치한다.
- 2) 시스템이 안정되고 시험 작동유 온도가 유지될때 까지 무부하 운전시킨다.
- 3) P.C를 켜고 소프트웨어를 로드 (load)시킨다.
- 4) 컴퓨터에서 요구되는 질문에 따라 사용자가 원하는 대로 답하면 된다.

5. 시험모터의 제원과 결과 및 고찰

5.1 모터의 제원

배제용적 (q) : 400 cc/rev

사용최대압력 (Pmax) : 350 kgf/cm²

사용최대 회전수 (Nmax) : 3,000 rpm

사용최대토크 (Tmax) : 25 kgf - m

5.2 결과 및 고찰

실험결과 그림 8 과 그림 9의 선도를 얻을 수 있었다. 그림 8의 첫번째 그림은 ΔP 와 η_v 에 대한 N의 변화를 나타낸 그림으로 N과 ΔP 가 증가하면 η_v 에 대한 N의 변화를 나타낸 그림으로 N과 ΔP 가 증가하면 η_m 이 증가함을 알 수 있고, 세번째 그림은 ΔP 와 η 에 대한

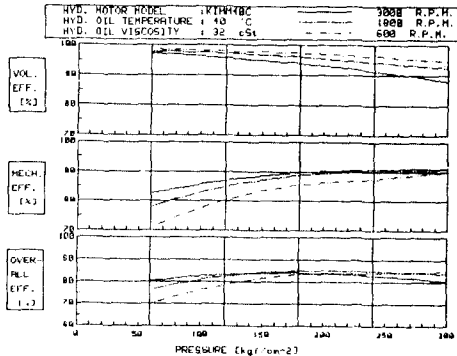


그림 8. ΔP 와 η_v , η_m , η 좌표에 대한 N의 변화곡선

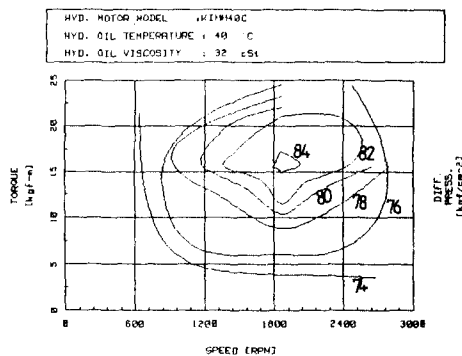


그림 9. N과 T좌표에 대한 η 의 곡선

N의 변화를 나타낸 그림으로 대체적으로 ΔP 가 180 ~ 200 kgf/cm²를 전후로 하여 앞부분에서는 ΔP 와 N이 증가하면 η 이 증가하고 뒷부분에서는 그 반대가 된다. 그림 9는 N과 T좌표에 대한 η 의 변화를 나타내며 η 의 최대치가 84% 이상이 됨을 알 수 있고, N은 1900 rpm과 T는 17 kgf/cm²에서 η_{max} 이 형성됨을 알 수 있다.

6. 결론

유압모터의 성능시험에 자동화를 위해서 소프트웨어를 개발하여 성능시험을 한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 유압모터-펌프 및 비례전자 압력조정밸브를 부하 발생부로 사용함으로써 어떤 특정압 력을 쉽게 유지시킬 수 있었다. 또한, 체크밸브를 적절히 사용함으로써 경제적으로 시스템을 구성시킬 수 있었다.
2. 비례전자 유량 및 압력조정밸브를 펌프 제어함으로써 일정 유량 및 압력을 유지시킬 수 있었고, 또한 테스트 시간을 훨씬 줄임과 동시에 정확한 실험을 할 수 있었다.
3. 데이터를 사용자가 원하는 파일명으로 입력함으로써 언제든지 결과를 출력시킬 수 있게 있었다.
4. 모터의 사양을 메뉴 방식의 입력에 의해 전모터에 관해 성능시험이 가능할 수 있게 하였다.
5. 등 효율선도의 출력을 자동화하게 함으로써 테스트된 모터의 성능에 대한 신뢰성을 갖게 할 수 있었다.
6. 등 효율선도를 그리기 위해서는 많은 데이터의 값이 필요하며 그를 위해서 회전수 및 압력차에 관해서 2차원 보간함으로서 적은 테스트 횟수로도 선도를 그릴수가 있었으며, 따라서 테스트 시간을 현저히 줄일 수 있었다.

[참고 문헌]

1. K.L. Johnson, "Testing Methods for Hydraulic Pumps and Motors", NCFP. (1974)
2. "Method of Testing and Presenting Basic Performance Data for Positive Displacement Hydraulic Fluid Power Pumps and Motors", NFPA. (25 October, 1978)
3. W.M.J. Schlosser, "The Overall Efficiency of Positive Displacement Pumps", German in Olhydraulik und Pneumatik 12, 10, PP. 415-420. (1968)
4. H.F. Costa, "Determining the Optimum Efficiency of a Hydrostatic Pump", Intern Report Laboratorium voor Hydraulischs Werktuigen. (January, 1961)
5. D.F. Boucher & G.E. Alves, "Dimensionless Numbers", Chem. Engng. Prog., 55, 9, PP. 55-64. (September, 1959)
6. G. Silva & R. Inoue, "Hydraulic Motors for High Torque/ Low Speed Applications", The BFPR Journal, PP. 501-508. (4 April, 1982)