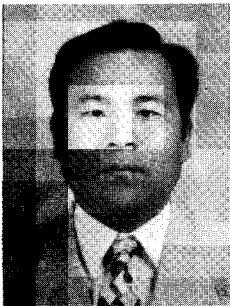


# Hydro-Dynamometer 에너지회생 유압회로의 설계기술



이 용 범

(KIMM 산업기술연구부)

- '87. 2      창원기능대 기계공학과
- '98. 2      한국방송대학교(학사)
- '87. 7- 현재   한국기계연구원 선임기술원



윤 소 남

(KIMM 산업기술연구부)

- '86. 2      제주대학교 기계공학(학사)
- '90. 2      부경대학교 유압제어(석사)
- '94. 2      부경대학교 유압제어(박사)
- '94. 7 - 현재   한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

실험실에서 시험대상물의 성능 및 내구성을 시험하기 위해서는 실제 현장에서 일어날수 있는 현상을 모의해주는 부하장치가 필요한데, 회전형 기기의 시험장비에서 유압식 다이너모미터(Hydro-Dynamometer)는 유압펌프/모터와 압력 제어 밸브로 구성되어 시험조건에 따라서 필요한 부하동력(압력·유량)을 발생시키는 장치이다.

오래 전부터 방산용기기(전차 장갑차 Transmission, Final drive 및 Hydro Steer Unit 등)와 자동차(Transmission, Axle) 그리고 산업용(Gearbox, Coupling) 및 유압모터 등의 종합성능 및 내구성 시험장비등에서는 저속 고 토크(Low Speed High Torque)영역에서 제어응답성이 우수하고, 또 콤팩트한 유압식 다이너모미터가 부하장치로 폭넓게 사용되고 있다. 다이너모미터(Dynamometer)는 동력흡수식인 수력식(Water brake type) 다이너모미터와 와전류식(Eddy current type)다이너모미터가 있으며, 동력회생이 가능한 AC & DC 다이너모미터와 유압식 다이너모미터 등이 있는데, 적용하는 회전수와 토크에 따라 고속 고 토크(High Speed High Torque)제어가 필요한 경우는 수력식 다이너모미터를 사용하고, 고속 저 토크(High Speed Low Torque)에서는 와전류식 다이너모미터와 AC & DC 다이너모미터를 주로 사용하며, 저속 고 토크에서는 유압식 다이너모미터가 사용되고 있다.

최근의 시험장비설계에서는 오랜 시간동안 내구성시험을 할 때 소요되는 동력이 제품의 생산원가상승에 파급되는 점을 감안하여 기존의 동력 흡수식 시험장비에서, 에너지 회생식 시험장비의 연구가 활발하게 추진되고 있다. 시험장비의 입력부에 유압모터를 사용하고, 부하부에 유압식 다이내모미터를 사용하여 유압식 다이내모미터에서 변환된 유체에너지를 입력부 유압모터에 공급하면, 에너지회생이 가능하게 된다. 이와 같은 에너지회생회로를 채택한 시험장비는 입력부의 유압동력 발생장치(Hydraulic power unit)의 에너지 절약과 다이내모미터에서 높은 온도로 변환된 오일냉각시설의 소형화가 가능하여 에너지소모를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 시험장비를 제작할 때 유압식 구동모터와 유압식 다이내모미터를 사용하여, 에너지회생이 가능하도록 설계함으로써, 시험장비를 구성하는 중요 기기(전기모터, 유압펌프, 제어밸브, Oil Reservoir 등) 및 주변시설(Utility : Cooling tower, Cooler, Pipe line 등)의 소형화와

시험장비를 사용할 때 운전비용 저감이 가능한 유압식 다이내모미터의 에너지회생 유압회로 설계기술에 대해서 설명하고자 한다.

## 2. 유압식 다이내모미터의 회로

### 2.1 유압식 다이내모미터의 동력흡수 회로

유압식 다이내모미터(Hdy)의 동력흡수 회로는 그림 1과 같다. 유압모터, 전기 모터 또는 엔진(Input drive)으로부터 시험제품에 기계적 에너지( $T_1 \cdot \omega_1$ )가 공급되고, 시험제품에서 손실을 제외하고 출력되는 기계적 에너지( $T_D \cdot \omega_D$ )는 유압식 다이내모미터( $H_{dy}$ )의 입력이 되어, 유압식 다이내모미터의 흡입부에 연결된 공급펌프(Supercharge pump)에서 토출된 저압(약10 ~20bar), 상온(20~30°C)의 유압유를 고압(210~450bar)으로 압축시켜 유체에너지( $P_1 \cdot Q_1, T_1$ )로 변환시키고, 압축( $P_2$ )된 상온( $T_2$ )의 유압유는 토크제어용 릴리프밸브(Relief Valve)의 교축을 통과하면서 발생

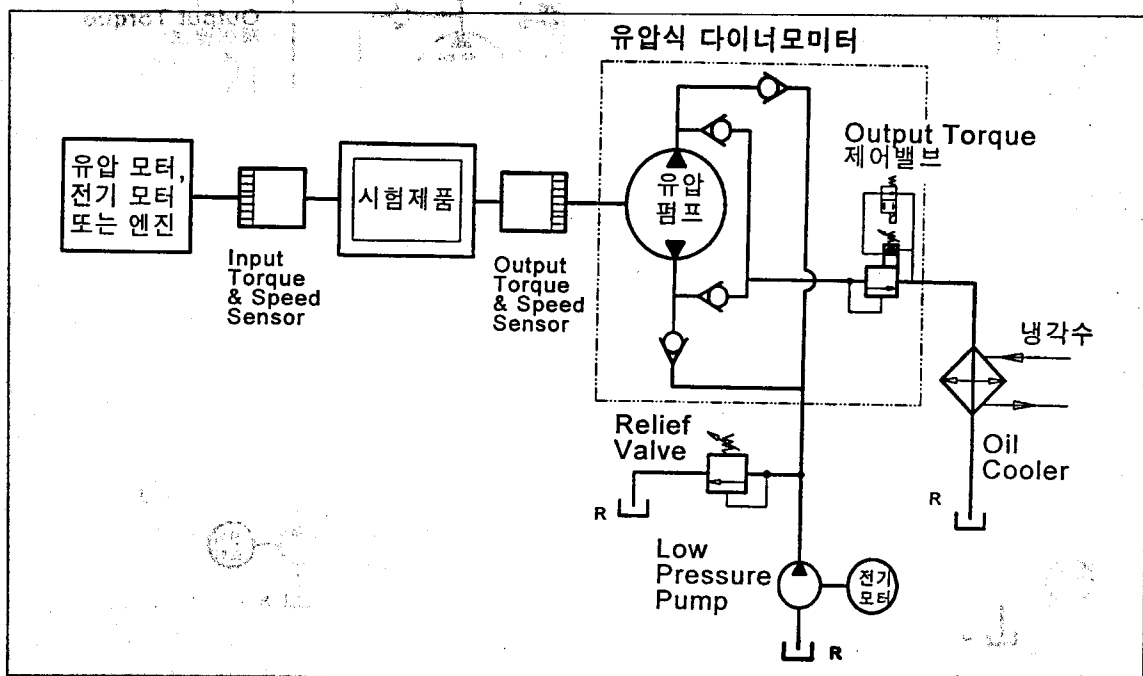


그림 1. 유압식 다이내모미터의 동력흡수 회로

한 큰 마찰로 인하여 유압작동유가 저압( $P_3$ ), 고온( $T_3$ )의 열에너지( $K$ )로 변환된다. 높은 온도로 변환된 유압유는 오일 냉각기를 사용하여 오일의 온도를 상온( $T_4$ )으로 환원시켜 오일탱크로 귀환시킨다. 따라서 연속적으로 시험은 가능하지만 시험제품에서 출력되는 기계적 에너지( $T_D \cdot \omega_D$ ) 상당(등가)량의 많은 열량( $K$ )을 냉각시킬 수 있는 대용량 냉각시설(Cooling tower, cooler, 냉각수 공급 펌프, 밸브 관로 등)이 필요하며, 이로 인하여 냉각시설을 운전하는데 비교적 커다란 동력을 소비하게 된다.

2.2 유압식 다이너모미터의 에너지회생 회로

유압식 다이너모미터( $H_{DM}$ )의 동력회생 회로는 그림 2와 같다. 에너지회생식 회로에서는 시험대상물의 입력부에서 필요한 기계적 에너지( $T_D \cdot \omega$

$D$ )를 유압모터( $H_m$ )로 구동하여야 되며, 시험에 필요한 최대토크는 유압모터의 배재용적( $V_{mTH}$ )과 공급압력( $P_2$ )을 변화시켜 설정하고, 회전수( $N$ )는 유압모터에 공급되는 유량( $Q_2$ )을 변화시켜 제어한다.

그림 2와 같이 유압모터에 공급되는 유량을 서보밸브 또는 비례제어밸브에 의해서 공급 유량을 조절함으로써 속도( $\omega_2$ )가 제어되고, 유압식 다이너모미터의 비례제어 릴리프밸브를 사용하여 부하토크( $T_D$ )를 제어하면서 다이너모미터에서 변환된 유체에너지( $P_5 \cdot Q_5$ )를 에너지회생제어용 비례유량제어밸브( $V_{HC}$ )를 사용하여 유압모터( $H_m$ )에 공급한다면, 약 45~65%<sup>[1]</sup> 에너지 회생이 가능하고, 유압유 냉각시설과 유압동력 발생장치(Hydraulic power unit)를 소형화시킬 수 있다.

그러나 유압식 다이너모미터의 에너지회생 회로에서는 입력부분이 유압모터를 사용해야 되며,

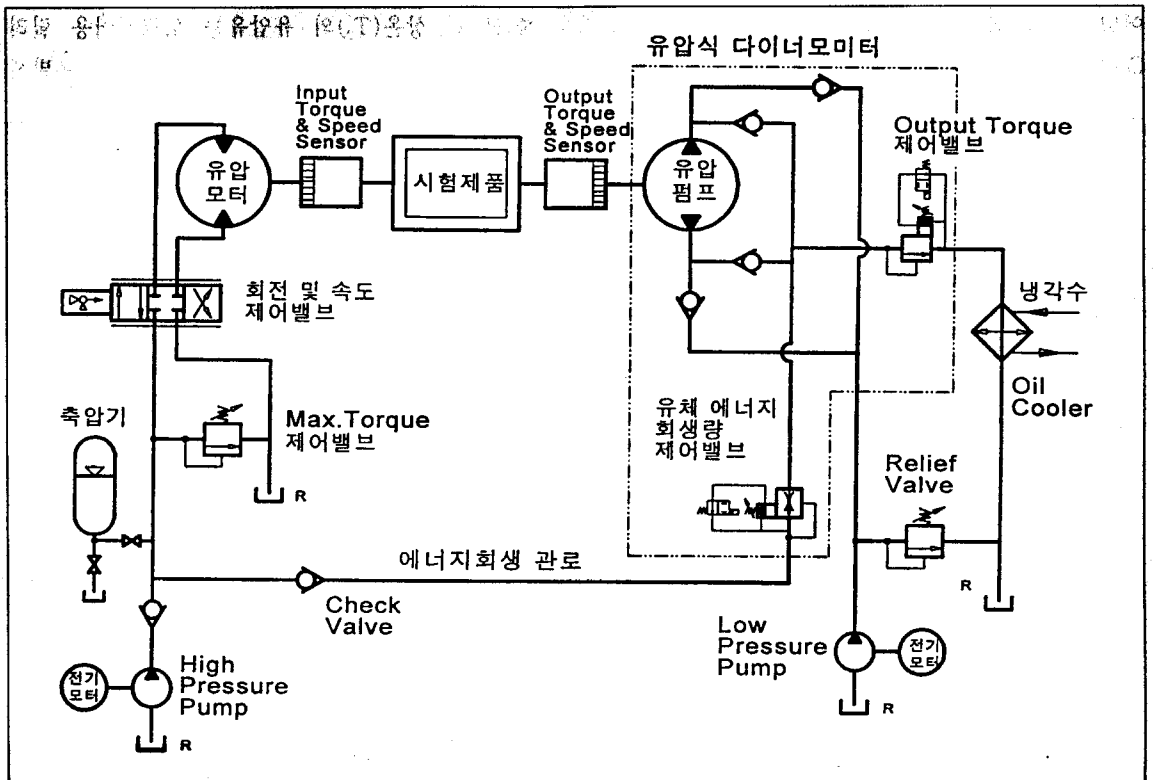


그림 2. 유압식 다이너모미터의 에너지회생 회로

유압식 다이내모미터에서 변환된 압력이 유압모터에 공급되는 압력보다 약10bar 이상 높아야만 다이내모미터에서 변환된 유체에너지가 입력부 유압모터의 공급 동력으로 사용이 가능하고, 이를 위해서는 에너지 회생밸브( $V_{HC}$ )를 동시에 제어하여야 한다. 따라서 유압식 다이내모미터의 에너지회생회로에서는 시험대상물로부터 출력되는 기계적 에너지를 유체에너지로 변환시킬 때 효율이 높을 것과 변환된 유체에너지를 유압모터에 안정적으로 공급하는 것이 매우 중요하다. 또 유압식 다이내모미터를 제어하는데는 전체 변환유체에너지(약30~40%)<sup>[2]</sup>가 소모되는데, 유압회로 및 최적 밸브의 선정으로 제어에 소모되는 유체에너지를 최소화하여 회생에너지량을 증가시키는 것이 필요하다.

### 2.3 시험장비의 에너지회생 회로 구성조건

회전형 기기의 시험장비에서 성능 및 내구성

시험을 수행하기 위해서는 시험대상물의 입력부에 기계적 에너지( $T_M \cdot \omega_M$ )를 공급하고, 시험제품에서 손실된 동력을 제외한 출력축의 기계적 에너지( $T_D \cdot \omega_D$ )를 축이 회전하는 중에 가변부하를 형성시킬 수 있어야한다. 그림 3과 같은 시험장비의 회로에서 유압식 다이내모미터는 출력축의 기계적 에너지( $T_D \cdot \omega_D$ )를 구동동력으로 하여 저압( $P_4$ ) 상온( $T_1$ )의 유압유를 고압( $P_5$ )으로 압축시켜 유체에너지( $P_5 \cdot Q_5$ )로 변환시키고, 변환된 동력은 시험대상물의 작동시나리오에 부합되는 부하로서 작용하게 된다. 이때, 동력을 발생시키는 릴리프밸브 전·후단에는 매우 큰 차압이 발생된 상태로 유체의 흐름이 발생하고, 이 에너지는 손실동력으로 차압에 비례한 만큼의 온도상승을 초래한다.

시험대상물의 입력부에서 필요한 기계적 에너지( $T_M \cdot \omega_M$ )는 유압모터( $H_m$ )의 배재용적( $V_{mTH}$ ), 압력( $\Delta P : P_2 - P_3$ )을 곱한 것에 비례하며, 회전수(N)는 유압모터에 공급되는 유량( $Q_2$ )에 유압모

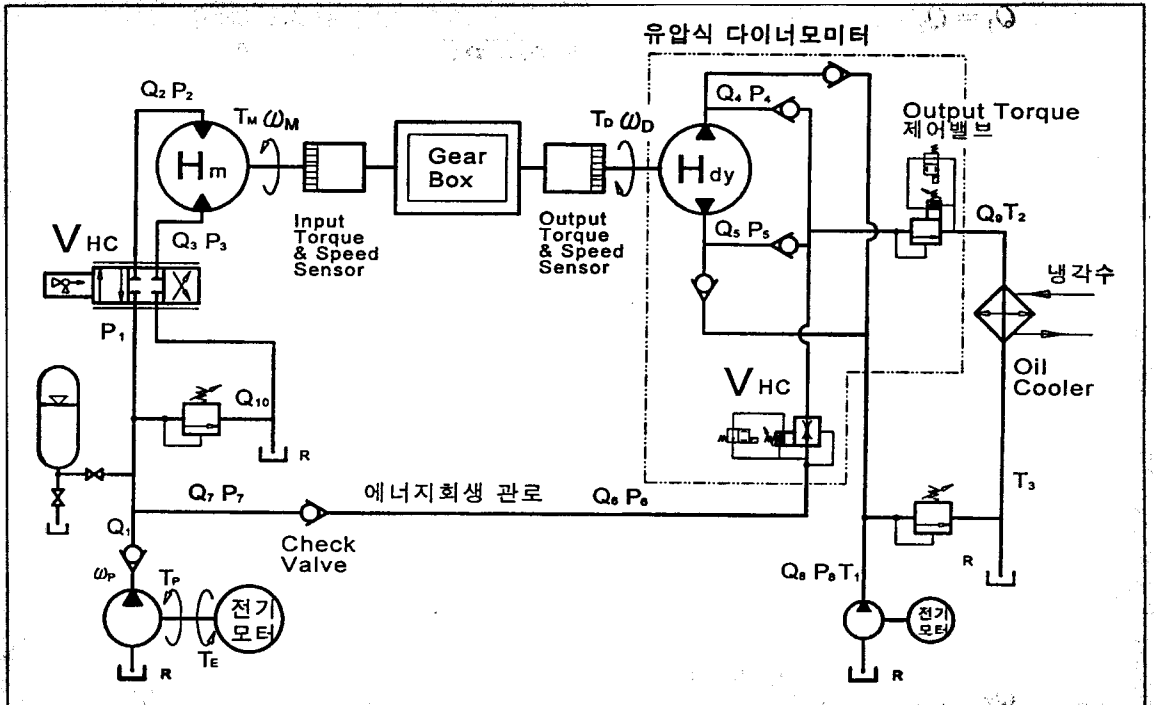


그림 3. 시험장비의 회로도

터의 배재용적( $V_{mTH}$ )을 나눈 것에 반비례한다. 이 회로에서 유압모터에 공급되는 유량( $Q_2$ )과 압력( $P_2$ )은 서보밸브 또는 비례제어밸브에 의해서 제어가 가능하여야 하고, 유압모터는 시험제품의 입력 토크 발생조건에 만족한 크기의 배재용적( $V_{mTH}$ )과 공급압력( $\Delta P$ )이 요구되며, 공급유량( $Q_2$ ) 또한 충분하여 시험에 필요한 회전( $N$ )을 만족시킬 수 있어야 한다. 그리고 유압식 다이내모미터에서 발생하는 압력( $P_5$ )은 입력부의 유압모터( $H_m$ )의 공급압력( $P_2$ )보다 약10bar 이상 높게 설정되어, 유압식 다이내모미터에서 발생하는 유체에너지( $P_5 \cdot Q_5$ )의 일부인 회생에너지( $P_7 \cdot Q_7$ )를 유압모터의 공급 동력으로 사용이 가능하게 할 수 있다.

위와 같은 필요충분 조건을 만족하는 그림 3의 시험장비의 회로에 관계되는 이론 식은 1) 유량 관계식과 2)토크관계식 그리고 3)열 발생 관계식으로 정리 할 수 있다.

### 3. 이론 관계식 정리

#### 3.1 유량관계식의 정리

에너지 회생회로에서 시험에 필요한 총 유량( $Q_2$ )은 전기모터구동으로 유압펌프에서 토출되는 유량( $Q_1$ )과 유압식 다이내모미터에서 회생되는 유량( $Q_7$ )을 합한 것에서 최대토크 설정용 릴리프밸브 유량( $Q_{10}$ )을 뺀 것과 같으며, 이때  $C_p$ 를 펌프의 유량계수로 하고  $A_{R1}$ 은 릴리프밸브의 개구면적이며  $A_{C7}$ 은 역류방지용 체크밸브의 개구면적이라면, 유량관계는 아래 식(1)과 같다.

또한 유압모터를 구동하는 밸브의 유량관계는 식(2)과 같다.

그리고 유압식 다이내모미터의 입구부의 유량관계는 식(3)과 같고 출구부의 유량관계는 식(4)과 같다.

또한 역류방지용 체크밸브의 유량관계는 아래

$$Q_1 = Q_2 + Q_{10} - Q_7$$

$$D_p \cdot \omega_p - C_p \cdot P_1 = C_d \cdot A_v \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} + C_d \cdot A_{R1} \cdot \sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} - C_d \cdot A_{C7} \cdot \sqrt{\frac{2(P_6 - P_7)}{\rho}} \quad (1)$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$C_d \cdot A_v \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} = D_m \cdot \omega_m + C_m(P_2 - P_3) \quad (2)$$

$$Q_8 = Q_5$$

$$C_d \cdot A_{C8} \cdot \sqrt{\frac{2(P_8 - P_5)}{\rho}} = D_D \cdot \omega_D + C_D(P_5 - P_4) \quad (3)$$

$$Q_4 = Q_6 + Q_9$$

$$D_D \cdot \omega_D - C_D(P_4 - P_5) = K_f \cdot V_f + C_d \cdot A_{R2} \sqrt{\frac{2P_6}{\rho}} \quad (4)$$

$$Q_7 = C_d \cdot A_{C7} \sqrt{\frac{2(P_7 - P_1)}{\rho}} \quad (5)$$

의 식(5)과 같다.

### 3.2 토크관계식의 정리

전기모터에서 출력되는 토크는 유압펌프의 입력토크와 같고, 이것은 유압펌프계의 관성( $J_P$ )에 유압펌프 각 가속도( $\omega_P$ )를 곱한 것과, 유압펌프계의 마찰손실( $b_P$ )에 유압펌프 각속도( $\omega_P$ )를 곱한 것을 더한 것과 같으며 그 관계는 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} T_E &= T_P \\ D_P \cdot P_1 &= J_P \cdot \dot{\omega}_P + b_P \cdot \omega_P \end{aligned} \quad (6)$$

또한 유압모터에서 출력되는 토크( $T_M$ )에 시험제품의 감속비( $\epsilon$ )를 곱한 것에서 시험대상 제품의 손실을 제외한 것이 유압식 다이내모미터의 입력 토크가 된다. 이때 유압모터 관성( $J_m$ )과 각 가속도( $\omega_m$ ), 그리고 유압모터계의 마찰손실( $b_m$ )에 각속도( $\omega_m$ )관계는 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} T_M &= \epsilon \cdot T_D \\ &= J_m \cdot \dot{\omega}_m + b_m \cdot \omega_m \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 유압식 다이내모미터 토크 식 또한 관성( $J_D$ )에 각 가속도( $\omega_D$ )를 곱한 것과, 마찰손실( $b_D$ )에 유압모터 각속도( $\omega_D$ )를 곱한 것을 더한 것과 같으며 관계는 식(8)과 같다.

$$T_D = J_D \cdot \dot{\omega}_D + b_D \cdot \omega_D \quad (8)$$

### 3.3 릴리프 관로의 열 관계식의 정리

다이내모미터에서 출력되는 유체에너지의 총 유량은 식 ④로부터 산출할 수 있고, 이 유체에너지에서 에너지회생량을 제외한 릴리프 유량은 식⑤에 의해서  $P_6$ 과  $Q_9$ 를 계산할 수 있다. 이때 시험대상제품의 출력토크제어용 릴리프밸브를 통과하는 유압유의 열 발생 관계는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} K &= P_6 \cdot Q_9 \frac{kgf}{cm^2} \cdot \frac{cm^3}{Sec} \cdot \frac{1000}{60} \\ &= P_6 \cdot Q_9 \frac{kgf \cdot cm}{Sec} \cdot \frac{1000}{60} \\ &= P_6 \cdot Q_9 \frac{Kcal}{h} \cdot \frac{9.806 \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot 0.24}{100 \cdot 60} \\ \therefore &= 1.412 P_6 \cdot Q_9 \frac{Kcal}{h} \end{aligned} \quad (9)$$

### 4. 부하제어 실험

앞에서 설계된 시험장치를 40cc/rev용량의 유압모터 시험장비에 동력흡수식과 에너지회생식으로 각각 회로를 구성하여, 유압식 다이내모미터의 회전수 및 입력 토크를 변화시켜가며 다이내모미터에서 토출되는 유량과 압력을 측정하여, 전체효율( $\eta_T$ )과 부하제어의 안정성 및 시험에 소요되는 전체에너지를 고찰하였다.

동력흡수식에서는 시험결과 전효율 그림 4과 같이 수회(10회 이상)토크 및 회전수변화를 반복해가면서 실험하였을 때, 비교적 높은 성능과 안정된 부하제어가 가능하였다. 그러나 최대마력(40.97 HP)시험에 필요한 총 소요동력이 114마력(Hydraulic Power Unit의 고압 펌프(51.25HP)+저압펌프(6.0HP)+냉각수 소비열량(36926.2Kcal/h) 및 제어 전력 등)소요되었다.

에너지 회생회로를 구성하여 회전수 변화에 따른 토출유량 및 토크 변화에 따른 토출압력, 전효율 그래프를 각각 그림 5, 그림 6, 그림 7,에 도시하였으며, 3D전효율 그래프는 그림 8과 같이 저속(300RPM이하)과 저압(70Bar이하)에서는 제어밸브의 부하제어가 불안정하여, 에너지의 회생을 할 수 없었으며, 회전속도 400~1800RPM과 제어압력 96.2~256.65Bar범위일 때 비교적 높은 에너지회생이 가능(약40~55%)하였고, 부하제어 또한 안정적이었다.

### 5. 결론

지금까지 유압식 다이내모미터의 에너지회생 유

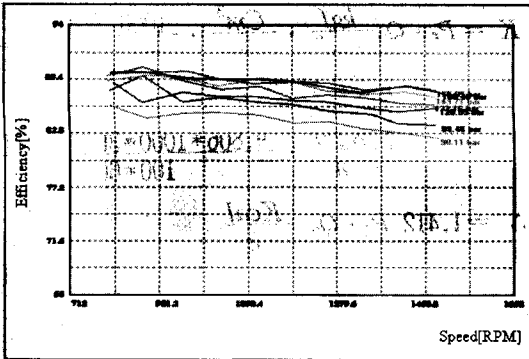


그림 4. 동력흡수식 Dynamometer 전효율

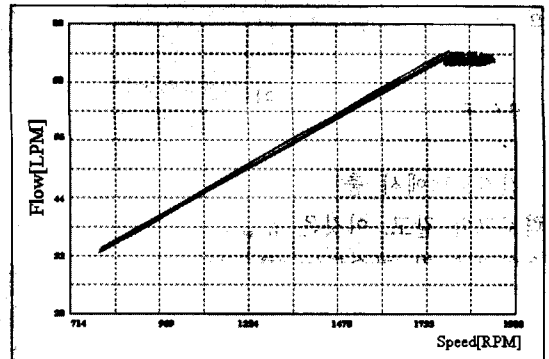


그림 5. 에너지 회생식 Dynamometer 유량

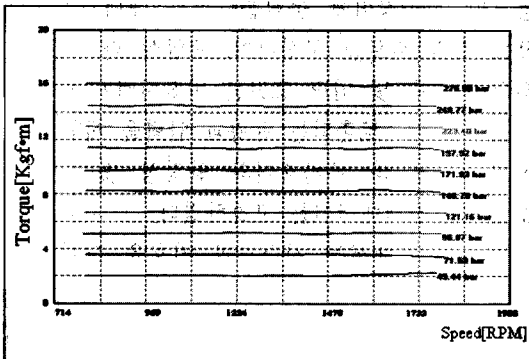


그림 6. 에너지 회생식 Dynamometer 압력

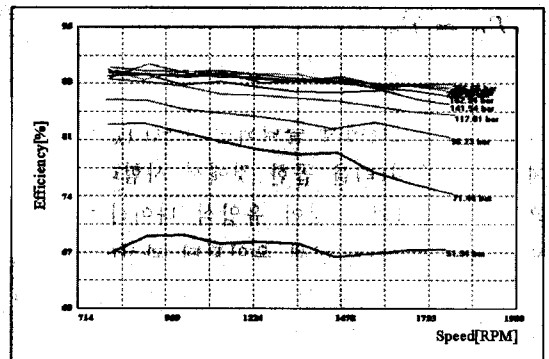


그림 7. 에너지 회생식 Dynamometer 전효율

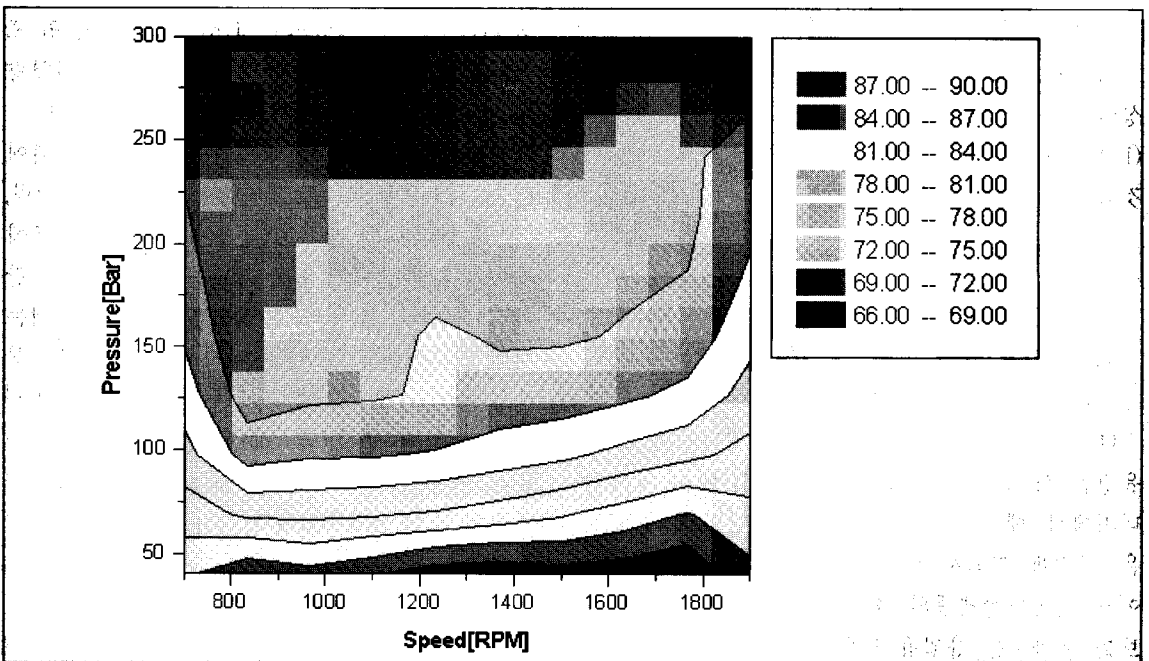


그림 8. 에너지 회생식 Dynamometer 3D 전효율

압회로설계와 시험장치를 구성하여 특성을 평가하였다. 본 논고에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 유압식 다이내모미터의 에너지회생시스템은 부하변동 주기가 작고, 장시간 시험이 계속되는 내구성시험장비에 적합하고, 다이내모미터의 부하제어안정성을 확보하기 위해서는 최대회전수대비 최저회전수의비가 22.2% 이상과, 최고압력대비 최저압력비가 37.4% 이상이어야 한다.

2) 유압모터(40cc/rev) 시험장비에서 유압식 다이내모미터의 동력흡수식과 에너지회생 식을 비교한 결과 동력 흡수식에서는 유압모터를 256bar×1800rpm으로 시험할 때 총 소요동력은 114마력이었으나, 에너지회생식에서는 85마력이 소요되어, 흡수식에 비해 약 25.4% 동력절감효과가 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 早川脩, 油壓ポンプのお話, 油壓と空氣壓, pp71~79, 1996
- [2] 田供孝, 油壓システムの省エネルギー活用, 油壓と空氣壓, pp26~31, 1983
- [3] 中野和夫 외1인, ポンプの容量制御, 油空壓システムの省エネルギー調査研究 報告書, pp. 60~72, 1985.
- [4] Robot A. Nasca, Pump/Motor Test Testing Fluid Power Components, pp. 171~190, 1990.
- [5] J. Williamson, Progress Towards ISO Standards for Starting and Low-Speed Characteristics of Hydraulic Motors, Fluid Power Symposium, pp.49~64, 1981.
- [6] J. K. Royle, Pumps, Motors and Transmission Fluid Power Engineering, pp. 98~168, 1976.
- [7] 김덕윤, 기기 및 장치 시험/검사, 유압기술 편람, pp. 528~543, 1997.
- [8] 상공부, 유압모터의 성능시험, Axil piston type 유압모터개발 공기반 보고서, pp. 86-94, 1991.