

시내버스용 유압식 에너지 회생시스템 연구

The Study for Hydraulic Type Energy Regenerative System of a City Bus

정동수 · 김형의
D. S. Jung and H. E. Kim

1. 서론

시내버스, 쓰레기 수거차 등 주차 및 정차가 빈번한 디젤 차량은 제동 시 대부분의 운동에너지가 브레이크에 의하여 열로 변환되어 대기 중으로 방출됨으로서 주행연비가 크게 악화되며 또한 기동 시 가속도를 높이기 위하여 구동엔진에 무리한 기동력을 요구함으로써 매연을 증가시킨다. 차량의 운동에너지를 제동 시 저장하였다가 가속 시 재사용하는 에너지 회생시스템을 이용하면 연비가 향상되고 매연이 감소되며 높은 기동력을 얻을 수 있다.

선진국에서는 유가상승과 매연규제에 대응하기 위하여 에너지 회생시스템에 대한 연구를 활발히 진행되어 왔다. 에너지 회생시스템은 에너지를 저장하는 형태에 따라 발전기/전동기와 축전기로 구성된 전기식^{1,2)}, 유압펌프/모터와 축압기로 구성된 유압식^{3,4)}, 그리고 회전체에 운동에너지를 저장하는 플라이휠식으로 크게 3가지 종류가 있다. 전기식은 일본의 HONDA(주)에서 그리고 플라이휠식은 독일의 MAN(주)에서 개발되었지만 둘 다 가격이 고가이면서 탑재되는 공간상의 제약 때문에 중·대형 디젤 차량에 상용화 되지는 못하였다. 유압식은 구성부품들의 배치가 용이하고 출력비가 높고 그리고 응답특성이 우수하기 때문에 차량에 적용하려는 연구가 1973년경부터 활발히 진행되어 왔다.

국내에서 연구된 유압식 에너지 회생시스템은 구조에 따라 두 가지 방식이 있다. 기존의 기계식 변속장치를 이용한 방식⁵⁾과 유압식 변속장치를 이용하는 방식^{6,7)}이 있다. 두 가지 방식은 모의 시험기를 통하여 구성 부품들의 설계 파라미터와 제어 알고리즘을 개선하여 에너지의 회생성능을 향상시키고자 하였다. 유압식 변속장치는 동력을 전달하는 효율이 상대적으로 낮아 주행차량에 적용하기에 어려운 점이 있다.

본 해설에서는 제동 시 운동에너지를 축적하고 기동 및 가속 시 축적된 에너지를 재사용하는 기존

액슬(axle)의 출력축에 연결되는 유압식 에너지 회생시스템에 대하여 기술한다. 그리고 시내버스의 실차조건을 부여한 시험장비에 회생시스템을 장착하여 에너지 회생효율, 연비, 매연 등에 관련된 시험을 수행하여 사용전의 시험결과와 비교분석한다.

2. 에너지 회생시스템의 구성

Fig. 1은 에너지 회생시스템의 유압회로를 보여주고 있고 Table 1은 주요부품들에 대한 제원들을 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of main components in hydraulic circuit

Capacity of Main Component	Specification
Displacement of Pump/Motor	125 cc/rev
Gas Volume of Piston Type Acc.	45 liter
Flow Rate of Charging Pump	40 l/min
Flow Rate of Flow Control Valve	10 l/min
Inner Diameter of Steel Tube	30 mm

유압펌프/모터는 운동에너지와 유압에너지를 상호 변환하는 부품으로서 운동에너지를 유압에너지로 변환시킬 때는 유압펌프로서 작동하고 반대의 변환일 때는 유압모터로서 작동한다. 유압펌프/모터는 사판(tilting pad)의 각도를 감지하는 변위센서와 조정기를 제어하는 비례유량제어밸브를 탑재하고 있는 Bosch-Rexroth(주)의 A4VSG125이다. 축압기는 제동 시에 유압펌프에 의하여 발생된 고압 작동을 저장하고 가속 시 유압모터에 유압에너지를 공급한다.

조정기(regulator)는 유압펌프/모터의 배제용적(volumetric displacement)을 제어하는 부품으로, 정밀하게 제어하고자 할 때에는 비례유량제어밸브(proportional flow control valve)에 의하여 작동되고 응답특성을 높이고자 할 때에는 3위치-4방향(3

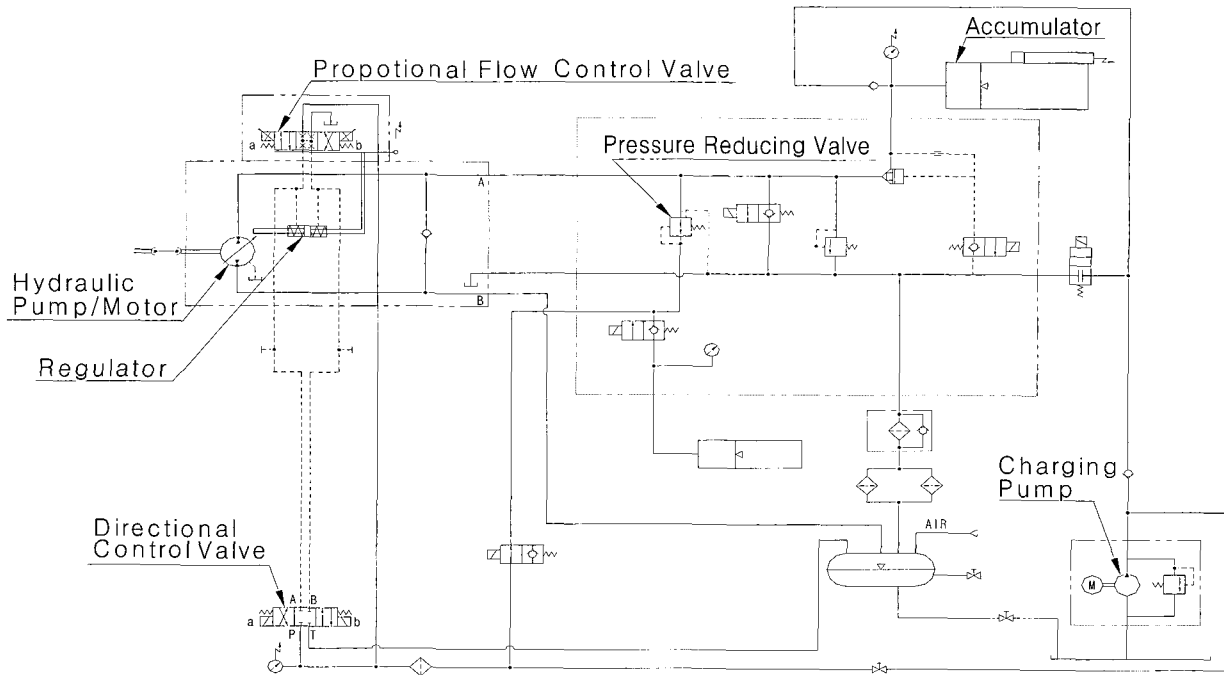


Fig. 1 Hydraulic circuit of the energy regenerative system

position-4way) 방향제어밸브(directional control valve)에 의하여 작동된다. 감압밸브(pressure reducing valve)는 고압라인의 압력을 조절기에 필요한 압력으로 강하하여 공급한다.

회생시스템을 장시간 사용하지 않으면 고압라인의 압력이 지나치게 저하될 수 있다. 이때, 보조 축압기는 시스템에 압력을 공급하여 시스템이 최소 규정압력을 유지하도록 한다.

2.1 축적/방출 유압에너지

피스톤형 축압기에 변위센서와 압력센서를 설치하고 식 (1)을 이용함으로써 축압기에 축적되는 유압에너지를 산출한다. 이때 축적 에너지(E_{hi})는 질소가스의 체적이 감소하므로 에너지가 양의 값을 갖도록 하기 위하여 음의 부호를 사용한다. 식(2)의 방출 에너지(E_{ho})는 질소가스의 체적이 증가하므로 양의 부호를 사용한다.⁸⁾

$$E_{hi} = -\frac{1}{100} \int_{V_1}^{V_2} P_a dV_a \quad (1)$$

$$E_{ho} = \frac{1}{100} \int_{V_1}^{V_2} P_a dV_a \quad (2)$$

여기서 V_1 과 V_2 는 시험 시작점과 종료시점의 축압기 질소가스 체적이다.

2.2 입·출력 운동에너지

차량의 운동에너지는 차량의 중량과 속도에 의하여 표현된다. 시험장비에서는 시내버스에 등가되는 관성질량과 회전속도가 이용된다. 회전수는 측정이 가능하지만 유압펌프/모터에서의 관성질량은 플라이휠, 변속기, 액슬, 증속기 등의 관성질량들과 기계적 손실에 해당되는 내부저항들로 표현되기 때문에 산출이 용이하지 않다. 따라서 유압펌프/모터에서 회전수와 입·출력 토크를 측정하고 식 (4)과 식 (5)를 이용하면 유압펌프/모터에서의 관성질량(I_m)이 구해진다.

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (3)$$

$$I_j = 9.806 T \left| \frac{\Delta t}{\Delta \omega_j} \right| \quad (4)$$

$$I_m = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} I_j \quad (5)$$

운동에너지는 식 (6)으로 표현되며 유압펌프의 구동 에너지와 유압모터의 출력 에너지로 분류된다.

$$E_k = \frac{I_m \omega^2}{2 \times 9.806} \quad (6)$$

3. 시험장비

3.1 시험장비 구성

시험장비는 국내 시내버스의 실차 시험조건을 부여하기 위하여 CITY540(현대자동차)과 BS106(대우자동차)의 재원을 참고로 하여 Table 2로 결정하였다. 결정된 재원을 기준으로 하여 시험장비에 구성되는 요소부품들을 설계하였다.

시험장비는 Fig. 2와 같이 디젤엔진, 변속기, 클러치, 플라이휠, 액슬(axle), 증속기, 그리고 에너지 회생시스템으로 구성된다. 에너지 회생시스템은 액슬의 후 축에 연결되어 있고 증속기는 플라이휠의 관성질량을 줄이기 위하여 사용된다.

Table 2 Design specification of the test equipment

Item	Unit	Specification
Vehicle Mass	kg	12,000
Engine Power	HP	280
Engine Torque	kgf-m	115
Vehicle Speed	km/hr	110
Vehicle Tire Diameter	m	1.016
Axle Speed	RPM	574

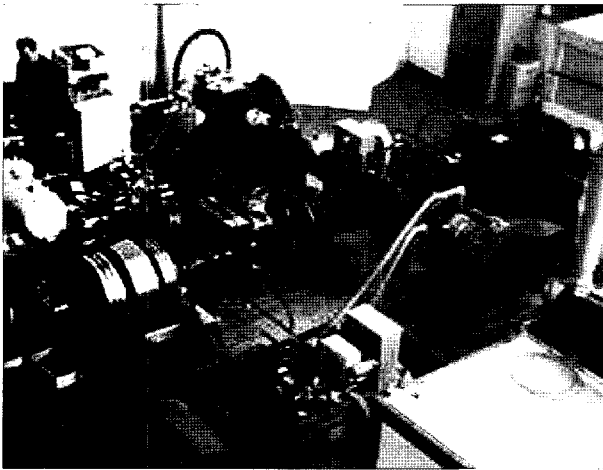


Fig. 2 Photo of the test equipment

3.2 시험방법

저자들은 에너지 축적효율, 에너지 회생효율, 그리고 회생시스템의 응답성능에 대한 시험을 수행하였다. 그리고 에너지회생시스템을 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때 연비 및 매연에 대한 비교시험도 수행하였다.

에너지 축적효율에 대한 시험은 일정한 주행속도를 유지한 후, 차량이 일정한 감속을 유지하도록 유

압펌프의 배제용적을 제어하면서 수행한다. 차량을 감속시키는 제동토크는 식 (7)로 표현되고 유압펌프의 입력토크는 식 (8)로 표현된다. 이 때 제동토크와 입력토크는 동일하다.

$$T = \frac{I_m}{9.806} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (7)$$

$$T = \frac{\Delta PV_{th}}{200\pi\eta_m} \quad (8)$$

에너지 회생효율에 대한 시험방법은 다음과 같다. 축압기에 축적된 유압에너지와 유압모터를 이용하여 차량이 일정한 가속을 유지하도록 유압모터의 배제용적을 제어한다. 차량을 가속시키는 구동토크는 식 (7)으로 표현되고 유압모터의 출력토크는 식 (9)로 표현된다. 이 때 구동토크와 출력토크는 동일하다.

$$T = \frac{\Delta PV_{th}\eta_m}{200\pi} \quad (9)$$

회생시스템의 응답특성에 대한 시험방법은 다음과 같다.

유압모터의 출력축을 시험장비로부터 분리한 후 축압기에 축적된 유압에너지를 자유롭게 방출하였을 때 유압모터의 출력회전수를 측정하여 응답특성을 분석한다.

연비 및 매연에 대한 시험은 축압기에 유압에너지가 축적된 상태에서 엔진과 유압모터를 이용하여 차량이 일정한 가속도를 유지하도록 엔진의 스로틀과 유압모터의 배제용적을 동시에 제어하면서 수행한다. 이 때 엔진의 연료량과 매연을 측정한다. 그리고 에너지 회생시스템의 축을 분리한 후 엔진만을 이용하여 동일한 시험을 수행한다.

4. 시험결과 분석

Fig. 3은 75km/hr 차량 속도에서 유압펌프로 제동하였을 때 운동에너지가 유압에너지로 변환되는 과정을 보여주고 있다. 약 250,000kgf-m의 운동에너지가 약 100,000kgf-m의 유압에너지로 변환되어 에너지 축적효율이 약 40%가 된다.

Fig. 4는 초기압력이 280bar인 축압기와 유압모터로 차량을 구동하였을 때, 유압에너지가 운동에너지로 변환되는 시험결과를 보여주고 있다. 약

80,000kgf·m의 유압에너지는 약 60,000kgf·m의 운동에너지로 변환되어 에너지 회생효율이 약 75%가 되고 있다.

Fig. 3과 4의 시험결과로부터 운동에너지가 유압에너지로 변환되어 축적되었다가 다시 운동에너지로 회생되는 전체 에너지 회생효율은 약 30%가 됨을 알 수 있다.

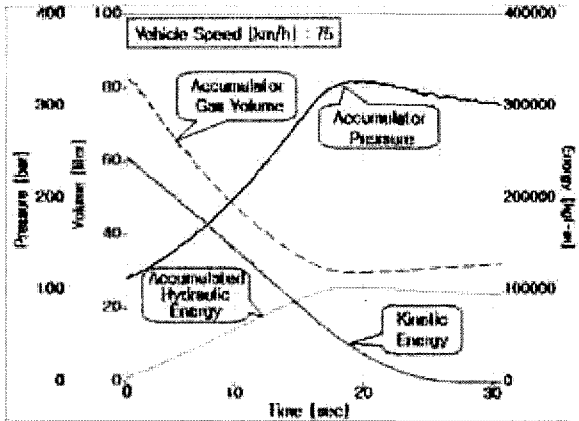


Fig. 3 Test results of the energy accumulation

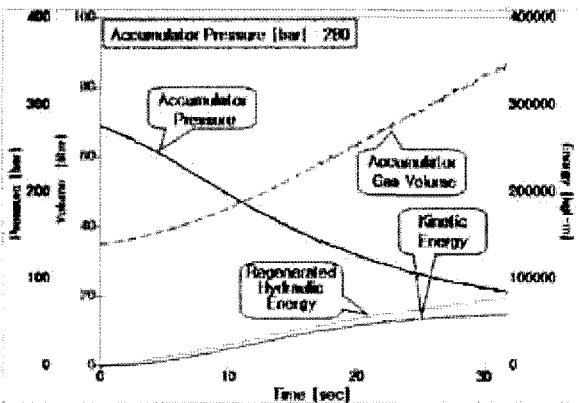
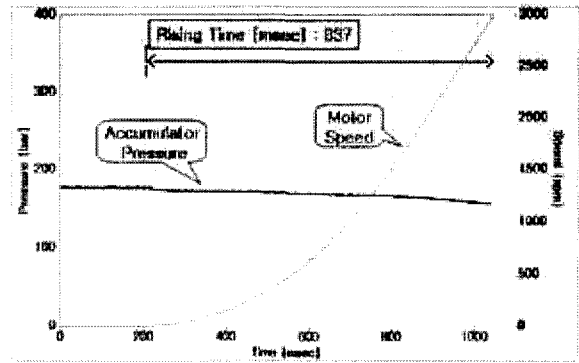
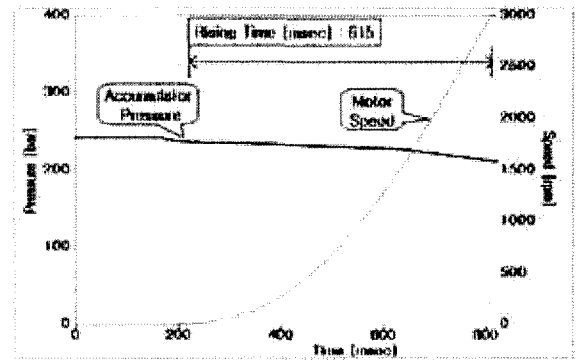


Fig. 4 Test results of the energy regeneration

Fig. 5는 에너지 회생시스템의 응답특성을 분석하기 위한 시험이다. 축압기에서 유압에너지를 자유롭게 방출하였을 때 유압모터가 정상속도까지 상승하는데 걸리는 오름 시간(rising time)이 차량의 감속 또는 가속에 필요한 시간보다 느리면 회생시스템을 사용할 수 없다. 유압모터의 오름 시간은 차량의 최대속도에 상당하는 회전수 3,000rpm까지 상승하는데 걸리는 시간이 축압기의 압력이 180bar, 240bar 일 때 각각 837ms, 615ms로 압력이 클수록 짧아짐을 알 수 있다. 차량의 가속도 또는 감속도가 2.5% 이내에서는 탑승자가 편안함을 느낀다고 보고된 바 있다⁸⁾. 차량을 2.5% 가속도로 110km/h까지

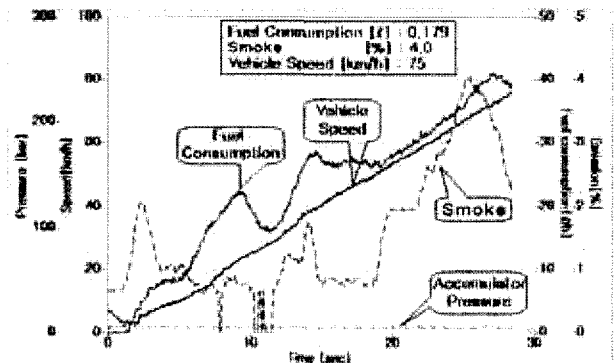


(a) Initial pressure 180bar

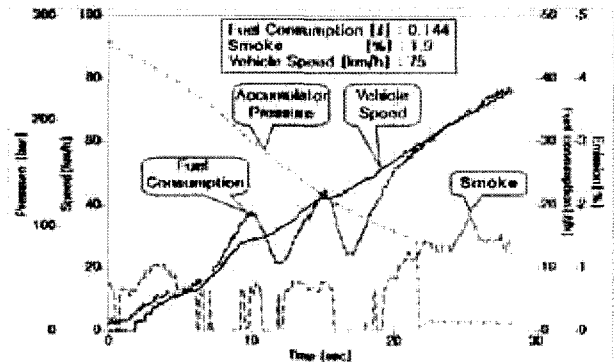


b) Initial pressure 240bar

Fig. 5 Test results for response time of the energy regenerative system



(a) no using energy regenerative system



(b) using energy regenerative system

Fig. 6 Test results for the smoke and the fuel efficiency

상승시킨다면 소요시간이 약 12초가 된다. 에너지 회생시스템은 오름시간이 1초 이내로서 차량의 가속시간보다 10배 이상 빠르므로 응답특성이 충분히 만족스럽다.

Fig. 6은 에너지 회생시스템을 사용하지 않았을 때와 사용하였을 때 동일한 0.7%의 가속조건으로 차량의 속도를 75km/hr까지 상승시켰을 때 엔진의 연료소모량과 매연 시험한 결과이다. 회생시스템을 사용하면 연료소모량이 20% 절감되어 연비는 약 25% 상승하고 배매연은 최대치가 약 53% 감소함을 확인할 수 있다.

6. 결 언

본 해설에서는 차량 제동 시 차량의 운동에너지를 유압에너지로 변환하여 에너지를 축적하였다가 발진 및 가속 시 축적된 에너지를 재사용할 수 있는 에너지 회생시스템 개발에 관하여 기술하였다. 축압기는 축적된 에너지를 인식할 수 있도록 압력센서와 변위센서를 내장하고 있으며 내구성 및 에너지 축적량을 높이기 위하여 피스톤 형식으로 제작되었다. 본 회생시스템은 75km/hr의 차량속도에서 제동 시 에너지 축적효율이 40%가 되고 가속 시 회생효율은 75%가 되어 축적 후 재생까지 전체 회생효율이 30%가 됨을 실험을 통하여 확인하였다. 그리고 차량제어에서 요구하는 응답특성이 우수함을 확인하였다. 본 회생시스템은 0.7%의 가속조건으로 차량을 구동하였을 때 사용전과 비교하면 연비를 약 25% 상승시키고 매연을 약 53% 감소시킨다. 향후 유가상승과 매연규제가 강화되면 실용화에 대한 전망이 밝을 것으로 사료된다.

기호 설명

E_h : hydraulic energy , kgf-m
 E_k : kinetic energy , kgf-m
 I_m : mean inertia mass at pump/motor, kg-m²
 N : rotation speed of pump/motor, rpm
 P_a : gas pressure of accumulator, kgf/cm²
 T : input/output torque of pump/motor, kgf-m
 V_a : gas volume of accumulator, cm³
 V_{th} : displacement of pump/motor, cc/rev
 η_m : mechanical efficiency of pump/motor
 ω : angular velocity of pump/motor, rad/sec

[Subscripts]

h, k : hydraulic, kinetic
 i, o : input, output

참고 문헌

- 1) Y. J. Lee, G. C. Kim and Y. D. Pyo, "The Influence of Operating Conditions on Fuel Economy of the Hybrid Electric Vehicle", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 3, pp. 35~40, 2005.
- 2) Y. Shida, M. Kanda, K. Ohta, S. Furata and J. Ishii, "Development of Inverter and Power Capacitors for Mild Hybrid Vehicle-Toyota 'Crown'", Int. J. Automotive Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 41~45, 2003.
- 3) S. Nakamura, "Development of a Low-emission Diesel-hydraulic Hybrid Bus", Jidousya Gijyutsu, Vol. 49, pp. 53~58, 1995.
- 4) T. Shima, "Development of Diesel-Hydraulic Hybrid Bus", Jidousya Gijyutsu, Vol. 50, No. 9, pp. 30~35, 1996.
- 5) S. R. Lee "Development of a Simulator of Vehicle Equipped with Mechanical Transmission and Hydraulic Accumulator Type-Braking Energy Regeneration system", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 5 pp. 180~186, 2004.
- 6) Y. R. Cho, B. S. Oh, K. K. Ahn, S. Y. Yang and B. R. Lee, "A Study on the Energy Saving of Hydraulic Control System using Variable Hydraulic Displacement Pump/ Motor", KSPE, pp. 239~244, 2003.
- 7) Y. R. Cho, S. Y. Yang and B. R. Lee. "Energy Saving Hydraulic Control System using Hydraulic Pump/Motor", ICCAS, pp. 995~999, 2002.
- 8) D. S. Jung, H. E. Kim and E. S. Kang, "Performance Evaluation for Hydraulic Type Energy Regenerative System", Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 2, pp. 136~144, 2006.

[저자 소개]



정동수(책임저자)

E-mail : jds667@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7154

1962년 6월 14일생

충남대학교 기계설계공학과 졸업, 공학박사, 1990년~현재 한국기계연구원 근무, 유압펌프 R&D 및 시험평가업무 종사, 대한

기계학회, 자동차공학회 회원

[저자 소개]



김형의

E-mail : khe660@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7160

1956년 2월 10일생

프랑스 I.S.M.C.M졸업 공학박사

1985년~현재 한국기계연구원 근무, 신뢰성평가센터장, 대한기계학회, 자동차공학회,

유공압시스템학회 회원