

정압력원을 이용한 에너지 절감 유압 제어 시스템에 관한 실험적 연구

조용래*, 안경관#, 김정수*, 윤주현*

An Experimental Study on the Energy Saving Hydraulic Control System Using Constant Pressure System

Yong Rae Cho*, Kyoung Kwan Ahn#, Jung Soo Kim* and Ju Hyeon Yoon*

ABSTRACT

It is strongly requested to reduce fuel consumption because of high oil price and exhaust gases of road vehicles for environmental preservation. To solve these problems, several types of hybrid vehicles have been developed. Among them, flywheel hybrid vehicle using variable displacement pump/motor was already proposed as one of the feasible hybrid systems in place of hybrid vehicle by the conventional storage battery. The proposed flywheel hybrid vehicle is to keep constant pressure of high pressure line by the control of swash plate angle of flywheel pump/motor as pressure compensator. The efficiency of the overall system depends severely on the efficiency of hydraulic pump/motor in the energy saving hydraulic control system by simulation. According to the control methods of swash plate angle of piston pump/motor, there remain several problems to be solved.

In this paper, experimental setup for energy saving is fabricated and the efficiency of energy saving is investigated by experiments with respect to various experimental conditions.

Key Words : Constant Pressure System (정압력원 시스템), Hybrid Vehicle (하이브리드 차량), Flywheel (플라이휠), Energy Saving (에너지 절감), SCL-CPS (스위칭 페루프 정압력원 시스템)

1. 서론

최근 고유가 및 환경 보호를 위하여 연료 소비 및 차량의 배출가스의 감소가 요구되고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 공해 감소와 에너지 절감을 위한 대체 에너지 자동차와 에너지 회생의 하이브리드 자동차의 개발도 동시에 진행되고 있다.

하이브리드 전기자동차의 개념은 지금까지 발전되어 온 기존 자동차 엔진과 새롭게 발전되어 가고 있는 축전지를 조합함으로써 엔진만을 사용할 경우보다 배출가스 공해를 줄일 수 있고, 전기 자동차에서 가장 큰 결점으로 지적되고 있는 일회 충전 시 주행거리가 짧은 점을 보완할 수 있으며 향후 축전기 기술이 향상 되는대로 엔진 크기를 줄여 감

* 접수일: 2006년 9월 1일; 게재승인일: 2007년 3월 14일

• 울산대학교 기계자동차공학부 대학원

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: kkahn@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2282

으로써 궁극적으로 전기자동차로 이전되어 가는 과도기 기술로 볼 수 있다. 하이브리드 자동차의 동력원으로는, 현재 기존의 가솔린이나 디젤뿐만 아니라 압축 천연가스(CNG), 연료전지(Fuel Cell), 가스 터빈 등이 있으며 에너지 저장장치로는 축전지, 유압 어큐뮬레이터 및 플라이휠(Flywheel)등을 열거 할 수 있다.

에너지 회생의 하이브리드 시스템에 관한 연구 및 개발은 다음과 같다. 스웨덴의 VOLVO 사는 배기가스, 소음공해 그리고 연료소비의 감소를 위해 플라이 휠에 의해 제동시 소비되는 에너지를 운동 에너지로 바꿔주는 회생 시스템을 가진 시내버스를 개발하였다.¹ 독일의 MAN 사는 유압 어큐뮬레이터를 사용하여 제동 에너지 저장과 출발 시 큰 구동 토크를 발생하는 시스템을 가진 노선 버스를 개발하였다.² 일반적으로 재생 브레이크 시스템의 시내버스와 자동차의 에너지 효율에 관한 연구가 수행되고 있다. 한편으로는 에너지 효율의 중요성보다 차량의 공해 물질 감소에 관한 연구도 있었다. 유압 구동 시스템과 전기 구동 시스템의 원리가 유사하기 때문에 에너지 회생 브레이크 시스템은 굴삭기, 불도저, 트럭, 크레인 등과 같은 건설 중장비에도 적용 가능하다. 그러나 이 분야에 관한 연구는 거의 진행되지 않았다.³ Nakazawa⁴ 등은 기존의 변속기를 대체한 엔진 플라이휠 하이브리드 차량을 위해 간단한 유압 구동 시스템인 정압력원 시스템(CPS)을 제안하였고, Hao⁵ 등은 부하측에 요구되는 토크와 요구 일률에 의하여 정압력원의 설정 압력과 차륜구동용치차의 감속비를 능동적으로 변경한 방법을 병용한 경우의 에너지 절감 효과에 대해 연구하였다. 본 실험실에서의 에너지 회생에 관한 연구로는 Matlab/Simulink를 이용하여 가변 유압 펌프/모터를 사용한 플라이휠 하이브리드 차량의 시뮬레이션 모델을 구축하였고, 주행 패턴에 따른 주행 및 정지 시 그리고 감속 시에 따라 시스템 압력을 가변적으로 적용한 플라이휠 하이브리드 차량의 에너지 절감 타당성에 대해 시뮬레이션으로 검토하였다.⁶ 그리고 기존의 CPS에서 플라이휠 펌프/모터 용적의 급격한 변화에 의해 발생하는 압력 피크와 같은 문제점의 새로운 대안으로 스위칭 페루프 정압력원 시스템(Switching type Closed Loop Constant Pressure System, 이하 SCL-CPS라고 함)을 새롭게 제안하였으며, 시스템의 에너지 회수에 대한 가능성에 대하여 이론적 모델링, 시뮬레이

션을 수행하였다. 또한, 유압 에너지 회생 실험을 위한 벤치 테스트를 설계, 제작하였다.⁷ Oh⁸는 SCL-CPS시스템으로 효율을 높이기 위한 기초 실험을 하고, 드라이브와 플라이휠 펌프/모터의 용량, 고압 및 저압 라인의 릴리프 압력 설정 및 에너지 저장용 플라이휠의 초기 회전 속도 등 각각의 설계 변수들이 에너지 회수 효율에 미치는 영향에 대해 실험적으로 검토하였다. 또한, Kim⁹ 등은 에너지 회수측 라인(Recovery line)의 압력설정을 가변적으로 제어하기 위하여 비례제어 릴리프 밸브를 이용하였으며, 에너지 회수율에 대한 영향을 검토하였다.

본 연구에서는 유압 에너지 회생을 위한 유압 벤치 테스트를 이용하여 유압 에너지 절감 실험을 실시하였다. 특히 주요한 설계변수인 구동용 드라이브 펌프/모터 및 에너지 회수용 플라이휠 펌프/모터의 용적이 에너지 회생 효율에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

2. 시스템 작동원리

2.1 종래의 CPS 시스템

종래의 정압력원 시스템(CPS: Constant Pressure System)을 이용한 플라이휠 하이브리드 차량의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 엔진의 출력축, 플라이휠축, 차축 각각에 가변 용량형 펌프/모터를 장착하고, 공통 고압라인과 공통 저압라인 사이에 병렬로 연결되어 있다. 또, 공통 고압라인에는 압력 맥동 흡수를 위한 유압 어큐뮬레이터가 연결되어 있다. 여기서 이용되는 가변 용량형 펌프/모터는 1회전당 용적을 사판각 제어에 의해 연속적으로 그리고 정/역 방향으로 변화시킴으로서 펌프 및 모터의 어떤 작동도 가능한 에너지 변환기구로서 역할을 한다.

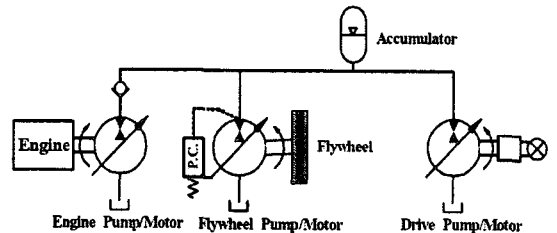


Fig. 1 Schematic diagram of conventional CPS

주행 시에 엔진은 기본적으로 정지 상태이고, 차량은 플라이휠의 회전 에너지에 의하여 구동된다. 공통 고압라인은 플라이휠에 장착된 플라이휠 펌프/모터 및 압력보상기의 작동에 의하여 일정하게 유지된다. 차량의 가속 시에는 드라이브 펌프/모터를 모터로 작동시키고, 감속 시에는 펌프로 작동시킨다. 드라이브 펌프/모터를 펌프로 작동시켜 차량을 감속시킬 경우 공통 고압라인의 압력은 상승하게 된다. 이 압력상승으로 플라이휠 펌프/모터는 모터 작동을 하게 되고 차량의 제동 에너지는 플라이휠의 회전관성 에너지로 회수되어 가속 시에 재이용된다. 엔진은 플라이휠의 회전속도가 설정한 하한치가 되면 시동되고, 공통 고압라인의 압력을 높게 된다. 이 압력 상승을 받아서 플라이휠 펌프/모터는 모터 작동을 하게 되고, 플라이휠의 회전속도를 상승시킨다. 그러나 이 시스템에서 플라이휠 펌프/모터의 사판각은 높은 에너지 회생 효율을 위하여 최대의 사판각 영역에서 작동되도록 제어되며, 이 사판각의 급격한 영역 변환에 의하여 고압 관로에서 큰 압력 맥동과 소음이 발생하게 된다.

2.2 SCL-CPS 시스템

기존에 제안된 SCL-CPS의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 이 시스템은 2차 제어에 의한 정유압 트랜스미션 시스템과 유사하다. 하나의 플라이휠과 두 개의 펌프/모터 및 3개의 전자 클러치로 구성되어 있으며, Driving line과 Recovery line 2개의 정압력 라인을 가지고 있다. Driving line의 압력은 차량 가속 시에 일정하게 유지되도록 제어되며, Recovery line의 압력은 차량 제동 시에 일정하게 유지되도록 제어되고 있다. 가속 시와 제동 시 각각의 작동조건에 따라 한쪽의 라인 압력은 설정된

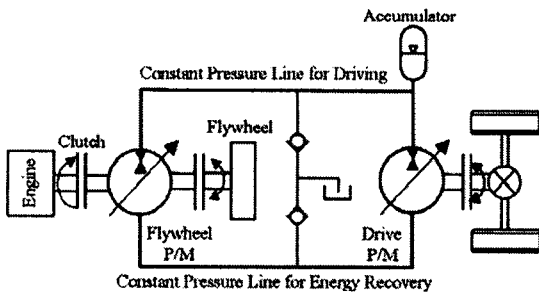
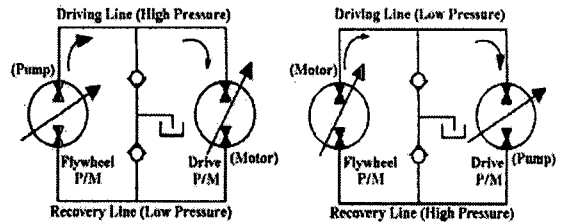


Fig. 2 Schematic diagram of SCL-CPS



(a) In the case of acceleration (b) In the case of braking

Fig. 3 Schematic diagram of SCL-CPS

압력으로 제어되며, 상대쪽 라인 압력은 저압으로 된다. 또한, 양 라인에 설치된 비례릴리프 밸브를 이용하여 양 라인의 압력을 제어할 수 있다. 여기서 엔진은 플라이휠의 속도가 일정 이하로 떨어졌을 때만 작동되어진다.

2.3 SCL-CPS의 작동원리

SCL-CPS의 작동원리는 Fig. 3에 나타낸다. 가속 시에는 플라이휠 펌프/모터의 토출유량이 드라이브 펌프/모터의 유량보다 크며, Driving line의 압력이 Recovery line의 압력보다 커짐으로, 드라이브 펌프/모터는 유압 모터로서 작동하게 된다. 역으로, 감속 시에는 플라이휠 펌프/모터의 토출유량보다 드라이브 펌프/모터의 유량이 더 크며, Recovery line의 압력이 Driving line의 압력보다 커짐으로, 드라이브 펌프/모터는 유압 펌프로써 작동하여 유압 브레이크로서의 기능을 하게 된다. 또한, 유압 펌프/모터의 사판각이 항상 양의 영역에서 작동하므로 급격한 압력 발생을 방지할 수 있으며 부품의 내구성도 높일 수 있다.

3. 실험장치

하이브리드 차량의 실험장치 개략도를 Fig. 4에 나타낸다. 또한, 실험장치의 자세한 제원은 Table 1에 나타낸다. 사용한 펌프/모터는 Linde사의 사판식 가변 피스톤 펌프/모터로 최대 사판각은 21°로서 최대 65LPM의 유량을 토출한다. 엔진의 역할을 대신하는 전동기는 3상 AC 모터로 1200rpm으로 회전한다. 피크 압력에 의한 시스템의 손상을 막기 위해 Driving line과 Recovery line의 양쪽에 비례제어 릴리프 밸브를 설치하여 압력 설정을 할 수 있다. 또한 두 개의 압력센서가 부착되어 에너지 회수를

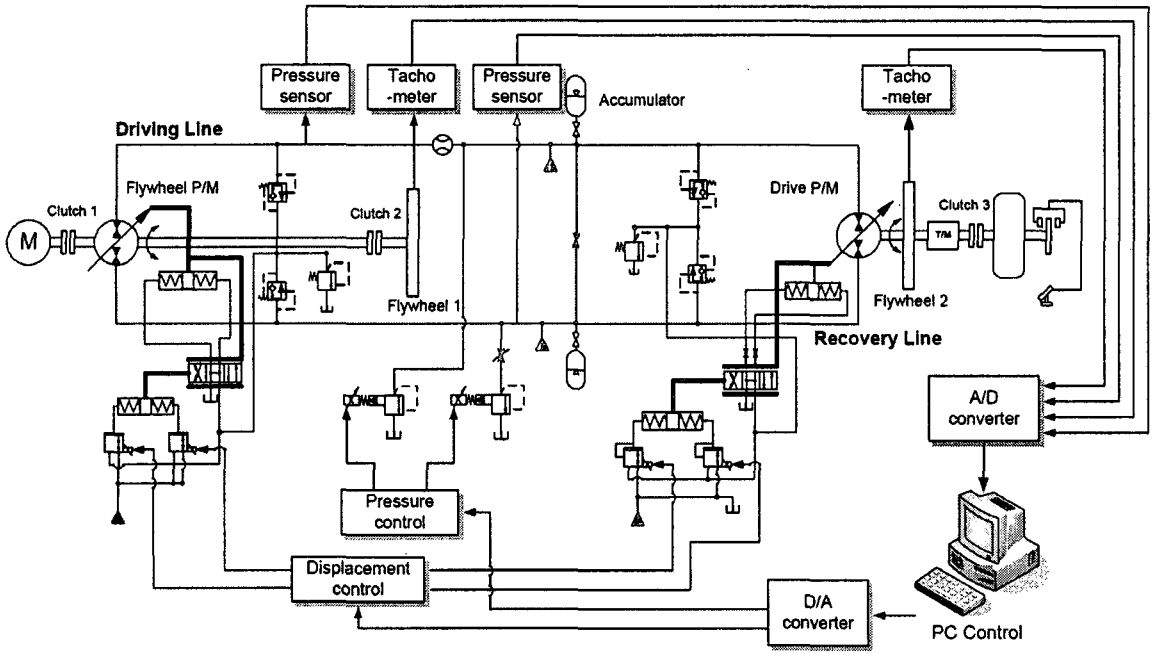


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

위한 사판각 제어에 필요한 압력신호를 측정한다. 샘플링 타임은 1msec 이며, 전자클러치, 전동기, 작동유의 과열 방지용 쿨러 등은 디지털 아웃 포트를 통해 출력되는 5V의 전압신호로 릴레이 스위치를 구동하여 제어한다.

4. 에너지 회생 실험

4.1 실험조건

본 연구에서의 실험조건으로는 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 초기 용적을 각각 60%로 설정하였다. 또한 Driving line과 Recovery line의 릴리프 밸브의 압력을 180bar로 설정하였다. 플라이휠 펌프/모터에 연결된 플라이휠1의 회전속도가 500rpm에 이르면 엔진 역할을 대신하는 전동기와 연결된 클러치1이 분리됨과 동시에 플라이휠 펌프/모터와 플라이휠1에 연결된 클러치2가 연결이 되면서 차량을 모사하는 플라이휠2의 회전에너지가 플라이휠1의 회전에너지로 축적이 된다. 이때 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 용적을 비례제어기를 적용하여 변화시킨다. 그 이유는 본 연구에서 에너지 회수 효율 향상을 위한 설계 변수 중의 하나인 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 용적을 주된 설계변수로 고려하고 있으며 이에 따른 에너지 회생 효율에 미치는 경향을 검토하기 위함이다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

	Model & Specification
AC Motor	50Hp × 6p
Hydraulic Pump/Motor	Linde, HPV55-02RE1P300P, 55cc/rev
Accumulator	4 Liter
Proportional relief valve	RZMO-A-030, 0~315 bar
Pressure Sensor	LPT400BB100MV, 0~400 bar
Tachometer	MP-981, 1~20000 rpm
Flywheel	3.5 kgm ²
A/D board	Advantech, PCI-1711, 12bit 16ch
D/A board	Advantech, PCI-1720, 12bit 4ch

Table 2 Condition of proportional control

	Drive P/M displacement [%]	Flywheel P/M displacement [%]
Condition 1	60	60
Condition 2	60 + U	60 + U
Condition 3	60 - U	60 - U
Condition 4	60 + U	60 - U
Condition 5	60 - U	60 + U
Condition 6	60 + U	60
Condition 7	60	60 + U
Condition 8	60 - U	60
Condition 9	60	60 - U

Table 2는 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 용적 변화 실험조건을 각각 나타내고 있다. 펌프/모터의 용적 제어량은 다음의 식(1)에 의해 계산된다.

$$U = K_p(P_{ref} - P_{recovery}) \quad (1)$$

여기서, U는 펌프/모터 용적 제어량 [%], P_{recovery}는 Recovery line의 측정 압력 값 [bar], P_{ref}는 Recovery line의 설정 압력 값 [bar], K_p는 비례게인 값을 각각 나타낸다.

각각의 실험 결과들에 대한 에너지 회생 효율의 계산은 식(2)에 의해 계산된다.

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} \times 100 \quad (2)$$

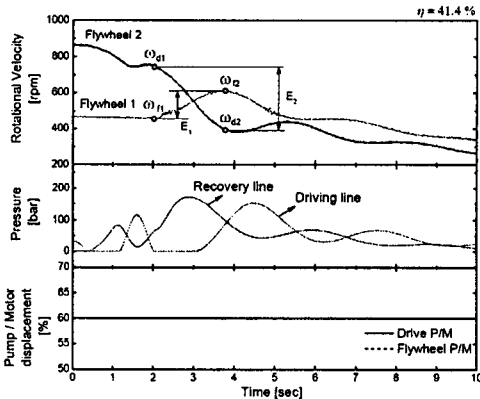


Fig. 5 One example of experiment for calculation of energy recovery efficiency (Condition 1)

여기서, η는 에너지 회생 효율 [%], E₁은 플라이휠 1이 회수한 에너지, E₂는 플라이휠 2가 소비된 에너지를 각각 나타낸다. Fig. 5는 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 용적 제어량을 60%로 각각 고정하였을 경우(Condition 1)의 실험결과이다. Fig. 5의 실험결과를 바탕으로 에너지 회생 효율을 계산하면, 플라이휠 펌프/모터가 에너지를 회수하는 시점(ω_{f1})부터 최고 회전속도가 되는 시점(ω_{f2})이 플라이휠 1이 회수한 에너지(E₁)이고, 이와 반대로 플라이휠 2에서 소비된 에너지는 드라이브 펌프/모터의 회전 에너지가 플라이휠 펌프/모터로 축적되면서 잃은 에너지(E₂)가 된다. 따라서 에너지 회생 효율은 아래와 같이 구할 수 있으며, 41.4%의 효율을 얻을 수 있다.

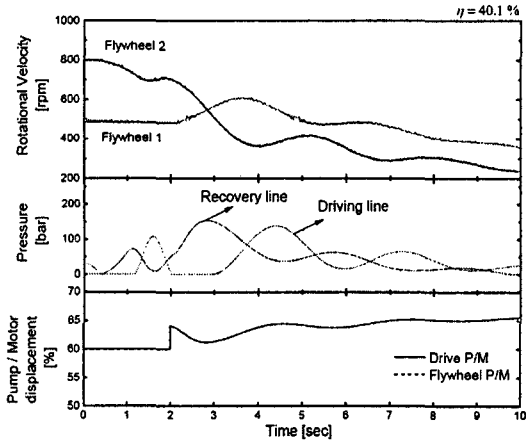
$$\eta = \frac{\omega_{f2}^2 - \omega_{f1}^2}{\omega_{d1}^2 - \omega_{d2}^2} \times 100 = \frac{613^2 - 457^2}{747^2 - 394^2} \times 100 = 41.4\%$$

4.2 실험결과

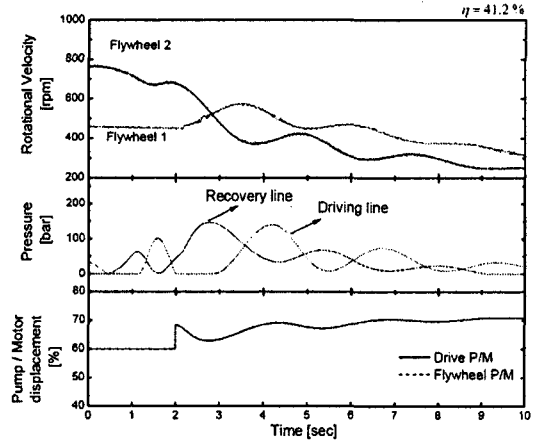
Fig. 6과 Fig. 7은 펌프/모터의 용적을 60%를 기준으로 비례제어기를 적용한 펌프/모터의 최대 용적제어량 |U|를 5%, 10%로 제한하여, Table 2의 조건으로 각각 실험한 결과로서 플라이휠 1과 플라이휠 2의 회전속도, Driving line과 Recovery line의 압력 그리고 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터의 용적 제어량을 각각 나타낸다. Table 3에는 각각의 조건으로 실험하여 얻은 에너지 회생 효율(η)을 나타낸다. 에너지 효율의 계산 결과에서 보듯이 드라이브 펌프/모터와 플라이휠 펌프/모터를 60%로

Table 3 Experimental results of energy efficiency (η)

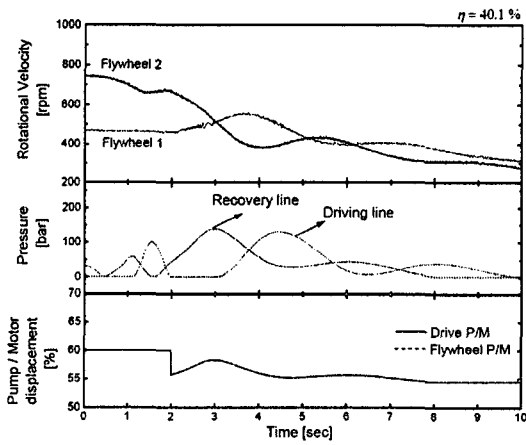
	P/M displacement (U ≤ 5%)	P/M displacement (U ≤ 10%)
Condition 1	41.4 %	41.4 %
Condition 2	40.1 %	41.2 %
Condition 3	40.1 %	30.2 %
Condition 4	37.5 %	41.4 %
Condition 5	40.1 %	41.5 %
Condition 6	39.9 %	42.0 %
Condition 7	45.5 %	53.7 %
Condition 8	45.3 %	43.5 %
Condition 9	39.4 %	39.4 %



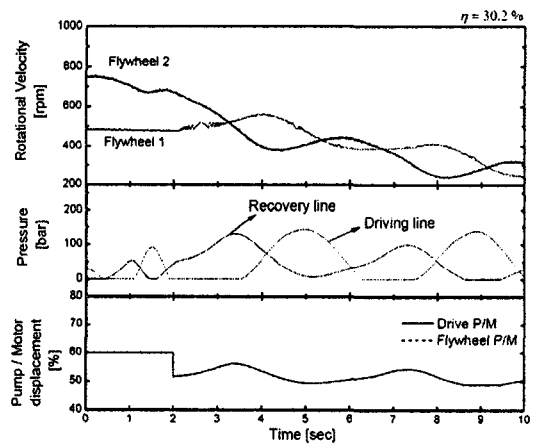
(a) In the case of condition 2



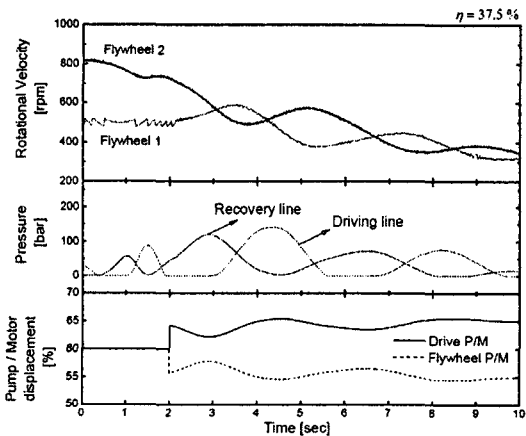
(a) In the case of condition 2



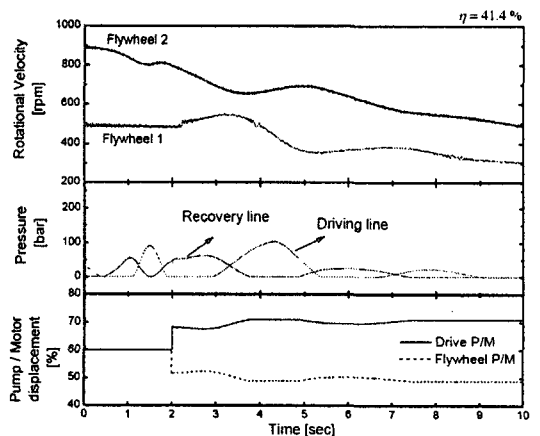
(b) In the case of condition 3



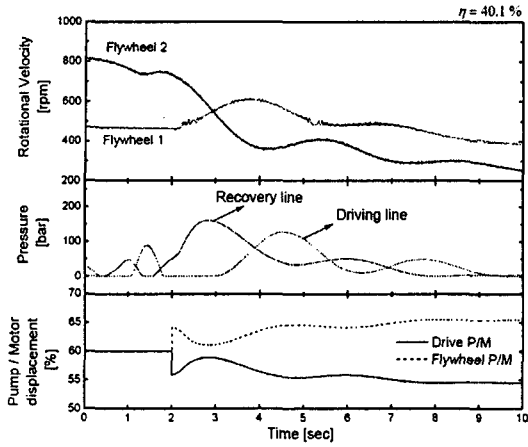
(b) In the case of condition 3



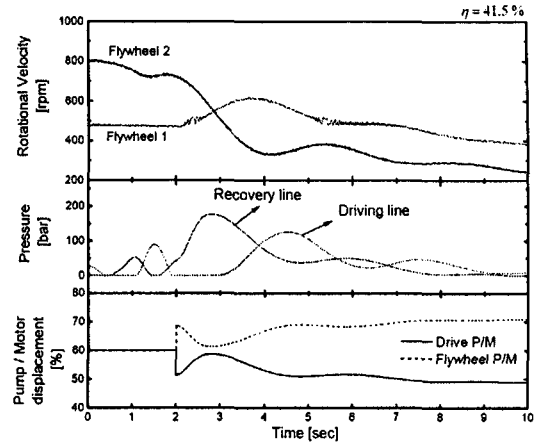
(c) In the case of condition 4



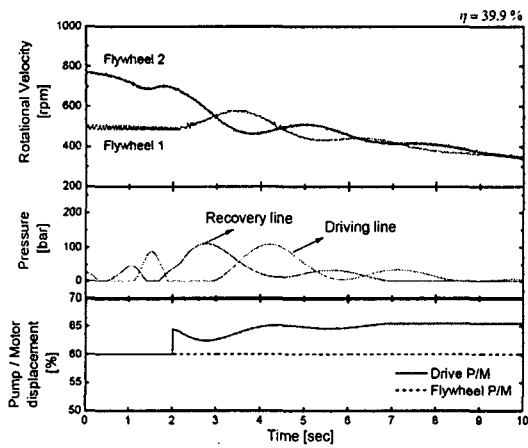
(c) In the case of condition 4



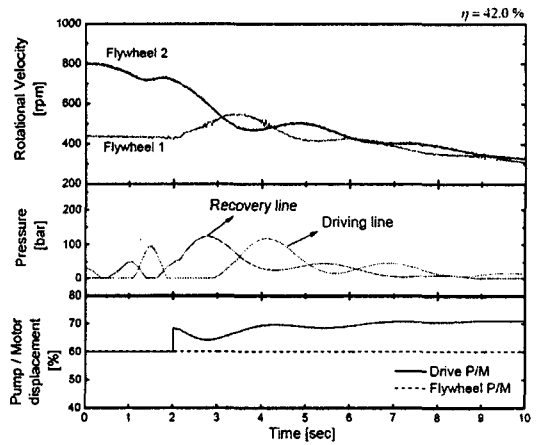
(d) In the case of condition 5



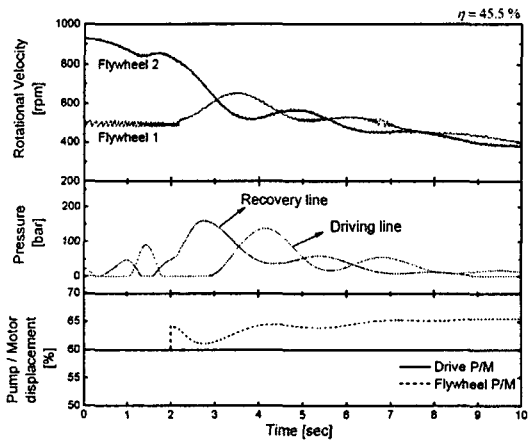
(d) In the case of condition 5



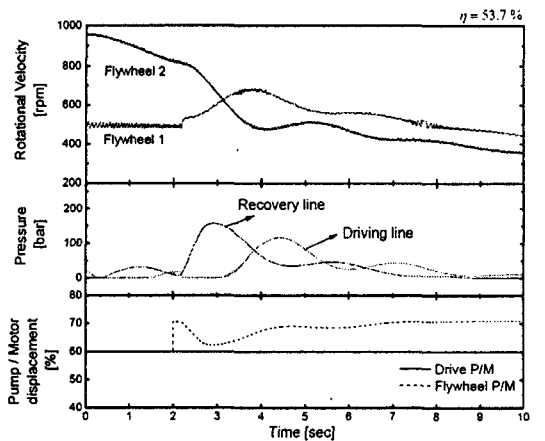
(e) In the case of condition 6



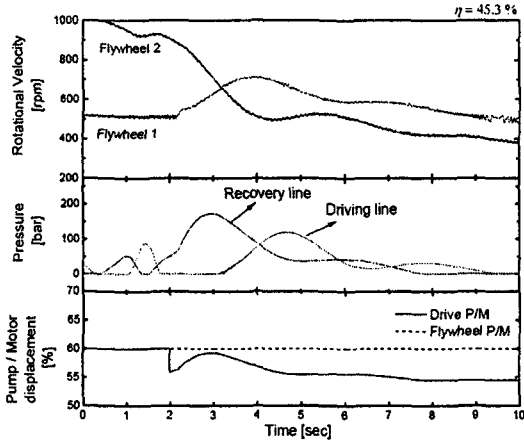
(e) In the case of condition 6



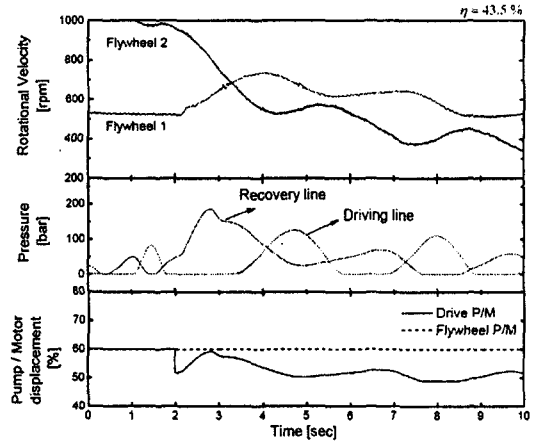
(f) In the case of condition 7



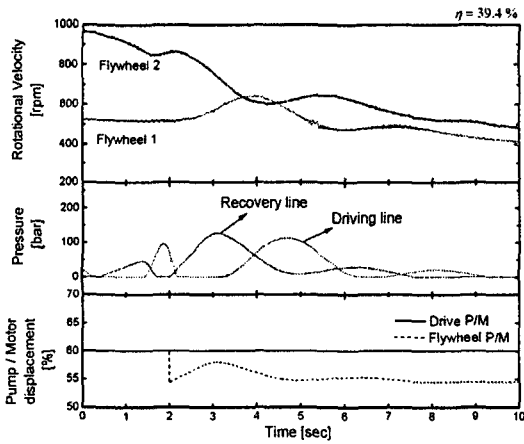
(f) In the case of condition 7



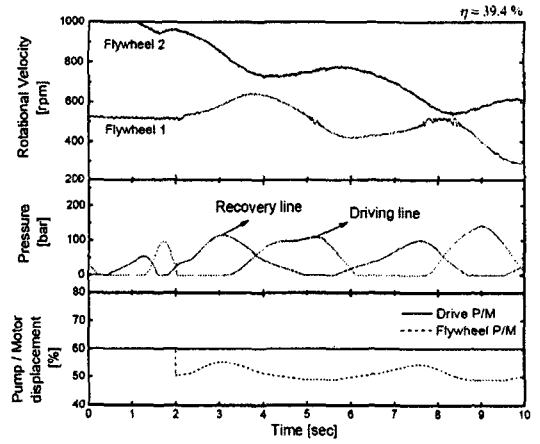
(g) In the case of condition 8



(g) In the case of condition 8



(h) In the case of condition 9



(h) In the case of condition 9

Fig. 6 Experimental results of $|U| \leq 5\%$

Fig. 7 Experimental results of $|U| \leq 10\%$

각각 고정(Condition 1)하였을 때 41.4%의 에너지 회생 효율을 얻었다. $|U|$ 가 5%일 경우에 에너지 회생 효율이 가장 낮은 경우(Condition 4)는 37.5%이고, 가장 높은 경우(Condition 7)는 45.5%의 에너지 회생 효율을 보이고 있다. 또한 $|U|$ 가 10%일 경우에 에너지 회생 효율이 가장 낮은 경우(Condition 3) 30.2%이고, 가장 높은 경우(Condition 7)는 53.7%의 에너지 회생 효율을 얻을 수 있었다. 따라서 $|U|$ 를 5%, 10%로 하여 각각 실험한 결과 드라이브 펌프/모터의 용적 제어량을 60%로 고정 설정하고, 플라이휠 펌프/모터의 용적 제어량을 증가시킨 경우(Condition 7)에 가장 좋은 에너지 회생 효율을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 정압력원 시스템이 가지고 있었던 문제점을 개량한 스위칭 페루프 정압력원 시스템(SCL-CPS)을 새롭게 제안하였다. 또한 제안한 시스템의 에너지 절감효과를 실험적으로 검토하기 위하여 유압 벤치테스트를 설계, 제작하였다. 특히 본 시스템에서 주요한 설계변수인 드라이브 및 플라이휠 펌프/모터의 용적이 에너지 회생 효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 9가지의 조건에서 실험을 실시하였다. 실험결과로부터 드라이브 펌프/모터의 용적을 60%로 고정하고, 플라이휠 펌프/모터의 용적을 $(60 + U)\%$ 로 설정한 경우가

고정으로 설정한 경우에 비해 에너지 회생 효율이 최대 12.3% 향상됨을 알 수 있었다. 또한 용적 제어량의 최대치 $|U|$ 를 10%로 설정한 경우가 5%로 설정한 경우에 비해 전반적으로 높은 에너지 회생 효율을 보였다.

향후 본 에너지 절감 시스템을 건설 증장비의 하이브리드 시스템에 적용하여 에너지 절감 효과를 검토할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2006-000-11370-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Evans, P. and Karlsson, A., "The Volvo City Bus," Institution of Mech. Eng., Paper C157 /81, pp. 143-150, 1981.
2. Federal Republic of Germany, MAN, Inc., "Hybrid Bus with stepless transmission and hydraulic energy recovery," International Edition 4, 1989.
3. Courtesy of Tyrone Hydraulic, Inc., "Regenerative drive for sawmill carriage uses fixed-displacement pumps and motors with an accumulator to store the hydraulic energy," 1989.
4. Nakazawa, H., Yokota, S. and Kita, Y., "A Hydraulic Constant Pressure Drive System for Engine - Flywheel Hybrid Vehicles," Third JHPS International Symposium, pp. 513-518, 1996.
5. Hao, J., Ikeo, S., Sakurai, Y. and Takahashi, K., "Energy Saving of a Hybrid Vehicle using a Constant Pressure System," Transaction on Japan Fluid Power System, Vol. 30, No. 1, pp. 20-27, 1999.
6. Cho, Y. R. and Ahn, K. K., "A Study on the Energy Saving Hydraulic Control System using Variable Displacement Hydraulic Pump/Motor," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 9, pp. 100-108, 2003.
7. Ahn, K. K. and Oh, B. S., "An Experimental Investigation of Energy Saving Hydraulic Control System using Switching Type Closed Loop CPS," ICFP 2005, pp. 153-157, 2005.
8. Oh, B. S., "An Experimental Study on the Energy Saving Hydraulic Control System using Variable Displacement Hydraulic Pump/Motor," M. S. Thesis, Univ. of Ulsan, pp. 24-28, 2005.
9. Kim, J. S. and Ahn, K. K., "A Study of Hydraulic Energy Saving of Constant Pressure System(CPS) using Proportional Relief Valve," Proceedings of the Korea Fluid Power System Conference, pp. 11-16, 2005.