

정압력원을 이용한 플라이휠 하이브리드 차량 Hybrid Vehicle Using Constant Pressure Hydraulic System with Flywheel for Energy Storage

이치류 켄
Ken Ichiryu

1. 서 론

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 감으로써 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 축전기, 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 개발하였다¹⁾. 독일의 MAN 사는 유압 어큐뮬레이터를 사용하여 제동 에너지 저장과 출발 시 큰 구동 토크를 발생시키는 시스템을 가진 노선 버스를 개발하였다²⁾. 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 않았다³⁾. 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. Ikeo⁶⁾ 등은 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. 그리고 기존의 CPS에서 플라이휠 펌프/모터 용적의 급격한 변화에 의해 발생하는 압력 피크와 같은 문제점의 새로운 대안으로 스위칭 폐루프 정압력원 시스템(Switching type Closed Loop Constant Pressure System, 이하 SCL-CPS라고 함)을 새롭게 제안하였으며, 시스템의 에너지 회수에 대한 가능성에 대하여 이론적 모델링, 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 유압 에너지 회생 실험을 위한 벤치 테스트를 설계, 제작하였다⁷⁾. Oh⁸⁾ 등은 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 기사에서는 CPS하이브리드 차량의 연비 절감효과와 연비를 향상시키기 위한 펌프/모터의 사

판각 제어방법에 대하여 검토를 하고, 나아가 실험 및 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 확인하고자 한다.

2. Flywheel Hybrid Vehicle 작동원리

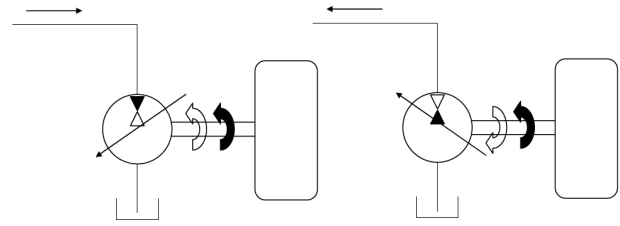
2.1 정압력원 시스템

정압력원 시스템(Constant Pressure System, 이하 CPS)는 정압력 유압라인을 가지는 시스템으로 에너지 저장장치와 연결된 유압펌프/모터의 사판각을 제어함으로써 정압력원을 유지하게 된다. 여기서 각 액추에이터는 병렬로 연결되어 있으므로, 각 액추에이터는 다른 액추에이터의 영향을 받지 않고 제어를 할 수 있게 된다. CPS의 가장 큰 장점은 에너지를 쉽게 회수하고 재사용할 수 있다는 점이다. 에너지 회수 방법은 다음의 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 화살표는 가변용량형 펌프/모터의 용적을 나타내고 있다. (a)의 경우에 있어서, 유압펌프/모터의 회전방향은 시계방향이고 용적은 음이기 때문에, 유압펌프/모터는 유압모터로 작용을 하여, 차량을 가속시키게 된다. 반면, (b)의 경우에 있어서, 유압펌프/모터의 회전방향은 시계방향이고 용적도 양이기 때문에, 유압펌프/모터는 유압펌프로 작용을 하여, 차량의 관성에너지를 회생하게 된다. 이와 같은 방식은 액추에이터의 용적을 제어함으로써 에너지 회생 혹은 구동이 가능하게 되고, 이를 유럽에서는 "Secondary Controlled System"이라고 부르

고 있다.

2.2 구동원리

정압력원 시스템을 이용한 플라이휠 하이브리드 차량의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 엔진의 출력축, 플라이휠축, 차축 각각에 가변 용량형 펌프/모터를 장착하고, 공통 고압라인과 공통 저압라인 사이에 병렬로 연결되어 있다.



(a) Acceleration (b) Braking
Fig. 1 Kinetic Energy Recovery

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.

CPS 하이브리드 차량의 작동원리는 Fig. 3과 같다. 주행시에 엔진은 기본적으로 정지 상태이고, 차량은 플라이휠의 회전 에너지에 의하여 구동된다.

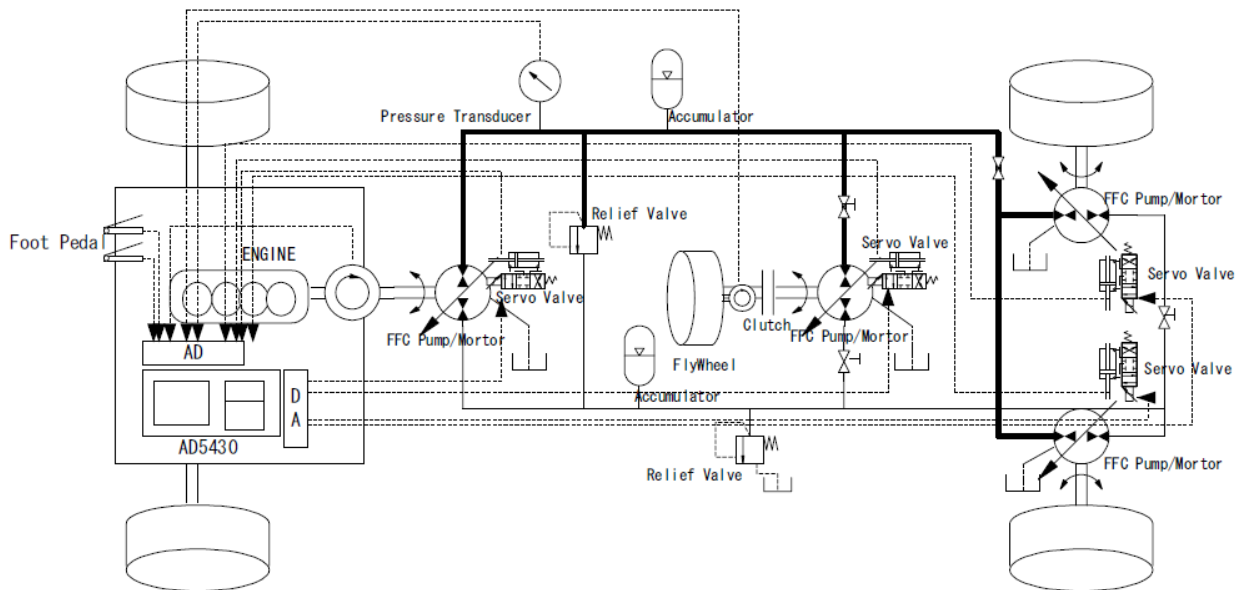


Fig. 2 Schematic Diagram of CPS Hybrid Vehicle

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 재이용

된다. 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.

2.3 플라이휠 유닛 시험

현재 전기자동차는 전력공급 및 에너지 저장을 위하여 다수의 배터리를 사용하고 있지만, 1회 충전으로 운행할 수 있는 거리가 제한되어 있으며, 충전에 걸리는 시간 등의 문제가 남아 있다. 또한 비록 전기화학 배터리가 높은 에너지 밀도를 가지고 있지만, 파워 밀도는 플라이휠과 비교하면 훨씬 낮다고 이야기 할 수 있다. 게다가 장시간 사용시 플라이휠은 교체 필요성이 없으나, 배터리는 사용함에 따라 충방전 성능이 떨어져서 결국 새로운 배터리를 정기적으로 교체해 주는 추가적인 비용 부담의 문제가 발생하게 된다. 플라이휠 사용시 한 가지 문제점이라고 이야기할 수 있는 부분은, 유압펌프모터와 플라이휠의 축이 상시 연결되어 있으므로 생기는 베어링 마찰 손실이라고 이야기할 수 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로서 여기서는 펌프모터와 플라이휠을 분리시키기 위한 클러치 시스템을 제안한다. Fig. 4는 본 실험에 사용한 플라이휠을 나타내고 있다. Fig. 5는 유압 펌프/모터와 플라이휠 사이에 클러치를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 비교 실험결과를 나타내고 있다. 여기서 (a)는 클러치를 사용하지 않은 경우의 플라이휠의 속도 감소를 나타내고 있으며, (b)는 클러치를 장착하여 플라이휠과 유압펌프모터의 동력을 차단한 경우의 플라이휠의 속도 변화를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 클러치를 사용함으로써 마찰 등의 손실을 줄여 에너지를 상당히 장시간 보존할 수 있음을 보여주고 있다.

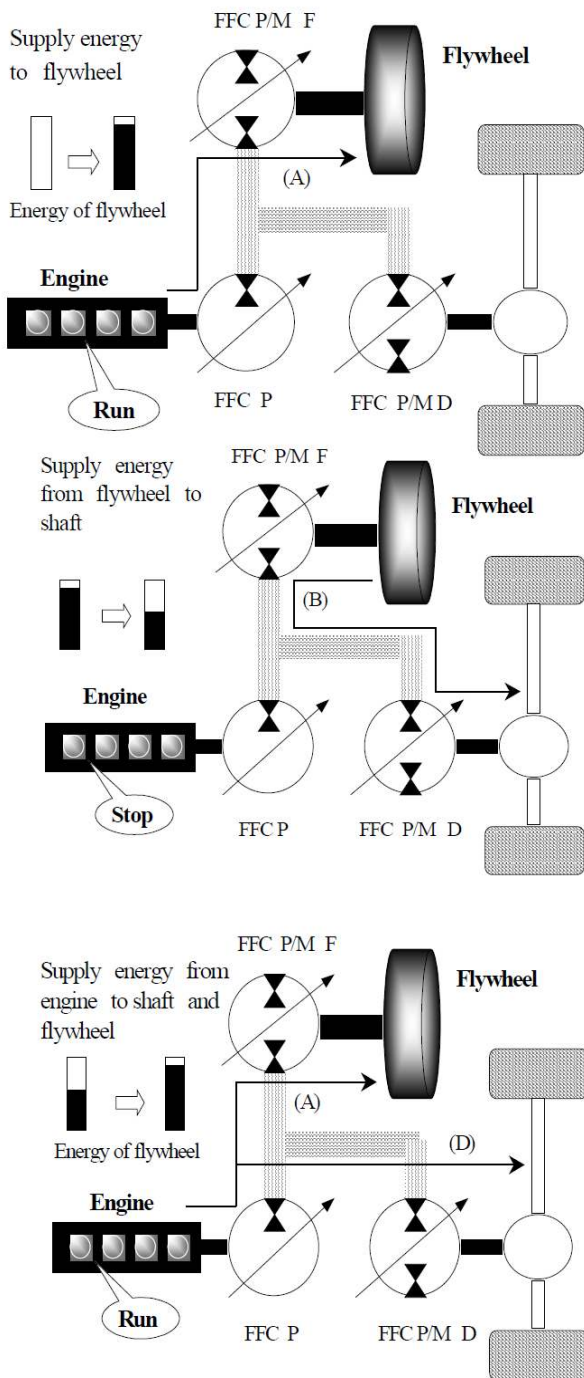
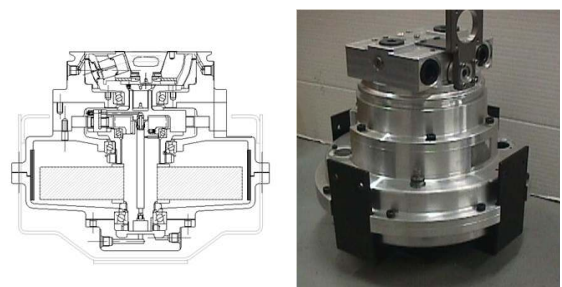


Fig. 3 Driving Principle



(a) Drawing (b) Photo

Fig. 4 Flywheel

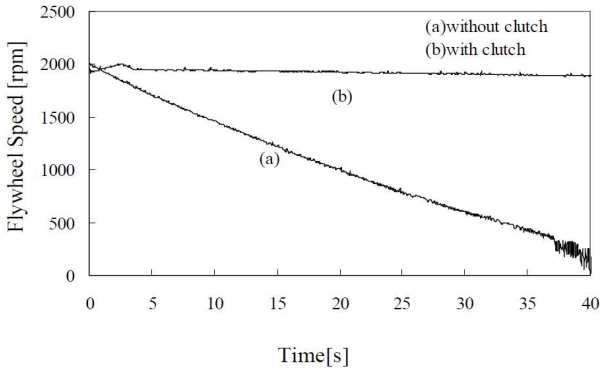


Fig. 5 Comparison of speed reduction

6은 차량을 약 23[km/h]로 가속을 한 뒤, 0[km/h]로 감속을 하는 실험이다. Fig. 6(b)에 플라이휠의 속도를 나타내고 있다. 플라이휠의 속도가 실험에서 설정한 최대속도인 3000[rpm]에 도달하게 되면, 엔진은 자동으로 정지하게 된다. 그리고 만약 플라이휠의 속도가 실험에서 설정한 최소 속도 1,000[rpm]에 도달하게 되면, 차량은 감속하게 되고, 이 구간에서 에너지 회생이 이루어진다. Fig. 6(c)에서 30~35초 구간대의 제동시, 플라이휠은 차량의 관성에너지를

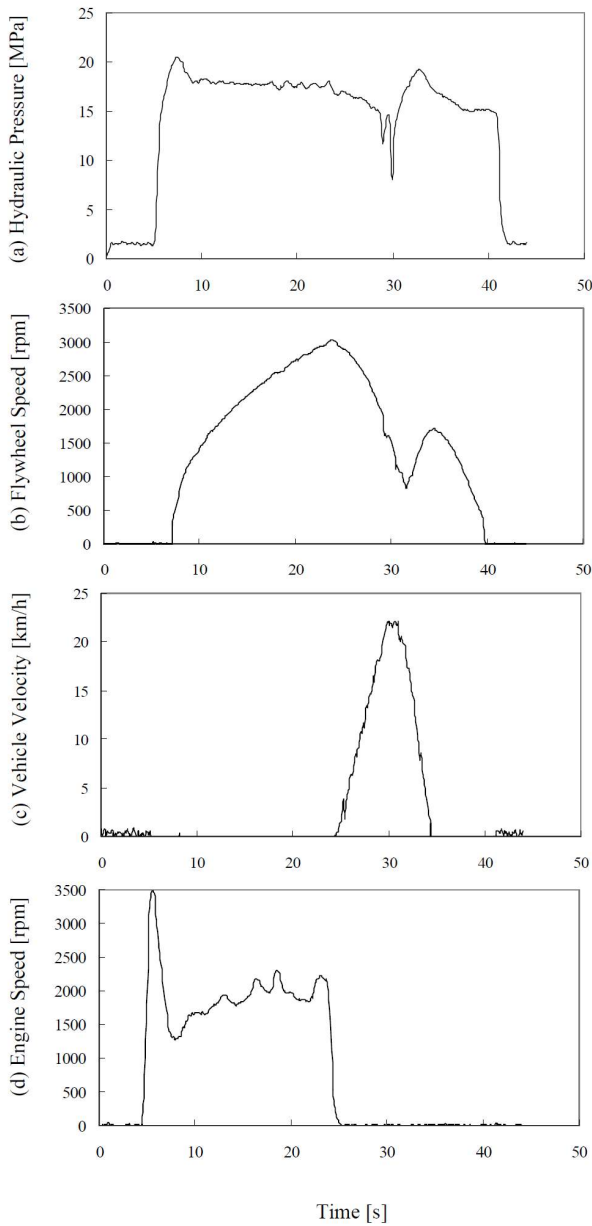


Fig. 6 Driving Test Data (Accelerating and Braking)

따라서 특히 아이들링과 등속 주행상태에서 클러치의 사용은 효과적이라고 이야기할 수 있다. Fig.

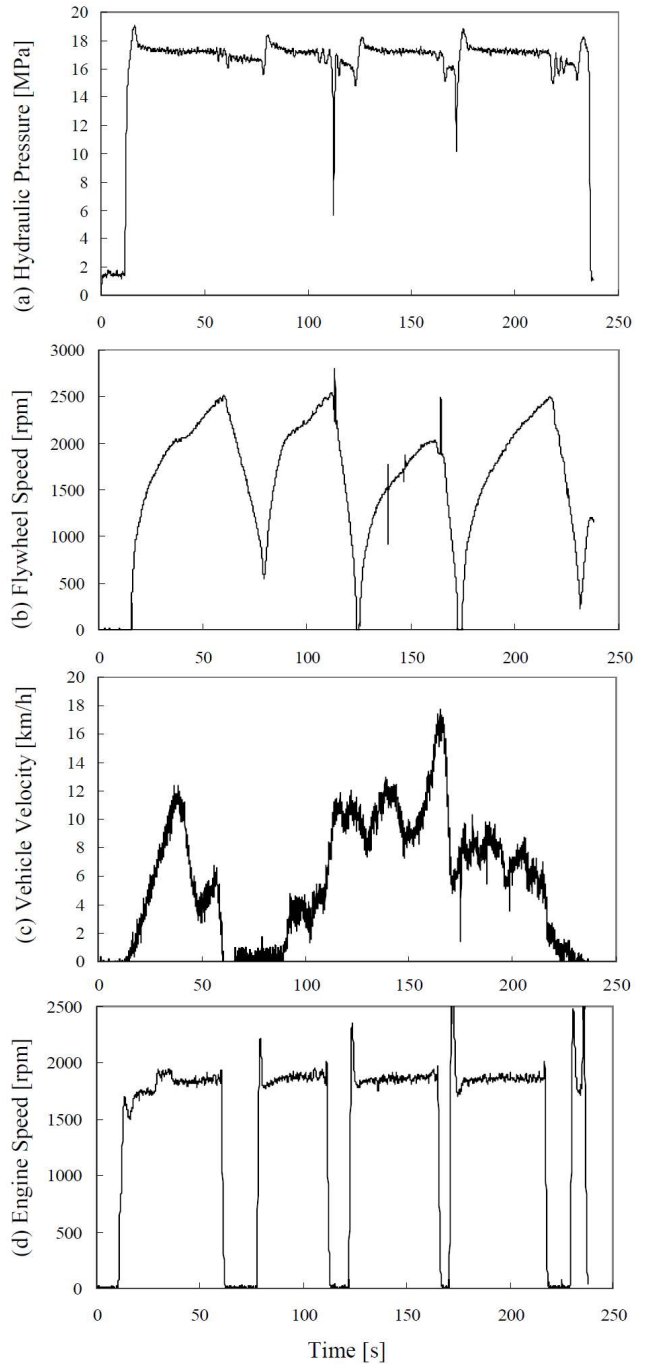


Fig. 7 Driving Test Data (at long distance mode)

흡수하게 된다. 본 실험에서는 약 73%의 차량의 관성에너지가 회생되었다. 이 값은 플라이휠의 증가된 운동에너지를 차량의 관성에너지로 나누어 구한 값이다. 이 실험에서 엔진의 스톱들은 제어하지 않고 일정하게 유지하였고, 따라서 엔진의 회전속도는 부하에 따라서 변하게 된다. 다음으로 장거리 모드 주행모드에서 실험을 실시하였다. 이 시험은 규정이 없는 시험모드이지만, 제작한 시스템에 실제 장거리에서 내구성을 가지는지를 확인하기 위하여 시험을 실시하였다. Fig. 7은 장거리에서 간헐적으로 작동될 수 있다.

3. 모델링 및 모의실험

3.1 수학적 모델

본 CPS시스템의 수학적 모델은 다음과 같다.

플라이휠 유닛

$$J_{fw} \frac{d\omega_{fw}}{dt} = T_{fw} - \Delta T_{fw} - P_{loss} / \omega_{fw}$$

여기서

- J_{fw} : Flywheel moment of inertia 2.02 [kgm²]
- ω_{fw} : Flywheel rotational speed [rad/s]
- P_{loss} : Gross loss of flywheel 250 [W]
- $T, \Delta T$: Rotating torque and torque loss of each P/M[Nm]

subscripts

- fw : Flywheel unit
- eg : Engine unit
- dr : Driving unit

Hydraulic Line Pressure

$$Q_{eg} - \Delta Q_{eg} + Q_{fw} - \Delta Q_{fw} - Q_{dr} - \Delta Q_{dr} = \frac{V_h}{K_e} \cdot \frac{dP_h}{dt}$$

- $Q, \Delta Q$: Flow rate and loss flow rate of each P/M [m³/s]
- V_h : Volume of hydraulic pipe 0.05 [m³]
- K_e : Bulk modulus of elasticity 1320 [MPa]
- P_h : Hydraulic line pressure [MPa]

Driving Unit

$$M \frac{dv}{dt} = F_{dr} - R$$

$$F_{dr} = (T_{dr} - \Delta T_{dr}) i_{dr} / r_{tr}$$

- M : Gross mass of vehicle 1860 [kg]
- F_{dr} : Driving force [N]
- R : Travel resistance including rotating, aerodynamic...etc[N]
- v : Vehicle speed [m/s]
- i_{dr} : Final reduction gear ratio 4:1
- r_{tr} : Radius of wheel 0.28 [m]

여기서

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

$$\Delta T_1 = 0.107(\omega / 2\pi)$$

$$\Delta T_2 = 0.19\delta(\omega / 2\pi) + 0.00102\delta^2(\omega / 2\pi)^2$$

$$\Delta T_3 = 1.86 \times 10^{-7} P_h$$

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$$

$$\Delta Q_1 = 1.68 \times 10^{-7}(\omega / 2\pi) + 1.72 \times 10^{-12} P_h$$

$$\Delta Q_2 = 0.119(\omega / 2\pi)q - 1.307 \times 10^{-6} \delta(\omega / 2\pi)$$

상기 손실계수는 실험으로부터 구하였다.

연료소모량

$$G_f = \int b \cdot W_{ep} dt / S \rho_f$$

여기서

- G_f : Fuel consumption [l/km]
- S : Distance [m]
- ρ_f : Fuel density [kg/m³]
- b : Net specific fuel consumption 300 [g/kWh]
- W_{ep} : Net power of engine [W]

축압기(맥동 흡수용)

$$P_g V_g^n = P_0 V_0^n$$

$$V_g = \int Q_g dt$$

$$P_g = P_h$$

여기서

- n : Polytropic index
- g : Gas in accumulator
- 0 : Default of accumulator gas

3.2 실험과 시뮬레이션 비교

상기 식을 이용하여, 실험과 동일한 주행조건으로 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 8은 시뮬레이션과 실험결과를 나타내고 있다.

이 시뮬레이션 결과로부터, 약 78%의 에너지 회생이 가능함을 알 수 있다. 또한 10 Mode에 대한 시뮬레이션에 대해서도 검토하였다.

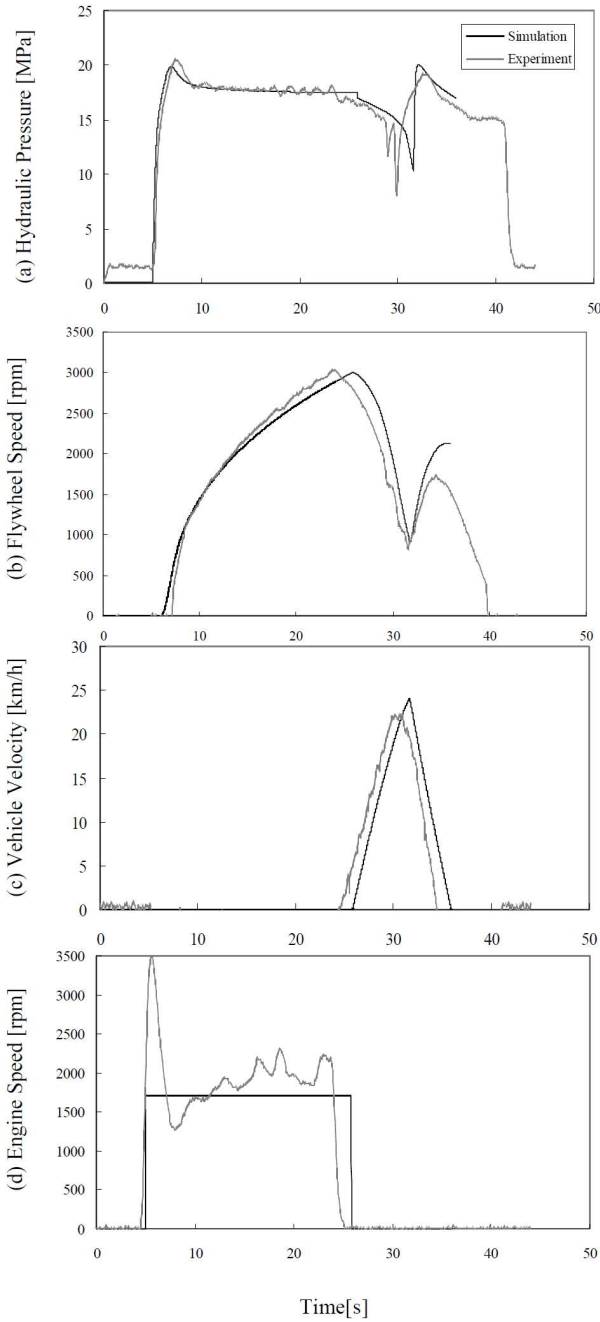


Fig. 8 Simulation Result
(Same mode as experiment)

3.3 10 Mode에서의 시뮬레이션

Fig. 9은 10 Mode 주행조건에서의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 약 8.3[km/L]이라는 결과를 얻었다. 이 시스템은 시리즈 방식의 하이브리드 차량이므로, 전체의 효율은 펌프/모터의 효율에 의존한다. 따라서 펌프/모터의 사판각도의 제어기법에 따라 전체 효율은 영향을 받게 된다. 또한, 시뮬레이션에서는 수학적 모델에 릴리프 밸브가 고려되지 않았기 때문에, 고압 라인에서의 압력은 일정하지 않다.

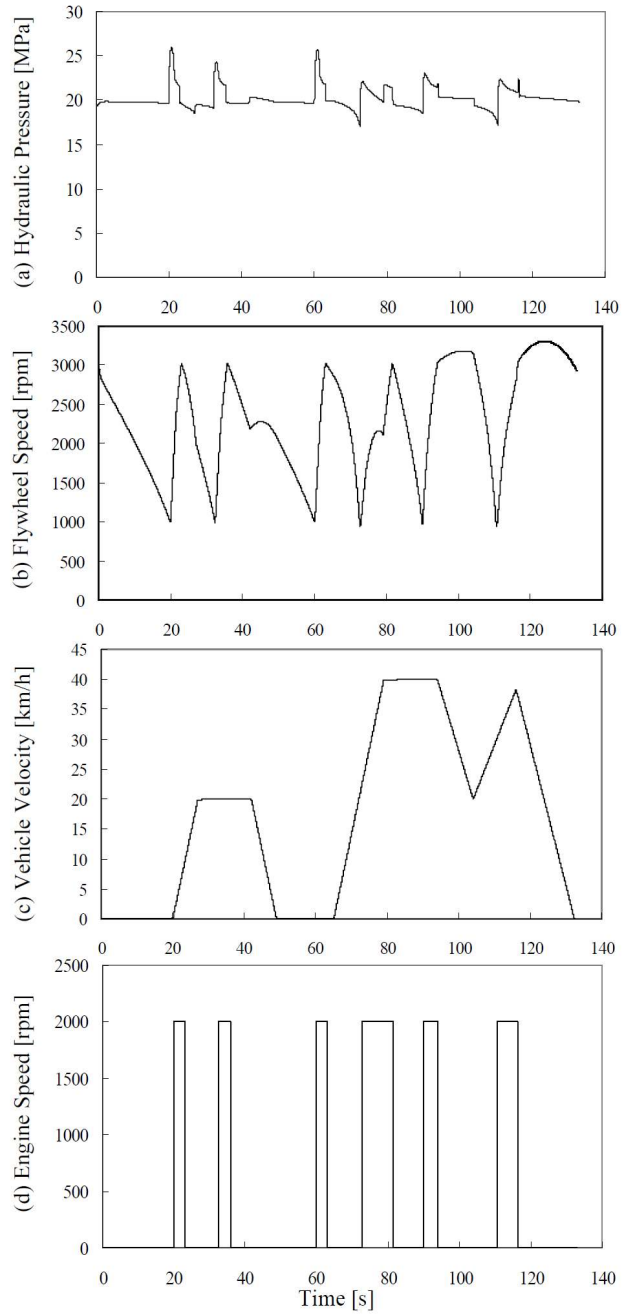


Fig. 9 Result of simulation at 10 mode

3.4 연비 개선 방안

위에서 서술한 바와 같이 전체 시스템의 효율은 펌프/모터의 효율에 의존한다. 따라서 펌프/모터를 어떻게 제어하는가가 전체 효율 및 연비를 결정하는 중요한 제어 파라미터가 된다. 예를 들어, Fig. 10는 펌프/모터의 용적에 변화에 따른 체적효율의 변화를 나타내고 있다.

여기서 펌프/모터의 제어 방식으로 앞서 이야기한 실험과 시뮬레이션에서 사용한 비례압력제어 대신에 다음에 주어지는 방법들을 적용하여 연비에 대하여 비교 검토하였다.

- (1) On-Off 압력제어 방식
- (2) 2단계 압력제어 방식
- (3) (1)과 (2)동시 사용

위의 사판각 제어방법 (1)에서는 고압 라인의 압력을 일정하게 제어하기 위하여 펌프/모터의 사판각을 최대 혹은 최소로 제어함으로써 펌프/모터의 효율이 높은 영역에서 펌프/모터를 구동해야 한다. 그리고 공회전이나 정속도 주행 중일 때는, 시스템 압력을 높게 설정할 필요가 없다.

위의 방법 (2)에서는 상기와 같이 공회전이거나 정속도 운전인 경우 정압력을 두 단계로 설정하여 제어하도록 한다. 방법 (3)에서는 상기의 방법(1)과 (2)를 함께 적용한 방법이다.

추가적으로, 플라이휠 시험에서 그 유효성이 검증된 클러치를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 상기 제어방식을 각각 적용하여 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내고 있다. Fig. 11에서 보여 준 바와 같이, 펌프/모터의 용적이 작은 영역에서 사용되었음을 알 수가 있다.

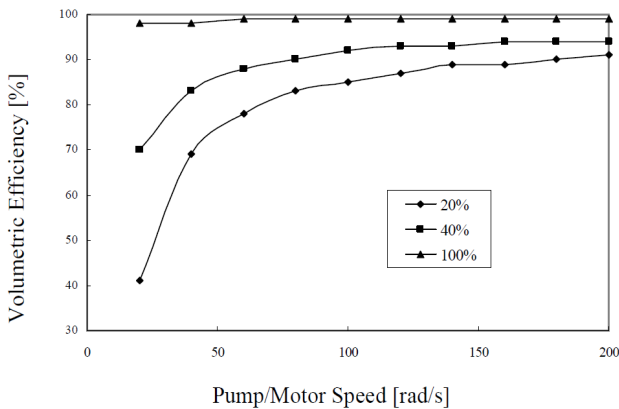


Fig. 10 Volumetric Efficiency of Pump/Motor

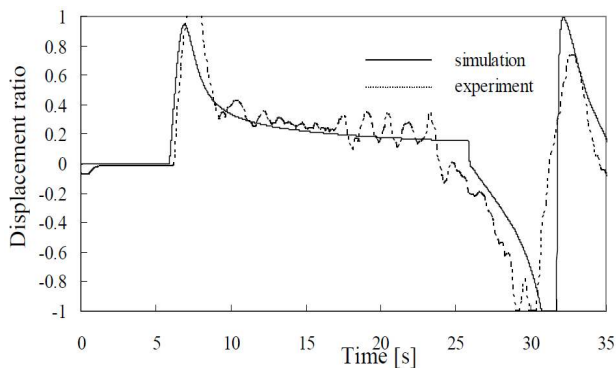


Fig. 11 Displacement of pump/motor

(1) ON-OFF제어

10모드에서의 제어 방법(1)의 용적과 압력을 Fig. 12에 나타내고 있다.

이 시뮬레이션 결과로부터, 클러치가 없는 경우와 있는 경우에 각각 8.1[km/l], 10.3[km/l]의 연비를 얻을 수 있었다.

(2) 2단계 압력제어

사판각 제어방법 (2)를 이용한 경우의 유압압력은 Fig. 12에 나타나 있다. 이 시뮬레이션에서 클러치를 사용하지 않을 때와 클러치를 사용시, 각각 12.0[km/h]와 19.0[km/h]의 연비를 얻었다.

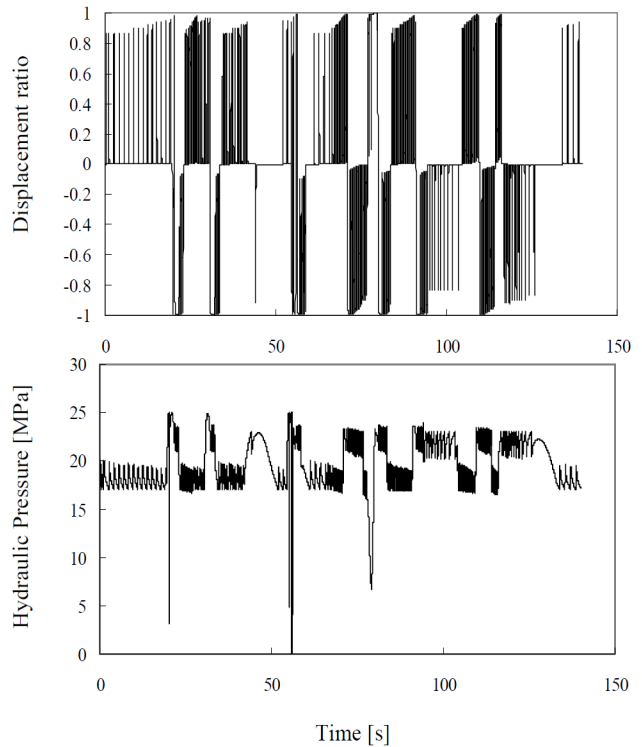


Fig. 12 Displacement and pressure of (1)

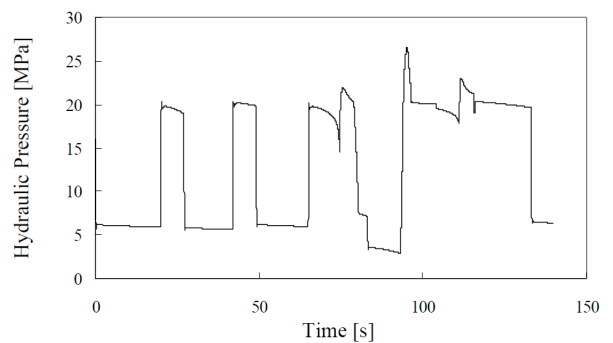


Fig. 13 Pressure data of (2)

(3) (1)과 (2)의 방법을 동시에 사용한 경우

10모드에서의 사관각제어 방법(3)을 이용한 경우의 펌프/모터의 용적을 Fig. 14에 보여주고 있다. 여기서는 클러치를 사용한 경우 효율이 높다는 사실을 알고 있으므로 클러치를 사용한 경우에 대한 시뮬레이션만 수행하였다. 시뮬레이션 결과 약 23.5[km/h]의 연비를 얻었다. 현재 일반적인 차량의 연비가 8~9[km/h]임을 고려해 볼 때, 여기서 제안하는 하이브리드 차량 시스템의 연비 향상의 가능성을 확인할 수 있다.

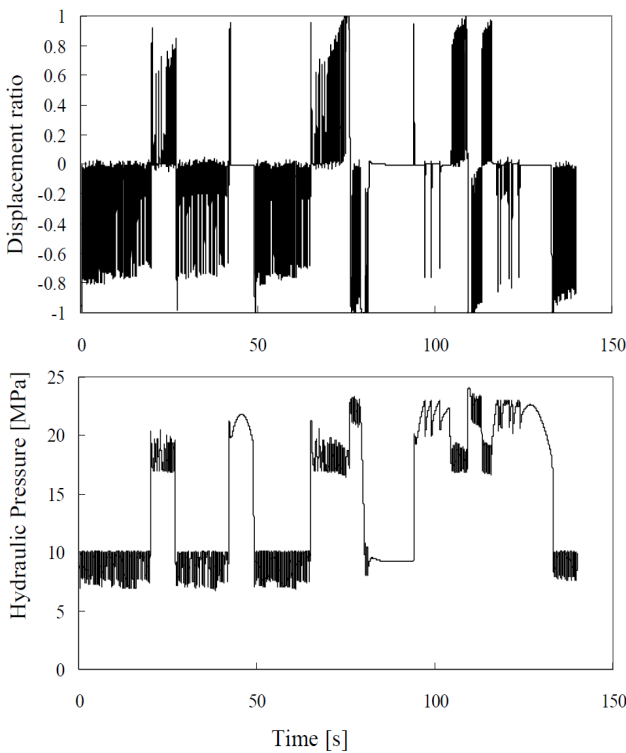


Fig. 14 Displacement and pressure data (3)

5. 결 론

본 연구에서는 CPS 하이브리드 차량의 유효성을 실차 조건의 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 실차 차량을 이용한 실험을 통하여, 약 20[km/h]의 주행속도에서 차량의 운동에너지의 약 73%를 플라이휠 회전관성에너지로 회수할 수 있음을 확인하였다. 또한 시뮬레이션으로부터 약 78% 가까운 에너지를 회생할 수 있었다. 이상의 실험과 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를

이용하여, CPS차량 전체의 시뮬레이션 모델을 구축하여 10모드 주행 스케줄에 적용하였다. 시뮬레이션 결과로부터 기존의 차량이 8~9[km/h]의 연비를 갖는 것에 비해, CPS하이브리드 차량의 경우에는 약 23.5[km/h]의 연비를 가짐을 확인할 수 있었다.

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., Ikee, 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) H.Shimoyama, S.Ikee, K.Ichiryu, E.Koyabu, "Study on hybrid vehicle using Constant Pressure System", JSME Yamanashi Meeting, pp. 217-218, 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.



연구에 종사

[저자 소개]

一柳 健(책임저자)

E-mail: ichiryu@kikuchiseisakusho.co.jp

Tel : 042-650-5065

1959년 히다치 제작소 입사

1986년 히다치 건기 근무

1997년 동경공과대학 교수

2006년~현재 Kikuchi제작소 연구소장

연구분야: 건설기계, 산업기계, 로봇 등의