에너지 회생 하이브리드 유압시스템 기술 소개

Introduction of Energy Regenerative Hybrid Hydraulic System Technologies

안경관 · 윤종일 · 도황틴

Kyoung Kwan Ahn, Jong Il Yoon, Hoang Thinh Do

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료는 고갈되는 반면 에너지 요구는 점점 늘어나는 추세다. 게다가 자동차에 의한 환경오염은 심각한 문제가 되어가고 있다. 따라서 배기가스의 저감뿐만 아니라 에너지를 절감하기 위한 승용차의 회생제동에 집중된 에너지 절감에 관한 연구가 계속되고 있다. 유압시스템에서 유압변속기(HST), 정압시스템(CPS), 전기유압 액추에이터(EHA), 두 개의 커먼레일이 있는 이차제어시스템(CPR)은 에너지절감 시스템으로 고려되고 있다. HST시스템에서 모터의 속도는 펌프유량 조절에 의해 연속적으로 제어된다. 따라서 휠로더, 전인차, 지게차 등과 같은 토목기계에 적합하다¹⁾. 그러나 HST 시스템은 하중의 운동에너지를 회수할 수 없으므로 잠재된 에너지 절감이 제한된다. CPS 시스템은 하중의 운동에너지를 회수하고 회수된 에너지를 재사용이 가능한 보조 유압펌프모터와 플라이휠을 사용한다. CPS 시스템에 대한 연구는 이 시스템이 자동차와 같은 모바일 어플리케이션에 적합하다는 것을 보여 준다^{2,3)}. EHA 시스템에서 배터리나 슈퍼커패시터는 부하의 운동에너지를 저장하는데 사용된다⁴⁾. EHA 시스템은 높은 회수율과 좋은 작동성능을 가지지만 낮은 파워와 높은 가격 때문에 적용 가능성은 제한적이다. CPR 시스템에서 두 개의 커먼레일은 사용된다. 고압라인은 고압 어큐뮬레이터와 연결되어 있고 저압라인은 탱크와 바로 연결되어 있다. CPR 시스템은 차량에 적용되고 이것은 에너지 소비감소를 보여준다^{5,6)}.

유압시스템의 장점을 이어가기 위해 FPMI의 연구뿐만 아니라 많은 연구들은 수행되고 논문으로서 각기 소개가 될 것이다.

2. 정유압 변속기의 작동원리

이번 장은 현재 개발되고 있는 일반적인 정유압

변속기와 에너지 회생 정유압 변속기의 기본 개념을 소개한다.

2.1 일반적인 정유압 변속기(HST)

정유압 변속기는 개루프 회로와 폐루프 회로의 두 가지 형태가 있다(Fig.1). 개루프 HST에서 탱크의 유체가 유압 펌프를 통해 유압 모터에 전달되고, 유압 모터를 통과 한 후 탱크로 들어간다. 폐루프 HST에서의 유체는 유압 펌프로부터 유압 모터로 흐르고 다시 유압모터에서 유압 펌프로 재순환 한다.

Fig. 1 Hydrostatic transmissions

HST의 간단한 형태는 고정 용량형 모터와 고정 용량형 펌프를 사용한다(Fig. 2 a)). 이 구성은 에너지 측면에서 효율적이고 가격이 싸긴 하지만 사용 제품으로써의 제한적인 측면이 있다. 펌프 용량이 고정되어 있으므로 펌프는 최고 하중에서 고정된 속도로 모터를 구동하기 위해 크기를 조절 하여야 한다. 최고속도가 요구되지 않을 때 펌프 출구로부터의 유체는 릴리프밸브로 흐른다. 이것은 열의 형태에서 에너지를 낭비한다.

고정 용량형 펌프 대신에 가변 용량 펌프를 사용하는 것은 일정한 힘을 만들 수 있다(Fig. 2 b)). 토크 출력은 유체 압력과 모터 용적에 영향을 받기 때문에 어떠한 속도에서나 일정하다. 펌프 용적이 증가 혹은 감소하는 것은 토크가 일정하게 유지되는 반면 모터 속도는 증가하거나 감소한다. 따라서 힘이 펌프 용적과 함께 증가되는 것이다.

고정 용량형 펌프와 함께 가변 용량형 모터를 사용하는 것은 일정한 힘을 제공하는 데 도움이 된다(Fig. 2 c)). 만일 모터에 흐르는 유량이 일정하고 모터 용적의 스피드와 토크 출력이 일정하게 유지된다면 힘이 일정하게 전달된다. 모터 용적이 감소하는 것은 모터 속도를 증가시키지만 토크를 감소시킨다.

가장 뛰어난 HST 형태는 Fig. 2 d)에 나타내어진다. 이론적으로 이러한 배치는 토크와 속도가 무한하게 제공되어 진다. 모터가 최대 용적일 때 다양한 펌프 출력은 토크가 일정하게 유지되는 동안에 다양한 속도와 출력이 나올 수 있도록 변화시킨다. 최대 펌프 용적에서 모터의 용적을 낮추면 모터속도가 최대로 향상한다.

Fig. 2 Characteristics of closed-loop transmission

Fig. 2 d) 에서와 같이 두 개의 구간으로 나뉘는 부분을 볼 수 있다. 첫 번째 구간에서는 모터 용적이 최대고 고정되었을 때 펌프 용적이 0에서 최대로 올라간다. 토크는 펌프 용적이 증가함에 따라 일정하지만 힘과 속도는 증가한다.

두 번째 구간에서는 펌프가 최대 용적에 도달하기 시작했을 때, 모터의 용적이 감소되기 시작한다. 이러한 범위를 통해서 토크는 속도가 증가함에 따라 감소하지만 힘은 일정하게 유지된다.

2.2 에너지 회생 정유압 변속기

2.2.1 병렬 유압 하이브리드 구동트레인

일반적으로 병렬 하이브리드 자동차는 유압과 기존의 기계적 힘을 함께 사용한다. 이것은 여러 가지 이름으로 문헌에서 찾을 수 있다. EPA, Eaton의 HLA, Bosch의 유압 회생 브레이크(HRB), Ford의 유압 파워 어시스트 등이 병렬 유압 하이브리드 파워 트레인 등으로 검색이 가능하다.

이것은 기계적 변속기와 연결된 내부연소엔진을 포함하고 에너지의 큰 일부분을 저장하고 차량제동에 쓰이는 저장장치와 연결된 유압 펌프/모터를 포함한다. 저장된 에너지는 다음 가속이 이루어지는 동안 차량이 나아가도록 엔진을 돕는데 사용된다. 병렬 HHV는 기존 구동 트레인의 추가 기능으로 볼 수 있다.

Fig. 3 Parallel hydraulic hybrid vehicle⁷⁾

2.2.2 직렬 유압 하이브리드 구동트레인

Fig. 4에서와 같이 직렬 유압 하이브리드 구동트레인은 내부 연소 기관은 고압 어큐뮬레이터를 충전시키기 위해 고압 펌프를 구동시킨다. 어큐뮬레이터에 있는 고압 유체는 고압 펌프/모터가 차량의 휠을 회전할 때 사용된다.

Fig. 4 Series Hydraulic hybrid drive trains⁷⁾

2.2.3 동력 분기 회생 구동트레인

Fig. 5는 병렬 및 직렬 구조의 장점을 보여주는 시스템이다. 하지만 복잡한 제어 전략을 요구하는 다소 문제가 있다. 기계 구동트레인은 여전히 병렬 하이브리드 디자인이지만 유압 펌프/모터는 하이브리드 디자인 내에서 휠 축에 연결되어 있다. 이러한 구성은 엔진이 휠을 구동시키는데 연결되고 휠에 있는 펌프/모터가 원하는 휠 속도에 도달할 수 있는 최적의 엔진관리가 가능하다. 엔진 바로 밑에 있는 클러치는 엔진이 병렬과 직렬 구성에서 부하에서 완전히 분리할 수 있게끔 해준다. 전원 분할은 병렬 구조와 직렬구조의 장점을 모두 가지고 있다. 이는 최적의 엔진관리를 유지하면서 바퀴에 고효율 전력 전달이 가능하다.

Fig. 5 Regenerative power-split drive trains⁷⁾

3. 에너지 회생 정유압 변속 기술 소개

3.1 관련 문헌 및 기술 연구

Sun⁸⁾의 논문에서 엔진의 효율과 브레이킹 시스템을 통한 에너지 재생의 효율을 개선하기 위하여 parallel hydraulic hybrid vehicle (PHHV)의 새로운

구조를 제시했다. 퍼지 기반의 토크 제어 전략은 엔진, 유압펌프/모터 사이에서 토크 분배에 의해 최적의 결과가 나오는 것을 보여준다. 그리고 차량의 하중 변화가 토크 제어 전략으로 인해 연료 경제성이 최대로 실현되는 것을 보여준다. 또한 연료 경제성이 기존의 차량에 비해 15.6% 향상되는 것을 볼 수 있다.

Sun⁹⁾은 단일 에너지 저장의 단점을 극복하기 위해 유압 하이브리드 차량을 위한 hydraulic/electric synergy system (HESS)을 제시하였다. 시너지 시스템의 주요 목표는 차량 성능을 만족하면서 연료 소비량을 개선하는 것이다. 본 연구에서는 효율성을 극대화 하여 연료 소비량을 20.05% 개선하였다.

Fig. 6 New configuration of parallel hydraulic hybrid vehicle

K. L. Cheong¹⁰⁾은 유압 하이브리드 전력 분배와 시스템 구성 최적화에 대한 연구를 하였다. Fig. 7에서 입력 커플 변속기는 고정된 기어와 함께 엔진으로부터 나오는 전원 분배 장치에 연결이 되어있다. 유압경로는 어큐뮬레이터와 전원에 의해 모듈화된다.

Fig. 7 Input coupled power-split configuration

Fig. 8의 출력 커플 변속기는 입력 커플 변속기의 그림과 반대방향이다. 엔진의 힘은 유압과 기계구조에 따라서 분할이 되고 출력 커플 변속기와 함께 고정된 기어와 재결합한다.

Fig. 8 Output coupled power-split configuration

Fig. 9 Compound power-split configuration

Fig. 9의 컴파운드 구조는 입력 커플 변속기와 출력 커플 변속기를 합쳐놓은 것이다. 이러한 컴파운드 구조는 높은 연료 경제성을 가진다. 컴파운드 설계의 운동 matrix G는 최적 입력 커플 설계와 유사하다. 유압 펌프/모터의 사이즈는 입력 커플 변속기와 출력 커플 변속기 보다 13%에서 21% 더 작게 설계되어진다.

Jiang¹¹⁾은 Fig. 11과 같이 Secondary Regulation Hydrostatic Transmission Technology (SRHT)를 적용하여 굴삭기 정지 특성과 유압 변속기 기술의 높은 정밀도의 분석을 기초로 하여 새로운 굴삭기의 제동 제어 기술을 제시하였다. 변수가 불확실성에 대하여 강건한 제어 문제를 처리하기 위해서 슬라이딩 모드 제어 방법을 유압 펌프/모터의 제어기 설계에 사용되었다. SRHT 굴삭기의 시뮬레이션 결과는 기존의 굴삭기와 비슷하다. 또한 이 기술로 연료 경제성과 가스 배출을 개선 할 수 있었다.

Fig. 10 Configuration of SRHT excavator

Table 1 Energy consumption during regenerative braking course

Dece. (m/s')	Braking energy (J)	Energy consumption (J)	Regenerated energy(J)	Energy regen. ratio (%)
-1.77	739840	151530	423470	57.24
-0.92	513480	198310	328320	63.94

3.2 에너지 회생 정유압 변속기 상용제품

1980년대 Volvo Flygmotor의 Comulo 부서는 Fig. 11에서와 같이 병렬 유압-공압 어큐레이터와 연결되는 고효율 가변 변속기와 샤프트를 개발하였다. 1983년부터 시작된 개발은 1985년부터 스톡홀름 도로에 다니는 시내 버스에 사용되기 시작했다. 개발된 구동트레인은 Cumulo Brake Energy Drive (CBED)라고 불리었다. 연료 소비량 감소 및 가스 배출이 16~25% 정도로 개선되어졌다¹²⁾.

Fig. 11 Cumulo Brake energy Drive (CBED)

2004 SAE World Congress에서 EPA사의 첫 번째 유압 하이브리드 차량이 발표되었다. 연료절감을

55%로 개선하였다. 또한 Fig. 12의 Army's SMARTRUCK III를 미국 국방차량 연구소에서 소개하였다. 이 차량은 25~35%의 연비개선을 하였고, 배출 가스를 30% 줄였다¹³⁾.

Fig. 12 The Army's SmarTruck III features hydraulic hybrid technology

Bosch Rexroth의 Hydrostatic Regenerative Braking System(HRB)은 연료 저장을 25%까지 할 수 있고 Fig. 13에 나타낸다¹⁴⁾.

Fig. 13 Hydrostatic Regenerative Braking System
HRB - Hydraulic Hybrid

Waste Management와 Eaton Corp.는 유압이 차량에 어떠한 도움을 주는지 테스트 하였다. 그 시스템은 Fig. 14, 15에서 보여진다. 제동하는 동안 에너지의 저장이 이루어지고 저장된 에너지는 가속 시 재 사용되어진다. 이는 연비 절감을 가져올 뿐만 아니라 브레이크 패드가 어긋나는 현상도 막아주어 브레이크 수명을 기존의 차량보다 2~4배 정도 증가함을 확인하였다. Bohlman이 자동차는 1000번의 출발과 정지를 반복해서 실험을 한 결과 약 19~28%의 연비 절감의 효과가 있음을 발표하였다. Eaton사는 2020년까지 연비 절감 15%, 배출 가스 15%감소의 목표를 가지고 있다¹⁵⁾.

Fig. 14 Waste Management Inc. is testing four Hydraulic Launch Assist hybrid systems in its fleet in Fort Worth, Texas

Fig. 15 Parallel hydraulic hybrid architecture on Eaton's HLA systems

4. FPMI 연구실 연구 소개

기존의 CPS는 플라이휠 펌프/모터의 용적의 급격한 변화에 의해 발생하는 압력 피크와 같은 문제를 가지고 있다. 이 논문에서는 기존의 CPS의 에너지 절감 방법의 새로운 대안으로서, 스위칭 폐루프 정압력원시스템(Switching type Closed Loop Constant Pressure System, 이하 SCL-CPS라고 함)을 새롭게 제안한다. 우선, SCL-CPS의 해석적 모델을 수립하고, 에너지 절감의 가능성을 평가하기 위한 시뮬레이션을 실시한다. 다음으로, 실험실의 벤치 시험장치를 제작하고, SCL-CPS의 주요 파라미터의 영향을 실험에 의해서 검토하였다.

4.1 시스템 작동원리

4.1.1 종래의 정압력원 시스템

종래의 정압력원 시스템(CPS: Constant Pressure System)을 이용한 플라이휠 하이브리드 차량의 구동계의 구성을 Fig. 16에 나타낸다. 엔진의 출력축, 플라이휠축, 차축 각각에 가변 용량형 펌프/모터를 취부하고, 공통고압라인과 공통저압라인 사이에 병렬로 접속되어 있다. 또, 공통고압 라인에는, 압력맥동 흡수를 위하여, 유압 어큐뮬레이터가 연결되어 있다. 여기서 이용되는 가변용량형 펌프/모터는, 1회 전당의 용적을 경전각 제어에 의하여 연속적으로, 그리고 정/역 방향으로 변화시킴으로써, 펌프 및 모터의 어떤 작동도 가능한 에너지 변환기구로서 역할을 한다.

Fig. 16 Schematic Diagram of Conventional CPS

주행 시에, 엔진은 기본적으로 정지상태이고, 차량은 플라이휠의 회전 에너지에 의하여 구동된다.

공통고압라인은, 플라이휠에 취부된 펌프/모터(플라이휠 펌프모터) 및 압력보상기의 작동에 의하여 일정하게 유지된다. 공통고압 라인의 압력이 일정 압력 이하로 저하된 경우에는, 플라이휠 P/M를 펌프로 작동시킨다. 차량의 가속은, 드라이브축에 취부되어 있는 펌프/모터 (드라이브 펌프/모터)의 용적변화에 의해 실현된다. 가속 시에는 드라이브 펌프/모터를 모터로 작용시키고, 감속 시에는 펌프로 작용시킨다. 드라이브 펌프/모터의 펌프작용에 의해, 차량을 감속시킬 경우, 제동에너지에 의해 공통 고압라인의 압력은 상승한다. 이 압력상승을 받아서 플라이휠 펌프/모터는 모터작용을 한다. 결과로서, 차량의 제동에너지는 플라이휠의 회전관성에너지로 회수되어, 가속 시에 재이용된다. 엔진은 플라이휠의 회전속도가, 설정한 하한치가 되면 시동되고, 공통고압라인의 압력을 높하게 된다. 이 압력상승을 받아서 플라이휠 펌프모터는 모터작용을 하게 되고, 플라이휠의 회전속도를 상승시킨다. 그러나, 이 시스템에서 플라이휠 펌프/모터의 사판각은

좋은 에너지 회수 효율을 위하여 최대의 사판각 영역에서 작동되도록 제어되며, 이 사판각의 급격한 영역 변환에 의하여 고압 관로에서 큰 압력 맥동과 소음이 발생하게 된다. 내구성의 관점에서도 이와 같은 현상은 해결되어야 하며, 그 해결책으로서 본 논문에서는 SCL-CPS를 제안하고자 한다.

4.1.2 제안하는 SCL-CPS

새롭게 제안하는 SCL-CPS의 개략도는 Fig.17에 나타나 있다. 이 시스템은 이차 제어에 의한 정유압 트랜스미션 시스템과 유사하다. 기존의 시스템과 제안하는 시스템사이의 시스템 구성의 차이점은 제안하는 시스템은 하나의 플라이휠과 두개의 펌프/모터 및 3개의 전자 클러치로 구성이 되어있다는 점이다. 특별히, 제안하는 시스템은 구동용과 에너지 축적용의 2개의 정압력 라인을 가지고 있다. 구동을 위한 정압력라인의 압력은 차량 가속시에 일정하게 유지되도록 제어되며, 에너지 축적용 정압력원라인의 압력은 차량 제동시에 일정하게 유지되도록 제어되고 있다. 각각의 작동조건에서, 한쪽의 라인압력은 설정된 압력으로 제어되며, 상대쪽 라인압력은 저압으로 설정되어 있으며, 양 라인에 설치된 비례 릴리프 밸브를 이용하여 양 라인의 압력을 제어할 수 있다. 여기서 엔진은 플라이휠의 속도가 일정이하로 떨어졌을 때만 작동되어진다.

Fig. 17 Schematic diagram of newly proposed CPS

(a) Acceleration Period (b) Braking Period

Fig. 18 Operational principle of SCL-CPS

Fig. 19 hydraulic circuit of experimental apparatus

4.1.3 SCL-CPS의 작동원리

SCL-CPS의 작동원리는 Fig. 18에 나타나 있다. 가속시에는 플라이휠 펌프/모터의 토출유량이 구동용 펌프/모터의 유량보다 크며, 구동측 라인의 압력이 에너지 회수측 라인의 압력보다 크므로, 구동측 펌프/모터는 유압모터로서 작용하게 된다. 역으로, 감속시에는 플라이휠 펌프/모터의 토출유량보다 구동용 펌프/모터의 유량이 더 크므로, 에너지 회수측 라인의 압력이 구동측 라인의 압력보다 크므로, 구동측 펌프/모터는 유압펌프로써 작용하여 유압 브레이크로서의 기능을 하게 된다.

따라서, 기존 시스템에서는 플라이휠 펌프/모터의 사판각이 양의 영역에서 음의 영역까지 바뀌게 되나, 제안하는 시스템에서는 항상 양의 값이다. 유압 펌프/모터의 사판각이 항상 양의 영역에서 작동한다면, 급격한 압력 발생은 방지할 수 있으며, 유압 부품의 내구성도 높일 수 있게 된다.

4.2 실험장치의 개략도

하이브리드 차량의 벤치 테스트 장치가 Fig. 19에 나타나 있다. 실험장치에는 엔진대신 전동기(50HP, 6p)를 사용한다. 유압 펌프/모터 1(Linde, HPV55-02RE1P300P, 55cc/rev)의 기능은 제동시 에너지를 축적하는 것과 가속시 에너지를 방출하는 것이며, 유압 펌프/모터2는 차량을 구동하는 것이다. 이 시스템에서는 같은 크기의 2개의 플라이휠이 있다. 이 중 플라이휠 펌프/모터에 부착된 것은 에너지 흡수용이고, 다른 하나는 차량의 부하를 모사하기 위한 것이다. 이 실험에서는 관성모우멘트가 3.5kgm²인 플라이휠과, 초기 예압이 10MPa

이고 체적이 4L인 두개의 어큐물레이터를 사용하고 있다.

Fig. 20 Simulation model of SCL-CPS

4.3 수학적 모델과 시뮬레이션

4.3.1 시뮬레이션 모델

SCL-CPS의 수학적 모델은 식(1)에서 식(10)과 같이 연속 방정식, 압력/유량 효율에 관한 식을 이용하여 다음과 같이 유도되어진다.

$$Q_{f0} + Q_{ch1} - Q_{r1} - Q_{d1} = \frac{V_0}{\beta} \frac{dP_1}{dt} \quad (1)$$

$$Q_{d0} + Q_{ch2} - Q_{r2} - Q_{f1} = \frac{V_0}{\beta} \frac{dP_2}{dt} \quad (2)$$

$$J_f \frac{d\omega_f}{dt} + C_d \cdot \omega_f = T_f \quad (3)$$

$$J_d \frac{d\omega_d}{dt} + C_d \omega_d = T_d \quad (4)$$

$$T_f = (P_2 - P_1) \cdot V_f \cdot \eta_T \quad (5)$$

$$T_d = (P_1 - P_2) \cdot V_d \cdot \eta_T \quad (6)$$

$$Q_{fo} = \omega_f \cdot V_f \cdot \eta_v \quad (7)$$

$$Q_{fi} = Q_{fo} / \eta_v \quad (8)$$

$$Q_{do} = \omega_d \cdot V_d \cdot \eta_v \quad (9)$$

$$Q_{di} = Q_{do} / \eta_v \quad (10)$$

여기서, 각 펌프/모터의 체적 및 토크 효율은 실제 피스톤 펌프/모터의 실험 데이터를 바탕으로 계산되어진다. 릴리프 밸브의 압력은 다음과 같이 설정되어진다.

$$P_1 = \begin{cases} P_{relief} & \text{at } P_1 > P_{relief} \\ P_{min} & \text{at } P_1 < P_{relief} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_2 = \begin{cases} P_{relief} & \text{at } P_2 > P_{relief} \\ P_{min} & \text{at } P_2 < P_{relief} \end{cases} \quad (12)$$

4.3.2 시뮬레이션 결과

Fig. 21은 제안한 에너지 절감 유압시스템의 시뮬레이션 및 실험결과를 각각 나타내고 있다. 시뮬레

(a) Simulation

(b) Experiment

Fig. 21 Comparison of simulation and experiment

이션에서는 구동축 펌프/모터의 사판각과 플라이휠 펌프/모터의 사판각을 각각 90%와 50%로 설정하였다. 구동용 펌프/모터에 부착된 플라이휠과 에너지 축적을 위한 플라이휠의 초기속도는 각각 900[RPM]과 400[RPM]으로 각각 설정하였다. 이 결과로부터 시뮬레이션과 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 시뮬레이션 모델이 유효함을 알 수 있다.

4.4 에너지 회수 실험

4.4.1 실험조건

에너지 절감의 주요 설계변수는 다음의 3가지 요소가 고려되어진다.

- 1) 플라이휠 펌프/모터의 용적
- 2) 릴리프 밸브의 압력설정
- 3) 플라이휠의 초기속도

차량을 모사하는 플라이휠의 초기 속도와 구동형 펌프/모터의 사판각은 각각 850 rpm과 100[%]로 설정하였다. 구동축 라인에서, 릴리프 밸브의 압력 설정치는 100bar이고, 4L용적의 어큐뮬레이터가 부착되어 있다.

실험을 통하여 에너지 절감에 미치는 각 설계 변수의 효과를 검토하기 위하여, 다른 설계변수를 가진 4가지 실험을 실시하였다. 각 실험에서, 에너지 회수효율은 다음 식과 같이 계산되어진다.

$$\eta[\%] = \frac{\text{Energy recovered in Flywheel 1}}{\text{Energy wasted in Flywheel 2}} \times 100$$

4.4.2 에너지 회수 실험결과

Fig. 22은 4가지 설계변수에 대한 에너지 회수 실험결과를 나타내고 있다. 실험결과로부터, 에너지 회수를 위한 펌프/모터의 용적, 에너지회수용 플라이휠의 초기속도 및 에너지 회수라인의 릴리프밸브의 압력 설정이 주요 설계변수로 선정되었고, 이 3가지 변수가 실험에서 변경되었다. 실험결과로부터, 가장 좋은 에너지 효율은 $V_f = 60\%$, $P_{relief} = 250\text{bar}$ and $w_f = 400\text{rpm}$ 일 때, 56%였고, 가장 나쁜 효율은 30.1%였다. 이로부터 에너지 회수효율에 가장 영향을 미치는 주요변수가 에너지 회수용 펌프/모터임을 알 수 있었다. Fig. 22(c)와 (d)에는 플라이휠의 초기속도와 릴리프밸브의 압력설정이 바뀐 경우에 대한 에너지 회수효율이 각각 45.1%와 40.0%로 낮아졌음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 해설에서는 에너지 회생을 이용한 하이브리드 유압시스템에 대한 논의를 하였다. 정유압 변속기의 작동원리와 에너지 회생이 가능한 정유압 변속기에 대한 소개를 하였으며, 이에 따른 관련 문헌 및 기술 내용을 소개하였다. 현재는 차량을 필두로 많은 연구자들이 연구를 진행하고 있으나, 추후 산업기계 전반에 유압시스템을 이용한 에너지 회생에 대한 많은 논의와 연구가 이루어질 것이다. 이러한 제품의 실질적 상용화를 위해서는 성능면에서는 기존의 장비와 대등하면서 가격은 기존 장비 수준으로 떨어져야한다. 차량을 비롯한 건설 중장비 제조사들은 더 싸고 효율이 높은 하이브리드 유압시스템을 개발하는데 그들의 노력을 계속해서 집중하리라 예상된다.

참고문헌

- 1) Martelli, M. and Zarotti, L., "Hydrostatic Transmission with a Traction Control", 22nd ISARC, 2005.
- 2) Shimoyama, H., Ikeo, S., Koyabu, E., Ichiryu, K. and Lee, S., "Study on Hybrid Vehicle Using Constant Pressure Hydraulic System with Flywheel for Energy Storage", Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, 10.4271/2004-01-3064, 2004.
- 3) Ho, T. H. and Ahn, K. K., "A Study on Energy Saving Potential of Hydraulic Control System Using Switching Type Closed Loop Constant Pressure System", Proc. of the Int. Conf. JFPS, 1-12, pp. 317-322, 2008.
- 4) Yang, H., Sun, W. and Xu, B., "New investigation in energy regeneration of hydraulic elevators", IEEE/ASME trans. on Mech., 12-5, pp. 519-526, 2007.
- 5) Johri, R. and Filipi, Z., "Low-cost pathway to ultra efficiency car: Series hydraulic hybrid system with optimized supervisory control", 2-2, pp. 505-520, 2010.
- 6) Matheson, P. and Stecki, J., "Modeling and simulation of a fuzzy logic controller for a hydraulic hybrid powertrain for use in heavy commercial vehicles", SAE Powertrain &

(a) $V_f=60\%$, $P_{relief}=250\text{bar}$, $w_f=400\text{rpm}$ (b) $V_f=30\%$, $P_{relief}=250\text{bar}$, $w_f=400\text{rpm}$ (c) $V_f=60\%$, $P_{relief}=250\text{bar}$, $w_f=800\text{rpm}$ (d) $V_f=60\%$, $P_{relief}=100\text{bar}$, $w_f=400\text{rpm}$

Fig. 22 Experimental results of energy recovery

- Fluid Systems Conference & Exhibition, 10.4271/2003-01-3275, 2003.
- 7) Kim A. STELSON, Jonathan J. MEYER, Andrew G. ALLEYNE, Brandon HENCEY, "Optimization of a passenger hydraulic hybrid vehicle to improve fuel economy", Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008 September 15-18, 2008.
 - 8) Sun Hui, Jiang Ji-hai, Wang Xin, "Torque control strategy for a parallel hydraulic hybrid vehicle", Journal of Terramechanics 46, pp. 259-265, 2009.
 - 9) Sun Hui, Yang Lifu, Jing Junqing, "Hydraulic/electric synergy system (HESS) design for heavy hybrid vehicles", Energy 35, pp. 5328-5335, 2010.
 - 10) Kai Loon Cheong, Perry Y. Li and Thomas R. Chase, "Optimal Design of Power-Split Transmissions for Hydraulic Hybrid Passenger Vehicles", 2011 American Control Conf., USA, 2011.
 - 11) Yu Ancai Jiang Jihai, "Research on the Regenerative Braking Control Strategy for Secondary Regulation Hydrostatic Transmission Excavators", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation, China, 2009.
 - 12) C. Hugosson, "Cumulo Hydrostatic Drive - a Vehicle Drive with Secondary Control", Proc. of the 3rd Scandinavian International Conference on Fluid Power, Sweden, 1995.
 - 13) <http://www.iags.org/n033104t3.htm>
 - 14) http://www.boschrexroth.com/business_units/bm/en/products_and_solutions/hydraulic-systems/hrb-system/index.jsp
 - 15) <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicPumpsM/Article/False/83395/TechZone-HydraulicPumpsM>

- 16) Kyoung Kwan AHN, Triet Hung HO and Quang Truong DINH, "A Study On Energy Saving Potential Of Hydraulic Control System Using Switching Type Closed Loop Constant Pressure System", Proc. of the 7th JFPS Int. Symposium on Fluid Power, TOYAMA, 2008.

[저 자 소 개]

안경관(책임저자)

E-mail: kkahn@ulsan.ac.kr

Tel: 052-259-2282

1990년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1992년 한국과학기술원 기계공학과 석사졸업, 1999년 동경공업대학

정밀기계시스템 박사 과정 졸업. 1992년 삼성중공업 중장비 사업본부 입사, 2000년~현재 울산대학교 교수. 유압시스템의 지능제어, 에너지 회생을 위한 유압시스템 및 기능성유체를 이용한 새로운 액추에이터의 연구에 종사. 유압건설기계학회 편집이사, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 제어자동화시스템공학회, IEEE, 일본기계학회, 일본유압학회, 일본계측자동제어학회, 일본 로봇학회 등의 정회원, 공학박사.

윤종일 (Jong Il Yoon)

E-mail : hero9825@nate.com

Tel : 052-259-1501

2007년 울산대학교 기계자동차 공학과 석사과정졸업, 2012년 울산대학교 기계자동차공학과 박사과정졸업. 현 울산대학교 특성화연구실 포스닥. 유압시스템

의 지능제어, 에너지 회생을 위한 유압시스템 스마트 액추에이터, 건설기계 에너지 회생 연구에 종사. 유압건설기계학회 회원, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 제어로봇시스템학회 등의 회원, 공학박사.

도황틴 (Hoang Thinh Do)

E-mail : hero9825@nate.com

Tel : 052-259-1501

2010년 베트남 호치민공대 학사 졸업, 현 울산대학교 기계자동차공학과 석사과정. 유압 제어 시스템, 에너지 회생 연구.