

유압시스템의 에너지절약 기술의 동향과 전망 Present and Future of Energy-Saving Hydraulic System

안 경 관
Kyoung Kwan Ahn

1. 서 론

화석에너지 비용의 증가와 환경문제, 특별히 온난화 억제를 위하여 CO2배출의 삭감 규제에 의하여, 유압시스템의 에너지 절약은 연구자 및 기술자들의 중요한 테마가 되고 있다. 또한 시장에 의하여 한층 에너지 절약을 유압시스템에서 요구되어지고 있다. 한마디로 유압시스템의 에너지 절약 기술이라 이야기함은 주로 요소기술, 시스템, 동력전달 매개로 나눌 수가 있으며, 각각 아래와 같이 세부분야로 나눌 수 있다.

- (1) 요소기술(펌프/모터 등)
 - (1-1) 각 요소기기의 효율의 향상
 - (1-2) 요소기기의 수명연장
 - (1-3) 혁신적인 요소기기 및 에너지 변환기술의 개발
- (2) 시스템
 - (2-1) 시스템 전체의 효율의 향상
 - (2-2) 파워원을 포함한 시스템 동작사이클의 최적화
 - (2-3) 분산화 기술
 - (2-4) 유압에너지의 축적/회생기술
 - (2-5) 하이브리드화 기술
- (3) 동력전달매체
 - (3-1) 작동유의 수명 연장
 - (3-2) 동력전달효율의 향상
 - (3-3) 혁신적인 동력전달매체의 개발

상기의 기술적인 방향성은 각각 서로 간에 중요하고, 최종적으로는 유압시스템전체에서의 에너지 절약화와 연결되지 않으면 안 된다. 본 기사에서는 유압시스템의 에너지 절감 기술에 관한 방향성을 정리함과 동시에 최근의 연구개발사례를 소개하면서 에너지 절감 기술의 동향과 전망에 관해서 해설한다.

2. 에너지 축적과 회생요소

에너지 절감의 관점에서 에너지 축적과 회생은 중요한 열쇠가 된다. 유압시스템에 있어서 에너지의 회수축적의 방식은, 그 축적에너지의 형태와 요소기기의 구성에서, 유압에너지 방식(어큐물레이터 방식), 전기에너지 방식(축전지 방식), 운동에너지 방식(플라이휠 방식)으로 구분할 수 있다.

Fig. 1에서 에너지의 축적방법의 차이에 의한 비교를 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 유압 어큐물레이터에 유압에너지를 축적하고, 유압펌프/모터를 에너지 축적시에는 펌프로, 에너지 재이용시에는 모터로서 기능시켜 에너지의 회생을 하는 회로이다. 이 경우, 유압 어큐물레이터의 압력레벨에 의해 유압펌프 또는 유압모터로서 작동하는 가변용량형 유압펌프/모터가 필요하게 된다. 그리고 Fig. 1(b)에서는 Fig. 1(a)의 가변용량형 유압펌프/모터를 발전기로, 유압 어큐물레이터를 축전지로 대체함으로써 양자가 대응됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 1(c)에 나타난 바와 같이 회전관성체의 운동에너지로서 플라이휠에 축적하여, 재이용하는 방법도 있다. 이 경우에는 유압모터의 회전운동에너지를 직접 플라이휠에 축적하는 것이 가능하다.

표2 및 그림 2는 상기 3가지 에너지 축적방식에 대하여 에너지 밀도 및 파워밀도에 대하여 비교한 내용이다.

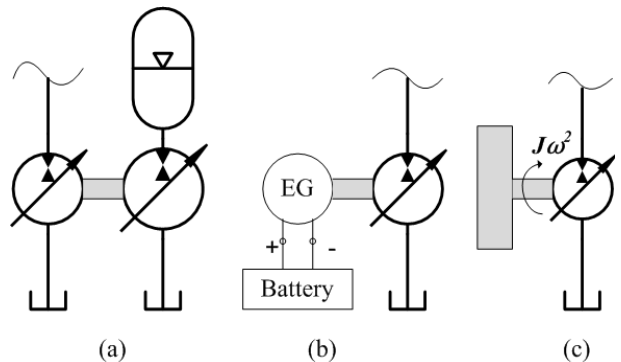


그림 3 3가지 에너지 축적방식

표 2 Off-Road Vehicle에서의 보조동력원의 비교

Auxiliary Power Source	Energy Density	Power Density	Energy Product Scrap	Product Cost	Life Span
Flywheel	○	○	◎	◎	◎
Battery	◎	×	×	×	×
Hydraulic Accumulator	○	◎	◎	○	○

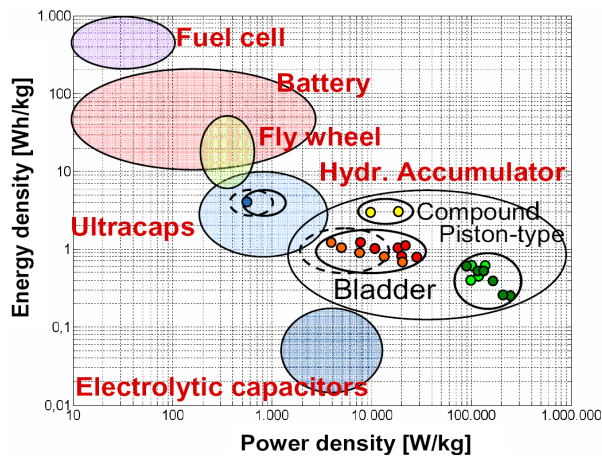


그림 2 3가지 에너지축척방식에 대한 파워 및 에너지 밀도의 비교

그림 2에서 배터리 또는 플라이휠과 비교하게 되면, 어큐물레이터는 단위중량당 동력밀도(Power Density)는 높으나, 반면 단위중량당 에너지 저장밀도(Energy Storage Density)는 플라이휠과 비교하면 약 1/20배, 배터리와 비교하면 약 1/50배 정도로 상당히 낮은 수준이다. 발전기나 전기모터의 운동에너지와 전기에너지간의 변환 효율은, 회전수에 의존해서 저속영역에서는 효율이 낮지만, 전력변환요소의 제어에 의해 고효율을 유지하는 것이 가능하다.

한편, 가변용량형 유압펌프/모터에 의한 운동에너지 및 유압에너지간의 변환효율을 향상시키기 위해서는 저속영역 혹은 저 경전각 영역에서 효율이 떨어지지 않는 넓은 범위에서의 고효율인 유압펌프/모터의 개발이 필요하게 된다.

또한 축전지에 의한 전기에너지의 회수 및 이용의 에너지 변환 효율은 어큐물레이터에 의한 유압에너지의 효율보다 낮고, 가격적으로는 대용량의 축전지는 고가이다. 현재의 상태에서는, 전기자동차에 사용되어지는 리튬이온 축전지의 효율은 80%정도로 이야기되어져, 유압 어큐물레이터의 효율은 94% 이상이라고 알려져 있다¹⁾. 그러나 이후에, 리튬이온 축전지와 전기이중층 캐패시터 등의 대용량화와 저

가격화, 전극소재 등의 개발에 의한 고성능화가 진전되어, 파워밀도와 에너지 밀도, 효율의 개선과 저가격화가 진전되리라 생각한다. 이와 함께, 유압에너지 축척 소자인 어큐물레이터의 고압 경량 저가격화와 고성능화가 이후의 유압기술에 있어서 에너지 회생의 주요 기술이 될 것이다. 플라이휠과 유압 어큐물레이터의 원리를 조합하여, 종래의 어큐물레이터에 비해 약 10배의 에너지 밀도가 얻어지는 혁신적인 에너지 축척소자의 보고도 있다²⁾.

이상과 같이 유압시스템에 있어서 에너지 절감 기술은 에너지의 축척과 회생의 관점에서, 유압펌프/모터와 유압어큐물레이터의 고압 고효율 고성능화와 장수명화를 위한 요소기기기술의 개발이 중요한 요소가 된다.

3. 시스템의 에너지 절감

3.1 시스템의 효율향상

유압시스템의 경우, 원동기에서 유압펌프를 구동해서 유압에너지를 발생시키는 유압원이 필요하게 되고, 많은 경우, 원동기의 역할을 전기모터나 내연기관의 엔진 등에 의존하지 않을 수 없게 된다. 시스템의 전체의 효율은 시스템을 구성하는 각 요소기기의 효율향상도 중요하지만 원동기의 에너지 효율도 함께 고려할 필요가 있다. 특히 건설기계 등의 이동체 시스템의 경우, 옥외 작업이 대다수이므로, 전기에너지의 입수는 엔진에 접속된 발전기나 사전에 충전된 축전지 등에 의존할 수밖에 없으며, 또한 엔진에 접속된 유압펌프로부터 유압에너지를 입수하는 것과 원리적으로는 동일하다. 이 경우에는 앞 절에서 나타난 바와 같이 어떤 형태의 에너지를 축척 회생하는가가 중요한 점이 된다.

한편, 내연기관의 피스톤 실린더와 용적식 유압실린더를 마주보게 배치한 유압 프리 피스톤엔진의 개발이 진행되고 있다. 이것은 내연기관의 왕복운동 에너지를 직접 유압에너지로 변환하는 혁신적인 에너지 변환기이다. 나아가 원동기의 운전 상태를 유압펌프와 부하 축의 구동상태에 맞추어 최적의 작동점에서 운전하는 빈도를 증가시키는 것과 같은 에너지 관리가 중요한 내용이 된다.

다수의 유압시스템에서는, 실린더 등의 유압 액추에이터의 구동제어에, 집중화한 유압펌프와 밸브 제어구동방식을 채용하고 있다. 이것에 반해 최근 밸브 제어를 분산화한 용량제어로 바꾸는 시도가 보

고되어지고 있다. 오리피스에 의한 에너지 손실을 대폭 줄이는 에너지 저감의 구조라고 이야기할 수 있다. 그림 3에서 두 가지의 새로운 용량제어방식의 개념도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 가변용량 펌프/모터에서 유압실린더를 폐회로로 구동 제어하는 방식의 구성 예. Fig. 3(b)는 3개의 흡입 및 토출포트를 가진 유압트랜스포머라고 불리는 새로운 유압 요소와 방향절환밸브를 이용하여 유압실린더를 수동 제어하는 방식의 구성 예를 나타내고 있다. 어느 것이나 큰 에너지 절감을 실현할 수 있는 가능성이 있어, 이후 실용화가 기대되어진다.

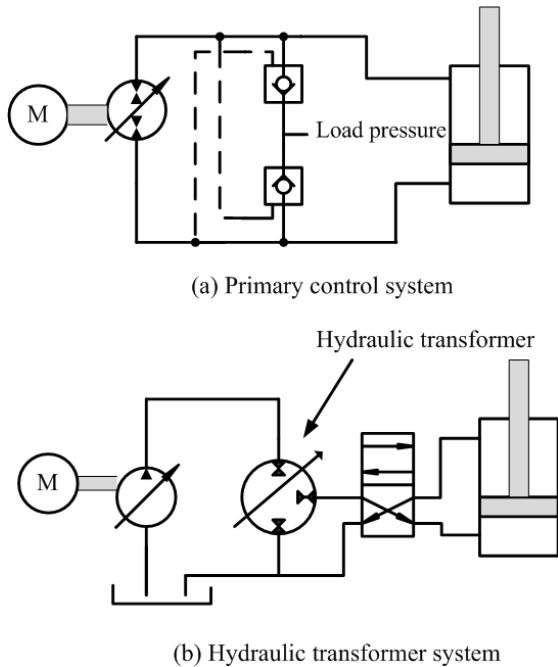


그림 5 새로운 용량제어방식의 사례

3.2 하이브리드 기술

종래의 유압시스템의 에너지 절감 기술에서는 부하측의 소비에너지와 구동상태에 맞춘 유압원의 가변용량형 유압펌프를 구동하는 로드센싱형 시스템이 일반적이었다. 그러나, 최근에는 유압펌프를 구동하는 원동기의 회전수와 토크를 제어하는 하이브리드 기술이 주류가 되고 있다⁴⁾. 이것은 전기구동과 유압구동의 이점을 융합시켜 고성능화와 에너지 절감의 두 목적을 달성하고자 하는 발표당시에는 혁신적인 기술이었으나, 현재는 전기모터 제어기술의 진보에 의해, 실제의 제품으로서 확립된 하이브리드 유압시스템의 사례가 되고 있다.

그리고 일본에서는, CO₂배출저감효과가 큰 저탄소형 건설기계의 보급의 촉진을 위하여, 2010년 4월

부터 저탄소형 건설기계의 인정을 개시하고 있다. 2011년 8월 현재에 5개사 13기종이 인정을 받고 있다. 인정을 받은 기종 모두, 건설기계의 선회와 주행 등의 일부의 기능을 전기구동으로 바꾸는 하이브리드 건설기계이다⁵⁾.

한편, 환경대응 자동차로 대표되어지고 있는 하이브리드 차량이란, 엔진과 그 엔진을 보조하는 전동기와 배터리를 병렬로 조합하여, 에너지의 회생을 수행하는 시스템을 지칭한다. 그러나 대형 버스의 유압식에너지 회생시스템의 사례와 해외에서는 유압식 하이브리드 자동차의 연구개발 사례⁶⁾ 및 그 시스템을 사용하는 요소기기의 사례⁷⁾등이 보고되어지고 있다. 다음 절에서는 동력분할방식에 의한 유압하이브리드 자동차에 대해서 소개한다.

3.3 유압하이브리드 자동차

동력분할방식(Power Split방식)의 사고방식은 2007년 하이브리드 자동차로서 세계에서 최초로 시판되어진 일본의 T사의 전동 하이브리드 차량에 채택되어진 방식이다. 하이브리드 자동차는 이 외에 직렬식 하이브리드방식과 병렬식 하이브리드 방식이 있다¹⁰⁾.

그림 4에 유압식 동력분할하이브리드 자동차의 구성개념도와 통상 동력분할모드의 동력 흐름도를 나타내고 있다. 엔진에 직결된 위성치차의 캐리어 C에 대하여, 선기어(S)의 축에 감속기G를 매개로 유압펌프/모터 PM1이, 링기어R의 축이 유압펌프/모터2와 구동축이 접속되어, 엔진의 동력을 분할하고 있다.

선기어 S에 접속되어진 유압펌프/모터PM1의 회전방향이 링기어R에 접속된 유압펌프/모터PM2에 대해서 정회전 또는 역회전에서 동력의 분할모드가 다르다. Fig. 5에서는 역회전시 동력분할모드의 동력의 흐름을 나타내고 있다.

그림 5에 나타내고 있는 통상동력분할모드의 경우, 차속이 저속 주행시에 있어서, 링기어 R은 상대적으로 저속에서 회전하고, 선기어 S는 링기어와 같은 방향으로 정회전을 하게 된다. 따라서, PM1에서는 펌프로서 기능하고 있으며, PM2는 모터로서 기능한다.

엔진에서 발생한 축 토크 T_e 는 위성기어에서 분할되어, 최종적으로는 PM2를 매개로 축 토크 T_e 와 유압파워가 구동축에서 통합된다.

한편, 그림 5에 보이는 역동력분할 모드인 경우,

차속이 고속주행인 경우, 링 기어 R은 상대적으로 고속으로 회전하고, 선 기어 S는 역방향으로 회전한다.

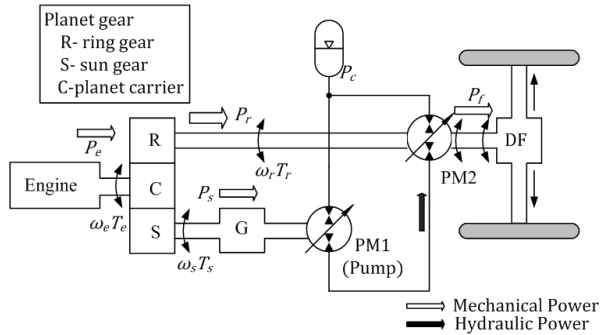


그림 6 유압식 하이브리드차의 구성과 동력분할모드

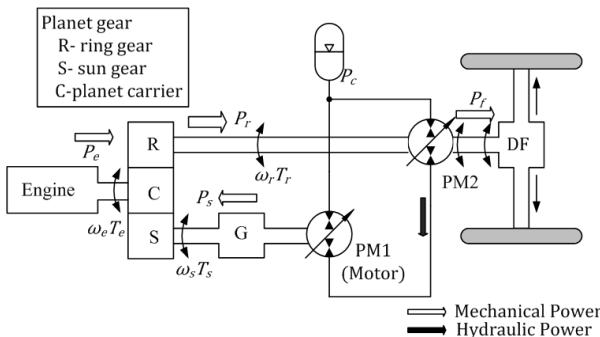


그림 7 유압식 하이브리드 차의 역동력분할모드

이 때, PM1은 모터로서 기능을 하고, 위성 기어를 매개로 링 기어의 구동토크 T_r 를 증대시킨다. 이 증대된 토크는 구동축 토크와 PM2가 펌프로서 기능하기 위한 구동 토크로 분할된다. 최초에 위성기어에서 토크가 통합되어, 최종적으로는 PM2에서 구동축의 축 토크와 유압파워로 분할된다.

이제 차량이 감속할 때와 어큐물레이터에 파워를 회수할 때, 또는 충분히 구동하는 파워가 어큐물레이터에 축적되어 있을 때, 엔진은 정지하고 있다. 이와 같은 운전모드의 절환은 복잡하여, 시스템의 모델화와 상세한 시뮬레이션이 필요하게 된다.

CCEFP의 연구그룹의 보고에서, 유압펌프/모터의 효율이 향상되면, 유압식 파워분할 하이브리드 형식은 전기식 파워분할 하이브리드 방식에 비하여 보다 우수한 에너지 절감을 이룰 수 있다고 보고되고 있다⁸⁾. 또한 유압식의 경우가 전기식에 비교해서 파워밀도가 높다는 점에서 시동 시에 가속성이 뛰어나다고 할 수 있다.

이상과 같이, 에너지 절감의 관점에서 유압시스템

의 하이브리드화는 한층 발전될 것으로 기대되어지며, 요소기기의 효율의 향상과 새로운 원리에 의한 고효율에서 혁신적인 유압요소의 개발이 이후 핵심 요소기술이 되리라 생각된다.

3.4 건설중장비 에너지 절약 기술

대표적인 건설중장비인 굴삭기의 에너지 절감을 위하여 다양한 에너지 절약기술이 제안되어 왔다. 굴삭기의 선회 제동 시와 붐 실린더 하강 시에 버려지는 에너지를 유효하게 회수하는 방법에 대한 다양한 연구 및 제품이 개발되어 있다.

그림 6은 렉스로스의 유압 플라이휠(Hydraulic Flywheel, HFW)이라는 제품으로 단순히 기존의 굴삭기 유압시스템에 본 제품을 부가함으로써 그 기능을 발휘할 수 있다. 본 HFW는 제동에너지를 회생할 수 있으며, 최적의 작동점에서 엔진이 작동하는 데 도움을 준다. 여기서 피스톤 펌프의 역할은 에너지 충전 또는 회생 시에 구동축의 토크를 일정하게 유지하도록 피스톤 펌프의 유량을 정역으로 제어하는 역할을 한다. 이로서 연비 저감 및 장비의 효율을 상승시키는 효과를 가진다¹¹⁾.

그림 7은 Parker사의 에너지 회생시스템의 개략도이다. 작동원리는 작업장치의 실린더로부터 유압 에너지를 이용하여 유압모터를 구동하고, 이 동력으로 펌프를 구동하여 어큐물레이터에 유압에너지를 충전하는 시스템이다. 충전된 유압에너지는 다음 사이클에 주 펌프유량을 보충하기 위하여 사용된다. 이 시스템을 채택 시, 펌프의 용적은 약 25% 가량 줄어들고, 소요되는 에너지는 약 30% 절감된다고 보고되고 있다¹²⁾.

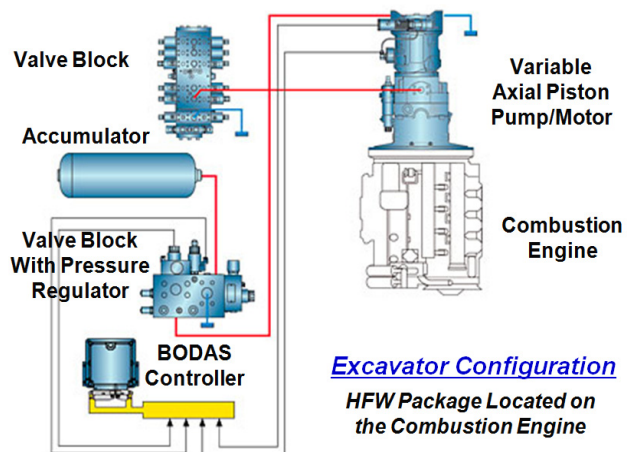


그림 8 Rexroth의 유압 플라이휠(Hydraulic Flywheel) 시스템

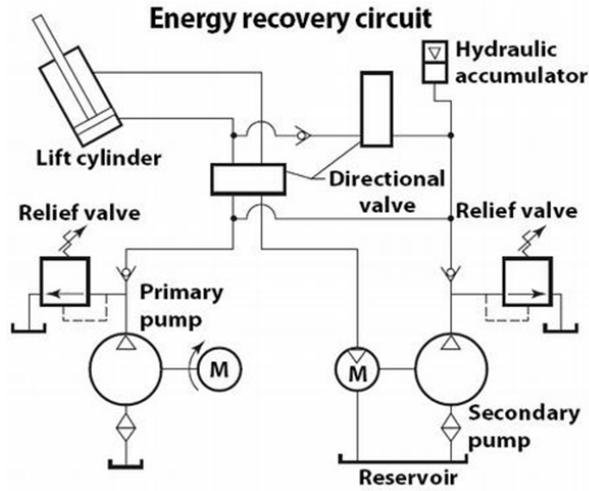


그림 9 Parker사의 에너지 회생시스템

한편 일본의 Kayaba사에서는 그림8과 같은 전기 유압 에너지 절약시스템을 제안, 붐과 스윙에너지 회생에 적용하고 있다¹³⁾.

본 시스템은 붐다운 및 선회를 위한 재생밸브, 주관로를 위한 보조 및 회생용 밸브, 배터리 및 인버터/컨버터를 포함하는 보조 펌프 및 회생용 모터 유닛으로 구성되어 있다. 필요시 선회 및 붐다운 동작으로부터 에너지 회생밸브를 통하여 직접 주관로에 유압을 공급할 수 있으며, 여유분의 유압 에너지는 보조 유압 모터 및 발전기를 통하여 배터리에 전기 에너지를 충전할 수 있다. 배터리에 충전된 전기 에너지는 필요시 전동기 및 유압펌프를 이용하여 주관로에 유압에너지를 추가로 공급할 수 있다. 본 시스템의 장점은 아래의 전기유압 에너지절약시스템이 고장이 난 경우에도 기존의 시스템이 그대로 작동한다는 점이다. 그리고 기존의 굴삭기 시스템에 별다른 변경이 없이 그대로 적용할 수 있다는 점이다. 본 시스템을 굴삭기의 표준 작업 모드에 적용한 결과, 약 30%의 에너지 절감효과가 있음을 확인하였다.

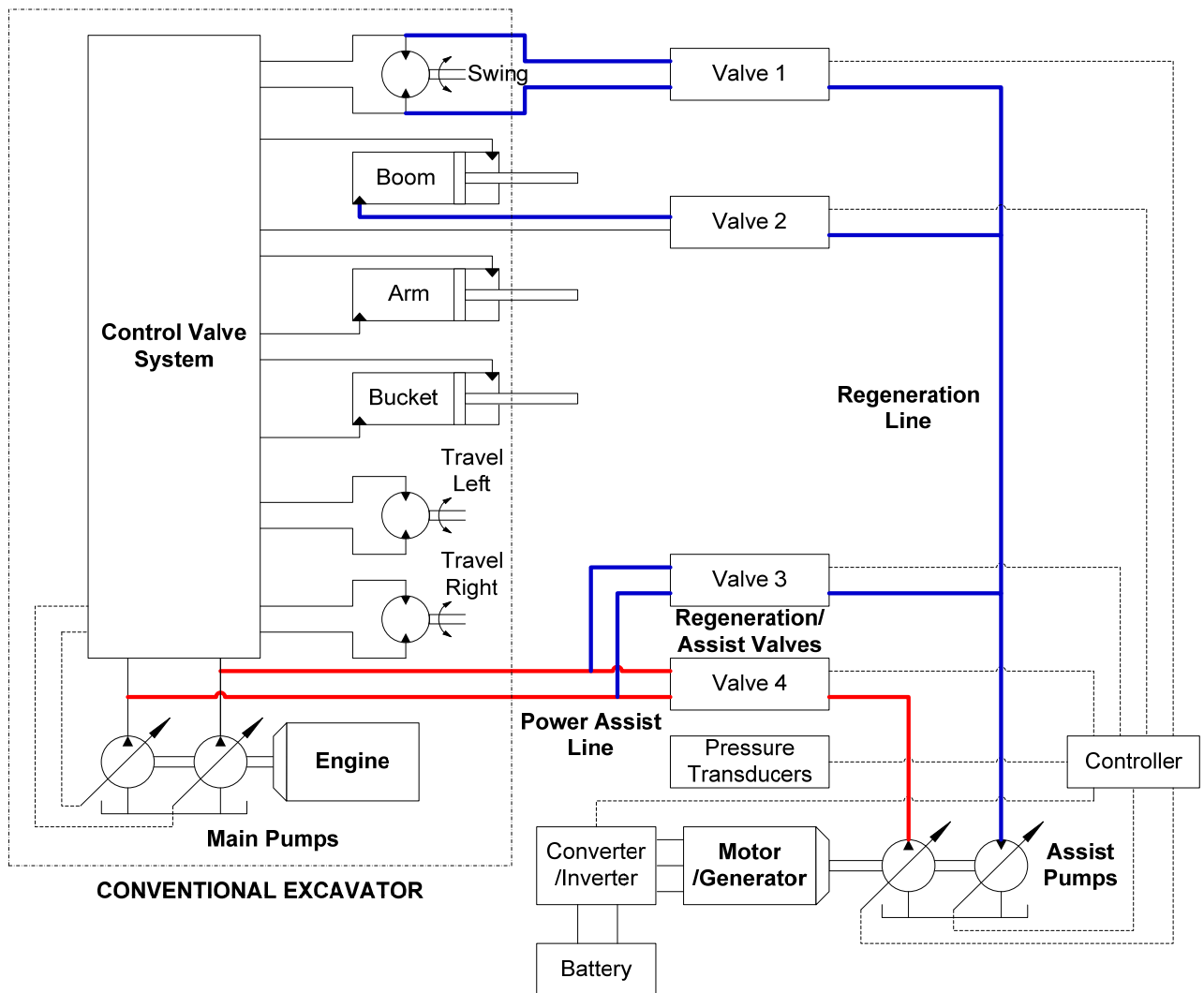


그림 10 Kayaba의 전기유압 에너지 절약시스템

4. 에너지 절감을 위한 작동유

유압시스템의 동력의 전달매체로서 이용되고 있는 작동유에 대해서도, 에너지 절감을 위한 연구가 진행되고 있다. 작동유에 요구되어지는 성능은, 동력전달, 윤활, 환경적합성, 에너지 절감, 안정성, 난연성 등이 있다. 그 중에서 에너지 절감에 관한 바람직한 작동유의 특성은 다음과 같다.

(1) 유동저항의 저감(배관내부의 압력손실의 저감)

(2) 펌프의 용적효율의 저감(내부누유의 저감)

(3) 압축에너지 손실의 저감

이 중에서 이후, 고압화가 진전함에 따라 3번째의 압축에너지에 의한 손실을 차지하는 비율이 상대적으로 커지게 된다.

최근, 이 과제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서, 고강성 작동유의 개발사례가 보고되고 있다. 이 고강성유는 표준의 광물유(체적탄성계수: 1.4GPa)에 비해 약 40%이상 높은 20GPa의 체적탄성계수를 가지고 있으며, 압축에너지에 의한 손실을 30%이상 개선된다는 보고도 있다. 또한 압력응답이나 위치결정 응답도 빠르고, 온도상승이나 가스 용해성이 낮고, 펌프 용적효율이 높다는 특징도 있다.

한편, 유압작동유 중에는 대기압 하에서 수 %~10%정도의 공기가 용해되어, 고압 동작 시에는 캐비테이션에 의해, 용해된 공기가 배출되는 빈도가 높다. 작동유에 용해되어 존재하는 기포나 용해가스를 분리 제거하는 방법에 의해, 작동유의 동력전달 특성을 향상시키는 고성능 장치와 시스템의 연구개발사례도 보도되고 있다.

이상과 같이, 요소기구나 시스템의 기술개발과 병행하여, 동력전달매체의 고성능화와 혁신적인 기술개발에 있어서도 적극적으로 나아가갈 필요가 있다.

5. 결 론

유압시스템의 에너지 절감 기술의 동향과 전망에 대하여 최신기술개발의 사례 등을 포함하여 소개하였다. 유압의 특징을 최대한 활용하여 소형, 고효율, 고효율 그리고 에너지 절감 요소기기, 시스템 및 작동유의 개발은, 이후에도 끊임없이 발전시켜나가지 않으면 안 되는 주제이다. 미래를 향한 유압시스템의 에너지절약 기술의 진보된 기술혁신과 발전이 기대되어진다.

참고문헌

- 1) K. Rydberg, "Hydraulic Hybrids- the new generation of energy efficient drives," Proc. ISFP in Hangzhou China 2009, pp.899-905, 2009.
- 2) J. D. Van de Ven and J. A. McInnis, "Design and experimental results of a bench top flywheel accumulator for compact energy storage," Proc. 52nd National Conference on Fluid Power, pp.237-242, 2011.
- 3) G.Layayette, S. Gruettert, M. Gandrud, B. Laudenbach and D. Koenemann, "Integration of engine and hydraulic controls for best operation," Proc. 52nd National Conference on Fluid Power, 2011.
- 4) K. Takaku, H. Hirade, K. Oba, "Application of the ASR series AC servo motor driven hydraulic pump to injection molding machines, Proc. 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama, pp. 127-130, 2008.
- 5) M. Ochiai, S. Ryu, "Hybrid in construction machinery," Proc. 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama, pp. 41-44, 2008.
- 6) P. Achten, G. Vael, M. I. Sokar and T. Kohmascher, "Design and fuel economy of a series hydraulic hybrid vehicle, Proc. 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp.47-52, 2008.
- 7) M. Cross and M. Ivantysynova, "Practical considerations for pump/motor selection in hybrid hydraulic vehicles," Proc. 52nd National Conference on Fluid Power, pp. 41-47, 2011.
- 8) F. Wang, M. I. Ramdan and K. Stelson, "Comparison between hydraulic hybrid and electric passenger vehicles using ADVISOR 2004," Proc. 52nd National Conference on Fluid Power, pp. 31-40, 2011.
- 9) T. Tsubouchi, H. Kamimura and J. Shinoda, "Development of oily buk modulus fluid," Proc. 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama, pp.329-334, 2008.
- 10) Y. Tanaka, "Review for energy saving of

hydraulic systems," Journal of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 43, No. 4, pp.201-205, 2012

- 11) http://www.boschrexroth.com/business_units/brm/en/products_and_solutions/functional_modules/hfw-system/index.jsp
- 12) <http://machinedesign.com/article/hydraulic-batteries-save-fuel-0306>
- 13) M. Usui, Meeting Materials for FY2011, Kayaba Corporation, May 17, 2012

[저 자 소 개]

안 경관(책임저자)

E-mail: kkahn@ulsan.ac.kr

Tel: 052-259-2282



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

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