

건설기계의 전기유압시스템 기술 현황

A Trend of Electro-Hydraulic System Technology for Construction Equipment

정은진 · 서보문 · 안경관

Eun Jin Jeong, Bo Moon Seo and Kyoung Kwan Ahn

1. 서론

전기-유압 시스템은 건설기계, 농기계 및 항공기와 같이 큰 동력이 요구되어지는 중장비 분야에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 유압 시스템을 사용하면 유압 라인을 통해 직선 및 회전식 액추에이터로 동력을 쉽게 전달할 수 있다. 한편 최근 고유가 등으로 인하여 건설 중장비의 에너지 절감 문제가 큰 이슈가 되고 있다. 건설기계에서 배출되는 NOx와 CO의 양도 상당하며 각 나라마다 배기가스 규제로 인하여 한층 에너지 절감을 위한 노력이 필요한 시점이다. 또한 건설기계 작동시 소비된 에너지 중 30%만이 유효하게 일을 하는데 사용되어지고, 반면 60%이상의 에너지는 동력 손실로 소모된다고 보고되어지고 있다¹⁾. 따라서 유압 시스템에서 유압부품의 효율 향상 및 건설기계에서 작업중 버려지는 에너지를 효과적으로 재사용함으로써 건설기계의 효율을 상당히 개선할 수 있다.

본 해설기사에서는 건설기계의 전기유압시스템 중 펌프 제어식 실린더의 최신 기술에 대하여 자세히 소개하고자 한다. 먼저, 펌프 제어 기술의 장점 및 다양한 실린더 제어 시스템을 소개하고, 펌프 제어에 의한 양로드 실린더 제어기술과 펌프 제어에 의한 편로드 실린더 제어기술을 설명한다.

끝으로 펌프제어 기반 에너지 회생시스템 기술에 대하여 기술하도록 한다.

2. 유압 실린더 제어 시스템의 진화

유압 실린더 제어 시스템은 제어 방식에 따라 밸브 제어 시스템과 펌프 제어 시스템으로 크게 분류할 수 있다. 밸브 제어 유압 시스템은 저렴한 비용과 간단한 구조로 기존의 장비에 널리 적용되어 왔다. 그러나 이것은 막대한 에너지 손실, 즉 제어밸브에서의 압력 손실이라는 단점이 있다^{4,5)}. 유압 시스템의 에너지 분석 연구에서 밸브에서의 압력

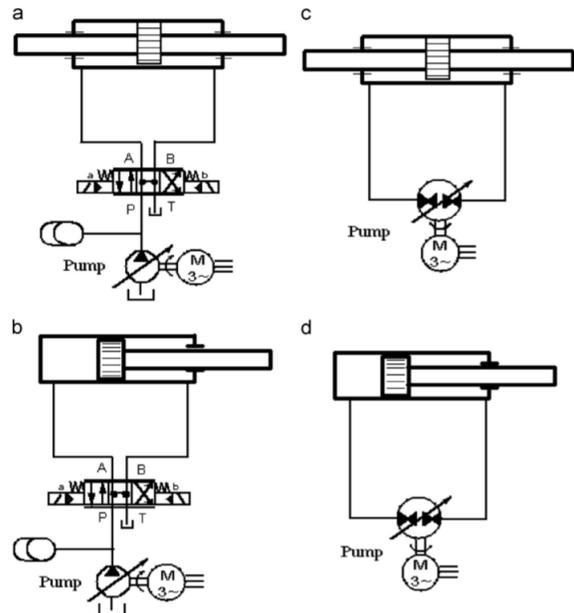


Fig. 1 Basic schemes of open circuits (a and b) and closed circuits (c and d)

손실로 인한 에너지 손실은 입력 에너지 중 35%가 손실된다고는 것을 보여주었다. 그러한 에너지 효율 저하는 높은 엔진 출력으로 이어지고 장비 작동 중에 많은 양의 열을 발생시킨다. 그리고 과열은 또한 기계의 고장 원인이 된다. 시스템의 온도를 낮추려면 추가 냉각 시스템이 필요하고 그에 따른 장비의 설치비용과 출력 또한 증가시킨다. 그리고 밸브 제어 시스템은 개회로로 일반적으로 많은 양의 작동유가 필요하다. 그래서 시스템의 비용을 증가시키고 오일을 처리할 때 오염 문제를 일으킨다. 로드 센싱 기술의 개발이 제어밸브의 스로틀 손실을 효과적으로 감소시키지만, 이러한 손실 제거하는 것은 불가능하다.

다른 유형의 유압 시스템은 펌프 제어 시스템이다. 이 시스템은 그림 1 (a)와 (b)의 개회로와 그림 1 (c)와 (d)의 폐회로로 크게 두 가지 유형으로 분류된다. 개회로 펌프 제어 시스템에서 제어 밸브는 여전

히 실린더 챔버의 작동유의 흐름 방향을 제어하는데 중요한 역할을 하므로 시스템의 에너지 효율은 밸브의 효율에 직접적인 영향을 받는다. 일부 구조는 여전히 주 동력 라인에서 밸브 압력손실이 발생된다. 그리고 제어 밸브의 압력 손실로 인하여 개회로 시스템의 에너지 효율이 저하된다.

밸브 압력 손실을 제거하고 전체적으로 유압 시스템의 에너지 소비를 감소시키기 위해, 직접적인 펌프 제어 시스템이 제안되었다. 그림 1 (c)와 (d)에서 볼 수 있듯이, 밸브 제어 시스템과는 다른 펌프 제어 실린더 시스템은 실린더의 두 챔버가 펌프에 연결된 폐회로로 구성된다. 이 시스템의 주요 전원 공급원은 일반적으로 전동기이다. 밸브 제어 시스템 및 개회로 펌프 제어 시스템과 비교할 때, 제어 밸브를 필요로 하지 않는 폐회로 펌프 제어 시스템은 주요 동력 라인에서의 오리피스에 의한 압력손실이 없으므로, 에너지 효율이 상당히 높다. 그리고 이 펌프 제어 시스템을 이용하게 되면, 버려지는 운동 에너지 및 위치 에너지를 효율적으로 회생할 수 있는 시스템을 쉽게 구축할 수 있다. 따라서 설치된 엔진 출력, 전반적인 장비 에너지 소비, 생성된 열이 크게 감소된다. 기존 연구로부터 두 종류의 유압 시스템의 에너지 효율 비교를 통해 펌프 제어 시스템을 사용하여 에너지 효율을 40 % 이상 향상시킬 수 있음을 보여주었다. 따라서 펌프 제어 시스템은 저소음, 고효율, 오염이 적은 유압 시스템을 구현하는 데 더 나은 해결책이라고 이야기할 수 있으며 그 핵심은 전자-유압 제어 기술이라고 이야기 할 수 있다.

실린더의 유형에 따라 기술은 그림 1(c)에서 보여주는 펌프 제어 양로드 실린더와 그림 1(d)의 편로드 실린더의 두 종류로 분류된다. 다음 절에서는 두 시스템에 대하여 자세히 소개하고자 한다.

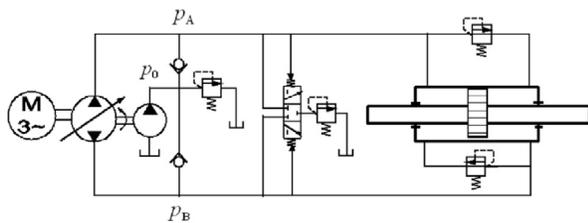


Fig. 2 Pump controlled double rods cylinder

3. 펌프 제어식 양 로드 실린더

1973년과 1979년에 Hahmann과 Spockhoff는 유압

실린더를 제어하기 위하여 펌프 구동 전동기 제어에 대한 회로를 소개하고, 펌프 제어 실린더 시스템의 정적 및 동적 성능을 최초로 연구하였다^{8,9)}. 그 회로는 그림 2에 나와 있다.

이 유압 시스템은 작동유의 온도 상승을 막기 위하여 플러싱 밸브를 사용한다. 그리고 유압 실린더의 하나의 챔버만이 가압된다. 그러나 시스템의 고유 진동수가 낮아 시스템의 동적 성능에 부정적인 영향을 가져온다.

1988년 Berbuer는 그림 3과 같이 일정한 압력 원과 오리피스로 구성된 새로운 실린더 프리로드 원리를 제안했다. 이 새로운 원리에 따라 실린더의 두 챔버 모두 유압으로 부하가 걸리며, 펌프 제어식 실린더 시스템의 고유 진동수와 부하 강성이 증가되어 이 시스템은 밸브 제어식 시스템과 유사한 특성을 갖게 된다¹⁰⁾. 하지만 이 회로에서는 작동유의 냉각을 위하여 하나의 펌프와 모터가 필요하다.

1990년 독일 회사 Parker Hannifin은 항공기 조작 시스템을 위한 새로운 펌프 제어식 양 로드 실린더 시스템 특허를 등록했다¹¹⁾. 서보 모터는 고정형 펌프를 구동하기 위해 사용되었다. 시스템의 구조는 그림 4와 같다. 이 시스템의 특징은 일정한 저압 오일 탱크나 저압 어큐뮬레이터에 의해 실린더의 두 챔버가 두 개의 체크 밸브를 통해서 부하가 걸린 것이다. 그리고 유압 펌프의 누유는 오일 탱크로 흘러간다. 실린더의 속도와 이동 방향은 서보 모터로 구동되는 고정형 펌프에 의해 제어된다. 1990년 독일 회사 Demag는 플라스틱 사출 성형 기계에 이 원리를 적용한 제어 방법을 특허로 등록했다¹²⁾.

독일 회사 Liebherr는 전자 제어식 비례 펌프를 기반으로 한 양로드 실린더용 페루프 제어기를 제안했고 이 기술을 항공기 제어 시스템에 적용했다¹³⁾. 그 회로는 그림 4에 도시된 회로와 동일하다.

그러나 고정 용적 펌프는 비례 펌프로 대체되며, 실린더가 위치하면 발열문제를 해결하기 위하여 소형 펌프가 추가된다. Kazmeier는 항공기 적용을 위한 양로드 실린더 시스템을 연구했다. 그는 연구를 통해 고정용량형 펌프 제어 시스템과 비례 펌프 제어 시스템을 모두 분석하였다. 그리고 퍼지 로직 기반 제어 방법은 시스템의 정적 및 동적 성능을 향상시키기 위해 제안되었다. 이 시스템은 A340 에어버스에서 구현되었으며 기존의 강철 파이프는 새로운 Power-by-Wire 액추에이터 시스템으로 대체되어 비행기 무게를 약 700kg 줄였다. 그리고 비행기의 안전과 신뢰성도 또한 향상되었다¹⁴⁾. Habibi와

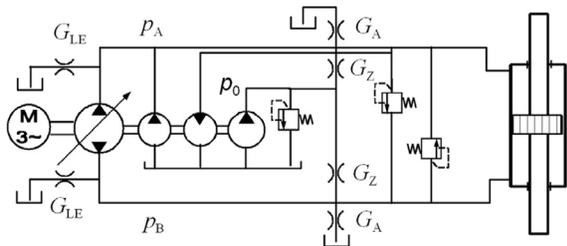


Fig. 3 Pump controlled double rods cylinder circuit with two chambers preloaded

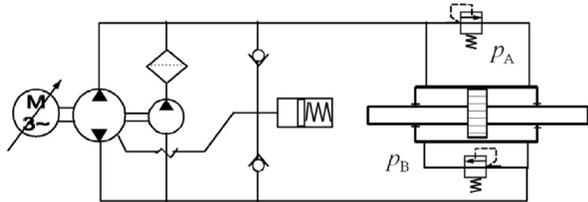


Fig. 4 Speed variable pump controlled double rods cylinder circuit

Goldenberg는 펌프 제어 대칭 선형 액추에이터의 원리를 제안했다¹⁵⁾. 이 액추에이터는 일반적인 양로드 실린더는 아니지만 양로드 실린더에도 적용가능하다. 이러한 펌프로 제어되는 이중로드 실린더 또한 비행 제어 장치에 적용되었다¹⁶⁻¹⁷⁾. Kang은 펌프 제어 양로드 실린더 시스템을 기반으로 한 비행 제어 시스템을 위한 유압 마력제어방식을 제안했다. 시스템의 강성과 에너지 효율을 향상시키기 위해 유압 잠금 장치가 도입되었다.

4. 펌프 제어에 의한 편로드 실린더 제어

설치 공간 및 출력에 대한 요구 사항 때문에 전기 유압 제어 시스템의 최소 80%가 편 로드 실린더를 액추에이터로 사용하고 있다. 양 로드 실린더와 달리, 두 챔버의 단면은 동일하지 않다. 따라서 두 챔버의 유동이 서로 다르므로 실린더의 두 포트에 비대칭 유량이 발생한다. 밸브 제어 시스템이나 개회로와는 달리, 비대칭적인 흐름은 직접적인 펌프 제어 편로드 실린더 시스템의 폐루프에서 순환한다. 비대칭 유량이 보상 되지 않는다면 피스톤 위치 제어의 부정확도 및 제어 성능 저하와 같은 몇 가지 문제를 야기한다. 또한 에너지 효율 역시 저하된다. 따라서 차동 실린더 시스템에서의 비대칭 유동의 보상 방법 및 그 응용 과 에너지 효율 개선에 초점을 맞추어 연구가 진행되었다. 이 섹션에서는 비대칭 펌프로 제어되는 시스템 및 기존 펌프로 제어되는 시스템 두 가지 유형의 시스템을 소개한다.

4.1 기존 펌프 제어 편로드 실린더 시스템

1994년 독일의 IFAS RWTH에 Lodewyks. R은 차동 실린더의 비대칭 흐름을 보상하기 위해 유압변압기 또는 2 개의 동축 구동 비례 펌프를 사용하는 회로 원리를 제시했다. 그림 5와 6이 그 회로이다. Rexroth의 Feuser는 고정 챔버 압력 부하 원리를 채택하여 회로의 정적 및 동적 성능을 연구했다.

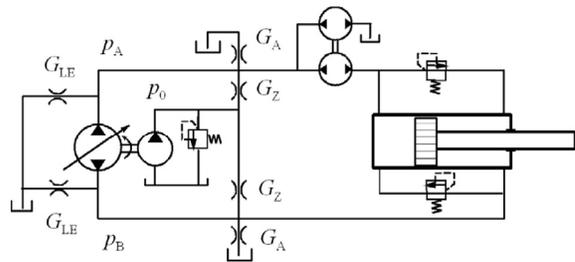


Fig. 5 Pump controlled differential cylinder circuit compensated with hydraulic transformer

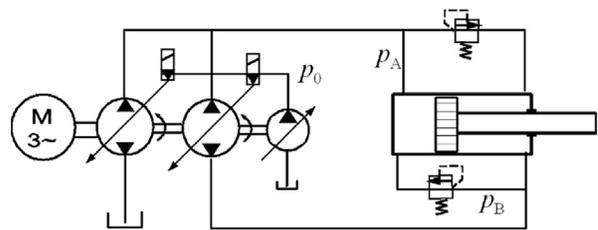


Fig. 6 Differential cylinder circuit controlled by two proportional pumps

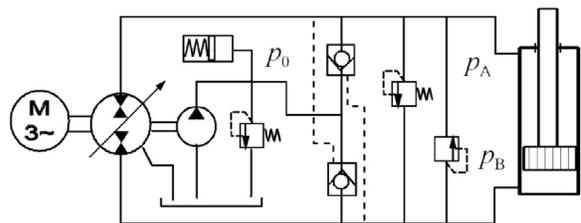


Fig. 7 Pump controlled differential cylinder with check valve balancing the flow

1998년 Ivantysynova는 건설 기계에 직접적인 펌프 제어 기술을 적용했다. 그리고 그들의 연구는 밸브 제어 시스템과 비교하여 펌프 제어 기술을 사용하면 회로를 단순화하고 무게를 줄이며 기능과 에너지 효율을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 제어 프로세스를 더 쉽게 만들 수 있다는 것을 밝혀냈다. 본 연구는 펌프 제어 기술에 대한 밝은 전망을 보여주었다¹⁹⁾.

다른 연구에서는, 일본 회사 Yuken과 Nachi가 그림 7에 나와 있는 회로의 원리를 패키지의 형태로

개발하여 실용화했다. 이 제품은 6 자유도 모션 시뮬레이터 및 기타 분야에서 사용되었다. 유사한 시스템이 미국 회사인 Vickers에 의해 제안되기도 했다. 그들은 AC 서보 모터를 사용하여 고정 용적 펌프를 구동하고 유압 제어 체크 밸브를 사용하여 유량 균형을 조정하는 차동 실린더의 폐루프 컨트롤 특허를 등록했다. 이 기술은 후에 플라스틱 사출 성형 기계에서 사용되었다²²⁾.

최근의 연구 결과로는 PMSM이나 SRM²⁵⁾과 같은 서보 모터에 의해 직접 구동되는 폐쇄형 펌프 제어 시스템은 넓은 속도 범위, 높은 정확도, 높은 에너지 효율, 높은 출력 밀도 등과 같은 많은 장점을 가지고 있음이 입증되었다²⁶⁾. Helduser는 처음으로 기어 펌프 및 사출 성형 기계용 가변 속도 AC 서보 모터에 의해 구동되는 유압 펌프 제어 시스템을 제안했다.

4.2 비대칭 펌프 제어 편로드 실린더 시스템

펌프 제어식 편로드 실린더 시스템은 많은 분야에서 에너지 효율이 입증되었지만 기존의 방법에는 여전히 한계가 있다.

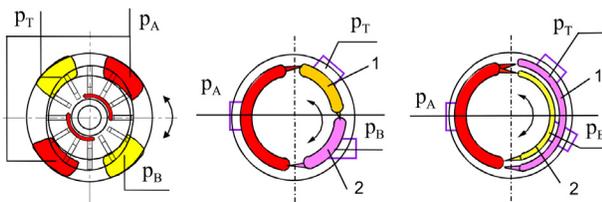


Fig. 8 Basic principle of asymmetric pump

Quan과 그의 그룹은 베인 펌프와 피스톤 펌프의 구조를 연구했다. 그들의 연구에서 3개의 새로운 펌프가 설계되고 제작되었다. 이 펌프들의 구조는 그림 8에 나타나있다. 복동 베인 펌프에 4개의 포트가 있다는 사실에 따라 그림 8(a)의 비대칭 유량 보상 시스템 원리가 제안되었다. 원래의 압력 포트를 피스톤 챔버에 연결하면 원래의 흡입 포트가 2개의 독립적인 포트가 분리된다. 하나는 실린더의 링 챔버에 연결되고 다른 하나는 오일 탱크와 연결된다. 기본적으로 포트와 차동 실린더의 면적 비를 보정한 다음, 베인의 스트로크를 조절하여 유량을 균형 있게 조정할 수 있다. 이러한 원리에 기초하여, 피스톤 펌프는 그림 8(b) 및 (c)에 도시된 바와 같이 변형될 수 있다. 두 개의 원래 흡입 포트 중 하나는 두 개의 포트가 분할된다. 포트 P_A 는 피스톤

챔버와 연결된다. P_B 는 링 챔버와 연결된다. 포트 1과 포트 2 사이의 길이 비율을 조절함으로써 기본적으로 유량이 균형을 이룬다. 새로운 펌프의 비대칭 구조로 인해 비대칭 펌프 또는 3 포트 펌프로 지칭된다. 이 새로운 펌프를 사용하면 실린더 제어 시스템에 차동 실린더의 비대칭 흐름을 보상하기 위한 보조 밸브가 더 이상 필요하지 않다. 또한, 실린더의 운동에서 발생할 수 있다. 더 나아가서 PMSM 구동 비대칭 펌프 제어 실린더 시스템에서 연구되었다. 이 제안된 시스템은 그림 9에서 볼 수 있다. 또한 그림 10과 같이 4 사분면에서와 같이 작동할 수 있다. 피스톤의 힘 방향과 피스톤 속도의 방향에 따라 축압기의 충전과 방전이 제어된다. 따라서 하나의 펌프로 구동 및 에너지 회생을 동시에 수행할 수 있다.

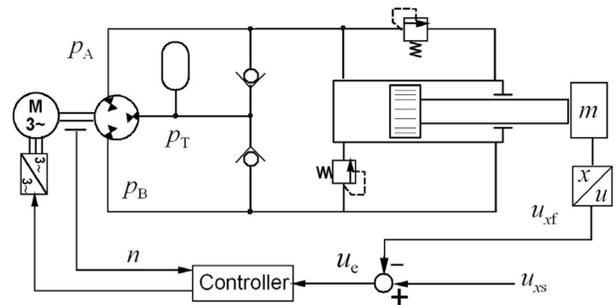


Fig. 9 Circuit of the PMSM driven asymmetric pump controlled cylinder system

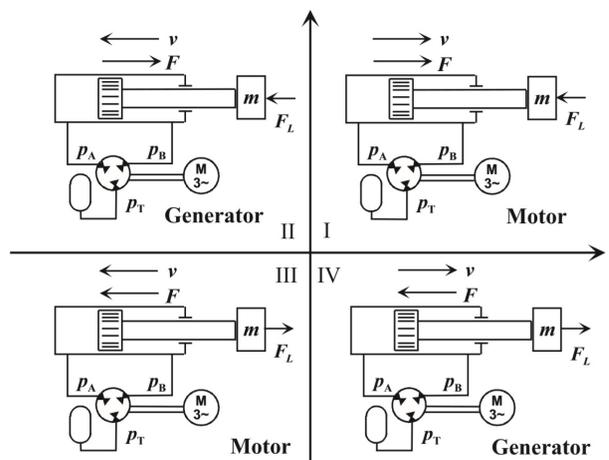


Fig. 10 Four-quadrant operation of the asymmetric pump controlled circuit

5. 펌프 제어에 의한 실린더 구동시스템의 에너지 회생 시스템 체계

펌프 제어 시스템의 가장 중요한 장점 중 하나는

에너지 회생이 적용 가능하다는 것입니다. 해당 에너지의 종류에 따라 에너지 회생 기술은 크게 운동 에너지 회생 시스템과 위치 에너지 회생 시스템의 두 가지로 분류 할 수 있다. 운동 에너지는 일반적으로 주행 시스템 또는 선회 시스템의 회생 제동 운전에서 발생합니다. 펌프 제어 실린더 시스템이 굴착기의 붐 및 암, 로더의 버킷 및 짧은 거리의 크레인 및 지게차와 같이 폭넓게 적용되는 리프팅 시스템의 하강 작업에서 위치 에너지가 발생한다. 기존의 밸브 제어식 실린더 시스템에서는 이러한 시스템의 하강 작동에서 발생하는 위치 에너지가 메인 스톱 밸브에서 대부분 열로 변환되어 많은 양의 에너지를 낭비한다. 펌프로 제어되는 실린더 구조에 기초하여, 이러한 에너지는 유압식 저장 방식 또는 전기 저장 방식으로 회수되고 재사용 될 수 있습니다. 개방형 펌프 제어식 실린더 회로를 기반으로 많은 에너지 회생 시스템이 제안되었다.

그러나 폐회로를 사용하여 제안 된 제품은 거의 없습니다. 그림 11을 보면 Liebherr에 의해 실행 가능한 회로가 제안되었는데, 두 개의 가변 펌프에 의해 제어되는 고출력 차동 실린더로 구성된 굴삭기 시스템이 연구되었다. 버킷과 스틱 실린더는 개방 루프로 제어되며 붐 실린더는 폐쇄 루프로 제어됩니다. 붐 하강에서 생성된 위치 에너지는 작동유의 보상 포트에 연결된 축압기에 저장되어 붐 드라이브와 제어 장치의 통합을 구현한다. 실차 테스트 결과에 따르면 제작된 시작품은 엔진 동력을 25% 줄였으며 붐 리프트 속도와 선회 가속도는 80% 증가하였다는 보고가 있다.

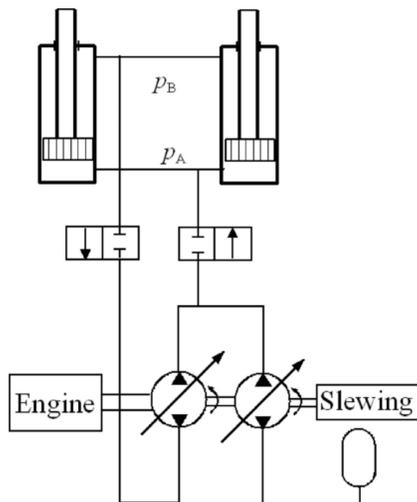


Fig. 11 Accumulator based energy recovery system for hydraulic excavator boom

6. 결 론

유압 시스템의 에너지 고효율 및 에너지 절감 기술이 점점 요구되어지고 있으며, 이를 구현하기 위해서 가급적 펌프 제어 시스템에 의한 유압시스템의 변화가 요구되어지고 있다.

펌프 제어 실린더 시스템은 가장 일반적인 펌프 제어 시스템으로 다양한 중량물 취급 작업 환경에서 적용되어 전체 장비의 연비에도 크게 영향을 미친다. 이 연구는 다양한 문헌에서 소개하는 펌프 제어 실린더 기술의 발전과 동향 상태 정보를 수집하고 요약하였다. 그리고 연구자들의 편의를 위해 다양한 유형의 유압 회로가 요약되어 있다. 이 기술은 여전히 한계와 도전에 직면해 있지만, 새로운 솔루션이 계속적으로 등장하고 있다. 에너지 효율과 작업 성능이 개선된다는 것은 새로운 전기 유압식 액추에이터 시스템인 direct pump controlled cylinder system이 그 핵심적인 역할을 수행하고 있다고 이야기할 수 있다. 본 해설 기사를 통하여 관련 연구자들에게 펌프 구동 유압 제어시스템의 다양한 회로에 대하여 이해하는 유익한 기회가 되기를 기대한다.

후 기

본 논문은 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원[KETEP]의 지원을 받아 수행하였습니다.[G032070311]

참고 문헌

- 1) J. Zimmerman, M. Pelosi, C. Williamson and M. Ivantysynova, "Energy consumption of an LS excavator hydraulic system", ASME international mechanical engineering congress and exposition, Seattle, WA, USA, pp. 117 - 126, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2007-42267>
- 2) D. Li, L. Yonggang and B. Jingwei, "An overview of hydraulic systems in wave energy application in China", Renewable Sustainable Energy Rev, Vol. 16, No. 7, pp. 4522-6, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.005>
- 3) L. Tianliang, W. Qingfeng, H. Baozan and G. Wen. "Development of hybrid powered hydraulic construction machinery", Autom Constr, Vol. 19, No. 1, pp. 11-9, 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.09.005>

- 4) J. Grabbel and M. Ivantysynova, "An investigation of swash plate control concepts for displacement controlled actuators", *Int J Fluid Power*, Vol. 6, No. 2, pp. 19-36, 2005.
- 5) The center for compact and efficient fluid power [Online]. Available at: <www.ccefp.org>, 2009.
- 6) M. Glauss, "Hydraulic pump control with industrial drive and integrated digital on-board electronics", *O+P*, Vol. 44, No. 9, pp. 552-6, 2000.
- 7) Bosch AG., "Electro-hydraulic adjustment of radial piston pump for the direct integration of the control circuit", *O+P*, Vol. 33, No. 11-12, pp. 819-21, 1995.
- 8) W. Hahmann, "The dynamic behavior of hydrostatic drives with servo pump and its use in control circuits", Doctor dissertation, RWTH Aachen, Germany, 1973.
- 9) V. Sprockhoff, "Reserach on the system performance of servo pump controlled cylinder. Doctor dissertation", RWTH Aachen, Germany, 1979.
- 10) J. Berbuer, "Servo drives with primary displacement control", Doctor dissertation, RWTH Aachen, Germany, 1988.
- 11) P. Hannifin, "An electro-hydraulic actuator", Euro Patent, 0395420A2, 1990.
- 12) Demag Inc., "An injection molding machine with hydraulic system", German Patent, 3919823A1, 1990.
- 13) Liebherr-Aero., "An electro-hydraulic actuator", Euro Patent, 0271744B1, 1992.
- 14) B. Kazmeier, "Optimization of energy consumption of an electro-hydraulic linear actuator with small capacity variable speed electric motor and variable pump", Doctor dissertation, TUHH, Germany, 1998.
- 15) S. Habibi and A. Goldenberg, "Design of a new high-performance electrohydraulic actuator", *IEEE/ASME Trans Mechatron*, Vol. 5, No. 2, pp. 158-64, 2000.
- 16) J. Fu, W. Zhanlin and G. Bo, "Design and analysis of novel airborne integrated electro-hydrostatic actuator", *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, Vol. 29, No. 12, pp. 1101-4, 2003.
- 17) J. Li, Y. Fu, Z. Wang and G. Zhang, "Research on fast response and high accuracy control of an airborne electro hydrostatic actuation system", *Proceedings 2004 international conference on intelligent mechatronics and automation*, pp. 428 - 432, 2004.
- 18) A. Feuser, J. Dantlgraber and D. Spath, "Servo pump drives for differential cylinder", *O+P*, Vol. 39, No. 7, pp. 540-4, 1995.
- 19) M. Ivantysynova, "The swash plate machine for displacement control unit with great development potentiality", First IFK, Aachen, Germany, 1998.
- 20) G. Jorg and M. Ivantysynova, "Model adaptation for robust control design of hydraulic joint servo actuators", Fourth ISFP, Wuhan, China, pp. 16 - 24, 2003.
- 21) R. Rahmfeld and M. Ivantysynova, "Linear actuator with differential cylinder in displacement control for the use in mobile machinery", 17th ICHP, Ostrvav, Czech Republic, pp. 129 - 137, 2001.
- 22) VickersINC, "Electro-hydraulic system and apparatus with bidirectional electric motor hydraulic unit", World Patent, 98/11358, 1998.
- 23) J. Jiang, "Direct drive variable speed electro-hydraulic servo system to position control of a ship Rudder", Fourth IFK, Dresden, Germany, pp. 103 - 114, 2004.
- 24) L. Wang, W. Book and J. Huggins, "A hydraulic circuit for single rod cylinders", *J Dyn Syst Meas Contr*, Vol. 134, No. 1, pp. 1-11, 2012.
- 25) S. Wei, S. Zhao, J. Zheng and Y. Zhang, "Self-tuning dead-zone compensation fuzzy logic controller for a switched reluctance motor direct drive hydraulic press", *Proc Inst Mech Eng, Part I: J Syst Control Eng*, Vol. 223, No. 5, pp. 647-56, 2009.
- 26) S. Helduser, "Electric-hydrostatic drive – an innovative energy-saving power and motion control system", *Proc. Inst Mech Eng, Part I: J Syst Control Eng*, Vol. 213, No. 5, pp. 427-39, 1999.
- 27) B. Johansson and K. Petter, "Object oriented and distributed modeling of a multidomain aircraft actuation system", Fifth ICFP, Hangzhou, China, pp. 344 - 349, 2001.
- 28) S. Cetinkunt, U. Pinsopon, C. Chen, A. Egelja and S. Anwar, "Positive flow control of closed center electrohydraulic implement by wire systems for

mobile equipment applications”, Mechatronics, Vol. 14, No. 4, pp. 403-20, 2004.

- 29) Ho, TH and K. K. Ahn, “Saving energy control of cylinder drive using hydraulic transformer combined with an assisted hydraulic circuit”, 2009 ICCAS-SICE, pp. 2115 - 2120, 2009.
- 30) Z. Quan, L. Quann and J. Zhan, “Review of energy efficient direct pump controlled cylinder electro-hydraulic technology”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 35, pp. 336-346, 2014.

[저자 소개]



정은진
 E-mail : dmswis8081@gmail.com
 Tel : 052-259-1501
 2018년 울산대학교 기계공학부 학사.
 현재 울산대학교 건설기계공학과 석사 과정.

[저자 소개]



서보문
 E-mail : tjqhans1994@hanmail.net
 Tel : 052-259-1501
 2018년 울산대학교 기계공학부 학사.
 현재 울산대학교 건설기계공학과 석사 과정.



안경관(책임저자)
 E-mail : kkahn@ulsan.ac.kr
 Tel: 052-259-2282
 1966년 12월 16일생.
 1990년 서울대학교 기계공학과 학사.
 1992년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1999년 동경공업대학 정밀기계시스템 박사. 1992년 삼성중공업 중장비사업본부 입사. 2000년~현재 울산대학교 기계자동차공학부 교수. 유공압시스템의 지능제어, 에너지 회생을 위한 유압시스템, 기능성 유체, 새로운 액추에이터 연구에 종사. 유공압건설기계학회 편집위원장, 산업기술평가원 평가위원, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 제어·로봇·시스템학회, IEEE, ASME, JSME, JFPS, SICE, 일본로봇학회 등의 정회원