

하이브리드 유압 건설 중장비 개발 동향 Trend of Development of Hybrid Powered Hydraulic Construction Machines

안 경 관
K. K. Ahn

1. 서론

지구의 온난화를 막고, 2011년 발효되는 강화된 CO₂배출에 대한 규제에 대응하기 위하여 건설 중장비 메이커들은 연비를 대폭 향상시킨 환경 친화적인 건설장비에 대한 연구개발에 박차를 가하고 있다. 기존의 건설 중장비 메이커들이 에너지 효율을 올리기 위하여 다방면으로 연구를 시도했지만, 여전히 낮은 효율과 배기가스의 문제를 해결하고 있지 못하고 있다. 따라서 연료소비량과 유해 배기가스를 더 한층 줄이기 위해서는 새로운 기술이 필요하게 되었다. 여기서 하이브리드 시스템은 건설 기계의 연비를 개선하는데 있어서 핵심기술이 되었고, 현재 건설 중장비 메이커들은 이 기술들을 채택하여 다방면으로 하이브리드 건설 중장비에 적용하고 있다. 이 해설 기사는 하이브리드 건설 중장비의 원리를 소개하고, 지금까지 개발되어온 하이브리드 건설 중장비의 개요와 향후의 건설 중장비의 하이브리드화의 방향에 대하여 소개하고자 한다.

2. 하이브리드 자동차와 하이브리드 건설중장비의 차이 분석

2.1 작동원리

건설 중장비에 적용될 하이브리드 기술은 차량에 적용되고 있는 하이브리드 기술과는 상당한 차이점이 있다¹⁾. Fig. 1은 유압굴삭기가 20초간 대표적인 작업 수행 시, 엔진의 출력 동력의 변화를 나타내고 있다. Fig. 1으로부터 출력동력이 빨리 그리고 주기적으로 변화하고 있음을 알 수 있다²⁾. 자동차와 비교를 해보면 부하 변화폭과 부하의 크기가 0kW에서 60kW정도로 차량의 부하 변동폭과 비교를 해보면 2~3배 커다는 것을 알 수 있다.

그리고 봄의 재생된 에너지를 Fig. 2에 나타내고 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 회생된 에너지가 상당히 크고 빈번하게 변동됨을 알 수 있다.

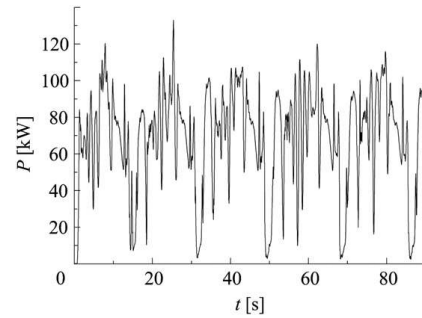


Fig. 1 Output power of the system of the 20-ton hydraulic excavator in digging working condition.

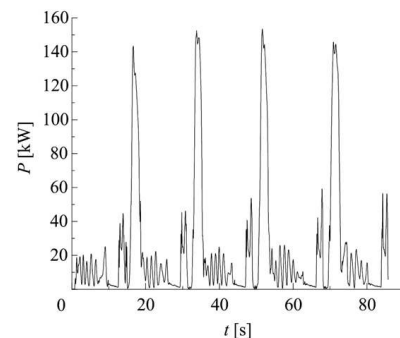


Fig. 2 Regenerative power of the boom of the 20-ton hydraulic excavator in digging working condition.

2.2 핵심 부품

건설중장비에 적용될 하이브리드 기술은 차량에 적용되는 기술과는 상당히 차이가 있다. 우선 건설 중장비의 작업시의 부하를 분석하여 보면 부하의 빈번하고 동적인 변동으로 인하여 엔진의 회전수를 효율이 좋은 영역에서 작동하기가 힘들다. 반면 차량은 상대적으로 안정적인 엔진의 회전속도에서 작동할 수 있다. 또한 에너지 충방전 시간에 있어서 차량은 분 단위의 시간으로 충방전이 이루어지지만, 이에 반해 건설중장비는 초단위로 에너지의 충방전이 이루어진다. 따라서 전력 충전시스템으로 빈번하게 에너지의 충방전이 가능한 커패시터가 적합하다

고 이야기 할 수 있다.

하이브리드 유압 건설중장비의 구동 시스템은 매우 좁은 공간에 엔진과 함께 전동기가 설치되어져야 한다. 따라서 여기에 적용되어지는 전동기는 소형, 경량이지만 고효율이 요구되어진다. 하이브리드 자동차인 경우, 전동기의 회전속도는 5000rpm이지만, 하이브리드 굴삭기의 경우, 정격출력에서 전동기의 회전속도가 감속기를 사용하지 않을 경우 2000rpm정도이다. 따라서 하이브리드 굴삭기에 사용되어지는 전동기의 중량대비 동력은 1 kW/kg 이상 도달하기 어렵다. 또한 하이브리드 굴삭기에서 사용되어지는 전동기는 엔진 동력의 부족분에 대하여 보충하여야 하나, Fig. 3에서 나타난 바와 같이 굴삭기의 특성상 엔진의 최고작동속도에서 전동기의 동력을 줄일 수 없다.

2.3 액추에이터

하이브리드 자동차는 단순히 모터는 구동바퀴를 회전시키는 역할을 담당하고 엔진의 동력의 대부분은 가속시 사용되어진다. 하이브리드 차량은 감속시에 주행시 차량의 관성에너지를 회생할 수 있으며, 따라서 적은 용량의 엔진을 사용할 수 있고 연료소비도 줄일 수 있다. 그러나 유압 굴삭기의 경우에는 6개의 작동기로 구성이 되고, 작업의 종류에 따라, 엔진의 전체 동력을 몇 개의 작동기가 동시에 나누어서 사용하거나, 또는 하나의 액추에이터에 집중적으로 동력을 공급할 필요가 있다. 이런 이유로 어떤 작동기가 더 많은 동력이 필요하고, 어떤 작동기가 회생 가능한 동력을 가지고 있으며, 엔진의 동력을 어떻게 소형화하는 가는 유압굴삭기의 하이브리드화하는데 있어서 상당히 어려운 문제이다³⁾.

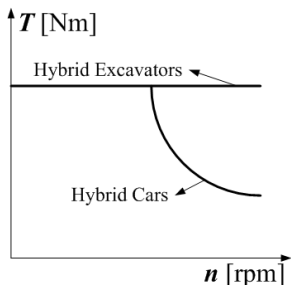


Fig. 3 Mechanical Characteristics of electric motor

2.4 신뢰성

건설기계는 다양한 환경에서도 작업을 수행할 수 있어야 한다. 그래서 그 부품은 자동차보다도 더 높

은 성능을 요구한다. 예를 들어, 자동차는 단지 약 5~7g의 진동을 견디면 되나, 건설중장비의 경우에는, 약 10g의 진동가속도를 견디어야 한다.

3. 하이브리드 파워시스템에 대한 연구

3.1 하이브리드 유압굴삭기의 구조

Zhang⁴⁾등은 하이브리드 건설기계에 관한 시뮬레이션 연구를 발표하였다. 그들은 다른 하이브리드 시스템(직렬, 병렬 및 직병렬 시스템)과 20톤 굴삭기에 바탕을 둔 다른 가능한 에너지 절감 방법을 비교하였다. 그 결과 하이브리드 시스템, 모터 에너지 회생 및 미터아웃 제어를 한 경우가 가장 좋은 에너지 효율(약 58%)을 나타냄을 알 수 있었다. 결론적으로 모터 에너지 회생의 실현은 현재로서는 어려운 일이다. 따라서 미래의 하이브리드 굴삭기 시스템의 전망은 병렬형 하이브리드 시스템, 개별 구동, 미터아웃 제어 및 유압모터 구동용 전동기의 조합으로 구성된다.

Wang⁵⁾등에 의한 연구에서, 소형 5톤급 굴삭기를 대상으로 파워트레인의 하이브리드화를 위한 최적화를 실시하였다. 이 연구에서는 유압굴삭기의 파워트레인의 하이브리드화의 성능을 분석하였으며, 이를 병렬형, 직렬형 및 기존의 굴삭기시스템과 비교하였다. 테이블 1로부터 병렬형 하이브리드 파워트레인 시스템이 중부하 및 경부하인 경우 더 높은 연료절감 효과가 있고, 반면에 그 중간의 부하에서는 직렬 및 병렬형 하이브리드 파워트레인 시스템이 더 좋은 연료절감 효과를 보였다. 성능과 코스트를 종합적으로 고려해보면, 병렬형 파워트레인이 현재의 하이브리드 굴삭기로서는 최적의 구성이라고 이야기 할 수 있다. 일본 와세다 대학의 Yoshiyuki⁶⁾ 등은 연비를 향상시키고, 배기가스 및 소음을 줄이기 위하여 직렬형 하이브리드 시스템에 관하여 연구를 수행하여 왔다. 펌프/모터 시스템이 붐, 암, 버킷을 각각 구동거나, 감속시와 붐 하강시에 에너지를 재생하기 위하여 사용되어졌다. 시험결과 기존 시스템에 비하여 약 35%의 에너지가 절감될 수 있음을 확인하였다. Etsujiro⁷⁾등은 연료소모량과 하이브리드 시스템의 최적 설계를 위하여 하이브리드 굴삭기의 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 구축한 모델은 컨버터와 같은 전력전자소자를 가진 하이브리드 파워트레인 시스템과 전기 유압에 의하여 구동되는 액추에이터 그리고 붐, 암, 버킷으로 구성되는 작업장치의 기구부를 포

함하고 있다. 이 논문에서는 전체 시스템의 방정식이 전력전자 시스템, 유압시스템 및 동역학 시스템의 연성을 고려하여 수립되어 있다.

Takao^{8~9)} 등은 하이브리드 굴삭기의 실제 작업을 고려하여 연료소모량을 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발했다. 여기서는 제안한 하이브리드굴삭기 모델은 전동기에 의하여 펌프를 구동하는 페루프 시스템으로 각각의 액추에이터에 대하여 제각기 유압펌프-전동기제어에 의하여 구동하도록 구성되어 있다. 시뮬레이션 결과 제안하는 하이브리드 굴삭기는 약 40%이상의 에너지 절감효과가 있음이 확인되었다. Kwon¹⁰⁾ 등은 슈퍼 커패시터를 장착한 하이브리드 굴삭기의 몇 가지 구조를 제안하였고, 이를 연비, 하이브리드에 따른 추가 비용 및 투자비 회수시기에 대하여 검토하였다. 이 검토에 따르면 혼합형(Compound) 하이브리드 구조의 경우가 투자대비 회수시기 및 신뢰성에 있어서 병렬형이나 직렬형에 비하여 더 나은 해결책임을 알 수 있다. 또한 이 논문에서는 엔진과 슈퍼 커패시터에 대한 전력제어 알고리즘을 제안하고 있다. 시뮬레이션 결과 하이브리드화에 의하여, 연료소모량이 기존 유압굴삭기에 비해 약 24% 줄어든다고 보고하고 있다.

표. 1 부하 및 하이브리드 구성에 따른 비교

System \ Load	Load Level		
	Heavy	Medium	Light
Conventional	100%	100%	100%
Parallel	70.5%	74.7%	79.3%
Series	71.7%	74.3%	84.3%

3.2 제어 전략

Qing Xiao¹¹⁾ 등은 유압 굴삭기에 사용되어진 하이브리드 시스템의 동적 제어 전략 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안된 알고리즘을 이용하여 엔진의 작동점을 동적으로 조절하여 시스템의 효율을 더욱 개선하였다. 또한 실험을 통하여 제안한 동적 동력 작동점 제어 알고리즘이 엔진의 작동 영역이 더 높은 효율에서 사용하도록 제어함과 동시에 커패시터의 SOC를 제한시켜 시스템의 효율을 개선시킴을 보이고 있다.

병렬형 유압 하이브리드 굴삭기의 시뮬레이션에서 Lin Xiao 등에 의하여 제안된 제어 알고리즘은 이른바 다중 일 작동점 동력제어 전략(multi work point dynamic control strategy)을 이용하고 있다¹²⁾. 본

제어 알고리즘에는 페루프 속도 PI제어와 직접 토크 제어를 동시에 수행한다. 비록 시뮬레이션 결과는 이 전략으로 구동되는 하이브리드 시스템이 동력 목표치를 만족하고 있으며, 더 낮은 시스템 안정성과 더 높은 연비를 달성하고 있지만, 이는 실제 굴삭기에는 적용할 수 없는 상태이다.

Masayuki^{13~14)} 등은 건설기계에서의 에너지 절감을 위하여 유압굴삭기의 하이브리드화에 초점을 맞추었다. 직렬형 하이브리드 굴삭기에 바탕을 둔 제어시스템을 구축하였고, 이 제어시스템은 DC전압제어, 동력분배제어, 엔진제어, 커패시터 전압제어 및 배터리 전압제어로 구성되어 있다. 동력전달장치의 벤치 시험장치가 설치되어져서 에너지 절감 효율을 위한 시험을 수행하였다.

4. 에너지 회생 시스템

유압굴삭기를 이용하여 작업시 중력 방향으로 작업장치가 움직이게 될 때, 이 중력위치에너지를 활용하게 된다면 에너지를 축적할 수가 있다. 예를 들어 굴삭기의 붐 하강시에는 중력에 의한 위치에너지를 에너지 저장원에 축적하여 두었다가, 다시 붐 상승시에 재사용하게 됨으로써 에너지 효율을 올릴 수 있다. 차량에 대한 많은 에너지 회생방법에 대해서는 최근 수년간 수많은 연구가 진행되어 왔다. 미국, 유럽 그리고 일본은 이와 관련된 프로젝트에 많은 연구비를 투입하였고, 많은 유용한 결과들이 활용되어지고 있으며, 이 중의 일부의 결과는 건설장비의 문제를 해결하는데 동일하게 활용되어 질 수 있다. 유압굴삭기 분야에서는 다음의 두 가지 에너지 회생방법이 있다.

- 배터리/커패시터 에너지 회생 시스템
- 유압 어큐뮬레이터 에너지 회생 시스템

4.1 유압 어큐뮬레이터 에너지 회생시스템

유압 어큐뮬레이터 에너지 회생시스템은 즉시 에너지원으로서 재사용하기 위하여 유압 작동유를 고압의 유압에너지로서 유압 어큐뮬레이터에 저장한다. 건설중장비에서 유압어큐뮬레이터를 이용하여 에너지를 축적을 하게 되면, 필요시 유압펌프/모터에서 바로 사용할 수 있다는 장점이 있다. Liang과 Virvalo^{15~16)}는 크레인 유압시스템에서 유압에너지를 저장하고 재사용할 수 있도록 밸런스 실린더에 유압 어큐뮬레이터를 연결한 에너지 회생 시스템에 관하

여 연구를 수행하였다. 여기서 밸런스 실린더는 실제로 작업을 하는 실린더와 함께 움직이는 별도의 실린더로, 크레인이 하강시에 어큐물레이터에 충전이 되고, 크레인과 부하의 위치에너지가 유압에너지의 형태로 저장이 되게 되고, 크레인이 상승을 하게 되면, 저장된 에너지는 재사용되게 된다. 이와 비슷한 시스템은 Nyman과 Rydberg¹⁷⁾에 의하여 연구되어졌다.

시스템의 효율을 개선시키는 한 가지 방법은 붐의 중력위치에너지를 이용하는 것이다¹⁸⁾. 이 아이디어는 유압 어큐물레이터에 붐 실린더의 하강 운동시에 위치에너지를 저장하고 다른 액추에이터 사용시 동시에 사용하는 것이다. Sun과 Virvalo¹⁹⁾는 붐 유압 시스템의 에너지 절감시스템에 관하여 연구를 하였다. 이 시스템의 주요 부분은 유압 어큐물레이터와 두개의 펌프/모터이다. 붐이 하강시, 다른 펌프/모터는 어큐물레이터를 충전시키는 역할을 한다. 어큐물레이터에 충전된 에너지는 붐을 상승시키는데 사용되어진다. 어큐물레이터에 충전된 압력이 부하를 들어 올리는데 충분하지 않다면, 추가적인 압력은 유압과워유닛으로부터 공급받게 되고, 반면 어큐물레이터는 일부의 동력만 공급하게 된다. 그 결과 전체 에너지 소모량은 에너지절감 장치가 없을 경우에 비하여 어큐물레이터-펌프-모터(APM) 시스템을 사용시 약 34%정도의 에너지 절감효과를 얻을 수 있다.

또한 유압 어큐물레이터 밸런싱 (Hydraulic Accumulator Balancing)²⁰⁾이라고 불리는 유사한 에너지 절감시스템이 발표되기도 하였다. Sun과 Virvalo는 제안한 회로에 대한 개량회로를 제안하였고 대상 시스템에 대하여 에너지 활용에 대하여 분석하였다.

비록 에너지 회생 응용은 산업계의 많은 분야에서 사용되고 있지만, 에너지 절감과 관련된 많은 발전은 모바일 머신에 대하여 적용되었고, 유압 굴삭기에 적용된 예는 그다지 많지 않다. Bruun²¹⁾는 유압 어큐물레이터에 바탕을 둔 Eco Mate[™]라는 에너지 절감 시스템을 발표하였고, 실제로 50톤급 굴삭기에 이를 장착하였다. 이 Eco Mate[™]시스템은 최근에 들어서 유압 붐제어 시스템에 있어서 에너지 회생을 위한 가장 성공적인 발명 중의 하나라고 이야기되고 있다^{22~23)}.

4.2 전기 배터리 에너지 회생시스템

배터리 기술은 하이브리드 차량에 적합한 전기적

인 에너지를 축적하는 상용화된 기술 중의 하나이다. 전기배터리 시스템에서 주요 문제는 건설중장비, 특별히 유압굴삭기와 같은 Off-Highway 차량에서 요구되어지는 큰 동력을 충전할 수 있는 배터리 기술이다. Nyman²⁴⁾등은 전기에 의해 구동되는 트럭에서 에너지 회생이 가능한 방법을 제시하였다. 그들은 유압펌프를 카운트 밸런스기능을 가진 유압모터로서 작동하도록 유압 펌프의 기능을 확대하였다. 부하를 하강시, 유압펌프는 전동기를 구동하게 되고, 이 때 전동기는 발전기로 작동하여 배터리를 충전하는데 사용하게 된다. 카운트 밸런스 기능은 유압 구동 실린더와 어큐물레이터에 적용된다. 카운트 밸런스 시스템은 리프팅 실린더의 부하를 보상하도록 설계된다. 시뮬레이션 결과로부터 카운트 밸런스 기능과 배터리 재충전 기술이 리프팅 에너지의 약 40~60% 절감할 수 있다. Anderson²⁵⁾ 등은 상기와 유사한 시스템에 대하여 검토하였다. 그들은 전기 모터와 배터리를 가진 메인 리프트에서의 에너지 회생에 집중하였다. 이 아이디어는 Nyman 등과 동일하다. 부하를 하강시킬 때, 배터리는 충전되고, 충전된 에너지는 나중에 트럭 구동시 및 리프팅 시 사용되어진다.

Anderson 등은 다른 시스템과 제어전략에 대하여 비교 분석하였다. 고려되는 가장 좋은 방법이 수립되었고, 에너지 효율이 계산되었으나, 제안된 시스템은 시스템의 응답이 진동적이어서 수명이 단축되는 문제점이 있었다.

유압굴삭기의 경우, Zhang²⁶⁾ 등은 유압모터의 회생에너지를 위한 에너지절감 방안에 관하여 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 각 액추에이터에 대하여 회생된 에너지의 비율과 에너지 절감효과에 대하여 계산하였다. 시뮬레이션 결과, 붐과 버킷의 에너지 회생은 다른 액추에이터들보다 더 중요하다는 점을 알 수 있었다. Lin²⁷⁾ 등은 에너지 회생시스템의 효율에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 유압 모터/발전기를 이용한 에너지 회생장치를 이용하여 배관의 길이를 제한시키고, 유도 모터의 시정수와 제어기 및 센서 신호의 지연을 줄임으로써 고 제어성능을 얻을 수 있었다.

5. 하이브리드 유압 건설기계

지난 5년간 유압 하이브리드 건설중장비를 개발하기 위하여 다양한 연구기관과 전 세계의 중장비 제

조업체들이 다수의 개발 프로젝트를 진행하였다. 대다수의 프로젝트들은 하이브리드 굴삭기와 하이브리드 휠로더를 대상으로 하고 있다. 대부분의 하이브리드 건설기계의 주요 사양은 Table 2에 주어진 것과 같다.

표 2 하이브리드 건설장비의 개요

제조사	하이브리드 방식	에너지 저장방법	Energy Saving
Komatsu	20 Ton Parallel Hybrid Excavator	Super Capacitor	25~41%
Hitachi	20 Ton Parallel Hybrid Excavator	Super Capacitor	25%
	Series Hybrid Wheel Loader	Battery	25~30%
Kobelco and NEDO	6 Ton Series Hybrid Excavator	Super Capacitor and Battery	More than 40%
VOLVO	Parallel Hybrid Wheel Loader	Battery	10%

5.1 Komatsu

2007년 5월, Komatsu는 세계최초로 전기식 포크리프트 트럭을 출시하였으며, 또한 하이브리드 굴삭기를 2008년 5월에 세계 최초로 생산하였다. 기존의 표준장비인 PC200-8유압 굴삭기 시리즈에 비해 약 25%~41%의 연비 절감 효과가 있음이 검증되었다. Fig. 4는 병렬형 하이브리드 시스템에 의하여 구동되는 Komatsu의 PC200-8하이브리드 굴삭기를 보여주고 있다. 표준형 굴삭기는 상부 프레임을 회전시키기 위하여 유압모터를 사용하나, Komatsu는 전기모터를 이용하여 상부 선회체를 회전시킨다. 전기모터는 굴삭기의 상부체가 감속시 에너지를 회생시키게 된다.

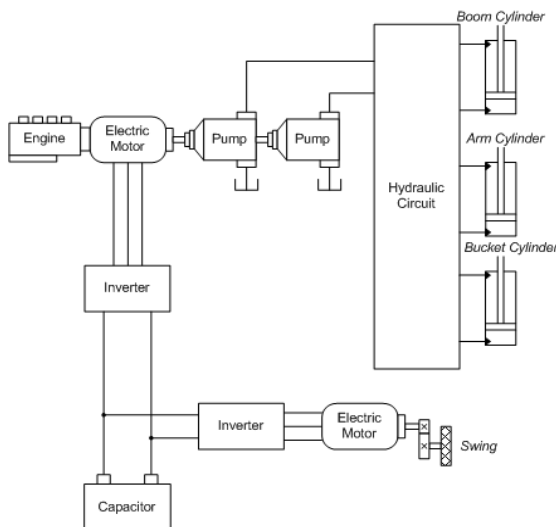


Fig. 4 System of PC200-8 hybrid excavator.

저장된 전기에너지는 상부선회체가 가속시 엔진을 보조하기 위하여 전기 모터를 이용하여 사용되게 된다. 그 결과, 엔진은 효율이 좋은 저속 회전영역에서 사용할 수 있다.

5.2 Hitachi

Hitachi에서의 하이브리드 기술의 발전을 보면, 2003년 세계 최초로 하이브리드 휠로더를 개발하였다³¹⁾. 그리고 20톤급 하이브리드 유압굴삭기를 2008년 5월에 개발하였다^{32~33)}. Fig. 5는 Hitachi건설기계에 의하여 개발된 하이브리드 유압 굴삭기의 시스템 개요를 나타내고 있다³⁴⁾. ZAXIS 200 하이브리드 굴삭기는 병렬식 하이브리드 시스템을 채택하고 있으며, 이 새로운 하이브리드 모델은 선회작업을 위하여 전기모터를 이용하고 있다. 선회 제동시의 관성 에너지와 붐 하강시의 중력 위치에너지는 전기에너지로 변환되어 커패시터에 저장되게 되고³⁾, 약 25%의 에너지 절감효과를 거두었다. 이 장비에서는, 엔진의 정격출력은 기존 표준장비와 동일하게 전체 작업 효율을 유지하기 위하여 줄이지 않았다.

Fig. 6은 하이브리드 휠 굴삭기의 시스템 개요를 나타내고 있다. 엔진은 유압 펌프와 발전기를 병렬로 구동하고, 펌프는 붐 및 암 등으로 구성된 작업 장치의 유압시스템에 유압을 공급하고, 발전기는 전동기를 구동하기 위한 전기에너지를 공급하게 된다. 작업장치 구동은 기존의 유압시스템을 그대로 채용하고 있으며 주행은 직렬형 하이브리드 시스템을 채용하고 있다. 휠로더의 전체 작업 중에서 주행이 차지하는 비율이 상당히 크기 때문에, 전력절감에 상당히 효과가 있음을 알 수 있다. 실제로, 하이브리드 시스템은 휠로더가 감속하는 동안 제동에너지를 전력으로 변환시켜 배터리에 전기에너지의 형태로 저장하여 두었다가 가속시 엔진을 보조하는 동력원으로서 사용하게 된다. 종래의 휠 굴삭기와 비교를 하면, 약 30~40%의 연비절감효과가 있다고 보고되었다.

5.3 Kobe Steel과 NEDO

Kobelco 건설기계는 일본의 신에너지 산업기술종합개발기구(이하 NEDO)와 Kobe 제강의 지원으로 2008년 7월에 6톤급의 프로토타입 직렬형 하이브리드 굴삭기를 개발하였다. 실험결과로부터 약 40%이상의 연비절감효과가 있음을 증명하였다³⁵⁾.

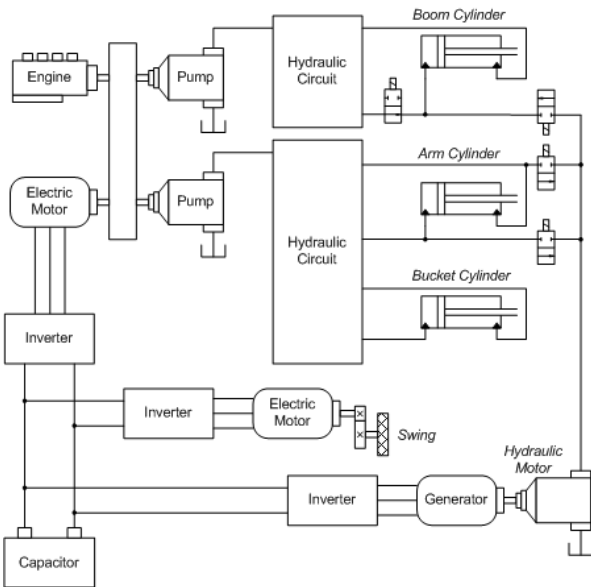


Fig. 5 System outline of ZX200 hybrid excavator.

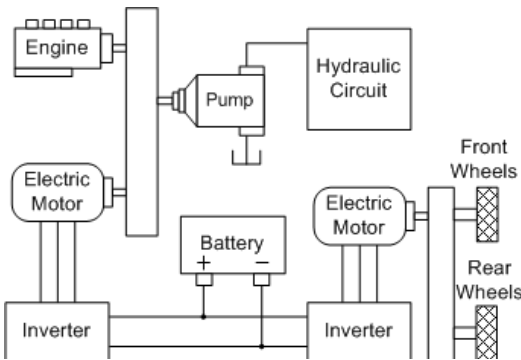


Fig. 6 System outline of hybrid wheel loader.

개발된 하이브리드 굴삭기의 시스템 구성을 Fig. 7에 보여주고 있다. 6개의 작동기 각각은 전기모터에 의해 구동되는 펌프에 의하여 개별적으로 제어된다. 개별제어 구성은 기존의 굴삭기 시스템에서 발생하는 작동기간의 간섭과 손실을 최소화할 수 있다. 붐은 전기모터와 양방향 유압펌프로 구성되는 폐회로 시스템에 의하여 구동되어, 붐 하강시 중력위치에너지가 유압펌프를 거쳐 전기에너지로 변환되어 배터리나 커패시터에 저장이 되게 된다. 제안한 직렬형 하이브리드 시스템에서는 엔진동력을 39kW에서 22kW로 줄여서 사용할 수 있다. 선회 작동은 기존의 유압모터 대신에 전동기에 의하여 구동되고, 상부 선회체의 운동에너지는 선회 제동시에 전기에너지로 변환되어 저장되게 된다. 또한 배터리와 커패시터의 사용으로 작업에 따라 요구되는 엔진 동력의 편차를 보상할 수 있게 되며, 엔진에 걸리는 부하를 일정하게 만들어, 기존의 굴삭기보다 더 적은 엔진으로도

구동이 가능하게 되며, 또한 연비를 향상시킨다. 게다가, 하이브리드 시스템은 엔진 동력을 전기에너지로 변환 후, 배터리의 에너지 충전이 일정이상 유지되면, 굴삭작업동안에도 엔진은 정지할 수 있다. 이 간헐적인 엔진작동으로 연료 절감을 향상시키게 된다.

5.4 볼보건설기계

Volvo건설기계는 2008년 3월 미국의 ConExpo 전시회에서 10% 연비를 절감한 L220F 하이브리드 휠로더를 공식적으로 선보였다.

볼보 L220F는 병렬형 하이브리드 시스템으로 구동된다. 이 하이브리드 시스템의 핵심은 통합된 발전기 및 스타터이다. 전기모터는 디젤 엔진을 신속하게 작동시킨다. 필요하다면, 전기모터는 디젤엔진에 추가동력을 제공해주고 저속회전속도에서는 더 빠른 응답을 가능하게 해준다. 디젤엔진은 휠로더가 다음 대차를 기다리고 있는 동안 엔진을 정지시킬 수 있다. 배터리는 생산성을 떨어뜨리지 않으면서 정상적인 작동을 하면서 전기 모터/발전기에 의하여 충전된다.

6. 도전

6.1 가격

하이브리드 굴삭기는 연비를 향상시키는 반면에 장비의 가격은 상승하게 된다. 이는 대형 굴삭기보다는 소형굴삭기의 경우에 더 열악하다고 이야기할 수 있다. 현재 하이브리드 굴삭기의 가격은 기존의 표준 장비에 비해 약 20%에서 50% 정도의 가격 상승이 된다. 향후 하이브리드 굴삭기의 가격은 기존 표준 장비 대비 동등하거나 약간 가격이 비싼 정도로 떨어질 필요가 있다.

6.2 시스템 제어 특성

하이브리드 시스템을 채택하는 것은 에너지 절감을 달성하기 위한 새로운 방법이다. 하이브리드 시스템은 동력전달을 위하여 컴퓨터 제어 등 복잡한 동력제어 알고리즘이 필요하게 된다. 또한 일부 하이브리드 시스템은 과도한 소음과 진동을 경험하기도 하였다. 따라서 이런 발전단계에서의 문제점은 어떻게 시스템의 효율을 현재의 시스템과 유사하도록 만드는가에 있다.

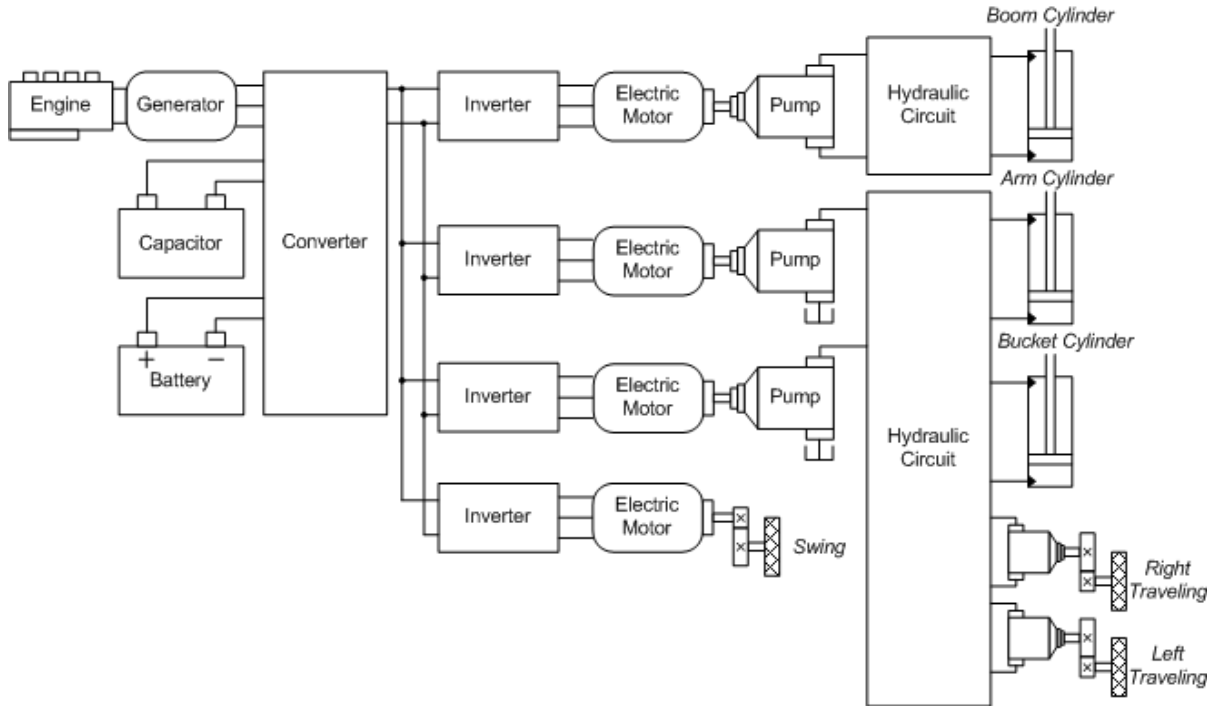


Fig. 7 System outline of prototype hybrid excavator of Kobe Steel and NEDO.

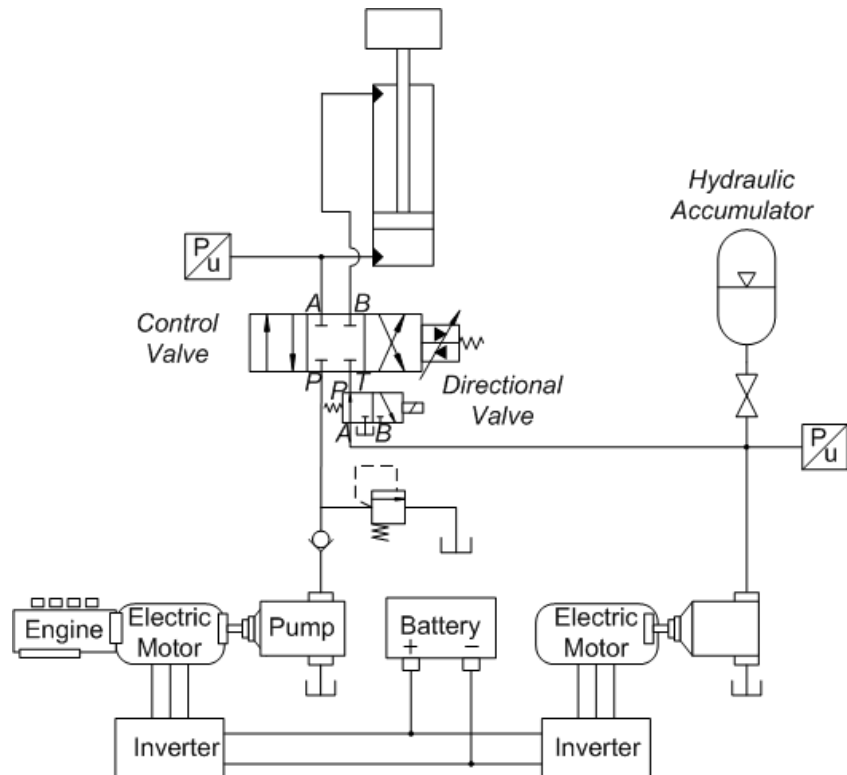


Fig. 8 Schematic of the proposed energy regeneration system.

6.3. 새로운 에너지 회생 시스템

유압시스템에서는 주로 유압 어큐물레이터를 이용하여 유압에너지를 축적하지만 그 에너지 저장 밀도가 다른 경쟁기술에 비해 너무 떨어진다는 단점을

가지고 있다. 또한 유압에너지를 어큐물레이터를 이용하여 축적하기 위해서는 대용량의 어큐물레이터 공간이 필요하게 된다. 예를 들어 20톤급 하이브리드 굴삭기의 붐 하강시의 위치에너지인 28kJ을

흡수하기 위해서는 약 50L용량의 어큐물레이터가 필요하게 된다. 그러나 유압 어큐물레이터는 전기 시스템에 비해 파워밀도측면에서 뛰어나다. 따라서 유압 어큐물레이터 에너지 회생 시스템은 빈번하게 그리고 간헐적으로 작동되는 굴삭기와 같은 시스템에는 이상적인 에너지 저장장치라고 이야기할 수 있다.

하이브리드 굴삭기를 개발하기 위해서는, 에너지 저장장치를 설치할 공간을 마련하는 것이 최우선적인 문제이다. Fig. 2로부터, 유압 굴삭기의 전력회생을 위한 시간은 단지 2~3초 정도이다. 따라서 배터리와 유압 어큐물레이터 모두 유압굴삭기의 에너지 축적 장치로서는 적합하지 않다.

고밀도동력 배터리, 저가 커패시터 및 높은 에너지 밀도를 가지는 유압 어큐물레이터 등이 이용가능하다. 그러나 하이브리드 파워 시스템을 구축하기 위해서는 초기단계에 해야 할 일이 많이 있다. 여기서 전기식 배터리와 유압식 어큐물레이터를 합친 새로운 에너지 회생 시스템을 Fig. 9에 제안한다. 봄이 내려갈 때, 중력위치에너지는 전기에너지와 유압에너지로 변환된다. 전기에너지와 유압에너지 사이의 비율은 에너지 회생시간에 의존한다. 유압 어큐물레이터는 신속하게 에너지를 축적하기 때문에, 회생시간이 작다고 하면 커패시터 대신에 배터리를 사용할 수 있다.

7. 결 론

본 해설은 하이브리드 차량과 하이브리드 건설중장비의 차이점에 대하여 논의를 하였다. 현재 개발되고 있는 하이브리드 굴삭기나 하이브리드 휠 로더는 에너지 절감 측면에서 기존의 굴삭기에 비해 충분한 가치를 인정받고 있으나, 실제 상용화에 이르기 위해서는 성능면에서는 기존 장비와 대등하면서 장비가격은 기존 장비 수준으로 떨어져야한다. 건설중장비 제조사들은 더 싸고 효율이 더 높은 하이브리드 건설중장비를 개발하는데 그들의 노력을 계속해서 집중하리라 예상된다.

참고문헌

1) S. Naoki, N. Takao, I. Etsujiro, et al., "Swing system development of construction machinery", JSAE, Vol. 56, pp. 7~12, 2004.

2) Q. Xiao, Q.F. Wang, "Research on parameter matching for power system of hybrid hydraulic excavator", China Journal of Highway and Transport, Vol. 21, No. 1, pp. 121~126, 2008.

3) M. Ochiai, S. Rye, "Hybrid in construction machinery", Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp. 41~44, 2008.

4) Y.T. Zhang, Q.F. Wang, Q. Xiao, "Simulation research on energy saving of hydraulic system in hybrid construction machinery", Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 509~513, Hangzhou, 2005.

5) D.Y. Wang, C. Guan, S.X. Pan, M.J. Zhang, X. Lin, "Performance analysis of hydraulic excavator power train hybridization", Automation in Construction, Vol. 18, No. 3, pp. 249~257, 2009.

6) Y. Kanezawa, Y. Daisho, T. Kawaguchi, et al., "Increasing efficiency of construction machine by hybrid system", JSAE Annual Congress, JSAE 100 pp. 17~20, 2001.

7) E. Imanishi, T. Nanjo, A. Tsutsui, Boom system simulation on hybrid excavator, Dynamics & Design Conference 3, pp. 31~36, 2003.

8) T. Najio, E. Imanishi, M. Kagoshima, "Power simulation for energy saving in hybrid excavator", Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 35, No. 4, pp. 101~106, 2004.

9) T. Najio, E. Imanishi, M. Kagoshima, "Power simulation on the actual operation in hybrid excavator", JSAE Annual Congress, Vol. 86 pp. 13~18, 2003.

10) T.S. Kwon, S.W. Lee, S.K. Sul, et al., "Power control algorithm for hybrid excavator with super capacitor", Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1~8.

11) Q. Xiao, Q.F. Wang, Y.T. Zhang, "Control strategies of power system in hybrid hydraulic excavator", Automation in

- Construction, Vol. 17, No. 4, pp. 361~367, 2008.
- 12) L. Xiao, S.X. Pan, D.Y. Wang, "Dynamic simulation and optimal control strategy for a parallel hybrid hydraulic excavator", Journal of Zhejiang University Science A, Vol. 5, pp. 624~632, 2008.
 - 13) M. Kagoshima, T. Sora, M. Komiyama, "Development of hybrid power train control system for excavator", JSAE (Society of Automotive Engineers of Japan) Annual Congress, JSAE Vol. 86, pp. 1~6, 2003.
 - 14) A. Tsutsui, T. Nanjyo, H. Yoshimatsu, "Development of the electro-hydraulic actuator system on hybrid excavator", JSAE (Society of Automotive Engineers of Japan) Annual Congress, JSAE, Vol. 86, pp. 7~12, 2003.
 - 15) X.G. Liang, T. Virvalo, "Development and research of an energy saving drive in a hydraulic Crane", 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 151~161, 2001.
 - 16) X.G. Liang, T. Virvalo, "Energy reutilization and balance analysis in a hydraulic crane", 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 306~310, 2001.
 - 17) J. Nyman, K.-E. Rydberg, "Energy saving lifting hydraulic systems", 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 163~177, 2001.
 - 18) T. Virvalo, W. Sun, "Improving energy utilization in hydraulic booms what it is all about", 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 55~65, Hangzhou, 2005.
 - 19) W. Sun, T. Virvalo, "Accumulator-pump-motor as energy saving in hydraulic boom", 8th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 297~309, Tampere, 2003.
 - 20) W. Sun, T. Virvalo, "Simulation study on a hydraulic-accumulator-balancing energy-saving system in hydraulic boom", 50th National Conference on Fluid Power, pp. 371~381, 2005.
 - 21) L. Bruun, "Svenskutvecklat energisparsystem i Caterpillars grävmaskiner", Scandinavia, pp. 6~9, 2002.
 - 22) K.-E. Rydberg, "Hydraulic accumulators as key components in energy efficient mobile systems", 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 124~129, Hangzhou, 2005.
 - 23) K.-E. Rydberg, "Energy efficient hydraulic systems and regenerative capabilities", 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 2~5, Linköping, 2005.
 - 24) J. Nyman, J. Bärnström, K.-E. Rydberg, "Use of accumulators to reduce the need of electric power in hydraulic lifting systems", 8th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp. 311~326, Tampere, 2003.
 - 25) T. O. Andersen, M. R. Hansen, H. C. Pedersen, F. Conrad, "Regeneration of potential energy in hydraulic forklift trucks", 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 302~306, Hangzhou, 2005.
 - 26) Q.F. Wang, Y.T. Zhang, Q. Xiao, "Evaluation for energy saving effect and simulation research on energy saving of hydraulic system in hybrid construction machinery", Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 41, No. 12, pp. 135~140, 2005.
 - 27) T.L. Lin, M. Ochiai, X.P. Liu, "Research on parallel hybrid hydraulic excavator with energy regeneration system", 7th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 252~256, Hangzhou, 2009.
 - 28) Komatsu Corporate Profile 2008, "PC200-8 hybrid hydraulic excavator contributes to reducing CO2 Emissions", Views 2008, Vol. 3, pp. 4~5, 2008.
 - 29) M. Naruse, M. Tamaru, K. Kimoto, "Hybrid construction equipment", US Patent No.6708787, 2004-03-23.
 - 30) "Komatsu launches world's first hybrid excavator", Down to Earth 7 (48), pp.23, 2008.
 - 31) M. Ochiai, "Development for environment friendly construction machinery", Construction 9 pp. 24~28, 2003.

- 32) W. Becca, Earthmoving, International Construction, Vol.47, No.10, pp. 25~34, 2008.
- 33) S. Riyuu, M. Tamura, M. Ochiai, et al., "Hybrid construction machine", JP Patent No. 2003328397, 2003-11-19.
- 34) Hitachi construction machinery, Co.Ltd, Development of battery driven construction machinery for CO2 reduction, Technical report for development of technical measure for global warming control, 2005.
- 35) M. Kagoshima, M. Komiyama, T. Nanjo, A. Tsutsui, Development of new hybrid excavator, Kobelco Technology Review 27, pp. 39~42, 2007.

[저자 소개]

안경관(책임저자)

E-mail: kkahn@ulsan.ac.kr

Tel: 052-259-2282

1966년 12월 16일생.

1990년 서울대학교 기계공학과학사. 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 중사. 유공압시스템학회 총무이사, 편집이사, 산업기술평가원 평가위원, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 제어·로봇·시스템학회, IEEE, ASME, JSME, JFPS, SICE, 일본로봇학회 등의 정회원