

건설기계용 하이브리드 동력 시스템에 관한 연구

김종철 허성재 조유환 이병석
 두산인프라코어주식회사 중앙연구소

A Study of Hybrid Power System for Construction Machine

Chong-Chul Kim Sung-Jae Huh Yu-Hwan Cho Byeong-Seok Lee
 Doosan Infracore Co., Ltd.

Abstract - 현재 건설기계에서 연비 절감에 대하여 유압 기기나 엔진의 에너지 손실 저감에 대한 대책이 있었으나 이것만으로는 한계가 있어 대폭적인 방안을 모색하는데 있어서 동력 시스템의 재검토가 필요한 시점이다. 더불어 자동차와 마찬가지로 건설기계에서도 배기가스 저감이나 연비 저감은 매우 중요한 과제이다. 그 해결책으로서 현재 자동차에서 개발된 하이브리드 시스템의 적용이 매우 유용하다 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 하이브리드 동력 시스템을 건설기계에 적용한 내용을 소개하고 있다. 건설기계의 하이브리드 동력 시스템을 구성하는 엔진, 발전기, 모터, 배터리, 커패시터 등의 전력전자 기기와 전동 유압을 구성하는 전동 유압 기기를 모델화 하여 하이브리드 동력 시스템을 적용한 건설기계의 기본적인 구조와 제어 성능을 파악하고 방식별 하이브리드 시스템의 성능을 비교하였다.

이선 모델을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 하이브리드 건설기계의 동력 시스템 구조

하이브리드 건설기계의 동력 시스템의 구성은 그림 1, 2, 3과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있으며 그림 1은 패러럴 방식, 그림 2는 시리즈 방식, 그림 3은 컴파운드 방식을 나타내고 있다. 그림 1의 패러럴 방식의 경우 엔진, 모터, 배터리로 동력 시스템이 구성되며 유압 펌프 이하의 액츄에이터 부분은 현행 건설기계와 같은 구조로 구성된다. 동력 시스템은 기존의 엔진만 사용하던 것을 소요 동력 및 배터리 SOC(State of Charge), 엔진의 상태를 고려하여 엔진과 모터를 적절하게 제어하여 유압펌프의 투입 동력을 발생시키도록 한다. 모터는 배터리로부터 전력을 공급받아 동작하며, 배터리 충전 시에는 발전기로 동작하게 된다.

1. 서 론

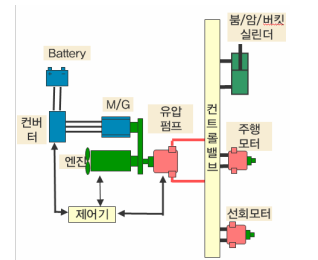
최근 에너지 절약과 지구 환경보존에 대한 관심이 증가하고 자동차 배기가스에 포함되어 있는 질소 산화물 등의 유해물질과 온실효과를 유발하는 이산화탄소 등의 배출을 엄격히 규제하고 있다. 예를 들면 2008년부터 2012년까지 각국의 온실가스 배출량을 1990년 대비 5.2% 감축하는 교토의정서의 합의로 각 나라 정부에서는 목표연도가 다가옴에 따라 여러 가지의 정부 정책을 내놓고 있다. 이런 추세는 자동차 산업뿐만 아니라 산업 전반에 걸쳐 확대됨에 따라 기존의 화석 연료를 사용하는 내연 기관을 대체할 수 있는 저공해 동력 시스템에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있으며 또한 관련 산업체와 연구 기관에서도 여러 방법을 모색하고 있다.

그 예로 첫 번째는 기존 동력전달계에 추가 장치나 보완 설계를 통하여 성능을 개선하는 방법(회박 연소, 촉매 장치)이며, 두 번째는 내연 기관 연료를 석유에서 다른 대체 연료로 바꾸는 방법 등이 있으며 세 번째는 하이브리드 시스템 관련 기술이다.

이미 자동차 동력원으로 일찍부터 연구되어 왔던 2차 전지의 경우, 일정한 에너지를 소모하면 외부로부터 충전을 받아야 하기 때문에 짧은 운행거리 및 배터리 수명이 커지는 문제점을 가지고 있다. 이에 반해 하이브리드 시스템은 기존의 내연 기관에 전동기를 부가하여 두 동력원이 서로 고효율 영역에서 작동하도록 하며 엔진의 잉여 파워를 이용하여 배터리를 충전하도록 하기 때문에 외부 충전이 필요 없어 기존의 2차 전지를 이용한 동력 시스템의 문제점을 해결 할 수 있다. 또한 하이브리드 시스템에 적용되는 전동기 제어 기술, 동력 분배 및 배터리 충전 제어 전략 등은 연료전지 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있다.

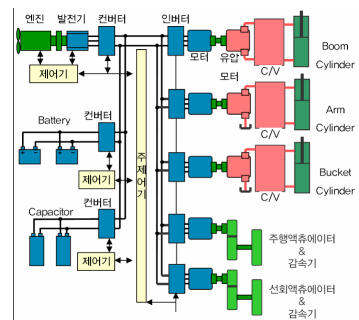
세계적으로 엔진을 동력원으로 사용하는 승용차와 상용차 다음으로 많이 사용하는 것이 건설기계이다. 이 건설기계 중에서도 가장 많이 사용되는 유압 굴삭기에 있어서 자동차와 같이 배기가스 저감이나 연비저감은 매우 중요한 과제이다. 또한 현재는 유압 굴삭기의 용도가 건설현장의 땅을 굴삭 하는 목적 이외에도 도시의 하수관 공사 및 조정 공사 등 그 용도가 매우 다양해짐에 따라 도심 작업과 야간작업이 늘어나고 있다. 이에 따른 소음에 관한 문제점도 해결해야 할 필요성이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 관련 건설기계 업계에서도 하이브리드 시스템을 적용한 건설기계에 대하여 연구개발 중에 있다.

현재 자동차업계에서 전기 자동차와 하이브리드 자동차 등이 개발되어 일부 상용화 되어 있고 건설기계에서도 하이브리드 시스템의 적용이 가능할 것이라 생각되지만 건설기계 중 하이브리드 동력 시스템을 적용하고자 하는 유압 굴삭기는 자동차와는 달리 붐, 암, 버킷, 선회, 좌우 주행의 6축 액츄에이터로 구성되어 있고 자동차와 비교하여 사용부하가 크고 부하 변동이 매우 심하여 자동차용으로 개발된 하이브리드 동력 시스템을 적용하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 5.5톤급 유압 굴삭기를 대상으로 한 건설기계용 하이브리드 동력 시스템에 관한 연구 내용을 서술하였다. 또한 건설기계에 적용 가능한 하이브리드 동력 시스템의 구조와 제어 방식을 제안하고 그 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레



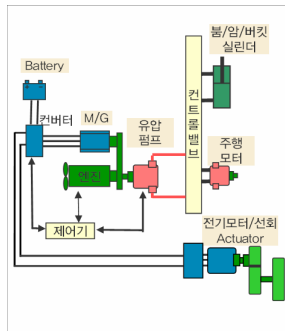
〈그림 1〉 패러럴 방식의 하이브리드 건설기계 동력 시스템 구조

그림 2의 시리즈 방식의 경우 붐, 암, 버킷의 각각의 액츄에이터에 독립적인 유압펌프와 모터가 연결되며 액츄에이터 동작에 따른 소요 전기 에너지를 하이브리드 동력시스템에서 발생시키게 된다. 시리즈 방식의 하이브리드 동력 시스템은 엔진, 발전기, 배터리, 커패시터 및 컨버터로 구성되며 각각의 액츄에이터의 부하와 동력 시스템의 구성 요소의 상태에 따라 출력을 결정하게 된다. 발전 동력 및 액츄에이터에 의한 에너지 발생 시 배터리와 커패시터의 상태에 따라 각각의 충방전량이 결정된다.



〈그림 2〉 시리즈 방식의 하이브리드 건설기계 동력 시스템 구조

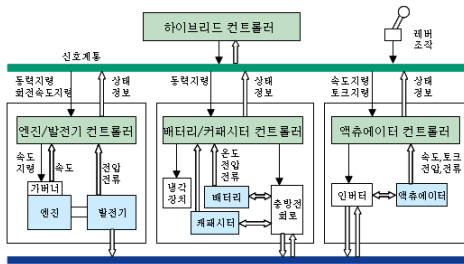
그림 3의 컴파운드 방식의 경우 그림 1의 패러럴 방식과 그림 2의 시리즈 방식의 혼합 방식으로 기본구조는 패러럴 방식과 마찬가지로 엔진, 모터, 배터리로 동력 시스템이 구성되며 유압 펌프 이하의 액츄에이터 부분은 현행 건설기계와 같은 구조로 구성된다. 하지만 패러럴 방식과 다른 점은 그림 3에 나타난 것과 같이 회생이 발생하는 선회부분을 전기모터를 사용하여 선회 동작 시 발생하는 회생 에너지를 배터리로 충전할 수 있도록 하였다.



〈그림 3〉 컴파운드 방식의 하이브리드 건설기계 동력 시스템 구조

2.2 하이브리드 건설기계의 동력 시스템 제어

하이브리드 건설기계에서 기존의 유압 굴삭기와 비교하여 작업성이 저하되지 않고 연비를 향상시키려면 안정적인 동력을 공급함과 동시에 엔진, 발전기, 배터리 등의 시스템 요소들의 성능에 따라 적절하게 전력을 분배하여 제어할 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 4와 같이 제어 시스템을 구성하였다. 제어 시스템은 그림에서처럼 하이브리드 컨트롤러, 엔진/발전기 컨트롤러, 배터리/커패시터 컨트롤러, 액츄에이터 컨트롤러로 구성된다. 각 컨트롤러의 세부기능 살펴보면 다음과 같다. 하이브리드 컨트롤러는 전체 시스템을 총괄하는 메인 컨트롤러로서 요구 동력과 동력 시스템 상태에 따른 동력 분배 제어를 수행하며 요구 동력이 공급동력을 초과할 경우 부하 측의 동력 제한을 수행하는 기능을 가지고 있다. 엔진/발전기 컨트롤러는 요구 동력과 속도에 따라 엔진 및 발전기의 속도를 지령하고 속도, 전압, 전류 등의 상태를 모니터링 하는 기능을 가지고 있다. 배터리/커패시터 컨트롤러는 요구동력에 따라 배터리, 커패시터의 충전 전 지령을 생성하고 그 상태를 모니터링하며 냉각 시스템을 관리하는 기능을 가지고 있다. 액츄에이터 컨트롤러는 속도, 토크 지령에 따라 액츄에이터의 속도, 토크, 전압, 전류 등을 관리하는 기능을 가지고 있다. 지금까지 서술한 내용은 시리즈 방식의 하이브리드 건설기계의 동력 시스템에 대한 내용이고 하이브리드 시스템 구성에 따라 컨트롤러의 구성이 달라질 수 있으며 분산형 또는 중앙처리형의 구조를 가질 수 있다. 또한 컨트롤러에서 처리해야 하는 태스크의 종류 및 속도, 입출력 수에 따라 하드웨어와 소프트웨어가 결정된다.



〈그림 4〉 하이브리드 건설기계 동력 시스템 제어 블록도

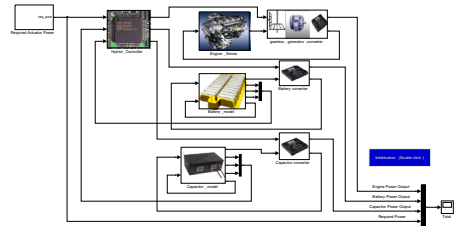
2.3 하이브리드 건설기계의 동력 시스템 성능 결과

본 논문에서는 하이브리드 건설기계의 동력 시스템으로서 모터 또는 전동 유압 액츄에이터, 배터리, 커패시터 등을 조합한 시스템을 제안하였다. 하지만, 시스템 개발 측면에서 에너지 소비와 성능 설계 및 조작성 설계를 시행하기 위해서는 각각의 시스템 구성 기기의 특성을 파악한 다음 다양한 작업 상태에 대응한 최적 제어를 실시할 필요가 있어 실험만으로는 하이브리드 동력 시스템의 성능 설계를 진행하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 시스템을 구성하는 엔진, 발전기, 배터리 등의 전력전자 기기와 전동 유압을 구성하는 전동 유압 기기를 모델화 하여 하이브리드 동력 시스템을 적용한 건설기계의 기본적인 구조와 제어 성능을 파악하고 방식별 하이브리드 시스템의 성능을 예측하였다.

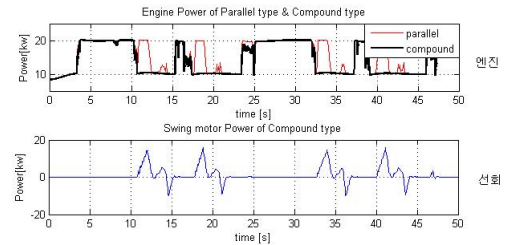
그림 5는 시리즈 방식의 하이브리드 동력 시스템의 모델링 그림이다. 동력 시스템 구성은 엔진/발전기, 배터리, 커패시터로 구성하였다. MATLAB/Simulink를 기반으로 시스템 요소 기기의 성능 설계가 가능하도록 단독 시뮬레이션 모델을 우선 개발하고 단독 모델들을 하이브리드 동력 시스템 방식에 적합하도록 조합한 복합 모델을 개발한 후 동력 시스템 제어를 포함시켰다.

그림 6으로부터 컴파운드 방식의 엔진 동력에서 선회 모터 동력이 0보다 큰 동력을 제외하면 패러럴 방식의 엔진 동력과 동일함을 알 수 있으며 선회 모터 동력에서 0보다 작은 동력은 회생 동력으로 배터리에 충전되어 연비가 개선됨을 알 수 있다. 결과적으로 컴파운드 방식이 패러럴 방식보다 선회 모터에 회생 동력만큼 연비 개선 효과를 가짐을 알

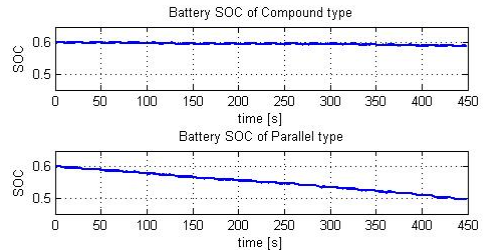
수 있다.



〈그림 5〉 시리즈 방식의 하이브리드 동력 시스템 모델링



〈그림 6〉 패러럴 방식과 컴파운드 방식의 동력 비교



〈그림 7〉 패러럴 방식과 컴파운드 방식의 배터리 SOC 비교

그림 7은 패러럴 방식과 컴파운드 방식의 배터리 SOC를 비교한 그림이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 컴파운드 방식이 패러럴 방식과 비교하여 회생되는 부분에 의하여 배터리 SOC가 보다 적게 낮아짐을 알 수 있다. 이 부분 역시 결과적으로 연비가 개선됨을 알 수 있다.

표 1은 하이브리드 건설기계의 방식과 기존의 건설기계와의 성능을 비교한 표이다. 표로부터 알 수 있듯이 기존의 건설기계보다는 하이브리드 동력 시스템을 적용함으로써 연비 측면에서 그 성능이 향상됨을 알 수 있으나 실제 제작 할 경우는 방식에 따른 성능과 건설기계의 제조 원가적인 부분이 고려되어야 될 것으로 사료된다.

〈표 1〉 하이브리드 방식에 따른 성능 비교 결과

	연비(ℓ/h)	개선율(%)
기존의 건설기계	4.68	-
패러럴 방식	4.44	5
컴파운드 방식	4.16	11
시리즈 방식	2.52	46

3. 결 론

본 논문에서는 건설기계용 하이브리드 동력 시스템에 대하여 살펴본다. 건설기계용 하이브리드 동력 시스템을 구성하는 각 요소 부품별 모델링을 통하여 용량 및 제어 전략 등을 검증하였고 그 결과로 동력 시스템의 개략적인 성능을 비교할 수 있었다. 그 결과 건설기계에서의 하이브리드 시스템의 적용가능성을 검증 할 수 있었고 기존 건설기계의 시스템보다는 하이브리드 시스템을 적용 할 경우가 연비측면에서 개선됨을 확인 할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.Ehsani, Y.Gao, S.E. Gay and A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles", CRC Press, 2005.
- [2] German, John M, "Hybrid Gasoline-Electroc Vehicle Development", Society of Automotive Engineers, 2005.
- [3] Society of Automotive Engineers, "Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology", Society of Automotive Engineers, 2002.