



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위 논문

건설기계용 하이브리드 전기 유압식
가변 파워트레인 시스템의
등가소비최소화전략에 관한 연구

A Study on Equivalent Consumption
Minimization Strategy of Hybrid
Electro-hydraulic Variable Powertrain System
for Construction Machinery

울산대학교 대학원
건설기계공학과
김 성 탁

건설기계용 하이브리드 전기 유압식
가변 파워트레인 시스템의
등가소비최소화전략에 관한 연구

지도교수 안경관

이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함

2022년 2월

울산대학교 대학원
건설기계공학과
김성탁

김성탁의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원

이 병 룡



심사위원

박 기 서



심사위원

안 경 관



울산대학교 대학원

2022년 02월

건설기계용 하이브리드 전기 유압식 가변 파워트레인 시스템의 등가소비최소화전략에 관한 연구

김 성 탁

울산대학교 대학원 건설기계공학과

국문요약

최근 건설기계 산업들은 4차 산업혁명 기술의 파고가 거세지고, 건설기계기술 발전 주기가 짧아짐에 따라 신속한 기술발전 추세에 맞추기 위해 많은 연구가 진행 되고 있다. 또한 환경 오염 문제가 대두 되면서 EU 집행위에서 제한을 둔 탄소배출가스를 맞추지 못 할 경우 벌금을 부과해야 될 정도로 탄소배출가스규제에 많이 민감하다. 따라서 기업들은 에너지 효율을 증가시키는 기술개발과, 환경친화형 전기식 건설기계의 개발도 빠르게 활성화 되고 있다. 현재 이러한 문제를 해결하기 위해 에너지 회생을 포함한 하이브리드 시스템은 주목받는 에너지 솔루션 중 하나이다.

본 연구는 유성기어를 이용한 동력 분배형 하이브리드 시스템과 변위 가변 펌프의 파워 트레인인 전기 하이브리드 시스템을 합친 전기 유압식 가변 파워트레인 시스템을 이용한 굴삭기 시스템을 제안하는 한편 규칙기반시스템을 이용한 시스템 제어 전략을 수립하여 ECMS를 통해 시스템의 에너지 효율을 높이고, Amesim, Matlab/Simulink같이 Co-Simulation을 이용한 시뮬레이션 모델을 구축하여 이를 검증하고 총 에너지 소비량을 최적화된 파라미터를 바탕으로 실험 장치에 적용시켜 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과가 일치하는지 확인 한다.

목 차

국문 요약	i
목 차	ii
표 및 그림 목차	iv
1. 서 론	1
1.1. 연구 배경 및 목적	1
1.2. 본문의 구성	2
2. 시스템 개요	3
2.1. 굴삭기 시스템	3
2.1.1. 엔진식 굴삭기 시스템	4
2.2. 하이브리드 시스템	4
2.2.1. 전기식 하이브리드 시스템	5
2.2.1.1. 직렬형 하이브리드 시스템	5
2.2.1.2. 병렬형 하이브리드 시스템	6
2.2.1.3. 동력 분배형 하이브리드 시스템	6
2.3. 제안된 하이브리드 굴삭기 시스템	7
2.3.1. 하이브리드 파워트레인 시스템 작동 모드	8
2.4. 에너지 회생 시스템	9
2.5. 시스템 요소	9
2.5.1. 유압 펌프	9
2.5.2. 유압 모터	11
2.5.3. 전기 모터	13
2.5.4. 발전기	14
2.5.5. 유성 기어	15
3. 제어 전략	16
3.1. 시스템 제어 분석	16
3.2. 동력 분배 및 구동 모드 선택	17
3.3. 제어전략	17
3.4. SoC (충전 상태)	20
4. 최적화 및 시뮬레이션	21
4.1. 최적화	21
4.1.1. 등가소비최소화전략(ECMS)	21

4.1.2. 목적 함수	22
4.2. 시뮬레이션	22
4.2.1. 시뮬레이션 모델링	22
4.2.1. 시뮬레이션 결과	24
5. 실험 및 결과	27
6. 결론 및 향후 계획	36
참고문헌	37
부 록	38
Abstract	40

표 및 그림 목차

1. 표 목차

Table. 2-1 유압 펌프 제원	10
Table. 2-2 유압 모터 제원	12
Table. 2-3 전기 모터 제원	13
Table. 3-1 실린더 상승	19
Table. 3-2 실린더 하강	19
Table. 4-1 구동모드 제원	25
Table. 4-2 SoC 초기 값 60%의 설정에 사용된 에너지 총 사용량 및 향상률	26
Table. 4-3 200kg일 경우 Simulation과 Test Bench의 에너지 총 사용량 및 향상률	31
Table. 4-4 600kg일 경우 Simulation과 Test Bench의 에너지 총 사용량 및 향상률	35

2. 그림 목차

Fig. 1-1 연도별 배기가스 규제 변화	2
Fig. 2-1 일반적인 굴삭기 시스템 구조	3
Fig. 2-2 굴삭기의 에너지 흐름 분포	4
Fig. 2-3 직렬형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름	5
Fig. 2-4 병렬형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름	6
Fig. 2-5 동력 분배형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름	6
Fig. 2-6 제안된 EHCVP test bench 회로도	7
Fig. 2-7 제안된 하이브리드 시스템의 구동 모드	8
Fig. 2-8 회생 시스템의 구조 및 에너지 흐름	9
Fig. 2-9 유압 펌프	10
Fig. 2-10 유압 펌프의 효율 맵	11
Fig. 2-11 유압 모터	11
Fig. 2-12 유압 모터의 효율 맵	12
Fig. 2-13 전기 모터	14
Fig. 2-14 엔진 효율 맵	14
Fig. 2-15 발전기 효율 맵	15
Fig. 2-16 유성 기어	15
Fig. 3-1 제어 시스템의 구상	16
Fig. 3-2 규칙 기반 구상도	17
Fig. 3-3 제안된 제어전략의 설정 된 입력 신호	21
Fig. 4-1 ECMS전략 구조	21
Fig. 4-2 AMESim상에서의 모델링	23

Fig. 4-3 Matlab상에서의 Co-simulation	24
Fig. 4-4 설정된 조이스틱 신호	24
Fig. 4-5 상황에 따른 요구된 파워	25
Fig. 4-6 설정된 모드 및 기어 비	25
Fig. 4-8 엔진 효율 변화	26
Fig. 5-1 테스트 벤치	27
Fig. 5-2 200kg일 때 실험 결과 값	31
Fig. 5-3 600kg일 때 실험 결과 값	35

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 건설기계 산업들은 4차 산업혁명 기술의 파고가 거세지고, 건설기계기술 발전 주기가 짧아짐에 따라 신속한 기술발전 추세에 맞추기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 환경오염 문제가 대두되면서 EU 집행위에서 제한을 둔 탄소배출가스를 맞추지 못 할 경우 벌금을 부과해야 될 정도로 탄소배출가스규제에 많이 민감하다.¹⁾ 따라서 기업들은 에너지 효율을 증가시키는 기술개발과, 환경친화형 전기식 건설기계 개발도 빠르게 활성화되고 있다.²⁾ 기술개발의 요구 변화는 Fig. 1-1과 같다. 현재 국내에서도 'Stage V'엔진을 개발하여 트럭, 버스, 소형 건설기계, 중대형 건설기계 등에 탑재하여 사용 중 이다.

현재 유압 굴삭기의 에너지 절약 및 배출감소에 대한 연구는 중요하고 여러 에너지 회생시스템과 하이브리드 시스템에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.³⁻⁶⁾ 그중 하이브리드 기술은 유압식 굴삭기의 에너지 소비를 줄이는 효과적인 방법이다.⁷⁻¹⁰⁾ 하이브리드 유압식 굴삭기는 유압식 하이브리드 굴삭기와 전기식 하이브리드 굴삭기 두 가지로 분류할 수 있다. 그중 유압식 하이브리드 굴삭기는 유압식 어큐뮬레이터를 활용하여 엔진 작동 시 여유동력이나, 붐 하강시의 위치에너지를 저장하여 부하가 요구되는 작업 시 재사용하여 에너지 소비를 줄일 수 있다.

전기식 하이브리드 굴삭기는 에너지 저장 장치로 배터리 또는 슈퍼 커패시터를 사용하여 액추에이터의 위치 에너지 또는 운동 에너지는 발전기에 의해 전기 에너지로 전환되어 에너지 저장 장치로 저장한다. 이를 보조 동력원인 전기식 서보 모터에 사용하여 시스템의 출력을 돕는다. Wang은 전기하이브리드 유압식 붐 시스템의 에너지 재생 시스템을 제안하였고 유압 모터와 발전기는 붐 시스템의 리턴 라인에 설치되었다. 무부하 조건과 부하 조건은 실험을 통해 연구가 되었으며, 유압모터, 발전기, 컨버터, 및 슈퍼 커패시터의 효율을 분석에 초점을 두었다.¹¹⁾ Cai은 PHEV/HEV 시스템에 입력 전력 분할 구성과 ECMS방법으로 최적화된 에너지 관리를 연구하였다. 이 논문에서는 보조 모터를 2개 사용하였지만 본 논문에서는 보조 모터 1개를 사용한다는 차이점이 있다.¹²⁾ 또한 본 연구의 이전 연구에서는 같은 구조의 시스템을 사용하여 효율 향상에 관한 연구를 했다. 제어로직은 Fuzzy를 사용하여 구동 모드를 선정하였으며 GA(유전 알고리즘)를 사용하여 각 변수들에 변수들을 최적화하여 효율 향상을 시켰다. 하지만 이전 연구에서는 기어 비를 1:1만 사용을 하여 엔진, 보조 모터의 최대 효율 점을 찾는 것에 한계가 있었다. 이런 부분을 개선하기 위해 본 연구에서는 기어 비를 1:1~1:1.3을 사용하여 엔진, 보조 모터의 효율을 극대화 시키고 에너지 소비량을 감축 하는 것에 목표를 두었다.¹³⁾

본 연구는 유성기어를 이용한 동력 분배형 하이브리드 시스템과 변위 가변 펌프의 파워 트레인이 전기 하이브리드 시스템을 합친 전기 유압식 가변 파워트레인 시스템을 이용한 굴삭기 시스템을 제안하는 한편 규칙기반시스템을 이용한 시스템 제어 전략을 수립하여 ECMS를 통해 시스템의 에너지 효율을 높이고, Amesim, Matlab/Simulink 같이 Co-Simulation을 이용한 시뮬레이션 모델을 구축하여 이를 검증하고 총 에너지 소비량을 최적화된 파라미터를 바탕으로 실험 장치에 적용시켜 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과가 일치하는지 확인 한다.

EPA and EU nonroad emissions regulations: 37 – 560 kW (50 – 750 hp)

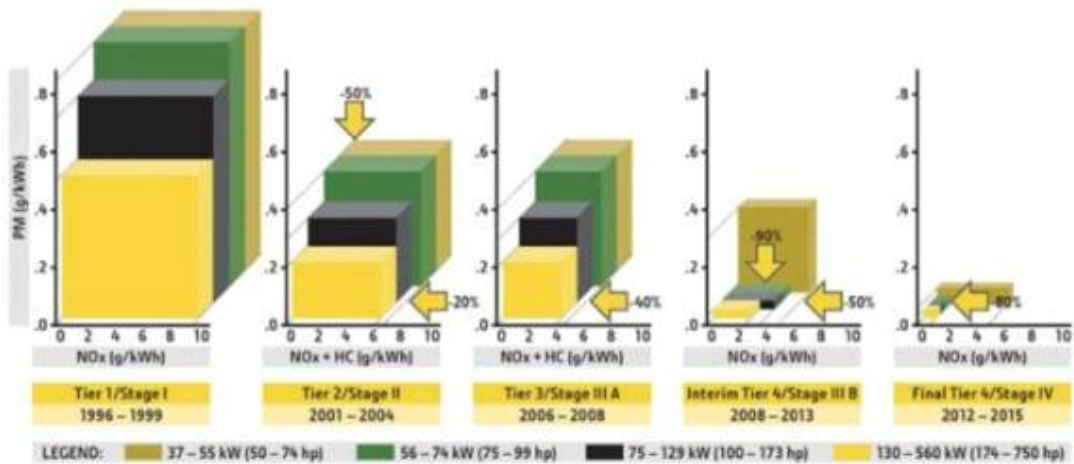


Fig. 1-1 연도별 배기가스 규제 변화

1.2 본문의 구성

본문은 총 6개의 장으로 구성되어 있으며 제 1장은 연구 배경 및 목적과 논문의 전체적인 개요를 서술하였다.

제 2장은 시스템 개요로서 제안된 복합형 하이브리드 유압 파워트레인 시스템을 소개하고 시스템에서 구동 가능한 여러 모드들을 소개하는 한편 중요 유압 부품들의 효율과 에너지 회생시스템에 대해서 정리 하였다.

제 3장은 여러 구동 모드들에 대한 규칙기반 시스템 구축 모드 방법에 대해 정리하였다.

제 4장은 Amesim-Matlab/Simulink 코시뮬레이션을 이용한 시스템 시뮬레이션과 등가소비최소화전략(ECMS) 최적화에 대해서 정리하였다.

제 5장은 최적화된 시뮬레이션 제어 시스템을 실험한 뒤 그 결과에 대해서 정리하였다.

제 6장은 실험결과를 바탕으로 결론을 서술하였다.

2. 시스템 개요

2.1. 굴삭기 시스템

Fig. 2-1는 일반적인 굴삭기의 유압 시스템의 회로를 나타내고 있다. 유압식 건설기계는 엔진동력을 사용하여 펌프를 이용해 원료를 공급하여 MCV를 통해 각 실린더에 직선운동을 하거나, 선회 동작을 하는 회전 운동을 할 수 있게 시스템을 작동 시킬 수 있다. 또한 가변 용량형 펌프를 사용하여 부하의 운동을 쉽게 제어할 수 있고, 직선 운동과 회전 운동 모두 가능하기 때문에 건설장비의 동력 전달 시스템으로 많이 사용되고 있다.

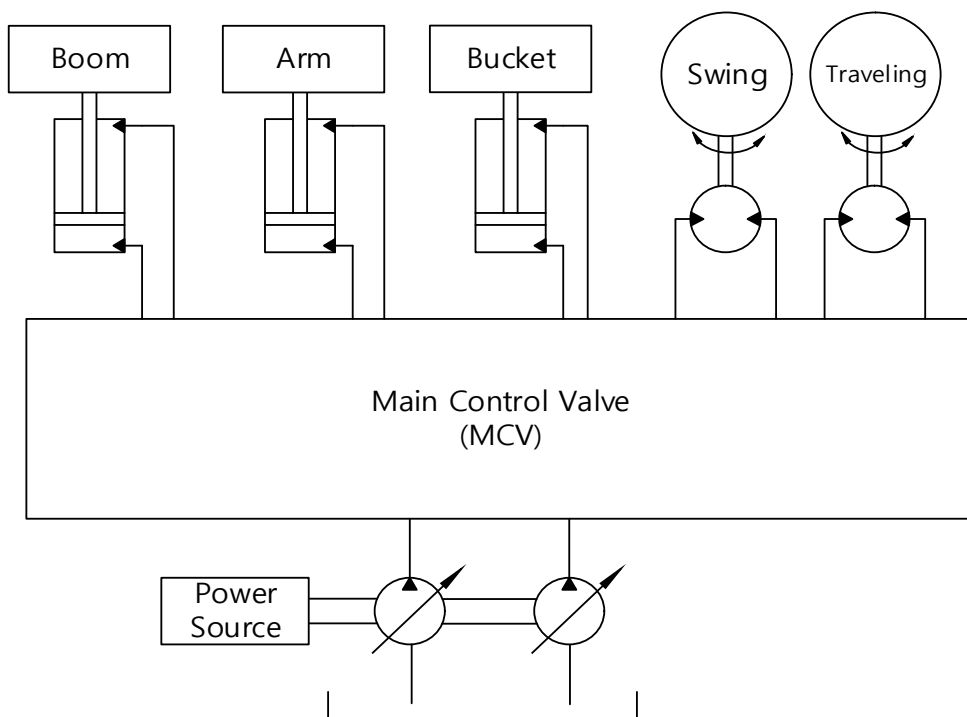


Fig. 2-1 일반적인 굴삭기 시스템 구조

2.1.1. 엔진식 굴삭기 시스템

엔진식 굴삭기의 에너지 흐름은 Fig.2-2과 같다. 엔진에서 연료의 화학에너지를 열에너지로, 열에너지에서 기계적 에너지로 변환하고, 유압 펌프에서 유압 에너지로 전환시켜 각 유압 액추에이터로 전달된다.

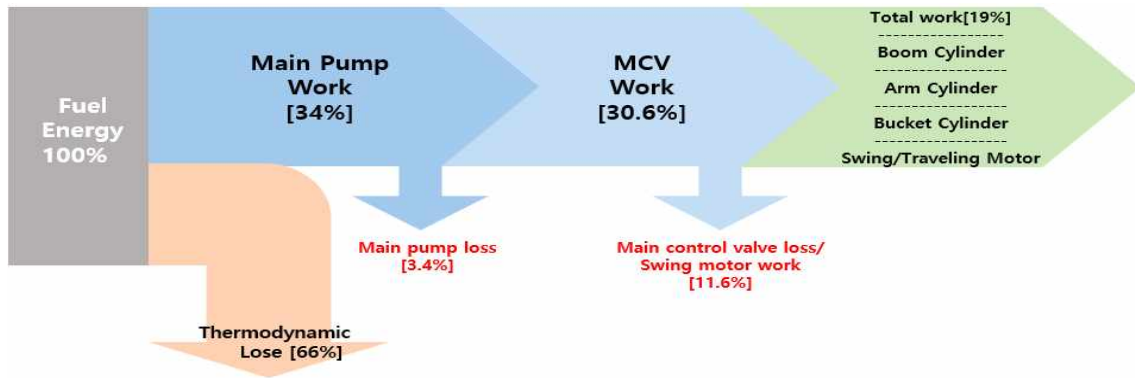


Fig. 2-2 굴삭기의 에너지 흐름 분포

Fig. 2-2 에서도 볼 수 있듯이 많은 양의 에너지가 손실된다. 엔진작동과 동시에 열손실로 인해 66%의 많은 에너지 손실이 발생하고 각 액추에이터로 연료가 공급되기 전에 펌프와 MCV시스템을 2단계를 더 거치면서 이미 적은 양의 에너지로 사용하게 된다. 이러한 굴삭기 시스템 구조상 발생하는 에너지 손실을 줄이고 효율을 향상시키기 위해 하이브리드 굴삭기의 개발이 활발히 진행 되고 있다.

2.2. 하이브리드 시스템

하이브리드 시스템은 두 개 이상의 동력원을 가지는 시스템을 말한다. 주 동력원인 엔진의 에너지 소비를 줄이기 위해 보조 동력원을 이용하여 엔진의 에너지 소비를 줄일 수 있고, 에너지 회생을 통해 에너지를 저장하고 저장된 에너지를 사용하여 시스템에 동력을 전달하는 방식으로 전체 시스템의 효율을 높일 수 있다. 이러한 하이브리드 굴삭기 시스템 방식은 크게 유압식과 전기식으로 나눌 수 있으며 전기식 하이브리드 시스템이 유압식에 비해 에너지 소비를 줄일 수 있는 반면 전기식으로 바뀌는 요즘 건설기계 산업에서 유리하게 작용 될 것이다. 본 논문에서는 전기 유압식 하이브리드 시스템에 대하여 논하고자 한다.

2.2.1. 전기식 하이브리드 시스템

일반적으로 전기식 하이브리드 시스템은 에너지 저장 장치로 배터리 또는 슈퍼 커패시터를 사용하여 회생된 에너지를 전기 에너지로 변환하여 저장한 뒤 전기 모터를 통해 사용함으로써 에너지 효율을 향상시킬 뿐만 아니라 배기가스를 감소시켜 환경규제를 맞추기에 적합하다.

전기식 하이브리드 시스템의 구조는 직렬형, 병렬형, 동력 분배형 등으로 나눌 수 있다. 각각 하이브리드 시스템의 장단점을 가지고 있으며 그 구조와 동력전달 흐름을 다음과 같이 보여준다.

2.2.1.1 직렬형 하이브리드 시스템

직렬형 하이브리드 시스템의 동력 전달 구조는 Fig. 2-3와 같다. 직렬형 하이브리드 구조는 엔진-발전기-모터가 직렬로 연결되고, 엔진의 동력은 모든 발전기를 구동하여 전기 에너지로 변환하고, 최종으로 모터를 구동하여 동작을 한다. 환경, 연비 측면에서는 장점을 가지고 있지만 교류로 발전하면서 직류로 변환하여 배터리를 충전하고, 모터 구동에는 교류를 사용하므로 에너지 효율이 큰 손실을 준다.

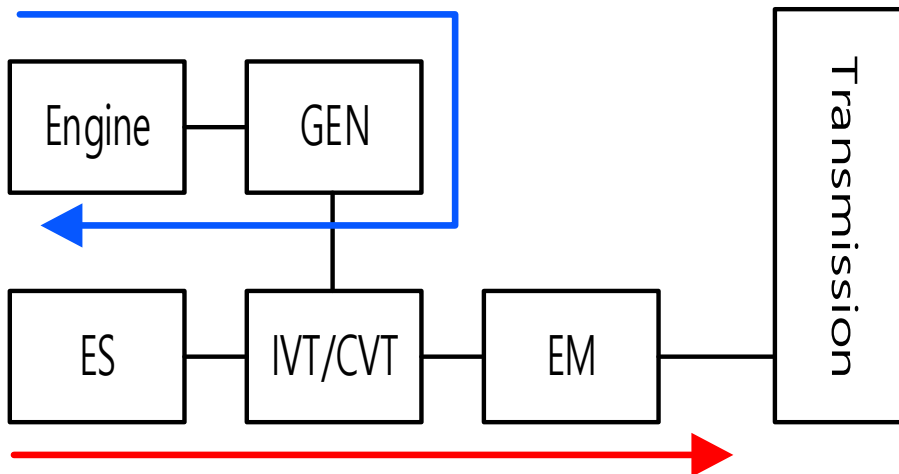


Fig. 2-3 직렬형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름

2.2.1.2 병렬형 하이브리드 시스템

병렬형 하이브리드 시스템의 동력 전달 구조는 Fig. 2-4와 같다. 병렬형 하이브리드 구조는 시스템의 다양한 조합이 가능하고, 엔진의 동력을 이용하여 동력을 전달하거나, 모터가 동력을 전달할 수 있다. 직렬형에 비해 에너지 손실이 적은편이다. 하지만 직렬형에 비해 엔진이 크고, 시스템 구성과 제어가 복잡하다.

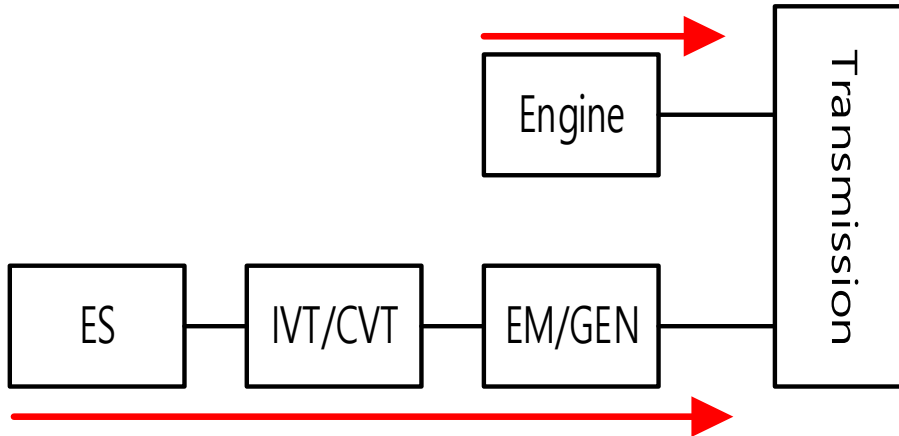


Fig. 2-4 병렬형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름

2.2.1.3 동력 분배형 하이브리드 시스템

동력 분배형 하이브리드 시스템은 하이브리드 시스템 중 가장 대표적인 시스템이다. 시스템의 동력구조는 Fig. 2-5와 같다. 엔진과 구동 모터, 발전 모터를 유성기어를 통해 구동 모터로만 구동할지, 모터와 엔진을 같이 구동할지, 발전 모터로 배터리를 충전할지를 다양한 구동 모드를 선정할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 시스템과 유사한 구조를 가진 굴삭기 시스템의 실험 장치를 만들어 연구를 진행 할 것이다.

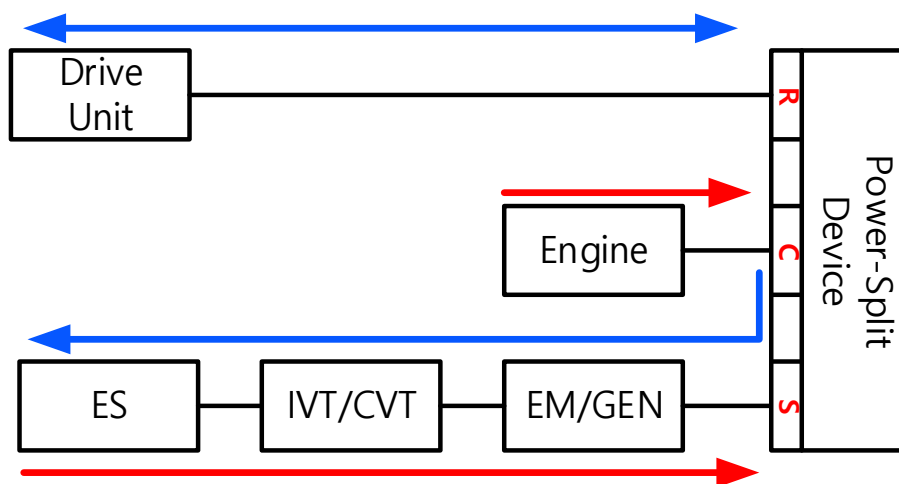


Fig. 2-5 동력 분배형 하이브리드 시스템 구조 및 에너지 흐름

2.3. 제안된 하이브리드 굴삭기 시스템

본 연구에서 제안된 EHCVP시스템의 구조는 Fig. 2-6과 같다. 이전 연구와 차이점은 기어 비를 1:1만 사용하지 않고, 각 구동 모드에 맞게 1:1~1:1.3을 사용할 수 있다는 점이다. 기어 비를 1:1~1:1.3을 사용함으로써 엔진, 보조 모터의 효율을 극대화 시킬 수 있는 장점을 가지게 된다. 실린더 상승 시에는 제안된 제어전략에 따라 각 구동 모드에 설정된 기어 비를 링 기어 측에 연결된 더블 클러치의 오른쪽을 사용하면 1:1의 기어 비를 사용할 수 있고, 왼쪽을 사용하면 1:1.3의 기어 비를 사용할 수 있다. 본 시스템에 사용된 부품의 제원은 부록 2에 나타내었다.

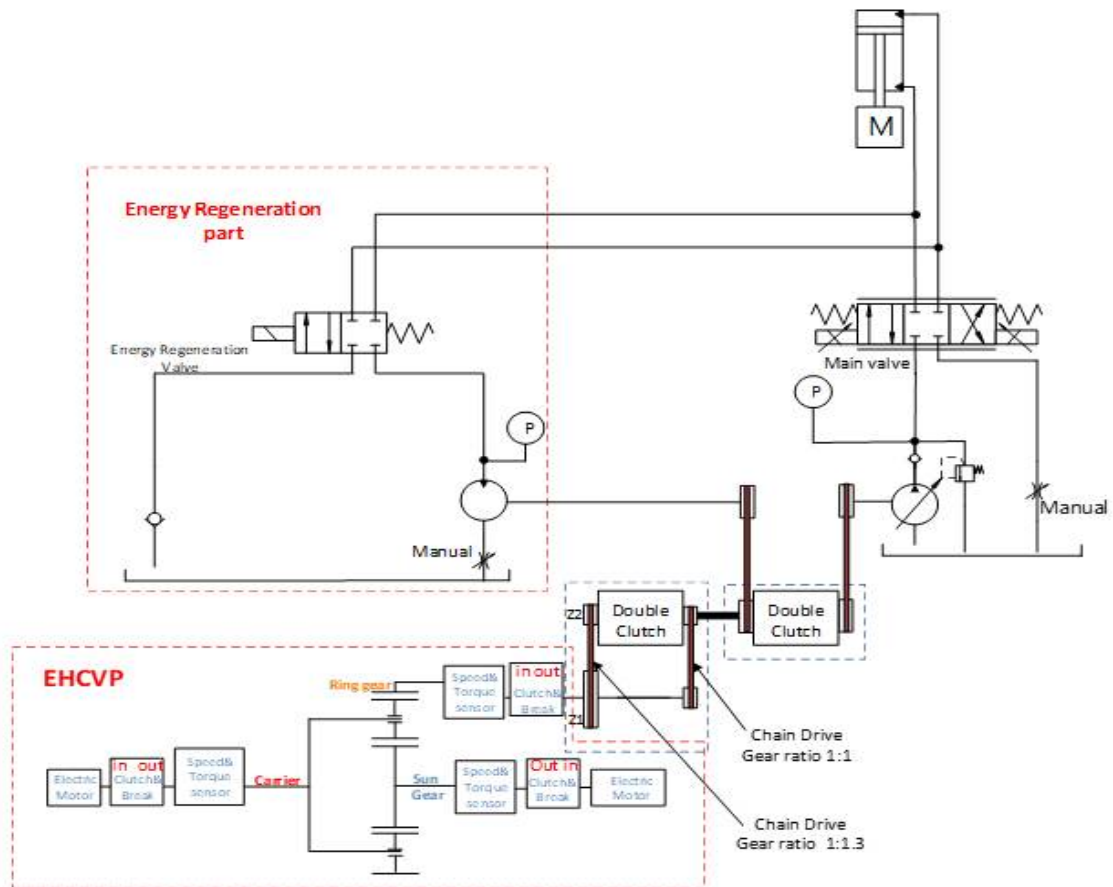


Fig. 2-6 제안된 EHCVP test bench 회로도

2.3.1 제안된 하이브리드 파워트레인 시스템 작동 모드

제안된 시스템은 유성기어의 각 기어 측에 설치된 클러치/브레이크를 통해 다양한 작동모드의 구현이 가능하여 에너지 관리가 가능하다. 이러한 시스템의 작동 모드들은 Fig. 2에 나타난다.

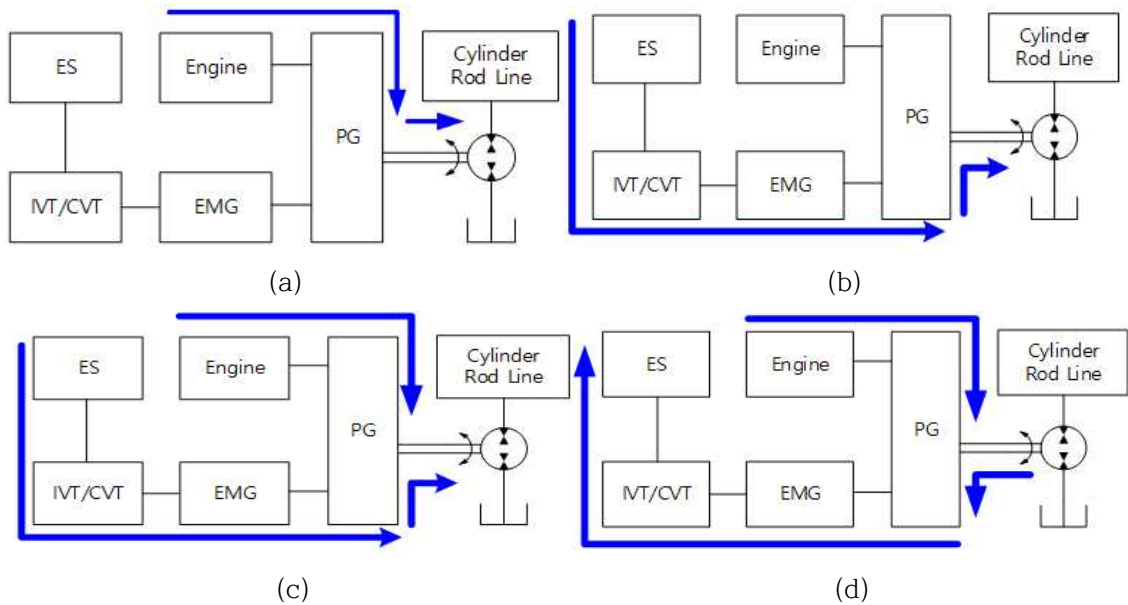


Fig. 2-7 제안된 하이브리드 시스템의 구동 모드 : (a) Engine drive mode, (b) Motor drive mode, (c) Engine and Motor drive mode, (d) Engine drive and Motor charge mode

(a)는 엔진모드이다. (b)는 모터모드이다. (c)는 엔진, 모터 동시 작동모드이다. 큰 힘이 필요로 할 경우 엔진, 모터를 동시에 돌려 엔진의 동적 거동에 도움을주어 효율을 높인다. (d)는 엔진 작동 및 충전모드이다. 엔진을 이용하여 유압시스템을 작동시키고, 충전도 가능한 모드이다.

2.4. 에너지 회생 시스템

Fig. 2-8은 제안된 시스템의 에너지회생 파트의 구조와 에너지 흐름을 나타낸다. 실린더가 상승할 때, 유압 펌프를 통해 실린더로 유압 에너지를 전달하며, 실린더가 하강시, MCV는 닫히고 유압 모터 측 제어 밸브가 열린 후 실린더에서 토출된 유체를 이용하여 유압 모터를 회전시켜 발전기를 구동한다. 발전기를 이용하여 회생된 에너지는 배터리에 저장된다.

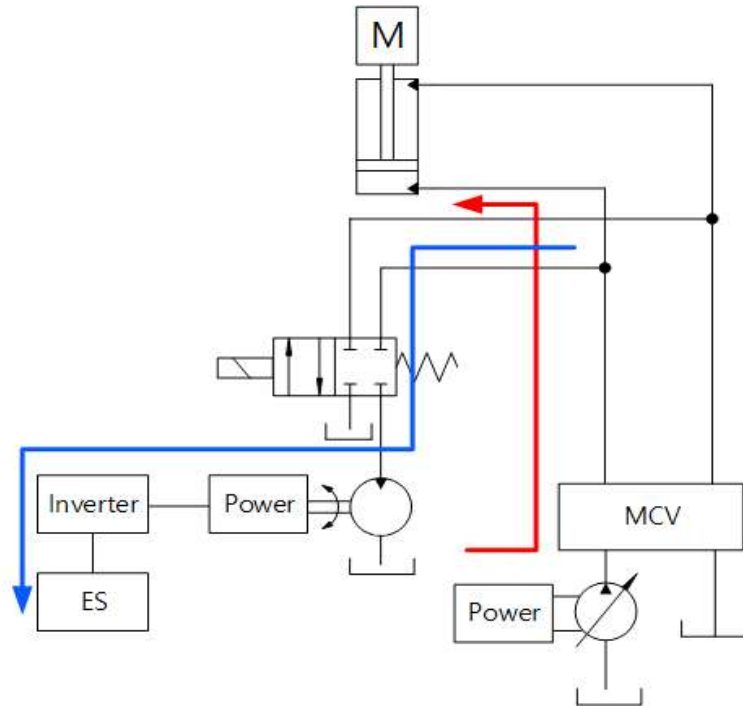


Fig. 2-8 회생 시스템의 구조 및 에너지 흐름

2.5. 시스템 요소

제안된 시스템은 작동 속도, 토크, 유량, 압력 등에 의해 효율이 변하는 장비들이 있다. 본 논문에서는 이러한 장비의 효율을 고려하여 제어전략을 제시함에 앞서 각 장비들의 제원과 작동 조건에 따른 효율을 설명하고자 한다.

2.5.1 유압 펌프

유압 펌프는 동력 장치에서 전달받은 기계적 에너지를 유압에너지를 바꾸는 역할을 하는 유압 시스템에서 핵심적인 부품이다. 본 연구에서 사용된 유압 펌프는 가변 펌프로 동력원은 전기 하이브리드 시스템을 적용하여 연구하였다. Fig. 2-9는 본 연구의 실험 장치에 사용된 유압 펌프이며 그 제원을 Table.1에 나타내었다.

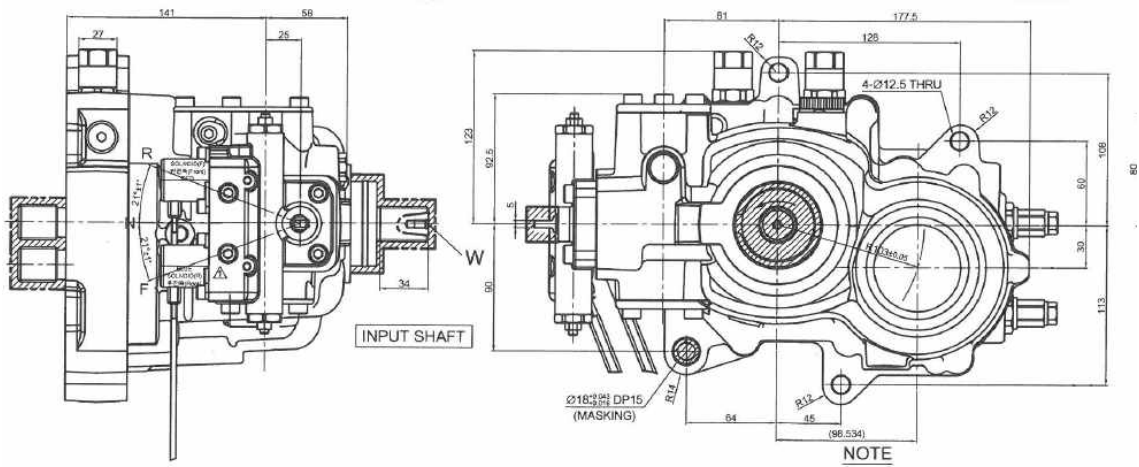


Fig. 2-9 유압 펌프

Table. 2-1 유압 펌프 제원

Hydraulic Pump	
Maximum Displacement	30 (cc/rev)
Rater input speed	2600 (rpm)
Relief setting pressure	380 (bar)
Maximum torque	250 (Nm)
Tilting angle	0 ~ 18 (degree)

Fig. 2-10에는 2가지 부하 조건(200kg, 600kg)에 대해 기계적 효율(Volumetric efficiency)과 체적 효율(Mechanical efficiency)을 나타내었다. 펌프 용적과 작동속도 조건에서 얻은 데이터를 가지고 체적 효율은 식(1), 기계적 효율은 식(2)를 이용하여 효율을 계산한다. 식(1),(2)를 이용하여 전 효율(Overall efficiency)을 구할 수 있다. 이러한 펌프의 효율들은 시스템 제어 시 고려하여야 된다.

$$\eta_{m.p} = \frac{P_p \cdot D_p}{T_p \cdot 2\pi} \quad (1)$$

$$\eta_{v.p} = \frac{Q_p}{D_p \cdot \omega_p} \quad (2)$$

$$\eta_{o.p} = \eta_{m.p} \cdot \eta_{v.p} \quad (3)$$

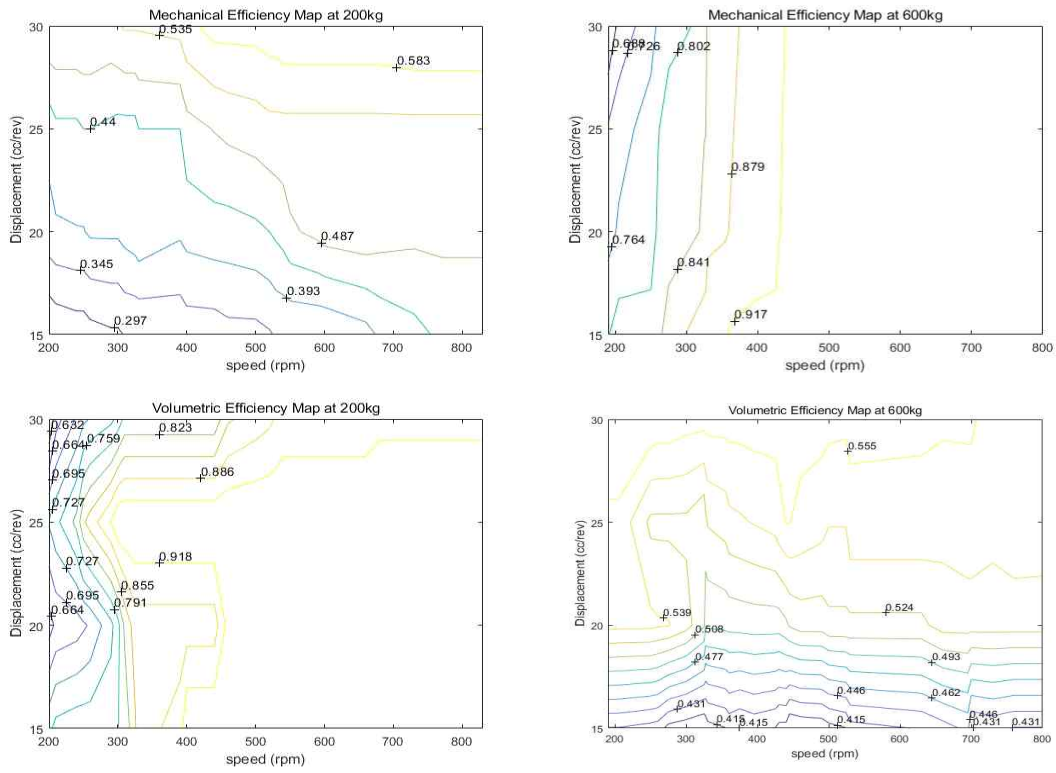


Fig. 2-10 유압 펌프의 효율 맵

2.5.2 유압 모터

Fig. 2-11는 본 연구의 실험 장치에 사용된 유압 모터이며 그 제원을 Table.2에 나타내었다.

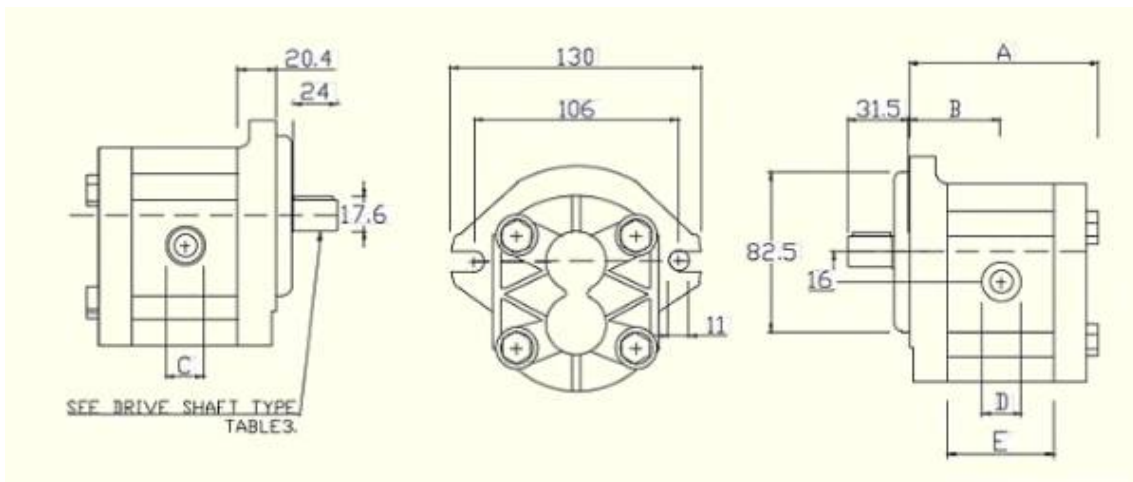


Fig. 2-11 유압 모터

Table. 2-2 유압 모터 제원

Hydraulic Motor	
Displacement	10 (cc/rev)
Minimum speed	300 (rpm)
Maximum speed	3500 (rpm)
Maximum pressure	210 (bar)

Fig. 2-12에는 실험 장치에 설치된 유압 모터의 체적 효율과 기계적 효율을 나타 내었으며 작동 조건에서 얻은 데이터를 기반으로 체적 효율(Volumetric efficiency)은 식(4), 기계적 효율(Mechanical efficiency)은 식(5)를 이용하여 계산한다. 식(4),(5)를 이용하여 식(6)의 전 효율(Overall efficiency)을 구할 수 있으며 이러한 모터의 효율들은 시스템 제어단계에서 고려 되어 전체 시스템 효율을 향상 시키는데 사용된다. 이러한 모터의 효율들은 시스템 제어 시 고려하여야 된다.

$$\eta_{m.m} = \frac{T_m \cdot 2\pi}{P_m \cdot D_m} \quad (4)$$

$$\eta_{v.m} = \frac{D_m \cdot \omega_m}{Q_m} \quad (5)$$

$$\eta_{o.m} = \eta_{m.m} \cdot \eta_{v.m} \quad (6)$$

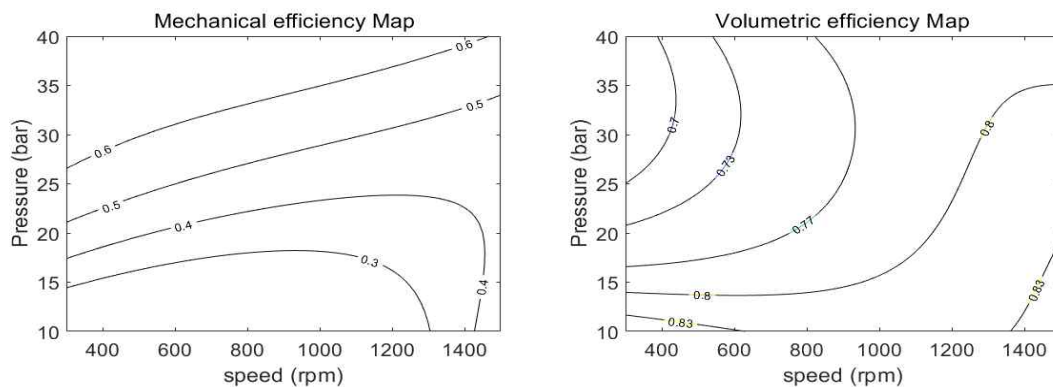


Fig. 2-12 유압 모터의 효율 맵

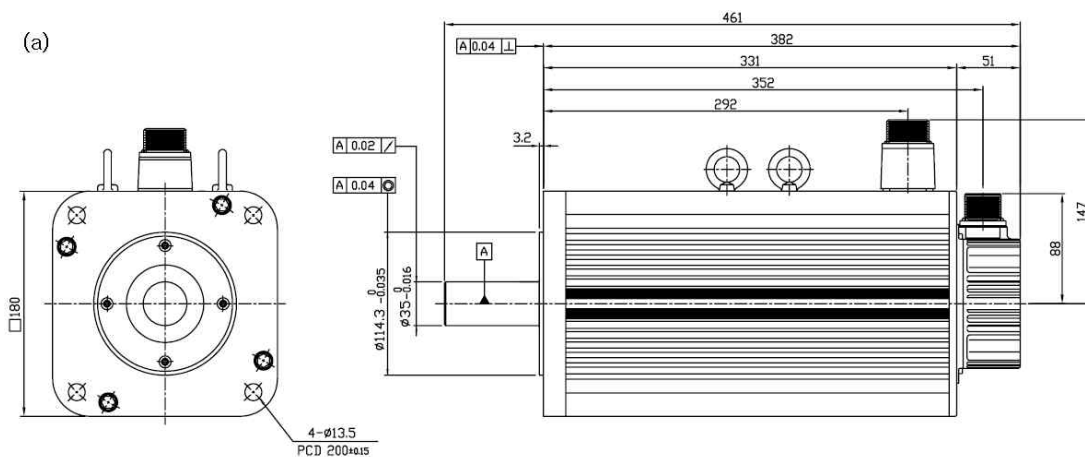
2.5.3 전기 모터

본 연구에 사용된 실험 장치는 2개의 전기 서보모터를 사용하고 있다. Fig. 2-13은 사용된 서보 모터이며 제원은 Table.3에 나타내었다. 7.5kW의 모터는 시스템의 주동력(엔진)의 역할을 하며 유성기어의 캐리어 측에 연결되어 있다. 5.5kW의 모터는 시스템의 보조동력(전기 모터) 및 발전기 역할을 하며 유성기어의 선 기어 측에 연결되어 있다.

본 연구 에서는 실제 굴삭기 보다 작은 크기의 테스트 벤치이다. 따라서 엔진을 7.5kW의 서보 모터를 이용하여 대체했기 때문에 효율 맵은¹²⁾에 설명된 것을 기반으로 엔진의 속도와 토크는 테스트 벤치에서 사용할 수 있는 수준으로 설정했다. Fig. 2-14는 본 연구에서 사용한 엔진 효율 맵이다. 이러한 효율 맵을 고려하여 엔진이 높은 효율 점에서 동작할 수 있도록 고 효율 점을 찾는 것이 목표이다.

Table. 2-3 전기 모터 제원

Electric servo Motor 7.5 (kw)		Electric servo Motor 5.5 (kw)	
Maker	Higen	Maker	Higen
model	FMATN75N-AB00	model	FMAKN55-AB00
Power	7.5 (kW)	Power	5.5 (kW)
Torque	47.7 (N.m)	Torque	26.18 (N.m)
Maaximum speed	3000 (rpm)	Maaximum speed	3000 (rpm)



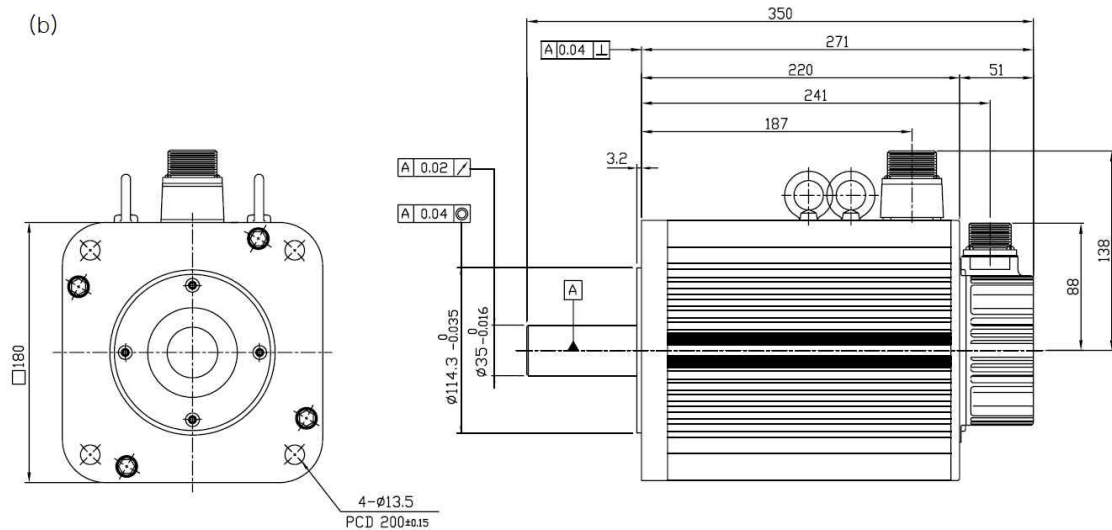


Fig. 2-13 전기 모터 : (a) 7.5kW, (b) 5.5kW

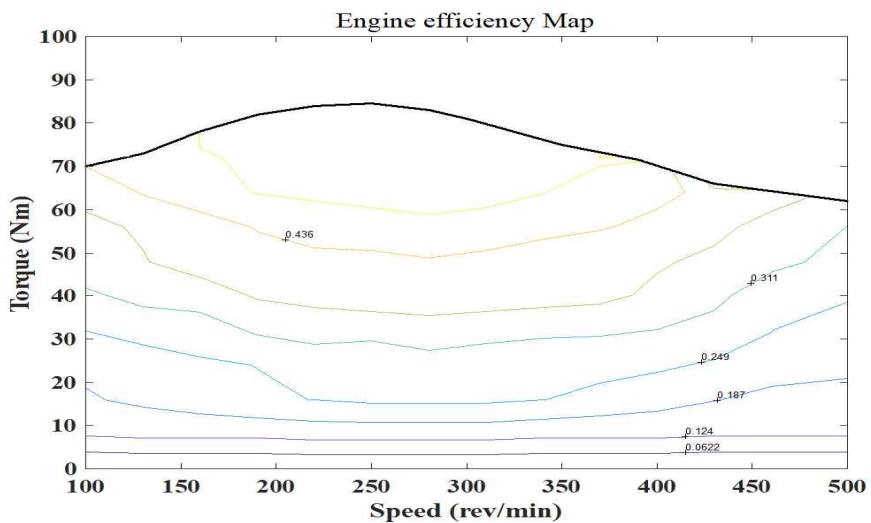


Fig. 2-14 엔진 효율 맵

2.5.4 발전기

발전기는 유압모터를 통해 전환된 기계적 에너지를 전기 에너지로 바꾸어 에너지 저장장치에 저장하는 역할을 한다. 본 연구에서 제안된 실험 장치에는 발전기가 구축되어 있지 않기 때문에 효율 맵은¹²⁾에 설명된 것을 기반으로 엔진의 속도와 토크는 테스트 벤치에서 사용할 수 있는 수준으로 설정했다. Fig. 2-15는 본 연구에서 사용한 엔진 효율 맵이다.

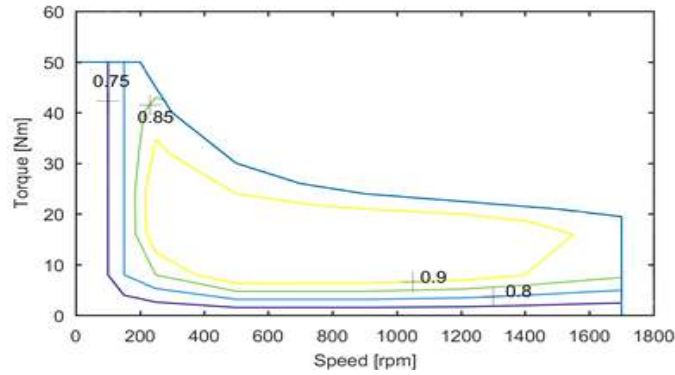


Fig. 2-15 발전기 효율 맵

2.5.5 유성기어

유성기어는 동력 분배와 변속을 목적으로 사용되는 기어의 일종으로 자동차의 CVT와 같은 원리로 사용이 가능하며 Fig. 2-16과 같이 구성이 되어 있다. 중심에 태양과 같이 자전을 하는 썬기어 (Sun gear), 썬기어 주위를 행성처럼 회전하는 Planet gear, 그리고 외곽에 링기어(Ring gear)로 구성되어 있다. 또한 planet gear를 일체형으로 움직이게 하는 캐리어 (Carrier)가 있다.

이러한 유성기어의 회전속도와 토크는 식 (7),(8)을 이용하여 사용 가능하며 제안된 시스템에 시스템에 사용된 기어 비는 식 (9)와 같다.

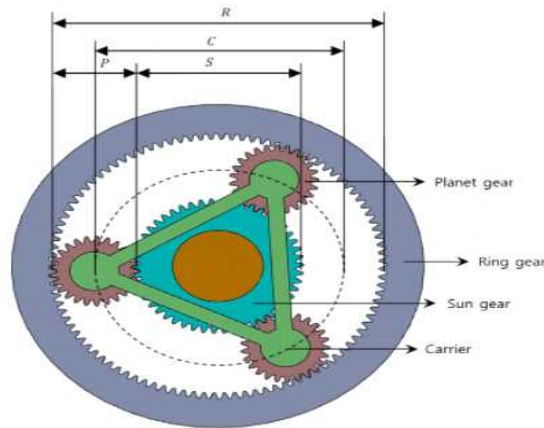


Fig. 2-16 유성 기어

$$N_s \omega_s + N_r \omega_r = (N_s + N_r) \omega_c \quad (7)$$

$$T_c = \left(\frac{N_s + N_r}{N_r} \right) T_r = \left(\frac{N_s + N_r}{N_s} \right) T_s \quad (8)$$

$$N_s : N_r = 50 : 130 \quad (9)$$

3. 제어 전략

제안된 시스템에서 에너지 소비량을 향상시키기 위해 각 상황에 맞는 구동 모드를 선정하기 위해 본 연구에서는 규칙기반으로 제어 전략 설계로 하였다. 제어 전략으로 규칙기반으로 구성 되어 에너지 효율을 극대화 시키며 시스템의 총 에너지 소비량을 줄이기 위한 목표로 한다. 본 연구에서 사용되는 제어 시스템의 구상은 Fig. 3-1과 같다.

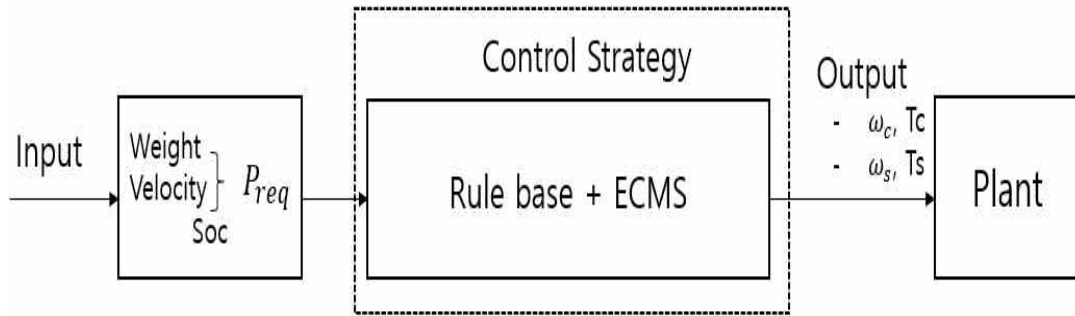


Fig. 3-1 제어 시스템의 구상

3.1. 시스템 제어 분석

운전자가 굴삭기의 붐 시스템을 실행할 때 조이스틱 신호는 붐의 속도(V)를 결정하는 제어 명령이다. 또한 펌프의 필요한 토크가 결정되면 엔진과 모터의 토크가 고정되어 제어 할 수 없다. 따라서 식(10)에 나타는 링 기어의 토크를 조절하기 위해 펌프의 변위를 제어하여 링 기어의 토크를 조절한다. 링 기어의 속도는 식(11)과 같다.

$$T_r = \frac{P_p D_p}{2\pi} \eta_{m.p} \quad (10)$$

$$\omega_r = \omega_p = \frac{Q_p}{D_p} \eta_{v.p} \quad (11)$$

위의 분석을 기반으로 엔진 속도는 펌프 속도에서 분리되는데, 여기서 기능은 연속 가변 변속기 (CVT)와 유사하며 전기 하이브리드 기술을 통해 실현된다. 엔진 토크는 가변 유압 펌프를 통해 부하에서 분리가 된다. 따라서 제안 된 파워 트레인은 전기 유압 연속 가변 파워 트레인 (EHCVP)으로 명칭 한다.

3.2. 동력분배 및 구동모드선택

본 연구에서 제안된 제어전략인 규칙기반시스템의 구상도는 Fig. 3-2과 같다.

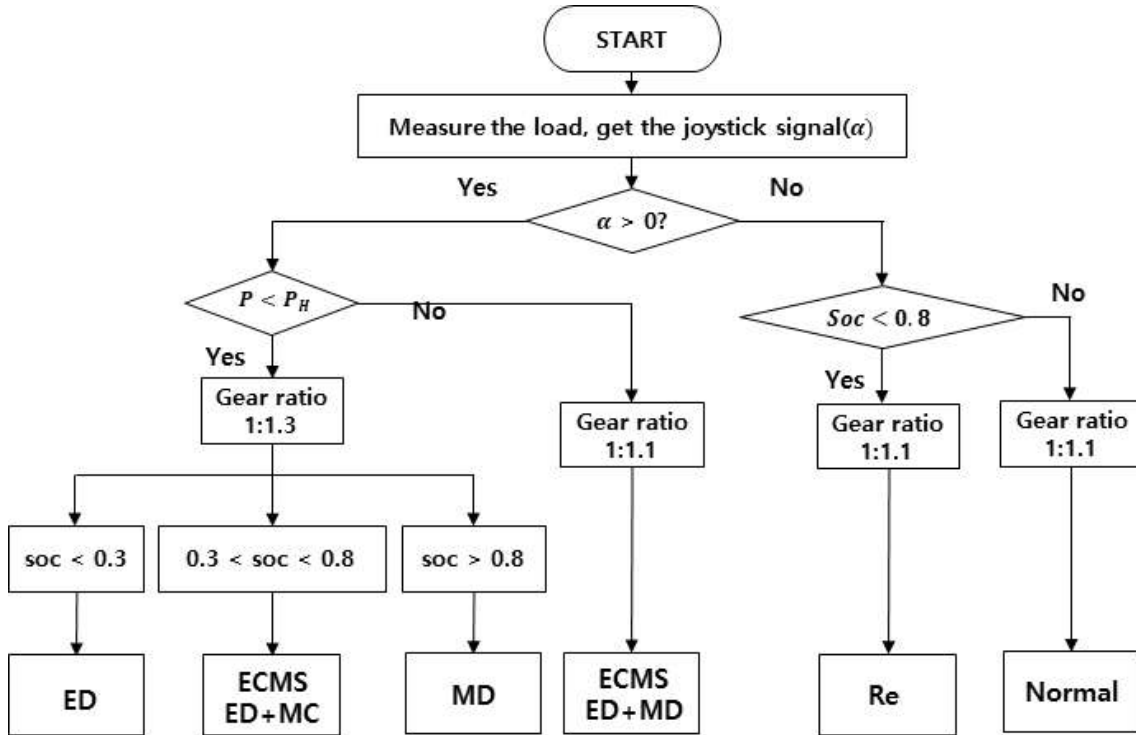


Fig. 3-2 규칙 기반 구상도

3.3. 제어 전략

제안된 시스템은 여러 가지 구동 모드를 가지고 있다. 이러한 구동 모드를 결정하기 위해서는 엔진 모터와 보조 모터의 속도가 정해져야 한다. 조이스틱 신호와, 요구된 파워, 충전상태(SOC)를 이용하여 시스템 구동 목표를 만족시킬 수 있는 규칙기반시스템을 이용하여 각 구동 모드에 맞는 동력분배를 결정하는 것이 본 연구에 사용되는 동력 분배의 개념이다. Fig. 3-3은 제안된 시스템의 제어 전략의 설정된 입력 신호를 나타낸다.

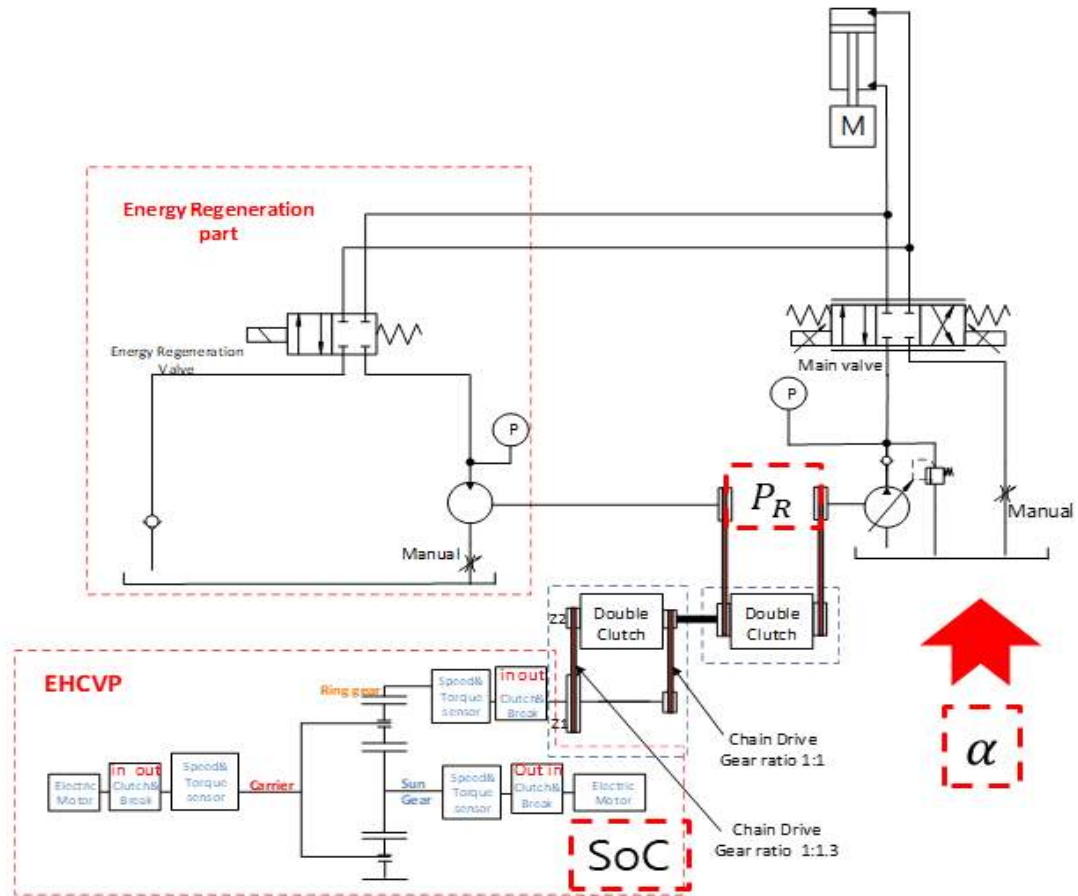


Fig. 3-3 제안된 제어전략의 설정 된 입력 신호

이러한 동력 분배를 위해서는 먼저 펌프 회전속도를 구해야 한다. 이를 위해 먼저 식(12)을 이용하여 목표 실린더 속도를 만족시키는 유량을 계산한다. 실린더 상승 시 식(11)를 이용하여 펌프 구동에 필요한 회전 속도를 계산할 수 있다. 펌프와 유성기어의 링기어 축은 상황에 따라 1:1의 기어 비와 1:1.3의 기어 비를 사용할 수 있다. 1:1의 기어 비를 사용할 경우 식(13)와 같고, 1:1.3의 기어 비를 사용할 경우에는 식(14)과 같다. 펌프 동력을 구하기 위해서는 식(13)과 실린더 로드 챔버의 압력을 이용하여 식(15)으로 구할 수 있다.

$$Q = VA \tag{12}$$

$$\omega_r = \omega_p, \quad \omega_r = \frac{\omega_p}{1.3} \tag{13),(14)}$$

$$P_{req} = p_c q_{req} \tag{15}$$

Table. 3-1 실린더 상승

Cylinder Up	
$P_{req} < P_H$	
if $SoC < 0.3$ (16)	
$\frac{N_s}{(N_s + N_r)}\omega_s + \frac{N_r}{(N_s + N_r)}\omega_r$	$G_{ear} = 1.3$
if $0.3 < SoC < 0.8$ (17)	
$ECMS : [ED + MC]$	$G_{ear} = 1.3$
if $SoC > 0.8$ (18)	
$\frac{(N_s + N_r)}{N_s}\omega_c - \frac{N_r}{N_s}\omega_r$	$G_{ear} = 1.3$
$P_{req} > P_H$ (19)	
$ECMS : [ED + MD]$	$G_{ear} = 1$

$P_{req} < P_H$ 일 때 식(16)의 식은 엔진 드라이브 모드이고 기어 비는 1:1.3을 사용하며, 식(17)의 식은 하이브리드 모드(엔진 드라이브 그리고 모터 차지모드)이다. 이때 하이브리드 모드는 ECMS전략으로 엔진, 보조 모터의 구동 속도를 설정한다. ECMS에 관한 내용은 4장에서 설명한다, 식(18)의 식은 모터 드라이브 모드이고 기어 비는 1:1.3을 사용한다.

$P_{req} > P_H$ 일 때 식(19)의 식은 하이브리드 모드(엔진 드라이브 모드 그리고 모터 드라이브 모드)이다. 이 식 또한 ECMS전략으로 엔진, 보조 모터의 구동 속도를 설정한다.

실린더 하강시, 유량 또한 식(12)를 이용하여 구할 수 있다. 이 후 식(20)을 이용하여 유압 모터가 구동 될 때 속도를 계산한다. 제안된 시스템에서는 유압 모터에서는 링 기어 축과 1:1의 기어 비를 사용한다.

$$\omega_m = -\frac{Q_d \cdot \eta_{v.m}}{D_m} \quad (20)$$

Table. 3-2 실린더 하강

Cylinder Down	
$SoC < 0.8$	Regeneration Mode
$SoC > 0.8$	Normal Mode

$SoC < 0.8$ 일 때 Regeneration모드가 작동 되고 메인 컨트롤밸브(MCV)부분이 동작을 멈추고 유압 모터 축으로 실린더의 유량이 흐르며 작동유를 회생하게 된다.

$SoC > 0.8$ 일 때는 실린더의 유량이 바로 저장 탱크로 흐르는 Normal모드가 작동된다.

3.4. SoC(충전 상태)

본 연구에서 사용된 SoC의 식은 식(21)과 같다. 이 식은 Zhou의 논문을 참고하여 SoC의 식을 적용했다.¹⁴⁾

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \int_0^t \frac{P_{motor}(t)}{\eta_b \cdot 3600 \cdot E_b} dt \quad (21)$$

$SoC(t_0)$ 는 $SoC(t)$ 의 초기입력 값이며 본 연구에서는 초기 값 60%로 설정 하였다. η_b 는 배터리의 효율이며 배터리 충전중이면 0.98, 충전 중이 아니면 1의 값으로 설정 하였으며, P_{motor} 는 모터의 파워를 나타내며 충전중이면 SoC 가 상승하게 되며, 충전 중이 아니면 SoC 가 감소하게 된다. E_b 는 배터리의 커패시터이며 20(Wh)로 설정 하였다.

Example)

Working Condition = 200kg, 0.13m/s, SoC = 60%

Set : $P_H = 435.55 W$

$$Q = A \cdot v = 9.8L/min$$

$$P_{req} = P \cdot Q = 246.55 W$$

$P_{req} < P_H$ -----> SoC = 60% = ECMS(4장에서 자세한 설명을 한다) : Engine Drive and Motor Charge Mode

$$\therefore \omega_c = 345 rpm, \omega_s = -350.5 rpm$$

4. 최적화 및 시뮬레이션

4.1. 최적화

3장에서 제안된 시스템에서 구동모드가 [ED+MC], [ED+MD]으로 선정되었을 때 엔진 모터와, 보조 모터가 동시에 구동되게 된다. 본 연구에서는 부업 모드에서 에너지 절약 효율의 최적화를 목표로 한다. 에너지 절약 효율을 높이기 위해 에너지 관리 방법으로 등가 소비 최소화 전략(ECMS)을 사용한다. 다음 단계에 따라 ECMS를 이용하여 최소의 에너지 소비량을 구한다.

4.1.1 등가소비최소화전략(ECMS)

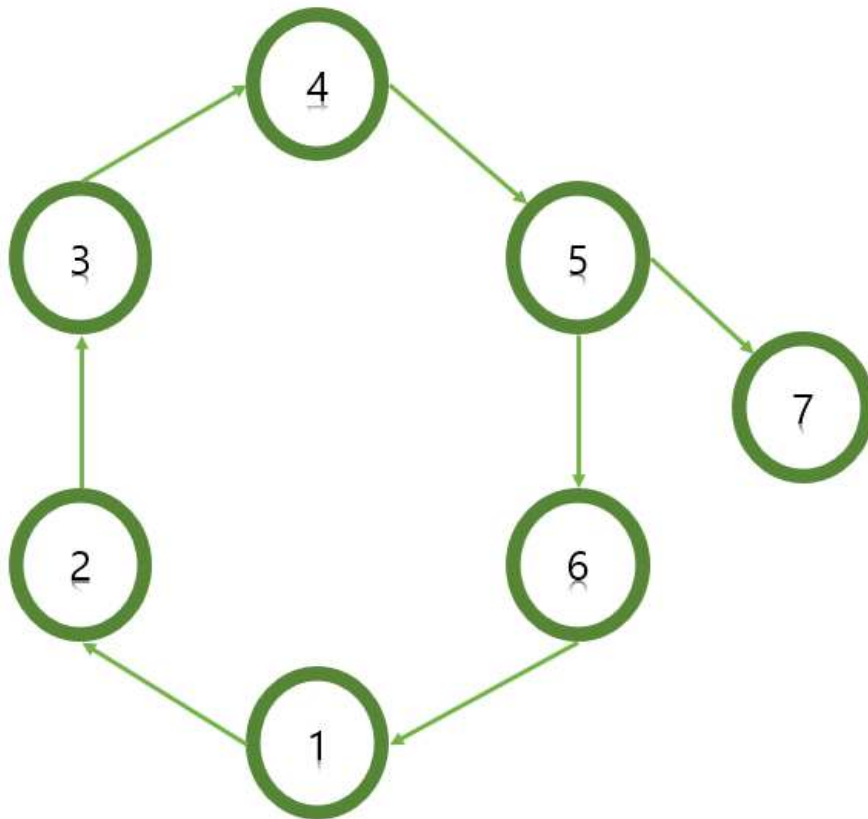


Fig. 4-1 ECMS전략 구조

Step.1 : 특정 전력요구 사항에서 식(7),(8)로 엔진 토크 및 엔진 속도를 계산한다.

Step.2 : Step.1에서 구한 엔진 토크, 엔진 속도를 기반으로 엔진 효율을 찾는다.

Step.3 : Step.1에서 구한 엔진 토크, 엔진 속도를 기반으로 보조 모터 토크, 보조 모터 속도를 구한다.

Step.4 : Step.3에서 구한 모터 토크, 모터 속도를 기반으로 모터 효율을 찾는다.

Step.5 : 엔진과 모터의 효율을 고려하여 식(21),(22)을 구한다.

Step.6 : Step.5에서 구한 식을 이용하여 식(23)을 구한다.

Step.7 : 가능한 모든 작동 지점을 사용하여 최고의 효율성 지점을 구한다.

Step.8 : 최소 및 최대 엔진 출력 사이의 각 전력 요구 사항에 대해 1-8 단계를 반복하고 최대 효율 점을 찾고 최소의 총 에너지 사용량을 찾는다.

4.1.2 목적함수

본 연구에서 사용되는 목적함수는 부업모드에서 에너지 총 사용량이다. 식(21),(22)을 이용하여 엔진모터와 보조 모터 구동에 사용된 에너지를 계산한다. 식(22)에서 $\omega_s T_s$ 가 양수이면 모터모드이며, $\omega_s T_s$ 가 음수이면 발전기모드이다. 제안된 시스템의 에너지 총 사용량이자 ECMS의 목적함수는 식(23)과 같다.

$$E_{en} = \int \frac{\omega_c T_c}{\eta_{eng}} dt \quad (21)$$

$$E_{mo} = \begin{cases} \int \frac{\omega_s T_s}{\eta_{motor}} dt, \omega_s T_s > 0 \\ \int \omega_s T_s \eta_{motor}, \omega_s T_s \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$E_{total} = E_{en} + E_{mo} \quad (23)$$

4.2. 시뮬레이션

4.2.1 시뮬레이션 모델링

향상된 에너지 사용량의 데이터를 검증하기 위해 유압 해석 사용프로그램인 AMESim과 Matlab을 같이 사용한 Co-simulation을 이용하여 모델링 및 시뮬레이션을 했다. Fig. 4-2은 AMESim에서의 EHCVP을 모델링한 것이고, Fig. 4-3은 Matlab에서 제안 한 제어 전략을 모델링 한 것이다. 동일한 구동 모드에서 기존의 시스템과 본 연구에서 제안된 시스템의 모델을 비교하여 검증한다.

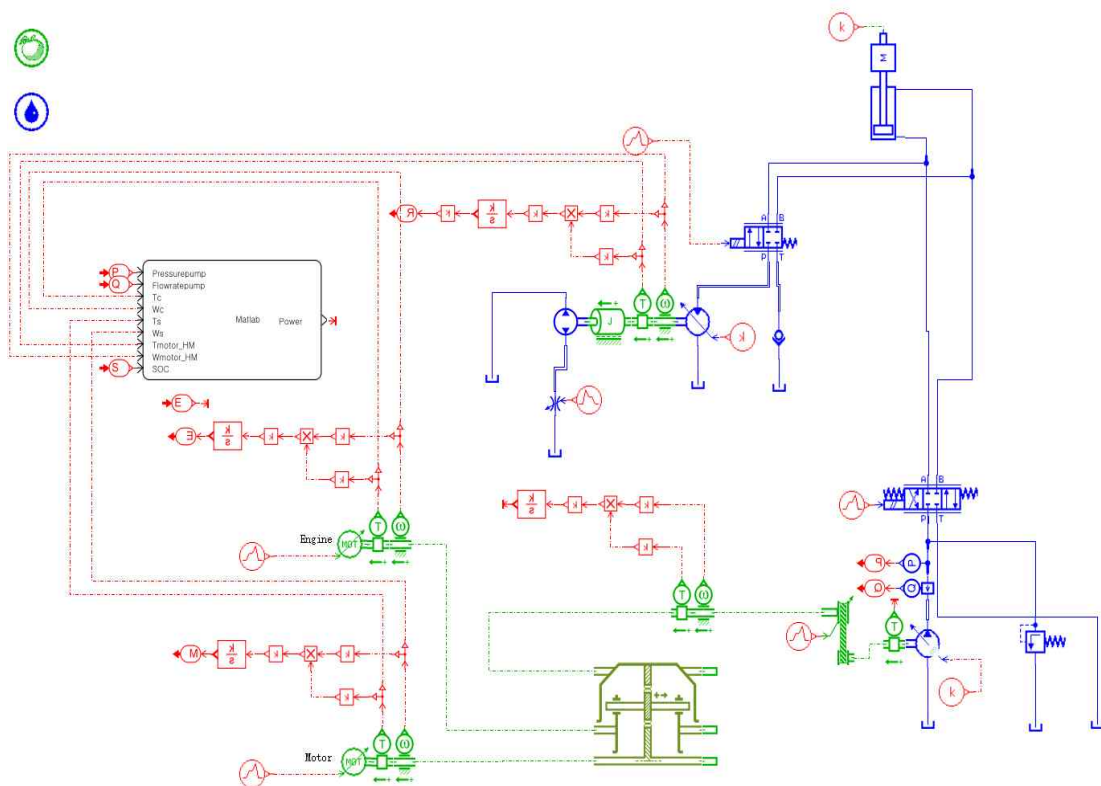


Fig. 4-2 AMESim상에서의 모델링

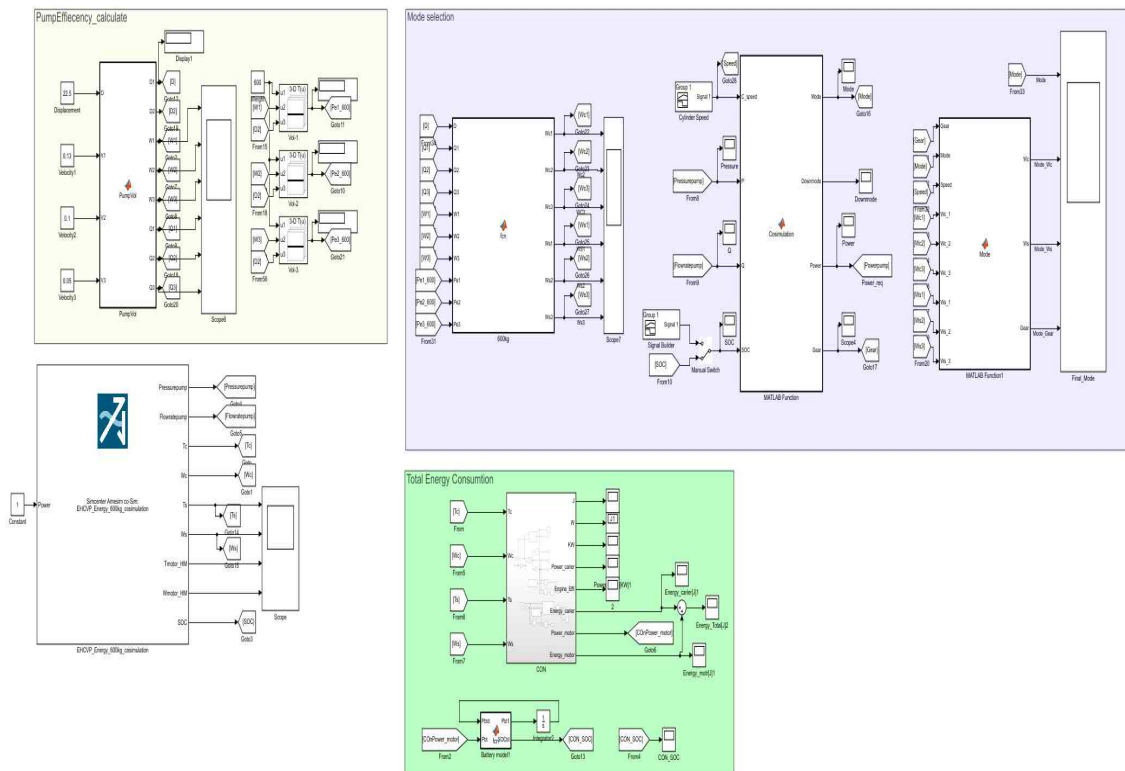


Fig. 4-3 Matlab상에서의 Co-simulation

4.2.2 시뮬레이션 결과

200kg, 600kg의 하중 조건에서 작업 상황을 Fig. 4-4에 나타난 조이스틱 신호(0.05, 0.1, 0.13)m/s를 입력 값을 이용하여 기어 비가 1:1로 고정된 기존의 시스템과 본 연구에서 제안된 시스템을 시뮬레이션을 통해 비교해 보았고, 그 결과들은 다음과 같다. 조이스틱 신호에 따라 요구되는 파워는 Fig. 4-5과 같이 보여준다. 제어전략에서 제안된 규칙기반전략을 사용하여 선정된 모드와 기어 비를 Fig. 4-6를 통해 확인 할 수 있다. Fig. 4-6에서 모드에 y축의 결과 값의 제원은 Table. 4-1에 나타내었다. 초기 충전상태(SoC)는 60%로 설정하였다. 시뮬레이션을 통해 에너지 총 사용량을 비교한 결과 값은 Fig. 4-7에서 나타내었다.

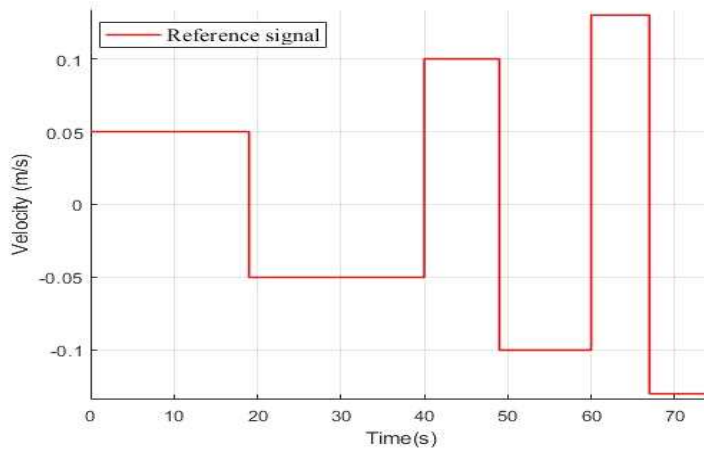


Fig. 4-4 설정된 조이스틱 신호

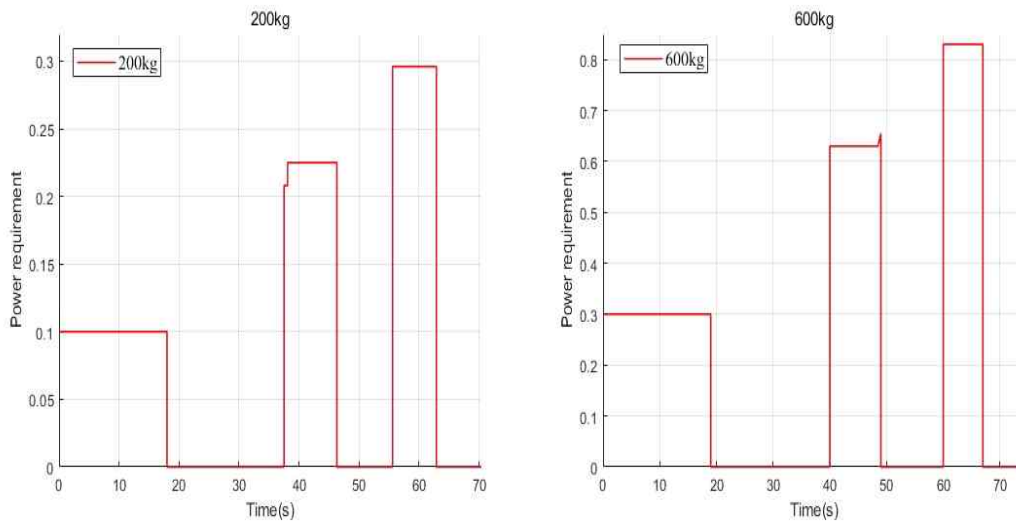


Fig. 4-5 상황에 따른 요구된 파워

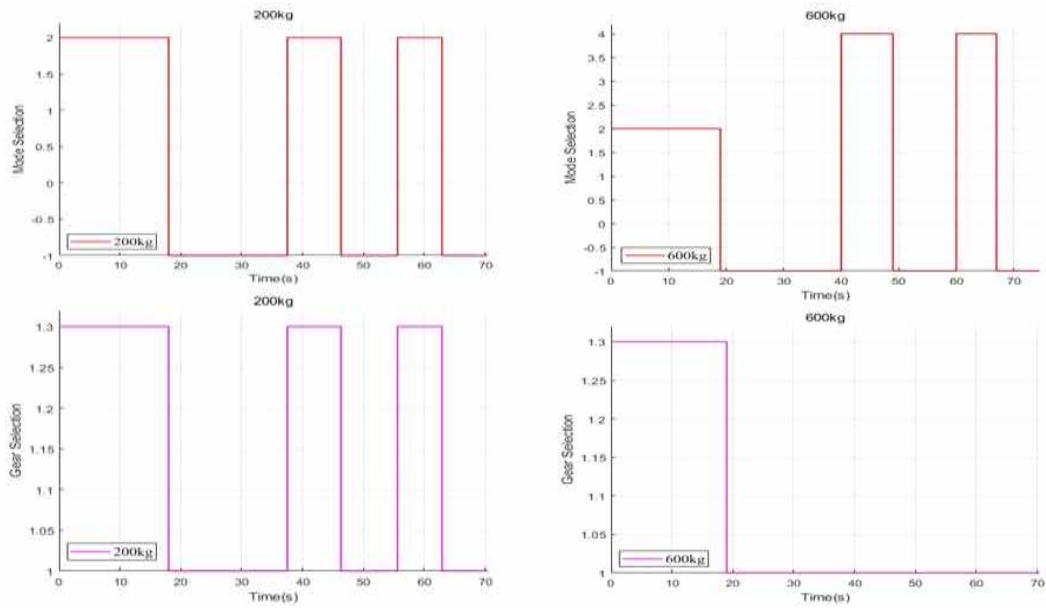


Fig. 4-6 설정된 모드 및 기어 비

Table. 4-1 구동모드 제원

Mode Selection	
Value	Mode
1	Engine drive mode
2	Engine drive and Motor charge mode
3	Motor drive mode
4	Engine and Motor drive mode
-1	Regeneration
-2	Normal

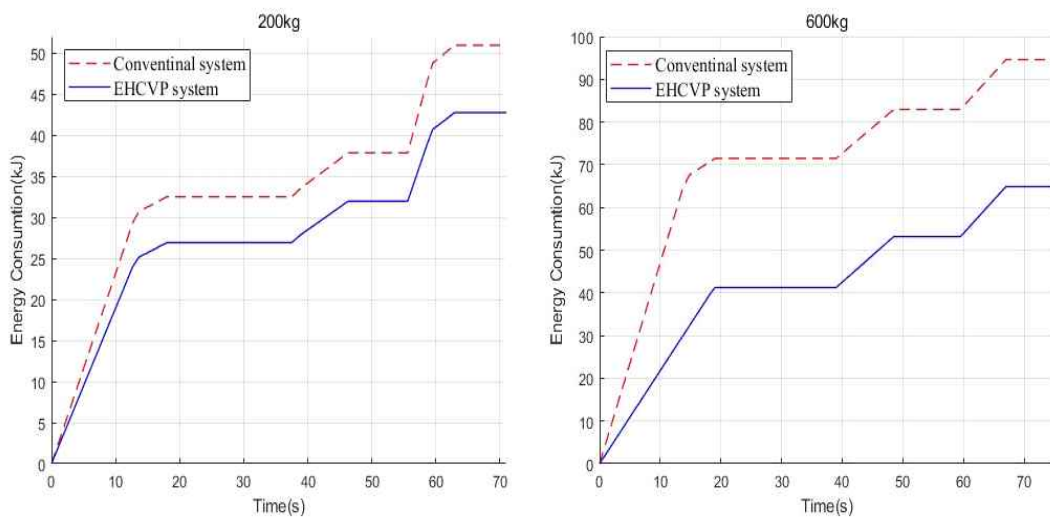


Fig. 4-7 총 에너지 사용량

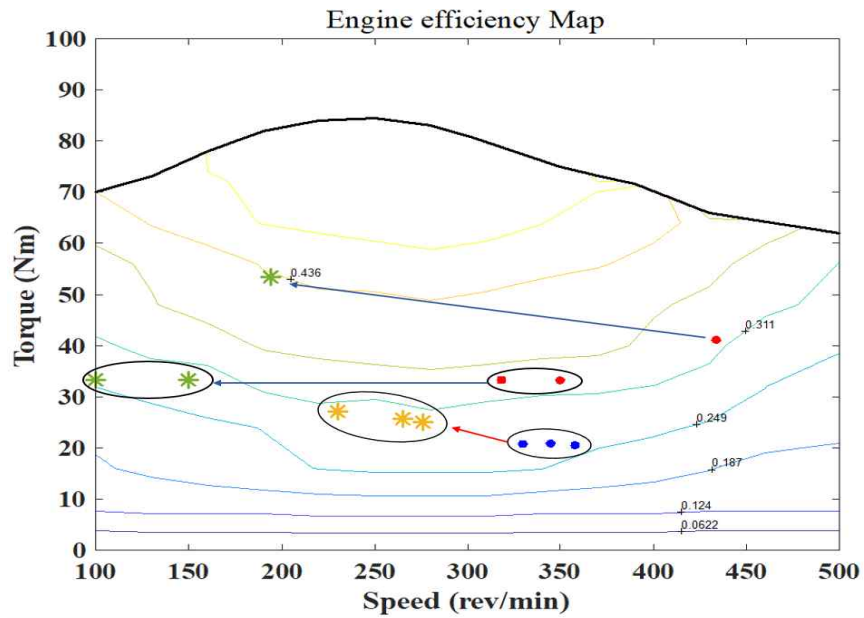


Fig. 4-8 엔진 효율 변화

Fig. 4-8에서는 200kg, 600kg에서의 엔진의 효율이 상승 한 것을 확인 할 수가 있다. 위에 두 포인트의 파란선의 표시는 200kg의 엔진 효율 변화를 보여 주며, 아래의 포인트의 빨간선의 표시는 600kg의 엔진 효율 변화를 보여준다. 200kg에서는 같은 모드인 (Engine Drive and Motor Charge Mode)이므로 기어 비를 1:1~1:1.3을 이용 하였을 경우 효율이 증가 하는 것을 확인 할 수 있다. 600kg에서 아래 두 포인트는 (Engine Drive and Motor Drive Mode)이고 기어 비의 변화가 없다. 이때는 모터의 효율이 엔진효율에 비해 많이 증가 한다.

각 시스템의 에너지 사용량에 대한 결과를 Table. 4-2에 나타 내었다. 제안된 시스템은 기존의 시스템에 비해 200kg, 600kg의 부하 조건에서 각각 16.11%, 31.4%씩 에너지 총 사용량이 감소한 것을 볼 수 있다.

Table. 4-2 SoC 초기 값 60%의 설정에 사용된 에너지 총 사용량 및 향상률

system	load[kg]	E_{sys} [kJ]	Improve[%]
Conventional	200	50.95	-
	600	94.61	-
Proposed	200	42.74	16.11
	600	64.87	31.4

5. 실험 및 결과

Fig. 5-1은 제안된 시스템을 검증하기 위해 구성된 실험 장치(a : 동력부, b : 유압부, c : 실린더부)이며 자세한 장치들의 제원은 부록.2에 기재되어 있다. 이 실험 장치에 본 연구에서 제안한 제어 전략을 적용시켜 결과를 확인한다.

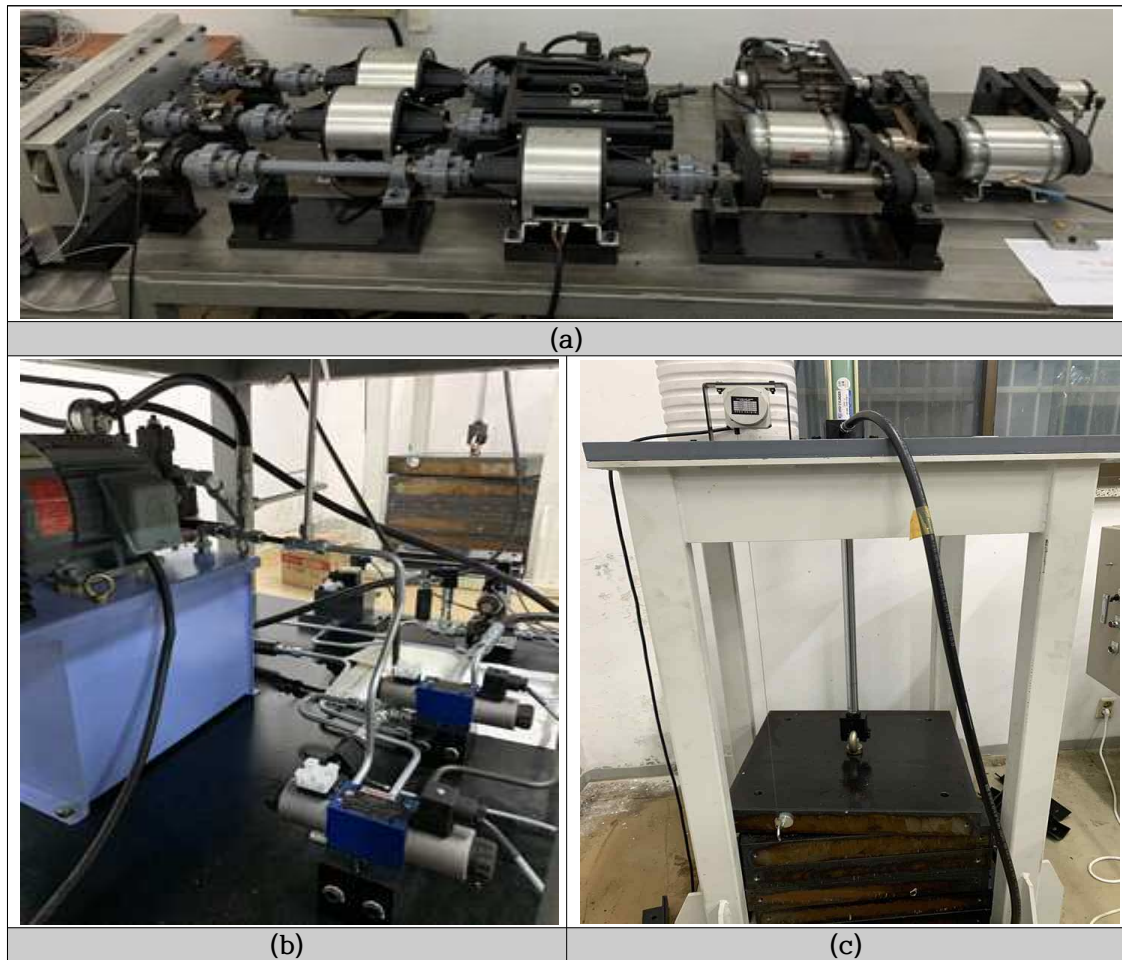


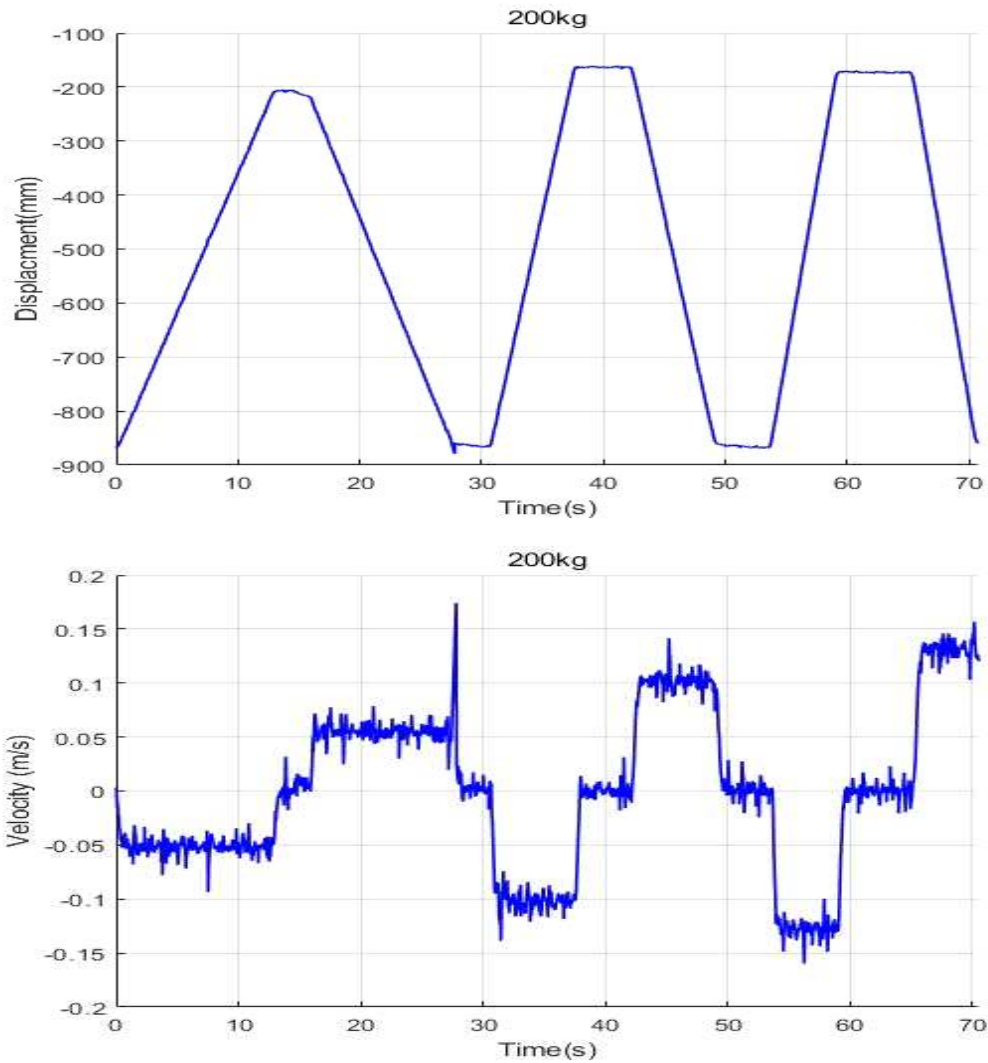
Fig. 5-1 테스트 벤치

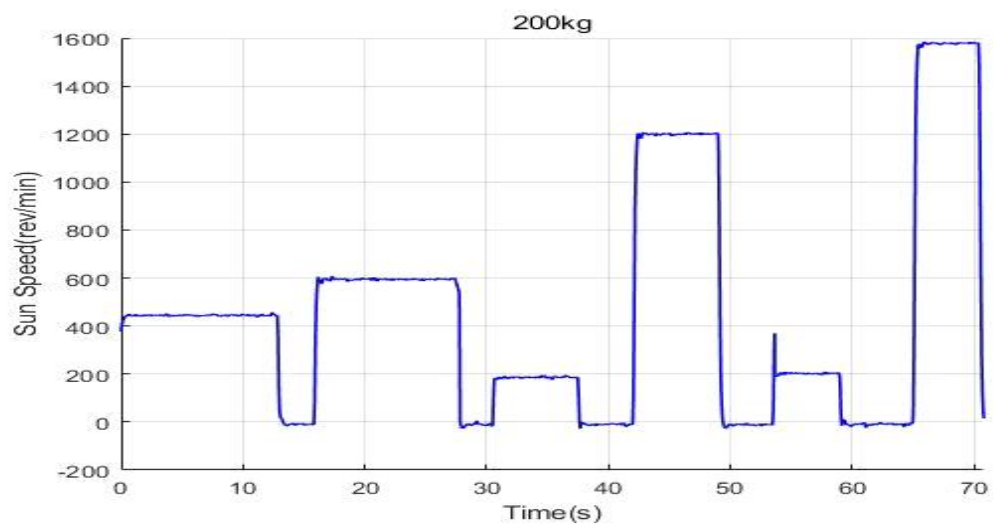
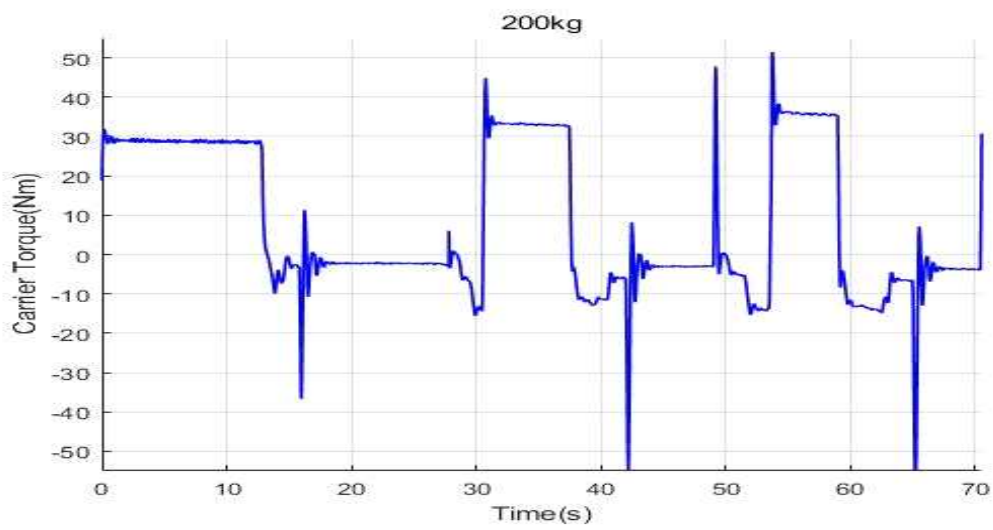
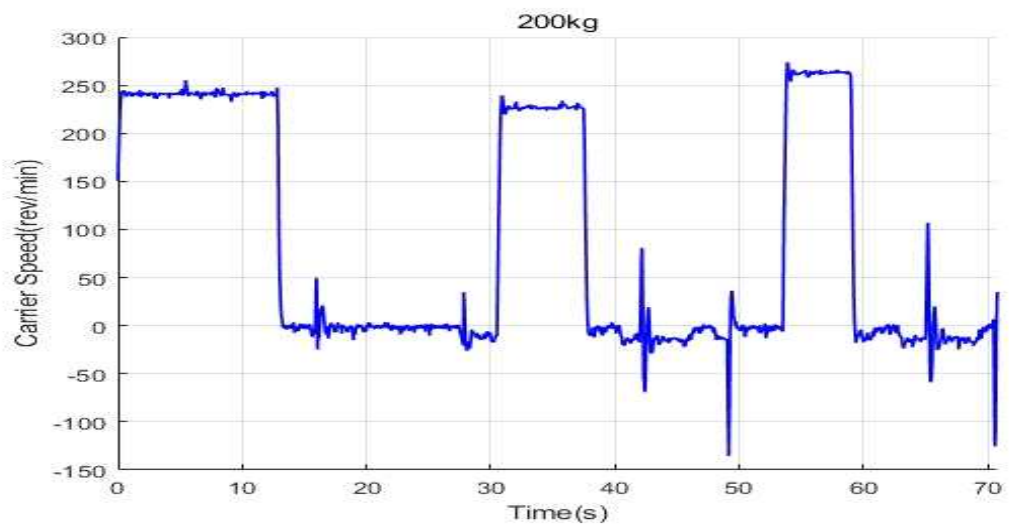
실험은 200kg과 600kg 두 가지 부하 조건에서 각각 (0.05, 0.1, 0.13)m/s의 속도로 상, 하 운동을 실시하였으며, 초기 충전 량의 설정은 60%로 하였고, 기어 비를 1:1만 사용한 결과는 (Convetical system), 이 연구에서 제안된 시스템인 (기어 비를 1:1~1:1.3을 사용한) 결과는 (EHCVP system)으로 표시 하였다. 실험의 결과 값은 Fig. 5-2에 나타내었다.

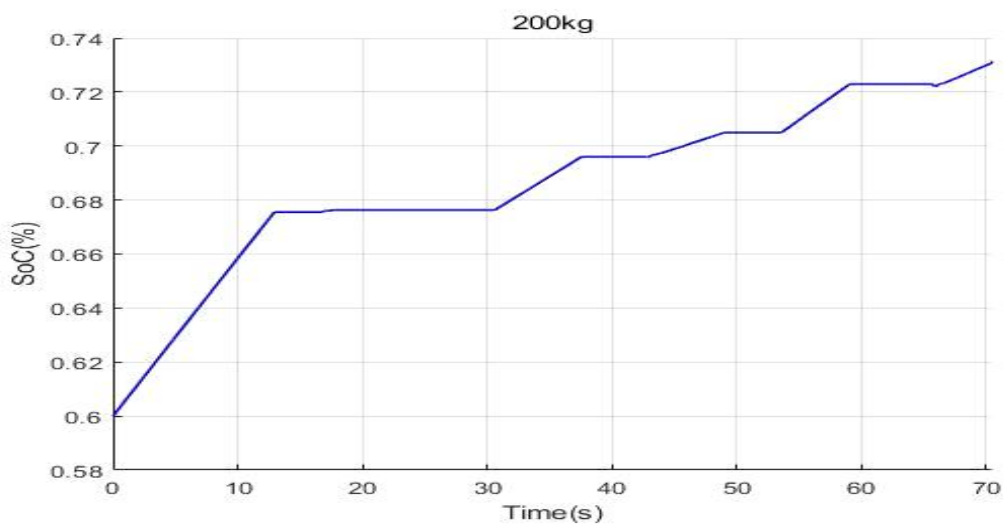
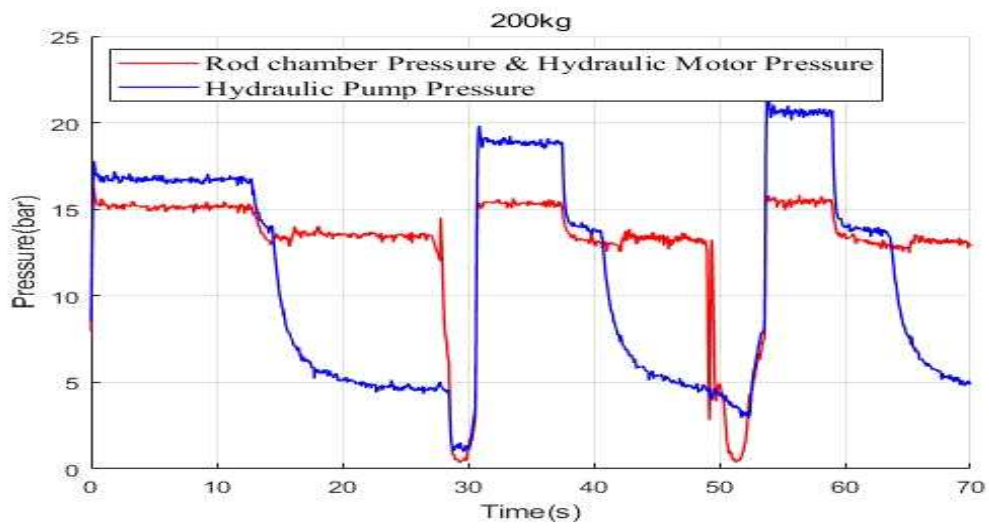
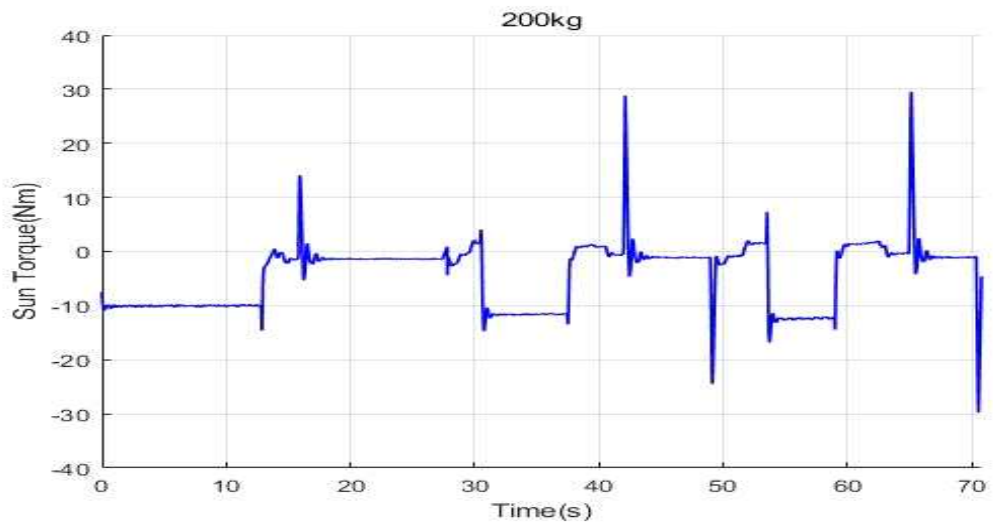
실험 결과는 실린더의 작동 변위 및 속도, 엔진과 모터의 회전 속도와 토크, 펌프, 유압 펌프와 모터, 실린더 로드측 압력, SOC(충전상태), 전력과 소비량에 대해 나타내었다. 각 실험의 사용 전력을 살펴보면 실린더 상승 시에는 하강 할 때보다 비교적 많은 전력을 사용하는 것을 확인 할 수가 있다. 또한 부하 조건이 200kg, 600kg일 때에도 다른 것을 확인 할 수 있다. 설정된 작업 조건에 따라 각각 작동 모드가 다르지만 기어 비를 1:1을 사용 했을 때보다

EHCVP system(기어 비를 1:1~1:1.3)을 사용 했을 경우에 에너지 소비량이 비교적 많이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

이러한 실험결과를 통해 실험장치의 작동 결과와 에너지 사용에 대한 결과는 시뮬레이션 결과와 거의 동일 한 것을 확인할 수 있다.







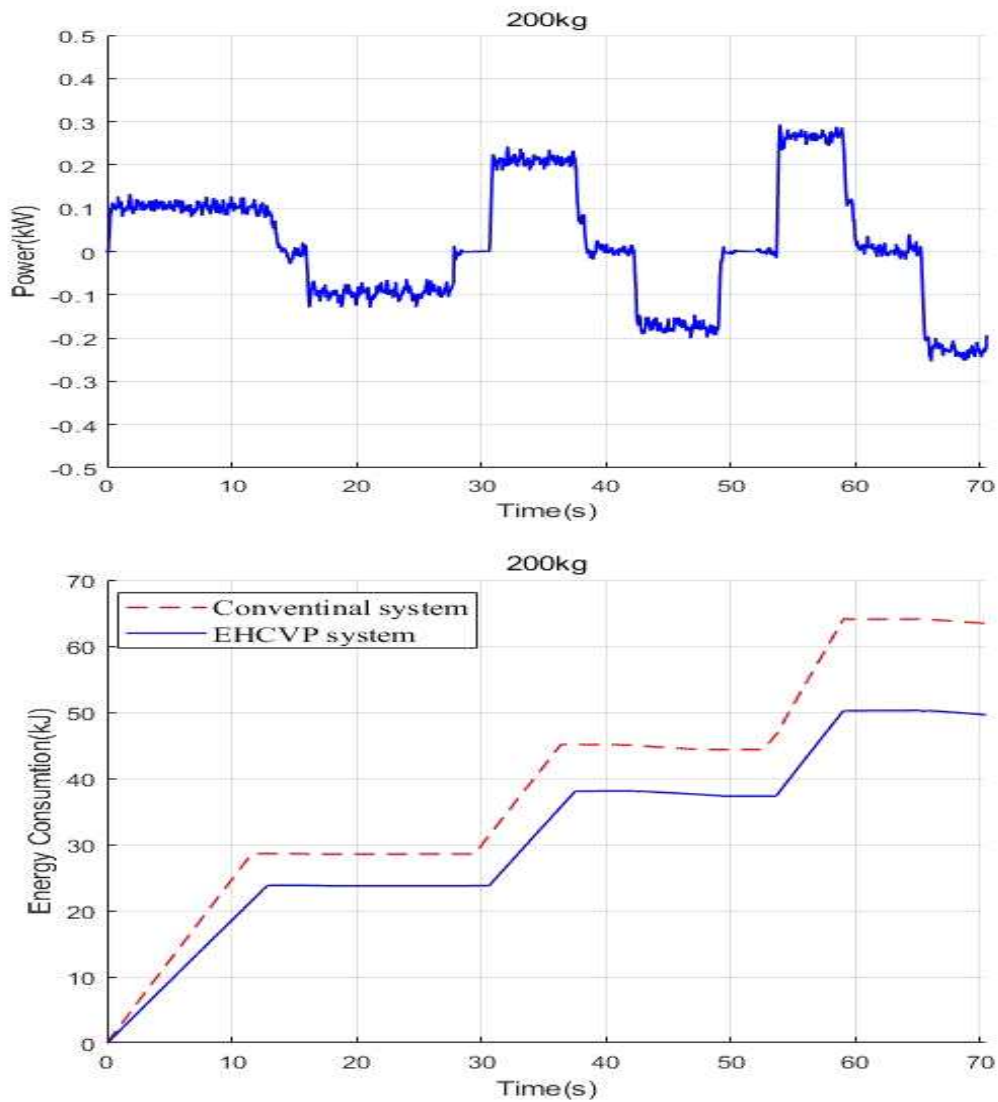
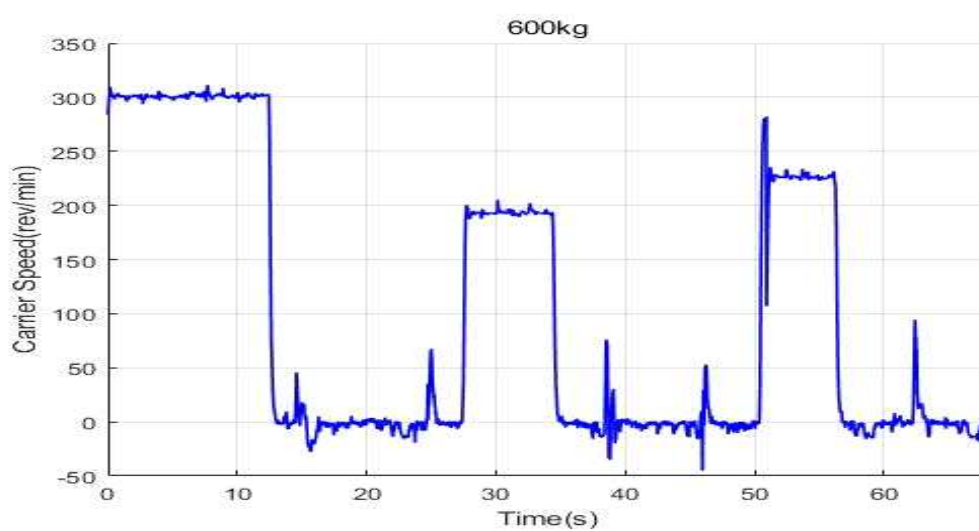
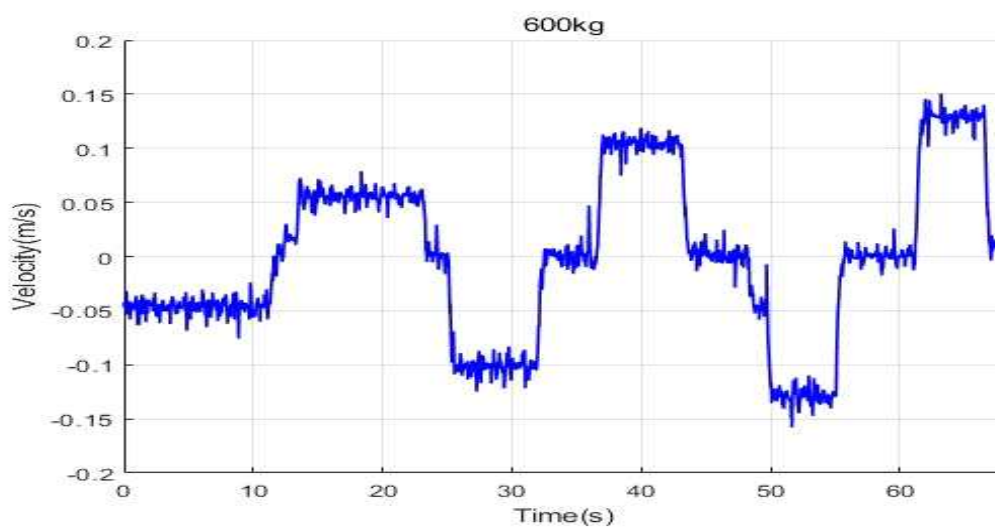
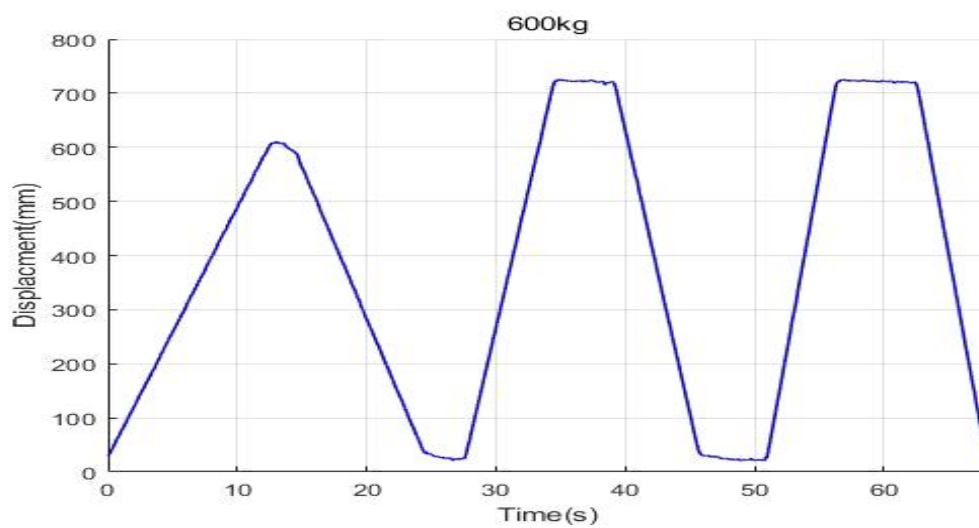
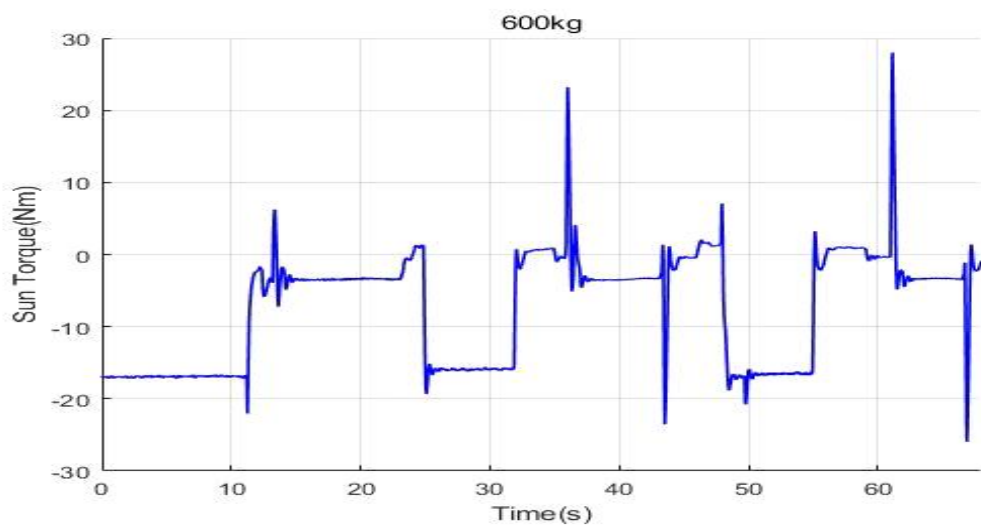
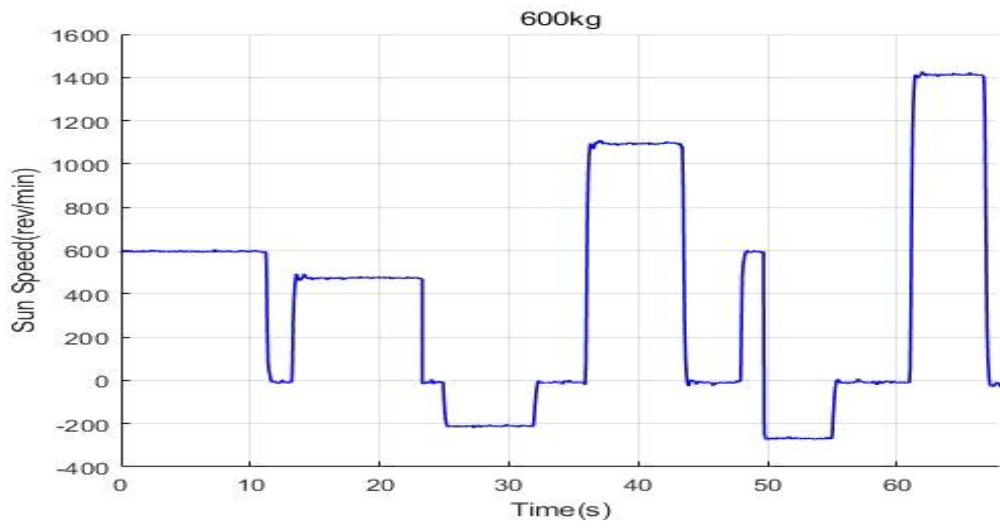
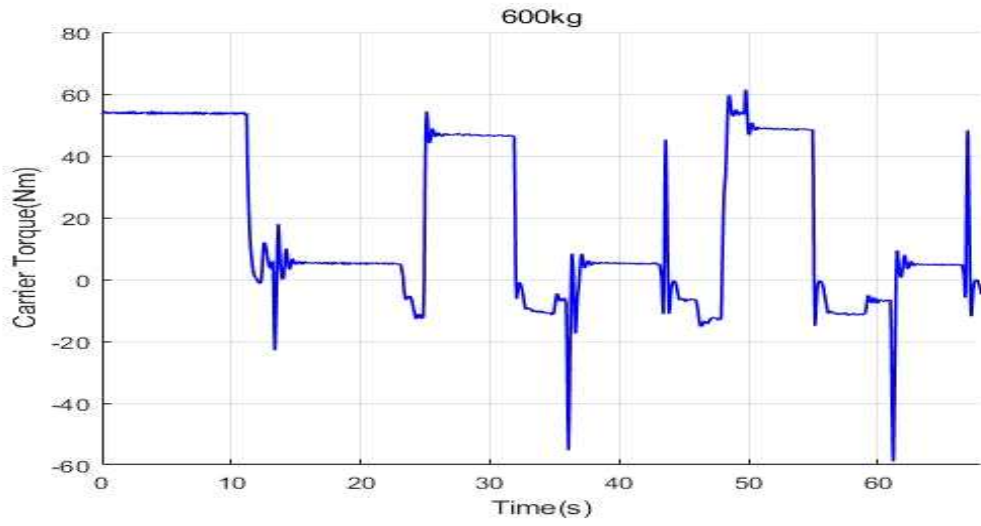


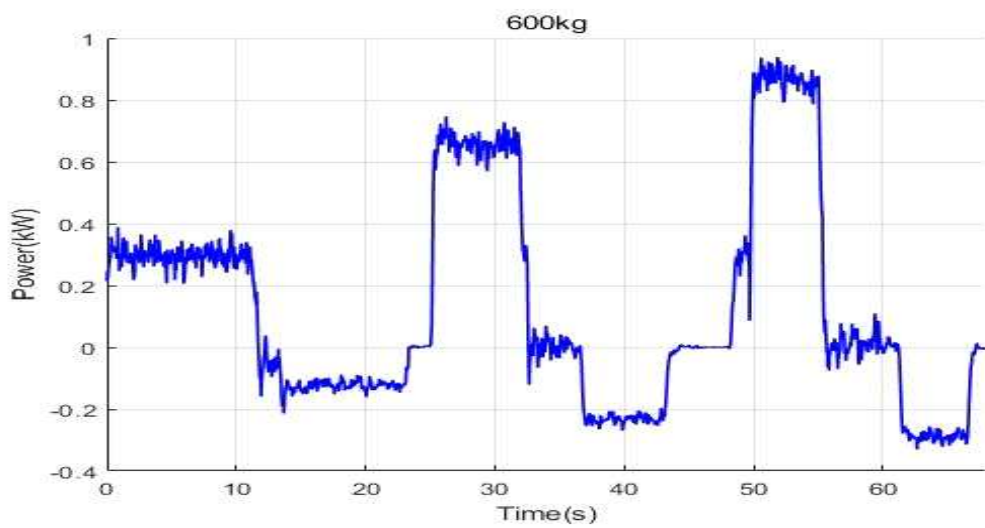
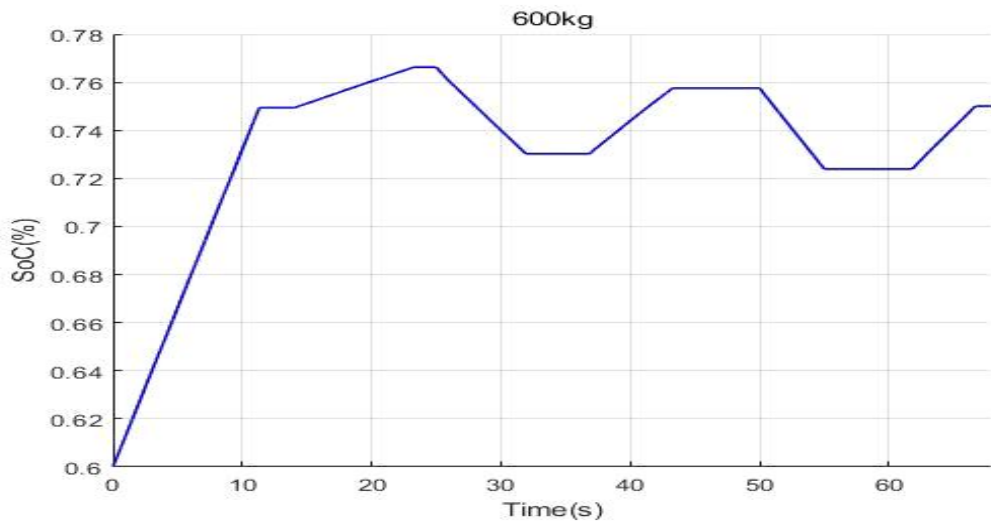
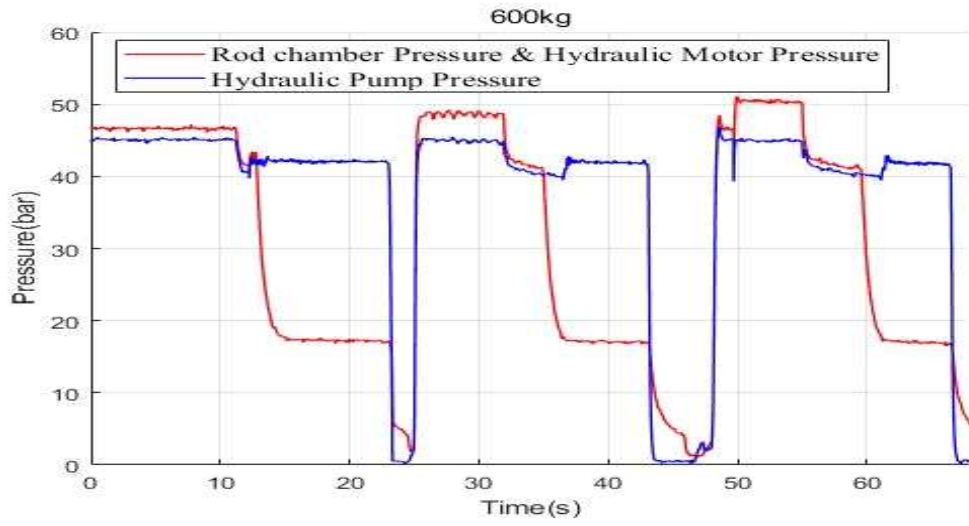
Fig. 5-2 200kg일 때 실험 결과 값

Table. 4-3 200kg일 경우 Simulation과 Test Bench의 에너지 총 사용량 및 향상률

system	load[kg]	E_{sys} [kJ]	Improve[%]
Conventional	Simulation - 200	50.95	-
	Test Bench - 200	64.05	-
Proposed	Simulation - 200	42.74	16.11
	Test Bench - 200	50	21.93







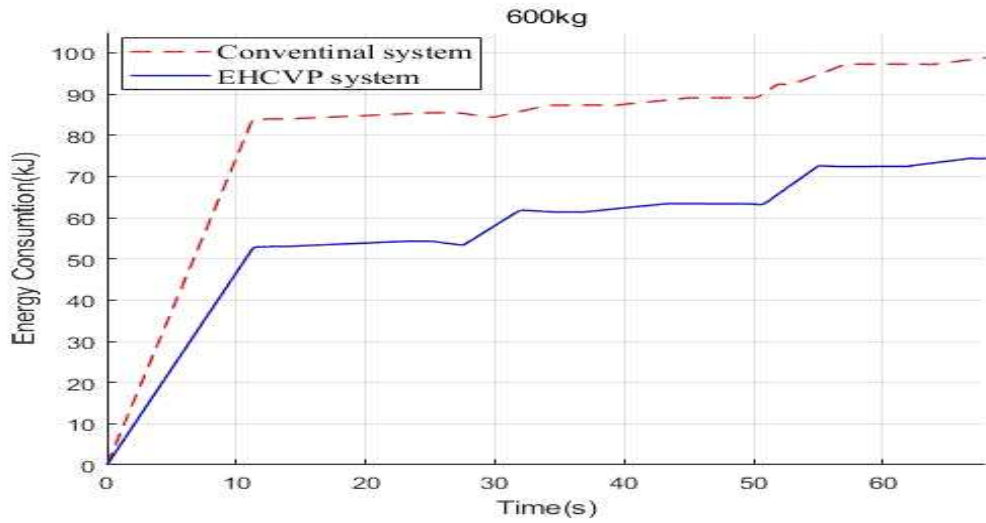


Fig. 5-3 600kg일 때 실험 결과 값

Table. 4-4 600kg일 경우 Simulation과 Test Bench의 에너지 총 사용량 및 향상률

system	load[kg]	E_{sys} [kJ]	Improve[%]
Conventional	Simulation - 600	94.61	-
	Test Bench - 600	98.48	-
Proposed	Simulation - 600	64.87	31.4
	Test Bench - 600	73.24	25.6

6. 결론 및 향후 계획

본 연구는 유성기어를 이용한 동력 분배형 하이브리드 시스템과 변위 가변 펌프의 파워 트레인이 전기 하이브리드 시스템을 합친 전기 유압식 가변 파워트레인 시스템을 이용한 굴삭기 시스템을 제안하였으며 기존의 시스템에서 개선된 기어 비를 1:1만 사용하지 않고 엔진, 모터의 효율을 극대화시키기 위해 1:1~1:1.3의 기어 비를 제안하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 기존의 선행 연구에서 사용 되었던 기어 비를 개선하여 1:1~1:1.3을 사용하여 엔진, 모터의 효율을 극대화시켰다.
2. 시스템 작동에 따라 목표 속도, 부하조건, 에너지 충전상태, 그리고 추정된 전략에 따라 구동모드와 엔진, 모터 동력간의 동력 분배를 결정하기 위해 Rule-base를 통해 모드와 동력 분배를 결정한다.
3. 구동 모드에서 Engine Drive and Motor Drive mode, EEngine Drive and Motor Charge mode(하이브리드 모드)일 경우에 ECMS전략을 사용하여 엔진, 모터의 최적화된 최대 효율 점을 찾아 엔진, 모터의 동력을 결정한다.
4. 제안된 시스템의 시뮬레이션 모델을 (Amesim, Matlab/Simulink) Co-simulation을 이용하여 구축하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 시스템은 200kg일 경우 16.11%, 600kg일 경우 31.43%만큼 에너지 총 사용량을 감소할 수 있었다. 이후 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터를 기반으로 실험을 하였으며 시뮬레이션의 결과와 실험을 통해 얻은 결과가 유효한 것을 확인할 수 있었다.

추후 연구에서는 제어 전략 측에서 좀 더 개선을 할 것이며, 다양한 조건에서의 실험을 통해 여러 환경조건에서도 에너지 소비량을 감소할 수 있는 시스템 개발에 대한 연구가 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] “세계 에너지시장 인사이트”, KEEI 에너지경제연구원, 2020.
- [2] 정만태, “세계 건설기계산업의 최근 동향과 시사점”, 월간 KIET 산업경제, 2018.
- [3] Lin, T., Wang, Q., Hu, B., & Gong, W. (2010). Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators. *Automation in Construction*, 19(8), 1016-1026.
- [4] Yu, Y. X., & Ahn, K. K. (2019). Optimization of energy regeneration of hybrid hydraulic excavator boom system. *Energy Conversion and Management*, 183, 26-34.
- [5] Yu, Y. X., & Ahn, K. K. (2017). Application of hydraulic transformer on energy saving for boom system of hybrid hydraulic excavator. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 868, pp. 118-123). Trans Tech Publications Ltd.
- [6] Yu, Y., Jeong, E., & Ahn, K. K. (2018). Review of energy saving technology of hybrid construction machine. *Journal of Drive and Control*, 15(4), 91-100.
- [7] Yu, Y. X., & Ahn, K. K. (2020). Energy regeneration and reuse of excavator swing system with hydraulic accumulator. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(4), 859-873.
- [8] Yu, Y. X., & Ahn, K. K. (2020). Improvement of Energy Regeneration for Hydraulic Excavator Swing System. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(1), 53-67.
- [9] Yu, Y. X., & Ahn, K. K. (2016). Study on the Energy Regeneration of Hybrid Hydraulic Excavator using Hydraulic Transformer, 16th International Conference on Control, Automation and System (ICCAS), 16-19.
- [10] Lee, S. Y. (2019). Development of Simulation Model for PEMFC Hybrid Excavator. *Journal of Drive and Control*, 16(3), 16-22.
- [11] Wang, T., & Wang, Q. (2014). Efficiency analysis and evaluation of energy-saving pressure-compensated circuit for hybrid hydraulic excavator. *Automation in Construction*, 47, 62-68.
- [12] Cai, Y., Ouyang, M. G., & Yang, F. (2017). Impact of power split configurations on fuel consumption and battery degradation in plug-in hybrid electric city buses. *Applied Energy*, 188, 257-269.
- [13] 박용수. (2020). 복합형 하이브리드 유압 파워트레인 시스템을 이용한 굴삭기 시스템 제안 및 효율 향상에 관한 연구. 울산대학교 석사 논문.
- [14] Zhou, D., Al-Durra, A., Matraji, I., Ravey, A., & Gao, F. (2018). Online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles: a fractional-order extremum seeking method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6787-6799.

부 록

I. 기호 설명

기호	설명	단위
SoC	State of Charge	-
ES	Energy Storage	-
IVT	Inverter	-
CVT	Converter	-
EM	Electric Motor	-
GEN	Generator	-
$\eta_{m.p}$	Mechanical efficiency of pump	-
$\eta_{v.p}$	Volumetric efficiency of pump	-
$\eta_{o.p}$	Over-all efficiency of pump	-
P_p	Pressure of pump	bar
D_p	displacement of pump	cc
T_p	Torque of pump	Nm
Q_p	Flow rate of pump	L/min
ω_p	Angular velocity of pump	rev/min
$\eta_{m.m}$	Mechanical efficiency of hydraulic motor	-
$\eta_{v.m}$	Volumetric efficiency of hydraulic motor	-
$\eta_{o.m}$	Over-all efficiency of hydraulic motor	-
P_m	Pressure of hydraulic motor	bar
D_m	displacement of hydraulic motor	cc
T_m	Torque of hydraulic motor	Nm
Q_m	Flow rate of hydraulic motor	rev/min
ω_m	Angular velocity of motor	rev/min
N_s	Gear ratio of sun gear	-
N_r	Gear ratio of ring gear	-
ω_r	Angular velocity of ring gear	rev/min
ω_s	Angular velocity of sun gear	rev/min
ω_c	Angular velocity of carrier	rev/min
T_r	Torque of ring gear	Nm
T_s	Torque of sun gear	Nm
T_c	Torque of carrier	Nm
P_{req}	Power estimation	kW
q_{req}	Flow rate estimation	L/min
P_H	Set high Power	kW
$SoC(t_0)$	Initial input of SoC	-
P_{motor}	Power of motor	kW
η_b	Battery efficiency	-

E_b	Battery capacitor	Wh
E_{en}	Engine energy consumption	kJ
E_{mo}	Motor energy consumption	kJ
E_{total}	Total energy consumption	kJ
η_{eng}	Engine efficiency	-
η_{motor}	Motor efficiency	-

II. 실험 장치 제원

Clutch		Speed sensor	
Maker	MIKI PULLEY	Maker	Setech
Model	125-16-12G	Model	MS-2000
Voltage	24(V)	Maximum speed	20000(rpm)
Maximum speed	3000(rpm)	Voltage	12(V)
Rotating part inertia	1.35×10^{-2} (J)	Pressure sensor	
friction torque	80(Nm)	Maker	Gefran
Double clutch		Model	ks-n-e-e-b25d-m-v
Maker	MIKI PULLEY	Maximum pressure	1000(bar)
Model	121-16-10G	Voltage	10(V)
Voltage	24(V)	Flow sensor	
Maximum speed	3000(rpm)	Maker	Kracht
Rotating part inertia	9.05×10^{-3} (J)	Model	FDA7000
friction torque	160(Nm)	Maximum flowrate	80(L/min)
Flow control valve		Voltage	12(V)
Maker	rexroth	Displacement sensor	
Model	4WRA(E)B6	Maker	Setech
Maximum pressure	350(bar)	Model	ps-pm-1000
Maximum flowrate	30(L/min)	Stroke	1000(mm)
Current	1.24(A)	Accuracy	$\pm 0.25\%$
Torque sensor			
Maker	Setech		
Model	TMA-10KM		
Maximum torque	98.07(Nm)		
Voltage	10(V)		

A Study on Equivalent Consumption Minimization Strategy of Hybrid Electro-hydraulic Variable Powertrain System for Construction Machinery

Seong-Tak Kin

Department of Construction Machinery Engineering
Graduate School, University of Ulsan

Abstract

Recently, in the construction machinery industry, as the wave of the 4th industrial revolution technology is intensifying and the development cycle of construction machinery technology is shortened, many studies are being conducted to keep up with the rapid technological development trend. They are very sensitive to carbon emission regulations to the extent that fines may be imposed if they do not meet the carbon emission limits that have been set. Therefore, companies are rapidly revitalizing the development of technologies to increase energy efficiency and the development of eco-friendly electric construction machines. Currently, to solve this problem, a hybrid system including energy regeneration is one of the energy solutions attracting attention.

This study proposes an excavator system using an electro-hydraulic variable powertrain system that combines an electric hybrid system with a power distribution hybrid system using a planetary gear and a powertrain of a variable displacement pump, and establishes a system control strategy using a rule-based system. and then, Increase the energy efficiency of the system through ECMS. A simulation model using Co-Simulation, such as Amesim and Matlab/Simulink, is constructed and verified, and the total energy consumption is applied to the experimental device based on optimized parameters to confirm that the results of the simulation match.