

현대 하이브리드 굴삭기 소개 Introduction of Hyundai Hybrid Excavator

이 민 희
M. H. Lee

1. 서론

최근 들어 고유가와 지구 온난화 방지를 위한 환경 규제로 인해 건설장비의 에너지 고효율화, 온실가스 배출 저감의 요구는 날이 높아지고 있다.

이러한 요구를 충족시키기 위해 제조업체들은 굴삭기를 대상으로 에너지 재생 부분에 대한 연구를 지속적으로 행해왔다. 굴삭기는 자동차와 달리 붐, 암, 버킷, 상부 선회, 주행이 가능한 총 5축의 작업기로 이루어져 있고, 붐과 암의 재생 에너지에 대한 연구도 활발히 진행되고 있지만, 이 중 상부 선회는 자동차 하이브리드 시스템과 동일한 원리로 에너지 재생이 가능하여 90년대 말부터 일본 건설기계 업체를 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔다. 현재 상부 선회 에너지 재생을 이용한 하이브리드 굴삭기는 20톤급을 중심으로 중국 및 북미 지역에 부분적으로 상용화가 되어 있으며 2011년에 전 지역으로 확대 적용 예정이다. 이에 대응하기 위해 당사에서는 08년부터 기존의 유압 모터 대신 전동기 모터를 이용하여 유압식 모터 대비 20% 이상의 연비 저감을 목표로 한 하이브리드 시스템을 개발해 왔으며 아래에 부품 구성도, 시물레이션, 제어 알고리즘, 부품 신뢰성 확보에 대해 설명하고자 한다.

2. 하이브리드 시스템 소개

현대 하이브리드 굴삭기는 09년 출시 이후 국내외에서 호평받고 있는 9 시리즈 굴삭기를 기본으로 개발하였다. 9 시리즈 굴삭기는 세계최초로 9인치 고휘도 LCD 모니터를 통하여 DMB 방송을 시청 및 동영상 감상을 감상할 수 있도록 디자인 되었으며 대화식으로 장비 운전 monitoring 이 가능하고 후방카메라가 표준 장착되는 등 편의성이 대폭 향상되었으며 현대 고유의 Posi-naga system이 적용되어 조작성에서도 뛰어난 성능을 발휘하고 연료 소모량에서도 동급 최소수준으로 국내 건설장비의 고급화에 선도적 역할을 하고 있다.



Fig. 1 Hyundai -9 Excavator Pictures

이러한 당사 9시리즈 굴삭기의 첨단 기술을 기본으로 선회모터를 전동화하여 정지 시 손실되는 에너지를 회수하고 엔진어시스트 모터로 하여금 동력을 보조하는 시스템을 취하고 있다. 핵심 구성품으로는 선회 전동기 모터, 엔진 어시스트 모터, 인버터, 전기 저장장치인 울트라 커패시터가 있으며, 하이브리드와 유압 시스템의 통합 제어를 위한 Hybrid Control Unit(이하 HCU)이 있다.

2.1 부품 구성도

Fig. 2에 하이브리드 부품 구성도와 Fig. 3에 현대 하이브리드 굴삭기의 외관을 나타내었다. 먼저 축전 장치와 연결된 인버터(컨버터)는 IGBT를 사용, DC/AC 변환하여 엔진 어시스트 모터와 선회 모터 구동 및 모터에서 발생하는 에너지를 저장하는 역할을 하고 있다. 인버터의 제어 여부에 따라 모터의 특성 및 효율이 좌우되는 만큼 하이브리드 굴삭기 시스템의 핵심 제어 부품이라고 할 수 있다. 엔진 어시스트 모터는 엔진과 유압 펌프 사이에 위치하며 선회 구동을 위한 축전 장치 충전 및 엔진에 과도한 부

하 발생 시 보조하는 역할을 하고 있다. 또 다른 전 동기인 선회 모터는 상부의 선회 및 제동을 담당하고 있으며, 통합 제어기는 인버터, 축전 장치 모듈과 CAN 통신을 통해 하이브리드 구동 정보를 실시간으로 메인 제어기에 전송한다.

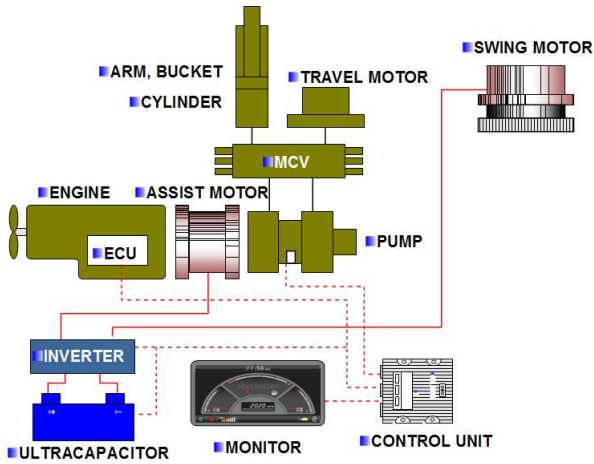


Fig. 2 Hybrid System Diagram



Fig. 3 Hyundai Hybrid Excavator Pictures

2.2. 시뮬레이션 분석

하이브리드 시스템을 적용하기 위해 우선 유압 선 회 모터의 압력과 파워를 측정했다. 유압 모터는 기

동과 제동 시에 모터 각각의 단에 높은 압력이 걸리 고 이 압력은 릴리프 밸브를 통하여 손실된다. Fig. 4에 모터 기동 및 제동 시에 생성되는 압력과 릴리 프 밸브에 의한 손실을 나타냈다.

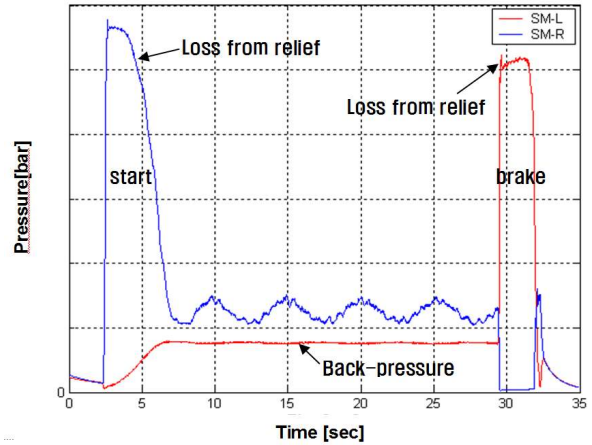


Fig. 4 Plot of Pressure for Swing Operation

하이브리드 시스템에서는 선회 전동기를 구동하여 반대편 유실의 배압에 의한 손실 에너지, 기동 및 제 동 시 릴리프 유량에 의한 에너지 손실을 제거하고 제동 시 에너지 회생을 통한 에너지 효율 개선을 할 수 있다. Fig. 5에 유압식 선회 모터의 선회 유효 동 작 에너지와 손실 에너지에 대해 나타내었다.

Fig. 6에 선회 동작시 필요한 에너지에 대해 유압 굴삭기와 하이브리드 굴삭기를 비교했다. 유 압 굴삭 기의 경우에서 엔진에서 유압 펌프, MCV (Main Control Valve), 유압 모터로 이어지는 선회 동작의 에너지 흐름에서 중간에 손실되는 에너지가 없다고 가정하면, 선회에 필요한 에너지는 엔진에 걸리는 부 하 에너지와 동일하다.

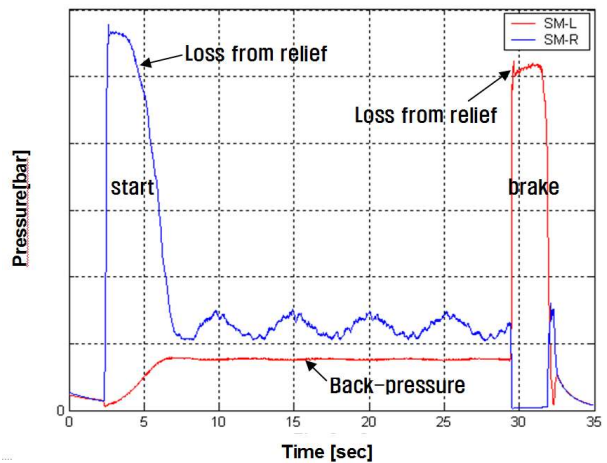
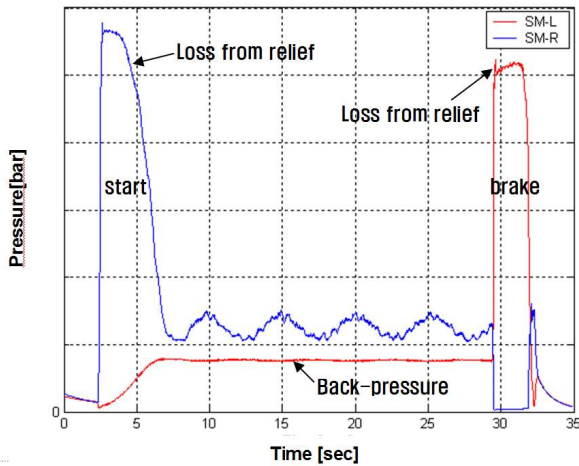


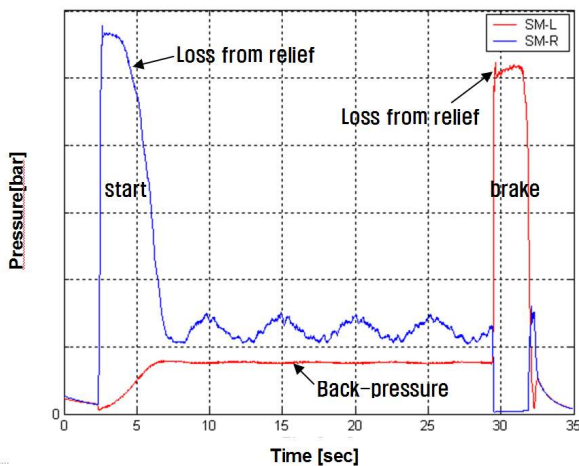
Fig. 5 Plot of Power for Swing Operation

반면 하이브리드 시스템에서는 엔진 어시스트 모터에 의해 발전되어 축전 장치, 즉 Ultra Capacitor에 저장된 에너지로 선회를 구동한다. 선회 제동 시 회생된 에너지 역시 다음 선회를 위해 축전장치에 저장되므로 선회를 구동하기 위한 에너지는 엔진 어시스트 발전 에너지와 선회 제동 회생 에너지로 나눌 수 있고, 어시스트 모터 발전 에너지에 대해 Fig. 6 (b)에 나타내었다.

Fig. 7는 앞서 비교한 에너지를 바탕으로 연료 소모량을 계산한 그래프이다. 하이브리드 시스템에서는 선회 기동 시 엔진에 걸리는 부하가 없기 때문에 연료 소모량이 상대적으로 유압 시스템에 비해 낮고, 펌프와 MCV, 모터의 효율, 압력 강하 등을 고려하면 작동 구간에서도 소요 에너지가 적은 것을 알 수 있다.



(a) Hydraulic System



(b) Hybrid System

Fig. 6 Swing Operating Power Profile

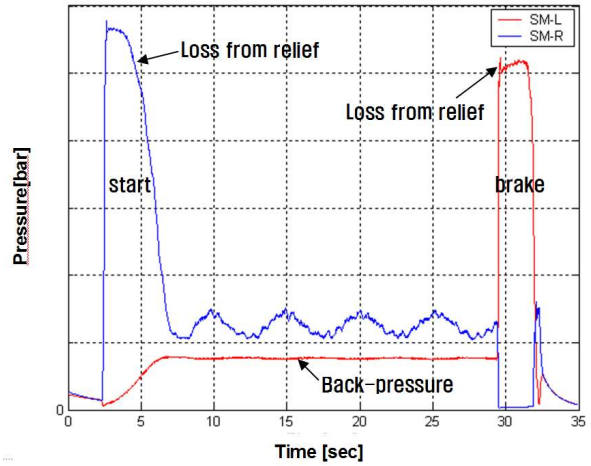


Fig. 7 Fuel Rate Profile

이를 기본으로 하이브리드 시스템의 90° 상차 작업에 대한 시뮬레이션은 Fig. 8 과 같다. 선회 전동기 모터는 제동 시에 유압식의 릴리프 밸브를 통해 손실되는 에너지를 덤프 시와 복귀 시의 선회 제동으로 회수할 수 있고, 이 부분을 3군데로 나눠서 표기하였다. 선회모터는 순수 전기 에너지로 구동하기 때문에 하이브리드 시스템의 총 파워는 작업장치와 엔진어시스트 모터 파워(발전)로 나눌 수 있다.

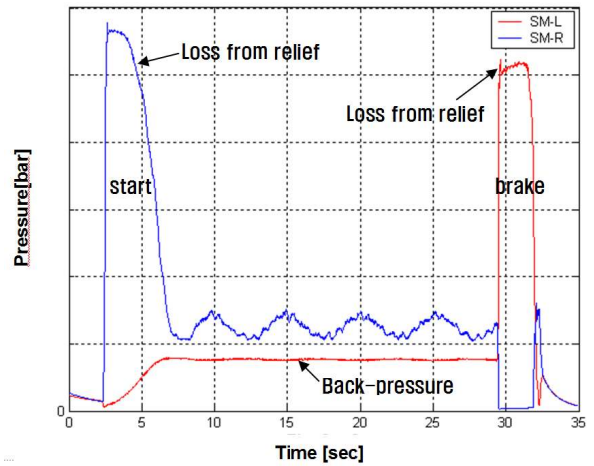


Fig. 8 Power analysis of Hybrid Excavator for 90° Digging and Dumping Operation

Fig. 9 을 보면 선회 에너지를 좀 더 자세히 비교해 볼 수 있다. 펌프 입력 파워와 유압 모터 입력 파워를 보면 알 수 있듯이 기존의 유압 구동 방식의 에너지 흐름은 펌프 입력 파워가 MCV(Main Control Valve)를 거쳐 모터로 입력되기 때문에 효율 및 압력 손실에 의한 Power Loss가 있음을 알 수 있다. 반면에 전기 모터의 구동은 엔진 어시스트에 의해

충전된 전기 에너지를 사용하기 때문에 유압식에 비해 상대적으로 손실이 적다. 이는 Fig. 10에 나타난 90° 상차 작업시에 엔진에 부과되는 파워에서 하이브리드 굴삭기 평균 파워와 유압 굴삭기 평균 파워를 비교해 봄으로써 알 수 있다.

90° 상차 1 Cycle의 엔진 부하 비교
 유압 굴삭기 : A [kW]
 하이브리드 굴삭기 : A' [kW]

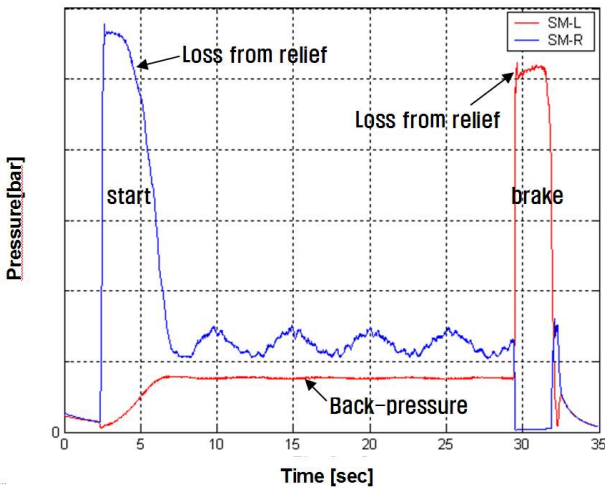


Fig. 9 Comparison of Power in Hybrid and Hydraulic system for 1 cycle digging-dumping

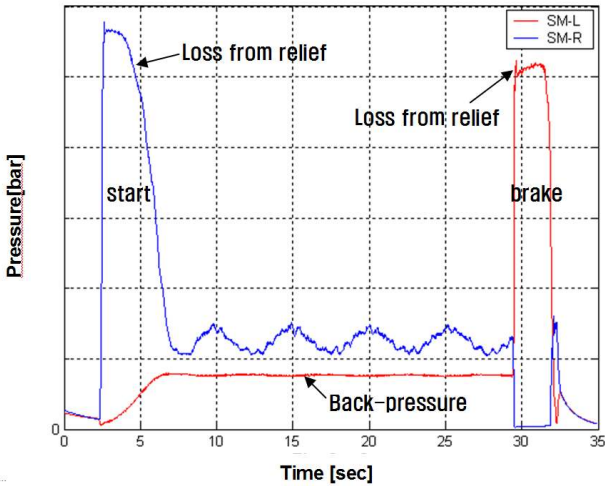


Fig. 10 Comparison of Engine Power in Hybrid and Hydraulic System

하이브리드 시스템을 이용한 에너지 회생은 연료 소모량 감소와 직결된다. 실제 개선되는 양을 계산하기 위해 동력원으로부터 선회 동작까지 단계별 에너지 분배를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Energy Flow of Hydraulic and Hybrid System

유압 굴삭기	하이브리드 굴삭기
엔진 출력	엔진 출력
A kW	A' kW
유압 펌프 효율 : α %	엔진 어시스트 모터 발전 효율 : β %
B kW	B' kW
MCV 압력강하 효율 : γ %	Ultra Capacitor 회생 에너지 : δ kW
C kW	C' (B' + δ) kW
유압 모터 효율 : ε %	선회 전동기 모터 효율 : ζ %
X kW	X kW
선회체	선회체

유압식에서 상부 90° 선회를 위한 유압 모터의 출력 에너지는 X kW이다. 유압펌프, MCV, 유압모터를 거치면서 발생한 효율 및 압력 강하에 의해 총 α %의 손실이 발생하므로 선회 구동을 위해서 엔진 출력 에너지는 A kW가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 하이브리드 굴삭기는 상대적으로 적은 에너지 A' kW의 엔진출력을 이용하여 엔진 어시스트 모터는 B' kW의 에너지를 생산하고, 이는 선회 전동기 모터 구동을 위해 Ultra Capacitor에 저장된다. 저장된 에너지 B' kW는 선회 제동시 회생되는 에너지 δ kW와 함께 Ultra Capacitor에 저장되어 90° 선회를 위해 전동기 모터에서 필요로 하는 에너지 C' kW를 생성하게 된다. 하이브리드 시스템을 사용한 90° 상차 연료 소모량 개선은 다음과 같다.

붐, 암, 버킷 소비에너지 : D kW

$$\begin{aligned} \text{Energy Saving} &= \text{ES} \% \\ &= (A - A') / (A + D) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuel Saving [L/hr]} &= \text{FS} \% \\ &= (\text{Hyd. Hyb.}) / \text{Hyd.} \end{aligned}$$

3. 부품 신뢰성 확보

건설기계의 하이브리드화에 있어서 해결해야할 중요한 과제중의 하나는 전장부품의 신뢰성 확보이다. 종래의 유압 굴삭기의 핵심 부품인 펌프, 모터, MCV

에 대한 신뢰성은 검증된 상태이나, 하이브리드 추가 구성품인 선회 전동기 모터, 엔진 어시스트 모터, 인버터, Ultra Capacitor에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 이를 위해 시제품을 완성장비상태에서 내구 신뢰 시험을 진행함과 동시에 신뢰도 향상의 위하여, 각 단품상태에서 내구시험 장치를 구성하여 벤치 내구 시험을 실시하였고, 진동 시험을 비롯하여 EMC 시험 등 환경시험도 완료 상태이다. Table 2에 부품 신뢰성 시험 항목의 예를 나타내었다.

Table 2 Examples of component reliability test

No	Component reliability test
1	Load tests
2	Driving test
3	Insulation resistance test
4	Withstand voltage test
5	Overvoltage voltage test
6	Reverse voltage test
7	Overcurrent Test
8	Leave the low and high temperature test
9	Low and high temperature operation test
10	Thermal shock test
11	Temperature cycle test
12	Salt spray test
13	Dust test
14	Vibration test
15	EMS test
16	EMI test
17	Heat Balance test
18	Etc...

3.1 Ultra Capacitor

울트라 커패시터의 신뢰성 시험은 굴삭기의 열악한 진동 환경을 감안해 진동을 중점적으로 실시했고, 높은 전압을 저장하는 만큼 절연 저항 시험을 포함한 노이즈 시험을 실시했다. 게다가 열에 취약한 커패시터의 특성을 고려하여 온도 시험도 실시했다.

3.2 인버터

인버터의 핵심 부품으로는 전동기 제어를 위한 스위칭 소자 IGBT와 전류 센서가 있으나 진동 사양이 낮은 문제점이 있다. 이를 위해 실차 장착은 방진 고무 장착 등 방진을 고려한 설계가 우선되었으며, 단품 진동 시험을 포함한 내환경 시험 및 전자 노이즈 시험을 실시했다.

3.3 선회 ·엔진 어시스트 모터

전동기 모터 역시 건설장비에 처음 장착되는 만큼 진동에 대한 신뢰성 확보를 우선시했다. 진동 시험 규격은 실차 테스트 결과와 진동 계수를 고려하여 선정했고, 내구 수명을 위해 상하 ·좌우 ·전후 각 축당 100만 Cycle로 가진했다. 그 외에 온도 시험을 비롯한 내환경 시험을 실시했다.

4. 맺음말

본 연구에서는 연비를 포함한 하이브리드 굴삭기의 유효성에 대해 고찰했다. 시뮬레이션은 AMESIM을 이용했으며, 유압 굴삭기의 압력 그래프를 통해 하이브리드 굴삭기와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굴삭기는 여러 작업기가 있으나 그 중 선회 동작은 기동과 제동 동작으로 이루어져 있으며 하이브리드 자동차의 것과 유사하여 적용이 용이하다. 제동시 릴리프에 의한 에너지 손실을 회생하여 에너지를 저장할 수 있고, Back-Pressure에 대한 손실이 없다. 또한 기동 및 작동 구간의 에너지도 효율 면에서 유압 시스템에 비해 유리한 측면을 가지고 있다.

(2) 하이브리드 굴삭기를 구성하는 부품으로는 선회 전기 구동을 위한 전동기 모터, 에너지 저장을 위한 Ultra Capacitor, 발전 및 엔진 과부하 보상을 위한 엔진 어시스트 모터, 시스템 통합 제어를 위한 컨트롤러가 있다.

(3) 90° 상차 시뮬레이션을 봄, 압, 버킷의 작업 장치 에너지와 선회 에너지로 나누어 분석했다. 덤프와 굴삭 작업 복귀 2개 구간에서 선회 제동 에너지 회생이 가능한 것을 알 수 있었다. 이 에너지를 이용하면 유압식에 비해 상대적으로 낮은 엔진 출력으로 선회를 구동할 수 있는 이점이 있고, 약 FS %의 연료 소모량을 개선할 수 있다.

(4) HCU는 장비 제어기, 인버터로부터 전달받은 정보를 바탕으로 통합 시스템을 제어하는 컨트롤러다. 굴삭기 작업의 특성상 선회가 차지하는 비중이 높지 않으므로 선회 재생 에너지 만으로는 높은 개선을 기대하기는 어렵다. 따라서 HCU는 엔진 출력 정보를 바탕으로 어시스트 모터, 펌프 유량을 최적으로 제어해 엔진의 과부하를 보상하여, 연료 소모량을 저장할 수 있다.

(5) 굴삭기의 하이브리드화에 따라 20~40 %의 연비개선 효과를 확인하였으며 이는 하이브리드화에

따른 에너지의 재생 이외에 냉각손실의 절감, 동력 제어의 최적화에 따라 효율의 극대화함에 따른 것이다.

참고 문헌

- 1) 이영재, 하이브리드 자동차의 기술 동향”, ETIS 분석지 제25권
- 2) 小見山昌之외 2명, “6 トンクラスショベルの省エネルギー効果評価モード”, 建設の機械化, No. 626, April 2002,
- 3) 日本經濟新聞(08/5/30)
- 4) 日本工業新聞(08/7/10)

[저자 소개]



이민희

E-mail: minilee@hhi.co.kr

Tel : 052-202-8803

1960년 9월 1일생.

1986년2월 인하대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1992년 아주대학교 기계공학과 석사졸업.

1987년~1988 일본 니산기자이 기술연수. 1985년 현대중공업 입사 후 굴삭기 유압시스템 개발, 유압 및 동력부품 개발업무 중사.

2008년~선행개발부장. 유공압시스템학회 편집위원, 대한기계학회울산지부 사업이사, 산업기술평가관리원 평가위원