

시뮬레이션을 이용한 하이브리드 굴삭기용 붐 에너지 회생 시스템

Boom Energy Regeneration System of Hybrid Excavator Using Simulation Technique

강병일 · 이재상

B. I. Kang and J. S. Lee

1. 서론

최근 지구온난화와 화석연료의 고갈로 인해 에너지 효율 향상을 위한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. 그 중 하이브리드 기술은 배출가스 감소와 연비 개선을 위해 적용 가능한 기술 중의 하나이며, 건설 장비, 특히 굴삭기 경우 하이브리드 기술의 적용을 통해 배출가스 및 연료소모량을 감소시키기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다.

굴삭기의 경우 배출가스 감소 및 에너지 효율의 향상은 엔진의 고효율 영역 운전, 유압시스템 손실 개선, 에너지 회생을 통해 이루어질 수 있는데, 본 연구에서는 에너지 회생에 관해 연구를 수행하였다.

Fig. 1은 1회 굴삭작업동안 각 Actuator의 동력을 분석한 것이다. 붐의 경우 하강 시 회생 가능한 에너지가 존재하며 그 양은 붐 실린더에 공급된 에너지의 약 93.7%에 해당한다. 선회의 경우도 선회 감속 시 에너지의 회수가 가능하며, 그 양은 공급에너지의 약 66.3%에 해당한다. 선회 에너지의 경우 기존의 유압 모터 대신 전동기를 사용함으로써 비교적 용이하게 에너지 회생이 가능하다.

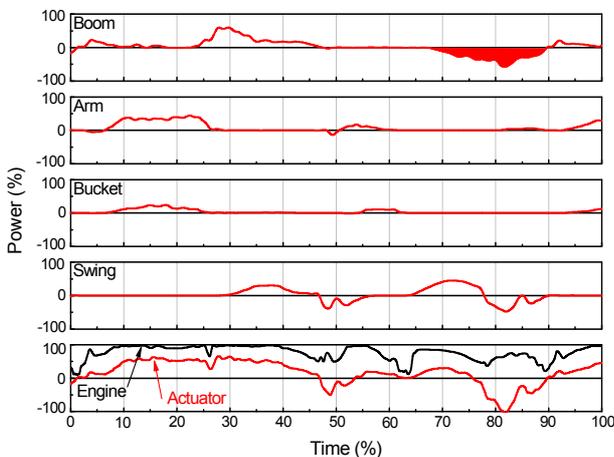


Fig. 1 Actuator Power of a Standard Excavation

그러나 붐의 경우 작동 메커니즘이 선회 시스템과 다르고, 보다 복잡한 제어 기술이 요구되기 때문에 붐 에너지 회생을 위해서는 선회 시스템과는 다른 새로운 개념의 설계가 요구된다. 본 연구에서는 전동기를 이용하여 전기 에너지 형태로 에너지를 저장하는 하이브리드 굴삭기에 적합한 두 가지 유형의 붐 에너지 회생시스템을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 두 시스템의 효율을 분석하였다.

2. 붐 에너지 회생 시스템의 설계

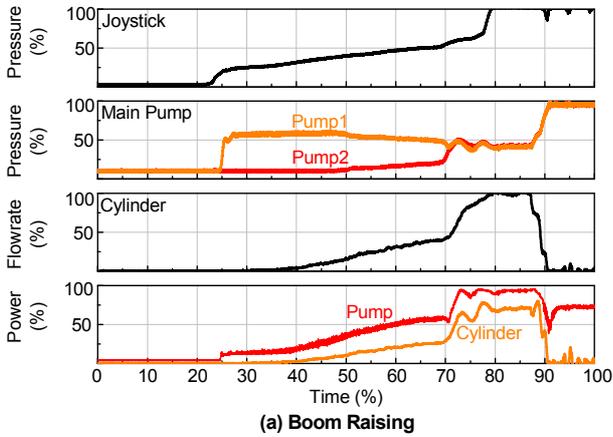
2.1 기존 굴삭기 붐 Actuator의 동력 특성 분석

2.1.1 단독동작

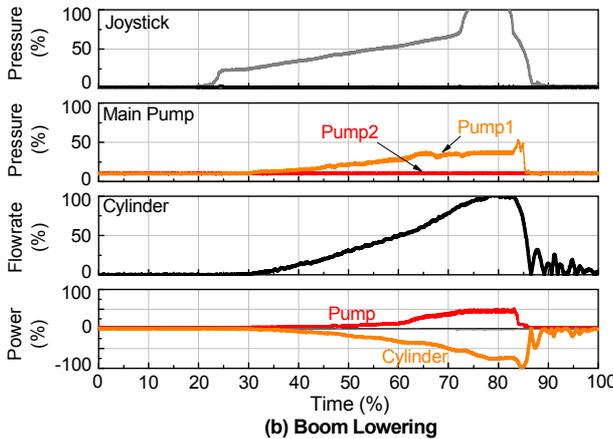
Fig. 2는 붐 상승 조이스틱의 압력을 서서히 상승시킬 때 메인펌프의 압력, 실린더 유입 유량 및 동력 특성을 분석한 것이다. 붐 상승 시 붐 조이스틱 압력과 붐 실린더의 유량은 전체 작동 시간 중 70% 정도 시간에 각각 최대 압력 및 유량의 50%에 도달하게 된다. 이 시간을 전후로 에너지 효율을 분석해 보면, 각각 32.8%와 72.4%로 작동 초기 저유량 구간에서 에너지 효율이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 붐이 낮은 속도에서 작동할 경우 제어 안정성을 위해 메인펌프는 실제 실린더에서 필요로 하는 유량보다 많은 유량을 토출하게 되고, 잉여 유량이 메인 컨트롤 밸브에서 탱크로 바이패스 되기 때문이다. 따라서 굴삭기의 에너지 효율을 상승시키기 위해서는 저유량 구간에서의 에너지 효율을 높이는 것이 필수적이다.

붐 하강 시에는 하나의 펌프만이 붐 실린더에 유량을 공급하나, 펌프의 동력은 붐 실린더에서 유효한 일로 전달되지 못하고 메인 컨트롤 밸브에서 대부분 손실된다. 또한 붐 실린더의 회생 가능한 에너지는 메인 컨트롤 밸브에서의 Meter-out 제어에 의해 열로 변환되어 소멸하게 된다.

따라서 붐 하강 시는 손실되는 메인 펌프의 동력을 감소시키고, 에너지를 회수함으로써 굴삭기의 에너지 효율을 높일 수 있다.



(a) Boom Raising



(b) Boom Lowering

Fig. 2 Characteristics of Single-Function of the Boom

2.1.2 굴삭작업

Fig. 3은 굴삭 작업 10회 동안의 붐 실린더의 작동 압력, 유량 및 동력 특성을 나타낸다. 굴삭 작업 시 특이한 점은 붐 실린더의 입/출 유량과 동력이 유압 펌프 최대 공급 유량과 동력의 50% 이하 구간 영역에서 대부분의 작업이 이루어지고 있다는 것이다. 붐 상승 시에는 총 소요 에너지량의 약 88%, 하강 시는 약 92%의 에너지량이 유압펌프의 최대 공급유량과 동력의 50% 이하 구간에 존재한다. 이는 굴삭 작업 동안 모든 Actuator가 동시에 작동되어 메인 펌프의 유량이 각 Actuator에 분리 공급되기 때문으로 굴삭 작업 동안 붐 실린더의 유량 및 동력은 단독 동작 시의 최대 유량과 동력에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다.

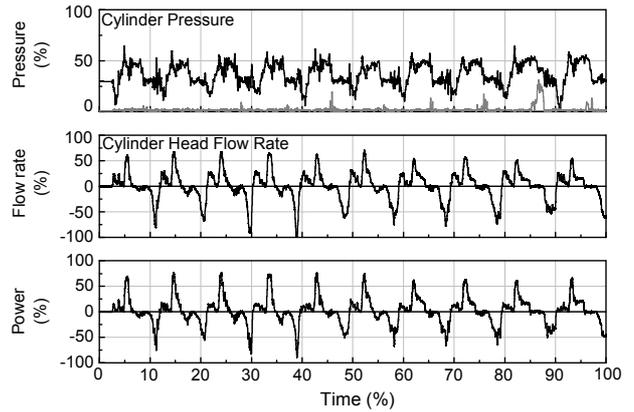


Fig. 3 Characteristics of Excavation

2.2 붐 에너지 회생 시스템의 설계

앞의 기존 굴삭기의 붐 작업 특성 분석을 통해 2가지 형태의 붐 에너지 회생 시스템을 설계하였다. 붐 에너지 회생 시스템의 설계 목표는 붐 상승 시는 에너지 손실을 감소시키고, 하강 시는 에너지 회생을 통해 시스템의 전체 에너지 효율을 증가시키는 것이다.

2.2.1 Stand-alone 시스템

Stand-alone 시스템은 붐 상승 시 요구되는 모든 유량을 공급하며, 붐 하강 시 붐의 모든 에너지를 회수한다. 본 시스템에서 기존 유압시스템은 붐 실린더로 어떤 유량도 공급하지 않는다.

Stand-alone 시스템의 개략도는 Fig. 4(a)와 같다. Stand alone 시스템은 유압시스템에서의 손실을 최소화할 수 있고, 회수되는 붐 에너지의 양을 극대화 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 붐 작동에 필요한 모든 유량의 공급 및 에너지 회수를 위해 대용량의 유압펌프모터와 전동기를 사용하여야 한다는 단점이 있다.

본 시스템을 구성하는 주요 부품의 명칭과 기능은 다음과 같다.

- ① Energy Storage Device : 전기에너지의 방전 및 충전
- ② Electric Motor/Generator : 붐 상승 시에는 전동기로 작동하며, 붐 하강 시에는 발전기로 작동
- ③ Regeneration Hydraulic Pump/Motor : 붐 상승 시에는 유압 펌프로 작동하며, 붐 하강 시에는 유압 모터로 작동
- ④ Pressure Control Valve : 붐 하강 시 붐 실린더 로드측의 압력을 제어
- ⑤ PT Flow Control Valve : 유압펌프모터에서

탱크로 바이패스 되는 유량을 제어

⑥ Direction Control Valve : 붐 실린더의 작동 방향 및 유량 제어

⑦ Main Relief Valve : 시스템의 최고 압력을 제어

⑧ TP Control Valve : 붐 상승 시 유압펌프모터의 Suction측 부족 유량을 탱크로부터 공급

⑨ CT Control Valve : 붐 하강 초기에 실린더 헤드 일부 유량을 로드 측으로 공급

2.2.2 Collaborated 시스템

Collaborated 시스템에 사용되는 전동기와 유압펌프모터의 용량은 Stand-alone 시스템의 약 50%이며, 시스템 회로도도 Fig. 4(b)와 같다. Collaborated 시스템은 붐 상승 시 필요한 유량 및 동력의 50%를 우선 공급한다. 기존 유압시스템은 나머지 50%를 공급하며 붐 에너지 회생 시스템을 보조한다. 붐 하강 시, 붐의 에너지는 붐 에너지 회생 시스템을 통해 회생되고, 붐 에너지 회생 시스템의 회생 용량을 초과하는 유량은 탱크로 바이패스 된다. 이를 통해 붐 상승 발생하는 유압시스템의 에너지 손실을 저감할 수 있고, 전동기 및 유압펌프모터의 용량을 축소할 수 있는 장점이 있다.

Collaborated 시스템을 구성하는 부품 중 ①~⑦, ⑨의 부품 기능은 Stand-alone 시스템과 동일하며, ⑧, ⑩ 부품의 명칭 및 기능은 아래와 같다.

⑧ TP Control 밸브 : 붐 하강 시 유압펌프모터나 발전기의 회생 가능 용량을 초과하는 유량을 탱크로 바이패스

⑩ 붐 보조 밸브 : 붐 상승 시 유압펌프모터나 발전기가 공급가능한 이상의 유량이나 동력이 요구될 경우 엔진에 의해 동작하는 메인펌프의 유량을 실린더에 공급하여 붐 에너지 회생 시스템을 보조

3. 시뮬레이션 모델 개발 및 성능 분석

3.1 시뮬레이션 모델 개발

설계된 두 가지 유형의 붐 에너지 회생 시스템의 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션 모델을 개발하고, 전동기 및 유압펌프모터의 제어 방식에 따른 성능을 분석하였다.

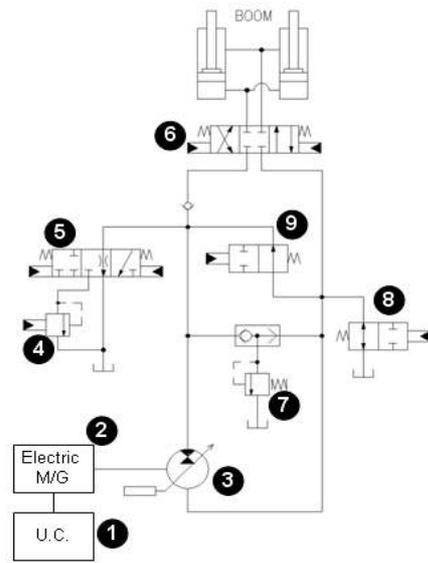
시뮬레이션 모델은 LMS사의 AMESim Software를 이용하여 구성하였으며, 모델은 Fig. 5와 같다.

시뮬레이션에 사용된 가정과 주요 핵심 Component

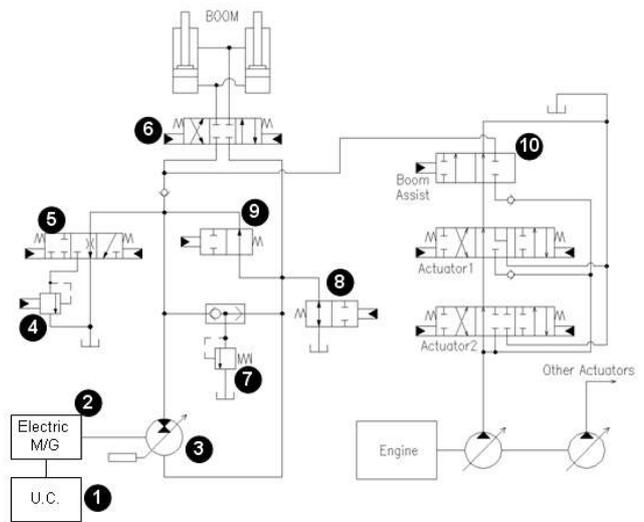
의 특성은 다음과 같다.

- Front Parts : 굴삭기의 Front부는 붐, 암, 버킷 그리고 실린더로 구성된다. Front부의 질량, 관성모멘트, 기하학적 치수 등은 실제 설계 데이터를 이용하여 모델링 하였다.

- Hydraulic Pump/Motor : 유압펌프모터의 효율은 사판각, 회전속도, 토출압력에 따라 변화한다. 붐 에너지 회생 시스템용 유압펌프모터는 아직 개발 전으로, 유사한 펌프의 효율 데이터를 Scaling하여 모델링 하였다. 사판각의 응답지연시간은 기존 굴삭기의 유압펌프와 유사한 0.2초로 가정하였다.



(a) Stand-Alone System



(b) Collaborated System

Fig. 4 System Schematic of the Boom Energy Regeneration System

- Electric Motor/Generator : 전동기는 효율은 회전속도, 토크에 따라 변화하며, 부하에 따른 응답특성 변화를 고려할 수 있도록 모델링 하였다. 붐 에너지 회생용 전동기의 경우도 아직 개발 전이므로, 하이브리드 굴삭기에 사용된 선회모터의 효율 데이터를 스케일링하여 사용하였다.

- Valves : 밸브의 개구 면적은 조이스틱 압력에 따라 제어된다. 밸브에서의 압력 손실은 개구 면적에 따라 변화하며, 밸브의 형상에 따른 압력 손실 및 Flow Force 등은 고려하지 않았다.

- Main Pump : 엔진에 의해 구동되는 기존 유압 시스템의 메인펌프는 Negative Flow Control 방식에 의해 유량이 제어된다. 메인 펌프의 동특성은 고려하지 않았다.

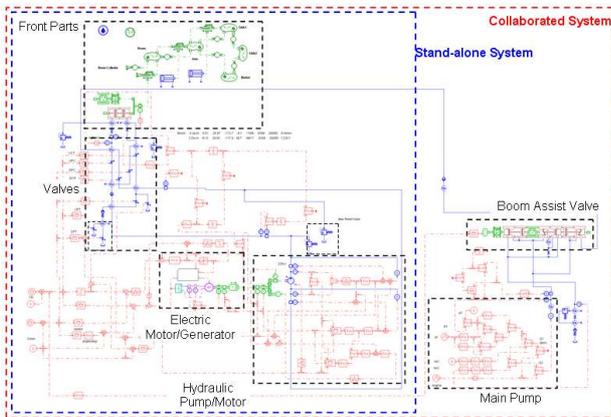


Fig. 5 Simulation Model of Boom Energy Regeneration Systems

3.1 성능 분석

3.2.1 제어 알고리즘

붐의 속도는 전동기의 회전 속도 및 회생용 유압 펌프모터의 사판각에 의해 제어 가능하다. 본 연구에서는 이 두 가지 제어 방법에 따른 시스템의 효율을 분석하였다. 붐 상승 및 하강 시 사용된 제어 방법은 다음과 같으며 제어 순서는 Fig. 6에 나타내었다.

- 붐 상승 :

유압펌프모터 사판각 제어 : 붐의 상승 신호가 입력되면 전동기는 정격속도로 회전하고, 유압펌프모터의 사판각은 붐 조이스틱 압력에 따라 제어된다. Collaborated 시스템의 경우 유압펌프모터의 사판각이 최대 각에 도달한 후 붐 보조 밸브가 동작하여 메인펌프의 유량을 붐 실린더로 공급한다.

전동기 회전속도 제어 : 작동 초기 유압펌프모터의 사판각은 최대 사판각의 50% 위치에 고정되며, 붐 조이스틱 압력에 비례하여 회전하는 전동기의 의

해 붐의 속도가 제어된다. 전동기의 회전속도가 정격속도에 도달하면, 조이스틱 압력에 따라 사판각이 제어된다. Collaborated 시스템의 경우 사판각이 최대 각에 도달 한 후 붐 보조 밸브가 작동된다.

- 붐 하강 : 붐 하강 시는 시스템의 제어 안정성 확보를 위해 전동기의 회전속도 제어 알고리즘만을 고려하였으나 초기 사판각의 영향을 알아보기 위해, 초기 사판각을 최대각으로 유지한 후 전동기의 회전속도를 제어하는 방법과, 사판각을 최대 경전각의 50%로 유지 후 전동기의 회전속도를 제어하는 2가지 방법에 대하여 분석하였다.

100%의 초기 경전각: Collaborated 시스템의 경우 전동기의 회전속도가 정격속도에 도달하게 되면 밸브를 통해 회생 용량을 초과하는 유량이 탱크로 바이패스 된다.

50%의 초기 사판각 : Stand-alone 시스템의 경우 전동기의 회전속도가 정격속도에 도달하게 되면 사판각이 제어된다. Collaborated 시스템의 경우 사판각이 최대 사판각에 도달 한 후 초과 유량은 밸브를 통해 탱크로 배출된다.

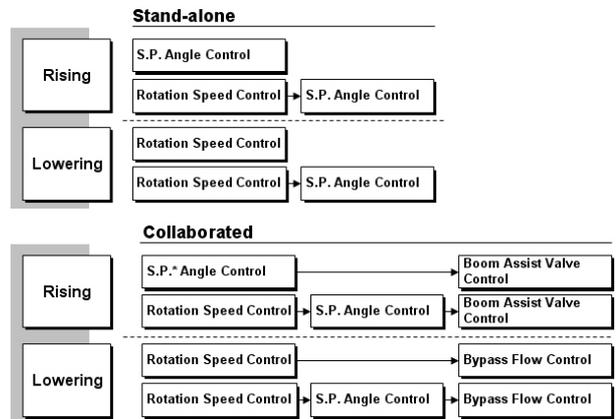
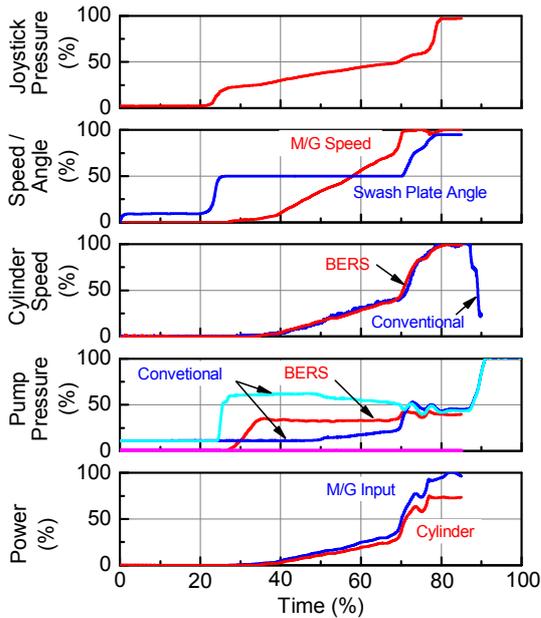


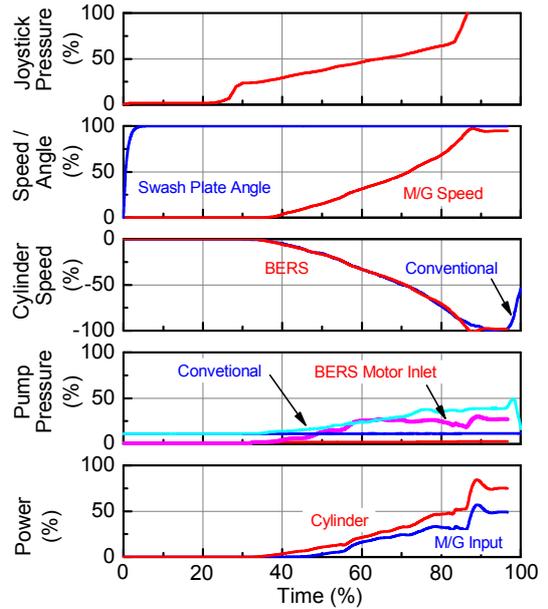
Fig. 6 Summary of Control Algorithms

3.2.2 단독동작 분석

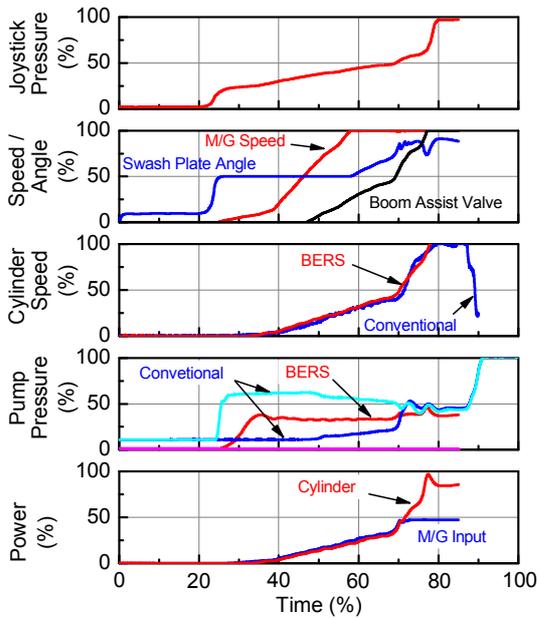
Fig. 7은 붐 상승 시 사판각 제어 알고리즘에 비해 높은 효율을 보이는 것으로 분석된 회전속도 제어 알고리즘을 적용했을 때의 해석 결과이다. 붐 에너지 회생 시스템에서의 붐 실린더 속도는 기존 굴삭기의 제어 특성과 매우 유사한 경향을 보인다. 붐 에너지 회생 시스템의 펌프압력은 기존 굴삭기의 메인펌프의 작동 압력보다 낮으며 이를 통해 붐 상승 시 효율을 높일 수 있다. Fig. 7 (b)에서 Collaborated 시스템은 붐 실린더 요구동력의 50%까지 공급 가능한 것을 알 수 있다.



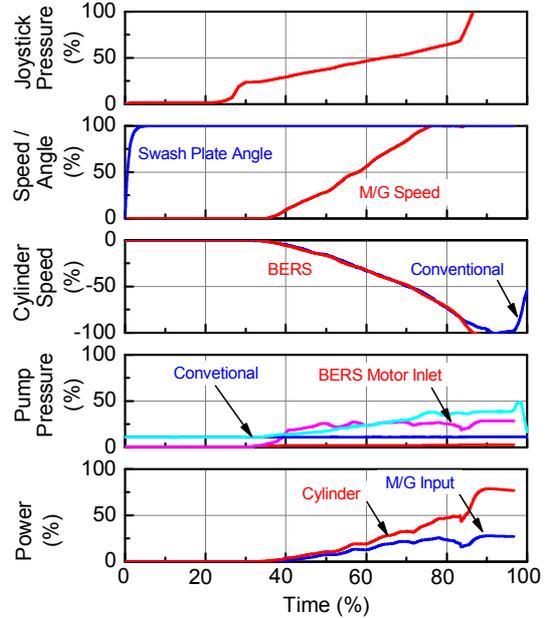
(a) Stand-Alone System



(a) Stand-Alone System



(b) Collaborated System



(b) Collaborated System

Fig. 7 Simulation results of Single – function of the Boom Raising

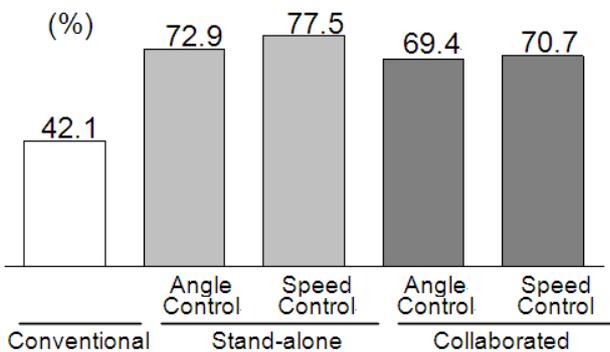
Fig. 8은 초기 사판각을 최대 사판각으로 유지했을 경우의 붐 하강 시뮬레이션 결과이다. 사판각의 각도는 일정하며, 붐의 하강 속도는 붐 전동기의 회전속도에 의해 제어된다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 Collaborated 시스템에서는 전체 작동 시간의 80%의 작동 시간 이후에는 더 이상 회생 동력이 증가하지 않으며, 이는 붐 실린더로부터의 배출 유량이 유압펌프 모터의 최대 허용 유량에 도달하였기 때문이다.

Fig. 9(a)는 붐 상승 시 붐 에너지 회생 시스템의 유형 및 제어 방식에 따른 에너지 효율을 나타낸다. 붐 에너지 회생 시스템의 효율은 기존 굴삭기에 비해 약 30% 더 높고, Stand-alone 시스템이 Collaborated 시스템에 비해 더 높은 효율을 보인다. 이것은 Collaborated 시스템의 경우, 붐 상승 시 붐 에너지 회생 시스템을 보조하기 위해 기존 유압시스템이 작동하게 되는데, 붐 에너지 회생 시스템에 비해 기존 유압시스템의 효율이 낮기 때문이다. 제어 방법에 따른 에너지 효율을 분석하면 회전속도 제어 알고리즘이 사판각 제어 알고리즘에 비해 높은 효율

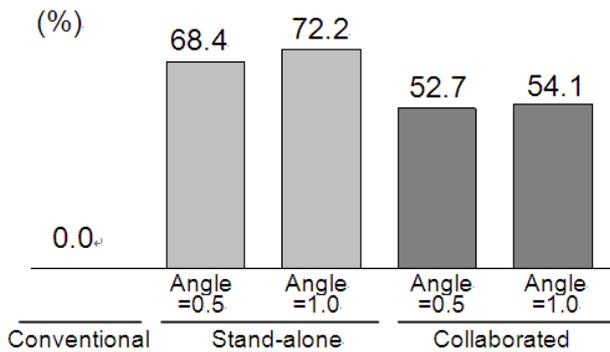
을 보였으며 이는 회전 속도 제어 알고리즘을 사용할 경우, 전동기가 좀더 높은 효율 영역에서 작동되기 때문이다.

Fig. 9(b)는 붐 하강 시 에너지 회생율을 나타낸다. Stand-alone 시스템은 약 70%의 붐 에너지 회생율을 보이며, 초기 사판각이 큰 경우가 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다.

Collaborated 시스템은 약 50%의 붐 에너지 회생율을 보인다. Collaborated 시스템에서는 전동기와 유압펌프모터의 용량이 붐의 전체 하강 동력을 회수할 수 있을 만큼 충분하지 않기 때문에 회생 용량을 초과하는 유량은 밸브를 통해 바이패스 된다. 이러한 이유로 Collaborated 시스템은 Stand-alone 시스템에 비해 낮은 효율을 보인다.



(a) Boom Raising



(b) Boom Lowering

Fig. 9 Efficiency of Boom Single Operation

4. 결 론

전기 에너지 저장 장치를 이용하는 하이브리드 굴삭기에 적용 가능한 두 가지 유형(Stand-alone 시스템과 Collaborated 시스템)의 붐 에너지 회생 시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통해 각 시스템의 성능을 분석하였다.

단독동작의 경우 Stand-alone 시스템은 Collaborated 시스템에 비해 높은 효율을 나타내며, 회생 효율의 경우 Stand-alone 시스템은 Collaborated 시스템에 비해 약 15% 높다.

그러나 굴삭작업의 경우 두 시스템의 효율 차이는 두 시스템의 구성요소의 용량 차이를 비해 크기 않은 것으로 분석되었다. Stand-alone 시스템은 Collaborated 시스템에 비해 약 2배 용량의 대용량 유압펌프모터와 전동기를 사용하지만, 붐 상승 시 최대 6%, 붐 하강 시 최대 8% 정도의 효율 개선이 있는 것으로 나타났다.

제어 방식의 영향을 살펴보면, 붐 상승 시에는 회전속도 제어 알고리즘이 사판각 제어 알고리즘에 비해 높은 에너지 효율을 나타내며, 붐 하강 시에는 최초 사판각이 클수록 회생 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 굴삭기의 작동 모드와 비용 대비 효율을 고려하였을 때 Collaborated 시스템이 하이브리드 굴삭기에 보다 적합한 것으로 판단되며, 추후 Collaborated 시스템 시험 장치를 개발하여 그 성능 및 시뮬레이션 결과를 평가 할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 전략기술개발사업의 지원을 받아 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Seungjin Yoo, Sangjun An, Cheol-Gyu Park, Nagin Kim, "Design and Control of Hybrid Electric Power System for a Hydraulically Actuated Excavator", SAE 2009 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition, Rosemont, IL, USA, 2009
- 2) Kagoshima, M., Komiyama, M., Nanjo, T.; Tsutsui, A., "Development of New Kind of Hybrid Excavator", Kobe Steel Works Engineering Reports, Vol. 57, No. 1, pp. 66-69, Apr. 2007.
- 3) Kagoshima, M. Sora, T. Komiyama, M., "Development of Hybrid Power Train Control System for Excavator", Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 35, No. 4, pp. 95-100, Oct. 2004.

[저자 소개]



강병일 (책임저자)

E-mail: byungil.kang@doosan.com

Tel : 031-270-1323

1975년 6월 10일생.

1998년 고려대학교 기계공학과 졸업. 2000

년 고려대학교 기계공학과 석사졸업. 2000

년 두산인프라코어 입사. (현) 두산인프라

코어 기술원 선임연구원.

[저자 소개]



이재상

E-mail: jaesang1.lee@doosan.com

Tel : 031-270-1431

1982년 12월 28일생.

2008년 성균관대학교 기계공학부 졸업.

2010년 성균관대학교 기계공학과 석사졸

업. 2010년 두산인프라코어 입사. (현) 두

산인프라코어 기술원 연구원