

## 복합형 하이브리드 굴삭기를 위한 동력전달계 제어기법 연구<sup>§</sup>

김학구<sup>\*†</sup> · 최재웅<sup>\*</sup> · 유승진<sup>\*\*</sup> · 이경수<sup>\*</sup>

\* 서울대학교 기계공학부, \*\* 두산 기술원

### Development of Power Management Strategies for a Compound Hybrid Excavator

Hakgu Kim<sup>\*†</sup>, Jaewoong Choi<sup>\*</sup>, Seungjin Yoo<sup>\*\*</sup> and Kyoungsu Yi<sup>\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

\*\* Doosan Infracore Co.

(Received December 13, 2010; Revised October 17, 2011; Accepted October 24, 2011)

**Key Words** : Compound Hybrid Excavator(복합형 하이브리드 굴삭기), Power Management Strategy(동력 제어 전략), ECMS Strategy(실시간 최적 제어 기법)

**초록**: 본 논문은 복합형 하이브리드 굴삭기를 위한 동력전달계 제어기법에 대하여 기술하였다. 하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기의 동력전달계를 하이브리드화 하여 연비향상 및 배출가스 저감을 목표로 개발되고 있다. 특히 복합형 하이브리드 굴삭기는 유압시스템의 일부를 전기시스템으로 대체하여 낮은 유압효율로 인한 에너지 손실을 줄일 수 있도록 구성되어 있다. 해당 굴삭기의 하이브리드 동력 제어기는 동력전달계의 동력 흐름을 관리하여 굴삭기의 연비를 향상 시키고, 슈퍼 커패시터의 충전량을 적절한 범위에서 유지하며, 기존 굴삭기에 준하는 성능을 유지하여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 슈퍼 커패시터의 충전량 기반의 서모스탯(Thermostat)형 제어기와 실시간 최적해를 이용한 ECMS 제어기를 설계하였으며 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 하이브리드 굴삭기의 연비가 대략 20% 이상 향상될 것으로 기대되며, 특히 등가 연료 개념을 이용한 ECMS 제어기의 성능이 서모스탯(Thermostat)형 제어기에 비해 연비 및 슈퍼 커패시터 충전량 관리 측면에서 보다 향상된 것을 확인하였다.

**Abstract**: This paper presents the power management strategies for a compound hybrid excavator. The compound hybrid excavator has been replaced the hydraulic swing motor to the electric swing motor. This excavator requires a proper control algorithm to regulate the energy flow between the mechanical coupling and the electric devices. The controller should improve fuel economy and maintain the super capacitor voltage within a proper range. A thermostat controller and ECMS controller are designed such that these objectives can be achieved. The thermostat controller regulates the power of the engine-assist motor on the basis of the super capacitor voltage, and the ECMS controller determines it using the real-time fuel minimization strategy based on the concept of equivalent fuel. Simulation results showed that by using the hybrid excavator, the fuel economy becomes about 20% higher than that obtained using the conventional excavator and that the ECMS controller outperforms the thermostat controller.

- 기호설명 -

$C_{s/c}$  : 슈퍼 커패시터 커패시턴스(F)  
 $H_{LHV}$  : 디젤 저위 발열량(kW/g)  
 $J$  : 비용함수(g/s)  
 $\dot{m}_{fuel}$  : 엔진 연료 소모량(g/s)

$P_{eng}$  : 엔진 출력(kW)  
 $P_{mot,eng}$  : 엔진 보조모터 출력(kW)  
 $P_{pump}$  : 유압펌프 요구동력(kW)  
 $P_{s/c}$  : 슈퍼 커패시터 출력(kW)  
 $P_{swing}$  : 선회모터 요구동력(kW)  
 $SOC$  : 슈퍼 커패시터 충전율  
 $V_{s/c}$  : 슈퍼 커패시터 전압(V)  
 $f_{PEN}$  : 패널티 함수  
 $s$  : 변환효율

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, [iku3333@snu.ac.kr](mailto:iku3333@snu.ac.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

강화된 배출가스 규제 및 원유값 상승에 대한 대응으로 하이브리드 동력시스템 개발을 위한 세계 각국의 연구 및 투자가 증가하고 있다. 하이브리드 차량뿐만 아니라, 응용기술로써 연료소모가 많은 중장비 및 건설 기계의 하이브리드화에 대한 관심 역시 증가하고 있다. 특히 건설기계는 일반 승용차에 비해 운용비용 중에 연비가 차지하는 비중이 크기 때문에, 하이브리드화에 따른 연비 절감에 대한 기대효과가 더욱 크다. 그러나 한편으로 해당 시스템들은 유압시스템 혹은 전장부품에 의한 에너지 소모가 비교적 크고, 운용 조건 및 부하특성이 일반 승용차량과 크게 다르기 때문에, 하이브리드 동력전달계 적용을 위한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

굴삭기는 가장 널리 운용되고 있는 중장비중에 하나으로써, 이미 세계 주요 굴삭기 메이커에 의해 하이브리드 굴삭기의 개발 및 시제품 생산이 진행되고 있다. 2003년 Komatsu는 직렬형 6톤급 굴삭기를 개발하여 제작 및 시험한 바 있으며, Kobelco 및 Hitachi 역시 복합형 굴삭기를 개발하여 탁월한 연비 상승효과를 보여주었다.

하이브리드 차량과 마찬가지로 하이브리드 굴삭기 역시 동력흐름 제어하기 위한 알고리즘을 요구한다. 그러나 복합형 하이브리드 굴삭기의 동력제어에 관한 논문은 몇몇 규칙제어기에 대한 연구 이외에는 거의 보고되지 못하고 있는 실정이다.<sup>(1-4)</sup> 그러나 복합형 하이브리드 굴삭기의 경우, 복잡해진 부하조건으로 인해 다양한 방향으로 동력흐름을 제어할 수 있기 때문에 제어기의 역할이 클 것으로 예상된다. 그러므로 본 논문에서는 복합형 하이브리드 굴삭기의 동력계 및 굴삭기의 일반적 부하특성의 분석을 통하여, 최적화 기반의 동력제어 알고리즘을 제시하고 그 효과를 시뮬레이션을 기반으로 검증해 보고자 한다.

2. 복합형 하이브리드 굴삭기의 구성

본 논문에서 고려한 굴삭기는 기존 굴삭기의 유압 선회모터를 전기 선회모터로 교체한 복합형 하이브리드 굴삭기이다.<sup>(5)</sup> 복합형 하이브리드 굴삭기는 크게 엔진과 슈퍼 커패시터, 엔진 보조 전동기 등을 포함하는 하이브리드 동력전달계와, 엔진과 직결된 유압펌프에 부하를 형성하는 유압시스템,

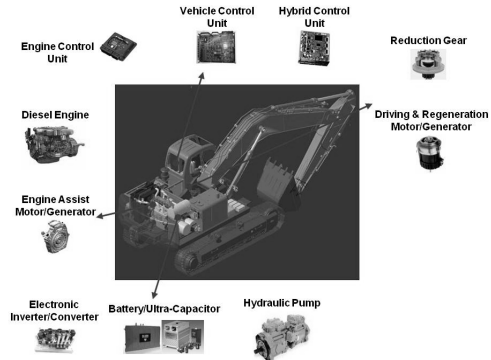


Fig. 1 Power flow of the hybrid excavator

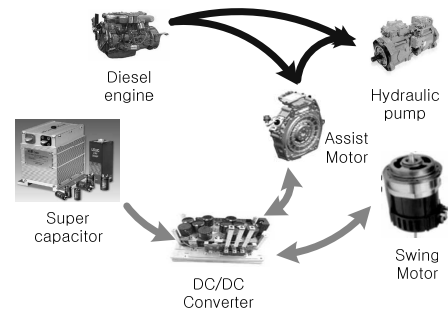


Fig. 2 Power flow of the hybrid excavator

그리고 각 단품을 제어하고 동력흐름을 조절하는 제어시스템으로 구성된다.

2.1 하이브리드 동력전달계

하이브리드 동력전달계는 굴삭기 운전에 필요한 동력을 생산 전달하고 회생된 에너지를 흡수해 저장하는 역할을 수행한다. Fig. 1은 하이브리드 동력전달계의 주요 단품을 도시하고 있다.

디젤 엔진은 하이브리드 굴삭기의 구동력을 공급하는 역할을 한다. 디젤엔진에서 공급된 구동력은 유압펌프에 의해 유압에너지로 전환되거나 엔진 보조모터에 의해 전기에너지로 전환된다.

전환된 유압에너지는 운전자의 입력에 따라 굴삭기를 구동하기 위해 유압 액추에이터에서 소비된다. 엔진 보조모터에 의해서 전기에너지로 전환될 경우, 전기에너지는 선회 모터에 의해 직접 소비되거나, 슈퍼 커패시터에 저장될 수 있다.

슈퍼 커패시터는 주로 하이브리드 굴삭기의 선회모터가 가속할 시에 전기에너지를 공급하며, 감속할 시에는 회생된 전기에너지를 흡수한다. 이 외에도 슈퍼 커패시터는 펌프가 과부하 상황에 놓일 경우 엔진 보조모터를 이용하여 일부의 부하를 담당할 수

있다. 뿐만 아니라, 선회모터에 의해 회생된 전기에 너지 역시 엔진 보조모터를 이용하여 유압펌프에 직접 공급될 수 있다. Fig. 2는 하이브리드 동력전달계의 에너지 흐름도를 나타내고 있다.

### 2.2 유압시스템

유압시스템은 디젤엔진으로부터 동력을 공급받아 운전자의 입력에 따라 굴삭기를 구동한다. 유압 펌프는 기계적 에너지를 유압 에너지로 전환하는 역할을 하며, 두 개의 유압 펌프가 직렬로 별도의 변속기 없이 디젤엔진에 직접 연결되어 있다. 각각의 펌프는 서로 다른 유압 액추에이터를 담당하지만, 경우에 따라서는 과부하를 받는 유압 액추에이터에 함께 동력을 공급할 수 있도록 구성되어 있다.

각 유압 액추에이터에 공급되는 유량은 제어밸브에 의해 조절된다. 이 외에도 굴삭기는 유압 시스템 내부의 과도한 압력 상승을 방지하고, 유압 손실을 최소화 하기 위해 릴리프밸브와 자세 제어 밸브 등 복잡한 밸브들을 포함하고 있다.

하이브리드 동력시스템의 동력흐름을 제어하기 위해서는 유압펌프에서의 정확한 요구 동력을 구해야 한다. 이를 위해서는 각 밸브 및 액추에이터에서의 압력과 유량에 대한 정보가 필요하며, 유압 시스템에 대한 모델링 및 검증이 필수적이다. 그러나 유압시스템은 매우 복잡하고, 또한 그 동역학적인 반응속도가 디젤엔진에 비해 매우 빠르기 때문에, 유압특성은 동력시스템 제어에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러므로 본 논문에서는 유압 모델을 이용하여 미리 계산된 펌프 요구동력을 직접 이용하기로 한다.

### 2.3 동력전달계 제어시스템의 구성

복합형 하이브리드 굴삭기의 제어시스템은 크게 상위 제어기와 하위 제어기로 구분할 수 있다. 상위제어기는 동력전달계를 구성하는 각 단품의 출력값을 제어하며, 상위제어기는 엔진 보조모터의 출력을 제어하여 동력전달계의 동력흐름을 제어한다.

디젤 엔진은 사용자에게 의해 설정된 목표속도를 추종하도록 엔진 ECU에 의해 제어된다. 엔진에 걸리는 부하에 의해 엔진속도가 변하게 되면, ECU는 연료 분사량을 조절하여 엔진속도를 조정하게 된다. 그러므로 엔진은 ECU에 의해 자동으로 부하만큼의 동력을 공급하게 된다. 만일 엔진의 관성에 의한 다이내믹스를 무시하면 다음의 기계시

스템 동력 균형 방정식을 만족한다고 가정할 수 있다.

$$P_{eng} + P_{mot,eng} + P_{pump} = 0 \tag{1}$$

하이브리드 동력전달계의 전기 시스템은 슈퍼커패시터와 엔진 보조모터 그리고 선회모터로 구성된다. 선회모터의 출력값은 운전자의 입력에 따라 속도제어기에 의해 결정되고, 보조전동기 출력은 상위제어기에 의해 결정된다. 그리고 슈퍼커패시터의 출력값은 직류 변환기 제어기에 의해 제어된다. 만일 슈퍼 커패시터의 출력동력이 엔진 보조모터와 선회모터에 의한 요구동력과 일치하지 않는다면, 직류단 전압이 떨어지게 되고, 전기시스템의 제어가 어려워지기 때문에, 슈퍼 커패시터의 출력동력은 자동으로 부하동력과 일치하게 된다. 그러므로 다음의 전기 시스템 동력 균형방정식은 항상 만족한다.

$$P_{s/c} + P_{mot,eng} + P_{swing} = 0 \tag{2}$$

상위제어기는 동력전달계의 동력흐름을 제어하여 슈퍼 커패시터의 SOC(State of Charge)를 항상 일정한 수준 이상으로 유지해야 하며, 디젤 엔진에서의 연료소모량을 최소화 해야 한다. 이를 위하여 상위제어기는 위의 두 개의 동력균형 방정식을 이용하여 동력흐름을 제어한다. 상위제어기에 의해 엔진 보조전동기의 출력동력이 결정되면, 동력균형 방정식에 의해 디젤엔진과 슈퍼 커패시터의 출력동력이 결정된다. 디젤 엔진의 연료 소모량과 슈퍼 커패시터의 SOC는 다음의 방정식에 의해 결정되므로, 상위제어기는 연료소모량과 SOC를 함께 제어할 수 있다.

$$\dot{m}_{fuel} = f(P_{eng}) \tag{3}$$

$$\dot{V}_{s/c} = \frac{1}{C_{s/c} V_{s/c}} (P_{s/c}) \tag{4}$$

하이브리드 동력전달계의 동력흐름은 각 단품사양에 의해 제약을 받게 된다. 상위제어기가 동력흐름을 제어함에 있어서 다음의 제한조건을 반드시 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} P_{eng,min} &\leq P_{eng} \leq P_{eng,max} \\ P_{eng,mot,min} &\leq P_{eng,mot} \leq P_{eng,mot,max} \\ P_{s/c,min} &\leq P_{sc} \leq P_{s/c,max} \\ V_{s/c,min} &\leq V_{s/c} \leq V_{s/c,max} \end{aligned} \tag{5}$$

### 3. 동력제어 알고리즘 및 부하조건

#### 3.1 복합형 하이브리드 굴삭기의 부하조건

복합형 하이브리드 굴삭기는 유압식 선회모터를 전기 선회모터로 대체하였기 때문에 작업부하가 두 개로 늘어난다. 이 중에 유압펌프에 의한 대부분의 요구동력은 디젤 엔진이, 그리고 선회모터에 의한 대부분의 요구동력은 슈퍼 커패시터에 의해 담당되어야 한다.

유압펌프 및 선회모터에서의 요구동력은 복합형 하이브리드 굴삭기를 이용한 실험으로부터 구하였다. 펌프 요구동력은 실험데이터와 유압시스템 모델을 이용하여 미리 계산된 값을 사용하였다.

선회모터에 의한 요구동력 역시 굴삭기의 회전관성 추정이 어렵기 때문에, 동일한 실험에서 선회모터에 의한 전력소모량 데이터를 사용하였다. 다양한 조건에서의 연비상승률을 알아보기 위하여 Fig. 3의 두 가지 실험데이터에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째 실험 데이터는 토사를 대상으로, 두 번째 실험데이터는 석산을 대상으로 굴삭 작업을 수행하였다. 유압펌프 및 선회부하는 엔진 최대 출력값을 기준으로 각각 표준화되었다.

#### 3.2 서모스탯(Thermostat)형 제어기

하이브리드 굴삭기의 동력흐름을 제어하는 가장 단순한 형태의 제어기로서 Thermostat 제어기를 들 수 있다. Thermostat 제어기는 SOC 를 기준으로 동력흐름을 제어한다. SOC 가 미리 정의된 하한값 이하로 떨어질 경우, 제어기는 엔진 보조모터를 이용하여 SOC 를 상한값까지 충전한다. 충전된

이후에는 다시 SOC 가 하한 값 이하로 떨어지기 전까지 Thermostat 제어기는 아무런 동력제어를 하지 않는다. Thermostat 제어기는 안정적인 SOC 유지는 가능하지만, 엔진 운전점 및 각 단품의 효율에 대한 고려가 전혀 없기 때문에 연비면에서의 성능은 떨어질 것으로 판단된다.

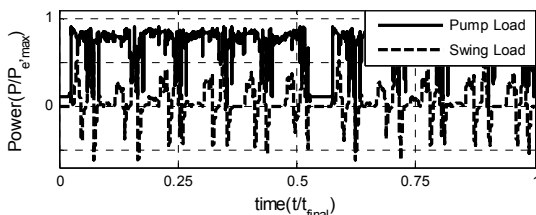
#### 3.3 ECMS 제어기

하이브리드 굴삭기에서 직접적으로 연료를 소모하는 단품은 디젤엔진이다. 그러나 일부의 요구동력은 슈퍼 커패시터에 의해서 공급되기 때문에, 슈퍼 커패시터의 출력동력에 대하여 고려하지 않는다면, 디젤엔진에서 소모하는 연료가 하이브리드 동력전달계가 소모하는 연료량과 일치한다고 볼 수 없다. 슈퍼 커패시터에서 사용하는 전기에너지를 고려하기 위하여 ECMS 제어기는 다음과 같은 등가비용함수를 고려하여 실시간으로 엔진 보조모터의 최적의 출력값을 결정한다.<sup>(6)</sup> 이 때 연비 비용함수는 다음과 같이 정의된다.

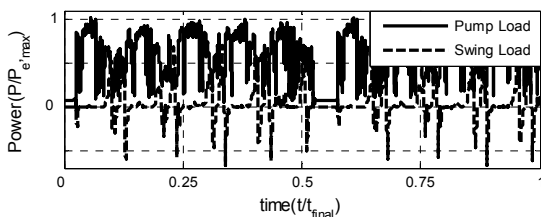
$$J = \dot{m}_{fuel} + s \cdot f_{PEN} \frac{P_{s/c}}{H_{LHV}} \tag{6}$$

$$f_{PEN} = 1 - SOC^3$$

식 (6)의 첫 번째 항은 디젤엔진에 의해 소모하는 연료량이다. 두 번째 항은 슈퍼 커패시터에서 사용한 전기에너지를 연료량으로 환산한 값이다. 슈퍼 커패시터에 저장되어 있는 에너지는 반드시 디젤 엔진에 의해서 공급되어야 한다. 그러므로 환산된 연료량 값에는 이에 상응하는 변환효율을 고려해 주어야 하며, 상수  $s$  는 저장된 전기에너지의 평균적인 변환효율을 의미한다. 그러나 디젤엔진의 효율은 운전조건에 따라 변하기 때문에 평균적인 변환효율을 정의할 수 없으며, 상수  $s$  는 부하조건에 따라 조절되어야 한다. 최적의  $s$  값은 부하조건에 따라 다르지만, 대부분 2.0-2.5 사이에 존재한다.  $f_{pen}$  은 SOC 를 적절한 수준으로 유지하기 위한 패널티함수이다. ECMS 제어기에 의해 엔진 보조모터의 출력값은 위의 비용함수를 최소화 하는 값으로 결정된다.



(a) Soil



(b) Rocks

Fig. 3 Load Profiles

Table 1 Final SOC's by different value of  $s$

변환효율( $s$ )	2.0	2.2	2.4	2.6
토사	0.71	0.73	<b>0.75</b>	0.75
석산	0.91	0.94	<b>0.96</b>	0.97

비용함수 상에서 상수  $s$ 의 값은 변환효율을 의미하지만, 수학적으로는 무게 함수의 기능을 하게 된다. 상수  $s$ 의 값이 클수록 엔진 보조모터를 사용하여 충전을 하는 것이 비용함수를 줄이는데 유리하다. 반대로 상수  $s$ 의 값이 작을 경우 충전을 하더라도 두 번째 항에서 비용함수의 감소폭이 작다. 그러므로 엔진 보조모터를 이용하여 충전하는 경향이 줄어들게 된다. 따라서 ECMS 제어기는 적절한  $s$  값을 선택함으로써 엔진 보조모터의 충전 경향을 조절할 수 있다. Table 1은 각각의 부하상황에서  $s$ 에 따른 최종 SOC 값을 나타내었다. ECMS 제어기의  $s$  값은 작업종료시 초기 충전량과 비슷한 수준인 80%의 충전량을 유지하도록 설정되었다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 제시된 두 개의 실험데이터를 기반으로 하는 작업부하에 대해 실행되었다. 작업시간은 총 10번의 굴삭작업을 기준으로 220s이다.

시뮬레이션 결과에서 두 제어기 모두 엔진보조모터를 주로 발전모드로 이용하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 선회모터에 의한 에너지 손실을 보상하기 위함이다. 실제 실험상에서 선회모터에 의한 에너지 회수율이 50%정도에 불과하기 때문에, 슈퍼 커패시터의 SOC를 유지하기 위해서 손실된 에너지는 반드시 보상되어야 한다.

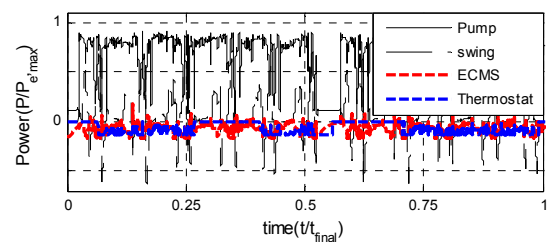
Thermostat 제어기는 부하상황에 관계없이 충전하는 것에 반해, ECMS 제어기는 주로 선회가속 구간에서 충전하는 경향이 있음을 그래프에서 확인할 수 있다. 이러한 경향은 패널티함수  $f_{pen}$ 의 영향으로써, 선회모터의 가속에 의해 슈퍼 커패시터의 충전량이 떨어지게 되면, 이를 보상하기 위해 엔진 보조모터를 이용해 발전하게 된다.

하이브리드 굴삭기의 연비 소모량을 정확히 비교하기 위해서는 초기 충전상태와 최종 충전량의 차이를 고려해야 한다. 저장되거나 손실된 전기에너지에 대한 연료소모량을 고려하기 위하여 Fig. 5와 같이 다양한 초기 충전상태에서의 초기와 말기에서의 충전에너지 차이에 대한 연료 소모량의 선형 보간법을 이용한다.

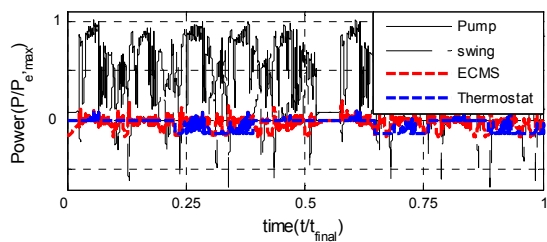
Table 2는 두 제어기의 연비 향상율을 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과 복합형 하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기에 비해 약 17~19%의 연비 향상율을 보여줄 것으로 기대된다. 특히 실시간 최적제어 알고리즘을 이용하여 엔진 효율 및 모터 효율 등을 고려한 동력제어를 수행함으로써 약

Table 2 Fuel Consumptions

	토사(g) <향상율>	석산(g) <향상율>
기존 굴삭기	1289.0	1085.5
하이브리드 (Thermostat)	1068.1<17.14%>	887.5<18.24%>
하이브리드 (ECMS)	1063.7<17.49%>	878.8<19.04%>



(a) Soil



(b) Rocks

Fig. 4 Control Results – Engine assist motor power

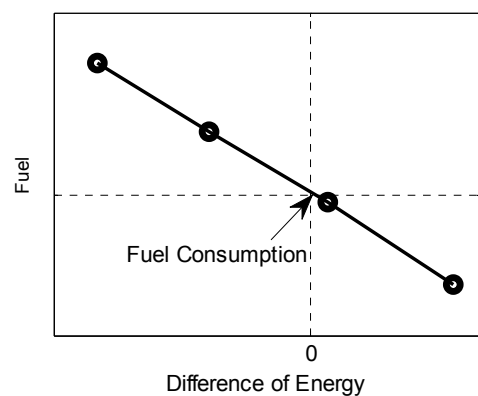


Fig. 5 Linear Fitting between Energy Difference and fuel consumptions

1%정도의 제어이득을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

실시간 제어기의 중요한 역할 중의 하나는 SOC를 적절한 수준으로 유지하는 것이다. Fig. 6와 Fig. 7는 시뮬레이션중 각 제어기에 의한 SOC 제어 결과를 도시하였다. Thermostat 제어기의 경우 슈퍼

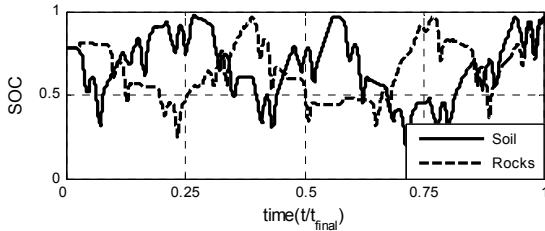


Fig. 6 Control Results – SOC\_Thermostat controller

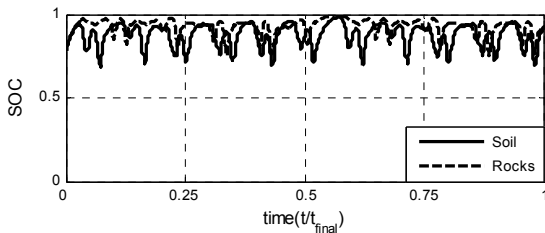


Fig. 7 Control Results – SOC\_ECMS controller

커패시터가 특정한 수준까지 방전 된 이후에 충전을 시작하는 것을 볼 수 있다. 그러나 ECMS 제어기의 경우 패널티함수의 영향으로 SOC 가 일정한 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문은 유압식 선회모터를 전기 선회모터로 교체한 복합형 하이브리드 굴삭기의 동력 제어 알고리즘에 대하여 기술하였다. 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 하이브리드 동력전달계 및 유압 시스템을 모델링 하였으며, 실험 데이터를 이용하여 모델 검증을 수행하였다.

복합형 하이브리드 동력전달계의 동력흐름을 제어하기 위하여 Thermostat 제어기 및 ECMS 제어기를 설계하였다. Thermostat 제어기는 슈퍼 커패시터의 충전상태를 기준으로, ECMS 는 등가함수 최적화 기법을 이용하여 동력흐름을 제어한다. 시뮬레이션 결과, 복합형 하이브리드 굴삭기는 기존 굴삭기에 비해 약 17~19% 연비가 향상될 것으로 기

대되며, Thermostat 제어기에 비하여 ECMS 제어기가 연비 및 SOC 유지 측면에서 뛰어난 성능을 보이는 것을 확인하였다.

향후 주어진 굴삭 부하에 대하여 최적화 기법을 이용한 최적해를 구하고, 분석 결과를 바탕으로 최적해에 근접한 성능을 얻을 수 있는 제어기법 개발에 대한 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 논문은 SNU-IAMD 와 지식경제부의 한국학술진흥재단 (KRF-2009200-D00003) 및 한국연구재단 (2009-0083495) 에서 후원하는 전략기술 개발사업 “하이브리드 굴삭기 핵심기술 개발”의 연구 결과를 토대로 작성되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Kwon, T.-S., 2008, “Power Control Algorithm for Hybrid Excavator with Super Capacitor,” *IEEE Transaction on Power Electronics*.
- (2) Xiao, Q., 2007, “Control Strategies of Power System in Hybrid Hydraulic Excavator,” *Automation in Construction*.
- (3) Yanting, Z., 2006, “Constant Work-Point Control for Parallel Hybrid System with Capacitor Accumulator in Hydraulic Excavator,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 4*, pp. 505~508.
- (4) Lin, X., 2008, “Dynamic Simulation and Optimal Control Strategy for a Parallel Hybrid Hydraulic Excavator,” *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, pp. 624~632.
- (5) Yoo, S., 2009, “Design and Control of Hybrid Electric Power System for a Hydraulic Actuated Excavator,” *SAE International*.
- (6) Lin, C.-C., 2003, “Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Vehicle,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.11, No. 6*, pp. 839~849.