

# 가변 유압모터를 이용한 전동지게차 리프트회생 효율에 관한 연구

## A Study on the Regeneration Efficiency of the Electric Forklift Using the Variable Hydraulic Motor

박용수<sup>1</sup> · 어영소<sup>2</sup> · 윤진수<sup>2</sup> · 도 씨 끄영<sup>2</sup> · 한성민<sup>3</sup> · 신정우<sup>3</sup> · 유충목<sup>3</sup> · 안경관<sup>2\*</sup>  
 Yong Soo Park<sup>1</sup>, Ying-Xiao Yu<sup>2</sup>, Jin Su Yun<sup>2</sup>, Tri Cuong Do<sup>2</sup>, Sung Min Han<sup>3</sup>,  
 Jung Woo Shin<sup>3</sup>, Choong Mok Yu<sup>3</sup> and Kyoung Kwan Ahn<sup>2\*</sup>

Received: 06 May 2020, Revised: 07 Jul. 2020, Accepted: 21 Jul. 2020

**Key Words** : Forklift(지게차), Energy Regeneration(에너지 회생), Hydraulic Energy(유압 에너지), Variable Motor(가변 모터), System Efficiency(시스템 효율)

**Abstract:** In modern society, the energy-saving problem of industrial vehicles is economically and environmentally critical. Energy savings using the potential energy of forklifts are one of the viable solutions to resolving this problem. The basic concept of this study is to operate the hydraulic motor and recharge the battery using the flow rate from the cylinder when loading heavy objects and lowering the fork. To save energy, the torque and rotational speed of the generator should be optimized according to the load and descent speed to increase efficiency. To this end, we propose a system that optimizes energy saving efficiency by controlling the swashplate angle of the variable hydraulic motor through the GA(Genetic-Algorithm). The results were verified by building and comparing fixed motor models and variable motor models using the AMEsim. The results of the study show that the proposed optimized swashplate angle increases the energy saving efficiency by approximately 6%-8%, depending on the working conditions.

### 기호 설명

$\omega_p$  : angular velocity of pump, rad/s  
 $\omega_m$  : angular velocity of motor, rad/s  
 $\alpha$  : joystick angle, rad  
 $D$  : displacement of hydraulic motor, m<sup>3</sup>/rev  
 $T_p$  : torque of pump, Nm  
 $T_m$  : torque of motor, Nm

$E_{pump}$  : working energy for pump, kW  
 $E_{reg}$  : regeneration energy, kW  
 $E_{reg\_th}$  : theoretical regeneration energy, kW  
 $E_{sys}$  : Energy for whole proposed system, kW  
 $\eta_o$  : over-all efficiency of Hydraulic motor  
 $\eta_v$  : volumetric efficiency of motor  
 $\eta_m$  : mechanical efficiency of motor  
 $\eta_{inv}$  : efficiency of inverter  
 $\eta_{bat}$  : efficiency of battery  
 $\eta_{gn}$  : efficiency of generator  
 $\eta_{save}$  : energy-saving efficiency system

\* Corresponding author: kkahn@ulsan.ac.kr

1 Department of Construction Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

3 Sewoncellontech Co., LTD., Changwon 51558, Korea

Copyright © 2020, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 국제적으로 환경오염 문제가 대두되면서 건설 중장비 분야에서는 배기가스 및 에너지 소비 절

감에 대한 기술개발이 요구되고 있다.<sup>1)</sup> 때문에 에너지 회생 시스템은 이러한 환경오염 및 에너지 소비 문제의 해결책으로서 각광받고 있다. 건설기계-굴삭기의 붐(Boom) 회생, 산업용 엘리베이터 하강 회생 등과 같은 에너지 회생 시스템은 현재 여러 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>2-5)</sup> 하지만 산업용 차량인 지게차의 경우에는 에너지 회생에 관한 연구가 많이 이루어지지 않고 있다.

현재 굴삭기에 사용되는 여러 에너지 회생시스템과 전략들에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>6-10)</sup> 대표적인 에너지 회생 방법으로는 어큐물레이터를 이용하여 실린더의 하강으로 발생하는 유압에너지를 직접 저장하는 방식과 발전기를 이용하여 배터리와 슈퍼캐패시터에 전기에너지로 저장하는 방법이 있다. 하지만 굴삭기와 같이 유압에너지를 이용하여 물체를 들어 올리는 지게차의 경우 에너지 회생에 관한 많은 연구가 진행되지 못했다.

지게차 작업 중에 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것은 주행과 리프팅 작업이다. 지게차는 화물을 들어올리기 위해 리프트 실린더 상승 시 에너지를 사용하고, 하강 시에는 포크와 부하중량에 의해 하강되도록 구성되어 있다. 또한 하강 작업 시 작업안전을 위해 유량 제어 밸브를 이용, 탱크로 유입되는 유량을 조절하여 하강속도를 조절한다. 이때 탱크로 유입되는 유압에너지는 사용되지 않고 버려지기 때문에 이를 유압모터와 발전기를 통해 전기에너지로 회생시키는 것이 이 연구의 핵심이다.

지게차의 에너지 회생에 관한 선행연구로 Minav<sup>11)</sup>는 모터/발전기 통합 모델을 사용하여 지게차의 에너지 회생 시스템을 제안하였다. 하지만 고정형 모터를 사용하였기 때문에 모터와 발전기의 최적 효율점에서 시스템을 구동하지 못했다. 또한 Wang<sup>12)</sup>은 가변 유압 모터를 사용했지만 유압 모터의 사판각을 제어함에 있어 Rule base의 제어 전략을 사용했기 때문에 작업 조건에 따른 최적효율점에서 시스템을 구동하지 못하였으며 제어 전략에 사용된 제어 조건과 파라미터를 또한 실험자의 경험에 의한 시행착오에 의해 결정되었기 때문에 전체 시스템의 효율을 극대화시켰다고 보기는 어렵다.

본 연구는 기존 지게차의 유압시스템에 가변 유압모터를 이용한 에너지 회생 시스템을 적용, 작업 부하와 하강 속도에 따른 효율을 고려한 유압 모터의 사판각 제어를 통해 전체 에너지 효율을 높이고자 한다. 시스템 최적화에 있어, 유압모터의 체적 및 기

계효율을 고려해야 하고 마찬가지로 발전기의 효율 또한 고려해야 한다. 하지만 이러한 요소들은 시스템에서 비선형적인 거동을 보이기 때문에 최적화시키기에는 어려운 점이 있다. 이러한 문제를 GA를 통해 극복하고자 한다.

유압 해석 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축한 뒤 고정형 유압모터를 사용한 기존의 시스템과 효율을 비교하는 한편, 리프트의 하강속도를 고려하여 Matlab/Simulink 상의 GA를 이용, 유압모터의 사판각을 최적화시키고자 한다.

## 2. 지게차 리프트 회생 시스템

에너지 회생 효율을 높이기 위해 본 연구에서 제안된 시스템은 Fig. 1과 같다. 시스템의 주요 요소들은 다음과 같다. 1 전동 모터, 2 메인 유압 펌프, 3 릴리프 밸브, 4 MCV 리프트용 메인제어밸브, 5 유압 모터, 6 발전기, 7 유량제어밸브, 8 리프트 실린더.

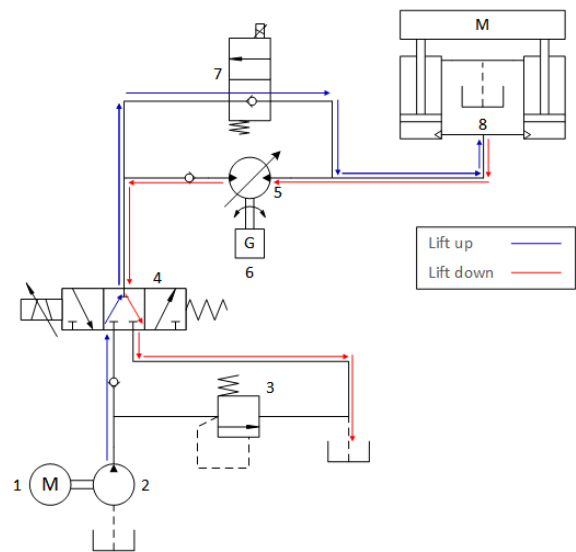


Fig. 1 The proposed forklift system

Fig. 2는 제안된 시스템의 Flow chart이며 여기에 나타난 제어 전략은 다음과 같다. 조이스틱 각도를 기준으로 실린더 상승 시, 메인제어밸브가 작동되며 전동 모터가 회전함에 따라 메인 유압 펌프에서 토출된 작동유체가 조절된 메인제어밸브를 지나 실린더로 유입되어 실린더가 상승하게 된다. 메인제어밸브의 개구면적은 조이스틱 각도( $\alpha$ )에 비례하여 결정되며,  $\alpha > 0$ 일 때는 실린더 상승, 반대의 경우 하강하도록 설정하였으며  $\alpha$ 의 크기에 따라 상승, 하강 속도가 결정된다.

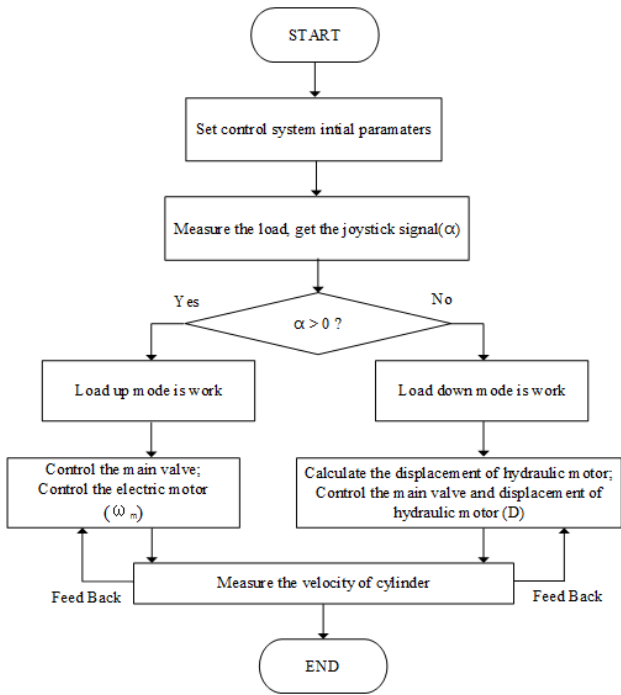


Fig. 2 Flow chart of the control strategy

실린더 하강 시에는 유량제어밸브 개구면적을 조절하여 실린더에서 토출되는 작동 유량을 조절하고 이를 통해 리프트 하강 속도를 조절한다. 이때 실린더에서 토출되는 유체를 바로 탱크로 보내지 않고 유압 모터를 통해 유압에너지를 전기 에너지로 바꾼다.

지게차 작업 중 리프트가 상승되어있는 상태에서 리프트와 리프트에 의해 상승된 물체는 중량에 의해 높은 위치에너지를 가지게 된다. 이러한 위치에너지는 리프트 하강 시에 실린더에서 토출되는 유압 에너지로 바뀌게 된다. 이를 바로 유압탱크로 바로 보내지 않고 유량제어밸브 개구면적을 조절하여 챔버 내에 높은 압력을 생성시킨다. 이때에 작동유체를 유압 모터에 통과시킴으로써 연결된 발전기를 회전시켜 전기에너지를 생산한다.

이렇게 전기에너지를 생산함에 있어 가장 많은 영향을 주는 요소는 부하의 하중과 하강 속도이다. 이 하중과 하강 속도 따라 유압 모터로 들어오는 유체의 압력과 유량이 달라지는데 이때 적절하게 유압 모터의 사판각을 조절, 흡입유량을 조절하여 전체 시스템의 효율을 증가시킬 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

Fig. 3는 앞서 설명한 리프트 에너지 회생 시스템을 AMESim을 이용하여 모델링한 것이다. Table 1, 2에는 AMESim 모델에 적용한 파라미터와 효율점 이

동을 보여주기 위한 시뮬레이션 조건을 나타내었다. 시뮬레이션 모델 구축 시 지게차의 내구성 테스트와 실제 작업 시 허용하중과 작업 속도를 고려하였다. 차량 내구성 테스트 시 요구되는 부하인 2000kg와 통상적인 허용 하중인 1500kg 2가지를 부하조건으로 선정하였고 앞서 선정한 부하조건 시에 통상적으로 적용되는 작업속도인 0.1, 0.15m/s 2가지 속도를 선정하였다.

각각의 조건하에서 유압 펌프에 사용되는 전력과 유압 모터를 통해 생성되는 전력을 측정할 수 있도록 시스템을 구축한 뒤 이를 고정형 모터를 사용한 기존의 시스템과 가변형 모터를 이용한 제안 시스템으로 나누어 효율을 비교하였다.

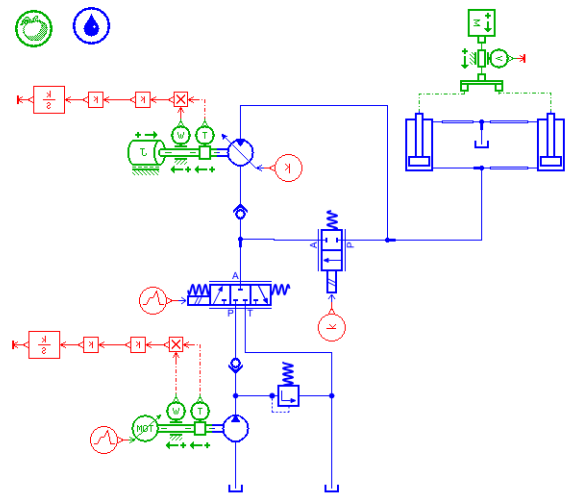


Fig. 3 Forklift energy regeneration model using AMESim

Table 1 Parameter of hydraulic circuit

Component	Value	Remark and unit
Hydraulic Pump	20	Displacement of gear pump (cc/rev)
Hydraulic Motor	20	Displacement of hydraulic motor (cc/rev)
Hydraulic Cylinder	42	Piston dia (mm)
	36	Rod dia (mm)
	1.5	Stroke length (m)

Table 2 Simulation condition by mass & lifting velocity

Case	Mass [kg]	Lifting Velocity [m/s]
Case1	2000	0.1
Case2	2000	0.15
Case3	1500	0.1
Case4	1500	0.15

### 4. 결과 및 최적화

#### 4.1 시뮬레이션 결과

Fig. 4는 4가지 조건을 각각 기존의 회로와 제안된 회로에 적용하여 표시한 발전기의 효율맵이다. 이를 통해 고정형 모터를 사용했을 때보다 가변형 모터를 사용하여 유량 조절하였을 때 더 높은 효율 ( $\eta_{gn}$ )을 보인다는 것을 알 수 있다.

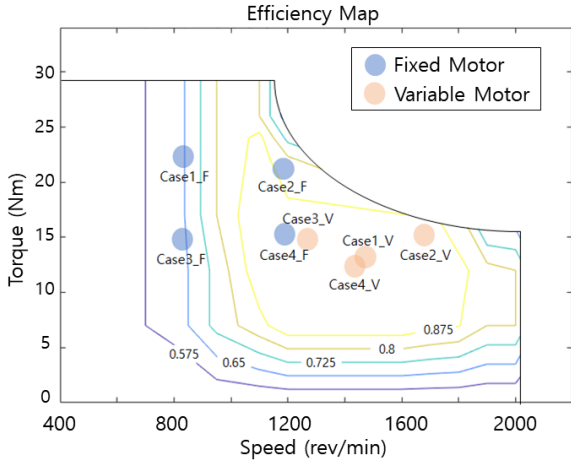


Fig. 4 Generator efficiency map for each case

Fig. 5-8은 2000kg과 1500kg의 경우, 모터 사판각과 하강속도에 따라 유압 모터에 출력되는 토크와 회전속도를 보여준다. 유압 모터의 회전속도는 사판각이 줄어들수록, 하강속도가 높아질수록 상승하는 것을 볼 수 있다. 토크는 하강속도가 낮아질수록, 사판각이 커질수록 상승하는 것을 확인할 수 있다. 여기서 유압 모터의 토크는 발전기의 부하토크를 포함한다.

결과적으로 유압 모터의 사판각이 변화함에 따라 출력되는 토크와 회전속도가 변하고 이에 따라 발전기 효율( $\eta_{gn}$ ) 또한 변하게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타난 효율맵을 이용하여 유압모터의 압력과 토출량에 따른 전효율과 체적효율 구하고 식 (1)을 이용하여 유압모터의 기계효율을 구한다. 이렇게 구한 유압모터의 체적효율과 기계효율을 바탕으로 식(2)와(3)을 이용해 실제 모터의 출력 토크와 회전속도를 구한다. 이를 통해 발전기와 유압모터의 모든 효율을 고려한 발전량을 계산할 수 있다.

$$\eta_m = \frac{\eta_o}{\eta_v} \tag{1}$$

$$T_m = \eta_m \cdot P \cdot D \tag{2}$$

$$w_m = \frac{\eta_v \cdot Q}{D} \tag{3}$$

$$E_{pump} = \omega_p T_p \tag{4}$$

$$E_{reg-th} = \omega_m T_m \tag{5}$$

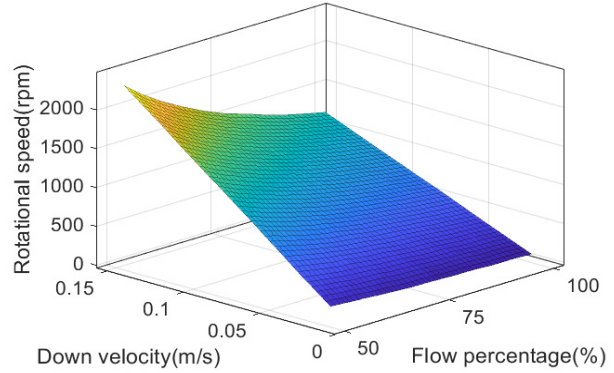


Fig. 5 Simulation Result of Rotational speed at load of 2000kg

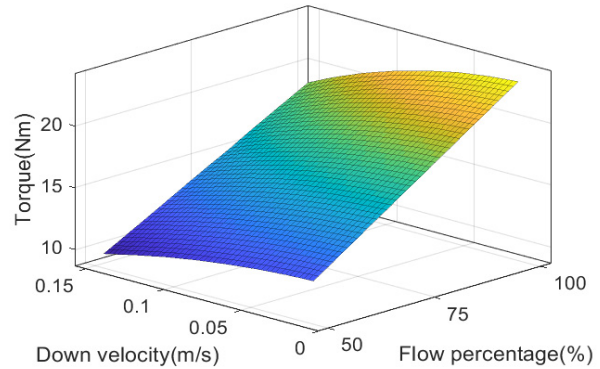


Fig. 6 Simulation Result of Torque at load of 2000kg

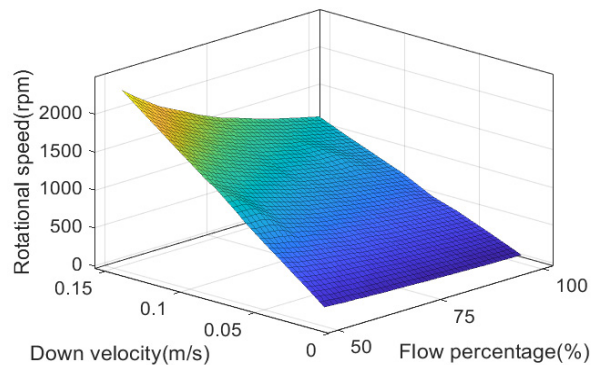


Fig. 7 Simulation Result of Rotational speed at load of 1500kg

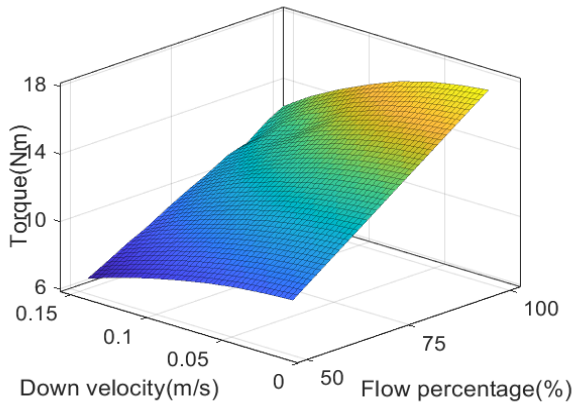


Fig. 8 Simulation Result of Torque at load of 1500kg

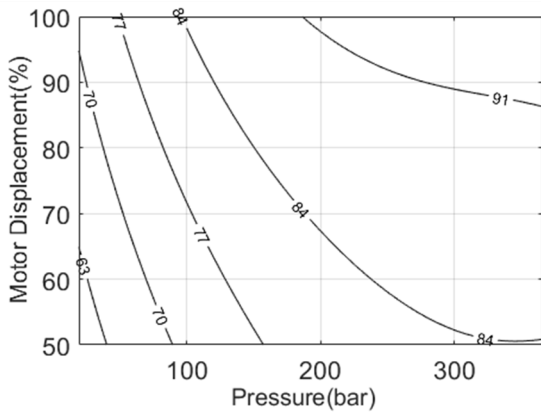


Fig. 9 Hydraulic motor over-all Efficiency Map

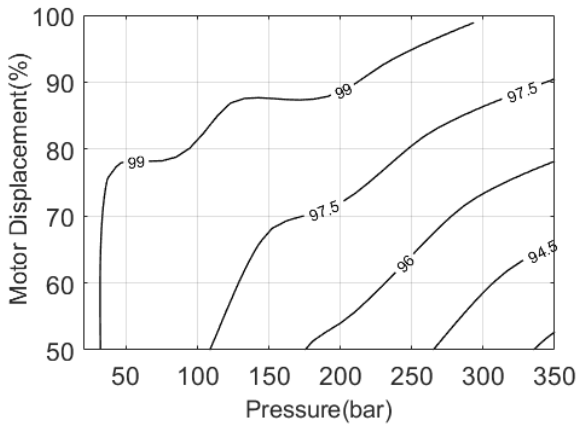


Fig. 10 Hydraulic motor volumetric Efficiency Map

#### 4.2 최적화

본 논문은 앞서 말한 발전기의 발전량을 최대화시키기 위해 MATLAB/Simulink상의 GA (genetic algorithm)를 이용, 이를 최적화 하였다.

최적화 절차는 다음과 같다.

1. 최적화를 위한 주요 인자 및 목표 함수 설정
2. 유전 알고리즘을 이용한 최적화
3. 도출된 최적화 변수의 검증 및 조정

최적화에 사용될 주요 인자로서 리프트 하강 속도와 유압모터의 사판각을 입력 변수로 두고 식(6)을 통해 구해지는 발전량을 최적화 시킬 목표함수로 설정하였다. 입력 변수의 모집단 유형은 더블형 벡터이며 50~100사이 값을 지정하였고 인구수는 100으로 지정하였다. 비선형 제약 조건 알고리즘으로는 확장 라그랑주 방식을 사용 했으며 초기별점은 10, 별점인자는 100으로 설정 하였다. 이주 방향은 순방향으로 비율은 0.2, 간격은 20으로 설정하였고 정체 세대는 50으로 설정했다. 그 다음 발전기 효율맵 상에 제한 조건을 GA에도 동일하게 적용시키고 Fig. 11에 나타난 임의의 하강속도를 입력하여 최적화를 실시하였으며 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

$$E_{reg} = E_{reg\_th} \cdot \eta_{ivt} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{gn} \quad (6)$$

$$E_{sys} = E_{pump} - E_{reg} \quad (7)$$

$$\eta_{save} = \frac{E_{pump} - E_{sys}}{E_{pump}} = \frac{E_{reg}}{E_{pump}} \quad (8)$$

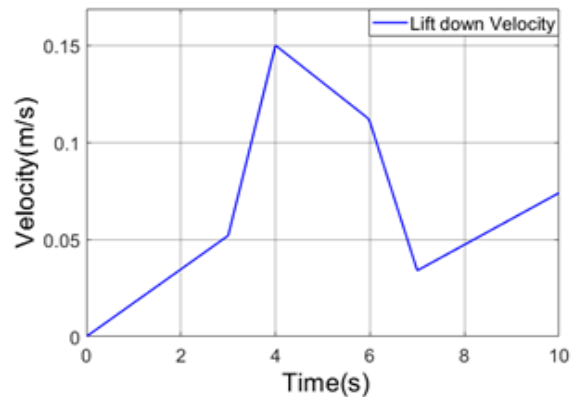


Fig. 11 Velocity of Lift down

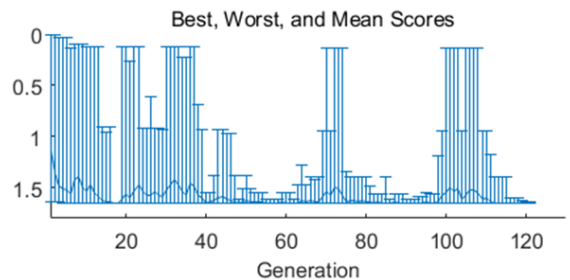
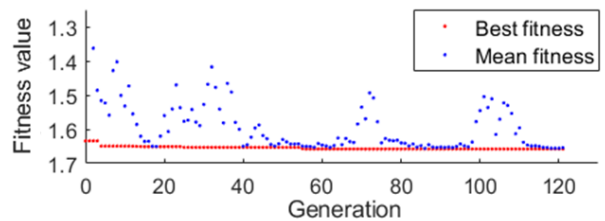


Fig. 12 Result of GA Optimization



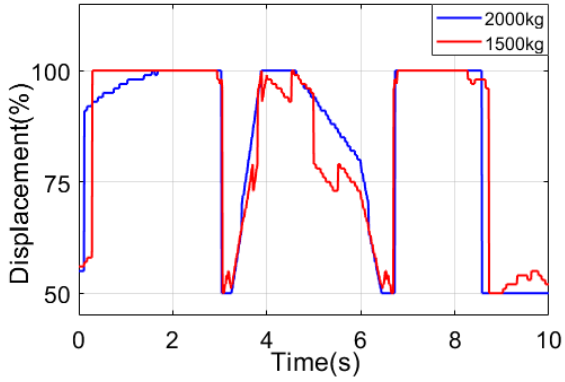


Fig. 13 Optimized Hydraulic Motor Displacement

최적화 이후 고려하여야 할 사항으로는 사판각의 동작 조절 문제가 있다. 발전기의 효율 맵이 선형적 이 않기 때문에 제어된 사판각 또한 선형적인 동작 거동을 가지지 못한다. 하지만 이러한 급격한 사판각 각도 변화는 유압 모터의 제어성과 내구성에 불리하게 적용되기 때문에 시간에 따른 사판각의 변화를 바로 전 샘플링 타임의 사판각과 비교하여 효율을 최대한 감소시키지 않는 범위 안에서 조정하였다.

이렇게 조정된 유압 모터 사판각에 따른 유체 토출량이 주어진 임의의 속도조건 하에 어떻게 변화되는지 Fig. 13과 같이 나타내었다.

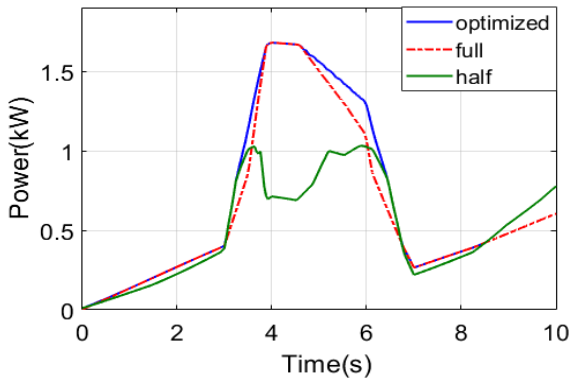


Fig. 14 Generated Power at case of 2000kg

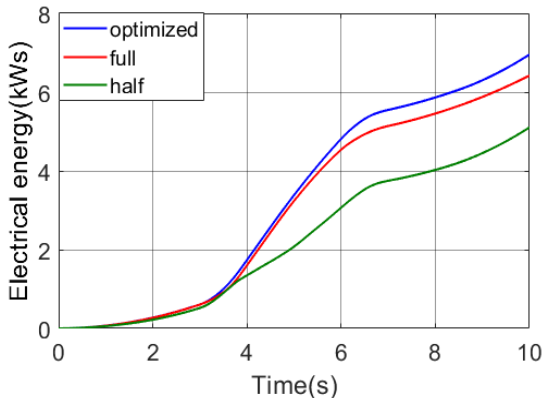


Fig. 15 Electrical energy at case of 2000kg

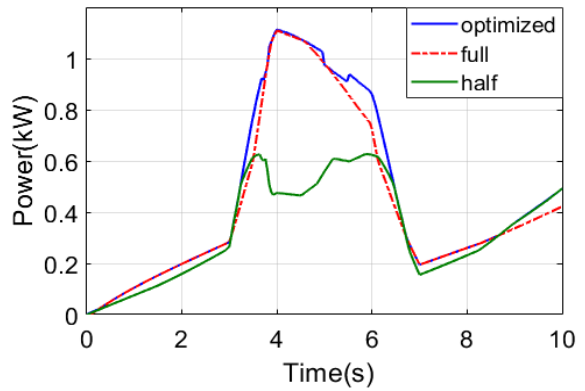


Fig. 16 Generated Power at case of 1500kg

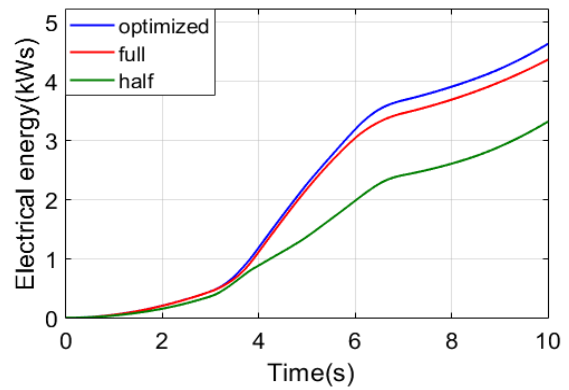


Fig. 17 Electrical energy at case of 1500kg

최적화된 사판제어를 적용한 Optimized displacement, 같은 용량의 고정형 모터와 같은 거동의 Full displacement와 그 절반의 만큼의 유량을 보내는 Half displacement를 2000kg과 1500kg의 경우에 적용하여 계산하였다. 이를 통해 산출된 각각의 전력과 전력량을 Fig. 14~17와 같이 나타내었다.

Table 3 Energy saving efficiency of each case

Mod	Mass[kg]	$\eta_{save}$	Improve[%]
Full	2000	0.2112	-
	1500	0.1820	-
Half	2000	0.1679	-
	1500	0.1383	-
Optimized	2000	0.2287	8.3165
	1500	0.1932	6.1121

기존의 시스템과 제안된 시스템 전체의 에너지 절약 효율을 비교하기 위해 식(4)을 통해 시스템의 전체 입력 에너지에 해당하는  $E_{pump}$ 를 계산하고 각각의 경우에 발전기를 통해 얻은 에너지를 식(5)를 통해 구한다. 이때 인버터 효율( $\eta_{inv}$ )과 배터리 효율( $\eta_{bat}$ )은 각각 0.9, 0.85로 설정했다. 이를 식(7)과(8)에 대입

하여 에너지 절약 효율을 계산했고 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

최적화된 시스템에서는 각각 0.2287, 0.1932의 효율을 보이며 이전의 시스템보다 8.31%, 6.11% 증가한 것을 볼 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고정형 모터를 사용하는 기존의 지게차 리프트 회생시스템의 효율을 높이고자 가변 유압 모터를 이용한 새로운 리프트 회생 시스템을 제안하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 제안된 시스템의 시뮬레이션 모델을 Amesim을 이용하여 구축하였다. 이를 이용하여 유압 모터와 발전기의 효율맵을 바탕으로 작업 부하와 작업속도에 따른 토크와 회전 속도를 도출하였고, 도출된 데이터를 이용하여 시스템 사용되는 에너지와 회생되는 에너지를 계산하였다.

(2) 유압 모터와 발전기의 비선형적인 효율 특성을 고려, 에너지 효율을 극대화할 수 있도록 유압 모터의 사관각을 GA를 이용하여 최적화 하였다. 최적화된 사관각에 의해 발전기의 토크와 회전속도가 조절되어 발전량을 극대화시켰다. 결과적으로 제안된 시스템은 에너지 절약 효율을 2000kg 경우 8.31%, 1500kg의 경우 6.11% 증가시켰음을 확인하였다.

본 연구를 바탕으로 향후에는 가변 유압 모터를 이용한 하이브리드 시스템의 에너지 회생에 대한 연구를 할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 한국에너지기술평가원[KETEP]의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. [G032070313]

## 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

## References

1) M. Jeong, "Recent Trend of Global Construction Machinery Industry and its Implication", KIET Monthly Industrial Economics, 2014.

2) Y. X. Yu, E. J. Jeong and K. K. Ahn, "Research on Energy Regeneration of a Hydraulic Excavator Boom System", Proceedings of 2018 Spring Conference on Drive and Control, pp.71-76, 2018.

3) T. Lin et al., "Research on the Energy Regeneration Systems for Hybrid Hydraulic Excavators", Automation in Construction, Vol.19, No.8, pp.1016-1026, 2010.

4) Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Optimization of Energy Regeneration of Hybrid Hydraulic Excavator Boom System", Energy Conversion and Management, Vol.183, pp.26-34, 2019.

5) Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Application of Hydraulic Transformer on Energy Saving for Boom System of Hybrid Hydraulic Excavator", Proceedings of the 20th International Conference on Mechatronics Technology, pp.118-123, 2016,

6) Y. X. Yu, E. Jeong and K. K. Ahn, "Review of Energy Saving Technology of Hybrid Construction Machine", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.91-100, 2018.

7) Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Energy Regeneration and Reuse of Excavator Swing System with Hydraulic Accumulator", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.7, pp.859-873, 2020.

8) Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Improvement of Energy Regeneration for Hydraulic Excavator Swing System", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.7, pp.53-67, 2020.

9) Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Study on the Energy Regeneration of Hybrid Hydraulic Excavator using Hydraulic Transformer", Proceedings of 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems, pp.16-19, 2016.

10) S. Y. Lee, "Development of Simulation Model for PEMFC Hybrid Excavator", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.3, pp.16-22, 2019.

11) T. Minav et al., "Electric Energy Recovery System for a Hydraulic Forklift - Theoretical and Experimental Evaluation", IET Electric Power Applications, Vol.5, No.4, pp.377-385, 2011.

12) L. Wang et al., "Energy Management Strategy Development of a Forklift with Electric Lifting Device", Energy, Vol.133, pp.1163-1165, 2017.