

연료전지 시스템을 적용한 하이브리드 굴삭기 해석 모델 개발 Development of Simulation Model for PEMFC Hybrid Excavator

이세영^{1*}

Se Young Lee

Received: 10 Jun. 2019, Accepted: 31 Jul. 2019

Key Words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Fuel Cell(연료전지), Hybrid Excavator(하이브리드 굴삭기), Battery(배터리), Ultra Capacitor(울트라 커패시터)

Abstract: Due to the rise in energy consumption and natural resource prices, the demand to improve energy efficiency in the construction machine has been highlighted. Even though many researchers have contributed to the development of the technology, CO₂ gas emissions of heavy machinery remains high. One of the most significant problems of the novel excavator with internal combustion engines is the emission of harmful gas. To reduce emissions in the construction machine, it is necessary to replace the internal combustion engines with the alternative one. To overcome those problems, this paper focuses on the adoption of PEMFC hybrid engine for the excavator system. An internal combustion engine is replaced by new structures with fuel cell, battery and ultra capacitor. The proposed system has been designed and modeled using Simcenter Amesim software and compared with the conventional one through simulation results.

1. 서 론

국제에너지기구(IEA)에서 발표한 세계 에너지 전망 보고서에 따르면 2040년까지 세계 에너지 수요가 37%, 이산화탄소 배출 규모가 20% 증가할 것으로 전망하고 있다. 이에 각국 정부는 환경 규제를 강화하는 등 배출가스를 줄이기 위해 노력하고 있으며 다양한 산업 분야에서 친환경 연구가 수행되고 있다.

건설중장비 분야도 예외는 아니며 다음과 같은 연구가 진행되었다. 공회전 제어를 통한 배기가스 저감이나 하이브리드 방식을 채용한 에너지 효율 향상에 대한 연구가 진행되었다.¹⁻⁵⁾ 스펴 방식의 유압 밸브가 가지는 압력 손실의 한계를 극복하기 위해 독립 미터링 밸브를 적용한 굴삭기에 대한 연구도 진행되었

다.⁶⁻⁸⁾ 또한, 붐 작업 장치와 선회 장치가 가지는 관성 에너지를 회생하여 재사용하는 연구도 진행되었다.⁹⁻¹²⁾

이처럼 다양한 방면에서 연구가 진행되어 상당한 효율 향상이 이루어졌으나 배출가스 문제는 여전히 해결하지 못한 상태이다. 이에 배터리를 기반으로 작동하는 전동 건설기계가 개발되었으나 충전 시간 대비 짧은 작업 시간으로 인해 한정된 현장에서만 사용되고 있다.¹³⁻¹⁴⁾

이와 같이 내연기관의 배출가스 문제, 배터리의 짧은 작업 시간이라는 한계를 극복하기 위해 연료전지를 기반으로 작동하는 건설기계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 하지만 앞선 연구에서는 소형 굴삭기를 대상으로 하거나 정하중에 대한 해석을 진행하거나 배터리 및 연료전지에 초점을 두는 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 연료전지 시스템을 적용한 하이브리드 굴삭기 해석 모델을 개발하되, 대형 굴삭기를 대상으로 동하중에 대한 해석을 진행한다. 또한, 배터리 및 울트라 커패시터를 모델링하고 충전 상태와 부하량에 기반한 연료전지 발전량 제어 알고리즘을

* Corresponding author: lsy5729@gmail.com

1 Software Team, Shinho Systems, Sungnam-si, Gyeonggi-do 13207, Korea

Copyright © 2019, 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.

제안한다. 앞서 개발한 개별 모델을 통합한 단일 해석 모델을 개발하고 굴착 작업에 대한 해석 결과를 검토하였다.

2. 모델링

연료전지 시스템을 적용한 하이브리드 굴삭기의 전체 개략도는 Fig. 1과 같다. 본 시스템은 크게 3가지 부분으로 구성된다.

첫 번째, PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) 시스템으로 주 동력원 역할을 한다.

두 번째, 배터리, 울트라 커패시터 및 ECU로 보조 동력원 및 PEMFC의 발전량을 제어하는 역할을 한다.

세 번째, 기구학 및 유압 시스템으로 액추에이터를 구동하고 그에 따른 굴삭기의 거동을 나타내는 역할을 한다.

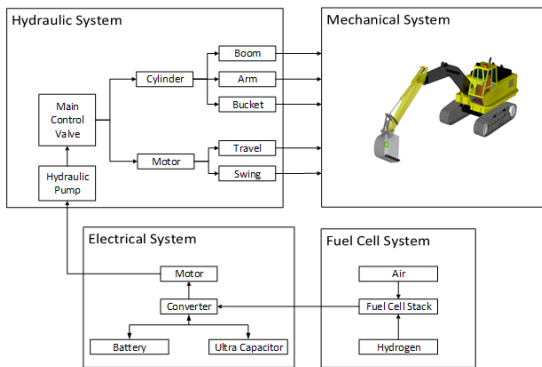


Fig. 1 Structure of the proposed system

2.1 PEMFC 시스템

PEMFC 시스템은 Stack, 수소 탱크, 컴프레서, 재순환 모터, 냉각 시스템 등으로 구성된다. Stack에서 생성된 전력은 굴삭기의 주 동력원 역할을 하며 본 시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

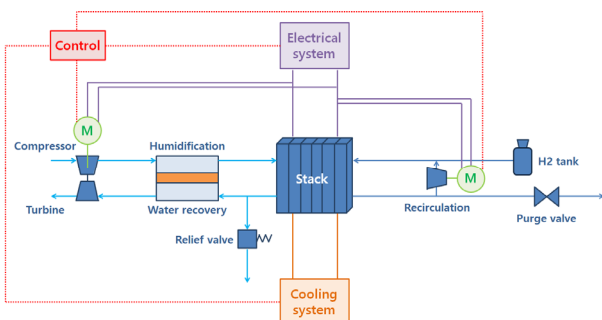


Fig. 2 Structure of the PEMFC system

Fig. 3는 PEMFC 시스템 모델을 나타내며 Table 1에는 파라미터가 요약되어 있다.

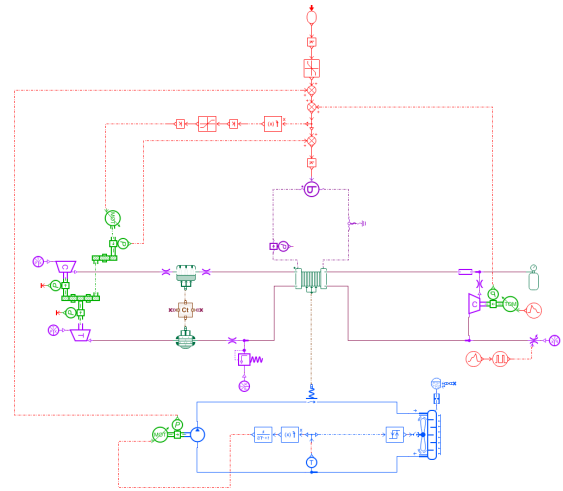


Fig. 3 PEMFC system model

Table 1 PEMFC system parameters

Mass of stack	50 [kg]
Number of cells	660
Cell area	800 [cm ²]
Cell rated voltage	3.8 [V]

Stack에 수소와 공기를 공급할 때, Stack의 성능 및 수명 확보를 위해 반응에 필요한 양보다 더 많은 양을 공급한다. 이때, Stack에서 사용하고 남은 수소를 Stack 입구 쪽으로 되돌려 재사용하여 연비를 향상시킬 수 있도록 재순환 펌프가 사용된다.

Stack은 Anode와 Cathode로 구성이 되며 각각 수소와 산소가 공급된다. Anode에 공급된 수소는 수소이온과 전자로 분리된 후 Cathode로 이동한다. Cathode에서 산소이온과 수소이온이 만나 반응생성물인 물이 생성되고 Anode에서 생성된 전자가 Cathode로 이동하면서 전기를 발생시킨다. 각 전극에서 일어나는 반응식과 총 반응식은 다음과 같다.



Stack에서 생성된 전력은 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$P_{stack} = V \cdot I \text{ [W]} \quad (4)$$

여기서, V 는 Stack의 전압[V], I 는 Stack의 전류[A]를 나타낸다. Stack의 전력 손실 및 보조 장치에서 소모한 동력은 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$P_{losses} = N_{cell} \cdot (1.25 - V_{cell}) \cdot I \text{ [W]} \quad (5)$$

$$P_{used} = P_{comp} + P_{rec} + P_{cool} \text{ [W]} \quad (6)$$

여기서, N_{cell} 은 스택 내 전체 셀의 수, V_{cell} 는 셀의 전압[V], P_{comp} 는 컴프레서에서 사용한 동력, P_{rec} 는 재순환 모터에서 사용한 동력, P_{cool} 는 냉각 시스템에서 사용한 동력을 나타낸다. Stack의 발전 효율은 전력 손실과 보조 장치에서 사용된 동력을 고려하여 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{stack}}{P_{stack} + P_{losses} + P_{used}} \quad (7)$$

2.2 배터리 및 울트라 커패시터

배터리 및 울트라 커패시터는 보조 동력원 역할을 하며 사용하고 남은 에너지를 저장하였다가 추후 재사용 한다. 배터리는 지속적인 저부하에서 주로 사용되며 울트라 커패시터는 순간적인 고부하에서 사용된다. Fig. 4는 배터리 및 울트라 커패시터 모델을 나타내며 Table 2, 3에는 파라미터가 요약되어 있다.

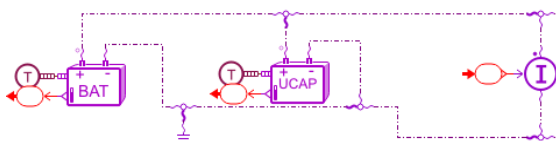


Fig. 4 Battery & Ultra capacitor model

Table 2 Battery model parameters

Pack rated voltage	80 [V]
Pack rated energy	10 [kWh]
Cell rated capacity	43 [Ah]
Cell rated voltage	3.8 [V]
Series cell number	22
Parallel branch number	3
Cell maximum voltage	4.08 [V]

Table 3 Ultra capacitor model paramters

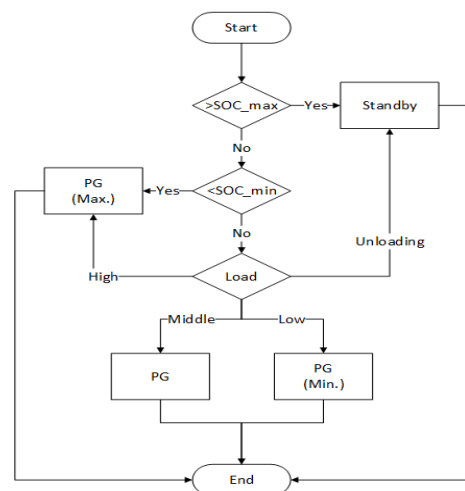
Pack maximum voltage	90 [V]
Pack maximum energy	8 [kWh]
Cell maximum capacity	3500 [F]
Cell maximum voltage	2.7 [V]
Series cell number	34
Parallel branch number	67

배터리 및 울트라 커패시터의 충전 상태(State of Charge)는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$SOC = \frac{E(t)}{E_{max}} \cdot 100 = \frac{I(t)^2}{V_{max}^2} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

여기서 $E(t)$ 는 저장된 에너지[W], E_{max} 는 최대 저장 가능한 에너지[W], V_{max} 는 최대 셀 전압[V], $I(t)$ 는 셀 전압[V]을 나타낸다.

PEMFC 시스템의 발전량은 유압 시스템의 요구 동력과 배터리 및 울트라 커패시터의 충전 상태를 고려하여 제어 명령을 내린다. 이때, 배터리의 수명을 최대화하기 위하여 완전 방전이나 과충전이 되지 않도록 발전량을 제어한다. 본 시스템에서는 SOC가 35% 이하에서는 발전량을 높게, 85% 이상에서는 최소로 제어하여 완전 방전과 과충전이 되지 않도록 제한하였다. 또한, 요구 동력이 높고 배터리 충전 상태가 낮은 경우 발전량을 최대로 높이도록 제어한다. 이러한 발전량 제어 알고리즘을 Fig. 5에 나타내었다. Amesim 내 Statechart 기능을 이용하여 배터리 충전 상태 및 요구 동력에 기반한 발전량 제어 명령을 하도록 모델링 하였으며 Fig. 6에 나타내었다.



SOC_max : 85%
SOC_min : 35%
PG : Power Generation

Fig. 5 PEMFC control algorithm

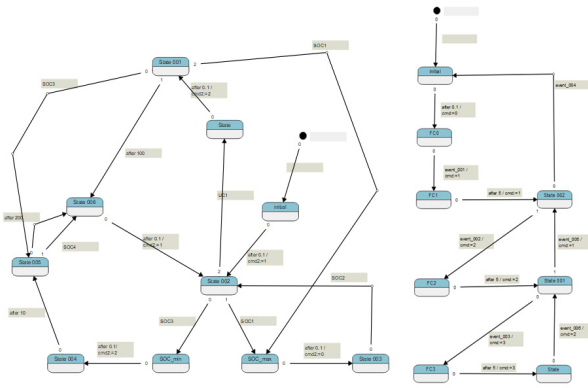


Fig. 6 PEMFC control algorithm model

2.3 기구학 및 유압 시스템

일반적으로 유압 굴삭기는 Boom, Arm, Bucket 실린더와 Swing, Travel 모터로 구성된다. 하지만 본 논문에서는 굴삭기의 주행은 고려하지 않으므로 Travel 모터는 반영하지 않았다.

전기 모터에 의해 유압 펌프가 구동되고 고압의 작동유가 공급된다. 운전자의 조이스틱 신호에 의해 제어 밸브가 움직이고 각 실린더 및 선회 모터가 구동된다. 이때, 조이스틱의 조작량에 따라 실린더 및 선회 모터의 구동 속도가 변한다. 굴삭기는 작업 장치의 위치, 구동 속도, 외부 부하량에 따라 요구 동력이 큰 폭으로 변한다. 작업 장치의 질량과 관성 모멘트를 반영하여 보다 정확한 요구 동력을 계산하기 위해 3차원 동역학 모델링을 하였다.

Fig. 7은 기구학 및 유압 시스템 모델을 나타내며 Table 4, 5에는 파라미터가 요약되어 있다.

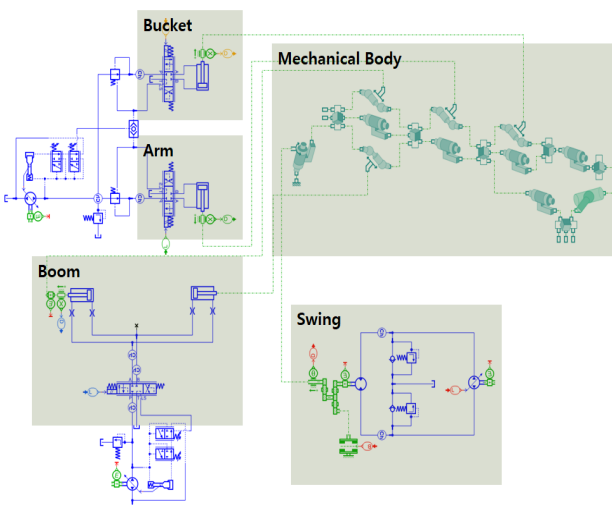


Fig. 7 Mechanical & Hydraulic system model

Table 4 Mechanical model parameters

Turret mass	20,000 [kg]
Turret MOI[X]	28,900 [$kg \cdot m^2$]
Turret MOI[Y]	18,900 [$kg \cdot m^2$]
Turret MOI[Z]	39,400 [$kg \cdot m^2$]
Boom mass	8,000 [kg]
Boom MOI[X]	40,100 [$kg \cdot m^2$]
Boom MOI[Y]	625 [$kg \cdot m^2$]
Boom MOI[Z]	39,700 [$kg \cdot m^2$]
Arm mass	3,000 [kg]
Arm MOI[X]	7,430 [$kg \cdot m^2$]
Arm MOI[Y]	290 [$kg \cdot m^2$]
Arm MOI[Z]	7,220 [$kg \cdot m^2$]
Bucket mass	2,500 [kg]
Bucket MOI[X]	980 [$kg \cdot m^2$]
Bucket MOI[Y]	980 [$kg \cdot m^2$]
Bucket MOI[Z]	980 [$kg \cdot m^2$]

MOI : Moment of inertia

Table 5 Hydraulic model parameters

Boom cylinder	0.16*0.1*1.6 [m]
Arm cylinder	0.18*0.1*2.2 [m]
Bucket cylinder	0.11*0.1*2.2 [m]
Hydraulic pump	200 [cc/rev]
Hydraulic motor	150 [cc/rev]
Relief pressure	350 [bar]
Oil density	870 [kg/m^3]
Oil bulk modulus	19115 [bar]
Oil viscosity	57 [cP]

Cylinder : Piston dia*Rod dia*Stroke

Oil@200bar, 40degC

3. 시뮬레이션

앞서 개발한 모델을 통합한 단일 해석 모델을 개발하였으며 이는 Fig. 8에 나타내었다.

3.1 해석 시나리오

시뮬레이션은 굴삭기의 굴착 작업을 대상으로 진행하였다. Fig. 9는 해석 모델의 움직임을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 9에서 1번 위치는 초기 위치 상태이다. 2~4번 위치 동안 흙을 퍼 올리고 7번 위치로

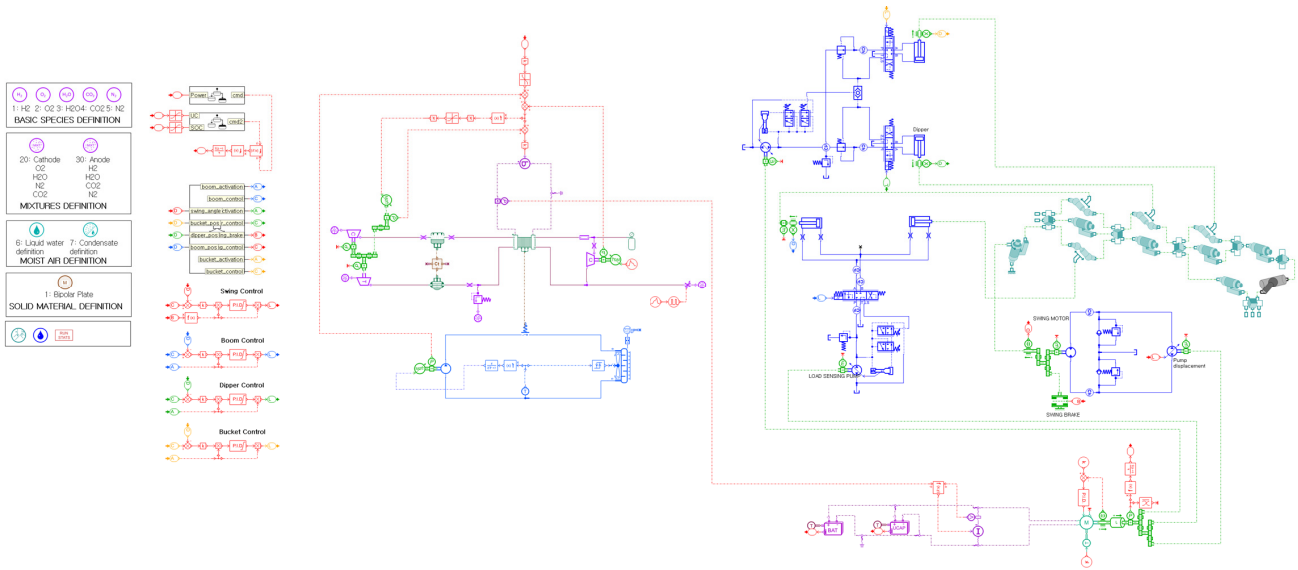


Fig. 8 Amesim model of the proposed system

선회한다. 흙을 버린 후 다시 초기 위치로 선회 복귀한다. 이후 동일한 작업을 반복한다.

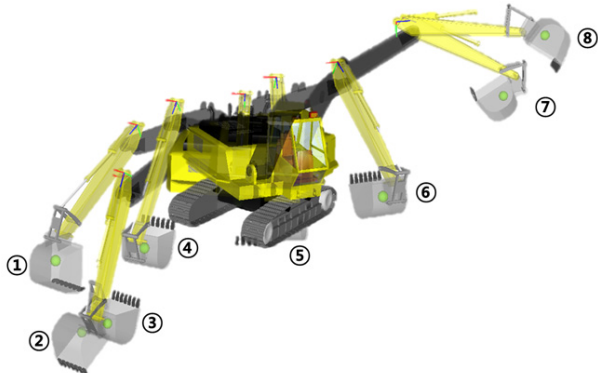


Fig. 9 Animation of proposed system

3.2 해석 결과

Fig. 10은 굴삭기가 굴착 작업을 하는 동안 Boom, Arm, Bucket 실린더 및 선회 모터의 변위 변화를 나타낸다.

굴착 작업을 하는 동안 배터리 및 울트라 커패시터의 충전 상태를 Fig. 11에 나타내었으며, 충전 상태 및 요구 동력에 기반한 PEMFC 발전량 제어 신호는 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 10에서의 굴착 작업을 5시간 동안 반복 작업 하였을 때 소모한 수소량을 Fig. 13에 나타내었다. 동일한 작업을 내연기관 굴삭기(ICE's excavator)가 수행하였을 때 NOx 배출량을 Fig. 14에 나타내었다.

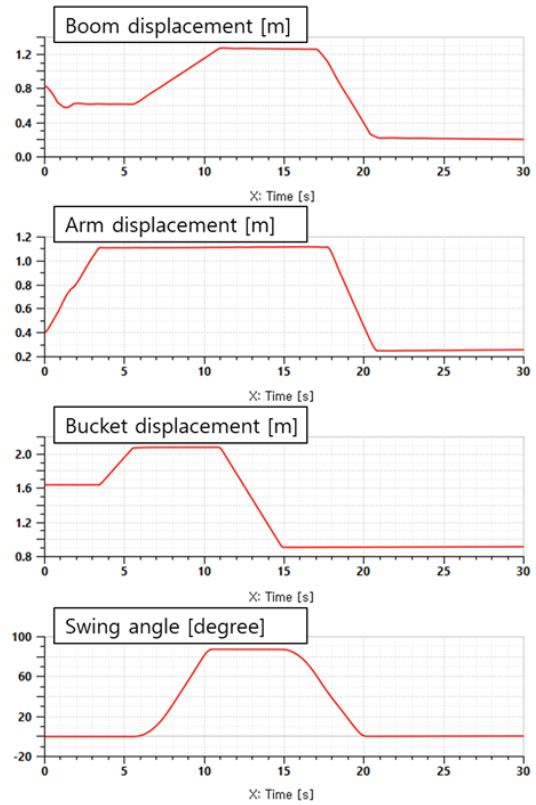


Fig. 10 Trajectory of cylinder and swing motor

5시간의 굴착 작업 동안 제안한 굴삭기는 총 28kg의 수소를 소모하였고, 내연기관 굴삭기는 323kg의 경유를 소모하였다. 현 시점에서 수소 연료의 충전 비용은 kg당 5,000원, 경유의 주유 비용은 리터당 1,350원임을 감안하면 경유 대비 절반 수준으로 연료비를 절감할 수 있다.

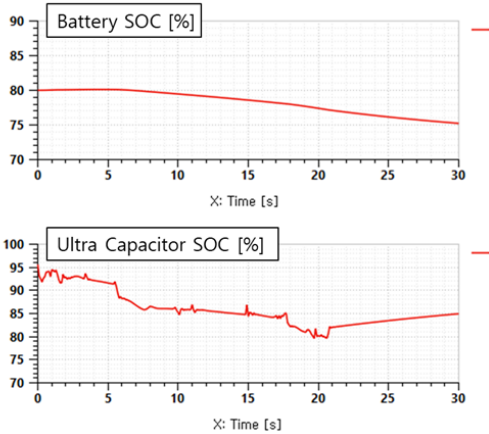


Fig. 11 Battery & Ultra capacitor SOC

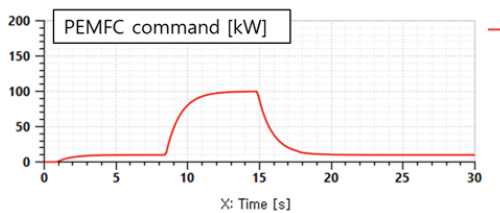


Fig. 12 PEMFC command

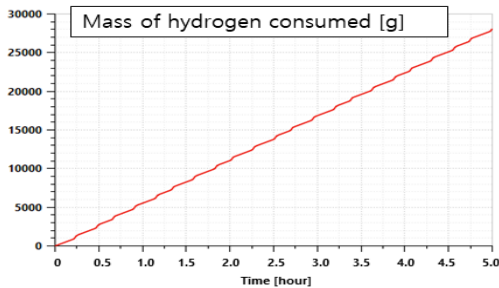


Fig. 13 Mass of hydrogen consumed

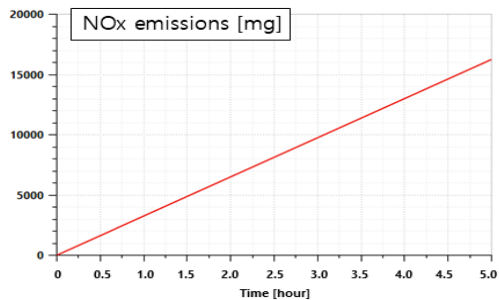


Fig. 14 NOx emissions (ICE's excavator)

4. 결 론

본 연구에서는 연료전지 시스템을 적용한 하이브리드 굴삭기를 제안하고 해석 모델을 개발하였다. 또한 배터리 및 울트라 커패시터의 충전 상태와 유압

시스템의 부하량을 기반으로 PEMFC 시스템의 발전량을 제어하는 알고리즘을 제시하였다.

개발된 모델은 굴삭기의 굴착 작업에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며 배터리 및 울트라 커패시터의 충전 상태의 변화와 PEMFC 시스템의 발전량 제어 신호를 확인하였다. 굴착 작업을 5시간 동안 반복하였을 때 약 28kg의 수소를 소모하는 것을 확인하였으며, 내연기관 굴삭기와 비교하여 절반 수준으로 연료비를 절감할 수 있는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 연료전지 시스템을 적용한 하이브리드 굴삭기 해석 모델을 통해 기존 내연기관 굴삭기가 가지는 배출가스 문제와 전동 굴삭기의 충전시간 대비 짧은 작업 시간의 문제를 해결 가능성을 확인하였다. 또한, 기존 내연기관 굴삭기와 비교하여 연료비 절감이 가능한 것을 확인하였다. 추후 PEMFC 발전량 제어를 위한 알고리즘을 보다 구체화하고 전체 시스템의 구조를 최적화 할 예정이다.

References

- 1) J. Yang, L. Quan and Y. Yang, "Excavator energy-saving efficiency based on diesel engine cylinder deactivation technology", Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol.25, No.5, pp.897-904, 2012.
- 2) S. Hui et al., "Control strategy of hydraulic/electric synergy system in heavy hybrid vehicles", Energy Conversion and Management, Vol.52, No.1, pp.668-674, 2011.
- 3) K. K. Ahn, T. H. Ho and Q. T. Dinh, "A study on energy saving potential of hydraulic control system using switching type closed loop constant pressure system", Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, pp.317-322, 2008.
- 4) K. K. Ahn and Q. T. Dinh, "Development of energy saving hybrid excavator using hybrid actuator", Proceedings of the 7th International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2009), pp.205-209, 2009.
- 5) Y. X. Yu, E. J. 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.

- 6) K. J. Choi et al., "Energy-saving in excavators with application of independent metering valve", *Journal of mechanical science and technology*, Vol.29, No.1, pp.387-395, 2015.
- 7) S. A. Nahian, D. Q. Truong and K. K. Ahn, "Introduction of Independent Metering Valve for Energy Saving Excavator System", *Journal of Drive and Control*, Vol.12, No.1, pp.45-52, 2015.
- 8) H. G. Park, S. A. Nahian and K. K. Anh, "A study on energy saving of IMV circuit using pressure feedback", *Journal of Drive and Control*, Vol.13, No.4, pp31-44, 2016.
- 9) 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.
- 10) K. Pettersson, and S. Tikkanen, "Secondary control in construction machinery-design and evaluation of an excavator swing drive", *Proceedings of the 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power SICFP09*, 2009.
- 11) B. N. M. Truong et al., "Study on energy regeneration system for hybrid hydraulic excavator", *Proceedings of 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, pp.1349-1354, 2015.
- 12) S. Y. Lee, B. N. Truong and K. K. Ahn, "Study on energy recuperation for swing motion in electro-hydraulic excavator", *Proceedings of the 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp.1941-1945, 2015.
- 13) P. Prochazka et al., "Battery Powered Mini-Excavator", *ECS Transactions*, Vo.87, No.1, pp.343-347, 2018.
- 14) H. Xiangyu and Y. Jiang, "Review of hybrid electric systems for construction machinery", *Automation in Construction*, Vol.92, pp.286-296, 2018.
- 15) H. S. Yi et al., "Optimal component sizing of fuel cell-battery excavator based on workload", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol.5, No.1, pp. 103-110, 2018.
- 16) T. D. Dang et al., "Design, Modeling and Analysis of a PEM Fuel Cell Excavator with Supercapacitor/Battery Hybrid Power Source", *Journal of Drive and Control*, Vol.16, No.1, pp.45-53, 2019.
- 17) J. Y. Huh and G. H. Jung, "Basic Design for Development of IMV for MCV", *Journal of Drive and Control*, Vol.15, No.3, pp.49-56, 2018.
- 18) Y. X. Yu, E. J. 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.