

컨볼루션을 이용한 전자 유압 시스템의 피크압력 저감 제어 연구

A Study of Peak Pressure Reduction Control of Electro Hydraulic System using Convolution

김경수¹ · 정진범¹ · 유범상^{2*}

Kyung Soo Kim, Jin Beom Jeong, and Beom Sahng Ryuh

Received: 19 Jun. 2019, Revised: 14 Aug. 2019, Accepted: 20 Aug. 2019

Key Words : Convolution(컨볼루션), Electro Hydraulic System(전자유압시스템), Peak Pressure(피크압력), Construction Equipment(건설기계), AMESim(아메심)

Abstract: Hydraulic systems are essential for most of the construction equipments due to their various advantages, such as very powerful, quick response speed, precision control and remote control. Moreover, they are necessary to apply the electro hydraulic systems for precise and remote controls. Operating the small electronic joystick of the remote controller for the control of a multipurpose work machine with remote control technology increases the possibility of a sudden operation compared to the use of a conventional hydraulic joystick. When a joystick is suddenly operated, the peak pressure is generated in the system due to the quick response of the system. Then a vibration is generated due to the peak pressure, which causes instability to the operation of the construction equipment. Therefore, in this study, we confirmed the level of reduction of peak pressure occurring in the electro hydraulic system by using AMESim, when the output signal of the step shape generated by the sudden operation of the electronic joystick was changed by using the convolution operation.

1. 서 론

유압시스템은 소형 장치로 큰 힘을 낼 수 있고, 빠른 응답속도 및 정밀제어, 원격제어와 같이 다양한 장점으로 인해, 일반기계, 항공, 농기계 및 건설기계 분야 등에서 널리 사용되고 있다. 특히, 건설기계는 큰 힘을 요하는 작업이 대부분으로, 모든 건설기계에는 유압 시스템이 필수적으로 사용되고 있으며, 정밀 제어 및 원격제어를 위해서는 전자 유압 시스템 적용이 필요하다.

실내 건물 철거, 터널내 작업, 비닐하우스 및 축사

작업과 같은 작업현장에서 사용되는 3톤 미만의 소형 건설기계는, 작업 시 발생하는 먼지, 돌 파편, 매연 및 악취와 같은 위험요인으로부터 운전자를 보호하기 위해 원격제어 기술을 적용하고 있다. 원격제어 기술에 대한 연구는 2000년대 초반부터 활발히 이루어 졌다. 진익훈은 ZigBee 모듈과 마이컴을 적용하여 굴삭기의 원격제어 기술에 관한 연구를 수행하였고¹⁾, 양순용은 XBee 통신으로 굴삭기 작업장치의 원격제어 시스템에 관한 연구를 수행하였고,²⁻³⁾ 정진범은 1개의 전자조이스틱 신호에 따라 굴삭기의 주행제어에 관한 알고리즘 연구를 수행하였다.⁴⁾

현재까지 다양하게 수행된 원격제어에 관한 연구는, 통신 방법에 따른 원격제어 특성 분석을 위한 연구였으나, Fig.1과 같이 소형 전자조이스틱(우)을 이용해 건설기계를 조작하게 되면, 기존 유압식 조이스틱(좌)을 이용할 때 보다 급조작 가능성이 커지게 된다. 조이스틱을 급조작 하게 되면, 유압시스템의 빠른 응답성으로 인해 피크압력이 발생되고, 피크압력으로 인해 진동이 발생되어 건설기계 작업에 안정성을 해치게 된다.

* Corresponding author: ryuhbs@jbnu.ac.kr

1 Korea Construction Equipment Technology Institute, Gunsan 54004, Korea

2 Department of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, 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.



Fig. 1 Hydraulic joystick vs electronic joystick

전자유압시스템이 적용된 굴삭기 제어에 관한 연구 동향을 살펴보면, 유봉수는 굴삭기 붐 실린더의 피크압력을 측정하여, 붐의 급정지 시 발생하는 진동 억제할 수 있는 알고리즘에 관한 연구를 수행하였고,⁵⁾ 김기용은 Anti-Windup 제어기를 이용하여 지능형 굴삭 시스템의 버킷 끝단 제어에 관한 연구를 수행하였다.⁶⁾

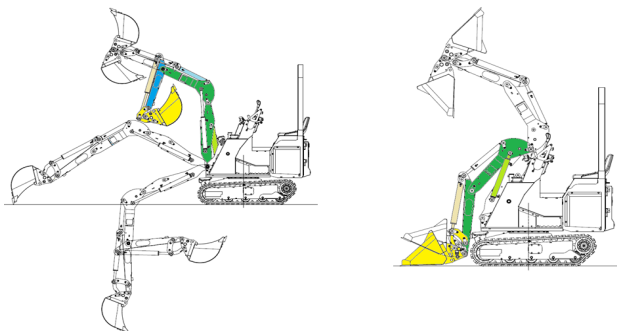
전자유압시스템이 적용된 건설기계의 정밀제어를 위해 Feedback 시스템을 구성하였으나, 이러한 시스템 구성은 비용적인 문제로, 소형 건설기계에 적용하는 것은 쉽지가 않다.

따라서, 본 연구에서는 소형 다목적 작업장비의 전자유압시스템에서 발생하는 피크압력 저감을 위해, 전자조이스틱의 급조작으로 발생된 스텝(step) 형상의 출력 신호를 컨볼루션 연산을 통해 신호 형상을 변화시켜, 전자유압시스템에서 발생하는 피크압력의 저감 수준을 AMESim을 이용하여 확인하고자 한다.

2. 시스템 모델링

2.1 기구학적 모델링

본 연구의 대상은 Fig. 2와 같이 1.5톤급 소형 다목적 작업장비로 일반적인 굴삭기 작업기와 달리, 붐, 압, 보조압 및 버킷으로 구성되어 있어 제어 방식에 따라 굴삭기 및 로더 작업이 가능하다.



(a) excavator mode (b) loader mode

Fig. 2 Small size multi-purpose work equipment

다목적 작업장비는 굴삭 및 로더 모드 변환을 위한 모드변환 실린더, 굴삭용 붐 실린더, 굴삭용 압 실린더, 로더용 붐 실린더, 버킷 실린더(굴삭 및 로더 공용), 선회 모터 및 주행 모터로 구성되어 있다. 본 연구에서는 선회 및 주행모터는 고려하지 않고, 실린더에 의한 동작만을 고려하였다.

작업기 각 링크의 좌표계(X, Z)는 Fig. 3 과 같이 나타내었고, Table 1과 같이 각 링크별 파라미터를 나타내었다. 이때, 아래첨자는 링크 번호를 의미한다.⁷⁾

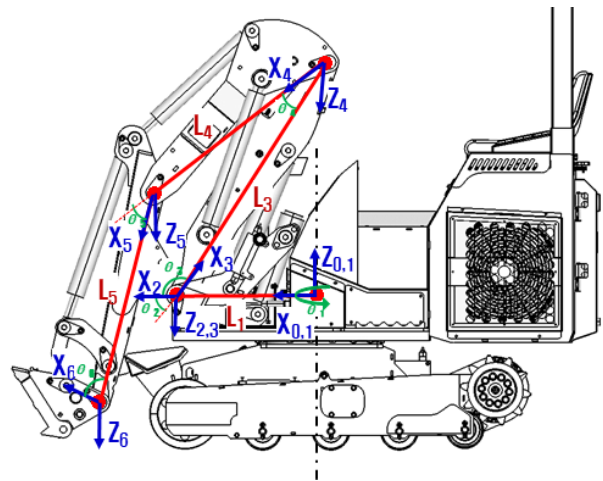


Fig. 3 Coordinate system of small size multi-purpose work equipment

Table 1 Link parameters of small size multi-purpose work equipment

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-90°	L_1	0	θ_2
3	0	0	0	θ_3
4	0	L_3	0	θ_4
5	0	L_4	0	θ_5
6	0	L_5	0	θ_6

여기서, α_{i-1} = the angle between Z_{i-1} and Z_i ,

a_{i-1} = the distance from Z_{i-1} to Z_i ,

θ_i = the angle between X_{i-1} and X_i ,

d_i = the distance from X_{i-1} to X_i .

Table 1의 링크 파라미터를 transformation matrix (${}^{i-1}T$)인 식(1)에 대입하여, 전체 변환 행렬(0T)을 구하면 식(2)와 같다.⁸⁾

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1 c_{23456}, & r_{12} &= -c_1 s_{23456}, & r_{13} &= -s_1, \\ r_{21} &= s_1 c_{23456}, & r_{22} &= -s_1 s_{23456}, & r_{23} &= c_1, \\ r_{31} &= -s_1 c_{23456}, & r_{32} &= -c_{23456}, & r_{33} &= 0, \\ p_x &= L_5 c_1 c_{2345} + L_4 c_1 c_{234} + L_3 c_1 c_{23} + L_1 c_1, \\ p_y &= L_5 s_1 c_{2345} + L_4 s_1 c_{234} + L_3 s_1 c_{23} + L_1 s_1, \\ p_z &= -L_5 c_{2345} - L_4 s_{234} - L_3 s_{23} \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

이때, Fig. 4와 같이 실린더에 의해 변화하는 θ 는 코사인 제2법칙을 이용하여 구할 수 있다. θ_1 은 선회 모터에 의한 회전각도이나, 선회동작은 고려하지 않아 0이다.

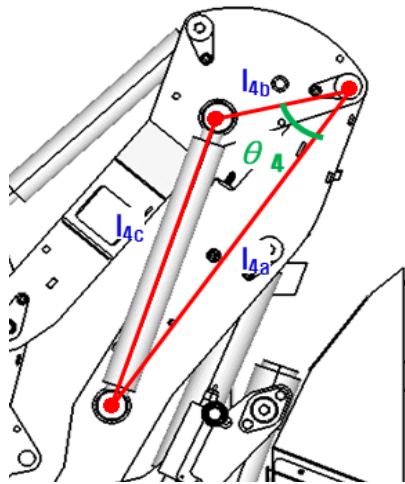


Fig. 4 Obtaining angles for linear systems

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{2c}^2 - l_{2a}^2 - l_{2b}^2}{-2l_{2a}l_{2b}} \right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{3c}^2 - l_{3a}^2 - l_{3b}^2}{-2l_{3a}l_{3b}} \right) \quad (4)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{4c}^2 - l_{4a}^2 - l_{4b}^2}{-2l_{4a}l_{4b}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_5 = \cos^{-1} \left(\frac{l_{5c}^2 - l_{5a}^2 - l_{5b}^2}{-2l_{5a}l_{5b}} \right) \quad (6)$$

버킷은 Fig. 5와 같이 4절 링크로 구성되어 있는 버킷의 각도(θ_6)는 링크 a 및 c 의 좌표를 구하여, 식 (7)을 통해 구할 수 있다.⁹⁾

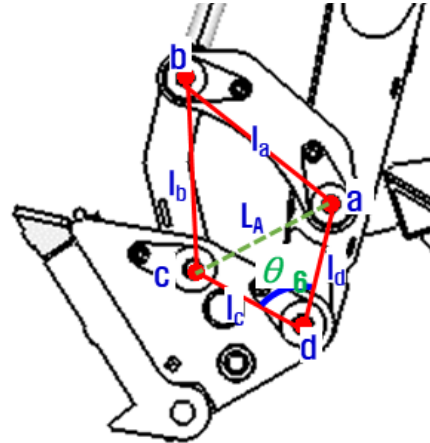


Fig. 5 Obtaining angles for linear systems

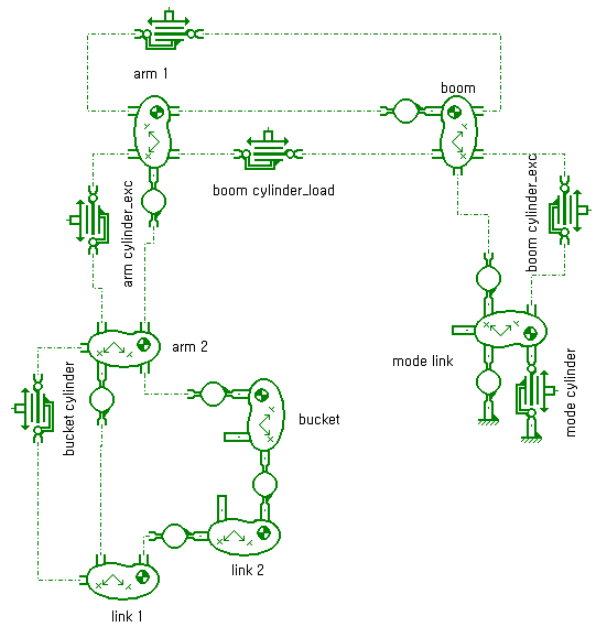


Fig. 6 Front attachment modeling using AMESim

$$\theta_6 = \cos^{-1} \left(\frac{L_A^2 - l_c^2 - l_d^2}{-2l_c l_d} \right) \quad (7)$$

여기서, $L_A = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2}$ 이다.

위와 같이 계산된 수식 및 다목적 작업장비의 실제 제원을 이용하여 Fig. 6과 같이 모델링을 수행하였다.

2.2 유압시스템 모델링

다목적 작업장비의 유압시스템은 총 6개의 유압실린더와 5개의 전자제어 밸브, 2개의 기어펌프로 구성되어 있다. 유압부품의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of hydraulic component

	Specification
Boom cylinder (excavator)	<ul style="list-style-type: none"> • Piston diameter : 70mm • Rod diameter : 40mm • Stroke : 300mm
Boom cylinder (Loader)	<ul style="list-style-type: none"> • Piston diameter : 55mm • Rod diameter : 40mm • Stroke : 376mm
Arm cylinder	<ul style="list-style-type: none"> • Piston diameter : 50mm • Rod diameter : 30mm • Stroke : 300mm
Bucket cylinder	<ul style="list-style-type: none"> • Piston diameter : 55mm • Rod diameter : 30mm • Stroke : 390mm
Valve	<ul style="list-style-type: none"> • Max. flow rate : 26L/min • Rate current : 680mA
Pump	<ul style="list-style-type: none"> • Displacement : 8 mL/r

유압부품은 AMESim에서 제공하는 기본 component를 이용하여 모델링을 하였고, Table 2의 제원을 사용하여 Fig. 7과 같이 모델링을 하였다.

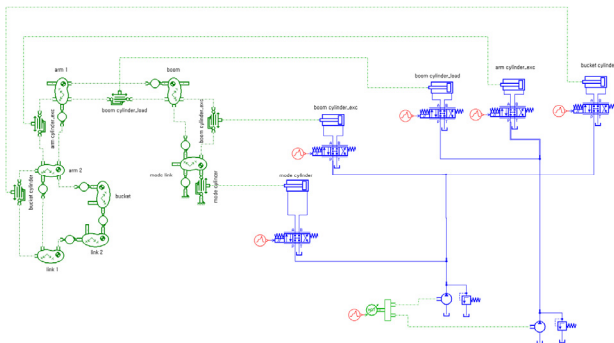


Fig. 7 Small size multi-purpose work equipment modeling using AMESim

3. 컨볼루션

3.1 컨볼루션의 표현

일반적으로 데이터 계측기를 이용해 저장되는 신호는, 시간영역에서 대상이 되는 값들을 순서대로 늘

여놓은 수열로써 이산신호라 한다. 이산신호는 보통 $x[n]$ 으로 표시하며, 신호 값이 발생한 시간을 나타내는 n 은 항상 정수 값만 갖게 된다.

임의의 이산신호 $x[n]$ 의 시간 k 에서의 성분을 단위 임펄스 신호 $\delta[n]$ 로 표현하면 식(9)과 같다. 여기에서 단위 임펄스 신호는 식(8)과 같은 특성을 가진다.¹⁰⁾

$$\delta[n] = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]\delta[n-k] \quad (9)$$

시스템이 선형 시불변이면, 식(8)은 식(9)와 같이 표현될 수 있고, 이것을 컨볼루션 합이라 한다.

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] \quad (10)$$

3.2 컨볼루션을 통한 신호처리

식(10)에 의해 2개의 신호를 컨볼루션 연산을 하게 되면 Fig. 8과 같이 변화하게 되는 특성을 가진다.

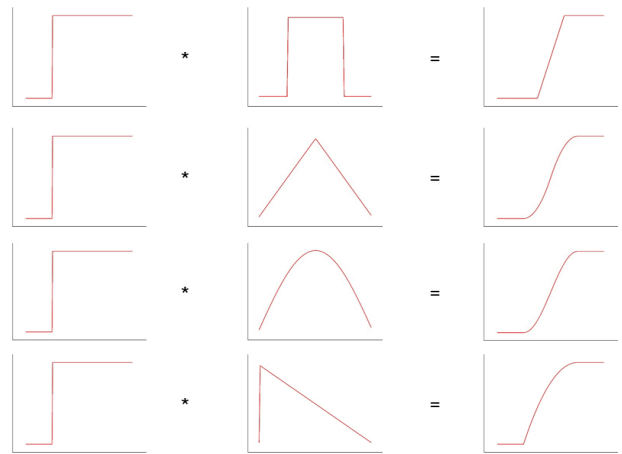
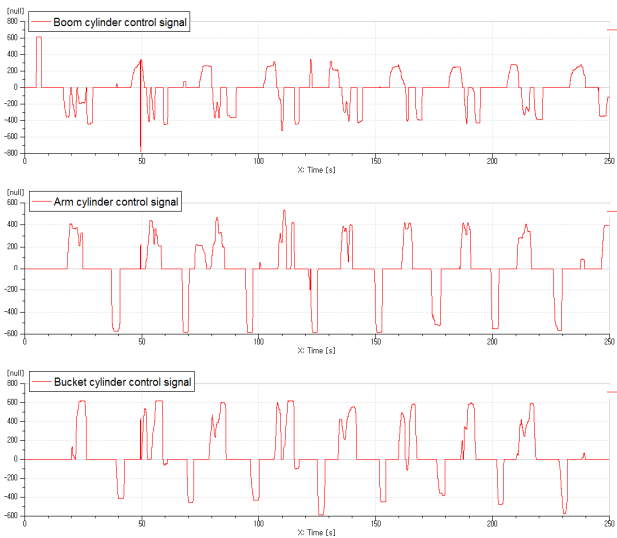
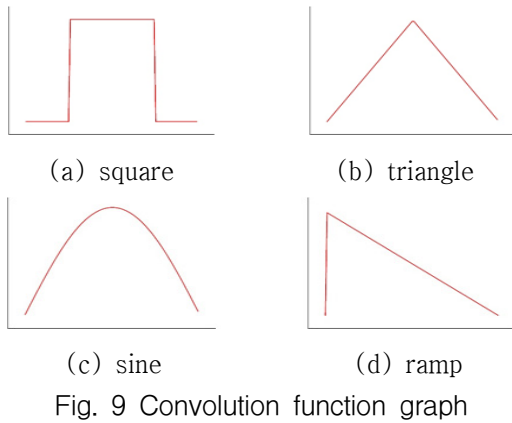


Fig. 8 Visual comparison of convolution

컨볼루션 연산시 중요한 것은 원신호(raw signal)와 컨볼루션 연산을 하는 함수의 형상 및 샘플링 개수(시간)이다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 4가지 형상을 이용하여 컨볼루션 연산을 수행하였다. 이때, 원신호는 Fig. 10과 같이 다목적 작업장비의 굴삭동작을 하기 위한 붐, 암, 버킷을 제어하는 전자조이스틱 신호이다.



컨볼루션 연산시 Fig. 9의 형상의 샘플링 개수를 500개(500ms) 및 1,000개(1,000ms)로 하였고, 컨볼루션 연산을 수행한 신호는 Fig. 11, 12와 같다.

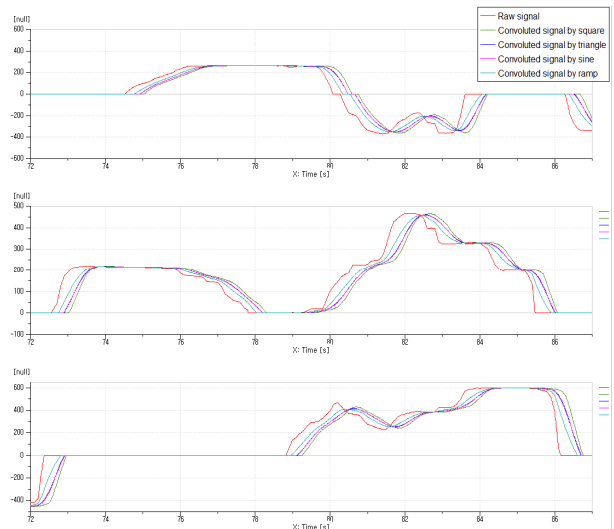
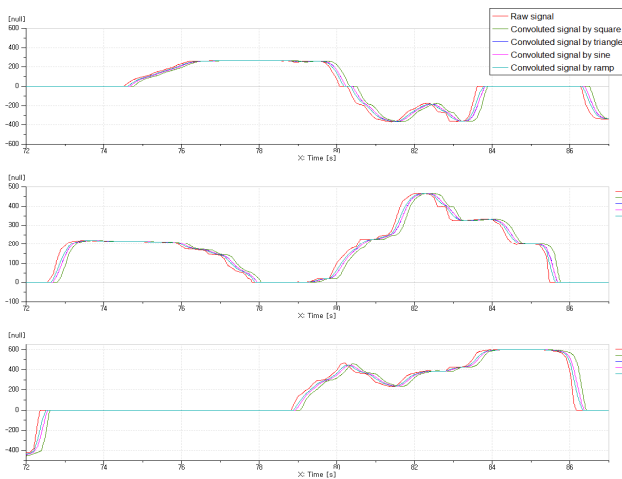


Fig. 12 Convoluted signal (sample point 1,000)

컨볼루션 연산을 통해 얻어진 신호는 원신호보다 약 0.11~0.52s 정도 시간지연이 발생하였으며, 각 조건별 지연시간은 Table 3과 같이 정리하였다.

Table 3 Delay time of convoluted signal

(unit : s)

sampling point	square	triangle	sine	ramp
500	0.27	0.17	0.17	0.11
1,000	0.52	0.41	0.41	0.25

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 시뮬레이션 조건

컨볼루션 연산에 의해 변환된 신호를 입력신호로 사용하였다. 시뮬레이션 해석 조건은 Table 4와 같다.

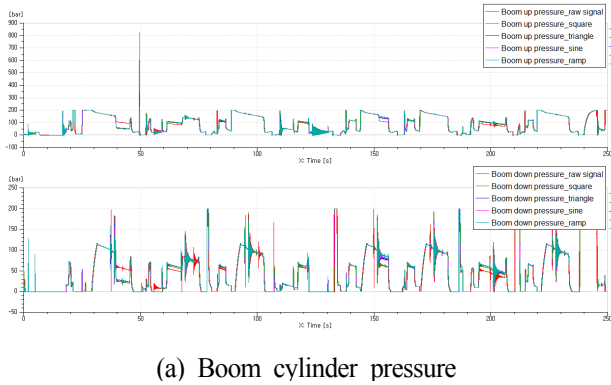
Table 4 Simulation condition

Parameter	Value
Rotation speed of electric motor	1,800 rpm
Relief pressure	20 MPa
Simulation time	250s
Sampling time	0.01s

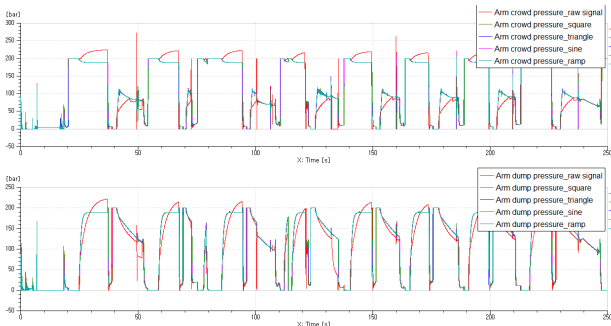
4.2 시뮬레이션 결과

컨볼루션 연산에 의한 변환된 신호에 따른 다목적 작업장비용 유압시스템의 압력특성은 Fig. 13, 14와 같다. 이때, raw signal 및 convoluted signal에 의해 제

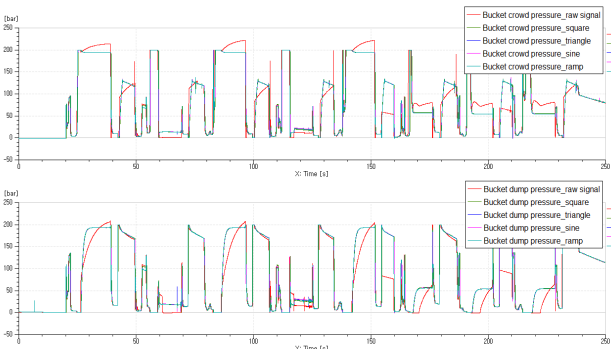
어떤 다목적 작업장비의 버킷 이동 궤적은 Fig. 15와 같이, 굴삭동작을 위한 주요 궤적은 일치하였고, 중간 이동 궤적에서 차이가 발생함을 확인하였다.



(a) Boom cylinder pressure

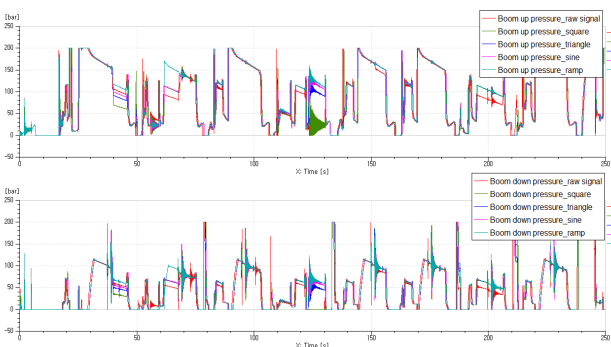


(b) Arm cylinder pressure

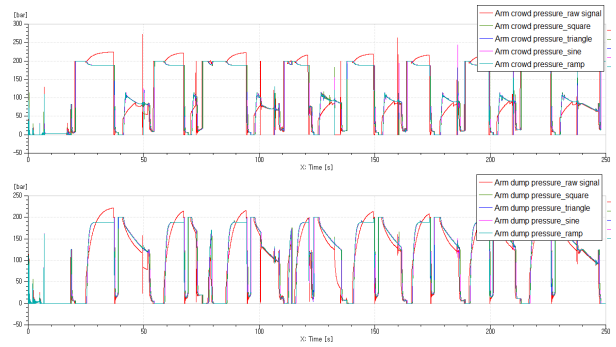


(c) Bucket cylinder pressure

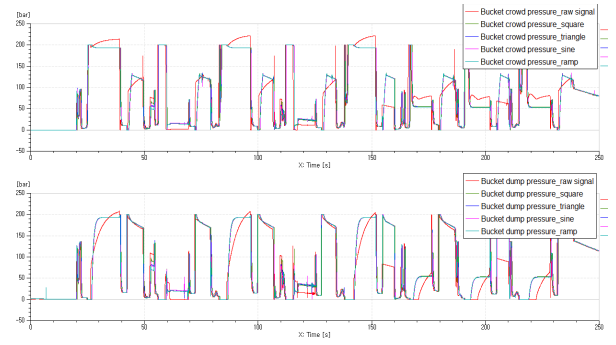
Fig. 13 Pressure characteristic result graph (sample point 500)



(a) Boom cylinder pressure

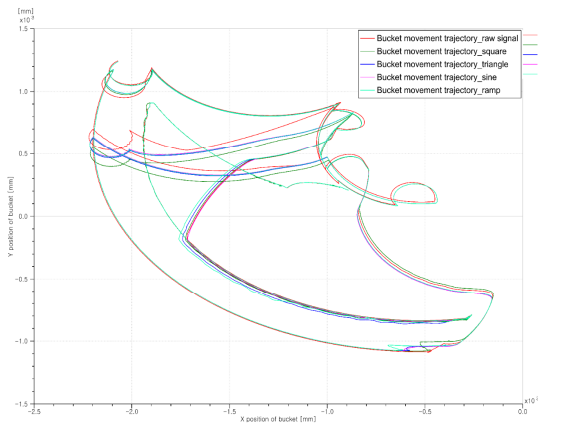


(b) Arm cylinder pressure

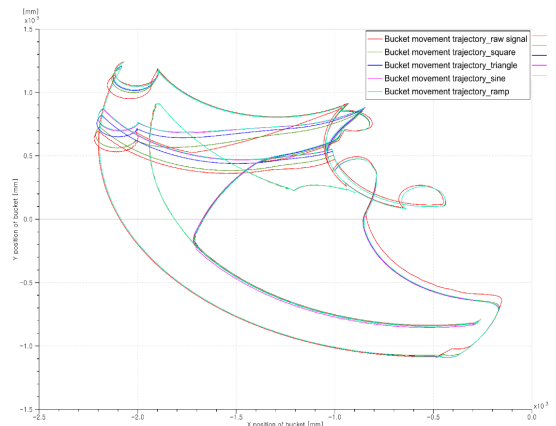


(c) Bucket cylinder pressure

Fig. 14 Pressure characteristic result graph (sample point 1,000)



(a) sample point 500



(b) sample point 1,000

Fig. 15 Motion trajectory of the bucket

샘플링 개수 500개인 경우, Fig. 16과 같이 원신호에서 발생하지 않은 피크압력이 붐 실린더에서 82.4MPa의 피크압력이 발생하였다.

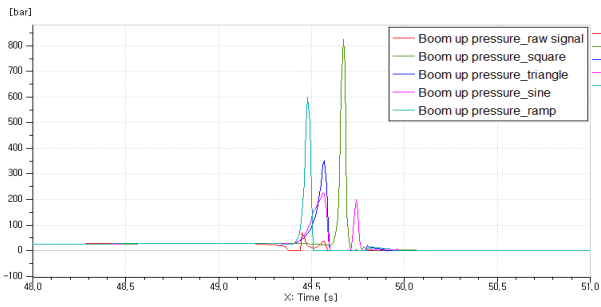
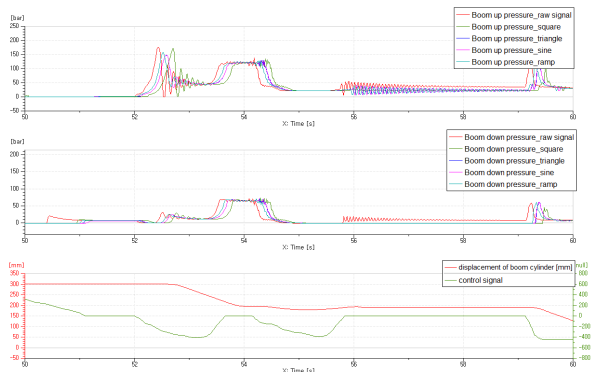
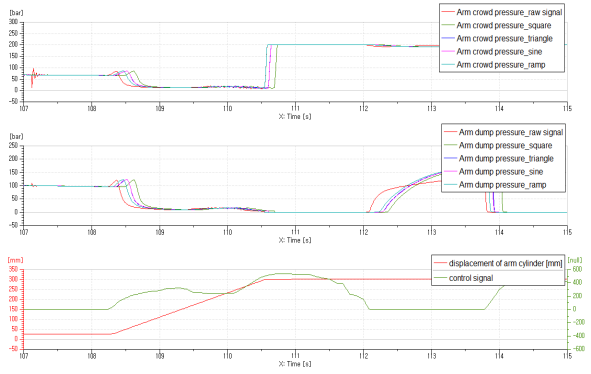


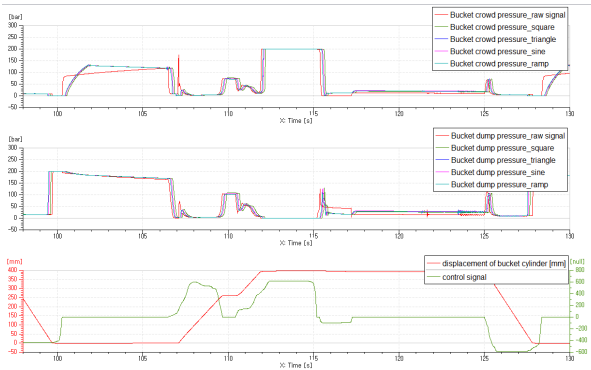
Fig. 16 Peak pressure in boom cylinder



(a) Boom cylinder pressure



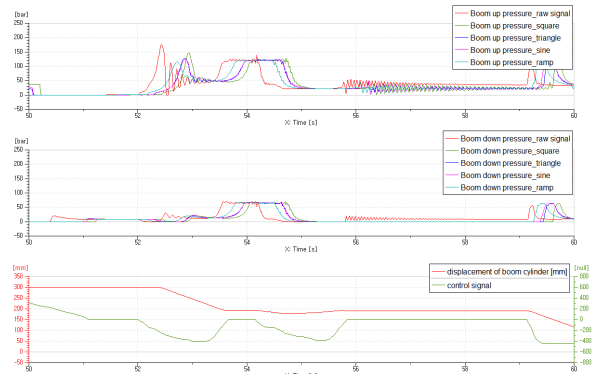
(b) Arm cylinder pressure



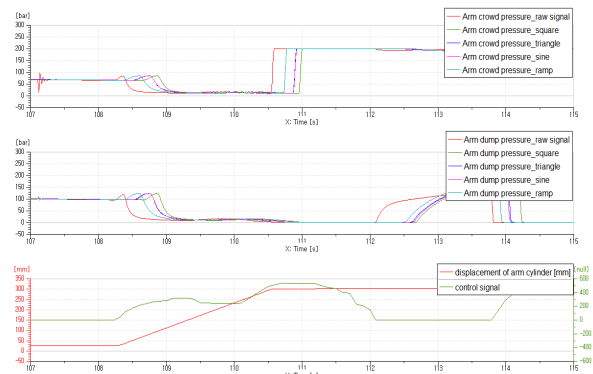
(c) Bucket cylinder pressure

Fig. 17 Pressure characteristic enlargement graph (sample point 500)

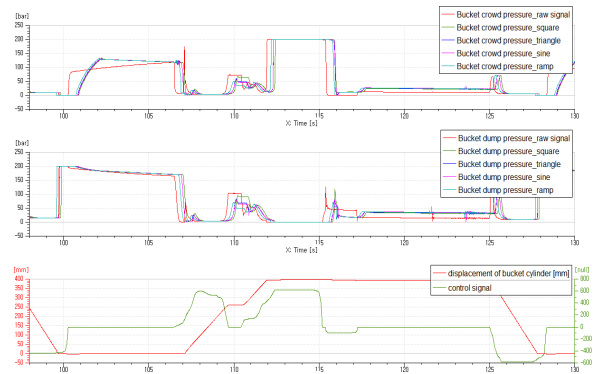
Fig. 17(a)와 같이 107초에 붐 실린더에서 약 17.5MPa의 피크압력이 발생하였으나, 킨볼루션으로 인해 14.6MPa 수준으로 낮아졌다. 암 실린더의 압력 특성은 Fig. 17(b)와 같이 원신호에서의 압력 특성과 큰 차이점은 없었다. Fig. 17(c)의 버킷 실린더에서 발생한 17.4MPa의 피크압력은 2.4MPa 수준으로 낮아졌다. 붐 및 버킷 실린더 모두 Ramp 파형에서 가장 크게 피크압력이 감소되었다.



(a) Boom cylinder pressure



(b) Arm cylinder pressure



(c) Bucket cylinder pressure

Fig. 18 Pressure characteristic enlargement graph (sample point 1,000)

샘플링 개수 1,000개인 경우, 원신호에서 발생하지 않은 피크압력이 발생하는 현상은 없었다. Fig. 18(a)와 같이 붐 실린더에서 발생한 17.5MPa 수준의 피크압력이 11.5MPa로 감소하였다. 암 실린더의 압력 특성은 Fig. 18(b)와 같이 원신호에서의 압력 특성과 큰 차이점은 없었다. Fig. 18(c)의 버킷 실린더에서 발생한 12.1MPa의 피크압력은 2.4MPa 수준으로 낮아졌다.

각각의 피크압력 수준은 Table 5와 같이 정리하였다.

Table 5 Peak pressure level (unit : MPa)

		raw	square	triangle	sine	ramp
Boom	500	17.5	17.1	14.6	14.6	15.9
	1,000	17.5	14.7	12.6	12.3	11.5
Arm	500	12.1	12.1	12.3	12.3	12.3
	1,000	12.1	12.2	12.4	12.4	12.4
Bucket	500	17.4	2.8	2.5	2.5	2.4
	1,000	17.4	2.3	1.8	1.7	1.7

5. 결 론

본 연구에서는 전자유압시스템을 사용하는 다목적 작업장비에서, 전자조이스틱의 급조작으로 발생하는 피크압력을 컨볼루션 연산을 이용해 감소 시킬 수 있는지 확인하였다.

다목적 작업장비로 굴삭 작업을 하는 전자조이스틱 신호를, square, triangle, sine 및 ramp 형상의 4가지 신호와 컨볼루션 연산을 이용해 신호처리를 하였다. 이때, 컨볼루션 연산을 하는 4가지 형상의 샘플링 개수는 500개와 1,000개로 하여 총 8가지의 컨볼루션된 신호를 취득하였고, 원신호 대비 피크압력 감소를 확인하기 위해, 유압전문 해석 프로그램인 AEMSim을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

컨볼루션 연산을 통해 변환된 신호는 최소 0.11초에서 최대 0.52초의 시간 지연이 발생하였고, ramp 형상에서 가장 짧은 시간 지연이 발생하였다.

시뮬레이션 결과, 샘플링 개수 500개인 경우, 붐 실린더에서는 triangle 및 sine 형상에서 16.6%, 버킷 실린더에서는 ramp 형상에서 86.2% 정도의 피크압력이 감소하였고, 샘플링 개수 1,000개인 경우, 붐 실린더 및 버킷 실린더에서는 ramp 형상에서 34.3%, 90.2% 정도의 피크압력이 감소하였다. 그러나, 암 실린더에서는 피크압력 감소현상은 나타나지 않았다.

따라서, 본 연구를 통해 전자유압시스템에서 조이스틱의 급 조작에 의해 발생하는 피크압력을 컨볼루션 연산을 통한 신호처리를 통해 감소 시키는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2017년 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 경제협력권산업육성사업으로 수행된 연구(과제번호 : P0000870)결과입니다.

References

- 1) I. H. Jin et al., "Study on the Remote Control Excavator for High-Risk Operations", Proceedings of 2010 The 25th ICROS Annual Conference, pp.479-483, 2010.
- 2) Y. M. Jeong and S. Y. Yang, "Development Trend of Remote Control Technology of Construction Machinery", Journal of Drive and Control, Vol.12, No.1, pp.34-38, 2015.
- 3) Y. M. Jeong and S. Y. Yang, "Application case of Sensor System Development for Excavator Automation", Journal of Drive and Control, Vol. 12, No.3, pp.77-81, 2015.
- 4) J. B. Jeong and K. S. Kim, "A Study on driving algorithm and communication characteristics for remote control of mini excavator", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.81-90, 2018.
- 5) B. S. Yoo, S. W. Koo and J. S. Joh, "A Study on Suppression of Vibration Caused by Quick-stop Operation of Hydraulic Excavator Boom", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.27, No.12, pp.33-40, 2010.
- 6) K. Y. Kim, D. S. Jang and H. S. Ahn, "A Study on the Bucket Trajectory Control for the Intelligent Excavation System", Journal of Drive and Control, Vol.5, No.2, pp.12-16, 2008.
- 7) D. T. Jeong et al., "Mission Scenario-based Design of Hydraulic Manipulators for Armored Robot Systems", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.4, pp.51-60, 2017.
- 8) J. J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, 1989.
- 9) R. L. Norton, "Kinematics and Dynamics of Machinery", McGraw-Hill Inc., New York, 2009.
- 10) C. H. Lee, "Digital Signal Processing", HANBIT Academy, Inc., Seoul, 2013.