

# 유압 굴삭기 붐의 급정지 시 발생하는 진동 억제에 관한 연구

## A Study on Suppression of Vibration Caused by Quick-stop Operation of Hydraulic Excavator Boom

유봉수<sup>1</sup>, 구성완<sup>1</sup>, 조종선<sup>2,✉</sup>

Bong Soo Yoo<sup>1</sup>, Seongwan Koo<sup>1</sup> and Joongseon Joh<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 대학원 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Graduate School, Changwon National Univ.)

<sup>2</sup> 창원대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: jsjoh@sarim.changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3665

Manuscript received: 2010.4.9 / Revised: 2010.9.12 / Accepted: 2010.9.17

*Vibration of a hydraulic excavator's body and boom occurs when the boom quickly stops after upward or downward motion. The main objective of this research is to present an idea of suppressing the vibration. Three parameters which affect the vibration are defined and analyzed thoroughly and a heuristic method suppressing the vibration is presented in this paper. Experimental results show that the proposed method works very well.*

Key Words: Vibration Suppression (진동 억제), Quick-stop Operation (급정지 동작), Hydraulic Excavator (유압 굴삭기)

### 1. 서론

유압 굴삭기는 다양한 작업이 가능한 매니퓰레이터 형태의 작업장치를 가지고 있어 여러 분야에서 널리 사용되는 대표적인 건설 중장비이다. 건설 현장 등의 매우 열악한 환경에서 사용됨에도 불구하고 작업 특성상 구조적으로 붐과 암 등의 운동과 관련된 진동을 억제시키기 위한 현가장치 등을 구성하기 곤란한 특징을 가지고 있다. 유압 굴삭기 붐의 상승, 하강 동작 중 급정지 시 발생하는 진동은 장비에 악영향을 줄 뿐만 아니라 작업효율 저하의 원인이 되기도 하지만 관련된 연구는 미미한 실정이다. 대표적인 연구로는 굴삭기의 운전석 현가 시스템에 반응동 댐핑 제어 알고리즘을 적용하여 붐의 진동에 의한 운동에너지를 감소시키는 방법,<sup>1</sup> 측정된 붐 실린더의 변위와 기준 변위의 차를 이용하여 붐 실린더의 제어 입력을 인가하는 방법,<sup>2</sup> 외란에 의해 평형점으로부터 벗어난

붐과 암의 각도를 측정한 후 두 개의 PID 제어기를 거쳐 각각 다르게 조절된 제어신호를 붐과 암 실린더를 조정하는 비례제어 밸브에 입력하여 진동을 제어하는 방법 등이다.<sup>3</sup> 이 방법들은 모두 모의실험을 통해 수행하였으며, 진동제어 효과가 만족스럽지 못하였다.

본 논문에서는 붐의 급정지 시에 발생하는 진동 억제에 필요한 제어 파라미터를 찾아내어 그 의미와 기능을 분석하고, 진동을 최소화하기 위한 제어 알고리즘과 적절한 제어 파라미터를 실차 실험을 통해 결정하는 방법을 제안하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 붐의 급정지 시 발생하는 진동에 대한 원인을 분석하여 진동 억제를 위한 해결방안 및 제어 알고리즘을 제시하였다. 3 장에서는 실험을 통하여 각 제어 파라미터들의 영향 및 제어 알고리즘의 적용가능성을 확인하였다. 4 장에서는 실차 실험을 통해 가장 우수한 성능을 보인 제어 파라미터를 결정하였고, 실험한

최종 데이터 및 결과를 요약하였다. 마지막으로 5 장에서는 본 논문의 내용을 요약하여 진동 억제 실험의 결론을 정리하였다.

## 2. 유압굴삭기 붐의 급정지 시의 운동과 진동

### 2.1 유압굴삭기 시스템의 구조

유압 굴삭기는 Fig. 1 과 같이 크게 하부체 (under frame), 상부체(upper frame), 작업장치 (attachment) 세 부분으로 구성된다. 이 중 작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket)과 각각을 구동하는 구동 실린더로 구성되어 있으며 굴삭기 작업의 대부분을 담당한다. Fig. 2 는 유압 굴삭기 붐의 구동을 위한 유압 회로이다. 작업자가 RCV (remote control valve) 레버를 조작함에 따라 파일롯 소스에서 공급되는 압유가 MCV 에 공급된다. MCV 에 공급된 제어 압유는 MCV 내의 스풀(spool)을 움직여 메인 소스에서 공급되는 압유를 붐 실린더에 전달하여 붐을 움직이게 된다. 대형 챔버(large chamber)에 공급된 압유가 붐을 움직일 수 있을 정도로 충분히 공급되면 붐 실린더의 피스톤이 소형 챔버(small chamber) 방향으로 밀리게 되어 결과적으로 붐은 상승하게 된다. 반대의 경우 붐 실린더의 소형 챔버에 압유가 공급되고 대형 챔버에서 유류가 빠져 나오게 되면 붐은 하강한다.

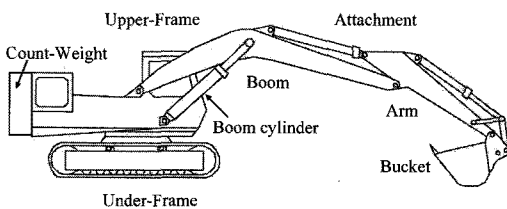


Fig. 1 Structure of a hydraulic excavator

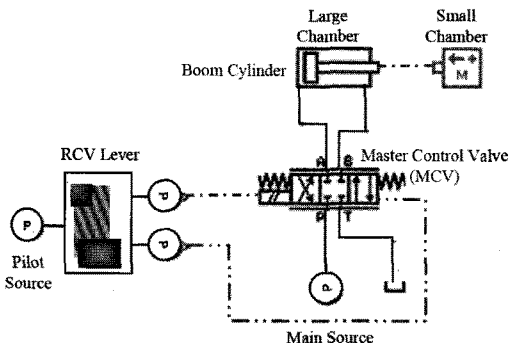


Fig. 2 Hydraulic circuit for boom operation

### 2.2 붐의 급정지 시 발생하는 진동 분석

굴삭기의 급정지 시 발생하는 진동의 원인을 분석하기 위하여 Fig. 3 과 같이 변위 센서를 부착하여 실린더 진동변위(Cyl\_st), 상부체의 진동변위(CWT\_st), 하부체의 진동변위(Step\_st)를 측정하였고, 붐 실린더의 각 챔버 내부압력과 MCV 에 공급되는 RCV 레버 제어 신호 압력을 측정하였다.

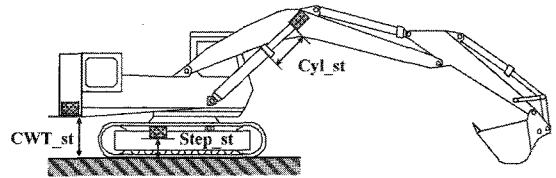


Fig. 3 Installation of displacement sensors

Fig. 4 는 붐 상승 운동 중 급정지 시켰을 경우의 실험 결과를 나타낸다. (a)는 RCV 레버의 조작에 의해 MCV 에 공급되는 제어 압력 신호( $P_{pilot\_Up}$ )를 나타내며, (b)는 붐 실린더 피스톤의 변위를 보여주고 있다. (c)와 (d)는 각각 상부체와 하부체의 변위를 나타내며, 붐 상승 도중 급정지 시 상부체와 하부체에 발생하는 심한 진동을 명확히 보여준다. (e)와 (f)는 각각 실린더의 소형, 대형 챔버의 내부 압력( $P_s$ ,  $P_L$ )을 나타낸다. RCV 레버의 정지 조작 후 MCV 에 의해 유압 펌프에서 실린더로 공급되는 압유가 차단되므로 실린더 내부에 새로운 유량이 공급되지 않는다. 그러나 붐 상승 운동 중 급정지를 하였으므로 붐의 관성에 의해 피스톤은 상승방향으로 계속 이동하게 되고, 이로 인해 붐 실린더의 소형 챔버의 공간이 압축되어 압력이 상승하게 된다. 그리고 대형 챔버는 상대적으로 압력이 하강하게 된다. 피스톤이 운동 에너지를 모두 소실하여 정지하게 되면 소형 챔버와 대형 챔버 간의 압력차는 최대가 되며 이때 소형 챔버에 축적된 포텐셜 에너지는 다시 에너지 평형 지점을 찾아 운동 에너지와 열 에너지 등으로 변환되기 시작한다. 이 과정은 실린더 챔버 내부 압력차로 인한 포텐셜 에너지가 운동 에너지와 다른 에너지 형태로 변환되어 붐의 하중을 지지할 수 있을 만큼 남을 때까지 계속 반복되어 붐 실린더의 진동을 발생시킨다.

Fig. 5 는 붐 하강 운동 중 급정지 시의 실험 결과이다. 붐 상승 운동과는 반대로 정지 시 관성에 의해 붐이 하강 운동을 하므로 대형 챔버의 압력이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

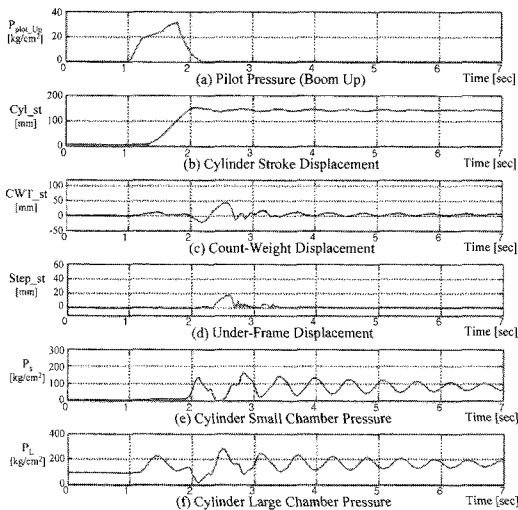


Fig. 4 Vibration of excavator when quick-stop is occurred during boom up motion

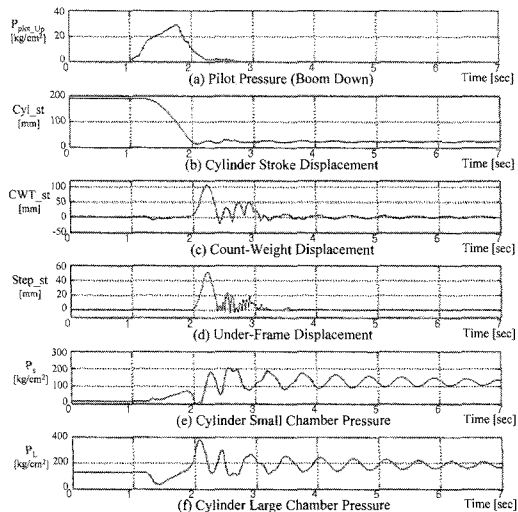


Fig. 5 Vibration of excavator when quick-stop is occurred during boom down motion

### 2.3 진동 억제 전략

Fig. 6 은 붐 하강 운동 중 급정지시켰을 때의 붐 실린더의 진동을 도시화한 것이다. 붐 급정지 명령 후에도 붐은 관성에 의해 계속 이동하며 붐 실린더 내부의 압력차 ( $\Delta P = P_L - P_S$ ) 는 급격히 증가한다. 이 과정에서 실린더의 운동 에너지는 압력차로 인해 포텐셜 에너지로 변환되어 실린더가 멈추는 시점까지 축적된다. 이 포텐셜 에너지는 다시 반대 방향의 운동에너지로 전환되어 붐에 진

동을 발생시킬 뿐만 아니라, 차체에 반작용을 가하여 차체 진동까지 유발하게 된다. 이러한 진동이 지속될 경우 장비를 마모, 파손할 위험이 크며 자칫 큰 사고로 이어질 수도 있기 때문에 붐의 진동을 억제하기 위한 진동 억제 전략이 요구된다.

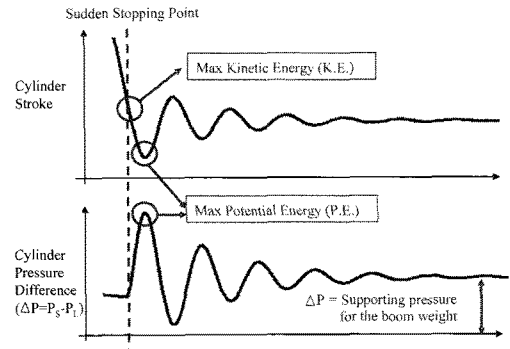


Fig. 6 Vibration characteristic of cylinder when quick-stop is occurred during downward motion of boom

붐의 진동을 억제하기 위한 방법은 붐의 관성에 의한 운동에너지를 소모시키는 방법과 축적되는 포텐셜 에너지를 감소시키는 방법이 있다. 전자는 실제 굴삭기에 적용하기 매우 어려우며 에너지 효율 또한 좋지 않은 반면 후자는 구현이 용이하며 에너지 효율 측면에서도 우수하다. 따라서 본 논문에서는 운동 에너지에서 변환되어 축적된 실린더의 포텐셜 에너지를 제거함으로써 다시 운동 에너지로 변환되는 것을 최소화하는 방안으로 초점을 두어 진동 억제 제어 전략을 구상하였다.<sup>4</sup> Fig. 7 은 본 논문에서 제안한 진동 억제 제어 개념을 나타낸다. 포텐셜 에너지를 제거하기 위하여 포텐셜 에너지가 최고가 되는 지점, 즉 붐의 실린더 내부압력 차가 최대가 되는 지점에서 제어 신호를 인가해 순간적으로 포텐셜 에너지를 제거하고자 할 경우 실린더 내부에서 압유가 흐르는 시간으로 인해 에너지가 다시 운동에너지로 변하게 된다. 따라서 포텐셜 에너지가 최대가 되기 전에 제어 신호를 인가하여 포텐셜 에너지의 축적 자체를 막을 경우 더 이상의 진동을 유발하는 운동에너지가 발생하지 않으며, 차체에 전달되는 에너지 또한 크게 줄일 수 있다. 포텐셜 에너지의 축적을 억제하기 위해서는 실린더 내부의 압유가 통과할 수 있는 통로를 열어주어 압유가 더 이상 압축되지 않도록 해야만 된다.

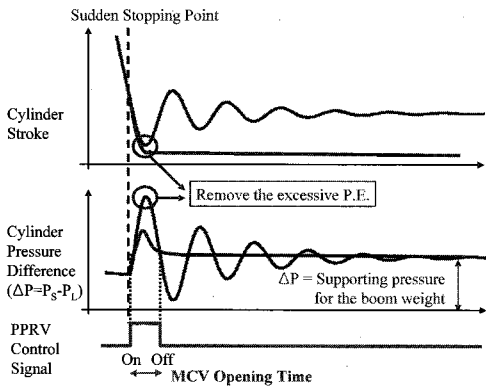


Fig. 7 Proposed control algorithm concept

본 논문에서는 포텐셜 에너지의 축적을 막기 위해 밀폐된 실린더 챔버에 일시적으로 유로를 제공해 주는 제어 알고리즘을 제안한다. 이 경우 유로를 제공해주는 제어 신호의 On 인가 시점과 Off 인가 시점 그리고 제어 신호의 크기가 중요 파라미터로 작용한다. 제어 신호 On 인가 시점은 포텐셜 에너지의 축적량을, Off 인가 시점은 붐 실린더의 최종 정지 위치를 결정한다. 제어 신호의 크기로는 MCV의 개구면적을 조절하여 압축 챔버 내부의 압유가 빠져나가는 속도를 조절함으로써 포텐셜 에너지의 감소 속도를 조절할 수 있고, 이로 인하여 붐의 구동속도가 조절된다.

### 3. 제안된 제어 알고리즘의 성능 및 제어 파라미터의 영향 분석

#### 3.1 시스템 구성 및 실험 방법

본 논문에서는 제안된 제어 알고리즘의 적용에 필요한 붐의 상승, 하강, 정지 명령을 검출하기 위하여 Fig. 8과 같이 RCV 레버와 MCV의 입력, 붐 실린더의 대형, 소형 챔버에 압력 센서를 부착하였으며 PPRV(proportional pressure reducing valve)를 추가로 연결하여 MCV 조작을 통해 실린더에 공급되는 유량이 조절되도록 하였다.<sup>3,5</sup> RCV 레버와 PPRV를 셔틀 밸브(shuttle valve)로 연결하여 두 출력 중 압력이 높은 출력이 MCV에 전달되게 한다.

붐 상승운동 중 급정지 시 MCV에 의해 실린더로 공급/회수되는 압유는 차단된다. 소형 챔버에 유로를 제공하기 위해서 상승 PPRV( $PPRV_{Up}$ )와 상승 셔틀밸브( $SV_{Up}$ )를 추가하였다. 붐 상승 운동 중 RCV 레버의 정지 조작 시에는 상승 파일럿 소스

( $P_{up}$ )는 출력되지 않고, 소형 챔버의 포텐셜 에너지를 제거하기 위한 제어 신호( $PPRV$  control signal)에 의해 상승 PPRV 압력( $PPRV_{Up}$ )만 출력되므로, 상승 셔틀밸브를 통하여 두 출력 중 높은 압력인  $PPRV_{Up}$ 만 MCV에 전달되게 된다. 붐 하강 운동 중 급정지 시에도 동일한 원리로 동작한다.

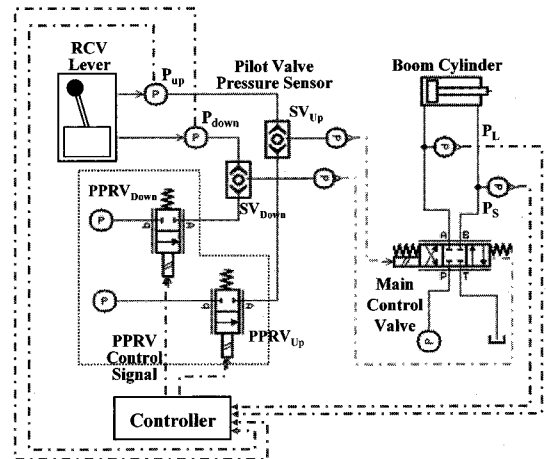


Fig. 8 Hydraulic circuit constitution of the controller

작업환경이 동일하다고 가정할 때 붐의 급정지 시 발생하는 진동은 크게 굴삭기 작업장치의 자세와 버킷에 실리는 부하, 그리고 붐 실린더의 구동 속도에 의해 결정된다. 본 논문에서의 실험은 굴삭기의 자세, 동작(붐 상승, 붐 하강), 부하 상태(부하, 무부하)의 3 가지 조건으로 구분한 각 조건에 대하여 붐의 진동 특성을 측정한다.

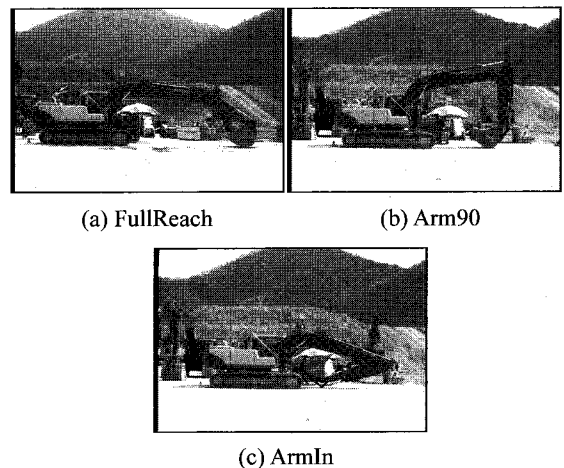


Fig. 9 Configurations of excavator

실험에 사용된 자세는 FullReach, Arm90, ArmIn으로써 Fig. 9 와 같고, 버킷에 실리는 부하는 무부하와 2.5ton 의 부하로 구분하였다. 이동속도는 급정지 시 처음 압축되는 실린더 챔버의 최대 압력을 이용하여 단계를 나누었다. 제어 파라미터는 제어 신호 On 과 Off 인가 시점, MCV 의 개구면적을 조절하기 위한 제어신호의 크기로 구성되며 각 파라미터를 바꾸며 굴삭기의 진동을 시험하였다.

### 3.2 제안된 제어 알고리즘의 흐름선도

제안된 알고리즘의 흐름선도는 Fig. 10 과 같다. 먼저 RCV 레버 압력( $P_{pilot}$ )을 측정하여 정지모드 여부를 판단한다. 여기서  $P_{pilot}$  은 붐의 상승, 하강시의 RCV 레버 압력  $P_{pilot\_Up}$ ,  $P_{pilot\_Down}$  을 나타낸다. 정지 모드일 경우 압축되는 챔버의 압력( $P_s$ ,  $P_L$ )을 측정하여 설정치( $On\_P$ )보다 클 경우 제어 신호 On 을 인가하게 된다. 이 때 제어 신호의 크기는 RCV 레버의 압력 최대치에 의해 결정되며, 제어 신호를 이용하여 MCV 의 개구면적을 조절하여 실린더의 압력을 조절함으로써 축적되는 포텐셜 에너지를 감소시킨다. 제어 신호 Off 는 측정된 실린더 내부 압력차( $P_L - P_s$ )가 설정치( $Off\_P$ )보다 작을 경우 인가하여 알고리즘을 종료한다.

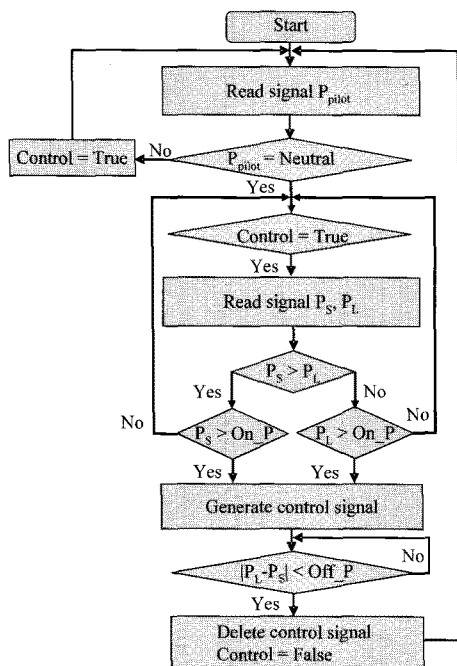


Fig. 10 Flow chart of proposed control algorithm

### 3.3 제어 파라미터의 영향 분석

본 논문에서 제안한 제어 알고리즘에서 포텐셜 에너지를 제거하기 위한 제어 파라미터는 제어 신호 On, Off, 개구면적 3 가지이다. 본 절에서는 붐 상승 도중 급정지 시 이 3 가지 제어 파라미터의 영향을 분석하고자 하며, 붐의 하강 도중 급정지 시에도 동일하게 분석이 가능하다.

#### 3.3.1 제어 신호 On 인가 시점의 영향 분석

제어 신호 On 인가 시점은 붐의 급정지 시 처음 압축되는 챔버의 압력 값을 이용하여 결정한다. 붐 상승 도중 급정지의 경우 소형 챔버가 압축되므로 소형 챔버의 내부 압력을 측정하여 제어 신호 On 인가 시점을 결정하게 되고, 붐 하강 중 급정지의 경우 대형 챔버의 내부 압력을 측정하여 제어 신호 On 인가 시점을 결정한다. Fig. 11 은 FullReach, 무부하, 붐 상승 조건에서 제어 신호 On 인가 시점을 달리하며 실차 실험한 결과이다. 붐 상승 중 급정지의 경우 관성에 의해 피스톤이 위쪽으로 이동하게 되어 소형 챔버의 압력이 급격히 상승하고, 얼마 후 굴삭기 차체에 진동에너지가 전달되어 차체의 상, 하부가 진동하는 것을 확인할 수 있다. 차체에 전달되는 진동을 최소화하기 위해서는 붐 실린더 중 압축되는 챔버의 압력이 높아지기 전에 제어 신호를 On 하여 압축되는 챔버의 압력이 과도하게 상승하는 것을 방지한다.

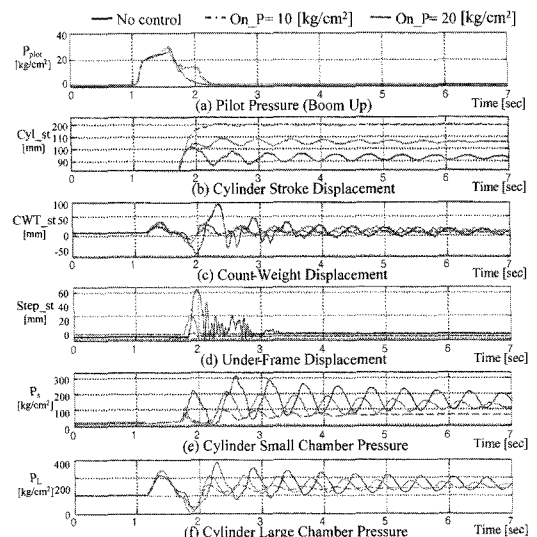


Fig. 11 Control performance comparison at control signal "on" time

Fig. 11 에서 압축되는 챔버의 압력이 과도하게 상승하기 전에 제어 신호를 On 함으로써 진동 성능을 개선시키는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제어 신호를 빨리 인가할수록 붐의 최종 정지 위치가 원래의 위치에서 더욱 벗어나게 된다. 이는 실린더 챔버 내부의 압력 상승을 억제함으로써 운동 에너지 감소효과를 제한하기 때문이다. 따라서 제어 신호 On 인가 시점을 적절하게 선택함으로써 차체에 전달되는 진동과 붐의 정지 위치 이탈을 최소화해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서 제안된 알고리즘에서는 RCV 레버 압력이 감소하는 지점을 정지 시점으로 설정하여 압력이 높아지기 전에 제어 신호를 On 하여 압력차가 더 이상 증가하지 않도록 제어기를 설계하였다.

### 3.3.2 제어 신호 Off 인가 시점의 영향 분석

제어 신호 Off 인가 시점은 실린더 내부의 압력차에 의한 포텐셜 에너지가 압력 정적 평형( $P_L - P_S = 0$ )을 이루는 지점에 수렴되었을 때가 가장 이상적이지만, 정확하게 이 시점을 인식하기란 쉽지 않다. 제어 신호 Off 인가 후 축적된 포텐셜 에너지가 압력 정적 평형 지점과 차이가 있을 경우 그 에너지 차가 곧 진동을 발생시키는 에너지원이 된다. 하지만 제어 신호 Off 인가 시점에서의 포텐셜 에너지가 정적 평형 지점과 크게 벗어나지 않는 경우 이미 수행된 제어에 의해 붐의 관성에 의한 운동에너지가 많이 소모되었으므로 잔여 진동의 크기는 미미한 정도에 그치게 된다.

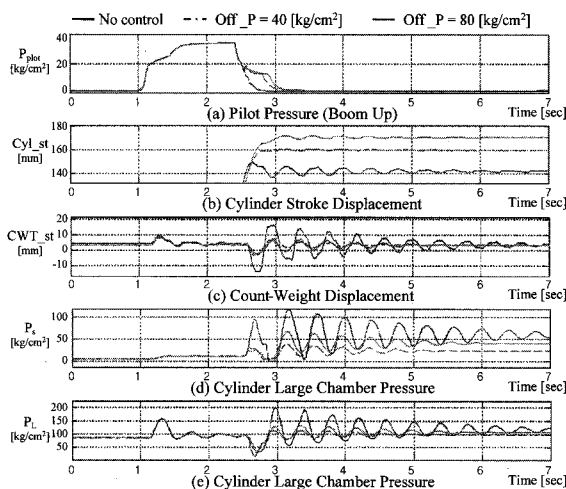


Fig. 12 Control performance comparison at control signal "off" time

Fig. 12 는 FullReach, 무부하, 붐 상승 조건에서 제어 신호 Off 인가 시점을 달리하여 실험한 결과이다. 제어 신호 Off 인가 시점에서 압력차가 예상되는 정적 평형 지점을 벗어났을 경우 붐의 진동이 크게 개선되지 않는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3.3 개구면적의 영향 분석

MCV의 개구면적은 압축되는 챔버에서 빠져나가는 유량을 결정하므로 압축 챔버의 압력 감소 속도를 결정하는 중요한 제어 파라미터이다. 일반적으로 붐의 구동속도가 빠를수록 압축 챔버의 압력이 높아지므로 개구면적을 넓혀 압축 챔버의 압유를 빠르게 제거해야 한다. 이때 필요한 붐의 구동속도는 RCV 레버의 출력 압력을 측정함으로써 알 수 있다. RCV 레버의 출력 압력이 클 경우 붐에 공급되는 유량이 많아 속도가 크게 증가하고, 반대로 작을 경우 붐에 공급되는 유량이 작아 속도가 크게 증가하지 못한다. 따라서 RCV 레버의 압력에 의해 붐의 구동속도는 결정된다.

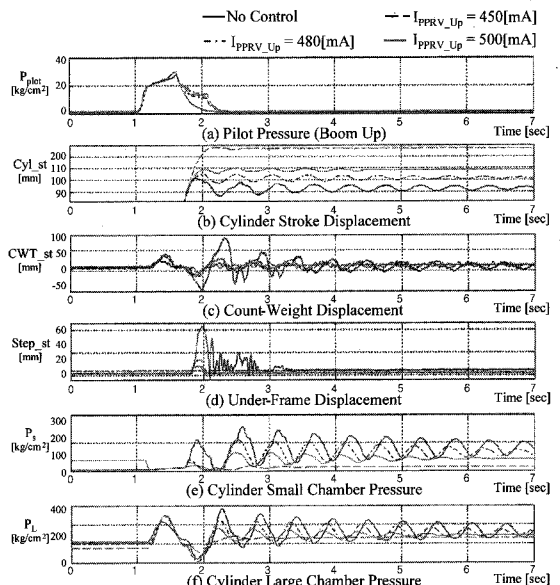


Fig. 13 The effect of MCV opening area on control performance

Fig. 13 은 FullReach, 무부하, 붐 상승 그리고 동일한 RCV 레버 압유를 가한 조건에서 MCV의 개구 면적만을 달리하여 제어 성능을 비교 분석한 것이다. MCV의 개구면적은  $I_{PPRV}$  신호를 이용하여 조절하며,  $I_{PPRV\_Up}$  과  $I_{PPRV\_Down}$  는 각각 붐의 상승

과 하강 시의 MCV 개구면적 조절 신호이다. MCV의 개구면적이 작은 경우에는 포텐셜 에너지를 충분히 제거하지 못하여 잔여 진동이 많이 남아 있으며, 반대로 개구면적이 과하게 큰 경우에는 붐의 정지 위치가 원래 목표 지점에서 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 정지 위치 차이는 큰 제어 입력이 압축 챔버의 에너지를 소모시키고 팽창 챔버의 소모된 에너지를 보상하는 범위를 초과하여 붐을 움직이는 역할을 하였기 때문이다. 이와 같이 붐의 정지 지점이 크게 벗어나는 것을 피하기 위해서는 다양한 제어 파라미터 튜닝을 통하여 적절한 개구면적의 설정이 필요하다.

#### 4. 실험 결과 분석

##### 4.1 각 실험 조건에 따른 제어 신호 출력

MCV의 개구면적은 굴삭기의 급정지 시 발생하는 진동 에너지를 제거하는 중요한 파라미터이다. 큰 진동에너지가 발생할 경우 축적되는 포텐셜 에너지 또한 커지므로 진동 에너지를 빨리 소멸시키기 위해서는 개구면적을 크게 하여 축적되는 포텐셜 에너지를 빠르게 제거해야 한다. 하지만 진동에너지가 작음에도 개구면적을 크게 하여 에너지를 과도하게 줄일 경우에는 최종 정지 지점의 이동만 커질 뿐 좋은 제어 성능을 얻을 수 없게 된다. 따라서 진동에너지에 크기를 고려한 제어 밸브의 개구면적 조절이 필요하다.

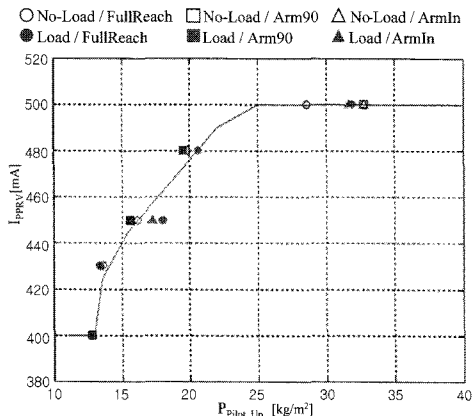


Fig. 14 Control signal output of boom up motion

그림 14와 15는 부하와 굴삭기의 자세, 그리고 붐의 구동속도를 달리하였을 때 MCV 개구면적을 결정하는 제어 신호의 크기( $I_{PPRV}$ )를 나타낸다.

붐의 구동속도는 RCV 레버의 압력( $P_{pilot}$ )에 의해 결정된다. 그래프를 보면 제어 신호의 출력 값이 자세와 부하 변화보다는 구동속도에 따른 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 RCV 레버 입력에서 거의 유사한 제어 출력으로 높은 제어 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

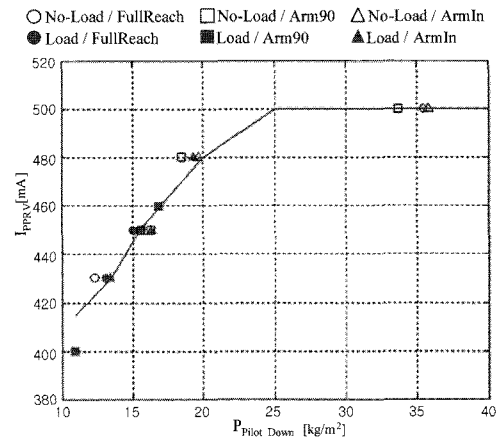


Fig. 15 Control signal output of boom down motion

Table 1 Comparison of test results

Test condition	Position/Load	Arm90/2.5ton					
	Motion	Boom up			Boom down		
	Max $P_{pilot}$ [kg/cm²]	13.3	17	31.5	11.8	15.8	20.3
Tuning parameter	Initial Velocity	Low	Middle	High	Low	Middle	High
	ON $P_L$ [kg/cm²]	0	0	0	110	110	110
	OFF ( $P_L$ - $P_S$ ) [kg/cm²]	80	80	80	180	180	180
Control parameter	PPRV signal [mA]	437	467	500	419	452	476
	Amplitude of the piston bouncing [mm]	(6) *1	(11) *2.5	(23) *2	(4) *0.5	(6.5) *2	(13) *2
	Improvement rate of the piston vibration [%]	83.3	77.3	91.3	87.5	69.2	84.6
	Amplitude of the frame vibration [mm]	(10) *2	(16) *7	(63) *8.5	(8.5) *4.5	(19) *5	(74) *14
	Improvement rate of the frame vibration [%]	80.8	56.3	86.5	47.1	73.7	81.1
	Setting Difference [mm]	3.5	15.5	41	2	15	100.5
	Max Difference [mm]	-8	10.5	30	0.5	11.5	92

\* (Value): No control, \*Value: with control

## 4.2 실험 결과

최종적으로 결정된 제어 파라미터를 적용하여 완성된 제어 알고리즘의 성능을 실차 실험을 통하여 검증하였다. 실험 결과 실린더 진동 폭과 차체 진동 모두 상당히 개선되었다. 시스템이 상당히 둔감한 면이 있어 약간의 조건 변화에는 크게 영향을 받지 않았으며, 부하, 무부하 조건에서 동일한 제어 출력을 인가하였을 때에도 모두 상당히 높은 제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. Table 1 은 최종적으로 설정된 제어 파라미터와 Arm90, 2.5ton 부하에 대한 실험 결과를 나타내며, Fig. 16 은 실린더 진동 개선비와 차체 진동 개선비를 나타낸다. 다른 조건의 실험에서도 평균 80%의 진동개선 효과가 있음을 확인하였다. 봄이 천천히 움직이는 미세조작의 경우 부하, 자세변화를 정확히 측정할 수 없는 어려움과 시스템 특성으로 인해 제어 성능을 크게 개선시키기는 어려웠다. 제어 알고리즘의 특성으로 인해 속도 조건이 높아질수록 정지 지점 차이가 상대적으로 커지는 한계가 있었지만, 진동과 정지오차가 굴삭기에 미치는 영향을 고려할 때 정지오차는 작업자의 숙련도에 의해 쉽게 해결될 수 있으므로 굴삭기의 성능에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

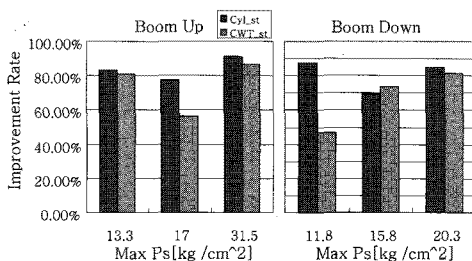


Fig. 16 Improvement rate of the piston bouncing and the vibration

## 5. 결론

본 논문에서는 굴삭기 봄의 급정지 시 발생하는 봄과 차체의 진동을 최소화하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였다. 비선형성, 불확실성이 강한 유압 시스템을 대상으로 수학적 인 측면에서 제어 이론에 접근하기보다는 실험을 이용한 굴삭기의 동적 거동 특성의 분석을 통해 제어 알고리즘을 제안하였고, 이에 필요한 제어 파라미터를 찾는 데 주력하였다. 굴삭기와 같은 중장비의 경우 진동

억제를 위해 에너지를 공급하기 보다는 축적된 에너지를 다른 형태로 소모시켜 진동으로 변환되는 에너지 양을 줄이는 방법이 유용할 수 있다. 제안된 제어 알고리즘에서는 급정지 후 운동 에너지가 포텐셜 에너지로 전환되는 동안 포텐셜 에너지를 꾸준히 감소시키는 방법으로 진동 에너지를 제거하여 진동을 억제하는 방법을 제시하였다. 알고리즘의 성능을 결정하는 제어 파라미터인 제어 신호 On/Off, 개구 면적은 Volvo EC330 모델에 실제 적용하여 FullReach, Arm90, ArmIn 3 가지의 자세, 부하/무부하의 조건에서 실험을 통해 결정하였다. 실린더에 축적되는 포텐셜 에너지를 꾸준히 감소시키므로 차체에 전달되는 진동 성분이 작아 충분한 제어 성능을 유도할 수 있었으며 수 차례에 거친 제어 파라미터 튜닝을 통해 최종적으로 결정된 값을 적용하여 검증한 결과 모든 실험 조건에서 실린더 진동 폭과 차체 진동 모두 우수한 진동 개선 효과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 제어 알고리즘의 특성상 최종 정지 지점의 이동이 발생하게 되며 이 현상은 봄의 속도가 증가할수록 큰 변위가 발생하였으나, 수용 가능한 범위였다.

## 후 기

본 논문은 2009 년도 창원대학교 연구비와 2010 년도 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- Kim, J. H. and Lee, C. W., "Semi-active Damping Control of Suspension Systems for Specified Operational Response Mode," Journal of Sound and Vibration, Vol. 260, No. 2, pp. 307-328, 2003.
- Ding, G., Qian, Z. and Pan, S., "Active Vibration Control of Excavator Working Equipment with ADAMS," International ADAMS User Conf., 2000.
- Cho, H., "Active Pitch Motion Control of a Hydraulic Excavator," Master Thesis, Mechanical Engineering, Korea University, 2002.
- Lee, J. K., "Hydraulic Cylinder Suspension Method," Korea Patent, No. 10-0559296-0000, 2006.
- Sunamura, K., Tomikawa, O. and Hirata, T., "Anti-Vibration Apparatus in a Hydraulic System for Boom Cylinder of Working Apparatus," US Patent, No. 5048296, 1991.