한국정밀공학회지 제 28 권 1 호 pp. 48-55 January 2011 / 48
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 28, No. 1, pp. 48-55

실린더 출력 힘의 실험적 추정을 통한 굴삭기 궤적제어

Trajectory Control of Excavator with Experimental Estimation of Cylinder Output Force

오경원 [1], 김동남 [1], 김남훈 [1], 홍대희 [2,✉], 김윤기 [3], 홍석희 [3]
Kyeong Won Oh[1], Dongnam Kim[1], Nam Hoon Kim[1], Daehie Hong[2,✉], Yun-Ki Kim[3] and Sukhie Hong[3]

1 고려대학교 기계공학부 대학원 (Graduate School of Division of Mechanical Engineering, Korea Univ.)
2 고려대학교 기계공학부 (Division of Mechanical Engineering, Korea Univ.)
3 ㈜ 내경엔지니어링 (Naekyung Engineering. Co., Ltd.)
✉ Corresponding author: dhhong@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3369

Manuscript received: 2010.3.2 / Revised: 2010.8.16 / Accepted: 2010.9.16

Hydraulic excavator is one of the most widely used heavy machines in construction sites including dismantling. In the dismantling sites, the excavators equipped with crusher or breaker carry out dangerous operations, so drivers are always exposed to unexpected danger. For safety operation, remote control of the hydraulic excavator has been studied using proportional control valve, which requires an appropriate motion control of its bucket tip. In this case, kinematics and dynamics analysis have to be preceded through modeling of excavator. However, it is difficult to acquire reasonable results from the analysis due to insufficient information of physical parameters such as mass of each links and locations of mass centers, etc. This study deals with the trajectory control of bucket tip, which is based on experimental estimation of cylinder output force. The estimated forces are fed into the control of each cylinder in order to compensate gravitational and frictional effects in the cylinders. The control was applied to horizontal trajectories that are for flattening work.

Key Words: Hydraulic Excavator (유압굴삭기), Gravity Compensation (중력보상), Trajectory Control (궤적제어), Remote Control (원격조종)

기호설명

$\overline{c_1c_2}$ = cylinder length of boom
$\overline{c_3c_4}$ = cylinder length of arm
$\overline{c_5c_6}$ = cylinder length of bucket
X_i = x-axis of each link (i = 0, 1, 2, 3)
Y_i = y-axis of each link (i = 0, 1, 2, 3)
Z_i = rotational axis of each link (i = 0, 1, 2, 3)
θ_i = rotational angle of each link (i =1, 2, 3)
$\vec{P}$ = position vector of bucket tip
P_x = x - coordinate of bucket tip
P_y = y - coordinate of bucket tip
θ_{imc} = rotational angle of mass center (i =1, 2, 3)
$L_{O_1O_2}$ = length of boom
$L_{O_2O_3}$ = length of arm
$L_{O_3O_4}$ = length of bucket
$L_{O_iG_i}$ = distance between joint and mass center (i =1, 2, 3)
M_i = mass of each link (i =1, 2, 3)
V = Coriolis and centripetal effects of each joint
G_i = gravitational term of each link (i =1, 2, 3)
g = gravitational acceleration
τ^* = torques acting at each joint

1. 서론

건설현장이나 해체현장에서 매우 다양한 종류의 중장비들이 사람이 하기 힘들거나 위험한 환경에서 작업을 대신 하고 있다. 그 중에서도 유압굴삭기는 유압실린더를 통해 매우 큰 힘을 낼 수 있고, 버켓 대신 크러셔나 브레이커 등을 장착하여 다양한 용도로 활용이 가능하여 가장 많이 사용되고 있다. 건설이나 해체현장에서 굴삭기를 이용하여 작업하는 경우 운전자는 직접 굴삭기에 탑승하여 작업을 하기 때문에 안전사고 등의 위험에 쉽게 노출되어 있다. 이를 보완하기 위해 그 동안 굴삭기의 원격조종에 관한 연구가 Hirabayashi,[1] Sasaki[2] 그리고 Kim[3] 등에 의해 많이 진행되었다. 굴삭기의 원격 제어를 위해서는 우선 비례제어밸브를 이용하여 전기신호에 따라 굴삭기 각 링크의 실린더 구동이 먼저 이루어져야 하며, 이를 이용하여 굴삭기 움직임을 제어하는 연구가 Quang[4] 등에 의해 많이 진행되어 왔다. 이러한 움직임 제어가 정확히 이루어지기 위해서는 굴삭기의 모델링을 통한 기구학적, 동역학적 분석이 반드시 필요하다. 하지만 대부분의 경우 굴삭기 링크의 무게중심 위치나 질량 등에 관한 물리적인 변수를 정확히 알지 못하는 경우가 많아 굴삭기의 정확하고 안정적인 움직임을 제어 하기가 어렵다.

이 논문에서는 앞서 말한 것과 같이 정확한 모델링을 하기 어려운 경우 유압굴삭기의 실린더 출력 힘에 대한 실험적 추정을 통해서 굴삭기 버켓의 끝 점을 궤적제어 하는 것에 대해 다룬다. 이를 위해서 우선 굴삭기의 기구학 분석을 기초로 하여 모델링을 진행하고, 동역학 분석을 통해 중력보상을 진행한 후 PI 제어를 통해 각 링크에 연결된 유압실린더를 제어한다. 이 경우에 굴삭기의 완벽한 모델링이 어렵기 때문에 중력 항에 대한 동역학 식만 고려할 것이다. 그리고 나서 중력보상과 PI 제어기가 적용된 실린더의 출력 힘과 각 링크를 움직이기 위해 필요한 비례제어밸브의 구동 신호 값을 실험을 통해 구한다. 이 실험을 통해 구한 붐, 암 그리고 버켓의 실린더 구동 신호 값을 바탕으로 버켓 끝 점의 수평방향 움직임 제어를 진행한다.

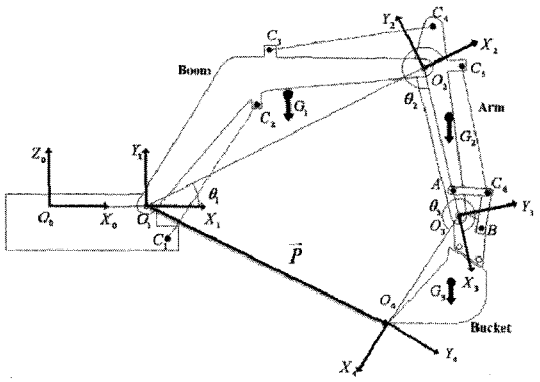

Fig. 1 Kinematics and dynamics modeling of excavator

2. 유압굴삭기 기구학 및 동역학 분석

굴삭기를 원격제어 하기 위해서는 기구학과 동역학에 대한 분석이 선행되어야 한다. Fig. 1 은 굴삭기의 기구학 및 동역학 분석을 위해 모델링한 그림이다. 이 논문에서는 굴삭기의 기본 4 자유도 중에서 스윙 동작을 제외한 붐, 암 그리고 버켓의 2 차원 동작에 대해서만 고려할 것이다. 굴삭기를 원격제어 하는데 있어서 기구학 분석이 중요한 이유는 각 링크에 연결된 실린더 길이에 따라 링크의 각도들을 구할 수 있고, 이 각도들을 바탕으로 버켓 끝 점의 X, Y 좌표를 얻을 수 있기 때문이다. 그렇기 때문에 유압굴삭기의 순기구학, 역기구학에 대한 연구가 Frimpong,[5] Joseph[6] 등에 의해 진행되어 왔으며, 다음의 식 (1) ~ (3)은 유압굴삭기 실린더 길이에 따른 붐, 암, 버켓의 각도에 대한 식을 나타낸다.[7]

$$\theta_1 = \angle C_1O_1C_2 - \angle C_2O_1O_2 - \angle X_1O_1C_1 \tag{1}$$

$$\theta_2 = 3\pi - \angle C_3O_2C_4 - \angle O_1O_2C_3 - \angle C_4O_2O_3 \tag{2}$$

$$\theta_3 = 3\pi - \angle AO_3C_6 - \angle C_6O_3B - \angle C_5O_3O_2 - \angle BO_3O_4 \tag{3}$$

다음의 식 (4), (5)는 붐, 암, 버켓 각도에 따른 버켓 끝점의 좌표를 붐 링크의 회전 조인트 O_1을 원점으로 하여 구한 식이며 최종적으로 이 점의 위치를 제어하는 것에 대해 진행할 것이다.

$$\begin{aligned} P_x = {} & L_{O_1O_2}\cos\theta_1 + L_{O_2O_3}\cos(\theta_1+\theta_2) \\ & + L_{O_3O_4}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} P_y = {} & L_{O_1O_2}\sin\theta_1 + L_{O_2O_3}\sin(\theta_1+\theta_2) \\ & + L_{O_3O_4}\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3) \end{aligned} \tag{5}$$

다음의 식(6)은 각 링크의 작용하는 토크에 관한 동역학 식을 나타낸다.[8] 굴삭기에 작용하는 토크는 각 링크의 질량관성, 마찰, 중력 등에 의해 결정된다. 하지만 굴삭기의 자세나 작업의 상황에 따라 링크에 걸리는 하중이나 무게 및 움직이는 속도가 다르고 질량, 관성 또는 마찰과 같은 값의 정확한 측정이 어렵다. 그렇기 때문에 굴삭기에 작용하는 토크에 영향을 주는 항목 중 다른 항에 비해 영향이 큰 중력 항에 대해서만 실험적 측정을 통한 모델링을 진행하였다.

$$M(\theta)\ddot{\theta}+V(\theta,\dot{\theta})+G(\theta)=\tau^{*} \tag{6}$$

다음의 식(7) ~ (9)는 붐, 암 그리고 버켓에 작용하는 토크의 중력 항에 관해 표현한 식이다.

$$\begin{aligned} G_1 &= M_3 g(L_{O_1O_2}\cos\theta_1 + L_{O_2O_3}\cos(\theta_1+\theta_2) \\ &\quad + L_{O_3G_3}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_{3mc})) \\ &\quad + M_2 g(L_{O_1O_2}\cos\theta_1 + L_{O_2G_2}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_{2mc})) \\ &\quad + M_1 g L_{O_1G_1}\cos(\theta_1+\theta_{1mc}) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} G_2 &= M_3 g(L_{O_2O_3}\cos(\theta_1+\theta_2) \\ &\quad + L_{O_3G_3}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_{3mc})) \\ &\quad + M_2 g L_{O_2G_2}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_{2mc}) \end{aligned} \tag{8}$$

$$G_3 = M_3 g L_{O_3G_3}\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_{3mc}) \tag{9}$$

3. 제어 시스템 구성

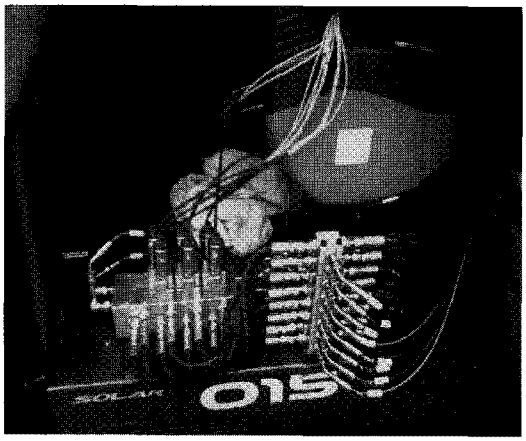

Fig. 2 Proportional control valve systems

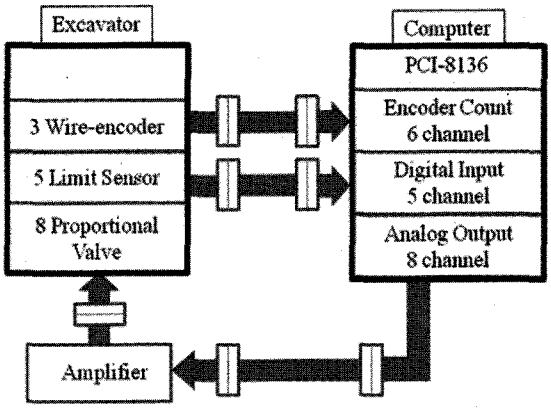

Fig. 3 Hydraulic control scheme of excavator

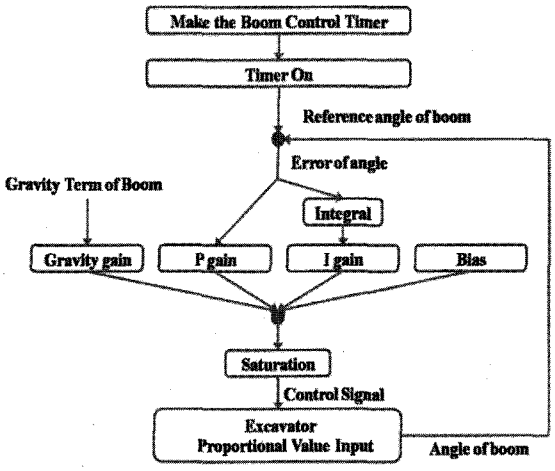

Fig. 4 Flowchart of PI controller and gravitational compensation algorithm for boom

본 논문에서는 두산인프라코어 사의 SOLAR 015 모델을 이용하여 유압굴삭기 제어 시스템을 구성하였다. 우선 굴삭기의 원격제어를 위해 아날로그 전압 신호에 따라 각 링크의 실린더가 구동될 수 있도록 비례제어밸브를 장착하였으며, Fig. 2는 비례제어밸브가 설치된 모습이다.

Fig. 3 은 유압실린더 제어를 위한 굴삭기 시스템을 나타낸 그림이다. 우선 각 링크의 자세 정보를 얻기 위해 굴삭기의 붐, 암 그리고 버켓의 실린더에 와이어 인코더를 설치하였다. 이를 이용한 기구학 분석으로 실린더 길이의 변화에 따른 각도 변화를 피드백 받고, 리미트 센서를 장착하여 굴삭기의 작업 범위를 넘어가는 경우에 대비하여 안전성을 확보하였다. 그리고 굴삭기 외부에서 산업용 컴퓨터에 장착된 인코더 카운트보드(ADLINK

PCI-8136)를 이용하여 굴삭기에 설치된 와이어 인코더 값과 리미트 센서 신호를 받는다. 이 보드에는 아날로그 신호를 함께 내보낼 수 있어 이를 통해 비례제어밸브 구동을 위한 -10 V 에서 10 V 사이의 아날로그 전압 신호로 증폭기를 거쳐 유압실린더를 동작시킨다. 굴삭기 각 링크를 제어하기 위해서 본 연구에서는 PI 제어와 중력보상 알고리즘을 적용하였고, 굴삭기에 설치된 와이어 인코더와 기구학 분석으로 계산된 링크의 위치 정보로부터 오차를 계산하였다.

Fig. 4 는 굴삭기 붐의 구동을 위해 중력보상을 적용한 PI 제어 알고리즘의 순서도이다. 암과 버켓에 대해서도 각각의 PI 제어기를 이용하여 각 링크의 움직임에 따라 다른 게인 값을 적용하였으며, Microsoft Visual C++ 프로그램을 이용하여 15 ms 마다 링크의 움직임을 제어하였다.

4. 실린더 힘의 특성에 따른 아날로그 제어 신호의 분석

굴삭기를 구동하는 경우 붐, 암 그리고 버켓의 위치와 각도에 따라서 각 링크의 무게 중심의 좌표가 변하게 된다. 따라서 이때 무게 중심의 위치에 따라 각각의 링크를 움직이기 위한 실린더 힘이 다르기 때문에 실린더 구동을 위해 비례제어밸브에 들어가야 하는 아날로그 신호 값 역시 다르게 적용된다. 그렇기 때문에 각 링크의 자세에 따른 아날로그 신호의 변화와 실린더 출력 힘과의 관계를 살펴보았다. Fig. 5(a) ~ (f)는 실험을 통해 얻은 결과 그래프이다. 그래프의 X 축은 굴삭기의 자세에 따른 실린더 출력 힘을 나타내고 Y 축은 그에 따른 각 링크의 비례제어밸브 구동에 필요한 아날로그 제어 신호 값(-10 V ~ 10 V)을 나타낸다. 결과를 살펴보면 굴삭기 링크의 각도에 따라 구동하기 위한 실린더 출력 힘의 크기가 커질수록 필요한 제어 신호의 크기 역시 커짐을 확인할 수 있다. 하지만 만약 Fig. 5(a)의 boom down 동작처럼 굴삭기 링크 무게중심이 중력이 작용하는 방향으로 움직이는 경우 이 때는 필요한 아날로그 신호 값은 변화 없이 일정한 값을 보인다. 암과 버켓의 같은 경우도 앞서 말한 것과 같은 결과를 확인할 수 있으며, 이때 Fig. 5(c) ~ (f)에서의 일정한 상수 값을 보여 주는 구간이 링크의 무게 중심이 중력 방향으로 움직이는 구간을 나타낸다. 그리고 이 결과

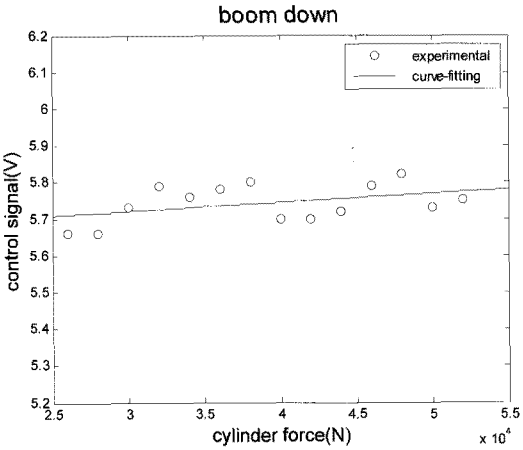

Fig. 5(a) Start-up control signal for boom down motion

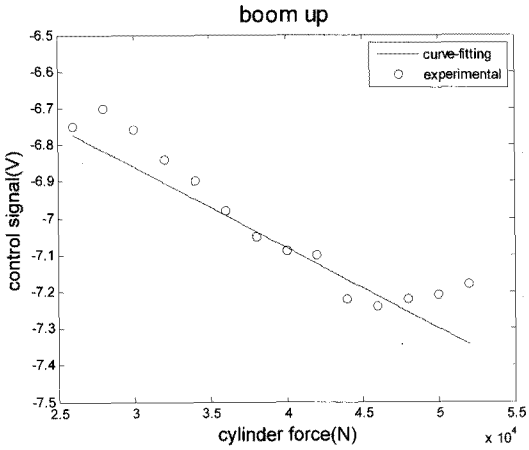

Fig. 5(b) Start-up control signal for boom up motion

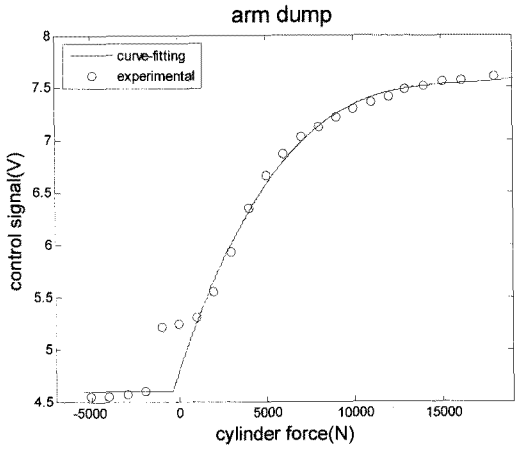

Fig. 5(c) Start-up control signal for arm dump motion

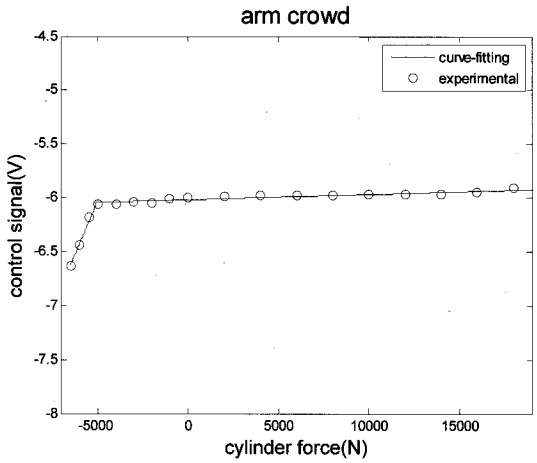

Fig. 5(d) Start-up control signal for arm crowd motion

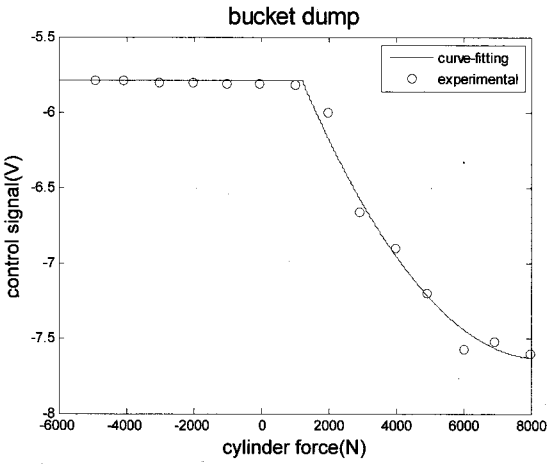

Fig. 5(e) Start-up control signal for bucket dump motion

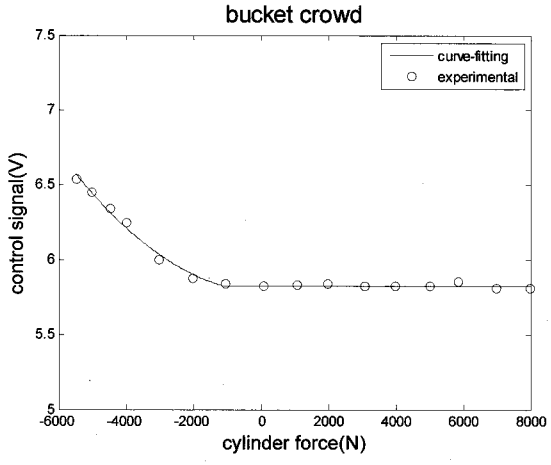

Fig. 5(f) Start-up control signal for bucket crowd motion

그래프를 살펴보면 실험적으로 실린더 출력 힘이 0 이 되는 부분에서 일정한 상수 값과 구동 신호 값 의 변화가 일어나는 구간이 나눠짐을 확인 할 수 있다. 이는 각 링크의 무게중심이 중력 방향과 중력 반대 방향으로 바뀌는 상황 에서는 실린더 출력 힘이 0 이 됨을 의미한다. Fig. 5(d)의 arm crowd 동작의 경우에서는 -5000 인 부분에서 변화하기 시작하는데 이는 실험적으로 추정을 통한 중력 보상을 진행하였기 때문에 약간의 오차가 발생하였다.

5. 실험 및 결과

5.1 실험 내용

실린더 출력 힘에 따른 각 링크의 비례제어밸브에 대한 제어 신호 값을 바탕으로 하여 굴삭기 버켓 끝점의 수평방향 움직임 제어에 대한 실험을 진행하였다. Fig. 6 은 실험을 진행하기 위해 Microsoft Visual C++를 이용하여 작성된 제어 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 버켓 끝점이 수평 방향으로 움직일 수 있도록 현재 위치를 바탕으로 경로를 생성하면, 기구학 분석을 통해 얻어진 버켓 끝점의 좌표가 PI 제어와 중력보상 알고리즘을 통해 구동되는 형태이다. 이 경우 같은 주기에서 레퍼런스 위치와 실제 위치 사이의 오차를 비교하여 각각의 링크에 독립적으로 피드백 되어 구동된다. 굴삭기의 수평 방향 움직임에 대한 제어는

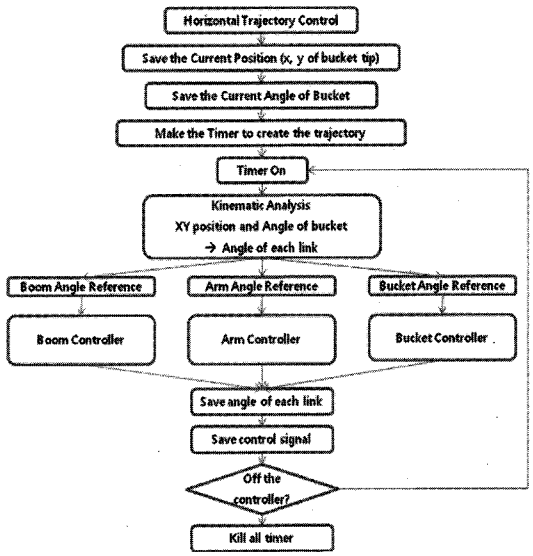

Fig. 6 The flowchart of horizontal trajectory motion control experiment

2 차원 평면에서의 버켓 끝점의 레퍼런스 위치와 현재 위치 사이의 높이 차이를 계산을 통해 확인해 볼 수 있다.

버켓 끝점의 수평 방향 움직임 제어에 대한 실험은 두 차례 진행되었으며, 버켓 끝점은 0.13 m/s 의 일정한 속도로 이동하며 실험 1 과 실험 2 에서 각 링크의 초기 각도는 서로 같게 하였으며, 붐의 각도(θ_1)와 초기 끝점((P_x , P_y))의 위치를 다르게 하여 실험하였다. Table 1 은 두 차례 진행된 실험의 링크 각도와 버켓 끝점의 초기 위치를 나타낸다.

Table 1 Initial position of bucket tip for horizontal trajectory motion control experiments

	θ_1	θ_2	θ_3	P_x	P_y
Exp. 1	67 °	223 °	392 °	152 cm	35.2 cm
Exp. 2	35 °	223 °	392 °	141 cm	-52.2 cm

5.2 실험 결과

Fig. 7(a) ~ (c)는 첫 번째 실험에서의 버켓의 끝점이 수평으로 움직이는 경우 붐, 암 그리고 버켓의 레퍼런스 각도와 실제 실험에서의 측정된 값을 비교한 그래프이다. 그래프에서의 굵은 실선은 기구학 분석을 기초로 하여 구한 각도 레퍼런스 값을 의미하고 가는 실선은 와이어 인코더로 측정을 통한 실제 각도를 나타낸다. 각 링크의 각도 오차는 1 ° 이내로 각각의 경우에는 레퍼런스 각도를 잘 따라감을 확인할 수 있다.

Fig. 8 은 실험 1 의 경우 버켓 끝점이 1.2 m 전진하는 경우의 움직임에 대한 결과 그래프이다.

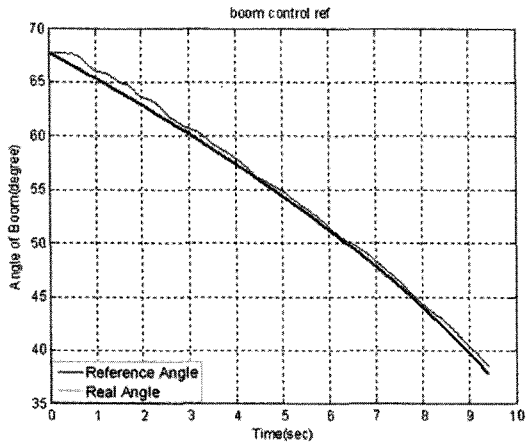

Fig. 7(a) The result of horizontal trajectory control experiment 1 (Boom motion)

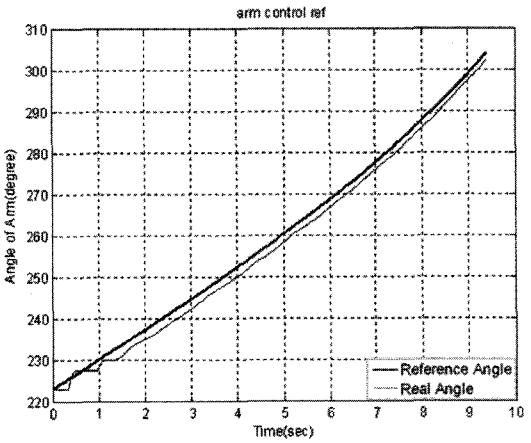

Fig. 7(b) The result of horizontal trajectory control experiment 1 (Arm motion)

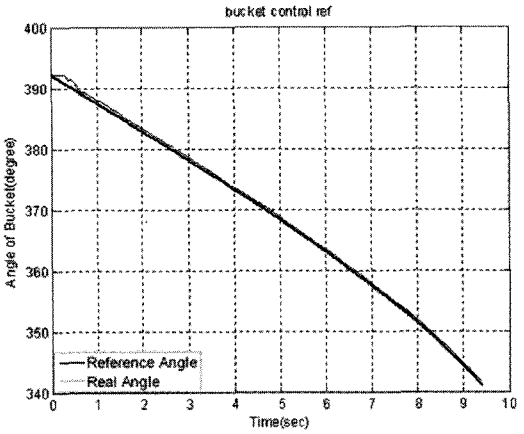

Fig. 7(c) The result of horizontal trajectory control experiment 1 (Bucket motion)

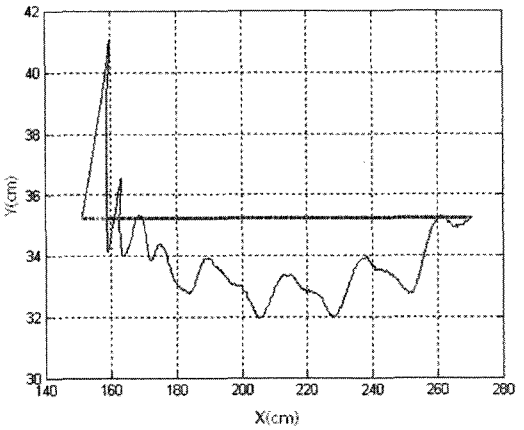

Fig. 8 The result of horizontal trajectory control experiment 1 (Motion of Bucket Tip)

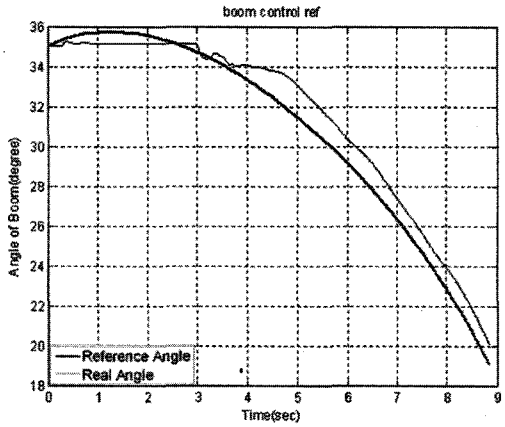

Fig. 9(a) The result of horizontal trajectory control experiment 2 (Boom motion)

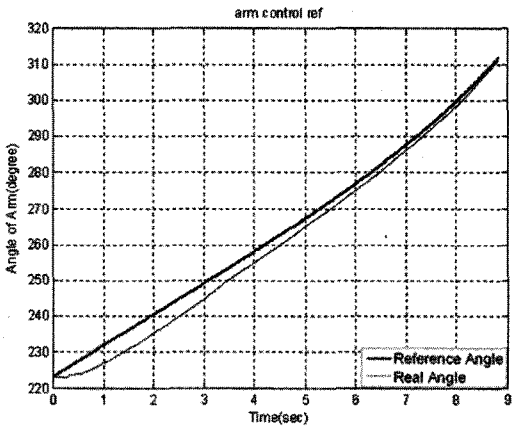

Fig. 9(b) The result of horizontal trajectory control experiment 2 (Arm motion)

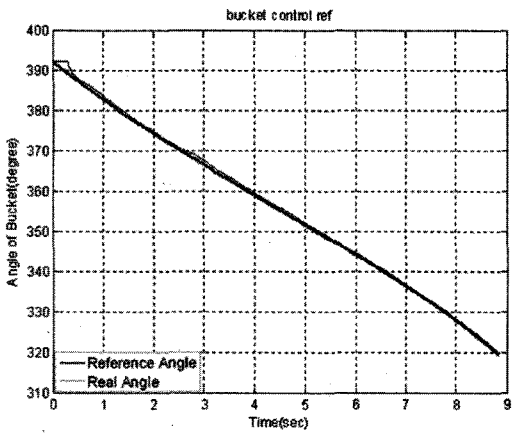

Fig. 9(c) The result of horizontal trajectory control experiment 2 (Bucket motion)

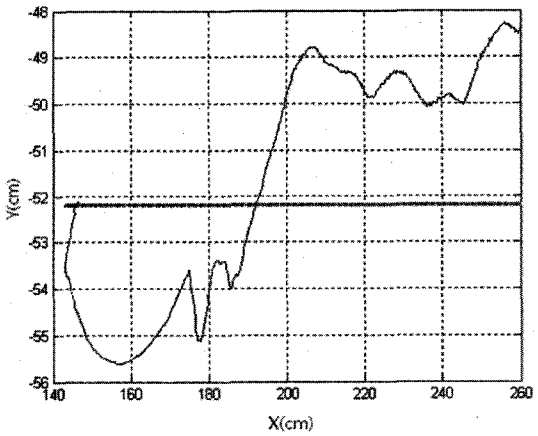

Fig. 10 The Result of horizontal trajectory control experiment 2 (Motion of bucket tip)

Fig. 9(a) ~ (c)는 두 번째 실험에서의 각 링크의 결과 그래프를 나타내며, 이 경우에서 각도 오차는 4° 이내로 역시 레퍼런스 값을 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실험 1 과는 달리 처음 움직임을 시작하는 경우에 붐이 처음에 위로 조금 움직인 후에 아래로 다시 내려가는 구간을 보인다. 굴삭기가 미세하게 방향을 바꿔야 하는 경우에 굴삭기 구동을 위한 아날로그 신호가 급격히 바뀌어야 한다. 하지만 이러한 미세한 변화에 밸브 시스템이 반응하지 않아 레퍼런스 값을 잘 따라가지 못해 이로 인해 상대적으로 각 링크의 레퍼런스 값과의 오차가 전 실험보다 크게 나타남을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 9(a)의 3 ~ 4 초 구간에서 붐의 각도 값이 출렁이는 부분을 확인할 수 있다.

본 실험의 경우에는 굴삭기의 RPM 을 최저로 하여 구동 신호를 측정하였다. 그러나 굴삭기의 RPM 이 낮은 상태에서 붐의 구동이 빠르게 반응하지 않아 붐을 올리는 제어가 늦어지게 되는 현상을 보인다. 이로 인해 실험 2 의 궤적 오차가 실험 1 보다 더 크게 발생하였다.

Fig. 10 의 결과 그래프는 실험 2 에 대한 경우로 역시 버켓 끝점이 수평 방향으로 약 1.2 m 전진하는 움직임에 대한 결과를 나타낸다. 이 때의 경우 역시 버켓 끝점의 수평 방향에 대한 Y 축 방향의 오차는 ±4 cm 이내로 붐의 구동에서 약간의 오차를 보였음에도 불구하고 실린더 출력 힘에 따른 구동 신호를 이용한 제어가 잘 진행되었음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 유압굴삭기의 원격제어에 대해 다루었으며 이를 위해 아날로그 신호를 이용하여 구동할 수 있는 비례제어밸브를 장착하였다. 그리고 굴삭기 기구학 분석과 와이어 인코더를 통해 실린더 길이의 변화에 따른 각 링크의 각도 변화를 측정하였다. 유압굴삭기의 정확한 모델링이 어렵기 때문에 실린더 출력 힘에 따른 굴삭기 구동 신호 값을 실험적 추정을 통해 굴삭기 자세에 따른 아날로그 신호 값을 분석하였다. 이에 따라 각각의 링크에 대해서 PI 제어와 동역학 식을 기초로 중력 보상 알고리즘을 적용하여 움직임을 제어하였다.

그 후 앞서 실험적 추정을 통한 구동 신호 값을 이용하여 버켓 끝점의 수평 방향 움직임에 대한 제어를 진행하였고, 끝점이 수평 방향으로 전진하는 동안 각 링크의 경우 레퍼런스 값과 4° 이내의 오차를 보였으며, 버켓 끝점의 수평 방향 움직임의 경우 Y 축 방향으로 5 cm 이내의 오차를 가졌다. 결과를 통해 실린더 출력 힘의 추정을 통해 구동 신호 값을 분석에 따른 굴삭기의 원격제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 "06 건설핵심 B04")과 BK21 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hirabayashi, T., Yamamoto, T., Hiroaki, Y. and Iwata, H., "Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information," Proceedings 23rd Int. Sym. on Automation and Robotics in Construction, pp. 36-41, 2006.
2. Sasaki, T., Nagai, T. and Kawashima, K., "Remote Control of Backhoe for Rescue Activities Using Pneumatic Robot System," Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3177-3182, 2006.
3. Kim, D., Oh, K. W., Hong, D., Park, J.-H. and Hong. S., "Design of a Remote Controller for Dismantling Processes Using Excavator," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 95-102, 2008.
4. Quang, N. H., "Robust Low Level Control of Robotic Excavation," Australian Centre for Field Robotics, A Thesis of Doctor of Philosophy, The University of Sydney, 2000.
5. Frimpong, S. and Li, Y., "Virtual Prototype Simulation of Hydraulic Shovel Kinematics for Spatial Characterization in Surface Mining Operation," International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 19, No. 4, pp. 238-250, 2005.
6. Joseph, G. F., "Development of a Haptic Backhoe Testbed," School of Mechanical Engineering, A thesis of Master of Science, Georgia Institute of Technology, 2004.
7. Oh, K. W., Kim, D., Kim. N. H., Hong, D., Kim, Y.-K. and Hong, S., "A Wearable Joystick System and Controller Design for Hydraulic Excavator," International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2009.
8. Koivo, A. J., Thoma, M., Kocaoglan, E. and Andrade-Cetto, J., "Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation," Journal of Aerospace Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 10-18, 1996.