

굴삭기 실린더 측정압력을 이용한 버킷 끝에서의 힘 반향 추정

An estimation of force from the soil-bucket tip interaction

*김기영¹, #홍대희¹, 배장호¹, 이창섭¹

*K. Y. Kim¹, # D. H. Hong(dhhong@korea.ac.kr)¹, J. H. Bae¹, Ch. S. Lee¹

¹고려대학교 기계공학과

Key words : Excavator Dynamics, Force estimation, Hydraulic Actuator friction

1. 서론

원격 조종 굴삭기에 대한 연구에서부터 인공지능 무인 굴삭기까지 다양한 굴삭기에 대한 자동화 연구가 국내외에서 이루어지고 있다. 대부분의 이런 연구들에서는 버킷 끝에서 받는 힘 데이터들이 굴삭기 제어를 위해 필요하다. 원격 조종 굴삭기의 경우, 효율적인 원격 조종을 위해서 버킷에서 받는 힘을 원격 조종자에게 전달하는 것이 필요하고, 인공지능 무인 굴삭기 경우에서도 현재 작업 환경에 따른 효율적이고 안전한 제어를 하기 위해 버킷에서 받는 힘 요소가 필요하다. 이런 이유에서 많은 연구에서 힘 센서를 굴삭기에 다양한 방법으로 설치하였다. 기존의 연구들을 보면 대부분 힘 센서를 암과 버킷 사이의 링크에, 또는 버킷 안쪽 등에 설치하였다. 하지만 다음과 같은 이유들로 인해 힘 센서를 사용하는 것은 그리 용이하지 않다. 암과 버킷 사이의 링크에 힘 센서를 설치하는 것은 특별한 장치를 설계하여 장착하여야 하고, 굴삭기 암의 길이에 변화가 생기게 되어 굴삭기 운동 특성에 변화가 생길 수 있다. 버킷 안쪽에 힘 센서를 설치하는 경우에는 버킷 안쪽의 공간을 차지하게 되고, 정확하게 버킷이 받는 모든 힘을 측정하기 어렵다. 또한 자동화된 굴삭기의 상용화를 위해서라도 초 고가의 힘 센서를 대체할 만한 다른 방법이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 실린더가 내는 힘, 실린더 마찰력, 중력, 관성/코리올리/원심력, 외부로부터 버킷이 직접 받는 힘을 고려하여 힘 센서 없이 굴삭기 버킷 끝에서 받는 힘을 추정하는 방법에 대해 설명한다. 실험은 아래의 사진처럼 실제 굴삭기 보다 축소된 형태의 굴삭기를 이용하였고, 암과 버킷 사이에 힘 센서를 설치한 후 좌표에 맞게 변환하여 힘을 측정하였다.

2. 실린더가 내는 힘

실린더가 내는 힘을 계산하기 위해서 실린더 내부의 마찰력에 대한 고려가 필요하다. 유압 실린더 내부의 마찰력은 비선형성이다. 속도가 빨라질수록 마찰력은 기하급수적으로 늘어난다. 마찰력은 실린더 길이의 속도뿐만 아니라 압력 요소에도 영향을 많이 받기 때문에 정확하게 마찰력을 알아내는 것은 쉽지 않다. 이전의 유압 실린더 내부 마찰력에 대한 연구들을 보면 viscous-coulomb 모델, Bonchis 모델[1], Hammerstein 모델을 이용한 Nonlinear system identification[2] 등 많은 연구들이 진행되었다. 먼저 기본적으로 실린더가 내는 힘은 식(1)과 같다. 마찰력에 대한 관계식은 식(2)와 (3)처럼 Bonchis 모델을 적용하였다. 굴삭기의 각 부분을 등속도로 움직이게 하여 가속도를 0으로 만들어 놓고, 식(2)와 (3)에 대한 관계식으로부터 마찰력을 구하는 식을 만들었다.

$$F_{hydr} = A_1 p_1 - A_2 p_2 \tag{1}$$

$$M\dot{x} = F_{hydr} - F_{friction} \tag{2}$$

$$F_{friction} = x_1 e^{x_2 v} + x_3 (p_1 - p_2) + x_4 p_2 + x_5 v \tag{3}$$

A_1, A_2 = 실린더 내의 유압이 힘을 전달하는 면적

p_1, p_2 = 실린더 내의 압력

x_1, x_2, \dots, x_5 = Coefficients to be determined

v = Cylinder length speed

3. 각 조인트의 토크

위에서 구한 실린더의 힘을 각 축의 토크로 변환시켜준다. Fig. 3은 붐, 암, 버킷 중 붐의 기구학적 해석을 나타내는 것이다. 실린더 길이가 변함에 따라 실린더가 내는 힘이 각 축에서 어느 정도의 토크로 변환되는 지에 대한 관계식은 아래의 식(4)~(8)과 같다.

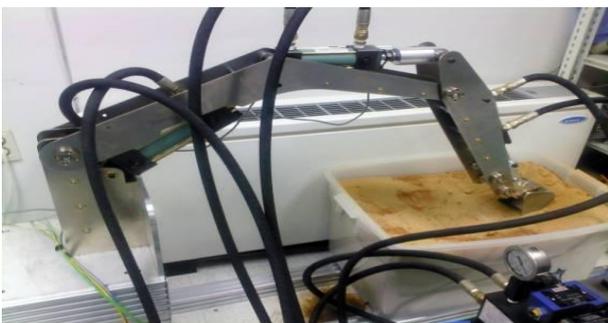


Fig. 1 Excavator used in the experiment



Fig. 2 Force sensor installed between bucket and arm

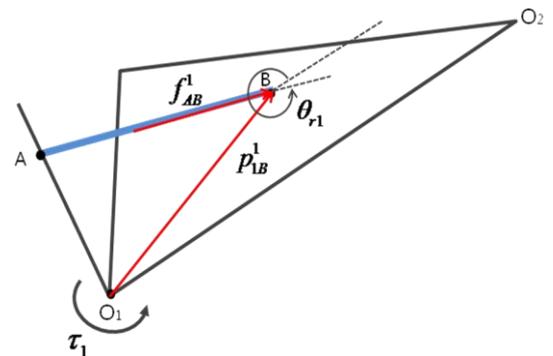


Fig.3 kinematics of Boom by change of cylinder length

$$\theta_{BA} = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + r_{1B}^2 - r_{1A}^2}{2l_1 r_{1B}} \right) \tag{4}$$

$$\theta_{r1} = 2\pi + (\theta_{B12} - \theta_{1BA}) \quad (5)$$

$$p_{1B}^1 = r_{1B} [\cos(\theta_{B12}) \quad \sin(\theta_{B12}) \quad 0]^T \quad (6)$$

$$f_{AB}^1 = |f(1)| [\cos(\theta_{r1}) \quad \sin(\theta_{r1}) \quad 0]^T \quad (7)$$

$$\tau_1 = (p_{1B}^1 \times f_{AB}^1) \cdot z_1 \quad (8)$$

l_1 = 뿔 실린더 길이, $r_{1B} = O_1$ 과 B 사이 길이,
 p_{1B}^1 = 무게중심 B와 O_1 사이의 위치벡터,
 f_{AB}^1 = 실린더가 내는 힘 벡터.

4. 굴삭기 LaGrangian Dynamic Model

이처럼 실린더에 따라 구해진 토크를 아래에 기술된 Lagrangian Dynamic 모델에 대입하면 버켓 끝에서 받는 힘을 추정할 수 있게 된다. 이 Lagrangian Dynamic 모델은 식(9)같이 운동에너지와 위치에너지를 차로 구할 수 있다. 식(10)과 (11)은 운동에너지와 위치에너지에 관한 식이다.[3][4]

$$L = K - U \quad (9)$$

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{ci}^T m_i v_{ci} + \omega_i^T I_i \omega_i \quad (10)$$

$$U = - \sum_{i=1}^n m_i g^T p_{o,ci} \quad (11)$$

v_{ci} = translational velocity vector
 ω_i = rotational velocity vector
 m = mass matrix
 I_i = inertia matrix
 g = gravitational vector
 $p_{o,ci}$ = position vector of the center of masses

위의 식(9), (10), (11)를 정리하고 미분하면, 결국 식(12)과 같이 토크에 관한 식으로 정리되게 된다.

$$\sum_{j=1}^n m_{ij} \ddot{\theta}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial \theta_i} \right) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \quad (12)$$

$$- \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{vj}^i = \tau_i$$

$$M(\theta)(\ddot{\theta}) + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (13)$$

식(12)은 MATLAB의 SYMBOL TOOLBOX를 이용하여 뿔, 압, 버켓에 대해서 풀었고 (n=3), Inertia는 Solidworks를 이용하여 식(12)에 대입하였다. 식(12)을 식(13)처럼 표현할 수 있는데, 의미하는 내용에 따라 다음과 같다. M은 관성에 관한 것이고 V는 원심력과 코리올리, G는 중력에 관한 것이다. 버켓에서 받는 힘과 실린더 마찰력을 고려하면 식(13)으로부터 식(14)를 만들 수 있다.

$$M(\theta)(\ddot{\theta}) + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = J^T (F_{hydr} - F_{friction} - F_{bucket_tip}) \quad (14)$$

보통 이런 유압 굴삭 시스템이 높은 속도와 가속도를

필요로 하지는 않고, 속도와 가속도가 작은 경우에는 관성, 원심력, 코리올리 효과 등이 작다. 또한 흙에 의해 버켓에 주어지는 힘은 단순히 중력과 정적인 실린더 압력에 많은 영향을 받기 때문에 [4] 식(14)에서 $G(\theta)$ 를 제외하고 나머지 항들은 무시한다. 이것은 식(15)과 같다.

$$F_{bucket_tip} = J^{-T} [G(\theta) - \tau] \quad (15)$$

$\tau = net\ torque$

5. 실험 결과 및 결론

기본적인 굴삭 경로를 이용하여 굴삭 작업을 하여 나온 데이터를 이용하여 Fig 4 그래프를 얻었다. 추정된 힘이 어느 정도 실제 버켓에서 받는 힘을 따라가기는 하나 만족할 만한 데이터는 아니다. 현재 굴삭 시스템의 버켓이 작아 실제 굴삭기처럼 다양한 힘 영역대를 실험하지는 못하였다. 좀 더 정확한 힘 추정을 위하여 시중의 굴삭기를 이용하여 실험할 예정이다. 또한 굴삭기의 운동 특성(동역학, 마찰력 등)에 대해 System identification을 이용하여 좀 더 정확한 힘 추정을 하기 위한 실험을 수행 중이다.

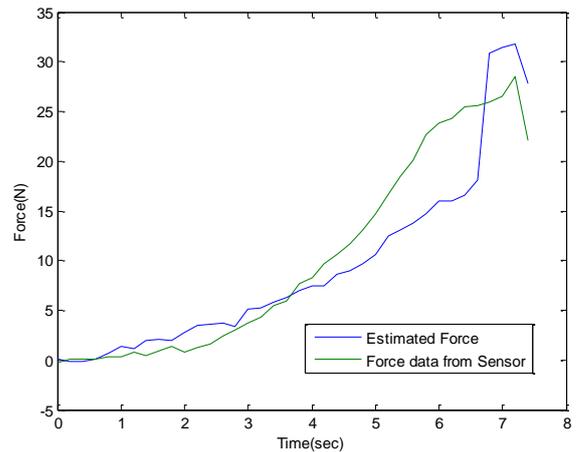


Fig. 4 Force data from force sensor and estimated force data

후기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업의 연구비지원 (06 첨단융합 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Adrian Bonchis, Peter I. Corke, "A Pressure-Based, Velocity Independent, Friction Model for Asymmetric Hydraulic Cylinders", IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, 1999
2. Byung J Kwak, Andrew E. Yagle, "Nonlinear System Identification of Hydraulic Actuator Friction Dynamics Using A Hammerstein Model", IEEE International Conference on the Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999
3. Amir Ali Akbar Khayyat, "Force Tracking of Hydraulic Manipulators Within an Impedance Control Framework," University of Manitoba, Canada, 2000.
4. Joseph George Frankel, "Development of a Haptic Backhoe Testbed", Georgia Institute of Technology, 2004