

에너지 함수 최적화를 통한 무인 굴삭 계획

A Path Planning for Autonomous Excavation Based on Energy Function Minimization

박형주¹, 배장호¹, 홍대희^{2,✉}
Hyongju Park¹, Janghobae¹ and Daehie Hong^{2,✉}

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

² 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

✉ Corresponding author: dhhong@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3369

Manuscript received: 2009.5.25 / Revised: 2009.9.29 / Accepted: 2009.11.4

There have been many studies regarding development of autonomous excavation system which is helpful in construction sites where repetitive jobs are necessary. Unfortunately, bucket trajectory planning was excluded from the previous studies. Since, the best use of excavator is to dig efficiently; purpose of this research was set to determine an optimized bucket trajectory in order to get best digging performance. Among infinite ways of digging any given path, criterion for either optimal or efficient bucket moves is required to be established. One method is to adopt work know-how from experienced excavator operator; However the work pattern varies from every worker to worker and it is hard to be analyzed. Thus, other than the work pattern taken from experienced operator, we developed an efficiency model to solve this problem. This paper presents a method to derive a bucket trajectory from optimization theory with empirical CLUB soil model. Path is greatly influenced by physical constraints such as geometry, excavator dimension and excavator workspace. By minimizing a energy function under these constraints, an optimal bucket trajectory could be obtained.

Key Words: Intelligent Excavator (지능형 굴삭기), Path Planning (경로 계획), Autonomous Excavation (굴삭자동화), Energy Function Minimization (에너지 함수 최적화)

1. 서론

그동안 국내·외 대학과 기업을 중심으로 자동화 굴삭작업을 위한 연구가 다수 진행되었다. 자동화 굴삭기 혹은 지능형 굴삭기는 주로 반복작업량이 많고 위험한 공사장이나 채석장과 같은 작업 공간에서 유용하게 사용될 수 있다. 인간의 노동력을 지능형 굴삭기로 대체 함으로서 작업효율증대, 노동력절감효과를 기대할 수 있고 더 나아가 작업장에서의 안전사고를 예방할 수 있다.

지능형 굴삭작업에서 가장 중요한 요소는 굴삭 작업계획이라고 볼 수 있다. 굴삭작업계획은 크게

전체적인 작업구획설정과 로컬작업영역 내에서의 작업계획으로 나눌 수 있다. 작업계획을 어떻게 세우는가에 따라 지능형 굴삭의 작업결과는 크게 달라지므로 효율적인 굴삭작업 결과를 기대하기 위해서는 작업계획 단계에서 결과 판단의 기준이 마련되어야 한다. 효율성의 측면에서 보면 같은 작업을 할 때 요구되는 작업시간, 그리고 같은 작업을 하는데 있어서 소모되는 에너지가 기준이 될 수 있다. 굴삭 작업 시 필요한 에너지는 굴삭기의 엔진 rpm 과 관계가 있고 더 구체적으로 굴삭기에 들어가는 연료의 소비와 관계가 있다. 역학적으로는 각 관절에서의 토크의 변화 추이에 대응한다고

볼 수 있다. 과거에 CMU(Carnegie Melon University)에서는 토질의 저항력을 가지고 토질파라미터를 예측하는 연구를 수행하였다.¹ 이 연구에서는 3 축 유압 머니플레이터를 이용하여 다양한 토질 형상에 따른 저항력을 측정, 기록하였다. 이 실험데이터를 Coulomb 토질 모델에 기초한 FEE(Fundamental Earth Moving Equation)에 대입하고 다양한 learning method 를 이용하여 토질파라미터를 예측하는데 연구의 초점을 두었다. 이 연구에서 주목할 점은 로컬작업경로를 penetrate, dragging, 그리고 curling 세가지 단계로 나누었다는 점이다. CMU 에서 수행한 연구내용 중 경로 생성에 관한 부분이 있지만, 본 연구와 달리 미리 토크의 한계치를 결정하고 그 한계범위를 벗어나지 않도록 하면서, 버킷의 부피 구속조건과 굴삭 후 토사의 모양에 중점을 두고 경로를 생성하였다는 점에서 큰 차이점이 있다. GA Tech.(Georgia Institute of Technology)에서는 햅틱장비를 이용하여 backhoe 를 원격제어하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 굴삭기의 기구학, 동역학과 햅틱장비와의 맵핑, 유압제어, HIL 시스템 구축에 대해 다루고 있다.² University of British Columbia 에서는 유압 임피던스 제어를 통한 굴삭기의 위치제어, 힘제어성능에 대한 연구를 수행하였다.³ MIT 에서는 유압머니플레이터를 이용하여 다양한 토질 모델에서의 파라미터를 예측하는 연구를 수행하였다.⁴ 일본의 한 논문에서는 굴삭기 숙련자의 작업형태를 카메라로 캡처하여 분석하는 연구를 수행하였다.⁵ 이 연구는 토질에 따른 실제 숙련자의 다양한 굴삭작업 방식을 데이터베이스화하기 위한 목적으로 수행되었다.

과거의 연구에서 실제 로컬작업경로를 생성하는 문제에 대해서는 CMU 에서의 연구를 제외하고는 모두숙련자의 경험 데이터에 바탕을 두고 있다. 로컬작업경로 생성의 가장 큰 틀은 CMU 에서 분류한 세 가지 작업단계에 숙련자의 모델을 추가한 형태가 되어야 한다. 숙련자의 작업경로에 대하여 수학적인 모델을 구상하기 쉽지 않은 반면 CMU 에서의 굴삭작업경로에 대해서는 분석적으로 접근하는 것이 가능하기 때문이다. 본 연구에서는 작업경로를 결정하는 요인을 크게 두 가지를 나누어 생각하였다. 첫째는 굴삭기의 workspace(작업공간), 작업을 시작할 때의버킷 끝점(end-effector)의 위치와 버킷 틀의 방향이다. 둘째는 토질 특성이다. 토질특성은 토질의 종류에 따라, 그리고 기후와 같은 자연환경조건에 따라 변할 수 있다. 본 연구에

서는 토질을 균일하고 마른 이상적인 것으로 가정하고, 토질알갱이 사이의 응집력을 제외한 토질의 밀도, 토질과 토질사이의 마찰력, 토질과 버킷간의 마찰력을 가장 중요한 토질 특성이자 작업경로 결정의 요인으로 간주하였다. 과거의 연구에서도 토질 파라미터를 예측하는데 있어서 위의 파라미터를 중요한 토질특성으로 보고 있다.^{1,4,7} 본 연구에서는 로컬작업영역에서의 작업계획을 세우는데 있어서 작업경로를 상황에 따라 어떻게 결정하는 것이 에너지적인 측면에서 효율적인가에 대한 물음의 해답을 찾아내는데 목적을 두고 있다. 즉 위에서 언급한 굴삭기의 물리적 변수와 토질변수에 따라 에너지적 관점에서 최적의 작업 경로를 찾는 것이다. 본 논문은 에너지 함수를 세우는 데 있어서 필요한 내용을 다루고 있다. 본문에서는 유압 머니플레이터의 구성과 기구학 및 정역학의 분석, 토질 이론과 최적화 이론의 적용방법, 시뮬레이션 결과 및 분석에 대한 내용을 다루고 있다.

2. 유압머니플레이터

2.1 시스템 구성

본 연구에서는 실험실에서 사용할 수 있도록 실제 굴삭기를 약 1/10 의 크기로 축소한 크기의 유압머니플레이터를 이용하여 연구를 수행하였다 (Fig. 1 참조). 이 머니플레이터는 스윙은 고려하지 않으며, 붐, 버킷의 3 자유도를 가지고 있다. 구동기는 유압을 동력으로 하는 세 개의 실린더로 구성되어 있다. Fig. 2 에는 전자식유압밸브, 매니플레이터, PC 간의 신호 흐름을 나타내었다. 실린더의 각 축에는 세 개의 전위차계(potentiometer)가 달려 있고 버킷 앞쪽에 6축 F/T 센서가 장착되어있다.

PC 에는 Visual C++로 구성한 위치기반 임피던스 컨트롤러가 구축되어 있고 데이터수집보드를

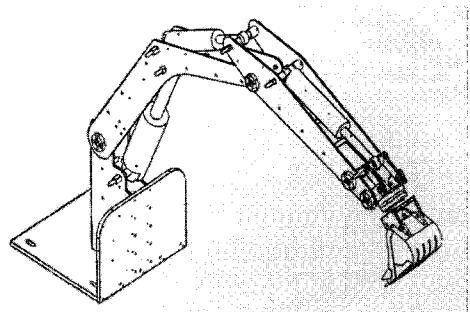


Fig. 1 The designed hydraulic manipulator

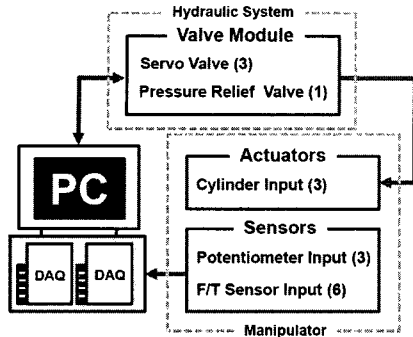


Fig. 2 Overview of input-output signal flow

통해 입·출력신호가 굴삭기로 이동한다. F/T 센서로는 ATI 사의 Mini45 가 장착되어 3 축의 힘과 3 축의 모멘트를 측정할 수 있다. 각 압, 붐, 버킷에 해당되는 3 개의 실린더가 사용되었으며 버킷과 압에는 각각 3.5MPa 의 압력을 견딜 수 있는 실린더를, 붐에는 7.0MPa 의 스펙을 가지는 실린더를 부착하였다. 그리고 1 개의 펌프를 동력원으로 하여 1 개의 수동식 압력보상밸브, 1 개의 전자식 압력보상밸브, 3 개의 전자식 유량 조절 밸브가 사용되었다. 전자식 밸브에는 모두 높은 신뢰도를 가진 위치컨트롤러가 내장되어 밸브 안에 있는 스톱의 위치를 매우 정확히 제어할 수 있도록 되어있다. 유압머니플레이터의 전체 블록다이어그램은 Fig. 3 과 같다. 경로생성기를 통해 생성된 경로는 기준 축에 대한 좌표이므로 역기구학 블록을 통하여 각 실린더의 길이로 변환된다. 이 실린더 길이와 실제 전위차계에서 측정된 실린더길이와의 오차는 위치제어기를 거쳐 각 실린더를 구동하는 유량제어밸브의 제어신호형태로 보내게 된다. 각각의 유량제어밸브에서의 스톱은 내재된 위치제어기에 의해 0.01% 위치오차범위 내에서 작동되도록 보장되어있다. 복동실린더의 입/출구에는 전자식 압력계가 부착되어있다. 각각의 압력계를 통해 수집된 압력신호정보는 굴삭기의 동역학블럭을 지나

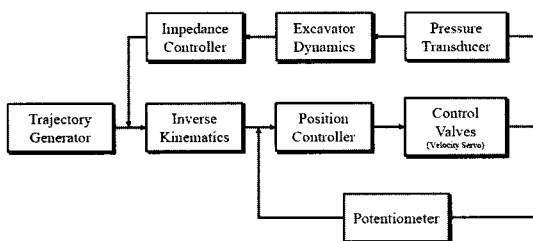


Fig. 3 Block diagram of hydraulic manipulator

임피던스 컨트롤러로 보내어 진다. 이 임피던스 컨트롤러에서 계산된 외부환경에 의한 보정 값은 경로생성기에서 생성된 경로명령에 더해지게 된다.

2.2 동역학 및 정역학

로보틱스에서 동역학 모델을 세우는 데에는 두 가지의 접근방법이 있다. Newton-Euler formulation 과 Lagrange formulation 이다. 1993 년에 P. K. Vähä 와 M. J. Skibniewski 는 Newton-Euler formulation 을 이용하여 굴삭기의 동역학 모델을 정리하였다.⁶ 본 연구에서는 Lagrange 에너지 방법을 이용하여 동역학식을 도출하였다.

$$\tau_i = \sum_{j=1}^4 D_{ij} \ddot{\theta}_j + I_{cyl} \ddot{\theta}_i + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 D_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + D_i + (J^T F)_i \quad (1)$$

여기서, i 와 j 는 링크의 번호로서 1 에서 3 까지로 번호가 매겨지고, D_{ij} 는 관성요소, D_{ijk} 는 코리올리 및 원심요소, D_i 는 중력요소, I_{cyl} 각 실린더의 관성요소를 나타내는 3x3 의 행렬이다. $(J^T F)_i$ 는 센서가 장착된 축을 기준으로 본 힘-모멘트를 머니플레이터 자코비안을 이용하여 각 관절의 토크로 변환한 것이다. 각 요소들을 유도하는데 있어서 각 축의 유사 관성 행렬(pseudo inertia matrix)인 J_p 이 사용되었고 다음과 같이 표현된다.

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{-I_{x_p} + I_{y_p} + I_{z_p}}{2} & I_{x_p} & I_{z_p} & m_p \bar{x}_p \\ I_{y_p} & \frac{I_{x_p} - I_{y_p} + I_{z_p}}{2} & I_{y_p} & m_p \bar{y}_p \\ I_{z_p} & I_{z_p} & \frac{I_{x_p} + I_{y_p} - I_{z_p}}{2} & m_p \bar{z}_p \\ m_p \bar{x}_p & m_p \bar{y}_p & m_p \bar{z}_p & m_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

그에 따른 동역학 요소들은 다음과 같이 주어진다.

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^4 \text{Trace} \left(\frac{\partial T_p}{\partial \theta_j} J_p \frac{\partial T_p^T}{\partial \theta_i} \right)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^4 \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial \theta_j \partial \theta_k} J_p \frac{\partial T_p^T}{\partial \theta_i} \right) \quad (3)$$

$$D_i = \sum_{p=1}^4 -m_p g^T \frac{\partial T_p}{\partial \theta_i}$$

버킷 끝점이 토양 밖에 위치하고 있을 때는 관성, 코리올리 및 원심 효과가 움직임에 큰 영향을 미치므로 가속도와 속도요소가 중요하다. 반면에 버

켓이 토양 속에 있을 때는 가속도 속도요소가 큰 영향을 미치지 않는다. 그러므로 각각의 조인트에 걸리는 토크는 각 링크에 걸리는 중력 힘과 버켓 끝에 걸리는 힘에 의해 대부분 결정된다고 볼 수 있다. 실제로 CMU 의 연구에도 정역학적인 접근방법이 이용되었다. 이 때 굴삭기의 토크는 다음과 같다.

$$\tau_i = \tau_g + \tau_e \tag{4}$$

여기서 τ_i 는 각 축에 걸리는 전체토크를, τ_g 중력에 의해 생기는 토크, 그리고 τ_e 는 버켓 끝에 걸리는 저항력에 의한 토크를 의미한다. 이 요소들은 모두 3x1 벡터로 구성되고 머니플레이터의 자유도와 그 행의 수가 일치한다. 무게중심(Center of Gravity)의 위치 $G_{i,j}$ 는 2x1 행렬로 구성되고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{ij} = \frac{1}{M_j} \int \rho_j(\mathbf{r}_{ij}) \mathbf{r}_{ij} dV \tag{5}$$

여기서 M_j 는 j 번째 링크의 질량을, \mathbf{r}_{ij} 는 i 축을 기준으로 한 j 번째 링크의 미소질량을, 위치벡터 $\rho_j(\mathbf{r}_{ij})$ (2x1) 는 i 번째 조인트 축을 기준으로 분산되어있는 j 번째 링크의 밀도함수, $G_{i,j}$ 는 i 번째 조인트 축으로부터 j 번째 링크의 무게중심까지의 거리를 나타낸다. $G_{i,j}$ 의 위치는 각도좌표계로 변환할 수 있다. 중력에 의한 토크는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\tau_g = \begin{bmatrix} \tau_{g1} \\ \tau_{g2} \\ \tau_{g3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 G_{11} \cos \Theta_{11} + m_2 G_{12} \cos \Theta_{12} + m_3 G_{13} \cos \Theta_{13} \\ m_2 G_{22} \cos \Theta_{22} + m_3 G_{23} \cos \Theta_{23} \\ m_3 G_{33} \cos \Theta_{33} \end{bmatrix} g \tag{6}$$

여기서, m_j 는 i 번째 링크의 질량, Θ_{ij} 는 i 번째 조인트 축의 x 좌표와 j 번째 링크가 이루는 각도, g 는 중력 가속도를 의미한다. (6)의 식을 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_{g_i} = \sum_{j=1}^3 m_j G_{ij} \cos \Theta_{ij} g \tag{7}$$

센서 축을 기준으로 F/T 센서로부터 측정된 힘-모멘트행렬은 두 축 사이의 힘-모멘트 변환 행렬을 통하여 기준 축에서의 힘-모멘트 행렬로 다음과 같이 변환할 수 있다.

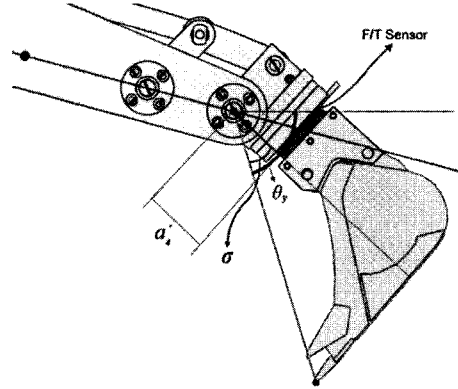


Fig. 4 Transformation of measured force at end-effector frame to force and moments at sensor frame

$${}^o F_o = {}^o T_f {}^s F_s \tag{8}$$

힘-모멘트 변환 행렬 ${}^o T_f$ 는 센서 축에서 기준까지의 회전 변환 행렬과 기준축에서의 센서 축까지의 좌표이동행렬에 외적 연산자가 곱해진 꼴로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} {}^o F_o \\ {}^o N_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^o R & 0 \\ {}^o P_{SORG} \times {}^o R & {}^o R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^s F_s \\ {}^s N_s \end{bmatrix} \tag{9}$$

좌표이동행렬에 외적 연산자가 곱해지면 skew-schematic 행렬로써 다음과 같이 확장할 수 있다.

$${}^o P_{SORG} \times = \begin{bmatrix} p_{s,x} \\ p_{s,y} \\ p_{s,z} \end{bmatrix} \times = \begin{bmatrix} 0 & -p_{s,z} & p_{s,y} \\ p_{s,z} & 0 & -p_{s,x} \\ -p_{s,y} & p_{s,x} & 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

반면에 회전변환행렬은 기준좌표계에서 본 센서의 부착 각도, θ_y 와 연관되어 있다.

$${}^o R = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_y) & 0 & -\sin(-\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\theta_y) & 0 & \cos(-\theta_y) \end{bmatrix} \tag{11}$$

기준 축에서 본 버켓각도와 센서의 각도 사이에는 각도 오프셋이 존재하는데 이것을 σ 로 놓으면 버켓각도 θ_y 와는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\theta_y' = \theta_y + \sigma \tag{12}$$

힘과 모멘트는 3 개의 요소를 가진 3x1 의 행렬로 구성되며 각각의 요소는 x, y, z 축에 대응한다.

$${}^sF_s = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad {}^sN_s = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

기준좌표계에서의 x, y, z 방향의 힘을 각각 $f_{res,x}, f_{res,y}, f_{res,z}$ 라고 하면 센서에서 측정된 힘을 삼각함수관계를 이용하여 도출해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{res,x} &= f_x \sin|\theta_y| + f_z \cos|\theta_y| \\ f_{res,y} &= 0 \\ f_{res,z} &= f_x \cos|\theta_y| + f_z \sin|\theta_y| \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)를 센서좌표계의 힘으로 변환하면 역으로 버킷 끝단에 걸리는 힘을 이용하여 각 관절의 토크를 구할 수 있다.

3. 에너지함수 최적화

3.1 에너지 함수

효율성을 판단하는 지표로써 Cost function 또는 Energy function 을 구성하여 해당 함수를 최소화 하는 변수를 찾는 것은 함수 최적화에서 널리 이용되는 방법이다. 본 연구에서는 에너지 함수를 구성하여 기본굴삭작업을 하는 데 있어서 에너지가 최소가 되는 버킷 값을 찾는 것을 목표로 하였다. 에너지 함수는 다음과 같다.

$$E_{cycle} = \sum_{i=1}^3 \int_{t=0}^{t_f} \tau_i d\theta_i \quad (15)$$

여기서 E_{cycle} 은 1 사이클의 작업을 마치는데 필요한 전체 에너지를 의미한다. 시간적인 효율성과 에너지 효율성을 동시에 달성할 수는 없기 때문에 본 연구에서는 1 사이클의 작업을 수행하는데 걸리는 시간은 고려하지 않기로 한다. t_f 은 1 사이클의 작업을 마치는 데까지 걸리는 시간을 τ_i 는 i 번째 링크에 가해지는 토크, $d\theta_i$ 는 i 번째 조인트의 미소 회전각을 의미한다. 에너지 함수를 구성하는 변수로는 크게 버킷 끝점의 위치와 버킷 각도 그리고 토질속성에 관련된 변수가 있으며 다음

과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{cycle} = f(\theta_y, \mathbf{p}_s, V_B, \phi, \gamma, \delta, \theta, \dots) \quad (16)$$

여기서 θ_y 는 기준 축에서 본 버킷의 각도로 토질 모델에서의 톨의 각도와 밀접한 관련을 갖는다. \mathbf{p}_s 는 벡터행렬로 기준 축에서 본 작업 시작점의 위치벡터이다. V_B 는 상수로 버킷에 담을 수 있는 흙의 부피를 의미한다. 이 부피는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$V_B = d_i D w \quad (17)$$

그러므로 일정부피 V_B 의 토사를 제거하는 데 있어서 굴삭깊이 d_i 가 길어질수록 굴삭깊이 D 는 알아지게 되고 굴삭깊이가 짧아지면 굴삭 깊이는 상대적으로 깊어지게 된다. ϕ 는 토양-토양간의 마찰각, γ 는 비중량을 의미한다. δ 는 토질-버킷간의 마찰각을, θ 는 붕괴각을 의미한다. 주어진 굴삭기의 작업영역 안에서 버킷각도, θ_y 와 굴삭 작업 시작위치벡터 \mathbf{p}_s , 그리고 버킷의 부피와 관련된 부분은 물리적인 구속조건이고 나머지 변수들은 토질 특성과 관련된 변수라고 볼 수 있다.

3.2 CLUB 토질 모델

본 연구에서는 토질모델로써 Fig. 5 의 Chen and Liu Upper Bound (CLUB) 토질모델을 적용하였다.⁷ CLUB 토질 모델은 버킷이 수평방향으로 이동할 때 토질의 붕괴면이 발생하는 순간에 정역학적으로 힘의 평형관계를 분석하는 방법을 사용하였다. Mohr-Coulomb 토질모델과 매우 유사하지만 토질의 붕괴구간을 다구간으로 설정하여 실제 토질과 좀더 가깝게 모델링했다는 점에서 차이가 있다.

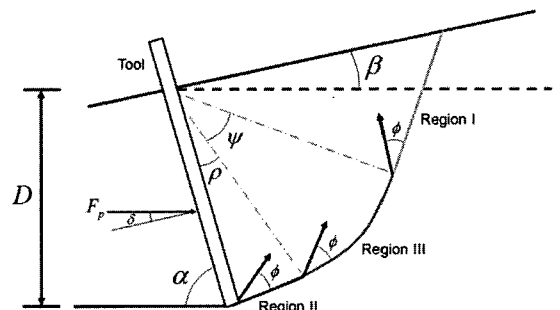


Fig. 5 CLUB soil model

Mohr-Coulumb 모델에 비해 연산시간은 더 오래 걸리지만 MIT 에서의 연구결과를 보면 알 수 있듯이 토질 파라미터를 실제값과 더 근접하게 예측할 수 있다.⁴ 붕괴 구간 II, III 의 각도인 ρ, ψ 는 토질에 따라 다소 차이가 있으므로 특정 값으로 가정하였다. 툴의 각도 α 는 머니플레이터의 버킷 각도 θ_y 와 차이가 있다.

$$\alpha = \theta_y + \nu \quad (18)$$

식 (18)에서의 ν 값은 버킷의 모양에 따라 차이가 있다. 본 연구에서는 두산의 중형급 굴삭기 DX-220LC 를 모델로 하고 있으며, 여기서 ν 는 120° 의 값을 갖는다. 툴에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F = F_p - F_A = \frac{1}{2} \gamma D^2 (K_p - K_A) \quad (19)$$

여기서 F_p, F_A 는 각각 작업방향에 대해 반력으로 작용하는 액티브힘, 버킷의 후면에서 작용하는 패시브힘(drag force)을 의미한다. K_p, K_A 는 각각의 힘을 도출해 내는데 필요한 계수에 해당한다. 토질의 알갱이 간의 응집력에 의한 강도, 그리고 토질 알갱이의 불균일성은 CLUB 토질 모델 변수에 해당하지 않으므로 고려하지 않았다. 따라서 토질은 균일하고 마른, 매우 고운 모래라고 가정하였다.

3.3 버킷 끝점의 위치에 따른 시뮬레이션

식 (16)에서 알 수 있듯이 에너지 함수는 다변수 함수이기 때문에 모든 변수를 기준으로 최적값을 얻는 것은 불가능하다. 실제 유체가 줄 수 있는 값은 버킷의 각도 θ_y 와 버킷의 시작위치 \mathbf{p}_i 로 한정된다. 따라서 초기 버킷각도와 시작점에서의 버킷 끝 점의 위치를 기준으로 최소함수 값을 찾는 시뮬레이션을 구상하였다. CLUB 토질모델에서의 툴의 각도는 일정한 범위를 가진다. 따라서 툴의 각도 α 를 다음과 같이 한정하였다.

$$0 < \alpha_i < \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

$$\alpha_f = \frac{4}{5} \pi$$

여기서 α_i 는 시작점에서의 툴의 각도를, α_f 는 완료점에서의 툴의 각도를 의미한다. 완료시점에서는 버킷은 흙을 담을 수 있어야 하므로 적절한 상수 값을 주었다. Fig. 6 에서는 $x-z$ 좌표축의 설정

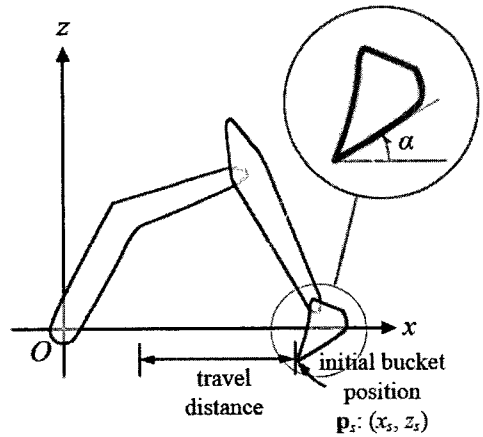
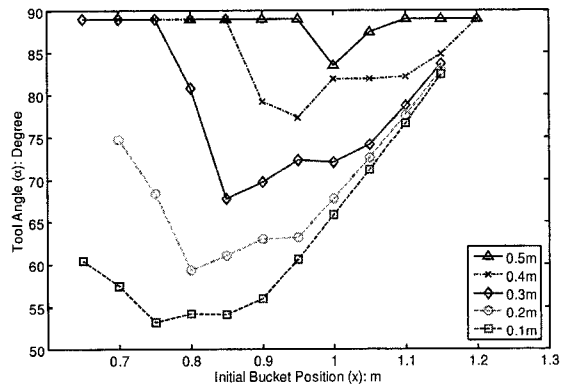
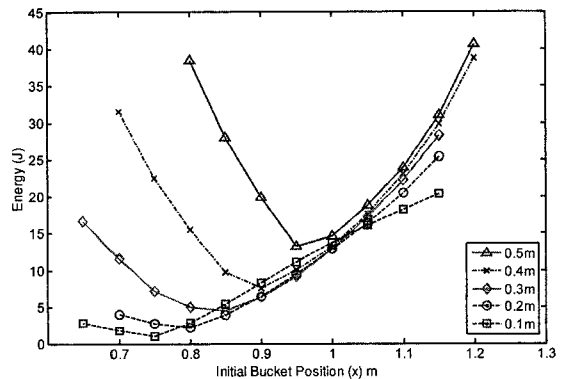


Fig. 6 Description of axes ,tool position and angle

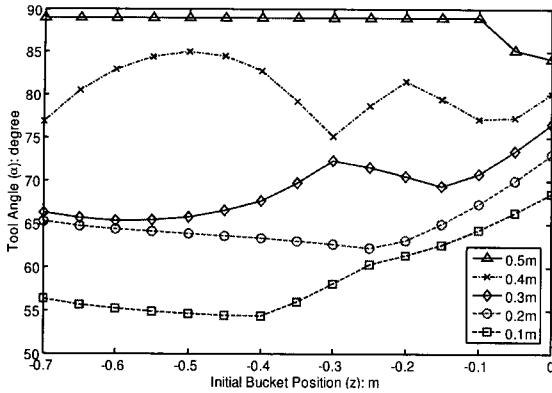


(a) Tool angle vs initial tool position (x)

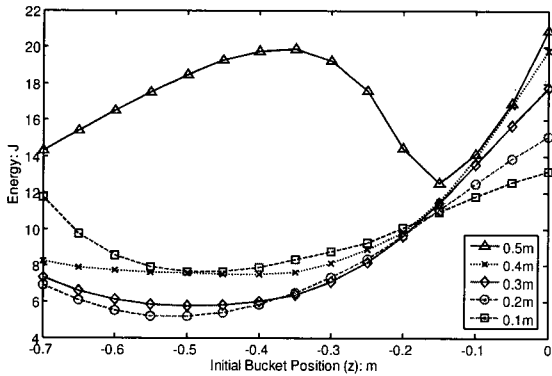


(b) Energy vs initial tool position (x)

Fig. 7 Optimized tool angle and optimized energy value



(a) Tool angle vs initial tool position (z)



(b) Energy vs initial tool position (z)

Fig. 8 Optimized tool angle and optimized energy value

과 툴의 각도 및 위치에 대하여 나타내고 있다. Fig. 7에서는 툴의 각도를 변화시키면서 툴의 시작점의 x 방향 위치에 따른 최적 버켓 각도와 에너지 소비량을 살펴보았다. 굴삭길이에 따른 결과를 살펴보기 위해 1 개의 그림에 5 개의 그래프를 동시에 표시하였다. Fig. 7-(a)는 최적 초기 툴의 각도를, Fig. 7-(b)에서는 그때의 최적 함수 값, 즉 에너지를 표시하고 있다. Fig. 7을 살펴보면 알 수 있듯이 굴삭 길이가 길어질수록 굴삭 깊이는 알아지게 된다. 최적 툴의 각도 값은 굴삭길이가 길수록 수직방향과 가깝다. 최적 툴 각도는 일정 위치를 기준으로 초기 버켓 끝점의 수평위치가 굴삭기 본체에서 멀어짐에 따라 커지고 가까워 질 때도 커지는 양상을 보였다. 전체적으로 볼 때 최적 에너지 값은 굴삭길이가 길면 길수록 더 높게 나타났다. 초기 버켓 끝점의 위치가 $0.7m$ 정도일 때는 진행거리를 $0.3m$ 이상으로 설정할 경우 최적 툴 각도를 적용해도 큰 에너지가 걸리기 때문에 $0.3m$ 이하로 정해야 한다. 반면에 초기 버켓 끝점의 위치가 $1.1m$

이상 떨어져 있을 경우에는 버켓 각도를 수정하더라도 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 툴의 각도를 변화시킬 때 툴의 시작점의 z 방향 위치에 따른 최적 버켓 각도와 에너지 소비량을 살펴보았다. Fig. 8-(a)는 최적 초기 툴의 각도를, Fig. 8-(b)에서는 그때의 최적 함수 값을 표시하고 있다. Fig. 8-(b)를 보면 전체적으로 굴삭 시작점의 수직방향 깊이가 $-0.5m$ 일 때 최적 에너지값이 최소값을 가지고 그 위, 아래 구간에서는 에너지가 각각 증가하는 양상을 보이고 있다. 그리고 굴삭길이가 길면 길수록 깊은 영역에서는 에너지 소모량이 적고 얕은 영역에서는 에너지 소모량이 상대적으로 크다. 굴삭길이 $0.1m-0.4m$ 구간에서는 에너지의 변화 추이가 비슷하다. 그러나 굴삭길이가 $0.4m$ 보다 길어질 때는 에너지가 소모량이 크게 늘어난다. Fig. 8-(a)에서 볼 수 있듯이 이 현상은 초기 툴각도의 최적 값이 경계 값인 90° 에 수렴함에 따른 결과라고 볼 수 있다.

3.4 토질의 대표속성 따른 시뮬레이션

시뮬레이션 결과 에너지 소모량이 최소가 되는 버켓 각도는 중요 토질파라미터의 변화와 무관한 것으로 밝혀졌다. 시뮬레이션에 이용된 토질관련 변수는 토질의 밀도, 토양-버켓 간 마찰각, 토양-토양 간 마찰각이다. 토질의 밀도에 대한 영향을 확인하기 위하여 토질의 비중량 (Specific Weight) 을 $1000-1600 (N/m^3)$ 으로 변화시켰다. 시뮬레이션 결과 최적 버켓 각도 값은 모든 경우에 동일하였다. 반면에 그때의 에너지 값은 밀도에 따라 증가하는 양상을 보였다. 토질-버켓 간 마찰각과 토질-토질 간 마찰각 각각 $0^\circ-60^\circ$ 까지 변화시키면서 시뮬레이션 결과를 살펴보았다. 시뮬레이션 결과 비중량과 마찬가지로 최적 버켓각도 값은 각도의 크기와 관계없이 일정하였다. 에너지량 역시 각도가 커짐에 따라 증가하였다. 에너지량의 증가는 밀도, 마찰력이 커짐에 따라 모두 증가하였으나, 툴의 각도는 일정하였으므로, 경로생성의 방향을 결정짓는데 필요한 정보가 아님을 알 수 있다.

4. 결론

시뮬레이션을 통하여 시작점에서의 버켓 끝점의 위치와 파고자 하는 굴삭 길이가 정해지면 매순간의 최적 버켓 각을 결정할 수 있음을 보였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 버켓 값은 시뮬레이션상

에서 대표 속성만을 고려한 토질 모델과 무관하게 적용할 수 있다. 그러나 실제의 토질에서는 본 연구에서는 고려하지 않았던 함수량에 따른 토질 알갱이 간 응집력, 토질 알갱이의 크기, 그리고 토질의 불균일성과 같은 다양한 변수도 존재하므로 이에 대해서도 고려해야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구는 토질 변수를 예측하는데 주력 하였던 기존의 연구와는 달리 버켓 끝점의 시작위치와 굴삭길이에 따른 최적의 버켓 각도를 찾는 것에 초점을 맞추었다. 스윙을 제외한 평면 상의 굴삭기 운동은 3 자유도이므로 경로명령을 내릴 때는 반드시 버켓 끝점의 위치와 버켓각도를 지정해 주어야 한다. 무수히 많은 버켓각 구성방법 중 한 가지를 택하는 데 있어서 본 연구결과를 데이터베이스화 하면 작업계획 수립 시에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

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

참고문헌

1. Singh, S., "Synthesizing Plans for Tactical Robotic Excavation," Ph.D. Thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1995.
2. Joseph, F., "Development of a Haptic Backhoe Testbed," M.S. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004.
3. Ha, Q. P., Nguyen, Q. H., Rye, D. C., Durrant-Whyte, H. F., "Impedance Control of a Hydraulically Actuated Robotic Excavator," Automation in Construction, Vol. 9, No. 5-6, pp. 421-435, 2000.
4. Hong, W. J., "Modeling, Estimation, and Control of Robot-Soil Interactions," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 2001.
5. Sakaida, Y., Chugo, D., Kawabata, K., Kaetsu, H. and Asama, H., "The Analysis of Skillful Hydraulic Excavator Operation," Nippon Kikai Gakkai Robotikusu, Mekatoronikusu Koenkai Koen Ronbunshu (CD-ROM), pp. 2A1-B01, 2006.
6. Vähä, P. K. and Skibniewski, M. J., "Dynamic Model of Excavator," Journal of Aerospace Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 148-158, 1993.
7. Chen, W. F. and Liu, X. L., "Limit Analysis in Soil Mechanics," Elsevier Science, 1990.