

# 굴삭기 버킷과 토양간 힘의 상관관계 모델링 Modeling of soil-bucket force interaction for excavator

\*배장호<sup>1</sup>, #홍대희<sup>1</sup>, 박형주<sup>1</sup>, 이상학<sup>1</sup>  
\*J. H. Bae<sup>1</sup>, # D.H. Hong(dhhong@korea.ac.kr)<sup>1</sup>, H. J. Park<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과

Key words : automated excavator, soil-bucket interaction

## 1. 서론

굴삭 작업의 자동화는 작업의 효율을 증대시키고 일관된 작업 품질을 제공하며 작업 환경의 안정성을 향상시킨다. 이에 현재 자동으로 작업 환경을 sensing 하고 굴삭 작업을 계획하며 주어진 경로로 굴삭 작업을 한 뒤 상차하는 지능형 굴삭기에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 지능형 굴삭기 연구에 있어서 경로를 생성하는 과정은 가장 중요하고 핵심이 되는 연구라고 할 수 있다. 실제 굴삭기 숙련자는 경로를 결정할 때 토질에서 버킷으로 전달되는 반력에 의존하여 경로를 수정한다. 만약 토질에서 버킷으로 전달되는 반력을 고려하지 않을 경우, 굴삭기에서 작용할 수 있는 최대 힘은 한계가 있기 때문에, 굴삭기가 전복되는 등의 안전사고가 발생할 여지가 있다. 따라서 작업자가 존재하지 않는 굴삭 작업의 자동화를 위해서는 버킷에 작용하는 반력을 예측하는 방법을 모델링 하는 것이 필요하다. 버킷에 작용하는 반력은 지형의 모양과 토양의 성질, 버킷-토양의 상관관계, 버킷의 운동 등과 관련이 있다[1]. 지금까지 soil-tool 의 반력을 예측하기 위한 모델이 다수 개발 되어 왔다. 하지만 지금까지 개발된 모델은 버킷이 아닌 평평한 날(flat blade)을 적용한 모델이고 굴삭기 버킷에 적용하였을 때 여러 가지 문제가 발생하였다.

이 논문에서는 버킷에 작용하는 반력 예측 모델 중 가장 일반적으로 알려진 Reece 의 Fundamental Earth Moving Equation(FEE)을 굴삭기 버킷에 적용하여 대표적인 경로로 굴삭 작업을 하였을 때, 반력 측정 시 발생하는 문제점을 파악하고 이를 해결할 수 있는 모델을 제시하려고 한다

## 2. Fundamental Earth moving Equation(FEE)을 굴삭 로봇에 적용했을 때의 문제점

Reece 에 의해서 만들어진 FEE 는 soil-tool 간의 힘의 상관 관계에 대한 대표적인 고전 모델이다. FEE 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = (\gamma g d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q)w \quad (1)$$

여기서 F 는 blade 에 작용하는 총 반력이고,  $\gamma$  는 토양의 밀도, g 는 중력가속도, d 는 토양 속으로 들어 간 blade 의 깊이, c 는 토양의 응집력, q 는 토양 표면에 수직으로 작용하는 surcharge 압력, w 는 blade 의 너비이다. 또한,  $N_\gamma$ ,  $N_c$ ,  $N_q$  는 각각 토양간의 마찰력, blade 의 형상, soil-tool 사이의 응집력에 대한 함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[2][3].

$$\begin{aligned} N_\gamma &= \frac{\cot \rho + \cot \beta}{2[\cos(\rho + \delta) + \sin(\rho + \delta)\cot(\beta + \phi)]} \\ N_c &= \frac{1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)}{\cos(\rho + \delta) + \sin(\rho + \delta)\cot(\beta + \phi)} \\ N_q &= \frac{\cot \rho + \cot \beta}{\cos(\rho + \delta) + \sin(\rho + \delta)\cot(\beta + \phi)} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 (1)식의 세 개의 항,  $\gamma g d^2 N_\gamma$ ,  $cdN_c$ ,  $qdN_q$  은 각각 weight term, cohesion term, surcharge term 에 해당한다. 이를 굴삭 로봇에 적용하여 세 개의 term 및 힘의 합력, F 를 구해 보면, 여러 문제점이 발생한다. 이는 세 개의 각 항에 존재하는 cot 함수의 불연속성과 발산하는 성질 때문이

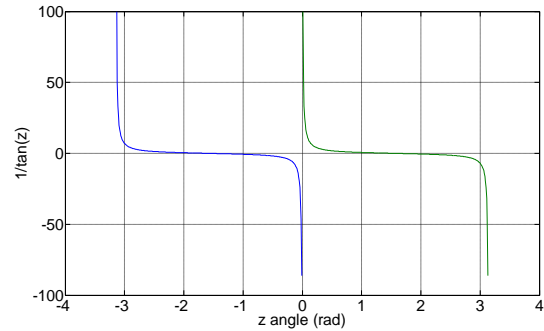


Fig. 1 Graph of cotangent in the domains  $-\pi < x < 0, 0 < x < \pi$

다. Fig 1 은 cot 함수의 그래프이다. cot 함수는  $0^\circ$  와  $180^\circ$  에서 정의 되어 있지 않고 그 근처에서 값의 변화율이 매우 크다. 또한  $90^\circ$  근처에서는 0 으로 수렴하기 때문에 앞서 언급한 식에 적용할 수 있는 각의 범위가 매우 좁다. 굴삭 로봇에 FEE 모델에 적용할 때,  $\rho$  와  $\beta$  값은 cot 함수의 허용 범위에 존재하지 않는 경우가 생기기 때문에 예상치 못한 문제들이 발생하게 된다.

## 3. 굴삭 로봇에의 적용을 위한 개선 방안

굴삭 작업 시 볼 수 있는 굴삭기의 동작은 매우 다양하지만, 가장 전형적인 굴삭 동작은 Fig. 2 에 나타난 트랜칭 작업이라고 할 수 있다. 기존의 FEE 이론을 버킷의 회전과 진행 각을 고려하여 굴삭 로봇의 트랜칭 동작에 18 개의 특정 점을 지정하여 FEE 모델을 적용하였다. 이 때, 문제가 되는 것은 위에서 언급한 cot  $\rho$  값과 cot  $\beta$  값이다. 여기서  $\beta$  값은 식 (2)의 weight term  $N_\gamma$  을 최소로 하는 값을 찾으므로써 구할 수 있다. 이렇게 구한  $\beta$  값을 각각 18 개의 특정 점에 따라 도시하면 Fig. 3 (a)와 같이 나타난다. 그림을 보면  $\beta$  값이 갑자기  $90^\circ$  가 되는 부분이 나타난다. cot 함수 값의 발산을 유도하는  $\beta$  값을 제거하고 나머지 데이터로 curve fitting method 를 사용하여  $\beta$  값을 구하면 Fig. 3 (b)의 그래프와 같이 나타난다. cot  $\rho$  에서도 트랜칭 동작이 이루어질 때  $\rho$  값의 변화에 따라 이러한 문제가 발생한다. 따라서 위에서 실행한 방법을 이용하여 FEE 모델에 적용할 수 있는  $\rho$  값을 구할 수 있다. Fig. 4 (a)는 curve fitting method 를 사용하기 전에 FFE 모델을 이용하여 weight, cohesion, surcharge 에 해당하는 힘을 도시 한 것이다. 그래프를 보면 cohesion 에 해당하는 힘은 거의 일정함을 알 수 있다. Weight 와 surcharge 에 해당하는 힘은 두 힘 모두 일정

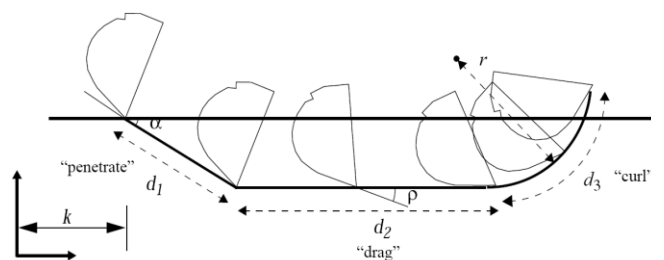
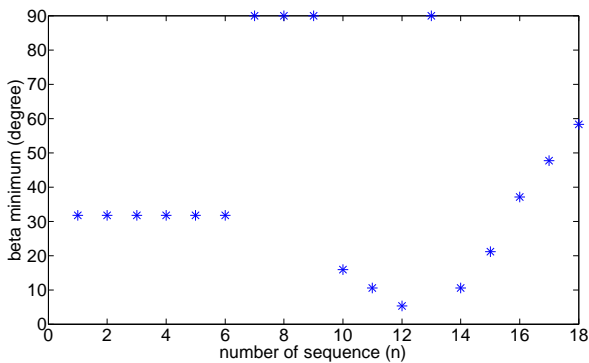


Fig. 2 A typical dig during a trenching operation[3].

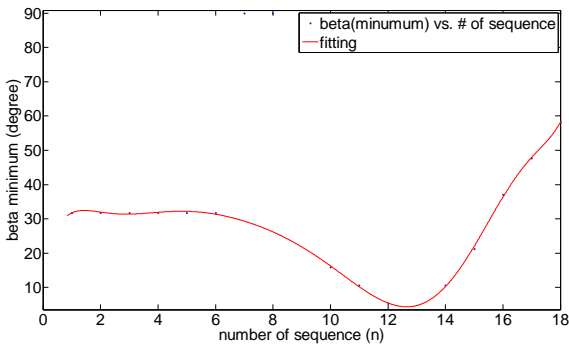
Table 1 Parameters and values used for simulation

Parameter	Description	Value
c	Cohesion	1000Pa
w	Bucket width	1m
d	Max depth	0.5744m
$\Phi$	The angle of soil-soil friction	0.3840rad
$\gamma$	Soil density	2000kg/m <sup>3</sup>

하게 상승하나 11 번째 특정 점을 지나면서 무한대로 발산한 뒤에 불연속 현상이 나타남을 알 수 있다. 따라서 FEE 모델을 그대로 사용하게 되면 반력을 예측을 할 수가 없다. 따라서, 앞서 언급한 curve fitting method 를 이용하여  $\rho$ ,  $\beta$  를 구하고 그 값을 FEE 모델에 적용하여 반력을 구하면 Fig. 4 (b)와 같이 나타난다. 이 모델에서는 모든 구간에서 신뢰할 수 있는 반력이 나타남을 알 수 있다.



(a)

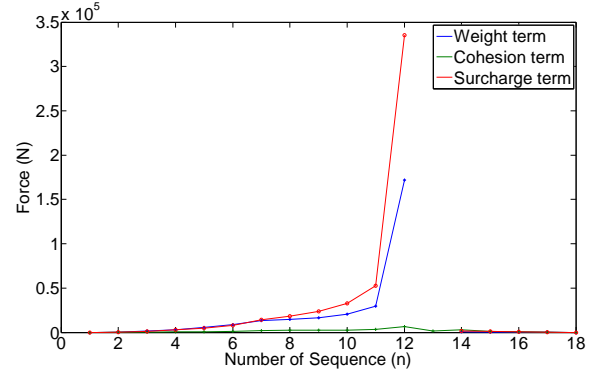


(b)

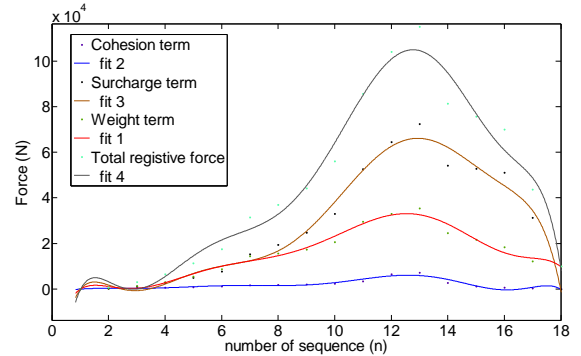
Fig. 3 (a) Discontinuity observed from  $\beta_{min}$  during the digging operation. (b) Removal of discontinuity using curve fitting method.

#### 4. 결론

기존의 FEE 이론을 버킷의 회전과 진행 각을 고려하여 굴삭 로봇의 트랜칭 작업 동작에 적용해 보았고 그 때 발생하는 문제점을 살펴보았다. 또한 그 문제점을 해결하기 위한 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 수행 결과, 갑자기 무한대로 발산하는 영역을 제거하여 curve fitting method 를 사용함으로써 함수의 불연속성을 없앨 수 있었고 좀 더 신뢰할 수 있는 총 반력을 얻을 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 Surcharge(q)에 해당하는 함수를 linear 하다고 가정하였으므로 실제 굴삭 로봇의 작업 형태와 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 실험을 통해 얻은 값들을 토대로 q 에 관한 함수를 모델링 하거나 흙의 운동에 대한 보다 심층적이 연구를 통해 q 값을 수학적으로 모델링 할 필요성이 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Plot demonstrating all force terms (weight, cohesion, and surcharge term) vs. number of sequence after applying conditioned values for  $\beta_{min}$  and  $\rho$ . (b) Plot demonstrating all force terms (weight, cohesion, and surcharge term) vs. number of sequence using conventional FEE method.

#### 후기

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

#### 참고문헌

1. Singh, S., "A survey of automation in excavation", submitted to Journal of Mining and Material Processing, Institute of Japan, 1996.
2. O. Luengo, S. Singh, and H. Cannon. "Modeling and identification of soil-tool interaction in automated excavation." In Proc. Of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, v. 3, pp. 1900-1906, 1998.
3. S. Singh, "Synthesis of Tactical Plans For Robotic Excavation," Doctoral Dissertation, Tech. Report CMU-RI-TR-95-27, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1995.