Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 36, No. 2: 325-332/ April, 2016
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.2.0325

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

에코토공을 위한 굴삭기 작업장치 최적 조합 탐색

이홍철* · 김병수** · 이동은***
Lee, Hong-Chul*, Kim, Byung-Soo**, Lee, Dong-Eun***

Configuring Excavator Attachments for Eco-Operation

ABSTRACT

Configuring excavator attachments and engine sizes is the prerequisite for appropriate excavator assignment. Existing experience based configuration practice is lack of scientific rational because many variables (e.g., equipment motion data, soil and rock type and condition, equipment's engineering dimension along with bucket properties, job and management conditions etc.) should be considered simultaneously and timely fashion. This paper presents a new excavator configuration searching method that identifies the most favorable excavator configuration (i.e., the optimal set of excavator's maximum digging height and bucket size) to complement these existing practices. The method coded by using MATLAB identifies an optimal excavator configuration by considering those variables causing the variability of productivity. A case study is presented to demonstrate and to verify the system.

Key words : Excavator, Attachments, Optimization, Bucket size, Maximum digging height

초 록

적합한 굴삭기 부착 작업 장치들과 엔진크기의 구성은 굴삭계획 전에 결정되어야한다. 기존의 경험에 근거하는 굴삭기 구성선택 관습은 다양한 변수들을(장비 동작데이터, 토사유형과 상태, 버킷 속성들, 작업조건 등) 동시에 그리고 시기적절하게 고려하지 못하기 때문에 과학적으로 타당한 근거가 부족하다. 따라서 본 논문은 이러한 기존의 방법을 보완하기 위해 가장 합리적인 굴삭기 구성을 판별하는 새로운 굴삭기 구성 탐색 방법을 제안한다. MATLAB을 사용하여 구현 된 본 방법은 생산성의 변동을 일으키는 변수들을 고려하여 최적 굴삭기 구성을 규명한다. 본 방법론을 검증하기 위해 사례연구를 수행하였다.

검색어 : 굴삭기, 작업장치, 최적화, 버킷용량, 최대굴삭깊이

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

굴삭기는 프론트 쇼벨, 백호, 로더 및 트랜쳐 등 종류가 다양하다. 굴삭장비들은 3부분, 즉 하부구조(예, 캐리어), 상부구조(예, 엔진 및 운전석), 그리고 작업장치(예, 붐, 스틱, 버킷, 붐 실린더, 스틱 실린더, 그리고 버킷실린더)로 구성되며, 하부 캐리어의 형식에 따라 무한궤도형 혹은 공기압 타이어 형으로 구분된다. 이는 다양한 작업장치들을 탈 부착할 수 있기 때문에 여러 작업 상황에 대응하는 융통성이 뛰어나다. 최근의 작업장치들은 유압으로 조정되기 때문에 정교하면서도 용이하게 조정할 수 있고 사이클 타임을 단축하여 작업효율성을 향상시킨다.

* 정회원·경북대학교 건설환경에너지공학부 박사과정 (Kyungpook National University·chrnow37@gmail.com)
** 종신회원·경북대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Kyungpook National University·bskim65@knu.ac.kr)
*** 정회원·교신저자·경북대학교 건축토목공학부 교수, 공학박사 (**Corresponding Author**·Kyungpook National University·dolee@knu.ac.kr)

Received January 7, 2016/ **revised** February 24, 2016/ **accepted** March 7, 2016

Copyright ⓒ 2016 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

쇼벨은 '프론트 쇼벨'과 '백 쇼벨'로 구분된다. 프론트 쇼벨은 하부 캐리어 트랙레벨(작업레벨)보다 상부에 위치한 경질지반(예, 수직 굴삭면)을 굴착해서 토사를 운송장비에 적재하는데 적합하다. 이는 버킷에 토사를 적재하기 위해 버킷을 아래에서 위로 향함과 동시에 작업장치(예, 붐과 스틱)를 상부구조로부터 멀리 밀어 내며 상향 원호를 그리며 회전시켜 굴삭력을 발휘하기 때문에 굴착면이 캐리어보다 상단에 위치할 때 적합하다. 반면, '백 쇼벨'은 하부 캐리어 트랙레벨(작업레벨)보다 낮은 피트를 굴착하는데 적합하다. 이는 버킷을 위에서 아래로 그리고 상부구조를 향해 버킷에 담긴 토사를 안으로 감싸 안음으로 굴삭력을 발휘한다. 이는 작업장치를 하향 원호를 그리며 회전시키고, 버킷을 차체방향으로 끌어당김과 동시에 안으로 감아올리기 때문에 굴착면이 항상 작업레벨보다 하단에 위치해야 생산성 및 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다. '프론트 쇼벨'과 '백 쇼벨' 모두 동일한 작업장치(예, 붐, 스틱 및 버킷)를 부착하지만, 이 둘은 버킷의 굴착동작과 작업장치의 회전방향이 다르다.

굴삭기의 단위생산 당 연료소모량(gal/m^3)은 시간당 생산성(m^3/hr)과 큰 상관관계를 지닌다. 이는 엔진유형, 규격 및 작업장치의 구성에 따라 변동성이 달라지며, 생산능력과 사이클 타임에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 단위연료소모량(gal/m^3)을 절감하는 의사결정을 적시에 수립하기 위해서는 굴삭기의 엔진규격, 작업장치의 최대 굴삭깊이 및 버킷용량 조합별 생산능력 및 사이클 타임을 연산하고, 생산성 및 에너지 효율성을 짧은 시간에 연산하는 방법론이 필요하다. 또한, 이는 굴삭기의 엔진규격 및 작업장치 구성(예, 최대 굴삭깊이 및 버킷용량) 최적 조합을 규명하는 연산과정에 요구되는 입력변수, 과정변수 및 출력 변수를 규명하고 데이터베이스로 구현하는 것을 요구한다.

토공물량(예, 터파기 및 되메우기)을 산출하기 위해 AgteckTM과 같은 토공 적산 프로그램이 사용되며, 단지토공의 경우는 부지를 격자구간으로 분할하여 각 격자구간별 물량을 연산한다. 터파기 구간에서 굴삭기의 생산속도(굴삭속도)는 운송장비에 의한 토사반출속도와 일치되도록 조율하는 것이 요구되며, 이처럼 현장에서 요구되는 토사반출속도에 적합한 최적 굴삭속도를 달성하는 작업장치 구성 및 엔진 rpm을 선택하는 방법론을 개발하는 것이 필요하다.

본 연구는 경험에 의존하여 굴삭기의 작업장치 구성을 결정하던 기존 실무의 한계점을 보완하고 굴삭기의 "최적 작업 장치 구성" 계획을 시스템으로 구현하는 것을 최종 목표로 한다. 시스템 개발을 위해 1) 토공 계약정보를 활용하여 제한조건을 규명, 2) 굴삭에 사용된 장비종류, 규격 및 성능 고려를 위한 데이터베이스 설계, 3) 최적 작업 장치 구성 규명에 요구되는 연산공식 정의, 4) 최적 작업 장치 구성을 규명하는 연산 자동화 방법론 개발을 목표로 한다.

본 연구의 절차는 다음과 같다. 첫째, 굴삭기의 생산성 연산 관련 선행연구를 분석하여 최적 작업장치 구성계획의 필요성을 규명한다. 이 중 작업 장치계획과 관련된 선행연구를 조사하여 개선방향을 도출한다. 둘째, 작업장치 구성계획 단계에 영향을 주는 변수들을 규명하고 굴삭기 에코 드라이빙 운행시간 산출 방법론을 제시한다. 셋째, 이들 연산 기법을 MATLAB (ver. 2008b)을 사용하여 시스템으로 개발한다. 넷째, 개발된 시스템이 굴삭기 작업장치 구성계획을 최적화는 성능 및 실무 적용성을 검증하기 위해 사례연구를 수행하며, 개발된 시스템의 기여점, 한계점 및 향후연구 방향을 제시한다.

2. 문헌고찰

2.1 굴삭공정 생산성 관련연구

장비 집약적인 토공의 생산성 향상을 위해 여러 분석기법들, 즉, 이산사건 시뮬레이션(Smith et al., 1995; Marzouk and Moselhi, 2003), 유전최적화(Moselhi and Alchibani, 2009; Limsiri, 2011) 등이 응용되었다. 이들 연구들은 주로 장비조합을 결정하는 방법론들이다. 기존 토공 시뮬레이션 모형들은 최적의 장비군을 규명할 때 단위 장비의 구성별 생산성 변동을 고려하지 않는다. 반면, 단위 굴삭기의 구성(예, 최대 굴삭 깊이 및 버킷 용량)은 생산성에 큰 영향을 미치기 때문에 산중한 선택이 요구된다. 적합한 작업장치 구성을 규명하는 것은 동시에 수많은 생산성 변동요인들을 고려해야하기 때문에 토공계획자에게 큰 도전적 상황을 제공한다. 이러한 도전에 대응하는 실무적 필요성이 있다.

2.2 스마트 센서를 활용한 굴삭기 모션 연구

굴삭기의 모션 변화는 3개의 피스톤들(예, 암, 스틱 및 버킷 피스톤), 상부구조(예, 캡)의 회전, 하부구조(예, 무한궤도 트랙)의 이동거리 등을 3축 가속도 및 방향 센서를 활용하여 측정된다. 어떤 움직이는 객체의 3축 가속도, 방향변화 및 시간 값들을 함께 분석하여 각 모션들이 발생한 이벤트와 이들 이벤트들의 발생 및 종료 시점을 구분할 수 있다(Lim et al., 2015). 역동적으로 변하는 굴삭기의 모션 유형 및 소요시간에 관한 정보를 토공계획자에게 제공하는 것은 보다 현실적인 장비 선택 및 구성관리를 증진시키는데 기여한다.

고유 모션을 식별하기 위해서 먼저 굴삭기가 각 정규동작들(예, 굴삭, 회전, 하역, 이동)을 수행하는 동안 발생시키는 동작 특성치를 수집하고 이들 상태를 Lim et al. (2015)의 인공지능 방법론을 활용하여 굴삭모션을 분류하였다. 굴삭기의 각 모션들(디깅, 덤핑을 위한 스윙, 덤핑, 굴착지로의 회귀스윙, 다음 굴삭 면으로의 이동, 대기)을 시행하는 동안 측정된 3축가속도 및 방향변화 정보를

사용하여 굴삭작업 시 모션들의 유형을 시공간 내에서 규명한다. 굴삭기의 암, 스틱 및 버킷 피스톤, 그리고 상부구조에 3축가속도 센서 및 방향센서를 탑재하여 작업장치의 모션, 상부구조의 회전 및 하부구조의 이동 등과 관련된 3축 가속도 및 방향 데이터를 수집하였다. 특정 모션이 발생된 전후 이러한 '에너지 발산'의 방향, 크기, 시점, 센서 고유번호 등에 대한 상세한 정보를 수집하였다.

3. 굴삭기 작업장치 구성 최적화 시스템

3.1 굴삭기 작업장치 최적화 시스템의 타당성

굴삭기 최적 작업장치 구성을 규명하기 위해서는 수많은 생산성 변동요인들을 고려해야한다. 이들 생산성 변동요인들은 굴삭장비의 유형에 따른 특성요인(하부구조 유형, 엔진마력, 작업장치의 최대길이, 장비 무게, 버킷용량, 타이어 종류 등), 운반토사 종류 및 상태에 따른 특성요인(단위중량, 팽창계수, 취급의 난이도, 등)과 대상현장의 특성(경사도, 지면상태, 수분함량, 배차 간격 등)이 포함된다. 이들 요인은 사이클 타임에 영향을 주며, 시스템은 작업 패키지, 장비, 토사 및 이력모션 데이터베이스(DB)를 활용하여 작업장치 구성조합의 적절성을 판단한다. 본 시스템은 서버 측에 탑재된 작업 패키지, 장비, 토사, 이력 모션 등에 관한 정보를 관리하는 DB를 사용한다. 굴삭작업에 적용할 굴삭기의 종류와 규격(예, 장비의 무게, 용량, 엔진유형, 하부구조 종류, 부착 가능한 버킷 시리즈 등) 데이터를 장비DB로부터 호출한다. 또한 토사의 종류, 상태, 단위중량 및 팽창계수 등의 정보를 토사DB로부터 호출하여 사용한다. 다음은 이들 데이터베이스와 이를 사용하는 굴삭기 작업장치 최적구성 탐색 방법론을 제시한다.

3.2 굴삭기 작업장치 최적화를 위한 데이터베이스 구조

굴삭기의 최적 작업장치 조합을 규명하는 의사결정에 필요한 변수들을 문헌조사를 실행하여 규명하였다. 또한, 굴삭기 재조사의 장비재원, 생산성 연산공식 및 의사결정 변수들을 분석하여 본 의사결정을 지원시스템의 데이터베이스의 구조를 설계하였다. 본 DB는 굴삭공정을 동작수준까지 상세히 분해하여 동작의 유형 및 소요시간을 추적하는 데이터베이스 구조를 지니도록 설계되었다(Fig. 1 참조).

[프로젝트] 테이블: 토공계약자가 발주자로부터 위임받은 프로젝트에 관한 속성들, 즉 대한 정보가 관리된다. 이는 프로젝트 ID, 프로젝트명, 현장소장 ID 등을 속성들로 갖는다. 본 테이블의 주요키(Primary key)는 프로젝트 ID이며, 발주자 ID 및 현장소장 ID는 각각 [발주자] 테이블 및 [고용자] 테이블을 참조하는 외부키이다.

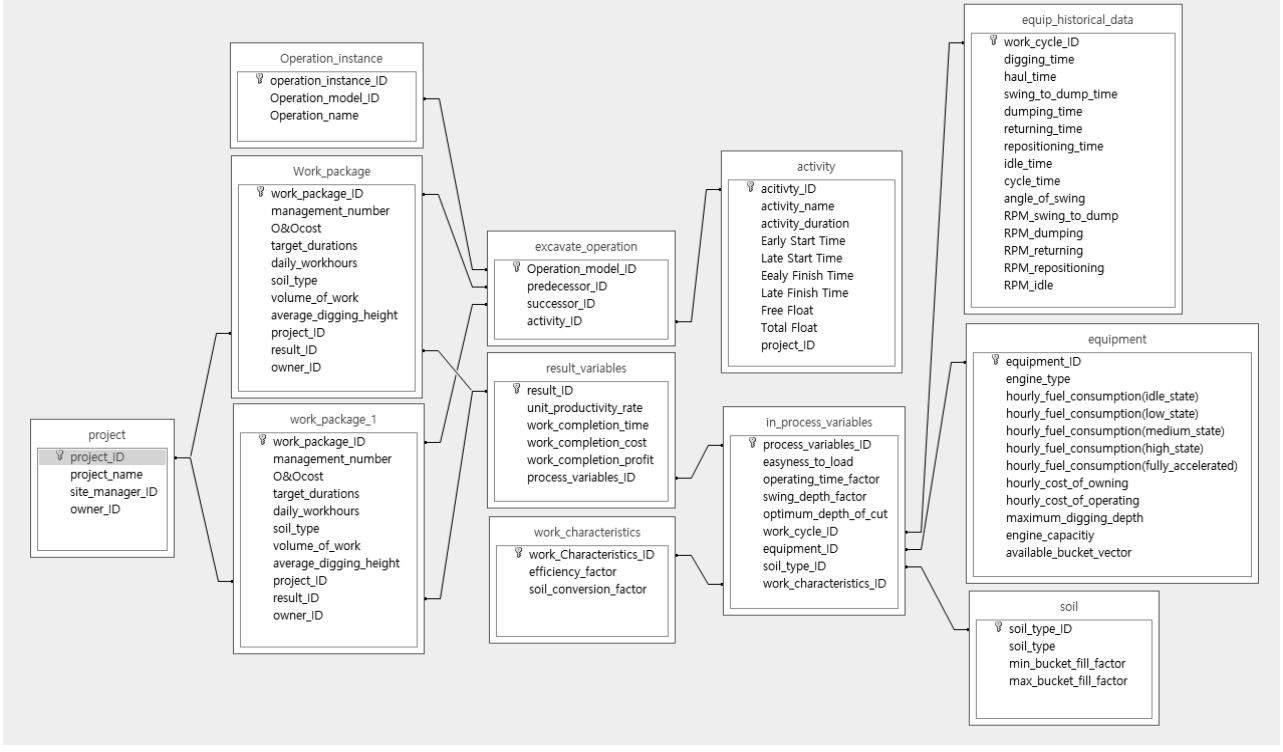

Fig. 1. System Database for Configuring Excavator Attachments

[액티비티] 테이블: 액티비티의 다양한 속성들, 즉 액티비티 ID, 액티비티 명, 액티비티 기간, 이른시작시간(EST), 늦은시작시간(LST), 이른종료시간(EFT), 늦은종료시간(LFT), 자유여유(FF), 총여유(TF), 프로젝트 ID에 대한 정보를 관리한다. 어떤 토공 액티비티를 실행하기 위해 다양한 토공공정들이 적용될 수 있기 때문에 하나의 액티비티가 여러 개의 토공공정모형을 갖도록 액티비티와 토공공정 모형은 1:M 관계로 대응된다.

[토공공정] 테이블: 공정모델링 시스템(예, Micro-CYCLONE)을 사용하여 생성된 공정모형이 저장된다. 본 테이블은 공정모형 ID, 선행작업 ID, 후행작업 ID, 액티비티 ID 등을 속성들로 갖는다.

[공정인스턴스] 테이블: 공정모형으로부터 복제되어 실제 실행된 공정인스턴스를 관리한다. 공정인스턴스 ID, 공정모형 ID, 공정명(Operation name), 등을 데이터 속성으로 갖는다.

[작업 패키지] 테이블: 액티비티 혹은 공정수준에서 토공 작업패키지 정보가 관리된다. 이러한 작업 패키지들은 작업분류체계도(Work Breakdown Structure) 상의 하나의 관리계정(Control Account)에 해당되며, 일정관리에 의해 토공계약자의 생산라인에 도입된다. 본 테이블은 관리계정번호, 토공굴삭 단가, 작업일수, 일일 작업시간, 평균 굴착 깊이, 토사유형, 굴삭 작업량, 프로젝트 ID, 발주자 ID, 성과 ID 등의 데이터 속성들을 관리한다. 본 테이블의 주요키는 관리계정번호이며, 프로젝트 ID, 발주자 ID 등 외부키는 해당 프로젝트 및 발주자에 대한 정보 접근을 가능하게 한다. 작업의 성과정보와 관계 확립을 위해 성과 ID를 외부키로 도입한다.

[토사] 테이블: 토사유형별 특성정보를 관리한다. 토사 분류코드, 토사 명, 최소 버킷 채움 계수, 최대 버킷 채움 계수 등을 데이터 속성으로 갖는다.

[장비] 테이블: 장비의 성능정보를 관리한다. 장비 재조사의 성능테이블 및 차트 정보를 포함한다. 장비 고유번호, 엔진유형, 휴지상태 시간당 평균 연료소모량, 저속상태 시간당 평균 연료소모량, 중속상태 시간당 평균 연료소모량, 고속상태 시간당 평균 연료소모량, 최대가속상태 시간당 평균 연료소모량, 시간당 장비 소유비용, 시간당 장비 운용비용, 최대 굴착 깊이, 엔진마력, 굴삭기별 부착가능한 버킷사양 벡터 등을 데이터 속성으로 갖는다.

[장비 이력모션] 테이블: 이 테이블은 현장에서 굴삭기가 작업하는동안 기록된 3축가속도 및 방향 센서들로부터 수집된 스트림을 활용하여 해당 동작별 시간 값들 및 rpm값들을 측정한 이력 데이터이다. 작업 사이클 ID, 굴삭시간, 하차회전시간, 하역시간, 굴삭지 귀환회전시간, 위치변경시간, 휴지시간, 1회 사이클 시간, 붐 회전각도, 굴삭시 rpm, 하차회전 rpm, 하역 rpm, 귀환 rpm, 위치변경 rpm, 휴지시 rpm등 을 데이터 속성으로 갖는다.

[연산과정변수] 테이블: 연산 ID, 토사 취급용이성(30~50%), 굴삭기 운용 시간계수, 장비 이력모션 데이터 속성들의 최적확률분포함수 및 인수들(예, 굴삭, 하차회전, 하역, 귀환회전, 위치변경, 휴지, 1회 사이클 시간, 붐 회전각도, 굴삭 rpm, 하차회전 rpm, 하역 rpm, 귀환 rpm, 위치변경 rpm, 휴지 rpm등), 스윙-깊이계수, 최적 굴삭 깊이를 데이터 속성으로 갖는다. 본 테이블에서 필요한 속성들을 참조하기 위해 작업 사이클 ID, 장비 고유번호, 토사분류코드, 작업특성 ID 등 속성들이 추가된다.

[작업특성] 테이블: 작업조건 및 관리조건에 따른 효율계수, 그리고 토사유형 별 토사체적변화 계수를 데이터 속성으로 갖는다.

[성과변수] 테이블: 성과 ID, 각 구성 조합별 단위생산성, 작업완료시간, 작업 완료비용, 작업완료 이윤, 연산 ID 등의 데이터 속성들을 관리한다.

3.3 굴삭기 작업장치 최적구성 탐색 알고리즘

본 굴삭기 작업장치 최적화 시스템은 3.2장에 상세히 제시된 11개의 주요 테이블들(예, 계약, 토사, 장비, 취급, 장비모션, 사이클타임, 그리고 작업조건 등)을 지닌 데이터베이스에 저장된 총 72개의 데이터 속성들(예, 입력변수 57개, 연산과정변수 12개, 그리고 출력변수 3개)을 취급한다. 특히, 입력변수 57개는 6개의 계약변수, 1개의 토사변수, 12개의 장비변수, 1개의 취급변수, 18개의 장비모션변수, 17개의 사이클 타임 변수, 그리고 2개의 작업조건변수로

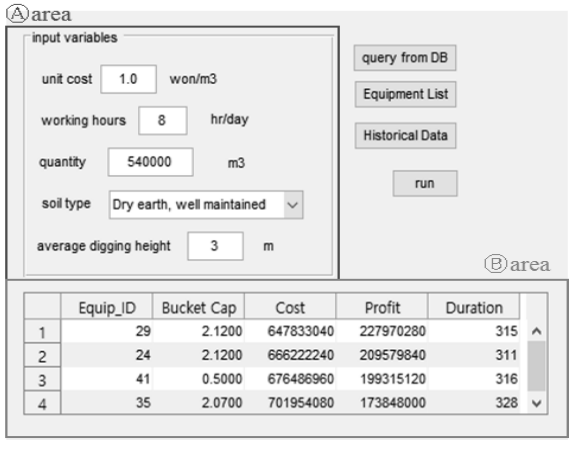

Fig. 2. GUI for Configuring Excavator Attachments

구성된다. 이들 데이터 속성들 및 정보원을 규명하고 이를 데이터베이스로 구현하는 것은 연산을 자동화하여 의사결정을 위한 정보를 적시에 제공하는 토대를 제공한다. 굴삭기 작업장치 구성최적화는 다음 Fig. 3에 제시된 알고리즘에 의해 규명된다(Lee et al., 2015).

본 시스템은 모든 해 공간을 빠짐없이 축차 반복하여 굴삭기의 모든 이용 가능한 작업장치 구성들 중 최적조합을 규명한다. 이는 공정비용을 최소화는 것을 목적함수로 사용한다. 해공간의 크기가 크지 않기 때문에 본 시스템은 모든 경우의 수를 연산하여 전역정확 해를 수학적으로 규명하는 분석기법을 탑재한다. 본 시스템은 다음의 4단계 연산과정으로 구성된다. (1) 대상 현장의 굴삭작업에 투입할 수 있는 굴삭 장비와 버킷 정보, 현장의 토사종류 및 상태에 관한 특성정보를 DB에서 호출하고, 계약서에 명시된 작업 패키지에 관한 정보를 Fig. 2의 Ⓐ영역에 입력하여 대상 현장을 정의한다. (2) 목적함수를 규명하고 이를 연산하는 함수를 구현한다. (3) 모든 경우의 수(작업 장치 최대길이 대비 버킷용량)를 중복 없이 반복수행 하여 목적함수가 최적이 되는 전역해를 규명한다. (4) 출력 데이터 분석을 수행한다. 분석된 데이터는 Fig. 2의 Ⓑ영역에 최적안을 기준으로 대안들을 출력한다. 본 시스템의 흐름도가 Fig. 3에 제시되고, 이는 MATLAB (ver. 2014b)을 사용하여 시스템으로 구현된다.

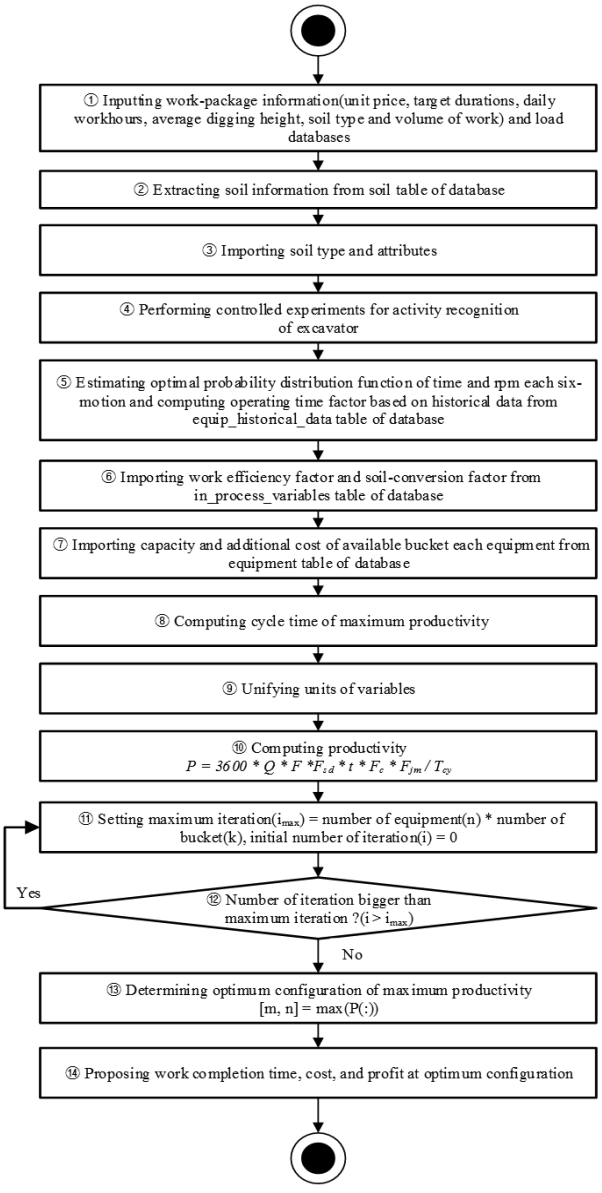

Fig. 3. System Algorithm

3.3.1 작업 패키지정보 입력 및 가용장비 탐색

단계 ①: 사용자는 굴삭공정에 관한 계약정보를 입력한다. 토공굴삭 단가, 작업일수, 일일 작업시간, 평균 굴삭 깊이, 토사유형 및 굴삭작업량 등 계약정보를 계약DB로부터 시스템 메모리에 호출한다.

단계 ②: 시스템은 굴삭토사의 종류 및 상태에 관한 정보를 사용하여 토사 DB로부터 버킷 채움 계수를 추출한다. 버킷크기 및 토사유형별 버킷 채움 계수는 Nunnally (2006) 혹은 Peurifoy (2009)에 의해 제시된 정보를 호출하여 해당 버킷 채움 계수를 추출한다. 사용자에 의해 제공된 굴삭장비의 종류 및 최대 굴삭깊이를 활용하여 해당 기업이 보유한 장비DB로부터 사용 가능한 장비 목록을 재원정보와 함께 시스템 메모리에 저장한다.

단계 ③: 굴삭 토사의 적재 용이성 정도에 관한 정보를 장비운전사로부터 획득한다. 토사의 적재 용이성이란 버킷 안으로 토사가 쉽게 들어오는 정도를 의미한다. 마사, 모래 혹은 잔자갈처럼 쉽게 버킷에 탑재하기 용이한 경우 낮은 백분율값(예, 30%)을 할당하고, 찰진 황토 혹은 입자가 균질하지 못한 거친 암석의 경우 높은 백분율(예, 50%)을 적용한다(Peurify 2009). 이 값은 매일 어떤 토사를 취급하느냐에 따라 달라진다.

3.3.2 굴삭기 모션 이력 데이터 수집

단계 ④: 굴삭기에 부착된 가속도 및 방향센서들을 사용하여 시계열 상의 3축 가속도 및 방향 데이터를 수집하기위해 제어실험을 실행한다. 각 모션은 센서들의 부착 위치에 영향을 받기 때문에 Fig. 4에 제시된 것처럼 표준위치(예, 가속도 센서들은 붐, 스틱 및 버킷 실린더 인근, 방향센서는 캐빈 지붕 중심)를 지정하고 해당위치에 고정한다. 이들 센서들의 상대적 3축 가속 및 방향 변화를 0.5초 윈도우 간격으로 구분하여 식별한다.

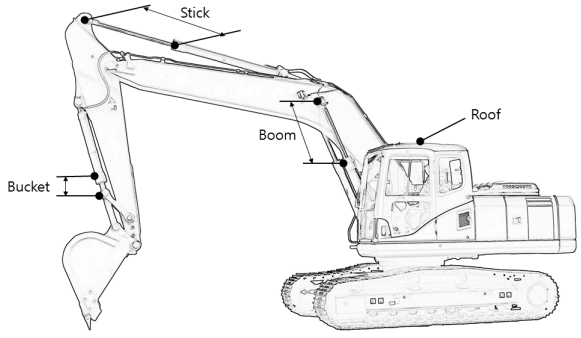

Fig. 4. Sensor Locations

단계 ⑤: 수집된 이력 데이터들을 활용하여 6가지 굴삭기 모션들(예, 디깅, 덤핑을 위한 스윙, 덤핑, 굴착지로의 회귀스윙, 다음 굴삭 면으로의 이동, 대기)의 시간 값들 및 rpm값들의 최적확률분포 함수 및 인수 값들을 추정한다. 또한, 1시간에 몇 분간 생산적인 작업에 관여하는지를 나타내는 운용효율계수를 연산한다.

3.3.3 작업 효율계수 및 작업장치 별 용량연산

단계 ⑥: 사용자로부터 제공된 작업조건 및 현장관리의 효율성에 관한 정보, 토사의 종류 및 상태변화에 관한 정보를 활용하여 [작업특성] 테이블로부터 작업효율계수 및 토사 체적변환계수를 추출한다.

단계 ⑦: 장비 제조사가 제공하는 굴삭기 재원으로부터 각 장비별 부착이 가능한 작업장치, 즉 버킷들의 고봉체적 값 및 추가적인 시간 당 비용 값을 획득한다.

3.3.4 굴삭기 생산성 연산모드

단계 ⑧: 최대 생산 사이클 시간을 연산한다. 이는 붐 및 스틱의 회전각도, 굴착높이(깊이), 작업조건(예, 새로운 굴삭 면으로 이동하기위해 움직이는 거리) 및 굴삭기 하부구조의 종류(무한궤도 혹은 루버타이어 등)별 기동성에 따라 달라진다.

단계 ⑨: 의사결정에 사용할 생산성 연산 단위(예, LCY, CCY, BCY, tons)를 일원화시킨다.

단계 ⑩: 각 작업장치 구성 조합별로 생산성(생산율)을 연산하고, 생산성이 최대가 되게 하는 작업장치 구성(최대굴착깊이 및 버킷규격)을 전역해로 채택한다. 각 조합별 생산율은 다음 Eq. (1)에 제시된 것처럼 Peurifoy (2009)의 연산 식을 사용한다. 여기서, P는 시간당 생산성; Q는 버킷 고봉체적; F는 버킷채움계수; F_{sd}는 붐의 스윙각도 및 최대굴착깊이에 따른 보정계수; t는 실질작업효율계수(초); E는 1시간에 몇 분 동안 생산적인 작업을 실행하는지 나타내는 효율계수; F_c는 흐트러진 상태에서 자연 상태로 변환시키는 토사변환계수; F_{JM}는 작업 및 관리 효율계수; T_{cy}는 사이클 타임이다.

$$P = \frac{3{,}600 \times Q \times F \times F_{sd} \times t \times F_c \times F_{JM}}{T_{CY}} \quad (1)$$

3.3.5 해 공간 전역해 탐색

단계 ⑪: 최적해 규명을 위해 단계 ⑩을 모든 굴삭최대깊이 및 버킷규격 조합들에 대해 실행한다. 최대 연산회수(i)를 굴삭최대깊이(n)와 가용 버킷규격 개수(k)를 곱하여 설정하고, 현재 축차반복 횟수는 0으로 설정한다.

단계 ⑫: 전체 해 공간을 탐색했는지 검증하기 위해 단계 ⑪에서 산출된 연산 횟수가 현재 축차반복 횟수에 도달했는지 판정한다. 연산 횟수가 현재 축차반복 횟수보다 크면 단계 ⑪을 반복하여 재실행한다.

단계 ⑬: 전체 해 공간 중 최대 생산율을 지니는 굴삭최대깊이 및 버킷규격 조합을 규명한다.

단계 ⑭: 전역해로 산출된 작업장치 조합을 적용했을 때 기대되는 토공기간, 토공비용 및 토공이윤을 제시한다.

4. 사례적용 및 분석

본 시스템의 성능 및 유효성을 검증하기위해 3D laser scanner로 스캔하여 얻은 사례 현장의 지반형상모델을 호출한다. 지반형상모델의 각 포인트는 위치(x,y,z), RGB, 반사도(Intensity) 및 토질주상도 정보를 기반으로 한 토양 특성(예, 토질, 습윤도, 밀도 등)이 mesh 형태의 데이터로 제공되었다. 지반형상모델의 각 큐빅별 토양특성(예, 토질, 습윤도, 밀도 등)은 생산성에 영향을 미치므로 규빅별로 구분되어 취급될 필요가 있다. 본 사례는 오피스 건물의 기초굴삭을 위해 L×W×H = 300m×300m×6m 크기의 평균적인 특성치, 즉 자연 상태 점토질 토양을 굴삭 하는 사례를 사용하여 실험하였다.

발주자의 견적에 의하면 토사의 자연 상태 단위체적당 굴삭단가는 1,240₩/m^3이고, 이 단가보다 20% 낮게 투찰한 토공업체가 해당 토공 패키지를 낙찰 받았다. 이 토공업체는 다양한 최대굴삭깊이 및 엔진규모(HP)를 지닌 유압식 프론트 쇼벨들과 각 쇼벨들에 탈부착 할 수 있는 다양한 크기의 버킷들을 보유하고 있다. 이들 쇼벨들 및 버킷들의 소유비용 및 운용비용은 이 회사의 회계데이터베이스에 관리되고 있는 정보를 활용하였다. 현장의 작업 조건에

Table 1. Solution Space

Alternatives			Cost (₩)	Profit (₩)	Duration (days)
Alternative No	Equipment	Bucket (cy)			
1	325L	2.12	647,833,040	227,970,280	315
2	322L	2.12	666,222,240	209,579,840	311
3	330L	2.5	676,486,960	199,315,120	316
4	328D	2.07	701,954,080	173,848,000	328
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Table 2. Best Fit Configuration

Excavator	CAT 325L
Quantity of Bucket	2.12 cy
Duration (days)	315
Cost (₩)	647,833,040
Profit (₩)	227,970,280

따르면 평균 굴착깊이는 3m, 굴삭기 작업장치의 평균 회전각도는 120도, 작업조건 및 현장관리여건은 모두 양호, 버킷 체움계수는 75%, 1시간 당 굴삭기의 실제작업시간은 55분으로 예상된다. 이러한 계약정보 및 현장 작업조건정보들을 사용하여 본 시스템의 유효성을 평가하였다. 실험에 사용된 장비는 Caterpillar (2014)에서 제공하는 백호계열인 320 series부터 330 series 모델들이고, 타이어종류는 Rubber tiers이다. 절토지의 작업장 정돈상태는 “Dry earth, well maintained”이며, 토사는 버킷에 용이하게 흘러들어오는 상황이다. 본 시스템은 장비모션 이력 데이터베이스로부터 각 장비 사양별 사이클 시간, 운용계수, 회전-굴삭깊이 계수, 사이클 타임, 운용효율계수, 토사 채적변환계수를 추출 및 연산하였다. 이 정보를 사용하여 모든 작업 장치 구성조합의 생산성을 연산하고 그 중 생산성이 최대가 되는 조합을 규명하였다. 본 시스템은 전체 해공간을 하나도 빠짐없이 탐색하기 때문에 Tables 1 and 2에 제시된 것처럼 비용 및 이윤에 대한 전역 정확해를 제시한다.

사례연구 결과, 최적의 조합은 Caterpillar사의 325L 굴삭기와 장착 가능한 버킷들 중 2.12 cy용량을 가지는 버킷으로 판명되었다. 해당 최적 작업장치 구성조합을 지닌 굴삭기 1대가 540,000m^3의 기초굴삭을 수행하는데 투입되는 경우 기간 및 비용이 각각 315일 및 ₩647,833,040가 소요되며, 수익은 ₩227,970,280가 획득되는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

공기단축, 비용절감 및 에너지 절감을 달성하는 최적의 작업장치 구성을 경험에 의존하여 결정하는 것은 비용 리스크가 크다. 본 연구는 이를 보완하기위해 토공현장 내 작업 장치 구성 최적화를 위한 시스템을 개발하여 제시한다. 시스템에 탑재된 핵심 기술요소는 다음과 같다. 첫째, 굴삭기의 생산성 변동요인을 고려하여 이력 데이터를 기반으로 작업장치 최적 구성을 연산하는 방법론을 개발하였다. 둘째, 최적 작업장치 구성을 규명하는 방법론의 정확성과 신속성을 충족시키기 위해 의사결정에 필요한 데이터 엔티티 및 각 엔티티의 속성들을 규명하였고, 이를 관리하는 데이터베이스를 설계, 구현 및 활용했다. 셋째, 연산성능은 입력변수, 연산과정 변수 및 출력변수의 이용가능성에 크게 좌우된다. 따라서 연산성능을 향상시키기 위해 이들 데이터를 체계적으로 관리하는 방법을 구현했다. 넷째, 전역 정확해를 규명하기위해 모든 경우의 수를 고려하는 기법을 구현했다.

본 연구는 굴삭장비의 생산성 변동요인들을 신속히 고려함으로써 굴삭장비의 구성계획을 자동으로 탐색하는 시스템을 개발하여 최적 작업장치 조합 계획의 정확성을 향상시키며, 굴삭공정의 생산성을 높이는데 기여한다. 또한, 경험에 의존하는 작업장치 구성계획의 한계점을 보완하기 위해 굴삭 작업장치 최적 구성조합 탐색 시스템을 개발하여 실효성을 규명하였다. 반면, 본 연구는 다음과 같은 한계점을 지닌다. 첫째, 특정 작업 장치 조합으로 구성된 굴삭기의 생산성은 이력 사이클 타임에 의해 영향을 받는다. 본 연구는 특정 공정에 투입된 장비로부터 이력 모션 데이터를 수집하여 사용하였다. 향후 이러한 이력 데이터를 체계적으로 수집하는 연구가 추천된다. 총 기간, 비용 및 이윤과 함께 연료소모를 고려하는 다중 목적함수를 갖는 문제로 확장하기위해 파레토 최적화 (Pareto Optimal) 기법을 통합하는 것이 추천된다. 둘째, 목적함수인 굴삭량이 결정론적으로 취급되었다. 현장의 불확실성을 반영하여 확률·통계적 방법론으로 확장하는 것이 바람직하며, 현장의 불확실성을 반영할 수 있도록 생산성 변동요인에 대한 추가적인 연구가 추천된다. 셋째, 3D 레이저 스케닝 및 3D 카메라를 활용한 이미지 프로세싱(image processing)과 같은 현장스캔 기술을 통합하여 굴삭과정 중 깊이에 따라 역동적으로 변하는 지리데이터를 실시간으로 수집하는 연구가 통합될 때 실무적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 넷째, 본 시스템은 굴삭기만을 다루고

있어 향후 다른 장비를 포함하는 장비의 조합적 측면을 고려하는 사례분석이 추천된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B079344-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Caterpillar, Inc. (2014). *Caterpillar performance handbook*, 40th Ed., Caterpillar Peoria.

Lee et al. (2015). "System for information providing of excavator combination and method for thereof." Korean Patent, 10-2015-0189873.

Lim, T., Park, S., Lee, H. and Lee, D. (2015). "Artificial neural network–based slip-trip classifier using smart sensor for construction workplace." *Journal Constr. Eng. Manage*., Vol. 142, No. 2. doi : 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001049.

Limsiri, C. (2011). "Optimization of loader-hauler fleet selection." *European Journal of Scientific Research*, Vol. 56, No. 2, pp. 266-271.

Marzouk, M. and Moselhi, O. (2003). "Object-oriented simulation model for earthmoving operations." *Journal of Const Engrg and Mangt*., Vol. 129, No. 2, pp. 173-181. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:2(173).

Moselhi, O. and Alshibani, A. (2009). "Optimization of earthmoving operations in heavy civil engineering projects." *Journal of Const Engrg and Mangt*., Vol. 135, No. 10, pp. 948-954. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(948).

Nunnally, S. W. (2006). *Construction Methods and Management*, Prentice Hall PTR.

Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J. and Shapira, A. (2009). *Construction Planning, Equipment, and Methods*, 7 th Ed. Mcgraw-Hill.

Smith, S. D., Osborne, J. R. and Forde, M. C. (1995). "Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation." *Journal Constr. Eng. Manage*., Vol. 121, No. 4. pp. 388-396. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9364(1995)121:4(388), 388-396.