

# 도저 생산성 연산모델 비교 연구

김윤희\* · 박영준\*\* · 이동은\*\*\*

Kim, Ryul-Hee\*, Park, Young-Jun\*\*, Lee, Dong-Eun\*\*\*

## Validating Dozer Productivity Computation Models

### ABSTRACT

Existing dozer productivity computation models use different input variables, formulas, productivity correction factors, and experimental data source. This paper presents a method that characterizes the productivity outputs obtained by the PLS model and the Caterpillar model that are accepted as industry standards. The method identifies the input variables to be collected from the site, the performance charts to be referenced, and the formulas and implements them in a single computational tool. This study verifies that the PLS model may replace the manual computational process of Caterpillar model by eliminating reliance on graphics manipulation. Replacing the Caterpillar model with the PLS model and implementing the process as a function contributes to assess the productivity of a dozer timely by encouraging to utilize real-time information collected directly from the site. This study allows researchers and practitioners to effectively deal with the values of productivity correction factors collected from the job site and to control the productivity. The practicality and effectiveness of the method have been validated by applying to a project case.

**Key words** : Dozer, Productivity, Computational model, Comparative verification

### 초록

기존의 도저 생산성 연산 모델은 각각 서로 다른 입력변수, 공식, 생산성 보정 요인 및 실험 데이터를 사용한다. 본 논문은 PLS모델과 Caterpillar 모델로부터 취득한 생산성 결과를 구체적으로 서술함으로써 산업표준으로 인정 될 수 있는 방법론을 제시한다. 본 방법론은 현장에서 수집한 입력 변수, 성능차트, 그리고 각 수식들을 확인하고 이들을 단일 계산도구로써 구현한다. 본 연구는 그래픽 추정에 대한 의존도를 제거함으로써 PLS모델이 Caterpillar 모델에서 사용되고 있는 수계산 프로세스를 대체 할 수 있음을 검증하였다. Caterpillar 모델을 PLS 모델로 대체하고 각 과정들을 함수로 대체하는 것은 현장정보를 실시간으로 수집하고 적시에 도저의 생산성을 평가할 수 있도록 기여한다. 본 연구를 통해 연구원과 실무자들은 현장의 생산성 보정요인들을 효과적으로 처리하고 이로부터 생산성을 제어할 수 있도록 한다. 본 방법론은 프로젝트 적용 사례를 통해 실용성과 유효성을 검증하였다.

**검색어** : 도저, 생산성, 연산모형, 비교검증

## 1. 서론

도저의 기계, 토사 및 작업 속성들은 도저의 생산성에 영향을 미친다. 현실계의 생산성 변동요인들을 규명하여 이를 예측모델에 반영하는 것은 생산성 예측의 정확도를 높이는데 기여한다. 토공실무에서 장비의 생산성을 추정하는 다양한 방법들이 존재한다. 그러나 이들은 정확한 적산보다는 현장에 적용 가능한 도저 종류별 성능을 상대 비교하는 데 목적이 있다. 기존 방법들에 의해 연산되는

\* 경북대학교 건설환경에너지공학부 박사수료 (Kyungpook National University · [archi\\_ryul@knu.ac.kr](mailto:archi_ryul@knu.ac.kr))

\*\* 정희원 · 지능형건설자동화연구센터 연구교수 (Intelligent Construction Automation Center · [py0307@knu.ac.kr](mailto:py0307@knu.ac.kr))

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 경북대학교 건축·토목공학부 정교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · [dolee@knu.ac.kr](mailto:dolee@knu.ac.kr))

Received March 17, 2019/ revised March 27, 2019/ accepted April 3, 2019

생산성 값들은 변동성을 지니며, 이 변동성은 생산성 평가와 관련하여 잘못된 의사결정을 초래할 수 있다. PLS (Peurifoy-Ledbetter-Schexnayder)모형과 Caterpillar 모형은 토공분야의 생산성 평가를 위한 산업표준으로 활용되고 있으며(Peurifoy et al., 2009), 대표적으로 활용되고 있는 이들 두 모형의 출력 편차에 대한 객관적인 분석은 토공관리자에게 보다 정밀한 생산계획을 수립하는 데 기여한다.

본 연구에서는 기존 연구에서 활용된 도저의 생산성 변동요인들을 분석하고 산업표준으로 사용되고 있는 두 모형의 연산절차 및 출력 편차의 원인에 대하여 규명하고자 한다. 모형의 동등한 비교를 위해 각 모형이 사용하는 생산성 보정요인들의 적용 조건 및 입력변수를 반추함으로써 모형 상호 간에 생략된 조건을 보완한 신규모형을 개발한다. 본 연구는 도저의 토사운반공정을 대상으로 사례분석을 실시하고 각 모형의 연산과정 및 결과를 상세히 비교하여 출력 편차의 원인을 분석한다.

## 2. 문헌고찰

### 2.1 도저의 생산성 변동속성

토공 생산성은 취급하는 토사의 역학특성(Touran et al., 1997), 도저의 기계속성(예, 도저무게, 견인력, 블레이드 형상 및 치수 등), 기후 및 지반속성들(예, 고도, 대기온도, 경사도, 토사종류, 노면상태 등)(Shi and AbouRizk, 1998) 및 현장관리요인들(예, 토사운송거리, 구름저항, 경사도, 운전자의 숙련도, 시야, 토질상태 등)(Shi, 1999; Xiaoping et al., 1996)에 의해 변동성을 지닌다. 도저의 생산성 변동요인들은 7가지 입력객체(예, 트랙터, 블레이드, 도저, 대기조건, 지형 및 지면, 오퍼레이션, 작업관리효율)와 총 30가지 속성들로 구성된다. 각 입력객체는 순서대로 7, 5, 1, 3, 3, 7 및 4개의 속성을 갖는다. 트랙터 객체의 7가지 속성은 엔진유형(디젤 혹은 가솔린), 무게, 구동방식(터보, 이륜, 사륜), 공칭마력(HP), 주행장치(휠 혹은 트랙), 캐리어 유형(단독 혹은 캐리어 부착), 타이어 공기압을 포함한다. 블레이드 객체의 5가지 속성은 블레이드유형(평, 앵글, 쿠션, 유니버설, 세미-유니버설), 규격(높이 및 너비), 용량, 무게 및 측면판 부착유무를 포함한다. 도저 객체는 도저구성 유형(단독작업 크롤러 도저, 단독작업 휠 도저, 캐리어를 부착한 크롤러 도저, 캐리어를 부착한 2륜구동 휠 도저, 캐리어를 부착한 4륜구동 휠 도저)이라는 단일 속성을 지닌다. 대기조건 객체는 3가지 속성, 즉 기압(혹은 고도), 온도 및 우천여부를 포함한다. 지형 및 지면 객체는 3가지 속성들, 즉 경사도, 바퀴 침하깊이 및 지면상태를 포함한다. 오퍼레이션 객체는 7가지 속성들, 즉 오퍼레이션 유형(Straight shuttle dozing, side hill cutting, Backfill excavation), 전진기어단수, 후진기어단수, 기어별 최고속도, 최고

속도 도달시간, 도저거리, 슬롯도징의 작업효율, 기어변속시간을 포함한다. 작업관리효율 객체는 4가지 속성, 즉 운전원 숙련도, 날찌 가시성(청명 혹은 안개), 주야간 및 장비엔진 성능발휘 안전계수를 포함한다.

기존 도저 생산성 연산모델들은 상기 30가지 요인들 중 14가지 생산성 변동요인들(예, 주행저항, 경사저항, 견인계수, 침하저항, 공칭 견인력, 고도, 온도, 가속 혹은 감속, 토사유형, 블레이드 용량, 작업조건, 관리효율, 운전원의 숙련도 및 장비 노후도)을 고려하는 생산성연산 방법을 제시한다. 이 변수들은 다시 여러 기계적 및 환경적 속성들을 포함한 9가지 생산성 변동요인(예, 토사종류, 사이클 시간, 작업장 가시성, 운전자 숙련도, 작업효율성, 블레이드 속성, 토사 취급난이도, 토사중량 및 함수상태, 작업구간의 경사도)으로 취급할 수 있다. 어떤 연구 대상이 되는 도징(Dozing) 작업의 유효생산성에 가능한 수렴하기 위해서는 이들 변동요인들을 완결성 있게 수집하여 생산성을 보정하는 것이 필수적이다. 이들 생산성 변동 속성들을 적시에 일관성 있게 수집하는 방법론이 필요하고, 이들 속성 값들을 사용하여 산업표준으로 사용되는 PLS 및 Caterpillar 모델을 적용하여 생산성 변동 정보를 즉시 분석, 비교하여 의사결정권자에게 제공하는 방법론 개발이 요구된다. 따라서 채택한 생산성 연산모형의 종류에 의해 발생하는 유효생산성 변동 및 편차를 보다 효과적으로 취급하는 방법론은 토공관리자가 장비계획을 수립하는 데 신뢰성 있는 장비생산성 예측정보를 제공한다.

### 2.2 문제제기

기존 5가지 장비 생산성 연산모형들(예, 1) PLS 모델, 2) Caterpillar 모델, 3) Church 모델, 4) SAE (Society of Automotive Engineers) 방법(SAE International, 2003), 5) IH (International Harvester) 방법) 중 앞 두 가지는 생산성 변동 요인들을 현실적으로 고려하고 있어 토공생산성 추정에 산업표준으로 활용된다. PLS 모델은 범용 생산공식(General output formula)을 사용하고, Caterpillar 모델은 표준 장비실현장에서 수집한 생산성 데이터를 활용하는 방법을 제공한다.

PLS 모델은 생산성 연산절차를 컴퓨터상에 코드화하기 용이하여 자동연산이 가능한 반면, Caterpillar 모델은 생산성 실험 데이터 원본들을 빈번히 참조해야하는 번거로움이 있다. 두 방법이 사용하는 입력 변수들, 생산성 연산공식들 및 수많은 그래프 형태로 제공되는 실험 데이터 원본들을 빠짐없이 연산절차에 반영하여 철저히 실행하고 결과를 비교하는 것은 다음의 선결 문제들이 관련된다.

- 1) 두 가지 연산 방법이 생산성 변동요인들을 동등하게 반영하여 연산절차의 등가성을 확보하기 위해 각각의 생산성 변동요인들을 고려하는 생산성 보정모델의 개발이 필요하다.

- 2) Caterpillar 모델은 그래프로 제공되는 실험 데이터 원본에 작도법을 적용하여 입력변수 및 보정계수들을 질의(Query) 한다. 생산성 연산과정은 참조해야할 그래프 수 및 참조 빈도수가 다량 존재하므로 그래프 작도법은 매우 시간 소모적이고 잦은 오류발생을 일으키며, 이는 토공작업의 실시간 성과평가의 방해요인으로 작용한다. 따라서 기존 실험 데이터 원본들을 함수(function)로 변환하는 과정이 요구된다.
- 3) 토공 의사결정권자가 상기 두 가지 산업표준 방법을 활용하여 주어진 토공공정의 생산성을 추정하고, 적용 모델에 기인하는 변동성에 관한 정보를 의사결정에 활용할 수 있도록 생산성 편차 정보를 제공할 필요가 있다.

### 3. 도저 생산성 연산방법 비교

본 방법론은 PLS 모델 및 Caterpillar 모델의 적용에 요구되는 생산성 보정 계수들, 즉 도저의 기계적 속성들, 현장 토사 및 작업 속성들의 값을 수집하고, 이 2가지 모델들을 Fig. 1에 따라 실행한다. 본 방법론은 두 모델의 공칭생산성, 생산성 보정계수들, 유효생산성 및 편차에 관한 정보를 제공하며, 상세한 설명은 아래에 제시한다.

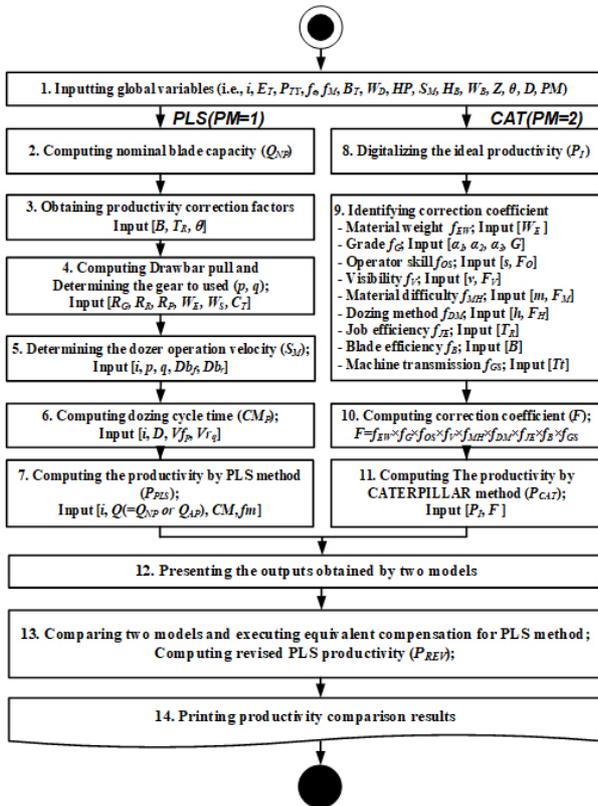


Fig. 1. Comparison Procedure of PLS and Caterpillar Operation Model

### 3.1 전역변수 정의

PLS 및 Caterpillar 모델 모두에 공통으로 적용되는 변수를 정의한다. 전역변수는 사용되는 연산 모델의 종류에 상관없이 공통으로 정의되는 토사, 도저 및 현장변수들이다. 첫째, 토사속성들 즉, 토사유형( $E_T$ ) 및 토공생산성 단위의 종류(예, 흐트러진 상태:  $P_{TY}=0$ ; 자연상태:  $P_{TY}=1$ ; 다진 상태:  $P_{TY}=2$ )를 사용하여 토사 체적변환 계수( $f_c$ )를 결정한다. 만약, 토사유형이 '일반토사'이고, 생산성 단위가 '자연상태'이면, 토사 체적변환 데이터 테이블로부터 흐트러짐 체적에서 자연상태 체적으로 변환하는 계수( $f_c$ )인 0.8을 호출한다. 토사 체적변환계수( $f_c$ )는 토사유형에 영향을 받는다. 토사종류는 4가지(예, 1) 흐트러진 흙무더기, 2) 난해한 굴삭성, 3) 접도가 높은 토사, 4) 바위)로 구분되며, 흐트러진 상태, 자연 상태 및 다져진 상태 간 전환이 가능하다. 토사가 흐트러진 흙무더기이면, 더 많은 토사를 이송시킬 수 있으므로 생산성이 가장 높다. 반면, 경암 지반이면 생산성이 가장 낮다. 토사유형별 보정계수 ( $f_M$ )값은 Peurifoy et al.(2009)가 제공하는 데이터를 참조한다. 둘째, 도저의 기계적 속성(예, 도저유형( $i$ ), 기어변속유형( $GS_T$ ), 차륜유형( $U_T$ ), 블레이드 유형( $B_T$ : 1=Universal, 2=Semi-Universal, 3=Straight, 4=Angle, 5=Cushion), 장비무게( $W_D$ ), 공칭마력( $HP$ ), 전후진속도( $S_M$ ))은 장비제원표를 참조하여 결정한다. Straight 및 Angle 블레이드는 블레이드 높이( $H_B$ ) 및 너비( $W_B$ )를 입력하고, Universal 및 Semi-Universal 블레이드는 왕의 수평길이( $Z$ ) 및 블레이드와 왕의 각도( $\theta$ )를 입력한다. 셋째, 현장 속성(예, 토사유형( $E_T$ ), 경사도( $G_B$ ), 도징거리( $D$ ))을 측정하고 저장한다.

### 3.2 도저 생산성 연산 모델

#### 3.2.1 Caterpillar 모델

장비제조사들(예, Caterpillar, Komatsu 등)은 출시한 도저의 성능차트(performance chart)를 제공한다(Caterpillar, 2010; Komatsu, 2009). 이 차트는 도저의 도징거리 별 공칭생산성을 그래프 형태로 제공한다. 이 공칭생산성 값들은 생산성 보정계수들을 다음과 같이 제어상태에서 실험을 실행하여 획득한 값들이다. (1) 토사의 밀도는 2,300 lb/lcy, (2) 작업면의 경사는 평지이며, 트랙타입 도저의 견인계수는 0.5이상 (3) 운전자의 숙련도는 매우 높고, 기어변경 시간은 0.05분, (4) 현장가시성은 매우 좋음, (5) 토사취급난이도는 용이함, (6) 도징방법은 단독 직진, (7) 작업효율은 100 % (즉, 1시간 작업 시 유휴시간 없음), (8) 사용된 블레이드 유형은 평블레이드, 그리고 (9) 기어변속장치는 자동변속으로 가정한다. 따라서 특정 현장에서 수집된 이들 9가지 생산성 보정계수들을 현실성 있게 보정할 필요가 있다. 성능차트를 사용하여 생산성을 연산하는 경우, 3단계의 연산들(예, 1) 공칭생산성 연산, 2) 보정계수 규명, 3) 환경요소를 고려한 유효 생산성 연산)을 실행한다.

성능차트는 도저유형( $i$ ) 및 도저거리( $D$ ) 별 공칭생산성 값을 그래프로 제공한다. 그래프에 제시된 곡선들은 쌍방대화식 질의가 불가능하다. 이를 보완하기 위해 이미지로 제공되는 생산성 그래프를 디지털 데이터로 샘플링하고, 곡선근사화 방법을 적용하여 샘플링 된 값을 함수로 모델링한다. 최적 공칭생산성함수는 Eq. (1)에 제시된 것처럼 지수함수로 규명되었다. 그래프를 함수로 정의하는 것은 실험데이터의 재사용 및 연산속도 단축에 기여한다.

$$P_i = ae^{(b \times D)} + ce^{(d \times D)} \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ 는 장비성능실험장에서 측정된 공칭생산성;  $a, b, c, d$ 는 도저별 생산성 커브의 상수.

Caterpillar사가 제시하는 생산성 보정계수들을 다음과 같이 정의하여 생산성 추정함수를 모델링하였다. 공칭생산성( $P_i$ )은 제어실험을 실행하여 수집한 실험데이터이므로 유효생산성은 보정요인들을 공제해야한다. 다음의 보정계수들을 공칭생산성에 곱하여 대상현장에 적합한 유효생산성을 연산한다. 이 계수들은 1) 토사무게( $f_{EW}$ ), 2) 작업면 경사( $f_G$ ), 3) 운전자의 숙련도( $f_{OS}$ ), 4) 현장가시성( $f_V$ ), 5) 토사취급난이도( $f_{MH}$ ), 6) 도저운용방법( $f_{DM}$ ), 7) 작업 효율성( $f_{JE}$ ), 8) 배토관 유형( $f_B$ ), 9) 변속장치유형( $f_{CS}$ )을 포함한다. 각 보정계수는 주행장치 유형(track and wheel-type)에 따라 다르다(Peurifoy et al., 2009). 이들 9가지 보정계수를 모두 고려하는 생산성 예측함수는 다음과 같다.

토사무게 보정계수( $f_{EW}$ )는 다음과 같이 획득된다. 공칭생산성은 흐트러진 상태의 표준 토사무게( $1,364 \text{ kg/m}^3$ )를 사용하여 산출된 값이다. 그러므로 토사무게 보정계수( $f_{EW}$ )는 Eq. (2)와 같이 표준 토사무게를 현장에 존재하는 토사유형에 상응하는 무게로

나누어 연산한다. 예를 들어 토사무게가 표준 토사무게보다 무겁다면 생산성 보정계수는 줄어들고 반면, 가볍다면 생산성 보정계수는 증가한다. Table 1에 제시된 것처럼 토사유형은 12가지로 구분되며, 각 토사 유형별 무게는 Eq. (3)과 같이 토사속성 매트릭스( $E_M$ )로부터 획득된다.

$$W_E = E_M(E_T, 2) \quad (2)$$

$$f_{EW} = 1,364 / W_E \quad (3)$$

여기서,  $E_T$ 는 토사유형;  $E_M$ 는 토사속성 매트릭스;  $W_E$ 는 토사유형별 토사무게;  $f_{EW}$ 는 토사무게 보정계수; 1,364은 표준토사무게 (Unit:  $\text{kg/m}^3$ )임.

작업면의 경사 보정계수( $f_G$ )는 다음과 같이 연산된다. 경사로를 등반하며 도징하는 경우, 도저가 전진하는 반대방향으로 중력이 작용한다. 따라서 평지에서 도징하는 것에 비해 적재된 토사가 블레이드 측면으로 더 많이 유실된다. 반면, 경사면을 내려오는 방향으로 도징하는 경우, 토사 운송방향과 중력방향이 같아져 블레이드에 적재된 토사가 쓸려 내려오면서 주변부의 토사도 함께 이동시키는 상승효과가 있다. 이처럼 토사운반량은 도저가 경사지를 운행하는 방법 및 경사도에 따라 변한다. 경사도( $G$ )는 백분율로 표시되며, 수평거리 100 ft당 1 ft의 높이변화를 1 %로 정의한다. '+'기호는 상승경사를 '-'기호는 하강경사를 의미한다. 경사도 보정계수는 장비제조사에서 그래프 형태로 제공하는 성능차트로부터 획득된다. Caterpillar가 제공하는 경사보정계수 그래프는 Eq. (4)에 제시된 것처럼 곡선근사화법에 의해 2차 다항식으로 규명되었다. 본 연구에서 도저의 성능차트를 근사화한 결과  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 의 값으로 각각 -0.0001, -0.0217, 1.008을 적용한다.

$$f_G = \alpha_1 G^2 + \alpha_2 G + \alpha_3 \quad (4)$$

운전자의 숙련도 보정계수( $f_{OS}$ )는 다음과 같이 연산된다. 운전자의 숙련도( $s$ )는 3등급( $s:1=$ 능숙,  $2=$ 보통,  $3=$ 미숙)으로 분류되며, Eq. (5)에 제시된 것처럼 Peurifoy et al.(2009)가 추천한 운전자 숙련도 계수( $O_M$ ) 행렬을 사용한다.

$$f_{OS} = O_M(s, 2) = \begin{bmatrix} 1, 1.0 \\ 2, 0.75 \\ 3, 0.60 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $O_M$ 은 운전자 숙련도 매트릭스

현장가시성 보정계수( $f_V$ )는 다음과 같이 연산된다. 가시성(visibility)은 날씨와 같은 기상환경 변화와 관계된다. 이는 운전자

Table 1. Unit Weight of Each Rock-Earth

$E_T$	Material	Bank weight ( $\text{kg/m}^3$ )
1	Clay, dry	1,602
2	Clay, wet	1,780
3	Earth, dry	1,661
4	Earth, wet	1,898
5	Earth and gravel	1,898
6	Gravel, dry	1,661
7	Gravel, wet	2,017
8	Limestone	2,610
9	Rock, well blasted	2,491
10	Sand, dry	1,542
11	Sand, wet	1,602
12	Shale	2,076

가 정상적인 작업수행을 위해 필요한 환경변수이다. 본 방법론은 Eq. (6)에 제시된 가시성 계수( $V_M$ ) 행렬을 사용한다(Peurifoy et al., 2009). 운전자에게 작업수행을 위한 충분한 가시성이 확보되면, 최대값 '1'을 부여하고, 그렇지 않으면(예, 먼지, 비, 눈, 안개, 또는 어두운 상황) '0.8'을 할당한다.

$$f_V = V_M(v, 2) = \begin{bmatrix} 1, 1.0 \\ 2, 0.8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $V_M$ 은 가시성 매트릭스;  $v$ 는 가시상태 등급.

토사운용난이도 보정계수( $f_{MH}$ )는 다음과 같이 연산된다. 도저의 생산성은 토사종류 및 상태에 영향을 받는다. 토사종류 및 상태는 4가지(예, 1) Loose stockpile, 2) Hard to cut, 3) Hard to drift/very sticky material, 4) Rock으로 구분한다. 토사가 흐트러진 흙무더기 라면 도징하기에 가장 적합한 반면, 단단한 바위 무더기일 경우 블레이드 전면에 쌓이는 형태가 불규칙적이고 바위들의 형태와 크기가 서로 달라 도징이 용이하지 않다. 또한, 매우 질척한 상태의 진흙은 점도가 너무 높기 때문에, 토사전면에 쌓이는 토사량이 도징가능 토사무게 또는 도징가능 토사량보다 더 많이 적재되기도 한다. 토사종류 및 상태는 토사를 운용하는 난이도에 영향을 주고, Eq. (7)에 제시된 것처럼 선행연구가 제공하는 데이터를 참조하며, 각 토사유형 별 운용난이도 계수를 참조한다.

$$f_{MH} = M_M(e, 2) = \begin{bmatrix} 1, 1.2 \\ 2, 0.7 \\ 3, 0.8 \\ 4, 0.7 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $M_M$ 은 운용난이도 매트릭스;  $e$ 는 운용난이도 구분임.

도저운용방법 보정계수( $f_{DM}$ )는 다음과 같이 연산된다. 토사운 반을 위한 도징 방법은 1) 좌우로 흙을 밀어내어 흙의 언덕을 만들면서 도징하는 방법(Slot dozing), 2) 2대의 도저를 양옆으로 동시에 운용하는 방법(Side-by-side or blade-to-blade), 3) 직진 도징 방법(Straight dozing)의 3가지로 분류되며, 각 방법 별로 도징 과정에서 유실토사량이 다르다. 각 운용방법별 보정계수는 Eq. (8)에 의해 결정된다.

$$f_{DM} = D_M(h, 2) = \begin{bmatrix} 1, 1.20 \\ 2, 1.15 \\ 3, 1.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $f_{DM}$ 은 도저운용방법 보정계수;  $DM$ 은 방법별 보정계수 매트릭스;  $h$ 는 도징방법.

작업효율성 보정계수( $f_{JE}$ )는 총 작업시간대비 실제작업시간을 반영하기 위해 사용되며, Eq. (9)로 연산된다.

$$f_{JE} = T_R/60 \quad (9)$$

여기서,  $f_{JE}$ 는 작업효율성 보정계수;  $T_R$ 은 작업시간 60분당 생산 활동을 수행한 시간.

배토판 유형 보정계수( $f_B$ )는 다음과 같이 연산된다. 배토판 유형( $B_T$ )은 Universal ( $B_T=1$ ), Semi-universal ( $B_T=2$ ), Straight ( $B_T=3$ ), Angle ( $B_T=4$ ), Cushion ( $B_T=5$ )을 포함한다. 장비 제조사 성능시방은 Angle-blade와 Cushion-blade가 Straight-blade의 50 ~ 75 % 성능을 발휘한다고 명시한다. 본 연구는 Straight-blade의 63 %로 가정한다. 배토판 유형 보정계수( $f_B$ )의 결정식은 Eq. (10)과 같다.

$$f_B = \begin{cases} 1 & \text{s.t. } B_T = 1, 2, 3 \\ 0.63 & \text{s.t. } B_T = 4, 5 \end{cases} \quad (10)$$

변속유형 보정계수( $f_{GS}$ )는 운전자가 사용하는 변속장치종류 ( $Tt$ ) (예, Direct drive, Power shift)에 의해 결정된다. 다이렉트 드라이브( $Tt=1$ )는 지형조건의 변화가 크지 않고, 잦은 기어변속이 요구되지 않으며, 도징거리가 긴 작업지에 유용하다. 반면, 파워시프트( $Tt=2$ )는 지형조건의 변화가 크고, 잦은 기어변속이 요구되며, 도징거리가 짧은 작업지에서 유용하다. 변속유형에 따른 보정계수의 결정 조건식은 Eq. (11)과 같다. 단, 변속 시간은 0.1분으로 가정한다.

$$f_{GS} = \begin{cases} 1 & \text{s.t. } Tt = 1 \\ 0.80 & \text{s.t. } Tt = 2 \end{cases} \quad (11)$$

상기 9가지 보정계수들을 모두 반영하는 지표인 생산성 보정계수( $F$ )는 Eq. (12)에 의해 연산된다.

$$F = f_{EW} \times f_G \times f_{OS} \times f_V \times f_{MH} \times f_{DM} \times f_{JE} \times f_B \times f_{GS} \quad (12)$$

마지막으로 유효생산성( $P_{CAT}$ ;  $m^3/h$ )은 Eq. (13)에 제시된 것처럼 공칭생산성( $P_I$ )과 생산성 보정계수( $F$ )를 곱하여 연산된다.

$$P_{CAT} = P_I \times F \quad (13)$$

### 3.2.2 PLS 모델

PLS 모델(Peurifoy et al., 2009)은 직진 도징 작업을 표준으로 하는 도저의 생산성 연산식을 제공한다. 이는 현장에서 직접 측정된 블레이드 용량을 사용하여 도저의 생산성( $P_{PLS}$ )을 다음과 같이 연산한다. 공칭 블레이드용량( $Q_{NP}$ )은 '흐트러진 토사'를 측정대상으로 한다. 이는 측면판(side plates)의 부착여부, 즉 슬롯(slot)

오퍼레이션 가능 여부에 따라 영향을 받는다. 블레이드 용량은 Eq. (14)에 제시된 것처럼 블레이드 전면에 쌓이는 토사높이( $H$ ), 블레이드 진행방향으로 쌓이는 토사길이( $W$ ) 및 블레이드 수평방향으로 쌓이는 토사너비( $L$ )를 사용하여 연산한다.

$$Q_{NP} = \begin{cases} H^2L & s.t. SL = 1 \\ 0.80H^2L & s.t. SL = 0, SD = 1 \\ 0.75H^2L & s.t. SL = 0, SD = 0 \end{cases} \quad (14)$$

여기서,  $H$ 는 블레이드 전면에 쌓이는 토사높이;  $L$ 은 블레이드에 적재되는 토사너비;  $SL$ 은 측면판 부착여부를 나타내는 변수(예,  $SL: 1=부착, 0=미부착$ );  $SD$ 은 슬롯도징 가능여부를 나타내는 변수(예,  $SD: 1=가능, 0=불가능$ ).

Peurifoy et al.(2009)는 블레이드 용량 산출시 토사길이( $W$ )를 토사높이( $H$ )의 2배로 제한하고, 토사높이의 제곱( $H^2$ ) 및 토사너비( $L$ )에 비례하는 공식을 제시하였다. 특정 블레이드가 적용되는 경우, 블레이드 용량은 측면판 부착 유무( $SL=0$  or  $1$ )와 슬롯도징 적용가능성( $SD=0$  or  $1$ )도 중용변수로 작용한다. 이와 관련하여 3개 경우의 수가 존재한다. 첫째, 측면판이 부착된 블레이드는 슬롯 오퍼레이션이 가능( $SL=1$ )하기 때문에, 블레이드 측면으로 유출되는 토사가 적다. 둘째, 측면판이 부착되지 않았으나( $SL=0$ ) 이전 도징에 의해 형성된 측면 흠무더기 때문에 슬롯도징이 가능( $SD=1$ )한 경우이다. 이 경우, 블레이드 용량은 측면판이 부착된 블레이드 용량의 약 80 %로 간주된다. 한편, 슬롯 오퍼레이션이 불가능( $SD=0$ )하고, 측면판도 미부착( $SL=0$ )이면, 측면판이 부착된 블레이드 용량의 75 %로 간주한다. 주지할 점은 공칭 블레이드용량( $Q_{NP}$ )의 경우, 실제 블레이드 전면에 누적된 토사더미의 규격(예, 높이, 전진방향 토사길이 및 너비)을 고려하지 않고 또한 생산성 보정계수들도 반영하지 않는다는 점이다. 결국 이러한 가정은 생산성 연산결과에 편차를 초래한다. 배토판에 적재되는 토사높이( $H$ )와 길이( $L$ )는 도저에 부착된 카메라를 사용하여 촬영된 영상을 분석하여 획득한다. 이 치수 정보는 부착된 블레이드 치수와 토사더미의 상대적 치수를 비교하여 측정한다.

작업장 지면마찰계수( $C_T$ )는 주어진 도저 주행장치 유형( $U_T: 1=track; 2=wheel$ )과 지면조건(예, 흐트러진 토사)을 활용하여 Peurifoy et al.(2009)가 제공하는 데이터를 참조하여 적용한다. 공칭도저무게( $W_N$ )는 트랙터 무게( $W_T$ )와 블레이드 무게( $W_B$ )를 더하여 산출한다. 공칭도저무게는 평평한 지면에서의 실제무게이다. 도징 경사도( $\theta$ , 예 5 %)가 주어졌을 때, 경로의 경사면과 동일면에 작용하는 단위 도저무게 당 경사저항( $R_G$ , 혹은 경사저항)은 kg/ton 단위로 계산된다. 경사도가 1 % 증감될 때마다 소요견인력은 10 kg/ton이 증감되는 것으로 간주한다(Peurifoy et al.,

2009). %단위에서 kg/ton단위로 변환하기 위해 Eq. (15)에 제시된 것처럼 계수 10이 사용된다.

$$R_G = (\tan(\theta) \times 100) \times 10 \quad (15)$$

유효도저무게( $W_E$ )는 Eq. (16)에 제시된 것처럼 도징 경로에 의해 발생하는 경사저항력 혹은 경사저항력을 고려하여 계산된다.

$$W_E = W_N(1 + R_G) \quad (16)$$

실제 블레이드 전면에 적재되는 토사량( $Q_{AP}$ )이 확정된 후, 유효도저무게( $W_E$ )를 수평방향으로 전진시키는 데 요구되는 힘은 유효도저무게( $W_E$ )와 지표면과 주행장치 간 마찰계수( $C_T$ )를 곱하여 획득한다. 도저가 계속 전진하기 위해서 수평방향 추진력은 블레이드 전면에 누적된 토사의 수평 저항력 이상을 요구한다. 수평방향 저항력은 토사무게( $W_S$ )와 블레이드 전면에 누적된 토사의 마찰계수를 곱하여 연산된다(Church, 1981). 주어진 토사유형(ET)의 단위무게( $w_e$ )를 취리한 후, 블레이드 전면에 쌓인 토사무게( $W_S$ )는 누적토사량( $Q_{AP}$ )과 단위무게( $w_e$ )를 곱하여 얻어진다. 실제 블레이드 전면에 누적된 토사의 마찰계수( $C_{FL}$ )는 Eq. (17)에 의해 산출된다.

$$C_{FL} = \frac{W_E \times C_T}{Q_{AP} \times 2,700} \quad (17)$$

총무게( $W_T$ )는 이송해야할 토사무게( $W_S$ )와 유효도저무게( $W_E$ )를 합하여 연산한다. 장비무게( $W_E$ )는 도저사양( $i$ ) 정보를 활용하여 제조사 성능차트로부터 획득된다. 전진에 요구되는 견인력( $Db_f$ )과 후진에 요구되는 견인력( $Db_b$ )은 각각 Eqs. (18) and (19)를 사용하여 산정한다.

$$Db_f = C_{FL} \times W_S + (R_R + R_G + R_p) \times W_E \quad (18)$$

$$Db_b = (R_R + R_G + R_p) \times W_E \quad (19)$$

전진속도 및 후진속도는 다음과 같이 획득된다. 도저의 1회 생산 사이클은 다음 4가지 동작들(예, 전진변속, 전진, 후진변속, 후진)로 구성된다. Eq. (20)은 장비제조사가 제공하는 장비성능 데이터로부터 커브 피팅(curve fitting method)을 통해 전진 및 후진속도에 해당하는 비선형회귀식을 유도한 함수이다. 도저사양( $i$ ), 선택된 전진기어( $p$ ), 후진기어( $q$ ), 전진에 요구되는 견인력( $Db_f$ ), 그리고 후진에 요구되는 견인력( $Db_b$ )이 주어지면, 이 함수

는 전진 및 후진속도( $S_M = [V_f, V_r]$ )를 연산한다. 후진속도는 토사를 운반하지 않기 때문에 최대속도를 제공하는 기어단수를 채택한다. 또한, 경사면을 후진으로 등반하는 경우는 경사저항을 후진에 요구되는 견인력( $Db_r$ )으로 설정한다.

$$[V_{f_p}, V_{r_q}] = cal V_{fp} V_{rq}(i, p, q, Db_p, Db_r) \quad (20)$$

도징 1회 사이클 시간( $CM$ ; min)은 Eq. (21)에 제시된 것처럼, 전·후진 기어변속시간, 전진 및 후진시간을 합산한 값이다. 단, 전진과 후진 거리는 동일한 것으로 가정한다.

$$CM = t_i + \frac{D}{V_{f_i}} + \frac{D}{V_{r_i}} \quad (21)$$

여기서,  $i$ 는 장비종류변수;  $t_i$ 는 장비별 기어 변경 시간(=전진변속시간+후진변속시간);  $V_{f_i}$ 는 장비별 전진 평균 속도(m/min);  $V_{r_i}$ 는 장비별 평균 후진 속도(m/min);  $D$ 는 도징거리(m).

PLS 모델기반 도저의 생산성( $P_{PLS}$ ;  $m^3/h$ )은 이전에 계산된 출력변수들의 값을 Eq. (22)의 입력변수로 사용하여 유도된다.

$$P_{PLS} = \frac{60 \times Q_p}{CM} \times fm \quad (22)$$

여기서, 60은 분단위를 시간단위로 환산하는 상수;  $Q_p$ 는 블레이드의 용량( $Q_{NP}$ ,  $Q_{AP}$ );  $fm$ 은 작업효율계수(적용계수가 없는 경우, 1로 가정);  $CM$ 은 경사도를 고려한 도저의 사이클 시간.

PLS 모델은 생산성( $P_{PLS}$ ) 연산을 위해 3가지 입력변수들(예,  $Q_p$ ,  $CM$ ,  $fm$ )을 사용한다. 그러나 이들 입력변수를 결정하는 상세한 절차 및 기준이 제공되지 않는다. 따라서 토공전문가조차 입력변수 값을 결정하는데 어려움이 있어 다소간 임의적 선택이 개입된다. 또한, 이 모델은 다른 기존 생산성 연산모델들이 고려하는 보정계수들 중 몇몇 계수들을 고려하지 않는 한계점이 있다. 예를 들어, 도저의 토사운반량에 중대한 영향을 미치는 도징 경로의 경사도( $\theta$ )가 고려되지 않는다. 또한 배도관 유형은 고려하면서도 토사무게 보정계수를 고려하지 않는다. PLS 모델은  $Q_{AP}$  값을 획득할 수 있을 때만 사용하거나,  $Q_{NP}$ 를 사용하기 위해서는 간과된 보정계수들을 공개해야한다. 그렇지 않으면 상당한 오류를 초래한다. 따라서 PLS 모델을 적용할 때,  $Q_{AP}$  혹은  $Q_{NP}$  중 어떤 값이 사용되느냐에 따라 생산성 보정 계수들을 달리 고려해야한다. 이상에 기술한 바와 같이, PLS 모델과 Caterpillar 모델은 생산성 보정요인들을 다르게 취급하고 적용하기 때문에 두 모델을 비교분석하기 위해 보정요인들을 동등하게 고려할 필요가 있다. 본 연구는 사례분석 단계에서 연산모델 식별자(예, PLS 모델( $PM=1$ ); Caterpillar

모델( $PM=2$ ))를 입력받아 두 가지 모델의 연산결과를 비교분석한다.

## 4. 사례연구

### 4.1 사례현장 및 장비운용 개요

상기 도저생산성 추정모형의 결과를 비교분석하기 위해 Fig. 2에 제시된 도로 성토작업을 대상으로 사례연구를 실시한다. 도로의 폭, 포설깊이 및 포설길이는 각각 18 m, 0.40 m 및 1,200 m이며, 노면에 다진 총 성토량은  $8,640 m^3 (=18 \times 0.4 \times 1200)$ 이다. 취토는 측면 경사면에 있는 흙을 사용한다. 도징은 호트러진 상태의 흙이 운송되기 때문에 실제 도징하는 총 토사량은 할증계수(1.11)를 적용한  $9,590 m^3 (=8,640 \times 1.11)$ 이다. 도저의 작업사이클은 다음과

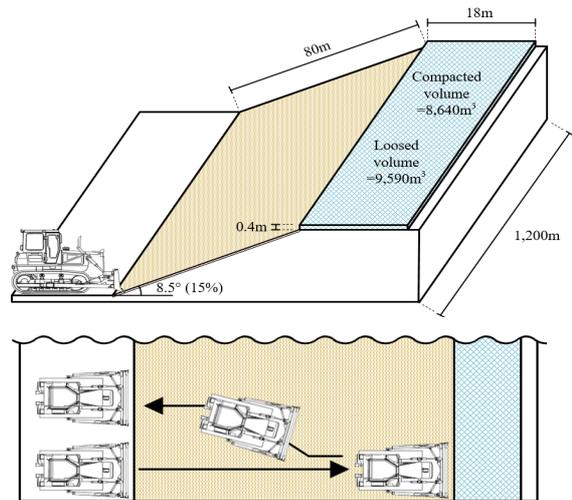


Fig. 2. Workplace Profile and Dozer Operation Method

Table 2. Caterpillar D8T Dozer Specification

Specification type	State	
Model	D8T	
Manufacturer	Caterpillar	
Tractor type	Track	
Shift type	Power-shift	
Engine Model	C15 ACERT	
Flywheel power	312 hp	
Blade dimensions	Type	Semi-U
	Capacity (by SAE)	8.60 m <sup>3</sup>
	Width	3.93 m
	Height	1.69 m
Transmission and speed	Forward gear 1	3.4 km/h
	Backward gear 3	14.2 km/h

같다. 도저는 80 m 오르막 경사(15 %)면을 전진기어 1단으로 도징하며 경사면에서 취토한 흙을 언덕 상부 수평 노면에 성토한 후, 후진기어 3단으로 변속하여 경사지 아래로 복귀한다.

현장에 투입된 도저는 Semi\_U-blade가 장착된 Caterpillar D8T (track-type)이며, 운전자는 10년 경력의 숙련자를 채용하였다. 실험 당일은 맑은 날로 오전9시부터 진행하였고, 도저의 평균작업시간은 측정결과 48 min/h로 분석되었다. 장비제원 정보는 Caterpillar 성능핸드북을 참조하여 Table 2에 제시한다.

## 4.2 생산성 분석 결과

### 4.2.1 Caterpillar 모델 분석결과

Caterpillar 모델을 사용하여 D8T도저의 생산성 보정계수 및 유효생산성은 다음과 같이 연산되었다. D8T도저의 공칭생산성 ( $P$ )은 Eq. (1)의 지수함수 합성식으로 근사화시킨 최적 계수를 추정하여 계산하였다. 계수값은 각각  $a=4,085$ ,  $b=-0.0165$   $c=494.2$ ,  $d=-0.0021$ 로 산출되었다. Caterpillar사가 제공하는 도저 성능 그래프(Caterpillar, 2010)에 따르면 이 도저는 평균 도징거리가 최소 50 ft (15.24 m)에서 최대 600 ft (182.88 m)에서 유효하다. 본 사례에서 도징거리( $D$ )는 80 m (262.47 ft)로 유도한 공칭생산성 추정식의 적용이 가능하다. 노체부분은 경사면을 대상으로 절토 후 성토가 이루어지며, 토사유형 ‘Earth, dry ( $f_{EW}=0.82$ )’, 작업경사 15 % ( $f_G=0.78$ ), 운전자 숙련도는 ‘전문기술자’( $f_{OS}=1.00$ ), 현장가시성은 ‘충분함’( $f_V=1.00$ ), 토사운용난이도는 ‘Loose stockpile’ ( $f_{MH}=1.20$ ), 도저운용방식은 ‘일반토사운반’( $f_{DM}=0.80$ ), 작업효율성은 ‘시간당 48분 가동’( $f_{JE}=0.83$ ), 사용되는 블레이드유형은 ‘Semi\_U blade’ ( $f_B=1.00$ ), 그리고 변속유형은 ‘Power-shift’ ( $f_{GS}=1.00$ )이다. Caterpillar가 장비별로 공개한 성능그래프를 사용하여 규명된 도저의 공칭생산성( $P$ )은 228.80 m<sup>3</sup>/h, 보정계수 ( $F$ ) 0.61로, Eq. (13)에 의해 산출되는 유효생산성( $P_{CAT}$ )은 139.56 m<sup>3</sup>/h이다. Table 3은 각 생산성 모델로 추정된 보정계수, 공칭생산성 및 유효생산성 정보를 제공한다.

### 4.2.2 PLS 모델 분석결과

PLS 모델을 사용하여 연산한 D8T도저의 유효생산성 산출과정은 다음과 같다. 현장에서 실측한 도저 블레이드에 적재된 토사형상

은 평균  $H=1.739$  m,  $L=4.542$  m로 측정되고, Eq. (14)에 의한 공칭 블레이드 용량( $Q_{NP}$ )은 12.65 m<sup>3</sup> (즉, 9.67 LCY)로 산출되었다. Eq. (20)에 의해 전진속도( $Vf_P$ ) 및 후진속도( $Vb_q$ )는 각각 3.4 km/h, 7.9 km/h가 유도되고, 평균전진속도( $Vf_i$ )와 평균후진속도( $Vr_i$ )는 각각 Table 2에 제시된 기어단수별 최고속도인 3.4 km/h (56.7 m/min), 14.2 km/h (236.7 m/min)을 참조하였다. 전·후진 평균속도( $Vf_i=56.7$  m/min,  $Vr_i=236.7$  m/min), 전·후진 평균기어변경 시간( $t_i=0.1$  min) 및 이동거리(전진거리=후진거리=80 m)를 Eq. (21)에 입력하면, 사이클 주기( $CM$ )가 1.94 min으로 산출된다. 도저의 공칭생산성( $P_{PLS}$ )은 앞서 산출된 입력변수와 Eq. (22)로부터 164.02 m<sup>3</sup>/h가 연산된다. 산출된 공칭 생산성에 실제 작업시간비율(48 min/h)에 해당하는 작업효율계수( $f_m=0.80$ )를 적용하면, 도저의 유효생산성은 131.21 m<sup>3</sup>/h이다.

Table 3에서, 각 모델의 공칭생산성과 보정계수를 적용한 생산성 결과값은 다소 편차가 존재한다. 공칭생산성(Nominal productivity) 추정결과는 PLS 모델이 Caterpillar 모델에 비해 보수적이다. 반면, 유효생산성(Effective Productivity) 산출식에 적용되는 보정계수 ( $F$ )는 Caterpillar 모델 및 PLS 모델이 각각 0.61 및 0.80을 연산하여 Caterpillar모델이 상대적으로 보수적이었다. 결과적으로 유효생산성은 Caterpillar모델이 PLS모델에 비해 5.9 % 높게 나타나 상대적으로 낙관적인 모델로 해석된다.

### 4.2.3 PLS 보정모델 제시

Caterpillar 모델은 생산성 영향요인을 제어된 실험환경에서 계측한 데이터를 사용하고, 상황에 따라 보정계수를 달리 적용하여 생산성을 예측하는 방식이다. 반면, PLS 모델은 연산에 필요한 최소 도징사이클을 현장에서 계측 및 분석하여 시간당 생산성 기대치를 연산하는 방식을 취한다. 따라서 두 생산성 예측모델의 접근방식의 차이를 절충하는 개선된 PLS모델을 제안하기 위해 Caterpillar 모델을 기초로하여 차용가능한 계수를 아래와 같은 기준에 따라 선정한다.

- (1) 토사유형( $f_{EW}$ )은 동일한 토공체적에 대해 흙의 밀도를 반영하는 지표이며, 토립자 특성은 토사 유형별 휴식각과 블레이드에 적재되는 토공량에 영향을 미친다. PLS 모델에서는 ‘운반이

Table 3. Comparison of Caterpillar Model and PLS Model

Model	Prod. (m <sup>3</sup> /h)	Blade cap. (m <sup>3</sup> )	Cycle time (min)	Correction factor								Applied factor	Effective prod. (m <sup>3</sup> /h)	Difference between (%)		
				$f_{EW}$	$f_G$	$f_{OS}$	$f_V$	$f_{MH}$	$f_{DM}$	$f_{JE}$	$f_B$			$f_{GS}$	$P_{CAT}$	$P_{REV}$
$P_{CAT}$	228.80	8.6	-	0.82	0.78	1.00	1.00	1.20	1.00	0.80	1.00	1.00	0.61	139.56	0	-13.4
$P_{PLS}$	164.02	12.65	1.94							0.80			0.80	131.21	+5.9	-6.7
$P_{REV}$	164.02	12.65	1.94		0.78	1.00		1.20	1.00	0.80		1.00	0.75	123.02	+11.9	0

완료된 토사의 형태(높이 및 너비)를 기반으로 평균적인 작업 토사량을 계산하므로 해당 변수는 PLS 모델에 이미 반영된 것으로 간주한다.

- (2) 작업지의 경사계수( $f_C$ )는 오르막인 경우 토사유실량이 증가되고, 내리막 경사인 경우 유실량이 감소한다. PLS 모델에 적용된 운반토사의 형태는 평지를 기준으로 계측되기 때문에 경사효율 계수를 차용할 필요가 있다.
- (3) 운전자 숙련도( $f_{OS}$ )는 Caterpillar 모델에서 숙련된 운전자를 기준으로 하므로 필요한 효율계수이다. PLS 모델에서는 ‘운반이 완료된 토사’를 기준으로 하고 있어 해당 계수는 PLS 모델에 이미 반영된 것으로 간주한다.
- (4) 가시성( $f_V$ ) 계수는 작업효율에 영향을 미치는 중요한 지역변수이다. 기존의 PLS 모델은 이러한 가시성 변수를 고려하지 않아 기상상태와 현장조건을 사실적으로 반영하기 위해 가시성 효율 계수(1.00)를 차용할 필요가 있다.
- (5) 토사운용난이도( $f_{MH}$ )는 작업시간에 영향을 미친다. PLS 모델은 운행속도와 작업거리를 입력변수로 사용하는 Eq. (21)로부터 평균 작업시간을 직접 유도하는 방식을 취한다. 그러나 토사운용난이도를 반영하면 평균화된 사이클 시간을 사실적으로 보정할 수 있기 때문에 토사운용난이도계수의 차용이 필요하다.
- (6) 도저운용방식( $f_{DM}$ )은 토사운반시의 배토판에 적재되는 토사의 유실량에 영향을 미친다. 본 사례연구는 직진 도장방법을 적용하지만, 현장상황에 따라 도저의 동작방식을 현실적으로 반영할 수 있도록 해당계수를 도입할 필요가 있다.
- (7) 도저에 적용되는 블레이드유형( $f_B$ )은 운반되는 토사의 형태에 영향을 미친다. PLS 모델은 ‘운반이 완료된 토사’의 계측값을 사용하므로 해당 변수는 PLS 모델에 적용된 것으로 간주한다.
- (8) 기어의 변속유형( $f_{GS}=1.00$ )은 Power-shift를 사용하는 도저의 평균 기어변경 시간을 적용하고 있기 때문에 실제 변속유형을 반영할 수 있도록 해당계수의 차용이 필요하다. 상기한 바와 같이 이론기반 Caterpillar 모델과 실측기반 PLS 모델을 절충하는 등가보정된 PLS 모델( $P_{REV}$ )을 Table 3의 마지막 행에 제시한다. 등가보정을 위해 PLS 모델이 고려하지 않은 작업지의 경사, 토사운용난이도, 변속유형 요인들을 Caterpillar 모델에 적용된 계수들로 대체할 경우 생산성 보정계수는 0.75 ( $0.78 \times 1.00 \times 1.20 \times 1.00 \times 0.80 \times 1.00$ )이 산출된다. 이들 생산성 영향요인들을 추가적으로 고려하여 보정된 PLS 모델의 유효생산성( $P_{REV}$ )은 123.02 m<sup>3</sup>/h로 산정된다. 이는 기존의 PLS 모델의 유효생산성과 비교하여 6.4 %, Caterpillar 모델의 유효생산성에 비해 13.4 % 더 보수적인 값으로 연산된다. 연산된  $P_{CAT}$ ,  $P_{PLS}$ ,  $P_{REV}$ 의 값을 사용하여 도저 1대를 하루

8시간 사례 프로젝트에 적용할 경우, 작업소요일은 각각 9일 (8.59일 = 9,590 m<sup>3</sup>/(139.56 m<sup>3</sup>/h × 8 h)), 10일(9.07일), 그리고 10일(9.74일)이 산출된다.

## 5. 결론

본 논문은 도저의 생산성 연산을 위한 입력변수들(예, 1회 사이클 시간, 가시성 및 운전자 숙련도 등에 따른 작업효율성, 블레이드 유형, 지형 및 지리적 속성, 엔진마력, 블레이드 용량, 운행속도, 토사유형, 작업조건, 관리효율, 운전원의 숙련도 등)을 규명하고, 이 생산성 변동요인들의 값들을 2가지 산업표준 생산성 연산모델에 동등하게 반영한 결과를 비교 분석하는 방법론을 제공한다.

본 연산모형은 Caterpillar 모델이 생산성 연산에 요구되는 입력 변수들, 공식들 및 수많은 실험 데이터 원본 그래프들을 빠짐없이 참조하여 연산절차에 반영해야하는 시간 소모적이고 오류발생 가능성이 큰 단점을 보완하는 새로운 방법을 제공한다. 보정된 PLS 모형은 시시각각 변하는 30가지 도저 생산성 변동속성들을 수집하고, 이들을 활용하여 주어진 토공공정의 생산성을 즉각적으로(초 및 분단위로) 비교 평가하는 연산모형을 제공한다. 의사결정권자들은 Caterpillar, PLS 모델 및 보정된 PLS 모델이 반환하는 보수적 결과값과 낙관적 결과값을 활용하여 수치에 기반을 둔 의사결정이 가능하다.

## 감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2018 R1A5A1025137). 이에 감사드립니다.

## References

- Caterpillar, Inc. (2010). *Caterpillar performance handbook 40<sup>th</sup> Ed*, Caterpillar Inc, Peoria, I.L.
- Church, H. K. (1981). *Excavation handbook*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Komatsu, Inc. (2009). *Specifications and application handbook*, 30th Ed, Komatsu Inc, Tokyo, Japan.
- Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J. and Shapira, A. (2009). *Construction planning, equipment, and methods 7<sup>th</sup> Ed*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- SAE International (2003). *Earth-moving machinery crawler and wheel tractor dozer blades volumetric ratings : SAE J/ISO 9246*, SAE International, Warrendale, M.I.
- Shi, J. and AbouRizk, S. S. (1998). “An automated modeling system

- for simulating earthmoving operations.” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 121-130.
- Shi, J. J. (1999). “A neural network based system for predicting earthmoving production.” *Construction Management & Economics*, Vol. 17, No. 4, pp. 463-471.
- Touran, A., Sheahan, T. C. and Ozcan, E. (1997). “Rational equipment selection method based on soil conditions.” *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 123, No. 1, pp. 85-88.
- Xiaoping, B., Gengyun, Z. and Xiaojing, Z. (1996). “Predicting vehicle turbocharged diesel engine performance at altitude.” *SAE Technical Paper*, No. 961826, pp. 57-64.