

## 굴삭기를 위한 레이저 스캐너 기반 확률 및 예견 작업 위험도 평가 알고리즘 개발

### Laser-Scanner-based Stochastic and Predictive Working-Risk-Assessment Algorithm for Excavators

오광석<sup>1</sup> · 박성렬<sup>2</sup> · 서자호<sup>3</sup> · 이근호<sup>4</sup> · 이경수<sup>2\*</sup>

Kwang Seok Oh<sup>1</sup>, Sung Youl Park<sup>2</sup>, Ja Ho Seo<sup>3</sup>, Geun Ho Lee<sup>4</sup> and Kyong Su Yi<sup>2\*</sup>

Received: 02 Aug. 2016, Revised: 07 Sep. 2016, Accepted: 23 Sep. 2016

**Key Words** : Laser scanner(레이저 스캐너), Kalman filter(칼만 필터), Reachable area(도달 가능영역), Behavior prediction(거동예측), Working area prediction(작업영역 예측), Intersection area(교차영역)

**Abstract**: This paper presents a stochastic and predictive working-risk-assessment algorithm for excavators based on a one-layer laser scanner. The one-layer laser scanner is employed to detect objects and to estimate an object's dynamic behaviors such as the position, velocity, heading angle, and heading rate. To estimate the state variables, extended and linear Kalman filters are applied in consideration of laser-scanner information as the measurements. The excavator's working area is derived based on a kinematic analysis of the excavator's working parts. With the estimated dynamic behaviors and the kinematic analysis of the excavator's working parts, an object's behavior and the excavator's working area such as the maximum, actual, and predicted areas are computed for a working risk assessment. The four working-risk levels are defined using the predicted behavior and the working area, and the intersection-area-based quantitative-risk level has been computed. An actual test-data-based performance evaluation of the designed stochastic and predictive risk-assessment algorithm is conducted using a typical working scenario. The results show that the algorithm can evaluate the working-risk levels of the excavator during its operation.

#### 기호 설명

$P$  : covariance matrix

$\psi$  : heading angle, rad

$\Delta t$  : discrete time interval, sec

$w$  : process noise

$v$  : measurement noise

$K$  : Kalman gain

$u$  : input matrix

$\psi_c$  : swing angle

$\theta_w$  : working part angle, rad

$A$  : area,  $m^2$

$v_b$  : body velocity,  $m/s$

\* Corresponding author: [kyi@snu.ac.kr](mailto:kyi@snu.ac.kr)

1 Department of Automotive Engineering, Honam University, 417 Eodeung-daero, Gwangsan-gu, Gwangju 62399, Korea

2 Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

3 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, 99 Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

4 Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

Copyright © 2016, KSFC

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.

#### 1. 서 론

굴삭기는 건설현장을 포함하는 다양한 작업현장에서 재료의 이동 및 파괴와 같은 작업을 수행하는

중요한 건설장비 중 하나이다. 특정 목적의 작업을 수행하기 위해 주변 작업자와 협동하여 작업을 수행하는 경우가 많고, 회전운동이 작업의 대부분을 차지하는 굴삭기는 blind spot과 장비운용자의 부주의로 인해 주변 작업자와의 충돌과 같은 치명적 사고가 많이 발생하고 있다. 실제로 작업현장 내 발생하는 사고사례 중 약 87%는 건설장비와의 충돌과 연관된 사고로 가장 높은 비율을 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 그러므로 건설현장 내에서 장비와의 사고를 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

J. Teizer는 건설장비의 blind spot으로 인해 발생하는 치명적인 사고를 분석하고, 레이저 스캐너를 이용하여 자동으로 blind spot을 탐지하고 safety zone을 확보할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.<sup>2)</sup> 또한 장비 혹은 알려지지 않은 물체와의 거리가 너무 가까워지게 되면 알람을 통해 위험상황을 알려줄 수 있도록 radio frequency(RF) 기반 기술을 연구개발 하였다.<sup>3)</sup> U. Lee는 건설현장에서의 모바일 안전 모니터링 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템은 초음파 센서, 적외선 센서, 그리고 무선통신 시스템으로 구성되어 있다.<sup>4)</sup> Y. Cho는 모델기반 automatic dynamic object recognition 방법을 제안하였고, 건설현장과 같은 3차원 공간에서 작업자가 신속히 동적물체를 인지할 수 있도록 projection-recognition-projection(PRPP) 기법을 제안하였다.<sup>5)</sup> F. Vahdatikhaki는 연속 모니터링 기법 기반 새로운 동적 작업공간을 표현하는 방법을 제안하였다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 굴삭기를 위한 단층 레이저 스캐너 기반 확률 및 예견 작업환경 모니터링 알고리즘을 제안하였다. 레이저 스캐너에서 획득된 거리정보와 각도정보를 이용하여 굴삭기 주변의 물체를 인지하고 클러스터링을 통해 대표점을 도출하였다. 도출된 대표점은 확장형 칼만필터(EKF)의 계측값으로 사용되어 물체의 위치와 속도정보를 추정하며 추정된 속도를 이용하여 선형 칼만필터(LKF) 기반 물체의 선수각도와 각속도를 추정하였다. 추정된 값들을 이용하여 물체의 도달가능 영역(reachable area)을 예측하고, 굴삭기의 작업장치부 kinematic 분석을 통해 작업영역을 예측하였다. 또한 예측된 물체의 거동과 굴삭기 작업영역을 이용하여 작업위험도를 평가하는 알고리즘을 개발하였으며, 본 연구에서는 특정 작업 시나리오(dumping)와 실제 레이저 스캐너의 계측 데이터를 이용한 현실적인 평가를 수행하였다. 개발된 알고리즘의 구성과 평가는 MATLAB 과

LABVIEW 환경에서 수행되었다. 평가결과 개발된 알고리즘은 합리적으로 작업 위험도를 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.


본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 레이저 스캐너 기반 상태추정 알고리즘에 대해 기술하고, 3장에서는 추정된 상태량을 기반으로 거동예측에 대한 내용을 설명한다. 4장에서는 실제 데이터 기반 시뮬레이션 결과에 대해 분석하고, 마지막 5장에서는 요약 및 결론에 대해 기술한다.

## 2. 레이저 스캐너 기반 상태추정

### 2.1 레이저 스캐너 특성

본 연구에서 건설 작업환경 인지를 위한 적합 센서를 선정하였다. 여러 센서 중 탐지 가능 각도와 거리가 본 연구에 적합하다고 판단되는 SICK사의 1-layer 레이저 스캐너 LMS111을 대상 센서로 선정하였으며 특성은 Table. 1과 같다. LMS111은 주사주파수와 각 분해능이 비례관계를 갖는 특성이 있다. 본 연구에서는 건설작업 환경의 보다 정확한 물체 탐지를 목표로 하므로 각 분해능을 0.25 deg로 설정하였다.

Table 1 Laser scanner specifications

Model	LMS111-10100
Sensor	
Size	152x102x106 [mm]
Mass	1.1 [kg]
Rated voltage	DC 24 [V]
Detection range	0.5~20 [m]
Field of view	270 [deg]
Resolution	0.25 / 0.5 [deg]
Frequency	25 / 50 [Hz]
Manufacturer	SICK

탐지 시야각이 270 deg인 대상 센서 2기를 굴삭기 상부체의 양 끝에 대각선으로 배치하는 경우, 최소 레이저 스캐너 개수로 작업기계의 전방위를 탐지할 수 있다. 대상으로 하는 5.5톤 굴삭기의 최대 작업 반경이 약 6.5m이므로 이를 고려하면, Fig. 1과 같이 최대 작업 영역이 인지 가능 영역에 포함되어 작업 환경 모니터링에 적합한 것을 확인할 수 있다.

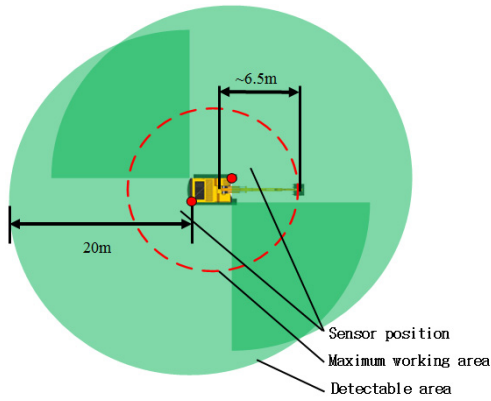


Fig. 1 Sensor position and detection range

### 2.2 주변 물체 상태 추정 알고리즘

굴삭기 주변의 작업 환경 모니터링 시스템은 대상 장비 주변 물체의 위치, 속도, 선수각도 등의 정보를 포함한 상태변수를 추정함으로써 위험도를 평가하는 것이 핵심이다. 이를 위해 본 연구에서 개발한 알고리즘은 Fig. 2에 설명된 것처럼 군집화(clustering), 상태 추정(state estimation), 선수각속도 추정(heading angle rate estimation) 과정으로 구성되어 있다.

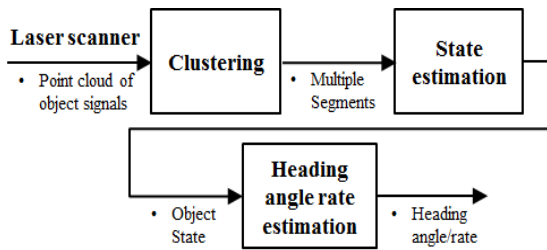


Fig. 2 Model schematics for state estimation

군집화 과정에는 euclidean minimum spanning tree(EMST) 기법을 이용하여 graph-based clustering을 진행하였다. Edge weights 간의 outlier를 결정할 때에는 random sample consensus(RANSAC) 기법을 이용하였다. 주변 물체의 상태를 추정하기 위해서 군집화된 물체 정보를 측정치로 사용하고, 물체의 거동정보를 제공하는 extended Kalman filter(EKF) 기반 추정기를 설계하였다. 추정기의 상태변수는 물체의 위치와 속도성분을 포함하도록 다음과 같이 정의하였다.

$$x_{[n]} = [p_{x[n]} \ p_{y[n]} \ v_{x[n]} \ v_{y[n]}]^T \quad (1)$$

여기서,  $p_{x[n]}, p_{y[n]}$ 는 물체의 x, y 위치를,  $v_{x[n]}, v_{y[n]}$ 는 물체의 x, y 방향 속력을 나타내며,  $n$ 은 물체의 track 번호이며 다음 수식부터 생략하겠다. 그

리고 굴삭기의 거동정보를 아래 수식과 같이 추정기의 입력으로 활용하였다.

$$u = [v_b \ \dot{\psi}_c]^T \quad (2)$$

여기서,  $v_b$ 는 굴삭기의 종방향 속도,  $\dot{\psi}_c$ 는 굴삭기의 yaw rate를 나타낸다. 위치 및 속도를 추정하기 위한 추정기의 process model은 다음과 같이 구성하였다.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + \omega_k \quad (3)$$

여기서,

$$f(x) = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T$$

$$F_1 = p_x \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) + p_y \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) - v_b \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t + v_x \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t + v_y \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t$$

$$F_2 = p_y \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) - p_x \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) + v_b \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t - v_x \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t + v_y \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t$$

$$F_3 = v_x \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t + v_y \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t$$

$$F_4 = v_y \cos(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t - v_x \sin(\dot{\psi}_c \Delta t) \Delta t$$

여기서  $\Delta t$ 는 대상 시스템의 주기이며 0.1 sec로 설정하였다. 추정기의 측정치로 군집화된 물체의 위치정보를 사용하며, 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (4)$$

이를 이용하여 아래와 같이 Kalman filter를 구성하였다.  $f$ 와  $h$ 를 편미분하여  $F$ 와  $H$ 를 얻고, 이를 이용하여 다음과 같이 time update 할 수 있다.

$$F = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad H = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

$$x_{k+1}^- = f(x_k^+, u_k) \quad (6)$$

$$P_{k+1}^- = F_k P_k F_k^T + W_k \quad (7)$$

Time update한 결과를 활용하여 Kalman gain을 구하고, 이를 이용하여 measurement update하여 추정 결과를 얻을 수 있다.

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H_k^T (H_k P_{k+1}^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (8)$$

$$x_{k+1}^+ = x_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - H_k x_{k+1}^-) \quad (9)$$

$$P_{k+1}^+ = (I - K_{k+1} H_k) P_{k+1}^- \quad (10)$$

위의 EKF 기반 추정기의 출력을 통해 다중 target의 위치와 속도를 알 수 있다. 보다 정확한 거동예측을 위해 linear Kalman filter (LKF) 기반 선수각속도 추정기를 설계하였다. 상태변수는 물체의 선수각과 각속도로 정의하였으며, 이산 시간 선형 상태방정식은 다음과 같다.

$$s = [\psi \quad \dot{\psi}]^T \quad (11)$$

$$s_{k+1} = F_k s_k + \omega'_k \quad (12)$$

$$t_{k+1} = H_k s_k + v'_k \quad (13)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \quad 0] \quad (14)$$

앞서 설명한 수식(6)-(10)을 이용하여 물체의 선수각속도를 얻을 수 있으며, 물체 합리적인 거동예측에 활용된다.

### 2.3 추정성능 평가

설계된 추정 알고리즘의 성능평가를 위해 실제 획득된 레이저 스캐너 데이터 기반 추정성능 결과를

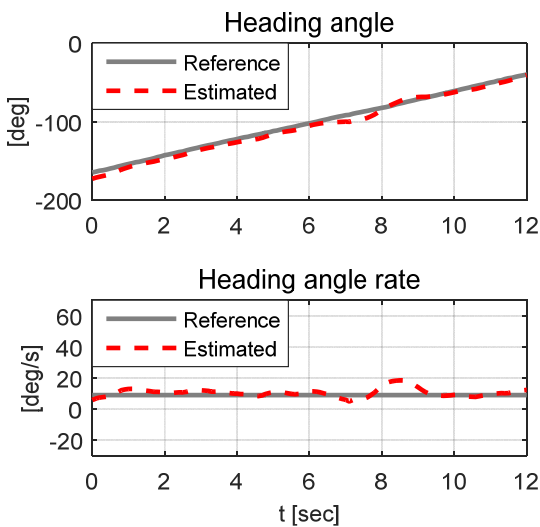


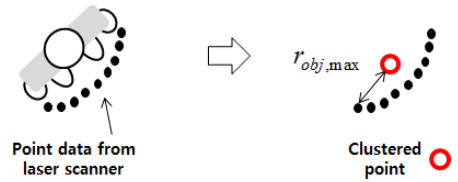
Fig. 1 Estimation result: heading angle and rate

Fig. 1에 나타내었다. 위치, 속도 그리고 선수각속도 기반 예측된 결과는 일정반경의 원운동을 하는 물체의 속도와 반경 기반으로 도출된 기준 선수각도와 각속도와 비교/분석 되었다.

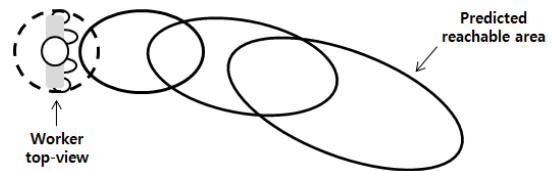
## 3. 확률 및 예견 작업환경 모니터링

### 3.1 물체 거동예측

본 연구는 주변 작업자와의 치명적인 사고를 예방하기 위한 모니터링 알고리즘의 개발을 목표로 하기 때문에 인지된 굴삭기 주변의 이동물체는 주변 작업자라고 가정하였다. 하지만 인지된 물체 중 사이즈의 크기와 추정된 속도의 크기를 이용하여 일반적인 사람의 가로 폭보다 작은 물체를 선택하고, 정지와 걷는 상태를 구분할 수 있는 속도 경계값을 이용하여 작업자를 구분하고 작업자의 이동상태를 구분하였다.<sup>7)</sup> 2장에서 추정된 물체의 위치, 속도, 선수각도, 선수각속도, 그리고 물체의 크기정보를 이용하여 향후 특정 시간 동안의 거동을 예측함으로써 도달가능 영역(reachable area)을 도출하였다. 이를 위해 일반적으로 보행자가 사용하는 확률적 가속도 분포 정보를 이용하였으며 Fig. 3는 물체의 사이즈 정보( $r_{obj,max}$ )의 도출과정과 이동물체(작업자)의 예측된 도달가능영역을 나타낸다.



(a) Object size



(b) Predicted reachable area

Fig. 3 Object size and predicted reachable area

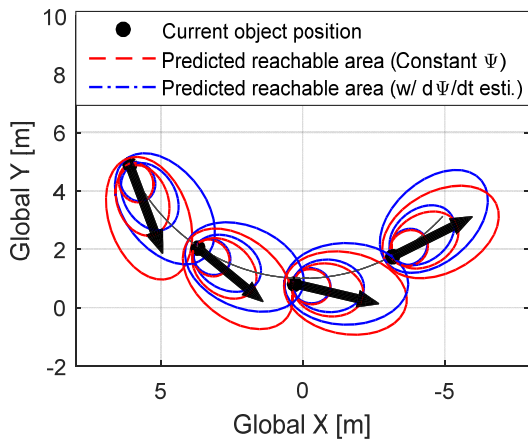
2장에서 도출된 이동물체의 사이즈 정보가 초기 물체를 동심원의 형태로 가정하였을 때 반지름으로 정의되어 Fig. 3의 점선이 나타내는 동심원을 구성하게 된다. 이때 추정된 위치와 속도값 그리고 일반적 보행자가 사용하는 종/횡방향 가속도 분포값을 이용

하여 아래와 같은 수식으로 타원으로 표현된 도달가능 영역의 반경을 계산할 수 있다.

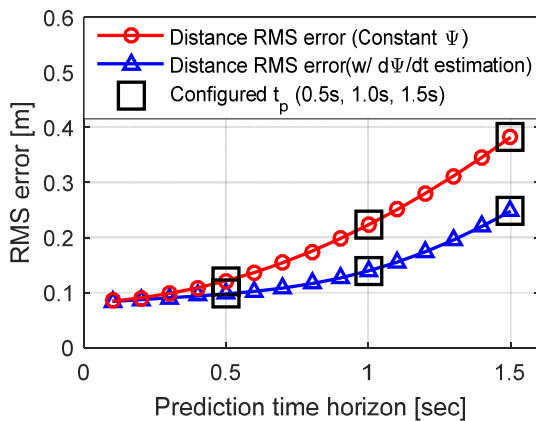
$$r_{major,i} = r_{obj,max} + 0.5(3\sigma_x)(i\Delta t)^2 \quad (15)$$

$$r_{minor,i} = r_{obj,max} + 0.5(3\sigma_y)(i\Delta t)^2 \quad (16)$$

$r_{major,i}$  와  $r_{minor,i}$  는 각각 타원의 장반경과 단반경을 나타내며 이들은 예측시간 간격( $\Delta t$ )과 예측단계( $i=0\sim 1.5$  sec) 그리고 보행자의 가속도 분포의 종/횡방향 표준편차( $\sigma_x, \sigma_y$ )를 이용하여 등가속도 운동상태 가정을 통해 계산되었다.<sup>8)</sup> 표준편차의 3배의 값이 가속도 값으로 적용된 것은 약 99.7%의 확률로 도달 가능한 영역을 도출하기 위함이다. 아래 Fig. 4는 2장에서 평가된 추정성능 시나리오의 작업자 거동예측 결과를 나타낸 것이다.



(a) Predicted reachable area without heading rate estimation



(b) Predicted error (RMS error)

Fig. 4 Behavior prediction: reachable area/error

확장형과 선형 칼만필터 기반 추정된 선수각속도를 적용한 거동예측 결과가 적용되지 않은 결과에 비해 현실적인 거동예측이 가능함을 확인할 수 있었으며 이를 기반으로 합리적인 위험도 평가를 수행하였다. 오차결과는 인지물체의 실제 이동경로와 예측된 이동경로와의 오차를 분석한 결과이며 선수각속도를 고려한 결과가 고려하지 않은 결과에 비해 예측오차가 상대적으로 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그러므로 레이저 스캐너를 이용한 물체의 추정 및 거동예측 결과는 합리적인 작업자의 거동을 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 다음 장은 굴삭기의 작업영역 예측에 관해 기술한다.

### 3.2 굴삭기 작업영역 예측

굴삭기의 작업장치는 버킷, 암, 붐으로 구성되어 있으며 각각의 장치는 굴삭기 차체에 연결되어 스윙모션에 의해 360도 회전하며 작업을 수행한다. 각 작업장치의 치수와 각도한계정보 등은 현재 실차 실험 고려대상인 5.5톤 급 굴삭기의 제원을 이용하여 kinematic 분석에 적용하였다. Kinematic 분석을 기반으로 굴삭기의 최대 작업영역과 현재 작업영역 그리고 예측작업 영역을 도출하였고, 도출된 각 작업영역은 작업위험도 평가에 사용되었다. Fig. 5는 kinematic 분석을 위한 굴삭기 작업장치의 주요점과 좌표를 나타낸다.<sup>9,10)</sup>

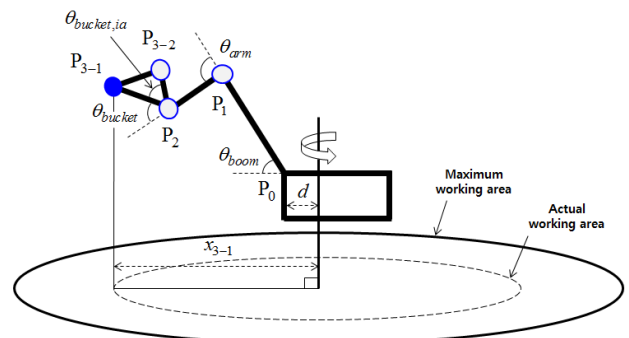


Fig. 5 Main points of working parts

$\theta_x (x : boom/arm/bucket/bucket,ia)$ 는 붐, 암, 버킷, 그리고 버킷의 사잇각을 나타낸다.  $P_m (m = 0, 1, 2, 3-1, 3-2)$ 는 작업장치의 주요점을 나타내며,  $d$ 는 굴삭기의 회전중심에서 붐의 시작점까지의 거리를 나타낸다.  $x_m$ 은 주요점의  $x$  성분을 나타내며 가장멀리 있는 주요점의  $x$  성분이 작업영역의 반지름으로 정의된다. 정의된 정보들을 이용하여 주요점의  $x$  성분을 아래 수식과 같이 계산할 수 있다.

$$X = AB \tag{17}$$

여기서 X, A, 그리고 B는 아래와 같다.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_{3-1} \\ x_{3-2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} l_{boom} \\ l_{arm} \\ l_{bucket} \\ d \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{boom}) & 0 & 0 & 1 \\ \cos(\theta_{boom}) \cos(\theta_{boom} + \theta_{arm}) & 0 & 0 & 1 \\ \cos(\theta_{boom}) \cos(\theta_{boom} + \theta_{arm}) \cos(\theta_{boom} + \theta_{arm} + \theta_{bucket}) & 1 & 1 & 1 \\ \cos(\theta_{boom}) \cos(\theta_{boom} + \theta_{arm}) \cos(\theta_{boom} + \theta_{arm} + \theta_{bucket,ia}) & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

계산된 주요점의 x 성분을 이용하여 실시간으로 절대값의 최대값을 도출하면 현재 실제 작업영역이 도출될 수 있으며, 굴삭기의 최대 작업반경은 각 작업장치의 각도한계를 이용하여 오프라인에서 최대 x 값을 도출함으로 결정되었다. 아래 수식은 실제 작업 반경의 도출 수식을 나타낸다.

$$r_{actual} = \max(X) \tag{18}$$

정의된 굴삭기 작업장치부 각도정보와 치수정보를 이용하여 최대 작업반경과 실제 작업반경을 도출 할 수 있었으며, 굴삭기의 회전각도와 속도정보를 이용하여 예측된 작업영역을 도출할 수 있다. Fig. 6는 도출된 작업영역과 주요점에 의해 정의된 예측된 작업 영역을 나타낸다.

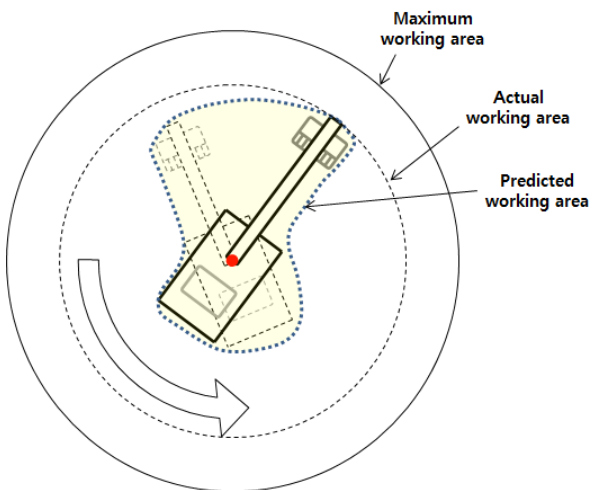


Fig. 6 Working area: maximum, actual, predicted

예측된 굴삭기의 작업영역은 5.5톤 급 굴삭기의 체원과 회전각도, 그리고 회전속도를 이용하여 주요 점의 좌표를 이용하여 예측된 i-th step에서의 위치

를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 굴삭기의 주된 작업 시 회전속도가 상대적으로 낮고 작업 각도가 평균적으로 90도 미만임을 고려하여 등속도 운동으로 가정하고 굴삭기의 거동을 예측하였다. 아래 수식들은 굴삭기 차체와 작업장치의 예측된 회전각도를 나타낸다.

$$\psi_{pre,i} = \psi_c + \dot{\psi}_c(i\Delta t) \tag{19}$$

$$\theta_{pre,w} = \theta_{c,w} + \dot{\theta}_{c,w}(i\Delta t) \tag{20}$$

$\psi_c$  과  $\dot{\psi}_c$ 는 각각 굴삭기 차체의 현재 회전각도와 회전각속도를 나타내며  $\psi_{pre,i}$ 는 i-th step에서의 예측된 회전각도를 나타낸다.  $\theta_{c,w}$  과  $\dot{\theta}_{c,w}$ 는 각각 굴삭기 작업장치부의 현재 회전각도와 회전각속도를 나타내며  $\theta_{pre,i}$ 는 i-th step에서의 예측된 작업장치 회전각도를 나타낸다. 예측된 시간은 물체의 거동예측 시간과 같은 1.5초로 정의하여 작업 위험도를 평가하였다. 아래 Fig. 7는 대상 굴삭기의 작업영역이 도출된 결과를 나타낸다.

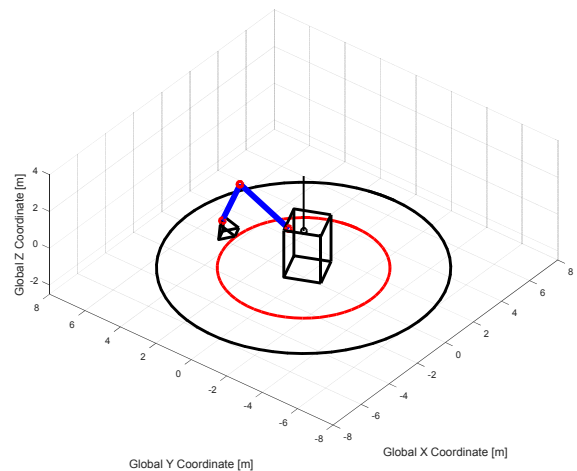


Fig. 7 Simulation result: working area (black - maximum working area, red circle - actual working area)

다음 3.3절에서는 본 연구에서 제안하는 작업 위험도 평가 알고리즘에 대해 기술한다.

### 3.3 작업 위험도 평가

작업위험도를 평가하기 위해 예측된 물체의 도달 가능영역과 굴삭기의 작업영역(최대, 실제, 예측)을 이용하여 작업위험도를 평가하였다. 위험도는 4가지

단계로 구분될 수 있으며 평가단계와 조건이 아래 Table 2에 기술되어 있다.

Table 2 Working risk assessment

위험도 단계	조건
Safety	예측영역 간 겹치는 부분 없음
Risky - Low	<b>최대 작업영역</b> 과 물체의 <b>예측영역</b> 이 겹침
Risky - Middle	<b>실제 작업영역</b> 과 물체의 <b>예측영역</b> 이 겹침
Risky - High	<b>예측 작업영역</b> 과 물체의 <b>예측영역</b> 이 겹침

각 예측된 시간에서의 물체의 도달가능 영역과 굴삭기 작업영역과의 겹치는 영역의 존재유무를 기반으로 작업 위험도를 평가하였으며, 정량적 평가를 위해 물체의 도달가능 영역이 특정 작업영역과의 겹치는 면적이 전체 도달가능 영역의 면적에서 차지하는 비율을 이용하여 평가결과를 도출하였다. 다음 수식은 정략적 평가값에 대해 나타낸다.

$$A_{ratio} = \frac{A_{obj,reachable} \cap A_{working}}{A_{obj,reachable}} \quad (21)$$

$A_{obj,reachable}$  는 물체의 도달가능 영역 면적;  $A_{working}$  은 굴삭기의 작업영역의 면적;  $A_{ratio}$  은 정략적 평가를 위한 면적의 비율값을 나타낸다. Fig. 8는 위험도의 각 단계 별 상황을 나타낸다.

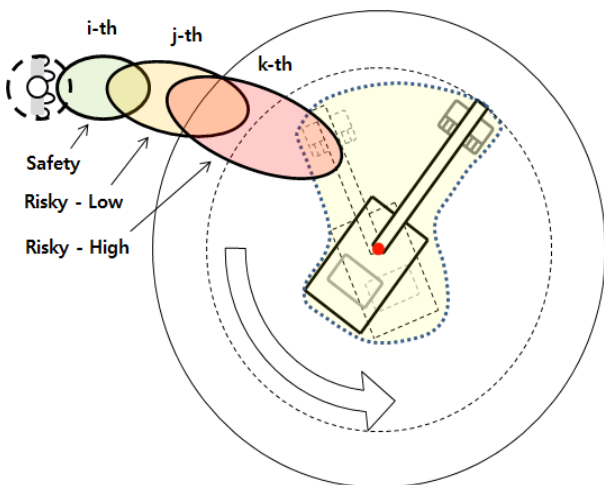


Fig. 8 Working risk levels

물체의 예측된 도달 가능영역이 i-th step에서는 최대 작업영역 밖에 존재하기 때문에 안전하다고 판단되지만 그 이후 예측시간인 j-th step에서는 최대 작업영역과 도달가능 영역이 겹쳐지기 때문에 Risky - low 단계로 평가될 수 있다. 하지만 k-th step에서는 굴삭기의 예측된 작업영역과 겹쳐지기 때문에 Risky - High 단계로 평가가 이루어짐을 확인할 수 있다. 예측된 도달가능 영역이 동시에 여러 작업영역과 겹쳐지게 될 때는 위험단계 중 높은 단계를 결과로도 출하게 구성되었다. 다음 장에서는 특정 작업조건에서의 제안된 안전도 평가 알고리즘의 성능을 실제 데이터 기반 성능평가 결과에 대해 기술한다.

#### 4. 실제 데이터 기반 성능평가

굴삭기의 전형적인 작업패턴인 dumping 시나리오를 기반으로 실제 계측된 데이터 기반 제안된 작업 위험도 평가 알고리즘의 성능을 평가하였다. 적용된 작업 시나리오는 3단계로 나뉘어져 있으며 Fig. 9에 설명되어 있다.

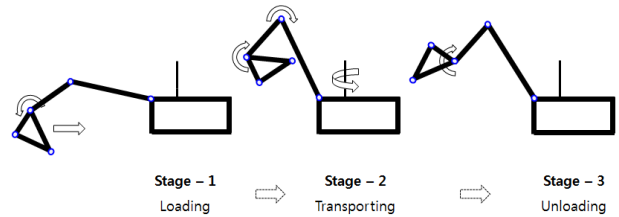


Fig. 9 Working scenario: dumping

Fig. 9에서 기술된 특정 dumping 시나리오의 작업 장치부와 차체의 회전각도 정보가 Fig. 10에 나타나 있고 위험도 평가를 위해 사용되었다.

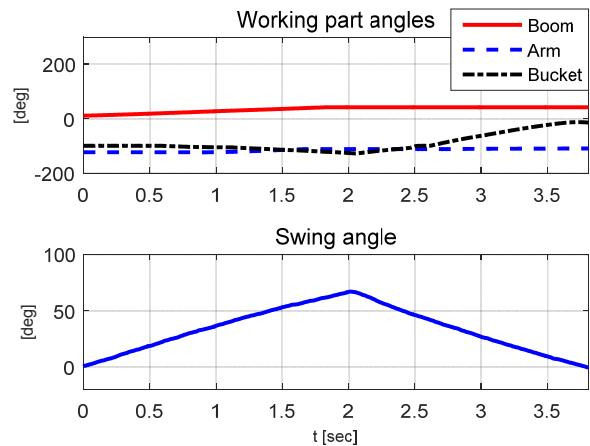


Fig. 10 Dynamic behaviors: working angles

Fig. 11 적용된 dumping 작업을 기반으로 예측된 물체의 도달가능영역과 굴삭기의 작업영역 예측을 통해 작업 위험도를 평가한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 굴삭기는 작업을 위해 Fig. 10의 선회각도와 같이 선회를 시작하고 작업자는 굴삭기로 가까워지는 상황을 나타낸다. 결과는 실제 계측된 레이저 스캐너 정보와 5.5톤급 굴삭기의 실 제원 기반 swing dynamics를 이용하여 도출되었다.

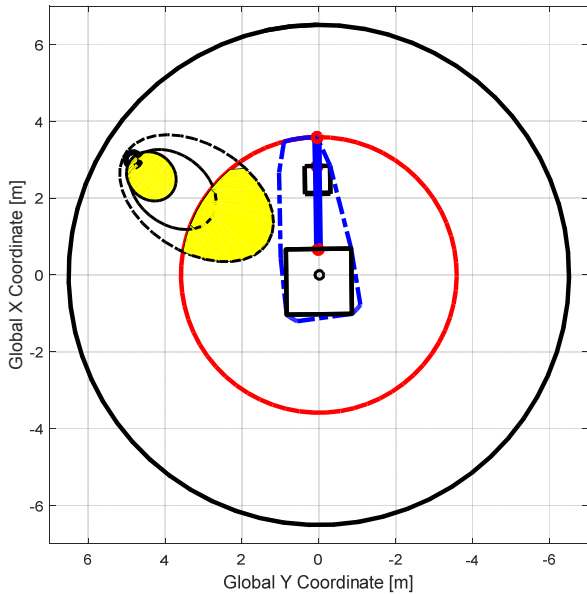


Fig. 11 Working risk evaluation results

Fig. 11의 검정색 동심원은 최대 작업영역, 빨간색 동심원은 실제 작업영역, 그리고 굴삭기 주변 파란색 점선은 예측된 작업영역을 나타낸다. 그리고 작업자를 나타내는 검정색 점 주변의 점선으로 표현된 점선은 도달가능영역을 나타내며 총 1.5초의 예측시간 내 0.5, 1, 1.5초 때의 도달가능 영역을 나타낸다. 각 도달가능 영역은 최대, 실제, 그리고 예측된 작업영역과의 교차영역에 따라 가장 위험한 영역과의 교차영역을 나타냄을 확인할 수 있으며, 교차영역은 노란색으로 표현되었다. Table. 3은 정의된 위험도에 따라 정의된 상태를 나타낸다.

Table 3 Risk assessment

Predicted time	Risk level
0.5 sec	Risky - Low
1 sec	Risky - Middle
1.5 sec	Risky - Middle

예측된 도달가능영역 중 0.5초에서는 도달가능영역이 최대 작업영역과의 교차영역만이 존재하기 때문에 “Risky-Low” 위험도로 분류되었으며, 1초와 1.5초 때의 도달가능 영역은 최대 및 실제 작업영역과 동시에 교차영역이 발생하지만 상대적으로 위험도가 높은 “Risky-Middle” 위험도로 분류되었음을 확인할 수 있었다. 그러므로 제안된 위험도 구분 알고리즘이 합리적으로 적용되었음을 확인할 수 있었으며 Table. 4는 분류된 위험도와 수식 (21) 기반 정량적 평가결과를 나타낸다.

Table 4 Risk assessment

Predicted time	Risk level	Area ratio(%)
0.5 sec	Risky - Low	100.00
1 sec	Risky - Middle	9.99
1.5 sec	Risky - Middle	42.05

Table. 4의 정량적 평가결과는 예측된 작업자의 거동을 기반으로 분류된 위험도마다의 상대적인 위험지수를 나타낸다. 예측시간 0.5초의 위험도는 100% “Risky - Low” 상태이지만, 1초와 1.5초 때는 같은 위험도 “Risky - Middle” 이지만 상대적으로 약 10% 와 42% 의 상대적 위험도의 차이를 보이고 있다. 이는 같은 작업영역에 포함되더라도 상대적인 위험도를 정량적으로 나타낼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 단층 레이저 스캐너 기반 굴삭기의 작업 위험도 평가를 위한 알고리즘을 제안하였다. 종래의 건설장비의 안전시스템은 장비와 작업자간의 현재 거리정보 혹은 현재 상태정보만을 이용하여 위험도를 평가하고 알람신호 혹은 다양한 경보를 통해 사고를 예방하는 시스템이었다. 하지만 본 연구에서는 작업자와 굴삭기의 동적특성을 고려하여 예측된 거동특성을 기반으로 일정 예측 시간 내의 위험도를 합리적으로 예측하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 물체의 거동과 작업영역을 예측함으로써 위험도를 예측할 수 있고, 이는 장비운용자 혹은 주변 작업자에게 위험도를 미리 인지하게 함으로써 사고를 미리 예방할 수 있다는 장점이 있다. 작업자 거동예측을 위해 레이저 스캐너와 칼만필터 기반 위치 및 속도를 추정하고, 추정된 결과를 기반으로 도달가



능영역(reachable area)을 예측하였다. 굴삭기의 작업 영역을 작업장치부 kinematic 분석을 통해 최대 작업 영역과 실제 작업영역을 도출하였으며, 작업장치부 붐, 암, 버킷의 각도와 제원을 획득할 수 있다는 가정 하에 예측된 작업영역을 도출할 수 있었다. 작업 위험도는 안전, risk-low, risk-middle, risk-high로 구분되었으며 위험도는 작업영역과 도달가능 영역의 교차여부로 구분될 수 있으며, 교차면적 비율을 이용하여 위험도의 정량적 평가를 수행하였다. 제안된 위험도 평가 알고리즘은 굴삭기의 특정 작업 시나리오(dumping)를 기준으로 실제 레이저 스캐너에서 획득된 데이터를 이용하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가 결과 제안된 위험도 평가 알고리즘은 합리적인 작업 위험도를 평가할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 위험도 평가 알고리즘은 향후 장비운용자와 주변 작업자에게 작업 위험도를 예측하여 알려줌으로 사고를 예방할 수 있을 것이다. 또한 굴삭기의 안전시스템의 작업 위험도 평가에 따른 제어전략 수립에 활용 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원, 2016 년도 두뇌한국 21 플러스 사업 그리고 서울대학교 정밀 기계설계 공동 연구소의 후원 하에 작성 되었으며, 이에 관계자 분들께 깊은 감사드립니다.

## References

- 1) J. Hinze and J. Teizer, "Visibility-related fatalities related to construction equipment," *Safety Science*, Vol. 49, pp. 709-718, 2011.
- 2) J. Teizer, B. Allread, and U. Mantripragada,

- "Automating the blind spot measurement of construction equipment," *Automation in Construction*, Vol. 19, pp. 491-501, 2010.
- 3) J. Teizer, B. Allread, C. Fullerton, J. Hinze "Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system," *Automation in Construction*, Vol. 19, pp. 630-640, 2010.
- 4) U. Lee, J. Kim, H. Cho, K. Kang, "Development of a mobile safety monitoring system for construction sites," *Automation in Construction*, Vol. 18, pp. 258-264, 2009.
- 5) Y. Cho and M. Gai, "Projection-Recognition-Projection Method for automatic object recognition and registration for dynamic heavy equipment operations," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 258-264, 2014.
- 6) F. Vahdatikhaki and Amin Hammad, "Dynamic equipment workspace generation for improving earthwork safety using real-time location system," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 29, pp. 459-471, 2015.
- 7) C. Wakim, S. Capperon, and J. Oksman, "A Markkavian model of pedestrian behavior," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 4028-4033, 2004.
- 8) K. Teknomo, "Application of microscopic pedestrian simulation model," *Transportation Research Part F*, Vol. 9, pp. 15-27, 2006.
- 9) A. Coivo, "Kinematics of excavator(Backhoes) for transferring surface material," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 7, pp. 17-32, 1994.