

회전관성의 순환최소자승 추정을 이용한 모델 예견 기반 굴삭기의 충돌회피 알고리즘 개발

Model-Prediction-based Collision-Avoidance Algorithm for Excavators Using the RLS Estimation of Rotational Inertia

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

Kwang Seok Oh, Jaho Seo and Geun Ho Lee

Received: 05 Aug. 2016, Revised: 02 Sep. 2016, Accepted: 25 Nov. 2016

**Key Words** : Model predictive safety evaluation(모델 예견 안전도 평가), Recursive least square(순환최소자승), Forgetting factor(망각인자), Updating rule(갱신규칙), Swing dynamics(회전 동역학)

**Abstract:** This paper proposes a model-prediction-based collision-avoidance algorithm for excavators for which the recursive-least-squares (RLS) estimation of the excavator's rotational inertia is used. To estimate the rotational inertia of the excavator, the RLS estimation with multiple forgetting and two updating rules for the nominal parameter and the forgetting factors was conducted based on the excavator-swing dynamics. The average value of the estimated rotational inertia that is for the minimizing effects of the estimation error was computed using the recursive-average method with forgetting. Based on the swing dynamics, the computed average of the rotational inertia, the damping coefficient for braking, and the excavator's braking angle were predicted, and the predicted braking angle was compared with the detected-object angle for a safety evaluation. The safety level defined in this study consists of the three levels *safe*, *warning*, and *emergency braking*. The analytical rotational-inertia-based performance evaluation of the designed estimation algorithm was conducted using a typical working scenario. The results of the safety evaluation show that the predictive safety-evaluation algorithm of the proposed model can evaluate the safety level of the excavator during its operation.

기호 설명

$P$  : covariance

$K$  : Kalman gain

$\lambda$  : forgetting factor

$w$  : process noise

$v$  : measurement noise

$J$  : cost function

$\bar{b}$  : nominal damping coefficient,  $Ns/rad$

$\theta_{sw}$  : swing angle,  $rad$

$J_t$  : rotational inertia,  $kgm^2$

$t_{d,perception}$  : human perception delay,  $sec$

$T_f$  : friction torque,  $Nm$

\* Corresponding author: seojaho@cnu.ac.kr

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

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

3 Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, 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

건설현장에서 굴삭기는 재료의 이동과 함께 다양한 작업을 수행하는 중요한 건설장비 중 하나이며

작업 특성상 주변 작업자와 함께 작업을 수행하는 경우가 많다. 굴삭기는 붐(boom), 암(arm) 그리고 버킷(bucket)으로 구성되는 작업장치를 기반으로 작업을 수행하며 회전운동이 작업의 대부분을 차지한다. 주로 주변 작업자와 함께 작업하는 특성으로 인해 굴삭기는 장비운영자의 부주의와 굴삭기 주변 사자들의 존재로 인해 주변 작업자와의 충돌에 의한 치명적 사고가 빈번히 발생하고 있다. J. Hinze는 건설 현장에서 발생할 수 있는 다양한 사고사례를 분석하여 장비와의 충돌에 의한 사고사례가 전체 사고사례 중 약 87 %를 차지한다는 분석결과를 제시하였다.<sup>1)</sup> 이는 건설현장에서 장비와의 충돌을 방지하기 위한 안전시스템의 필요성을 보여주고 있는 결과이며 실제로 다양한 분야에서 건설현장의 안전을 확보하기 위한 연구가 진행되고 있다.

U. Lee 외 3명은 건설현장에서 사용될 수 있는 모바일 안전 모니터링 시스템을 제안하였으며, 초음파 센서, 적외선 센서 그리고 무선통신 시스템으로 시스템을 구성하고 실제 현장에서 성능을 검증하였다.<sup>2)</sup> Y. Cho 외 1명은 모델을 기반으로 automatic dynamic object recognition 기법을 제안하였고, 3차원 공간에서 장비운영자가 효율적으로 동적 물체를 인지할 수 있는 projection - recognition - projection(PRP) 기법을 제안하였다.<sup>3)</sup> F. Vahdatikhaki 외 1명은 연속적인 모니터링 기법을 기반으로 장비의 동적 특성을 분석하여 동적 작업공간을 표현하는 새로운 방법을 제안하였다.<sup>4)</sup> S. Park 외 6명은 단층 레이저 스캐너 기반 주변 물체의 인지와 함께 굴삭기의 거동예측을 통해 작업 환경을 모니터링하는 기술을 제안하였다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 굴삭기의 작업 시 작업장치의 자세, 다양한 재료 그리고 버킷 및 다양한 부착물의 종류에 따라 변하는 회전관성을 추정하는 순환최소자승법 기반 알고리즘을 제안하였고, 추정된 회전관성을 이용하여 회전동역학 기반 굴삭기의 회전 거동예측을 통해 안전도를 평가하고 충돌회피를 위한 제어 알고리즘을 제안하였다. 회전관성 추정을 위해 굴삭기의 회전 각속도는 계측이 가능하고 댐핑계수는 실험적으로 도출이 가능하다고 가정하였다. 추정성능 향상을 위해 갱신규칙(update rule)을 정의하였으며 다물체 동역학 소프트웨어를 이용해 실제 작업상황을 기반으로 도출된 해석적 회전관성과의 비교를 통해 성능을 검증하였다. 작업 안전도 평가를 위해 인지된 물체의 각도를 추정된 회전관성을 이용하여 회전동역학 기반 굴삭기의 거동을 예측하였다. 예측된

거동은 굴삭기 주변 물체의 각도와 비교되면서 충돌의 관점에서 작업 안전도를 평가하였다. 작업 안전도는 안전(safe), 경고(warning), 긴급정지(emergency braking) 3단계로 구분되며, 실제 작업조건을 기준으로 평가 알고리즘의 성능을 평가하였다. 본 연구에서 개발한 추정 알고리즘과 안전도 평가 알고리즘은 Matlab/Simulink 환경에서 구성되었으며 평가결과 개발된 알고리즘은 합리적으로 작업안전도를 평가하고 충돌회피를 위한 제어를 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 순환최소자승 기반 회전관성 추정에 대해 기술하고, 3장에서는 모델 예견 기반 안전도 평가 알고리즘에 대한 내용을 설명한다. 4장에서는 작업조건 기반 성능평가 결과에 대해 분석하고, 마지막 5장에서는 결론에 대해 기술한다.

## 2. 순환최소자승 기반 회전관성 추정

굴삭기는 재료의 종류와 부착물(attachment) 그리고 작업장치의 자세에 따라 회전관성이 크게 변하며 이는 굴삭기의 동적특성에 큰 영향을 준다. 그러므로 회전관성의 추정은 동적특성을 고려한 안전시스템 개발에 필수요소이다. 본 연구에서는 회전관성 추정을 위해 망각인자 기반 순환최소자승(recursive least squares) 기법을 적용하였으며 굴삭기의 회전 각속도를 계측값으로 사용하고 회전 댐핑계수를 실험적으로 도출 가능하다고 가정하였다. 수렴 성능 확보를 위해 갱신규칙(update rule)을 적용하였으며 Fig. 1은 알고리즘의 모델 개략도를 나타낸다.

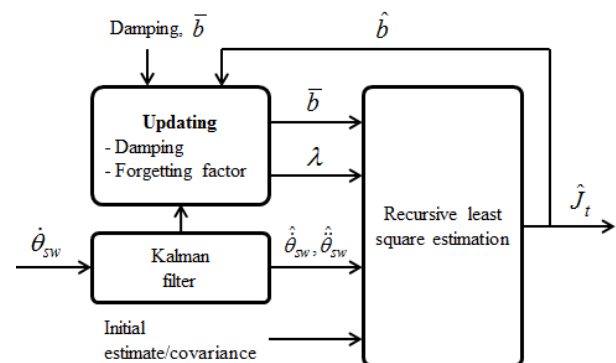


Fig. 1 Model schematic for estimation algorithm

여기서,  $\dot{\theta}_{sw}$ 는 굴삭기의 회전 각속도,  $\hat{\theta}_{sw}$ 와  $\hat{\theta}_{sw}$ 는 각각 칼만필터 기반으로 추정된 회전 각속도와

각가속도를 나타낸다.  $\bar{b}$  와  $\hat{b}$  는 실험적으로 도출된 댐핑계수와 추정된 댐핑계수를 나타낸다. 그리고  $\lambda$  와  $\hat{J}_t$ 는 망각인자와 굴삭기의 추정된 회전관성을 나타낸다. 회전관성 추정을 위해 필요한 정보인 회전각 가속도를 추정하기 위해 선형 칼만필터가 적용되었으며, 다음 절에서 적용된 선형 칼만필터에 대해 기술한다.

### 2.1 선형 칼만필터(Linear Kalman filter)

굴삭기의 회전 각속도와 각가속도 추정을 위해 선형 칼만필터가 적용되었으며 추정을 위해 double integrator model이 사용되었다. 굴삭기의 회전 각가속도를 계측치로 사용하였으며 사용된 이산시간 선형 상태공간 시스템은 아래 수식과 같다.

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}w_{k-1} \quad (1)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

여기서,  $x_k = [\dot{\theta}_{sw,k} \ddot{\theta}_{sw,k}]^T$  이고  $y$ 는 계측값을 나타낸다.  $G$ 는 단위행렬이고,  $w_k = [w_1 w_2]^T$ 는 프로세스 잡음을 나타낸다.  $w_k$ 와 계측 잡음인  $v_k$ 는 평균이 0인 white Gaussian으로 가정되었다.  $F$ 와  $H$ 는 각각 상태전이 행렬과 관측행렬을 나타내며 아래 수식과 같이 표현된다.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, H = [1 \ 0] \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 샘플링 시간을 나타낸다. 프로세스와 계측 잡음은 서로 비상관이고, 평균이 0인 white Gaussian으로 간주하였으며 이들의 공분산은 아래와 같이 각각  $Q_k$ 와  $R_k$ 로 정의하였다.

$$w_k = N(0, Q_k) \quad (4)$$

$$v_k = N(0, R_k) \quad (5)$$

$$E[w_k v_k] = 0 \quad (6)$$

프로세스 잡음의 공분산 행렬은  $Q_k = \text{diag}[0, q]^T$ 로 정의될 수 있으며, 실제 가속도 값의 변화는 정량적인 하나의 값으로 표현될 수 없기 때문에  $q$ 값은 일반적으로 굴삭기가 사용하는 가속도의 값을 이용하여 실험적으로 정의되었다. 본 연구에서 사용된  $q$  값은 특정 덤핑시나리오에 대한 회전 각가속도 정보

를 이용하여 정의되었으며 초기 추정치와 공분산인  $\hat{x}_0$ 와  $P_0$ 는 주어졌다고 가정하였다. 계측잡음은 향후 잡음의 분석을 통해 정의가 가능하기 때문에 현 알고리즘의 개발 단계에서는 가정하여 적용하였다. 적용된 선형 칼만필터는 두가지 단계 (1) Prediction와 (2) Update 단계로 수행된다. Prediction 단계에서는 상태변수의 priori 추정치가 아래와 같이 계산된다.

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_{k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (7)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (8)$$

Update 단계에서는 priori 추정치를 계산된 칼만이득 행렬  $K$ 를 이용하여 posteriori 추정치로 계산하고, 공분산  $P$ 를 update한다.

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (10)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (11)$$

여기서,  $I$ 는 단위행렬을 나타낸다. 다음 절에서는 칼만필터 기반으로 추정된 각속도와 각가속도를 이용한 회전관성 추정에 대해 기술한다.

### 2.2 회전관성 추정 알고리즘

회전관성 추정을 위해 본 연구에서 사용된 굴삭기의 단순화된 회전동역학은 아래 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$J_t \ddot{\theta}_{sw} = -b \dot{\theta}_{sw} - T_f + T_{sw} \quad (12)$$

여기서,  $T_f$ 와  $T_{sw}$ 는 각각 coulomb 마찰 돌림힘과 회전 돌림힘을 나타낸다. 순환 최소자승법을 적용하기 위해 정의된 회전동역학 수식은 아래와 같이 3가지 항으로 분류되는 수식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$0 = J_t \ddot{\theta}_{sw} + b \dot{\theta}_{sw} - T_t \quad (13)$$

여기서,  $T_t$ 는  $-T_f + T_{sw}$ 와 같으며 아래와 같이 행렬을 이용한 선형결합의 형태로 나타낼 수 있다.

$$y_r = \psi^T \theta \quad (14)$$

$$\psi = [\psi_1 \ \psi_2 \ \psi_3]^T, \theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (15)$$

여기서,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 는 추정해야 할 매개변수를 나타내며

$$\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T = [J_t b T_t]^T \quad (16)$$

$\psi_1$ ,  $\psi_2$ 와  $\psi_3$ 는 추정된 각속도와 각가속도를 이용하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\psi = [\psi_1 \psi_2 \psi_3]^T = [\hat{\theta}_{sw} \hat{\theta}_{sw} - 1]^T \quad (17)$$

$\theta_1$ ,  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 는 일반적으로 시간에 따라 변하는 매개변수이다. 매개변수  $\theta_1$ 은 굴삭기의 자세에 따라 변하고,  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 는 작업조건에 따라 변하는 매개변수이지만 본 연구에서  $\theta_2$ 는 상대적으로 변화가 크지 않다고 가정하였다. 시변하는 매개변수의 추정을 위해 망각인자를 적용하였으며 순환최소자승법을 이용하여 매개변수  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 를 추정하였다. 그리고 서로 다른 변화율을 갖는 매개변수의 추정성능을 확보하기 위해 3개의 망각인자( $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ )를 개별 적용하였다.<sup>6)</sup> 적절한 망각인자를 적용함으로써 개별 매개변수의 오차를 분리하기 위한 분리된 목적함수를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$J(\hat{\theta}_1(k), \hat{\theta}_2(k), \hat{\theta}_3(k), k) = A + B + C \quad (18)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda_3^{k-i} (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 \quad (21)$$

정의된 목적함수  $J$ 의 우변  $A$ ,  $B$  그리고  $C$ 는 각각 매개변수들의  $k$ 번째 오차를 나타낸다. 목적함수  $J$ 를 최소화하는 최적의 추정치는  $J$ 를 편미분했을 때의 값을 0으로 만드는 값을 도출하는 과정으로 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_1(k)} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_2(k)} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_3(k)} = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (-\psi_1(i)) (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} (-\psi_2(i)) (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 = 0 \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_3^{k-i} (-\psi_3(i)) (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k))^2 = 0 \quad (25)$$

기술된 수식들을 정리하여 추정치  $\hat{\theta}_1$ ,  $\hat{\theta}_2$ 와  $\hat{\theta}_3$ 에 대해 정리하면 아래 수식과 같다.

$$\hat{\theta}_1(k) = \left( \sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} \psi_1(i)^2 \right)^{-1} \times \left( \sum_{i=1}^k \lambda_1^{k-i} (y_r(i) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k)) \right) \quad (26)$$

$$\hat{\theta}_2(k) = \left( \sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} \psi_2(i)^2 \right)^{-1} \times \left( \sum_{i=1}^k \lambda_2^{k-i} (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_3(i)\hat{\theta}_3(k)) \right) \quad (27)$$

$$\hat{\theta}_3(k) = \left( \sum_{i=1}^k \lambda_3^{k-i} \psi_3(i)^2 \right)^{-1} \times \left( \sum_{i=1}^k \lambda_3^{k-i} (y_r(i) - \psi_1(i)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(i)\hat{\theta}_2(k)) \right) \quad (28)$$

그러나 실시간 순환최소자승 기법의 적용을 위한 수학적 형태가 필요하다. 그러므로 Eq. (26), (27) 그리고 (28)을 이용하여 재귀형태의 수식으로 추론하면 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\hat{\theta}_1(k) = \hat{\theta}_1(k-1) + \frac{L_1(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k-1) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k))}{\lambda_1(k)} \quad (29)$$

$$\hat{\theta}_2(k) = \hat{\theta}_2(k-1) + \frac{L_2(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k))}{\lambda_2(k)} \quad (30)$$

$$\hat{\theta}_3(k) = \hat{\theta}_3(k-1) + \frac{L_3(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k-1))}{\lambda_3(k)} \quad (31)$$

여기서,

$$L_1(k) = P_{r,1}(k-1)\psi_1(k)(\lambda_1 + \psi_1^T(k)P_{r,1}(k-1)\psi_1(k))^{-1} \\ P_{r,1}(k) = (I - L_1(k)\psi_1^T)P_{r,1}(k-1)/\lambda_1 \quad (32)$$

$$L_2(k) = P_{r,2}(k-1)\psi_2(k)(\lambda_2 + \psi_2^T(k)P_{r,2}(k-1)\psi_2(k))^{-1} \\ P_{r,2}(k) = (I - L_2(k)\psi_2^T)P_{r,2}(k-1)/\lambda_2 \quad (33)$$

$$L_3(k) = P_{r,3}(k-1)\psi_3(k)(\lambda_3 + \psi_3^T(k)P_{r,3}(k-1)\psi_3(k))^{-1} \\ P_{r,3}(k) = (I - L_3(k)\psi_3^T)P_{r,3}(k-1)/\lambda_3 \quad (34)$$

도출된 수식의 미지의 매개변수  $\theta_1(k)$ ,  $\theta_2(k)$ 와  $\theta_3(k)$ 는 추정성능이 확보되어 추정치와 실제 값 사이의 오차가 크지 않다는 가정 하에 각각의 추정치  $\hat{\theta}_1(k)$ ,  $\hat{\theta}_2(k)$ 와  $\hat{\theta}_3(k)$ 로 대체될 수 있다. 추정치로 대체한 수식을 기반으로 다음의 수식을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_1(k) + L_1(k)\psi_2(k)\hat{\theta}_2(k) + L_1(k)\psi_3(k)\hat{\theta}_3(k) \\ = \hat{\theta}_1(k-1) + L_1(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k-1)) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} L_2(k)\psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) + \hat{\theta}_2(k) + L_2(k)\psi_3(k)\hat{\theta}_3(k) \\ = \hat{\theta}_2(k-1) + L_2(k)(y_r(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1)) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} L_3(k)\psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) + L_3(k)\psi_2(k)\hat{\theta}_2(k) + \hat{\theta}_3(k) \\ = \hat{\theta}_3(k-1) + L_3(k)(y_r(k) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k-1)) \end{aligned} \quad (37)$$

추정치  $\hat{\theta}_1(k)$ ,  $\hat{\theta}_2(k)$ 와  $\hat{\theta}_3(k)$ 에 대한 해는 Eq. (35), (36) 그리고 (37)를 이용하여 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_1(k) \\ \hat{\theta}_2(k) \\ \hat{\theta}_3(k) \end{bmatrix} = A^{-1}B \quad (38)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & L_1(k)\psi_2(k) & L_1(k)\psi_3(k) \\ L_2(k)\psi_1(k) & 1 & L_2(k)\psi_3(k) \\ L_3(k)\psi_1(k) & L_3(k)\psi_2(k) & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$B = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1(k-1) + L_1(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k-1)) \\ \hat{\theta}_2(k-1) + L_2(k)(y_r(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1)) \\ \hat{\theta}_3(k-1) + L_3(k)(y_r(k) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k-1)) \end{bmatrix} \quad (40)$$

$P_1, P_2, P_3$ 가 항상 양수이기 때문에 아래 행렬의 행렬식(determinant)이 항상 0이 아니다.<sup>7)</sup>

$$\begin{bmatrix} 1 & L_1(k)\psi_2(k) & L_1(k)\psi_3(k) \\ L_2(k)\psi_1(k) & 1 & L_2(k)\psi_3(k) \\ L_3(k)\psi_1(k) & L_3(k)\psi_2(k) & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

그러므로 Eq. (41)의 역행렬은 항상 존재하며 추정치  $\hat{\theta}_1(k)$ ,  $\hat{\theta}_2(k)$ ,  $\hat{\theta}_3(k)$ 는 Eq.(38)을 기반으로 항상 계산될 수 있다. 다음 절에서는 추정성능 향상을 위해 정의한 갱신규칙에 대해 기술한다.

### 2.3 갱신규칙(Updating rule)

본 연구에서 제안한 순환최소자승 기반 회전관성의 추정알고리즘은 굴삭기의 회전각속도를 이용하여 회전각속도를 추정하고 실험적으로 도출된 댐핑계수를 이용하여 회전관성을 추정하였다. 하지만 추정치를 실제값으로 수렴시키기 위해서는 합리적인 영역으로 추정치를 유도하는 것이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 실험적으로 도출된 댐핑계수를 이용하여 댐핑계수에 대한 추정치가 도출된 실제 값의 기준으로 일정범위를 벗어나면 갱신을 하는 첫 번째

규칙을 정의하였으며, Fig. 2는 정의된 갱신규칙을 나타낸다.

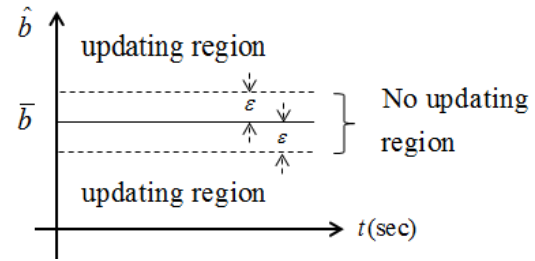


Fig. 2 Updating rule for nominal parameter

$\epsilon$ 은 갱신을 위한 추정 경계값을 나타낸다. 댐핑계수와 관련된 추정치가 updating region으로 잘못 추정되면 순환최소자승 계산 순서 중 갱신단계(Eq.(30))에서 추정치를 실험적으로 도출된 댐핑계수 값으로 대체하게 된다. 갱신규칙을 적용함으로써 실제값이 아닌 추정치로 수렴하는 것을 방지할 수 있게 된다. 갱신과정을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\text{if } |\theta_2(k) - \hat{\theta}_2(k)| < \epsilon \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_2(k) = \hat{\theta}_2(k-1) + \\ L_2(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k)) \end{aligned}$$

$$\text{else} \quad \begin{aligned} \hat{\theta}_2(k) = \bar{b} + \\ L_2(k)(y_r(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k)) \end{aligned}$$

실제 굴삭기의 댐핑계수의 값은 하중에 따라 달라지는 비선형 특성을 나타내기 때문에 갱신 경계값은 실험적으로 설정되어야 한다.

두 번째 갱신규칙은 회전각가속도 추정을 위해 적용된 칼만필터의 추정성능을 고려한 규칙이다. 칼만필터는 계측치가 크게 변할 때 추정오차가 상대적으로 크게 발생한다. 그러므로 칼만필터의 추정오차가 커질 때 순환최소자승 기반 회전관성의 추정성능 또한 저하될 수밖에 없다. 본 연구에서는 추정성능의 강건성 확보를 위해 개별 추정치에 정의된 망각인자를 칼만필터의 추정오차가 커질 때 발산하지 않고 추정성능을 확보할 수 있는 망각인자 값으로 갱신함으로써 성능을 확보하였다. 망각인자 중 댐핑계수는 상대적으로 일정한 값으로 간주되는 값이기 때문에 갱신하지 않지만 회전관성과 돌림힘과 관계된 망각인자는 추정오차에 영향을 받기 때문에 특성에 따라 망각인자가 갱신되도록 규칙을 설계하였다. 갱신 조건은 칼만필터의 오차가 커지는 상황으로 각가속도의 값이 급격히 변하는 스윙 조이스틱 입력 방향이

변할 때를 갱신조건으로 정의하였다. 칼만필터 추정 오차의 수렴성을 오프라인에서 분석하여 갱신 시간을 정의하였으며, 본 연구에서 현실적인 성능평가를 위해 적용된 잡음을 기준으로 도출된 갱신 유지 시간은 0.25초이다. Table. 1은 정의된 망각인자 값과 갱신규칙을 나타내고 있다.

Table 1 Forgetting factors for updating

Forgetting factor	No updating	Updating
$\lambda_1$	0.5	0.99
$\lambda_3$	0.99	0.1

Fig. 3은 회전 각가속도의 값이 크게 변하는 상황으로 일반적으로 굴삭기가 작업 시 감속하기 위해 회전 조이스틱 입력을 반대로 인가하는 상황을 나타낸다.

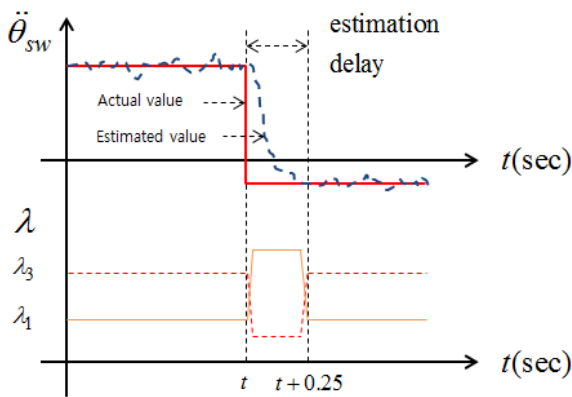
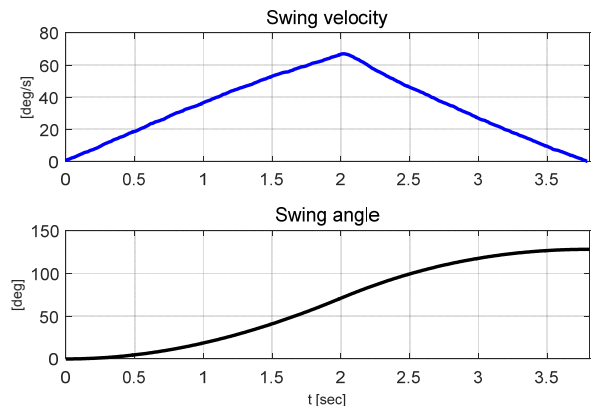
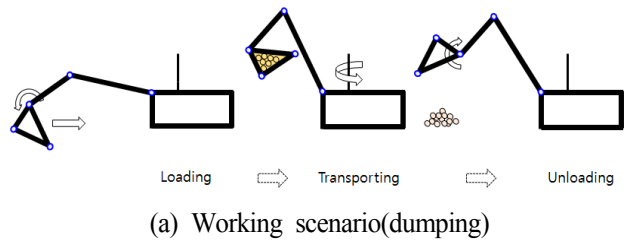


Fig. 3 Updating rule for forgetting factor

회전관성의 추정과 연관된 망각인자( $\lambda_1$ )는 회전 각가속도가 크게 변하면서 칼만필터의 추정성능이 저하될 때 상대적으로 큰 망각인자의 값을 취하면서 회전관성의 값이 오차에 의해 크게 변하는 것을 방지하도록 설계가 되었다. 반대로 회전 각가속도가 크게 변한다는 것은 굴삭기에 적용되는 돌림힘이 크게 변한다는 것을 의미하므로 돌림힘의 추정과 관련된 망각인자( $\lambda_3$ )는 갱신 시 상대적으로 낮은 값을 취하면서 돌림힘의 변화에 대한 추정성능을 확보할 수 있도록 갱신규칙이 설계되었다. 제안된 회전관성의 추정 알고리즘은 굴삭기의 일반적인 dumping 작업 시나리오에 대해 해석적으로 도출된 회전관성과의 비교를 통해 추정성능을 평가하였다. 또한 현실적인 추정성능 평가를 위해 계측값인 회전각속도에 평균

이 0이고 분산이 약 0.0001인 white Gaussian잡음을 추가하였으며, Fig. 4는 특정작업과 동적거동을 나타낸다.



(b) Dynamic behavior (swing motion)

Fig. 4 Working scenario: dynamic behavior

작업조건과 적용된 잡음을 기반으로 Matlab/Simulink 환경에서 추정성능을 확인하였다. 대상 굴삭기는 5.5톤급 굴삭기로 회전관성이 가장 크게 변하는 재료조건(sandstone, 423 kg)으로 성능평가를 수행하였다. 또한 추정오차에 의한 성능저하를 최소화하기 위해 망각인자 기반 재귀평균기법을 적용하여 추정오차의 영향을 최소화하였다. 아래 수식은 적용된 망각인자 기반의 재귀평균 수식을 나타낸다.

$$\widehat{J}_{k,avg} = \widehat{J}_{k-1,avg} + \frac{1}{M_k} (\widehat{J}_k - \widehat{J}_{k-1,avg}) \quad (43)$$

여기서,  $M_k = \sum_{i=1}^k \lambda_{avg}^{k-i}$  이다.

$\lambda_{avg}$ 는 재귀평균을 계산하기 위한 망각인자를 나타내며, 회전관성의 추정결과 분석을 기반으로 0에서 1사이의 적절한 값으로 정해져야하는 값이다. 본 연구에서는 회전관성을 추정하기 시작하면서 재귀평균 값을 합리적으로 도출할 수 있는 0.93의 값이 적용되었다. Fig. 5는 회전관성의 추정결과와 추정오차에 대한 분석을 나타낸다.

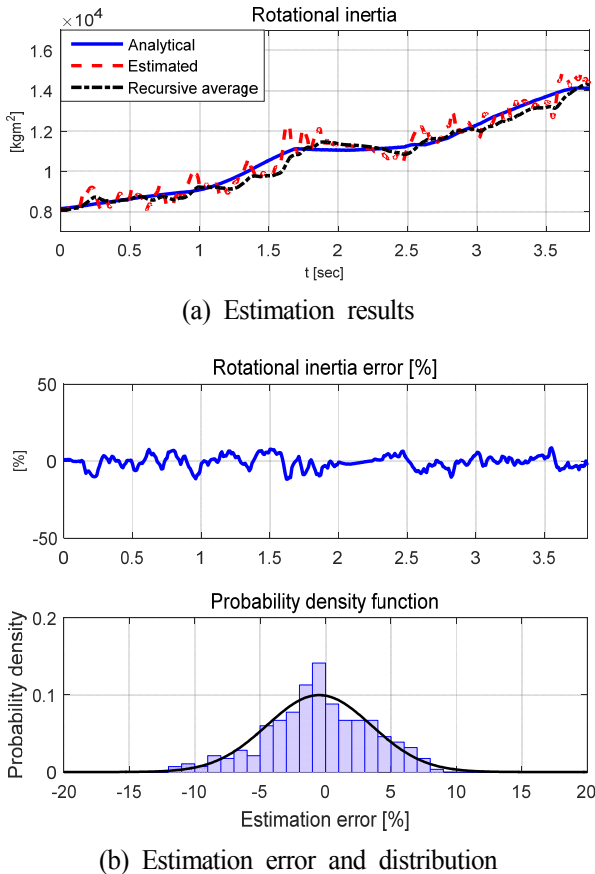


Fig. 5 Estimation performance results

회전관성 추정 알고리즘의 성능평가는 회전운동 조건에서 수행되었으며 재료를 이동시키면서 봄(감소), 압(증가), 버켓(증가)의 각도변화에 따른 회전관성의 변화를 추정한 결과, 회전관성의 변화를 합리적으로 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 망각인자 기반 재귀평균 값은 추정오차의 영향을 줄일 수 있음을 확인하였다. 도출된 재귀평균값을 이용하여 예견기반 안전도 평가 알고리즘을 구성하였다. 다음 장에서는 안전도 평가 알고리즘에 대해 기술한다.

### 3. 모델 예견 기반 안전도 평가 알고리즘

제안된 작업 안전도 평가 알고리즘은 회전동역학 모델을 기반으로 하였으며, 회전운동 중 긴급정지 시의 거동을 수학적으로 실시간 예측하여 작업 안전도를 평가한다. 굴삭기의 브레이크 시스템을 분석하고 감속상황을 수학적으로 모델링하여, 굴삭기의 회전운동이 정지를 할 때까지의 시간 및 각도를 예측하였다. 굴삭기의 다양한 브레이크 시스템이 연구개발되고 있지만 본 연구에서는 유압시스템 기반의 브레이크 시스템이 적용된 굴삭기를 선정하고, 아래 수식과

같이 댐핑계수를 이용하여 감속 시 회전동역학 모델을 수학적으로 나타내었다.<sup>8)</sup>

$$\hat{J}_t \ddot{\theta}_{sw} = -b_{br} \dot{\theta}_{sw} - T_f \tag{44}$$

위 수식은 굴삭기의 긴급제동 시 거동예측을 통한 안전도 평가 및 제어를 위해 회전 돌림힘( $T_{sw}$ ) 요소가 없으며, 감속 시 등가 댐핑계수( $b_{br}$ )가 적용된 수학적 모델이다. 댐핑계수( $b_{br}$ )는 평균적인 최대 감속을 나타내는 댐핑계수로 실험적으로 도출 가능한 값이며 일정한 값으로 가정하여 적용되었다.  $T_f$ 는 정지마찰 토크이며 회전 동역학 모델을 이용하여 실험적으로 도출할 수 있는 일정한 값이다. 추정된 회전관성과 감속 시 댐핑계수 기반의 회전동역학 모델을 이용하여 실시간으로 정지 할 때까지의 속도변화와 각도변화를 예측하였다. 예측시간은 회전 각속도가 0에 가까운 일정한 값 미만이 될 때까지 예측하였다. 예측결과 도출에 대한 실시간성 확보를 위해 Eq. (44)는 시간에 대한 솔루션을 도출하여 향후 실차실험 시 시간지연 없이 계산될 수 있도록 적용될 계획이다. 굴삭기 주변 물체를 인지하고, 회전각도의 값을 계산할 수 있다는 가정 하에 물체의 회전각도와 굴삭기의 회전 각도를 비교하여 작업 안전도를 평가하였다. 작업 안전도는 크게 3가지 단계로 나눌 수 있으며 각 단계는 안전(safe), 경보(warning), 긴급정지(emergency braking)로 나뉜다. Table 2에서는 양의 방향 회전 시 설정된 각 단계별 조건을 기술하였다.

Table 2 Condition for safety level

Working safety	Condition (CCW)
Safe	Predicted stop angle < object angle
Warning	Predicted stop angle ≥ object angle - threshold angle
Emergency braking	Predicted stop angle ≥ object angle

Fig. 6은 인지된 작업자의 위치 및 굴삭기가 정지할 때까지 예측된 거동에 따라 구분된 작업 안전도를 나타낸다.

예측된 굴삭기의 회전각도가 물체의 각도와 같아지게 되면 긴급정지가 필요한 상태이다. 그리고 경고에 의해 충돌회피가 가능하도록 각도경계값(threshold angle,  $\theta_{th}$ )을 정의하기 위해 사람의 인지 지연시간( $t_{d,perception}$ )을 기반으로 아래 수식과 같은 각도 경계값을 도출하였다.

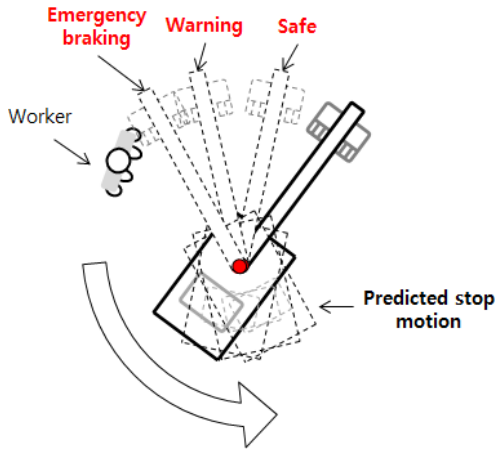


Fig. 6 Predicted motion and working safety

$$\theta_{th} = \dot{\theta}_{sw} t_{d, perception} \quad (45)$$

다음 장에서는 작업조건 기반 안전도 평가에 대해 다룬다.

#### 4. 작업 조건 기반 성능평가

회전관성 추정에 사용된 주된 작업조건(dumping)을 기반으로 가상의 작업자 각도정보를 이용하여 작업 안전도 평가를 수행하였다. 성능평가는 Matlab/Simulink 환경에서 해석적으로 도출된 회전관성, 댐핑계수 그리고 마찰토크 등의 값을 이용하여 수행되었으며 실제 작업조건을 이용함으로써 합리적인 성능평가 결과를 도출하였다. 인지된 물체와 굴삭기의 초기 조건은 Fig. 7과 같다.

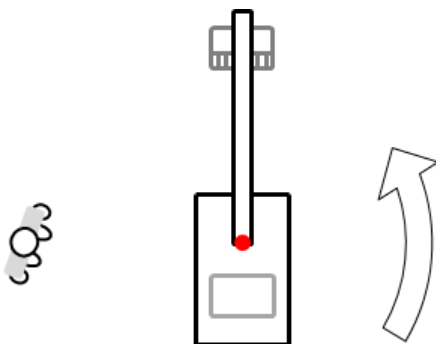
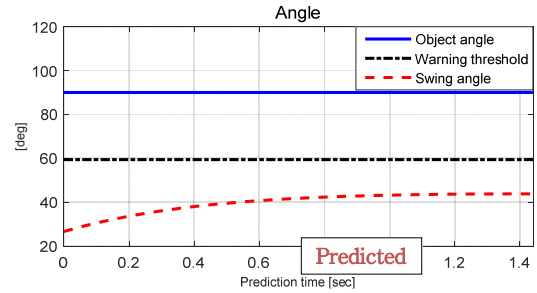
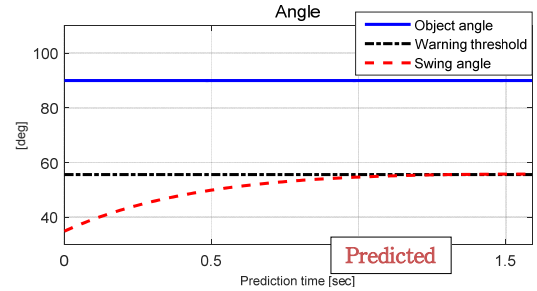


Fig. 7 Performance evaluation condition

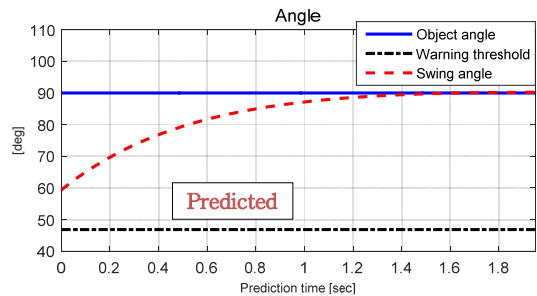
Fig. 8은 회전이 시작된 후 1.2 sec, 1.4 sec 및 1.8 sec 에서의 작업 안전도 평가결과를 나타낸다. 예측된 시간(prediction time horizon)은 굴삭기가 긴급 정지 시 속도가 0에 가까워져 충분히 정지될 수 있는 시간인 2초로 정의하였다.



(a) Safe [after t = 1.2 sec]



(b) Warning [after t = 1.4 sec]



(c) Emergency braking [after t = 1.8 sec]

Fig. 8 Safety evaluation results

알고리즘의 성능평가 결과 예측된 굴삭기의 선회 각도와 물체와의 각도비교를 통해 작업 안전도를 평가할 수 있었으며 합리적으로 경보단계와 긴급정지 단계를 구분할 수 있음을 확인하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 회전관성의 순환최소자승 추정을 이용하여 모델 예견 기반 충돌회피를 위한 굴삭기 안전도 평가 및 제어 알고리즘을 제안하였다. 기존 건설현장에서의 안전시스템은 장비와 작업자간의 현재 거리정보 혹은 현재의 정적 상태정보를 이용하여 위험도를 정량적으로 평가하고 시각적 정보를 이용해 사고를 예방하는 시스템이었다. 하지만 본 연구에서는 선회운동이 대부분을 차지하는 굴삭기의 작업 특성을 분석하고, 선회운동을 수학적으로 묘사하여



동적거동을 예측하였다. 예측된 동적 거동을 기반으로 물체와의 충돌을 회피하기 위한 작업 안전도를 평가할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이때 굴삭기는 재료의 종류, 작업자세 그리고 부착물에 따라 회전관성의 크기가 크게 변할 수 있고, 이는 동적거동에 큰 영향을 준다. 그러므로 복합 망각인자 기반 순환최소자승 기법을 이용한 회전관성 추정을 수행하였으며, 알고리즘의 성능은 실제 작업조건에서 해석적 회전관성 값과 비교하여 평가되었다. 작업 안전도는 실제 작업조건에서 인지된 물체의 각도정보와 굴삭기의 정지를 위한 감속 시 거동예측 결과를 비교하여 평가되었다. 성능평가 결과 회전관성 추정 알고리즘은 재료와 함께 작업자세의 변화에 따른 회전관성의 변화에도 약15% 이내의 추정오차 성능을 보였다. 하지만 추정성능은 추정 초기치에 따라 수렴성능이 큰 영향을 받기 때문에 향후 초기치에 영향을 받지 않는 강건한 추정 알고리즘의 개발을 계획하고 있다. 오차의 영향을 최소화하기 위해 망각인자 기반 재귀평균 기법을 이용하여 회전관성의 평균값을 도출하였으며 이를 이용한 안전도 평가 결과 실제 작업조건에서 물체와의 충돌에 대한 작업 안전도를 합리적으로 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 현실적인 작업 안전도 평가를 위해 실제 시스템에 존재할 수 있는 불확실성(제어, 센서, 추정오차 등)을 고려하여 수학적인 제동각도를 예측하고 이를 이용하여 안전도를 평가하는 알고리즘이 필요할 것이다. 그리고 회전관성의 추정성능을 향상시키기 위해 회전각도 측정센서를 이용한 알고리즘의 고도화를 향후 연구계획으로 고려하고 있다. 본 연구에서 제안하는 추정 알고리즘 기반 안전도 평가 알고리즘은 향후 굴삭기의 작업 안전도 평가에 따른 물체와의 충돌회피를 위한 효율적 제어전략 수립에 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업(NK198C)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- 1) J. Hinze and J. Teizer, "Visibility-related fatalities related to construction equipment," *Safety Science*, Vol. 49, pp. 709-718, 2011.
- 2) U. Lee, J. Kim, H. Cho, and K. Kang, "Development of a mobile safety monitoring system for construction sites," *Automation in Construction*, Vol. 18, pp. 258-264, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) S. Park, K. Oh, J. Park, J. Kim, J. Seo, G. Lee, and K. Yi, "Development of an environment monitoring technology of working site for construction machinery based on laser scanner," *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers*, pp. 279-284, 2015.
- 6) X. Xu, H. He, and D. Hu, "Efficient reinforcement learning using recursive least-squares methods," *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 16, pp. 259-292, 2002.
- 7) B. Pence, H. Fathy, and J. Stein, "Recursive estimation for reduced-order state-space models using polynomial chaos theory applied to vehicle mass estimation," *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 22, pp. 224-229, 2014.
- 8) K. Pettersson and Seppo Tikkanen, "Secondary control in construction machinery design and evaluation of an excavator swing drive," *The 11<sup>th</sup> Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09*, June, Linkoping, Sweden, Vol. 9, pp. 2-4, 2009.