

2025년 추계학술발표대회 : 대학생부문

ZMP 이론을 활용한 IMU 기반 실시간 굴착기 전복 위험성 예측 시스템 개발

Development of a Real-Time Excavator Rollover Risk Prediction System Based on IMU Using ZMP Theory

○이 재 경* 오 태 균* 김 채 현* 최 민 지**
Lee, Jae-Kyung Oh, Tae-Gyung Kim, Chae-Hyun Choi, MinJi

Abstract

Excavator rollovers are a major safety concern in construction sites, often caused by excessive loads, steep slopes, or improper operation. Current systems mainly provide post-accident alerts, lacking preventive measures. This study presents a real-time rollover risk prediction system using IMU sensors and Zero Moment Point (ZMP) theory. A scaled excavator model with multiple IMU sensors (MPU6050, MPU9250) was tested under flat ground, inclined slopes (10°, 20°, 30°), and varying bucket loads. Sensor data were integrated with RecurDyn and MATLAB to calculate ZMP relative to the support polygon. Results showed that ZMP deviations outside the support area effectively indicate instability, enabling rollover risk prediction. Calibration coefficients were introduced to reduce slope-induced errors, improving accuracy. The proposed system classifies stability into safe, caution, and danger zones, providing intuitive real-time warnings. This research demonstrates the potential of sensor-based monitoring to enhance excavator safety and prevent rollover accidents.

키워드 : 굴착기 전복사고, ZMP(Zero Moment Point), IMU(Inertial Measurement Unit)

Keywords : Excavator Rollover, ZMP(Zero Moment Point), IMU(Inertial Measurement Unit)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

굴착기는 건설 현장에서 필수적인 장비로 널리 사용되지만, 구조적 특성과 불안정한 작업 환경으로 인해 전복 사고가 빈번하게 발생한다. 전복 사고는 작업자의 안전을 위협할 뿐만 아니라 장비 손상, 현장 생산성 저하, 경제적 손실로 이어져 심각한 문제로 지적된다. 그러나 기존의 안전 관리 시스템은 주로 사고 발생 이후 경고 발송이나 외부 환경 감지에 초점을 맞추고 있어, 사고를 사전에 예방하는 데에는 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해 최근 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서를 활용한 장비 동작 분석과 로보틱스 분야에서 널리 활용되는 ZMP(Zero Moment Point) 이론이 굴착기 안전 연구에 새로운 대안으로 주목받고 있다. IMU 센서는 기울기, 가속도, 각속도를 실시간으로 측정할 수 있으며, ZMP는 지지면 내 안정성 여부를 직관적으로 평가할 수 있어 굴착기 전복 위험성 분석에 효과적으로 적용 가능하다. ZMP 이론을 활용하여 유보현 등(2016)은 실제 굴착기에 IMU 센서를 적용한 전도율 감지 시스템을 개발·검증하였으나, 제한된 동작 범위와 단일 작업

조건 중심의 실험으로 다양한 지반 상황과 하중 변화까지 반영하기에는 한계가 있었다.

이에 본 연구는 축소형 굴착기에 IMU센서를 부착하고 지반 경사도와 버킷 하중을 다변화하여 ZMP를 실측함으로써 보다 폭넓은 작업 환경에서 전복 위험성을 평가하여 선행연구의 한계를 보완하고자 한다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해 축소형 굴착기 모델을 활용하여 평지, 경사면, 버킷 하중 변화 조건에서 실험을 수행하고, RecurDyn 기반 시뮬레이션과 비교·검증을 수행한다. 또한 측정 오차 보정 및 단계별 안정성 평가 알고리즘을 도입하여 보다 정밀한 예측 시스템을 구현하고자 한다.

본 연구의 결과는 굴착기 전복 사고를 사전에 예방할 수 있는 실질적인 안전 관리 방안을 제시하며, 향후 실제 장비 적용을 위한 기반을 마련할 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

2.1 ZMP(Zero Moment Point)

ZMP는 로봇 공학 및 보행 안정성 연구에서 활용되는 개념으로, 대상 시스템의 지지면에 대해 모든 외력 및 관성력에 의한 모멘트의 합이 0이 되는 점을 의미한다. ZMP가 지지면 내부에 위치할 경우 시스템은 안정 상태이며, 외부로 벗어나면 불안정 상태로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 굴착기의 붐, 암, 버킷 및 본체의 질량과 가속도 데이터를 기반으로 ZMP를 계산하고, 이를 통해 굴착기의 안정성을 평가한다. ZMP에 대한 각 성분의 계산은 아래와 같

* 인하대 건축학부 건축공학전공 4학년

** 인하대 건축학부 건축공학전공 교수

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Inha University, mjchoi@inha.ac.kr)

이 연구는 2025년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: RS-2024-00337975

은 식(1), (2)와 같다. (최종환, 2006)

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (2)$$

3. 연구방법

3.1 축소형 굴착기 실험

실험을 위해 볼보 EC160E 모델을 1:16의 축소 비율로 제작한 축소형 RC 굴착기를 활용하였다. 상부체와 하부체에는 MPU9250, 불·암·버킷에는 MPU6050 센서를 부착하여 각 부위의 가속도 및 각속도를 수집하여 실시간 ZMP 값을 계산하였다. 계산된 ZMP 값에 기반하여 그림2와 같이 안전, 보통, 위험 영역으로 분류한 지지면 위에 결과를 나타내어 시각화하였다. 센서 데이터는 Arduino와 Python을 통해 실시간으로 가공 및 분석되었다.



그림1. 축소형 굴착기 프로토타입



그림2. 전복 위험성 평가를 위한 지지면 영역 구분

3.2 RecurDyn 시뮬레이션

실제 굴착기의 동역학적 특성을 반영하기 위해 RecurDyn을 활용하여 굴착기 모델을 구현하였다. RecurDyn은 다물체 동역학(Multibody Dynamics, MBD) 기반의 시뮬레이션 소프트웨어로, 복잡한 기계 시스템의 운동 및 동적 거동을 정밀하게 분석할 수 있는 특징을 갖는다. 본 연구에서는 RecurDyn으로 구현된 굴착기 모델을 Matlab과 연동하여 ZMP 변화를 시각화하였으며, 평지, 경사(10°, 20°, 30°), 버킷 하중 변화(150g,

300g, 450g) 조건에서의 결과를 도출하였다.

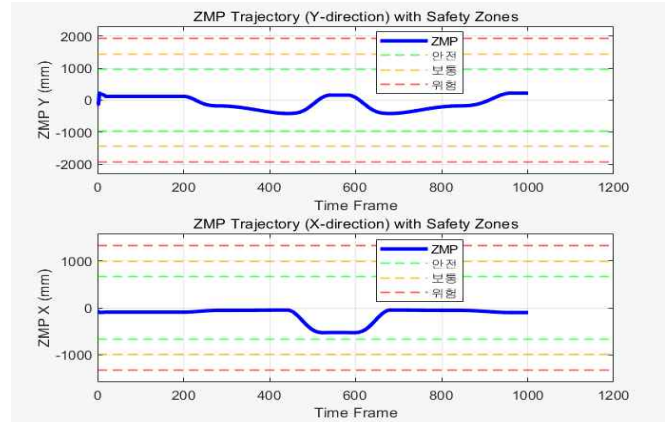


그림3. 시뮬레이션을 통한 ZMP 시각화

3.3 실험-시뮬레이션을 통한 보정 계수 산출

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 굴착기 ZMP 좌표와 시뮬레이션 결과를 비교하여 차이를 분석하였다. ZMP 계산 정확도를 향상시키기 위해, 두 결과 간의 편차를 기반으로 보정 계수를 산출하였다. 보정 계수 산출은 평지 조건에서 수행되었으며, 다양한 동작에 보정 계수를 적용하여 유효성을 검증하였다. 이 과정을 통해 실시간 전복 위험성 평가에 활용 가능한 보정 계수를 도출하였다.

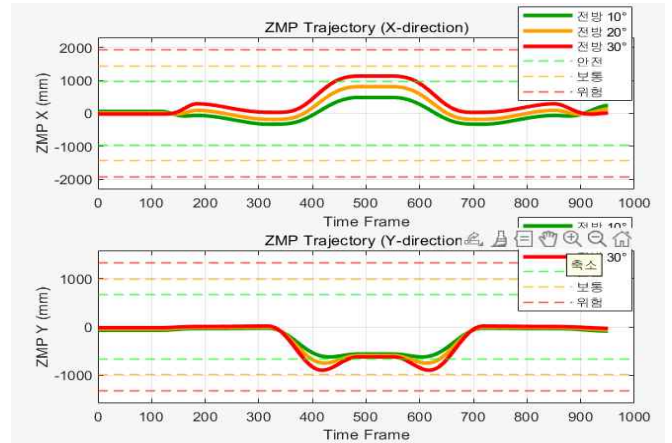


그림4. 시뮬레이션을 통한 경사로 ZMP

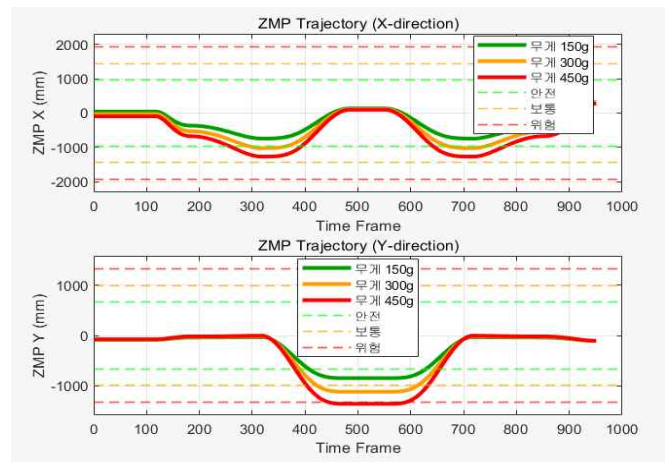


그림5. 시뮬레이션을 통한 버킷 하중에 따른 ZMP

4. 연구결과

4.1 연구결과

본 연구에서는 축소형 굴착기 실험과 RecurDyn 기반 시뮬레이션을 통해 IMU 센서를 활용한 ZMP 계산 알고리즘의 적용 가능성을 검증하였다. 우선 초기 자세에서의 캘리브레이션을 통해 센서 오차를 최소화하였으며, 그 결과 상부체의 회전 및 버킷 동작에 따른 ZMP 값의 변화를 안정적으로 관찰할 수 있었다. 특히 시작 값과 종료 값의 일치성은 센서 기반 데이터의 신뢰성을 보여준다. 또한, 계산된 ZMP 좌표를 지지면 내 위치에 따라 안전·보통·위험 영역으로 구분함으로써, 굴착기의 동작에 따른 안정성 변화를 명확하게 확인할 수 있었다.

먼저 그림 6과 같이 평지 조건에서 축소형 굴착기의 동작에 따른 ZMP 변화를 관찰하였다. 초기 안정 자세에서는 ZMP 값의 변동이 거의 없었으나, 버킷, 암, 붐을 작동시키면서 ZMP 값의 변동이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

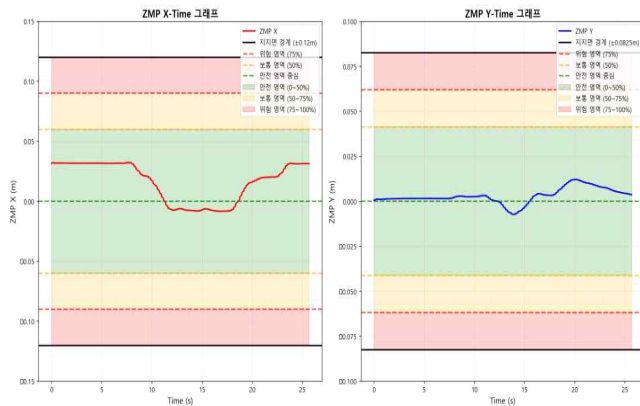


그림6. 평지에서 축소형 굴착기 실험 결과

그림7은 경사면 조건(10°, 20°, 30°)에서 경사각이 증가함에 따라 ZMP 좌표가 점진적으로 안전 영역 밖으로 이동하는 경향을 보여준다. 특히 30° 경사에서는 축소형 굴착기가 전복됨과 동시에 ZMP 값이 위험 영역으로 이동하였다. 이는 굴착기의 안정성이 지면 기울기에 크게 영향을 받는다는 점과, ZMP 계산이 전복 위험성을 신뢰성 있게 반영함을 보여준다. 다만, 각도별 ZMP 값의 차이가 상대적으로 작게 나타나 경사 환경에 특화된 추가 보정 알고리즘의 필요성이 제기되었다.

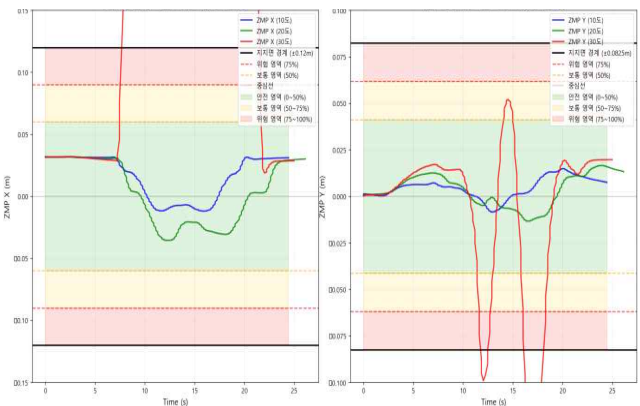


그림7. 경사면에서 축소형 굴착기 실험 결과

버킷 하중 변화 실험에서는 버킷에 150g, 300g, 450g의 무게를 순차적으로 부가하여 ZMP 변화를 관찰하였다(그림8). 그 결과 하중 증가에 따라 ZMP 좌표의 이동이 감지되었으나, 변화 폭이 크지 않아 단일 센서만으로는 하중 변화를 정밀하게 반영하기 어려웠다. 따라서 버킷의 하중 변화를 정확히 측정하기 위한 추가 센서의 필요성이 확인되었다.

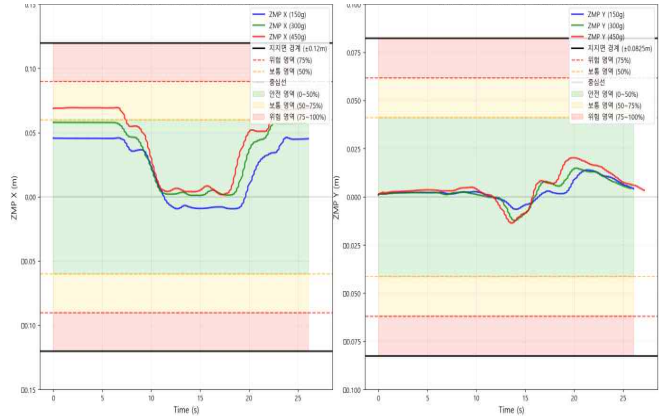


그림8. 버킷 무게 변화에 따른 굴착기 실험 결과

4.2 보정 계수 산출 및 검증

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 ZMP 값과 RecurDyn 기반 시뮬레이션 결과를 비교하여 양자 간의 차이를 분석하고, 이를 바탕으로 보정 계수를 산출하였다. 보정 계수는 평지 조건에서 도출하였으며, 시뮬레이션 결과와 실험값 간의 편차를 최소화하도록 계산되었다(그림9). 산출된 보정 계수는 이후 다양한 조건에 동일하게 적용될 수 있도록 설계되었다.

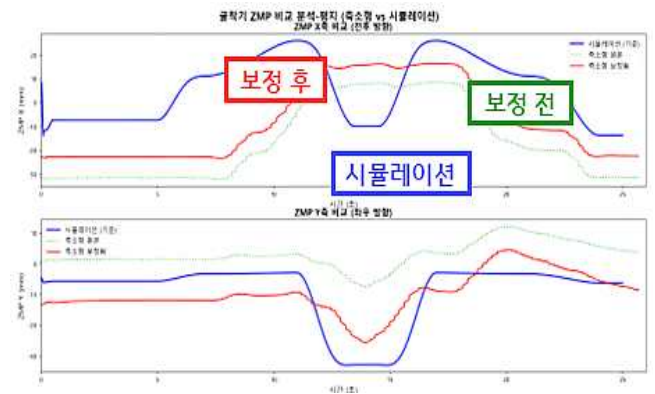


그림9. 평지 기반 보정 계수 산출

산출된 보정 계수를 적용한 결과, 평지 조건뿐만 아니라 경사면 조건에서도 그림10과 같이 ZMP 좌표의 정확도가 유의하게 향상됨을 확인하였다. 이를 통해, 본 연구에서 도출한 보정 계수가 다양한 지형 조건과 동작에서도 ZMP 기반 안정성 평가의 신뢰성을 높이는 데 유효함을 검증하였다.

산출한 보정 계수를 다양한 굴착기 동작 상황에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 구체적으로 붐, 암, 버킷의 상승 및 하강 동작과 상부체의 회전 동작 등 실제 작업 조건을 반영한 다양한 시나리오에 보정 계수를 적용하였다. 그 결과, 보정 계

수를 활용한 ZMP 계산은 원래의 계산 값과 비교했을 때 보다 일관된 안정성 평가 결과를 도출하였으며, 실제 전복 위험성과의 연관성도 향상된 것으로 나타났다(그림11). 이러한 검증 과정을 통해 제안된 보정 계수가 굴착기의 다양한 작업 환경에서도 효과적으로 적용 가능함을 확인하였다.

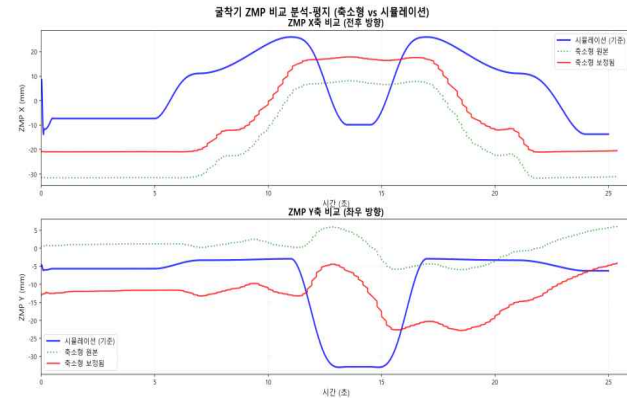


그림10. 경사면 ZMP 값에 보정 계수 적용

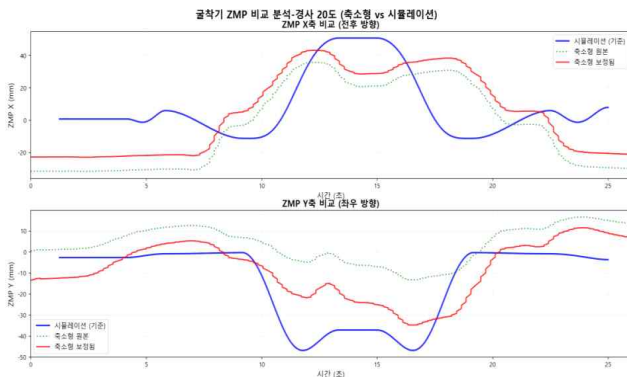


그림11. 다양한 동작을 통한 보정 계수 검증

최종적으로 본 연구는 ZMP 이론을 적용하여 굴착기의 지지면을 안전, 보통, 위험 영역으로 구분하고, 경사각 변화와 버킷 하중 변화에 따른 실시간 전복 위험성 예측 시스템을 구현하였다. 이를 통해 굴착기의 작업 조건에 따른 안정성 평가가 가능함을 확인하였으며, 향후 실제 현장 적용을 위한 기초 데이터를 확보하였다.

5. 시사점 및 결론

본 연구는 IMU 센서 데이터를 ZMP 이론과 결합하여 굴착기의 전복 위험을 실시간으로 예측할 수 있는 가능성을 검증하였다. 센서 기반 ZMP 계산으로 동작 중 안정성을 평가하였으며, 평지에서 도출된 보정 계수는 경사 환경에도 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한 버킷 하중 변화에 따른 위험 차이를 정량적으로 분석하고, 지지면을 안전·보통·위험 영역으로 구분하여 직관적인 위험 신호를 제공할 수 있는 관리 체계로 확장 가능함을 제시하였다.

다만 본 연구는 축소형 굴착기를 대상으로 수행되어 실제 장비의 동역학적 특성과 환경 요인을 완전히 반영하지

는 못하였다. 지반 불균형, 풍하중, 작업 속도 변화, 센서 잡음 및 장시간 사용 시 오차 누적 문제가 남아 있으며, 이는 향후 실제 현장 실험과 장비 적용 과정에서 보완되어야 한다.

현장 적용 방안으로는 굴착기 운전석에 IMU 센서 기반 전복 경고 시스템을 설치하여 운전자가 즉시 대응할 수 있도록 하고, 장시간 운용 시 발생할 수 있는 센서 오차를 보정하는 알고리즘을 적용함으로써 실제 작업 환경에서 사고를 예방하고 안전 관리 효율을 높일 수 있다.

참고문헌

1. 최종환 외, “ZMP를 이용한 굴삭기의 안정성 연구.” 한국기계학회 논문집 A, 27(1), 86-92, 2003.
2. 이원주, “RFID 기반 중장비 안전관리 시스템 개발 및 평가.” 석사학위논문, 아주대학교, 2016.
3. 류병호 외, “임베디드 시스템 기반 원격 굴착기의 전도율 계산.” 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 439-440, 2014.
4. M. Zumanas 외, “Determination of excavator tool position using absolute sensors.” IEEE Open Conf. Electrical, Electronic and Information Sciences, 1-7, 2021.
5. 유보현 외, “원격 조작 굴삭기의 전도율 감지 시스템 개발.” 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 한양대학교, 2016.