

도심지 굴착 현장 인접 지반함몰 모니터링을 위한 UGV 탑재 멀티 센서의 적응형 에너지 관리 기법*

Adaptive Energy Management Technique for UGV-Mounted Multi-Sensors in Monitoring Ground Subsidence Adjacent to Urban Excavation Sites

김정우** · 정진만*** · 김서연**** · 정영훈***** · 민홍***** · 김태식*****

Jung Woo Kim** · Jinman Jung*** · Seoyoen Kim**** · Young-Hoon Jung***** · Hong Min***** ·

Taesik Kim*****

Abstract

This research proposes a monitoring system using Unmanned Ground Vehicles (UGVs) to address the issue of ground subsidence in urban areas. In environments where Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) face limitations due to urban obstacles, UGVs offer an effective alternative. This research aims to equip UGVs with various sensors, establish adaptive sensing management suitable for urban ground subsidence monitoring, and evaluate their effectiveness. The study involves creating a risk map by identifying areas with a high likelihood of subsidence and categorizing them into monitoring zones (M zones) that require frequent monitoring and saving zones (S zones) that allow for energy saving. A strategy is proposed to adjust the sensing intervals of the navigation sensor (NS), which detects the UGV's location, and the monitoring sensor (MS), which monitors subsidence-related factors, according to these zones. Tests simulating typical urban deep excavation scenarios confirmed that adjusting the sensing intervals of MS and NS reduces energy consumption substantially. The study highlights the importance of optimizing energy consumption based on the UGV's monitoring path, suggesting that this approach can enhance urban safety by effectively monitoring ground subsidence.

Keywords: Unmanned Ground Vehicle, Ground Subsidence, Multi Sensor, Energy Optimization, Adaptive Energy Management

*본 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2021R1F1A1060223)을 받아 수행된 연구임.

**홍익대학교 토목공학과 박사수료(주저자: lovekimj@naver.com)

***인하대학교 컴퓨터공학과 부교수

****인하대학교 인간중심컴퓨팅연구소 박사후연구원

*****경희대학교 사회기반시스템공학과 정교수

*****가천대학교 시소프웨어학부 부교수

*****홍익대학교 토목공학과 부교수(교신저자: taesik.kim@hongik.ac.kr)

Received: August 16, 2024 / Accepted: November 6, 2024

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

4차 산업혁명과 함께 등장한 무인 비행체(Unmanned Aerial Vehicle, UAV), 일명 드론(Drone)을 공사 현장의 공정관리나 사회기반시설의 모니터링 및 유지관리에 활용하는 것은 많이 일반화되었다(권영주·문성호, 2023). 그러나 도심지는 고층 건물로 인한 비행의 어려움, 통신 중계기로 인한 무인 비행체와 파일럿 간의 통신 방해, 전력선으로 인한 자기장 교란 등 무인 비행체의 비행을 방해할 수 있는 요소들이 많아 안전한 비행을 보장할 수 없다. 따라서, 도심지와 같이 드론의 비행이 어려운 경우, 드론의 일종인 무인 지상 차량(Unmanned Ground Vehicle, UGV)을 활용한 자동화된 모니터링 시스템이 주목받고 있다. UGV는 다양한 센서를 탑재하고 지상에서 돌아다닐 수 있어 추락의 위험이 없으며, UAV에 비해 탑재 중량에 대한 제약이 작다는 장점이 있다.

도심지에서의 지반함몰은 심각한 사회적, 경제적 영향을 미칠 수 있는 중요한 문제로, 사회 인프라의 붕괴, 인명 피해 등 다양한 위험을 초래할 수 있다(조영석·장연수, 2017). 이러한 지반함몰은 주로 지하수의 과도한 사용, 노후 된 하수도 및 상수관의 누수, 지하 굴착 작업 등 다양한 요인에 의해 발생한다. 특히, 도심지에서 빈번하게 발생하는 깊은 굴착 현장 주변에 지반함몰을 유발하는 요인들이 복합적으로 공존한다면 그 문제는 더 심각해질 수 있다. 즉, 인구 밀집 지역인 도시는 지반함몰로 인한 피해가 더욱 치명적일 수 있어, 이를 예방하고 모니터링하는 기술 개발이 필요하다. Fig. 1은 도심지 깊은 굴착 현장 주변 지반함몰 모습을 나타낸다.

해당 목적을 위해 다양한 센서를 탑재한 UGV를 활용할 수 있다. UGV에 탑재 가능한 다양한 센서로는 포인트 클라우드 데이터 작성을 위한 LiDAR, 근거리 포토그래메트리를 위한 카메라, 정밀한 변위 측정을

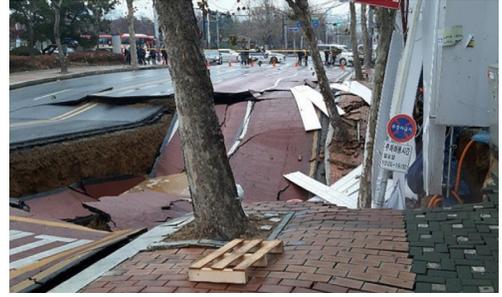


Fig. 1. Ground Settlement Adjacent to Deep Excavation Site

Source: Byun (2019)



Fig. 2. Unmanned Ground Vehicle Developed for Ground Monitoring Purpose

위한 선 레이저 등이 있을 수 있다. UGV가 모니터링 범위를 돌아다니면서 지반함몰과 관계있는 탐지 대상들을 다양한 센서들을 이용하여 탐지하고 수집하면 UAV가 도심지에서 갖는 제약을 극복할 수 있다. 일반적으로 배터리로 구동되는 UGV의 경우, 모니터링 가능 범위와 배터리의 성능이 직결되어 있다. 따라서, 탑재된 센서의 배터리 성능과 관련하여 최적화된 탐지 주기가 중요하다. Fig. 2는 지반 침하 모니터링을 위해 개발된 UGV의 모습을 나타낸다.

본 연구의 목적은 UGV에 다양한 센서가 탑재되었을 때, 일반적인 고정 탐지 주기 대신 탐지 주기를 상황에 따라 바꾸는 적응형 센서를 이용하여 도심지 굴착현장 인접 지반함몰 모니터링에 적합한 탐지주

기 설정 기법을 제안하고 평가하는데 있다. 이를 위해 앞서 언급한 지반함몰 고위험 구역에 대한 지도를 작성하고, 이에 따른 멀티센서의 적응형 탐지 기법을 제안하였다. 이러한 기술은 도심지의 안전성을 높이고, 지반함몰로 인한 피해를 최소화하는 데 기여할 것으로 기대한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 도심지 굴착으로 인해 발생하는 현장 인접 지반의 지반함몰 모니터링을 위한 UGV 탑재 멀티센서들의 적응형 탐지 기법을 설계하였다. 이를 평가하기 위해 지반함몰 고위험 지역에 대한 위험도 지도를 설정하여 평가를 진행하였다.

본 연구는 Kim et al.(2024)이 제안한 연구 결과를 활용하여 위험도 지도에서의 효율적 배터리 사용에 관한 평가를 진행하였다. 도심지에서 지반함몰이 예상되는 굴착 현장 인근의 퇴매움 구역, 하수관거 매설구역 및 인접 구조물의 피해가 발생할 수 있는 구역에서 UGV의 이동 경로에 따른 최적 에너지 사용을 위한 적응형 탐지 주기를 분석하였다. 더불어, 깊은 굴착 현장 주변을 따라 UGV가 이동할 때, 탐지 시작점의 위치 및 경로에 따라서 달라지는 에너지 소비에 대한 시뮬레이션 분석도 진행하였다.

2. 선행연구 검토

임무에 따른 UAV 혹은 UGV의 최적화된 경로 설정과 관련한 연구는 다수 진행됐다. Sadrpour et al.(2012)는 UGV의 임무 수행 중 에너지 소비를 예측하기 위한 모델을 제안하였으며, 이를 통해 도로 조건, 주행 형태 등 다양한 요인을 고려한 에너지 소비가 가능하게 하였다. Kilic and Omer(2019)는 산불 위험 감시를 위한 UAV 최적 경로 모델을 제시하였으며, 위험 지역에 따라 UAV가 회피하거나 혹은 우선하여 모니터링하는 경로 계획이 중요하다는 점을

강조하였다. 또한 위험도 지도를 활용한 모니터링의 효율성을 높이는 방법을 연구하였다. Våljaots and Sell(2019)는 UGV의 에너지 효율성을 분석하였다. UGV의 이동 및 센서 사용 시 에너지 소비를 최소화하기 위한 전략을 제시하였다. 에너지 효율성을 높이기 위한 다양한 기법을 실험하였으며, 이는 UGV의 적응형 센서 관리기법을 제시하였다. Bradley and Atkins(2015)는 가상 물리 시스템에서의 최적화와 제어에 관한 연구를 수행하였다. 특히 자율 주행 차량의 데이터 처리 및 센서 관리 측면에서 에너지 소비를 최소화하는 방법을 다루었다. 이 내용은 UGV의 자율 제어 및 모니터링 시스템 개발에 유용하게 사용할 수 있다고 판단한다. Guglieri et al.(2015)는 원격 조작 항공 시스템(Remotely Piloted Aircraft System, RPAS)에서 항공기의 경로 계획 전략을 다루었다. 무인 항공기가 수행하는 임무의 효율성과 에너지 소비의 균형을 맞추기 위한 경로 최적화 방법을 제안하였다. Elmakis et al.(2022)는 UAV를 사용하여 위험 지역을 추정하는 연구를 수행하였다. 연구를 통해 위험 지역을 정확하게 식별하고, 모니터링을 최적화하기 위한 방법론을 제시하였다. Liu et al.(2021)은 UGV 엣지 러닝(Edge Learning)을 결합하여 경로, 에너지 소비, 데이터 샘플의 크기를 최적화하는 모델을 제안하였다. 해당 연구를 통해 통신을 통한 서버에서의 처리가 아닌 엣지에서의 데이터 처리로 통신이 원활하지 않은 환경을 극복하고 에너지 소비를 최소화할 수 있는 UGV의 경로를 계획할 수 있다. Gokhale et al.(2021)은 자율 주행 차량의 실내 위치 추정을 위한 빠르고 에너지 효율적인 로컬라이제이션 방법을 제안하였다. 특히, 에너지 소비를 최소화하면서도 정확한 위치 추정을 가능하게 하는 알고리즘을 개발하였다. 이는 UGV의 위치 인식 및 네비게이션 성능을 향상하는 데 중요한 참고자료로 판단한다. Primatesta et al.(2018)은 UAV를 위한 위험 인지 경로 계획 방법을 제안하였다.

UAV 임무의 안전성과 에너지 효율성을 높이기 위해 위험구역을 회피하는 경로를 자동으로 생성하는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 이루고자 하는 목적과는 상반될 수도 있으나, 위험 지역을 고려한 최적화 전략을 수립하는데 유용한 내용이라고 판단한다.

Kim et al.(2017)은 공사 현장에서 센서의 최적 탐지 주기와 관련한 연구를 수행하였다. 터널 굴착 중 공사인력을 포함한 물체를 추적하기 위해 탐지 대상체의 이동성을 고려한 적응형 탐지 주기 메커니즘을 제안하였다. 이는 에너지 소비를 줄이기 위해 센서의 탐지 주기를 조정하는 방법을 다루었으며, 본 연구에서 이루고자 하는 UGV의 효율적 에너지 사용에 유용한 내용을 제공한다고 판단한다.

3. 적응형 센서 에너지 소비 모델

3.1 모델의 개념

Kim et al.(2024)는 UGV에 탑재된 효율적인 센싱을 위해, 적응형 센서 관리 모델을 제안하였다. UGV가 모니터링 임무를 수행할 때 사용되는 모니터링 센서(Monitoring Sensor, MS)와 UGV의 위치를 파악하기 위한 네비게이션 센서(Navigation Sensor, NS)의 전력을 최소화하는 데 초점을 맞추고 있다. 위험도 지도를 기반으로 집중 모니터링이 필요한 구역(Monitoring Zone, M)과 에너지 절약이 가능한 구역(Saving Zone, S)으로 구분하고, MS의 탐지 주기와 NS의 탐지 주기를 조절하여 UGV의 에너지 소비를 최적화하였다. 본 연구에서는 Kim et al.(2024)이 제안한 적응형 관리 모델을 이용하였다.

Fig. 3는 UGV에 탑재된 NS의 탐지 주기에 따라 M 구역과 S 구역으로 분류되는 상황을 모사하고 있다. Fig. 3의 δ 는 UGV가 있는 구역 판단을 위한 NS의 탐지 주기를 나타낸다. 위험도 지도에서 M 구역으로 분류하고 있더라도, UGV가 실제로 M 구역에 있는지

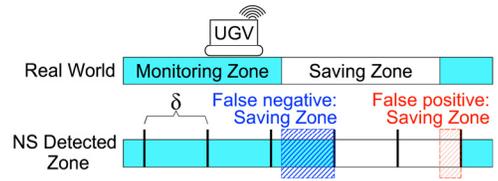


Fig. 3. Zoning in Real World and Detected Zones by UGV Navigation Sensor

S 구역에 있는지 구분하기 위해서는 NS가 위치를 탐지해야 한다. NS의 탐지 간격 사이에 UGV가 위치한 구역이 M에서 S 혹은 S에서 M으로 바뀔 수 있으며, 탐지 주기가 느리다면 구역을 잘못 인식하고 있을 확률이 높다. 즉, UGV가 이미 S 구역으로 이동했음에도 M 구역에 있는 것으로 구분될 수도 있고, UGV가 M 구역으로 이동했음에도 S 구역에 있는 것으로 구분될 수도 있다. 즉 UGV 위치를 정확하게 파악하기 위해서는 NS의 탐지 주기가 짧아야 한다. 그러나, NS의 탐지 주기가 짧아지면, NS는 많은 에너지를 사용하게 되어, 적은 에너지를 소비하는 전략에 반하게 되어, 적절한 수준을 찾아야 한다. UGV를 활용하여 지반함몰 위험도를 모니터링하는 목적을 고려할 때, 긴 탐지 주기로 인해 모니터링 해야하는 M 구역을 놓치고 지나가는 것은 바람직하지 않다. 따라서, S 구역에서는 NS의 탐지 주기를 짧게 하는 것이 바람직하다. 반면, M 구역에서는 NS의 탐지 주기를 길게 하여 NS가 사용하는 에너지를 절약하는 것이 최적 에너지 소비 전략에 부합한다.

MS의 탐지 간격 조절 전략은 명확하다. UGV가 지반함몰의 위험도가 높은 M 구역에 있을 경우, 탐지 주기를 짧게 하여 많은 데이터를 수집하는 것이 모니터링 목적에 부합한다. 반면, UGV가 상대적으로 지반함몰의 위험도가 낮은 S 구역에 있을 경우, MS의 탐지 주기를 길게 하여 에너지 소비를 줄일 수 있다. 이런 관계 모사를 위해 식 (1), (2)를 정리하였다 (Kim et al., 2024).

$$f_i(t) = \begin{cases} f_s & \text{if } s_i(t) = M \\ \frac{1}{\alpha} \cdot f_s & \text{else if } s_i(t) = S \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_i(t) = \begin{cases} \delta & \text{if } s_i(t) = M \\ \frac{1}{\beta} \cdot \delta & \text{else if } s_i(t) = S \end{cases} \quad (2)$$

여기서, f_s 는 MS의 기본 탐지 주기를 나타내며, UGV가 있는 구역에 따라 α 의 비율로 탐지 주기를 조절하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, δ 는 UGV가 있는 구역 판단을 위한 NS의 탐지 주기를 나타내며, β 의 비율로 주기를 조절하게 된다. $s_i(t)$ 는 시간에 따라 UGV가 있는 구역을 의미한다.

3.2 전력 소비 분석

UGV가 있는 구역과 관계없이 일정하게 MS의 탐지 주기를 설정할 경우, MS의 소비전력은 식 (3)과 같다. 여기서, P_0 은 단위 시간당 전력 소비량을 의미한다. 본 논문에서 센서가 소비하는 전력의 단위는 W 혹은 mW에 해당하며, 탐지 주기는 일반적으로 ms이다.

$$P_{fixed} = P_M = P_0 \cdot f_s \quad (3)$$

MS와 NS의 구역에 따라 소비전력의 적응형 관리를 위한 관계는 식 (4)과 같이 정리할 수 있다(Kim et al., 2024). MS 소비 전력은 M 구역에서 P_M , S 구역에서는 P_S 이며, NS의 소비전력은 P_e , τ 는 1회 감지하는 데 걸리는 시간을 의미한다. Pr_M 은 S구역에서 M구역으로 넘어갈 확률을, Pr_S 은 M구역에서 S구역으로 넘어갈 확률을 뜻한다.

$$P_{adaptive} = \{P_M \beta \delta Pr_M + P_S \delta Pr_S + P_e \beta \tau (Pr_M + Pr_S)\} / (\beta \delta Pr_M + \delta Pr_S) \quad (4)$$

만약, NS에 의한 전력 소비가 없는 이상적인 상황이라면, MS의 M 구역과 S 구역의 이동에 따른 전력 소비는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다(Kim et al., 2024).

$$P_{ideal} = \frac{P_M \cdot \lambda^{-1} + P_S \cdot \mu^{-1}}{\lambda^{-1} + \mu^{-1}} \quad (5)$$

동일한 구역이 연속적으로 이어지는 경우 Fig. 4에 나타난 오탐(False Positive) 및 미탐(False Negative)은 발생하지 않는다. 이를 고려하기 위해, 식 (5)의 λ 는 M 구역에서 S 구역으로 이동하는 비율, μ 는 S 구역에서 M 구역으로 이동하는 비율을 의미한다. 이 비율은 다음 식 (6), (7)과 같이 정의한다.

$$\lambda = \frac{\text{No. of Groups of M Zone}}{\text{No. of M Zone}} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\text{No. of Groups of S Zone}}{\text{No. of S Zone}} \quad (7)$$

멀티센서의 소비전력 최적화를 전혀 고려하지 않은 경우가 식 (3)이므로, 전력 소비의 상한값에 해당

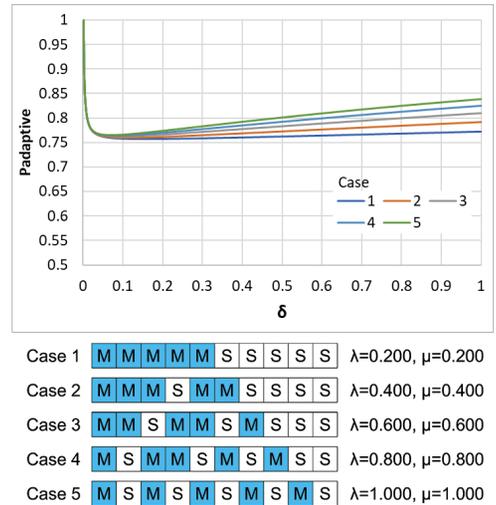


Fig. 4. Variation of $P_{adaptive}$ with Various Number of Groups of Monitoring And Saving Zones

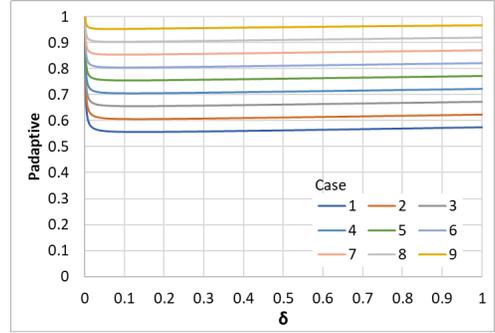
하며, 식 (5)는 이상적인 상황으로 전력소비의 하한 값에 해당하게 된다. 따라서, $P_{adaptive}$ 는 식 (4)는 두 값 사이에 존재하게 된다.

3.3 구역 분포에 따른 적응형 센서 관리 분석

M 구역과 S 구역이 다양한 형태로 존재할 때, 멀티 센서의 소비전력에 대해 분석하였다. 센서들의 정확한 소비전력을 이용하기 보다는, $P_M = 1$ 을 기준으로 사용하는 입력 변수들 사이의 비율로 분석하였다. $\alpha = 2, \beta = 10, \tau = 0.1, P_e = 1, P_s = 0.5$ 을 사용하였다. Fig. 4는 M 구역과 S 구역이 5개씩 존재하는 모니터링 현장에서 M 구역과 S 구역의 분포에 따라 소비되는 멀티센서의 전력을 나타낸다. 모든 Case에서 NS의 위치 탐지 주기가 0에 가까울수록 에너지 소비는 매우 높으며, 탐지 주기가 증가함에 따라 급격히 감소하였다가 증가하는 양상이 나타났다. 그러나 M 구역에서 S 구역으로 바뀌거나, S 구역에서 M 구역으로 바뀌는 횟수가 늘어날수록, 즉 λ 와 μ 가 증가할수록, NS의 탐지 주기에 따른 소비전력이 증가하는 양상이 달랐다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, Case 5가 가장 많이 증가하였으며, Case 1이 가장 적게 증가하였다.

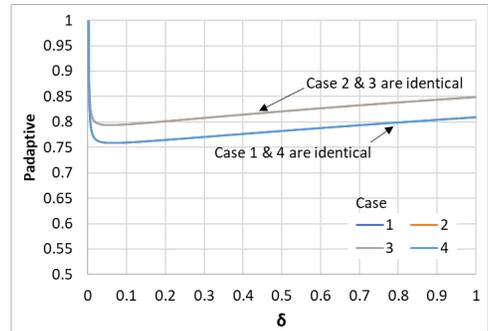
Fig. 5는 M 구역의 개수에 따른 UGV 탐재 멀티센서의 소비전력을 분석하였다. M 구역이 1개인 Case 1부터 M 구역이 9개인 Case 9에 대해서 분석하였다. 지반함몰 고위험도 구역으로 분류되어 MS가 짧은 주기로 지반함몰의 위험성을 모니터링하는 M 구역의 경우, MS가 많은 전력을 소비하게 된다. 따라서, M 구역이 늘어날수록 전력 소비는 커진다.

Fig. 6은 M 구역과 S 구역의 개수가 정해진 상황에서 구역의 분포가 달라질 때, $P_{adaptive}$ 를 나타낸다. Case 1, 2, 3, 4는 M 구역이 5개, S 구역이 5개로 같고, M 구역의 모여있는 그룹도 3개로 일정하여 λ 값이 0.6으로 고정되어 있다. 다만 S 구역의 분포에 따라 μ 가 0.6, 0.8의 값을 나타내는 상황이다. Case 1과 4



Case 1	M S S S S S S S S S	$\lambda=1.000, \mu=0.111$
Case 2	M M S S S S S S S S	$\lambda=0.500, \mu=0.125$
Case 3	M M M S S S S S S S	$\lambda=0.333, \mu=0.143$
Case 4	M M M M S S S S S S	$\lambda=0.250, \mu=0.167$
Case 5	M M M M M S S S S S	$\lambda=0.200, \mu=0.200$
Case 6	M M M M M M S S S S	$\lambda=0.167, \mu=0.250$
Case 7	M M M M M M M S S S	$\lambda=0.143, \mu=0.333$
Case 8	M M M M M M M M S S	$\lambda=0.125, \mu=0.500$
Case 9	M M M M M M M M M S	$\lambda=0.111, \mu=1.000$

Fig. 5. Variation of $P_{adaptive}$ with Various Number of Monitoring and Saving Zones



Case 1	M M S M M S M S S S	$\lambda=0.600, \mu=0.600$
Case 2	S M M S M M S M S S	$\lambda=0.600, \mu=0.800$
Case 3	S S M M S M M S M S	$\lambda=0.600, \mu=0.800$
Case 4	S S S M M S M S S S	$\lambda=0.600, \mu=0.600$

Fig. 6. Variation of $P_{adaptive}$ with Various Distribution Pattern of M and S while the Number of Zones Are Given

는 구역의 분포는 다르더라도 λ 와 μ 의 값은 같은 상황으로 $P_{adaptive}$ 는 같은 곡선으로 표현되었다. Case 2와 3도 같은 λ 와 μ 의 값을 갖고, 같은 곡선으로 표

현이 되었다. μ 가 0.8로 더 큰 Case 2와 3이 Case 1과 4보다 에너지 소비가 더 큰 것으로 나타났다.

UGV에 탑재한 멀티센서에 적응형 센서 관리기법을 적용하면 다음과 같은 특징이 나타난다. 지반함몰 위험도 지도에 위험구역으로 분류되는 M 구역이 많을수록, M 구역과 S 구역이 자주 바뀔수록 에너지 소모가 커지는 것으로 나타났다. 지반함몰 위험구역을 모니터링할 때, UGV의 모니터링 경로에 따라 UGV에 탑재된 멀티센서의 소비전력이 달라질 수 있음을 의미한다.

4. 도심지 굴착 현장 인접 지반함몰 모니터링 시뮬레이션

본 절에서는 도심지 지반함몰 위험도 지도를 설정하고, 설정된 지도에 따라 UGV를 활용하여 모니터링 하는 동안 소비되는 전력에 대해 분석하였다. Fig. 7은 도심지에서 일반적으로 발생할 수 있는 굴착 공사 현장의 주변 상황을 묘사하고 있다. Fig. 7 Plan view를 살펴보면, 도심지 굴착 현장에 인접한 건물이 있으며, 굴착으로 인해 지반 변형이 발생하면 건물의 안전에 영향을 끼칠 수 있다. 지반함몰의 주요 원인으로 추정되는 하수관거도 근처에 있다. 되메운 구역도 굴착 지지 벽체에 인접해 있는데, 굴착 벽

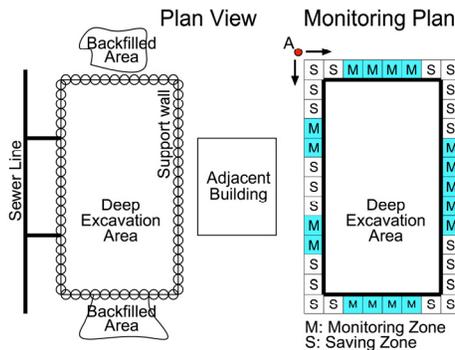


Fig. 7. Illustration of Deep Excavation Site in Urban Area and Monitoring Plan

체 내부 공간으로 지하수가 못 들어오게 하도록 양정하면 그 영향을 받아 지반함몰에 취약해질 수 있는 구역이다. Fig. 7의 Monitoring Plan은 이런 사안을 고려하여 M 구역과 S 구역을 분류하였다. 앞서 언급한 지반함몰의 발생 가능성이 크거나, 지반 변형으로 인해 주변에 미치는 영향이 큰 구역을 M 구역으로, 나머지는 S 구역으로 설정하였다.

UGV가 해당 깊은 굴착 현장을 모니터링할 때, 소비되는 전력에 대해서 분석하였다. Fig. 7의 A, B 지점에서 시계 방향(Clockwise)으로 혹은 반시계 방향(Counterclockwise)으로 이동하며 모니터링할 때의 소비전력은 Figs. 8, 9에 나타났다. UGV가 모니터링을 A 지점에서 시작하는 경우, 방향에 무관하게

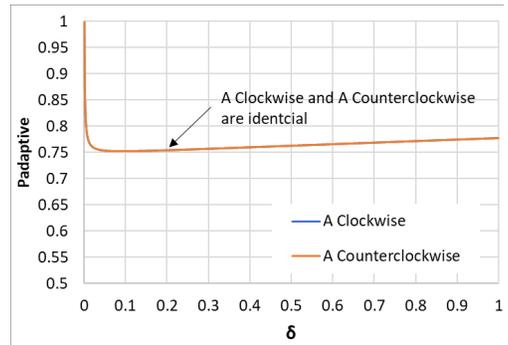


Fig. 8. $P_{adaptive}$ When UGV Moving Clockwise or Counterclockwise from Point A

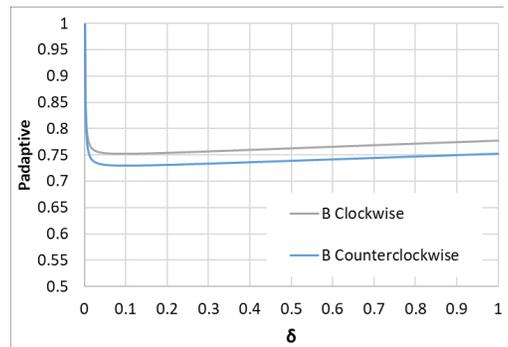


Fig. 9. $P_{adaptive}$ When UGV Moving Clockwise or Counterclockwise from Point B

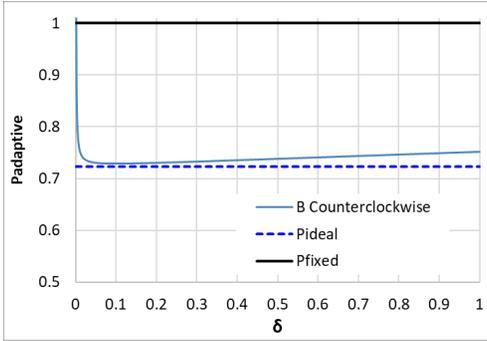


Fig. 10. Comparison between P_{fixed} , P_{ideal} and $P_{adaptive}$.

멀티센서는 같은 전력을 소비하는 것으로 나타났다. 그러나 UGV가 B 지점에서 모니터링을 시작할 때, 반시계 방향으로 이동하는 경우가 시계 방향으로 이동하는 경우보다 더 적은 에너지를 소비하는 것으로 나타났다. 이는 같은 지역을 모니터링 하더라도 UGV의 시작점과 방향에 따라 멀티센서는 다른 전력을 소비할 수 있음을 의미한다. 즉, UGV를 활용하여 위험도 지도에 기반하여 모니터링을 수행할 때, 사전 분석을 통해 시작점과 경로를 설정해야 UGV의 배터리 소비를 줄일 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 7의 위험도 지도에서 가장 작은 에너지를 사용하는 B 지점에서 반시계 방향으로 UGV가 이동할 때의 $P_{adaptive}$, 고정형 탐지 주기를 사용할 때의 P_{fixed} , 이상적인 상황에서의 소비전력 P_{ideal} 을 비교하였다. 고정형 탐지 주기일 때의 소비전력에 비해서 적응형 탐지 주기를 사용하였을 때 전력 소비가 25% 이상 감소하였으며, 이상적인 전력 소비에 가까운 것으로 나타났다. 본 연구에서 분석한 $P_{adaptive}$ 값을 찾는 시나리오를 사용할 경우, UGV의 배터리를 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

적응형 센서 관리기법을 탑재한 UGV를 활용한 도심지 굴착 현장 인접 지반함몰 모니터링에 관한 연

구를 수행하였다. 본 연구에서는 UGV의 모니터링 임무에서 에너지 소비를 줄이기 위해 적응형 센서 관리 전략을 제안하였다. 위험 지도를 기반으로 UGV의 모니터링 방식을 특성화하고, 멀티센서의 에너지 효율성을 분석하였다. 또한, M 구역과 S 구역의 분포를 고려하여 에너지 소비를 최소화할 수 있는 탐지 주기를 이용하여, 분석에 사용된 모델의 유효성을 검증하였다. 전형적인 도심지 깊은 굴착 상황을 가정하여 시험한 결과, MS 및 NS의 탐지 주기 조정이 에너지 소비 감소에 크게 이바지하는 것을 확인하였다. 또한, UGV의 모니터링 경로에 따른 에너지 소비 최적화의 중요성을 확인하였으며, 이러한 접근이 지반함몰 모니터링을 통해 도심지 안전성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 MS의 탐지 주기를 상황에 따라 매우 다양하게 설정해야 하는 문제에 대해서 적절한 해법을 제시하는 데 한계가 있다. 향후 본 연구에서 설정한 경우보다 더 다양한 탐지 주기를 갖는 경우에 관한 연구와 현장 실험을 통해 UGV에 탑재한 멀티센서별 에너지 소비 최적화 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 권영주·문성호(2023), “드론 촬영 데이터를 기반으로 한 도로 균열 탐지 딥러닝 모델 개발”, 『LHI Journal』, 14(2): 125~135.
2. 변완영(2019.12.23), “국토부, ‘지반침하’ 건설현장 고강도 특별점검 실시”, 매일건설신문.
Byun, W. Y. (2019.12.23), “The Ministry of Land, Infrastructure and Transport Conducts High-Intensity Special Inspections on Construction Sites for Ground Subsidence”, Maeil Construction News.
3. 조영석·장연수(2017), “도심지 지반함몰의 초기발생 현상에 대한 흐름해석적 접근”, 『LHI Journal』, 8(1): 13~22.
4. Bradley, J. and E. Atkins (2015), “Optimization and Control of Cyber-Physical Vehicle Systems”, *Sensors*, 15(9): 23020~23049.

5. Elmakis, O., T. Shaked, B. Fishbain and A. Degani (2022), "BREEZE-Boundary Red Emission Zone Estimation Using Unmanned Aerial Vehicles", *Sensors*, 22(14): 5460.
6. Gokhale, V., G. M. Barrera and R. Venkatesha Prasad (2021), "FEEL: Fast, Energy-Efficient Localization for Autonomous Indoor Vehicles", *ICC 2021 : IEEE International Conference on Communication*, Montreal, QC, 1~6.
7. Guglieri, G., A. Lombardi and G. Ristorto (2015), "Operation Oriented Path Planning Strategies for RPAS", *Am. J. Sci. Technol.*, 2(6): 1~8.
8. Kilic, S. and O. Omer (2019), "A Self-Adaptive UAV Routing for Forest Fire Risk Mitigation: A Conceptual Model", *Proceedings of the 2019 Summer Simulation Conference*, Berlin, 1~12.
9. Kim, S., Y.-H. Jung, H. Min, T. Kim, and J. Jung (2024), "Adaptive Sensor Management for UGV Monitoring Based on Risk Maps", *Robotics and Autonomous Systems*, 172: 104605.
10. Kim, T., H. Min and J. Jung (2017), "A Mobility-Aware Adaptive Duty Cycling Mechanism for Tracking Objects During Tunnel Excavations", *Sensors*, 17(3): 435
11. Liu, D., S. Wang, Z. Wen, L. Cheng, M. Wen, and Y.-C. Wu (2021), "Edge Learning with Unmanned Ground Vehicle: Joint Path, Energy, and Sample Size Planning", *IEEE Internet Things J.*, 8(4): 2959~2975.
12. Primatesta, S., G. Guglieri and A. Rizzon (2018), "A Risk-Aware Path Planning Method for Unmanned Aerial Vehicles", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dallas, TX, 905~913.
13. Sadrpour, A., J. Jin and A. G. Ulsoy (2012), "Mission Energy Prediction for Unmanned Ground Vehicles", *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, 2229~2234.
14. Våljaots, E. and R. Sell (2019), "Energy Efficiency Profiles for Unmanned Ground Vehicles", *Proc. Est. Acad. Sci.*, 68(1): 55~65.

요 약

본 연구에서 도심지 굴착 현장 인접 구역에서 발생할 수 있는 지반함몰 문제를 해결하기 위해 UGV를 활용한 모니터링 시스템을 제안하였다. 무인 비행체(UAV)의 비행이 제한되는 도심지 환경에서는 무인 지상 차량(UGV)이 효과적인 대안이 될 수 있다. 본 연구의 주요 목적은 UGV에 다양한 센서를 탑재하고, 도심지 지반함몰 모니터링에 적합한 적응형 탐지 주기를 설정하고, 이를 평가하는 것이다. 본 연구에서는 도심지에서 지반함몰의 가능성이 큰 구역을 설정하여 위험도 지도를 작성하고, 지반함몰의 위험도가 높아 모니터링을 자주 하는 M 구역과 위험도가 낮아 에너지를 절약하는 S 구역으로 구분하였다. UGV에는 UGV의 위치를 탐지하는 센서(NS)와 지반함몰 관련 항목들을 모니터링 하는 센서(MS)의 탐지 주기를 M 구역과 S 구역에 따라 조절하는 전략을 제안하였다. 전형적인 도심지 깊은 굴착 상황을 가정하여 시험한 결과, MS 및 NS의 탐지 주기 조절이 에너지 소비 감소에 크게 기여하는 것을 확인하였다. UGV의 모니터링 경로에 따른 에너지 소비 최적화의 중요성을 확인하였으며, 이러한 접근이 지반 함몰 모니터링을 통해 도심지 안전성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

주제어: 무인 지상 차량, 지반 함몰, 멀티 센서, 에너지 최적화, 적응형 센서 관리