

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.6.141>

IIBC 2016-6-17

굴착현장 모니터링 시스템을 위한 적응적인 듀티사이클링 제어 기법

Control Method of Adaptive Duty-cycling for Monitoring System in Excavations

김태식*, 민홍**, 정진만***

Taesik Kim*, Hong Min**, Jinman Jung***

요약 굴착 현장 인접 구조물의 안정성을 확보하기 위해 현장 주변 지반의 변형을 모니터링하는 것은 중요하다. 지반특성과 굴착 깊이에 따라 굴착 중 벽체의 변형이 다르게 발생하며, 이를 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 따라서 굴착지 벽체 후방에 inclinometer를 탑재한 센서를 설치하여 이를 모니터링한다. 본 논문에서는 굴착과정에서 벽체의 변형을 모니터링하기 위해 무선 센서 노드를 사용한 모니터링 시스템을 설계하였다. 또한 배터리 기반의 센서 노드의 수명을 연장하기 위해 굴착 진행 과정과 inclinometer의 계측 값에 따라 위험도 등급을 설정하고 해당 등급에 따라 활성/휴면 구간을 적응적으로 변경하는 기법을 제안하였다. 지연시간 분석을 통해 제안기법은 굴착현장과 같이 위험도가 다른 데이터가 동적으로 발생하는 환경에서 고정 듀티사이클링 기법에 비해 지연시간을 크게 줄일 수 있음을 확인한다.

Abstract Geotechnical engineering projects that requires excavation activity can cause massive ground deformation and this can damage adjacent structures. Depending on the engineering characteristics of ground material and the excavation depth, the ground movement is various. To overcome this issue, the ground deformation is monitored by multiple sensors. Typically, an inclinometer is installed behind the support wall. In this paper, we present an adaptive duty-cycling control mechanism using wireless sensors for monitoring ground deformation in excavations. The proposed mechanism dynamically adjusts the sleep time based on the urgency degree of sensed data from inclinometer. Through analytical evaluation of expected latency time, we confirm our adaptive duty-cycling mechanism has lower latency compared with periodic duty-cycling mechanism under variable conditions.

Key Words : Wireless sensors, Adaptive duty-cycling, Excavation, Inclinometer

1. 서론

토목공학의 한 분야인 지반공학에서 주요하게 다루는 두 가지 요소는 지반 구조물의 안정성(Stability)과 지반의 변형(Ground deformation)이라 할 수 있다[1]. 지반

구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 지반 구조물에 작용하는 힘의 크기보다 지반 구조물이 저항할 수 있는 힘이 커야 한다. 설계 기술과 시공 기술이 발달함에 따라 지반 구조물에 작용하는 힘의 크기를 정확하게 계산할 수 있게 되었고, 적절한 보강재를 적절한 시기에 설치하

*정회원, 홍익대학교 토목공학과

**정회원, 호서대학교 컴퓨터정보공학과

***정회원, 한남대학교 정보통신공학과

접수일자: 2016년 9월 2일, 수정완료: 2016년 10월 28일

게재확정일자: 2016년 12월 9일

Received: 2 September, 2016 / Revised: 28 October, 2016

Accepted: 9 December, 2016

***Corresponding Author: jmjung@hnu.kr

Dept. of Information and Communication Engineering, Hannam University, Korea

여 충분한 저항력을 확보할 수 있게 되었다. 따라서 지반 구조물의 안정성은 현대의 지반공학기술로 충분히 확보할 수 있는 수준이 되었다. 그러나 힘과 관련되어 있는 안정성과는 다르게 공사 중 발생할 수 있는 지반 변형의 정확한 예측은 쉽지 않다. 지반 구성물질인 흙과 암반의 강성(Stiffness)의 정확한 평가가 쉽지 않고, 지반의 거동을 모사할 수 있는 구성모델(Constitutive model)에도 한계가 있기 때문이다. 더욱이 공사현장이 도심에 위치할 경우, 현장 인근에 위치한 기존 구조물에 피해를 주지 않기 위해서는 지반의 변형 관리가 매우 중요하다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 설계 단계에서 지반의 변형을 정확하게 예측하는 것은 쉽지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 공사현장에서는 그림 1과 같이 센서들을 설치하고, 계측 값을 모니터링하여 지반의 변형을 관리하게 된다[2].

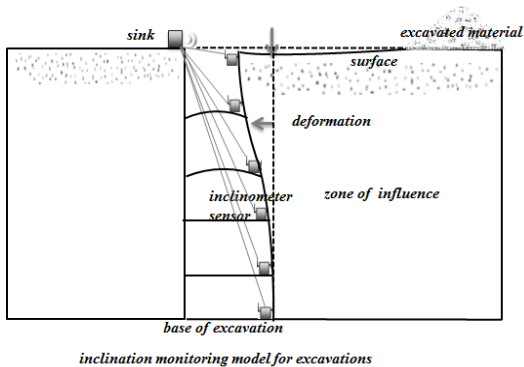


그림 1. 굴착 현장에서 경사 모니터링 모델
Fig. 1. Inclination monitoring model for excavations

지반의 굴착(Excavation) 공종이 포함되어서는 토목공사현장은 굴착하고자 하는 지반의 경계를 따라 굴착지지벽체(Excavation support wall)를 설치한 후 굴착을 진행한다. 굴착지지벽체는 굴착으로 인해 생긴 빈 공간으로 주변의 흙이 밀려들어 오는 것을 막는 역할을 한다. 굴착지지벽체는 강성이 큰 H파일, 콘크리트, 강널말뚝(Sheet pile)등을 사용하는데, 굴착이 진행됨에 따라 토압으로 인해 수 mm에서 수 cm의 변형이 벽체에 발생하게 된다. 이 벽체의 변형은 굴착현장인근 지반 변형의 직접적인 원인이 되며, 영향 범위는 굴착 깊이의 4배에 이른다 [3]. 예를 들어 굴착 깊이가 10 m라고 할 때, 굴착벽면으로부터 40 m 떨어진 영역까지가 지반변형 발생 영향권에 해

당된다. 따라서 영향권을 모두 모니터링 하는 것 보다 굴착벽체를 모니터링 하는 것이 효율적이다.

굴착벽체의 변형은 일반적으로 인클리노미터(Inclinometer)로 측정한다. 인클리노미터는 벽체에 인접한 지반에 수직 공(Bore hole)을 뚫거나, 벽체 내부에 수직공을 만들어 설치한다. 인클리노미터는 일반적으로 벽체의 경사를 측정할 수 있는 여러 개의 프로브(Probe)가 케이블로 직렬 연결되어있다. 각각의 프로브가 측정값을 케이블을 통해 지상으로 전달하며, 인력으로 수집하거나 자동 데이터 수집 시스템(Automated Data Acquisition System, ADAS)를 활용하기도 한다[4].

본 논문에서는 수직공 없이 굴착벽체의 변형을 예측하기 위해 무선센서 기반의 모니터링 시스템 모델을 제안한다. 특히 굴착공사 시 공사기간 동안 배터리기반의 센서가 효율적으로 동작하기 위해 적응적인 듀티사이클링 기법을 제안한다.

II. 시스템 설계

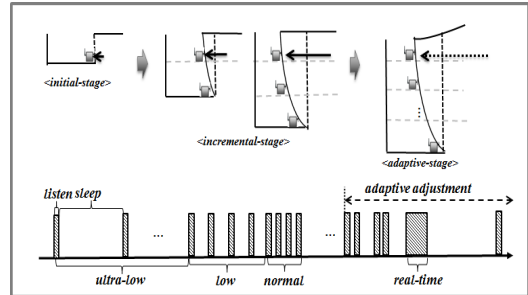


그림 2. 굴착 과정에서 적응적인 듀티사이클링 기법
Fig. 2. Adaptive control of duty-cycling during excavation process

듀티사이클링은 배터리 기반 무선 통신 장치에서 에너지 절약을 위해 지속적으로 통신 장치를 활성화 시키지 않고 주기적으로 휴면 시켜 전체 네트워크의 수명을 연장하는 기법이다[5]. 즉 휴면 구간이 길수록 배터리 절약과 네트워크 수명 연장 효과가 늘어난다. 그러나 센서들 사이의 무선 송수신을 통해 데이터를 수집해야하는 시스템에서 지나치게 휴면 구간이 길 경우 지연 시간이 커져 실시간 전송을 요구하는 응용에서는 문제가 발생할 수 있다[6]. 이를 위해 무선 통신 기반 모니터링 시스템 설계 시 적절한 휴면 주기 대한 고려가 필요하다[7].

듀티사이클링은 크게 동기적 기법과 비동기적 기법으로 나눌 수 있다^[8]. 동기적 기법을 사용하는 센서들은 활성/휴면 구간을 맞추어 동작하고 비동기적인 기법을 사용하는 센서들은 서로 독립적인 휴면/활성구간을 가지고 동작한다. 일반적으로 굴착 공사는 단계적으로 이루어지며, 굴착장비가 실제로 지반을 굴착하는 공종과 보강재 (Support)를 설치하는 공종의 반복이다. 그림 2와 같이 각 공종 단계에서 무선센서가 설치되며 단일 홉 거리에 있는 지상의 싱크 노드에 인클리노미터의 측정값이 전달된다. 굴착현장에서는 지상의 싱크노드는 상시전원이 가능하므로 지중에 설치된 무선센서는 비동기적인 기법이 적합하다.

본 논문에서는 굴착현장 모니터링 시스템을 위한 적응적인 듀티사이클링 제어 기법을 제안한다. 굴착 공사 대부분 저전력으로 동작하고 벽체의 변형 단계에 따라 지연시간을 줄이는 방법이다. 초기 굴착 단계에서는 굴착으로 인한 벽체의 변형이 크지 않기 때문에 벽체에 설치된 무선 센서 노드에서 수집된 데이터의 값의 변화가 크지 않다. 또한 설치된 센서 노드의 수도 작기 때문에 빠른 주기로 데이터를 전송할 필요성이 낮아 배터리 절약을 위해 휴면 구간을 늘린다. 굴착이 진행되면서 벽체 변형의 정도가 심해지면 센서 노드들의 설치 위치에 따라 측정되는 값이 달라지고 이러한 측정값은 서로 다른 위험도를 의미하기 때문에 벽체 변형의 위험도가 증가한 노드는 인클리노미터의 값을 측정하여 싱크 노드로 전달하는 주기를 일정하게 감소시킨다. 마지막으로 각 센서 노드들 마다 측정되는 위험도의 편차가 심하고 일부 구간에서 벽체 붕괴와 같은 위험한 상황이 발생할 가능성이 높을 경우에는 필요에 따라 수면을 하지 않고 실시간적으로 데이터를 전송한다. 제안 기법은 수개월~수년이 걸리는 굴착 현장에서 효율적으로 적은 배터리를 사용하면서 동시에 위급상황 시 지연시간을 최소화 할 수 있다.

III. 분석 및 평가

본 장에서는 제안된 적응적인 듀티사이클링의 성능 평가를 다룬다. 먼저 센서 데이터들을 위험 상태에 따라 분류하고 발생 빈도를 확률적으로 정의한다. 발생 확률이 다른 환경에서 고정 듀티사이클링과 적응적인 듀티사이클링의 예상 지연시간을 분석한다.

1. 지연 시간 분석

고정 듀티사이클링은 주기적으로 활성화 되어 T시간 동안 인클리노미터로 부터 측정한 데이터를 전송하고 고정된 τ 시간동안 휴면상태로 전환한다. 반면 제안된 적응적인 듀티사이클링은 측정한 기울기 값을 이동된 위험 상태에 따라 n등급으로 분류하고 그 등급에 따라 동적으로 휴면시간(τ_i)이 결정된다. 그림 3은 고정 듀티사이클링과 적응적인 듀티사이클링의 차이를 보여준다.

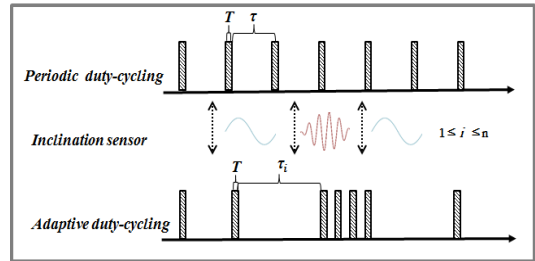


그림 3. 적응적인 듀티사이클링 모델
 Fig. 3. Adaptive duty-cycling model

모든 노드는 싱크노드와의 1홉 (single-hop) 거리에 위치하고 전파 시간(propagation delay)는 없다고 가정한다. 또한, 센서 MAC 프로토콜에서 처리 시간과 CSMA와 같은 충돌회피를 위한 지연시간은 휴면시간에 비하면 미미하므로 전송 지연시간 ($E[t]$)에 초점을 맞추어 분석한다. 전송 지연시간은 데이터 전송 시 활성 구간이 되기 까지 대기 시간에 의해 결정된다. X 를 데이터 발생시간을 나타내는 확률 변수라고 하고 $f_X(x)$ 를 X 의 확률 밀도 함수라고 할 때, 평균 지연시간은 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[t] = \int_T^{T+\tau} (T+\tau-x)f_X(x) dx \quad (1)$$

또한 데이터 발생이 $[0, T+\tau]$ 에서 연속균등분포라고 할 때, $f_X(x) = \frac{1}{T+\tau}$ 을 수식 (1)에 대체하여 고정 듀티사이클링의 예상 지연시간을 수식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[t] &= \int_T^{T+\tau} (T+\tau-x) \frac{1}{T+\tau} dx \\ &= \frac{1}{T+\tau} \int_T^{T+\tau} (T+\tau-x) dx \\ &= \frac{\tau^2}{2(T+\tau)} \end{aligned} \quad (2)$$

적응적인 듀티사이클링은 센서 데이터를 통해 이동된 정도를 판단한 후, 그 등급에 따라 휴면시간을 결정하는 방식이다. 따라서 센서 위험도에 따라 분류된 데이터 등급의 발생 빈도가 지연시간을 결정한다. i 등급의 센서 데이터가 발생할 확률을 p_i 라고 할 때, 적응적인 듀티사이클링의 예상 지연시간은 모든 등급의 p_i 와 지연시간의 곱들의 합으로 수식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$E[t] = p_1 \frac{\tau_1^2}{2(T+\tau_1)} + p_2 \frac{\tau_2^2}{2(T+\tau_2)} + \dots + p_n \frac{\tau_n^2}{2(T+\tau_n)} \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n p_i \frac{\tau_i^2}{2(T+\tau_i)}$$

표 1. 논문에서 사용된 용어
Table 1. The notations used in the paper

Notation	Description
T	활성 시간
τ	고정 듀티사이클링에서 휴면시간
n	센서 데이터 최대 등급
τ_i	적응적인 듀티사이클링에서 휴면시간 ($1 \leq i \leq n$)
p_i	i 등급의 센서 데이터가 발생할 확률
$E[t]$	평균 지연시간

표1은 본 논문에서 사용되는 기호를 설명한다.

2. 평가

고정 듀티사이클링과 적응적인 듀티사이클링의 예상 지연시간을 비교하기 위해 파라미터들은 표2와 같이 설정되었다. 고정 듀티사이클링에서 100 (ms)의 활성구간과 4096 (ms)의 수면구간으로 나누어 주기적으로 반복하도록 설정하였다. 공정한 비교 분석을 위해 적응적인 듀티사이클링에서 최대 휴면시간은 8192 (ms)로 설정하였고, 등급에 따라 지수 감소한다.

표 2. 설정 파라미터
Table 2. Configuration parameter

Configuration	Value
T	100 (ms)
τ	4096 (ms)
n	14
τ_i	$\tau_i = 2^{n-i}$ [8192 4096 2048 1024 ... 2 1]

그림 4는 데이터 등급의 발생 확률이 균등할 경우

($\forall i, j, p_i = p_j$) 고정 듀티사이클링과 적응적인 듀티사이클링의 예상 지연시간을 나타낸다. 4096 (ms) 휴면시간을 가진 고정 듀티사이클링의 예상 지연시간은 1999 (ms)으로 전체 듀티사이클 주기의 약 1/2이다. 반면 센싱된 기울기 등급에 따라 동적으로 변화하는 적응적인 듀티사이클링의 경우, 지연시간은 560 (ms)으로 고정 듀티사이클링에 비해 확연히 감소한 것을 확인할 수 있다.

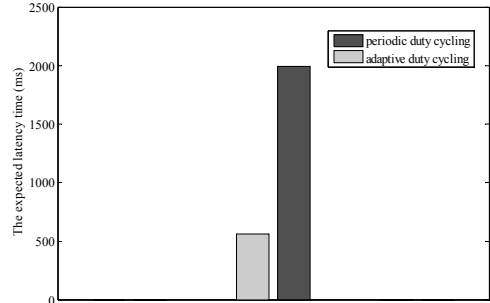


그림 4. 예상 지연 시간 비교
Fig. 4. The comparison of expected latency time

굴착 깊이와 벽체에 인접한 지반의 성질에 따라 변형의 정도가 달라지므로 센싱된 기울기 등급의 발생 확률은 굴착현장에 따라 달라진다. 굴착 현장에서 센싱된 정상적인 등급($i = 1$)의 센서값 발생 확률이 편향적으로 크다고 가정하고 편향 분포 상황에서 성능 평가를 수행하였다. 비정상적인 나머지 등급 ($2 \leq i \leq n$)의 발생 확률은 모두 같고 모든 등급의 발생 확률의 합이 1을 유지하도록 설정하였다. 즉 편향성이 증가할수록 정상적인 데이터의 발생확률이 높다는 것을 의미하고 반대로 편향성이 작아질수록 비정상적인 움직임을 보이는 데이터의 발생확률이 높다는 것을 의미한다.

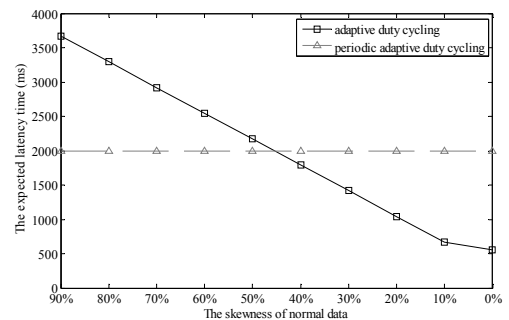


그림 5. 정상데이터 발생비율에 따른 예상 지연시간
Fig. 5. The expected latency time according to the skewness of normal data

그림 5는 정상데이터 발생 비율에 따른 고정 듀티사이클링과 적응적인 듀티사이클링의 예상 지연시간을 나타낸다. 제안 기법은 정상데이터 발생 비율이 낮아질수록 적응적으로 휴면시간을 줄임으로서 예상 지연시간을 크게 줄일 수 있다.

IV. 결론

지반 굴착이 포함된 토목공사현장은 벽면의 붕괴를 막기 위해서 벽체를 설치한다. 이러한 벽체는 굴착 과정에서 변형이 발생하기 때문에 안전을 위해 이를 모니터링하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 벽체의 변형을 효율적으로 모니터링하기 위해 인클리노미터가 탑재된 무선 센서 노드를 사용한 시스템을 설계하였다. 또한 배터리 기반의 센서 노드의 수명을 연장하기 위해 굴착 진행 과정과 인클리노미터의 계측 값에 따라 위험도 등급을 설정하고 해당 등급에 따라 활성/휴면 구간을 적응적으로 변경하는 기법을 제안하였다. 지연시간 분석을 통해 위험도가 다른 데이터가 동적으로 발생하는 환경에서 적응적인 듀티사이클링 기법이 전송 지연시간을 줄일 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] F. Prunier and et al., "Designing geotechnical structures with a proper stability criterion as a safety factor," *Computers and Geotechnics*, Vol.71, pp.98-114, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.09.007>
- [2] Y. Hong and et al., "Three-dimensional deformation behaviour of a multi-propped excavation at a greenfield site at Shanghai soft clay," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.45, pp.249-259, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.09.012>
- [3] P. Hsieh, and C. Ou, "Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.6, pp.1004-1017, 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1139/t98-056>
- [4] G. Machan, and V. G. Bennett, "Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects," *Transportation Research Circular*, pp.1-92, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.17226/23074>
- [5] K. Han and et al., "Algorithm design for data communications in duty-cycled wireless sensor networks: A survey," *IEEE Communications Magazine*, Vol.51, No.7, pp.107-113, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6553686>
- [6] E. Biondi and et al., "Duty cycling in opportunistic networks: the effect on intercontact times," *Proc of the 17th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp.197-201, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1145/2641798.2641822>
- [7] S. Oh, "Design of a Smart Application for Remote Diagnosis in Ubiquitous Computing Environment", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 16, NO. 4, pp.81-87, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.81>
- [8] R. C. Carrano, "Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.16, No.1, pp.181-194, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.052213.00116>

저자 소개

김 태 식(정회원)



- 2000년 : 서울대학교 지구환경시스템 공학부 졸업 (학사).
- 2002년 : 서울대학교 지구환경시스템 공학부 졸업 (석사).
- 2011년 : Northwestern University. 졸업(박사).
- 2013년 ~ 현재 : 홍익대학교 토목공학 조교수

<주관심분야 : 도심지 굴착, 무선 센서 네트워크, IoT>

민 흥(정회원)



- 2004년 : 한동대학교 전산과학 졸업(학사)
- 2011년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 졸업(박사)
- 2013년 ~ 현재 : 호서대학교 컴퓨터 정보공학부 조교수

<주관심분야 : 운영체제, 무선 센서 네트워크, IoT>

정 진 만(정회원)



- 2008년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
- 2014년 서울대학교 전기컴퓨터공학과 졸업(박사)
- 2014년 ~ 현재 : 한남대학교 정보통신공학과 조교수

<주관심분야 : 운영체제, 임베디드 시스템, IoT >

※ 이 논문은 2016년도 한남대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 연구되었음