무선센서 네트워크를 이용한 산사태 감지방법 및 경보발령 관리 기준치 설정 연구

A study on the landslide detection method using wireless sensor network (WSN) and the establishment of threshold for issuing alarm

김 형 우*, 김 구 수, 장 성 봉
(Hyung-Woo Kim, Goo-Soo, Kim and Sung-Bong, Chang)

Abstract: Recently, landslides frequently occur on natural slope and/or man-made cut slope during periods of intense rainfall. With a rapidly increasing population on or near steep terrain, landslides have become one of the most significant natural hazards. Thus, it is necessary to protect people from landslides and to minimize the damage of houses, roads and other facilities. To accomplish this goal, many landslide monitoring systems have been developed throughout the world. In this paper, a simple landslide detection system that enables people to escape the endangered area is introduced. The system is focused on the debris flows which happen frequently during periods of intense rainfall. The system is based on the wireless sensor network (WSN) that is composed of wireless sensor nodes, gateway, and remote server system. Wireless sensor nodes and gateway are deployed by commercially available Microstrain G-Link products. Five wireless sensor nodes and one gateway are installed at the test slope for detecting ground movement. The acceleration and inclination data of test slope can be obtained, which provides a potential to detect landslide. In addition, thresholds to determine whether the test slope is stable or not are suggested by a series of numerical simulations, using geotechnical analysis software package. It is obtained that the alarm should be issued if the x-direction displacement of sensor node is greater than 20mili-meters and the inclination of sensor node is greater than 3 degrees. It is expected that the landslide detection method using wireless senor network can provide early warning where landslides are prone to occur.

Keywords: landslide, debris flow, disaster mitigation, wireless sensor network (WSN), monitoring system, numerical simulation

I. 서론

기상이변에 따른 집중호우로 인하여 산사태의 발생빈도가 점차 증가추세에 있으며 그 피해규모도 대형화하고 있다. 특히, 급경사 지역에서는 빗물과 함께 흙과 바위 등이 한꺼번에 빠른 속도로 씻겨 내려가는 토석류(土石流)와 같은 산사태가 자주 발생하고 있으며 이로 인하여 인명피해, 건물파손, 도로유실과 같은 심각한 사회적 경제적인 손실이 초래하고 있는 실정이다. 이와 같은 산사태를 방지하기 위해서는 위험하다고 판단되는 경사면에 대한 철저한 보강이 이루어져야 하며(예방적 측면), 이와 동시에 경사면 움직임을 항상 감시하며 이상 징후 발생 시 즉각적으로 위험상황을 알릴 수 있는 조기경보 시스템을 구축할 필요가 있다(대비적 측면). 국가에서도 「급경사지 재해예방에 관한 법률」(2007년 7월 27일 공포)에 따라 택지 · 도로 · 철도 및 공원시설 등에 부속된 자연 비탈면과 인공 비탈면(옹벽 및 축대 포함) 가운데 붕괴 또는 낙석 등으로 국민의 생명과 재산의 피해가 우려되는 급경사지에 대해서는 계측관리를 하도록 하고 있다.

일반적으로 경사면의 안정성을 파악하기 위하여 여러 유형의 계측센서를 사용하는데 전통적인 계측센서로는 지표면 경사계(tiltmeter), 균열측정계(crack gauge), 지중경사계(inclinometer), 지중침하계(borehole extensometer), 간극수압계(piezometer) 등이 있다[1]. 하지만, 이와 같은 계측센서를 설치하려면 경사면에 수 미터 깊이 이상의 구멍을 뚫을 수 있는 숙련된 기술자가 필요하므로 설치비용이 많이 들며, 계측지점이 많을 경우 계측센서와 데이터로거를 전선으로 연결처리하거나 이들을 유지보수 하는 작업이 쉽지 않게 된다. 이와 같은 기술적, 경제적 이유로 인하여 경사면에 계측센서를 조밀하게 설치할 수 없고 적은 수의 계측센서만으로 넓은 면적의 경사면(100~200m 간격)을 모니터링 해야 하는 문제가 있다[2]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선진국에서는 정보통신기술을 활용한 경사면 계측 모니터링 시스템을 연구 개발하고 있는데 그 가운데 특히 무선센서 네트워크에 의한 경사면 모니터링 시스템은 특히 전원과 통신 인프라가 잘 갖추어져 있지 않은 산간벽지의 경사면이라 할지라도 무선센서 네트워크를 잘 구축하면 비교적 넓은 지역의 경사면 거동을 저렴한 비용으로 감시할 수 있으며 유지관리가 용이하다는 장점이 있다. 하지만, 무선센서 네트워크의 센서노드는 전원이 빨리 고갈되어 원하는 기간 동안 계측 모니터링을 수행할 수 없는 한계점이 지적되고 있다. 최근 이를 해결하기 위하여 태양에너지를 이용한 자가발전기술과 저전력 무선센서 네트워크 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 논문은 무선센서 네트워크를 이용한 산사태 감지방법 및 경보발령 관리기준치 설정에 관한 연구로서 제2장에서 국내외 산사태 감지방법에 대한 최근의 연구동향을 살펴보았으며, 제3장에서는 1차년도에 개발한 산사태 감지 기본개념을 소개하였고 이를 바탕으로 실제 현장에 활용할 수 있는 산사태 감지용 무선센서 네트워크를 미국 Microstrain사의 G-Link 무선센서를 사용하여 구축한 사례를 제시하였다. 그리고 제4장에서는 산사태 감지용 무선센서 네트워크가 구축된 테스트베드를 대상으로 지반공학 수치해석 프로그램인 Geostudio ™ 를 사용하여 경사면이 붕괴되기 시작할 때의 관리기준치(변위 및 각도)를 제시하였다. 마지막으로 제5장에서는 무선센서 네트워크에 의한 산사태 모니터링 시스템의 결과 및 문제점에 대하여 살펴본 후 결론을 제시하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2008.08.08. 채택확정: 2008.08.15.
김형우, 김구수, 장성봉: KT 인프라연구소
(hyungwoo@kt.com; goosoo@kt.com; sbchang@kt.com)

II. 산사태 감지방법 연구동향

2.1 국내 산사태 예측 및 예보기술

건설교통부와 한국건설기술연구원이 공동으로 개발한 절토사면 유지관리 시스템 (Cut Slope Management System, CSMS)은 일반 국도변의 절토사면을 감시하기 위한 시스템으로서 절토사면 지표부의 변위를 측정하기 위하여 신축계(slope movement sensor)를 사용하였으며 이 신축계는 절토사면의 안정영역과 불안정영역에 각각 설치되어 두 지점간의 거리 변동을 계측하여 붕괴의 진행상태를 파악하는 방법이다. 측정 수집된 자료는 실시간 무선 원격 측정시스템에 의해 도로관리부서에 자동으로 전송하도록 구성되어 있다. 한국도로공사에서는 도로사면의 재해방지를 위하여 무인시스템을 개발하였는데 원격지에서 사면을 카메라를 통해 감시하거나 센서를 통하여 계측함으로써 사면의 안정성을 장단기로 예측할 수 있다. 철도기술연구원에서도 붕괴우려 사면에 관한 24시간 계측시스템을 개발하여 현재 운영 중에 있으며 인터넷에 의해 측정데이터, 그래프, 분석자료가 사면관리자들에게 제공되도록 하였다[3]. 한편, 건설교통부 산하에 "낙석 및 산사태 방재연구단"이 구성되어 현재 제1세부과제인 통합사면관리기술 개발, 제2세부과제인 광역산사태 저감기술개발, 그리고 제3세부과제인 사면안정성 증대기술개발 연구가 활발히 진행 중이다(http://www.rlprc.re.kr/).

2.2 국외 산사태 예측 및 예보기술

미국은 1997년 집중호우에 의해 시에라 네바다 북 캘리포니아의 50번 고속도로가 경사면 붕괴로 인해 파괴되는 피해가 발생하였는데 이 사고 이후 미국지질조사국(USGS)을 중심으로 전 국토의 붕괴우려사면을 대상으로 실시간 사면 모니터링 시스템을 설치하였다. 이 시스템은 일정 시간 마다 지반의 움직임과 지하수 압력을 측정하고 사면의 거동은 익스텐소미터(extensometer)에 의해 계측된다. 또한 지반의 움직임에 의한 진동은 진동감지센서인 지오폰(geophone)에 의해, 그리고 지하수위는 간극수압계에 의해 계측되며 강우는 강우량계에 의해 측정되도록 구성되어 있다. 지반의 거동이 없는 안정 상태인 경우에는 10분마다, 그리고 사면붕괴와 같은 강한 지반진동이 감지되면 즉시 미국지질조사국의 컴퓨터로 전송된다[4-5]. 한편, 토석류가 발생할 때에는 엄청난 소리와 진동이 수반되므로 진동을 감지할 수 있는 20-200Hz 범위의 진동감지센서를 사용하여 토석류를 모니터링 하는 방법이 개발되었다[6].

일본은 전 국토의 약 80%가 산악으로 이루어져 있으며 국토개발의 결과로 암반사면붕괴가 빈번하게 발생하고 있다. 이와 같은 암반사면의 붕괴예측을 위하여 음향방출(Acoustic Emission)이라는 비파괴방법이 사용되고 있는데 이것은 암반이 파괴되기 시작할 때 발생하는 미세한 음향을 감지함으로써 붕괴를 예측하는 기술이다. 이를 위하여 암반 내부에 높은 대역의 주파수 및 낮은 대역의 주파수를 각각 감지할 수 있는 센서를 설치한 후 어느 임계값 이상이 되면 자동으로 경보를 알리는 시스템으로 구성되어 있다[7]. 한편, 광섬유케이블을 붕괴우려가 있는 사면에 설치한 후 광섬유케이블의 전송특성과 변형과의 상관관계를 이용하여 사면을 상시 모니터링 하는 방법도 실제 현장에 적용되고 있다.

홍콩은 지질 및 강우특성이 우리나라와 유사하며 기울기가 가파른 인공사면이 많은 특징이 있다. 사면붕괴는 이러한 인공사면에서 주로 발생하는데 가장 큰 원인은 강우로서 5월에서 8월 간의 집중호우 동안 또는 직후에 많이 발생한다. 이에 따라 홍콩의 지반공학사무소에서는 자동우량계 시스템을 이용한 산사태 경보시스템을 개발하여 운영하고 있는데 이 경보시스템은 지난 20년간의 산사태와 강우기록을 바탕으로 이들의 상관관계를 분석하여 개발되었으며 5분 간격으로 강우량 데이터가 서버로 전송되며 이때 미리 설정된 임계값 이상이 되면 자동으로 경보가 발령되도록 구성되어 있다[8].

2.3 최근의 산사태 예측 및 예보기술

지리정보시스템(Geographical Information System, GIS)의 비약적인 발전에 따라 산사태로 인한 재해 분야에도 GIS의 도입이 이루어지고 있다. 이는 GIS의 공간데이터 획득기능을 이용한 것으로 원격탐사, GPS, 위성영상이나 항공촬영을 통한 측량과 결부하여 산사태 방재에 필요한 다양한 공간자료를 얻을 수 있다. 산사태 방재를 위해서는 GIS를 기반으로 한 산사태 취약 지도를 제작하여 지질, 경사도, 토질, 임상 등 다양한 산사태 발생요인을 분석할 수 있다. 또한 산사태 발생요인별 등급값을 이용하여 산사태 발생가능성 및 위험성을 예측하고, 산사태 발생시 피해를 최소화할 수 있는 방안을 마련할 수 있다[9]. 또한, 산사태 방재에 활용 가능한 지형공간정보 획득방법으로는 항공촬영, 지상촬영, 인공위성 센싱 및 [1]LiDAR 시스템 등이 있다. 이 가운데 LiDAR는 산사태를 매핑하거나 특징을 파악할 때 필수적인 기술이 되었으며 북미와 유럽에서 산사태 방재분야에 널리 사용되고 있다[10-11].

III. 산사태 감지용 무선센서 네트워크 구축

3.1 무선센서 노드 개발

산사태의 발생원인은 사면을 구성하고 있는 지반의 종류(토사사면, 암반사면), 토질조건, 강수량, 사면의 피복 식생상태, 경사면의 기울기 등에 따라 다르며 파괴양상도 다양하다. 우리나라에서 발생하는 대부분의 산사태 유형은 토석류로서 여름철 집중호우가 주요 원인으로 작용한다. 즉, 집중호우가 내리기 시작하면 사면 내에 유로가 형성되기 시작하며 이 유로를 따라 흙덩어리나 돌덩어리 등이 무너져 내리는 등 붕괴조짐현상이 나타나게 되는데, 만일 이러한 붕괴조짐 현상을 정확히 감지할 수 있다면 토석류에 대한 조기경보체계 구축이 가능할 것이며 이러한 개념을 바탕으로 경사와 가속도를 측정할 수 있는 무선기반의 센서노드를 개발하였다[12]. 센서노드에는 블루투스 근거리 무선통신 모듈이 탑재되어 있으며 주요 사양을 표 1에 제시하였다. 산사태의 조기감지를 위하여 ADXL 202 MEMS 센서를 사용하였는데 이 센서는 x축과 y축 방향의 가속도를 ±2g (여기서, g는 중력가속도)의

[1] LiDAR(Light Detection And Ranging)는 레이저를 이용하여 특정지점의 거리를 측정하는 것으로 항공기에 부착하여 지형의 3차원 좌표를 획득하는 기술이다.

범위까지 2mg의 정밀도로 측정할 수 있는 초소형(가로 5mm, 세로 5mm, 높이 2mm) 센서이다. 이 센서를 사용하여 지반의 움직임, 즉 경사와 가속도를 측정할 수 있도록 프로그래밍 하였으며, 측정 데이터는 아날로그 디지털 변환기에 의해 디지털 값으로 변환된 후 전송되도록 하였다. 이 센서노드의 전원은 9V 배터리이며 외관사진을 그림 1에 제시하였다.

표 1. 블루투스 근거리 통신모듈 주요사항

항목	사양
최대 통신거리(line-of-sight)	30m
주파수 범위	2.4 GHz ISM Band
전류 소비 (데이터 전송 시)	최대 43mA
통신속도	1,200~115,200 bps

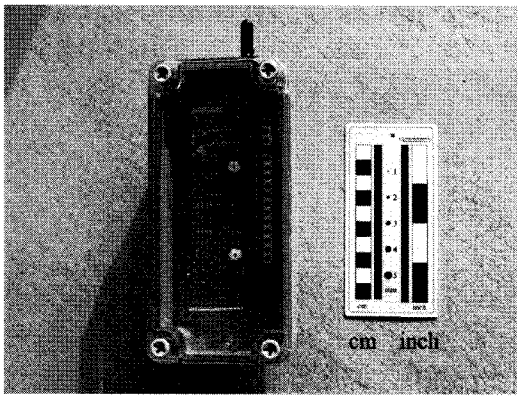

그림 1. 산사태 감지용 무선센서 노드 프로토타입

개발된 사면감지 무선센서 노드 프로토타입의 현장적용성을 파악하기 위하여 인공사면을 대상으로 실내실험을 수행하였으며 실험결과 센서노드의 가속도 및 기울기 변화에 의해 지반의 움직임을 감지할 수 있는 것으로 파악되었다. 즉, 가속도의 크기를 살펴봄으로써 지반의 움직임 세기를, 그리고 기울기 데이터로부터 지반의 경사변화를 추정할 수 있을 것으로 판단되었다. 이 무선센서 노드는 우리 나라에서 자주 발생하는 토석류의 조기감지에 적합할 것으로 생각되는데 그 이유는 토석류의 특성 상 흙이 집중호우에 의한 빗물과 함께 씻겨 내려가면서 사면에 설치한 센서노드를 건드리거나 쓰러뜨릴 것으로 예상되기 때문이다. 따라서, 센서노드의 가속도 및 기울기에 대한 임계값을 사면특성에 알맞게 설정해 놓으면 토석류의 조기경보(early warning)가 가능할 것으로 판단된다[12].

3.2 무선센서 네트워크 구축

앞 절에서 수행한 실내실험 결과를 근거로 하여 실제 현장에 적용할 수 있는 무선센서 노드를 구축하였다. 실험실이 아닌 실제 현장에서 토석류 발생을 정확히 감지하기 위해서는 다음과 같은 요구사항을 만족하여야 한다. 즉, 토석류를 감지할 수 있는 민감도가 우수한 가속도 감지센서가 구비되어 있어야 하며, 센서노드의 가격이 저렴해야 하고, 경사면의 변동을 장기간 지속적으로 감시할 수 있으려면 소비전력이 작아야 한다. 또한, 산사태가 우려되는 경사면에 설치가 용이하도록 소형이며 무게가 가벼워야 하며, 간소화된 무선통신 시스템을 지향하고 있어야 하며, 열악한 옥외 환경에 장시간 노출되어도 정상작동이 가능하도록 방수가 완벽해야 하며 낙뢰 시에도 피해를 받지 않는 구조이어야 하며 견고해야 한다. 이러한 요구사항을 분석, 검토한 후 미국 Microstrain사(http://www.microstrain.com/)의 G-Link 무선센서 상용 제품을 사용하여 산사태 감지용 무선센서 네트워크를 구축하기로 결정하였다. G-Link에 내장된 MEMS 타입의 초고속 3축 가속도 센서(ADXL202)는 토목계측 분야에서 널리 이용되고 있으며 그 정확성 및 신뢰성이 이미 여러 연구결과에서 입증된 바 있다. 이 G-Link는 무선센서 네트워크에 적용할 수 있도록 설계되어 있고 미국전기전자학회의 공개 통신규격인 IEEE 802.15.4를 채택함으로써 2.4GHz 통신이 가능하다. 또한, 게이트웨이와 최대 16개 동시접속이 가능하며 2메가바이트의 자체 메모리를 이용함으로써 데이터를 백만 개까지 저장할 수 있는 특징이 있다. 그리고 개활지(line-of-sight)환경에서 최대 70m까지 통신할 수 있으며 저전력모드의 구성이 가능한 특징이 있다(데이터 통신 시 25 mA, 슬립모드 시 0.5 mA). 한편, 센서 노드의 계측 데이터를 수집, 처리하고 가공된 데이터를 최종 서버로 전송하는 게이트웨이를 구성하기 위해 Microstrain사의 RS-232 베이스스테이션을 사용하였다. 즉, G-Link의 데이터를 수신하는 Microstrain사의 RS-232 베이스스테이션, 베이스스테이션과의 RS-232통신을 통해 데이터를 축적, 가공처리하여 최종 서버로 전송하기 위한 Host PC 그리고 CDMA통신을 위한 무선데이타 통신모뎀으로 게이트웨이를 구성하였다. 그림 2에 미국 Microstrain사의 G-Link 무선센서 및 베이스스테이션을 제시하였다.

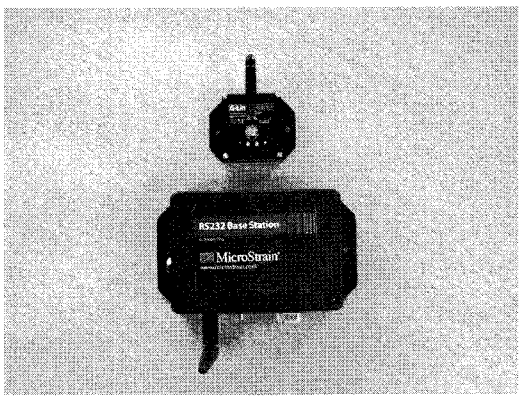

그림 2. 무선센서 노드 및 베이스스테이션

일반적으로 계측을 수행할 때에는 계측목적에 맞추어 샘플링 주파수 또는 샘플링 방법을 설정해야 하며 이를 위해 G-Link는 세 가지 동작모드(stream mode; low duty cycle mode; trigger mode)에 따른 다양한 샘플링 방법(datalogging; streaming; low data duty; high speed streaming)을 지원하고 있다. 예를 들어, low duty cycle 모드는 센서노드가 슬립 기능을 최대한 사용하고 배터리의 수명을 최대한 연장할 수 있는 모드이며 트리거 모드는 특정 값을 초과하면 자료를 수집하는 방식으로서 센서노드에서는 현장에서 계측된 데이터가 임계치를 초과하면 베이스스테이션과의 통신을 요구하고 그 결과를

송신한다. 이 모드는 특정 이벤트를 계측할 때 유용한 방법으로 판단된다. 이 연구에서는 산사태의 움직임을 일정한 주기로 연속적으로 모니터링할 수 있으며 배터리의 수명을 최대한 연장할 수 있는 low duty cycle 모드를 적용하였으며 샘플링 주기는 10분으로 설정하였다.

한편, G-Link 무선센서에 의해 측정된 가속도로부터 경사각은 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다[13].

$$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{V_{out} - V_{0g}}{sensitivity\left(V/g\right)}\right]\left(\frac{1}{1g}\right) \qquad (1)$$

여기서, V_{out} : 출력전압,

V_{0g} : 0 g 일 때의 전압으로서 1.5 볼트

3.3 테스트베드 구축

산사태 감지용 센서를 설치한 경사면은 자연사면과 보강토 옹벽으로 구성되어 있으며 경사면 평균 기울기는 약 1:1.5 (약 34도)이다. 지질조사 결과 경사면 표층은 성토 매립층으로 이루어져 있으며 그 아래 붕적층, 풍화토, 풍화암 및 연암 순으로 구성되어 있다. 그림 3에 적용 경사면에 대한 단면도를 제시하였다. 무선센서 노드를 경사면에 설치하기 위하여 센서 설치봉(길이 1500mm, 직경 21.7mm의 강철봉)을 제작하였으며 한쪽 끝은 땅속에 쉽게 박힐 수 있도록 뾰쪽하게 가공하였고 다른 한쪽 끝은 무선센서 노드를 설치할 수 있도록 소형 철판을 용접하여 부착하였다. 그리고 강철봉 표면은 녹이 슬지 않도록 하기 위하여 도금처리 하였다.

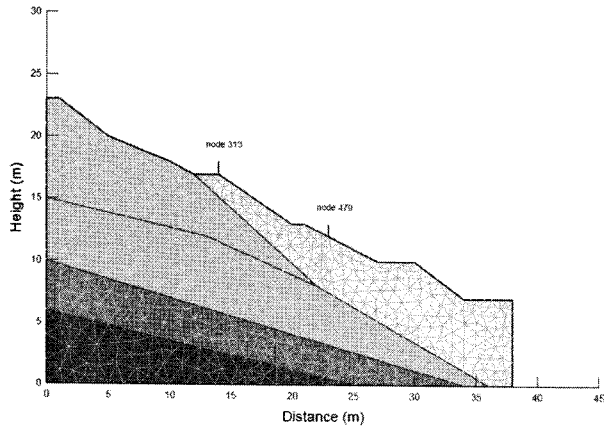

그림 3. 테스트베드 지질주상도

약 1,000m^2 (20m x 50m) 면적의 테스트베드에 총 5개의 무선센서 노드를 설치하였는데 2개는 경사면 상부(node 313지점 부근)에, 그리고 3개는 경사면 하부(node 479지점 부근)에 설치하였으며 베이스스테이션은 이들 센서노드와 통신이 원활이 이루어질 수 있는 장소를 물색하여 설치하였다. 무선센서 노드는 방수가 되는 박스 내부에 수용하여 빗물이 침투하지 못하도록 하였고 베이스스테이션, Host PC 그리고 CDMA 무선데이터 통신모뎀으로 구성된 게이트웨이는 스테인리스 함체 내부에 수용함으로써 옥외 환경조건으로부터 보호가 되도록 하였다.

IV. 관리기준치 설정

대부분의 모니터링 시스템은 관리기준치가 설정되어 있어 계측 데이터가 이 관리기준치를 초과하는 경우 경보가 울리도록 설계되어 있다. 따라서 이러한 관리기준치는 모니터링 시스템의 신뢰도와 직접적인 연관이 있으며 특히, 재난관리를 위한 모니터링 시스템에 있어서는 관리기준치를 어떻게 설정하느냐에 따라 인명과 재산피해의 규모가 좌우된다. 산사태 모니터링 또는 조기경보 시스템의 경우도 이러한 관리기준치를 정확히 설정하여야 하며 따라서 국내외에서 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 산사태는 집중호우 또는 지진 등과 같은 외부적 요인과 직접적인 관련이 있으며, 강우강도, 토양함수비, 지하수위, 선행강우일수와 같은 수문기상학적 요인과 산사태와는 강한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다[14]. 조기 경보를 위한 관리기준치는 모든 경사면에 대해 똑같이 일률적으로 정할 수는 없으므로 case by case로 설정해야 하며 이때 수치해석 시뮬레이션 프로그램을 사용하면 관리기준치에 대한 근사적인 가이드라인을 구할 수 있다.

앞 절에서 개발된 모니터링 시스템은 주로 토석류를 조기에 감지하기 위한 것으로서 집중호우에 의해 경사면 지반이 거동하기 시작할 때 경보를 발령하는데 그 목적이 있다. 따라서 지반이 거동하기 시작하기 전에 빗물과 함께 지표면의 크고 작은 돌이 굴러 내려오면서 무선센서 노드에 부딪힐 때의 충격을 감지함으로써 산사태의 위험을 예보할 수 있으며 지반이 거동하기 시작할 때의 지표면 변위와 경사를 계측한 후 측정값이 미리 설정해 놓은 임계값을 초과하는 경우 위험신호를 발령함으로써 산사태의 위험을 알릴 수 있다. 이 때 임계값 설정은 경사면 모니터링에 있어서 반드시 필요하며 이 논문에서는 [2]강우강도에 따른 사면안전율 변화를 고려함으로써 임계값을 설정하였다. 해석 프로그램은 캐나다 GEO-SLOPE사의 GeoStudio™ 를 사용하였으며[15-16], 해석 물성치는 표 2에 제시되어 있다.

표 2. 해석 물성치

토질	단위중량 (t/m^3)	내부마찰각 (도)	점착력 (t/m^2)	포화투수계수 (m/sec)	탄성계수 (t/m^2)	포와송비
매립층	1.8	30	0.5	5.0E-07	1,000	0.35
붕적층	1.8	30	0.5	1.0E-07	1,000	0.35
풍화토	1.9	33	3.0	1.0E-07	5,000	0.35
풍화암	2.1	33	5.0	3.0E-08	20,000	0.30
연암	2.3	35	7.0	7.0E-10	50,000	0.25

해석은 그림 3에서 제시한 단면을 대상으로 건조한 상태의 지반, 포화 상태의 지반, 그리고 포화 상태의 지반에 비가 내릴 때의 경우로 각각 나누어 수행하였다. 강우조건은 강우강도를 변화시켜 가면서 홍수경보 발령기준인 10분당 5mm까지 단계적으로 증가시켰으며 각 단계별로 침투해석 및 사면안정해석을 수행함으로써 안전율의 변화를 살펴보았다. 그

[2] 강우강도(rainfall intensity): 시간당 내리는 강우량으로서

림 4는 강우강도가 10mm이고 지속시간이 24시간인 경우의 침투, 사면안정해석, 응력-변형율 해석결과 예를 나타낸 것이다.

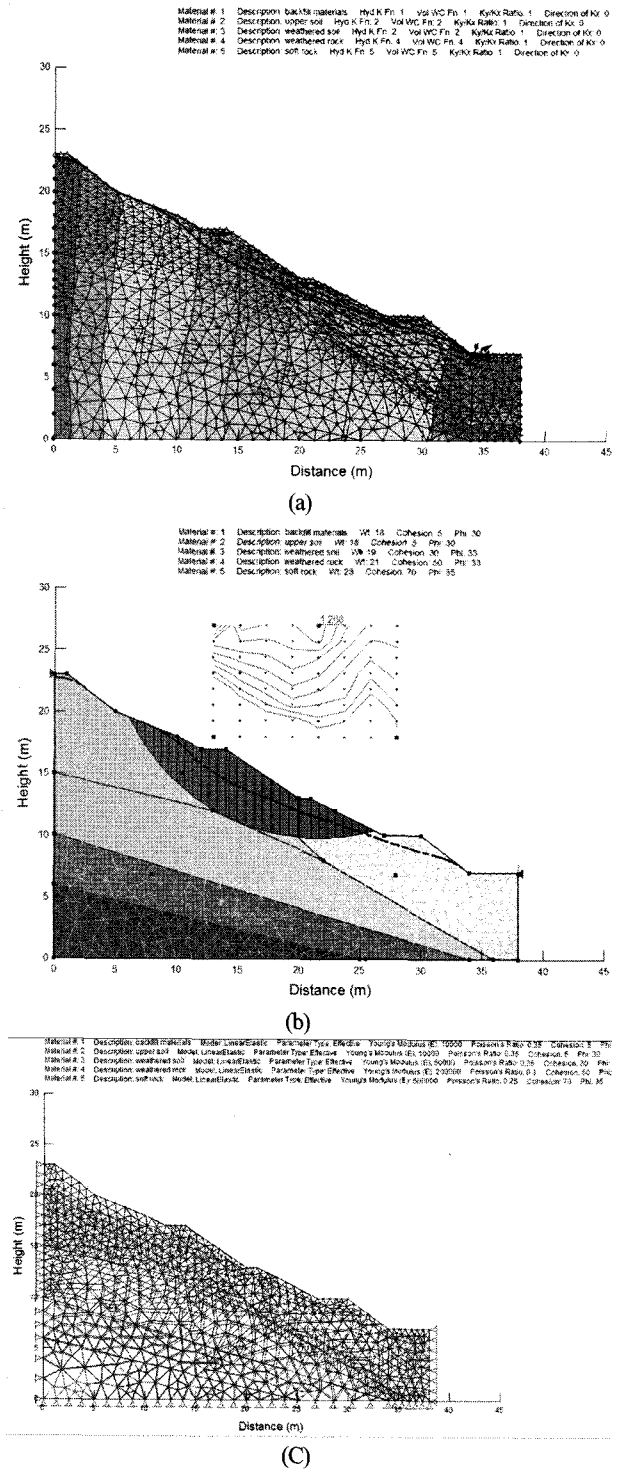

그림 4. 수치해석 결과: (a) 침투해석; (b) 사면안정해석; (c) 응력-변형율 해석.

사면안정해석 결과 경사면이 건조한 상태인 경우 안전율이 1.754로서 안정하였고, 강우가 시작되어 경사면 내부의 지하수위가 서서히 상승하는 단계에서는 안전율에 특별한 변화가 없었으나 지하수위가 경사면 지표면과 일치하여 완전포화 상태에서는 안전율이 1.267로 다소 불안정해진 것으로 나타났다. 또한 선행강우로 인하여 경사면이 포화된 상태에서 비가 지속적으로 내리는 경우 안전율이 1.25 아래로 떨어지면서 지표면의 거동이 발생하기 시작하였으며 이 때 경사면 상단 센서노드의 x방향 변위는 20mm, 경사각은 3도인 것으로 나타났으며 경사면 하단 센서노드의 x방향 변위는 20mm, 경사각은 4도인 것으로 나타났다. 따라서 무선센서 노드를 설치한 테스트베드의 경우 선행강우에 의해 지반이 완전히 포화되었을 때 지반변위가 x방향으로 20mm, 그리고 경사각이 3도를 초과하는 경우 위험경보를 발령하는 것이 바람직할 것으로 판단된다[17].

V. 결론

지금까지 무선센서 네트워크를 이용한 산사태 감지방법 및 경보발령 관리기준치에 대하여 살펴보았으며 실제 테스트베드를 대상으로 무선센서 네트워크를 운용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 테스트베드에 구축한 무선센서 네트워크에 의해 경사면의 가속도 및 경사각 데이터가 10분 간격으로 원격 서버로 안정적으로 전송됨을 파악하였으며 우리나라에서 자주 발생하는 토석류를 조기에 감지할 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다.

(2) G-Link 무선센서 노드에 내장되어 있는 충전용 리튬 배터리의 용량은 200mAh로서 low duty cycle 모드(슬립모드 시 0.5mA 소비)로 설정하였을 때 배터리 수명이 약 15일 내외인 것으로 파악되었다. 따라서, 장기적인 산사태 모니터링을 위해서는 내장 배터리 외에 외장 배터리를 무선센서 노드에 추가로 부착할 필요가 있는 것으로 파악되었다.

(3) 산사태 감지센서로부터 측정된 데이터를 가지고 경사면이 안전한 지 불안전한 지를 판단할 수 있는 관리기준치 설정에 대한 연구를 수치해석 프로그램을 사용하여 수행하였다. 테스트베드를 대상으로 수치해석 시뮬레이션을 수행한 결과 사면의 안정성은 강우강도, 선행 강우조건, 지하수위 위치, 토양함수비 등에 의해 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며 선행강우에 의해 지반이 완전히 포화되었을 때 지반변위가 x방향으로 20mm, 그리고 경사각이 3도를 초과하는 경우 위험경보를 발령하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다.

(4) 현재 국외에서는 무선센서 네트워크에 의한 산사태 모니터링 기술개발이 대학 및 연구소를 중심으로 활발히 이루어지고 있으며 머지 않은 시기에 상용화 수준의 산사태 감지용 무선센서가 등장할 것으로 예상된다. 우리나라의 경우 발전된 정보통신기술을 산사태 조기경보 시스템 개발에 적용시킨다면 매년 되풀이되고 있는 산사태 피해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] J. Dunnicliff and G. E. Green, Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, A Wiley-Interscience Publication, pp.443-451, 1988.

[2] A. Terzis, A. Anandarajah, K. Moore and I. J. Wang, "Slip Sur-

단위는 보통 mm/hr 또는 mm/10min 등을 사용한다.

face Localization in Wireless Sensor Networks for Landslide Prediction," *IPSN'06*, April 19-21, Nashville, Tennessee, USA, 2006.

[3] 김형우, "사면붕괴 예측을 위한 관리기준치 설정 시 고려사항," 2007년 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 2007.

[4] USGS, "Real-Time Monitoring of Active Landslides," U.S. Geological Survey Fact Sheet 091-99.

[5] M. E. Reid, R. L. Baum, R. G LaHusen, Capturing landslide dynamics and hydraulic triggers using near-real-time monitoring, *Landslides and Engineered Slopes*, Taylor & Francis Group, London, pp.179-191, 2008.

[6] USGS, "Acoustic Flow Monitoring System – User Manual," Open File Report 02-429, 2005.

[7] T. Shiotani, "Evaluation of long-term stability for rock slope by means of acoustic emission technique," *NDT&E International*, Vol. 39, pp.217-228, 2006.

[8] A. K. L. Kwong, M. Wang, C. F. Lee and K. T. Law, "A review of landslide problems and mitigation measures in Chongqing and Hong Kong: similarities and differences," *ENGINEERING GEOLOGY*, Vol. 26, pp.27-39, 2004.

[9] 박종택, "특집 – 재해에 강한 국토만들기 5, GIS를 활용한 방재국토 구축," 월간국토, 통권273호, pp.45-55, 2004.

[10] W. H. Schulz, "Landslide Susceptibility Estimated From Mapping Using Light Detection and Ranging (LiDAR) Imagery and Historical Landslide Records, Seattle, Washington," U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1405, 2005.

[11] N. R. Morgenstern and C. D. Martin, "Landslide: Seeing the ground," *Landslides and Engineered Slopes*, Taylor & Francis Group, London, pp.3-23. 2008.

[12] 김형우, "무선센서 네트워크를 이용한 산사태 모니터링 기초기술 연구," 2007년 한국정보통신설비학회 하계 학술대회 논문집, 2007.

[13] K. M. Furlani, P. K. Miller, and M. A. Mooney, "Evaluation of Wireless Sensor Node for Measuring Slope Inclination in Geotechnical Applications," *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Ferrara, Italy, 2005.

[14] H. Rahardjo, R. B. Rezaur, E. C. Leong, E. E. Alonso, A. Lloret and A. Gens, "Monitoring and modeling of slope response to climate changes," *Landslides and Engineered Slopes*, Taylor & Francis Group, London, pp.67-84. 2008.

[15] J. Krahn, *Stability Modeling with SLOPE/W©*, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE/W International Ltd., 2004.

[16] J. Krahn, *Stability Modeling with SEEP/W©*, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE/W International Ltd., 2004.

[17] 김형우, "무선센서 네트워크에 의한 경사면 계측 실용화 연구," 2008년 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.93-98, 2008.

김 형 우

1986년 연세대학교 토목공학과(공학사). 1988년 연세대학교 토목공학과(공학석사). 2003년 KAIST 건설및환경공학과(공학박사). 1990년~현재 KT인프라연구소 수석연구원 관심분야는 재난관리.

김 구 수

1983년 경희대학교 전자공학과(공학사). 1985년 경희대학교 전자공학과(공학석사). 1986년~현재 KT인프라연구소 FTTH & u-City 부장. 관심분야는 u-City 요소기술 표준화 분야.

장 성 봉

1981년 경북대학교 통계학과(공학사). 1983년 서울대학교 수리통계학과(공학석사). 1985년~현재 KT인프라연구소 FTTH & u-City 부장. 관심분야는 재해관리시스템, u-City 방재.