

무선 센서 네트워크 시스템을 이용한 실시간 저수지 댐의 상태평가 시스템

Real-time Reservoir Dam Status Evaluation System Using Wireless Sensor Network System

유 찬 호[†] · 김 승 욱¹⁾ · 황 정 순²⁾ · 나 기 혁³⁾ · 유 광 호⁴⁾

Chanho Yoo · Seungwook Kim · Jungsoon Hwang · Gihyuk Na · Kwangho You

Received: October 8th, 2018; Revised: October 23rd, 2018; Accepted: November 19th, 2018

ABSTRACT : The wireless sensor network system has the advantage of confirming the behavior of the entire facility by improving the disadvantages of conventional monitoring system. As a result, it is widely proposed as safety diagnosis and measurement of structures, water management systems, and management systems for dam structures. However, there is a lack of research that can evaluate the condition of facilities such as safety at the same time as monitoring. In this study, it is proposed a wireless sensor network system which can evaluate the behavior characteristics of facilities and evaluate the safety status for improving the technical disadvantages on conventional monitoring system. The geotechnical risk factors for the reservoir dam facility were evaluated and the limit values for the risk factors causing the failure of the facility were set. In other words, the system was set up so that the risk factors can be measured and the limit status can be evaluated immediately for each factor. In this study, numerical analysis is carried out for seepage and slope stability analysis using the typical cross section for reservoir dams. The stress-porewater coupling finite difference numerical analysis is performed for establishing the limit displacement for reservoir dam structures. It is developed a system that can estimate the time to reach the critical value by regression analysis using the measured datas.

Keywords : Dam, Internet of things, Monitoring system, Reservoir, Wireless sensor network

요 지 : 무선 센서 네트워크 시스템은 종래의 계측기술이 가지는 한계인 집중계측방법이 가지는 단점을 보완하여 시설물 전체의 거동을 확인할 수 있다는 장점으로 구조물의 안전진단 및 계측, 물 관리 시스템 그리고 댐 구조물에 대한 관리시스템에 까지 폭 넓게 제안되고 있다. 그러나 계측과 동시에 시설물의 상태평가가 가능한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 기존의 기술적 단점을 개선하기 위하여 시설물의 거동을 파악함과 동시에 안전 등에 대한 상태평가가 가능하도록 무선 센서 네트워크 시스템을 제안하였다. 저수지 댐 시설에 대한 지반공학적 위험인자를 사전에 평가하고, 시설물의 파괴를 유발하는 인자에 대한 한계값을 설정함으로써 위험인자를 측정함과 동시에 인자별로 한계상태를 즉시 평가할 수 있는 시스템을 제안하였다. 본 연구에서는 저수지 댐에 대한 표준단면을 이용하여 침투 및 비탈면 활동에 대한 수치해석을 수행하였고, 응력-간극수압 연동 유한차분 수치해석을 수행하여 저수지 댐 구조물에 대한 한계변위를 설정함으로써 즉시 상태평가가 가능하고 측정값을 이용해 회귀분석 함으로써 한계값에 도달하는 시간을 예측할 수 있음으로써 재난, 재해를 사전에 인지할 수 있는 시스템을 제안하였다.

주요어 : 계측 시스템, 댐, 무선 센서 네트워크, 사물인터넷, 저수지

1. 서 론

현재 저수지 댐 시설물의 관리 및 상태평가는 가장 위험하다고 생각되는 구간에 지중경사계, 간극수압계 등과 같은 계측기를 집중적으로 매설하여 시설물을 상시 계측하고, 설계 시에 예측된 값을 기준값으로 설정하여 측정된 값이 기준값을 초과하는지 여부만 알려주는 획일적인 방법으로 진행되고 있다. 이러한 현재 시스템은 계측이 이루어지지 않는 구간에 대해서는 상태평가가 어렵고, 측정결과가 실시간

으로 전달된다고 하더라도 전공지식이 부족한 시설물 관리자에게는 상시 측정결과로 시설물의 위험정도에 대한 즉시 판단이 어려움 등으로 인해 계측결과가 효율적으로 이용되지 못하고 있는 실정이다. 최근 이러한 부분적인 계측에 대한 문제를 개선하고자 무선 센서 네트워크 시스템을 이용한 기술이 저수지 댐과 같은 기반시설물에 폭넓게 제안되고 있다.

무선 센서 네트워크 시스템은 정보통신 분야에서 제안된 이래 최근 토목분야에서도 사물인터넷 기술과 융합하여 교량과 같은 구조물의 안전진단 및 계측, 물관리 시스템 그리

† Ph.D, Asin C&T Co., Ltd. (Corresponding Author : randy2680@nate.com)

1) Ph.D, Asin C&T Co., Ltd.

2) Ph.D, Doosan Engineering & Construction Co., Ltd.

3) CEO, Gaya Construct Co., Ltd.

4) Professor, Department of Civil Engineering, Suwon University

고 댐 구조물에 대한 관리시스템까지 폭넓게 확장 제안되고 있다. 댐 시설에 대한 무선 센서 네트워크 시스템은 Anita et al.(2015)이 계측과 관리시스템을 제안하고, Yoo et al. (2018)이 실시간으로 시설물의 상태평가가 가능한 관리 시스템을 제안하는 등 관련 기술의 활용방법에 대한 연구가 활발히 발전하고 있는 실정이다. 이와 같이 사물인터넷을 이용한 무선 센서 네트워크 기술이 발달하여 저수지 댐과 같은 시설물 전체를 계측관리 하는 방법은 많은 연구자가 제안하고 있지만, 아직까지 시설물의 계측과 동시에 구조물의 상태평가가 가능한 연구는 미진한 실정이다.

이에 본 연구에서는 시설물 전체의 거동을 동시에 확인할 수 있는 무선 센서 네트워크 시스템을 이용하여 시설물의 거동을 파악함과 동시에 안전 등에 대한 상태평가가 가능한 시스템을 제안하고자 한다. 본 연구에서는 시설물 전체를 계측함과 동시에 상태평가가 가능하도록 저수지 댐 시설에 대한 지반공학적인 위험인자를 사전에 평가하고, 시설물의 파괴를 유발하는 인자에 대한 한계값을 설정함으로써 위험인자를 측정함과 동시에 각각의 인자별로 한계상태를 즉시 평가할 수 있는 시스템을 설정하였다. 본 연구에서는 저수지 댐 시설에 대한 표준단면을 이용하여 침투 및 비탈면 활동에 대한 수치해석을 수행하였고, 응력-간극수압 연동 유한차분 수치해석을 수행하여 저수지 댐 구조물에 대한 한계변위를 설정하여 댐 시설에 대한 거동을 측정함과 동시에 즉시 상태평가가 가능하고 실시간으로 측정되는 계측값을 이용해 회귀분석 함으로써 한계값에 도달하는 시간을 예측하여 발생할 수 있는 재난, 재해를 사전에 인지할 수 있도록 시스템을 고안하였다.

2. 무선 센서 네트워크(WSN)를 이용한 실시간 상태평가 시스템

무선 센서 네트워크 시스템은 종래의 계측이 가지는 특

정지점 집중계측 방식을 시설물 전체에 센서를 설치하여 센서 네트워크를 구축하고 센서가 설치된 설치점이 상호 통신하여 전송되도록 개선한 통신 네트워크이다. 무선 센서 네트워크는 2008년 물관리 시스템에 적용된 이후로 Wang et al.(2009)이 수질 모니터링에 제안하였고, Peng(2010)이 도로의 재해 모니터링에 제안하여, Thinagaran et al.(2015)이 사물인터넷 기술과 접목한 물관리 시스템을 적용하는 등 관련 기술이 지속적으로 발전하고 있는 기술이다.

무선 센서 네트워크 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 시설물의 상태를 평가하는 센서, 측정된 값이 상호 통신하여 게이트웨이로 송신하는 통신장치 그리고 게이트웨이에서 클라우드 서버로 전송하는 시스템으로 구성되어 있다. 센서에는 각각 ID가 부여되고 센서별로 기준값이 설정되어 있어 각각의 센서가 측정과 동시에 기준값을 초과하는지 여부를 평가할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 측정된 데이터는 실시간으로 회귀분석하여 기준값에 도달하는 시간을 예측할 수 있도록 구성하여 집중호우 및 지진 등과 같은 이벤트가 발생하는 경우에도 재난, 재해를 유발하는 기준값에 도달하는 시간을 예측하여 재해를 사전에 예측하고 인명피해를 사전에 방지할 수 있도록 고안하였다.

3. 저수지 댐의 지반공학적인 위험인자 분석

3.1 대상구조물

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 시스템을 이용하여 저수지 댐의 실시간 거동특성 및 상태평가가 가능한 시스템을 개발하고자 하였으며, 이를 위해 사전에 시설물에 대한 위험인자를 도출하고 위험인자에 대한 지반공학적인 분석을 통해 시설피해를 유발시키는 위험인자의 기준값을 설정하고자 하였다. 대상 구조물은 국내의 저수지 댐에 가장 보편적으로 적용되고 있는 중심코어형 필댐을 선정하였다. 또한 재해예측 시스템은 댐 시설 하부에 민가 등이 인접하게 위

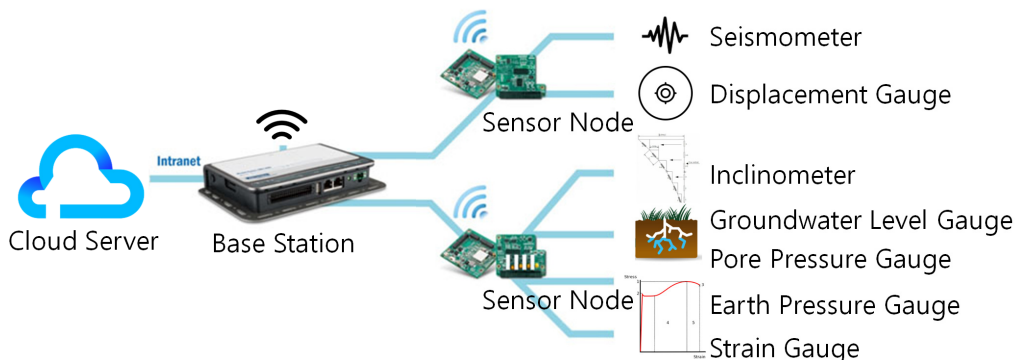


Fig. 1. Wireless sensor network system

치해 적극적으로 재해를 예방해야 하는 곳이 적정하다. 이러한 기준을 통해 인천광역시 강화도에 위치하고 있는 00 저수지를 대상구조물로 선정하였으며, 저수지의 전경 및 표준단면은 Fig. 2에 나타내었다.

3.2 위험인자 분석

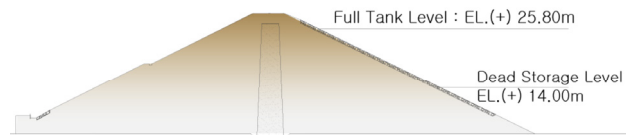
일반적으로 필댐의 지반공학적 위험인자는 크게 침투수에 의한 파이핑과 제체의 사면활동을 주요 위험인자로 선정하

여 안정성검토를 수행하고 있다. 이에 본 연구에서도 저수지댐의 주요 위험인자를 침투에 의한 파이핑과 제체의 활동을 위험인자로 선정하여 인자별 영향성을 검토하였다. 저수지댐의 경우 변위기준이 없기 때문에 일반적으로 변위 확인을 위한 수치해석은 수행하지 않지만 본 연구에서는 제체가 파괴되는 조건을 기준으로 변위 기준값을 설정하기 위하여 지중응력-간극수압 연동 수치해석을 추가로 수행하였다.

저수지가 만수위 조건인 경우에 대한 침투해석 결과, 사면

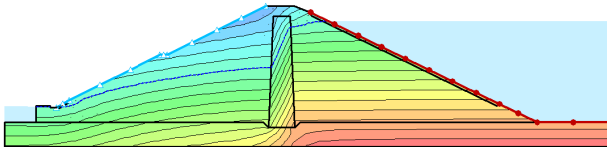


(a) Panorama on reservoir dam

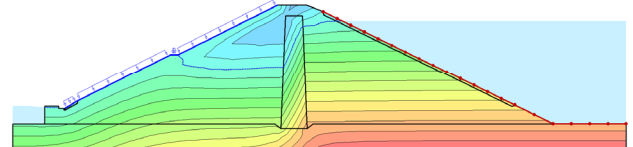


(b) Typical cross section of reservoir dam (fill dam)

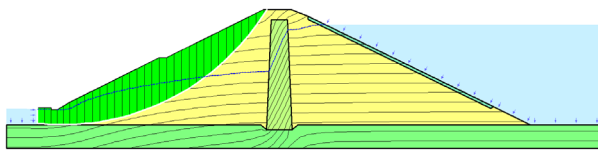
Fig. 2. Panorama and typical cross section of reservoir dam (fill dam)



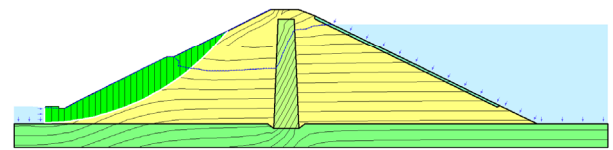
(a) Seepage analysis result with F.W.L



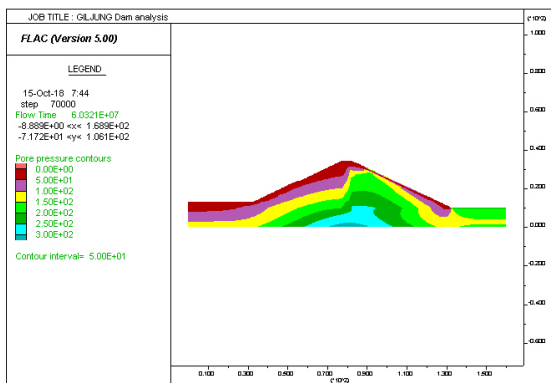
(b) Seepage analysis result with F.W.L and rainfall (24hr 20.8mm)



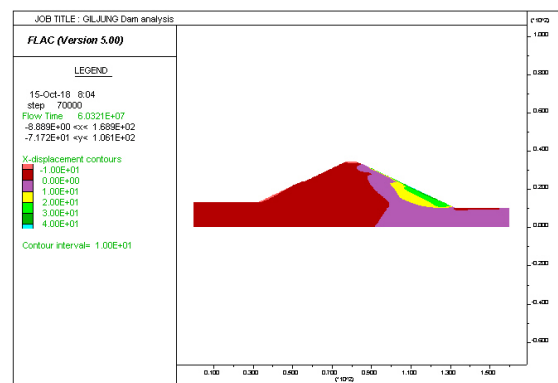
(c) Slope stability analysis result with F.W.L



(d) Slope stability analysis result with F.W.L and rainfall



(e) Pore pressure distribution by F.D.M



(f) Horizontal displacement distribution by F.D.M

Fig. 3 Numerical analysis results

안정 해석 및 수치해석에 대한 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 결과를 살펴보면, 만수위 조건에서 파이핑이 발생하는 제체 선단부에서의 간극수압은 5~20kPa로 평가되었으며, 동일조건에서 제체의 비탈면 활동에 대한 안전율은 약 1.14로 평가되었다. 국내의 저수지 댐 붕괴는 대부분이 우기 시 강우가 작용하는 조건에서 비탈면 활동으로 발생하는 경우가 많았던 사례를 토대로 하여 본 연구에서는 만수위 조건에 추가로 강우가 작용하는 조건에 대하여 침투해석과 사면안정 해석을 수행하였다. 만수위에 설계강우강도 20mm가 24시간 작용하는 경우 제체 내부로 형성되는 침윤선은 선단부에서 상승하여 소단부분까지 상승하는 것으로 분석되었고, 이러한 경우 비탈면 활동에 대한 안전율은 약 1.02로 평가되었다.

일반적으로 저수지 댐의 계측항목에 지중경사계와 침하계 등 변위에 대한 계측을 권장하고 있지만 저수지 댐 시설물에 대한 허용변위 등 관리기준이 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 연구대상인 필댐 구조물에 대해 유한차분 수치해석을 수행하여 파괴되는 시점의 변위를 기준값으로 선정하였다.

만수위 조건에서 추가로 강우가 작용하는 경우에는 제체 내부의 침윤선이 상승하고 비탈면의 활동에 대한 안전율이 감소하기 때문에 본 연구에서는 불포화 지반의 거동평가에 영향을 미칠 수 있는 함수특성곡선을 이용하여 함수특성곡선의 변화에 따른 간극수압, 침윤선 그리고 비탈면의 활동에 대한 안전율이 어떻게 변화하는지 분석하였고 그 결과는

Fig. 4에 나타내었다.

필댐에서 성토재의 체적함수비를 0.25~0.55로 변화시켜 침투해석 및 비탈면 안정해석을 수행한 결과, 동일한 조건에 체적함수비가 증가할수록 침윤선의 수위는 저하되고 비탈면의 활동에 대한 안전율은 증가하는 것으로 분석되었다. 침투해석을 평가한 제체의 선단부에서 작용하는 간극수압은 14.41~14.47kPa로 큰 변화가 없게 나타나지만 체적함수비에 따라 침윤선의 높이는 정상류 상태를 기준으로 했을 때 보다 4.6~7.2m까지 상승하는 것으로 나타나 체적함수비에 민감하게 작용하는 것으로 평가되었다.

이와 같이 필댐의 지반공학적 위험인자를 종합적으로 고려할 때, 저수지 댐 시설에 대한 위험요인은 제체의 파이핑, 비탈면의 활동이지만 파이핑과 비탈면의 활동을 유발하는 세부인자에 대한 명확한 설정이 필요하다.

3.3 위험인자 결정

위험인자 영향분석에서 분석한 바와 같이 성토재의 체적함수비는 침윤선의 상승과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며 침윤선의 위치는 비탈면의 활동 그리고 파이핑에 직접적인 영향을 주게 된다. 이러한 분석결과를 고려해 본 연구에서는 필댐의 지반공학적 위험인자인 파이핑과 제체의 사면 활동에 영향을 줄 수 있는 위험인자를 선정하였으며, 선정된 결과는 Table 1에 요약 정리하여 나타내었다. 또한 세부

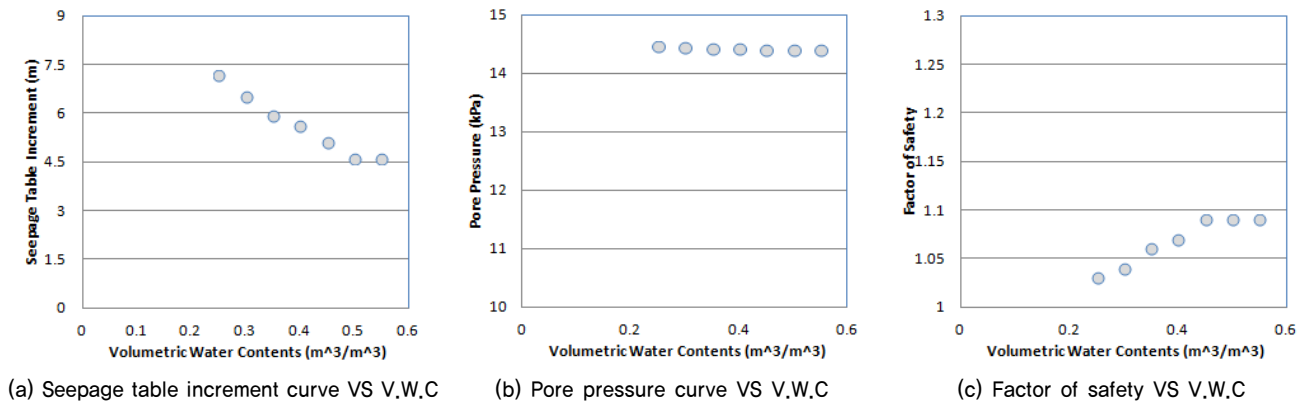


Fig. 4. Seepage table, pore pressure and factor of safety curves by numerical analysis

Table 1. Risk factor and measuring sensors on reservoir dam

Risk factor	Detailed risk factor	Measuring sensor
Piping failure	Water level of reservoir	Reservoir water gauge
	Groundwater level in dam	Groundwater gauge
	Volumetric water contents on fill material	Volumetric water contents gauge
	Rainfall	Rainfall measuring instrument (meteorological instrument)
Dam slope sliding	Earth pressure	Earth pressure meter
	Pore pressure	Pore pressure meter
	Volumetric water contents on fill material	Volumetric water contents gauge
	Earthquake	Seismometer or seismic accelerometer

인자를 측정할 수 있는 센서를 선정하여 함께 나타내었고, 본 연구에서 제안하는 무선 센서 네트워크 시스템의 필드 센서로 선정하였다.

4. 무선 센서 네트워크를 이용한 실시간 상태평가 시스템 제안

본 연구에서는 무선 센서 네트워크를 이용하여 실시간으로 구조물의 거동을 평가함과 동시에 시설물의 상태평가가 가능한 시스템을 제안하였다. 측정과 동시에 시설물의 상태평가를 위해서는 측정센서에 대한 기준값의 설정이 필요하며 이 측정값을 이용하여 실시간으로 측정되는 데이터가 기준값에 도달하는 시간은 회귀분석으로 예측할 수 있다. 이러한 알고리즘을 토대로 본 연구에서는 저수지 댐 시설물에 적용할 수 있는 실시간 상태평가 시스템을 제안하였고 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 실시간 상태평가 시스템은 크게 사전검토 및 DB 구축단계, 무선센서 네트워크를 이용한 현장 모니터링 단계, 재해예측을 위한 재해 모니터링 단계 그리고 실시간 상태평가 단계를 거쳐 상태평가 및 재난, 재해 발생 예측결과를 알려주는 신호단계로 구성된다. 사전검토 단계에서는 무선 센서 네트워크를 설치할 대상 구조물에 대하여 위험인자를 분석하고 한계상태에 대한 분석을 통해 위험인자 각각에 대한 한계값을 설정하는 것으로 구성되어

있다. 이는 무선 센서 네트워크를 이용한 실시간 모니터링의 센서 각각에 ID와 함께 부여되어 측정과 동시에 한계값의 도달여부를 평가하는 방식으로 실시간 상태평가가 가능하도록 고안하였다. 집중호우 또는 지진 등과 같은 재해가 발생하는 경우 즉시 센서값과 기준값을 분석하여 상태를 평가하고 측정된 데이터를 이용해 회귀분석을 수행함으로써 재난, 재해 발생여부를 예측할 수 있도록 고안하였다. 아울러 예측결과의 신뢰성 검증을 위해 동일한 위치에 설치되는 동일 센서의 측정결과를 서로 비교하여 오차범위를 넘어가는 센서는 즉각적으로 점검할 수 있고, 부분적으로 측정값이 기준값에 도달되거나 도달될 것으로 예측되는 구간에 대해서도 알림으로써 부분적인 시설물 피해에 대해서 실시간으로 예측이 가능하도록 고안하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 시스템을 이용하여 저수지 댐구조물의 거동을 파악함과 동시에 안전 등에 대한 상태평가가 가능하고, 지진 또는 집중호우와 같은 재난이 발생할 때 재해발생 여부를 사전에 예측할 수 있도록 실시간 상태평가 시스템을 개발하였으며, 연구를 통해 얻어진 주요 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 필댐의 위험인자에 대한 분석결과, 파이핑 및 비탈면

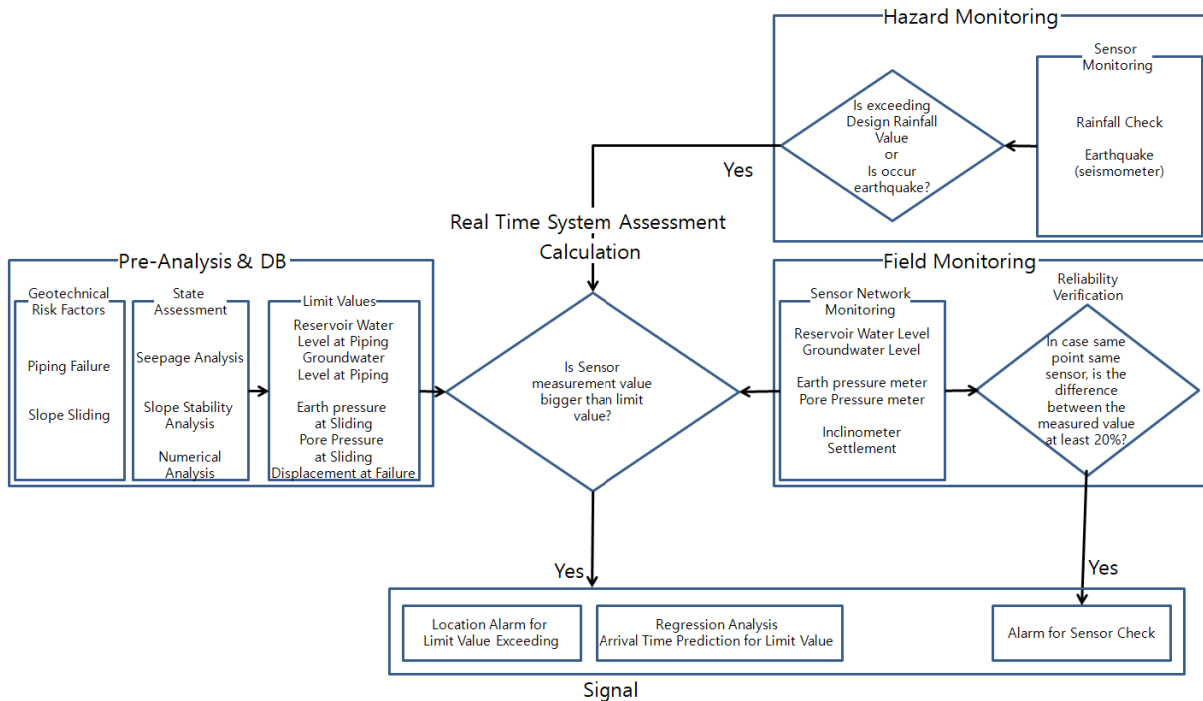


Fig. 5. System algorithm for real time system assessment and prediction hazard

활동을 유발시킬 수 있는 세부 위험인자들이 있으며, 특히 체적함수비에 제체내부의 침윤선 위치 그리고 비탈면 활동 안전율이 민감하게 작용하는 것으로 분석되었다.

- (2) 파이핑을 유발하는 세부인자는 저수지 수위, 제체 내부의 지하수위, 성토재의 체적함수비 그리고 강우량으로 판단되며 비탈면의 활동을 유발하는 세부인자는 토압, 간극수압, 성토재의 체적함수비 그리고 지진으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 제안한 실시간 상태평가 시스템은 크게 사전검토 및 DB 구축단계, 무선센서 네트워크를 이용한 현장 모니터링 단계, 재해예측을 위한 재해 모니터링 단계 그리고 실시간 상태평가 단계를 거쳐 상태평가 및 재난, 재해 발생 예측결과를 알려주는 신호단계로 구성된다.
- (4) 사전검토 단계에서는 위험인자에 취약한 구간과 한계값을 설정하고, 실시간 상태평가 단계에서는 무선 센서 네트워크의 센서에서 실시간으로 측정되는 결과값을 한계값과 비교하여 측정과 동시에 한계값의 도달여부를 평가하도록 구성하였다. 재해가 발생하는 경우 즉시 센서 측정값과 설정되어 있는 한계값을 분석하고 회귀 분석 기법으로 재난, 재해 발생여부를 예측할 수 있도록 고안하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 기술 사업화 지원으로 수행된 성과의 일부로 지원에 감사드립니다.

References

1. Anita, Rajesh, S., Sushabhan, C. and Bhupendra, S. (2015), Wireless disaster monitoring and management system for dams, International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence (ICCC-2015), Conference Organized by Interscience Institute of Management and Technology, Bhubaneswar, Odisha, India, pp. 381~386.
2. Peng, Hongwei. (2010), Wireless sensor networks based highway disaster hierarchy cooperation monitoring system, International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, Wuhan, China, pp. 10~12.
3. Thinagaran Perumal., Md Nasir Sulaiman and Leong. C. Y. (2015), Internet of things (IoT) enabled water monitoring system, IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Catrino, Malaysia, pp. 86~87.
4. Wang, Z., Wang, Q. and Hao, X. (2009), The design of the remote water quality monitoring system based on WSN, 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, pp. 24~26.
5. Yoo, C. H., Kim, I. H., Lee, S. J., Hwang, J. S. and Baek, S. C. (2018), Basic study on monitoring system of reservoir and levee using wireless sensor network, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 19, No. 1, pp. 25~30 (In Korean).