

안전한 토석류 관리를 위한 계측기 선정에 관한 연구

민대홍 · 윤형구[†]

대전대학교 건설안전방재공학과

(2017. 2. 20. 접수 / 2017. 4. 6. 수정 / 2017. 6. 21. 채택)

Study of Determination in Measurement System for Safely Managing Debris-Flow

Dae-Hong Min · Hyung-Koo Yoon[†]

Department of Construction Safety And Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

(Received February 20, 2017 / Revised April 6, 2017 / Accepted June 21, 2017)

Abstract : Recent studies have shown that there are various systems which can be used to monitor hazardous area in a debris flow location, but lack of methodological research on the exact location where each instrument should be installed has hindered the success of this systems. The objective of this study is to suggest the measurement system for monitoring debris-flow and propose the effective method to determine location of measurement system. Previously studied, from 1991 to 2015, were referred and the applied ratio of every instrument was investigated. The measurement information was divided into 8 categories including rainfall, debris-flow velocity, displacement, fluid pore pressure, ground vibration, image processing, impact force and peak flow depth. The result of this study revealed that the most applied instruments to be rain gauge and geophone for measuring average rainfall and ground vibration respectively. The Analytic Hierarchical Process (AHP) method was selected to determine installation location of instrument and the weighting factors were estimated through fine content, soil thickness, porosity, shear strength, elastic modulus, hydraulic conductivity and saturation. The soil thickness shows highest weights and the fine content relatively demonstrates lowest weights. The score of each position can be calculated through the weighting factors and the lowest score position can be judged as the weak point. The weak point denotes the easily affecting area and thus, the point is suitable for installing the measurement system. This study suggests a better method for safely managing the debris-flow through a precise location for installing measurement system.

Key Words : analytic hierarchical process, debris-flow, install location, monitoring system, weighting factor

1. 서론

일반적으로 어떤 문제를 해결하기 위해서는 빅 데이터 기반의 다양한 정보나 전문가 집단에 의한 의견을 참고한다¹⁻²⁾. 하지만 전문가들의 의견을 수립하여 평가하는 기법인 의사결정기법은 체계적인 의견 조사 평가서를 기반으로 수학적 분석을 통하여 객관적인 결과가 도출되어야 한다. 의사 결정기법은 통계적인 기법을 통해 문제를 빠르고 신속하게 해결할 수 있는 장점이 있으며, 전문가의 의견은 쌍별비교 (pairwise comparison) 를 통해 더욱 정확하고 합리적인 선택을 도모할 수 있는 특징이 있다. 적용 가능한 분야는 자연과학, 사회과학 그리고 공학 등 다양한 분야에 활용되고 있으며, 특히 자연재해 위험분석에도 사례연구를 통해 해결할 수

있도록 발전하고 있다³⁾. 전문가의 의견은 다기준 의사 결정 분석 (Multi Criteria Decision Analysis)의 방법이 활용되며, 그 중 계층분석법 (Analytic Hierarchical Process) 이 가장 많이 응용되고 있다. 계층분석법은 유사성이 없는 항목들 간의 우선순위를 결정하는 방법으로 투자 평가⁴⁻⁵⁾, 복잡한 작업의 실행계획⁶⁾ 그리고 물품목록 분석⁷⁾ 등에 활용되고 있으며, 최근에는 GIS를 활용한 사면의 위험 지역 구축에도 이용된 사례가 있다⁸⁻¹⁰⁾.

토석류는 강우로 인해 지반이 유체와 함께 중력방향으로 급속하게 붕괴되는 현상을 의미하여, 속도가 빠르고 붕괴되는 영역이 넓어 큰 피해를 야기한다¹¹⁾. 이와 같은 자연재해를 안전하게 관리하기 위해서 계측시스템이 활용되고 있으며, 토석류 계측을 토석류 발생 전과 후로 구분하여 각각에 적합한 계측시스템을 제시

[†] Corresponding Author : Yoon, Hyung-Koo, Tel : +82-42-280-2578, E-mail : hyungkoo@dju.ac.kr

Department of Construction Safety And Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, 62 Daehak-ro, Dong-gu, Daejeon 34520, Korea

한 연구 결과가 존재 한다¹²⁾. 토석류가 발생하기 전에는 강우량을 측정하여 경험적으로 토석류 발생을 예측할 수 있도록 제안하였으며, 발생 이후에는 초음파 센서, 와이어 센서, 간극수압계 그리고 진동계 등을 활용하여 지속적인 계측으로 피해를 경감시킬 수 있음을 제시하고 있다. 또한 다양한 연구자들에 의한 추가적인 연구도 진행되어¹³⁻¹⁸⁾ 각 센서의 특징, 이를 활용하여 신뢰성 높게 계측할 수 있는 방법 그리고 이를 통해 대피경보를 발령 할 수 있는 방법 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 하지만 선행연구는 대체적으로 개별적인 계측기의 특성만을 제시할 뿐 실제적으로 토석류 위험지역에 계측기를 설치하고자 할 때 어떤 계측기를 선택해야 하는지에 대한 방법론에 대해서는 연구가 부족한 실정이다. 뿐만 아니라 계측기를 선택하여도, 광범위한 토석류 위험지역 중 어디에 설치를 해야 하는지 결정하기 어려운 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 다양한 데이터 베이스와 계층분석법을 활용하여 적절한 계측기 선택 및 계측기 설치 위치에 대한 방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 안전한 토석류 모니터링에 활용되고 있는 계측정보 및 계측기 조사에 대한 내용으로 시작되며, 다양한 문헌 분석을 통해 각 계측기마다 활용빈도를 제시하였다. 또한 계층분석법을 통해 토석류에 관련된 지반공학 물성치들의 상대적 중요성을 분석하였으며, 이를 통해 각 인자들 간의 가중치로 환산하였다. 마지

막으로 계층분석법의 신뢰성도 검토하여 본 연구에서 제시하는 방법의 우수성을 증명하였다.

2. 데이터베이스 활용을 통한 계측기 활용 빈도 분석

토석류 계측에 관련된 데이터 베이스를 구축하기 위하여 선행 연구를 조사하였으며, 이를 통해 기존에 활용된 모니터링 시스템의 정보를 파악하였다. 데이터는 1991년부터 최근까지 발표된 논문을 토대로 분석되었으며, 총 80여 편의 자료를 수집하고 검토하였다.

2.1 활용 빈도 분석 결과

토석류를 안전하게 관리하기 위하여 활용한 정보는 강우량(강우량 측정기), 토석류 속도(가속도계, 지오폰, 속도계, 초음파), 변위(변위계, GPS 센서, 경사계), 수압(간극수압계, TDR 센서, 표면장력계), 지반진동(지오폰, 소형폰, 지진계), 영상(카메라, Correlation, MPEG 방법, 국부적인 필터링, STD 방법), 충격력(지반반력기, 로드셀) 그리고 표면두께(스테이지 센서, 초음파, 와이어 센서) 총 8개로 구분되며, 각각의 정보에 포함되는 그룹별 계측기는 괄호안과 같다. 결국 토석류를 안전하게 관리하기 위하여 필요한 정보와 그 정보를 제공하기 위해 활용한 계측기의 종류가 다양함을 보여준다.

본 연구의 선행 연구 조사 대상은 국내 토석류 모니터링 시스템에 대한 논문 23편, 특히 7편과 해외 토석

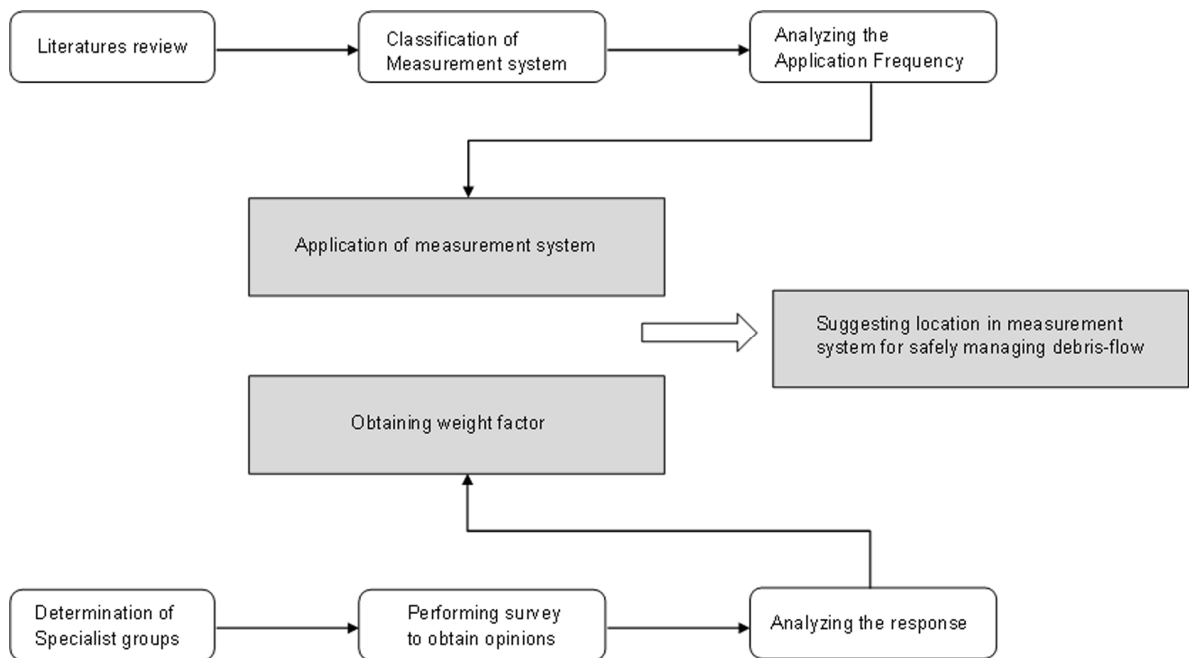


Fig. 1. Flow chart in this study for suggesting the location in measurement system for safely managing debris-flow.

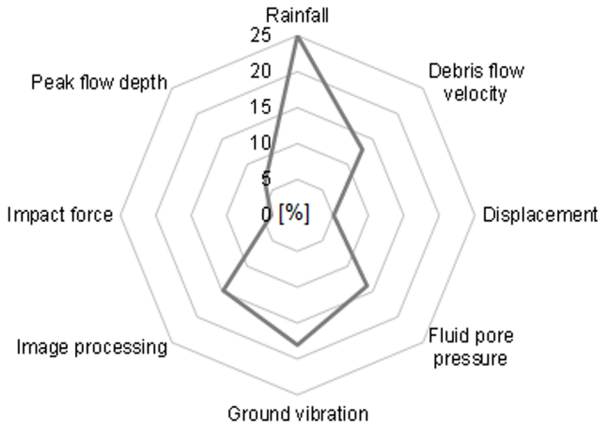


Fig. 2. Application ratio of each information for monitoring debris-flow.

류 모니터링 논문 및 보고서 50편이며, 이를 통해 기본 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 데이터를 활용하여 계측항목을 강우량, 토석류 속도, 변위, 수압, 지반진동, 영상, 충격력 그리고 표면두께의 8항목으로 구분한 후 각 항목이 활용된 빈도수를 계산하여 Fig. 2와 같이 레이더 차트로 도식화 하였다.

Fig. 2은 강우량, 토석류 속도, 변위, 수압, 지반진동, 영상, 충격력 그리고 표면두께 각 항목 마다 활용빈도가 25%, 12%, 5%, 13%, 18%, 14%, 3% 그리고 6% 임

을 알 수 있다. 즉, 토석류 위험지역을 안전하게 관리할 수 있도록 가장 많이 활용되는 계측 항목은 강우량임을 알 수 있으며, 충격력의 정보가 상대적으로 활용성이 많이 부족한 것으로 나타났다.

Fig 3는 각 계측 항목에 따른 계측기 종류별 활용빈도를 보여주며, 각 정보별 활용성이 높은 계측센서는 강우량계, 지오폰, GPS 센서, 간극수압계, 지오폰, 카메라, 지반반력기, 로드셀, 그리고 와이어 센서로 파악됐다.

2.2 활용 빈도 분석 토의

강우량 정보는 토석류 발생에 중요한 인자로 토석류 발생과 경험적인 상관관계를 통해 사전 경보를 제공할 수 있다. 또한 각종 계측 시스템의 트리거로 활용되어 타 계측기 보다 활용빈도가 상당히 높게 나타나는 것을 알 수 있다¹⁹⁻²⁰. 두 번째로 많이 활용되는 계측기는 지오폰으로 지반진동의 정보를 제공하는데 활용되고 있다. 지오폰은 물체의 움직임을 즉각적으로 측정할 수 있는 장점이 있어 강우 시 토석류 흐름이 발생하였을 경우 계측의 활용빈도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 지오폰은 지반진동 외에 여러 개의 지오폰에서 획득한 파형을 활용하여 흐름의 속도도 추정할 수 있어 토석류 발생 시 하부로 유입되는 지반의 속도 측정에도 활용되고 있다. 이는 토석류 하부에 도심지 및 도

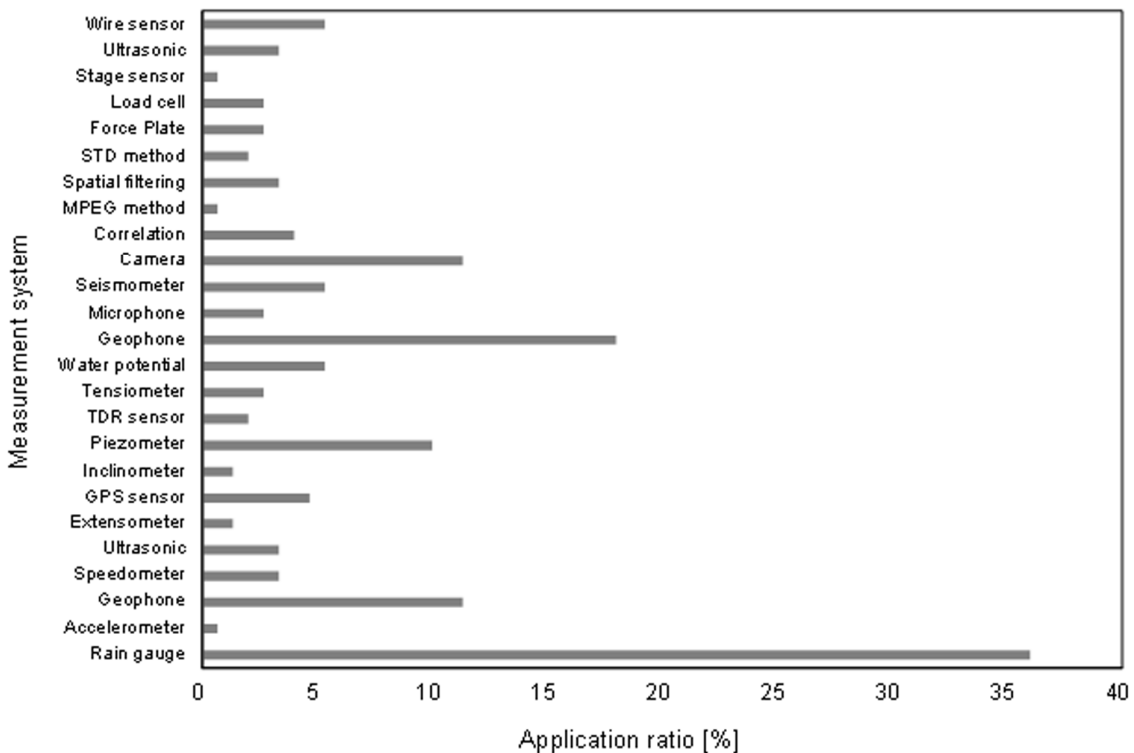


Fig. 3. Application ratio of each measurement system for monitoring debris-flow.

로 등의 민간시설이 있는 경우 효율적인 대피경로를 발현시킬 수 있는 장점이 있음을 보여준다. 또한 안전한 토석류 관리를 위하여 경보 발생 시 정확한 데이터에 근거하도록 이미지 영상 제공을 위해 카메라의 활용도 높게 나타났다. 이는 토석류 위험 경보 시 계측 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 다 방면으로 고려하고 있는 것을 보여준다. 그 밖의 GPS 센서, 간극수압계, 지반반력기, 로드셀, 그리고 와이어 센서는 각 정보분류에서는 높은 활용성을 보이지만, 전체적인 계측 시스템을 비교할 때 활용빈도가 낮게 나타났다. 따라서 조사된 활용빈도를 근거로 강우량계, 지오폰 그리고 카메라의 계측기는 안전한 토석류 관리를 위해 필수적으로 설치되어야 할 계측기로 판단되며, 나머지 계측기는 토석류 유역 형태 및 경제성을 고려하여 사용자의 목적에 맞도록 계측기를 선택하는 것이 바람직해 보인다.

3. 계층분석법

(Analytic Hierarchical Process: AHP)

본 연구에서는 계측기 설치 위치를 결정하기 위해 다기준 의사결정 분석 (Multi Criteria Decision Analysis) 중 계층분석법 (Analytic Hierarchical Process: AHP)을 활용하였다. AHP 분석은 전문가들의 의견을 종합하여 각 인자들 간의 중요도를 판단할 수 있는 의사결정방법으로 복잡한 문제를 계층화 할 수 있는 장점이 있다. 계층화된 요소들은 상대적인 이원비교를 통해 가중치를 부여할 수 있으며, 최종적으로 각 인자들의 중요도를 제시할 수 있다. AHP 분석은 전문가의 의견이 절대적으로 반영되는 기법으로 설문조사 형태 및 전문가 설정에 신중을 기해야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 활용하고 있는 상대비교 설문 조사지를 선택하였으며, 전문가들은 토석류 계측 시스템에 최소 5년이상 경험이 있는 교수, 연구원 그리고 기업 소속의 그룹으로 구성하였다.

전문가들 답변에 의한 결과는 다음 식 (1)과 같이 이원행렬로 표시할 수 있으며, 이때 가중치는 이원행렬 간의 곱셈으로 유추할 수 있다. AHP는 개인적인 의견이 동반되는 조사 기법으로 개개인이 얼마나 일관성 있게 설문에 응했는지도 검토해야 한다. 본 연구에서는 일관성 비율 (Consistence Ratio: CR)을 통해 전문가들의 설문조사 신뢰성을 검토하였으며, 식 (2)를 통해

계산된 CR 값이 0.1이하 값 이하로 나타나면 우수한 일관성임을 판단할 수 있다²¹⁾.

$$\text{Matrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{CR} = \frac{\text{CI}}{\text{RI}} \quad (2)$$

일관성 비율(CR)은 일관성 지수(Consistence Index: CI), 무작위 지수(Random Index: RI)의 상관식으로 이루어진다. CI는 식 (3)과 같으며 평가자가 얼마나 일관성을 가지고 결과를 판단하였는지 보여주는 지표이며, 평가 결과에 있어 논리적 모순을 검증하여준다.

$$\text{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

무작위 지수(RI)는 1~9까지의 이원비교척도를 무작위로 생성하여 이원비교행렬을 구성하였을 때의 일관성 지수를 의미하며, 식 (4)와 같다.

$$\text{RI} = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (4)$$

3.1 계층분석법 적용

계측기 설치 최적 위치를 설정하기 위하여 활용한 계층분석법은 토석류 흐름 시 지반공학 특성의 중요성을 고려하여 “1. 흙의 구조 및 입자분포도 2. 지반의 응력 및 변형 그리고 3. 흙과 유체” 총 3가지를 핵심 기준으로 설정하였다. 흙의 구조 및 입자분포도는 흙덩어리의 배열 상태를 반영하여 토석류 발생 시 대상지역의 취약 정도 예측에 활용 가능하며, 지반의 응력 및 변형은 지반의 파괴와 관련 있는 기준으로 토석류 발생 시 지반의 안정성을 대신할 수 있다. 강우로 인한 유체의 흐름이 대체적으로 토석류 유발의 주원인으로 알려져 있어 흙과 유체를 마지막 핵심 기준으로 설정하였다²²⁻²⁷⁾.

3.2 계층분석법 결과 및 토의

설정된 3가지 기준에 큰 영향을 받는 지반공학적인 물성치를 다음과 같이 8개의 하위층으로 결정하였다: 1) 세립분 함량, 2) 간극비, 3) 전단강도, 4) 탄성계수, 5) 투수계수, 6) 포화도, 7) 표면두께, 8) 함수비. 본 연구의 계층분석법에서 설정한 첫 번째 기준인 흙의 구조 및 입자분포도는 세립분 함량, 간극비, 표층 두께, 탄성계수, 전단강도 그리고 투수계수와 연관이 있다.

Table 1. Survey format

Question	Impotant score				
	3	2	1	1/2	1/3
How important fine content than void ratio					
How important fine content than shear strength					
How important fine content than elastic modulus					
How important fine content than hydraulic conductivity					
How important fine content than saturation					
How important fine content than soil thickness					
How important fine content than water content					

* Score meaning
 - 3: Absolute more important -1/2: Strongly important
 - 2: Very strongly important -1/3: weakly important
 - 1: Equal important

두 번째 지반의 응력 및 변형은 간극비, 탄성계수 그리고 전단강도와 관련이 있으며, 투수계수, 포화도 그리고 함수비는 세 번째 기준인 흙과 유체에 밀접한 영향을 받는 지반공학 물성치로 분류하였다. Table 1과 같이 각 지반 공학 물성치 항목 간의 1:1 비교를 통한 중요도를 점수화 시켰으며, 점수 척도는 3점 척도로서 가장 높은 중요도 점수는 3점, 가장 중요하지 않으면 1/3 점으로 점수를 측정하였다. Table 1은 세립분 함량에 대한 각 물성치와의 중요도를 비교한 것으로서 이와 같이 기본 서식을 기반으로 다른 물성치의 중요도를 점수화 하였다.

본 설문조사는 전자메일 형태로 토석류 계측기 설치 및 측정에 경험이 있는 전문가 집단에게 발송하였으며, 56개의 조사서 중 24개의 조사서만 답장을 받아 응답률은 약 42%로 나타났다. 나머지 32개의 조사서는 본인들의 의견이 본 설문조사서에 적합하지 않다는 이유

로 회신되지 않았다. 계층분석법은 다양한 전문가들의 의견을 반영하여 결과를 분석해야 하나 모든 전문가들의 의견을 취합해야 하는 어려운 한계를 가지고 있다. 따라서 연구자가 할 수 있는 만큼 최대의 의견을 수집하고 이를 분석하는 “rule-of-thumb”의 법칙에 따라 약 42%의 회신된 의견으로 결과를 도출하였다²⁸⁻²⁹⁾. 따라서 전문가들이 각 지반공학적 물성치마다 상대적으로 중요하다고 제시한 물성치의 점수를 Table 2와 같이 도출 하였다.

Table 2 결과를 기반으로 다음 식 (5)와 같이 8 × 8의 이원행렬로 표현하였다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0.79 & 0.89 & 0.85 & 0.79 & 0.71 & 0.63 & 0.89 \\ 1.25 & 1 & 1.07 & 1.26 & 1.07 & 1.20 & 0.89 & 0.95 \\ 1.12 & 0.93 & 1 & 1.48 & 0.89 & 1.05 & 0.83 & 1.07 \\ 1.17 & 0.79 & 0.67 & 1 & 0.85 & 0.89 & 0.66 & 0.95 \\ 1.25 & 0.93 & 1.12 & 1.17 & 1 & 1.12 & 0.89 & 1.00 \\ 1.41 & 0.83 & 0.95 & 1.12 & 0.89 & 1 & 0.79 & 1.12 \\ 1.58 & 1.12 & 1.20 & 1.51 & 1.12 & 1.25 & 1 & 1.41 \\ 1.12 & 1.04 & 0.93 & 1.04 & 1.00 & 0.89 & 0.70 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 각 행과 열은 세립분 함량, 간극비, 전단강도, 탄성계수, 투수계수, 포화도, 표면두께 그리고 함수비를 의미한다. 예를 들어 2행 1열은 1.25값은 간극비가 세립분 함량보다 얼마큼 중요인가? 의 질문에 대한 계산 값이다. 계산된 이원행렬을 통해 각 행렬의 가중치는 세립분 함량, 간극비, 전단강도, 탄성계수, 투수계수, 포화도, 표면두께 그리고 함수비의 순서대로 각각 0.101, 0.134, 0.128, 0.107, 0.131, 0.124, 0.156, 0.119로 나타났다. 따라서 가중치는 표면두께 > 간극비 > 전단강도 > 투수계수 > 탄성계수 > 포화도 > 함수비 > 세립분 함량 순서로 나타났으며, 가중치가 가장 높은 물성치는 표면두께 그리고 가장 낮은 물성치는 세립분 함량으로 나타났다. 즉 계측기 설치 위치는 각각의 격자 형 위치에서 도출된 지반공학 물성치에 AHP 분석

Table 2. Importance according to factors

	Fine content	Void ratio	Shear strength	Elastic modulus	Hydraulic conductivity	Saturation	Soil thickness	Water content
Fine content	1	0.79	0.89	0.85	0.79	0.71	0.63	0.89
Void ratio	1.26	1	1.07	1.26	1.07	1.20	0.89	0.95
Shear strength	1.12	0.93	1	1.48	0.89	1.05	0.83	1.07
Elastic modulus	1.18	0.79	0.68	1	0.85	0.89	0.66	0.95
Hydraulic conductivity	1.26	0.93	1.12	1.18	1	1.12	0.89	1.00
Saturation	1.41	0.83	0.95	1.12	0.89	1	0.79	1.12
Soil thickness	1.59	1.12	1.20	1.52	1.12	1.26	1	1.41
Water content	1.12	1.05	0.93	1.05	1.00	0.89	0.71	1

으로 나타난 가중치를 고려하여 결정할 수 있으며, 본 연구에서는 가중치를 통하여 계산된 결과 값이 가장 낮은 지역을 상대적으로 불안정한 지역으로 설정하여 계측기 설치 위치로 선정하고자 하였다. 식 (6)은 계측기 설치 위치가 지반공학 물성치와 가중치를 통해 결정 가능함을 보여준다.

$$\begin{aligned} \text{Installation Location of Measurement system} = & \\ & (0.101 \cdot \text{Fine content}) + (0.134 \cdot \text{Void ration}) + (0.128 \\ & \cdot \text{Shear strength}) + (0.107 \cdot \text{Elastic modulus}) + (0.131 \quad (6) \\ & \cdot \text{Hydraulic conductivity}) + (0.124 \cdot \text{Saturation}) + \\ & (0.156 \cdot \text{Soil depth}) + (0.119 \cdot \text{Water content}) \end{aligned}$$

각 전문가들 의견의 신뢰성 및 연속성을 검증하기 위하여 앞서 설명한 CR 값을 계산하였으며, 본 연구에서 활용한 설문지 답변의 CR 값은 0.0022로 나타났다. 이는 분석에 토대가 된 전문가 의견이 상당히 일관성 있음을 시사하며, 지반공학 물성치의 설정 및 가중치의 결과 값도 신뢰성 있음을 보여준다. 참고로 본 논문에서 CR 값을 계산하기 위한 고유값(eigenvalue)은 각 지반공학 물성치의 가중치와 상대적인 점수의 합을 통해 8.02 값으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 강우에 의해 산발적으로 발생하는 토석류 거동 계측 시 그동안 활용되고 있는 계측기의 종류와 사용 빈도에 대해 조사하였으며 계측기 설치 위치를 결정하기 위한 방법론도 제시하였다. 연구를 통해 도출된 상세한 결론은 다음과 같다.

- 토석류 모니터링에 활용되고 있는 계측기들의 종류 및 빈도를 조사하기 위하여 1991년부터 현재까지의 다양한 정보를 조사하였으며, 그 결과 계측기들은 강우량, 토석류 속도, 변위, 수압, 지반진동, 영상, 충격력 그리고 표면두께 총 8개의 측정 범주로 구분하였다. 그리고 각 측정 범주별 활용성이 높은 계측센서는 강우량계, 지오폰, GPS 센서, 간극수압계, 지오폰, 카메라, 지반반력기, 로드셀, 그리고 와이어 센서로 나타났다.
- 문헌조사를 통해 조사된 계측기의 합리적인 설치 위치를 결정하고자 계층분석법이 활용되었으며, 세립분 함량, 간극비, 전단강도, 탄성계수, 투수계수, 포화도, 표면두께 그리고 함수비의 지반공학적 물성치를 통해 토석류 발생 위험지역에서 가중치를 결정하였다. 가중치는 표면두께가 상대적으로 가장 중요하게 나타

났으며, 세립분 함량이 가장 낮은 가중치를 보였다. 본 연구에서 제시한 방법은 토석류 위험지역을 일정한 간격의 격자로 구성 한 후, 각 격자의 지반공학 물성치에 가중치로 최적의 계측기 설치 위치를 산정할 수 있음을 보여준다

본 연구는 토석류 위험지에 모니터링 시스템 설치 시 계측기 선택 및 계측기 설치 위치를 제공하며, 추후 안전한 토석류 관리에 다방면으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구 S04)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) F. Dweiri, S. Kumar, S. A. Khan and V. Jain, “Designing an Integrated AHP Based Decision Support System for Supplier Selection in Automotive Industry”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 62, pp. 273-283, 2016.
- 2) M. Karanik, L. Wanderer, J. A. Gomez-Ruiz and J. I. Pelaez, “Reconstruction Methods for AHP Pairwise Matrices: How Reliable are They?”, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 279, pp. 103-124, 2016.
- 3) P. Fernandez and M. Whitworth, “New Technique for the Detection of Large Scale Landslides in Glacio-lacustrine Deposits using Image Correlation Based Upon Aerial Imagery: A Case Study from the French Alps”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 52, pp. 1-11, 2016.
- 4) T. O. Boucher and E. L. MacStravic, “Multiattribute Evaluation within a Present Value Framework and its Relation to the Analytic Hierarchy Process”, *The Engineering Economist*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-32, 1991.
- 5) K. Mandic, B. Delibasic, S. Knezevic and S. Benkovic, “Analysis of the Financial Parameters of Serbian Banks through the Application of the Fuzzy AHP and TOPSIS Methods, *Economic Modelling*”, Vol. 43 No. 43, 2014.
- 6) R. Tyagi and C. Das, “A Methodology for Cost Versus Service Trade-offs in Wholesale Location-distribution using Mathematical Programming and Analytic Hierarchy Process”, *Journal of Business Logistics*, Vol. 18, No. 2, pp. 77, 1997.
- 7) F. Lolli, A. Ishizaka and R. Gamberini, “New AHP-based Approaches for Multi-criteria Inventory Classification”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 156,

- pp. 62-74, 2014.
- 8) P. Kayastha, M. R. Dhital and F. De Smedt, "Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study from the Tinau Watershed, West Nepal", *Computers & Geosciences*, Vol. 52, pp. 398-408, 2013.
 - 9) H. Hong, H. R. Pourghasemi and Z. S. Pourtaghi, "Landslide Susceptibility Assessment in Lianhua County (China): A Comparison between a Random Forest Data Mining Technique and Bivariate and Multivariate Statistical Models", *Geomorphology*, Vol. 259, pp. 105-118, 2016.
 - 10) G. Zhang, Y. Cai, Z. Zheng, J. Zhen, Y. Liu and K. Huang, "Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process Technique for the Assessment of Landslide Susceptibility in Huizhou", *China, CATENA*, Vol. 142, pp. 233-244, 2016.
 - 11) M. akob, O. Hungr and D. M. Jakob, "Debris-flow Hazards and Related Phenomena", Berlin: Springer, pp. 739, 2005.
 - 12) M. Arattano and L. Marchi, "Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning", *Sensors*, Vol. 8, No. 4, pp. 2436-2452, 2008.
 - 13) M. Berti, R. Genevois, R. LaHusen, A. Simoni, and P. R. Tecca, "Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology", *Oceans and Atmosphere*, Vol. 25, No. 9, pp. 707-715, 2000.
 - 14) Y. Itakura, N. Fujii and T. Sawada, "Basic Characteristics of Ground Vibration Sensors for the Detection of Debris Flow, Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology", *Oceans and Atmosphere*, Vol. 25, Issue. 9, pp. 717-720, 2000.
 - 15) R. Genevois, A. Galgaro and P. R. Tecca, "Image Analysis for Debris Flow Properties Estimation. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar", *Terrestrial & Planetary Science*, Vol. 26, No. 9, pp. 623-631, 2001.
 - 16) L. Marchi, M. Arattano, and A. M. Deganutti, "Ten Years of Ddebris-flow Monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps)", *Geomorphology*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-17, 2002.
 - 17) M. Arattano and L. Marchi, "Measurements of Debris Flow Velocity through Cross-correlation of Instrumentation Data", *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 137-142, 2005.
 - 18) Y. Itakura, H. Inaba and T. Sawada, "A Debris-flow Monitoring Devices and Methods Bibliography", *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 5, No. 6, pp. 971-977, 2005.
 - 19) P. R. Tecca, A. Galgaro, R. Genevois, and A. M. Deganutti, "Development of a Remotely Controlled Debris Flow Monitoring System in the Dolomites (Acquabona, Italy)", *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 9, pp. 1771-1784, 2003.
 - 20) C. H. Huang, H. Y. Yin, C. Y. Chen, C. Y. Yeh, and C. L. Wang, "Ground vibrations produced by rock motions and debris flows", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003 - 2012), pp. 112, 2007.
 - 21) M. Karanik, L. Wanderer, J. A. Gomez-Ruiz, and J. I. Pelaez, "Reconstruction methods for AHP pairwise matrices: How reliable are they?", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 279, pp. 103-124, 2016.
 - 22) A. M. Youberg, R. H. Webb, C. R. Fenton, and P. A. Pearthree, "Latest Pleistocene - Holocene debris flow activity, Santa Catalina Mountains, Arizona; Implications for modern debris-flow hazards under a changing climate", *Geomorphology*, Vol. 219, pp. 87-102, 2014.
 - 23) F. Vagnon, A. Segalini, and A. M. Ferrero, "Studies of Flexible Barriers Under Debris Flow Impact: An Application to an Alpine Basin", *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 15, pp. 165-172, 2015.
 - 24) H. Brunkal and P. Santi, "Exploration of Design Parameters for a Dewatering Structure for Debris Flow Mitigation", *Engineering Geology*, Vol. 208, pp. 81-92, 2016.
 - 25) H. X. Chen, S. Zhang and M. Peng, "A Physically-based Multi-hazard Risk Assessment Platform for Regional Rainfall-induced Slope Failures and Debris Flows", *Engineering Geology*, pp. 203, pp.15-29, 2016.
 - 26) W. Hu, X. J. Dong, Q. Xu, G. H. Wang, T. W. J. Asch and P. Y. Hicher "Initiation Processes for Run-off Generated Debris Flows in the Wenchuan Earthquake Area of China, *Geomorphology*, Vol. 253, pp. 468-477 2016.
 - 27) S. P. Pudasaini, "A Novel Description of Fluid Flow in Porous and Debris Materials," *Engineering Geology*, Vol. 202, pp. 62-73.
 - 28) S. F. Olejnik, "Planning Educational Research: Determining the Necessary Sample Size" *The Journal of Experimental Education*, Vol. 5, pp. 40-48, 1984.
 - 29) F. Dweiri, S. KumMr and S. Khan, "Designing an Integrated AHP Based Decision Support System for Supplier Selection in Automotive Industry", *Expert Systems with Applications*, Vol. 72, pp.467-468, 2016.