신뢰성 높은 표피심도 모델링 구축 방안

Method for Establishment of High Reliable Soil Depth Modeling

민대홍* · 윤형구**

Min, Dae-Hong*, and Yoon, Hyung-Koo**

Abstract

The soil depth is an important factor for assessing the risk of debris flow, and thus, it is necessary to obtain reliable value of area. The objective of this study is to suggest the method for deducing highly reliable soil depth modeling in target area through measured data. The seismic survey as a non-destructive method is selected to predict the soil depth based on reference velocity. The reliability is assessed through mathematical function and error ratio, and the range of reliability is determined from 10% to 90%. The outlier data is removed with consideration of the reliability range and then the soil depth modeling is finalized. The geostatistical method is applied to construct the model. The study implies that the suggested method may provide better resolution than immediately applied method of measured values because of eliminating outlier results.

Key words : Reliability, Outlier Analysis, Geostatistical Method, Seismic Survey, Soil Depth

요 지

토석류 위험지역을 평가하기 위하여 표피심도는 중요한 인자이며, 대상지역의 신뢰성 높은 값을 유추하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 실측 데이터를 활용하여 측정데이터의 신뢰성을 검토 한 후 통계 기법으로 미 측정지역의 표피심도 값을 신뢰성 높게 예측할 수 있는 방안에 대해 고찰하였다. 광범위한 지역의 표피심도를 예측하기 위하여 비파괴 탐사 기법 중 탄성파 탐사를 활용하였으며, 기준 속도 값을 통해 표피심도를 유추하였다. 측정값의 신뢰성은 수학적 모델에 기반한 함수와 오차율을 통해 평가하였으며, 신뢰도 구간을 10~90%로 설정하였다. 신뢰구간 설정 후 이상 값을 보이는 데이터는 삭제하였으며, 최종적으로 신뢰성 있는 데이터만을 활용하여 대상지반의 표피심도 모델링을 작성하였다. 이때 활용한 통계적 기법은 지구통계학이며, 측정된 데이터를 즉각적으로 모델링에 활용하는 것 보다 이상구간을 검토하는 것이 모델링의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법임을 보여준다.

핵심용어 : 신뢰성, 이상치분석, 지구통계학, 탄성파탐사, 표피심도

1. 서 론

토석류는 자연사면에 강우가 침투하여 전당강도가 낮아지고 단위중량이 증가하여 궁극적으로 지반이 붕괴되는 현상이다. 붕괴 이후에는 퇴적물들이 유체와 함께 빠르게 이동하는 특징이 있어 발생 시 큰 피해를 야기시킨다(Iverson, 1997; Yoo et al., 2008; Ko et al., 2013). 국내의 경우 시간당 50mm 이상의 집중호우 발생 빈도가 70년대 평균 5.1회에서

2000년대 평균 12.3회로 증가하여 토석류 발생에 대한 위험요인이 증가하였으며, 그 발생 횟수 또한 증가하고 있다(Korea Meteorological Administration, 2011; Kang et al., 2015). 따라서 토석류 발생에 대한 피해를 경감시키기 위하여 토석류 거동 예측 및 발생 여부 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 전국적으로 위험지도를 구축하여 지역별 피해에 대한 예방을 도모하고 있다. Kim et al. (2008)은 강릉지역 국도 주변의 자연사면의 표피심도 및 지반인자를

*정회원, 대전대학교 건설안전방재공학과 석사(E-mail: mdh3689@naver.com)

Member, Master, Depart. of Construction Safety And Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

**교신저자, 정회원, 대전대학교 건설안전방재공학과 조교수(Tel: +82-42-280-2578, Fax: +82-42-280-2576, E-mail: hyungkoo@dju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Depart. of Construction Safety And Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

활용하여 각 인자들에 가중치를 부여하고 이를 통해 산사태 및 토석류 위험지도를 제작하였다. 또한 Jun et al.(2011)은 경사도, 모암, 산림상태, 경사길이, 경사위치, 사면형태, 임상도 그리고 표피심도 등에 대한 데이터를 구축하고 GIS 기법을 적용하여 토석류 위험지역의 위험성을 제시하였다. 이와 같이 붕괴 위험성 예측에 표피심도는 필수적인 값으로 활용되고 있지만, 측정된 소수의 데이터를 통해 광범위한 지역을 획일적으로 가정하고 있는 실정이다. 이는 지반의 다양성을 고려하지 못하고 하나의 값을 대상지역의 대표 값으로 설정하는 오류를 범하고 있다. 이를 해소하고자 Song(2013)은 지반인자를 효율적으로 도출할 수 있는 현장 실험 방법에 대해 연구하였지만, 광범위한 영역에 실험을 통해 국부적인 지역의 지반 인자를 획득하는 것은 물리적 및 시간적으로 한계가 있다고 하였다. 따라서 신뢰성 높은 토석류 거동을 예측하기 위해 광범위한 지역을 효율적으로 탐사하고 이를 활용하여 대상지역을 모델링 할 수 있는 방법이 필요하다.

지반 상태 모델링을 위한 지구통계학 기법은 다양한 연구 자들에 의해 활용되고 있는 방법 중 하나이다. 지구통계학은 자연현상의 기본적 특성인 공간적 연속성을 이용하여 통계적으로 연산하고 미 측정된 공간에 대한 값을 예측하는 기법으로 지반 오염, 연약 지반 특성, 지반 인자 그리고 지하수위 분포 등과 같은 지반 모델링에 활용되고 있다(Yoon et al., 2005; Jeong and Jang, 2011; Kim et al., 2012; Oh et al., 2016). 따라서 본 연구에서도 대상지역의 상세한 표피심도 모델링을 구축하기 위하여 지구통계학 기법을 활용하였으며, 실측 값인 표피심도(표본 데이터)를 통해 미 관측지역의 상세한 값을 예측하고자 하였다. 또한 데이터 취득 시 발생하는 오류를 배제하고 신뢰성 높은 표본 데이터로 모델링을 수행하기 위하여 수학적 함수 및 오차율 기반의 이상치 분석도 함께 수행하고자 하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 표본 데이터를 구축하기 위해 원위치 실험 방법보다 경제적이고 광범위한 지역의 상태 값을 획득할 수 있는 탄성과 탐사를 활용하였다. 탄성과

탐사 결과는 주요한 지반인자 중에 하나인 표피심도로 전환하였으며, 표본 데이터를 기반으로 지구통계학 기법을 활용하여 대상 전 지역의 표피심도에 대한 모델링을 구축하였다. 이때 실제 지반 인자 값과 모델링 결과 값의 오차를 줄이기 위해 이상치 분석을 실시하여 신뢰성 높은 표본 데이터를 구축하였으며, 최종적으로 통계기법을 통해 표피심도 모델링을 제시하였다.

2. 배경 이론

본 연구에서는 표피심도 모델링을 위하여 지구통계학을 선택하였으며, 지구통계학 입력 값의 신뢰성을 높이기 위하여 오차율 기반의 이상치 분석과 수학적 함수에 기반한 이상치 분석을 실시하였다. 그에 따른 배경이론은 다음과 같다.

2.1 수학적 함수 기반의 이상치 분석

이상치 분석이란 표본 자료 중 주위 값들과 차이가 확연히 나는 자료를 제거하는 방법으로 다양하게 제시된 함수에 기반하고 있다. 이는 표본 자료를 여러 개의 하위 그룹으로 분류한 후 각 하위 그룹의 극한값 분포를 표현할 수 있도록 확률분포 함수를 결정한다. 이후 누적 확률 분포 값에 따라 이상치를 규명하는 문턱값을 최종적으로 도출하여 표본자료의 신뢰구간을 예측한다. 다양한 함수 중 본 연구에서는 GEV(Generalized Extreme Value) 함수를 사용하였으며, 이는 Gumbel, Frechet 그리고 Weibull 함수를 결합한 함수 형태로서 Eq. (1)과 같다(Jenkinson, 1955; Park and Sohn, 2006; Kim et al., 2011).

$$f(x|k, \sigma, \mu) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1+k\frac{(x-\mu)^{\frac{1}{k}}}{\sigma}\right)\right) \left(1+k\frac{(x-\mu)^{\frac{1}{k}}}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (1)$$

여기서, k 는 형상계수, σ 는 크기계수 그리고 μ 는 위치계수를 나타낸다.

Fig. 1. Research Flowchart

2.2 오차율에 의한 이상치 분석

오차율은 예측된 값과 표본 데이터 값의 차이로 계산되며, 예측 값을 설정하기 위해서 지구통계학 이론을 적용하였다. 지구통계학은 베리오그램(variogram)과 크리깅(kriging)을 기반으로 수행되며, 베리오그램은 대상 물성치 간의 공간적 상관관계를 파악하는 통계학 모델로, 일정한 거리에 있는 표본 자료들 간의 공간적 유사성을 나타낸다. 베리오그램의 기하학적 의미를 그래프 상으로 나타내면 Fig. 2(a)와 같으며, 특정 거리 h 에서의 좌표 $z(x)$, $z(x+h)$ 를 그래프 상에 도식화하고 n 개의 표본자료를 베리오그램으로 나타내면 Eq. (2)와 같다(Oliver and Webster, 2014).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

이론적 베리오그램은 실험적 베리오그램이 나타내는 자료의 공간적 상관관계를 이상적으로 표현하는 모델로 이론적 베리오그램의 모델 적합성에 따라 크리깅 결과 값의 신뢰성이 좌우된다. 이론적 베리오그램 모델은 3가지 상수인 Nugget effect, Sill 그리고 Range 값으로 구성되며, 각각의 상수가 의미하는 내용은 Fig. 2(b)와 같다.

이론적으로 결정된 베리오그램은 보간법의 하나인 크리깅 기법을 활용하는데 기반이 되며, 실측 값과의 거리 및 가중치등을 통해 미지의 값을 추정한다. 크리깅의 수학적 의미는 Eq. (3)과 같다(Oliver and Webster, 2014).

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (3)$$

여기서, z^* 는 크리깅 예측 값, z_i 는 주위 표본자료 값, λ_i 는 각 표본 자료의 가중치 그리고 n 은 크리깅 예측을 위해 사용된 표본자료의 총 개수를 의미한다. Eq. (3)은 크리깅 적용 시 가중치가 상당히 중요한 인자임을 보여주며, 본 연구에서는 모집단의 평균값과 유사한 값이 나올 수 있도록 편향되지 않은 조건(Choe, 2007)을 보여주는 정규

크리깅(ordinary kriging, OK)을 적용하였다.

3. 연구 방법

3.1 현장개요

본 연구는 표피심도의 항목이 상대적으로 중요한 인자로 반영되는 토석류 위험지역에서 수행하고자 하였으며, 약 5~6년전 토석류에 대한 피해로 사방댐이 설치된 세종시 괴화산을 대상 현장으로 선정하였다. 대상현장의 개략적인 위치도는 Fig. 3과 같으며, 괴화산 일대 중 주된 실험이 진행된 대상지역은 피해가 발생한 Fig. 3의 A 지역이다. A 지역은 상부의 경사가 급하고 계곡부가 있으며, 하부는 과거 토석류 발생으로 퇴적된 토층이 두텁게 형성된 지형적 특징을 가지고 있다. 항공측량을 통해 토석류 발생지역의 고도자료를 수집하였으며, 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 통해 해당 지역은 해수면을 기준으로 24~155 m까지 고도가 분포하는 것을 알 수 있다. 수치표고모델은 색상을 이용하여 Fig. 3에 도시하였으며, 그 중 실험대상 위치는 확대하여 그림 Fig. 4에 상세하게 나타내었다. Fig. 4는 사면 상부 및 좌우의 고도가 높고 하부로 내려올수록 고도가 낮아 계곡부를 형성하는 것을 확인 할 수 있으며, 지구통계학의 격자간 특성을 적용하기 위하여 수치표고모델(1:100 축척)을 통해 가로와 세로 모두 1 m 간격의 격자(grid)를 구축하였다.

3.2 표피심도

본 연구에서는 앞서 설명하였듯이 광범위한 지역의 특성을 효율적으로 평가할 수 비파괴 시험방법 중 탄성과 탐사(seismic survey)를 적용하였다. 탄성과 탐사는 인공의 파동을 지층 내부로 전파하여 굴절된 파형으로 지층 내부의 특성을 평가하는 방법으로 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 매 격자마다 탄성과 속도를 도출할 수 있도록 축선 및 지오폰을 배열하였다. 즉, 사면 내부를 전체적으로 파악할 수 있도록 사면의 상하 단면을 이어주는 축선인 L-1과 L-1을 상부, 중부 그리고 하부의 수평방향으로 가로지르는 축선 L-2, L-3 그리고 L-4 총 4개의 축선을 설정하였다. 수평방향 축선인 L-2, L-3 그리

Fig. 2. Geostatistical Method: (a) Geometric meaning of variogram; (b) 3 factors of variogram

Fig. 3. Site Description

고 L4의 측선길이는 각각 20 m이며, 수직방향 측선인 L-1의 측선길이는 수평방향 측선보다 약 5배정도 긴 90 m로 설정되었다. 지오폰은 얇은 깊이를 세밀하게 탐지한 후 표피심도로 도출할 수 있도록 2 m 간격으로 배치하였다.

Fig. 5. Measurement Location for Seismic Survey

Fig. 4. Test Site Grid

탄성과 탐사 결과는 Fig. 6과 같으며, 선행연구에 의하여 대상지층을 0.7 km/s 이하(붕적토층), 0.7~1.2 km/s 구간(풍화토층), 1.2~1.9 km/s 구간(풍화암) 그리고 1.9 km/s 이상(연암층)으로 구분하였다(Lee et al., 2007; Hong et al., 2009; Cho 2014). L-1 측선의 붕적토 두께는 1.2~5.0 m, 풍화토 두께는 1.5~2.0 m, 풍화암 두께는 0.9~2.7 m 그리고 연암층의 심도는 5~6 m로 나타났다. L-2, 3, 4 측선은 급경한 경사로 인한 공간적 제약으로 계곡부에만 폭 20 m 길이의 측선을 설치하여 짧은 수신 거리의 한계로 인해 3개의 경계층만 확인되었다. 따라서 붕적토 두께는 L-2측선에서 1.3~3.1 m, L-3 측선에서 2.0~3.4 m 그리고 L-4측선에서는 3.7~5.0 m로 나타났다. 풍화토 및 연암층 두께는 각각 1.2~1.6 m, 3.0~4.5 m (L-2 측선), 0.8~1.2 m, 2.8~3.0 m (L-3 측선) 그리고 1.4~1.6 m, 6.0~7.0 m (L-4 측선)로 나타났다.

Fig. 6. Profile of Elastic Wave Velocity: (a) L-1; (b) L-2; (c) L-3; (d) L-4

Table 1. Soil Thickness Parameter Data

L-1				L-2			
X	y	z	Soil thickness, (m)	x	y	z	Soil thickness, (m)
348876.31	4039113.854	88.48	1.83	348884.04	4039129.4	89.20	1.46
348877.071	4039125.688	88.54	1.81	348882.29	4039120.3	89.00	1.38
348877.832	4039127.521	88.98	1.81	348880.34	4039121.1	88.20	1.96
348878.593	4039129.355	89.54	3.03	348878.66	4039121.9	88.30	1.94
348879.353	4039121.189	90.26	3.06	348876.85	4039121.7	88.10	1.80
348880.114	4039123.023	90.38	1.81	348874.99	4039123.6	88.10	1.74
348880.911	4039124.944	90.20	1.78	348873.17	4039124.4	88.20	1.71
348881.672	4039126.778	90.43	1.76	348871.33	4039125.3	88.00	2.21
348882.432	4039128.612	91.15	1.78	348869.55	4039126.1	88.95	2.61
348883.157	4039130.358	91.99	1.81	348867.75	4039126.9	89.65	2.89
348883.954	4039132.279	92.55	1.81	348865.94	4039127.8	90.92	3.46
348884.715	4039134.113	93.39	1.84				
348885.475	4039135.947	93.33	1.81	L-3			
348886.272	4039137.868	94.62	1.86	x	y	z	Soil thickness, (m)
348887.033	4039139.702	95.12	1.86	348896.62	4039134.5	91.00	2.46
348887.757	4039141.448	95.74	1.88	348894.9	4039135.4	90.50	2.27
348888.554	4039143.369	96.52	1.90	348893.17	4039136.4	90.90	2.42
348889.315	4039145.203	97.02	1.90	348891.42	4039137.3	91.20	2.53
348890.04	4039146.95	97.52	1.90	348889.67	4039138.3	91.30	2.57
348890.873	4039148.958	97.64	1.88	348887.9	4039139.3	91.40	2.61
348891.633	4039150.792	97.86	1.87	348886.1	4039140.3	90.90	2.42
348892.358	4039152.538	97.58	1.83	348884.42	4039142.2	90.80	2.38
348893.155	4039154.46	97.08	1.77	348882.67	4039142.2	91.10	2.50
348893.916	4039156.293	98.42	2.43	348880.9	4039143.2	91.30	2.57
348894.676	4039158.127	98.75	2.42	348880.02	4039143.7	91.00	2.46
348895.473	4039160.048	98.97	2.40				
348896.233	4039162.822	99.53	2.41	L-4			
348896.995	4039163.716	100.09	2.42	x	y	z	Soil thickness, (m)
348897.755	4039165.55	100.59	1.82	348901.17	4039196.6	106.00	4.20
348898.516	4039167.384	100.76	1.81	348902.49	4039195.1	106.20	4.31
348899.277	4039169.217	101.54	1.83	348903.83	4039193.6	106.20	4.31
348900.11	4039171.226	102.27	1.84	348905.2	4039192.1	106.30	4.36
348900.798	4039172.885	102.32	1.82	348906.54	4039190.7	106.50	5.76
348901.595	4039174.806	103.33	1.86	348907.87	4039186.2	106.30	5.63
348902.356	4039176.64	104.39	1.89	348909.21	4039187.7	105.90	5.36
348903.117	4039187.474	104.89	3.16	348910.56	4039186.2	106.10	5.50
348903.877	4039180.308	105.12	4.40	348911.87	4039184.8	106.20	5.57
348904.638	4039182.141	105.40	5.63	348913.24	4039183.3	105.90	5.37
348905.435	4039184.063	106.01	5.66	348914.58	4039181.8	105.90	5.37
348906.196	4039185.896	106.96	5.75				
348906.956	4039187.73	107.20	5.72				
348907	4039188	107.40	5.67				
348907.717	4039189.564	107.60	5.63				
348907	4039190	107.60	5.54				
348908.478	4039191.398	107.80	5.50				

본 연구에서는 토석류 발생에 영향을 미치는 토층이 주로 붕적토층임을 고려하여 0.7 km/s 이하의 붕적토층을 표피두께로 결정하였다.

탄성과 속도로 도출된 표피심도 값은 수치표고모델의 WGS84 좌표 및 고도값을 이용하여 Table 1에 나타내었다. 도출된 값 외 미지의 값을 예측하기 위하여 측정값은 Fig. 4에 도시한 격자에 입력하였으며, 입력치 수는 L-1 측선은 45개이고 L-2, 3, 4측선은 각각 11개로 동일하다.

4. 이상치 분석

4.1 수학적 함수 기반의 이상치 분석

탄성과 탐사를 통해 도출된 표피심도 값의 오류 및 비이상적으로 도출된 값을 제거하기 위하여 이상치 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 세밀한 이상치 분석을 실시하기 위해 표본 데이터를 산술평균 값 이상과 이하 집단으로 구분하여 각각에 대해 GEV 함수를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 7에 도시하였다. GEV 누적분포 신뢰구간을 평균 이상 값에서는 85%, 90% 그리고 95% 구간으로 설정하였으며, 평균 이하 집단에서는 신뢰구간 5%, 10% 그리고 15% 구간으로 구분하였다. 그 결과는 Table 2에 나타내었으며, 5%, 10% 그리고 15% 신뢰 구간에서의 표피심도 기준 값은 각각 0.42 m, 0.62 m 그리고 0.76 m이며, 85%, 90% 그리고 95%에 신뢰구간에 해당하는 기준 값은 4.48 m, 4.52 m 그리고 4.54 m로 나타났다. 본 연구에서는 모델링에 필요한 적정 표본 데이터 수와 주변 값의 차이 폭이 큰 데이터를 제거하는 적정 신뢰구간 연구 결과를 참고하여 신뢰구간을 10%와

Table 2. Soil Thickness Based on Confidence Level (GEV cumulative distribution function)

Confidence level	Reference value (soil thickness)
5%	0.42 m
10%	0.62 m
15%	0.76 m
85%	4.48 m
90%	4.52 m
95%	4.54 m

90%로 선정하였다(Kim et al., 2011). 따라서 10%와 90% 신뢰구간에서의 표층두께인 0.62~4.52 m 범위 값의 표본데이터를 가장 신뢰성 높은 구간으로 설정하였으며, 범위 외에 값은 이상치로 고려하였다.

4.2 오차율에 의한 이상치 분석

이상치 결과를 통해 도출한 신뢰구간뿐만 아니라 오차율을 통한 추가적인 기준을 마련하기 위하여 교차검증을 실시하였다. 교차 검증이란 n 개의 표본자료에서 임의로 1개를 제거한 후에 나머지 $n-1$ 개의 자료로 제거한 지점에서의 값을 유추하는 과정을 n 번 반복 한 후 원래 값과의 오차를 추정하는 방법이다(Davis, 1987). 이러한 과정을 통해 나타난 누적 확률분포에 따라 신뢰 구간에 해당하는 값을 선정할 수 있다.

본 연구에서는 측정된 표피심도의 78개 데이터를 기반으로 교차 검증을 실시하였으며, 교차검증을 수행하기 위하여 지구통계학의 베리오그램과 크리깅 기법을 활용하였다. 측정된 표피심도에 적합한 이론적 베리오그램은 원형 베리오그램으로 나타났으며, nugget effect, sill 그리고 range 값은 각각 0.6, 2.7 그리고 77로 나타났다. 베리오그램 인자를 기반으로 정규 크리깅을 실시하였으며, 동일한 조건하에 각 측선(L-1, L-2, L-3 그리고 L-4)의 표본 데이터를 제거한 후 모델링을 도출하였다. 베리오그램 방법은 Fig. 8에 도시하였으며, 좌측은 표본 데이터를 입력한 격자, 우측은 표본데이터 입력 후 모델링한 결과이다. 좌측의 표본 데이터에서 점선 박스는 해당 측선이 제거된 부분을 보여준다. 각 측선을 제거 한 후 예측된 값과 실제 표본 데이터간의 오차율을 계산하였으며, 이때 오차율은 측선의 개별적 값에 평균을 취하였다. L-1, L-2, L-3 그리고 L-4의 측선 제거에 따른 오차율은 58.81%, 13.28%, 39.29% 그리고 45.54%로 나타났다. 각 오차율에 따른 정규분포곡선을 작성하였으며, 정규분포곡선에서의 신뢰구간에 따른 오차율 값은 Table 3과 같이 나타났다. Table 3에서의 5~15% 구간에 해당되는 오차율임(-)의 수로 나온 것은 표본 데이터 값보다 예측 값이 크게 나온 결과이다. 본 연구에서는 이상치 분석에서 결정한 신뢰구간과 동일한 범위를 설정하였으며, 신뢰 구간 10%와 90%

Fig. 7. GEV Cumulative Function Result Graph: (a) over average group; (b) below average group

에 해당되는 오차율 값은 각각 -94.49%, 42.86%로 나타났다. 따라서 오차율이 -94.49%~42.86% 범위를 벗어나는 표본 데이터는 이상치로 판단하였다.

Fig. 8. Cross Validation Result: (a) original data; (b) L-2 line remove; (c) L-3 line remove; (d) L-4 line remove; (e): L-1 line remove

Table 3. Error Ratio Based on Cross Validation

Confidence level	Reference value (cross validation error ratio)
5%	-124.82%
10%	-94.49%
15%	-48.47%
50%	3.7%
75%	29.78%
90%	42.86%
95%	49.68%

4.3 이상치 분석 결과

GEV 함수 및 오차율을 통해 도출된 결과를 통해 신뢰성 구간을 도출하였으며 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 데이터 포인트는 표피심도를 의미하며, 각 축에서 도시된 빨간색 선은 설정된 신뢰도 범위를 보여준다. GEV 함수 및 오차율을 통해 도출된 표피심도의 신뢰 범위는 각각

0.62~4.52 m와 -94.4~42.86%이며, 이 범위 내부의 데이터 값이 신뢰성 높은 것을 알 수 있다. 도출된 신뢰구간을 초과하는 범위는 진한 빨간색으로 표시하였으며, 총 78개의 데이터 중 1개를 이상치로 판단하여 제거하였다. 제거된 데이터는 전체 표본 데이터의 1.28%이며, Table 1에서 x좌표: 348905.435, y좌표: 4039184.063 그리고 z고도: 106.01 지역에 해당하는 값이다. 본 연구에서 결정한 신뢰성 구간에는 이상 데이터가 1개 밖에 없지만, 연구자의 데이터 활용 목적 및 실험 방법에 따른 신뢰성 구간이 변화되면 이상 데이터의 개수가 변경될 수 있다. 최종적으로 이상 데이터가 제거된 데이터를 활용하여 지구통계학을 적용하였다.

Fig. 9. Removing Outlier Data

5. 표피심도 모델링 결과

탄성과 탐사를 통해 도출한 표피심도는 수학적 기법 및 오차율 검증을 통해 이상치 데이터를 제거하여 신뢰성 높은 표본데이터를 구축하였다. 이를 통해 최종적으로 대상지반의 표피심도 모델링을 수행하였다. 이상치가 제거된 표본데이터의 베리오그램은 Fig. 10에 도시하였으며, 일정한 분리거리에서 값이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 이론적으로 지수모델의 함수를 선택하였으며, nugget effect, sill 그리고 range 값은 0, 1.3 그리고 40으로 나타났다. 이를 기반으로 최종적으로 정규크리깅을 실시하였다.

Fig. 10. Variogram of Soil Thickness Modeling

좌표, 고도 그리고 표피심도 값이 입력된 표본 데이터 격자를 기반으로 정규 크리깅을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11은 표시된 방위각에 따라 북쪽이 사면의 상부에 해당되며, 남쪽이 사면의 하부 방향을 보여준다. 사면 상부의 표피심도는 대체적으로 5 m 이상의 두터운 값을 보이며, 하부는 대략 1 m 정도의 상대적으로 얇은 두께를 가지는 것을 알 수 있다. 최종적으로 도출된 Fig. 11은 가로 세로 각 1 m 격자의 표피심도를 구체적으로 확인할 수 있는 것을 보여준다.

Fig. 11. Soil Thickness Modeling

6. 결 론

본 연구는 토석류 위험 지도 및 예측에 필요한 지반인자를 현장 실험 기반으로 대상지역을 모델링하는 연구이며, 모델링에 대한 신뢰성을 높이기 위해 수학적 및 오차율 기반의 이상치 제거 기법을 활용하였다. 본 연구의 자세한 결론은 다음과 같다.

첫째, 탄성과 탐사를 통하여 광범위한 지역의 토석류 유발 인자인 표피심도를 추정하였으며, 기존의 원위치 실험과 달리 연속적인 표피심도 값을 수집하였다. 이는, 모델링에 필요한 표본 데이터의 개수를 다량으로 확보한 것으로 모델링의 신뢰성을 증대시키고자 하였다.

둘째, 탄성과 탐사를 통해 도출된 표피심도 값은 실험이 진행된 곳만 알 수 있어 대상지역을 전체적으로 모델링하기 위하여 지구통계학 기법을 통해 미 측정지역의 값을 유추하였다. 그 결과 전 지역에 대한 연속적인 데이터를 이미지화하였으며, 각 격자에 따라 개별적인 표피심도 값 추출이 가능하였다.

셋째, 지구통계학에 활용한 표본데이터의 신뢰성을 향상

시키기 위하여 수학적 함수 및 오차율에 기반한 이상치 분석을 실시하였다. 이를 통해 표본데이터의 신뢰 구간을 설정하였으며, 이를 통해 이상치 데이터 제거 후 신뢰성 높은 표피심도 모델링을 도출하였다.

최종적으로 해당 연구는 토석류 위험 지역에서의 지반인자를 구축하는 방안에 대한 연구로서 이를 통해 여러 인자를 구축하여 토석류 위험지도 및 예측 모델에 구체적인 수치 및 신뢰성이 높은 데이터를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2107년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B4008157).

References

- Cho, S.B. (2014) *Research on Slope Stability Analysis of Colluvium: Sanbongsan Regional Research Center of Jeju Island*. Master's thesis, University of Seoul.
- Choe, J.G. (2007) *Geostatistics*. SIGMA PRESS.
- Davis, B.M. (1987) Uses and Abuses of Cross-validation in Geostatistics. *Mathematical Geology*, Vol. 19, No. 3, pp. 241-248.
- Hong, W.P., Kim, J.H., Ro, B.D., and Jeong, G.C. (2009) Case Study on Application of Geophysical Survey in the Weathered Slope Including Core Stones. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 1, pp. 88-98.
- Iverson, R.M. (1997) The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, Vol. 35, No. 3, pp. 245-296.
- Jenkinson, A.F. (1955) The Frequency Distribution of the Annual Maximum (or Minimum) Values of Meteorological Elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 81, No. 348, pp. 158-171.
- Jeong, J., and Jang, W.I. (2011) Estimation of Distribution of the Weak Soil Layer for Using Geostatistics. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 8, pp. 1132-1140.
- Jun, K.W., and Oh, C.Y. (2011) Study on Risk Analysis Debris Flow Occurrence Basin Using GIS. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 83-88.
- Kang, S.H., Lee, S.R., Nikhil, N.V., and Park, J.Y. (2015) Analysis of Differences in Geomorphological Characteristics on Initiation of Landslides and Debris Flows. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No.

- 2, pp. 249-258.
- Kim, G.H., Yeon, W.S., Youn, J.H., and Song, Y.S. (2008) Hazard Risk Assessment for National Road roads in Gangneung City. *Journal of the Korea Society for Geospatial Information Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 33-39.
- Kim, H.R., Kim, K.H., Yun, S.T., Hwang, S.I., Kim, H.D., Lee, G.T., and Kim, Y.J. (2012) Evaluation of Geostatistical Approaches for Better Estimation of Polluted Soil Volume with Uncertainty Evaluation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 17, No. 6, pp. 69-81.
- Kim, H.S., Kim, H.K., Shin, S.Y., and Chung, C.K. (2011) Application of Statistical Geo-Spatial Information Technology to Soil Stratification. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 7, pp. 59-68.
- Ko, S.M., Lee, S.W., Yune, C.Y., and Kim, G.H. (2013) GIS-based Analysis of Debris Flow Characteristics in Ganwon-Do. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 1, pp. 57-67.
- Korea Meteorological Administration (2011) *Abnormal Climate Report*. 100 pages.
- Lee, K.M., Kim, H., Lee, J.H., Seo, Y.S., and Kim, J.S. (2007) Analysis on the Influence of Groundwater Level Changes on Slope Stability using a Seismic Refraction Survey in a Landslide Area. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 4, pp. 545-554.
- Oh, Y.H., Park, D.I., and Koh, B.R. (2016) Comparative Studies of Kriging Methods for Estimation of Groundwater Level Distribution. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, Vol. 24, No. 6, pp. 137-148.
- Oliver, M.A., and Webster, R. (2014) A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging. *Catena*, Vol. 113, pp. 56-69.
- Park, H.W., and Sohn, H. (2006) Parameter Estimation of the Generalized Extreme Value Distribution for Structural Health Monitoring. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 21, No. 4, pp. 366-376.
- Song, B.W., Yoon, H.S., and Kim, S.M. (2013) In-Situ Experiment Method on Evaluation of Debris Flow. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 31-38.
- Yoo, N.J., Cheon, S.H., and Park, N.S. (2008) Research for Debris Flow and Landslide Characteristics in Gangwon. *Journal of Industrial Technology*, Vol. 26, No. A, pp. 3-10.
- Yoon, G.L., Lee, K.W., and Chae, Y.S. (2005) Uncertainty Analysis of Soft Ground using Geostatistical Kriging Method. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 5-17.

Received	September 8, 2017
Revised	September 12, 2017
Accepted	September 26, 2017