개발이전 지형정보에 의한 산사태 · 토석류 모의

Landslide and Debris-Flow Simulation Based on Pre-Development Geographic Information Data

오경두* · 이창희**

Oh, Kyoung Doo*, and Lee, Chang Hee**

Abstract

Umyeonsan has been an important place since prehistoric lives. Today, it has become an area where many citizens of Seoul want to live as a result of its environment, which is adjacent to downtown Seoul but is nature-friendly. However, due to heavy rain in 2011, landslides occurred in the area of Umyeonsan, causing damage to property and claiming many lives. In this study, the terrain of the Umyeonsan area before it underwent development was restored using the map produced by the Chosun governor's office during the Japanese colonial period, and the risk of landslides and debris-flow was analyzed using this restored terrain. For the analysis, the SINMAP and Debris Avalanche models, which are GIS-based analysis models, were used. As a result, it was confirmed that the hazardous area with a slope stability coefficient of 1 or less was distributed extensively between the 8th ridge and the 5th ridge. It was found that several roads and apartment complexes were located in places at which ridges and valleys existed previously, and they were therefore located in the path of debris-flows.

Key words : Land Slide, Debris-Flow, SINMAP, Debris Avalanche, Pre-Development Terrain

요 지

우면산 일대는 선사시대부터 중요한 삶의 터전이었으며, 오늘날에는 서울 도심에 인접하면서도 개발이 덜 된 자연환경을 갖춘 입지요건으로 인하여 많은 서울시민들이 살고 싶어 하는 지역으로 되었다. 그러나 지난 2011년 집중호우로 인해 우면산 일대에 산사태로 인하여 인명 및 재산 피해가 많이 발생하였다. 본 연구에서는 일제강점기 조선총독부에서 제작했었던 도엽을 이용하여 우면산 일대 개발이전의 지형을 복원하였고, 이를 이용하여 산사태 및 토석류에 대한 위험도를 분석하였다. 분석을 위해 GIS 기반의 해석모형인 SINMAP과 Debris Avalanche 모형을 이용하였다. 모의결과 우면산 8부 능선부터 5부 능선 사이에서 사면안정계수가 1 이하인 위험지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 함께 도로와 많은 아파트 단지가 과거에 능선과 계곡이 있던 위치에 자리하고 있었고, 토석류의 흐름경로에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 산사태, 토석류, SINMAP, Debris Avalanche, 개발이전지형

1. 서 론

우면산 일대는 선사시대의 고인돌과, 백제시대 석실분, 주거지 등의 발견을 통해 예로부터 중요한 삶의 터전이었음을 알 수 있다(Korea Joongang Daily, 2011). 오늘날에는 고속도로, 남부순환도로, 강남대로, 지하철 등 사회기반 인

프라시설이 갖추어 지고, 대형마트, 전시관, 아파트 단지를 포함한 주거시설 및 각종 생활편의시설 등이 들어섰으며, 서울 도심에 인접하면서도 개발이 덜 된 자연환경을 갖춘 입지요건으로 인하여 많은 서울시민들이 살고 싶어 하는 지역으로 되었다.

그러나 지난 2011년 7월 27일 집중호우로 인해 발생한

*정회원, 육군사관학교 토목·환경학과 교수(E-mail: okd0629@kma.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering & Environmental Sciences, Korea Military Academy

**교신저자, 정회원, 중원대학교 소방방재공학전공 조교수(Tel: +82-43-830-8685, Fax: +82-43-830-8579, E-mail: lch75039@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor. Department of Fire & Disaster Prevention Engineering. Jungwon University

산사태로 토사, 전석 등의 사태물질이 주택지로 유입되어 60여가구가 고립되고 20여명의 사상자가 발생되었다(Korean Geotechnical Society, 2011). 산사태 피해는 우면산 북쪽의 래미안, 임광 신동아 아파트 등을 포함하여 형촌마을, 남태령 전원마을 까지 많은 지역에서 발생하였는데, 피해가 발생한 지점들은 주로 골짜기 하류에 위치하였다.

본 연구에서는 일제강점기에 조선총독부 육지측량부에서 제작했었던 도엽을 이용하여 우면산 일대 개발 이전의 지형을 복원하였고, 이를 이용하여 우면산 일대 중 북측사면에 위치한 방배동 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지를 중심으로 산사태 및 토석류 위험도를 분석을 하여, 피해지역에 대해서 공학적으로 살펴보고자 한다. 이와 함께 같은 지역에 대한 개발이후 현재지형조건을 위험도를 분석하고, 이를 개발이전 지형조건에 의한 모의 결과와 비교하였다.

산사태 및 토석류 위험도 분석을 위해 GIS 기반의 해석 프로그램인 SINMAP과 Debris Avalanche 모형을 이용하였다.

SINMAP은 급경사지의 얇은 토층에서 지하수위 상승으로 인하여 발생하는 사면붕괴위험도를 평가하기 위하여 개발된 모형이며(Pack et al., 2005), 급경사 산지에서 무한사면(infinite slope)으로 가정하여 해석한다(Pack et al, 2005; MPSS 2015). SINMAP을 통해 잠재적인 산사태 붕괴 위험지역과 토석류가 발생 가능한 지점을 평가하는데 이용된다(Oh et al., 2006; Oh et al., 2013; Lee, Oh, Heo, et al., 2015).

Debris Avalanche 모형은 에너지전 이론에 근거하며(Griswold and Iverson, 2008), 에너지전 이론은 산사태로부터 유발된 토석류 피해 범위 예측에 대한 적용성이 높은 것으로 알려져 있다(Oh et al., 2013; Lee, Oh, and Oh, 2015). Debris Avalanche 모형은 토석류의 유하경로를 따라 발생하는 확산범위 및 최종 퇴적지역 뿐만 아니라 유하과정에서의 토석류 유속을 계산하여 제공한다(MPSS, 2015). SINMAP의 분석한 결과를 바탕으로 토석류의 이동경로 및 토석류 피해예상지역의 범위를 모의하게 된다(Youberg, 2010; Lee, Oh, and Oh, 2015).

SINMAP과 Debris Avalanche 모형을 이용한 산사태·토석류 모의와 관련하여 Hungr (2005)는 토석류의 흐름을 모의하기 위해 산사태 붕괴지역, 이송 및 퇴적지역으로 구성하였고, Youberg (2010)는 미국 캘리포니아 주 매리코파 도시에 토석류 위험 분석을 위해 산사태 위험지역을 분석하는 다양한 Initiation 모형과 산사태로 발생 후 토석류가 유하하기 위한 Rounout 모형을 소개하면서 SINMAP과 Debris Avalanche 모형 조합의 적용성을 설명하였다. Magirl et al. (2010)은 Debris Avalanche를 이용한 결과를 이용하여 다양한 통계적 분석을 수행하였으며, Lee, Oh, and Oh (2015)는 SINMAP과 Debris Avalanche 모형을 이용한 위험도 분석 및 위험대책 수립방안에 대해서 제시하였고, 국민안전처(현 행정안전부) 연구에서 이 방법으로 수행한 서울과 부산 지역 산사태와 토석류 모의 결과와 우면산 일대 피해 지역 84곳을 비교 검증한 결과 94%, 부산 지역에서는 검증 대상 111개 곳에 대해 97%의 높은 일치도를 보였다(MPSS, 2015).

2. 개발이전 지형 복원

본 연구에서는 일제강점기인 1919년 3월 30일 조선총독부 육지측량부에서 1:50,000축척으로 제작한 廣州와 軍浦場 등 2개 도엽을 이용하여 우면산 일대 개발 이전의 지형을 복원하였다. Fig. 1에서 외곽 청색선은 가로 5.9 km, 세로 4.6 km의 지형 복원 지역이고 가운데 적색선은 가로 2.5 km, 세로 3.1 km의 산사태와 토석류 모의 지역이다. 산사태와 토석류 모의 지역을 복원 지역 보다 작게 선정한 이유는 모의 결과에 대한 분석시 관악산 등 주변 지역의 영향을 배제하기 위해서이다.

Fig. 1. A Map Produced by the Japanese Government-General of Korea

본 연구에서는 지형 복원 대상 지역 일제강점기 제작 지도를 고해상도 정밀 스캔한 후 국립지리정보원 수치지도를 이용하여 정위치에 표정하였다. Fig. 2는 좌표 체계에 맞게 표정된 일제강점기 지도의 등고선을 독취하여 벡터라이징한 것이다. Fig. 2에서 적색선이 등고선을 나타내는 벡터자료들이다.

Fig. 2. Vectorized Contours Made from the Japanese Colonial Period Map

Fig. 3은 벡터라이징한 등고선으로부터 작성한 TIN 지형 자료이다. 우면산 일대는 표고 20미터에서 290미터 범위로 나타났다.

Fig. 3. 3-D Map (TIN) Made from the Japanese Colonial Period Map

현재 우면산의 표고가 293미터인데 일제강점기 지도에 290미터로 3미터 낮게 되어 있는 것은 기준점 표고의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 관악산도 632미터인데 일제강점기 지도에는 629미터로 3미터 낮게 나타나 있다. Fig. 4는 복원한 3차원 지형도에 현재의 도로망을 오버랩시킨 것이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 경부고속도로와 남부순환로 등이 산지를 가로지르고 있으며 방배동 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지가 산지였던 곳에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4. Overlap of Current Road Network with TIN

Fig. 5는 우면산 북측사면에 위치한 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지 일대의 복원된 3차원 지형과 현재의 도로망을 오버랩시켜 확대한 것이다. 남부순환로와 아파트 단지가 산 아래 능선과 계곡이 있던 위치에 자리하고 있다. 즉, 피해를 당한 아파트 단지들은 원래 산지였던 곳에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. Enlarged Map of TIN and Current Road

Fig. 6은 현재의 3차원 지형과 도로망에 적색선으로 표시한 일제강점기 지도의 등고선을 오버랩시킨 것이다. 조선총독부 지도의 축척은 1:50,000인 반면에 현재의 국립지리정보원 수치지도는 1:5,000으로 해상도에 큰 차이가 있다. 전체적인 등고선의 형태는 현재의 지형과 비슷하지만 계곡 등 미세한 지형의 해상도가 떨어지는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 흰색 박스 안의 화살표는 우면산 계곡으로부터 평지 방향으로 토석류가 진행했던 유하 경로를 나타낸 것이다(Seoul City, 2014). 청색으로 표시한 것은 현재 지형에서 토석류가 유하할 수 있는 위험물골이며 우면산 정상 of 흑색선은 부대시설의 위치를 지형도 위에 오버랩시킨 것이다. 여기서 위험물골은 Beven et al. (1979)에 의해 제시된 지형학적 습윤 지수(Topographic Wetness Index, TWI)에 의하여 구할 수 있다.

Fig. 6. Debris-Flow Traces on the Japanese Colonial Period Map

3. 산사태 · 토석류 모의

3.1 개발이전지형을 이용한 산사태 · 토석류 모의

Fig. 7은 산사태 · 토석류 모의 대상 지역에 대해서 일제강점기에 제작된 지도에서 복원한 3차원 지형에 현재의 도로망을 오버랩시켜 나타낸 것이다. 이후 일제강점기 지도에서 복원된 지형을 ‘개발이전지형’이라 부르기로 한다.

Fig. 7. Overlap of Current Road Network with 3D Pre-Development Terrain

일제강점기에 제작된 지도로부터 복원한 우면산 일대 개발 이전의 3차원 지형을 이용하여 산사태와 토석류 모의를 수행하기 위한 방법은 SINMAP 모형에 의한 산사태 위험도 해석과 Debris Avalanche 모형에 의한 토석류 모의 방법을 적용하였다.

Fig. 8은 SINMAP 모형에 의해 과거 지하수 포화도를 모의한 것으로 우면산 정상부로부터 계곡을 따라 지하수가 수렴하고 있으며 특히 우면산 북측 물골들은 급경사면을 따라 지류가 없이 마치 붓글레이 경기장의 미끄럼틀과 같은 위험한 형태를 보이고 있다. 남부순환로와 아파트 단지가 토석류의 통로인 물골 위에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 과거 우면산 북측사면 남부순환로와 래미안, 임광, 신동아 아파트 일대의 지하수 포화도에 도로망을 오버랩시킨 것이다. 남부순환로와 아파트 단지 일대가 토석류의 통로인 위험물골 위에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 위험물골상에 사방댐 등 토석류 방지 시설을 설치하지 않을 경우 우면산 정상부에서 발생한 토석류가 빠르게 유하하면서 관성 운동량에 의해 물골이 위치했던 남부순환

로와 아파트 단지를 통과하여 유하할 것임을 의미한다.

Fig. 8. Groundwater Saturation of the Pre-Development Terrain

Fig. 9. Overlap of Current Road Network with Groundwater Saturation of Pre-Development Terrain

Fig. 10은 SINMAP 모형에 의해 과거 산사태 위험도를 모의한 것이다.

SINMAP 모형의 사면안정계수(Stability Index) 분류에서 Stable은 사면안정계수가 1.5 이상, Moderately Stable은 1.25~1.5, Quasi-Stable은 1.0~1.25, Lower Threshold는 0.5~1.0, Upper Threshold는 0.0~0.5, Defended는 0.0인 지역을 의미하는데, 우면산 8부 능선부터 5부 능선 사이에 사면안정계수가 1.0 이하인 위험지역이 집중적으로 분포하고 있으며 능선 보다는 물골 주변에 집중되어 있다.

Fig. 10. Landslide Risk of the Pre-Development Terrain

Fig. 11은 Debris Avalanche 모형에 의해 과거 토석류 위험도를 모의한 것으로 우면산 주요 계곡마다 토석류 위험도가 높은 것으로 나타났으며 특히 남부순환도로를 넘어 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지쪽으로 토석류 위험도가 높게 나타나고 있다. 일제강점기에 제작된 지도가 1:50,000 축척으로 계곡부의 해상도가 낮아 위험물골이 다소 부정확하며 현재와 계곡 하류부 지형이 달라지기는 하였으나 우면산 일대의 전반적인 토석류 위험도를 파악하기에는 큰 문제가 없는 것으로 보인다.

Fig. 11. Debris-Flow Risk of the Pre-Development Terrain

Fig. 12는 Debris Avalanche 모형에 의해 과거 토석류 유속을 모의한 것으로 우면산 주요 계곡마다 빠른 유속의 토석류가 발생할 것으로 나타났으며 특히 남부순환도로를 넘어 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지쪽으로 매우 빠른 유속의 위험한 토석류가 발생할 것으로 나타나고 있다.

Fig. 12. Debris-Flow Velocity of the Pre-Development Terrain

3.2 개발이후지형(현재지형)을 이용한 산사태 · 토석류 모의

국립지리정보원의 1:5,000 수치지도를 이용하여 현재의 우면산 일대 지형을 구성하였다. Fig. 13은 우면산 일대 현재 자연 지형의 산사태 위험도를 모의한 것이다. 우면산 8부 능선으로부터 우면산 5부 능선 사이에 위험한 사면들이 주로 분포하고 있으며 특히 물골 주변에 집중적으로 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 우면산 일대 현재 자연 지형의 토석류 유속을 모의한 것이다. 토석류는 계곡을 따라 유하하면서 가속된 후 다시 감속되면서 퇴적되는 것으로 모의되었다. 특히, 신동아, 임광, 래미안 아파트와 국립국악원, 예술의 전당 방면 물골을 따라 빠른 유속의 토석류가 주거지역까지 유하하는 것으로 나타났다.

Table 1은 개발전후의 지형에 대해 SINMAP에 의해 산사태 위험도를 평가한 것인데, 위험지역 분포면적을 나타낸다. Table 1, Fig. 12, 그리고 Fig. 14와 같이 개발전후 위험지역에 대한 모의결과가 큰 차이가 없었으며, 개발전후 모두 우면산 8부 능선부터 5부 능선 사이의 물골 주변에서 사면안정계수

가 1 이하인 위험지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 함께 산아래 능선과 계곡이 있던 위치에 자리하고 있는 남부순환로와 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지 일대의 아파트 단지가 토석류의 흐름경로에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13. Landslide Risk of the Post-Development Terrain

Fig. 14. Debris-Flow Velocity of the Post-Development Terrain

Table 1. Risk Area Distribution of Pre/Post Development Terrain

구 분	Pre-Development Terrain		Post-Development Terrain	
	Area (km ²)	Ratio (%)	Area (km ²)	Ratio (%)
Stable	4.6	58.8	5.1	65.6
Mod Stable	1.1	13.5	0.9	12.1
Quasi-Stab	1.2	15.3	1	12.2
Lower	0.9	12	0.7	9.4
Upper	0	0.4	0	0.6
Defended	0	0	0	0.1
Total	7.8	100	7.8	100

4. 결 론

본 연구에서는 일제강점기 조선총독부에서 제작했었던 도엽을 이용하여 우면산 일대 개발이전의 지형을 복원하였고, 이를 이용하여 산사태 및 토석류에 대한 위험도를 분석하였다. 분석을 위해 GIS 기반의 해석모형인 SINMAP과 Debris Avalanche 모형을 이용하였다. 이와 함께 같은 지역에 대한 개발이후 현재지형조건을 이용하여 위험도를 분석하였고 개발이전 위험도와 비교하였다. 모의결과 위험지역에 대한 면적분포가 큰 차이가 없었으며, 개발전후 모두 우면산 8부 능선부터 5부 능선 사이의 물골 주변에서 사면 안정계수가 1 이하인 위험지역이 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 함께 산아래 능선과 계곡이 있던 위치에 자리하고 있는 남부순환로와 래미안, 임광, 신동아 아파트 단지 일대의 아파트 단지가 토석류의 흐름경로에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 오늘날 우리나라의 기후가 과거와 많이 바뀌어, 종전의 호우기록을 넘어서는 집중호우 발생 위험도가 높아졌는데도 불구하고, 안전보다 산지에 대한 조망권이나 접근성에 더 많은 비중을 두게 됨으로써 산사태 및 토석류에 대한 노출 위험이 증가하였다. 따라서 과도한 난개발을 자제하고, 입지 적합여부 검토 및 위험지역에 대한 재해저감 대책이 마련되어야 하겠다.

References

- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Griswold, J.P., and Iverson, R.M. (2008). *Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches* (Ver. 1.1). U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5276, Reston, Virginia, U.S.

- Geological Survey, Department of Interior.
- Hungr, O. (2005). Classification and terminology. In M. Jakob, and O. Hungr, (Eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena* (pp. 9-23). Berlin: Springer.
- Korea JoongAng Daily. (2011). *Umyeonsan! trapped in greed* (August 21, 2011). Retrieved from <https://news.joins.com/article/6015639>
- Korean Geotechnical Society. (2011). *A final report on the cause of landslide and establishment of recovery measures in Umyeonsan*.
- Lee, C.H., Oh, K.D., and Oh, K.R. (2015). A study on landslide and debris flow area risk management using initiation and runout analysis model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 291-296.
- Lee, C.H., Oh, K.D., Heo, J.Y., and Oh, K.R. (2015). A study on feng shui of Chosun royal tombs by land slide and debris flow risk analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 269-275.
- Magirl, C.S., Griffiths, P.G., and Webb, R.H. (2010). Analyzing debris flows with the statistically calibrated empirical model LAHARZ in southeastern Arizona, USA. *Geomorphology*, Vol. 119, No. 1-2, pp. 111-124.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security). (2015). *Development of precision hazard risk assessment methods and hazard maps for landslides and debris flows due to heavy rainstorms: 2nd annual Report*.
- Oh, K.D., Hong, I.P., Jun, B.H., Ahn, W.S., and Lee, M.Y. (2006). Evaluation of GIS-based landslide hazard mapping. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 1, pp. 23-33.
- Oh, K.D., Lee, C.H., Kang, B.H. Heo, J.Y., and Hwang, S.B. (2013). A methodology to analyse landslide and debris-flow hazards due to heavy rainstorms. *Crisisonomy*, Vol. 9, No. 9, pp. 45-66.
- Pack, R.T., Tarboton, D., Goodwin, C.N., and Prasad, A. (2005). *SINMAP 2.0 for ArcGIS: A stability index approach to terrain stability hazard mapping, User's Manual*.
- Seoul City. (2014). *Additional and supplementary investigation report of cause of landslide in Umyeonsan*.
- Youberg, A. (2010). *Methods for Evaluating Alluvial Fan Flood Hazards From Debris Flows in Maricopa County, Arizona*. Open File Report, OFR-10-01, Arizona Geological Survey.

Received	October 1, 2018
Revised	October 5, 2018
Accepted	October 15, 2018