지진시 산사태 발생 예측 및 산지 내 문화재 영향 분석

Prediction of the Landslide and Effect on Heritage Located in Mountain induced Earthquake

전성곤* · 김덕문** · 최원일*** · 최은화****

Jeon, Seongkon*, Kim, Derkmooon**, Choi, Wonil***, Choi, Eunhwa****

Abstract

It was selected as the study area where heritage are located on the Mountain in Seoul. The variation of landslide risk induced earthquake by using the Newmark displacement model and the prediction of debris flow pattern due to landslides were performed. And these effects on heritage distributed in the study area were investigated. As a result, it was analyzed that heritage on landslide risk areas induced earthquake does not be placed, however the further research for Sajikdan on the predicted moving path of debris flow would be recommendable.

Key words : Newmark model, Landslide, Earthquake, Heritage

요 지

문화재가 위치하고 있는 서울특별시 종로구 일대의 산지를 연구지역으로 선정하고 Newmark displacement model을 이용하여 지진으로 유발되는 산사태 위험지 변화와 산사태로 인한 토석류 흐름 양상을 예측하여 연구 지역에 분포하고 있는 문화재에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 지진으로 유발되는 산사태 발생 위험지에는 문화재가 위치하지는 않는 것으로 분석되었으나, 토석류 예상 이동경로 상에 사직단이 위치하고 있어 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 뉴마크 모델, 산사태, 지진, 문화재

1. 서 론

산사태 발생은 인명 및 재산 피해를 유발할 뿐만 아니라 도로 및 주요 시설물의 직·간접적 피해를 일으킨다. 특히, 산지 부근에 위치한 문화재는 산사태 발생시 매우 큰 피해를 입는다. 그 예로 2002년 8월 태풍 ‘루사’로 인해 산사태가 발생하여 전라북도 남원시 산내면 대정리에 위치한 실상사 백장암의 백장암 3층 석탑(석조문화재 국보 제10호)과 백장암 석등(보물 제40호)이 피해를 입었다(Song, 2007).

산사태를 유발시키는 가장 큰 인자로는 강우와 지진을 들 수 있다. 그중 지진으로 인한 산사태는 대규모 지진에 의해

발생되는 경우가 주를 이루지만, 강우에 의한 지층포화조건이 수반된다면 소규모 지진에서도 산사태 발생은 충분히 가능하다. 그 예로 2006년 2월 필리핀 레이테(Leyte) 남부 지역에서 발생한 산사태를 들 수 있다. 레이테 산사태는 집중호우로 포화된 지반에 규모 2.6의 소규모 지진이 발생하여 대규모 산사태로 1,100여명의 사망자가 발생하였다(Evans *et al.*, 2007; Kim, 2011). 우리나라 역시 기후변화에 의한 돌발성 집중호우와 1988년 이후 꾸준히 증가하고 있는 지진 발생빈도(Fig. 1)를 살펴볼 때 더 이상 지진에 의한 산사태의 안전지대가 아니라는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 지진으로 인한 사면의 변위량 분석에 사용되

*정회원. 여주대학교 토목공학과 교수(E-mail: skjeon777@nate.com)
Member, Professor, Department of Civil Engineering, Yeosu Institute of Technology

**국립문화재연구소 건축문화재연구실 학예연구관
Curator, Research Division of Architectural Heritage, National Research Institute of Cultural Heritage

***교신저자. 정회원. (사)경기방재연구소 연구실장(Tel: +82-31-776-0260, Fax: +82-31-776-0261, E-mail: wonil2000@hanmail.net)
Corresponding Author. Member, General Manager, Gyeonggi Disaster Management Institute

****(사)경기방재연구소 연구원
Researcher, Gyeonggi Disaster Management Institute

Fig. 1. Domestic Earthquake Trend(Recent 30 years).

는 Newmark displacement model(이하 Newmark model)을 이용하여 연구지역의 지진으로 인한 산사태 위험지를 예측하고, 이를 기반으로 토석류 이동경로를 파악하여 토석류가 산지 내의 문화재에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 분석 기법 및 해석 모형

본 연구에 사용된 Newmark model은 동적변위분석법으로, 연구자의 경험에 의해 산정되는 지진계수의 불확실성을 보완하기 위하여 Newmark에 의해 개발되었다(Newmark, 1965). 이후 Newmark model은 Wilson and Keefer(1985), Wicczorek *et al.*(1985), Jibson *et al.*(1993), Refice and Capolongo (2002), Wang *et al.*(2008) 등 많은 연구자들에 의해 지진으로 유발되는 산사태 해석 모델로 사용되었다(Kim, 2011). Newmark model은 활동토괴를 강체블럭으로 가정하여 지진이 발생하였을 때 작용가속도가 항복가속도보다 클 경우에 토체가 이동한다고 가정하여 활동토괴의 변위를 구한다(Cho *et al.*, 2003). 이때 활동면 하부와 활동토괴는 서로 상대적인 속도차이를 가지게 되며 가속도가 항복가속도 이하로 떨어졌음에도 불구하고 속도가 0이 될 때까지 이동이 지속되며, 가속도가 다시 항복가속도를 초과하기 시작하면 활동토괴는 활동과 멈춤을 반복한다. 여기서 주어진 작용가속도와 항복가속도를 이용하여 변위를 계산하게 된다(Duncan and Weight, 2005; Makdishi and Seed, 1978; Kim, 2011).

본 연구에서 사용될 모델 선정을 위하여 동일한 공식을 사용한 연구를 제외한 3가지 모델(Wilson and Keefer(1985), Jibson *et al.*(2000), Refice and Capolongo(2002))의 결과를 비교 분석해 보았다. 그 결과, Jibson *et al.*,(2000), Refice and Capolongo(2002)의 변위량이 Wilson and Keefer(1985)의 결과보다 과소평가 되는 것으로 나타났다. 이는 Jibson *et al.* (2000), Refice and Capolongo(2002)의 연구와 Wilson and

Fig. 2. Sliding Block Representation of Newmark Displacement Model. a_c : Yield Acceleration, a : Base Acceleration, α : Angle (Jibson *et al.*, 1993).

Table 1. Comparing the Results of the Various Newmark Model

Proposed formula	Displacement (Min/Max)
· Wilson and Keefer, 1985 - $\log D_N = 1.46 \log I_a - 6.642 A_c + 1.546$ - Standard : Greater than about 100mm	3.73e-38mm/ 1.58e+14mm
· Jibson <i>et al.</i> , 2000 - $\log D_N = 1.521 \log I_a - 1.993 \log A_c - 1.546$ - Standard : Greater than about 150mm	2.39e-38mm/ 2.31e-29mm
· Refice & Capolongo, 2002 - $\log D_N = 0.7605 \log I_a - 0.9965 \log A_c - 0.773$ - Standard : Greater than about 100mm	5.60e-23mm/ 4.81e-15mm

Keefer(1985)의 연구에서 제안한 식 및 위험지역을 분류하는 기준이 서로 상이하기 때문이며(Table 1), 본 연구에서 적용할 기준에 부합하는 Wilson and Keefer(1985)의 연구를 기초로 지진으로 유발되는 산사태 분석을 실시하였다.

이때 Newmark model은 다음 식을 기초로 한다(식 (a)).

$$\log D_N = 1.46 \log I_a - 6.642 A_c + 1.546 \quad (a)$$

여기서, D_N 은 최종 분석 결과인 사면의 변위량(mm)이며, Newmark model을 이용하여 지진으로 유발되는 산사태 위험지 예측에는 사면의 변위량이 100 mm 이상인 지역을 산사태 위험지로 분류한다(Jibson, 1993; Keefer and Wilson, 1989).

여기서, I_a 는 지진관련 정보를 나타내며, 지진 규모 및 분석 지역과 진앙과의 거리 등으로 나눌 수 있다. 이러한 지진 관련 정보를 단순화시켜 나타내며 I_a 값은 Wilson and Keefer (1985)가 제안한 식 (b)에 의해 계산된다(Wilson and Keefer, 1985; Kim, 2011).

$$\log I_a = M_w - 2 \log R - 4.1 \quad (b)$$

여기서, M_w 는 지진 규모, R 은 분석 지역과 진앙의 거리를 나타낸다.

또한, A_s 는 임계가속도로써 해당 지역의 경사도, 점착력, 내부마찰각, 단위중량 등의 사면 정보가 포함된 안전율을 통해 산정되기 때문에 연구지역에 따라 다양하게 나타나게 되며, 다음의 식 (c)로부터 구할 수 있다(Wilson and Keefer, 1985; Kim, 2011).

$$A_c = (F_s - 1)g \sin \alpha \quad (c)$$

여기서, g 는 중력가속도, α 는 사면 경사, F_s 는 사면 안전율을 의미한다. 이 중 사면의 안전율을 무한사면안정모델을 이용한 대표적인 해석기법인 SINMAP(Stability INdex Mapping) 분석을 통해 구했다. SIINMAP은 정상상태의 습윤지수를 바탕으로 한 사면안정해석 모델로, 모든 강우가 지표하로 침투한다고 가정한다. 사면의 안정성은 사면안정지수(SI: Stability Index)로 등급화하여 분류하며(Table 2), 각 지점(cell)의 산사태 발생 위험 정도로 나타낸다(Choi *et al.*, 2012).

SINMAP을 이용한 사면의 안전율 산정은 다음 식 (d)를 이용한다(Robert *et al.*, 2006).

$$SI = FS = \frac{C + \cos \alpha \left[1 - \min \left(\frac{R}{T \sin \alpha}, 1 \right) r \right] \tan \phi}{\sin \alpha} \quad (d)$$

여기서, A 는 집수 면적, α 는 사면경사, C 는 무차원 점착력, ϕ 는 내부마찰각, r 은 물의 밀도/토양밀도, R 은 연평균 강우량×지하수 함양률, T 는 투수계수/흙의 두께를 의미한다. A 와 α 는 수치지형도를 기반으로 한 DEM(Digital Elevation Model) 분석을 통해서 도출하며, C , ϕ , r , R/T 값은 현장에서 조사된 사면의 정보를 토대로 적용된다(Choi *et al.*, 2012).

일반적으로 산사태의 피해는 산사태 발생지역 뿐만 아니라 산사태로 유발되는 토석류에 의한 피해가 크다. 따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 Newmark model로 분석된 지진시 산사태 위험지를 대상으로 Flo-2D(Two-Dimensional Flood Routing Model) 프로그램을 이용하여 토석류 이동 경로를 예측하였다. Flo-2D는 사면 상부에서 하부 유역으로 유입되는 토석류가 퇴적되는 영역 및 퇴적 두께를 모의하는 프로그램으로, 토석류의 흐름 추적 및 토석의 퇴적을 모의하는데 적합하다(Kim *et al.*, 2013). 토석류 흐름을 결정하는 인자는 토석류 토사농도에 관련된 것으로 체적농도, 밀도, 중량농도, 혼합

Fig. 3. Physical Processes Simulated by Flo-2D (FLO-2D reference manual, 2009).

물 농도 규모 등이다. 이 중 가장 중요한 것은 중량농도(C_w) 또는 체적농도(C_v)이고 다음과 같이 정의 된다(Kim, 2012).

$$C_w = \text{토사의 중량/물} + \text{토사의 중량} \quad (e)$$

$$C_v = \text{토사의 부피/물} + \text{토사의 부피} = \frac{C_w \gamma}{\gamma_s - C_w(\gamma_s - \gamma)} \quad (f)$$

여기서, γ 는 물의 단위중량, γ_s 는 토사의 단위 중량을 의미한다.

토석류의 단위중량(γ_m)은 체적농도(C_v)를 이용해 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \quad (g)$$

토석류 혼합물 밀도(ρ_m)는 다음과 같다.

$$\rho_m = \rho + C_v(\rho_s - \rho) = \frac{\gamma_m}{g} \quad (h)$$

여기서, g 는 중력가속도를 의미한다.

결국, 토석류의 물과 총 토사 체적(V)은 물과 부피인자(BF)의 곱에 의해 결정된다. 부피인자는 다음과 같이 정의된다.

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \quad (i)$$

$$V = V_w \times BF = V_w \times \frac{1}{1 - C_v} \quad (j)$$

3. 연구지역 및 데이터베이스 구축

3.1 연구지역

지진으로 유발되는 산사태 위험지 예측 및 인근 문화재에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서울특별시 종로구에 위치한 산지 일대를 연구지역으로 하였다. 서울특별시는 국보, 보

Table 2. Stability Class Definitions

Condition	Class	Predicted State
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately Stable slope zone
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-Stable slope zone
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower Threshold slope zone
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper Threshold slope zone
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone

Fig. 4. Satellite Photos of Study Area and Selected Heritage Location: 1. Honggimun and Tangchundaeseong, 2. Seokpa-jeon, 3. Prince Anpyeong Yi Yong's House, 4. Nusangdong Lee Jung Sub House, 5. Hwanghakjeong, 6. Pirundae, 7. Sajikdan, 8. Sukjeongmun(Great North Gate), 9. Gyeongbokgung(Palace), 10. Sunglakwon, 11. Jeongneung, 12. Changdeokgung(Palace), 13. Changgyeonggung(Palace).

물, 무형문화재, 사적문화재 등 약 1,868개의 문화재가 존재한다. 이 중 지진으로 유발되는 산사태로 인한 문화재 피해 영향을 분석하기 위하여 연구지역 부근의 문화재 13개소를 선정하였다(Fig. 4).

3.2 데이터베이스 구축

기본 데이터베이스 구축을 위하여 1:5,000 수치지형도를 이용하여 5 m×5 m 격자(grid)의 DEM을 구축하였다.

앞서 언급한 바와 같이 Newmark model을 이용한 분석에는 연구지역에 대한 여러 가지 데이터가 필요하며, 크게 지진 특성과 관련된 데이터와 사면특성과 관련된 데이터로 나눌 수 있다.

먼저 지진특성과 관련된 데이터에는 지진 규모와 연구지역과 진앙과의 거리 등이 필요하다. 본 연구에서는 지진에 의해 유발되는 산사태가 문화재에 미치는 영향을 분석하기에 앞서, 지진 정보(지진 규모, 연구지역과 진앙과의 거리)에 따른 산사태 발생 양상을 분석하였다. 이를 위하여, 우리나라에서 발

Fig. 5. Earthquake Information.

생한 다양한 지진 정보(2004년 5월 동해상에서 발생한 규모 5.2의 지진, 2005년 10월 서해상에서 발생한 3.4의 지진, 2004년 9월 서울특별시 영등포구에서 발생한 규모 2.5)를 조합하여 분석에 사용하였다(Table 3, Fig. 5).

사면특성과 관련된 데이터에는 사면의 경사각, 사면의 안전율 등이 있다. 본 연구에서는 사면의 안전율을 구하기 위하여 무한사면안정모델의 대표적인 해석기법인 SINMAP을 사용하였고, 투수계수, 강우량, 지하수 함양률, 점착력, 단위중량, 내부 마찰각 등은 여러 문헌과 본 연구지역 관련 지반 보고서를 취합하여 계산하였다. 강우량 및 지하수 함양률에 대한 자료는 기상청 및 서울특별시 자료(2006)를 이용하였다(Table 4).

Table 4. Parameter Used in the SINMAP Analysis

	Mt. A	Mt. B
Hydraulic conductivity (m/hr)	7.748×10^{-4}	2.461×10^{-5}
Soil thickness (m)	2	3.5
Average annual rainfall (mm/year)	1450.5	1944.5
Groundwater recharge (%)	12.80	12.82
Cohesion (tf/m ³)	1.2	1.5
Specific weight of the soil (tf/m ³)	1.9	1.9
Internal friction angle of the soil (degree)	30	31

Table 3. Earthquake Information Used to the Newmark Displacement Model Analysis

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Date	2004. 5. 29	2005. 10. 10	2004. 9. 15
Epicentral location	36.8/130.2 (Latitude/Longitude)	37.9/124.9 (Latitude/Longitude)	37.5/126.9 (Latitude/Longitude)
Epicentral distance	About 300 km	About 180 km	About 8 km
Earthquake magnitude	5.2 (ML)	3.4 (ML)	2.5 (ML)
Influence	Severe damage occurs in poor buildings in a small area.	Humans feel. There is no harm.	Only detected by seismographs.

Fig. 6. Slope Angle.

Table 5. Distribution of Slope angle

Slope (°)	Number of cell	Percentage (%)
0-10	65,456	15.718
10-20	138,107	33.163
20-30	140,918	33.838
30-40	59,246	14.226
40-50	11,325	2.719
50-60	1,299	0.312
60-67	101	0.024
Total	416,452	100.000

연구지역의 사면 경사 범위는 0° ~ 67° , 평균 20.43° 로 나타났다. 또한 10° ~ 30° 의 경사 분포가 전체의 약 67%(면적 $6,975,625 \text{ m}^2$)로 급경사지는 비교적 적게 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6, Table 5).

연구지역 내 사면안정지수는 0~10의 범위로 나타나며, 1.5 이상의 지역이 약 66%(면적 $6,855,200 \text{ m}^2$), 1 이하인 지역은 약 6.857%(면적 $713,900 \text{ m}^2$)로 나타났다(Fig. 7, Table 6).

Fig. 7. Slope Stability Index.

Table 6. Distribution of Slope Stability Index

Stability index	Number of cell	Percentage (%)
0-0.001	28,556	6.857
0.001-1	0	0.000
1-1.25	51,839	12.448
1.25-1.5	61,849	14.851
1.5-10	274,208	65.844
Total	416,452	100.000

4. 연구 결과 분석

4.1 지진정보에 따른 산사태 발생 예측 결과 변화

Newmark model 분석에 적용되는 지진 정보(지진규모, 연구지역과 진앙과의 거리)에 따른 영향을 분석하였다. 분석에 사용되는 사면정보와 비교되는 지진정보를 제외한 나머지 지진정보는 2005년 10월 연구지역으로부터 약 180 km 거리 서해상에서 발생한 규모 3.4ML(Table 3-CASE 2)의 지진 조건으로 동일하게 설정하였다.

지진규모에 따른 산사태 위험지 변화 분석 결과, 세 가지 경우(2.5ML, 3.4ML, 5.2ML) 모두 사면의 변위가 발생되지 않는 지역이 각각 약 88.799%, 약 86.823%, 약 81.943%로 나타났다. 지진의 규모가 2.5ML에서 5.2ML로 커질수록 사면의 변위 발생 지역은 약 11.201%에서 약 18.057%로 증가하였다. 그 중 산사태 발생에 영향을 미치는 100 mm 이상의 변위가 발생하는 지역은 약 3.179%(면적 $331,000 \text{ m}^2$)에서 약

Table 7. Slope Displacement According to the Earthquake Magnitude

Magnitude	Displacement (mm)	Number of cell	Percentage (%)
2.5 ML	D=0	369,806	88.799
	$0 < D \leq 25$	32,381	7.775
	$25 < D \leq 50$	548	0.132
	$50 < D \leq 100$	477	0.115
	$D > 100$	13,240	3.179
3.4 ML	D=0	361,577	86.823
	$0 < D \leq 25$	38,198	9.172
	$25 < D \leq 50$	564	0.135
	$50 < D \leq 100$	570	0.137
	$D > 100$	15,543	3.732
5.2 ML	D=0	341,255	81.943
	$0 < D \leq 25$	53,630	12.878
	$25 < D \leq 50$	564	0.135
	$50 < D \leq 100$	568	0.136
	$D > 100$	20,435	4.907

Fig. 8. Comparison of Landslide Risk Area according to Earthquake Magnitude.

4.907%(면적 510,875 m²)로 증가하는 것으로 분석되었다 (Table 7, Fig. 8).

진앙거리에 따른 산사태 위험지 변화 분석 결과, 세 가지 경우(8 km, 180 km, 300 km) 모두 진앙거리가 8 km에서 300 km로 멀어질수록 사면의 변위 발생 지역은 약 32.628%에서 11.118%로 감소하였다. 이 중 산사태 발생에 영향을 미치는 100 mm 이상의 변위가 발생하는 지역은 약 6.533%(면적 680,150 m²)에서 약 3.158%(면적 328,775 m²)로 감소되었다 (Table 8, Fig. 9).

하지만 모든 분석에서 25~100 mm의 변위가 나타나는 지역은 지진 규모나 진앙거리에 따른 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 이는 Newmark model 분석에 사용

Table 8. Slope Displacement According to the Epicentral Distance

Distance	Displacement (mm)	Number of cell	Percentage (%)
8 km	D=0	280,570	67.372
	0<D≤25	108,457	26.043
	25<D≤50	97	0.023
	50<D≤100	122	0.029
	D>100	27,206	6.533
180 km	D=0	359,958	86.434
	0<D≤25	38,198	9.172
	25<D≤50	564	0.135
	50<D≤100	3,801	0.913
	D>100	13,931	3.345
300 km	D=0	370,150	88.882
	0<D≤25	32,150	7.720
	25<D≤50	515	0.124
	50<D≤100	486	0.117
	D>100	13,151	3.158

Fig. 9. Comparison of Landslide Risk Area according to Epicentral Distance

된 SINMAP 분석의 사면 안정지수 결과 중 0.001~1의 값을 나타내는 지역이 없었기 때문에 판단된다.

4.2 문화재 피해 영향 분석

4.2.1 지진시 산사태 위험도 분석

Newmark model을 이용하여 연구 지역의 지진으로 유발되는 산사태 발생을 예측하기 위하여, 우리나라에서 발생한 최대 지진 규모와 연구지역에서 가장 근접한 지역에서 발생한 지진의 위치 정보의 조합을 통해 가상 시나리오(지진 규모 5.2ML, 진앙 거리 8km)를 구축하였다(Table 9).

Newmark model 분석 결과, 지진 발생 시 사면의 변위가 나타나는 지역은 약 38.845%로 나타났으며 이 중 산사태 발생에 영향을 미치는 100 mm 이상의 변위가 나타나는 지역은 약 6.677%(면적 695,200 m²)로 나타났다(Fig. 10, Table 10).

시나리오를 이용하여 지진으로 유발되는 산사태 발생을 분석해본 결과, 사면의 변위가 100 mm 이상 나타나는 지방에는 선정된 문화재가 위치하지 않아 산사태 발생으로 인한 직접적인 피해는 없는 것으로 나타났다(Fig. 11). 그러나 홍지문 및 당춘대성, 황학정, 필운대, 사직단 등의 문화재가 위치한 지역이 지진으로 인한 산사태 발생 위험지에 인접해 있고, 산사태 발생에는 영향을 미치지 않지만 지진시 나타나는 변위가 노후된 문화재에 영향을 미칠 수 있어 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다(Fig. 10).

본 연구에서는 Newmark model 분석의 중요 인자 중에 하나인 안전율을 SINMAP을 통해 산정하였다. 그 결과,

Table 9. Earthquake Information Used to the Analysis of the Effect on Heritage

Epicenter location	Latitude : 37.5 Longitude : 126.9
Epicenter distance	About 8 km
Earthquake magnitude	5.2 ML

Fig. 10. Displacement of Slope by Earthquakes Using the Newmark Displacement Model: 1. Honggimun and Tangchundaeseong, 2. Seokpajeon, 3. Prince Anpyeong Yi Yong's House, 4. Nusangdong Lee Jung Sub House, 5. Hwanghakjeong, 6. Pirundae, 7. Sajikdan, 8. Sukjeongmun(Great North Gate), 9. Gyeongbokgung(Palace), 10. Sunglakwon, 11. Jeongneung, 12. Changdeokgung(Palace), 13. Changgyeonggung(Palace).

Table 10. Analysis of Slope Displacement by Earthquakes Using Newmark Model

Displacement(mm)	Number of cell	Percentage (%)
D=0	254,680	61.155
0<D≤25	133,836	32.137
25<D≤50	61	0.015
50<D≤100	67	0.016
D>100	27,808	6.677

SINMAP 분석에서 산사태 위험지(SI<0.5)는 약 6.857%(면적 713,900 m²), Newmark model 분석에서 지진시 산사태 위험지(Displacement>100 mm)는 약 6.677%(면적 695,200 m²)로 최종적으로 Newmark model 분석 결과 중 100 mm 이상의 변위가 발생하는 지역을 분류하는 과정에서 SINMAP 분석의 기준 안전율 미달 구간과 유사한 결과가 나타났다. 이는 Newmark model과 SINMAP 분석의 연동 해석에 의한 것으로, 다음 Fig. 12는 SINMAP 분석의 산사태 발생 위험지와 Newmark model 분석의 지진시 산사태 위험지를 중첩하여 나타낸 것으로 일부분만 확대하여 나타내었다.

Fig. 11. Distribution of Landslide Risk Area of Heritage Located in Mountain by the Earthquake (Red part : Landslide risk area): 1. Honggimun and Tangchundaeseong, 2. Seokpajeon, 3. Prince Anpyeong Yi Yong's House, 4. Nusangdong Lee Jung Sub House, 5. Hwanghakjeong, 6. Pirundae, 7. Sajikdan, 8. Sukjeongmun(Great North Gate), 10. Sunglakwon, 11. Jeongneung.

Fig. 12. Overlapping of Landslide Risk Area to be Analysed by Using the SINMAP and Newmark Model.

4.2.2 토석류 영향 범위 분석

앞서 분석된 Newmark model 분석 결과를 토대로 현장 조사를 실시한 결과, 실제 사면 풍화로 인하여 토석류 발생 가능성이 존재하고, 산지 하부에 문화재가 존재하고 있는 지점 세 곳을 선정하여 토석류 이동 경로 예측을 통한 인근 문화재의 영향을 분석해 보았으며, 적용된 매개변수는 Table 11과 같다.

Table 11. Flo-2D Analysis Parameter Estimation

Inflow Cell size	10×10
Total inflow (m ³ /h)	2.16
Maximum inflow (m ³ /h)	7.0
Inflow cell (ea)	3
Simulation time	0.5h (30min)
K(resistance parameter for laminar flow)	0
Sediment concentration	60 %
Yield stress	Coefficient : 0.0383 Exponent : 19.6
Viscosity stress	Coefficient : 0.000495 Exponent : 27.1

여기서, 사용되는 유출량(Inflow)은 1889년 Emil Kuiching 이 제안한 합리식을 이용하여 산정하였으며(Urban flood disaster management research center, 2008), K는 층류흐름에 대한 저항매개변수로, '0'을 입력하여 FLO-2D 프로그램 자체 함수에 의해 자동적으로 계산되도록 하였다. 또한, 토석류는 전체 체적의 50% 이상을 함유할 경우 토석류로 분류하므로

Fig. 13. Prediction of Debris Flows Path (Flow Sequence : 1→2→3→4): 1. Nusangdong Lee Jung Sub House, 2. Hwanghakjeong, 3. Pirundae, 4. Sajikdan.

(Takahashi, 2007, Pierson and Costa, 1987) 유사 농도 (Sediment concentration)는 60%로 설정하였으며, 항복 및 점성 응력(Yield stress, Viscosity stress)은 유사 농도 및 경험 계수에 따라 다양한 값을 가지며, O'Brien and Julien(1998)의 연구 결과에 따라 현장과 가장 유사한 조건의 계수를 적용하였다(Kim, 2013).

연구 결과, 사직단이 토석류 이동경로 상에 위치하는 것으로 나타났다(Fig. 13). 이러한 위험지역에 대해서는 심층적인 정밀분석을 통해 문화재 보호를 위한 안전 대책을 강구하여야 할 것이다.

5. 결 론

Newmark model을 이용한 지진으로 유발되는 산사태 발생 예측 연구는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Newmark model을 이용한 사면의 변위량 및 산사태 위험지 예측은 지진규모가 클수록, 진앙과의 거리가 가까울수록 변위 발생 면적이 크게 나타났다.
- 2) 시나리오(지진규모 5.2ML, 진앙거리 8 km)를 통해 지진으로 유발되는 산사태 위험지(Displacement>100 mm)를 예측해본 결과, 전체 지역의 6.677%(면적 695,200 m²)로 나타났다.
- 3) SINMAP을 이용하여 분석된 산사태 발생 위험지(SI<0.5)와 Newmark model을 이용하여 분석된 지진시 산사태 위험지(Displacement>100 mm)는 각각 약 6.857%(면적 713,900 m²), 약 6.677%(면적 695,200 m²)로 유사성을 확인할 수 있었다.
- 4) 본 연구에서 선정된 문화재가 위치한 지반은 지진으로 인한 산사태 발생 위험이 없는 것으로 분석되었으나, 문화재 인근에 산사태 위험지가 다수 분포하며, 지진시 나타나는 변위가 노후된 문화재에 영향을 미칠 수 있어 추가적인 연구가 필요할 것이다.
- 5) 산사태 발생으로 유발되는 토석류의 이동 경로를 예측해본 결과, 토석류 이동 경로 상에 사직단이 위치해 있는 것으로 나타나 보다 심층적인 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 문화유산융복합연구 「주요 지역별 건축문화재 지진 및 홍수 재해 위험도 평가를 위한 기초 연구」의 일부 과정으로 국립문화재연구소 연구지원으로 수행하였다.

References

Cho, S.W., Chung, E.S., and Kim, M.M (2003) Estimation of

slope movement by earthquake loading in the region of moderate seismicity, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, pp. 259-264.

Choi, W.I., Jeon, S.K., Kim, D.M., and Choi, E.H (2013) Prediction of Heritage Damage Impact Due to Landslides Caused by Earthquake, KOSHAM, pp. 274.

Choi, W.I., Kim, D.H., and Jeon, S.K (2012) Forecasting technique of landslide risk zone by SINMAP analysis, KOSHAM, pp. 228.

Choi, W.I., Kim, D.H., Jeon, S.K., and Jeong, N.H (2012) Prediction flow hazard zone in development area by infinity slope modeling, KGS Spring National Conference 2012.

Duncan, J.M. and Wright, S.G. (2005) Soil strength and slope atability, John Wiley and Sons.

Evans, S.G., Guthrie, N.J., Roberts, N.J., and Bishop N.F. (2007) The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines : a catastrophic landslide in tropical mountain terrain, *Natural hazards and earth system science*, Vol. 7, pp. 89-101.

FLO-2D software INC (2009), FLO-2D reference manual.

Jeon, S.K., Choi, W.I., Kim, D.H., Kim, D.M., and Choi, E.H (2012) Study of landslide hazard area prediction methods nearby heritage caused by a small-scale earthquake, GSKO-REA, pp. 168.

Jibson, R.W. (1993) Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis, *Transportation Research Record*, No. 1411, pp.9-17.

Jibson, R.W. and Keefer, D.K. (1993) Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the new madrid seismic zone, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 105, No. 4, pp. 521-536

Jibson, R.W., Harp E.L., and Michael, M.A. (2000) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps, *US Geological Survey*, pp. 271-283.

Keefer, D.K. and Wilson, R.C (1989) Predicting earthquake induced landslides with emphasis on arid and semi-arid environments, in Sadler, P. M., and Morton, D. M., eds., *Landslides in a semi-arid environment*, Inland Geological Society of Southern California, Vol. 2, pp. 118-149.

Kim, J.S (2011) Assesment of landslide hazard induced by earthquake and groundwater level variation, Sejong university.

Kim, P.K. (2012) Numerical modeling for the detection and movement of debris flow using detailed soil maps and GIS, Kyungpook national university.

Kim, S.E., Paik, J.C., and Kim, K.S. (2013) Run-out Modeling of Debris Flows in Mt. Umyeon using FLO-2D, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974.

Makdishi, F.I. and Seed, H.B. (1987) Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE. Vol. 104, pp. 849-867.

Newmark N.M. (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments, *Gootechnique*, Vol. 15, pp. 139-160.

O'Brien, J.S. and Julien, P.Y (1998) Laboratory analysis of Mud-flow properties, *Journal of Hydraulics Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887.

Pierson, T.C. and Costa, J.E (1987) A rheologic classification of

- subaerial sediment- water flows, in Debris Flows/Avalanches : Process, Recognition, and Mitigation, Rev. Eng. Geol., Vol. 7, edited by J. E. Costa and G. F. Wieczorek, Geol. Soc. of Am. Boulder, Colo, pp. 1-2.
- Refice, A. and Capolongo, D (2002) Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment, Computers and Geosciences, Vol. 28, pp. 735-740.
- Robert, T.P., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., and Prasad, A (2006) SINMAP2 User's Manual.
- Seoul metropolitan government (2006) Seoul metropolitan government groundwater plan.
- Song, Y.S., Kim, K.S., Jo, Y.C., and Lee, C.O (2007) Prediction of landslide to natural terrain around Paek Jang Am of Sil Sang Sa, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 2007, pp. 110-114.
- Takahashi, T (2007) Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures, Taylor&Francis group, London, UK.
- Urban flood disaster management research center (2008) A Urban Catchment Flood Estimation Handbook.
- Wang, H., Wang, G., Wang, F., Sassa, K., and Chen Y (2008) Probabilistic modeling of seismically triggered landslides using Monte Carlo simulations, Landslides, Vol. 5, pp. 387-395.
- Wieczorek, G.E., Wilson, R.C., and Harp, E.L. (1985) Map showing slope stability during earthquakes of San Mateo country, Miscellaneous investigations series(U. S. Geological survey).
- Wilson, R.C. and Keefer, D.K. (1985) Predicting areal limits of earthquake induced landsliding. In : Ziony JI(ED), Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region - An Earth-science Prespective. U.S. Geological survey Paper 1360, pp. 317-346.
- Korea Meteorological Administration, KMA, <http://www.kma.go.kr/>

Received	June 25, 2013
Revised	June 26, 2013
Accepted	January 24, 2014