

## 지하수위 변화에 따른 지진 유발 산사태의 취약성 분석

김지석<sup>1,2</sup> · 박혁진<sup>2\*</sup> · 이정현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국전력기술주식회사, <sup>2</sup>세종대학교 지구정보공학과

## Assessment of Earthquake Induced Landslide Susceptibility with Variation of Groundwater Level

Ji Seok Kim<sup>1,2</sup>, Hyuck Jin Park<sup>2\*</sup> and Jung Hyun Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KEPCO E & C

<sup>2</sup>Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

Since the frequency of the earthquake occurrence in Korean peninsular is continuously increasing, the possibility that massive landslides are triggered by earthquake is also growing in Korea. Previously, the landslide is known to be induced by large magnitude earthquake, whose magnitude is larger than 6.0. However, the landslide can be induced by only small magnitude earthquake, especially in the fully saturated soil. Therefore, the susceptibility of landslide caused by small magnitude earthquake in fully saturated soil is analyzed in this study. For that, the topographical and geological characteristics of the site were obtained and managed by GIS software. In the procedure of the study, slope angle, cohesion, friction angle, unit weight of soil were obtained and constructed as a spatial database layer. Combining these data sets in a dynamic model based on Newmark's displacement analysis, the landslide displacements were estimated in each grid cell. In order to check out the possibility of the earthquake induced landslides, the level of the groundwater table is varied from dry to 80% saturated soil. In addition, in order to analyze the effect of the magnitude of earthquake and distance to epicenter, four different earthquakes epicenters were considered in the study area.

**Key words :** Newmark model, GIS, Landslides, Probability of landslides, critical acceleration

최근 들어 우리나라에서도 지진의 발생빈도가 증가함에 따라 지진관련 재해에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 지진의 발생빈도가 증가함에 따라 지진에 의해 유발되는 산사태의 발생 가능성에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 최근 필리핀 레이테섬 산사태의 경우처럼 집중강우에 의해 포화된 사면에서는 소규모의 지진에 의해서도 대규모의 산사태가 유발될 수 있다는 사실이 밝혀짐에 따라 소규모 지진의 발생빈도가 증가하고 있는 우리나라에서도 지진에 의한 산사태의 발생 가능성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강우에 의해 지하수위가 상승하여 포화된 지반 조건에서 소규모 지진에 의해 유발될 수 있는 산사태의 가능성에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 이를 위하여 국내의 지질 및 지형특성을 고려할 수 있는 Newmark displacement model을 해석모델로 선정하고 GIS 분석기법을 활용하여 연구대상지역에 대한 산사태 취약성 분석을 실시하였다. 연구 수행을 위하여 수치지형도와 지질도 등을 이용, 사면의 기하학적 특성과 지질공학적 특성에 대해 커버리지 형태인 10 m × 10 m 크기 격자(grid) 형태의 주제도를 작성하였으며 이를 지진특성에 의해 결정되는 Arias intensity와 임계가속도와 결합하여 Newmark 변위를 계산하였다. 본 연구에서는 특히 2007년 1월 연구지역 주변에서 발생한 규모 4.8의 지진에 대하여 지진에 의해 유발되는 산사태의 취약성을 분석하였으며 지반의 포화도가 취약성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지하수위를 변동시켜가며 분석을 수행하였다. 또한 지진의 규모와 진앙까지의 거리가 산사태의 취약성 해석결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3.0 - 4.0 규모의 지진이 연구지역 내의 다양한 위치에서 발생하는 것을 가정하였으며 집중강우에 의해 지반에 포화된 상황을 고려하기 위해 지하수위를 변동시켜가며 산사태의 취약성을 분석하였다.

**주요어 :** 지리정보시스템, Newmark model, 산사태, 산사태 발생 확률, 임계가속도

\*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

## 1. 서 론

산사태를 유발하는 요인으로는 집중강우, 지진, 해빙, 화산폭발 등과 같은 다양한 원인들이 알려져 있으나 그 중 가장 주요한 원인으로는 집중강우와 지진이 고려되고 있다. 우리나라와 같이 짧은 기간 동안 많은 양의 강우가 집중되는 기후 특성을 보이는 지역에서는 주로 집중강우에 의해 산사태가 유발되나 미국 서부 지역이나 이탈리아와 같이 지진이 많이 발생하는 지역에서는 지진도 역시 산사태를 유발하는 주요 요인으로 보고되고 있다. 특히 지진 발생시 지진 자체에 의한 피해규모보다도 지진에 의해 유발되는 산사태에 의한 피해규모가 더 큰 것으로 알려져 있다.

Keefe(1984)의 연구에 의하면 진앙까지의 거리와 지진의 규모가 산사태 발생에 주로 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 따라서 지진에 의해 유발되는 산사태의 경우 주로 규모 6.0 이상을 갖는 대규모의 지진에 의해 산사태가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 2006년 필리핀 레이테(Leyte) 남부 지역에서는 사람이 거의 인지할 수 없는 규모 2.6의 지진에 의해 약 1천여 명의 사망 및 실종자가 발생하는 대규모의 산사태가 발생했다. 이 산사태는 집중강우에 의해 포화된 지반에 소규모의 지진이 발생하여 산사태를 유발한 것으로 이 산사태로 인해 집중강우와 동시에 발생하는 소규모의 지진으로 인해 대규모의 산사태가 발생할 수 있는 가능성이 존재하고 있다고 할 수 있다.

최근 수년간 우리나라의 지진 기록에 의하면 1990년대에 비해 2000년 이후 지진의 발생 빈도가 약 2배 가까이 증가한 것으로 나타났다. 지진발생 횟수의 증가는 지진탐지 기술과 장비의 발달, 소규모 지진의 탐지능력 상승, 측정개소 증가 등의 영향으로 인한 것이라고도 할 수 있으나 규모 3.0 이상의 지진 역시 꾸준한 증가 추세에 있음을 볼 때 전반적인 지진의 발생빈도가 증가추세에 있다고 할 수 있다. 따라서 필리핀 레이테섬의 산사태와 같이 우리나라에서도 집중호우에 의해 포화된 지반에서 발생한 소규모의 지진에 의해 대규모의 산사태가 발생할 가능성이 제기되고 있다.

국내의 산사태 연구는 주로 집중강우로 인해 발생하는 산사태의 예측 및 취약성 분석 연구가 주로 진행되어 왔으며(Kim *et al.*, 2000; Lee and Min, 2000; Ryu *et al.*, 2002; Chae *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2005; Song and Hong, 2007; Kim and Chae, 2009; Oh, 2010) 지진에 의해 유발되는 산사태의 발

생 가능성에 대한 연구는 거의 수행된 바 없다. 이것은 우리나라가 지진에 대해 비교적 안정한 지반으로 알려져 있고 또 피해를 줄만한 규모의 지진이 거의 발생하지 않았기 때문으로 보인다. 반면 국외의 경우 집중강우에 의해 유발되는 산사태에 대하여서는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 왔으며 지진에 의해 유발된 산사태와 관련된 연구는 1990년대 들어 주로 지진 발생이 빈번한 지역을 중심으로 수행되었다(Tibaldi *et al.*, 1995; Murphy, 1995; Julian and Anthony, 1996; Castadini *et al.*, 1998; Rodriguez *et al.*, 1999). 특히 2000년대에 들어서면서 지진에 의해 유발되는 산사태를 대상으로 GIS를 활용한 취약성도 작성 및 예측 기법과 관련된 연구가 수행되고 있다. 그러나 이러한 연구들은 주로 규모 6.0 이상의 대규모 지진에 의한 산사태를 중심으로, 지반의 지하수위 상승여부는 고려되지 않은 건조한 조건에서의 분석이 주를 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 강우에 의해 지반이 포화되고 지하수위가 상승한 조건에서 소규모의 지진에 의해 유발될 수 있는 산사태의 위험성을 예측하고자 하였다. 특히 이를 국내의 지반조건에 적용하여 강우로 인해 포화된 지반에서 발생한 소규모의 지진이 산사태 발생에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 2007년 1월 연구지역 주변에서 발생한 규모 4.8의 지진과 국내의 지진발생 특성을 고려하여 규모 3.0-4.0 사이의 지진에 대해 다양한 지하수위 조건에서 유발될 수 있는 산사태 가능성에 대해 분석을 수행하였다.

## 2. Newmark Displacement Model

지진에 의해 유발되는 산사태의 예측 및 취약성도 작성과 관련된 연구는 주로 통계적인 접근 방식과 지질공학 모델에 의한 접근 방식으로 분류될 수 있다. 통계적인 접근 방식은 지진에 의해 발생된 산사태에 대해 현장 조사 및 관련 자료 수집을 통해 산사태의 지질학적 및 지형학적 특성과 산사태 발생 사이의 상관성을 통계적으로 분석하는 기법이다. 이 기법에서는 산사태의 규모와 빈도와와 상관분석이나 경사, 지질학적 요인, 식생, 사면방향 등과 같은 다양한 요인과 산사태의 발생 빈도를 통계적으로 분석하여 지진에 의해 발생한 산사태와의 상관관계를 분석하였다(Keefe, 2000; Khanzai and Sitar, 2000; Parise and Jibson, 2000; Lin and Tung, 2003; Malamud *et al.*, 2004; Havenith *et al.*, 2006). 그러나 통계적 접근방식은 지

진에 의해 산사태가 발생한 사례가 없는 경우 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

지질공학 모델에 의한 분석기법은 지진에 의해 발생되는 산사태에 대한 지질공학적 또는 process based model을 설정하고 이 모델에 의하여 일정 규모의 지진이 발생할 때 산사태가 발생할 지역을 예측하는 것이다. 지진에 의한 산사태 발생 예측에 있어서 일반적으로 사용되는 모델은 Pseudo static method와 Newmark displacement model 분석법이 있다. Pseudo static method는 지진에 의한 사면의 안전성을 분석하는데 전통적으로 사용되어 왔으며(Seed, 1967; Hadj-Gamou and Kavazanjian, 1985), 이를 이용한 산사태 위험도 분석이 시도되어 왔다(Van Westen, 1993). 그러나 Pseudo static model은 복잡한 지진의 거동을 지진계 수라는 단순한 파라미터를 사용하여 구현한다는 점과 지진계수의 결정에 대한 명확한 기준이 없다는 점이 가장 큰 단점으로 지적되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 dynamic displacement analysis인 Newmark displacement model이 제안되었으며 이를 이용한 산사태 위험도 분석이 다수 수행되었다(Wilson and Keefer, 1983; Wiczorek *et al.*, 1985; Jibson and Keefer, 1993; Jibson *et al.*, 2000; Refice and Capolongo, 2002; Wang, 2008). Newmark model을 구성하는 인자들은 Pseudo static method에 비해 지질 조사와 지진 관측을 통해 축적된 자료 분석을 통해 비교적 명확하게 결정될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 분석 결과의 신뢰성과 정확성이 검증된 Newmark model을 사용하여 지진의 영향에 따른 산사태 위험도 분석을 수행하였다.

Newmark model을 이용한 해석방법은 강체블록(rigid sliding block) 거동을 기초로 하는 변형해석 기법으로 활동면 상부의 활동토크를 강체블록으로 모델링하고 지진에 의해 블록이 받게 되는 가속도가 임계 가속도(critical acceleration)를 초과하는 경우, 활동면을 따라 미끄러짐이 발생하는 것으로 가정한다. Newmark model은 지진에 의해 획득된 가속도 기록 및 항복가속도를 이용하여 변위를 계산하며, 이때 상향 거동은 무시하게 되고 모든 변위는 한 방향 거동으로만 가정한다(Duncan and Wright, 2005).

Newmak model을 이용하여 변위를 예측하기 위해서는 임계가속도(critical acceleration,  $A_c$ )가 우선적으로 결정되어야 하는 데 이 값은 무한사면모델과 같은 한계평형해석을 통해 획득된 안전율( $F_s$ )과 식 (1)을 이용하여 획득한다.

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

여기서  $g$ 는 중력 가속도이고  $\alpha$ 는 사면위 블록의 thrust angle으로 사면의 경사와 상응한다고 볼 수 있다. 또한 Newmark displacement 계산에 사용되는 Arias intensity( $I_a$ )는 지진의 규모와 진앙 등 지진과 관련된 정보를 단순화시켜 포함하게 된다. Arias intensity는 지진계 등을 통해 얻어진 정확한 지진 기록을 토대로 획득되며 여러 연구를 통해 지진으로 발생된 산사태와 상관성이 있음이 밝혀졌다(Harp and Wilson, 1995). 특히 일반적으로 사면에서 변위를 발생시키는 힘을 산정하기 위해 사용되는 파라미터인 peak ground acceleration보다 더 정량적인 방법으로 알려져 있다. Wilson and Keefer(1985)이 제안한  $I_a$ 의 경험식은 식 (2)와 같다.

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

이때  $M_w$ 는 지진의 모멘트 규모,  $R$ 은 진앙과의 거리를 나타낸다.

이렇게 산정된 임계가속도( $A_c$ )와 Arias intensity( $I_a$ )를 Wilson and Keefer(1985)가 제안한 경험식에 적용하여 Newmark displacement( $D_N$ )를 획득한다.

$$\log D_N = 1.46 \log I_a - 6.642A_c + 1.546 \quad (3)$$

Newmark model의 신뢰성과 정확성은 이미 기존 연구들을 통해 검증되었는데 Jibson *et al.*(1998, 2000)은 Newmark model을 이용하여 예상되는 산사태의 변위량을 분석하였으며 특히 모델로부터 획득한 자료를 1994년 Northridge 지진에 의해 유발된 산사태 자료와 비교를 수행하였다. Refice and Capolongo(2002)는 Newmark model을 활용하여 1980년 지진에 의해 다수의 산사태가 발생한 이탈리아의 Sele valley 지역에 대한 분석을 수행하여 실제 산사태가 발생한 지역과 예측모델사이에 상관성이 있음을 밝혀냈다. Miles and Ho(1999)는 Newmark의 모델과 stochastic ground motion을 이용한 산사태 예측기법을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 주로 규모 6.0이상의 지진에 의해 유발된 산사태를 중심으로 분석이 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 소규모 지진이 발생하였을 경우 강우에 의해 포화된 지반조건에서 산사태가 발생할 가능성에 대하여 분석을 수행하였다. 이를 위하여 안전율을 계산하는 과정에서 지반이 포화되는 상황을 고려하여 지하수위를 상승시켜가며 분석을 수행하였으며 소규모의 지진이 발생한 것으로 가정하여 분석을 수행하였다.

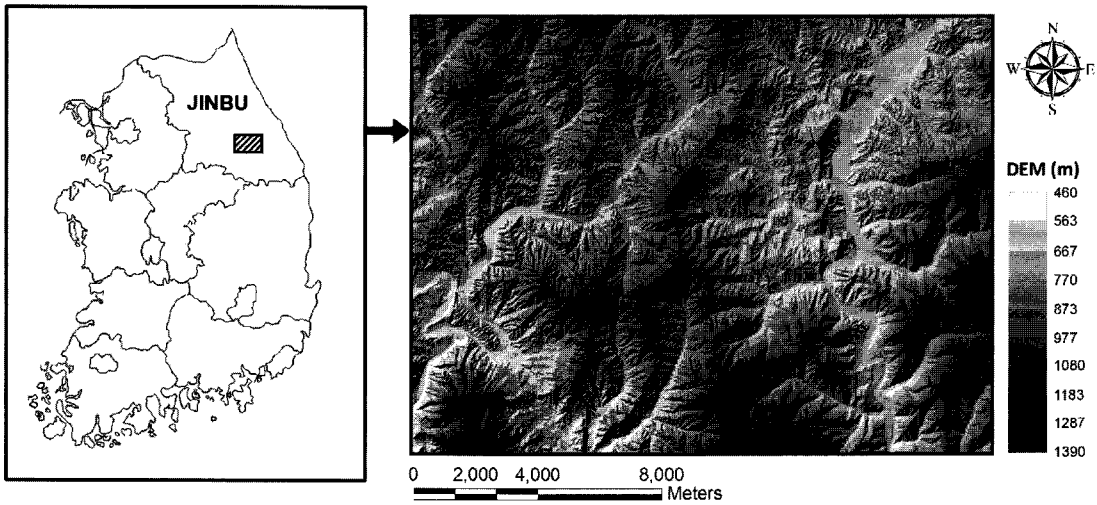


Fig. 1. Location and DEM of the study areas.

### 3. 연구지역

Newmark displacement model을 이용하여 지진으로 유발되는 산사태에 대한 취약성을 분석하기 위하여 강원도 평창군 진부면 일대를 연구 지역으로 선정하였다. 이 지역은 2006년 여름철 집중호우로 인해 약 700회 이상의 산사태가 발생했던 지역으로 산사태에 매우 취약한 지역 중 하나이다. 이 지역은 좌표 상으로 위도  $37^{\circ}36'12.16''N$  경도  $128^{\circ}31'53.81''E$  부근에 위치하고 있으며, 진부면 일대를 중심으로 선캠브리아기의 혼성편마암과 중생대 쥐라기의 대보화강암이 넓게 분포하고 있으며 남쪽에 고생대 평안계 퇴적암이 분포하고 있다. 화강암 분포지역엔 산성 및 중성 암맥이 국지적으로 분포하고 있으며 기복이 낮은 산지와 넓은 충적지가 발달하고 있다. 본 연구에서는 진부면 일대 10 km~15 km 지역에 대해 산사태 취약성 분석을 수행하였다(Fig. 1).

### 4. 공간데이터베이스 구축

Newmark displacement model을 이용한 산사태 취약성 분석에 필요한 연구지역의 정보로는 사면의 기하학적 특성과 구성물질의 지질공학적 특성 그리고 지진 특성 등이 있다. 사면의 기하학적 특성으로는 사면의 경사가 요구되며 구성 물질의 지질공학적 특성으로는 흙의 점착력, 내부 마찰각, 단위 중량, 토심 등이 필요하다. 반면 지진관련 특성은 지진의 규모와 진앙까지의 거리정보 등이 요구된다. 산사태 취약성 분석에 필

요한 자료는 연구 지역에 대한 관련 수치정보 및 특성 정보 자료 등을 기반으로 ARC/INFO 프로그램을 통해 10 m×10 m 크기의 격자(grid) 구조인 커버리지 형태로 공간 데이터베이스화 하였으며 이를 주제로 작성하여 입력자료로 활용하였다.

먼저 연구 지역의 경사 정보는 1:25,000 축척의 수치지형도를 활용, 사면에 대한 해발고도 정보를 추출하여 불규칙삼각망을 생성하였고, 불규칙삼각망으로부터 수치표고모델(DEM, digital elevation model)을 획득하였다(Fig. 1). DEM grid의 크기는 10 m×10 m로 설정하였으며 이를 통해 연구지역의 각 cell에 대한 사면 경사각 정보를 추출하였다(Fig. 2a). DEM으로부터 획득된 연구 지역 내의 경사의 범위는 약  $0^{\circ}$ ~ $81^{\circ}$ 로 평균  $23.5^{\circ}$ 로 나타났다. 흙의 지질공학적 특성인 점착력과 내부 마찰각, 단위 중량 등은 사면의 안전을 계산에 활용되는 무한사면모델의 입력변수로 사용되며 사면의 안정성 분석에 필수적인 자료이다. 이들 자료들은 해당지역에 대한 현장조사로부터 획득되는 것이 원칙이나 본 연구의 경우 연구지역의 범위가 매우 광범위하고 다양한 지질 및 토질이 존재하기 때문에 전체 지역에 대한 현장조사나 실내실험이 불가능한 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 1:25,000 축척의 정밀 토양도로부터 토양의 특성을 공학적인 분류법인 통일분류법(Park *et al.*, 2003; United Soil Classification System, USCS)에 기초하여 분류하고, 분류된 토양구분에 따라 기존 연구문헌을 활용하여 각 토양분류에 해당하는 공학적인 특성인 내부마찰각과 점착력을 획득하였다(Korea Highway Corporation, 2009). 이러한

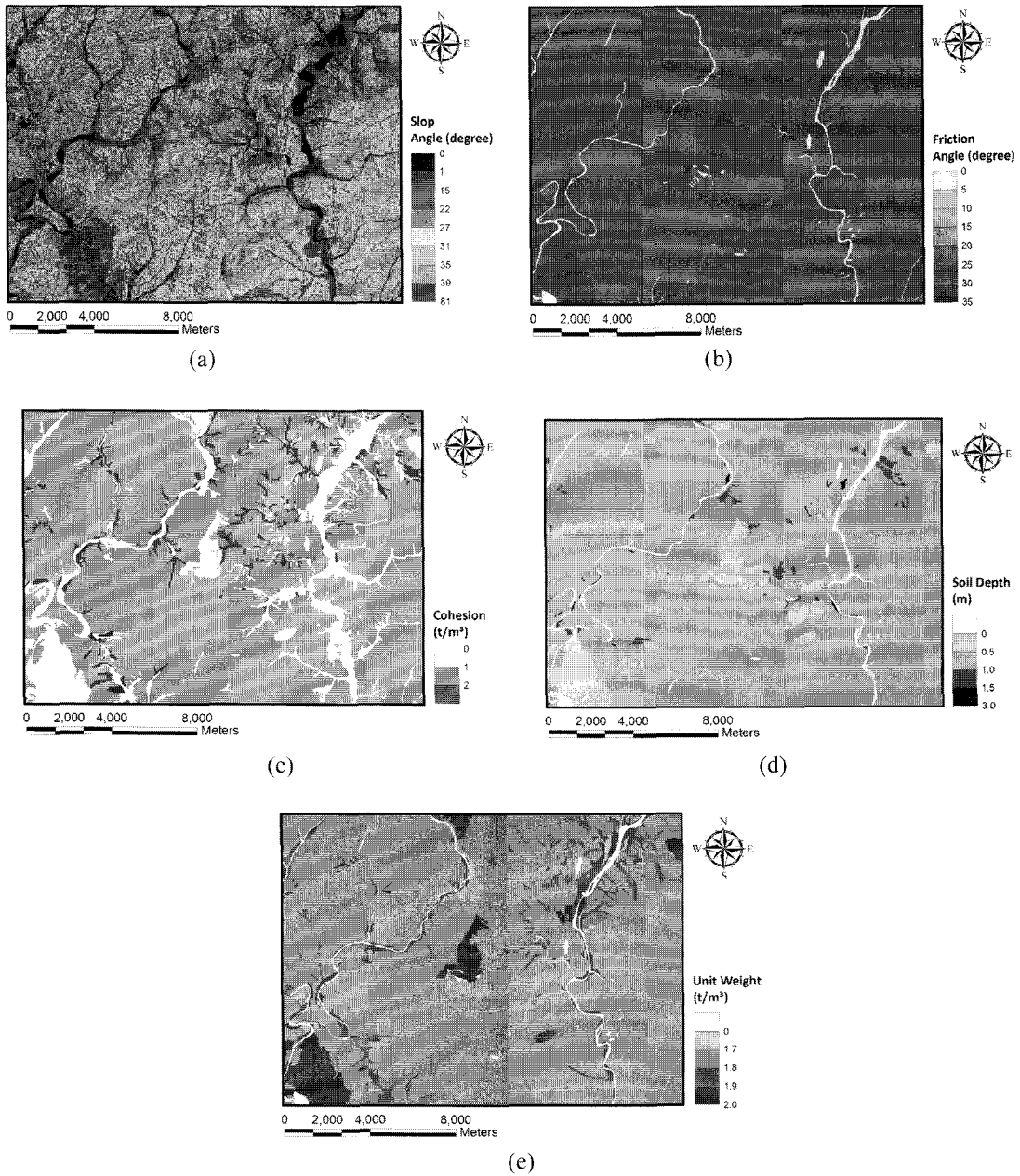


Fig. 2. Various thematic data layers for landslide analysis (a) slope angle, (b) friction angle, (c) cohesion, (d) soil depth and (e) unit weight.

과정을 통해 획득된 이 지역의 내부 마찰각 분포를 주제도로 작성하였다(Fig. 2b). 또한 점착력의 경우 연구 지역의 지반이 가지는 점착력의 분포를 주제도로 작성하였으며(Fig. 2c) 토양종류의 분류에 따른 사면의 토심분포는 그림 Fig. 2d, 흙의 단위 중량분포는 Fig. 2e와 같이 작성하였다.

반면 지진 특성과 관련된 정보의 경우 지진의 규모와 진앙까지의 거리정보가 요구된다. 본 연구에서는 연구지역내의 강원 평창군 도암면-진부면 경계지역에서 2007년 1월 20일 발생한 규모 4.8의 실제 지진기록에 기초하여(Fig. 3의 A지점) 먼저 건기시 산사태의 발생 가능성에 대하여 분석을 수행하였으며 강우에 의해 지

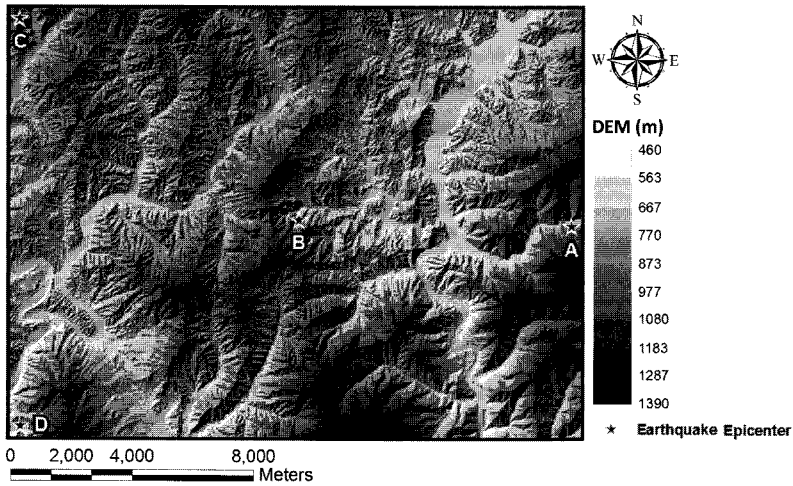


Fig. 3. Locations of earthquake epicenters.

반이 포화되는 상황을 가정하여 지하수위를 증가시켜 가며 사면의 거동을 분석해 보았다. 한편 우리나라에서 발생하는 지진의 경우 규모 3.0 이상의 지진이 발생한 횟수가 1978년 이래로 총 276회에 이르고 있으며, 규모 5.0이상의 지진인 경우도 2000년대 이후 2003년과 2004년에 각각 한차례씩 발생한 점을 감안하여 연구지역내의 다양한 위치에서 소규모의 지진이 발생하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다. 가상 지진은 진앙까지의 거리와 지진 규모에 따른 산사태 발생 가능성의 변화를 분석하기 위하여 연구지역내의 3 곳(중심, 왼쪽 상단, 왼쪽 하단)에서 규모 3.0의 지진과 규모 4.0의 지진이 발생하는 것으로 가정하여 분석을

수행하였다(Fig. 3의 B, C, D지점). 진앙의 위치는 각각 중심으로부터 북서 그리고 남서 방향으로 약 15 km 정도 떨어진 지점으로 설정하였다.

### 5. 연구 분석 및 결과

Newmark model에 의한 지반의 변위량(displacement)은 다음과 같은 과정을 통해 획득한다.

1. 수치표고모델로부터 각 grid cell의 경사도를 획득하고 이를 주제도로 작성한다.
2. 지질도 및 토양도로부터 구성물질의 지질공학적 특성, 즉 내부마찰각과 점착력을 획득하고 각 cell

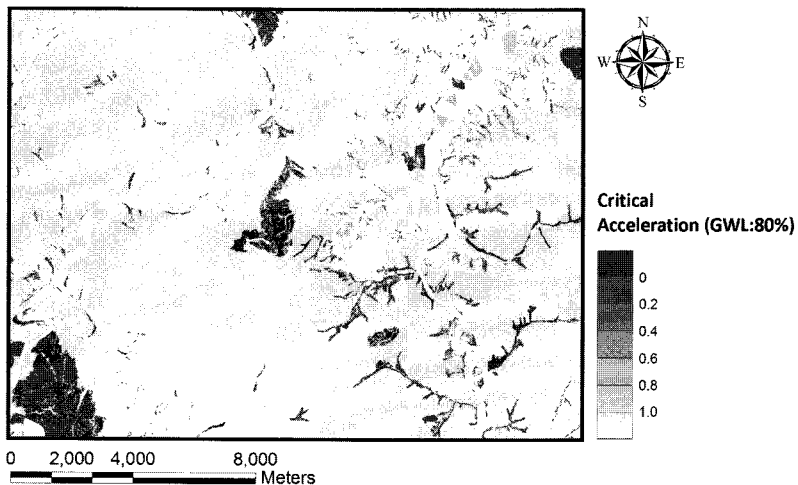


Fig. 4. Critical acceleration distribution evaluated from the epicenter location A and 80% groundwater level.

에 저장하여 내부마찰각 분포도와 점착력 분포도를 작성한다.

3. 각 grid cell의 지질공학적 특성 값과 경사도 값으로부터 각 cell의 안전율을 산정한다. 안전율의 계산을 위해 사용되는 계산식은 식 (4)와 같다. 이때 강우에 의한 지반 내의 포화도를 고려하기 위하여 지하수위(m)을 고려한다.

$$FS = \frac{c}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \frac{m \gamma_w \tan \phi}{\gamma \tan \alpha} \quad (4)$$

c는 점착력,  $\gamma$ 는 지반 구성물질의 단위중량, t는 사면의 두께,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\alpha$ 는 사면의 경사, m은 사면의 토심과 지하수 수위에 대한 높이의 비,  $\gamma_w$ 은 물의 단위중량이다. 특히, 본 연구에서는 집중강우로 인해 지하수위가 증가함에 따라 지진이 유발하는 산사태의 취약성을 분석하기 위하여 사면의 토심과 지하수 수위에 대한 높이의 비를 건조 상태를 의미하는 0%의 경우, 지하수가 붕괴 사면 높이의 50%까지 상승한 경우 및 80%까지 수위가 상승한 경우에 대하여 분석을 수행하였다.

4. 사면의 경사와 앞서 계산한 안전율을 이용하여 각 grid cell의 임계가속도(critical acceleration)를 산정하고(Fig. 4) 발생한 지진의 규모와 진앙까지의 거리를 고려하여 Arias intensity를 획득한다.
5. Arias intensity와 식 (3)을 이용하여 Newmark displacement를 계산하고 이 값의 분포를 주제도로 작성한다. 기존의 연구들(Jibson *et al.*, 1998, 2000)에 따르면 Newmark 변위가 100mm 이상인 경우 산사태의 발생 가능성이 있는 것으로 해석하고 있다.

### 5.1. 과거 지진 기록을 이용한 산사태 발생 가능성 해석

본 연구에서는 먼저 2007년 1월 20일 연구지역 오른쪽 경계 중앙 부분(A 지점)에서 발생한 규모 4.8의 지진에 대한 산사태 발생가능성을 분석하였다. 지반이 건조한 경우의 분석결과인 Fig. 5a를 살펴보면 규모 4.8의 지진에도 연구지역의 사면 변위는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이는 2007년 1월 규모 4.8의 지진이 발생한 후 연구지역에서 지진에 의해 발생한 산사태가 보고되지 않았던 사실과 일치하고 있다. 그러나 강우로 인해 지하수위가 50%로 상승하는 것으로 가정하였을 경우, 연구 지역의 산사태 발생 가능성이 증가하는 것으로 분석되었다(Fig. 5b). Table 1을

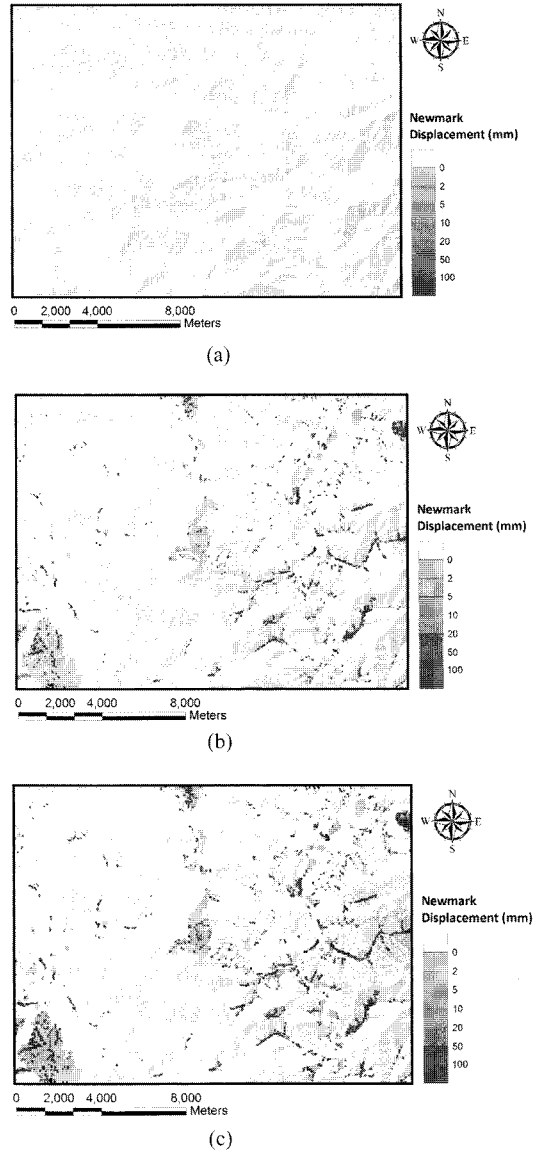


Fig. 5. Map showing predicted Newmark displacement by earthquake of epicenter A at (a) dry condition (b) 50% grounwater level (c) 80% groundwater level.

살펴보면 연구 지역의 92.08%에 해당하는 지역에서는 전혀 지반의 변위가 발생하지 않는 것으로 분석되었으나 전체 면적의 7.72%에 해당하는 면적에서 0-25 mm의 변위가 발생할 것으로 예상되었으며, 0.01%의 지역에서 25-50 mm의 변위가, 약 0.01%의 지역에서 50-100 mm의 변위가 예측되었다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 기존 연구들에 따르면 Newmark model로부터 획득한 100 mm 이하의 변위들은 산사태의 발생에

**Table 1.** Distribution of Newmark displacements from earthquake occurred at epicenter A

Location of epicenter	Magnitude	Displacement (mm)	Level 50%		Level 80%	
			Number of cell	Percentage	Number of cell	Percentage
37.68N 128.59E	4.8	D = 0	2,428,134	92.08%	2,332,493	88.45%
		0 < D ≤ 25	203,587	7.72%	294,039	11.15%
		25 < D ≤ 50	211	0.01%	308	0.01%
		50 < D ≤ 100	251	0.01%	603	0.02%
		D > 100	4,932	0.19%	9,672	0.37%
		SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%

거의 영향이 없는 것으로 보고되고 있다. 반면 실제 산사태 발생에 영향을 미칠 것으로 보고되는 100 mm 이상 구간의 경우 전체 연구지역의 약 0.19%에 해당하는 면적에서 발생할 것으로 분석되었다. 이는 10 × 10 m 사이즈로 구분된 연구지역의 grid cell 중 4,932 cell에서 산사태가 발생할 수 있는 것으로 분석되었음을 의미한다. 지하수위가 80%로 증가하게 되면 Fig. 5c에서와 같이 진앙의 위치에 의한 영향이 뚜렷이 나타나고 있음이 확인되었다. 즉, 진앙을 중심으로 많은 지역에서 산사태의 발생가능성이 있는 것으로 분석

되었다. 특히 100 mm 이상의 변위가 예측된 구간이 0.37%로 증가하여 강우에 의한 지하수위의 증가가 소규모의 지진에 의한 산사태의 발생에서도 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 100 mm 이상의 변위가 발생한 지역의 경우 주로 경사각이 큰 산악지역(평균 경사 약 46.7도)에서 주로 발생하는 것으로 분석되었다.

## 5.2. 임의의 지진을 이용한 산사태 발생 가능성 해석

본 연구에서는 지진의 규모와 지진 발생 위치까지의

**Table 2.** Distribution of Newmark displacements from earthquakes occurred at epicenter B, C and D

Location of epicenter	Magnitude	Displacement (mm)	Level 50%		Level 80%		
			Number of cell	Percentage	Number of cell	Percentage	
B	3	D = 0	2,442,079	92.60%	2,405,559	91.22%	
		D ≤ 100	191,874	7.28%	224,617	8.52%	
		D > 100	3,162	0.12%	6,939	0.26%	
		SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%	
	4	D = 0	2,430,183	92.15%	2,376,068	90.10%	
		D ≤ 100	202,798	7.69%	252,136	9.56%	
		D > 100	4,134	0.16%	8,911	0.34%	
		SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%	
	C	3	D = 0	2,471,455	93.72%	2,436,327	92.39%
			D ≤ 100	163,937	6.21%	196,846	7.46%
			D > 100	1,723	0.07%	3,942	0.15%
			SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%
4		D = 0	2,457,649	93.19%	2,423,080	91.88%	
		D ≤ 100	177,107	6.72%	208,768	7.92%	
		D > 100	2,359	0.09%	5,267	0.20%	
		SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%	
D		3	D = 0	2,467,264	93.56%	2,435,651	92.36%
			D ≤ 100	167,714	6.36%	196,581	7.45%
			D > 100	2,137	0.08%	4,883	0.19%
			SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%
	4	D = 0	2,456,812	93.16%	2,425,468	91.97%	
		D ≤ 100	177,332	6.73%	205,224	7.79%	
		D > 100	2,971	0.11%	6,423	0.24%	
		SUM	2,637,115	100.00%	2,637,115	100.00%	



거리가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3곳의 지점에 대해 각각 규모 3.0의 지진과 규모 4.0의 지진이 발생하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다. 즉, 진앙 위치에 따른 사면 변위의 차이를 비교하기 위해 연구지역의 중앙 지점(B)과 경계의 두 모서리 지역(C, D) 등 총 3곳을 선정하여 분석을 수행하였으며(Fig. 3) 이때 강우에 의한 지반의 포화도가 사면 변위에 미치는 영향을 확인하기 위해 지하수위를 건조한 경우인  $m = 0\%$ 와 지하수위가 상승하여 50%와 80%에

도달한 경우로 나누어 가정하고 분석을 수행하였다. 각 조건별 변위량과 이에 따른 분포는 Table 2와 같다.

진앙의 위치를 연구지역의 중앙(B)으로 가정한 경우 지진의 규모가 3.0이고 수위가 0%인 건조한 경우에는 지반 변위는 거의 발생하지 않아 실질적으로 안정된 상태를 보여준다(Fig. 6a). 그러나 같은 지진조건에서 지하수위가 50%로 상승한 경우 전체 면적의 0.12%에서 100 mm 이상의 변위가 예측되었으며 주로 경사가 급한 연구지역의 산악지형(평균 경사 약 51.8도)에 위

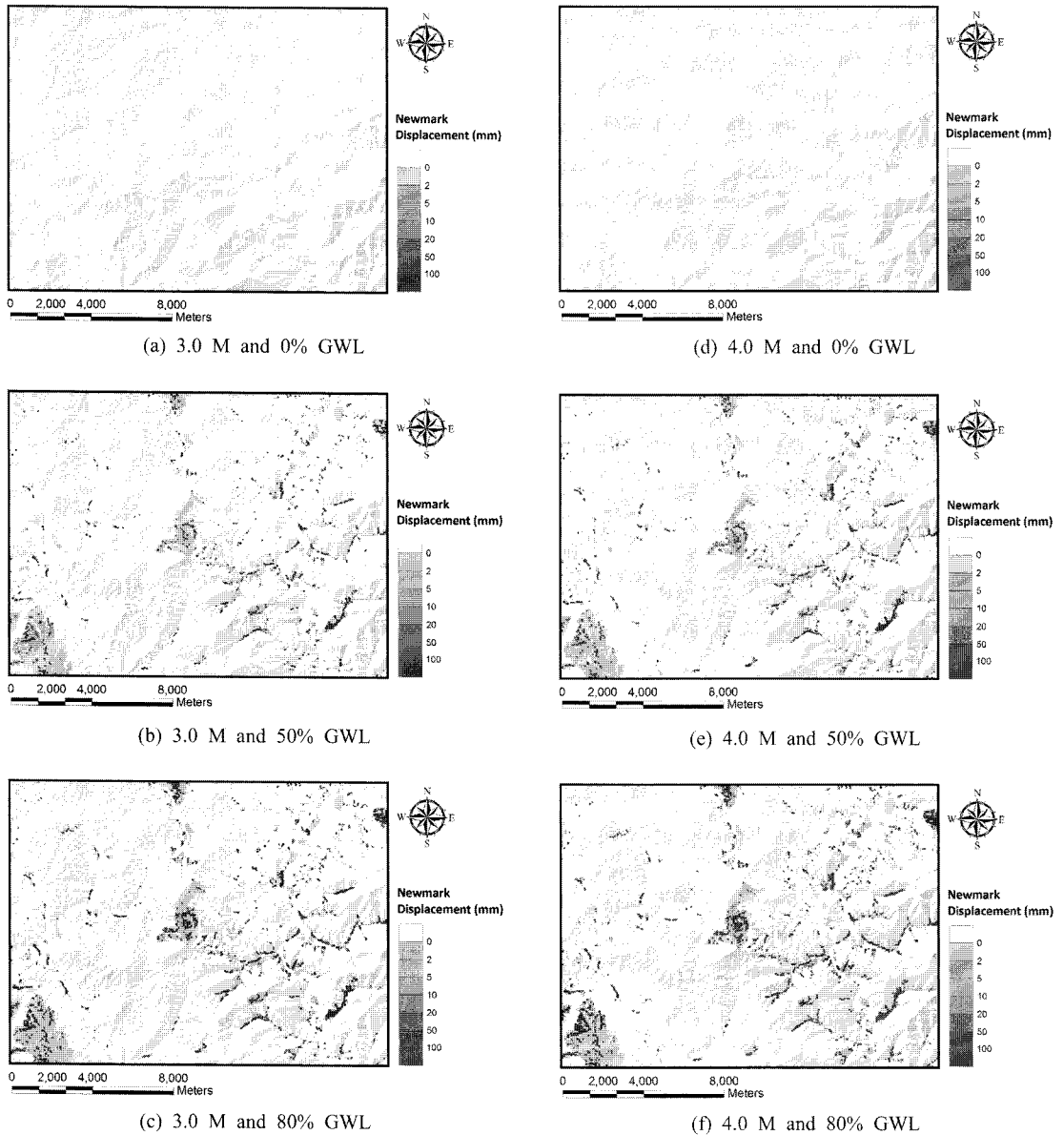


Fig. 6. Map showing predicted Newmark displacement by earthquake of epicenter B.

험지역이 주로 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 6b). 지하수위가 80%로 증가한 경우 지하수위가 50%일 때와 비교해보면 지진의 영향이 좀 더 뚜렷함을 보여주며, 100 mm 이상의 변위가 발생한 지역이 전체 면적의 0.26%로 전체적인 산사태 위험지역이 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 지하수위가 사면의 안정에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다(Fig. 6c). 같은 진앙의 위치 조건에서 지진의 규모를 4.0로 가정했을 경우 건조 시에는 지반 변위가 거의 발생하지 않아 안정한 것으로 나타났다(Fig. 6d). 그러나 지진 규모가 4.0이고 사면의 수위가 50%로 증가하면 산사태가 발생할 수 있을 정도의 변위가 발생할 것으로 예측되는 지역이 0.16%로 증가하는 것으로 분석되었으며(Fig. 6e) 수위가 80%까지 증가한 경우 100 mm 이상의 변위가 예상되는 지역이 0.34%에 해당하는 총 8,911개의 cell에 이르는 것으로 분석되었다(Fig. 6f). 100 mm 이상 변위의 발생위치를 확인해 보면 A지점을 대상으로 분석한 결과와 유사한 위치에서 변위가 발생한 것으로 확인되었으며 특히 진앙이 위치한 연구지역의 중심부에

서 변위가 집중적으로 발생한 것으로 분석되었다.

반면 진앙의 위치가 연구지역의 서북쪽, 즉 왼쪽상단에 존재하는 경우(C)의 분석결과를 살펴보면 Table 2와 Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 연구지역의 중앙에 진앙이 있는 경우에 비해 위험면적이 전반적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 즉 규모 3의 지진이 발생시 50%의 지하수위에서는 0.07%가 위험한 지역으로 분석되었으며 지하수위가 80%로 증가한 경우 위험면적이 0.15%로 분석되었다. 규모 4의 지진을 가정한 경우 50%의 지하수위에서는 0.09%의 지역에서, 80%의 지하수위를 고려했을 경우 0.20%의 지역에서 산사태의 발생 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 이는 진앙에 위치한 주변지역의 지형이 완만한 편이고 경사가 급한 지역까지의 거리가 증가함에 따라 지진의 영향이 감소한 것으로 판단된다.

진앙의 위치를 연구지역의 서남쪽, 즉 왼쪽 하단으로 가정한 경우(D)에는 진앙이 C에 위치한 경우보다는 위험한 지역이 증가하기는 하였지만 진앙이 연구지역의 중앙에 위치하는 경우보다는 위험지역의 규모가 적

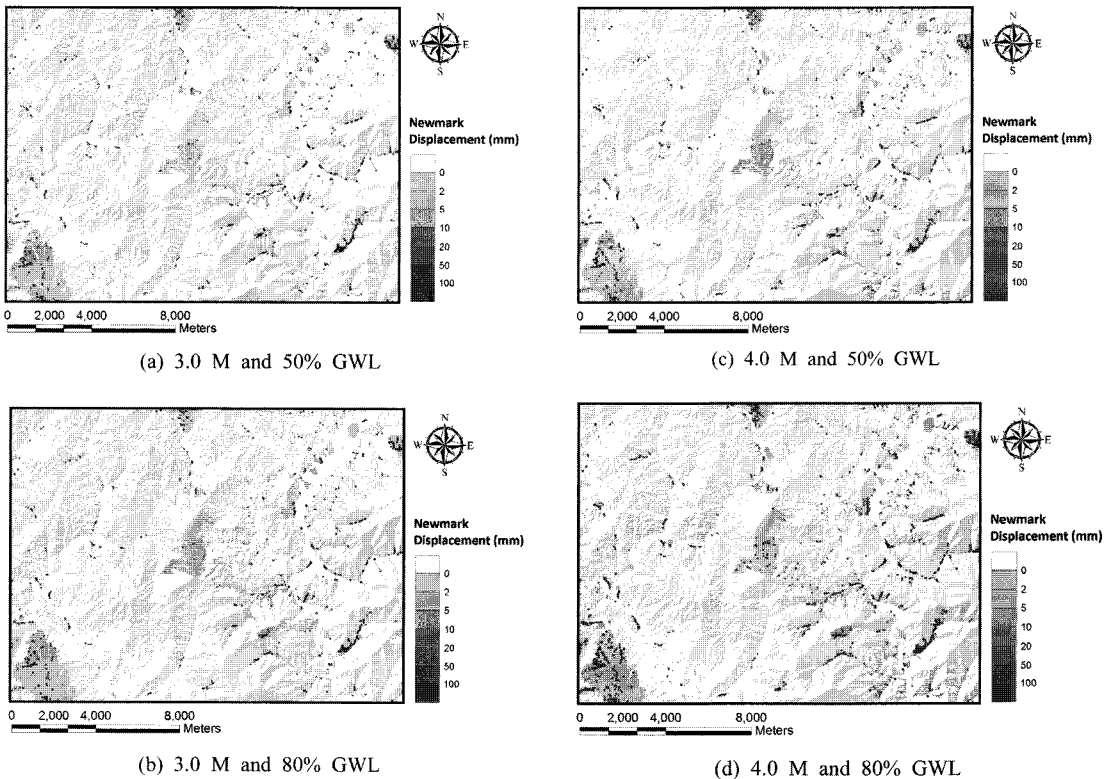


Fig. 7. Map showing predicted Newmark displacement by earthquake of epicenter C.

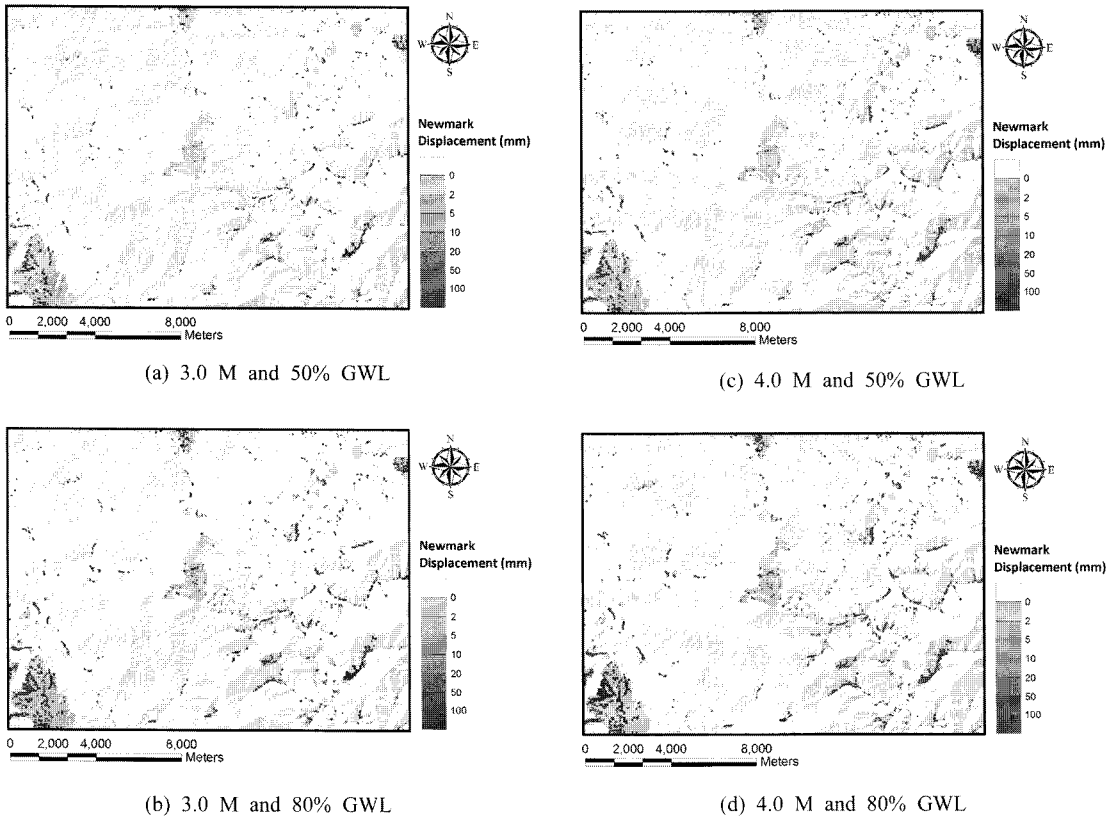


Fig. 8. Map showing predicted Newmark displacement by earthquake of epicenter D.

계 분석되었다(Fig. 8). 규모 3.0의 지진이 발생시 50%의 지하수위에서는 0.08%가 위험한 지역으로 분석되었으며 지하수위가 80%로 증가한 경우 위험면적이 0.19%로 분석되었다. 규모 4.0의 지진을 가정할 경우 50%의 지하수위에서는 0.11%의 지역에서, 80%의 지하수위를 고려했을 경우 0.24%의 지역에서 산사태의 발생 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 이 경우 진앙이 위치한 지역을 중심으로 변위의 분포가 증가한 것을 확인할 수 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 동일한 지역에서 지진의 규모와 지하수위를 변동시켜가며 분석을 수행한 결과 지진 규모 1의 증가는 약 30배의 에너지가 증가함을 감안할 때 지진 규모의 증가보다 강우에 의한 지하수위의 증가가 산사태의 발생 가능성에 더 많은 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

### 5.3. 지진에 의한 산사태 확률지도(Probabilistic Seismic Landslide Map) 작성

Jibson *et al.*(2000)에 의하면 앞서 계산된 Newmark

변위(displacement)는 실제 지진에 의해 현장에서 발생한 변위량과 정확하게 일치하지 않는다. 즉, 앞서 계산된 Newmark 변위는 실제 현장에서도 동일한 크기의 변위가 발생함을 의미하는 것이 아닌 발생하는 현상에 대한 지수로서의 의미를 갖는다. 따라서 100 mm 이상의 변위는 산사태가 발생할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미하지만 실제 현장에서 100 mm의 변위가 발생하는 것을 의미하지는 않는다. 따라서 Newmark의 변위와 실제 현장에서 발생한 변위와의 상관관계를 밝히기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며 이러한 연구는 실제 지진에 의해 산사태가 발생했던 현장들을 중심으로 계산을 통해 획득한 Newmark 변위와 실제 지진에 의해 발생하여 현장으로부터 수집된 변위사이의 상관관계에 대한 분석이 수행되고 있다. 본 연구에서도 이러한 상관관계 분석을 수행하여 국내 지질특성에 따른 상관관계식이 제안되어야 하나 지진에 의해 산사태가 발생한 사례가 없는 국내에서는 이러한 상관관계를 분석하기 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Jibson *et al.*(2000)이 제안한 상관관계

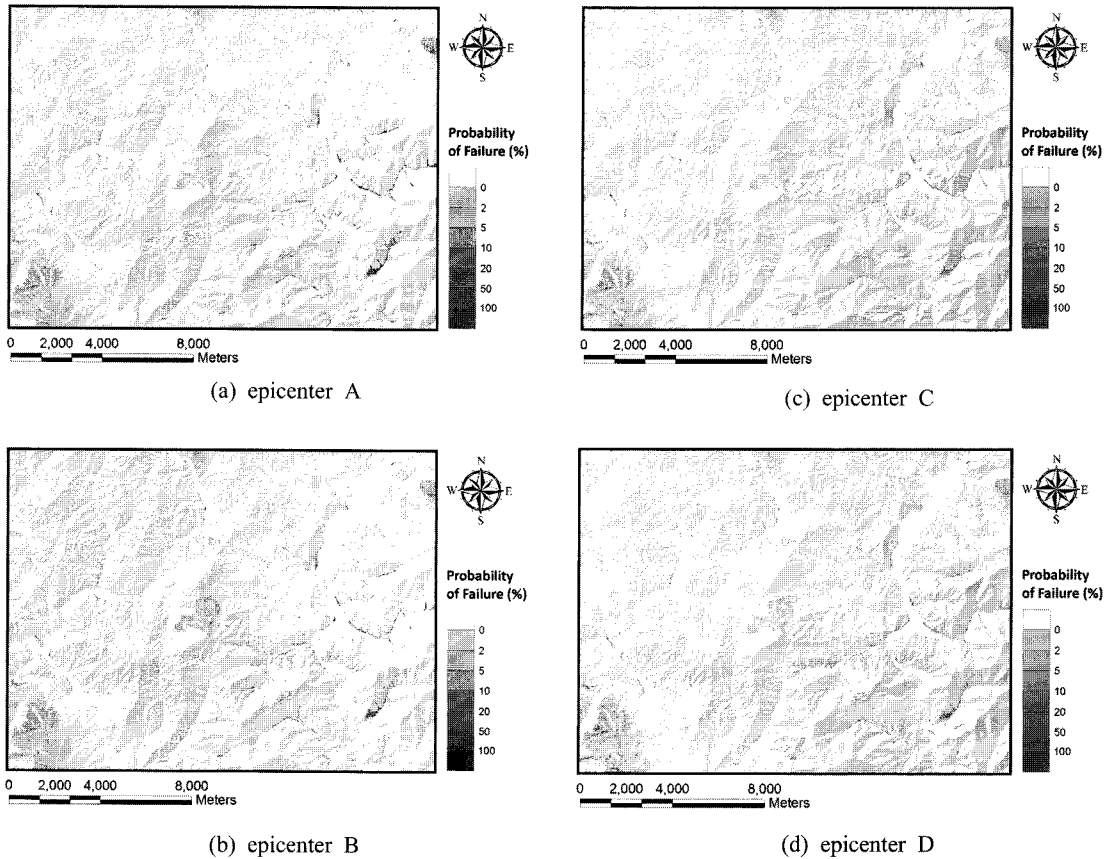


Fig. 9. Map showing probability of seismic triggering landslides.

식 (5)를 사용하였다.

$$P(f) = 0.335[1 - \exp(-0.048D_N^{1.565})] \quad (5)$$

이때  $D_N$ 은 Newmark displacement이다. 이 관계식은 Newmark 변위와 파괴확률사이의 상관관계를 표현한 식으로 이 식을 이용하여 연구지역에서의 강우시 지진에 의한 산사태 발생 확률을 계산할 수 있으며 이를 기초로 하여 산사태 발생 확률 지도를 제작하였다 (Fig. 9). 산사태 발생 확률지도의 경우 각 진앙의 위치에서 가장 불리한 조건, 즉 지진의 규모가 4.0이고 지하수위가 80%로 높은 경우에 대하여서만 Fig. 9에 제시하였다. Fig. 9에서 나타난 산사태의 발생 확률이 높은 지역은 앞서 분석되었던 100 mm 이상의 변위가 발생한 지역과 유사한 것으로 분석되었으나 100 mm의 변위량을 기준으로 산사태 발생 여부를 정성적으로 판단하였던 이전의 분석결과에 비해 지진에 의해 산사태가 발생할 확률을 제시함으로써 좀 더 정량적인 결과를 제시하였다.

## 6. 결론 및 토의

본 연구에서는 연구대상지역의 지질 및 지반 특성 정보를 기초로 Newmark displacement model을 이용, 강원도 평창군 진부면 일대에 대해 지진에 의한 산사태 취약성과 산사태 발생 확률지도를 작성하였다. 이를 위하여 지진의 규모 및 진앙의 위치 조건을 달리한 지진 정보를 고려하고 다양한 지하수위를 가정하여 분석을 수행하였다. 최종적으로 산정된 지진에 의한 산사태 취약성 분석 결과를 살펴보면 지진의 규모가 3.0과 4.0로 비교적 소규모의 지진인 경우 지진의 규모에 상관없이 사면이 건조한 조건에서는 산사태에 매우 안정적인 것으로 나타났다. 그러나 강우 등에 의해 사면의 지하수위가 상승하게 될 경우, 지진에 의한 변위가 발생할 것으로 예상되는 지역이 상당히 증가하였다. 진앙위치의 경우 연구지역의 중앙에서 지진이 발생시 산사태에 대한 위험성이 가장 높았으며 연구지역 주변의 경우, 진앙위치에 따른 변위 발생 정도의 차이가 크지

않기 때문에 진앙의 위치보다는 대상 지역과 진앙과의 거리에 따른 영향이 큰 것으로 나타났으며, 지진의 규모가 작을 경우에는 산사태 발생 요인 중 지진의 규모보다는 지하수의 수위가 산사태 위험성에 더욱 중요한 인자임을 확인 할 수 있다.

일반적으로 지진 규모 6.0 이상의 대규모 지진이 발생할 경우 산사태도 발생하는 것으로 알려져 있지만 본 연구를 통해 지반의 지하수위가 상승한 경우에는 소규모의 지진에 의해서도 산사태의 발생 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 규모 3.0 이상의 지진이 꾸준히 발생하고 집중강우에 의해 피해가 반복되고 있는 국내 여건을 감안할 때 소규모의 지진에 의한 산사태의 발생 가능성에 대한 연구와 대책이 필요한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 활용된 Newmark model의 경우, 비교적 간단한 수식과 현장자료를 이용하여 지진에 의한 영향을 고려한 산사태 분석이 가능한 기법으로서 지진에 의한 산사태 취약성 분석시 효과적으로 활용이 가능할 것으로 보인다. 특히 GIS와 결합하여 사용될 경우 광범위한 지역에 대하여서도 분석이 가능하며 따라서 향후 전 국토를 대상으로 지진에 의한 산사태 위험성도의 작성에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 지진 발생 패턴의 분석 등을 통해 지진 발생 우려 지역에 대한 추가적인 정보를 획득 가능할 경우 지진에 의한 산사태의 예측 및 피해 산정 등과 같은 연구에 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(KRF-2008-313-C00930)과 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

Castaldini, D., Genevois, R., Panizza, M., Puccinelli, A. and Simoni, A. (1998) An integrated approach for analysing earthquake induced surface effects: A case study from Northern Apennines, Italy. *Journal of Geodynamics*, v.26, p.413-441.

Chae, B.G., Kim, W.Y., Na, J.H., Cho, Y.C., Kim, K.S. and Lee, C.O. (2004) A prediction model of landslides in the Tertiary sedimentary rocks and volcanic rocks area. *The Journal of Engineering Geology*, v.14, p.443-450.

Choi, J.W., Lee, S., Min, K.D. and Woo, I. (2004) Landslide susceptibility mapping and verification using GIS

and Bayesian probability model in Boun. *Econ. Environ. Geol.*, v.37, p.207-223.

Duncan, M. and Wright, S.G. (2005) *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley and Sons, 297p.

Hadj-Gamou, T. and Kavazanjian, E. Jr. (1985) Seismic stability of gentle infinite slopes. *ASCE J. Geotech Engrg.*, p.681-697.

Harp, E.L. and Wilson, R.C. (1995) Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: Evidence from 1987 whittier Narrows and Superstition hills earthquake strong motion records. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v.85, p.1739-1757.

Havenith, H., Storm, A., Caceres, F and Picard, E. (2006) Analysis of alndslide susceptibility in the Suusamy region, Tien Shan. *Landslides*, v.3, p.39-53.

Jibson, R.W. and Keefer, D.K. (1993) Analysis of the seismic origin of landslides Examples from the New Madrid seismic zone. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v.105, p.421-436.

Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A. (1998) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard map. *US Geol. Surv. open file*.

Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A. (2000) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, v.58, p.271-289.

Julian, M. and Anthony, E. (1996) Aspect of landslide activity in the Mecantour Massif and the French Riviera, southeastern France. *Geomorphology*, v.15, p.275-289.

Keefer, D.K. (1984) Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.95, p.406-421.

Keefer, D.K. (2000) Statistical analysis f an earthquake-induced landslide distribution-1989 Loma Prieta, California event. *Engineering Geology*, v.58, p.231-249.

Khanzai, B. and Sitar, N. (2000) Assessment of seismic slope stability using GIS modeling. *Geogr. Inf. Sci.*, v.6, p.121-128.

Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G. and Cho, Y.C. (2000) Engineering geologic characteristics of landslide induced by rainfall. *The Journal of Engineering Geology*, v.10, p.163-174.

Kim, W.Y. and Chae, B.G. (2009) Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, v.19, p.331-344.

Korea Highway Corporation (2009) *Road Design Guide-line*, 472p.

Lee, M.J., Lee, S. and Won, J.S. (2004) Study on landslide using GIS and remote sensing at the Kangneung area (I). *Econ. Environ. Geol.*, v.37, p.425-436.

Lee, S. and Min, K.D. (2000) Landslide analysis of Yongin area using spatial database. *Econ. Environ. Geol.*, v.33, p.321-332.

Lee, S., Lee, M.J. and Won, J.S. (2005) Landslide susceptibility and verification using artificial neural network in the Kangneung area. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, p.33-43.

Lin, M. and Tung, C. (2003) A GIS based potential analysis f the landslides induced by the Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology*, v.71, p.63-77.

Malamud, B.D., Turcotte, D.L. Guzzetti, F. and Reichen-

- bach, P. (2004) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf. Processes Landform*, v.29, p.687-711.
- Miles, S.B. and Ho, C.L. (1999) Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation. *Soil Dyn. Earth Eng.*, v.18, p.305-323.
- Murphy, W. (1995) Earthquake triggered landslide at the Brunssummerheide, Limburg. the Netherlands. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v.28, p.61-74.
- Newmark, N.M. (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, p.139-160.
- Oh, H.J. (2010) Landslide detection and landslide susceptibility mapping using aerial photos and artificial neural networks, *Korean J. of Remote Sensing*, v.26, p.47-57.
- Park, N.W., Chi, K.H., Chung, C.J., and Kwon, B.D. (2005) Application of GIS based probabilistic empirical and parametric models for landslide susceptibility analysis. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, p.45-55.
- Park, H.J., Lee, S. and Kim, J.W. (2003) Analysis and verification of slope disaster hazard using infinite slope model and GIS. *Econ. Environ. Geol.*, v.36, p.313-320.
- Parise, M. and Jibson, R.W. (2000) A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristic of landslides triggered by the 17 Jan. 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering Geology*, v.58, p.251-270.
- Refice, A. and Capolongo, D. (2002) Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Computers and Geosciences*, v.28, p.735-740.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J. and Chandler, R.J. (1999) Earthquake induced landslide:1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, v.18, p.325-346.
- Ryu, J.H., Lee, S., and Won, J.S. (2002) Weight determination of landslide factors using artificial neural networks. *Econ. Environ. Geol.*, v.35, p.67-74.
- Seed, H.B. (1967) Slope stability during earthquakes. *ASCE, J. Soil Mech. Found. Div.*, p.299-323.
- Song, Y.S. and Hong, W.P. (2007) A case study on the analysis of cause and characteristics of a landslide at the sedimentary rock area, *The Journal of Engineering Geology*, v.17, p.101-113.
- Tibaldi, A., Ferrari, L. and Pasquare, G. (1995) Landslide triggered by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry: an example from Ecuador. *Geomorphology*, v.11, p.215-226.
- Van Westen. (1993) *Geographic Information systems in slope Instability Zonation*, ITC, Publication, 15, p.245.
- Wang, H. (2008) Probabilistic modeling of seismically triggered landslides using Monte Carlo simulations. *Landslide*, 5, p.389-391.
- Wieczorek, G.F., Wilson, R.C. and Harp, E.L. (1985) Map showing slope stability during earthquakes of San Mateo county, California. *US Geol. Surv. Misc. Geol. Investig. map I-1257e*, scale 1:62500.
- Wilson, R.C. and Keefer, D.K. (1983) Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v.73, n.3, p.863-877.
- Wilson, R. C. and Keefer, D. K. (1985) Predicting areal limits of earthquake induced landsliding. In: Ziony, J. I. (Ed.), *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region. An Earth-science Perspective*. *US Geol. Surv. Prof., Paper 1360*, p.316-345.