

## 기후변화 시나리오를 이용한 광역 사면안정 해석(2): 결과분석

오성렬<sup>1</sup> · 이기하<sup>2\*</sup> · 최병습<sup>3</sup> · 이건혁<sup>4</sup> · 권현한<sup>5</sup>

## Large-Scale Slope Stability Analysis Using Climate Change Scenario (2): Analysis of Application Results

Sung-Ryul OH<sup>1</sup> · Gi-Ha LEE<sup>2\*</sup> · Byoung-Seub CHOI<sup>3</sup>  
Kun-Hyuk LEE<sup>4</sup> · Hyun-Han KWON<sup>5</sup>

### 요 약

본 연구에서는 선행 연구된 광역 사면안정해석 방법론(기후변화 시나리오를 이용한 광역 사면안정 해석(1): 방법론)에 근거하여 기상청에서 제공하는 지역규모의 A1B 시나리오 기반의 RCM 자료와 비집수면적 개념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정모형을 이용하여 전라북도 수계(20개 중권역)를 대상으로 미래 기후변화에 따른 사면안정 변동성을 평가하였다. 광역 사면안정해석을 위해 필요한 중요 지형학적, 지질학적, 임상학적 매개변수의 공간정보 데이터베이스를 구축하였으며, 1971년부터 2000년까지를 현재기간, 2011년부터 2100년까지를 미래기간으로 하여 연도별 일최대강우량을 입력자료로 하여 현재기간 대비 미래기간 동안의 전라북도 수계 20개 중권역에 대한 사면안정성의 변동성을 분석하였다. 전라북도 수계 전체에 대한 사면안정 해석결과, 유역전체 평균 사면안정도는 1.36으로 Moderately Stable 상태로 미래 기후변화에 따른 유역 전체의 변동 양상은 큰 차이가 없는 것으로 분석되었으며, 현재기간 대비 사면안정성이 향상되는 중권역은 7개소(용담댐, 무주남대천, 논산천, 금강하구연, 동진강, 주진천, 외탄천)였으며, 사면안정성이 지속적으로 감소하는 중권역은 5개소(용담댐하류, 영동천, 오수천, 섬진곡성, 황룡강)로 분석되었다.

주요어 : 기후변화, A1B 시나리오, 무한사면안정모형, 광역 사면안정해석

### ABSTRACT

This study aims to assess the slope stability variation of Jeonbuk drainage areas by

2014년 5월 9일 접수 Received on May 9, 2014 / 2014년 6월 24일 수정 Revised on June 24, 2014 / 2014년 7월 7일 심사완료 Accepted on July 7, 2014

- 1 국토교통부 금강홍수통제소 Geumriver Flood Control Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport
  - 2 경북대학교 건설방재공학부 Department of Construction & Disaster Prevention, Kyungpook National University
  - 3 한국수자원공사 수자원사업본부 Water Resources Business Division, Korea Water Resources Corporation
  - 4 한국수자원공사 미래기술안전본부 엔지니어링처 Engineering Department, Future Technology & Safety Division, Korea Water Resources Corporation
  - 5 전북대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University
- \* Corresponding Author E-mail : leegiha@knu.ac.kr

RCM model outputs based on A1B climate change scenario and infinite slope stability model based on the previous research by Choi *et al.*(2013). For a large-scale slope stability analysis, we developed a GIS-based database regarding topographic, geologic and forestry parameters and also calculated daily maximum rainfall for the study period(1971~2100). Then, we assess slope stability variation of the 20 sub-catchments of Jeonbuk under the climate change scenario. The results show that the areal-average value of safety factor was estimated at 1.36(moderately stable) in spite of annual rainfall increase in the future. In addition, 7 sub-catchments became worse and 5 sub-catchments became better than the present period(1971~2000) in terms of safety factor in the future.

**KEYWORDS :** *Climate Change, A1B Scenario, Infinite Slope Stability Model, Large-Scale Slope Stability Analysis*

## 서론

최근 기후변화로 인한 이상강우에 의해 전 세계적으로 다양한 재해가 발생하고 있으며, 2010년 파키스탄 대홍수, 2011년 태국 대홍수, 2014년 아프가니스탄 산사태 등을 그 예로 들 수 있다. 우리나라 역시 2012년에 1962년 이후 50년 만에 4개의 태풍이 한반도에 연속적으로 상륙하는 등 기후변화에 의한 영향이 현실화되고 있는 실정이다. 특히, 이러한 기후변화에 따른 강우일수의 감소와 강우량의 증가와 더불어 무분별한 도시 개발로 인해 산사태의 발생 위험성은 지속적으로 증가하고 있다.

Park *et al.*(2006)에 의하면 1976~2005년까지 산사태 및 사면재해 발생관련 사망자는 총 1,321명으로 연평균 약 47명, 전체 자연재해로 인한 사망자 대비 22.3%를 차지하고 있으며, 이는 단일유형의 재해로서 사망자 비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 국내 산사태 발생 추이를 보면 과거 강원도 등과 같은 산지지형에서 장마전선 정체 및 태풍의 이동경로 등에 의한 집중호우로 산사태가 집중적으로 발생하였으나 최근 들어 국지성 집중호우로 인해 수도권 지역 등 도심지내의 산사태 발생빈도가 증가하고 있다.

기후변화에 따른 자연재해의 빈발화, 대형화

추세에 따라 산사태 발생면적은 1980년대 230ha 였으나 2000년대에는 713ha로 증가추세에 있으며, 순수 산사태로 인한 사상자 추이를 볼 때 태풍의 강도와 일치하는 양상을 보이고 있다. 이에 따라 기후변화를 고려한 적절한 산사태 방지기술의 개발 및 피해 저감 대책이 요구된다.

산사태에 영향을 주는 요인은 크게 내적요인과 외적으로 구분된다(Kim *et al.*, 2005). 내적요인에는 토심, 토성, 모암의 재질과 같은 지질학적 요인과 경사, 고도, 방위 등과 같은 지형학적 요인을 의미하며, 외적요인은 지진이나 태풍, 집중호우 등으로 나뉠 수 있다. 일반적으로 산사태는 내적요인의 변화보다는 외적요인에 변화에 의해 발생하는 경우가 대부분이며 국내에서는 그중에서도 지진이 원인이 되어 발생하는 산사태는 드물며, 대부분은 강우의 영향으로 산사태가 발생하고 있다

국외 사면안정해석에 대한 연구는 사면의 내적요인 및 법면의 안정성 해석과 같은 초기 연구로 시작하여 이후 1980년대 후반부터 내적요인뿐 아니라 강우, 지진 등의 외적요인을 고려한 다양한 연구들이 수행되어 오고 있다. Montgomery and Dietrich(1994)는 무한사면 안정모형에 토양포화도 또는 습윤지수(wetness index) 개념을 도입하여 미국 내 3개 지역에 적용한 결과 산사태 및 토석류 초기 발

생지역과 비슷하게 일어남을 확인하였다. Borga *et al.*(2002)는 Montgomery and Dietrich(1994)가 제안한 무한사면안정모형에 상재압력과 뿌리의 점착력을 고려한 수정무한사면안정모형을 이탈리아 Cordon 유역과 Vauz 유역에 적용하였다. Borga *et al.*(2002)의 연구에서는 한계강우(critical rainfall)와 한계습윤지수(critical wetness index)의 개념을 도입하여 대상유역을 격자 형태로 구분하고 공간분포형 형태의 수문학적 인자의 변화에 따른 파괴확률을 결정하였다.

국내 사면안정해석 연구의 경우, Lee(1999)는 용인 및 장흥 지역을 대상으로 산사태 발생 요인 데이터베이스로 구축하고 지리정보시스템(geographic information system; GIS)을 이용하여 확률·통계, 인공 신경망 기법 등을 적용하여 산사태 취약성을 분석하였고, Yeon(2011)은 로지스틱 회귀분석 기법을 이용하여 2006년 강원도 인제에서 발생한 산사태 취약성을 분석하였다. 또한 산사태 발생 위치와 발생 요인간의 상관관계를 분석하였으나 강수에 의한 사면안정성 평가는 수행하지 않았다. Lee(2011)는 강원도 평창군 진부면 일대를 대상으로 지형학적 요인에 대한 데이터베이스를 구축하고 강도정수(마찰각, 점착력)가 가지는 불확실성을 고려하기 위해 Monte Carlo Simulation을 통하여 안전율을 계산하였다. 이 연구에서는 강도정수가 가지는 불확실성이 안전율의 불확실성으로 전이되는 문제점을 해결하고자 확률론적 접근을 시도하여 개선하였으나 안전율 산정 시 공간집중형 습윤지수(spatially-lumped wetness index)를 적용하고 있어 실제 강우현상에 고려한 토양포화도의 공간적 변화를 고려하지 못했다. Lee *et al.*(2012)은 2012년 산사태가 발생한 우면산 지역을 대상으로 지형학적, 지질학적, 식생요인을 데이터베이스화 하고 산사태 발생 당일의 AWS 강우량을 적용하여 생산된 흐름분배기법별 공간 분포형 사면안전율과 집중형 습윤지수 적용 결과를 비교·분석하였다. 이와 같이 사면안정해석에 대한 선행연구들은 사면안정과 관

련된 다양한 변수들을 파악하는 단계에서, 통계적인 분석을 통한 변수 간의 상관관계를 파악하는 단계를 거쳐서, 산사태 발생지점과 변수 간의 관계를 기반으로 통계적인 모형을 통해 산사태 발생가능성을 예측하는 단계로 진행되었다(Kim *et al.*, 2013) 하지만 적용 대상지역의 범위가 제한적이며, 기후변화로 인한 외적요인의 변화양상을 고려하지 못한다는 한계를 지닌다. 최근 Kim *et al.*(2012)은 전국을 대상으로 기후변화에 따른 산사태 취약성의 시·공간적 변동성 분석을 위해 기후변화 시나리오의 적용에 따른 산사태 관련 민감성, 노출도, 적응성 지표를 산출하고 취약성 평가를 수행한 바 있다. 국외의 경우 Borgatti and Soldati(2010)은 이탈리아 지역의 기후변화 시나리오를 통해 강우량 변화에 따른 산사태 발생 위험성에 대해 평가한 바 있다. 최근의 기후변화를 고려한 사면안정해석에 대한 연구는 대부분 강우량과 산사태의 관계를 정량적으로 분석하기 위한 기초 연구로서 그 가치를 가질 수 있으나 미래 강우량의 변화에 따른 사면안전율의 시·공간적 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 기후변화에 따른 광역적 산사태 발생가능성을 평가하고자 우리나라 전라북도 수계를 대상으로 사면안전율 분석에 필요한 지형학적, 지질학적, 식생인자 별 매개변수 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 기상청에서 제공하는 A1B 기후변화 시나리오를 통해 생산된 RCM 강우량 자료의 편의보정과 상세화 과정을 통해 2100년까지의 일 강우량 자료를 생산하였으며, 이를 역거리법(inverse distance weight method)을 통해 전라북도 유역에 대한 공간분포형 강우장(rainfall field) 자료를 생성하였다. 최종적으로 이상의 내·외적 요인 정보를 Borga *et al.*(2002)이 제안한 수정무한사면안정모형에 적용하여 대상유역에 대해 현재기간(1971~2000)대비 미래기간(2010~2100)에 대한 시·공간적 사면안정 변동성을 평가하였다.

## 대상구역

일반적으로 산사태에 대한 위험성은 산악형 지형이 많은 강원도의 일부 문제로 국한되어 온 것이 사실이다. 하지만 2011년 7월 서울시 서초구에서 발생한 우면산 산사태와 같이 도심지의 난개발과 기후변화에 따른 집중호우의 증가는 도심지에서의 산사태 위험성을 가중시키고 있다. 이러한 도심지의 사면재해 증가 양상은 물적 피해 중심으로 대별되던 사면재해 피해가 점점 인적 피해 중심으로 변화될 수 있음을 나타내며, 이에 따라 사면안정해석에 대한 좀 더 심도 있는 연구가 필요한 실정이다. Kim(2013)의 연구결과에 의하면 기후변화 시나리오를 통해 얻어진 산사태 발생 기준수량 대비 초과빈도 100회 이상인 지역의 산사태위험도를 분석한 결과, 2015년 이후 전주와 임실과 같은 전라북도 및 남부지역의 위험도 및 범위가 급격히 증가하는 것으로 분석되었다. 최근 전라북도 지역은 골프장, 관광시설 및 목축업 등의 발달로 인해 99년 이후 전국에서 산림훼손 면적이 강원도에 이어 2번째(약 8,198ha)

로 많은 것으로 분석되었다(Lee, 2005). 또한, 부족한 하천의 홍수소통 능력과 지질학적으로 사면안정에 취약한 사질토의 구성 비율이 높아 기후변화에 따른 사면안정성의 시·공간적 변동성 평가가 필요한 지역으로 본 연구에서는 전라북도 지역을 중심으로 기후변화시나리오를 적용하여 사면안정해석을 수행하였다. 부족한 하천의 홍수소통 능력과 지질학적으로 사면안정에 취약한 사질토의 구성 비율이 높아 기후변화에 따른 사면안정성의 시·공간적 변동성 평가가 필요한 지역으로 본 연구에서는 전라북도 지역을 중심으로 기후변화시나리오를 적용하여 사면안정해석을 수행하였다.

그림 1은 대상구역인 전라북도 유역(파랑색 선)을 나타내고 있으며, 유역의 수문학적 특성을 내포하는 비집수면적(specific catchment area)이 무한사면안정모형의 주요 매개변수로서 적용됨에 따라 유역단위 계산을 수행하였다. 전라북도 지역은 금강 상류유역, 만경강·동진강유역, 남강댐 및 섬진강 유역을 포함하며 본 연구에서는 표 1에 제시된 20개의 중권역을 대상으로 권역별 사면안정해석을 실시하였다.

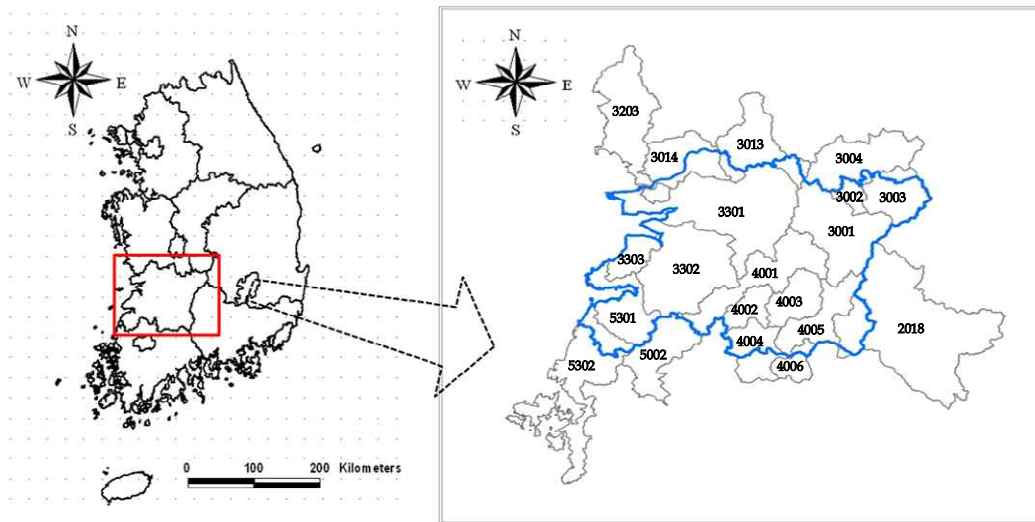


FIGURE 1. Administrative district of Jeonbuk and sub-catchments for slope stability assessment

TABLE 1. List of sub-catchments

Code	Sub-catchment	Code	Sub-catchment	Code	Sub-catchment
2018	Namgang-dam	3203	Geumgang (west)	4004	Sunchang
3001	Yongdam-dam	3301	Mangyeonggang	4005	Yocheon
3002	Yongdam-dam (downstream)	3302	Dongjiingang	4006	Seomjingoksung
3003	Mujunamdaecheon	3303	Jiksocheon	5002	Hwangryonggang
3004	Youngdongcheon	4001	Seomjingang-dam	5301	Jujincheon
3013	Nonsancheon	4002	Seomjingang-dam (downstream)	5302	Watancheon
3014	Geumgang (estuary dam)	4003	Osucheon		

## GIS기반의 사면안정해석 모형 매개변수 추출

본 연구에서는 사면안정해석 모형의 매개변수 추출을 위하여 본 논문의 선행연구인 Choi *et al.*(2013)의 연구에서 제시된 매개변수 산정 공식을 적용하여 각 매개변수별 분류표를 제시하고 지형정보 분석 프로그램인 ArcGIS 9.3.1과 범용 수치지형도(SRTM DEM), 농업과학기술원(농업토양정보시스템(Agriculture Soil Information System; <http://asis.rda.go.kr/>))에서 제작·배포하는 1:25,000 정밀도 양도, 산림청의 산림공간정보서비스(<http://www.forest.go.kr/>)에서 제공하는 1:25,000 임상도 및 영급도를 이용하여 전라북도 내 격자별(90m×90m) 지형(사면경사, 비집수면적), 지질(투수계수, 유효토심, 포화단위중량, 흙의 점착력, 내부마찰각), 임상학적(뿌리점착력) 매개변수를 추출하였다.

### 1. 지형학적 매개변수 선정

무한사면안정공식에서 토양의 포화도를 산출하기 위하여 Montgomery and Dietrich (1994)와 Borga *et al.*(1998)은 사면의 지형학적 특성에 따른 습윤지수 산정방법을 제시하였다. 제시된 방법의 매개변수는 강우강도, 흙의 투수계수, 포화토층의 두께, 유출기여면적, 흐름방향의 단면폭이며, 본 연구에서는 지형학

적 흐름특성에 의해 기인되는 비집수면적(유출기여면적과 흐름방향의 단면폭의 비)을 범용수치지형도 SRTM DEM 자료를 이용하여 전라북도 유역을 90m×90m 격자로 분할하고 흐름분배 알고리즘을 적용하여 산출하였다. 일반적인 흐름분배 산정방식에는 일방향 흐름해석기법(single flow direction method, 이하 SFD)과 다방향 흐름해석기법(multiple flow direction method, 이하 MFD)이 있다. 본 연구에서는 계곡과 같이 경사가 급한 수렴지형이나 평지지형에 적용성이 높은 SFD 흐름해석기법을 이용하여 전라북도 내 중권역별 사면경사 및 비집수면적을 산정하고 그림 2와 3과 같이 도시하였다.

그림 2는 전라북도 유역 내 위치한 중권역별 사면경사를 도시한 그림으로 대상 유역 내 최대경사는 49.8°, 평균경사는 8.8°로 나타났다. 또한, 대상 유역 내 급경사 지역은 금강 상류인 용담댐(3001), 영동천(3004)유역과 남강 상류에 위치한 남강댐(2018) 유역으로 분석되었다. 대상 유역 내 완경사지역은 평야지대가 집중적으로 위치한 만경강(3301), 동진강(3302)유역으로 나타났다.

그림 3은 중권역별 비 집수면적을 도시한 것으로서 비 집수면적의 밀도가 낮은 격자(회색)와 밀도가 높은 격자(회색 이외)로 구별되며, DEM으로부터 산출된 비 집수면적의 밀도가 높은 격자의 경우 유역 내 실제 하천망과 유사한

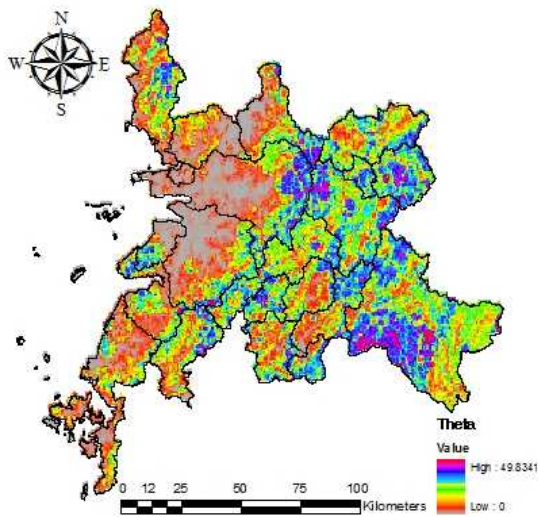


FIGURE 2. Slope of the sub-catchments (unit:  $^{\circ}$ )

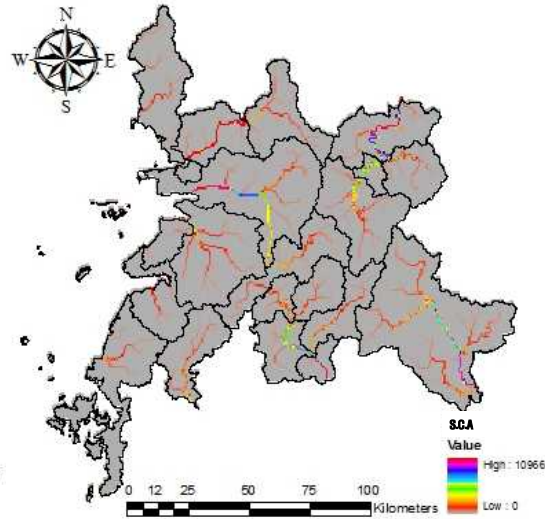


FIGURE 3. Specific catchment area of the sub-catchments (unit:  $m$ )

형태를 나타내고 있다.

## 2. 지질학적 매개변수 선정

토양의 고유성질을 나타내는 지질학적 매개변수의 획득에는 현장에서의 시료를 직접 획득하여 측정하는 직접측량방법을 많이 이용된다. 하지만 동일한 특성을 지니는 지역일지라도 시·공간적 변동 뿐 아니라 광범위한 지역의 매개변수 산정에 있어 시간적, 경제적 제약으로 인해 지역을 대표하는 매개변수를 제시한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구를 통해 제시된 토양의 물리변수 산출 공식을 이용하여 표토토성별, 토양통별 물성치를 산출하였다. 무한사면안정공식의 입력자료로 이용되는 지질학적 매개변수에는 포화단위중량, 흙의 점착력, 내부마찰각, 투수계수, 유효토심이 있다.

본 연구에서는 미국 농무성(USDA, United States Department of Agriculture)에서 제공하는 표토토성별 삼각분류표를 한국토양정보시스템에서 제공되는 표토토성의 함량비에 따라 11개군으로 분류하였다. Rawls *et al.*(1983)이 제시한 토성별 유효공극률과 일반적으로 제

시된 흙의 진 비중값 2.65를 기준으로 Choi *et al.*(2013)에서 제시된 Eq.(18)를 통해 표토토성별 포화단위중량을 산출하여 표 2와 같이 제시하였으며 이를 통해 그림 4와 같이 전라북도 유역내 표토토성별 포화단위중량을 도시하였다.

또한, 표토토성별 점착력은 Kim(2005)이 제안한 함량비 별 가중치법을 이용하였다. 일반적으로 제시된 모래, 실트, 점토의 점착력을 0, 1, 1.7( $t/m^2$ )을 기준으로 함량비를 곱함으로써 그 값을 산출하였으며, 내부마찰각의 경우 「지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해 연구」(National Disaster Management Institute, 2003)에서 제시한 표토토성별 내부마찰각 분류표에 의하여 표 3과 같이 분류하였다. 또한 이를 통해 그림 5와 6과 같이 표토토성별 흙의 점착력과 표토토성별 내부마찰각을 도시하였다.

그림 4~6은 지질학적 특성 중 표토토성을 기준으로 분류한 흙의 포화단위중량, 흙의 점착력, 내부마찰각을 보여주고 있다. 유역전반에 걸쳐 상대적인 차이를 보여주는 곳은 금강과 남강의 상류에 위치한 무주남대천, 남강댐, 용담댐, 영동천 유역(이하 1군유역 표기)과 만경강과 동진강 하류지역에 위치한 만경강과 동진

TABLE 2. Soil saturation weight

Type	Efficient porosity $\theta_e$ ( $cm^3/cm^3$ )	Saturation weight ( $kg/m^3$ )
Sand	0.417	2160
Loamy sand	0.401	2180
Sandy loam	0.412	2170
Loam	0.434	2150
Silt loam	0.486	2110
Sandy clay loam	0.330	2240
Clay loam	0.309	2260
Silty clay loam	0.432	2150
Sandy clay	0.321	2250
Silty clay	0.423	2160
Clay	0.385	2190

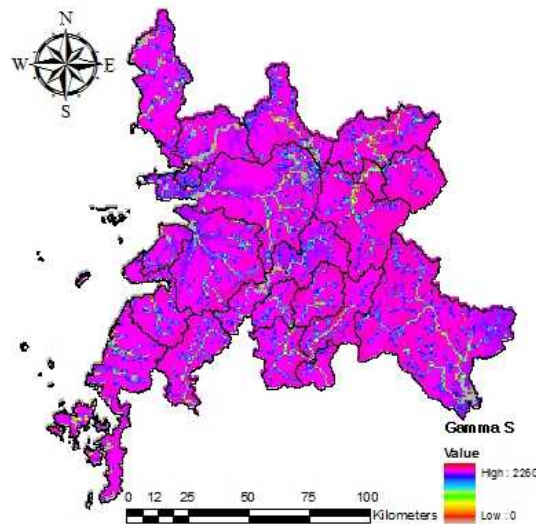


FIGURE 4. Soil saturation weight of the sub-catchments (unit:  $kg/m^3$ )

TABLE 3. Soil cohesion and Internal friction angle of soil types

Type	Content	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Cohesion( $kg/m^2$ )	Internal Friction Angle(°)
Loamy sand		80	10	10	270	30
Sandy loam		70	15	15	405	28
Loam		40	40	20	740	25
Silt loam		15	70	15	955	27
Clay loam		30	30	40	980	20
Silty clay loam		10	55	35	1145	22
Sand		100	0	0	0	30



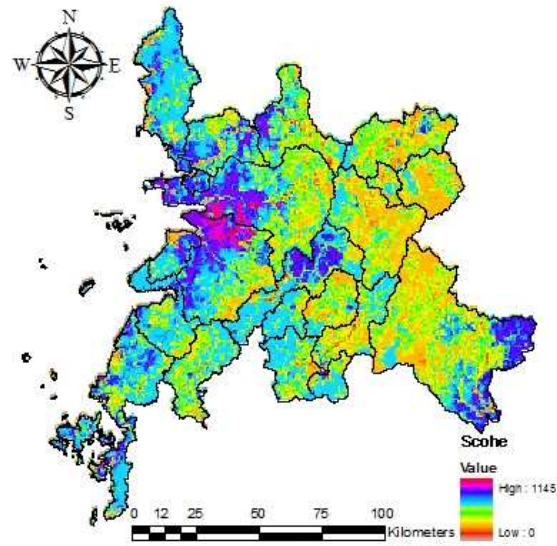


FIGURE 5. Soil cohesion of the sub-catchments (unit:  $kg/m^2$ )

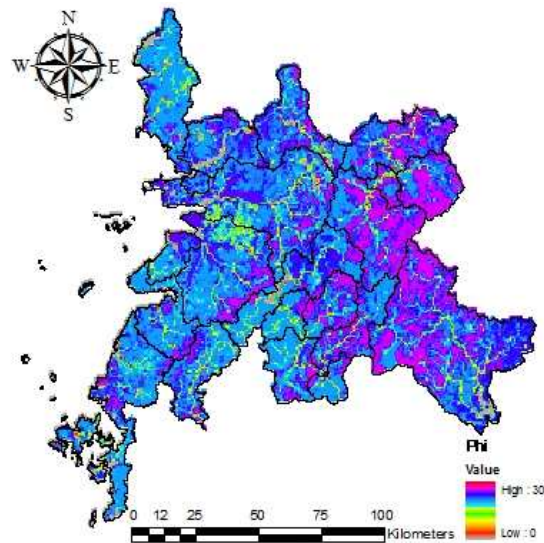


FIGURE 6. Soil internal friction angle of the sub-catchments (unit:  $^{\circ}$ )

강 유역(이하 2군 유역 표기)으로 구분된다. 1군 유역의 경우 표토토성군은 사양토(52.7%), 양토(35.3%)로 구성되어 있으며, 대표적인 지질학적 매개변수의 평균값의 경우, 포화단위중량  $2,170kg/m^3$ , 내부마찰각  $28^{\circ}$ , 흙의 점착

력  $405kg/m^2$ 으로 분석되었다. 또한, 2군 유역의 경우 유역하류 및 평야지대에 위치한 지역적 특성으로 다양한 표토 토성군으로 구성되어 있으며, 대표적인 표토토성군은 양토(45%), 미사질양토(23%), 사양토(21%)로 나타났다. 2



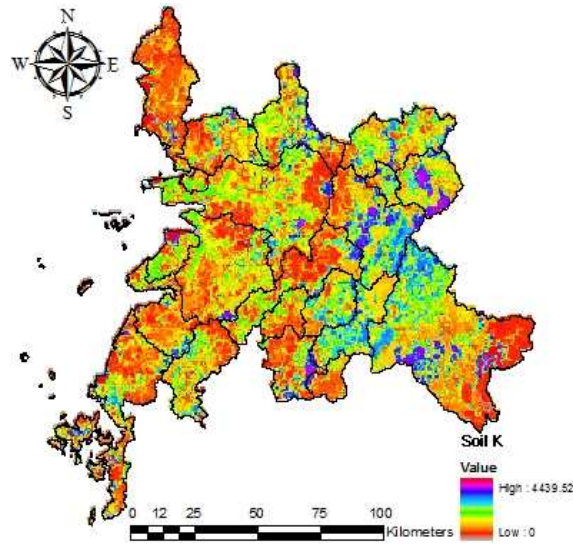


FIGURE 7. Hydraulic conductivity of the sub-catchments (unit: *mm/day*)

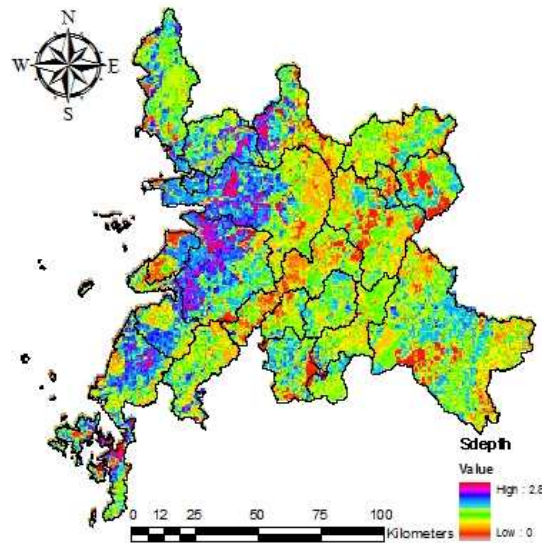


FIGURE 8. Effective soil depth of the sub-catchments (unit: *m*)

군 지역의 지질학적 매개변수의 평균값의 경우, 포화단위중량  $2,150\text{kg}/\text{m}^3$ , 내부마찰각  $25^\circ$ , 흙의 점착력  $740\text{kg}/\text{m}^2$ 으로 나타났다.

투수계수 산정의 경우, 점토 함량비(%)와 모래 함량비(%)는 한국토양정보시스템 토양통 검

색서비스에서 제공되는 입경분포 5개 분류군 중 조사, 중사, 세사는 모래의 함량비(%), 점토는 점토의 함량비(%)로 하여 투수계수를 계산하였다. 유효토심의 경우, 동 시스템에서 제공하는 기층별 토심값을 합산함으로써 산출하였

다. 이를 통해 국내 425개의 토양통별 투수계수와 유효토심값을 산출하고, 그림 7과 8과 같이 도시하였다.

1군 유역의 평균 유효토심의 깊이는 0.49m였으며, 유효토심의 깊이가 1~1.5m인 지역의 해당 유역의 면적 대비 3.7%, 1m 이하인 유효토심의 깊이는 96.3%로 나타났다. 평균 투수계수의 경우 500.2mm/day로 2군 지역에 비해 크게 나타났다. 이는 1군 지역이 유역 상류부에 위치한 산악형 지형으로 유효토심은 얇은 반면, 토성의 구성상 투수계수가 비교적 큰 모래질로 구성되어 있는 사양토의 토성군이 많이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

2군 유역의 평균 유효토심은 0.69m였으며, 유효토심의 깊이가 1~1.5m인 지역의 해당 유역의 면적 대비 63.5%, 1m 이하인 유효토심의 깊이는 36.5%로 나타났으며, 평균 투수계수의 경우 376.8mm/day로 상대적으로 작게 나타났다. 이는 유역의 하류부에 위치하여 토사의 퇴적으로 인해 유효토심은 깊은 반면 토성의 구성상 비교적 투수계수가 작은 실트질로 구성되어 있는 양토와 미사질 양토의 토성군이 많

이 존재하기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

지질·지형학적 특성을 볼 때 무주남대천, 남강댐, 용담댐, 영동천 유역은 급경사지역이 많은 비중을 차지하며, 표토토성 구성상 모래의 함량이 매우 높은 사양토 계열로서 사면의 안정성 측면에 있어 만경강과 동진강 유역에 비해 상대적으로 불안정할 것으로 추측이 가능하다.

### 3. 임상학적 매개변수 선정

뿌리의 점착력은 임상의 종류에 따라 혹은 뿌리를 내리는 토성 및 임상의 밀도와 년생에 따라 그 크기가 천차만별이다. 본 연구에서는 Wu *et al.*(1979), Kim(2005)이 제시한 식생별 뿌리의 평균 인장강도를 산림청에서 제공하는 24개의 식생군을 기준으로 분류하고 Wu *et al.*(1979)이 제시한 뿌리점착력 산정공식을 이용하여 임상별 평균 뿌리점착력을 산정하였다. 또한 영급을 고려하기 위해 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)와 뿌리의 건조량의 비율에 관한 연구(Choi, 2010)에서 제시된 식생군 별 가중치를 부여함으로써 표 4와 같이 임상별 영급별 뿌리의 평균 점착력 분류표를 제시하고,

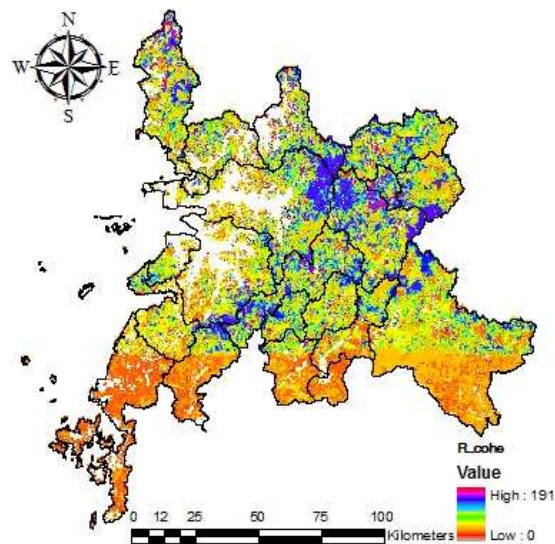


FIGURE 9. Root cohesion of the sub-catchments (unit:  $kg/m^2$ )

TABLE 4. Classification of root cohesion(unit:  $kg/m^2$ )

Species	Age					
	1~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~
Douglas fir	17	34	36	58	108	60
Willows	27	81	84	140	159	157
Populus	26	77	80	134	152	150
Alders	47	140	145	243	276	271
Siver maps	27	81	84	140	159	157
Western hemlock	32	97	100	168	191	188
Huckleberry	19	58	60	100	113	111
Barley	28	83	86	144	163	160
Grass, Forb	13	40	41	69	78	77
Candlenut	7	22	22	37	42	42
Acacia	13	40	41	69	78	77

그림 9와 같이 도시하였다. 전라북도 유역내의 주요 임상은 소나무림(29%), 활엽수혼효림(24%), 침활혼효림(19%) 순으로 많으며, 총 임상면적 대비 비율은 활엽수 지역이 28%, 침엽수 지역은 51%로 나타났다. 영급별 분류시 전체면적 대비 4영급(31%), 2영급(30%), 3영급(25%) 순으로 많은 비율을 차지하였다. 일반적으로 활엽수의 경우 침엽수에 비해 뿌리의 관입 깊이가 작고, 실제 뿌리의 인장강도에 영향을 미치는 잔뿌리의 개수가 상대적으로 작은 특성으로 인해 침엽수에 비해 토양에 작용하는 뿌리 점착력이 약하다. 전라북도 지역의 경우 혼효림 침엽수 지역이 활엽수 지역에 비해 2배 이상 크며 영급 또한 2~4영급의 분포 비율이 86%로 임상학적 측면에 있어서의 사면안정에 있어 유리할 것으로 판단된다.

### 사면안정해석 결과분석

본 연구에서는 Choi *et al.*(2013)에서 제시한 바와 같이 기상청에서 제공하는 공간해상도 27km 규모의 편의보정된 A1B 시나리오를 이용하여 미래(2011~2100년) 일 강우량자료를 생성하였다. 또한, 광역 사면안정해석을 위하여 3절에서 전술한 바와 같이 전라북도 유역을 90m×90m 격자로 구분하고, 지형학적, 지질학적, 임상학적 매개변수 데이터베이스를 구축하였다.

기후변화 시나리오로부터 생산된 미래 강우량 자료에서 연도별 최대일강우량(daily maximum rainfall)을 입력자료 및 지형·지질·임상학적 매개변수와 비집수면적 개념을 무한사면안정해석모형에 적용하여 전라북도 유역을 대상으로 미래 기후변화에 따른 중권역별 사면안정 변동성을 평가하였다.

#### 1. 미래 강우자료 생산 결과

본 연구에서는 ECHO-G에서 기후변화 시나리오의 산출을 위해 사용된 배출시나리오 중 IPCC 배출시나리오 특별보고서(Special Report On Emission Scenarios, SRES)의 A1B 시나리오 사용하여 산출된 GCM 자료를 이용하여 강우량 자료를 생산하였다. A1B 시나리오는 현재 이산화탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경에 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하며, 대기 중 이산화탄소 농도는 2100년경에 700ppm에 도달할 것으로 예상하는 시나리오이다. 기상청에서 제공하는 지역기후변화 자료는 한반도를 중심(38° N, 125° E)으로 27km 해상도를 가지며, 125(동서)×105(남북)의 격자점으로 구성되어 있는 MM5(Mesoscale Model Version5)모델에서 생산된 1971~2100년까지의 RCM 강우량자료이다. 생산된 RCM 강우량 자료에 내재된 편의(bias)로부터 발생하는 계통오차를 보완하고자 전라북도 6개(군산, 전주,

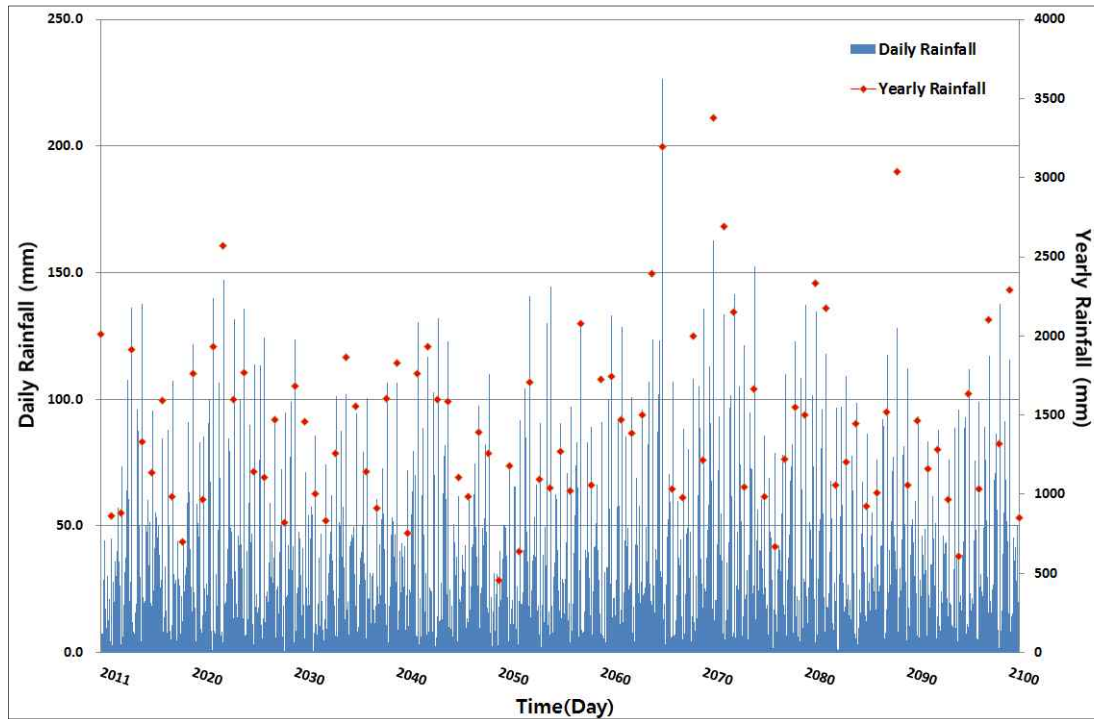


FIGURE 10. Daily and yearly rainfall of Jeonbuk for 2011~2100

TABLE 5. Summary of rainfall information for 3 periods of 2011~2100

Period	Yearly average rainfall (mm)	Number of rainy days (day)	Daily average rainfall (mm)	Daily maximum rainfall (mm)
P1 (2011~2040)	1248.6	159.6	7.7	73.8
P2 (2041~2070)	1396.4	162.2	8.4	78.4
P3 (2071~2100)	1359.2	163.2	8.1	82.0

부안 임실, 정읍, 남원) 지상관측소의 과거 40년(1971~2010)동안의 실측 강우량을 기준으로 계통오차 보정방법인 Quantile Mapping 방법을 사용하여 편의보정을 실시하였다. 또한, 대규모 기상순환과 같은 외부 인자에 영향을 받는 일강우량의 특성을 고려한 유역단위 상세 수문시나리오 생산을 위하여 비정상성 다지점 Markov Chain모형을 이용하여 미래(2011~2100)일강우량을 재생산 하였다. 이렇게 생산된 전라북도 6개 지상관측소의 미래 강

우량 자료를 역거리법(Inverse Distance Weight Method)을 이용하여 그림 10과 같이 전라북도 일평균 및 연평균 면적강우량을 산정 하였다.

표 5는 전라북도 수계에 대한 대상기간별 미래강우량 변동을 보여주고 있다. 세 기간(P1: 2011~2040, P2: 2041~2070, P3: 2071~2100)별 연평균강우량은 P1기간 대비 P2 및 P3기간 모두 증가하는 경향을 보였으나, P3기간의 경우 P2기간 대비 감소하는 경향을 나타

났다. 반면, 강수일수와 일최대강우량의 분석결과, P1기간 대비 P2 및 P3 미래 기간에 대해 지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

## 2. 무한사면안정해석모형을 이용한 사면안정성 평가결과

비 집수면적 개념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정모형에 앞서 제시한 년도 별 일 최대강우량 자료와 지형·지질·임상학적 매개변수를 적용하여 사면안정성 평가를 수행하였으며, 그림 11은 2100년 전라북도 중권역 별 사면안정 해석결과를 보여주고 있다. 본 연구에서는 Borga *et al.*(2002)이 제시한 바와 같이 외부영향인자에 의해 변화하는 안전율의 천이구간 변동성을 고려하기 위하여 안전율의 영역을 다음과 같이 4단계( $F_s < 1$ : Unstable,  $1 \leq F_s \leq 1.25$ : Quasi stable,  $1.25 \leq F_s \leq 1.5$ : Moderately stable,  $F_s > 1.5$ : stable)로 나누어 분석하였다. 그림 11에서 흰색 지역은 사면안정성이 1.5를 초과하는 안정된 상태이며, 붉은색 지역은 사면안정성이 1.0 미만인 불안정한 상태를 의미한다. 그림 12는 1971년부터

2100년까지 전라북도 중권역에 전체에 대한 평균 사면안정 해석결과를 보여주고 있다. 계산된 유역전체 평균 사면안정도는 1.361으로 Moderately Stable 상태로 미래 기후변화에 따른 유역 전체의 변동 양상은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이중 가장 큰 변동성이 보이는 기간은 1998년과 2065년도로 분석되었다. 이러한 안전율의 변화원인은 강수량의 변화에 의한 것으로 관측기간에 해당하는 1971년부터 2010년까지 기간 중 가장 큰 변동성을 보이는 1998년의 일 최대강수량은 179mm로 일 최대강수량의 40년(1971~2010) 평균치인 115mm 대비 62mm 더 많게 관측되었으며, 미래기간에 해당하는 2011년부터 2100년까지 기간 중 가장 큰 변동성을 보이는 2065년의 일 최대강수량은 226mm로 90년(2011~2100) 평균치인 106mm 대비 약 120mm 더 많게 모의되어 안전율에 영향을 미친 것으로 분석되었다. 각 중권역이 가지는 지형·지질·임상·기상학적 공간적 차이에 따른 미래기간(2011~2100)동안의 사면안정성을 평가하기 위하여 전라북도 20여개 중권역을 대상으로 현

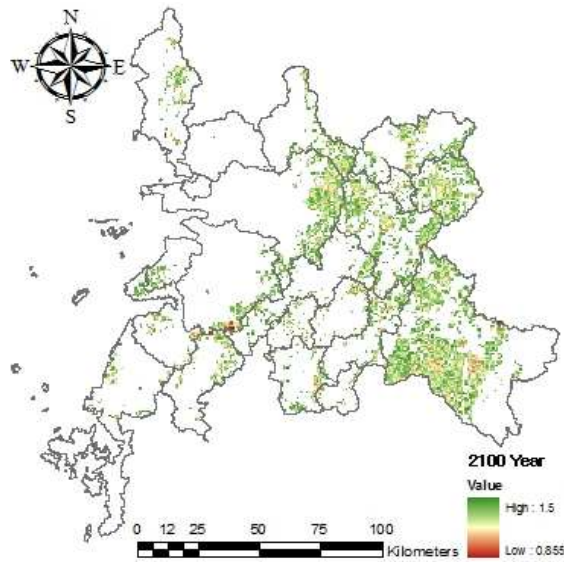


FIGURE 11. Analytical result of slope stability in the year 2100

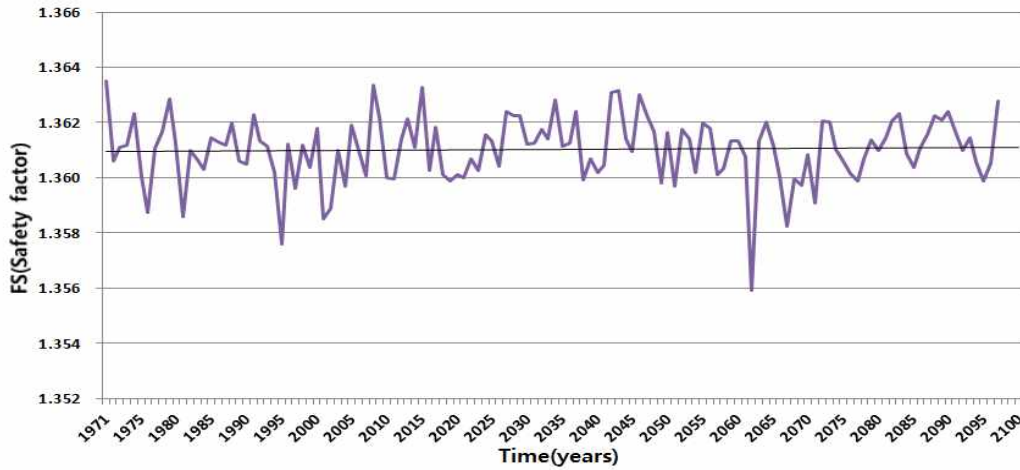


FIGURE 12. Areal-average safety factor time series of Jeonbuk for 1971~2100

재기간(1971~2000, 이하 P0)대비 미래기간 (P1, P2, P3)에 대한 사면안전성의 변동양상을 그림 13과 같이 정리하였다. 그림 13에서 (+) 기호는 현재대비 안정성이 증가한 지역을 의미 하며, (-) 기호는 안정성이 감소한 것을 의미 한다. 기후변화에 따른 현재기간대비 전반적인 중권역별 변화양상은 P1 기간에 용담댐하류, 섬진강댐, 섬진곡성 등 3개소에서 정량적으로 가장 큰 안전율의 변동성을 보였다. 중권역별 불안정성을 보이는 개소수는 연평균강우량 및 일평균강우량이 증가하는 P2 기간에 가장 많은 중권역(남강댐, 용담댐하류, 영동천, 만경강, 직

소천, 섬진강댐하류, 오수천, 섬진곡성, 황룡강 등 9개소)에 걸쳐 감소 경향을 보였으며, 이후 P1 및 P3 순으로 감소하는 양상을 보였다. 미래 강우량의 변화에도 현재기간 대비 안전율의 지속적인 증가양상을 보이는 중권역은 7개소 (용담댐, 무주남대천, 논산천, 금강하구언, 동진강, 주진천, 와탄천)였으며, 현재기간 대비 안전 율이 지속적으로 감소하는 중권역은 5개소(용 담댐하류, 영동천, 오수천, 섬진곡성, 황룡강) 나타났다.

또한, 전라북도 전체유역의 사면안전성 평가 결과의 평균값(대상기간: 1971~2100, Avg.

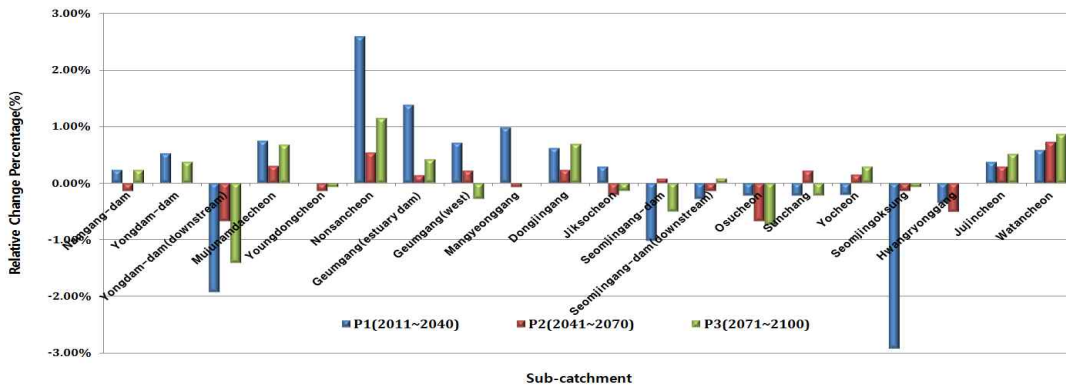


FIGURE 13. Relative safety factor of 20 sub-catchments



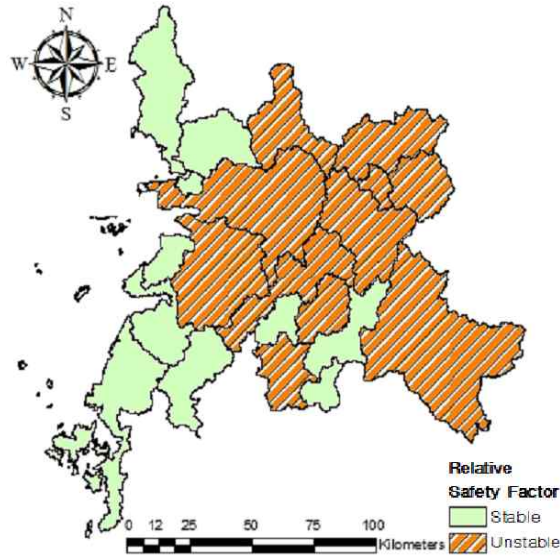


FIGURE 14. Stable or unstable sub-catchments based on the areal-average safety factor of Jeonbuk

TABLE 6. Relative percentage of slope stability of 20 sub-catchments(Unit: %)

Sub-catchment	Period	P0	P1	P2	P3
		(1971~2010)	(2011~2040)	(2041~2070)	(2071~2100)
2018	Namgang-dam	-2.88	-2.92	-2.89	-2.90
3001	Yongdam-dam	-1.35	-1.39	-1.36	-1.37
3002	Yongdam-dam(downstream)	-1.30	-1.36	-1.32	-1.34
3003	Mujunamdaecheon	-2.09	-2.12	-2.10	-2.11
3004	Youngdongcheon	-2.19	-2.23	-2.20	-2.21
3013	Nonsancheon	-3.61	-3.62	-3.61	-3.62
3014	Geumgang(estuary dam)	6.11	6.08	6.10	6.09
3203	Geumgang(west)	3.02	2.99	3.01	3.00
3301	Mangyeonggang	-2.15	-2.18	-2.16	-2.18
3302	Dongjingang	-4.63	-4.67	-4.64	-4.65
3303	Jiksocheon	3.11	3.07	3.10	3.09
4001	Seomjingang-dam	-0.04	-0.09	-0.05	-0.07
4002	Seomjingang-dam(downstream)	3.00	2.96	2.99	2.98
4003	Osucheon	-1.36	-1.41	-1.38	-1.39
4004	Sunchang	-1.30	-1.35	-1.31	-1.33
4005	Yocheon	0.23	0.19	0.23	0.22
4006	Seomjingoksung	0.44	0.37	0.43	0.42
5002	Hwangryonggang	1.78	1.73	1.76	1.75
5301	Jujincheon	0.04	-0.01	0.03	0.02
5302	Watancheon	1.56	1.52	1.56	1.54



FS. 1.361) 대비 현재 및 미래기간(P1, P2, P3) 중권역별 사면안정성 상대평가 결과는 표 6과 같으며, (+) 기호는 전체유역 평균 사면안정성 대비 안정성이 높은 지역을 (-) 기호는 안정성이 낮은 지역을 의미한다. 표 6의 결과를 기준으로 그림 14와 같이 도시하였으며, 각 대상기간별(P0, P1, P2, P3) 중권역의 상대사면안정도 분석결과 9개의 중권역(금강하구연, 금강서해, 직소천, 섬진강댐 하류, 요천, 섬진곡성, 황룡강, 주진천, 와탄천)이 전라북도 전체유역 사면안정성 평균보다 안정된 것으로 분석되었으며, 나머지 11개 중권역(남강댐, 용담댐, 용담댐 하류, 무주남대천, 영동천, 논산천, 만경강, 동진강, 섬진강댐, 오수천, 순창)은 상대적으로 불안정한 것으로 확인되었다.

## 결론

본 연구에서는 전라북도 수계(20개 중권역)을 대상으로 광역 사면안정해석 방법론에 근거하여 기상청에서 제공하는 지역규모의 A1B 시나리오 기반의 RCM 자료와 비집수면적 개념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정모형을 이용하여 미래 기후변화에 따른 사면안정 변동성을 평가하였다. 광역 사면안정해석을 위해 필요한 중요 지형학적, 지질학적, 임상학적 매개변수의 공간정보 데이터베이스를 구축하였으며, 1971년부터 2000년까지를 현재기간(P0), 2011년부터 2040년(P1), 2041년부터 2070년(P2), 2071년부터 2100년(P4)까지를 미래기간으로 하여 연도별 일최대강우량을 입력자료로 하여 현재기간 대비 미래기간 동안의 전라북도 수계 20개 중권역에 대한 사면안정성의 변동성을 분석하였다. 이상의 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 전라북도 수계내 미래강우량 변동성 분석 결과, 연평균강우량은 P1기간 대비 P2 및 P3기간 모두 증가하는 경향을 보였으나, P3기간의 경우 P2기간 대비 감소하는 경향을 나타냈다. 반면, 강수일수와 일최대강우량의 분석결과, P1기간 대비 P2 및 P3 미래 기간에 대해

지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

둘째, 전라북도 수계내의 지형·지질학적 특성분석결과 금강과 남강의 상류에 위치한 무주남대천, 남강댐, 용담댐, 영동천 유역의 표토토성군은 사양토(52.7%), 양토(35.3%)로 구성되어 있으며, 대표적인 지질학적 매개변수의 평균값은 포화단위중량  $2,170\text{kg}/\text{m}^3$ , 내부마찰각  $28^\circ$ , 흙의 점착력  $405\text{kg}/\text{m}^2$ , 평균 유효토심  $0.49\text{m}$ , 평균 투수계수는  $500.2\text{mm}/\text{day}$  분석되었다. 또한, 유역하류 및 평야지대에 위치한 만경강·동진강 유역의 경우 지역적 특성으로 다양한 표토 토성군으로 구성되어 있으며, 대표적인 표토토성군은 양토(45%), 미사질양토(23%), 사양토(21%)로 나타났다. 대표적인 지질학적 매개변수의 평균값은 포화단위중량  $2,150\text{kg}/\text{m}^3$ , 내부마찰각  $25^\circ$ , 흙의 점착력  $740\text{kg}/\text{m}^2$ , 평균 유효토심은  $0.69\text{m}$ 였으며, 평균 투수계수는  $376.8\text{mm}/\text{day}$ 로 나타났다. 지질·지형학적 특성을 볼 때 무주남대천, 남강댐, 용담댐, 영동천 유역은 급경사지역이 많은 비중을 차지하며, 표토토성 구성상 모래의 함량이 매우 높은 사양토 계열로서 사면의 안정성 측면에 있어 만경강과 동진강 유역에 비해 상대적으로 불안정할 것으로 분석되었다.

셋째, 전라북도 20여개 중권역이 가지는 매개변수의 공간 변동성에 따른 미래기간(2011~2100)의 사면안정성을 평가하기 위하여 P0기간 대비 미래기간(P1, P2, P3)에 대한 사면안정성의 변동양상을 분석한 결과 P1기간에 용담댐하류, 섬진강댐, 섬진곡성 등 3개소에서 정량적으로 가장 큰 안전율의 변동성을 보였다. 중권역별 불안정성을 보이는 개소수는 연평균강우량 및 일평균강우량이 증가하는 P2기간에 가장 많은 중권역(남강댐, 용담댐하류, 영동천, 만경강, 직소천, 섬진강댐하류, 오수천, 섬진곡성, 황룡강 등 9개소)에 걸쳐 감소 경향을 보였으며, 이후 P1 및 P3 순으로 감소하는 양상을 보였다. 미래 강우량의 변화에도 현재기간 대비 안전율의 지속적인 증가양상을 보이는 중권역은 7개소(용담댐, 무주남대천, 논산천, 금강하

구인, 동진강, 주진천, 와탄천)였으며, 현재기간 대비 안전율이 지속적으로 감소하는 중권역은 5개소(용담댐하류, 영동천, 오수천, 섬진곡성, 황룡강) 나타났다.

넷째, 전라북도 수계의 1971년부터 2100년 까지 중권역에 대한 유역전체 평균 사면안정도는 1.361로 Moderately Stable 상태였으며, 미래 기후변화에 따른 유역 전체의 변동 양상은 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 또한, 전라북도 전체유역의 평균사면안정도 대비 중권역별 사면안정성 상대평가 결과는 20개의 중권역중 9개의 중권역(금강하구인, 금강서해, 직소천, 섬진강댐 하류, 요천, 섬진곡성, 황룡강, 주진천, 와탄천)이 전라북도 전체유역 사면안정성 평균보다 안정된 것으로 분석되었으며, 나머지 11개 중권역(남강댐, 용담댐, 용담댐 하류, 무주남대천, 영동천, 논산천, 만경강, 동진강, 섬진강댐, 오수천, 순창)은 상대적으로 불안정한 것으로 확인되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음. **KAGIS**

## REFERENCES

- Borga, M., G. Dalla Fontana, D. Da Ros and L. Marchi. 1998. Shallow landslide hazard assessment using physically based model and digital elevation data. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 35:81-88.
- Borga, M., G. Dalla Fontana and F. Cazorzi. 2002. Analysis of topographic and climatic control on rainfall triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *Journal of Hydrology* 268:56-71.
- Borgatti, L. and M. Soldati. 2010. Landslides as a geomorphological proxy for climate change: a record from the Dolomites (northern ITALY). *Geomorphology* 120(I-2):56-64.
- Choi, B.S., S.R. Oh, K.H. Lee, G.H. Lee and H.H. Kwon. 2013. Large-scale slope stability analysis using climate change scenario (1): methodologies. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(3):193-210 (최병습, 오성렬, 이근혁, 이기하, 권현한. 2013. 기후변화 시나리오를 이용한 광역 사면안정 해석(1): 방법론. *한국지리정보학회지* 16(3): 193-210).
- Choi, J.R. 2010. Assessment of potential landslides in Naerin watershed: linking eco-hydrology model and stability model. Master Thesis, Kangwon National University, Korea. pp.34-41 (최정렬. 2010. 생태수문모형과 사면안정모형을 이용한 내린천 유역의 잠재 산사태 위험도 평가. 강원대학교 대학원 석사학위논문. 34-41 쪽).
- Kim, B.S. 2013. Climate change and landslide. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4):44-51 (김병식. 2013. 기후변화와 토사재해, *한국방재학회지* 13(4):44-51).
- Kim, H.G., D.K. Lee, Y.W. Mo, S.H. Kil, C. Park and S.J. Lee. 2013. Prediction of landslides occurrence probability under climate change using MaxEnt model. *Journal of Environment Impact Assessment* 22(1):39-50 (김호걸, 이동근, 모용원, 길승호, 박찬, 이수재. 2013. MaxEnt 모형을 이용한 기후변화에 따른 산사태 발생 가능성 예측. *한국환경영향평가학회지* 22(1):39-50).
- Kim, K.S., W.Y. Kim, B.G. Chae, Y.S. Song

- and Y.C. Cho. 2005. Engineering geological analysis of landslides on natural slopes induced by rainfall -Yongin · Ansong area-. The Journal of Engineering Geology 15(2):105-121. (김경수, 김원영, 채병공, 송영석, 조용찬. 2005. 강우에 의해 발생된 자연사면 산사태의 지질 공학적 분석 -용인·안성지역을 대상으로-. 대한지질공학회지 15(2):105-121).
- Kim, M.G. 2005. GIS landslide hazard mapping using root strength reinforcement model. Master Thesis, SungKyunKwan University, Korea. pp.1-29 (김민구. 2005. 뿌리보강모델을 활용한 GIS 산사태 위험도 작성방법연구. 성균관대학교 대학원 석사학위논문. 1-29쪽).
- Kim, S.W., K.W. Chun, J.H. Kim, M.S. Kim and M.S. Kim. 2012. Characteristics of heavy rainfall for landslide-triggering in 2011. Journal of Korea Forest Society 101(1):28-35 (김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석. 2012. 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성분석. 한국임학회지 101(1):28-35).
- Lee, G.H., S.R. Oh, H.U. An and K.S. Jung. 2012. A comparative analysis on slope stability using specific catchment area calculation. Journal of Korea Water Resources Association 45(7):643-656 (이기하, 오성렬, 안현욱, 정관수. 2012. 학술논문 비 집수면적 산정기법에 따른 사면 안정성 비교·분석. 한국수자원학회논문집 45(7):643-656).
- Lee, H.W. 2011. Analysis of Landslide susceptibility using probabilistic method and GIS. Master Thesis, Sejong University, Korea. pp.1-87 (이현우. 2011. 확률론적 해석기법과 지리정보시스템(GIS)를 이용한 산사태 취약성 분석. 세종대학교 대학원 석사학위논문 1-87쪽).
- Lee, J.W. 2005. Survey about large-scale damaged mountain, monitoring scheme for cause analysis and sustainable forest conservation. Korea Forest Conservation Association. 36pp (이준우. 2005. 대규모 산지훼손지 실태조사, 원인분석 및 지속가능한 산지보전을 위한 모니터링 방안. 한국산지보전협회. 36쪽).
- Lee, M.J., S.R. Lee and S.W. Jeon. 2012. Landslide hazard mapping and verification using probability rainfall and artificial neural networks. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(2):57-70 (이명진, 이사로, 전성우. 2012. 미래 확률강우량 및 인공지능망을 이용한 산사태 위험도 분석 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 15(2): 57-70).
- Lee, S.R. 1999. Development and application of landslide susceptibility analysis techniques using Geographic Information System(GIS). Doctorate Thesis, Yonsei University, Korea. pp.148-150 (이사로. 1999. 지리정보시스템(GIS)를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구. 연세대학교 대학원 박사학위논문. 148-150쪽).
- Montgomery, D.R. and W.E. Dietrich. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research 30(4):1153-1171.
- National Disaster Management Institute. 2003. Slope failure disaster research using geographic information system. 80pp (국립방재연구소. 2003. 지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해 연구. 80쪽).

- Park, D.K., J.L. Oh and J.H. Park. 2006. Ground disasters and policy about prevention of disasters in Korean. The Journal of Engineering Geology. pp.185-189 (박덕근, 오정림, 박정훈. 2006. 우리나라 지반재해와 방재정책. 대한지질공학회 심포지움 논문집. 185-189쪽).
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Proceedings of a Symposium ASCE, New York. pp.293.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek and N. Miller. 1983. Green-ampt infiltration parameters from soil data. Journal of Hydraulic Engineering 109(1):62-70.
- Wu, T.H., W.P. McKinell and D.N. Swanston. 1979. Strength of tree roots and landslide on prince of Wales island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal 16(1):19-33.
- Yeon, Y.K. 2011. Evaluation and analysis of Gwangwon-do landslide susceptibility using logistic regression. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 14(4):116-127 (연영광. 2011. 로지스틱 회귀분석 기법을 이용한 강원도 산사태 취약성 평가 및 분석. 한국지리정보학회지 14(4):116-127). [KAGIS](#)