Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 16(3) 2013, pp. 193-210
http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2013.16.3.193

기후변화 시나리오를 이용한 광역 사면안정 해석(1): 방법론

최병습[1] · 오성렬[2] · 이건혁[1] · 이기하[3※] · 권현한[4]

Large-Scale Slope Stability Analysis Using Climate Change Scenario (1): Methodologies

Byoung-Seub CHOI[1] · Sung-Ryul OH[2] · Kun-Hyuk LEE[1] · Gi-Ha LEE[3※] · Hyun-Han KWON[4]

요 약

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 공간해상도 27km 지역규모의 A1B 시나리오 기반의 RCM 자료와 비집수면적 개념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정모형을 이용하여 전라북도 수계를 대상으로 미래 기후변화에 따른 사면안정 변동성을 평가하였다. 우선, 미래의 사면안정성 변동성 평가를 위하여 RCM 자료는 공간적으로 유역단위에서 강우관측소 지점단위로, 시간적으로 월단위에서 일단위 자료로 다운스케일링을 수행하였다. 또한, 무한사면안정모형의 중요 매개변수인 습윤지수 산정을 위하여 비집수면적 개념을 도입하여 격자기반의 습윤지수 정보를 획득하였으며 범용수치지형도, 정밀토양도, 임상도를 이용하여 지형 · 지질 · 임상학적 매개변수을 추출하여 GIS기반의 무한사면안정모형을 구축하였다. 이상의 미래 강우입력자료와 무한사면안정모형을 이용하여 현재(1971~2000)대비 미래(2010~2100)에 대한 사면안정 변동성을 평가하였다. 본 논문은 2편으로 구성되어 있으며, 제1편에서는 기후변화 시나리오에 따른 사면안정 변동성 해석을 위한 RCM자료의 가공 및 무한사면안정모형의 구축 등 방법론을 제시한다.

주요어 : 기후변화, A1B 시나리오, 전라북도, 무한사면안정모형, 비집수면적

ABSTRACT

This study aims to assess the slope stability variation of Jeollabuk-do drainage areas by RCM model outputs based on A1B climate change scenario and infinite slope stability model based on the specific catchment area concept. For this objective, we

2013년 8월 2일 접수 Received on August 2, 2013 / 2013년 9월 24일 수정 Revised on September 24, 2013 / 2013년 9월 27일 심사완료 Accepted on September 27, 2013

1 한국수자원공사 설계지원처 Engineering Services Dept. Korea Water Resources Corporation
2 국토교통부 금강홍수통제소 Geum River Flood Control Office, Ministry of Land, infrastructure and Transport
3 경북대학교 건설방재공학부 School of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University
4 전북대학교 토목공학과 Dept. of Civil Engineering, Jeonbuk National University
※ Corresponding Author E-mail : leegiha@gmail.com

downscaled RCM data in time and space: from watershed scale to rain gauge scale in space and from monthly data to daily data in time and also developed the GIS-based infinite slope stability model based on the concept of specific catchment area to calculate spatially-distributed wetness index. For model parameterization, topographic, geologic, forestry digital map were used and model parameters were set up in format of grid cells(90m×90m). Finally, we applied the future daily rainfall data to the infinite slope stability model and then assess slope stability variation under the climate change scenario. This research consists of two papers: the first paper focuses on the methodologies of climate change scenario preparation and infinite slope stability model development.

KEYWORDS : Climate Change, A1B Scenario, Jeollabuk-do, Infinite Slope Stability Model, Specific Catchment Area

서 론

우리나라의 경우 국토의 65%이상이 산지로 구성되어 있는 지형학적 특성 및 화강암 및 편마암이 풍화된 지질학적 특성으로 인해 토양침식 및 산사태 발생 위험에 노출되어 있으며, 매년 전국 각지에서 산사태로 인한 인명 및 재산피해가 반복적으로 발생하고 있다. 1989년부터 2005년까지 우리나라에서 발생한 산사태로 인한 사망자는 총 472명(연평균 약 28명), 산사태 발생면적은 1970년대 300ha에서 2000년대 들어서 700ha로 두 배 가량 증가하였다(Park *et al.*, 2006). 산사태는 일반적으로 강원도 등과 같은 산간지역에서 집중적으로 발생하였으나, 최근에는 국지성 집중호우로 인해 인구 및 자산이 밀집되어 있는 수도권 등 도심지역에서도 산사태 발생빈도가 증가하고 있다(Lee, 2012). 실제로 산림청의 '2011년 산사태 관련 통계' 에 따르면 2001년부터 2010년까지 서울·경기 지역의 산사태 평균 피해면적이 6.1(ha)인 반면, 우면산 산사태가 발생한 2011년의 경우 152.7(ha)으로 보고된 바 있다.

이러한 산사태를 포함한 사면재해의 주요 원인은 집중호우(강우)이며, 최근 지구온난화로 인한 기상이변으로 태풍 및 국지성 집중호우의 발생빈도가 빈번해짐에 따라 산사태 발생위험성은 점차 증가할 것으로 예측되고 있다. 그림

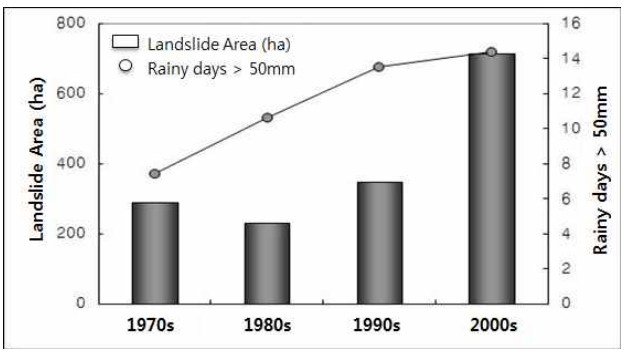


FIGURE 1. Trends of landslide area and recovery costs(Korea Forest Service)

1과 같이 50mm 호우일수는 1970년대 7.4일에서 2000년대 14.4일로 약 2배 이상 증가하였으며, 이러한 집중호우의 발생빈도가 증가함에 따라 산사태 발생면적 역시 약 2배 이상 증가하고 있는 추세이다(Forest Service, 2012).

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 따르면, 지구평균기온은 지난 1세기 동안 약 0.74℃ 상승하였으며, 이산화탄소 농도는 산업혁명 이전 280ppm과 비교하여 2000년에는 370ppm으로 증가하였다고 분석한 바 있다(IPCC, 2007). 한반도의 경우, 평년(1971~2000) 대비 21세기말(2071~2100) 우리나라의 기온은 4℃ 상승하고, 강수량은 17% 증가할 것으로 전망하고 있다(기상청, 2009). 또한, 강수량은 증가하는 반면, 강수일수가 감소하여 많은 양의 강우가 일시에 내리는 집중호우의 일수가 증가할 것으로 전망하고 있다. 이와 같이 기후변화에 따른 집중호우의 증가로 인해 산사태 등과 같은 토사재해 발생 위험성이 증가할 것으로 예측되므로 이에 대비하기 위해 다양한 기후변화 시나리오를 반영한 산사태 방지정책이 마련되어야 할 것이며, 재해예방 및 피해저감 대책 차원에서 기후변화에 따른 산사태 위험성 변동성 평가가 요구된다(Yeon, 2011; Lee *et al.*, 2012).

Ministry of Environment(2012)에서는 기후변화에 따른 산림 부문별 취약성 평가를 위하여 ① 집중호우에 의한 산사태 취약성, ② 산사태에 의한 임도 및 등산로의 취약성을 평가항목으로 선택하여 그 취약성을 평가한 바 있다. 특히, 집중호우에 의한 산사태 취약성 평가의 경우, 기후노출(일강우량이 80mm이상인 날의 횟수 외 3개 지표), 민감도(산림 내 평균경사도 외 3개 지표), 적응능력(산림 공무원수 외 3개 지표)에 대한 대용변수를 선택하여 우리나라 전역에 대해 행정구역별로 취약성을 평가하였으며, 현재대비 미래에는 산사태 취약지역이 전국적으로 확대될 것으로 예측하고 있다. 그러나 이 연구에서는 취약성 평가를 위한 대용변수 및 가중치 선정에 객관성이 결여될 수 있으며, 산사태의 물리적 발생 메카니즘을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. Lee(2013)는 IPCC 제5차 보고서의 RCP 8.5(Representative Concentration Pathways 8.5) 기후변화 시나리오를 이용하여 우리나라 산지토사재해 변화경향의 공간분석을 실시하였으며, 우리나라 전국을 대상으로 연도별 산사태발생기준우량(산사태 발생 가능성이 높은 강우량 값의 기준)을 넘어서는 지역 및 빈도를 분석하여 위험도의 변화를 예측하였다. 이 연구에서는 공간해상도가 12.5km×12.5km인 RCP 8.5 자료를 그대로 활용했으며 기후변화 자료의 편의(bias)보정을 생략함에 따라 분석결과에 불확실성을 내포하고 있고, Ministry of Environment(2012)의 연구결과와 마찬가지로 산사태 발생 메커니즘을 반영하지 않고 산사태발생기준우량대비 미래 강우량자료의 증감에 따라 위험성을 평가하였다.

이상의 연구들은 우리나라 전역을 대상으로 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 산사태 위험성을 광역적으로 평가한 사례지만, 취약성 평가를 위한 대용변수 선택의 주관성, 기후변화 자료의 편의 미보정, 기상 · 지형 · 지질 · 임상학적 산사태 발생 메카니즘이 반영되지 않아 분석결과의 정확도에 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 편의보정된 기후변화 시나리오 및 물리적 기반의 사면안정 해석모형을 이용하여 전라북도 수계지역에 대해 산사태 발생 위험성 변동성 평가를 수행함으로서 전술한 불확실성 요소를 제거하고, 분석결과의 정확도를 제고하였다.

기후변화 시나리오는 기상청에서 제공하는 공간해상도 27km 지역규모의 A1B 시나리오 기반의 RCM(Regional Climate Model)을 선택하여 공간적으로 유역단위에서 강우관측소 지점단위로, 시간적으로 월단위에서 일단위 자료로 다운스케일링을 수행하였다. 또한, 산사태 발생 위험성 평가를 위해 범용수치지형도, 정밀토양도, 임상도를 이용하여 지형 · 지질 · 임상학적 매개변수을 추출하여 GIS기반의 무한사면안정모형을 구축하였다. 이상의 미래 강우입력자료와 무한사면안정모형을 이용하여 현재(1971

~2000)대비 미래(2010~2100)에 대한 사면안정 변동성을 평가하였다. 본 논문은 2편으로 구성되어 있으며, 제1편에서는 기후변화 시나리오에 따른 사면안정 변동성 해석을 위한 RCM 자료의 가공 및 무한사면안정모형의 구축 등 방법론에 대해 상세히 기술하고, 제2편에서는 구축된 모형을 이용하여 분석된 전라북도 수계지역의 사면안정 변동성 결과를 제시한다.

기후변화 시나리오

1. 대상 시나리오

일반적으로 전지구를 대상으로 기후변화 시나리오를 생성하기 위해서는 GCM(General Circulation Model or Global Climate Model)을 사용한다. GCM은 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자시스템으로 구성하고 각 격자점에서의 대기 상태를 지배하는 방정식(운동량, 연속, 정역학, 열역학, 상태 방정식 등)을 시간 적분하여 지구의 대기상태를 재현 및 예측하는 모형이다(Ahn *et al.*, 2001). 이러한 GCM의 결과물들은 시·공간적으로 해상도가 낮아 우리나라 또는 더 세분화된 지역에 적용하기에는 어려움이 있으므로 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의 유역에 대한 수문기상학적 분석을 실시하거나, GCM 결과를 경계조건으로 한 후 RCM을 사용하여 국지규모에 대한 분석을 실시하는 방법 등이 주로 이용된다(Park *et al.*, 2011).

ECHO-G 모형은 독일의 MIUB(Meteorological Institute of the University of Bonn)와 한국의 기상청이 공동연구하여 개발한 GCM으로써 대기모형인 ECHAM4와 해양-해빙 모델인 HOPE-G로 구성되어 있다. ECHO-G의 대기모형과 해양모형의 해상도는 각각 약 400km와 300km이며, 전술한 바와 같이 GCM의 저해상도(low resolution)로 인해 강수 및 온도에 영향을 미치는 지형인자에 대한 특성을 전혀 고려하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 GCM 해상도 문제점을 해결하기 위해 통계학적 또는 역학적 상세화기법(downscaling method)이 사용되며, 기상청에서는 미국 펜실베니아 대학에서 개발한 MM5(Mesoscale Model Version 5)를 이용한 역학적 상세화기법을 통해 저해상도의 GCM(ECHO-G)자료를 27km의 고해상도로 상세화하여 한반도 미래 기후 예측자료를 작성하였다.

본 연구에서는 기상청 기후변화정보센터에서

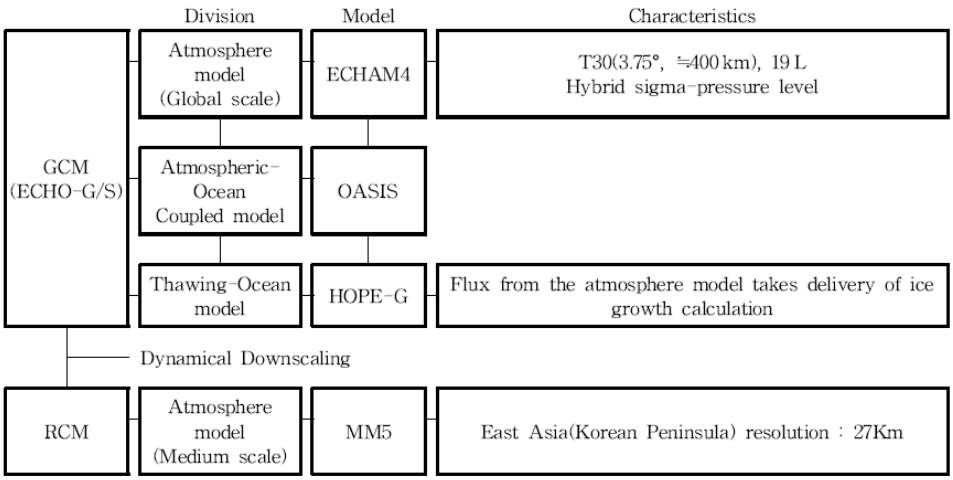


FIGURE 2. GCM and RCM of National Institute of Meteorological Research (Park *et al.*, 2011)

제공하는 A1B 시나리오를 사용하였다. A1B 시나리오는 현재 이산탄소의 배출량이 점차 증가하여 2050년경 정점에 도달한 다음 그 이후 다소 감소하는 시나리오로 대기 중 이산화탄소의 농도는 2100년경 720 ppm까지 도달할 것으로 예상하고 있다. 즉, A1B 시나리오는 미래에도 화석에너지 및 고효율 에너지원이 균형있게 사용된다고 가정하고 있으며, 현실에 가장 잘 부합하여 기후변화에 따른 영향성 평가에 많이 사용되는 시나리오로 알려져 있다(Kwon *et al.*, 2007). 본 연구에서 사용된 A1B 시나리오 생성절차는 그림 2와 같다.

2. RCM 편의보정

전라북도 지역에 대해 RCM 자료의 정확도를 평가하기 위해 과거 30년(1979~2008)에 대한 기상청의 지상관측소와 RCM에서 생성된 전라북도 지역에 대한 연평균 면적강우량을 비교 · 분석하였다. 그림 3은 RCM 해상도(27km ×27km)로 분할된 전라북도 지역을 나타내고 있으며, 그림 4는 연평균강우량의 비교결과를 보여주고 있다. 또한 그림 5는 비모수적 검정기법중 하나인 Mann-Kendall Test를 이용하여 전라북도 행정구역별로 지상관측소와 RCM 강우량의 경향성(붉은색: 감소, 파란색: 증가)을 평가한 결과이다.

그림 4에서 알 수 있듯이 과거 30년 동안 지상관측소와 RCM의 강우량 자료를 비교해보면, RCM 자료가 전반적으로 과소산정되었으며, 공간적으로도 지상관측소와 달리 RCM의 경우, 부안군에서만 강우량의 증가경향을 보이고 있으며 나머지 지역에서는 강우량이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 RCM 자료의 편의보정없이 미래자료를 생성할 경우 시 · 공간적으로 예측결과에 상당한 불확실성이 포함될 수 있으며, 기후변화에 따른 산사태 등 재해영향에 실질적인 평가를 위해서는 기후변화 시나리오가 가지는 편의문제, 불확실성문제, 시 · 공간적 스케일의 상이성 등을 고려한 상세 기후변화시나리오 기법의 적용이 필요함을 의미한다.

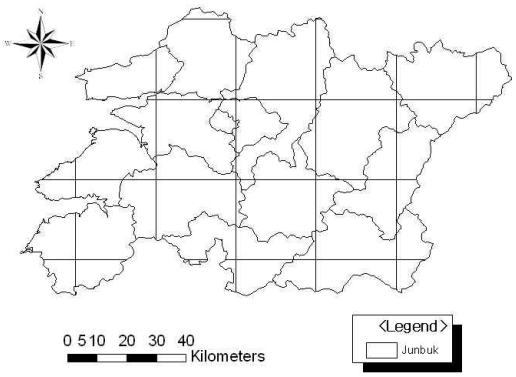


FIGURE 3. Spatial resolution of RCM in Jeollabuk-do

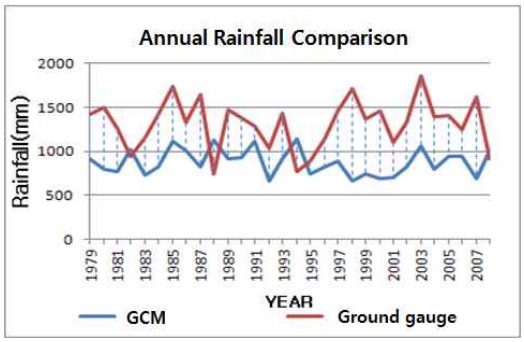
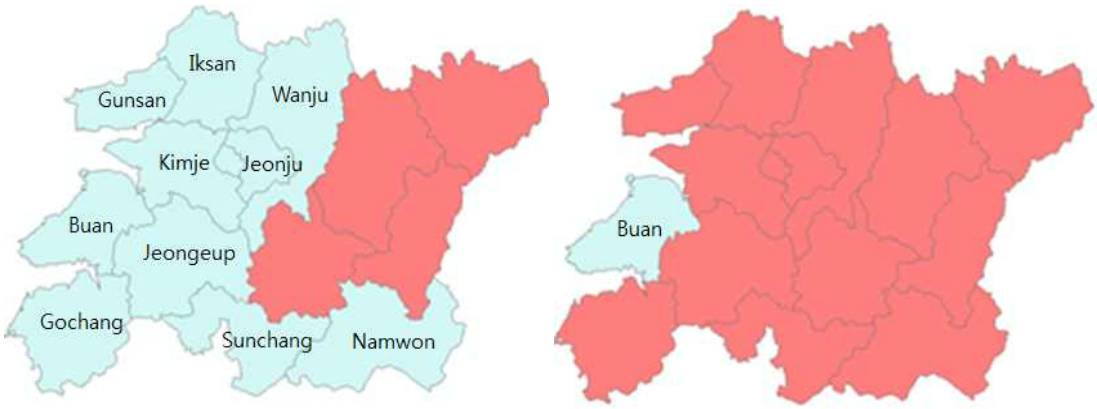


FIGURE 4. Comparison of annual rainfall between ground gauges and RCM for the past 30 years

RCM에서는 여러 입력 자료를 구축하는 과정에서 일정 정도의 편의(bias)가 내재되어 계통오차(systematic discrepancy)가 포함된 결과를 얻게 되며, 본 연구에서는 이를 보정하고자 계통오차 제거방법인 Quantile Mapping 방법을 사용하였다. Quantile Mapping은 RCM에 의한 모의 자료가 동일한 비초과확률을 갖는 관측자료의 크기로 대체되어 단순히 형태를 맞추는 것이 아니라 과거 자료로부터 관측자료와 모의 자료의 통계치를 일대일(one-to-one)로 대응하는 과정을 반복함으로서 편의를 보정하게 된다.

그림 6은 본 연구에서 편의보정을 위해 선택된 전라북도내 6개의 지상관측소(군산, 전주,



(a) Ground Gauge (b) RCM

FIGURE 5. Spatial comparison of annual rainfall trend between ground gauges and RCM for the Past 30 years (Red: downward, Blue: upward)

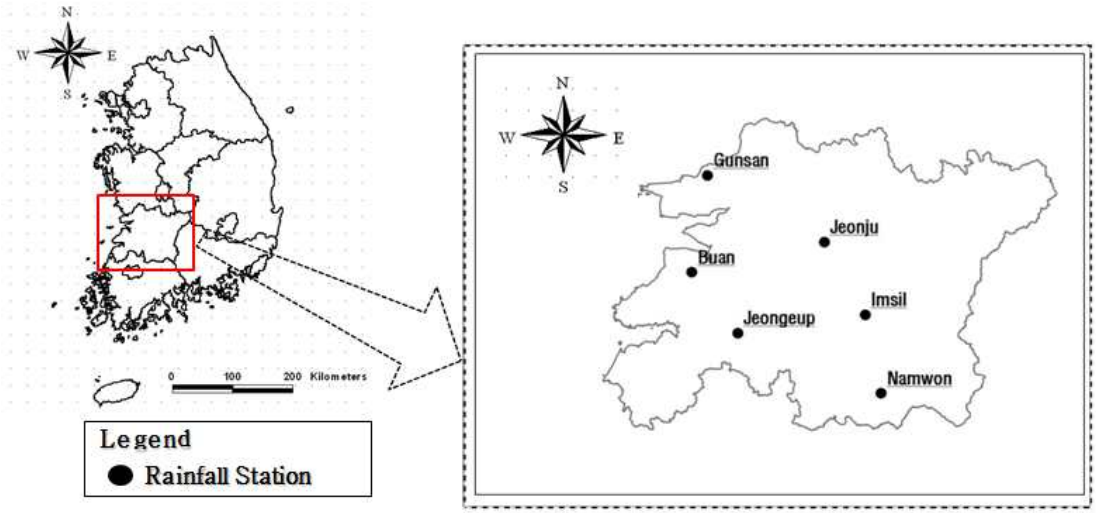


FIGURE 6. Selected ground gauges for Bias Correction using Quantile Mapping

부안, 임실, 정읍, 남원)를 나타내고 있으며, 그림 7은 전주지점의 강우자료를 사용하여 Quantile Mapping을 실시한 그림으로 관측자료에 대한 비초과확률을 도시 후 모의값과의 일대일 대응 과정을 통하여 편의를 가지는 RCM자료 보정결과를 보여주고 있고, 그림 8은 전라북도 내 6개 지점에 대해 편의보정된 RCM의 월별 강우량을 도시한 결과로써 강우량의 월별 변동성이 유지되면서 편의가 보정된 것을 확인할 수 있다.

3. 기후변화 시나리오 생성

그림 4와 5와 같이 현재까지 개발된 GCM이나 RCM 등의 기후변화 시나리오는 실제 관측된 강수의 특성을 재현하지 못하는 문제점을 가지는 것으로 보고되고 있다(Moon *et al.*, 2010). 따라서 다양한 기후변화 영향성 평가를 위해서는 일반적으로 상세화기법을 통해 기후

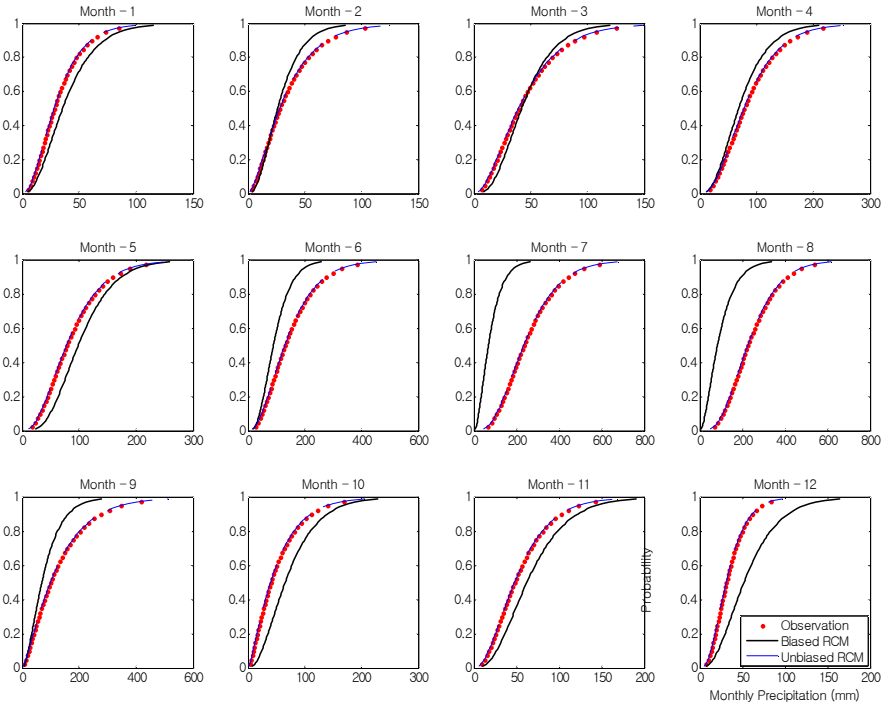
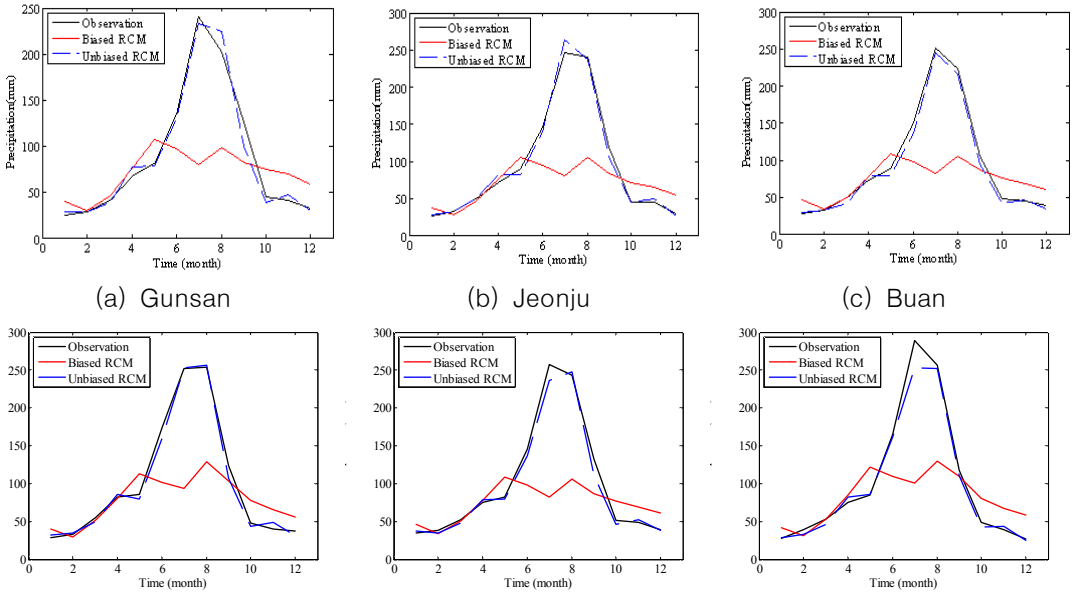


FIGURE 7. Bias correction of RCM by quantile mapping(Jeonju)



(a) Gunsan (b) Jeonju (c) Buan

(d) Imsil (e) Jeongeup (f) Namwon

FIGURE 8. Comparison between biased and unbiased RCM rainfall

변화 영향을 유역단위에 상세수문시나리오로 재생산이 필요하다.

본 연구에서는 대규모 기상순환과 같은 외부인자에 영향을 받는 일강수량의 특성을 고려하여 비정상성 Markov Chain모형(Kwon and Kim, 2009)을 이용하여 미래 강우자료를 생성하였다. 이 모형은 추계학적 모형인 Markov Chain과 통계학적 상세화기법을 결합한 방법으로 비조건부 Markov Chain모형의 매개변수를 외부 인자와 연결하기 위하여 회귀분석이 이용된다. 이 매개변수들은 무강수에서 강수로 진행하는 천이확률, 강수에서 강수로 진행하는 천이확률, 강우량을 모의하기 위한 Gamma 확률분포의 축적매개변수와 형상매개변수로 구성되며 이들은 물리적으로 일강수량모의 시 계절적 강수량의 총량은 외부인자로부터 그리고 천이확률과 강수일 등 일강수량 자체 특성은 강수지점의 원자료로부터 유도된다(Park *et al.*, 2011).

또한, 단지점(single-site) Markov Chain 모형의 경우 강수지점마다 단일 모형이 적용되기 때문에 강우관측소간 상관성을 효과적으로 모의하기가 어려우므로 비정상성 Markov Chain모형을 다지점(multi-site)에 대해 적용할 수 있도록 확장개발된 모형(Moon *et al.*, 2010)을 이용하여 미래 강우자료를 생성하였다. 다지점 비정상성 Markov Chain 모형은 월강수량과 일강수량을 모의하는데 필요한 천이확률, 확률분포형의 매개변수들이 동적으로 관계를 갖으면서 추정되며, 이를 활용하여 미래 기후변화 영향이 반영된 일강수량 계열을 모의하게 된다.

그림 9는 6개 지점을 대상으로 다지점 비정상성 Markov Chain 모형을 이용하여 생성된 2010년부터 2100년까지의 일강우량 자료를 나타내고 있으며, 본 연구에서는 전라북도 수계에 대한 공간분포형 강우장 자료를 생성하기 위하여 역거리법을 이용하여 6개 관측소 지점을 기준으로 내삽(interpolation)을 수행하였다. 역거리법(Inverse Distance Weight Method)은 인접한 기지 관측소 좌표와 강우를 추정하고자 하는 미지 관측소 좌표까지의 거리에 따라 비선형적으로 변화하는 경중률을 계산하며, 기본 가정은 서로 다른 기지 관측소 좌표가 하나의 미지관측소 좌표에 미치는 영향은 미지관측소 좌표로부터 기지 관측소 좌표까지의 거리에 따라 감소한다는 것으로 강우 추정 값은 아래 식으로 표현할 수 있다(식 1).

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^{n} d_i^{-m}} \quad (1)$$

여기서, P_x는 미지 관측소 좌표에서의 강우량, d_i는 미지 관측소 좌표에서 주변의 기지 관측소 좌표 i까지의 거리, P_i는 기지 관측소에서의 강우량, m은 가중치, n은 추정을 위해 사용된 자료의 총개수를 나타낸다. 식 (1)을 다시 정리하면 식 (2)와 같으며,

$$P_x = \sum_{i=1}^{n} P_i \lambda_i \quad (2)$$

여기서, 경중률$(\lambda_i) = \frac{d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^{n} d_i^{-m}}$이며, 그림 10은 역거리법을 이용하여 내삽된 공간분포형 강우장 사례(2100년 시나리오의 최대일강우량 강우장)를 나타내고 있다.

사면안정해석을 위한 모형의 구성

GIS와 RS기술의 비약적 발전으로 인해 다양한 형태의 공간분포형 인자들의 추출이 가능해졌으며, 이를 활용한 무한사면안정해석기법은 산사태위험지도 작성 등, 광역적 사면재해 영향평가를 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서 사용된 무한사면안정해석모형의 기본이론 및 모형의 수문학적 매개변수인 분포형 습윤지수의 산출과정은 다음과 같다.

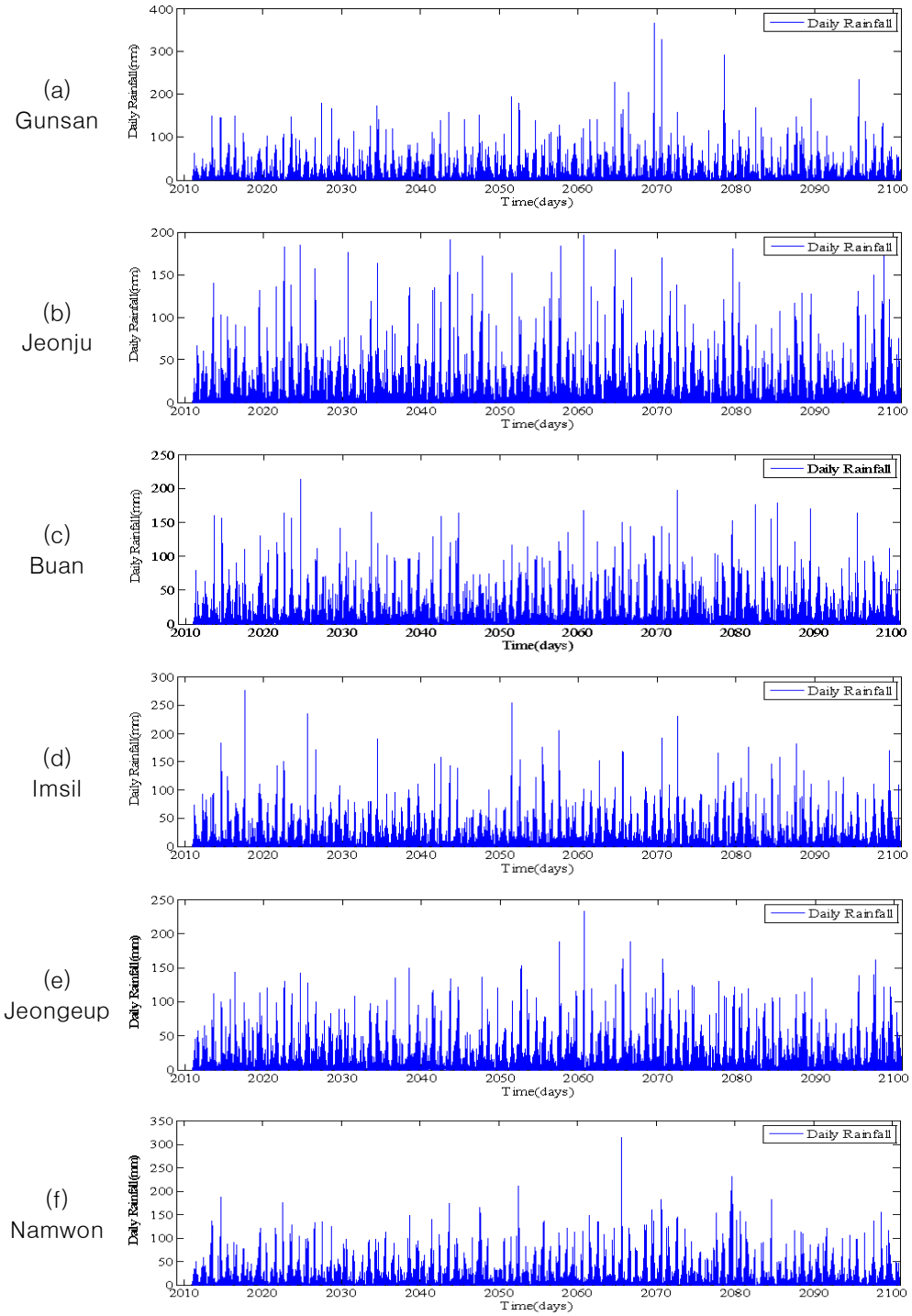


FIGURE 9. Projected daily rainfall data by multi-site non-stationary markov chain model

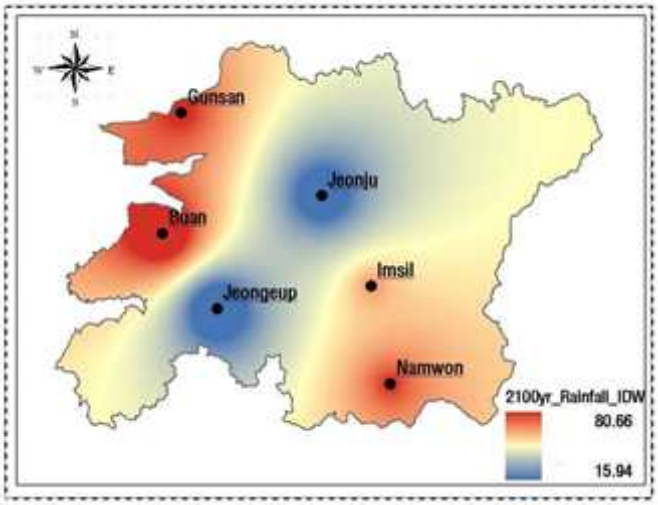


FIGURE 10. Spatially-distributed rainfall field based on the 6 selected ground gauges

1. 무한사면안정해석모형

그림 11은 무한사면안정해석모형의 개념적 모식도로써 깊이에 비해 사면의 길이가 상대적으로 긴 경우 파괴면은 사면에 평행하게 형성되며, 사면의 길이는 거의 무한대이므로 양끝의 영향은 무시한다. 또한 침투수압이 사면에 평행하게 작용한다고 가정할 때 무한사면안정해석식은 다음과 같이 유도된다.

단위길이당 전단응력 :

$$\tau = \frac{T}{b/\cos\theta} = \frac{W}{b}\cos\theta\sin\theta;\ W = \gamma D b \quad (3)$$

단위길이당 수직응력 :

$$\sigma = \frac{P}{b/\cos\theta} = \frac{W}{b}\cos^2\theta \quad (4)$$

여기서, T는 사면의 전단력(N), P는 파괴면의 수직방향력(N), D는 모암으로부터 지표면

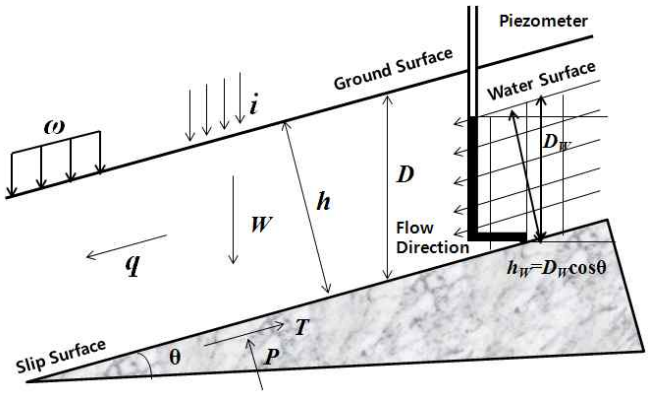


FIGURE 11. Concept of the infinite slope stability model

까지의 높이(m), b는 사면폭(m), θ는 사면경사(°), W는 흙의 자중(N), γ는 흙의 단위중량(kN/㎥), τ는 전단응력(kPa), σ는 수직응력(kPa)이다.

Mohr-Coulomb의 법칙에 의해 전단강도(S)는 식 (5)와 같으며,

$$S = c + (\sigma - u)\tan\Phi \quad (5)$$

여기서, c는 점착력(Pa), u는 간극수압(kPa), Φ는 내부마찰각(°)을 의미한다.

또한, 안전율(safety factor, Fs)의 개념으로부터 전단응력은 식 (6)와 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{S}{Fs} \quad (6)$$

식 (3)~(6)로 부터 식 (7)과 같이 정리할 수 있으며,

$$\frac{W}{b}\sin\theta\cos\theta = \frac{1}{Fs}(c + [\frac{W}{b}\cos^2\theta - u]\tan\Phi) \quad (7)$$

식 (7)를 Fs에 대해 다시 정리하면 무한사면안정해석을 위한 기본식, 식 (8)을 유도할 수 있다.

$$Fs = \frac{c + [\gamma D\cos^2\theta - u]\tan\Phi}{\gamma D\sin\theta\cos\theta} \quad (8)$$

식 (8)로부터 뿌리보강효과를 고려하기 위해 점착력 c를 흙의 점착력과 뿌리의 점착력으로 구분하여 정리하면 식 (9)와 같고,

$$Fs = \frac{c_s + c_r + [\gamma D\cos^2\theta - u]\tan\Phi}{\gamma D\sin\theta\cos\theta} \quad (9)$$

여기서, c_s는 흙의 점착력(kN/㎡), c_r은 뿌리점착력(kN/㎡)이다.

마지막으로, 식 (9)에서 간극수압(u)의 영향에 의해 감쇄되는 흙의 단위중량과 사면에 작용하는 상재하중(w)의 영향을 고려하면 무한사면안정해석식은 식 (10)과 같이 정리된다 (Borga *et al.*, 2002).

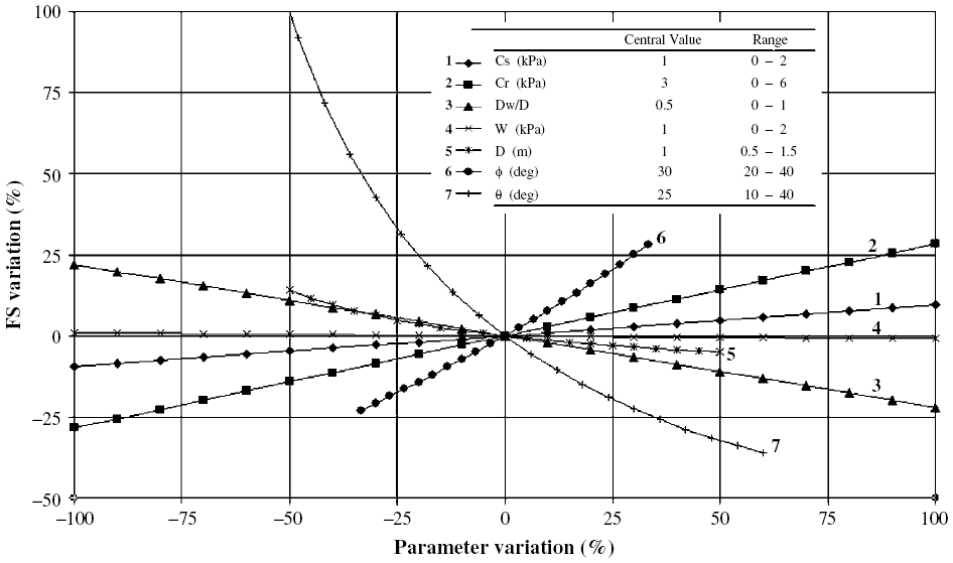


FIGURE 12. Sensitivity plot for the infinite slope equation (Borga *et al.*, 2002)

$$Fs = \frac{c_s + c_r + [\cos^2\theta \gamma_s (D - D_w) - \cos^2\theta D_w (\gamma_s - \gamma_w) + w\cos\theta]\tan\Phi}{D\gamma_s \sin\theta\cos\theta + w\sin\theta} \quad (10)$$

여기서, D_w는 모암으로부터 수면까지의 수심(m), γ_w는 물의 단위중량(kN/㎥), γ_s 는 흙의 포화단위중량(kN/㎥), w는 상재하중(kN/㎡)이다. Borga *et al.*(2002)은 식 (10)의 각각의 매개변수의 변화에 따른 Fs의 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과는 그림 12와 같다. 그림 12에서 알 수 있듯이 Fs는 사면경사(θ)와 내부마찰각(Φ)에 매우 민감하며, 경사가 급해짐에 따라 불안정($Fs < 1$)해지고, 내부마찰각이 커짐에 따라 안정($Fs > 1$)해지는 것을 확인할 수 있다.

2. 습윤지수

강우에 의한 침투량의 증가는 토양의 포화도와 간극수압을 증가시키며, 이는 결과적으로 잠재 파괴면에서의 전단강도의 감소를 발생시킨다. 따라서 침투량 증가에 따른 토양 포화도의 증가는 사면의 불안정성을 야기하게 된다. 이러한 토양의 포화도를 추정하기 위해 Montgomery and Dietrich(1994)와 Borga *et al.*(1998)은 사면의 지형학적 특성에 따른 습윤지수(그림 11의 D_w/D 또는 h_w/h) 산정 모형을 제시하였다. 그림 13과 같이 집수면적(catchment area)에서 총 강우의 침투량은 지표하수와 같으며 이는 지형경사와 평행하게 흐른다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 결과적으로 토양 포화층에서의 흐름은 Darcy법칙에 의해 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$q = \sin\theta K h_w \quad (11)$$

여기서, q는 단위폭당 유량(㎡/s), K는 흙의 투수계수(m/s), h_w는 포화토층의 두께(m), $\sin\theta$ 는 경사이다.

또한 그림 13에서 유출기여면적(A)에 일정한 강우(i)가 내린다고 가정할 경우 식 (11)의 단위폭당 유량(q)는 식 (10)과 같다.

$$q = iA/b \quad (12)$$

식 (11)과 (12)로부터 식 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$iA = (\sin\theta K h_w) b \quad (13)$$

여기서, b는 흐름방향의 단면 폭(m), i는 강우강도(m/s), A는 유출기여면적(m^2)이다.

식 (13)을 h_w에 대해 정리하고 이를 $h(= D\cos\theta)$로 나누면 식 (14)의 습윤지수로 표현할 수 있다(그림 11 참조).

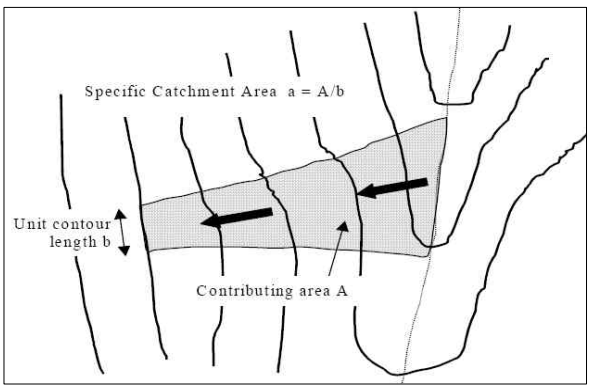


FIGURE 13. Definition of specific catchment area

$$m = \frac{h_w}{h} = \frac{D_w}{D} = Min\left\{ \frac{ia}{Khsin\theta}, 1 \right\} \quad (14)$$

여기서, $a = A/b$ 로 a는 비 집수면적, m은 습윤지수로써 그 범위는 0(건조)~1(포화)이며, 1이상인 경우 지표흐름(overland flow)이 발생한다.

식 (14)는 유출기여면적(contributing area)의 모든 흐름이 하부지역 임의의 한 지점으로 수렴한다는 가정을 기반으로 하고 있으며, 이때 상부사면으로부터 하부로 진행시의 흐름의 지체, 저류 등은 고려하지 않는다(Ray and De Smedt, 2009). 그림 12에서 나타낸 바와 같이 토양이 포화되어 지표류가 발생하고, 습윤지수가 커짐에 따라 안전율은 감소하게 되며, 습윤지수가 작아짐에 따라 안전율은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 산사태 발생의 위치를 규명하기 위해서는 강우로 인한 토양의 습윤지수 변동성을 공간적으로 모의할 수 있어야 하며, 격자기반의 DEM(digital elevation model)으로부터 산출되는 흐름방향(flow direction) 및 유출기여면적 정보는 습윤지수 산정에 매우 유용하게 활용될 수 있다(Tarboton, 1997).

3. DEM을 이용한 습윤지수 산정기법

유출기여면적은 사면경사를 이용하여 흐름방향을 결정하게 되고, 이를 흐름방향으로 누적한 흐름누적 값(flow accumulation value)에 의해 산정된다. 만약 집수면적에 내린 강우가 식생에 의한 차단, 대기 증발 등과 같은 손실이 없다고 가정하면, 흐름누적값은 각 격자에 유입되는 유입량(식 12)을 나타내며, 이러한 흐름누적값을 등고선의 폭으로 나눈 것이 비집수면적이 된다.

일반적으로 흐름누적값은 해당 격자에 영향을 미치는 상부격자(upslope cell)의 개수를 나타내며, 격자의 개수와 흐름누적값은 같은 의미로 혼용되어 사용된다. 유출기여면적은 해당 격자에서의 상부격자에 의한 영향면적(상부격자의 개수 × 격자의 크기)이 되며, 이 영향면적을 등고선의 폭으로 나눈 값이 비집수면적이 된다(그림 13 참조).

유출기여면적 계산을 위한 가장 간단한 방법으로 O'Callaghan and Mark(1984)가 소개한 일방향 흐름해석기법(single flow direction method, 이하 SFD)이 있으며, 이 기법은 그림 14(a)와 같은 표고를 갖는 DEM자료에서 어느 한 격자에서 이웃 격자 8개 중 가장 경사가 급한 경사에 흐름 전체를 배분해줌으로써 유출기여면적을 계산하게 된다. 즉, 그림 14(b)와 같이 경사가 가장 급한 격자(0.519)로 상류격자에서의 모든 흐름이 집중된다. 기본적으로 SFD는 인접한 격자에 축방향이나 대각선 방향으로만 흐름을 생성하게 되므로 흐름이 발산하는 지역과 수렴하는 지역 그리고 평행한 지역에 따라 유출기여면적이 다르게 나타나는 제약사항이 있다(Han, 2003).

SFD와 달리 Quinn *et al.*(1991)이 제안한 다방향 흐름해석기법(multi flow direction method, 이하 MFD)은 그림 14(c)와 같이 어느 한 격자 주위의 8방향에 대한 격자 각각의 경사를 계산하고 해당 격자보다 고도가 낮은 모든 방향에 대해서 일정한 비율을 가지고 흐름을 분산시킨다. 즉, 해당 격자보다 고도가 낮은 격자(경사 값이 0.519, 0.233에 해당하는 두 격자)에 대하여 흐름이 분산되며, 이때 경사에 따른 가중치를 부여하여 두 격자 중 급경사의 경우 더 높은 비율의 흐름이 분배된다. 따라서 이러한 다방향 흐름방법은 산의 봉우리와 같이 흐름이 분산되는 지형에 적합하며, 계곡과 같이 경사가 급한 수렴지형에서는 SFD보다 적용성 낮은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 식 (14)의 비집수면적(a) 산정을 위하여 SFD 기법을 이용하였으며, 격자별 비집수면적 정보를 활용하여 공간분포형 습윤지수를 산정하였다.

GIS기반의 사면안정해석 모형 매개변수 추출

GIS기반의 사면안정해석을 위해서는 식 (10)과 그림 12에서 나타난 바와 같이 다양한 지형,

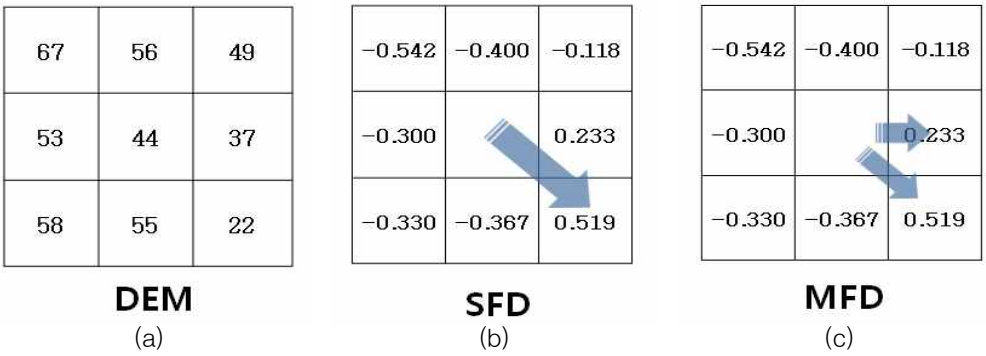


FIGURE 14. Comparison of flow direction methods for contributing area calculation

지질, 임상학적 매개변수를 필요로 한다. 본 연구에서는 범용수치지형도, 정밀토양도, 임상도를 이용하여 무한사면안정해석모형(식 (10) 참조)의 매개변수를 격자별로 추출하였다.

1. 지형학적 매개변수 선정

본 연구에서는 미국 NASA에서 제공하는 범용수치지형도(SRTM 90m digital elevation map)를 바탕으로 전라북도 수계를 90m×90m 격자로 분할하고, 각 격자에 해당하는 평균경사를 계산하였으며, 평균경사는 인접 8개 격자의 표고를 고려한 식 (15)로 정의된다.

$$Slope = Arctan\left([(\delta Z/\delta X)^2+(\delta Z/\delta Y)^2]^{1/2}\right) \quad (15)$$

여기서, δZ: 고도변화, δX, δY : 평면직각좌표에 의한 수평거리변화(격자간 간격)이다.

2. 지질학적 매개변수 선정

투수계수는 Rawls and Brakensiek(1985)가 실제 미국전역의 약 5,000여개의 토양표본에 적용하여 만들어진 경험식인 식 (16)~(17)을 이용하여 산출하였다. 이 식에서 사용되는 변수인 점토의 함량비(%)와 모래의 함량비(%)의 경우 한국토양정보시스템 토양통 검색서비스에서 제공되는 입경분포 5개 분류군 중 조사, 중사, 세사는 모래의 함량비(%), 점토는 점토의 함량비(%)로 하여 투수계수를 산정하였다.

$$SAT = 0.332 - 0.0007251 \cdot m_s + 0.1276 \cdot \log_{10}(m_c) \quad (16)$$

$$K = \mathrm{EXP}[12.012 - 0.0755 \cdot m_s + (-3.895 + 0.03671 \cdot m_s - 0.1103 \cdot m_c + 0.00087546 \cdot m_c^2)/SAT] \quad (17)$$

여기서, m_c는 점토의 함량(%), m_s는 모래의 함량(%), K_{sat}는 포화투수계수(cm/hr)이다.

유효토심은 한국토양정보시스템 토양통 검색서비스에서 제공되는 토양통별 기층별 토심의 합산 값을 유효토심으로 환산하여 사용하였다. 흙의 단위중량, 점착력 및 내부마찰각은 토양의 자연적 조건에 따라 같은 토성함량을 가진 같은 토양이라도 그 값이 천차만별이기 때문에 대표값을 결정하기 어렵다. 본 연구에서는 Rawls *et al.*(1983)이 제시한 토양의 유효공극률과 일반적으로 제시된 흙의 진 비중값 2.65를 기준으로 식 (18)을 통해 표토토성별 포화단위중량을 산출하였다.

$$\gamma_{sat} = \frac{Gs+e}{1+e}\gamma_w \quad (18)$$

여기서, Gs는 흙의 비중, e는 흙의 공극률, γ_w는 물의 단위중량(t/㎥)이다.

흙의 점착력은 Kim(2005)가 제시한 식을 이용하였으며, 일반적인 모래, 실트, 점토의 점착력을 0, 1, 1.7(t/㎡)로 적용하여 점착력의 함량비별 가중치를 주어 그 값을 산출하였다. 식(19)는 미사질 식양토(모래 10%, 실트 55%, 점토 35%)에 대한 점착력 산출 예를 보여주고 있다.

$$\text{모래}(0.1\times 0)+\text{실트}(0.55\times 1)+\text{점토}(0.35\times 1.7)=1.145\,t/m^2 \quad (19)$$

흙의 내부마찰각은 National Disaster Management Institute(2003)에서 제공된 표토토성별 내부마찰각 분류표에 의거하여 이를 토성별로 분류하였다.

3. 임상학적 인자

흙의 전단강도를 상승시키는 요인인 뿌리점착력은 임상 및 영급에 의해 그 값이 결정된다. 본 연구에서는 Wu *et al.*(1979)이 제시한 식생별 뿌리의 평균인장강도를 기반으로 하여, 산림청에서 제공하는 24개의 식생군을 기준으로 국내 식생분류기준표에 맞게 학명별로 대체수목을 결정하여 임상별 인장강도를 재분류하였다. 또한 영급을 고려하기위해 엽면적지수(LAI, Leaf Area Index)와 뿌리의 건조량의 비율에 관한 연구(Choi, 2010)에서 제시된 1군과 2군의 영급의 변화를 고려하여 임상별, 영급별 인장강도를 식 (20)을 이용하여 산정하였다.

$$C_r = 0.6\,T_r(A_r/A) \quad (20)$$

여기서, T_r은 임의전단면에 존재하는 뿌리만의 평균인장강도(t/m^2), A는 임의의 전단면의 면적(m^2), A_r는 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적(m^2)이다. 뿌리의 면적비(A_r/A)는 Lee *et al.*(1991)이 연구를 통해 제시한 뿌리의 일반적 면적비 평균값인 0.001을 적용하였다.

결 론

본 연구는 기존의 기후변화에 따른 산사태 위험성 평가와 관련된 연구에서 다루지 못한 기후변화 시나리오의 편의보정 및 산사태 발생 메카니즘을 반영한 물리적 사면안정해석모형을 구축하여 보다 신뢰성 있는 미래 사면안정 변동성 해석결과를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 IPCC SRES를 기반으로 기상청에서 제공하는 공간해상도 27km 지역규모의 A1B 시나리오 기반의 RCM 자료와 비집수면적 개념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정모형을 이용하여 전라북도 수계를 대상으로 미래 기후변화에 따른 사면안정 변동성을 평가하기 위한 방법론을 제시하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 과거 30년(1979~2008)에 대한 기상청의 RCM 강우자료와 지상관측소 강우자료를 비교 · 분석한 결과, RCM의 연평균강우량은 지상관측소 실측치보다 과소산정되었으며, Mann-Kendall Test를 통한 연평균강우량의 공간적 증감 경향성의 경우, RCM은 부안군을 제외한 전라북도 전지역에서 강우량이 감소하는 경향을 나타내는 반면, 지상관측소는 진안군, 무주군, 임실군, 장수군을 제외한 전라북도 서쪽 지역에서 강우량이 증가하는 것으로 나타났다.

둘째, RCM의 시 · 공간적 스케일의 상이성에 따른 불확실성으로 인해 편의보정없이 미래 기후변화 시나리오를 생성하는 것은 기후변화 영향성 평가 또는 예측결과의 정확도에 영향을 주므로 Quantile Mapping기법을 통해 RCM 강우자료의 편의를 보정하였다.

셋째, GIS 기반의 사면안정해석을 위해 공간분포형 강우장이 필요하며, 본 연구에서는 강우관측소의 상관성을 고려한 다지점(6개 관측소) 비정상성 Markov Chain 모형을 통해 미래 강우량 시계열 자료를 생성하였으며, 역거리법을 이용하여 동일 시간별 6개 지상관측소의 일강우량 자료에 대한 내삽을 통해 공간분포형 강우장을 구축하였다.

넷째, 사면안정해석의 경우, 비집수면적의 개

념을 도입한 GIS기반의 무한사면안정해석모형을 구축하였으며, 모형에 필요한 매개변수의 경우, 지질학적 매개변수 산정을 위해 농촌진흥청에서 제작·배포하는 1:25,000 정밀토양도(표토토성, 배수등급, 토양통) 자료를 이용하여 토양형을 구별하고 투수계수, 유효토심, 흙의 단위중량, 점착력 및 내부마찰각을 산정하였다. 또한 산림청에서 운영하는 산림공간정보시스템의 정보를 이용하여 24개의 식생군을 기준으로 국내 식생분류기준표에 맞게 학명별로 대체수목을 결정하고, 임상별 인장강도를 재분류하여 임상별 영급을 고려한 뿌리점착력을 산정하였다. KAGIS

참고문헌

Ahn, J.H., C.S. Yoo and Y.N. Yoon,. 2001. An analysis of hydrologic changes in Daechung dam basin using GCM simulation results due to global warning. Journal of Korea Water Resources Association 34(4):335-345 (안재현, 유철상, 윤용남. 2001. GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. 한국수자원학회논문집 34(4):335-345).

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.

Choi, J.R. 2010. Assessment of potential landslides in Naerin watershed: linking eco-hydrology model and stability model. Master's Thiesis, Kangwon National University, Korea. pp.34-41 (최정렬. 2010. 생태수문모형과 사면안정모형을 이용한 내린천 유역의 잠재 산사태 위험도 평가. 강원대학교 대학원 석사학위논문. 34-41쪽).

Forest Service. 2013. Report on selection and management of landslide-prone area. pp.1-13 (산림청. 2013. 산사태 취약지역의 합리적 지정·관리 방안 연구. 1-13쪽).

Han, J.Y. 2003. Digital terrain analysis for the prediction of soil moisture and development of dynamic wetness index. Master's Thiesis, Pusan National University, Korea. pp.6-8 (한지영. 2003. 토양수분 예측을 위한 수치지형 분석과 동역학적 습윤지수의 개발. 부산대학교 대학원 석사학위논문. 6-8쪽).

IPCC. 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers. Cambridge University Press. pp.1-2.

Kim, M.G. 2005. GIS landslide hazard mapping using root strength reinforcement model. Master's Thiesis, SungKyunKwan University, Korea. pp.1-29 (김민구. 2005. 뿌리보강모델을 활용한 GIS 산사태 위험도 작성방법연구. 성균관대학교 대학원 석사학위논문. 1-29쪽).

Korea Meteorological Administration. 2009. Understanding of Climate Change. pp.4-10 (기상청. 2009. 기후변화 이해하기. 4-10쪽).

Kwon, H.H. and B.S. Kim. 2009.

Development of statistical downscaling model using nonstationary Markov chain. Journal of Korea Water Resources Association 42(3):213-225 (권현한, 김병식. 2009. 비정상성 Markov chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발. 한국수자원학회논문집 42(3):213-225).

Kwon, Y.A., W.T. Kwon, K.O. Boo and Y.E. Choi. 2007. Future projections on subtropical climate regions over South Korea using SRES A1B data. Journal of the Korean Geographic Society 42(3): 355-367 (권영아, 권원태, 부경은, 최영은. 2007. A1B시나리오자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망. 대한지리학회논문집 42(3):355-367).

Lee, C.W. 2013. Climate change and the trend of sediment problem in mountainous area. Forest Vol.6. National Forestry Cooperative Federation 6:100-103 (이창우. 2013. 기후변화와 산지토사재해 변화 경향. 6:100-103).

Lee G.H. 2012. Improvement plan of landslide prevention in urban area. Issue and Point No.484. National Assembly Research Service (이기하. 2012. 도심지역 산사태 방지를 위한 개선방안(이슈와 논점, 제484호). 국회입법조사처).

Lee, I.M., S.G. Sung and C.M. Im. 1991. An experimental study on the effect of vegetation roots on slope stability of hillside slopes. Journal of Korean society of Geotechnical Engineers 7(2): 51-66 (이인모, 성상규, 임층모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구. 대한토질공학회지 7(2):51-66).

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 인공신경망을 이용한 산사태 위험도 분석 개발 및 검증. 한국지리정보학회지 15(2): 57-70).

Ministry of Environment. 2012. Vulnerability Map of Local Government for Climate Change Adaption: Forest. pp.1-7. (환경부. 2012. 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도: 산림. 1-7쪽).

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.

Moon, J.W., H.H. Kwon and Y.I. Moon. 2010. Nonstationary Markov Chain model for multi-site daily rainfall simulation. Journal of Korea Water Resources Association pp.1495-1499 (문장원, 권현한, 문영일. 2010. 비정상성 Markov Chain Model을 이용한 다지점 일강수량 모의. 한국수자원학회 2010년도 학술발표논문집. 1495-1499쪽).

National Disaster Management Institute. 2003. Slope failure disaster research using geographic information system. 80pp (국립방재연구소. 2003. 지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해 연구. 80쪽).

O'Callaghan, J.F. and D.M. Mark. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer

Vision, Graphics and Image Processing 28(3):324-344.

Park, D.G., J.R. Oh, T.H. Kim and J.H. Park. 2006. Landslide damage and countermeasures in Korea. Journal of the Korean Geotechnical Society 22(6): 6-18 (박덕근, 오정림, 김태훈, 박정훈. 2006. 우리나라 사면재해 피해현황과 대책. 한국지반공학회논문집 22(6):6-18).

Park, J.H., H.H. Kwon and S.H. No. 2011. Outlook of discharge for Daecheong and Yongdam dam watershed using A1B climate change scenario based RCM and SWAT model. Journal of Korea Water Resources Association 44(12):929-940 (박진혁, 권현한, 노선희. 2011. A1B기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출량 전망. 한국수자원학회논문집. 44(12):929-940).

Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier and O. Plancheon. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Process 5(1):59-79.

Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Proceedings of a Symposium ASCE, New York. pp.293-299.

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.

Ray, R.L. and F. De Smedt. 2009. Slope stability analysis using GIS on a regional scale: a case study from Dhalding, Nepal. Environmental Geology 57(7):1603-1611.

Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research 33(2):309-319.

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