

## 기후변화 적응 농경지 토양유실 취약성 평가

오영주 · 김명현<sup>1</sup> · 나영은<sup>1</sup> · 홍선희<sup>2</sup> · 백원기<sup>3</sup> · 윤성탁<sup>4\*</sup>

한반도생물다양성연구소, <sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원, <sup>2</sup>고려대학교 환경생태연구소,  
<sup>3</sup>대진대학교 생명과학과, <sup>4</sup>단국대학교 식량생명공학과

## Vulnerability Assessment of Soil Loss in Farm area to Climate Change Adaption

Young-Ju Oh, Myung-Hyun Kim<sup>1</sup>, Young-Eun Na<sup>1</sup>, Sun-Hee Hong<sup>2</sup>, Woen-Ki Paik<sup>3</sup>, and Seong-Tak Yoon<sup>4\*</sup>

*Korea Biodiversity Reserarch Center Co., Ltd, Pocheon 487-711, Korea*

*<sup>1</sup>National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-707, Korea*

*<sup>2</sup>Institute of Environment and Ecology, Korea University, 136-701, Seoul, Korea*

*<sup>3</sup>Department of Life Science, Deajin University, Pocheon 487-711, Korea*

*<sup>4</sup>Crop Science and Biotechnology, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea*

**Due to the climate change in South Korea the annual total precipitation will increase by 17 percent by 2100. Rainfall is concentrated during the summer in South Korea and the landslide of farmland by heavy rain is expected to increase. Because regional torrential rains accompanied by a storm continue to cause the damage in farmland urgent establishment of adaptation plant for minimizing the damage is in need. In this study we assessed vulnerability of landslide of farmland by heavy rain for local governments. Temporal resolution is 2000 year and the future 2020 year, 2050 year, 2100 year via A1B scenario. Vulnerability of local government were evaluated by three indices such as climate exposure, sensitivity, adaptive capacity and each index is calculated by selected alternative variable. Collected data was normalized and then multiplied by weight value that was elicited in delphi investigation. Current vulnerability is concentrated in Jeju island and Gyeongsangnam-do, however, it is postulated that Kangwon-do will be vulnerable in the future. Through this study, local governments can use the data to establish adaptation plans for farmland landslide by climate change.**

**Key words:** Climate change, Vulnerability assessment, Landslide, A1B scenario

## 서 언

지난 100년 (1906~2005년)간 전 지구의 평균온도는 약 0.74°C 상승하였으며 우리나라의 경우에도 1970년대에 비해 평균기온이 0.7°C 상승한 것으로 알려져 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 향후 100년간 지구의 평균온도는 A1B 시나리오에 대비하여 약 2.8°C 증가할 것으로 예측하고 있으며, 우리나라의 경우에도 약 4°C가 상승할 것으로 예측하고 있다. 이러한 기후변화는 극단적인 기후 현상의 빈도와 강도는 증가시키고 단기적인 환경 변화뿐만 아니라 장기간에 걸친 CO<sub>2</sub>의 변화, 온

도 상승, 강수량의 변화, 해수면 상승 등을 유발할 것으로 현재의 과학적 관측 자료를 통해 설명되어지고 있다 (IPCC, 2007; NIER, 2010).

농경지는 토지이용 형태 중 상대적으로 강우에 의한 토양유실에 취약하며 반복적인 토양의 유실로 이어지며 이와 더불어 토양 내 영양염류의 소실로 이어진다. 기후변화는 강우량의 증가와 더불어 강우의 빈도 및 강도에서도 증가 추세를 보이고 있어 토양유실이 심각한 문제로 여겨지고 있다 (Kim et al., 2009; Jung et al., 1983; Wischmeier and Smith, 1978; Wischmeier, 1971).

IPCC (2007)는 기후변화에 기인한 취약성을 평가하여 악영향을 최소화하기 위한 적응 (adaptation) 조치의 중요성을 권고하기 시작하였고 우리나라의 농업분야에서는 현재 까지 온실가스 배출에 대한 감축 (mitigation)에 대한 연구

접수 : 2012. 9. 25 수리 : 2012. 10. 5

\*연락처 : Phone: +82415503623

E-mail: styoon@dankook.ac.kr

들이 진행되어 왔으나 기후변화의 영향평가 및 적응에 대한 연구는 부족한 실정이다.

기후변화에 대한 적응대책을 수립하기 위해 취약성 지수를 도입하였고 국가 수준의 취약성과 적응능력을 지수화하기 위해 변수를 구성하여 기후의 취약성 정도를 평가하였다 (Moss et al., 2001; Brooks et al., 2005). 농업분야에서는 취약성을 민감도와 적응능력의 함수로 보고 취약성을 평가하기도 하였다 (Wehbe et al., 2005). 국내에서는 CCGIS (Climate change adaptation toolkit based on GIS)를 이용하여 행정구역별 취약성 지수를 효율적으로 산출할 수 있는 방법론을 제시하였다 (National Institute of Environmental Research, 2010).

본 연구는 국내 232개 시군구를 대상으로 기후노출, 민감도, 적응능력의 대응변수를 선정하고 이를 기반으로 취약성 평가를 실시하여 현재와 미래의 취약성을 분석하고 기후변화에 지자체가 적응계획을 수립할 수 있는 자료를 제안하고자 한다.

### 자료 및 방법

**연구의 시간적, 공간적 범위** 농경지 토양유실을 위한 연구의 시간적 범위는 2000년 (1996~2005년), 2020년 (2016~2025년), 2050년 (2046~2055년), 2100년 (2096~2105년)으로 구분하여 구분하였고 기후변화 시나리오는 A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2를 대상으로 국립환경과학원에서 구축한 CCGIS (2010)의 기후자료를 바탕으로 분석하였다. 연구의 공간적 범위는 전국의 232개 시군구를 대상으로 시나리오에 근거한 취약성 분석을 실시하였다.

**취약성 평가 방법** 취약성 평가의 주요 방법은 상향식 방법론 (Bottom-up methods)과 하향식 방법론 (Top-down methods)을 이용하여 진행하였다. 상향식 방법론은 지자체를 중심으로 기후지표, 민감도지표, 적응능력을 분석하여 대응변수를 산출하고 이를 이용하여 취약성을 평가하는 방법이다 (Moss et al., 2001; Books et al., 2005). 본 연구에서 상향식 평가방법은 농경지 토양유실에 관련하여 문헌과 2회에 걸친 델파이 조사를 통하여 대응변수와 대응변수 가중치를 선정하고 취약성 평가를 시각화하는 도구로서 CCGIS (Climate change adaptation toolkit based on GIS)를 이용하여 평가 결과를 도출하였다. 하향식 방법론은 국립환경과학원의 기후예측자료로서 국립환경과학원의 전지구모델인 CCSM3 (Community climate system model version 3)의 다운스케일링 자료로 지역기후모델인 RCM (Regional climate model)의 자료를 사용하여 결과를 산출하였다 (National Institute of Environmental Research, 2010).

**대응변수의 선정과 지수 산출방법** 취약성 평가를 위해 대응변수를 사용하였고 대응변수는 기후노출, 민감도, 적응능력으로 구분하여 평가하였다. 기후노출은 기후변화에 의한 영향, 민감도는 기후변화에 의해 영향을 받을 수 있는 환경적 스트레스 요인, 적응능력은 기후변화에 의한 영향에 대응할 수 있는 사회·경제적 요인으로 정의할 수 있다 (National Institute of Environmental Research, 2010). 기후변화에 의한 취약성 지수의 산출은 기후노출과 민감도로 구성된 기후영향과 이에 대응할 수 있는 적응능력의 차로 정의하였다 (UNDP, 2005). 대응변수와 가중치에 대한 델파이 조사를 통하여 각각의 세부 대응변수에 대한 가중치를 도출하였고 도출된 가중치를 식에 반영하여 취약성 지수를 산출하였다.

$$Vulnerability = a \times climate\ exposure + \beta \times sensitivity + \gamma \times adaptation\ ability$$

(weights : a, β, γ)

기후노출 변수는 농경지 토양유실에 영향을 줄 수 있는 기후 인자를 중심으로 대응변수를 설정하였고 민감도 변수는 기후변화에 영향을 받아 농경지 토양유실이 발생하여 영향을 미칠 수 있는 요인을 대응 변수로 선정하였다. 적응능력 변수는 기후노출과 민감도에 의해 발생할 수 있는 요인에 대한 지역사회의 경제적·사회적 요인으로 기후변화에 적응할 수 있는 대응변수를 선정하였다.

**취약성 평가 결과와 표준화 방법** 기후노출, 민감도, 적응능력의 세부 대응변수는 다양한 항목으로 구성되고 각 항목 별로 갖게 되는 값의 범위가 매우 다양하여 세부 대응변수들을 취약성 평가식에 도입하기 위해서는 세부 대응변수의 값을 표준화하는 과정이 필요하다 (Fig. 1). 본 연구에서는 표준화 식을 이용하여 다양한 값의 대응변수를 0~1의 범위를 갖도록 표준화 하였다. 표준화 방법은 세부 대응변수의 표준화, 대응변수 (기후노출, 민감도, 적응능력)의 표준화, 취약성 지수의 표준화 과정을 거쳐서 최종 취약성 지수를 산출하였다.

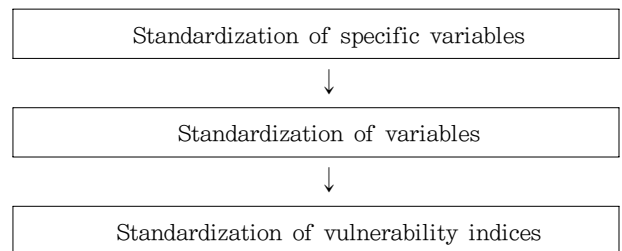


Fig. 1. Process of standardization

standardization formula =

$$\frac{\text{Value of variables} - \text{Minimum value of variables}}{\text{Maximum value of variable} - \text{Minimum value of variables}}$$

## 결과 및 고찰

**취약성 평가 항목의 선정** 기후노출 변수 선정은 농경지의 토양유실이 강수량과 많은 관련이 있기 때문에 이와 관련된 변수를 중심으로 선정하였다. 연간 평균 강수량이 많아지면 토양유실의 가능성이 높아지고, 강우의 강도가 강할수록 토양유실량이 많기 때문에 강우의 강도를 나타낼 수 있는 지표로서 일강수량이 80 mm 이상인 날의 횟수를 선정하였다. 또한 강우의 특성 중 강우의 지속시간을 나타내는 변수로서 강우일수를 선정하여 강우의 강도를 나타낼 수 있도록 하였다 (Shin, 1990; Lee, 2007; Kim et al., 2009).

민감도 변수 선정은 농경지의 특성상 식생피복이 낮기 때문에 경사도가 크면 토양유실의 가능성이 높아진다. 따라서 이들의 대용변수로 밭 면적, 논 면적, 지역평균경사도를 선정하였다 (Jung et al., 1983; Wischmeier and Smith, 1978; Wischmeier, 1971).

적응능력 변수 선정은 농경지 토양유실을 경감시킬 수 있는 적응능력으로 농경지 면적당 농기계 보유대수, PC활용 농가수/총 농가수, 농경지 면적당 농업인구수, 경지면적당 정비사업관계 직원수, 1인당 지역내 총생산, 재정자립도의 6가지 대용변수를 선정하였다. 중장비보유량이 많으면 농경지관리가 용이하며, PC활용은 기상정보 등에 대한 정보수집 능력을 높여주고, 농업인수가 많으면 농경지 기반관리가 용이하며, 정비사업관련 행정인력이 많으면 정책수립이 용이하며, 1인당 지역내 총생산과 재정자립도는 재해에 대처할 수 있는 잠재력과 적응 능력 제고에 대한 투자 잠재력을 나타내었다.

대용변수와 세부 대용변수의 가중치는 1차 (2011년 7월 15일~7월 25일)와 2차 (2011년 8월 15일~8월 25일)에 걸친 델파이 조사를 통하여 도출하였다. 델파이조사는 총 11인의 농업분야 전문가를 선정하여 대용변수와 이에 대한 가중치와 세부 대용변수의 가중치를 각각 응답하는 방식으로 진행하여 도출한 결과를 기후노출, 민감도, 적응능력에 대한 가중치의 합이 1이 되도록 설정하였다 (Table 1).

**현재의 농경지 토양유실 취약성 평가 결과** 현재 2000년을 기준으로 한 기후노출, 민감도, 적응능력, 취약성 평가 지수에 대한 232개 시군구의 결과 도면이다 (Fig. 2). 기후노출은 제주도, 전라남도 동쪽지역, 경상남도 서쪽 지역이 취약한 것으로 조사되어 전국적으로 보았을 때는 한반도의 남쪽지역이 기후노출에 취약한 것으로 분석되었다. 기후노출이 높은 지역은 상대적으로 강우량 및 강우빈도가 높은 지역으로 판단되었다. 민감도는 강원도와 경상북도 일부지역으로 주로 산악지역을 따라 높게 나타났고 서울시, 경기도, 충청남도과 전라북도 일부지역은 낮은 민감도를 보여주었다. 민감도가 강원도와 산악지역을 따라 높게 나타나는 것은 경사도 대용변수에 의한 영향으로 판단할 수 있었다. 적응능력은 서울특별시를 중심으로 한 수도권 지역과 울산광역시로 높은 것으로 나타났고 전라북도는 상대적으로 적응능력이 낮게 분석되었다. 현재 (2000년대)를 기준으로 농경지 토양유실의 취약성을 전국의 시군구를 대상으로 결과를 도출하였을 때는 취약성이 높은 곳은 기후영향이 크고 적응능력이 낮은 제주도, 경상남도 일부지역과 전라남도 일부지역으로 나타났고, 기후영향이 낮고 적응능력이 높은 서울특별시를 중심으로 한 수도권과 경기도 일대, 충청남도 태안반도 일대, 대구광역시, 대전광역시가 취약성이 낮은 것으로 분석되었다. 취약성이 높은 지역의 전국적 분포 경향은 해발고도가 높은 산맥을 따라 나타났으며, 이는 기후

**Table 1. Weights of variables.**

Variables	Weight	Lists of variables	Weight
Climate exposure	0.39	Average precipitation of year (mm)	0.26
		Number of dates with over 80 mm of precipitation	0.50
		Number of dates with over 10 mm of daily precipitation	0.24
Sensitivity	0.37	field farm area (ha)	0.20
		paddy area (ha)	0.30
Adaption ability	0.24	Average slope of local governments (°)	0.50
		Number of agricultural machine/unit of arable land (ha)	0.28
		Number of family farm with a PC/Total family farm	0.12
		Number of farmers /unit of arable land (ha)	0.16
		Number of people related with refurbishment project/unit of arable land (ha)	0.10
		Gross regional domestic product (GRDP)	0.10
	Financial independence (%)	0.24	

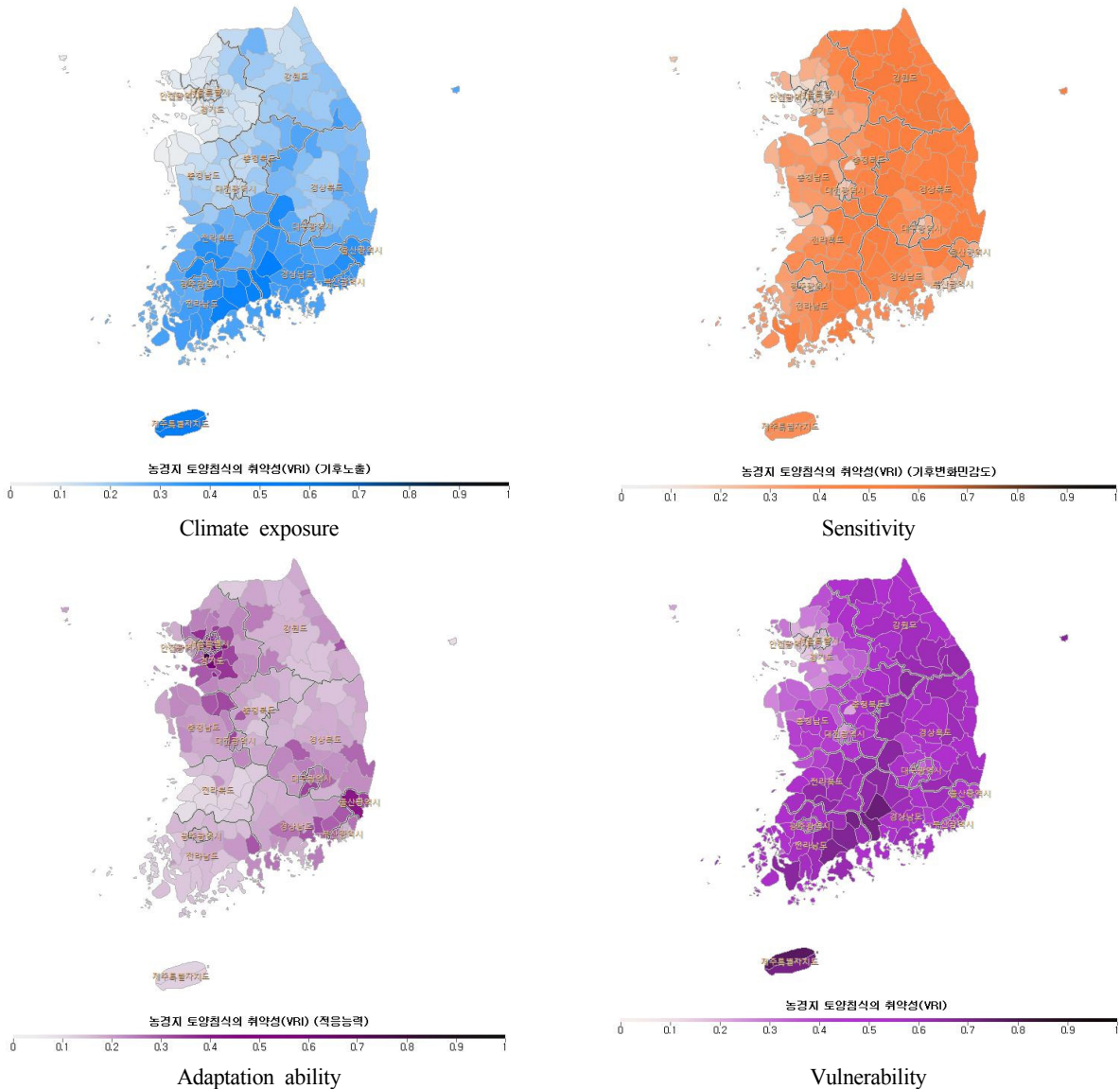


Fig. 2. Results of vulnerability assessment of present.

영향 중에서도 민감도의 경사도가 취약성에 크게 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단되었다.

**취약성 평가 결과의 기여도** 전국 232개 시군구를 대상으로 농경지 토양유실의 취약성에 영향을 미치는 기후노출, 민감도, 적응능력을 구성하는 세부 대응변수의 기여도를 파악하기 위하여 방사형 그래프를 작성하였다 (Fig. 3). 대응변수의 기여도 분석결과는 취약성 지수에 기여하는 정도는 기후노출과 적응능력이 거의 유사하고 민감도가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

기후노출 대응변수에서는 기여도의 차이는 거의 없었으나, 강수일수가 조금 높은 기여도를 갖는 것으로 분석되었고 민감도에서의 기여도가 가장 높은 대응변수는 지역평균 경사도로 파악되었으며 적응능력의 기여도는 대응 변수들 사이에 큰 차이를 나타내지 않았으나 농경지 면적당 농기계

보유대수, 1인당 지역내 총생산이 상대적으로 높은 기여도를 보여주었다.

**미래의 농경지 토양유실 취약성 평가 결과** 농경지 토양유실의 취약성을 평가한 결과를 현재와 미래에 대하여 A1B 시나리오를 기준으로 2020년대, 2050년대, 2100년대의 취약성 평가 결과를 도출하였다 (Fig. 4). 취약성을 평가한 결과 현재와 미래의 취약성 패턴이 큰 차이를 나타내었고, 2020년 이후 2100년 까지 미래에는 유사한 패턴으로 진행되었다. 전체 시나리오에서 2100년으로 진행될수록 취약성이 높아지는 경향을 보이고 있으며 이는 미래의 기후변화 시나리오의 특성상 강우량이 증가하는 것이 반영된 것으로 판단되었다. 현재의 취약성 평가 결과에서 남부지방이 취약성이 높게 나타났으며, 미래에는 남부지방의 취약성과 더불어 강원도를 중심으로 취약성이 많이 높아지는 경향을 나

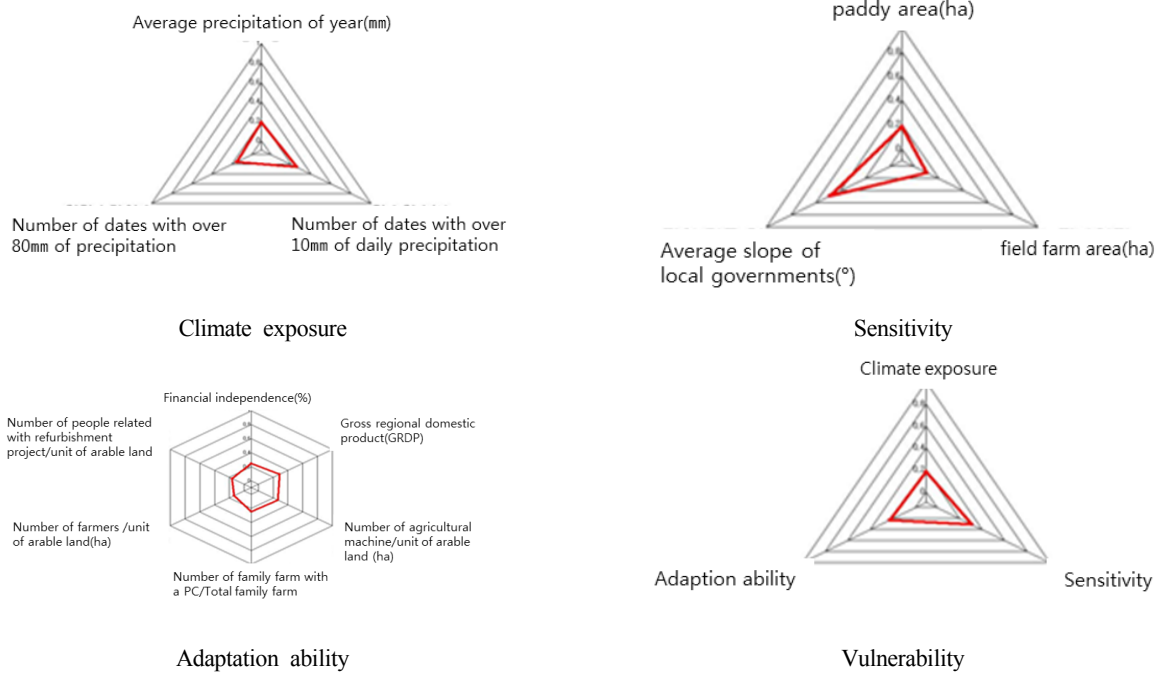


Fig. 3. Level of contribution analysis for 232 local governments.

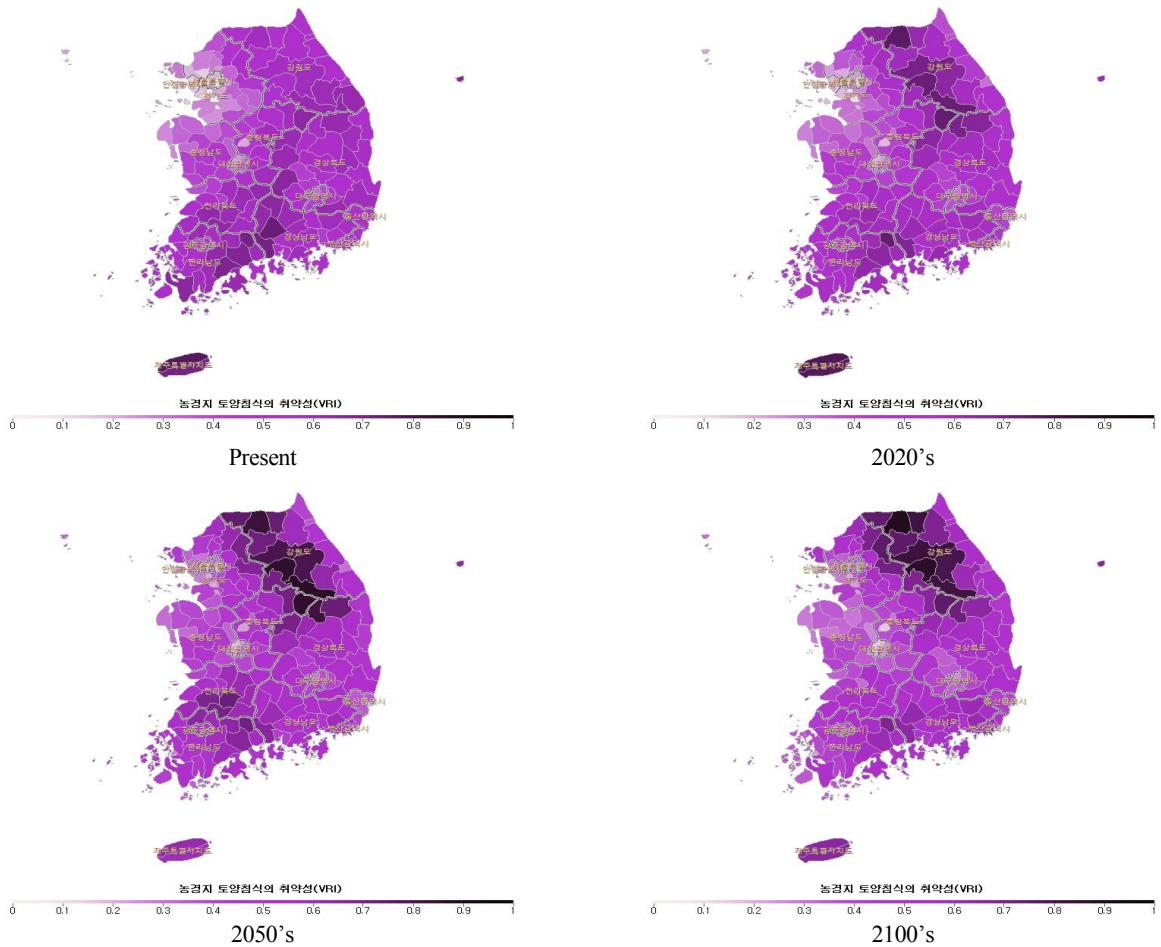


Fig. 4. Future of vulnerability of landslide in farm area.

타내었다. 강원도에서 미래 취약성의 증가는 강수량의 증가와 높은 지역 경사도가 결합된 결과로 판단되었다.

## 요 약

기후변화는 100년 후에 남한의 강수량이 17% 증가할 것으로 예측되었다. 우리나라와 같이 여름철 집중호우가 발생하는 경우는 농경지 토양유실이 많아질 것으로 예상된다. 또한 폭풍을 동반한 국지성 호우는 농경지에 많은 피해를 주고 있기 때문에 이에 대한 영향을 최소화하기 위한 적응 계획 수립이 시급한 실정이다. 이에 본 연구는 232개 시군구를 대상으로 농경지 토양유실의 취약성 평가를 실시하였다. 취약성 평가의 기간은 현재는 2000년, 미래는 A1B 시나리오를 기준으로 2020년, 2050년, 20100년에 대한 자료를 취합하였다. 취약성을 평가하기 위해 기후노출, 민감도, 적응능력의 대응변수를 선정하였다. 취합된 자료는 표준화 과정을 거쳐 델파이 조사에서 도출된 가중치를 고려하여 취약성을 산정하였다. 취약성은 현재는 남부지방인 제주도와 경상남도가 취약한 것으로 판단되었으나 미래 취약성은 강원도가 증가 추세를 보였다. 본 연구를 통하여 지자체 단위에서 농경지 토양침식에 대한 기후변화 적응계획을 수립하는데 도움이 되고자 한다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청의 지원 (과제번호: PJ008317, PJ008954)에 의해 수행되었음.

## 인 용 문 헌

Brooks, N., W.N. Adger, and P.M. Kelly. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation, *Global*

- Environ. Change.* 15: 151-163.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. UK.
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimating soil loss. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16(2): 112-118.
- Kim, J.H., K.T. Kim, and H.J. Lee. 2009. Analysis of Korea soil erosion yields and soil loss hazard zone. *J. GIS Assoc. Korea* 17: 261-268.
- Lee, J.S. 2007. A Study on characteristic analysis of soil erosion medels in Korea and foreign country. National disaster management institute. p. 175.
- Moss, R.H., A.L. Brenkert, and E.L. Malone. 2001. *Vulnerability to climate change: A quantitative approach*. Prepared for the U.S. Department of Energy. National Institute of Environmental Research.
2010. *Development of technique for the assessment of vulnerability by WEB base and GIS (II)*. Incheon. Korea.
- Shin K.J. 1999. *The Soil loss analysis using GIS in watershed*. Ph. D. Thesis. Kangwon National university. Chunchon. Korea.
- UNDP. 2005. *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures*. Cambridge University Press. 29-205, USA.
- Wehbe, M.B., R.A. Seiler, M.R. Vinocur, H. Eakin, C. Santos, and H.M. Civitaresi. 2005. *Social methods for assessing agricultural producer's vulnerability to climate variability and change based on the notion of substantiality*. Assessments of Impacts and Adaptations of Climate Change Working Papers.
- Wischmeier, W.H. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.* 26: 189-193.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Agr. Handbook.