

## 기후변화 취약성 평가 분석도구 개발에 관한 연구: 충남지역 산불 취약성을 중심으로

윤수향·이상신<sup>†</sup>

충남연구원 기후변화대응연구센터

### Development of a Climate Change Vulnerability Assessment Analysis Tool: Based on the Vulnerability Assessment of Forest Fires in Chungcheongnam-do

Yoon, Soo Hyang and Lee, Sang Sin<sup>†</sup>

Research Center for Climate Change, Chungnam Institute, Gongju 32589, Korea

#### ABSTRACT

Chungnam region has established and executed the 2nd Climate Change Adaptation Initiative Execution Plan (2017~2021) based on the Framework Act on Low Carbon, Green Growth. The Execution Plan is established based on the results of climate change vulnerability assessment using the CCGIS, LCCGIS, and VESTAP analysis tools. However, the previously developed climate change vulnerability assessment tools (CCGIS, LCCGIS, VESTAP) cannot reflect the local records and the items and indices of new assessment. Therefore, this study developed a prototype of climate change vulnerability assessment analysis tool that, unlike the previous analysis tools, designs the items and indices considering the local characteristics and allows analysis of grid units. The prototype was used to simulate the vulnerability to forest fires of eight cities and seven towns in Chungcheongnam-do Province in the 2010s, 2020s, and 2050s based on the RCP (Representative Concentration Pathways) 8.5 Scenario provided by the Korea Meteorological Administration. Based on the analysis, Chungcheongnam-do Province's vulnerability to forest fires in the 2010s was highest in Seocheon-gun (0.201), followed by Gyeryong-si (0.173) and Buyeo-gun (0.173) and the future prospects in the 2050s was highest in Seocheon-gun (0.179), followed by Gyeryong-si (0.169) and Buyeo-gun (0.154). The area with highest vulnerability to forest fires in Chungcheongnam-do Province was Biin-myeon, Seocheon-gun and the area may become most vulnerable was Pangyo-myeon, Seocheon-gun. The prototype and the results of analysis may be used to establish the directions and strategies in regards to the vulnerability to wild fires to secure each local government's 2nd execution plan and attainability.

**Key words:** Chungcheongnam-do, Climate Change, Climate Change Adaptation, Vulnerability Assessment, Forest Fires, Grid Unit

#### 1. 서론

전 지구적으로 지구온난화 및 기상이변 등에 의한 사회·경제적 피해가 해마다 증가하고 있어 기후변화는 이제 더 이상 지구적 차원의 문제에 머물러 있지 않고, 국가, 지역사회, 개인 차원에서 적응 대응해야 하는 중요한 환경이슈가 되었다. 우리나라를 비롯한 세계 각국은 기후변화에 대응한 적응대책을 국가 또는 지역차원에서 수립하도록 유도하고 있다(Lee, 2015). 기후변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Cli-

mate Change; IPCC)도 인류가 지금 당장 온실가스를 전혀 배출하지 않더라도 이미 배출된 온실가스로 인해 어느 정도의 영향은 피할 수 없기 때문에, 이에 대한 적응의 시급성을 강조하고 있다(IPCC, 2007; Lee *et al.*, 2011). 국내에서는 저탄소 녹색성장기본법 및 동법 시행령에 의거 제1차 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)이 완료됨에 따라 제2차 적응대책(2016~2020)을 수립·이행하고 있다. 정부의 국가대책의 이행을 위해 세종특별자치시(제1차 세부시행계획(2015~2019))를 제외한 16개 광역시·도가 기후변화 적응대책 세부시행계

<sup>†</sup> Corresponding author: [sinslee@cni.re.kr](mailto:sinslee@cni.re.kr)

Received July 5, 2017 / Revised August 11, 2017 1st, September 11, 2017 2nd / Accepted September 22, 2017

획(2012~2016)을 2012년 기간 내 모두 수립하도록 하였고, 현재 시행 중에 있다(Park, 2016). 충청남도는 제1차 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012~2016)과 제2차 세부시행계획(2017~2021)에 따라 기후변화에 능동적으로 대응하고 있다.

지자체 기후변화 적응대책 수립을 위해서는 취약성 평가를 통해 기후변화로 인한 지역 내 현재 취약성과 미래취약성에 대한 변화경향을 파악하고 이를 반영함으로써 실효성 있는 정책을 수립해야한다. 지자체는 기후변화 취약성 평가 결과를 기반으로 중점추진분야의 선정, 사업별 우선순위 선정 등 주요 의사결정을 하게 된다. 기후변화 취약성 정도는 환경부에서 제공하고 있는 GIS 기반의 CCGIS(Climatic Change adaptation program based on GIS) 및 LCCGIS(Local Climate Change adaptation program based on GIS)와 Web 기반 VESTAP(Vulnerability Assessment Tool to build Climate Change Adaptation Plan)을 활용하여 평가한다(Kim *et al.*, 2014). CCGIS는 온실가스 배출량 시나리오인 Special Report on Emission Scenario (SRES)를 적용한 시·군·구 단위 취약성 평가 분석도구로 광역지자체 제1차 세부시행계획 수립 시 활용되었다. LCCGIS는 기초지자체 적응대책 수립 시 활용되는 읍·면·동 단위 분석도구로 상대적인 취약성 정도를 나타낸다. VESTAP은 대표농도 경로방식인 Representative Concentration Pathways(RCP) 시나리오(Lim, 2016)를 적용한 분석도구로 광역 및 기초지자체가 일원화되어 있어 모든 지자체 적응대책 수립 시 활용이 가능해 제2차 세부시행계획 수립 시 활용되었다.

CCGIS와 LCCGIS, VESTAP은 기존 연구들에서 다수 활용하였고, 현재에도 활용되고 있는 평가도구이나, 일부 한계를 지니고 있는 것으로 파악되었다. 미흡한 부분 중 공통사항은 분석 대상 지자체 고유의 환경적 특성 및 조건을 충실히 반영하지 않았다는 점과 지역 내 보유 자료의 부족 등으로 인하여 지역 특성화 평가 항목과 지표가 다수 누락되어 결과적으로 읍·면·동별 취약성 차이를 부각하지 않았다는 것이다. 또한, 대응변수에 대한 변별력이 미흡한 일부 지자체의 경우, 제1차, 제2차 세부시행계획의 정책 활용도가 저조한 것으로 조사되었다. 취약성 평가의 목적은 과학적 근거를 기반으로 한 실효성 있는 정책 수립으로 정책측면에서의 활용도를 극대화할 수 있는 기후변화 취약성 평가 분석도구의 지속적인 보완·개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존 취약성 평가 분석도구의 한계를 제시하고, 이를 개선하기 위하여 기후변화 취약성 평가 분석도구 prototype을 개발하고, 충남지역 산불 취약성 평가에 적용하였다. 기존 분석도구와의 차별화를 위하여 격자단위 분석이 가능하도록 설계하였고, 지역 여건을 고려한 신규 지표를 발굴

하여 포함하였다. 본 연구에서의 한계와 미흡한 점에 대해서는 후속연구를 통한 지속적인 보완이 필요하며, 연구결과는 향후 충청남도 15개 시·군의 제2차 세부시행계획 수립 또는 관련 정책 수립 시 실질적인 이행과 성과 창출을 담보하여 기초자료로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 기후변화 취약성 평가

### 2.1 기후변화 취약성 평가의 정의

취약성(vulnerability)은 기후 관련 재해 위험에서 기인한 사회·경제적 시스템 노출 상태 또는 기후의 변화, 극한기상 등에 대한 시스템 수용능력을 의미하며, 일반적으로 기후노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의하고, Kim *et al.*(2012)에서 제시한 정의와 같이 Fig. 1로 표현한다. 여기서 기후노출이란 시스템에 영향을 주는 기후의 변동 폭 또는 자극이며, 민감도는 기후자극에 대한 민감한 정도, 적응능력은 기후자극으로부터의 시스템 적응정도를 의미한다(KEI, 2015). 기후노출은 시스템 민감도에 따른 잠재적 영향을 주고, 적응능력에 따라 최종 취약성이 결정되는데, 기후노출이나 민감도가 높은 지역에 적응능력을 증대시킴으로써 취약성을 낮출 수 있다(Kelly and Adger, 2000; Fussel and Klein, 2006).

기후변화 취약성은 지표의 목적에 따라 노출, 민감도, 적응능력을 모두 고려하기도 하고, 혹은 그 중 일부만 고려하기도 한다(KEI, 2010). 기후변화 취약성 평가는 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 시 근간이 되는 근거자료로 이상기후(가뭄, 홍수, 폭염 등)에 의한 재난/재해에 대한 취약함을 나타내며, 지자체 내 상대적인 평가 결과를 표출한다. 서론에서 언급한 바와 같이, 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립을 위해서는 기후변화로 인한 영향 및 취약성 평가가 선행되어야 하는데, 평가 과정과 결과 전반에 대한 정확성, 신뢰성 확보가 중요하다.

### 2.2 기후변화 취약성 평가 접근방법

기후변화 취약성 평가는 정량평가와 정성평가로 구분되는

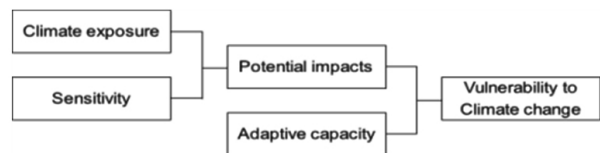


Fig. 1. The definition of climate change vulnerability index.

데, 정량평가는 국립환경과학원에서 제공하고 있는 정의, 기후변화 취약성 평가 도구를 활용하여 평가하는 방식으로 하향식 접근법(top-down approach), 상향식 접근법(bottom-up approach), 절충식 접근법이 여기에 해당된다. 정성평가는 비 정량적 검증·평가방식으로 대다수가 설문조사기법을 활용한 델파이 기법(Delphi technique), AHP(Analytic Hierachy Process) 등을 활용한다.

하향식 접근법은 전 지구 기후 시나리오 및 기후모형(모델)을 기반으로 하여 물리적 취약성을 평가하는 방법으로 장기적인 기후변화 영향에 정량적인 평가가 가능하다. 상향식 접근법은 다양한 지표를 토대로 시스템에 대한 기후노출, 민감도, 적응능력 간 상관관계 분석을 통해 사회·경제적 취약성을 평가하는 방법으로 미래 기후변화 영향 예측 등의 평가가 가능하다. 또한, 지자체, 지역을 주제로 단기 적응방안 개발이나 정책 개발, 우선순위 선정, 예방적 차원에서의 적응과 적응능력 강화에 적합하나, 자료 및 시·공간적 비교 분석의 한계 등 문제점이 있다(GRI, 2009). 마지막으로 절충식 접근법은 지역 내 과거 기후 영향 및 피해 자료와 취약성 지표 간 상관성 분석을 통한 상향식 접근과 기후변화 시나리오 및 모델을 기반으로 장기적 영향을 평가하는 하향식 접근을 종합한 방식이다(NIER, 2012).

### 2.3 기후변화 취약성 평가 프로세스

기후변화 취약성 평가를 위한 절차는 평가방법론 검토 및 분석도구 선정, 평가대상(분야, 항목) 선정, 대응변수(지표) 및 가중치 산정, 취약성 평가단계로 구분된다. 우선 문헌연구를 통하여 분석대상에 적합한 평가방법론과 분석도구를 선정해야 하는데, 이때 기후 시나리오(SRES(B1, A1T, B2, A1B, A2, A1F1), RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5)와 미래 분석시점(2000~2100)을 선정한다. 기존 연구에 의하면 광역지자체의 제1차 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012~2016) 수립 당시 대다수 광역 시·도에서 CCGIS를 활용하였고, 시범 기초지자체의 경우 LCCGIS를 이용하여 취약성 평가를 실시한 것으로 조사되었다. 제2차 세부시행계획(2017~2021)은 VESTAP을 통해 수립·시행 중인 것으로 파악되었다. 지자체는 환경부에서 제공하는 기후변화 취약성 평가 분석도구 이외에도 지자체 특성을 효과적으로 나타낼 수 있는 다각적인 방법론과 분석 툴 사용을 통해 지역 내 취약성을 평가할 수 있다.

평가방법론 검토와 분석도구 선정이 끝나면 평가 분야(건강, 재난/재해, 농업, 산림, 물관리, 생태계, 해양/수산 등)와 분야에 따른 세부항목(홍수에 의한 건강 취약성, 벼 생산성의 취약성, 이수의 취약성 등)을 선정해야 한다.

평가대상 선정이 완료되면 대응변수(지표)와 가중치를 산정해야 하는데, 먼저 대응변수인 기후노출, 민감도, 적응능력과 그에 따른 하위 변수목록을 신규 생성하거나 제외하여 인벤토리를 구축해야 한다. 대응변수에 따른 하위지표 인벤토리가 구축되면, 문헌조사나 지자체 의견 수렴, 자료 유무, 적용 가능성 검토를 통해 1차 대응변수를 산정하고, 전문가 의견수렴과 Oh *et al.*(2016)에서 제시한 식 (1)에 따라 최종 대응변수와 하위지표별 가중치를 부여해야 한다.

Vulnerability =

$$\alpha \times \text{Exposure} + \beta \times \text{Sensitivity} - \gamma \times \text{Adaptive capacity} \quad (1)$$

$\alpha, \beta, \gamma$ : weighting per variable

이때, 가중치를 고려할 필요가 없다고 판단되는 지자체의 경우, 해당 단계를 생략해도 무방하다. 대응변수(기후노출, 민감도, 적응능력)는 단위가 서로 상이하므로 Korea Environment Institute(2008)에서 제시한 스케일 재조정법(re-scaling)과 UNDP(2005)에서 제시한 변수 표준화(normalization) 방법론을 활용하여 식 (2)에 따라 대응변수와 하위지표 범위를 동일 범위(0~1)에 해당하도록 무차원화 하였다. 스케일 재조정법은 지표 값의 분산에 의존하지 않고 지표 값들의 범위에 근거하여 값을 산출하는 방법으로, Min-Max법에 의해 산출된 지표 값은 0에서 1 사이의 값을 가지며, 작은 범위에 몰려 있는 지표의 경우 재계산 과정을 통하여 지표 값의 범위가 넓어지게 되어 Z-score 방법보다 각 지표가 가지는 의미를 보다 정확히 반영한다(Shin and Lee, 2013).

$$\text{Dimension index} = \frac{\text{Actual value} - \text{Minimum value}}{\text{Maximum value} - \text{Minimum value}} \quad (2)$$

식 (2)에 의하여 대응변수가 모두 표준화되면, 식 (1)에 따라 연산하여 최종적으로 취약성 평가 결과를 산출한다. 취약성 평가 분석도구는 시·공간정보에 따른 취약 정도를 정량적(계량적)으로 표출하며, 해당 결과는 기후변화 적응대책과 취약지역 지원 전략 수립, 방향성 제시 등에 활용이 가능하다.

### 2.4 기후변화 취약성 평가 분석도구와 한계점

기후변화 취약성 평가 분석도구로는 광역지자체 제1차 세부시행계획(2012~2016) 수립 당시 활용된 CCGIS와 시범 기

초지자체 제1차 기후변화 적응대책 세부시행계획수립 시 활용된 LCCGIS, 가장 최근 배포되어 광역지자체 제2차 세부시행계획(2017~2021) 및 기초지자체 제1차 적응대책 수립에 활용 중인 VESTAP이 있다.

CCGIS는 GIS 기반의 취약성 평가 프로그램으로 SRES 시나리오를 적용한 광역지자체의 시·군·구별 과거기후(2000년대)와 미래기후(2020년대, 2050년대, 2100년대) 예측 데이터 및 정보를 제공한다. 앞서 언급한 바와 같이 법정계획인 광역지자체의 제1차 적응대책 수립 시 이용되었으나, 국내여건(RCP 시나리오 적합)과 상이한 SRES 시나리오를 기반으로 평가하여 적응대책의 실효성이 저조하다는 평가를 받고 있다. 또한, 한 시·군에 동일 조건의 기후변화 현상이 발생하더라도 지역적 요소인 지리조건, 기반시설 등에 따른 영향은 상이하기 마련인데, CCGIS에 적용된 변수, 지수 입력과 지역 DB의 범위 또는 규모 등과 달라 지역 내 취약성 변이를 고려할 수 없다.

한편, LCCGIS는 GIS 기반의 RCP 8.5 시나리오를 적용한 취약성 평가 프로그램으로 기초지자체의 읍·면·동별 과거기후(2000년대), 미래기후(2020년대, 2050년대, 2100년대) 취약성 정보를 제공한다. 해당 프로그램은 34개 시범 기초지자체를 포함한 다수의 기초지자체 제1차 적응대책 수립 시 활용되었으나, RCP 8.5 시나리오(온실가스의 저감 없이 현재 추세로 배출되는 경우)만을 고려하여 평가하였으므로 시나리오별 비교가 불가능하며, 미래취약성 결과, 과다 산정으로 신뢰도가 떨어진다. LCCGIS 프로그램은 기초지자체별로 선택하도록 인터페이스가 설계되어 있어 특정 지역 내 취약성 평가는 가능하나, 타 지자체와의 상대비교가 불가능하다. CCGIS와 LCCGIS는 인터페이스가 복잡하며, 특허권(S/W 특허등록)에 의하여 수정·보관·갱신이 불가하고, 업데이트 버전의 재배포에 제약이 있어 시스템적 오류 또는 결함에 대한 대안이 없다. 전지역을 대상으로 통합적인 비교분석이 불가하며, 다수의 지표가 누락되어 있어 신뢰성이 부족하고 표준화 과정에서 오류가 발견되어 정확도가 떨어진다.

VESTAP은 웹 기반의 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오를 적용한 취약성 평가 프로그램으로 광역·기초지자체의 과거기후(2000년대)와 미래기후(2010년대, 2020년대, 2030년대, 2040년대) 취약성 결과를 제공한다. 기존 CCGIS와 LCCGIS의 단점을 일부 보완하여 인터페이스가 편리하고 지자체 구분 없이 적용 가능하나, 읍·면·동 내 상대적 우선 순위만을 제공하여 개별지자체 세부시행계획 수립에만 적용이 가능하고, 지자체 간 비교분석과 해당 시·군·구의 읍·면·동 간 비교가 불가능하다. 항목 또는 지표별로 정확한 취약성 결과를 제공하는 것이 아니므로 절대적인 취약정도를 알 수 없으며, 특정

항목과 지표에 따른 취약 정도도 예측 불가능하다.

따라서 기존 취약성 평가 분석도구의 한계점을 보완하고 개선하기 위해서는 첫째, 기존 분석도구에서 제공하던 평가단위를 고해상도 1 km × 1 km 격자단위로 변경하고, 공간상 평가 결과를 제공하여 명확한 취약지역의 파악과 결과 활용의 효율·효과성을 증대해야 한다. CCGIS, LCCGIS, VESTAP은 법정동, 행정동 구분 없이 행정구역별 결과를 제공하므로, 광범위지역 또는 인접지역이 동일한 값을 갖는 오류가 있어 평가 단위를 세분화를 통해 정확성을 향상시켜야 한다. 둘째, 동일 시·군·구 내 읍·면·동별 기후변화 영향과 취약성 상대비교가 가능해야 하며, 상대적 순위가 아닌 절대적 수치를 제공하여 취약지역의 기후변화 적응능력 향상과 효과적 적응대책 수립에 지원해야 한다. 셋째, 평가항목 및 변수의 수정이 가능해야 하며, 지자체 실무자와 전문가, 주민의견 등을 적극 반영하여 대응변수별 변별력을 확보하고, 특성화 지표를 다수 적용해 정책 활용도 증대와 기후변화 적응 확산에 기여해야 한다.

### 3. 기후변화 취약성 평가 분석도구 Prototype

#### 3.1 모델 설계

기존 평가 분석도구가 갖는 한계점 보완 및 개선, 기존 연구과의 차별화를 위하여 기후변화 취약성 평가 분석도구 prototype을 개발하고, 평가결과의 오차범위를 최소화하였다. 현재 Fig. 2와 같이 논리·물리데이터베이스 모델을 설계하여 산림분야 산발 취약성 항목에 대한 평가 DB를 시범 구축하였으며, 대응변수 및 가중치의 경우 사용자의 편의와 정확도 향상을 위하여 수정, 삭제, 신규 생성 등 편집이 가능하도록 설계하였다. 기후노출(RCP 8.5 기후 시나리오 grid data의 2000~2100년 DB 등) 민감도(산림청 1:5,000 수치임상도 등), 적응

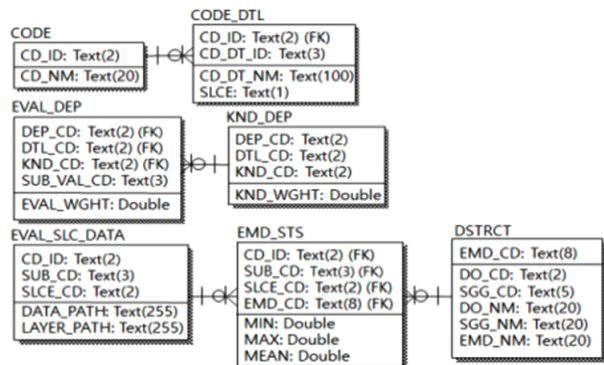


Fig. 2. The design and implementation of database system.

능력(재정자립도 및 자주도 등)별 평가지표와 메타데이터를 구축하였다. RCP 8.5 시나리오를 적용하였으며, 미래취약성 결과는 2010년대(2011~2015), 2020년대(2016~2025), 2050(2045~2055)년대의 정량화된 시계열 정보를 제공한다. ArcGIS 기반으로 행정구역(시·군·구, 읍·면·동)별 격자단위 지리 정보를 제공하며, 폴리곤 형태의 공간 DB와 매칭하기 위해 보간법(interpolation)을 적용하였다. 평가결과는 지도형태로 화면에 표출된다.

### 3.2 지표 DB 구축

충남지역 기후변화 취약성 평가에 적용할 평가지표 선정에 위하여 제1차 세부시행계획을 완료한 16개 광역지자체와 시

행 중인 34개 시범 기초지자체 중 무관한 지역을 제외한 31개 기초지자체 보고서 31건, 관련 정책 보고서 61건, 논문 120건을 조사·분석하였다. 분석결과, 기반으로 기초지자체 취약성 평가 시 다수 지역에 활용된 지표이거나 명확한 출처와 DB를 보유하고 있는 지표, 전문가 의견수렴을 통하여 필수적으로 평가가 필요한 지표, 대체 가능한 통계자료인지를 고려하여 인벤토리를 구축한 후, 지역 여건을 반영한 후 최종 평가항목을 선정하였다. 최종 선정된 평가지표는 6개 분야 17개 항목(건강(3), 농업(3), 물관리(3), 산림(4), 생태계(2), 재난/재해(2)) 363개로 구분된다.

본 연구에서 활용한 산불 취약성 평가지표는 Table 1에서와 같이 기후노출(5), 민감도(8), 적응능력(7)로 구성되며, 가

Table 1. List of proxy variables and weighting on the vulnerability assessment for forest fires

	List of proxy variable	Weighting	Source
Climate exposure (0.43)	· Precipitation(mm/day)	0.12	RCP 8.5 Scenario
	· The number of days that maximum wind velocity is 14 m/s and over.	0.15	RCP 8.5 Scenario
	· The maximum value of non-consecutive days of rain	0.34	RCP 8.5 Scenario
	· The number of days that daily effective humidity is 35% and less.	0.30	Data of LCCGIS
	· The number of days that maximum temperature is 33℃ and over.	0.09	RCP 8.5 Scenario
Sensitivity (0.27)	· Unstocked forest area (ha)	0.11	1:5,000 scale digital forest type map
	· Forest in the average slope (°)	0.14	1:5,000 scale digital topographic map
	· Forest in the average altitude (m)	0.13	1:5,000 scale digital topographic map
	· Total population	0.13	Data of LCCGIS
	· Coniferous forest area (ha)	0.23	1:5,000 scale digital forest type map
	· Soil water 10 cm (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	-0.11	Data of LCCGIS
	· Mixed forest area (ha)	0.19	1:5,000 scale digital forest type map
· Deciduous forest area (ha)	0.18	1:5,000 scale digital forest type map	
Adaptive capacity (0.30)	· The number of forest officers	0.14	Data of LCCGIS
	· Forest disaster area (ha)	0.25	Data of LCCGIS
	· Precipitation of forest fire danger period (mm)	0.14	RCP 8.5 Scenario
	· Financial independence (%)	0.11	Statistics annual report of Chungcheongnam-do
	· Gross regional domestic product (GRDP)	0.06	Data of LCCGIS
	· Adjacent distance of fire suppression using water (m)	0.15	1:5,000 scale digital topographic map
	· Accessibility for fire truck (m)	0.15	Digital mapping of forest roads

중치는 관련 산식에 적용하거나 실무자와 전문가 의견을 종합하여 산정하였다. 취약성 평가 결과는 대용변수와 하위변수별 가중치와 고유 값에 의하여 0~1 사이의 표준화된 값으로 계산되며, 1에 가까울수록 취약한 것으로 해석된다.

#### 4. 충청남도 산불 취약성 평가 결과

본 연구를 통한 사례 제시를 위하여 prototype을 활용한 충청남도의 시·군·구 및 읍·면·동(법정동)별 미래기후(2010년대, 2020년대, 2050년대) 산불 취약성의 결과를 Fig. 3과 같이 제시하였다.

결과적으로 2010년대보다 2020년대 취약성은 증가할 것으로 예측되며, 2050년대에는 다시 감소할 것으로 전망된다. 이러한 결과는 가까운 미래인 2020년에는 적응능력보다 기후노출과 민감도 대용변수의 영향이 커 증가할 것으로 예측되는 것으로 해석할 수 있다. 반면, 2050년대에 감소할 것으로 예측되는 미래취약성 결과는 기후노출이나 민감도 영향보다 상대적으로 적응능력이 뛰어남을 의미한다.

충남지역 8개 시(천안시(동남구, 서북구), 공주시, 보령시, 아산시, 서산시, 논산시, 계룡시, 당진시)의 산불 취약성 평가 결과, Table 2에서와 같이 2010년대에는 계룡시(0.173)로 당진시(0.161), 서산시(0.159)의 순으로 취약한 것으로 분석되었다. 2020년대에는 계룡시(0.170), 서산시(0.138), 당진시(0.137), 2050년대의 경우 계룡시(0.169), 당진시(0.137), 천안시 동남구(0.133) 순으로 취약할 것으로 분석되어 계룡시의 상대적 산불 취약성이 타 시보다 높은 것으로 분석되었다. 8개 시의 산불 취약성 결과 비교와 검증을 위하여 Fig. 4(a)와 같이 방사형 그래프로 표현할 경우, 결과적으로 미래취약성(2010년대, 2020년대, 2050년대) 모두 계룡시가 높은 것으로 분석되었다.

8개 시의 행정동, 법정동 포함한 읍·면·동별 산불 취약성

평가결과, 2020년대를 기준으로 천안시 동남구는 사직동, 다가동, 구룡동의 순으로 취약할 것으로 예측되며, 서북구의 경우 쌍용동, 불당동, 성환읍 순으로 취약할 것으로 분석되었다. 한편, 공주시는 반포면, 신평면, 유구읍, 보령시의 경우 성주면, 미산면, 주산면, 아산시는 영이면, 음봉면, 염치읍의 순으로 취약성이 높을 것으로 예상된다. 서산시의 경우에는 팔봉면, 수석동, 갈산동, 논산시는 벌곡면, 부창동, 등화동, 계룡시 신도안면, 엄사면, 두마면, 당진시 용연동, 사기소동, 정미면 순으로 취약성이 높을 것으로 분석되었다.

충남지역 7개 군(금산군, 부여군, 서천군, 청양군, 홍성군, 예산군, 태안군)의 취약성 평가결과, Table 3과 같이 2010년대에는 서천군(0.201), 부여군(0.173), 예산군(0.166) 순으로 취약한 것으로 분석되었다. 2020년대는 서천군(0.194), 부여군(0.155), 청양군(0.143), 2050년대는 서천군(0.179), 부여군(0.154), 청양군(0.152) 순으로 취약할 것으로 예측되어 타 군보다 상대적으로 서천군의 산불 취약성이 높을 것으로 전망된다. 결과의 비교와 검증을 위하여 Fig. 4(b)와 같이 방사형 그래프로 표현한 결과, 미래취약성(2010년대, 2020년대, 2050년대) 모두 서천시가 높아, 관련 대책 수립이 시급한 것으로 판단된다.

7개 군의 행정동, 법정동 포함한 읍·면·동별 산불 취약성 평가결과, 2020년대를 기준으로 금산군의 경우 군북면, 복수면, 남이면, 부여군은 충화면, 내산면, 외산면 순으로 취약할 것으로 예측된다. 서천군의 경우에는 판교면, 문산면, 화양면, 청양군은 대치면, 장평면, 남양면, 홍성군 서부면, 구항면, 갈산면, 예산군 봉산면, 고덕면, 덕산면, 태안군 이월면, 소원면, 원북면 순으로 취약할 것으로 분석되었다.

기존 평가 분석도구와의 차별성 확보를 위하여 충청남도 전역 내 산불 취약성 평가 결과를 비교분석하였다. 시·군별 행정구역 구분 없이 전 지역의 취약성 평가지수를 Fig. 5에서

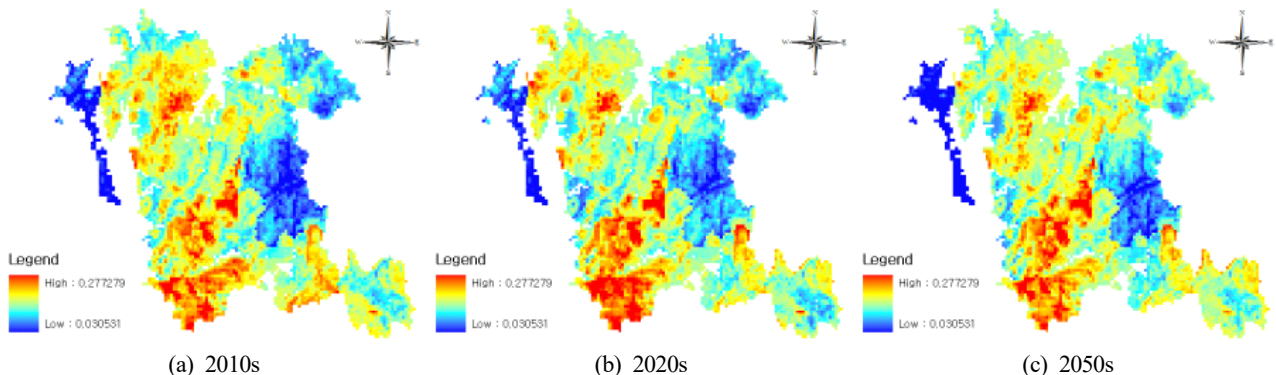


Fig. 3. Vulnerability map of forest fires in the (a) 2010s, (b) 2020s, (c) 2050s.

Table 2. Result of forest fires vulnerability in eight cities

Location		2010's	2020's	2050's
Cheonan-si		Dongnam-gu(0.132)	Dongnam-gu(0.121)	Dongnam-gu(0.133)
	1st	Guryong-dong(0.158)	Sajik-dong(0.153)	Sajik-dong(0.156)
	2nd	Sinbang-dong(0.157)	Daga-dong(0.151)	Daga-dong(0.155)
	3rd	Cheongdang-dong(0.15)	Guryong-dong(0.15)	Guryong-dong(0.153)
		Seobuk-gu(0.115)	Seobuk-gu(0.094)	Seobuk-gu(0.109)
	1st	Ssangyong-dong(0.152)	Ssangyong-dong(0.135)	Ssangyong-dong(0.142)
	2nd	Buldang-dong(0.132)	Buldang-dong(0.111)	Buldang-dong(0.121)
	3rd	Backseok-dong(0.126)	Seonghwan-eup(0.100)	Ipjang-myeon(0.116)
Gongju-si		0.081	0.080	0.075
	1st	Sinpung-myeon(0.129)	Banpo-myeon(0.114)	Sinpung-myeon(0.123)
	2nd	Yugu-eup(0.123)	Sinpung-myeon(0.111)	Yugu-eup(0.118)
	3rd	Banpo-myeon(0.107)	Yugu-eup(0.102)	Jeongan-myeon(0.104)
Boryeong-si		0.146	0.129	0.125
	1st	Seongju-myeon(0.19)	Seongju-myeon(0.176)	Seongju-myeon(0.171)
	2nd	Misan-myeon(0.171)	Misan-myeon(0.175)	Misan-myeon(0.167)
	3rd	Ungcheon-eup(0.165)	Jusan-myeon(0.155)	Namgok-dong(0.14)
Asan-si		0.141	0.115	0.127
	1st	Yeomchi-eup(0.161)	Yeongin-myeon(0.135)	Baebang-eup(0.146)
	2nd	Eumbong-myeon(0.159)	Eumbong-myeon(0.133)	Songak-myeon(0.145)
	3rd	Baebang-eup(0.157)	Yeomchi-eup(0.133)	Yeomchi-eup(0.144)
Seosan-si		0.159	0.138	0.127
	1st	Suseok-dong(0.19)	Palbong-myeon(0.173)	Palbong-myeon(0.15)
	2nd	Palbong-myeon(0.183)	Suseok-dong(0.171)	Suseok-dong(0.149)
	3rd	Eumam-myeon(0.173)	Galsan-dong(0.158)	Unsan-myeon(0.143)
Nonsan-si		0.152	0.129	0.121
	1st	Beolgok-myeon(0.182)	Beolgok-myeon(0.149)	Beolgok-myeon(0.151)
	2nd	Yangchon-myeon(0.178)	Buchang-dong(0.141)	Yangchon-myeon(0.137)
	3rd	Yeonmu-eup(0.169)	Deunghwa-dong(0.139)	Buchang-dong(0.136)
Gyeryong-si		0.173	0.170	0.169
	1st	Sindoan_myeon(0.184)	Sindoan_myeon(0.183)	Sindoan_myeon(0.173)
	2nd	Eomsa-myeon(0.178)	Eomsa-myeon(0.168)	Duma-myeon(0.172)
	3rd	Duma-myeon(0.169)	Duma-myeon(0.166)	Geumam-dong(0.168)
Dangjin-si		0.161	0.137	0.137

Table 2. Continued

Location		2010's	2020's	2050's
Dangjin-si	1st	Yongyeon-dong(0.184)	Yongyeon-dong(0.155)	Guryong-dong(0.158)
	2nd	Guryong-dong(0.184)	Sagiso-dong(0.154)	Yongyeon-dong(0.158)
	3rd	Sagiso-dong(0.181)	Jeongmi-myeon(0.153)	Sagiso-dong(0.156)

Table 3. Result of forest fires vulnerability in seven towns

Location		2010's	2020's	2050's
		0.143	0.123	0.132
Geumsan-gun	1st	Nami-myeon(0.163)	Gunbuk-myeon(0.14)	Gunbuk-myeon(0.146)
	2nd	Gunbuk-myeon(0.153)	Boksu-myeon(0.135)	Boksu-myeon(0.146)
	3rd	Jewon-myeon(0.148)	Nami-myeon(0.131)	Jewon-myeon(0.139)
		0.173	0.155	0.154
Buyeo-gun	1st	Chunghwa-myeon(0.2)	Chunghwa-myeon(0.183)	Naesan-myeon(0.185)
	2nd	Oesan-myeon(0.198)	Naesan-myeon(0.181)	Oesan-myeon(0.184)
	3rd	Jangam-myeon(0.192)	Oesan-myeon(0.181)	Eunsan-myeon(0.173)
		0.201	0.194	0.179
Seocheon-gun	1st	Biin-myeon(0.218)	Pangyo-myeon(0.212)	Pangyo-myeon(0.197)
	2nd	Gisan-myeon(0.212)	Hwayang-myeon(0.206)	Munsan-myeon(0.192)
	3rd	Hwayang-myeon(0.212)	Munsan-myeon(0.206)	Biin-myeon(0.188)
		0.161	0.143	0.152
Cheongyang-gun	1st	Daechi-myeon(0.197)	Daechi-myeon(0.181)	Daechi-myeon(0.188)
	2nd	Namyang-myeon(0.186)	Jangpyeong-myeon(0.164)	Namyang-myeon(0.174)
	3rd	Jangpyeong-myeon(0.176)	Namyang-myeon(0.163)	Jangpyeong-myeon(0.165)
		0.161	0.135	0.145
Hongseong-gun	1st	Seobu-myeon(0.192)	Seobu-myeon(0.167)	Guhang-myeon(0.161)
	2nd	Guhang-myeon(0.173)	Guhang-myeon(0.149)	Seobu-myeon(0.16)
	3rd	Galsan-myeon(0.17)	Galsan-myeon(0.14)	Eunha-myeon(0.149)
		0.166	0.141	0.147
Yesan-gun	1st	Bongsan-myeon(0.213)	Bongsan-myeon(0.193)	Bongsan-myeon(0.186)
	2nd	Godeok-myeon(0.191)	Godeok-myeon(0.164)	Deoksan-myeon(0.162)
	3rd	Deoksan-myeon(0.186)	Deoksan-myeon(0.156)	Godeok-myeon(0.161)
		0.074	0.064	0.037
Tae'an-gun	1st	Iwon-myeon(0.089)	Iwon-myeon(0.088)	Iwon-myeon(0.05)
	2nd	Sowon-myeon(0.085)	Sowon-myeon(0.084)	Sowon-myeon(0.048)
	3rd	Wonbuk-myeon(0.083)	Wonbuk-myeon(0.08)	Wonbuk-myeon(0.043)



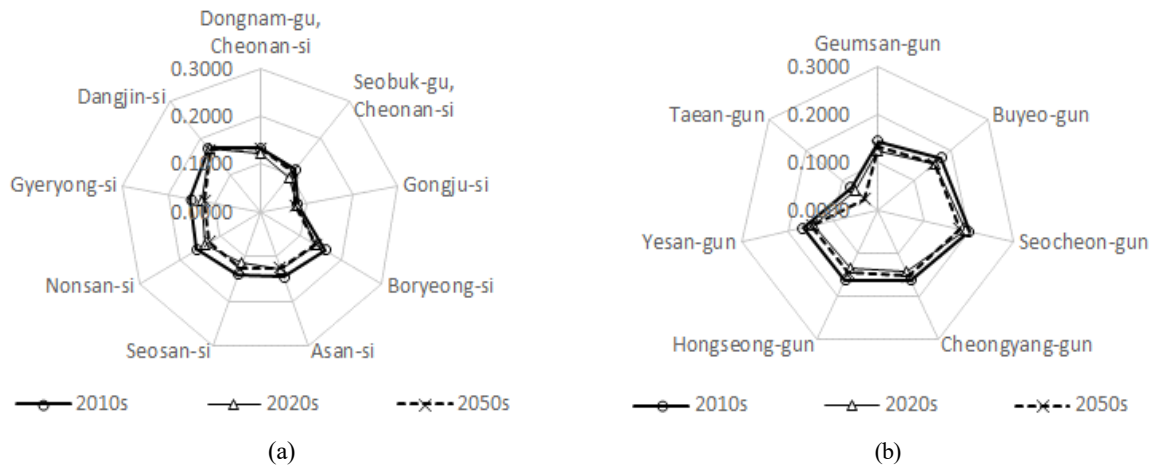


Fig. 4. Result of forest fires vulnerability. (a) variation between present and future of eight cities, (b) variation between present and future of seven towns.

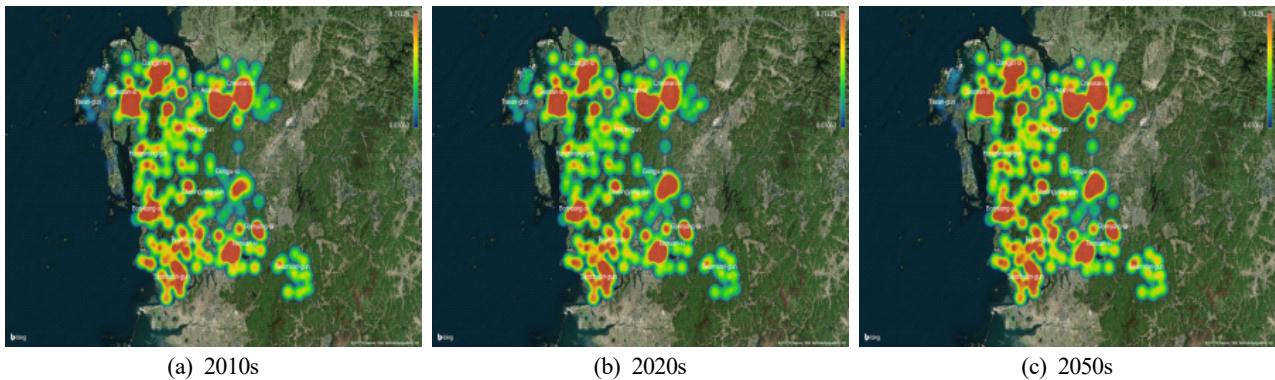


Fig. 5. Mapping for forest fires vulnerability in (a) 2010s, (b) 2020s, (c) 2050s.

와 같이 heap map으로 표현하였으며, 결과를 토대로 최소/최대 취약지역을 선정하였다. 지리정보는 법정동별 대표지점(주민자치자치센터, 복지회관 등 행정기관)의 위·경도를 활용하였고, 면적은 행정동 단위로 구분되어 있어 고려하지 않았다. 해당 지점에 부합하는 취약성 평가 결과를 적용하여 2차원 지도 형태로 재구현하였으며, 결과는 연대별, 지역별로 해석이 가능하다. 지역별 해석 시 특정 지점이 취약한 것으로 잘못 해석하는 오류를 범하지 않도록 주의해야 하며, 연대별 충청남도 전역의 취약성 평가 결과는 Fig. 3을 참고해야 한다.

결과를 연대별로 구분하여 해석할 경우, 충남 전역에서 산불 취약성이 가장 낮은 지역은 2010년대에는 공주시 월미동 일대, 2020년대와 2050년대에는 태안군 고남면 일대, 향후 50년간 가장 취약할 것으로 예측된 지역은 서천군 비인면 일대와 판교면 일대로 분석된다.

충남의 산불 취약성을 지역별로 해석할 경우, 서쪽에서 내

륙으로 갈수록 상대적 취약성이 높아지고 내륙에서 동쪽으로 갈수록 낮아지는 정규분포그래프 형태와 유사한 양상을 보이게 된다. 내륙에 위치한 서산시, 당진시 등은 서해안에 위치한 태안군과 동쪽에 위치한 천안시, 공주시, 금산군보다 취약성이 현저히 높은 것으로 분석되었다. 즉, 서해와 인접한 해안가 및 강원도, 충청북도, 경상북도와 인접한 외곽지역의 취약성이 충청남도 중심부보다 낮은 것으로 분석되었는데, 이러한 결과는 충남지역의 지형적 요인과 산림 분포, 지역별 적응능력 등에 기인한 것으로 해석된다.

### 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 기후변화 취약성 평가가 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 및 관련 정책 결정 시 과학적 근거자료로 활용되므로 기존 기후변화 취약성 평가 분석도구가

갖는 한계점을 분석하여 신규 분석도구 prototype을 개발함으로써 한계점을 개선하고, 지역적 특성을 최대한 반영하여 정확도와 신뢰성을 확보하고자 하였다. 기존 분석도구의 주요 한계점은 예측에 따른 불확실성 내재, 지역정보 및 역량 요소와 자료 부족, 타 지자체 및 지역 내 상대비교 불가, 행정구역별 구분에 의한 평가단위로 인한 변별력 미흡, 정책 활용률 저조이다. 이에 본 연구에서는 평가단위의 세분화, 지역 특성화, 실효성 측면을 적극 고려하여 prototype에 반영하였고, 이를 통해 충남 전역의 2010년대, 2020년대, 2050년대 산불에 대한 취약성 정보를 제공하였다.

연구결과, 절대적 취약도가 가장 높은 지역은 계룡시와 서천군으로 분석되었으며, 시·군의 상대적 순위 비교에서는 해안에서 내륙방향으로 취약성이 높아지는 경향을 보였다.

연구결과는 읍·면·동별 산림, 산불 취약성 관련 대안 수립과 기초지자체의 기후변화, 산림, 재난/재해, 취약성 등의 정책 수립 시 기초자료로의 활용이 가능하다. 또한, 15개 시·군의 기초지자체 제2차 세부시행계획 수립 시 기존 취약성 평가 분석도구와 함께 상호 보완하여 활용함으로써 신뢰도 및 정확성 확보와 활용성 증진에 기여할 것으로 판단된다. 이외에도 충청남도 차원에서 관련 정책의 우선순위 결정 및 의사결정 시 기간이 되고, 관련 사업의 방향성 제시에 기반이 되는 자료로 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

현재 개발된 prototype의 버전은 불안정하거나 개선이 필요한 요소들을 일부 포함하고 있어 보완이 필요하다. 본 논문에서 충청남도 전 부문별 취약성 평가가 아닌 산림부문의 산불 취약성에 대한 결과만을 제시하고 있어 취약성 평가에 필요한 분야, 항목 등 DB 구축 범위를 확대하고, 문제점을 개선할 수 있는 관련 연구가 후속되어야 한다. 마지막으로 취약성 평가의 웹 또는 모바일 지원, 버그 수정, 사용자 편의 강화, 인터페이스체계 고도화, 활용성 극대화를 위한 노력과 관련 연구가 지속되어야 할 것이다.

## 사 사

본 논문은 충남연구원 2015년 정책지원과제 ‘충청남도 기후변화 취약성 평가 Prototype 개발’의 일부 내용을 대폭 보완·수정한 것입니다.

## REFERENCES

Füssel HM, Klein RJ. 2006. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climate Change* 75(3):301-329.

Gyeonggi Research Institute(GRI). 2009. A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-Do.

IPCC. 2007. *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Fourth Assessment Report*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kelly PM, Adger WN. 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic Change* 47(4):325-352.

Korea Environment Institute(KEI). 2008. Development and application of a climate change vulnerability index.

Korea Environment Institute(KEI). 2010. Reviewing the national-level indices to climate change impact, adaptation and vulnerability with focusing on South Korea's current state.

Korea Environment Institute(KEI). 2015. A study on the support system of local vulnerability assessment to climate change.

Kim CH, Song CK, Hong YD, Yu JA, Ryu SH, Yim GY. 2012. Development and application of CCGIS for the estimation of vulnerability index over Korea. *Climate Change Research* 3(1):13-24.

Kim YS, Lee SH. 2014. Improvement of vulnerability assessment to climate change using LCCGIS. *Journal of Climate Change Research* 5(2):165-178.

Lee BD, Kim BT, Cho YS. 2011. A study on vulnerability assessment to climate change in regional fisheries of Korea. *The Journal of Fisheries Business Administration* 42(1):57-70.

Lee GE. 2015. A study on vulnerability analysis and effective implementation related to climate change adaptation strategy in Daegu. Ph.D. Thesis, Keimyung University, Daegu, Republic of Korea, p 140.

Lim CH. 2016. The vulnerability assessment forest fire in Jeju to climate change using the VESTAP. *Fire Science and Engineering* 30(1):57-62.

National Institute of Environmental Research(NIER). 2012. A study on climate change vulnerability for supporting pilot project of local government adaptation implementation planning.

Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of web-based supporting tool (VESTAP) for climate change vulnerability

- assessment in lower and municipal-level local governments. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(1):1-11.
- Park IK. 2016. A study on climate change vulnerability assessment for Ulsan Local Government using VESTAP. Master's Thesis, Sejong University, Seoul, Republic of Korea, p 97.
- Shin HS, Lee SH. 2013. Development of a climate change vulnerability index on the health care sector. *Journal of Environmental Policy* 13(1):69-93.
- UNDP. 2005. *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures*. Cambridge University Press, USA.