

기후변화에 대한 산업부문 취약 핫스팟 지역 분석 -적응 및 완화 측면에서-

윤은주* · 이동근*** · 김호걸* · 최광림***

*서울대학교 대학원, **서울대학교 조경·지역시스템공학부, ***산업에너지환경연구소

Vulnerable Homogeneous Hotspot Areas of the Industrial Sector for the Climate Change - Focused on Mitigation and Adaptation Perspective -

Yoon, Eun Joo*, Lee, Dong Kun**†, Kim, Hogul* and Choi, Kwang Lim***

*Graduate School, Seoul National University, Seoul, Korea

**Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

***Industrial Energy and Environment Institute, Seoul, Korea

ABSTRACT

Recently, many countries all over the world have been suffered from disaster caused by climate change. Especially in case of developed countries, the disaster is concentrated in the industry sector. In this research, we analyzed industrial vulnerable homogeneous hotspot for the climate change using spatial autocorrelation analysis on the south Korea. Homogeneous hot spot areas through autocorrelation analysis indicate the spatial pattern of areas interacted each other. Industry sector have responsibility of green house gas emissions, and should adapt to the climate change caused by greenhouse gas already released. So, we integrated the areas sensitive to mitigation option with the areas hardly adapt to climate change because of vulnerable infrastructure. We expected that the result of this research could contribute to the decision-making system of climate change polices.

*Key words: Spatial Autocorrelation Analysis, Electricity Consumption, Infrastructure Vulnerability, Moran's I, Getis Ord G^*i*

1. Introduction

21세기에 들어서며 기후변화로 인한 이상 기후로 국내산업 부문 피해가 속출하고 있으며, 실제 기상이변으로 인한 재산 피해액은 1990년대에 비해 3배 이상 늘어난 것으로 보고되고 있다(KMA, 2010; Bae *et al.*, 2013). 기후시나리오 RCP 8.5에 따르면 미래 50년간의 기후변화는 과거의 기후변화에 비해 3 배 이상 빠를 것으로 예측되므로(IPCC, 2014), 앞으로 기후로 인한 산업부문의 피해 규모 역시 커질 것으로 예상된다. 특히, 기후변화란 단순한 온도 및 강우량의 증가만이 아닌, 그 변동 폭의 증가를 수반하기 때문에 더욱이 그러하다. 일반적으로 기후변화에 대한 대응은 기후변화의 '완화'와 기후변화에 대

한 '적응'의 두 가지 측면으로 구분될 수 있으며, 산업부문 역시 그러하다(IPCC, 2007). 이 중 완화의 측면에서 정부는 '저탄소녹색성장기본법' 제정을 통해 총량제한배출권거래제, 탄소세, 에너지·온실가스목표관리제 등의 규제정책 도입을 본격화하고 있다. 또한 2015년 12월, 신기후체제에 따라 전 세계 모든 나라에 감축의무가 부여하는 파리협정문(Paris agreement)이 채택되었다.

다음으로 적응 측면에서 국가는 제 1, 2차 기후변화국가적응대책을 수립하고 있으며, 산업부문에서는 2010년대부터 기후변화에 대한 산업단지의 취약성을 다루는 연구가 수행되고 있다. Bae *et al.*(2013)은 석유 및 자동차 산업관련 산업단지의 취약성 평가지표와 가중치를 연구하였으며, Kim *et al.* (2013)

† Corresponding author : dklee7@snu.ac.kr

Received January 6, 2016 / Revised February 16, 2016 / Accepted February 26, 2016

은 입지적 특성, 기반시설, 경제적 특성에 근거하여 일부 산업 단지의 취약성을 평가한 바 있다. 또한 Kang(2014)은 기후변화에 대해 도시가스산업의 취약요인과 그 영향 정도를 분석한 바 있다. 이렇듯 기후변화에 대한 대응이 취약성 평가에 기초하는 이유는 취약성 평가가 가장 취약한 기후노출과 그 정도를 구체화 하고, 적응계획의 우선순위를 결정하는 근거를 제시한다는데 있다.

그러나 기후변화에 대한 국내 산업부문의 대응은 다음과 같은 한계점이 있다. 첫째, 기후변화에 대한 온실가스 감축목표가 수립되고, 이것이 산업에 대한 규제로 작용함에 따라 실제 산업부문 혹은 기업의 관심은 완화 부분에만 집중되어 있다(KMKE, 2012). 그러나 장기적으로 기 배출된 온실가스에 의해 기후변화가 필연적으로 발생하므로, 이에 대한 적응부분 역시 함께 다루어야 할 필요가 있다. 둘째, 일반적으로 적응 관련하여 산업부문 취약성 평가의 대상이 일부 국가산업단지 혹은 특정 업종에 한정되어 있다. 즉, 전 국토에 광범위하게 분포하는 중·소규모의 산업단지 혹은 기업들은 기후변화에 대한 대응 부분에서 소외되어 있다. 셋째, 기존의 연구에서 산업부문의 기후변화 영향에 대한 취약성 혹은 리스크 수준을 도출하고는 있으나, 우선적으로 정책적 지원이 필요한 공간적 범위를 명확하게 제시하고 있지 않다. 따라서 완화 혹은 적응 측면에서 지원이 집중적으로 필요한 지역을 분류함으로써 그 정책적 활용도를 높일 필요가 있다.

이에 따라 본 연구의 목적은 기후변화에 대한 산업부문의 완화와 적응, 두 가지 측면에서 국내 전 지역 중 취약한 핫스팟 지역을 도출하는데 있다. ‘기후변화의 완화’ 측면에서는 기존에 에너지 소비량이 높아 온실가스 감축목표 설정 시 부담이 가중될 수 있는 지역을 반영하였으며, ‘기후변화에 대한 적응’ 측면에서는 현재 기반시설이 혹서, 홍수 등의 기후노출에 취약하여 기후 변화 시 산업단지 혹은 기업이 적응하기 어려운 지역을 반영하였다. 또한 공간자기상관 분석을 이용한 핫스팟 개념을 적용함으로써 정책적으로 선택 및 집중되어야 할 공간의 범위를 명확히 제시하였다.

2. Materials and Methods

취약성은 시스템의 적응능력을 고려하여 극한의 스트레스가 발생했을 때 시스템이 받을 것으로 예측되는 부정적인 영향의 통합적 결과로 정의될 수 있다(IPCC, 2007). 이를 기초로, 본 연구에서는 시스템을 국내 산업부문으로, 극한의 스트레스는 기후변화를, 이로 인한 부정적인 영향은 기후변화를 완화시키는데 대한 부담과, 기후변화에 대해 적응하는데 대한 어려움으로 정의하였다.

2.1 Mitigation Perspective

기후변화를 완화시키는데 따른 지역별 산업부문의 부담 정

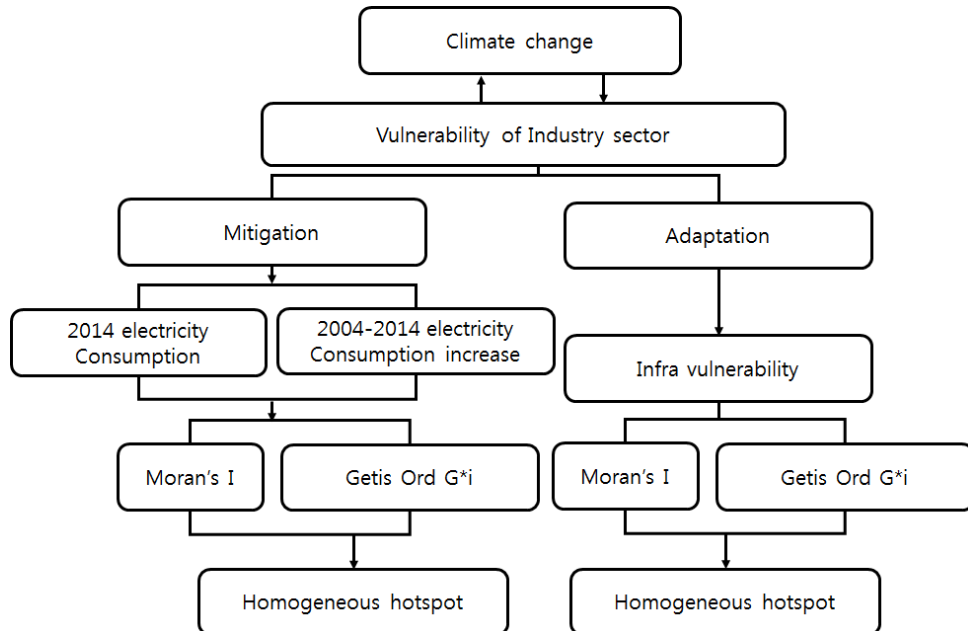


Fig. 1. Research flow.

도를 파악하기 위한 부분이다. 기후변화의 완화는 온실가스의 감축을 의미하는데, 현재 국가별 감축목표가 수립됨에 따라 산업부문이 직접적으로 당면한 과제이다. 완화부분에서 취약한 지역을 분석하기 위해 통계청에서 제공하고 있는 전국 시/군/구 단위에 대한 산업부문 전력소비량과 2004~2014년 사이의 산업부문 전력소비 증가량 데이터를 이용하였다. 이러한 전력 소비량을 통해 온실가스 발생량을 간접적으로 파악할 수 있으며, 전력소비량이 높을수록 기후변화 완화에 대한 부담이 가중될 것으로 판단할 수 있다(Xie et al, 2014).

2.2 Adaptation Perspective

기후노출에 대한 기반시설의 취약수준에 근거하여, 향후 기후변화에 대한 지역별 산업부문의 적응 정도를 파악하기 위한 부분이다. 이를 위해 NIER(2012)의 ‘지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도’에서 분석된, 현재시점(2000년대)에 대한 전국 시/군/구별 기반시설 취약성 데이터를 이용하였다. 이 데이터는 기후노출, 민감도, 적응력으로 구성되는 IPCC(2007)의 상향식 취약성 평가 방법을 적용하여 홍수, 혹서, 폭설, 해수면 상승의 네 가지 기후노출에 대해 항만, 수도·전기·가스공급 설비, 유류저장 및 송유설비 등의 12가지 기반시설을 반영한 결과이다. 일반적으로 산업단지 혹은 개별 기업은 지역의 기반시설에 의존하기 때문에, 기후변화와 관련 있는 기후노출에 대한 기반시설의 취약성은 산업의 적응부분과 밀접한 관련이 있다.

2.3 Spatial Autocorrelation Analysis

완화와 적응 각 측면에서 취약한 핫스팟 지역을 도출하기 위해 공간 자기상관분석을 실시하였다. 기후변화에 대한 완화와 적응부분은 사회경제적 현상의 하나로서 인접한 지역과 상호 영향관계에 있다. 그리고 특정 사회경제현상에 대해 공간적으로 의미 있는 단위를 도출하기 위해서는 단순히 시/군/구 등의 행정구역경계 단위보다는 상호 영향관계가 있는 지역의 군집 혹은 실제의 사회경제활동이 발생하는 단위를 반영할 필요가 있다(Yun and Seo, 2010; Yeo and Seo, 2014). 공간자기상관이 있다는 것은 한 지점의 특정 변수 값이 인접한 다른 지점의 같은 변수에 대한 값과 상관관계가 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 공간자기상관분석은 지역적인 사회경제 현상의 공간적 상호작용 정도를 측정하여 적용된다(Xie et al., 2014).

본 연구에서는 시/군/구 단위로 구축된 완화 및 적응 측면에서의 변수값을 이용하여 공간자기상관분석을 실시하였다.

우선 Global Moran's I를 이용하여 대상지 전체에 대한 공간 자기상관의 경향을 파악한 다음(식 1), Local Moran's I과 Local Getis Ord G*i를 이용하여 유의한 공간자기상관이 나타나는 핫스팟 지역을 추출하였다(식 2, 식 3). Local Moran's I에서 나타나는 결과 값은 HH(High-High), LL(Low-Low), HL(High-Low), LH(Low-High) 등으로 나타난다. 이때의 HH, LL은 주변지역에 비해 상대적인 높고 낮음으로, 일반적인 의미의 hot spot, cold spot으로 적용하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 Local Moran's I의 결과 중 HH, LL을 주변지역에 비해 균질하게 나타나는 지역으로 구분하고, Local Getis Ord G*i를 이용하여 높은 변수 값이 집중적으로 분포하는 핫스팟을 추출하였다. 이 두 지역을 중첩하여 도출된 지역을 균질한 핫스팟 지역(Homogeneous Hot Spot)으로 정의하였으며, 정책의 단위로서 효용성이 있다(Ling and Hung, 2015). 분석 데이터가 시/군/구 단위로 구축되어 있고, 각각의 단위의 크기와 형태가 일정하지 않음을 고려하여 주변지역(neighbouring units)의 범위를 설정하기 위한 가중치로 queen contiguity를 적용하였다(Lin and Hung, 2015).

$$\text{Global Moran's I} = \frac{n \sum \sum W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{W \sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$\text{Local Moran's I} = Z_i \sum_j^n W_{ij} Z_j \quad (2)$$

$$\text{Local Getis Ord G*i} = \frac{\sum_j W_{ij} X_j}{\sum_j X_j} \quad (3)$$

n : 시/군/구 단위 개수

W_{ij} : i 와 j 사이의 강도를 나타내는 가중치(이웃하면 1, 그렇지 않으면 0)

\bar{X} : X 의 평균값

Z_i, Z_j : 평균과의 편차

3. Results and Discussions

완화와 적응측면에서 Global Moran's I를 적용한 결과는 다음과 같다(Table 1). Global Moran's I의 값은 -1에서 1사이의 값으로 나타나는데, 양의 값이면 정적 상관관계(positive)에 있고, 음의 값이면 부적 상관관계(negative)에 있는 것으로

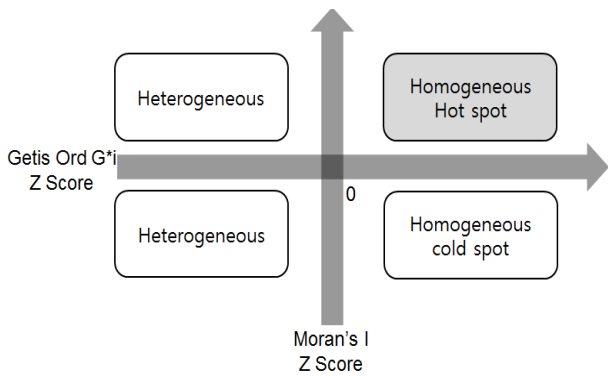


Fig. 2. Concept of heterogeneous hot spot area.

Table 1. Result of Global Moran's I

	Categories	Index
Mitigation	Electricity consumption (2014)	0.181066
	Electricity consumption increase (2004~2014)	0.132066
Adaptation	Infrastructure vulnerability for the flood	0.485405
	Infrastructure vulnerability for the intense heat	0.398669
	Infrastructure vulnerability for the heavy snowfall	0.525625
	Infrastructure vulnerability for the sea level rise	0.284481

파악할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 완화와 적응측면 모두에서 양의 값이 나타났으므로 주변 지역 간에 유사한 값이 분포하고 있음을 판단할 수 있으며, 적응 측면에서 그 경향이 강하게 나타나고 있다. 이것은 적응측면에서 홍수, 혹서, 폭설, 해수면 상승 등의 기후노출을 반영하였기 때문에, 지리적으로 가까운 지역의 기후가 유사하게 나타나는 데에 기인하는 것으로 해석된다.

다음으로 완화와 적응 측면에서 Local Moran's I과 Local Getis Ord G*i를 적용하여 공간자기상관의 공간적 패턴을 분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 3). 원래의 변수 값의 분포를 나타낸 도면은 높은 변수 값이 분포하는 지역을 확인할 수는 있으나, 너무 많은 정보를 담고 있어 취약성이 높은 지역을 어느 정도로 한정해야 하는지에 대한 의사결정의 어려움이 있다. 또한 단순히 특정 임계값으로 그 범위를 한정하는 경우에도 공간적으로 분산된 무작위적인 공간패턴이 나타나므로, 정

책 적용 등의 활용 측면에서 효율성이 낮아질 가능성이 있다. 그에 반하여, 공간자기상관 분석을 한 결과를 나타낸 도면에서는 통계적으로 유의한(유의수준 5%) 핫스팟 지역과 균질한 지역을 제시하고 있다.

완화 측면에서 산업부문 전력 소비량과 전력 소비 증가량이 다른 지역에 비해 균질하게 나타나는 지역(Local Moran's I)과 다른 지역에 비해 집중적으로 높게 나타난 핫스팟 지역(Local Getis Ord G*i)을 중첩하여 도출한 지역은 다음과 같다. 산업부문 전력 소비량 부문에서는 경기도의 안성, 용인, 화성, 안산, 평택과 충청도의 아산, 천안, 당진 그 외에 울산이 균질한 핫스팟지역으로, 산업부문 전력 소비 증가량 부문에서는 경기도의 이천, 안성, 충청도의 진천, 음성, 증평, 전라도 완주, 경상도의 창녕, 밀양, 고령 성주가 균질한 핫스팟으로 나타났다(Fig. 4a).

적응 측면에서 홍수, 혹서, 폭설, 해수면 상승에 대한 기반 시설 취약성이 다른 지역에 비해 균질하게 나타나는 지역(Local Moran's I)과 다른 지역에 비해 집중적으로 높게 나타난 핫스팟 지역(Local Getis Ord G*i)을 중첩하여 도출한 지역은 다음과 같다. 홍수에 대한 기반시설 취약성 부문에서는 인천광역시, 대구광역시, 부산광역시, 광주광역시 일부 지역과 경기도 파주, 화성, 오산, 의왕, 용인, 광주, 경상도의 경산, 밀양, 김해, 양산, 함안 등의 지역이 균질한 핫스팟으로 나타났다. 혹서 부문에서는 인천광역시 일대와 경기도의 파주, 남양주, 시흥, 안산, 군포, 의왕, 광주, 용인, 화성, 오산, 평택, 안성, 이천 등의 지역이 균질한 핫스팟으로 나타났다. 폭설 부문에서 경기도의 광주, 시흥, 군포, 화성과 강원도의 고성, 속초, 인제, 양양, 강릉, 정선 등의 지역, 해수면 상승부문에서 균질한 핫스팟지역은 경기도의 시흥, 군포, 의왕, 용인, 화성, 오산, 전라도의 완도, 제주도 전체 지역이 해당하는 것으로 나타났다(Fig. 4b).

위에서 균질한 핫스팟으로 도출된 지역에는 대규모의 산업 단지가 입지하고 있지 않은 지역도 상당부분 포함되어 있다. 그러나 본 연구에서는 일부 중소규모의 산업시설 혹은 기업을 포함하는 지역적 차원에서의 산업부문 취약성을 다루었다는 점에서 의미가 있다. 향후, 본 연구에서 도출한 균질한 핫스팟(homogeneous hotspot)의 활용도를 높이기 위해서는, 실제 산업관련 현황 혹은 입지적 특성 등에 대하여 도출된 지역과 그렇지 않은 지역 간 차이를 분석할 필요가 있다(Hernández-Manrique *et al.*, 2012; Lin and Hung, 2015).

4. Conclusions

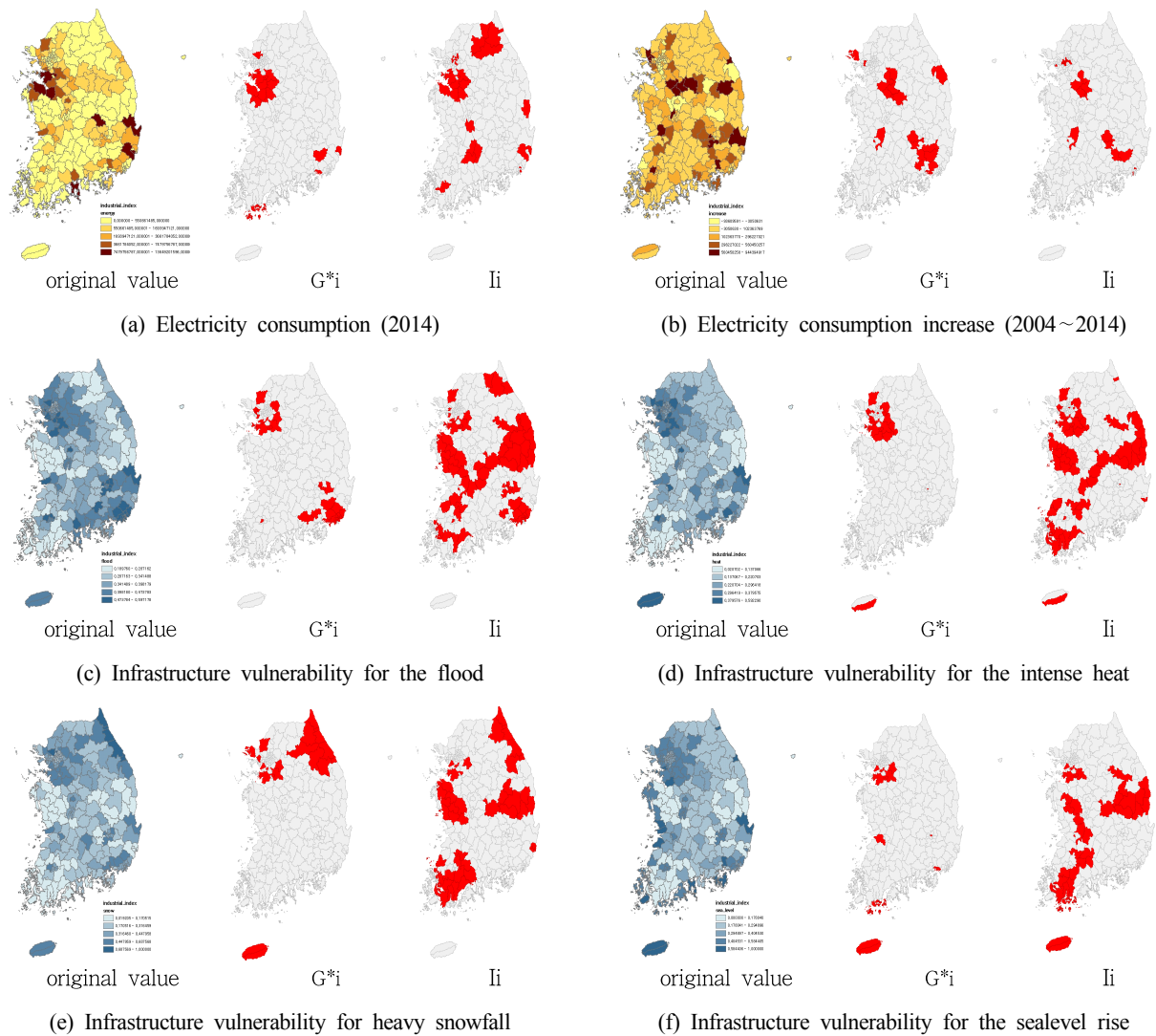


Fig. 3. The result of local spatial autocorrelation statistics. (a),(b): mitigation perspective, (c)~(f): adaptation perspective (Gi: hot spots from local Getis Ord G*i, Ii: homogeneous area from local Moran's I).

기후변화에 대한 산업부문의 완화 및 적응 측면에서 공간 자기상관분석을 통해 통계적으로 유의한 핫스팟 지역을 추출할 수 있었으며, 이것은 산업취약성의 공간적 분포가 무작위적인(random) 패턴이 아님을 보여주고 있다. 본 연구에서 제시한 방법은 주변지역에 비해 높은 취약성이 유사하게 나타나는 시/군/구의 군집을 그렇지 않은 지역과 명확하게 구분함으로써 정책적 의사결정시 그 근거로 활용되기 용이하다는 장점이 있다. 만약 정책적 의사결정에 각 변수의 값을 그대로 적용한다면 수치가 높은 지역들이 전국에 산발적으로 나타나게 된다. 이를 정책적 지원의 근거로 활용하기 위해서는 지원이 필요한 임계점에 대한 추가적 가치 판단이 필요하며, 공간적

으로 흩어져 있어 비용 및 효율성 측면에서도 소모적일 것으로 예상된다. 반면에 핫스팟 단위로 정책적 지원을 연계한다면 추가적인 가치 판단이 필요 없으며, 공간적으로 유사한 지역들을 하나의 단위로 산정하므로 해당지역에 대해 더 나은 정책적 효과와, 주변지역에 대한 파급효과 등을 기대할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 한계점을 도출할 수 있으며, 각각은 향후 연구와 연계하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구 중 완화측면에서 핫스팟으로서 도출된 지역은 원래의 변수 값과 비교하였을 때 해석이 어려운 부분, 즉 실제 수치가 높지 않음에도 핫스팟으로 분류된 지역이 상당

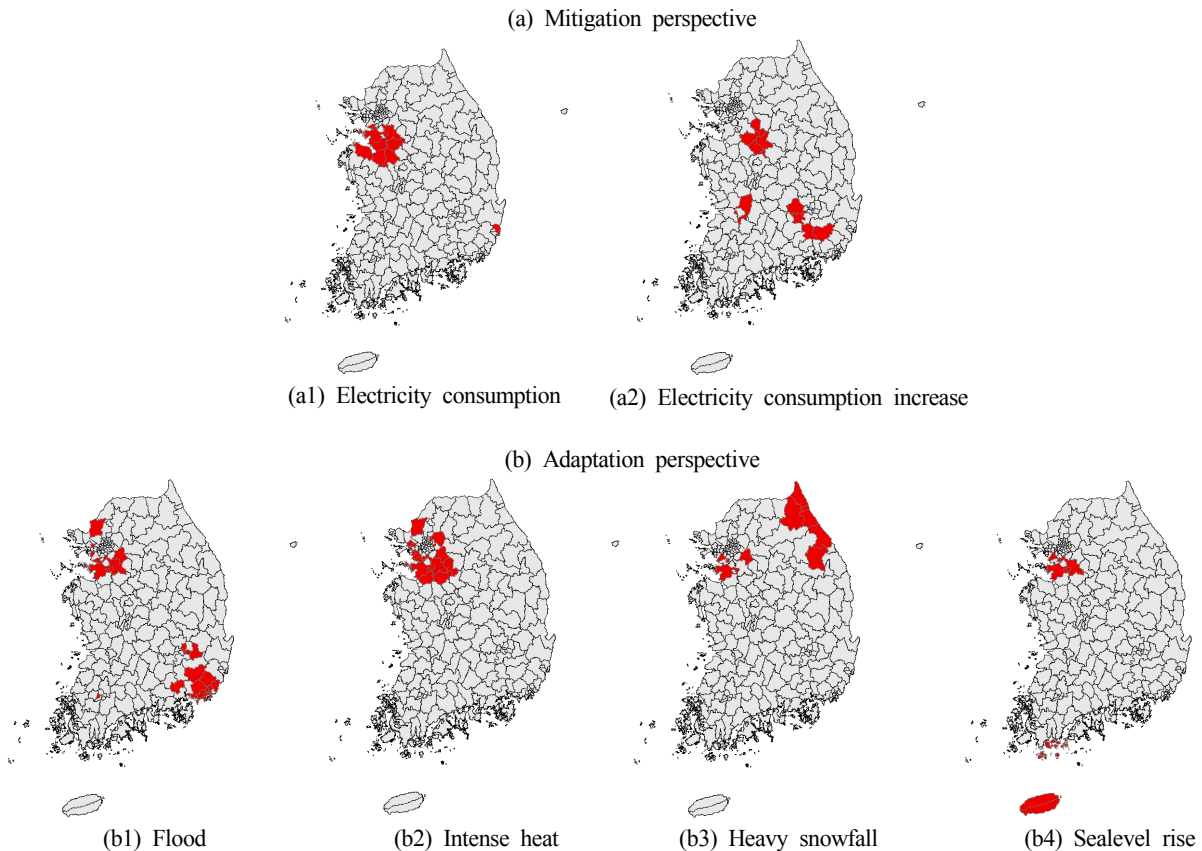


Fig. 4. Vulnerable homogeneous hotspot areas of the industry sector for the climate change.

부분 포함되어 있다. 완화 측면에서의 Global Moran's I이 양의 값이므로 해당 변수 값이 가까운 지역일수록 유사하게 나타난다고 해석할 수 있으나, 그 정도는 적응 측면에 비해 낮다. 따라서 향후 연구에서는 완화 측면에서 공간자기상관 분석방법에 적합한 변수를 보완하거나, 공간자기상관 분석 방법 혹은 관련 가중치 등을 적절하게 조정하는 것이 필요하다.

둘째, 본 연구에서 적용한 전력소비량, 혹은 전력소비 증가량 등은 데이터 수집이 용이하다는 점, 현재에 한정하는 연구의 시간적 범위에 부합한다는 장점이 있으나, 완화에 대한 산업부문의 부담을 설명하기에는 미흡하다. 완화에 대한 부담, 즉 감축 수준은 현재 전력소비량 혹은 에너지 소비량을 기준으로 하는 것이 아닌, 미래의 배출전망치인 BAU를 기준으로 결정되기 때문이다. 이에 따라 향후 연구에서는 연구의 시간적 범위를 미래의 특정 시점까지 확대하고, 이에 대한 BAU 대비 감축량을 반영할 필요가 있다. 이를 위해 공간자기상관 분석 이전 단계에서 완화 관련 데이터를 구축 및 가공하여 공간적으로 표현하는 과정이 추가될 필요가 있다.

셋째, 본 연구의 내용적 범위는 완화와 적응 측면 각각에

대해 중요하게 다루어져야 할 공간적 범위, 즉 균질한 핫스팟을 도출하는 과정에 한정되어 있다. 기후변화에 대한 대응이란 측면에서 완화와 적응 부문을 통합적으로 고려한다면 시너지 효과가 있을 것으로 예상되나, 완화와 적응의 상호관계를 구조화하기 위해서는 또 다른 추가 연구가 필요하다. 향후 연구에서 완화와 적응을 공간적으로 종합한 핫스팟을 도출한다면, 정책적인 활용도 측면에서 역시 의미 있을 것으로 예상된다.

Acknowledges

본 연구는 2015년도 한국에너지공단 ‘산업부문 기후변화 취약성 진단 프로그램 개발 및 시범운영’ 과제 지원으로 수행되었습니다(과제번호 : 0525-20150060).

REFERENCES

Bae CY, Oh YG, Baek GH, Choi KL, Lee SH, Lee DK. 2013. A study on climate change vulnerability assessment

- index and weights of industrial sectors. *Journal of Korea Planning Association* 48(2):313-328 in Korean with English abstract.
- Hernández-Manrique OL, Sáchez-Fernández D, Verdú JR, Numa C, Galante E, Lobo JM. 2012. Using local autocorrelation analysis to identify conservaton areas: And example considering threatened invertebrate species in Spain. *Biodivers Conserv* 21:2127-2137.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC. Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kang HJ. 2014. Vulnerability and impact in citygas industry by climate change. *Journal of the Korean Institute of Pland Engineering* 19(3):15-21 in Korean with English abstract.
- Kim HJ, Oh KS, Lee DK. 2011. A time-series analysis of landscape structural change using the spatial autocorrelation method. *J Korean Env Res Tech* 14(3):1-14 in Korean with English abstract.
- Kim YJ, Lee DK, Seo CW, Ryu JE, Chae YR, Baek GH, Bae CY. 2013. Vulnerability assessment on the location of industrial complex considering climate change. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22(6):627-637.
- KMA(Korea Meteorological Administration). 2010. *Meteorological Technology & Policy* 3(1).
- KMKE(Korean Ministry of Knowledge Economy). 2012. *Developing industrial complex climate change vulnerability assessment index*. Gwacheon.
- Lin WY, Hung CT. 2015. Applying spatial clustering analysis to a township level social vulnerability assessment in Taiwan, *Geomatics. Natural Hazards and Risk* 1-18.
- NIER(National Institute of Environmental Research). 2012. *Sectorial vulnerability map for the climate change: For the adaption action plan of local governments*.
- Xie H, Lin G, Liu Q, Wang P. 2014. Analysis of spatial disparities and driving factors of energy consumption change in china based on spatial statistics. 6:2264-2280.
- Yeo CH, Seo YH. 2014. An analysis on the spatial spillover patterns of aging population in rural areas. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(3):39-53 in Korean with English abstract.
- Yun JM, Seo KC. 2010. Deriving the declining areas and analysing their spatial characteristics using the spatial autocorrelation measure. *The Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(3):64-73 in Korean with English abstract.