연구논문 「환경정책」 제29권 제2호 2021. 6: 259-273
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2021.29.2.259
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

복합재난 대응지역 설정을 위한 시공간 클러스터 분석

Space-Time Cluster Analysis for Detecting of Multi-Hazard Response Areas

김효정* · 이성호**
Hyojeong Kim · Sungho Lee

요약: 최근 국내외적으로 두 개 이상의 위험이 동일 지역에 동시 또는 연속적으로 발생하는 복합재난의 발생빈도가 잦아지고 있으나 복합재난에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 과거 10년간 자연재난 및 사회재난 데이터를 바탕으로 시공간스캔통계량의 시공간순열모델을 이용하여 복합재난 시공간 클러스터를 분석하였다. 그 결과, 부산을 비롯하여 울산·경남·대구·경북 일부를 포함한 지역에서 9월~11월 경 1차 시공간 클러스터가 도출되었다. 또 자연재난과 사회재난을 각각 개별적으로 분석했을 때와 재난을 종합적으로 고려하였을 때 분석되는 시공간 클러스터가 다름에 따라 복합재난 대응을 위한 분석이 별도로 필요함을 확인할 수 있었다. 본 연구는 통계적인 검증을 거쳐 복합재난 핫스팟 클러스터 분석 및 지도 작성에 의의가 있으며 이는 복합재난 대응을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.
핵심주제어: 복합재난, 시공간스캔통계량, 시공간순열모델, 클러스터, 핫스팟

Abstract: Recently, the frequency of disasters in which more than one hazard occurs simultaneously or continuously in the same area has been increasing both domestically and abroad. However, research on multi-hazard responses has been insufficient. This study included an analysis of space-time clusters about multi-hazard in Korea by using space-time scan statistics based on natural and social disaster data over the past decade. Consequently, space-time cluster was analyzed in Busan and in parts of Ulsan, Daegu, Gyeongsangnam-do, and Gyeongsangbuk-do between September and November. In addition, it was confirmed that an analysis of multi-hazard-response areas was needed separately, instead of an individual disaster-response area analysis. This study is significant in that it included statistical analysis, verification, and mapping out of multi-hazard hotspot cluster. Its use as basic data that can be employed to respond to multiple hazards is anticipated.
Key Words: Multi-Hazard, Space-Time Scan Statistics, Space-Time Permutation Model, Cluster, Hot spot

* 주저자, 부산대학교 공간정보전공 박사수료
** 교신저자, 부산대학교 도시공학과 명예교수

I. 서론

최근에는 자연적 위험(Natural Hazard)과 사회적 위험(Social Hazard) 등 두 개 이상의 위험요인에 의해 동시 또는 연속적으로 피해가 발생하는 재난의 발생빈도가 국내외적으로 증가하고 있으며 급격한 기후 변화 및 도시고도화로 인하여 더욱 증가할 것으로 예상된다. 그러나 기존의 재난 대응은 각 재난을 단일재난으로 보고 대응하고 있으며 넓은 범위에서도 태풍, 홍수 등과 같은 자연적 위험에 의해 피해가 발생하는 재난(이하 자연재난) 혹은 도시화, 사회발전 등에 따른 화재·붕괴·폭발·감염병 등 사회적 위험에 의해 피해가 발생하는 재난(이하 사회재난)으로 이분화하여 대응하고 있다. 다중 위험들에 의해 복합화, 대형화, 다양화되어 발생하는 재난(이하 복합재난)으로 인한 인명피해 및 재산피해가 증가하고 있으며 재난 발생 이후 피해 복구에 사회적, 경제적, 환경적 비용이 증대됨에 따라 복합재난 대응 필요성이 대두되고 있다(한우석 등, 2019; 오승희 등, 2018).

재난대응에 있어 피해를 감소시키기 위해서는 재난 대응지역을 사전에 선정하는 단계가 가장 선행되어야 한다. 다양한 재난 유형에 있어서 대응지역의 적절한 범위 설정은 방법론적인 면에서나 적용 면에서 항상 이슈가 되어 왔다(최예술 등, 2018; 안찬중 등, 2020; 이명진·강정은, 2012). 한정된 자원을 사용하여 효율적으로 재난에 대응하기 위해서는 재난의 발생 가능성이 높은 지역과 예상되는 재난피해 시나리오 등을 사전에 파악하여 예방적 차원에서 이들 지역의 체계적 관리 필요성이 증대됨에 따라 재난 지도화 작업이 필요하다(강영옥, 2004). 미국, 일본 등 국외에서는 재해 유형별로 취약한 지역을 사전에 파악하고 이를 토대로 대응할 수 있는 재해위험지도 작성·활용 사례가 많다. 국내에서도 침수흔적도, 산사태 위험지도 등을 비롯하여 단일 재난별 취약지역 및 피해범위를 파악할 수 있는 정책이 기 진행되고 있으며 「자연재해대책법」을 비롯한 여러 법률에서 재난의 가능성이 있는 지역을 대상으로 사전 예방하기 위하여 지역·지구

를 지정하고 있다. 그러나 아직 단일 재난 중심으로 진행되고 있으며 기존 예측 시스템으로는 한계가 있다. 두 가지 이상의 위험이 상호 연계된 재난에 대해서는 국내·외적으로 아직 초보적인 연구 수준에 머무르고 있으며 제도적 기반 역시 크게 미흡한 실정이다(오승희 등, 2018; 정우석 등, 2019; 김태훈·윤준희, 2018; 김동영·정일원, 2018). 재난을 단일재난으로 단편 분석할 경우, 하나의 재난이 다른 재난에 주는 영향을 고려하지 못해 재난의 강도가 달라질 수 있고, 동일한 지역에 대한 반복적인 피해가 이중으로 계산되는 문제가 발생할 수도 있다. 이로 인해 재난 대응을 위한 우선순위, 지역의 취약성·위험성 등이 왜곡되거나 과소·과대평가 될 수 있다(Tobin and Montz, 1997; ARMONIA, 2007; Kappes et al., 2010; Budimir et al., 2014; Mignan et al., 2014).

복합재난의 효율적 대응을 위해서는 단일재난이 아닌 모든 재난을 전체적으로 파악 할 수 있어야 하며 복합재난 분석지도의 개발로 우선적으로 대책마련이 필요한 지역 도출이 필요하다(나유경, 2020; 한우석 등, 2019). 따라서 본 연구는 자연재난 및 사회재난의 발생 통계 데이터를 바탕으로 시공간 클러스터 분석방법 중 하나인 시공간스캔통계량을 이용하여 시공간적으로 재난이 집중된 복합재난 클러스터를 확인하고 복합재난 대응이 우선적으로 필요한 지역도출 및 지도 작성에 그 목적이 있다.

II. 이론적 고찰

1. 복합재난

복합재난은 법적으로 정의하고 있지 않으나, 다수 연구자들의 정의를 참고·정리하면 '최소 시·군·구 단위 규모의 광범위한 지역에서 동시 또는 연속적으로 두 개 이상의 자연재난과 사회재난이 발생하고 그 영향이 복합화되어 인명, 재산, 기반시설 마비 등 피해가 극심해서 범부처의 통합적 대응이 필요한 재난'을 의미한다(박미리·이영근, 2016; 한우석 등, 2019; 정우

석 등, 2019; 김동영·정일원, 2018). 복합재난을 전개 양상에 따라 분류하면 서로 연관성이 없는 재난이 동시에 발생하는 다발형과 선재 재난이 원인이 되어 그 결과로 후속 재난이 발생하는 연속형, 다발형과 연속형이 혼합되어 있는 복합형으로 구분 할 수 있다(남기훈, 2014; 나유경, 2020). 본 연구에서의 복합재난은 두 개 이상의 재난이 동시 또는 순차적으로 발생하여 그 피해가 복합적으로 나타나 기관 간의 협력이 필요한 재난으로 복합적 피해에 대한 대응·관리 측면이며 전개양상에 따라 분류하면 다발형과 유사하다. 복합재난의 대표사례로 2005년 미국 허리케인 카트리나, 2011년 일본 대지진 등이 있으며 최근 2020년 여름에는 코로나19 감염병 확산 상황에서 집중호우로 인한 많은 인명·재산 피해가 발생하였으며 복합재난 대응에 대한 준비가 부족하여 급작스런 이재민 대피소 폐쇄 및 복구지원인력 부족 등 원활한 대응이 이뤄지지 않았다(연합뉴스, 2020).

복합재난은 단일재난과 달리 동시성(Simultaneity) 또는 연속성(Continuity)의 요소를 반드시 고려해야 한다. 동시성은 다른 종류의 재난이 동일 지역에 동시에 일어나거나 처음 영향을 끼친 재난의 영향이 소멸되기 전 두 번째 재난이 영향을 미치는 경우를 의미하며, 연속성은 하나의 재난발생 후 이 영향으로 다시 두 번째 재난이 발생하는 것을 의미한다(Kim et al., 2011; 강호권, 2020). 따라서 복합재난을 연구하기 위해서는 공간적 개념뿐만 아니라 시간적 개념도 함께 고려해야만 한다.

복합재난 대응지역 분석 및 지도작성 관련 선행연구는 국내외적으로 아직 많지 않으며 한우석 등(2019)은 재난 대응별 시설물을 기준으로 복합재난 관리지도를 작성하고 있으며 그 밖의 대부분 논문은 자연재난 중 단일 재난 2~3개를 선정하여 위험지도를 작성하고 있다. 점차 대형화 되고 불확실해지는 새로운 형태의 재난인 복합재난 대응 필요성에는 공감하고 있으나 지역별 재난 발생이력을 바탕으로 자연재난과 사회재난을 모두 고려한 연구는 없으며 재난대응이 필요한 지역 뿐 아니라 시기도 확인할 수 있는 시공간 클러스터 분석 및 지도 작성 연구는 없는 실정이다.

〈표 1〉 복합재난 대응지역 분석 및 지도작성 선행연구

구분	선행연구	연구내용
국외	Pourghasemi et al. (2019)	SWARA-ANFIS-GWO 새 앙상블 모델을 사용하여 산사태, 홍수, 지진 3가지 위험에 대해 복합위험 확률을 평가하여 지도 작성
	Skilodimou et al. (2019)	산사태, 홍수, 지진에 따른 복합위험 지도를 작성하여 도시개발 적합성에 대하여 5가지 등급으로 분류
국내	한우석 등 (2019)	재해취약성분석방법을 준용하여 예방, 대응, 단기복구, 장기복구 단계로 구분하여 대응단계별 주요 취약 및 지원시설의 중요도를 도출하여 복합재난 관리지도 개발
	나유경 등 (2019)	호우, 홍수 후 산사태 시나리오를 사례로 온라인 뉴스 데이터를 바탕으로 빅데이터 분석 방법을 활용하여 지역별 발생 가능성 및 기간 분석

2. 시공간 클러스터 분석

공간적 클러스터는 특정현상의 공간적 밀도가 높은 것, 즉 주변보다 개별 케이스 사이의 거리가 상대적으로 가까워 공간현상의 밀집이 이루어진 곳이라 할 수 있다. 시공간 클러스터는 이런 개념을 시·공간으로 확장한 것으로 공간적 x, y 좌표에 시간적 z 좌표를 추가하여 시간거리와 공간거리 모두가 밀집되어 있는 클러스터를 분석하는 것이라 할 수 있다(김영호, 2012). 공간통계학 분야에서 제시된 시공간 클러스터 분석방법 중 시공간 스캔통계량을 제외한 대부분의 방법은 시공간집중의 발생유무에 대한 답만을 제공하는 전역적 분석 방법으로 일부 범위를 제시하는 경우도 있으나 집중이 일어나는 구체적인 시간, 장소에 대해서는 명확한 답을 제시하지 못하고 있다(강호제, 2007; 정경석 등, 2010).

시공간스캔통계량 분석방법은 관심지역 내 특정지역의 중심에 원통을 투영하고 원의 크기와 높이를 최대치까지 증가시켜 나가면서 최대치의 우도비(likelihood ratio)를 계산하는 방법으로 원통의 지름과 높이는 각각 공간거리와 시간거리를 의미한다. 최대치에 이른 원통은 인근지역으로 이동하여 다시 각각의 원통에 대한 개별 우도비를 산정·비교하게 되며 이때 계산되는 우도비는 원통 내에서 관측된 사건의 수와 원통 외부에서 관측되는 사건의 수를 비교해서 최대우도비(maximum likelihood)를 산정함으로써 구체적 시공간 클러스터를 밝혀낼 수 있게 된다(Kulldorff, 2001; 강

호제, 2007; 정경석 등, 2010). 시공간스캔통계량 분석을 위한 통계 모델로는 포아송 모델, 베르누이 모델, 시공간순열모델 등이 있으며 다른 통계 모델들과 달리 시공간순열모델은 사례만을 가지고 분석이 가능하며 각 사례의 시간적 및 공간적 속성에 대한 많은 수의 무작위 순열을 만들어 시공간 클러스터를 분석하게 된다. 통계적 유의성은 CSR(Complete Spatial Randomness) 무위적 상태 가정 하에 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 평가한다(Kulldorff et al., 2005).

시공간스캔통계량 분석은 이 기법을 제안한 Kulldorff가 제작한 소프트웨어인 SatScan로 계산할 수 있으며 행정구역별로 집계되는 일반통계를 분석에 사용할 수 있기 때문에 자료구득이 비교적 용이한 장점이 있다. 나아가 데이터의 시간적 범위와 연속성의 여부에 따라 과거에 시공간집중이 발생했던 공간과 시간적 범위를 주로 찾는 소급적 분석방법(retrospective analysis)와 현재의 상황을 근거로 과거의 시·공간 데이터에 최신의 새로운 시·공간 데이터가 연속적으로 업데이트되어 실시간에 가까운 상태로 분석이 진행되는 전망적 분석방법(prospective analysis) 두 가지 형태의 분석이 가능하다.

이 분석방법은 주로 특정 질병에 대한 핫스팟 클러스터를 분석하는데 사용되었으며(Kulldorff et al., 2005; Tango et al., 2011), 재난연구에서는 감염병(Hohl et al., 2020) 및 화재와 관련된 클러스터 분석(Tonini et al., 2009; 지병곤·정대현, 2021) 등의 연구에 활용되었다.

Ⅲ. 연구방법

복합재난 대응지역 설정을 위한 시공간 클러스터 분석의 대상지는 대한민국 전역으로 하였으며 재난은 「재난 및 안전관리 기본법」에 따른 자연재난과 사회재난을 모두 포함하였다. 이를 위해 10년간(2010년~2019년)의 재해연보(자연재난) 및 재난연감(사회재난)을 바탕으로 데이터를 구축

하였으며 사회재난 중 감염병 자료는 질병관리청 감염병포털 자료를 바탕으로 작성하였다. 사회재난은 재난연감의 작성 기준에 따라 시·군·구 지역재난안전대책본부 이상 운영된 재난을 대상으로 하였으며 자연재난은 사회재난의 피해규모 및 프로그램 시뮬레이션 용량을 고려하여 재해연보상의 자연재난 중 피해액이 1억원 이상이거나 이재민을 포함하여 사망, 부상, 실종 등의 인명 피해가 있는 재난으로 하였다. 시공간 클러스터 분석을 위하여 시간단위는 월, 공간단위는 시·군·구를 기본으로 하였으며 가축질병은 시·군·구 단위의 자료 획득의 어려움으로 시·도 단위로 구축하였다.

〈표 2〉 분석데이터 개요

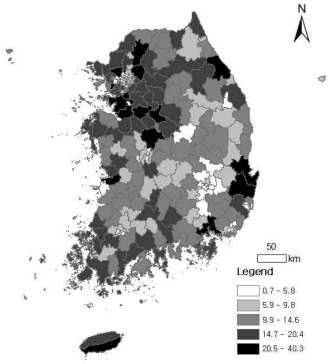
<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">분석재난</th><th colspan="2">분석단위
(최대 반경)</th></tr>
<tr><th>시간</th><th>공간</th></tr>
<tr><td>자연재난
(재해연보)</td><td>■ 태풍
■ 호우
■ 대설
■ 풍랑
■ 강풍
■ 폭염
■ 지진
■ 낙뢰
■ 기타</td><td rowspan="3">월
(3개월)</td><td rowspan="2">시·군·구
(최대시·도)</td></tr>
<tr><td>사회재난
(재난연감)</td><td>■ 산불
■ 유해화학물질 유출사고
■ 대규모해양오염
■ 지하철대형사고
■ 고속철도대형사고
■ 다중밀집시설대형화재
■ 해양선박사고
■ 사업장대규모 인적사고
■ 다중밀집건축물 붕괴 대형사고
■ 감염병
■ 전력
■ 보건의료
■ 육상화물운송
■ 기타</td></tr>
<tr><td></td><td>■ 가축질병</td><td>시·도
(최대시·도)</td></tr>
</table>

한편, 재난의 특성상 자연재난의 경우 이재민 발생 등의 피해가 많은 반면, 사회재난의 경우 인명·재산피해가 많이 발생하므로 피해금액이나 피해인력을 기준으로 분석할 경우 특정 재난에 치우치는 경향을 나타내는 문제가 있어 발생건수를 기준으로 분석하였으며 지난 10년간 발생현황 및 시간적, 공간적 재난발생 누적건수를 각각 〈표 3〉, 〈그림 1〉에 나타내었다.

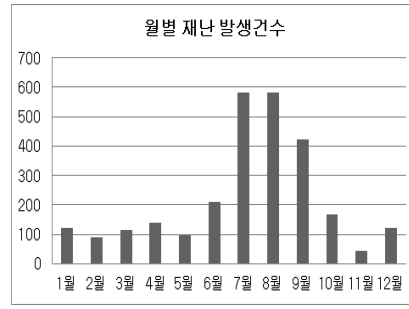
〈표 3〉 2010년-2019년 재난피해 현황

구분		발생건수(건)	재산피해(억원)	인명피해(명)	이재민(명)
자연재난	총계	2,367	35,079	400	201,538
	건 평균	-	15	0.2	85.1
사회재난	총계	328	34,231	2,400	81
	건 평균	-	104	7.3	0.2

〈그림 1〉 2010년-2019년 시·공간별 재난발생 현황



(a) 시·군·구별 재난발생 현황



(b) 월별 재난발생 현황

시공간스캔통계량분석의 시공간순열모델을 이용하여 분석하였으며 이때 공간범위의 최대 분석반경은 입력한 기초데이터의 최대범위이자 보통의 재난대응이 이뤄지는 단위인 시·도 단위로 하되 입력한 데이터의 영향범위를 모두 포함할 수 있도록 가장 큰 시·도의 반경을 기준으로 적용·분석하였다. 시간범위는 과도한 시뮬레이션 소요시간을 줄이기 위해 월 단위로 구축하였으며 발생된 재난피해를 대응하는 시간을 고려하여 3개월까지 확장하여 탐색할 수 있도록 설정하였다. 그 이상 기간으로의 확장은 복합재난의 동시성 및 연속성의 특징을 담아내기 어렵다고 판단하였다.

자연재난, 사회재난 각각의 시공간클러스터를 분석하고 최종적으로 복합재난 우선 대응이 필요한 시공간 클러스터 지역을 도출하였으며, 각 재난별 retrospective 분석과 prospective 분석을 모두 시행하였다.

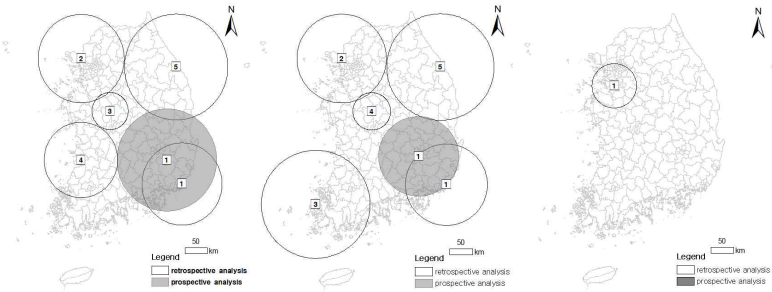
Ⅳ. 분석결과

자연재난, 사회재난, 복합재난의 시공간스캔통계량 분석 결과는 〈표 4〉, 〈그림 2〉와 같으며 최대우도비를 가지는 클러스터 원통의 중심점 경위도 좌표를 포함한 공간범위 및 시간범위를 알 수 있고, 포함된 시·군·구의 수, 재난 실제 관측값(Obs)과 예측값(Exp) 그리고 그 비율인 ODE을 알 수 있다. 복합재난 1차 시공간클러스터를 예로 살펴보면 유의수준 내에서 과거 복합재난이 가장 크게 발생한 지역으로는 2016년 9월부터 11월까지 3개월 간 부산을 비롯하여 울산, 경남, 대구, 경북을 일부를 포함한 48개의 시·군·구로 태풍 차바, 호우, 경주 지진 등과 더불어 서문시장 화재가 발생한 시점으로 분석되었으며 관측 값은 43건으로 무위적 분포를 가정하였을 때 시뮬레이션 예측 값인 7.7건과 비교할 때 실질적으로 5배 이상 재난이 시공간적으로 밀집된 지역임을 알 수 있다. 현재를 기준으로 한 복합재난 시공간클러스터 분석은 입력한 자료 중 가장 최근의 자료인 2019년 하반기 자료를 근거로 재난이 집중된 지역이며 그 공간범위는 과거 1차 시공간클러스터의 반경보다 조금 더 넓은 범위로 분석되었다. 각 클러스터별 재난발생 내용을 살펴보면 retrospective 분석의 1, 2차 클러스터의 경우 2가지 이상의 재난이 발생된 복합재난의 형태를 보이며 3, 4, 5차 클러스터의 경우 한 가지 재난이 비교적 크게 발생되어 형성된 단일재난 클러스터로 확인되었다. 시기적으로는 9월의 밀도가 높은 것으로 나타나 지난 10년간 시간별, 공간별 재난발생 누계 자료〈그림 1〉과는 다른 복합재난 시간, 공간 클러스터를 확인할 수 있었다. 또 자연재난과 사회재난을 각각 개별적으로 살폈을 때 클러스터와 재난을 종합적으로 고려하였을 때 분석되는 클러스터를 비교하여 보면 지난 10년간 사회재난 발생 건수보다 자연재난의 발생건수가 더 많고 호우, 태풍, 지진 등 2가지 이상의 자연재난이 복합적으로 발생된 유형이 많아 일부 클러스터는 유사하게 분석되었으나 전체적으로 보았을 때는 분석결과가 다름을 알 수 있다. 이에 따라 복합재난의 대응을 위한 분석이 별도로 필요함을 확인할 수 있다.

〈표 4〉 시공간 클러스터 분석 결과

재난 종류	분석 방법	번호	공간			시간		검정 통계량	관측 시군구	Obs	Exp	ODE	p-value	재난 형태
			위도	경도	반경	시점	종점							
복합 재난	Retrospective 분석	1	35.19	129.15	90.31	16/9	16/11	38.99	48	43	7.7	5.6	0.00	복합
		2	37.68	126.63	96.88	10/9	10/9	36.13	84	125	53.1	2.4	0.00	복합
		3	36.65	127.37	40.81	17/7	17/7	20.67	21	21	3.4	6.2	0.00	단일
		4	35.68	126.64	82.77	15/11	16/1	17.37	33	29	7.7	3.8	0.00	단일
		5	37.51	129.06	116.24	16/5	16/5	14.91	25	18	3.5	5.1	0.00	단일
	Prospective 분석	1	35.67	128.79	112.23	19/10	19/12	11.88	76	37	14.7	2.5	0.00	단일
자연 재난	Retrospective 분석	1	35.19	129.15	88.79	16/9	16/10	40.96	43	42	6.9	6.1	0.00	-
		2	37.68	126.63	96.88	10/9	10/9	37.03	75	125	52.5	2.4	0.00	-
		3	34.81	126.04	117.87	10/10	10/12	21.78	25	23	3.9	5.9	0.00	-
		4	36.65	127.37	40.81	17/7	17/7	21.52	20	21	3.2	6.5	0.00	-
		5	37.51	129.06	116.24	16/5	16/5	14.68	24	18	3.6	5.0	0.00	-
	Prospective 분석	1	35.76	128.50	86.83	19/10	19/12	14.11	59	32	10.57	3.03	0.00	-
사회 재난	Retrospective 분석	1	37.17	126.87	49.13	15/5	15/7	12.65	36	38	15.3	2.5	0.00	-
	Prospective 분석	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-

〈그림 2〉 시공간 클러스터 분석 결과



(a) 복합재난 (b) 자연재난 (c) 사회재난

Ⅴ. 결론

10년간의 재해연보 및 재난연감 자료를 바탕으로 시공간스캔통계량의 시공간순열모델을 활용하여 복합재난 시공간클러스터 분석을 시행하였다. 부산을 비롯하여 울산·경남·대구·경북 일부를 포함한 지역에서 9월~11월 경 1차 시공간클러스터가 발생함을 알 수 있었다. 이는 단순 시간적, 공간적 자료의 누계 결과와 달리 시공간집중이 발생하는 클러스터를 확인할 수 있었으며, 자연재난, 사회재난, 복합재난의 각각의 시공간 클러스터 분석과 비교한 결과 클러스터의 위치 및 속성값이 달라 단일재난별 분석이 아닌 복합재난 대응지역 분석이 별도로 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 과거 동일공간과 동일시기에 걸쳐 발생했던 단일재난들을 복합재난으로 재해석하여 시공간분석을 시행하고 통계적인 검증을 거쳐 복합재난 대응을 위한 시공간 클러스터를 도출했다는 점에서 의의가 있으며 이는 다양화, 복합화되는 복합재난을 대응하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 복합재난 클러스터 분석 결과 구체적 시기와 지역이 설정되며 그 지역에서 빈번하게 일어나는 복합재난 시나리오를 확인할 수 있으므로 대비 집중 시기 및 지역을 설정할 수 있고 시나리오에 따른 재난현장에서의 명확한 지휘, 대응 우선순위 설정 등 대응 매뉴얼 개발이 가능하다. 이에 따른 복합재난 대응을 위한 인력을 효율적으로 배치하여 재난대응을 보다 신속하게 할 수 있으며 해당 지역의 재난담당 공무원 및 주민에게 지역의 취약성을 알리는 예방활동의 기초자료로도 활용가능하다. 또한 매년 주기적인 데이터의 갱신을 통해 복합재난 클러스터 모니터링이 가능해지므로 지속적으로 재난 대응을 할 수 있다. 다만 원통을 기준으로 분석했기 때문에 모든 클러스터 지역은 원형이며 이는 실제 재난발생의 경계와 반드시 동일하지는 않다는 점에 유의하여야 한다.

본 연구는 과거 재난발생이력 통계를 기반으로 하였으므로 과거에 발생되지 않았던 새로운 유형의 재난이 발생하였을 때 이를 설명하지 못하는 한계가 있으며 향후 연구에서는 복합재난 클러스터 지역이 어떤 영향과

요인으로 인해 발생하였는지에 대한 분석이 추가적으로 필요하다고 사료된다.

▮참고문헌▮

강영옥, 2004,『서울시 방재지도 작성방안 연구-화재위험지도를 중심으로-』, (시정연; 2004-R-39), 서울: 서울시정개발연구원.

강호권, 2020, “한국의 복합재난 대응을 위한 위기관리시스템 운영에 관한 연구,” 박사학위논문, 수원대학교, 경기.

강호제, 2007, “시공간분석기법:시공간분석의 변화와 응용,”『국토』, pp.104-111.

국민안전처, 2014-2015,『2013-2014 재난연감』, 서울: 국민안전처.

_____, 2015,『2014 재해연보』, 서울: 국민안전처.

_____, 2016,『2015 재난연감』, 세종: 국민안전처.

_____, 2016,『2015 재해연보』, 세종: 국민안전처.

김동영·정일원, 2018, “복합재난 시나리오 개발을 위한 국내 재난 사례 인벤토리 구축 연구,”『복합신소재구조학회지』, 9(4), pp.27-31.

김영호, 2012, “공간데이터의 시공간적 평가방법에 대한 고찰,”『한국지리학회지』, 1(2), pp.193-204.

김태훈·윤준희, 2018, “대형복합재난의 효율적 관리를 위한 제도개선방안 연구,”『한국산학기술학회』, 19(5), pp.176-183, DOI: 10.5762/KAIS.2018.19.5.176.

나유경, 2020, “복합재난 피해 추정을 위한 GIS 모형 설계와 구현,” 박사학위논문, 경희대학교, 서울.

나유경·박진홍·최진무, 2019, “빅데이터를 이용한 복합재난의 발생 지역 및 유형 분석,”『국토지리학회』, 53(4), pp.375-384.

남기훈, 2014, “베이지안 네트워크를 이용한 복합재난 위험성 평가에 관한 연구,” 박사학위논문, 인제대학교, 경남.

박미리·이영근, 2016, “대형복합재난 특집, 대형복합재난의 주요사례와 시사점,”『방재저널』, 69(3), pp.19-27.

소방방재청, 2011-2013,『2010-2012 재난연감』, 서울: 소방방재청.

_____, 2011-2014,『2010-2013 재해연보』, 서울: 소방방재청.

안찬중·박용미·최원식, 2020, “취약인자의 엔트로피 기반 중첩 분석을 이용한 부산광역시의 적설재해 취약지역 등급 평가,”『대한원격탐사학회지』, 36(2), pp.217-229, DOI: 10.7780/kjrs.2020.36.2.1.9.

연합뉴스, 2020.8.20., “[르포] 시멘트 바닥에 이불 한장이 전부…코로나 탓에 이재민 이

중고".

오승희·손진·정우석·이용태, 2018, "시나리오 기반의 복합재난 통합모델링 개발,"『한국통신학회논문지』, 43(11), pp.1920-1928, DOI: 10.7840/kics.2018.43.11.1920.

이명진·강정은, 2012, "빈도비 모델과 GIS을 이용한 침수 취약 지역 예측 기법 개발 및 검증,"『한국지리정보학회지』, 15(2), pp.86-102.

정경석·문태헌·정재희, 2010, "시공간검정통계량을 이용한 도시범죄의 핫스팟분석,"『한국지리정보학회지』, 13(3), pp.14-28.

정우석·오승희·이용태, 2019, "재난 빅데이터를 활용한 대형복합재난 피해확산예측 시스템 구현에 관한 연구,"『한국통신학회논문지』, 44(7), pp.1433-1442, DOI: 10.7840/kics.2019.44.7.1433.

지병곤·정대현, 2021, "스캔통계학을 이용한 국내 화재 발생 고위험군 탐색,"『Journal of The Korean Data Analysis Society』, 23(1), pp.183-194, DOI: 10.37727/jkdas.2021.23.1.183.

최예술·김재원·임업, 2018, "서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석,"『국토계획』, 53(7), pp.87-107, DOI: 10.17208/jkpa.2018.12.53.7.87.

한우석·이병재·조만석·정연희·김태훈·라정일, 2019,『대형재해에 대비한 도시복합재난 관리방안 연구』, (기본; 19-08), 세종: 국토연구원.

행정안전부, 2017-2020,『2016-2019 재난연감』, 세종: 행정안전부.

_____, 2017-2020,『2016-2019 재해연보』세종: 행정안전부.

ARMONIA, 2007, *Assessing and mapping multiple risks for spatial planning*, (European union 6th framework orogramme reports), Italy: European Union.

Budimir, M. E. A., P. M. Atkinson, and H. G. Lewis, 2014, "Earthquake-and-landslide events are associated with more fatalities than earthquakes alone," *Natural Hazards*, 72(2), pp.895-914, DOI: 10.1007/s11069-014-1044-4.

Hohl, A., E. M. Delmelle, M. R. Desjardins, and Y. Lan, 2020, "Daily surveillance of COVID-19 using the prospective space-time scan statistic in the United States," *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 34, 100354, DOI: 10.1016/j.sste.2020.100354.

Kappes, M. S., M. Keiler, and T. Glade, 2010, From single- to multi-hazard risk analyses: A concept addressing emerging challenges, in Mountain Risks: Bringing Science to Society, In J. P. Malet, T. Glade, and N. Casagli, (Ed.), *Mountains risks: Bringing science to society*, (pp.351-356), Strasbourg, France: CERG Editions.

Kim, B. and J. Jeong, 2011, *Disaster management plan against new types of disasters*,

Seoul: National Institute for Disaster Prevention.

Kulldorff, M., 2001, “Prospective time-Periodic geographical disease surveillance using a scan statistic,” *Journal of the Royal Statistical Society*, 164(1), pp.61-72, DOI: 10.1111/1467-985X.00186.

Kulldorff, M., R. Heffernan, J. Hartman, R. M. Assunção, and F. Mostashari, 2005, “A space-time permutation scan statistic for the early detection of disease outbreaks,” *PLoS Medicine*, 2, pp.216-224, DOI: 10.1371/journal.pmed.0020059.

Mignan, A., S. Wiemer, and D. Giardini, 2014, "The quantification of low-probability-high-consequences events: Part I. A generic multi-risk approach," *Natural Hazards*, 73(3), pp.1999-2022, DOI: 10.1007/s11069-014-1178-4.

Pourghasemi, H. R., A. Gayen, M. Panahi, F. Rezaie, and T. Blaschke, 2019, “Multi-hazard probability assessment and mapping in Iran,” *Science of The Total Environment*, 692, pp.556-571, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.203.

Skilodimou, H. D., G. D. Bathrellos, K. Chousianitis, A. M. Youssef, and B. Pradhan, 2019, “Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: A case study,” *Environmental Earth Sciences*, 78, 47, DOI: 10.1007/s12665-018-8003-4.

Tango, T., K. Takahashi, and K. Kohriyama, 2011, "A space-time scan statistic for detecting emerging outbreaks," *Biometrics*, 67(1), pp.106-115, DOI: 10.1111/j.1541-0420.2010.01412.x.

Tobin, G. A. and B. E. Montz, 1997, *Natural hazards: Explanation and integration*, New York: Guilford Press.

Tonini, M., D. Tuia, and F. Ratle, 2009, “Detection of clusters using space-Time scan statistics,” *International Journal of Wildland Fire*, 18(7), pp.830-836, DOI: 10.1071/WF07167.

질병관리청 감염병포털, http://www.kdca.go.kr/npt/, [2020.12.8]

김효정: 경북대학교에서 공간정보학 석사학위를 취득하고, 부산대학교에서 공간정보전공 박사과정을 수료했다. 연구의 관심분야는 EcoGIS, 도시환경, 도시방재 등이다(hhhyo6@naver.com).

이성호: 서울대학교에서 도시계획전공 박사학위를 취득하고, 부산대학교 도시공학과 교수로 정년퇴임 후 현재는 명예교수로 재직 중이다. 연구의 관심분야는 지역계획 및 GIS, 방재계획이다(snhlee@pusan.ac.kr).

투 고 일: 2021년 02월 18일
심 사 일: 2021년 03월 03일
게재확정일: 2021년 04월 08일