기후재난 관리를 위한 적응대책 네트워크 분석

Analysis of Adaptation Measure Networks for Climate Disaster Management

김나윤* · 박창석**

Kim, Na yoon*, and Park, Chang Sug**

Abstract

This study analyzed the interconnectivity of climate change adaptation measures in the water management, health, and disaster sectors. A survey encompassing inputs from 94 experts was conducted for the analysis. Then a social network analysis was performed, based on the results of the survey, using Netminer 4.0. The findings confirmed that climate change adaptation measures in the water management, health and disaster sectors are interconnected. In addition, the results demonstrated that adaptation measures across these sectors are effective at addressing interconnected risks of climate change. Findings from this study have value as they can be used to prepare climate change adaptation measures that reflect climate risk. It is also significant that clusters of climate change adaptation measures have been derived from the results of this study.

Key words : Climate Change, Climate Disaster, Adaptation Measures, Adaptation Measures Cluster

요 지

본 연구는 물관리, 건강, 재난재해 부문의 기후변화 적응대책 상호연계성을 파악하였다. 분석을 위해 전문가 94명을 대상으로 설문조사를 실시하였고, 설문조사 결과를 바탕으로 Netminer 4.0을 이용하여 사회 네트워크 분석을 실시하였다. 본 연구결과 물관리, 건강, 재난재해 부문의 기후변화 적응대책이 상호연관되어 있음을 확인하였다. 또한 다양한 부문의 기후변화 적응대책들이 상호연계될 시 기후위험 대응에 효과가 있을 것을 확인하였다. 본 연구결과 기후 리스크를 고려한 기후변화 적응대책 마련의 근거로 활용되기를 기대하며, 기후변화 적응대책 클러스터를 도출하였음에 연구의 의미가 있다.

핵심용어 : 기후변화, 기후재난, 적응대책, 적응대책 클러스터

1. 서 론

최근 10년간(2009~2018) 우리나라 자연재해 피해액은 약 3.6조 원에 이르며, 이 중 물 관련 재해 피해액은 3.5조 원으로 약 95% 비중을 차지한다(National Assembly Research Service, 2020). 기후변화에 따른 대규모 자연재난 위험이 증대되고, 복합재난으로 확대됨에 따라 피해 규모는 더욱 커지고 있다. 우리나라는 「저탄소 녹색성장 기본법」 제48조에 의거하여 기후변화의 영향을 완화시키거나 건강·자연재해 등에 대응하는 적응대책을 수립·시행하고 있다. 하지만,

우리나라 기후변화 적응대책은 국가기후변화 적응대책과 광역·지자체 세부시행계획 간 연계가 부족(An appropriate central administrative agency, 2020)하고, 지역에서 활용할 수 있는 기후공간환경 정보가 부족하여 실효성 있는 대책 마련이 미흡하다(Kim, 2015).

이에 본 연구는 사회 네트워크 분석 기법(Social Network Analysis)을 활용하여 기후변화 적응대책 간 상호연계성을 실증하고자 한다. 사회 네트워크 분석은 구조적 관계를 명확히 표현하고 측정하여 관계발생의 원인 및 관계로부터 가져오는 결과를 설명하는 것이다. 따라서, 구조적 관계가 개인적

*정회원, 울산과학기술원 도시환경공학과 박사과정(E-mail: nyunk47@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST

**교신저자, 정회원, 한국환경연구원 물국토연구본부 선임연구위원(Tel: +82-44-415-7771, Fax: +82-44-415-7799, E-mail: plade290@kei.re.kr)

Corresponding Author, Member, Chief Research Fellow, Division for Environmental Planning, Korea Environment Institute

속성보다 더 중요한 특성 가진다는 전제를 기반으로 한다 (Knocke and Yang, 2008; Hong, 2021). 최근 사회 현상을 이해하기 위한 수단으로 사회 네트워크 분석의 중요성이 커지며(D.R. Lee, 2012), 이를 활용한 연구들이 다수 등장하고 있다. Gregorio et al. (2017)은 기후변화와 토지이용에 대한 25개 주요 정책문서를 중심으로 기후변화 완화, 적응 그리고 비기후 간 정책문서 내용을 코드화 한 뒤, 사회 네트워크 분석을 시도하였다. 그 결과 기후변화 적응과 토지이용 간 시너지 효과를 유발하기 위해서는 적응 행위자와 정책 간 일관성이 요구되며, 정부가 기후변화 적응정책의 일관성에 대한 강력한 권한을 내재화하고, 정책조치를 효과적으로 조정하는 방법이 필요함을 시사하였다. Newell et al. (2018)은 기후행동에 관한 특정계획 이행 시, 발생할 수 있는 효과와 잠재성에 대한 전문가 인터뷰를 시행하고, 이를 바탕으로 사회 네트워크 분석을 시도하였다. 그 결과 기후변화 적응전략은 다른 전략과 시너지 효과를 유발할 수 있지만, 지역사회의 개발 관행 간 복잡한 관계를 이해하고 시너지 효과를 예측한 뒤 개발사업을 시행하는 것은 불확실성이 있음을 제안하였다. 또한, 에너지 혁신, 도시 밀도화, 도심 활성화, 건축 자재, 폐기물 등 다양한 기후행동이 공동의 이익을 추구하나, 다른 계획과 전략으로부터 사업이 이행되므로 잠재적 상충 효과를 내재하고 있음을 밝혔다.

국내의 사회 네트워크 분석 기법을 활용한 연구를 살펴보면, Lee et al. (2019)는 1961년부터 2019년까지 수행된 국내 연구물의 초록을 바탕으로 키워드 분석과 키워드 네트워크 분석을 수행하였다. 그 결과 도시 기후변화 및 재난재해 측면에서 2011년 이후부터 회복력에 관한 연구가 집중적으로 수행되었음을 밝혔다. Lee et al. (2021)은 사회 네트워크 분석의 중심성 지표를 활용하여, 기후변화 대응을 목적으로 온실가스 저감 프로젝트를 수행하는 주요 행위자와 Clean Development Mechanism (CDM, 청정개발체제) 사업 간 협력관계를 확인하였다. Han et al. (2021)은 2000년부터 2020년간 국내외 재난 관련 연구 20,411편의 논문을 기반으로 토픽모델링과 네트워크 분석을 수행하여 재난연구 주제를 유형화하고 그 동향을 조사하였다. 그 결과 국내 재난연구는 기술·방법론적 연구 비중이 높게 나타난 반면, 국외 재난연구는 정책적 연구의 비중이 높음을 밝혔다.

선행연구 분석결과 사회 네트워크 분석 기법을 활용한 국내 연구는 연구동향과 사업주체 간 관계분석 연구에 중점을 두고있는 반면, 국외 연구는 정책연구에 중점을 두고 있음을 확인하였고, Han et al. (2021)은 이를 뒷받침한다. 국외 정책연구는 국내의 실정이 반영되지 않기 때문에 국내 정책 동향이나 향후 정책의 방향성을 대변하지 못한다. 이에 본 연구목적에 따른 사회 네트워크 분석 방법은 첫째, 기후변화 적응대책 간 상호연계성을 파악하고자 전문가 94명을 대상으로 설문조사를 시행한다. 둘째, 설문조사 결과를 바탕으로 사회 네트워크 분석 기법을 통해 상호연계성을 실증한

다. 마지막으로 기후 리스크 기반 기후변화 적응대책 클러스터를 도출하고 특징을 파악하여 정책적 제언 및 지렛대를 제시한다.

2. 연구방법

2.1 사회 네트워크 분석

사회 네트워크 분석 기법은 노드(node)와 링크(link)의 네트워크 구조를 시각적으로 보여주고 구조적으로 중요한 위치에 놓여있는 개체와 클러스터를 도출하여 네트워크의 효율성이나 정책적 함의를 이끌어 낼 수 있다(Scott, 1987; Hanneman and Mark, 2005). 사회 네트워크 분석은 크게 거시적(macro) 분석과 미시적(micro) 분석으로 구분되며, 거시적(macro) 분석은 전체적 수준에서 네트워크의 구조적 특성들을 분석하는 기법으로 네트워크의 밀도(density)와 집중도(degree centralization index) 등의 분석지표를 사용한다. 미시적(micro) 분석은 노드 간 연결관계에 따른 특징을 분석하는 것으로, 노드와 링크에서 형성되는 다양한 역할과 양상을 분석하여 중심성(centrality), 연결정도, 연결강도 등의 분석지표를 사용한다(S.S. Lee, 2012).

본 연구는 기후변화 적응대책 간 네트워크 구조를 파악한 뒤, 네트워크의 거시적 특성인 밀도와 집중도를 분석하였다. 밀도는 네트워크 노드들 사이에 연결된 정도를 의미하며, 밀도가 높은 네트워크는 노드의 연결관계가 그만큼 많다는 것을 의미한다. 즉, 밀도는 한 네트워크가 얼마나 완벽하게 구축되어 있는가를 표현하는 개념으로 노드 간 도움이나 교류가 많음을 의미한다. 집중도는 네트워크의 전체 노드중 네트워크 중심부에 위치한 노드들의 집중된 정도를 개념화한 지표로 한 네트워크 내 중심에 집중되는 노드의 비중을 표현한 지표이다. 이는 네트워크에서 중심적인 역할을 하는 노드의 비중을 의미한다.

네트워크의 거시적 특성을 살펴본 뒤 각 부문별 중심역할을 하는 적응대책을 확인하고자 아이겐벡터 중심성(Eigenvector Centrality)을 파악하였다. 네트워크에서 한 노드가 다른 노드에 영향력을 미치고 영향을 받은 노드 또한 많은 노드에 영향을 미치는 노드 체인에서 처음 영향을 준 첫 번째 노드는 아이겐벡터 중심성이 높다고 할 수 있다. 즉, 아이겐벡터 중심성은 네트워크 내에서 가장 영향력 있는 노드를 찾는 데 유용하며, 0과 1사이의 값으로 1에 가까울수록 영향력이 높다고 해석한다.

본 연구는 전문가 설문조사 결과를 중심으로 사회 네트워크 분석 기법을 적용하여 적응대책 간 상호관계를 분석하였다. 분석결과를 기반으로 국회기후변화포럼에서 조사한 기후 리스크와의 부합성 정보를 활용하여, 기후 리스크 중심의 기후변화 적응대책 클러스터를 도출하였다. 분석을 위해 Netminer 4.0을 이용하였고, Netminer 4.0은 Cyram에서 개발되어 전 세계적으로 통용되고 있는 사회 네트워크 분석

패키지로 네트워크 분석 및 네트워크 시각화에 유용하여 여러 선행연구에서 활용되고 있다.

2.2 연구범위

기후변화 적응대책은 다양한 부문으로 구성됨에 따라 전부분의 기후변화 적응대책을 고려하기에는 현실적으로 어려운 한계가 있다. 따라서, 본 연구는 우리나라 자연재해 피해액 중 물 관련 재해 피해액이 높으며, 홍수, 가뭄, 태풍 등 물 관련 재난이 증가할 것(ADB, 2015)을 고려하여 물 재난과 관련성이 높은 기후변화 적응대책들을 연구범위로 한정하였다.

분석에 활용할 기후변화 적응대책 목록 구축에 앞서, 국가 기후변화 적응대책, 광역시·도 및 기초시·군·구 기후변화 적응대책 세부시행계획을 토대로 적응대책 이행과제 목록을 도출하고 스크리닝 작업을 수행하였다. 스크리닝 작업은 중복성, 유사성, 구체성을 기준으로 타 부문과 중복되는 이행과제를 대표 부문을 정하여 중복되지 않도록 조정하는 작업으로 유사한 이행과제는 하나의 대표과제로 정리하였다. 정리된 기후변화 적응대책 목록은 국회기후변화포럼(2018)에 참석한 40명의 전문가에게 효과성, 탄소저감 효과, 비기후 효과, 시급성, 실행가능성 등에 대한 의견을 수렴하고, 추가적으로 「우리나라 기후 리스크 목록 갱신자료」(KEI, 2017)를 참고하여 기후 리스크와의 부합성을 조사하였다.

최종적으로 확정된 기후변화 적응대책은 물관리 부문의

가뭄, 홍수, 수질 및 수생태계 3개 전략 아래 21개 적응대책, 건강 부문의 이상기온 및 기상재해, 감염병, 대기오염, 건강 부문 공공서비스 4개 전략 아래 19개 적응대책, 재난재해 부문의 예방, 대비, 대응, 복구 4개 전략 아래 16개 적응대책으로 총 56개를 선정하였다(부록 참고).

2.3 전문가 설문조사

분석을 위한 원자료(raw data)를 구축하고자, 기후변화, 물관리, 방재, 건강, 도시, 환경 등 관련 업무에 종사하고 있는 전문가 94명(대학 및 학회, 공무원, 연구원 등)을 대상으로 설문조사를 시행하였다. 전문가 설문조사는 2019년 9월 21일부터 10월 17일 25일간 실시하였고, 기후변화 적응대책 간 시너지 효과(Synergy)와 상충 효과(Trade-off)에 대해 설문(Fig. 1)하였다.

사회 네트워크 분석 시 관계 데이터를 인접행렬(adjacent matrix)로 변환하여 각 요소 간 어느 정도의 관계를 맺고 있는지를 입력값으로 사용하므로 (1)~(3)으로 조사된 구간을 시너지 효과, (-3)~(-1)로 조사된 구간을 상충 효과로 구분하고, 단, 0점은 아무 영향도 없을 것으로 예상될 때 할당되는 점수로 구분하여 이들의 평균값을 산출하여 입력값으로 활용하였다.

최종적으로 물관리 30부, 건강 28부, 재난재해 36부를 회수하여 본 분석에 활용하였다. 분석에 활용된 조사대상자의 통계학적 특성(Table 1)을 살펴보면, 대학교수 63.8%,

지역에서 전문가의 적응대책가중치 및 영향력 조사에 대한 설문 - (3)으로 할당된 전문가의 설문이다.

Fig. 1. Expert Survey (ex. Health)

Table 1. Survey Respondent's Characteristics

Classification		Respondent	
		NO	%
Job	Professor	60	63.8
	Researcher	22	23.6
	Public official	8	8.4
	Etc	4	4.2
Related work period	Less than 10 years	14	14.8
	More than 10 years and less than 15 years	17	18.1
	More than 15 years and less than 20 years	16	17.0
	More than 20 years and less than 25 years	21	22.4
	More than 25 years	26	27.7
Affiliation	Climate change	7	7.5
	Water	15	16.0
	Disaster	9	9.6
	Health	21	22.3
	Urban	21	22.3
	Environment	21	22.3

연구원 23.6%, 공무원 8.4%, 기타 4.2% 순으로 나타났다. 이들의 현 업무 종사기간은 10년 미만 14.8%, 10년 이상 15년 미만 18.1%, 15년 이상 20년 미만 17.0%, 20년 이상 25년 미만 22.4%, 25년 이상 27.7%로 분포하였다.

3. 연구결과

3.1 부문별 적응대책 네트워크 구조와 중심대책

각 부문별 기후변화 적응대책 네트워크를 시각화한 뒤, 영향력이 큰 적응대책을 도출하였다. 각 부문별 적응대책 네트워크의 구조분석 결과는 Table 2와 같다.

각 부문 시너지 네트워크의 평균 링크 수(Avg. link)는 0.9 이상으로 적응대책 간 시너지 효과가 유발되는 것으로 해석된다. 반면 상충 네트워크는 0.4~0.8로 일부 적응대책 간 상충 효과가 유발되는 것으로 해석된다.

다음으로 네트워크의 밀도(network density)이다. 네트워크의 밀도는 0~1 사이의 값으로, 1에 가까울수록 노드 간 상호연계성이 높다고 해석된다. 따라서, 각 부문의 시너지 네트워크와 재난재해 부문 상충 네트워크는 0.4~0.5 수준으로 상호연계 정도가 보통이라 해석된다. 반면, 건강과 물관리

부문의 상충 네트워크는 0.2~0.3 수준으로 비교적 상호연계 정도가 낮다고 해석된다.

마지막으로, 네트워크의 집중도(degree centralization index)이다. 네트워크의 집중도는 중심적인 역할을 하는 노드의 비중으로, 각 부문별 시너지 효과를 유발하는 적응대책들은 전체 적응대책의 약 50%이다. 반면, 상충 효과를 유발하는 적응대책들은 10% 미만으로 극히 낮은 비중을 보였다. 특히, 네트워크 집중도가 0%로 분석된 재난재해 상충 네트워크는 모든 적응대책이 상충 효과를 유발하지 않는다고 해석된다.

3.1.1 물관리 부문의 중심 적응대책 분석

물관리 부문 시너지 네트워크의 아이젠벡터 중심성 0.25 이상의 적응대책은 [물관리 3]이 가장 높았고, [물관리 14]가 그 뒤를 따랐다. 그 외 [물관리 4], [물관리 21] 순으로 나타났다. 반면, 상충 네트워크 아이젠벡터 중심성이 0.25 이상의 적응대책은 [물관리 21], [물관리 5], [물관리 13] 순으로 나타났다(Table 3).

시너지 네트워크(Fig. 2)에서 아이젠벡터 중심성이 높게 나타난 [물관리 3], [물관리 4]는 물 부족 현상 및 가뭄 재난 발생을 사전 대비하기 위함이다. 반면, [물관리 14]는 물

Table 2. Sector Adaptation Measure Network Characteristics

Classification		Node	Avg. link	Network density	Degree centralization index
Water management	Synergy	19	18 (0.95)	0.5	52.77%
	Trade-off		8.4 (0.44)	0.23	4.93%
Health	Synergy	16	15 (0.94)	0.5	53.33%
	Trade-off		13.6 (0.85)	0.45	0%
Disaster	Synergy	21	19.3 (0.92)	0.48	49.0%
	Trade-off		13.4 (0.64)	0.33	7.12%

Table 3. Water Management Network's Influential Adaptation Measures

No.		Adaptation Measure
Synergy	Water Management 3 (물관리 3)	Rainwater Management, protection and reduction techniques of the water leakage
	Water Management 4 (물관리 4)	Emergency drought countermeasures
	Water Management 14 (물관리 14)	Expansion of rainwater outflow reduction facilities
	Water Management 21 (물관리 21)	Water Safety Plan
Trade-off	Water Management 5 (물관리 5)	Strengthening measures to save water
	Water Management 13 (물관리 13)	Flood Prevention measures for buildings
	Water Management 21 (물관리 21)	Water Safety Plan

재난을 사전 예방하고, 안정적인 용수 공급을 위한 인프라 확충 및 관리체계 강화를 위한 대책이다. 종합해보면, 우리나라는 물 관련 재해 피해액 비중이 높음에 따라 사전 예방대책이 중시됨을 시사한다.

상충 네트워크(Fig. 3)의 아이젠벡터 중심성이 높게 나타난 [물관리 5]는 수요자들이 물을 효율적으로 사용하도록 유도·관리하는 대책이다. 우리나라 물관리 정책은 다목적댐 건설, 대규모 하천정비사업 등 공급위주의 물관리 정책들이 시행되어 수요중심의 물관리 정책은 비교적 미흡한 실정이다(Kim and Kim, 2018). 현재는 「수도법」 제15조에 따라 일부 시설에 절수기기 설치를 규정하고 있으나 범위를 확대할 경우 다른 적응대책 및 정책들과의 충돌이 발생할 우려가 있다. [물관리 13]은 건물 내 침수방지를 위해 자동 수증 펌프, 배수 설비 개선 등 사전 침수방지 시설 도입을 위한 대책이다. 건물 침수방지를 위한 규제는 재산권에 대한 제약과 추가적인 비용을 수반하기 때문에 적용이 쉽지 않으며, 부문내 다른 적응대책들과의 사업 및 예산 중복 가능성이 높을 것이라 사료된다.

시너지 네트워크와 상충 네트워크 모두 중심성이 높게

Fig. 2. Synergy Network between Adaptation Measures (Water Management)

Fig. 3. Trade-off Network between Adaptation Measures (Water Management)

나타난 [물관리 21]은 어떠한 상황에도 물을 안정적으로 공급하기 위한 적응대책으로, 대부분의 적응대책들과 시너지 효과를 유발하는 적응대책이다. 이는 물 공급뿐만 아니라 홍수, 가뭄 등 물 재난을 사전 대비하여 피해를 줄일 수 있다. 하지만, 우리나라 물관리는 수량, 수질, 수재해 등으로 구분·관리되며, 국토부, 환경부뿐만 아니라 행정안전부, 농림축산식품부 등 다양한 부처가 물 관련 업무를 분담하여 수행하고 있다(K-water, 2019). 따라서, 다양한 부처의 사업 간 중복성과 예산 낭비가 발생 될 가능성이 높아 [물관리 21]이 다른 적응대책과 상충 효과를 유발할 가능성이 높다고 제언한다.

3.1.2 건강 부문의 중심 적응대책 분석

건강 부문 시너지 네트워크(Fig. 4)의 0.25 이상 적응대책은 [건강 16], [건강 18], [건강 17], [건강 15] 순으로 나타났다(Table 4). 이러한 결과는 건강 부문 공공서비스와 관련성이 높은 적응대책들이 중심역할인 것으로 해석된다. 기후변화에 따른 건강 피해는 도시 및 지역의 입지적, 물리적, 사회·경제적 특성에 따라 상이하다. 따라서, 지역 중심의 건강 피해 대책이 수립되어야 함을 시사한다.

반면, 상충 네트워크(Fig. 5)의 아이젠벡터 중심성은 19개 적응대책 모두 0.2294로 나타났다. 건강 피해의 원인이 기후

Fig. 4. Synergy Network between Adaptation Measures (Health)

Table 4. Health Network's Influential Adaptation Measures

No.		Adaptation Measure
Synergy	Health 15 (건강 15)	Climate Health Impact Assessment System
	Health 16 (건강 16)	Public Relations and Education for Health Impact Prevention Action Guidelines
	Health 17 (건강 17)	Training for health managers
	Health 18 (건강 18)	Regional-based Health Vulnerable Class management system

Fig. 5. Trade-off Network between Adaptation Measures (Health)

변화임을 인식하는 것은 비교적 어려움이 있고, 단기간 조사를 통해 밝혀내는 것도 한계가 있다. 그렇기 때문에 기후변화의 불확실성과 특수성, 피해 인식 속도 등에 따라 언제든 적응대책 간 상충 효과가 유발 될 수 있음을 함축한다. 이러한 결과는 전문가 설문조사 시 상충 효과에 대한 평균점수가 비교적 낮게 나타난 이유와 맥을 같이한다.

최근 기후변화로 인한 신종 바이러스, 감염병 등이 등장하며, 영향을 미치는 경로를 추적하는 것은 매우 복잡하다. 기후변화에 따른 인적피해는 감염병에 한정되는 것이 아니며, National Research Council for Economics, Humanities and Social Sciences (2020)는 기후변화로 인한 건강문제는 새롭게 진단 받기 보다는 기저질환의 악화임을 제안하고, 환자 개인이 기후변화 피해 정도를 인식하는데 어려움이 있음을 제안하였다.

따라서, 건강 부문의 공공서비스는 직접적인 위험요인을 해결하기 위함으로 질병 악화에 미치는 영향을 지속적으로 관찰 할 필요가 있다. 앞서 언급한 바와 같이 기후변화 피해는 상이 하므로, 지역사회 환경보건 문제해결을 위해 기술적·제도적 개선이 필요하다. Rohr et al. (2019)은 기후변화로 야기되는 건강 피해는 식량 생산, 유통 등 의식주와 관련된 다른 부문에서 부정적 영향을 미침을 제한한 바, 본 분석결과를 뒷받침한다.

3.1.3 재난재해 부문의 중심 적응대책 분석

재난재해 부문 시너지 네트워크(Fig. 6)는 0.25 이상의 적응대책은 다른 부문에 비해 비교적 많이 도출되었다. 이를 살펴보면, [재난재해 6], [재난재해 9]의 아이젠벡터 중심성은 0.3 이상으로 최상위권으로 나타났다. [재난재해 5], [재난재해 1], [재난재해 10], [재난재해 11], [재난재해 12], [재난재해 8] 순으로 그 뒤를 따랐다(Table 5).

시너지 네트워크에서 아이젠벡터 중심성이 높게 나타난 [재난재해 1], [재난재해 6], [재난재해 5], [재난재해 8] 4개의 적응대책은 재난재해의 예방과 대비를 위한 사전대책이다. 그리고, [재난재해 9], [재난재해 10], [재난재해 11], [재난재

Fig. 6. Synergy Network between Adaptation Measures (Disaster)

Table 5. Disaster Network's Influential Adaptation Measures

No.		Adaptation Measure
Synergy	Disaster 1 (재난재해 1)	Risk analysis and risk mapping
	Disaster 5 (재난재해 5)	Forecast warning and information transmission systems
	Disaster 6 (재난재해 6)	Integrated disaster control system
	Disaster 8 (재난재해 8)	Education and Exercise
	Disaster 9 (재난재해 9)	Guidance on emergency preparedness and response to accidents
	Disaster 10 (재난재해 10)	Disaster suppression
	Disaster 11 (재난재해 11)	Disaster relief
	Disaster 12 (재난재해 12)	Emergency medical assistance

해 12]은 재난재해 발생 시 대응대책이다. 재난 발생 이전과 재난 발생 시 적용되는 적응대책이 중심대책으로 도출되었으며, 재난 발생에 따른 피해를 미리 예방하고 대비하기 위한 체계적인 관리체계 마련에 집중하고 있는 것으로 해석된다.

반면, 상충 네트워크(Fig. 7)의 아이젠벡터 중심성은 건강 부문과 마찬가지로 모두 0.2500으로 동일하게 나타났다.

이는 앞서 재난재해 부문 상충 네트워크의 집중도가 0%로 나타나는 것과 같은 맥락이다. 피해 유형은 예측할 수 있지만, 피해 강도는 예측 불가하므로 재난 발생 상황과 안전관리 역량 등에 따라 상충 효과를 야기 할 수 있다. 또한, 상황에 따라 적응대책의 영향력이 달라지기 때문에 특정 적응대책의 두드러진 영향력으로 인해 상충 효과를 유발한다고 정의하는 것은 한계가 있다.

Fig. 7. Trade-off Network between Adaptation Measures (Disaster)

Table 6. Climate Risk Index

CODE	Climate Risk	CODE	Climate Risk
AG 01	Loss of farmlands and nonpoint pollutant spills	HE 20	Increase in water-borne, food-borne, and mental diseases due to natural disaster
AG 02	Decrease in crop production due to severe drought	HE 23	Increase in skin damage due to excessive UV exposure
ES 14	Hydroecological pollution due to organic materials	LC 01	Traffic damage due to flood
HE 03	Increase in water-borne, food-borne, and mental diseases due to climate change	LC 06	Weakened bridges and their collapse
HE 04	Increase in vector-borne diseases due to climate change	LC 07	Building collapse due to heavy snow load
HE 05	Chronic diseases due to air pollutants	WA 02	Increase of drying streams
HE 07	Increase in sicknesses due to extremely cold winter	WA 03	Inadequate domestic water
HE 10	Chronic diseases in summer	WA 14	Damaged water supply
HE 18	Increase in injuries and death due to natural disaster	WA 22	Decrease in national water supply due to unpredictable rainfall

Fig. 8. Climate Risk Based Adaptation Measure Cluster Mapping

3.2 기후 리스크 기반 적응대책 클러스터 분석결과

3.2.1 적응대책 클러스터 네트워크 구조

기후변화 적응대책 클러스터는 기후 리스크 관리 목적이 같은 적응대책들로 구성되기 때문에 적응대책의 양적 측면(교류)과 기후 리스크 관리를 위한 질적 측면(시너지 효과)을 파악하는 데 용이하다. 이에 3개 부문 기후변화 적응대책과 기후 리스크(Table 6) 부합성을 고려하여 클러스터 분석을 수행한 결과 18개 기후 리스크 클러스터(Fig. 8)를 도출하였다. 18개 기후 리스크 클러스터는 기후 리스크를 중심으로 구분하였기에 3개 부문 모든 기후변화 적응대책이 포함된다.

Table 7. Results of a Cluster Analysis on Adaptation Measures Based on Climate Risk

	SMI	E-I	Cohesion Index	Group Density
HE03	0.548	0.517	2.182	0.500
HE23	-1.000	1.000	0.000	0.000
LC01	0.268	0.727	0.928	0.250
HE18	0.489	0.677	1.571	0.357
HE20	-1.000	1.000	0.000	0.000
HE07	0.951	0.882	1.656	0.500

Note: “HE03” Increase in water-borne, food-borne, and mental diseases due to climate change, “HE07” Increase in sicknesses due to extremely cold winter, “HE20” Increase in water-borne, food-borne, and mental diseases due to natural disaster, “HE23” Increase in skin damage due to excessive UV exposure, “LC01” Traffic damage due to flood

클러스터가 상대적으로 크게 나타나는 [HE 03] 11개 (19.6%), [LC 01]은 9개(16.0%), [HE 18]은 8개(14.2%), [WA 03]은 7개(12.5%), [HE 07]은 6개(10.7%)를 중심으로 그 특징을 살펴보았다(Table 7).

클러스터 분석지표인 Segregation Matrix index (SMI)와 External Internal index (E-I), Cohesion index는 클러스터를 기준으로 하여 네트워크의 밀도, 링크 수, 집중도를 분석하고 다른 클러스터와 상대적으로 비교하기 위한 값이다(Bock and Husain, 1950; Krackhardt and Stern, 1988; Fershtman and Chen, 1993; Cyram, 2008). SMI는 밀도를 기준으로 동일 클러스터와 다른 클러스터와의 관계를 상대적으로 비교한다. Eq. (1)은 클러스터의 SMI를 산출하는 식으로 $D_{X,Y}$ 는 X 부터 Y 까지의 밀도를 의미한다.

$$SMI = \frac{D_{AA} - D_{AB}}{D_{ZZ} - D_{BB}} \quad (1)$$

SMI값이 양수(+)인 경우 클러스터 내 밀도가 다른 클러스터 간의 밀도 보다 높음을 의미한다. SMI 지표가 양수(+)인 [HE 03], [LC 01], [HE 18], [HE 07]은 클러스터 내 밀도가 클러스터 간 밀도보다 크다. 이는 클러스터내 적응대책 간 상호관계가 강하게 형성하여 해당 클러스터의 응집력이 높다고 해석된다.

E-I 지표는 클러스터 외부와 연계된 링크 수와 클러스터 내부에서의 링크 수의 비율을 측정한 값으로, 1에 가까우면 클러스터 내 링크가 외부 클러스터와의 연결이 강함을 의미한다. 이를 통해 클러스터 내부간의 연계와 외부 클러스터와의 연계를 비교해 볼 수 있다. Eq. (2)은 클러스터의 E-I를 산출하는 식으로 EL 은 클러스터 외부 링크 수, IL 은 클러스

터 내부 링크 수를 의미한다.

$$E-I = \frac{EL - IL}{EL + IL} \quad (2)$$

따라서, [HE 23]과 [HE 20]의 E-I는 1로 나타나 다른 클러스터와 강하게 연결되어 있다고 해석할 수 있다. 즉, 외부 클러스터와 연계되어 해당 클러스터의 영향력이 커질 수 있으며, [HE 23]과 [HE 20]은 상위 클러스터 내부에 존재하는 작은 클러스터이므로 상위 클러스터의 영향력을 높이는 데 효과가 있다.

마지막으로 Cohesion Index 지표는 클러스터에서 다른 클러스터로의 집중 정도로 나누어 산출한 값으로 클러스터의 집중도를 나타낸다. 즉, 클러스터간 집중도에 대해 한 클러스터내에서의 집중도가 얼마인지를 나타내는 지표이다. Eq. (3)은 Cohesion Index를 산출하는 식으로 the number of internal ties는 클러스터 A에서 클러스터 A로의 연결로서 그룹 내부의 집중도, the number of external ties는 클러스터 A에서 다른 클러스터로의 연결로서 클러스터 A와 외부 클러스터 간의 집중도를 의미한다.

$$\text{Cohesion Index} = \frac{\text{the number of internal ties}}{\text{the number of external ties}} \quad (3)$$

[HE 03]과 [HE 07]의 Cohesion Index가 0.5로 가장 높게 나타났다. 이는 두 클러스터에 포함된 물관리, 건강, 재난재해 적응대책이 상호연계될 경우 두가지 기후 리스크 관리에 비교적 효과적임을 제언한다.

3.2.2 적응대책 클러스터 중심대책

각 적응대책 클러스터별 중심대책을 파악하였다. 가장 많은 적응대책을 포함하는 “HE 03” 클러스터는 11개 적응대책으로 구성된다. “HE 03” 클러스터는 [물관리 21], [건강 2], [건강 3], [건강 6], [건강 7], [건강 8], [건강 9], [건강 13], [건강 16], [건강 17], [재난재해 13] 적응대책을 포함한다.

특히 [물관리 21]과 [건강 16], [건강 17]은 물관리 및 건강 시너지 네트워크에서 중심성이 높은 적응대책으로 도출되었다. [물관리 21], [건강 16], [건강 17]은 “HE 03” 리스크에 대비하여 건강 부문의 사전 예방 교육과 물관리 부문의 물 안전 계획이 상호 연계될 경우 시너지 효과를 기여 할 수 있음을 시사한다. 더불어, “HE 03” 클러스터는 “HE 23” 클러스터를 포함하고 있어 “HE 23” 리스크 관리에도 긍정적 영향을 줄 것으로 판단된다.

다음으로, “LC 01” 클러스터는 9개 적응대책으로 구성된다. “LC 01” 클러스터는 [물관리 10], [물관리 13], [물관리 14], [재난재해 1], [재난재해 2], [재난재해 5], [재난재해 6], [재난재해 14], [재난재해 15] 적응대책을 포함한다. “LC

01” 클러스터 내 [물관리 14], [재난재해 1], [재난재해 5], [재난재해 6]은 각 부문의 시너지 네트워크에서 중심성이 높은 적응대책으로 도출되었다. [물관리 14]는 물 재난 예방을 위한 적응대책이고, [재난재해 1], [재난재해 5], [재난재해 6]은 재난재해 예방 및 대비를 위한 사전대책이다. 즉, 물 재난 발생에 따른 침수방지를 위해 물관리 부문과 재난재해 부문 적응대책 간 시너지 효과가 유발될 것으로 해석된다. 그러나 앞서, [물관리 13]은 사업 및 예산 중복이 우려됨을 시사한 바, 물 재난 관리에 시너지 효과를 기여 할 수 있지만 지속적인 모니터링이 필요하다.

“HE 18” 클러스터는 8개 적응대책으로 구성된다. “HE 18” 클러스터는 [건강 1], [재난재해 7], [재난재해 8], [재난재해 9], [재난재해 10], [재난재해 11], [재난재해 12], [재난재해 16] 적응대책을 포함한다. 이 중 [재난재해 8]은 재난재해 부문 대비를 위한 적응대책이고, [재난재해 9], [재난재해 10], [재난재해 11], [재난재해 12]는 재난재해 발생 시 대응을 위한 적응대책이다. 이들은 재난재해 시너지 네트워크에서도 중심성이 높게 나타났으며 부문내에서도 시너지 효과를 유발함을 확인하였다. 반면, [건강 1]와 [재난재해 12]이 상호연계 될 경우, 기후재난 발생 시 신속하고 체계적인 인명구조가 가능 할 것이라 해석된다. “HE 18” 클러스터는 “HE 20” 클러스터를 포함하고 있어, “HE 20” 리스크 관리에도 긍정적 영향을 줄 것으로 판단된다.

마지막으로 “HE 07” 클러스터는 6개 적응대책으로 구성된다. “HE 07” 클러스터는 [물관리 21], [건강 3], [건강 15], [건강 17], [건강 18], [건강 19] 적응대책을 포함한다. 특히, [물관리 21], [건강 15], [건강 17], [건강 18]는 물관리와 건강 시너지 네트워크에서 중심성이 높은 적응대책으로 도출되었다. 여기서 건강 부문 적응대책은 건강 부문 공공서비스를 위한 적응대책들과 [건강 3]이며, [물관리 21]과 상호연계 된다면 겨울철 취약계층의 한랭질환과 물 공급 불평등을 해소하는데 기여 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 전문가 94명을 대상으로 수행한 설문조사를 통해 기후변화 적응대책 간 상호연계성을 검토함으로써 향후 기후변화 적응대책 수립 시 정책적 제언 및 지렛대 제공을 목적으로 하였다.

우리나라의 물 관련 재해 피해액이 높고 물 재난이 증가할 것으로 예측되어, 물관리, 건강, 재난재해 부문 기후변화 적응대책 56개를 선정하였다. 전문가 설문조사를 기초자료로 활용하여 사회 네트워크 분석을 수행한 결과 물관리 부문 4개, 건강 부문 4개, 재난재해 부문 8개 적응대책이 시너지 효과를 유발하는 중심역할임을 파악하였다. 반면, 상충 효과를 유발하는 중심역할의 적응대책은 물관리 부문 3개 적응대책으로 분석되었다.

한편, 기후 리스크 기반 적응대책 클러스터 분석 결과 18개 기후 리스크 클러스터가 도출되었고, 이 중 6개의 클러스터가 비교적 적응대책의 비중이 높은 클러스터임을 파악하였다. 기후변화 적응대책 클러스터 분석 결과는 다음과 같은 시사점을 제공한다. 첫째, 건강 부문의 사전 예방 교육과 물관리 부문의 물 안전 계획이 상호연계될 경우 온도변화로 인한 건강 피해 리스크 관리가 유용할 것이다. 둘째, 물관리 부문과 재난재해 부문의 적응대책이 상호연계될 경우 침수로 인한 재해 발생 및 기반시설 관리에 효율적일 것이다. 마지막으로 건강 부문 공공서비스를 위한 적응대책과 물관리 부문 물 안전 계획의 상호연계는 취약계층의 기온 질환 및 물공급 불평등 해소에 기여할 것이다.

본 연구는 기후변화 적응대책 간 상호연계성을 파악하고, 기후 리스크 관리를 위한 클러스터를 도출하였다는 점에서 의미가 있다. 이를 바탕으로 다양한 기후변화 적응대책 간 상호연계성이 고려되어야 하며, 적응대책 간 패키지 정책체계 마련되어야 함을 제언한다. 현재 세계적으로 기후변화 적응의 중요성이 부각됨에도 불구하고 적응대책 시행 전후의 효과를 살펴볼 수 있는 체계가 마련되어 있지 않기 때문에 적응대책의 상호연계에 따른 효과를 정량적으로 평가한 연구는 극히 제한적인 실정이다. 이에 본 연구결과는 향후 정책입안자와 의사결정자들이 기후 리스크를 고려한 기후변화 적응대책 마련 시 기초자료로 활용될 것으로 기대되며, 기후변화 적응대책 간 상호연계성을 평가하고 기후 리스크 관리를 위한 적응대책 클러스터를 도출하였다는 점에서 정책효과의 극대화를 꾀할 수 있을 것이다.

본 연구는 건강, 재난재해, 물관리 3개 부문으로 한정하였고, 전문가 의견을 토대로 평가하였기에 이를 일반화하는 것은 한계가 있다. 또한, 기후변화의 불확실성과 특수성으로 도시 및 지역 특성에 따라 적응대책의 효과에도 차이가 있을 것이다. 따라서, 향후 지역적응을 통한 실증적 조사와 다양한 부문의 기후변화 적응대책을 고려한 분석 등 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 KEI에서 환경부 R&D로 수행된 “지자체 적응정책 의사결정 지원을 위한 기후변화 적응정보 DB·인벤토리 구축 및 격자기반 공간화 기법 개발(우선순위평가)(2020-005-02(R))”의 연구결과를 기초로 작성되었습니다.

References

- An appropriate central administrative agency. (2020). *The 3rd national climate change adaptation plan (2021-2025)*.
- Asian Development Bank (ADB). (2015). *Water-related disasters and disaster risk management in the people's*

Republic of China.

- Bock, R.D., and Husain, S.Z. (1950). An adaptation of holzinger's b-coefficients for the analysis of sociometric data. *Sociometry*, Vol. 13, pp.146-153.
- Cyram. (2008). *Net Miner Help*. Seoul: Cyram.
- Fershtman, M., and Chen, M. (1993). The segregation matrix: A new index for measuring sociometric segregation. *Megamot*, Vol. 34, pp. 563-581.
- Gregorio, M.D., Nurrochmat, D.R., Paavola, J., Sari, I.M., Fatorelli, L., Pramova, E., et al. (2017). Climate policy integration in the land use sector: Mitigation, adaption and sustainable development linkages. *Environmental Science and Policy*, Vol. 67, pp. 35-43.
- Han, C.Y., Kim, W.S., and Yoon, D.K. (2021). A comparative analysis of disaster research trends using topic modeling and network analysis. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 5, pp. 79-88.
- Hanneman, R.A., and Mark, R. (2005). *Introduction to social network methods*.
- Hong, S.P. (2021). *Diagnosis of public transport central hierarchy and analysis of relationship with land-use*. Ph. D. dissertation, University of Seoul.
- Kim, J.S., and Kim K.M. (2018). Drought management status and improvement tasks. *National Assembly Research Service*, Vol. 3, pp. 1-25.
- Kim, T.H. (2015). Linking and utilizing urban, environmental, disaster prevention spatial data for a climate change adaptation spatial planning. *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 14, No. 1, pp. 85-112.
- Knoke, D., and Yang, S. (2008). *Social network analysis*. Sage.
- Korea Environment Institute (KEI). (2017). *Establish the foundation for climate change risk management at the national level: Establishing a national climate change risk management system*.
- Korea Water Resources Corporation (K-water). (2019). *Suggestions for the national water management committee*.
- Krackhardt, D., and Stern, R.N. (1988). Information districts: Old wine in new bottles?. *Regional Studies*, Vol. 26, No. 5, pp. 469-483.
- Lee, D.R. (2012). A social network analysis on basic old-age pension policymaking process. *Korean Policy Sciences Review*, Vol. 16, No. 3, pp. 109-135.
- Lee, G.S., Jin, D.Y., Song, S.K., and Choi, H.S. (2019). Text analysis on the research trend of 'Resilience' in Korea: Focus on climate change and urban disaster. *Journal of Climate Change Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 401-414.
- Lee, S.S. (2012). *Network analysis methodology*. Seoul: Nonhyung.
- Lee, Y.W., Kim, J.H., and Lee, D.K. (2021). A social network analysis on domestic clean development mechanism projects. *Modern Society and Public Administration*, Vol. 31, No. 2, pp. 1-28.
- National Assembly Research Service. (2020). *Water resource facility management plan to cope with climate change*.
- National Research Council for Economics, Humanities and Social Sciences. (2020). *[ISSUE&INSIGHT] Climate Crisis, Daily Crisis I: Agriculture and Health*. Retrieved November 20, 2020, from <https://nrc.re.kr/index.es?sid=a1>
- Newell, R., Ann, D., and Mark, R. (2018). Climate action co-benefits and intergrated community planning: Uncovering the synergies and trade-offs. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, Vol. 10, No. 4, pp. 1-23.
- Rohr, J.R., Barrett, C.B., Civitello, D.J., Craft, M.E., Delius, B., DeLeo, G.A., et al. (2019). Emerging human infectious diseases and the links to global food production. *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 445-456.
- Scott, J. (1987). *Social Network Analysis: A Handbook*. London: Sage.

Received	November 10, 2021
Revised	November 15, 2021
Accepted	November 24, 2021

부록. 기후변화 적응대책 목록

부문	전략	적응대책	
물관리	가뭄	물관리 1	해수담수화 기술
		물관리 2	하수 재이용 확대
		물관리 3	빗물관리, 누수방지 및 저감기술
		물관리 4	비상시 가뭄대책
		물관리 5	절수대책 강화
		물관리 6	산업·농업수자원 수요관리
		물관리 7	지하수 자원관리
	홍수	물관리 8	홍수 사후관리 대책
		물관리 9	하천 홍수방재 시설물 확충
		물관리 10	개발단계에서 침수안전 확보 체계 구축
		물관리 11	물관리 기초시설의 홍수대응체계 구축
		물관리 12	도시 홍수방재 시설물 확충
		물관리 13	건물 침수방지 대책
		물관리 14	우수유출 저감시설 확충
	수질 및 수생태계	물관리 15	생태 하천 및 습지 조성
		물관리 16	농축업 오염원 관리
		물관리 17	염수 침입 제한
		물관리 18	도시 비점오염원 관리
		물관리 19	상수원 보호 관리
		물관리 20	소규모 하수처리시설 확충
		물관리 21	물 안전 계획
건강	이상기온 및 기상 재해	건강 1	기상재해 피해현장 응급의료지원체계
		건강 2	온열한랭질환 감시체계
		건강 3	기상이변 취약계층 지원체계
		건강 4	이상기온 대비 공동편의 시설
		건강 5	도시열섬 완화 설비
	감염병	건강 6	권역별 감염병 감시망 구축
		건강 7	감염병 예방접종 지원
		건강 8	집단급식/공중이용 시설 관리
		건강 9	종합적인 방제체계
	대기오염	건강 10	대기오염 예경보 및 전달체계
		건강 11	환경성 질환 감시체계
		건강 12	미세먼지 고농도시 비상저감조치
		건강 13	대기오염 측정망
		건강 14	도로분진 청소
	건강부문 공공 서비스	건강 15	기후 보건영향 평가체계
		건강 16	건강영향 예방/행동요령 홍보 및 교육
		건강 17	건강부문 담당자 교육
		건강 18	지역단위 건강취약계층 관리체계
		건강 19	건강취약계층 주거환경 개선
재난재해	예방	재난재해 1	위험성 분석 및 위험지도 작성
		재난재해 2	재해관측장비 개선
		재난재해 3	재난보험
		재난재해 4	방재시설
	대비	재난재해 5	예경보체계 및 전달체계
		재난재해 6	재난통합관제체계
		재난재해 7	민방위 경보시설
		재난재해 8	교육훈련 및 연습
	대응	재난재해 9	비상계획/사고 대책본부 가동 운영지침
		재난재해 10	재난진압
		재난재해 11	구조구난
		재난재해 12	긴급의료지원
	복구	재난재해 13	재해 복구 지침 개발
		재난재해 14	재해복구모델 및 복구공급 개발
		재난재해 15	재해복구 및 구호물자 관리체계
		재난재해 16	재난/재해 폐기물 처리