

결과보고서 요약

사업기관	국토문제연구소		
사업명	평화번영의 국토공간정책 수립을 위한 공간의사결정시스템 활용		
사업책임자	성명	소속	직위
	김대현	국토문제연구소/ 사회과학대학 지리학과	소장/교수
사업기간	2020.3.1.~2021.1.31	사업비	

1. 사업 목적 : 다행위자시스템 기반 공간의사결정시스템을 통한 한반도의 취약성을 극복하고 회복력을 높이는 국토공간정책 대안 수립

- 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 이해 증진
- 공간의사결정시스템의 보완
 - 환경변화 시나리오 개발
 - 의사결정시스템을 보완·시험
- 국토공간정책 대안 수립

2. 사업 내용

- 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 이해 증진(Step 1)
 - 사전경고신호 기법 검토 및 개발
 - 북한 식량위기에 적용결과 사전예방신호 확인
- 공간의사결정시스템의 보완(Step 2~3)
 - 통계자료를 바탕으로 한 의사결정모형 및 환경모형 개선
 - 심층인터뷰를 통한 추가 개선사항 도출 및 환경변화 시나리오 개발

3. 사업 성과

- 통일국토 네트워크를 활용한 지리교재 개발 : 저서 1건
- 사업성과 활용한 연구성과 도출 : Book Chapter 1건

국토문제연구소

1. 사업 배경

□ 개요

- 사업명: 평화번영의 국토공간정책 수립을 위한 공간의사결정시스템 활용
- 기관명: 국토문제연구소

□ 추진 배경 및 목적

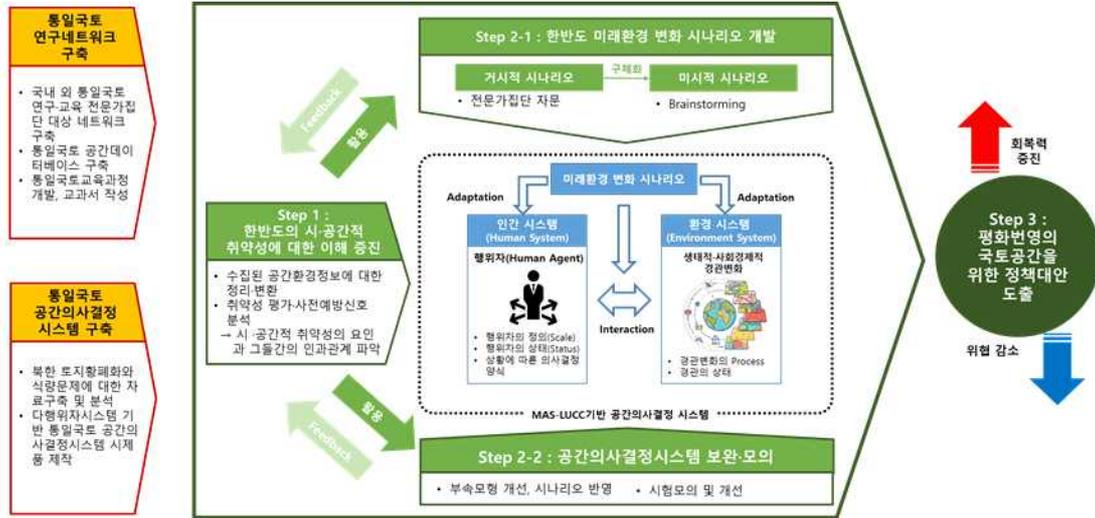
○ 추진배경

- 문제인식 : 한반도의 공간적 속성에 따른 불확실성이 높으며, 최근 국제정세의 변화에 따라 취약성이 증대되고 있음
 - 다양한 행위자 : 남·북한 뿐 아니라, 미국과 중국, 러시아, 일본 등의 이해관계가 복잡하게 얽혀 있음
 - 변화에 취약한 자연환경 : 산지가 많은 지형조건과 높은 인구밀도로 인해, 사회경제 및 자연환경 변화에 극히 취약함. 조선시대 17세기 대기근, 1990년대 북한의 대기근이 대표적인 사례라 할 수 있음
 - 국제정세·환경변화 : 자국 중심주의의 확산으로 인한 전통적인 국제정치·경제환경이 변화하고 있으며, 기후·환경변동성이 증대됨에 따라 많은 환경재해가 발생하고 있음
- 대안 : 한반도의 사회-생태적인 회복력(resilience)을 높임으로써 취약성을 줄여 가려는 대안 모색
 - **지리학적 접근** : 정치·경제·사회·농업 등으로 파편화된 현재 북한 및 통일연구에 대한 학제간·시스템적 통합을 위한 대안
 - **시나리오 기반(scenario-based) 접근** : 예상되는 국제정세·환경변화는 우리가 경험하지 못한 것(e.g. COVID-19)이기 때문에 과거 자료를 바탕으로 한 미래예측은 의미가 떨어지며, 여러 가지 미래의 가능성을 시나리오의 형태로 제시하고 이를 다양한 방식으로 평가하는 형태로 접근해야 함
 - **복잡적응계(complex-adaptive system)적 접근** : 현실의 복잡성은 미래예측을 어렵게 만들기 때문에, 위험을 사전탐지(early warning)하고 이를 회피해 나가는 형태의 접근이 필요

○ 목적

- 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 이해 증진
- 공간의사결정시스템의 보완
 - 환경변화 시나리오 개발

- 의사결정시스템을 보완·시험
- 국토공간정책 대안 수립



2016~2019 성과

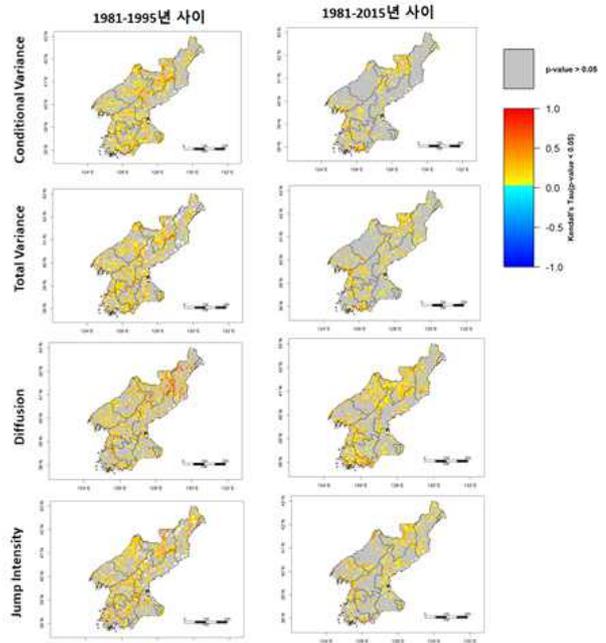
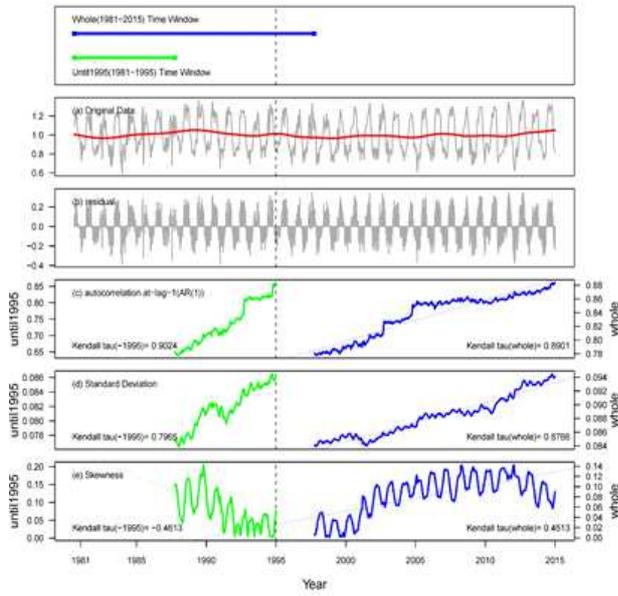
2020 추진계획

<사업 흐름도>

2. 사업 내용

□ 사업 추진 내용

- 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 이해 증진(Step 1)
 - 북한의 토지황폐화와 식량문제에 대한 사전경고신호(Early Warning Signal, EWS)에 대한 포착 관련 연구를 검토함으로써, 북한과 한반도의 시·공간적 취약성을 포착할 방법 개발
 - 구축된 데이터베이스에 적용한 결과, 1995년 북한 식량위기 발생 전 사전예방신호를 1980년대 후반을 중심으로 확인할 수 있었음
 - 세부적인 내용 확장판 결과보고서 별지 1 참조
- 공간의사결정시스템의 보완(Step 2~3)
 - 통계자료를 바탕으로 의사결정모형 및 환경모형에 대한 관계식 개선 진행
 - 심층인터뷰를 통한 추가 개선사항 도출 및 환경변화 시나리오 개발 : 확장판 결과보고서 별지 2 참조
 - 현재까지 진행된 공간의사결정시스템 연구내용은 확장판 결과보고서 별지 3 참조



<북한 정규화식생지수(NDVI)에 대한 사전예방신호 분석 적용 사례>

일정별 추진 사항

일 정	추진 내용
2020.3~6	통일국토 공간데이터베이스 자료 검토 및 한반도의 시·공간적 취약성 자료 추가 수집
2020.3~9	통일국토 네트워크를 활용한 지리교재 개발
2020.7~11	한반도의 시·공간적 취약성 분석
2020.11	통일기반구축 연합 학술대회 참가
2020.8~12	공간의사결정시스템 부속모형 보완
2020.12	취약성 분석 및 부속모형 보완 연구 정리
2021.1~2	전문가 설문조사, 연구성과 정리(진행 중)

□ 참여 인력

○ 책임자

성명	대학	학과	직급
김대현	사회과학대학	지리학과	교수
연구소(원)	국내전화	휴대전화	이메일
국토문제연구소	4059		biogeokim@snu.ac.kr

○ 주요 참여 인력

성명	소속	직급	이메일
박수진	사회과학대학 지리학과	교수	catena@snu.ac.kr
김대현	사회과학대학 지리학과	부교수	biogeokim@snu.ac.kr
박준범	사회과학대학 지리학과/ 국토문제연구소	박사과정/ 자체연구원	sink9388@snu.ac.kr
안유순	사회과학대학 지리학과/ 국토문제연구소	박사과정/ 자체연구원	newsoon8@snu.ac.kr

3. 사업 성과

□ 사업 성과

○ 통일국토 네트워크를 활용한 지리교재 개발 : 저서 1권

- 개요·과정

- 본 연구소는 지난 4년간 국내·외 통일국토 연구 및 교육네트워크를 구축하여 왔으며, 연변대와의 연구교류사업, 북한 공간자료 구축 등을 진행한 바 있음
- 본 사업에서 구축한 네트워크와 성과를 바탕으로 통일평화연구원-지리학과의 “통일교육 선도대학사업”아시아연구소의 “아시아연구기반구축사업 ” 과 협력하여 북한지리 교육과정 과 교재개발 추진
- 2018, 2019년 “북한지리특강”수업을 진행하였으며, 교재 개발을 완료하여 2020년 9월 출판



- 결과 : 박수진 · 안유순(편), 2020, “북한지리백서-인문,자연, 환경“, 푸른길
- 2020년 9월 발간
- 북한의 자연지리를 중심으로(지형, 기후, 생태) 북한의 경제사회, 농업, 해양, 행정구역에 대해서 다루고 있는 종합적인 북한 지리학 교재
- 단순히 지식의 전달 뿐 아니라, 북한에 대한 해당 주제 연구를 어떻게 수행하는지, 관련된 최신 연구에는 무엇이 있는지에 대해서 다룸으로써, “북한지리지식의 발전 ” 에도 중점을 두고 있음
- 활용 : 지리학, 북한학 학부생의 교재, 북한연구자를 위한 참고도서



<책 표지>

북한지리백서
인문, 자연, 환경

초판 1쇄 발행 2020년 9월 25일
 역사가 박우진·안우진
 역사가 김성기
 편집장 안우진
 출판등록 1996년 4월 12일 제16-1202호
 주소 08077 서울 서초구 서천로 13길 48 대왕포스트타워 7층 1000호
 전화 02-521-2967, 02-521-2970-2
 팩스 02-521-2951
 이메일 pearingbook@naver.com
 홈페이지 www.pearingbook.kr
 ISBN 978-89-6274-475-4 93930

이 책은 서울대학교 통일평화연구원 통일교육센터에서 기획·편집·가공·출판과 서
 목차례와 디자인을 맡고, 이서연연구기관연구소의 지원을 받아 출판되었습니다.

<사사표기>

북한의 식물과 자연생태 공우하

1. 서론 109
2. 생물의 다양성 109
3. 식물의 다양성 112
4. 식물 118
5. 동물 120
6. 조류 127
7. 기후변화의 생태적 영향 134
8. 결론 139

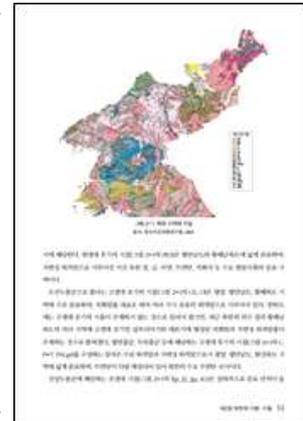
북한의 생물다양성과 보호 지역 홍수영

1. 서론 139
2. 생물다양성 136
3. 북한의 생물다양성 현황 143
4. 북한의 자연보호 지역 157
5. 결론 156

북한의 물환경 홍수영

1. 서론 167
2. 수자원 현황 167
3. 북한의 물환경 168
4. 남해안 물환경의 특징 170
5. 기후변화에 따른 북한 물환경 전망 181

<차례 일부>



<본문 일부>

○ 공간의사결정시스템 사업성과 활용한 연구성과 도출 : Book Chapter 1
 건

An, Y. and Park, S., 2020, An Agent-Based Model for Simulating Land Degradation and Food Shortage in North Korea, 83-100, In: Carmichael, T., and Yang, Z., (eds.), 2020, Proceedings of the 2018 Conference of the Computational Social Science Society of the Americas, Springer (ISBN : 978-3-030-35901-0), 2020년 5월

□ **관련분야 기여도**

- 국내외 네트워크를 공고히 구축함으로써 향후 통일시대에 대비하는 연구 협력의 기반을 마련함
- 국내외 관련학계에서 진행되기 어려웠던 북한에 대한 공간데이터 확충 및 공간의사결정시스템 구축 연구의 새로운 방향 제시
- 통일시대 국토공간 의사결정 모형의 기본 틀 구성

4. 자체평가 및 건의사항

□ 사업평가

○ 사업의 적절성

- 금년 사업에서는 다양한 연구활동과 전문가 자문을 통해 의사결정시스템의 완성도를 높일 수 있는 다양한 성과가 도출되었으나, 연구 목표를 달성하기 위해서는 예상보다 많은 시간이 필요한 것을 확인하였음
- COVID-19에 의해 연구 네트워크 사업은 제약이 있었으나, 이전 네트워크를 통해 성과를 얻을 수 있었음

○ 사업의 효율성

- 의사결정시스템 연구가 성숙됨에 따라 보다 더 완성된 형태의 연구결과 도출
- 성과의 양적 측면에서 벗어나 질적 측면, 특히 저명국제학술지 투고를 목표로 할 필요가 있음

○ 사업의 영향력

- 자연환경과 인문환경을 포괄하는 데이터베이스 구축을 통해 기 연구에서 다소 미흡했던 다학제적 연구를 진행할 수 있었음
- 다양한 기관과 교류를 진행하면서 네트워크 구축과 관련된 비용을 다른 연구 사업의 발전에 활용할 수 있었음

○ 사업의 발전가능성

- 본 사업의 통일국토 네트워크의 활용을 통해 통일국토 관련 다학제적 국제 연구를 발전시켜 나갈 수 있을 것으로 기대됨
- 본 사업에서 구축한 통일국토 의사결정모형은 북한 및 통일 한반도 관련 다양한 문제에 관한 의사결정모형의 틀로 활용될 수 있음

□ 미흡한 점(한계) 및 개선(보완)할 점

- 결과물을 국제저명학술지에 출판할 필요가 있음
- COVID-19에 의해 위축된 네트워크 활동을 보완할 계획 필요

□ 향후 계획

- ※ 연구진 내부 사정으로 2021년 사업에 지원하지 않기로 하였으나, 해당 연구는 사업 종료 후에도 지속적으로 진행하고 성과화할 계획이며, 이후 여건이 마련되면 이후 재신청할 계획임
- 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 사전경고신호(EWS) 적용 기법의 보완, 확장

- 공간적 범위 확장 및 비교연구 : 북한 데이터 → 한반도 또는 동북아시아 전체와의 비교검토
- 데이터베이스 추가 : 고해상도 위성영상(가능할 경우),
- 추가 방법론 고려 : Spectral Analysis 등
- 공간의사결정시스템의 추가 보완 및 시나리오별 결과 도출
 - 심층 인터뷰에서 수집한 보완사항에 대한 적용
 - 환경자료 간의 관계식 연구 방법론 및 자료 보완
 - 주요 시나리오에 대한 추가 결과 도출
- 국제저명학술지 투고 : 성과에 대해서 수시로 SCI급 학술지에 투고할 계획임

6. 성과 관련 지표

대표 사업 실적

- 박수진 · 안유순(편), 2020, “북한지리백서-인문,자연, 환경“, 푸른길

성과 자율 지표

- 사사 표기(예정) 논문 및 북챕터 : 1편(2편 예정)
- 저서 발간 : 1편

한반도의 시·공간적 취약성 분석을 위한 사전경고신호 분석

1. 배경 및 방법

◎ “임계 변화(Critical Transition) ” 또는 “임계점(Critical Thresholds)”

- 복잡계시스템에서(Complex System)에서 발생하는 갑작스러운 변화를 말함 (Scheffer et al., 2009)
e.g 독일 통일, 주식시장의 붕괴, 급격한 기후변화(Younger Dryas)등
- 대체로 임계 변화는 정확한 시점이나 방향성을 알기 어렵지만, 임계 변화의 위험성을 사전에 알 수 있는 수학적, 통계적인 징후가 있음 → 임계변화에 대한 사전 경고 신호(EWS)

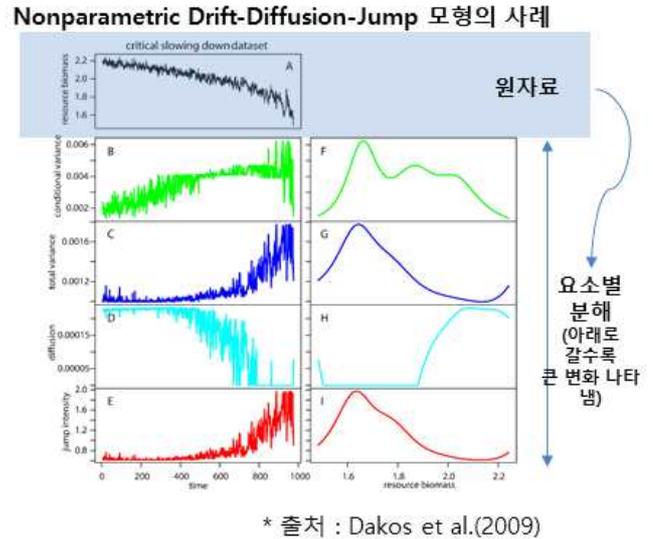
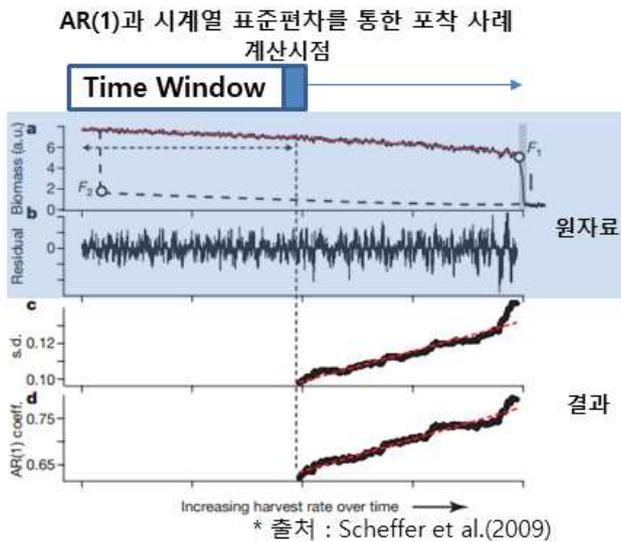
<<임계변화 시스템의 거동특성에 따른 사전예방신호 지표>>

특성	설명	지표
임계감속 (Critical Slowing Down)	<ul style="list-style-type: none"> • 교란과 섭동에 대한 회복속도(recovery rate)가 낮아지면, 점점 임계점과 분기에 가까워짐. • 회복속도가 느려지면서 변화율이 감소하기 때문에, 시스템 상태는 과거 상태와 비슷해짐(Rising Memory) • 회복속도가 느려지면 Fluctuation의 분산이 증가(Rising Variance) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rising Memory : 자기상관성 지표와 스펙트럼 분석, Autocorrelation at lag-1(AR1), Spectral Density 등 • Rising Variance : 표준편차, CV 등
편향된 반응 (Skewed Response) & 깜빡임 (Flickering)	<ul style="list-style-type: none"> • 임계점에 가까워진 시스템이 불안정한 상황에서 혼돈의 가장자리와 평형 상태 사이를 오고 갈 때, 변화의 속도는 느려짐에 따라 시스템은 혼돈의 가장자리, 즉 현재 평형과 멀어지는 방향으로 편향됨 • 즉, 편향이 증가한다는 것은 시스템이 단순히 임계변화에 가까워 졌다는 것 뿐 아니라, 새로운 안정 상태로 넘어갈 수 있는 혼돈의 가장자리에 가까워졌음을 말함 • 해당 상태에서는 시스템이 여러 다른 평형 상태로 전환될 수 있기 때문에, “깜빡거리는(Flickering)”형태로 진폭이 급격하게 증가할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 왜도(Skewness), 첨도(Kurtosis) • 분산(Variance)

* 출처 : Scheffer *et al.*(2009); Dakos *et al.*(2012)

◎ 시간자료에 대한 사전예방신호 도출(Dakos et al., 2012)

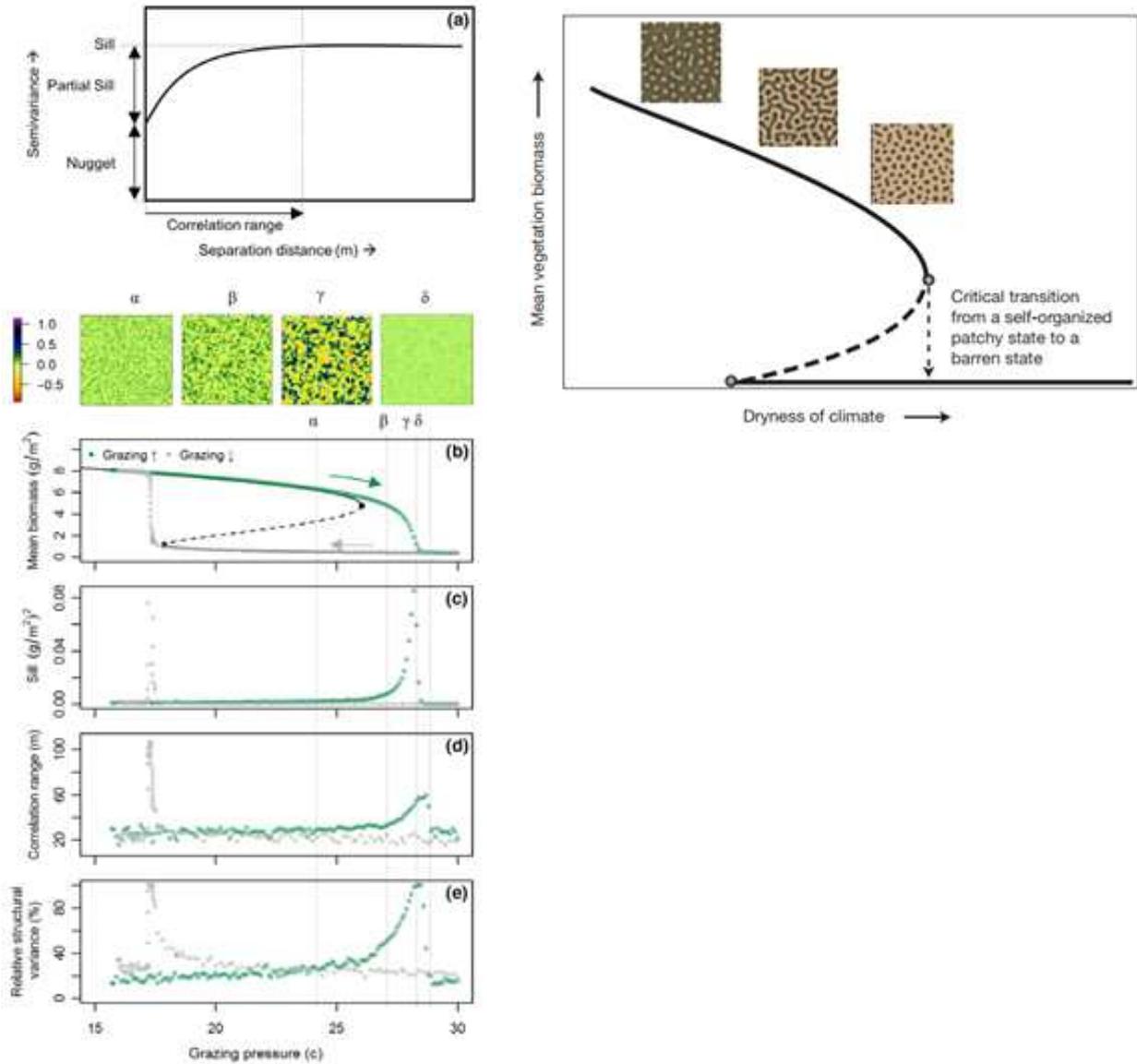
- 측정자료 기반 접근법(metric-based method) : 앞선 시간과 현재와의 통계적 관계를 바탕으로 임계변화와 파국의 사전예방신호를 포착하는 방법 → 시간적 자기상관(AR1), 시계열의 표준편차 등
- 모형기반 접근법(model-based approach) : 임계변화 일반모형에 자료를 맞춤(fitting)으로써 변화에 얼마나 접근했는지를 포착 → Nonparametric Drift-Diffusion-Jump 등



<<시간자료에 대한 사전예방신호 도출 사례>>

◎ 시공간자료에 대한 사전예방신호 도출(Kéfi et al., 2014)

- 공간적 자기상관성(Spatial Autocorrelation) 파악 : 임계변화와 파국의 직전에 시스템 구성요소들은 공간적으로 유사한 속성을 가지게 됨 → Moran's I, Semivariogram Analysis 등(왼쪽)
- 주파수 속성과 공간 패턴 파악 : 임계변화와 파국의 전조증상으로 공간패턴에 패턴의 주파수가 낮아지고(reddening), 특정 형태(fractal)를 띄게 됨 (오른쪽)



2. 연구 자료와 연구 방법

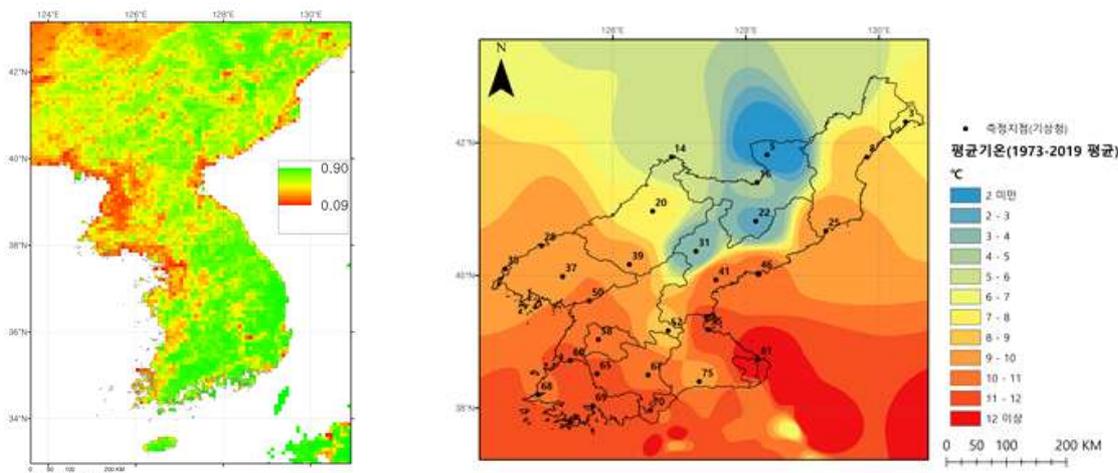
2.1 연구 자료

◎ 정규화식생지수(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)

- 위성영상에서 근적외선과 가시광선(적색)을 이용해 식생의 건강도, 활력도를 추정할 수 있는 지표
- 북한에 대한 식량생산량 추정, 산림지황폐화 정도 추정 등 북한에 대한 다양한 연구에 활용됨
- 미국 해양대기청(NOAA)의 기상위성 AVHRR자료를 NDVI로 가공한 GIMMS AVHRR NDVI(1982-2015)를 사용

◎ 기상 자료

- 기상청에서 확인한 북한 27개지점의 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량 자료
- 점 자료로 되어 있는 것을 북한 주변(중국 동북지역, 남한 경기, 강원도)자료와 함께 보간(Kriging)
- 시기 : 1973~2019(14개 지점은 1981~2019)



<<정규화식생지수(왼쪽), 기상자료(오른쪽) 사례>>

◎ 시계열 자료 : 아래 표 참조

자료구분	자료제목	출처*	데이터 가용기간
식량생산과 소비 관련자료	식량생산량(톤)	FAOSTAT	1961-2018
	식량수입량(톤)	FAOSTAT	1961-2018
	식량생산량+수입량(톤)**	FAOSTAT	1961-2018
	1인당 식량생산량+수입량(KG)**	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 식량생산량(Kg/ha)	Worldbank	1961-2018
	단위면적당 옥수수 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 감자 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 쌀 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018

자료구분	자료제목	출처*	데이터 가용기간
에너지 관련자료	재생에너지생산량(QuadBTU)	USEIA	1980-2014
	총에너지소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2015
	석탄소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2016
	석유소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2017
	재생에너지소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2018
	발전용량(10억kwh)	USEIA	1980-2019
	전기소비량(10억kwh)	USEIA	1980-2020
	1인당 에너지 강도(백만BTU)	USEIA	1980-2021
	화석연료 에너지 소비비율(%)	Worldbank	1971-2013
인구 및 기타 관련자료	총인구(명)	Worldbank	1960-2018
	인구 중 여성의 비율(%)	Worldbank	1960-2018
	인구 중 남성의 비율(%)	Worldbank	1960-2018
	농어촌 인구비율(%)	Worldbank	1960-2018
	도시 인구비율(%)	Worldbank	1960-2018
	총 연령 부양비	Worldbank	1960-2018
	노인 부양비	Worldbank	1960-2018
	유·청소년 부양비	Worldbank	1960-2018
	인구밀도(sqkm)	Worldbank	1960-2018
	인구성장률(%)	Worldbank	1960-2018
	기대 수명(세)	Worldbank	1960-2018
	여성 1인당 출산율	Worldbank	1960-2018
	1000명당 합계출산율	Worldbank	1960-2018
	1000명당 합계사망률	Worldbank	1960-2018
	무기수입량	Worldbank	1960-2010

* 세부 출처 정보

- ① FAOSTAT(<http://www.fao.org/faostat/en/>) : 유엔식량농업기구의 통계정보시스템, 농업관련 각국 및 유관 국제기구의 통계가 수집, 정리되어 있음
- ② Worldbank Open Data(<https://data.worldbank.org/>) : 세계은행의 데이터 공개 정보 시스템, 주로 공적개발 원조 및 이와 관련된 기초정보가 수집, 정리되어 있음
- ③ USEIA(<https://www.eia.gov/>) : 미 연방정부 에너지부(Department of Energy)산하 에너지정보관리청(Energy Information Administration)의 국제통계에 북한 에너지 관련 정보가 정리되어 있음

**기본통계를 바탕으로 단순 합산한 자료임

2.2 연구 방법

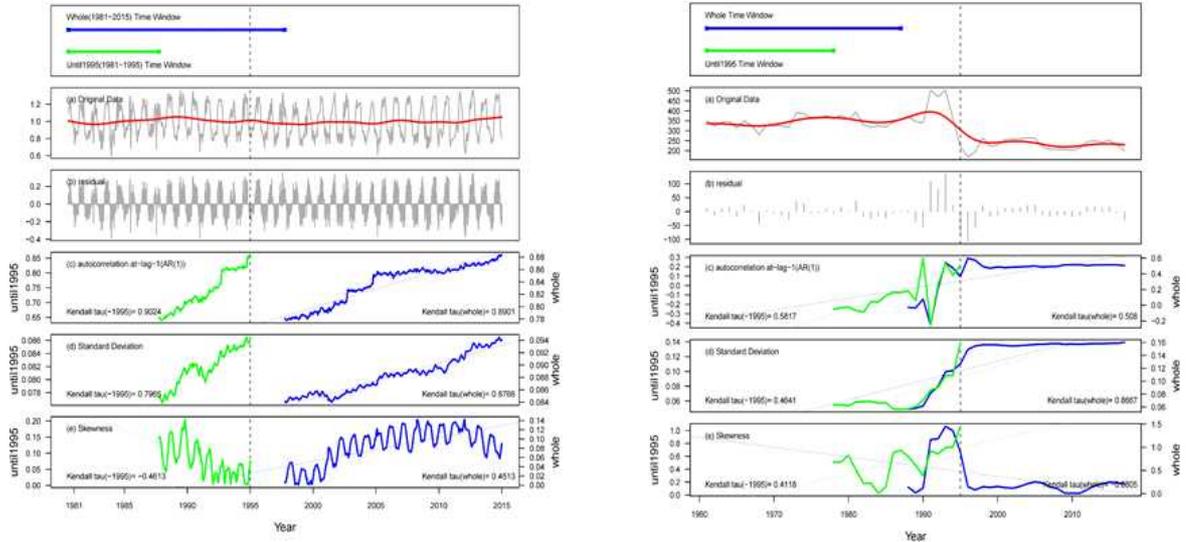
구분		측정자료 기반	모형기반		공간적 사전예방신호	
			Nonparametric DDJ	Timevarying AR(n)	공간상관/분산/왜도	Semivariogram
분석방법	연구	Dakos <i>et al.</i> (2012)	Carpenter and Brocks(2011), Dakos <i>et al.</i> (2012)	Pace <i>et al.</i> (2017), Taranu <i>et al.</i> (2018)	Kefi <i>et al.</i> (2014)	Nijp <i>et al.</i> (2019)
	도구	R "earlywarnings" Package	R "earlywarnings" Package	DynamicLinear-Models by Carpenter(in R) + R MARSS Package	R "Spatialwarnings" Package	R gstat Package
해석 방법	식량위기시점 (1995)과 현재와의 비교	O	O	O	O	O
	구체적인 임계변화 시점 특정	X	O	△	△	△
	취약지점 (Hotspot) 추출	O	O	△	X	X
	임계변화의 프로세스적 해석	X	O	X	△	△

3. 연구 결과와 해석 : 전체 결과 중 일부만 제시

3.1 측정자료 기반 결과

◎ 시계열 자료 적용사례

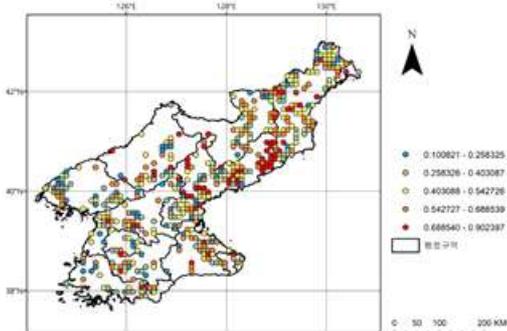
- (왼쪽) 정규화식생지수(N 40.47792, E 126.307, 자강도 희천-강계 사이)에 대한 결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015)
- (오른쪽) 북한의 1인당 "식량생산량+수입량"에 대한 결과 예시(왼쪽 : 1961-1995, 오른쪽 1961-2019)



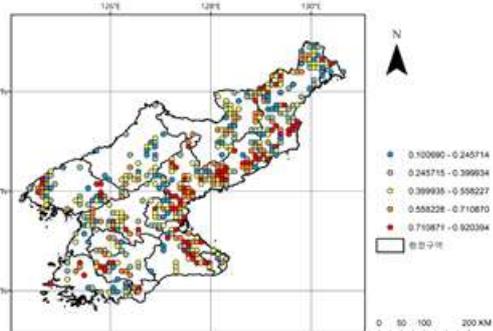
◎ 시공간 자료

- 식생지수의 (1995년도 이전까지/최근까지) EWS 도출결과(Hotspot)의 공간적 분포

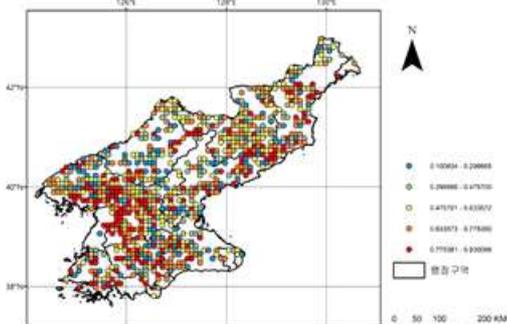
(a) 1995년까지의 AR(1) Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



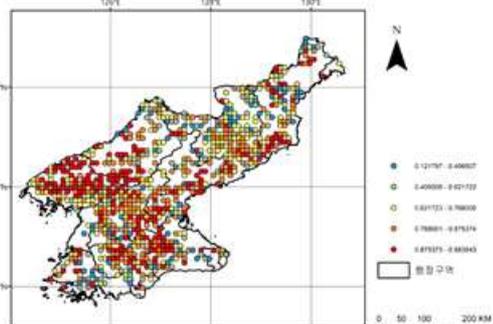
(b) 1995년까지의 표준편차 Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



(c) 2015년까지의 AR(1) Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



(d) 2015년까지의 표준편차 Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



◎ 결과

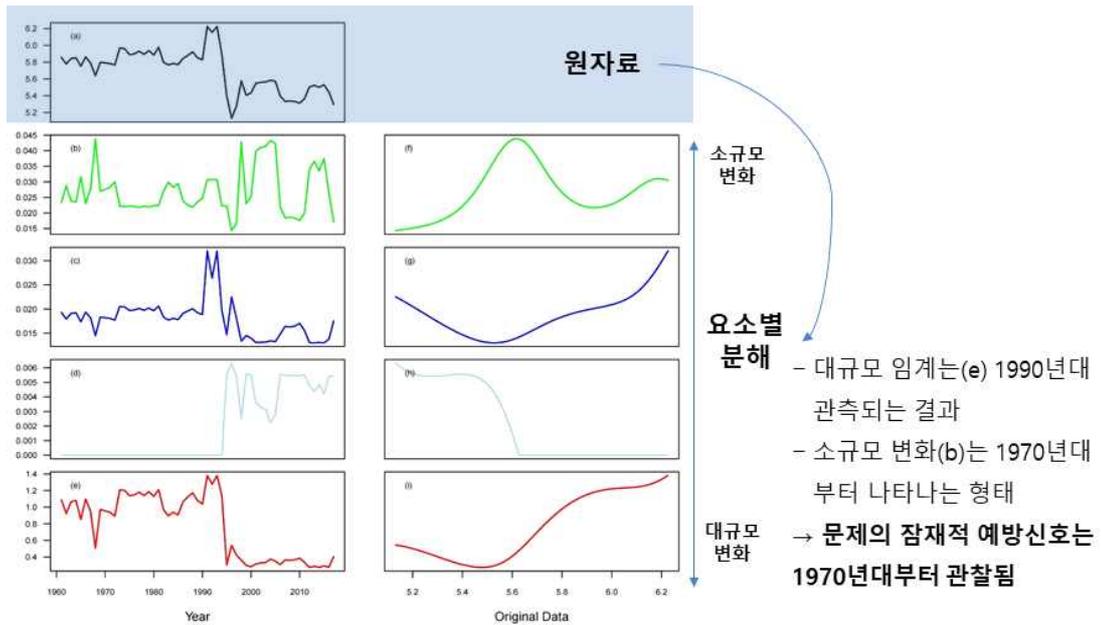
- 식량위기가 발생한 1995년까지의 임계변화의 정도가 과거부터 최근까지의 임계변화의 정도보다 다소 분명하게 도출
- 관북지역(특히 동해안)이 식생지수, 기후(강수) 측면에서 분명한 1990년대 중반 사전예방신호를 보임

자료구분		자료 시작점-1995년까지				자료 시작점-최근까지				
		AR (1)	SD	왜도	첨도	AR (1)	SD	왜도	첨도	
정규식생지수		전역	◎	○	X	X	○	○	X	X
		관서	△	△			◎	◎		
		관북	◎	◎			◎	◎		
		휴전선	○	○			○	○		
기후자료	기온	관서	◎	△	X	X	○	X	X	X
		관북	○	△	X	X	△	X	X	X
		휴전선	○	△	X	X	△	X	X	X
	강수	관서	△	◎	X	X	X	△	X	X
		관북	◎	◎	X	X	X	△	X	X
		휴전선	○	◎	X	X	X	△	X	X
인문사회자료		식량	○	○	△	X	△	◎	X	X
		에너지	X	○	△	X	X	X	△	X
		인구/기타	△	X	X	X	△	X	X	X

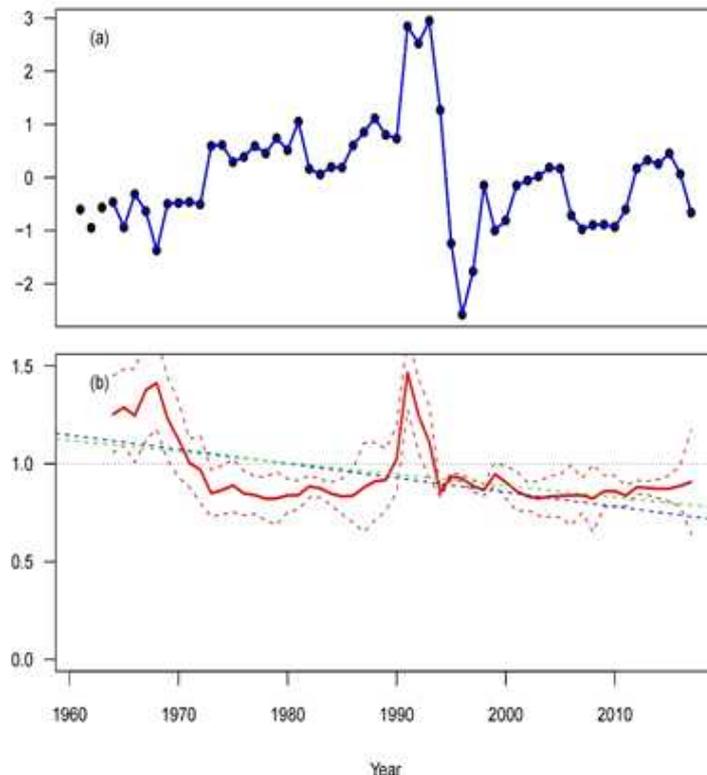
3.2 모형기반 결과

◎ 시계열 자료 적용사례

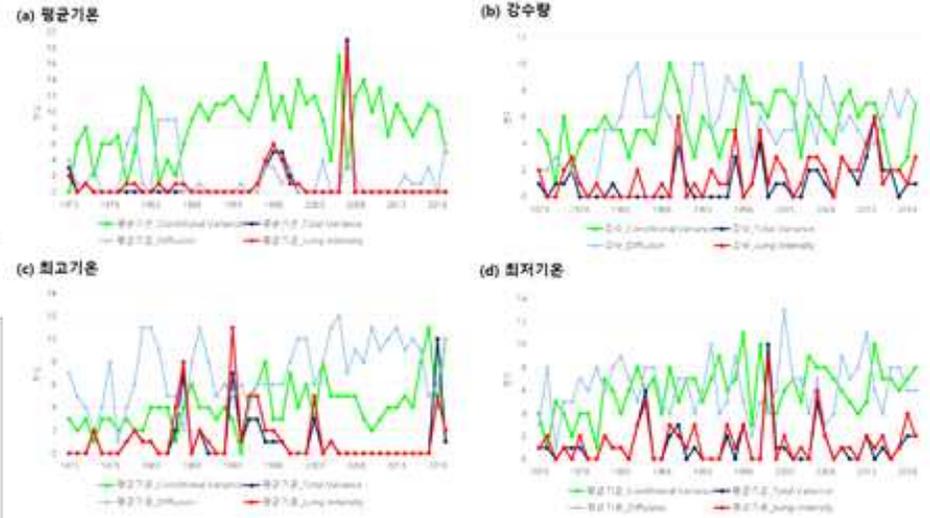
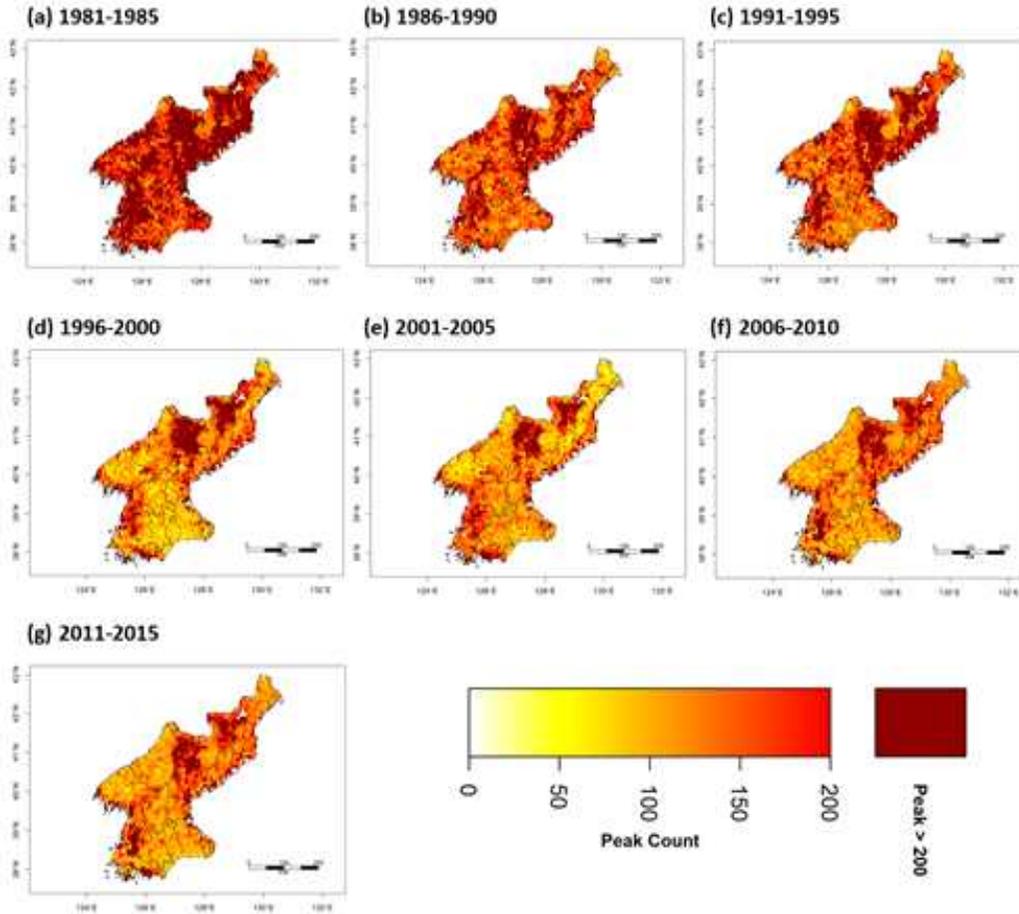
- Nonparametric DDJ 모형 적용결과 예시 : 1인당 식량생산량+수입량



- Timevarying AR(n) 결과 사례 : 1인당 식량생산량+수입량 자료를 분석한 결과로, 유사고유치(pseudo-eigenvalue)가 1 이상인 경우 “임계변화 사전예방신호”로 해석할 수 있음



◎ 시공간 자료

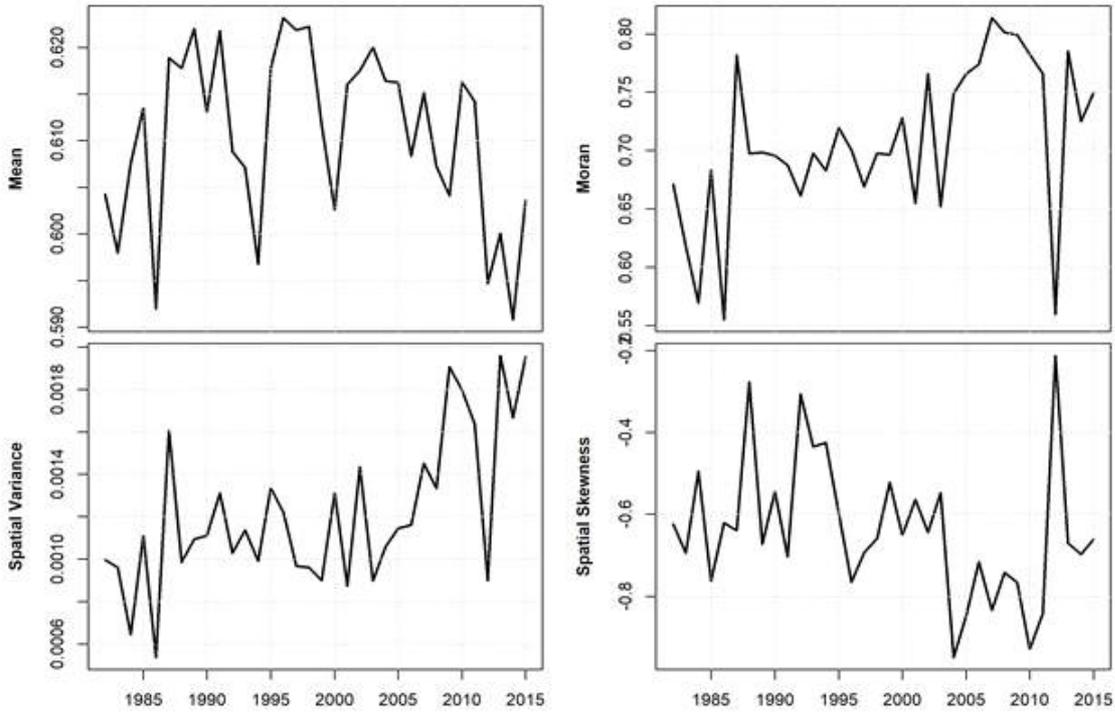


(왼쪽) 식생지수의 시기별 DDJ Model 조건부 분산 (Conditional Variance)에 따른 사전예방신호의 공간적 밀도
 (오른쪽) 각 기후자료의 연 DDJ Model 임계변화 확인 횟수

3.3 공간적 사전경고신호

◎ 시계열 자료 적용사례

- 식생지수 연 최대값의 공간적 사전예방신호 사례
- (평균을 제외하고) 각 지표의 수치가 높게 도출될수록 임계변화의 가능성이 높음



유의수준 : 전 구간 Moran's I < 0.001, Spatial Variance < 0.001, Spatial Skewness > 0.1

3.4 해석

◎ 1995년 전후와 최근과의 비교

- 대부분의 지표에서 1990년대 중반 지표의 임계변화 사전예방지표가 분명하게 도출
- 단, 기후 등 일부 지표와, 지역적인 식생지수의 변화 양상은 다소 다른 결과가 도출되었으나, 이는 북한 토지황폐화-식량위기 문제가 앞으로도 국지적으로, 기후변화의 측면에서 아직 충분한 문제임을 드러내는 결과라고 해석할 수 있음

◎ 각 요인들 간의 사전예방신호 시기 확인 : 시차가 확인됨

- 자연환경 지표(식생지수, 기후)에서는 1980년대 초반과 중반에 유의미한 사전예방신호를 도출
- 식량 관련 지표는 1990년대 초반에 유의미한 사전예방신호를 도출하였다. 이는 북한의 토지황폐화로 인한 식량위기가 빠르면 1980년대 초, 늦으면 1990년대 초에 사전에 포착이 가능했다는 것을 보여주는 결과로 해석할 수 있다.

◎ 토지황폐화와 식량위기 임계변화 요인들의 지역적 차이

- 시스템적, 기반적인 사전예방신호는 1980년대~90년대 관북 해안지방 및 백두산-개마고원에서 주로 도출, 이 지역이 자연환경 및 농업정책 상 취약한 지역이라고 판단
- 재해 및 급변사태에 큰 영향을 받았던 것은 관서 지방이라는 것을 확인할 수 있었다.

◎ 북한의 토지황폐화-식량위기의 프로세스를 유추

- 앞서 언급한 자연환경지표와 식량관련 지표의 임계점의 시차는, 북한의 토지황폐화와 식량위기가 3~5년의 간격을 둔 약한 자연환경 프로세스(시스템적 문제, 1980년대 초반), 강한 자연환경 프로세스(재해 및 급변사태, 1980년대 후반), 식량생산량의 급격한 감소(1990년대 초반)의 과정을 거쳤다는 것을 암시
- 이를 토대로 시차를 둔 관계에 대해서 복원해 볼 수 있을 것으로 기대된다. 이는 다음 장에서 더 구체적으로 다루도록 한다.

별지 2

심층인터뷰를 통한 의사결정시스템 추가 개선사항 도출 및 시나리오 개발

※ 별지 2의 내용은 2021. 1. 29 현재 진행중인 내용으로 이후 추가, 변경될 계획임

1. 자문위원 명단

순서	소속	직책	성명	자문일시	장소/방법	분야
1	서울대학교 농업생명과학대학 농림생물자원학부	객원교수	허성기	'21. 1. 25.(월) 14:00-17:00	서울대학교 75-1동 206-1호	북한 농업환경 일반
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	
2	서울시립대학교 자연과학대학 환경원예학과	교수	김계훈	'21. 1. 26(화) 14:00-17:00	서울시립대학교 자연과학관 8동 403호	북한 토양 및 생태
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	
3	한국농촌경제연구원 농업·농촌발전연구부	선임연구 위원	김영훈	'21. 1. 27(수) 14:00-17:00	Zoom 회의	북한 농업경제
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	
4	사단법인 굿파머스	연구소장	조충희	'21. 1. 28(화) 14:00-17:00	서울특별시 서초구 강남대로 37길 58	북한 농업 및 자연환경 (새터민으로서 의 실제 경험)
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	
5	한국환경정책· 평가연구원 자연환경연구실	선임연구 위원	명수정	'21. 1. 28(목) 18:00-21:00	Zoom 회의	북한 환경정책
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	
6	농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과	농업 연구사	나상일	'21. 1. 29(금) 13:00-16:00 (예정)	Zoom 회의	북한 원격탐사
				'21. 2. 5(금) 까지(예정)	서면자문	

2. 주요 자문내용 요약

◎ 북한 협동농장의 구조

- 규모의 측면 : 특별한 지적 없음. 단, 규모를 조정하는 모형이 필요하다는 의견(조충희)이 있었음
- 토지이용 측면 : 특별한 지적 없음.
- 하나의 협동농장 vs. 여러개로 유형화 : 대개는 모형이 복잡해진다는 이유로 반대, 그러나 일부 3개 정도로 유형화가 필요하다는 주장(조충희)이 있었음

◎ 모형의 구성요소 설계

- 환경 모형 : 토지의 집중 이용 정도가 주된 요인인 것은 타당하나, 인간이 토지에 약탈만 진행하는지(김영훈) 등을 고려할 필요가 있으며, 각 요인들간의 관계도 있음을 고려할 필요가 있음
- 인간의사결정 : 토지를 버린다는 것이 이치에 부합하는지 아니면 다른 표현으로 바꾸면 의미가 있는지에 대해서 대립. 다만 에너지 투입을 추가할 필요는 있을 듯
- 작목 선택 : 많은 연구진들이 이를 추가하는 것을 추천
- 소규모 축산업과 이를 통한 사료 투입, 유기질 비료 유출과 관련된 모형을 만들어 내는 것이 타당할 듯

◎ 시나리오

- 북한이 통제할 수 없는 요소에 대해서는 시나리오화 하지 않는 것이 좋다(할 수 있지만 해도 의미가 없다)
- "협동농장의 발전적 유지"와 관련된 시나리오 : 해체와의 비교, 많은 연구자들은 중국 및 동유럽과 달리 협동농장의 개인농화가 별 효과가 없을 것이라 봄
- 지속가능 농법 : 축산업 도입 또는 Agroforestry
- 시장화 도입 관련 시나리오 : 환금작물의 도입과 이를 이용한 식량 수입
- 그 외에도 다른 방식의 작물선택이 시나리오에 들어가야
- 감자의 역할에 대해서 다소 논란이 있었음

3. 각 자문위원별 자문내용

□ 서울대학교 농림생물자원학부 허성기 연구교수

◎ 북한 협동농장의 구조

- 협동농장에는 휴경이 없다, 소득이 나오지 않아도 농사를 짓는다, 돼기밭(텃밭)의 농사를 중시함
- 1995년 이전에는 배급이 정상적으로 이루어졌기 때문에 비공식부분이 적었음, 분명히 다르다. 이후에는 배급이 이루어지지 않았기 때문에 비공식부분이 늘어났고, 사람들은 이 부분에 집중. 장마당을 통한 교환
- 북한 협동농장의 일반형태는 "자력갱생의 구조", 전문성을 가지고 있는 협동농장은 한정적이고, 대부분은 모든 것을 하려고 한다(심지어 전문성을 가지고 있는 협동농장들도, 식량작물 등을 어떤 식으로든 재배한다), 그래서 토지이용으로 다른 유형을 만드는 것은 부적절하다
- 1995년 이후에는 환금성도 중요
- 논이 50만 정보인데, 30만 정보를 간척을 통해 추가 확보하고자한다. 현재 11만 정보 정도 확보. 모형에 꼭 집어 넣기를 추천. 북한은 내염성 벼를 가지고 있다.
- 북한의 협동농장은 평양과 그 주변 접경지대를 제외하고는 교통이 불편, 고립되어 있다고 보면 된다(그래서 자력갱생의 구조임) 그것을 고려해야

◎ 모형의 구성요소 설계

- 작물선택이 구체적으로 반영되어야 한다. 벼, 옥수수, 고구마는 경쟁작물(6-10월), 감자는 그 이전(3-6월) 작물, 작물 생장 시기 고려 필요.
- 옥수수는 단위 면적당 생산량이 가장 높음(옥수수->밀->벼 순). 그러나 토질을 가장 많이 빼앗는 특성이 있다.
- 기후조건(북한 기후조건과 미국 콘벨트의 기후조건은 유사)을 고려하여 보았을 때 옥수수는 북한에 타당. 단 북한이 운이 없어서 에너지 공급이 1980년대 끊기고, 이것이 토지황폐화로 이어졌을 뿐이다.
- 옥수수의 또 다른 단점은 잔여물이 썩어 비료가 되는데 2-3년이 소요
- 감자가 중요. 감자는 김정일 때 강조, 상황이 여전히 안좋았음에도 고난의 행군 이후 굶주림에서 벗어난 것은 감자에 의해서였다. 그러나 감자는 보관의 문제, 손실율이 30%를 넘으며, 기술이 좋지 않았다. 바이러스의 문제는 현재도 상존하고 있다(아무 품종이나 들여왔고, 바이러스가 같이 들어옴) 2000년대 초에 Worldvision을 통해 씨감자 기술을 도입하였으며, 고려지연구소의 기술지원을 15년을 거쳐서 북한의 감자농사 정착. "가장 성공적인 남북협력". "1998 감자혁명"
- "옥수수 외에는 토질에 큰 영향을 끼치지 않았을 것"
- 미국 농무성(USDA)에서는 곡물추정사업을 진행하고 있다. Dr. Mitta를 참고하기 바란다. 이 자료를 보내 주겠다.

◎ 시나리오 설계

- 작물선택이 시나리오에 들어가야 한다.

□ 서울시립대학교 김계훈 교수

◎ 모형의 구성요소 설계

- 유기농, 유기질비료에 관심-화학비료를 위한 자원이 거의 없기 때문(생태적목적 <<화학비료를 쓸수 없기 때문)
- 북한의 작물이 토양 질에 영향을 받지 못했음리는 없다(허성기 박사님 의견 반대).
- 화학비료 공급의 부족이 문제. 한반도는 토질이 좋지 못해 화학비료가 필수
- 유기농은 수질오염 등의 문제 발생
- 토양질을 추정할 때는 USLE를 따르는 형태로 진행해라(홍석영 박사 연구 참조)

◎ 시나리오 설계

- 남한의 가축분뇨를 유기질비료로 북한에 공급하는 대안->북한이 거부
- 북한의 협동농장은 고립된 구조(허성기 박사님 의견 동조)에 착안해서, 협동농장의 농장 구조에 적절한 규모의 축산을 진행해서, 이 축산산출물(분뇨)를 유기물 비료로 활용하고, 농업산출물의 일부를 다시 축산에 활용하는 형태로 순환하는 형태로 개발한다면, 현재의 저에너지 형태, 고립된 형태에도 지속가능한 농업생산이 가능하지 않을까? 다만 축산이 너무 큰 경우에는 농업산출물이 너무 잠식되어 사람들의 삶에 방해가 되니(그리고 대형화로 인한 피해 유발 가능), 적절한 수준을 찾는 것이 좋을 것 같다.(이것이 시나리오의 핵심)

□ 한국농촌경제연구원 김영훈 선임연구위원

◎ 북한 협동농장의 구조

- 현재 제시된 모형도 과도하게 복잡, 현실과 더 가깝게 만들기 위해 추가적인 요소를 도입하는 것은 분석을 불가능하게 하거나(데이터 문제) 분석결과의 신뢰성을 떨어뜨리거나(자유도 문제) 필요하지도 않음. 모형은 모형일 뿐임.

◎ 모형의 구성요소 설계

- 식량난 재발 방지를 위해, 토지황폐화를 막아야 하며 이를 위해 인간 행위를 달리 해야 함.
- 바람직한 인간의 행위 - 노동력과 에너지를 보다 덜 투입, 산지를 보전하거나 농지를 산지로 환원
- '토지황폐화'를 막거나 '토지의 질'을 향상시키는 '인간의 행위'를 이 모형에서 잘못 선정한 것은 아닌가? 노동력과 에너지를 '덜' 투입? 산지를 보전? - 어떤 스토리로? - 인간의 행위를 토양의 착취를 초래하는 것으로만 이해한 것은 아닌가?
- 토지를 비옥하게 하는 적극적인 행위(석회비료, 유기질비료, 화학비료 증투, 농업생산 기반의 정비와 확충, 산림녹화)가 더 필요한 것은 아닌가? - 인간 행위에서

‘step1: 투입의 변화’를 수정할 필요성 제기

- 농업분배구조는 현재 형태가 타당. 바뀌었다고 알려져 있지만 현재 수준에서 바꿀 수 있는 것이 별로 없음

◎ 시나리오 설계

- 북한의 토지황폐화와 식량문제의 (농업경제학적)원인을 파악하여 그 원인들의 특성을 파악하고, ”조정 가능한 것“에 대해서만 시나리오를 정할 필요가 있음, (본인이 생각하는) 북한 식량위기의 원인은 크게 생산부족과 수입부족으로 나뉘고, 생산부족은 경지면적의 부족(높은 산지), 자본의 부족(농자재, 농업기반시설, 산림생태, 생산기술 등), 동기유발의 부족(집단적인 생산체제)이 있음. 이 중 경지면적 부족과 동기유발의 부족은 극복할 수 없는 문제일 듯. 대부분 자본의 부족의 문제일텐데 이를 통해 접근할 필요가 있음

□ (사) 굿네이처 조충희 연구소장

◎ 북한 협동농장의 구조 : 현재도 북한의 협동농장의 상태를 잘 반영하고 있으나, 3개로 유형화하는 것도 좋은 생각임

- 별방지대(황해도, 평안도 해안지역) 논 80%, 밭 20%, 산은 많아야 5% 수준임. 면적이 더 넓음
- 중간지대 : 현재 설정한 수준 정도
- 산간지대(개마고원 등) : 논이 거의 없음(10-15%), 개마고원 등,
- 규모는 평지일수록 더 큼, 일예로 평안남도 산지 군(양덕, 신계)는 한 군이 연간 1만톤 생산하지만, 평지 지역은 연간 10만톤 수준, 5개 정도지만 한 협동농장이 1만톤 생산하는 곳도 있다.

◎ 모형의 구성요소 설계

- 토양의 질 측면에서 산성-염기성/화학비료의 주요 구성성분(질소, 요소, 인)/미생물의 도입이 필요하다.
- 현금분배의 특성 주목, 현금분배를 국정가격으로 하는데, 이것은 현대 협동농장에서 문제(시장가격 킬로당 4000원, 국정가격 46원, 약 100배 차이)
- 작목을 설정할 경우 수확량의 질적 측면을 주목할 필요가 있음. 질적으로 쌀 1kg=옥수수 2kg=감자 10kg라 볼수 있음
- 환금성 작물을 설정하는 것이 어떨까? 무역을 살릴 수 있다면 이 또한 나쁘지 않을 듯
- 밀식재배, 2모작은 토질을 몹시 악화시킴.
- ”토지를 버린다“라는 표현은 ”토지를 더 이상 농업으로 쓸수 없다“라는 표현으로 바꾸면 문제가 없을 듯. 실제로 모형의 결과처럼 1990년대 초반 급격하게 쓸수 없는 토지가 늘었음(이에 대한 대비책으로 북한에서는 1990년대 후반, 대규모 토지정리사업과 임업을 이용한 농업을 진행했다)

◎ 시나리오 설계

- "협동농장의 발전적 유지"라는 측면에 주목했으면. 중국이나 동구는 협동농장을 해체했을 때 소득이 올라갔지만, 토지가 좁고 상대적으로 도시로 나가고자 하는 젊은 사람들이 유출되면, 개인농이 효율적일지는 다시 생각해 봐야(테스트 해봤으면)
- 협동농장 크기 주목(우리 식으로는 "적정 스케일") : 현재는 1개 리, 10개 자연취락이 하나의 협동농장인데, 통제가 잘 되지 않기 때문에 1개 자연취락("작업반")을 협동농장으로 축소해야 상호간의 경쟁심과 책임감이 많이 생김
- 수매가 문제, 국정가격을 시장가격으로 현실화했을 때 문제가 어떻게 해결되는지 확인할 필요가 있음
- 주곡 중심의 농업을 상품중심으로 바꾸고 이를 수출을 통해 팔아 곡물로 바꾸는 모형도 필요(무역 전제 필요). 개가 경쟁력 있고, 어느 지역은 고구마를 통해 경쟁력을 구할 수 있다. (그러나 상품 작물의 경우 교통로가 핵심적이지 않을까?)
- 축산업을 농업에 반영해서 지속가능성을 높이는 방안(가축분뇨를 유기질 비료로 활용), 남한의 1인당 사육두수에 맞추면 좋을 듯.

□ 한국환경정책·평가연구원 명수정 선임연구위원

◎ 북한 협동농장의 구조

- 협동농장을 여러 가지로 유형화할라하면 얼마든지 할 수 있다. 그러나 하나로 요약하는 경우에도 특별히 문제는 없는 것 같다

◎ 모형의 구성요소 설계

- 토양의 물리적 성질과 화학적 성질을 독립적으로 놓는 것에 대해서 다시 생각해 봐야 한다. 용어를 바꾸던지 아니면 이들의 관계를 재정립해 보던지 하는 것이 필요할 듯 하다

◎ 시나리오 설계

- "북한이 통제 가능한 부분"에 대해서만 다루는 것이 좋다. 외부 식량지원, 기후변화 같은 것은 반영하기 어렵다.
- 기후변화의 경우, "기후재해"정도만 반영하면 좋겠다. 이 모형에서 구체적인 기후모형을 반영하면 너무 복잡해진다.
- 유기농법은 보건문제와 관련해서 복잡할 가능성이 높다
- Agroforestry 도입 시나리오 반영 필요

평화번영의 국토공간정책 수립을 위한 공간의사결정시스템 -가상의 북한 협동농장 모형을 사례로-

1. 연구배경과 목적, 방법

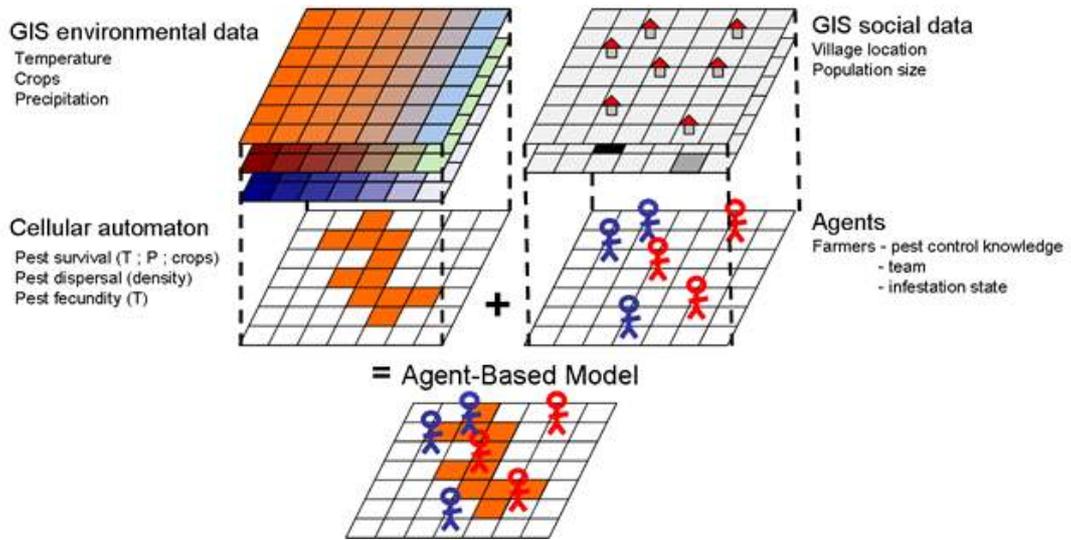
◎ 문제인식

- 북한의 토지황폐화 문제는 1990년대 북한 대기근의 근본 원인 중 하나로써, 한반도의 자연환경이 가지는 회복탄력성을 초과하여 벌어진 대표적인 사건이자 문제임
- 조선 후기 대기근과의 공통점(고립된 국제환경, 산림황폐화, 기후변화 등)에서 확인할 수 있듯, 북한뿐만 아니라 과거 한반도의 역사에서 유사한 사례가 있었으며, 앞으로 한반도의 자연·인문환경이 임계점을 초월할 경우 언제든 재현될 수 있음
- 그러나 토지황폐화 문제와 이로 인한 식량문제에 대한 접근은 사회경제적인 측면과 자연환경적인 측면이 복잡하게 얽혀 있는 문제로 예측의 어려움이 있음

◎ 연구목적 : 북한의 토지황폐화와 식량문제를 모의하는 모형을 개발함으로써, 1990년대 식량위기와 같은 문제를 사전 예방하는 “의사결정시스템 개발”

◎ 연구방법

- 전통적인 공간의사결정 시스템은 수식 또는 통계를 이용하여 예측하는 방법론이었으나, 현실의 복잡성을 고려하지 않고, 통계자료가 반영하지 못하는 의외성과 창발적(emergent) 현상을 설명하지 못함
- 다행위자시스템(Multi-Agent System) 또는 행위자기반모형(Agent-Based Model)은 현실을 (인간)행위자(Agent)와 환경으로 정의하고 행위자 간의, 행위자와 환경 간의, 이들과 외부 요소와의 상호작용을 구현하는 모형으로, 이를 통해 현실의 복잡성을 구현하고, 특히 창발적 변화를 모의할 수 있는 강점이 있음



<<다행위자시스템의 모식도>>

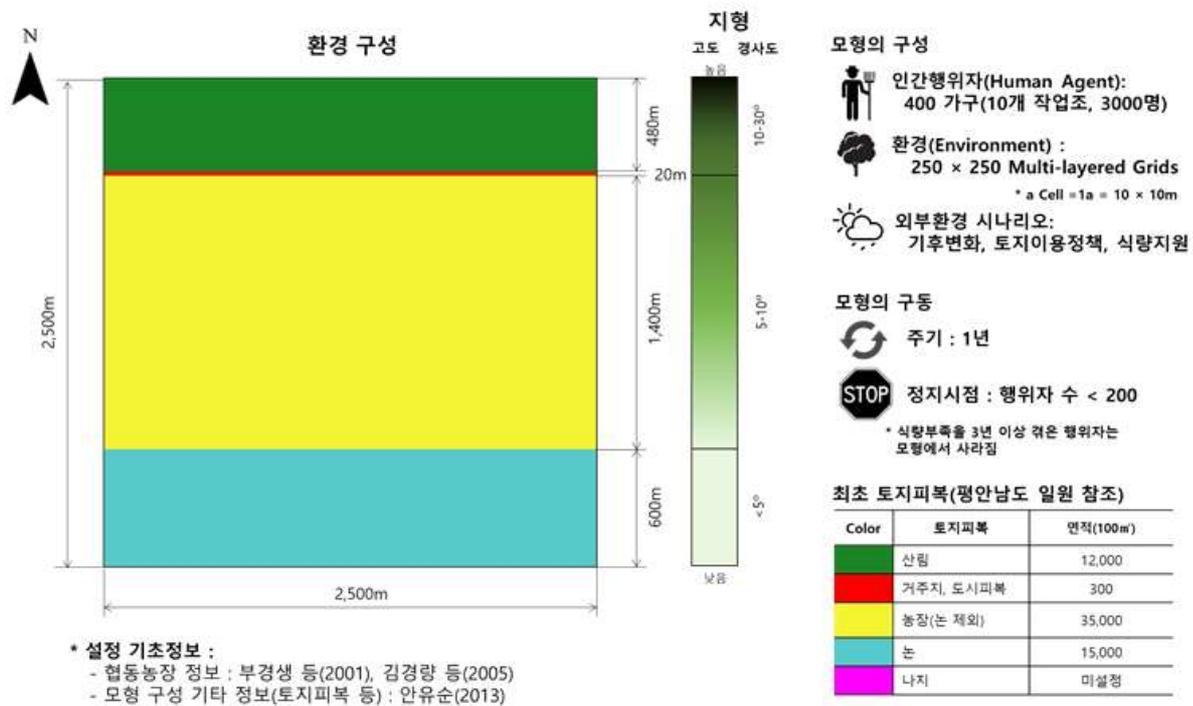
* 출처 : Rebaudo et al., (2011)

2. “가상의 북한 협동농장” 개념모형

◎ “가상의 북한 협동농장”이란?

- 북한은 1960년을 전후로 모든 농토를 협동농장으로 전환하였기 때문에, 협동농장은 북한의 농업환경과 농업경관을 대표하는 기본 단위로서 의미가 있음
- 북한의 식량문제와 토지황폐화를 포함한 주원인과 연관된 북한의 농업환경 특성을 하나 또는 다수의 “가상의 북한 협동농장”에 요약하여 표현한다면, 북한의 식량문제와 토지황폐화의 원인을 파악하고, 미래를 예측할 수 있는 모형으로 발전시킬 수 있음
 - * 현재 연구는 북한을 하나의 협동농장으로 요약하였으나, 환경조건(기후, 지형, 사회경제조건)에 따라 2개 이상으로 유형화하여 복수의 “가상의 북한 협동농장”의 개발 필요성에 대해서 고민하고 있음

◎ 현재까지의 “가상의 북한 협동농장”의 개념모형



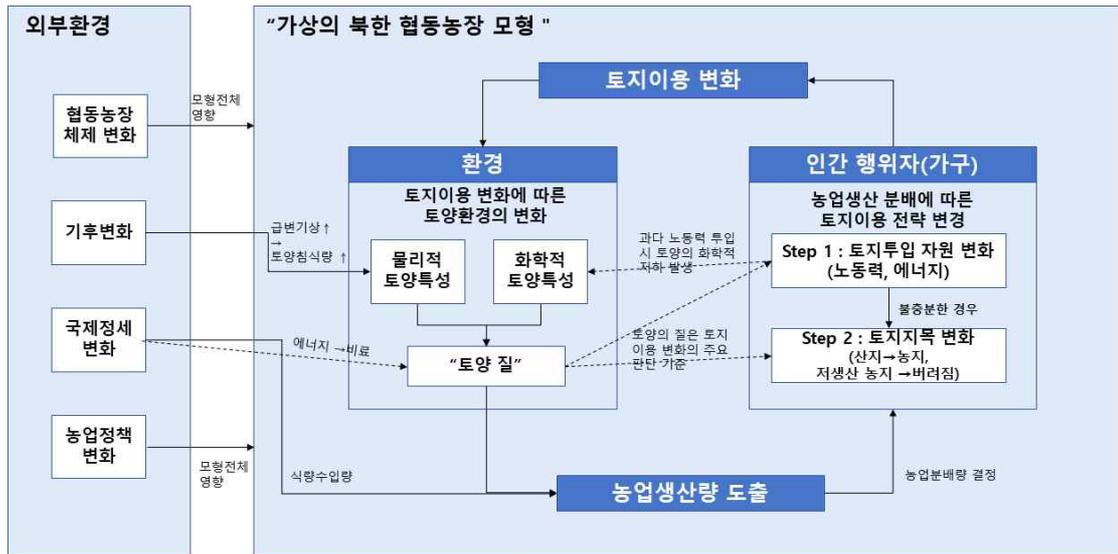
<<“가상의 북한 협동농장 모형” 개념모형>>

- 부경생 등(2001), 김경량 등(2005), 남성욱(2016) 과 같은 문헌에서 소개한 북한 협동농장의 속성과 농업 일반 요약
- 규모 : 625ha(한 면의 크기가 2.5km인 정방형 크기), 400가구
- 토지피복 : 농업(논:밭=30:70), 거주지(최소화하여 임의 표현, 모형 자체에 큰 의미가 없음), 산림(농지의 24%수준, “산지개간”을 표현하기 위해 충분한 규모로 임의 반영)
- 지형 : 북쪽이 높고 남쪽이 낮은 형태로, 토지이용에 따라 임의 구성

3. 모형설계 및 구축

3.1 모형 전체 구축

◎ 거시적 설계 : 개념모형을 바탕으로 가상의 협동농장에서의 행동과 사건 모사



<<“가상의 북한 협동농장 모형” 설계>>

- 환류(feedback)의 구조 : 인간 행위자의 행동으로 토지이용이 변화하고, 이로 인해 토양환경이 변화하며, 이는 다시 농업생산량의 도출로 인간 행위자에게 영향을 미치는 형태
- 모형이 한 번 환류할 때마다 1년의 시간이 경과함
- 모형의 결과는 (1인당) 식량생산량, 토양의 질, 인구 등으로 도출됨
- 구체적으로는 아래 그림 및 설명과 같이 설계되어 있음

◎ 환경 : 토지이용 변화에 따른 토양환경의 변화를 모사

- 물리적 토양특성 : 토양의 침식량에 대한 지표로, 토지이용과 지형, 기후에 의해 주로 결정됨(위성영상자료와 알려져 있는 모형을 사용)
- 화학적 토양특성 : 토양영양성분에 대한 지표.(실제 측정이 불가능하기 때문에) 토양 이용 강도가 높으면 토양의 화학적 잠재력은 높아지고, 낮으면 토양의 화학적 잠재력은 떨어진다고 가정
- “토양 질” : 물리적 토양특성 + 화학적 토양특성

◎ 인간 행위자(각 가구) : 농업생산량의 가구당 분배에 따라 토지이용 전략을 변경(총 2단계)

- Step 1 : 토지투입 자원 변화, 토지에 투입하는 노동력 등을 효율화하는 전략 수립
- Step 2 : 토지이용의 변화, 산지개간을 수행하고, 비효율적인 토지는 버려짐

◎ 각 요인간의 관계와 외부환경

- 환경 → 인간 행위자 : 토지이용과 “토양 질”을 바탕으로 도출된 농업생산량과

배분모형에 따라 행동에 영향을 줌

- 인간 행위자 → 환경 : 토지이용의 변화를 통해 영향을 줌
- 외부환경 : 모형의 전체적인 구조의 변화 또는 각 요인에 직접 영향을 줌

* 세부내용 “별지 2. 가상의 북한 협동농장 모형 인간행위자(가구) 의사결정 부속모형 설계 및 구축” 참조

◎ 농업환경변화 시나리오(외부환경) : 현재 개발 중점 사항으로 아래와 같음

- 크게 네 가지로 구성 : 협동농장 체제의 변화(해체, 개혁 등), 기후변화, 대외관계의 변화(식량, 에너지 수입), 농업정책의 변화(경사지이용제한, 작물선택-옥수수,감자 등)

3.2 환경모형 구축

◎ 토양 질 지표

- 물리적 토양 질 지표 : USLE 모형 활용(Wischmeier and Smith, 1978), 지형 및 기후 반영, 결과에 따라 0.5점 만점의 지표로 변환(아래 표 참조)

$A = R \times K \times LS \times C \times P$
<p>A : 연간 토양 유실량(USLE)</p> <p>R : 강수에 의한 침식인자</p> <p>K : 토양에 의한 침식인자</p> <p>LS : 지형인자(L : 침식사면길이, S : 침식사면의 경사각)</p> <p>C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자</p> <p>P : 경지개간 형태에 의한 침식조절인자</p>

USLE 결과 (이민부 등, 2003)	100 이하 (침식이 거의 없음)	100-500 (침식이 일부 발생)	500-1000 (침식이 상당히 발생)	1000이상 (침식이 매우 많이 발생)
물리적 토양 질 지표 (0~0.5, 높을수록 침식이 덜 일어남)	0.5	0.45	0.4	0.35

- 화학적 토양 질 지표 : “노동력/에너지 투입을 늘려 토양잠재력보다 많은 식량생산을 하면 토질이 떨어진다”라는 전제에 바탕을 둠

$$F_{yield} > F_{yield-potential}, \text{ 라면, } Sc_1 = Sc_0 - \alpha \frac{F_{yield}}{F_{yield-potential}}$$

그렇지 않으면 $Sc_1 = Sc_0$

SC₁ : 금년의 화학적 토양 질 지표
 SC₀ : 전년의 화학적 토양 질 지표
 F_{yield} : 금년의 식량생산량
 F_{yield-potential} : 금년의 토지의 식량생산 잠재력
 α : 상수(1 부여)

- 토양 질 지표(만점 1.0점) : 물리적 토양 질 지표+화학적 토양 질 지표

◎ 모형 내 환경 내 각 토지의 농업생산잠재력(F_{yield-potential})

- 알려져 있는 “북한의 단위면적당 식량생산 예측모형” 모형의 각 환경의 지형, 기후, 환경조건에 따른 식량생산 예측량을 “농업생산잠재력”이라 계산
- 식생지수를 통한 예측모형(홍석영 등, 2009; 홍석영 등, 2015)이 가장 잘 알려져 있으며, 이를 이용하여 정규화식생지수-단위면적당 식량생산량 모형을 계산하여 적용하였음(아래 표 참조)

작물	공식	R ²
쌀 생산잠재력	$F_{yield-potential} = 1137.209NDVI - 601.416$.449
밭작물 생산잠재력	$F_{yield-potential} = 0.66NDVI + 0.641$.555

- 현재 식생지수 뿐 아니라 기후지표, 인문사회지표 등을 결합한 예측모형으로 발전시키기 위해 추가 분석 진행 중

◎ 모형 내 각 토지의 농업생산량(F_{yield})

- 기존 “북한 단위면적당 식량생산 예측모형”은 미시적인 차원의 노동력 투입, 에너지 자원 투입 등이 반영되지 못하였음을 고려하여, 이를 고려한 농업생산량 공식 도출
- 농업생산량 공식

$$F_{yield} = \alpha F_{yield-potential} \times \beta SQ_i \times \gamma L_i$$

F_{yield} : 토지의 식량생산 추정치
 F_{yield-potential} : 토지의 식량생산 잠재력
 SQ_i : 토지의 토양 질 지수(최대치 1)
 L_i : 노동력/에너지 투입 지수(최대치 1, 토지이용 변화와 연관)
 α, β, γ: 상수(현재 모두 1 부여)

3.3 의사결정모형 구축

□ 농업생산량 분배구조 : 남성욱(2016), 김영훈 등(2001)을 따름

◎ 협동농장 차원의 분배 구조 : 약 60%정도를 국가와 협동농장에게 돌아가고, 약 40% 이내가 개인에게 분배됨

분배서열 높음←		협동농장분			→ 낮음
국가 수매분(생산량의 20%)	생산시설 이용료, 관개사용료, 농기계 작업료 등 (수확량의 30-40%)	공동기금 문화, 후생시설 유지비 (순수입의 20-30%→수확량 의 8-15%)	생산물 분배분 (기본)	생산물 분배분 (초과소득)	
	생산비	공동기금	분배총량	우대기금	
총수입					
우대기금 생성 범위(90%)					
할당량(100%)					
* 생산량 미달시 생산물 분배분을 공제					

◎ 각 개인별 분배구조 : 생산물 분배분에, 초과 이득금을 연간 노동량을 기반으로 분배
- 작업반우대제하 기본분배(1960~)

$W_i = D_i \times T_p / \sum D_f$	
W_i : i 가구 분배몫 T_p : 분배총량(총수입-생산비-공동기금-우대기금) D_i : i 가구 노동일수 $\sum D_f$: 농장 총노동일수	

- 기본분배절차

순서	절차	계산식
1	기본분배기금(Fp)	$F_p = \text{분배총량}$
2	협동농장의 1노동일당 분배몫(D)	$D = F_p / N$
3	분조의 분배몫(B)	$B = D \times N_b$ (분조의 재평가된 총노동일수)
4	분조의 1노동일당 분배몫(Db)	$D_b = B / N'$ (분조의 재평가하지 않는 총노동일수)
5	개별농장원 기본분배몫	$S = D_b \times M$

- 보충분배

- (작업반 우대몫/작업반 획득 총노동일)*가구의 총노동일
- 90%를 초과한 작업반에게만 부과되며, 미달된 경우 5-10%를 공제
* 공제의 경우 분조관리제(1996)이후 미적용

- 각 가구별 분배몫

$O_i = (P + Y) \times M \times \alpha$	
O_i : i 가구 총분배몫 P : 기본분배기금/재평가된 농장총 노동일수($F_p / \sum N_b$) Y : 작업반우대기금/재평가된 작업반 총 노동일수 M : 개인별 연간 총 노동일수 α : (분조계획투하노동일수/분조실제노동일수) × 계획수	

□ 의사결정 구조 : 분배량에 따른 압박도에 따라 토지이용 변경, 가정에 기반을 둠

◎ 식량압박도 : 1 이하면 연간 요구량 이상 식량 충족, 1 이상이면 연간 요구량 이하의 식량 충족

$$AF_{pressure} = \frac{Pop \times Fl}{AF_{yield} + AF_{aid}}$$

RAF_{pressure} : 행위자의 식량압박 예상
 AF_{yield} : 행위자 거주 토지의 식량의 총량
 AF_{aid} : 행위자에게 주어지는 외부 수입(지원)식량의 총량
 Pop : 행위자의 인구
 Fl: 1인당 연간 식량 최소 요구량(김연철(1997)의 UN이 정한 1인당 하루 최소 식량 권장량인 450g에 1년을 곱한 값임)

◎ 노동력 변경 : 토양 질에 따라서 투입 노동량을 변경

* 토양 질 지표의 만점은 1임, 에너지 또한 마찬가지로 메커니즘으로 반영 계획

- 전제 : 보통의 노동력 투입이면 노동력 지표는 1, 0.2(±0.05의 임의성 반영)단위로 부여/회수되며, 최대 2(보통의 2배)까지 투입 가능
- 노동력 회수 : 토양 질 지표가 0.5이하이면 토지 포기, 0.7이하이면, 노동력 0.05삭감
- 현 상태 유지 : 토양 질 지표가 0.7~0.9인 경우
- 노동력 추가 : 토양 질 지표가 0.9-1인 경우, 노동력지수 0.2(±0.05의 임의성 반영) 단위 부여
- 회수된 노동력을 모두 추가하지 못했을 경우 “잉여노동력”으로 남음

행동구분	기준	행동방식	비고
노동력 회수	$SQ_i < 0.5 \pm 0.05$ $F_{yield-potential} \leq 0$	노동력지수 전체 삭감(토지 포기)	
	$0.5 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.6 \pm 0.05$	노동력지수 0.2±0.05 삭감	노동력 0.05미만시 삭감 중지
	$0.6 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.7 \pm 0.05$	노동력지수 0.1±0.05 삭감	노동력 0.05미만시 삭감 중지
아무 행동 안함	$0.7 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.9 \pm 0.05$	-	-
노동력 추가 부여	$0.9 \pm 0.05 \leq SQ_i$	노동력지수 0.2±0.05 추가부여	노동력 2 이상시 부여 중지

* 주 : SQ_i - 토양 질 지표 F_{yield-potential} - 식량 생산 잠재력

◎ 토지이용의 변경 : 식량압박도 1 이상인 경우에만, 그 중에서도 잉여노동력이 남을 경우에만 작동

- 토양 질 지표가 0.5 이상인 산지를 선택하여 농지로 변경, 잉여노동력 투입(행위제한 없는 경우)

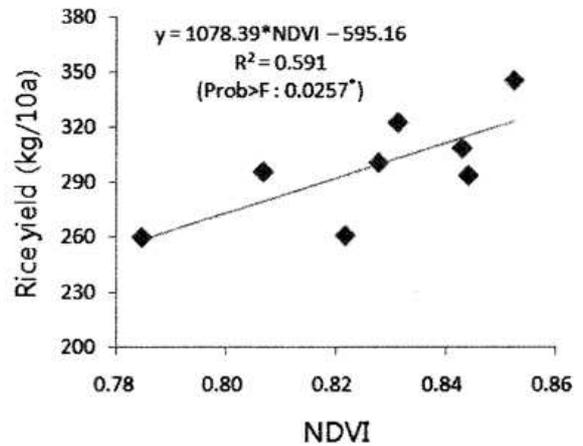
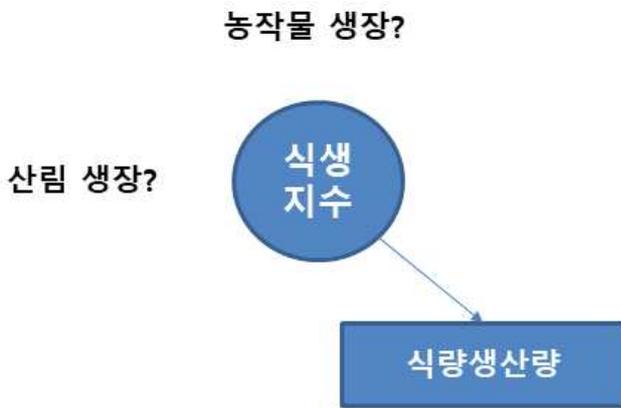
- 식량압박도와 상관 없이, 노동력이 0가 된 토지는 나지로 변경

◎ 행위자의 “가상의 북한 협동농장 모형” 탈출 : 식량압박도 3 이상(기초생활보장량의 1/3 이하)이 3년동안 이어지는 경우, 행위자 삭제하도록 설정(“탈출”을 의미)

3.4 각 요소들의 보완

◎ 식량생산량 추정모형 보완

- 기존 방식 : 정규화식생지수를 통한 식량생산 추정
 - 단순하고 직관적인 방법으로 북한 식량생산 추정에 많이 활용되어 오고 대체로 설명력이 높으나, 정규화식생지수 자체의 문제(뜻하는 바가 애매함, 뭉뚱그려짐) 및 통계적 타당성의 문제가 있음
 - 사례 : 홍석영 등(2009:2015, 오른쪽 그림), 안유순(2013)



<<기존 식량생산량 추정 방식에 대한 모식도>>

- 보완 : 시차와 다중환경요소 변환
 - 환경요인이 식량생산량의 변화에 영향을 끼치는 시차 반영 : 약 5년 정도의 차이 발생
 - “변수의 비 구체성 보완 : 식생지수를 “건강성”을 나타내는 지수(NDVI-Max)와 “변동성”을 나타내는 지수로 분해(NDVI-CV)
 - 토양의 물리적 침식(USLE-CV), 에너지사용량 등 식량생산에 영향을 미치는 다른 지표도 반영

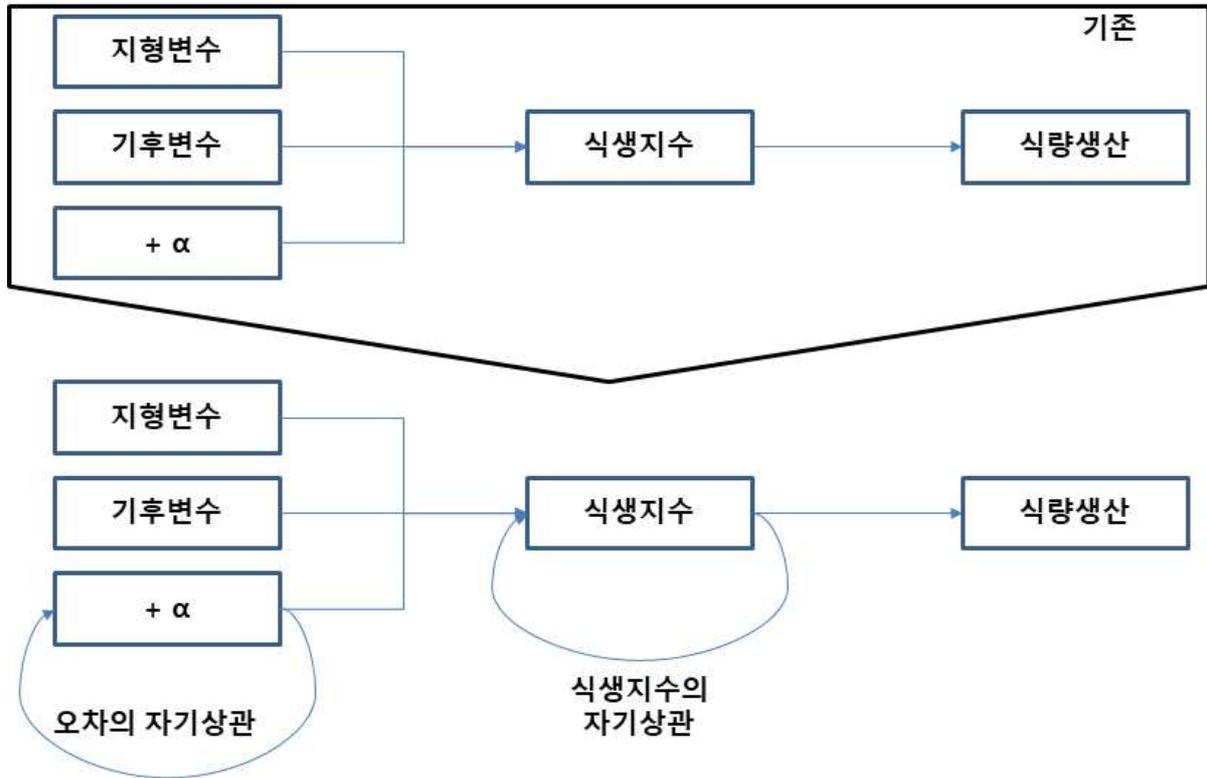
종속변수	R제곱	보정된 R제곱	Durbin-Watson
단위면적당 곡물생산량(kg/ha)	0.6487***	0.5876***	1.5324*
독립변수(시차)	비표준화계수	유의확률	VIF
상수항	3585.9	0.35789	-
식생의 변동성(5년전 자료) NDVI-CV(-5)	-48610.7	0.02644 *	1.133
식생의 건강성(현재자료) NDVI-MAX(0)	10665.0	0.00220 **	1.699
토양침식량의 변동성(5년전 자료) USLE-CV(-5)	-1668.5	0.00473 **	1.551
에너지사용 대표변수(3년전 자료) 전기에너지사용량(-3)	3605.9	0.01782 *	1.246

유의확률 : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1

<<보완된 식량생산량 추정 모형>>

◎ 환경자료 간 관계식 보완

- 기존 방식 : 식생지수와 환경자료(기후, 지형자료)와의 관계식, 설명력이 낮다는 한계가 있으며, 공간특성 미반영 문제
- 변경 방식 : 공간적 자기상관성 반영, 공간시차(Spatial lag)와 공간오차(Spatial Error)모형을 통해 OLS 회귀모형의 공간적 자기상관성 미반영을 개선할 수 있음



<<환경자료간 관계식의 보완 모식도>>

구분	모형 적합성			공간효과		Moran's I	
	(유사)R 제곱	Log Likelihood	AIC	$\rho(\text{rho})$	λ (lambda)	종속변수	잔차
OLS	0.3768** *	2520.1	-5028.2			0.4929***	0.2833** *
Lag	0.5059	2734.77	-5455.5	0.5996***			0.011
Error	0.5077	2738.27	-5462.5		0.6665**		-0.009
회귀계수							
구분	상수	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)		
OLS	0.742114***	-0.00034	1.70E-05***	7.19E-05***	0.045778***		
Lag	0.25755***	0.002533***	7.19E-06	4.26E-05***	0.02767***		
Error	0.75091***	0.001336	2.62E-06	8.13E-05***	0.022217***		

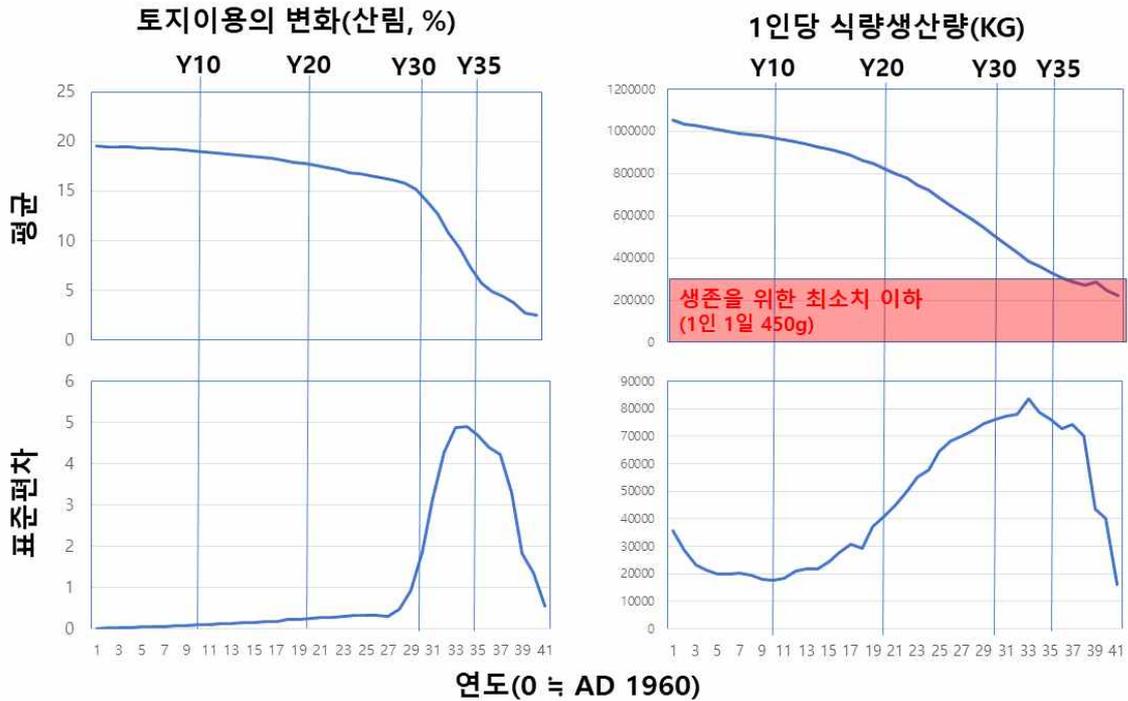
<<환경자료간 공간적 자기상관성 반영 모형 사례>>

3.5 시나리오 설계

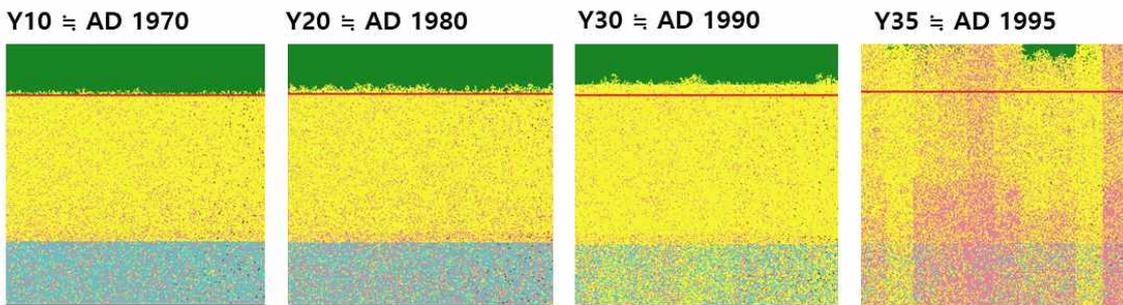
대분류	세부 시나리오	내용
협동농장 체제의 변화	협동농장의 해체	- 협동농장 체제 → 개인농 형태로 해체 - 1980년대 이후 동구권 및 중국 모형
	협동농장의 발전적 유지	- 협동농장의 장점 유지하되(대형, 공장식), 자본주의적 요소 적극 도입 - 인센티브의 확대 및 현실화 - 작업조를 개인농 수준으로 분화, 책임감 및 주인의식 증대
	협동농장 현상 유지	- 사회주의적 체제의 협동농장 유지 - 현재보다 다소 개선된 형태의 인센티브 및 분조 관리제
기후 변화	지구 온난화	- 지구 기온 상승은 상대적으로 고위도인 북한의 농업생산성을 높일 수 있음 - 일부 지역은 강우량이 증가하여, 농업생산성에 긍정적인 영향 가능
	극한기후의 증가	- 극한기후는 1990년대 북한 식량위기의 주원인 중 하나 - 극한기후는 앞으로 더욱 증가할 것으로 예상
대외관계의 변화	식량수입의 변화	- 북한은 연 100만톤 이상의 곡물 수입 의존 - 곡물 수입이 되지 않는 경우 “자력갱생”이 사실상 어려움 - 식량수입이 늘어나면, 북한 농업의 제약도 해소될 수 있음
	에너지수급의 변화	- 북한의 식량위기는 1980년대 후반 에너지수급 문제로 비료 및 농기구 연료 사용이 어려웠던 것에서 비롯된 것으로 추정 - 북한의 협동농장 체제는 “고에너지”구조 : 대형 농기계, 수리 시설, 화학비료 의존 - 에너지수급이 늘어날 수 있다면 토양의 질적인 문제와 노동력 문제 해결 가능
농업정책의 변화	토양침식을 고려한 작물 선택	- 북한의 식량위기 잠재 요인으로 1990년 이전 토양침식에 취약한 옥수수 위주의 작물 선택 전략이 많이 제기됨 - 감자가 이후 대안으로 제시되었지만, 확실하게 대체되었는지는 미지수
	적정기술의 도입	- 에너지 절약 구조로 변화 : 농기구, 수리시설의 저에너지화 - 재생에너지의 도입 확대
	경사지 제한정책의 강화	- 당초 15도 이상의 경사지 제한정책은 여러 가지 이유로 북한의 산지개간에 반영되지 못하였음 - 보다 더 엄격한 또는 현실적인 경사지 제한정책 수립 필요

4. 현재까지의 연구결과

(a) 모형 내 지표의 변화 사례



(b) 토지이용의 변화 사례



<<“가상의 북한 협동농장 모형” 시험모의 결과 요약>>

◎ 모형의 구동

- 시험구동 단계로써 초기시점을 협동농장제도가 완비된 1960년으로 설정하였으며, 시나리오는 1960~1990년대의 평균 형태로 설계하였음
- 모의 종료 시점은 따로 설정하지 않았지만, 인구가 절반 이상 감소하면 모형이 정지되도록 설계
- 총 100회 모의하여 이 전체 경향성에 대해서 요약, 결과 도출

◎ 결과와 해석(아래 그림)

- 대체로 모형 시작 시점에서 35년이 지난 후에 “가상의 협동농장”이 급격하게 붕괴되는 결과가 도출되었으며, 이는 실제 시점에서 1995년에 해당
- 첫 20년간(1960~1980)은 토지이용에 큰 변화가 없으나, 20-30년 후(1980~1990)

모든 면에서 변화가 빈번해지며, 토지이용에서는 산림지 개간이 일반화되고, 30년 이후부터(1990~)는 버려지는 땅의 면적이 지속적으로 증가하며, 산지가 사라짐
→ 아직 모형에는 보완할 부분이 많지만, 이 결과는 1990년대 북한의 식량위기를 모사할 수 있다는 가능성을 보여준 결과

참고문헌

- 김경량·이광석·홍성규, 2005, “북한 농업의 개혁-전망과 과제”, 한울아카데미
- 김연철, 1997, “북한의 배급제 위기와 시장개혁 전망”, 삼성경제연구소
- 김영훈·전형진·문순철, 2001, “북한 집단농장의 분배제도에 관한 연구”, 한국농촌경제연구원.
- 남성욱, 2016, “현대 북한의 식량난과 협동농장 개혁(개정판)”, 한울아카데미
- 부경생·김성필·김운근·김종환·김채수·류인수·박규택·박근용·박석홍·손해룡·유병일·이근상·이실관·임상철·최장경, 2001, “북한의 농업 : 실상과 발전방향”, 서울대학교출판부
- 이민부·김남신·강철성·신근하·최한성·한옥, 2003, “북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정”, 한국지역지리학회지, 9(3), 373-384
- Park et al., 2001, Identification of the Spatial Distribution of Soils using a Process-based Terrain Characterization, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Rebaudo, F., Crespo-Perez, V., Silvain, J., and Dangles, O., 2011, Agent-Based Modeling of Human-Induced Spread of Invasive Species in Agricultural Landscapes: Insights from the Potato Moth in Ecuador, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(3), 7
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978, *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook NO.537
- Wilensky, U. 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL). Northwestern University, Evanston. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>