

결과보고서 요약

사업기관	국토문제연구소		
사업명	통일시대 국토공간의 통합적 진단을 위한 의사결정지원시스템 구축		
사업책임자	성명	소속	직위
	김대현	사회과학대학 지리학과	부교수
사업기간	2019.4.1.~2020.2.28	사업비	

1. 사업 목적

- 한반도 및 통일국토에 대한 통일국토 공간데이터베이스 고도화
- 통일국토 지속가능성 연구 네트워크 유지·확장 지향
- 통일시대 국토공간구조의 선제적인 정책대안을 수립하기 위한 공간의사결정지원시스템 구축

2. 사업 내용

- 통일국토 공간데이터베이스 고도화
 - 위성영상(AVHRR, MODIS, Rapideye)에 대한 구득, 기초분석
 - 북한 취약공간(Hotspot) 분석 및 사전예방신호(Early-Warning Signal) 분석
- 통일국토 지속가능성 연구 네트워크 유지·확장
 - 제 4차 서울대-연변대 “통일국토” 공동 심포지움 개최
 - 그 외 “통일국토 지속가능성” 연구 기관 중심 통일국토 연구 네트워크 확장
- 통일국토 의사결정시스템 모형 구축

3. 사업 성과

- 정량적 성과 : 논문 투고 예정 2편, 북챕터 1편, 국제학술대회 발표 2편
- 네트워크 구축 : 서울대-연변대 공동 학술대회

국토문제연구소

1. 사업 배경

□ 개요

- 사업명: 통일시대 국토공간의 통합적 진단을 위한 의사결정지원시스템 구축
- 기관명: 국토문제연구소

□ 추진 배경 및 목적

○ 추진배경

- 북한과 한반도의 국토공간을 이해하고, 지속가능한 통일국토를 위한 정책수립을 위해서는 북한의 토지황폐화(Land Degradation) 문제와 이로 인한 1990년대 중반 식량·경제 위기에 대한 이해가 선행되어야 할 필요가 있음
- 통일국토의 지속가능성에 대한 연구를 위해서는 학제 간 통합 연구가 필수적이며, 현 학제 중심적인 연구를 통합하여 통일국토 정책의사결정에 활용할 수 있는 기반 구축이 필요
- 통일국토의 지속가능성을 위한 통합적 연구의 틀을 마련하고, 선제적인 정책대안을 수립하기 위하여 공간의사결정시스템(Spatial Decision Supporting System; SDSS)을 구축할 필요가 있음

○ 목적

- 공간의사결정지원 시스템 구축을 위해 한반도 및 통일국토에 대한 통일국토 공간데이터베이스 고도화를 목적으로 함
 - 통일국토에 대한 학제간 통합 접근방향 도출을 위하여 통일국토 지속가능성 연구 네트워크 유지·확장을 지향하고자 함
 - 데이터베이스 및 연구 네트워크를 바탕으로 통일시대 국토공간구조의 선제적인 정책대안을 수립하기 위한 공간의사결정지원시스템을 구축하는 것을 목적으로 함
- 최신 SDSS 기법인 다행위자시스템을 북한지역 공간구조의 시공간적 변화에 적용함으로써 바람직한 통일국토공간 건설을 위한 합리적인 정책대안을 수립하는 것이 목표임

2. 사업 내용

□ 사업 추진 내용

- (추진전략 1)통일국토 공간데이터베이스 고도화
 - 저해상도 위성영상(AVHRR, MODIS)에 대한 구독, 기초분석
 - 고해상도 위성영상(RapidEye)영상에 대한 구독, 기초분석
 - 북한 취약공간(Hotspot) 분석 및 사전예방신호(Early-Warning Signal) 분석
 - 구체적인 추진 내용 및 결과 [별첨 1] 참조(p.11)
- (추진전략 2)통일국토 지속가능성 연구 네트워크 유지·확장
 - 제 4차 서울대-연변대 “통일국토” 공동 심포지움 개최
 - 그 외 “통일국토 지속가능성” 연구 기관 중심 통일국토 연구 네트워크 확장
- (추진전략 3)통일국토 의사결정시스템 모형 구축
 - 모형 고도화 및 시나리오 개발
 - 향후 발전계획 도출
 - 구체적인 추진 내용 및 결과 [별첨 2] 참조(p.31)

□ 일정별 추진 사항

일 정	추진 내용
2019. 4 ~ 6	통일국토 공간데이터베이스 검토 및 보완
2019. 6 ~ 7	통일국토 의사결정시스템 모형 보완 및 국제학술대회 발표 준비('19. 7. 17 - 20)
2019. 8 ~ 10	통일국토 공간데이터베이스(저해상도 위성영상) 기초분석 및 Early-Warning Signal 확인
2019. 11	서울대-연변대 “통일국토” 공동 심포지움
2019. 11 ~ 2020.1	통일국토 공간데이터베이스(저해상도 위성영상) 기초분석 및 Hotspot 확인
2020. 2	통일국토 공간데이터베이스(고해상도 위성영상) 분석 및 Hotspot 검증

3. 사업 성과

□ 사업 성과

○ 연구성과

- 학술대회 발표 : 2건

An, Y., 2019, A Complexity Approach to North Korea Famine in the 1990s: By Using Agent-Based Model, the 5th International Conference on Computational Social Science (5th IC2S2), July 17-20, 2019, University of Amsterdam, The Netherlands

An, Y. and Park. S., 2019, An Assessment on Socio-ecological Health of Soil of Korean Peninsula by Multi-Agent System for Land-use and Cover Change(MAS-LUCC), 2019 Future Earth East Asia International Symposium

- 수상 : 1건, 제 29회 과학기술우수논문상 수상

- 수상논문 : 박수진·안유순·김추홍·심우진·이승진, 2018, “북한 토양정보 예측정보의 개발:북한 토양정보의 중요성과 토양형 추정,” 대한지리학회지, 53(5), 649-668

- 2018년 사업의 성과와 연관되어 있음

- 저서 : 1건(북챗터, 2020. 4월 발간 예정)

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

- 본 사업 내용 중 일부를 2020년 중 KCI 또는 SCI급 학술논문 2~3편으로 제출할 예정임

- 주제 1 : 위성영상자료를 이용한 북한 토지황폐화의 Hotspot과 Early-Warning Signal 추출 (관련내용 ‘별첨 1’ 참조, p.11)
- 주제 2 : 다행위자시스템을 이용한 북한 토지황폐화-식량문제 모의모형 도출 (관련내용 ‘별첨 2’ 참조, p.31)

○ 네트워크 구축

- 제 4차 서울대-연변대 “통일국토” 공동 심포지움 개최

- 일시/장소 : ‘19. 11. 13(수) 13:00-18:30/아시아연구소 영원홀
- 주제 : 한반도의 사회생태적 건강성과 지속가능성

* 2019 Future Earth East Asia International Symposium “Social-Ecological Health in Asia” 의 일환으로 주최

- * 위 사업의 일환으로 진행되어 관련 자원·인력에 대한 소요가 적었고, 이에 따라 전년과 달리 제 4차 심포지움에는 직접 참여, 예산 지원에 참여하지 않고, 구성원 참여(차지현 연구원 지원) 및 발표에 집중하였음
- 세부내용 첨부 프로그램 참조

□ 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

5. 자체평가 및 건의사항

□ 사업평가

- 사업의 적절성
 - 금년 사업에서는 데이터베이스 구축 및 활용, 특히 위성영상 데이터베이스 활용한 연구를 다수 진행하여, 앞으로 이를 바탕으로 의사결정시스템을 보완할 수 있는 많은 결과를 도출하고 논문성과 또한 기대되나, 보완할 여지가 다소 있으며, 이에 따라 가시적인 성과가 아직 나타나지 않았음
 - 연구 네트워크 사업은 전년 대비 발전하였지만, 참여기관이 증가함에 따라 본 연구소의 비중이 낮아져, 차후 연구에는 네트워크 사업에 대한 집중도를 낮출 필요가 있음
- 사업의 효율성
 - 지난 사업 대비 금년 사업에는 논문화할 수 있는 다양한 연구내용이 도출될 수 있었음
 - 도출된 연구내용을 논문화할 수 있는 방안을 고려할 필요가 있음
- 사업의 영향력
 - 본 사업을 통해 향후 북한과의 직접 교류의 허브 역할을 수행할 수 있는 연변대학교와의 교류를 지속·확장할 수 있었음
 - 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

○ 연구소의 역량 및 현실 여건의 변화 고려한 선택과 집중 필요

- 전년도 사업에서, 본 사업의 강점인 인문·자연 통합 통일국토 네트워크의 틀은 유지하되, 내부 연구사업은 자연환경을 중심으로 선택·집중한다고 했던 목표는 일정 부분 달성함
- 연구 네트워크 구축 활동은 타 기관의 역량을 적극적으로 활용하고, 이를 본 사업의 연구발전에 적극적으로 활용할 필요가 있음

○ 결과물을 논문 또는 출판물로 발전시킬 필요가 있음 : 2020년중 적극 추진 계획

□ 향후 계획

○ 본 사업은 2020년에는 의사결정시스템의 “활용”에 중점을 두어 “평화번영의 국토공간정책 수립을 위한 공간의사결정시스템 활용”이라는 제목으로 연구를 이어갈 계획임

○ 한반도의 시·공간적 취약성에 대한 이해 증진(Step 1)

- 한반도 시·공간자료에 대한 정리
- 한반도 시·공간자료에 대한 취약성 평가·사전예방신호 분석·인과관계 분석

○ 환경변화 시나리오 개발(Step 2-1)

- 거시적 시나리오 : 전문가 자문(콜로키움 등)
- 미시적 시나리오 : 비전문가(일반인) 대상 브레인스토밍

○ 의사결정시스템 보완·시험(Step 2-2)

- 시나리오 구축 연관하여 모형 수정

○ 국토공간정책 대안 수립(Step 3)

□ 건의사항

○ 북한 데이터베이스에 대한 공유체계의 마련 필요

- 모든 북한 연구 기관들은 북한의 자료에 대한 부족을 겪고 있음
- 본 사업에 참여하고 있는 기관들이 활용 가능한 데이터베이스 공유 체계의 구축과 필요 데이터 공동 구매를 진행한다면 더 발전적인 북한 연구가 가능할 것으로 기대됨
- 예산 지급 및 집행 구조를 법인회계가 아닌 교내 연구과제 형태로 변경
 - 본 연구 사업 또는 연구 기반 구축 사업으로 주로 진행되는 만큼 교내 연구과제 형태로 운영하는 것이 타당
 - 현 학교 법인회계 시스템보다는 연구비 관리 체계로 편입하여 운영하는 것이 효율적일 것으로 예상됨
- 2020년 통일기반구축사업 인건비 및 사업비 집행 제약 해소 필요
 - 2020년 이후 통일기반구축사업의 사업비에서 인건비가 30% 이하로 제한되어, 우수한 인력을 고용·활용하기 어려워졌으며, 대학원생을 사업에 참여시켜 “학문후속세대를 양성”하겠다는 사업목적을 달성하기 어려워짐
 - 여타 연구사업과 마찬가지로 적어도 70%는 (학생)인건비로 보장할 필요가 있음
 - 또한 위성영상 구매와 같은 데이터구축 또한 북한 연구 뿐 아니라 연구 네트워크 구축에 핵심적인 부분이므로, 이 부분을 사업비의 집행에서 제외하지 말아야 할 필요가 있음

6. 성과 관련 지표

대표 사업 실적

- 북챗터(2020. 4월 발간 예정) 또는 이를 기반으로 나올 모형에 대한 논문

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

성과 자율 지표

- 사사 표기(예정) 논문 : 0편(2편 예정)
- 학술대회 발표 : 2편

통일국토의 지속가능성 평가를 위한 정규화식생지수 자료의 효용성과 활용가능성 모색 -취약지 검출과 고해상도 자료와의 비교검토, 사전예방신호 탐색을 중심으로-1)

1. 서론

북한은 1990년대 중반 일명 “고난의 행군”이라고 하는 식량위기를 겪었으며, 약 25~70만 명 많게는 300만명에 이르는 사람이 식량위기로 인한 기근으로 목숨을 잃었을 것으로 추정된다(Natsios, 1999; 이석, 2004b). 이러한 극도한 식량위기가 초래된 원인으로 1980년대 후반 소비에트권의 붕괴와 같은 대외 요인과 1990년대 중반의 홍수와 가뭄 등의 자연재해 등이 제기되지만, 보다 더 근본적으로는 다락밭 개간, 주체농법 등의 잘못된 정책으로 인한 토지생산성의 악화, 즉 토지황폐화(Land Degradation)이 원인으로 제기된다(안유순, 2013).

하지만 이 시기 북한의 식량위기의 실태를 확인할 수 있는 통계정보는 정확하지 않다. 그림 1은 북한의 식량생산량에 대한 각 기관 별 통계를 정리한 자료로, 각 기관별로 편차가 상당한 것을 확인할 수 있다. 많은 연구에서는 이러한 통계수치별 자료의 상이함에 주목하여, 북한의 식량통계의 상당 부분은 신뢰도가 낮으며 특히 1980년대의 통계자료의 신뢰도가 낮다고 주장한다(김연철, 1997; 이석, 2004a). 따라서 북한의 식량문제에 관한 분석을 진행할 경우 통계자료에만 의존하는 것에는 한계가 있으며, 투명성이 낮은 북한의 상황을 고려하여 다양한 간접자료를 통해 이를 보완할 필요가 있다.

이러한 문제를 극복하고자, 인공위성 영상을 이용해서 북한의 농업과 임업에서의 산출량을 확인해 보고자 하는 시도가 있었다. 홍석영 등(2009)의 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation)를 이용한 북한 식량생산량의 추정공식은 농업 분야의 대표적인 사례이다. 임학적 대한 접근은 북한의 산림지황폐화 면적을 연구하는 연구에 집중되었는데, 황순욱(1997), 이승호 등(1998), 김상욱(2002), 이성구(2003), 김도형(2006), 홍석영 등(2008), 유재심(2010) 등 다양한 연구자들에 의해서 이루어져 왔다.

하지만 인공위성 영상을 이용한 연구들은 과거에 대한 자료만을 이용한 분석에 불과하며, 앞으로의 환경 변화에 따라 북한의 식량 생산량 또는 산림지황폐화의 변화의 미래양상이 어떻게 변화할지에 대해서는 접근하지 못하고 있는 실정이다. 이 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 접근법으로 하림 등(2007)의 연구를 주목하였다. 하림 등(2007)은 위성영상을 통해 추출한 정규화식생지수와 기상자료를 이용하여, 앞으로의 기후변화에 따라 남한 지역의 식생지수가 어떠한 변화를 보일 수 있을지에 대한 연구를 진행하였다. 이 방법을 활용하여, 북한 지역에서

1) 본 내용은 본 사업의 연구결과의 학술논문 Draft를 일부 수정한 것으로, 진전되는 경우 2~3개의 주제로 분할하여 논문으로 출판할 수 있을 것으로 기대된다. 본 사업의 “추진전략 2”의 결과 내용기술의 필요에 따라 첨부하였으며, 이후 이를 바탕으로 도출된 연구 성과의 내용은 다소 달라질 수 있다.

정규화식생지수를 예측하는 모형을 개발한다면, 기존의 연구를 결합하여 북한의 농업과 임업 산출량을 예측할 수 있는 모형으로 발전시켜 나갈 수 있을 것으로 보인다.

이 연구는 이에 대한 기초적인 접근으로서 북한의 농업·임업 산출량 예측을 위한 정규화식생지수의 활용 방안을 도출하고자 한다. 이를 통해 통계자료와 위성영상 자체만으로는 알기 어려운 북한의 미래 농업·임업 산출량을 예측할 수 있는 모형을 개발하고자 한다.

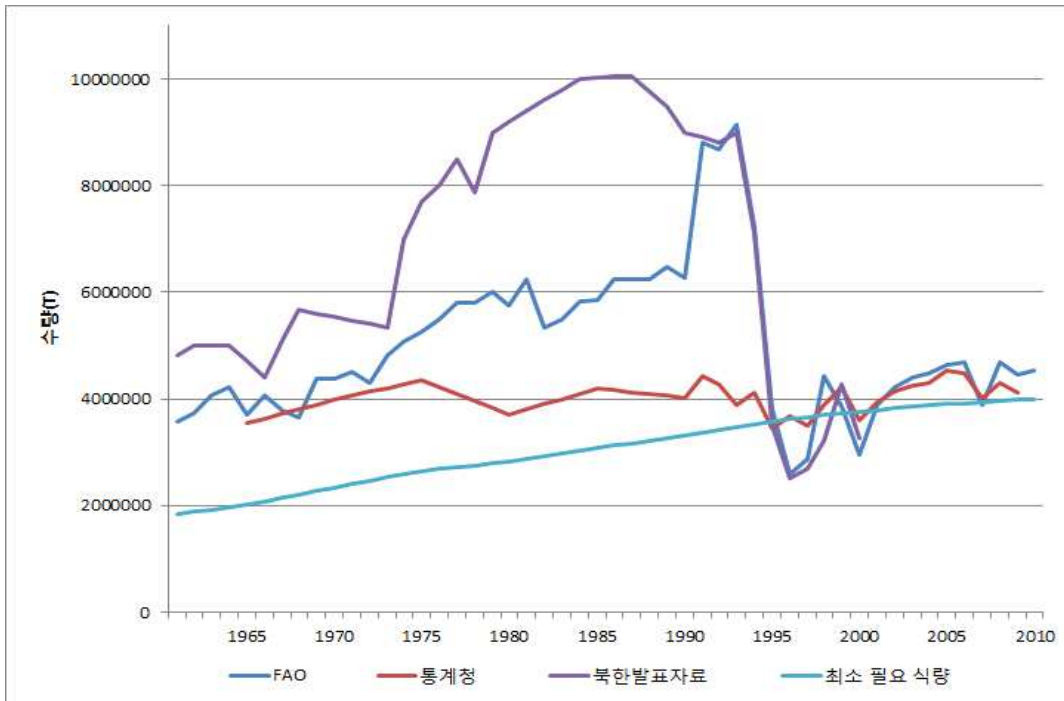


그림 1. 각 기관 별 북한 식량생산량 통계

* 출처

- 1) FAO : FAOSTAT(<http://faostat.fao.org>)
- 2) 통계청 : 통계청 북한통계(<http://kosis.kr/bukhan/>)
- 3) 북한발표자료 : Lee and Shim(2004), 이석(2004a)에서 재인용
- 4) 이 그림의 모든 내용은 안유순(2013)에서 재인용

* 주 : 최소 필요 식량은 김연철(1997)의 UN이 정한 1인당 하루 최소 식량 권장량인 450g에 북한 인구로 곱하여 연 단위로 환산한 값임

2. 이론적 배경 및 연구자료

2.1 정규화식생지수

1) 이론적 배경

위성영상을 이용해 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성 등을 확인하기 위한 식생지수들은 20여 종 이상이 개발되어 있으며, 위성영상을 이용해 식물의 분포와 활동성을 볼 수 있는 원리는 식물이 적색광(Red) 파장대에서 낮은 값을 보이고 근적외 파장대에서 높은 값을 보이는 성질 때문이다. 그 이유는 식물의 울타리 조직 내의 엽록소는 적색광을 흡수하고, 식물의 갯숨 조직은 근적외 파장을 반사시키기 때문에 적색광 파장의 값은 낮게, 근적외 파장의 값은 높게 나오는 것이다. 위성은 반사되는 파장을 수신하는 것으로 흡수보다는 반사가 된 파장대의 값을 더 많이 수신할 수 있기 때문에 일반적으로 식물의 활력도가 높을수록 적색광 값과 근적외 값은 차이가 많이 난다(Jensen, 2004).

정규화식생지수(NDVI)는 이러한 적색광과 근적외선 값의 차이를 -1과 1사이의 지수로서 환산한 지수이며, 1974년 Rouse 등에 의해 개발되었다(Jensen, 2005). 정규화식생지수는 위성영상에서의 근적외선과 적색광의 차이를 분자로, 합을 분모로 하여 계산되며 이는 식 1과 같다. 정규화식생지수가 1에 가까울수록 식물의 양과 활력도는 높으며, 정규화식생지수가 -1에 가까워질수록 식생의 분포가 없거나 활력도가 낮다.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (\text{식 1})$$

NDVI : 정규화식생지수

NIR : 근적외선

red : 적색광

정규화식생지수는 개발된 이래 다양한 다분광 위성영상에 적용되어 식생의 분포와 식생의 건강함, 활력도를 나타내는 연구에 적용되어 왔다.

북한 농업 분야에서 정규화식생지수를 활용한 사례는 많지 않은 편이다. 그 중 홍석영 등(2009;2015)의 정규화식생지수를 이용한 벼농사 수량 추정 연구가 알려져 있으며, 이를 기반으로 안유순(2013)이 응용하여 밭작물의 생산량까지 추정하는 연구를 진행하였다.

2) 북한연구 적용사례 1 - 북한 농업생산량 예측

홍석영 등(2009)은 북한에 대한 정규화식생지수와 연간 식량생산 통계자료를 이용하여 북한의 단위면적당 쌀 생산량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 사용한 영상은 미국 항공우주국(NASA)에서 제공하는 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)²⁾ 위성영상이다. 이를 이용하여 벼농사 지점으로써 확실하다고 할 수 있는 서해안 평야지 4지점을 대상으로 연구 지역을 선정하여 정규화식생지수 값을 추출하였다. 정규화식생지수 값 중 연중 가장 높은 여름철의 값이 식생의 건강도를 나타내는 대푯값이라고 판단하여, 여름철의 최대치

2) 미국 NASA의 EOS(Earth Observing System) 위성체(Terra위성과 Aqua위성)에서 촬영한 중해상도(Moderate-resolution, 250~1km의 공간해상도), 다분광(36개 Band) 영상, 공간해상도는 종래에 많이 사용하던 Landsat TM(30m)에 비해 떨어지나, 시간해상도(하루에 1회 이상 촬영 가능)가 높은 편이기 때문에 식생분석 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있음. 위성이 1999~2000년에 발사되어 그 이후의 영상이 이용 가능.

를 이용하였다. 또한 FAO와 통계청의 자료를 활용하여 북한의 쌀 생산량을 도출하였다. 이를 바탕으로 정규화식생지수와 단위면적당 쌀 생산량간의 관계식을 회귀분석을 활용하여 도출하였다. 그 결과는 그림 2와 같다.

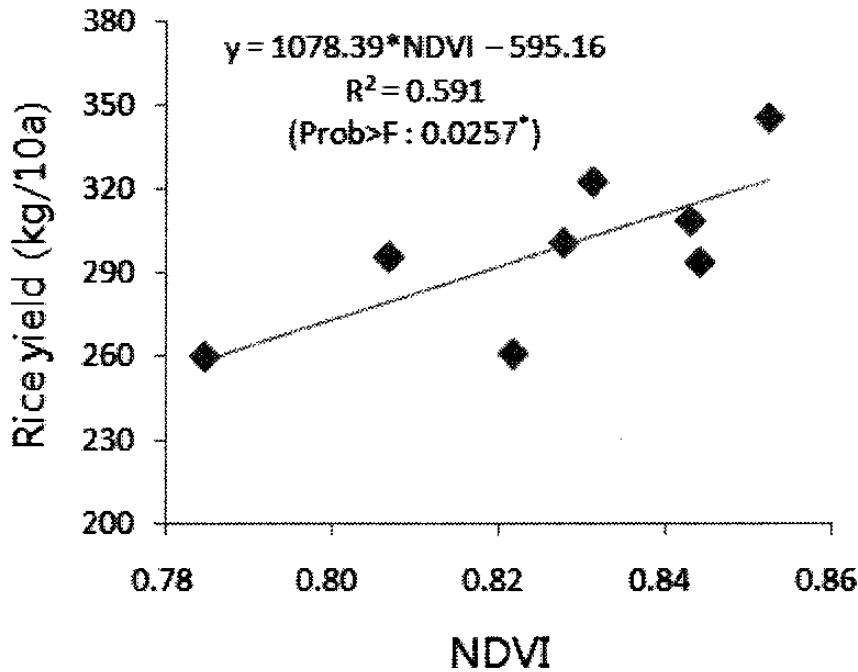
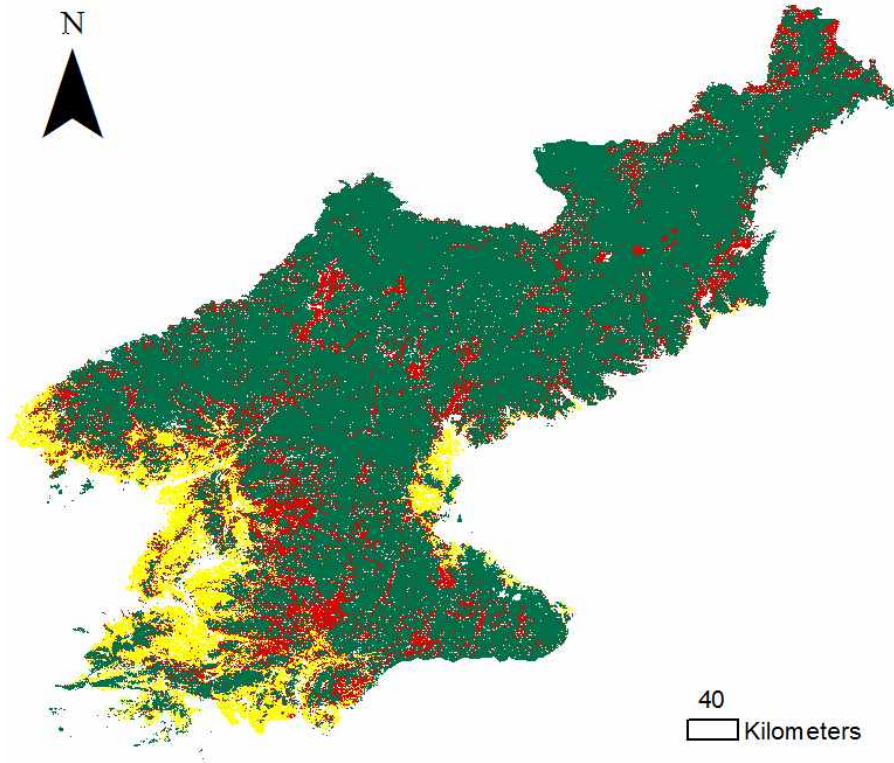


그림 2. NDVI를 이용한 식량생산량 추정모형(홍석영 등, 2009)

이 연구는 쌀 이외의 다른 작물의 생산량을 설명하지는 못하는 한계가 있으며, 회귀분석을 사용하여 연구를 진행하기에는 표본 수(8개)가 너무 적다는 통계적인 한계도 지닌다. 하지만 이러한 한계에도 불구하고 이 모형은 NDVI를 이용한 단위면적당 식량생산량을 쉽게 예측할 수 있다는 점에서 자료의 부족으로 식량생산량 자료를 공간적으로 추정해 내기 어려운 북한 지역에서는 간단하고 유용한 방법이다.

안유순(2013)은 홍석영 등(2009)의 방법을 응용하여, 논과 밭의 토지생산량을 추정하는 모형을 개발하였다. 이를 위해서는 논과 밭, 농지가 아닌(산지) 지역을 구별해 내야 했다. 농지 자체는 환경부의 대분류 토지피복도를 통해서 분류해 낼 수 있었는데, 대분류 토지피복도에는 논과 밭까지 구별되지는 않는다. 이를 위해 부경생(2001)의 북한의 벼 재배의 환경조건을 고려하여 농지 중 경사도 5° 이내, 고도 100m 이하, 30년(1980~2010) 연평균기온이 10℃ 이상이 되는 지역은 논으로, 이에 해당하지 않는 토지는 밭으로 분류하였다(그림 3).



	논	경사도 5°이내, 고도 100m 이하, 평균기온 약 10°C 이상 (부경생 등, 2001)
	밭	논이 아닌 농업 토지이용으로 구분된 지역
	기타(산림)	위 구분에 해당하지 않는 지역

그림 3. NDVI 회귀식 구축을 위한 토지이용 분류(안유순, 2013)

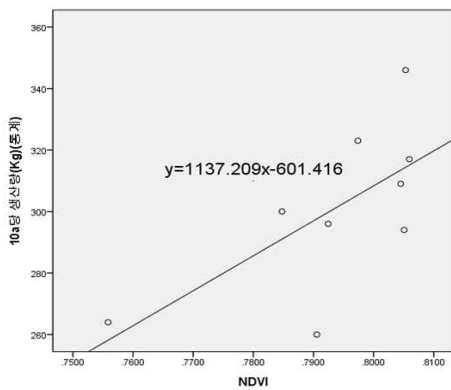


그림 4. NDVI를 이용한 벼농사 지역 식량생산량 추정모형(안유순, 2013)

* 주 : 종속변수는 NDVI(eMODIS), 독립변수는 통계청 북한통계의 단보(10a)당 쌀 생산량(2000~2008)이며, 모형의 R제곱은 0.449, 유의수준은 0.048(95%신뢰수준 만족)

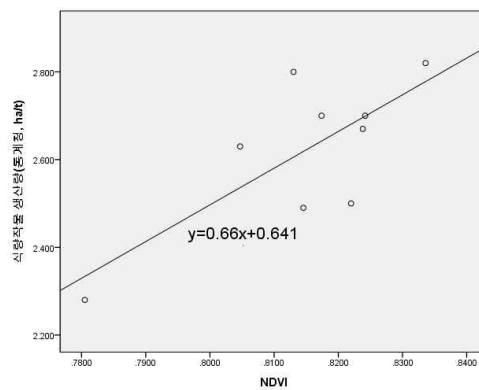


그림 5. NDVI를 이용한 밭농사 지역 식량생산량 추정모형(안유순, 2013)

* 주 : 종속변수는 NDVI(eMODIS), 독립변수는 통계청 북한통계의 정보(1ha)당 쌀 생산량(2000~2008) 모형의 R제곱은 0.555, 유의수준은 0.021(95%신뢰수준 만족)

안유순(2013)은 이 결과가 대체로 홍석영 등(2009)과 유사하고 모형의 설명력이 높으며 유의수준을 만족하기 때문에 활용에 문제가 없을 것으로 예상하였으며, 북한 지역의 단위면적당 식량생산량을 정규화식생지수로 예측하는데 활용하였다.

이후 홍석영 등(2015)는 정규화식생지수와 강우자료를 이용하여 논벼의 생산량을 예측하려는 연구를 진행하였다. 사용한 자료는 홍석영 등(2009)와 거의 유사하며 그 연도만 2002~2014년도로 바꾸어 분석하였으며, 강우자료는 기상청 국가기후데이터센터에서 제공하는 북한의 27개 자료를 활용하였다. 그 결과 도출된 정규화식생지수, 강우-식량생산량 모형은 그림 6과 같이 도출되었다. 그 결과 모형의 설명력도 홍석영(2009)보다 나쁘고, 유의수준도 만족하지 못하는 부정적인 결과로서 도출되었다. 하지만 저자 등이 남한에서 진행한 연구(홍석영 등, 2012)로 미루어 보았을 때 자료가 개선이 된다면 충분히 유의미한 결과로 도출될 수 있다고 판단하였다.

$$\text{Rice yield (Ton/ha)} = -0.4293 + 5.1577 \times \text{NDVI}_{\max} - 0.003131 \times \text{Rainfall}_{\text{SEI}}$$

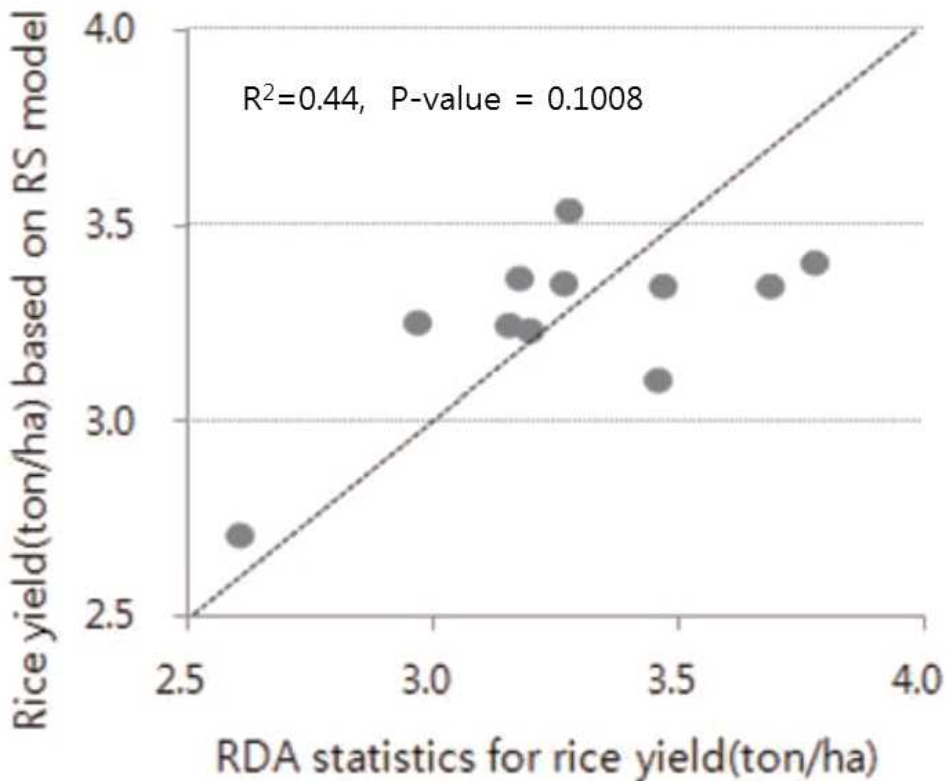


그림 6. 홍석영 등(2015)의 단위면적당 식량생산량 추정모형

3) 북한연구 적용사례 2 - 북한 산림분석

북한의 산림이나 임학과 관련하여 정규화식생지수를 적용한 연구는 많지 않다. 염종민 등(2008)은 SPOT/Vegetation NDVI영상을 활용하여 북한의 산림을 포함한 식생의 변화를 기술한 연구, 차수영 등(2008)과 같이 특정 지역의 식생의 분포 변화에 대해서 추정하는 연구 등 식생변화에 대한 기술(Description)에 그치는 연구가 다수다.

정규화식생지수에 대한 북한 산림 분야의 응용 측면에서, 산림지황폐화의 경향을 추정할 수

있는 침식예측모형(RUSLE)에 활용할 수 있는 Van der Knijff et al., (1999;2000)에 대한 연구가 적용해 볼 만 하다고 생각된다. 지리학 분야에서는 침식모형 중 하나인 RUSLE모형을 이용하여 북한의 산림지황폐화에 따른 토양침식량을 추정하는 연구가 있었다(이민부 등, 2003; 이민부 등, 2006; 이민부 등, 2008). RUSLE는 토양침식량을 추정하기 위해 널리 사용되는 경험모형으로, 가장 널리 사용되는 Wischmeier and Smith(1978)의 공식은 아래와 같다

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{식 2})$$

- A : 연간 토양 유실량
- R : 강수에 의한 침식인자
- K : 토양에 의한 침식인자
- LS : 지형인자(L : 침식사면길이, S : 침식사면의 경사각)
- C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자
- P : 경지개간 형태에 의한 침식조절인자

이 중 다른 인자들은 여러 가지 직간접 자료에 의해서 계산할 수 있지만, 문제는 방문할 수 없는 지역의 식생과 지표피복의 인자(C,P인자) 어떻게 구득하고 반영하여 토양침식량을 추정하느냐 하는 문제이다. 이와 관련하여, 앞서 설명한 이민부 등(2003;2006;2008)의 연구와 다른 광범위한 지역을 대상으로 한 연구에서는 토지 피복으로 이를 대신해서 연구를 진행하여 왔다. 이에 따르면 같은 토지피복을 가진 토지의 토양침식량은 거의 유사하게 도출되고, 이는 황폐화를 겪은 북한의 산림의 조건에는 맞지 않는 것으로 보인다. Van der Knijff et al., (1999;2000)는 유럽 일원의 광범위한 지역의 RUSLE를 적용하고자 하였을 때 유사한 문제의 식을 가지고 있었고, 정규화식생지수를 통해서 C인자를 계산하는 공식을 개발하였다(식 3). 이를 북한 산림 지역에 토양침식량 추정과 산림지황폐화의 자료로 활용한다면, 유의미한 분석결과를 도출해 낼 수 있을 것으로 예상된다.

$$C = \exp\left(-\alpha \times \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad (\text{식 3})$$

- C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자(C)
- α, β : 경험지수(대개 α 와 β 는 1로 이 연구에서도 1로 적용)

2.2 활용 위성영상자료

1) AVHRR

AVHRR은 “발전된 고해상도 방사측정기(Advanced Very High Resolution Radiometer)”로, 미국 해양대기청(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 발사한 극궤도 환경위성에 달려있는 센서를 말하는 것으로, 1978년 8월부터 발사된 TIROS-N위성, 1982년 이후 발사된 NOAA위성(NOAA-6~19), 에 달려 있다. 이 영상은 토지피복 특성, 주야간 구름의 상태, 눈, 얼음 등 표면온도 등을 구하는데 사용된다. 가장 정밀한 공간해상도가 약 1km정도로 거칠지만, 하루에 두 번까지 촬영이 가능하기 때문에 큰 규모의 자료 수집에 유용하다(이상 Jensen, 2005; Julien and Sobrino, 2009 내용을 정리).

AVHRR 영상은 다양한 형태로 제공되는데, 본 연구에서는 정규화식생지수로 바로 활용이 가능한 GIMMS영상을 활용하였다. 이는 미국 항공우주국(NASA)의 Ecocast³⁾ 서비스에서 제공되는 GIMMS(Global Inventory Monitoring and Modeling System)영상을 사용하였다. 이 영상은 AVHRR자료를 NDVI로 변환한 후, 구름 등의 오류 자료를 제거하기 위해, 15일 간의 자료를 합쳐서(최대값) 구축한 자료로, 해상도는 약 8KM이며, 1981년 7월부터 현재까지 자료가 이용 가능하다(Julien and Sobrino, 2009).

이 연구에서는 한반도 전역에 해당하는 구역의 GIMMS자료를 R “Gimms” 패키지를 사용하여 1981년 7월부터 2015년 12월까지 구득하였으며, 본 자료에서 제공되는 자료 중 QA(품질 관리 자료)를 이용하여 구름 등의 에러가 없는 자료로 변환하였다. 그리고 이를 연 단위 자료(연평균)으로 가공하여, 분석에 활용하였다. 그 결과의 예시는 그림 7과 같으며, 북한지역의 정보를 요약하면 그림 8과 같다. 그림 8을 통해서, 북한의 식량위기가 있던 1990년대 중반에는 NDVI평균이 상대적으로 낮고 변동성이 큰 결과가 도출되었으며, 최근 10년 사이에 NDVI가 급격히 낮아지고, 변동성이 올라가는 것을 확인할 수 있다.

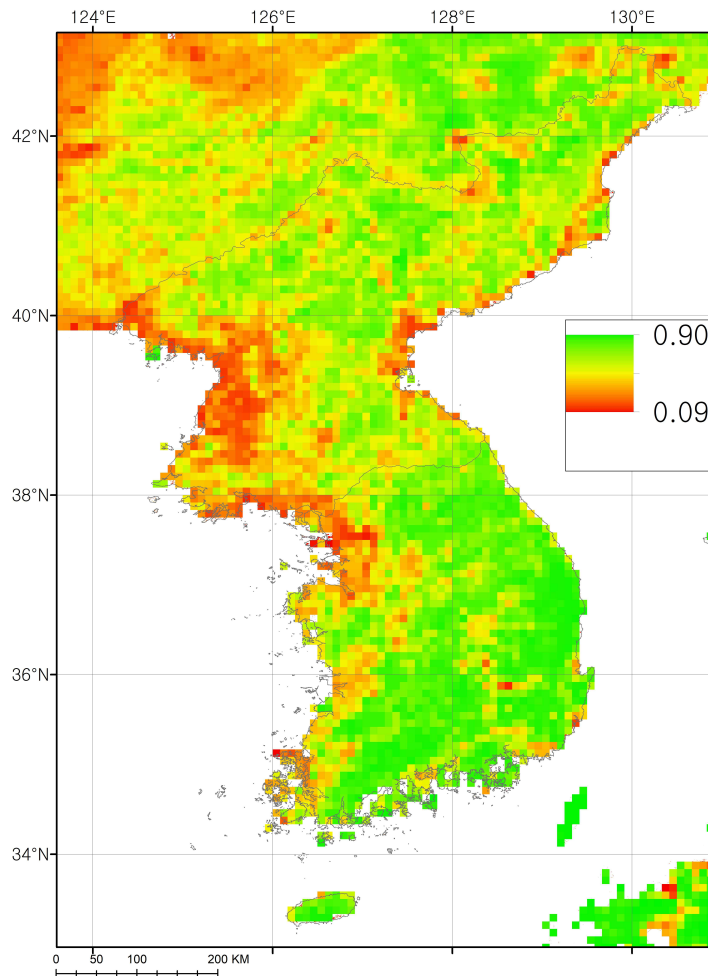


그림 7. AVHRR GIMMS NDVI 2001년 평균 예시

3) <https://ecocast.arc.nasa.gov/>

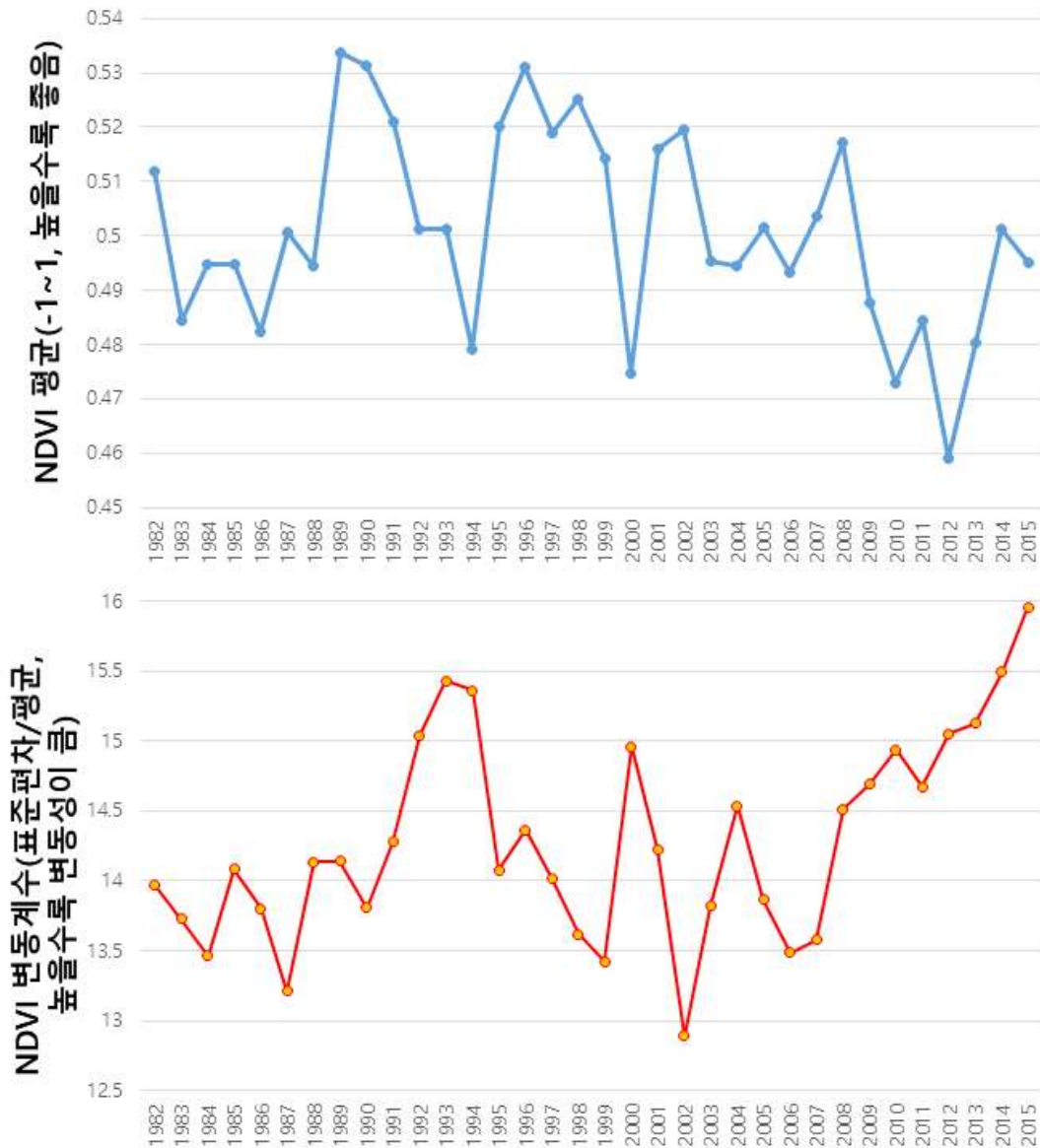


그림 8. AVHRR GIMMS NDVI 북한지역 정보 요약(평균 및 변동계수)

2) MODIS

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)영상은 미국 항공우주국(NASA)의 Terra위성과 Aqua위성에서 촬영된 영상으로, 파장 영역대에 따라 250m, 500m, 1Km의 공간해상도를 가지고 있으며, 하루에 1회 촬영기 가능하고, 36개의 밴드를 가지고 있어 다용도로 활용할 수 있는 다중분광(Hyperspectral)영상이다(Jensen, 2005). Terra의 경우 2000년대 중반부터 이용 가능하며, 식생 뿐 아니라, 기상, 토지이용 정보 등 다양한 분야에서 AVHRR을 대체 또는 상호보완하는 형태로 이용하는 경우가 많다

MODIS의 경우에도 다양한 형태의 자료로 가공되어 제공된다. 이 연구에서는 다양한 영상 중 MODIS를 NDVI로 변환한 영상(MOD13 Series)을 이용하였다. 이 중에서도 16일 간의 자료를 합성하여 에러를 보정한 후 NDVI로 구축한 MOD13Q1 자료를 이용하였으며 이는 250m 해상도를 가진다(Didan et al., 2015). 여러 가지 구득 방법 중 R “MODISstsp” package를 적용하여 구득하였다(Busetto and Ranghetti, 2016). 2000년 7월 자료부터 2015년 12월 자료

까지를 구득하였다. 이 자료 역시 영상에서 제공되는 QA자료를 활용하여, 구름 등에 의해 영향을 받지 않은 “우수”자료만을 활용하였으며, 이를 마찬가지로 연간 자료로 바꾸어 이용하였다. 그 결과의 예시는 그림 9와 같으며, 정보를 요약하면 그림 10과 같다.

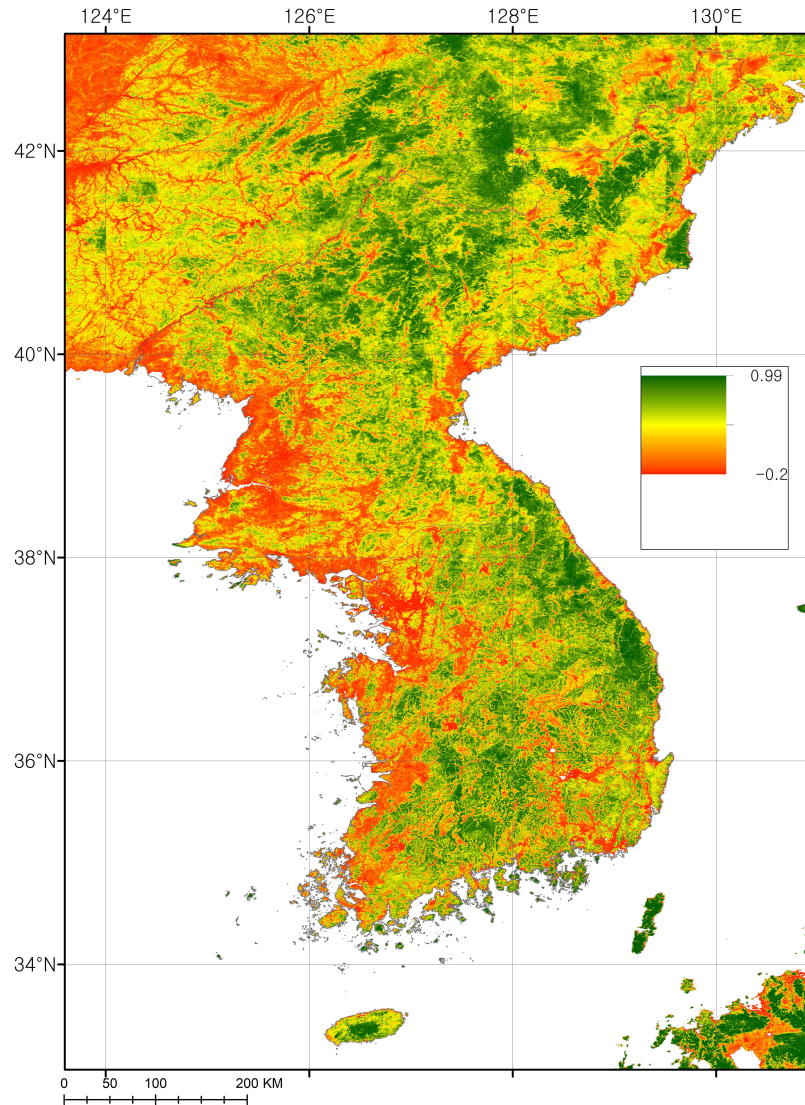


그림 9. MODIS MOD13Q1 NDVI 2001년 평균 예시

MODIS자료와 AVHRR자료를 비교하였을 때, 안타깝게도 두 자료 사이의 상관성이 그리 높지 않았다. 일례로 2001~2015년 자료를 비교하였을 때, 이 둘 사이의 연평균 자료의 상관관계지수는 -0.618 이며(99% 신뢰수준 만족), 이는 두 자료간의 상관성이 오히려 역의 관계임을 말해준다⁴⁾. 이에 대해서는 추후 선행연구 및 심층 분석을 통해 원인을 파악해 볼 필요가 있으며, 이를 통해 AVHRR의 저해상도 문제와, 2000년대 이전 자료의 구득이 불가능한 MODIS자료에 대한 상호보완적 분석을 진행할 계획이다.

4) 변동계수의 상관관계는 유의수준을 충족하지 못하였다.

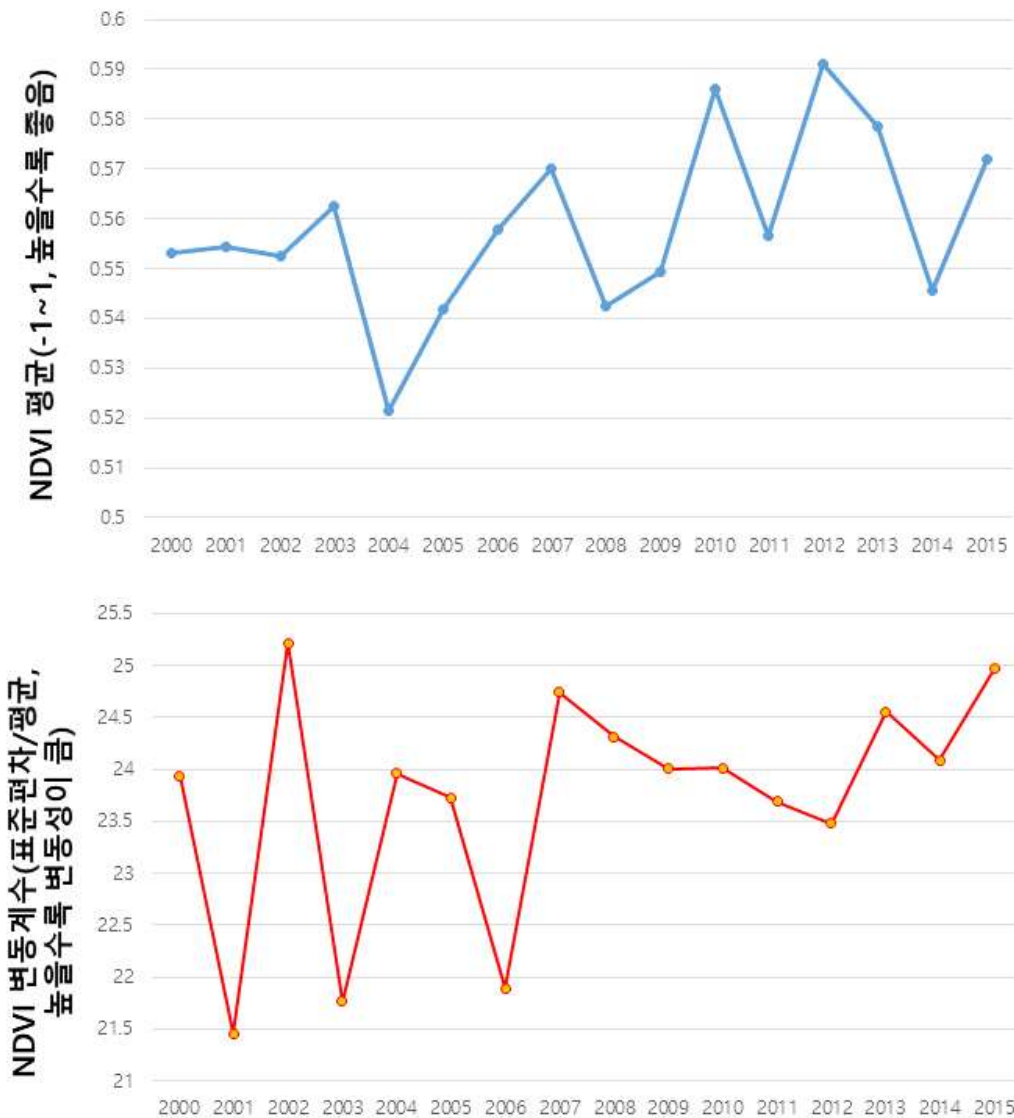


그림 10. MODIS MOD13Q1 NDVI 북한지역 정보 요약(평균 및 변동계수)

3) RapidEye

RapidEye 위성영상은 독일 우주기구(DLR, German Aerospace Agency)가 발사한 Rapideye위성에서 촬영한 영상으로, 2008년에 발사되었다. 청색 (blue), 녹색 (green), 적색 (red), 적색경계 (red edge), 근적외선 (near infrared) 밴드로 구성되어 있으며, 특히 적색 경계 밴드를 포함하고 있어 세밀하고 작은 식생의 변화 관측에 활용이 가능하다고 알려져 있다. 공간해상도는 6.5m로 앞선 영상보다 정밀하고, 농업, 산림 분야 등 다양한 용도에 활용되고 있다(홍석영 등(2012)와 지오포커스 주식회사 홈페이지⁵⁾ 내용 정리).

본 위성영상은 위 영상들과 달리 무료 영상이 아니며, 2018~2019년 기준 1km²당 2000원 수준으로 다소 고가인 영상이다. 따라서 이 연구에서는, 3장에서 언급할 취약지 분석을 바탕으로, 3개 지역을 선정하여(그림 11) 그 지역의 영상을 구매하였으며, 시기 또한 2010~2017년 사이의 생육기-비생육기 영상을 구독하였다. 이를 바탕으로 취약지가 잘 구분이 되었고, 이 지

5) <http://www.geofocus.kr/>

역의 상태가 어떻게 변화하였는지를 시각적으로 파악하는 데에 주력하였다.

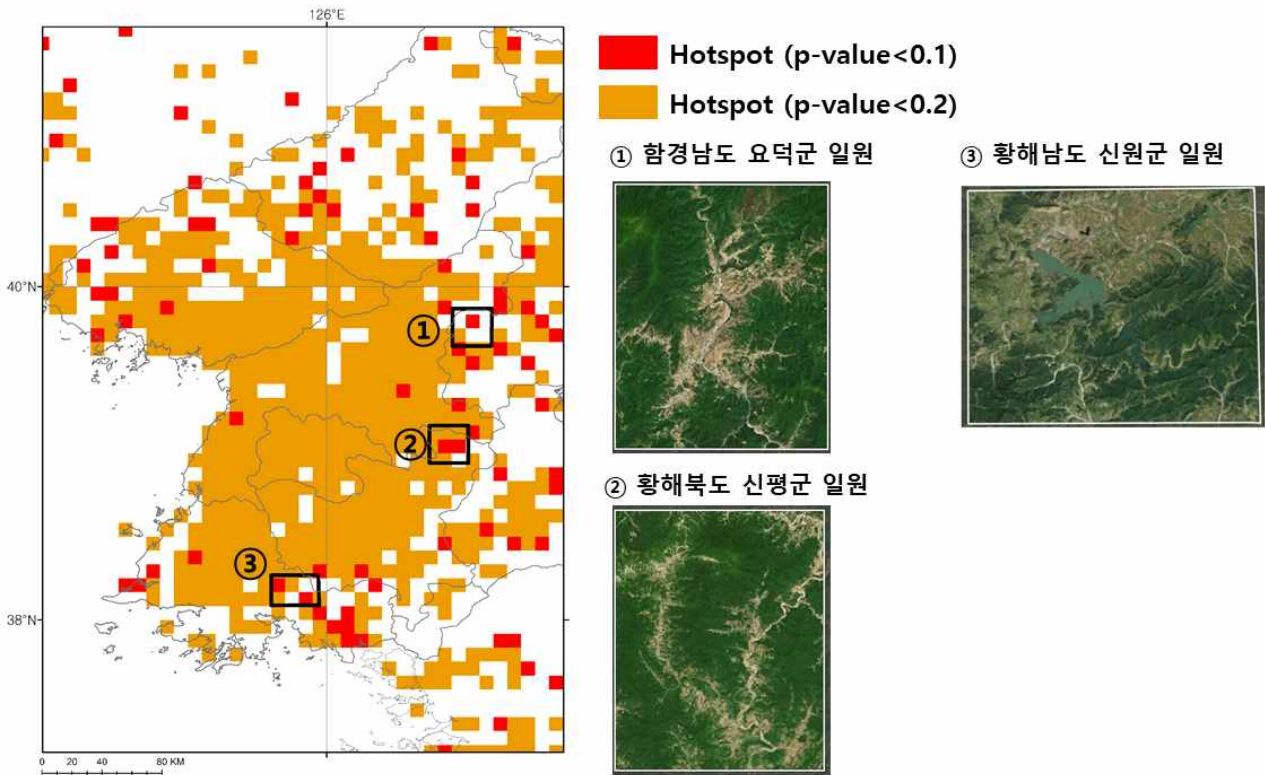


그림 11. RapidEye 자료 구득 지역과 영상 예시

* 주 : 왼쪽 Hotspot지도는 3장 1절 참조

3. 토지황폐화 취약지역 도출 및 비교검토

3.1 이론적 배경 및 방법

NDVI를 통해 토지황폐화의 취약지(Hotspot)를 분석하는 연구는 다수 있었으나, 이 연구에서는 아프리카 대륙 스케일에서 열대-건조-온대지역 전체의 토지황폐화 경향을 확인하는 독일 University of Bonn의 ZEF(“발전문제연구소”에 해당) 연구진들의 토지황폐화 취약지 분석 연구(Vlek et al., 2009; Le et al., 2012)들을 참고하여 분석을 진행하였다(이상 ZEF방법으로 기술).

ZEF방법에서는 일차 생산량으로서 식생지수와, 기후요소로서 강수량 자료를 토지황폐화의 지표(Proxy)라고 가정하였다. 이를 바탕으로, NDVI의 경향성이 감소하는 지역이면서, NDVI와 강우량의 상관관계가 양의 관계가 아니거나 상관관계가 없는 지역을 토지황폐화 취약지로 정의내렸다. 이는 대체로 NDVI는 기후와 상관관계가 높기 때문에, 그렇지 않은 지역은 “기후와 상관 없이 일차생산량이 감소하는 지역”으로써 인간에 의해 토지황폐화가 이루어지는 지역으로 볼 수 있기 때문에 타당한 접근방법이라 할 수 있다.

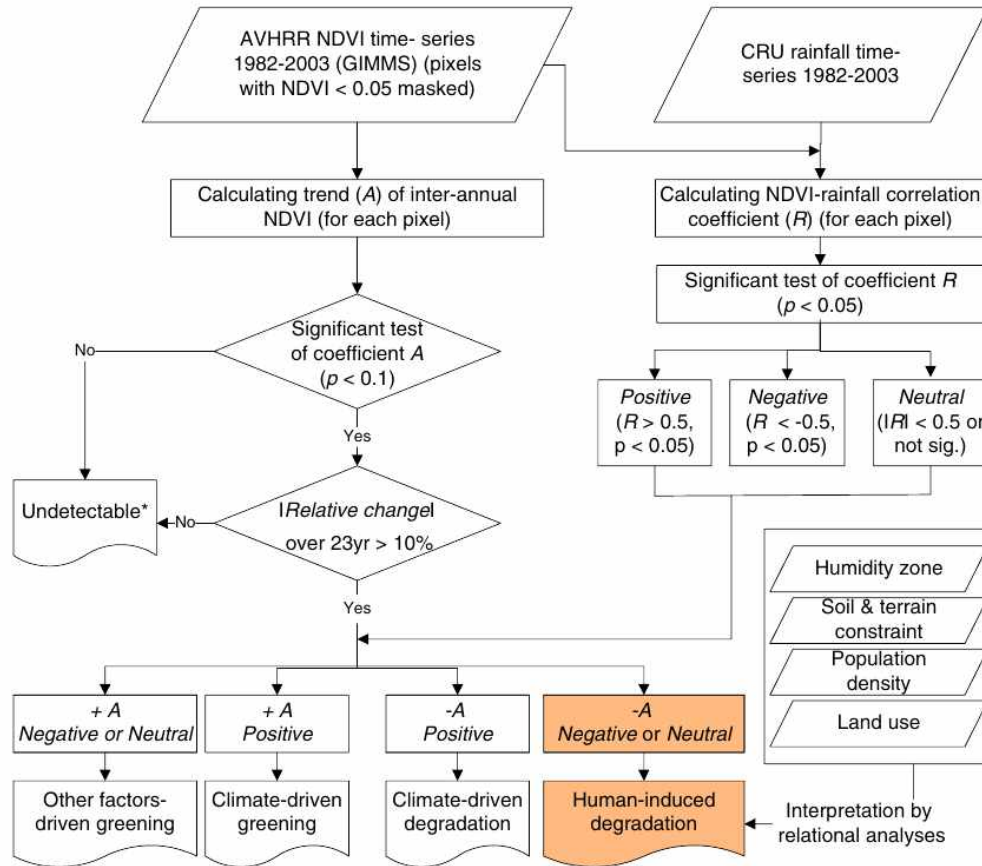


그림 12. 독일 ZEF연구진의 AVHRR GIMMS자료를 이용한 토지황폐화 취약지 분석방법(Le et al., 2012)

본 연구에서도 ZEF방법과 거의 동일한 방법으로 NDVI를 이용한 토지황폐화 취약지 도출을 진행하였다. 그 절차는 그림 12와 같다. ZEF방법에서 사용하였던 AVHRR GIMMS를 그대로 사용하여 연구를 진행하였으며, MODIS MOD13Q1에도 그대로 활용하였다. 단, 두 가지 부분은 그림 12와 다르게 진행하였다. 첫째, A의 P-value가 0.1을 넘는 값만 채용하는 경우 Hotspot이 거의 추출되지 않기 때문에, 0.2까지 확대하여 도출하였다.⁶⁾ 둘째, MODIS NDVI는 2000-2015년으로 시기가 짧기 때문에 NDVI의 변화율이 10%가 넘는 부분을 제거하는 규칙을 적용하지 않았다. AVHRR GIMMS영상은 1982년부터 2015년까지 영상을, MODIS영상은 2000년부터 2015년까지의 영상을 활용하였다. 기후자료는 ZEF방법과 마찬가지로 CRU Rainfall⁷⁾자료를 활용하였다.

3.2 도출 결과

ZEF방법을 적용해 본 결과는 그림 13과 같다. AVHRR GIMMS의 저해상도 스케일로는 북한의 대부분이 남한과 구별되는 토지황폐화 취약지역으로 도출되었으며 평안도-황해도 일원 전체와, 함경남도 해안 및 개마고원 일대가 토지황폐화 취약지역으로 도출되었다. 반면

6) 이는 Vlek et al.(2009)에서도 필요한 경우 적용하고 있는 방법이다.

7) <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cru-ts-gridded-precipitation-and-other-meteorological-variables-1901>

MODIS NDVI의 영상은 다소 다른 결과가 도출되었으며, 주로 황해도 일 때 저산지 일원과, 산지와 평지가 만나는 지점에서 주로 취약지역이 도출되었다. 이는 다락밭, 비탈밭 등 북한의 산지 개간이 계속해서 이루어진다는 것을 보여주는 결과라고 해석할 수 있다.

이 두 영상은 촬영 시기가 다르고, 앞서 확인하였듯 해상도의 차이에 따라 결과에 큰 차이가 있기 때문에 일률적으로 비교할 수 없지만, 해상도에 따라 볼 수 있는 토지황폐화 정의의 차이를 보여준다는데 의미가 있다고 볼 수 있다.

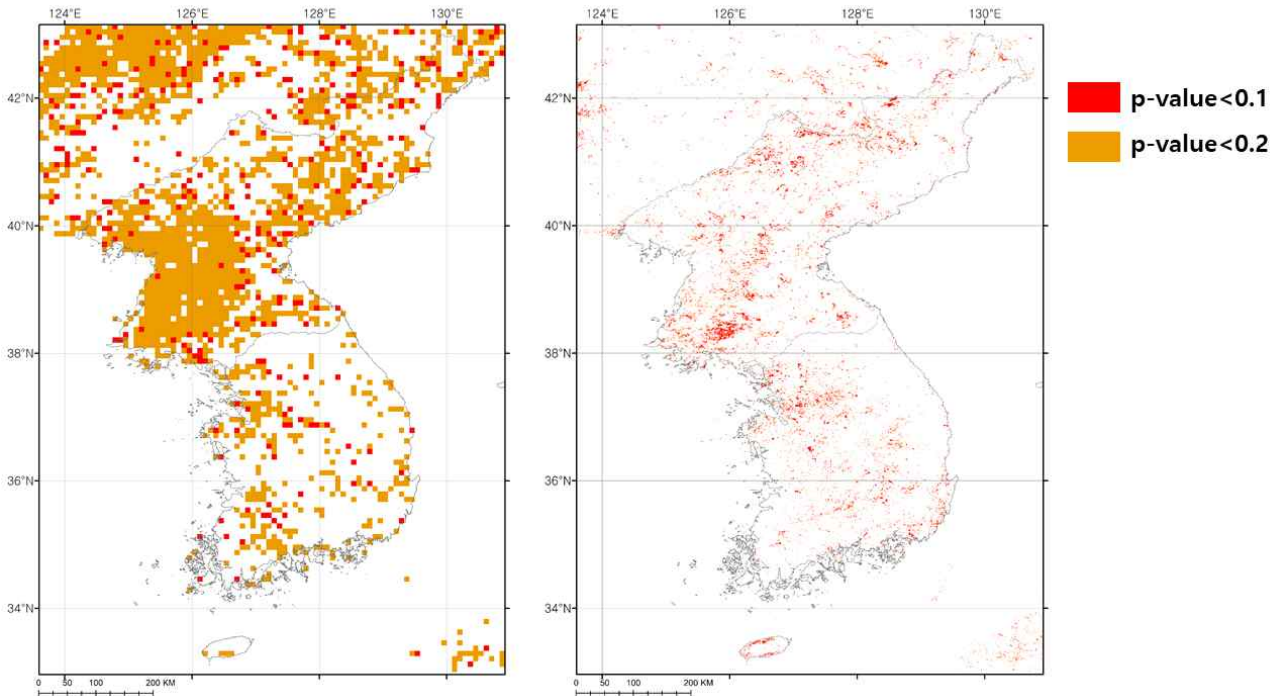


그림 13. ZEF방법을 이용한 한반도 토지황폐화 취약지역 도출 (왼쪽) AVHRR GIMMS(1982-2015), (오른쪽) MODIS MOD13Q1(2000-2015)

3.3 남한 자료와의 비교검토

본 자료가 과연 북한의 토지황폐화 경향을 반영하는지에 대해 검증하기 위해서는, 북한의 자료를 이용하는 방법과, 남한의 자료를 이용해서 간접적으로 비교, 검토하는 방법이 있다. 본 연구에서는 남한의 택지개발지구 개발 자료 및 환경부의 토지피복도와 비교하는 형태로 본 자료가 토지황폐화 경향을 반영하는지를 확인해 보았다. AVHRR GIMMS의 공간해상도가 너무 낮아 객관적인 정확도 탐지는 어렵기 때문에, MODIS 결과와 비교, 검토하였다.

1) 택지지구자료와의 비교

택지개발지구의 개발은 필연적으로 NDVI를 감소시키고, 이것은 기후 변화와 특별히 관련성이 없기 때문에, 그리고 2000년대 이후 남한의 토지황폐화는 대부분 택지개발에 의해 온다는 가정에 근거해, 남한의 택지개발지구 자료와 취약지역 결과와 비교 검토를 진행하였다. 택지개발지구 자료는 국토교통부와 한국토지주택공사의 “택지정보시스템 api⁸⁾”의 자료를 다운로드 받아서 활용하였고, 이 중 MODIS 결과와 중복되는 2000-2015년 사이 진행된 택지개발 지구

8) <https://openapi.jigu.go.kr/>

를 추출하여 단순 비교하였다. 이를 수도권 지역을 시각화해서 나타낸 것은 그림 14와 같으며, 개발지와 미개발지가 토지황폐화지역으로 어느 정도 비율로 구별되었는지를 계산한 결과는 표 1과 같다.

그림 14를 통해서, 우리에게 잘 알려진 2000-2010년대의 수도권의 택지지구인 판교, 광교, 동탄, 인천공항신도시 등이 대부분 토지황폐지로 구분된 것을 알 수 있다. 표 1에서 ZEF방법으로 토지황폐지로 분류된 택지지구의 면적비는 45.17%로 절반에 못 미치지만, 반면 택지지구가 아닌데 토지황폐지로 구별된 것은 4.44%에 불과했다. 이는 그림 14에서도 알 수 있듯 간척으로 인한 개발을 식생지수를 통해 잡아낼 수 없기 때문에 이런 결과가 나온 것으로 추정되며, 남한의 측면에서 이 결과는 매우 정확한 토지황폐지 추정 결과라 볼 수 있다.

표 1. 남한의 택지지구 개발지역이 ZEF방법에 토지황폐지로 구분된 면적비율

남한의 택지지구 (2000~2015년)	ZEF방법		
	토지황폐지	비황폐지	합계
택지지구 개발지	45.17%	54.83%	100.00%
해당없음	4.44%	95.56%	100.00%

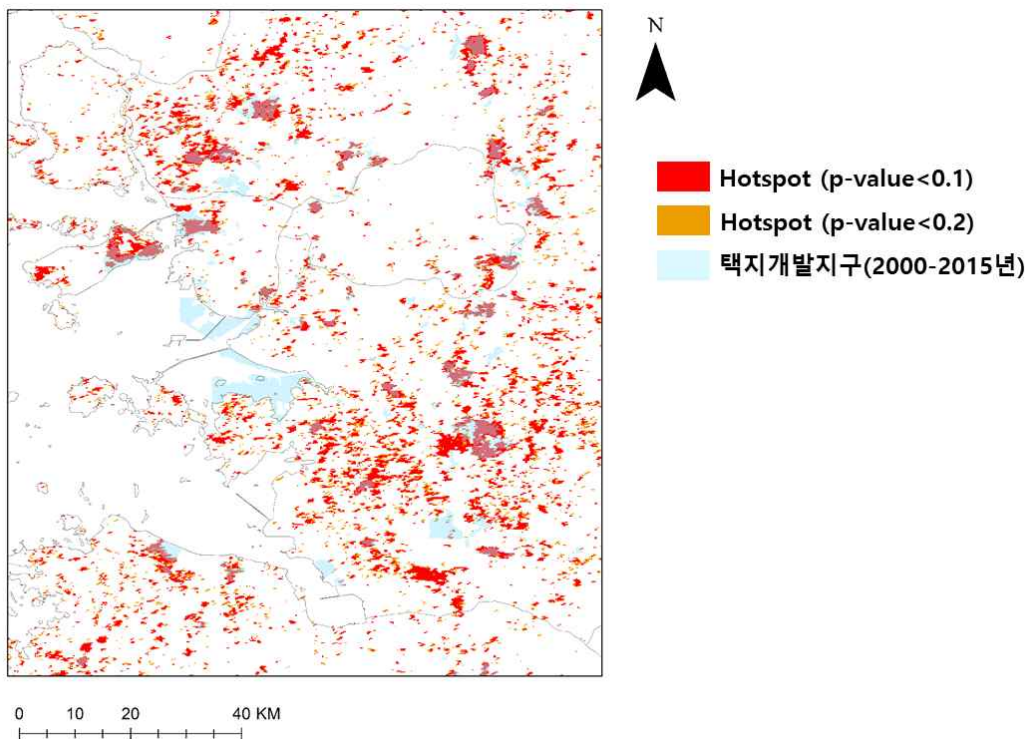


그림 14. 수도권 지역의 ZEF Hotspot분석결과(MODIS)와 택지개발지구 비교결과(2000-2015년)

2) 토지피복도와의 비교

환경부 환경공간정보시스템⁹⁾에서 제공하는 대분류 토지피복도와 토지황폐화 취약지

9) <https://egis.me.go.kr/>

도를 비교하였다¹⁰⁾. 대분류 토지피복도를 이용하여, MODIS 위성영상의 시기에 맞추어 1990년대 토지피복과 2010년대 토지피복을 활용하여, “토지황폐화”의 정의에 부합하는 토지이용의 변화(표 2의 주 참조)가 있는 지역과 ZEF Hotspot과 비교 검토를 진행하였다. 그 결과는 표 2와 같으며, 택지개발지와 마찬가지로 두 지역이 공통으로 구분한 황폐지의 비율은 높지 않지만, ZEF Hotspot에서 황폐지로 구분된 곳 중에서 토지피복상 황폐지가 아닌 비율은 약 1%에 불과했다. 이는 두 자료의 구분방법의 오류와 차이점 때문에 비롯된 것으로 보이며, 앞서 결과와 마찬가지로 ZEF방법이 비황폐지를 가리키는 경우가 거의 없었다는 것을 주목할 필요가 있다.

표 2. 남한의 대분류 토지피복지도로 도출한 황폐지와 ZEF방법에 토지황폐지로 구분된 면적비율

환경부 대분류 토지피복도(1990년대 말-2010년대 말 비교)	ZEF방법		
	토지황폐지	비황폐지	합계
토지피복상 황폐지*	15.23%	84.77%	100.00%
비황폐지	1.03%	98.97%	100.00%

* 주 : 모든 다른 토지피복에서 시가화 지역 또는 나지로 변화, 산림지역에서 다른 모든 토지이용으로 변화로 정의하였음

3.4 북한의 고해상도 영상과의 비교검토

앞서 2장에서 제시하였던 세 지역을 대상으로 RapidEye영상을 구독하였고, ZEF Hotspot결과와 비교 검토하였다. 그 결과는 그림 15와 같다. 그 결과 영상에서 산지 개간지일 것으로 추정되는 지역이 대부분 MODIS를 통한 취약지 분석 결과로 도출되는 것을 시각적으로 확인할 수 있었다. 특히 황해북도 신평군 일원의 산지 계곡부에서 그러한 모습을 관찰할 수 있었다.

단, RapidEye영상과 MODIS영상 간의 스케일이 일치하지 않고, 시간 또한 Rapideye는 2010년 이후 영상을 구독 가능하기 때문에, 기존에도 마을이나 농토로 썼던 것으로 보이는 지역이 황폐지로 보이는 등의 문제가 있을 것이다. 이 때문에 분석은 우선적으로 시각적인 부분을 중점적으로 진행하였다.

결론에 자세히 설명하겠지만, 고해상도 영상과의 비교 검토는 추후 검토를 통해 보완할 예정이다. 가능하다면 앞선 분석 결과처럼 수치로서 정확도를 나타내는 방향을 검토할 계획이다.

10) 환경부 환경공간정보시스템에서는 북한의 토지피복도 또한 제공하지만, 대체로 비공개인 데다가, 여러 연구자들이 정확성에 대해서 의문을 제기하여, 남한의 자료를 비교하는 것으로 대신하였다.

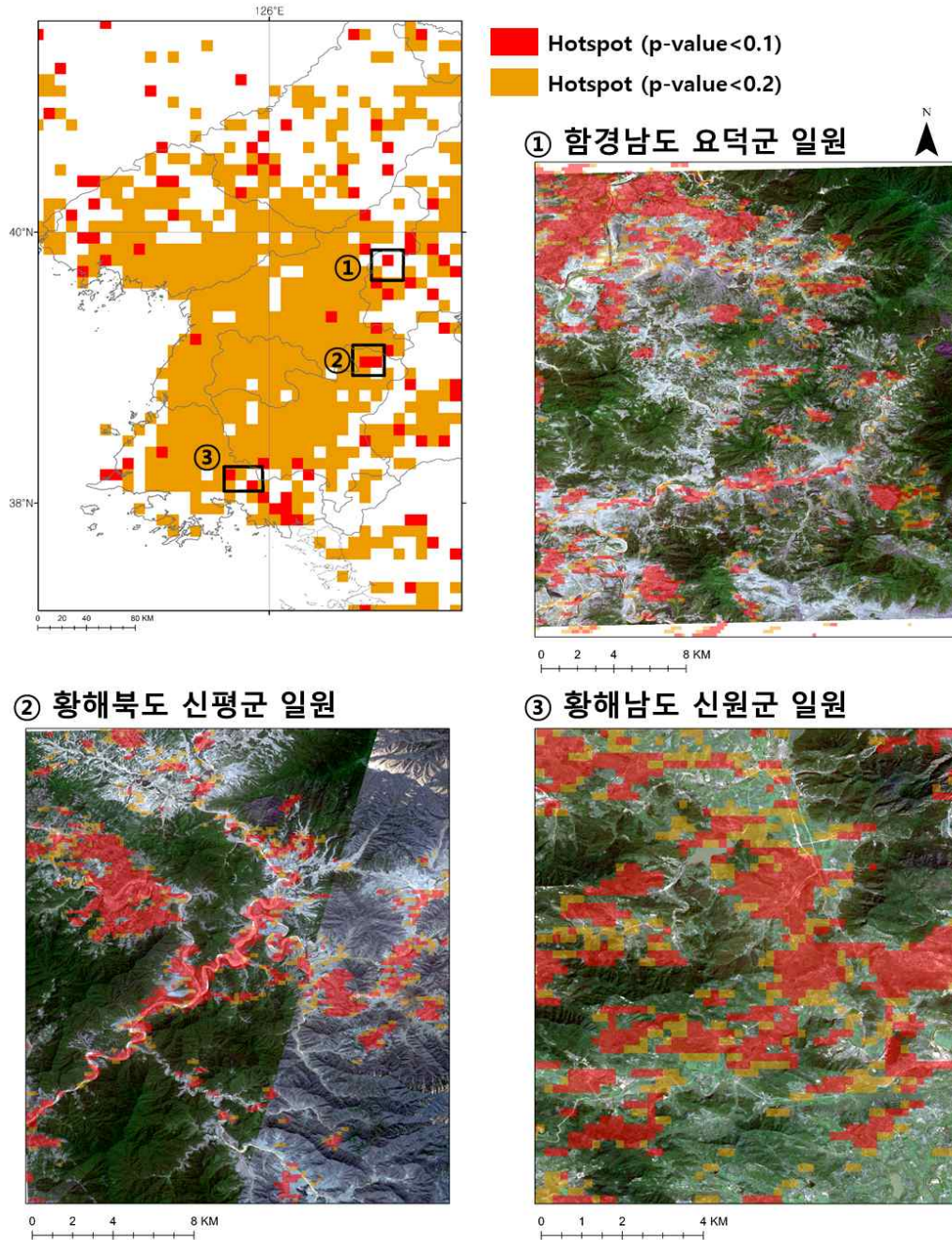


그림 15. 북한의 RapidEye영상과 ZEF Hotspot 분석결과(MODIS)와의 비교 사례

4. NDVI를 이용한 북한 토지황폐화의 사전예방신호 도출

4.1 배경 및 방법

서론의 그림 1로 돌아가면, 북한의 식량위기는 1990년대 폭발적이고 붕괴적인 형태로 찾아왔고, 서론에서 언급하였듯 여러 가지 모순이 복합적으로 누적되어 발생된 복잡적응계적 붕괴 또는 창발 현상으로 해석할 수 있다. 이러한 시스템의 붕괴는 큰 피해를 초래하기 때문에, 이를 사전에 예측하고자 하지만 쉽게 예측하기 어려운 것이 현실이다. 이러한 임계변화(critical

transition)에 대한 예측 불가능성에 대한 대안으로, 복잡계 연구에서는 정확한 시점이나 방향의 예측 대신에, 수학적, 통계적인 징후를 바탕으로 그 신호를 찾을 수 있는 사전예방신호(Early-Warning Signal)을 들 수 있다(Scheffer et al., 2009).

사전예방신호는 여러 가지 도출 방법이 존재하지만, 이 연구에서 가지고 있는 시계열 NDVI 자료를 이용한다면, 시간적 자기상관성(AR(1)과 표준편차를 확인하는 것을 통해서 급격한 변화의 사전예방신호를 포착할 수 있다(Scheffer et al.,1999; Dakos et al., 2012). 실제로 그림 1의 자료를 북한의 식량위기 발생시점인 1995년을 종료시점으로 잡아 Dakos et al.,(2012)의 방법을 적용하면, 사전예방신호가 관찰된다(그림 16의 왼쪽 참조).

이 연구에서도 Dakos et al.,(2012)의 방법을 사용하여, 북한의 식량생산량의 사전예방신호와 마찬가지로 그 근원적인 이유가 되는 북한의 토지황폐화의 경향의 사전예방신호 도출이 가능한지를 확인하여 보았다. 이를 위해, 마찬가지로, 북한의 식량위기 시점인 1995년으로 종료시점을 설정하였다. 1995년 이후의 자료밖에 없는 MODIS자료의 사용이 불가능하기 때문에 AVHRR GIMMS자료를 부득이 사용할 수밖에 없었다. 분석의 도구는 Dakos et al.,(2012)에 근거하여 만들어진 R “Earlywarnings” 패키지를 사용하였다. 시간적 자기상관분석(AR(1))과 시간자료의 표준편차를 지표로 활용하였으며, 계산을 위한 범위(moving window)는 선행 연구와 마찬가지로 전체 시계열의 절반(7년)을 사용하였다.

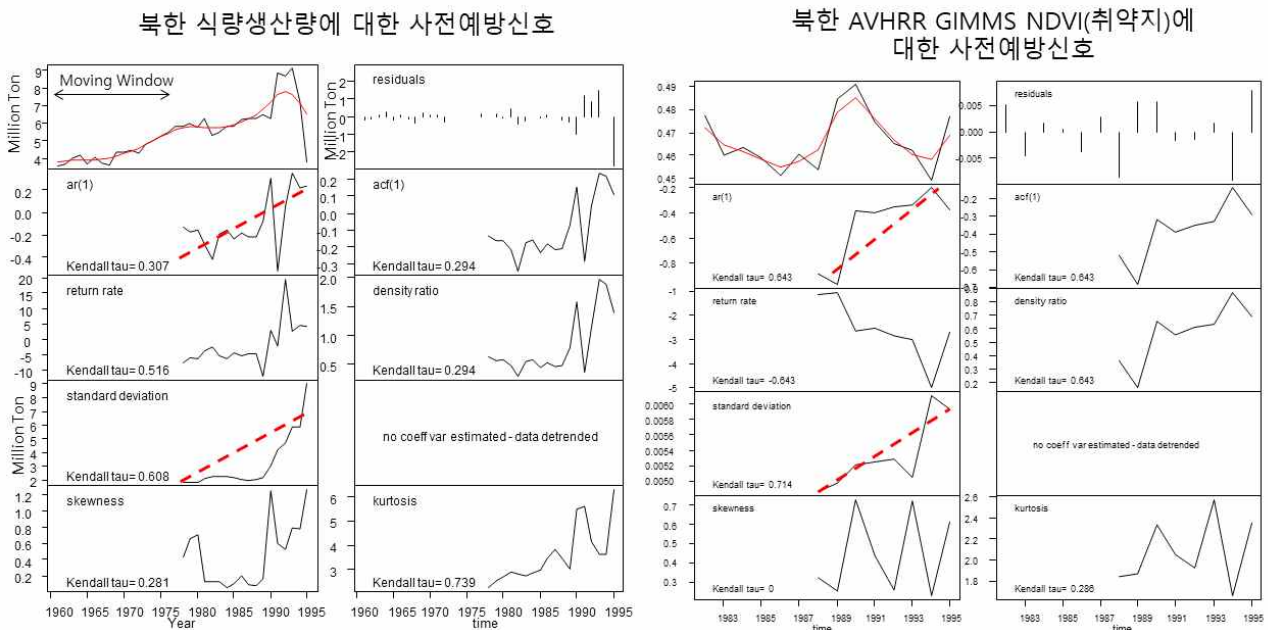


그림 16. 북한 식량생산량(왼쪽)과 NDVI(오른쪽)의 사전예방신호 도출결과

4.2 NDVI를 이용한 북한 식량생산량-토지황폐화의 사전예방신호의 도출결과

우선 북한 전역을 대상으로 AVHRR GIMMS NDVI의 연평균 시계열 자료를 사용한 결과, AR(1)과 표준편차에서 분명한 사전예방신호가 도출되지 않았다. 이에 대한 대안으로, “토지황폐화”지역의 NDVI 사전예방신호는 존재할 것으로 판단하여, ZEF 방법으로 도출한 토지황폐화 취약지역(그림 13의 왼쪽, p-value < 0.2)의 NDVI만을 기준으로 NDVI의 연평균 시계열 자료를 다시 추출하여 분석을 진행하였다. 그 결과는 그림 16의 오른쪽과 같이 사전예방신호가 북한 식량생산량에 비해서 더 분명하게 kendall tau가 더 높음) 도출된 것을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 보완방향

본 연구를 통해서 북한에 대한 공간자료 중 NDVI자료는 북한의 토지황폐화 문제의 취약성을 파악하고, 시계열적인 사전예방신호를 찾는 데 도움이 된다는 결론을 얻을 수 있었다. 이를 응용하여 NDVI를 통일국토의 시공간적 취약성을 파악하고, 위험을 사전 회피한다면, 지속가능한 통일국토의 관리에 도움이 될 것으로 기대할 수 있다.

본 연구는 다음과 같은 사항을 발전 보완하여, 보다 더 완성된 연구로 발전시키고자 한다.

첫째, 본 연구에서 사용하였던 고해상도 위성영상인 RapidEye를 다방면으로 가공하여 저해상도 분석 결과와 비교, 검토하고자 한다. 이를 바탕으로 통일국토 지속가능성 평가에 있어서 자료가 가지고 있는 스케일의 문제를 해결하고, 한반도의 특색에 부합하는 스케일 변화(up-scaling or down-scale)의 방법을 도출하고자 한다.

둘째, 본 연구에서 사용하였던 취약지 탐지와 사전예방신호 탐지의 추가적인 방법을 적용할 계획이다. 특히 사전예방신호 탐지는 공간적인 측면도 존재하기 때문에, 이를 반영해서 연구를 발전시킬 계획이다.

셋째, 본 연구는 식생지수가 지속가능성 평가에 대표성이 있는(proxy)자료로서, 다른 환경자료와의 관계성을 규명하는 것을 목표로 하고, 이를 다른 예측모형 연구에 적용하고자 한다. 특히 기후자료, 지형자료 등과 같은 자연환경 자료나, 이와 연관이 있다고 알려져 있는 식량생산량 등과 같은 자료 뿐만 아니라, 북한의 정책변화와 경제상황 변화와 같은 비공간적·비자연환경 자료의 도입 부분에 대해서 고민할 계획이다.

참고문헌

- 김도형, 2006, MODIS 다중 시기 영상을 이용한 북한 지역의 토지피복 변화 분석, 서울대학교 환경대학원 환경조경학과 조경학석사학위논문
- 김상욱, 2002, 지형조건을 고려한 북한지역 산림황폐화 변화조사, 통일과 국토, 10, 125-134
- 김연철, 1997, 북한의 배급제 위기와 시장개혁 전망, 삼성경제연구소
- 유재심, 2010, 생물계절 의사결정 분지도에 의한 북한 토지피복 분류기법 연구, 서울대학교 환경대학원 환경조경학과 조경학석사학위논문
- 이민부·김남신·강철성·신근하·최한성·한옥, 2003, 북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정, 한국지역지리학회, 9(3), 373-384
- 이민부·김남신·金石株·김항덕, 2008, 임진강유역의 토지이용에 따른 지표침식에 관한 연구, 대한지리학회지, 43(3), 263-275
- 이민부·김남신·한옥·한주연·최한성·강철성·신근하, 2006, 북한의 환경변화와 자연재해, 도서출판 한울
- 이석, 2004a, 1980년대 북한의 식량생산, 배급, 무역 및 소비 : 식량위기의 기원, 현대북한연구, 7(1), 41-86
- 이석, 2004b, 1994-2000년 북한 기근: 초과 사망자 규모와 지역별 인구변화, 국가전략, 10(1), 117-145
- 이성구, 2003, MODIS 시계열영상을 이용한 한반도 토지피복 분류, 서울대학교 환경대학원 석사학위 논문
- 이승호·정성학·송장호, 1998, 원격탐사에 의한 북한의 산림자원조사, 산림과학논문집, 58,

- 차수영·서동조·박종화, 2009, MODIS자료를 이용한 북한 개마고원 및 백무고원 식생의 생물계절 모니터링, 대한원격탐사학회지, 25(5), 399-409
- 하림·신형진·박근애·김성준, 2007, NOAA AVHRR 위성영상과 기후변화 시나리오에 의한 기상 자료를 이용한 미래 식생정보 예측 기법 개발, 한국GIS학회 2007 공동춘계학술대회 논문집, 162-168
- 홍석영·민병걸·이지민·김이현·이경도, 2012, RapidEye영상을 이용한 북한의 논 면적 산정, 한국토양비료학회지, 45(6), 1194-1202.
- 홍석영·임상규·이승호·이정철·김이현, 2008, 위성영상을 이용한 북한의 농업환경 분석 I. Landsat TM 영상을 이용한 북한의 지형과 토지피복분류, 한국환경농학회지. 27(2), 120-132
- 홍석영·최은영·김건엽·강신규·김이현·장용선, 2009, MODIS NDVI를 이용한 북한의 벼 수량 추정 연구, 2009 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 116-120
- 황순옥, 1997, NOAA/AVHRR 자료를 이용한 북한지역 지피식생 및 농경지 모니터링, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문
- Busetto, L. and Ranghetti, L., 2016, MODISrtp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series, *Computer & Geoscience*, 97, 40-48.
- Dakos, V., Carpenter, S.R., Brock, W.A., Ellison, A.M., Guttal, V., Lves A.R., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D.A., van Nes, E. H., and Scheffer, M., 2012. Methods for Detecting Early Warnings of Critical Transitions in Time Series Illustrated Using Simulated Ecological Data. *PLoS ONE* 7(7)
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., and Huete, A., 2015, MODIS Vegetation Index User's Guide(MOD13 Series)-Version 3.00, June 2015(Collection 6), Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona
- Jensen, J. R., 2005, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3rd Edition, 임정호·박종화·손홍규 역, 2005, 원격탐사와 디지털 영상처리, 시그마프레스
- Julien, Y. and Sobrino, J. A., 2009, Global land surface phenology trends from GIMMS database, *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495-3513.
- Natsios, A., 1999, *The Politics of Famine in North Korea*, USIP Special Report
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E., Rietkerk, M., and Sugihara, G., 2009, Early-warning signals for critical transitions, *Nature*, 461, 53-59.
- van der Kniiff, J., J. Jones and L. Montanarella. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau.
- van der Kniiff, J., J. Jones, and L. Montanarella. 1999. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau.

통일국토의 지속가능성을 위한 다행위자시스템 기반 의사결정시스템 모형 구축 - 북한의 토지황폐화-식량문제를 중심으로-11)

1. 서론

북한의 토지황폐화(Land Degradation) 문제는 한반도의 지탱력과 임계점을 초월하는 대표적인 사례이다. 토지황폐화는 자연환경 및 인간의 영향으로 토양 침식, 토양 염류화 등으로 토지가 토지가 생·물리적 또는 경제적인 관점에서 생산 능력을 잃어버리는 것을 말하며, 1960년대 아프리카 사헬 지대 대기근의 원인으로 지적된 것을 시작으로 이후 지속가능성을 위협할 수 있는 주요 환경문제 중 하나로 대두되고 있다(Eswaran et al., 2001). 북한은 1960년대부터 농업생산성 증대를 위한 산지개간(다락밭, 비탈밭), 난방 연료 및 퇴비 수요를 위한 산림벌채, 주체농업으로 대표되는 잘못된 농업 정책 등으로 인해 토지의 생산성을 저하시켜 1990년대 중반 토지 생산성은 임계점을 초과함으로써 토지 황폐화의 문제점을 야기하였다(부경생 등, 2001). 이에 대한 결과로 북한은 1990년대 중반 “고난의 행군”이라 스스로 일컬을 정도로 극심한 식량위기에 시달렸으며, 위성영상으로 남과 북이 뚜렷하게 구별될 정도로 황폐화된 산림을 가지게 되었다(안유순, 2013).

북한의 토지황폐화 문제는 한반도의 자연환경이 가지는 회복탄력성을 초과하여 벌어진 대표적인 사건이며, 북한 뿐 아니라 과거 한반도의 역사에서 유사한 사례가 있었으며, 앞으로 한반도의 자연·인문환경이 임계점을 초월할 경우 언제든지 재현될 수 있다. 뿐만 아니라, 남과 북의 국토에서 회복탄력성을 뛰어넘을 수 있는 많은 사회경제적·자연환경적 요인이 상존하고 있다.

따라서, 앞으로 다가올 남북화합과 변영, 통일시대의 지속가능성을 위해서는 통일국토공간에 대한 지속가능한 설계가 필수적이며, 이를 위해서는 국토공간구조의 변화에 대한 통합적인 사전 예측과 선제적인 정책대안 수립 방안이 제시되어야 한다. 하지만 그동안의 북한 관련 연구는 미시적인 차원에서 진행되거나, 거대 담론 중심의 시나리오 위주로 접근하고 있다. 기존 학계에서는 이러한 북한의 문제들을 각각의 학문의 맥락에서 다루어 왔으며, 시스템적으로 연결하여 다루어지지 않는 것으로 보인다. 일례로 잘못된 농업과 토지관리 정책은 경작면적이 좁고 비교적 한랭 건조한 북한의 불리한 자연환경 조건을 극복하기 위한 시도에서 비롯되었다고 추정되며 이는 많은 분야에서 지적되어 왔으나 시스템적 사고로 통합적으로 관찰하기 보다는 각자의 맥락에서 연구가 이루어졌다. 특히 북한의 식량위기는 산림벌채와 산림개간으로 산지가 황폐화(Forest Degradation)됨에 따라, 농지의 생산성이 같이 떨어지는 공간적 프로세스를 겪

11) 본 내용은 본 사업의 연구결과의 학술논문 Draft를 일부 수정한 것으로, An & Park(2018)의 내용을 기반으로 하여, 내용을 일부 수정·보완 하였다. 본 사업의 “추진전략 3”의 결과 내용기술의 필요에 따라 첨부하였으며, 이후 이를 바탕으로 도출된 연구 성과의 내용은 다소 달라질 수 있다.

어 왔음에도, 북한에 대해서 공간적인 맥락으로 전체를 바라보려는 시도는 부족하였다(안유순, 2013). 즉, 북한의 1990년대 이후로 겪어왔던 위기와 변화는 북한의 공간시스템의 위기 및 변화에서 비롯된 것이지만, 시스템적으로 또는 공간적으로 그 문제를 접근하려는 시도는 많지 않았다. 이에 대한 대안으로 실제 수집 가능한 현황 자료를 중심으로 분석을 진행하고, 이를 토대로 종합적이고 체계적 예측과 대응방안 마련이 필요하다. 이를 위해서는 북한의 내·외부적 환경변화와 이에 따른 공간구조의 변화가 이해되어야 할 필요성이 있다.

단기적으로는 북한의 취약성과 위협에 대해서 예측하고 지원하고자 하는 차원에서, 장기적으로는 남북통일에 대비한 국토공간의 발전을 위한 전략 수립 차원에서 공간의사결정시스템(Spatial Decision Supporting System; SDSS)을 구축해야 한다. 기존의 공간의사결정지원시스템의 구축은 특정한 정책, 특정한 맥락을 대상으로 진행되었으며, 다양한 분야가 포괄된 방향으로 진행되지는 못하였다. 이는 사회경제적 문제와 자연적 문제를 결합할 때 발생하는 현실의 복잡성(Complexity)의 문제 때문이다. 과거 이러한 복잡성은 현재 인류의 역량으로 보기에 너무 복잡하거나(Complicated), 실제 보려는 것을 방해하는 잡음(noise)으로 간주되었다. 하지만 최근 현실의 복잡성을 극복하기 위한 복잡적응계(Complex-adaptive System)적 연구 방법이 등장하였고, 공간의사결정 지원시스템에도 이를 위한 다양한 기법이 등장하기 시작하였다. 본 연구에서는 여러 가지 방법 중 통일국토 지속가능성에 대한 의사결정을 지원하는 것을 목적으로 한 다행위자시스템 기반 공간의사결정시스템을 개발하고자 한다.

2. 연구방법 : 다행위자시스템(MAS-LUCC)

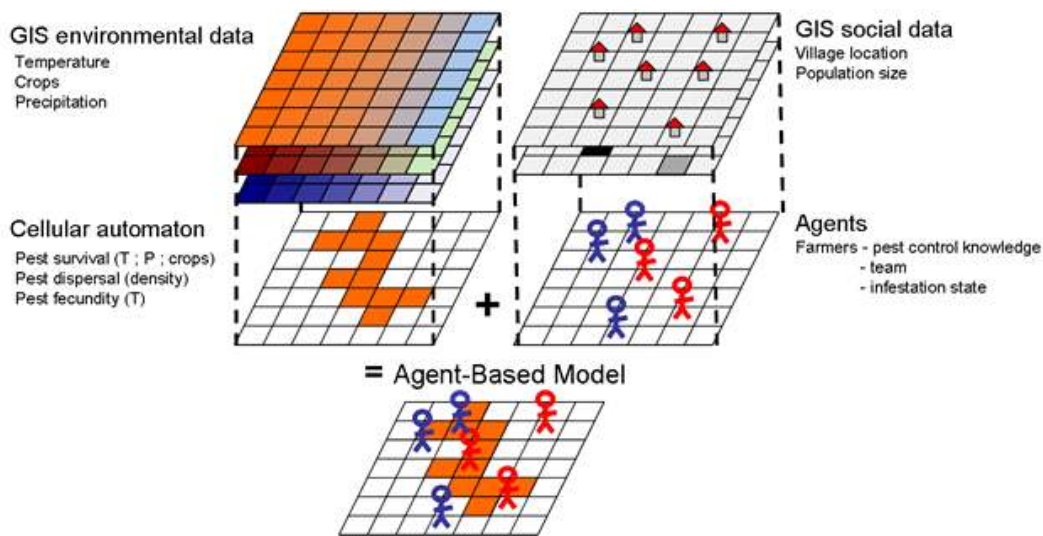


그림 17. 다행위자시스템의 모식도(Rebaudo et al., 2011)

기존 환경변화에 따른 공간구조의 변화를 연구하는 방법론으로는 대표적으로 토지이용 및 토지피복 변화 모델링(Land-Use and Land-Cover Change Modeling, 이하 LUCC Modeling) 기법이 있다. LUCC Modeling은 사회경제적 변화 및 자연환경의 변화로 인해 발생하는 공간구조 변화의 시·공간적 변화양상과 그 요인을 파악하고자 하는 모델링 기법이다(Veldkamp and Lambin, 2001; Verberg et al., 2005; Lambin and Meyfroidt, 2011). 전통적인 LUCC Modeling은 토지이용변화와 관련된 수식을 이용하거나, 통계자료를 이용하여 변

화를 예측하는 등의 방법론이었으나, 현실의 복잡성(complexity)과 비선형성(nonlinearity)을 반영하지 못한다는 한계가 지적되어 왔다(Parker et al., 2003; Heckbert et al., 2010; An, 2012; Poulsen, 2013). 뿐만 아니라, 북한에 대한 정보의 부족은 북한의 토지이용의 시공간적 변화 예측의 불확실성을 증대시키고, 오히려 복잡성을 더 크게 하는 결과를 초래하기 때문에, 북한의 토지이용변화에 대한 연구에는 활용되지 못하여 왔다.

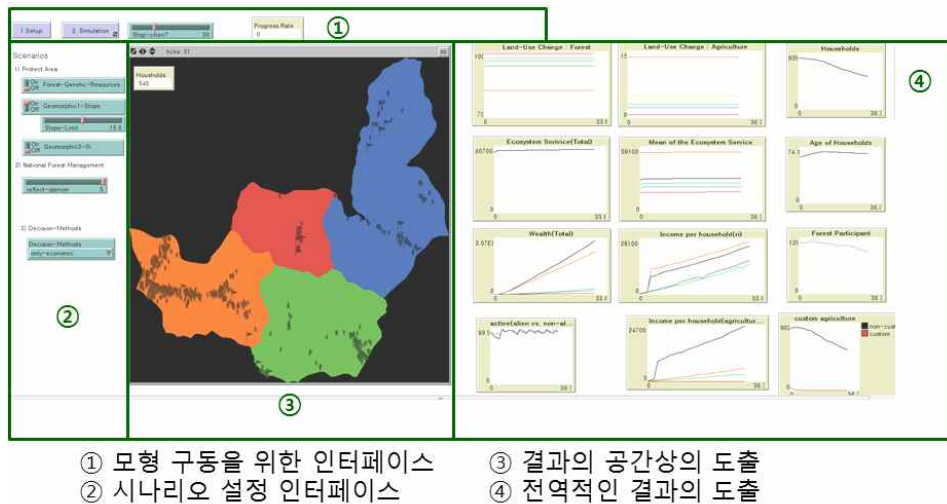


그림 18. 강원도 가리왕산 일원의 LUDAS 모형 적용사례

* 출처 : 박수진 등(2015); 허동숙 등(2016)

최근에는 기존 모델의 한계를 보완하기 위해 다행위자시스템(Multi-Agent System for Land-Use and Cover Change) 기법이 활발하게 사용되고 있다(그림 1). 다행위자시스템은 행위자와 환경을 정의하고 행위자 간의 상호작용을 구현하는 모형으로, 이를 통해 기존의 모형에서 반영하지 못했던 현실의 복잡성과 비선형성을 반영한다는 장점이 있다(Parker et al., 2003; Moncitino et al., 2007; Le et al., 2008; An, 2012). 또한 다행위자시스템은 다른 모형과의 결합·수정이 용이하여 학제간 연구 성과를 종합하는 틀로서 활용할 수 있다는 강점이 있다(Le et al., 2008). 특히 최근에는 정부의 정책을 시나리오로 설정하여, 정책의 변화에 따른 각 행위자 및 환경의 반응을 모의하는 공간의사결정지원시스템(Spatial Decision Support System; SDSS)으로 활용되고 있다(Parker et al., 2003; Le et al., 2008; 김동한, 2012; 김동한 등, 2014). 다행위자시스템은 정보의 부족으로 불확실성과 복잡성이 큰 북한의 공간구조 변화와 남한 북한을 아우르는 통일시대 국토공간을 관리하는 틀로 활용 가치가 높을 것으로 예상된다.

다행위자시스템 방법론과 이 연구의 공간정책의사결정 방법론으로서의 적용 가능성이 소개된 후, 도시 및 교통과 보건 분야 등에서 한국 및 한반도를 대상으로 각 정책의 효과를 평가하는 연구가 다수 수행되었다(이종호, 2003; Ariuntsetseg·염재홍, 2013; 신혜섭, 2014; 이종덕 등, 2015; 박수진 등, 2015에서 재인용). 보다 더 구체적인 공간정책의사결정모형으로 사용하였던 연구는 김동한 등(2014)가 부산권 도시의 공간의사결정에 관한 모형이 있으며, 박수진 등(2015), 허동숙 등(2016), 안유순 등(2017)이 강원도 평창군 일원의 산림정책 의사결정모형에 사용한 연구가 대표적이다. 그리고 공간정책의사결정모형의 단계까지 이르지 못했지만 안유순(2013)의 연구는 북한에 다행위자시스템 방법론을 적용했다는 데 그 의미가 있다.

3. 모형 구축

3.1 개념모형 설계

이 논문의 모형은 안유순(2013)의 석사논문을 기반으로 하였다. 이 논문에서는 북한의 토지 황폐화에 대한 기존 연구 사례들을 정리하고 이를 기반으로 북한의 토지황폐화에 대한 프로세스를 구체화 한 후, 평안남도 일대를 대상으로 모형을 설계하여 결과를 도출하였다. 이 연구에서는 이를 보다 단순화하고 micro-scale로 변환함으로써, 북한의 토지황폐화 문제에 대한 일반화와 구체화를 목표로 하였다.

1) 북한 토지황폐화-식량문제의 Process 모형

현재까지 알려져 있는 북한의 토지황폐화와 식량문제의 요인은 다양하며 복잡한 연결고리를 가진다. 이 인과관계를 정리하는 여러 틀 중 유럽연합 환경기구(EEA)에서 개발한 환경문제 접근 틀인 DPSIR Framework를 이용해 북한의 토지황폐화와 식량문제를 정리한 것이 그림 3과 같다. 북한 토지황폐화의 요인인 기후변화, 환경재해, 대외관계의 변화는 구동력으로 작용하여, 식량 및 에너지 수급 문제 등 북한의 토지황폐화 요인의 압력요인에 영향을 주게 된다. 이에 따라 다락밭 또는 연료목 공급을 위한 산림 개간과 벌채가 일어나는지, 농업을 위한 비료와 농업자재가 공급이 되는지를 영향을 주게 된다. 산림 개간 문제는 산림지황폐화로 대표되는 생물리적 토지황폐화에 영향을 주게 되고, 이 요인과 비료와 농업자재는 경제적 토지황폐화에 영향을 미치게 된다. 이 결과는 북한 사람들에게 토지이용을 변화시키고, 노동력과 자원의 투입을 변화시키며, 대외관계에 변화를 미치게 된다. 이는 다시 외부 환경의 구동력들과 압력에 영향을 주게 된다.

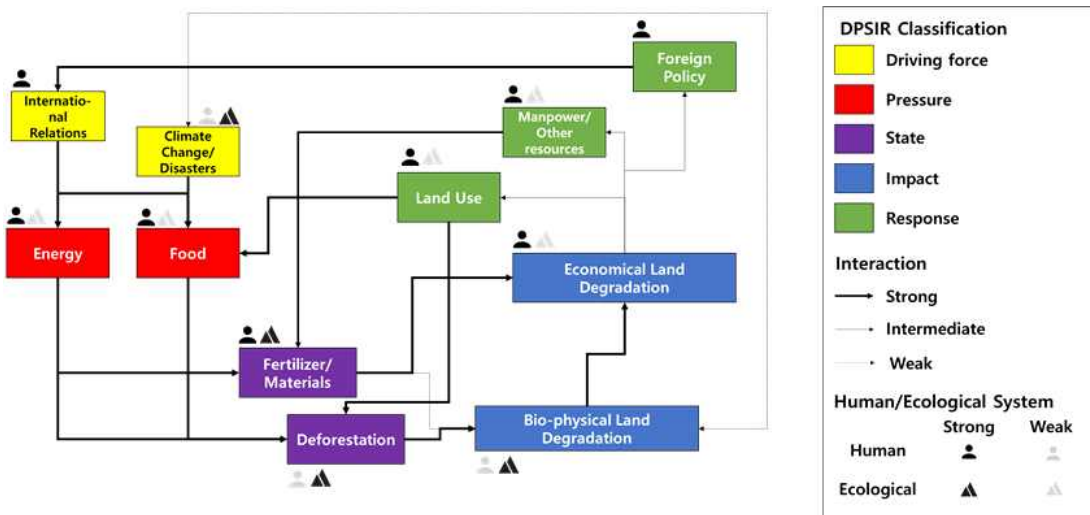


그림 19. DPSIR Framework에 기반을 둔 북한의 토지황폐화-식량문제 거시적 프로세스 모형

2) 북한 협동농장 모형 설정

북한은 한국전이 끝난 이후 소련식의 협동농장 체계를 구축하기 시작하여, 1960년대 전체 농업을 협동 농장으로 전환하였다. 1960년대에 완성된 집단농장 체제는 현재까지 유지되고 있으며, 1990년대까지 기본적인 속성이 크게 변하지 않았는데, 1990년대 이전 북한의 협동농장

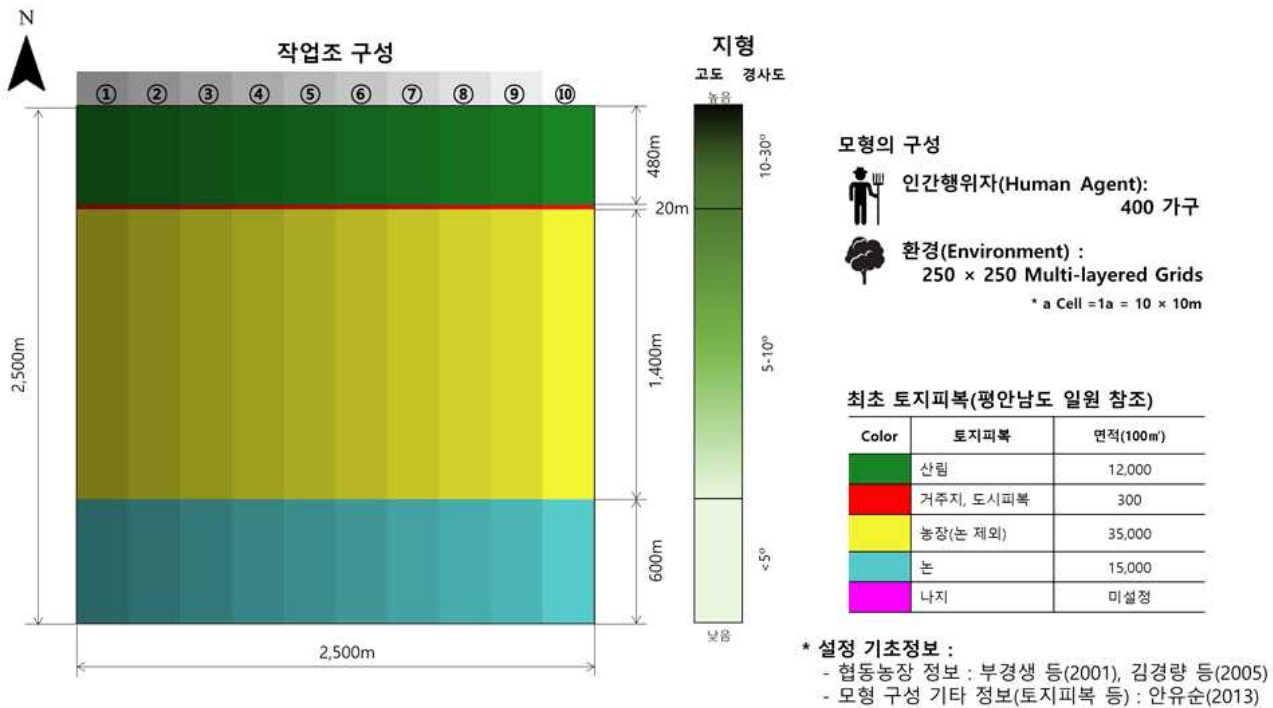


그림 20. 북한 협동농장 모형의 개념적 구조

에 대해서 기술한 부경생 등(2001)과 김경량 등(2005)에 따르면 북한 협동농장의 일반적인 속성은 다음과 같다.

먼저 북한의 협동농장의 크기는 550~750ha로 리 단위의 행정단위와 일치되는 형태를 보여준다. 즉 북한의 협동농장은 단순한 경제 단위가 아닌, 통치 단위로서의 기능도 한다. 이 협동농장은 북한 전체에 약 3,000여개소가 위치한다. 협동농장의 구성 및 환경조건에 따라 다르겠지만, 한 협동농장은 약 300~400가구로 이루어져 있으며, 이는 다시 700~900여명의 노동자, 그리고 1,900~2,000여명의 노동자로 구성된다. 그리고 각 협동농장은 5~10개의 작업반으로 이루어져 있으며, 50~100명 정도를 작업반원으로 둔다.

이러한 북한의 협동농장의 속성을 대표하기 위해 현실에 실존하지 않는 가상의 “북한 협동농장”모형을 구상하였으며, 이는 그림 2와 같다. 행위자기반모형의 기본 구성인 행위자와 환경을, 이 모형에서는 협동농장을 이루고 있는 가구와 협동농장에서 이루어지고 있는 자연·인문환경 프로세스로 설정하였다. 앞선 통계자료에서 도출된 대로 가구 행위자의 수는 300~400명 사이로 도출되도록 구성하였으며, 이들이 가지고 있는 부양인구, 노동자, 작업반 구성 등 또한 앞선 조사 결과를 따랐다. 환경은 한 번의 크기가 10m인 격자로 구성하였는데, 정방형으로 한 번에 이 격자가 250개씩 분포하도록 설정하였다. 즉 모형의 전체적인 크기는 625ha로써 앞선 결과와 유사한 수치이다. 환경의 속성은 다양한 층위의 인문사회 환경과 자연환경으로 설정되는데, 이는 각각의 협동농장마다 다를 것으로 예상되기 때문에 현재까지 알려진 북한의 일반적인 속성을 반영하는 데에 주력하였다. 먼저 토지이용의 경우 An(2012)의 평안남도 일대의 토지이용 분포를 활용하여 비율을 추산하였으며 임의로 논, 밭, 취락, 산림의 형태로 배치하였다. 기후(기온, 강수) 토양 등의 자연환경 정보 또한 평안남도 일대 알려진 정보의 범위에서 정리하였다. 다만 북한의 토지황폐화 및 농업생산성에 큰 영향을 끼치는 지형구성에 대해서는 임의의 규칙을 세워서 설정하였는데, 논의 토지이용인 지역이 낮은 고도와 낮은 경사도, 밭이 10도

이하의 경사도, 그리고 상부에 위치한 산림을 높은 고도와 경사도로 가지는 지역으로 구분하였다. 즉 위쪽을 북쪽으로 본다면 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 고도가 낮아지는 형태로 지형을 구성하였다.

3.2 모형의 구축

앞선 모형을 바탕으로, 가상의 북한 협동농장을 통해 북한의 토지황폐화와 식량문제 경향을 확인할 수 있는 행위자기반모형을 구축하였다. 모형의 전체적인 구성은 평안남도 일대를 대상으로 같은 목적의 모형을 구성했던 안유순(2013)에 기반한다. 이 모형은 베트남의 유역을 기반으로 Le et al.(2008; 2010)의 LUDAS Framework에 기반을 두었다. 이 Framework는 행위자기반모형 기반 토지이용변화 모형, 즉 다행위자시스템(MAS-LUCC) 기법으로, 행위자들과 그 집합, 그리고 행동규칙인 인문환경시스템, 자연환경의 프로세스를 대표하는 자연환경시스템, 그리고 행위자들의 상호작용과 외부환경(외부정책) 시나리오로 구성된다.

본 모형은 현실세계의 토지이용변화를 모사하는 안유순(2013)과는 다르게 가상으로 설정된 세계를 다루지만, LUDAS Framework에 따라 모형을 구성하였으며, 많은 부분에서 안유순(2013)의 연구에서 구축한 부속모형을 스케일 등을 바꾸는 형태로 차용하였다. 모형은 Netlogo 6.2.0으로 구축하였다.

본 모형은 1회 구동될 때마다 1년이 경과하는 것으로 정의내려져 있으며, 모형의 전체적인 구조와 흐름은 그림 5와 같다. 세부적인 내용은 LUDAS Framework에 따라 기술하며, 모형의 흐름에 따라 자연환경시스템, 인문환경시스템, 외부환경 시나리오의 순으로 기술한다.

1) 자연환경시스템

자연환경시스템은 이 연구에서 확인하고자 하는 토지황폐화와 관련된 북한의 자연환경 특성을 분석하여 Physical Land Degradation Submodel, Chemical Land Degradation Submodel, Biological Land Degradation Submodel로 구성하였다. 그리고 이러한 요인들이 결합되어 Bio-physical Land Degradation이 반영된 “Soil Quality”가 계산되었으며, Economical Land Degradation이 반영된 Potential of Food Production이 반영되었다.

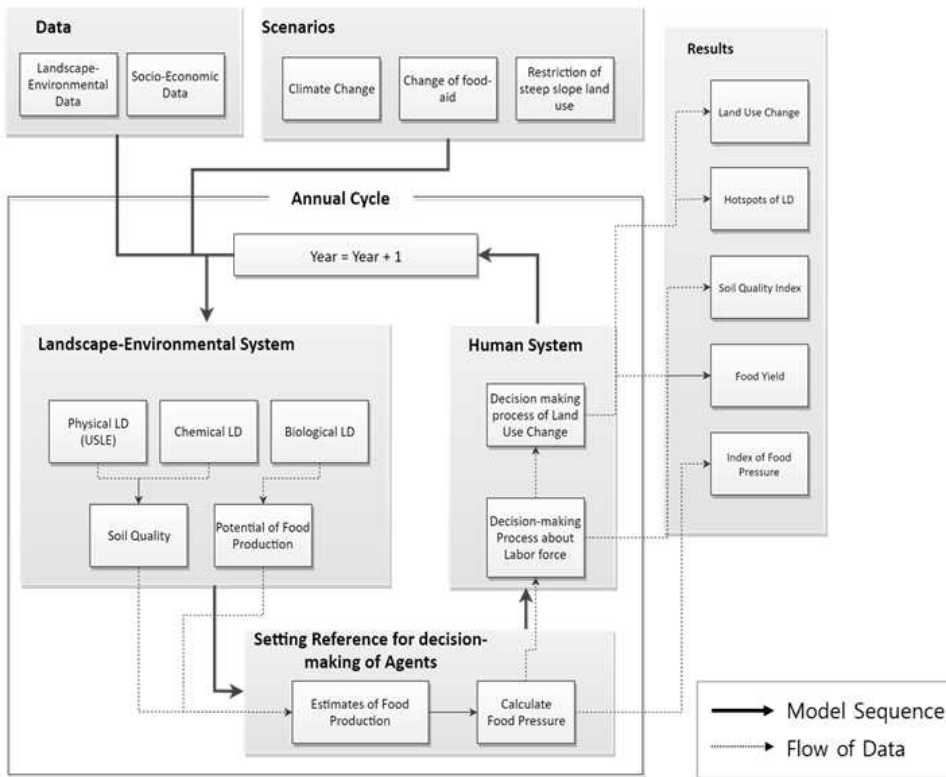


그림 21. 모형의 구조와 흐름

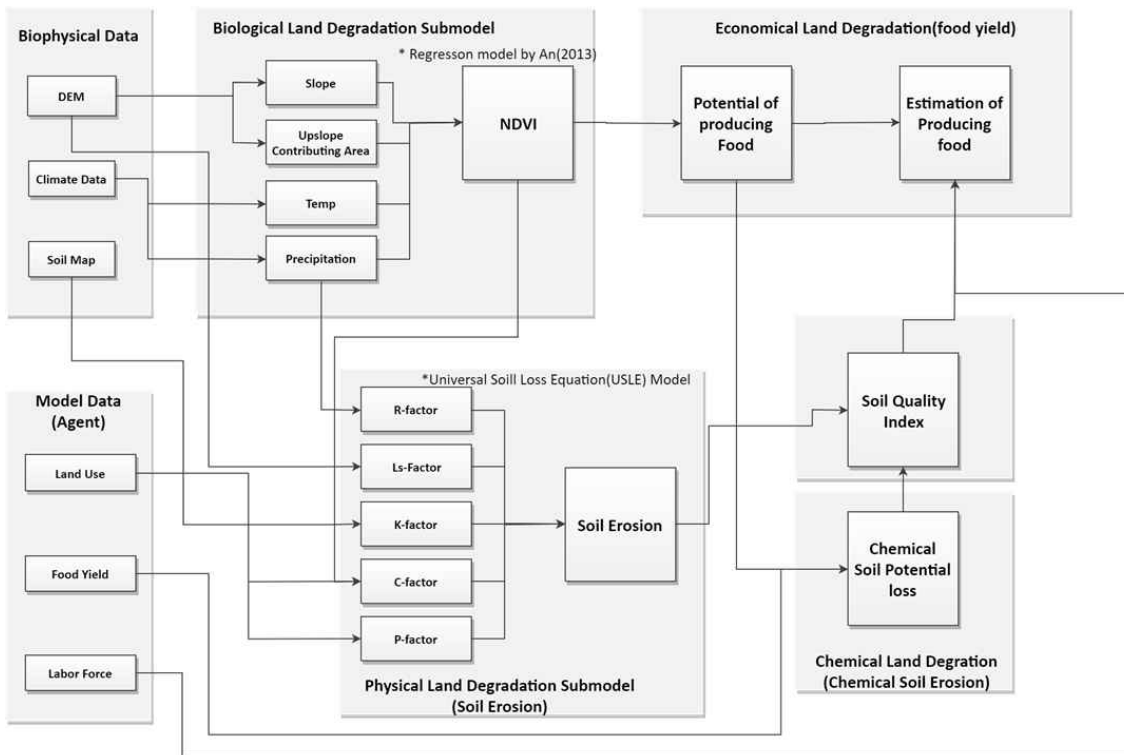


그림 22. 자연환경시스템 모형의 구조

Biological Land Degradation Submodel은 토양의 생물학적 활력도를 나타내는 지표로, 우리가 알고 있는 북한의 생물학적 활력도 지표이자, 이 덕분에 북한의 식량생산 지수를 추정

할 수 있는 지표로 활용하는 NDVI지수를 말한다. 그러나 NDVI는 위성영상을 통해 구하는 지표로 모형에 활용하기 위해서는 다른 자연환경자료와의 관계식이 필요하다. 이러한 목적에 따라 안유순(2013)은 북한 전역을 대상으로 논, 밭, 산림으로 구분하고, 그 지역마다 NDVI와 다른 환경자료와의 관계식을 도출하였다. 이는 아래 표 1과 같다

표 1. “Biological Land Degradation Submodule”의 공식(안유순, 2013)

Land use	Formula	R ²
Rice field	NDVI=ln (1.464-0.019 ln S-0.026 ln E+0.215 ln R-0.023T)	.158
Farm (except rice field)	NDVI=ln(2.115+0.005S-0.01 lnAs+0.02 lnE+0.002T)	.142
Forest	NDVI=((7111.178 -30.361 logAs+8 3.839 lnS+213.554 lnE+36.004T-1.107R))	.289

* Note

1. Abbreviation of Dependent Variables: S-Slope, E-Elevation, As-Upslope Contributing Area, R-Precipitation, T-Temperature
2. Data sources: United States Geological Service (USGS), eMODIS (NDVI), USGS SRTM 90m(S, E, As), North Korea Climate Data by Korea Meteorological Administration (T, R)
3. P-Value (All Dependent Variables and R²) < 0.01

물리적 토지황폐화 추정모형은 토양침식의 양을 추정하는 모형이다. 이 연구에서는 그 중 가장 유명한 토양침식 모형인 Universal Soil Loss Equation을 사용하였으며, 그 공식은 다음과 같다.

$$A=R \times K \times LS \times C \times P$$

R factor은 강우에 강도에 의한 침식력을 나타내며 모형 내 강우값을 바탕으로 Lee et al.(2008)이 사용한 공식을 활용하였다. C Factor와 P Factor는 토지이용변화에 대한 인자로 역시 앞선 논문에서 사용한 표를 바탕으로 토지이용별로 가치를 부여하였다. 단 산림에 대한 C factor는 Van der Knijff et al., (1999;2000)의 식생지수를 이용한 추정 공식이 있어 그를 활용하였다. 지형에 대한 변수는 앞서 개념모형 설정에서 구성하였던 가상의 지형변수를 이용하여 Van der Knijff et al., (1999;2000)와 Moore et al.(1993)의 공식을 활용하여 계산하였다. K factor는 자료가 부족하여 안유순(2013)의 모형에서 부여되는 값의 범위를 바탕으로 임의로 부여하였다.

Chemical Land Degradation Submodel은 뒤이어 설명할 Human System에서의 인간의 의사결정에 따라 토지에 노동력이 얼마나 투입되는지에 따라 바뀌도록 설계되었다. 즉, 인간이 토지를 더 많이 이용할수록 토지의 화학적 능력이 떨어진다는 명제에 따라 설계하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\text{If } F_{\text{yield}} > F_{\text{yield-potential}}, SC_1 = SC_0 - a (F_{\text{yield}} > F_{\text{yield-potential}})$$

여기서 F_{yield} 는 금년도 생산량, $F_{\text{yield-potential}}$ 은 생산 잠재력을 말하고, SC_1 은 현재시기 화학적 토지황폐화 정도를 나타내는 지수, SC_0 은 전년도 화학적 토지황폐화 정도를 나타내는 지수다 (α 는 상수, 여기서는 1) 즉 생산량이 생산 잠재력을 넘었을 때 화학적 토지황폐화 지수는 떨어지는 형태를 보인다.

토양 질 지표는 토양에 대한 물리적, 화학적, 생물학적인 통합 지표이며 Physical Land Degradation Submodel의 결과와 Chemical Land Degradation Submodel의 합으로 구성하였다. 식량생산량 예측은 홍석영 등(2009)을 바탕으로 NDVI를 통해 단위면적당 식량생산량을 추정하는 식을 구한 안유순(2013)의 결과를 바탕으로 하며, 이 공식은 논과 밭이 달라지며 표 2와 같다.

표 2. 식량생산량 예측 Submodule의 공식(안유순, 2013)

Land use	Formula	R ²
Rice field	$F_{\text{yield-potential}} = 1137.209\text{NDVI} - 601.416$.449
Farm (except rice field)	$F_{\text{yield-potential}} = 0.66\text{NDVI} + 0.641$.555

* Data sources: USGS eMODIS(NDVI); Yield data from FAOSTAT

* Note : . P-Value (All Dependent Variables and R²) < 0.01

이렇게 구해진 식의 값들은 식량생산잠재력으로 해석되며, 토양 질 지표, 노동력 투입 지표와 곱해져야만 식량생산량이 구하여진다고 가정하였다. 이것이 경제적 토지황폐화 모형, 즉 식량생산량 추정 모형이다.

2) 인문환경시스템

이 모형에서 행위자는 자연환경시스템의 변화에 대해서 체감하고, 이에 따라 대응하는 행동 전략을 수립하게 된다. 그리고 이것이 다시 자연환경시스템에 영향을 주게 된다. 다른 행위자 기반모형과 달리 이 모형에서는 관련 행위자들에게 인터뷰를 하거나 하는 행위를 할 수 없기 때문에 “인간 행위자가 식량을 필요로 한다면, 그들은 노동력 투입 전략을 바꾸거나 토지이용을 바꾼다”라고 하는 최소한의 전제를 바탕으로 모형을 구축할 수 밖에 없었다.

이에 대한 사전 모형으로 식량과 토지 배분, 그리고 식량압박도 추정모형이 있다. 토지배분은 단순히 각 그룹별로 평등하게 이루어지는 식으로 설계하였으며, 식량배분은 Nam et al.(2004)의 모형을 활용하였다. 이를 바탕으로 식량압박도는 다음과 같이 계산된다.

$$AF_{\text{pressure}} = (\text{Pop} \times F1) / (AF_{\text{yield}} + AF_{\text{aid}})$$

여기서 AF_{pressure} 는 행위자의 식량압박 예상치, AF_{yield} 는 행위자 거주 토지의 식량 중 분배량, AF_{aid} 는 행위자에게 주어지는 외부 수입(지원)식량의 총량, Pop는 행위자의 가구 부양인구수, F1는 1인당 연간 식량 최소 요구량(김연철(1997)의 UN이 정한 1인당 하루 최소 식량 권장량인 450g에 1년을 곱한 값)을 말한다. 이 모형에 따르면 식량압박도가 1이 넘으면 1인당 연간 최소요구치에 못미치는 식량을 수확할 것이라고 예상할 수 있다.

노동력 배분모형은 이 모형에서 행위자가 의사결정을 하는 절차 중에 하나이며, 배분된 노동력이 식량생산량에 영향을 미치게 된다. 이 모형에서는 행위자가 가지고 있는 노동인구(대개 2명)이 300일을 노동할 수 있고, 하루에 8시간을 일할 수 있다고 가정하였다. 그리고 시험 모의 결과 논 1are(1개 cell)에는 연간 36시간, 밭 100m²에는 연간 48시간의 노동시간이 투입된다는 추정결과를 얻었다. 만약 행위자가 식량압박도가 1 이하라면 이 투입시간을 바꾸지 않는다고 가정하였다. 하지만 식량압박도가 1을 넘는다면, 토양 질 지표를 바탕으로 행위자는 토양

질 지표가 떨어지는 토지의 시간을 빼서 토양 질이 높은 토지에 투자한다고 가정하였다. 그 방법은 표 와 같다. 그 결과 투입되는 시간이 바뀌면 앞서 언급한 토지이용별 시간과의 비율에 따라 앞서 언급한 식량생산량 추정에 들어가는 노동력 투입 비율 지수가 결정되게 된다.

표 3. 행위자 노동력 재배분의 기준(안유순, 2013)

행동구분	기준	행동방식	비고
노동력 회수	$SQ_i < 0.5 \pm 0.05$ $F_{\text{yield-potential}} \leq 0$	노동력지수 전체 삭감(토지 포기)	노동력 0.05미만시 삭감 중지
	$0.5 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.6 \pm 0.05$	노동력지수 0.2 ± 0.05 삭감	
	$0.6 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.7 \pm 0.05$	노동력지수 0.1 ± 0.05 삭감	
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 $F_{\text{yield-potential}}$ - 식량 생산 잠재력

토지이용 변화 모형은 노동력 배분모형과 마찬가지로 행위자가 의사결정을 하는 절차 중에 하나이며, 노동력 배분모형에서 배분되지 않은 잉여 노동력을 이용하여 농지가 아닌 토지를 개간하거나, 노동력이 완전히 박탈된 토지를 나지로 바꾸거나, 기후 및 지형조건에 따라 농지를 논으로 이용할지 밭으로 이용할지를 결정하는 모형이다. 마찬가지로 이 프로세스 또한 행위자의 식량압박도가 1 이상일 때에만 가동되며, 식량압박도에 비례하여 토지이용 변화의 강도를 높인다. 농지 개간 프로세스에서 주요한 고려사항은 토양 질 지표와 토지이용 제한 시나리오이다. 행위자는 농지 개간을 할 때 토양 질 지표가 0.5 이상인 토양만 선택하며, 제한된 경사도 이내의 토양만 선택하여 개간한다.

농지 개간 프로세스 이외에도 노동력이 완전히 박탈된 토지는 버려졌다고 판단해서 토지이용 변화 모형에서 나지로 변경된다. 또한 기후변화와 지형조건을 고려하여 농지를 논으로 이용할지 밭으로 이용할지도 이 모형에서 변경된다.

3) 미래 환경변화 시나리오

기후변화 시나리오는 기온변화와 강수량 변화로 나뉘는데, MLEP.DPRK(2012)의 내용 중 극단적 시나리오를 참고하여 따라 2040년에 현재(2010년)보다 기온은 약 2도, 강수량은 약 10% 상승한다는 시나리오로 설계하였다. 둘 모두 2040년 상승분을 우선 가정한 후 각 연 당 상승폭을 계산하여 그만큼 상승한다고 가정하였다. 하지만 기후변화는 현실적으로 점진적으로 이루어지지 않는다는 점을 고려해서 임의의 기후 변동(Fluctuation)을 대입하였다(식 3-11 참조). 이의 대조군으로 설정한 것은 기후변화가 일어나지 않는다는 가정이다. 기후변화와 동반하여 일어날 수 있는 급변기후에 대한 반영은 모형의 구조가 과도하게 복잡해지는 문제가 있어 반영하지 않았다.

식량지원 정책 변화는 북한이 1년에 대체로 50~100만톤의 추가 식량 지원이 필요하다는(이석, 2004) 관련 문헌을 참고하여, 북한의 식량지원 필요량 최대치인 100만톤이 북한에 지원(또는 수입)된다는 가정과, 그 대조군으로 극단적으로 대외관계가 악화되어 식량지원이 전혀

이루어지지 않는다는 가정으로 설정하였다. 연구지역은 북한의 인구 중 약 30%를 차지하고 있다는 점을 고려하여, 지원의 30%가량이 연구 지역에 투입된다고 가정하였다.

토지이용 제한 정책 시나리오는 경사도를 기준으로 토지이용 제한 정책을 실시하느냐 그렇지 않느냐를 기준으로 설정하였다. 제한 경사도의 적당한 기준이 없어, 모형의 시험 가동을 통해 제한 경사의 기준을 10도로 설정하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 모의 결과 세팅

서두에서 언급하였듯, 이 연구는 북한 토지황폐화 문제와 식량문제를 모의하는 데 초기 연구로써 북한을 축소한 가상 협동농장이 북한의 현실을 어느 정도 모사하였는지에 대한 논의로 한정한다. 이에 본 연구에서는 시나리오 시작 시점을 북한이 협동농장 체제를 완비한 1960년대로 가정하였다. 이에 시나리오 조건을 20세기 후반의 북한의 조건으로 설정하였으며, 이는 기후변화를 현재와 같은 배출량의 시나리오로, 토지이용 제한 정책도 북한 당국이 정해 둔 15도 경사도 이상으로, 그리고 식량지원 또한 북한 전역에 연간 100만 톤 지원 조건으로 설정함으로써 구현하였다.

모의 종료 시점은 100년 또는 북한의 토지황폐화 문제와 식량문제가 극대화되는 시점으로 설정하였다. 북한의 토지황폐화와 식량문제가 극대화되는 시점에 대해서 가정하기 위해, 우선 식량압박이 3년 이상 극심한 가구 행위자들은 모형에서 제거되는 것으로 설정하였다. 이것은 행위자들이 굶주림에 목숨을 잃거나, 연구지역을 떠나는 것을 이용하였다. 이러한 가구 행위자들의 수가 행위자수의 절반에 도달하면, 모형이 종료가 되는 것으로 설정하였다.

모의는 총 100번 실시하였다. 모의결과는 토지황폐화와 식량문제의 시점을 알 수 있는 모의 종료 시점, 토지황폐화의 경향을 확인할 수 있는 토지이용의 변화, 모형에서 사용하였던 토지황폐화와 식량문제 관련 지수들의 변화로 나누어 살펴보았다.

4.2 모의 종료 시점

그림 7의 좌측 그림은 모의 중의 행위자(가구) 수의 변화를 뜻하며, 좌측은 각 모의가 종료된 시점을 상자도표로 나타낸 것이다. 대체로 행위자 수는 30년이 지날 때까지 큰 변화가 없다가, 30년이 지난 후 급격하게 변화하는 결과를 보여 준다. 100번의 모의 결과 평균 36.12년이 소요되면 모의가 종료되었으며, 최소 31년에서 최대 41년까지, 대체로 35~38년 정도에서 모의가 멈추었다. 즉 모의가 시작된 후 30여년 이후에 토지황폐화의 영향이 본격적으로 행위자에게 영향을 주었으며, 약 35년 전후의 시점에서 식량문제가 발생하였다는 결론을 도출하여 볼 수 있다. 이를 모형의 초기 설정 시점이었던 1960년에서부터 가정하여 본다면, 1980년대 후반~1990년대 초반에 토지황폐화 문제가 본격화되고, 1990년대 중반에 식량위기가 발생하였다고 해석할 수 있다.

북한이 “고난의 행군”시기를 1990년대 중반에 경험하였다는 점에 비추어 볼 때, 이 결과는

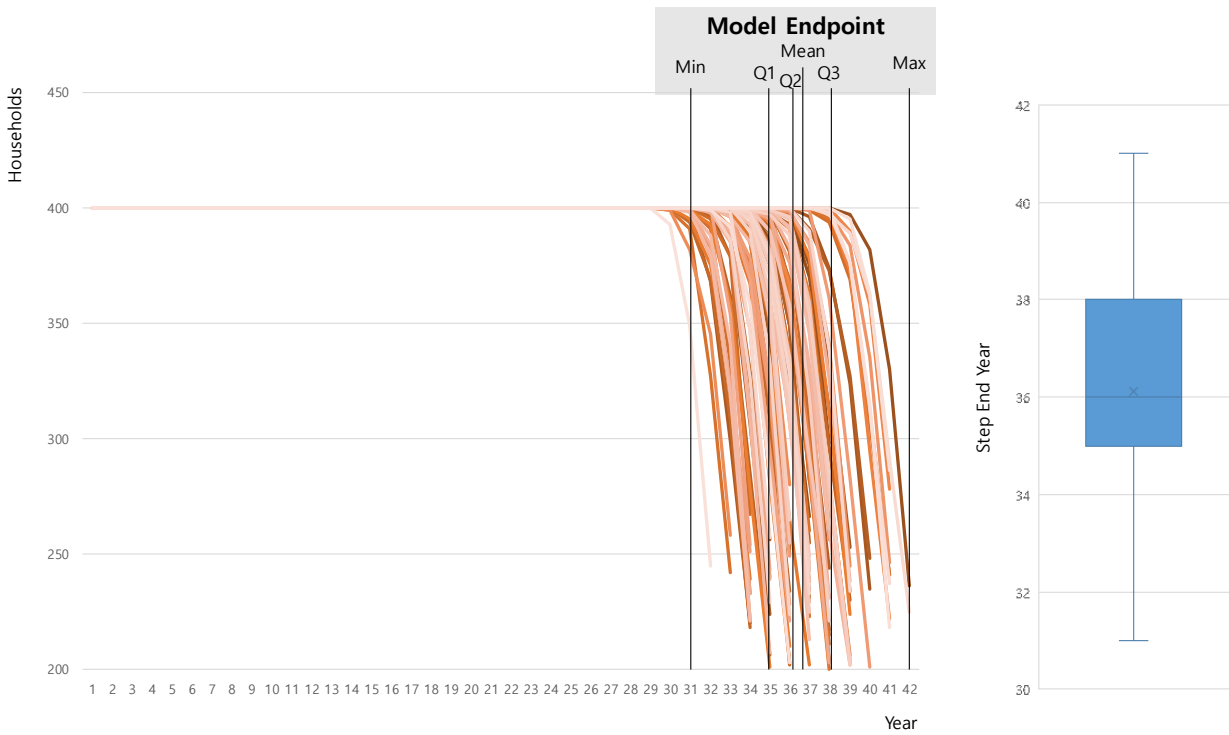


그림 23. 모의 결과 중 가구 수의 변화(왼쪽)와 시뮬레이션 종료 시점(오른쪽)

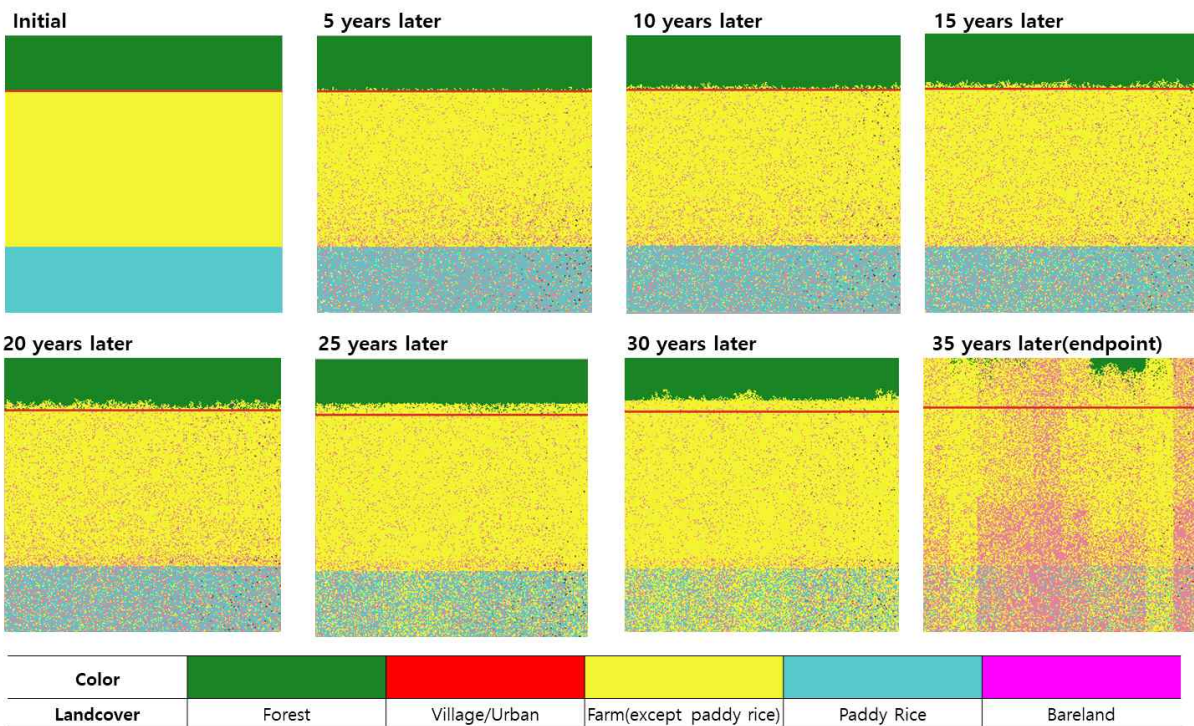
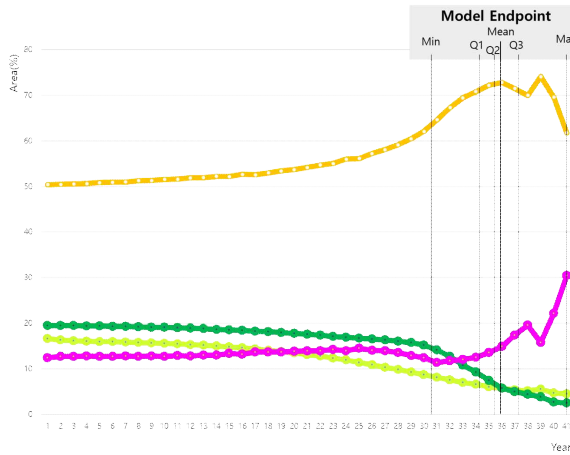


그림 24. 토지이용변화 결과 예시

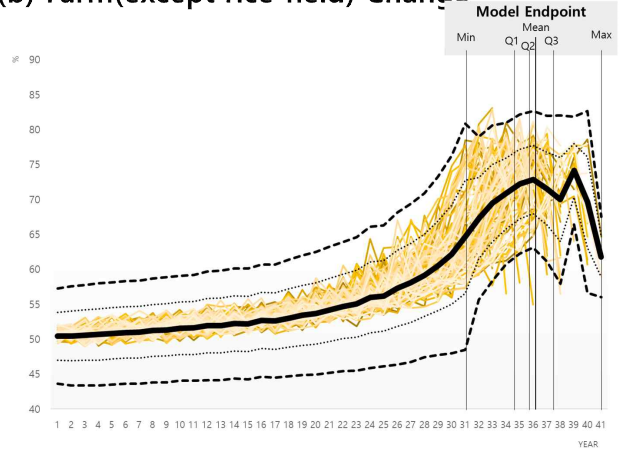
매우 정확한 결과라고 볼 수 있다. 특히 모의에서는 북한의 식량위기 시 주요 문제로 언급하였던 대외관계의 변화로 인한 고립이나 급변기후로 인한 자연재해를 시나리오로서 설정하지 않았다. 그럼에도 불구하고 이러한 결과가 도출된 것은 북한의 식량위기는 외부적인 이벤트보다는 내부적인 토지황폐화 프로세스로 인한 붕괴가 더 큰 영향을 미치지 않았을까 추정해 볼 수

있다. 향후 1980년대 후반과 1990년대 초반에 있었던 이벤트들을 대입하였을 때 결과와 비교하여 볼 필요가 있다.

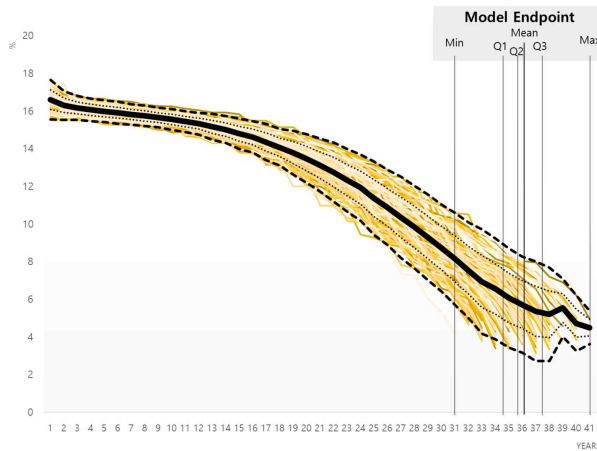
(a) Land Use Change



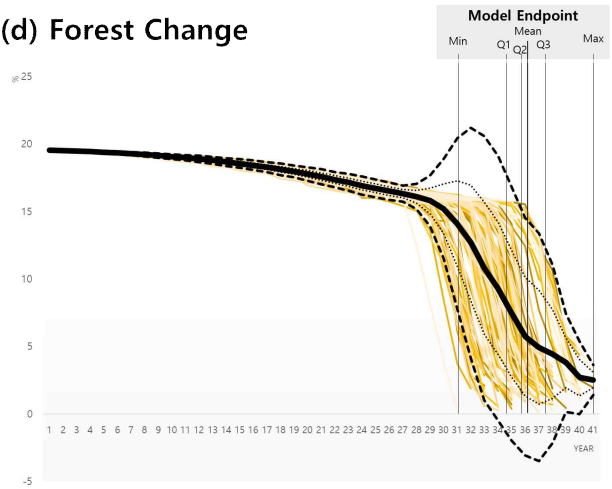
(b) Farm(except rice field) Change



(c) Rice Field Change



(d) Forest Change



(e) Bareland Change

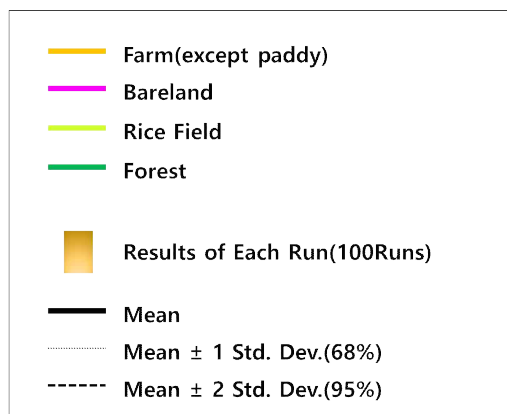
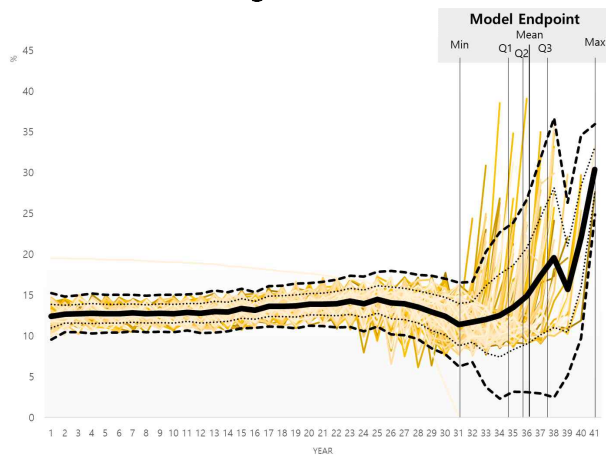


그림 25. 토지이용변화 모의결과

4.3 토지이용의 변화

토지이용의 변화 결과는 모의 결과마다 상당한 차이를 보이며, 그림 8은 변화의 예시, 그림 9는 각 토지이용별 변화를 나타낸 것이다. 모의 초기부터 20년까지는 나지 면적이 추가되고, 산지개간이 점진적으로 이루어진다는 것 외에 추가적인 변화는 관찰되지 않는다. 모의 후 20년이 지난 이후 산지개간이 더 많아지는 등 밭의 면적이 급격하게 올라가는 모습을 관찰할 수 있다. 30년이 지난 이후에는 모의결과마다 다른 패턴을 보이는데, 산지가 대부분 개간되고, 나지 면적이 급격하게 늘어난 이후 모의가 종료되는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다.

토지이용의 변화 결과만 확인하였을 때 산지개간의 경향이 20년 전후, 30년 전후에 변화가 있는 원인에 대해서는 쉽게 알 수 없다. 다만 식량압박이 높을 때, 토지이용 규제정책을 무시하고 산지개간을 더 적극적으로 수행하도록 토지이용변화 의사결정을 설계하였기 때문에, 그리고 전체적으로 토양이 질적으로 저하되는 이유 때문에 양의 되먹임이 작용하여 이 때 산지개간이 적극적으로 이루어진다고 추정해 볼 수 있다. 이는 이후 지수들의 변화를 설명할 때 다루기로 한다.

4.4 토지황폐화-식량생산 지수의 변화

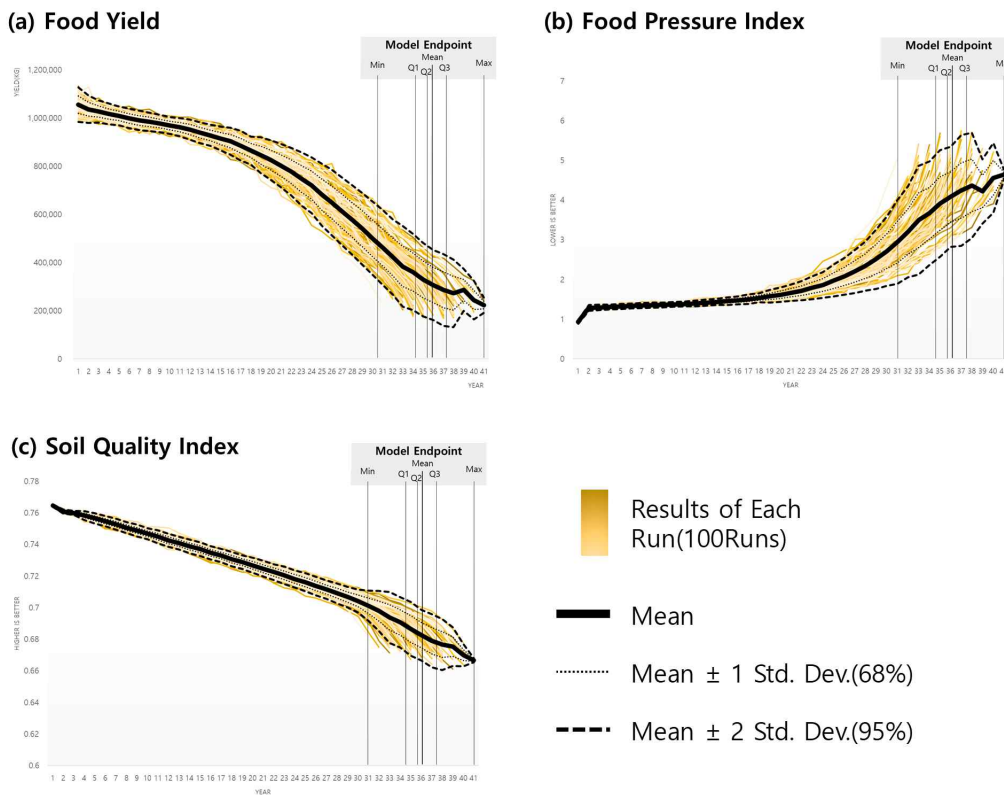


그림 26. 토지황폐화-식량생산 지수의 변화

경제적 토지황폐화를 나타내는 식량생산량의 변화를 살펴보면, 점진적인 변화 경향을 보이거나 대체로 20년을 기점으로 식량생산 저하가 커지는 것으로 결과가 나타난다(Fig. 10a). 이에 따라 사람들의 식량압박도 20년을 기점으로 폭발적으로 증가하며, 변위도 커진다(Fig. 10b). 반면 자연적(물리적, 생화학적) 토지황폐화를 나타내는 토양 질 지표는 이러한 결과와 상관없이 일률적으로 감소하고, 모형 종료 시점에 이르러서야 모형마다 다른 결과가 도출된다(Fig.

10c).

식량생산량과 식량압박도가 20여년 경에 경향이 바뀌는 모의 결과는, 토지이용변화의 결과와 경향이 같으며, 이는 앞서 언급하였듯 식량압박도의 급격한 변화가, 행위자들의 20년 이후의 토지이용의사결정을 바꾸어 적극적으로 토지이용을 바꾸도록 유도했다는 해석이 가능하다. 토양 질 지표는 이와 다르게 점진적으로 감소하였는데, 이는 결과로써의 경제적 토지황폐화의 경향과 원인으로써의 생물리적 토지황폐화의 경향은 그 패턴이 다르다는 것을 보여주는 결과라고 해석할 수 있다. 생물리적 토지황폐화의 경향은 점진적으로 일어나지만, 그 파급효과는 어느 정도의 시점에 이르면 갑작스럽게 변화하며, 이는 점진적인 자연환경의 저하로 인한 인문사회요소의 창발현상이라 해석해 볼 수 있다.

4.5 해석① : 토지황폐화-식량문제의 복잡적응계적 속성

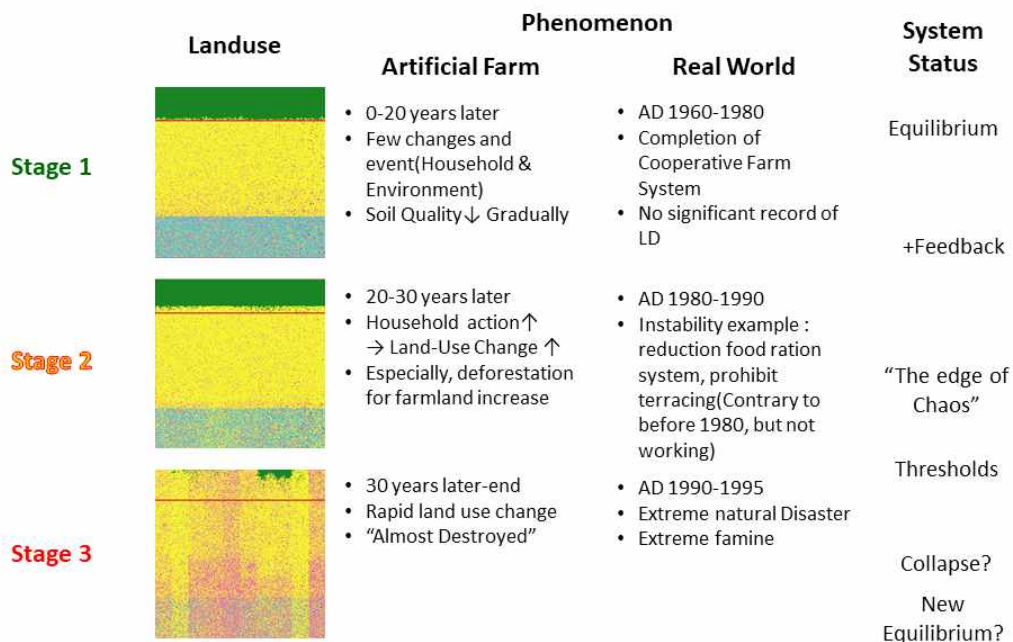


그림 27. 모의 결과와 현실과의 비교결과-3단계 해석

앞서 언급하였듯 모의 결과는 북한의 토지황폐화-식량문제의 현실을 비교적 유사하게 묘사하였다. 이를 바탕으로 모의 결과와 현실의 상황을 서로 비교하여 보았을 때, 협동 농장이 완비된 1960년대 이후로, 북한의 토지황폐화-식량문제의 경향은 3개의 단계가 있다고 볼 수 있다(그림 11). 첫 번째 단계는 1960년대부터 1980년대까지이며, 이 때는 모형속 세계와 현실 세계 모두 큰 변화가 없는 평형(equilibrium)상태였다고 볼 수 있다. 두 번째 단계는 1980년대를 말하며, 본격적인 변화가 있었으나, 어떤 형태로 변화할지는 알 수 없는 상태였다. 이 시기는 앞서 평형상태에서 있었던 문제가 되먹임(feedback)에 따라 점차 영향을 받아 변화하기 시작하였으며, 시스템이 임계점(threshold)의 상태로 점점 다가가는 상태로 해석할 수 있다. 세 번째 시기는 1990년대 시기로, 모형의 세계나 실제 세계 모두 급격하게 변화하는 붕괴의 모습을 보여 주었다. 이는 일종의 창발(emergence) 또는 붕괴(collapse), 새로운 평형의 형성 등으로 볼 수 있다.

4.6 해석② : 토지황폐화-식량생산 문제의 사전예방 가능성

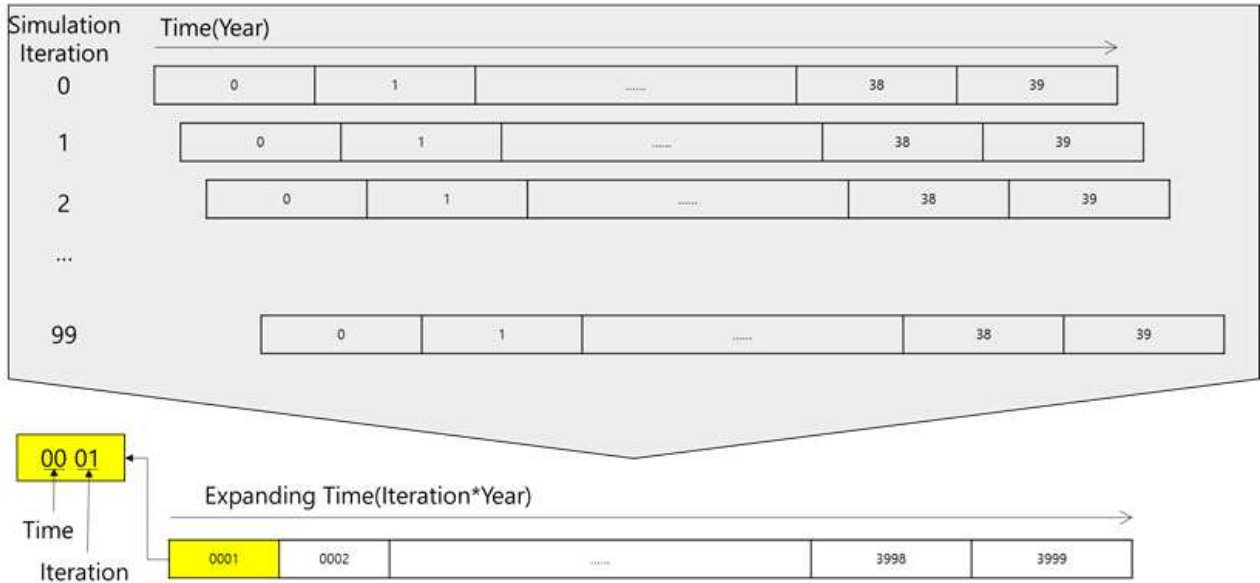


그림 28. 반복 모의결과를 시계열로 치환(“Iteration-for-Time Substitution”)하는 것의 모식도

앞선 해석은 1990년대 식량 위기는 임계점을 사전에 알 수 있는 “사전 예방 신호(early warning signal)”이 사전에 포착될 수 있는 가능성을 보여 준다. 사전예방신호는 복잡계적 세계관에서 임계변화(critical transition)에 대한 예측 불가능성에 대한 대안으로, 정확한 시점이나 방향을 알 수는 없지만, 수학적, 통계적인 징후를 바탕으로 그 신호를 찾을 수 있다는 복잡계적 시각을 뜻하는 것이다(Scheffer et al., 2009). 이 연구에서는 이를 확인하기 위해, Scheffer et al.(1999)와 Dakos et al.(2012)에서 확인할 수 있는 다양한 사전 예방 신호 탐지 방법 중, 시계열자료의 시간적 자기상관성(AR(1))과 표준편차의 변화를 통한 탐지 방법을 사용하였다. 다만, 각 모의 결과는 30~40개의 시계열로 본 분석을 하기에는 다소 짧기 때문에, 각 모의 결과를 평균내지 않고, 이들을 이용해서 시계열을 확장하는 그림 12의 방식을 사용하였다¹²⁾. 그 결과 식량압박, 토지이용변화(산림면적 변화) 등에서 AR(1)과 표준편차가 증가하는 등의 변화가 관찰되었고, 이는 그림 12의 오른쪽 결과와 같으며, 실제 북한의 식량생산량 통계량 자료를 가지고 동일한 분석을 시행하였을 때와 거의 같은 결과가 도출되었다.

12) 본 방식의 정당성에 대해서는 연구자들 간의 검토중이며, 관련 선행연구 저자들에게도 문의를 해 둔 상태이다.

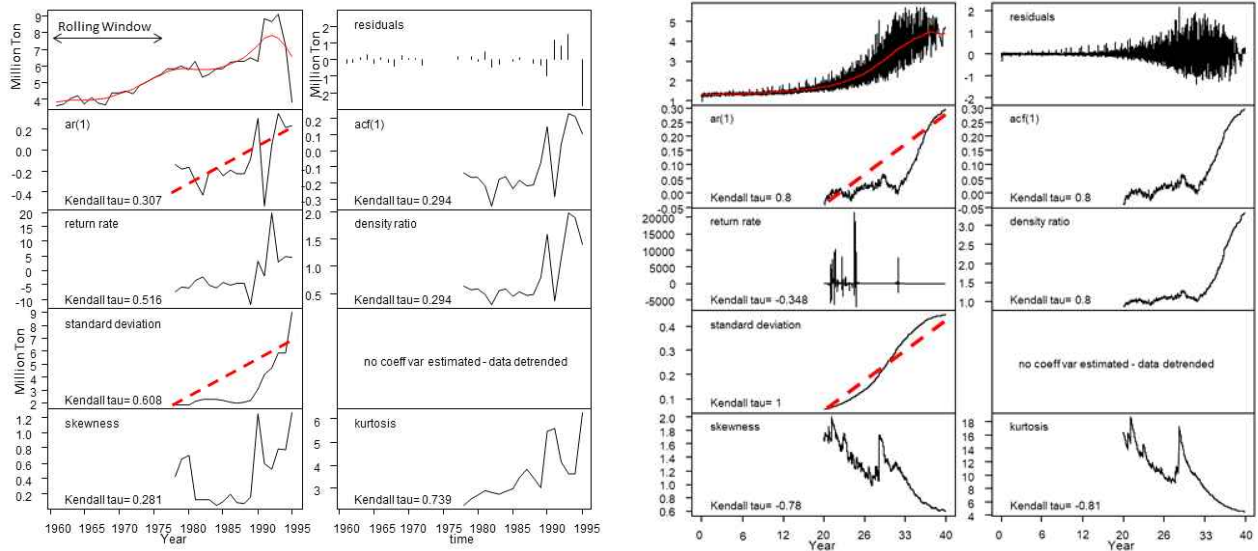


그림 13. 사전 예방신호 확인결과(식량압박도)

5. 결론 및 향후 연구방향

5.1 결론

이 연구에서는 북한 토지황폐화와 식량문제 문제에 대해서 접근하기 위해 북한을 대표하는 가상의 협동농장을 가정하고, 이에 대한 행위자기반모형을 구축하였다. 그리고 1960년을 기점으로 이후의 변화 양상을 모의함으로써 현재 파악하고 모의한 북한의 토지황폐화와 식량문제의 프로세스와 원인에 대해서 살펴보고, 토지황폐화와 식량문제에 대한 연구로써 본 모형이 타당성을 가지고 있는지를 파악하여 보았다. 이로써 파악한 두 가지 key findings는 다음과 같다.

첫째, 모의시점인 1960년 이후 35년 전후의 시점에서 식량위기가 모의되었다. 이는 북한에서 발생하였던 식량위기와 부합하는 결과로 이 모형에서 설계한 가상의 북한 모형이 북한의 토지황폐화와 식량위기를 비교적 정확하게 모사한다는 결론을 도출할 수 있었다. 현실에서 발생하였던 식량위기를 촉발하였던 외부요인이 반영되지도 않았는데도 불구하고 이러한 결과가 도출된 부분에 대해서는 추가적인 논의가 필요하지만, 이 식량위기의 원인이 북한의 내부 분제임을 암시하는 결과라고도 해석할 수 있다.

둘째, 식량위기의 발생 경향은 창발적 발현의 형태로, 생물리적 토지황폐화의 패턴은 점진적인 형태로 변화가 이루어졌다. 따라서 유사한 조건과 상황이었을 때 식량문제가 발생하지 않았더라도 이에 유의할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

5.2 향후 연구방향

향후 연구에서는 두 가지 방향으로 연구를 발전시키고자 한다.

첫째, 모형의 내부 구조 및 미래환경 변화 시나리오를 정교화함으로써, 북한 토지황폐화 문제에 대해서 미래경향을 예측하는 연구로 발전시키고자 한다. 북한의 현장 자료를 최대한 구하고, 구하기 어렵다면 test simulation을 통해서 현실의 북한에 맞는 형태로 모형을 보완하고자

한다. 또한 미래환경 변화 시나리오는 현행의 상황대로 계속 진행된다는 부분만 test가 된 상황이며, 다른 상황에서 어떻게 변화하는지에 대해서 test와 수정을 진행할 필요가 있다. 그리고 가정된 모형의 구조 또한 현실에 가깝게 수정하고, 미래 환경변화 시나리오도 더 구체화 할 수 있을 것이라 생각한다. 일례로 현재 ski slope형태로 설정되어 있는 topography를 유역 분지와 같은 현실의 형태로 바꾸는 방안을 논의해 볼 수 있고, 협동농장 체제에 인센티브 제도가 들어가거나, 아예 협동농장 체제가 해체되는 사회적 변화 시나리오를 가정해 볼 수도 있다.

둘째, 이 모형의 결과를 다양한 스케일에 적용하고자 한다. 이 모형은 가정된 세계를 바탕으로 한 모형으로 북한 전역 스케일 또한 일부 반영되어 있으나, 대체로는 마을 단위 정도의 작은 스케일이다. 이 논문의 기반이 되는 안유순(2013)의 연구와 결합된 모형으로 발전한다면 다양한 스케일에서 프로세스를 확인할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 뿐만 아니라, 북한 전역 또는 동북아 스케일로 확장하는 방안도 고려해 볼 수 있다. 이를 위해서는 행위자기반 모형 뿐만 아니라 시스템다이나믹스 등을 적용하여 이와 연동해 보는 방안도 생각해 볼 수 있다.

참고문헌

- Ariuntsetseg, E., 염재홍, 2013, “행위자 기반 공간 모델을 이용한 구제역 확산 시뮬레이션”, 한국측량학회지 31(3):209-219.
- 김경량·이광석·홍성규, 2005, 북한 농업의 개혁-전망과 과제, 한올아카데미
- 김동한, 2012, “행위자 기반 도시모형의 장점 및 한계 분석에 관한 연구”, 국토연구 75:69-85.
- 김동한·서태성·구형수·강민규·성혜정·김은빈, 2014, “행위자 기반의 공간변화 시뮬레이션 모형 구축과 국토도시정책 활용방안 연구”, 국토연구원 정책보고서.
- 김연철, 1997, 북한의 배급제 위기와 시장개혁 전망, 삼성경제연구소
- 박수진·안유순·신유진·이수연·심우진·문지윤·정관용·김일권·허동숙·성주한·박찬열, 2015, “다행위자시스템(Multi-Agent System)을 이용한 토지이용 변화와 그 영향에 대한 연구: 산림정책의 변화에 따른 가리왕산과 그 일원의 토지이용변화를 사례로,” 대한지리학회지 50(3):1-22.
- 부경생·김성필·김운근·김종환·김채수·류인수·박규택·박근용·박석홍·손해룡·유병일·이근상·이실관·임상철·최장경, 2001, “북한의 농업 : 실상과 발전방향”, 서울대학교출판부.
- 신혜섭, 2014, An Agent-based Approach for Modelling Spatial Transmission Processes of Foot-and-mouth Disease in Korea 2010-11, 서울대학교 지리학과 석사학위 논문.
- 안유순, 2013, “다행위자시스템(Multi-Agent System)을 이용한 북한 토지황폐화의 모형구축 및 분석”, 서울대학교 지리학과 석사학위 논문.
- 안유순·허동숙·박수진, 2017, 국유림의 경제적·환경적 효용을 극대화하는 최적 거버넌스 구축 방안 : 가리왕산을 사례로, 대한지리학회지, 52(3), 321-340
- 이석, 2004, 1980년대 북한의 식량생산, 배급, 무역 및 소비 : 식량위기의 기원, 현대북한연구, 7(1), 41-86.
- 이종덕·박인선·황기연, 2015, “행위자기반모형을 활용한 Personal Mobility와 Partial Autonomous Vehicle의 교통혼잡개선효과 분석,” 교통연구 22(1):27-44.

- 이종호, 2003, “교통시스템분석시 에이전트기반모형기법의 적용,” 대한교통학회지 21(1):147-156.
- 허동숙·안유순·박수진, 2016, “토지이용 및 토지피복 변화 모델링(LUCC Modeling)에서의 행위자 의사결정 체계 구축 방안-가리왕산 일대를 중심으로,” 국토지리학회지, 50(1): 63-80.
- 홍석영·최은영·김건엽·강신규·김이현·장용선, 2009, MODIS NDVI를 이용한 북한의 벼 수량 추정 연구, 2009 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 116-120
- An, L., 2012, Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models, *Ecological Modelling*, 229:25-36.
- An, Y. S and Park, S.J. 2018, An Agent-based Model for Simulating Land Degradation and Food Shortage in North Korea, *Proceedings of Computational of Social Science 2018*, Santa Fe, New Mexico, USA, 2018. 10. 26.
- Dakos, V., Carpenter, S.R., Brock, W.A., Ellison, A.M., Guttal, V., Lves A.R., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D.A., van Nes, E. H., and Scheffer, M., 2012. Methods for Detecting Early Warnings of Critical Transitions in Time Series Illustrated Using Simulated Ecological Data. *PLoS ONE* 7(7)
- Eswaran, H., Lal, R., Reich. P.F., 2001, Land degradation: an overview. in Bridges, E.M., Hannam, I.D., Oldeman, L.R., Pening de Vries., F.W.T., Scherr, S.J.. Sompatpanit, ed. *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification*, New Delhi : Oxford Press
- Heckbert, S., Baynes, T., and Reeson, A., 2010, Agent-based Modeling in Ecological Economics, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185: 39-53.
- Le, Q. B., Tamene, L., and Vlek, P. L. G., 2012. Multi-pronged assessment of land degradation in West Africa to assess the importance of atmospheric fertilization in masking the processes involved, *Global and Planetary Change*, 92-93, 71-81
- MLEP(Ministry of Land and Environmental Protection), DPRK, 2012, *Environment and Climate Change Outlook*, Democratic People's Republic of Korea
- Monticino, M., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T., Lindquist, C., 2007, Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach, *Environmental Modelling & Software*, 22:656-663.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Peterson, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society America*, 57, 443-452.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Homann, M. J. and Deadman, P., 2003, Multi-agent system for the simulation of land-use and land-cover change: a review, *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 314-337.
- Rebaudo et al., 2011, Agent-Based Modeling of Human-Induced Spread of Invasive Species in Agricultural Landsape: Insights from the Potato Moth in Ecuador, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(3), 7
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E., Rietkerk, M., and Sugihara, G., 2009, Early-warning signals

for critical transitions, *Nature*, 461, 53-59.

van der Kniiff, J., J. Jones and L. Montanarella. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau.

van der Kniiff, J., J. Jones, and L. Montanarella. 1999. Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau.

Wilensky, U. 1999. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL). Northwestern University, Evanston. Retrieved from: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>