

기후 변화의 생태계 영향에 대한 ABMS 연구 -빙하감소와 북극곰의 모의실험을 바탕으로-

조성진** · 나유경** · 이준영*** · 조창현****

Analysis of the Ecological Impact of Climate Change using ABMS: A Case Study of Polar Bears and Glacier

Sung-jin Cho* · Yu-Gyung Na** · Joon-young Lee*** · Chang-Hyeon Joh****

요약 : 최근 기후 변화에 따른 생태계의 변화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구는 생태계 연구에 새로운 연구방법으로서 행위자 기반 모델(ABMS)을 소개하고, 사례연구를 통해 이 분야에 대한 활용 가능성을 제안하고자 한다. ABMS의 활용 가능성을 제안·평가하기 위하여, 기후 변화로 인한 빙하의 감소와 그에 따른 북극곰의 멸종 위기에 대해서 에이전트기반의 모형을 수립하고 모의실험을 실행하였다. 연구 결과는 중요 변수 간 상호작용에 신뢰할 만한 일관성을 발견할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 제한한 빙하-북극곰 모델이 환경 변화에 따른 북극곰 멸종 시기 예측에 기여할 것을 기대할 수 있게 한다. 이에 따라, ABMS는 생태계의 다양한 변화 과정의 분석 일반에 적용이 가능할 것을 기대할 수 있다.

주요어 : 기후변화, 생태계 영향, 수리모형, ABMS, 에이전트, 북극곰, 빙하

Abstract : It has actively advanced to study the impact of climate change on ecosystem. This study addresses ABMS (Agent Based Modeling and Simulation) as a methodology of ecosystem research. ABMS would suggest the possibility of practical use in this sector. This study would investigate how the melting speed of glacier in the arctic influences the extinction period of polar bears. The Polar Bears and Glacier Model in this study is expected to contribute to accurate prediction of the polar bear's extinction period. The suggested ABMS could also be applied to the study of various factors of ecosystem in general.

Key Words : Climate change, ecological impact, mathematical model, ABMS, agent, polar bear, glacier

이 논문은 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2010-330-B00278)

* 경희대학교 지리학과 석사졸업(M.S., Graduate school of Kyung Hee University), island.jin@gmail.com

** 경희대학교 지리학과 학부과정(Undergraduate Student, Department of Geography, Kyung Hee University), breezeer@naver.com

*** 경희대학교 지리학과 석사과정(The master's course, Department of Geography, Kyunghee University), jyoung0523@hanmail.net

**** 교신저자, 경희대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Department of Geography, Kyung Hee University), bwchjoh@khu.ac.kr

1. 서론

1) 연구배경

근래의 전 지구적인 급격한 기후 변화는 환경의 변화 속도를 과거에 비해 급격히 증가시켰다(IPCC, 2001). 이에 따라 환경 변화에 대한 동·식물의 적응 기간이 과거에 비해 크게 감소하여, 환경에 적응하지 못한 종은 멸종되거나 생태계 교란이 일어나는 등 생물다양성 측면에서의 심각성이 대두되고 있다. 최근 기후 변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate, Change, IPCC)의 제4차 보고서는 현재의 추세대로 지구 기온 상승이 계속될 경우, 2100년에는 현재 생물종의 30%가 사라질 것이라는 충격적인 결과를 제시하였다. 이러한 연구 결과는 기후 변화가 생태계에 직·간접적으로 미치는 심각성을 말해준다. 특히, 동·식물의 멸종과 생태계의 교란에 관한 문제는 기후 변화로 인한 환경 적응 기간과 직접적으로 연관되어 있다. 따라서 기후 변화가 생태계에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 환경 변화의 속도가 생태계 변화에 어떠한 영향을 미치는 것에 대한 연구가 필요하다.

2) 선행연구 고찰

최근 국내외에서 기후 변화에 따른 동·식물을 포함한 생태계의 변화에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 국내 연구 동향을 살펴보면, 이승호 외(2008)는 나주 지역을 사례로 작물의 생육 시기와 생산량의 변화를 분석하여 기후 변화가 농업 생태에 미치는 영향을 밝혔으며, 평균 기온 상승에 따른 각 작물의 출수기 변화와 낱알 수, 당도의 변화를 예측하였다. 공우석 외(2009)는 기후 변화 취약 식물종의 분포와 기온의 관계를 제시한 바 있다. 지구온난화의 영향을 연구하기 위해 식물종별 온도 범위를 파악하여 지구온난화와 식물들의 분포역 변화를 예측할 수 있는 정보를 구축하였다. 김지석 외(2010)는 도시의 기온 변화에 따른 야생조류 종의 개체 수와 서식지 변화를 파악하였다. 6년

동안 월드컵공원의 야생조류 출현 현황과 서울시 기온과의 관계를 밝히고자 회귀분석을 시행한 결과, 야생조류 7종에서 유의한 상관관계가 있음을 밝혔다. 해외 연구 동향을 살펴보면, Perry *et al.*(2005)은 기후 변화와 해양의 어족 이동에 관한 연구를 통해, 북해(North Sea)에서 수온의 상승으로 어족의 서식지가 북쪽으로 이동하였다고 밝혔다. Fischbach *et al.*(2007)은 북부 알래스카 지역 해안지역에서 유빙과 북극곰의 관계에 대한 연구를 진행하였다. 1985년에서 2005년 사이에 경도 137W-167W 사이의 지역의 북극곰 서식지 분포를 위성 원격측을 통한 측정으로 살펴본 결과, 빙하의 감소에 따라 해안지역의 서식지의 분포가 1985~1994년에 62%였던 것이 1998~2004년에 37%로 줄어들었다고 밝혔다.

이러한 연구들은 대체로 직접 자료를 수집하여 회귀식과 같은 수리 모형을 제작함으로써 환경 변화로 인한 동·식물의 서식지나 개체수의 변화를 분석하였다. 이러한 분석 방법은 결과에 신뢰도가 비교적 높고 검증이 용이하여 생태학뿐만 아니라 여러 분야에서 광범위하게 활용되어 왔다. 하지만 수리모형 구축 시 연구 대상에 관한 되도록 많은 자료가 요구되므로, 자료 획득에 제약이 있을 시에는 모형 구축이 어렵다. 더불어 과거의 수치 자료와의 비교 분석은, 과거와 달리 여러 측면에서 새로운 양상을 보일 것으로 예상되는 불확실한 미래 예측 시, 다양한 매커니즘의 변화를 담아내지 못하는 한계를 내포하고 있다. 식물은 생장에 미치는 환경 및 조건에 대해 계량적인 요소가 많은 것과 달리, 동물은 환경과의 상호작용을 계량화하기 어려운 요소가 많아 다양한 매커니즘의 변화를 모의실험을 통해 연구할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하고자 행위자 기반 모델(ABMS: Agent-Based Modeling and Simulation)을 도입하였다.

3) 행위자 기반 모델을 활용한 연구사례

컴퓨터공학에 기원을 두고 있는 ABMS은 현재 공학뿐만 아니라 경제학, 심리학, 지리학 등 여러 분야에서 새로운 방법론으로서 활용되고 있다. 지리학 분야에서는 ABMS를 활용한 스프롤 확산 현상(Torrens &

Alberti, 2000), 회피경로 모델링(Torrens, 2006)과 같은 연구가 진행되었다. 특히, Thomas(2001)는 자원 이용의 변화와 기술 혁신의 과정이 농업을 변화시키는 과정을 공간적으로 연구하였다. 경제적 프로세스와 수문학적 프로세스를 통합하여 관개용 물이 농업에 미치는 영향을 분석한 결과, 자원 이용의 변화가 농업에 미치는 과정을 이해하는데 ABMS가 효과적인 방법론임을 밝혔다.

4) 연구대상 및 목적

본 연구는 기후 변화가 생태계 분야에 미치는 영향에 대한 새로운 분석 방법으로서 ABMS의 활용 가능성을 제안하고자 빙하와 북극곰 모형을 제작하였다. 극지방은 기후 변화의 영향을 크게 받는 지역이며, 북극곰의 멸종은 기후 변화에 의한 생태계 영향을 잘 나타내는 지표로서 널리 인식되고 있기에 이를 연구 대상으로 선정하였다.

ABMS는 행위자들의 행동을 바탕으로 전체 시스템을 평가한다. 변화된 환경 속에서 생태계의 미래를 예측하는 방법으로서, 위에서 언급한 수리 모형이 갖는 한계를 보완할 수 있으며, 생태계 분야의 다양한 요소에 적용이 가능하다. 이에 본 연구에선 빙하의 융해 속도를 달리한 모의실험을 수행하여 북극곰 개체수의 변화를 관찰하여 분석하였다. 이는 지구 기온 상승으로 빙하가 융해되는 속도가 북극곰의 멸종시기에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위한 것이다. 빙하의 융해에 관한 기존 연구와 북극곰의 생활 방식에 대한 자료 수집이 선행되었으며, 객관적·통계적 자료를 바탕으로 모델을 구성하였다.

WMO의 자료에 따르면, 북극의 해빙(海氷)은 지난 30년 동안 급격하게 감소하였으며, 여름 해빙기(解氷期)에 가장 극심한 감소를 보였다(WMO, 2010). 빙하의 융해는 북극곰의 생활에 직·간접적인 영향을 미친다. 멸종 위기종인 북극곰은 북극에서 생활하기에 알맞도록 완벽하게 적응된 형태로 진화되었으며, 삶의 대부분을 북극해의 빙하 위에서 생활하기 때문이다. 북극의 기온 상승으로 인한 빙하 융해는 북극곰의 서식지 축소를 의미한다. 또한 북극곰의 주식인 바다표

범 사냥이 봄철 결빙일과 해빙일(解氷日) 사이의 짧고 제한된 기간에 빙하 위에서만 가능하므로, 빙하의 감소는 사냥 시기의 단축과 사냥 장소의 축소를 초래하고 있다. 생활환경이 악화됨에 따라 북극곰의 생활은 다른 양상을 보이게 된다. 이처럼 빙하 융해 추세에 따른 북극곰 멸종 시기 예측 모의실험을 수행, 분석하여 생태계 분야에 대한 ABMS의 활용가능성을 제안·평가하였다.

2. 행위자 기반 모델

1) ABMS의 정의 및 구성요소

ABMS(Agent-Based Modeling and Simulation)는 복잡계과학¹⁾(complexity science), 컴퓨터공학, 경영학, 사회과학 등 다양한 분야에서 기원한 행위자 기반 모델이다. 자율적 목적 지향적인 개별 에이전트(agent)의 특성과 상호작용과정을 기반으로 전체 시스템을 분석하는 Bottom-up의 모델 수립 방식이다. 다양한 요소들의 개별 메커니즘을 결합하여 결과를 도출한다.

ABMS는 에이전트와 환경으로 구성되어 있다. 에이전트와 환경에 대한 명확한 정의는 정립되지 않았다. Woodridge(2002)에 따르면, 에이전트는 목적을 달성하기 위해 상황 의존적·자율적으로 행동하는 개체이다. 환경은 에이전트가 행동하며 상호작용하는 공간으로 정의되며, 변화하는 동적시스템이다. 에이전트와 환경의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 환경은 고정된 값이 아니라 변화하는 동적 시스템으로 특정 메커니즘을 따라 변화한다. 둘째, 에이전트는 목적을 가지며 목표에 도달하는 방향으로 행동한다. 행동이 가능한 대안들 중 자율적으로 판단하여 행동하므로 모형 설계자가 행동의 세부사항을 일일이 지정해 주지 않아도 된다. 셋째, 에이전트는 환경에 대한 불완전한 지식에 기반을 두고 가장 합리적인 대안을 선택하여 행동한다. 지속적으로 변화하는 환경에 대한 정보는 전체 중 일부만 에이전트에게 전달되어 시행착오를 경험할 수 있다. 따라서 동일한 환경의 유사한 상황일지라도

각각의 에이전트는 다르게 행동하여 행동의 결과가 다르게 나타날 수 있다. 넷째, 에이전트는 환경과 사건을 인식하는 반응성(reactivity)을 가지고 변화하는 환경에 반응하면서 행동을 수정한다. 마지막으로, 다른 에이전트와 의사전달규칙(protocol)을 통해서 상호작용이 가능하며, 경쟁, 협력, 협동 관계에 있는 에이전트들의 지속적인 상호작용은 에이전트의 행동에 영향을 준다. Figure 1은 에이전트와 환경의 상호작용과 각 속성을 나타낸 것이다.

ABMS가 종래의 시뮬레이션 방식과 구별되는 다음과 같은 몇 가지 특성은 동·식물의 행태 예측에 매우 유리하게 작용한다(Macal *et al.*, 2009). 첫째, 연구에 필요한 자료가 한정적인 경우에도 간단한 행동규칙과 몇 개의 변수를 활용하여 분석이 가능하다. 따라서 지리적으로 접근이 불가능하거나 개체의 특성상 자료 수집이 어려운 동·식물의 자료 수집상 한계를 극복할 수 있다. 둘째, 대상의 변화 양상을 예측할 때 미래의 특정 시점뿐만 아니라 변화하는 과정을 관찰할 수 있다. 변화하는 과정을 살핌으로써 환경이 에이전트에게 미치는 영향이 시간의 흐름에 따라 어떻게 변화하는지 분석이 가능하다. 셋째, 에이전트 간 의사소통이 가능하므로 다수의 에이전트가 서로 연관되어 있는 경우에

특히 유용하다. 서로 다른 에이전트들 간의 상관성을 고려할 수 있으므로 식물의 천이²⁾와 동물의 서식지 이동 과정에서 특정 집단과의 경쟁, 협동, 협력 관계를 지정할 수 있다.

2) ABMS 개발환경

에이전트는 다른 에이전트와 의사전달규칙(protocol)에 따라 메시지 형식의 에이전트 대화언어(Agent Communication Language, ACL)를 통해서 상호작용을 수행한다. 이때 에이전트는 일반적인 대화를 비롯해 정보나 지식을 교환하고, 명령을 하거나 질문을 하는 등 다양한 형식의 상호작용을 수행한다. 아래 Figure 2는 에이전트의 상호작용에 사용되는 에이전트 대화 언어를 나타낸 것이다. 대표적인 에이전트 대화 언어로는 APRIL(Agent Process Interaction Language), KQML(Knowledge Query and Manipulation Language) 등이 있다. ABMS는 범용 및 전용 개발소프트웨어나 툴킷(toolkit)을 이용해 제작이 가능하며, Visual Basic, C++, Java 등 프로그래밍 언어를 이용해서도 개발할 수 있다. 본 연구에서는 ABMS의 개발 환경을 지원하는 전용 개발 소프트웨어 NetLogo를

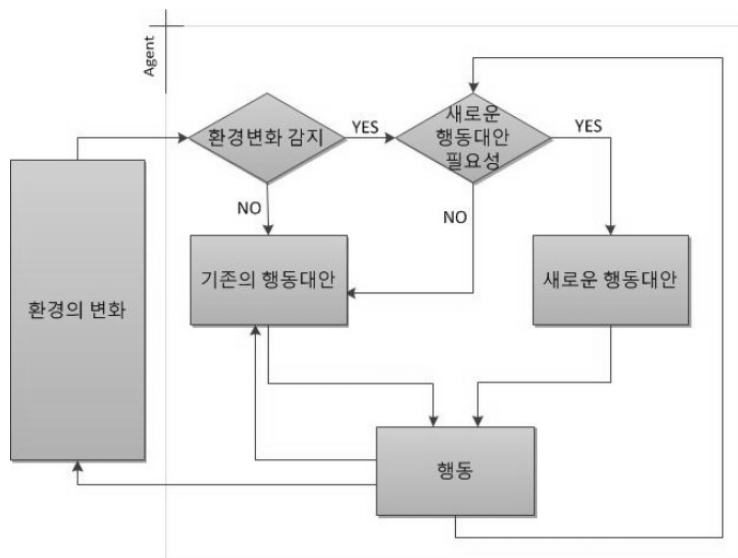


Figure 1. Interaction between agent and environment. 에이전트와 환경의 상호작용

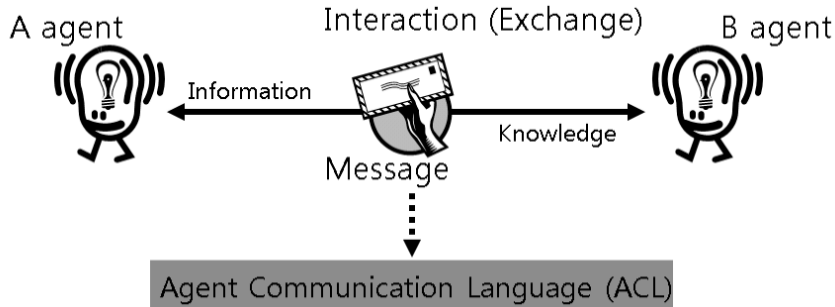


Figure 2. Agent Communication Language. 에이전트 대화 언어

* 출처: Cho, 2007

이용하여 모형을 제작하였다. Java에 기반을 두는 NetLogo는 노스웨스턴대학에서 개발되었으며, 개발자가 여러 에이전트에게 동시에 실행 가능한 명령을 부여할 수 있어 복잡계에 대한 시계열적 변화 패턴을 분석하는데 적합하다.

3. 연구 설계 및 분석 결과

1) 연구 설계

ABMS(Agent Based Modeling and Simulation)는 에이전트와 에이전트의 활동 공간인 환경으로 구성된다. 모델의 환경은 북극곰의 서식지인 북극(빙하)을 가정하는 가상공간으로 설정하였다. 전 지구적인 온도 상승에 따라 빙하가 감소하는 환경을 구축하였으며, 이는 IPCC의 2007년 보고서(IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities: 95-96, 101)를 근거로 하였다. 빙하의 고도는 실제 북극의 모습과 유사하도록 임의의 값인 100m 이하의 값을 무작위로 부여하였다. 최고 고도 값을 가진 빙하의 비율은 2009년 NASA와 콜로라도대학의 ‘국립설빙데이터센터’(National Snow and Ice Data Center)에서 제시한 자료를 참고하였다. 고도의 변화가 없는 빙하로서 실제 북극에서 2년 이상 녹지 않은 빙하가 언급되었으며, 이를 모델 내에서는 최고 고도 빙하라고 지정하였다. 자

료에서 ‘2년 이상 녹지 않은 빙하의 면적이 1981년에 35%를 차지하였으나 2009년에는 10%로 줄어들었다’고 제시된 점을 감안하여 모델링 환경에서 최고 고도의 빙하 비율을 1~10%로 지정한 후 모의실험한 결과 명확한 결과를 보이는 비율인 6%, 7%, 8%의 경우를 각각 택하였다.

독립변수인 빙하의 용해 속도는 Maslanik J. A. *et al.*(2007)의 빙하면적 감소 자료를 참고하여 10단계로 모의실험을 하였다. 임의로 지정한 것은 실제 북극 빙하의 용해 속도에 대한 자료의 한계 때문이다. 고도의 변화가 아닌 면적의 변화(%)로 주어졌기에 본 연구의 모형의 환경에서 면적의 변화가 실제와 유사한 형태가 되도록, 모델에 알맞은 형태인 고도의 변화 수치를 지정하였다. ABMS는 빙하의 고도값을 각각 지정해주는 것이 아니라 기본적인 규칙이 주어지면 임의로 지정된다. 빙하고도의 감소가 바로 면적의 감소로 이어지는 경우도 있으며 빙하의 고도가 낮아지더라도 면적의 변화가 없는 경우도 있다. 이 때 고도의 변화에 따른 지형의 변화가 Figure 3과 유사하도록 지정하였다. 100번 모의실험을 반복 수행하여 실현 가능한 다양한 경우를 검토하였다. 빙하의 감소 속도 1단계는 빙하의 용해 속도가 가장 느린 단계이며, 단계가 상승할수록 속도가 빠르게 설계하였다. 모형 설계의 흐름과 관련 변수, 참고한 자료는 아래의 Figure 4와 같다.

에이전트는 포식자인 북극곰과 피식자인 바다표범 두 종류로 설정하였다. 초기 북극곰의 수와 바다표범의 수는 빙하가 용해되지 않는 상황에서 두 개체수가

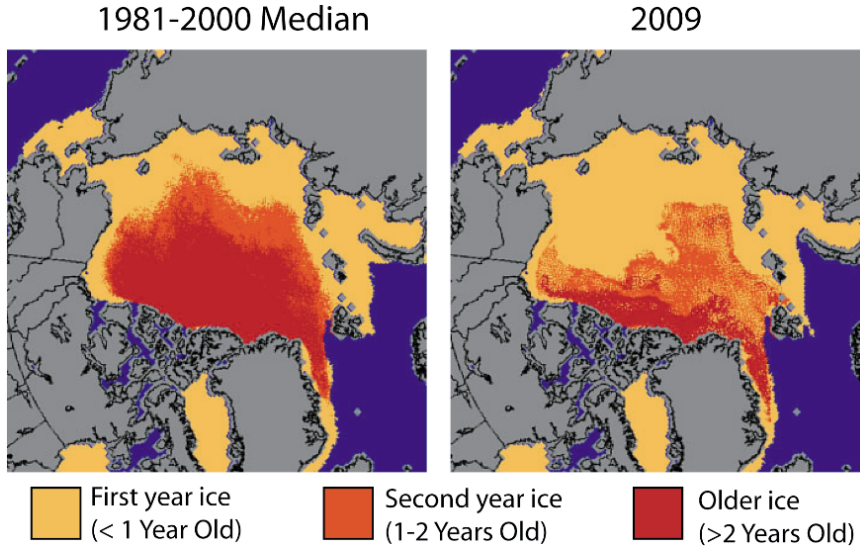


Figure 3. End of February Arctic Sea Ice Age (*Quote from National Snow and Ice Data Center, courtesy J. Maslanik and C.Fowler, Univ.Colorado, 2009).

*2월 말 북극 해빙. 국립설빙데이터센터 자료 인용

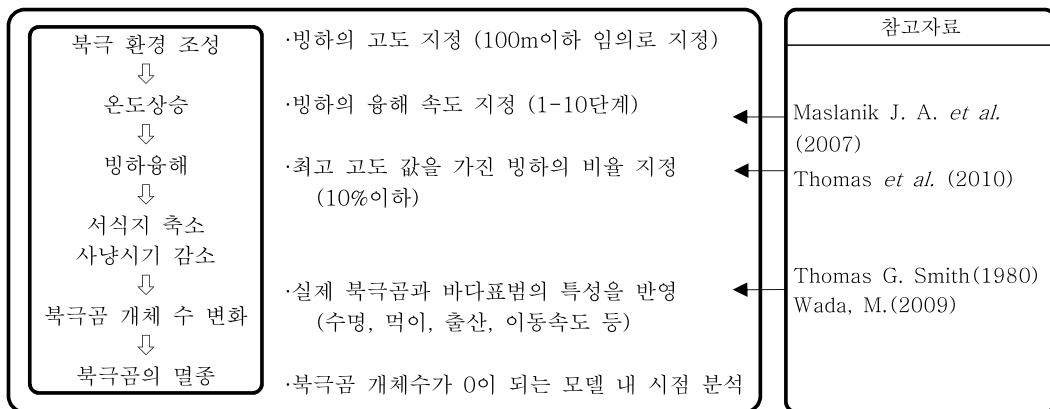


Figure 4. Process of Model and Setting the Variables. 모형설계의 흐름과 변수의 설정

가장 균형적으로 오랫동안 지속되는 값(바다표범이 북극곰 대비 150%)을 지정하였다. 연구의 목적이 빙하의 용해가 북극곰에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 먹이 부족으로 사망하지 않도록 바다표범의 초기 값을 지정하되, 시간이 지남에 따라 출산으로 인해 바다표범의 수가 급증하지 않도록 하였다. 초기 설정을

위해 빙하 용해 속도를 0으로 지정한 후 에이전트의 수를 달리하면서 모의하여 바다표범의 수가 급증하거나 부족하지 않으며 북극곰과 조화롭게 오래 지속되는 값(북극곰 대비 150%)을 도출하였다.

에이전트의 속성은 실제 특성을 반영하였다. 실험 결과에 영향을 주는 특성인 수명, 출산, 이동속도, 먹

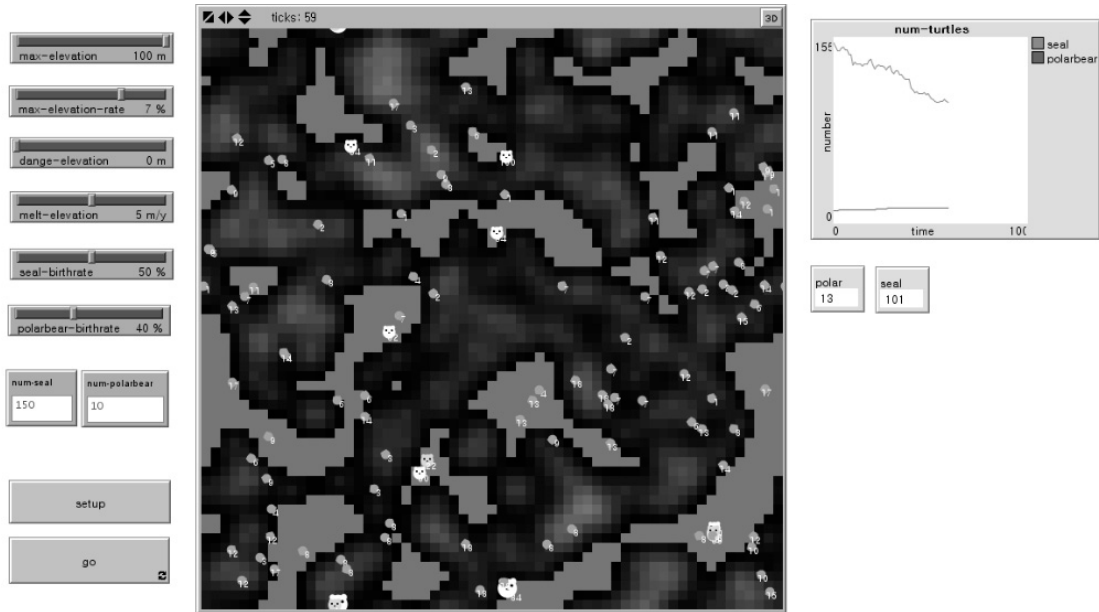


Figure 5. Model Interface(NetLogo). 모형의 설정 화면(NetLogo 활용)

이 등을 고려하였다. 구체적인 내용은 다음과 같다. 북극곰의 수명은 야생에서 15~18년, 최장 25~30년으로 알려져 있으므로 25년 이하 무작위로 부여하였으며, 바다표범의 수명은 20년 이하 무작위로 부여하였다 (Wada *et al.*, 2009). 북극곰의 출산은 태어난 지 6년 이상 된 북극곰이 특정 조건을 만족할 때 한 마리씩 출산하게 하였으며 이는 실제 북극곰의 특성과 매우 유사하게 작용한다(Wada *et al.*, 2009). 북극곰은 가장 가까이 있는 바다표범을 먹이로 삼고, 빙하 위에서만 사냥이 가능하다. 북극곰과 바다표범 사이의 상호작용 규칙을 살펴보면, 바다표범은 임의의 방향으로 움직이며 바다에서 더 빠르고, 나이가 20년 이상이 되거나 북극곰과 마주치면 죽게 된다. 북극곰은 태어나 6년 후 특정 조건을 만족하면 새끼를 낳는다. 태어난 지 25년이 넘거나 체력이 소진되면 죽게 되는데, 체력이 소진되는 경우는 바다표범의 사냥이 어려워져 아사한 경우와 바다 위를 표류하다 익사하는 경우로 풀이된다. 즉 북극곰의 개체 수 감소는 빙하의 감소로 인한 익사, 에너지 공급 미달로 인한 아사, 개체 수 감소를 위해 수컷이 새끼 곰을 죽이는 행위, 임신한 암컷의 유

산 등이 있으나 이 모델에서는 익사와 아사만을 다루었다. 아사는 먹이의 부족으로 야기된 것이 아니라 사냥시기의 제한과 사냥장소의 축소에 기인한 것이다.

모형의 설정 화면은 Figure 5와 같다. 모델 제작에 활용한 프로그램인 NetLogo의 인터페이스를 통해 빙하의 용해가 진행되는 과정을 살펴볼 수 있으며 북극곰과 바다표범의 생활을 볼 수 있다. 그래프를 통해 에이전트의 개체 수 증감을 관찰할 수 있으며, 북극곰의 개체 수가 0이 되는 지점을 확인할 수 있다.

2) 분석 결과

ABMS는 모델의 초기 값은 동일하게 지정한 경우라도 결과는 항상 다르게 나타난다. 이는 에이전트가 목적달성을 위해 상황 의존적·자율적으로 행동하는 개체이며, 변화하는 환경에 대한 정보가 제한되는 것에 기인한다. 즉 환경에 대한 불완전한 지식에 기반을 두고 가장 합리적인 대안을 선택하는 에이전트의 제한적 합리성(bounded rational ability)과 환경의 비결정론적(non-deterministic)특성은 매 상황에 대해 다른 결

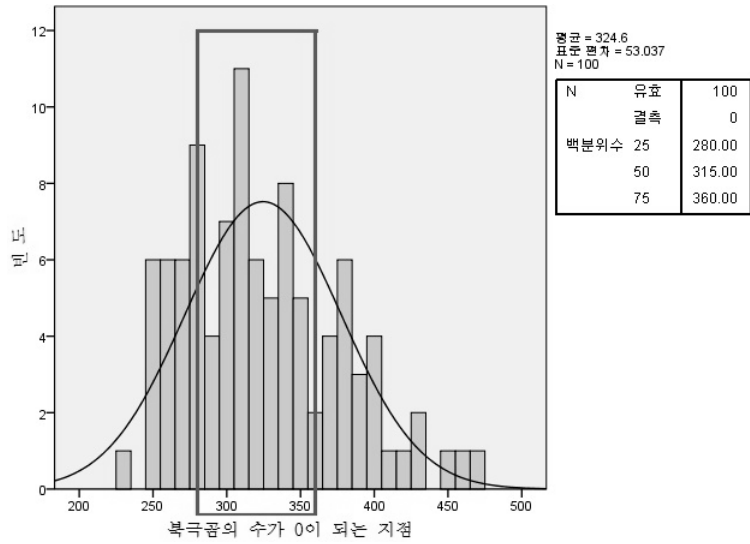


Figure 6. Quartile of Simulation Result. 모의실험 결과의 사분위수 측정

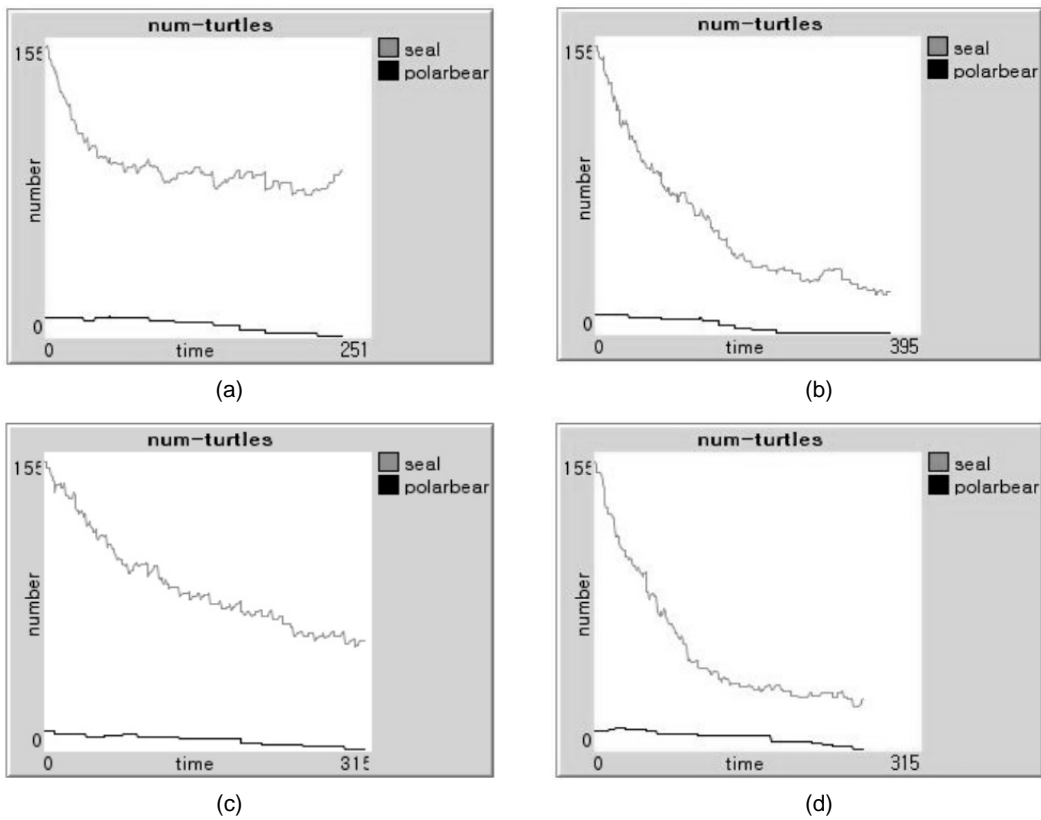


Figure 7. Change in the number of polar bears according to the melting rate of glaciers (a) level 1, (b) level 5, (c) level 8, (d) level 10. 빙하의 용해속도에 따른 북극곰의 개체 수 변화 (a) 1단계, (b) 5단계, (c) 8단계, (d) 10단계

과를 야기하므로 모의실험을 반복하여 시행해야 한다.

본 연구에서 모의실험은 각각의 초기 설정에 대해 100회씩 반복적으로 수행하였다. 모의실험 결과는 예외적인 결과 값을 배제하고자 사분위수 사이의 값을 토대로 분석을 시행하였다. 아래의 Figure 6은 최고 고도의 빙하의 비율이 6%, 빙하의 용해 속도는 1단계로 지정하였을 때 모의실험을 100번 반복 수행된 결과이다. 모델은 북극곰의 개체수가 0이 되면 정지되도록 설계되었으며, 결과로는 시간의 흐름에 따른 북극곰의 개체 수 증감 그래프와 북극곰의 개체수가 0이 되는 지점의 모델 내 시간(model time)이 도출되었다. 빙하의 용해 속도가 멸종 시기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 북극곰 멸종 시기를 의미하는 모델 내 시간 자료를 이용하였으며, 각 단계마다 도출된 100개의 결과 중 25~75%의 값을 분석하였다.

Figure 7은 최고고도 빙하의 비율을 6%로 지정하였을 때, 빙하의 용해속도를 달리하며 모의실험한 결과이다. 최고 고도 빙하의 비율과 최고 고도, 에이전트의 초기 개체 수와 출산율 등은 고정변수이며, 독립변수로 빙하의 용해속도를 1~10단계로 변화시켰다. 그래프를 보면 북극곰의 출산과 사망으로 인해 개체 수가 증감을 반복하면서 점차 줄어들어 갈 수 있다. 또한 빙하의 용해 속도가 빨라짐에 따라 북극곰의 개체 수가 0이 되는 모델 내 시간(model time)이 앞당겨짐을 알 수 있다.

각각의 경우에 대해 100회씩 반복한 결과의 사분위수를 정리한 것은 Figure 8로 나타난다. 최대 고도 빙하의 비율이 6%(a), 7%(b), 8%(c)일 때 각각의 그래프로 나타난다. 빙하의 용해 속도에 따라 북극곰의 개체 수가 0이 되는 지점에 표시를 하여 중첩한 결과 다음과 같은 그래프가 되었다. 각 단계마다 50개의 결과를 표시하였다. y축은 모델 내에서 북극곰의 멸종 시기를 의미한다. 각 단계마다 북극곰이 멸종하는 시기에 대한 기간이 나타난다. 한 가지 경우를 예로 들자면, 최고 고도 빙하가 6%, 빙하의 용해 속도가 1단계일 때 북극곰의 멸종 시기는 모델 내 시간(model time)으로 260~360 사이에 존재한다고 해석할 수 있다.

최고 고도를 가진 빙하의 비율을 6%, 7%, 8%로 달리 하여 모의실험 한 결과 유의한 차이가 발견되지 않

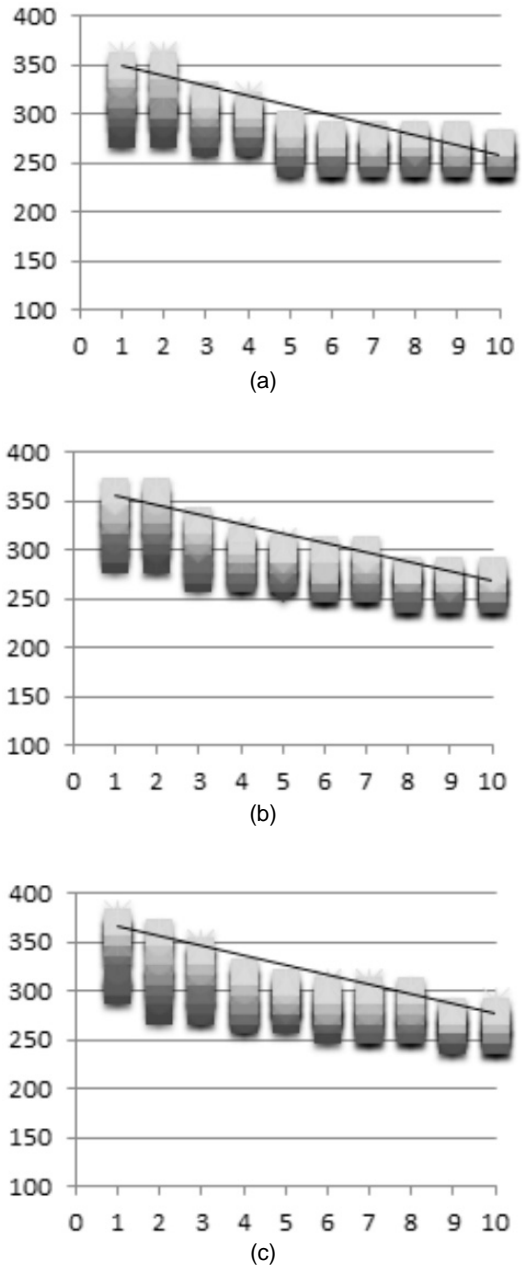


Figure 8. Reduced rates of glacier and extinction period (model time) of polar bears on highest-glacier rate is (a) 6%, (b) 7%, (c) 8%. 최고고도 빙하의 비율이 (a) 6%, (b) 7%, (c) 8%일 시 빙하용해속도와 북극곰 멸종시기(모델 내 시간)

았다. 북극곰의 개체 수 감소에 최고 고도 빙하의 비율은 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 특히 빙하의 용해 속도가 빠른 8단계 이상의 단계에서는 세 경우 모두 매우 흡사한 양상을 보였다. 다만, 용해 속도가 비교적 느린 1단계와 2단계에서는 최고 고도를 가진 빙하의 비율이 높을수록 북극곰의 멸종시기가 늦게 나타났다.

세 경우를 종합한 실험 결과는 빙하의 용해 속도에 따라 1단계와 2단계, 3-7단계, 8-10단계의 결과가 비슷한 양상을 보이고 있다. 용해 속도가 비교적 느린 1단계와 2단계에서 북극곰 멸종 시기는 모델 내 시간(model time)으로 260-360 사이의 값을 가진다. 예측된 멸종 시기의 예측 범위가 넓게 나타나는 이유는 비교적 환경 적응 기간이 길기 때문이다. 환경에 적응하는 기간 동안 적응이 잘 이루어지면 더 오랫동안 삶을 지속하여 멸종 시기가 늦은 반면, 환경 적응이 잘 이루어지지 않은 경우에는 멸종 시기가 빠르게 나타나는 것이다. 3-7단계는 빙하의 용해 속도가 빨라질수록 북극곰의 멸종 시기가 앞당겨지는 정적 상관관계를 보인다. 빙하의 용해는 북극곰의 생활환경을 악화시키므로 북극곰의 사망률이 증가하게 되어 나타나는 결과이다. 240-330 사이의 결과 값은 1-2단계의 기간과 큰 차이를 보인다. 특히 최대값의 차이가 크게 벌어진다. 이러한 차이는 빙하의 용해 속도가 3단계 이상으로 빨라짐에 따라 환경에 적응을 하더라도 삶을 지속하기 힘들 정도로 영향력이 커진다는 것을 의미한다. 8-10단계는 최대값과 최소값의 차이가 크지 않아 예측된 멸종 시기의 범위가 좁다. 환경에의 적응 기간이 단축되어 적응 여부에 관계없이 멸종 시기가 이른 시기에 나타난다. 한편, 8단계에서 10단계로 빙하의 용해 속도가 증가하더라도 북극곰의 멸종 시기가 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 8단계 이상은 매우 열악한 상황이므로, 빙하 용해 속도의 증가가 북극곰의 멸종 시기에 주는 영향이 매우 커서 속도가 증가하더라도 비슷한 값이 나오는 것으로 해석하였다.

이와 같은 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 빙하의 용해 속도가 증가할수록 북극곰의 생활환경을 악화시켜 북극곰의 멸종 시기가 빨라지는 상관관계를 보인다. 둘째, 그래프의 기울기는 서서히 감소하는데 어느

시점에 가면 일정하게 유지된다. 최고 고도 빙하의 비율이 다른 세 경우 모두 빙하의 용해 속도가 8단계 이상일 때 북극곰의 멸종 시기가 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 8단계 이상은 매우 열악한 상황이므로 속도의 증가가 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. 셋째, 빙하 용해 속도가 빨라질수록 모의실험값의 범위, 즉 멸종 시기의 기간이 좁아지는 것을 알 수 있다. 이는 빙하 용해 속도가 급격할 때 환경 적응 기간이 줄어들기 때문이다. 환경 적응 기간이 감소하면 북극곰 개별 개체들이 변화된 환경에 적응하는 정도의 차이가 줄어들기 때문에 북극곰 개체 전체의 삶에 민감하게 영향을 주어 멸종 시기의 예측 범위가 좁게 나타난다.

4. 결론

본 연구는 기후 변화에 의한 생태계의 반응에 대한 ABMS의 활용 가능성을 제안하고자 빙하의 용해에 따른 북극곰의 멸종위기에 대한 주제로 모형을 수립하여 모의실험을 실행·분석하였다. 빙하가 용해되지 않는 상태에서 북극곰과 바다표범 개체 수가 균형을 이루는 수준을 초기 값으로 지정하여 빙하의 용해 속도에 따른 북극곰 개체 수의 변화를 살펴보았다. 빙하의 용해 속도는 10단계로 구분하여 모의실험을 진행하였으며, 각 단계마다 100회씩 반복 실험하였다. 빙하의 용해 속도를 달리하여 북극곰 개체 수 변화를 분석한 결과, 첫째, 빙하의 용해 속도가 증가할수록 북극곰의 생활 환경이 악화되어 북극곰의 멸종 시기가 빨라지는 상관관계를 보였다. 둘째, 최고 고도 빙하의 비율이 다른 세 경우 모두 빙하의 용해 속도가 8단계 이상일 때 북극곰의 멸종 시기가 유지되는데, 8단계 이상은 매우 열악한 상황이므로 용해 속도의 증가가 북극곰의 멸종 시기를 앞당기는데 큰 영향을 주지 않는다. 셋째, 변화한 환경에 적응하기 위한 기간이 감소하면 북극곰이 환경 변화에 적응하는 정도의 차이가 줄어들기 때문에 멸종 시기의 예측 범위가 좁게 나타난다.

위 모델은 그러나 북극곰의 사망 원인을 다양하게 고려하지 못하였다. 북극곰의 먹이가 감소하면 본능적

으로 개체 수를 줄이기 위하여 새끼를 죽이는 동족끼리의 생존경쟁 문제, 출산 후 먹이 부족으로 인한 어미곰의 아사 문제 등등을 고려해보아야 할 것이다. 둘째, 주된 먹이인 바다표범만을 다루었으나 향후 연구에서는 먹이를 다양화시키고자 한다. 셋째, 본 모델은 빙하의 용해를 빙하고도의 변화로 나타나도록 설계하였으나, 현재 제공되는 북극빙하 용해 속도에 대한 자료는 면적의 축소로서 제공되고 있다. 자료의 한계로 인해 임의의 가상공간 내에서 도출된 결과라는 점에서 향후 실제 빙하 용해 속도를 고려한 결과의 도출이 필요하다. 본 연구에서 사용한 모형의 신뢰성 검증을 위해선 향후 관찰값이 주어진다면, 예측값과의 비교를 통하여 신뢰성 검증 및 환경에 대한 고찰이 가능할 것으로 생각된다. 구체적으로, 고도변화에 대한 자료가 제공될 시에는 고도와 고도변화 수치를 지정해줌에 따라 더 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 과거 북극곰 개체 수 자료가 제공될 시 모델에 과거자료를 삽입함으로써 모델의 타당성 검증이 가능하다.

본 연구에 사용된 모형은 향후 북극곰의 멸종 시기를 예측하는 도구로 활용될 수 있으며 예방책을 강구함에 있어 필요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 실제 북극빙하의 고도와 고도의 변화에 관한 자료가 주어질 경우 현실적인 멸종 시기 도출이 가능할 것이다. 또한, ABMS는 시나리오에 근거하여 공간 정보를 삽입하여 분석이 가능하므로 실제 환경과 흡사한 모델링 환경을 구축하여 더욱 현실성 있는 결과를 도출할 수 있다. 향후 정교하게 발전된 모델은 기후 변화에 따른 지형의 변화와 수문학적 변화, 먹이사슬의 변화 메커니즘 등을 고려한 종합적인 결과를 도출할 수 있어 생태계 연구에 기여할 수 있을 것이다.

주

1) 복잡계(Complex System)란 '복잡한 시스템'이라는 점을 강조하기 위해 만들어진 용어로서 '단순성'과 배치되는 개념이다. 복잡계 이론은 확률적 접근방법을 강조하며, 변수들 사이의 상호작용이 비선형(non-linear)관계를 이루면서 복

잡성이 나타난다고 본다(Min, 2006).

2) 천이(succession)란 환경의 변화에 따라 식물 군락이 변해가는 과정을 말한다. 자연 상태의 나지에서는 일년생 초본식물들이 착생하며, 이후 목본식물들이 침입하여 자리를 잡는다. 두세 차례의 천이를 거치면 특정 우점종 식물이 중심이 되어 군집을 이룬다(Kim, 2002).

참고문헌

- A. S. Fischbach, S. C., Amstrup, D. C. Douglas, 2007, Landward and eastward shift of Alaskan polar bear denning associated with recent sea ice changes, *Polar Biology*, Volume: 30, Issue 11, 1395-1405.
- Ashleigh E. Crompton, Martyn E. Obbard, Stephen D. Petersen, Paul J. Wilson, 2008, Population genetic structure in polar bears (*Ursus maritimus*) from Hudson Bay, *Canada*, *Biological Conservation*, Volume 141, Issue 10, 2528-2539.
- Allison L. Perry, Paula J. Low, Jim R. Ellis, John D. Reynolds, 2005, Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes, *Science New Series*, 308(5730), 1912-1915.
- Berger, T., 2001, Agent-Based Spatial Models Applied to Agriculture: A Simulation Tool for Technology Diffusion, Resource Use Changes and Policy Analysis, *Agricultural Economics*, 25, 245-260.
- Charles M. Macal, Michael J. North, 2006, *Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation Part 2: How to Model with Agents*, Proceedings of the 2006.
- Charles M. Macal, Michael J. North, 2009, *Agent-Based Modeling and Simulation: desktop ABMS*, Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference.
- Fowler, C., W. J. Emery, J. Maslanik, 2004, Satellite-derived evolution of Arctic sea ice age: October 1978 to March 2003, *IEEE Geosci, Remote Sensing Letters*, 1(2), 71-74.

- Hong, J. H., Kang, J. B., Choi, J. M., 2006, Efficient Reinforcement Learning System in Multi-Agent Environment, *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers: Journal of the great autumn Conference*, 33(2-B).1-603 (in Korean).
- Kim, J.-S., Han, B.-H., Kwak, J.-I., 2010, Relationship between the Distribution of Wildbirds and Temperature for Six Years ?A Case Study of Worldcup Park in Seoul, Korea-, *Korean journal of environment and ecology*, 24(3), 227-234 (in Korean).
- Kim, K. Y., 2002, Historical Reflections on the Social and Culture Background of Ecology, *The Korean History of Science Society*, 24(1) (in Korean).
- Kong, W.-S., Lee, S. G., Park, H. N., 2009, Species distribution which vulnerable to climate change and temperature, *Journal of the Korean Geographical Society*, 15-16 (in Korean).
- Lee, S. H., Heo, I. H., Lee, K. M., Kim, S. Y., Lee, Y. S., Kwon, W.-T., 2008, Impacts of Climate Change on Phenology and Growth of Crops: In the Case of Naju, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(1), 20-35 (in Korean).
- Min, B. W., 2006, Order out of Uncertainties: The Complex Systems Theory and International Relations, *Journal of The Korean Political Science Association*, 40(1), 201-221 (in Korean).
- Øystein Wiig, Jon Aars, Erik W. Born, 2008, Effects of climate change on polar bears, *2008 Science Progress*, 91(2), 151-173.
- Peter Lemke, Jiawen Ren, 2007, Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.
- Thomas G. Smith, 1980, Polar bear predation of ringed and bearded seals in the land-fast sea ice habitat, *Canadian Journal of Zoology*, 58: 2201-2209.
- Thomas Stocker, Qin Dahe, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, Pauline Midgley, 2010, *IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA*.
- Thomas Stocker, Qin Dahe, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, Simon Allen, Pauline Midgley, 2010, *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities Kuala Lumpur, Malaysia Workshop Report*.
- Torrens, P. M. and Alberti, M, 2000, "Measuring sprawl", *CASA Working Paper 27*, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.
- Torrens, P. M., 2006, Simulating sprawl, *Annals of the Association of American Geographers*, 96(2): 248-275.
- Torrens, P. M., 2006, *Urban simulation at the micro-level*, Autodesk, Inc.
- Marco Janssen, Bert de Vries, 1988, The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change, *Ecological Economics*, Volume 26, Issue 1, 43-65.
- Maslanik J. A., C. Fowler, J. Stroeve, S. Drobot, J. Zwally, D. Yi, W. Emery, 2007, A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss, *Geophysical Research Letters*, 34, L24501
- Michael Woodridge, 2002, *An Introduction to MultiAgent System*, John Wiley & Sons. LTD.
- Richard T. T. Forman, Lauren E. Alexander, 1998, Roads and Their Major Ecological Effects, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207-231
- R. W. Macdonald, T. Harner, J. Fyfe, 2005, Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data, *Science of The Total Environment*, Volume 342, Issues 1-3, 5-86.
- Wada, M., Ashuma, k., Kaminuma, K., Yatanabe, G., Azo, D., 2009, *The Question of the Antarctic and the Arctic*, Purungil (in Korean).

교신: 조창현, 서울시 동대문구 회기동 1번지, 경희대학교 이과대학 동관 504호(이메일: bwchjoh@khu.ac.kr, 전화: 02-961-9264)

Correspondence: Chang-Hyeon Joh, Room 504, Donggwan,
Bldg. College of Science, Kyung Hee University, 1 Hoegi-
dong, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-701, Korea (e-mail:
bwchjoh@khu.ac.kr, phone: +82-2-961-9264)

최초투고일 2011. 6. 14

수정일 2011. 6. 27

최종접수일 2011. 6. 28