

기본연구
2009-18

기후변화 관련
충청남도 생태계
장기모니터링 방안 연구

정옥식



기본연구
2009-18

기후변화 관련
충청남도 생태계
장기모니터링 방안 연구

2009.12

충남발전연구원

기본연구 2009-18

기후변화 관련 충청남도 생태계 장기모니터링 방안 연구

정 옥 식

발 간 사

지난 12월 7일 전세계의 시선은 덴마크의 코펜하겐으로 집중되었다. 10여 일간의 일정으로 기후변화협약 제15차 당사국총회가 열렸기 때문이다. 124개국 정상과 194개국 정부 대표단 등 8000명을 포함해 3만명 이상이 참가하였다. 유례없는 이러한 참가 규모는 기후변화에 대한 전 세계적 관심과 우려를 대변한다.

산업혁명 이후 화석연료 사용량이 증가함에 따라 진행된 이산화탄소 농도 증가 추세는 국지적, 지역적 기후 뿐 만 아니라 지구 수준의 기후변화를 일으키고 있다. 이러한 단기간 내 급속한 기후변화와 이로 인한 환경 변화는 생물종 수준에서의 개체수 변동이나 멸종 뿐 만 아니라 개체군 및 군집변화, 나아가 생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있다. 생태계의 이러한 변화는 범 지구적 규모로 그리고 생태계 전반에 걸쳐 일어나고 있으며 국가 및 지역 사회의 산업 및 경제 분야 등에 큰 파급 효과를 초래하고 있다. 따라서 생태계 유지, 나아가 인류의 생존을 위해 생태계 변화에 대한 이해와 예측, 더불어 생태계 변화에 의한 사회적 영향에 대한 대책 마련이 필요한 실정이다.

특히 전 세계적인 추세로 볼 때 국가의 경우 법률 및 지원 제도를 마련할 뿐 기후 변화 및 생태계 변화에 대한 대처는 지방 정부의 몫이다. 따라서 지방 정부에서는 생태계 변화에 대한 예측 뿐 만 아니라 현황 파악을 위한 모니터링 방안을 우선시 해야할 것이며 이에 대한 구체적인 안을 시급히 마련해야할 실정이다. 따라서 본 연구는 매우 시의적절하다고 여겨지며 지방정부 차원에서 기후변화에 따른 생태계 변화 및 영향에 대한 관심을 증대시키는데 도움이 되길 바란다.

끝으로, 본 연구를 수행하는 과정에서 많은 자문과 협조를 아끼지 않은 관계 전문가에게 깊은 감사의 뜻을 표한다. 무엇보다도 여러 가지 어려운 여건에서도 기후변화에 따른 생태계 변화 모니터링 방안을 수립한 연구진의 노고에 고마움을

전한다. 본 연구의 결과가 기후변화에 따른 생태계 변화 및 모니터링에 대한 많은 이해와 관련시책 및 후속연구에 유익한 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2009년 12월 31일

충남발전연구원장 김 용 응

연구요약

본 연구는 기후변화에 따른 중남 생태계 변화에 대한 장기 모니터링 방안을 모색하는 데 목적이 있으며 이를 위해 모니터링의 지표 선정과 모니터링 대상지 그리고 지침 등을 해외 사례를 통해 비교, 분석하여 최종적으로 정하였다.

영국의 경우 1992년 환경(기후)변화네트워크(ECN)를 구축하여 기후변화에 관한 장기적 모니터링을 실시하고 있으며 1997년 환경, 식량, 농업사무성에 의해 영국 기후 영향 프로그램(UKCIP)이 설립되었으며 과학연구자, 정책입안자, 이해당사자 등을 위한 기후변화 종합 연구를 실시하고 있다. 지표의 경우 2008년 현재 총 57개 지점(육상 : 12개 지점, 하천 : 29개 지점, 호수 : 16개 지점)에서 생태계 전반 뿐 만 아니라 물리적, 화학적, 생물학적 환경에 대해 260개 지표를 지정하고 이에 대한 자료 측정 및 구축하고 있으며 각 지점의 경우 공통된 조사항목과 지역적 특성을 고려한 조사가 진행 중이다

미국은 장기생태연구가 가장 잘 계획되고 유지되는 곳 중 하나이며 1980년 5개 지역의 장기생태연구지소로 출발하여 현재 24개 지소로 증가되어 육상, 산림, 하천, 호수, 해안 등 미국 전역의 다양한 생태계를 모니터링하고 있으며 2002년 기후변화과학기술통합위원회(CCCSTI)를 백악관 산하에 설치하여 기후변화연구를 통합하여 지원하고 있으며 기후변화과학 프로그램(CCSP)과 기후변화기술 프로그램(CCTP)으로 구성하였다. 이를 통해 1995년 이후 기후 변화 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 지표의 경우 전국적 공통 지표는 운영하지 않으며 지역적 생태계 특성을 고려한 지표 선정하여 운영하고 있다. 단일적 요소보다는 생태계의 유기적 관계를 규명하는 지표 선정에 우선하고 있다. 특히 적응은 지방이나 지역 단위에서 이루어져야 한다는 인식이 강하다.

호주의 경우 2003년 호주 환경 위원회가 기후변화에 대응한 국가 생물다양성 행동 계획(2004-2007)을 수립하고 기후변화가 생물다양성에 미칠 영향과 나아가 행동 계획의 기본 원리를 수립하였다. 이후 2007년 정부는 기후변화 적응 프레임

워크를 수립하였으며 전략과 시행 계획을 적응 능력과 이해의 구축과, 부문과 지역적 취약성 감소의 두 분야로 나누어 수립하였다. 지표의 경우 잠재적 기후변화 지표, 생리적 지표, 현상학적 지표 등 세부적으로 구분되고 특화된 지표를 선정하고 있으며 호주의 생태적 특성을 고려한 지표가 선정되었다.

일본의 경우 1970년 유네스코 주관의 국제 생물권 연구 프로그램(IBP)사업이 시발점이 되어 대학과 연구소들이 주축이 되어 주요 생태계들을 선별하고 장기생태조사 지점들을 확정하였다. 1995년 일본의 학술심의회는 지구환경과학 연구의 추진에 관한 논의를 진행하여 그 결과 지구환경과학 관련 핵심연구기관 설립의 필요성을 제안하였으며, 이를 기초로 1995년 조사연구회가 설치되어 핵심연구기관의 연구내용, 연구방법 및 조직에 관한 검토를 실시하였다. 1997-1998년도에는 지구환경과학분야 연구조직에 조사연구비가 책정되었으며 2002년에 종합지구환경과학연구소가 설립되게 되었다. 장기생태 연구(LTER)지소를 Core-sites(16개 지소)와 Associate-sites(28개 지소)를 설치하여 장기 생태연구 수행하고 있다.

기후변화에 따른 생태계 장기모니터링 사업의 국내 실정의 경우 첫째 top down 방식으로 인해 지역적 영향에 대한 파악이 어려우며 이에 따라 지역적 정책 및 대책 수립이 어렵다. 둘째, 장기생태연구과제로 적절치 못한 지표가 선정된 경우가 많으며 조사지점 및 임의적인 지표선정으로 인해 자료 공유 및 분석에 어려움이 많다. 셋째, 생태계 전반에 관한 변화 파악이 어려우며 특히 현지 외 조사자에 의한 모니터링으로 인해 짧은 기간 내 발생하는 현지 현황을 간과하는 경우가 많으며 일 단위 측정의 어려움(출현 시기)이 많다.

따라서 충남지역에 대한 장기모니터링 사업은 전담기구를 설립하여 직접 운영하거나 운영 및 관리를 위탁하는 방식 둘 중 하나를 선택하더라도 조사자는 현지 내 거주자를 선정하는 것을 원칙으로 해야 한다. 기후변화에 따른 생태계 장기모니터링 사업의 충남지역에 대한 조사지점은 계룡산과 대호방조제 및 간월호 그리고 유부도 지역이 적절하며 연구 지표는 식생동태와 생물계절현상, 곤충상 변화, 조류의 한배산란수와 첫산란일, 이동 및 월동조류 모니터링, 저서무척추동물 생물향, 섭금류 아동 시기 및 개체군 동태 등이다.

그 외 생태계 장기모니터링 사업의 운영 주체를 결정함과 동시에 지역의 모니

터링의 효율적인 관리를 위해 관련 분야의 전문가와 지역 전문가(대학), 공무원 등으로 구성된 모니터링 운영위원회 구성해야 할 것이다.

기후변화에 따른 생물다양성 변화에 대응하기 위한 행동계획이 구축되어야한다. 특히 생물다양성의 경우 농업과 어업 등 식량자원과 직결되는 문제이므로 시급히 이뤄져야 할 필요성이 있다. 또한 행동계획에서는 개체수 변화 혹은 이상 징후를 보이는 생물종에 대한 원인을 구명하고 유지 관리하기 위한 대책을 수립하는데 있어 필요한 관련 기관 및 부서 간의 협력과 이해를 신속히 하는 데 필요한 협조체계를 미리 구축해야 한다.

차 례

제1장 서 론

| | |
|-----------------------|---|
| 1. 연구 배경 및 목적 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구 필요성 | 2 |
| 1.3 연구 목적 | 2 |
| 2. 연구 내용 및 방법 | 3 |
| 2.1 연구 범위 | 3 |
| 2.2 연구 방법 | 3 |
| 2.3 선행 연구와의 차별성 | 5 |
| 2.4 용어 정의 | 5 |

제2장 생태계 장기모니터링의 개념 및 연구 결과 사례

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 생태계 장기모니터링의 개념 | 7 |
| 1.1 생태계 장기모니터링 개념 | 7 |
| 1.2 모니터링 자료의 활용 사례 | 9 |
| 2. 기후변화 관련 생태계 장기모니터링의 개념 | 11 |
| 2.1 개념 및 목적 | 11 |
| 2.2 기존 생태계 모니터링과의 차별성 | 14 |
| 3. 국·내외 생태계 장기모니터링 연구 결과 사례 | 13 |
| 3.1 생태계 장기모니터링 연구 결과 국외사례 | 13 |
| 3.2 생태계 장기모니터링 연구 결과 국내 사례 | 21 |

제3장 기후변화 관련 생태계 장기모니터링 시스템 및 연구 지표

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. 국외 시스템 및 연구 지표 | 24 |
| 1.1 국외 연구 시스템 | 24 |
| 1.2 장기생태계 모니터링 국외 연구 지표 | 31 |
| 2. 국내 시스템 및 연구 지표 | 34 |
| 2.1 국내 연구 시스템 | 34 |
| 2.2 국내 연구 지표 | 36 |
| 3. 국·내외 장기생태모니터링 운영 시스템 종합 | 36 |
| 3.1 연구 시스템 | 36 |
| 3.2 연구 지표 | 39 |

제4장 충청남도 생태계 장기모니터링 지침 및 방안

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. 충청남도 자연환경 및 주요 서식지 | 40 |
| 1.1 충남의 자연환경 현황 | 40 |
| 1.2 충남의 주요 서식지 | 42 |
| 2. 현장 조사 결과 및 검증 | 45 |
| 2.1 조사 개요 | 45 |
| 2.2 조사 결과 및 고찰 | 46 |
| 3. 충남 장기모니터링 지표·지점 및 지침 선정 | 48 |
| 3.1 충남 장기모니터링 지표 및 지점 선정 | 48 |
| 3.2 충남 장기 모니터링 지표별 지침(안) | 50 |
| 4. 장기 생태모니터링 운영 및 활용 방안 | 55 |
| 4.1 모니터링 운영 방안 | 55 |
| 4.2 모니터링 활용 방안 | 56 |

제5장 요약 및 제언

| | |
|------------------|----|
| 1. 요약 및 결론 | 57 |
| 2. 정책 제언 | 60 |

표 차 례

| | |
|---|----|
| <표 1> 미국의 부문별/지역별 기후변화 영향 | 9 |
| <표 2> 가상 시나리오를 통한 분야별 손실의 경제적 가치 | 10 |
| <표 3> 미국의 기후변화 관련 주요 생태계 변화 | 20 |
| <표 4> 1967년과 2003년 사이의 36년 동안 일어난 식생 변화표 | 22 |
| <표 5> 현재 이용 또는 계획 중인 미국의 산림에 대한 기후 영향 관측 시스템 .. | 27 |
| <표 6> 영국의 기후변화 관련 장기모니터링 생태지표 | 32 |
| <표 7> 미국의 생태계 장기 모니터링 연구의 지표 | 33 |
| <표 8> 호주의 기후변화 관련 장기모니터링의 생태적 지표 | 34 |
| <표 9> 국내 생태계 장기 모니터링 지점별 연구 지표 | 36 |
| <표 10> 해외 주요국의 생태계 장기모니터링 운영 시스템 | 37 |
| <표 11> 국내 생태계 장기모니터링의 운영 시스템 현황 및 문제점 | 38 |
| <표 12> 국내외 주요국의 생태계 장기모니터링 지표 및 특성 | 39 |
| <표 13> 충청남도 토지이용현황 (2004년, 단위 km ²) | 40 |
| <표 14> 6년간 대호지의 월동 수조류 종 수 및 개체수 (환경부 2004) | 42 |
| <표 15> 6년간 간월호의 월동 수조류 종 수 및 개체수 (환경부 2004) | 43 |
| <표 16> 5년간 금강호의 월동 수조류의 종 수 및 개체수 | 43 |
| <표 17> 5년간 금강하구의 월동 수조류의 종 수 및 개체수 | 44 |
| <표 18> 5년간 유부도 월동 수조류의 종 수 및 개체수 | 44 |

그림 차례

| | |
|--|----|
| [그림 1] 연구흐름도 | 4 |
| [그림 2] 생태계 장기모니터링의 개념도 | 7 |
| [그림 3] '기후변화에 기인한 조류 번식시기와 곤충의 발생 시기 전후 (왼쪽 그림은 변화 이전의 일치된 상황 오른쪽은 기후변화에 따른 불일치) | 12 |
| [그림 4] 이산화탄소 증가에 의한 수생태계의 변화 흐름 | 12 |
| [그림 5] 영국의 120여 년간 연평균기온 | 13 |
| [그림 6] 봄철 영국의 기온에 따라 앞당겨지는 참나무류의 개엽시기(좌)와 울새류인 Robins과 되새류인 Chaffinches의 첫 산란일의 변화(우) | 14 |
| [그림 7] 기온에 따른 개구리 첫 발견 시점(좌)과 곤충 발생시기 및 풍부도 변화(우) | 14 |
| [그림 8] 영국의 20여 년 간 연어 도래 시기 및 생존율 | 15 |
| [그림 9] 독일 Heligoland 지역의 쇠흰턱딱새와 대륙지빠귀의 첫 관찰시기 | 16 |
| [그림 10] 독일 Heligoland 지역의 쇠흰턱딱새와 대륙지빠귀의 월동지로의 이동시기 | 16 |
| [그림 11] 멸종위기에 처한 | 17 |
| [그림 12] 온도 변화에 따른 양서·파충류의 | 17 |
| [그림 13] 최근 20년간 미국 내부의 기온 변화 | 18 |
| [그림 14] 설치류 2종(Glaucomys volans, Glaucomys sabrinus)의 서식지 이동 | 19 |
| [그림 15] 년별 산림재해 발생 빈도 | 21 |
| [그림 16] 개나리, 진달래, 벚꽃 개화일 변화 | 22 |
| [그림 17] 기후변화에 따른 식생변화를 보여주는 전 처리된 항공사진 | 23 |
| [그림 18] 기후변화에 따른 식생변화를 보여주는 전 처리된 항공사진 | 23 |
| [그림 19] 영국 ECN(Environment Change Network) 조사지점 | 25 |
| [그림 20] 미국 LTER(Long Term Ecosystem Research) 조사 지소 | 28 |
| [그림 21] 일본 LTER 지역 분포 | 29 |
| [그림 22] 호주의 장기생태 연구 지역 분포 | 31 |

| | |
|---|----|
| [그림 23] 국내 생태계 장기모니터링 지점(위:산림과학원 아래: 환경부) | 35 |
| [그림 24] 충남 지역의 주요 시군별 토지이용현황 | 41 |
| [그림 25] 인공새집 배치 형태 | 45 |
| [그림 26] 지리산 지역의 첫산란일과 한배산란수 | 46 |
| [그림 27] 계룡산 지역의 첫산란일과 한배산란수 | 47 |

제1장 서론

1. 연구 배경 및 목적

1.1 연구 배경

지구 환경은 장기간에 걸쳐 지속적으로 변화해오고 있으며 생태계는 이러한 변화에 끊임없이 반응하며 적응해오고 있다. 19세기를 기점으로 화석연료 사용량이 증가됨에 따라 대기 중의 이산화탄소 농도는 급격한 증가 추세를 보이며 이로 인해 지구 온난화 현상은 국지적, 지역적 기후 뿐 만 아니라 지구 수준의 기후변화를 일으키고 있다. 이러한 단기간 내 급속한 기후변화와 이로 인한 환경 변화는 종 수준에서의 개체수 변동이나 멸종 뿐 만 아니라 개체군 및 군집변화, 나아가 생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있다. 특히 많은 생물종의 경우 개발에 따른 서식지의 인위적인 소실이나 파편화 그리고 과도한 이용에 따라 개체수가 급감하고 있는 상황에서 인간의 활동에 기인한 기후 변화로 인한 환경변화는 종의 유지 뿐 만 아니라 생존에 더 큰 위협이 되고 있다. 이러한 영향은 범지구적 규모로 그리고 생태계 전반에 걸쳐 일어나고 있으며 국가 및 지역 사회의 산업 및 경제 분야 등에 큰 파급 효과를 초래하고 있다. 따라서 생태계 유지, 나아가 인류의 생존을 위해 생태계 변화에 대한 이해와 예측, 더불어 생태계 변화에 의한 사회적 영향에 대한 대책마련이 필요한 실정이다.

국내의 경우 생태계 변화에 대한 예측 뿐 아니라 현황파악을 위한 모니터링 방안조차 구체적으로 마련되어있지 않으며, 생태계 변화가 국가 및 지역 사회에 미칠 영향에 대한 대책 또한 마련되어 있지 않은 실정이다.

1.2 연구 필요성

기후변화에 의해 생태계 및 사회 전반에 걸쳐 전방위적으로 변화와 영향이 발생함에 따라 이러한 변화와 영향을 파악하고, 예측하고 이에 따른 국가적, 지역 사회적 영향에 대비한 효과적인 저감방안과 환경정책이 필요한 상황이다. 해외 주요국의 경우 생태계 장기모니터링을 위한 기관 혹은 네트워크를 설립하여 지난 수 십년 간 환경변화 및 생태계에 대한 지속적인 모니터링을 해오고 있으며 환경변화 및 생태계 변화에 따른 산업적, 사회적 피해와 영향을 예측하고 이에 대한 피해저감방안과 환경정책 등을 사전에 준비하고 있다. 또한 기후변화에 대한 대응의 경우 지자체의 역할을 중시하고 있으며 모니터링 또한 지역의 실태 파악을 최우선으로 하고 있다. 특히 충남과 같이 농촌 중심 지역의 경우 생태계 변화에 대한 현 상황의 진단과 미래 상황에 대한 예측은 도시 사회보다 더 중요시되며 파급효과 또한 더 직접적일 것으로 예상된다. 따라서 환경변화에 따른 생태계 변화에 대한 대처 방안이나 환경정책 마련이 시급하며 그 첫걸음으로서 생태계 변화를 진단·예측하고, 나아가 정책수립에 필요한 기초 자료를 제시할 수 있는 국가적, 지역적 차원에서 생태계 장기모니터링 사업이 필요한 실정이다.

현재까지 국내에서 실시된 생태계 장기 모니터링과 관련한 연구는 산림과학원의 장기연구와 환경부에서 실시하는 장기생태연구가 있다. 하지만 산림과학원에서 수행한 장기생태연구의 경우 연구내용이 생태학적인 것이라기보다는 산림환경보전 쪽에 치중하고 있으며 환경부의 장기생태모니터링의 경우 기후변화에 관한 지표 설정이 불확실하며 지역적 변화를 모니터링 할 수 없으므로 지역 차원의 생태계 변화 대응책 마련하기에는 역부족이다. 따라서 충남 생태계 변화에 대한 진단과 예측을 위한 효과적인 생태계 장기모니터링 사업이 필요하며 이를 위한의 지침(프로토콜)과 운영 방안 등 이 마련되어야 할 필요가 있다.

1.3 연구 목적

본 연구는 기후변화에 따른 충남 지역의 생태계 변화를 진단·예측하고 사회·생태학적 문제에 대처할 수 있는 방안 및 정책 수립의 근거가 될 생태계 장기모니터링 사업의 시스템의 운영 방안과 효과적인 모니터링을 위한 지침(프로토콜)을 작성하는 데 목적이 있다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 연구 범위

2.1.1 공간적 범위

충청남도 지역을 대상으로 하여 지역의 생태계 특성을 고려한 기후변화에 따른 장기생태모니터링의 지침과 운영 방안을 검토하였다.

2.1.2 내용적 범위

충남의 현실에 맞는 기후변화 관련 생태계 장기모니터링 지침과 운영 시스템 제언과 이를 위한 생태계 지표 및 조사 장소 선정에 관한 것을 연구의 주 내용으로 하며 세부적 내용은 다음과 같다.

- 기후 변화와 관련한 생태계 장기모니터링 연구결과 사례 소개
- 국·내외 생태계 장기 모니터링의 지표(indicator) 및 시스템 분석
- 충남 지역의 기후변화 관련 생태계 장기모니터링의 지표 및 장소 선정
- 충남 지역 생태계 특성을 고려한 기후변화 관련 생태계 장기 모니터링의 지침과 운영 시스템 제언
- 데이터의 활용방안 제시

2.2 연구 방법

2.2.1 문헌 조사

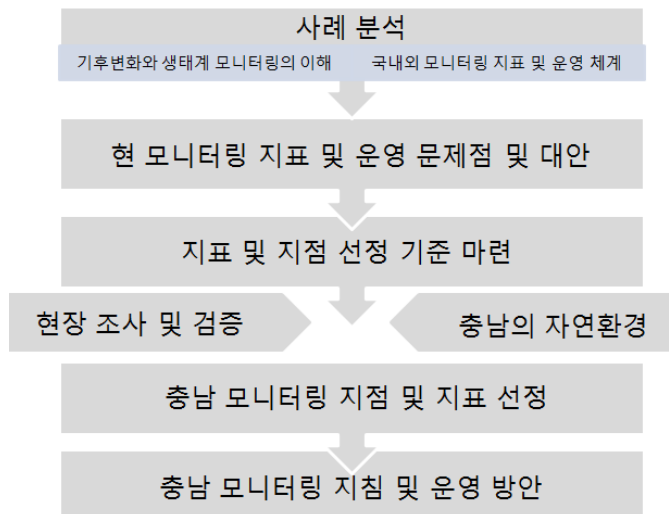
연구 논문 및 문헌, 장기모니터링 관련 국가별 및 홍보 책자, 인터넷 홈페이지, 통계연감 등 기후변화 관련 각종 자료를 통해 기후변화 관련 생태계 변화에 대한 국외 모니터링 시스템 및 지표에 대한 사례를 수집하였다.

이를 토대로 장기생태모니터링의 국내 지표와 비교 분석하고 「전국자연환경조사」 및 「전국 월동조류 동시센서스」 등의 자료를 이용하여 충남의 자연환경 여건을 토대로 장기 모니터링의 지점과 지표를 설정하였다.

가. 현장 조사

현재 전국 단위에서 검증 중인 ‘번식조류의 한배산란수와 첫산란일 모니터링’의 충남지역 지점 선정에 대한 타당성을 검토하기 위해 실시하였다. 주 내용은 계룡산 지역에서 번식하는 곤줄박이의 고도별 한배산란수와 첫산란일 등 번식 생태의 차이를 파악하는 것이다. 실험의 내용과 방법은 다음과 같다.

- 해발 300m와 800m 지점에 30m 간격으로 6열, 8행으로 각각 48개의 인공새집을 설치하였다. 둥지의 입구는 3.5cm와 4cm 두 가지 종류이며 각 열을 교차하여 설치하였다.
- 번식 시기인 4~6월 사이 주 1회 방문하여 산란 및 부화 유무를 확인하였다.
- 지리산에 기 설치된 모니터링 지점 결과와 비교 분석하여 유의성 유무를 확인하였다.



(그림 1) 연구흐름도

2.3 선행 연구와의 차별성

국내에서 실시된 생태계 장기 모니터링과 관련한 연구는 산림과학원의 장기생태연구와 환경부에서 실시하는 장기생태연구가 있다. 산림과학원에서 수행중인 장기생태연구의 경우 연구내용이 생태 전반에 걸친 것 보다는 산림환경의 보전에 더 치중하고 있으며 국내 유일의 장기모니터링 사업인 환경부의 장기생태모니터링의 경우 기후변화에 관한 지표 설정이 각 지소별로 명확하지 않으며 특히 지역적 변화를 모니터링 하기는 어려우며 때문에 지역 차원의 생태계 변화 대응책 마련하기에는 역부족이다. 또한, 기존 연구의 경우 기후변화와 관련한 지표의 선정과 장소 등의 고찰이 다소 미비한 실정이다.

본 연구의 경우 기후변화와 관련한 생태계 변화를 인지할 수 있고 지역의 변화를 모니터링 할 수 있는 지표를 선정할 것이다.

2.4 용어 정의

■ 기후변화

세계적 규모의 기후 또는 지역적 기후의 시간에 따른 변화를 말한다. 대체로 단기간 보다는 짧게는 10년에서부터 수만년의 기간 동안의 기후의 평균적인 상태 변화를 의미한다.

■ 생태계 모니터링(ecological monitoring)

생태계의 상태와 그 변화를 기록하기 위한 동일한 장소에 대한 과학적으로 계획된 연속적 측정과 관측을 말한다. 주로 생태적 변화에 관한 정량적(定量的)인 지식 습득과 생태계에 관한 이해를 증가시키기 위해 실시한다.

■ 생태적 지표(ecological indicator)

생태계의 변화 추이를 관측할 수 있는 대표성을 띠는 인자를 말한다. 예로 호수의 생태계를 복원한 경우 복원 실효성과 성공 여부에 대한 검증이 필요할 경우

호수의 수질, 수서 곤충 다양성 및 서식 현황, 어류 다양성 및 서식 현황 등과 같이 호수 생태계의 전체적인 군집구조를 조사하기는 어렵다. 이때 호수 생태계의 건강성을 대변하는 특정종의 서식 유무만 확인한다면 손쉽게 그리고 효과적으로 복원의 성공 여부를 평가할 수 있다. 이와 같이 현상을 대변할 수 있는 사항만 조사하면 된다. 이 경우 조사 대상 종은 생태계 복원 조사의 지표(indicator)라 하고 생태계의 변화 추이를 대표하는 인자를 생태적 지표라 한다.

■ 모니터링 지침

모니터링의 정량적 자료 추출을 위한 각 지표별 조사방법에 대한 규정을 말한다. 조사 시기, 횟수, 조사 장비 및 시설의 규격, 방형구의 크기, 설치 규정 등을 포함한다.

■ 한배산란수(clutch size)

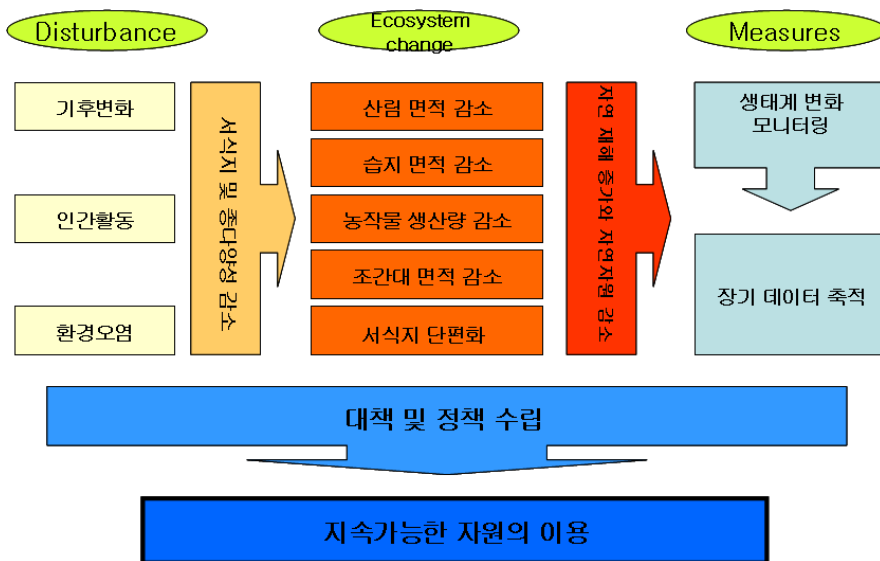
조류가 한 번의 번식에서 낳는 알의 개수를 말한다. 같은 종일 지라도 위도별, 지역별로 차이가 있음, 주변의 먹이량과 번식 조류의 밀도 등에 영향을 받으므로 주변 환경을 고려한 생태계 모니터링에 중요한 지표로 사용된다.

■ 첫산란일

번식조류가 둥지를 만든 후 첫 번째 알을 낳는 시기를 말하며 첫산란은 식생의 개엽과 곤충의 우화를 고려해서 일어나므로 주변 환경을 고려한 생태계 모니터링에 중요한 지표로 사용된다.

제2장 생태계 장기모니터링의 개념 및 연구 결과 사례

1. 생태계 장기모니터링의 개념



[그림 2] 생태계 장기모니터링의 개념도

1.1 생태계 장기모니터링 개념

1.1.1 정의 및 목적

동일한 장소에 대한 과학적으로 계획된 연속적 측정과 관측을 말하며 다음의 목적을 지닌다.

- 자연환경과 인간 활동에 의한 생태계의 변화를 정량적으로 분석하기 위한 자료

수집을 목적으로 함

- 자원관리의 기초 조사의 목적으로 실시함
- 생태계 보전의 수단과 방향을 알기위한 목적으로 실시함
- 지속가능한 자원의 이용을 최종의 목적으로 함

1.1.2 생태계 장기모니터링 계획 수립 절차

가. 목적 수립

모니터링의 경우 목적을 최우선으로 설정하여야 한다. 설정된 목적에 따라 모니터링 항목과 대상지, 자료 수집 방법 등을 정하며 그 외 모든 것이 목적에 귀결되어야 한다.

나. 조사 항목(지표)의 선정

지표의 경우 대표성을 띠어야 하며 지속적인 관찰과 측정이 가능해야 한다. 또한 자료 수집의 절차가 용이하고 간편해야 한다.

다. 대상지 선정

대상지의 경우 모니터링의 목적에 가장 적합한 장소가 선정되어야한다. 또한 주변 여건상 개발이나 변형이 없이 지속적인 모니터링이 가능해야 한다. 그리고 목적을 위한 대표성도 함께 지녀야 한다.

라. 자료의 관리 및 분석

자료 접근과 수집은 용이해야 하며 지속적인 수집이 가능해야 한다. 그리고 표준화된 규정(지침)에 의해 수집, 관리 되어야 한다.

1.2 모니터링 자료의 활용 사례

1.2.2 미국

2004년 Pew Center on Global Climate Change에서 미국 산업 부문에 대한 기후변화의 영향을 종합적으로 평가(Smith, 2004)하였다. 이 보고서에는 기후변화가 농업, 수자원, 해안 주민, 공중보건, 육상생태계, 임업, 바다 생태계에 미치는 영향 평가하였다. 전체적으로 적은 정도의 온난화가 진행하였을 경우, 적은 정도의 생산성 증대가 예상되나 높은 정도로 진행할 경우 부정적인 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다. 세부 사항을 보면 Shugart et al.(2003)의 연구 결과의 소개와 함께 Sohngen et al.(2001)의 기후변화가 세계 목재 시장에 미치는 영향에 대해 언급하는 등 각 분야에 대한 실증 자료를 싣고 있다. 전국을 6개 지역(북동부, 남동부, 북부 대평원, 중서부, 남서부, 북서부)으로 나누고 부문별 영향을 종합하여 정리하였으며 내용은 다음과 같다(표 1).

〈표 1〉 미국의 부문별/지역별 기후변화 영향

| Region | Sector | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|----------|---------------------|----------|------------------------------------|--------------------------|----------|------------------------------------|
| | Agriculture | Water | Coastal Communities | Health | Terrestrial Ecosystem Productivity | Terrestrial Biodiversity | Forestry | Aquatic Biodiversity ¹² |
| Northeast | ↓ Low | ? | ↓ High | ↔ Med | ↑ Low-Med | ↓ Med | ↑ Low | ↔ Low-Med |
| Southeast | ↓ Med | ↓ Low | ↓ High | ↔ Med | ↔ Low | ↓ Med | ↔ Low | ↓ Med |
| Southern Great Plains | ↓ Med | ↓ Low | ↓ High | ↔ Med | ↔ Low | ↓ Med | ↔ Low | ↓ Med |
| Midwest | ↑ Med | ↓ Low | N/A | ↔ Med | ↑ Low-Med | ↓ Med | ↑ Low | ↔ Low-Med |
| Southwest | ↔ Med | ↓ Low | ↓ High | ↔ Med | ↔ Low | ↓ Med | ? | ↓ Med |
| Northwest | ↑ Med | ↔ Low | ↓ High | ↔ Med | ↔ Low | ↓ Med | ? | ↓ Low-Med |

출처: Smith, 2004

미국의 경우 기후변화에 의해서 사회 전반의 각 분야에서 나타날 손실에 대한 연구를 추가적으로 실시하며 대책안을 마련하고 있다. 분야별로 기후변화의 정도에 따른 시나리오를 예측하고 있다. 각각의 시나리오에서 모든 분야에서 손실이 발생할 것이라고 예측하였고, 생물 종의 감소를 돈의 단위로 환산할 수 없다는

가정 하에 Nordlhuse와 Titus 는 종의 감소를 제외한 결과를 산출하기도 하였다 (표 2). 농경 분야를 보면 온도가 3 ℃ 증가할 경우 농작물은 5-20% 수확 감소로 이어지고 농산물 가격은 70-80% 상승할 것으로 보고 있으며 이에 대한 대책을 마련 중에 있다.

〈표 2〉 가상 시나리오를 통한 분야별 손실의 경제적 가치

| Study | Cline (1992) | Fankhauser (1995) | Nordhaus (1991) | Titus (1992) | Tol (1995) |
|------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| Climate Change Scenario | +2.5°C | +2.5°C | +3°C | +4°C | +2.5°C |
| Agriculture | 21.2 | 10.2 | 1.3 | 1.5 | 12.1 |
| Forest Loss | 4.7 | 1.0 | — | 61.6 | — |
| Species Loss | 5.6 | 11.9 | — | — | 7.1 |
| Sea-level Rise | 9.9 | 12.7 | 17.2 | 8.0 | 12.0 |
| Electricity | 15.2 | 10.7 | 1.5 | 7.6 | — |
| Non-electric Heating | -1.8 | — | — | — | — |
| Total—Market | 54.8 | 46.5 | 20.1 | 78.7 | 31.2 |
| Human Amenity | — | — | — | — | 16.9 |
| Human Life | 8.2 | 16.1 | 0.0 | 13.3 | 52.8 |
| Migration | 0.7 | 0.8 | 0.0 | — | 1.4 |
| Hurricanes | 1.1 | 0.3 | 0.0 | — | 0.4 |
| Leisure Activities | 2.9 | — | — | — | — |
| Availability | 9.9 | 22.0 | 0.0 | 16.1 | — |
| Pollution | — | — | — | 32.6 | — |
| Urban Infrastructure | 0.1 | — | — | — | — |
| Tropical Ozone | 4.9 | 10.3 | 0.0 | 38.4 | — |
| Mobile Air Conditioning | — | — | — | 2.5 | — |
| Total—Nonmarket^b | 27.9 | 49.6 | 60.8 | 102.9 | 71.6 |
| Total—All Sectors | 82.7 | 96.0 | 80.9 | 181.6 | 102.8 |
| % of GDP (reported) | 1.10% | 1.30% | 1.00% | 2.50% | 1.50% |
| % of GDP (actual) | 1.02% | 1.18% | 1.00% | 2.24% | 1.27% |

1.2.2 호주

관광수입이 국가 경제에 미치는 영향이 큼에 따라 모니터링을 통한 자국 관광 산업 피해를 예측하고 이에 대한 대책을 수립하고 있다. 일례로 2002년의 경우 해안 산호 군락의 60%에 백화현상 발생하여 \$320억 규모의 생태관광이 타격을 입음에 따라 지속적인 모니터링을 실시하고 있으며 이를 통해 백화 현상에 대한 원인 규명하고 보전 정책 수립하고 있다. 또한 멸종위기종이며 호주의 주요 생태관광 상품 중 하나인 펭귄 개체수 감소함에 따라 장기생태모니터링으로 규명된 원인을 통해 보전 대책 마련하고 있다. 모니터링 결과 천적과 애완동물에 의한 개체수 감소로 밝혀지자 천적의 퇴치 및 공원 지역의 내 개, 고양이 사육 금지 규정을 마련하는 등의 정책이 수립되었다.

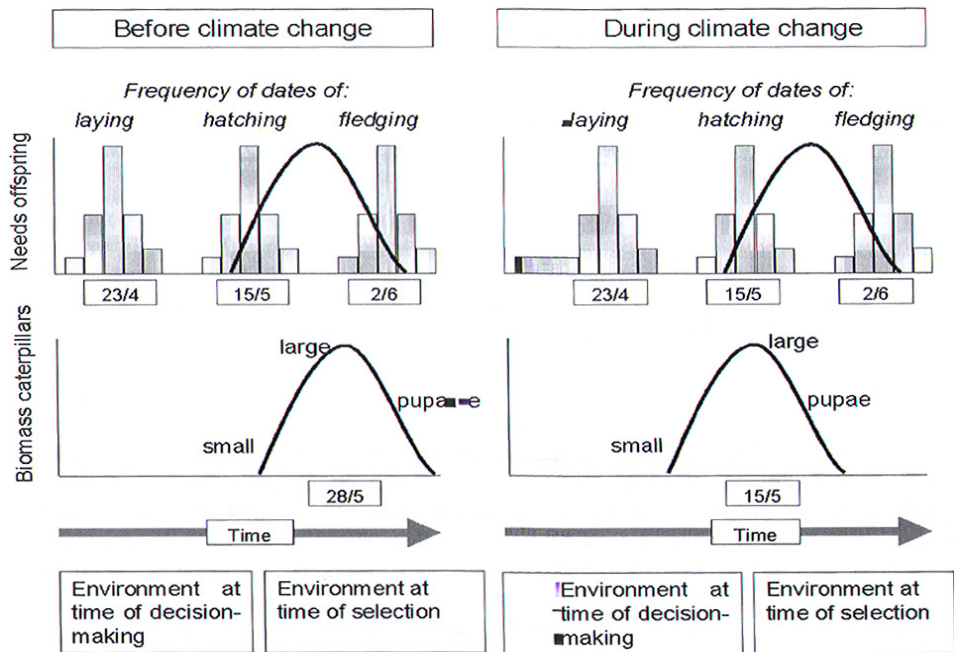
2. 기후변화 관련 생태계 장기모니터링의 개념

2.1 개념 및 목적

기후변화와 관련한 생태계 장기모니터링은 과거 수십년 간 인간의 활동과 자연환경의 변화, 환경오염으로 인한 생태계 변화를 정량적으로 추적하기 위해 실시되어 오던 생태계 장기모니터링 사업에서 기후 변화적 요인에 대한 영향을 더욱 집중적으로 추론하기위해 기후와 관련한 지표를 추가하거나 지역을 강조한 것이다. 영국에서처럼 기후변화에 따라 곤충 용화와 식물의 개화시기 불일치로 인한 식물의 수분 문제점으로 인해 농작물이 감소하는 사회 전반적 문제가 발생하자 기후와 관련한 생태계 지표를 선정하여 모니터링을 하는 경향이 많아졌다.

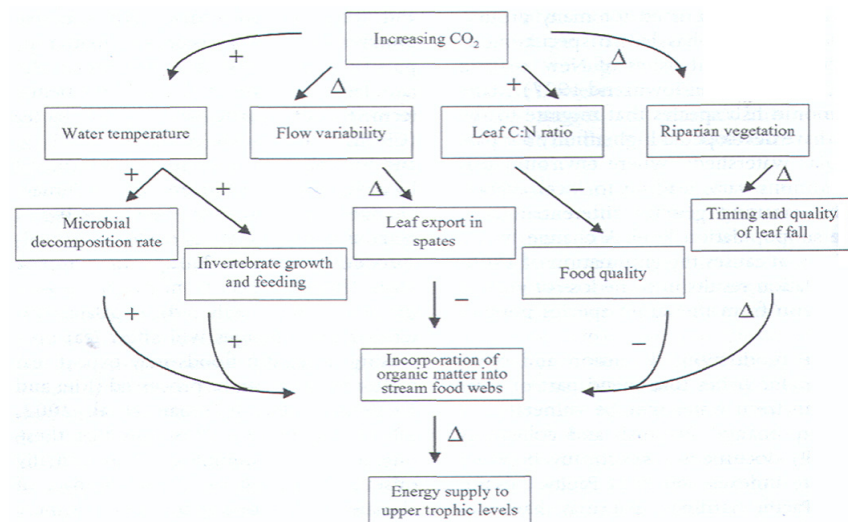
2.2 기존 생태계 모니터링과의 차별성

생태계 내의 먹이사슬과 같이 종 네트워크 구성원의 변화를 추정하기 위한 지표 선정이 주가 된다[예 : 기후변화는 곤충의 발생시기를 변화 시키고 이는 오랜 기간 적응해온 조류의 번식과 조류의 주된 먹이인 곤충 유충의 발생 시기의 균형을 깨트림, 이로 인해 조류의 수가 감소하며 이는 다시 특정 곤충의 밀도 증가 및 분포 확산을 일으킴(그림 3). 기후변화에 따른 생태계 변화는 한 종에 국한된 것이 아니라 군집구조 및 생태계 전반에 걸쳐 일어나므로 변화에 따른 종속적인 인자를 지표로 삼는 경우가 많다(그림 4). 기후변화와 관련한 특정 생태계의 변화를 추적하기 위한 조사지 선정과 지표 선정 혹은 기후변화와 관련한 생태계 변화를 모니터링한다.



(그림 3) 기후변화에 기인한 조류 번식시기와 곤충의 발생 시기 전후(왼쪽 그림은 변화 이전의 일치된 상황 오른쪽은 기후변화에 따른 불일치)

출처 : Moller et al. 2006. bird and climate change.



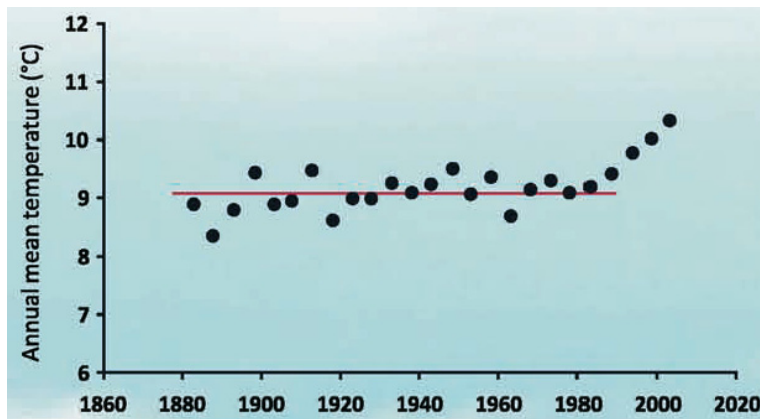
(그림 4) 이산화탄소 증가에 의한 수생태계의 변화 흐름

3. 국·내외 생태계 장기모니터링 연구 결과 사례

3.1 생태계 장기모니터링 연구 결과 국외사례

3.1.1 영국

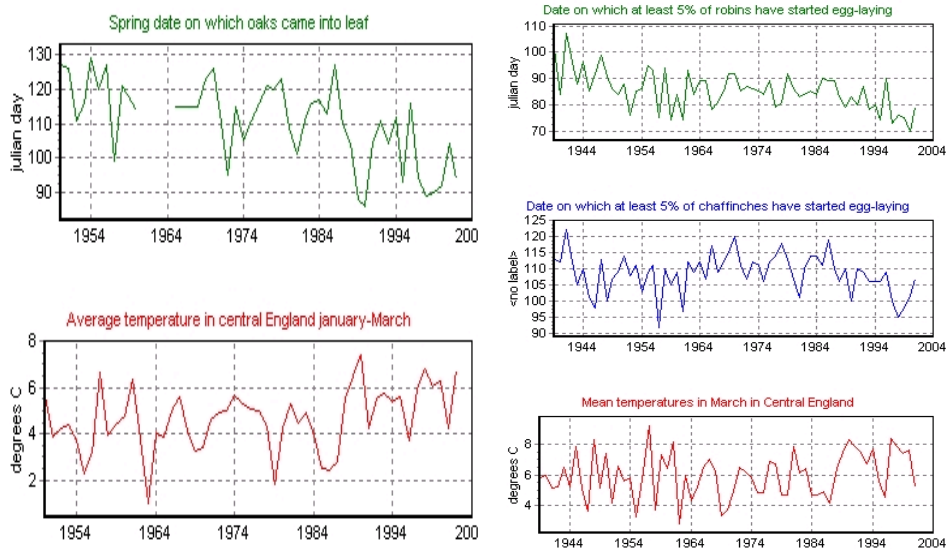
가장 오래된 모니터링 시스템을 구축하고 있는 국가 중 하나이며 1878년에서 2005년까지의 130여년 간의 결과를 축적하고 있다. 이를 통해서 볼 때 최근 들어 기후의 급격한 변화가 일어나고 있음이 밝혀졌다(그림 5).



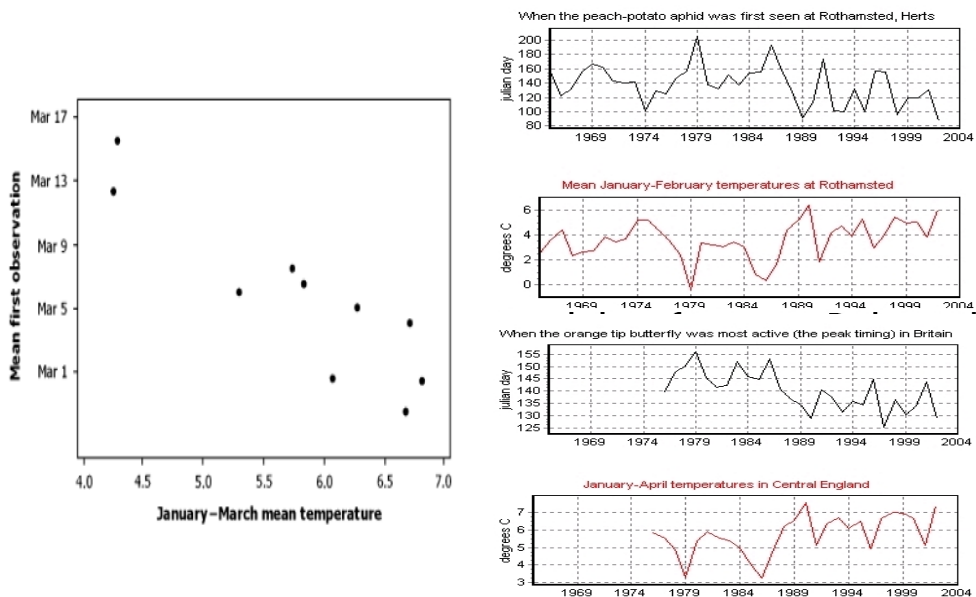
[그림 5] 영국의 120여 년간 연평균기온

출처 : 2009. Sier. climate change report.

세부적 내용을 보면 1900년 이후 영국 중부지역의 경우 식생의 생육 기간이 1개월 정도 길어진 것으로 나타났다. 또한 남부지역에 서식하는 종은 증가한 반면 북부지방에 서식하는 종의 경우 감소하였으며 이는 농업 품종 및 생산량과도 직결된다. 1973년부터 1998년까지 해수면 상승으로 인해 종다양성과 멸종위기조류의 서식지로서 중요한 Essex 지역의 조간대가 1/4가량 면적이 감소한 것으로 나타났으며 봄 계절의 온도가 높아지고 기간이 길어짐에 따라 제비의 도래시기가 빨라지고 참나무류의 개엽시기가 빨라지고 그에 따라 robins와 chaffinches의 첫 산란일이 빨라지는 결과를 보이고 있다(그림 6).

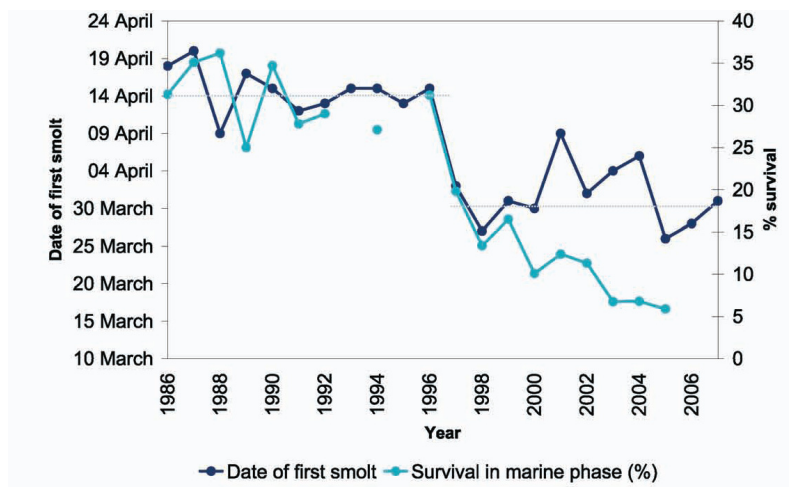


(그림 6) 봄철 영국의 기온에 따라 앞당겨지는 참나무류의 개엽시기(좌)와 올새류인 Robins과 되새류인 Chaffinches의 첫 산란일의 변화(우)
출처 : 2009. Sier. climate change report.



(그림 7) 기온에 따른 개구리 첫 발견 시점(좌)과 곤충 발생시기 및 풍부도 변화(우)

개구리 등의 양서류는 번식시기가 빨라지고, 곤충의 경우 종풍부도(Insect abundance)와 발생시기(Date of appearance)가 종의 특성의 따라 난대종은 기온이 높을수록 종풍부도가 높고 발생시기가 빨라지는 반면 한대종은 기온이 높아질수록 종풍부도가 낮아지는 현상이 나타났다(그림 7). 연어의 경우 도래시기가 점차 빨라지고 있으며 대신 생존율은 점점 저하되고 있는 것으로 나타났다(그림 8).



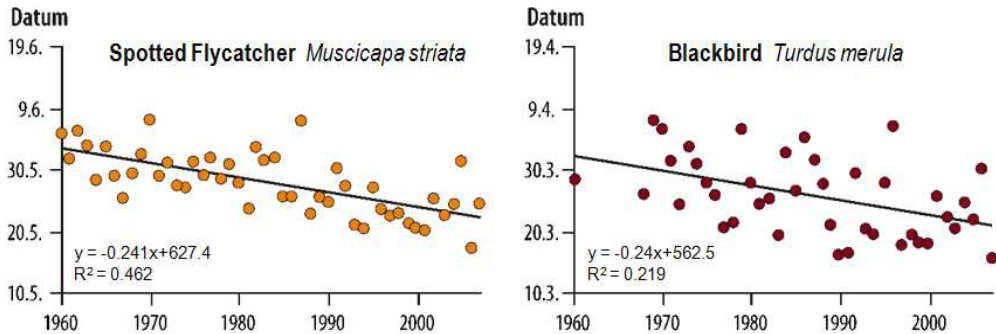
(그림 8) 영국의 20여 년 간 연어 도래 시기 및 생존율

3.1.2 독일

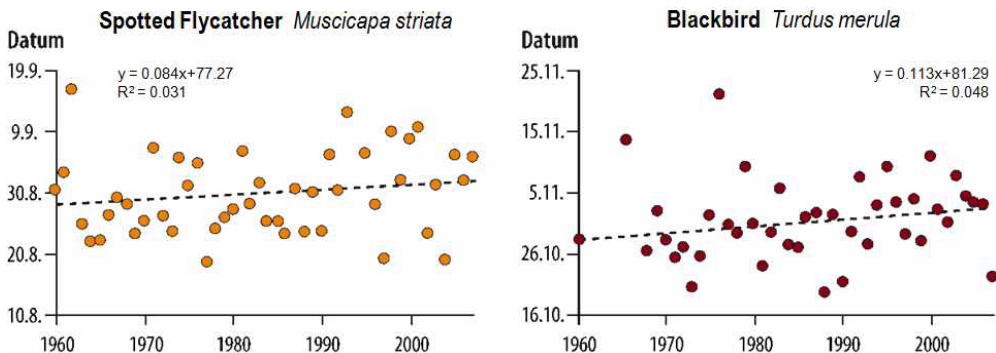
독일의 경우 철새의 이동과 관련한 40여 년간의 장기모니터링 결과와 함께 이에 대한 원인 분석을 함께 실시하고 있다. 기후변화와 독일 주변의 기단의 및 기류의 변화와 철새의 이동 양상 변화에 대한 자료를 최근 발표하였다. 이 보고서에 따르면 철새들의 최초 도래일이 대체로 빨라지는 것으로 나타났다(대륙지빠귀 : 11일, 연노랑술새 : 13일, 쇠흰턱딱새 : 14일, 검은다리술새 : 14일)(그림 9). 일부 종의 경우 기후변화에 따른 월동지 서식환경 악화에 따라 도착시기가 늦어지는 경우도 발생하며 이는 번식 실패로 이어져 결국 개체수가 감소하는 결과를 낳고 있다.

월동지로 떠나는 가을철 이동 시기 또한 늦어지는 경향이 발생하고 있으며 이

는 번식지에서의 체류기간이 늘고(그림 10) 번식 기회가 많아져 개체수 증가로 이어지고 있다. 이와 같은 조류 종의 군집 및 개체군 변화는 이와 연관된 생태계 내의 다른 개체군에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.



[그림 9] 일 Heligoland 지역의 쇠흰턱딱새와 대륙지빠귀의 첫 관찰시기



[그림 10] 독일 Heligoland 지역의 쇠흰턱딱새와 대륙지빠귀의 월동지로의 이동시기

3.1.3 호주

호주는 지구상에서 가장 종다양성이 높은 지역이며 약 백 만 여종의 고유종을 지니고 있다. 하지만 이미 인간들에 의해 교란과 간섭을 받고 있으며, 기후변화에 의해 종다양성이 크게 위협받고 있는 상황이다. 호주 내 국제 현상학회(International Phenological Garden)에서는 1959년~1993년의 데이터를 통해 봄의 생태적 사건들은 6일이 빨라졌고, 가을의 생태적 사건들은 4.8일 늦어져 여름이

10.8일이 증가했다고 보고했다.

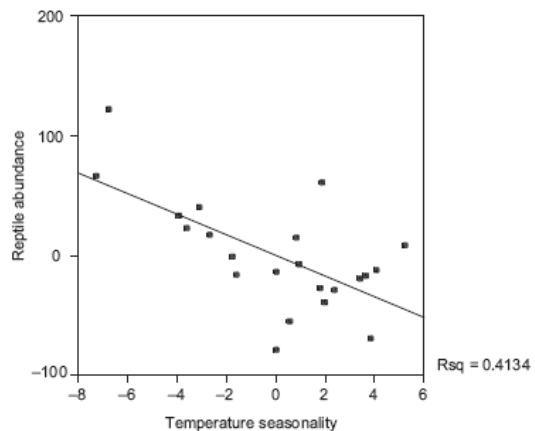
해양 생태계의 중요한 역할을 하는 산호초가 수온의 상승으로 인해 Coral Bleaching(백화현상)이 발생하였으며 따라서 공생하는 생물들에게 위협주고 있으며 이로 인해 호주의 해양 생물종의 다양성 또한 감소하고 있다. 육상생태계의 경우 1952년 이후로 개엽 시기는 16일, 열매 맺는 시기는 9일, 나비의 출현 시기는 11일이 빨라졌다. 유칼립투스 잎이 CO2 공급의 증가로 두꺼워지는 현상이 발생하였으며 열대 우림이 유칼립투스 군락에 침투하여 유칼립투스의 자생 면적이 감소하고 있는 것으로 나타났다.

Sleepy lizard의 행동학적 변화와 근지역성 경계(parapatric boundary)의 지위가 변하였으며 기온 상승으로 서식지가 산 정상부로 제한된 도마뱀류(*Lampropholis robertsi*)(그림 11)의 경우는 서식지 파편화와 매우 제한된 서식환경 때문에 멸종 위기에 처해졌다. 뿐 만 아니라 온난화로 인해 호주 전역의 양서류, 파충류의 개체 수가 줄어드는 현상 발생(그림12)하고 있다.



Lampropholis robertsi (4 cm snout-vent) is a high altitude, regionally-endemic skink. It is generally restricted to above 900 m and has a very limited and fragmented distribution on mountain tops in the northern mountain ranges of the region. (Photo: Stephen Williams)

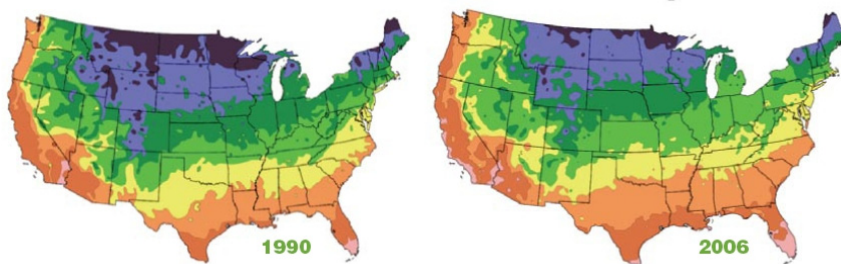
[그림 11] 멸종위기에 처한 *Lampropholis robertsi*



[그림 12] 온도 변화에 따른 양서류 · 파충류의 다양성 변화

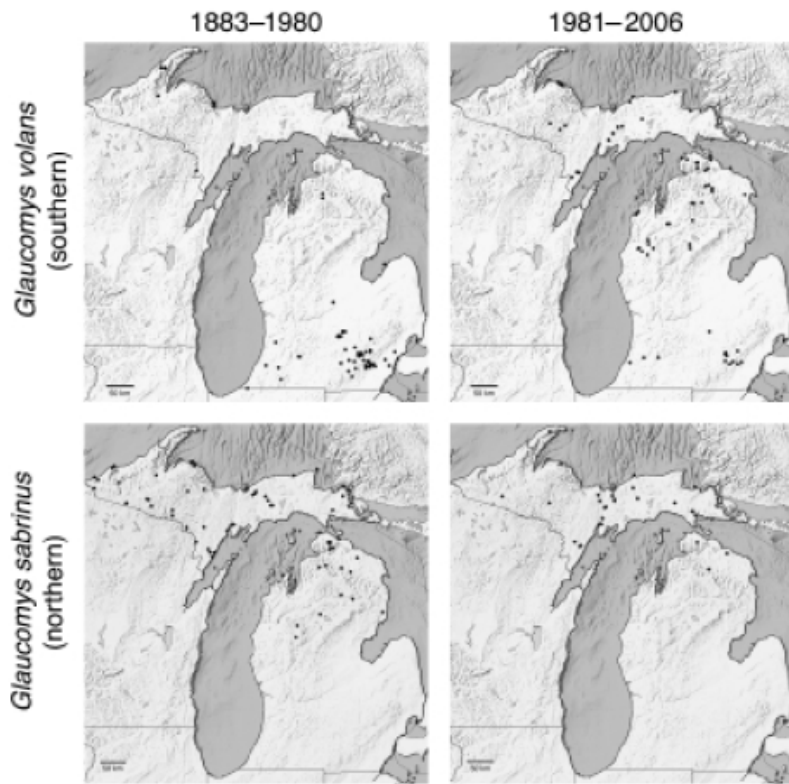
3.1.4 미국

미국의 경우는 최근 20여 년간의 조사를 통해 기온 변화가 관측되고 있다(그림 13). 2003년 ‘Pew Center on Global Climate Change’에서는 미국의 산림에 대해 생태적인 부문과 경제적인 부문으로 나누어 기후변화가 각 부문에 끼칠 잠재적 영향에 대한 연구를 수행하였다(Shugart et al., 2003). 이에 따르면 식물의 수종들이 보다 북쪽으로, 보다 높은 고도로 이동하였으며 산림 생산성은 변화하나 증감 여부는 알 수 아직은 보고되지 않았으며 대기 중 이산화탄소의 증가의 영향은 복잡하고 불확실하나 산림생산성의 변화를 깊이 이해하는데는 기여하고 있다. 산림의 구조와 기능을 변화시키는 주요한 교란 패턴이 변화하고 있으며 목재 시장은 기후변화에 대해 아직은 높은 민감성을 갖지는 않지만 목재 생산에 대해 약간의 부정적인 영향을 갖고 있는 것으로 나타났다. 기후변화가 진행되고 남부 수종이 북부로 이동할 경우, 남부지방은 생산량이 감소하는 반면 북부지방의 생산량은 증가할 것으로 예측하고 있으며 기후변화에 의한 목재시장의 변화에 대한 이해는 천연림과 자연림의 반응을 통제하는 몇 개의 중요한 요인의 과학적인 이해에 의해 다소 제한적인 것으로 나타났다.



[그림 13] 최근 20년간 미국 내부의 기온 변화








미시건 주의 포유동물 (흰발쥐, 남부 날다람쥐, 주머니쥐 등)이 이미 지구 온난화로 인하여 북부지방으로 이동했다는 연구 결과 보고되었다. 미국 3개의 대학이 참여한 이 연구에서 Phillip Myers박사는 설치류 동물들은 종자 살포와 생태계 먹이 사슬에 중요한 영향을 미치기 때문에 이러한 이동은 생태계 교란을 가져올 수 있다고 보고하였다(Phillip Myers et al. 2009)(그림 14).



[그림 14] 설치류 2종(*Glaucomys volans*, *Glaucomys sabrinus*)의 서식지 이동

특히 산림의 확장이나 식물 종의 이동은 설치류에 의한 산포가 중대한 역할을 함과 동시에 동물의 먹이사슬에서 최저 단계에 있으므로 이들의 감소에 의한 생태계 교란은 클 것으로 예상하고 있다. 이외에도 식물, 조류, 포유류, 곤충 등 각 개체군들이 유기적인 관계를 형성하고 있기 때문에 전반적인 생태계 시스템 변화가 관측되고 있다(표 3).

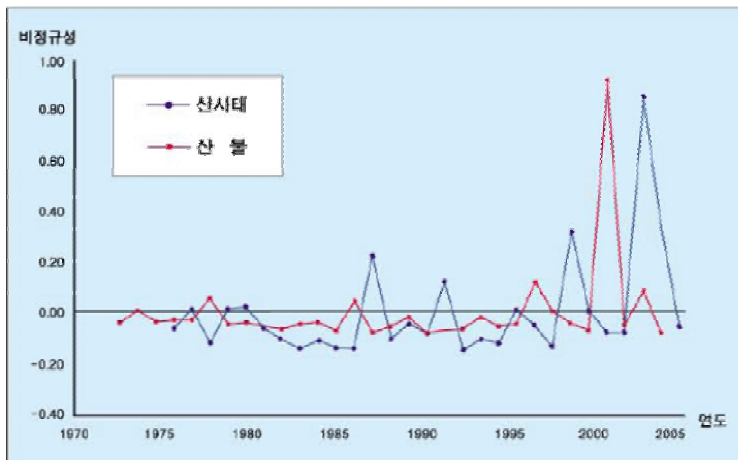
〈표 3〉 미국의 기후변화 관련 주요 생태계 변화

| 미국 내의 생태 변화 | |
|---|--|
|  <p>The European goldfinch, which has been introduced to North America, is now being outcompeted by native goldfinches in some areas, leading to a decline in the European goldfinch population.</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 알락솔딱새의 경우 기후변화에 의한 나비목유충(caterpillar)의 발생시기의 변경을 인지하지 못하여 번식시기와 불일치로 인한 개체수 감소 - 서식지의 이동, 계절적 행동의 변화 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 기후변화에 의해 가장 위협받고 있는 종. 좁은 서식면적과 그 지역조차도 너무 덥고 건조해져서 개체감소 - 나비는 migration을 하지 않는 종이지만 기후변화로 서식지의 대이동 발생 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 초본의 변화로 인해 먹이사슬에 가장 중요한 역할을 하는 유럽 순록의 개체군 변화 - 이에 따른 1차, 2차 육식동물의 생태 교란 발생 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 바다의 빙하가 녹아 이곳에서 서식하는 바다사자의 서식지가 위협받게 됨 - 빙하에서 사냥을 하는 북극곰 역시 개체수 감소 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 미국 우는 토끼(American Pika)의 경우 빙하시대에 고도가 낮은 지역에서 서식하였으나 기온이 점점 올라가면서 고도가 높은 지역으로 이동 - 결국 현재 고립된 산정상에서만 서식 - 멸종에 가까워 지고 있음 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 해수면의 기온 상승은 산호초에게 일명 산호 백화현상(coral bleaching)을 발생시켜 유도하여 산호초가 죽음에 이르게 함 - 이는 산호초와 공생하는 어패류의 서식환경을 변화시킴 - 또한 산호초는 바다의 산성화를 막는 작용을 하는데 이같은 기작도 무너지는 현상이 발생 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> - 열대지방에서 번식하는 적색 벌새(Rufous Hummingbird)와 멕시코 어치류가 북상하여 미국 본토 내에서도 번식하는 현상이 발생 |

3.2 생태계 장기모니터링 연구 결과 국내 사례

3.2.1 식생 변화

국립 산림과학원은 지구 온난화로 인해 식생대가 남쪽에서 북쪽으로, 그리고 저지대에서 고지대로 이동하고 있다고 발표하였다. 고산 지대에서만 서식하는 식물 종들은 분포하는 범위가 줄어들거나 소멸될 위험성이 높아지고 있으며 또한 지구온난화의 영향으로 가뭄, 폭염, 폭설, 집중호우 등 이상기후가 많이 나타나 산림훼손, 산사태등 산림피해가 점차 증가하고 있다(그림 15).

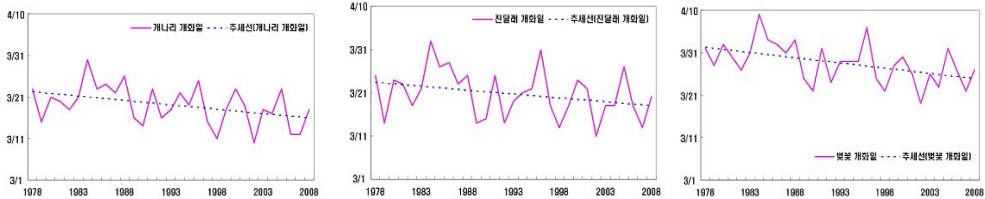


(그림 15) 년별 산림재해 발생 빈도

출처자료 : 산림청, 2006. 지구온난화, 기후변화협약

식생에 대한 아열대성 병해충 발생이 증가하고 있으며, 향후 그 빈도가 증가할 것으로 예측하고 있다. 수목병원균인 푸사리움가지마름병은 원래 미국의 남부 지역과 멕시코, 하이티 그리고 일본 큐슈남부 및 오키나와 등 아열대 기후에 분포하였으나 1996년 이 병원균이 우리나라에서 최초로 발견되었고 현재 부분적으로 확산 중에 있는 실정이다. 또한 대벌레 등 열대지역이 원산지인 곤충도 기온 상승으로 인해 더욱 확산되고 있다. 그 외 30년간(78~08년) 전국 14개 지점에 대한 개나리, 진달래, 벚꽃의 개화시기를 분석한 결과 개나리는 7일, 진달래는 6일, 벚꽃은 8일 정도 개화일이 빨라진 것으로 나타났다(그림 16).

(분석지점 : 속초, 강릉, 서울, 울진, 청주, 대전, 추풍령, 대구, 울산, 광주, 부산, 여수, 완도, 서귀포)

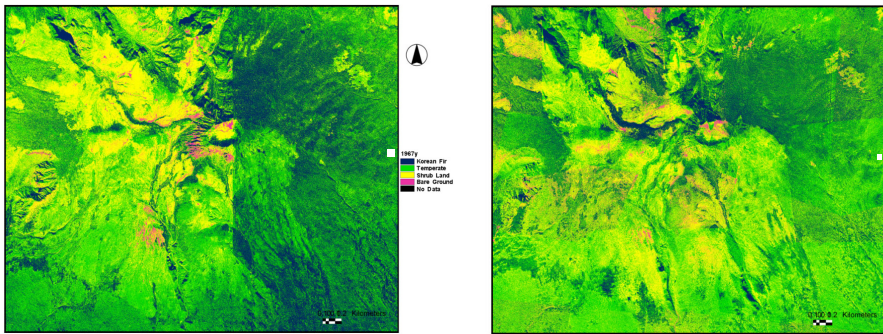


(그림 16) 개나리, 진달래, 벚꽃 개화일 변화

환경부에서는 장기생태 연구를 시행한 결과 한라산의 경우 온대지역에 서식하는 침·활혼효림 면적이 크게 증가하였다고 발표하였다. 기후변화에 가장 취약한 지역으로 여겨지는 한라산의 고산생태계 해발고도 1,000m이상 지역에 대한 구상나무림, 침·활혼효림, 관목림 및 나지의 면적을 비교한 결과, 한라산의 한대지역에 서식하는 구상나무림은 1967년 935.4ha에서 2003년 617.1ha로 크게 감소한 반면(표 4), 온대지역에 서식하는 침·활혼효림, 관목림 및 나지의 면적은 크게 증가하였다(그림 17, 18).

〈표 4〉 1967년과 2003년 사이의 36년 동안 일어난 식생 변화표

| 식생유형 | 1967 | | 2003 | |
|--------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Area (ha) | % | Area (ha) | % |
| 구상나무림 (한대림) | 935.4 | 30.2 | 617.1 | 19.9 |
| 침·활혼효림 (온대림) | 1399.2 | 45.2 | 1498.1 | 48.4 |
| 관목림 | 725.1 | 23.4 | 923.4 | 29.8 |
| 나 지 | 35.5 | 1.2 | 56.6 | 1.8 |
| 전 체 | 3095.2 | 100.0 | 3095.2 | 100.0 |



(좌: 1967년 사진, 우: 2003년 사진, 조사범위: 해발고도1,000 m 이상)

[그림 17] 기후변화에 따른 식생변화를 보여주는 전 처리된 항공사진



[그림 18] 기후변화에 따른 식생변화를 보여주는 전 처리된 항공사진

3.2.2 농업 부문

기온 상승으로 인해 벼의 재배가능 기간이 늘어났고 같은 품종이라도 성장이 빨라지면서 출수기가 약 2~5일 빨라졌다(이정택 2003). 또한 지역별 서리일수 감소하고 있어 동해의 피해가 줄어드는 반면 해충의 월동 가능성을 높이는 악영향을 줄 수도 있다. 가을보리의 안전재배지대 북상(심교문 외 2004)하였고, 추운 지역에서 주로 재배되는 사과의 재배면적 감소하였지만 따뜻한 지역에서 주로 재배되는 복숭아의 경우 재배지역이 경기도 북부, 충청북도, 강원도일대까지 확대되었다(서형호 2003). 난지형 마늘의 재배지역이 크게 북상하고 있으며, 특히 육쪽마늘로 유명한 한지형 마늘을 재배하던 서산 지역은 현재 대부분 난지형 마늘로 변경되고 있다(이승호 외 2005).

제3장 기후변화 관련 생태계 장기모니터링 시스템 및 연구 지표

1. 국외 시스템 및 연구 지표

미국은 이미 1980년대에 장기생태연구를 시작하여 국내 네트워크 구축을 완료하였다. 미국이 주도하는 국제장기생태연구(International Long Term Ecological Research; ILTER)의 경우 이미 32개 국가들이 네트워크에 가입되어 있으며 표준화된 생태계 모니터링 정보 공유·관리시스템 구축 및 생태정보처리 기술 고도화를 통해 전 지구적 차원에서 환경변화에 따른 생태계의 변화를 모니터링, 평가, 예측하고 있다. 하지만 미국과 영국은 자국의 면적과 특색을 고려한 자체의 모니터링 시스템을 구축하고 있다.

1.1 국외 연구 시스템

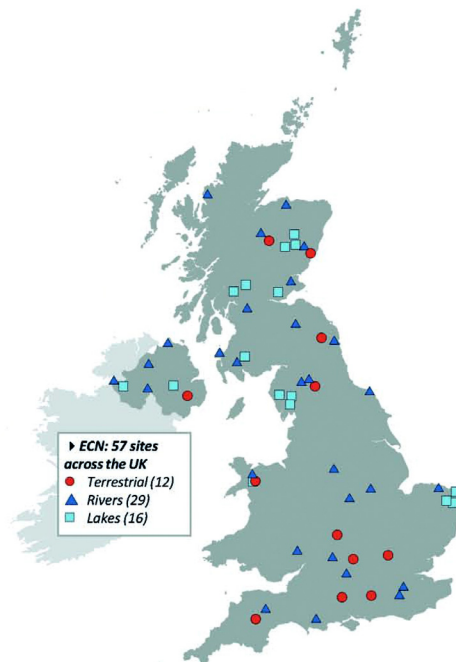
1.1.1 영국

영국의 경우 기후변화에 대한 국제적 공동대응 전략 마련을 위한 정보 제공을 목적으로 1992년 환경(기후)변화네트워크(ECN : Environment Change Network) 구축하여 기후변화에 관련한 장기적 모니터링을 실시하고 있다.

1997년 환경, 식량, 농업사무성(Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA)에 의해 영국 기후 영향 프로그램(UK Climate Impact Program; UKCIP)이 설립(UKCIP, 2008)되었으며 과학연구자, 정책입안자, 이해당사자 등을 위한 기후변화 종합 연구를 실시하고 있다. UKCIP는 2005년 『Measuring Progress』에서 부문별 영향을 정량화하고 지역별/부문별 영향을 평가하고 적응활동을 구분하였다(UKCIP, 2005). 특히 임업, 생물다양성으로 산림 부문을 구분하고 생물다양성 부문에서의 영향 정량화하였다. 이에 따라 저산성 서식지와 수종이

취약해질 위험이 있으며 몇몇의 종들의 경우 서식지 크기가 감소 또는 증가하며 높은 수준의 시나리오에서는 2050년 내로 몇몇의 희귀종의 멸종이 예상하였다.

영국의 경우 2008년 현재 총 57개 지점(육상 : 12개 지점, 하천 : 29개 지점, 호수 : 16개 지점)(그림 19)에서 생태계 전반 뿐 만 아니라 물리적, 화학적, 생물학적 환경에 대해 260개 항목을 지정하고 이에 대한 자료 측정 및 구축하고 있으며 각 지점의 경우 공통된 조사항목과 지역적 특성을 고려한 조사가 진행 중이다.



(그림 19) 영국 ECN(Environment Change Network) 조사지점

1.1.2 미국

미국은 2002년 기후변화과학기술통합위원회(Committee on Climate Change Science and Technology Integration; CCCSTI)를 백악관 산하에 설치하여 기후변화연구를 통합하여 지원하고 있으며 기후변화과학 프로그램(Climate Change Science Program; CCSP)과 기후변화기술 프로그램(Climate Change Technology Program; CCTP)으로 구성하였다. 이를 통해 1995년 이후 기후 변화 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다.

2001년 기후변화 연구 계획에 의해 국가 종합 평가 보고서를 작성(Joyce et al., 2001)하였으며 산림에 대한 기후변화의 영향을 산림 변화, 산림과 교란, 생물 다양성, 사회-경제적 영향으로 구분하여 영향을 분석하였다.

2008년 Pew Center on Global Climate Change에서는 기후변화가 부문별 미칠 영향을 재언급하고 기후변화 적응에 대한 성공적인 접근법, 현재 주와 지역단위에서 일어나고 있는 적응 노력에 대한 소개, 연방정부의 역할에 대한 논의하고 있다(Pew Center on Global Climate Change, 2008). 이 보고서에서는 기후변화 적응에 대한 성공적인 접근방법은 다음과 같다.

- 적응은 지방이나 지역 단위에서 이루어져야 한다는 인식
- 중요한 취약점들에 대한 식별
- 모든 중요 이해당사자들의 참여
- 예측되고 관측된 영향을 기본으로 하는 실행에 있어서의 우선 순위
- 효능, 위험, 비용에 대한 주의 깊은 평가를 기반으로 하는 적응 옵션의 선택

미국의 경우 기후변화에 대한 대응은 주 정부에서 주도적으로 진행하려는 노력이 진행되고 있으며 연방 정부에서는 보조적인 역할과 함께 재정적 지원을 하고 있다. 그 외 기후변화와 관련한 연방정부의 역할을 정리하면 다음과 같다.

- 지능적인 리더십과 연구 개발
- 정책과 규정
- 지방 정부, 기관, 민영 부문 등 간에서의 조정
- 모범 실행 사례의 공유
- 모델과 계획 수단의 제공
- 교육과 홍보
- 재정 지원
- 연방 정부 소유지에 대한 기후 영향 고려

2008년 기후변화 과학 프로그램과 기후변화 연구 부위원회에서는 기후변화가 부문별로 미치는 영향을 정리하였다. 이곳에서는 기존 연구결과들을 종합하여 앞으로의 영향을 예측하고 기후변화 지표와 관측 시스템을 소개하였다(표 5).

〈표 5〉 현재 이용 또는 계획 중인 미국의 산림에 대한 기후 영향 관측 시스템

| Observation System | Characteristics | Reference |
|---|---|---|
| Forest Inventory and Analysis (U.S. Forest Service) | Annual and periodic measurements of forest attributes at a large number (more than 150,000) of sampling locations. Historical data back to 1930s in some areas. | Bechtold and Patterson 2005 |
| AmeriFlux (Department of Energy and other Agencies) | High temporal resolution (minutes) measurements of carbon, water, and energy exchange between land and atmosphere at about 50 forest sites. A decade or more of data available at some of the sites. | http://public.ornl.gov/ameriflux/ |
| Long Term Ecological Research network (National Science Foundation) | The LTER network is a collaborative effort involving more than 1,800 scientists and students investigating ecological processes over long temporal and broad spatial scales. The 26 LTER Sites represent diverse ecosystems and research emphases | http://www.lternet.edu/ |
| Experimental Forest Network (U.S. Forest Service) | A network of 77 protected forest areas where long-term monitoring and experiments have been conducted. | Lugo 2006 |
| National Ecological Observation Network | The NEON observatory is specifically designed to address central scientific questions about the interactions of ecosystems, climate, and land use. | http://www.neoninc.org/ |
| Global Terrestrial Observing System (GTOS) | GTOS is a program for observations, modeling, and analysis of terrestrial ecosystems to support sustainable development. | http://www.fao.org/gtos/ |

출처: (Ryan et al., 2008)

현재 미국은 장기생태연구가 가장 잘 계획되고 유지되는 곳 중 하나이며 1980년 5개 지역의 장기생태연구지소로 출발하여 현재 24개 지소로 증가되어 육상, 산림, 하천, 호수, 해안 등 미국 전역의 다양한 생태계를 모니터링하고 있다(그림 20). 각 LTER(Long Term Ecosystem Research) 지소에서는 기온, 강수량, 적설량 등 기상요인 외 동식물에 대한 분류군별 개체군 동태 및 군집을 모니터링하고 있으며 주된 연구는 다음과 같다.

- 1차 생산물의 패턴과 조절에 관한 연구
- 영양 구조에 의한 개체군의 공간과 시간적 분포에 대한 연구
- 영양물질 즉, 유기물의 순환과 축적 패턴과 조절에 관한 연구
- 무기질의 토양, 지표수, 지하수등을 통해 이동과 유입 패턴에 대한 연구
- 동식물의 변화 유발하는 교란 패턴과 빈도에 대한 연구

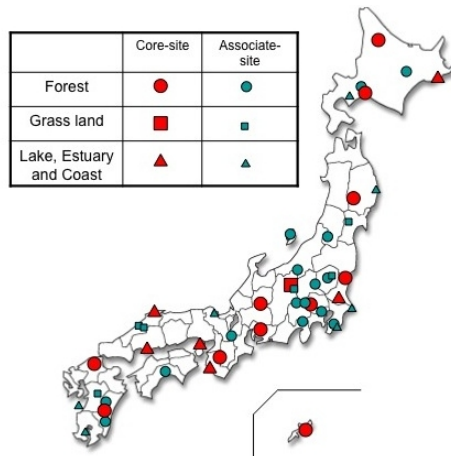


(그림 20) 미국 LTER(Long Term Ecosystem Research) 조사 지소

각 LTER 지소는 전국 지소의 공통된 연구 외 생산량, 에너지 흐름, 물질순환 등 군집과 생태계 차원에서 일어나는 여러 가지 생태현상들을 그 지역의 환경변화와 결부시켜 연구가 진행되고 있으며 지소별 연구 및 관리는 인근 대학에서 전반적으로 맡고 있다. 그리고 지소에는 연구실과 숙소, 세미나실도 마련되어 있다. 연구비는 주로 NSF(미국국가과학재단)로부터 지원을 받고 있으며 영국과 달리 연방정부에서 지정한 지표종을 전 미국에서 통합적으로 연구를 시행하지 않고 있다. 미국은 기본적으로 국토가 넓기 때문에 전 국토에서 동시에 연구를 수행할 만큼 공통적으로 서식하는 종이 없기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 미국은 기후변화에 따른 생태의 변화를 각 주(state) 단위 또는 생태지역(예를 들면 건조사막, 갯벌 등)으로 구분지어 조사를 수행하고 있다. 하지만 연구 대상종이 각 state의 범위를 넘어설 경우 주(state)를 초월하여 연구를 수행하고 있다 (예, 앞서 언급한 기후변화에 따른 설치류의 이동에 대한 연구, 그림 10).

1.1.3 일본

일본의 장기모니터링의 시작은 1970년대에 시작된 유네스코 주관의 국제 생물권 연구 프로그램(IBP; International Biosphere Program)사업이 시발점이 되었다. 대학과 연구소들이 주축이 되어 주요 생태계들을 선별하고 장기생태조사 지점들을 확정하였다. 1995년 일본의 학술심의회는 지구환경과학 연구의 추진에 관한 논의를 진행하여 그 결과 지구환경과학 관련 핵심연구기관 설립의 필요성을 제안하였으며, 이를 기초로 1995년 조사연구회가 설치되어 핵심연구기관의 연구내용, 연구방법 및 조직에 관한 검토를 실시하였다. 1997-1998년도에는 지구환경과학분야 연구조직에 조사연구비가 책정되었으며 2002년에 종합지구환경과학연구소가 설립되게 되었다(환경부 2003). 일본은 장기생태 연구(LTER)지소를 Core-sites(16개 지소)와 Associate-sites(28개 지소)를 설치하여 장기 생태연구 수행하고 있다(그림 21). 주된 연구 내용은 다음과 같다.



[그림 21] 일본 LTER 지역 분포

- 기후변화에 의한 종 다양성과 생태계 기능의 feedback와 반응
- 육상에서 해양 생태부문까지 수문-생물지구화학적 과정과 생태계와의 상호 관계
- 다양한 규모와 차원의 생태계 모니터링 네트워크와 기술의 발전

1.1.4 호주

호주 정부 의회(the Council of Australian Governments)와 the Natural Resource Management Ministerial Council(NRMMC)는 기후변화에 대한 종다양성을 조사를 위한 지침을 발표하였다. 지침은 자연 시스템과 종들을 위해 서식지를 제공하여 종다양성을 위협하는 가능성을 줄이고 생태계 관리자를 위한 기후 변화 정보를 공유하는 방안과 종의 자연적응을 돕고 보존가치가 높은 지역의 보호하는 방안, 기후변화의 영향을 모니터링하고 기후변화에 의해 위협받는 종과 생태시스템을 위한 적응 방안 등을 제공한다.

2003년 호주 환경 위원회에서는 기후변화에 대응한 국가 생물다양성 행동 계획(2004-2007)을 수립(Natural Resource Management Ministerial Council, 2004)하고 기후변화가 생물다양성에 미칠 영향을 평가하고 나아가 행동 계획의 기본 원리를 수립하였다. 또한 행동 계획과 그 목적, 전략 에 대해 기술하고 있다.

2007년 호주 정부는 기후변화 적응 프레임워크를 수립하였으며 전략과 시행 계획을 적응 능력과 이해의 구축과, 부문과 지역적 취약성 감소의 두 분야로 나누어 수립하였다. 2004-2007년 행동 계획을 재검토하고 생물다양성과 생태계과정에 기후변화가 미칠 영향에 대한 국가적 연구 프로그램 설립하고 생물다양성의 보전과 교란에 대처한 구체적인 지침서를 제공하고 있다. 또한 세계유산지역과 습지에 대한 취약성을 평가하였다.

Bird Australia 에서는 대륙적 규모로 조류의 분포와 종풍부도를 조사하여 데이터베이스화 하고 있으며 The Nest Record Scheme 데이터베이스에서는 조류의 번식(timing etc.) 등을 모니터링하고 자료 구축하고 있다. 그 외 호주 LTER 연구 지점 및 연구 센터는 다음과 같다(그림 22).

- 오스트레일리아 Canopy Crane 연구 센터
- 캥거루 장기생태연구 지소
- Victoria Site의 중앙 고원지대
- Tumut Fragmentation Experiment, SE Australia Site
- Warra Long Term Ecological Research Site, Tasmania







(그림 22) 호주의 장기생태 연구 지역 분포

1.2 장기생태계 모니터링 국외 연구 지표

1.2.1 영국

영국의 경우 생태계 전반 뿐 만 아니라 물리적, 화학적, 생물학적 환경에 대해 260개 항목을 지정하고 이에 대한 자료 측정하고 축적하고 있다. 특히 기후변화와 관련한 34개 지표항목(Indicator)을 선정하고 이에 대한 지속적 모니터링 실시 중(표 6)이며 특히, 전국 공통지표와 지역 지표로 이원화된 지표 선정하여 조사하고 있다.






〈표 6〉 영국의 기후변화 관련 장기모니터링 생태지표

| 농업 및 임업 (Agriculture and Forestry) | |
|------------------------------------|---|
| 19 | 농업을 위한 용수량 |
| 20 | 경작 면적 대비 감자 경작 면적 |
| 21 | 감자 생산량 |
| 22 | 포도밭 면적(온난작물) |
| 23 | Forage Maize(온난작물) 면적 |
| 24 | 늦여름 초본류의 생산량 |
| 25 | 봄철 개엽시기(Date of Leaf Emergence) |
| 26 | 너도밤나무 생육 |
| 곤충 및 조류 (Insects and Birds) | |
| 27 | <div> <div> <p>곤충활동시기</p> <ul style="list-style-type: none"> - footman moth 최초 출현 시기 - orange tip butterfly 최대발생시기 - peach-potato aphid 최초 출현 시기 </div> <div>   </div> </div> |
| 28 | <div> <p>곤충량(풍부도)</p> <ul style="list-style-type: none"> - footman moth 의 곤충량 - orange tip butterfly 의 곤충량 - peach-potato aphid 의 곤충량 </div> |
| 29 | 제비도래시기 |
| 30 | <div> <p>조류의 첫 산란일</p> <ul style="list-style-type: none"> - chaffinch - robin </div> <div>   </div> |
| 31 | <div> <p>소형 조류 개체군 변화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 농경지와 산림지역 내 굴뚝새의 개체수 </div> |
| 해수 및 담수 (Marine and Freshwaters) | |
| 32 | 해수 플랑크톤 |
| 33 | 연어 이동시기 |
| 34 | Winder 호의 결빙시기 |

1.2.2 미국

전국적 공통 지표는 운영하지 않으며 지역적 생태계 특성을 고려한 지표 선정하여 운영하고 있다(표 7). 단일적 요소보다는 생태계의 유기적 관계를 규명하는 지표 선정에 우선하고 있다.

〈표 7〉 미국의 생태계 장기 모니터링 연구의 지표

| 종 | 연구 지표 |
|---|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> * 기후변화에 따른 사막, 준사막 지역에서 조류 - 수백만의 이르는 철새의 stopover-site를 제공하는 습지와 하변에 대한 연구 - 습지의 질이 조류의 생존과 번식에 미치는 영향- |
|  | <ul style="list-style-type: none"> * 해수면의 상승에 따른 샌프란시스코의 갯벌 습지의 멸종위기 종 - 해수면의 상승에 대한 정량적, 공간적 분석 - 해수면의 상승에 따른 식생의 변화와 해수면을 이용하는 종의 행동 변화 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> * 강 또는 개천의 수온 및 흐름 변화에 따른 대서양 연어의 영향 - 기후 변화 시나리오에 따른 연어 개체군의 변화 모니터링 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> * 민물 생태의 변화 - 기후변화에 따른 송어류의 생태 변화 - 타겟종의 지역적 분포와 수온, 흐름과의 관계 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> * 록키 산의 기후 변화에 따른 유제동물 분석 - 기후변화에 많은 영향을 받는 game species 유제동물에 대한 연구 - 계절 이동 루트, 채식 장소, 질병 등의 변화 분석 |

1.2.3호주

잠재적 기후변화 지표, 생리적 지표, 현상학적 지표 등 세부적으로 구분되고 특화된 지표를 선정하고 있으며(표 8) 호주의 생태적 특성을 고려하여 선정되었다.

〈표 8〉 호주의 기후변화 관련 장기모니터링의 생태적 지표


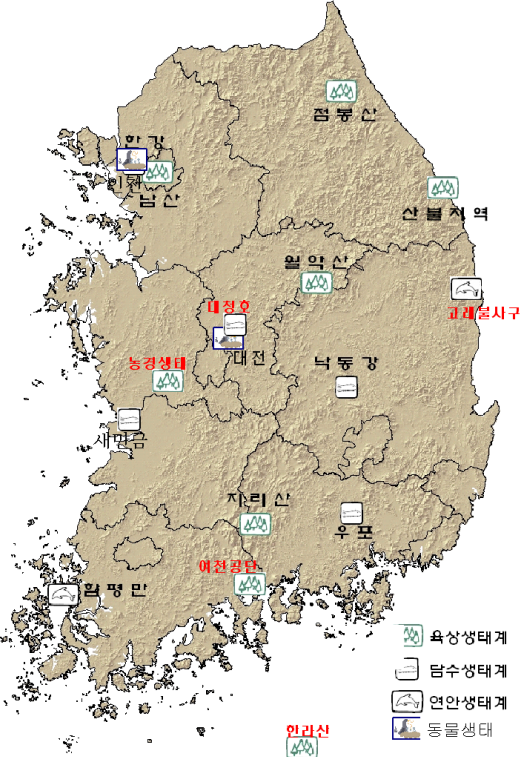
| Indicator | Sensitivity |
|------------------------------------|----------------------|
| 생리적 지표 | |
| Coral bleaching(산호초 백화 현상) | 바다 표면의 기온 |
| calcification in long-lived corals | 해수의 기온 |
| 식생의 잎 두꺼워짐 | CO2 와 기후 영향 |
| 지표로서의 분포 | |
| 조류 | 기온, 강수량, 해수면의 상승 |
| 고산지대의 척추동물 | 기온과 눈의 유지길이와 적설량 |
| 호주 동부의 'flying fox'의 서식 경계 | 기온, 강수량, 동결 빈도 |
| 바다새의 번식군락 구성 | 기온, 엘니뇨의 발생횟수와 강도 |
| 현상학적 지표 | |
| 고산지대 식물 | 기온 상승과 눈의 감소, 봄의 빨라짐 |
| 고산지역 철새의 도착 | |
| 새의 산란 날짜 | 기온과 강수량 |
| 도마뱀(sleepy lizard)의 행동 | |

2. 국내 시스템 및 연구 지표

2.1 국내 연구 시스템

산림청 산하 국립산림과학원에서 현재 5지역의 LTER(Long-Term Ecological Research) 지소(경기도 광릉, 강원도 계방산, 전라남도 금산, 제주도, 삼척)를 운영하고 있다(그림 23). 산림환경 보전 및 공익기능 유지 증진을 위한 기술을 개발하기 위해 산림생물다양성 보전 및 생태계 변화 연구를 제한적으로 시행하고 있다.

환경부의 경우 2004년부터 대학 및 연구소의 전문가를 주축으로 한 국가장기 생태연구사업단을 구성하여 점봉산, 남산, 월악산, 지리산을 대상으로 동물상 및 식생, 식물동태 등 장기생태연구사업을 추진해오고 있으며, 특히 지리산에 설치된 인공새집을 이용한 박새류의 번식시기 모니터링은 기후변화에 따른 개체의 반응을 지역별로 확인할 수 있는 지표가 될 수 있다. 해안 생태 시스템에 대한 LTER 연구를 수행하기 위해 전라남도 함평만에 지소 설치하였으며 2007년과 2008년부터는 산불피해지역과 농경지역, 공단지역에 대한 연구도 함께 진행하고 있다.

| | |
|--|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> ○ 1990년대 초반부터 준비를 시작하여 경기도 광릉, 강원도 계방산, 전라남도 금산, 제주도 서귀포, 삼척의 5지역의 산림 생태계를 대상으로 장기생태조사지를 설치 ○ 5년 간격으로 임분 동태, 생물 다양성, 입지 환경, 물질 순환 등을 모니터링 ○ 그 가운데에서 계방산 장기생태조사지의 경우는 2008년 3차 총 조사가 실시되어 임분 구조, 수종구성, 식생 등의 변화 경향이 나타남 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ○ 동물생태분야: 2개 지소 까치(서울, 대전) & 곤충(당진), 고라니 ○ 육상생태분야: 8개 지소 점봉산, 월악산, 지리산, 남산, 삼척산불피해지, 여천, 농경생태, 한라산 ○ 담수생태분야: 5개 지소 낙동강, 한강, 우포, 새만금, 대청호 ○ 연안생태분야: 2개 지소 함평만, 동해사구(고래불사구) |

[그림 23] 국내 생태계 장기모니터링 지점(위:산림과학원 아래: 환경부)

2.2 국내 연구 지표

각 지소별 공통적 지표는 없으며 지점별 개별적 그리고 분류군별 연구 지표 선정하여 운영하고 있다. 기후변화와 관련한 지표로 적절치 못한 경우도 있으며 조사 지점별 지표는 다음과 같다(표 9).

〈표 9〉 국내 생태계 장기 모니터링 지점별 연구 지표

| | 연구지표 | | | |
|------|--------------------------|---------------|------------------------|--------|
| | 조류 및 포유류 | 곤충 | 식생 | 양서류 |
| 점봉산 | 멧돼지 서식 모형 | - | 식물의 화력 식생 동태 | - |
| 월악산 | 조류상 | 종다양성 및 나비 | 식생 동태 및 군락 | 양서류 군집 |
| 지리산 | 조류의 첫산란일, 한배산란수, 알 크기 | 나비 종다양성 | 침엽수 식생 동태 식물 화력 | - |
| 남산 | 조류의 번식 군집 | 나방 군집 | 식물 화력 | - |
| 농경생태 | 농법에 따른 조류상 | 곤충 분포 | 식생 구조 식물동태 | - |
| 한라산 | 조류 및 포유류 서식 특성 | 곤충 분포 | 식물계절현상 개엽, 개화, 낙화시기 | - |
| 여천공단 | 조류 군집 | 나비와 나방상 특성 | 식물 구조 및 화력학적 특성 | - |

3. 국·내외 장기생태모니터링 운영 시스템 종합

3.1 연구 시스템

3.1.1 국외 생태계 장기 모니터링 시스템의 특성

해외 주요국의 생태계 장기 모니터링 시스템의 공통된 특징은 지역 중심의 연구 지점과 지점을 상호 연결하는 네트워크 체제를 구축하고 있으며 네트워크의 통합적 DB 운영과 지점의 역할 강화 또한 공통된 특징으로 하고 있다. 해외 주요 국별 장기모니터링 운영 시스템은 표 10과 같다.

〈표 10〉 해외 주요국의 생태계 장기모니터링 운영 시스템

| | 영국 | 미국 | 호주 | 일본 |
|----------------------|--|---|---|--|
| 운영 주체 및 예산 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 중심의 네트워크 방식 ■ 정부기관과 연구소 등 14개의 스폰서에서 예산지원 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 백안관 산하 기후 변화과학기술통합 위원회의 통합 관리 ■ 지역 중심의 네트워크 시스템 운영 ■ 미국국가과학재단(NSF) 예산 지원 ■ 지역의 관리는 지역 대학 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 의회와 정부에서 지원 및 운영 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 정부 지원으로 전문연구소와 같은 조직 및 기관설립 ■ 네트워크 운영 |
| 조사지점 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 생태계 특성을 고려한 네트워크 중심의 조사 지역 57개 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 주요 생태계 서식지 특성을 고려한 주정부, 지역 중심의 조사지로 24개 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 특성 중심, 특정 종 중심의 연구 병행 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 16개 핵심지역, 28개 보조지역 설정 |
| 주요 연구 지표 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 생태계 전반에 관한 260개 항목 ■ 기후변화와 관련한 34개 항목 별도 선정 ■ 전국적의 공통 지표와 지역적 특성을 고려한 항목 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 공동된 지표 항목은 일부를 제외하고는 없으며 지역의 특성을 고려한 조사 항목 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 생태계 변화 중심의 지표 선정 ■ 생리적 변화, 현상, 특화된 지표 등 세부적 항목의 지표 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 생물지구화학적 과정과 생태계와의 상호 관계를 규명하는 지표 선정 |
| 현지 조사 및 자료 축적 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 자체 기관 및 7개의 전문 연구 기관 참여 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 대학에서 조사를 맡음(교수, 연구원, 대학원생 참여) ■ 각 지소의 경우 연구시설 완비 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 각 지역의 연구소에서 현장 조사 실시 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 연구 지소에서 조사 |
| DB구축 및 자료 체계 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ECN 통합 DB운영 ■ 57개 장소, 250개항목 자료 공유 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 통합 DB운영 ■ 장기생태자료 외 다양한 정보 공유 | <ul style="list-style-type: none"> ■ The Nest Record Scheme 등 특성화된 DB 운영 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 통합 DB운영 |

3.1.2 국내 장기모니터링 시스템 현황

국내 생태계 장기모니터링 시스템의 특징은 중앙 정부 주도 체제인 것과 이로 인하여 지역 생태계 변화규명에 어려움이 있다. 국내 생태계 장기모니터링 시스템의 현황과 문제점은 표 11과 같다.

〈표 11〉 국내 생태계 장기모니터링의 운영 시스템 현황 및 문제점

| | 연앙 | 문제점 | 대안 |
|---------------|--|--|--|
| 운영 주체 및 예산 지원 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 운영 주체는 정부(환경부)이며 전체 예산 지원 ■ 국가장기생태연구사업단에서 위탁 운영 | <ul style="list-style-type: none"> ■ TOP DOWN 방식 ■ 지역적 영향에 대한 감지가 어려움 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 중심의 모니터링(BOTTOM UP 방식) ■ 지역을 연결하는 네트워크 방식 도입 ■ 예산의 경우 지역과 정부의 공동 지원 |
| 조사 지점 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 주요 생태분야별 주요 지점별로 선정 ■ 예산 내에서 국가장기생태사업단과 환경부 협의 후 결정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역적 대책 및 정책 수립의 어려움 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역의 현안과 특성을 고려한 조사 지점과 지표 설정 ■ 전국적 공통 조사 지침의 경우 중앙에서 지정 |
| 주요 연구 지표 선정 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 조사지역 책임자의 임의적 결정 ■ 종에 국한된 조사 지표가 많음 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 장기생태연구과제로 적절치 못한 지표가 선정된 경우 발생 ■ 조사지점 개별적 지표로 인해 자료 공유 및 분석 어려움 ■ 생태계 전반에 관한 변화 파악 어려움 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 조사 지점별 지표의 이원화/ 전국적 공통 연구지표 설정과 지역적 특성의 개별적 지표를 포함 ■ 생태계의 시스템을 고려한 지표 선정 필요 |
| 현지 조사 및 자료 축적 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 전문가 위주로 선정된 조사자에 의해 조사됨 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 짧은 기간 내 발생하는 현지 현황을 간과하는 경우가 많음 ■ 일 단위 필요 측정의 어려움(출현 시기) | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역에 상주하는 전문가에 의한 조사 실시 ■ 지역 전문가 양성 프로그램 활용 |
| DB 구축 및 관리 체계 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 현재 없음 / 구축 중 | | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 정보의 경우 지역 자체 관리하며 공통 지표에 대한 자료는 중앙에 수집 관리 |
| 활용 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 국가 정책 활용에 국한 | | <ul style="list-style-type: none"> ■ 지역 정책 활용 |

3.2 연구 지표

국내를 포함한 생태계 장기모니터링의 연구 지표와 특성은 표 12와 같다.

〈표 12〉 국내외 주요국의 생태계 장기모니터링 지표 및 특성

| | 미국 | 영국 | 호주 | 한국 |
|--------------------|--|---------------------------------|---|---|
| 지표 선정 | ■ 일부를 제외하고 공통 지표는 없으며 지역의 생태적 특성을 고려한 지표 설정 운영 | ■ 전국 공통과 지역 항목을 이분화 하여 조사 | ■ 공통과 지역을 이분화 하며 설정, 특히 지역의 생태적 특성과 종에 관한 지표 설정 | ■ 전국 공통된 지표는 설정되지 않음 |
| 기후 변화 관련 유무 | ■ 기후변화 지표 강화 | ■ 기후 변화 지표 강화 | ■ 기후 변화 지표 강화 | ■ 일부의 경우 기후변화 지표로서의 적절성 부재 |
| 지표 선정의 특성 | ■ 분류군별 보다는 지역 생태적 특성 고려한 지표 | ■ 분류군별 보다는 생태계 유기적 관계 중시한 지표 설정 | ■ 지역의 고유의 생태 및 종과 관련한 지표 선정 | ■ 분류군 별 지표 마련, 생태계 유기적 관계 및 지역 특성 고려 부재 |

제4장 충청남도 생태계 장기모니터링 지침 및 방안

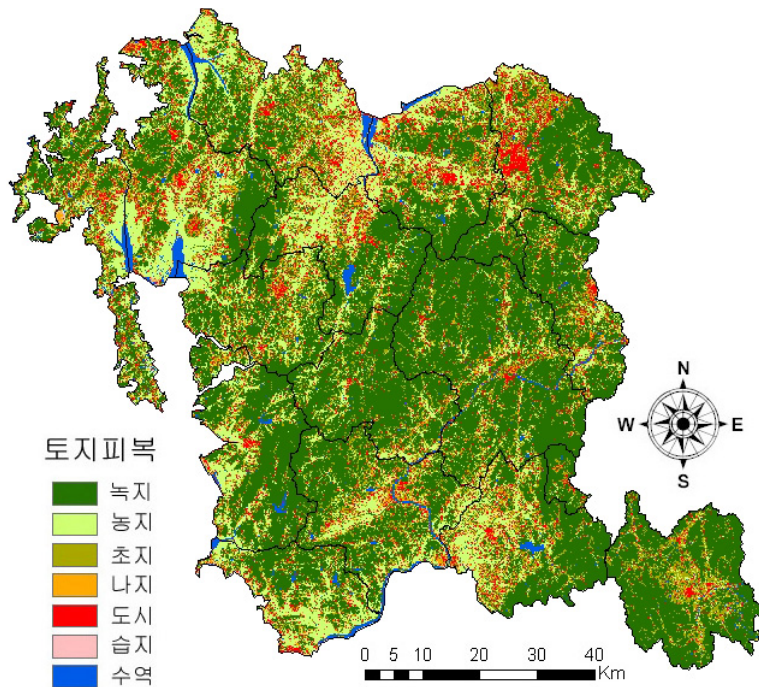
1. 충청남도 자연환경 및 주요 서식지

1.1 충남의 자연환경 현황

충남지역의 경우 전체 면적의 52%를 산림이 차지하고 있으며 그 외 논과 밭이 전체의 19%와 15%를 각각 차지하고 있다(표 13). 산림지역의 경우 공주시와 금산군 일원을 중심으로 넓게 분포하고 있으며 농경지의 경우 당진군과 서산시를 중심으로 분포하고 있다(그림 24). 또한 충남 지역의 경우 304.2km² 면적의 갯벌이 분포하며 아산시, 당진군과 태안군, 아산시, 보령시, 서산시, 서천군 등 7개 시군이 해안과 접해있으며 특히 서천군과 태안군의 경우 조간대가 발달해 있다.

〈표 13〉 충청남도 토지이용현황 (2004년, 단위 km²)

| 산림 | 논 | 밭, 초지 | 나지 | 도시 | 습지 | 수역 | 계 |
|---------|---------|---------|-------|-------|------|-------|---------|
| 4,472.6 | 1,616.3 | 1,366.4 | 214.9 | 683.5 | 21.3 | 192.3 | 8,567.3 |



| 시·군 | 토지피복 | 산림 | 농지(논) | 초지 (밭+초지) | 나지 | 도시 | 습지 | 수역 | 계 |
|-----|------|-------------|---------|--------------|-------|-------|------|-------|---------|
| 천안 | | 344.9(54.5) | 78.4 | 119.7 | 9.5 | 78.8 | 0.0 | 2.1 | 633.4 |
| 공주 | | 690.5(73.3) | 64.1 | 123.8 | 14.7 | 39.8 | 0.0 | 8.7 | 941.6 |
| 보령 | | 334.6(60.1) | 101.5 | 64.8 | 10.1 | 30.8 | 2.6 | 12.0 | 556.4 |
| 아산 | | 220.9(40.6) | 129.1 | 92.1 | 14.3 | 69.7 | 1.4 | 17.0 | 544.5 |
| 서산 | | 259.1(35.5) | 220.5 | 112.1 | 24.0 | 75.6 | 3.4 | 35.8 | 730.5 |
| 논산 | | 262.1(47.4) | 125.4 | 88.7 | 18.1 | 48.4 | 0.1 | 9.6 | 552.4 |
| 계룡 | | 47.5(78.9) | 1.2 | 6.8 | 1.5 | 2.9 | 0.0 | 0.3 | 60.2 |
| 금산 | | 412.6(71.5) | 21.8 | 106.4 | 5.0 | 25.0 | 0.0 | 6.1 | 576.9 |
| 연기 | | 226.0(62.3) | 39.5 | 58.1 | 10.6 | 23.1 | 0.0 | 5.1 | 362.4 |
| 부여 | | 325.3(52.0) | 109.5 | 110.0 | 19.1 | 45.9 | 0.1 | 16.0 | 625.9 |
| 서천 | | 151.1(40.8) | 110.1 | 55.7 | 8.4 | 27.7 | 2.8 | 14.7 | 370.5 |
| 청양 | | 332.4(69.3) | 51.5 | 68.0 | 4.3 | 19.8 | 0.0 | 3.8 | 479.8 |
| 홍성 | | 211.8(47.4) | 99.5 | 80.7 | 15.3 | 32.1 | 0.4 | 6.8 | 446.6 |
| 예산 | | 270.1(49.9) | 123.3 | 79.5 | 17.3 | 40.3 | 0.5 | 10.9 | 541.9 |
| 태안 | | 189.3(38.3) | 115.6 | 86.2 | 22.6 | 51.9 | 7.0 | 22.0 | 494.6 |
| 당진 | | 194.4(29.9) | 225.3 | 113.8 | 20.1 | 71.7 | 3.0 | 21.4 | 649.7 |
| 계 | | 4,472.6 | 1,616.3 | 1,366.4 | 214.9 | 683.5 | 21.3 | 192.3 | 8,567.3 |

(그림 24) 충남 지역의 주요 시군별 토지이용현황

1.2 충남의 주요 서식지

1.2.1 산림생태계

가. 계룡산

충남의 산림 생태계를 대표하는 지역으로 충남광역생태 네트워크 상의 핵심지역이다. 식물의 경우 1,000여 분류군이 분포하며 온대남부와 중부의 특징 식물이 거의 공통적으로 분포하고 있다. 포유류의 경우 18종, 어류 17종, 양서파충류 18종 등이 서식하며 조류의 경우 최근 조사에서는 70여종이 서식하는 것으로 나타났다. 곤충의 경우 1500여 종이 서식하며 그중 나비목이 70% 이상을 차지한다(국립공원 2004).

1.2.2 농경생태계

가. 대호지

국내 주요 월동지 중 하나로 해마다 한 해 평균 32~45종의 수조류가 10,000-20,000 개체 규모로 월동하며(표 14) 멸종위기종Ⅰ급으로 지정된 흰꼬리수리, 매와 멸종위기종Ⅱ급으로 지정된 알락해오라기, 큰고니, 고니, 큰기러기, 가창오리, 솔개, 갯빛개구리매, 말뚝가리, 큰말뚝가리, 비둘기조롱이, 쇠황조롱이 등이 기록되어 있다.

〈표 14〉 6년간 대호지의 월동 수조류 종 수 및 개체수 (환경부 2004)

| | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 종수(총 77종) | 39 | 45 | 35 | 32 | 36 | 37 |
| 개체수 | 20,818 | 20,114 | 3,134 | 14,013 | 21,599 | 10,025 |

나. 간월호

국내 최대 월동지로 한 해 평균 54~73종의 수조류가 평균 40,000 여 개체로 월동한다(표 15). 멸종위기종 I급으로 지정된 황새, 노랑부리저어새, 흰꼬리수리, 참수리, 검독수리, 매와 II급으로 지정된 알락해오라기, 큰고니, 고니, 개리, 큰기러기, 가창오리, 독수리, 잣빛개구리매, 조롱이, 참매, 말뚝가리, 털발말뚝가리, 큰말뚝가리, 흰죽지수리, 쇠황조롱이, 흑두루미, 검은머리물떼새, 검은머리갈매기 등 많은 희귀조류가 서식하고 있다.

〈표 15〉 6년간 간월호의 월동 수조류 종 수 및 개체수 (환경부 2004)

| | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 종수(총 102종) | 54 | 54 | 72 | 73 | 64 | 63 |
| 개체수 | 68,373 | 75,858 | 41,822 | 33,328 | 24,718 | 37,275 |

다. 금강호

국내 주요 월동지 중 하나로 해마다 25~39종(평균 32종)의 수조류가 평균 140,000 여 개체로 월동하며(표 16) 멸종위기 II급으로 지정된 큰고니, 고니, 개리, 큰기러기, 가창오리, 잣빛개구리매, 말뚝가리 등이 월동하고 있다.

〈표 16〉 5년간 금강호의 월동 수조류의 종 수 및 개체수

| | 1999 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 종수(총 54종) | 25 | 28 | 39 | 35 | 35 |
| 개체수 | 55,592 | 49,507 | 160,060 | 341,329 | 108,449 |

출처 : 환경부, 2004. 전국동시센서스

1.2.3 연안생태계

가. 금강하구

국내 주요 월동지 및 중간기착지로 수조류의 경우 해마다 19 ~ 36종(평균 29종)이 평균 20,000여 개체 규모로 월동하며 섭금류의 경우 해마다 15 ~ 30종(평균 25종)이 평균 20,000여 개체 규모로 중간 기착한다(표 17) 멸종위기II급으로 지정된 큰고니, 고니, 개리, 큰기러기, 가창오리, 솔개, 검은머리물떼새, 검은머리갈매기 등이 기록되어 있다.

〈표 17〉 5년간 금강하구의 월동 수조류의 종 수 및 개체수

| | 1999 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 종수(총 56종) | 25 | 19 | 28 | 36 | 35 |
| 개체수 | 43,136 | 22,658 | 25,344 | 22,548 | 14,085 |

출처 : 환경부, 2004. 전국동시센서스

나. 유부도

국내 최대 규모의 섭금류 중간 기착지 중 하나이며 수금류의 월동지로도 유명한 곳이다. 수금류의 경우 13 ~ 26종(평균 19종)이 평균 12,000여 개체로 월동하며 20 ~ 30종(평균 25종)이 평균 25,000여 개체 규모로 중간 기착한다(표 18). 멸종위기I급 조류인 노랑부리저어새와 청다리도요사촌, 넓적부리도요와 멸종위기II급으로 지정된 큰기러기, 말뚝가리, 검은머리물떼새, 검은머리갈매기 등이 기록되어 있다.

〈표 18〉 5년간 유부도 월동 수조류의 종 수 및 개체수

| | 1999 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 종수(총 38종) | 15 | 13 | 23 | 17 | 26 |
| 개체수 | 6,811 | 13,608 | 18,952 | 12,010 | 8,503 |

출처 : 환경부, 2004. 전국동시센서스

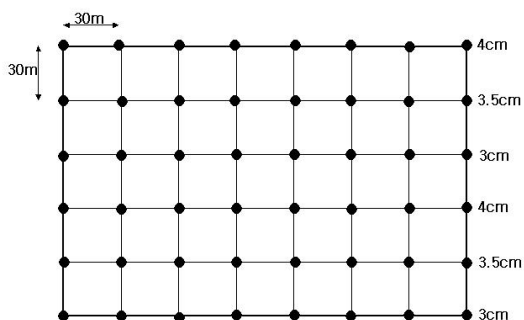
2. 현장 조사 결과 및 검증

2.1 조사 개요

조류 번식 생태에 관한 항목의 국가 차원 혹은 지역 차원의 조사 항목 결정 유무 확인을 위하여 실시하였다.

2.1.1 인공새집 설치

사용된 인공새집은 모두 자체 제작된 목재형으로 입구직경은 쇠박새와 진박새 그리고 박새 및 곤줄박이의 선호 직경을 고려해 3.5cm, 4cm로 각각 다르게 제작하였다. 설치 장소는 고도별로 갑사와 금잔디고개 등 2 구역을 지정하여 설치하였으며 인공새집 간 간격은 30m로 유지하였다. 3.5cm, 4cm의 각기 다른 입구직경의 새집을 8개씩 일렬로 배치하였으며 2회 반복하여 총 6줄로 배치하였다(그림 25). 지리산과 한라산 지역에도 동일한 방법으로 설치 후 번식생태를 측정하였다.



[그림 25 . 인공새집 배치 형태]

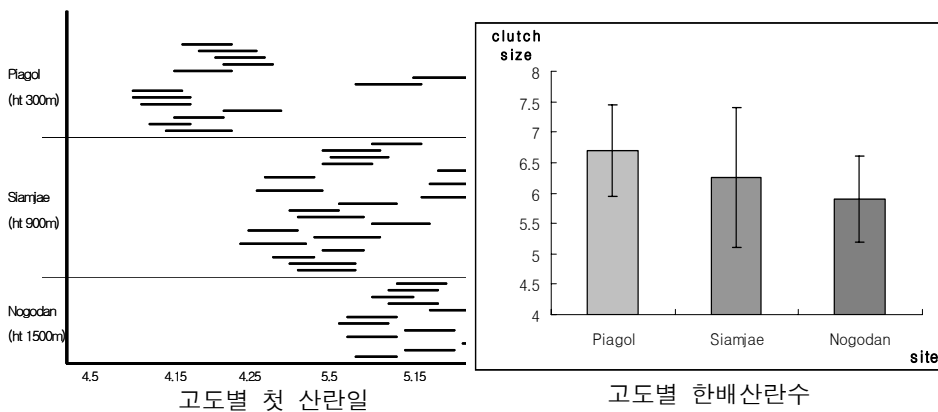
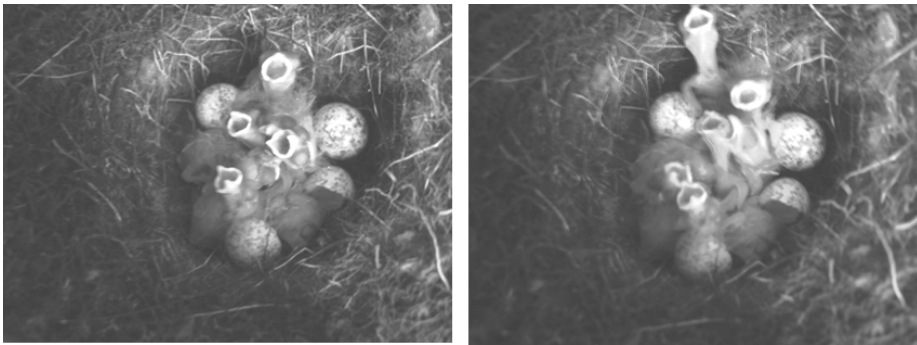
2.1.2 첫산란일 및 한배산란수 측정

연구 대상종은 인공새집에서 흔히 번식하는 텃새인 곤줄박이이며 조사 기간은 4월초부터 6월초까지 실시하였다. 각각의 조사 지역을 2-3일에 한번 씩 방문하여 산란 유무와 한배산란수를 측정하였다.

2.2 조사 결과 및 고찰

2.2.1 지리산 지역 조사 결과

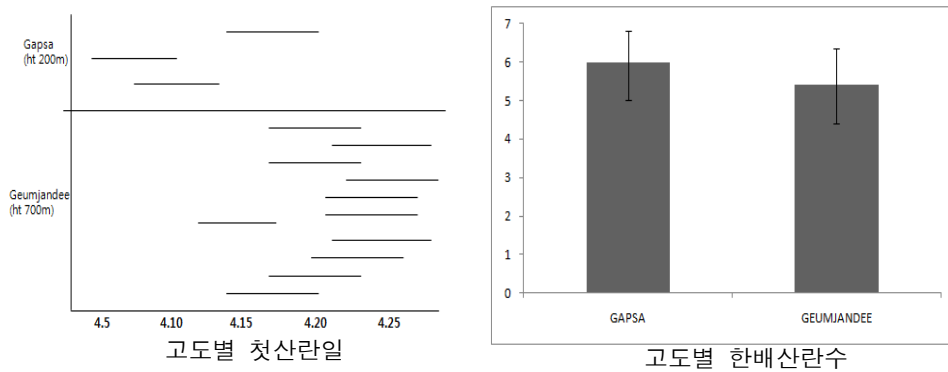
첫 번째 알의 산란일은 세 지역에서 차이가 있는 것으로 나타났다(Kruskal-Wallis Test, $P < 0.0001$). 각 피아골과 시암재, 시암재와 노고단, 노고단과 피아골 간의 곤줄박이 첫 산란일도 차이가 있는 것으로 나타났다(Wilcoxon, P -value = 0.0004, 0.0006, 0.0005). 한배 산란수는 피아골지역에서 6.69 ± 0.75 , 시암재는 6.26 ± 1.15 , 노고단은 5.90 ± 0.70 으로 나타나 각 지역별로 유의한 차이를 보였다(P -value=0.091).



[그림 26] 지리산 지역의 첫산란일과 한배산란수

2.2.2 계룡산 지역 조사 결과

첫산란일은 갑사 지역(평균 4월 8일)과 금잔디 지역(평균 4월 18일)이 유의한 차이를 보였다. 한배산란수는 갑사 지역과 금잔디 지역이 평균 6개와 5.4개로 유의한 차이를 보이지 않으며, 이는 샘플량의 차이인지 아니면 한배산란수에 영향을 줄 정도의 고도차가 아닌지에 대한 추후 조사가 필요할 것으로 판단된다.



(그림 27) 계룡산 지역의 첫산란일과 한배산란수

2.2.3 지리산 지역과 계룡산 지역의 비교

지리산 지역과 계룡산 지역의 첫산란일은 유의한 차이를 보였다. 비슷한 고도끼리 한배산란수를 비교할 경우 갑사와 피아골에서는 차이가 없지만 금잔디 고개와 시암재에서는 유의한 차이를 보였다. 따라서 첫산란일과 한배산란수는 생태계의 지역별 변화를 유기적으로 판단할 지표로써 의미가 있으며 앞으로 한라산과 지리산, 계룡산 지역을 더불어 추후 강원도 혹은 경기도 지역의 산림지역 한곳을 선정하여 기후변화와 관련한 장기 생태계 모니터링의 국가적 네트워크 형성이 필요하다. 특히 첫산란일과 한배산란수의 경우 식생과 곤충의 우화, 생물량과 직결되므로 생태계 변화 추이를 모니터링 할 수 있는 최적의 지표이므로 네트워크 형성은 더 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

3. 충남 장기모니터링 지표·지점 및 지침 선정

3.1 충남 장기모니터링 지표 및 지점 선정

3.1.1 지표 및 지점 선정 기준

가. 산림생태계

산림생태계의 경우 기후변화에 따라 식생 및 곤충의 개엽, 우화 생육 사이클 변화 이에 따라 고차 소비자인 조류의 번식 생태에 영향을 준다. 따라서 산림생태계 모니터링을 위한 지표는 식생 동태와 곤충량 그리고 번식 조류의 영향을 인지할 수 있는 지표여야 한다. 모니터링 지점의 경우 충남 지역의 산림 생태계를 대표하는 식생군을 지니며 지리산과 한라산에서 수행되는 고도별 한배산란수 등과 같은 실험이 가능한 고도를 지녀야 한다.

나. 농경생태계

농경생태계의 경우 기후변화에 따라 곤충의 발생시기, 곤충상 및 곤충량 변화가 예상됨 또한 농작물 생육의 변화도 예상되며 상위 포식자인 조류인 도래 시기 또한 변화할 것으로 추정된다. 따라서 곤충량과 곤충상 그리고 농경지 의존 조류의 도래 시기를 인지하는 지표가 필요하다. 모니터링 지점의 경우 넓은 면적의 농경지가 분포한 곳이며 조류의 서식 또한 많은 곳 이어야 한다.

다. 연안생태계

연안생태계의 경우 수온 상승에 따른 저서무척추 동물의 생활환 및 서식종의 분포와 생물량 변화, 섭금류의 이동 형태 변화가 예상된다. 따라서 연안생태계의 저서무척추동물 생물량 변화와 서식종 그리고 섭금류의 이동 형태 변화를 인지할 수 있는 지표가 필요하다. 모니터링 지점의 경우 조간대가 발달하고 섭금류의 주요 도래지이어야 한다.

3.1.2 충남 장기 모니터링 지표 및 지점

가. 산림생태계

모니터링 지점은 계룡산 지역이 적절할 것으로 판단되며 온대남부와 중부의 특징 식물이 거의 공통적으로 분포하고 있음, 올해 현장조사 검증실험이 있었으며 충남지역에서 유일하게 해발 800m 급으로 고도차를 지니고 있다.

모니터링 지표는 식생동태, 생물 계절 현상, 곤충상(량) 변화, 곤충박이의 한배 산란수와 첫산란일, 이동 조류에 관한 모니터링이 적절할 것으로 판단된다.

나. 담수생태계

모니터링 지점은 대호방조제와 간월호가 적절하며, 특히 간월호의 경우 동아시아 최대 규모의 수조류 월동지이며 많은 멸종위기 조류가 서식하는 곳으로 보전생물학적 의미 뿐 만 아니라 생태관광자원으로써도 중요한 곳으로 지속적인 모니터링이 필요한 곳이다.

모니터링 지표는 곤충량 조사(주야간), 제비 도래일, 제비 번식일 적절할 것으로 판단된다.

다. 연안생태계

모니터링 지점은 유부도 지역이 타당하며 특히 EAA(동아시아-호주 간 철새 이동경로)의 중요 거점 기착지로서 많은 멸종위기종에 등록된 섬금류가 도래하며 서식지 파괴로 인해 국내 유일의 섬금류 도래지로 남아있다. 최근 환경변화로 인해 섬금류의 도래 개체수가 줄고 패류량이 줄어들에 따라 주민의 생계에도 많은 영향을 주고 있으므로 지속적인 모니터링이 필요한 실정이다.

모니터링 지표는 저서무척추동물 생물량과 생물상 조사, 섬금류 도래 시기 및 개체군, 퇴적량 조사가 적절할 것이다.

3.2 충남 장기 모니터링 지표별 지침(안)

<식생 동태>

연계 환경부 실시중인 모니터링 매뉴얼과 동일

1. 식생구조

- 조사시기는 최성기인 6~8월에 한다.
- 전체피도, 교목층(>8 m), 아교목층(2~8 m), 관목층(1~2 m), 초본층(< 1.0 m)의 피도와 평균수고를 기록한다.
- 영구방형구에 출현하는 모든 식물에 대하여 피도를 파악하여 기록한다.

2. 생산성

- 수관층 목본식물의 현존량 측정 : 매목조사를 통해 이들의 흉고직경과 수고를 기록한다.
- 임상층 목본과 초본 현존량의 측정
 - * 영구방형구내에서 관목층의 조사는 5×5 m, 초본층은 1×1 m 방형구를 설치한 다음 조사한다.
 - * 초본층의 현존량은 영구방형구 외부에서 내부와 유사한 피도를 가진 곳을 선정하여 수확법으로 조사한다(1×1 m, 5개).

3. 고사목과 낙엽·낙지 생산량 및 분해

- 고사목 생산량
 - * 현존 고사목 조사: 조사구내에 존재하는 목질부 유기물 (수간, 가지, 뿌리) 중 최대 직경이 5 cm 이상인 유기물을 고사목으로 분류, 조사한다.
- 고사목의 양분 함량 측정
 - * 고사목 내 양분 (C, N, P, K, Ca, Mg, Na 등)을 분석한다.
- 낙엽의 생산과 분해
 - * 직경 1 m인 원형의 litter trap을 설치하고 월별로 낙엽 및 낙지생산량을 측정한다.
 - * litter bag을 제작하여 현장에 분산시켜 놓은 후 일정시간 간격으로 수거하여 그 감소량으로 낙엽 분해율을 측정한다.

〈생물계절연상〉

연계 환경부 실시중인 모니터링 매뉴얼과 동일

1. 표본식물 선정

표본식물은 목본종과 초본 중에서 비교적 널리 분포하고, 우점종이거나 일찍 개화하는 특성을 가진 종으로 9종을 선택한다(신갈나무, 소나무, 진달래, 노린재나무, 개나리, 당단풍, 개벚나무). 지역별로 분포하지 않는 종이 있을 경우는 지역의 계절별 지표가 될 수 있는 종을 선정하여 관찰한다.

2. 식물의 계절현상 관찰

■ 계절현상의 관찰항목과 기준은 다음의 지침서를 따른다

〈식물의 계절현상 평가 기준〉

| 구 분 | | 기 준 |
|-----|-----|------------------------------------|
| 개화 | 시작기 | 꽃이 연속적으로 만개하는 시기 |
| | 종기 | 꽃의 대부분(95% 이상)이 만개한 시기 |
| 낙화 | 기간 | 개화시기부터 개화종기까지의 기간 |
| | 시작기 | 꽃이 연속적으로 낙화하거나 현저한 마름이 나타나는 시기 |
| | 종기 | 꽃의 대부분(95% 이상)이 낙화 또는 현저하게 마른 시기 |
| 개엽 | 시작기 | 잎이 연속적으로 만개하는 시기 |
| | 종기 | 잎의 대부분(95% 이상)이 만개한 시기 |
| | 기간 | 개엽시기부터 개엽종기까지의 기간 |
| 단풍 | 시작기 | 잎이 연속적으로 변색되는 시기 |
| | 종기 | 잎의 대부분(95% 이상)이 변색된 시기 |
| 낙엽 | 시작기 | 잎이 연속적으로 낙엽되는 시기 |
| | 종기 | 잎의 대부분(95% 이상)이 낙엽되었거나 잎말림이 나타난 시기 |
| | 기간 | 낙엽시기부터 낙엽종기까지의 기간 |

■ 환경요인 측정

* 식물계절 현상에 영향을 미치는 기온을 비롯한 환경인자를 측정한다. 즉, 식물계절 현상 조사지점의 미기후를 실측하고, 고도, 방위, 경사 및 식생구조를 비롯해 토양의 물리화학적 특성을 파악한다.

〈곤충상의 변화 연구〉

연세 환경부 실시중인 모니터링 매뉴얼과 동일

1. 조사 항목 : 나비, 나방

2. 조사 시기 : 5월부터 10월까지 trap을 설치, 한달 간격으로 샘플링을 수행한다.

3. 조사 방법

(1) 나비

두 지점을 관통하는 조사 노선 (200m x 2m)에서 약 15분간 이동하면서 관찰되는 모든 출현종의 종명과 개체수를 기록하고, 종명확인이 어려운 종은 포충망으로 채집하여 실험실로 가져와 건조표본을 제작 후 분류 동정한다.

조사 노선의 수는 필요에 따라 갯수를 늘려 갈 수 있다. 예를 들어 두 숲의 중앙부나, 주변부, 고도에 따라서, 하천을 따라서 조사 노선을 구성하고, 지속 관찰 할 수 있도록 관찰자가 지역에 맞게 선정할 수 있도록 한다. 조사한 지역의 조사노선은 지도상에 정확히 표시하고, 차기에 연속적으로 관찰 가능하도록 하고, 필요하다면 Flagging을 하여서 나비 장기 monitoring 연구에 이용 할 수 있도록 한다.

(2) 나방

나방류 조사는 야행성 곤충들을 파장의 범위가 낮은 단파장에 의해 정량적으로 채집할 수 있는 Black Light Trap을 이용하여 야간채집을 실시한다. 채집지 주변에 다른 빛이 있으면 교란효과가 일어나 채집의 효율성이 떨어지며, 달이 크게 뜨는 날도 간섭효과가 많이 나타나는 편이므로 다른 광원과의 경쟁을 줄이기위해 달빛이 없고 흐린 날을 골라 채집을 실시한다.

방형구내에 세개의 B/L Trap을 적당한 곳에 설치하고 하루밤 경과 후 수거한다 (Trap이 부족하면 두개의 trap을 이틀에 걸쳐서 수행한다. 이는 통계학적으로 반복수를 높이기 위해 시행 되는 것이다). 그 트랩은 전원이 전기플러그를 사용가능한 곳에선 교류를 사용하지만, 그렇지 못한 곳에선 자동차용 battery를 이용하고 사용후엔 반드시 Charger로 다시 충전을 한다.

그 Trap안에 있는 채집통엔 곤충들이 유입된후 즉사시키거나 포식 활동을 중지시키기 위해서 무취의 독성이 있는 No Pest Strip을 적당량 절개하여 함께 넣어둔다. 다음날 유인된 나방류를 실험실로 가져온 후 건조표본 제작 전에 냉동실에 샘플을 보관하고, 건조표본을 제작한 후 분류동정에 이용한다.

Trap 설치 기간은 4주 간격으로 하루간 trap을 설치하는데, 만약 두개의 트랩을 사용하는 경우는 둘째날은 첫째날의 Trap을 이동시켜서 설치한다.

< 한배산란수와 첫산란일>

1. 인공새집설치

- 사용된 인공새집은 모두 자체 제작된 목재형으로 입구직경은 쇠박새와 진박새 그리고 박새 및 곤줄박이의 선호 직경을 고려해 3cm, 3.5cm, 4cm로 각각 다르게 제작함
- 고도별로 300m 간격으로 설치
- 3cm, 3.5cm, 4cm의 각기 다른 입구직경의 새집을 8개씩 일렬로 배치하였으며 2회 반복하여 총 6줄로 배치함

2. 첫산란일 및 한배산란수 측정

- 조사 기간은 4월초부터 6월초까지 실시함
- 각각의 조사 지역을 2-3일에 한번 씩 방문하여 산란 유무와 한배산란수를 측정함
- 조류 번식 생태에 관한 항목의 국가 차원 혹은 지역 차원의 조사 항목 결정 유무 확인을 위함

3. 호브설치

< 이동조류 모니터링 >

1. 그물(mist-net)설치

- 한배산란수 관련 실험이 진행되는 방형구 내에 그물을 조류의 이동시기인 4월 중순부터 5월 초순까지 20일간, 9월 중순부터 10월 초순까지 20일간 설치하며 해마다 동일 장소에서 시행
- 오전 6시부터 12시까지 매 시간 그물을 확인, 이후 시간은 그물 접음

2. 가락지 부착

- 포획된 조류는 가락지를 부착하며 재포획 유무를 확인함

<저서무척추동물 생물량>

1. 생물량 조사

- 영구 고정 조사 지점을 20곳을 선정하고 주변으로 반경 1m 이내로 5곳의 지름 15cm, 깊이 30cm의 갯벌을 채취
- 그물눈 3mm, 1mm 체를 통해 거른 후 저서생물을 수집후 생물량 조사
- 생물량 조사는 봄철(4월 중순)과 가을철(9월 중순) 각각 1회 실시한다.

2. 생물상 조사

- 생물량 조사시 수집된 생물 뿐 만 아니라 정량채집망을 이용하여 채집 후 동정

〈섭금류 이동 시기 및 개체군〉

1. 이동 시기 조사

■ 해마다 4월 초순부터 5월 초순까지 매주 1회씩 조사 실시, 매주 동일 요일을 지정해서 만조시 갯벌 외곽에서 휴식하는 섭금류의 종 및 개체수 기록

2. 가락지 부착 작업

- 4월 초순부터 5월 말까지 최대 만조일자와 전후 1일씩을 포함하여 3일간 그물을 이용하여 섭금류 포획
- 포획된 개체의 경우 가락지를 부착하여 재방사함

4. 장기 생태모니터링 운영 및 활용 방안

4.1 모니터링 운영 방안

4.1.1 제1안

전담 기구를 신설하고 각 지점에 연구지소를 설치하여 연구 인력을 상주 시켜 기후 관련 모니터링 외 생태계 모니터링을 수행한다. 데이터 관리, 자료정리, DB 구축, 연보 발간 모든 업무는 전담 기구에서 총괄한다.

4.1.2 제2안

전담 기구를 설립하고 각 지소별 관리는 현지 내 조사자를 고용하여 모니터링을 실시한다.

4.1.3 제3안

운영의 주체는 전담 기구를 두기 보다는 도내의 관련 부서(환경관리과)내에 업무 일임하며 주 업무는 자료 정리와 DB구축, 연보 발간 등이다. 각 모니터링 지점의 경우 현지 내 거주민에 조사를 우선으로 하며 재원이 마련될 경우 현지 내 조사자를 고용하여 조사를 위임한다.

현지 내 조사자의 경우 인근 대학교 관련 학과 혹은 최근 환경부에서 시행하는 '거점교육센터' 수료생을 활용하며 재원 마련이 어려울 경우 각 지점별 유사한 연구를 수행하는 기관과 협력 체계 구축, 이 경우 조사자와 시스템은 선정된 지표에 대한 조사를 추가로 실시해야 한다. 여기에 대한 비용만 일부 제공하며 자료는 공유한다.

- 계룡산의 경우 국립공원관리공단에서 자원조사와 함께 유사한 모니터링을 실시하고 있다.
- 유부도의 경우 국립생물자원관에서 도요새의 이동을 봄가을 2-3회씩 조사를 실시하고 있다.
- 간월도의 경우 서산시에서 간월호에 대해 유사한 모니터링을 실시하고 있다.

4.2 모니터링 활용 방안

4.2.1 환경정책 및 활동의 근거 자료 활용

지구온난화와 관련한 대책 마련 및 피해 저감 등 환경정책 수립 시 근거자료로 활용할 수 있다. 또한 자연환경 및 멸종위기종 보전활동의 기초자료로 이용할 수 있다.

4.2.2 생물자원의 관리 유지에 활용

개체수 변화 혹은 이상 징후를 보이는 생물종에 대한 원인을 구명하여 유지 관리하기 위한 대책 수립하는 데 활용할 수 있다. 농업과 어업에 관련한 종에 대한 모니터링을 통해 농작물 질병의 변화 및 어획량 변화를 예측하는데 활용할 수 있다.

제5장 요약 및 제언

1. 요약 및 결론

본 연구는 기후변화에 따른 충남 생태계 변화에 대한 장기 모니터링 방안을 모색하는 데 목적이 있으며 이를 위해 모니터링의 지표 선정과 모니터링 대상지 그리고 지침 등을 해외 사례를 통해 비교, 분석하여 최종적으로 정하였다.

1) 영국의 경우 1992년 환경(기후)변화네트워크(ECN)을 구축하여 기후변화에 관한 장기적 모니터링을 실시하고 있으며 1997년 환경, 식량, 농업사무성에 의해 영국 기후 영향 프로그램(UKCIP)이 설립되었으며 과학연구자, 정책입안자, 이해당사자 등을 위한 기후변화 종합 연구를 실시하고 있다. 지표의 경우 2008년 현재 총 57개 지점(육상 : 12개 지점, 하천 : 29개 지점, 호수 : 16개 지점)에서 생태계 전반 뿐 만 아니라 물리적, 화학적, 생물학적 환경에 대해 260개 지표를 지정하고 이에 대한 자료 측정 및 구축하고 있으며 각 지점의 경우 공통된 조사항목과 지역적 특성을 고려한 조사가 진행 중이다

2) 미국은 장기생태연구가 가장 잘 계획되고 유지되는 곳 중 하나이며 1980년 5개 지역의 장기생태연구지소로 출발하여 현재 24개 지소로 증가되어 육상, 산림, 하천, 호수, 해안 등 미국 전역의 다양한 생태계를 모니터링하고 있으며 2002년 기후변화과학기술통합위원회(CCCSTI)를 백악관 산하에 설치하여 기후변화연구를 통합하여 지원하고 있으며 기후변화과학 프로그램(CCSP)과 기후변화기술 프로그램(CCTP)으로 구성하였다. 이를 통해 1995년 이후 기후 변화 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 지표의 경우 전국적 공통 지표는 운영하지 않으며 지역적 생태계 특성을 고려한 지표 선정하여 운영하고 있다. 단일적 요소보다는 생태계의 유

기적 관계를 규명하는 지표 선정에 우선하고 있다. 특히 적응은 지방이나 지역 단위에서 이루어져야 한다는 인식이 강하다.

3) 호주의 경우 2003년 호주 환경 위원회가 기후변화에 대응한 국가 생물다양성 행동 계획(2004-2007)을 수립하고 기후변화가 생물다양성에 미칠 영향과 나아가 행동 계획의 기본 원리를 수립하였다. 이후 2007년 정부는 기후변화 적응 프레임워크를 수립하였으며 전략과 시행 계획을 적응 능력과 이해의 구축과, 부문과 지역적 취약성 감소의 두 분야로 나누어 수립하였다. 지표의 경우 잠재적 기후변화 지표, 생리적 지표, 현상학적 지표 등 세부적으로 구분되고 특화된 지표를 선정하고 있으며 호주의 생태적 특성을 고려한 지표가 선정되었다.

4) 일본의 경우 1970년 유네스코 주관의 국제 생물권 연구 프로그램(IBP)사업이 시발점이 되어 대학과 연구소들이 주축이 되어 주요 생태계들을 선별하고 장기생태조사 지점들을 확정하였다. 1995년 일본의 학술심의회는 지구환경과학 연구의 추진에 관한 논의를 진행하여 그 결과 지구환경과학 관련 핵심연구기관 설립의 필요성을 제안하였으며, 이를 기초로 1995년 조사연구회가 설치되어 핵심연구기관의 연구내용, 연구방법 및 조직에 관한 검토를 실시하였다. 1997-1998년도에는 지구환경과학분야 연구조직에 조사연구비가 책정되었으며 2002년에 종합지구환경과학연구소가 설립되게 되었다. 장기생태 연구(LTER)지소를 Core-sites(16개 지소)와 Associate-sites(28개 지소)를 설치하여 장기 생태연구 수행하고 있다.

5) 기후변화에 따른 생태계 장기모니터링 사업의 국내 실정의 경우 첫째 top down 방식으로 인해 지역적 영향에 대한 파악이 어려우며 이에 따라 지역적 정책 및 대책 수립이 어렵다. 둘째, 장기생태연구과제로 적절치 못한 지표가 선정된 경우가 많으며 조사지점 및 임의적인 지표선정으로 인해 자료 공유 및 분석에 어려움이 많다. 셋째, 생태계 전반에 관한 변화 파악이 어려우며 특히 현장의 조사자에 의한 모니터링으로 인해 짧은 기간 내 발생하는 현지 현황을 간과하는 경우가 많으며 일 단위 측정의 어려움(출현 시기)이 많다.

6) 기후변화에 따른 생태계 장기모니터링 사업의 충남지역에 대한 조사지점은 계룡산과 대호방조제 및 간월호 그리고 유부도 지역이 적절하며 연구 지표는 식생동태와 생물계절현상, 곤충상 변화, 조류의 한배산란수와 첫산란일, 이동 및 월동조류 모니터링, 저서무척추동물 생물량, 섭금류 아둥 시기 및 개체군 동태 등이다.

2. 정책 제언

지구온난화에 따른 생태계 변화는 범지구적으로 일어나고 있으며 국가차원의 대응보다는 지방 정부차원의 대응이 우선시 되고 있다. 따라서 지역적 특색을 고려한 장기모니터링 사업이 우선 실시되어야 하며 그 이외 다음과 같은 정책이 수반되어야 한다.

1) 생태계 장기모니터링 사업의 운영 주체를 결정함과 동시에 지역의 모니터링의 효율적인 관리를 위해 관련 분야의 전문가와 지역 전문가(대학), 공무원 등으로 구성된 모니터링 운영위원회 구성해야 할 것이다.

2) 기후변화에 따른 생물다양성 변화에 대응하기 위한 행동계획이 구축되어야 한다. 특히 생물다양성의 경우 농업과 어업 등 식량자원과 직결되는 문제이므로 시급히 이뤄져야 할 필요성이 있다. 또한 행동계획에서는 개체수 변화 혹은 이상 징후를 보이는 생물종에 대한 원인을 구명하고 유지 관리하기 위한 대책을 수립하는데 있어 필요한 관련 기관 및 부서 간의 협력과 이해를 신속히 하는 데 필요한 협조체계를 미리 구축해야 한다.

■ 집 필 자 ■

연구책임 : 정옥식 책임연구원 충남발전연구원 환경생태연구부

기본연구 2009-18 · 기후변화 관련 충청남도 생태계 장기모니터링 방안 연구

글쓴이 · 정옥식 / 발행자 · 김용웅 / 발행처 · 충남발전연구원
인쇄 · 2009년 12월 31일 / 발행 · 2009년 12월 31일
주소 · 충청남도 공주시 금홍동 101 충남발전연구원 (314-140)
전화 · 041-840-1203(직통) 041-840-1114(대표) / 팩스 · 041-840-1219
ISBN · 978-89-6124-106-9 03350

<http://www.cdi.re.kr>

©2009. 충남발전연구원

- 이 책에 실린 내용은 출처를 명기하면 자유로이 인용할 수 있습니다.
무단전재하거나 복사, 유통시키면 법에 저촉됩니다.
- 이 연구는 본 연구원의 공식 견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.