

기후변화 빅데이터를 이용한 중부 도시림의 생태적 특성변화¹⁾

김 호 국²⁾

EcoSoup생태연구소/대표

본 연구의 목적은 한반도 중부권 도시림에서 기후변화에 따른 생태적 변화 특성 즉, 기 후대별 식물의 개화 변화, 생물의 출현변화, 조류의 군집특성을 구명하는 것이었다. 이를 통하여 도심지의 기후의 변화가 생태적 특성변화에 미치는 영향을 규명하고 그 결과를 토 대로 장래의 변화예측 및 대응방안 마련을 목적으로 한다.

기후변화 관련연구

기후변화는 기온이 자연적 변화에 의하여 작은 폭으로 상승 또는 하강하였다가 다시 원 상으로 돌아가는 현상을 말한다(Folland and Karl, 2001).

기후변화의 원인으로 그동안 관측된 20세기 중반 이후 관측된 지구평균 기온 상승의 대 부분이 인위적 온실가스 농도의 증가 때문일 가능성이 높다고 하였다(Forster and Ramaswamy, 2007). 온실가스는 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)와 같은 물질로 구성되어 있는데 이러한 온 실가스 중 온실효과를 가장 많이 영향을 미치는 것은 아산화질소(N₂O)이다(Boden, 2009).

IPCC 4차 보고서(Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) Fourth Assessment Report, 2007)에 의하면 과거 100년간(1906~2005년) 지구의 평균기온이 약 0.74°C가 상승 하였으며, 최근 30년간 기온 상승은 더욱 빨라져 인간이 주기적인 활동이 현재와 같이 지 속화 된다면 2100년까지 전 지구 평균기온이 최대 6.4°C, 해수면은 59cm 상승할 것으로 전망하고 있다.

온실가스 증가에 의해 발생하는 지구 온난화는 생물종의 서식 분포에 직접적인 영향을 미침에 따라 나뭇잎 개엽, 개화기, 철새 도래시기, 양서류 및 파충류의 산란과 같은 현상 의 발생 또는 이동시기가 빨라지고 있고, 동·식물 서식지 이동, 서식지의 축소로 인한 생 물 종 멸종 등 자연현상이 나타나고 있다(Beaumont, 2006; Forchhammer, 1998; Penuelas,

1)Study on the Ecological Characteristics of Urban Forest Complex with Big Data of Climate Change at Middle Part in Korea

2)KIM, Ho Gug, The President of EcoSoup Ecology Research Institute

2002; Rubolini, 2007).

또한, 북반구 농업 및 산림관리에도 영향을 미쳐 봄철 기온상승으로 인하여, 봄철 파종 시기가 더욱 빨라지고, 산불과 병충해의 확산으로 인한 산림 생태계의 교란 및 변화를 가져오고 있다(內嶋先兵術, 2005).

이러한 변화는 전 지구적 뿐만 아니라 한반도에도 나타나고 있는데 기상청자료(Korea Meteorological administration(KMA), 2012)에 의하면, 2100년 경 한반도의 일평균기온은 평년대비 4.0°C, 일 최고기온은 3.8°C, 일 최저기온은 4.2°C 상승할 것으로 예측하고 있고, 강수량은 21%, 상대습도는 21% 상승할 것으로 예측되어 경기도 해안지역과 충청남도, 전라남·북도, 경상남도, 강원도의 영동지방까지 아열대기후대를 보일 것으로 추정하고 있으며, 한반도 주변해역의 해수면 온도상승으로 우리나라로 접근하는 태풍의 강도가 더욱 강해질 것으로 예측하고 있다.

한반도가 기후변화에 의해 점점 따뜻해짐에 따라, 냉해에 약한 복숭아가 춘천지역에 재배되기 시작하였고, 망고, 파파야 등 수입 의존 외국의 아열대 작물 지역이 늘고 있다.

이러한 새로운 열대작물의 재배는 농가 소득증대에 영향을 주지만 열대기후변화로 인한 새로운 해충의 유입 및 증가가 나타나고 있는 실정이다(National Institute of Biological Resources(NIBR), 2010).

최근의 난대성 상록 활엽수의 분포 변화 분석 연구(Lee, 2009)에 의하면, 1941년 Uyeki가 설정한 난대성 상록활엽수의 북방한계선이 북쪽으로 크게 세력을 확장하여 14~74 km 이동한 것으로 밝혀졌다.

또한 생물계절적인 변화로 신갈나무의 개엽시기가 봄철의 기온변화와 상관관계가 있음이 보고되었고(Lim and Shin, 2005), 지리산과 한라산의 구상나무 성장속도를 분석한 연구결과에서 여름철 기온상승에 따른 증발산량의 증가로 인하여 성장율이 감소되는 것으로 확인된 바 있다(Koo *et al.*, 2001; Park and Seo, 1999). 생물다양성의 변화로서 광릉, 설악산, 앵무봉의 나비류에 대한 조사에서 북방계 및 남방계 나비류의 밀도가 변화했음이 보고된 바 있고(Koun *et al.*, 2006), 한라산 정상 부근의 고산식물을 대상으로 생물 지리학적으로 분석한 결과, 지구온난화에 따른 멸종가능성이 제시된 바 있다(Kong, 1999).

기후변화에 의한 식물의 영향

지구의 온난화가 진행되면서 인간이 직·간접적으로 느낄 수 있는 현상 중에 하나는 계절의 변화이다. 이에 국립기상연구소는 앞당겨진 서울지역의 계절변화를 살펴보고 1910년대의 10년(1908~1917년)과 2000년대의 10년(1998~2007년)을 비교한 결과 2000년대 겨울과 봄의 기온이 1910년대 보다 많이 상승하고 있다고 제시하였다. 이러한 원인으로 서울의 봄과 여름은 시작일이 15~17일 빨라졌으며, 가을과 겨울은 시작일이 17일 늦어졌다. 지속기간은 여름이 32일, 봄은 4일이 길어지고, 겨울은 35일 단축되었고(KMA,

2004), 이와 같이 계절현상이 변화하므로 식물의 개화 및 생육시기의 부조화 등의 현상이 나타난다.

서울지역의 개화일을 1922~2004년까지 조사한 결과 10년당 개화일수는 개나리와 진달래가 각 2.4일, 벚꽃과 복숭아가 각 1.4일 빨라졌으며, 아까시나무는 0.5일 빨라지므로(Ho, 2006) 이른 봄에 개화하는 식물 일수록 개화일이 더 앞당겨지는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 지속적인 연구가 진행되고 있다. 미국의 Miller-rushing and Primack(2008)은 한 고장의 기온이 1°C 상승할 때마다 개화기는 토종식물(33종)이 2.93일, 외래식물(10종)이 3.40일씩 앞당겨졌고 1월, 4월 및 5월의 평균기온은 1852~1858년에 4.3°C가, 1978년과 1888~1902년에 5.0°C가, 21세기 초(2004~2006년)에 5.9°C가 높아진 사실도 밝혀냈다.

또한 스페인에서는 Penuelas(2002)가 서양사과나무의 경우 1952~2000년 개엽기 및 개화기, 결실기가 앞당겨지고 낙엽기는 늦어지는 결과를 제시하였으며, 영국에서는 1990년대 식물 385종의 개화일이 10년당 평균 4.5일이 앞당겨졌고(Fitter and Fitter, 2002), 1990년대 독일에서는 개화기가 10년당 1.0~4.2일 앞당겨졌다(Schaber and Badeck, 2005).

계절의 변화는 지구상의 일정한 위치의 식생 상태를 15일마다 관측하여 자료를 수집한 결과 1980년대 이후 지구 온난화로 인하여 봄이 앞당겨지고 가을이 늦어짐에 따라 고위도 지역 식물의 생육 기간이 1982~1983년 보다 7년 후인 1989~1990년에 12일 연장되었다고 보고되었다(Myneni, 1997).

중국의 경우 Piao(2006)는 북위 30° 이북에 분포하는 온대식생의 생육기간을 연구한 결과 초봄의 개엽기는 10년당 15.4일씩 빨라지고 늦은 가을 낙엽기는 10.1일씩 늦어져서 총 25.5일이 길어졌으며, 이러한 결과 계절은 기온이 1°C 상승할 때 마다 개엽기는 7.5일 빨라지고, 낙엽기는 3.5일 늦어졌다고 제시하였다.

유럽에서도 식물의 생육기는 매년 봄 0.2일씩 앞당겨져 지난 30년 동안 6일이 빨라졌고, 낙엽기가 매년 0.16일 씩 늦어져 30년 동안 4.8일 늦어지고 생육기간은 108일 길어졌다(Menzel and Fabian, 1999).

이러한 기온상승은 식물계절, 생육기 뿐만 아니라 식물의 분포지 및 재배한계지역을 변경하는 결과로 나타난다.

우리나라 상록활엽수의 분포역은 1941년 대청도, 변산, 영암, 죽도, 울릉도를 잇는 선이라고 하였으나(Uyeki, 1941), 2009년에는 북한계선이 백령도, 칠갑산, 내장산, 동해안의 구룡포를 잇는 선으로 북상하였다(Lee, 2009).

우리나라의 남부 지역에 분포하는 왕대속 식물의 북한계선은 1월 평균기온이 1°C 상승할 때 30~50 km 북상했다고 한다. 이러한 추세로 볼 때 왕대속의 북한계선은 30년 후 강화, 용인, 진천, 보은, 보현산 남부지역으로 이동할 것으로 전망된다(Heo *et al.*, 2006)고 보고되었다.

뿐만 아니라 유실수인 사과나무재배지도 일교차가 큰 경북지대에서 2000년대에는 강원

도 영월, 경기 포천, 강원 인제 등지에서 재배가 가능할 것으로 보이며(Hwang *et al.*, 2001), 제주도의 감귤과 한라봉은 전남고흥, 경남거제에서도 재배하고, 봄배추는 재배적지인 제주에서 전남 해남으로, 봄 감자는 나주와 전북 김제로 재배지가 북상하고 있다(Korea Climate & Environment Network, 2013).

기후변화로 인한 기온상승의 영향은 농작물의 재배적지 변화뿐만 아니라 농장물의 생산량에도 많은 영향을 미치고 있는 것으로 조사되었다. 온대지역에서 벼, 밀, 옥수수는 기온이 1~3°C 상승하면 수확량이 증가하지만 그 이상의 온도가 상승하면 오히려 수확량이 감소하는 경향이 나타났으며(Esterling and Aggarwal, 2007), 벼의 경우 개화기에 일정온도(23~35°C)가 유지되지 않으면, 쪽정이 발생 확률이 높아져 생산성이 떨어지는 것으로 조사되었다(內嶋先兵衛, 2005).

이러한 기후변화로 나타나는 식물의 반응은 평지와 저위도 지역의 식물보다 고산과 고위도 지역의 식물에 미치는 영향이 더 크다. 이러한 연구는(Perfors, 2003) 표고 2,920 m 고산지대에 고온구와 대조구를 만들어 식물의 반응을 실험한 결과 고온구에서 다년생 사막쭉의 목질부분의 생산량이 증가하고, 식물의 분포지는 북쪽 또는 고지대로 이동했고, 이는 고온으로 인하여 눈이 일찍 녹아 생장이 빨라진데 있다고 제시하였다.

북극 툰드라의 생태계 특성은 기온이 낮고 토양 속에 질소성분이 부족하며, 초본-지의류와 관목이 혼생하는 특이성이 있다. 기온이 높아져서 관목이 많이 자라면 초본-지의류의 생장이 억제되고, 반대로 기온이 낮아지면 초본-지의류가 무성해진다. 이러한 생태적 특이성을 가진 툰드라 지역에 기온을 높이는 실험 결과(Harte, 1995) 툰드라 지역의 온난화가 진행되면 관목이 무성해지고 초본이 쇠퇴하여 종 다양성이 낮아질 것으로 보고되었다.

이상의 내용을 종합하면, 기온상승으로 인하여 식물의 개화기, 생육시기, 분포한계지, 재배지 등이 변화하고 있는 결과가 나타나고 있다.

기후변화에 의한 동물의 영향

기후변화로 인한 기온상승이 동물에 미치는 영향에 대하여 살펴 본 결과 곤충류인 나비의 경우 봄철의 기온상승으로 활동기가 빨라졌다. 영국의 연구자료(Roy and Sparks, 2000)에 의하면 갈고리나비와 아틀란타멋쟁이나비의 첫 출현일이 10년당 각 8일, 16.5일이 빨라졌고 평균활동기간이 10년당 아틀란타멋쟁이나비 18.1일, 시알봄나비 13.1일, 줄흰나비 10.7일이 길어졌다.

스페인에서는 꿀벌, 배추흰나비, 토로라도감자잎벌레 및 올리브하늘소에 대한 첫 출현일이 빨라졌으며, 이것은 자연계 식물의 생육시기와 깊은 관계가 있는 것으로 나타났다(Gordo and Sanz, 2005).

이러한 기온의 상승은 곤충류의 활동시기 뿐만 아니라 분포지역에도 변화를 주었다. 영국의 남쪽 해안과 내륙에 분포하고 있던 나무그늘나비는 1960년대 이후 기온이 상승한

북쪽으로 북상하고 있으며(Parmesan, 1999). 나비류의 이동은 수평이동 뿐만 아니라 저지대에서 고지대로의 수직이동이 나타났다고 한다(Konvick, 2003).

나비뿐만 아니라 영국의 생태학자들은 잠자리의 분포지 이동 및 확산에 관하여 연구한 결과 기온이 높았던 1960년에서 90년대 사이의 30년 동안 평균 약 74 km 북쪽 방향으로 이동했고, 분포역도 넓어졌다고 한다(Hicking, 2006).

양서류의 경우 봄철 기온상승과 개구리의 산란시기 변화를 관찰한 결과 영국에서는 Beebee(2009)는 이른 봄 산란을 하는 개구리의 산란일은 변화가 없었으나, 늦게 산란하는 개구리의 알 낳는 시기는 기온이 1°C 상승할 때마다 9~10일 앞당겨졌으며, 산란기 1~2개월 전의 최저기온이 높은 해일수록 일찍 알을 낳았다. 또한 미국에서는 1900~1999년 까지 개구리의 첫 울음소리를 조사한 결과 100년당 10~13일 빨라졌다고(Gibbs and Breisch, 2001) 보고되었다.

조류의 경우 스코틀랜드의 박새는 봄 기온이 낮은 해에 큰 알을 낳고 높은 해에는 작은 알을 낳는다, 그런데 최근 기온이 높아짐에 따라 박새 알이 작아지고 있고(Stevenson and Bryant, 2000), 말뚝가리의 번식밀도와 적설량의 관계를 살펴보면 적설량이 많아질수록 먹이원의 부족 등의 영향으로 번식밀도가 감소하는 것으로 나타났다(Selas, 2001).

철새의 이동시기 변화를 보면 온대지역에서 번식, 한대지역에서 월동하는 철새의 경우 지구온난화에 의해 회유시기가 앞당겨지고 번식지에서의 첫 도래일이 빨라지고 있으며, 산란 및 부화시기가 앞당겨지고 번식지의 체류기간이 길어지는 등 생활사의 변화가 나타나고 있다(Coppack and Both, 2002).

기온이 상승하기 이전인 1968~1972년과 상승한 1988~1991년의 분포지의 변화를 보면 영국 남쪽에만 서식하던 서양휘파람새 등 59종의 분포한계선이 평균 19 km 북쪽방향으로 이동하고 있는 것으로 조사되었으며, 북쪽에서만 서식하는 비오리 등 42종의 남한계선은 약 4.5 km 이동하여, 북한계과 남한계는 서식하는 조류의 기온 민감도가 같지 않다는 연구 결과를 보여줬다(Thomas and Lennon, 1999).

포유류의 경우 기후변화로 계절이 앞당겨지면서 포유류가 동면에서 깨어나는 시기가 빨라지고(Inouye, 2000), 붉은다람쥐는 출산일이 촉진되는(Reale, 1999) 것으로 나타났다.

이상의 동물의 분류군별 변화는 연속된 먹이사슬에 영향을 나타냈다. 조류의 경우 먹이원인 곤충류의 성장속도가 빨라지면서 조류의 산란일과 부조화가 나타나 조류의 번식률이 낮아지고 있으며(Christiaan Both, 2009; Visser, 2006), 곤충류는 애벌레시기의 먹이원인 식물의 잎 피는 시기가 빨라지면서 애벌레의 성장에 영향을 미치는 것으로(Viaer and Holleman, 2001) 보고되었다.

이상의 내용을 종합하면 기후변화에 의한 기온상승은, 동물의 번식기, 출현시기, 이동방향 및 분포, 먹이사슬 등에 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서 기후변화가 동물의 이동 및 출현시기와의 관계를 규명하였다.

연구고찰

본 연구 대상지가 위치하고 있는 경기도 수원, 서울, 경북안동, 전라남도 광주, 강원도 평창 등 관측소 5개 지역의 기상데이터(1964~2014년) 50년 동안의 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량, 최심신적설량을 분석하였다. 조사대상지의 기후환경을 중심으로 5개 식물구계로 구분하여 냉온대북부(대관령), 냉온대중부(서울, 수원), 냉온대 남부(안동), 난온대림(전라남도 광주)지역의 식물종별 개화기 및 단풍시기 자료 및 동물 출현시기를 조사·분석하였다. 군집구조의 분석에는 상대풍부도 및 각 조사지점에 대하여, 종다양도(Diversity), 균등도지수(Evenness Index)와 풍부도지수(Richness Index) 및 우점도지수(Index of Dominance)를 이용하여 산출하였다.

연도변화에 따른 기후요인변화를 분석한 결과 지난 50년간 평균기온은 지속적으로 상승하고 있으며, 연평균기온 $0.48^{\circ}\text{C}(Y = 0.048X - 83.036)$, 연평균최고기온 $0.33^{\circ}\text{C}(Y = 0.033X - 47.951)$, 연평균최저기온 $0.64^{\circ}\text{C}(Y = 0.064X - 120.350)$ 씩 증가된 것으로 관측되었다.

월별 기후인자변화를 분석한 결과 봄철과 가을철의 온도변화에 고도의 유의성이 인정되어 10년 후 평균기온은 $0.29\sim 0.68^{\circ}\text{C}$ 상승 할 것으로 예측되었고, 최고기온은 $0.25\sim 0.66^{\circ}\text{C}$, 최저기온은 $0.28\sim 0.91^{\circ}\text{C}$ 상승할 것으로 예측되었다.

야생조류 군집분석 결과, 겨울철새의 종다양성과 풍부도는 연도가 지남에 따라 증가하였으며, 여름철새의 경우 종다양성은 감소하였지만, 풍부도는 2015년을 제외하고 증가하는 것으로 나타났다.

기후요인변화에 따른 식물개화기의 변화양상에 대하여 각 식물종별 개화기는 온도가 1°C

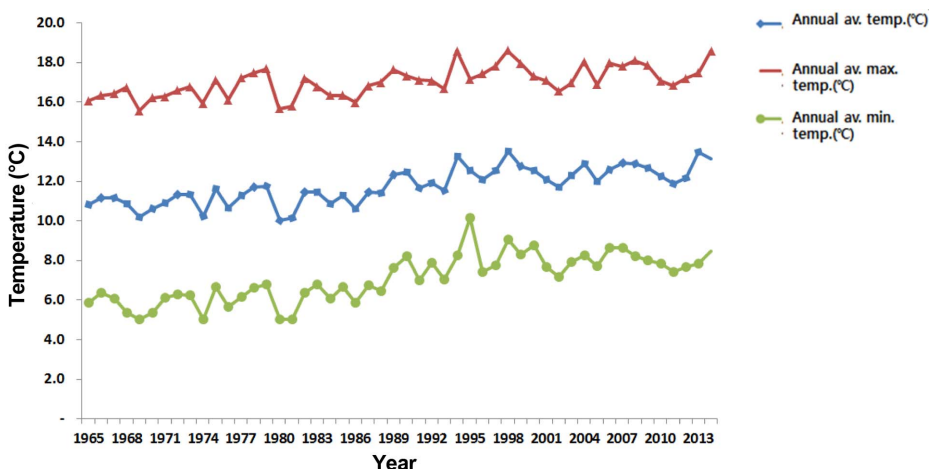


Fig. 1. 50년간 평균연간 기온, 최고기온, 최저기온의 변화
(Changes of average annual temperature, the maximum and minimum temperatures for observation periods of fifty years)

증가하면 개나리의 개화일은 3.12~7.16일, 진달래는 2.98~9.47일, 벚나무는 4.34~6.38일, 매화는 12.2~15.0일, 아까시나무는 2.35~3.53일이 빨라지고 있는 것으로 예측되었다.

기후요인변화에 따른 생물종의 출현시기변화에 대해 각 동물의 출현시기는 온도가 1°C 증가함에 따라 제비 마지막 출현기는 4.1~9.02일, 뚝구기 첫소리는 5.83일, 매미 첫소리는 5.30~10.60일 빨라질 것으로 예측되었다.

기후변화에 따른 조류의 도래유형별 변화를 분석한 결과, 전체 출현종수가 증가하고 있었고, 겨울철새의 경우 평균기온의 상승으로 종수가 증가하고 있으며, 도래시기는 가을은 늦어지고, 봄철 이동시기가 늦어진 것으로 나타났다. 텃새의 경우 봄철 번식기에 과거보다 더 많은 종이 관찰되었다.

종합적으로, 이러한 변화양상이 지속적으로 진행될 때는 생물종의 이동 및 생리적인 현상의 변화뿐만 아니라 일부 변화에 민감한 종들을 멸종의 위험성도 예측된다.

기후변화에 의한 도시림의 생태계 영향 연구는 도시림에서 서식하는 동·식물의 변화를 파악할 뿐만 아니라 도시민의 생태적 서비스 제공 및 도시림 관리정책 수립을 위한 기초 자료 활용 측면에서 매우 중요하다.

참고문헌

- Coppack, T. and Both, C., 2002. Predicting life-cycle adaptation of migratory birds to global climate change. *Ardea*, 90(3): 369-378.
- Fitter, A. H. and Fitter, R. S. R., 2002. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 296(5573): 1689-1691
- Folland, C. K., Karl, T. R. and Salinger, M. J., 2002. Observed climate variability and change. *WEATHER-LONDON-*, 57(8): 269-277.
- Forchhammer, M. C., Post, E. and Stenseth, N. C., 1998. Breeding phenology and climate. *Nature*, 391(6662): 29-30.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W. and Nganga, J., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. In *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)*.
- Koo, K. A., Kong, W. S. and Kim, C. K., 2001. Distribution of evergreen broad-leaved plants and climatic factors. *J. Korean Geog. Soc.*, 36: 247-257. (in Korean)
- Korea Climate, Environment Network, 2013. *Climate change also alters the movement of migratory birds?* (in Korean)
- Korea Meteorological Administration, 2012. *Peninsula climate change outlook report*. (in Korean)
- Lee, B. Y., 2009. *The effect of climate change on biographical subregions in Korea*. National Institute of Biological Resources. (in Korean)

- Lim, J. H. and Shin, J. H., 2005. Forest Vegetation Shift and Plant Phenological Changes according to Global Warming, 130: 8-17. (in Korean)
- Menzel, A. and Fabian, P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721): 659-659.
- Miller-Rushing, A. J. and Primack, R. B., 2008. Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: a community perspective. *Ecology*, 89(2): 332-341.
- National Institute of Biological Resources, 2010. Management of biological organisms and biological resources against climate change in Korea. (in Korean)
- Park, W. K. and Seo, J. W., 1999. A Dendroclimatic Analysis on *Abies koreana* in Cheonwang-bong Area of Mt. Chiri, Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 13(1): 25-33. (in Korean)
- Peñuelas, J., Filella, I. and Comas, P., 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 8(6): 531-544.
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P. and Zhu, B., 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12(4): 672-685.
- Schaber, J. and Badeck, F. W., 2005. Plant phenology in Germany over the 20th century. *Regional Environmental Change*, 5(1): 37-46.
- Thomas, C. D. and Lennon, J. J., 1999. Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 399(6733): 213-213.
- Visser, M. E. and Holleman, L. J., 2001. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 268(1464): 289-294.
- Yun, S. H., Im, J. N., Lee, J. T., Shim, K. M. and Hwang, K. H., 2001. Climate change and coping with vulnerability of agricultural productivity. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 3(4): 220-227. (in Korean)