

탄소저장량 및 공간분포 추정 기법 소개

기후변화 정책 지원을 위한 기반 자료의 구축

글 : 노영희 (yhroh@kei.re.kr)

한국환경정책·평가연구원 초빙연구원

1. 배경

지난 2015년 12월, 유엔기후변화협약 당사국총회(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC COP 21)에서는 신기후체제인 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였다. 파리협정은 교토의정서가 2020년 만료됨에 따라, 그 이후 시점을 위해 새로이 채택된 기후변화 국제협약이다. 이 협약에서는 감축목표 이행의 대상이 선진국뿐만 아니라 195개 당사국으로 확대되었다. 2016년 4월에는 파리협정 서명식을 통해 175개국이 온실가스 감축에의 첫 발걸음을 내디뎠다.

기후변화협약의 성과물인 기후변화 완화를 이행하기 위해서는 우선적으로 기반 데이터를 활용한 현황 파악이 필요하다. 온실가스의 대부분(2013년 배출량 기준 약 92%)을 차지하고 있는 이산화탄소의 경우는 화석연료의 사용이나 산림벌채 등의 원인으로 인한 대기 중 농도 증가가 대부분이다. 이러한 대

기 중 이산화탄소 농도를 감소시키도록 함에 있어 화석연료 사용 부문에서의 배출량 감축목표를 달성 하도록 하는 것도 중요하지만, 온실가스 흡수원을 증가시킴으로써 상쇄하는 방법을 적용할 수도 있다. 온실가스 흡수를 통한 기후조절은 생태계서비스 항목 가운데 조절 서비스에 해당하는데, 토지피복의 범주 차원에서 특히 바이오매스의 형태로 탄소를 저장할 수 있는 수목을 다수 포함하고 있는 산림이 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 최근 개발의 바람이 불고 있는 제주 지역의 경우, 1980년대부터 2000년대 후반으로 접어들면서 산림이나 초지의 비율이 감소하고 농지나 시가지지역이 증가하고 있다(이현우 등, 2015). 앞으로 이러한 추세가 지속된다면 온실가스 감축 노력이 효율적으로 이루어지기 어렵다. 변화 추세를 모니터링하고 과거로부터 현재에 이르기까지의 탄소고정량을 시계열적으로 파악할 수 있도록 하는 기본 자료를 구축함으로써 온실가스 감축과 관련된 정책적 규제 및 이행에의 객관적인

지표들을 제시할 수 있을 것이다. 이렇게 연구의 결과가 실질적인 정책적 규제를 뒷받침한다는 측면에서 언급할 수 있는 것이 규제과학적 접근 방법이다. 규제과학(regulatory science)은 과학적 연구가 정책과 밀접한 관련성을 가지고 있다는 것이 그 특징이다(김태호, 2003). 규제과학적 관점에서는 학문적인 연구의 결과가 학문의 범주에 국한하여 존재하는 것이 아니라 정책적인 부분에 영향을 끼치게 된다. 이러한 점에서 비침벌 때, 탄소저장량 추정 연구 혹은 시계열적 변화량을 제시하는 등의 지속적인 연구가 진행된다면, 연구의 결과는 정책의 효율적인 이행에 도움을 줄 수 있는 규제과학적 성격을 띠게 될 것이다.

본 연구에서는 최근의 온실가스 감축 노력과 관련하여 현재의 탄소저장량에 대한 총량 추정 연구뿐만 아니라 2006년 IPCC 가이드라인에 제시된 Tier 3 수준의 정밀한 공간적 추정을 실현하기 위하여 진행되었던 기존의 연구들에 대해 소개한다. 이러한 연구의 결과 혹은 방법론들을 차용함으로써 객관적인 기후변화 정책 관련 기반 자료를 제시할 수 있다.

2. 연구 동향

생태계서비스란 1960년대 후반 최초로 사용된 용어로, 인간이 생태계로부터 얻는 편익을 의미한다(Millennium Ecosystem Assessment (이하 MA), 2005). MA의 분류체계에 따르면, 생태계서비스는 공급, 조절, 지지 그리고 문화서비스로 구분할 수 있고 탄소저장으로 인한 혜택은 조절 서비스에 해당한다. 기후 조절의 측면에서, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 토지이용 변화에 따른 탄소저장량의 시계열적 변화 자료를 요구하는 바, 공

간적으로 명확한 탄소 추정 방법이 필요하게 되었다. 특히 탄소저장 능력이 월등한 산림 지역은 1997년 교토의정서에서 온실가스 흡수원으로 인정한 바 있다. 이로 인해 산림 지역의 중요성이 대두되었고 이 지역의 탄소저장량을 추정하기 위한 다양한 노력이 진행되어 왔다.

1) 해외 연구 동향

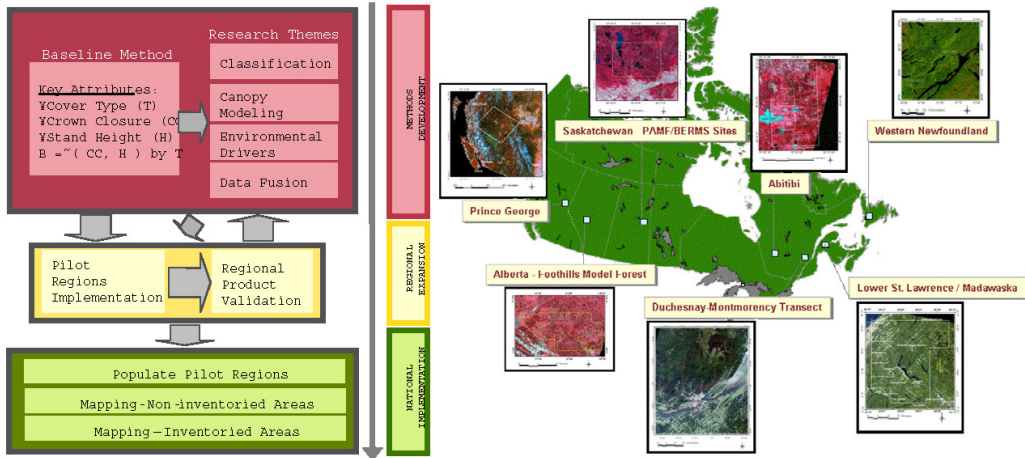
국가 규모의 바이오매스 지도가 구축된 국가로는 산림 자원이 풍부한 핀란드, 스웨덴 등의 북유럽 일부 국가들과 미국 등의 지역이 포함된다. 해외의 산림탄소저장량 추정 연구는 <표 1>에 요약한 바대로 다양한 범주에서 다양한 기법들을 통해 진행되어 오고 있음

표 1: 분야별 바이오매스 추정 기법 요약 소개

범주	기법
원격탐사	고해상도 (항공사진, IKONOS, QuickBird)
	단순회귀
	상대생장식
	다중회귀
	k-NN
	중해상도 (Landsat)
	다중회귀
	선형 및 지수회귀
	인공신경망
	k-NN
	비모수회귀
	생산력 모델(PnET)
	저해상도 (NOAA AVHRR, MODIS)
	다중회귀
	일반화 가법 모델 (Generalized additive model)
지구통계	트리기반 모델
	규칙기반 모델
	크리깅
	상관관계 분석
환경변수	다중회귀
	규칙기반모델

자료: 김경민 등(2011)

그림 1: 캐나다의 산림바이오매스 추정 및 파일럿 지역 사례



자료: Luther 등(2002)

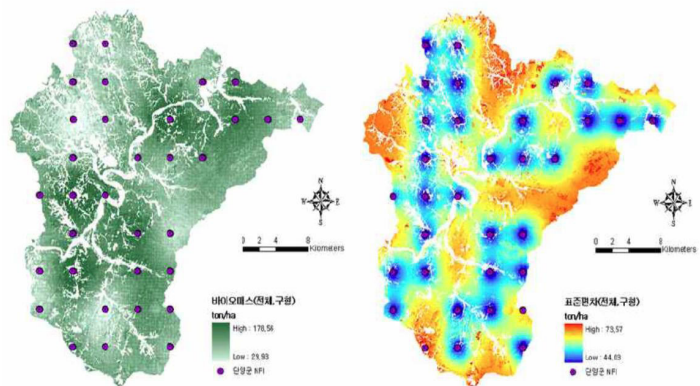
을 알 수 있다. 특히 캐나다의 경우는 <그림 1>과 같이 바이오매스의 추정에 대한 체계적인 접근 방식을 구축하였다. 크게 기법의 개발, 지역 규모의 확장 그리고 국가 규모로 적용의 3단계로 구성되어 있다 (Luther 등, 2002).

도 하였다(박현주 등, 2012). 회귀크리깅 기법을 활용하게 되면 Tier 3 수준인 공간적으로 명확한 탄소 저장량을 추정할 수 있다는 장점을 가진다.

2) 국내 연구 동향

국내에서는 대부분 원격탐사 자료를 활용한 산림탄소저장량 추정이 이루어져 왔다. 활용된 기법으로는 k-NN이 다수를 차지하고 있으며(임종수 등, 2007; 정재훈 등, 2010; 박동환, 2011), 회귀모형을 활용한 사례도 있다(이승호 등, 2004; 장안진과 김형태, 2008). 또한 <그림 2>와 같이 국가산림자원조사 자료와 임상도, 위성영상 등 다양한 자료들을 활용하는 회귀크리깅 기법이 적용되기

그림 2: 회귀크리깅을 활용한 바이오매스 추정 사례



자료: 박현주 등(2012)

3. InVEST를 활용한 탄소고정량 추정 소개

이현우 등(2015)이 수행한 자연자본의 평가 관련 연구 내용에는 InVEST를 활용한 탄소저장량 추정 관련 연구가 포함되어 있다. InVEST는 생태계서비스 기반의 의사결정지원 모델로 The Natural Capital Project에서 개발하였고, 사용자 편의성으로 인해 전 세계적으로 가장 많이 사용하는 모델로 알려져 있다. 이 모델은 2016년 5월 현재 18개의 모듈로 구성되어 있다(<http://www.naturalcapitalproject.org/invest>).

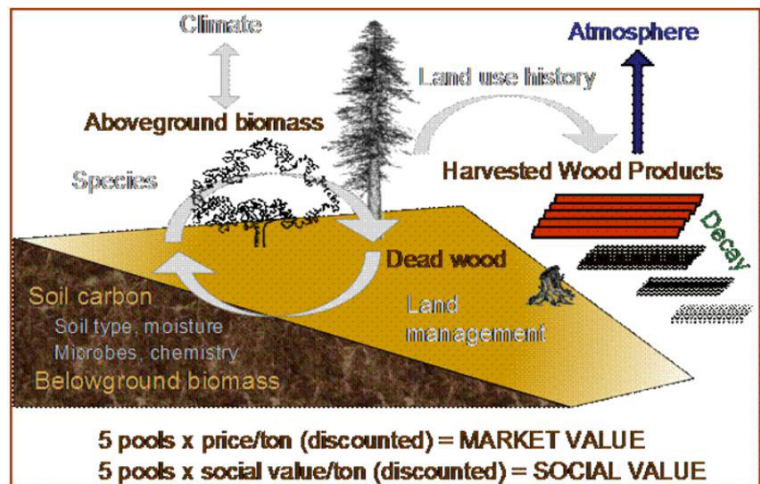
상기 연구에서는 다양한 모듈 가운데 탄소저장량 추정 모듈인 ‘Carbon Storage and Sequestration: Climate Regulation’ 모듈을 통해 제주 지역에 대한 시계열적 탄소저장량을 추정하였다. 추정 대상은 산림 지역뿐만 아니라 대분류 토지피복 항목을 모두 포함하고 있고, 탄소저장 대상도 지상부뿐만 아니라 <그림 3>과 같이 목제품 부문을 제외한 지하부, 토양, 고사목을 포함하고 있다.

위에서 언급한 바대로 InVEST 모듈 사용상의 사용자 편의성은 적은 입력자료의 투입, 그리고 모듈 수행의 용이성으로 정리할 수 있다. 모듈 수행에 필요한 입력자료는 토지피복지도와 각 탄소풀

에 따른 계수값 설정이다. <표 2>는 연구기간 동안의 토지피복지도를 기반으로 하여 산출된 카테고리별 면적 및 비율의 변화량이다. 이와 같이 단시기가 아닌 다시기의 범위를 주게 되면 해당 기간 동안의 토지피복 변화에 따른 탄소저장량을 추정할 수 있다.

또 다른 입력자료인 탄소풀 계수 테이블은 각 토지피복 카테고리별, 그리고 4개 영역의 탄소풀별 계수값으로 이루어져 있다. 우리나라의 경우 토지피복

그림 3 : 탄소저장량 추정의 개념적 대상



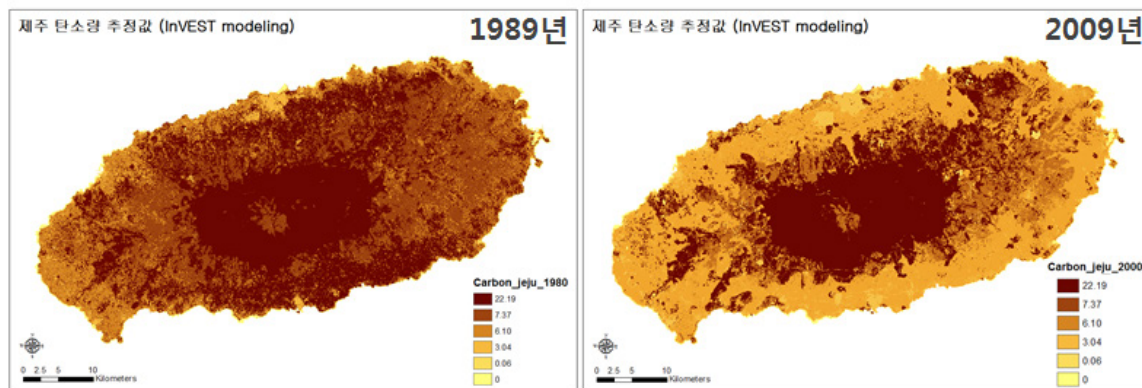
자료: Sharp 등(2015)

표 2 : 1989년부터 2009년 동안의 토지피복 변화

토지피복	1989년		2009년	
	면적(km ²)	비율(%)	면적(km ²)	비율(%)
수역	30	1.6	26	1.4
나지	7	0.4	14	0.8
습지	0	0.0	0	0.0
초지	465	24.9	271	14.5
산지	920	49.3	645	34.6
농지	373	20.0	813	43.6
시가화지역	69	3.7	98	5.2

자료: 이현우 등(2015)

그림 4 : 1989년과 2009년의 제주 탄소저장량 추정 사례



자료: 이현우 등(2015)

에 따른 탄소풀이 아직 체계적으로 구축되어 있지 않기 때문에 IPCC 및 다양한 연구에서 제시된 연구 결과를 고려하여 매트릭스를 구성한 Tomasso와 Leighton(2014)의 연구논문에서 제시된 계수값을 차용하였다. 이 두 개의 입력자료를 통해 토지피복 전 분야에 대한 탄소저장량을 산출할 수 있다. <그림 4>와 같이 각각의 단시기 자료를 입력하는 경우는 탄소저장량을 추정할 수 있고, 다시기 자료를 입력하는 경우는 탄소저장량의 시기별 차이값을 고려한 탄소고정량을 추정할 수 있다. 분석 결과, 1989년 기준으로 탄소저장량은 약 3,200만톤으로 추정되었고, 2009년의 경우는 약 2,600만톤으로 약 600만톤 가량 감소한 것을 확인할 수 있었다.

이러한 탄소저장량 감소 추세는 <표 2>에서 살펴보았던 토지피복의 증감에 따른 결과이다. 시간이 지남에 따라 탄소저장량이 비교적 높은 산지가 감소하고 농지나 시가지지역이 증가함에 따른 결과로 해석할 수 있다. <표 2>에서 보면, 산지의 면적이 920 km²에서 645km²로 대폭 감소한 반면 농지의 경우 373 km²에서 813km²로 급증한 것을 알 수 있다. 공간적으

로는 <그림 4>에서 볼 수 있는 바와 같이 한라산을 포함한 중심 산지를 제외하고 해안선을 따라 원형의 형태로 탄소저장량이 감소하였음을 살펴볼 수 있다.

4. 결론 및 제언

기후변화 완화 지원을 위한 정책적 연계 필요성의 차원에서 지금까지 국내·외의 다양한 탄소저장량 추정 기법들에 대해 간략히 살펴보았다. 원격탐사 자료를 활용한 탄소저장량 추정이 주류를 이루는 가운데, 본고에서는 사용자 편의성 측면에서 장점을 가지는 InVEST를 활용한 연구 사례를 중심으로 소개하였다. 다만, 입력자료 가운데 토지피복에 맞는 탄소풀 계수의 정의는 국내 여건상 해외의 연구 결과를 차용하는 수밖에 없었다. 이러한 점은 국내에서 토지피복 카테고리에 적합한 탄소풀 계수의 개발 연구가 진행되어야 함을 말해주고 있다. 우리나라의 실정에 맞는 계수의 개발을 통해 앞으로 보다 정확한 탄소저장량을 추정할 수 있을 것이고, 세계 무대에 보다 신뢰도 높은 통계량을 제시할 수 있을 것이다.

탄소저장량 총량을 추정하는 데에는 앞에서 언급 하였던 InVEST를 활용하는 것이, 공간적으로 명확한 탄소저장량을 추정할 필요가 있는 경우에는 공간 통계 기법을 적용하는 것이 효율적인 것이라 생각된다. 이러한 연구 현황 파악을 기반으로 하여 실제 탄소저장량에 대한 추정 및 모니터링이 지속적으로 이루어진다면, 기후변화 완화를 위한 정책적인 규제의 견지에서 보다 객관적이고 정량적인 자료들을 제시함과 동시에 시계열적 자료를 구축하는데 도움이 될 수 있을 것이다. ■■■

참고문헌

- Luther, J.E., Fournier, R.A., Hall, R.J., Ung, C.-H., Guindon, L., Piercey, D.E., Lambert, M.-C., and Beaudoin, A.R., 2002, A strategy for mapping Canada's forest biomass with Landsat TM imagery, 1312-1315 in IGARSS 2002, Proceedings: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing (CD-ROM), June 24-28, 2002, Toronto, Ontario, IEEE, Piscataway, New Jersey.
- MA, 2005, Millennium Ecosystem Assessment: ecosystems and human well-being: synthesis, Island Press, Washington, D.C.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., and Bierbower, W. 2015. InVEST +VERSION+ User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Tomasso, L. P. and Leighton, M. 2014. The Impact of Land Use Change for Greenhouse Gas Inventories and State-Level Climate Mediation Policy: A GIS Methodology Applied to Connecticut. Journal of Environmental Protection 5(17): 1572.
- 김경민, 이정빈, 김은숙, 박현주, 노영희, 이승호, 박기호, 신휴석, 2011, 원격탐사와 GIS 기반의 산림탄소저장량 추정에 관한 주요국 연구 동향 개관, 한국지리정보학회지 14(3), pp.28-39.
- 김태호, 2003, 규제과학 논쟁의 연구 동향, 과학기술정책 143, pp.103-116.
- 박동환, 2011, GIS와 원격탐사기술을 이용한 산림바이오매스 자원량 평가 - 강원대학교 학술림을 대상으로 -, 강원대학교대학원 석사학위논문.
- 박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호, 2012, 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정 - 지상부 바이오매스를 대상으로 -, 한국지리정보학회지 15(1), pp.16-33.
- 이승호, 김철민, 원현규, 김경민, 조현국, 2004, Landsat TM 위성영상을 이용한 산림자원량 산정, 한국임학회 학술연구발표논문집, pp.250-252.
- 이현우, 김충기, 홍현정, 노영희, 강상인, 김중호, 신상철, 이수재, 강진영, 김태윤, Spencer Wood, David Fisher, 2015, 자연자본의 지속가능성 제고를 위한 의사결정 지원체계 개발, 한국환경정책·평가연구원.
- 임종수, 공지수, 김성호, 신만용, 2007, k-NN 기법을 이용한 강원도 평창군의 산림주제도 작성과 산림통계량 추정, 한국임학회지 96(3), pp.259-268.
- 장안진, 김형태, 2008, 항공사진과 Lidar 데이터를 이용한 산림지역의 바이오매스 추정에 관한 연구, 한국지리정보학회지 11(3), pp.166-173.
- 정재훈, 허준, 유수홍, 김경민, 이정빈, 2010, kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소 저장량 추정, 한국지리공간정보학회지 18(4), pp.119-129.