

강원도 산지지역의 기후변화 취약성평가를 위한 임상 변화 분석

장동호¹ · 이승호²

¹공주대학교 지리학과 · ²건국대학교 지리학과
(2013년 5월 27일 접수, 2013년 6월 10일 수정, 2013년 6월 18일 게재 확정)

Analysis of Forest Type Changes for Vulnerability Assessment of Climate Changes in the Mountainous Regions of Gangwon-do, Korea

JANG, Dong-Ho¹ · Seungho, Lee²

¹Department of Geography, Kongju National University

²Department of Geography, Konkuk University

(Received 27 May 2013, Revised 10 June 2013, Accepted 18 June 2013)

Abstract : We analyzed the surface changes in each forest type based on multi-temporal satellite imagery and climate data analysis on the mountainous regions of Gangwon-do as the case study. As a result of forest type classification using satellite imagery, the area of coniferous forests was decreased, but the area of deciduous forests and the mixed forests were increased. The annual mean temperature in the study area generally risen, and the rise in the annual mean temperature in Wonju particularly displayed a notable rise in 1992. Temperature change in the seasons resulted in a greater rise rate in winter and autumn, compared to other seasons. Such annual mean temperature rise affected the change in forest type distribution, thus directly and indirectly affecting the decrease in the surface area of coniferous forests, and also greatly affecting the expansion of distribution and the growth of mixed forests and deciduous forests. The surface change analysis of each forest type using the post-classification comparison method showed considerable change from coniferous forests to deciduous forests and mixed forests, as a result of the change in forest type based on the increased annual mean temperature after 1990. Furthermore, the change in deciduous forests significantly occurred in mixed forest regions. With these results, future forest type data are expected to be used as the main index of climate change vulnerability assessment, and more accurate quantitative results are expected to be deduced with the assessment of other climatic elements and relationships with different forest types.

Key Words : climate change, satellite imagery, forest type, post-classification comparison method, climate data

1. 서론

기후변화는 육상 및 해양 생태계의 변화뿐만 아니라 인간 활동에 직·간접적으로 영향을 미치고 있어 21세기 세계적으로 최대 이슈로 대두되고 있다. 즉, 이러한 영향은 현재의 기후에 순응하고 있는 생태계의 구조와 기능을 변화시키고, 나아가 지구상의 모든 생물들의 생존 여부를 위협할 것으로 예상된다(한국환경정책·평가연구원, 2010). 특히 산림생태계는 기후변화의 원인 물질로 생각되고 있는 이산화탄소를 흡수하거나 방출할 수 있는 역할을 하기 때문에 기후변화와 밀접한 관련이 있다. 기후변화는 현재 존재하는 산림의 수종 분포에 변화를 일으킬 수 있고, 이러한 변화는 과실의 생산이나 임목 생산 등에 영향을 미칠 수 있다(Dale *et al.*, 2001; 변정현 등, 2012). 따라서 기후변화가 산림 생태계에 미치는 영향에 대한 취약성 평가는 향후 악영향을 최소화하고 이에 적응할 수 있는 기반을 마련한다는 측면에서 매우 중요하다(IPCC, 2007).

기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC) 4차보고서에서는 지구의 온도가 매 10년마다 0.1~0.2°C 상승하여 2020년대에는 지구평균기온이 1°C 상승하고, 2100년까지 지구평균기온이 최대 6.4°C 까지 상승할 것이라는 예측결과를 제시하였다(IPCC, 2007). 최근 우리나라 역시 지난 30년간 연평균기온이 0.1~0.5°C 상승하여 기후변화가 급진전된 것으로 평가하였다(기상청, 2006). 이러한 기온 상승은 벚꽃의 조기 개화나 구상나무 군락지의 감소, 상록활엽수림의 확대 및 복상, 신갈나무 잎이 돌아나는 시기가 빨라지는 등 산림생태계에 영향을 미치고 있다(임종환·신준환, 2000; 구경아 등, 2001; 이승호·이경미, 2003; 이동근·김재욱, 2007; 강진택 등, 2012).

최근 들어 기후변화로 인한 식생환경 변화와 생

태계 변화를 과학적으로 예측, 평가하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 식생 변화를 원격탐사 및 GIS 공간자료를 활용하여 분석하는 활동들이 다양한 분야에서 연구되고 있다(장동호·권원태, 2007; 김인환 등, 2011; 김장수·장동호, 2012). 원격탐사 자료는 단기간에 광범위한 지역에 대한 주기적 조사가 가능하며, 시·공간적 변동성이 큰 지역의 관찰에 용이하다. 따라서 많은 시간과 비용이 들어가는 현장조사를 통한 산림 식생대 변화 분석 대신에 시계열적인 공간 변화에 대한 신속하고 정확한 정보 구축 및 처리를 가능한 원격탐사 기술이 매우 유용하게 활용될 수 있다.

몇몇 기후변화에 대한 산림생태계의 변화에 관한 국내 연구들을 분야별로 살펴보면, 현장 및 식생통계 자료를 이용한 산림 식생대 이동(구경아 등, 2001; 허인혜 등, 2006; 신현탁 등, 2012), 원격탐사 및 GIS 공간자료를 활용한 식생변화 및 예측(장동호·권원태, 2007; 김인환 등, 2010; 이동근 등, 2010; 김장수·장동호, 2012), 산림 식생대의 기후변화 취약성 평가(임종환 등, 2006; 이동근·김재욱, 2007; 이상철 등, 2011; 이상현, 2012; 변정연 등, 2012) 등이 수행되었다.

세부적으로 식생대 변화에 관한 연구를 살펴보면, 구경아 등(2001)은 기후변화에 따른 한라산 구상나무의 생장 변화를 밝히고자 현장조사 자료와 기후요소와의 관계를 분석하였는데, 겨울 기온이 상승하였을 경우 생장이 감소하고, 가을 기온이 상승하였을 때 생장이 증가하는 것으로 분석하였다. 또한 허인혜 등(2006)은 기후특성에 따라 분포의 차이가 잘 나타나는 대나무와 마늘을 이용하여 각각의 북한계 및 기온과 분포와의 관계에 대한 연구를 실시하였다. 이밖에 신현탁 등(2012)은 경상남도수목원 내의 지표종을 대상으로 기후변화에 따른 개화시기 및 개화기간 등의 변화를

분석하였다.

원격탐사 자료를 활용한 식생변화에 관한 연구는 지금까지 다중시기 위성영상을 활용하여 토지피복도 및 NDVI를 작성하여 시계열 분석을 통해 변화 추이를 분석하였다. 장동호·권원태(2007)는 기상자료와 다중시기 위성영상을 이용하여 남해안 지역의 임상변화를 분석하였으며, 이동근 등(2010)은 토지피복도와 현존식생도를 이용하여 공간통합 방법을 적용하여 미래의 토지피복 변화와 산림식생의 변화를 추정하였다. 이밖에 김장수·장동호(2012)는 다중시기 위성영상과 ASTER DEM을 이용하여 기후변화에 따른 충남해안지역의 임상변화와 지형인자와의 관계를 분석하였다.

국외에서도 식생분포와 기후요소와의 관계를 다양한 통계분석과 GIS 분석 기법을 이용하여 생태학적 연구를 다수 수행하였다(Bianca, 2003; Accad and Neil, 2006; Garcia-Aguirre *et al.*, 2007; Austin, 2007; Michaud *et al.*, 2013). 또한 위성영상을 이용한 기후변화에 따른 식생 변화 및 예측에 관한 연구도 이루어졌다(Feddema *et al.*, 2005; Hermance, 2007; Beatriz and Gilabert, 2008; Yin and He, 2012).

이렇게 기후변화에 의한 산림 식생대의 변화에 관한 연구들은 주로 위성영상을 활용하거나 현장조사, 실험, 모델링을 통한 분석 연구들이 대부분이다. 또한 통계적 기법 및 GIS를 이용하여 식생대의 변화를 분석하기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 따라서 산림 식생대의 변화를 분석하기 위해서는 시간의 경과에 따른 지표의 공간적 변화 형태를 분석할 수 있는 위성영상의 활용이 보다 효과적인 방법이다.

본 연구에서는 향후 지역단위의 기후변화 영향 평가를 위한 기초 작업으로 강원도 산지지역을 사례지역으로 기후자료 분석 및 위성영상을 기반으로 임상별 면적 변화를 분석하였다. 특히, 임

상변화 분석을 위하여 선 분류 후 비교법(post-classification comparison)을 이용하여 변화 속성을 탐지하고자 하였다. 이를 통하여 기후변화가 강원도 산지지역의 임상 변화에 어떤 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법, 사용자료

1) 연구지역

연구지역은 행정구역상 강원도 평창군·강릉시·동해시·홍천군·횡성군·영월군·정선군·양양군 등이다. 지리적 좌표는 127°29'49"E~129°12'23"E, 37°00'35"N~38°11'24"N에 해당된다(그림 1).

각 시·군별 기후 및 임상 특징을 현재 기상관측소가 위치한 인접지역을 중심으로 살펴보면, 영동지방인 양양군은 강원도 동북쪽에 위치하여 남북으로 뻗은 태백산맥의 영향으로 서쪽은 산악기후의 특성이 나타나고, 반면에 동쪽은 해양성 기후 특성이 나타난다. 연평균기온은 12.2℃로 비교적 온화한 기후를 보이며, 연평균강수량은 1402.2 mm로 강원도 내에서는 비교적 비가 많은 지역이

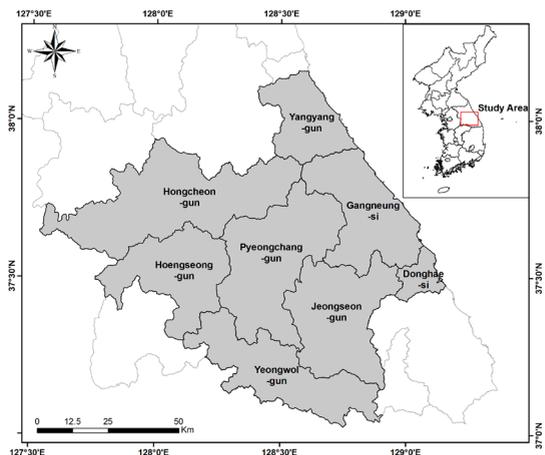


그림 1. 연구지역 위치도

다. 임상은 활엽수림의 비중이 44.3%로 가장 높으며, 다음으로 침엽수림(32.3%), 혼효림(23.4%) 순이다(양양군, 2012).

강릉시는 연평균기온이 13.1℃이며, 연평균 최고기온과 최저기온은 각각 17.5℃와 9.2℃이다. 같은 위도의 서해안보다 기후가 온난하고, 여름에는 태백산맥의 서쪽보다 시원하다. 임상은 침엽수림의 비중이 40.8%로 가장 높으며, 다음으로 활엽수림(29.7%), 혼효림(29.5%) 순이다(강릉시, 2012). 동해시는 태백산맥 동쪽해안에 위치하여 해양성기후의 특성이 나타난다. 연평균 기온은 12.6℃로서 같은 위도의 서해안보다 기후가 온난하고, 여름에는 동해와 태백산맥의 영향으로 다른 지역에 비해 시원하다. 연강수량은 1,278.9mm이며, 겨울에는 폭설로 인해 강수량이 다른 지역에 비해 상대적으로 많고, 여름에는 적은 편이다. 임상은 혼효림의 비중이 36.0%로 가장 높으며, 다음으로 침엽수림(35.2%), 활엽수림(28.8%) 순이다(동해시, 2012).

정선군은 강원남부 산지지역에 위치하여 산지 기후의 특성이 나타난다. 연평균기온은 8.7℃이며, 연강수량은 1,324.3mm이다. 임상은 활엽수의 비중이 36.8%로 가장 높으며, 다음으로 침엽수림(35.7%), 활엽수림(27.5%) 순이다(정선군, 2012). 평창군은 고산지대에 위치하여 바람, 안개, 기온 등 고산 기후 특성이 나타난다. 연평균 기온은 6.6℃이고, 최고기온이 30℃이상 되는 날이 거의 없으며, 0℃이하의 일수는 110일 이상이다. 연강수량은 1,898.0mm로 여름철에 50%로 편중되어 있으며, 바람은 주로 서풍으로 평균풍속이 4.3%로 연중 강한 편이다. 임상은 활엽수의 비중이 42.0%로 가장 높으며, 다음으로 침엽수림(32.9%), 활엽수림(25.1%) 순이다(평창군, 2012).

영월군은 험준한 산과 동쪽으로는 태백산맥을 등지고 있는 산간분지 지형이다. 연평균기온은

10.8℃ 정도이며 내륙분지 지형으로서 일교차 및 연교차가 크게 발생한다. 연강수량은 1,224.4mm로, 이 중 60~80%가 하절기에 집중된다. 임상은 침엽수의 비중이 37.2%로 가장 높으며, 다음으로 혼효림(33.4%), 활엽수림(29.3%) 순이다(영월군, 2012). 이밖에 원주시·횡성군은 강원도의 남서부의 백두대간의 서남쪽에 위치한다. 연평균 기온의 평년값은 11.3℃이며, 연교차는 29.1℃이며, 연강수량 평년값은 1,343.6mm이다. 임상은 침엽수의 비중이 47.7%로 가장 높으며, 다음으로 활엽수림(34.5%), 혼효림(17.7%) 순이다(원주시·횡성군, 2012).

2) 연구방법 및 사용자료

기후변화에 따른 산지지역의 임상 변화를 분석하기 위해서는 그 지역의 정확한 임상 현황자료가 필요하다. 하지만, 임상은 자연적인 요인 및 인간 활동에 의해 끊임없이 변화하기 때문에 시간의 변화에 따른 공간적 변화를 파악하는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 시·공간적 변동성이 큰 지역의 관찰에 용이한 다중시기 위성영상을 이용하여 산지지역의 임상별 면적 변화를 분석하였다. 또한 연구지역의 기온 및 강수량 자료 분석을 통해 기후변화와 강원 산지지역의 임상 변화와의 관계 등을 검토하였다. 이를 세부적으로 살펴보면 그림 2와 같다.

먼저, 다중시기 위성영상 처리에서는 영상 획득 시 발생한 기하학적 왜곡을 보정하기 위하여 2009년 5월 25일 획득된 Landsat TM 영상을 수치지형도(1:25,000)를 이용하여 기하학적 보정을 실시하고 연구지역을 추출하였다. 다음으로 보정된 영상을 이용하여 비모수적 분류처리 기법인 감독분류(최대우도법: maximum likelihood classification) 방법을 이용하여 토지피복도를 작성한 후 산림지를 각 연도별로 마스크 처리하였다. 마스크

킹 처리된 각 영상들은 다시 연산처리(multiplication)를 통하여 연구기간(1988~2009) 동안 토지 피복 유형의 변화가 없는 최종적인 산림지만을 재분류하였다. 또한 재분류된 영상은 다시 기존 영상의 각 밴드별로 연산처리를 통하여 산림지의 정보만 가질 수 있도록 하였다. 재분류 연산처리 기법을 사용한 이유는 도시화 및 산업화에 따른 인위적인 변화요인을 최소화하기 위해서다.

재분류된 각 연도별 영상은 임상분류에서 일반적으로 사용되고 있는 무감독분류 방법인 K-Means 분류법을 이용하여 임상분류도를 작성하고 검증하였다. 사용된 분류 항목은 침엽수, 활엽수, 혼효림 등 총 3개 항목이다. 분류된 영상은 최종적으로 선분류 후비교법(post-classification comparison method)을 이용하여 변화 매트릭스를 작성하고, 이를 토대로 각 기간별(1988~1999, 1999~2009) 토지피복 변화를 고찰하여 현재의 임상이 어떤 임상 변화 패턴을 거쳐 형성되었는지 분석하였다.

다음으로, 본 연구에서는 기후통계 자료를 이용하여 시계열분석을 실시하였으며, 이를 통하여 강원 산지지역의 기후변화 관련성 및 임상 변화와의 관계 등을 검토하였다. 사용된 기후자료는 기온 및 강수량자료이며, 연구에 사용된 연평균기온 자료는 일평균기온 자료를 누적한 후 작성된 월평균기온 자료를 다시 누적하여 획득하였다. 또한 연평균기온 자료는 각 계절별로 구분하여 계절에 따른 기온변화와 임상과의 관계 등을 분석하였다.

연구에 사용된 위성영상은 1984년도부터 2009년도까지 각기 다른 세 시기의 Landsat TM 및 ETM+ 자료이며, 각 시기의 위성영상 및 제원은 다음 표와 같다(표 1). 영상분석 및 자료처리는 PCI Geomatica 9.1과 ArcMap 9.2를 이용하였다.

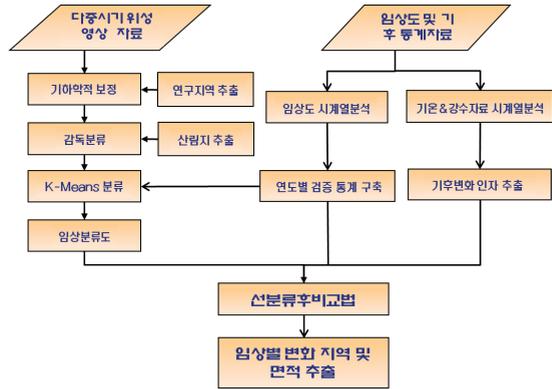


그림 2. 연구 흐름도

표 1. 연구에 사용된 위성영상 제원

Satellite	Sensor	Path/ Row	Acquisition date
Landsat-5	TM	115/34	1988. 08. 03
Landsat-7	ETM+	115/34	1999. 10. 29
Landsat-5	TM	115/34	2009. 05. 25

3. 다중시기 위성영상을 이용한 임상 분류 및 검증

본 연구에서는 다중시기의 Landsat 영상을 이용하여 임상분류도를 작성하였다. 분류 항목은 총 3개, 전체 분류영상의 화소수는 5,000×4,000 pixel이다. 분석에 사용된 연구지역의 전체 영상 면적은 약 19,880km²이며, 이중 임상 면적은 6,696 km²로 전체 토지피복 유형에서 차지하는 비율이 약 33.8%이다. 분류된 임상분류도의 정확도 검증은 분류 오차 행렬(Error matrix)을 이용하였다. 검증자료는 무작위로 표본 추출한 총 400개 화소를 사용하였으며, 각 연도별로 분류된 영상과 검증 자료를 이용하여 정확도를 평가하였다. 각 연도별 검증자료는 수치임상도(1990년대, 2000년대, 2010년대) 및 고해상도의 항공사진 등을 활용하였다.

전체 정확도를 살펴보면, 2009년 영상이 92.5%로 매우 정확하게 분류되었으며, 1988년 영상은 87.5%로 가장 낮은 정확도를 보였다(표 2). 전체적으로 모든 영상들이 87% 이상의 정확도를 보여 토지피복 분류도가 비교적 정확하게 작성된 것으로 판단된다. 하지만, 세부 분류 항목별로 생산자 및 사용자 정확도를 보면, 세 시기 동안 혼합림의 정확도가 전체적으로 다른 임상분류 항목에 비해 낮음을 알 수 있다. 이는 혼합림의 분광 특성이 다른 임상분류 항목과 비슷하여 분류의 오차가 상대적으로 크게 나타난 결과이다. 하지만 사용자 및 생산자 정확도도 전체적으로 비슷한 비율로 비교적 높은 신뢰성을 보여주고 있어서 임상 분류 정확도가 높은 것으로 판단된다.

임상별 분류 결과를 살펴보면, 혼효림 및 활엽수림은 꾸준히 증가한 반면에 침엽수림은 급격히 감소하고 있음을 분석할 수 있었다(표 3). 1988년 임상별 분류 면적은 침엽수림(3,279.8km²), 활엽수림(1,867.5km²), 혼효림(1,549.2km²) 등의 순으

로 나타났다. 1999년 임상분류에서는 침엽수림(3,077.2km²), 활엽수림(1,964.0km²), 혼효림(1,655.3km²) 등의 순으로 나타났다. 1988년에서 1999년 사이의 임상별 변화 특징을 살펴보면, 이 기간 동안 침엽수림의 면적은 감소한 반면에 혼효림 및 활엽수림의 면적은 증가하였다.

2009년 임상 분류에서는 침엽수림(2,806.0km²), 활엽수림(2,165.6km²), 혼효림(1,724.9km²) 등의 순으로 나타났다. 1999년에서 2009년 사이의 임상별 변화 특징은 침엽수림의 면적이 감소하였고, 반면에 활엽수림 및 혼효림의 면적은 증가하였다. 전년 기간(1988~1999)에 비해 이 기간 동안 임상의 가장 큰 변화는 침엽수림이 상대적으로 크게 감소하였고, 활엽수림의 면적이 급격히 증가한 것이다. 이러한 임상별 면적 변화는 지구온난화로 인한 산림 생태계의 변화 가운데 쉽게 예상할 수 있는 산림 수종 분포 범위의 이동 즉, 임상의 변화가 진행된 결과인 것으로 사료된다.

각 연도별 임상분류도는 그림 3과 같다. 1988년

표 2. 토지피복 분류 검증 결과

분류	연도	1988		1999		2009	
		사용자 (%)	생산자 (%)	사용자 (%)	생산자 (%)	사용자 (%)	생산자 (%)
침엽수림		89.7	86.3	92.9	89.3	93.8	91.6
혼효림		86.0	85.4	88.3	88.3	91.2	90.5
활엽수림		87.0	90.9	90.5	93.9	92.6	95.4
전체정확도		87.5		90.5		92.5	
Kappa value		0.812		0.857		0.887	

표 3. 연구지역 전체 임상별 분류 결과

분류	연도	1988		1999		2009	
		area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)
침엽수림		3,279.8	49.0	3,077.2	45.9	2,806.0	41.9
혼효림		1,549.2	23.1	1,655.3	24.7	1,724.9	25.8
활엽수림		1,867.5	27.9	1,964.0	29.4	2,165.6	32.3
Total		6,696.5	100.0	6,696.5	100.0	6,696.5	100.0

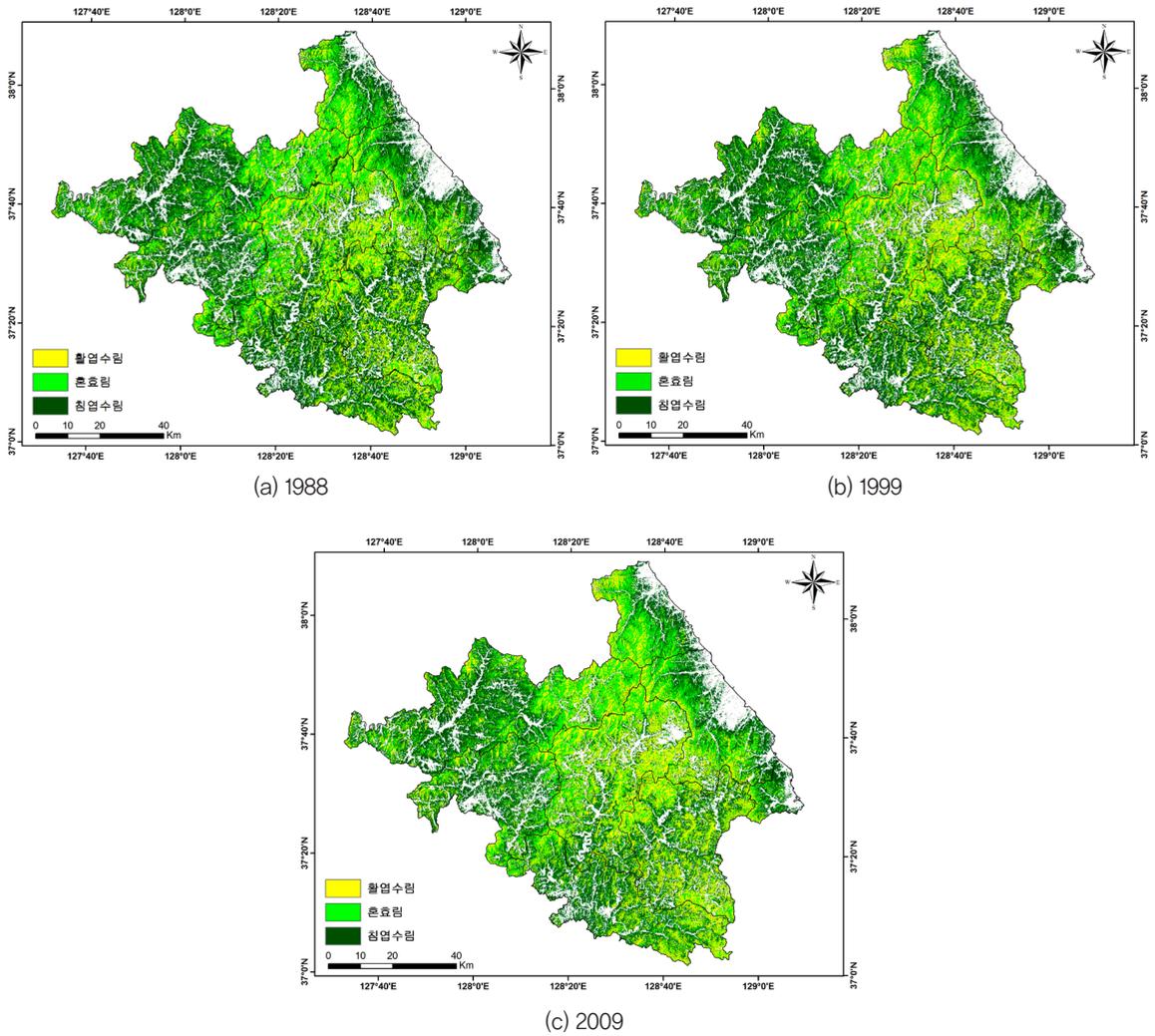


그림 3. 연구지역의 임상분류도

임상분류도에서는 침엽수림이 전체 임상면적의 50% 정도를 차지할 정도로 넓은 면적에 걸쳐 분포하며, 주로 동해안의 구릉지 및 저산성 산지를 중심으로 분포한다. 또한 연구지역 서쪽의 홍천·횡성·영월군 등의 비산림지역 인접지역을 따라 침엽수림이 분포한다. 활엽수림은 연구지역 중앙부인 태백산지 서사면에 주로 분포하며, 특히 평창군과 정선군, 양양군의 800m 이상 고산지역에서 군락을 이루며 분포한다. 혼효림은 연구지역

의 저산성 구릉지와 곡지를 중심으로 분포하며, 또한 침엽수림과 활엽수림의 경계를 따라 넓게 분포한다(그림 3(a)).

1999년 임상분류도를 1988년 임상분류도와 비교하여 살펴보면, 침엽수림의 경우 평창군과 정선군 지역을 제외하고 전 지역에서 혼효림과 활엽수림에 잠식당하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 태백산지 동사면 및 저구릉지를 중심으로 침엽수림의 분포 범위가 광범위하게 축소되었다. 반

면에 혼효림은 침엽수림대의 가장자리에서 증가를 보이며, 활엽수림은 혼효림대를 대체하는 경향을 보였다. 특히 태백산지 일대에서는 활엽수림이 침엽수림과 혼효림을 잠식하고 그 분포 범위가 확대되고 있음을 파악할 수 있었다(그림 3(b)).

2009년 임상분류도를 1999년 임상분류도와 비교하여 살펴보면, 침엽수림은 기존 임상분류도와 마찬가지로 동해안 구릉지 및 저산성 산지와 홍천·횡성·영월군 등의 비산림지역 인접지역을 중심으로 분포한다. 하지만, 이들 지역은 전반적으로 혼효림과 활엽수림에 잠식당해 그 분포 범위가 축소되고 있다. 반면에 활엽수림은 연구지역 중앙부인 태백산지 서사면인 평창군과 정선군 등과 동해안의 양양군 등의 고산지역에서 군락을 이루며 전반적으로 확대되고 있다(그림 3(c)).

4. 기온·강수자료와 임상분류도를 이용한 강원산지 지역의 기후변화 특성 분석

1) 기온 및 강수자료를 이용한 기후변화 특성 분석

지구온난화로 인한 산림생태계의 변화 가운데 가장 쉽게 예상할 수 있고 과거 지구 역사적인 기록에서도 찾아볼 수 있는 것이 산림 수종 분포 범위의 이동 즉, 임상 변화이다. 특히, 기온이 상승하면 침엽수림은 저위도에서 고위도로, 저지대에서 고지대로 이동하게 되고, 활엽수림은 기온이 하강하면 정반대의 이동 결과로 나타난다(임종환 등, 2006).

본 연구에서는 기후변화에 따른 기온 및 강수량 변화가 산림지의 임상 변화에 다양한 영향을 미칠 것으로 판단되어 연구지역 내에 위치한 기상 관측소의 기온 및 강수량 자료를 시계열분석 하

였다. 먼저, 연구지역의 기온 변화 특성을 분석하였는데, 기온자료는 연평균기온 자료를 이용하여 연도별, 계절별 기온 변화 특성을 분석하였다. 그림 4는 연구지역의 연평균기온을 평균하여 작성한 변화 그래프이다. 연평균기온은 전반적으로 상승하였으며, 1998년에 가장 높은 연평균기온(11.8℃)을 보이고, 1974년에 가장 낮은 연평균기온(9.3℃)이 나타났다. 지역별로 살펴보면, 연평균기온은 강릉이 13.0℃로 가장 높고, 대관령이 6.6℃로 가장 낮은 연평균기온 분포를 보였다. 이밖에 속초, 원주, 홍천이 각각 12.2℃, 11.1℃, 10.3℃로 나타났다.

그림 5는 연구지역의 연평균강수량을 평균하여 작성한 변화 그래프이다. 연평균강수량은 연평균기온변화와 유사하게 전반적으로 증가하였지만, 그 변동 폭이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 즉 1990년에 가장 많은 연평균강수량(2,136mm)을 보이고, 1974년에 가장 적은 연평균강수량(1,039mm)을 보여서 변동 폭이 1,000mm 이상 나타났다. 지역별로 살펴보면, 연평균강수량은 대관령이 1,736mm로 가장 많고, 원주가 1,318mm로 가장 적은 연평균강수량 분포를 보여 지역별로도 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 이밖에 강릉, 속초, 홍천이 각각 1,436mm, 1,374mm, 1,352mm로 나타났다.

본 연구에서는 지역별 연평균기온 변화 특성을 분석하기 위해서 두 시기(A=1973~1991, B=1992~2010)에 따른 연평균기온 변화를 분석하였다. 표 4에서 보듯이, 모든 지역에서 그룹 A의 연평균기온 보다는 그룹 B에서 연평균기온이 상승하였고, 연평균기온의 변동도 작다는 것을 알 수 있다. 이를 기반으로 두 집단 간에 연평균기온 변화에 차이가 있는지 살펴보기 위해 유의성 검정을 실시하였다.

그 결과, 강릉, 대관령, 원주, 홍천 등 네 지역 모두 유의수준 1%에서 두 집단 간 연평균기온 변

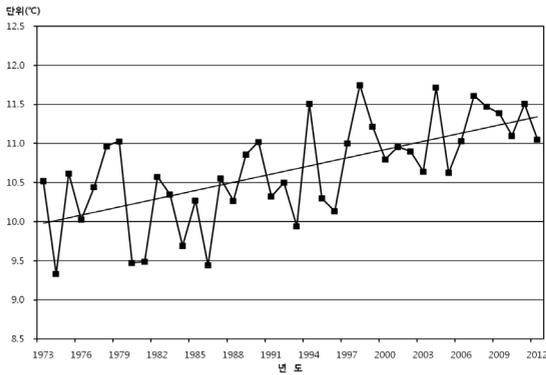


그림 4. 연구지역의 연평균기온 변화

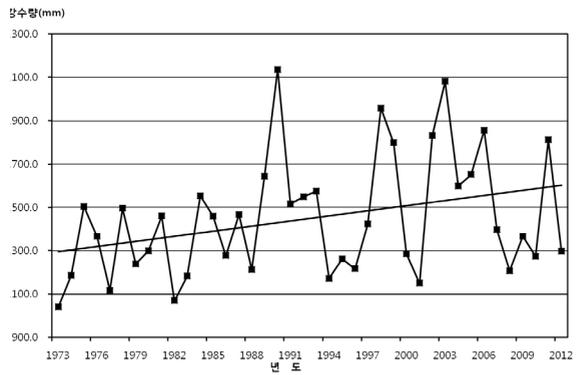


그림 5. 연구지역의 연평균강수량 변화

화에 대해 통계적으로 유의한 결과가 나타났다. 하지만 속초시의 경우 유의수준 1%에서는 통계적으로 유의하지 않았지만, 유의수준 5%에서 유의한 결과를 보여주고 있어서 두 집단 간에 연평균기온 변화가 있음을 파악할 수 있었다. 그중 원주가 두 시기별 연평균기온 상승이 가장 크며 (1.2℃), 다음으로 강릉, 대관령, 홍천의 상승률이 동일하게 나타났다(0.6℃). 따라서 전반적으로 연구지역의 시기별 연평균기온 변화율은 1992년을 기준으로 평균 0.7℃ 정도 상승하였음을 분석할 수 있었다.

다음으로, 각 지역에서 연도 별 두 집단에 대해 계절별 평균기온 변화 특성을 분석하기 위해 유의성 검정을 실시하였으며, 그 결과는 표 5와 같다. 먼저 강릉 및 대관령은 여름철 평균기온을 제외한

모든 계절이 유의한 결과를 얻을 수 있었으며, 특히 겨울 및 가을 평균기온 상승이 높은 것으로 나타났다. 원주 및 홍천은 모든 계절에 있어 두 집단 간 평균기온의 변화가 유의하였으며, 특히 강릉·대관령과 마찬가지로 가을 및 겨울 평균기온 상승이 높은 것으로 나타났다. 반면에 속초는 여름 및 겨울에 평균기온 변화가 유의하지 않은 결과를 보여주는 반면, 봄, 가을은 유의한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 봄의 평균기온 상승 변화가 통계적으로도 유의하며 가장 크게 나타났다. 종합하여 보면 연구지역에서는 전 계절에 걸쳐 평균기온이 0.6℃ 이상 상승하였지만, 유의성 검증 결과 여름철 평균기온은 유의하지 않았다. 따라서 여름철을 제외한 모든 계절의 평균기온 상승이 높으며, 특히 겨울 및 가을철 평균기온 상승이 가장 높은

표 4. 연구지역 관측소의 시기별 연평균기온 변화

(단위: ℃)

시기 \ 지역	강릉	대관령	원주	속초	홍천	전체
A(1973~1992)	12.7	6.3	10.5	11.9	10.0	10.3
B(1993~2012)	13.3	6.9	11.7	12.4	10.6	11.0
연평균기온 변화율	0.6**	0.6**	1.2**	0.4*	0.6**	0.7**
p-값	0.009	0.002	0.000	0.027	0.003	0.000

* 유의수준: $\alpha=0.05$ (양측검정)에서 유의

** 유의수준: $\alpha=0.01$ (양측검정)에서 유의

표 5. 연구지역 관측소의 두 시기의 계절별 평균기온 변화

(단위: °C)

년도	시·군	강릉				대관령				원주			
		봄	여름	가을	겨울	봄	여름	가을	겨울	봄	여름	가을	겨울
	A(1973~1992)	11.9	22.9	14.6	1.4	5.8	17.9	7.8	-6.3	10.5	23.3	11.6	-3.3
	B(1993~2012)	12.4	23.4	15.2	2.1	6.4	18.3	8.5	-5.5	11.6	24.1	13.0	-1.8
	평균기온 변화율	0.5*	0.5	0.6**	0.7*	0.6**	0.4	0.7**	0.8*	1.1**	0.8**	1.4**	1.5**
	p-값	0.040	0.114	0.003	0.014	0.004	0.145	0.002	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000

년도	시·군	속초				홍천				전체			
		봄	여름	가을	겨울	봄	여름	가을	겨울	봄	여름	가을	겨울
	A(1973~1992)	10.7	21.7	14.3	1.0	9.9	22.8	11.0	-3.9	9.8	21.7	11.9	-2.2
	B(1993~2012)	11.2	22.1	14.7	1.4	10.5	23.3	11.8	-3.3	10.4	22.3	12.6	-1.4
	평균기온 변화율	0.5*	0.4	0.4*	0.4	0.6**	0.5*	0.8*	0.6*	0.6**	0.6	0.7**	0.8*
	p-값	0.022	0.148	0.078	0.177	0.004	0.038	0.003	0.043	0.005	0.109	0.006	0.041

* 유의수준: $\alpha=0.05$ (양측검정)에서 유의
 ** 유의수준: $\alpha=0.01$ (양측검정)에서 유의

것으로 나타났다.

그림 6은 연구지역의 계절별 연평균기온 변화 그래프이다. 연구지역에서 봄철은 전반적으로 평균 기온이 상승하였으며, 특히 1990년대 후반 이후에 최근까지 큰 폭으로 상승하였다(그림 6(a)). 여름철 평균기온은 다른 계절과 달리 기온 변화가 폭이 크지 않지만 전체적으로는 약간 상승하는 경향성을 보였다(그림 6(b)). 가을철은 봄철과 유사한 평균기온 변화를 나타내지만, 기온 상승 폭은 더 높은 것으로 나타났다(그림 6(c)). 겨울철은 다른 계절에 비하여 평균기온 상승 폭이 가장 크며, 특히, 1980년대 후반 이후 급격한 상승 경향을 보여 전반적으로 온난해지고 있음을 분석할 수 있었다(그림 6(d)).

이상의 계절별 평균기온 변화 분석 결과, 본 연구지역에서는 전반적으로 계절별 평균기온이 상승하였고, 특히, 겨울 및 가을철이 다른 계절에 비하여 상승률이 높은 것으로 나타났다. 따라서 이러한 계절별 기온 상승은 임상분포 변화에도 영향을 미쳤을 것이다. 특히, 겨울 및 가을철 기온의 상승은 침엽수림보다는 혼효림 및 활엽수림의

성장 및 분포지역 확대에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서는 지역별 연평균강수량 변화 특성을 분석하기 위해서 연평균기온 변화 분석에서와 마찬가지로 두 시기로 나누어 연평균강수량 변화를 분석하였다(표 6). 그 결과, 전체적으로 연구지역에서는 연평균강수량이 122mm 정도 증가하였으며, 특히 홍천이 175mm로 가장 많은 증가 경향이 나타났다. 이밖에도 대관령과 원주 등이 100mm 이상 증가하였다. 하지만, 표 6의 유의성 검증에서 보듯이, 모든 지역에서 두 시기 간 연강수량 변화에 대해 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 연평균강수량은 본 연구에서 제외하였다.

2) 다중시기 임상분류도를 이용한 기후변화 특성 분석

본 연구에서는 강원도 산지지역의 임상 특성이 어떻게 변화되었는지를 분석하기 위해 세 시기의 영상을 선분류 후비교법을 통해 분석하였다. 먼저 1988년에서 1999년 사이의 임상 변화를 살펴

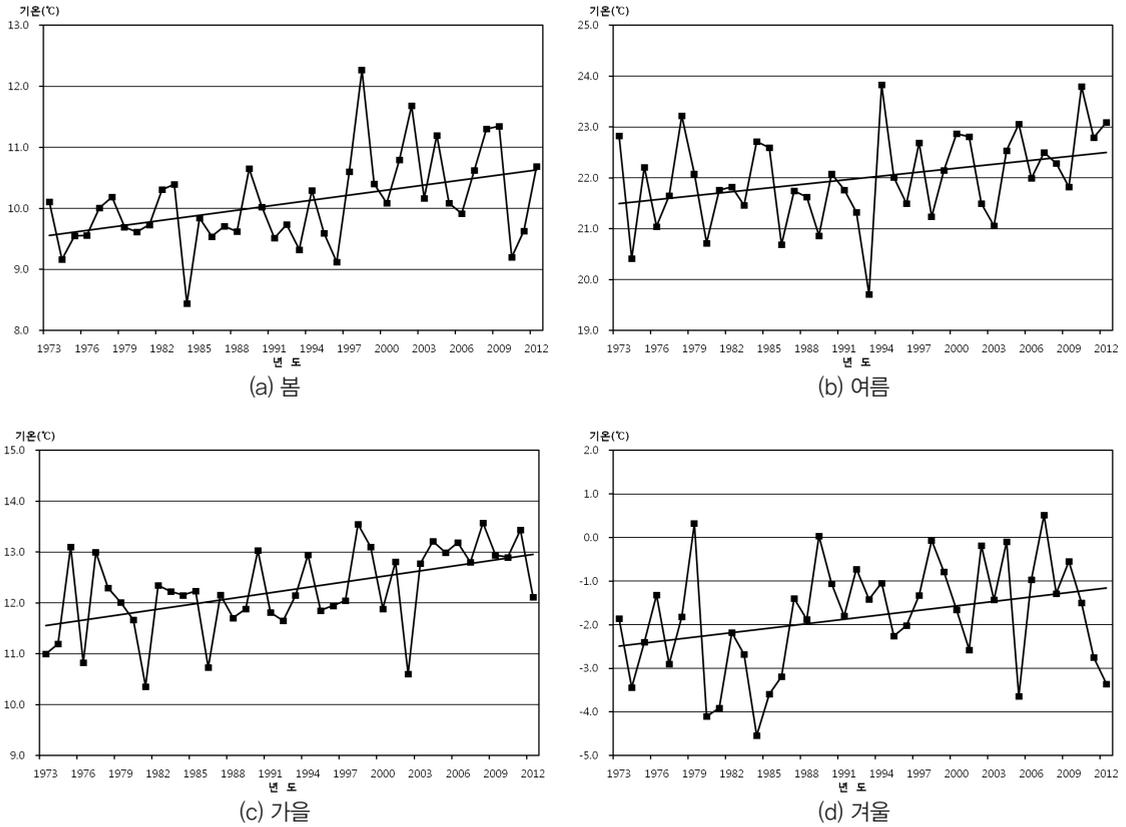


그림 6. 연구지역의 계절별 평균기온 변화

표 6. 연구지역 각 관측소의 두 시기별 연강수량 변화

(단위: mm)

년도	지역	강릉	대관령	원주	속초	홍천	전체
	A(1973~1992)	1,407	1,653	1,283	1,328	1,271	1,388
	B(1993~2012)	1,480	1,798	1,400	1,427	1,446	1,510
	연강수량 변화량	73	145	117	99	175	122
	p-값	0.520	0.445	0.166	0.247	0.109	0.221

* 유의수준: $\alpha=0.05$ (양측검정)에서 유의

** 유의수준: $\alpha=0.01$ (양측검정)에서 유의

보면, 침엽수림의 경우 활엽수림으로의 변화가 166.1km²로 가장 크게 나타났으며, 혼효림으로도 38.5km²로 큰 변화가 일어났다(표 7). 이 기간 동안 이러한 침엽수림에서 활엽수림으로의 변화가 일어난 원인은 1990년대 이후 연평균기온 상승, 특히 겨울 및 가을 기온 상승에 따른 임상 변화가 진

행된 결과인 것으로 사료된다. 반면에 혼효림은 이 기간 동안 큰 변화가 일어나지 않았는데, 활엽수림과 침엽수림으로의 변화가 각각 4.2km²와 1.0 km²로 나타났다. 이밖에 활엽수림은 대부분 혼효림으로의 변화가 72.8km² 정도로 가장 크게 나타났는데, 그 원인은 활엽수림 내의 저산성 구릉지 및

표 7. 1988~1999년 사이의 임상 변화 탐지 매트릭스

(단위: km²)

1988 \ 1999	침엽수림		혼효림		활엽수림	
	area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)
침엽수림	3,075.2	45.9	38.5	0.6	166.1	2.5
혼효림	1.0	0.0	1,544.0	23.1	4.2	0.1
활엽수림	1.0	0.0	72.8	1.1	1,793.7	26.8

표 8. 1999~2009년 사이의 임상 변화 탐지 매트릭스

(단위: km²)

Class	침엽수림		혼효림		활엽수림	
	area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)	area (km ²)	rate (%)
침엽수림	2,805.4	41.9	179.5	2.7	92.21	1.4
혼효림	0.2	0.0	1,522.3	22.7	132.89	2.0
활엽수림	0.4	0.0	23.1	0.3	1,940.5	29.0

태백산맥 동사면에서 일부 전나무 및 소나무 등의 인공림이 조성되면서 혼효림으로의 변화가 일어난 결과인 것으로 판단된다(그림 7(a)).

1999년에서 2009년 사이의 임상 변화를 살펴보면, 침엽수림의 경우 혼효림으로의 변화가 179.5 km²로 가장 크게 나타났으며, 활엽수림으로도 92.21km²로 큰 변화가 일어났다(표 8). 이 기간 동안 침엽수림에서 혼효림 및 활엽수림으로의 큰 변화가 일어난 원인은 전술한 바와 같이 지속적인 연평균기온이 상승하면서 침엽수림 수종의 하나인 소나무가 사라지고 그 지역을 활엽수와 혼효림이 대체한 결과인 것으로 판단된다. 하지만, 혼효림의 비중이 전년 기간(1989~1999)에 비해 더 많이 증가한 것은 기후변화의 영향도 포함되지만 저산성 산지지역에서 인공림이 조성되면서 상대적으로 혼효림의 면적이 늘어난 것으로 사료된다. 다음으로 이 기간 동안 혼효림 임상지역에서는 활엽수림으로의 변화가 가장 크게 나타났는데, 그 면적이 132.89km²로 나타났다. 반면에 활엽수림에서 혼효림으로의 변화는 23.1km²로 크지 않았다. 이러한 원인은 2000년대 이후 연구지역에서 기후

변화로 인한 기온 상승이 지속되면서 활엽수림이 혼효림 지역을 잠식하는 것으로 보여 진다(그림 7(b)).

이상의 결과를 종합하여 보면, 강원도 산지지역에서 기후변화로 인한 기온 상승은 전체적으로 임상의 변화에 직·간접적으로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 특히, 침엽수림 지역에서 활엽수림 및 혼효림으로의 변화는 1990년 이후 연평균기온 상승에 따른 임상 변화가 진행된 결과인 것으로 사료된다.

임상 변화지역을 살펴보면, 혼효림은 주로 침엽수림대의 가장자리에서 증가를 보이며, 이에 따라 침엽수림대의 고도가 더 높아진 것을 파악할 수 있었다. 반면에 활엽수림은 혼효림대를 대체하는 경향을 보이는데, 특히 태백산지 일대에서는 활엽수림이 침엽수림과 혼효림을 잠식하고 그 분포 범위가 눈에 띄게 넓어졌음을 파악할 수 있었다. 이밖에 내륙지방에서는 혼효림과 활엽수림의 확장률이 동해안 해안지역 보다 높게 나타났는데, 이는 태백산맥의 서사면 지역들이 겨울철 차가운 북서풍을 직접 받고 있는 지역으로 겨울 및

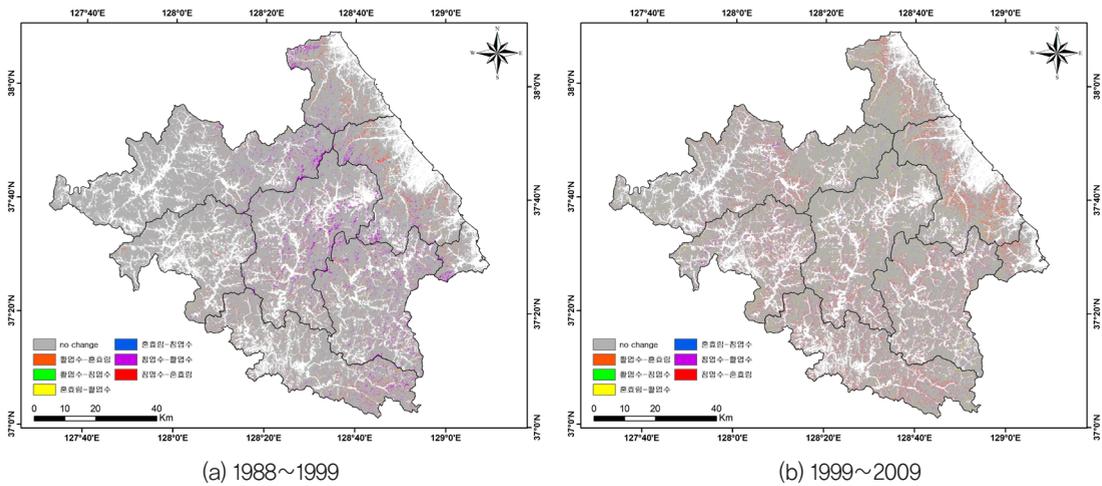


그림 7. 선분류 후비교법을 이용한 임상 변화 탐지

가을철 기온 상승이 침엽수림의 임상 변화에 어느 정도 영향을 주었을 것으로 판단된다.

5. 결론

기후변화 영향평가의 기초자료로 활용 될 수 있는 임상 정보는 원격탐사 기법을 이용하여 산림 식생대의 변화를 효과적으로 분석할 수 있다. 본 연구에서는 향후 지역단위의 기후변화 취약성 평가를 위한 기초 작업으로 강원도 산지지역을 대상으로 기후자료 분석 및 위성영상을 기반으로 임상 별 면적 변화를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 다중시기 위성영상을 이용한 임상분류 결과, 1988년에서 2009년 사이의 가장 큰 감소를 보인 임상 항목은 침엽수림으로 나타났으며, 반면에 활엽수림과 혼효림은 증가하였다. 이러한 원인은 강원 산지지역에서 인공림이 조성되어 활엽수림 및 혼효림의 면적이 늘어나기도 하였지만, 우리나라 대표 침엽수림 수종의 하나인 소나무가

기후변화로 인한 기온 상승으로 인해 그 면적이 감소하면서 상대적으로 활엽수와 혼효림의 면적이 늘어난 결과인 것으로 판단된다.

둘째, 임상분류도 분석 결과에서도 침엽수림 분포지역은 1988년에 동해안 구릉지 및 저산성 산지와 태백산지 서쪽의 비산림지역 인접지역을 따라 분포하던 것이 2009년에 대부분의 지역이 혼효림과 활엽수림에 잠식당해 그 분포범위가 지속적으로 후퇴하였다.

셋째, 연평균기온 및 연평균강수량 분석 결과, 연구지역은 전반적으로 연평균기온과 연평균강수량이 상승 및 증가하였으며, 특히, 시기별 연평균기온 변화에서 원주의 연평균기온이 1992년 이전 대비 1.2℃로 가장 크게 상승하였다. 계절별 두 시기의 평균기온 변화에서는 겨울 및 가을철이 다른 계절에 비하여 상승률이 높은 것으로 나타났다. 이러한 평균기온 상승은 임상 분포 변화에도 영향을 미쳤을 것이며, 특히, 혼효림 및 활엽수림의 성장 및 분포지역 확대에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 반면에 연평균강수량은 연구지역에서 1992년을 기준으로 122mm 정도 증가하였지

만, 유의성 검증 결과, 모든 지역에서 두 집단 간의 연평균강수량 변화에 대해 통계적으로 유의하지 않아 기후변화 취약성 평가의 기초자료로 부적합한 것으로 분석되었다.

마지막으로, 선분류 후비교법을 이용한 임상별 면적 변화를 분석한 결과, 1988~1999년 사이의 임상 변화는 주로 침엽수림에서 활엽수림과 혼효림으로의 변화가 가장 많이 일어났다. 이러한 원인은 1990년 이후 연평균기온 상승, 특히 겨울 및 가을 기온 상승에 따른 임상 변화가 진행된 결과인 것으로 사료된다. 1999년~2009년 사이의 임상 변화는 전년 기간과 유사하게 침엽수림에서 혼효림과 활엽수림으로의 변화가 가장 많이 일어났다. 하지만 이 기간 동안 혼효림 지역에서도 활엽수림으로의 변화가 많이 일어났는데, 그 원인은 2000년대 이후 연구지역에서 기후변화로 인한 기온 상승이 지속되면서 활엽수림이 혼효림 지역을 지속적으로 잠식한 결과인 것으로 판단된다.

이상의 연구결과를 종합 고찰하여 보면, 강원도 산지지역에서 기후변화로 인한 기온 상승은 전체적으로 임상 변화에 직·간접적으로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 특히, 침엽수림 지역에서 활엽수림 및 혼효림으로의 변화는 1990년 중반 이후 연평균기온 상승에 따른 임상 변화가 진행된 결과인 것으로 사료된다. 따라서 기후변화 취약성 평가의 주요 지표로서 임상자료는 향후 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 다른 기후요소 및 산림 수종별 관계 등을 분석하면 보다 더 정량적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원

을 받아 연구되었음(NRF-2010-330-B00278).

참고문헌

- 강진택·김정운·김철민, 2012, 기후변화에 따른 난대 상록활엽수의 적지예측 평가 모델 개발, 농업생명과학연구, 46(3), 47-58.
- 구경아·박원규·공우석, 2001, 한라산 구상나무의 연륜연대학적 연구-기후변화에 따른 성장변동 분석-, 한국생태학회지, 24(5), 281-288.
- 강릉시·동해시·원주시·양양군·영월군·정선군·평창군·횡성군, 2012, 시·군 통계연보.
- 기상청, 2006, 기후변화 영향평가 및 적응방안에 관한 연구, 기상지진개발사업.
- 김장수·장동호, 2012, 다중시기 위성영상과 ASTER DEM자료를 이용한 충남해안지역의 임상 변화 분석, 한국지형학회지, 19(1), 69-81.
- 김재철·이종범·최성호, 2012, 잠재 산림분포를 고려한 토지이용도가 장래 기후변화에 미치는 영향 모사, 환경영향평가, 21(1), 105-117.
- 김인환·한경수·김상일, 2010, 1KM NDVI 10년 자료를 이용한 한반도 식생의 경년변동 분석, 대한원격탐사학회지, 27(1), 17-24.
- 변정연·이우균·최성호·오수현·유성진·권태성·성주한·우재욱, 2012, 시공간 정보기반 산림 생태계의 기후변화 취약성 평가, 대한원격탐사학회지, 28(1), 159-169.
- 신현탁·성정원·이명훈, 2012, 경상남도수목원 내 식물종의 개화시기 변화 연구, 기후연구, 7(3), 241-254.
- 임종환·신준환, 2000, 지구온난화가 산림생태계에 미치는 영향, 자연보존, 111, 19-25.
- 임종환·신준환·이돈구·서승진, 2006, 기후변화에 따른 산림생태계 영향: 우리나라 연구현황과 과제, 한국농림기상학회지, 8(3), 199-207.
- 이동근·김재욱, 2007, 한반도지역의 기후변화에 의한 고산·아고산 식생 취약성 평가, 한국환경보존학회지, 10(6), 110-119.

- 이상철 · 최성호 · 이우균 · 박태진 · 오수현 · 김순아, 2011, 기후변화 시나리오에 따른 산림 분포 취약성 평가, *한국임학회지*, 100(2), 256-265.
- 이상현, 2012, GIS를 활용한 기후변화 대응체계 구축: 산림의 취약성 평가, *전북대학교 대학원 석사 학위논문*.
- 이동근 · 김재욱 · 박 찬, 2010, 토지피복 변화를 반영한 미래의 산림식생 분포 예측에 관한 연구, *환경영향평가*, 19(2), 117-125.
- 이승호 · 이경미, 2003, 기온변화에 따른 벚꽃 개화시기의 변화 경향, *환경영향평가*, 12(1), 45-54.
- 장동호 · 권원태, 2007, 위성영상을 이용한 남서해안지역의 기온변화에 따른 식생분석, *한국지형학회지*, 14(1), 67-75.
- 한경수 · 김영섭, 2004, SPOT/VEGETATION 영상을 이용한 눈과 구름의 분류 알고리즘, *대한원격탐사학회지*, 20(4), 235-244.
- 한국환경정책 · 평가연구원, 2010, 기후변화 대응을 위한 수자원 네트워크 구축방안(I).
- 허인혜 · 권원태 · 전영문 · 이승호, 2006, 우리나라에서 기온 상승이 식생분포에 미치는 영향, *환경영향평가*, 15(1), 67-78.
- Accad, A. and Neil, D. T., 2006, Modelling pre-clearing vegetation distribution using GIS-integrated statistical, ecological and data models: A case study from the wet tropics of Northeastern Australia, *Ecological Modelling*, 198, 85-100.
- Austin, M., 2007, Species distribution models and ecological theory : A critical assessment and some possible new approaches, *Ecological Modelling*, 200(1-2), 1-19.
- Beatriz, M. and Gilbert, M. A., 2008, Vegetation dynamic from NDVI time series analysis using wavelet transform, *Remote sensing of Environment*, 113, 1823-1842.
- Bianca, H., 2003, Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models, *Ecological Modelling*, 168, 267-282.
- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Nielson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., and Wotton, B. M., 2001, Climate change and forest disturbances, *Bioscience*, 51(9), 723-734.
- Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Meams, L. O., Buja, L. E., Meehl, G. A., and Washington, W. M., 2005, The importance of land-cover change in simulation future climates, *Science*, 310(5754), 1674-1678.
- Garcia-Aguirre, M. C., Ortiz, M. A., Zamorano, J. J., and Reye, Y., 2007, Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano Mexico, using a geographic information system(GIS), *Forest Ecology and Management*, 239, 1-12.
- Hermance, J. F., 2007, Stabilizing high-order, nonclassical harmonic analysis of NDVI data for Average annual models by damping model roughness, *International Journal of Remote Sensing*, 28(12), 2801-2819.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.
- Michaud, G. A., Monger, H. C., and Anderson, D. L., 2013, Geomorphic-vegetation relationships using a geopedological classification system, northern Chihuahuan Desert, USA, *Journal of Arid Environments*, 90, 45-54.
- Yin, J. and He, F., 2011, Researching the relationship between the change of vegetation cover and runoff based on RS and GIS, *Procedia Environmental Sciences*, 12, 1077-1081.