

축척변화로 인한 임상 비율의 불확실성 평가: 소양강댐 및 충주댐 유역을 중심으로

유철상* · 송성욱**

*고려대학교 건축사회환경공학과

Uncertainty assessment of forest type ratios due to scale change: Focusing on the Soyang River Dam and Chungju Dam basins

Chulsang Yoo* · Sunguk Song**

**School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea*

(Received : 13 May 2024, Revised : 12 August 2024, Accepted : 23 January 2025)

요약

본 연구에서는 임상도의 축척이 변함으로 해서 발생하는 임상 비율의 불확실성을 검토하였다. 축척의 변화는 결국 해상도의 변화와 같다. 연구 대상 지역으로 소양강댐 유역과 충주댐 유역을 선정하였다. 연구대상 기간은 1980년부터 2020년까지이며, 이 기간 가용한 임상도를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 임상도 중 2019년의 것은 1:5000의 축척을, 그 이전의 것은 1:25000의 축척으로 제작되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 가용한 임상도에 나타난 임상 비율은 2019년 이전의 임상도와 2019년의 임상도에서 크게 다르다. 2019년 임상도의 임상 비율은 직전 임상 비율과도 10% 이상의 큰 차이를 보였다. 둘째, 이러한 변화는 임상도의 축척 변화에 기인함을 확인할 수 있었다. 과거 임상도가 2019년의 임상도와 같은 고해상도로 바뀌는 경우에 대한 임상 비율의 불확실성(오차막대로 표현한 오차범위)은 2019년의 임상도의 임상 비율을 포함하는 것으로 확인되었다. 셋째, 2019년의 임상도를 과거의 축척으로 변환한다고 가정하여 추정된 불확실성(오차범위)은 과거 임상비율을 대부분 포함하나 충주댐의 집엽수림 비율이 이 범위를 초과하여 과대 추정의 여지가 있음을 확인하였다. 마지막으로, 축척 변화를 양방향으로 고려한 불확실성(오차범위) 및 가장 최근의 고해상도 임상도가 보다 정확할 것이라는 가정에서 과거 40여년간의 임상 비율 변화를 판단하였다. 그 결과 두 유역에서는 과거 임상 비율의 뚜렷한 변화는 없었으며, 가장 최근인 2019년 임상도의 임상 비율을 대푯값으로 고려하는 것이 가장 타당하다는 결론을 내릴 수 있었다.

핵심어 : 임상도, 축척 변화, 해상도, 불확실성

Abstract

This study examines the uncertainty of forest type ratios resulting from that the scale of forest type map changes. This scale change also indicates the change in the resolution of the product. The Soyang River Dam basin and Chungju Dam basin are selected as the study areas. The study period is from 1980 to 2020, and the forest type data available during this period are used. Among the forest type maps used in this study, the one after 2019 was produced at a scale of 1:5,000, and those before 2019 were produced at a scale of 1:25,000. The results of this study are summarized as follows. First, the forest type ratio in the map in 2019 is significantly different from that in maps before 2019. More than 10% difference is also observed between the forest type ratio in the map of 2019 and that just before. Second, it is confirmed that this change is mainly due to the scale change of the forest type map. The uncertainties of the forest type ratios (i.e., the range of error expressed by the error bar) of the past forest type maps, are found to encompass the forest type ratio of the 2019 forest type map. Third, the uncertainty of the forest type ratio of the 2019 map, in the case of transforming the scale of the 2019 map into that of past maps, is also found to encompass most of the past ratios. However, the ratio of needle leaf forest in Chungju Dam exceeds this range to confirm that its overestimation. Lastly, this study evaluates the change in the forest type ratio over the last 40 years by considering the uncertainties due to scale change in both directions and by assuming that the most recent high-resolution forest type map would be more accurate. As a result, this study cannot find any significant change in the forest type ratio in the two basins. It is concluded that the forest type ratio of the most recent 2019 forest type map is most appropriate to be used as a representative value.

Key words : Forest type map, scale change, resolution, uncertainty

*All authors equally contributed

†To whom correspondence should be addressed. Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea
E-mail : ssu0103@korea.ac.kr

• Chulsang Yoo School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea/Professor(envchul@korea.ac.kr)
• Sunguk Song School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea/Ph.D Candidate(ssu0103@korea.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

물순환 과정에서 삼림이 차지하는 비중은 작지 않다. 삼림이 지구 전체 표면적에서 차지하는 비율은 지구 표면적의 10% 내외, 또는 육지 면적의 30% 정도에 해당한다(FAO, 2020), 삼림은 광합성 활동을 통해 이산화탄소를 흡수하고 산소를 방출한다. 이 과정에서 상당량의 물을 소비하고 있는 데, 지구 생태계의 구성원 중 가장 많은 물을 소비하고 있는 주체이다(Oki and Kanai, 2006; Teuling et al., 2009; Schlesinger and Jasechko, 2014; Brendel, 2021). 그 결과물로 순일차생산량이 만들어지며 육지에서의 총량 중 삼림이 43% 정도를 차지하고 있다고 알려져 있다. 삼림의 영향은 증발산에 한정되지 않으며, 수원함양 기능(water yield function; Reinhart and Trimble, 1962; Rothacher, 1970), 홍수저감(McCulloch and Robinson, 1993; Farley et al., 2005; Sun et al., 2006) 등 부가기능도 중요한 부분이다.

유역에서의 강우-유출해석에 있어 토지이용을 반영하는 것은 매우 중요하다. 도시화의 비율 증가로 홍수위험이 가중된다는 것은 잘 알려진 사실이다(Chen et al., 2017; Feng et al., 2021; Zhang et al., 2018). 삼림 면적이 클 경우 증발산이 커지고(Li et al., 2017; Ning et al., 2020), 농경지의 경우에도 논이나 밭이나에 따라 침투, 증발산 등의 특성이 크게 달라진다(Linquist et al., 2015; Wang et al., 2018). 토지피복의 변화는 필연적으로 수문순환에 적지 않은 영향을 미친다(Hong et al., 2023; Jung et al., 2024). 따라서 유역을 토지이용 종류에 따라 정확히 구분하는 것은 매우 중요하다. 이 과정에서의 오류는 당연히 유출해석 결과에도 크게 반영되어 작게는 유출특성, 크게는 유역 수문순환 과정에 대한 왜곡된 이해를 가져오게 된다.

대유역의 경우 토지이용의 상당부분이 삼림(forest)이다. 삼림은 간단히 나무로 채워져 있는 지역을 의미한다. 예외적인 경우도 있겠지만 삼림지역의 면적이 가장 큰 것이 일반적인 특성이다. 인구밀도가 작은 지역이라면 삼림면적의 비율은 더욱 클 것이고, 농업이 발달하지 않은 지역에서도 삼림지역의 비중이 절대적이다. 이런 지역에서 삼림지역의 수문순환 특성이 전 유역의 수문순환 특성을 지배하는 것은 당연하다. 우리나라의 경우에도 전국적으로 삼림의 비율은 63%에 육박할 정도로 크며(KFS, 2021), 따라서 삼림의 특성이 한반도에 있는 대유역 수문순환을 좌우하는 역할을 하게 된다.

삼림은 크게 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분한다. 더 자세한 구분도 물론 가능하고, 임상도라고 하여 관련된 정보도 규칙적으로 만들어지고 있다(NGII, 2020; NIFOS, 2020). 수문학 분야에서 삼림 구분(또는 임상 구분)이 중요한 이유는 당연히 증발산 때문이다. 구체적인 임상의 종류를 고려하기도 하지만, 유역단위로 수문순환 특성을 파악하는 것이 일반적이므로, 간단하지만 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 구분이 가장 일반적이다. 간단한 구분이지만, 이러한 임상 구분에 따라 증발산량이 다르며(Awessou et al., 2017; Rana et al., 2020), 특히 계절적인 차이가 크다(Peters et al., 2011; Ghimire et al., 2014). 소위, 성수기 비성수기의 차이에 따라 어떤 임상이나의 차이도 매우 중요하게 고려된다(Brümmner et al., 2012; Chen

et al., 2022). 따라서 유역에서 어떤 식생이 어떤 비율로 존재 하느냐를 파악하는 매우 중요한 일이다.

소위 임상 비율이라고 하는 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율은 임상도를 가지고 추정한다. 임상도가 주기적으로 만들어지고 있어 임상 비율의 변화도 파악할 수 있다(NIFOS, 2020; Kim et al., 2020). 지구온난화의 영향이 임상 비율의 변화에 어떤 영향을 미치고 있는지도 파악해 볼 수 있다(Jeong et al., 2013; Kim et al., 2023). 그러나 임상도가 참값을 제공해 주지 않는다는데 문제가 있다. 임상도는 조사 분석을 거쳐 완성되는 것이므로 그 자체로 상당한 오차를 포함할 수 있다(Jeon et al., 2015; Lee et al., 2018). 또한 임상도가 주어진 축척으로 제공되는 문제도 있다(Kang et al., 2003; Lee et al., 2018). 이는 해상도의 문제로 저해상도 또는 고해상도의 정보가 가지고 있는 불확실성의 문제이기도 하다.

본 연구에서는 이러한 문제, 즉, 임상도가 주어진 축척으로 제작되고, 또한 그 축척이 변함으로 해서, 결과적으로 해상도가 변함으로 해서 발생하는 문제를 검토해 보고자 한다. 저해상도의 자료가 가지고 있는 불확실성, 고해상도의 자료(작은 축척의 자료)를 저해상도(큰 축척의 자료)로 만들어 사용하는 경우의 불확실성이 어떻게 정량화 될 수 있는지를 파악해 보고자 한다. 이러한 분석은 임상도를 가지고 유도되는 임상비율을 평가하는데 굉장히 중요한 역할을 한다. 단순히 임상도를 가지고 추정된 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율에 상당한 왜곡이 있을 수 있으며, 또한 이를 그대로 이용하여 임상 비율의 추세 분석을 수행할 경우 어떤 심각한 문제가 발생할 수 있는지 등도 파악해 볼 수 있을 것이다. 본 연구는 충주댐 및 소양강댐 유역을 대상으로 수행하였으며, 1980년대 이후 지난 40여년간의 임상 비율이 어떠한지를 검토하였다.

2. 연구 방법론

2.1 침엽수, 활엽수 및 혼효림의 구분

FAO(1998)에 따른 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 판단 기준은 간단하다. 먼저, 입목본수의 비율이 25% 이내인 경우에는 무림목지라고 하여 삼림으로 취급하지 않는다. 삼림으로 구분되면, 이제 침엽수림, 활엽수림 또는 혼효림의 구분이 이루어진다. 먼저, 침엽수의 입목본수 비율이 75%를 넘으면 침엽수림, 반대로 활엽수의 비율이 75%를 넘으면 활엽수림으로 구분된다. 침엽수와 활엽수 중 어느 한 종류의 임상의 입목본수 비율이 75%를 넘지 않는 경우는 혼효림으로 분류된다. 이는 FAO의 수종구분기준(FAO, 1998)을 따른 것이다. 즉, 임상도의 임상 구분은 다음과 같은 순서도를 따라 결정된다(Fig. 1).

2.2 해상도의 증가에 따른 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림 비율의 변화 범위

대상지역 또는 유역에서 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율은 임상도를 가지고 판단할 수 있다. 그러나 임상도가 언제 만들어졌느냐에 따라 임상도의 축척(해상도)이 다르다. 과거에는

저해상도의 임상도만 가용하였으나 최근에는 고해상도의 임상도가 가용해졌다. 그러나 문제는 저해상도이든 고해상도이든 동일한 해상도의 자료가 있어야 식생비율의 추세적 변화를 살펴볼 수 있는데, 그렇지 않다는 점이다. 최근에 고해상도의 자료가 가용해졌지만, 저해상도의 자료는 가용하지 않다. 물론 고해상도의 자료를 가지고 저해상도의 자료를 만들 수는 있으나 이 과정에도 다른 불확실성이 개입하게 된다.

해상도의 변화에 따른 불확실성의 문제를 추정해 보는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서는 이를 오차막대(error bar)의 형태로 정량화하였다. 먼저 저해상도 자료가 가지는 불확실성에 대해 살펴보도록 하자. 이런 분석에는 어떤 해상도에서 어떤 해상도로 변하는지를 미리 확정하여야 한다. 본 연구에서는 과거 임상도의 해상도가 2010년을 전후로 1:25,000에서 1:5,000으로 향상됨을 고려하였다. 이러한 변화는 면적을 기준으로 25배 더 정밀하게 임상을 구분하게 되었다는 것을 의미한다. 이런 상황을 설명하면 아래 Fig. 2와 같다. 이 그림에서는 당초 혼효림으로 구분되었던 셀이 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림으로 구분되는 상황을 보여준다. 결과적으로 혼효림의 비율이 줄어들 가능성이 매우 큼을 보여준다.

그림 1과 같은 변화로 인해 발생하는 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율 변화는 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저, 당초 침엽수림으로 분류되었던 경우를 살펴보자. 침엽수림으로 분류되었다는 것은 전체 수목 중 침엽수의 비율이 최소 75%, 최대 100% 라는 것을 의미한다. 추가로 수목의 분포로 완전군집과 완전혼합의 두 극단적인 경우를 가정해 볼 수 있다. 결과적으로

4가지의 극단적인 상황을 상정해 볼 수 있다. 먼저, 침엽수의 비율이 75%인 경우의 완전군집을 고려해 보자. 이 상황에서 해상도가 증가한다면 결과적으로 침엽수림의 비율은 75%, 활엽수림의 비율은 25%로 나타난다. 그러나 침엽수, 활엽수의 완전혼합을 가정하면 해상도 증가에 따른 침엽수림의 비율은 100%가 된다. 만일 침엽수의 비율이 100%라면 완전군집이나 완전혼합의 조건에 관계없이 침엽수림의 비율은 100%가 된다.

이 극단적인 상황에 추가로 활엽수림의 비율이 더 커질 수 있는 상황을 생각해 볼 수 있다. 이 경우는 침엽수와 활엽수의 수량이 각각 75%, 25%인 조건에서 대상 지역을 25개로 나눌 때 활엽수림의 비율을 최대로 만드는 문제이다. 결과적으로 보면, 이 문제는 활엽수가 75%인 셀을 몇 개 만들 수 있는냐의 문제가 된다. 답은 물론 25%를 0.75로 나눈 값인 33.3%가 된다. 현실성을 떠나 이 값이 이론적으로 최대값이다. 이상의 결과를 정리하며 Table 1과 같다. 활엽수림의 경우도 같은 결과가 된다.

혼효림의 경우도 유사한 방법으로 해상도의 증가에 따른 변화를 계산할 수 있다. 혼효림은 두 개의 극단적인 상황으로 침엽수와 활엽수의 비율이 각각 75:25, 25:75인 상황이 있을 수 있다. 원칙적으로 75%를 포함하면 안 되지만 극단적인 경우로 이 비율을 고려해 본다. 먼저, 침엽수와 활엽수의 비율이 각각 75%, 25%인 경우를 생각해 보자. 이 상황에서 완전군집을 가정하면 침엽수림의 비율은 75%, 활엽수림은 25%가 된다. 만일 완전혼합을 가정한다면 혼효림의 비율은 100%가 된다. 침엽수림의 비율을 최대로 한다면 75%를 0.75로 나눈 96%까지 침엽수림이 된다. 반대로 활엽수림을 최대로 한다면 25%를 0.75로 나눈 33.3%가 활엽

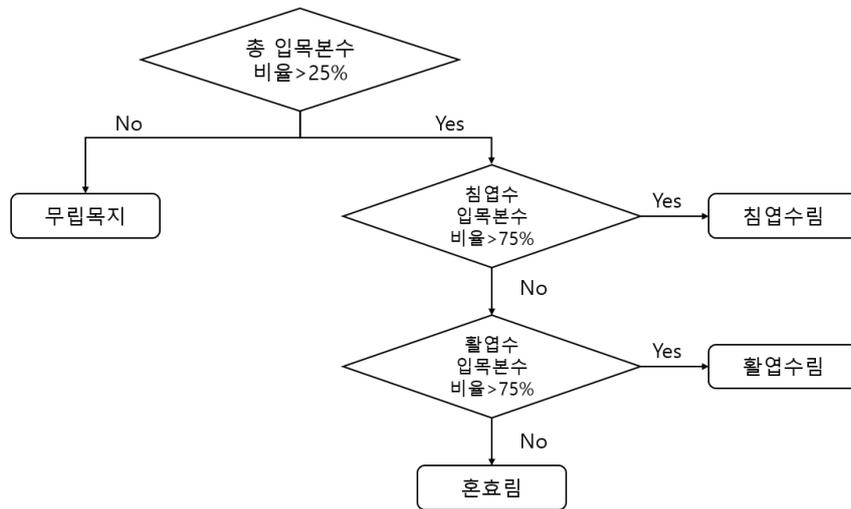


Fig. 1. Flow chart of forest map classification

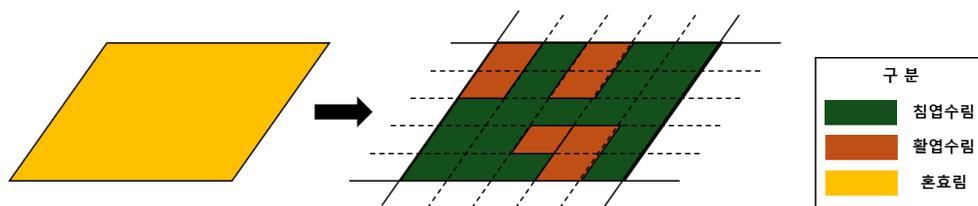


Fig. 2. Example of forest type classification difference due to resolution change

Table 1. Change of needleleaf/broadleaf forest when resolution increases by 25 times

Needleleaf forest ratio (Before, %)	Broadleaf forest ratio (Before, %)	Needleleaf forest ratio (After, %)	Broadleaf forest ratio (After, %)	Mixed forest ratio (After, %)	Condition
75	25	75	25	0	Group mixture
		100	0	0	Single tree mixture
		66.7	0	33.3	Maximize mixed forest
100	0	100	0	0	
Maximum range		66.7 - 100	0 - 25	0 - 33.3	
Possible range		75 - 100	0 - 25	0 - 25	

Table 2. Change of mixed forest when resolution increases by 25 times

Needleleaf forest ratio (Before, %)	Broadleaf forest ratio (Before, %)	Needleleaf forest ratio (After, %)	Broadleaf forest ratio (After, %)	Mixed forest ratio (After, %)	Condition
75	25	96	4	0	Maximize needleleaf forest
		66.7	33.3	0	Maximize broadleaf forest
		0	0	100	Group mixture
		75	25	0	Single tree mixture
25	75	4	96	0	Maximize broadleaf forest
		33.3	66.7	0	Maximize needleleaf forest
		0	0	100	Group mixture
		25	75	0	Single tree mixture
Maximum range		0 - 96	0 - 96	0 - 100	
Possible range		25 - 75	25 - 75	0 - 100	

Table 3. Range of changes in needleleaf forests, broadleaf forests and mixed forests when resolution is increased by 25 times

	Needleleaf forest	Broadleaf forest	Mixed forest
Needleleaf forest (A)	0.75 ~ 1	0 ~ 0.25	0 ~ 0.25
Broadleaf forest (B)	0 ~ 0.25	0.75 ~ 1	0 ~ 0.25
Mixed forest (C)	0.25 ~ 0.75	0.25 ~ 0.75	0 ~ 1
Change range	$(0.75A+0.25C) \sim (A+0.25B+0.75C)$	$(0.75B+0.25C) \sim (0.25A+B+0.75C)$	$0 \sim (0.25A+0.25B+C)$

Table 4. Range of changes in needleleaf forests, broadleaf forests and mixed forests when resolution is reduced by a factor of 25

		Needleleaf forest	Broadleaf forest	Mixed forest
Before		A	B	C
After	Single tree mixture	A-B	B-A	$(C+A) \sim (C+B)$
	Group mixture	A	B	C
	Range	$(A-B) \sim A$	$(B-A) \sim B$	$C \sim \text{Max}\{(C+A), (C+B)\}$

수림이 된다. 다른 극단적인 상황인 침엽수 25%, 활엽수 75%인 경우도 유사하게 계산된다. 이를 정리하면 Table 2와 같다. 표에 제시한 것처럼 현실적인 범위는 최대 범위보다는 좁게 설정할

수 있다.

결과적으로 해상도의 증가로 당초 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림 비율의 큰 변화가 가능하다. 이를 종합하면 다음과 같다.

2.3 해상도의 감소에 따른 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림 비율의 변화 범위

해상도가 감소하는 경우는 앞서 살펴본 내용과 반대의 경우이다. 이 경우는 완전혼합 및 완전군집만을 고려하여 간단히 그 변화를 살펴볼 수 있다. 먼저 완전군집을 가정하면 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 비율의 변화는 없다. 그러나 완전혼합을 가정하면 결과는 크게 달라진다. 침엽수림과 활엽수림이 합쳐지는 상황이 되므로 혼효림의 비율이 크게 증가한다. 침엽수림이나 활엽수림의 경우는 두 비율의 차이 또는 0으로 축소된다. 이를 정리하면 다음 Table 4와 같다.

3. 대상 유역 및 자료

3.1 대상 유역

본 연구에서 다년간 임상 변화를 검토하기 위한 대상 지역으로 소양강댐 유역과 충주댐 유역을 선정하였다. 소양강댐 유역은 유역면적이 2,703 km²이며 위도 37.9°~38.1° 사이에 위치하여 강원도 일부 지역을 포함한다. 소양강댐 유역의 평균 표고는 638.5 m이며, 1981년부터 2020년 사이의 연 평균 강수량은 1,242 mm이며, 평균 기온은 11.8 °C이다. 충주댐 유역은 유역면적이 6,648 km²에 이르며 위도 37.1°~37.4° 사이에 위치하여 강원도, 충청북도의 일부 지역을 포함한다. 충주댐 유역의 평균 표고는 608.3 m이며 연 평균 강수량은 1,105 mm, 평균 기온은 12.2 °C이다. 참고로 남한은 위도 33.3°~38.2°에 걸쳐있어 두 유역 모두 비교적 북쪽에 위치함을 알 수 있다. 평균 표고 역시 255.5 m로 남한의 평균치에 비해 다소 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 대상 유역의 위치를 지도상에 표시한 것이다.

3.2 임상도에 나타난 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 변화

임상도는 산림청에서 제작하는 지도로, 산림의 분포를 나타낸다. 임상도는 2010년 이전에 제작된 저해상도 임상도와 2010년 이후 제작된 고해상도 임상도로 구분할 수 있다. 현재 일시적으로 자료 제공이 중단된 1990년대 자료의 3차 임상도를 제외한 나머지 시기의 자료는 모두 웹에서 열람 및 이용이 가능하다. 참고로 2010년 이전 임상도에선 임상 종류 외에도 임상코드, 경급, 영급, 밀도 등의 정보가 함께 제공된다.

2010년 이후의 임상도에서는 토지이용, 산림(forest), 임종(type), 임상(forest type), 수종(species), 경급(diameter at breast height (DBH) class), 영급(age class), 수관밀도(crown density)까지 총 8개의 정보가 제공된다. 토지이용은 해당 지역이 산림인지 비산림 인지를 구분하는 것이고, 산림은 해당 지역이 임목지(stacked forest land)인지 무림목지(unstacked forest land)인지를 구분하는 것이다. 임종은 인공림(artificial forest)/천연림(natural forest) 여부를 구분하는 것이고, 임상은 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림을 구분한 것이다. 수종은 구체적으로 나무의 종류를 나타내며, 경급은 주림목의 평균흉고직경에 대한 정보이고, 영급은 주림목의 평균임령급을 나타낸다. 수관밀도는 주림목의 수관점유밀도를 나타낸다. 임상코드의 경우, 2010년 이전의 임상도와 가장 크게 달라진 부분 중 하나이다. 이전의 임상도에서는 임상과 수종이 섞여 있었으나, 2010년 이후의 임상도에서는 임상코드와 수종코드를 따로 구분한 것이다.

임상도의 임상코드는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림, 소나무림 등을 비롯한 27개 항목으로 구분되어 있다. 참고로, 침엽수림과 침엽수림의 하위 수종인 소나무림, 낙엽송림 등이 따로 정의되어

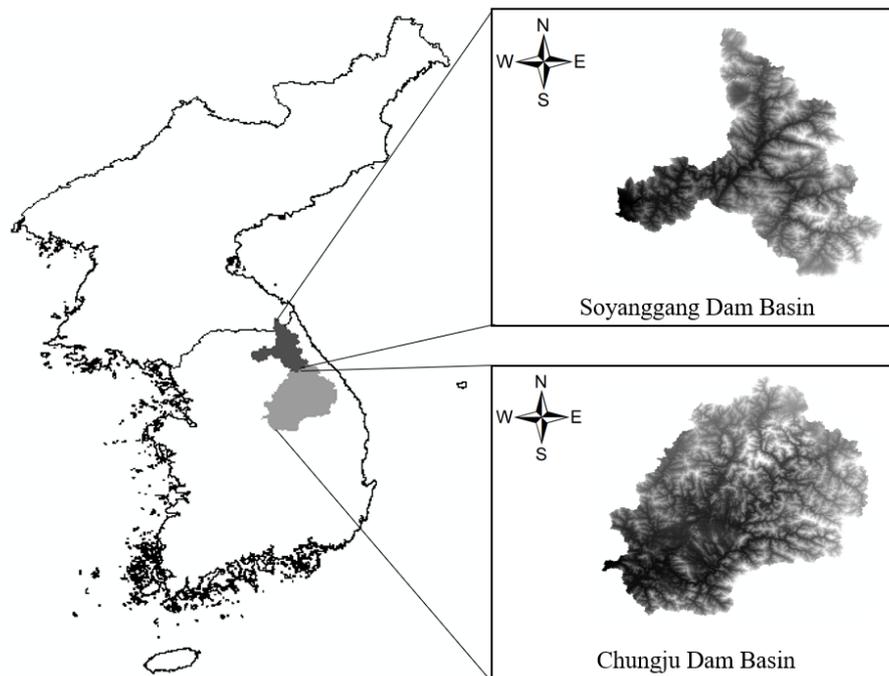


Fig. 3. Location of the two target basins in this study

있으며, 활엽수림의 경우에도 마찬가지로 참나무림, 밤나무림, 삼나무림 등의 항목이 별도로 정의되어 있다. 침엽수 인공림, 활엽수 인공림이나 소나무 인공림 등을 포함한 인공림도 4개의 항목으로 정의되어 있다. 특이한 사항으로, 이립목지, 황폐지, 벌채적지, 임간나지, 제지 등 무림목지에 해당하는 항목 또한 정의되어 있으며, 죽림이나 목장, 경작지, 수체 또한 임상도의 항목으로 정의되어 있다. 본 연구에서는 침엽수림과 소나무림, 소나무 인공림, 잣나무림, 낙엽송림 등 침엽수림에 해당하는 수종을 모두 침엽수림으로 분류하였고, 활엽수림의 경우에도 마찬가지로 활엽수림에 해당하는 모든 수종을 활엽수림에 포함시켜 이용하였다.

본 연구에서는 1980년대 이후를 대표하는 2차, 4차, 5차 및 6차 임상도를 이용하였다. 이 중 2010년에 마무리된 5차 임상도 지는 1:25000의 축척으로 제작되었고, 이후 6차 임상도는 축척 1:5000으로 제작되었다. 해상도로 따진다면 6차 임상도가 이전 것들의 25배에 달하는 것이다. 이들 임상도를 이용하여 추출한 연구 대상 지역의 임상 비율은 Fig. 4와 같다.

위 그림에서 살펴볼 수 있는 것처럼 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율 변화는 일관되지 않는다. 먼저, 축척이 크게 달라진

최근 것을 제외하고 살펴보기로 하자. 침엽수림의 경우, 충주댐 유역에서의 비율이 소양강댐 유역에서의 비율보다 대략 15% 이상 크다. 그러나 그 변화 경향은 감소 후 증가로 유사하다. 이에 반해 활엽수림은 충주댐 유역에서의 증가경향과 소양강댐 유역에서의 감소경향으로 대비된다. 1980년대 15% 정도의 차이에서 2008년에는 5% 이내의 차이로 줄어들었다. 혼효림의 경우는 두 유역에서 모두 증가경향을 보인다. 증가폭은 소양강댐 유역에서 훨씬 커서 1980년대 5% 이내의 차이에서 2008년대에는 10% 이상의 차이로 확대되었다.

그러나 2019년 임상도의 결과는 이러한 경향을 완전히 뒤집는 것이다. 충주댐 유역의 침엽수림 감소와 소양강댐 유역의 증가로 두 유역 간 차이가 갑자기 5% 이내로 줄어들었다. 활엽수림의 증가가 급격하여 두 유역에서 모두 거의 20% 가까운 증가를 보였다. 과거 꾸준한 감소세를 보이던 소양강댐 유역에서도 동일한 증가가 나타났다는 점도 특이하다. 마지막으로 두 유역에서 모두 꾸준한 증가세를 보이던 활엽수림의 비율이 급격히 하락하여 10%대로 떨어진 것은 충격적이다. 충주댐 유역의 경우 20% 정도의 하락을 소양강댐 유역에서는 30% 정도의 하락이 나타났다.

이러한 변화를 정상적이라고 판단하는 것은 무리이다. 무엇보다

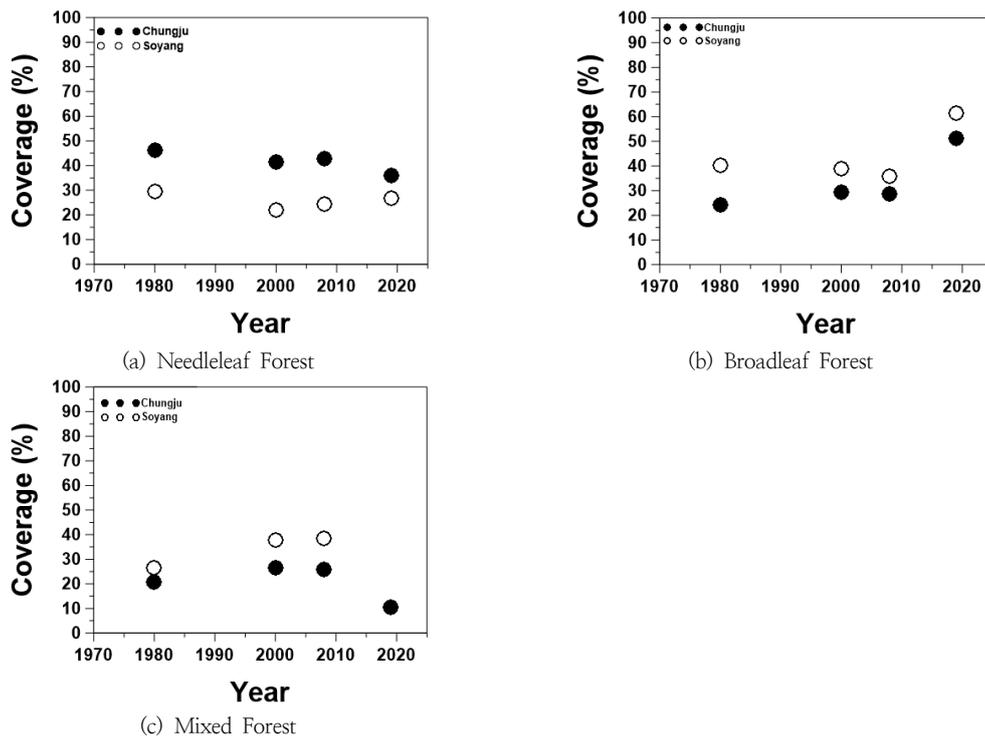


Fig. 4. Comparison of forest ratio according to forest types

Table 5. Changes in forest type ratio shown in the forest type map for each period

Basin	Soyang river dam basin			Chungju dam basin		
	Needleleaf forest	Broadleaf forest	Mixed forest	Needleleaf forest	Broadleaf forest	Mixed forest
1980	29.3%	40.2%	26.4%	46.20%	24.20%	20.80%
2000	21.8%	38.9%	37.9%	41.40%	29.20%	26.50%
2008	24.4%	35.8%	38.5%	42.70%	28.60%	25.70%
2019	26.6%	61.5%	10.5%	35.90%	51.30%	10.30%

축적의 변화로 인한 해상도의 영향이 크게 반영되어 있다고 판단되며, 또한 과거 큰 축적을 사용함에 따른 불확실성도 존재할 것이다. 위 그림과 같이 도출한 결과는 따로 표로 정리하였다(Table 5). 이 표의 내용은 이후 본 연구의 추정결과와 비교에 활용될 것이다.

4. 임상도 축적 변화에 따른 임상 비율의 불확실성 평가 및 추세분석

4.1 축적 변화를 반영한 평가

2019년 임상도의 축적을 기준으로 과거 임상도 임상 비율의 불확실성 평가는 표 3의 결과를 이용하여 수행하였다. 이 결과는 Fig. 6에 붉은색의 오차막대(error bar) 형식으로 제시되어 있다. 먼저, 침엽수림의 비율을 살펴보면, 유도한 오차막대의 범위 안에 2019년 침엽수림의 비율이 포함되어 있다는 점이 고무적이다. 오차막대의 구간이 상대적으로 추정치의 위쪽에 위치하고 있어,

2019년의 비율이 보다 참값에 가까운 것이라고 추정할 수 있다. 이 결과를 놓고 보면 소양강댐이나 충주댐에서 그 비율의 변화가 뚜렷하다고 판단하기는 어렵다.

활엽수림의 경우에도 유도한 오차막대의 범위 안에 2019년 활엽수림의 비율이 포함되어 있기는 하다. 그러나 과거의 비율과 2019년의 비율 차이가 너무 커서 정상적인 판단이 서지 않는 문제가 발생한다. 이는 혼효림의 경우에도 마찬가지이다.

이러한 문제는 추가로 2019년의 자료에 대해 해상도 감소를 적용하여 어느 정도 해소할 수 있다. Fig. 6에 추가한 검은색 오차막대는 2019년 자료의 해상도를 25배 감소시키는 경우(과거 자료의 해상도와 일치시키는 경우)의 불확실성을 Table 4의 결과를 이용하여 유도한 결과이다. 이 결과를 보면 침엽수림과 활엽수림의 오차막대는 아래 방향으로, 혼효림의 오차막대는 위 방향으로 설정된 것이 나타난다. 결과적으로 침엽수림, 활엽림의 비율은, 실제로 그 비율의 극단적인 변화가 없는 이상, 과거 저해상도에서 추정된 값이 현재 고해상도에서 추정된 값보다 더 커질 수 없다는 것을 의미한다. 반대로, 혼효림의 비율은 현재

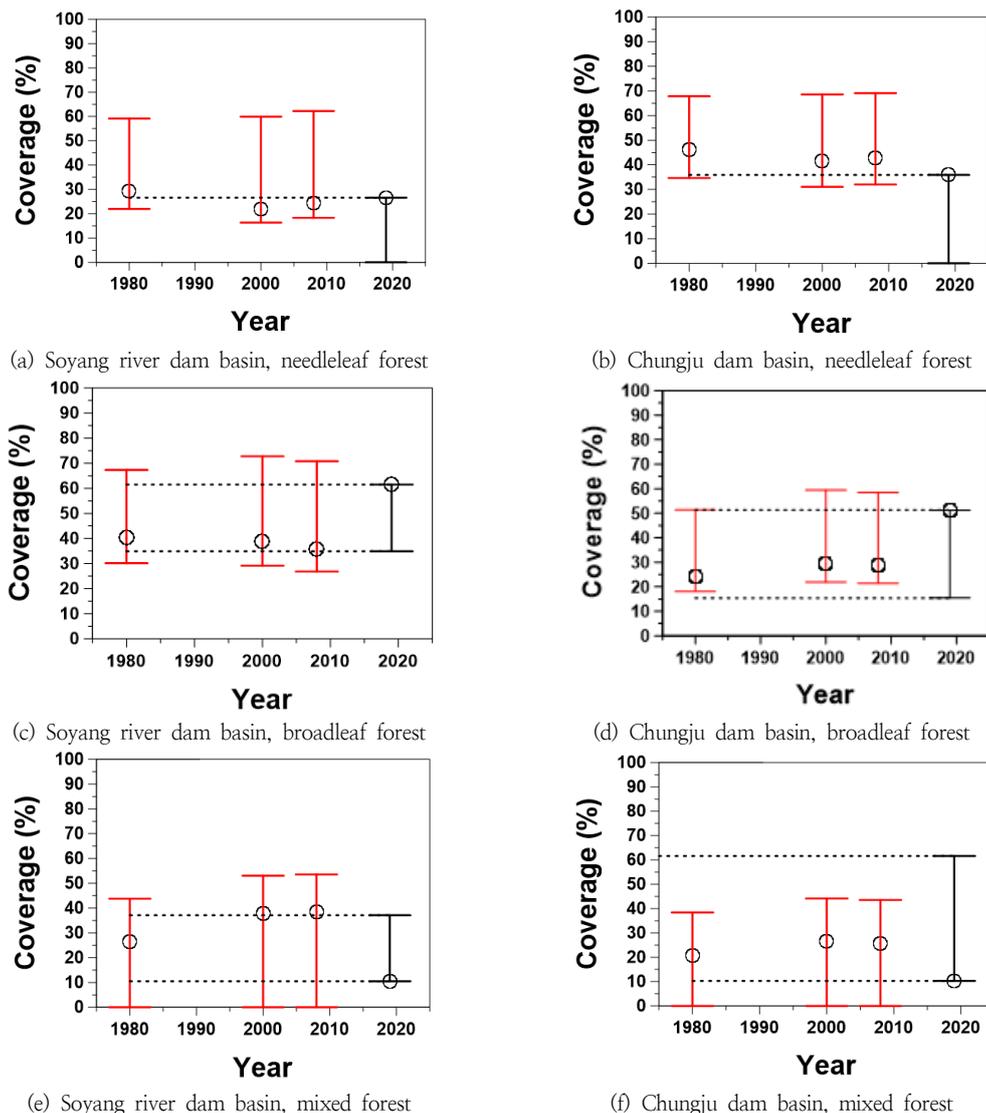


Fig. 6. Comparison of estimated forest type ratio ranges of different forest types

고해상도의 비율보다 작아질 수는 없다는 것을 의미한다.

이를 근거로 과거 식생비율의 신뢰도를 판단해 볼 수 있다. 먼저, 충주댐 유역의 침엽수림 비율은 꾸준히 약간 과대 추정된 측면이 있으며, 소양강댐의 경우는 약간의 변동이 있지만 적절하게 추정되었다고 판단할 수 있는 것이다. 그러나 활엽수림과 혼효림의 비율은 두 유역에서 모두 더 극적인 차이가 있다. 먼저, 소양강댐 유역에서 활엽수림의 비율은 과거 상당히 작게, 혼효림의 비율은 반대로 상당히 크게 산정되었던 것으로 보인다. 특히, 해상도의 감소에 따라 유도된 오차 구간 경계에 걸치거나 벗어나는 과거의 추정치는 현실적이지 못하다. 이에 반해 충주댐 유역에서는 이러한 심각한 문제까지는 발생하지 않았다. 그러나 사실 충주댐 유역의 경우도 마찬가지이다. 오차막대의 범위가 훨씬 넓게 추정되어 과거 추정치의 문제가 부각되지 않았을 뿐이지 두 유역 모두에 유사한 문제가 있어 보인다.

4.2 임상 비율의 변화 평가

앞서 살펴본 내용은 소양강댐 유역 및 충주댐 유역의 임상 비율 변화 평가에 심각한 영향을 미친다. 축적(해상도)의 변화를 고려하지 않고 임상 비율의 변화를 판단하거나 평가한다는 것은 매우 위험한 일임을 판단할 수 있었다. 공교롭게도 두 유역에서의 임상 비율의 변화는 일관성이 없었고 그러한 차이가 마치 두 유역의 차이인 것처럼 평가될 여지도 있었다.

결과적으로 보면 두 유역의 임상 비율에 유의한 변화가 있다고 판단할 근거는 없어 보인다. Fig. 6에 제시하고 있는 것처럼 두 유역에서 침엽수림의 비율 변화가 나타나고 있다고 판단하기 어렵다. 과거의 변화 추세도 이를 뒷받침한다. 만일 2019년의 침엽수림 비율을 가지고 그 변화 경향을 판단한다면 두 유역은 정확히 반대의 추세가 된다. 이런 판단이 적절하지는 않을 것이다.

2019년의 활엽수림의 비율이 이전의 비율에 비해 극단적으로 큰 것은 사실이다. 그러나 이 값은 충분히 가능한 값을 이미 증명한 바 있다. 과거 활엽수림의 비율이 뚜렷한 경향이 없다고 판단한다면 2019년의 활엽수림 비율 추정치가 과거에도 그대로 유지되었다고 판단하는 것이 보다 합리적이다. 소양강댐 유역의 감소, 충주댐 유역의 증가라고 판단할 여지가 전혀 없는 것은 아니지만, 이러한 변화는 2019년의 추정치에 비하면 무의미한 그저 미미한 수준이다. 혼효림에 대한 평가는 활엽수림에 대한 평가와 동일하다.

결론적으로 두 유역에서 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율 변화는 없었다고 보는 것이 합리적이다. 과거 침엽수림의 비율 판단은 어느 정도 신뢰도가 있어 보인다. 그러나 활엽수림이나 혼효림의 비율 판단은 현재와는 상당히 다르며, 신뢰도도 떨어진다고 판단할 수 있다.

4.3 한반도에서의 임상 비율 변화

본 연구에서는 우리나라에서 수행된 임상 비율의 변화와 관련된 연구를 수집하고 그 경향을 비교하였다. 연구의 대상지역도 다르고 또한 연구의 대상 시점이 달라 일관된 비교 또는 경향 파악은 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 한반도에서 나타나고 있는 임상 비율 변화의 시-공간적 경향을 파악하는 데는 도움이 될 것이다. 특히

각 연구의 대상 시점이 대략 1980~2000년 사이를 포함하고 있어 각 연구에서 제시하고 있는 추세가 지역별로 어떻게 다른지를 확인하는 데도 도움이 될 것이다. Table 6은 임상 비율의 검토를 위해 수집한 선행 연구의 대상 지역, 조사 기간 등을 정리한 결과이다.

먼저, 전국적인 임상비율의 변화는 국립산림과학원(NIFOS, 2020)에서 발간한 ‘2020 한국의 산림자원’에서 살펴볼 수 있다. 본 연구에서의 연구기간과 일치하는 기간으로 한정할 경우 침엽수림은 1980년에 49.5%에서 2020년 36.9%로 12.6% 감소한 것으로 나타난다. 반대로 활엽수림은 1980년 17.5%에서 2020년에는 31.8%로 14.3% 증가한 것으로 나타난다. 혼효림의 변화는 크지 않은데 1980년 28.9%에서 2020년에는 26.5%로 2.4% 감소하였다. 그러나 임상비율은 전국적으로 균일하지 않으며, 예를 들어, 강원도의 경우에는 활엽수림의 비율이 높고 반대로 경상북도의 경우에는 침엽수림의 비율이 더 높게 나타난다.

지역적인 임상 비율 변화에 대한 연구도 몇몇 확인할 수 있다. 먼저, Jang and Kwon (2007)은 다중시기의 Landsat 위성영상을 이용하여 한반도의 남서해안 지역인 전라남도의 완도군, 해남군, 강진군, 장흥군, 보성군, 순천시, 광양시, 여수시를 대상으로 임상 변화를 조사하였다. 연구방법은 조사 기간은 1989년부터 2003년 지 14년 정도이다. 위성영상 자료는 수치임상도와 고해상도 항공사진을 이용하여 보정하였고, 보정된 자료를 이용하여 각각 임상 비율을 추정하였다. 그 결과 침엽수림은 63.5%에서 49.3%로 14.2%가 감소한 것으로 나타났다. 반대로 활엽수림은 20.6%에서 23.7%로 3.1% 증가를, 혼효림은 15.9%에서 27.0%로 11.1% 증가한 것으로 나타났다.

유사한 연구는 충청남도 지역으로 대상으로도 수행되었다. Kim and Jang (2012)은 충청남도 해안가 지역 3개 시(보령시, 서산시, 당진시) 및 3개 군(서천군, 홍성군, 태안군)을 대상으로 임상 변화를 조사하였다. 조사 방법은 Jang and Kwon (2007)에서와 동일하다. 분석 시기는 영1984년, 1988년 및 2010년이다. 연구 결과를 보면, 침엽수림의 비율은 1984년에 70.6%, 1988년에는 69.0%였으나, 2010년에는 55.0%로 총 15.6%가량 감소한 것으로 나타났다. 반대로 활엽수림의 경우는 1984년 9.6%에서 2010년 17.7%로 8.1% 증가하였고, 혼효림 역시 19.8%에서 27.3%로 7.5% 증가였다.

마지막으로, Jang and Lee (2013)는 강원도 지역(홍천군, 횡성군, 평창군, 영월군, 정선군, 양양군과 강릉시, 동해시)을 대상으로 임상 비율의 변화를 파악하였다. 참고로 평창군, 영월군, 정선군은 충주댐 유역의 면적에도 포함되는 면적이며, 비율로는 충주댐 유역의 57%를 차지한다. 조사 기간은 1988년, 1999년, 2009년으로 10년 단위로 분석하였다. 조사 방법은 Jang and Kwon (2007)에서와 동일하다. 그 결과 침엽수림의 비율은 1988년에 49.0%, 2010년에는 41.9%로 약 20년간 총 면적의 7.1%만큼 감소한 것으로 나타났다. 반대로 활엽수림은 1988년에는 27.9%, 2010년에는 32.3%로 20여 년간 4.4%가 증가하였다. 혼효림의 경우에는 1988년에는 23.1%였으나 2010년에는 25.8%로 2.7% 증가한 것으로 나타났다. 이상의 결과는 충주댐 유역에서의 과거 비율과 유사한 측면이 있다. 그러나 해상도가 향상된 최근의

Table 6. Target area and research period of previous research

Researcher	Target area	Research period
Jang and Kwon (2007)	Jeollanam-do (Wando-gun, Haenam-gun, Gangjin-gun, Jangheung-gun, Boseong-gun, Suncheon-si, Gwangyang-si, Yeosu-si)	1989 - 2003
Kim and Jang (2012)	Chungcheongnam-do (Seocheon-gun, Boryeong-si, Hongseong-gun, Seosan-si, Taean-gun, Dangjin-si)	1981 - 2009
Jang and Lee (2013)	Gangwon-do (Hongcheon-gun, Hoengseong-gun, Pyeongchang-gun, Yeongwol-gun, Jeongseon-gun, Yangyang-gun and Gangneung-si, Donghae-si)	1988 - 2010
NIFOS (2020)	Total area of South Korea	1974 - 2020

비율과는 상당한 차이를 보인다.

이상과 같은 연구의 결과는 기본적으로 본 연구의 결과와는 크게 다르다. 대상 지역이 다르므로 다른 결과가 나오는 것은 어찌 보면 당연한 것일 수도 있다. 충주댐 유역이나 소양강댐 유역에 그대로 적용될 수 없다는 것은 자명하다. 그러나 충주댐 유역과 상당히 중복되는 지역의 연구결과와도 다른 특성을 보인다는 것에는 보완된 설명이 필요하다. 본 연구에서는 이 결과가 과거 임상도에서 유도된 결과와 유사한 점에도 주목하였다. 즉, 이 연구에서 자료보정에 사용된 것이 수치임상도임을 고려하면, 도출된 결과가 수치임상도의 결과와 유사하게 나타나는 것은 어찌보면 당연한 일이다. 만일 최근의 임상도를 가지고 보정한 정보를 이용하였다면 다른 결과가 유도되었을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 임상도가 주어진 축적으로 제작되고, 또한 그 축적이 변함으로써, 결과적으로 해상도가 변함으로써 발생하는 문제를 검토해보았다. 저해상도의 자료가 가지고 있는 불확실성, 고해상도의 자료(작은 축적의 자료)를 저해상도(큰 축적의 자료)로 만들어 사용하는 경우의 불확실성을 정량화하였다. 이러한 분석을 토대로 1980년대 이후 40여 년간의 소양강댐 및 충주댐 유역 임상 비율을 평가하였다. 평가 결과를 바탕으로 임상 비율의 추세 분석을 수행할 경우 어떤 문제가 발생할 수 있는지 추가로 파악해보았다. 본 연구의 주요 결과를 요약해보면 다음과 같다.

첫째, 1980년 이후 가용한 임상도를 이용하여 충주댐 및 소양강댐 유역의 임상 비율 변화를 검토하였다. 축적이 바뀐 2019년 이전의 임상도만 고려하는 경우, 침엽수림은 충주댐 유역에서의 비율이 소양강댐 유역에서의 비율보다 약 15%가량 높았다. 변화 경향은 두 유역에서 유사한 형태로 나타났다. 활엽수림의 경우 충주댐 유역에서는 증가, 소양강댐 유역에서는 감소로 대비되는 경향을 보였다. 혼효림의 경우, 두 유역 모두 증가세를 보였다. 그러나 2019년 임상도를 고려하는 경우, 과거의 경향을 완전히 뒤집는 10% 이상의 급격한 변화가 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 임상도의 축적 변화에 의한 해상도 차이의 영향으로 판단된다.

둘째, 과거 임상도가 2019년의 임상도와 같은 고해상도로 바뀌는 경우에 대한 임상 비율의 불확실성(오차범위로 표현한 오차범위)을 추정하였다. 두 유역 모두 2019년의 임상 비율은 과거 임상도의 임상비율이 가지는 오차범위 안에 위치하는 것으로

나타났다. 그러나 침엽수림의 비율은 서로 유사한 수준임에 비해 활엽수림과 혼효림의 비율은 극단적인 차이가 나타났다. 즉, 과거 임상도의 활엽수림 비율은 과소추정, 혼효림의 비율은 과대추정된 것으로 판단되어, 이를 대푯값으로 적용하기에 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 결과적으로 2019년 자료와 과거 임상도의 정보를 함께 고려하여 임상 비율의 추세분석을 수행하는 것은 불가능한 것으로 나타났다.

다음으로, 2019년의 임상도를 과거의 축적으로 변환한다고 가정하여 불확실성을 추정하였다. 과거 임상비율을 검토한 결과, 충주댐의 침엽수림 비율이 오차범위를 약간 벗어나는 것으로 나타났다. 활엽수림이나 혼효림의 비율은 대체로 오차범위 안에 위치하는 것으로 확인되었다. 이 결과는 충주댐의 과거 침엽수림 비율이 과대평가되어 있다는 것을 의미한다. 활엽수림이나 혼효림의 비율은 소양강댐 유역에서는 오차범위의 경계에, 충주댐에서는 오차범위의 중간 정도에 위치하고 있어 두 유역 간 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 이러한 임상 비율의 불확실성을 고려하여 과거 40여 년간 두 유역에서의 임상 비율의 변화를 평가하였다. 과거 임상도의 임상 비율에 나타난 변화 경향 및 축적의 변화로 인한 불확실성(오차범위) 등을 함께 고려하였다. 아울러 가장 최근인 2019년 임상도의 임상 비율이 가장 참값에 가깝다고 가정하였다. 산림 수종은 주어진 면적에 생육하는 수종의 종류로 결정되므로, 사실 높은 해상도의 자료가 산림을 구성하는 수종에 대한 상세한 정보를 주리라는 것은 자명한 사실이다. 본 연구에서 사용한 자료보다 높은 해상도의 자료를 사용하면 다른 결과를 도출할 여지도 있으며, 다른 결론을 내릴 수도 있다. 다만, 본 연구에서 사용한 자료의 해상도의 범위 내에서는 2019년 자료의 해상도를 참값에 가깝다고 추정하는 것이 최선이었다. 결과적으로 두 유역에서는 임상 비율의 뚜렷한 변화가 없다는 결론을 내릴 수밖에 없었다. 임상 비율의 경우도 2019년 임상도의 수치를 기준으로 판단하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 과거 한반도 전체 및 일부 지역에 대해 수행한 임상비율의 변화 경향과는 다른 것이다. 대부분의 연구에서 침엽수림의 감소, 활엽수림의 증가 및 혼효림의 약간 증가 등을 보고한 바 있다. 그러나 이들의 연구가 위성영상 정보를 분석한 것이기는 하나 기본적으로 국내에서 가용한 임상도를 가지고 학습한 측면이 있다. 그에 따라 유도된 결과가 임상도의 추세를 따라가는 경향이 나타나는 것은 불가피한 측면이 있다고 볼 수 있다.

References

- Awessou, KGB, Peugeot, C, Rocheteau, A, Seguis, L, Do, FC, Galle, S, Bellanger, M, Agbossou, E and Seghieri, J (2017). Differences in transpiration between a forest and an agroforestry tree species in the Sudanian belt, *Agroforestry Systems*, 91, pp. 403–413.
- Brendel, O (2021). The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes, *Annals of Forest Science*, 78(2), p. 47.
- Brümmer, C, Black, TA, Jassal, RS, Grant, NJ, Spittlehouse, DL, Chen, B, Nestic, Z, Amiro, BD, Arain, MA, Barr, AG, Bourque, CP, Coursolle, C, Dunn, AL, Flanagan, LB, Humphreys, ER, Lafleur, PM, Margolis, HA, McCaughey, JH and Wofsy, SC (2012). How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems, *Agricultural and Forest Meteorology*, 153, pp. 14–30.
- Chen, J, Theller, L, Gitau, MW, Engel, BA and Harbor, JM (2017). Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States, *J. of Environmental Management*, 187, pp. 470–481.
- Chen, QW, Liu, MJ, Lyu, J, Li, G, Otsuki, K, Yamanaka, N and Du, S (2022). Characterization of dominant factors on evapotranspiration with seasonal soil water changes in two adjacent forests in the semiarid Loess Plateau, *J. of Hydrology*, 613, 128427.
- Farley, KA, Jobbágy, EG and Jackson, RB (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy, *Global Change Biology*, 11(10), pp. 1565–1576.
- Feng, B, Zhang, Y and Bourke, R (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models, *Natural Hazards*, 106(1), pp. 613–627.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forestry Department (Rome). (2010). *Global forest resources assessment 2010: Main report*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ghimire, CP, Lubczynski, MW, Bruijnzeel, LA and Chavarro-Rincón, D (2014). Transpiration and canopy conductance of two contrasting forest types in the Lesser Himalaya of Central Nepal, *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, pp. 76–90.
- Hong, SW, Park, MO and Koo, BH (2023). An Analysis of Hydrological and Ecological Characteristics of River Wetlands—Case Study of Wangjin District in Geumgang River. *J. of Wetlands Research*, 25(4), pp. 315–325.
- Jang, DH and Kwon, WT. (2007). The analysis of the vegetation according to the temperature changes using satellite imagery: A case in the southwestern coast, Korea, *J. of the Korean Geomorphological Association*, 14(1), pp. 67–75.
- Jang, DH and Lee, SH (2013). Analysis of Forest Type Changes for Vulnerability Assessment of Climate Changes in the Mountainous Regions of Gangwon-do, Korea, *J. of Climate Research*, 8(2), pp. 169–183.
- Jeon, S, Kim, J, Kim, Y, Jung, H, Lee, W and Kim, J (2015). Improvement of Forest Boundary in Landcover Classification Map(Level-II) for Functional Assessment of Ecosystem Services, *J. of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 18(1), pp. 127–133.
- Jeong, HY, Lee, WK, Nam, KJ and Kim, M (2013). Estimating the Change of Potential Forest Distribution and Carton Stock by Climate Changes—Focused on Forest in Yongin-City, *Climate Change Research*. 4(2), pp. 177–188.
- Jung, HE, Choi, SJ and Kim, SD (2024). Improving Monitoring Performance of VHI and Quantitative Assessment of Vegetation Response to Meteorological Drought. *J. of Wetlands Research*, 26(4), pp. 344–355.
- Kang, S, Running, SW, Lim, JH, Zhao, M, Park, CR and Loehman, R (2003). A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 86(2), pp. 232–242.
- Kim, C, Kim, J, Hong, M, Song, C and Lee, W (2023). Prediction of the Future Distribution of Tree Species Based on the Representative Concentration Pathways (RCP) and Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Climate Change Scenarios in Korea, *J. of Climate Change Research*, 14(2), pp. 119–134.
- Kim, ES, Jung, BH, Bae, JS and Lim, JH (2022). Future prospects of forest type change determined from National Forest Inventory time-series data, *J. of Korean Society of Forest Science*, 111(4), pp. 461–472.
- Kim, JS and Jang, DH (2012). Analysing of forest types in Chungnam coastal area using multi-temporal satellite imagery and ASTER DEM data, *J. of the Korean Geomorphological Association*, 19(1), pp. 69–81.
- Korea Forest Service. (2021). *2020 Forest Basic Statistics*, Korea Forest Service.
- Lee, B, Kim, E, Lee, J, Chung, J and Lim, J (2018). Detecting Phenology Using MODISVegetation Indices and Forest Type Map in South Korea, *Korean J. of Remote Sensing*, 34(2-1), pp. 267–282.
- Li, G, Zhang, F, Jing, Y, Liu, Y and Sun, G (2017). Response of evapotranspiration to changes in land use and land

- cover and climate in China during 2001–2013, *Science of the Total Environment*, 596, pp. 256–265.
- Linquist, B, Snyder, R, Anderson, F, Espino, L, Inglese, G, Marras, S, Moratiel, R, Mutters, R, Nicolosi, P, Rejmanek, H, Russo, A, Shapland, T, Song, Z, Swelam, A, Tindula, G and Hill, J. (2015). Water balances and evapotranspiration in water- and dry-seeded rice systems, *Irrigation Science*, 33, pp. 375–385.
- McCulloch, JS and Robinson, M (1993). History of forest hydrology, *J. of Hydrology*, 150(2–4), pp. 189–216.
- National Geography Information Institute. (2020). *The National Atlas of Korea II*. National Geography Information Institute, Ministry of Land Infrastructure and Transport.
- National Institute of Forest Science (2020). *2020 Korean Forest Resources*.
- Ning, T, Li, Z, Feng, Q, Chen, W and Li, Z (2020). Effects of forest cover change on catchment evapotranspiration variation in China, *Hydrological Processes*, 34(10), pp. 2219–2228.
- Oki, T and Kanae, S (2006). Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313(5790), pp. 1068–1072.
- Peters, EB, Hiller, RV and McFadden, JP (2011). Seasonal contributions of vegetation types to suburban evapotranspiration, *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1).
- Pyo, JG and Lee, SS (2016). *Alternative measures for tree species in forests in South Chungcheong Province to respond to climate change*, Chungnam Institute.
- Rana, G, De Lorenzi, F, Mazza, G, Martinelli, N, Muschitiello, C, and Ferrara, RM (2020). Tree transpiration in a multi-species Mediterranean garden, *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107767.
- Reinhart, KG, and Trimble Jr., GR (1962). Forest cutting and increased water yield, *J. American Water Works Association*, 54(12), pp. 1464–1472.
- Rothacher, J (1970). Increases in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest, *Water Resources Research*, 6(2), pp. 653–658.
- Schlesinger, WH and Jasechko, S (2014). Transpiration in the global water cycle, *Agricultural and Forest Meteorology*, 189, pp. 115–117.
- Sun, G, Zhou, G, Zhang, Z, Wei, X, McNulty, S and Vose, JM (2006). Potential water yield reduction due to forestation across China, *J. of Hydrology*, 328(3–4), pp. 548–558.
- Teuling, AJ, Hirschi, M, Ohmura, A, Wild, M, Reichstein, M, Ciais, P, Buchmann, N, Ammann, C, Montagnani, L, Richardson, AD, Wohlfahrt, G and Seneviratne, SI (2009). A regional perspective on trends in continental evaporation, *Geophysical Research Letters*, 36(2).
- Wang, T, Tang, X, Zheng, C, Gu, Q, Wei, J and Ma, M (2018). Differences in ecosystem water-use efficiency among the typical croplands, *Agricultural Water Management*, 209, pp. 142–150.
- Zhang, Y, Xia, J, Yu, J, Randall, M, Zhang, Y, Zhao, T, Pan, X, Zhai X and Shao, Q (2018). Simulation and assessment of urbanization impacts on runoff metrics: insights from landuse changes, *J. of Hydrology*, 560, pp. 247–258.