

조림지 개벌에 의한 빛환경 변화가 식생회복에 미치는 영향

Effects of Light Condition on the Vegetation Restoration by Clear Cutting in a Larch Plantation

박석곤¹ · 오구균² · 신현탁³

¹규슈대학교 열대농학연구센터, ²호남대학교 조경학과, ³경상남도산림환경연구원

서 론

빛은 수분과 함께 식물의 광합성 및 증산, 호흡작용에 큰 영향을 미치며, 엽록소와 같은 색소합성에 영향을 미쳐 생육과 생장에 제한을 가하는 결정적인 인자다. 또한 산림 내에 수관 갭(gap)이 생기면 일사량 및 광량 증가로 지온이 상승해 선구수종의 매토종자들이 발아해 급격히 성장하여 초기식생을 형성한다(Washitani and Takenaka, 1986). 이 때문에 산림내의 빛환경 변화는 식물생장 및 식생변화에 큰 영향을 미친다. 따라서 산림생태계에서 식물의 생육 및 생장, 식생천이 등을 예측하는데 빛환경 평가가 중요하다.

하지만, 기존의 파장 555nm를 중심으로 밝기를 표현하는 상대조도(relative illumination)는 식물 생육공간의 빛환경을 평가하는 것은 부적절한 것으로 알려져 있다(Muraoka and Kachi, 2003). 따라서 최근에 광센서를 이용해 직접적으로 광합성유효광량자밀도(PPFD, Photosynthetic photon flux density)를 측정하거나 천공사진(天空寫眞)을 이용해 빛환경을 간접적으로 평가하는 방법이 제안되었다(Frazer et al., 1999). 특히 천공사진을 이용한 평가법은 간편하게 산림 내를 어안(魚眼)렌즈로 촬영해 이 화상을 컴퓨터로 신속하게 해석할 수 있어 그 이용가치가 점점 높아지고 있다.

한편, 인공 조림지를 천연림으로 갱신하기 위해서 개벌, 간벌 등의 임학적인 수법이 종종 이용되고 있다. 이러한 수법은 산림내의 환경요인에 변화를 주며, 환경요인 중에 특히 일사량 및 광량 등의 빛환경에 크게 영향을 주며, 이로 인해 산림내 토양표면의 온도와 토양함수량 등도 함께 달라질 것이다. 따라서 이러한 수법에 따른 산림내의 빛환경 변화가 식생에 어떠한 영향을 미치는지 직접적인 상관성을 파악하는 것이 중요하다. 그러나 빛환경 변화와 식생천이

또는 식물상의 상관성을 밝히는 연구가 국내에서는 미비한 상태다.

따라서, 본 연구에서는 일본잎갈나무 조림지에서 개벌에 따른 빛환경 변화를 평가하고, 이 빛환경 변화가 식생회복에 미치는 영향을 파악하고자 했다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

연구대상지는 지리산국립공원 노고단 일원으로서 1983년 서울대학교 남부학술림에서 녹화를 목적으로 일본잎갈나무와 잣나무를 조림한 지역(면적: 약 1.75ha)이다. 이 조림지는 경관 및 생태학적으로 이질감을 주어, 지리산국립공원 남부사무소에서 2007년에 등고선의 수평방향과 이에 직각이 되는 상하방향으로 각각 폭 20m로 교목층, 아교목층의 일본잎갈나무와 잣나무를 대상으로 벌채를 실시하였다. 벌채면적은 약 0.48ha(수평방향: 길이150m×폭20m, 수직방향: 길이90m×폭20m)로서 제거된 잣나무와 일본잎갈나무의 수목량은 총 422주이었다.이 지역은 해발 1400m의 아고산대로 인근에 신갈나무군락, 구상나무군락, 철쭉꽃군락 등이 분포하고 있다.

2. 현지조사 및 데이터 분석

조사지의 빛환경 이외의 환경요인을 가능한 동일하게 설정하기 위해서 일본잎갈나무림(조림지)과 그 벌채지(개벌지) 그리고 두 곳의 경계부(주연부)에 방형구를 설정해 식생 조사와 빛환경 등을 조사하였다.

각 조사지는 해발 1365-1426m의 아고산대로 남서사면에

표 1. 조사지의 개황

Attribute	Clear cutting	Edge	Plantation
Altitude(m)	1413-1416	1425	1365
Aspect	S188W	S210W	S180W
Slope(°)	3-15	15	4

위치해 있으며, 이 지역은 완만한 지형을 이루고 있다(표1). 낙엽층 두께(0.6-1.8cm)와 pH(4.1-5.1), 유기물함량(2.3-5.7%), 전질소(1.0-1.8%), 전기전도도(0.2-0.3ds/m) 등의 토양화학적 특성은 조사지별로 큰 차이가 없었다. 각 조사지에서 2010년 7월에 5m×5m 크기의 방형구를 세 곳에 설정해 높이 0.6m이하의 하층식생을 조사하였다. 하층식생은 Braun-Blanquet의 우점도 7등급을 변형한 Dierssen(1990)의 9등급을 적용하여 우점도와 피도를 조사했다.

각 조사지에서의 빛환경을 평가하기 위해서 디지털카메라(Coolpix5400, Nikon Inc.)와 화각(시야각)이 180도인 어안렌즈(FC-E9, Nikon Inc.)를 이용해 임상 0.6m의 높이에서 수직방향으로 칼라 천공사진을 식생조사지마다 촬영하였다. 이 사진을 빛환경 분석프로그램인 Gap Light Analyzer Version 2.0을 이용하여 수관개방율(canopy openness)과 광합성광량자속밀도(rPPFD)를 추정했다. 조사지의 상대광합성광량자속밀도(rPPFD)는 태양광이 전혀 차단되지 않은 공간의 PPFD값에 대한 상대값으로 나타냈다. 각 식생조사지의 인근에서 0.5m×0.5m 크기의 소방형구를 3곳에 설정해, 이 방형구에 출현한 모든 식물체를 뿌리까지 채취하여, 잎과 이외 부분으로 나누어 각각의 건중량을 측정하였다.

종다양도지수는 Shannon-Wiener수식을 이용했고, 종풍요도는 Margalef수식을 이용하여 계산했다. 각 조사지의 수관개방율, rPPFD, 식물종수, 목본종수, 건중량, 피도 등의 통계적 차이는 분산분석과 Turkey's test로 유의성을 검정하였다. 또한 이곳의 빛환경(수관개방율, rPPFD)과 식물종수, 피도, 건중량간 상관관계분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 빛환경 변화

세 곳의 조사지에서 촬영한 천공사진을 분석프로그램상에서 그림1과 같이 흑백으로 이원화하였다. 이 화상의 흑색은 수목 등의 차폐물이고 백색은 천공(하늘)을 의미하며,

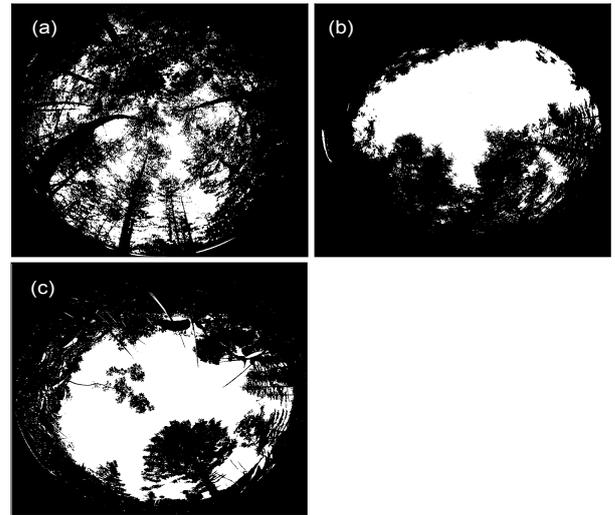


그림 1. 조림지(a)와 주연부(b), 개별지(c)의 임상에서 촬영한 천공사진을 분석프로그램상에서 이원화된 화상 (흑색: 차폐물, 백색: 하늘)

백색 부분이 넓을수록 수관개방율이 높을 것으로 판정된다. 분석결과, 조사지인 개별지의 수관개방율이 유의적으로 가장 높았고($p<0.001$), 다음으로 주연부, 조림지 순이었다(그림2).

수관개방율과 rPPFD는 정의 상관관계(Machado and Reich, 1999)로 수관개방율의 상승에 따라 rPPFD도 높아진다. 본 조사에서도 수관개방율이 높은 개별지에서 rPPFD가 다른 조사지에 비해 유의적으로 가장 높았다($p<0.001$). 하지만, 그림 2에서 보듯이 rPPFD의 증가율(기울기)이 수

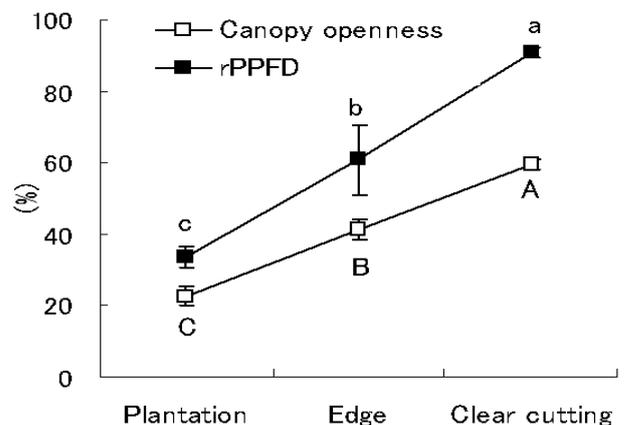


그림 2. 각 조사지별 수관개방율과 상대광합성광량자속밀도(rPPFD)

관개방울보다 크게 상승한 것을 알 수 있다. 이것은 수관개방울이 rPPFD에 크게 영향을 미치지, 조사위치, 계절, 경사, 주위 차폐물 등의 다른 요인들도 rPPFD에 영향을 미치기 때문이다(Elliott *et al.*, 1993).

수관이 폐쇄된 조림지의 rPPFD가 34%정도 임상에 도달하는 것에 비해 교목층의 벌채로 수관이 열린 개별지는 90%이상의 직사광과 산란광이 임상에 도달할 것으로 추정된다(그림2). 이처럼 벌채에 의한 임상의 급격한 빛환경 변화는 토양수분과 미환경 등의 변화와 함께 식물상 및 식생 변화 등에 크게 영향을 미치게 된다(Zhu *et al.*, 2008).

2. 하층식생과 빛환경과의 관계

하층식생에서의 출현종수는 조림지에서 유의적으로 가장 높았다. 하지만 개별지와 주연부의 종수는 유의적으로 차이가 없었으며, 목본종수는 조사기간 유의적 차이가 없었다(그림3a). 또한, 종다양도와 종풍요도를 나타내는 Shonnon-Whiener지수와 Margale지수는 조림지가 가장 높았고, 다음으로 주연부, 개별지순이었다(그림3b). 피도와 현존량을 살펴보면, 상술한 결과와 다르게 개별지와 주연부의 피도는 조림지보다 유의적으로 높은 것을 알 수 있다(그림 4a). 식물체의 현존량인 전체 건중량은 개별지가 조림지보다 유의적으로 높았고, 잎건중량은 개별지가 조림지와 주연부보다 유의적으로 높았다(그림4b). 빛환경 요인(수관개방울과 rPPFD)과 식물종수, 건중량, 피도간 상관관계 분석결과는 표2와 같다. 수관개방울과 rPPFD는 잎건중량과 전체 건중량간 정의 상관관계를 보였으나, 빛환경 요인과 식물종수 사이에는 부의 상관관계였다. 또한, 피도 및 잎건중량은 식물종수간 높은 부의 상관관계를 보였다. 한편, 빛환경 이외의 환경요인이 하층식생에 미치는 영향을 알아보기 위해서 낙엽층 두께, 토양화학적 특성(낙엽층 두께, pH, 유기

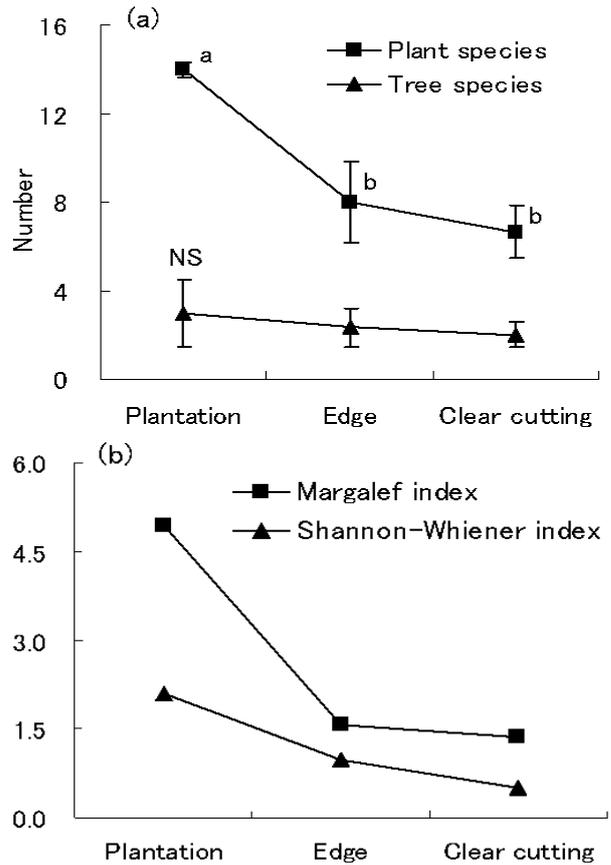


그림 3. 조사지별 하층식생의 출현종(a) 및 종다양도와 종풍요도(b).

물함량, 전기전도도 등)과 식생(종수, 건중량, 피도)과의 상관관계를 분석해 보았으나, 유의적 상관관계가 보이지 않았다.

이 결과들을 종합해 보면, 일본잎갈나무림 개별에 따른 수관개방울의 증가와 함께 임내로의 광량 상승으로 인해 하층식생의 현존량과 피도는 조림지에 비해 증가했으나, 식물종수와 종다양성이 감소했다는 것을 알 수 있다. 또한,

표2. 빛 환경 요인과 식물종수, 식물체의 건중량, 피도 사이의 상관관계

	Canopy openness (%)	rPPFD (%)	Number of species	Leaf biomass (g)	Biomass (g)
rPPFD (%)	0.976**				
Number of species	-0.755*	-0.790*			
Leaf biomass (g)	0.882**	0.726*	-0.669**		
Biomass (g)	0.863**	0.742*	-0.457	0.809**	
Coverage (%)	0.561	0.616	-0.733**	0.561	0.370

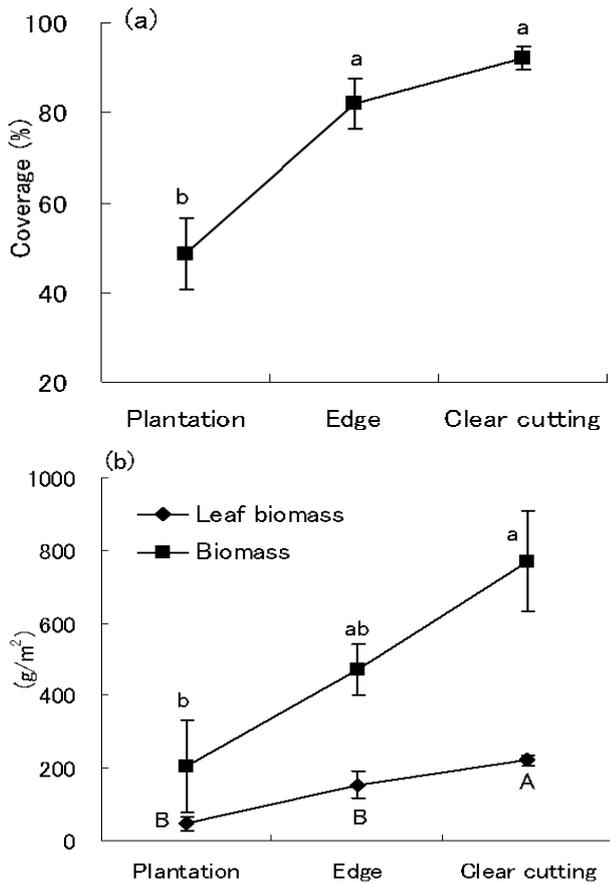


그림 4. 조사지별 피도(a)와 식물체의 건중량(b)

피도와 잎의 현존량 증가로 새로운 식물종의 유입 또는 발생이 방해될 것으로 보인다. 마지막으로, 개발에 따른 환경 변화에서 있어 다른 요인보다 빛환경 요인이 하층식생의 현존량과 식물종수에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

일반적으로 간벌이나 개발에 따른 임내 광량의 상승은 하층식생의 현존량을 증가시킨다. 또한, Zhu et al.(2008)는 일본잎갈나무의 조림지내에서 간벌에 의해 빛강도와 조도 시간의 상승으로 인해 무간벌지에 비해 하층식생의 종수 및 종다양도가 증가했다고 보고하였다. 그러나 본 조사지에서는 개발 3년경과 후에 조림지에 비해 개발지에 하층식생의 현존량은 증가했으나 식물종수와 종다양성이 줄어든 것으로 나타났다. Yahata(1993)에 따르면, 개발 등으로 하층식생 내에 직사광이 급증하면, 토양건조로 치수발생이 저해되고, 강한 직사광에 의해 성장장애 현상이 발생한다고 하였다. 이러한 이유로 벌채전 임내의 빛환경에 적응해 왔던

식물종은 사라졌을 것이고, 반대로 이러한 입사광량이 높은 환경에 생육이 적합한 양지성 식물종은 빠르게 유입되어 세력을 확장함에 따라 새로운 식물종의 유입이 방해된 것으로 보인다.

3. 식물종과 빛환경과의 관계

주요 식물종의 피도변화를 보면, 실새풀은 조림지와 주연부에서 피도가 낮았으나 개발지에서 급격히 증가하였다. 반대로 지리터리풀과 개발꽃은 조림지에 피도가 높았으나, 주연부와 개발지에서 거의 출현하지 않았다. 청사초의 피도가 거의 변하지 않았고, 미역줄은 주연부에서 피도가 가장 높았다. Ruben et al.(1999)은 개발에 따른 하층식생은 빛조건에 따라 민감하게 변하며, 이를 기초로 빛에 민감한 종(sensitive species, 개발지에서 우점도가 줄어들), 둔감한 식물종(insensitive species; 약간 줄어들거나 변화 없음) 그리고 광량 증가로 우점도가 증가한 강화종(enhanced species), 주연부에서 우점도가 늘어나는 주연부종(edge-enhanced)으로 구분하였다. 이 기준에 따라 조사지에 주요 식물종을 구분해 보면, 민감종은 지리터리풀과 개발꽃이며, 둔감종은 청사초, 강화종은 실새풀, 주연부종은 미역줄인 것으로 판단된다. 실새풀과 미역줄은 양지성 식물이며, 개발꽃은 음지성 식물, 청사초는 중용성 식물로 판단된다. 그러나 지리터리풀의 경우에는 주로 숲속 계곡부나 습윤지의 양지에 서식하는 것으로 보아(이창복, 1999) 개발에 의한 임상의

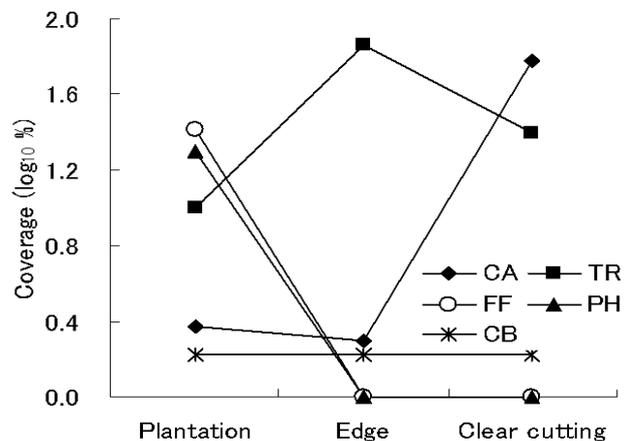


그림 5. 주요 식물종의 조사지별 피도 변화. CA: 실새풀, TR: 미역줄, FF: 지리터리풀, PH: 개발꽃, CB: 청사초.

빛환경 요인보다 토양수분에 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 이처럼 개벌에 따라 토양수분, 미환경 등의 환경요인이 하층식생에 크게 영향을 미치며, 특히 빛환경 조건에 따른 식물상이 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다.

개벌지에서는 벼과 다년생식물인 실새풀과 덩굴성 목본인 미역줄 등의 피도가 84.3%를, 주연부에서는 미역줄의 피도가 71.8%를 우점하였다(그림5). 조림지 벌채로 인해 광량 증가로 기존 조림지에 생육했던 식물종은 개벌지 환경에 적응하지 못하고 사라져 종다양도가 낮아진 것으로 보인다. 또한 새로운 식물종 유입이 있더라도 양지성 식물인 실새풀과 미역줄의 세력 급증으로 생육경쟁에서 밀릴 것으로 판단된다.

결론

개벌로 인한 빛환경 변화는 식물상 및 식물생장 등에 크게 영향을 미쳐, 입사광량이 높은 개벌지에서는 몇 종의 양지성 식물이 크게 우점하여 종다양성은 다소 떨어졌지만 현존량은 증가하였다. 개벌지는 일사량이 급증해 토양수분의 건조와 직사광에 의한 생장장애로 매토종자 발아 및 식물 초기생육에 악영향을 미쳐 종다양성이 떨어진 것으로 판단된다. 또한 아고산대의 열악한 기상환경 조건에서 개벌로 급격하게 임상환경을 변화시키면 이 환경에 적응한 몇종이 우점하게 되어 식생천이가 더딜 것으로 예상된다.

급격한 환경변화를 주는 개벌보다는 간벌로 점진적으로 임상의 빛환경을 변화시키는 것이 종다양성 회복과 함께 식생천이를 촉진시켜 인공 조림지를 자연식생으로 회복시키는 데 유리할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구의 현지조사에 국립공원관리공단 정승준, 대구수목원 김병도, 영남대 이명훈과 윤정원, 호남대 임동완 등이

도움을 주셨으며 이에 감사드립니다.

인용문헌

- Elliott, K.J., D.L. Loftis and K. Steinbeck(1993). Vegetation diversity after logging in the southern Appalachians. *Conserv. Biol.* 7:220-221.
- Frazer, G.W., C.D. Canham and K.P. Lertzman(1999) Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies. Millbrook. New York. 31pp.
- Machado, J. and P.B. Reich(1999) Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. *Can. J. For. Res.* 29:1438-1444.
- Muraoka, H. and N. Kachi(2003) Introduction to plant physiological ecology. Bun-ichi Sogo Shuppan Co. 319pp.
- Ruben, J.A., D.T. Bolger, D.R. Peart, M.P. Ayres(1999) Understory herb assemblages 25 and 60 years after clearcutting of a northern hardwood forest, USA. *Biol. Conserv.* 90:203-215.
- Washitani, I. and A. Takenaka(1987) Gap-detecting mechanism in the seed germination of *Mallotus japonicus* (Thunb.) Muell. Arg., a common pioneer tree of secondary succession in temperate Japan. *Ecol. Res.* 2:191-201.
- Yahata, H.(1993) Estimation of light regimes in a forest floor using photographs and the effect on seedling growth of several species of Dipterocarps in a tropical rain forest. *Jpn J. for. envir.* 35:10-19(in Japanese with English Summary).
- Zhu J., Z. Mao, C. Zhang, Q. Yan, and Z. Liu(2008) Effects of thinning on plant species diversity and composition of understory herbs in a larch plantation. *Front. For. China.* 3:422-428.
- 이창복 (1999) 대한식물도감. 향문사. 990pp.