

## 생장모니터링을 통한 임분변화에측 및 탄소흡수·저장량 평가<sup>1</sup>

손영모<sup>2</sup> · 이경학<sup>2</sup> · 김래현<sup>2</sup> · 서정호<sup>2</sup>

### Stand Development Estimate and Carbon Stocks/Removals Assesment using Stand Growth Monitoring<sup>1</sup>

Yeong Mo Son<sup>2</sup>, Kyeong Hak Lee<sup>2</sup>, Rae Hyun Kim<sup>2</sup> and Jeong Ho Seo<sup>2</sup>

#### 요 약

본 연구는 강원도 홍천군 운두령 일대에 설치된 잣나무 등 5개소 생장고정조사구를 대상으로 생장 변화를 구명하고, 탄소저장량 및 흡수량을 산정하여 운두령 산림관리에 기초적인 자료를 제공하고자 하였다. 임분생장변화는 유령림인 잣나무, 낙엽송, 소나무 임분에서 연년수고생장과 흉고직경생장이 점진적으로 진행되었으며, 그 외 임분은 이들보다는 생장율이 낮은 것으로 나타났다. 직경급 분포 및 직경변화 예측에 있어서는 신갈나무와 자작나무 임분의 직경급분포는 현재와 유사할 것으로 예측되며, 다른 수종은 상위 직경급으로의 변화가 많을 것으로 예측되었다. 2005년 말 현재 운두령 모델림 내 총탄소량은 5,974천 탄소톤이고, 2005년도 한 해 동안 산림의 생장에 따른 총탄소량은 166,174 탄소톤이며, 순탄소흡수량은 155,481탄소톤으로 전년 대비 2,736탄소톤(1.8%)이 증가하였다. 결과적으로 운두령모델림은 온실가스 측면에서 볼 때 순흡수원으로 작용하고 있으며, 그 순흡수량도 최근 조금씩 늘어나고 있는 경향을 보이고 있다.

#### ABSTRACT

This study looked into the change of tree growth of five forest growth monitoring plots which were set up at the Undulyeong Hongchungun Kangwondo, and was accomplished to provide the basic data for the forest management calculating carbon storage and absorption in the Undulyeong area. Annual height and DBH growth were slowly progressed in the *Pinus koraiensis*, *Larix kaempferi*, and *Pinus densiflora* stand which were at young stage, but the growth rates of the other stands were lower than those young stands. The diameter class of the mixed forest and *Quercus mongolica* and *Betula platyphylla* stand was predicted to be similar as it is and those of *Pinus koraiensis* and *Larix kaempferi* stands were predicted to move to the upper diameter classes because of rapid growth rates of the those stands. As

1. 접수 2006년 10월 26일, Received on October 26, 2006.  
2. 국립산림과학원 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea.

in the year 2005, total carbon storage of the Undulyeong model forest was increased by 155,000 TC (2.7%) compared with the previous year. During 2005, total carbon which was absorbed and stored according to growth of the forest was 166,174 TC and net carbon absorption (155,481 TC) increased by 2,736 TC (1.8%) compared with the previous year. Resultingly, the Undulyeong model forest is acting as a net sink and the net carbon absorption rate is slightly increasing recently.

**keywords** : carbon removals, net carbon absorption, stand growth monitoring, stand Development Estimate

## 서 론

임업경영과 산림사업에 있어 임목생산량, 임분 동태변화, 장래 수확량 예측, 성장모델개발 등은 의사결정을 위해 필수적으로 요구되는 자료들이며, 이러한 자료들을 획득하기 위해서는 성장모니터링 표준지 조사가 반드시 필요하다. 이와 같이, 정기적인 그리고 장기적인 모니터링은 현재 산림의 파악뿐만 아니라 미래 산림의 변화를 예측할 수 있는 기본 자료로 그 활용 가치가 매우 높다. 그러나 우리나라에서의 국가차원에서 관리하는 성장고정조사구는 국립산림과학원에서 관리하는 영구성장표준지 40여개소와 생태 관련 일부 고정조사구가 전부이며, 일부 대학에서 극소수가 운영되고 있는 실정이다.

고정조사구의 효과적인 설치 및 관리를 위해서는 국가차원에서 하나의 별도 시스템을 구축해야 할 필요가 있다. 여기서 말하는 시스템이란 컴퓨터 시스템 등으로 연상되는 간단한 조사설계나 데이터의 처리 등 협의의 내용이 아닌 조직 등 까지를 포함하는 보다 넓은 의미를 갖는다. 우리 현실에서 새롭게 성장에 대한 모니터링을 실시하기 위하여는 이를 전담하는 조직이 필요하지만, 이것이 여건상 채택될 수 없다면 다른 몇 가지 방안이 있다. 그중 하나가 국유림관리소를 이용하는 것이다. 이들 관할구역 내에 설치되는 고정조사구는 해당 관리소가 책임지고 조사하며, 조사된 자료는 Web상에서 입력하고, 이를 분석팀에서는 분석 및 결과 도출을 하며, 결과물은 다시 현지로 돌려보내는 일종의

feedback 시스템을 결성하는 것이다. 일선 관리소가 이런 역할을 할 수 없다면 지역에 있는 대학의 산림관련 학과에 위탁하는 방안도 고려해볼만 하다. 물론 이러한 조직을 일사분란하게 설치, 운영함은 쉬운 일이 아닐 것이다. 그러나 발상의 전환이 요구되고 있고, 행정계통에서 이를 받아들여 지혜를 모음으로서 가능할 것이다. 이렇게 고정조사구를 설치, 관리함으로써 산림에 관한 많은 정보가 획득될 것이며, 이 정보는 반드시 공개하여 누구라도 열람하거나 이용하여야 할 것이다. 21세기에는 정보공개나 주민참여가 한층 더 활발하게 될 것이므로 공용재로서의 측면을 가진 산림에 대한 관심도 당연히 높아질 것이다. 산림에 관한 객관적인 정보를 제공하는 것은 국가 산림 모니터링에 맡겨진 궁극적인 사명이라 볼 수 있다.

본 연구는 강원도 홍천군 운두령 일대에 설치된 잣나무 등 5개소 성장고정조사구를 대상으로 성장변화를 구명하고자 하였으며, 또한 탄소저장량 및 흡수량을 산정하여 운두령 산림관리에 기초적인 자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 공시재료

분석에 이용된 재료는 2001년 설치된 강원도 홍천군 운두령 지역에 설치된 잣나무, 소나무, 낙엽송, 자작나무, 신갈나무림 고정조사구에서의 성장시작 시점에서 매목조사된 자료를 이용

Table 1. General description of the forest growth monitoring plots.

Plots	Area(ha)	Position(coordinates)	Aspect	Slope	Topography	Shape
<i>Pinus koraiensis</i>	0.04	N 37.42.05.8, E128.25.57.8	52°	34°	Hillside	Flat
<i>Larix kaempferi</i>	0.04	N 37.42.04.8, E128.25.32.4	85°	40°	Hillside	Flat
<i>Pinus densiflora</i>	0.09	N 37.42.44.4, E128.25.40.4	262°	18°	Hillside	Flat
<i>Betula platyphylla</i>	0.04	N 37.42.08.9, E128.26.03.5	10°	14°	Hillside	Flat
<i>Quercus monglica</i>	0.04	N 37.41.42.3, E128.19.51.0	215°	37°	Hillside	Flat

하여, 수종별로 경시적인 성장변화와 탄소저장 및 흡수량 산정에 이용하였다.

## 2. 분석방법

생장고정조사구 설치 시점인 2001년부터 2005년 말까지의 임분성장 및 임분구조 변화 구명 및 예측을 위하여 직경분포 모델로 많이 사용되는 임분표 예측(stand table projection) 모델을 이용하였는데, 이 방법에서 가장 중요한 것은 성장지수율(movement ration)을 구하는 것이다. 성장지수율이란 과거 조사에서는 일정 직경급에 이르지 못하였다가 최근 조사시 조사되어 분석에 이용되는 진계성장량(ingrowth)을 구하거나, 일정 직경급에서 상위 경급으로 이동되는 상위성장량(upgrowth)을 구하기 위하여 계산되는 것으로서 보통 다음과 같이 표기된다(Davis *et al.*, 1987; Knowe *et al.*, 1997; Nepal & Somers, 1992, 손영모 등, 2006).

$$\text{Movement ratio } (M) = \frac{g}{i} \times 100$$

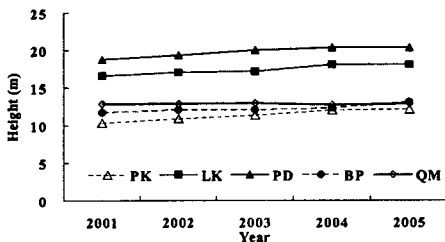
where,  $g$ =Diameter growth in the survey period  
 $i$ =Diameter class section(rounding off)

그리고 탄소저장량 및 흡수량 산정은 축적량에 목재기본밀도(수종에 따라 다름), 바이오매스확장계수(수종에 따라 다름), 탄소변환계수(0.5)를 적용시켜 구하였다(Aldred & Alemdag, 1988; 이경학 등, 1988; 이경학 등, 2001; 손영모 등, 2001; 김규현 등, 1998; 이경학 등, 2003).

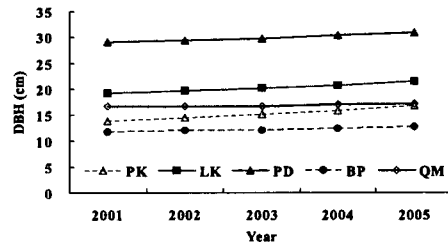
## 결과 및 고찰

### 1. 임분성장 변화

운두령 임목성장 고정조사구에서의 연평균 수고 생장은 잣나무가 0.5m, 낙엽송, 소나무 임분은 0.4m로 유사한 성장을 보였으며, 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 신갈나무임



(A) Height growth by year



(B) Diameter growth by year

Figure 1. Comparison of height and diameter growth according to species and year.

(PK : *Pinus koraiensis*, LK : *Larix kaempferi*, PD : *Pinus densiflora*, BP : *Betula platyphylla*, QM : *Quercus mongolica*)

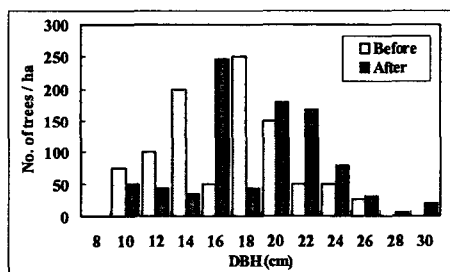
분은 연년 수고 성장범위가 약 0.2m로 생장이 거의 이루어지지 않았다. 연평균 흉고직경 성장(cm)은 잣나무(0.8), 낙엽송(0.6), 소나무(0.5), 자작나무(0.3) 그리고 신갈나무임분(0.1)의 순으로 빠른 것으로 나타났으며, 잣나무, 낙엽송, 소나무 임분만 생장이 증가하는 경향을 보이고 다른 수종 임분의 생장율은 낮은 것으로 나타났다(Figure 1).

## 2. 임분구조 변화 예측

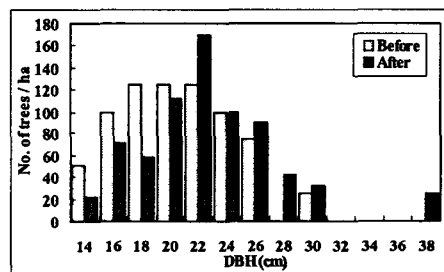
임목생장 고정조사구에서의 현재 임분경급구조와 이들 임분이 어떻게 변화할 것인 지를 구

명하는 것은 산림 시업 및 경영에 있어 아주 중요한 일이며, 이를 예측하기 위한 방법 중 하나가 임분표 예측(stand table projection) 모델에 의한 방법으로 이 모델에 의하여 Figure 2와 같이 각 임분별 경급분포 변화를 예측하였다.

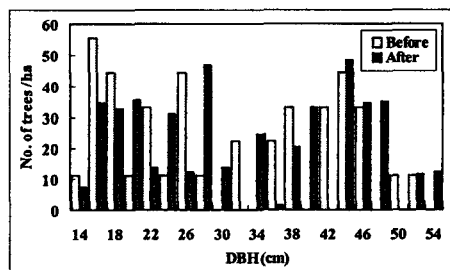
수종별로 직경급 분포가 다양하게 나타났으며, 경급 이동에도 차이가 있는 것으로 나타났다. 자작나무와 신갈나무임분의 경우 직경급의 이동이 많지 않을 것으로 예측되었으나, 잣나무, 낙엽송, 소나무 임분은 상위 직경급으로의 이동이 많을 것으로 예측되었다. 이는 수종별로 경급간의 생장율이 다르기 때문으로 예상되는데, 소나무임분(Figure 2. C)의 경우 흉고직경 30cm 직경급까



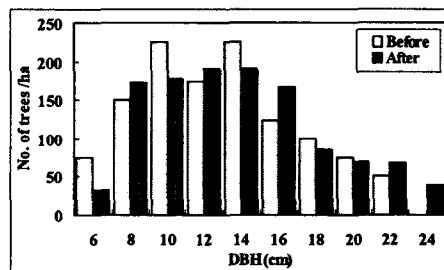
(A) *Pinus koraiensis* stand



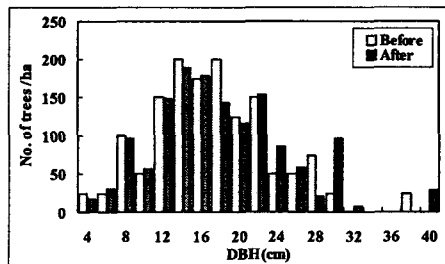
(B) *Larix kaempferi* stand



(C) *Pinus densiflora* stand



(D) *Betula platyphylla* stand



(E) *Quercus mongolica* stand

Figure 2. Transformation of the diameter class by species.

Table 2. Carbon pool by forest types of the Undulyeong model forest.

Classification	Forest type	Years							
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
Carbon removals (1,000TC)	Coniferous forest	808	832	858	882	906	932	958	16%
	Broad-leaved forest	2,533	2,600	2,669	2,739	2,810	2882	2956	50%
	Mixed forest	1,748	1,796	1,847	1,899	1,952	2,005	2,060	34%
	Total	5,089	5,228	5,373	5,519	5,668	5,819	5,974	100%

지는 상위경급으로의 이동이 많지만, 그 이상의 직경급에서는 경급간 이동이 적은 것으로 나타났다. 또한 직경생장이 빠른 유령림인 잣나무와 낙엽송 임분에서 상위경급으로의 이동이 많은 것으로 나타나, 임령에 따른 영향도 큰 것으로 예상된다. 2005년의 수종별 생장율 (%)은 잣나무(3.82), 소나무(3.27), 자작나무(3.04), 낙엽송(2.88), 그리고 신갈나무(1.52) 순으로 나타났다.

5,973천 탄소톤으로 전년도에 비해 2.7%인 155천 탄소톤 증가하였다. 이를 임상별로 보면 활엽수가 50%를 차지하여 가장 많고, 그 다음으로 혼효림 34%, 침엽수림 16% 순이었다.

3. 탄소저장량 및 흡수량

3.1 임분 탄소저장량

2005년도말 현재 운두령 모델림(102,613ha) 내의 식생(교목)에 저장되어 있는 총탄소량은

3.2 운두령 모델림 고정조사구의 탄소 수치  
2005년도 한 해 동안 운두령 모델림에서 산림(교목)이 생장에 의해 흡수·저장한 총탄소량은 166,174톤이며, 이 중 6.4%인 10,693톤이 벌채로 인하여 배출된 것으로 나타났다. 결과적으로 운두령 모델림은 5,481톤의 탄소를 순흡수하였으며, 이는 전년도에 비해 1.8%인 2,736톤 더 늘어난 것이다. 이를 임상별로 보면 침엽수림에서 가장 많은 3.3%를 흡수하였으며, 그 다음이

Table 3. Carbon flux by forest types of the Undulyeong model forest.

Classification	Forest type	Years							
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
Total removals (TC)	Coniferous forest	25,420	26,268	27,156	28,125	29,055	30,010	30,996	3.3%
	Broad-leaved forest	66,021	67,894	69,827	71,840	73,883	75,932	78,038	2.3%
	Mixed forest	47,720	49,182	50,694	52,263	53,874	55,483	57,140	2.8%
	Total	139,162	143,343	147,677	152,228	156,812	161,425	166,174	
Carbon emission (TC)	Coniferous forest	2,847	2,651	1,295	3,687	4,864	4,584	6,020	31.3%
	Broad-leaved forest	1,422	1,324	647	1,842	2,429	2,289	3,158	38.0%
	Mixed forest	500	466	228	648	855	807	1,515	87.7%
	Total	4,770	4,441	2,169	6,177	8,148	7,680	10,693	
Net carbon removal (TC)	Coniferous forest	22,573	23,616	25,861	24,438	24,192	24,426	24,976	2.3%
	Broad-leaved forest	64,599	66,570	69,181	69,998	71,453	73,643	74,880	1.7%
	Mixed forest	47,220	48,716	50,466	51,615	53,019	54,626	56,626	1.8%
	Total	134,392	138,902	145,508	146,051	148,664	152,745	155,481	

Table 4. Carbon removals and emission by species of the forest growth monitoring plots.

Species	Total volume				Carbon removals				Net removals	
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005	Increase rate	2005
<i>Pinus koraiensis</i>	86.40	98.15	119.08	130.3	33.4	37.9	46.0	50.3	8.6%	4.3
<i>Larix kaempferi</i>	196.07	204.79	233.68	241.10	79.6	83.2	94.9	97.9	3.1%	3.0
<i>Pinus densiflora</i>	272.59	296.60	325.18	335.09	106.4	115.8	127.0	130.9	3.0%	3.9
<i>Betula platyphylla</i>	110.80	114.38	124.13	130.13	65.2	67.3	73.1	76.6	4.6%	3.5
<i>Quercus mongolica</i>	249.38	250.14	254.92	255.51	138.9	139.3	142.0	142.3	0.2%	0.3

혼효림과 활엽수의 순으로 각각 3.0%와 2.8%를 나타내었다. 연평균 순흡수량을 살펴보면, 매년 혼효림이 2.8%, 활엽수림과 침엽수림이 2.5%, 1.8%씩 탄소를 흡수·저장하는 양이 매년 증가하고 있다. 따라서 운두령 모델림은 온실가스 측면에서 볼 때 순흡수원으로 작용하고 있으며, 그 순흡수량도 약 2.5%씩 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 운두령 고정조사구의 단위면적당 축적 및 탄소저장량(교목)

각 고정조사구의 단위면적(ha)당 2005년말 현재 탄소저장량(t C/ha)은 활엽수 천연림인 신갈나무임분이(142.3) 가장 많고, 소나무(130.9), 낙엽송(97.9), 잣나무(50.3) 임분의 순으로 나타났다. 임령이 낮은 잣나무, 낙엽송, 자작나무임분의 탄소저장량은 상대적으로 많지는 않았으나, 실제 연평균 탄소증가율을 보면 잣나무(12.7%), 낙엽송(6.6%), 자작나무(5.2%) 임분이 높았다. 천연림의 연평균 탄소증가율은 소나무임분이 5.2%로 높은 편이었으나 신갈나무임분은 0.8%로 생장이 거의 이루어지지 않았다. 또한 일부 임목이 고사하는 일이 발생하여 오히려 전년 대비 흡수능력이 감소한 것으로 나타났다. 절대적인 탄소흡수량에 있어서는 잣나무가 4.3탄소톤으로 가장 많았고, 그 다음이 소나무 3.9탄소톤, 자작나무 3.5탄소톤, 낙엽송 3.0탄소톤, 그리고 신갈나무 0.3탄소톤의 순이었다.

결론

강원도 홍천군 운두령 지역에 지속가능한 산림경영 측정모니터링 체계 구축을 위하여 설치한 잣나무 등 5개 고정조사구의 연년 성장량과 탄소 흡수 및 저장량을 구명하기 위하여 본 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

연년 수고 생장은 유령림인 잣나무, 낙엽송, 소나무 임분의 생장이 점진적으로 증가하는 경향을 보였으나, 신갈나무는 수고생장이 거의 이루어지지 않았다. 흉고직경 역시 잣나무, 낙엽송, 소나무임분의 생장이 증가하는 경향을 보이고, 다른 수종의 생장율은 낮은 것으로 나타났다.

고정조사구별로 현 직경급 분포 및 직경변화 예측에 있어서는 신갈나무와 자작나무임분의 직경급분포는 현재와 유사할 것으로 예측되지만, 다른 수종은 상위 직경급으로의 변화가 많을 것으로 예측되었다.

2005년 말 현재 운두령 모델림 내 식생에 저장되어 있는 총탄소량은 5,974천 탄소톤으로 전년도에 비해 2.7%인 155천 탄소톤 증가하였다. 2005년에 운두령 모델림에서 산림이 생장에 의해 흡수저장한 총탄소량은 166,174톤이며, 이중 6.4%인 10,693톤이 벌채로 인하여 배출된 것으로 나타났다. 운두령 모델림에서의 순 탄소흡수량은 155,481톤이었으며, 전년 대비 2,736톤(1.8%) 더 늘어난 것이다. 결과적으로 운두령 모델림은 온실가스 측면에서 볼 때 순흡수원으로

작용하고 있으며, 그 순흡수량도 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다.

산림 내 고정으로 설치된 성장모니터링구의 활용성은 무한히 많음을 서두에서 밝힌 바 있다. 국내 열악한 산림경제 여건이나 연구 노동력으로 많은 수의 고정조사구를 설치하는 일은 어려운 현실일 것이다. 그러나 연구사업에서 발생하는 조사구를 연구 종결 후 방치하지 말고, 새롭게 이용할 수 있는 방안을 찾아야 할 것이며, 하나의 조사구를 설치하기 위해서는 많은 인력과 경비가 소요됨을 잊어서는 안 될 것이다.

### 인 용 문 헌

1. Aldred, A. H., and I. S. Alemdag. 1988. Guidelines for forest biomass inventory. Can. For. Serv., Petawawa Nat. For. Inst., Inf. Rep. PI-X-77. 134pp.
2. Davis, L. S., and K. N. Johnson. 1987. Forest management. McGraw-Hill Co. New York.
3. Knowe, S. A., G. R. Ahrens and D. S. DeBell. 1997. Comparison of diameter distribution prediction, stand table projection and individual tree growth modeling approaches for young red alder plantations. For. Ecol. Manage. 98 : 49-60.
4. Nepal, S. K., and G. L. Somers. 1992. A generalized approach to stand table projection. For. Sci. 38(1) : 120-133.
5. Pienaar, L. V., and W. M. Harrison. 1988. A stand table projection approach to yield prediction in unthinned even-aged stands. For. Sci. 34(3) : 804-808.
6. 김규현 외 11. 1998. 산림의 온실가스 저장 방안. 임업연구원 연구자료 제143호, 205p.
7. 손영모 외 6. 2000. Stand Table Projection을 이용한 영구표준지의 성장량 추정. 한국임학회 정기 학술발표대회(고려대학교).
8. 손영모 외 7. 2000. 고정수확시험지에서의 임분성장량 추정 및 정도비교-Stand table projection 및 기타 생장식 이용-. 한국임학회 하계 학술발표대회(대구대학교).
9. 손영모, 이경학, 정영교. 2001. 인제지역 73년생 강원지방소나무임분의 Biomass 추정. 한국산림측정학회지 4(1) : 8-14.
10. 이경학, 정영교, 손영모. 1998. 경기도 포천 지방 35년생 잣나무인공림의 바이오매스에 관한 연구. 한국산림측정학회지 1(1) : 61-68.
11. 이경학, 손영모, 김영수. 2001. 임업 및 토지 이용부문의 온실가스 흡수 및 배출 현황. 임산에너지 20(1) : 53-61.
12. 이경학 외 5. 2003. 임업부문의 기후변화협약 국가보고서 작성. 임업연구원 연구자료 제211호. 193p.