

## 남한 삼림의 질소와 염기성 양이온의 흡수량 추정

심재면·박순웅

서울대학교 지구환경과학부

**적 요:** 1995년부터 1999년까지의 임업통계 자료를 사용하여 남한 삼림에서의 연순생산량과 질소(N) 및 염기성 양이온(BC=K, Mg, Ca)의 흡수량을 추정하였다. 줄기와 가지의 연순생산량은 약 1.8 ton DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>이었으며 침엽수림에 비해 활엽수림의 연순생산량이 높게 나타났다. 삼림 전체 면적인 6.246×10<sup>6</sup> ha에서 전 연순생산량은 약 1.13×10<sup>7</sup> ton DM/yr 이었다. 1999년의 용재생산량으로 추정한 남한 삼림에서 줄기와 가지의 수확량은 약 6.1×10<sup>5</sup> ton DM/yr 이었으며 단위 면적당 수확량은 98 kg DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>이었다. 한편, 생장에 의한 N과 BC의 흡수량은 각각 350 mol. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>와 296 mol. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>이었고, 수확량에 포함된 N과 BC의 양은 각각 20 mol. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>와 16 mol. ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 BC에 비해 N의 흡수량이 높게 나타났다. 남한의 전 삼림에서 생장과 수확에 의한 N과 BC의 총 흡수량은 각각 2.309×10<sup>9</sup> mol./yr와 1.953×10<sup>9</sup> mol./yr 이었다.

**검색어:** 수확량, 연순생산량, 염기성 양이온, 질소, 흡수량

### 서론

동북아 지역에서 대기 오염 문제가 심각해짐에 따라 관련 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 최근 박 등(1999)의 연구 결과에 의하면 중국에서의 아황산가스 배출량은 1990년에 2.4×10<sup>7</sup> ton/yr에서 1996년에는 3.3×10<sup>7</sup> ton/yr으로 증가하였고 질소산화물(NO<sub>2</sub>)의 배출은 1990년에 약 1.5×10<sup>7</sup> ton/yr에서 1996년에 2.0×10<sup>7</sup> ton/yr으로 증가하였다. 또한 남한에서의 아황산가스의 총 배출량은 1988년에 1.1×10<sup>6</sup> ton/yr에서 1995년에 1.5×10<sup>6</sup> ton/yr으로 연평균 1.25배의 증가율을 보였고, 질소산화물의 배출은 1988년에 4.2×10<sup>5</sup> ton/yr에서 1995년에 9.2×10<sup>5</sup> ton/yr으로 연평균 약 1.8배의 증가율을 보였다(박 등 1997). 이렇게 대기로 배출된 대기 오염 물질은 건성 침착과 습성 침착과정에 의하여 지표로 되돌아와 토양, 물, 생태계 등에 영향을 미치게 된다. Park 등(2000)은 1994년부터 1997년까지 황의 연평균 침착량을 약 4.7 ton km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>로 추정하였다. 이렇듯 많은 양의 대기 오염 물질이 지표로 침착되고 있어 이들이 생태계에 미칠 영향이 증대될 것이 예상되므로 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

그 일 예로 삼림식태에 관한 연구(류 1994, 1995), 소나무속 식물에 대한 Al 독성의 완화 실험(류와 김 1996), 소나무의 건물생장량과(Ca+Mg+K)/Al 몰비와의 상관성 연구(이 등 1999) 등을 들 수 있다. 그 외 삼림생태계의 물질 분배와 순환에 관해서는 무기영양소의 순환에 관한 연구(Mun et al. 1977, 이 등 1987, Cho and Kim 1989, Kwak and Kim 1992, 유 1994), 식생의 기관별 무기영양소의 분포에 관한 연구(이와 박 1987, 이 1998, Kim 1999, 박 등 2000), 식생의 연순생산량에 관한 연구(김 1971, 박과 문 1999) 등이 있다.

그러나 위의 연구들은 특정 지점 또는 지역을 중심으로 진행

되어 왔기 때문에 남한 전체의 삼림을 대상으로 한 종합적인 대기오염 물질의 영향을 연구하기에는 자료가 부족한 실정이다. 현재와 같이 대기 오염이 광역화되고 오염 물질의 장거리 수송 문제가 국제적인 분쟁으로까지 확산되고 있는 상황에서 한반도 전체의 생태계에 대한 대기 오염 물질의 영향에 관한 연구가 필요하며 나아가 중국 등으로부터 장거리 수송된 오염 물질의 영향에 대한 정량적 평가가 이루어져야 할 것이다. 오염 물질이 생태계에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 산성 임계 부하량 개념(Posch et al. 1995)이 널리 사용되고 있다. 이 방법을 적용하기 위해서는 남한 전체 삼림의 연순생산량과 염기성 양이온(BC=K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 그리고 Ca<sup>2+</sup>) 및 질소(N)의 흡수량 추정이 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 이용 가능한 기존의 연구 결과와 국가 통계 자료로부터 남한 삼림의 연순생산량과 염기성 양이온 및 질소의 흡수량을 추정하여 한반도의 임계 부하량 산출 과정에 필요한 기본 자료를 마련하고자 한다.

### 연구 방법

#### 기본 가정

장기적인 관점에서 볼 때 식생에 의한 BC와 N의 흡수량은 수확에 의해 임지에서 제거되는 BC와 N의 양으로 간주할 수 있다. 그러나 국내의 경우 연간 벌채량이 임목축적 증가량의 약 6% 정도로 아직은 낮은 수준이다(임업연구원 2000). 따라서 본 연구에서는 남한 삼림에서의 BC와 N의 흡수량을 줄기와 가지의 생장에 따른 BC와 N의 흡수량과 벌채량에 포함된 BC와 N의 양의 합으로 규정하였다. 잎과 뿌리 그리고 하층 식생(관목, 초본)을 연구 대상에 포함시키지 않았으며 산림의 소유 형태(국유림, 공유림, 사유림)도 고려하지 않았다.

연순생산량 추정

줄기와 가지의 연순생산량(net primary production, NPP)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$NPP = V_{st} \cdot \rho_{st}(1 + F_{br/st}) \tag{1}$$

여기서  $V_{st}$ 는 단위 면적당 줄기의 성장량 ( $m^3 ha^{-1} yr^{-1}$ )이고,  $\rho_{st}$  ( $kg/m^3$ )는 단위 입목 재적 당 건조량의 비인 밀도를 나타내며,  $F_{br/st}$ 는 줄기에 대한 가지의 중량비인 지조율( $kg/kg$ )이다.

산림청 입엽통계자료(산림청 2000a)에서 1995년부터 1999년까지의 시·군·구별 입상별 영급별 산림 면적 및 입목 축적 자료를 구하였다. 죽림과 무림목지를 제외한 입목지만 삼림으로 고려하였다. 1994년부터 1998년까지의 시·군·구별 국토면적 자료(통계청 2000)로부터 행정 구역의 변동을 조사하여, 1998년의 행정구역 단위로 그 이전 기간의 자료를 일치시켰다.

1995년 이후의 산림자원조사는 1996~1997년에 강원도에서, 1998년에는 경북과 대구 지역에서 그리고 1999년에는 경남, 부산 그리고 울산 지역에서 각각 실시되었다(임업연구원 1997~2000). 1995~1999년 동안의 시·도별 입상별 단위 면적당 입목 축적량 경향(Fig. 1)에서는 강원도의 단위 면적당 입목 축적량이 가장 높게 나타났다. 전국 평균 단위 면적당 입목 축적량의 증가율은 혼효림이  $3.6 m^3 ha^{-1} yr^{-1}$ 로 가장 높았고 활엽수림이  $2.8 m^3 ha^{-1} yr^{-1}$ 로 가장 낮았다. 각 시·도별 단위 면적당 입목 축적량의 변화 경향에서는 지역별로 산림자원조사가 실시된 기간에 변화폭이 크게 나타났다. 특히 혼효림의 경우에 울산에서 1998~1999년 사이의 변화폭이 매우 크게 나타났는데 이는 산림 자원조사 전후의 자료에 불연속성이 있음을 시사해 준다. 따라서 지역별로 산림자원조사 기간을 제외한 나머지 기간의 자료를 이용하여 단위 면적당 줄기의 성장량을 계산하고 이를 (1) 식에 적용하여 2영급 이상의 연순생산량을 구하였다. 1영급(흉목직경 6 cm 이하)의 나무는 입목 축적량이 조사되지 않기 때문에 침엽수는 김 등(1988)의 잣나무 6년생과, 활엽수는 김 등(1977)의 은수원사시나무 6년생의 연순생산량에서 각각 줄기와 가지의 값( $2.9 ton DM ha^{-1} yr^{-1}$ 과  $4.6 ton DM ha^{-1} yr^{-1}$ )을 선택하고 혼효림은 이들의 중간값을 적용하였다. 1영급의 연순생산량과 2영급 이상의 연순생산량을 가중 평균하여 삼림의 연순생산량을 계산하였다.

산림면적을 고려하면 소나무가 침엽수림의 63%를 차지하고(임업연구원 개인서신), 참나무류가 활엽수림의 67%를 차지하기 때문에(임업연구원 1996) 소나무와 참나무류의 지조율(산림청 2000b)과 체적수축을 고려한 전건비중(임업연구원 1994)을 각각 침엽수와 활엽수의 지조율과 줄기의 밀도로 사용하였다. 혼효림의 경우는 침엽수와 활엽수가 50%씩 포함되어 있는 것으로 가정하여 중간값을 적용하였다. 따라서 침엽수림과 활엽수림 그리고 혼효림의 지조율은 각각 0.26  $kg/kg$ , 0.33  $kg/kg$ , 0.30  $kg/kg$ 을, 줄기의 밀도는 각각 356  $kg/m^3$ , 695  $kg/m^3$ , 526  $kg/m^3$ 을 사용하였다.

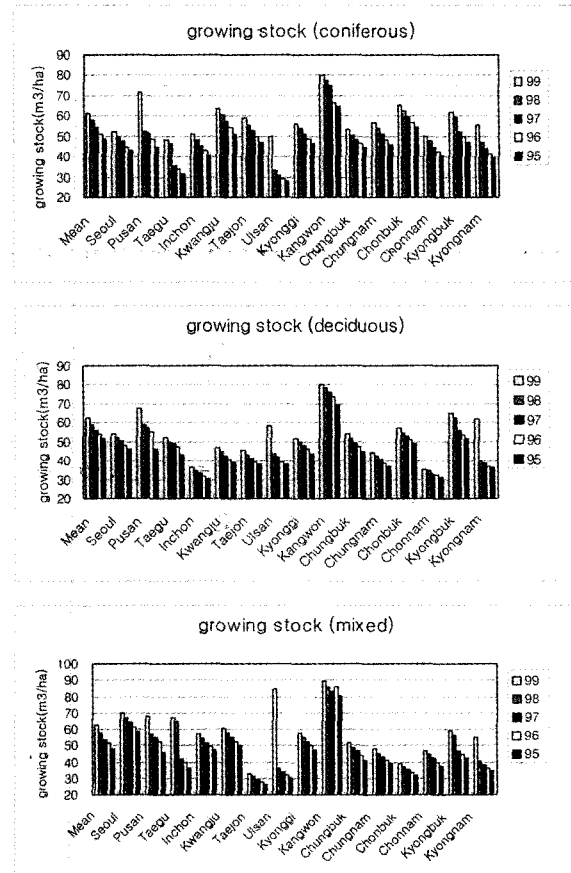


Fig. 1. Trend of growing stock ( $m^3/ha$ ) in each administrative province from 1995 to 1999.

생장에 의한 BC와 N의 흡수량 추정

식생의 생장에 필요한 연간 염기성 양이온의 흡수량(BCu)과 질소의 흡수량(Nu)을 아래와 같이 추정할 수 있다 (UBA 1996).

$$BCu = V_{st} \cdot \rho_{st} (BC_{st} + F_{br/st} BC_{br}) \tag{2}$$

$$Nu = V_{st} \cdot \rho_{st} (N_{st} + F_{br/st} N_{br}) \tag{3}$$

여기서  $BC = K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}$ 이다.  $BC_{st}$ 와  $BC_{br}$ 는 줄기와 가지 중의 BC의 당량 농도( $mol/kg$ )이고  $N_{st}$ 와  $N_{br}$ 는 줄기와 가지 중의 N의 당량 농도 ( $mol/kg$ )이다. BC의 기관별 농도 분포는 기존에 연구된 논문(이와 박 1987, 유 1994, 이 1998, Kim 1999, 박 등 2000)을 그리고 N의 경우는 이 외에도 Mun 등(1977), Cho와 Kim(1989), Kwak과 Kim(1992), Shin과 Lee(1985), 이 등(1987), 김 등(1996)의 결과를 사용하였다. 각각의 자료를 침엽수와 활엽수로 나누어 농도 단위를  $mol/kg$ 로 환산하여 산술 평균하고, 혼효림의 경우는 이들의 중간값을 적용하여 그 결과를 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Mean concentrations of nitrogen (N) and base cations (BC) in stems and branches. The values are based on the data in literature

Forest type	N (mol/kg)		BC (mol/kg)	
	stems	branches	stems	branches
	(N <sub>st</sub> )	(N <sub>br</sub> )	(BC <sub>st</sub> )	(BC <sub>br</sub> )
Coniferous	0.14	0.29	0.12	0.26
Deciduous	0.18	0.33	0.13	0.34
Mixed forest	0.16	0.31	0.12	0.30

References : Lee and Park 1987, You 1994, Lee 1998, Kim 1999, Park et al. 2000, Mun et al. 1977, Cho and Kim 1989, Kwak and Kim 1992, Shin and Lee 1985, Lee et al. 1987, Kim et al. 1996.

**수확량에 포함된 BC와 N의 추정**

임업통계연보에 수확량과 관련하여 임목별채허가실적, 임산물생산량, 목재수급실적 자료가 각각 제시되어 있으나 세 가지의 통계가 각각 다르고 시·군별 임상별 분류가 나타나 있지

Table 2. Timber production (m<sup>3</sup>) in 1999 based on the data from Korea Forest Service (2000)

Classification	Timber production (m <sup>3</sup> )		
	Total	Coniferous	Deciduous
Seoul	0	0	0
Pusan	1,462	1,282	180
Taegu	11	11	0
Inchon	2,392	652	1,740
Kwangju	0	0	0
Taejon	3,813	2,391	1,422
Ulsan	2,008	2,008	0
Kyonggi	134,119	70,938	63,181
Kangwon	182,554	154,114	28,440
Chungbuk	93,487	42,808	50,679
Chungnam	120,944	85,811	35,133
Chonbuk	112,172	101,499	10,673
Chonnam	116,836	97,055	19,781
Kyongbuk	77,643	16,443	61,200
Kyongnam	21,587	11,997	9,590
Cheju	4,575	3,685	890
Forestry R.I.	0	0	0
National Arboretum	0	0	0
Northern N.F.O.	38,937	32,661	6,276
Eastern N.F.O.	56,231	41,523	14,708
Southern N.F.O.	11,195	4,904	6,291
Central N.F.O.	12,432	8,311	4,121
Western N.F.O.	26,471	20,117	6,354
Total	1,018,869	698,210	320,659

R.I. means Research Institute and N.F.O. means National Forest Office

않기 때문에 실제 수확량을 시·군 단위로 추정하기가 어렵다. 따라서 시·군·구별 수종별 자료의 이용이 가능한 1999년도 용재 생산량 자료(산림청 2000c)를 1995~1999년의 수확량의 대표값으로 사용하였다. 연료림은 임상별 구분이 되어 있지 않기 때문에 계산에서 제외하였다. 1999년도 시·도별 임상별 용재 생산량을 Table 2에 나타내었다. 지방자치단체 중에서는 강원도가 용재 생산량이 182,554 m<sup>3</sup>으로 가장 많았으며 다음으로 경기, 충남, 전남, 전북의 순으로 용재 생산량이 많았다. 임상별 비율은 침엽수와 활엽수가 각각 68.5%와 31.5%를 차지하였다. 줄기와 가지만 수확하는 것으로 가정하고 용재 생산량을 이용하여 앞의 흡수량 계산과 동일한 방법으로 수확량에 포함된 BC와 N의 양을 계산하였다. 용재 생산량과 임목 재적과의 차이는 고려하지 않았다. 실제 용재가 생산된 지점의 임상 정보가 표시되지 않았기 때문에 공간 분포를 추정하기 위하여 혼효림의 산림 면적을 반분하여 각각 침엽수와 활엽수림에 포함시키고 용재 생산량을 배분하였다. 각 지방산림청 자료는 관리소별 임상별 자료를 해당 행정 구역에 면적 비율대로 배분하였다.

**격자화된 공간 분포**

남한 삼림에 대한 11×14 km의 격자 단위의 연산생산량과 흡수량의 공간 분포를 추정하기 위하여 Suh et al.(1997)이 1996

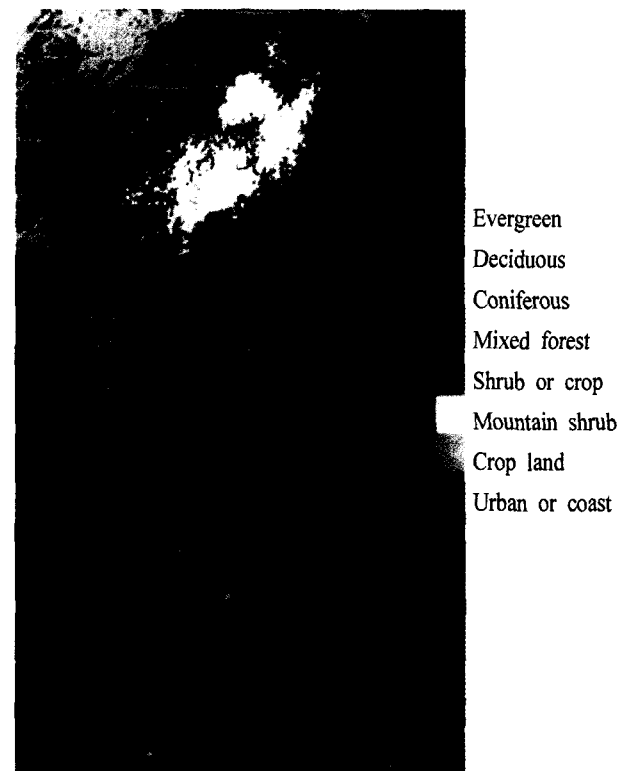


Fig. 2. Map showing spatial distribution of the land use types in Korean Peninsula derived from NOAA/AVHRR from August 1996 to July 1997 (After Suh et al. 1997).

년 8월 1일부터 1997년 7월 31일까지 1년간 평균한 극궤도 기상위성 NOAA-14/AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 자료로부터 계산한 한반도의 토지 이용도(Fig. 2)를 사용하였다. Fig. 2의 화소는 약  $1.1 \times 1.1$  km 로 구성되었으며 토지 이용도는 8가지로 분류되었다. Fig. 2의  $125^{\circ}30'E$ 와  $34^{\circ}00'N$ 을 기준으로 남한 지역을 한 번이  $7'30''$  ( $11 \times 14$  km)인 동서 방향 33개, 남북방향 36개, 총 1,188개의 격자로 구획하여 각 격자 속에 포함되어 있는 식생의 종류를 분류하였다. 분류된 남한의 토지 이용도에서 침엽수림 2.5%, 활엽수림 16.3%, 혼효림 22.0% 그리고 상록수림이 9.0%로 전 삼림지역은 약 50%로 나타났다.

제주도와 울릉군을 제외한 160여 개의 광역시 및 시·군별 행정구역 자료로부터 격자화된 공간 분포로 변환시키기 위하여 각각의  $11 \times 14$  km 격자에 해당하는 시·군 면적과 비율을 계산하였다. 해당 시·군 격자내의 임상별 산림 면적의 분포를 추정하기 위하여 Fig. 2에서 분류된 토지 이용도 자료를 사용하였다. 이 때 상록수는 상록침엽수로 간주하여 침엽수림에 포함시켰다. 해당 시·군에 포함된 격자들의 침엽수림, 활엽수림 및 혼효림의 비율에 따라 임업통계상의 임상별 산림면적을 배분하였다. 각 격자의 평균값은 격자 내의 임상별 단위 면적당 연순생산량과 BC와 N의 흡수량을 임상별 산림면적의 비율에 따라 가장 평균하여 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 격자화된 삼림 면적의 분포

각 격자의 토지면적에 대한 삼림 면적의 백분율을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 분류된 격자 내의 삼림과 임업 통계 자료에 의해 조정된 남한 전체의 국토에 대한 삼림 면적비율은 침엽수림이 22.3%, 활엽수림이 14.6%, 혼효림이 16.4%로 전 삼림 면적이 53.3%이었다. 계산된 전 삼림 면적에 대한 임상별 면적 비율은 침엽수림, 활엽수림, 혼효림이 각각 41.9%, 27.3%, 30.8%로 임업 통계 자료에 의한 남한 전체의 삼림 면적 62.9%에 대한 침엽수림, 활엽수림, 혼효림의 면적 비율인 43.6%, 26.8%, 29.6%에 근접하였다. Fig. 3에서 전체 삼림과 침엽수림의 면적 비율이 60%이상을 차지하는 격자는 각각의 삼림 영역의 45.6%와 6.0%로 나타났다.

### 연순생산량과 생장에 의한 BC와 N의 흡수량

1995~1999년의 줄기와 가지만의 평균 연순생산량과 생장에 따른 BC와 N의 흡수량을 Table 3에 나타내었다.

시·도별로 산림자원조사 기간을 제외하고 계산한 1995~1999년의 평균 연순생산량은 약  $1.8 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로서 산림 자원조사를 고려하지 않고 임업 통계 자료로부터 직접 계산한 남한의 평균 연순생산량(약  $2.4 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )의 75%를 차지하였다. 침엽수림의 평균 연순생산량  $1.6 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 는 줄기와 가지만 고려한 리기다소나무 18년생의  $2.2 \text{ ton DM ha}^{-1}$

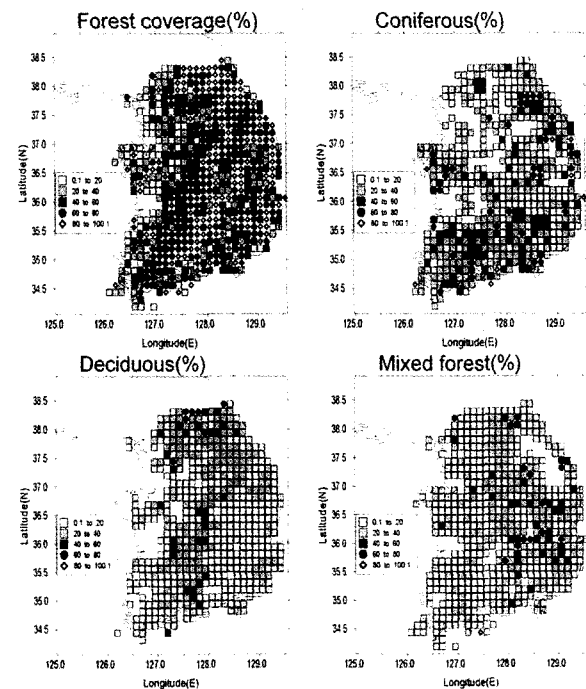


Fig. 3. Spatial distribution patterns of forest coverage (%) in the grid scale of  $11 \times 14$  km over South Korea.

$\text{yr}^{-1}$  (임 등 1982)나  $1.0 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (김 등 1985)와 근사하였다. 활엽수림의 평균 연순생산량  $2.2 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 은 줄기와 가지만 고려한 활엽수림  $2.2 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (유 1994), 굴참나무 20년생  $2.3 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (최와 박 1993) 그리고 떡갈나무 38년생  $1.9 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (박 등 1996)에 가깝게 나타났다. Yim(1986)은 한반도의 면적을  $2.186 \times 10^7 \text{ ha}$ 로 간주하고 전부가 삼림으로 덮여 있다는 가정하에 전 연순생산량을 계산한 결과, Miami model로  $2.907 \times 10^8 \text{ ton DM/yr}$ , Montreal model로  $3.108 \times 10^8 \text{ ton DM/yr}$  및 Kira model로  $3.521 \times 10^8 \text{ ton DM/yr}$ 로서 대체로 3억  $\text{ton DM/yr}$ 으로 계산하여 단위 면적당 평균 연순생산량을 약  $15 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 추정하였다. 본 연구에서 남한의 삼림 면적( $6.246 \times 10^6 \text{ ha}$ )에 대하여 계산한 줄기와 가지만의 전 연순생산량은 약  $1.13 \times 10^7 \text{ ton DM/yr}$ 로 Yim(1986)의 전 연순생산량의 1/27이었으며 단위 면적당 평균 연순생산량은 Yim(1986)의 평균 연순생산량의 1/8로서 남한 삼림의 실제 생산력이 매우 낮은 것을 알 수 있었다.

Table 3에 나타낸 줄기와 가지의 생장에 의한 단위 면적당 평균 N 흡수량은  $350 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 침엽수림과 활엽수림의 평균 N 흡수량은 각각  $261 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와  $466 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 후자의 N 흡수량이 많았다. 네덜란드에서 연생장물을 고려한 줄기의 평균 N 흡수량은 침엽수림과 활엽수림에서 각각  $300 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 과  $500 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다 (De Vries 1993). 또한 광릉의 침엽수림과 활엽수림의 평균 N 흡수량 (줄기와 가지)이 각각  $1,754 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와  $575 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다 (유

Table 3. Forest area, annual mean net production, uptake of nitrogen (N) and base cations (BC) by growing aboveground biomass in forests over South Korea from 1995 to 1999

Forest type	Forest area (10 <sup>3</sup> ha)	Net production (kg DM ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	Uptake (mol <sub>c</sub> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	
			N	BC
Coniferous	2,737 (43.6%)	1,575	269	235
Deciduous	1,674 (26.8%)	2,217	481	404
Mixed forest	1,835 (29.6%)	1,801	351	291
Mean		1,813	350	296
Total	6,246 (100%)			

1994). 일반적으로 삼림은 일정량의 순생산을 증가시키는데 침엽수보다 활엽수가 더 많은 N을 흡수한다. 따라서 본 연구와 네덜란드의 N흡수 경향은 일치하지만 유 (1994)의 결과는 왕성한 흡수력을 가진 어린 침엽수림과 500년 이상된 늙은 활엽수림을 비교하였기 때문에 N 흡수에서 본 연구와 상반된 결과가 나온 것이다. 남한의 전 삼림에서 N 흡수량은  $2.186 \times 10^9$  mol<sub>c</sub>/yr이었다 (Table 4).

줄기와 가지의 생장에 의한 단위 면적당 평균 BC 흡수량은 296 mol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 이었다 (Table 3). 침엽수림과 활엽수림의 평균 BC 흡수량은 각각 235 mol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>와 404 mol<sub>c</sub> ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 후자의 BC 흡수량이 많은 것으로 나타났다. 이는 연순생산량의 차이와 BC의 농도 차이 때문이다. N과 BC의 흡수량을 비교하면 평균 N 흡수량이 BC 흡수량보다 높게 나타났다. 이는 줄기 속의 N 농도가 상대적으로 높기 때문이다. 남한의 전 삼림에서 BC의 흡수량은  $1.852 \times 10^9$  mol<sub>c</sub>/yr이었다 (Table 4).

남한 삼림의 연순생산량(줄기와 가지)의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 평균 연순생산량이 2~3 ton DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>인 영역이 전 삼림 영역의 23.1%이었다. 연순생산량이 2 ton DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> 이상을 차지하는 면적 비율은 활엽수림에서 68.7%, 침엽수림에서 3.5% 이었다. 침엽수는 활엽수보다 격자 내의 삼림 면적 비율 (Fig. 3)이 높은 데도 불구하고 연순생산량이 적었다. 그 원인은 아마 침엽수가 솔잎혹파리 등의 피해를 받아 생산량이 낮

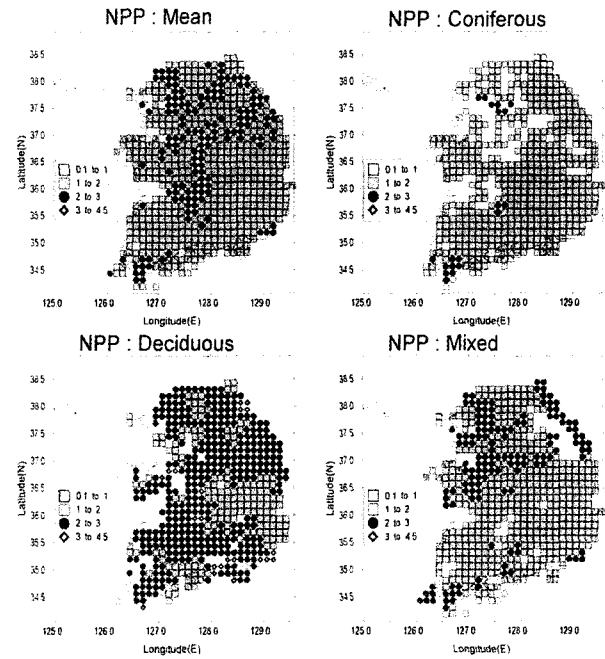


Fig. 4. The same as in Fig. 3 except for annual mean net primary production (NPP; ton DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) by different forest including stem and branch only for the period from 1995 to 1999.

아졌고 또 침엽수 목재의 건중비가 활엽수의 약 1/2 이기 때문 일 것이다.

수확량에 포함된 BC와 N

1999년의 수확량(용재 생산량: 줄기 + 가지)은  $6.1 \times 10^5$  ton DM/yr로 이 중에서 침엽수가 51%, 활엽수가 49%를 차지하였다. 남한의 전 삼림에서 단위 면적당 수확량은 98 kg DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>로 연순생산량의 약 5%에 해당하였다. Fig. 5에 나타난 삼림

Table 4. Annual mean net uptake of nitrogen(N) and base cations(BC) by growing and harvested aboveground biomass in forests over South Korea from 1995 to 1999

Type	Uptake (mol <sub>c</sub> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )		Total uptake in South Korea (10 <sup>6</sup> mol <sub>c</sub> /yr)	
	N	BC	N	BC
Growth	350	296	2,186	1,852
Harvest	20	16	123	101
Total	370	312	2,309	1,953

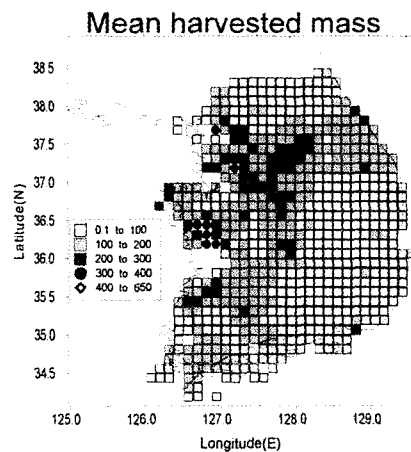


Fig. 5. Spatial distribution of the mean harvested biomass (kg DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) of stem and branch over South Korea in 1999.

의 단위 면적당 수확량 분포는  $200 \text{ kg DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이하인 영역이 89.5%로 대부분을 차지하였고  $400 \text{ kg DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이상인 영역이 1.1%이었다. 지역별로는 강원도, 경기도 및 충청북도에서 단위 면적당 수확량이 많았다.

Table 4에 제시된 남한의 단위 면적당 수확량에 포함된 BC량은  $16 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이었고 N량은  $20 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이었다. 전 수확량 중에 포함된 총 BC와 N량은 각각  $1.01 \times 10^8 \text{ molc/yr}$  과  $1.23 \times 10^8 \text{ molc/yr}$  이었다. 이처럼 수확(용재 생산)에 의하여 삼림으로부터 제거되는 BC와 N의 양이 생장에 의한 흡수량의 5% 정도인 것으로 보아 한국의 삼림이 아직 유흥림 단계임을 알 수 있었다.

**생장과 수확에 의한 BC와 N의 흡수량**

생장과 수확에 의한 BC와 N의 흡수량은 생장에 의한 BC와 N의 흡수량과 수확량에 포함된 BC와 N량의 합이다. Table 4에 나타낸 생장과 수확에 의한 단위 면적당 BC 흡수량과 N의 흡수량은 각각  $312 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  와  $370 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이었다. 남한의 전 삼림에서 총 BC 흡수량과 N 흡수량은 각각  $1.953 \times 10^9 \text{ molc/yr}$  과  $2.309 \times 10^9 \text{ molc/yr}$  로 추정되었다. Park과 Lee(2001)는 1994~1997년의 남한의 연평균 비해염 BC의 건성 침착량을  $130 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , 습성 침착량을  $290 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  그리고 총 침착량을  $420 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  로 추정하였다. 이는 본 연구에서 얻은 BC 흡수량의 약 1.3배에 해당된다. 또한 군집 분류에 의한 1994~1998년의 남한의 연평균 N습성 침착량을 약  $830 \text{ molc}$

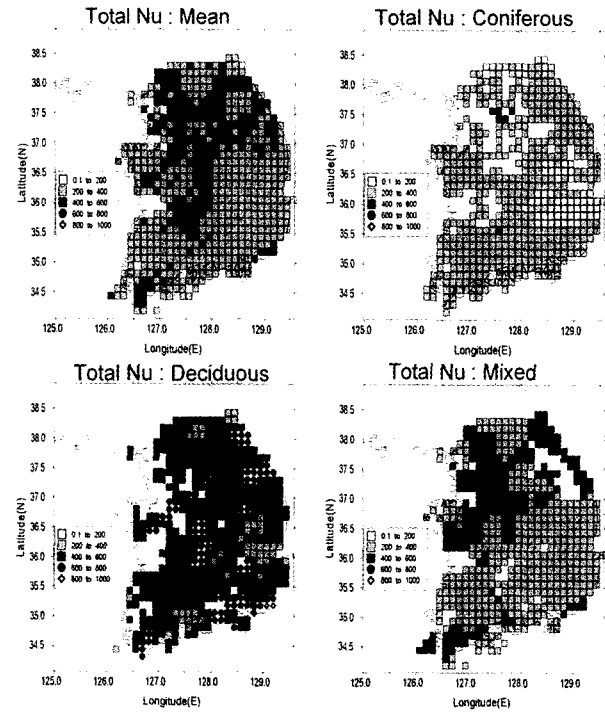


Fig. 7. The same as in Fig. 6 except for the annual mean total nitrogen uptake ( $\text{molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ).

$\text{ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 추정하였다 (Park and Lee 2000). 이는 본 연구에서 얻은 N 흡수량의 2.2배에 해당하는 양이다. N의 건성 침착량까지 고려하면 이 비율은 더 증가할 것이다. 따라서 부영양화의 영향을 받을 수 있는 지역이 있을 것으로 예상된다.

Fig. 6에 생장과 수확에 의한 BC 흡수량의 분포를 나타내었다. 생장과 수확에 의한 평균 BC 흡수량 분포는  $200 \sim 400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  과  $400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이상인 영역이 각각 전 삼림 영역의 92.8%와 5.1%를 차지하였다. 지역적으로는 강원도와 경기도 그리고 충청도의 일부 지역에서 BC 흡수량이  $400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이상이었다. 침엽수림의 경우 BC 흡수량이  $200 \sim 400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 영역이 전 침엽수림 영역의 81.1%를 차지하고  $400 \sim 600 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 지역이 전무한데 비하여 활엽수림의 BC 흡수량 분포는  $200 \sim 400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  와  $400 \sim 600 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 영역이 각각 전 활엽수림 영역의 42.1%와 56.6%를 차지함으로써 후자의 BC 흡수량이 많은 것으로 나타났다. 지역별 활엽수림의 BC 흡수량은 강원도와 부산 지역에서 대체로 높게 나타난 반면 경상북도에 낮게 나타났다.

Fig. 7에 생장과 수확에 의한 N 흡수량의 분포를 나타내었다. 생장과 수확에 의한 평균 N 흡수량이  $200 \sim 400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  과  $400 \sim 600 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 영역이 각각 전 삼림 영역의 66.8%와 32.9%를 차지하였다. 침엽수림과 활엽수림의 N 흡수량 분포는  $200 \sim 400 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 지역이 각각 86.8%와 8.3%이었고  $400 \sim 600 \text{ molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  인 지역이 각각 1.1%와 81.2%로 후자의 N

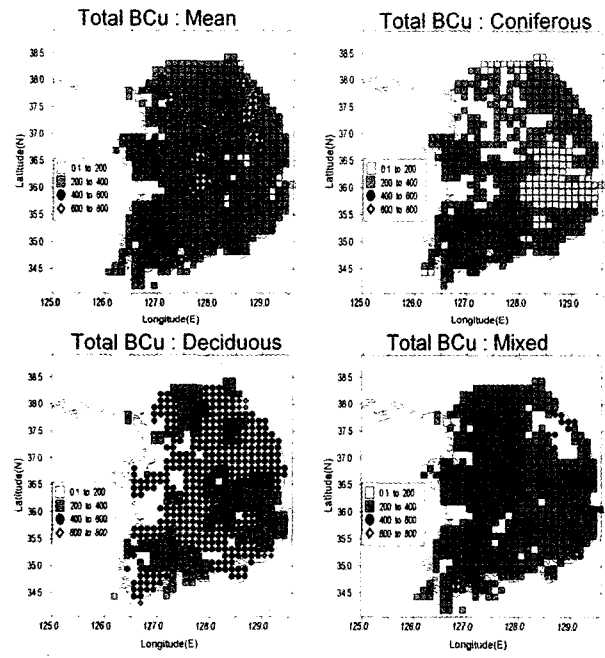


Fig. 6. The same as in Fig. 4 except for the annual mean total base cation uptake ( $\text{molc ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) by growing and harvested aboveground biomass.

흡수량이 많았다. 경상도와 전라도의 대부분 지역에서 평균 N 흡수량이  $400 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 낮게 나타났다. 이는 이들 지역의 연순생산량이 낮기 때문이다. 부산지역에서 활엽수림의 흡수량이 BC의 경우와 같이 높게 나타나는 원인은 이 지역의 임목축적량의 변화가 1995~1996년 사이에 컸기 때문이다 (Fig. 1).

## 결론

이용 가능한 기존의 연구 결과와 1995~1999년의 시·군별 임상별 산림 면적 및 임목 축적 자료로부터 남한 산림의 연순생산량과 염기성 양이온 및 질소의 흡수량을 추정하여 남한 전역의 공간 분포를 마련하였다.

그 결과 남한 산림에서 줄기와 가지만의 평균 연순생산량은  $1.8 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며 활엽수림의 연순생산량( $2.2 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )이 침엽수림( $1.6 \text{ ton DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )에 비해 높았다. 생장에 의한 단위 면적당 BC와 N의 평균 흡수량은 각각  $296 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  과  $350 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  이었다. 1999년의 용재 생산량으로부터 계산된 단위 면적당 줄기와 가지의 수확량은  $98 \text{ kg DM ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었으며 이에 포함된 BC와 N의 양은 각각  $16 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  과  $20 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 남한 산림에서 생장과 수확에 의한 평균 BC와 N의 흡수량은 각각  $312 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 와  $370 \text{ mol. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 대기로부터 유입되는 BC와 N의 평균 침착량보다 적었다.

본 연구에서는 대기 오염 물질이 산림에 미치는 영향을 평가하기 위하여 장기간 산림 생태계에 유입되거나 또는 유출되는 무기 영양소의 수지에 중점을 둔 임계 부하량 산정의 기초 자료를 마련하고자 줄기와 가지의 생장과 수확에 따른 무기영양소 흡수량만을 고려하였다. 현재 시·군 단위의 임상별(침엽수, 활엽수, 혼효림) 임업 통계 자료가 1995년부터 활용이 가능하기 때문에 지역별로 약 10년 주기로 실시되는 산림자원조사 결과를 반영한 시·군별 임상별 10년 평균 성장량을 정확하게 추정하는데 어려움이 있었다. 또한 BC를 포함한 무기 영양소 분포에 관한 기존의 연구 문헌도 충분하지 않기 때문에 각 임상별로 무기영양소 흡수량의 대표값을 추정할 수 밖에 없었다. 따라서 남한 산림 전체에 대하여 주요 수종별로 임업 통계 자료를 활용한 무기영양소의 흡수량 분포를 추정하기 위해서는 무기영양소 농도, 줄기와 가지의 중량비, 재적과 건중량의 비에 관한 자료와 산림면적 및 임목 축적 자료가 수종별로 필요하다. 또한 현재의 수치임상도와 같이 GIS를 활용하여 산림자원조사와 산림 입지 자료를 구축하면 보다 상세한 격자( $1 \times 1 \text{ km}$  이내) 자료를 만들 수 있으므로 대기 오염의 영향이나 무기영양소 순환 분석에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 G-7 과제 산성화 감시 및 예측 기술 개발의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이 논문의 내용을 검토하면서 조언을 아끼지 않으신 여천생태연구소의 김준호 교수께

감사드립니다. 또한 한반도 지역에 대한 토지 이용도 자료를 제공해 주신 공주대학교 서명석 박사, '99 임산물생산통계'를 제공해 주신 산림청 임업정책과 임상섭 사무관 그리고 이 연구와 관련된 질문에 기꺼이 응답해 주신 임업연구원 관계자 분들께 감사드리며 임업 통계 자료의 처리를 도와준 김종원과 이상현에게도 감사의 뜻을 포함합니다.

## 인용문헌

- 김갑덕, 박재욱, 박인협, 김철민, 정성학. 1985. 리기다 소나무와 아까시나무의 성장과 물질생산량에 관한 연구. 임산에너지 5: 1-9.
- 김용택, 이승우, 김준호. 1988. 잣나무유림의 수령에 따른 생산량 및 태양에너지 이용효율 비교. 한국생태학회지 11: 83-95.
- 김종성, 손요환, 임주훈, 김진영. 1996. 리기다소나무와 낙엽송 인공 조림지의 지상부 생체량, 질소와 인의 분포 및 낙엽에 관한 연구. 한국임학회지 85: 416-425.
- 김준호. 1971. 산림의 생산구조와 생산력에 관한 연구 I. 리기다소나무 조림지에 대하여. 식물학회지 14: 19-26.
- 김준호, 선순화, 이석구, 김정석. 1977. 은수원사시나무 조림지의 생산구조와 생산성. 한국임학회지 35: 9-14.
- 류태철. 1994. 수도권 지역에서 산성 강하물에 의한 리기다소나무림 쇠퇴의 기구와 회복. 서울대 박사학위논문. 219 p.
- 류태철. 1995. 삼림쇠퇴의 현상과 그 원인. 김준호 외 13인 (편). "고급생태학"에서 교문사. 서울. pp. 557-601.
- 류훈, 김준호. 1996. 소나무속 식물에서 칼슘과 마그네슘에 의한 알루미늄 독성의 경감. 한국생태학회지 19: 193-199.
- 박순용, Bai Naibin, 이동수, 김만구, 이태영, 조석연, 문승의, 이종범, 심상규. 1997. 산성비 감시 및 예측 기술 개발. 2단계 2차년도 보고서. 환경부. 631 p.
- 박순용, 이태영, 심상규, Bai Naibin, Bashkin, V.N., 선우영, 이동수, 김만구, 조석연, 이종범. 1999. 산성비 감시 및 예측 기술 개발. 3차년도 보고서. 환경부. 602 p.
- 박인협, 이돈구, 이경준, 문광선. 1996. 참나무류의 성장 및 물질생산에 관한 연구(I)-경기도 광주지방의 굴참나무, 상수리나무, 떡갈나무, 신갈나무 천연임분을 대상으로-. 한국임학회지 85: 76-83.
- 박인협, 문광선. 1999. 전남 모후산 지역 소나무-굴참나무 혼효림의 중간경쟁 및 물질생산. 한국임학회지 88: 462-468.
- 박인협, 임도형, 류석봉. 2000. 편백 유령 인공림의 임령에 따른 물질생산 및 무기양료 분배. 한국임학회지 89: 85-92.
- 산림청. 2000a. 임업통계자료(1995-1999). 산림청 홈페이지 <http://www.foa.go.kr/>
- 산림청. 2000b. 산림과 임업기술 III. 755 p.
- 산림청. 2000c. '99임산물 생산통계. 733 p.
- 유영한. 1994. 광릉의 활엽수림과 침엽수림 소유역 생태계 내

- 무기 영양소 유입과 유출. 서울대학교 박사학위논문. 142 p.
- 이경재, 박인협. 1987. 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질생산량과 무기영양물분포. *임산에너지* 7: 11-21.
- 이돈구, 이경재, 신준환, 이경학. 1987. 중부지방 산림 생태계의 물질생산 및 양료순환. *임산에너지* 7: 15-32
- 이명중. 1998. 강원도 지방 잣나무 인공림의 임령 변화에 따른 지상부 현존량과 양분축적. *한국임학회지* 87: 276-285.
- 이충화, 유정환, 김영걸, 변재경, 김춘식, 이승우, 이봉수. 1999. 토양산성화가 소나무 묘목의 생장에 미치는 영향. *산림과학논문집* 61: 90-96.
- 임경빈, 이경재, 권태호, 박인협. 1982. 리기다소나무 인공조림지의 물질생산량에 관한 연구. *임산에너지* 2: 1-12.
- 임업연구원. 1994. 한국산 주요 목재의 성질과 용도. 임업연구원 연구자료 95호.
- 임업연구원. 1996. 활엽수자원조사보고서. 임업연구원 연구자료 122호.
- 임업연구원. 1997-2000. 산림자원조사보고서.
- 임업연구원. 2000. 임업경제동향 2000년/봄. 임업연구원 연구자료 162호.
- 최영철, 박인협. 1993. 전남 모후산지역 굴참나무 천연림과 현사시나무 인공림의 물질생산에 관한 연구. *한국임학회지* 82: 188-194.
- 통계청. 2000. 국토면적자료(1994-1998). 통계청 홈페이지 <http://www.stat.go.kr/>
- Cho, K.H. and J.H. Kim. 1989. A comparison of nitrogen cycling among young *Pinus koraiensis* plantations of different ages. *Korean J. Ecol.* 12: 245-256.
- De Vries, W. 1993. Average critical loads for nitrogen and sulfur and its use in acidification abatement policy in the Netherlands. *Water Air and Soil Pollution* 68: 399-434.
- Kwak, Y. S. and J. H. Kim. 1992. Nutrient cyclings in Mongolian oak (*Quercus mongolica*) forest. *Korean J. Ecol.* 15: 35-46.
- Kim, C. S. 1999. Aboveground nutrient distribution in pitch pine (*Pinus rigida*) and Japanese larch (*Larix leptolepis*) plantations. *J. Korean For. Soc.* 88: 266-272.
- Mun, H.T., C.M. Kim and J.H. Kim. 1977. Distributions and cyclings of nitrogen, phosphorus and potassium in Korean alder and oak stands. *Korean J. Botany* 20: 109-118.
- Park, S.U., H.J. In, S.W. Kim and Y.H. Lee. 2000. Estimation of sulfur deposition in South Korea. *Atmospheric Environment* 34: 3259-3269.
- Park, S.U. and Y.H. Lee. 2001. Mapping of base cation deposition in South Korea. *Water, Air and Soil Pollution* (in press)
- Park, S.U. and Y.H. Lee. 2000. Estimation of wet deposition of nitrogen in South Korea. 15th International Clean Air and Environment Conference, 26-30 Nov. 2000 Sydney, Australia.
- Posch, M., P.A. M. de Smet, J.P. Hettelingh and R.J. Downing (eds.). 1995. Calculation and mapping of critical thresholds in Europe: *In CCE Status Report*. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) Rep. 259101005, Bilthoven, Netherlands.
- Shin, J.H. and D.K. Lee. 1985. Total nitrogen distribution and seasonal changes of inorganic nitrogen at a *Pinus koraiensis* stand in Kwangju-gun, Kyunggi-do, Korea. *J. Korean For. Soc.* 69: 56-68.
- Suh, M.S., K.M. Jang and D.K. Kim. 1997. Land cover classification over Korean Peninsula using phenological data derived from NOAA/AVHRR. 6th Annual Workshop of EMSEA (Environmental Monitoring from Space of East Asia), 15-20, 1997.
- UBA. 1996. Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. UN/ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Texte 71/96. Berlin.
- Yim, Y.J. 1986. Estimation of the net primary production in the Korean peninsula. *Korean J. Ecol.* 9: 41-50.

(2000년 9월 22일 접수 ; 2000년 11월 29일 채택)



---

## Estimation of the Nitrogen and Base Cation Uptake of South Korean Forest

Shim, Jae-Myun and Soon-Ung Park

*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 151-742, Seoul, Korea*

**Abstract:** Estimation of the annual net production, nitrogen (N) and base cation (BC = K, Mg, Ca) uptake by stocked forests in South Korea has been done with national statistical data of forestry from 1995 to 1999. The annual net production of stems and branches was about 1.8 ton DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. The net productivity of deciduous forests was higher than that of coniferous forests. Total net production of the stocked forests from the whole stocked area of South Korea of 6.246 × 10<sup>6</sup> ha, was about 1.13 × 10<sup>7</sup> ton DM/yr, and the total harvested biomass obtained from timber production data in 1999, was estimated about 6.1 × 10<sup>5</sup> ton DM/yr that was equivalent to 98 kg DM ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Net growth uptake of N and BC were 350 molc ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> and 296 molc ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively, and the content of N and BC contained in the harvested biomass were 20 molc ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> and 16 molc ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively. Net uptake of N was higher than that of BC. Total net uptake of N and BC from growth and harvest by stocked forests in South Korea were 2.309 × 10<sup>9</sup> mol<sub>e</sub>/yr and 1.953 × 10<sup>9</sup> mol<sub>e</sub>/yr, respectively.

**Key words:** Base cation, Harvested biomass, Net production, Nitrogen, Uptake

---