

# 점봉산 신갈나무군락의 생물종 다양성, 구조 다양성과 지상부 생물량의 관계에 대한 연구<sup>1a</sup>

정현모<sup>2</sup> · 장인영<sup>3</sup> · 홍승범<sup>2\*</sup>

## Relationship between Aboveground Biomass and Measures of Structure and Species Diversity in *Quercus mongolica*-Dominated Forest, Mt. Jeombong<sup>1a</sup>

Heon Mo Jeong<sup>2</sup>, Inyoung Jang<sup>3</sup>, Seungbum Hong<sup>2\*</sup>

### 요약

본 연구는 강원도 점봉산에 분포하고 있는 신갈나무군락에서 군락의 지상부 생물량과 생물종 다양성, 그리고 군락 구조의 다양성 간의 관계 특성을 밝히기 위하여 수행되었다. 이를 위해, 2004년부터 2013년까지 점봉산 신갈나무군락에서 측정된 지상부 생물량은 총 311.1ton·ha<sup>-1</sup>였으며, 종 별 생물량 및 구성 비율은 신갈나무 206.3ton·ha<sup>-1</sup>(66.3%),까치박달 36.9ton·ha<sup>-1</sup>(11.9%),피나무 30.6ton·ha<sup>-1</sup>(9.8%)등의 순으로 적었다. 신갈나무의 지상부 생물량이 가장 많은 것은 전체에 비해 임목 밀도가 많지 않지만, 평균 흉고직경(DBH)이 50cm 이상인 개체수 비율이 다른 수종에서 보다 월등히 높기 때문인 것으로 판단된다. 이 군락의 종 다양성 지수( $H'$ )와 종 균등도( $J'$ )를 추정해 본 결과 각각 2.015~2.166과 0.673~0.736의 범위 내에서 시간에 따른 점진적인 증가를 보여 주고 있다. 위의 종 다양성 지수와 종 균등도는 지상부 생물량과 높은 양의 상관관계를 나타내는데, 이는 시간이 변함에 따라 신갈나무군락의 지상부 생물량이 공간적으로 균일해진다는 것과 이러한 현상이 다양한 수종에 걸쳐 나타나고 있다는 것을 의미한다. 또한, 생물량-종 다양성 지수( $BS$ )와 종 풍부도-생물량-종 다양성 지수( $ABS$ )도 각각 3.746~3.811, 4.781~5.028 범위 내에서 시간에 따른 점진적인 증가를 보여주고 있었으며, 이들 지수와 지상부 생물량 높은 양의 상관관계가 관찰되었다. 이는 신갈나무군락의 지상부 생물량이 다양한 수종에서 뿐만 아니라 다양한 직경급에 따라 균일해 지고 있음을 나타낸다. 그리고 점봉산 신갈나무군락은 군락의 구조적 다양성을 통하여 생산성과 탄소 저장 능력이 더욱 효율화 되어, 자원이 풍부한 생태계로서의 역할을 수행 할 것으로 예상된다. 또한 복원된 산림의 생물다양성과 생산성의 유지를 위하여 생태적 특성을 고려한 다양한 수종과 다양한 DBH 수목의 선택적 식재를 제안한다.

주요어: 현존량, 생물다양성, 산림구조, 상관분석, 장기생태연구

### ABSTRACT

Relationships of standing biomass with biodiversity and structural diversity were examined in the *Quercus mongolica*-dominated forest in Mt. Jeombong, Gangwon-do. We examined the standing biomass of the *Q.*

1 접수 2016년 10월 5일, 수정 (1차: 2016년 12월 8일, 2차: 2016년 12월 19일), 게재확정 2016년 12월 20일

Received 5 October 2016; Revised (1st: 8 December 2016, 2nd: 19 December 2016); Accepted 20 December 2016

2 국립생태원 생태기반연구실 Division of Basic Research, National Institute of Ecology, 1210 Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seochon-gun 33657, Korea

3 국립생태원 융합연구실 Division of Ecosystem Services & Research Planning, National Institute of Ecology, 1210 Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seochon-gun 33657, Korea

a 이 논문은 환경부 국가장기생태연구와 한국환경산업기술원(2014001310009, 기후변화대응 환경기술개발사업)의 지원으로 수행되었음.

\* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-41-950-5804, Fax: +82-41-950-5953, E-mail: sbhong@nie.re.kr

*mongolica* community ( $311.1\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) from 2004 to 2013, and the observed major species were *Q. mongolica*, *Carpinus cordata*, *Tilia amurensis* whose standing biomasses were  $206.3\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  (66.3%),  $36.9\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  (11.9%), and  $30.6\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  (9.8%), respectively. Although the number of *Q. mongolica* individuals was very small compared with total density, the reason that *Q. mongolica* showed the most biomass than other species is due to greater average diameter at breast height (DBH) and the higher number of  $\text{DBH} \geq 50\text{cm}$  individuals. We calculated the range of Shannon index ( $H'$ ) and Shannon evenness ( $J'$ ) in the *Q. mongolica* community, and they were gradually increased in time, showing 2.015~2.166, 0.673~0.736, respectively. Their  $H'$  and  $J'$  showed positive linear relationships with their standing biomass. This indicates that the spatial distribution of the standing biomass in *Q. mongolica* community becomes more homogeneous with time and this homogenization appears in various species in the community. In addition, we estimated biomass-species index ( $BS$ ) and abundance-biomass-species diversity ( $ABS$ ) and they also showed gradual increase in time, ranging from 3.746 to 3.811 and from 4.781 to 5.028, respectively. Their indices showed positive linear relationships with the standing biomass. This can be explained from the observations of variations in standing biomass with tree diameters as the differences in the average standing biomass in the community have reduced gradually in time. Moreover, it is expected that increase in the structure diversity of the *Q. mongolica* community enhances the efficiency in carbon sequestration and productivity, so the community can be developed to a more sustainable ecosystem with more abundant resources. Thus, applications of uneven-aged plantations with considerations of local ecological properties can be a very efficient reforestation method to ensure stable support of biodiversity and productivity.

**KEY WORDS:** *STANDING BIOMASS, BIODIVERSITY, FOREST STRUCTURE, LINEAR RELATIONSHIP, LONG-TERM ECOLOGICAL RESEARCH*

## 서론

생태학의 중요한 목적은 생물종 다양성과 생태계 프로세스의 정량화를 통한 생태계의 구조와 이들 사이의 관계를 이해하는 것이다(Hooper *et al.*, 2005; Keddy, 2005). 생물종 다양성과 식물군락의 생산성 간의 관계는 가장 일반적인 연구 주제 중 하나이며(Hooper *et al.*, 2005), 최근 30년간 생태학자들에게 생물종 다양성과 다양한 생태계 기능의 관계를 밝히는 것이 중요한 논점이 되어 왔다(Con *et al.*, 2013). Odum(1971)은 산림 천이의 모델에 따라 현존량과 종 다양성 간에 양(positive)의 상관관계가 존재 한다고 하였으며, 생물종 다양성이 에너지의 흐름과 물질의 순환에 영향을 미칠 것인지에 대한 문제에 대해서 논의 되어왔다(Tilman *et al.*, 1996; Stocker *et al.*, 1999). 전 세계적으로 생물종 다양성과 식물군락의 생산성에 관한 연구는 초지(Hector *et al.*, 1999; Tilman *et al.*, 1996; Vance-Chalcraft *et al.*, 2010)와 산림(Caspersen and Pacala, 2001; Creed *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011) 등의 다양한 육상 생태계를

대상으로 생태계의 생산성과 생물종 다양성 간의 관계를 증명하는 연구가 수행되었다. 우리나라에서 육상 생태계의 생산성과 생물종 다양성 간의 관계를 규명하기 위한 연구는 전무한 실정이며, 산림 식생의 종 조성과 종 다양성의 특징 분석에 대한 연구들이 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2015; Cheon *et al.*, 2013; Kwak *et al.*, 2013; Jang and Song, 1997).

산림의 생산성과 생물종 다양성 관계에 대한 연구가 많이 없는 것은 수명이 긴 수목 현존량의 장기적인 활용이 어렵기 때문이다(Con *et al.*, 2013; Vance-Chalcraft *et al.*, 2010). 그리고 산림생태계의 생물학적 다양성과 산림의 생산성에 대한 대부분의 연구들은 종 풍부도, 종 다양성 지수, 종 균등도 등과 같은 간단한 다양성 지수에 근거하며, 식생의 구조적 다양성에 따른 영향을 간과하는 경향이 있어 왔다(Martinez-Sanchez *et al.*, 2016). 그러나 종 풍부도, 줄기 두께와 높이가 모두 산림의 지상부 생물량에 영향을 미치기 때문에 군락의 구조적 지수는 종 다양성 지수보다 지상부 생물량과의 관계를 더 잘 보여 줄 수 있다(Con *et al.*, 2013).

식물군락의 생산성과 생물종 다양성의 관계에 대한 현재까지의 연구결과는 대개 양(positive)의 상관관계를 나타낸

다. 반대로 생태계의 환경에 따라 식물군락의 생산성과 생물종 다양성이 음(negative)의 상관관계를 나타내기도 하는데, 이는 연구 대상이 되는 식물군락에서 구성하고 있는 수종이 얼마나 균일한가에 따른 영향으로 인해 식물군락의 생산성과 생물종 다양성의 관계에 의한 환경적 차이 때문인 것으로 분석되고 있다(Con *et al.*, 2013). Mulder *et al.* (2004)는 식물군락을 대상으로 수행한 실험에서 높은 종 풍부도가 현존량을 증가시킨다고 보고하였으며, Martinez-Sanchez *et al.* (2016)는 성숙하고 오래된 숲에서 구조적 다양성이 높으며 더 많은 탄소를 저장한다고 밝혔다. 또한, Wilsey and Potvin (2000)은 초지군락의 환경적 스트레스 연구를 통하여 인위적 영향에 의한 식물 종 다양성의 감소는 직·간접적으로 식물의 생산성 감소를 초래한다고 밝힌 바 있다. 반면에 베트남 열대림의 종 풍부도와 현존량(Con *et al.* 2013), 중앙 유럽 자연림에서 종 다양성 지수와 현존량(Szwagrzyk and Gazda, 2007) 등의 연구는 생물종 다양성과 현존량의 관계가 음의(negative) 상관관계를 나타냈다.

본 연구는 생물종 다양성과 생산성 관계 연구에서 군락의 구조적 다양성과 현존량과의 관계를 알아보기 위하여 점봉산의 신갈나무군락을 중심으로 수행되었다. 점봉산은 위치적으로 북방계와 남방계의 접이지대이기 때문에 우리나라에서 가장 식물 다양성이 풍부한 산악지역이며 점근성의 제약으로 인하여 생물자원이 잘 보존된 곳이다(Korea National Arboretum, 2014). 점봉산 일대에는 약 457종의 유관속식물 출현하는 것으로 알려졌으며, 신갈나무와 당단풍나무가 80% 이상의 출현 빈도를 나타내 광역적으로 우점하는 가운데 거제수나무, 가래나무, 소나무, 들메나무, 전나무, 사스래나무, 서어나무 등의 다양한 교목성 수종이 함께 출현하고 있어, 군락의 생물종다양성과 생산성의 관계를 연구하는데 이상적인 생태계라 할 수 있다. 이 연구의 목적은 장기 연구를 통한 점봉산 신갈나무군락에서 목본성 식물들을 중심으로 생물종 다양성 및 구조적 다양성과 현존량의 관계에 대한 패턴을 분석하여 상관관계를 밝히는 것이다. 그리하여 산림 생태계의 물질생산에서 종 다양성과 군락의 구조적 다양성의 중요성을 확인하고 산림 생태계의 기능 유지를 위한 산림 복원과 조림의 방향을 제시 하고자 한다.

## 연구방법

### 1. 지역개황

본 연구가 진행된 점봉산 신갈나무군락은 행정구역상 강원도 양양군의 점봉산에 위치하고(Figure 1.), 설악산국립공원 권역상 남단에 위치하고 있다(N 38°02'10.3", E 128°26'11.1"). 점봉산의 신갈나무군락의 해발고도는 1,066m

이며 2004년에 0.5ha의 영구 방형구를 설치하였다(Table 1, Ministry of environment 2013). 신갈나무군락의 사면은

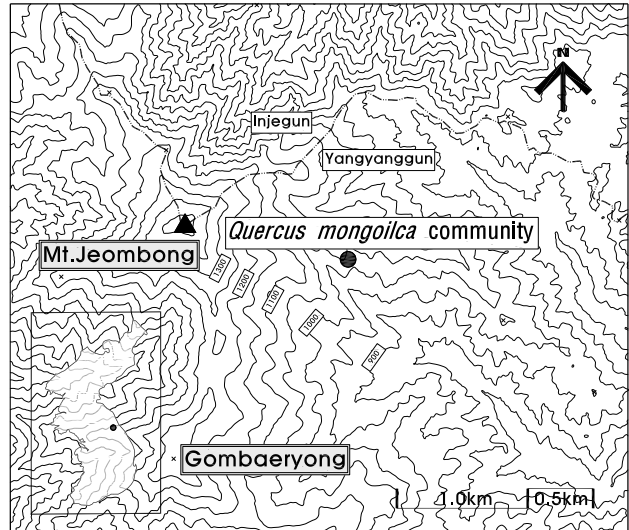


Figure 1. A map showing the study area. The closed circle indicates the location of the *Q. mongolica* community in the study area

Table 1. Topological characteristics in the quadrat of *Q. mongolica* community in Mt. Jeombong

Characteristics	
Dominated species	<i>Quercus monolica</i>
Sampled area(ha)	0.5
Maximum DBH(cm)	73.5
Location	N 38°02'10.3", E 128°26'11.1"
Topography	low slope-ridge
Aspect	south-eastern
Altitude(m)	1,066
Naked rock(%)	4.0
Litter thickness(cm)	2.7
Soil depth(cm)	50.5

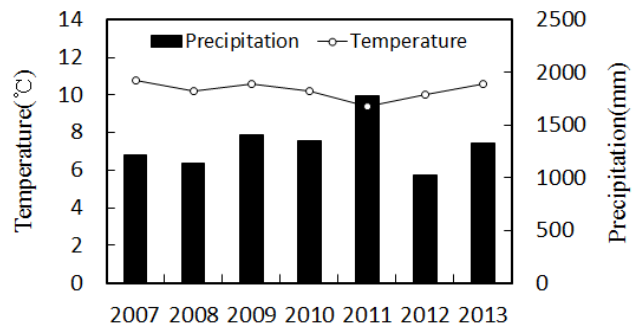


Figure 2. Annual variation of air temperature and precipitation in the study area

북-서사면, 암석 노출도는 약 4%, 군락의 최대 DBH(Diameter of breast height)는 73.5cm, 토양의 깊이는 50.5cm, 낙엽의 깊이는 2.7cm 였다. 이 지역의 기상관측이 시작 된 2007년부터 2013년까지 본 연구지소가 위치한 설악산 지역의 연평균 강수량은 1,320.5mm, 연평균 기온은 10.3℃ 였다 (Figure 2.).

## 2. 자료 수집

2004년부터 2013년까지 면적 0.5ha인 신갈나무군락 방형구에서 발견되는 모든 목본식물(DBH ≥ 3cm)에 대해 매 목조사를 실시하였으며 각 개체에 대한 생물정보를 기록하였다(Ministry of environment, 2013). 이렇게 수집된 정보는 연도별로 정리하여 지상부 생물량, 생물종 다양성, 균등도 등 신갈나무군락의 생태학적 특성을 분석하는데 이용하였다.

## 3. 지상부 생물량(aboveground biomass, *ABG*) 추정

본 연구에서 점봉산 신갈나무군락의 지상부 생물량 추정을 위하여 상대생장식을 이용하였다. 상대생장식은 수목의 흉고직경(DBH)과 수고 등을 통하여 수목의 현존량을 간접적으로 추정할 수 있는 방법으로, Kwon and Lee (2006)는 수고와 흉고 직경과 지상부 생물량(가지, 줄기, 잎의 무게) 사이에는 높은 양의 상관관계가 있다고 보고한 바 있다. 신갈나무의 지상부 생물량은 Son et al. (2007)에 의한 상대생장식을 이용하여 측정하였고 다음(1)과 같았다.

$$\log(AGB) = 2.076 + 2.579\log(DBH) \quad (1)$$

신갈나무군락에서 발견된 가래나무, 까치박달나무, 복장나무, 피나무 등의 수종은 각 수종에 적합한 상대생장식에 적용하여 지상부생물량을 측정하였다(Wang, 2006; Kwak et al., 2004; Lim et al., 2003; Son et al., 2002; Dong et al., 2015; Ali et al., 2015; Son et al., 2014; Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997; Park et al., 1986). 신갈나무군락의 전체 지상부생물량은 방형구 내 모든 개체의 지상부생물량의 합으로써 추정하였다.

## 4. 종 다양성(Species diversity)

신갈나무군락의 종 다양성과 관련하여 종 풍부도(species richness, *S*), 종 다양성 지수(Shannon index) 그리고 종 균등도(Shannon evenness)를 측정하였다. 종 풍부도(*S*)는 방형구 내에서 발견된 종 수로 계산 하였으며, 종 다양성 지수(Shannon index, *H'*)는 다음(2)과 같이 계산하였다(Magurran,

1988).

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln(p_i) \quad (2)$$

$p_i$ 는 전체 개체수에 대한  $i$ 번째 종의 개체수 비율을 나타낸다.

종 균등도(Shannon evenness, *J'*)는 다음(3)과 같이 계산하였다.

$$J' = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

## 5. 식생구조와 종 다양성(Structure-species diversity)

군락에서 식생의 생산성과 탄소 흡수량은 기후나 지리적 위치 등에 영향을 받는 한편, 군집의 구조, 개체의 수평적 분포의 다양성 등에 의해서도 결정된다(Con et al., 2013). 따라서 식생의 군집 구조와 개체의 수평적 분포 다양성에 의해 나타나는 지수는 지상부 생물량과 종 다양성의 관계를 더 잘 설명할 수 있다. 신갈나무군락의 구조적 다양성과 종 다양성, 지상부 생물량에 관하여 나타낼 2개의 지수는 Con et al. (2013)의 방법에 따라 생물량-종 다양성 지수(biomass-species diversity index, *BS*)와 종 풍부도-생물량-종 다양성 지수(abundance-biomass-species diversity index, *ABS*)이다. 생물량-종 다양성 지수(biomass-species diversity index, *BS*)는 지상부 생물량에 대한 각 흉고 직경급의 인수(factor)의 합과 각 흉고 직경급에 대한 종 수의 인수(factor)의 합을 더한 것이다. *BS*의 값이 클수록 각 흉고 직경급 별 지상부 생물량과 종 수가 균등하다는 것을 의미한다. 그리고 종 풍부도-생물량-종 다양성 지수(abundance-biomass-species diversity index, *ABS*)는 *BS* 지수와 각 흉고 직경급에 대한 개체수 인수(factor)의 합을 더한 것이다. *ABS*의 값이 클수록 흉고 직경급 별 지상부 생물량과, 종 수 그리고 개체수가 균등하다는 것을 의미한다.

생물량-종 다양성 지수(*BS*)는 다음(4)과 같이 계산하였다.

$$BS = - \sum_{i=1}^d [p_{AGB_i} \ln(p_{AGB_i}) + p_{s_i} \ln(p_{s_i})] \quad (4)$$

$p_{AGB_i}$ 는  $i$ 번째 흉고 직경급의 지상부 생물량의 비율이고  $p_{s_i}$ 는  $i$ 번째 흉고 직경급의 종의 비율이며  $d$ 는 흉고 직경급의 수이다.

종 풍부도-생물량-종 다양성 지수(*ABS*)는 다음(5)과 같이 계산하였다.

$$ABS = - \sum_{i=1}^d [p_{A_i} \ln(p_{A_i}) + p_{AGB_i} \ln(p_{AGB_i}) + p_{s_i} \ln(p_{s_i})] \quad (5)$$

$p_{A_i}$ 는  $i$ 번째 흉고 직경급에서 개체수의 비율이다. 생물량-종 다양성 지수( $BS$ )와 종 풍부도-생물량-종 다양성 지수( $ABS$ ) 산출 과정에서 흉고 직경급은 10cm 단위로 분류하여 계산하였다.

## 6. 통계 분석

점봉산 신갈나무군락에서 지상부 생물량과  $H'$ ,  $J'$ ,  $BS$ ,  $ABS$ 의 관계는 상관관계(correlation coefficient) 분석을 통하여 관계성을 분석하였다. 이때 상관계수 추정과 유의성 검증은 R 프로그램(version 3.1.3., <http://www.r-project.org/>)을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 신갈나무군락의 구조와 지상부 생물량

연구가 시작된 2004년부터 2013년까지의 점봉산 신갈나무군락의 평균 임목 밀도는  $1,754 \text{ trees} \cdot \text{ha}^{-1}$ , 기저면적은  $36.8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 지상부 생물량은 약  $311.1 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ 였다(Table 2.). 신갈나무군락 내 수종별 개체수는 당단풍나무가 598개체로 가장 많았고 까치박달 381개체, 피나무 175개체, 신갈나무 125개체 등의 순으로 많았다. 평균 DBH는 신갈나무가 32.5cm(3.3-73.5cm)로 가장 컸고 가래나무 21.6cm(3.4-46.4cm), 복장나무 18.8cm(3.6-50.2cm), 층층나무 17.9cm(3.1-32.5cm), 팔배나무 17.6cm(3.6-38.2cm), 피나무 16.3cm(3-63.8cm), 만주고로쇠나무 14.6cm(3-41.2cm), 들메나무 14.3cm(3.3-37.7cm), 까치박달 11.8cm(3.1-45.7cm), 당단풍나무 7.9cm(3-22.9cm) 등의 순으로 컸다. 수종별 기저면적은 신갈나무가  $14.0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ 로 가장 넓었고 피나무  $5.7 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 까치박

달  $5.5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 당단풍나무  $3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  만주고로쇠나무  $1.9 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 팔배나무  $1.3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 가래나무  $1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 층층나무  $1.1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 복장나무  $1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 들메나무  $30.8 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  순이었다. 지상부 생물량은 신갈나무가  $206.3 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (66.3%)로 가장 많았고 까치박달  $36.9 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (11.9%), 피나무  $30.6 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (9.8%) 등의 순서로 많았다. 신갈나무의 임목밀도는 까치박달과 피나무, 당단풍나무 등에 비해 낮지만 DBH가 높아 지상부 생물량이 많았고 까치박달과 피나무는 임목밀도는 높지만 DBH가 작아 지상부 생물량이 적은 것으로 분석되었다. 신갈나무군락 10년간의 평균 지상부생물량은  $311.1 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ 이었으며 강원도 춘천지역의 신갈나무림  $500.28 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Park *et al.*, 2003) 보다 작았으나 서울 남산의  $147.76 \sim 278.48 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Park *et al.*, 2005), 경기도 광주 태화산의  $67.9 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Son *et al.*, 2002), 전라도 광양 백운산의  $132.0 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Son *et al.*, 2007) 등 전국 다른 지역의 신갈나무군락의 현존량 보다 많았다. 본 신갈나무군락의 현존량이 많은 것은 다른 지역의 평균 DBH(경기도 광주의 태화산 9.83cm, 전라도 백운산 9.0cm)보다 본 지역의 평균 DBH(18.0cm)가 크기 때문인 것으로 판단되며 서울 남산의 경우 평균 DBH가 약 16.2cm로 본 지역과 큰 차이가 없었다. 전 세계적으로는 온대 낙엽수림의 현존량은  $300 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Wittaker and Likens, 1973)으로 알려져 있으며 중국의 상록성 참나무림  $248 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Ni *et al.*, 2001), 스페인의 상록성 참나무림  $250 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Rapp *et al.*, 1999), 벨기에의 낙엽성 참나무림  $176.9 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Yuste *et al.*, 2005) 이었으며, 국내·외적으로 점봉산 신갈나무군락의 생산성이 더 많았다.

### 2. 종 다양성 특성과 지상부 생물량과의 관계

점봉산 신갈나무군락의 종 풍부도( $S$ )는 2004년 20종이

Table 2. Average stem density, DBH, basal area and above-ground biomass of permanent plot from 2004 to 2013

Species	Basal area ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	Above-ground biomass( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	DBH(cm)		Density $\text{trees} \cdot \text{ha}^{-1}$
			Mean $\pm$ S. D.	Max	
<i>Quercus mongolica</i>	14.0	206.3	32.5 $\pm$ 0.5	73.5	125
<i>Tilia amurensis</i>	1.2	30.6	16.3 $\pm$ 0.9	63.8	175
<i>Carpinus cordata</i>	1.0	36.9	11.8 $\pm$ 0.4	45.7	381
<i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	1.1	5.9	7.9 $\pm$ 0.6	22.9	598
<i>Acer truncatum</i>	1.3	1.0	14.6 $\pm$ 0.6	41.2	84
<i>Sorbus alnifolia</i>	5.7	9.2	17.6 $\pm$ 1.2	38.2	41
<i>Juglans mandshurica</i>	0.8	7.0	21.6 $\pm$ 1.3	46.4	26
<i>Cornus controversa</i>	1.9	4.0	17.9 $\pm$ 0.6	32.5	33
<i>Acer mandshuricum</i>	5.5	0.3	18.8 $\pm$ 1.3	50.2	25
<i>Fraxinus mandshurica</i>	3.5	4.7	14.3 $\pm$ 0.8	37.7	36
Others(9 species)	0.8	4.7			230
Total	36.8	311.1			1,754

Table 3. Annual number of individuals, above-ground biomass(ton·ha<sup>-1</sup>), biological diversity and structural diversity indices in *Quercus mongolica* community

Years	No. of individuals	Above-ground biomass	<i>S</i>	<i>H'</i>	<i>J'</i>	<i>BS</i>	<i>ABS</i>
2004	1,013	299.4	20	2.015	0.673	3.746	4.781
2006	992	305.8	19	2.018	0.685	3.783	4.838
2007	956	309.3	19	2.035	0.691	3.778	4.858
2008	862	310.0	19	2.077	0.705	3.796	4.936
2009	838	314.0	19	2.106	0.715	3.805	4.973
2010	844	316.7	19	2.136	0.725	3.786	4.956
2011	821	313.9	19	2.146	0.729	3.789	4.973
2012	784	319.5	19	2.152	0.731	3.797	5.006
2013	767	311.7	19	2.166	0.736	3.811	5.028

었으며 이후에는 전나무 1종이 감소하여 19종을 유지하였다(Table 3.). 종 다양성 지수(*H'*)와 종 균등도(*J'*)는 각각 2.015~2.166, 0.673~0.736의 범위였으며 연구기간 동안 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하였다. 종 다양성 지수(*H'*)의 증가는 신갈나무군락 전체 개체수에 대한 각 종의 개체수 비율 차이가 감소한 결과인 것으로 판단되었다. 실제로 연구기간 동안 개체수가 많은 당단풍나무, 신갈나무, 까치박달, 만주고로쇠 등의 개체수가 감소하였고 개체수가 적은 팔배나무, 들메나무, 가래나무 등이 증가하여 종 다양성 상승에 직접적인 원인이 되었다. 본 연구지소의 종 다양성 지수는 2012년 강원도 고성외 향로봉에서 조사된 신갈나무군락의 종 다양성 지수(*H'*, 0.970-1.227) 보다 컸다(Cheon *et al.*, 2013). 종 다양성 지수(*H'*)와 종 풍부도(*S*)가 고려되어 산출되는 종 균등도(*J'*)의 증가 역시 각 수종 별 개체수 비율의 차이가 감소한 결과인 것으로 판단되며 이 결과는 열대 지역에서 숲이 성숙할수록 종 균등도가 1에 가깝게 증가한 Do *et al.* (2010)의 결과와 같은 것이었다. 그리고 점봉산의 신갈나무는 군락이 안정상태에 이르게 될 약 200년 후에 4% 정도로 현저히 감소하고 유지될 것이라고 예측한 결과도 이를 뒷받침한다(Lee *et al.*, 2000).

종 다양성 지수(*H'*) 그리고 종 균등도(*J'*)와 지상부 생물량은 양의 상관관계를 나타내었다(Figure 3.). 종 다양성 지수(*H'*)와 지상부 생물량에 대한 상관계수와 유의확률(*p* value)은 각각 0.83, 0.0056이었으며 종 균등도(*J'*)와 지상부 생물량에 대한 상관계수와 유의확률(*p* value)은 각각 0.88, 0.0019였다(Table 4). 이 결과는 신갈나무군락의 현존

량이 여러 수종에 걸쳐 고르게 분포한다는 것을 의미하며, Vance-Chalcraft *et al.* (2010)는 종 균등도와 지상부 생물량 사이의 음(negative)의 관계는 높은 생물량으로 몇몇 종이 우점한다고 언급한 바 있다. 그리고 위의 결과는 생물종 다양성이 식물 군락의 주요한 기능인 에너지의 흐름과 물질 순환에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

### 3. 군락의 구조적 다양성과 지상부 생물량의 관계

생물량-종 다양성 지수(biomass-species diversity index, *BS*)와 종 풍부도-생물량-종 다양성 지수(abundance-biomass-species diversity index, *ABS*)는 각각 3.746~3.811, 4.781~5.028의 범위였으며 연구기간 동안 시간이 지날수록 증가하는 경향을 나타내었다(Table 3.). 시간 경과에 따른 *BS*와 *ABS*의 증가는 수목의 직경이 다양하고 직경에 따른 수종의 비율과 개체수가 균등하다는 것을 의미한다. 위의 결과는 수목의 직경급에 따른 생물량의 비율과 종 수 비율 그리고 개체수 비율의 차이가 감소하였기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 *ABS*가 *BS*보다 지수 값과 상관계수(*R*)가 더 큰 것은 신갈나무군락을 이루는 수목의 현존량이 직경급에 따른 군락의 구조 뿐만 아니라 수목의 종 풍부도에 의한 영향에도 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 이 결과는 *ABS*보다 *BS*의 상관계수가 더 높았던 Con *et al.* (2013)과 Martinez-Sanchez *et al.* (2016)의 열대지역의 연구 결과와 다른 것이었다.

*BS* 그리고 *ABS*와 지상부 생물량은 서로 양의 상관관계를 나타내었다(Figure 4). *BS*와 지상부 생물량에 대한 상관

Table 4. Statistical results about relationships between above-ground biomass and biodiversity indices (*H'* and *J'*), structural diversity(*BS* and *ABS*)

	<i>H'</i>	<i>J'</i>	<i>BS</i>	<i>ABS</i>
Pattern	Positive linear	Positive linear	Positive linear	Positive linear
R	0.83	0.88	0.73	0.86
<i>p</i> value	0.0056	0.0019	0.0263	0.0029

계수와 유의확률(p value)은 각각 0.73, 0.0263이었으며 ABS와 지상부 생물량에 대한 상관계수와 유의확률(p value)은 각각 0.86과 0.0029였다(Table 4). 이 결과는 신갈나무군락의 직경급에 따른 구조적 요인이 지상부 생물량과 서로 유기적인 관계에 있음을 나타낸다. 구조적으로 다양한 숲이 식생을 통하여 더 많은 물질과 탄소를 저장한다는 연구는 열대지역(Con *et al.*, 2013, Martinez-Sanchez *et al.*, 2016)과 온대지역(Lei *et al.*, 2009, Wang *et al.*, 2011)의 산림을 대상으로 수행된 바 있는데 본 연구의 결과와 같았다.

식물 군락의 구조는 생물종 다양성과 생물량 사이의 패턴을 반영한다는 점에서 특히 중요하다(Szwagrzyk and Gazda, 2007). Ishii *et al.* (2004)는 군락의 구조적 복잡성이 식물종들의 상호보완적인 자원활용을 통하여 숲의 성장을 증가시키고 이는 곧 자원이 풍부한 서식처 조성으로 연결되어 수목을 서식 기반으로 하는 생물들의 다양성이 상승된다고 밝힌 바 있다. 그리고 유럽너도밤나무군락의 식물체에는 500-600Mg C ha<sup>-1</sup>의 많은 양의 탄소를 축적하고 있는데,

그것은 DBH ≥ 50cm인 오래된 유럽너도밤나무의 기저면적이 군락 전체의 30%이상이기 때문인 것으로 분석되었다(Merino 2007). 본 연구가 진행된 신갈나무군락에서 DBH ≥ 50cm인 수목의 기저면적 비율은 43.4%이었으며 타 지역 산림 보다 현존량이 높아 식물체에서의 탄소 축적량이 많을 것으로 판단된다. 점봉산의 신갈나무군락이 200년 이상 유지될 것을 감안 할 때(Lee *et al.*, 2000), 향후 점봉산 신갈나무군락의 종 다양성 및 구조적 다양성의 증가로 인한 물질생산과 탄소축적의 잠재성이 높아 지속가능한 보전과 지속적인 식생 동태 연구가 필요하다.

식생 발달과정을 통한 종 다양성 및 구조적 다양성과 지상부 생물량의 관계에 대한 연구는 지역적인 주요 우점식생의 생태적 특성을 파악하는 한편, 서로 다른 생태환경에 따라 반응하는 산림생태계의 개별적 특성을 분석하는데 중요하다고 할 수 있다. 특히 천이 초기 단계의 식생은 종 다양성 변화와 물질생산의 능력이 크고 같은 상관의 식생일지라도 기후 환경에 따라 생육에 차이가 나타나기 때문이다. 베트

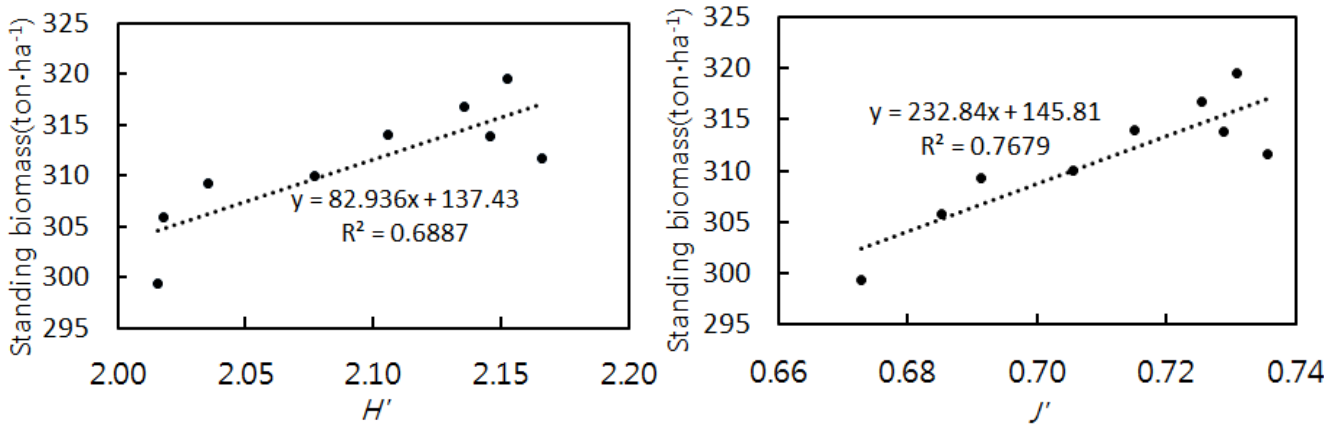


Figure 3. Relationships between aboveground biomass and measure of biodiversity (Shannon index;  $H'$ , and Shannon evenness;  $J'$ )

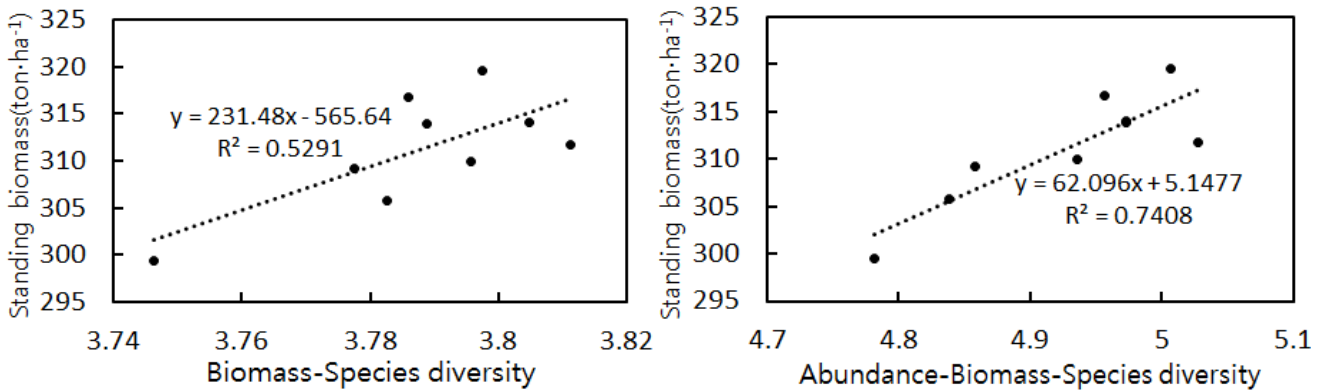


Figure 4. Relationship between aboveground biomass and measures of structure-species-diversity (biomass-species diversity ( $BS$ ) and abundance-biomass-species diversity ( $ABS$ ))

남에서 다양한 임령의 상록활엽수림과 낙엽수림의 지상부 생물량은 종 다양성 지수( $H'$ ),  $BS$ ,  $ABS$ 와 선형의 관계를 나타냈으나 종 균등도( $J'$ )와 음의 지수함수 관계를 나타내 본 연구와 부분적으로 차이가 있었다(Con *et al.*, 2013). 이 결과는 종 균등도( $J'$ )는 높으나 지상부 생물량이 매우 낮기 때문인 것으로 분석된 바 있으며 Puerto Rico의 아열대 산림 역시 동일한 결과를 나타냈다(Vance-Chalcraft, 2010). 반면 브라질 Eucalyptus 식재림에서 각 수목의 구조적 균등도 감소는 7년 동안 생산성이 20% 이상 감소했다고 보고된 바 있다(Soares *et al.*, 2016). 캐나다 전나무 우점 산림에서 군락의 구조적 다양성은 지상부 생물량에 양의(positive) 관계를 가지며, 군락의 구조적 다양성 증가는 곧 지상부의 탄소 저장 능력을 상승시킨다고(Wang *et al.*, 2010) 하여 본 연구와 유사한 경향을 나타냈다. 이상의 전술한 연구 결과들과 본 연구결과를 종합해 볼 때, 생물종 다양성과 구조적 다양성의 증가는 직·간접적으로 산림의 생산성 향상에 기여하며 이러한 경향은 본 연구에서 처음 시도된 점봉산의 신갈나무군락과 같았다. 최근 산림의 생산성은 생물종 다양성보다 구조적 다양성에 더 관계가 있다고 연구되어(Dănescu *et al.*, 2016) 본 연구와 차이를 나타냈다. 또한 국내외에서 천이 과정에 따른 산림의 생물종 다양성 및 구조적 다양성과 지상부 생물량의 관계에 대한 연구는 찾아보기 어려운 실정이며, 기후변화와 인간의 간섭 등 외부 영향에 기인한 생태계 변화를 평가하기 위한 연구가 요구되고 있다. 따라서 주요 산림생태계의 장기적인 식생 연구를 통하여 연속적인 데이터를 지속적으로 수집하는 한편, 기존의 여러 관련 분야의 기관에서 수행하고 있는 식생 데이터를 충분히 활용하여 변화하는 산림생태계의 특성과 기능의 관계를 평가하기 위한 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

종 다양성과 군락의 구조적 다양성 지수를 통하여 본 연구 결과는 적절한 산림사업을 위한 방안으로 활용이 가능하다. 산림의 생태적 복원이 필요한 지역 또는 산림의 경제적 활용을 위한 조림지에 단일 수종 또는 동일한 수령의 수목을 식재하기보다 지역적인 기후환경과 지형에 따른 산림생태계의 개별성을 고려하여 적합한 수종의 선정과 수목의 다양한 DBH 크기를 갖는 수목으로 식재하고 관리함으로써, 산림의 현존량과 생산성을 늘리고 탄소 저감의 양과 속도를 증가시킬 수 있어 산림 생태계 기능의 향상에 효과적이라 할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 국가장기생태연구와 한국환경산업기술원(2014001310009, 기후변화대응 환경기술개발사업)의 지원으로 수행되었으며, 장기생태연구 자료 활용에 흔쾌히

협조해 주신 강릉원주대학교 이규송 교수님께 감사의 마음을 전합니다.

## REFERENCES

- Ali A., M. S. Xu, Y. T. Zhao, Q. Q. Zhang, L. L. Zhou, X. D. Yang and E. R. Yan.(2015) Allometric biomass equations for shrub and small tree species in subtropical China. *Silva Fennica* 49:id1275
- Caspersen, J. P., S. W. Pacala(2001) Successional diversity and forest ecosystem function. *Ecological Research* 16, 895-93
- Cheon, K., J. Byun, S. Jeong and J. Sung(2013) Community structure of *Quercus mongolica* stand in Hyangrobong area, Baekdudaegan. *Journal of agriculture & life science* 48:1-13(in Korean with English abstract)
- Con, T. V., N. T. Thang, D. T. T. Ha, C. C. Khiem, T. H. Quy, V. T. Lam, T. V. Do and T. Sato(2013) Relationship between above-ground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. *Forest Ecology and Management*. 310:213-218
- Creed, R. P., R. P. Cherry, J. R. Pflaum and C. J. Wood(2009) Dominant species can produce a negative relationship between species diversity and ecosystem function. *Oikos* 118, 723-32
- Dănescu, A., A. T. Albrecht, J. Bauhus. 2016. Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. *Oecologia* 182:319:333
- Do, T. V., A. Osawa and N. T. Thang(2010) Recovery process of a mountain forest after shifting cultivation in Northwestern Vietnam. *Forest ecology and management* 259:1650-1659
- Dong L., L. Zhnag and F. Li(2015) Developing additive systems of biomass equations for nine hardwood species in Northeast China. *Trees* 29:1149-1163
- Hector, A., B. Schmid, C. Beierkuhnlein, M. C. Caldeira, M. Diemer, P. G. Dimitrakopoulos, J. A. Finn, H. Freitas, P. S. Giller, J. Good, R. Harris, P. Hogberg, K. Huss-Danell, J. Joshi, A. Jumpponen, C. Körner, P. W. Leadley, M. Loreau, A. Minns, C. P. H. Mulder, G. O'Donovan, S. J. Otway, J. S. Pereira, A. Prinz, D. J. Read, M. Scherer-Lorenzen, E. D. Schulze, A. S. D. Siamantziouras, E. M. Spehn, A. C. Terry, A. Y. Troumbis, F. I. Woodward, S. Yachi and J. H. Lawton(1999) Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* 286, 1123-1126.
- Hooper, D.U., F. S. Chapin III, J. J. Ewel, A. Hector, P. Inchausti, S. Lavorel, J. H. Lawton, D. M. Lodge, M. Loreau, S. Naeem, B. Schmid, H. Setälä, A. J. Symstad, J. Vandermeer and D. A. Wardle(2005) Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*. 75: 3-35
- Ishii, H. T., S. Tanabe and T. Hiura(2004) Exploring the relation-



- ships among canopy structure, stand productivity and biodiversity of temperate forest ecosystems. *Forest science* 50:342-355
- Keddy, P.(2005) Putting the plants back into plant ecology: six pragmatic models for understanding and conserving plant diversity. *Ann. Bot.* 96: 177-189
- Korea National Arboretum(2014) Geography and vegetation of Mt. Jumbong experimental forest. Sumeungil Press. Seoul(in Korean)
- Kwak, J. I., K. J. Lee, B. H. Han, J. H. Song and J. S. Jang(2013) A study on the vegetation structure of evergreen broad-leaved forest. *Korean Journal of Environmental Ecology* 27:241-252 (in Korean with English abstract)
- Kwak, Y. S., Y. K. Hur, J. H. Song and J. K. Hwangbo(2004) Quantification of atmospheric purification capacity by afforestation impact assessment of Kwangyang Steel Works. *Research Institute of Industrial Science & Technology* 18(4):334-340 (in Korean with English abstract)
- Kwon, K. C. and D. K. Lee(2006) Above- and below-ground biomass and energy content of *Quercus mongolica*. *Journal of Korean For. Energ. Society* 25:31-38(in Korean with English abstract)
- Lee, H. Y., J. H. Lee and C. W. Yun(2015) Characteristics of species composition and community structure for the forest vegetation of aspect area in Mt. Eungbok. *Korean J. En. Ecol.* 29:791-802(in Korean with English abstract)
- Lee, W. S., J. H. Kim and G. Z. Jin(2000) The analysis of successional trends by topographic positions in the natural deciduous forest of Mt. Chumbong. *Journal of Korean Forestry Society* 89:655-665(in Korean with English abstract)
- Lei, X., W. Wang and C. Peng(2009) Relationships between stand growth and structural diversity in spruce-dominated forests in New Brunswick, Canada. *Can. J. For. Res.* 39:1835-1847
- Lim J. H., J. H. Shin, G. Z. Jin, J. H. Chun, and S. O. Jeong(2003) Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung National Forest in Korea. *Korean Journal of agricultural and Fores Meteorology* 5:101-109 (in Korean with English abstract)
- Magurran, A. E(1988) *Ecological diversity and Its measurement*. Princeton University Press. Princeton N. J.
- Martinez-Sanchez, J. L., B. J. Tigar, L. Camara and O. Castillo (2016) Relationship between structural diversity and carbon stocks in humid and sub-humid tropical forest of Mexico. *Ecoscience* at:21-26
- Ministry of environment(2013) Long-Term Ecological Research. 2133p. (in Korean)
- Merino, A, C. Real, J. G. Alvarez-Gonzalez and M. A. Rodriguez-Guitian(2007) Forest structure and C stocks in natural *Fagus sylvatica* forest in southern Europe: The effects of past management. *Forest ecology and management* 250:206-214
- Mulder C. P. H., E. Bazeley-White, P. G. Dimitrakopoulos, A. Hector, M. Scherer-Lorenzen and B. Schmid(2004) Species evenness and productivity in experimental plant communities. *Oikos* 107: 50-63
- Ni, J. X. Zhang and JMO Scurlock(2001) Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forest. *Ann. of for. sci.* 58:351-384
- Odum, E. P(1971) *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia, PA, USA, W. B. Saunders & Co.
- Park, I. H., D. Y. Kim, Y. H. Son, M. J. Yi, H. O Jin and Y. H. Choi(2005) Biomass and net production of a natural *Quercus mongolica* forest in Namsan, Seoul. *Korean Journal of Environmental Ecology* 19:299-304(in Korean with English abstract)
- Park. I. H. and K. D. Kim(1986) Forest structure, biomass, and net production in a natural forest ecosystem at Mt. Baekun area. *Journal of Korea Forestry Energy* 6:1-45 (in Korean with English abstract)
- Park, I. H., Y. K. Seo, D. Y. Kim, Y. H. Son, M. J. Yi and H. O Jin(2003) Biomass and net production of a *Quercus mongolica* stand and a *Quercus variabilis* stand in Chuncheon, Kangwon-do. *Journal of Korean Forestry Society* 92:52-57(in Korean with English abstract)
- Rapp, M., I. S. Regina, M. Rico and H. A. Gallego(1999) Biomass, nutrient content litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests. *Forest ecology and management* 119:39-49
- Son, Y., D. Y. Kim, I. H. Park, M. J. Yi and H. O Jin(2007) Production and nutrient cycling of oak forests in Korea: A case study of *Quercus mongolica* and *Q. variabilis* stands. *Kangwon national university press* 57p.(in Korean)
- Son, S. Y., K. C. Kwon and T. S. Jeong(2002) Productive structure and net production of *Quercus mongolica* forest in Mt. Taehwa (Kwangju, Kyeonggi-do). *Journal of Korea Forestry Energy* 21:76-82(in Korean with English abstract)
- Son Y. M., R. H. Kim, K. H. Lee, J. K. Pyo, S. W. Kim, J. S. Hwang, S. J. Lee and H. Park(2014) Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. *KFRI* (in Korean with English abstract)
- Stocker, R., Ch. Korner, B. Schmid, P. A. Niklaus and P. W. Leadley(1999) A field study of the effects of elevated CO<sub>2</sub> and plant species diversity on ecosystem-level gas exchange in a planted calcareous grassland. *Global change biology* 5:95-105
- Szwagrzyk, J. and A. Gazda(2007) Above-ground standing biomass and tree species diversity in natural stands of Central Europe. *Journal of Vegetation Science* 18:555-562
- Ter-Mikaelian M. T. and M. D. Korzukhin(1997) Biomass equations for sixty-five North American tree species. *For. Ecol.*

- Manage 97:1-24
- Tilman, D., D. Woding and J. Knops(1996) Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystem. *Nature* 379:718-720
- Vance-Chalcraft, H. D., M. R. Willing, S. B. Cox, A. E. Lugo and F. N. Scatena(2010) Relationship between aboveground biomass and multiple measures of biodiversity in subtropical forest of Puerto Rico. *Biotropica* 42:290-299
- Wang C.(2006) Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222:9-16
- Wang, W., X. Lei, Z. Ma, D. D. Kneeshaw and C. Peng(2011) Positive relationship between aboveground carbon stocks and structural diversity in spruce-dominated forest stands in New Brunswick, Canada. *Forestry Science* 57:506-515
- Whittaker, R. H. and G. E. Likens(1973) Primary production: The biosphere and Man. *Human Ecology* 1:357-369
- Wilsey, B. J. and C. Potvin(2000) Biodiversity and ecosystem functioning: Importance of species evenness in an old field. *Ecology* 81:887-892
- Yuste, J. C., B. Konopka, I. A. Janssens, K. Coenen, C. W. Xiao and R. Ceulemans(2005) Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and *Pinus sylvestris*. *Tree physiology* 25:701-712