

위도와 해발고에 따른 신갈나무림의 에너지 고정량

권기철^{1*} · 이돈구²

¹국립산림과학원, ²서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부

Energy Content of *Quercus mongolica* Stands in Korea with Respect to Latitude and Altitude

Ki-Cheol Kwon^{1*} and Don Koo Lee²

¹Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

요 약: 본 연구는 위도와 해발고에 따른 우리나라 신갈나무림의 에너지 고정량을 알아보기 위해 강원도 평창군 중왕산 지역(해발 1,300 m, 1,000 m, 800 m), 경기도 광주시 태화산 지역(해발 350 m), 충청북도 제천시 월악산 지역(해발 300 m), 전라남도 광양시 백운산 지역(해발 800 m), 제주도 서귀포시 한라산 지역(해발 1,000 m)을 대상으로 수행되었다. 우리나라 신갈나무림의 에너지량은 2,916~6,550 GJ/ha이고, 연간 에너지 고정량은 250~440 GJ/ha이다. 신갈나무림의 에너지량과 연간 에너지 고정량은 위도가 낮아질수록 더 많아지는 것으로 나타났다. 해발고가 낮을수록 신갈나무림의 에너지량은 증대되는 것으로 나타났다. 신갈나무림의 연간 에너지 고정량과 환경 인자간의 상관관계는 온도, 해발고, 임령, 사면 등의 순서로 크게 나타났다.

Abstract: This study was conducted to investigate differences in energy content of *Quercus mongolica* stands in the Republic of Korea with respect to latitude and altitude. Study sites were located in Mt. Joongwang, Pyeongchang-gun, Gangwon-do (altitude 1,300 m, 1,000 m, 800 m), Mt. Taehwa, Gwangju-gun, Gyeonggi-do (altitude 350 m), Mt. Wolak, Jecheon-si, Chungcheongbuk-do (altitude 300 m), Mt. Baekwoon, Gwangyang-gun, Jeollanam-do (altitude 800 m), and Mt. Halla, Jeju-do (altitude 1,000 m) by northern and southern aspect. Total energy content and annual energy fixation of *Q. mongolica* stands were 2,916-6,550 GJ/ha and 250-440 GJ/ha, respectively during the study period. Lower latitude (NE) stands of *Q. mongolica* showed more energy contents and annual energy fixation than higher latitude stands. Energy content and annual energy fixation of *Q. mongolica* stands were increased in low altitude. Energy content of *Q. mongolica* stands were higher in northern aspect than southern aspect. However, there were no significant differences in annual energy fixation between the aspects. Annual energy fixation of *Q. mongolica* stands was highly correlated with warm index and followed by descending orders: altitude, stand age, aspect, annual solar radiation and latitude.

Key words : *Quercus mongolica*, biomass, energy content, latitude, altitude

서 론

생태계에서 식물의 바이오매스 생산량이 가장 많은 것은 산림 생태계로 알려져 있으며, 산림 생태계 내의 에너지 흐름과 유기물 축적량을 파악하기 위한 연구가 계속 진행되어 왔다. 특히 물질 생산에서 순생산 에너지량을 계산하기 위해서 식물체의 발열량을 직접 측정하는 기법이 개발되었다(Ovington과 Heitkamp, 1960). 식물이 생산하

는 열량은 곧 태양에너지가 고정되는 것이며, 지구의 육상 생태계에서 식물에 의해 매년 고정되는 에너지량은 $425\sim 530 \times 10^{15}$ Kcal에 달한다(Lieth, 1973).

미국에서는 2010년까지 목재자원으로 미국 내 에너지 자원의 4%를 충당할 수 있도록 계획하고 산림의 바이오매스와 바이오에너지에 대한 많은 연구를 진행하고 있다(U.S. Department of Energy, 1986). 그러나 우리나라에서 신갈나무림의 물질 생산량에 대한 연구는 일정 지역의 임분에 국한되어 수행되었을 뿐이며(박인협, 2003), 위도와 해발고에 따른 에너지량의 분포에 대한 연구는 없는 실정이다. 최근 임목이 재생가능한 에너지 자원으로 고려됨에

*Corresponding author
E-mail: kkch30@yahoo.co.kr

따라 대체 에너지원으로서의 생산성 파악을 위해서는 물질 생산량 뿐만 아니라 유기 에너지량에 관한 연구도 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 신갈나무림을 대상으로 여러 환경인자, 특히 위도와 해발고에 따른 에너지 고정량의 차이를 구명하는 것이다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구는 신갈나무가 우점하고 있는 강원 평창 중왕산 지역(37° 29' N, 128° 32' E), 경기 광주 태화산 지역(37° 19' N, 127° 18' E), 충북 제천 월악산 지역(36° 51' N, 128° 11'E), 전남 광양 백운산 지역(35° 15' N, 127° 35' E), 제주 서귀포 한라산 지역(33° 21' N, 126° 31' E)을 대상으로 위도, 해발고, 사면, 지형 등을 고려하여 선정했다 (Figure 1., Table 1. 참조).

2. 조사 방법

1) 식생

각 조사구(20 m×20 m) 내에 출현한 흉고직경 4 cm 이상의 목본식물에 대하여 수종, 흉고직경, 수고를 측정했다. 수종의 명명은 산림청의 국가 표준식물목록을 기준했다.

2) 기상 환경

조사지 인근의 무인기상관측장치(CR10X, Campbell Scientific, INC.)에서 얻은 기상 자료 중 온량지수, 연간 강수량, 연간 일사량을 Table 2에 요약했다. 중왕산 지역은

2004년 8월 말부터 9월 초 사이에 바이오매스 조사가 이루어졌으므로 2003년 9월부터 2004년 8월까지의 기상 자료를 수집했으며, 2003년에 바이오매스 조사가 수행된 다른 지역들은 2002년 9월부터 2003년 8월까지의 기상 자료를 수집했다.

3) 지형 및 토양 환경

환경 조건으로는 조사구의 방위, 해발고, 평균 경사도, 지형, 토양 환경 등을 조사했다. 조사구 내 임의의 3곳에서 A층 토양의 깊이를 측정하고 다음 약 2 kg의 토양시료를 균등 채취한 후 밀봉하여 운반하였고, 2 mm 표준체를 통과한 토양으로 분석했다. 토성은 비중계법을 이용하였고, 토양 수분 함량은 건조기에서 100°C로 48시간 이상 건조시킨 후 감소한 무게의 차이로, 토양 내 유기물 함량은 건조 직후의 토양을 600°C에서 6시간 동안 유기물을 태운 후 감소한 무게의 차이로 측정했다. 토양 pH는 토양 시료와 증류수를 1:5의 비율로 섞어 pH meter(HANNA Instrument Inc.)로 측정했다.

토양의 물리·화학적 성질은 식생의 다양성과 생산성을 결정하는데 중요한 역할을 하며(Lag, 1990; 한상돈, 1995), Table 3에 조사지의 토양 환경을 요약했다. 조사지의 토양 수분이 가장 건조한 곳은 태화산 지역으로서 평균 20% 내외이고, 기타 지역은 35% 내외의 수분 함량을 보이고 있었다. 그러나 토성이 식토인 한라산 지역은 주변에 습지가 형성되어 있어서 토양 수분 함량이 50% 정도로 매우 높아 신갈나무의 생육에 불리한 것으로 나타났다. 토양 유기물 함량은 토양 구조, 토양 공극, 통기성, 토양 온도 변화, 보수력, 양이온 치환능력, 양료 공급 등에 중요한 영향을 주

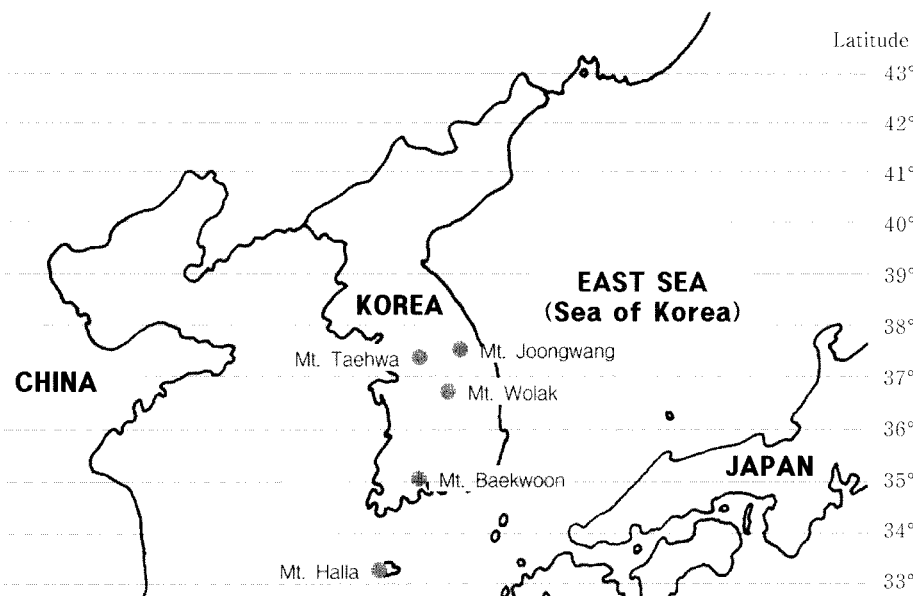


Figure 1. Location of the study sites.

Table 1. The characteristics of the study sites.

Sites	Plot no.	Altitude (m)	Topo.*	Aspect (°)	Slope (°)	Mean age (yr.)	SV** (%)	No/ha	No. of sample trees***	Sub-major species****
Mt. Joongwang	J-01	1,275	US	NE70	19	70	75.9	1,725	-	PD, APM
	J-02	1,300	US	NE10	25	70	90.7	1,375	7	-
	J-03	1,275	R	NE50	18	70	83.4	1,225	-	MA
	J-04	1,300	US	SE45	15	70	94.5	1,250	6	-
	J-05	1,275	R	SE58	22	70	71.8	1,300	-	UD, APM
	J-06	1,250	US	SE20	35	70	80.2	1,450	-	APM
	J-07	1,000	MS	NE8	23	60	89.7	1,600	7	-
	J-08	1,000	MS	NE42	25	60	98.4	1,250	-	KS
	J-09	950	MS	NE54	25	60	91.3	1,075	-	TA, APM
	J-10	1,000	MS	SE15	27	70	93.2	1,250	6	-
	J-11	1,000	MS	SE40	20	70	89.7	1,175	-	FR
	J-12	1,050	MS	SE20	25	70	91.4	1,100	-	FR
	J-13	770	R	NW30	5	60	82.4	1,275	6	FR
	J-14	780	V	NE35	30	60	75.6	1,575	-	APM, FR
	J-15	825	LS	NW25	27	60	72.3	1,750	-	MA, FR
	J-16	800	MS	SE60	25	60	88.5	1,200	5	PDS
	J-17	825	MS	SE80	23	60	87.4	1,275	-	PDS, MA
	J-18	890	R	SE85	25	60	86.8	1,325	-	FR
Mt. Taehwa	T-01	350	MS	SW50	15	35	80.5	1,875	8	QV, CC
	T-02	340	MS	SW45	15	35	78.7	1,775	-	QV, CC
	T-03	380	MS	SW70	20	35	79.4	1,950	-	QV, PS
Mt. Wolak	W-01	300	LS	NE65	10	35	80.8	2,425	10	QV, SO
	W-02	320	LS	NE60	15	35	84.4	2,050	-	QV, SO
	W-03	275	LS-V	NE80	10	35	82.5	2,475	-	QV, SO
Mt. Baekwoon	B-01	800	US	NW70	38	60	85.3	1,325	6	AP, SB
	B-02	780	US	NW75	38	60	86.5	1,375	-	AP, SO, SB
	B-03	770	MS	NW75	35	60	78.8	1,400	-	QS, CL, SB
	B-04	810	US	SW40	35	70	80.8	1,525	9	CL, RS
	B-05	790	US	SW40	35	70	87.5	1,575	-	RS, SB
	B-06	820	US	SW30	38	70	85.8	1,500	-	RS, SB
Mt. Halla	H-01	1,020	MS	NE20	10	60	77.4	2,450	-	QS, AP
	H-02	1,000	MS	NE10	10	60	89.5	2,033	5	QS, AH, SB
	H-03	980	MS	NW5	10	60	83.7	2,475	-	QS, AP, SB
	H-04	1,040	MS	SW10	10	60	88.3	2,850	-	UD, AP, SB
	H-05	1,010	MS	SW25	10	60	72.6	3,500	-	UD, SB
	H-06	1,000	MS	SE10	10	60	81.9	2,800	5	APM, SB

*Topography : R; Ridge, US; Upper slope, MS; Middle slope, LS; Lower slope, V; Valley

**SV : Synthetic Value of *Quercus mongolica*, $SV = (RD + RC) / 2$

***Sample trees collected for investigating biomass and energy content

****Sub-major species : AH; *Abies holophylla*, AP; *Acer pseudosieboldianum*, APM; *Acer pictum* subsp. mono, CC; *Castanea crenata*, CL; *Carpinus laxiflora*, FR; *Fraxinus rhynchophylla*, KS; *Kalopanax septemlobus*, MA; *Maackia amurensis*, PD; *Populus davidiana*, PDS; *Pinus densiflora*, PS; *Prunus sargentii* var. *sargentii*, QS; *Quercus serrata*, QV; *Quercus variabilis*, RS; *Rhododendron schlippenbachii*, SB; *Sasa borealis*, SO; *Styrax obassia*, TA; *Tilia amurensis*, UD; *Ulmus davidiana*

는 것으로 알려져 있으며(芝本武夫, 1954), 월악산 지역이 평균 4.3%로 가장 적고, 한라산 지역은 평균 25.0%로 가장 많았다.

4) 신갈나무의 에너지 고정량 측정

각 조사지에서 매목 조사 후 줄기가 둘로 나뉘지 않고

평균적인 수형을 보이는 임목을 흉고직경 6 cm부터 35 cm까지 직경급별로 선정했으며, 총 80본의 신갈나무를 벌채했다(Table 1).

(1) 바이오매스 측정

선정하여 벌채한 임목은 줄기, 가지, 잎을 분리하여 건중량을 측정했다. 여기서 2 m 간격으로 채취한 수간부의

Table 2. Meteorological data in the study sites.

Sites	Latitude (°)	Altitude* (m)	Warmth Index (°C · month)	Precipitation (mm)	Solar radiation (MJ/m ²)
Mt. Joongwang**	37.48	1,050	63.62	1,890.0	3,394.48
Mt. Taehwa	38.18	100	88.00	1,806.5	3,389.83
Mt. Wolak	36.85	200	96.67	1,851.0	3,735.40
Mt. Baekwoon	35.10	450	87.67	1,887.2	4,586.10
Mt. Halla	33.35	5	134.55	2,100.6	5,826.50

*Location of the automatic weather station

**The meteorological data of Mt. Joongwang collected in 2003-2004, and other sites in 2002-2003.

Table 3. Soil characteristics of the *Quercus mongolica* stands in study sites.

Site	Soil moisture (%)	pH (1:5 H ₂ O)	Organic matter (%)	Soil texture (USDA)
J-01	41.81	4.41	9.9	SCL
J-02	35.08	5.23	8.8	SCL
J-03	43.33	4.64	13.1	SCL
J-04	35.58	4.59	9.0	SCL
J-05	33.72	4.82	14.5	SCL
J-06	38.16	4.61	18.5	SL
J-07	37.32	4.58	7.6	SCL
J-08	43.80	4.45	11.9	SCL
J-09	43.12	4.25	13.1	SCL
J-10	29.30	5.00	10.6	SCL
J-11	29.99	4.57	8.4	CL
J-12	28.71	4.58	10.2	SCL
J-13	28.34	4.04	15.0	SCL
J-14	34.96	4.57	9.5	SCL
J-15	35.19	4.51	9.1	SCL
J-16	36.52	4.44	8.9	SL
J-17	36.30	5.12	7.9	L
J-18	26.99	4.77	8.4	SL
T-01	23.12	4.73	12.4	SL
T-02	12.85	4.79	4.9	SL
T-03	24.78	5.08	11.8	SL
W-01	26.03	5.68	2.6	SL
W-02	38.20	4.45	4.8	SCL
W-03	36.09	4.53	5.6	SCL
B-01	37.46	4.25	10.2	SCL
B-02	38.49	4.51	16.6	SCL
B-03	36.74	4.25	12.7	SCL
B-04	38.14	3.97	11.1	SCL
B-05	33.48	4.40	12.8	SCL
B-06	29.32	4.40	12.1	SL
H-01	46.56	4.16	22.1	SiC
H-02	48.37	4.10	23.7	C
H-03	48.77	4.28	24.9	C
H-04	53.70	4.80	24.6	C
H-05	53.31	4.38	20.6	SiCL
H-06	50.30	4.13	22.0	C

단편은 다시 수피를 박피하여 목질부와 수피부의 비율을 얻어냈다. 또한 수간석해를 통해 변재부와 심재부의 재적

을 측정하였고, 표본목당 2개씩 총 320개의 표본을 절삭하여 마이크로미터와 전자저울로 각각의 목편을 측정하여 변재와 심재의 부피별 중량을 알아냈다.

지하부의 바이오매스를 측정하기 위해 각 조사지별로 1~2분씩 신갈나무의 뿌리를 전부 캐내어 총 18본의 뿌리 생중량을 측정했다. 또한 전체 중량의 5% 정도에 해당하는 일부를 채취하여 80°C 이상에서 항중이 될 때까지 건조시켜 뿌리의 건조중량을 구했다.

(2) 열 에너지량 측정

각 조사구에서 채취한 전체 신갈나무 표본목에서 각 부위별(수피, 변재부, 심재부, 잎)로 USA Oxygen Bomb Calorimeter (1241 PARR)를 이용하여 열에너지량을 2만복 측정하여 평균했다. 열량 분석에 이용된 시료의 수는 수피부 160개, 변재부 160개, 심재부 160개, 잎 160개, 뿌리 36개로서 총 676개이다.

에너지량은 $D^2H(DBH(cm))^2 \times$ 수고(m)와 줄기, 변재, 심재, 수피, 가지, 잎, 뿌리의 관계를 $\log E = A \log D^2H + B$ 의 상대생장식을 유도해 계산했다. 여기서 지상부 에너지량의 상대생장식은 6개 조사지 각각에서 구했고, 지하부는 전체 조사지에서 얻은 표본목을 통합하여 구했다. 연간 에너지 고정량은 80본의 표본목을 수간석해하여 1년간의 흉고직경과 수고 생장량을 조사하고, 여기서 얻은 D^2H 를 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 에너지량 차이로 계산했다.

5) 자료 분석

(1) 환경 인자에 따른 상관

신갈나무림의 연간 에너지 고정량과 환경 인자와의 상관관계를 살펴보기 위해 내부 인자로는 임령을, 외부 인자로는 1차 인자인 기상 인자(온량지수, 강수량, 일사량)와 토양 인자(토양 유기물 함량, 토양 수분 함량) 및 2차 인자인 지형 인자(위도, 해발고, 사면)를 상관 분석했다. 또한 환경 인자에 따른 연간 에너지 고정량을 추정하기 위해 환경 인자들을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 했으며, stepwise 방법으로 최적화된 회귀모형을 도출했다.

온량지수는 각 기상관측장치가 설치된 곳의 해발고를

Table 4. The aspect where plots were situated was quantified based on annual net production.

Aspect	SE	NW	E	NE	S	N	SW	W
Quantity	13.98	14.16	15.56	17.21	17.69	17.70	18.74	20.50

기준으로 조사구별 해발고의 변동에 따라 해발 100 m당 0.5°C의 기온을 증감하여 구했다. 사면은 8방위로 구분한 다음, Table 4와 같이 각 방위별 연간 순생산량 값을 평균하여 정량화했다. 임령은 각 조사지 내 상층 임목의 평균 연령을 50년생 이하는 5년 단위로, 50년생 이상은 10년 단위로 파악했다(Table 1). 온량지수, 강수량, 일사량 등 기상 데이터는 바이오매스를 조사한 해의 전년도 9월부터 조사한 당해년도 8월까지의 합계로 했다.

(2) 위도와 해발고에 따른 차이

위도와 해발고에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량을 비교하기 위해 분산분석(ANOVA)으로 유의성 검정을 했다. 위도의 경우에는 해발고와 임령이 유사한 중왕산 1,000 m와 800 m 지역, 백운산 800 m 지역, 한라산 1,000 m 지역을 사면별로 비교했으며, 해발고는 중왕산 지역에서 해발고 1,300 m, 1,000 m, 800 m 각각의 조사구를 대상으로 사면별로 비교했다. 회귀분석과 ANOVA에는 SAS version 9.1.3(SAS Inc., 2005)이 사용되었다.

결과 및 고찰

1. 신갈나무림의 에너지량

신갈나무림의 지상부 에너지량을 구하기 위한 상대생

장식을 Table 5에 요약했다. 백운산 지역의 가지와 잎을 제외하면 결정계수가 모두 0.9 이상으로 높게 나타났다. 한편, 지하부 에너지량(J)의 상대생장식은 $\log_{ER} = 5.713 + 0.841 \log D^2H$ ($R^2=0.97$)로 유도되었다.

Figure 2는 각 조사지별로 신갈나무림의 부위별(잎, 가지, 변재부, 심재부, 수피, 뿌리) 에너지량을 나타낸 것이다. 신갈나무림의 에너지량은 지상부가 2,331 GJ/ha에서 5,568 GJ/ha 사이에 분포했으며, 지하부와와의 총합은 2,916 GJ/ha에서 6,550 GJ/ha로 나타났다. 지역별로는 한라산 해발 1,000 m 북사면이 6,550 GJ/ha로 가장 높았고, 태화산 해발 350 m 남사면의 신갈나무림이 2,916 GJ/ha로 가장 낮았다. 월악산 해발 300 m 북사면 신갈나무림의 에너지량은 3,796 GJ/ha으로서 중왕산 해발 1,000 m 남사면 지역(4,181 GJ/ha)이나 중왕산 해발 1,300 m 북사면 지역(4,352 GJ/ha) 및 남사면 지역(4,259 GJ/ha)보다 낮은 수준이었다.

다른 임분의 에너지량과 비교하면, 충북 월악산 48년생 소나무림 6,086 GJ/ha, 24년생 잣나무림 1,028 GJ/ha, 30년생 낙엽송림 8,357 GJ/ha, 경기 광주 태화산 36년생 리기다소나무림 7,971 GJ/ha 등(이돈구와 권기철, 2005)으로서, 신갈나무림의 에너지량은 24년생 잣나무림보다 많지만 48년생 소나무림이나 30년생 낙엽송림, 36년생 리기다소나

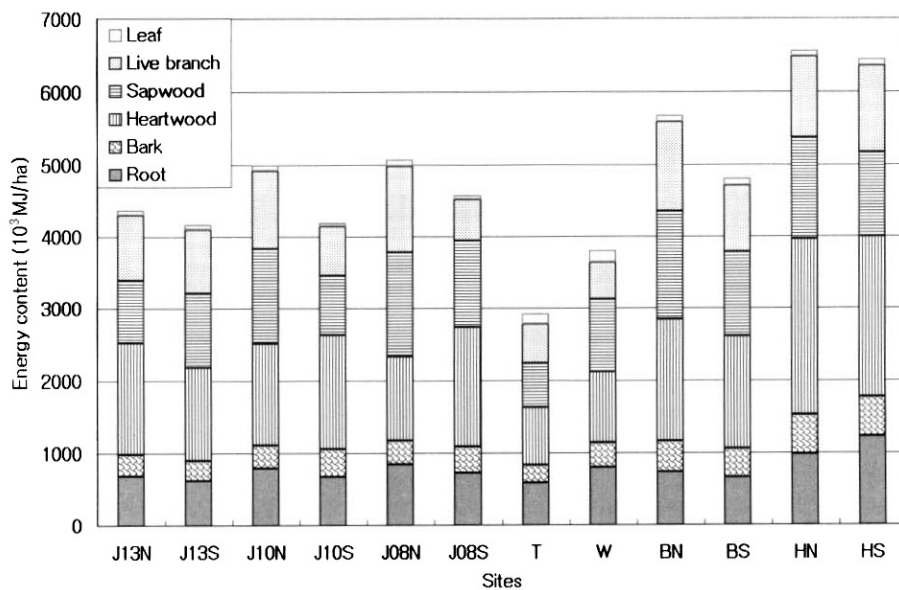


Figure 2. Energy content of *Q. mongolica* stands in the study sites.

J13N (Mt. Joongwang 1,300m N), J13S (Mt. Joongwang 1,300 m S), J10N (Mt. Joongwang 1,000 m N), J10S (Mt. Joongwang 1,000 m S), J08N (Mt. Joongwang 800 m N), J08S (Mt. Joongwang 800 m S), W (Mt. Wolak 300 m N), T (Mt. Taehwa 350 m S). BN (Mt. Baekwoon 800 m N), BS (Mt. Baekwoon 800 m S), HN (Mt. Halla 1,000 m N), HS (Mt. Halla 1,000 m S)

Table 5. Regression coefficients and R² when aboveground energy content of *Q. mongolica* was regressed on D²H [$\log Y = A + B \log X$; Y, energy content (J); X, DBH (cm)² × height (m)].

Parameter (Y)	A	B	R ²	Prob. level	A	B	R ²	Prob. level
Mt. Joongwang (1,300 m, N)				Mt. Taehwa (350 m, S)				
Stem wood	5.6002	1.0018	0.99	< 0.001	5.5151	1.0020	0.99	< 0.001
Sapwood	5.5721	0.8970	0.93	< 0.001	6.0512	0.7560	0.97	< 0.001
Heartwood	4.9885	1.1059	0.97	< 0.001	3.4218	1.5234	0.96	< 0.001
Stem bark	5.0168	0.9156	0.98	< 0.001	5.3852	0.8236	0.97	< 0.001
Live branches	3.9483	1.3050	0.90	< 0.001	3.5731	1.4274	0.99	< 0.001
Leaves	4.5318	0.8704	0.96	< 0.001	3.8043	1.1958	0.90	< 0.001
Mt. Joongwang (1,300 m, S)				Mt. Wolak (300 m, N)				
Stem wood	5.3968	1.0452	0.98	< 0.001	5.8186	0.9220	0.93	< 0.001
Sapwood	5.3354	0.9730	0.94	< 0.001	5.9706	0.8005	0.91	< 0.001
Heartwood	4.9284	1.0919	0.98	< 0.001	4.7649	1.1272	0.93	< 0.001
Stem bark	5.1763	0.8719	0.99	< 0.001	5.8107	0.7089	0.93	< 0.001
Live branches	4.3277	1.2196	0.97	< 0.001	4.9536	0.9943	0.96	< 0.001
Leaves	4.6624	0.8344	0.97	< 0.001	4.6558	0.9467	0.98	< 0.001
Mt. Joongwang (1,000 m, N)				Mt. Baekwoon (800 m, N)				
Stem wood	5.6915	0.9745	0.99	< 0.001	5.1520	1.1249	0.99	< 0.001
Sapwood	5.5675	0.9261	0.98	< 0.001	5.3352	1.0035	0.99	< 0.001
Heartwood	5.1657	1.0339	0.99	< 0.001	4.0464	1.3282	0.98	< 0.001
Stem bark	5.2051	0.8645	0.99	< 0.001	5.0386	0.9413	0.97	< 0.001
Live branches	3.3825	1.4487	0.93	< 0.001	4.5296	1.1763	0.87	0.003
Leaves	4.5775	0.8645	0.99	< 0.001	4.5427	0.8928	0.87	0.004
Mt. Joongwang (1,000 m, S)				Mt. Baekwoon (800 m, S)				
Stem wood	5.4643	1.0342	0.99	< 0.001	5.4300	1.0621	0.98	< 0.001
Sapwood	5.7438	0.8472	0.96	< 0.001	5.6462	0.9206	0.96	< 0.001
Heartwood	4.6575	1.1897	0.99	< 0.001	4.2211	1.3112	0.99	< 0.001
Stem bark	4.7782	1.0049	0.99	< 0.001	5.1863	0.9135	0.97	< 0.001
Live branches	4.4300	1.1548	0.97	< 0.001	4.6375	1.1443	0.97	< 0.001
Leaves	4.7378	0.7913	0.98	< 0.001	4.4472	0.9377	0.94	< 0.001
Mt. Joongwang (800 m, N)				Mt. Halla (1,000 m, N)				
Stem wood	5.7654	0.9487	0.99	< 0.001	5.2307	1.1127	0.98	< 0.001
Sapwood	5.5341	0.9406	0.99	< 0.001	5.5357	0.9339	0.90	0.007
Heartwood	5.3928	0.9536	0.94	< 0.001	3.6217	1.4825	0.99	< 0.001
Stem bark	5.3110	0.8339	0.99	< 0.001	4.5453	1.0784	0.97	< 0.001
Live branches	3.4584	1.4433	0.96	< 0.001	4.1024	1.2721	0.99	< 0.001
Leaves	3.2621	1.2015	0.92	0.001	5.2141	0.6716	0.97	< 0.001
Mt. Joongwang (800 m, S)				Mt. Halla (1,000 m, S)				
Stem wood	5.5219	1.0350	0.99	< 0.001	5.2167	1.1092	0.98	< 0.001
Sapwood	5.3711	0.9763	0.99	< 0.001	5.6481	0.8783	0.92	< 0.001
Heartwood	5.1184	1.0762	0.96	0.002	3.5867	1.5057	0.98	< 0.001
Stem bark	5.3284	0.8558	0.98	< 0.001	4.4902	1.0831	0.98	< 0.001
Live branches	3.8404	1.2824	0.90	0.008	4.0834	1.2740	0.98	< 0.001
Leaves	4.3094	0.9082	0.99	< 0.001	5.2006	0.6968	0.93	0.004

무림보다 적었다. 그 이유는 낙엽송과 리기다소나무가 생육적지에 조림되어 수고가 높고 생장이 빠르며 단위 건중당 열량도 신갈나무보다 더 높았기 때문으로 생각된다.

1) 위도에 따른 신갈나무림의 에너지량

Figure 2에서 신갈나무림의 에너지량을 보면 전체적으

로 위도가 낮아질수록 증가하고 있다. 이 중 해발고와 임령이 비슷한 중왕산, 백운산, 한라산 지역을 Figure 3에 비교하여 나타냈다.

북사면 지역 신갈나무림의 총 에너지량의 경우, 중왕산 해발 1,000 m 지역은 4,997 GJ/ha, 중왕산 해발 800 m 지역은 5,040 GJ/ha, 백운산 해발 800 m 지역은 5,666 GJ/

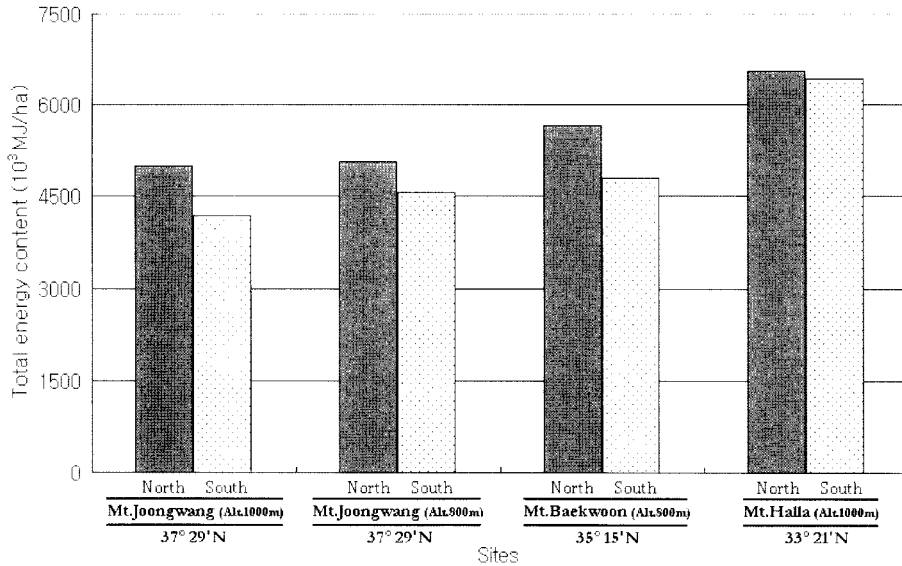


Figure 3. Energy content of *Q. mongolica* stands by latitude.

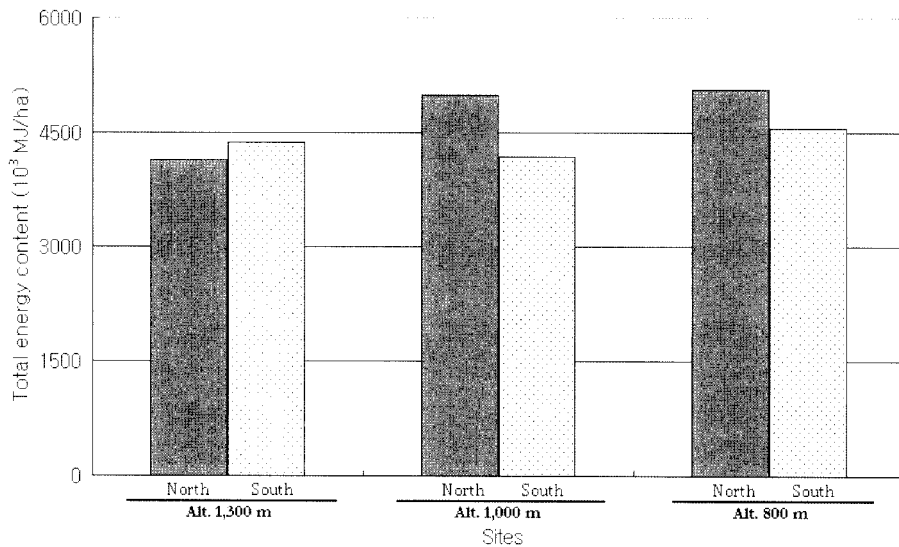


Figure 4. Energy content of *Q. mongolica* stands in Mt. Joongwang by altitude.

ha, 한라산 해발 1,000 m 지역은 6,550 GJ/ha로서 위도가 낮아짐에 따라 증가했다. 남사면 지역에서도 마찬가지로 중왕산 해발 1,000 m 지역은 4,181 GJ/ha, 중왕산 해발 800 m 지역은 4,560 GJ/ha, 백운산 해발 800 m 지역은 4,793 GJ/ha, 한라산 해발 1,000 m 지역은 6,435 GJ/ha로 나타나, 남·북 사면 모두 위도가 낮아질수록 신갈나무림의 에너지량이 크게 늘어났다.

Figure 2와 3을 보면 신갈나무림의 에너지량이 북사면에서 남사면보다 더 높은 것으로 나타났다. 온대 지방에서 북사면의 식생이 남사면의 식생보다 다양하고 생산성도 높은 것으로 여러 연구들에서 보고되었는데(Minckler, 1961; Finney 등, 1962; 박봉규과 이현순, 1981; 박은숙, 1987; 신현철과 이강영, 1990; 광동훈, 1991; 김성덕과 김운동, 1995; 권기철, 1998), 남사면에서 주로 토양 수분 함

량과 식물체의 증산 작용이 생장에 제한요인이 되는 것으로 생각된다.

2) 해발고와 사면에 따른 신갈나무림의 에너지량

강원도 중왕산 북사면 지역에서 신갈나무림의 에너지량을 비교하면, 해발 1,300 m는 4,352 GJ/ha, 해발 1,000 m는 4,997 GJ/ha, 해발 800 m는 5,040 GJ/ha로 나타났으며, 남사면 지역에서도 해발 1,300 m는 4,259 GJ/ha, 해발 1,000 m는 4,181 GJ/ha, 해발 800 m는 4,560 GJ/ha로 나타나, 남·북 사면 모두 해발고가 낮아짐에 따라 신갈나무림의 에너지량이 증가했다(Figure 4).

2. 신갈나무림의 연간 에너지 고정량

신갈나무림의 연간 에너지 고정량은 249 GJ/ha/yr(중

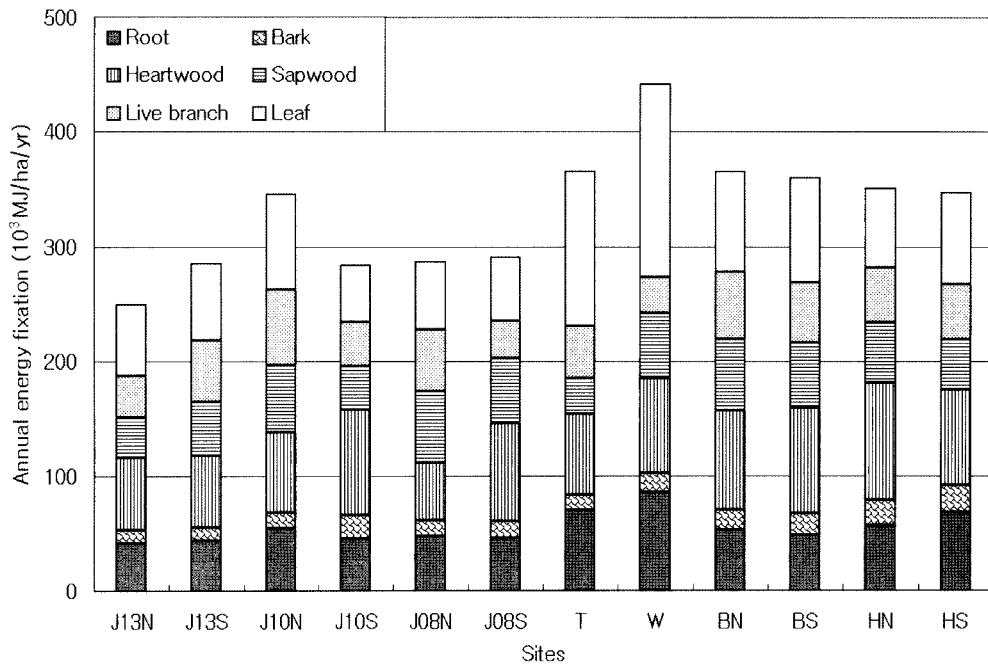


Fig. 5. Annual energy fixation of *Q. mongolica* stands in the study sites.

J13N (Mt. Joongwang 1,300 m N), J13S (Mt. Joongwang 1,300 m S), J10N (Mt. Joongwang 1,000 m N), J10S (Mt. Joongwang 1,000 m S), J08N (Mt. Joongwang 800 m N), J08S (Mt. Joongwang 800 m S), W (Mt. Wolak 300 m N), T (Mt. Taehwa 350 m S). BN (Mt. Baekwoon 800 m N), BS (Mt. Baekwoon 800 m S), HN (Mt. Halla 1,000 m N), HS (Mt. Halla 1,000 m S)

왕산 해발 1,300 m 북사면)에서 441 GJ/ha/yr(월악산 해발 300 m 북사면) 사이로 나타났다(Figure 5). 태화산과 월악산 지역의 연간 에너지 고정량이 매우 높게 나타났는데, 이 지역과 다른 지역(중왕산, 백운산, 한라산)을 비교하면 평균 임령(35년생:60-70년생)과 해발고(300-350 m:800-1,300 m)에서 큰 차이가 나타났다. Figure 5에서 전체 에너지량에 대해 잎이 차지하고 있는 비율은 각각 37%와 32%로서 다른 지역 잎의 비율 17~25%보다 훨씬 높은 비중을 차지하고 있다. Ovington과 Heitkamp(1960), 吉良(1971), Satoo와 Madgwick(1982) 등은 임령과 엽량에 따라 숲의 에너지 효율이 다르게 나타난다고 하였는데, 본 연구에서도 임령과 엽량의 차이가 태화산과 월악산 지역의 연간 에너지 고정량이 높아진 이유로 추측된다.

1) 환경 인자에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량 신갈나무림의 연간 에너지 고정량(AE)과 환경 인자를 상관 분석하여 Table 6에 나타냈다. 온량지수가 0.81로 가장 높은 상관을 보였으며, 해발고(-0.74), 임령(-0.72), 사면(0.32) 순으로 나타났다. 이 중 온량지수(WI)와 사면과는

정의 상관을 보였고, 임령(Age), 강수량(Prec.), 일사량(Solar), 토양 유기물 함량(OM), 토양 수분 함량(MO), 위도, 해발고와는 부의 상관을 보였다.

연간 에너지 고정량을 추정하기 위한 최적 회귀 모형을 유도하기 위해 수정 결정계수와 총오차제곱 순으로 배열하여 Table 7에 요약했다. 여기서 독립변수를 4개 이하로 제한하면 임령, 온량지수, 강수량, 해발고를 변수로 하는 $Y = 1030.31 - 3.08Age + 19.87WI - 1.31Prec. + 0.65Alt.$ ($R^2=0.86$)가 가장 적절한 것으로 나타났다. 그 외 1차 인자와 2차 인자 각각으로 구한 회귀식도 높은 결정계수를 보여 신갈나무의 에너지 고정량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 임령의 분포가 다양하지 못하고 35년생과 60~70년생의 임분으로 양분되어 있어서 회귀식에서 임령 인자가 매우 중요하게 평가되고 있다. 또한 사면 방위 역시 더 많은 자료의 확보와 정량화가 필요하며, 토양 수분 함량은 연중 일기에 따라 항상 변하므로 이에 대한 표준화도 필요하다. 향후 보완 조사가 이루어진다면 몇 가지 주요 환경 인자로 신갈나무 임분의 연간 에너지 고정량을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 6. Correlations among annual energy fixation and environmental factors of *Q. mongolica* stands in the study sites.

	Age	WI	Prec.	Solar	OM	MO	Latitude	Altitude	Aspect
AE	-0.72***	0.81***	-0.07	0.23	-0.19	-0.02	-0.22	-0.74***	0.32+

*** Indicates significance at 0.001, and + 0.1.

Table 7. The regression models of annual energy fixation selected by adjusted R-square selection method and C(p) selection method.

No. in Model	Adjusted R ²	R ²	C(p)	Variables in Model*
5	0.86	0.88	4.02	X ₁ X ₂ X ₃ X ₈ X ₉
4	0.84	0.86	7.58	X ₁ X ₂ X ₃ X ₈
3	0.76	0.78	24.21	X ₂ X ₃ X ₆
3	0.65	0.68	47.76	X ₁ X ₇ X ₈

*X₁=Age, X₂=WI, X₃=Prec., X₄=Solar, X₅=OM, X₆=MO, X₇=Lat., X₈=Alt., X₉=Aspect

2) 위도에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량 비교
 위도에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량은 1% 유의 수준에서 차이가 나타났는데(Table 8), 북사면에서 중왕산 해발 1,000 m 지역 345 GJ/ha/yr, 중왕산 해발 800 m 지역 287 GJ/ha/yr, 백운산 해발 800 m 지역 365 GJ/ha/yr, 한라산 해발 1,000 m 지역 351 GJ/ha/yr이고, 남사면에서 중왕산 해발 1,000 m 지역 284 GJ/ha/yr, 중왕산 해발

Table 8. ANOVA for annual energy fixation of *Q. mongolica* stands by latitude and aspect of the study sites.

Source	df	Mean Squares	Pr > F
Latitude	3	19,996	0.000
Aspect	1	1,695	0.088
Latitude*Aspect	3	4,131	0.082
Residual	16	8,227	

Table 9. ANOVA for annual energy fixation of *Q. mongolica* stands by altitude and aspect in Mt. Joongwang.

Source	df	Mean Squares	Pr > F
Altitude	2	3,357	0.016
Aspect	1	258	0.513
Altitude*Aspect	2	3,708	0.012
Residual	12	567	

800 m 지역 291 GJ/ha/yr, 백운산 해발 800 m 지역 360 GJ/ha/yr, 한라산 해발 1,000 m 지역 347 GJ/ha/yr로 나타나 남·북사면 모두 백운산 지역에서 신갈나무림의 연간 에

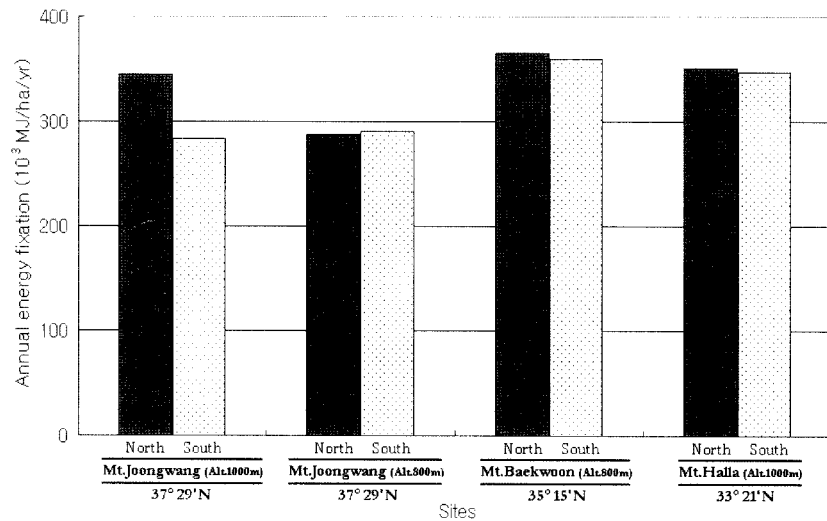


Figure 6. Annual energy fixation of *Q. mongolica* stands by latitude.

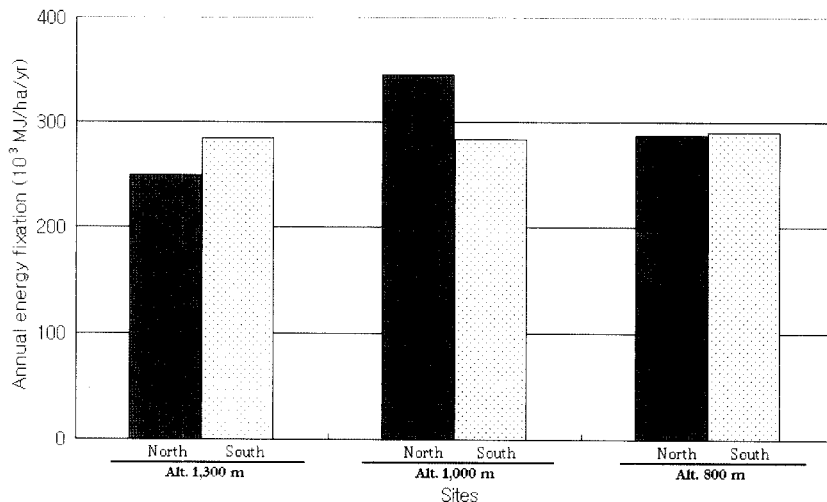


Figure 7. Annual energy fixation of *Q. mongolica* stands in Mt. Joongwang by altitude.

너지 고정량이 가장 높게 나타났으며, 전반적으로 위도가 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보여주었다(Figure 6).

3) 해발고에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량 비교
신갈나무림의 연간 에너지 고정량은 해발고가 낮아짐에 따라 증가하고 있었다(Figure 7). 해발 1,000 m 북사면 지역의 신갈나무림에서 연간 에너지 고정량이 가장 높게 나왔는데, 중왕산 지역에서 해발 1,000 m 부근의 신갈나무가 가장 생육이 좋다는 이전의 보고와 일치하는 결과로서 이 일대의 토양이 습윤하고 임분 구조가 잘 발달되었기 때문에 판단된다(이돈구 등, 1995). Table 9에서 연간 에너지 고정량은 5% 유의수준 하에서 해발고에 따라 차이가 있는 것으로 나타났으나, 사면별로 연간 에너지 고정량은 차이가 나타나지 않았다. 해발고와 사면의 상호작용에서는 5% 유의수준에서 해발고별로 연간 에너지 고정량과 에너지 고정 효율의 차이가 사면의 차이에 어느 정도 영향을 받는 것으로 나타났다.

결론

위도와 해발고에 따른 우리나라 신갈나무림의 에너지 고정량을 알아보기 위해 강원도 평창군 중왕산, 경기도 광주시 태화산, 충청북도 제천시 월악산, 전라남도 광양시 백운산, 제주도 서귀포시 한라산 등을 대상으로 연구한 결과, 우리나라 신갈나무림의 에너지량은 2,916~6,550 GJ/ha 이고, 연간 축적되는 에너지 고정량은 250~440 GJ/ha로 나타났다.

신갈나무림의 에너지량과 연간 에너지 고정량은 위도가 낮아질수록 더 많아지는 것으로 나타났다. 해발고가 낮을수록 신갈나무림의 에너지 고정량은 증대되는 것으로 나타났다.

신갈나무림의 연간 에너지 고정량과 환경 인자간의 상관관계에서는 온도, 해발고, 임령, 사면 등의 순서로 크게 나타났다. 다만 본 연구의 표본수가 방위에 따른 전체 신갈나무림의 연간 순생산량을 일반화시킬 수 있을 정도로 충분하지 못하며, 몇몇 방위는 일부 지역에만 집중적으로 나타났다. 또한 본 조사에서 해발고가 낮은 곳에 있는 임분이 전체적으로 임령이 낮기 때문에 환경인자와 연간 에너지 고정량의 상관은 본 연구에 한정해야 할 것이다.

환경 인자에 따른 신갈나무림의 연간 에너지 고정량을 추정하기 위해 최적화된 다중회귀식을 유도한 결과, 임령, 온량지수, 강수량, 해발고를 독립변수로 하는 $Y=1030.311-3.083Age+19.869WI-1.313Prec.+0.65Alt.(R^2=0.86)$ 가 선택되었다. 이 회귀식은 본 연구에 국한된 것이며, 모든 신갈나무림에 적용하기 위해서는 더 많은 데이터가 수집되

어야 한다.

인용문헌

1. 광동훈. 1991. 월악산 삼림군집의 식물사회학적 연구 - 사면방위를 중심으로. 동국대학교 석사학위논문. 43pp.
2. 권기철. 1998. 천연갱신을 위한 월악산 천연림의 군집생태학적 무육방안. 충북대학교 농학석사학위논문. 85pp.
3. 김성덕, 김윤동. 1995. 접봉산 신갈나무림의 갱신 과정에 관한 연구. 한국임학회지 84(4): 447-455.
4. 박봉규, 이현순. 1981. 도봉산의 사면에 따른 식생구조에 관한 연구. 한국생활과학연구원 논총 제27집. 81-94pp.
5. 박은숙. 1987. 황학산 천연활엽수 이차림의 식물사회학적 특성과 물질생산에 관한 연구. 경희대학교 대학원 박사학위논문. p.46-47.
6. 박인협, 서영권, 김동엽, 손요환, 이명종, 진현오. 2003. 강원도 춘천지역 신갈나무 임분과 굴참나무 임분의 물질생산. 한국임학회지 92(1): 52-57.
7. 신현철, 이강영. 1990. 금산의 남북사면에 따른 삼림구조 보고. 한국임학회지 79: 245-254.
8. 이돈구, 고영우, 윤종화, 권기원, 김갑태, 마상규, 김지홍, 김수인, 황재우, 신만용. 1995. 국유림 경영 현대화 산학협동 실연 연구 (XI). 산림청.
9. 이돈구, 권기철. 2005. 산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발. 농림부 농림기술관리센터. p.29-92.
10. 한상돈. 1995. 다중회귀 및 경로분석에 의한 참나무류 임지요인 평가. 충북대학교 농학박사학위논문. 173pp.
11. 吉良龍夫. 1971. 作物の光合成と物質生産. 養賢堂. p.225-243.
12. 芝本武夫. 1954. 森林土壤學. 朝倉書店. 439pp.
13. Finney, H.R., N.H. Holoway and M.R. Heddleson. 1962. The influence of microclimate on the morphology of certain soils of the Allegheny Plateau Ohio. Soil Sci. Soc. Ann. Proc. 26: 287-292.
14. Lag, V. 1990. Forest increment and distribution of plant species in relation to forest soil conditions. In Proceedings of the First International Symposium on Forest Soils, July 22-27, 1990. Harbin, China.
15. Lieth, H. 1973. Primary production: Terrestrial ecosystems. Human Ecol. 1: 303-332.
16. Minckler, L. 1961. Silviculture considerations in the challenges for forestry. State U. of New York, College of For., Syracuse, N.Y.
17. Ovington, J.D. and D. Heitkamp. 1960. The accumulation of energy in forest plantations in Britain. J. Ecol. 48: 639-646.
18. Satoo, T. and H.A.I. Madgwick. 1982. Forest Biomass. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. 152pp.