

우리나라 침엽수 및 활엽수림의 고사율 추정식 개발

손영모^{ID*} · 전주현 · 이선정 · 임종수 · 강진택

국립산림과학원 산림산업연구과

Development of Estimated Equation for Mortality Rates by Forest Type in Korea

Yeong Mo Son^{ID*}, Ju Hyeon Jeon, Sun Jeong Lee,
Jong Su Yim and Jin Taek Kang

Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 우리나라의 침엽수와 활엽수림에서 발생하는 고사율(고사 임목의 재적량, %) 추정식을 개발하는 것이 목적이다. 고사율 추정을 위하여 적용한 모형은 지수식, Hamilton식 등 6개식이었으며, 이용한 변수는 흉고직경, 흉고단면적, 지위지수 등이었다. 고사율 추정에 이용한 원자료는 5차 및 6차 국가산림자원조사 자료였으며, 표본점별 고사목과 생존목의 재적량 비로서 고사율을 산정하였다. 적용한 식 중 침엽수와 활엽수의 고사율을 가장 잘 설명하는 식은 $P = (1 + e^{(a+b \times DBH + c \times BA + d \times no.ja + e \times density)})^{-1}$ 의 형태를 갖는 식이다. 침엽수는 약 34%, 활엽수는 약 51%의 적합도를 나타냈다. 두 식 모두 적합도가 높게 나타나지 않았는데, 이는 임목 고사에 영향을 미치는 인자가 지리적 환경, 토양, 기상, 지위, 경쟁 등 너무나 다양하기 때문이다. 따라서 본 분석에 이용한 흉고직경, 흉고단면적 등 2~3개의 변수로 산림 내 고사를 설명하기는 매우 어려운 일이라 판단된다. 그러나 전국적으로 활용될 수 있는 임상별 고사율 정보가 없는 현시점에서는 본 연구의 가치가 있다고 생각되며 추후 수관윽폐도, 경쟁지수 등을 변수로 추가적으로 활용하여 고사율 추정식의 정도를 높여야 할 것이다.

Abstract: This study was conducted to develop estimated equation for mortality rates (volume of dead trees, %) on coniferous and broad-leaved forests, representative forest types of South Korea. There were 6 equation models applied for estimating mortality such as a exponential equation, a Hamilton equation and variables using were DBH, basal area, and site index. Raw data used for estimating mortality were 5th and 6th national forest inventory data, and mortality was calculated with the difference of stocks between lived trees and dead trees by each sample plots. The most applicable equation to describe mortality on coniferous forest and broad-leaved forest was indicated as $P = (1 + e^{(a+b \times DBH + c \times BA + d \times no.ja + e \times density)})^{-1}$ and their goodness of fit showed 34% and 51% respectively. Goodness of fit in both equations were not much high because there were various factors which affect the mortality such as topographic conditions, soil characteristic, climatic factors, site quality, and competition. Therefore, it is considered that explaining mortality in forest with only 2 or 3 variables like DBH, basal area used in this analysis could be very difficult facts. However, this study is certainly worth in that there is no useful information on mortality by each forest type throughout the country at the present, and we would make an effort to promote the fitness of estimated equation for mortality adding competition index, tree crown density etc.

Key words: national forest inventory, mortality rates, DBH, basal area, site index, coniferous forest, broad-leaved forest

서론

최적의 산림경영은 낭비가 없는 임목생육 공간을 만들어 임목을 성장시키고 또한 이를 관리하여 최종적으로

질 높은 목재를 생산하는 것이 하나의 큰 목적이라고 할 수 있다. 산림은 다양한 종이 집단을 이루며 성장하므로 이들 간에는 개체목의 광합성 작용 유지 및 종족 보존 등을 위하여 생활의 공용자원을 치열하게 확보·확장하려고 한다. 임목은 수종간의 경쟁과 수종 내부간의 경쟁 등이 있을 수 있다. 경쟁하는 집단에서는 공존이 있을 수 없고, 경쟁의 정도가 강하거나 약하거나 또는 보통이거나, 이러한 치열한 경쟁만이 존재한다. 상호간의 경쟁이 심한

* Corresponding author
E-mail: treelove@korea.kr

ORCID

Yeong Mo Son ^{ID} <http://orcid.org/0000-0002-9346-4351>

산림 집단에서는 일부는 패하여 집단에서 고사(mortality) 하게 된다(Yim et al., 1985).

탁월한 산림경영을 위해서는 중간 또는 종내 경쟁을 사전에 제거하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 임분의 밀도관리가 필요하다. 밀도관리를 위해 가장 우선시되는 방법은 인위적 간벌(숙아베기)이며, 임내에서는 자기 스스로 간벌(self-thinning) 즉, 고사가 일어나나 이는 자연적인 밀도관리이므로 대경재 수확 또는 균질한 목재 수확을 위해서는 인위적인 간벌을 유도하는 수 밖에 없다.

임분의 밀도관리는 인공림보다 천연림이 어려울 수 밖에 없으며, 천연림에서의 임목 고사 메카니즘을 파악하여 이를 실제 경영에 도입하는 것은 더더욱 어려운 일이다. 따라서 고사율을 정확하게 추정하여 인공림 및 천연림의 산림관리에 도입한다면 차후 임목의 생장 및 수확 예측에도 크나큰 도움을 줄 수가 있을 것이다.

임목의 고사에 대한 연구는 Reineke(1933)의 임분밀도 지수 및 Yoda et al.(1963)의 자연간벌선 등에 초점을 맞추어 Drew and Flewelling(1977), Aikman and Watkinson(1980), White(1981), Smith and Hann(1984), Lonsdale(1990) 등이 순림에서의 경쟁 및 피압 등에 대하여 연구를 수행하였으나, Vanclay(1994)는 이러한 단순한 이론으로 산림에서 일어나는 고사 및 밀도변화를 모두 설명하는 것을 역부족이라고 하였다. 다양한 수종이 동반 성장하는 혼효림에서는 이러한 상황이 더욱 복잡해지며, 빛, 토양, 물리적 공간성 등이 최소 필요에 미치지 못할 경우 열세목은 결국 고사하게 될 것이다.

일반적으로 고사율을 추정하는 모델은 보통 흉고직경, 수고, 수관급, 임분 흉고단면적 등의 인자를 이용하여 개발되고 있으며, 대표적으로는 Hamilton and Edwards(1976)의 고사율 추정모델을 들 수 있다. 일반적인 고사율 추정모델은 다양한 인자를 이용할 때와 1개인 인자만을 이용할 때가 있는데, 다수의 인자를 이용한다고 해서 고사율을 잘 설명한다고 볼 수 있는 것은 아니다. 임목의 고사 현실을 가장 잘 설명해 줄 수 있는 인자의 선택이 중요하며, 필요 시는 인자를 변형시켜 추정 모델을 개발할 수도 있을 것이다.

현재 우리나라에서의 임목의 고사량에 대한 조사나 임의 탄소 저장량 등의 연구는 지엽적으로 수행된 바가 있으나, 전국적으로 임상별 또는 수종별로 유령기부터 노령기까지의 고사율이 어떻게, 얼마나 발생하는지에 대한 연구는 거의 전무하다 할 수 있고, 따라서 그동안 우리나라 산림에서 자연 고사율에 대한 기본적인 정보를 제공하지 못하여 왔다. 그러나 2006년부터 새롭게 시작된 국가산림자원조사가 마침 동일한 영구표본점에 대하여 고사량, 임목본수 등 다양한 항목에 대해 조사가 이루어지고 있고, 5차(2006~2010), 6차(2011~2015) 조사가 완료됨에 따라 이 결과로서 우선적으로 임상별 즉, 침엽수 및 활엽수림에 대한 고사율을 파악할 수 있는 추정식을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 분석 자료

고사율을 추정하기 위한 자료는 국가산림자원조사의 5차(2006~2010년)와 6차(2011~2015년) 조사 내용 중 2013년까지 약 8년간 자료를 활용하였으며(KFS, 2016), 시업이 이루어지지 않은 인공림과 천연림을 대상으로 표준지 내 전체 임목의 재적 대비 고사한 임목재적을 고사율로 산정하고, 이를 흉고단면적, 지위지수, 임목본수 등을 변수로 하는 추정식을 개발하고자 하였다.

분석에 이용된 자료의 개황은 Table 1과 같다.

2. 분석방법

고사율을 추정하기 위하여 이용한 추정식은 Table 2와 같이 6개식을 이용하였으며, 이들은 흉고직경, 흉고단면적, 지위지수, 임목본수, 수관밀도 등을 변수로 가지는 식이다. 이들 변수가 임목의 경쟁에 크게 영향을 미치는 인자로 판단하여 선택하였으며, 수관밀도와 같은 경우는 현재 국가산림자원조사에서는 1~25%, 26~50%, 51~75%, 76~100% 등으로 조사되고 표시되고 있어 각 구간별로 중간값을 변수로 이용하였다. 그리고 분석에 이용한 식들은 문헌적으로 각 연구자들의 활용빈도가 높은 것을

Table 1. Number of trees and characteristic of growth factors by forest type.

Forest	No. of plots	Growth factors					
		Age (yr)	DBH (cm)	Height (m)	BA (m ² /ha)	Tree no. (No./ha)	Density (%)
Coniferous	421	37.6	19.4	12.0	52.3	1277	77
		19.0-91.0	7.5-33.5	3.8-23.2	3-74	75-3375	12-88
Broad-leaved	580	38.3	18.9	11.4	50.9	1249	78
		5.0-94.0	7.6-43.2	4.9-19.6	7-74	138-3450	12-88

Table 2. Nonlinear growth equations fitted in the study.

Equations	Equations Forms
eq.1	$P = (1 + e^{(a+b \times BA + c \times density)})^{-1}$
eq.2	$P = (1 + e^{(a+b \times DBH + c \times BA + d \times no_ha + e \times density)})^{-1}$
eq.3	$P = (a + b \times SI)(1 + e^{(c \times BA + d \times density)})^{-1}$
eq.4	$P = (a + b \times SI)(density^c \times e^{(d \times BA)})$
eq.5	$P = (a + b \times SI)(BA^c \times e^{(d \times density)})$
eq.6	$P = (a + b \times SI)(BA^c \times e^{(d \times no_ha)})^{-1}$

우선적으로 선택하였고(Hamilton, 1974; Clutter, 1973; Sit and Poulin-Costello, 1994; Monserud and Sterba, 1999; Eid and Tuhus, 2001), 이용한 모든 식은 고사율을 적절한 형태로 표현할 수 있는 추세선을 가지고 있다고 판단된다. 식의 정확성 및 타당성 판단은 적합도지수(Fitness Index, FI)에 의하였다.

추정식에 활용한 종속변수는 동일한 표본점에서의 전체 입목에 대한 재적(A)과 5년동안 고사된 입목의 재적(B)을 계산하고, 이를 다시 B/A×100를 구하여 종속변수인 고사율로 이용하였다. 또한 식에 사용된 독립변수 BA는 헥타당 흉고단면적, DBH는 흉고직경, SI는 지위지수, density는 수관울폐율, no_ha는 헥타당 본수를 나타내고 있다.

고사율을 추정하기 위하여 SAS 통계프로그램(ver.9.3, SAS Institute Inc., USA)를 사용하였으며 PROC NLIN 구문을 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 고사율 추정식 결과 비교

1) 침엽수림의 고사율 추정식 정도 비교

Table 3에 의하면 우리나라 침엽수림에서 단위면적 당 생존목 대비 발생하는 고사목의 축적인 고사율을 추정할

수 있는 가장 최적의 식은 흉고직경, 흉고단면적, 입목밀도 등을 변수로 하는 식 2였으며, 식의 적합성(fitness index) 즉, 설명력은 약 34%였다. Kramer(1977)는 임분수에 따른 식재본수별 소나무 생존본수 연구에서 해충, 균류, 기타 영향 등 임분내 변이로 인해 고사율 추정에 어려움이 있음을 밝힌 바 있다. 또한 NiFoS(2015)의 임령에 의한 수종별 고사 축적량 추정 연구에서는 수종별로 우리가 이해할 만한 경향치를 보이고 있지 않다는 결론이 나와, 다른 인자의 적용 및 적합성이 높은 추정식을 도입할 필요가 있다고 밝힌 바 있다. 복잡한 생존경쟁 구조를 갖는 임분 상에서 몇 가지 변수에 의해 고사율을 추정하기에는 어려움이 있으므로 이 정도의 결과도 침엽수의 고사율이 어떻게 변해가는 지를 알 수 있는 중요한 정보가 될 것이라 판단된다. 앞으로 경쟁지수, 개체목간 거리 등 또 다른 변수를 도입하여 고사율을 추정하는 연구가 수행되어야 한다고 생각된다.

6개식에 대한 흉고단면적 대비 잔차도를 도표화한 바 Figure 1과 같다. 대체적으로 '0(zero)'을 중심으로 고르게 분포하나 흉고단면적 40~60 m²/ha 범위에서는 추정식에 의한 예측 고사율이 약간 과소값을 갖는 것으로 나타나고 있다.

Table 3. Parameters and fitness index (FI) of nonlinear growth equations in coniferous forest.

Equations	Parameters					FI
	a	b	c	d	e	
eq.2	1.5021	-0.0202	0.0253	0.0006	-0.0006	0.3420
eq.6	0.1587	-0.0012	0.2664	-0.0018		0.3315
eq.3	0.3891	0.0031	0.0473	-0.0037		0.3278
eq.4	0.1238	0.0012	0.2041	-0.0393		0.3228
eq.1	1.2356	0.0418	-0.0041			0.3223
eq.5	0.3864	0.0869	-0.9791	0.0056		0.2315

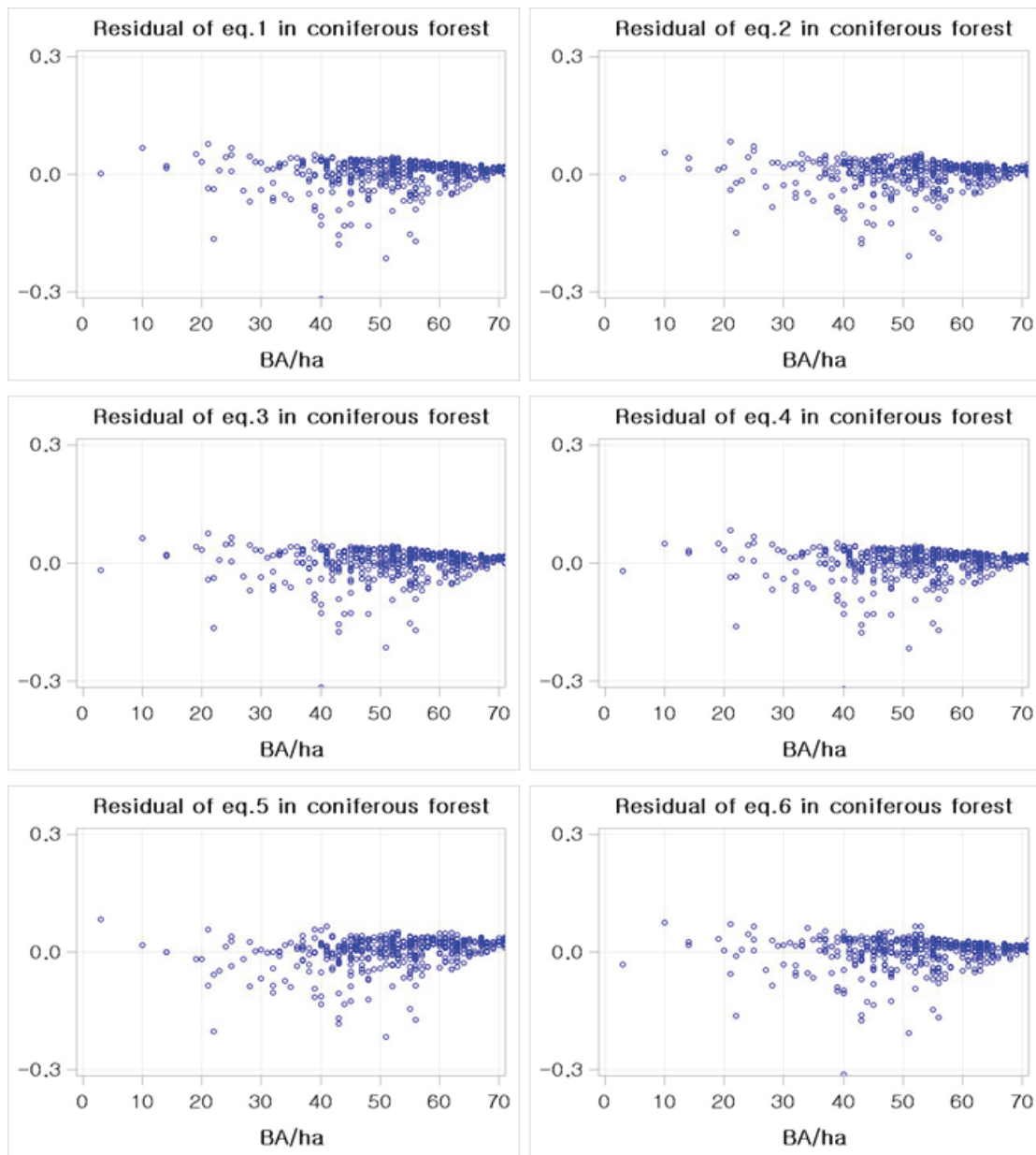


Figure 1. Residual scatter diagram of estimates for the mortality rates in coniferous forest.

Table 4. Parameters and fitness index (FI) of nonlinear growth equations in broad-leaved forest.

Equations	Parameters					FI
	a	b	c	d	e	
eq.2	1.1689	-0.0191	0.0306	0.0006	0.0020	0.5108
eq.3	0.4460	0.0096	0.0540	-0.0008		0.5091
eq.6	0.1628	0.0022	0.2519	-0.0022		0.5042
eq.4	0.1727	0.0044	0.1324	-0.0475		0.5039
eq.1	0.8718	0.0500	-0.0015			0.4985
eq.5	2.0037	0.1104	-1.2003	0.0039		0.4010

2) 활엽수림 고사율 추정식 정도 비교

활엽수림에서 발생하는 고사율을 가장 잘 설명할 수 있는 추정식은 흉고직경과 흉고단면적 등을 갖는 식 2였으며, 식의 설명력은 약 51%로 나타났다. 그러나 식 5 정도를 제외하고는 나머지 식들도 활엽수의 고사율을 설명하는데 식 2와 별다른 적합성이 유의적 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

활엽수 고사율을 추정하는 6개 식에 대한 흉고단면적 대비 잔차도를 도표화한 바 Figure 2와 같다. 대체적으로 '0(zero)'을 중심으로 고르게 분포하나, 침엽수림의 고사율 잔차도와 같이 흉고단면적 10~60 m²/ha 범위에서 추정식에 의한 예측 고사율이 약간 과소값을 갖는 것으로 나타나고 있다.

2. 침엽수림의 고사율 추정

침엽수림의 고사율 추정은 앞서 언급한 바 있듯이 Table 3의 식 2가 최적식으로 나타났으며, 이로써 고사율 실측치와 예측치를 비교한 바 Figure 3과 같다.

침엽수림이 어린 상태 즉, ha당 흉고단면적이 적을 때는 고사율이 높으며, 임분이 점차 안정화 될수록 고사율은 낮은 것으로 나타났다. 추정식에 의하면 침엽수림은 최고 20%, 최저 3% 정도의 고사율을 갖을 것으로 추정되며, 평균적으로는 약 4.7% 정도로 추정된다.

Eid and Tuhus(2001)에 의하면 노르웨이산 전나무의 고사율이 직경급 크기에 따라 최고 4%에서 점차 낮아진다고 하였으며, 유럽침엽수는 최고 5%에서 점차 고사율이 감소한다고 보고한 바 있다. Monserud and Sterba

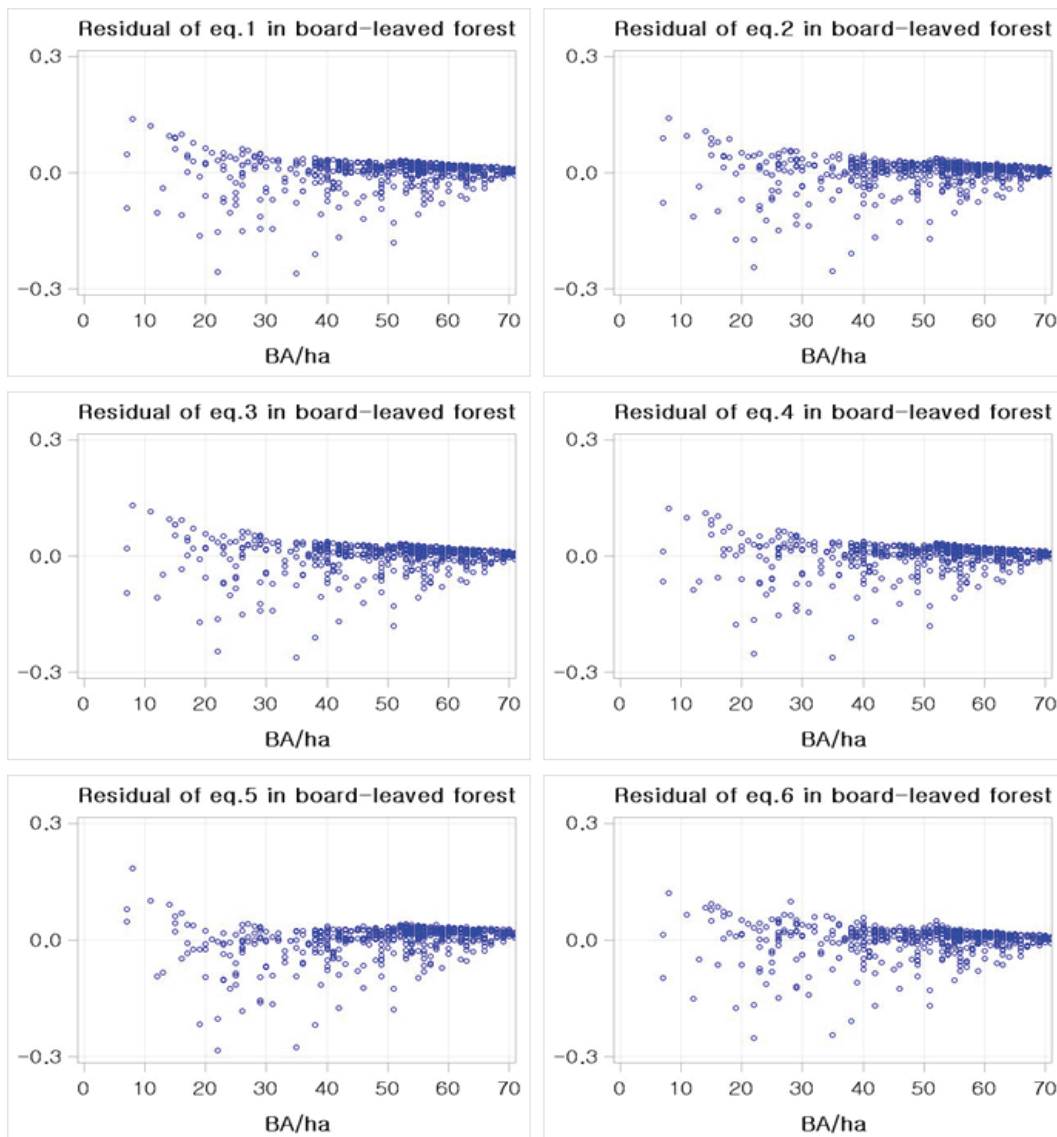


Figure 2. Residual scatter diagram of estimates for the mortality rates in broad-leaved forest.

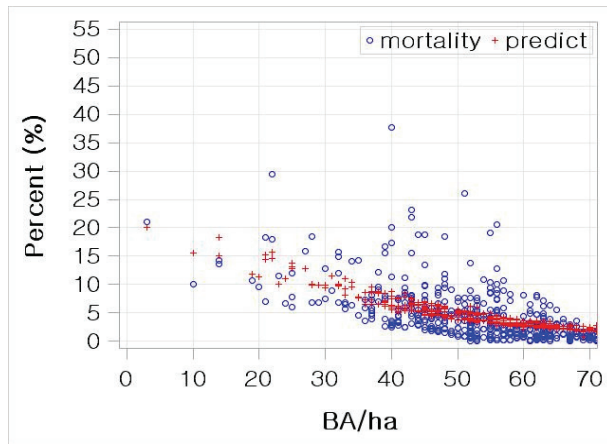


Figure 3. Comparison between observed values and predicted values of mortality in coniferous forest.

(1999)는 오스트리아 산림 주요 침엽수종 중 가문비나무 4.4%, 전나무 6.1%, 낙엽송 2.9%, 유럽침엽수 5.6%의 평균 고사율을 갖는다고 밝힌 바 있어, 본 연구보다는 낮은 고사율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 유럽지역 산림이 산림 수탈, 전쟁, 조림 등의 교란과 회복을 단계를 거친 우리나라와는 달리 안정화되었기 때문인 것으로 판단된다.

3. 활엽수림의 고사율 추정

활엽수림의 고사율 추정은 Table 3의 식 2가 최적식으로 나타났으며, 이 식은 Hamilton(1974)이 개발한 식으로 고사율을 추정하는데 가장 유명한 식이라 볼 수 있으며, 많은 임목 고사율 모델 개발에 응용이 되기도 하였다 (Hamilton and Edwards, 1976; Hann, 1980, Monserud and Sterba, 1999; Eid and Tuhus, 2001).

이로써 고사율 실측치와 예측치를 비교한 바 Figure 4와 같다.

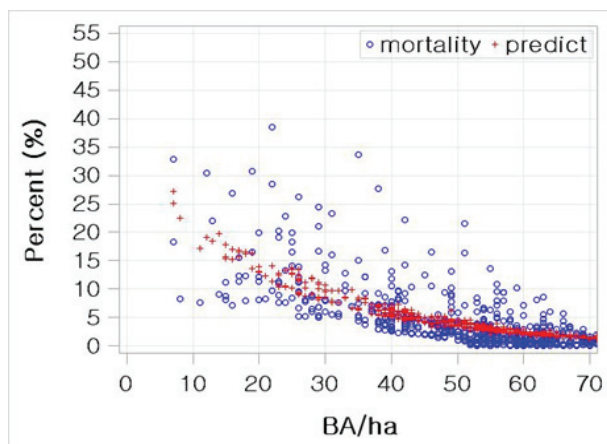


Figure 4. Comparison between observed values and predicted values of mortality in broad-leaved forest.

활엽수림은 침엽수림과 마찬가지로 ha당 흉고단면적이 적을 때는 고사율이 높으며, 임분이 점차 안정화 될수록 고사율은 낮은 것으로 나타났다. 추정식에 의하면 활엽수림은 최고 27%, 최저 3%정도의 고사율을 갖을 것으로 추정되며, 평균적으로는 약 4.4% 정도를 갖을 것으로 추정된다.

Eid and Tuhus(2001) 의하면 자작나무의 고사율은 직경급 크기에 따라 최고 5%에서 극히 미미하게 낮아진다고 하였으며, 기타 활엽수는 최고 12%선에서 5%까지 낮아진다고 보고한 바 있다. Monserud and Sterba(1999)는 오스트리아 산림 주요 활엽수종 중 너도밤나무 4.3%, 참나무류 3.2%, 기타 활엽수 8.0%의 평균 고사율을 갖는다고 밝힌 바 있다.

결론

본 연구는 우리나라 침엽수와 활엽수림을 대상으로 흉고단면적, 지위지수, 임목밀도 등을 변수로 갖는 고사율 추정식을 도출하여, 산림관리에 기본적인 정보를 제공하고 나아가서는 국가차원에서 OECD 등의 고사율 및 고사량 통계 제시 요구에 대응하고자 하였다.

현재 우리나라의 주요 수종 및 임상별로 고사율 추정 연구는 임시표본점에 의한 연구는 수행된 바 있으나, 전국을 대상으로 활용 가능한 추정 모델은 없다고 볼 수 있으며, 이에 전국을 대상으로 영구표본점을 5년 주기로 조사하고 있는 국가산림자원조사 자료를 활용하여 우리나라 고유의 고사율 추정모델을 처음으로 제시하고자 하였다.

임상별 고사율 추정을 위하여 적용한 추정식들은 문헌을 통하여 많이 활용되고 검증된 식을 가져 왔으며, 분석에 이용된 변수는 고사율에 영향을 미치리라 예상되는 흉고직경, 흉고단면적, 지위지수 등이었다.

우리나라 침엽수 및 활엽수에 대한 고사율을 추정하는데에는 Hamilton(1974)이 개발한 식이 우리나라 침엽수와 활엽수림의 고사율을 가장 잘 설명해 주고 있었으며, 식의 설명력은 약 30~50% 범위로 그다지 높은 편은 아니었다. 그러나 복잡 다양한 산림 내 구성인자와 경쟁 등을 몇 가지 변수를 이용하여 고사율 변화를 정확하게 추정할 수는 없는 일이며, 고사율에 대한 변화 경향치를 파악할 수 있다는 점에 본 연구의 효과성을 두고 싶다.

추후 연구는 6차 국가산림자원조사부터 조사되고 있는 경쟁지수, 개체목간 거리 등을 이용하면 고사율 추정에 좀 더 높은 정도를 확보할 수 있을 것이라 판단되며, 우리나라 주요 수종별로도 고사율을 도출하여 산림경영을 위한 의사결정을 지원할 계획이다.

References

- Aikman, D.P. and Watkinson, A.R. 1980. A model for growth and self-thinning in even-aged monocultures of plants. *Annals of Botany* 45: 419-427.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. and Bailey, R.L. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons. pp. 333.
- Drew, T.J. and Flewelling, J.W. 1977. Some recent Japanese theories of yield-density relationships and their application to Monterey pine plantations. *For. Sci.* 23: 517-534.
- Eid, T. and Tuhus, E. 2001. Models for individual tree mortality in Norway. *Forest ecology and management* 154: 69-84.
- Hamilton, D.A. 1974. Event probabilities estimated by regression. *USDA For. Serv., Res. pap. INT-152*.
- Hamilton, D.A. and Edwards, B.M. 1976. Modelling the probability of individual tree mortality. *USDA For. Serv., Res. Pap. INT-185*.
- Hann, D.W. 1980. Development and evaluation of even- and uneven-aged ponderosa pine/ Arizona fescue stand simulator. *USDA. For. Serv., Res. pap. INT-267*.
- Kramer, H. 1977. Die qualitätsentwicklung junger kiefernbestände in abh ngigkeit vom ausgangsverband. *FoHo* 32, 469-476.
- KFS (Korea Forest Service. 2016. Data base of national forest inventory. Inner information.
- Lonsdale, W.M. 1990. The self-thinning rule: dead or alive? *Ecology* 71:1373-1388.
- Monserud, R.A. and Sterba, H. 1999. Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management* 113: 109-123.
- NiFoS (National Institute of Forest Science). 2015. Development of dynamic growth model in major species. Inner information.
- Reineke, L.H./ 1933. Perfecting a stand density index for even-aged stands. *J. Agric. Res.* 46: 627-638.
- Sit, V. and Poulin-Costello, M. 1994. Catalogue of curves for curve fitting. Ministry of Forests Research Program, Province of British Columbia. pp. 110.
- Smith, N.J. and Hann, D.W. 1984. A new analytical model based on the $-3/2$ power rule of self-thinning. *Can. J. For. Res.* 14: 605-607.
- Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield: Applications to mixed tropical forests. CAB International. pp. 312.
- White, J. 1981. The allometric interpretation of the self-thinning rule. *J. Theoretical biology* 89: 475-500.
- Yim, K.B. et al. 1985. A principle of silviculture. Hyang Mun Co. pp. 491.
- Yoda, K., Kira, T., Ogawa, H. and Hozami, K. 1963. Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J. Biol.* 14: 107-129.

(Received: August 9, 2017; Accepted: October 23, 2017)