

피톤치드(모노테르펜) 농도 예측을 위한 회귀분석 기반 모델식 -춘천 수리봉을 중심으로-

이석종^{1*} , 김병욱¹ , 홍영균¹, 이영섭¹ , 고영훈¹ , 양승표¹ , 현근우¹ , 이건호¹, 김재철², 김대열³

¹강원도보건환경연구원 대기공학과, ²(주)에어텍, ³강원지방기상청

Regression Analysis-based Model Equation Predicting the Concentration of Phytoncide (Monoterpenes) - Focusing on Suri Hill in Chuncheon -

Seog-Jong Lee^{1*}, Byoung-Ug Kim¹, Young-Kyun Hong¹, Yeong-Seob Lee¹, Young-Hun Go¹, Seung-Pyo Yang¹,
Geun-Woo Hyun¹, Geon-Ho Yi¹, Jea-Chul Kim², and Dae-Yeol Kim³

¹Atmospheric Engineering Division, Gangwon Institute of Health and Environment, ²AirTech Inc., ³Gangwon Regional Meteorological Administration

ABSTRACT

Background: Due to the emergence of new diseases such as COVID-19, an increasing number of people are struggling with stress and depression. Interest is growing in forest-based recreation for physical and mental relief.

Objectives: A prediction model equation using meteorological factors and data was developed to predict the quantities of medicinal substances generated in forests (monoterpenes) in real-time.

Methods: The concentration of phytoncide and meteorological factors in the forests near Chuncheon in South Korea were measured for nearly two years. Meteorological factors affecting the observation data were acquired through a multiple regression analysis. A model equation was developed by applying a linear regression equation with the main factors.

Results: The linear regression analysis revealed a high explanatory power for the coefficients of determination of temperature and humidity in the coniferous forest ($R^2=0.7028$ and $R^2=0.5859$). With a temperature increase of 1°C, the phytoncide concentration increased by 31.7 ng/Sm³. A humidity increase of 1% led to an increase in the coniferous forest by 21.9 ng/Sm³. In the deciduous forest, the coefficients of determination of temperature and humidity had approximately 60% explanatory power ($R^2=0.6611$ and $R^2=0.5893$). A temperature increase of 1°C led to an increase of approximately 9.6 ng/Sm³, and 1% humidity resulted in a change of approximately 6.9 ng/Sm³. A prediction model equation was suggested based on such meteorological factors and related equations that showed a 30% error with statistical verification.

Conclusions: Follow-up research is required to reduce the prediction error. In addition, phytoncide data for each region can be acquired by applying actual regional phytoncide data and the prediction technique proposed in this study.

Key words: Phytoncide, monoterpene, modeling equation, coniferous, deciduous

Received October 5, 2021

Revised December 14, 2021

Accepted December 14, 2021

Highlights:

- An empirical model was developed to predict monoterpenes in forests.
- Observations were correlates with temperature and humidity.
- The model showed 30% errors based on meteorological factors and seasonal index.

*Corresponding author:

Atmospheric Engineering Division,
Gangwon Institute of Health and
Environment, 386-1 Sinbuk-ro, Sinbuk-
eup, Chuncheon 24203, Republic of Korea
Tel: +82-33-248-6460
Fax: +82-33-248-6500
E-mail: sjong727@korea.kr

I. 서 론

최근, 코로나 19 감염증의 출현 및 확산은 사람들의 생활 패

러다임 및 의식구조에 많은 변화를 바꾸어 놓았다. 문화활동, 야외활동, 사람간의 만남은 현저히 감소한 반면, 집에 있는 시간이 증가하였고, 온라인 모임, 화상 회의, 영상 콘텐츠 시청 등

의 취미활동이 증가하였다.¹⁾

한정된 공간에서 활동이 제한되고, 세계적 팬데믹이 장기화됨에 따라 우울감을 호소하는 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 2021년 1분기 보건복지부 국민 정신건강 실태조사에 따르면, 우리나라 국민 약 22.8%가 코로나로 인한 우울감을 경험하고 있다고 하였으며, 코로나 전 약 3.8%에 비해 약 6배 높은 우울감을 겪은 것으로 나타났다.²⁾

사람들은 이러한 정신적 우울감에서 벗어나고 심리적 치유와 면역력 증진을 위해 쾌적한 자연을 찾아 떠나는 여행을 선호하며,³⁾ 여행 중심장소로는 바다/해변 43.6% 그리고 산/계곡으로 다녀온 비율이 26.3%로 높게 나타나는 등 자연활동의 비율이 증가한 것으로 조사되었다.⁴⁾

연구에 따르면 여가스포츠 활동이나 신체적 활동의 참여는 이러한 정신적 스트레스 감소에 긍정적인 영향을 미친다고 보고되어 있고,⁵⁾ 또한 숲이나 산림에서 향기, 소리, 경관 등을 활용하는 산림치유 활동 또한 심리적 안정과 인체의 면역력을 증진시키는 것으로 알려져 있다. 사람들은 자연을 이용하여 건강 증진 효과를 얻고자 하는 치유정원, 식물을 활용한 원예심리치료 그리고 산림치유 활동까지 점점 자연환경에 대한 관심이 높아지고 있다.^{6,7)}

산림치유 대표 물질로는 피톤치드를 들 수 있다. 피톤치드는 나무가 곤충이나 미생물 등 자기방어 생존수단으로 방출하는 이차대사물질로 자연적휘발성유기화합물(Natural VOC, NVOC)이다. 이러한 물질은 스트레스와 피로지수를 감소시키고, 산림욕 후 안정적인 뇌파, 혈압, 맥박의 이완효과, 스트레스 감소 등 생리적인 변화와 심리적 안정의 효과가 있는 것으로 보고되어 있다.⁸⁻¹¹⁾

산림 내에서 모노테르펜 배출에 영향을 미치는 인자는 빛조사 시간, 강도, 상대습도, 잎의 수분, 물 스트레스 그리고 식생 환경 등이 있다. 김건우(2017)등¹²⁾은 소나무림에서의 연구에서 온도 및 습도 증가하면 NVOCs의 농도는 증가하고, 풍속 1%가 증가하면 7.5% 감소한다고 하였다. 즉, 기온과 습도는 산림내 모노테르펜 농도에 양의 영향을 주며, 풍속은 음의 영향을 주는 것으로 보고되어 있다.^{13,14)}

우리는 강원도 춘천시 신북읍 수리봉(침엽수림: 37.9731/127.7548), 활엽수림: 37.9695/127.7529) 일대에서 2017~2019년 기간 침엽수림(잣나무) 지점과 활엽수림(밤나무, 참나무) 지점으로 나누어 피톤치드(모노테르펜) 농도를 측정하였다. 수종별 계절별 피톤치드 발생특성 및 기상인자와의 관계를 보고한 바 있으며, 선행연구에서 결과값을 활용한 예측 모델식의 필요성을 제시하였다. 피어슨 상관계수를 이용한 분석결과 우리가 측정한 피톤치드 발생량은 온도와 습도에 따라 높은 상관관계가 있는 것을 확인하였다.¹⁵⁾

최근 피톤치드 연구는 농도측정에 머무르지 않고, 기상인자 및 식생인자와 연계하여 회귀분석을 통한 경험적 예측 모델식

을 구축하려는 시도가 이루어지고 있다.^{12,16-18)} 예측 결과에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 실제 관측치의 장기간 분석자료가 필요하므로, 춘천인근 야산에서 측정한 장기간 자료를 활용하고자 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 지역별 모노테르펜 실제 측정값을 기반으로 기상인자를 활용한 모델식을 제시하고자 하였다. 현장측정이 용이한 주요 기상인자를 활용했으며, 회귀분석과 통계적기법을 활용하여 산림의 계절적 요인을 연계한 피톤치드 발생량을 예측하였다. 이를 통해 지역별 산림휴양 정보(피톤치드) 서비스 구축을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

II. 조사내용 및 방법

1. 지점 현황 및 분석 방법

기준식 개발을 위해 춘천 인근 수리봉에서 2017년 4월~2019년 3월까지 매월 1~2회 피톤치드 농도를 측정하였다. 수리봉은 경사도 약 10°의 야산지역이며, 조사지역은 침엽수림과 활엽수림대가 명확히 구분되어 있었다. 따라서, 수종별 발생량 및 기상인자를 동일하게 적용하기 위해 측정 지점으로 선정하였다(Fig. 1). 침엽수의 주요 수종은 잣나무이었으며, 활엽수림의 주요 수종은 밤나무와 참나무로 이루어져 있었다. 침엽수림의 수관밀도는 높은 편이었으며, 활엽수림의 수관밀도는 보통 수준이었다.

측정한 피톤치드 종류는 모노테르펜류이며, 항목별로 α -pinene, camphene, β -pinene, α -phellandrene, α -terpinene, ρ -cymene, d-limonene, γ -terpinene, sabinene hydrate, 3-carene 총 10개 항목을 분석하였고, 측정된 항목의 총량

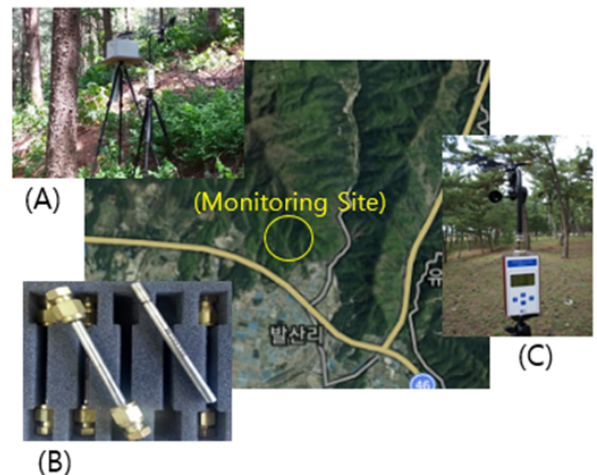


Fig. 1. Monitoring site and sampling method. (A) 24 h monitoring system (B) Tenax TA absorbent tube (C) Wether monitoring Coordinate: Conifer Forest (37.9731/127.7548), Deciduous Forest (37.9695/127.7529)

을 계산했다. 시료채취 방법은 수목에서 배출되는 휘발성유기화합물질을 Tenax TA (200 mg, MARKES) 흡착관을 이용하여 지상 1.5 m 높이에서 포집하였으며, 피톤치드(모노테르펜) 분석은 자동열탈착장치(Ultra TD Autosampler, MARKES)와 가스크로마토그래피/질량분석기(Agilent GC/MSD, HP 7890B/5977B)를 이용하여 분석하였으며, 기기분석 조건은 Table 1과 같다.

지점별 시료채취는 mini pump (SIBATA MP-Σ30KN)를 사용하여 100 mL/min의 유량으로 Tenax TA관에 흡착하였다. 피톤치드의 농도단위는 기온, 기압 등 환경조건 변화를 고려하여 표준상태(0°C, 1기압)로 환산하는 ng/Sm³ 단위를 사용하였다.

모델링을 위한 자료는 측정된 피톤치드 실측값과 기상인자(기온, 습도, 풍속, 기압)를 활용하였고, 수종별 발생특성을 비교하기 위해 침엽수림과 활엽수림을 구분하여 평가하였다.

겨울철 -4°C 이하의 기온에서는 피톤치드(모노테르펜)의 발생량이 여름철에 비해 현저히 낮고, 실측치에서 불검출 빈도가 높아 검출되지 않는 것으로 설정하였다. 상관성분석에 사용한 통계프로그램은 기초통계에 주로 사용되는 SPSS (Statistical Packages for Social Science)와 통계 계산식을 활용하였다.

2. 회귀분석을 통한 기상영향 인자 변수값 추정

피톤치드 농도에 영향을 주는 기상인자를 추정하기 위해 다

Table 1. Operating parameters of the thermal desorber (TD) and GC/MSD

Instrument	Operation condition
Thermal desorber	Markes, TD autosampler (ULTRA-xr, UNIT-xr) Tube: Tenax-TA Desorption temperature: 300°C Desorption time: 10 min Desorption flow rate: 50 mL/min Split: 5:1 Cold Trap low temperature: 10°C Cold Trap high temperature: 300°C Trap desorb time: 5 min Flow path temperature: 150°C
Gas Chromatography/ Mass Spectrometry Detector (GC/ MSD)	Agilent GC/MSD, HP 7890/5977B GC column: VF-1 (60 m×0.25 mm×1.0 μm) Oven temperature: 40°C (4 min) ⇒ 4°C/min ⇒ 170°C (0 min) ⇒ 25°C/min ⇒ 260°C (0 min) Column flow rate: 1.5 mL/min MS source temperature: 230°C Detector type: EI (Quadrupole) Mass scan range: 50~550 amu

중회귀분석을 실시하였다. 단계적 검정절차에 따라 회귀분석을 실시하였으며, 주요 기상인자로 기온, 기압, 습도 그리고 바람을 적용하였다. 회귀분석은 반응변수와 설명변수 사이의 함수적 관계, 즉 함수식을 구할 수 있으며, 이 함수식을 이용하여 한 변수의 값으로부터 다른 변수의 값을 예측할 수 있다.

회귀분석(Regression analysis)을 이용하기 위해서는 랜덤표본, 독립성, 정규성 그리고 등분산성이라는 가정이 필요하다. 회귀모형의 유의성을 및 다중공선성을 확인하기 위해 VIF 계수를 확인하였다. VIF계수가 10 이하일 때 다중공선성이 없으며, 독립변수로 사용한다. 독립성은 Durbin-Watson 검정을 실시하였다.

다중회귀분석에 도출된 주요 기상인자를 추출한 후, 피톤치드 발생량과의 단순선형회귀분석을 실시하여 최종 함수식을 적용하였다.

3. 시계열 분석을 통한 계절지수 산정

계절지수(Seasonal index)란 통계기법에서 시계열값이 계절적 요인에 의하여 추세가 변동할 때 적용하는 것으로, 이번 연구에서 산림식생 활성도에 따라 변하는 피톤치드의 계절 특성을 반영하기 위해 적용하였다.

피톤치드 주성분인 모노테르펜은 식물의 다양한 성장과정을 통해 잎과 줄기에 축적되고 식물의 종에 따라 배출되거나 저장되며,¹⁹⁾ 대기중으로 직접 배출되지 않고 잎에 저장되고, 생성된 모노테르펜은 수지구(resin duct)와 같은 분비기관에 저장된다.²⁰⁾ 침엽수의 경우 수지구와 같은 복잡한 분비기관을 가지고 있어 활엽수에 비해 배출량이 더 많은 것으로 알려져 있다.²¹⁾ 모노테르펜의 배출에 영향을 주는 요인으로는 잎의 온도, 상대습도, 잎의 수분, 빛의세기, 잎의 C/N비율 등이 있으나, 온도에 의한 상관관계가 가장 크다.²²⁾

따라서 식생의 활성도가 높은 여름철에는 피톤치드 농도가 높으며, 잎이 떨어지는 가을~겨울에는 피톤치드 발생량이 낮아지는 요인이기도 하다. 이러한 산림의 사계절 생리변화를 계절지수로 도출할 경우, 산림의 식생지수를 간접적으로 반영하며, 예측값의 에러를 줄일 수 있을 것으로 판단하였다.

따라서, 측정된 농도값과 예측값을 활용하여 이동평균법(식 1)에 따라 추세분석과 계절지수 산정을 위한 기초자료를 확보하였다. 계절지수는 실측값/예측값의 비율로 측정기간 각각의 계절지수를 구하고(식 2), 동일한 월별 지수값을 합산한 후 평균하여 최종 월별 계절지수를 산정하였다.

$$\text{Moving average } F_t = \frac{\sum_{i=1}^n A_{t-i}}{n} \quad (\text{식 1})$$

여기서 F_t = 차기 예측치

A_{t-i} = $t-i$ 기간 예측치

n = 기간 수

$$\text{Seasonal Index (SI)} = \frac{\text{Value of observe}}{\text{Model predictive value}} \quad (\text{식 2})$$

$$\text{Mean Absolute Error (MAE)} \quad MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |C_{p,i} - C_{o,i}| \quad (\text{식 3})$$

4. 예측모델의 검증

측정된 피톤치드 농도와 모델값과의 오차를 평가하기 위해 통계분석을 실시하였다. 모델값과 측정값 사이의 상관관계를 평가하여 직선성을 평가하였으며, 예측값의 정확도를 평가하기 위해 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)를 사용하였다(식 3). 평균절대오차(MAE)는 예측값과 관측값의 차에 절대값을 취하여 전체 자료의 수로 나누어 나타낸다(식 4). MAE값은 0에서부터 무한대의 범위이며, 0에 가까울수록 예측이 우수한 것으로 평가한다. 또한, MAPE는 예측값과 관측값의 에러를 계산하는 대표적인 측정방법으로, 정확도를 백분율로 나타내는 방법이다.²³⁾

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{C_{p,i} - C_{o,i}}{C_{o,i}} \right| \quad (\text{식 4})$$

*Cp: predicted concentration

Co: observed concentration

III. 결과 및 고찰

1. 수종별 피톤치드 농도 분포

침엽수림 분석결과 6~10월의 기간 피톤치드 농도가 높게 측

Table 2. Monoterpene concentration of conifer forest and deciduous forest applying model equation (unit: ng/Sm³)

	Conifer forest				Deciduous forest			
	Observed	Model ¹⁾	Model ²⁾	SI ³⁾	Observed	Model ¹⁾	Model ²⁾	SI ³⁾
2017~Apr	257.5	572.9	288.6	0.450	73.4	82.7	77.6	0.888
May	491.2	860.2	872.0	0.571	213.1	230.5	211.2	0.925
Jun	1,250.2	998.7	1,013.8	1.252	382.5	434.3	370.8	0.881
Jul	1,029.4	1,171.5	1,141.7	0.879	253.8	349.6	262.8	0.726
Aug	742.6	831.6	681.9	0.893	265.8	339.6	271.0	0.783
Sep	526.3	863.7	721.3	0.609	225.4	272.6	214.6	0.827
Oct	396.0	550.2	631.2	0.720	179.2	204.8	175.3	0.875
Nov	57.2	122.3	88.7	0.468	22.7	41.4	28.2	0.548
Dec	17.1	17.2	5.2	0.993	12.6	12.6	11.2	1.000
2018~Jan	93.3	186.7	85.4	0.500	91.0	131.0	90.3	0.694
Feb	5.2	5.3	3.3	0.988	2.5	2.5	2.5	1.011
Mar	152.6	540.2	152.3	0.282	58.1	85.7	42.2	0.678
Apr	398.3	713.7	359.5	0.558	152.1	153.7	144.3	0.989
May	1,229.0	843.9	855.4	1.456	314.0	346.0	317.0	0.908
Jun	725.2	931.5	945.6	0.778	210.4	254.5	217.3	0.827
Jul	1,258.6	1,175.9	1,145.9	1.070	359.0	461.7	347.1	0.778
Aug	903.4	1,209.3	991.6	0.747	382.3	470.2	375.2	0.813
Sep	891.2	840.1	701.5	1.061	195.2	261.1	205.6	0.748
Oct	1,000.0	635.1	728.5	1.575	427.4	510.7	437.1	0.837
Nov	425.0	432.3	313.7	0.983	166.2	204.5	139.1	0.813
Dec	67.3	65.3	19.6	1.029	26.6	33.8	30.2	0.785
2019~Jan	27.3	65.7	30.0	0.415	12.0	17.6	12.1	0.683
Feb	17.2	62.1	39.3	0.277	11.2	11.3	11.3	0.988
Mar	97.6	347.0	97.8	0.281	21.2	68.9	34.0	0.308
Average	502.4	585.1	496.4	0.785	169.1	207.6	167.8	0.805

¹⁾Results of model equation application.

²⁾Results of seasonal Index model equation.

³⁾Seasonal index.

정되었다. 2017년의 경우 이 기간 396.0~1,250.2 ng/Sm³이 측정되었고, 2018년 725.2~1,258.6 ng/Sm³로 높게 측정되었다. 활엽수림은 2017년 6~10월 179.2~382.5 ng/Sm³ 그리고 2018년 195.2~427.4 ng/Sm³로 높았다(Table 2).

침엽수림의 피톤치드 평균 농도는 502.4 ng/Sm³이었고, 활엽수림의 평균 농도는 169.1 ng/Sm³로 침엽수림의 피톤치드 농도가 약 3배 높게 측정되었다. 한편, 1~3월 농도범위는 각각 5.2~152.6 ng/Sm³과 2.5~91.0 ng/Sm³로 낮게 측정되었다.

김형철(2013) 등²⁴⁾은 피톤치드의 계절적 분포에서 여름철 농도가 가을보다 약 20% 높으며, 봄보다 약 40% 높다고 하였고, 침엽수림으로 조성된 삼나무 숲길의 피톤치드 분포농도는 1,011~1,087 pptv로 활엽수로 구성된 지역의 농도분포 290~513 pptv 보다 약 2배 높다고 하였다.

그 외 선행연구에서도 계절별 수종별 피톤치드 농도는 비슷한 양상을 보이고 있으며, 영향인자로써는 기온 및 산림생리활성도가 크게 영향을 준다고 하였다.²⁵⁾

2. 다중회귀분석을 활용한 주요 영향인자 도출

피톤치드 농도에 영향을 주는 기상인자를 추정하기 위해, 다중회귀분석을 실시하였다. 단계적 검정절차에 따라 회귀분석을 실시하였으며, 주요 기상인자로 기온, 기압, 습도 그리고 바람을 적용하였다.

분산분석 결과 침엽수림의 경우 피톤치드와 기상인자 간에는 $F=17.034$ ($p<0.01$)로 회귀모델이 적합하였으며, $R^2=0.634$ 로 약 63%의 설명력을 보였다. 기상인자 중 기온의 $B=23.333$ ($p<0.001$)이었으며 습도의 $B=11.305$ ($p<0.006$)로 기온과 습도가 Monoterpenes 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다(Table 3).

기압과 바람은 $p>0.1$ 로 유의성이 인정되지 않았으며, 바람의 경우 $B=-80.519$ 로 부의 영향을 주는 것으로 평가되었다. 표준화계수 결과에서 기온과 습도는 각각 $\beta=0.526$ 및 $\beta=0.379$ 로 기온에 의한 상대적 영향이 큰 것으로 나타났다. 한편, 본 회귀모델의 공선성 통계량 지표인 Tolerance (TOL)은 모두 >0.1 이며, VIF값은 <10 로 다중공선성이 나타나지 않았다. 독립변수

Table 3. Multiple regression analysis of conifer forest

Conifer	Standardized regression coefficient		Standardized coefficient		Multicollinearity	
	B	SE	β	t (p)	TOL	VIF
Temperature	23.333	5.417	0.526	4.307 (<0.001)	0.664	1.506
Pressure	4.381	4.247	0.114	1.032 (0.310)	0.807	1.240
Humidity	11.305	3.827	0.379	2.954 (0.006)	0.599	1.669
Wind	-80.519	117.735	-0.081	-0.684 (0.499)	0.707	1.415
F (p)				17.034***		
R ²				0.634		
Durbin-Waston				1.825		

Tolerance (TOL).

Variance Inflation Factor (VIF).

* $p<0.5$, ** $p<0.05$, *** $p<0.01$.

Table 4. Multiple regression analysis of deciduous forest

Deciduous	Standardized regression coefficient		Standardized coefficient		Multicollinearity	
	B	SE	β	t (p)	TOL	VIF
Temperature	7.032	1.378	0.579	5.1303 (<0.001)	0.575	1.739
Pressure	1.202	0.980	0.117	1.227 (0.229)	0.821	1.218
Humidity	3.201	1.030	0.391	3.107 (0.004)	0.469	2.132
Wind	-5.581	29.781	-0.021	-0.178 (0.852)	0.582	1.718
F (p)				25.458**		
R ²				0.726		
Durbin-Waston				1.438		

Tolerance (TOL).

Variance Inflation Factor (VIF).

* $p<0.5$, ** $p<0.05$, *** $p<0.01$.

간 자기상관성을 검정하는 지표인 Durbin-Watson 값은 1.825로 변수 간 독립성이 인정되었다.

활엽수림에서 피톤치드와 기상인자 간에는 $F=25.458$ ($p<0.05$)로 통계적으로 유의한 회귀모델로 확인되었으며, $R^2=0.726$ 으로 회귀모델식은 약 73%의 높은 설명력을 보였다. 4개의 기상인자 중 기온의 $B=7.032$ ($p<0.001$)이었으며, 습도의 경우 $B=3.201$ ($p<0.004$)로 기온과 습도가 피톤치드 농도에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Table 4).

한편, 기압과 바람은 $p>0.1$ 로 유의성이 인정되지 않았으며, 바람의 경우 $B=-5.581$ 로 부의 영향을 주는 것으로 평가되었다. 표준화계수 결과에서 기온과 습도의 비표준화지수 값은 각각 $\beta=5.103$ 및 $\beta=3.107$ 로 기온에 의한 상대적 영향이 큰 것으로 나타났다. 한편, 본 회귀모형의 공선성 통계량 지표인 TOL은 모두 >0.1 이었으며 VIF값은 <10 로 다중공선성이 나타나지 않았다. Durbin-Watson 값은 1.438로 자기상관성이 없고 독립성이 인정되었다.

김병욱(2020) 등¹⁵⁾은 선행연구에서 피어슨 상관계수 분석을 통해, 온도와 습도가 피톤치드 발생량에 영향을 주며, 기온과의 회귀분석식을 적용하여 피톤치드 농도변화를 예측할 수 있을 것이라 가능성을 제시한 바 있다. 그러나 당시 보고에서는 회귀방정식을 이용하여 도출된 회귀식에 실제 측정값을 그대로 적용한 결과이며, 검증을 통한 최적화된 모델식을 제시하지 않았으며, 실측값과 모델값의 편차를 줄이고 예측값의 신뢰성을 높이는 시도는 하지 못했다.

본 연구에서는 상관성이 높은 기온과 습도를 모두 고려하여 모델식을 유도하고자 하였으며, 임목축적도 및 임상자료 등 산림의 식생변화에 따른 피톤치드 농도 변화를 계절지수로 적용하는 모델식을 제시하고자 하였다.

피톤치드 발생량을 예측한다는 것은 매우 정교한 작업이다. 대산지역의 식생분포에 따라 크게 영향을 받으며, 지역별 기온과 일조량에 의해 발생농도의 차이가 나타날 수 있다. 또한, 발

생기작과 농도와와의 상관성 그리고 발생메카니즘에 대한 연구가 미비한 상태로 모델식의 적용 확대에 한계가 있다. 그러나, 지역별로 장기간 실제 측정값을 제시하고, 임상변화에 따른 농도변화의 영향을 단순화할 수 있다면, 사람들이 숲에서 느끼는 피톤치드 농도 정보를 쉽게 제공 받을 수 있을 거라 사료된다.

3. 피톤치드(Monoterpene) 측정량 함수식 도출

다중회귀분석 결과로부터 기온과 습도가 피톤치드 농도에 영향을 주는 주요 인자로 평가되었다. 따라서 피톤치드 농도와 기온 및 습도의 인자만 활용하여 단순선형 회귀분석을 도출하였다.

선형회귀분석 결과 침엽수림과 활엽수림에서 기온과의 결정계수는 $R^2=0.7028$ 과 $R^2=0.6611$ 로 약 70%의 높은 설명력이 인정되었다. 침엽수림과 활엽수림 모두 F값은 $p<0.05$ 신뢰수준에서 만족하였다. 회귀관계식은 $y=31.559x+11.027$ 로 침엽수림에서 기온이 1°C 증가할 때 피톤치드 농도는 약 $31.7 \text{ ng}/\text{Sm}^3$ 증가하였고, 활엽수림은 $y=9.5875x+19.840$ 에 따라 약 $9.6 \text{ ng}/\text{Sm}^3$ 변하는 것으로 인정되었다(Fig. 2).

침엽수림에서 습도와의 결정계수는 $R^2=0.5859$ 이며, 활엽수림에서는 $R^2=0.5893$ 로 각각 약 60%의 설명력을 보였고, F값은 $p<0.05$ 신뢰수준에서 만족하였다. 상관관계식 결과 침엽수림에서 $y=21.935x-461.94$ 로 습도 1% 증가하면 피톤치드 농도는 약 $21.9 \text{ ng}/\text{Sm}^3$ 증가하며, 활엽수림은 $y=6.8672x-133.35$ 에 따라 약 $6.9 \text{ ng}/\text{Sm}^3$ 변하는 것으로 나타났다(Fig. 3).

한편, 다중회귀식의 표준화계수 결과 기온과 습도의 비표준화지수 값은 각각 $\beta=5.103$ 및 $\beta=3.107$ 로 습도에 의한 영향력이 기온에 비해 적었다. 따라서 습도의 영향을 20% 보정한 함수식을 제시하였다.

4. 계절지수를 활용한 예측값의 보정

실측치와 모델식으로 유도된 계산값과의 비율을 토대로 월별 계절지수를 산정하였다(Table 2). 침엽수림에서 계절적 변동은

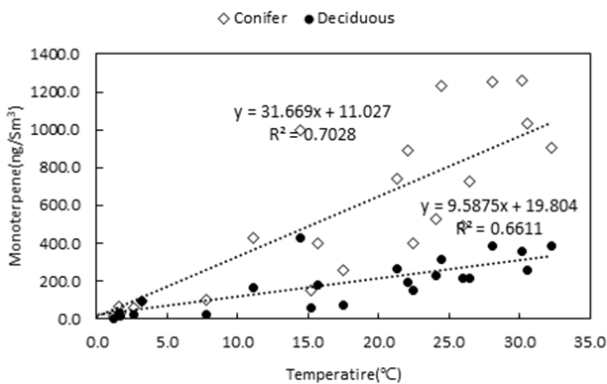


Fig. 2. Linear regression analysis between temperature and monoterpene in conifer and deciduous forest

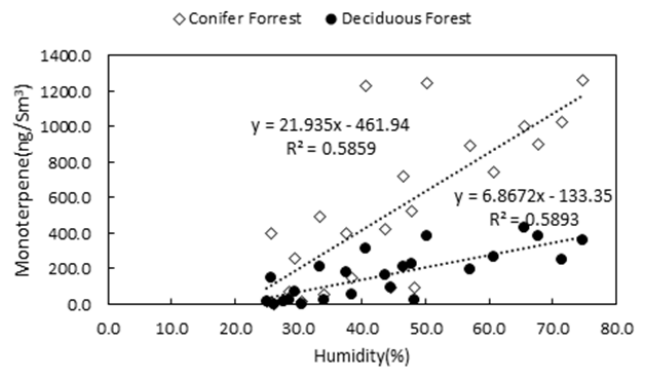


Fig. 3. Linear regression analysis between humidity and monoterpene in conifer and deciduous forest

즉 계절지수는 1월~4월 0.28~0.63으로 낮다가, 5~10월에는 증가하여 0.82~1.15 범위를 나타냈으며, 다시 12월 0.3으로 낮아지는 뚜렷한 경향을 보였다. 활엽수림의 경우 11월~3월 겨울기간 0.49~1.0으로 침엽수보다 높았으며, 4월~10월 여름철에는 0.5~1.15로 침엽수보다 낮게 나타났고, 침엽수림 보다 계절적 변동이 뚜렷하지 못했다.

이러한 차이는 활엽수가 침엽수에 비해 잎 내부에 함유된 NVOCs의 양이 1/3~1/10 적은 것으로 알려져 있는데, 그 영향으로 피톤치드 측정시 활엽수 지역에서는 농도 편차가 적었고, 계절지수 산정시 실측치와 모델값의 차이가 적은 것으로 사료되었다.

수종별 실측치에서 계절지수를 적용하여 모델값을 재산정하였다(Table 2). 그 결과 침엽수림의 평균값은 585.1 ng/Sm³에서 496.4ng/Sm³로 낮아졌다. MAE는 보정 전 177.4 ng/Sm³에서 보정 후 116 ng/Sm³으로 낮아졌으며, MAPE 또한 70.8에서 31.9로 줄어들었다. 활엽수림에서 평균은 보정전 207.6 ng/Sm³에서 167.8 ng/Sm³로 낮아졌다. MAE는 38.5 ng/Sm³에서 7.1 ng/Sm³로 나타났고, MAPE는 32.1에서 보정후 8.3로 낮아졌다. 따라서 계절지수를 적용했을 때 모델식의 정밀성이 최적화되는 결과를 얻었다(Fig. 4).

계절지수를 활용한 예측은 전력수요예측 분야에서 계절형 지수평활법과 이중계절형 자기회귀누적이동평균법 모형을 통해 주로 사용하고 있으며, 그 외 항공수요예측과 관광수요 예측분야 등에서 주로 사용하고 있다.^{26,27)} 환경분야에서 류인구 등(2017)²⁸⁾은 팔당호 유역의 수질특성 평가에서 오염물질의 시계열분석을 통한 계절지수를 제시한 바 있으며, 제한적이지만 계절적 변동이 반복적으로 재현될 경우 통계분석에 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

한편, 피톤치드 발생량에서 식생지수를 적용하기 위해, 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)를 활용하기도 한다. 엽면적지수는 지표 환경에 영향을 미치는 광합성, 증발 그리고 에너지 균

형과 같은 생물물리학적 변화 과정에 있어 중요한 인자이다.²⁹⁾ 엽면적지수의 측정은 잎의 면적을 직접 측정하는 방법과 간접적인 방법이 있으며, MODIS (Moderated resolution Imaging Spectroradiometer)의 위성자료를 활용하는 간접적인 방법이 있다.³⁰⁾

그러나 이러한 엽면적지수 값을 활용하여, 소규모의 산림 지역에서 피톤치드 예측 식을 적용하기에는 지수적용의 한계가 있었다. 따라서 통계기법을 활용한 계절지수를 활용하면, 계절에 따라 바꾸는 식생지수를 대체할 수 있을 것으로 사료되었다.

지금까지 연구결과를 종합하여 피톤치드 발생량 예측을 위한 모델식을 다음과 같이 제시하였다.

$$MCC = [(31.669 \times T + 11.027) + 0.2 \times (21.935 \times H)] \times SI \quad (\text{식 } 5)$$

$$MCD = [(9.587 \times T + 19.804) + 0.2 \times (6.867 \times H)] \times SI \quad (\text{식 } 6)$$

여기서 MCC: Monoterpene Concentration in Conifer Forest

MCD: Monoterpene Concentration in Deciduous Forest

T: Temperature

H: Humidity

SI: Seasonal index

5. 피톤치드 예측 모델식의 검증

침엽수림과 활엽수림에서 모델식을 적용하여 모의 계산값을 도출하였다(Table 2). 침엽수림에서 예측값의 평균은 585.1 ng/Sm³이었고, 활엽수림에서는 207.6 ng/Sm³로 실측값과 비슷하였다. 한편 계절지수를 적용했을 경우 실측치와의 차이가 더 줄어드는 경향을 보였다. 계절별 변화에 따른 농도변화는 기온의 증가와 함께 여름철 높아졌고 가을 겨울에 낮아지는 패턴을 보여 계절지수를 적용하는 것이 타당하였다(Fig. 5).

따라서, 관측농도와 모델의 전체적인 예측 정확도를 평가하는 성능평가를 실시하였다. 침엽수림의 측정값과 모델값의 절

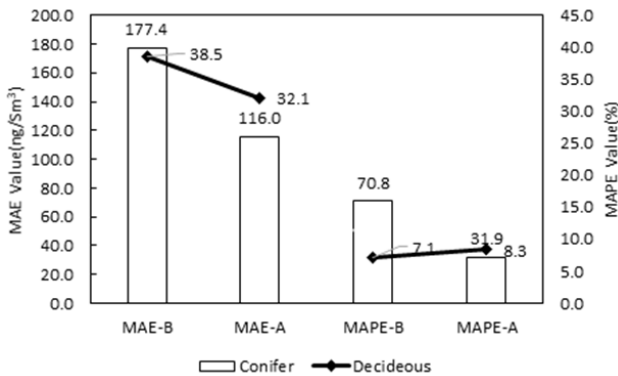


Fig. 4. Change of error value before and after applying the seasonal index

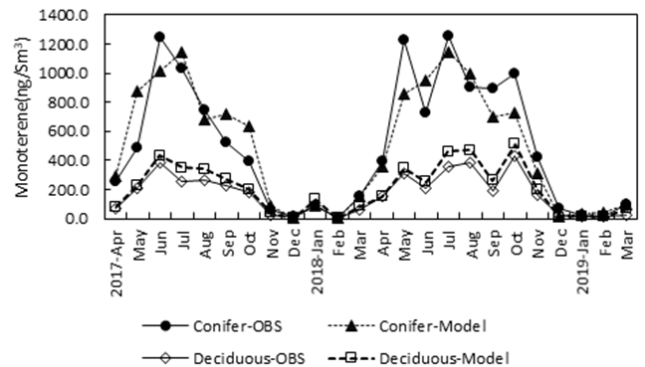


Fig. 5. Trend of actual measured value and model value in the each forest

대오차 MAE는 피톤치드가 높게 측정되는 시기 112~380.8 ng/Sm³로 오차가 커졌고, MAE는 116.0 ng/Sm³이었다. 예측 모델이 관측값과 얼마나 유사한지 비율로 나타내는 MAPE는 2018년 봄~여름철 21.3~30.4%로 안정되었고 최종 MAPE는 31.9%로 낮았다. 활엽수림은 MAE는 38.5 ng/Sm³로 침엽수와 유사하였고 MAPE는 36.4%를 나타냈다. MAPE는 0~100의 값을 갖으며, 예측값의 차이가 클수록 100에 가까운 수치를 나타내고, 차이가 적을수록 작은 수를 나타낸다(Table 5).

본 연구에서 도출한 예측식은 약 30%의 오차를 보이는 것으로 평가되었으며, 향후 절대오차를 줄이기 위한 피톤치드 경험식의 고도화가 필요하였다.

오차는 실제 온도가 높더라도 피톤치드 발생에 영향을 주는 인자인 바람, 임목밀도 등의 조건에 따라 피톤치드 농도는 달라질 수 있다. 또한, 상대습도의 일변화가 뚜렷한 기간과 높은 상대습도가 지속되는 습한 날의 경우 모델의 피톤치드 농도 변화는 큰 차이를 보인다. 특히, 상대습도가 높으며, 온도가 높을 경

우 실제 피톤치드 농도는 높아지는 반면, 예측 모델의 시간 변화에 따른 피톤치드 농도의 변화 폭은 상대습도 일주기 변화가 뚜렷한 날에 비하여 작게 나타나며 오차발생의 원인이 되었다.

IV. 결 론

기상에 따른 피톤치드(모노테르펜) 농도를 예측하기 위해 기준 모델식을 개발하였다. 모델식에 사용한 자료는 본 연구그룹이 2017년부터 2019년까지 측정된 춘천지역의 피톤치드 농도와 인근 춘천기상대의 기상 인자와의 다중회귀분석과 단순선형회귀분석을 통해 도출했다. 도출된 기준식의 기상인자는 일변화(평균) 피톤치드 농도의 산출에 각각 적용했다.

산림에서 피톤치드 농도 관련하여 수요자에게 정보 서비스하기 위한 알고리즘(모델)을 개발하고자 하였다. 실시간 농도분포도(MAP)를 만들기 위해 환경인자 변화와 및 지역별 농도를 측정하였으며, 최종 피톤치드 기준식 적용하여 모델링의 적합

Table 5. Observed error variances of predictive model equation

	Conifer			Deciduous		
	MAE	MAPE	MSE	MAE	MAPE	MSE
2017~Apr	31.1	12.1	9,9451.2	9.3	12.6	85.9
May	380.8	77.5	13,6167.5	17.3	8.1	299.5
Jun	236.4	18.9	63,258.1	51.8	13.5	2,684.4
Jul	112.2	10.9	20,188.7	95.8	37.7	9,176.6
Aug	60.7	8.2	7,929.3	73.8	27.7	5,439.3
Sep	195.0	37.1	113,864.1	47.2	20.9	2,225.6
Oct	235.2	59.4	23,802.0	25.6	14.3	657.8
Nov	31.5	55.0	4,229.7	18.7	82.6	351.4
Dec	11.9	69.8	0.01	0.0	70.0	0.0
2018~Jan	7.9	8.5	8,713.8	40.1	44.0	1,605.5
Feb	1.9	36.0	0.004	0.0	1.1	0.0
Mar	0.3	0.2	150,214.8	27.6	47.5	762.1
Apr	38.7	9.7	99,498.5	1.6	1.1	2.7
May	373.6	30.4	148,308.6	31.9	10.2	1,019.6
Jun	220.5	30.4	42,592.1	44.1	20.9	1,943.6
Jul	112.7	9.0	6,841.9	102.7	28.6	10,546.5
Aug	88.2	9.8	93,592.9	87.9	23.0	7,729.0
Sep	189.7	21.3	2,619.7	65.8	33.7	4,332.3
Oct	271.5	27.1	133,168.3	83.3	19.5	6,944.1
Nov	111.3	26.2	54.1	38.3	23.1	1,468.3
Dec	47.7	70.9	3.7	7.3	61.8	52.7
2019~Jan	2.8	10.2	1,476.6	5.6	46.4	30.9
Feb	22.1	128.0	2,015.7	0.1	1.2	0.02
Mar	0.2	0.2	62,196.4	47.7	224.6	2,274.5
Result	116.0	31.9	50,841.1	38.5	36.4	2,484.7

성을 평가하였다. 지금까지 지역별 산림별 피톤치드 연구사례는 많이 보고 되어있으나, 알고리즘을 통한 적용 사례는 미미한 상태이다.

다양한 요인을 고찰하고 토론한 결과, 피톤치드의 시간별, 일별 변화 값에 대한 수치적 해석에는 기상인자(기온, 습도, 풍속)가 주요 변수였다. 피톤치드의 방출에 직접적인 변수인 산림환경인자의 경우, 계절지수를 적용하여 봄철과 가을철의 나무생리특성을 보정했다.

관측농도와 모델의 전체적인 예측 정확도를 평가하는 성능평가를 실시한 결과, 침엽수림의 측정값과 모델값의 절대오차 MAE는 116.0 ng/Sm³이었고, 예측모델이 관측값과 얼마나 유사한지 비율로 나타내는 MAPE는 31.9%로 평가되었다. 활엽수림의 MAE는 38.5 ng/Sm³이었고, MAPE는 36.4%로 비교적 낮은 MAPE값을 나타냈다.

본 연구에서 도출한 예측식은 약 30%의 오차를 보이는 것으로 평가되었으며, 향후 절대오차를 줄이기 위한 피톤치드 경험식의 고도화가 필요하였다. 모델 성능평가에서 계절별 증감 추세를 실측치와 추정 가능한 경향을 보였다.

따라서 추후 보정식 및 변수 조절을 통해 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 수리봉 지역에서 피톤치드의 발생량을 실시간 제공하는데 기여할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 강원지방기상청의 협업연구 및 환경부 환경 분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업 지원에 의해 수행되었다. 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Sa HJ, Lee WS, Lee BG. Corona blue and leisure activities: focusing on Korean case. *J Internet Comput Serv.* 2021; 22(2): 109-121.
2. Ministry of Health and Welfare. National Mental Health Survey due to Corona 19. Available: http://www.mohw.go.kr/react/al/sal0301vw.jsp?PAR_MENU_ID=04&MENU_ID=0403&CONT_SEQ=366599 [accessed 8 November 2021].
3. Jang DY, Lee SJ. COVID-19 Changed the Future of Travel No. 419. Suwon: Gyeonggi Research Institute; 2020.
4. Korea Culture and Tourism Institute. Survey of Domestic Travel Behavior Occurrence of COVID 19: First Quarter Result. Seoul: Korea Culture and Tourism Institute; 2021.
5. Oh SS, Oh KA, Sohn YM. Analysis of the trend of researches in study of leisure in Korea: major journals were centered. *Korean J Phys Educ.* 2013; 52(3): 405-419.
6. Lee DS, Ahn MY, Lee JW, Kang JW, Park CH, Lee B. Effect of Forest Healing Program and Verification. Research Report 18-01. Yeongju: Korea Forest Welfare Institute; 2018.
7. Jeong MA, Park SJ, Lee JH, Park CW, Kim JJ. A case study on the effects of forest environmental factor on human psychological and physiological responses. *J Korean Inst For Recreat.* 2012; 16(3): 13-19.
8. Park BJ. Experimental approach of therapeutic effect of forest recreation activities: focused on viewing and walking in forest environments [dissertation]. [Daejeon]: Chungnam National University; 2010
9. Shin WS, Kim SK, Yeon PS, Lee JH. Effects of phytoncides on psychophysical responses. *J Korean Inst For Recreat.* 2010; 14(2): 85-91.
10. Shin WS, Yeoun PS, Lee JH, Kim SK, Joo JS. The relationships among forest experience, anxiety and depression. *J Korean Inst For Recreat.* 2007; 11(1): 27-32.
11. Lee YK, Woo JS, Choi SR, Shin ES. Comparison of phytoncide (monoterpene) concentration by type of recreational forest. *J Environ Health Sci.* 2015; 41(4): 241-248.
12. Kim GW, Park CH, Lee SG, Joung DW, Lee JD, Park BJ. Development of a prediction model for NVOCs concentration with changing microclimate in *Pinus densiflora* forest. *J Korean Inst For Recreat.* 2017; 21(3): 11-21.
13. Lerdau M, Litvak M, Palmer P, Monson R. Controls over monoterpene emissions from boreal forest conifers. *Tree Physiol.* 1997; 17(8_9): 563-569.
14. Lee DH, Kim MH, Seo HJ, Min GW, Kim SH, Seo KY, et al. Correlation analysis between terpene and meteorological factors at artificial coniferous forest of Mt. Moodeung. *J Environ Sci.* 2012; 21(10): 1221-1234.
15. Kim BU, Hyun GW, Choi JH, Hong YK, Yi GH, Huh IR, et al. Survey of emission characteristics and weather factors for application in prediction modeling for phytoncide weather services. *J Environ Health Sci.* 2020; 46(6): 636-645.
16. Kim GW, Kwon CW, Yeom DG, Joung DW, Choi YH, Park BJ. Relationship between NVOCs concentration and Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) forest environment in spring season. *J Korean For Soc.* 2014; 103(3): 483-489.
17. Park SJ, Lee JH, Yoo RH, Jo YS, Lee ST, Jeong SH. The Concentration of Phytoncide in Pine Trees and the Characteristics of Occurrence of Microclimatic Factors. Seoul: Korea Forest Research Institute; 2018.
18. Jo YS, Park SJ, Jeong MA, Lee JH, Yoo RH, Kim CM, et al. Analysis of phytoncide concentration and micrometeorology factors by *Pinus Koraiensis* stand density. *J Environ Health Sci.* 2018; 44(3): 205-216.
19. McGarvey DJ, Croteau R. Terpenoid metabolism. *Plant Cell.* 1995; 7(7): 1015-1026.
20. Loreto F, Nascetti P, Graverini A, Mannozi M. Emission and content of monoterpenes in intact and wounded needles of the mediterranean pine, *Pinus pinea*. *Funct Ecol.* 2000; 14(5): 589-595.

21. Lewinsohn E, Gijzen M, Croteau R. Defense mechanisms of conifers: differences in constitutive and wound-induced monoterpene biosynthesis among species. *Plant Physiol.* 1991; 96(1): 44-49.
22. Monson RK, Lerdau MT, Sharkey TD, Schimel DS, Fall R. Biological aspects of constructing volatile organic compound emission inventories. *Atmos Environ.* 1995; 29(21): 2989-3002.
23. Shin KH, Kim C, Nam SH, Park SJ, Yoo SS. Estimation method of predicted time series data based on absolute maximum value. *J Energy Eng.* 2018; 27(4): 103-110.
24. Kim HC, Oh SS, Song YC, Kim YJ. Distribution characteristics of phytoncide in Jeolmul natural recreation forest of Jeju. *J Naturop.* 2013; 2(2): 89-98.
25. Yu SJ, Son YS. A review on characteristics of biogenic volatile organic compounds emitted from major tree species in South Korea. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2021; 37(5): 695-709.
26. Jung SW, Kim S. Electricity demand forecasting for daily peak load with seasonality and temperature effects. *Korean J Appl Stat.* 2014; 27(5): 843-853.
27. Son HG, Ha MH, Kim S. A study on the tourism combining demand forecasting models for the tourism in Korea. *Korean J Appl Stat.* 2012; 25(2): 251-259.
28. Ryu IG, Yu SJ, Lee YJ, Park MJ, Noh HR, Cho HS, et al. A Comprehensive Study on Water Quality Control of Paldang Watershed(III). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2017.
29. Ha R, Shin HJ, Park GA, Hong WY, Kim SJ. The evaluation of application to MODIS LAI(Leaf Area Index) product. *J Korean Assoc Geogr Inf Stud.* 2008; 11(2): 61-72.
30. Park JH. Analysis of vegetation net primary production algorithm based on MODIS satellite data [dissertation]. [Incheon]: InHa University; 2005

〈저자정보〉

이석중(환경연구소), 김병욱(환경연구소), 홍영균(환경연구소), 이영섭(환경연구소), 고영훈(환경연구소), 양승표(환경연구소), 현근우(환경연구관), 이건호(환경연구관), 김재철(대표), 김대열(주무관)