

TECHNICAL NOTE

Reflectance water index를 이용한 참나무속 3종 낙엽의 함수량 추정

서계홍*

대구대학교 자연과학대학 생명과학과

Estimation of Water Content in Leaf Litter of Three *Quercus* Species by Reflectance Water Index

Kyehong Suh*

Department of Life Science, Daegu University, Daegu 38453, Korea

Abstract

Water status of intact plants has been optically estimated by measuring reflectance at the wavelengths 1,450 nm and 1,900 nm based on their signal strengths. Although another water band at 970 nm is considered to have very small signals, the band apparently lies within the detection range of inexpensive spectrometer and plain charge-coupled device (CCD) camera used in wild fire studies. However measurement of the reflectance at 970 nm has been rarely applied to estimate the water status of dead plant materials such as fallen branch, twig, and leaf. To test the possibility of applying water reflectance at 970 nm to estimate the water content (WC) in leaf litter, the reflectance in various WC values were measured in the leaf litter of three *Quercus* species (*Q. aliena*, *Q. mongolica*, and *Quercus variabilis*). The results showed that the WC in the leaf litter can be determined by reflectance water index (WI) in the three *Quercus* species ($WC=1,450 \times WI - 1,378.8$, $r=0.865$). However, there was no interaction effect in the relationship between WI and WC among the litter of the three *Quercus* species.

Key words : Reflectance water index (WI), Water content, *Quercus aliena*, *Quercus mongolica*, *Quercus variabilis*, Litter, Wild-fire

1. 서론

최근 10년 동안 한국에서는 연평균 394건의 산불 중 70% 이상이 주로 2월~5월 사이 봄철에 발생하며, 연평균 478 ha 면적의 삼림이 소실되는 것으로 집계되었다(Korea Forestry Service, 2016), 산불의 발생은 산림 녹화에 의한 삼림 내 연료 물질의 축적과 지구 온

난화에 따른 국지적 건조의 심화에 따라 더욱 증가 추세에 있는 것으로 보고된 바 있다(Sung et al., 2010). 특히 산불의 연료 물질인 낙엽의 수분 함량은 산불 발생의 확률을 결정할 뿐 아니라 산불의 세기나 확산 속도를 결정하는 중요한 요인이 된다(Kwon et al., 2011). 따라서 원격탐지 기법을 이용하여 광범위한 지역에 분포하는 낙엽의 수분함량 현황을 신속히 파악

Received 21 February, 2018; Revised 21 March, 2018;

Accepted 23 March, 2018

*Corresponding author: Kyehong Suh, Department of Life Science, Daegu University, Daegu 38453, Korea
Phone : +82-53-850-6453
E-mail : ecology@daegu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다면 산불 예방책의 수립과 발생한 산불의 진압에 매우 효과적으로 이용될 것이다.

식물 잎과 수관의 수분함량을 추정에는 단파 적외선(1,400~3,000 nm) 범위의 특정 파장대를 강하게 흡수하는 물의 광학적 특성(Gaussman, 1977; Carter, 1991)을 이용한 여러 지수가 제안되었다(Gao, 1996; Ceccato, 2001). 그런데 이 파장대를 측정하는 분광광도계는 고가일 뿐 아니라 적외선 측정시 발생하는 잡음 감쇄를 위한 냉각장치의 부착에 따라 장비의 무게가 증가하므로 원격탐지를 위한 비행체 탑재에 제한요인이 된다. 근적외선(700~1,400 nm) 영역에서 970 nm 파장의 반사율도 식생 및 토양의 수분함량과 높은 상관관계에 있으므로(Tucker, 1980), Water Index(WI) 등의 지수가 제안된 바 있다(Penuelas et al., 1997). 이 파장대는 반사율 신호의 크기가 작아서 수분의 상태를 추정하는 원격탐지 분야에서 이용은 단파적외선대 영역에 비하여 저조하지만(Roberts et al., 2003), 보급형 spectrometer나 digital camera의 감지 범위(350~1100 nm) 안에 있으므로 그 활용 잠재성은 매우 크다 할 것이다.

기존의 연구에서 WI는 주로 살아 있는 식물의 잎이나 수관의 수분 상태 추정에 이용되어 왔으며, 낙엽이나 낙지 등 식물의 고사부에 대한 수분 상태 추정에는 반사율의 신호가 크게 나타나는 단파적외선대 파장이 주로 이용되어 왔다. 따라서 근적외선 파장대만으로 구성된 WI를 이용하여 낙엽이나 낙지 등 식물의 고사 부위에 대한 수분 상태 추정에 관한 보고는 전무한 상태이며, 적용 가능성도 불분명하다. 따라서 본 연구에서는 한반도 중부 이남에서 우점하는 것으로 알려진 신갈나무를 포함한 참나무 속 3종 식물의 낙엽을 대상으로 낙엽의 수분함량과 WI를 동시에 측정한 자료를 비교 분석함으로써 WI 지수의 낙엽에 대한 적용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물 재료

측정에 사용된 참나무속 갈참나무(*Quercus aliena* Blume), 신갈나무(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), 그리고 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume)

의 낙엽은 2018년 1월 24일 경상북도 소재 팔공산 도립공원 구역 중 경북 칠곡군 동명면 한티재(북위 36.020391도, 동경 128.631023도) 인근에서 채취하여 식물 채집용 비닐봉지에 넣어 실험실로 운반하였다. 채취된 낙엽의 종을 동정한 후 절지동물 등에 의한 손상이 없으며, 반사율 측정에 용이하게 비교적 편평한 낙엽을 각 종별 6개 선정하여 측정에 사용하였다.

2.2. 측정 및 분석

근적외선 영역인 900 nm 및 970 nm 파장 반사율은 반사율 측정용 광섬유(R200-REF-VIS-NIR, Ocean Optics, US)를 spectrometer(MMS, Zeiss, Germany)에 연결하여 동시에 측정하였으며, tungsten-halogen lamp(LS-1, Ocean Optics, US)의 광원 중 적외선 통과 광학 filter를 이용하여 걸러진 720 nm 이상 파장의 빛을 이용하여 파장별 광도를 측정하였다. 가시광선 범위에서의 파장별 반사율은 900 nm 및 970 nm 반사율 측정을 마친 후 적외선 통과 광학 filter를 광원에서 제거하고 3 종의 낙엽에 대하여 측정하였으며, 본 실험실에서 보유 중인 신갈나무 생엽의 파장별 반사율(unpublished data)과 비교하였다. 낙엽의 반사율은 그 크기에 따라 4~6개 위치에서, 그리고 각 위치당 4회 측정한 값을 산술평균하여 얻었다. 모든 측정값은 BaSO₄를 도말한 작은 판을 이용하여 실험 전후에 측정한 백색 표준의 값으로 나누어 반사율로 계산하였다. WI는 종별 6개 시료를 대상으로 각각의 수분함량에서의 측정된 900 nm 및 970 nm 반사율을 아래 식으로 계산하여 얻었다(Penuelas et al., 1997; Champagne et al., 2003).

$$WI = R_{900} \div R_{970}$$

(여기서 R₉₀₀ 및 R₉₇₀은 각각 900 nm 및 970 nm에서의 반사율이다.)

최대 수분함량 조건은 종별로 각각 6개씩 선정된 낙엽을 20℃ 수조에서 24시간 침수시켜 얻었으며, 이후 실험실 조건에서 자연 건조시킴으로써 수분함량을 여러 정도로 조절하며 반사율을 측정하였다. 각 수분함량에서 반사율 측정을 마친 후 즉시 낙엽의 생체량(fresh weight)을 측정하였다. 모든 측정을 마친 낙엽

시료를 80℃ 온도에서 3일 동안 건조 시킨 후의 무게를 건조량(dry weight)으로 간주하였으며, 수분함량은 아래 식에 따라 계산하였다.

$$WC (\%) = (W_f - W_d) \div W_f$$

(여기서 W_f 및 W_d 은 각각 생체량 및 건조량이다.)

측정된 값은 통계 패키지 Minitab을 이용하여 낙엽의 종별 수분함량 및 WI 사이, 2종을 합한 수분함량 및 WI 사이, 그리고 3종을 모두 합하여 수분함량 및 WI 사이의 상관관계를 산출하였으며, 낙엽에 대한 수분함량과 WI 사이의 상관관계가 종별로 차이를 인정할 수 있는지를 확인하기 위한 분산 분석은 General linear model 기법을 이용하여 하여 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽의 파장별 반사율

가시광선대 파장에서 3종 식물 낙엽의 평균 반사율은 청색 영역 450 nm 파장대의 15%~17%에서 시작하여 적색 영역 650 nm에서 27%~34%, 그리고 근적외선 영역 1000 nm에서 61%~78%에 이르기까지 점진적으로 증가하였다(Fig. 1). 참나무 3종의 낙엽에서는 생엽과 달리 청색 및 적색 영역에서 반사율이 낮게 나타나지 않았는데 이는 낙엽이 모수에서 떨어지기 전에 엽록소가 분해되고 없으므로 이 영역에서 흡광

하지 않기 때문이며, 낙엽이 갈색으로 관찰되는 것과 일치하는 결과이다. 갈참, 신갈, 그리고 굴참나무의 평균 반사율은 가시광선(400~700 nm)대에서 각각 24.1%, 24.2% 그리고 20.8%이었으며, 그리고 근적외선(700~1,000 nm)대에서 각각 55.5%, 62.5%. 그리고 49.2%로 나타났는데, 신갈나무 생엽이 가시광선대 및 근적외선대에서 각각 9.0% 및 41.4%인 것과 비교된다. 특히 800 nm 이상의 근적외선 파장대에서 생엽보다 낙엽의 반사율이 큰 것은 900 nm 및 970 nm를 이용하는 WI를 자연 상태에서 원격으로 측정할 때 유리하게 작용할 것으로 기대된다.

그런데 900 nm에서 1,000 nm 사이의 근적외선대에서 관찰되는 낙엽 반사율은 동일 구간에서 점진적으로 감소하는 생엽과 달리 증가 추세에 있다. 따라서 900 nm를 비교 파장으로 하여 물이 흡광하는 970 nm에서의 감소 정도를 이용하는 WI 지수는 동일한 수분함량에 대한 낙엽과 생엽의 값이 다를 것으로 예상된다.

3.2. 낙엽의 수분함량과 WI

24시간 침수시킨 결과 낙엽의 수분함량은 종에 따라 40%~62%까지 증가하였으며, 실내에서 자연 건조시킨 낙엽은 최저 0.1%~1.5%까지 감소하였다. 이는 한국의 영동지방 강원도 삼척 및 동해시 인근 숲에서 낙엽의 수분 함량은 강우 직후 66%로부터 시작하여 6일 경과시 5%까지 감소한다는 야외 실험 보고와 유사한 범위의 수분함량이었다(Kwon et al., 2011).

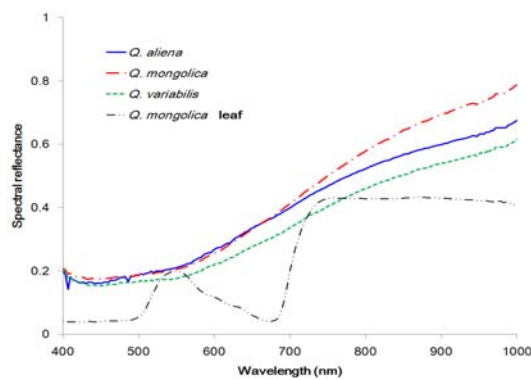


Fig. 1. Spectral reflectance of dry litters (*Q. aliena*, *Q. mongolica*, and *Q. variabilis*) and a fresh leaf (*Q. mongolica*).

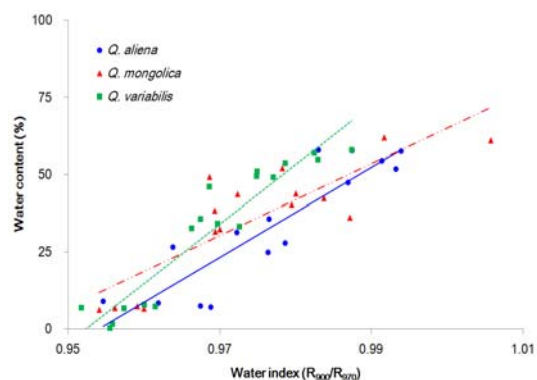


Fig. 2. Relationships between water content(%) and reflectance WI of dry litters (*Q. aliena*, *Q. mongolica*, and *Q. variabilis*). Three regression lines are shown for litters of the three *Quercus* species.

Table 1. Correlation coefficients (r) between reflectance WI and water content (%) of each species, pair of two species and the total of three *Quercus* species

Species	Sample size	Correlation coefficient	Slope	Interception
<i>Q. aliena</i>	18	0.910	1521.5	-1454.2
<i>Q. mongolica</i>	18	0.860	1278.8	-1212.3
<i>Q. variabilis</i>	18	0.946	1925.1	-1833.4
<i>Q. aliena</i> + <i>mongolica</i>	36	0.873	1375.7	-1309.3
<i>Q. mongolica</i> + <i>variabilis</i>	36	0.875	1479.4	-1404.4
<i>Q. variabilis</i> + <i>aliena</i>	36	0.874	1564.7	-1490.2
<i>Q. aliena</i> + <i>mongolica</i> + <i>variabilis</i>	54	0.865	1450.0	-1378.8

본 실험 조건의 수분함량 범위에서 가장 건조한 갈참, 신갈, 그리고 굴참나무 낙엽의 WI는 각각 0.957, 0.954, 그리고 0.956이었으며, 가장 습한 낙엽의 WI는 각각 0.994, 1.006, 그리고 0.987이었다. 이는 포도의 생엽을 건조시켜 수분함량을 0-70% 범위에서 조절하며, 측정된 WI의 범위(0.97-1.02)와 대체로 일치하였다(Rodríguez-Pérez, 2007).

참나무 3종 낙엽의 WI와 수분함량 사이의 관계를 회귀분석하여 각각의 회귀직선을 Fig. 2에 도시하고 상관계수(r) 등의 통계값을 Table 1에 요약하였다. 3개 종의 낙엽 모두에서 WI와 수분함량 사이에 각각 양의 상관관계가 있었다. WI와 수분함량 사이의 상관계수는 굴참나무 낙엽에서 0.946로 가장 컸으며, 그다음 갈참 낙엽 0.910, 그리고 신갈나무 낙엽 0.860 순이었다. 이 결과는 겨울 밀의 수관에서 보고된 WI와 수관의 수분함량 사이의 상관계수 0.825를 조금 상회하는 것이었다(Zhang et al., 2018). 그런데 Fig. 2의 좌측 하단에 볼 수 있듯이 수분함량이 7% 정도로 건조된 낙엽의 WI 값이 수평으로 퍼진 정도는 단순한 실험 오차로 보기에 다소 크므로 식물 종의 차이에 따른 낙엽의 조직 구조 차이가 원인이 아닌지 의심된다.

이는 각 종의 회귀직선에서 기울기의 차이에서도 나타난다. 하지만 임의 2 종을 한 집단으로 간주한 경우 뿐 아니라 3개 종을 한 집단으로 간주한 경우에도 상관계수의 값은 감소하지만 양의 상관관계가 존재하였다(Table 1).

전체 측정 자료에 대하여 수분함량과 WI 사이에는 비교적 높은 상관관계가 있었지만 3개 종의 낙엽에서 수분함량과 WI 사이에 각각 존재하는 상관 관계가 종에 따라 독립적인지 검증하기 위하여 종을 factor, 그리고 WI를 covariate로 하여 General linear model을 적용한 분산분석을 실시하여 종과 WI 사이의 교호(interaction) 효과를 Table 2에 요약하였다. 참나무 속 3종 모두의 낙엽을 1개 집단으로 간주하였을 때 WI와 수분함량 사이의 상관관계에 낙엽의 종에 따른 차이를 인정할 수 없었다($P < 0.05$). 한편 각 2종 낙엽 사이의 상관관계에 종에 따른 차이를 인정할 수 있는지에 관하여 추가로 검증한 결과, 신갈-굴참나무 낙엽 집단에서만 교호 효과의 확률이 통상적으로 사용하는 유의수준 5%보다 작은 2.22%로 나타났으나, 다중 비교 bonferroni 교정을 하면 유의 수준 5%는 $5/3 = 1.667\%$ 로 보아야 하므로 유의한 교호작용이 있다고 인정할

Table 2. Analysis of variance for interaction between WI and species in regressions among litters of three *Quercus* species

Species	Degree of Freedom	F-Value	P-Value (%)
<i>Q. aliena</i> + <i>mongolica</i>	1	0.88	35.5
<i>Q. mongolica</i> + <i>variabilis</i>	1	5.84	2.22
<i>Q. variabilis</i> + <i>aliena</i>	1	2.68	11.2
<i>Q. aliena</i> + <i>mongolica</i> + <i>variabilis</i>	2	2.91	6.4

수 없었다. 따라서 참나무 속 3종의 낙엽의 수분함량을 WI로 추정하는 회귀직선은 Table 1의 최하단에 제시된 자료를 이용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

한편 본 연구의 재료는 동일한 참나무 속에 속한 3종 식물의 낙엽이므로 수분함량과 WI 사이 관계에 종별 차이가 없었으나 유의 수준이 6.4% 정도이므로 잎의 모양이나 함유 색소의 조성이 매우 다를 것으로 예상되는 다른 종류 식물의 낙엽의 경우에는 종에 따른 차이가 현저히 나타날 것으로 예상된다. 따라서 특히 산불의 연료가 되는 여러 종류 식물의 낙엽에 대하여 더 많은 연구가 있어야 그 활용도가 커질 것이다.

4. 결론

최근 더욱 빈발하는 산불의 대책 수립을 위하여 넓은 면적에 걸친 낙엽의 수분함량을 신속한 파악할 필요가 있다. 낙엽의 광학적 특성을 이용한 원격탐지 방법 중 근적외선 파장대인 970 nm의 반사율로 계산되는 WI가 낙엽의 수분함량 추정에도 적용 가능한지 확인하기 위하여 참나무 속 갈참나무, 신갈나무, 그리고 굴참나무 3개 종의 낙엽을 대상으로 여러 범위의 수분함량에서 파장별 반사율을 측정하여 결과는 다음과 같다.

1) 참나무 속 3종인 갈참, 신갈, 그리고 굴참나무의 낙엽 수분함량은 WI를 이용하여 유의하게 추정할 수 있다.

$$WC (\%) = 1,450 \times WI - 1,378.8 \quad (r=0.865)$$

2) 참나무 속 3종 낙엽에서 수분함량과 WI 사이의 상관 관계에 종별 차이를 인정할 수 없다(P<0.05).

감사의 글

본 연구는 2013학년도 대구대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다. 실험 자료의 통계학적 해석에 많은 도움을 주신 대구대학교 통계학과 윤상후 교수님과 황진섭 교수님께 깊은 감사드립니다.

REFERENCES

Carter, G. A., 1991, Primary and secondary effects of water contents on the spectral reflectance of leaves, *Am. J. Bot.*, 78, 916-924.

Ceccato, P., Flasse, S., Taratora, S., Jacquemoud, S., Gregoire, J. M., 2001, Detection vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sens. Environ.*, 77, 22-33.

Champagne, C. M., Staenz, K., Bannaru, A., McNairin, H., Deguise, J. C., 2003, Validation of a hyperspectral curve fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies, *Remote Sens. Environ.*, 87, 148-160.

Gao, B. C., 1996, NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sens. Environ.*, 58, 257-266.

Gaussman, H.W., 1977, Reflectance of leaf components. *Remote Sens. Environ.* 6, 1-9.

Korea Forestry Service, 2016, Annual report on wild fire in 2016, 242.

Kwon, C., Lee, S. Y., Lee, H. P., Cha, J. Y., 2011, Comparison of surface fuel moisture after rainfall in pine tree forests during spring/autumn season in young dong region (Case study on surface fuel and soil layer moisture), *J. Disaster Management*, 11, 157-166.

Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., Filella, I., 1997, Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970), *Int. J. Remote Sensing*, 18, 2869-2875.

Roberts, D. A., Dennison, P. E., Gardner, M. E., Hetzel, Y., Ustin, S. L., Lee, C. T., 2003, Evaluation of the potential of Hyperion for fire danger assessment by comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1297-1310.

Rodríguez-Pérez, J. R., Riaño, D., Carlisle, E., Ustin, S., Smart, D. R., 2007, Evaluation of hyperspectral reflectance indexes to detect grapevine water status in vineyards, *Am. J. Enol. Vitic.*, 58, 302-317.

Sung, M., Lim, G., Choi, E., Lee, Y., Won, M., Koo, K., 2010, Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence, *Atmosphere*, 20, 27-35.

Tucker, C. J., 1980, Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sens. Environ.*, 10, 23-32.

Zhang, C., Pattey, E., Liu, J., Cai, H., Shang, J., Dong, T., 2018, Retrieving leaf and canopy water content of winter wheat using vegetation water indices, *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11, 112-126.