



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

농학석사 학위논문

가뭄 후 4년간
잣나무조림지와 낙엽활엽수림의
순생태계생산량 변화 차이

**Differences of Net Ecosystem
Production Change between a *Pinus
koraiensis* Plantation and a Deciduous
Broad-leaved Forest over a Four-year
Period after Drought**

2019년 8월

서울대학교 대학원
산림과학부 산림환경학 전공
이 호 진

가뭄 후 4년간
잣나무조림지와 낙엽활엽수림의
순생태계생산량 변화 차이

지도 교수 김 현 석

이 논문을 농학 석사 학위논문으로 제출함

2019년 6월

서울대학교 대학원

산림과학부 산림환경학 전공

이 호 진

이호진의 석사 학위논문을 인준함

2019년 7월

위 원 장 박 필 선

부위원장 김 현 석

위 원 강 민 석

초록

기후변화로 인한 가뭄과 같은 기상이변의 지역별 변이가 증가하고, 산림생태계의 탄소 순환에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 가뭄으로 인한 산림생태계의 탄소 순환의 변화와 가뭄 이후 회복에 대한 이해가 중요하다. 특히 우리나라는 봄 가뭄의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 봄 가뭄 발생 시 잎의 존재 여부에 따라 가뭄이 산림의 탄소 순환에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 평년의 53% 수준으로 연강수량이 크게 감소하여 가뭄이 시작된 2014년 이후, 2015년부터 2018년까지 총 4년간 잣나무조림지와 참나무과 수종이 우점하고 있는 낙엽활엽수림에서 순생태계생산량(net ecosystem production, *NEP*)이 가뭄 강도에 따라 어떻게 변화하고, 가뭄 종료 후 *NEP* 회복을 나타내는 회복지수(R_C *NEP*)가 두 임분에서 어떻게 달랐는지 확인하였으며, 두 임분 간에 *NEP*의 차이가 발생하는 원인을 분석하였다.

본 연구는 경기도 태화산 내 50년생 잣나무조림지(Taehwa conifer forest, TCK)와 그로부터 약 300 m 떨어진 낙엽활엽수림(Taehwa deciduous broad-leaved forest, TBK)에서 에디공분산 시스템을 이용하여 수행되었다. 연구대상지에서 SPI(standardized precipitation index)는 2014년 7월 이후 심한 가뭄으로 -2 이하로 감소하였으며, 2015년 4월부터 가뭄의 강도가 서서히

약해져 2016년 10월까지 SPI가 점차 증가하였다. 2016년 11월부터 SPI가 다시 감소하면서 2017년 5월과 6월에 연구 기간(2015-2018년) 중 가장 심한 가뭄으로 SPI가 -2.38까지 감소하였다. 이후 2017년 7월에 평년의 137.7% 수준인 532.3 mm의 많은 비가 내리면서 8월부터는 가뭄이 종료되어 SPI가 정상범위($-0.99 \leq SPI \leq 0.99$)로 돌아왔다.

TCK와 TBK에서 비생장기간인 겨울철을 제외한 연간 NEP는 2015년부터 2016년 사이 각각 539.9 g C m^{-2} 에서 565.4 g C m^{-2} , 636.1 g C m^{-2} 에서 756.9 g C m^{-2} 로 증가하였으며, SPI와 토양수분함량이 가장 크게 감소하였던 2017년에는 두 임분 모두 NEP가 감소하였다. TBK에서 2017년의 NEP는 737.8 g C m^{-2} 로 연평균 SPI가 연구 기간(2015-2018년) 중 가장 낮았던 2015년의 NEP 보다 16.0% 큰 것으로 나타났다. 반면 TCK에서 2017년의 NEP는 2015년의 NEP 보다 10.5% 낮은 483.3 g C m^{-2} 를 기록하여 연구 기간(2015-2018년) 중 NEP가 가장 작았다. TBK와 달리 TCK에서 2017년의 NEP가 연구 기간(2015-2018년) 중 가장 작았던 원인 중 하나는 2016년 가을부터 2017년 봄까지 이어지는 가뭄으로 2017년 5월과 6월에 TCK의 토양수분함량이 사양토에서 식물의 위조점을 나타내는 8% 이하로 감소하여 잣나무 임분에서 기공을 닫고 광합성 활동을 크게 줄였기 때문이다. 또한 2016년 10월부터 2017년 4월 사이 엽면적이 크게 감소하는 TBK와 달리 계속해서 잎을 달고 있는 TCK에서는

TBK보다 51.7 mm 더 많은 물을 증발산으로 소비하였으며, 2016년 11월부터 2017년 3월 사이 TCK의 수관 차단에 의해 15.2 mm의 강수가 토양으로 공급되지 않아 2017년 5월과 6월에 TCK에서 토양수분함량이 위조점 이하로 감소하는 데에 영향을 미친 것으로 나타났다. 2017년 7월에 22일간 집중적인 강우로 산림이 이용할 수 있는 빛이 감소하여 광합성이 크게 저해되었으며, TCK에서 대사작용에 필요한 에너지원의 고갈로 이어져 가뭄이 종료된 2017년 8월 이후에도 *NEP*가 회복되지 못한 것으로 생각된다. TCK와 TBK에서 겨울철을 제외한 2018년의 *NEP*는 각각 614.6 g C m^{-2} , 949.3 g C m^{-2} 로 2015년부터 2018년까지 연구 기간(2015-2018년) 중 *NEP*가 가장 큰 것으로 나타났다. TBK에서 2018년의 *NEP*는 다른 해 보다 $239.0 \pm 64.9 \text{ g C m}^{-2} (34.4 \pm 12.9\%)$ 컸으며, TCK에서는 $85.1 \pm 42.0 \text{ g C m}^{-2} (16.6 \pm 9.5\%)$ 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 2018년의 *NEP*와 2015년부터 2017년 사이 평균 *NEP*의 비를 나타내는 R_C (*NEP* recovery index)는 TCK와 TBK에서 각각 1.16 ± 0.10 과 1.34 ± 0.13 이었으며, 이는 토양수분함량이 높은 곳에서 R_C (recovery index)가 높다는 선행 연구 결과와 유사하였다. TCK에서 TBK 보다 R_C (*NEP*)가 낮았던 원인은 토양수분함량이 상대적으로 높게 유지되었던 TBK와 달리 TCK에서는 극심한 수분 스트레스로 대사작용이 저하되어 가뭄 종료 후 *NEP*의 회복이 오랜 기간 늦어지는 legacy effect 때문으로 생각된다.

본 연구의 결과는 가뭄 기간 중 수종적 차이에 의해 잣나무조림지에서 낙엽활엽수림 보다 토양수분함량이 크게 감소할 수 있으며, 이로 인해 잣나무조림지에서 극심한 수분 스트레스와 legacy effect로 산림의 *NEP*가 감소하고, 가뭄 이후 *NEP* 회복이 늦어질 수 있음을 시사한다. 기후변화로 인한 가뭄 발생으로 산림의 피해가 증가될 것으로 예측되는 가운데, 본 연구 결과를 바탕으로 지속적인 산림관리 방안을 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

주요어: 가뭄, 에디공분산, 순생태계생산량, 토양수분, 수분 스트레스, legacy effect, 회복

학 번: 2017-29143

목 차

I.	서론	10
II.	재료 및 방법	14
	1. 연구 대상지.....	14
	2. 플럭스 및 환경인자 관측.....	17
	3. 데이터 처리.....	22
	4. 수관전도도(canopy conductance, g_c).....	24
	5. Standardized precipitation index(SPI).....	26
	6. 순생태계생산량(NEP).....	27
III.	결과	29
	1. 환경인자 및 SPI 가뭄지수.....	29
	2. 순생태계생산량(NEP) 및 회복지수($R_{c\ NEP}$).....	34
	3. 두 임분의 NEP 차이 발생 원인.....	38
IV.	고찰	42
	1. 토양수분함량의 차이와 NEP 의 감소.....	42
	2. 수종별 광보상점과 NEP 변화.....	46
	3. 회복지수($R_{c\ NEP}$)와 legacy effect.....	47
V.	결론	52
	참고문헌	53
	Abstract	60

표 목차

Table 1. Main features of the experimental sites.....	16
Table 2. List of instruments for flux and environmental factor measurements at TCK and TBK.....	21
Table 3. Monthly variation of air temperature(T_a), photosynthetic active radiation(Q), precipitation(P), volumetric soil water content(θ), and standardized precipitation index(SPI) at Icheon weather station over 33 years and at Mt. Taehwa for each year of the measurement.....	33
Table 4. Monthly net ecosystem production(NEP) of two sites during four years from 2015 to 2018. Non-growing winter season was excluded.	36
Table 5. Monthly evapotranspiration at TCK and TBK during four years from 2015 to 2018. Evapotranspiration differences between TCK and TBK and differences between precipitation and evapotranspiration at both TCK and TBK are also shown at the table.	45

그림 목차

Figure 1. (a) Locations of eddy covariance flux towers(grey color) of both TCK and TBK and 20m meteorological measurement tower(blue color) of TCK at Mt. Taehwa. The results of footprint analysis at (b) TCK and at (c) TBK during day and night in June, 2018 are shown on the right side.....20

Figure 2. (a) Relationship between mean annual SPI and annual net ecosystem production(*NEP*) excluding winter season over four years from 2015 to 2018 at TCK and TBK. (b) Monthly net ecosystem production(*NEP*) differences between 2015 and 2017 at TCK and TBK.37

Figure 3. Relationships between (a) daily mean volumetric soil water content(θ) and daily net ecosystem production(*NEP*) during growing season(from May to September) in 2017, (b) daily mean volumetric soil water content(θ) lower than 8% and daily mean canopy conductance(g_c), (c) daily mean canopy conductance(g_c) and daily net ecosystem production(*NEP*) under the condition of volumetric soil water content(θ) lower than 8% at TCK. Rainy days were excluded for analysis.....40

Figure 4. Relationships between (a) monthly rainy days and monthly mean photosynthetic active radiation(Q), (b) monthly precipitation and monthly mean photosynthetic active radiation(Q), (c) monthly mean photosynthetic active radiation(Q) and monthly net ecosystem production(*NEP*) in July of four years from 2015 to 2018, and (d) daily mean photosynthetic active radiation(Q)

lower than $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and daily net ecosystem production(*NEP*) on rainy days during four years from 2015 to 2018 at TCK and TBK.....41

Figure 5. (a) Observed LAI using plant canopy analyzer(LI-2200, LI-COR, Inc., U.S.A.) at TCK and MODIS LAI at Mt. Taehwa over three years from 2015 to 2017.....52

I. 서론

기후변화로 가뭄 혹은 홍수와 같은 이상기후의 발생 빈도, 강도, 지속 기간 등이 과거에 비해 증가하고 있으며(IPCC, 2014; Cavin *et al.*, 2013), 지구의 탄소순환에 영향을 줄 것으로 예상된다(Reichstein *et al.*, 2013). 특히 산림은 육상생태계에서 발생하는 탄소 흡수의 절반 가량을 차지하며(Beer *et al.*, 2010; Pan *et al.*, 2013), 가뭄으로 인한 수분 스트레스로 임목의 생장이 저하되거나 고사하는 등 산림의 생산성이 감소하여 전지구적 탄소 순환에 영향을 미친다(Greenwood *et al.*, 2017; Peltier *et al.*, 2016; Yin & Bauerle, 2017). 그러나 산림생태계의 탄소 순환은 산림 내 식생 분포가 매우 복잡하고, 수종, 기후, 환경적 특성 등 다차원적인 영향을 받기 때문에 아직까지 정밀한 가뭄-탄소 순환 메커니즘을 이해하기에는 한계가 있다(Gazol *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2017; Houghton *et al.*, 2018).

산림생태계와 대기 사이의 탄소 교환량을 의미하는 순생태계 생산량(net ecosystem production, *NEP*)은 총일차생산량(gross primary production, *GPP*)과 생태계호흡량(ecosystem respiration, *Re*)의 차이로 나타낼 수 있는데, 에디공분산 시스템을 이용하여 산림생태계와 대기 사이의 CO₂ 교환량을 측정함으로써 가뭄에 의한 산림생태계의 *NEP*, 즉 탄소순환의 변화를 확인할 수 있다. *NEP*가 양(+)¹의 값일 때는 산림생태계의 광합성을 통한 총 탄소흡수량이 생태계호흡을 통해 대기 중으로 내보낸 총 탄소배출량 보다 많아 생태계에 의한

순탄소흡수를 나타내며, 반대로 음(-)의 값은 순탄소배출을 말한다. 유럽에서는 2003년에 발생한 폭염과 가뭄으로 총 14곳 중 7곳의 산림에서 2003년의 *NEP*가 2002년에 비해 평균 $89.7 \pm 41.5 \text{ g C m}^{-2}$ 감소하였으며, 그 중 2 곳의 산림생태계가 탄소흡수원에서 탄소배출원으로 변한 것으로 나타났다(Ciais *et al.*, 2005). 아마존에서는 2005년의 가뭄으로 약 100 mm의 수분이 감소함에 따라 약 5.3 Mg C ha^{-1} 의 지상부 바이오매스가 감소하는 것으로 나타났으며(Phillips *et al.*, 2009), 2010년에는 가뭄에 의해 연간 탄소흡수량이 크게 감소하여 연간 탄소배출량과 비슷해져 산림이 가뭄으로 인해 탄소배출원이 될 수 있음을 시사하였다(Gatti *et al.*, 2014).

가뭄 종료 후 산림의 회복에 대한 연구도 활발히 이루어졌는데, 극심한 가뭄 후 임목의 직경생장량이 가뭄 이전의 직경생장량으로 회복이 늦어지는 *legacy effect*에 대한 연구에서는 건조한 지역일수록, 그리고 참나무과(*Fagaceae*) 보다 소나무과 (*Pinaceae*) 수종에서 *legacy effect*가 크게 나타나 직경생장량의 회복이 느린 것으로 나타났으며, 특히 수분 손실에 취약한 수종에서 가뭄 후 직경생장량이 느리게 회복되는 경향을 보여 *legacy effect*의 영향을 크게 받는 것으로 보고되었다(Anderegg *et al.*, 2015). 또한 일부 참나무과 수종에서는 가뭄 기간 전후로 목부 도관의 구조적 변화를 통해 가뭄에 의한 수분 손실에 유연하게 대응하여 가뭄 종료 후 직경생장이 빠르게

회복되는 것으로 보고된 바 있다(Corcuera *et al.*, 2004). 가뭄 기간과 가뭄 종료 후의 직경성장량의 비를 회복 지수(recovery index, R_c)로 이용하여 가뭄 종료 후 산림생태계의 회복을 다룬 연구에서는 토양수분함량이 산림생태계의 회복에 큰 영향을 미치며, 토양수분함량이 높은 곳에서 회복지수가 큰 것으로 나타났다(Gazol *et al.*, 2017).

우리나라에서는 겨울과 봄에 가뭄이 심한 경향을 보이며(Kim *et al.*, 2005), 산림 내 토양수분함량의 변화가 산림지역의 가뭄 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Hong *et al.*, 2011). 특히 강수량이 감소하였을 때, 산림 내 토양수분은 산림의 증발산과 수관차단 강수에 의해 더욱 감소할 수 있으며(Hong *et al.*, 2012), 상록침엽수림에서 수관차단 강수가 토양수분의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Kim *et al.*, 2004). 또한 겨울철 강우 및 적설량이 감소하게 되면 봄철 토양수분의 회복이 저하되어 봄 가뭄이 발생할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Hong *et al.*, 2012).

근래에 우리나라에서도 폭염과 가뭄 등 계속해서 이상기후가 증가하는 것으로 관측되고 있다. 기상청에서 발간하는 기상연감 자료에 따르면 2017년 상반기(1-6월) 전국의 누적 강수량이 평년의 절반 수준(48.5%)을 보이면서 1973년 관측 이래 역대 최저 수준을 기록하였다(KMA, 2017). 본 연구가 진행된 경기도 광주시의 태화산에서도 2014년의 연강수량이 평년의 53.4% 수준으로 크게

감소하여 가뭄이 시작되었으며, 이후 매년 연강수량이 서서히 증가하는 경향을 보이다가 2018년에 평년 수준으로 돌아와 가뭄이 종료되었다.

따라서 본 연구에서는 2014년 이후 2015년부터 2018년까지 총 4년간 경기도 태화산 내 잣나무조림지와 참나무과 수종이 우점하는 낙엽활엽수림에서 (1) 에디공분산 시스템을 이용하여 측정한 *NEP*가 가뭄의 강도에 따라 어떻게 달랐는지, (2) 가뭄 기간 중 *NEP*와 가뭄 종료 후의 *NEP*간의 차이가 어떻게 달랐는지, (3) 두 임분에서 *NEP*의 차이가 발생한 원인은 무엇이며, 어떻게 *NEP* 변화에 영향을 미쳤는지 확인하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구는 경기도 광주시에 위치한 서울대학교 태화산학술림 내 잣나무조림지(Taehwa conifer forest, TCK, 37° 18' 17" N, 127° 19' 02" E, 179 m a.s.l.)과 낙엽활엽수림(Taehwa deciduous broad-leaved forest, TBK, 37° 18' 14" N, 127° 18' 50" E, 238 m a.s.l.)에서 수행되었다. 이천 기상대는 30년 이상의 기상 데이터를 보유하고 있는 관측소 중 연구 대상지로부터 약 15 km 거리의 가장 인근에 위치한 기상관측소로, 이곳에서 측정된 1980년부터 2012년까지 33년간의 평균 기온은 11.38 ± 0.61 °C이었으며, 같은 기간 평균 연강수량은 1385.5 ± 311.7 mm이었다. TCK는 6영급 잣나무(*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.) 조림지로, 전체면적은 약 27 ha이다(<https://gis.kofpi.or.kr/gis/main.do>). TCK는 태화산의 동북사면 산록에 위치하고 있으며, 경사도는 약 5-15° 이다. TCK에서 잣나무는 전체 기저면적의 약 90%를 차지하고 있으며(Lee, 2018), 임분밀도는 약 400본/ha, 잣나무의 평균 수고와 흉고직경은 각각 약 21 m, 30.4 ± 5.9 cm이다. TCK의 하층식생으로는 산철쭉(*Rhododendron yedoense* f. *poukhanense* (H.Lév.) M. Sugim. ex T. Yamaz.), 개웃나무(*Rhus trichocarpa* Miq.), 생강나무(*Lindera obtusiloba* Blume) 등이 서식하고 있다(Lee, 2018)(Table 1). TCK로부터 약 0.3 km 떨어진 거리의

동북사면 산복에 위치한 TBK의 전체면적은 약 4.8 ha, 경사도는 약 10-25° 로, 갈참나무(*Quercus aliena* Blume)와 굴참나무(*Quercus variabilis* Blume) 등 참나무과 수종이 전체 기저면적의 70% 이상을 차지하고 있다(Lee, 2018; <https://gis.kofpi.or.kr/gis/main.do>). TBK의 임분밀도는 약 1,080본/ha이며, 참나무과 수종의 평균수고와 흉고직경은 각각 약 20 m, 23.3±7.6 cm이다. 하층에는 쪽동백나무(*Styrax obassia* Siebold & Zucc.), 철쭉(*Rhododendron schlippenbachii* Maxim.), 개웃나무(*Rhus trichocarpa* Miq.), 팔배나무(*Sorbus alnifolia* (Siebold & Zucc.) C.Koch) 등이 서식하고 있다(Lee, 2018)(Table 1). 태화산학술림의 토양은 모래의 함량이 높은 사질양토이다(Hong *et al.*, 2012; Kim & Kim, 2013; Suh *et al.*, 2014).

Table 1. Main features of the experimental sites.

Site	TCK	TBK
Elevation (m a.s.l.)	178	234
Slope(°) / Direction	5-15° / NE	10-25° / NE
Area (ha)	27.02	4.78
Dominant species (Overstory)	<i>Pinus koraiensis</i> Siebold et Zucc.	<i>Quercus aliena</i> Blume, <i>Quercus variabilis</i> Blume
Dominant species (Understory)	<i>Rhus trichocarpa</i> Miq.	<i>Styrax obassia</i> Siebold & Zucc.
Stand density (trees ha ⁻¹)	400	1080
Mean DBH (cm)	30.4±5.9	23.3±7.6
Canopy height (m)	21	20
Soil type	Sandy loam	Sandy loam

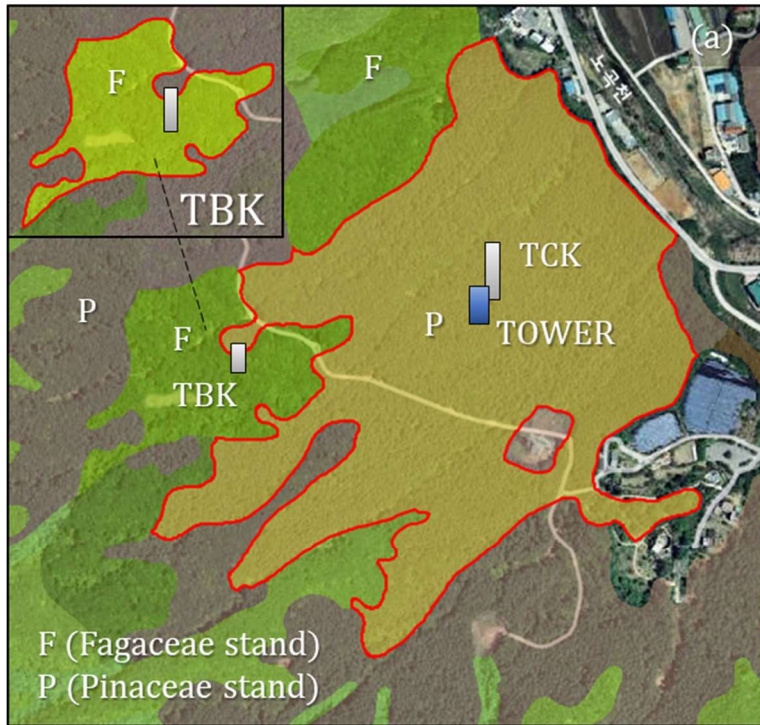
2. 플럭스 및 환경인자 관측

본 연구를 진행한 TCK와 TBK에는 각각 41 m와 27 m의 플럭스타워가 소나무과 임분, 즉 잣나무조림지와 참나무과 임분 내에 위치하고 있으며, TCK에서는 2015년 1월부터, TBK에서는 2015년 3월부터 플럭스타워에 설치된 에디공분산 시스템을 이용하여 CO₂ 및 H₂O 플럭스 자료를 수집하고 있다(Figure 1a). 에디공분산 시스템은 대기 경계층 내에서 발생하는 난류 물질교환량(turbulent flux)을 측정하고 계산하는 데 사용되는 기술로, 단위시간당 일정한 표면을 통과하는 물질의 양으로 나타낸다(Kim *et al.*, 2012). 본 연구에서는 2015년부터 2018년까지 에디공분산 시스템을 이용하여 두 임분의 CO₂ 및 H₂O 플럭스와 광합성유효복사(photosynthetic active radiation, Q), 기온(air temperature, T_a), 상대습도(relative humidity, RH), 강수량(precipitation, P) 등의 산림 미기상 자료를 측정하였다(Table 2). CO₂ 및 H₂O 플럭스 자료는 적외선가스분석기(LI-7200 & LI-7500(A), LI-COR, Inc., U.S.A.; EC150, Campbell Scientific, Inc., U.S.A.)와 3차원 초음파 풍향풍속계(CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., U.S.A.)를 이용하여 초당 10회 측정된 자료를 수집하였으며, 미기상 자료는 30분 평균 자료를 수집하였다. TCK에서는 2015년 1월부터 2018년 12월까지 LI-7500A를 이용하여 플럭스를 측정하였으며, TBK에서는 2015년 3월부터 8월과 2017년 9월부터 2018년 12월 기간에는 LI-7500A(LI-COR, Inc., U.S.A.)를

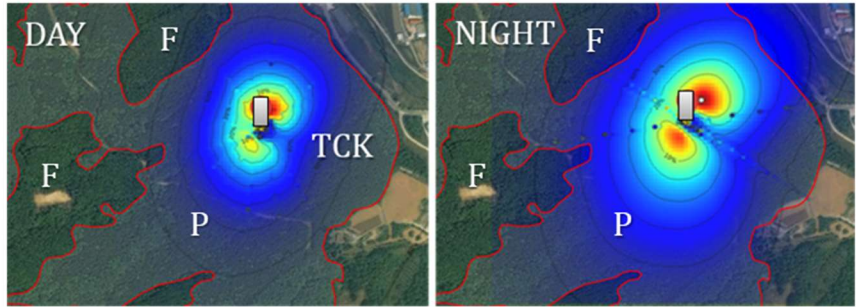
이용하였으며, 2015년 9월부터 2016년 5월과 2016년 12월부터 2017년 9월 기간에는 LI-7200(LI-COR, Inc., U.S.A.), 2016년 6월부터 11월 사이에는 EC150(Campbell Scientific, Inc., U.S.A.)를 이용하여 플릭스를 측정하였다. 두 임분의 토양수분함량(volumetric soil moisture content, θ)은 토양 표면에서부터 30 cm 깊이 사이에 임분별 3개씩 설치된 토양수분함량 측정계(CS616, Campbell Scientific, Inc., U.S.A.)를 이용하여 30분 평균 자료를 수집하였으며, 2014년부터 관측된 자료를 분석에 이용하였다(Table 2). 잣나무조림지 내에는 41 m 높이 플릭스타워로부터 약 50 m 거리에 20 m 높이의 기상관측타워가 설치되어 있으며, 타워의 20 m 높이에서 강수량 측정계(03319-00, Cole-Parmer, U.S.A.)를 이용하여 강수량 자료를 수집하고 있다. 2015년부터 2018년까지 기상관측타워, TCK, TBK의 월강수량 자료를 이용하여 Paired t-test를 수행한 결과, 세 곳의 강수량의 유의한 차이가 없는 것으로 확인되었다(p -value > 0.05). 따라서 본 연구에서는 연구 대상지에서의 가뭄 지수 산출 및 강수량 분석을 위해 2013년부터 2014년까지는 20 m 높이의 기상관측타워에서 수집된 강수량 자료를 이용하였으며, 2015년부터 2018년 사이에는 기상관측타워, TCK, TBK 세 곳에서 수집된 강수량 자료의 평균을 분석에 이용하였다. TBK의 경우 2015년 1월과 2월에 CO₂ 및 H₂O 플릭스와 더불어 산림 미기상 자료가 수집되지 않았기 때문에 광합성유효복사와 기온 자료는 TCK와 TBK에서 2015년 1월과

2월을 제외한 다른 기간에 관측된 값들 사이의 회귀식을 바탕으로 결측값을 메워 분석에 이용하였으며, 강수량 자료는 잣나무조림지 내 20 m 기상관측타워의 자료로 대체하였다.

측정된 CO₂ 및 H₂O 플럭스가 각 임분에서 발원되는지를 확인하기 위해 TOVI(Li-Cor, USA) 소프트웨어의 Footprint Analysis(FPA) 기능을 이용하여 플럭스 발자국 분석을 진행하였으며, 한국임업진흥원 산림정보서비스(<https://gis.kofpi.or.kr/gis/main.do>)에서 나타내는 임상지도를 이용하여 비교하였다. TCK에서 관측된 플럭스는 대체로 잣나무조림지에서 발원되는 것으로 나타났으며(Figure 1b), TBK에서 관측된 플럭스는 참나무과 임분에서 약 70% 정도가 발원되는 것으로 나타났다(Figure 1c).



(b) TCK



(c) TBK

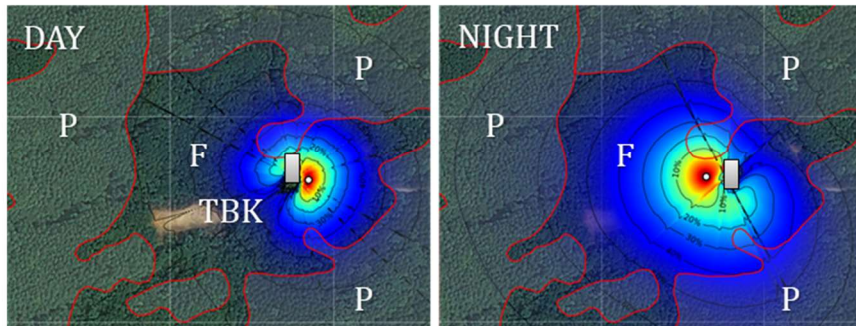


Figure 1. (a) Locations of eddy covariance flux towers (grey color) of both TCK and TBK and 20m meteorological measurement tower (blue color) of TCK at Mt. Taehwa. The results of footprint analysis at (b) TCK and at (c) TBK during day and night in June, 2018 are shown on the right side.

Table 2. List of instruments for flux and environmental factor measurements at TCK and TBK.

Measurement	Instrument	TCK	TBK
		Measurement height or depth (m)	
CO ₂ /H ₂ O flux	LI7200, LI7500(A) ^a EC150 ^b	41	27
Wind speed/sonic temperature	CSAT3 ^b	41	27
Short/longwave radiation	CNR4 ^c	40	27
Photon flux density	LI190 ^a	40	27
Air temperature/humidity	HMP60 ^d	40	27
Volumetric soil water content	CS616 ^b	0 – -0.3	0 – -0.3
Wind speed/direction	CSAT3 ^b	41	27
Barometric pressure	LI7200, LI7500A ^a	41	27
Precipitation	TE525 ^e	41	21
CO ₂ /H ₂ O concentration	AP200 ^b	-	27, 20, 16, 8, 5, 3, 1, 0.1

^aLi-Cor, Inc., USA

^dVaisala, Finland

^bCambell Sci., Inc., USA

^eTexas Electronics, USA

^cKipp & Zonen, Netherlands

3. 데이터 처리

두 임분에서의 순생태계생산량(net ecosystem production, *NEP*)을 계산하기 위해서 에디공분산 시스템에서 수집된 원자료를 10단계로 나뉘어진 KoFlux 표준화 자료 처리방법에 따라 자료처리 및 품질관리 처리를 하였다(Kang *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2018). 먼저 수집된 원자료를 LoggerNet(Campbell Scientific, Inc., U.S.A.) 소프트웨어를 이용하여 특정 파일 형식으로 변환한 후, EddyPro(LI-COR, Inc., U.S.A.) 소프트웨어에서 추세 제거, 시간지연보상, 좌표 변환, 공기밀도 보정 등의 처리를 하여 30분 단위의 정리된 자료를 만들었다. 이후 MATLAB(Mathworks, Inc., U.S.A.)기반의 KoFlux 표준화 방법을 이용하여 미기상자료 및 플럭스 자료의 튀는 자료 제거, 결측값 메우기, 야간 CO₂ 플럭스 보정 등의 8단계의 과정을 거쳐 최종적으로 *NEP* 자료를 산출하였다(Kang *et al.*, 2018). 장파 및 단파복사, 기온, 습도, 기압, 풍향 및 풍속, 마찰속도, 강수량 등의 미기상 자료의 결측값을 메우는 과정에서 태화산학술림 인근의 이천기상대(약 15 km) 및 용인기상대(약 9 km) 자료와 TCK의 미기상 자료의 결측값을 메울 경우 TBK의 자료를, TBK의 미기상 자료의 결측값을 메울 경우 TCK의 자료를 이용하였다.

관측 지역이 편평하고 균질한 지형일 때, 연직 및 수평 이류에 의한 CO₂ 수송을 무시하여 에디 플럭스항과 저장항만으로도 *NEP*를 계산할 수 있지만, 산림과 같이 복잡한 지형에서는 연직 및 수평

이류의 영향이 있을 수 있다. 수직 CO₂/H₂O 농도 프로파일 시스템이 구축되지 않은 TCK에서는 연직 및 수평 이류향이 서로 상쇄되어 에디 플럭스항으로만 NEP를 산출할 수 있다는 가정 하에 NEP를 산출하였으며(Hong *et al.*, 2008), 실제로 TBK에서 2017년과 2018년에 프로파일 시스템의 자료 유무에 따른 월별 NEP를 Paired t-test한 결과, 두 방법의 차이는 평균 1.63±5.56 g C m⁻²로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(*p*-value > 0.05).

대기안정화로 난류 혼합이 적은 야간에는 수관층의 1.5배 이상의 높이에 설치된 에디공분산 시스템이 수관 하부의 CO₂/H₂O 수송을 과소평가한다는 단점이 있으며, 우리나라와 같이 산악지형이 주를 이루고 있는 산림에서는 야간 시간의 이류 발생으로 인한 플럭스의 과대/과소평가의 문제가 있다. 본 연구에서는 KoFlux 표준화 자료 처리방법에서 제공하는 마찰속도(u^*)필터링(Friction velocity Filtering, FVF) 및 야간 이류를 고려한 van Gorsel 필터링(van Gorsel Filtering, VGF)의 두 가지 야간 CO₂ 보정 방법으로부터 산출된 NEP의 평균값을 사용하였으며, 마찰속도(u^*) 역치값은 0.3 또는 0.35을 연도별로 다르게 적용하였다.

4. 수관전도도(canopy conductance, g_c)

가뭄 기간 중 두 임분에서의 NEP 의 변화를 산림의 생리적 요인을 이용하여 분석하기 위해 공기역학전도도(aerodynamic conductance, g_a)와 잠열플럭스(latent heat flux, λE)/대기포차(vapor pressure deficit, D) 비를 이용한 임분의 지표전도도(surface conductance, g_s)를 아래의 식을 이용하여 산출하였다.

$$g_s^{-1} = \left(\frac{\Delta}{\gamma} \beta - 1\right) g_a^{-1} + \frac{\rho C_p}{\gamma \lambda E} D \quad (1)$$

$$g_a = \frac{u_*^2}{u} \quad (2)$$

여기서 Δ 는 기온에 대한 포화수증기압의 변화율(rate of change of saturation water vapor pressure with temperature; Pa K⁻¹), γ 는 건습구상수(psychrometer constant; Pa K⁻¹), β 는 보웬비(Bowen ratio)를 의미하며, ρ 는 공기밀도(density of air; kg m⁻³), C_p 는 공기의 정압비열(specific heat of air at constant pressure; kJ kg⁻¹ K⁻¹), D 는 대기포차(vapor pressure deficit; Pa), λ 는 물의 기화열(latent heat of vaporization of water; J g⁻¹), u^* 는 마찰속도(friction velocity; m s⁻¹), u 는 평균 풍속(mean wind speed; m s⁻¹)을 의미한다. 에디공분산 관측으로부터 계산한 g_s 는 수관층의 기공전도도뿐만 아니라 토양 증발의 영향을 포함하고 있기 때문에 수관전도도(canopy conductance, g_c)와는 다르게 된다. 하지만 엽면적지수(leaf area index, LAI)가 3을 초과할 경우에는 토양 증발의 영향이 작아 g_s 와 g_c 를 동일하다고 간주할 수 있기 때문에 본 연구기간 중 LAI가 3을 넘는 약 5~9월에는 g_s 와 g_c 를

같다고 가정하였다(Kelliher *et al.*, 1995; Kumagai *et al.*, 2004; Lee, 2018).

5. Standardized precipitation index(SPI)

연구 기간 중 가뭄의 강도 및 지속기간을 확인하기 위해 Standardized precipitation index(SPI) 가뭄 지수를 이용하였다. SPI는 2009년 World Meteorological Organization(WMO)에서 가뭄 상태를 모니터링하기 위해 권고한 가뭄지수로(Hayes, 2011; WMO, 2012; Svoboda & Fuchs, 2016), 최소 30년 이상의 강수량 기록을 입력 자료로 이용하며, 입력된 자료를 기준으로 사용자가 설정한 시간 규모에서 강수량의 많고 적음을 계산하여 지수로 나타낸다. 본 연구 대상지에서의 SPI를 계산하기 위해 National Drought Mitigation Center(NDMC)에서 제공하고 있는 SPI program을 이용하였으며(Svoboda & Fuchs, 2016; <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>), 입력자료는 경기도 태화산 학술림 인근 이천기상대의 1980년부터 2012년도까지의 33년간의 강수량 자료, 태화산학술림 내 20 m 높이 기상관측타워의 2013년부터 2014년까지 2년간 강수량 자료, 그리고 2015년부터 2018년까지 4년간 기상관측타워, TCK, TBK의 강수량 평균 자료를 사용하였다. SPI는 -1 이하일 때 가뭄의 강도가 약하다는 것을 나타내며, -1.5 이하로 감소하면 보통 강도의 가뭄, -2 이하로 감소하면 심한 강도의 가뭄을 말한다. 본 연구에서는 Palmer drought severity index(PDSI)와 유사한 것으로 알려진 12개월 시간단위의 SPI를 이용하였다(WMO, 2012).

6. 순생태계생산량(NEP)

총 4년간 두 임분에서 관측된 NEP를 이용하여 연간 및 월별 NEP의 변화를 비교 분석하였으며, 광합성에 의한 탄소흡수량의 변화에 가뭄이 미치는 영향을 확인하기 위해 두 임분에서 광합성활동을 하지 않는 12월부터 2월의 겨울철 비생장기간 자료를 분석에서 제외하였다. NEP의 변화 원인을 분석하기 위해 강수량(P), 증발산량(Evapotranspiration, ET), 토양수분함량(θ) 등 환경인자가 두 임분에서 차이가 있는지 Paired t-test를 통해 비교 분석하였으며, 토양수분함량, 광합성유효복사(Q), 수관전도도(g_c) 등과 NEP와의 상관분석을 수행하였다. 또한 각 연도별 특정 기간의 환경 인자를 비교하기 위해 Welch test를 수행 후, 사후 검정으로 Games-Howell test를 수행하였다.

가뭄 종료 후 산림 성장량의 회복 정도는 회복 지수(R_c), 즉 가뭄 이후의 성장과 가뭄 기간 중 성장의 비를 이용하여 비교할 수 있는데(Lloret *et al.*,2011), 본 연구에서는 두 임분에서 가뭄 종료 후 NEP의 회복 정도를 비교하기 위해 기존의 직경성장량을 이용하여 계산된 R_c 를 아래와 같이 변형시켜 사용하였다.

$$R_{c\ NEP} = NEP_{post}/NEP_d \quad (3)$$

여기서 NEP_{post} 는 가뭄 종료 후의 NEP, NEP_d 는 가뭄 기간 중 평균 NEP를 의미한다. 본 연구에 활용한 모든 통계적 분석은 RStudio(Version 1.2.1335, RStudio, Inc.) 및 SPSS(Version 25, IBM Corp.)

소프트웨어를 이용하였다.

III. 결과

1. 환경인자 및 SPI 가뭄지수

2015년부터 2018년까지 총 4년간 TCK와 TBK에서 관측된 기온 (T_a)을 비교 분석하였다. TCK에서 관측된 연평균 기온은 2015년부터 2018년까지 차례로 $12.0 \pm 9.5^\circ\text{C}$, $12.2 \pm 10.3^\circ\text{C}$, $11.4 \pm 10.4^\circ\text{C}$, $11.4 \pm 10.9^\circ\text{C}$, TBK에서는 $12.2 \pm 9.4^\circ\text{C}$, $12.3 \pm 10.3^\circ\text{C}$, $11.6 \pm 10.4^\circ\text{C}$, $11.6 \pm 10.8^\circ\text{C}$ 를 기록하여 두 임분의 기온 간 유의한 차이를 보였다(Table 3, $p\text{-value} < 0.05$). 월평균 기온 분석 결과, 두 임분 모두에서 겨울철인 12월에서 1월 사이에 기온이 가장 낮았으며, 여름철인 7월과 8월 사이에 가장 높았다(Table 3).

2013년과 2014년의 연강수량(P)은 각각 1458.2 mm, 740.2 mm을 기록하여 2014년에 연강수량이 2013년의 50.8% 수준으로 크게 감소하였다. 이후 2015년부터 2018년까지 연강수량은 차례로 918.2 mm, 906.3 mm, 1082.4 mm, 1330.1 mm로 연강수량이 서서히 증가하여 2018년에 평년의 1385.5 ± 311.7 mm 수준으로 회복한 것으로 나타났다(Table 3). 2015년부터 2018년까지 월강수량 분석 결과, 두 임분 모두 장마가 발생하는 7월경 연중 가장 많은 비가 내리는 경향을 보였으며, 2017년 7월에는 평년의 137.7% 수준인 약 532.3 mm의 많은 비가 내려 2015년, 2016년, 2018년의 7월보다 평균 285.3 ± 70.7 mm의 강수량이 많은 것으로 나타났다. 반면 2018년 7월에는 2015년부터 2017년

의 7월 보다 평균 173.3 ± 155.8 mm 줄어든 188.4 mm의 적은 비가 내려 2018년 8월에 276.1 mm로 연중 가장 많은 비가 내린 것으로 나타났다(Table 3). 가을에서 봄 사이에는 여름철에 비하여 강수량이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 2017년에는 겨울철인 1월부터 여름이 시작되는 6월까지의 강수량이 평년의 35.6%인 147.4 mm로 크게 감소하여 다른 해의 같은 기간 보다 평균 249.9 ± 131.9 mm 적은 비가 내린 것으로 나타났다(Table 3). 또한 2016년과 2017년의 9월부터 11월 사이 가을철에는 평년의 각각 50.6%, 34.4% 수준인 137.1 mm, 93.2 mm의 적은 강수량을 기록하였다(Table 3).

월별 광합성유효복사(Q)의 경우, 장마 기간인 7월에 5월과 6월에 비하여 광합성유효복사가 더 작았는데, 많은 비가 내렸던 2017년 7월에 TCK와 TBK의 광합성유효복사는 각각 $278.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $255.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 2015년, 2016년, 2018년의 7월에 비해 각각 평균 $96.1 \pm 54.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (24.6±10.3%), $118.1 \pm 69.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (30.2±11.8%) 유의하게 낮았다. 반면 상대적으로 적은 비가 내렸던 2018년 7월에 TCK와 TBK의 광합성유효복사는 각각 $436.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $452.2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 2015년부터 2017년의 7월 보다 각각 평균 $114.4 \pm 39.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (36.9±17.5%), $144.3 \pm 46.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (49.4±24.4%) 유의하게 높았다 (Table 3, p -value < 0.05).

2014년부터 2018년까지 지면으로부터 0-30 cm 깊이에서 측정된 연평균 토양수분함량(θ)은 TCK에서 차례로 $17.7 \pm 2.9\%$, $17.5 \pm 3.0\%$,

15.5±4.1%, 14.2±4.1%, 17.9±3.3%이었으며, TBK에서는 차례로 20.3±2.0%, 19.6±2.4%, 18.4±2.4%, 18.8±2.8%, 20.3±2.3%로 TCK에서 TBK보다 유의하게 낮았다(Table 3, p -value < 0.05). 월별 토양수분함량을 분석한 결과, 2014년부터 2018년까지 TCK의 토양수분함량이 TBK보다 평균 2.9±2.1% 낮았으며, 매년 가을에서 봄 사이에 TCK와 TBK에서 토양수분함량 차이가 증가하는 경향을 보였다. 306.3 mm에서 548.6 mm의 비가 내렸던 2015년, 2016년, 2018년의 1월부터 6월 사이에는 두 임분 간 토양수분함량 차이가 평균 1.6±2.0%에서 3.4±1.1% 사이였던 반면, 246.4 mm와 147.4 mm로 강수량이 감소하였던 2014년과 2017년의 같은 기간에는 두 임분 간 토양수분함량의 차이가 각각 평균 4.1±3.0%, 6.4±1.3%로 크게 증가하였다(Table 3). 특히 2017년 6월 초에는 TCK의 토양수분함량이 TBK보다 최대 9.13%까지 더 감소하였으며, 6월 중순에 TBK의 토양수분함량은 최저 10.4%까지 감소한 반면, TCK에서는 6.3%까지 감소하여 연구 기간 중 토양수분함량이 가장 낮은 것으로 나타났다. 한편 2014년, 2015년, 2018년의 8월부터 12월 사이에 비하여 평균 213.1±118.1 mm 적은 비가 내렸던 2016년의 8월부터 12월 사이에는 TCK와 TBK 간 토양수분함량의 차이가 2014년, 2015년, 2018년의 같은 기간의 차이 보다 평균 3.6±0.4% 큰 것으로 나타났다(Table 3).

2013년의 연평균 SPI는 0.74±0.22이었으나, 연강수량이 2013년의 절반수준으로 감소한 2014년에 -0.92±1.23로 감소하였다. 이후 2015

년부터 2017년 사이 연평균 SPI는 차례로 -1.82 ± 0.29 , -1.24 ± 0.21 , -1.32 ± 0.67 을 기록하여 해마다 가뭄의 강도가 서로 다른 것으로 나타났으며, 2018년에는 가뭄이 종료되어 -0.23 ± 0.43 으로 확인되었다(Table 3). 월별 SPI 분석 결과, 2014년의 7월부터 보통 가뭄, 9월부터 심한 가뭄($SPI \leq -2$)의 강도를 나타냈으며, 2015년 3월부터 2016년 10월까지 심한가뭄에서 보통 가뭄, 약한 가뭄으로 서서히 가뭄의 강도가 약해지다가 2016년 11월부터 SPI가 다시 감소하여 2017년 5월과 6월에 SPI가 연구기간 중 최저수준인 -2.28 에서 -2.38 까지 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 2017년 7월 한달간 532.3 mm의 많은 비가 내림으로써 2017년 8월($SPI = -0.52$) 부터 가뭄이 종료되어 SPI가 정상범위($-0.99 \leq SPI \leq 0.99$)로 돌아왔다(Table 3).

Table 3. Monthly variation of air temperature(T_a), photosynthetic active radiation(Q), precipitation(P), volumetric soil water content(θ), and standardized precipitation index(SPI) at Icheon weather station over 33 years and at Mt. Taehwa for each year of the measurement.

		Winter			Spring		Summer			Autumn		Annual		
		Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	
T_a (°C)														
1980-2012	ICH ^a	-1.4	-3.9	-0.8	4.9	11.7	17.3	21.7	24.4	24.8	19.6	12.7	5.5	11.4±10.4
2015	TCK	0.6	-1.9	-0.1	5.3	11.5	17.4	21.5	23.8	24.1	19.8	14.0	7.9	12.0±9.5
	TBK	0.9	-1.6	0.3	5.6	11.7	17.5	21.6	23.8	24.2	19.9	14.2	8.1	12.2±9.4
2016	TCK	0.4	-3.6	-0.4	5.9	13.2	18.0	21.8	24.3	25.7	20.8	14.2	6.0	12.2±10.3
	TBK	0.8	-3.6	-0.4	6.0	13.2	18.2	21.8	24.3	25.8	20.9	14.4	6.1	12.3±10.3
2017	TCK	-3.2	-2.4	-0.9	5.2	12.7	17.7	21.3	25.1	23.8	19.3	14.0	4.1	11.4±10.4
	TBK	-3.1	-2.1	-0.7	5.4	12.8	17.9	21.4	25.1	23.9	19.7	14.5	4.6	11.6±10.4
2018	TCK	-1.6	-5.0	-2.7	6.8	11.8	16.7	21.5	25.9	26.4	19.3	11.2	6.5	11.4±10.9
	TBK	-1.3	-4.9	-2.5	6.9	12.0	16.8	21.6	26.0	26.4	19.5	11.7	7.1	11.6±10.8
Q ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)														
2015	TCK	137.8	172.3	225.2	370.3	362.2	490.1	472.2	354.5	380.3	363.9	281.8	129.5	311.7±122.1
	TBK	151.1	171.9	224.5	366.8	350.6	481.0	466.2	345.0	370.1	360.2	281.3	133.1	308.5±116.6
2016	TCK	143.3	177.3	230.1	327.3	395.3	492.0	455.2	333.7	393.3	286.3	226.7	183.9	303.7±114.4
	TBK	157.3	195.5	236.3	330.0	395.9	482.3	443.4	323.1	383.0	281.4	228.3	192.8	304.1±105.9
2017	TCK	158.3	183.7	271.6	344.7	426.2	491.5	495.3	278.9	307.8	350.5	269.0	199.0	314.7±112.3
	TBK	164.7	169.5	275.7	339.7	424.0	490.1	491.7	255.3	309.6	358.2	284.6	202.3	313.8±112.3
2018	TCK	161.7	185.8	249.9	321.3	385.1	411.0	469.2	436.7	383.1	341.6	279.1	186.5	317.6±104.6
	TBK	172.9	185.8	234.2	312.7	385.6	420.2	476.0	452.2	410.6	356.6	284.2	195.2	323.8±108.5
P (mm)														
1980-2012	ICH	22.1	23.2	24.5	49.0	78.8	94.1	144.3	386.5	291.9	175.6	48.5	47.0	1385.5
2013	MMT ^b	25.8	24.0	37.1	39.1	72.1	129.4	116.6	586.4	166.2	188.2	13.1	60.2	1458.2
2014	MMT	23.9	16.7	23.4	26.9	49.9	65.8	63.7	101.2	176.7	79.1	79.2	33.7	740.2
2015	Mt.TH ^c	35.7	22.6	27.1	19.4	107.6	43.1	86.5	227.0	122.1	15.4	57.8	153.9	918.2
2016	Mt.TH	56.0	2.7	51.9	53.3	85.4	127.3	16.5	325.6	50.7	33.4	85.6	18.0	906.3
2017	Mt.TH	29.2	8.9	18.2	14.8	44.7	24.7	36.1	532.3	280.3	30.6	29.0	33.6	1082.4
2018	Mt.TH	19.5	2.7	31.8	74.9	147.7	193.3	98.3	188.4	276.1	90.9	140.0	66.5	1330.1
θ (%)														
2014	TCK	21.0	18.5	19.4	18.3	16.7	15.8	13.3	11.8	21.3	18.9	17.0	20.0	17.7±2.9
	TBK	21.2	20.0	20.4	19.8	23.0	22.8	20.4	15.5	21.7	19.7	18.0	20.5	20.3±2.0
2015	TCK	21.7	17.9	18.9	18.5	19.9	16.6	12.3	15.3	19.8	16.3	12.7	20.4	17.5±3
	TBK	22.1	21.2	21.2	20.9	22.1	19.5	15.0	16.9	20.7	18.2	16.5	20.8	19.6±2.4
2016	TCK	13.8	19.1	19.9	20.5	17.8	19.5	11.0	19.2	11.8	10.0	11.4	12.3	15.5±4.1
	TBK	18.6	19.1	19.7	20.7	20.5	21.3	15.9	21.3	16.5	14.5	15.6	17.4	18.4±2.4
2017	TCK	14.5	14.7	14.0	14.7	12.7	8.4	8.0	21.2	20.9	16.6	13.4	11.8	14.2±4.1
	TBK	18.5	19.6	20.4	20.3	20.5	16.6	13.5	22.7	22.4	18.8	16.6	15.2	18.8±2.8
2018	TCK	20.9	14.2	11.7	19.6	19.5	21.2	14.6	17.9	14.7	19.6	20.6	20.9	17.9±3.3
	TBK	21.4	18.9	16.3	22.8	22.8	22.9	17.5	20.1	17.0	20.5	21.2	21.8	20.3±2.3
SPI														
2013	Mt.TH	0.45	0.78	0.88	0.83	0.58	0.85	0.94	1.21	0.70	0.63	0.48	0.49	0.74±0.22
2014	Mt.TH	-2.17	0.43	0.39	0.35	0.28	0.09	-0.08	-1.89	-1.85	-2.35	-2.04	-2.16	-0.92±1.23
2015	Mt.TH	-1.40	-2.14	-2.13	-2.16	-1.90	-2.00	-1.90	-1.37	-1.59	-1.86	-1.96	-1.45	-1.82±0.29
2016	Mt.TH	-1.45	-1.48	-1.38	-1.24	-1.33	-1.01	-1.28	-0.90	-1.17	-1.10	-1.00	-1.53	-1.24±0.21
2017	Mt.TH	-0.77	-1.42	-1.56	-1.72	-1.90	-2.38	-2.28	-1.38	-0.52	-0.53	-0.73	-0.68	-1.32±0.67
2018	Mt.TH	0.06	-0.80	-0.75	-0.53	-0.19	0.34	0.52	-0.57	-0.58	-0.38	-0.01	0.09	-0.23±0.43

^a Climate data from nearby Icheon weather station

^b Precipitation data from meteorological measurement tower at Mt. Taehwa

^c Mean precipitation data from meteorological measurement tower, TCK, and TMK at Mt. Taehwa

2. 순생태계생산량(*NEP*) 및 회복지수($R_{c\ NEP}$)

TCK에서 2015년부터 2018년까지 총 4년간 겨울철을 제외한 연간 *NEP*는 차례로 539.9 g C m⁻², 565.4 g C m⁻², 483.3 g C m⁻², 614.6 g C m⁻²로 연평균 SPI가 -1.82±0.29로 가장 낮았던 2015년 보다 SPI가 -1.24±0.21이었던 2016년에 *NEP*가 더 증가한 것으로 나타났다. 하지만 연평균 SPI가 -1.32±0.67 이었던 2017년의 *NEP*는 2015년의 *NEP* 보다 10.5%(56.6 g C m⁻²) 더 낮았으며, 가뭄 종료 후 2018년의 *NEP*는 가뭄 기간(2015-2017년) 중의 *NEP* 보다 평균 16.6±9.5%(85.1±42.0 g C m⁻²) 증가하였다(Table 4). TBK에서 2015년부터 2018년까지 각 연도별 겨울철을 제외한 기간의 *NEP*는 636.1 g C m⁻², 756.9 g C m⁻², 737.8 g C m⁻², 949.3 g C m⁻²로 연평균 SPI의 변화에 따라 *NEP*가 변동하는 경향을 보였다. SPI가 가장 낮았던 2015년의 *NEP*가 가뭄 기간 중 가장 낮았으며, 2015년 다음으로 SPI가 낮았던 2017년의 *NEP*는 2015년의 *NEP* 보다 16.0%(101.7 g C m⁻²) 높아 가뭄 기간 중 두 번째로 낮은 것으로 나타났다. SPI가 가장 높았던 2018년의 *NEP*는 가뭄 기간(2015-2017년) 중의 *NEP* 보다 평균 34.4±12.9%(239.0±64.9 g C m⁻²) 증가하였다(Table 4, Figure 2a). 이에 따라 TCK의 $R_{c\ NEP}$ 는 1.16±0.10이었으며, TBK는 1.34±0.13으로 TCK보다 $R_{c\ NEP}$, 즉 *NEP*의 회복지수가 높았다.

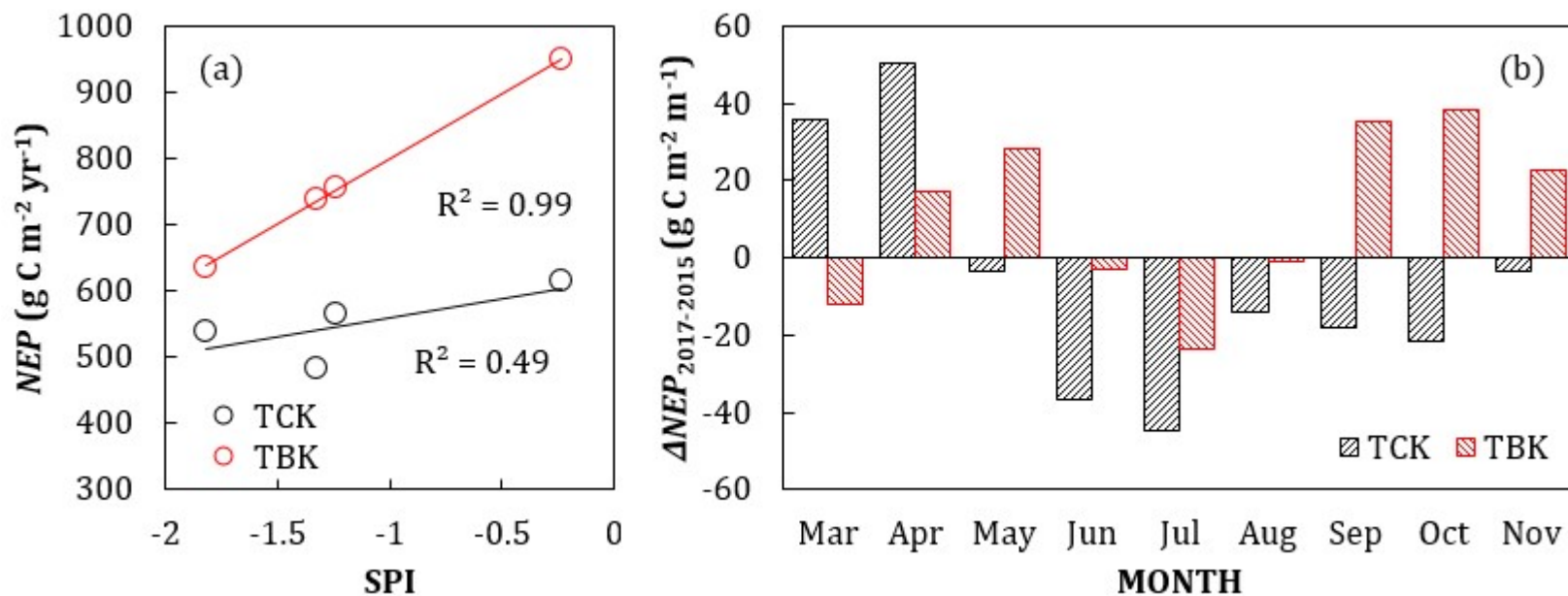
두 임분에서 2017년 *NEP*의 변화에 차이가 발생한 원인을 분석하기 위해 월별 *NEP*를 분석하였다. TBK에서는 주로 5월에서 10월 사이에 광합성 활동을 통해 탄소를 흡수하여 잎을 떨어뜨리는 낙엽수

림의 생물계절학적 특징이 뚜렷하게 나타났으며, 2015년과 2017년의 월별 *NEP*를 비교하였을 때 성장 기간(5-10월) 중 많은 비가 내렸던 2017년 7월의 *NEP*가 2015년 7월보다 3.7%(23.8 g C m⁻²) 감소한 것으로 나타났다(Table 4, Figure 2b). 반면 TCK에서는 주로 3월에서 10월 사이에 광합성 활동을 하는 것으로 나타나 낙엽수림보다 성장기간이 긴 것으로 나타났으며, 2015년과 2017년의 월별 *NEP*를 비교하였을 때 성장 기간(3-10월) 중 2017년 6월부터 10월 사이 *NEP*가 2015년의 같은 기간 보다 25.1%(135.4 g C m⁻²) 크게 감소한 것으로 나타났다. 토양수분함량과 SPI가 크게 감소하였던 2017년 6월의 *NEP*는 50.3 g C m⁻² 으로 2015년 6월보다 6.8%(36.6 g C m⁻²) 감소하였으며, 많은 비가 내린 2017년 7월의 *NEP*는 18.3 g C m⁻²로 낮아져 2015년 7월보다 8.3%(44.9 g C m⁻²) 감소한 것으로 나타났다. 가뭄이 종료된 2017년 8월부터 10월 사이에는 SPI가 평균 -0.59±0.12로 2015년의 같은 기간의 -1.80±0.19 보다 SPI가 크게 높았지만, *NEP*는 오히려 10.0%(53.9 g C m⁻²) 감소한 것으로 나타났다(Table 4, Figure 2b).

Table 4. Monthly net ecosystem production(*NEP*) of two sites during four years from 2015 to 2018. Non-growing winter season was excluded.

		Spring			Summer			Autumn			Total
		Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	
<i>NEP</i> (g C m ⁻²)											
TCK	2015	18.6	35.3	97.3	86.9	63.2	87.1	87.9	62.8	0.8	539.9
	2016	23.7	43.2	98.9	107.6	81.6	98.0	72.4	42.7	-2.8	565.4
	2017	54.4	85.4	93.9	50.3	18.3	72.8	69.8	41.3	-2.9	483.3
	2018	25.9	85.0	101.5	99.9	104.0	70.7	75.3	50.3	2.0	614.6
TBK	2015	-10.1	-32.9	126.6	167.1	122.1	130.6	108.1	52.1	-27.6	636.1
	2016	-48.9	-1.8	174.4	207.2	134.6	145.2	118.3	54.1	-26.2	756.9
	2017	-22.0	-15.8	154.6	164.4	98.3	129.7	143.3	90.1	-4.7	737.8
	2018	-7.7	13.6	174.5	216.7	212.2	151.5	129.6	78.5	-19.5	949.3

Figure 2. (a) Relationship between mean annual SPI and annual net ecosystem production (*NEP*) excluding winter season over four years from 2015 to 2018 at TCK and TBK (b) Monthly net ecosystem production (*NEP*) differences between 2015 and 2017 at TCK and TBK.



3. 두 임분의 *NEP* 차이 발생 원인

TCK에서 SPI와 토양수분함량이 크게 감소하였던 2017년 6월에 토양수분함량이 *NEP*의 감소에 미치는 영향을 확인하기 위해 2017년 5월부터 9월 사이 토양수분함량과 *NEP* 간의 상관분석을 진행하였다. 강수와 광합성유효복사에 의한 영향을 제거하기 위해 비가 온 날의 자료는 제외하였다. 2017년 5월과 6월에 TCK의 토양수분함량이 8% 이하로 감소할 때 *NEP*가 함께 감소하는 경향을 보였으며, 특히 2017년 6월에 토양수분함량이 1% 감소할 때 *NEP*가 약 $1.94 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 감소하는 것으로 나타났다(Figure 3a). 또한 토양수분함량이 8% 이하일 때 토양수분함량이 감소함에 따라 수관전도도가 함께 감소하는 경향을 보였으며(Figure 3b), 같은 기간 수관전도도와 *NEP* 또한 양의 상관관계를 나타내 잣나무 임분에서 토양수분함량의 감소로 인한 수분 스트레스로 기공을 닫고 광합성 활동을 줄이는 것으로 나타났다(Figure 3c).

많은 비가 내렸던 2017년 7월에 광합성유효복사가 두 임분의 *NEP*에 미치는 영향을 확인하기 위해 먼저 각 연도별 7월의 강우 일수를 확인하였다. 2015년부터 2018년까지 7월의 강우 일수는 차례로 14일, 17일, 22일, 10일을 기록하여 2017년 7월에 가장 오랜 기간 비가 내린 것으로 나타났다. 또한 각 연도별 7월의 광합성유효복사는 같은 기간 강수량과 강우 일수가 증가함에 감소하는 경향을 보였으며 (Figure 4a, 4b), 같은 기간 두 임분 모두 7월의 광합성유효복사가 감

소함에 따라 7월의 *NEP*가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 2017년 7월에 2015년 7월 보다 오랜 기간 많은 비가 내려 산림이 광합성 활동에 이용할 수 있는 빛이 감소함으로써 2017년 7월의 *NEP*가 2015년 7월 보다 감소한 것으로 확인되었다(Figure 4c). 두 임분에서 2015년부터 2018년까지 7월에 비가 온 날을 대상으로 광합성유효복사와 *NEP* 간의 상관관계를 확인하였다. TBK에서 더 낮은 광보상점을 보여 같은 광합성유효복사에도 TBK에서는 탄소를 흡수하는 반면, TCK에서는 탄소를 배출하는 것으로 나타나 강수에 의한 광합성유효복사의 감소가 TCK의 광합성 저하에 보다 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다(Figure 4d).

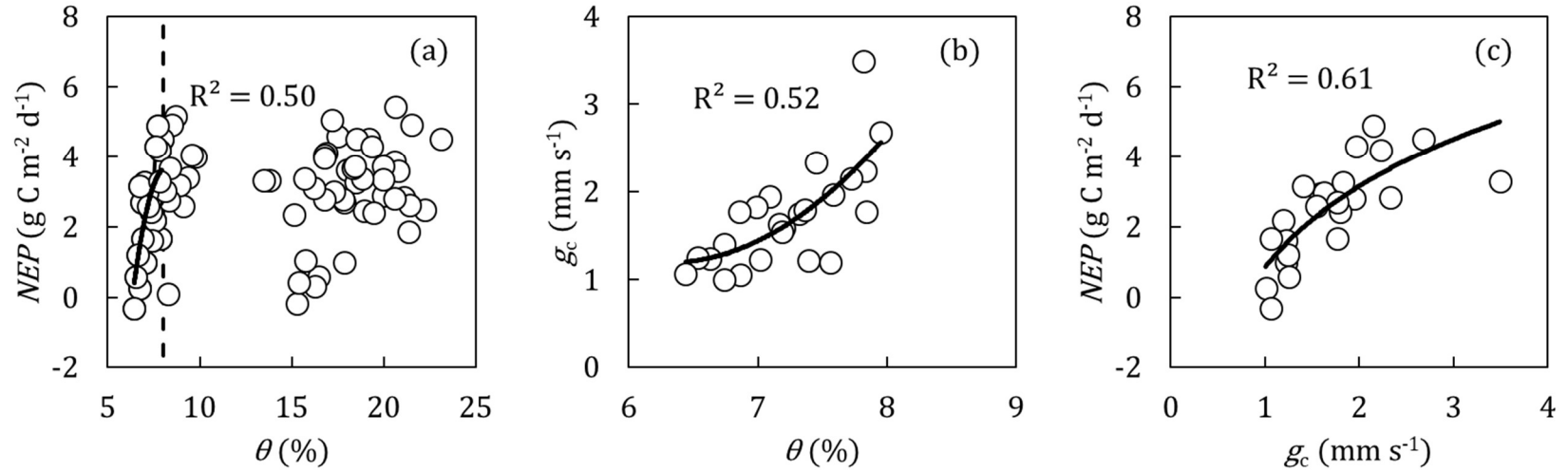


Figure 3. Relationships between (a) daily mean volumetric soil water content(θ) and daily net ecosystem production(NEP) during growing season(from May to September) in 2017, (b) daily mean volumetric soil water content(θ) lower than 8% and daily mean canopy conductance(g_c), (c) daily mean canopy conductance(g_c) and daily net ecosystem production(NEP) under the condition of volumetric soil water content(θ) lower than 8% at TCK. Rainy days were excluded for analysis.

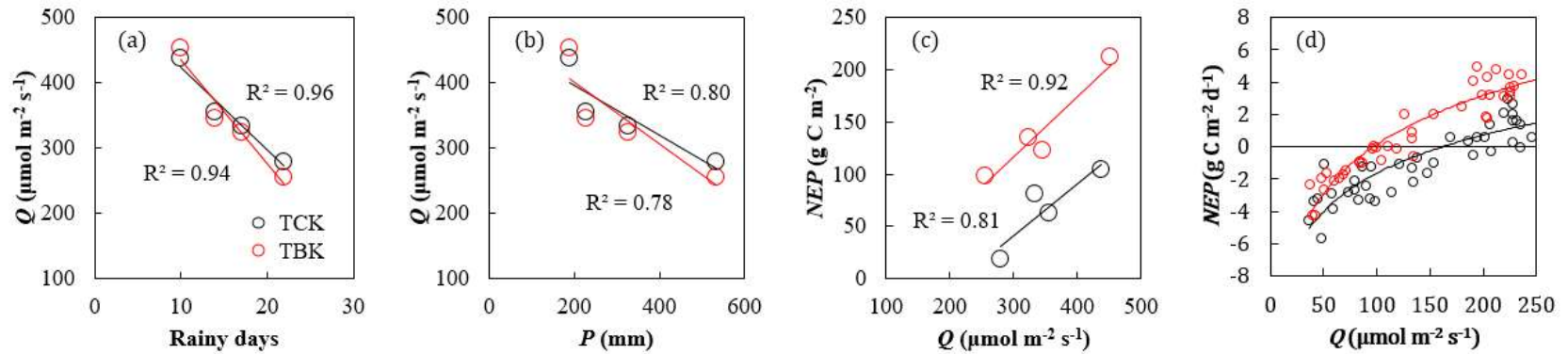


Figure 4. Relationships between (a) monthly rainy days and monthly mean photosynthetic active radiation(Q), (b) monthly precipitation and monthly mean photosynthetic active radiation(Q), (c) monthly mean photosynthetic active radiation(Q) and monthly net ecosystem production(NEP) in July of four years from 2015 to 2018, and (d) daily mean photosynthetic active radiation(Q) lower than $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and daily net ecosystem production(NEP) on rainy days during four years from 2015 to 2018 at TCK and TBK.

IV. 고찰

1. 토양수분함량의 차이와 *NEP*의 감소

연구 기간 약 300 m 거리에 위치한 두 임분에서 유의한 차이가 없는 강수량을 보였음에도 불구하고 가을에서 봄철 TCK의 토양수분함량이 TBK보다 크게 감소하는 경향을 보였다. 특히 강수량이 다른 해보다 크게 줄어들었던 2016년 8월부터 2017년 6월 사이에는 2016년 8월부터 두 임분의 토양수분함량의 차이가 크게 증가하여 2017년 7월 많은 비가 내리기 이전까지 그 차이가 지속되었다. TCK에서 TBK보다 토양수분함량이 낮은 원인을 분석하기 위해 두 임분 사이의 월별 증발산량(ET) 차이 및 두 임분에서 월별 강수량(*P*)과 증발산량(ET)의 차이를 확인하였다. 5월에서 9월 사이 생장기간 중에는 TBK의 증발산량이 TCK보다 많았지만, TBK에서 잎을 떨어뜨리고 광합성 활동을 하지 않는 비생장기간에는 TCK의 증발산량이 TBK보다 높은 경향을 보였다. TCK의 토양수분함량이 TBK보다 크게 감소하였던 2017년 1월부터 4월 사이 TCK에서는 TBK보다 36.5 mm 많은 물을 증발산으로 소비하였으며, 2016년 10월부터 12월 사이에는 TCK에서 TBK보다 15.2 mm 많은 물을 증발산으로 사용하여 2016년 10월부터 2017년 4월 사이 TCK에서 TBK보다 총 51.7 mm(같은 기간 강수량의 23.6%) 더 많은 물을 소비한 것으로 나타났다. 또한 2017년 1월부터 4월 사이에 TCK에서는 강수량 86.6 mm 보다 3.2 mm 많은 89.8 mm를 증발산으로 사용한 반면, TBK에서는 같은 기간

강수량 보다 33.3 mm 적은 53.3 mm를 증발산량으로 소비한 것으로 나타났다. 이에 따라 5월에서 9월 사이 집중적으로 광합성 활동을 하는 TBK에서 TCK보다 더 많은 물을 증발산으로 소비하지만, 10월에서 4월 사이 TBK에서는 광합성 활동이 줄고, 엽면적이 감소하거나 잎을 떨어뜨리기 때문에 증발산량이 감소하고, 토양수분을 회복하여 겨울과 봄철 토양수분함량이 TCK와 같이 크게 감소하지 않는 것으로 생각된다. 반면 10월에서 4월 사이 잎을 계속해서 유지하고 있는 TCK에서는 TBK에 비해 더 많은 양의 물을 증발산으로 소비하기 때문에 겨울과 봄에 토양수분이 TBK보다 덜 회복되어 두 임분의 토양수분함량의 차이가 커지는 것으로 생각된다(Table 5).

TCK의 토양수분함량이 TBK보다 낮은 또 다른 원인으로 수관차단 강수량의 차이를 생각할 수 있는데, TCK의 비생장기간 중의 엽면적지수(LAI)는 대략 2.5~3.3 사이로(Lee, 2018), 잎을 떨어뜨리는 참나무과 수종보다 비생장기간 중 수관차단우의 양이 크게 된다. Valente *et al.*(1997)에 따르면 TCK와 비슷한 임분밀도(312본/ha), 수고(23.9 m), 흉고직경(33.7 cm), 그리고 엽면적지수(2.7)를 보이는 *Pinus pinaster* Ait 임분에서 연강수량 800 mm 중 약 17%가 차단된 것으로 나타났다. TBK에서 잎을 떨어뜨리는 2016년 11월에서 2017년 3월 사이 TCK의 수관차단우를 같은 기간 강수량의 17%의 비율로 계산하였을 때 15.2 mm의 강수가 잣나무 임분의 수관에 차단되어 토양에 공급되지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 2016년 10월부터 2017년 4월까지 7개월간 두 임분에서 증발산량과 수관차단 강수량을 고

려하였을 때, 총 66.9 mm(같은 기간 강수량의 30.5%)의 수분의 차이가 발생하였으며, 이러한 원인으로 같은 기간 TCK의 토양수분함량이 회복되지 못하고 두 임분의 토양수분함량의 큰 차이가 지속된 것으로 생각된다.

TCK에서 2017년 5월과 6월에 토양수분함량이 8% 아래로 감소함에 따라 수관전도도(g_c)와 *NEP*가 모두 감소하였는데, 2017년 5월과 6월에는 다른 해의 같은 기간 보다 평균 127.5 ± 89.7 mm 감소한 60.8 mm의 적은 비가 내려 매우 가물었던 동시에 TCK에서 122.2 mm의 물을 증발산으로 소비하여 토양수분함량이 크게 감소해 수분 스트레스가 심했을 것으로 생각된다(Table 5). 또한 태화산학술림의 토양은 모래의 함량이 높은 사질양토(Hong *et al.*, 2012; Kim & Kim, 2013; Suh *et al.*, 2014)로 사질양토에서 -1500 kPa(-15 bar)의 식물의 위조점을 나타내는 토양수분함량은 8% 이다(Saxton & Rawls, 2006). 따라서 이 기간 TCK에서는 위조점 아래로 토양수분함량이 감소하여 극심한 수분 스트레스를 받았으며, 물관의 공동현상(xylem cavitation) 발생을 피하고자 기공을 닫고 광합성 활동을 줄인 것으로 생각된다.

Table 5. Monthly evapotranspiration at TCK and TBK during four years from 2015 to 2018. Evapotranspiration differences between TCK and TBK and differences between precipitation and evapotranspiration at both TCK and TBK are also shown at the table.

		Winter			Spring			Summer			Autumn			Annual
		Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	
ET (mm)														
TCK	2015	10.9	6.7	9.4	27.5	46.6	68.5	62.1	64.0	76.2	55.7	38.3	16.4	482.4
	2016	7.9	5.5	12.0	21.4	29.1	68.1	64.1	69.2	77.8	46.3	36.1	15.1	452.6
	2017	11.8	8.5	10.4	21.4	49.6	62.3	59.9	59.3	66.0	53.6	43.0	16.0	461.7
	2018	8.5	1.2	1.1	15.2	47.2	60.9	71.8	92.5	77.2	63.5	40.8	16.7	496.8
TBK	2015	6.7	-	-	15.2	27.9	72.1	86.8	79.0	84.7	62.5	42.5	12.3	489.7
	2016	6.3	5.0	8.4	28.4	48.7	86.5	77.3	69.0	80.5	49.2	30.2	8.8	498.3
	2017	8.8	5.5	6.5	13.3	28.0	69.5	74.1	47.2	57.2	65.5	41.3	12.0	429.0
	2018	5.5	6.8	6.8	16.2	34.6	65.2	85.9	101.6	90.6	68.0	38.5	10.7	530.5
Δ ET (mm)														
TCK-TBK	2015	4.2	-	-	12.3	18.7	-3.6	-24.7	-15.0	-8.5	-6.8	-4.2	4.1	-23.4
	2016	1.6	0.4	3.6	-7.1	-19.5	-18.4	-13.2	0.3	-2.7	-2.8	5.9	6.3	-45.6
	2017	3.0	3.0	3.8	8.2	21.5	-7.3	-14.3	12.1	8.8	-11.9	1.7	4.0	32.7
	2018	3.1	-5.6	-5.7	-1.0	12.6	-4.3	-14.1	-9.0	-13.4	-4.6	2.3	6.1	-33.7
P - ET (mm)														
TCK	2015	24.8	15.9	17.7	-8.1	61.1	-25.4	24.4	163.0	45.8	-40.3	19.5	137.6	
	2016	48.1	-2.8	39.9	31.9	56.2	59.2	-47.6	256.4	-27.1	-12.9	49.6	2.9	
	2017	17.4	0.4	7.9	-6.6	-4.9	-37.6	-23.8	473.0	214.3	-23.0	-14.0	17.6	
	2018	10.9	1.4	30.6	59.7	100.4	132.4	26.5	95.8	198.9	27.5	99.2	49.8	
TBK	2015	29.0			4.2	79.8	-29.0	-0.3	148.0	37.3	-47.1	15.3	141.6	
	2016	49.7	-2.4	43.5	24.8	36.7	40.8	-60.7	256.6	-29.8	-15.7	55.4	9.2	
	2017	20.4	3.4	11.7	1.5	16.6	-44.8	-38.0	485.1	223.1	-34.9	-12.3	21.6	
	2018	14.0	-4.2	24.9	58.7	113.0	128.1	12.4	86.8	185.5	22.9	101.5	55.9	

2. 수종별 광보상점과 *NEP* 변화

2017 년 7 월에 평년의 137.7% 수준의 532.3mm 가 내렸으며, 강수일수로는 31 일 중 22 일간 비가 내려 극심한 가뭄 이후 토양수분함량은 회복된 반면, 산림이 광합성에 이용할 수 있는 빛이 감소하여 두 임분의 *NEP* 는 모두 감소하였다. 하지만 TCK 에서는 TBK 보다 광보상점(light compensation point)이 높아 강수에 의한 광합성유효복사 감소에 영향을 크게 받아 TBK 보다 *NEP* 가 더 크게 감소하는 것으로 나타났다. 광보상점은 호흡작용으로 방출하는 CO₂ 와 광합성으로 흡수하는 CO₂ 의 양이 같아지는 시점으로, 잣나무류와 참나무류 모두 전광의 10-30%에서 생존 가능한 중성수로 알려져 있다. Burns(1923)의 연구에 따르면 유럽적송과 폰데로사소나무 등 소나무과 수종은 전광의 28.7% 에서 30.6%의 광도에서 광보상점을 보인 반면, 참나무 수종은 이보다 낮은 전광의 13.6%에서 광보상점을 보였다. 따라서 잣나무와 참나무과 수종 모두 중성수이지만, 그 안에서 서로 다른 광보상점의 특성을 갖고 있기 때문에 참나무과 수종에서 소나무과 수종 보다 낮은 광합성유효복사에서 더 높은 이산화탄소 흡수량을 보이는 것으로 나타났다.

3. 회복지수(R_{cNEP})와 legacy effect

극심한 가뭄이 발생했던 2017년 6월과 많은 강수로 광합성이 저해했던 2017년 7월 이후, TBK에서 2017년 가을철 NEP는 2015년보다 크게 증가하였으나, TCK에서는 NEP가 회복되지 못하고 2015년보다 계속해서 낮은 것으로 나타났다(Figure 2b). 또한 두 임분에서 가뭄 종료 후 2018년의 NEP는 가뭄 기간 중 NEP 보다 증가하였으나, TCK에서 TBK 보다 NEP의 회복이 더 작은 것으로 나타났다. TCK의 R_{cNEP} 는 1.16 ± 0.10 으로 Gazol *et al.*(2017)의 연구 결과 중 *Pinus ponderosa*와 유사한 회복지수를 보였으며, TBK의 R_{cNEP} 는 1.34 ± 0.13 으로 *Quercus alba*나 *Quercus stella* 보다 약간 높은 것으로 나타났으나 분포 범위 내에 있는 것으로 나타났다. Gazol *et al.*(2017)의 연구에서 토양수분함량이 높은 지역에서 회복지수(R_c)가 높은 것으로 나타났는데, 이는 본 연구에서 R_{cNEP} 가 TCK보다 TBK에서 더 높았던 것과 같은 결과였다. Anderegg *et al.*(2015)에 의하면 연강수량이 500 mm 보다 높은 습윤한 지역에서 참나무과 수종은 가뭄의 legacy effect가 약하게 나타나는 반면, 소나무과 수종은 legacy effect의 큰 영향을 받아 가뭄 종료 후 3년 내지 4년이 지나고 나서 가뭄 이전의 직경생장량으로 회복하는 것으로 나타났다. 그러한 원인으로 수분 손실에 취약한 수종에서 가뭄 이후 직경생장량이 느리게 회복되는 경향을 보여 legacy effect의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 극심한 수분 스트레스를

받은 TCK에서 2017년 8월 이후로 *NEP*의 회복이 더딘 것과 유사하였다. 수분 스트레스를 받은 임분에서 *legacy effect*의 영향으로 직경성장량의 회복이 늦어지는 원인은 크게 3가지로 생각할 수 있는데(Anderegg *et al.*, 2013), 먼저 가뭄 기간 중 수분 스트레스를 받아 엽면적이 감소하거나 저장된 비구조 탄수화물이 감소하여 가뭄 종료 후에 광합성 능력이 떨어지고, 생장에 사용할 에너지원이 부족해지기 때문이다. 또한 병해충의 영향으로 가뭄에 시달리는 임목에 피해를 가중시켜 생장의 저하를 유발하게 되며, 가뭄 이후에도 목부의 공동현상(*xylem cavitation*)이 남아 있는 경우 수분의 이동이 저해되고, 광합성에 필요한 수분 공급이 어려워져 생장이 감소하게 된다. 본 연구대상지인 TCK에서의 가뭄 기간 중 상대적인 엽면적의 변화를 확인하기 위해 선행 연구(Lee, 2018)의 *Leaf area index*(LAI) 측정 자료와 NASA의 MODIS 위성 자료를 제공하는 온라인 사이트(<https://modis.ornl.gov/>)의 LAI 자료를 이용하여 분석하였다. MODIS LAI 자료는 TCK의 40 m 플렉스 타워의 좌표를 기준으로 500 m 격자의 공간 해상도와 4일 간격의 시간 해상도의 자료를 제공 받아 이용하였다. 현장에서 관측한 TCK의 LAI는 매우 가물었던 2017년 6월이나 많은 비가 내렸던 2017년 7월에 큰 변동이 없는 것으로 나타났으며(Figure 5a), MODIS LAI에서도 3년 간 LAI의 유의한 차이는 없는 것으로 확인되어 TCK에서 수분 스트레스로 인한 엽면적 감소 현상은 없는 것으로 나타났다(Figure 5b, *p-value* > 0.05). 목부의 공동현상으로 수분 이동이 저해되었는지

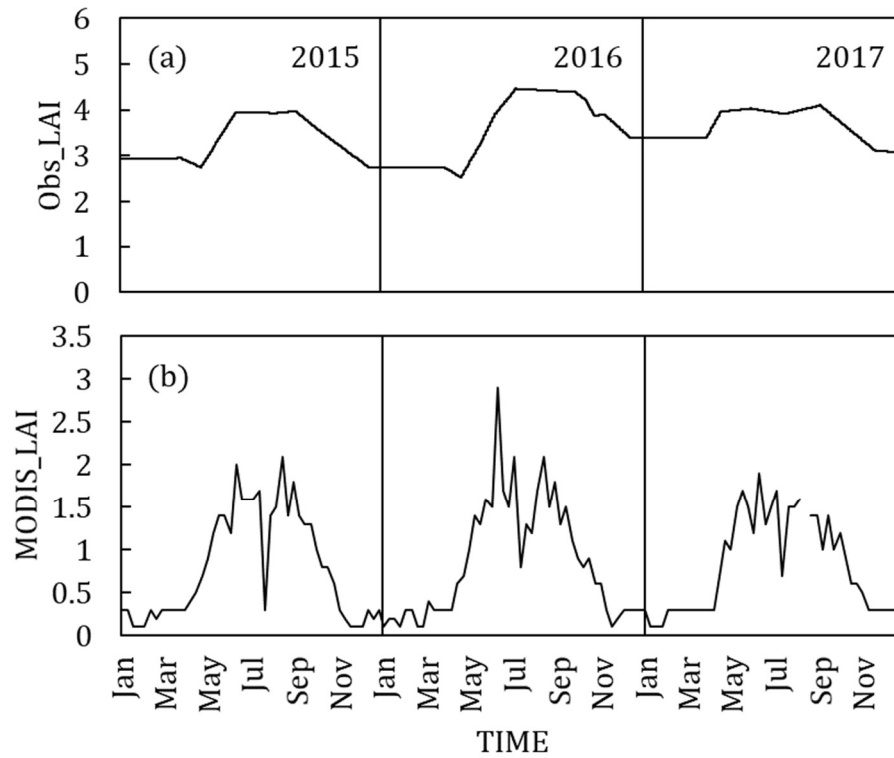
확인하기 위해 TCK의 증발산량을 비교하였다. 각 연도별 8월에서 10월 사이 증발산량은 유의한 차이를 보이지 않았으며, 성장기간인 3월부터 11월 사이 증발산량 또한 유의한 차이를 보이지 않아 목부의 기능 저하로 인한 수분 이동이 저해되는 현상은 없는 것으로 나타났다($p\text{-value} > 0.05$). 2017년 6월에 위조점 이하로 토양수분함량이 감소할 때 TCK에서 기공을 닫는 것으로 보아 목부의 공동현상은 모면하였으나 광합성의 감소로 대사 작용에 사용할 수 있는 에너지원이 감소한 것으로 생각되며, 2017년 7월에 강수현상으로 광합성이 다시 한 번 크게 저해되어 가뭄 이후 사용할 에너지원이 고갈될 수 있는 것으로 생각된다. 따라서 가뭄 종료 이후 TCK에서 TBK보다 NEP의 회복이 느린 원인으로 1) 물질 대사에 사용할 에너지원, 즉 탄소 고갈 현상과 2) 병해충의 영향, 두 가지를 고려할 수 있을 것이다.

Baldocchi(2018)에 따르면 많은 연구 결과들($n=506$)을 바탕으로 계산된 연간 NEP의 평균은 $182.9 \pm 269.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로, 특히 연간 NEP가 $1,000 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에 가까운 곳은 극히 드물다. 하지만 본 연구에서 관측된 TCK와 TMK의 연간 NEP는 타 연구 결과에 비해 높은 경향을 보였으며, 특히 2018년 TMK의 NEP는 일반적인 결과보다 큰 것으로 나타났다. TCK와 TMK에서 연간 NEP가 다른 연구 결과보다 큰 원인으로서는 야간에 관측된 플럭스 자료가 야간 보정 후에도 여전히 과소평가되었기 때문으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 NEP의 경년변동에 대한 분석은 가능하지만, 절대적인 값

자체에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 생각된다.

미래에 장기간 지속되는 심각한 가뭄이 예상되는 가운데, 본 연구 결과와 같이 임분의 수종적 특성에 따라 가을부터 봄까지 지속되는 가뭄 발생 시 토양수분함량이 극단적으로 감소할 수 있으며, 결과적으로 산림생태계의 탄소흡수량을 감소시키고, 가뭄으로부터의 회복을 늦어지는 결과를 초래할 것으로 보인다. 그러나 본 연구는 2018년 한 해를 기준으로 두 임분의 순생태계생산량의 회복을 비교하였다는 한계가 있으며, 실제로 가뭄 종료 후 *NEP*의 차이를 발생시키는 *legacy effect*의 원인을 구명하는 것과 *legacy effect*가 가뭄 종료 후 얼마나 오랫동안 영향을 미칠 수 있는지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Figure 5. (a) Observed LAI using plant canopy analyzer(LI-2200, LI-COR, Inc., U.S.A.) at TCK and MODIS LAI at Mt. Taehwa over three years from 2015 to 2017.



V. 결론

우리나라에서 겨울과 봄철 가뭄에 대한 연구와 같이, 본 연구에서도 가을부터 봄까지 이어지는 가뭄이 순생태계생산량(*NEP*)에 미치는 영향을 확인하였다. 특히 가을 가뭄이 봄까지 지속되는 경우 봄 가뭄이 보다 심화되며 TCK와 같은 상록침엽수림에서 비생장기간 중 토양수분의 회복을 저해하는 것으로 나타났다. 이러한 비생장기간의 토양수분 회복의 저하는 봄철 가뭄에 의해 극단적인 토양수분 감소로 이어져 가뭄의 *legacy effect*로 인해 가뭄 이후에도 회복이 늦어질 수 있는 것으로 나타났다. 또한 수종별 광포화점의 차이가 강수량이 집중되는 기간의 탄소 수지 변화에 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구 대상지에서 지속적인 *NEP*의 변화를 관찰하여 *legacy effect*에 대한 모니터링과 추가적인 연구를 통해 기후변화로 산림생태계가 탄소배출원이 되는 원인을 밝혀내고, 지속적인 산림관리 방안을 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Anderegg, W. R., Plavcová, L., Anderegg, L. D., Hacke, U. G., Berry, J. A., & Field, C. B. (2013). Drought's legacy: multiyear hydraulic deterioration underlies widespread aspen forest die-off and portends increased future risk. *Global change biology*, 19(4), 1188-1196.
- Anderegg, W. R., Schwalm, C., Biondi, F., Camarero, J. J., Koch, G., Litvak, M., ... & Wolf, A. (2015). Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 349(6247), 528-532.
- Baldocchi, D. (2008). 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 56(1), 1-26.
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., ... & Bondeau, A. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834-838.
- Burns, G. P. (1923). Measurement of solar radiant energy in plant habitats. *Ecology*, 4(2), 189-195.
- Cavin, L., Mountford, E. P., Peterken, G. F., & Jump, A. S. (2013). Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Functional Ecology*, 27(6), 1424-1435.
- Change, I. P. O. C. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, RK

- Pachauri and LA Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., ... & Chevallier, F. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529.
- Corcuera, L., Camarero, J. J., & Gil-Pelegrín, E. (2004). Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees*, 18(1), 83-92.
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., ... & Freitas, S. (2014). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506(7486), 76.
- Gazol, A., Camarero, J. J., Anderegg, W. R. L., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global ecology and biogeography*, 26(2), 166-176.
- Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C. D., ... & Kraft, N. J. (2017). Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecology Letters*, 20(4), 539-553.
- Hayes, M. J. (2011). Comparison of major drought indices: Introduction. Available at drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofIndicesIntro.aspx (verified 24 Dec. 2011). Natl. Drought Mitigation Ctr., Univ. of Nebraska, Lincoln.
- Hong, E. M., Choi, J. Y., Nam, W. H., & Yoo, S. H. (2011). Analysis of soil moisture recession characteristics in conifer forest. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(4), 1-9.

- Hong, E. M., Choi, J. Y., Yoo, S. H., & Nam, W. H. (2012). Analysis of soil moisture characteristics in nut pine forest about seasons and soil layers. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), 105-114.
- Hong, J., Kim, J., Lee, D., & Lim, J. H. (2008). Estimation of the storage and advection effects on H₂O and CO₂ exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research*, 44(1).
- Houghton, R. A., Baccini, A., & Walker, W. S. (2018). Where is the residual terrestrial carbon sink?. *Global change biology*, 24(8), 3277-3279.
- Kang, M., Kim, J., Kim, H. S., Thakuri, B. M., & Chun, J. H. (2014). On the nighttime correction of CO₂ flux measured by eddy covariance over temperate forests in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 16(3), 233-245.
- Kang, M., Kim, J., Lee, S. H., Kim, J., Chun, J. H., & Cho, S. (2018). Changes and Improvements of the Standardized Eddy Covariance Data Processing in KoFlux. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20(1), 5-17.
- Kelliher, F. M., Leuning, R., Raupach, M. R., & Schulze, E. D. (1995). Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73(1-2), 1-16.
- Kim, D. S., & Kim, S. (2013). N₂O and CH₄ Emission from Upland Forest Soils using Chamber Methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 789-800.
- Kim, K. H., Jeong, Y. H., Jeong, C. G., Jun, J. H., & Yoo, J. Y. (2004). Effects of Thinning and Pruning on Canopy Storage Capacity, Net Rainfall and

- Interception Loss in *Pinus koraiensis* and *Abies holophylla* Plots. *Journal of Korean Forestry Society*.
- Kim, S., Park, C. K., & Kim, M. K. (2005). The regime shift of the northern Hemispheric circulation responsible for the spring drought in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(4), 571-585.
- Kim, S. Y., Kim, S. Y., Choi, S. H., & Kim, S. W. (2012). A Preliminary Flux Study for CO₂ and Biogenic VOCs in a Forest. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(5), 485-494.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2017). Annual Report.
- Kumagai, T. O., Saitoh, T. M., Sato, Y., Morooka, T., Manfroi, O. J., Kuraji, K., & Suzuki, M. (2004). Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *Journal of Hydrology*, 287(1-4), 237-251.
- Lee, H.T. (2018). Impact of Leaf Area Index from Various Sources on Estimating Gross Primary Production in Temperate Forest Using JULES Land Surface Model (Master's Thesis, Graduate School of Seoul National University).
- Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909-1920.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution, and biomass of the world's forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 593-622.
- Peltier, D. M., Fell, M., & Ogle, K. (2016). Legacy effects of drought in the

- southwestern United States: A multi-species synthesis. *Ecological Monographs*, 86(3), 312-326.
- Phillips, O. L., Aragão, L. E., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-González, G., ... & Van Der Heijden, G. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919), 1344-1347.
- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M. D., Seneviratne, S. I., ... & Papale, D. (2013). Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500(7462), 287.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
- Suh, S., Park, S., Shim, K., Yang, B., Choi, E., Lee, J., & Kim, T. (2014). The Effect of Rain Fall Event on CO₂ Emission in *Pinus koraiensis* Plantation in Mt. Taehwa. *Korean Journal of Environmental Biology*, 32(4), 389-394.
- Sun, Y., Peng, S., Goll, D. S., Ciais, P., Guenet, B., Guimberteau, M., ... & Poulter, B. (2017). Diagnosing phosphorus limitations in natural terrestrial ecosystems in carbon cycle models. *Earth's future*, 5(7), 730-749.
- Svoboda, M., & Fuchs, B. (2016). *Handbook of drought indicators and indices*.
- Valente, F., David, J. S., & Gash, J. H. C. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190(1-2), 141-162.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Standardized precipitation index user guide*.

Yin, J., & Bauerle, T. L. (2017). A global analysis of plant recovery performance from water stress. *Oikos*, 126(10), 1377-1388.

Abstract

Differences of Net Ecosystem Production Change between a *Pinus koraiensis* Plantation and a Deciduous Broad-leaved Forest over a Four-year Period after Drought

Hojin Lee
Major in Forest Environment Science
Department of Forest Sciences
The Graduate School
Seoul National University

As climate change progresses, regional variability in meteorological changes such as drought will increase and is expected to have a significant impact on the carbon cycle of forest ecosystems. Therefore, it is important to understand the change of carbon cycle of forest ecosystem due to drought and recovery after drought. In Republic of Korea, the frequency of spring drought is increasing, and the effect of drought on forest carbon cycle can be changed depending on the presence of leaves during the drought. In this study, we analyzed the differences of net ecosystem production (*NEP*) change at a *Pinus koraiensis* plantation and a deciduous broad-leaved forest where *Quercus* species are dominant over a four-year period from 2015 to 2018 after about 50% annual precipitation decreased in 2014.

This study was carried out in 50 year old Taehwa conifer forest (TCK) and nearby Taehwa deciduous broad-leaved forest (TBK). The standardized precipitation index (SPI) at the study site decreased to -2 or less after July 2014, and it gradually increased from March, 2015 to October, 2016. From November, 2016, the SPI declined to the lowest values during May and June 2017. After a heavy rainfall of 523.3 mm (137.7% of the normal level) in July 2017, the SPI has returned to the normal range ($-0.99 \leq \text{SPI} \leq 0.99$).

The annual *NEP* excluding non-growing winter season in TCK and TBK increased from 539.9 g C m⁻² to 565.4 g C m⁻² and from 636.1 g C m⁻² to 756.9 g C m⁻² respectively between 2015 and 2016. And the *NEP* decreased in both stands in 2017 when SPI and soil moisture content decreased the most. In TBK, the *NEP* in 2017 was 737.8 g C m⁻², which is 16.0% larger than the *NEP* in 2015. On the other hand, in TCK, *NEP* in 2017 was 483.3 g C m⁻², 10.5% lower than *NEP* in 2015, and it was the smallest during the period of study (2015-2018). In TCK, one of the reasons for large reduction in *NEP* during 2017 is that photosynthesis activity of forest ecosystem decreased along with canopy conductance reduction because the soil moisture content in TCK decreased by 8%, which indicates the plant wilting point under sandy loam soil condition, during May and June, 2017 due to the severe drought from autumn, 2016 to spring, 2017. Furthermore, TCK consumed 51.7 mm more water by evapotranspiration than TBK from October, 2016 to April, 2017, and 15.2 mm of precipitation was not supplied to the soil due to the canopy interception in TCK from November, 2016 to March, 2017, thus it affected large reduction of soil moisture content in TCK. In July of 2017, intense rainfall for 22 days

resulted in a decrease in light available for photosynthesis and severe inhibition of photosynthesis. Therefore, it seemed to lead to depletion of the energy source needed for metabolism after drought in TCK.

The *NEP* both in TCK and TBK in 2018, excluding winter, were 614.6 g C m⁻² and 949.3 g C m⁻² respectively, which was the largest during study period from 2015 to 2018. *NEP* in 2018 was 16.6±9.5% (85.1±42.0 g C m⁻²) and 34.4±12.9% (239.0±64.9 g C m⁻²) larger than that of the other years in TCK and TBK, respectively. As a result, the *NEP* recovery index ($R_{C\ NEP}$) was 1.16±0.10 and 1.34±0.13 for TCK and TBK, respectively. The reason why $R_{C\ NEP}$ for TCK was lower than that of TBK was thought to be due to the legacy effect that the recovery of *NEP* after drought was delayed for a long time due to the extreme water stress and the decrease of metabolism in TCK unlike the TBK where the soil moisture content remained relatively high.

The results of this study show that the soil moisture content in *Pinus koraiensis* plantation can be decreased significantly more than that of deciduous broad-leaved forest due to the difference of species characteristics during the drought period. Therefore, the *NEP* of the forest is decreased by the extreme water stress and legacy effect in the *Pinus koraiensis* plantation, suggesting that recovery may be delayed. The results of this study can be applied to sustainable forest management plan, as drought caused by climate change is predicted to increase the damage of forests.

Keywords : drought, eddy covariance, net ecosystem production, soil moisture limitation, drought stress, legacy effect, recovery

Student Number : 2017-29143