

천연림 간벌에 기인한 산림생물량 감소가 산림 내부 온도에 미치는 영향 연구^{1a}

강래열² · 홍석환^{3*}

The Effect on the Forest Temperature by Reduced Biomass Caused by Natural Forest Thinning^{1a}

Rae-Yeol Kang², Suk-Hwan Hong^{3*}

요 약

본 연구는 숲가꾸기가 시행된 부산대학교 제1학술림을 대상으로 간벌 전·후의 산림생물량 및 온도를 실측하여 천연림에서 간벌에 따른 산림생물량 감소와 산림 내부 온도변화의 관계를 확인하고자 하였다. 산림생물량은 간벌 전·후 동일 조사구에 흉고단면적, 수관단면적, 수관체적을 각각 동일한 도출식을 적용하여 도출하였으며, 산림 온도와의 관계성을 파악하고자 하였다. 온도측정은 간벌 이전인 2016년 04월 20일~28일, 간벌 전후인 2016년 07월 26일~11월 04일, 간벌 이듬해인 2017년 04월 15일~05월 08일에 각각 실시하였으며 온도데이터로거를 방형구 내 중앙에 위치한 수목의 지상 2.0m 높이에 북향으로 설치하여 동일기간동안 각 10분마다 데이터가 기록되도록 설치하였다. 간벌이 산림 전역에 진행되어 산림 내 대조구 설정이 어려워 인근 도시에 위치한 동래구 지역별상세관측자료(AWS)를 대조구로 활용하였다. 산림생물량의 변화와 온도와의 관계성을 분석한 결과, 산림 내부 온도 변화는 한낮 시간대(PM12:00~15:00)에 가장 큰 변화를 보였으며, 산림생물량 중 수관체적과 깊은 관계성을 가지고 있었다. 간벌 직후(평균 0.74°C)보다 간벌 후 1년이 경과한 시점(평균 1.91°C)에서 훨씬 높은 온도 상승을 보였다. 조사구별 수관체적 감소비율과 온도 상승정도를 비교한 결과, 수관체적 감소량이 15.4%로 가장 높았던 리기다소나무군락에서 간벌 직후와 1년 후 분석에서 각각 1.06°C, 2.49°C로 가장 높은 온도 상승을 나타냈다. 수관체적 감소비율이 5.0%로 가장 적었던 리기다소나무-소나무군락에서 간벌 직후는 그 차이가 없었으며 1년 후 분석에서는 0.92°C가 상승하였다. 천연림에서 간벌로 인한 산림생물량 감소는 산림내부 온도를 급격히 상승시키는 것을 확인할 수 있었으며 특히, 간벌 직후보다는 이듬해에 더 극심하게 나타나고 있어 제거된 산림생물량에 의한 미기후 변화는 단기간에 회복될 수 없음을 확인할 수 있었다.

주요어: 미기후, 온도데이터로거, 지역별상세관측자료, 수관체적

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the relationship between the decrease of forest biomass by forest thinning and the change of temperature in the natural forest by measuring forest biomass and temperature before and after forest thinning in the Pusan National University forest where afforestation had been carried out. We intended to investigate the relationship between the forest biomass, estimated by calculating the Basal area, Crown area and Crown volume using the same formula to the same quadrat before and after forest thinning, and the forest temperature. Temperature measurement was carried out on April 20, 2016 through 28 before forest

1 접수 2017년 11월 30일, 수정 (1차: 2018년 3월 27일, 2차: 2018년 4월 30일), 게재확정 2018년 5월 1일

Received 30 November 2017; Revised (1st: 27 March 2018, 2nd: 30 April 2018); Accepted 1 May 2018

2 부산대학교 대학원 조경학과 Graduate School, Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea

3 부산대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea

a 이 논문은 강래열의 석사학위 논문을 수정·보완하여 작성되었음.

* 교신저자 Corresponding author: hong@pusan.ac.kr

thinning, July 26, 2016 through November 4 around the time of forest thinning, and April 15, 2017 through May 8 after forest thinning. A temperature data logger was installed to point north at the height of 2.0 m above the ground in the center of the quadrat to record data every 10 minutes during the measurement periods. We used the AWS (Automatic Weather Station) data of the Dongnae-gu area located in the nearby city because it was difficult to set the control group since the whole forest was the subject to the forest thinning. The analysis of the relationship between forest biomass change and temperature showed that the change in temperature inside the forest was the greatest in the midday (12:00 - 15:00) and was highly correlated with the Crown volume in the forest biomass. The temperature increase was much larger (average 1.91 °C) 1 year after forest thinning than immediately after forest thinning (average 0.74 °C). The comparison of the decrease rate of Crown volume and the increase in temperature showed that the Pitch pine community, which showed the highest decrease of Crown volume by 15.4%, recorded the highest temperature rise of 1.06 °C immediately after forest thinning and 2.49 °C 1 year after forest thinning. The Pitch pine-Korean red pine community, which showed the lowest Crown volume reduction rates with 5.0%, recorded no significant difference immediately after forest thinning but a temperature rise of 0.92 °C 1 year after forest thinning. The results confirmed that the decrease of forest biomass caused by forest thinning led to a rapid increase of the internal temperature. The fact that the temperature increase was more severe after 1 year than immediately after forest thinning confirmed that the microclimate changes due to the removed biomass cannot be recovered in a short time.

KEY WORDS : MICROCLIMATE, TEMPERATURE DATA LOGGER, AUTOMATIC WEATHER STATION, CROWN VOLUME

서론

전 세계적으로도 기상관측 이래 가장 뜨거웠던 해로 기록된 2016년은 우리나라에서도 심각한 온도상승을 보였는데, 2015년에 비해 2016년 연평균기온이 1.1°C가 상승하는 등 기후변화가 급속도로 악화되어가고 있다(KMA, 2017). 기후변화는 전 지구적으로 복잡한 관계 속에서 발생하고 있어 뚜렷한 해결책을 찾기는 어려운 실정이나, 근본적으로는 기후변화 발생요인인 온실가스 배출량 감소와, 배출된 온실가스를 포집하는 것이다. 이 중 배출된 온실가스의 흡수는 식물의 생장이 거의 유일하다. 숲은 온실가스의 축적과 함께 증발산을 통해 주변의 에너지를 소모함으로써 일 최고기온을 최대 5.1°C, 평균 1.8°C까지 낮추고 침엽수림보다 활엽수림에서, 겨울보다 여름에, 고도가 낮을수록 높은 온도 저감효과를 가진다(von Arx *et al.*, 2012). 수목의 증발산에 의한 에너지 소모량은 매우 큰데, 플라타너스나 느티나무 한 개체가 주변의 에너지를 소모하는 양은 약 5,100kcal/h나 되며(Jo, *et al.*, 1999), 윤용한 등(1998)은 수목 수량간의 중회귀분석을 통해 수목 10그루 증가에 대해 최고기온의 경우 교목 0.33~0.50°C, 아교목 0.31~0.43°C, 최저기온의 경우 교목 0.21~0.23°C, 아교목 0.14~0.28°C의 감소 효과가 있음을 보고하여 수목 수량의 증가는 급격한 기후변화를

완화하는데 유효하다고 밝힌바 있다. 기경석 등(2012)은 녹지량과 실측 온도와의 상관관계 분석 결과 녹피울과 녹지용적계수는 모두 실측 온도 값과 높은 음(-)의 상관관계가 있고 녹지량과 실측 온도 회귀분석을 통해 녹피울이 1% 증가할 때마다 -0.002°C, 녹지용적계수가 1m³/m² 증가할 때마다 -0.122°C의 온도 감소 효과가 있으리라 추정하였으며, 안미연(2015)은 위성영상을 통해 숲이 파괴될 경우 평균적으로 1.8°C이상, 활엽수림이 파괴되었을 경우 2.3°C, 침엽수림이 파괴되었을 경우 1.9°C 온도가 증가한 것을 밝힌 바 있어 수목의 수량이나 체적의 증대는 기후변화 완화를 위한 근본적 해결책으로 정리할 수 있다. 그러나 기후변화 완화를 위한 단위면적당 수목의 수량이나 체적의 증대노력과는 달리 현재 우리나라의 대표적 산림정책인 숲가꾸기 중 간벌은 단위면적당 수목 총량의 개념을 배제하고 선별된 개별 수목의 집중생장유도나 특정 수목의 생산을 위한 접근으로 목적수종 외 하층 식생과 생장을 방해하는 수목, 구부러진 수목, 두 갈래 이상으로 자란 수목 등을 제거하고 있다. 이는 수목의 수량이나 체적의 확대와는 확연히 상반되는 실정이었으며 기후변화와 같은 환경문제 관점으로 보았을 때, 온도 저감과 같은 숲의 공익적 기능을 크게 저하할 우려가 있다(Hong and Lee, 2015).

국내에서 숲가꾸기 사업은 대표적 산림정책으로 꾸준히

진행되어 오면서 2016년 기준 누적량 4,795,867ha에 달하는 면적에 시행되었고 해마다 평균 368,913ha의 숲에 꾸준히 인위적 간섭을 적용해 오고 있다(KFS, 2005-2017). 국내는 물론 국외에서도 숲가꾸기는 오랜 세월 진행되어 오고 있으며, 이에 대하여 긍정적 측면과 부정적 측면이 양립하고 있다. 다만 외국의 경우와 달리 우리나라는 효과에 대한 검증 없이 천연림까지 광범위하게 적용하고 있어 숲가꾸기의 긍정적인 측면을 저해할 우려가 제기되고 있다. 간벌의 긍정적 측면으로는 5영급 이상의 임상에 대한 산사태 위험성 감소(Youn *et al.*, 2011), 3-4영급 수목의 직경 및 수관부 생장이 증가하는 등 목재생산성 증대(Forrester and Baker, 2012; Park *et al.*, 2013; Moreno-Fernández *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017), 생물다양성 증가(Spies and Franklin, 1991; Hayes *et al.*, 1997; Verschuyl *et al.*, 2011; Azor *et al.*, 2015)가 주를 이루고 있었다. 그밖에 산불위험이 감소하지만 임내에 적재되는 숲가꾸기 부산물은 산불의 재발화 가능성을 높인다는 연구결과와(Yeom, 2009) 수자원 함양 기능의 향상(Jutras *et al.*, 2006) 등의 연구결과가 있었다. 부정적 측면으로는 외생균근균의 종 수 감소(Waters *et al.*, 1994; Choi *et al.*, 2014), 3-4영급의 임상에 대한 산사태 위험성 증가(Youn *et al.*, 2011), 생물다양성 감소(Fujii and Kubota, 2011), 온도 상승(Rambo and North, 2009; Hong and Lee, 2015), 미기후에 대한 공간적 변동성의 증가(Ma, S., *et al.*, 2010) 등 자연적 문제와 관련된 측면이 주를 이루고 있었다. 산사태의 경우, 국내산림의 65.7%가 3-4영급 산림이며 마땅한 간벌 규제가 없고 민간 지원을 통한 무분별한 간벌이 함께 시행되어 왔음을 감안하면 오히려 전체적인 산사태의 위험성은 훨씬 증가했을 것으로 정리할 수 있다.

이미 국내외에서 숲의 미기후 조절 효과에 관한 연구는 온도를 중심으로 대다수 진행되어 왔으나 간벌에 따른 온도 연구는 국내에서 연구된 바가 거의 없다. 간벌이 숲 내부 온도에 미치는 영향에 관한 연구로, 김준수(2010)는 소나무

림의 개벌이 주연부에서 숲 내부 20m까지 미기후를 불안정하게 만든다고 밝힌바 있으며, 배상원 등(2010)과 최은진 등(2016)은 각각 잣나무림과 곰솔림에서 간벌에 따라 토양 온도의 증가를 밝힌 바 있다. 또한, 도시에서의 온도 관련 연구는 도시공원 및 도시녹지 조성, 토지피복 변화에 관한 온도 연구가 대부분이었으며 실측을 통한 연구보다는 위성영상을 활용한 온도 연구가 대부분 진행되었다.

이에 본 연구는 숲가꾸기 사업시행 중 간벌 전·후의 숲 내부 온도의 실측을 통해 인위적으로 변화된 산림생물량과 온도의 관계성을 살펴보고자 하였다.

연구방법

1. 연구대상지

연구대상지는 부산대학교 제1학술림으로 숲가꾸기가 진행되기 전까지 산림에 대한 인위적 관리가 진행되지 않은 천연림이며 부산광역시 기장군 철마면 산 180-2 일대에 위치하고 있다. 2012년 9월 19일에 학술림으로 지정 되었으며, 이후 숲을 건강하고 가치있게 만들고자 노쇠한 나무, 굵은 나무 등을 간벌하는 천연림가꾸기의 목적성과는 달리 부산시 치유의 숲 사업과 관련하여 방문객에게 심미적 특성을 부각시키기 위한 목적으로 학술림 50ha 전체와 주변산림에 대하여 2016년 8월 30일부터 동년 10월 4일까지 간벌을 통한 시야확보, 인력집재, 하층식생 제거를 통한 임내정리가 시행되었다. 본 대상지는 연구 및 학술 목적을 가진 학술림으로 다른 산림에 비해 숲가꾸기 외 여타 인위적 변수가 일반 도시 숲에 비하여 비교적 적어 연구대상지로 적합한 것으로 판단하였다.

조사구는 주변 숲의 대표적 임상인 소나무군락, 리기다소나무-소나무군락, 소나무-굴참나무군락, 굴참나무-소나무

Table 1. Environmental characteristic of each survey plot.

Division	Korean red pine community	Pitch pine-Korean red pine community	Korean red pine-Oriental cork oak community	Oriental cork oak-Korean red pine community	Pitch pine community
Altitude	80m	110m	120m	140m	180m
Aspect	S30W	S30W	S20W	S20W	S10E
Slope	30°	28°	30°	23°	25°
Topography	Side slopes	Side slopes	Side slopes	Side slopes	Side slopes
Dominant species	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc., <i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	<i>Pinus rigida</i> Mill., <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc., <i>Quercus variabilis</i> Blume	<i>Quercus variabilis</i> Blume, <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	<i>Pinus rigida</i> Mill., <i>Quercus variabilis</i> Blume

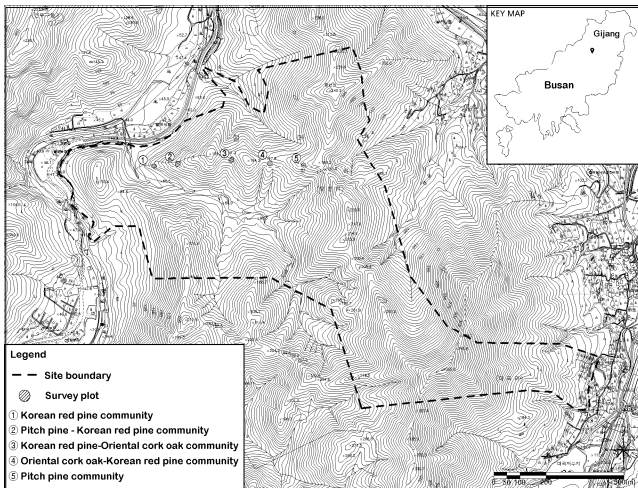


Figure 1. Location of Study site

군락, 리기다소나무군락 총 5곳을 설정하였으며, 숲가꾸기 외 여타 변수의 통제를 위해 지형적 특성이 유사한 곳에 선정하였다. 조사구는 해발고 80~180m, 경사 23~30°에 분포하며 모두 산림능선 하부 산복사면에 설정하였다 (Table 1). 방위의 경우 남사면 언덕에서 일평균 온도 저감 효과가 가장 크므로 이를 고려하여 남사면에 위치한 곳을 선정하였다(An *et al.*, 2016).

2. 조사분석방법

1) 산림생물량

식생유형 및 특성을 알아보기 위해 각 조사구에 10×20m (200m²) 방형구를 설치한 뒤 흉고직경 2cm 이상의 목본식물을 대상으로 교목상하층 및 수고 2m 이하인 관목층으로 구분하여 식생구조를 조사하였다(Park, 1985; Choi *et al.*, 1993). 조사 항목으로는 교목상하층은 수고, 흉고직경, 지하고, 수관폭을 측정하였으며, 관목층은 흉고직경을 제외한 나머지 항목을 조사하였다. 생물량 조사는 간벌 시행 전·후로 2차례에 걸쳐 실시하였으며, 1차 조사는 간벌 시행 전으로 2016년 04월 19일, 2차 조사는 간벌 시행 후로 2016년 11월 04일에 실시하였다.

간벌에 의해 제거된 산림생물량을 객관적으로 파악하고자 현장조사를 통해 획득한 자료를 활용하여 각 조사구의 간벌 전·후 흉고단면적, 수관단면적, 수관체적을 도출하였다. 수관폭의 경우 수목의 수관 장·단축 길이를 조사한 후 장·단축 길이에 따른 타원면적을 수관면적으로 계산하여 적용하였다(Hong and Lee, 2015). 도출식은 다음과 같다.

$$1) BA = \frac{BDH_1}{2} \times \frac{BDH_2}{2} \times \pi$$

$$2) CA = \frac{W_1}{2} \times \frac{W_2}{2} \times \pi$$

$$3) CV = \frac{W_1}{2} \times \frac{W_2}{2} \times \pi \times \frac{4}{3} \times \left(\frac{H-B}{2} \right)$$

(BA: basal area (cm²), CA: crown area(m²), CV: crown volume(m³), BDH: diameter breast height(cm), W: width of crown(m), H: height(m), B: clear length(m))

2) 온도 측정

온도데이터 수집은 간벌 이전인 2016년 04월 20일~28일에 실시하였으며, 간벌 전후인 2016년 07월 26일부터 동년 11월 04일까지, 간벌 후 이듬해인 2017년 04월 15일~05월 08일에 각각 실시하였다. 측정은 온도데이터로거를 방형구 내 중앙에 위치한 수목에 지상 2.0m 높이에 북향으로 설치하여 동일기간동안 각 10분마다 데이터가 기록되도록 설치하였다.

수집된 자료는 수집기간동안 발생한 인위적 변수와 자연적 변수의 영향을 제외하기 위해 간벌 시행일 및 이상기후, 우천시에 수집된 자료를 제외하였다. 분석에 사용된 자료는 간벌 직후 분석에서 간벌 전은 2016년 08월 29일, 간벌 후는 2016년 09월 05일에 측정된 온도자료를 활용하였으며 간벌 후 이듬해 분석에는 2016년 04월 23일~24일과 2017년 04월 23일~24일에 측정된 온도자료를 활용하여 비교분석을 진행하였다. 본 연구대상지는 간벌이 주변 산림 전체에 대하여 이루어져 인접지역에 대조구 설정이 가능하지 않았다. 따라서, 분석에 사용한 온도측정 시기와 동일한 시기의 온도자료를 인근 도시에 위치한 부산시 동래구 지역별 상세관측자료(Automatic Weather Station, AWS)에서 획득하여 대조구로 활용하였다.

3) 간벌에 의한 온도 영향 분석

간벌로 인해 제거된 산림생물량과 온도변화의 관계성이 존재하는지 파악하기 위해 흉고단면적 감소량, 수관단면적 감소량, 수관체적 감소량과 간벌 전·후의 온도차(실측온도-대조구AWS) 차이를 변수로 상관분석을 실시하였다. 상관관계분석을 토대로 간벌로 인한 간벌 전과 후의 온도변화를 정량적으로 확인하고자 간벌 실행 여부를 독립변수로, 도출한 온도차(실측온도-대조구AWS)를 종속변수로써 t검정을 통해 비교분석을 실시하였으며 간벌로 인해 나타나는 온도의 일간 경향을 알아보기 위해 종일(24시간) 분석을 실시하였다. 시간대에 따른 산림의 온도 변화 특성 또한 확인하고자 새벽(AM03:00~06:00), 한낮(PM12:00~03:00) 각 3시간씩 추출하여 비교분석을 진행하였다. 통계분석은 SPSS 23.0 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 식생분포 현황

연구대상지 각 조사구의 일반적 식생분포 현황을 분석한 결과, 산림생물량의 대부분을 차지하고 있는 교목층에서 소나무군락은 평균 수고 9m, 평균 흉고직경 15cm, 식피율 80%로 소나무와 신갈나무가 우점하고 있었으며 리기다소나무-소나무군락은 평균 수고 7m, 평균 흉고직경 12cm, 식피율 75%로 리기다소나무와 소나무가 우점하고 있었다. 소나무-굴참나무군락의 경우 평균 수고 16m, 평균 흉고직경 16cm, 식피율 70%로 소나무와 굴참나무가 우점하고 있었으며 굴참나무-소나무군락의 경우 평균 수고 19m, 평균 흉고직경 23cm, 식피율 80%로 굴참나무, 소나무, 졸참나무가 우점하고 있었다. 마지막으로 리기다소나무의 경우 평균 수고 14m, 평균 흉고직경 17cm, 식피율 85%로 리기다소나무와 굴참나무가 우점하고 있었다(Table 2).

2. 산림생물량 현황

간별 전 평균 조사구의 흉고단면적, 수관단면적, 수관체적은 각각 621.8cm², 194.8m², 486.6m³로 나타났으며 간별 후는 각각 554.6cm², 160.9m², 426.7m³로 나타났다. 따라서 간별로 인해 제거된 산림생물량은 흉고단면적, 수관단면적, 수관체적 각각 평균 67.2cm², 34.0m², 60.0m³이었다. 각 조사구의 제거된 산림생물량을 비율로 비교해 보았을 때, 흉고단면적은 소나무-굴참나무군락에서 16.0%로 가장 많은 감소량을 보였으며 수관단면적과 수관체적은 리기다소나무군락에서 각각 20.9%, 15.4%로 가장 많은 감소량을 보였다(Table 3). 더불어 지속가능한 산림자원 관리지침에 따르면 정량간벌의 경우 기준본수의 30% 범위를 적시하고 있으므로 본 연구대상지에 진행된 간벌은 재적대비 수목 제거비율이 23%로 일반적인 간벌에 비해 다소 약한 수준의 간벌이 진행된 것을 확인할 수 있었다.

3. 온도 변화 분석

1) 산림생물량과 온도 상관관계

모든 조사구를 대상으로 간벌로 인한 산림생물량 감소에 따른 온도 변화량(간별 전-후)은 한낮 시간대에서만 그 유의성을 찾아볼 수 있었으며 수관체적 감소량과 깊은 관계성을 보였다(Table 4). 한낮 시간대의 수관체적 감소량에 대한 온도 변화량은 음(-)의 상관관계를 보였으며 이는 수관체적이 감소할수록 온도가 상승하는 상관관계이다. 그러나 상관

계수가 -0.205로 다소 낮게 나타났는데, 이러한 경향은 숲의 속성과 하층식생의 발달에 따라 간벌이 온도에 미치는 영향이 일정하지 않은 것으로 판단할 수 있다. 향후 하층식생의 발달 모니터링과 함께 동질한 숲을 대상으로 보다 정밀한 비교연구가 추가적으로 진행되어 관계성이 규명되어야 할 것으로 판단된다.

2) 간벌 직후 온도 변화

간벌 직전과 직후의 온도변화 분석 결과 모든 조사구에서 온도상승이 뚜렷하게 확인되었다. 다만 종일 시간대와 한낮 시간대와는 달리 새벽 시간대의 온도변화는 뚜렷하지 않았다. 한낮의 온도변화는 수관체적 감소비율이 15.4%로 가장 높았던 리기다소나무군락이 1.06℃가 상승하여 가장 큰 변화를 보였으며, 수관체적 감소비율이 5.0%로 미미한 리기다소나무-소나무군락의 경우 0.4℃의 온도상승이 있었으나 통계적으로 인정되지는 않았다. 일평균 온도변화는 5개 조사구 모두 온도상승이 통계적으로 인정되었으며 소나무군락이 가장 높은 상승을 보인 것으로 나타났다(Table 5). 분석결과 간벌 직전과 직후 상대적으로 약한 간벌강도에도 불구하고 높은 온도상승이 관찰되어 숲에 대한 인위적 간섭이 미기후에 미치는 영향은 매우 큰 것을 확인할 수 있었다.

3) 간벌 이듬해 온도 변화

간벌 이듬해 온도 변화는 간벌 직후와 매우 유사한 경향을 보였으나 그 정도는 예측과는 달리 약 2배정도로 심해졌음을 확인할 수 있었다. 간벌 이듬해 한낮의 온도변화 또한 직후와 동일하게 수관체적 감소비율이 15.4%로 가장 높았던 리기다소나무군락에서 2.49℃가 상승하였으며, 수관체적 감소비율이 5.0%로 가장 낮았던 리기다소나무-소나무군락의 경우 0.92℃가 상승하였는데 간벌 직후와는 다르게 온도가 상승하였지만 타 조사구에 비해 온도 상승이 현저히 낮아 수관체적 감소비율에 따른 온도 상승 경향이 간벌 직후와 매우 유사하였다(Table 6). 종일 시간대에서는 수관체적 감소비율이 5.0%였던 리기다소나무-소나무군락을 제외하고 모든 대상지에서 온도가 상승하였고, 새벽 시간대의 경우 온도 분포가 고르지 않아 간벌 직후 분석과 마찬가지로 산림생물량 감소와 관계성을 찾을 수 없었다.

이상으로 살펴보았을 때, 간벌에 의한 미기후 변화는 단기적으로 회복될 수 있는 것은 아니며 매우 높은 온도상승을 유발하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 간벌에 따른 온도 변화의 정도가 계절적으로 다르게 나타나는지에 대한 연구 또한 추가적으로 밝혀야 할 것으로 판단되었으며, 온도상승이 언제까지 이어지는가에 대한 장기 연구 또한 추가적으로 진행할 필요성이 있었다.

Table 2. General vegetation community condition of each survey plot.

Layer	Division	Korean red pine community	Pitch pine-Korean red pine community	Korean red pine-Oriental cork oak community	Oriental cork oak-Korean red pine community	Pitch pine community
Tree (canopy)	Average Height (m)	9	7	16	19	14
	Average diameter at breast height (cm)	15	12	16	23	17
	Cover degree (%)	80	75	70	80	85
	Dominant species	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc., <i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	<i>Pinus rigida</i> Mill., <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc., <i>Quercus variabilis</i> Blume	<i>Quercus variabilis</i> Blume, <i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc., <i>Quercus serrata</i> Murray	<i>Pinus rigida</i> Mill., <i>Quercus variabilis</i> Blume
Subtree	Average Height (m)	5	-	4	7	-
	Average diameter at breast height (cm)	7	-	3	8	-
	Cover degree (%)	10	-	10	15	-
	Dominant species	<i>Pinus rigida</i> Mill.	-	<i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume	<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc.	-
Shrub	Height (m)	≤ 2m	≤ 2m	≤ 2m	≤ 2m	≤ 2m
	Cover degree (%)	30	30	15	15	15
	Dominant species	<i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume, <i>Quercus variabilis</i> Blume	<i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume, <i>Rhododendron mucronulatum</i> Turcz.	<i>Fraxinus sieboldiana</i> Blume, <i>Smilax china</i> L.	<i>Styrax japonicus</i> Siebold & Zucc., <i>Lindera obtusiloba</i> Blume	<i>Rhododendron mucronulatum</i> Turcz., <i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.

4. 종합고찰

산림생물량 감소에 따른 간벌 전·후의 온도 차이는 산림 생물량 중 수관체적과 깊은 관계성을 가지고 있었으며 한낮 시간대에 뚜렷하게 나타났다. 상관계수의 경우 -0.205로 다소 낮게 나타났는데, 이는 본 연구가 동일한 임상에서 진행되지 않고 다양한 임상에 적용하였으며 시간이 흐름에 따른 하층식생의 발달을 함께 모니터링 하지 않은 결과로 판단된다. 따라서 향후 하층식생의 발달과 함께 각각의 동일임상에 대한 정밀한 연구의 진행이 필요한 것으로 판단되었다. 개별 임상에 대한 온도변화는 매우 뚜렷하게 발생하고 있었

는데, 간벌 직후 한낮 시간대 간벌 전·후의 온도차는 모든 대상지에서 평균적으로 0.74℃가 증가한 것을 확인할 수 있었으며, 1년 후 분석에서는 1.91℃가 상승한 것을 확인할 수 있었다. 한낮 시간대 모든 대상지에서 온도가 상승함에 따라 수관체적 감소비율과 대조해본 결과 간벌 직후와 1년 후 모두 매우 유사한 결과를 보였다. 15.4%로 수관체적 감소비율이 가장 높았던 리기다소나무군락이 간벌 직후와 1년 후 각각 1.06℃, 2.49℃로 가장 높은 온도차 증가를 보였으며 5.0%로 수관체적 감소비율이 가장 적었던 리기다소나무-소나무군락은 간벌 직후에는 0.4℃의 온도차 증가를 보였으나 통계적으로 유의성이 인정되지 않아 그 차이가 없었

Table 3. Forest biomass of each survey plot.

Division		Korean red pine community	Pitch pine-Korean red pine community	Korean red pine-Oriental cork oak community	Oriental cork oak-Korean red pine community	Pitch pine community	Average
Basal area (cm ²)	before thinning	577.9	405.6	640.9	775.3	709.3	621.8
	after thinning	519.5	352.9	538.3	743.0	619.2	554.6
	removal	58.4	52.7	102.5	32.3	90.1	67.2
	ratio(%)	10.1	13.0	16.0	4.2	12.7	11.2
Crown Area (m ²)	before thinning	123.9	130.4	148.3	336.3	235.1	194.8
	after thinning	104.3	117.9	129.8	266.4	186.1	160.9
	removal	19.6	12.6	18.5	70.0	49.1	34.0
	ratio(%)	15.8	9.7	12.5	20.8	20.9	15.9
Crown volume (m ³)	before thinning	257.5	202.0	409.4	966.5	597.4	486.6
	after thinning	224.8	191.9	362.1	849.2	505.3	426.7
	removal	32.8	10.1	47.3	117.2	92.1	60.0
	ratio(%)	12.7	5.0	11.5	12.1	15.4	11.3

Table 4. Correlation analysis of midday Temperature variation(Before Thinning - After Thinning) of each forest biomass.

Division	correlation			
	Basal area decrement	Crown area decrement	Crown volume decrement	Temperature variation
Midday temperature variation	-0.064	-0.139	-0.205*	1

* $p < .05$ ** $p < .01$

Table 5. Split-timed average temperature difference of each survey plot(directly after the thinning).

Division	Daily average temperature difference (°C)			Dawn average temperature difference (°C)			Midday average temperature difference (°C)		
	After	Before	Difference	After	Before	Difference	After	Before	Difference
	N=144	N=144		N=19	N=19		N=19	N=19	
Korean red pine community	-0.70	-1.70	1.00**	-1.33	-1.21	-0.12	-0.15	-0.83	0.68**
Pitch pine-Korean red pine community	-0.57	-1.33	0.76**	-1.03	-1.02	-0.01	0.14	-0.26	0.40
Korean red pine-Oriental cork oak community	-1.13	-1.99	0.86**	-1.01	-1.14	0.13	-1.74	-2.62	0.88**
Oriental cork oak-Korean red pine community	-1.20	-1.78	0.58**	-1.08	-0.82	-0.26	-1.74	-2.40	0.66**
Pitch pine community	-1.20	-1.85	0.65**	-1.10	-1.12	0.02	-1.72	-2.78	1.06**
Average	-0.96	-1.73	0.77	-1.11	-1.06	-0.05	-1.04	-1.78	0.74

* $p < .05$ ** $p < .01$

Table 6. Split-timed average temperature difference of each survey plot(one-year after the thinning).

Division	Daily average temperature difference (°C)			Dawn average temperature difference (°C)			Midday average temperature difference (°C)		
	After	Before	Difference	After	Before	Difference	After	Before	Difference
	N=287	N=287		N=38	N=38		N=38	N=38	
Korean red pine community	-1.27	-2.16	0.89**	-3.93	-4.43	0.50**	2.86	0.87	1.99**
Pitch pine-Korean red pine community	-1.17	-1.35	0.18	-3.19	-2.57	-0.62**	2.15	1.23	0.92**
Korean red pine-Oriental cork oak community	-0.69	-1.39	0.70**	-1.25	-1.10	-0.15	1.52	-0.44	1.96**
Oriental cork oak-Korean red pine community	-0.36	-1.33	0.97**	-1.42	-0.79	-0.63	1.65	-0.52	2.17**
Pitch pine community	0.09	-0.93	1.02**	0.01	-0.05	0.06	2.28	-0.21	2.49**
Average	-0.68	-1.43	0.75	-1.96	-1.79	-0.17	2.09	0.19	1.91

* $p < .05$ ** $p < .01$

고, 1년 후에는 0.92°C의 온도차 증가를 보였으나 타 조사구에 비해서는 현저히 낮은 증가량을 나타냈다. 기상청에 따르면 1980년부터 2017년까지 38년간의 부산지역 평년기온은 14.7°C, 2016년과 2017년의 연평균기온은 각각 15.7°C, 15.3°C로 평년기온에 비해 2016년은 1.0°C, 2017년은 0.6°C가 상승하였다. 2017년이 2016년에 비해 연평균기온이 0.4°C 낮았음에도 불구하고 간벌 이듬해 온도 변화가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 천연림에서 간벌로 인해 제거된 교목과 아교목의 산림생물량은 단기간에 회복할 수 없다고 정리할 수 있으며 인위적 간섭으로 인해 상승한 온도로 인한 부정적 효과와 긍정적 효과는 직후에 모두 발생하는 것이 아니라 시간에 따라 더욱 커질 수 있음을 의미한다.

배상원 등(2010)은 흉고단면적 기준 45%와 60%의 비율로 간벌이 진행된 잣나무림에서 대조구에 비해 평균 토양온도가 각각 1.1°C, 1.3°C 증가하였으며, 간벌시점으로부터 4년이 경과한 시점에서도 토양 온도는 지속적으로 간벌 영향을 받는 것을 밝힌바 있다. 간벌에 의한 토양온도 상승 정도와 비교하였을 때, 본 연구는 간벌밀도가 훨씬 적은 약 간벌지임에도 기온 상승이 토양 온도 상승과 유사하게 나타난 바 간벌강도가 높은 일반지역의 온도상승분은 훨씬 클 것으로 추정할 수 있었다. 또한, 간벌 후 이듬해에 숲의 온도가 간벌 직후보다 오히려 약 2배 정도 상승한 것이 확인되었다. 이렇게 온도 상승으로 불안정해진 산림 내부는 숲의 구성인자 사이에도 그 영향을 미칠 수 있다. 기주 식물(특히, 참나무와 소나무)의 뿌리에서 상리 공생 관계를 형성하는

외생균근균 종 수를 크게 감소시키거나(Waters *et al.*, 1994; Choi *et al.*, 2014) 소나무재선충의 확산을 야기시킬 수 있다(Hong and Lee, 2015). 따라서, 산림이 간벌 이전과 상응하는 회복을 이루기까지 상승한 산림 내부 온도로 인해 천연림은 지속적으로 쇠퇴할 우려가 있었다. 다만, 지구 온도 상승이라는 관점에서 천연림 내부 온도 상승은 다소 부정적인 면이 부각되었으나 생물다양성 증가(Spies and Franklin, 1991; Hayes *et al.*, 1997; Verschuyt *et al.*, 2011; Azor *et al.*, 2015), 산불 위험성 감소(Yeom, 2009), 수자원 함양 기능의 향상(Jutras *et al.*, 2006)과 같은 긍정적 측면 또한 배제할 수 없다. 따라서, 산림의 유형과 특성, 목적에 따른 숲가꾸기가 수반되어야 할 것이라 판단되며, 산림 내부의 온도뿐만이 아닌 보다 다양한 관점에서의 복합적인 정밀연구가 필요하다고 판단된다.

REFERENCES

- An, M.Y.(2015) Relationship between changing vegetation type and temperature in urban forest. Master's thesis, Graduate School of Pusan National University, 56pp. (in Korean with English abstract)
- An, S.M., H.G. Son, K.S. Lee and C.Y. Yi(2016) A Study of the Urban Tree Canopy Mean Radiant Temperature Mitigation Estimation. J. KILA. 44(1):93-106. (in Korean with English abstract)
- Azor, J.S., X. Santos and J.M. Pleguezuelos(2015) Conifer-

- plantation thinning restores reptile biodiversity in Mediterranean landscapes. *Forest Ecology and Management* 354: 185-189.
- Bae, S.W., J.H. Hwang, S.T. Lee, H.S. Kim and J.M. Jeong(2010) Changes in Soil Temperature, Moisture Content, Light Availability and Diameter Growth After Thinning in Korean Pine(*Pinus koraiensis*) Plantation. *Jour. Korean For. Soc.* 99(3): 397-403.
- Choi, E.J., H.Y. Seo, K.S. Lee, B.O. Yoo, C.S. Kim and H.S. Cho(2016) Soil CO₂ Efflux by Thinning Treatments of a Black Pine (*Pinus thunbergii* Parl.) Stand Disturbed by Pine Wilt Disease. *J. Korean For. Soc.* 105(1): 12-18.
- Choi, J.W., E.H. Lee, J.K. Eo, C.D. Koo and A.H. Eom(2014) Community Changes of Ectomycorrhizal Fungi by Thinning in a Forest of Korea. *The Korean Journal of Mycology* 42 (2):133-137. (in Korean with English abstract)
- Choi, S.H. and K.J. Lee(1993) A Study on the Change of the Plant Community Structure for Five years in Puk'ansan National Park. *Kor. J. Env. Eco.* 7(1): 35-48. (in Korean with English abstract)
- Forrester, D.I. and T.G. Baker(2012) Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, and *Eucalyptus grandis* plantations in south eastern Australia. *Can. J. For. Res.* 42: 75-87.
- Fujii, S. and Y. Kubota(2011) Understory thinning reduces wood-production efficiency and tree species diversity in subtropical forest in southern Japan. *Journal of Forest Research* 16(3): 253-259.
- Hayes, J.P., S.S. Chan, W.H. Emmingham, J.C. Tappeiner, L.D. Kellogg and J.D. Bailey(1997) Wildlife response to thinning young forests in the Pacific Northwest. *Journal of Forestry* 95(8): 28-33.
- Hong, S.H. and S.D. Lee(2015) Report on Forests Damaged Due to Cutting Trees Infected by Pine Wilt Disease. *Kor. J. Env. Eco.* 29(4): 590-598. (in Korean with English abstract)
- Jo, H.K. and T.W. Ahn(1999) Function of Microclimate Amelioration by Urban Greenspace. *J. KILA.* 27(4): 23-28. (in Korean with English abstract)
- Jutras, S., A.P. Plamondon, H. Hökkä and J. Bégin(2006) Water table changes following precommercial thinning on post-harvest drained wetlands. *Forest ecology and Management* 235(1-3): 252-259.
- Ki, K.S., B.H. Han and J.Y. Hur(2012) A Study of Factors Influencing of Temperature according to the Land Cover and Planting Structure in the City Park. *Kor. J. Env. Eco.* 26(5): 801-811pp. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.S.(2010) Edge effects on vegetation and environment after clearcutting of *Pinus densiflora* forest. Master's thesis, Graduate School of Kyungpook National University, 36pp. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service(2005) Statistical yearbook of forestry 2005. 222-223pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2006) Statistical yearbook of forestry 2006. 230-231pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2007) Statistical yearbook of forestry 2007. 230-231pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2008) Statistical yearbook of forestry 2008. 236-237pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2009) Statistical yearbook of forestry 2009. 230-231pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2010) Statistical yearbook of forestry 2010. 230-231pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2011) Statistical yearbook of forestry 2011. 236-237pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2012) Statistical yearbook of forestry 2012. 238-239pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2013) Statistical yearbook of forestry 2013. 228-229pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2014) Statistical yearbook of forestry 2014. 234-235pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2015) Statistical yearbook of forestry 2015. 226-227pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2016) Statistical yearbook of forestry 2016. 228-229pp. (in Korean)
- Korea Forest Service(2017) Statistical yearbook of forestry 2017. 228-229pp. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration(2017) Abnormal Climate Report 2016. 20-22pp. (in Korean)
- Li, R. S., Q.P. Yang, W.D. Zhang, W.H. Zheng, Y.G. Chi, M. Xu, Y.T. Fang, A. Gessler, M.H. Li and S.L. Wang(2017) Thinning effect on photosynthesis depends on needle ages in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Science of the Total Environment* 580: 900-906.
- Ma, S., A. Concilio, B. Oakley, M. North and J. Chen(2010) Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning treatments. *Forest Ecology and Management* 259(5): 904-915.
- Moreno-Fernández, D., M. Sánchez-González, J.G. Álvarez-González, A. Hevia, J.P. Majada, I. Cañellas and G. Gea-Izquierdo(2014) Response to the interaction of thinning and pruning of pine species in Mediterranean mountains. *European Journal of Forest Research* 133(5): 833-843.
- Park, I.H. and G.D. Kim(1985) Forest Structure, Biomass, and Net Production in a Natural Forest Ecosystem at Mt. Baekun Area. Doctor's thesis, Graduate School of Seoul National University, 48pp. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., S.K. Kim, S.T. Lee, K.S. Lee and H.H. Kim(2013)

- Thinning Effect on Vegetation Structure and Stand Characteristics of Oak Stands. *Journal of Agriculture & Life Science* 47(6): 81-89. (in Korean with English abstract)
- Rambo, T. R. and M.P. North(2009) Canopy microclimate response to pattern and density of thinning in a Sierra Nevada forest. *Forest Ecology and Management* 257(2): 435-442.
- Spies, T.A. and J.F. Franklin(1991)The structure of natural young, mature, and old-growth Douglas-fir forests in Oregon and Washington. *Wildlife and vegetation of unmanaged Douglas-fir forests*. pp. 91-109.
- Verschuyf, J., S. Riffell, D. Miller and T.B. Wigley(2011) Biodiversity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests—a meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 261(2): 221-232.
- von Arx, G., M. Dobbertin and M. Rebetez(2012) Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural & Forest Meteorology* 166: 144-155.
- Waters, J.R., K.S. McKelvey, C.J. Zabel and W.W. Oliver(1994) The effects of thinning and broadcast burning on sporocarp production of hypogeous fungi. *Can J For Res.* 24(7): 1516-1522.
- Yeom, C.H.(2009)A study on the effect of forest thinning or non-thinning on damage of forest fire. Master's thesis, Graduate School of Kangwon National University, 62-67pp. (in Korean with English abstract)
- Youn, H.J., C.S. Woo and C.W. Lee(2011) Effects of forest tending on Landslide. *Jour. Korean For. Soc.* 100(3): 417-422. (in Korean with English abstract)
- Yun, Y.H., E.I. Kim and T.G. Song(1998) Effect of open space on the temperature drop -on Syakujii park of Tokyo in Japan-. *J. KILA* 26(2): 259-268. (in Korean with English abstract)