

RCP 8.5 시나리오를 이용하여 온량지수에 따른 천안시 적응 가능한 식물종 연구*

공석준 · 신진호 · 양금철

공주대학교 건설환경공학부

The Study of Adaptable Plant Species according to Warmth Index using RCP 8.5 Scenarios in Cheonan-Si*

Kong, Seok Jun · Shin, Jin Ho and Yang, Keum Chul

Dept. of Civil & Environmental Eng. Kongju National University.

ABSTRACT

This study was proposed to adaptable species according to climate change using warmth index(WI) in Cheonan-Si. RCP 8.5 was used to estimate change of warmth index(WI) depending on climate change in Cheonan-Si. Climatic change of Cheonan-Si was estimated to change from cool temperate forest central zone to warm temperate forest zone.

The following plant species will survive within WI change of Cheonan-Si from 2010 to 2050 : 18 species in the tree layer including *Quercus serrata*, *Q. variabilis*, *Pinus densiflora*, *Q. acutissima* etc.; 28 species in the shrub layer including *Rhus trichocarpa*, *Lindera obtusiloba*, *Zanthoxylum schinifolium* etc.; 24 species in the herb layer including *Oplismenus undulatifolius*, *Carex lanceolata*, etc.; 12 species in the vine plants including *Smilax china*, *Cocculus trilobus*, etc.

Key Words : *Cool temperate forest central zone*, *Warm temperate forest zone*.

* 본 연구는 환경부 2012 차세대에코이노베이션기술 개발사업의 지원으로 수행되었음.

First author : Kong, Seok Jun, Dept. of Civil & Environmental Eng. Kongju National University,
Tel : +82-41-521-9311, E-mail : chaos008@kongju.ac.kr

Corresponding author : Yang, Keum Chul, Dept. of Civil & Environmental Eng. Kongju National University,
Tel : +82-41-521-9311, E-mail : yangkc@kongju.ac.kr

Received : 7 February, 2013. **Revised** : 1 April, 2013. **Accepted** : 10 May, 2013.

I. 서 론

산업혁명 이후 화석연료 사용이 급격하게 늘어남에 따라 대기 중 온실가스의 농도가 증가하였으며, 현재 이산화탄소의 농도는 400ppm까지 올라갔다. 기후변화는 열파, 가뭄, 홍수 등 극한 기상현상을 일으키며, 해수면 상승 등 지구생태계 전반에 걸쳐 광범위한 영향을 끼치고 있다(이현우, 2010).

지난 100여 년(1912~2008년)간 한반도의 평균 기온 상승률은 1.7°C로 전 지구 평균기온 상승률 $0.741 \pm 0.003^\circ\text{C}$ 에 비해 높게 나타났다(국립기상연구소, 2009). 또한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 평가 보고서의 기온 전망에 따르면 향후 100년간 지구의 기온은 1.8~4.0°C가 상승할 것으로 전망하였다. 이러한 지구 평균기온의 상승은 생태계의 구조와 기능, 종, 생태계 상호 작용, 종의 지리적 분포에 부정적인 영향을 미치며, 동·식물 종의 약 20~30%가 멸종 위기에 처한다고 전망했다(IPCC, 2007). 식생 발달에 관련하여 영향을 미치는 주요한 환경인자로는 기후, 토양, 지형 등의 무기적 환경조건과 생물 간 경쟁 등의 규제 조건이 각각의 생물에 작용하여 생육지를 제한하기 때문에 종류에 따라 생육장소가 각각 정해져 있다. 일반적으로 중위도 이상에서 식생 성장에 가장 중요한 기후요소는 기온과 강수량으로 알려져 있으며, 한반도와 같이 강수량이 충분한 곳에서는 기온이 주요 인자가 된다(Suh et al., 2005).

도시 녹지는 인간의 교란에 따른 파편화, 고립화 등으로 서식지로서의 가치보다는 개발의 논리가 앞서서 훼손되거나 소멸된 곳들이 많으며(김귀곤 등, 2000), 조경위주의 도시녹지공간 조성으로 인하여 자연생태와 이질적인 형태를 보이고 있다(정홍락 등, 2007). 이러한 도시 산림생태계내 자생식물군집의 파괴로 인하여 생물종다양성이 낮아지고, 식생구조의 불균형을 초래하였으며 단일수종에 의하여 우점하는 현상이 나

타나고 있다(Hough, 1983). 이러한 현상은 산림생태계내 목본식물 및 민감성이 높은 초본식물이 환경오염에 의한 쇠퇴징후의 심각성이 표면화되면서 자연성 회복을 위한 복원모델의 제시가 요구되고 있다(강현경·방광자, 2001).

이경재 등(1995; 1996)은 서울을 중심으로 한 훼손된 생태계의 식생복원에 대한 연구를 통해 도시지역의 녹지복원용 수종선발, 녹지내 식생의 생태적 층위구조를 고려한 식생도입방안 및 녹지조성방안을 제시하였다. 오구균(1986)은 기후에 맞는 수종선정 및 상호작용과 생태적 지위를 고려한 식재설계 방향을 제시하였고, 심우경(1988)은 조경배식 설계에 관한 연구에서 식물 종선정 시 적지적수의 중요성을 강조하여 식물 소재의 향토성과 환경내성, 관리성 등의 객관적, 합리적, 과학적 근거를 지닌 적수평가표를 통한 계량적 평가지표를 제안하였다. 박종철 등(2010)은 기후변화에 따른 난온대 상록활엽수림대의 이동에 관한 연구를 통해 지구온난화에 따른 난온대 상록활엽수림대의 이동을 분석하였으며, 윤종학 등(2011)은 기후변화에 따른 한반도 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지 변화 예측에 관한 연구에서 CT-model을 이용하여 현재기후(1961~1990)와 3종류의 미래기후(2081~2100) 시나리오(CCCMA-A2, CSIRO-A2, HADCM3-A2)를 이용하여 잠재 생육지를 예측하였다. 이러한 연구들은 도시생태계의 복원을 위한 연구이거나, 기후변화에 따른 한반도의 난온대 상록활엽수종 또는 상록활엽수림의 생육지 변화에 대한 연구이다. 반면 변정연 등(2012)은 시공간 정보를 기반으로 산림생태계의 기후변화 취약성에 대한 평가연구를 하였으나 이는 기후변화에 따른 생산성을 중심으로 연구한 결과로 기후변화에 따른 구체적인 적응 수종에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 IPCC 4차보고서에서 제공하는 기후변화 시나리오 중 RCP 8.5를 이용하여 지역(천안시)에 적응 가능한 식물종을 제시

하고자 한다. 이러한 연구는 향후 기후변화에 따른 각 지역에 적합한 식재수종 혹은 복원종의 정보를 제공하는 자료로 활용 가능할 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

천안시는 충청남도의 동북부에 위치하고 (Figure 1) 있으며, 총 인구는 595,756명이며, 행정구역은 4개읍, 8개면, 행정동 16개동으로 전체 면적은 636.07km²이다(천안통계연보). 중앙에 남북을 가로 지르는 차령산맥의 줄기인 태조산(424m)을 중심으로 동·서측으로 지역이 분리되어 있고, 북측지역은 평택평야까지 탁 트인 얽은 구릉성 평지로 이루어져 있다. 식물구계지리학상 한반도 중부아구(Lee and Yim, 1978)에 속하며, 식생의 군계수준에서 냉온대 중부(Yim and Kira, 1975)에 해당한다. 천안시의 기후는 대체로 온난하나 기온의 교차가 비교적 큰 대륙성 기후를 나타내며, 1월 평균기온은 -2.9°C, 8월 평균기온은 25.1°C, 연평균기온은 11.8°C이었으며, 연강수량은 1,226.5mm으로 나타났다(천안기상대, 1980~2010년 평균).

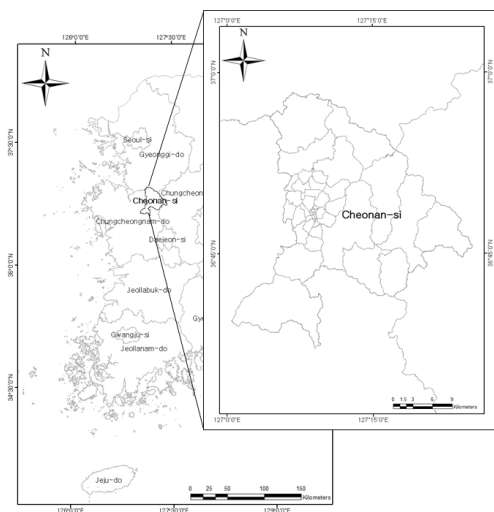


Figure 1. Map of study sites.

2. 기후자료

2.1 현재기후구축

현재의 기후자료는 기상청에서 제공하고 있는 67개 관측소(Figure 2) 최근 30년(1981 ~ 2010년)간의 평균기온을 이용하였으며, 이를 이용하여 남한의 온량지수(WI : Warmth Index) 분포를 구하였다. 온량지수란 식물이 잘 성장하기 위해서는 기준온도 이상의 온도가 일정기간 이상 유지되어야 한다는 개념으로 Kira (1945)가 제안한 기후를 표시하는 지수 중 하나이다. 국내에서 Yim (1977)이 우리나라의 식생분포를 설명하기 위해 사용하였으며, 식물생장의 유효 열량(Effective heat for plant)과 관계가 있다. 온량지수는 5°C보다 높은 월평균 기온의 합으로 계산할 수 있다.

$$WI = \sum_{t=1}^n (t - 5), t > 5^\circ\text{C} \quad t: \text{월평균기온}$$

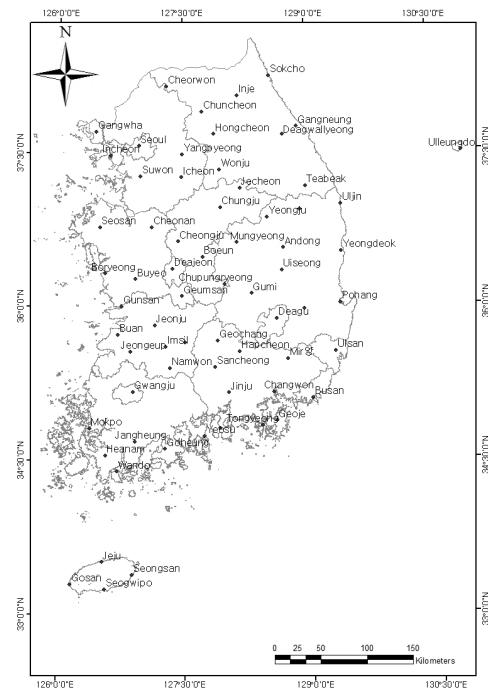


Figure 2. Location of meteorological observation station in South Korea.

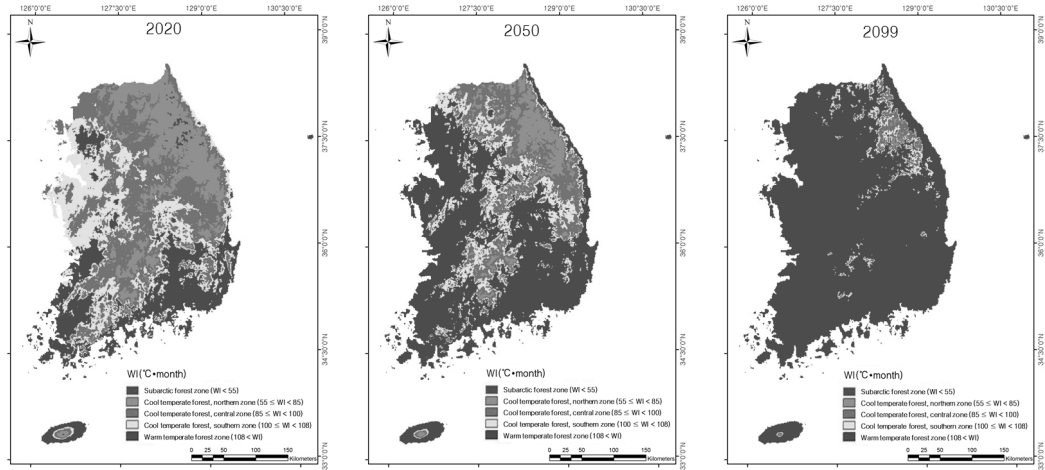


Figure 3. Change in Forest zone of S. Korea according to RCP 8.5 Scenarios.

온량지수에 의한 산림기후대의 구분은 난온대림은 $WI \geq 108^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$, 냉온대 남부림은 $108 > WI \geq 100^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$, 냉온대 중부림은 $100^{\circ}\text{C} \cdot \text{month} > WI \geq 85^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$, 냉온대 북부림은 $85^{\circ}\text{C} \cdot \text{month} > WI \geq 55^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$, 아한대림은 $WI < 55^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$ 로 구분된다 (Yim & Kira, 1975; 양금철, 2001).

2.2 미래기후구축

미래 기후자료는 기상청의 기후변화정보센터 (<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하고 있는 RCP 8.5를 이용한 결과를 ESRI ASCII GRID 형태의 파일을 사용하였다. 남한의 상세자료의 격자 크기는 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 이었으며, 월평균기온을 이용하여 2020년, 2050년, 2099년에 대한 온량지수를 산정하였다(Figure 3).

3. 온량지수 변화에 따른 식물종의 분포분석

우리나라의 자생 식물종은 205과 1,162속 4,961종(Nature 국가생물종 지식정보시스템, <http://www.nature.go.kr>)이 분포하고 있는 것으로 알려졌다. 그 중 식물종의 분포는 Arc GIS 프로그램을 이용하여 국립환경과학원의 전국자연환경조사 통해 조사된 식물종과 생물자원관의 표본 식

물종의 위치정보를 가지고 있는 1,522종에 대하여 분포도를 작성하였다(Figure 4). 작성한 식물종의 분포와 현재 온량지수 분포를 중첩해 1,522종에 대한 온도에 따른 분포특성을 분석하였다.

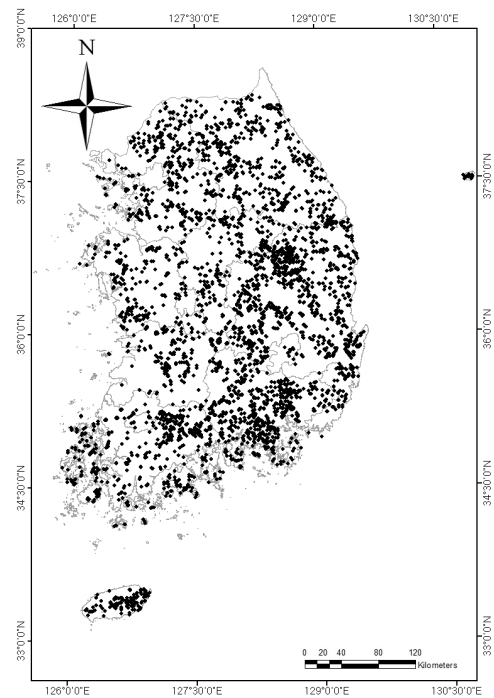


Figure 4. Distribution of 1,522 major plant species.

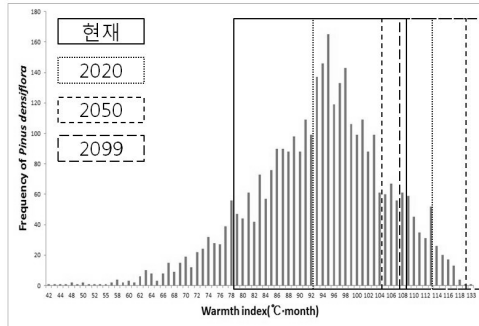


Figure 5. Selection of adaptable plant species according to RCP 8.5 scenarios in Cheonan-Si

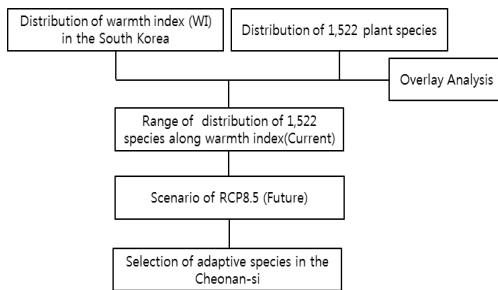


Figure 6. Flow chart of the study.

분석된 1,522종의 온량지수 분포특성에 대하여 천안시의 현재 온량지수 및 기후변화에 따른 2020년, 2050년, 2099년의 온량지수 변화를 중첩하여 천안시에 적응 가능한 식물종을 선정하였다(Figure 5).

앞서 구한 미래기후의 온량지수분포와 식물종별 온량지수분포범위를 비교하여 미래기후에 적절한 식물종에 대해 선정하였다. 연구의 흐름은 Figure 6과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 온량지수에 따른 식물종의 분포특성

최근 30년간의 평균기온으로 산출한 남한의 온량지수 분포는 25~143°C·month의 범위를 가졌으며, 아한대림, 냉온대 북부·중부·남부림, 난온대림의 5개의 산림기후대를 가지는 것으로 나타났다. 남한의 평균 온량지수는 94.2°C·month로 산정되었으며, 평균 온량지수에 의한 산림기후대는 냉온대 중부림에 해당하였다. 우리나라에 분포하고 있는 식물종 중 위치정보를 가진 1,522종 중 100회 이상의 출현빈도를 가지는 식물종은 308종으로 나타났다. 온량지수 분포범위가 넓은 교목성 식물 7종을 살펴보면 Table 1과 같다.

줄참나무의 온량지수의 분포역은 35~134°C·month로 나타났으며, 평균 온량지수는 95.9°C·month로 산정되었고, 냉온대 중부림에서 48%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 남한에서의 줄참나무 우점림의 온량지수 분포역 53~117°C·month, 최적범위 WI 90~

Table 1. Range of distribution of 7 species along Warmth Index (WI).

Species	Frequency	WI(°C·month)			Subarctic forest zone WI<55 (%)	Cool temperate forest			Warm temperate forest zone 108≤WI (%)
		Min	Max	Mean		northern zone 55≤WI<85 (%)	central zone 85≤WI<100 (%)	southern zone 100≤WI<108 (%)	
<i>Quercus serrata</i>	4,283	35	134	95.9	0.3	13.8	48	22.7	15.2
<i>Quercus mongolica</i>	4,215	35	118	84.8	2.9	41.7	44.9	8.5	2
<i>Quercus variabilis</i>	3,866	50	118	93.3	0.1	20	52.4	17.1	10.4
<i>Pinus densiflora</i>	3,374	42	133	93.4	0.4	19.9	50	18.9	10.8
<i>Quercus acutissima</i>	1,723	55	128	98.6	0	5.7	49.7	29.8	14.8
<i>Quercus aliena</i>	1,638	41	118	96.4	0.2	8.9	53.2	25.5	12.2
<i>Quercus dentata</i>	1,240	36	120	91.5	0.2	24.7	51.2	18.1	5.7

Table 2. Change in warmth index of Cheonan-Si according to climate change.

	2010	RCP 8.5 scenarios		
		2020	2050	2099
WI range (°C · month)	77~103	84~109	95~122	122~151
WI average (°C · month)	96.1±4.8	100.6±5.3	112.7±5.7	140.8±6.1
Forest zone	Cool temperate forest, Central zone	Cool temperate forest, Southern zone	Warm temperate forest zone	Warm temperate forest zone

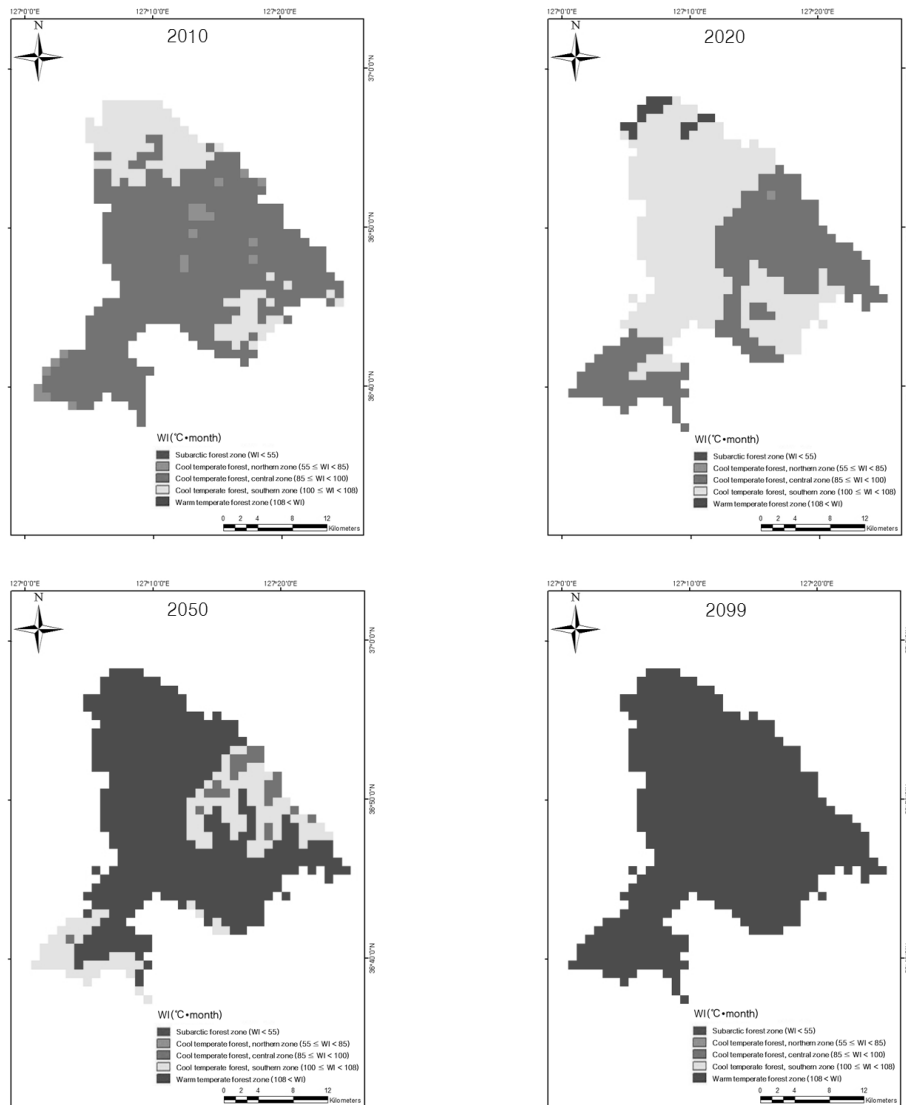


Figure 7. Change in forest zone of Cheonan-Si according to climate change.

105°C · month에서 62.8%로 가장 많이 분포하며, 평균 WI 92°C · month라고 한 양금철(2001)의 연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

굴참나무의 온량지수 분포역은 50~118°C · month의 범위를 가졌으며, 온량지수 85~100°C · month에 해당하는 냉온대 중부림에서 52.4%로 가장 많이 나타났고, 평균 WI는 93.3°C · month로 산정되었다. 양금철(2001)은 굴참나무 우점림의 온량지수 분포역 56~115°C · month 범위를 가지며, 최적범위 90~100°C · month에서 58.3%로 나타났고, 평균 WI 93°C · month라 하였는데 본 연구결과 역시 그 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

소나무의 온량지수 분포는 42~133°C · month의 범위에서 나타났으며, 평균 온량지수는 93.4°C · month로 산정되었고, 산림기후대 중 냉온대 중부림에 해당하는 범위 85~100°C · month에서 50%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 양금철(2001)은 소나무 우점림의 온량지수 분포역이 47~120°C · month의 범위를 가지며, 최적범위는 90~100°C · month에서 58.3%로 나타났고, 평균 WI 93°C · month라 하였는데 본 연구결과와 유사하게 나타났다.

상수리나무의 온량지수 분포범위는 55~128°C · month에서 나타났으며, 산림기후대 중 냉온대 중부림에서 49.7%로 가장 많이 분포하였으며, 평균 온량지수는 98.6°C · month로 산정되었다. 이는 양금철(2001)의 상수리나무 우점림의 온량지수 분포역 56~119°C · month, 최적범위 90~105°C · month, 평균 WI 95°C · month의 결과와 유사하였다.

갈참나무의 경우 온량지수 분포역은 41~118°C · month로 나타났으며, 평균 온량지수는 96.4°C · month로 산정되었고, 냉온대 중부림에서 53.2%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 남한에서 갈참나무 우점림의 온량지수 분포역 60~111°C · month범위를 가졌고, 최적범위 WI 90~100°C · month에서

56.4%로 가장 많이 분포하며, 평균 WI 92°C · month라고 한 양금철(2001)의 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다.

떡갈나무의 온량지수 분포역은 36~120°C · month로 나타났으며, 평균 온량지수는 91.5°C · month로 산정되었고, 산림기후대 중 냉온대 중부림에서 51.2%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 남한에서 떡갈나무 우점림의 온량지수 분포역 58~107°C · month, 최적범위 WI 95~100°C · month에서 21.5%로 가장 많이 분포하며, 평균 WI 88°C · month라고 한 양금철(2001)의 연구 결과와 유사하게 나타났다.

2. 천안시 기후변화

천안시의 온량지수 평균에 따른 산림기후대를 살펴보면 2010년(현재)은 냉온대 중부림에 해당하는 것으로 나타났으며, 온실가스 저감노력 없이 지금과 같은 경제성장을 하였을 때의 시나리오인 RCP 8.5를 이용하여 기후변화에 따른 산림기후대의 변화를 살펴보면 2020년에 냉온대 남부림 2050년과 2099년에는 난온대림에 해당하는 것으로 나타났다(Table 2).

또한 2010년 천안시 지역에 넓은 면적에서 나타나던 냉온대 중부림이 시간이 지남에 따라 점차 감소하고 2099년에는 난온대림으로 변화하는 것으로 예상된다(Figure 7).

3. 기후변화에 따른 천안시 적응 가능한 식물종 선정

현재 식물종의 온량지수 분포와 기후변화에 따른 천안시 온량지수의 변화를 중첩하여 천안시 적응 가능한 식물종을 선정하였다(Table 3). 2010년 현재 천안시 지역 온량지수 분포에 따른 천안시에 적용하여 식재할 수 있는 식물종에는 교목층에 졸참나무, 신갈나무, 굴참나무, 소나무, 상수리나무 등이 나타났으며, 관목층에 생강나무, 개울나무, 산초나무, 진달래, 싸리 등

Table 3. Adaptable species according to climate change in Cheonan-Si.

	2010	2020	2050	2099
Tree layer	<i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus variabilis</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Prunus sargentii</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Styrax japonica</i> , <i>Quercus dentata</i> , <i>Lindera erythrocarpa</i> , <i>Styrax obassia</i> , <i>Fraxinus rhynchophylla</i> , <i>Fraxinus sieboldiana</i> , <i>Sorbus alnifolia</i> , <i>Platycarya strobilacea</i> , <i>Morus bombycis</i> , <i>Diospyros lotus</i> , <i>Potentilla freyniana</i> , <i>Albizia julibrissin</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Prunus leveilleana</i> , <i>Alnus hirsuta</i> , <i>Acer mono</i> , <i>Trachelospermum asiaticum</i> var. <i>intermedium</i> , <i>Cornus kousa</i>	<i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus variabilis</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Styrax japonica</i> , <i>Prunus sargentii</i> , <i>Quercus dentata</i> , <i>Lindera erythrocarpa</i> , <i>Styrax obassia</i> , <i>Fraxinus rhynchophylla</i> , <i>Fraxinus sieboldiana</i> , <i>Platycarya strobilacea</i> , <i>Sorbus alnifolia</i> , <i>Diospyros lotus</i> , <i>Albizia julibrissin</i> , <i>Morus bombycis</i> , <i>Prunus leveilleana</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Alnus hirsuta</i> , <i>Trachelospermum asiaticum</i> var. <i>intermedium</i> , <i>Potentilla freyniana</i> , <i>Cornus kousa</i> , <i>Celtis sinensis</i>	<i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus variabilis</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Styrax japonica</i> , <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Prunus sargentii</i> , <i>Lindera erythrocarpa</i> , <i>Quercus dentata</i> , <i>Platycarya strobilacea</i> , <i>Fraxinus sieboldiana</i> , <i>Sorbus alnifolia</i> , <i>Albizia julibrissin</i> , <i>Diospyros lotus</i> , <i>Fraxinus rhynchophylla</i> , <i>Celtis sinensis</i> , <i>Styrax obassia</i> , <i>Prunus leveilleana</i>	<i>Neolitsea sericea</i> , <i>Machilus thunbergii</i> , <i>Quercus glauca</i> , <i>Celtis sinensis</i> , <i>Camellia japonica</i> , <i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> , <i>Distylium racemosum</i> , <i>Tilia miqueliana</i> , <i>Quercus acuta</i> , <i>Idesia polycarpa</i> , <i>Lozoste lancifolia</i>
Shrub layer	<i>Lindera obtusiloba</i> , <i>Rhus trichocarpa</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Juniperus rigida</i> , <i>Stephanandra incisa</i> , <i>Ligustrum obtusifolium</i> , <i>Atractylodes japonica</i> , <i>Lespedeza maximowiczii</i> , <i>Callicarpa japonica</i> , <i>Rubus crataegifolius</i> , <i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Corylus heterophylla</i> var. <i>thunbergii</i> , <i>Acer pseudo-Sieboldianum</i> , <i>Rhus chinensis</i> , <i>Lindera glauca</i> , <i>Rosa multiflora</i> , <i>Indigofera kirilowii</i> , <i>Weigela subsessilis</i> , <i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i> , <i>Securinega suffruticosa</i> , <i>Viburnum erosum</i> , <i>Euonymus alatus</i> for. <i>ciliato-dentatus</i> , <i>Acer ginnala</i> , <i>Potentilla fragarioides</i> var. <i>major</i> , <i>Lespedeza cyrtobotrya</i> , <i>Clerodendron trichotomum</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> var. <i>ciliatum</i> , <i>Rubus oldhamii</i> , <i>Rubus parvifolius</i> , <i>Viburnum dilatatum</i> , <i>Boehmeria spicata</i> , <i>Corylus heterophylla</i> , <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Spiraea prunifolia</i> for. <i>simpliciflora</i> , <i>Euonymus alatus</i> , <i>Sapium japonicum</i> , <i>Lespedeza x tomentella</i>	<i>Lindera obtusiloba</i> , <i>Rhus trichocarpa</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> , <i>Juniperus rigida</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Ligustrum obtusifolium</i> , <i>Stephanandra incisa</i> , <i>Callicarpa japonica</i> , <i>Atractylodes japonica</i> , <i>Lespedeza maximowiczii</i> , <i>Lindera glauca</i> , <i>Rubus crataegifolius</i> , <i>Rosa multiflora</i> , <i>Corylus heterophylla</i> var. <i>thunbergii</i> , <i>Indigofera kirilowii</i> , <i>Rhus chinensis</i> , <i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Acer pseudo-Sieboldianum</i> , <i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i> , <i>Viburnum erosum</i> , <i>Weigela subsessilis</i> , <i>Euonymus alatus</i> for. <i>ciliato-dentatus</i> , <i>Securinega suffruticosa</i> , <i>Clerodendron trichotomum</i> , <i>Viburnum dilatatum</i> , <i>Lespedeza cyrtobotrya</i> , <i>Rubus parvifolius</i> , <i>Acer ginnala</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> var. <i>ciliatum</i> , <i>Rubus oldhamii</i> , <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Potentilla fragarioides</i> var. <i>major</i> , <i>Boehmeria spicata</i> , <i>Corylus heterophylla</i> , <i>Sapium japonicum</i> , <i>Euonymus alatus</i> , <i>Spiraea prunifolia</i> for. <i>simpliciflora</i>	<i>Rhus trichocarpa</i> , <i>Lindera obtusiloba</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> , <i>Juniperus rigida</i> , <i>Ligustrum obtusifolium</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Lindera glauca</i> , <i>Rosa multiflora</i> , <i>Stephanandra incisa</i> , <i>Indigofera kirilowii</i> , <i>Platycarya strobilacea</i> , <i>Lespedeza maximowiczii</i> , <i>Callicarpa japonica</i> , <i>Atractylodes japonica</i> , <i>Rubus crataegifolius</i> , <i>Rhus chinensis</i> , <i>Corylus heterophylla</i> var. <i>thunbergii</i> , <i>Eurya japonica</i> , <i>Viburnum erosum</i> , <i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i> , <i>Rhododendron schlippenbachii</i> , <i>Rubus parvifolius</i> , <i>Rhododendron mucronulatum</i> var. <i>ciliatum</i> , <i>Viburnum dilatatum</i> , <i>Celtis sinensis</i> , <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Weigela subsessilis</i> , <i>Clerodendron trichotomum</i> , <i>Acer pseudo-Sieboldianum</i>	<i>Litsea japonica</i> , <i>Mallotus japonicus</i> , <i>Ficus erecta</i> , <i>Eurya japonica</i> , <i>Ardisia japonica</i> , <i>Ligustrum obtusifolium</i> , <i>Lindera obtusiloba</i> , <i>Ligustrum japonicum</i> , <i>Ardisia crenata</i> , <i>Euonymus japonica</i> , <i>Kadsura japonica</i> , <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Eurya japonica</i> var. <i>aurescens</i> , <i>Rosa multiflora</i> , <i>Cudrania tricuspidata</i>

Table 3. Continued.

	2010	2020	2050	2099
Herb layer	<p><i>Carex lanceolata</i>, <i>Spodiopogon sibiricus</i>, <i>Aster scaber</i>, <i>Artemisia keiskeana</i>, <i>Oplismenus undulatifolius</i>, <i>Symplocos chinensis</i> for. <i>pilosa</i>, <i>Pyrola japonica</i>, <i>Disporum smilacinum</i>, <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>, <i>Polygonatum odoratum</i> var. <i>pluriflorum</i>, <i>Carex humilis</i>, <i>Arundinella hirta</i>, <i>Smilax nipponica</i>, <i>Isodon inflexus</i>, <i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i>, <i>Carex siderosticta</i>, <i>Calamagrostis arundinacea</i>, <i>Chrysanthemum zawadskii</i> var. <i>latilobum</i>, <i>Staphylea bumalda</i>, <i>Commelina communis</i>, <i>Solidago virga-aurea</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Cornus controversa</i>, <i>Phryma leptostachya</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Athyrium yokoscense</i>, <i>Viola dissecta</i> var. <i>chaerophylloides</i>, <i>Youngia denticulata</i>, <i>Syneilesis palmata</i>, <i>Iris rossii</i>, <i>Asarum sieboldii</i>, <i>Dryopteris chinensis</i>, <i>Sedum kamschatcicum</i>, <i>Ainsliaea acerifolia</i>, <i>Melampyrum roseum</i>, <i>Carex ciliato-marginata</i>, <i>Peucedanum terebinthaceum</i>, <i>Smilax riparia</i> var. <i>ussuriensis</i>, <i>Lysimachia clethroides</i>, <i>Cephalanthera longibracteata</i>, <i>Impatiens textori</i>, <i>Astilbe chinensis</i> var. <i>davidii</i>, <i>Viola rossii</i>, <i>Isodon japonica</i>, <i>Asplenium incisum</i>, <i>Spodiopogon cotulifer</i>, <i>Artemisia princeps</i>, <i>Adenophora triphylla</i> var. <i>japonica</i>, <i>Duchesnea chrysantha</i>, <i>Osmunda japonica</i>, <i>Meehania urticifolia</i>, <i>Hosta longipes</i>, <i>Convallaria keiskei</i>, <i>Athyrium niponicum</i></p>	<p><i>Carex lanceolata</i>, <i>Oplismenus undulatifolius</i>, <i>Aster scaber</i>, <i>Spodiopogon sibiricus</i>, <i>Artemisia keiskeana</i>, <i>Pyrola japonica</i>, <i>Symplocos chinensis</i> for. <i>pilosa</i>, <i>Arundinella hirta</i>, <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>, <i>Disporum smilacinum</i>, <i>Carex humilis</i>, <i>Polygonatum odoratum</i> var. <i>pluriflorum</i>, <i>Isodon inflexus</i>, <i>Smilax nipponica</i>, <i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i>, <i>Calamagrostis arundinacea</i>, <i>Commelina communis</i>, <i>Carex siderosticta</i>, <i>Chrysanthemum zawadskii</i> var. <i>latilobum</i>, <i>Staphylea bumalda</i>, <i>Solidago virga-aurea</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Phryma leptostachya</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Cornus controversa</i>, <i>Dryopteris chinensis</i>, <i>Viola dissecta</i> var. <i>chaerophylloides</i>, <i>Youngia denticulata</i>, <i>Athyrium yokoscense</i>, <i>Iris rossii</i>, <i>Sedum kamschatcicum</i>, <i>Carex ciliato-marginata</i>, <i>Syneilesis palmata</i>, <i>Smilax riparia</i> var. <i>ussuriensis</i>, <i>Artemisia princeps</i>, <i>Lysimachia clethroides</i>, <i>Asarum sieboldii</i>, <i>Asplenium incisum</i>, <i>Ainsliaea acerifolia</i>, <i>Spodiopogon cotulifer</i>, <i>Peucedanum terebinthaceum</i>, <i>Melampyrum roseum</i>, <i>Cephalanthera longibracteata</i>, <i>Isodon japonica</i>, <i>Osmunda japonica</i>, <i>Impatiens textori</i>, <i>Duchesnea chrysantha</i></p>	<p><i>Oplismenus undulatifolius</i>, <i>Carex lanceolata</i>, <i>Arundinella hirta</i>, <i>Aster scaber</i>, <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>, <i>Spodiopogon sibiricus</i>, <i>Pyrola japonica</i>, <i>Artemisia keiskeana</i>, <i>Miscanthus sinensis</i> var. <i>purpurascens</i>, <i>Symplocos chinensis</i> for. <i>pilosa</i>, <i>Disporum smilacinum</i>, <i>Carex humilis</i>, <i>Commelina communis</i>, <i>Polygonatum odoratum</i> var. <i>pluriflorum</i>, <i>Calamagrostis arundinacea</i>, <i>Smilax nipponica</i>, <i>Phryma leptostachya</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Staphylea bumalda</i>, <i>Chrysanthemum zawadskii</i> var. <i>latilobum</i>, <i>Solidago virga-aurea</i> var. <i>asiatica</i>, <i>Carex siderosticta</i>, <i>Carex ciliato-marginata</i>, <i>Dryopteris chinensis</i>, <i>Artemisia princeps</i> var. <i>orientalis</i></p>	<p><i>Rumohra aristata</i>, <i>Dryopteris bissetiana</i>, <i>Dryopteris erythrosora</i>, <i>Asplenium incisum</i>, <i>Boehmeria plataniifolia</i>, <i>Dryopteris pacifica</i></p>
Vine	<p><i>Smilax china</i>, <i>Cocculus trilobus</i>, <i>Smilax sieboldii</i>, <i>Parthenocissus tricuspidata</i>, <i>Pueraria thunbergiana</i>, <i>Ampelopsis brevipedunculata</i> var. <i>heterophylla</i>, <i>Lonicera japonica</i>, <i>Celastrus orbiculatus</i>, <i>Rubia akane</i>, <i>Clematis apiifolia</i>, <i>Clematis mandshurica</i>, <i>Hydrangea serrata</i> for. <i>acuminata</i>, <i>Dioscorea batatas</i>, <i>Actinidia arguta</i>, <i>Vitis amurensis</i></p>	<p><i>Smilax china</i>, <i>Cocculus trilobus</i>, <i>Parthenocissus tricuspidata</i>, <i>Smilax sieboldii</i>, <i>Pueraria thunbergiana</i>, <i>Ampelopsis brevipedunculata</i> var. <i>heterophylla</i>, <i>Lonicera japonica</i>, <i>Celastrus orbiculatus</i>, <i>Rubia akane</i>, <i>Clematis apiifolia</i>, <i>Clematis mandshurica</i>, <i>Hydrangea serrata</i> for. <i>acuminata</i>, <i>Dioscorea batatas</i>, <i>Humulus japonicus</i></p>	<p><i>Smilax china</i>, <i>Cocculus trilobus</i>, <i>Parthenocissus tricuspidata</i>, <i>Pueraria thunbergiana</i>, <i>Lonicera japonica</i>, <i>Paederia scandens</i>, <i>Ampelopsis brevipedunculata</i> var. <i>heterophylla</i>, <i>Smilax sieboldii</i>, <i>Celastrus orbiculatus</i>, <i>Zelkova serrata</i>, <i>Clematis apiifolia</i>, <i>Rubia akane</i>, <i>Dioscorea batatas</i></p>	<p><i>Hedera rhombea</i>, <i>Trachelospermum asiaticum</i> var. <i>intermedium</i>, <i>Lemmaphyllum microphyllum</i>, <i>Smilax china</i>, <i>Parthenocissus tricuspidata</i>, <i>Lonicera japonica</i>, <i>Akebia quinata</i>, <i>Celastrus orbiculatus</i>, <i>Paederia scandens</i>, <i>Ampelopsis brevipedunculata</i> var. <i>heterophylla</i>, <i>Clematis apiifolia</i></p>

이 나타났고, 초본층에 그늘사초, 큰기름새, 참취, 맑은대쭉, 주름조개풀 등이 나타났다. 또한 덩굴식물에는 청미래덩굴, 땀땀이덩굴, 청가시덩굴, 담쟁이덩굴, 쑥 등이 나타났다.

기후변화 시나리오에 따른 2020년 천안시 온량지수분포 따른 적응 가능한 식물종에는 교목층에 졸참나무, 굴참나무, 소나무, 신갈나무, 상수리나무 등이 나타났으며, 관목층에 생강나무, 개웃나무, 산초나무, 진달래, 노간주나무 등이 있었고, 초본층에 그늘사초, 주름조개풀, 참취, 큰기름새, 맑은대쭉 등이 나타났다. 덩굴성 종에는 청미래덩굴, 땀땀이덩굴 등이 나타날 것으로 예상된다. 2050년 온량지수에 따른 천안시 적응 가능한 식물종에는 교목층에 졸참나무, 굴참나무, 소나무, 상수리나무, 때죽나무 등이 나타났으며, 관목층에 개웃나무, 생강나무, 산초나무, 진달래, 노간주나무 등이 나타났고, 초본층에 주름조개풀, 그늘사초 등이 나타났으며, 덩굴식물인 청미래덩굴, 땀땀이덩굴, 담쟁이덩굴 등이 나타날 것으로 예측된다. 2050년까지 공통적으로 나타나는 식물종에는 교목층에 졸참나무, 굴참나무, 소나무, 상수리나무 등이 있었으며, 관목층 개웃나무, 생강나무, 산초나무, 진달래 등이 있었고, 초본층에 주름조개풀, 그늘사초, 새, 참취 등이 있으며, 덩굴식물인 청미래덩굴, 땀땀이덩굴, 담쟁이덩굴 등이 공통적으로 나타나 2050년까지 적응하여 살 수 있을 것으로 판단된다.

2099년에는 냉온대림에서 난온대림으로 변화하여 식물종의 대부분은 상록활엽수인 난온대림 식물종이 천안시 지역에 나타날 것으로 예측된다. 따라서 기후변화에 따른 2099년에 적응 가능한 식물종은 교목층에는 참식나무, 후박나무, 종가시나무, 팽나무 등이 나타났으며, 관목층에는 까마귀쪽나무, 예덕나무, 천선과나무 등이 나타났고, 초본층에는 가는최고사리, 족제비고사리, 홍지네고사리 등이 나타났으며, 덩굴식물은 송악, 마삭줄, 콩짜개덩굴 등이 적응하여

출현할 것으로 예측된다.

윤종학 등(2011)에 의하면 난온대 상록활엽수의 실제 분포에서 추출한 유/무의 자료와 4가지 기후변수(온량지수, 최한월 최저기온, 동경강수량, 하계강수량)를 사용하여 현재기후에서 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지는 28,230km²로 예측하였으며, 3종류의 기후변화 시나리오(CCCMA-A2, CSIRO-A2, HADCM3-A2)에서는 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지가 77,140~89,285km² 변화하여 증가할 것으로 예측하였다. 박종철 등(2010)은 기후자료와 지형고도자료를 이용하여 남한의 온량지수 분포도를 작성하고 이를 통하여 지구온난화에 따른 과거 20년(1968~1987), 최근 20년(1988~2007), 미래의 난온대 상록활엽수림대의 이동을 분석하였다. 연구 결과 과거 20년에 비해 최근 20년간 난온대 상록활엽수림대의 면적이 약 2.7배 증가하였으며 미래에는 서해안을 따라 충남 내륙방면으로 넓게 퍼져 북상하고, 동해 해안선을 따라 좁고 길게 북상할 것으로 예측하였다. 그러나 본 연구는 난온대 상록활엽수의 수종을 연구한 것이 아니라 기후변화에 따른 제한된 지역에서 나타날 수 있는 적응 가능한 식물종에 대한 연구이므로 연구대상에 대한 차이가 나타난다. 그렇지만 기후변화에 따라 한반도는 난온대의 상록활엽수림으로 변화하는 것에 대해서 큰 이견이 없을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

IPCC 4차보고서의 기후변화 시나리오 중 온실가스 저감노력 없이 지금과 같은 경제발전을 하였을 때의 시나리오인 RCP 8.5를 이용하여 기후변화에 따른 천안시의 온량지수 변화 및 산림기후대의 변화를 예측하였다. 또한 우리나라에 분포하고 있는 자생 식물 4,961종 중 위치정보를 가지고 있는 1,522종에 대하여 2010년 현재 온량지수에 따른 식물종의 온량지수 분포범

위를 이용하여 천안시의 2010년, 2020년, 2050년, 2099년에 온량지수 분포범위를 중첩하여 적응 가능한 식물종을 선정하였다.

1. 기후변화 시나리오에 따른 천안시 산림기후대의 변화는 냉온대 중부림에서 2099년에 난온대림으로 변화할 것으로 예상된다.

2. 천안시 적응 가능한 식물종 중 2010년부터 2050년까지 공통적으로 적응 가능한 식물종은 교목층에 졸참나무, 굴참나무, 소나무, 신갈나무, 상수리나무를 포함하여 18종이 나타났으며, 관목층에 개웃나무, 생강나무, 산초나무, 진달래를 포함하여 28종이 나타났고, 초본층에 주름조개풀, 그늘사초, 새, 참취를 포함한 24종이 있으며, 덩굴성식물인 청미래덩굴, 땀땀이덩굴을 포함한 12종들이 2050년까지 적응하여 살 수 있을 것으로 판단된다. 2099년에는 냉온대림에서 난온대림으로 변화하여 냉온대 식물종에서 난온대 식물종인 상록활엽수림이 나타날 것으로 예측된다. 따라서 2099년에 적응 가능한 식물종은 교목층에 참식나무, 후박나무, 종가시나무, 팽나무 등이 나타났으며, 관목층에 까마귀쪽나무, 예덕나무, 천선과나무 등이 나타났고, 초본층에 가느쇠고사리, 족제비고사리, 홍지네고사리 등이 나타났으며, 덩굴성 식물은 송악, 마삭줄, 콩짜개덩굴 등이 나타날 것으로 판단된다.

기후변화 시나리오를 이용하여 대상 지역인 천안시의 온량지수 변화 따른 적응 가능한 식물종을 분석하였다. 이는 향후 기후변화 시나리오를 이용하여 각 지역에 적합한 식재 식물종 및 적응 가능한 식물종을 선정하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

인 용 문 헌

- Kang, Hyun-Kyoung and Bang, Kwang-Ja. 2001. Restoration Model of *Quercus mongolica* Community in the Case of Korean National Capital Region. Journal of Korean institute of landscape architecture 28(6):1-15.
- Kim, Kwi-Gon · Cho, Dong-Gil · Kim, Nam-Choon and Min, Byung-Mee. 2000. A Study on the Development of Techniques for Urban Forest Restoration and Management. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 3(1) : 27-37
- Park, Jong-Chul · Yang, Keum-Chul and Jang, Dong-Ho. 2010. The Movement of Evergreen Broad-Leaved Forest Zone in the Warm Temperate Region Due to Climate Change in South Korea. Journal of Climate Research 5(1) : 29-41.
- Sim, Woo Kyung. 1988. Studies on Landscape Planting Design(I) -With Special reference to the Selection of tiles in the Landscape -. Journal of Korean institute of landscape architecture 15(3) : 1-10.
- Byun, Jung-Yeon · Lee, Woo-Kyun · Choi, Sung-Ho · Oh, Su-Hyun · Yoo, Seong-Jin · Kwon, Tae-Sung · Sung, Joo-Han and Woo, Jae-Wook. 2012. Vulnerability Assessment for Forest Ecosystem to Climate Change Based on Spatio-temporal Information. Korean Journal of Remote Sensing 28(1) : 159-169.
- Yang, Keum-Chul. 2001. Classification of Major Habitats Based on the Climatic Conditions and Topographic Features in Korea. Thesis for the Degree of Ph.D. Department of Biology Graduate School Chung-Ang University.
- Yun, Jong-Hak · Katsuhiko Nakao · Park, Chan-Ho · Lee, Byoung-Yoon and Oh, Kyoung-Hee. 2011. Change Prediction for Potential Habitats of Warm-temperate Evergreen Broad-leaved Trees in Korea by Climate Change. Kor. J. Env. Eco. 25(4) : 590-600.
- Lee, Kyong-Jae · Cho, Woo and Han, Bong-Ho. 1996. Restoration and Status of Urban Ecosystem in Seoul(1)-Plant Community Structure in

- Forest Area-. *Kor. J. Env. Eco.* 10(1) : 137-127.
- Hough, M. 1983. *City from and natural process.* Croom Helm, London, 281p.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007 : Synthesis Report.* IPCC Fourth Assessment Report. Geneva, Switzerland, 104p.
- Kira, T. 1945. *A new Classification of Climate in Eastern Asia as the basis for Agricultural Geography.* Horticultural Institute. Kyoto Univ, Kyoto.
- Lee, W. T. and Yim, Y. J. 1978. *Studies on the distribution of vascular plants in the Korean Peninsula.* *Korean J. Pl. Taxon.* 8, Supplement : 1-33.
- Suh, M. S. · Lee, J. R. · Kang, J. H. · Lee, D. K. and Ahn, M. H. 2005. *On the relationship between seasonal change of vegetation and climate elements in East Asia, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 41(4) : 557-570.
- Yim, Y. J. 1977. *Distribution of Forest Vegetation and Climate in the Korean Peninsula III. Distribution of Tree Species Along the Thermal Gradient.* *Japanses Journal of Ecology* 27 : 177-189.
- Yim, Y. J. and T. Kira. 1975. *Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. I. Distribution of some indices of thermal climate.* *Japanese J. Ecol.* 25 : 77-88.