

LiDAR 자료를 이용한 산림 CO₂ 흡수량 산출 연구

Study of CO₂ Absorption in Forest by Airborn LiDAR Data

고신영* · 박정기** · 조기성***
Go, Sin Young · Park, Jung Gi · Cho, Gi Sung

要 旨

산림지역에서 이산화탄소흡수량 산출을 위해서는 현지산림조사와 영상정보 등의 원격탐사 자료를 이용함으로써 흉고직경이나 수고와 같은 산림 탄소흡수량 추정에 필요한 기본자료를 정량적으로 수집하여 활용한다. 그러나 여전히 현장조사의 비중이 높고 혼효림이 많은 국내 산림 여건상 취득된 산림정보의 정확도가 낮은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 LiDAR 자료를 이용하여 경사기반 영역확장법을 적용하여 수목의 수직적 구조를 파악하고 수목 정점추출 알고리즘을 통한 개체목의 수고 및 개체수를 파악하여 이를 현장조사를 통한 자료로부터 도출된 수고-흉고직경 관계식에 대입하여 정량적인 이산화탄소흡수량 산출에 필요한 기본데이터를 산출 할 수 있었다. 또한 총 3종류의 수목에 대한 이산화탄소흡수량을 계산하고 단위면적당 이산화탄소흡수량을 추정할 수 있었다.

핵심용어 : 산림지역, 이산화탄소, LiDAR, 수고, 흉고직경

Abstract

Generally, Calculation of carbon dioxide absorption in the forest area is calculated using the information of the forest, such as tree height and DBH(Diameter of Breast Height). Tree height and DBH of these are obtained using the remote sensing data such as imagery and information of local forest survey. However, Mixed forest with a high proportion of field survey to lower the accuracy of forest information. In this study, vertical structure of the tree were identified by applying region growing method based on the slope using LiDAR data and height and number of the tree were identified by applying extracting top of the tree algorithm. Through the vertex tree extraction algorithm to identify height of tree and the number of individuals, substitute this for the DBH relation formula which is drawn from data through field surveys. In this, a quantitative calculation of carbon dioxide absorption were able to calculate the basic data. Also, carbon dioxide absorption of three type trees were calculated and average per unit area of carbon dioxide absorption were able to estimate.

Keywords : Forest Carbon Dioxid, LiDAR, Tree Height, DBH(Diameter at breast height)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 지구온난화에 대한 관심이 고조되면서 과거 산업혁명을 통해 온실가스 배출의 역사적 책임이 있는 선진국을 중심으로 온실가스 감축의무를 규정한 교토의정서가 2005년에 발효되었다. 이에 따라 각국은 온실가스 감축에 대한 다각적인 노력을 하고 있고 탄소배출권시장의 규모도 확대 되고 있는 추세이다.

이와 관련하여 유일한 이산화탄소 흡수원인 산림자원의 축적과 생장 정보의 체계적인 획득 및 관리의 중요성이 높아지고 있다. 특히 전 국토의 65% 이상을 산림이 차지하는 우리나라는 세계 10위 온실가스 배출국으로서 탄소배출량을 조절해야 하는 시점에 임목의 축적과 생장을 파악할 수 있는 정확한 측정 기술은 환경적인 측면과 자국의 경제적 이익에 직결된 중요한 기술이라 할 수 있다(Son, 2009).

우리나라에서는 제5차국가산림자원조사에서 전국을

2013년 8월 7일 접수, 2013년 11월 2일 수정, 2013년 12월 9일 채택

* 정회원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정(Member, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, road001@chol.com)

** 정회원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정(Member, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, gosinqq@jbnu.ac.kr)

*** 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 교수, 공업기술연구센터(Corresponding author, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, gscho@jbnu.ac.kr)

4km 단위의 격자로 구분하고 교차점에 표본점을 배치하여 산림정보를 수집하고 있다. 전국규모로 수집되는 표본점 자료와 산림 바이오매스 전환계수와 탄소전환계수를 이용함으로써 표본점별 산림 바이오매스 및 탄소흡수량 산출이 가능하다. 그러나 전국 규모로 시행되는 국가산림자원조사는 소면적 시군구의 경우 표본비율이 낮기 때문에 정확도 확보에 한계가 있으며 표본점 조사가 이루어지지 않은 지점에 대해서는 산림 정보의 공간적 분포현황을 제공하지 못하기 때문에 미조사 지점에 대해서는 일반적으로 다양한 부가정보를 이용한 내삽기법의 적용을 통하여 대상 지점의 산림정보를 추정하는데 그치고 있다(Choi, 2012).

정확한 산림정보 추출을 통한 산림의 탄소흡수량 추정을 위해서는 수목의 수직분포 등에 대한 정확한 3차원 정보취득이 필수적이다. 이와 같은 3차원 정보 취득을 위해서는 LiDAR 시스템을 도입한 3차원 자료취득이 매우 용이하다. LiDAR 자료를 활용하는 경우 수목의 수직적 구조분석에 의한 구성요소별 산림 탄소흡수량의 추정이 가능하기 때문에 이를 적용하고자 하는 노력이 다각도로 시도된 사례가 있다.

특히 VCM(Vegetation Cover Maps)과 NVS(National Vegetation Survey)를 이용하여 산림과 관목의 바이오매스를 산출하고 수종별 탄소 바이오매스 저장고를 추정 연구(Chhabra, 2000)가 있었으며 LiDAR 데이터에서 지면점과 비지면점으로 분류하고 심한 곡률이 일어나는 부분을 비교 삭제함으로써 산림지역에서 수목만은 제거하는 Despiking 알고리즘을 제시한 연구가 있었으며(Haugerud, 2001) 미국 pine tree를 대상으로 LiDAR 데이터와 회귀모델을 이용하여 지상부 바이오매스를 추정하는 연구를 수행하였다(Popescu, 2008). 또한 LiDAR 데이터와 DCM(Digital Canopy Model)을 이용하여 개체목을 분할하고 watershed segmentation 방법으로 수고를 측정하고 다음 측정된 수고와 현지조사의 실측치를 비교하여 정확도를 검증연구가 진행되었다(Jeong, 2009).

앞선 선행연구에서는 LiDAR 데이터를 이용한 산림 이산화탄소 흡수량 산출을 위한 개별 개체목 분류 및 산림 인자를 추정함으로써 산림이산화탄소 흡수량을 산출하는 연구가 진행되었다. 그러나 이들 연구에서는 수목의 임상경계 및 수직구조를 추출하는 것은 어려운 일이었으며 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 경사기반 영역확장법과 수고정점추출 알고리즘을 적용함으로써 해당 문제를 해결하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 연구방법을 설정하고 먼저 LiDAR 자료에 경사기반 영역확장법을 적용하

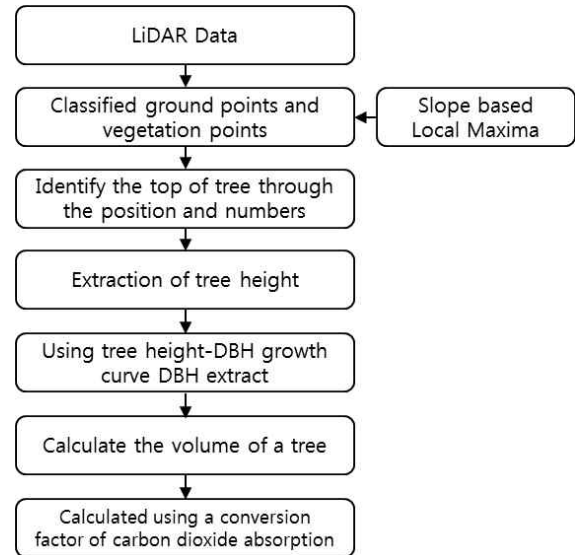


Figure 1. The Flow of the study

여 산림지역의 식생점 분류를 수행하고 수목의 형태적 특성을 이용하여 수목정점 추출 알고리즘을 적용하여 수목의 개체수 및 수고를 추출하였다. 또한 현장 조사 자료로 추정된 흉고직경-수고 관계식 도출을 통해 대상 지역 수목의 흉고직경을 간접적으로 계산하였다. 최종적으로 수고와 흉고직경 등을 이용하여 수목의 이산화탄소흡수량을 추정하였다. 이에 본 논문의 구성은 경사기반 영역확장법과 수목정점추출 알고리즘에 대한 설명과 수목정보를 이용한 산림이산화탄소 흡수량 산출 과정을 설명하고 이를 대상영역에 적용한 결과로 구성되어 있다.

2. 수목정보 추출

2.1 식생점 분류 및 수고 추출

산림지역의 LiDAR 자료를 활용하여 이산화탄소흡수량 추정을 위해서 지면점과 식생점의 분류가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 대상지역의 지면의 경사도를 먼저 조사하고 이 경사도를 기준으로 LiDAR 자료의 점간 거리와 표고차를 통한 경사도를 계산하여 지면의 경사도와 비교하고 지면점을 분류하는 작업을 수행하였다. 그러나 기복을 갖는 산림의 특성상 Fig. 2와 같이 높은 표고를 갖는 지면점과 낮은 지면 표고에 위치한 수목점 간의 경사도 계산을 수행하여 수목점이 지면적으로 분류되는 문제점이 발생할 수 있다. 또한 대상지역의 모든 점들을 기반으로 경사도 분석을 수행할 경우 주어진 점의 개수만큼 많은 계산을 수행해야 하므로 시간적 효율성이 감소하는 문제점이 발생하게

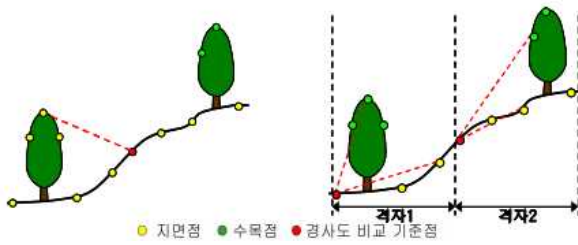


Figure 2. Grid partitioning process

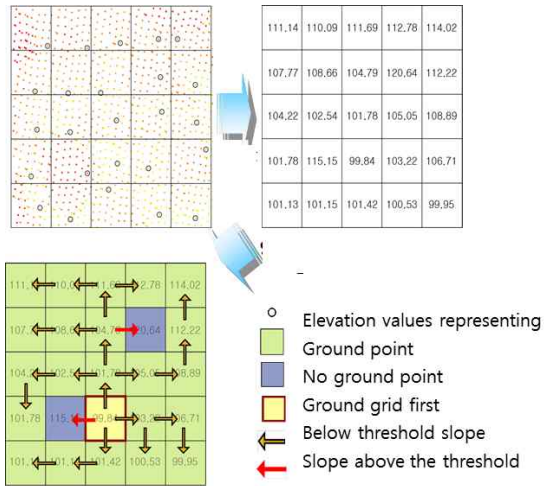


Figure 3. Classification using the slope-based region growing method

된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 산림지역 수목의 평균수간의 크기를 고려하여 격자크기를 정하고 다수의 점자료를 하나의 지역으로 선정하여 분할된 격자 마다 지면점과 식생점 분류를 위한 경사도 기준을 계산하도록 하였다.

또한 수목의 구조 중 수관(Tree Crown)이 대체적으로 원추형을 형성하고 있는 형태학적 특성을 고려하여 (Felix Morsdorf, 2004) Fig. 4와 같은 과정을 통해 수목의 수고 및 개채수를 추출하였다. 먼저 수관의 폭을 고려한 검색반경을 설정하고 Fig. 5와 같이 분류된 임의의 식생점을 기준으로 설정된 검색 반경내의 점자료를 검색한다. 그리고 검색 기준점과 검색된 식생점들을 대상으로 표고 비교를 수행하여 검색 기준점이 반경내 식생점들의 표고보다 높을 경우 이를 수목 정점으로 설정한다. 그러나 반경내 식생점이 검색 기준점의 표고보다 높은 값이 검색되면 다음 임의의 식생점을 검색 기준점으로 하여 다시 표고 비교를 수행한다. 이와 같은 표고 비교를 모든 점에 대하여 수행 한 후 수목의 점점과 수목의 개채수를 파악할 수 있다.

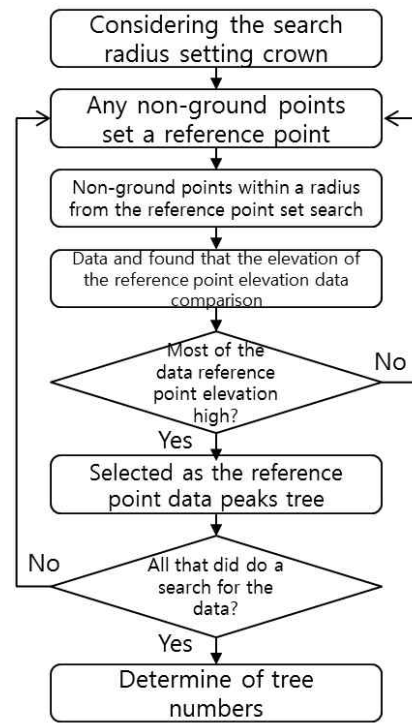


Figure 4. Tree high extraction flowchart

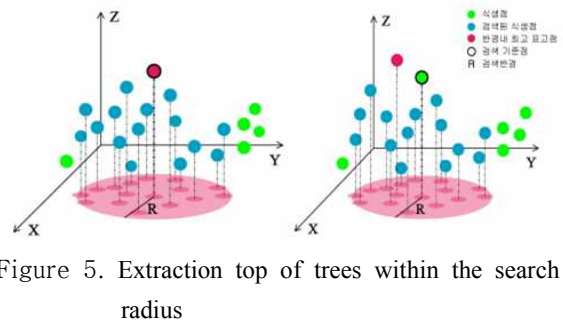


Figure 5. Extraction top of trees within the search radius

2.2 흉고직경 추정

본 연구에서는 표본조사를 통해 수고와 흉고직경 (DBH: Diameter at breast height) 모두 측정한 수목 자료를 모아 흉고직경-수고 회귀식을 작성하고 이 식에 근거하여 흉고직경 미측정 수목에 대한 흉고직경을 추정하는 방법을 사용하였다.

Table 1은 비선형 회귀식을 나타내고 있으며 이중 본 연구에서는 침활엽수 모두 적용이 가능하고 가장 좋은 결과를 나타내는 6번째 식을 이용하였으며(Kwak, 2005) 회귀분석을 통해 추정된 함수식에 LiDAR 자료에서 추출된 수고정보를 대입하여 흉고직경을 간접적으로 계산하였다.

Table 1. DBH-High curve function

No	Function
1	$DBH = a \cdot H^b \cdot c^H$
2	$DBH = a \cdot H$
3	$DBH = a \cdot e^{h \cdot H}$
4	$DBH = e^{a-bH}$
5	$DBH = a \cdot e^{\frac{b}{H}}$
6	$DBH = a \cdot b^H$

(a,b,c :parameter, DBH:흉고직경(cm), H:수고(m), e:exponential)

Table 2. Calculated coefficient of carbon dioxide absorption

Tree species	Expansion coefficient		Basic density (kg/m ³)	CF
	Ground	Under ground		
Larch	1.29	1.28	0.56	0.478
Oak	1.22	1.41	0.78	0.488
Pitch Pine	1.29	1.28	0.49	0.510

2.3 산림 이산화탄소 흡수량 산출 과정

이산화탄소흡수량 산출은 식(1)에서와 같이 산림청에서 지정한 규정에 따라 수목의 수고와 흉고직경을 이용하여 수목 줄기의 형태학적 특성을 고려한 흉고형수를 적용하여 수목의 줄기재적을 계산하고 이에 수목의 지상부와 지하부의 확장계수를 적용하여 수목의 총 부피를 계산 하였다. 최종적으로 식(2)와 같이 수종에 따른 목재기본밀도 및 탄소전환계수(CF: Carbon Fraction)를 각각 적용하여 수종에 따른 이산화탄소흡수량을 계산하였다(Korea Forest Service, 2008).

$$Vol(m^3) = \frac{\pi}{4} \times DBH \times 수고 \times 흉고형수 \quad (1)$$

$$CO_2 Abs(kg/m^3) = Vol \times 기본밀도 \times 확장계수 \times CF \quad (2)$$

본 연구에서는 표본지역 내 수종에 맞는 이산화탄소 흡수량 산출계수를 Table 2와 같이 선택하였다.

3. 적용 및 고찰

3.1 연구대상지역 현장조사

본 연구의 연구대상지역은 대전시 일원으로 북위 36도 20분, 동경 127도 19분에 위치하며, 행정구역으로

는 대전시 유성구, 서구에 걸쳐 있다. 또한 Fig. 6과 같이 수종이 서로 다른 지역을 선택하여 수종에 따른 이산화탄소흡수량 산정을 비교 분석 하였다.

Fig. 7은 대상지역 항공 LiDAR자료를 나타내고 있으며 2007년 4월에 촬영된 자료로 약 3 points/m²의 점 밀도로 취득되었다.

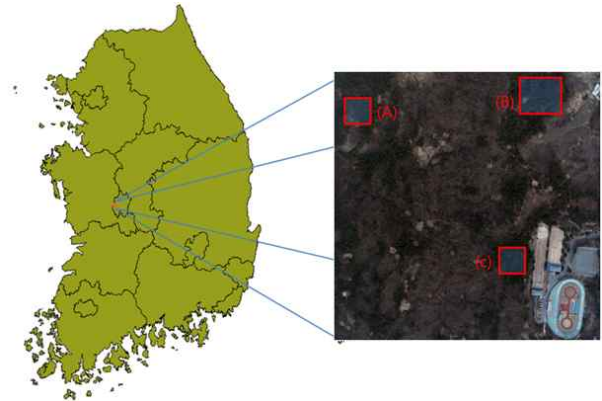


Figure 6. The study area

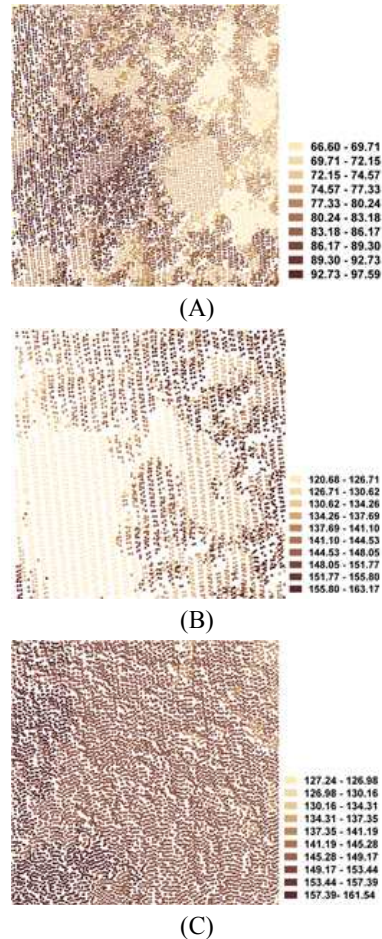


Figure 7. Sample area LiDAR data

Table 3. Count of Field Survey

	A	B	C
Tree species	Larch	Oak	Pitch Pine
Count	63	139	64
Space(m ²)	50×50	80×70	50×50

Table 4. DBH & Tree High of Field Survey

	Larch		Oak		Pitch Pine	
	High (m)	DBH (cm)	High (m)	DBH (cm)	High (m)	DBH (cm)
1	16.3	28.5	10.8	21.5	24.3	35.0
2	16.4	28.9	13.5	27.0	22.6	32.1
3	15.4	28.0	14.2	29.8	18.4	26.5
4	16.1	28.5	14.0	29.8	17.5	25.1
5	15.7	27.0	12.5	25.0	18.9	27.5
6	16.6	29.5	15.7	32.3	18.5	26.5
7	17.5	30.5	17.1	38.5	9.3	16.9
8	17.5	31.5	17.5	41.5	16.1	23.6
9			18.9	45.0		
10			17.1	37.8		
11			15.7	32.2		
12			15.9	35.5		
13			16.7	36.2		
14			15.1	31.5		
15			16.7	35.8		
16			15.0	31.2		

수목의 개체수 및 흉고직경-수고 회귀식 작성을 위한 현장조사는 표본지역을 사각형의 조사구로 하여 수목 정보를 수집하였다. 표본지역 내에 존재하는 수목의 개체수는 Table 3과 같다.

또한 수목의 수고와 흉고직경은 GPS를 이용하여 대상지역내 수목 중 표본지역의 일부에 치우치지 않고 관측이 용이한 수목을 표본수목으로 선정하였으며 면적을 고려하여 낙엽송지역 8본, 참나무지역 16본 리기다 소나무지역 8본의 표본 수목정보를 측정하였다.

3.2 식생점 분류 및 수목정보 추출 결과

식생점 분류를 위해 먼저 대상지역 LiDAR 자료를 격자형식으로 분할하여야 한다. 본 연구에서는 항공사진을 육안으로 판독을 통한 대상지 수목의 평균 수관폭을 고려하여 결정하였으며 분할 격자크기를 5m로 설정하였다. 분할된 LiDAR 자료를 본 연구에서 제안한 경사기반 영역확장법 알고리즘에 적용하였으며 분류된 식생점을 검색반경내 표고비교를 통한 수목의 개체수와 수고를 계산하였다. Fig. 8은 식생점 분류와 수목의 정점 추출을 나타내고 있다.

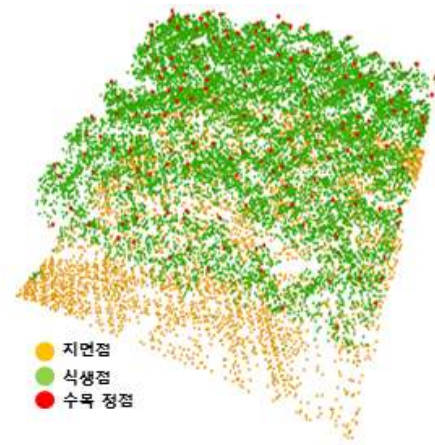


Figure 8. Tree Top Classification

Table 5. Count comparison of LiDAR & Field Survey

Tree species	LiDAR	Field Survey	Accuracy (%)
Larch	58	63	92.1
Oak	132	139	94.9
Pitch Pine	62	64	96.7

Table 5는 본 연구에 적용한 알고리즘 수행결과와 현장에서 측정한 수목의 개체수를 대상지별로 비교 분석한 결과이다. 수목정점 추출 알고리즘을 수행하여 수목의 개체수와 실제 측정값을 비교한 결과 평균 94.5%의 정확도를 나타내었다. 수목 개체수 파악 시 오차의 원인은 Fig. 9와 같이 수목의 정점 파악 시 평균 수관폭을 검색반경으로 설정하여 알고리즘을 수행할 때 특정 개체목이 서로 매우 근접해 있을 경우 낮은 높이의



Figure 9. Errors due to adjacent trees

수목이 높은 높이의 수목을 기준으로 하나의 수목으로 인식되는 문제점을 발견할 수 있었다.

3.3 흉고직경 추정 결과

현장조사 결과인 Table 4를 바탕으로 대상지역 표본 수목의 흉고직경과 수고자료를 이용하여 Table 6과 같이 3종류의 수종별 흉고직경-수고 관계식을 도출 하였다. 도출된 회귀식에 수고정점 추출 알고리즘을 적용하여 계산된 LiDAR 자료의 수목 정보를 대입하여 간접적으로 대상지역 모든 수목의 흉고직경을 계산하였다. Table 7~9는 수종별 수고와 흉고직경을 현장측량을 통한 수고와 비교한 값을 나타내고 있다.

수종별 현장 측량값과 알고리즘에 의해 계산된 수고의 차이값이 평균 0.3~0.6m의 차이로 현지측정값보다 낮게 추출되었으나 산림입분계적측정방법 중 표본조사법(Korea Forest service, 2008)에서 수고 측정오차 ±1m 의 기준으로 볼 때 양호한 결과를 나타냈음을 알 수 있었다. 또한 이와 같은 결과의 원인으로 취득된 LiDAR 자료의 점밀도가 3 points/m²인 반면 수목의 정점은 협소하여 취득된 LiDAR 자료가 수목 정점 표고를 반영하지 못하였으며 수목정점 추출 알고리즘 수행 시 수목의 정점 표고보다 낮은 수목상의 점자료를 수목 정점의 표고로 계산하였기 때문이다.

Table 6. Type of DBH-High curve function

Tree species	Function
Larch	$DBH = 13.418 \cdot 1.0475^h$
Oak	$DBH = 8.052 \cdot 1.098^h$
Pitch Pine	$DBH = 10.957 \cdot 1.0491^h$

Table 7. Comparison of Larch tree height and DBH

	Heigh (m)			DBH (cm)		
	LiDAR	Survey	Differe nce	LiDAR	Survey	Differe nce
1	15.6	16.3	0.7	27.6	28.5	0.9
	16.0	16.4	0.4	28.2	28.9	0.7
3	15.2	15.4	0.2	27.1	28.0	0.9
4	15.5	16.1	0.6	27.6	28.5	0.9
5	14.8	15.7	0.9	26.7	27.0	0.3
6	16.5	16.6	0.1	28.9	29.5	0.6
7	17.1	17.5	0.4	29.7	30.5	0.8
8	17.3	17.5	0.2	29.9	31.5	1.6
Mean	16.0	16.4	0.4	28.2	29.1	0.9

Table 8. Comparison of Oak tree height and DBH

	Heigh (m)			DBH (cm)		
	LiDAR	Survey	Differe nce	LiDAR	Survey	Differe nce
1	10.3	10.8	0.5	21.2	21.5	0.3
2	12.9	13.5	0.6	26.9	27.0	0.1
3	13.9	14.2	0.3	29.6	29.8	0.2
4	13.7	14.0	0.3	29.0	29.8	0.8
5	11.8	12.5	0.7	24.3	25.0	0.7
6	14.8	15.7	0.9	32.2	32.3	0.1
7	16.7	17.1	0.4	28.2	38.5	0.3
8	17.4	17.5	0.1	41.0	41.5	0.5
9	18.2	18.9	0.7	44.1	45.0	0.9
10	16.5	17.1	0.6	37.6	37.8	0.2
11	14.7	15.7	1	31.8	32.2	0.4
12	15.8	15.9	0.1	35.4	35.5	0.1
13	16.0	16.7	0.7	36.0	36.2	0.2
14	14.5	15.1	0.6	31.1	31.5	0.4
15	15.9	16.7	0.8	35.7	35.8	0.1
16	14.2	15.0	0.8	30.5	31.2	0.7
Mean	14.8	15.4	0.6	32.8	33.2	0.4

Table 9. Comparison of Pitch Pine tree height and DBH

	Heigh (m)			DBH (cm)		
	LiDAR	Survey	Differe nce	LiDAR	Survey	Differe nce
1	24.2	24.3	0.1	34.9	35.0	0.1
2	22.4	22.6	0.2	32.0	32.1	0.1
3	18.2	18.4	0.2	26.2	26.5	0.3
4	16.9	17.5	0.6	24.6	25.1	0.5
5	18.8	18.9	0.1	27.0	27.5	0.5
6	18.0	18.5	0.5	26.0	26.5	0.5
7	8.7	9.3	0.6	16.6	16.9	0.3
8	15.7	16.1	0.4	23.2	23.6	0.4
Mean	17.9	18.2	0.3	26.3	26.7	0.4

3.4 이산화탄소 흡수량 산출 결과

앞선 2절에 제시한 산림 수목정보 및 이산화탄소흡수량 추정과정을 바탕으로 수목의 전체 바이오매스를 산출한 후 이에 탄소전환계수를 적용함으로써 수종별 이산화탄소흡수량을 얻을 수 있었다. 이산화탄소흡수량 추정과정을 통해 얻어진 적용 대상지의 수종별 이산화탄소흡수량 분석결과 평균 이산화탄소흡수량은 Table 10과 같은 결과로 계산되었다.

Table 10. Carbon dioxide absorption by species calculated results

Tree species	Mean Biomass (kg/m ³)	Mean CO ₂ abs (kg/m ³)
Larch	0.3427	0.1638
Oak	0.6362	0.3106
Pitch Pine	0.2375	0.1210

4. 결 론

본 연구는 산림지역에서 LiDAR 자료를 경사기반 영역확장법과 수고정점추출 알고리즘을 이용하여 수목 수고 및 개체수를 파악하고 이를 흉고직경-수고 회귀식을 통해 대상지역 산림의 이산화탄소흡수량 산출을 위한 연구로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

LiDAR 자료에 경사도기반 영역확장법 분류를 적용하여 지면점과 식생점을 분류하였으며 수목의 정점추출 알고리즘을 적용하여 표본지역내 수목의 개체수를 파악 한 결과 평균 94.5%의 정확도를 보였으나 LiDAR 자료의 낮은 점밀도로 인해 수목의 정점 파악 시 평균 수관 폭을 검색반경으로 설정하여 알고리즘을 수행할 때 특정 개체목이 서로 매우 근접해 있을 경우 낮은 높이의 수목이 높은 높이의 수목을 기준으로 하나의 수목으로 인식되는 문제점을 발견할 수 있었다.

수목 정점 알고리즘에 의해 계산된 수고와 실제 측정된 수고를 비교한 결과 평균 0.3~0.6m의 차이로 임분재적측정규정의 수고 오차한계내로서 양호함을 알 수 있었지만 수목의 정점 표고를 정확히 반영하지 못하는 한계를 알 수 있었다.

또한 수목에서 추출된 수목정보를 이용하여 수종별 인자값을 적용함으로써 평균 및 단위면적당 이산화탄소흡수량을 정량적으로 계산하였고 이들 결과를 통해 비교적 접근이 어려운 산림지역에서의 이산화탄소흡수량 산출에 효과적일 것으로 사료된다.

향후 다중시기의 고해상도 영상자료와 LiDAR 자료를 이용하여 산림지역의 변화탐지 및 식생분류를 통한 보다 정확한 산림이산화탄소흡수량 산출 연구를 수행할 계획이다.

References

1. Chhabra, A., PALRIA, S. and Dadhwal, V. K, 2000, Growing stock-based forest biomass estimate for India, Biomass and Bioenergy, Vol. 22, pp. 187-194.
2. Choi, Ko Mi, 2012, Analysis of forest health monitoring using national forest inventory data in korea, Journal of Korean Forest Society Conference, pp. 645-648.
3. Choi, Yeon Woong, 2005, The building segmentation using entropy theory from LIDAR data, Chonbuk University.
4. Felix, M., Erich, M., Benjamin, K., Klaus, I. I., Matthias, D., Britta, A., 2004, LiDAR-based grometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management, Vol. 92, pp. 353-362.
5. Haugerud, R. A. and Harding, D. J, 2001, Some algorithms for virtual deforestation of LiDAR topographic survey data, International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences, Vol. 34, pp.3-4.
6. Jeong, Sung Eun, 2009, Estimating Crown Volume of Individual Trees using Aerial LiDAR and Terrestrial Laser Scanner, Korea University.
7. Korea Forest Service, 2008, Forests and forestry technology.
8. Kwak, Doo Ahn, Lee, Woo Kyun, Son, Min Ho, 2005, Application of LiDAR for measuring individual trees and forest stands, Journal of Korean Forest Society, Vol. 94, No. 6, pp. 431-440.
9. Popescu, S. C. and Zhao, K., 2008, A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine trees, Remote sensing of environment, Vol. 112, No. 3.
10. Son, Young Mo, 2009, Development of pine carbon emission factor, Korea Forest Research Institute.