

개량형탄화로를 이용한 제탄과정 중 탄화로 내·외벽 온도변화 및 목탄 특성*¹

권 구 중*² · 권 성 민*² · 장 재 혁*² · 황 원 중*³ · 김 남 훈*^{2†}

Charcoal Properties and Temperature Change of a Kiln's Inner and Outer Walls in Carbonization Process Using an Improved Kiln *¹

Gu-Joong Kwon*² · Sung-Min Kwon*² · Jae-Hyuk Jang*² ·
Won-Joung Hwang*³ · Nam-Hun Kim*^{2†}

요 약

본 연구는 개량형 탄화로를 이용하여 제탄과정 중 탄화로 내·외벽체의 온도변화를 측정하고, 제탄된 목탄의 특성을 조사하였다. 공시탄화로의 탄화과정은 8일정도 소요되었다. 탄재탄화시 탄화로 내부온도는 720°C 정도였고, 정련단계에 이르기까지 탄화로 내부온도는 점점 증가하여 정련단계에서는 1,000°C 이상의 고온에 달하였다. 연통부는 착화시 90°C였고, 서서히 증가되어 정련단계에서는 750°C까지 상승하였다. 이 때 탄화로 벽체의 온도변화는 제탄과정 중의 탄화로 내부의 온도변화 경과곡선과 비슷한 경향을 보여주었다. 제탄과정에서 나타난 탄화로 벽체의 최고 온도는 500°C 정도였다. 적외선 열화상카메라를 이용하여 제탄된 탄화로의 내·외벽체의 온도분포를 측정된 결과, 출탄 후 시간이 다소 경과되어도 상당한 양의 잠열이 탄화로 벽체와 천장에서 감지되었다. 출탄된 목탄의 고정탄소는 85.9~89.9%였다. 정련도는 1, 경도는 12, 발열량은 7,047~7,456 kcal/kg, pH는 9.0~9.9였다. 목탄의 수탄율은 13.8% 정도로 기존의 탄화로에 얻어진 수탄율 9.8~12.3%에 비해 1.5% 정도 향상되었다.

*¹ 접수 2011년 3월 17일, 채택 2011년 5월 2일

*² 강원대학교 산림환경과학대학. College of Forest & Environmental Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea

*³ 국립산림과학원 녹색자원이용부 환경소재공학과. Div. of Environmental Wooden Material Engineering, Dept. of Green Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-172, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김남훈(e-mail: kimnh@kangwon.ac.kr)

ABSTRACT

The study was performed to investigate the characteristics of charcoal and temperature change of a kiln's inner and outer walls in carbonization process using improved kiln. In this kiln system, carbonization process was completed in eight days. In the kiln, the ignition temperature was kept about 720°C. And then the temperature were increased gradually prior to be refined. Finally, the temperature in refining process was reached to maximum point, 1,000°C. In the chimney, the temperature was increased gradually from 90°C at ignition to 750°C at refining. The temperature change of the kiln wall resembles a temperature change progress curve during a carbonization process. The highest temperature of the kiln wall that appeared by a carbonization process was around 500°C. As a result of having measured an inner wall and the outer wall of the kiln using an infrared thermography camera, it was judged with there being considerable latent heat on kiln wall and ceiling. Fixed carbon contented of charcoal was 85.9~89.9%. Refining degree of charcoal, hardness, calorific value and pH were 1, 12, 7,047~7,456 kcal/kg, 9.0~9.9, respectively. The yield of wood charcoal was 13.8%, and compared to conventional kiln's yield increased 15%.

Keywords: charcoal, kiln structure, temperature in carbonization process, charcoal yield, waste heat

1. 서 론

현재 화석에너지 고갈과 지구온난화 문제를 해결하기 위해 환경 부하가 적은 에너지를 개발하여 이용하고자 하는 전략을 추구하고 있다. 그 에너지로서 태양광, 풍력, 바이오매스 등 이른바 “신재생에너지” 이용이 주목을 받고 있다. 이 중 에너지로 이용할 때 자연조건에 좌우되지 않고, 원료를 안정적으로 공급할 수 있으며, 저장과 운반이 가능한 이점을 가지고 있고, 이산화탄소의 배출감축에 의한 지구 온난화 방지 및 임업·목재산업 진흥 등에도 기여할 수 있는 목질계 바이오매스 에너지의 이용확대를 추진하고 있다.

목탄은 저산소의 밀폐된 공간에서 목재를 서서히 가열하여 수분과 휘발성물질을 제거하고 탄소만 남기는 방법으로 제조된 친환경연료로서, 환경문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 그 수요가 증가하고 있는 추세이다. 또한, 최근 목질바이오매스 자원의 에너지화 및 신소재화에 관한 관심이 높아지면서 목재의 열분해 특성, 탄화메카니즘 구명 및 목탄의 특성에

관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(권 등, 2007; 이와 김, 2010; 조 등, 2007, 2008; 김 등, 2006).

목탄의 제조는 탄화과정과 소화방식에 따라 크게 흑탄과 백탄으로 구분하고 있다. 흑탄은 600~800°C 정도에서 제조되며, 백탄은 1,000°C 이상의 온도에서 제조된다(황 등, 2002). 이렇게 고온의 제탄과정에서 발생하는 열은 탄화로 내에서 장시간 유지될 뿐만 아니라 제탄 후에도 탄화로 내부에는 고온의 열이 장시간 유지된다. 이러한 탄화로는 단지 목탄을 제탄하기 위한 용도로만 사용될 뿐, 제탄시 발생하는 고온의 연소열이나 그 후 계속되는 잠열은 효과적으로 활용되지 못하고 그대로 버려지고 있는 실정이다.

최근 폐 바이오매스를 이용하여 발효과정에 발생하는 폐열을 경제적으로 활용하기 위해 효율적으로 회수할 수 있는 열교환장치를 개발하여 농가의 난방용이나 온수용 등으로 이용하고자 하는 방안이 일부 제시되고 있다(조 등, 2009; 이 등, 2004). 석유류 가격의 급등으로 열 공급에 사용되는 비용이 급증하고 있는 요즘, 폐열 활용은 에너지 재활용의 좋은 예라 생각한다.

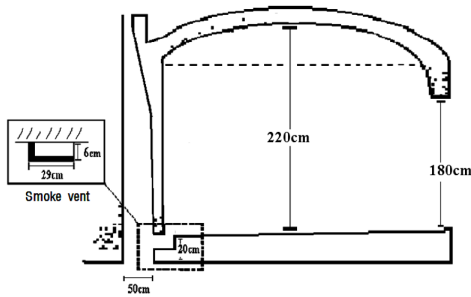


Fig. 1. Side view of an improved kiln for charcoal making.

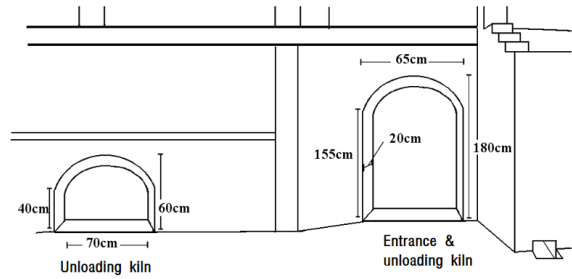


Fig. 2. Front view of an improved kiln for charcoal making.

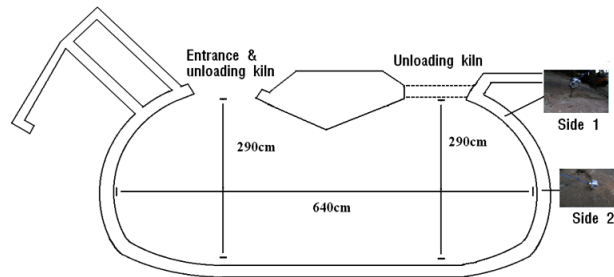


Fig. 3. Cross sectional view and position (side 1, side 2) of k-type thermocouple of an improved kiln for charcoal making.

따라서 본 연구는 고품질 목탄의 대량 생산 및 수율을 향상시키기 위해 제작된 개량형 탄화로를 이용하여 제탄과정에서 발생하는 폐열을 효율적으로 회수할 수 있는 방안을 모색하기 위해 개량형 탄화로의 구조와 제탄과정에서 탄화로 내·외벽 및 벽체의 온도변화, 제탄된 목탄의 특성을 조사·검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에는 강원도 홍천군 화촌면에 소재 (주) 흥천삼속에서 개량형 탄화로를 제작하여 이용하였다.

2.1. 공시탄화로의 구조

본 연구에 이용된 개량형 탄화로는 고품질 목탄의 대량 생산과 수율향상을 위한 목적으로 내부공간을 크게 확장하여 제작하였다. 탄화로의 내부 바닥은

Fig. 1과 같이 진흙으로 약 20 cm 정도의 두께로 다졌고, 탄화로 내부의 가스를 잘 빨아내기 위해서 배연구쪽이 탄화로 입구보다 약 3 cm 정도 낮게 제작하였다. 배연구(Fig. 1)는 탄화로 내부의 연기가 나가는 구멍으로서 돌을 이용하여 바닥에 길이 27 cm, 폭 6 cm 정도로 제작하였고, 기존의 탄화로 보다 내부 공간이 커졌기 때문에 2개를 설치하였다.

연통부는 벽돌과 진흙으로 쌓았고, 아래쪽을 넓게 하고 위로 올라갈수록 좁게 만들어 외부공기가 탄화로 안으로 역류해 들어가지 못하게 한 구조로 제작하였으며, 탄화로의 규모가 크게 제작되었기 때문에 연통부를 2개 설치하였다.

탄화로 입구는 Fig. 2와 같이 높이 180 cm, 폭 65 cm로 제작하였다. 탄화로 내부 천장은 둥근 형태를 이루고 있으며, 탄화로 벽에 가까운 부분은 두껍게 하고 중심부로 갈수록 비교적 얇게 제작되었다. 천장은 탄화로 중에서 가장 열을 많이 받는 곳으로 두꺼

운 철망을 대고 그 위를 진흙으로 덮고, 철망을 굵은 빔으로 지탱하는 구조이다. 탄화로 내부는 중심부 높이 220 cm (Fig. 1), 가로 640 cm, 세로 290 cm의 크기(Fig. 3)로 제작하였다.

본 연구에서 이용되어진 탄화로는 내부규모가 크게 제작되었기 때문에 Fig. 2에 나타난 것과 같이 출탄작업구를 하나 더 설치하여 원활한 출탄작업을 수행할 수 있게 제작하였다.

2.2. 고온측정용 센서를 이용한 제탄과정 중의 개량형 탄화로 온도측정 및 벽체온도측정

제탄되는 과정 중에 개량형 탄화로 내부 및 벽체의 온도변화를 측정하기 위하여 탄화조에 K형 열전저항 센서(측정범위 : 1,200°C)를 설치하였다. 제탄과정 중의 탄화로 내부의 온도측정은 권 등(2008)이 전통식 탄화로의 온도변화를 측정하기 위해 설치한 위치와 같은 위치에 온도측정용 센서를 설치하여 측정하였다. 탄화로 벽체온도는 온도측정용 K-type 센서(삼손하이테크, 한국)를 벽체 내부로 깊이 20 cm 정도 삽입하여 설치하였다(Fig. 3). 온도기록은 측정용 센서와 연결된 자동기록계에 각각의 온도변화를 실시간으로 그래프용지에 기록하였으며, 2시간마다 온도를 숫자로 기록하게 설정하였다.

2.3. 적외선 열화상 분석기를 이용한 개량형 탄화로 내·외벽의 온도측정

적외선 열화상 분석기(InfraTec GmbH, DE/Varic CAM Basic 120)를 이용하여 개량형 탄화로의 내·외벽에서 발생하는 열의 분포를 측정하였다. 측정은 제탄과정이 끝난 후, 고온의 열이 탄화로 내부에 존재하고 있기 때문에 목탄을 생산하기 위한 원료를 넣기 전에 실시하였다.

2.4. 목탄의 특성분석

공업분석은 목탄을 각각 60 mesh 정도의 시료로

제작하여 목탄에 함유된 수분(KS E ISO589 무연탄-총 수분 함량의 측정 참조), 회분(KS E ISO1171 고풍광물 연료-재 함량 측정 참조), 휘발분(KS E ISO562 무연탄과 코크스-휘발성 물질의 결정 참조), 고정탄소를 중량비율로 측정하였다.

pH는 목탄 1 g을 삼각 플라스크에 넣어서 증류수 100 mL을 가한 후 5분간 자비시켜 증발한 양의 증류수를 가해 냉각 후 pH meter로 측정하였다.

정련도는 목탄정련계(삼양전기제작소 FA 56형, 일본)를 이용해서 측정하였다. $10^0 \sim 10^8 \Omega/\text{cm}$ 의 전기저항을 측정하여 그 지수 0~8의 정련도로 그 이상의 것은 정련도 9로 나타낸다.

목탄의 경도는 신목탄경도계(삼양전기제작소, 일본)로 이용하여 측정하였다. 경도계는 납, 안티몬, 동, 아연, 주석, 강철 등을 소정 배합한 것으로, 경도의 차이로 20종류의 금속편이 이용되며 가장 무른 납으로만 된 금속편이 1번이고, 가장 단단한 강철의 금속편은 20번이다.

발열량은 시료 0.5 g을 열량계(Parr 6,300 calorimeter)에 넣고 산소를 충전하고 점화하여 연소전 후의 온도변화로부터 열량을 계산하였다. 연료용 목탄의 단위부피당 열량은 국립산림과학원에서 고시한(국립산림과학원 2007-8호) 연료용 목탄의 단위부피당 열량 기준에 의거하여 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$\text{연료용 목탄의 단위부피당 열량}(\text{cal}/\text{cm}^3) = \text{발열량} \times \text{용적중} \times \text{함수율}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 개량형 탄화로의 제탄과정 중 온도 변화

공시 개량형 탄화로의 연통부와 탄화로 상층부에 온도센서를 설치하여 제탄과정을 측정된 결과(Fig. 4), 탄화조에 탄재를 적재하여 아궁이에 불을 지핀 후 탄화가 시작되어 가열을 멈출 때 온도는 탄화로 내부 온도 720°C, 연통 온도 90°C였다. 이것은 숙련

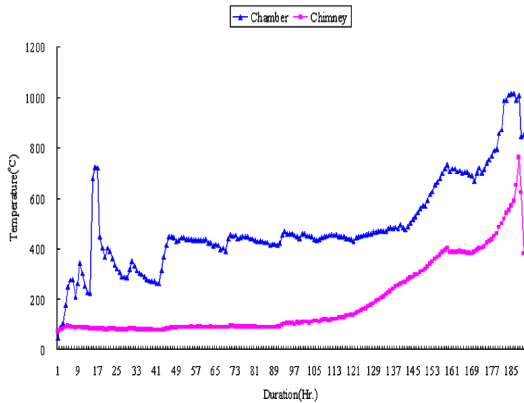


Fig. 4. Temperature profile in the chimney and chamber of kiln during carbonization.

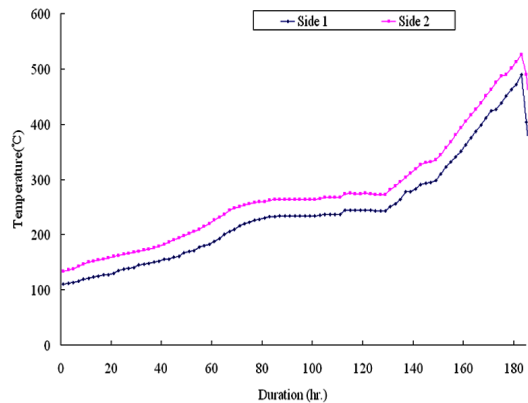


Fig. 5. Temperature profile in the kiln wall during carbonization.

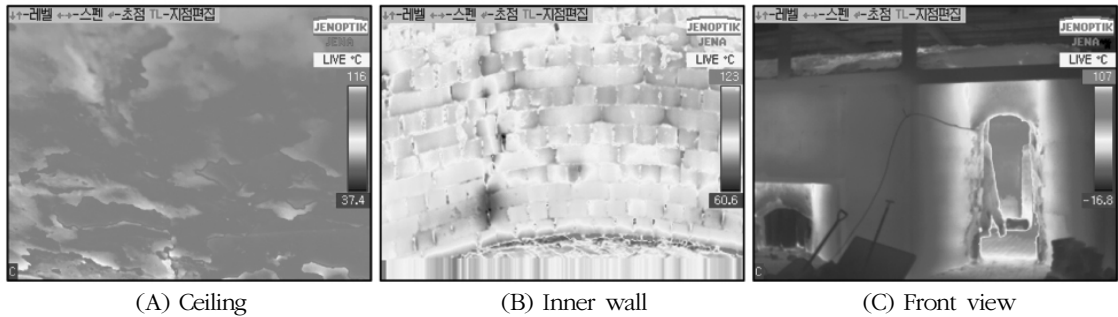


Fig. 6. Infrared thermography images of a kiln.

자에 의한 제탄과정으로 온도변화를 측정된 결과, 탄화로 내부의 온도는 670~800°C, 연통온도 80~90°C의 범위와 비슷한 결과를 보여주었다(권 등, 2008). 탄화종료시점의 온도는 탄화로 내부 온도 약 600°C, 연통 온도 450°C 정도가 되었다. 이후 연통에 나오는 연기가 무색을 띠는 시점에서 약 3시간 후 정련을 10~12시간 정도 실시하고 출탄작업을 하였다. 탄화로 내부 최고온도는 1,000°C의 범위였고, 연통온도는 750°C 정도까지 상승하였다.

전체 제탄시간은 아궁이에 점화해서 탄화로 내부 탄재의 탄화가 시작되는 시간이 12시간 정도 소요되었다. 그리고 착화 후 탄화과정을 거쳐 정련이 시작되는 600°C에 도달할 때까지 약 150시간 정도 소요되었다. 그 후 정련과 출탄작업까지 26시간 정도 소

요되었다. 전체 제탄시간은 8일 정도였다.

고온측정용 센서를 이용하여 제탄과정 중의 탄화로 벽체의 온도를 2곳(Fig. 5-Side 1, Side 2)에서 측정된 결과, 벽체의 온도변화는 제탄과정에서 탄화로 내부의 온도변화와 비슷한 경향을 보여주었다. 목탄 제탄과정에서 나타난 탄화로 벽체의 최고 온도는 500°C정도였다.

3.2. 적외선 열화상 카메라를 이용한 제탄전 탄화로 내·외벽과 벽체의 온도

Fig. 6은 제탄전 탄화로 내·외벽과 상층부의 온도를 적외선 열화상카메라를 이용하여 측정하였다. 출탄 후 탄화로 내부는 고온이기 때문에 다음 제탄작업

Table 1. Proximate analysis of samples

Charcoal No.	Moisture content (%)	Ash (%)	Volatile matter (%)	Fix carbon (%)
1	6.40 ± 0.59	1.63 ± 0.23	3.07 ± 0.12	89.90 ± 0.94
2	6.50 ± 0.50	2.71 ± 0.39	3.55 ± 0.25	87.24 ± 0.70
3	7.97 ± 0.04	2.36 ± 0.63	3.78 ± 0.23	85.89 ± 0.01
4	7.37 ± 0.60	2.04 ± 0.28	3.52 ± 0.30	87.07 ± 0.72
5	7.56 ± 0.21	1.79 ± 0.19	3.61 ± 0.28	87.04 ± 0.31
6	7.06 ± 0.72	2.55 ± 0.43	3.21 ± 0.32	87.18 ± 0.85
7	6.34 ± 0.61	2.61 ± 0.63	3.24 ± 0.22	87.81 ± 0.17

Table 2. Basic properties of samples

Charcoal No.	Refining degree	Hardness	Heating value (kcal/kg)	pH	Quantity of heat per unit area (cal/cm ²)
1	1	12	7,341 ± 11	9.0 ± 0.0	5,236
2	1	12	7,195 ± 20	9.9 ± 0.0	5,287
3	1	12	7,047 ± 32	9.3 ± 0.0	5,312
4	1	12	7,247 ± 15	9.1 ± 0.1	5,486
5	1	12	7,145 ± 23	9.4 ± 0.0	5,387
6	1	12	7,100 ± 25	9.0 ± 0.1	5,458
7	1	12	7,456 ± 40	9.1 ± 0.0	5,232

을 위해 2일 정도 방치한다. 적외선 열화상 카메라를 이용하여 제탄전 탄화로 내벽과 천장의 온도분포를 분석한 결과(Fig. 6-A, B), 탄화로 내벽 중간부분과 천장에는 80~90°C 정도의 고온의 열이 감지되었다. 이것은 20°C 물 1 ton의 온도상승에 대하여 제탄과정에서 발생된 고온의 열 평균 85°C로 가정하여 열량을 계산하면, 열용량공식 $Q = mc\Delta T$ 식에서 $Q = 1,000 \text{ kg} \times 4,190 \text{ J/Kg}^\circ\text{C} \times 65^\circ\text{C} = 272,350,000 \text{ J}$ (65,364 kcal)의 열량을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 출탄 후, 시간이 다소 경과되어도 탄화로 벽체와 천장에는 상당한 양의 열에너지가 존재하는 것으로 판단된다. 그러나 탄화로 외벽과 상층부는 천장과 벽을 두껍게 쌓았기 때문에 제탄과정 중에 발생한 열의 영향을 받지 않아 외기온도와 비슷한 온도를 보여주었다(Fig. 6-C).

3.3. 목탄의 공업분석 결과

Table 1은 같은 탄화로에서 수회 반복하여 제탄된

각각의 목탄에 대한 공업분석결과를 나타낸 것이다. 국립산림과학원에서 고시한 목탄의 규격과 품질기준(2007)은 수분 10% 이하, 회분 3.0% 이하로 규정하고 있다. 공시 탄화로에서 제탄된 목탄의 수분은 6.34~7.90%, 회분 1.63~2.71%로 나타났다. 또한 휘발분은 3.07~3.78%, 고정탄소 85.9~89.9%였다. 본 연구에 참여하고 있는 강원목탄은 각 탄화로에 설치된 온도센서를 이용하여 표준화된 제탄공정으로 제탄하기 때문에 같은 탄화로에서 제탄된 목탄의 특성차이가 크지 않는 것으로 생각된다.

3.4. 정련도, 경도, 발열량, pH 및 단위 부피당 열량

탄화로에서 제탄된 목탄의 정련도, 경도, 발열량, pH 및 단위부피당 열량의 특성을 Table 2에 나타냈다. 정련도는 탄화물표면의 전기저항을 측정하여 탄화물의 탄화정도를 판단하는 기준으로 이용된다. 모든 시료가 낮은 전기저항 값을 보여주고 있어 탄화가

Table 3. Charcoal yield of samples (Unit : %)

	Ref. ²⁾			Present work
	A	B	C	
Yield	11.00 ± 1.25	11.17 ± 0.88	10.75 ± 0.87	12.8 ± 0.10

잘 되어 불순물이 적은 목탄으로 판단한다. 경도는 모든 시료가 12로 나타나 단단하게 제조된 목탄으로 생각된다. 발열량은 국립산림과학원에서 고시한 목탄의 규격과 품질 기준(2007)에서 발열량 5,500 kcal/kg 이상으로 규정하고 있다. 본 연구에서 제탄된 목탄의 발열량은 7,047~7,456 kcal/kg으로 기준 이상으로 높게 나타나 고품질 목탄으로 판단된다. 岸本(1990)는 1,000°C에서 제탄된 목탄의 열량이 약 7,600 kcal/kg라고 보고하고 있어, 본 연구에서 제탄된 목탄도 1,000°C 정도의 고온에서 제탄된 것으로 사료된다.

pH는 9.0~9.9 정도의 알칼리성으로 나타났다. 목탄은 일반적으로 알칼리성이며 제탄온도에 따라 값이 다르게 나타나는데(김과 공, 1999), 1,000°C에서 제탄된 백탄은 pH 9.0~9.5 정도로 본 실험의 결과와 비슷한 값을 보여주었다.

국립산림과학원에서 고시한 목탄의 품질기준(2007)에서 단위부피당연료의 기준을 보면 연료용 목탄의 품질 A등급은 단위부피당 5,001 cal/cm³ 이상, 연료용 목탄의 품질 B등급은 단위부피당 5,000 cal/cm³ 이하로 구분하고 있다. 본 실험에서 이용된 목탄의 단위 부피당 열량은 A등급으로 나타났다.

3.5. 수탄율

목탄의 수탄율은 13.8% 정도로 이전의 탄화로(권 등, 2008)에 얻어진 수탄율 9.8~12.3%에 비해 1.5% 정도 증가하였다(Table 3). Brunner와 Roberts (1980)는 저속탄화가 반응메카니즘의 차이로 인해 탄화물의 특성에 영향을 주고 수율도 증가한다고 보고하였다. 본 연구에 이용되어진 탄화로에서 제탄된 목탄 수율이 증가한 것은 이전 탄화조에 비해 탄화로의 규모가 2배 정도 크게 제작되어서 제탄과정에서 탄재의 탄화속도가 이전 탄화조에 비해 저속으로 행해지

기 때문에 전체 수율이 향상된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서 개량형 탄화로를 이용하여 제탄과정 중 탄화로 내·외벽의 온도변화를 측정하고 제탄된 목탄의 특성을 분석하였다. 공시 탄화로의 탄화과정은 8일 정도 소요되었다. 탄재 착화시 탄화로 내부 온도는 720°C 정도였고, 연통부위는 90°C 정도였다. 정련단계에 이르기까지 탄화로 내부온도는 점점 증가하여 정련단계에서는 1,000°C 이상의 고온에 달하였으며, 연통온도는 750°C까지 상승하였다. 이 때 탄화로 벽체의 온도변화는 제탄과정 중의 탄화로 내부의 온도변화 경과곡선과 비슷한 경향을 보여주었다. 목탄제탄과정에서 나타난 탄화로 벽체의 최고 온도는 500°C 정도였다. 적외선 열화상카메라를 이용하여 제탄전 탄화로의 내·외벽체의 온도분포를 측정할 결과, 탄화내벽과 천장에는 80~90°C 정도의 고온의 열이 감지되었다.

출탄된 목탄은 수분이 6.34~7.90%, 회분 1.63~2.71%, 휘발분 3.07~3.78%, 고정탄소 85.9~89.9%였다. 정련도는 1, 경도는 12, 발열량은 7,047~7,456 kcal/kg, pH는 9.0~9.9, 단위면적당 열량은 5,232~5,486 cal/cm³로 고품질의 목탄이 제조되고 있는 것으로 판단된다. 또한 각 탄화조에 부착된 온도센서에 의한 제탄공정을 확립하여 목탄을 제탄하기 때문에 목탄의 특성의 차이는 크지 않은 것으로 생각된다. 목탄의 수탄율은 13.8% 정도로 기존의 탄화조에 얻어진 수탄율 9.8~12.3%에 비해 1.5% 정도 향상되었다.

이상의 결과로부터 제탄과정에서 발생된 열에너지가 제탄 후에도 탄화로 천장 또는 내벽에 존재하고 있지만, 그대로 방치해서 버려지어 이것을 활용할 수 있는 방안을 검토해야 할 것으로 사료된다. 또한 개량형 탄화로에서 제조된 목탄은 고품질이고, 수탄율도 기존 탄화조에 비해 약간 향상되었다.

사 사

본 연구는 산림청 '산림과학기술개발사업(과제번

호 : S120910L070110) 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 국립산림과학원. 2007. 목탄의 규격과 품질. 국립산림과학원 고시 제2007-8호.
2. 권구중, 박형수, 이성재, 권성민, 이귀현, 김남훈. 2008. 숙련공에 의한 목탄제조과정 중 전통식 탄화로 내의 온도변화(I). 산림바이오에너지 27(1): 30~35.
3. 권성민, 김남훈. 2007. 목재의 탄화기구 해석(II). 목재공학 35(3): 45~52.
4. 김남훈, 황원중, 권성민, 권구중, 이성재. 2006. 제조온도에 따른 굴참나무 목탄의 해부학적 특성. 목재공학 34(4): 1~8.
5. 김병로, 공석우. 1999. 미이용 목질폐잔재의 탄화 이용 개발(I) - 수종의 간벌재 탄화와 탄화물의 특성 -. 목재공학 27(2): 70~77.
6. 조남석, 최태호, 김홍은, 이석호, 이충구. 2009. 목질계 페바이오메스의 발효열 이용 열교환기의 개발. 목재공학 37(1): 94~104.
7. 조태수, 이오규, 최준원, 변재경. 2008. 신갈나무 목탄의 카드뮴(Cd) 이온 흡착 특성. 목재공학 36(3): 93~100.
8. 조태수, 최준원, 이오규. 2007. 탄화온도가 목탄의 물리, 화학적 특성에 미치는 영향. 목재공학 35(3): 53~60.
9. 이동영, 김병로. 2010. 국내 시판용 목탄의 흡착특성(1). 목재공학 38(1): 27~35.
10. 이충구, 이세균, 이계복, 이석호, 유인선. 2005. 페바이오메스를 이용한 폐열회수 열교환기에 관한 연구. 에너지공학 14(4): 248~258.
11. 황원중, 권구중, 이성재, 박형수, 김남훈. 2002. 전통식 탄화로에서 제탄된 목탄의 해부학적 특성. 임산에너지 21(1): 49~55.
12. Brunner, P. H. and P. V. Roberts. 1980. The significance of heating rate on char yield and char properties in the pyrolysis of cellulose. Carbon 18: 217~224.
13. 岸本定吉. 1990. 木炭と木酢液の新用途開發研究成果集. 炭化技術. 木材炭化成分多用途利用技術研究組合: 9~26.