

研究報告

平地造林烏心石疏伐木製炭之研究

黃國雄^{1,5)} 李金梅²⁾ 何振隆³⁾ 王秋嫻⁴⁾ 游漢明⁴⁾

摘要

本研究以屏東地區平地造林之烏心石疏伐木材為原料，裁斷成長度1 m測定徑級後，再製取2 cm厚之圓盤試樣測定比重與含水率，利用土窯製炭時測定窯內炭化溫度與煙囪口溫度，出窯時秤取木炭質量並計算收炭率，取不同炭化溫度之木炭進行性質試驗，製炭過程中收集木醋液並對不同煙囪口溫度之木醋液進行性質試驗與成分分析。

由試驗結果得知烏心石疏伐木之容積比重為0.49，含水率為46.3%，由炭化溫度曲線得知製炭過程中窯內上層溫度之上升較下層者快，窯內上層溫度達740°C以上而下層溫度則約為570°C，收炭率為27.10%，碳保留率為47.84%。木炭之精煉度1.9~6.2隨炭化溫度升高而明顯降低，pH值8.57~9.42隨炭化溫度升高而略為升高，真密度隨炭化溫度升高而明顯增大，含碳量隨炭化溫度升高而略增。木醋液收集量為286.6 kg，為進窯量之10.49%，其中煙囪口溫度100°C以下之收集量占85.03%，煙囪口溫度101°C以上之收集量較少。木醋液之比重與pH值隨煙囪口溫度升高而有略增之趨勢，酸度與木焦油含量兩者受煙囪口溫度升高之影響不明顯。不同煙囪口溫度之木醋液有機成分中均以酸類(51.2~59.2%)最多，酚類(19.8~22.6%)次之，醇類(15.7~20.6%)再次之，而中性物質(5.3~6.4%)則最少。

關鍵詞：烏心石、疏伐木、炭化、木炭、木醋液。

黃國雄、李金梅、何振隆、王秋嫻、游漢明。2017。平地造林烏心石疏伐木製炭之研究。台灣林業科學32(1):43-55。

¹⁾ 林業試驗所技術服務組，10066台北市南海路53號 Division of Technical Service, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 林業試驗所森林利用組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

³⁾ 林業試驗所木材纖維組，10066台北市南海路53號 Division of Wood Cellulose, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

⁴⁾ 林業試驗所集水區經營組，10066台北市南海路53號 Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

⁵⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: gshwang@tfri.gov.tw

2016年4月送審 2016年5月通過 Received April 2016, Accepted May 2016.

Research paper

Study of Charcoal Making with *Michelia compressa* Thinned Wood from Afforestation on the Plains

Gwo-Shyong Hwang,^{1,5)} Chin-Mei Lee,²⁾ Chen-Lung Ho,³⁾
Chiu-Hsien Wang,⁴⁾ Han-Ming Yu⁴⁾

【 Summary 】

In this study, trees of *Michelia compressa* thinned from an area of a Plain Afforestation Program in Pingtung were cut into segments 1 m in length for charcoal making. The specific gravity and moisture content were measured. The carbonization and chimney temperatures were separately measured with K-type thermocouples during wood charcoal production and wood vinegar collection in an earthen kiln. After discharging the charcoal, yields were calculated by weighing. In order to investigate the properties of the wood charcoal affected by differences in the carbonization temperature in the earthen kiln, the refined degree, pH value, carbon content, and true density tests were performed for specimens sampled at different carbonization temperatures. Quantities of the collected wood vinegar were periodically measured. The specific gravity, pH value, acidity, tar content, and component analysis of the wood vinegar were determined for samples collected at different chimney temperatures.

The volume specific gravity and moisture content of *M. compressa* were 0.49 and 46.3%, respectively. From the measured carbonization temperature at each measuring point in the kiln, a curve of different temperatures was obtained. Carbonization temperatures in the upper part of the kiln rose faster and earlier than did those in the lower part. The highest temperature in the upper part of the kiln exceeded 740°C at the end of carbonization, whereas the temperature in the lower part was only 570°C. The yield of wood charcoal was 27.10%. Carbon retention was 47.84%. The refined degree of the wood charcoal ranged 1.9~6.2, and decreased significantly with an increasing carbonization temperature. The pH value of wood charcoal was 8.57~9.42 and increased a little with an increase of carbonization temperature. The true density of wood charcoal increased with an increase in the carbonization temperature. The yield of wood vinegar was 10.49% in the charcoaling process. The quantity of wood vinegar collected at chimney temperatures of < 100°C made up 85.03% of the total, while the amount notably decreased at temperatures of > 101°C. The specific gravity and pH value of the wood vinegar increased with an increasing chimney temperature. The acidity and tar content of the wood vinegar were not appreciably affected by the chimney temperature. Concentrations of acids, phenols, alcohols, and neutral compounds ranged 51.2~59.2, 19.8~22.6, 15.7~20.6, 5.3~6.4%, respectively, for wood vinegar collected at different chimney temperatures.

Key words: *Michelia compressa*, thinned wood, carbonization, wood charcoal, wood vinegar.

Hwang GS, Lee CM, Ho CL, Wang CH, Yu HM. 2017. Study of charcoal making with *Michelia compressa* thinned wood from afforestation on the plains. *Taiwan J For Sci* 32(1):43-55.

緒言

國內自2002年推動「平地造林」，輔導農民與農企業進行農地長期休耕並改以造林，由於平地造林之栽植密度較高，為使林木健全生長與生產形質優良之大徑原木，在經營管理上須進行疏伐作業，然而疏伐木與其枝梢材之徑級小而不利加工利用，棄置林地殊為可惜，亦可能妨礙撫育作業與帶來負面評價，若能將其製成木炭，除了具有碳保存之效益外，亦可達到有效利用森林資源之目的。

木材係由碳、氫、氧等主要元素構成之有機材料，在炭化過程中大部分碳元素殘留細胞壁並經縮合與重排產生具物理吸附作用之奈米級微孔，又由氫與氧重新組成含有各種官能基而具有化學吸附作用之化合物，因而木炭具有良好之調濕(Ohgama et al. 2005)、淨化室內空氣(Saito et al. 2000, Hayashimoto et al. 2003)與淨化水質(Yatagai et al. 1995, Oshima et al. 2007)等之效果。木炭亦可作為土壤改良資材(Isobe et al. 1996)、飼料添加劑(Murano 2005)與鑄鋼用加碳材(Manabe et al. 2010)。宮藤久士與坂志朗認為在二氧化碳減量與碳中和議題中，環境負荷較小之生質資源轉換為能源或機能性材料，備受矚目，並對木炭作為能源與環境淨化材料之新用途加以論述(Miyafuji and Saka 2006)。石原茂久在木炭作為機能性碳素材料新素材之利用中，提到高溫炭化之高導電性木炭，可作為靜電防制材料、導電性材料、燃料電池材料與電磁波遮蔽材料等，用途極為廣泛(Ishihara 1999)。

木炭製造過程中木材於熱分解所產生之氣體與水蒸氣等煙霧，由煙囪排出後經收集、冷卻與凝結而成茶褐色之木醋液。木醋液中含有百餘種至兩百餘種之化學物質，其主要成分可大分為酸類、醇類、酚類與中性物質等(Yatagai et al. 1988, Jodai et al. 1989)。木醋液在農業方面之應用甚廣，如促進植物種子之發芽與生長(Yatagai et al. 1987, Uehara et al. 1993)，抑制土壤病原菌與植物病原菌(Numata et al. 1994, Yoshida et al. 2000)，防除香菇害菌(Meguro et al. 1992)，促進水稻根系生長(Tsuzuki et al.

2000)，提高甘蔗之直徑與收穫量(Uddin et al. 1994)，調節芝草生育(Shirakawa et al. 1998)等。木醋液亦具有除臭(Shibutani et al. 2014)、抑制病毒發病(Matsuki et al. 1998)與白癬菌發育(Watanabe et al. 2004)等之效果。

本研究以平地造林烏心石疏伐木為原料，利用土窯製炭時採用K型熱電偶測定炭化過程窯內溫度上升情形，檢討收炭率、碳保留率與炭化溫度對木炭性質之影響，並於製炭過程中收集木醋液，檢討收集速度與收集量，亦將不同煙囪口溫度之木醋液進行性質測試與成分分析。

材料與方法

一、材料

以屏東地區平地造林烏心石(*Michelia compressa*)疏伐木為原料，裁鋸成長度1 m之段木，抽樣選取約200支段木，於中央部位以直徑尺測定直徑後，又由距端部10 cm與中央處製取長度2 cm之小圓盤試樣共20個試樣，秤取質量後利用排水法測定生材體積，再以爐乾法測定絕乾質量，分別計算容積比重(W_0/V_g)與含水率。

二、製炭過程與測定炭化溫度

製炭採用土窯之形狀與尺寸，如Fig. 1所示，其炭化室底部之形狀如扇形，距後方60 cm最寬之處為2.8 m，縱深長度為2.8 m，窯壁高度1 m，窯頂成拱形，最高處距地面1.4 m。進窯時先秤取捆綁成束之試材質量後，由窯內後方向前方緊密直立排列，試材上端與窯頂之空間，則將試材左右橫置作為引火材之用。採用直徑3.2 mm之K型熱電偶測溫棒，測定窯內溫度與煙囪口溫度之變化，測定點如Fig. 1所示共計7點。分別於窯內中央處，如測溫點1、2與3，窯內後方距煙口50 cm處如測溫點4、5與6。兩處之測溫點離地面高度分別為130、90與10 cm。為了減少煙囪口溫度受到煙囪外冷空氣之影響，其測定點為煙囪口下方5 cm之中心處，如測溫點12。

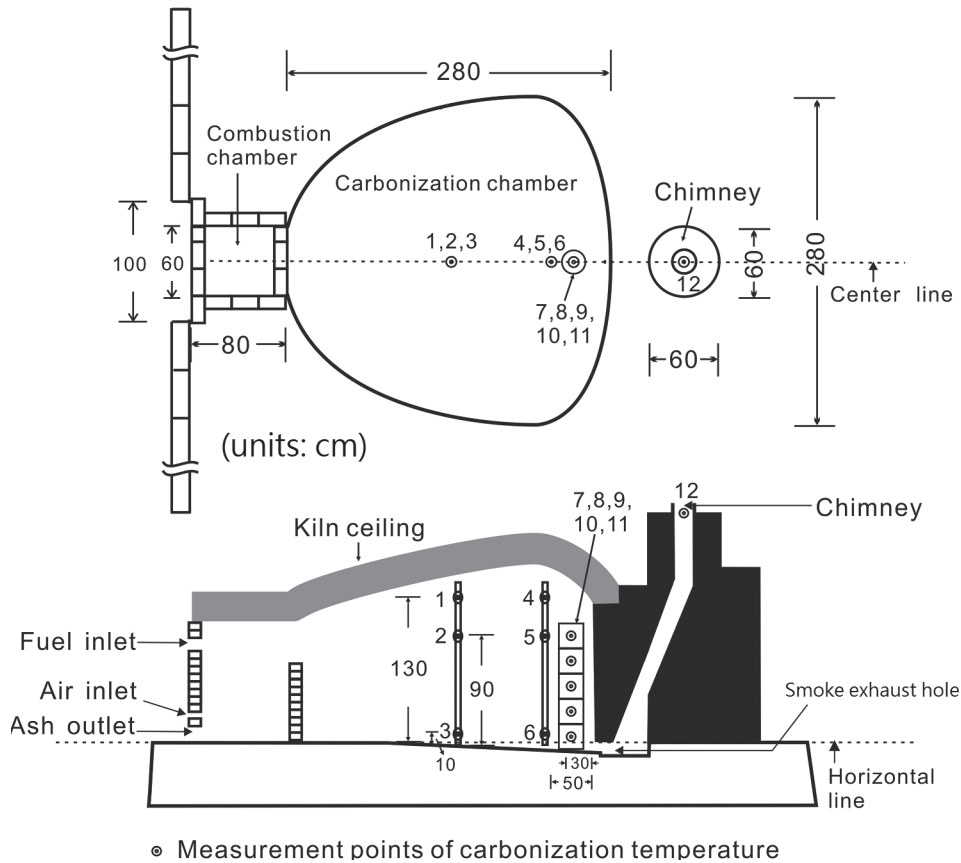


Fig. 1. Dimensions of the earthen kiln and measurement points of carbonization Temperature (nos. 1~12).

為了探討土窯內不同炭化溫度對木炭性質之影響，本研究另外製取長度20 cm之試材，分別置入5個直徑與高度均為20 cm之有孔不銹鋼圓筒內，其孔徑為0.5 cm、孔距為1.5 cm。將該等置滿試材之5個圓筒垂直堆疊成高度1 m，由上而下分別稱之最上層、第四層、第三層、第二層與最下層，其外圍以直徑10 mm之不銹鋼圓條加以固定，置於炭化室後方距煙口30 cm處，每一圓筒之中央位置亦設置測溫點，離地面高度分別為90、70、50、30與10 cm，如Fig. 1之測溫點7至11。

完成進窯作業後於燃燒室添加適量之燃料，將其點燃進行預熱時，須將煙窗蓋住以避免引燃窯內之引火材，約經4天之預熱後，於燃燒室添加大量燃料並敞開煙窗，點燃窯內之引

火材後，使窯內溫度上升至250°C與煙窗口溫度達85°C時，再將內徑20 cm圓形煙窗口以兩個磚塊將其適度縮小，於中央僅留寬度4 cm之排煙口。隨窯內炭化之進行，依煙窗口溫度之上升，逐漸將進氣口與排煙口適度放大，約經5天餘煙窗口溫度上升至320°C時，則將進氣口與煙窗完全敞開，約經數小時煙窗口溫度達380°C即可進行封窯作業。封窯後須經7天之冷卻，確認窯內溫度下降後進行出炭作業，將木炭裝入紙箱，秤其質量以供計算收炭率。

三、木炭性質試驗與碳保留率

於出炭作業時，分別將5個不銹鋼圓筒之木炭試樣取出後，進行精煉度、pH值、真密度與含碳量等性質試驗，分述如下：

(一) 精煉度

精煉度以木炭表面兩測定點距離1 cm之電阻值指數表示，如電阻值為 $10^5 \Omega$ 時，其精煉度為5，而CNS2598木炭(燃料用)中之精煉度試驗中，使用電阻計測定，電阻值介於 $10^4 \Omega/cm$ 以上，未滿 $10^5 \Omega/cm$ 之間，其精煉度為5。本試驗使用日本三陽電機製作所FA56型木炭精煉計進行測試，精煉度可讀至小數一位，每一條件之重複數為10。

(二) pH值

秤取60~100 mesh之木炭粉末1 g，置入100 mL之燒杯中再加入70 mL之蒸餾水攪拌後靜置1 h，使用Suntex pH 315i手提式微電腦酸鹼度計測試，每一條件之重複數為3。

(三) 含碳量

將烏心石木材與不同炭化溫度之木炭分別研磨成100 mesh以下之細粒粉末後，秤取2~4 mg經絕乾後之試材粉末裝入儀器專用錫盒內，以元素分析儀(CHNOS Elemental Analyzer, Elementar, vario EL, city, Germany)分別測定其含碳量，每一條件之重複數為3。

(四) 真密度

將木炭粉碎後，篩取粒徑大小為36~60 mesh之粉末。以秤量瓶秤取約5 g試樣粉末，置入 105°C 烘箱中乾燥24~48 h，使其充分乾燥後置入Quantachrome ultrapycnometer 1000之真密度測定儀中測試，該測定儀測得5次數據之平均值為該試樣之真密度，每一條件之重複數為3。

(五) 碳保留率

碳保留率係指木炭中碳質量與木材中碳質量之比值，可依下列公式計算。

$$CR (\%) = (W_1 \times C_1) / [(W_2 / (1 + Mc)) \times C_2] \times 100$$

CR：碳保留率 C_1 ：木炭含碳量

W_1 ：木炭質量 C_2 ：木材含碳量

W_2 ：木材質量 Mc ：木材含水率

四、木醋液之收集、性質試驗與成分分析

木炭燒製之過程中，於煙囪口溫度 145°C 以

下時收集木醋液，並每一小時之秤取收集量，以kg計算木醋液之總收集量，並以kg/h計算收集速度。並於不同煙囪口溫度收集5組木醋液試樣進行性質試驗與成分分析。性質試驗之項目分述如下：

(一) 比重

取一只200 mL之量筒倒入適量之木醋液，再置入比重計測定之，每一條件之重複數為3。

(二) pH值

取100 mL之木醋液置於燒杯內，於室溫約 25°C 以pH meter測定，每一條件之重複數為3。

(三) 酸度

秤取1~2 g木醋液於250 mL三角燒瓶中，再以蒸餾水稀釋100倍，滴入數滴酚酞指示劑，以0.1 N NaOH溶液滴定之，並進行空白試驗，以醋酸含量為準，依下列公式計算酸度。

$$\text{酸度} (\%) = [(A - B) \times N \times 6] / S \times 100$$

A：滴定木醋液所用NaOH之mL數

B：空白試驗滴定NaOH之mL數

N：NaOH之當量濃度

S：木醋液之質量

(四) 木焦油含量

秤取1~2 g木醋液置於坩埚內，利用本生燈加熱直至木醋液呈現乾固的黑色殘渣，測定其質量並依照下列公式計算木焦油含量，每一條件之重複數為3。

$$\text{木焦油含量} (\%) = (\text{黑色殘渣質量} / \text{木醋液質量}) \times 100$$

(五) 木醋液成分分析

係利用氣相層析-質譜儀(gas chromatography-mass spectrometry)分析，採用HP 6890N氣相層析儀及5973N MSD質譜儀，分離管柱為BPX-70 capillary column (30 m \times 250 μm \times 0.30 μm)，遞載氣體為氦氣，流速1.0 mL/min，分流比1:10，注射孔溫度 270°C ，離子化電壓為70 eV，質譜範圍(mass range) m/z 41~400

a.m.u.，起始溫度40°C，升溫速率1.5°C/min升至46°C後改為4°C/min，最後升至209°C。成分鑑定使用mass-spectra比對，採用之Library為National Institute of Standards and Technology (NIST)及Wiley等，並使用標準品加以比對。

結果與討論

一、材料性質

烏心石疏伐木之容積比重與含水率之試驗結果如Table 1所示，由Table 1得知烏心石試材之容積比重為0.42~0.53，平均0.49，進窯時含水率為32.9~54.5%，平均46.3%。

Table 2所示為烏心石疏伐木試材之徑級分布，由Table 2得知其中直徑6~12 cm者占有率為80%，而直徑5與14 cm以上者占有率各為10%。

二、窯內炭化溫度之變化

炭化過程中窯內溫度與煙囪口溫度之變化情形，如Fig. 2所示，其起始溫度係經約4天預熱後之溫度，在預熱過程中為避免窯內之引火材燃燒而須將煙囪封蓋，預熱之目的係提高窯內木材溫度可縮短點燃引火材之時間與減少窯內點燃範圍過大而降低收炭率。由於進窯時之木材含水率仍高達46.3%，經預熱後窯內距地面130 cm處之溫度(簡稱上層溫度)雖約130°C，但距地面90 cm處之溫度(簡稱中層溫度)與距地面10 cm處之溫度(簡稱下層溫度)則較低，分別約為90°C與60°C，而煙囪口溫度則為55°C。為使窯內上層溫度達到炭化即熱分解之溫度，預熱

後添加大量薪材與敞開煙囪並點燃窯內上層之引火材，使得窯內上層溫度迅速上升達300°C以上，中層溫度上升至約120°C，下層溫度上升至80°C並與煙囪口溫度相近。由於上層溫度已達木材自發炭化之溫度而不再添加薪材，為避免急速炭化與降低木炭品質，利用磚塊蓋住部分煙囪口使其適度縮小，亦將燃料口與出灰口封閉，僅留進氣口調節適量之空氣進入窯內，因而使得窯內之上層溫度明顯下降至250~290°C，中層溫度下降至140°C，下層溫度與煙囪口溫度則維持80~85°C。窯內溫度趨於穩定與平衡狀態後，窯內上層溫度緩慢上升，中層溫度亦隨之上升，而下層溫度與煙囪口溫度則維持一段相當長久之時間而無明顯上升，自大量添加薪材點燃引火材後，約經80餘小時後下層溫度方明顯上升，其中屬窯後方測溫點6之下層溫度較窯中央測溫點3之下層溫度高且較早上升。由上述窯內溫度上升之情形可知土窯內之炭化過程係由上而下進行，於炭化初期煙囪口溫度與下層溫度非常相近，至下層溫度開始明顯上升之前，上層溫度與中層溫度均達250°C以上，可使窯內木材產生熱分解即炭化，至煙囪口溫度達220°C時，下層溫度上升至340°C以上時，可推知窯內之烏心石疏伐木已完成一次炭化，其後將煙囪口與進氣口逐漸放大，因較大量之空氣進入窯內而使得溫度急速升高，至煙囪口溫度達396°C時，上層溫度達740°C以上，則以濕潤之厚紙板蓋住將煙囪口蓋住並以磚塊重壓進行封窯作業，其後窯內溫度明顯下降，同時煙囪因無熱氣通過，其溫度下降速度更為明顯。

如上所述，為了探討土窯內炭化溫度對木

Table 1. Specific gravity and moisture content of material for charcoal making

Scientific name of material	Specific gravity ¹⁾	Moisture content (%)
<i>Michelia compressa</i>	0.49 ± 0.04	46.3 ± 7.6

¹⁾ W_0/V_g

Table 2. Diameter distribution of materials for charcoal making

Diameter (cm)	5	6	7	8	9	10	12	14	16
Percentage (%)	10	13	12	11	8	19	17	8	2

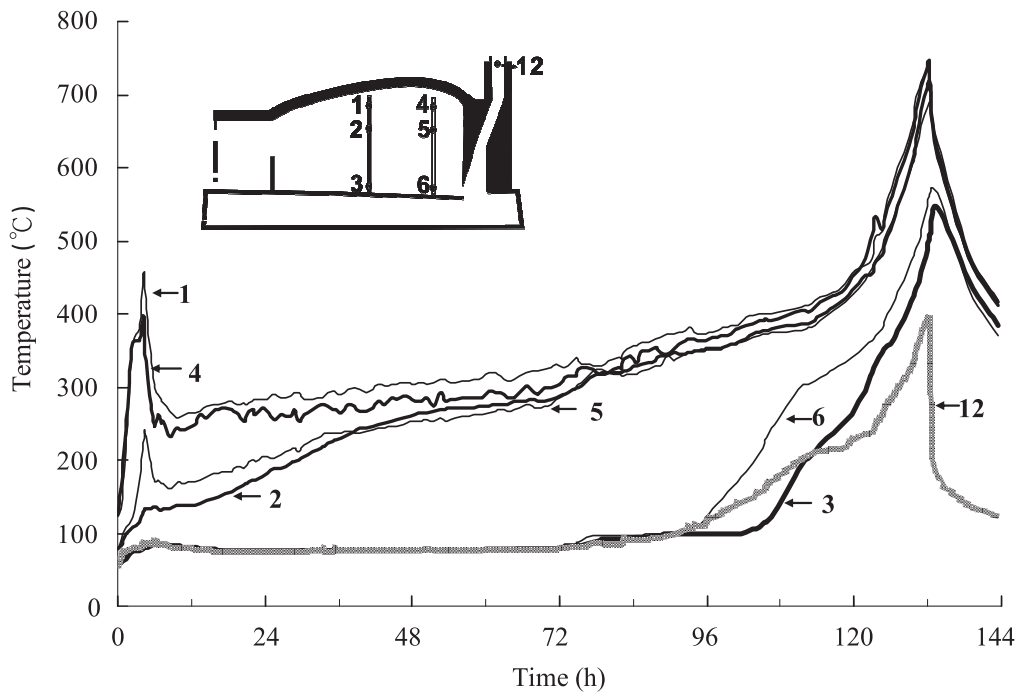


Fig. 2. Temperature curves of the carbonization process (measurement points nos. 1~6 and 12).

炭性質之影響，本研究使用5個置滿長度20 cm之烏心石材之不銹鋼圓筒，垂直堆疊並置於窯後方之煙口前30 cm處，於炭化過程中該等圓筒內之溫度變化，如Fig. 3所示。由Fig. 3可得知距窯內地面90 cm之最上層之溫度上升最早，依序為距窯內地面70 cm之第四層、距窯內地面50 cm之第三層、距窯內地面30 cm之第二層，而距窯內地面10 cm之最下層者最慢，亦顯示土窯內炭化過程中，在無外加熱源之情況下，其熱分解即炭化過程由上而下，封窯時各層之最高炭化溫度由上而下分別為707、690、651、617、578°C。

三、燃料使用率與收炭率

烏心石疏伐木製炭之燃料使用率與收炭率如Table 3所示。由Table 3得知烏心石疏伐木之進窯質量為2732 kg，燃料質量包括預熱與點燃引火材所使用之燃料共為336 kg，與進窯質量相比較，其燃料使用率為12.30%，出窯之木炭質量為506 kg，為進窯烏心石疏伐木質量之18.52%，可知以土窯生產1 kg之木炭約須5.4 kg之生材，若以進窯質量之絕乾質量為基準即扣除木材中46.3%之含水率，則其收炭率為27.10%，與光蠟樹收炭率25.42%者相近(Hwang et al. 2013)。

Table 3. Percentage of wood fuel use and yield of charcoal for charcoal making with thinned wood of *Michelia compressa*

Weight of wood a (kg)	Weight of wood fuel b (kg)	Moisture content c (%)	Weight of charcoal d (kg)	Percentage of wood fuel use ¹⁾ e (%)	Yield of charcoal ²⁾ f (%)
2732	336	46.3	506	12.30	27.10

¹⁾e = (b/a) × 100; ²⁾f = [d/(a/(1+c))] × 100.

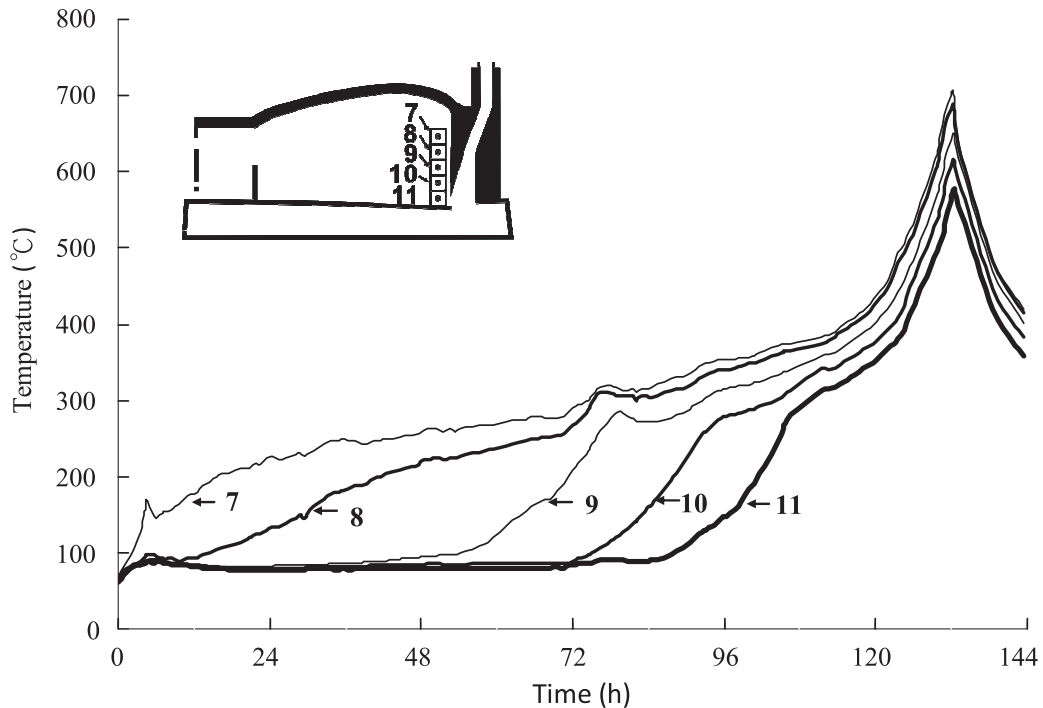


Fig. 3. Temperature curves of the carbonization process (measurement points nos. 7~11).

四、木炭之基本性質

不同炭化溫度烏心石木炭基本性質之試驗結果，如Table 4所示。由Table 4得知烏心石木炭精煉度為1.9~6.2隨炭化溫度之增高而增大，pH值為8.57~9.42，隨炭化溫度升高而略為升高，真密度為1.549~1.829 g cm⁻³，隨炭化溫度升高而明顯增大，而含碳量79.35~81.46%，隨炭化溫度升高而有略為增加之趨勢，雖然炭化溫度690°C之pH值與碳含量均較707°C者略高，但由Table 4之標準偏差可知其差異性不大。又上述試驗結果顯示烏心石木炭之基本性質依炭

化溫度而不同，其趨勢與柳杉木炭(Lin et al. 2008)及銀合歡木炭(Hwang et al. 2010)之試驗結果相似。

五、碳保留率

Table 5所示為烏心石疏伐木製造木炭之碳保留率，由Table 5得知烏心石疏伐木與木炭之含碳量分別為45.58%與80.48%，其中木炭之含碳量係為Table 4所示5種不同炭化溫度含碳量之平均值。為了計算碳保留率，Table 5中之木材質量係為進窯供作製炭用之木材質量，而木材之

Table 4. Properties of wood charcoal at different carbonization temperatures

Carbonization temperature (°C)	Degree of refining	pH value	True density (g cm ⁻³)	Carbon content (%)
707	1.9±0.3	9.34±0.06	1.829±0.01	80.88±0.40
690	2.3±0.2	9.42±0.05	1.727±0.02	81.46±0.28
651	3.5±0.3	9.36±0.04	1.698±0.01	80.61±0.26
617	5.2±0.3	8.83±0.03	1.598±0.02	80.08±0.11
578	6.2±0.4	8.57±0.05	1.549±0.05	79.35±0.12

碳重為扣除水分之木材絕乾重與木材含碳量之乘積，同樣地木炭之碳重亦由Table 3之木炭質量與木炭含碳量之乘積，再由木炭碳重與木材碳重之比值計算出烏心石燒製木炭之碳保留率為47.84%，與銀合歡木炭之46.10%相近(Hwang et al. 2010)，然而於製炭時仍有少部分之碳元素於熱分解之過程中轉換成木醋液之有機物而未予計算，因此碳保留率應可略為增高。

六、木醋液之收集

不同階段煙囪口溫度木醋液收集百分率與收集速度之結果，如Table 6所示，由Table 6可得知煙囪口溫度145℃以下之木醋液收集時間為81 h，收集量總計為286.6 kg，為烏心石疏伐木質量2732 kg之10.49%，其中煙囪口溫度

100℃以下之收集量為243.7 kg，占總收集量之85.03%，煙囪口溫度101℃以上之收集量較少。

Fig. 4所示為木醋液收集速度與煙囪口溫度之上升之變化，由Fig. 4顯示木醋液之收集速度非固定，係土窯製炭過程中為避免窯內自發性炭化即一次炭化受到影響，採用開放式並利用集煙罩、集煙管、集煙箱與冷卻管收集木醋液(Hwang et al. 2011)，因而木醋液之收集速度除了受到窯內炭化條件之影響外，亦受到窯外氣溫與風速等因素之影響。

七、木醋液之基本性質

不同煙囪口溫度烏心石木醋液基本性質之試驗結果，如Table 7所示。由Table 7得知烏心石木醋液之比重為1.005~1.008，隨煙囪口溫度

Table 5. Carbon retention of wood charcoal for charcoal making with thinned wood of *Michelia compressa*

Weight of wood a (kg)	Carbon content of wood g (%)	Weight of carbon in wood ¹⁾ h (kg)	Carbon content of charcoal i (%)	Weight of carbon in charcoal ²⁾ j (kg)	Carbon retention ³⁾ k (%)
2732	45.58	851.1	80.48	407.2	47.84

¹⁾ $h = (a/(1+c)) \times g$; ²⁾ $j = d \times i$; ³⁾ $k = (j/h) \times 100$; for c and d refer to Table 3.

Table 6. Collection of wood vinegar at different temperatures at the chimney exit

Temperature of chimney exit (°C)	Time of collection (h)	Quantity of collection (kg)	Percentage of yield (%)	Collection speed (kg h ⁻¹)
≤80	51.0	188.8	65.87	3.70
81~90	9.0	30.6	10.68	3.40
91~100	9.0	24.3	8.48	2.70
101~120	6.0	18.6	6.50	3.10
121~145	6.0	24.3	8.47	4.05

Table 7. Basic properties of the wood vinegar collected at different temperatures at the chimney exit

Temperature of chimney exit (°C)	Specific gravity	pH value	Acidity (%)	Tar content (%)
80~82	1.005 ± 0.000	2.41 ± 0.01	5.22 ± 0.05	0.27 ± 0.01
90~92	1.005 ± 0.000	2.52 ± 0.01	5.56 ± 0.06	0.39 ± 0.02
100~105	1.006 ± 0.000	2.87 ± 0.00	4.66 ± 0.06	0.20 ± 0.01
120~125	1.007 ± 0.000	2.85 ± 0.00	5.04 ± 0.05	0.11 ± 0.01
140~145	1.008 ± 0.000	3.08 ± 0.01	4.90 ± 0.05	0.31 ± 0.01

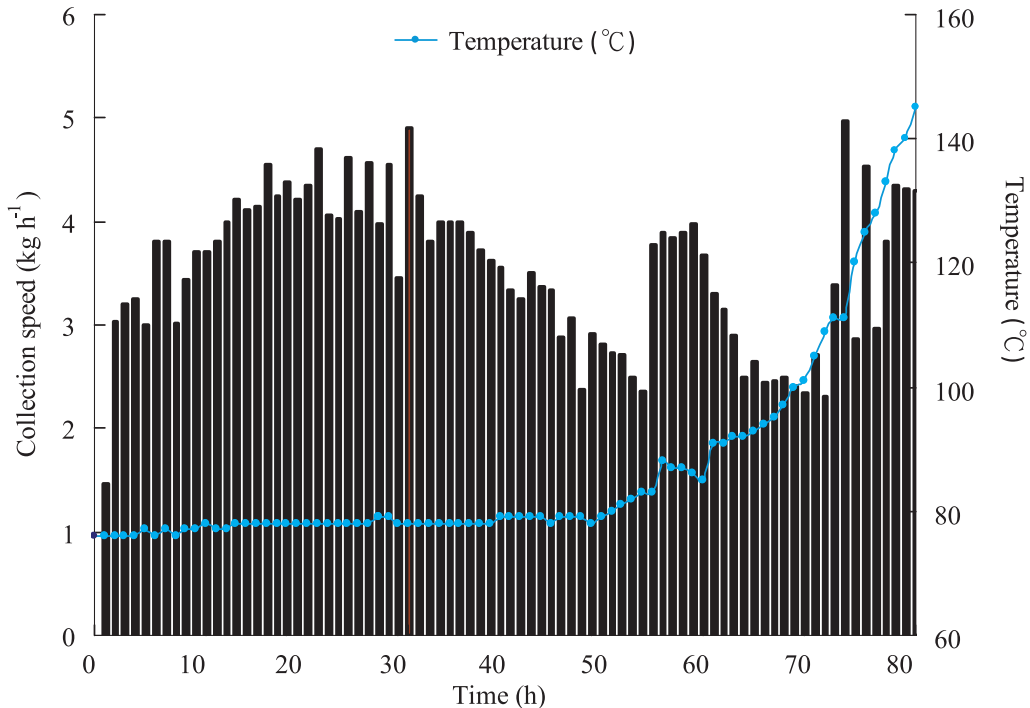


Fig. 4. Changes in the collection speed of wood vinegar and the rise of the chimney temperature.

升高之增加不甚明顯，係因木醋液中有機物約占6~41%，依樹種而有相當程度之差異，其中大部分為醋酸，水約占59~94% (Yatagai et al. 1988)，因而木醋液之比重受窯內炭化溫度之影響較不明顯。pH值為2.41~3.08，隨煙囪口溫度升高而有略增之趨勢。酸度為4.66~5.56%，木焦油含量0.11~0.39%，兩者受煙囪口溫度升高之影響不明顯。

八、木醋液之成分

不同煙囪口溫度下烏心石木醋液之成分分析結果，如Table 8所示。由Table 8得知酸類成分之含量最高，為51.2~59.2%，受煙囪口溫度上升之影響不明顯，竹醋液中酸類成分亦為最高(Ho et al. 2007)，酚類成分含量次高，為19.8~22.6%，較酸類成分明顯減少，受煙囪口溫度上升之影響亦不明顯。醇類成分含量再次高，為15.7~20.6%，隨著煙囪口溫度上升而降低。中性物質之含量最少，為5.3~6.4%，受煙囪口溫度上升之影響亦不明顯。

然而，酸類成分中醋酸之含量最高為47.3~50.9%，依序丙酸(propanoic acid)之含量為2.5~3.4%及丁酸(butanoic acid)之含量為0.3~1.0%；酚類之成分中紫丁香醇(syringol)之含量最高為6.5~8.7%、愈創木酚(guaiacol)之含量為3.7~7.9%及酚(phenol)之含量為2.2~3.4%；醇類成分中甲醇(methanol)含量最高為7.1~13.3%，其次為丙酮醇(acetol)之含量為2.4~4.1%及1-羥基-2-丁酮(1-hydroxy-2-butanone)之含量為0.7~1.9%；中性物質中丁內酯(butyrolactone)之含量為2.6~4.3%，其次為呋喃甲醛之含量為(furfural) 0.9~2.1%。

結論

本研究使用之土窯點燃窯內上層之引火材後不再添加燃料，可利用木質系材料自發炭化之特性，在氧氣不足之條件下完成一次炭化，為了提升木炭品質，其後再引入大量之空氣繼續進行精煉即二次炭化，由於土窯製炭

Table 8. Main composition of the wood vinegar collected at different temperatures at the chimney exit

Temperature of chimney exit (°C)	Composition (%)			
	Acidic compounds	Phenolic compounds	Alcohol compounds	Neutral compounds
80~82	51.1	22.6	20.6	5.7
90~92	54.4	20.9	18.3	6.4
100~105	56.7	20.9	17.0	5.4
120~125	55.2	21.9	16.9	6.0
140~145	59.2	19.8	15.7	5.3

時無外加熱源，使得窯內炭化溫度之差異較明顯，最高溫度可達700°C以上，而最低溫度約為550°C。由本研究之試驗結果得知木炭之pH值與含碳量受炭化溫度之影響較不明顯。精煉度隨炭化溫度之增高而明顯降低，真密度隨炭化溫度之增高而增大，兩者可作為木炭品質或炭化程度之評估指標，又由本研究之試驗結果得知木醋液受炭化溫度之影響較木炭者不明顯。

由本研究結果得知以烏心石疏伐木製造木炭之碳保留率可達47.84%，燃料使用率僅12.30%，顯示土窯製炭時所需之熱源甚少且不使用煤、天然氣或柴油等化石燃料，因此土窯製炭對炭保存與減少二氧化碳排放量均具有正面之意義。今後可期以平地造林加工利用價值低之疏伐木與修枝材作為製炭之原料，進而達到有效利用森林資源之目的。

引用文獻

Hayashimoto M, Suzuki Y, Watanabe H, Okuyama T. 2003. Reduction of indoor radon concentration by radon adsorption on charcoal. I. Radon adsorption capacity of sugi charcoals and its dependence on carbonizing temperature. *Mokuzai Gakkaishi* 49(2):131-7. [in Japanese with English summary].

Ho CL, Wang CL, Hwang GS. 2007. Component analyses and anti-house dust mite efficiency of Moso bamboo vinegar. *For Prod Industry* 26(2):141-8. [in Chinese with English

summary].

Hwang GS, Lee CM, Ho CL, Yu HY. 2011. Study on quality analysis and development of the high value-added products for charcoal made from *Leucaena leucocephala* waste wood. *J Natl Park* 21(2):60-72. [in Chinese with English summary].

Hwang GS, Lee CM, Ho CL, Yu HY, Wang CH, Yu HM. 2013. Study on earthen kiln charcoal making with branches of *Fraxinus fimosana* pruned from plain afforestation. *Q J Chin For* 46(1):63-72. [in Chinese with English summary].

Hwang GS, Lee CM, Wang CH, Yu HY. 2010. Making charcoal from wood of *Leucaena leucocephala* in Kenting National Park. *J Natl Park* 20(3):25-33. [in Chinese with English summary].

Ishihara S. 1999. Wood charcoal as functional carbon materials. *J Soc Mater Sci Jpn* 48(5):473-82. [in Japanese].

Isobe K, Fujii H, Tsuboki Y. 1996. Effect of charcoal on yield of sweet potato. *Jpn J Crop Sci* 63(3):453-9. [in Japanese with English summary].

Jodai S, Yano S, Uehara T. 1989. Components of wood-vinegar liquors and their smoke flavors. *Mokuzai Gakkaishi* 35(6):555-63. [in Japanese with English summary].

Lin YJ, Ho CL, Yu HY, Hwang GS. 2008. Study on charcoal production with branches

and tops wood of *Cryptomeria japonica* using an earthen kiln. Q J Chin For 41(4):549-58. [in Chinese with English summary].

Manabe T, Doi Y, Sakawa M. 2010. Use of charcoal to recarburizer for cast steel. J JFS 82(8):491-4. [in Japanese].

Matsuki N, Mitamura T, Doi N. 1998. Effect of wood vinegar to fungus disease of silkworm, *Bombyx mori*. J Seric Sci Jpn 62(2):143-5. [in Japanese with English summary].

Meguro S, Kawachi S, Tanaka T. 1992. Protection of *Lentinus edodes* from mycoparasites by acetic acid and wood vinegars. Mokuzai Gakkaishi 38(11):1057-62. [in Japanese with English summary].

Miyafuji H, Saka S. 2006. Wood charcoal as old but new material-materials for energy or environment cleaning. J Soc Mater Sci Jpn 55(4):356-62. [in Japanese].

Murano T. 2005. Effect of provision of charcoal feed against the development and meat quality in the Bouson native fowls. Bull Chiba Prefect Livest Res Center 5:19-22. [in Japanese].

Numata K, Ogawa T, Tanaka K. 1994. Effect of pyroligneous acid (wood vinegar) on the several soilborne diseases. Proc Kanto-Tosan Plant Prot Soc 41:107-110. [in Japanese].

Ohgama T, Imamura Y, Norimoto M, Abe K, Tatsumoto H. 2005. Humidity conditioning by wood charcoal. Mokuzai Gakkaishi 51(5):334-9. [in Japanese with English summary].

Oshima H, Kitamura T, Sato T, Ishitobi Y, Nagano K. 2007. Utilization of charcoal from waste wood as an adsorbent material for water treatment. J Jpn Soc Waste Manage Exp 18(3):211-7. [in Japanese with English summary].

Saito Y, Mori M, Shida S, Arima T. 2000. Formaldehyde adsorption and desorption properties of wood-based charcoal. Mokuzai Gakkaishi 46(6):596-601. [in Japanese with

English summary].

Shibutani S, Yamauchi S, Kirikoshi K, Yatagai M. 2014. Chemical deodorant effects of pyroligneous liquids from woody materials. Mokuzai Gakkaishi 60(5):261-8. [in Japanese with English summary].

Shirakawa N, Fukazawa M. 1998. Studies on the plant growth regulatory effect of pyroligneous acid to turfgrasses. Part I : Some characteristics of pyroligneous acid. J Jpn Soc Turfgrass Sci 26(2):113-23. [in Japanese with English summary].

Tsuzuki E, Morimitsu T, Matsui T. 2000. Effect of chemical compounds in pyroligneous acid on root growth in rice plant. Rep Kyushu Br Crop Sci Soc Jpn 66:15-6. [in Japanese].

Uehara T, Horio Y, Furuno T, Jodai S. 1993. Effect of wood vinegars on germination and radicle growth of seed plants. Mokuzai Gakkaishi 39(12):1415-20. [in Japanese with English summary].

Uddin SMM, Murayama S, Ishimine Y, Tsuzuki E. 1994. Studies on sugarcane cultivation. 1. Effects of the mixture of charcoal with pyroligneous acid on cane and sugar yield of spring and ratoon crops of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). Jpn J Trop Agr 38(4):281-5.

Watanabe K, Sumiyoshi K, Kaneko N, Yokota K, Kawata C. 2004. Antifungal effect of “Mokusaku-Eki” against *Trichophyton mentagrophytes* and *Trichophyton rubrum*. Bull Fac Health Sci Okayama Univ Med Sch 14:129-33. [in Japanese with English summary].

Yatagai M, Ito R, Ohira T, Oba K. 1995. Effect of charcoal on purification of wastewater. Mokuzai Gakkaishi 41(4):425-32. [in Japanese with English summary].

Yatagai M, Unrinin G. 1987. By-products wood carbonization III. Germination and growth acceleration effects of wood vinegars on plant seeds. Mokuzai Gakkaishi 33(6):521-9.

Yatagai M, Unrinin G, Ohira T. 1988. By-products wood carbonization IV. Components of wood vinegars. *Mokuzai Gakkaishi* 34(2):184-188.

Yoshida T, Terao H, Tsuzuki E, Kamiunten H. 2000. Effects of components of pyrolygenous acid on the several plant pathogenic fungi. *Jpn J Crop Sci* 69(2):196-7. [in Japanese].

