

稻米電磁波加熱與模擬系統建立之研究

陳政佑^[1] 萬一怒^{[1]*} 洪梅珠^[2] 連振昌^[3]

摘要 本研究發展了一套 2.45 GHz 之稻米電磁波加熱系統，並建立電腦模擬分析及其 3D 立體圖顯示電磁場分佈模態，作為探討稻米殺蟲時微波共振腔內的電場強度分佈與實際米溫之分佈關係。研究顯示，圓柱共振腔能產生 TM010 和 TE111 能量分佈模態，而共振腔在空腔和有負載時的電場模態並不相同。以米柱加熱實驗顯示，電腦模擬電場強度計算之米溫分佈曲線與實驗量測之米溫分佈曲線相關係數為 0.89。而白米溫度在 25°C 到 80°C 加熱區間，白米的含水率與米溫呈線性反比關係， $R^2=0.77$ 。本研究結合模擬分析與實驗探討微波加熱之能量分佈，可協助電磁波穀物殺蟲系統之發展，深入瞭解腔體設計、熱源分佈及稻米在電磁波中的相關特性。

關鍵詞：介電加熱、電磁波、模擬分析、穀物殺蟲、微波、共振腔。

Establishment and Simulation of Rice Electromagnetic Heating System

Cheng-Yu Chen^[1] Ye-Nu Wan^{[1]*} Mei-Chu Hong^[2] Cheng-Chang Lien^[3]

ABSTRACT This study established a 2.45 GHz rice electromagnetic heating system and its computer simulation model to investigate the possible generated electromagnetic field distribution modes, as well as to study the relationship between the electric field and the temperature distribution during rice disinfestation using the system. According to the studies, in the cylindrical cavity resonator will be generated two basic electromagnetic modes of TM010 and TE111. The resonant cavity is empty or loaded with rice resulting in different electric field modes. When the resonator loaded with a 2.5 cm diameter rice cylinder, the rice temperature distribution curve of the simulation to the electric field and the rice temperature distribution curve of the experimental measurement have correlation coefficient of 0.89. In the rice heating from 25°C to 80°C period, the moisture content of the rice has a linear inverse relationship with the temperature, $R^2=0.77$. This study combining simulation and experimental methods assists understanding the characteristics of cavity design, the energy distribution and the rice heated pattern in development of microwave grain insecticide system.

Key Words: Dielectric heating, electromagnetic waves, simulation analysis, grain insecticide, microwave, resonant cavity.

一、前言

微波為頻率從 300MHz 到 300GHz 之間的電磁波，其

中 915MHz 和 2.45GHz 已廣泛應用於工業與食品業^[5]，例如材料的高溫燒結^[1]、微波爐於食品的解凍與調理、滅菌^[18]，以及木材、菸草和穀物乾燥^[6,7]等領域。材料中的極性分子，

[1] 國立中興大學生物產業機電工程學系

Dept. of Bio-industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 40227, Taiwan.

[2] 行政院農業委員會台中區農業改良場

Taichung District Agricultural Research and Extension Station, COA, Changhua 51544, Taiwan.

[3] 國立嘉義大學生物機電工程學系

Dept. of Biomechatronic Engineering, National Chiayi University, Chiayi 60004, Taiwan.

* Corresponding Author. E-mail: ynwan@nchu.edu.tw

例如水分子，會受到電磁場驅使轉動與震動，經分子間的摩擦與碰撞將電磁能轉化為熱能，為一種內部加熱過程，熱能不需要經由外部長時間的傳導，因此具有加熱速度快、時間短等優點。然而在共振腔中電磁波的反射、透射等特性，會形成干涉、駐波等現象，加熱過程中材料內會有冷熱點的分佈，因此有些微波爐應用了轉盤、材料內水蒸氣移動、設計多模共振電磁場分佈等方式來改善。

應用電磁波於食品及殺蟲的研究，包括電磁波頻率影響材料或蟲體之介電係數、電磁波穿透深度等物理性質，以及探討蟲的致死溫度、處理時間、能量密度(W/m³)、致死率等關係^[9,13,16]。

台灣位於亞熱帶，食米生蟲問題層出不窮，經常造成嚴重地經濟損失以及對產業聲譽負面的影響。傳統積穀害蟲防治使用藥劑薰蒸法，具有藥物殘留、米蟲消滅不完全、大氣環境污染等許多問題。例如米象蟲會鑽洞產卵在米粒裡面孵化生長，雖經過礱穀與精米等加工過程或薰蒸，都無法完全清除，這也是市售真空包裝米開封後米蟲仍會滋生的原因。因此國內外相關產業亟需發展快速有效、無藥殘留、適合產業需要的防治方法。然而發展電磁波殺蟲，受限於電磁波能量分佈、穿透力、殺蟲效果與穀物品質成反比、無一致性適用的腔體設計、設備成本高等特性之影響，雖然其應用潛能長期被看好，但是一直缺乏實用之系統^[9,17]。

本研究目的在建立基本模態的電磁波加熱系統，應用模擬分析軟體建立電磁波在空腔及負載時之電場分佈與 3D 加熱模型，並與實驗量測之米溫對照，探討白米在電磁波場之加熱特性，作為發展電磁波殺蟲系統之依據。

二、實驗設備與方法

(一) 電磁波加熱系統

電磁波加熱系統包括磁控管、波導管與共振腔構成的封閉空腔(圖 1)。磁控管(Panasonic 2M210-M1)輸出功率 900 W、電極電壓 4.4 kV、由震盪器產生 2.45 GHz 電磁波，經天線耦合至波導管導入共振腔形成特定的電磁波場，能量被限制在腔體內，金屬腔體本身並不產生對外的電磁波輻射損耗。系統使用 220 V 交流電，需配合變壓器使用。

波導管使用了可傳輸大功率之不鏽鋼矩形波導管(WR-340)，截面寬(a)與高(b)分別為 0.086 m 與 0.043 m。不同模態常數 m 、 n ，即 a 、 b 半駐波數，所能形成電磁波模態的截止頻率(f_c)如式(1)^[3]， f_c 需小於系統頻率。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

μ_0 為真空磁導率(1.2566x10⁻⁶ henry/m)、 ϵ_0 為真空介電常數(8.8542 × 10⁻¹² F/m)。波導管長 20 cm，電阻量測值為 7.2×10⁻⁷Ω。

共振腔電磁場模態與腔體形狀、尺寸、系統頻率以及加熱材料的介電性質、形狀、大小等因素相關。共振腔為不鏽鋼圓柱腔，腔體半徑(r)與高(h)分別為 4.7 cm 與 12.9 cm。其截止頻率如式(2)^[3]。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{(\mu_0\epsilon_0)}}\sqrt{\left(\frac{x_{mn}}{r}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{h}\right)^2} \quad (2)$$

m 、 n 、 l 為模態常數分別代表在圓周、半徑、腔高的駐波數。 x_{mn} 為貝索函數(Bessel function of first kind)第 m 階第 n 個根。

共振腔輸出功率與穩定性之量測是以加熱水 2 分鐘作系統暖機，再將不吸收微波之燒杯裝 250 g 水，以玻璃棒攪拌量測水的初溫 (K 型熱電偶，泰仕電子，TES-1384) 之後置於共振腔內，封蓋開啟電源加熱各 20、40、60、80、100 秒，取出燒杯經攪拌後量測加熱後的水溫，實驗採 5 重複，以統計計算共振腔加熱純水所輸出之最大功率。

(二) 白米性質

台南 11 號白米取自霧峰農會一期稻，其物理性質及介電性質等參數計算如下：

含水率(wc)：採烘箱法，將 100 g 白米以 105°C 乾燥 72 小時，計算其濕基含水率(ASAE Standards, 2003)。實驗白米之含水率為 12.4±0.4% (w.b.)。

熱傳導係數(k)：稻米熱傳導係數測定可使用線熱源法，



圖 1 穀物微波加熱系統

Fig. 1 Rice microwave heating system

白米在室溫及 13% (w.b.) 含水率時約為 0.13 (W/m°C) (萬與蕭, 1984)。

介電常數(ϵ')與介電損耗因子(ϵ''): 白米之複介電係數為 $\epsilon_c = \epsilon' - \epsilon''i$ 。其介電常數(ϵ' , dielectric constant)和介電損耗因子 ϵ'' (dielectric loss factor)與含水率相關, 如式(3)與式(4)所示^[14]:

$$\epsilon' = 3.92wc^2 + 15.36wc + 1.3 \quad (3)$$

$$\epsilon'' = 3.39wc^2 + 3.75wc + 0.1 \quad (4)$$

白米之複介電係數為 $3.27 - 0.62j$, $i = \sqrt{-1}$ 。

體密度(ρ): 將白米裝滿不吸收微波之圓形玻璃容器, 以振動檯振動 1 分鐘, 使白米在容器中形成緊密排列, 分別量測白米重量與容器體積, 計算白米體密度約為 0.856 (g/cm³)。

比熱(C_p): 米的比熱是含水率的函數, 如式(5)所示^[10]:
 $C_p = 1180 + 3764wc$ (5)
 白米於 12.4% (w.b.) 的比熱為 1646.7(J/kg°C)。

實驗使用長 12.9 cm、直徑 2.5 cm 的鐵弗龍管, 裝入白米經振動緊實 1 分鐘後使用。

(三) 模擬分析

模擬分析使用 COMSOL Multiphysics V4.0 工程模擬分析軟體的電磁波模組與熱傳模組, 分別計算系統為空腔與置入負載米柱時之電場強度與米溫的變化。模擬軟體使用有限元素法解馬克斯威爾(Maxwell)及熱傳等方程式[式(6)、式(7)、式(8)], 經帶入設定的邊界條件迭代演算獲得收斂結果, 並能以彩色 3D 立體圖表示電場強度的空間分佈。

電磁波模組以馬克斯威爾方程式, 如式(6)所示, 計算腔體內的電場強度分佈^[15]。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu'} \nabla \times \vec{E} \right) - \frac{\omega^2}{c} (\epsilon' - i\epsilon'') \vec{E} = 0 \quad (6)$$

$\nabla \times ()$ 為旋度、 E 為電場強度、 μ 為導磁率、 c 光速(m/s)、 $\omega = 2\pi f$ 。

材料單位體積吸收電磁能的功率 P (W/m³) 如式(7)所示^[13,15]是電場強度 E (V/m)、頻率 f (Hz) 和 ϵ'' 的函數, 其中 σ 為材料導電度(S/m)。

$$P = \sigma |\vec{E}|^2 = 2\pi\epsilon_0\epsilon''f |\vec{E}|^2 \quad (7)$$

依據材料吸收功率, 可計算材料中的溫度變化, 其熱傳模組方程式如式(8)所示^[15]。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = P \quad (8)$$

ρ 為材料密度(kg/m³)、 t 為加熱時間(sec)、 T 為溫度(°C)、 k 為材料的熱傳導係數(W/m°C)。

加熱模型中波導管、共振腔與米柱的網格設計是採用四面體元素。波導管和共振腔體的網格為 1.64 cm, 而米柱為 0.90 cm, 均小於 2.45 GHz 波長約 12.2 cm 的 1/6, 符合奈奎斯特準則(Nyquist criterion)建議使用 1/2 波長以及呂^[2]使用小於 1/4 波長的要求。腔壁與米柱之間設定為充滿空氣, 米管不吸收微波, 對電磁波場的影響可忽略。圖 2 所示為有限元素法數值模型的網格架構示意圖。模擬使用 64 位元之 Win7 個人電腦系統, Intel Core i5、2.80 GHz、16 GB 主記憶體。

波導管壁與共振腔壁之邊界條件, 均假定可以無損的反射電磁波(Knoerzer et al. 2008), 即 $\vec{E} \times \hat{n} = 0$ 以及 $\vec{H} \cdot \hat{n} = 0$, 其中 \vec{H} 為磁場, 而 \hat{n} 代表腔壁的法向量。

(四) 實驗步驟

米管填滿白米的平均重量約為 54.2 g, 放入共振腔封蓋後開啟電源加熱各 20、30 及 40 秒。取出加熱後的米柱在 7 個不同位置以 K 型熱電偶垂直管壁插入約 1 cm 至米柱軸心, 如圖 3 所示。紀錄各點加熱後的米溫探討與電場模態分佈計算之米溫的差異, 實驗採 5 重覆。實驗從關閉電源取出米柱到量測米溫的操作時間約需 100 秒。從加熱 20 秒、30 秒及 40 秒後之米柱量測點分別挖取該點白米各約 15 g, 以烘箱法量測白米含水率(w.b.), 建立電磁波加熱時米溫與含水率之關係。

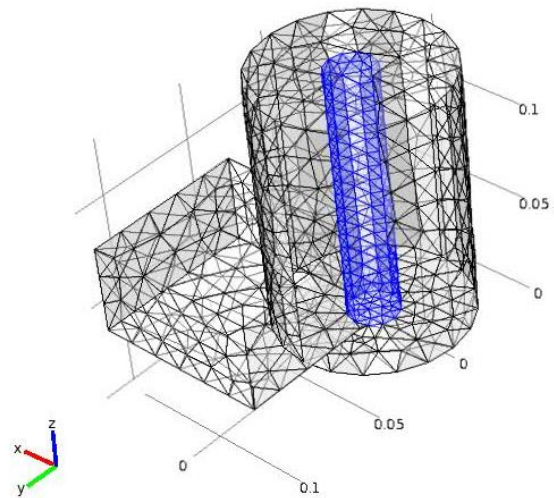


圖 2 介電加熱模型及網格

Fig. 2 Dielectric heating model and the grid

三、結果與討論

(一) 電磁波加熱系統

計算波導管不同模態之 f_c 如表 1 所示，顯示 TE10 為主模態，其 f_c 為 1.743×10^9 Hz 可傳輸系統電磁波，其餘模態 f_c 皆高於系統電磁波頻率。圖 4 所示為波導管電場 3D 分佈，兩個深紅色表示高電場強度能量集中點，為電磁波的駐波。

圖 4 顯示圓形共振腔空腔電場的 TM010 模態，其 f_c 為 2.445×10^9 Hz，小於系統電磁波頻率，此模態電場能量集中在腔體中心，不隨腔體高度與時間而改變。另外此共振腔也可產生在軸向有電場強度變化的 TE111 模態，其 f_c 為 2.21×10^9 Hz，而其它模態 f_c 均大於系統頻率 (表 2)。

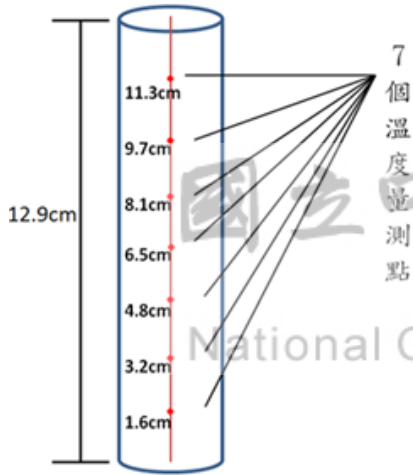


圖 3 溫度量測點示意圖

Fig. 3 Schematic diagram of temperature measurement point

表 1 矩形波導管模態截止頻率

Table 1 Rectangular waveguide mode cutoff frequency

模態	f_c (Hz)
TE10	1.74×10^9
TE20	3.49×10^9
TE02	3.49×10^9
TE11	3.90×10^9
TE21	4.93×10^9
TE12	7.19×10^9

* 最低 6 個模態的截止頻率

初溫 20°C 純水 250 g 在 20~100 秒期間經不同時間加熱後量測水溫，計算共振腔對水加熱之平均輸出功率為 620.0 ± 7.2 W，不同加熱時間所量測功率之變異數分析 (ANOVA) ($F = 0.78 < F_{\alpha=0.05}$) 顯示無顯著差異 (圖 5)，共振腔的最大能量供給穩定。

波導管長約 20cm，電阻值為 $7.2 \times 10^{-7} \Omega$ ，經計算單位長度電磁波能量的損耗常數 $\alpha = 8.27 \times 10^{-7}$ (dB/m)，因此能量耗損可不計。水是良好的微波吸收介質，在共振腔中加熱系統可視為全負載。磁控管標示輸出功率為 900W，系統由磁控管產生電磁波經波導管至共振腔加熱水之效率約為 69%，其能量差可能包括了磁控管的轉換效率、腔壁歐姆功率損耗等損失及功率標示的誤差。由於磁控管會產生高熱，因此需要風扇冷卻，此系統包括變壓器和風扇，以鉗形功率計所量測輸入電源的平均總消耗功率約為 1606W。

(二) 白米介電加熱

空腔電磁場模態可做為系統與共振腔設計之參考依據。但是當腔內置入物體時電磁場模態則會有所變化，例如 TM010 模態共振腔在軸向加一段細圓柱導體不穩定，例如

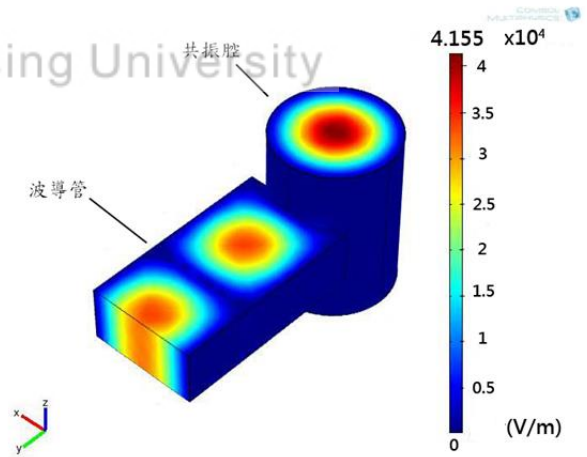


圖 4 系統之空腔電場強度分佈

Fig. 4 Cavities electric filed intensity distribution

表 2 共振腔模態之截止頻率

Table 2 Cot-off frequency of the resonant cavity mode

模態	f_c (Hz)
TE111	2.21×10^9
TM010	2.45×10^9 *
TM110	3.91×10^9
TM210	5.24×10^9

TM010 模態時，在共振腔軸向加一段細圓柱導體就可作為調諧的功能。

米柱初溫約為 25°C，於共振腔加熱 20 秒、30 秒及 40 秒後所量測中心軸各量測點之平均溫度 (±標準差)，以及依電場計算之米溫分佈曲線，如圖 7、圖 8 及圖 9 所示。各點米溫隨加熱時間而增加，溫度分佈與電場強度分佈相當一致且不隨加熱時間而改變。米柱加熱時之軸向電場有一個冷點位於米柱中間約 6.5 cm 處。圖 6 所示為加熱 20 秒後米柱之溫度分佈 3D 圖，顯示有近似於 TE111 模態之溫度分佈，但是能量分佈侷限於米柱內，與空腔時電場能量分佈不同。

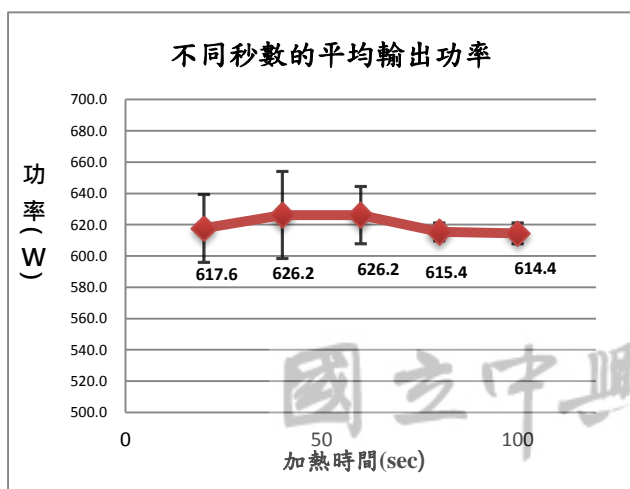


圖 5 共振腔加熱水的輸出功率
Fig. 5 Output power of the resonator cavity in hearty water

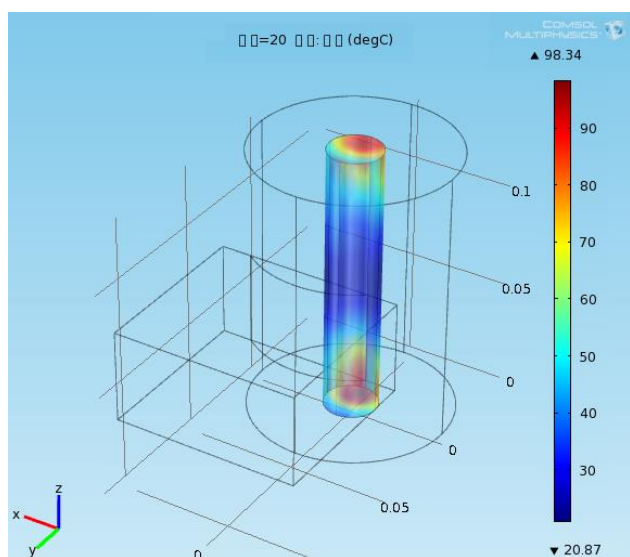


圖 6 白米加熱 20 秒之 3D 溫度分佈
Fig. 6 White rice 3D temperature distribution after heated 20 seconds

加熱 20 秒實驗量測的米溫與模擬計算的米柱溫度均呈 U 形分佈，兩邊的升溫斜率相似，但是在實際量測的米溫曲線尾端之升溫斜率有下降的現象，量測的米溫冷點在米柱中心約 29°C，兩端熱點約 74°C (圖 7)。

經過 30 秒加熱，實驗量測米溫在米柱兩端到距離 3 cm 處的米溫升高到約 80°C (圖 8)，經過 40 秒加熱，有更長一段米柱從兩端到距離 5 cm 處的米溫上升到約 80°C (圖 9)，當兩端升溫曲線已趨近水平，顯示接近 80°C 有米溫不再升高的現象。

圖 10 所示為白米三種不同加熱時間，7 個溫度量測點，各 5 重複實驗量測之平均溫度與對應模擬計算溫度的關係，其相關係數為 0.89，圖中虛線為溫度相符線。在 20°C~75°C 之間升溫曲線相當符合，實驗量測的米溫會略高於以電場強度計算的米溫，但是米溫升高到約 75°C 以上大約在 80°C 左

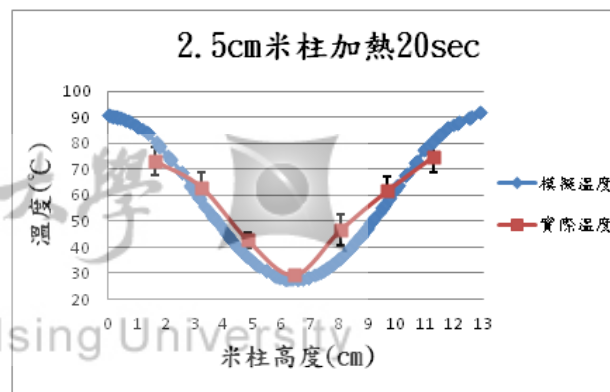


圖 7 米柱加熱 20 秒的溫度分佈
Fig. 7 Rice column temperature distribution after hearty 20 seconds

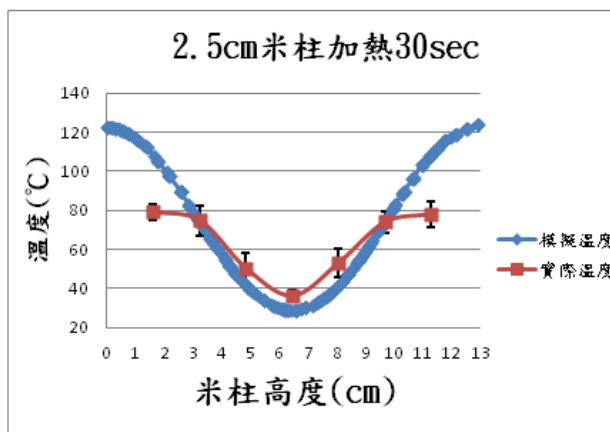


圖 8 米柱加熱 30 秒的溫度分佈
Fig. 8 Rice column temperature distribution after hearty 30 seconds

右即不再上升。此現象經量測米溫與含水率之變化顯示，電磁波加熱時，米溫由 25°C 升高到 80°C，所量測之米的含水率會由 12.6% (w.b.) 降低到約 10.3% (w.b.)，呈線性反比關係， $R^2 = 0.77$ 。由於水的汽化熱為 2266(J/g°C) 遠大於白米的比熱 1.65(J/g°C)，因此高溫時白米水份汽化吸熱會讓米溫不會如模擬計算之溫度曲線有持續上升的現象。

米柱軸向溫度乘上各溫度點相對的米體積以及密度 ρ 與比熱 C_p ，即為米柱所吸收之能量(W)。計算顯示米柱總吸收能量僅達到共振腔可輸出總能量[620(W) x t(sec)]約 25%，可能的原因是電磁場負載較小時，共振腔會有較大的歐姆功率損耗以及電磁波反饋磁控管而以熱能逸散。

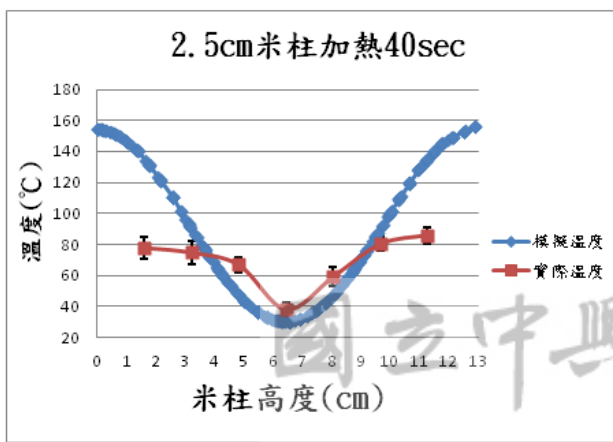


圖 9 米柱加熱 40 秒的溫度分佈
Fig.9 Rice column temperature distribution after hearty 40 seconds

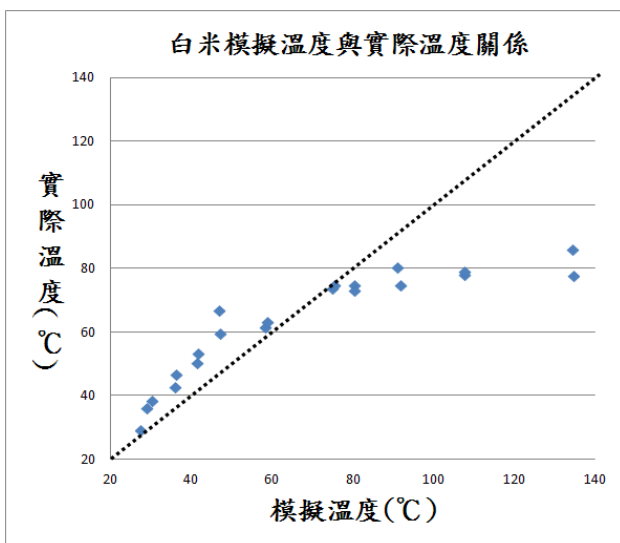


圖 10 管徑 2.5 cm 米柱量測與模擬之溫度分佈
Fig. 10 Measured and simulated temperature distribution of rice column

本研究顯示結合模擬分析與實驗，可以深入探討電磁波加熱白米的許多特性。能協助發展電磁波穀物殺蟲系統腔體設計與瞭解能量之分佈。

四、結論

本研究建立了 2.45 GHz 頻率之稻米電磁波加熱系統。模擬計算電場分佈顯示系統圓柱共振腔能產生 TM010 模態以及 TE111 模態之基本能量分佈模態。米柱加熱時，其 U 形電場與實驗量測之米溫分佈曲線符合，相關係數達 0.89。白米微波加熱時，隨著米溫上升在 25°C 到 80°C 區間與米含水率呈線性反比關係，而米水份的汽化熱是導致米溫維持在 80°C 的原因。空腔時和有負載時的共振腔電場模態有很大的不同，電磁波場的模態變化相當靈敏。本研究結合模擬計算實驗分析的方法，可以協助電磁波應用系統的發展。

參考文獻

- [1] 林瑞明 (2003)。「氮化鋁陶瓷材料之微波燒結與傳統燒結研究」，碩士論文，台南：國立成功大學。
- [2] 呂英華 (2006)。「計算電磁學的數值方法」，清華大學出版社 p.151-152。
- [3] 黃進芳 (2005)。「微波工程」，初版，台灣：五南出版社。
- [4] 萬一怒、蕭介宗 (1984)。「熱傳導係數測定器之研製及應用於農產品之測定」，農工學報 30(4): 114-124。
- [5] 劉鍾棟 (1998)。「微波技術在食品工業中的應用」，初版，p.2，中國輕工業出版社。
- [6] 曹潔穹、王健強、樊亞玲、趙宗儒 (2006)。「微波加熱鬆散在片菸製絲工藝中的應用」，菸草科技 3: 5-8。
- [7] 馮丁樹 (1996)。「循環式稻穀乾燥模式之建立及應用」，農業機械學刊 5(1): 1-15。
- [8] ASAE Standards (2003). "Moisture measurement - Grains and seeds." ASAE. Standard: ASAE S352.1.
- [9] Das, I., Kumar, G. and Shah, N. G. (2012). "Review Article: Microwave heating as an alternative quarantine method for disinfestation of stored food grains." *International Journal of Food Science*, Volume 2013, Article ID 926468, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/926468>.
- [10] Haswell, G. A. (1954). "A note on the specific heat of rice, oats, and their products." *Cereal Chemistry*, 31: 341-343.

- [11] Knoerzer, K., Regier, M. and Schubert, H. (2008). "A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications." *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, (9): 374-384.
- [12] Nelson, S. O. and Kantack, B. H. (1966). "Stored-grain insect control studies with radio-frequency energy." *J. Econ. Entomol*, 59(3): 588-594.
- [13] Nelson, S. O. (1996). "Review and Assessment of Radio-Frequency and Microwave Energy for Stored-Grain Insect Control." *Transactions of the ASAE*, 39(4): 1475-1484.
- [14] Prasad, A. & Singh, P. N. (2007). "A New Approach to Predicting the Complex Permittivity of Rice." *Transactions of the ASABE*, 50(2): 573-582.
- [15] Salvi, D., Boldor, D., Aita, G. M. and Sabliov, C. M. (2011). "COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids." *Journal of Food Engineering*, 104(3): 422-429.
- [16] Von Hippel, A. (1954). "Dielectrics and Waves." New York. John Wiley & Sons.
- [17] Wang, S., Monzon, M., Johnson, J. A., Mitcham, E. J. and Tang, J. (2007). "Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: Heating uniformity and energy efficiency." *Postharvest Biology and Technology*, 45: 240-246.
- [18] Zhang, H., Datta, A. K., Taub, I. A. and Doona, C. (2001). "Electromagnetics, Heat Transfer, and Thermokinetics in Microwave Sterilization." *AIChE Journal*, 47(9): 1957-1968.

2014 年 08 月 05 日 收稿

2014 年 09 月 01 日 修正

2014 年 09 月 20 日 接受