

真空預冷庫體結構分析與設計

莊曉明¹，李允中²

1. 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所碩士
2. 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所副教授，本文通訊作者

摘 要

真空預冷是蔬菜最有效的預冷方式之一，尤其對於葉菜類格外顯著，美日皆已發展完備。國內第一部自行研發完成的真空預冷庫已在雲林縣啓用，由於缺乏使用試驗數據，庫體並未經過嚴厲的設計過程，因此有待進一步的研究。電腦輔助工程分析為解決工程科學問題的利器，其中最為大量採用的數值分析技術如有限元素法等，尤其配合現今電腦硬體的進步，也促進了有限元素分析軟體在產業界的廣泛應用。本研究將以實測庫體模型及電腦軟體模擬分析真空預冷庫體，研究中使用 Cosmos / Design Star 有限元素分析軟體，模擬庫體模型與現有預冷設備結構，對照模型所量測的數據；以建立預冷庫體承受真空運轉的能力，提供真空預冷設備的設計依據。

關鍵詞：真空預冷庫、電腦輔助工程分析、有限元素分析軟體、結構分析設計

STRUCTURE ANALYSIS AND DESIGN OF AVACUUM COOLER

Hsiao-Ming Chuang¹, Yeun-Chung Lee²

1. *Former Graduate Student, Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University.*
2. *Associate Professor, Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Corresponding Author.*

ABSTRACT

Vacuum cooling is one of the most effective methods for vegetable pre-cooling process. Although it is a very common practice in America and Japan, but in Taiwan, the first domestic manufactured vacuum cooler just started to operate in Yun-Lin County in 2001. Due to in short of experimental data, the vacuum cooler is not a well-designed equipment yet. Computer Aided Engineering (CAE) is an efficient way for solving engineering problems. The improvement of computer hardware nowadays, finite element method (FEM) becomes the most popular tool used in the industrial circles. This research endeavors to analysis a vacuum cooler by experiments and computer simulations using FEM. A 450mm×500mm×700mm scale experimental vacuum cooler was constructed for structure studies during vacuum operating. A

commercial design software named "Cosmos / Design Star" was used for computer simulations. The simulation data were compared with the experimental measurements. Both data were very consistence in displacements and strains on the structure surface during vacuum operation. The research offers the ability of vacuum cooler being accepted by vacuum operating, and CAE might be a good foundation of vacuum cooler design in the near future.

Keywords: Vacuum cooler , Computer Aided Engineering , Finite element method solver, Structure analysis and design

一、前 言

預冷是提高農產品品質、確保農民收益的一個有效方法。台灣預冷設備的設置已推廣多年，農民團體不但運用預冷設備進行冷藏前消除田間餘熱的作用，並且利用預冷的快速冷卻特性來降低運銷前產品的溫度，以保障產品的品質，常用方法有冰水預冷法、室冷法、壓差預冷法、真空預冷法等。預冷方法各有其優缺點，其中以真空預冷法最為快速。因應加入世界貿易組織(WTO)後所帶來的競爭壓力，本地的葉菜品質必須接受外來進口農產品的挑戰，因此使用預冷技術提高產品品質勢在必行。台灣預冷技術的發展已行之多年，水冷、冰冷、大型冷藏庫、壓差預冷技術已臻完備。由於水冷法與冰冷法容易造成農產品污染；大型冷藏庫的靜置室冷法耗時過長；壓差預冷法有操作不易與失水率過高的缺點。相反的真空預冷法具有快速、操作簡便且無污染的特性，近年來真空預冷設備已經成為葉菜生產區必備的設施。

真空預冷法在美國與日本推行甚早，在50年代美國開始使用在萵苣等葉菜類的預冷(Greinter and Kleis, 1962)；日本則於60年代末期開始研究並大量推廣應用於蔬果類的冷卻(石橋等人, 1969, 1971)。台灣真空預冷法的研究發展時間只有短短十餘年，相關研究皆偏重於產品與真空預冷設備使用上的關係(陳, 1986；郭與蕭, 1987)。國立台灣大學生物產業機電工程學系與恒資有限公司經產學合作，在雲林縣庄西鄉聯合自行開發一套每次處理一公噸葉菜類植物的真空預冷庫，此預冷庫經實際量測確實能在短時間內降低農產品溫度。後來各廠商競相仿製，目前國

內有大型真空預冷庫11座(林與李, 2004)。雖然真空預冷庫已經商品化，但國內外對於預冷庫結構方面的探討並不多見。

真空預冷庫體結構設計是屬於一種薄板壓力容器的設計，薄板應力應變分析在 Timoshenko, Stephen (1878~1972) 的一系列力學教科書有一專書「板殼理論」(Timoshenko and Woinowsky 1940) 書中應用彈性力學的理论探討各種負荷與邊界條件下薄板應力與應變，這方面較新的書籍有 Ventsel and Krauthammer (2001)。依據理論分析所得的解析解常被引用於工程設計手冊上如 Young (1989)、小栗 (1974) 等，後者為國內壓力容器設計廠商常遵守的設計規範。形狀與邊界條件較為複雜的薄板結構用解析方法不容易得到解答，有限元法分析提供一個有利的工具，Akin (1994) 與 Zienkiewicz and Taylor (2001) 等典型有限元法教科書都有關於薄板應力應變分析的章節。近年來商用軟體大量出現，許多商用軟體都具有分析結構體應力與應變的能力，如 ANSYS (Moaveni, 2003)、COSMOS / Design Star (2005)。後者為整合型的電腦輔助設計軟體方便工業上設計之用，但在學術界有許多應用的實例，如 Magnucki et al. (2004) 用此軟體探討薄壁樑的應力與座曲；Yao, et al. (2001) 用於超導體試驗設備的大型真空槽設計。

因此本研究目的為實際量測一實驗室用小型真空庫體，探討真空負荷對結構的影響。利用繪圖計算軟體 Think 3 Design 6.0 針對真空庫體的結構完整的繪製；接著以有限元素分析軟體 Cosmos Design Star 2.1 模擬在真空負荷下，大氣壓力對於庫體結構的影響；並利用實測結果與軟體模擬相互應證，再利用軟體模擬設計出最適的大型真空庫體。

二、設備與方法

為驗證有限元素分析軟體 Cosmos /Design Star 可以應用在真空預冷庫體的分析設計，本研究包括實測與電腦分析模擬等兩部份。研究使用一小型真空預冷試驗用庫體，在實際抽取真空下量測庫板與結構樑框特定點的位移以及應變，並以虎克定律通式公式計算求量測點的應力值。應用軟體繪出庫體結構幾何圖形並分析庫內抽取真空時，大氣壓力負荷在庫板與結構樑框所產生的位移、應變及應力。實測數據與電腦結構分析計算所得的值相比較，以建立一個可信的電腦模擬設計模式。

在模擬模式建立之後，為了設計出更安全、更經濟的庫體結構；本研究以電腦進行數種大型庫體結構的模擬設計，以提供廠商製造出能承受真空負荷且精簡的預冷庫體結構。

(一) 實驗設備

實驗過程所使用的儀器與設備包括：

1. 真空庫體

真空預冷庫庫體主要的結構為以鋼材構成的四面邊庫壁板與支持的主外框、背板、背板框、庫門、庫門框組成。本實驗使用適合放置一個蔬菜紙箱的真空冷卻庫體，其內尺寸為：450mm×500mm×700mm；庫壁與庫背板之板厚皆為 6mm；外框為口字形，厚度為 25mm，外尺寸為：562mm×612mm 如圖 1 所示。

在庫背上庫背框呈目字形，中間區域留有三個外牙套管孔，以便於抽氣與量測模擬庫體的內部狀況，中間大管連結直徑 42mm 真空耐壓管，管外有止回閥可以防止真空泵停機時，大氣由抽氣口處洩漏進入真空庫體內。

2. 真空幫浦與馬達：

實驗所使用的真空泵為日本 ULVAC 公司生產 D-650 型油封式真空泵。運轉速度：1200rpm、抽氣能力 640 l/min；使用的馬達為東元電機 AEEC 90L 三相感應電動機，規格為 220V-6A、1720 轉／分，2 馬力。



圖 1 實驗用真空預冷庫

1.門板, 2.門框, 3.主框, 4.庫壁板

Fig.1 Photo of the experimental vacuum vessel
1.door plate, 2.door frame, 3.main frame, 4.wall plate

3. 千分計

使用日本 Mitutoyo 公司生產的千分計量測變形位移，其精度可以達到 0.001mm。實驗時以磁性座將千分計固定在牛角座上，以利於更精確的量測到位移數據。

4. 壓力表與壓力紀錄器

壓力表與壓力計連結在庫體小管牙套孔，以三通接頭連接。壓力表是日本 Nishin 公司真空壓力表，大氣壓力下指針位置為零，完全真空狀態指針位置為 76 公分水銀柱，而實驗中可到達的抽氣極限為 20Torr。

5. 應變規

應變規是一種最常用來量測結構體應變與應力關係與數值的工具，藉由應變規連接電橋量測電位比值計算求得應變值。本研究所使用的應變規是日本 KYOWA 公司生產 FG-1-120-C1-16L1M2R 不鏽鋼專用應變規，其應變規係數為 2.13。

6. 放大器與電橋組

實驗採用日本 KYOWA 公司放大器 DPM-601B。應變放大器可將應變規所擷取的電位值加以放大，讓電表能輕易地在範圍內得取數值。電橋組可以使得應變規與電橋組內的電阻形成一個惠斯同電橋，更方便讀取應變的數值。

(二)實驗方法

1. 量測點位置

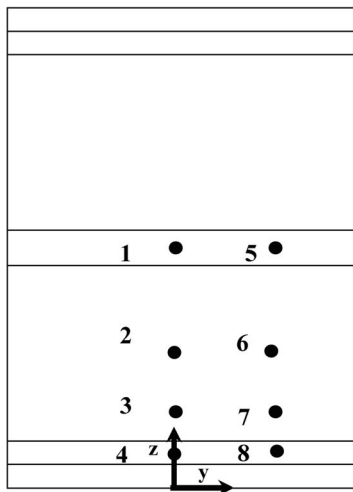
試驗用真空預冷庫的庫體為長方體，由於對稱性，量測點只挑選在體積八分之一的表面，即頂面、背面與一側的側面面積的四分之一面積，每一面上選擇代表性的八點，合計 24 量測點其分佈如圖 2 所示。量測點包括外框的幾何中心與外框間長方形庫板的幾何中心等這些位移較大的點。在量測點上以千分計做位移量測，以應變規做應變量測。

2. 位移實驗

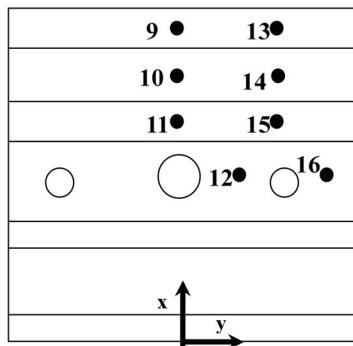
位移的量測使用位移千分計，量測數值取十次平均，取垂直於模擬庫體庫壁板的方向。選取位置依照軟體模擬結果的最大位移點與經驗法則選定。將真空幫浦以耐壓管接上模擬庫體，一次量取 4-5 點位移值。抽氣至壓力表數值 20Torr 不再變動為止，觀察千分計指針讀數並反覆試驗求取平均值（圖 3）。

3. 應變實驗

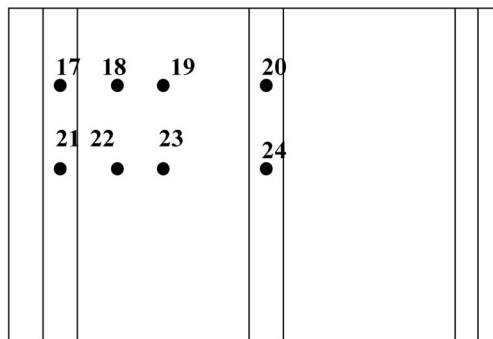
應力與應變的測量採用應變規(Strain Gage)進行，經由紀錄式電表量測電位比值再由公



上視圖 (top view)



前視圖 (front view)



側視圖 (side view)

圖 2 量測點位置圖 (面向庫體背面)

Fig.2 Locations of measuring points (from back side)



圖 3 使用千分計進行位移試驗

Fig.3 Using dial indicator to measure displacement of the measuring points

式計算求得應變與應力，利用求得應力與應變的變化值，以觀察庫體內部達到真空時結構的受力情形。

將三個應變規以 45 度夾角黏貼在量測點後，接上放大器抽取真空，直到壓力表指針為 20Torr 不再變動為止，量取此時應變規的電位比值，經由換算後求得應變值；再由公式求取應力值。

(二) 實驗用真空庫體電腦模擬

模擬庫體邊牆由鋼板以及數個相同形狀的口形鋼框，再加上庫門與門外框所形成，為一連續的結構體。邊牆與鋼框以焊接結合，由於 Cosmos-Design Star 軟體有效且正確的模擬焊接狀況；所以若焊道為連續，可將鋼框與鋼板視為一體，以兩者接合處的應力作為焊接強度的依據。

利用 Think 3 軟體繪出模擬庫體的主體，可以利用立方體挖槽或是製作薄殼、布林運算(Boolean Expression)等方式繪製出主體，尺寸與真實模擬庫體一樣，內尺寸為長 450mm (x 軸)×寬 500mm (y 軸)×高 700mm (z 軸)，板厚 6mm；主外框為口字形，厚度為 25mm，外尺寸為：562mm×612mm；外圓角根據真實模擬庫定為 3mm。

主外框繪製方法與主體類似，外框厚度 25mm，內尺寸為 462mm×512mm；外尺寸為 562mm×612mm。四個外圓角的尺寸 $R=50\text{mm}$ ；內圓角估計

大約為 $R=5\text{mm}$ 。值得注意的是外框的內圓角必須比主體的外圓角尺寸大，否則在轉檔時會產生計算錯誤導致轉檔失敗。庫門尺寸為 462mm×512mm×6mm。庫門與外框一起使用 Think 3 零件組合(Solid Mating)指令與主體結合(圖 4)，結合時要滿足軟體所需條件，一般而言組合件最少皆需三個條件。

Think 3 軟體繪製出的幾何圖形可以 STE 與 IGS 檔轉至 Cosmos/Design Star 軟體中作分析。其中，STE 是以整體結構為主，對於零件與幾何邊界定義較少；而 IGS 檔以零件為主，幾何邊界定義較為清楚，所以選用 IGS 檔作轉換。

固定底牆四個頂點，所以在底牆的四個頂點用完全拘束(Fixed)，或是將鋼框底面固定，並且施以均勻大氣壓力(0.1MPa)垂直作用於庫壁，由於外框與邊牆在幾何定義時已完全合為一體，所以將外力施加在庫壁板或是另外施加負荷在外框上並無差別。

在執行計算完畢後會產生四種結果，分別是應力、應變、位移。而三種結果也可分別觀察單一方向結果。電腦模擬求出結果後，查驗實際量測點的位移、與應變規黏貼點之應力值，紀錄後與實驗值相互比對。

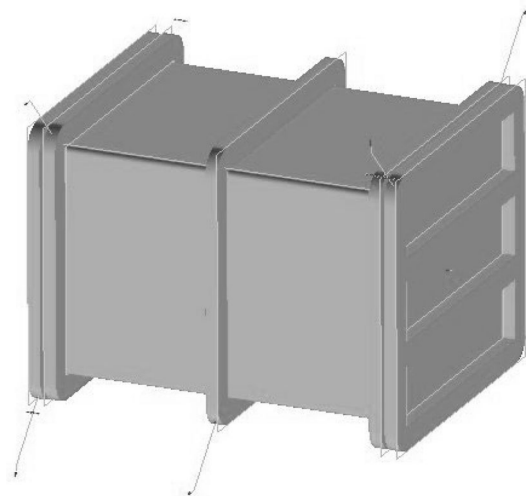


圖 4 模擬分析實驗庫體圖

Fig.4 Drawing of the experiment vacuum vessel for computer structure simulation analysis

四、大型真空庫體電腦模擬

應用電腦模擬可以找出縮小模型受的應力與應變，並且可以很容易的探討鋼板厚度、外框尺寸與跨距所產生的影響。若是軟體模擬超出應力上限，則改變設計的方向。例如改變庫壁板的厚度、鋼框的尺寸與間距等等。

利用已經以模擬與實測應證過的電腦模擬程序，探討大型真空預冷庫庫體的設計。首先以文獻(Thompson, 1998)常見之大型真空預冷庫體估算其尺寸，並以電腦軟體計算位移、應力分布情形。再採用幾種不同的改良設計，比較其重量、位移、應力、安全係數等設計所必須考慮的因素。

設計分析過程先以 Think 3 繪製大型庫體後，再利用 Cosmos /Design Star 探討該設計庫體受真空負荷結構時的受力情形。此大型真空預冷庫體結構圖形外觀尺寸為 $3\text{m} \times 3\text{m} \times 13\text{m}$ ，庫壁板厚度 8mm 總重為 50 公噸；外框為 $120\text{mm} \times 60\text{mm}$ 矩形截面碳鋼鋼樑，每個外框間距為 340mm ，共有 33 個外框；門外框為 $3240\text{mm} \times 3240\text{mm} \times 150\text{mm}$ 厚碳鋼製成。分析時由於庫體過於龐大，且庫體可從中間視為前後對稱結構，所以繪製模擬大型庫體時僅需描述一半庫體即可，在使用軟體時將切開處設定為對稱面。

由於庫體重量過於龐大，因次嘗試幾種不同的改善方案進行分析。庫體設計方案一的外框總數為 21 個，也就是樑框間距為 580mm ；庫體設計方案二的外框總數為 27 個，樑框間距 435mm 。門外框若依照原設計尺寸，庫門總重量高達 7 公噸，因此建立兩個庫門設計方案，庫門設計方案一與二分別使用 75mm 、 60mm 厚的門外框。庫體設計方案三將外框形狀改為工字樑，外框同樣維持 27 個。另外找出與上述大型外框具有相同的慣性矩的工字樑： $125\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，工字樑互相跨接，再連結到庫體上。

三、實驗結果與討論

(一) 位移實驗與電腦模擬結果比較

從實驗中觀察量測到的位移數值列於表 1。數值較大的點如位移超過 $300\mu\text{m}$ 之各點皆為庫板

上的量測點，在這些點上量測數據的標準差除以平均值所得得百分標準差數值較小。量測位移平均值較小的各點，大多是外框或門外框上的量測點，但其百分標準差較大。位移量測平均值愈小其百分標準差愈大，這種數值的變異可能是受到量測精度的影響。

真空庫體為一個長方體，除庫門與後庫板外的四面，由外框與折角將庫體八個平面，其中四個相同形狀的平面($237.5\text{mm} \times 500\text{mm}$)分別位於庫頂與庫底；另四個相同形狀的平面($237.5\text{mm} \times 450\text{mm}$)分別位於庫體左右兩側。庫頂板平面面積最大，其幾何中心點 2 之位移最大達 $660\mu\text{m}$ ，通過點 2 平行外框線上的一點 6 因較靠近折角，其位移為 $610\mu\text{m}$ 為此平面量測點中位次次大者。通過點 3 與點 7 的線平行於外框，與外框距離較近位移較小分別為 590 與 $370\mu\text{m}$ ，點 7 因接近折角，位移顯著變小。在側面的平面上四點之位移的趨勢與上述相似，但因此平面長邊較短靠近長邊兩點 19、18 與對應的點 23、22 位移量相差就很大。

利用 Cosmos /Design Star 軟體模擬庫體受真空負荷所產生的位移與應力分別如圖 5 與圖 6 所示。模擬結果發現庫體平板中央是位移最大的位置；由於庫底與庫頂的尺寸較左右兩側大，所以 x 方向的位移較大。庫門的地方有門外框支持，所以位移比較不明顯。庫門與門外框位移主要在 z 方向，x、y 方向幾乎沒有位移量的存在，而庫

實驗 1-1：靜力位移
單位：m

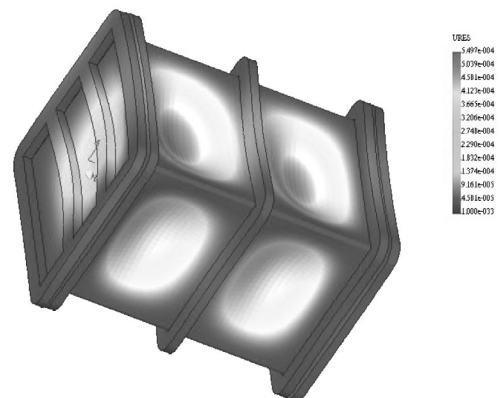


圖 5 實驗用庫體電腦模擬位移結果

Fig.5 Displace diagram of the experiment vacuum vessel by computer simulation

實驗 1-1：靜力節點應力
單位：N/m²

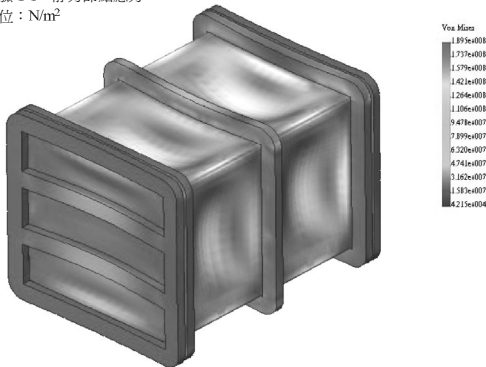


圖 6 實驗用庫體預冷電腦模擬應力結果

Fig.6 Stress distribution diagram of the experiment vacuum vessel by computer simulation

門中心最大位移量接近 0.2mm，由於門框與庫門以焊接相連，繪製軟體時視為一體，所以最大位移量與位置與庫門相同。

各量測點實驗量測位移與軟體模擬計算位移比較。圖 7 之各點為庫頂上的各主要量測點，點 2、3、6、7 為庫壁板上的量測點，位移較大；實驗與模擬值的差異也較大。數值較小的量測點都位於外框上，這些點之實驗值與模擬值的差異較小。圖 7 所描繪的誤差線為量測值的一個標準差的範圍。庫壁板的位移是外框與庫壁板兩部分的位移之和，數值較大，影響位移的因素較多，因而誤差也可能較大。

庫體左側面上的各主要量測點（圖 8），點 18、22、23 位於庫壁板上的量測點，位移較大，實驗與模擬值的差異也較大。數值較小的量測點都位於外框上，而點 19 雖然位於庫壁板上，但是其位置相當接近庫壁板邊緣，所以位移較小，實驗值與模擬值的差異較小。這些變化與庫頂各量測點的變化相似，只是因為庫體側板較頂板面積小，位移也較小。

表 1 量測點位移實測值

Table 1 Displacement at measurement points

量測點 編號 Location NO.	方 向 Dir- ection	位 移 Dis- placement (μ m)	百 分 標準差 % St. dev.	量測點 編號 Location NO.	方 向 Dir- ection	位 移 Dis- placement (μ m)	百 分 標準差 % St. dev.
1	x	260	66	12	z	440	16
2	x	660	8	13	z	80	83
3	x	590	19	14	z	140	72
4	x	130	55	15	z	160	62
5	x	220	40	16	z	150	55
6	x	610	11	17	y	125	73
7	x	370	26	18	y	325	22
8	x	90	81	19	y	98	80
9	z	120	72	20	y	125	62
10	z	260	66	21	y	125	67
11	z	350	21	22	y	500	11
12	z	440	10	23	y	650	13
13	z	80	77	24	y	100	64

百分標準差：標準差／平均值×100%

% St. Dev. = St. Dev. / Avg × 100%

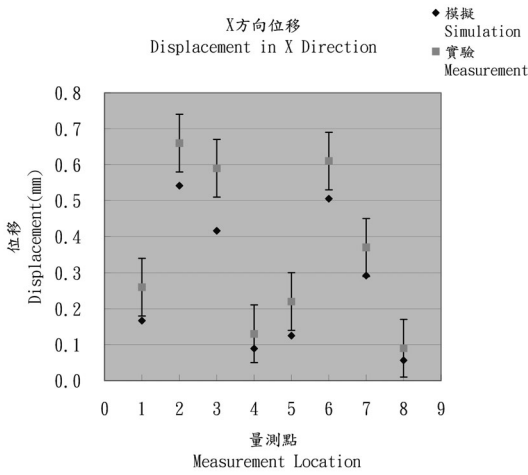


圖 7 庫頂 x 方向位移模擬值與實驗值比較

Fig.7 Comparison between displacement in x direction by measurement and by simulation at different locations on the roof of the vacuum vessel

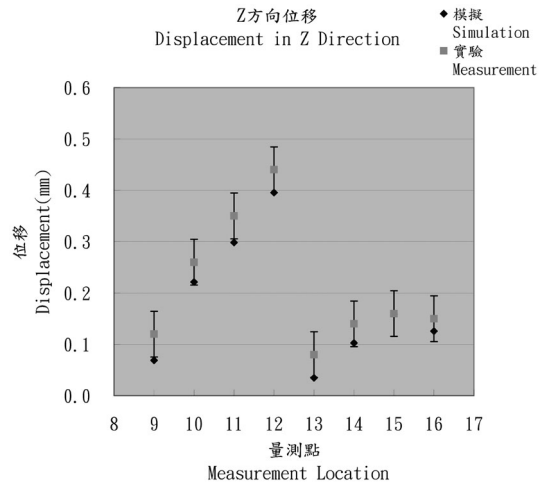


圖 9 庫後壁 z 軸方向位移模擬值與實驗值比較

Fig.9 Comparison between displacement in z direction by measurement and by simulation at different locations on the rear wall of the vacuum vessel

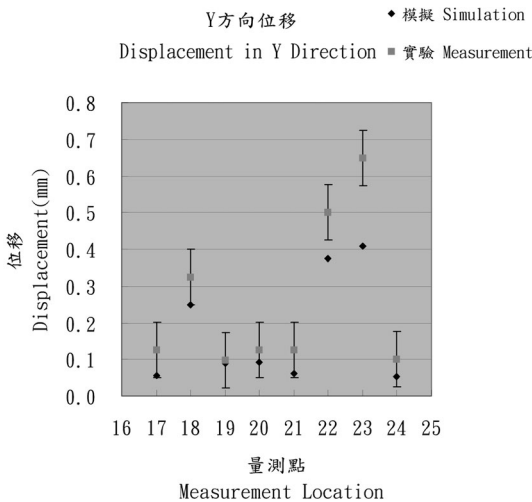


圖 8 庫體側面 y 方向位移模擬值與實驗值比較

Fig.8 Comparison between displacement in y direction by measurement and by simulation at different locations on the side wall of the vacuum vessel

庫門上的各主要量測點，點 10、12 為庫板上的量測點，位移較大，而點 11 雖然位於門外框上，但靠近庫門幾何中心位置，因而位移較大。點 12 為庫板上最靠近庫門幾何中心的量測點，

因而數值最大。數值較小的量測點都位於門框上，門框固定於庫體上，故位移很小，實驗值與模擬值的差異也較小（圖 9）。

(二) 應力實驗與電腦模擬結果比較

應變量測使用電阻式應變規，儀器的讀值為電壓值，經換算為應變值後，利用公式，將應變值換算為應力值，如表 2 所示。由於量測點在庫體表面，剪應變值都是零，所以此處僅列出兩個垂直方向的正應力。

應力較大的地方分別位於庫板、外框與庫門三個區域。在庫板部分應力較大的區域為庫板中央以及外框與庫板連接處；在外框部分則為外框的對稱軸；在庫門部分則發生於庫門板與門外框連接處上方以及門外框條條的中心之處，但是這些位置的應力都未超過容許應力。

庫體結構由平板、框與折角所構成，受到均勻壓力負荷反映出邊緣折角附近受到張應力，而庫板中央受到壓應力，庫板上所受最大張應力的數值較最大壓應力的數值為大。而庫體中央與外框連結的部分，除了連接處四周應力較大外，其餘位置應力值都很小，這些應力可以視為焊接材料所需承受的應力，其數值約為 16.52MPa。

表 2 量測點應變實測值與正應力計算結果
Table 2 Strain and stress at measurement points

量測點 編號 Location NO.	電壓 Volt- age (V)	正應變 Normal strain (μ)	正應力 Normal stress (MPa)	方向 Dir- ection	電壓 Volt- age (V)	正應變 Normal strain (μ)	正應力 Normal stress (MPa)	方向 Dir- ection
1	-3.500	-210	-42.00	y	1.000	60	-2.449	z
2	-1.000	-60	2.186	y	4.250	255	51.50	z
3	-1.167	-70	-30.10	y	-4.200	-250	-57.67	z
4	0.367	22	23.65	y	5.200	310	68.53	z
5	-0.420	-25	-5.029	y	0.000	0	0.054	z
6	-1.420	-85	-28.73	y	-2.833	-170	-41.70	z
7	2.390	143	28.56	y	-0.667	-40	-0.050	z
8	2.400	144	27.67	y	-1.000	-60	-4.122	z
9	0.225	13.5	2.639	y	0.000	0	-0.300	z
10	-0.416	-25	-5.030	y	0.000	0	0.010	x
11	-0.170	-10	-2.580	y	0.000	0	-1.920	x
12	1.630	98	15.44	y	-1.550	-93	-14.05	x
13	-0.400	-24	-4.730	y	0.000	0	0.000	x
14	0.000	0	-2.887	y	-0.750	-45	-10.05	x
15	0.000	0	-0.671	y	-0.340	-20	-4.340	x
16	1.670	100	15.59	x	-1.500	-90	-13.86	z
17	0.650	40	15.40	x	1.850	111	26.61	z
18	4.670	280	51.75	x	2.583	-155	-16.45	z
19	1.390	-83	-31.04	x	-3.667	-220	-52.29	z

就中間外框條而言，中央受到壓應力，中央兩側受到張應力也與平板結構相似。而前後兩個外框所受到的應力較中間外框小。因為外框受到的應力相對於庫體來說是微小的，但是其個數與跨距對於庫體所受應力影響甚大，所以在設計真空預冷庫體時，除了可控制庫體鋼板的厚薄外，也可以藉由改變外框的尺寸與個數來改變庫板所承受的應力，以達到最適的設計。

門外框所受到的 Von Mises 應力（圖 6），可以觀察到中央兩框條受到的應力較周圍大。再與庫門的 Von Mises 應力圖作比較，發現庫門仍是依照著平板應力的變化，連結處四周的應力較中央大。值得注意的庫門與門外框在建構幾何模型時已定義為一體，所以門外框中央承受相當大的應力，在設計時需注意此處的尺寸，以增加庫門的強度。

圖 10 與圖 11 描繪庫頂各量測點由應變規量測所計算出的正應力實驗值與電腦模擬正應力值比較。由圖中可以發現電腦模擬計算所得的正應力值非常接近實驗計算出的正應力值，其差異全部小於一個標準差。因此可以知道此電腦模擬計算的正應力值於實際量測計算出的正應力值相當的吻合。在其他兩面上的各量測點也顯示相同結果，本研究所使用的模擬軟體在設計分析上可靠性很高。

四大型真空庫體模擬結果

由文獻推估設計之大型庫體外框有 33 個，樑框間距 340mm，此結構總重為 50 公噸，此大型庫體經模擬得庫板最大位移為 3.58mm，門框附近的位移較小。應力最大值為 88MPa，小於碳鋼降服應力值的 200MPa，表示此結構非常安全。

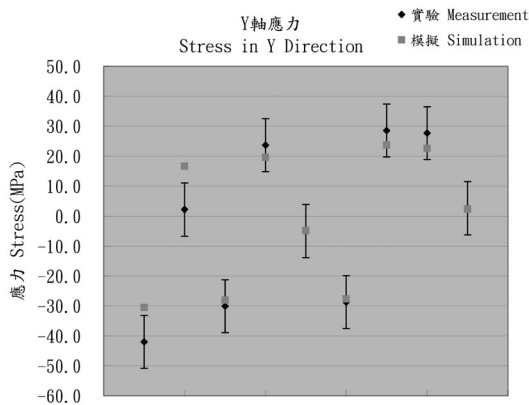


圖 10 庫頂面 y 方向應力模擬值與實驗值比較

Fig.10 Comparison between stress in y direction by measurement and by simulation at different locations on the roof of the vacuum vessel

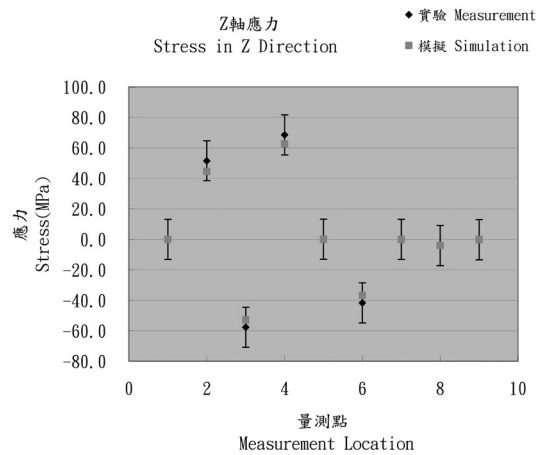


圖 11 庫頂面 z 方向應力模擬值與實驗值比較

Fig.11 Comparison between stress in z direction by measurement and by simulation at different locations on the roof of the vacuum vessel

庫體設計方案的第一個方案大幅減少外框數目，採用樑框間距為 580mm，外框 21 個，此結構總重量約 30 公噸（表 3）。此結構的位移結果在合理範圍內，但最大應力值在容許應力範圍之外，且外框邊緣處所受的應力值很大。以安全係

數 1.3 作檢查，發現外框邊緣有破壞危險。

庫體設計方案二係將方案一之樑框數增加，樑框間距改為 435mm，外框 27 個，結構總重量約為 38 公噸（表 3）。位移結果在合理範圍內，

表 3 大型真空庫體不同結構設計的最大位移與最大應力比較

Table 3 Comparison of maximum deformation and stress in commercial vacuum coolers with various structural design

	樑框截面 形狀 frame cross-section	樑框截面 尺寸 dimension of cross-section	樑框 間距 (mm) span of frame	樑框 個數 no. of frame	總重量 (ton) total weight	最大位移 (mm) Max. dis- placement	最大 應力 (MPa) Max. stress	最小安全 係數 Min. Safety factor
文 獻 Literature	矩 形 square	60mm×120mm	340	33	50	3.58	88	2.3
設 計 方案一 case 1	矩 形 square	60mm×120mm	580	21	30	4.64	264	0.76
設 計 方案二 case 2	矩 形 square	60mm×120mm	435	27	38	4	116	1.7
設 計 方案三 case 3	工 字 樑 I beam	125mm×60mm	436	27	26	3.1	161	1.24

應力值也在容許應力範圍之內（圖 12）。以安全係數 1.3 作檢查，發現外框邊緣處並無破壞的顧慮，顯見此設計方向正確。

庫門的永久變形是真空預冷庫洩漏的主要原因，變形量的大小常作為設計上重要的考量。庫門結構門外框是節省材料的關鍵位置。原設計之庫門最大位移只有 1.5mm，變形量很小，安全係數檢驗可以看到安全係數已經高達 10，但是此結構重量亦高達 7.0 公噸，可見此結構為過度設計，使得庫體材料浪費。

在門外框 60mm 厚的改善設計中，最大位移高達 8mm。安全係數檢驗也在 1.5 時於庫門中央部位出現臨界點。由於一般庫門設計採取較高的安全係數，所以此門框改善方案較具有變形的疑慮。若改用 75mm 厚度的門外框，最大位移可減少至 5mm。而在安全係數檢驗時，安全係數的臨界值可達到 3.0。這是一個可以接受的設計，且此庫門重量也大幅度降低為 3.5 公噸。所以此方案是在降低材料成本與安全考量下的一個較佳的平衡點。

設計方案三之主要構想為降低總重量，使用

與矩形截面慣性矩相同的工字樑製作的外框。工字樑尺寸 125mm×60mm，外框數為 27 個外框，總重量約為 26 公噸（表 3）。經過軟體模擬後，發現位移值與安全係數皆在容許範圍之內。

使用工字樑的大型真空庫體受力後之最大位移仍發生於板的中央，但最大位移量僅約為 3.1mm，此數值較其他大型庫體小（圖 13）。雖選用工字樑與其他大型庫外框的矩形樑慣性矩相同，工字樑的斷面較高，與庫板和組成的斷面與矩形樑不同，所以位移會變小。安全係數為 1.3 的情況下，庫體結構也無發生破壞危險的地方，證實工字樑的設計確實可以降低大型庫體的重量而且在安全方面沒有破壞的疑慮。

表 3 為本研究中所有大型庫體的比較，由表中可以清楚的觀察出不同的設計方案可以有效的減少庫體的重量，而大型庫的原設計使用過多的材料產生過當設計。使用工字樑的大型庫體，其最大應力值在破壞標準以下，最大應力值換算安全係數約為 1.24，在合理的接受範圍之內，而且重量約為原本的一半，確實能減少材料成本而達到安全的目的，可以提供設計的參考。

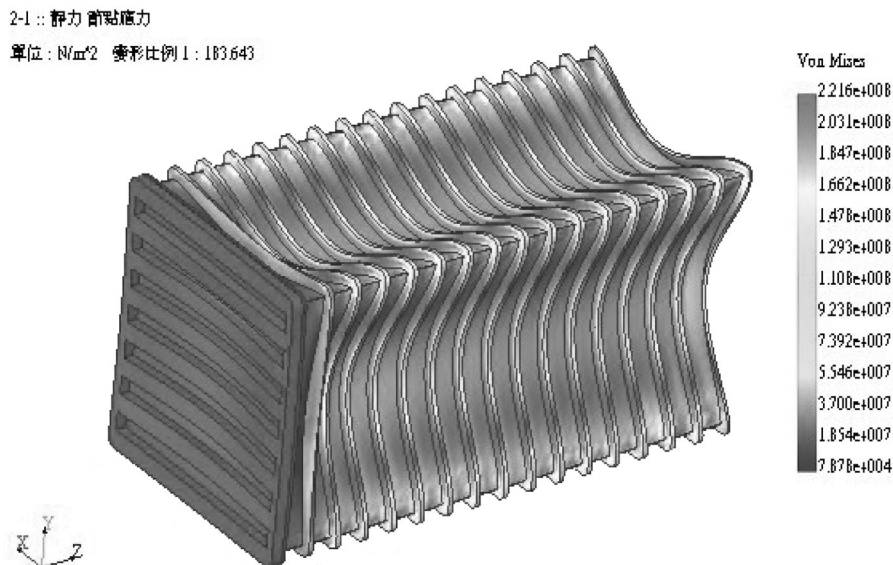


圖 12 大型設計方案二庫體電腦模擬 Von Mises 應力結果

Fig.12 Von Mises stress distribution in design case II by simulation

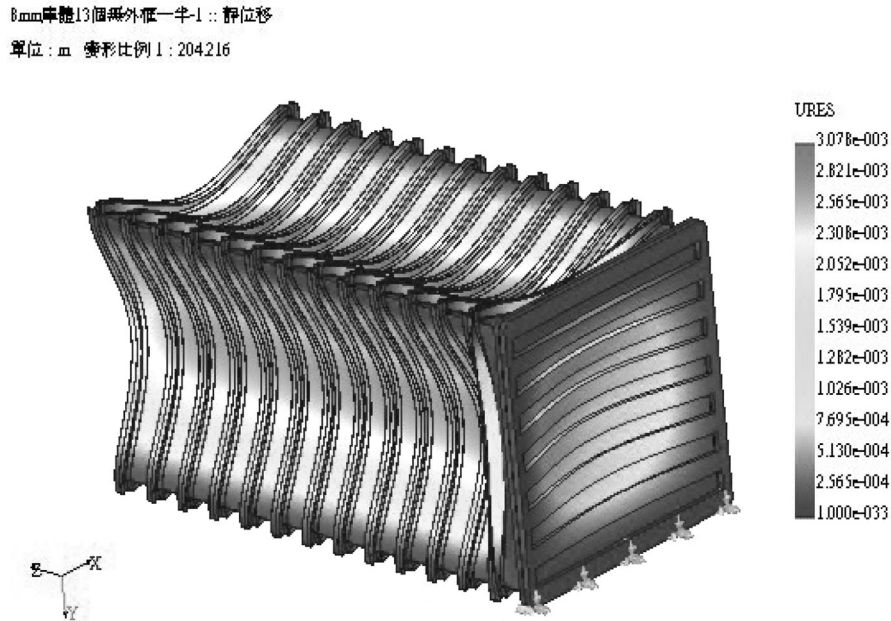


圖 13 大型設計方案三庫體電腦模擬位移結果

Fig.13 Diagram of displace on the surface of design case III by simulation

四、結 論

由實驗與模擬結果相比較可以發現：電腦模擬庫體的計算值與實驗值相當接近，證實有限元素分析軟體 Cosmos / Design Star 可以正確進行真空預冷庫體之靜力分析，進而設計出最佳化尺寸庫體。由於實驗需耗費大量的人力與經費，且稍有不慎，實驗可能失敗，所以我們可以利用電腦輔助工程分析軟體先進行工程模擬了解問題的癥結以及研究的方向再進行實驗以節省時間與物質。

研究中所設計的小型實驗用庫體確實地可以承受真空負荷，證實此種結構體適用於真空預冷庫體。庫體的尺寸、結構形狀與庫體受的應力有重要的關係，也直接影響庫體本身的安全。所以決定一結構尺寸後，先進行靜力分析，評估其安全性，避免設計出危險或是大而無當的結構。實驗與電腦模擬結果皆顯現：真空預冷庫體受負荷時，造成應力集中產生危險之處在庫體平板結構的中央與邊緣位置，所以實際設計真實預冷庫時應就這些位置必須加強設計。

研究中建立以電腦模擬軟體設計真空庫體的的程序，在安全設計範圍內可以有效減少材料消耗與設計風險。為了完全符合實際情形，本研究將庫體、外框、門外框、庫門等零件視為一體來進行分析。焊道的寬度、熱應力集中的問題雖然在本研究的小型庫體影響不明顯，但在大型庫體設計與施工上人不可忽視。未來可以建立模擬焊接的程式，以達到更完美的工程設計分析。

五、誌 謝

本研究為行政院農業委員會科技研究計畫「國產農產品運銷職能技術改進」(90農科-1.6.2-輔-#1(3))的部分研究成果。執行期間曾蒙國立臺灣大學生物產業機電工程學系賈精石技正協助在此誌謝。

六、參考文獻

1. 小栗富士雄。1974。標準機械設計圖表便覽。新版訂正四版。東京市：共立。
2. 石橋貞人、小島孝之、御木英昌。1969。真空冷卻裝置的相關研究I（日文）。農業機械學會誌 31 (1) : 52-60。
3. 石橋貞人、小島孝之、御木英昌。1971。真空冷卻裝置的相關研究II（日文）。農業機械學會誌 33 (1) : 53-58。
4. 林棟樑、李允中。2004。真空預冷技術在台灣的發展現況。行政院農委會農業試驗所，2004年10月1日，台中。園產品採後處理技術之研究與應用研討會專刊，228-232。
5. 陳貽倫。1986。真空預冷及其能源分析。農工學報 32 (1) : 43-50。
6. 郭景儀、蕭介宗。1987。主要果蔬預冷設備之研製與應用I：真空預冷之研製與應用。農工學報 33 (1) : 12-23。
7. Akin, J. E. 1994. Finite Elements for Analysis and Design. London : Academic Press.
8. COSOMS. 2005. COSOMS—analysis software to help companies get to market faster. At <http://www.cososm.com/> Accessed 17 May 2005.
9. Greinter, L. M. and R. W. Kleis. 1962. Vacuum cooling for Production Scale Operation. Agri. Eng. 43 (Feb) : 86-89.
10. Magnucki, K., W. Szyc, and P. Stasiewicz. 2004. Stress state and elastic buckling of a thin-walled beam with monosymmetrical open cross-section. Thin-Walled Structures 42 (1) : 25-38.
11. Moaveni, S. 2003. Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS" 2nd ed. 499-561. N. J : Prentice Hall.
12. Timoshenko, S., and S. Woinowsky-Krieger. 1940. Theory of Plates and Shells. New York : McGraw-Hill.
13. Thompson, J. F., F. G. Mitchell, T. R. Rumsey, R. F. Kasmire, and C. H. Crisosto. 1998. Commercial Cooling of Fruits, Vegetables, and Flowers. Publ. 21567. Univ. Calif. Div. Nat. Resources, Oakland, CA, 61 p.
14. Ventsel, E., and T. Krauthammer. 2001. Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications. New York : Marcel Dekker.
15. Yao, D. M., Y. T. Song, S. T. Wu, Y. X. He, W. Y. Wu and S. J. Du. 2001. Design and structure analysis of the HT-7U vacuum vessel. 58-59 (Nov.) : 839-843.
16. Young, W. C. 1989. Roark's formulas for stress and strain. 6th ed. New York : McGraw-Hill.
17. Zienkiewicz, O. C., and R. L. Taylor. 2000. The Finite Element Method. 5th ed. vol. 2. Boston: Butterworth-Heinemann.

收稿日期：2006年3月24日

修改日期：2006年4月12日

接受日期：2006年4月17日

