

研究報告

惠蓀林場紅檜人工林與闊葉樹次生林 生態系經營模式之導入

蔡尙惠¹ 吳聲海² 顏江河³ 唐立正⁴ 許博行⁵ 呂金誠⁵ 歐辰雄⁵ 林昭遠⁶ 謝顯宗⁷

【摘要】林業經營目標從早期的傳統木材生產，擴展至 1960 年代的多目標經營，而於 1992 年美國農部林務署更發展出生態系經營的理念，強調森林生態系的多樣性與完整性。本研究選定國立中興大學惠蓀林場中二個林班內之紅檜造林地為試區，探討如何將生態系經營之理念落實於試區內，且於 248 號造林地附近之闊葉樹次生林，設置二個調查樣區作為試驗研究的對照組。試區中之紅檜多為分叉叢生，且多入侵的闊葉樹幼木，故進行疏伐處理，希藉以提高其生產力與歧異度，疏伐度的決定係以胸高斷面積為其介量，訂有 30、50、60% 等三種疏伐度，疏伐後若有較大之孔隙產生，再適度混植牛樟、香楠、烏心石等苗木於孔隙下，且定期監測土壤、微氣候環境因子、植群、土壤表層動物以及昆蟲等，以評估其施業的效應與影響。並在考量生態性、經濟性以及社會性的層面，發展適切的环境、生物以及生態經濟等生態指標，以為永續經營之評估指標，並藉由適應性經營的反饋，建構森林生態系經營模式，期供未來於大尺度之地景單元經營的參考與依據。

【關鍵詞】生態系經營、模式、疏伐、監測、適應性經營

-
1. 環球技術學院環境資源管理系助理教授，通訊作者
Assistant Professor, Department of Environmental Resources Management, Transworld Institute of Technology;
Corresponding author.
Tel: 0912-614341 E-mail: tst1123@ms78.hinet.net
 2. 國立中興大學生命科學系副教授，臺中市 402 國光路 250 號
Associate Professor, Department of Life Sciences, National Chung Hsing University.
250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.
 3. 國立中興大學森林學系助理教授，臺中市 402 國光路 250 號
Assistant Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University.
250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.
 4. 國立中興大學昆蟲學系副教授，臺中市 402 國光路 250 號
Associate Professor, Department of Entomology, National Chung Hsing University.
250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.
 5. 國立中興大學森林學系教授，臺中市 402 國光路 250 號
Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University.
250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.
 6. 國立中興大學水土保持學系教授，臺中市 402 國光路 250 號
Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University. 250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.
 7. 國立中興大學生命科學系助教，臺中市 402 國光路 250 號
Teaching Assistant, Department of Life Sciences, National Chung Hsing University.
250, Kuokwang Rd., Taichung, 402, Taiwan.

Research paper

Embodiment of Ecosystem Management Model to Taiwan Red Cypress Plantations and Secondary Broadleaf Forest in Huisun Forest Station

Shang-Te Tsai¹ Sheng-Hai Wu² Chiang-Her Yen³ Li-Chang Tang⁴ Bor-Hung Sheu⁵
Chern-Hsiung Ou⁵ King-Cherng Lu⁵ Chao-Yuan Lin⁶ Shean-Tzong Hsieh⁷

【Abstract】 The goal of forest managements has transformed since the 1960s from timber production to multi-purpose utilization, and culminated in the adoption of ecosystem management by USDA Forestry Service in 1992, which emphasizes the maintenance of diversity and integrity of forest ecosystems. In order to realize the concepts of ecosystem management, we conducted experiments in two compartments of the Taiwan red cypress plantations in Huisun Forest Station of the National Chung Hsing University. Two secondary broadleaf forest plots adjacent to the experimental plots were chosen as controls. Most Taiwan red cypress trees within experimental plots grow in clumps and bifurcate into branches at very low height, and the plots are invaded by broadleaf seedlings. We performed 30%, 50%, and 60% thinning based on breast height basal area. Three broadleaf tree species (*Cinnamomum kanahirai*, *Machilus zuihoensis* and *Michelia compressa*) were planted within large gaps after thinning. The effects of thinning on forests were evaluated by monitoring the soil properties, microclimate conditions, understory plant diversity, and surface-dwelling animal diversity before and after thinning. This practice of developing suitable environmental, biological, and ecological-economical indices for sustainable forest management is based on the consideration at several levels (ecology, economics, and society). By means of feedback based on adaptive management principles, we hope this model of forest ecosystem management can be applied in landscape scale management in the future.

【Key words】 ecosystem management, model, thinning, monitoring, adaptive management.

一、前言

昔日的林業經營方式，僅側重於木材生產之永續收穫 (sustained yield)；1960 年代方轉變為森林多目標經營 (multiple purpose management) (Brunson and Kennedy, 1995；Toman and Ashton, 1996；Franklin, 1997；Seymour and Hunter, 1999)。1980 年代初期，復隨著森林科學、生物以及生態學等相關研究成果之累積，發現複雜的森林生態系與人類息息相關，如不重視森林生態系之整體資源的永續性 (sustainability)，將會嚴重影響人類與後代子孫的生活環境；時至今日，更因面臨全球氣候變遷、物種滅絕、

熱帶雨林的日漸消失，以及溫室效應遽增等危機，而引發全球性的環保熱潮，致使多目標經營方式倍受質疑 (Grumbine, 1994; Kessler and Salwasser, 1995; Franklin, 1997; Seymour and Hunter, 1999)。因此，1980 年代後期，美國農部林務署 (USDA Forest Service) 提出林業新展望 (new perspective in forestry)，即新林業 (new forestry) 之經營理念，旨將林業導入一全盤性的生態系統模式，以維持森林生態系結構的歧異度，並建立穩定的森林生態系；故又於 1992 年 6 月 4 日美國林務署發布生態系經營 (ecosystem management) 為林業經營的新政策

(Grumbine, 1994 ; Kessler and Salwasser, 1995 ; Franklin, 1997 ; Schlaepfer, 1997 ; Seymour and Hunter, 1999 ; McCormick, 1999)。

森林多目標經營僅考量經濟尺度，評估木材、水、野生動物、遊樂機會與荒野地 (wilderness) 等資源的個別利用價值，以供人類使用；而生態系經營係以整體生態系的尺度考量之，視森林生態系為一功能性系統 (functioning system)，冀創造和維護森林中的動態平衡，並確保森林的永續發展。然而，森林生態系中的生物資源繁多，其個別物種多與環境因子相互關連，且資源間亦交互地影響，若不瞭解資源，也就無從去善用資源或保護資源，更遑論有合理的經營決策，所以需要藉由科際整合 (multidisciplinary)，進行整合性森林資源監測調查 (integrated forestry resource monitoring inventory)。本文之研究目的即將生態系經營之理念，落實於惠蓀林場關刀溪集水區之紅檜人工林與闊葉樹次生林的經營管理，而此森林生態系經營模式建構的方式，即確立經營目標，落實生態系經營理念於所選定之林分，並透過植群、動物、土壤以及微氣候等因

子之定期監測，使用整合性的分析方法，從生態性、經濟性與社會性等三個向度，評估經營施業的影響，以為修正監測計畫或改善經營方式的參考，使能達成具彈性且有效的適應性經營 (adaptive management)。

二、材料與方法

(一) 研究地區

國立中興大學惠蓀林場之地理位置為北緯 24° 02'-24° 06'、東經 120° 59'-121° 09'，面積為 7,477 ha (國立中興大學農學院實驗林管理處，1994)。林場內以東峰溪與關刀溪等二溪流為主 (圖 1)，東峰溪集水區包含林場第 10-15 林班，面積約計 2,564 ha，多為天然林限制施業地而少人工林；而關刀溪集水區涵蓋林場第 3-8 林班，面積為 2,216 ha 左右，屬天然林普通施業地，亦多人工林夾雜其中，又涵蓋部分森林遊樂區範圍，為將生態系經營理念落實於林場之經營管理，故規劃關刀溪集水區為森林生態系經營示範區，並以圖 1 中較具可及性之 242、248 紅檜造林地為小尺度經營單元進行試驗研究。

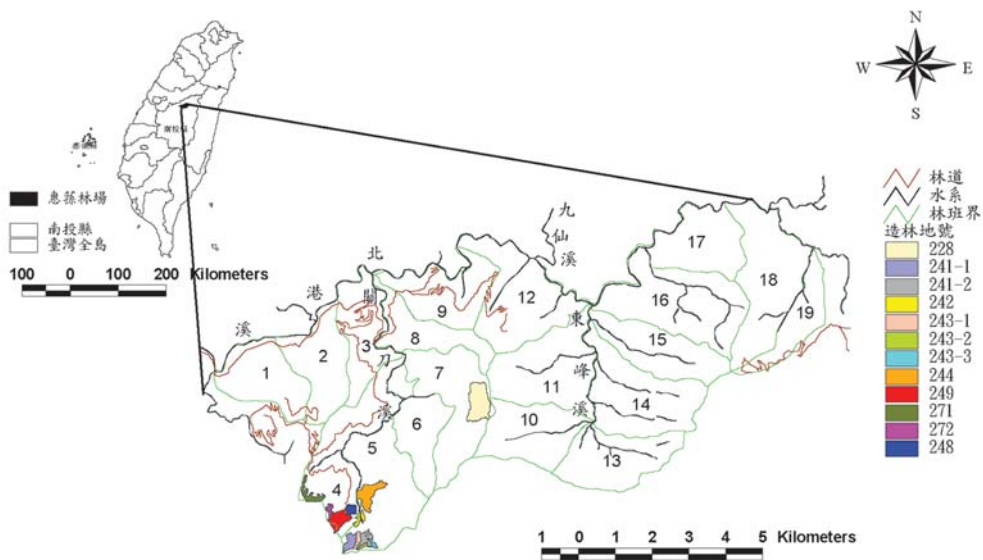


圖 1. 惠蓀林場關刀溪集水區紅檜造林地位置圖

Fig. 1. Locations of Taiwan red cypress plantations of Guandaoshi watershed in Huisun Forest Station.

(二) 研究方法

究重點與方法分述如下：

本研究之流程即如圖 2 所示，茲就各項研

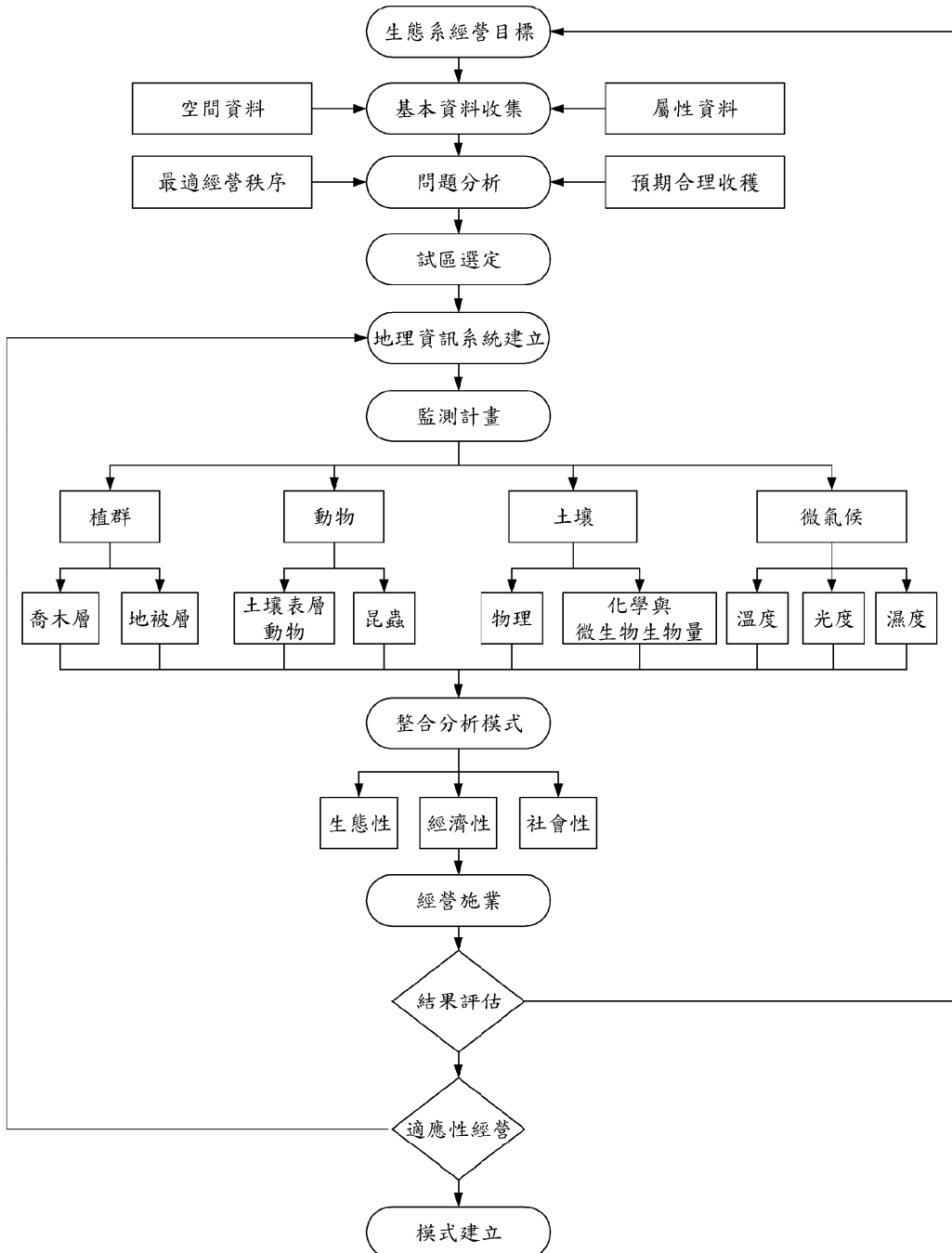


圖 2. 森林生態系經營模式建構之研究流程

Fig. 2. Research flowchart for constructing forest ecosystem management model.

1. 擬定經營目標

透過文獻的蒐集，瞭解過去臺灣經營概況，並針對惠蓀林場特性，以擬定符合地域性之生態系經營目標。

2. 選定試區

規劃關刀溪集水區為森林生態系經營示範區，配合造林、伐木台帳與其它試驗研究之空間和屬性資料，以及利用地理資訊系統 (geographic information system, GIS) 之查詢、疊圖等分析功能，並多方評估後進行試區選定和樣區設置。

3. 建立地理資料庫

蒐集林場經營管理如造林台帳等屬性資料加以整理建檔，同時並數化造林台帳之空間資料，再建立屬性與空間資料之關聯，以擴充惠蓀林場之地理資訊系統資料庫。

4. 微氣候因子調查

調查與分析樣區內微氣候 (microclimate) 因子，包含平均溫度 (TEMP)、相對光度與相對濕度 (HUMID) 等資料，其中相對光度並區分為清晨之相對光度 (LIGHT1) 和傍晚的相對光度 (LIGHT2)。

5. 土壤性質分析

進行土壤 pH 值 (pH)、全氮量 (total nitrogen content, TN)、有效磷 (available phosphorus, P)、陽離子置換能量 (cation exchange capacity, CEC)、微生物氮生物量 (microbial biomass-N, BN)、土壤 L-天冬醯胺酶 (L-asparaginase, E) 活性、有機質含量 (organic matter content, OM) 以及 C/N 之比值 (C/N ratio, CNR) 等八項理化性質調查與分析。

6. 植群調查

植物分為喬木層 (overstory, OS) 與地被層 (understory, US)，並分別求算其 Shannon 訊息統計指數 (information statistic index)。

7. 動物相調查

土壤表層動物與昆蟲相調查中，並將土壤表層動物區分為次級肉食性動物 (secondary carnivorous animal, SCA)、初級肉食性動物

(primary carnivorous animal, PCA) 以及腐生植食性動物 (detritivorous-phytophagous animal, DPA) 等三類，而所誘集之昆蟲分為肉食性 (carnivorous insect, CI)、雜食性 (omnivorous insect, OI)、植食性 (phytophagous insect, PI)、腐食性昆蟲 (detritivorous insect, CI) 等四類，並分別求算其 Shannon 訊息統計指數。

8. 環境與生物因子分析

研究中使用 SPSS for Windows (Advanced Statistics 8.0) 統計軟體 (張紹勳與林秀娟, 1995; SPSS Inc, 1998)，透過 Spearman 等級相關分析 (rank correlation analysis) 探討土壤、平均溫度、相對光度和相對濕度等環境因子，以及植群與動物間的關係；並利用主成分分析 (principle component analysis, PCA)，以更深入了解環境與生物因子的關連性。

(三) 生態經濟評估

研究中以林分同時皆肩負林木生產、景觀遊樂、水源涵養、孕育野生動物等功能之多資源經營管理為原則。然因各資源組成與結構之資訊難以取得，且各資源經營管理指標與價值之評定不易，故除瞭解環境與生物資源間的交互影響機制，並利用能值分析 (emergy analysis) 評估森林生態系經營之總體經濟價值 (羅玉霖與羅紹麟, 1994)。而能值 (embodied energy, emergy) 即將生態系中各組成分之能量流轉單位，透過太陽能換率 (transformity)，轉換為太陽能的統一單位 (solar emjoule, sej)，以此為共通性的能量單位，衡量組成分間之能量流的質變 (Odum, 1982, Odum, 1983; Odum, 1988; Christensen, 1994; Jørgensen *et al.*, 1995; Brown and Herendeen, 1996; Odum and Peterson, 1996)。

三、結果與討論

本文之研究目的，即期將生態系經營之理念，落實於惠蓀林場關刀溪集水區之紅檜人工林與闊葉樹次生林的經營管理，茲就圖 2 之各項研究流程，進行綜合性的檢核與探討。

(一) 經營目標擬定

臺灣林業發展，向以兼顧經濟性、公益性與永續性為政策目標；所不同者，在於各不同時代背景之下，各項目標的比重有所差異(黃裕星, 1997)。生態系經營係結合生物多樣性、永續林業與多資源利用等經營原則，再將其經營規劃之單位，擴大為較大範圍的地景層級，而成為以生態系為單元的新經營理念。惠蓀林場為國立中興大學的實驗林場之一，採自給自足之作業基金制度(自八十三會計年度起，營運所需人事費之 60%，係由教育部編列預算予以補助)(國立中興大學農學院實驗林管理處, 1994)，其經營規劃除木材和副產品永續收穫，提供遊樂、特殊景觀資源展示以及解說教育，並需考量教學實習與試驗研究的重要性。茲將其經營任務、目標以及經營之作業程序分述如下：

1. 任務

維持經營區之生物歧異度，並發展為永續的試驗、教學與示範林地。

2. 目標

- (1) 配合教學實習、試驗研究以及示範經營為鵠的。
- (2) 開放並維持一整合性的自然資源資料庫，收集各類森林作業之監測結果，提供教學、研究與示範之需。
- (3) 保護水土資源，並維持森林植群的歧異度與生產力。
- (4) 維持野生動物的生物歧異度。
- (5) 確認並保護區內的文化資產。
- (6) 維持生態系的完整性，並檢測森林結構和經營體系對整體生態系的輸出效應。
- (7) 確保伐採收穫的強度不超過永續生產的上限，以維持各類森林作業和經營之林地，並供為示範的場所。
- (8) 妥善採納來自各關懷團體和社會大眾的意見，維持公共關係，接納一般性的關注和自發性的合作。
- (9) 開放作為非機械性遊憩的場所，並提供必要

的措施。

- (10) 積極推展社會教育計畫的運作。

3. 作業程序

- (1) 森林生態保育區之劃定。
- (2) 景觀保護區之劃定。
- (3) 教學示範區之劃定。
- (4) 試驗研究區之劃定。
- (5) 森林遊樂區之劃定。
- (6) 營林區之劃定。
- (7) 步道系統的規劃。
- (8) 收穫計畫。

(二) 試區選定與樣區設置

由第三次臺灣森林資源及土地利用調查結果可知；臺灣全島土地面積概為 3,591,500 ha，其中森林地面積約為 2,102,400 ha，其森林覆蓋率達 58.54% 左右，其中屬檜木之天然林的森林地約為 48,500 ha (約占臺灣全島森林地面積之 2.31%)。又屬林務局管轄事業區之森林地總面積概為 1,456,900 ha，其中檜木之天然林的森林地約為 48,000 ha (約占 3.29%)，而檜木人工林的森林地約為 24,800 ha (約占 1.70%) (管立豪與陳仲賢, 1995)。此外，林務局(1997)統計 1996 年全臺的造林面積概為 5,230.47 ha，屬紅檜造林地約計 217.95 ha，占該年造林面積 4.17% 左右。許博行(1999)亦將紅檜列為全民造林運動計畫的重要經濟樹種之一。綜觀此等資料顯示紅檜於臺灣林業的重要地位。

由惠蓀林場歷年的造林台帳得知，各造林地之造林樹種與台帳面積等資料共計 94 筆，總面積為 780.86 ha；而分布於關刀溪集水區之紅檜造林地面積計 165.45 ha，占林場造林總面積(780.86 ha)之 21.19%。林子玉(1956)曾針對林場內第 5-7 林班之天然針闊混交林內的臺灣扁柏與紅檜，建立其胸高形數表和材積表。然自此調查之後，鮮少對林場之紅檜人工林深入研究，而經實地勘查發現；諸多紅檜分叉叢生，且有關葉樹種入侵；如何將生態系經營的理念落實於此等造林地的經營管理，乃本研究所欲解決的問題。因此，本研究係以關刀溪集

水區內第四、五林班之 242 號與 248 號造林地為森林生態系經營試區，而由於試區中之紅檜多為分叉叢生，且多入侵的闊葉樹幼木，冀透過疏伐處理營造複層林，以提高其生產力與歧異度。又其中 242 號造林地面積為 5.61 ha，248 號造林地(關刀山入口旁)面積為 6.91 ha，總計 12.52 ha (表 1)。於此二紅檜人工林設置 8 個 40 m × 100 m 之施業樣區 (即疏伐處理之

範圍)，再分別於其中設置 20 m × 50 m 之調查樣區 (即生物與環境因子監測調查之範圍)；另於 248 號造林地附近的闊葉樹次生林，設置 2 個 20 m × 25 m 之調查樣區，作為試驗研究的對照組。各樣區之屬性資料與位置如表 2、圖 3 所示。此外，所有調查樣區外圍設至少 20 m 以上的緩衝帶。

表 1. 生態系經營試區性質表

Table 1. Properties of experimental sites for ecosystem management.

造林地 編號	造林 方法	苗木來源	造林前土地 利用狀況	海拔高 (m)	坡向	坡度 (°)	土壤性質			
							種類	深度	濕度	結合度
242	人工 育林	守關山紅 檜次生林 採種後之 塑膠袋苗	原為針闊葉天 然混交林皆伐 後之伐木跡地	1,600- 1,700	東北	20-45	紅土 多石	淺、中	適中	鬆
248	同上	同上	原為 234 號造 林地，育林失 敗後重新改植	1,600	東北	10-45	紅土 壤土	淺	乾燥 適中	鬆

表 2. 紅檜人工林與闊葉樹次生林樣區屬性表

Table 2. Attributes of plots of Taiwan red cypress plantations and secondary broadleaf forest.

屬性資料	紅 檜 人 工 林 樣 區								闊葉樹 次生林樣區	
	242 號造林地				248 號造林地				H1	H2
	C3	T	A2	B2	C2	B1	C1	A1		
坡度 (°)	30	30	35	40	37	40	34	30	40	45
坡向 (°)	65	65	85	85	85	83	83	83	195	140
調查長邊 (m)	55	55	60	60	60	60	60	55	25	26
調查短邊 (m)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
施業長邊 (m)	70	70	100	100	100	100	100	100	-	-
施業短邊 (m)	33	33	40	40	40	40	40	40	-	-
疏伐處理類別	對照組	50%	30%	60%	對照組	60%	對照組	30%	對照組	對照組

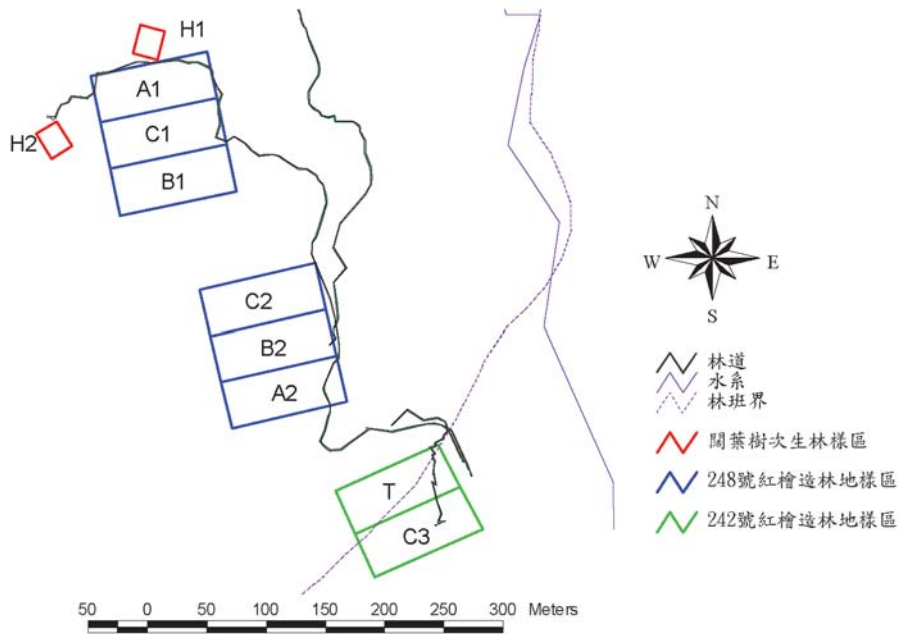


圖 3. 紅檜人工林與闊葉樹次生林樣區位置圖

Fig. 3. Locations of plots in Taiwan red cypress plantations and secondary broadleaf forest.

(三) 施業處理

鍾旭和等 (1995) 認為紅檜人工林之經營，係以生產高價值大徑木為導向，因此在生長過程中至少需進行二次以上之疏伐與修枝撫育作業，故提出紅檜人工林疏伐與修枝之撫育作業基準。242、248 號紅檜造林地之林齡分別為 26、25 年，又試區中之紅檜多為分叉叢生，且多入侵的闊葉樹幼木，故進行疏伐處理，期藉以提高其生產力與歧異度。疏伐度的決定係以胸高斷面積為介量，分 30、50、60% 等三種

疏伐度，並以 $20\text{ m} \times 25\text{ m}$ 之疏伐小區為單位，參照鍾旭和等 (1995) 所提之疏伐木選定標準，進行選木作業 (含紅檜、臺灣杉與其他闊葉樹)，疏伐株數如表 3 所示；如以每公頃保留立木 2,500 株而言，則表 3 中五個樣區之立木株數皆達此標準 ($2,500 \times 0.4 = 1,000$ 株)；然因疏伐後有較大之孔隙產生，故以 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 之株距，適度混植牛樟、香楠、烏心石等苗木於孔隙下。

表 3. 紅檜人工林各樣區喬木層植物之疏伐

Table 3. Overstory thinning of each plot in Taiwan red cypress plantations.

樣區編號	每公頃原株數	每公頃疏伐株數	每公頃現存株數	施業樣區理論株數	施業樣區現存株數	施業樣區應補植株數
T	5,530	2,090	3,440	1,000	1,376	0
A2	7,280	3,750	3,530	1,000	1,412	0
B2	8,420	5,240	3,180	1,000	1,272	0
B1	4,050	1,260	2,790	1,000	1,116	0
A1	3,910	690	3,220	1,000	1,288	0

註：理論株數係將每公頃立木株數 (2,500 株) 乘以施業樣區之面積 (0.4 ha)

(四) 環境與生物因子分析

欲將生態系經營之理念，導注入此等紅檜人工林的經營施業，需考量喬木層和地被層植物，以及亦與森林生態系息息相關的動物、土壤與微氣候等因子間的交互關係，方能加以正確地評估經營施業所產生的效應，以營造合理之生產力與合適之歧異度的複層林，使能增加對環境逆壓的適應性，並供為動物所需的棲息場所，使森林資源的利用與生態保育之間取得平衡，而達永續且具整體性的生態系經營之目標。因此，研究中以土壤之 pH 值 (pH)、全氮量 (TN)、有效磷 (P)、陽離子置換能量 (CEC)、微生物氮生物量 (BN)、L-天冬醯胺酶活性 (E)、有機質含量 (OM)、C/N 之比值 (CNR)，平均溫度 (TEMP)、清晨之相對光度 (LIGHT1) 和傍晚之相對光度 (LIGHT2) 與相對濕度 (HUMID)，以及次級肉食性動物 (SCA)、初級肉食性動物 (PCA)、肉食性昆蟲 (CI)、雜食性昆蟲 (OI)、植食性昆蟲 (PI)、腐生植食性動物 (DPA)、腐食性昆蟲 (DI)、喬木層植物 (OS) 和地被層植物 (US) 等之 Shannon 訊息統計指數的 21 項環境與生物因子，進行 Spearman 等級相關分析，另並使用 SPSS for Windows (Advanced Statistics 8.0) 統計軟體中資料萃取 (data reduction) 模組之主成分分析，以求更進一步瞭解因子間的關連性；而由表 5 之分析結果得知，於特徵值 (eigenvalue) 大於 1 的條件下，可萃取 7 個成分，且其解釋總變異量達 85.013%。楊孝濬等 (1993) 認為以不超過 5 或 6 個成分，即能解釋總變異量 70-80%，則以符合研究需求。

表 5 中成分 1-5 之解釋總變異量已達 71.952%，成分 1 可解釋總變異量達 24.151%，其中 L-天冬醯胺酶活性、微生物氮生物量、pH 值和有機質含量等土壤因子，平均溫度、清晨和傍晚之相對光度等微氣候因子，以及初級肉食性動物與腐生植食性動物之 Shannon 訊息統計指數的負荷量 (loading) 較高；而表 4 中土壤

之 pH 值與 L-天冬醯胺酶活性、初級肉食性動物之 Shannon 訊息統計指數呈現正相關，另土壤之微生物氮生物量與 L-天冬醯胺酶活性、平均溫度以及初級肉食性動物之 Shannon 訊息統計指數呈現正相關，且和清晨之相對光度、腐生植食性動物之 Shannon 訊息統計指數具負相關，此外，土壤 L-天冬醯胺酶活性與平均溫度、初級肉食性動物之 Shannon 訊息統計指數呈現正相關，且和土壤有機質含量具負相關，又清晨之相對光度與初級肉食性動物之 Shannon 訊息統計指數具負相關；綜上顯示 L-天冬醯胺酶活性、微生物氮生物量、pH 值與有機質含量等土壤因子，平均溫度和清晨之相對光度等微氣候因子，以及初級肉食性、腐生植食性動物等土壤表層動物具重要影響性與關連性。另表 5 中成分 2 可解釋總變異量為 16.002%；而表 4 中肉食性與腐食性昆蟲之 Shannon 訊息統計指數，以及土壤之 C/N 的比值與全氮量的負荷量較高，又土壤全氮量與 C/N 之比值、肉食性昆蟲具負相關，此等顯示肉食性昆蟲與全氮量、C/N 之比值等土壤因子之影響性與關連性較大。此外，表 5 中成分 3 可解釋總變異量為 12.286%，其中土壤陽離子置換能量、相對濕度、次級肉食性動物與雜食性昆蟲之 Shannon 訊息統計指數的負荷量較高；而表 4 中土壤陽離子置換能量與傍晚之相對光度具正相關，且傍晚之相對光度與雜食性昆蟲的 Shannon 訊息統計指數呈正相關，由此可知雜食性昆蟲與土壤陽離子置換能量、傍晚之相對光度等環境因子之影響性與關連性較高。綜觀所論，L-天冬醯胺酶活性、微生物氮生物量、pH 值、有機質含量、全氮量、C/N 之比值與陽離子置換能量等土壤因子，以及平均溫度、清晨和傍晚之相對光度等微氣候因子為極重要的環境因子，且與初級肉食性、腐生植食性動物等土壤表層動物、肉食性和雜食性昆蟲具有高度的關連性。

表 4. 21 環境與生物因子之 Spearman 等級相關分析
 Table 4. Spearman rank correlation analysis of 21 environmental and biological factors.

	Spearman 等級相關分析																								
	pH	TN	P	CEC	BN	E	OM	CNR	TEMP	LIGHT1	LIGHT2	HUMID	SCA	PCA	CI	OI	PI	DPA	DI	OS	US				
pH						+																			
TN	0.009						-																		
P	0.155	0.151																							
CEC	0.047	0.055	-0.358								+														
BN	0.470	-0.320	0.085	0.171		++							+												
E	0.576	-0.156	-0.230	0.176	0.647			+				+													
OM	-0.459	0.397	0.419	-0.090	-0.374	-0.638																			
CNR	-0.352	-0.578	0.075	-0.084	0.060	-0.226	0.430																		
TEMP	0.332	0.094	0.169	0.250	0.729	0.606	0.081	0.134																	
LIGHT1	-0.496	0.103	-0.211	0.131	-0.520	-0.379	0.415	0.273	-0.256																
LIGHT2	-0.153	0.295	-0.029	0.515	-0.421	-0.203	0.421	0.088	0.029	0.259															
HUMID	0.248	0.143	-0.138	0.268	0.312	0.585	-0.171	-0.198	0.494	0.155	0.068														
SCA	0.227	0.033	0.302	-0.290	-0.029	0.099	-0.185	-0.183	0.029	-0.329	-0.378	-0.250													
PCA	0.673	-0.345	0.200	-0.316	0.518	0.503	-0.411	-0.008	0.305	-0.536	-0.446	0.038	0.360												
CI	-0.270	-0.641	-0.228	0.210	0.418	-0.109	-0.154	0.425	-0.001	-0.250	-0.287	-0.237	-0.159	0.082											
OI	-0.243	-0.394	-0.153	0.310	-0.166	0.006	0.053	0.502	0.023	0.235	0.505	0.174	-0.090	-0.277	0.151										
PI	-0.108	0.080	-0.016	0.180	0.408	-0.038	0.070	0.014	0.305	-0.235	-0.327	0.194	0.106	-0.108	0.515	-0.025									
DPA	-0.325	0.132	0.001	-0.257	-0.530	-0.292	0.174	-0.150	-0.418	0.200	0.284	-0.025	-0.297	-0.250	-0.231	0.003	-0.520								
DI	-0.203	-0.204	0.094	-0.318	-0.021	-0.344	0.312	0.472	-0.179	0.379	-0.356	-0.015	-0.219	0.143	0.288	-0.081	0.212	-0.058							
OS	-0.406	0.116	-0.177	-0.158	-0.202	0.110	0.046	0.048	-0.006	0.206	-0.274	-0.077	0.473	-0.164	-0.100	0.025	0.080	-0.073	0.024						
US	0.296	0.007	-0.272	0.156	0.191	0.656	-0.677	-0.485	-0.012	-0.116	-0.309	0.412	0.144	0.068	-0.215	-0.108	-0.049	-0.165	-0.247	0.357					

註：表中左下部為相關係數；
 右上部之++和--即達 0.01 的顯著水準；+和-即達 0.05 之顯著水準

成分 4 中可解釋總變異量為 10.732%，其中以喬木層和地被層植物之 Shannon 訊息統計指數的負荷量較高 (表 5)，又土壤 C/N 之比值和地被層植物之 Shannon 訊息統計指數具負相關 (表 4)，顯示植群之影響性亦高。此外，植食性昆蟲於成分 2 之負荷量為 0.418，成分

3 中之負荷量為 0.444，成分 4 中之負荷量為 -0.351，成分 5 中之負荷量為 -0.421 (表 5)，即相對而言於各成分中占較小之影響性，然因其所誘集之種類和數量非常多，為重要的植食性動物，故其所扮演的角色亦不容忽視。

表 5. 21 項環境與生物因子之主成分分析

Table 5. Principle component analysis of 21 environmental and biological factors.

環境與生物因子	環境與生物因子於各萃取之主成分中的負荷量						
	成分 1	成分 2	成分 3	成分 4	成分 5	成分 6	成分 7
pH	0.682	-0.419	-0.205	0.278	0.043	-0.124	0.001
TN	-0.416	-0.564	-0.149	-0.236	-0.493	0.382	-0.127
P	0.195	0.060	-0.457	0.342	-0.041	0.467	0.056
CEC	0.081	-0.303	0.681	-0.160	-0.317	0.101	0.264
BN	0.774	0.172	0.447	0.076	-0.251	0.110	-0.232
E	0.795	-0.409	0.192	0.033	0.308	-0.040	-0.069
OM	-0.699	0.164	0.040	0.298	-0.061	0.561	-0.196
CNR	-0.206	0.687	0.195	0.473	0.404	0.106	-0.039
TEMP	0.630	-0.089	0.288	0.406	0.086	0.447	-0.238
LIGHT1	-0.596	-0.043	0.326	-0.208	0.479	-0.050	-0.232
LIGHT2	-0.612	-0.453	0.177	0.523	-0.116	0.045	0.217
HUMID	-0.001	-0.482	0.590	0.082	0.242	0.130	-0.145
SCA	0.381	0.052	-0.516	-0.176	0.209	0.358	0.563
PCA	0.694	0.301	-0.342	0.255	0.028	-0.027	-0.123
CI	0.229	0.737	0.246	-0.239	-0.368	-0.256	0.124
OI	-0.270	0.124	0.512	0.398	0.299	-0.117	0.570
PI	0.161	0.418	0.444	-0.351	-0.421	0.328	0.109
DPA	-0.688	-0.222	-0.274	0.081	-0.125	-0.311	-0.188
DI	-0.154	0.721	0.037	-0.193	0.208	0.029	-0.278
OS	-0.275	0.091	-0.080	-0.618	0.451	0.453	0.093
US	0.386	-0.475	0.108	-0.557	0.395	-0.022	-0.049
特徵值	5.072	3.360	2.580	2.254	1.844	1.569	1.174
解釋總變異量 (%)	24.151	16.002	12.286	10.732	8.781	7.472	5.589
累積解釋總變異量 (%)	24.151	40.153	52.439	63.171	71.952	79.424	85.013

(五) 生態經濟分析

研究中除基於生物多樣性之永續發展的複層林營造，並瞭解環境與生物資源間的交互影響機制，以兼顧生態性、經濟性與社會性的三種層面，建立森林生態系經營模式。然因各資源組成與結構之資訊難以取得，且各資源經營管理指標與價值之評定不易，是故以每一塊林地皆同時肩負林木生產、景觀遊樂、水源涵養、孕育野生動物等功能之多資源經營管理為原則。

由王德春與戚永年 (1993, 1994) 對我國國民嚮往森林之意向的調查分析結果得知，社會大眾對於森林之生產木材、防洪防砂、涵養水源、保護自然生態、提供國民休閒旅遊以及國土保安等六大直接和間接功能，均有正面而高度的認知，尤其對於保護自然生態環境與涵養水源方面，更表強烈之認同；而有關森林利用問題，國民最優先之意向乃是確保水資源、治山防洪以及保障居住環境，次優先考慮則是森林遊憩活動和享受大自然以陶冶身心。另自高明瑞 (1994) 調查高屏地區民眾，以及森林學者專家對「森林、森林效益和森林目標」的主觀認知研究顯示；民眾對林業政策重點目標的綜合意見，依序為涵養水源、國土保安、造林復建、自然保育、教育研究、經濟利用以及森林遊樂。此外，任憶安等 (2000) 比較一般民眾與林業人員對臺灣森林價值 (分為經濟和功利價值、維生價值、美的價值以及道德和精神價值) 改變之研究亦發現，維生、美、道德和精神等三類價值於林業專業人員的認知上均有愈來愈重要的趨勢；而森林之維生價值在一般社會大眾群體上亦有愈來愈重要的趨勢。但是，高明瑞 (1994) 發現民眾對森林和林業的認知缺乏，僅知其各項經營目標之名詞的表面意義，並無深入瞭解其意涵，而填答問卷時有傾向感性和理想答案的趨勢，故推測於現實生活中，當面臨個人短期利益 (如木材利用、森林遊樂) 與長期的間接效益衝突時，一般民眾必會選擇「現在和有形」的利益，而放棄「未來和無

形」的效益。又鄭欽龍 (1999, 引自黃裕星, 1999) 以實際訪談和問卷調查方式，研究東勢林區麗陽工作站 (和平鄉)，以及臺東林區大武工作站 (達仁鄉) 當地社區社會狀況與居民意向，結果顯示居民咸認森林經營目標中，保護野生動物、涵養水土資源以及提供戶外遊樂等相當重要，但當訪談者要求僅能擇取一種目標時，多數居民均採「務實」態度，認為生產木、竹和副產品應優先於其他三種經營目標。此結果恰證實高明瑞 (1994) 的研究推論，故就生態系經營的社會性取向而言，經濟性的現實條件常與生態性和公益性的效益相互衝突，而解決之道，除政策面的宣導、補助和輔導，以及法令的規範，尚需將此等生態性和公益性的效益加以評估後量化，並納入公共福利政策之擬定的參考，強化民眾對森林的具體認知。

全球皆關心考量經濟的可行性、生態性與社會責任以經營自然資源，而生態系經營則為兼顧生態經濟層面的觀念 (Thoms and Betters, 1998)。近年來，對森林資源需求的日趨多樣化，森林調查已不僅限於林木及林地，其它相關性資源，即涵括非林木資訊者，均應在調查之列，故整合性森林資源調查亟需加強此類資訊之獲得，以適應國民需求態度及經營管理者任務的轉變。以往森林調查中有關獲取林木資訊已有相當成熟的方法，然對非林木資源之調查方法與量化評價，仍缺乏較適切的方法可供依循。成晨光 (1993) 曾以國立臺灣大學實驗林溪頭營林區之林木、森林遊樂、野生動物及水土保持等四項分區經營目標，利用多目標線性規劃模式 (multi-objective linear programming, MOLP) 以編擬森林多資源管理計畫，其除可涵蓋單一目標線性規劃外，並能較需事先獲得決策者偏好資訊之特定水準目標規劃做出更有效率的決策，透過生產函數法與條件評估法量化經營施業之效益；其中並引用隨機影子價格 (stochastic shadow price) 評定非市場財貨之資源指標的價值，以將各資源之經營管理指標轉換成貨幣價值，再透過敏感度分析探討各資源

間在不確定情形下之最適配置狀況，以尋求最佳的決策，結合各資源之經營管理目標函數式，以建構多資源森林經營管理模式。此外，李國忠與林俊秀 (1991) 亦以森林資源多目標利用規劃的經濟模式，量化經營施業之效益。Hunter (1999) 認為量化生態的經濟價值中，除用於燃料、紙漿和建築材料等之木材具明確的市場價值，其他如精神、科學和教育等無形價值常難以明確量化。而為達生態性、經濟性與社會性之生態系經營評估，使用各樣區中系統層級之訊息指數—總系統傳輸量 (total system throughput, TST) 進行能值分析 (表 6)。羅玉霖與羅紹麟 (1994) 利用能值分析，探討國有林森林生態經濟系統之能量與物質間相互關係之結果得知；國有林每年蘊含 $2.488E+22 \text{ sej ha}^{-1}$ 之能值運作，約占臺灣全島能值的十分之一，其中以水資源涵養所產生的能值最高，總體經濟價值亦最高，此顯示森林在水資源涵養之功能

的重要性，而臺灣森林之林木材積生長能值遠低於波多黎各 (Puerto Rico) 之熱帶林，在自給不足下，需進口木材；另由能值指標分析結果顯示林業仍屬原始、粗放產業，然國民經濟依賴森林提供無須付費的自然資源度偏高，能值貨幣比值過高，故於保育的規範下，適當進行森林的利用仍屬必要。另 Odum and Peterson (1996) 研究松樹人工林之林木生長的能值為 $9E+14 \text{ sej ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ；而針葉樹林之之太陽能換率為 $3,800 \text{ sej J}^{-1}$ 。羅玉霖 (1994) 認為能值分析可評估森林利用、水資源開發、森林遊樂區和自然保留區的設置等對於森林生態系之影響，且可提供為森林生態系經營計畫之參考，以及支援決策系統上的應用；然因自然環境的定量性資料不易獲得，故能值評估和能值指標分析，僅可提供為決策上相對性數值的比較，而非絕對性的資料。

表 6. 各樣區之能值分析與能量價值

Table 6. Emergy analysis and energy value of each plot.

能值評估	樣 區 編 號				平均值
	T	A2	B1	H2	
總系統傳輸量 ($\text{J ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	8.539E+11	1.644E+12	1.576E+12	2.378E+12	1.613E+12
能值 ($\text{sej ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	1.607E+16	3.093E+16	2.966E+16	4.475E+16	3.035E+16
能量價值 ($\text{\$ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)	1.190E+4	2.291E+4	2.197E+4	3.315E+4	2.248E+4

由於相關轉換參數不易取得，而四種生態系中概以植物與枯枝落葉的生物量最高，對總系統傳輸量之影響較大，故首先以木材能量 ($1.050E+4 \text{ J kg}^{-1}$)、針葉樹枯枝落葉之能量 ($3.469E+7 \text{ J kg}^{-1}$)、針闊葉樹枯枝落葉之能量 ($3.194E+7 \text{ J kg}^{-1}$) 以及闊葉樹枯枝落葉量之能量 ($2.719E+7 \text{ J kg}^{-1}$) 的平均值 ($2.346E+7 \text{ J kg}^{-1}$) 為能量轉換參數 (羅玉霖與羅紹麟, 1994)，分

別將總系統傳輸量轉換為能量單位；而由表 6 得知；其轉換後之平均總系統傳輸量為 $1.613E+12 \text{ J ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。再以木材能換率 ($3.490E+4 \text{ sej J}^{-1}$) 與枯枝落葉能換率 ($3.737E+3 \text{ sej J}^{-1}$) 之平均值 ($1.882E+4 \text{ sej J}^{-1}$) 為能換率的轉換參數 (羅玉霖與羅紹麟, 1994)，分別求算各樣區之能值，而由表 6 得知平均能值為 $3.035E+16 \text{ sej ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。最後，利用羅玉霖與羅紹麟 (1994)

所提之 1992 年臺灣能值與貨幣的比值 ($1.350E+12$ sej $\$^{-1}$)，求算各樣區之能量價值 (energy value)，其結果如表 6 所示；紅檜人工林之 T 樣區為 $11,903.406$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，A2 樣區為 $22,911.120$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，B1 樣區為 $21,973.801$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，闊葉樹次生林之 H2 樣區為 $33,150.765$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。

以表 6 中紅檜人工林之 A2 和 B1 樣區的平均能量價值 ($22,442.461$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，乘以 248 號造林地之面積 (6.91 ha)，可得此紅檜人工林之總體經濟價值為 $155,077.403$ $\$ \text{ yr}^{-1}$ ；而將紅檜人工林之 T 樣區的能量價值，乘以 242 號造林地之面積 (5.61 ha)，可得此紅檜人工林之總體經濟價值為 $66,778.109$ $\$ \text{ yr}^{-1}$ ；再以紅檜人工林之 A2、B1 和 T 樣區的平均能量價值 ($17,172.934$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，乘以林場內所有紅檜造林地之面積 (165.45 ha)，則其總體經濟價值達 $2,841,261.848$ $\$ \text{ yr}^{-1}$ 。另以表 6 中之平均能量價值 ($22,484.773$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，乘以關刀溪集水區之面積 ($2,216$ ha)，其總體經濟價值達 $49,826,257.387$ $\$ \text{ yr}^{-1}$ ；此外，若將平均能量價值 ($22,484.773$ $\$ \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)，乘以惠蓀林場之總面積 ($7,477$ ha)，則其總體經濟價值高達 $166,387,321.598$ $\$ \text{ yr}^{-1}$ 。

(六) 生態指標

生態系經營為兼顧生態系中各種資源間的關連性，並落實於更大之地景單元的經營管理，而欲將此觀念應用於臺灣之林業經營，就地狹人稠且資源有限的臺灣而言，此觀念的推展是可行且必須的，然就資源特性而言，其林相複雜、資源豐富且生物歧異度高，欲達成生態系經營的目標，仍有所困難，而首先面臨的問題，即是對森林生態系中的各種資源特性，及其交互影響關係的資料缺乏，雖然完成臺灣全島三次森林資源調查，且有多處之長期生態研究站持續進行調查研究，但仍缺乏對各種資源間的關連性，以及生態系中的能量流轉與養分循環等資料，是故惟由大處著眼，以地景之大尺度單元進行經營規畫，而從小處著手，逐

步釐清和瞭解小尺度之各種生態系的本體，方能有確切的資料，真正將生態系經營的觀念落實於臺灣。此外，蒙特婁協議中曾發展適用於溫帶林和寒帶林之保育與永續經營的準則與指標 (CFS, 1995)。然各項準則中的指標，因量測的難易有別，為求適地適用，研究中並發展環境、生物與生態經濟等生態指標 (ecological indicator)，茲分述如下：

1. 環境指標

由 21 項環境與生物因子之 Spearman 等級相關分析 (表 4)，以及主成分分析 (表 5) 結果得知；L-天冬醯胺酶活性、微生物氮生物量、pH 值、有機質含量、全氮量、C/N 之比值與陽離子置換能量等土壤因子，以及平均溫度、清晨和傍晚之相對光度等微氣候因子為極重要的環境因子，故選擇此 10 項環境因子為環境指標。

2. 生物指標

生物指標與生態過程中的環境因子，具有直接或間接的關連性，環境因子可控制生物之出現或存活，而當某些環境因子難以直接量測時，生物指標可為評估環境品質的生態資訊 (劉棠瑞與蘇鴻傑, 1989; Behan-Pelletier and Newton, 1999)。又 Power and Tilman (1996) 認為豐富度高的物種，於控制群落或生態系過程的速率和方向中扮演要角，此可為關鍵種；然豐富度較低的物種可能對群落和生態系具極巨之影響，故亦可能為關鍵種，因此，關鍵種的確定不易，須考量時間和空間尺度，並透過生態系中的營養階層，以及各分類群的歧異度加以評判。因此，透過 21 項環境與生物因子之 Spearman 等級相關分析 (表 4) 與主成分分析 (表 5) 結果，以及重要值指數分析中之優勢植物，或具局部分布性等具生物指標意義的相關資訊，選擇紅檜、木荷和臺灣杉等原栽植樹種，另香桂、薯豆、變葉新木薑子、小葉赤楠、反刺楸、南投石櫟、竹葉楠、豬腳楠、反刺楸、綠樟與狗骨仔，野桐、百香果和山胡椒，倒葉瘤足蕨、生根卷柏、芒萁、廣葉鋸齒

雙蓋蕨、五節芒、裏白、冷清草、裂緣花與蓮花池杉木，以及疏伐後出現的火炭母草、昭和草、蔓芒萁、菁芳草、醉醬草、倒地蜈蚣、紅面番、紫花霍香薊、野苧蒿、飛機草、黃鸝菜、薄瓣懸鉤子與臺灣檫木共 39 種植物為監測候選種；此外，紹德步行蟲、蚊科等肉食性昆蟲，屬雜食性之蟻科昆蟲，葉蟬科、癭蚧科等植食性昆蟲，埋葬蟲科、麗蠅科、偽毛蚋科和跳蟲科等腐食性昆蟲，以及初級肉食性、腐生植食性動物等土壤表層動物，其於生態系食物網中之數量具季節性變化，或具有某種特定意涵，是故亦選擇為生物指標的監測候選種。

3. 生態經濟指標

以能值分析中的能值與能量價值為經濟指標；如以表 6 中之平均能量價值 ($22,484.773 \$ \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)，乘以關刀溪集水區之面積 (2,216 ha)，其每年之總體經濟價值為 4,980 萬元；此外，若將平均能量價值 ($22,484.773 \$ \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)，乘以惠蓀林場之總面積 (7,477 ha)，則其每年的總體經濟價值高達 16,800 萬元。

(七) 經營施業與適應性經營

Parrotta (1999) 比較純林與混交林 (二種固氮植物和其他非固氮植物，混值比例為 1:1) 之生產力與養分循環，發現混交林對提高林分生產力，以及促進養分循環有正面影響。然純林的建造並非生態上絕對有害的經營方式，問題在於純林的建造需有適合之環境條件的地區，例如北美或中國大陸的寒溫帶氣候區，其天然林中有相當面積為天然純林 (特別是樹種組成較單純的針葉樹純林)，因此，營造人工純林並非完全不符合生態原則，然而，以臺灣而言，大面積天然純林且合乎傳統經濟原則，又可經營的林地微乎其微，尤其是中低海拔且到達性高的森林，概為樹種複雜和具多樣性的闊葉樹混交林 (其每公頃之喬木樹種達 30-50 種的林分非常普遍)，然為短期的經濟利益，皆伐後多不種植闊葉樹，而為針葉樹的純林 (金恆鏞，1996)。此外，Björse and Bradshaw (1998) 亦

認為現今的林業經營原則，需考量林地的自然狀況，適度混植原生樹種，以確保林木的生產和生物多樣性的保育。

將生態系經營之理念，實踐於臺灣之林業經營的技術與方法仍處於試驗階段，而本研究所使用的資料僅為期一年半 (後因 921 地震而致使道路中斷，故無法抵達試區持續調查)，因此，在缺乏充分之知識與經驗下，需藉由全面性和適地性之監測計畫的持續進行，以掌握資源現況與改變，從中瞭解自然干擾法則的交感效應，隨時檢定原經營方針與策略，並透過適應性經營的方式，審慎評估、修正與調整，以回饋至生態系經營的目標。

四、結論

生態系經營即結合多資源的經營管理系統，即除包括林木、其它生物和環境資源，同時將人類納入生態系因子，並透過生態、經濟以及社會等三種層面的考量，以適時調節生態系內在結構與功能，並維持其生產力與歧異度，保續珍貴生態系的長久健康運作不息。欲將生態系經營之理念，導入此等紅檜人工林的經營施業，需考量地被層植群差異，以及與森林生態系亦息息相關的動物、土壤、與微氣候等因子間的交互關係，方能加以評估並營造合理之生產力與合適之歧異度的複層林，使能增加對環境逆壓的適應性，並供為動物所需的棲息場所，於森林資源的利用與生態保育之間取得平衡，而達永續且具整體性的生態系經營之目標。本研究僅以紅檜人工林與闊葉樹次生林之林分尺度為例，建立森林生態系經營之理論模式，期能提供為爾後大尺度地景生態系經營之基礎。然欲兼顧生態性的無形經濟價值，以及社會性的現實經濟需求，係為弔詭的哲學問題，而除學術界積極將評估與量化工具公信力的生態經濟價值，尚需有政策面的配套措施，並可透過網際網路的方式，加強宣導民眾對森林的具體認知，及其對資源之非市場性效益的重視。

五、致謝

本研究承蒙行政院農業委員會之經費補助(87科技-1.7-林-06-01(5)、88科技-1.7-林-04、87-農建-8.1-林-01(4)、88-農建-8.1-林-01(4))；中興大學實驗林管理處和惠蓀林場人員於試驗研究期間的協助，以及各研究室曾參與野外調查的同學們，謹此致上由衷謝忱。

六、參考文獻

- 王德春、戚永年(1993)我國國民嚮往森林之意向調查與分析(一)。臺灣林業 19(12): 2-10, 40。
- 王德春、戚永年(1994)我國國民嚮往森林之意向調查與分析(二)。臺灣林業 20(1): 32-38, 48。
- 任憶安、林俊成、吳萬益、塗三賢、賴建興(2000)臺灣森林價值改變之研究：一般民眾與林業人員之比較。中華林學季刊 33(2): 245-253。
- 成晨光(1993)森林多資源指標之整合及其在多目標經營管理計畫上之應用。國立臺灣大學森林學研究所資源管理組碩士論文，臺北市。
- 李國忠、林俊秀(1991)森林資源多目標利用規劃之經濟性模式。中華林學季刊 24(2): 33-45。
- 林子玉(1956)能高林場黃檜紅檜胸高形數表及材積表。臺灣森林 2(2): 1-10。
- 林務局(1997)臺灣省林業統計，第一版。臺灣省政府農林廳林務局，臺北市。
- 金恆鏞(1996)林業與現代化經營經營。現代育林 12(1): 4-8。
- 高明瑞(1994)自然資源保育與管理，第一版。淑馨出版社，臺北市。
- 國立中興大學農學院實驗林管理處(1994)國立中興大學農學院實驗林管理處簡介，第一版。國立中興大學農學院實驗林管理處，臺中市。
- 張紹勳、林秀娟(1995)SPSS For Windows 統計分析：初等統計與高等統計，第三版。松崗電腦圖書資料股份有限公司，臺北市。
- 許博行(1999)全民造林運動－經濟樹種簡介，第一版。行政院農業委員會，臺北市。
- 黃裕星(1997)臺灣林業經營與自然保育。臺灣林業 23(2): 6-14。
- 黃裕星(1999)森林生態系經營之規劃。11 pp。永續林業發展策略研討會，臺中市。
- 楊孝濬、趙碧華、李明政(1993)社會統計學，第一版。黎明文化事業股份有限公司，臺北市。
- 管立豪、陳仲賢(1995)第三次臺灣森林資源及土地利用調查。臺灣省農林廳臺灣省林務局。
- 劉棠瑞、蘇鴻傑(1989)森林植物生態學，第三版。臺灣商務印書館，臺北市。
- 鍾旭和、羅卓振南、邱志明(1995)紅檜人工林疏伐修枝作業手冊，第一版。臺灣省林業試驗所，臺北市。
- 羅玉霖(1994)臺灣國有林區森林生態經濟系統能值分析。國立中興大學森林學研究所碩士論文，臺中市。
- 羅玉霖、羅紹麟(1994)臺灣國有林區森林生態經濟系統能值分析。國立中興大學實驗林研究報告 16(2): 107-116。
- Behan-Pelletier, V. and G. Newton(1999) Linking soil biodiversity and ecosystem function—the taxonomic dilemma. *Bioscience* 49(2): 149-152.
- Björse, G. and R. Bradshaw(1998) 2000 years of forest dynamics in Southern Sweden: suggestions for forest management. *For. Ecol. Manage.* 104: 15-26.
- Brown, M. T. and R. A. Herendeen(1996) Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecol. Econ.* 19: 219-235.
- Brunson, M. W. and J. J. Kennedy(1995)

- Redefining “multiple use” : agency responses to changing social values, *In* R. L. Knight and S. F. Bates eds. *A New Century for Natural Resource Management*, 1st ed. Island Press, Washington, D.C. pp. 143-158.
- CFS (1995) *Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests- the Montreal Process*, 1st ed. Canadian Forest Service (CFS), Quebec.
- Christensen, V. (1994) Emergy-based ascendancy. *Ecol. Model.* 72: 129-144.
- Franklin, J. F. (1997) Ecosystem management: an overview, *In* M. S. Boyce and A. Haney, eds. *Ecosystem Management: Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resource*, 1st ed. Yale University Press, New Haven & London. pp. 21-53.
- Grumbine, R. E. (1994) What is ecosystem management? *Conserv. Biol.* 8(1): 27-38.
- Hunter, M. L., Jr. (1999) Biological diversity, *In* M. L. Hunter, Jr. ed. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 3-21.
- Jørgensen, S. E., S. N. Nielsen and H. Mejer (1995) Emergy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecol. Model.* 77: 99-109.
- Kessler, B. W. and H. Salwasser (1995) Natural resources agency: transforming from within, *In* R. L. Knight and S. F. Bates eds. *A New Century for Natural Resource Management*, 1st ed. Island Press, Washington, D.C. pp.171-187.
- McCormick, F. J. (1999) Principle of ecosystem management and sustainable development, *In* J. D. Peine, ed. *Ecosystem Management for Sustainability: Principles and Practices Illustrated by a Regional Biosphere Reserve Cooperative*, 1st ed. Lewis Publishers, Boca Raton. pp. 3-21.
- Odum, E. P. (1983) *Basic Ecology*, 1st ed. CBS College Publishing.
- Odum, H. T. (1982) *System Ecology*, 1st ed. John Wiley & Sons, New York.
- Odum, H. T. (1988) Self-organization, transformation, and information. *Science* 242: 1132-1139.
- Odum, H. T. and N. Peterson (1996) Simulation and evaluation with energy system blocks. *Ecol. Model.* 93: 155-173.
- Parrotta, J., A. 1999. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *For. Ecol. Manage.* 124: 45-77.
- Power, M. E. and D. Tilman (1996) Challenges in the quest for keystones. *Bioscience* 46 (8): 609-621.
- Schlaepfer, R. (1997) Ecosystem- Based Management of Natural Resources: A Step Towards Sustainable Development. IUFRO Occasional Paper 6, ISSN 1021-414X.
- Seymour, R. S. and M. L. Hunter, Jr. (1999) Principles of ecological forestry, *In* M. L. Hunter, Jr. ed. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 22-61.
- SPSS Inc. (1998) *SPSS Base 8.0- Application Guide*, 1st ed. SPSS Inc., USA.
- Thoms, C. A. and D. R. Betters (1998) The potential for ecosystem management in Mexico’s forest ejidos. *For. Ecol. Manage.* 103: 149-157.
- Toman, M. A. and P. M. Ashton (1996) Sustainable forest ecosystems and management: a review article. *For. Sci.* 42(3): 366-377.

研究報告

森林生態旅遊市場區隔之研究— 以阿里山、滿月圓及墾丁森林遊樂區為例¹

黃有傑² 葉美智³ 羅紹麟⁴

【摘要】本研究以「需求層次理論」和「自我決定理論」作為遊憩需求及動機的主要理論架構，進行森林生態旅遊區的市場區隔及定位。研究以阿里山、滿月圓及墾丁三處國家森林遊樂區作為實證地點，以事後區隔模式進行人口統計、地理、心理及行為變數等分析。結果顯示遊客進行森林生態旅遊的動機主要可分為4項，分別為「身心健康」、「地區互動」、「嗜好興趣」和「自我意志」；而依動機因素對遊客進行集群分析後，可得到2個市場區隔族群，分別定名為「單純為生態旅遊活動而來」及「為了自身健康及抒解調適」。此外若以基本性格變數來進行分類，則主要包含「環境關懷」、「社會關懷」和「資源關懷」等3個因素，並將市場區分為「對社會及環境充滿關懷」及「對社會及環境較冷淡」2類。

【關鍵詞】市場區隔、需求層次理論、自我決定理論

Research paper

The Market Segmentation of Forest Ecotourism- A Case Study of Ali-shan, Man-yueh-yuan and Ken-ting Forest Recreation Areas¹

You-Jei Huang² Mei-Chih Yeh³ Shaw-Lin Lo⁴

【Abstract】The main purpose of this paper is to study the market segmentation and position of forest ecotourism areas by “theory of need hierarchy” and “self-determination theory” to study recreation needs and motives. 3 study areas were chosen there are Ali-shan, Man-yueh-yuan and Ken-ting forest recreation areas. Post-hoc segmentation model with demographic, geographic, psychologic and behavioral variables were applied for segmentation analysis. The results were shown that recreation

1.本研究呈農委會 94 農科-11.3.2-務-e1 (6) 研究計劃經費補助，特此感謝

2.國立中興大學森林系博士候選人

Ph.D Candidate, Department of Forestry, National Chung Shing University.

3.朝陽科技大學休閒事業管理學系講師、

國立中興大學森林系博士候選人(通訊作者)。E-mail: tfhmey@ms23.hinet.net。台中市國光路 250 號森林系

Instructor, Department of Leisure, Recreation, and Tourism Management, Chaoyang University

Ph.D Candidate, Department of Forestry, National Chung Shing University. (Corresponding author)

4.國立中興大學森林系名譽教授

Emeritus Professor, Department of Forestry, National Chung Shing University.

motives factors of visitors go to forest ecotourism areas were “health of body and mind”, “localized interaction”, “hobby and interest” and “self-awareness”. According to their recreation motives the tourists were segmented into two groups with “just for ecotourism” and “self-health and self-relaxation”. The character factors of tourists were including “care of environment”, “care of society”, and “care of natural resources”. The tourists were be segmented into two groups according to their character: “the full care of society and environment” and “the coldness of society and environment”.

【key words】 market segmentation, theory of need hierarchy, self-determination theory.

一、前言

生態旅遊提供了遊客感受大自然的瑰麗景緻，也喚醒了大眾對自然動植物生態環境的保育和維護的良知，並協助改善當地居民經濟、文化、生活與實質環境(劉吉川，1994)。生態旅遊理想的狀況，即建構在當地居民、資源保育及觀光遊憩彼此間和諧、互利共生的基礎上(Ross & Wall, 1999)；這與一般傳統的觀光或大眾觀光(mass tourism)所具有的資本主義掠奪式的觀光模式大相逕庭，也因此進行生態旅遊的市場區隔，將可幫助其劃清在觀光遊憩市場中的角色及定位。

台灣地區林地總面積為2,102,400公頃(佔全島面積之58.53%) (林務局，2005)，為陸地

生態系中最重要之生育地；而在羅紹麟(2001)、楊宏志(2002)及楊秋霖(2004)均曾強調，不論從景觀、保育、冒險、環境敏銳性、資源獨特性、參與及利益等各角度來看，森林遊樂均與生態旅遊密不可分，可視為生態旅遊的代言人。因此本研究以森林遊樂區之生態旅遊作為對象，進行森林生態旅遊市場區隔，試著在生態旅遊的框架中找到森林遊樂區之市場特性，進而給予不同於其他生態旅遊活動之行銷及管理策略，以提高服務品質並增加遊客滿意度。

二、文獻探討

(一) 遊憩需求

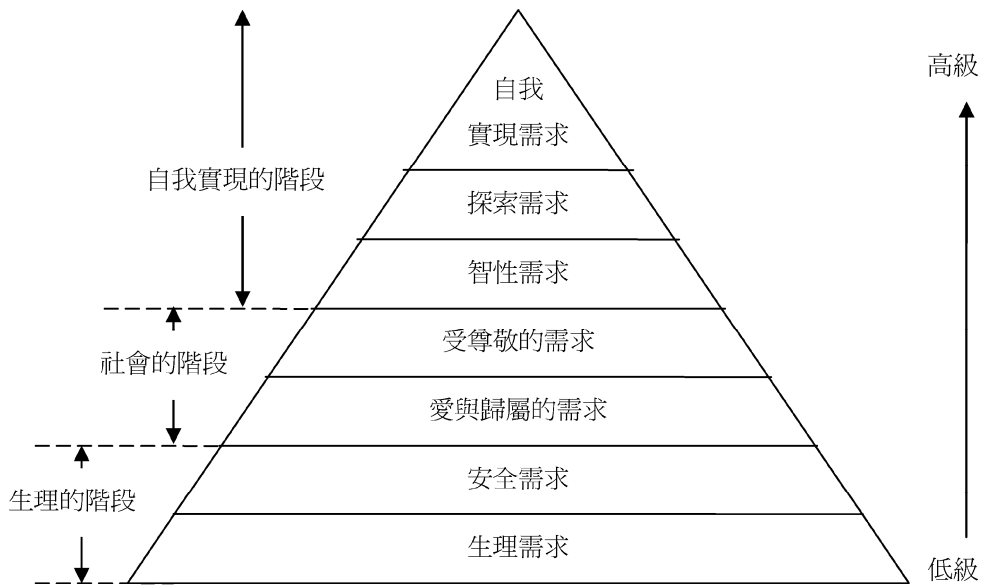


圖 1. 需求層次 (修改自張集毓，1994)

Fig. 1. Needs hierarchy.

人類的需求大致可分生理需求及心理需求，依「需求層次理論」生理需求獲得滿足後方有心理需求，而遊憩即在於滿足心理需求(黃榮賜, 1988)。「需求層次理論」是由Maslow所提出，其由下而上的需求層次可表示如圖1。7種需求中與生態旅遊有關者為「生理需求」、「受尊敬的需求」、「智性需求」、「探索需求」及「自我實現的需求」等5項。至於在遊憩需求方面，Lavery (1975)曾將遊憩需求 (demand) 歸納為以下三類 (李銘輝, 1991) :

- 1.有效 (effective) 需求：實際到目的地從事遊憩活動，使用當地設施與服務的人次。
- 2.展延 (deferred) 需求：有遊憩動機、遊憩需求或遊憩能力，但或因缺乏設施，或因缺乏參與之知識，或上述二者皆缺乏之人次。
- 3.潛在 (potential) 需求：雖有遊憩需求，但目前或因社會因素，或因經濟因素而無法參與者，必須等到社會或經濟狀況改善才能參與的人次。

上述之分類，可應用於生態旅遊市場區隔抽樣之選取上；亦即一般遊客問卷多忽略了展延需求及潛在需求之遊客，本研究之樣本選取以國家森林遊樂區到訪遊客為主，參與過生態旅遊者視為「有效需求」遊客，未參與過者則視為「展延需求」及「潛在需求」遊客。

(二) 遊憩動機

需求和動機是一體兩面的，透過人類的需求才會引進行為的動機。遊憩動機也源於人類的遊憩需求(謝淑芬, 1994)。人類社會的動機一般分為兩類，一是「內在動機」，假設人的行為是決定於任務或情境本身的特徵(Weissinger and Bandalos, 1995)，因人們對活動本身感到興趣或能從中獲得滿足，故無需外力推動。二是「外在動機」，對遊憩本身並無興趣，而是外界刺激所生之推力(時蓉華, 1996)。有時外在動機可視為內在動機的影響因素。

內在動機主要由三構面所構成：1.求知的

內在動機；2.獲得成就的內在動機；3.體驗刺激的內在動機 (Alexandris *et al.*, 2002)。內在動機雖廣泛用來解釋許多人類行為，但人類的行為有時非簡單的內外動機所能解釋且個人亦有差異；故 Deci and Ryan (1985) 發展出自我決定理論 (self-determination theory) 來解釋人類行為受內在及外在動機影響的狀況 (Weissinger and Bandalos, 1995)。

自我決定理論將動機概分為三個主要類型，內在動機、外在動機和無動機；即自決程度愈多者其行動主要受內在動機所引發，愈少者即行為主要受外在動機的成分愈多，沒有自決時即可稱為無動機 (Losier *et al.*, 1993；Alexandris *et al.*, 2002)。而外在動機依其自決程度還可分為表面的 (external)、投入的 (introjected)、認同的 (identified) 到整合的 (integrated) 4種 (Baldwin and Caldwell, 2003) (如圖2)。本研究欲嘗試以自我決定理論來解釋並區別動機之類型，以瞭解遊客想參加生態旅遊之動機為何。

(三) 森林生態旅遊市場區隔

1. 森林生態旅遊市場區隔之定義

市場區隔最早之概念係由Smith W.R. (1956) 所提出，其定義市場區隔為一個市場的消費者根據某些標準加以細分的過程 (盧永祥, 2001)。至於與遊樂相關的市場區隔，則有曾國基 (1989)；羅尤娟 (1998) 與李銘輝、郭建興 (2000)，均為市場區隔定義之延伸，即將消費者鎖定在遊憩市場中的遊客。

生態旅遊主要是生態與觀光的結合，其內涵是生態、經濟及社會文化等三大目標，當地居民、遊客及觀光發展組織結合成一環環相扣的結構體；而森林生態旅遊則以森林地區為生態旅遊之活動稱之。綜合上述定義及森林生態旅遊之內涵，本研究定義森林生態旅遊市場區隔為「森林生態旅遊地區依其環境特性及當地居民與遊客需求進行市場細分，配合適當行銷組合以符合當地環境設施及滿足當地居民與遊客需求之過程」。

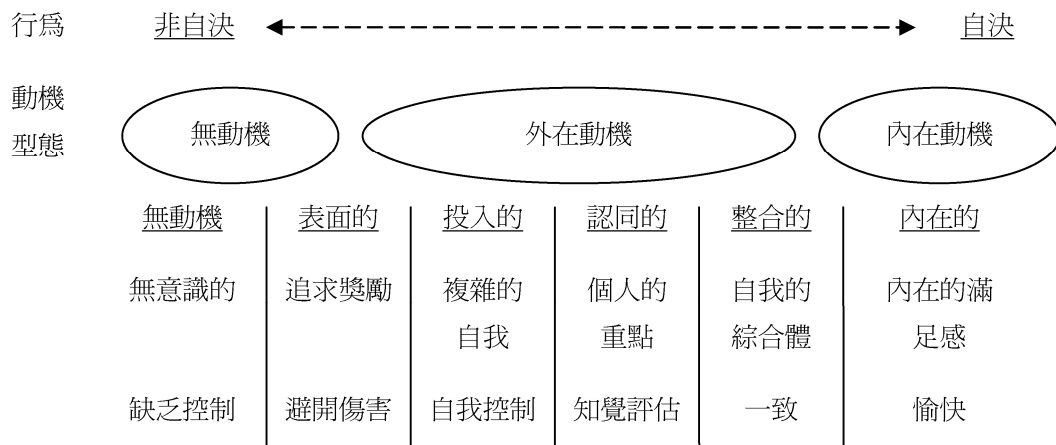


圖 2. 連續的動機型態 (Baldwin and Caldwell, 2003)

Fig. 2. Continuum of types of motivation

2. 森林生態旅遊市場區隔變數

一般市場區隔常用的區隔變數可分為以下 4 種 (Engel *et al.*, 1995; 李銘輝、郭建興, 2000): 1. 地理變數; 2. 人口統計變數; 3. 心理變數; 4. 行為變數。而市場區隔之變數選取, 只要區隔後市場能顯示出有意義的市場機會, 即是選擇了適當的區隔變數 (Fitzgibbon, 1987)。且運用單一人口統計變數, 通常不能有效反應遊客需求或特殊偏好, 故一般會選擇兩個以上變數進行區隔分析 (黃旭男等, 2002; 劉瓊如等, 2002)。本研究在變數選取上將 4 種變數均納入, 藉以分析與森林生態旅遊有關的區隔變數。

三、研究材料與方法

(一) 研究樣區選取

綜合交通部觀光局 (1997) 所列之前 20 處潛在生態觀光地; 吳貞純、童秋霞 (2002) 整理指出國家森林遊樂區在 2002 年曾進行生態旅遊活動的地區; 及配合現階段林務局強力推廣的生態旅遊動線 11 條, 共 13 座森林遊樂區 (農委會林務局, 2005)。交叉比對後, 選取出「阿里山」、「墾丁」及「滿月圓」3 處做為研究地點, 進行市場區隔分析。

1. 墾丁森林遊樂區 (濱海型, 南部)

本區為林務局屏東林區管理處所轄, 位於屏東縣恆春鎮, 海拔 200-400 公尺, 佔地 149.82 公頃, 區內自然景觀有珊瑚礁、鐘乳石山洞等, 遊憩設施則有觀海樓、眺望台等。

2. 阿里山森林遊樂區 (高山型, 中部)

本區為林務局嘉義林區管理處所轄, 位於嘉義縣阿里山鄉, 海拔高 2,216 公尺, 佔地達 1,400 公頃, 區內有各式櫻花、姐妹潭、巨木群等; 最為人稱道的則是神木、日出及小火車。

3. 滿月圓森林遊樂區 (近郊型, 北部)

本區位於臺北縣三峽鎮東方約 16 公里, 區內受降雨影響甚大, 呈現許多陡壩、水潭及瀑布; 海拔由 300-1920 公尺, 地形陡峻且相對高差大; 區內之台灣一葉蘭、紅星杜鵑等均為國寶級之珍貴稀有植物 (林務局, 1992; 彭馨慧, 2005)。

(二) 研究架構

本研究採用「需求層次理論」及「自我決定理論」作為生態旅遊動機與需求之理論架構, 並配合生態旅遊內涵及一般遊憩市場區隔變數進行實證研究, 藉因素分析、集群分析及區別分析完成市場區隔, 並以卡方檢定及變異數分析進行各細分市場的特徵描述 (如圖 3)。

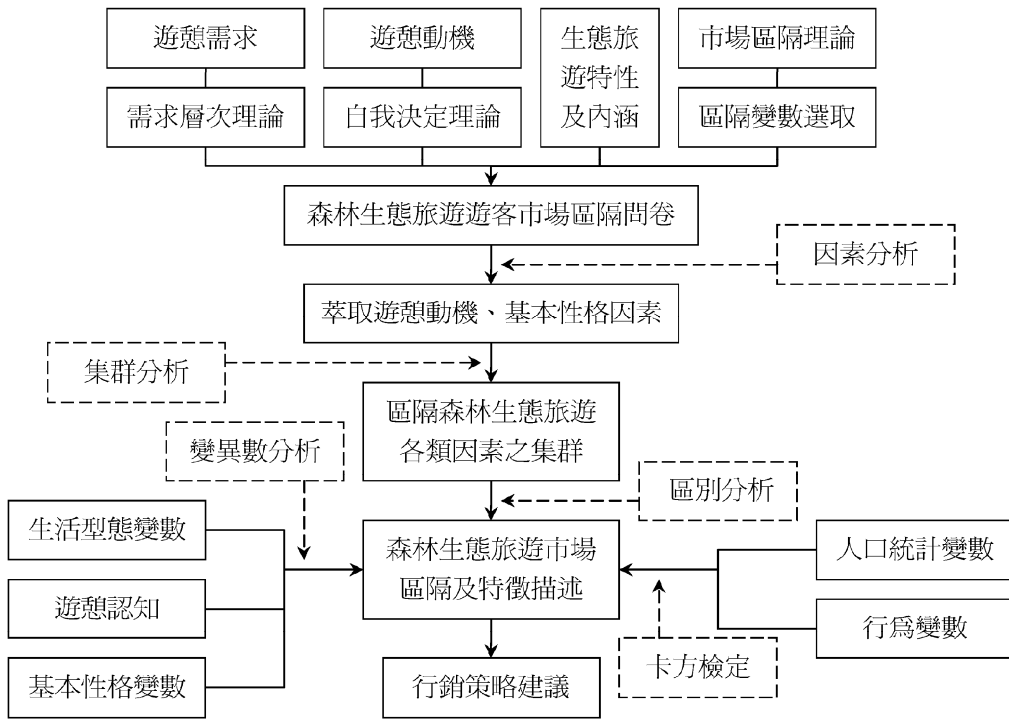


圖 3. 研究流程及架構

Fig. 3. The flow chart and framework of research.

(三) 變數選取

1. 遊憩動機變數選取

Weissinger and Bandalos (1995) 分析 44 項評估休閒活動內在動機的問題，最後將評估的內容概分為四個部份，主要是「自我決定 (self-determination)」、「勝任感 (competence)」、「自我肯定 (commitment)」及「挑戰性 (challenge)」。Alexandris *et al.* (2002) 研究休閒運動的參與，則將動機分為三大類，無動

機、內在動機及外在動機。Baldwin and Caldwell (2003) 參考 Deci and Ryan (1985) 所提出的「自我決定理論」，將動機分為六個部份。根據上述之資料彙整，本研究共選取出三大類動機進行問卷設計，內、外在動機再各自細分 4 項，即 Deci and Ryan (1985) 所提出的「自我決定理論」進行問卷之編訂，主要因素整理如表 1 所示。

表 1. 內、外在遊憩動機與無遊憩動機種類及問項

Table 1. Types and items of intrinsic motivation, extrinsic motivation and amotivation.

內在動機			外在動機			無動機	
動機類型	遊憩需求	問項	動機類型	遊憩需求	問項	動機類型	問項
自我決定		2 項	整合的動機	探索與智性	3 項	內在阻礙	4 項
勝任感	自我實現	2 項	認同的動機	受尊重	1 項	外在阻礙	4 項
自我肯定		1 項	投入的動機	愛與歸屬	3 項		
挑戰性	智性	3 項	表面的動機	生理與安全	3 項		

2. 生態旅遊認知、生活型態、行為及人口統計變數選取

由林喻東、高君邁 (2004) 和黃旭男等 (2002) 研究採用「對景觀的印象」及「價值觀」等變數可看出，除較常被使用的四類變數外，亦可配合不同研究主題給予不同變數之選取。生態旅遊為近年來甚為推廣之遊憩方式，然而一般民眾接受度或對其認知為何，卻是值得探討的部份，故研究中將配合 Honey 所提出的七大特性 (李麗雪等譯，2003)，並配合李素馨 (1996) 所提及的生態旅遊之意涵，即生態旅遊是當地居民、遊客及觀光發展組織結合成一環環相扣的結構體，遊憩區為他們共同活動的

環境，相互藉著協調及教育的方法，達到生態保育、經濟效益及社會文化尊重的三大永續發展目標，建立本研究的生態旅遊認知變數 (即經濟、生態及社會永續發展之三大認知)。

此外，研究亦參考黃旭男等 (2002)、陳肇堯 (1999)、鄭健雄、劉孟奇 (2001) 及劉瓊如等 (2002) 所採用之相關變數，綜合整理出生活型態、行為及人口統計變數等如表 2 所示。另本研究依據生態旅遊之特殊旅遊型態，另行設計一基本性格變數以供分析，主要依據現今社會對環境保護及文化保存時會注意之事項，藉以區別不同族群之特性。

表 2. 生態旅遊認知、生活型態、行為及人口統計變數

Table 2. Variables of cognition of ecotourism, lifestyle, behavior and demographics.

變數名稱	歸納因素	問項數
生態旅遊認知	經濟、生態、社會文化	17 項
生活型態	生活品味、社交聯誼、家庭旅遊、逃離生活、喜愛自然、追求健康、生活觀念	11 項
遊客行為	資訊來源、購後態度、遊憩活動特性	9 項
人口統計	居住地屬地理變數，其餘為一般人口變數	8 項

四、結果與討論

本研究在 2005 年 10 月 14 至 10 月 31 日，分別於滿月圓、阿里山及墾丁森林遊樂區進行遊客問卷調查，共回收問卷 1,031 份，扣除填寫不完全之廢卷 49 份，所得問卷 982 份，其中依問卷中設計之反向題進行有效問卷之篩選，共得有效問卷 925 份，有效率為 94.20%。以下即針對問卷各項分析結果進行說明。

(一) 描述性統計分析

1. 遊客基本資料

本研究受訪遊客男女比例相當 (男：51.7%，女：48.3%)，年齡層以青壯年為最多 (21-50 歲) 佔 79.8%；教育程度以大學為最高 (38.6%)；職業分佈甚為平均；家庭月平均所得以 2 萬到 6 萬不等的人數最多 (共計 53.5%)；居住地以各森林遊樂區所在地之鄰近地區為最

高 (最多人數；阿里山：雲嘉南 24.8%；滿月圓：大臺北 39.9%；墾丁：高屏 46.4%)。家庭及婚姻狀況，已婚的略高於未婚者，唯一例外為阿里山，至於已婚家庭以育有幼兒的比率為最高 (21.9%)。

2. 遊客遊憩行為

受訪遊客以舊地重遊的最多 (32.7%)，此亦是阿里山及墾丁森林遊樂區之主要資訊來源，其次是藉由親朋好友的推薦 (30.9%)，該項則是滿月圓遊客最主要的資訊管道。交通工具以自用客車的比例最高 (64.6%)；同行夥伴以家人 (42.6%) 和朋友 (36.9%) 最多。一年到訪的次數以 2-4 次的最多 (54.1%)，且遊玩的時間又以 1-2 天 (61.3%) 的遊程安排為主。至於到森林遊樂區遊玩的花費，平均一人以 2,000 元以下的最多 (44.2%)，而滿月圓此比例更高

達 79.0%，可見停留時間和花費有一定的關係，而森林遊樂區普遍屬於低消費的遊憩景點。

3. 遊憩需求分析

以遊憩需求來區分遊客，具有遊憩動機之遊客又可區分為有效需求及展延需求兩類，其人數分別為 241 及 521 人。至於無動機又可分為兩個阻礙，其中外在阻礙影響較大之遊客，

可視為具有潛在需求之遊客，內在阻礙影響較大者，可視為無生態旅遊需求者，無動機 156 人中，具潛在需求之遊客有 86 人，無需求者為 51 人，其結果如表 3 所示。由表可看出生態旅遊遊客以展延需求人數為最多 (57.95%)，若再加上潛在需求遊客數則達 67.52%，可見生態旅遊未開發之市場非常大；而對生態旅遊活動完全沒有意願者僅佔了 5.67%。

表 3. 不同需求之遊客比率

Table 3. The ratio of different demands of tourists.

項 目	統計量		阿里山		滿月圓		墾丁		總計	
	人數	%	人數	%	人數	%	人數	%	人數	%
有效需求 (有動機且參與過)	77	24.68	81	27.93	83	27.95	241	26.81		
展延需求 (有動機但無參與過)	173	55.45	173	59.66	175	58.92	521	57.95		
潛在需求 (無參與且為外在阻礙)	38	12.18	22	7.59	26	8.75	86	9.57		
無需求 (無參與且為內在阻礙)	24	7.69	14	4.83	13	4.38	51	5.67		
遺漏值	6	—	8	—	12	—	26	—		
合計	318	100.00	298	100.00	309	100.00	925	100.00		

註：%係指有效百分比

(二) 森林生態旅遊動機變數

1. 因素分析

本研究之遊憩動機區分內在及外在動機共 8 類，然而各問項之信度檢定效果不佳，在進行完 KMO and Bartlett's test 後發現，KMO 為 0.920、Bartlett's test 為 4019.081，顯示各變項間有顯著相關，故重新以因素分析萃取動機因素。本研究之因素分析採主成份分析法 (principal component)，以特徵值大於 1.0 做為共同因素之選取標準，並以直交轉軸法 (varimax) 進行因素之選取，共得遊憩動機 4 項因素 (如表 4)。

遊憩動機因素共解釋了 56.73% 的變異量，分別依其包含項目將因素定名為「身心健康」、「人際互動」、「嗜好興趣」及「自我意志」。而各別因素之一致性檢定 (Cronbach's α 值) 均有達 0.6 以上，顯示各問項皆能有效反應

因素結果。

2. 集群分析

本研究依生態旅遊遊客之遊憩動機 4 項因素之因素得分 (factor scores) 做為集群分析 (cluster analysis) 之變項，分析採兩階段式集群分析，即先以階層法中的 Ward's Method 決定集群數量，再以 K-means 集群分析法進行市場區隔，其結果如表 5 所示。遊客依動機因素分成兩個族群，人數分別為 434 及 306 人，其在「嗜好興趣」該因素上並未有顯著差異外，其餘 3 項因素皆可明確區分此兩個集群之遊客。區別分析 (discriminant analysis) 則進一步驗證所區隔之兩個族群是否正確判別區分所欲區分之族群，依 Wilks' Lambda 分析顯示該區別函數主要考量自我意志因素，其次為地區互動，身心健康及嗜好興趣因素之影響則較小。

表 4. 遊憩動機之因素分析

Table 4. Factor analysis of tourists' recreational motivations.

因素名稱	問 項	因素負荷	特徵值	解釋變異量	Cronbach's α
身心健康	1.接近大自然覺得很輕鬆愉快	0.670	3.487	20.51 (%)	0.8379
	2.可以欣賞到美麗的景緻	0.770			
	3.可以獲得很好的休息	0.700			
	4.可以達到養生的目的	0.684			
	5.獲得更多當地生態環境知識	0.605			
	6.可以活絡筋骨、抒解壓力	0.699			
人際互動	1.可以多認識些新朋友	0.532	3.074	18.08 (%)	0.7834
	2.服務人員的態度很好	0.628			
	3.因他人或媒體宣傳	0.558			
	4.更瞭解附近生活文化	0.641			
	5.可展現我的知識與才能	0.685			
	6.嚐試冒險性或挑戰性的活動	0.444			
	7.可以提供當地就業機會	0.678			
嗜好興趣	1.周遭朋友從事相關活動	0.734	2.051	12.066 (%)	0.6656
	2.可以獲得更多新奇的體驗	0.584			
	3.原本就很感興趣	0.657			
自我意志	沒理由，想來就來	0.933	1.032	6.073 (%)	—

表 5. 遊憩動機之集群分析及標準化之區別函數

Table 5. Cluster analysis of tourists' recreation motivations and standardized discriminant function.

因素名稱	集群 1	集群 2	One-away ANOVA		函數 係數	Wilks' Lambda	卡方檢定	
			F	P-value			χ^2 -value	P-value
身心健康	-0.23529	0.33372	62.980	0.000	-0.580	0.313	855.051	0.000
地區互動	0.18734	-0.26570	38.713	0.000	0.469			
嗜好興趣	0.04949	-0.07019	2.576	0.109	0.127			
自我意志	0.62519	-0.88671	920.850	0.000	1.072			
人 數	434 (58.65%)	306 (41.35%)	Missing value	29				
合 計	740 人 (100%) (僅包含具生態旅遊動機之遊客，人數差距為遺漏值所致)							

本集群分析的結果，平均判別正確率可高達 99.5% (集群 1：99.8%；集群 2：99.0%)，其結果具有相當的穩定度及可信度。至於兩個

集群之命名，依據主要影響之因素區分如下：
(1) 集群 1：「單純為生態旅遊活動而來的族群」：是以「自我意志」因素為主，「人際

互動」因素為輔，主要的動機在於文化或知識的獲取、交換及社會互動上。

(2) 集群 2：「為了自身健康及抒解調適的族群」：是以「身心健康」因素為主的集群，此類族群的遊客若回應到「需求層次理論」來看時，是偏重在基本生理需求的一群。

3. 集群之社經特性

依 Pearson 卡方檢定的結果發現，兩個集群在各項人口特性上除所得及婚姻外，相關均不顯著 (χ^2 -value：性別 2.006；年齡 7.558；教育程度 1.372；職業 9.007；居住地 7.508；家庭週期 5.869；三處遊樂區 5.812)，顯示兩個族群不易用人口統計變數加以區隔其市場特性。

表 6. 不同集群之人口統計分析及主要區別變項

Table 6. Demographic attributes and variables of different clusters.

人口變數	χ^2 -value	變項	1. 單純為生態旅遊活動而來	2. 為了自身健康及抒解調適
所得	12.629*	2 萬以下	53 (12.6%)	24 (8.1%)
		6 萬到 8 萬	50 (11.9%)	57 (19.3%)
婚姻	5.305*	未婚	200 (46.1%)	115 (37.6%)
		已婚	234 (53.9%)	191 (62.4%)
參加與否	0.518	有效需求	131 (30.6%)	101 (33.1%)
		展延需求	297 (69.4%)	204 (66.9%)

註：*表示 P < 0.05；各分項人數不足者為遺漏值所致

族群 1 所得傾向稍微偏低，主要差距在 2 萬元以下，婚姻則未婚與已婚差距不大；族群 2 所得傾向稍高，婚姻狀況以已婚居多 (62.4%)。而在不同的遊憩行為變數上，兩個集群間也沒有明顯的相關性。至於有參與生態旅遊動機之遊客，若簡單以遊憩需求來區分，則可區分為有效需求及展延需求兩類遊客，其遊客人數分別為 232 人及 501 人，遺漏值有 36 人。此外在生態旅遊認知、基本性格與生活型態分析上，亦僅有生態旅遊認知中的「旅遊的生活品質會較差或原始」(F=7.727；P < 0.01；集群 1 < 集群 2) 及生活型態變數中的「能親近大自然」(F=10.024；P < 0.01；集群 1 < 集群 2) 兩項達顯著水準。

(三) 基本性格變數區隔

1. 因素分析

基本性格之 KMO 為 0.845、Bartlett's test 為 2487.364，顯示各問項間有顯著相關，故進行因素分析萃取基本性格之組成因素，以主成

份直交轉軸分析，特徵值大於 1.0 者做為共同因素之選取標準，得到遊客基本性格可歸納出 3 個因素，解釋總變異量達 70.658%。各因素依其包含問項，分別定名為「環境關懷」、「社會關懷」及「資源關懷」。至於內部一致性檢定均高達 0.7 以上，顯示各問項同樣能有效反應各因素結果。

2. 集群分析

生態旅遊遊客之基本性格同樣依 3 項因素得分做為集群分析之變項，並採兩階段式集群分析進行，結果如表 8。遊客依基本性格因素分成兩個族群，人數分別為 495 及 425 人，其在「資源關懷」該因素上並未有顯著差異外，其餘 2 項因素皆可明確區分此 2 個集群之遊客。

至於區別分析之結果只形成一個函數，其係數顯示該函數主要考量的因素是環境關懷，其次是社會關懷，資源關懷的影響不大。本集群分析的結果，平均判別正確率達 100.0%，至於兩個集群命名依據主要影響因素區分如下：

表 7. 基本性格之因素分析

Table 7. Factor analysis of tourists' characters.

因素名稱	問 項	因素負荷	特徵值	解釋變異量	Cronbach's α
環境關懷	1.不亂丟垃圾並自行帶回處理	0.873			0.835
	2.不製造噪音造成他人的困擾	0.861	2.409	30.115 (%)	
	3.努力保護大自然的生態環境	0.745			
社會關懷	1.願花較多錢參加生態旅遊	0.805			0.7389
	2.常主動獲取或關懷生態環境	0.769	2.215	27.687 (%)	
	3.想瞭解各類族群的特有文化	0.654			
	4.關懷社會弱勢族群並協助	0.588			
資源關懷	1.我都會使用自行攜帶的餐具	0.982	1.029	12.856 (%)	—

表 8. 基本性格之集群分析及標準化之區別函數

Table 8. Cluster analysis of tourists' characters and standardized discriminant function.

因素名稱	集群 1	集群 2	One-away ANOVA		函數 係數	Wilks' Lambda	卡方檢定	
			F	P-value			χ^2 -value	P-value
環境關懷	-0.77245	0.89968	2098.934	0.000	1.056			
社會關懷	-0.20314	0.23660	46.403	0.000	0.491	0.255	1252.949	0.000
資源關懷	-0.03368	0.03922	1.215	0.271	0.083			
人 數	495 (53.80%)	425 (46.20%)	Missing value	5				
合 計	920 (100%)							

(1) 集群 1：「對社會及環境充滿關懷的族群」：是以「環境關懷」因素為主，「社會關懷」因素為輔的族群，即會主動關懷及保護自然生態環境並強調社會關懷及文化保存。

(2) 集群 2：「對社會及環境較冷淡之族群」：本族群是相對於上述之族群，即對環境及社會文化較不注重的一群，本族群並無主要的影響因素。

3. 基本性格集群之社經特性

(1) 人口統計變數

依 Pearson 卡方檢定的結果發現，兩個集群在年齡、職業、所得、婚姻、及遊憩需求上均有顯著的差異 (χ^2 -value：性別 0.100；教育程度

8.706；居住地 7.078；家庭週期 7.738；三處遊樂區 0.582，其餘如表 9)，可見依基本性格來分類的集群，容易用人口特性加以區隔。

分析的結果，其中第 1 類的族群「對社會及環境充滿關懷」的年齡層較輕，以 21-30 歲者區分較大，職業則以服務業及學生較多 (佔 38.7%)，所得傾向在 4 萬元以下者 (47.8%)，有無結婚差距不大並在潛在需求上較第 2 類集群多。第 2 類「對社會及環境較冷淡」的族群則年齡層稍長，以 41-50 歲者差距最大，職業多是軍公教人員 (22.2%)，所得偏高，傾向在 8 萬元以上者，明顯較第 1 類族群多了 11.1%；已婚者的比例較多 (60.2%)，並多是有效需求的遊

表 9. 不同集群之人口統計分析及主要區別變項

Table 9. Demographic attributes and variables of different clusters.

人口變數	χ^2 -value	變項	1.對社會及環境充滿關懷	2.對社會及環境較冷淡
年齡	20.163**	21-30	189 (38.2%)	116 (27.4%)
		41-50	75 (15.2%)	104 (24.5%)
職業	15.469*	軍公教	69 (14.0%)	94 (22.2%)
		服務業	109 (22.1%)	70 (16.6%)
		學生	82 (16.6%)	54 (12.8%)
所得	32.084***	2 萬以下	60 (12.5%)	38 (9.3%)
		2 萬到 4 萬	169 (35.3%)	87 (21.4%)
		8 萬到 10 萬	35 (7.3%)	49 (12.0%)
		10 萬以上	39 (8.1%)	59 (14.5%)
婚姻	8.392**	未婚	244 (49.3%)	169 (39.8%)
		已婚	251 (50.7%)	256 (60.2%)
參加與否	37.591***	有效需求	102 (21.2%)	138 (33.3%)
		潛在需求	66 (13.7%)	19 (4.6%)

註：*P < 0.05，**P < 0.01，***P < 0.001

客(較第 1 類集群多了 12.1%)。

(2)遊憩行為變數

在遊憩行為變數中，兩集群主要差異在交通工具、同行夥伴、重遊次數及遊程長短等 4 項(如表 10)。其餘為資訊來源(10.262)，旅遊花費

(2.531)；至於滿意度、重遊意願及推薦宣傳此 3 項行為變數採用 T-test，結果重遊意願(F=5.501；P < 0.05；集群 2 > 集群 1)及推薦宣傳(F=8.167；P < 0.01；集群 2 > 集群 1)達顯著水準。

表 10. 基本性格之 Pearson 卡方檢定

Table 10. Pearson chi-square analysis of different groups of tourists' characters.

行為變數	χ^2 -value	變項	1.對社會及環境充滿關懷	2.對社會及環境較冷淡
交通工具	17.25**	自用客車	307 (62.1%)	287 (67.5%)
		機車	29 (5.9%)	5 (1.2%)
同行夥伴	20.652**	家人	179 (36.2%)	211 (50.0%)
		朋友	205 (41.4%)	133 (31.5%)
		同學	26 (5.3%)	12 (2.8%)
重遊次數	10.128*	1 次	120 (24.2%)	71 (16.8%)
		9-15 次	12 (2.4%)	18 (4.3%)
旅遊長度	8.572*	當天來回	129 (26.1%)	89 (20.9%)
		3 至 4 天	58 (11.7%)	74 (17.4%)

註：*P < 0.05，**P < 0.01

集群 1 較集群 2 的遊客在交通工具上使用機車多些，同遊夥伴比較傾向朋友及同學 (佔 46.7%)，會到相同遊樂區遊玩的次數偏低，選擇 1 次的遊客多出 7.4%，且當天來回的機率較高。集群 2 的遊客則搭乘自用客車者多些，同遊者以家人居多 (50.0%)，重遊次數則在 9-15 次的遊客較多，遊程長度在 3-4 天的遊客多些。至於重遊意願及是否願意宣傳推薦的回答上，集群 2 的遊客意願均較集群 1 的遊客為高。

(3) 生態旅遊認知變數

研究先進行生態旅遊認知變數內部一致性檢定及修正，以確定研究區分之經濟、生態與

文化三方面的認知問項，是否能有效反應其因素。結果顯示三者之內部一致性檢定值均偏低，在剔除經濟認知問項 3 項 (保留 4 項)，生態認知問項 1 項 (保留 4 項) 及社會認知問項 2 項 (保留 3 項) 後，三個因素之 Cronbach's α 值分別變為 0.7394、0.5248 和 0.7576，皆在 0.5 的水準以上，後續便以保留的問項進行分析。

集群 1 與集群 2 的遊客在生態旅遊的認知上，三項因素均有顯著的差異 (如表 11)。集群 1 的遊客不論是在經濟的、生態環境的亦或者社會文化的認知上，都較集群 2 的遊客認同度低，可見集群 2 的遊客對生態旅遊的認知較為清楚。

表 11. 基本性格集群之生態旅遊認知變數比較

Table 11. Comparison of ecotourism's cognitions among different characters' groups.

認知因素	範圍	F 值	集群 1	集群 2
經濟認知	非常同意 5-非常不同意 1	14.175***	3.6869	3.9313
生態認知	非常同意 5-非常不同意 1	10.883**	3.7156	3.9787
社會文化認知	非常同意 5-非常不同意 1	74.384***	3.9393	4.2948

註：**P < 0.01，***P < 0.001

(4) 生活型態變數

生活型態變數同樣先進行內部一致性檢定，發現 Cronbach's α 值均高，分別為生活享受 (0.8363)、社交聯誼 (0.5682)、家人相處 (0.8269)、享受自然 (0.9133)；可有效反應各因素的內容。進一步進行兩個集群的分析，除

「享受自然」無明顯差異外，其餘 3 項在兩類族群遊客間均有顯著差異，集群 2 的遊客是以和家人相處的理由居高，並更強調不是來進行生活享受的；集群 1 的遊客則在生活享受及社交聯誼的活動上表現出較無意見的態度 (如表 12)。

表 12. 基本性格集群之生活型態變數比較

Table 12. Comparison of lifestyles among different characters' groups.

生活型態因素	範圍	F 值	集群 1	集群 2
生活享受	非常同意 5-非常不同意 1	27.811***	2.7591	2.6496
社交聯誼	非常同意 5-非常不同意 1	22.494***	3.0071	2.8807
家人相處	非常同意 5-非常不同意 1	57.127***	4.0598	4.4764
享受自然	非常同意 5-非常不同意 1	1.008	4.1893	4.6923

註：*P < 0.05，**P < 0.01，***P < 0.001

(四) 綜合整理

依照上述之集群分析及相關屬性彙整，本研究將兩種變數區分的 4 個集群之社群屬性進

行綜合整理，以更明確定位出生態旅遊之不同市場區隔(如表 13)。至於三個森林遊區在集群分析結果上，則無明顯差異。

表 13. 基本性格與生態旅遊動機集群屬性分析

Table 13. Demographic attributes and variables of different clusters with tourists' characters and ecotourism motivations.

屬性	基本性格		生態旅遊動機	
	集群 1：對社會及環境充滿關懷	集群 2：對社會及環境較冷淡	集群 1：單純為生態旅遊活動而來	集群 2：為了自身健康及抒解調適
年齡	21-30 歲者	41-50 歲者		
職業	服務業及學生	軍公教		
所得	較低，多在 2-4 萬元及其以下	較高，差別在 8 萬元以上者	較低，偏向 4-6 萬元以下者	較高，偏向 4-6 萬元以上者
婚姻	無明顯差異	已婚者居多	無明顯差異	已婚者居多
遊憩需求	潛在需求者	有效需求者		
交通工具	機車族群	自用車族群		
同行夥伴	朋友及同學	家人		
重遊次數	1 次	9-15 次		
遊程長度	當天來回	3 至 4 天		
重遊意願	稍低	較高		
推薦宣傳	稍低	較高		
生態旅遊之				
經濟認知	稍低	稍高	較不認同生態旅遊	較能認同生態旅遊
生態認知	稍低	稍高	要簡單樸實	就要回歸自然
文化認知	稍低	稍高		
生活型態之				
生活享受	些許不認同	較不認同	接近大自然的意願	接近大自然的意願
社交聯誼	無意見	稍不認同	稍低	較高
家人相處	認同	極為認同		
森林遊樂區				
阿里山	176 (55.5%)	141 (44.5%)	155 (63.8%)	88 (36.2%)
滿月圓	156 (52.7%)	140 (47.3%)	141 (56.9%)	107 (43.1%)
墾丁	163 (53.1%)	144 (46.9%)	138 (55.4%)	111 (44.6%)
合計	495 (53.8%)	425 (46.2%)	434 (58.6%)	306 (41.4%)

1. 生態旅遊動機

(1) 族群 1：「單純為生態旅遊活動而來的族群」：以所得相對較低的各層級人士為主，該族群的人對生態旅遊的認知不全以生態自然為主。

(2) 族群 2：「為了自身健康及抒解調適的族群」的人，則較強調與自然的結合，並以健康養生的角度出發，多為已婚的高薪族群。

2. 基本性格

(1) 族群 1：「對社會及環境充滿關懷的族群」：以年齡所得相對較低的學生或服務業所組成，潛在需求的比例也較族群 2 者為多，遊玩的方式多半是與朋友或同學騎乘機車當天來回，其重遊及推薦的意願相對也較低；對生態旅遊的概念不如另一族群好外，生活型態也比較是屬社交聯誼性。

(2) 族群 2：「對社會及環境較冷淡的族群」，則是以年齡較長、所得也較多的已婚軍公教人員組成，其旅遊方式較多以開自用客車和家人一起出遊，常常會到訪類似的森林遊樂區，一次以 3-5 天，並較為願意重遊及推薦。族群 2 的遊客在生態旅遊的認知上都較族群 1 者為高，他們的生活型態主要是傾向和家人相處。

(五) 討論

(1) 本研究中「遊憩動機」族群之分類特性不易表現；「基本性格」所區隔之市場，雖較能反應不同族群之社經特性，然而部份結果卻又與常理不符。例如對社會及環境充滿關懷的族群，反在生態旅遊的認知上不如對環境較為冷淡者，又較為冷淡者在遊憩需求的分類中，反倒是有效需求的比例較高；此部份實有待進一步深究。

(2) 市場區隔之後續行銷策略雖不在本研究最初所設定之範圍，然而在進行遊客分類的同時，若能連同將行銷策略及經營方法也納入研究結果一併呈現，將更有助於實務單位在實際操作時的參考及依據，故未來研究會嘗試進一步進行嚴謹的行銷策略研擬，以提供

更實質之幫助。

五、結論與建議

森林生態旅遊為生態旅遊之一種，主要乃生態旅遊地點鎖定在森林遊憩區；本研究為能涵蓋具森林生態旅遊潛在需求之遊客，故抽樣對象以到訪森林遊樂區內所有遊客為主，在後續分析時才加以區別剔除並比較，較傳統研究更能了解未來市場之需求及方向。

研究以森林生態旅遊動機及基本性格作為市場區隔之變數進行分析，分別歸納動機因素 4 項及基本性格因素 3 項，並分別區分出 2 組族群。建議未來國家森林遊樂區若在承辦森林生態旅遊活動時，應可針對以下不同族群進行不同行銷策略：

1. 健康養生目標：即生態旅遊動機族群 2 之民眾；可針對所得較高的已婚族群進行宣傳，並強調該活動與大自然的結合，可達到如何的健康或養生的成效。
2. 生態教育或文化導覽：即生態旅遊動機族群 1 之民眾；可針對所得較低的族群進行宣傳，主打低價及學習的內容。
3. 生態環境及文化關懷：即基本性格族群 1 之民眾；可針對年輕、所得較低及過去從未參與過生態旅遊的學生族群為主，宣傳時以低價、交朋友及對當地環境或文化可提供的貢獻作為訴求，強調生態旅遊不會造成環境污染及破壞以得到認同。
4. 精質高享受的遊程：即基本性格族群 2 之民眾；可針對年紀較長、所得較高及曾經參與過生態旅遊的已婚軍公教人員為主，宣傳時可強調親子同樂的目標。由於該市場較能接受生態旅遊，故遊程安排可以較為深入的生態旅遊行程為主。

除上述初步成果外，本研究也建議未來在區隔森林生態旅遊之市場時，可以遊客的基本性格加以區別，較能明確區分不同市場特性。此外市場區隔乃提供經營管理及業者一個明確細分市場之內容及其行銷策略，實際進行時仍

需配合法律、政策並透過社區參與的機制，使當地居民出聲，生態旅遊在進行時方能更順利而成功，令生態旅遊能達永續發展之目標。

六、引用文獻

交通部觀光局(1997) 台灣潛在生態觀光及冒險旅遊產品研究與調查。戶外遊憩學會。37-53 頁。

吳貞純、童秋霞(2002) 國家森林遊樂區生態旅遊活動之設計與評估。中華林學會 91 年度學術論文發表會論文集。253-264 頁。

李素馨(1996) 觀光新紀元—永續發展的選擇。戶外遊憩 9 (4) : 1-17。

李銘輝(1991) 遊憩需求與遊客行為特性之探討。戶外遊憩研究。4 (1) : 17-33。

李銘輝、郭建興(2000) 觀光遊憩資源規劃。揚智文化事業股份有限公司。600 頁。

李麗雪、顏家芝、洪得娟、葉美智譯(2003) 生態觀光·永續發展。台北市：地景。357 頁。

林務局(1992) 國有林森林遊樂區。林務局。77 頁。

林務局(2005) 林務局簡介。http://www.forest.gov.tw/web/intro/intro-all.htm

林喻東、高君邁(2004) 運用集群區隔模式於搭乘阿里山登山火車遊客之市場區隔研究。林業研究。26 (4) : 11-28。

時蓉華(1996) 社會心理學。東華書局。609 頁。

張集毓(1994) 遊憩區市場定位之研究。國立中興大學園藝學研究所碩士論文。133 頁。

陳肇堯(1999) 應用市場區隔理論探討不同類型遊憩區遊客旅遊特性之差異。戶外遊憩研究 12 (3) : 1-20。

彭馨慧(2005) 森林遊樂滿意度及重遊意願之研究-以惠蓀森林遊樂區和滿月圓森林遊樂區為例。國立中興大學森林學研究所碩士論文。67 頁。

曾國基(1989) 森林遊樂區行銷管理技術之應用。國立中興大學森林學研究所碩士論

文。131 頁。

黃旭男、張德儀、孫仁和(2002) 台北市溫泉遊憩區遊客行為之研究。戶外遊憩研究 15 (2) : 1-22。

黃榮賜(1988) 都市公園遊憩需求與遊憩效益之研究-以青年公園為例。國立中興大學都市計劃所碩士論文。100 頁。

楊宏志(2002) 生態旅遊制度的建立。台灣林業 28 (1) : 68-76。

楊秋霖(2004) 國家森林遊樂事業發展之願景。台灣林業 30 (4) : 13-17。

劉吉川(1994) 生態觀光及其在觀光發展上所面臨之問題。野生動物保育彙報及通訊 2 (1) : 13-17。

劉瓊如、林若慧、吳正雄(2002) 海岸型風景區遊客旅遊意象之區域研究-以東北角海岸國家風景區為例。戶外遊憩研究 15 (3) : 55-78。

鄭健雄、劉孟奇(2001) 國人渡假生活型態量表建構之初探-以墾丁國家公園遊客為例。戶外遊憩研究 14 (3) : 57-80。

盧永祥(2001) 台灣地區家計單位鴨肉消費行為與市場區隔之研究。國立中興大學農產運銷學系碩士論文。103 頁。

謝淑芬(1994) 觀光心理學。五南圖書出版社。271 頁。

羅尤娟(1998) 奧萬大森林遊樂區定位之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。55 頁。

羅紹麟(2001) 生態旅遊與森林遊樂。林業研究季刊 23 (1) : 43-50。

Alexandris, K., C. Tsorbatzoudis and G. Grouios (2002) Perceived constraints on recreational sport participation: investigating their relationship with intrinsic motivation, extrinsic motivation and amotivation. Journal of Leisure Research. 34 (3): 233-252.

Baldwin, C. K. and L. L. Caldwell (2003) Development of the free time motivation

- scale for adolescents. *Journal of Leisure Research*. 35 (2): 129-151.
- Deci, E. L. and R. M. Ryan (1985) *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York; Plenum. (adapted from Weissinger and Bandalos, 1995)
- Duinker, P. N.; Matakala, P. W.; Patrick W.; Chege, F. and Bouthillier, L. 1994, *Community forests in Canada : an overview*. *The Forestry Chronicle*. 70 (6) : 711-720.
- Engel, J. F., R. D. Blackwell and P. W. Miniard (1995) *Consumer behavior*, 8th Ed., The Dryden Press. 951pp.
- Fitzgibbon, J. R. (1987) *Market segmentation research in tourism and travel*. pp.489-496.
- In J. R. B. Ritchie and C. R. Goeldner, eds. *Travel, tourism and hospitality research*. NY: John Wiley and Sons.
- Losier G. F., P. E. Bourque and R. J. Vallerand (1993) *A motivational model of leisure participation in the elderly*. *The Journal of Psychology*. 127 (2): 153-170.
- Ross, S. and G. Wall (1999) *Ecotourism : towards congruence between theory and practice*. *Tourism Management*. 20: 123 -132.
- Weissinger, E. and D. L. Bandalos (1995) *Development, reliability and validity of a scale to measure intrinsic motivation in leisure*. *Journal of Leisure Research*. 27 (4): 379-400.

研究報告

環氧壓克力樹脂之合成及其做為紫外線 硬化型木材塗料之應用¹

張家偉² 盧崑宗²

【摘要】本研究係探討以雙酚A、環氧氯丙烷及丙烯酸為原料之環氧壓克力樹脂的合成，並將其作為預聚合體而與二丙烯酸 1,6-己二醇酯 (HDDA) 單體依 90/10、80/20、70/30 及 60/40 (重量比) 混合，加入 Benzil dimethyl ketal 光引發劑而調配成紫外線硬化 (UV) 塗料，分析其作為木材塗料之可行性。環氧壓克力樹脂之性質包括顏色、黏度、分子量、羥價、酸價、固形分及 FT-IR 分析等。UV 塗料與塗膜性質則包括黏度、顏色、硬度、拉伸強度、耐衝擊性、附著性、冷熱循環試驗及耐光性等。經 FTIR 分析結果，環氧壓克力樹脂可以穩定地合成，其顏色呈淡黃色透明狀，Gardner 色值為 5.4，黏度約 64,000 cps (25°C)，重量平均分子量 877，羥價為 377，酸價為 0.3，固形分為 97.3%。整體而言，以環氧壓克力樹脂/HDDA = 80/20 (重量比) 所調配成之 UV 塗料，其塗膜具有最高的拉伸強度、耐衝擊性及優良的耐久性，其他塗膜性質亦較為均衡，若能改善其塗膜附著性則可適用做為木材塗料。

【關鍵字】環氧壓克力樹脂、紫外線硬化塗料、木材塗料、塗料與塗膜性質

Research paper

Synthesis of Epoxy Acrylate Resin and Its Application on UV Curing Wood Coatings¹

Chia-Wei Chang² Kun-Tsung Lu²

【Abstract】The objectives of this study were to examine the synthesis of epoxy acrylate resin using bisphenol A, epichlorohydrin and acrylic acid as raw materials and analyzed the properties of UV coating and films which prepared from epoxy acrylate resin and 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA) monomer by the weight ratios of 90/10, 80/20, 70/30 and 60/40, respectively, and the benzil dimethyl ketal as a photoinitiator was added. The properties of epoxy acrylate resin, such as color, viscosity, molecular weight, hydroxyl value, acid value, solid content and FTIR analysis were conducted. The characteristics of UV coating and films including color, viscosity, hardness, tensile strength, impact

1. 本研究為國科會 95 年度專題研究計畫 (NSC 95-2313-B-005-072-MY2) 之部分結果，承蒙國科會經費補助，謹此致謝

This project was sponsored by the National Science Council, R.O.C (NSC 95-2313-B-005-072-MY2).

2. 國立中興大學森林系 碩士、副教授 (通訊作者)

Master, Associate Professor (Corresponding Author), Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

resistance, adhesion, hot and cold cycle test, and lightfastness were examined. The results indicated that the transparent light yellow color epoxy acrylate resin could readily be synthesized by the FTIR analysis and the Gardner color value of 5.4, viscosity of 64,000 cps (25°C), weight average molecular weight of 877, hydroxyl value of 377, acid value of 0.3, and solid content of 97.3 % were obtained. Generally speaking, the UV coating of epoxy acrylate resin/HDDA by the weight ratio of 80/20 had the best tensile strength, impact resistance and excellent durability of films, as well as a balance effect on the other properties of films. However, the poor adhesion of this UV coating must be improved for using as wood coatings.

【key words】 Epoxy acrylate resin, UV curing coatings, Wood coatings, Properties of coating and films.

一、前言

塗料經由塗裝後在素材表面硬化形成塗膜，以達到保護素材，增進美觀或賦予機能性的功能。我國自幾千年前便懂得使用天然漆於生活工具及工藝品中(陳劉旺，1997)，而作為塗裝素材之木材具有溫和的觸感和保持天然的特性，且富變化之紋理及光澤，又由於木材複雜的組織及抽出成分之差異，使其色澤多變，更影響塗膜的潤色及染料的發色，而使塗裝之木材更形多采多姿，此種溫潤多變的外觀是塑膠、金屬及種種仿木紋材料所無法媲美的；然而木材易吸脫濕而引起膨脹收縮之異方性，及易受天候及生物附著而劣化的特性，使得塗裝成為保護木材之必要手段(盧崑宗、劉正字，1999)。又木製家具產業向來是台灣林產工業中重要的一環，且塗裝作業在家具製程、成本及品質方面皆佔相當重要之地位，往昔木材塗裝後，為了避免產生塗膜缺陷(例如針孔、發泡等)，通常以自然乾燥或熱風乾燥等長時間乾燥居多，也因此大幅增加製程時間，使得塗裝乾燥作業往往成為家具製程的瓶頸(盧崑宗，2001)。因此如何縮短塗料乾燥時間，提升塗膜品質及降低生產成本，成為台灣加入WTO後，家具業圖謀生存的首要課題。

在眾多木材塗料中，紫外線硬化型塗料(Ultraviolet curing coatings, 以下簡稱UV塗料)具有高固形分，在紫外線照射下數秒即可乾燥，可節省能源及廠房空間，塗膜性能優異，又不含或僅少量揮發有機溶劑，且適合熱

敏感基材塗裝等優點(張上鎮，2001；盧崑宗，2001；Weiss, 1997)，因此以經濟效益及對環境友善之觀點而言，UV塗料更是契合時代需求的環保型塗料(川村，1993；Price, 1995；Weiss, 1997；Benfarhi *et al.*, 2004)。

UV塗料之基本組成包括預聚合體(或稱光聚合性寡聚合體、Photocurable oligomer)、單體(Monomer)及光引發劑(Photoinitiator)等，其中，預聚合體種類繁多，目前廣泛用於UV塗料之聚預合體以自由基聚合型的丙烯酸酯系樹脂(俗稱壓克力樹脂，Acrylate resin)為主(張上鎮、許富蘭，2001)，如環氧壓克力系(Epoxy acrylates)、胺基甲酸酯壓克力系(Urethane acrylates)、聚酯壓克力系(Polyester acrylates)及聚醚壓克力系(Polyether acrylates)樹脂等，其中環氧壓克力系樹脂係由含環氧基化合物與丙烯酸(Acrylic acid)反應而成，由於此預聚合體具有環氧樹脂之特性，柔軟性與硬度兼具、耐熱性、耐藥品性佳，硬化速度快且對皮膚刺激性低(加藤，1989)；因此，環氧壓克力系樹脂作為木材UV塗料深具可行性(Idriss Ali *et al.*, 1997)。單體亦以丙烯酸酯系為主，但其又分為單官能性、雙官能性及多官能性單體。自由基型UV塗料之所以廣泛應用於塗料工業，主要由於其具有高反應性，在紫外線照射下硬化快速，可選擇樹脂種類多，但其在照光硬化時易受氧氣干擾且塗膜收縮劇烈，又塗膜收縮的程度、UV塗料之硬化速度、架橋密度、塗膜硬度及韌性等物化性能均

與單體種類及比例有密切關係。故本研究即探討以環氧氯丙烷 (Epichlorohydrin)、雙酚 A (Bisphenol A) 及丙烯酸為原料之環氧壓克力樹脂之合成，並將此樹脂依不同預聚合體/單體比例調配成 UV 塗料，分析其作為木材塗料之可行性。

二、材料與方法

(一) 試驗材料

1. 藥品：雙酚 A [Bisphenol A, 2,2-bis (4' hydroxyl phenyl propane)]、環氧氯丙烷 (Epichlorohydrin)、氫氧化鈉、丙烯酸 (Acrylic acid)、三乙胺 (Triethylamine)、對苯二酚 (Hydroquinone)、二丙烯酸 1,6-己二醇酯 (1,6-Hexanediol diacrylate, HDDA)、光引發劑 Benzil dimethyl ketal (2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone, 商品名 Irgacure 651)。以上藥品均為試藥級，購買後直接使用，未再進一步純化。
2. 塗裝試材：紅櫟木 (*Quercus* spp., Red oak)，含水率為 12.6%，試片規格為 10 cm (R) × 15 cm (L) × 0.6 cm (T)，以 #180 砂紙研磨後，再以補土填充導管，之後以 PU 底漆 (Polyurethane wood sealer, 永記造漆公司) 塗裝，乾燥後以 #400 砂紙細磨，拭淨後備用；玻璃板、白色卡紙、鐵弗龍 (Teflon) 板等，以應不同塗膜性質測定用途。

(二) 試驗方法

1. 雙酚 A 型環氧樹脂 (Epoxy resin) 之合成與基本性質分析

取相當於雙酚 A/環氧氯丙烷 = 1/8 (莫耳比) 之試藥，置於 1000 mL 之四口燒瓶中，攪拌溶解後，加熱至 110°C，並在 4 h 內逐滴加入計算量之 40% NaOH 溶液，繼續反應 1 h，之後在室溫下冷卻，過濾及水洗以去除 NaCl，再經減壓蒸餾去除水及未反應之環氧氯丙烷，即得雙酚 A 型環氧樹脂。分子量以 Hitachi, L-6200A 型膠體滲透層析儀 (Gel permeation chromatography, GPC) 配合 D2520 積分儀測定之，分離管柱為 Phenomenex 5 μ 100A，以 UV

檢測器 (L-4000) 波長 254 nm 做偵測，以分子量 22000、10100、5050、2450、1100 及 578 之苯乙烯標準品製作檢量線，取試料以四氫呋喃 (Tetrahydrofuran, THF) 稀釋至 0.1%，稀釋後再以 0.45 μ m 之濾膜過濾，並以超音波振盪機去除氣泡。樣品注入量為 10 μ L，四氫呋喃沖提液流速為 1 mL/min，依分析結果計算得數量平均分子量 (Number average molecular weight, \bar{M}_n)、重量平均分子量 (Weight average molecular weight, \bar{M}_w) 及分子量分散度 (Molecular weight polydispersity, Q)。

雙酚 A 型環氧樹脂合成前後之官能基變化，以 Mattson Genesis II FTIR™ 傅立葉紅外線光譜儀分析之，將經純化之雙酚 A 型環氧樹脂與溴化鉀 (KBr) 粉末以重量比 1:100 混合，並加以研磨使樹脂均勻分散，以散反射法 (Diffuse reflectance) 測定之，檢測器為 DTGS (Deuterated tri-glycine sulphate)，檢測光譜範圍為 4000-400 cm^{-1} ，解析度為 8 cm^{-1} ，掃描次數 16 次。此外，並測定環氧樹脂之酸價、顏色、黏度及環氧當量。

2. 環氧壓克力樹脂 (Epoxy acrylate resin) 之合成與基本性質分析

將雙酚 A 型環氧樹脂與丙烯酸依環氧基/羧基 = 1/0.9 (莫耳比) 之計算量混合，並加入樹脂重 1% 之三乙胺及 0.02% 的對苯二酚，在 85°C 氮氣環境下反應 5 h，之後以水洗去殘留之丙烯酸，再以減壓蒸餾去除水分，即得環氧壓克力樹脂 (Bajpai *et al.*, 2002)。並以醋酸酐-吡啶法測定羧價，並分析固形分、分子量、FT-IR 分析、酸價、顏色、黏度等基本性質。

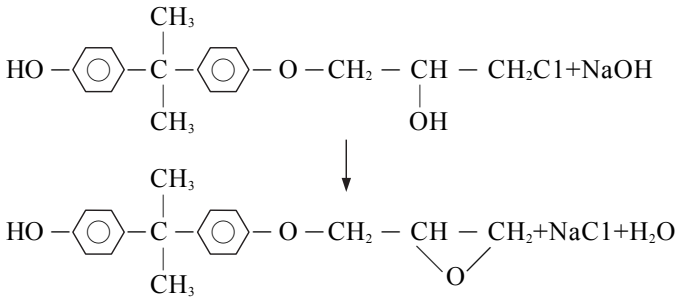
3. UV 塗料之調配與基本性質之測定

預聚合體為環氧壓克力樹脂，單體為 HDDA，將預聚合體/單體以 90/10、80/20、70/30 及 60/40 (重量比) 混合，並添加兩者總量之 3% 的 Benzil dimethyl ketal 光引發劑，調配成 UV 塗料，並測定其黏度與顏色性質。

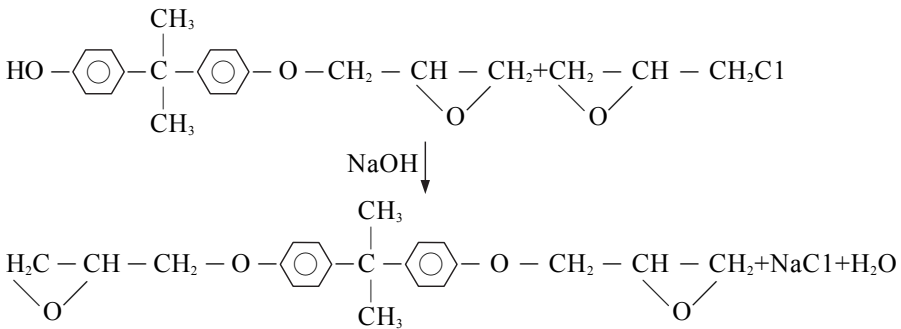
4. UV 塗料之塗裝及性質測定

將不同配方之 UV 塗料以施膜器分別塗裝

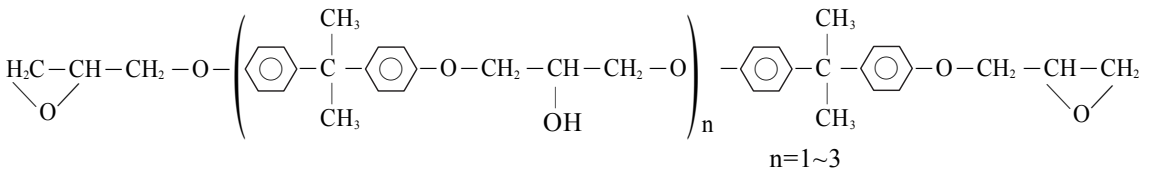
2. 脫氯反應



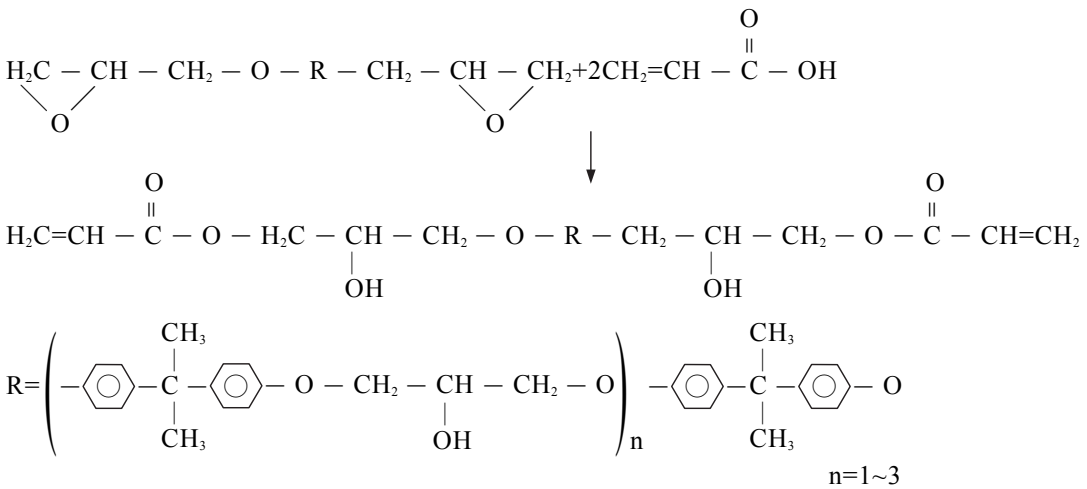
3. 再次與環氧氯丙烷反應



4. 環氧樹脂可能之分子式



5. 環氧樹脂與丙烯酸合成環氧壓克力樹脂



環氧樹脂及環氧壓克力樹脂之基本性質如表 1 所示；其中，環氧樹脂外觀為淡黃色透明，Gardner 色數為 2.9，環氧當量為 240，酸價為 0，黏度為 3,520 cps，固形分為 92.4%。

環氧壓克力樹脂外觀為黃褐色透明狀，Gardner 色數為 5.4，羥價為 377，因水洗後仍殘留少許丙烯酸，酸價為 0.3，因含有大量氫鍵故黏度高達 64,000 cps，固形分為 97.3%。

表 1. 環氧樹脂與環氧壓克力樹脂之基本性質

Table 1. Fundamental properties of epoxy resin and epoxy acrylate resin.

Resin	Epoxide equivalent	Acid value	Hydroxyl value	Color (gardner)	Viscosity (cps) 25°C	Solid content (%)
Epoxy resin	240	0.0	-	2.9	3520	92.4
Epoxy acrylate resin	-	0.3	377	5.4	64,000	97.3

圖 1 為環氧樹脂之 GPC 分析圖，由圖中可以明顯發現 5 個訊號峰，A 峰分子量為 115，推測應為過量之環氧氯丙烷，或是反應副產物之丙三醇。而 B 峰推測為丙三醇進一步與環氧氯丙烷反應得到之環氧化丙三醇。C、D、E

三個峰則分別為聚合度 (n 值) 不同之環氧樹脂。環氧樹脂之重量平均分子量 (\bar{M}_w) 為 305、數量平均分子量 (\bar{M}_n) 為 190 及分散度 (Q) 為 1.6。

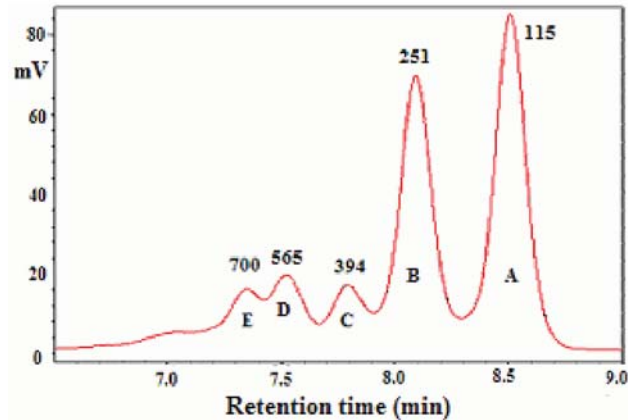


圖 1. 環氧樹脂之 GPC 圖形

Fig. 1. GPC curve of epoxy resin.

圖 2 為環氧壓克力樹脂的 GPC 分析圖，分子量分別為 A 之 479 與 B 之 953 與理論上 n=0 與 n=2 之環氧壓克力樹脂分子量 432、964 相符合。而在圖譜右端有一分子量 274 的小訊

號峰，可能為殘留之環氧氯丙烷或丙三醇與丙烯酸的反應產物。環氧樹脂與丙烯酸反應生成環氧壓克力樹脂後，重量平均分子量為 877，數量平均分子量增 567，分散度為 1.55。

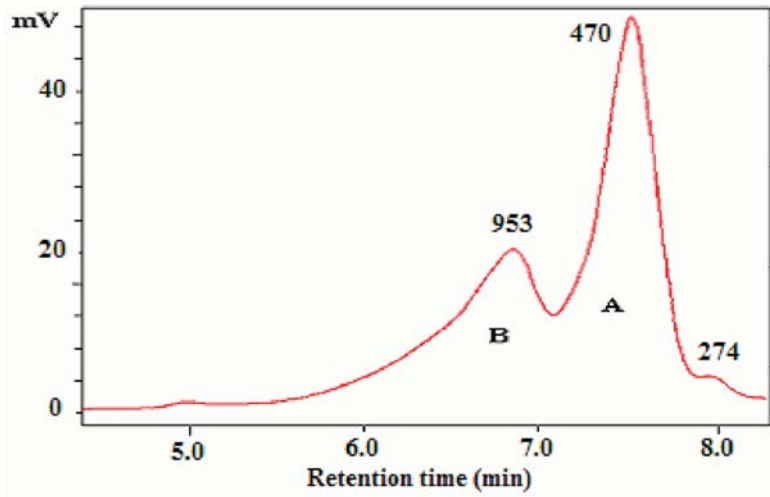


圖 2. 環氧壓克力樹脂之 GPC 圖形

Fig. 2. of GPC curve of epoxy acrylate resin.

圖 3 為環氧樹脂與環氧壓克力樹脂的 FTIR 分析圖，由圖中可看出環氧樹脂合成環氧壓克力樹脂後，位於 3500 cm^{-1} 代表羥基之吸收峰的面積明顯增加，在 1740 cm^{-1} 更出現代表酯結構之羰基 (-C=O) 吸收峰；又在 985 及 940 cm^{-1} 亦出現代表丙烯醯基雙鍵 (=CH₂) 的吸收峰，而原本位於 1290 及 900 cm^{-1} 代表環氧基

之 C-C 及 C-O 之平面伸縮振動吸收峰則強度減弱。此外在 1622 cm^{-1} 代表的 -C=C- 吸收峰，由於環氧樹脂只具有苯環，但環氧壓克力樹脂則另具丙烯醯基之雙鍵，故 1622 cm^{-1} 吸收峰面積增加。由 -OH 之增加與 -C=O、-C=C- 與 =CH₂ 的導入，可以確認環氧樹脂已與丙烯酸反應生成環氧壓克力樹脂。

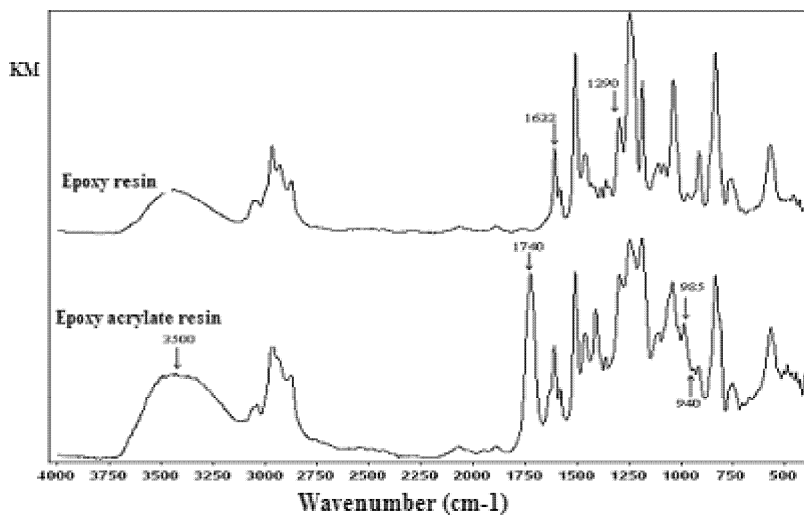


圖 3. 環氧樹脂與環氧壓克力樹脂之 FTIR 圖譜

Fig. 3. FTIR spectra of epoxy resin and epoxy acrylate resin.

(二) 環氧壓克力 UV 塗料之性質

以環氧壓克力樹脂作為預聚合體、添加單體 HDDA，依預聚合體/單體重量比 = 90/10、80/20、70/30 及 60/40 (重量比) 混合，並添加兩者總量之 3% 的 Benzil dimethyl ketal 光引發劑，調配成自由基聚合型 UV 塗料。各種 UV 塗料配方之黏度及顏色如表 2 所示；由結果得

知當預聚合體含量增加，塗料整體黏度上升，例如，60/40 者之黏度僅 1050 cps，但 90/10 者黏度高達 12500 cps，而添加單體能有效降低 UV 塗料之黏度，可以改善 UV 塗料之作業性。各種塗料之顏色均為淡黃色透明狀，色值以 90/10 者最高為 4.0，而 60/40 者最低僅 3.0。

表 2. 不同預聚合體/單體重量比 UV 塗料之黏度與顏色

Table 2. Viscosity and color of UV coatings with different prepolymer/monomer weight ratios.

UV coating	Viscosity (cps), 25°C	Color (gardner)
60/40 ¹	1050	3.0
70/30	2250	3.3
80/20	5000	3.7
90/10	12500	4.0

¹ represents the weight ratio of epoxy acrylate resin/HDDA.

不同預聚合體/單體比例之 UV 塗膜之 FTIR 分析圖，如圖 4 所示。由結果得知代表羥基之 3500 cm^{-1} 吸收峰面積隨著環氧壓克力樹脂含量增加而上升，換言之，當環氧壓克力樹脂增加，硬化後塗膜的羥基含量增加；而代表苯環雙鍵的 1622 cm^{-1} 亦隨環氧壓克力樹脂增加而

吸收峰面積加大，且於 985, 940 cm^{-1} 代表 =CH₂ 之吸收峰，除 90/10 者尚有微弱吸收峰外，其餘均消失，顯示各不同預聚合體/單體比例之塗膜在紫外光照射下，除 90/10 者未反應完全外，其餘皆可由預聚合體及單體之雙鍵進行自由基聚合而硬化。

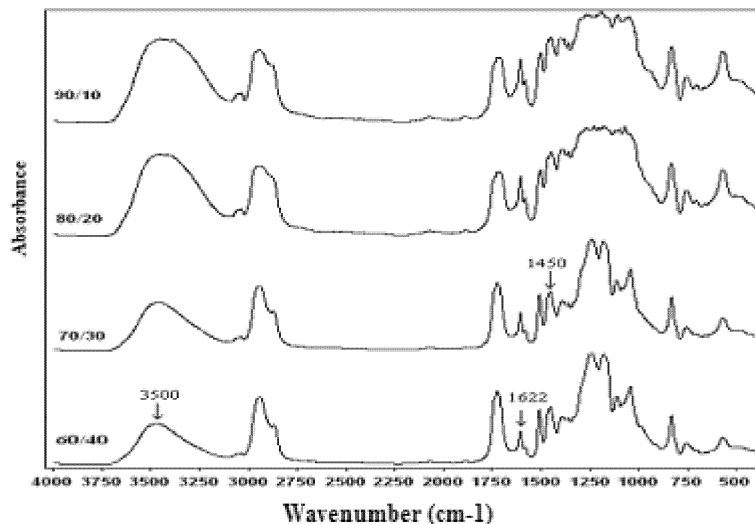


圖 4. 不同預聚合體/單體比例 UV 塗料之塗膜 FTIR 光譜圖

Fig. 4. FTIR spectra of UV-cured coating films with different prepolymer/monomer weight ratio.

將各種 UV 塗料塗佈於試材，再經紫外線乾燥機照射後之塗膜性質如表 3 所示。在硬度方面，以環氧壓克力樹脂/HDDA=60/40 者之塗膜硬度最高，可達 97 sec，其次為 70/30 者之 78 sec，由試驗結果得知，隨著預聚合體含量增加則塗膜硬度下降，此可能預聚合體比例較高時，塗料分子間架橋點較少所致。在拉伸強度方面，其中除 60/40 比例者塗膜硬脆無法取得完整單離塗膜外，塗膜拉伸強度則以 80/20 比例為最高，達 248 kgf/cm²，而以 90/10 比例者為最差，僅達 145 kgf/cm²，此可能預聚合體

含量較高時，相對使單體含量較少，使得塗膜之交聯密度較低所致。而在破壞伸長率方面，以 90/10 比例者之 12.0% 最高，80/20 者次之，而以 70/30 比例者最差僅 1.3%，其中 90/10 比例者雖然具有高破壞伸長率，但其拉伸強度只有 145 kgf/cm²，硬度亦最低，故為一軟韌之塗膜；而 80/20 比例者的破壞伸長率為 4.1% 屬於較硬強之塗膜，而 70/30 比例破壞伸長率僅 1.3% 屬於較硬脆之塗膜 (佐藤，1993；郭銘松，1993；李育德等，1996；蔡信行，2002)。

表 3. 不同預聚合體/單體比例 UV 塗料之塗膜性質

Table 3. Properties of UV-cured coating films with different prepolymer/monomer weight ratios.

Property	UV coating			
	60/40 ¹	70/30	80/20	90/10
Hardness (König, sec)	97	78	59	27
Tensile strength (kgf/cm ²)	-	235	248	145
Elongation at break (%)	-	1.3	4.1	12.0
Impact resistance (cm)	15	15	20	20
Adhesion (grade)	0	0	2	4
Gel content (wt. %)	72.9	71.9	71.6	64.5
60° Gloss	92	95	100	96
Hot and cold cycles	> 20	> 20	> 20	15
Gloss retention (%) ²	81	72	71	--

¹ represents the weight ratio of epoxy acrylate resin/HDDA.

² Gloss retention (%) = the gloss after hot and cold cycle test/ the gloss before hot and cold cycle test × 100.

在塗膜耐衝擊性方面，以 80/20 及 90/10 比例者之衝擊高度均為 20 cm，耐衝擊性較為優良，而 60/40 及 70/30 比例者僅達 15 cm，耐衝擊性較差；此係環氧壓克力樹脂含量愈多，塗膜中苯環及氫鍵鍵結增加 (Dutta and Karak, 2005)，且樹脂之架橋點間分子量較大，塗膜較軟韌所致，此結果與上述之塗膜硬度及拉伸強度等性質相互驗證。又塗膜附著性以環氧壓克力樹脂/HDDA=90/10 比例者之 4 等級

為最佳，80/20 比例者之 2 等級次之，而 70/30 及 60/40 比例者最差均為 0 等級，此乃因 UV 塗料照射紫外光硬化過程中會發生劇烈收縮而產生內部應力，使塗膜之附著性下降 (張上鎮，2001)，又環氧壓克力樹脂含量增加，塗膜附著性有較佳之現象，此與塗膜之耐衝擊性有相似的結果。但整體而言，各種不同環氧壓克力與 HDDA 配合之 UV 塗料附著性仍不理想，亟待加以改善。又將各種 UV 塗料之塗膜以丙酮抽

出後之膠化度，以預聚合體/單體比例為 60/40 者之 72.9% 為最高，而 90/10 者最低，僅 64.5%，由此結果更進一步驗證，HDDA 單體含量 10% 時，無法得到完整的架橋反應，因此其塗膜機械性質較差。

將各種塗佈於櫟木之 UV 塗料之塗膜光澤度，如表 3 所示。由結果得知各種塗膜光澤度均在 90 以上，且光澤度隨環氧壓克力樹脂含量增加而愈高之趨勢。冷熱循環試驗中，除 90/10 比例者在第 15 回發生垂直木理之裂痕，其餘三種塗膜經 20 回冷熱循環試驗後，塗膜皆無異狀，又由結果顯示當單體含量愈多，其塗膜光澤度保留率亦愈高，如 60/40 者可達 81%，此係單體含量愈多，塗料成分間反應程度愈高，塗膜耐久性愈佳。

塗佈於櫟木之各種 UV 塗料之塗膜，經褪色試驗機照射 100 h 後之顏色變化如表 4 所示；

由結果得知，除 70/30 比例者明度差值 (ΔL^*) 為正值 0.4 稍微增加外，其餘均為負值，顯示明度降低，但彼此間差異不大。在色差值 (ΔE^*) 方面，以 60/40 與 70/30 比例者相近，均為 17 左右，但當預聚合體含量增加時色差值亦隨之增加。而黃色指數差值 (ΔYI) 之變化趨勢與色差值者相似，亦即隨環氧壓克力樹脂含量增加而塗膜黃化越嚴重，例如 60/40 比例者為 36.2，而 90/10 者增加至 44.1，此可能因環氧壓克力樹脂結構中具有芳香環結構，當樹脂含量愈多，芳香環含量增加，受到紫外光照射時可能形成醌類化合物，而此共軛雙鍵結構為一發色基；而單體 HDDA 為一脂肪族分子，受到紫外光照射時不易形成共軛雙鍵之發色基，對塗膜耐光性影響不大，因此 UV 塗膜的差異主要受環氧壓克力樹脂所影響，而環氧壓克力樹脂含量增加，則塗膜耐光性則越差。

表 4. 不同預聚合體/單體比例 UV 塗料之塗膜耐光性

Table 4. Lightfastness of UV-cured coating films with different prepolymer/monomer weight ratios.

UV coating	ΔL^* ²	ΔE^*	ΔYI
60/40 ¹	-1.2	17.7	36.2
70/30	0.4	17.3	37.4
80/20	-3.0	21.2	42.5
90/10	-3.2	22.0	44.1

¹ represents the weight ratio of epoxy acrylate resin/HDDA.

² the samples were measured after exposure to a UV light for 100 h.

四、結論

本研究係探討雙酚 A 型環氧壓克力樹脂之合成，將其與 HDDA 單體依不同重量比混合，並加入 Benzil dimethyl ketal 光引發劑調配成 UV 塗料，分析其作為木材塗料之可行性，試驗結果獲得以下 2 點結論。

(一) 經 FTIR 分析結果，利用雙酚 A、環氧氯丙烷及丙烯酸可以穩定地合成雙酚 A 型環氧壓克力樹脂，其顏色呈淡黃色透明狀，

Gardner 色值為 5.4，黏度約 64,000 cps (25°C)，重量平均分子量 877，羥價為 377，酸價為 0.3，固形分為 97.3%。

(二) 整體而言，以環氧壓克力樹脂/HDDA = 80/20 (重量比) 所調配成之 UV 塗料，其塗膜具有最高的拉伸強度與耐衝擊性，其他塗膜性質亦較為均衡，若能改善塗膜附著性則可適用做為木材塗料。

五、參考文獻

- 李育德、顏文義、莊祖煌 (1996) 聚合物物性。高立圖書有限公司。台北。222-231 頁。
- 陳劉旺 (1997) 工業塗料與高分子化學。高立圖書有限公司。台北。1-40 頁。
- 張上鎮 (2001) 紫外光硬化塗裝的特性與發展。林產工業叢書 17 : 175-182。
- 張上鎮、許富蘭 (2001) 紫外光硬化塗料之光劣化與改善方法。林產工業叢書 17 : 201-208。
- 蔡信行 主編 (2002) 新版聚合物化學。新文京開發出版有限公司。台北。198-216 頁。
- 郭銘松 著 (1993) 有機高分子材料概論。國興出版社。新竹。95-96 頁。
- 盧崑宗、劉正字 (1999) 木工家具塗料 I. 概論。木工家具雜誌 191 : 112-130。
- 盧崑宗 (2001) 木器塗料之促進乾燥技術。林產工業叢書 17 : 73-91。
- 川村二郎 (1993) ワークに役立つ実用木材塗裝講座第 9 回、UV 塗裝システムによる木材塗裝。塗裝技術 32 (11) : 109-118。
- 加藤清視 (1989) 紫外線硬化システム。総合技術センター。東京。pp.153-157。
- 佐藤弘三 (1993) 塗膜の硬さ。塗裝と塗料。505 : 38-49。
- Bajpai, M., V. Shukla and A. Kumar (2002) Film performance and UV curing of epoxy acrylate resins. *Prog. Org. Coat.* 44: 271-278.
- Benfarhi, S., C. Decker, L. Keller and K. Zahonily (2004) Synthesis of clay nanocomposite materials by light-induced crosslinking polymerization. *Europ. Polym. J.* 40: 493-501.
- Idriss Ali, K. M., M. A. Khan, M. rahman and M. ghani (1997) Ultraviolet curing of epoxy coating on wood surface. *J. Appl. Polym. Sci.* 66: 1997-2004.
- Price, L.N. (1995) Free radical and cationic photoinitiators in ultraviolet light curable coatings. *J. Coat. Technol.* 67: 27-34.
- Weiss, K. D. (1997) Paint and coatings: a mature industry in transition. *Prog. Polym. Sci.* 22: 203-245.

論述

有限元素分析應用於瓦楞紙板強度之預測

林曉洪¹ 徐尙宗² 洪國榮² 黃健能²

一、前言

紙張主要由木材纖維所組成，為一天然可再生資源，故亦為綠色材料。雖其力學性質不及木材，惟其優點為使用後可回收數次再利用，故除可節省寶貴的資源外，對公害影響亦為最輕微者。

依據台灣區造紙工業同業公會統計資料(台灣區造紙工業同業公會，2006)顯示，2005年台灣區紙張總生產量約466萬噸，其中紙板生產量約337萬8千噸，占總產量72.5%；紙板中，紙箱用紙生產量約249萬8千噸，占總產量53.6%，為紙板產量73.9%。由此可見紙箱用紙在造紙工業之重要性。

自早期至今，造紙及包裝之相關產業多利用破裂強度、環壓強度及耐壓強度試驗等測值作為評估瓦楞紙板及估計瓦楞紙箱的強度。其中紙箱耐壓強度計算公式，如 kellicutt、Maltenfort、Mackee 及 Wolf 等為業界所熟知者。近年來則有許多學者紛紛開始利用有限元素分析(Finite element analysis; FEA)探討瓦楞紙板的力學行為。有限元素分析是以模擬瓦楞紙板力學行為的有限元素模型為基礎，進行瓦楞紙板於各種載重條件下之強度預測。其優點如 1.減少研發成本，在產品研發的設計階段，可免去不必要的試驗；2.縮短研發時間，在設計初期即可獲得更充分的瓦楞紙板力學性質資料；3.如須使用新材質，可評估其通過整套測試項目的可行性；及 4.可作為瓦楞紙板

局部現象(局部應力及變形)之研究。(Aboura *et al.*, 2004)

欲建立能預測瓦楞紙板行為的有限元素模型並對其加以驗證，首先需完成原材料—裱面紙板與瓦楞芯紙及瓦楞紙板之試驗；包含拉伸、剪力、抗彎及側向抗壓強度試驗(Edge compression test; ECT)等。其目的在於獲得非均向材料—紙張之彈性係數及強度等四項參數，以建立層板內之平面應力模式。此四項參數為縱向或 MD 彈性係數(E_L 或 E_x)、橫向或 CD 彈性係數(E_T 或 E_y)、波松比(ν_{LT})及剪彈性係數(G_{LT} 或 G_{xy})等(Aboura *et al.*, 2004、Biancolini and Brutti, 2003)。其次為發展出完整的有限元素模型以建構局部的瓦楞紙板模型。經模型網格(Mesh)尺寸之最適化後，最後再進行模型的驗證工作，即將分析結果的數值與實驗值進行比對。

本文擬就瓦楞紙板之性質及應用有限元素分析預測瓦楞紙板強度進行整理，期提供相關研究之參考。

二、瓦楞紙板概論

周守正(1982)曾列舉瓦楞紙箱之八大優點，即(1)有效利用木材資源，相同木材耗用量，瓦楞紙箱之容積為其他木質容器之5-7倍(2)包裝材料費用低(3)重量輕、作業性良好(4)可大量生產(5)可獲得某種必要之強度(6)可施以精美印刷，提高商品價值(7)可摺疊堆

1. 國立屏東科技大學 木材科學與設計系教授

Professor. Department of Wood Science and Design, NPUST.

2. 國立中興大學 森林學系 研究生(通訊作者)、教授、研究生

Graduate student (Corresponding author), Professor and Graduate student. Department of Forestry, NCHU.

存，減少儲存空間及 (8) 可耐運輸及堆積，保護被包裝物等。瓦楞紙箱係由瓦楞紙板摺合而成，而瓦楞紙板係由膠合劑將波浪狀的瓦楞芯紙與其上、下側之裱面紙板黏合而成 (圖 1)；

係一廣泛應用於包裝工業的材料。其主要優點為材質輕 (相對於木材、木質、金屬)、具相當強度、便於搬運、可再回收利用及價格低廉等特性，故為製造包裝容器最佳材料選項之一。

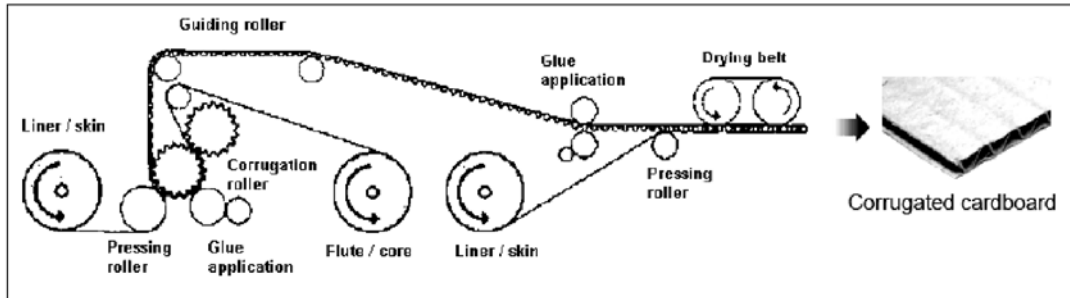


圖 1. 瓦楞紙板之生產示意圖 (Pflug *et al.*, 2004)

Fig. 1. The diagram of the corrugated board process.

於其他的應用領域亦可發現以瓦楞紙板作為結構設計用材之實例。如，El Damatty 等學者 (2000) 曾發表紙板避難所 (圖 2) 的結構設計及其計算方法；Ahmed 等學者 (Biancolini, 2005) 亦於同年曾研究探討比較鋼及紙板製成

之屋頂用波浪板相關性質。於家具材之應用，則有 Pflug 等學者 (2004) 探討 TorHex 蜂巢芯板 (由瓦楞紙板製成) (圖 3) 之力學性質；雖然 TorHex 蜂巢芯板的強度性質並不理想，但具有非常高之衝擊抗彎強度。

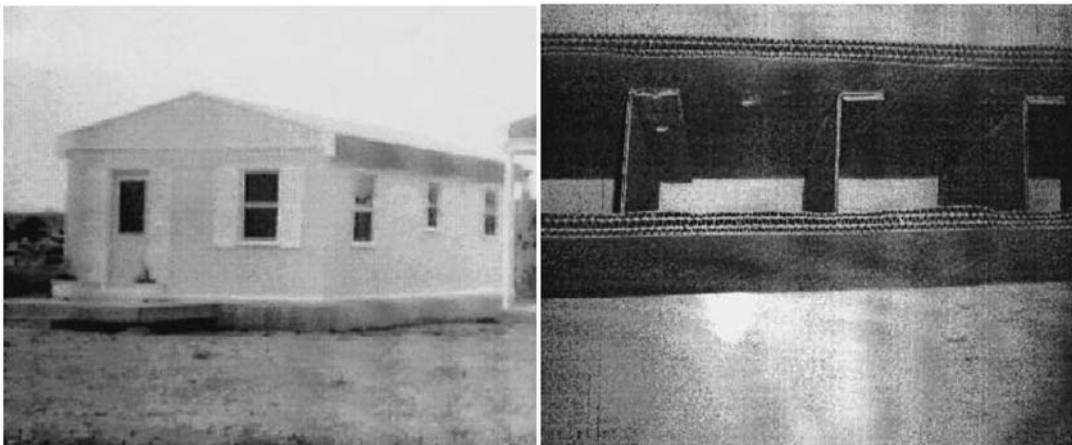


圖 2. 避難所 (左) 及其牆壁橫段面 (右) 照片 (El Damatty *et al.*, 2000)

Fig. 2. The Photos of a finished shelter (left) and the cross-section of side walls (right).

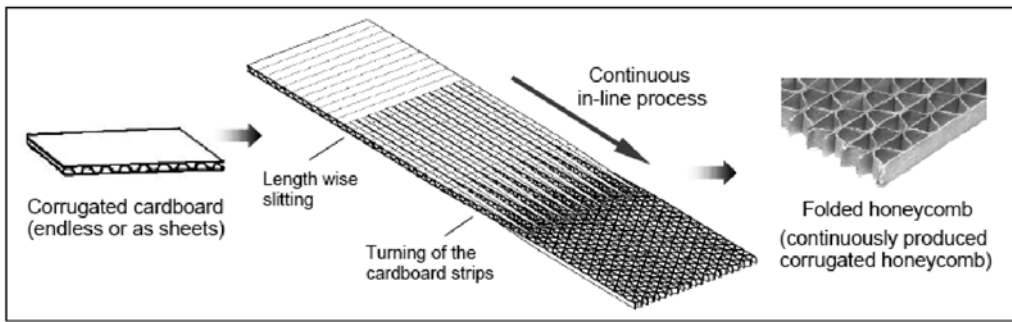


圖 3. TorHex 紙質蜂巢芯板之製作示意圖 (Pflug *et al.*, 2004)

Fig. 3. The diagram of TorHex paper honeycomb process.

瓦楞紙板於工業應用時，其強度為極重要之參考指標。圖 4 為瓦楞紙板的概略外形。顯示其為一具有方向性的複合結構材料，此因其組成一裱面紙板及瓦楞芯紙為異方性 (Anisotropy) 材料及芯層之瓦楞構造所造成。為了界定此材質的方向特性，此以圖 4 說明之，即 MD 為紙面上之紙機方向，此係紙張或瓦楞紙板的製造方向，並定義與 x 軸方向相同；CD 為紙面上之橫向，與紙機方向垂直，並定義與 y 軸方向相同；TD 為紙張或瓦楞紙板厚度方向，並定義與 z 軸方向相同。此外圖 4 中尚有幾個重要的物理量，分別為瓦楞紙板的厚度 (H)、波浪狀瓦楞的高度 (h_c)，瓦楞的投影長度 (p)。瓦楞紙板之載重能力一方面來自於其原材料的強度，即位於表層之裱面紙板賦予瓦楞紙板抵抗彎曲的性能，芯層的瓦楞芯紙則賦予瓦楞紙板抵抗剪力的性能；另一方面則取決於正確的結構設計 (Aboura *et al.*, 2004 ; Nyman and Gustafsson, 2000)。紙板組件的結構分析是紙箱設計的一個關鍵。在堆疊所造成的側面壓潰及垂直重壓下，紙箱必須能夠保護內裝物品不會受到損害；因此紙板強度特性的研究遂成為重要的一項工作。事實上在上述載重情況下，尚可能會發生挫曲 (Buckling) 破壞而降低了瓦楞紙板或紙箱原有的載重能力；欲避免發生此種情形即需對紙板的結構特性一剛性性質－應有深度的了解。

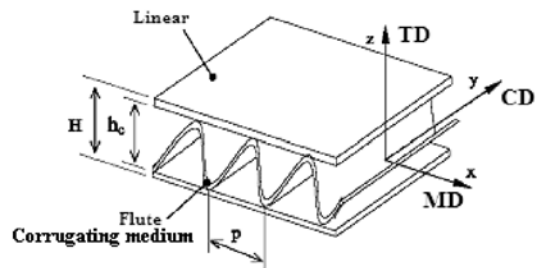


圖 4. 瓦楞紙板外形及主要的材料方向 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Fig. 4. Corrugated board geometry and principal material directions.

三、瓦楞紙板的組成及種類

(一) 裱面紙板 (Liner board)

依 CNS 1455 之定義：以製造外裝紙箱用瓦楞紙板之外層為目的之紙板，包括本色(未漂)牛皮紙板、斑白裱面紙板 (Mottled white liner)、全白裱面紙板 (Bleached white liner)、塗布裱面紙板 (Coated liner) 及其他種類之紙板。

依其品質之不同，區分為特 A、A、B 及 C 等四級，基本特性要求，如表 1 所示。

(二) 瓦楞芯紙 (Corrugating medium)

依 CNS 2955 之定義：以製造外裝紙箱用瓦楞紙板之內層或中芯為目的之紙板稱之。

依其品質之不同，區分為特 A、A 及 B 等三級，基本特性要求，列如表 2 所示。

表 1. 裱面紙板之分類及其特性要求 (經濟部標準檢驗局, 2005)

Table 1. The grades of linerboards and the characteristics requirements.

種類	基重 ⁽¹⁾ g/m ²	破裂強度 kgf/cm ² {kPa}	比破裂度 {kPa·m ² /g}	環壓強度 (橫向) kgf {N}	比環壓強度 kgf m ² /g {N·m ² /g}	水分 %
特 A 級	180	5.9{579}以上	3.3{324}以上	23.4{229}以上	13{127}以上	8.0±1.0
	200	6.6{647}以上		26.0{255}以上		
	220	7.3{716}以上		28.6{280}以上		
	240	7.9{775}以上		31.2{306}以上		
	280	8.7{853}以上	3.1{304}以上	39.2{384}以上	14{137}以上	
	340	10.5{1030}以上		47.6{467}以上		
A 級	180	5.6{549}以上	3.1{304}以上	21.6{212}以上	12{118}以上	8.0±1.0
	200	6.2{608}以上		24.0{235}以上		
	220	6.8{667}以上		26.4{259}以上		
	240	7.4{726}以上		28.8{282}以上		
	280	8.1{794}以上	2.9{284}以上	36.4{357}以上	13{127}以上	
	340	9.9{971}以上		44.3{434}以上		
B 級	220	5.5{539}以上	2.5{245}以上	24.2{237}以上	11{108}以上	8.0±1.0
	240	6.0{588}以上		26.4{259}以上		
	280	7.0{686}以上		33.6{330}以上	12{118}以上	
	340	8.5{834}以上		40.6{400}以上		
C 級	180	3.6{353}以上	2.0{196}以上	18.0{176}以上	10{98}以上	8.0±1.0
	200	4.0{392}以上		20.0{196}以上		
	220	4.4{431}以上		22.0{216}以上		
	240	4.8{471}以上		24.0{235}以上		

註 (1): 基重許可差 ±5%

表 2. 瓦楞芯紙之分類及其特性要求 (經濟部標準檢驗局, 2005)

Table 2. The grades of corrugating mediums and the characteristics requirements.

種類	基重 ⁽¹⁾ g/m ²	厚度 mm	斷裂長度 (縱向) km	環壓強度 (橫向) kgf {N}	比環壓強度 (橫向) kgf m ² /g {N·m ² /g}	水分 %	平面壓縮 強度 kgf {N}	比平面壓 縮強度 kgf m ² /g {N·m ² /g}
特 A 級	115	0.19-0.23	4.0 以上	12.7{125}以上	11{108}以上	9±1	16.7{164}以上	14.5{142}以上
	125	0.21-0.25		13.8{135}以上			18.1{177}以上	
	160	0.26-0.31		20.8{204}以上	13{127}以上		23.2{227}以上	
A 級	180	0.29-0.34		23.4{229}以上			26.1{256}以上	
	115	0.19-0.23	3.5 以上	10.4{102}以上	9{88}以上	9±1	15.0{147}以上	13.0{127}以上
	125	0.21-0.25		11.3{111}以上			16.3{160}以上	
	160	0.26-0.31		17.6{173}以上	11{108}以上		20.8{204}以上	
180	0.29-0.34		19.8{194}以上		23.4{229}以上			
B 級	115	0.19-0.23	3.0 以上	8.1{79}以上	7{69}以上	9±1	12.7{125}以上	11.0{108}以上
	125	0.21-0.25		8.8{86}以上			13.8{135}以上	
	160	0.26-0.31		14.4{141}以上	9{88}以上		17.6{173}以上	
	180	0.29-0.34		16.2{159}以上			19.8{194}以上	

註 (1): 基重許可差 ±5%

(三) 瓦楞紙板 (Corrugated board)

依 CNS 1454 之定義：以製造運輸用紙箱為目的，由裱面紙板及瓦楞芯紙組合而成之平板狀瓦楞紙板。依其構造分為單層 (雙面，以 S 表示) 及雙層 (複雙面，以 D 表示) 兩種。依楞型形狀分 A、B、C 等三類。

瓦楞之楞型形狀除 CNS 所規定者，尚有其他型式，較常見者為 E 楞。各國對楞型高度及單位數量 (個/30 cm) 的規定稍有差異。

四、有限元素分析之應用

(一) 有限元素分析之預備試驗

就探討結構物一般性能的方式而言，通常係依據標準計畫行為理論 (Theory of planned behavior ; TPB) 及剪力試驗執行橫向剪力剛性、彎曲剛性的實驗及數值計算 (Biancolini and Brutti, 2003)。另者，當載重方向與 MD 垂直時，瓦楞紙板可視為短而寬的短柱結構，可採用側向抗壓強度試驗的結果預測瓦楞紙板及瓦楞紙箱的挫曲強度 (Urbanik, 1996)。有限元素法利用試驗數據及計算得到的參數，進行局部結構物的外形數值分析。

試樣在進行各項試驗前須經 23±2°C、

50±2% RH 環境下調濕 24 小時以上，每項測試之最低試樣數量為 10 件。試驗項目概述如下。

1. 裱面紙板與瓦楞芯紙的試驗

測試裱面紙板及瓦楞芯紙之目的在於求得基重、厚度、縱向與橫向彈性係數 (Young's modulus)、波松比 (Poisson's modulus)、降伏應力及極限應力等參數。縱向與橫向彈性係數及波松比可由試樣的縱向及橫向拉伸試驗結果求得。

剪彈性係數可依下式求得，式中 E_{45} 為試樣之測試方向與 MD 呈 45° 時所測得的試樣彈性係數。

$$G_{LT} \text{ 或 } G_{xy} = \left[\frac{2\nu_{LT}}{E_L} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + \frac{1}{E_{45}} \right]^{-1}$$

表 3 為學者 Urbanik 探討瓦楞紙板紙機方向強度所使用之裱面紙板及瓦楞芯紙的參數；由數據顯示，基重較大者，其強度及彈性係數亦較大。Biancolini 及 Brutti 兩位學者的實驗數據，如表 4 所示。由紙機方向與橫向之數值差異、係數的誤差值達 18.8% 及強度的誤差值達 22.2%，可窺知紙張是一種非均向性，且變異很大的材料。

表 3. 裱面紙板(紙機方向)與瓦楞芯紙性質 (橫向) (Modified from Urbanik, 1996)

Table 3. Average MD properties of liner and average CD properties of corrugating medium.

Average MD properties of linerboard.

BW g/m ²	Measurement			Property		
	S_u kN/m	EA_u MN/m	EI_u mN·m	σ_c MPa	d_2 GPa	h μm
139	3.17	1.14	3.93	15.6	5.61	203
169	3.93	1.39	6.02	17.2	6.10	228
207	4.62	1.78	11.5	16.6	6.38	278
278	5.32	2.29	27.8	13.9	5.99	382
333	6.00	2.35	39.4	13.4	5.23	449
437	7.84	3.03	82.2	13.7	5.31	571

Average CD properties of corrugating board

BW g/m ²	Measurement		
	<i>t</i> μm	<i>E</i> A _u MN/m	<i>c</i> ₂ GPa
85	153	315	2.06
136	253	389	1.54
165	308	545	1.77
189	378	602	1.59
270	422	883	2.09

表 4. 依據義大利標準瓦楞紙板製造同業公會而設計之瓦楞紙板之試驗結果：係數及強度 (Modified from Biancolini and Brutti, 2003)

Table 4. Experimental results for corrugated board paper designated according to Italian standard GIFCO: Moduli and Strength.

Moduli											
Name	E _{MD} (MPa)	Error (%)	E _{CD} (MPa)	Error (%)	E ₄₅ (MPa)	Error (%)	G _{xy} (MPa)	Error (%)	<i>v</i>	<i>ρ</i> (g/m ²)	Thickness (mm)
KL-5	3326	7.35	1694	12.3	2160	9.41	860	18.8	0.34	200	0.29
S-9	2614	8.69	1532	11.1	1954	9.82	792	18.8	0.33	175	0.30

Strength										
Name	<i>σ</i> _{yCD} (MPa)	Error (%)	<i>σ</i> _{uCD} (MPa)	Error (%)	<i>σ</i> _{yMD} (MPa)	Error (%)	<i>σ</i> _{uMD} (MPa)	Error (%)	RTC KN/m	
KL-5	7.07	19.4	19.4	5.3	10.4	13.4	41.2	4.0	2.36	
S-9	6.36	22.2	14.9	6.2	10.9	16.3	32.6	8.5	1.92	

2. 瓦楞紙板的試驗項目

試驗項目包括拉伸試驗 (Tensile tests)、剪力試驗 (Shear tests)、抗彎強度試驗 (Bending tests) 及側向抗壓強度試驗 (Edge compression test ; ECT) 等。

試驗結果如表 5-8 所示 (Urbanik, 1996 ;

Aboura *et al.*, 2004)。依表 5 之拉伸應力數據，試樣的 MD/CD 比值為 1.61，可知瓦楞紙板亦為非均向材料。另需要注意的是，即便橫向彈性係數 (E_{CD}) 的變異達 15%，Aboura 等學者認為仍在可接受範圍內；由此亦可得知瓦楞紙板是一種性質變異大的材料。

表 5. 瓦楞紙板的拉伸性質 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Table 5. Tensile properties of corrugated board.

E _{MD} (MPa)	<i>v</i> _{xy}	<i>σ</i> _{MD} (MPa)	E _{CD} (MPa)	<i>v</i> _{yx}	<i>σ</i> _{CD} (MPa)
863.05±99.50 (11.53%)	0.27±0.03 (11.11%)	4.44±0.14 (3.15%)	554.97±85.89 (15.47%)	0.22±0.03 (13.64%)	2.76±0.28 (10.14%)

表 6. 瓦楞紙板的剪力性質 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Table 6. Shear properties of corrugated board.

G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xy}^B (MPa)
2.32±0.12	3.93±0.14	267.83

表 7. 瓦楞紙板的抗彎性質 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Table 7. Bending properties of corrugated board.

E_{MD} (MPa)	E_{CD} (MPa)	$E_{MD \text{ flex}} / E_{MD \text{ tensile}}$	$E_{CD \text{ flex}} / E_{CD \text{ tensile}}$
844.45±71.29(8.44%)	605.73±24.54(4.05%)	0.98	1.09

表 8. 瓦楞紙板紙機方向側向抗壓強度 (Urbanik, 1996)

Table 8. MD ECT strength of corrugated board.

Corrugated Medium BW, g/m ²	Actual and Predicted (in parentheses) Strength, kN/m, at Various Linerboard BW					
	139 g/m ²	169 g/m ²	207 g/m ²	278 g/m ²	333 g/m ²	437 g/m ²
85	1.68	2.45	4.27	6.97	8.58	11.8
136	2.56	3.43	5.52	7.81	10.4	12.8
165	2.68	3.61	5.29	8.62	9.61	14.4
189	2.94	3.78	5.29	9.25	10.6	13.7
270	3.05	4.12	5.50	8.86	10.8	14.9

(二) 有限元素法

1. 簡介

雖然有限元素法的名稱於 50 年前才被提出，不過遠在很久以前就已具有此種概念。例如，古代的數學家發現可用一多邊形近似地表示一個圓的圓周；若以目前的表示法，則多邊形的每一個邊，均稱為“有限元素”。有限元素分析係 Turner、Clough、Matin 及 Topp 等航空工程師為分析飛機複雜的結構問題，而於 1956 年提出第一篇有限元素法的論文。其後陸續有許多相關書籍及論文發表，應用範圍也由航太工業擴及造船、土木、機械、汽車...等工業。1990 年代，隨著個人電腦效能之突飛猛進及以有線元素法開發之有限元素分析軟體的蓬勃發展，有限元素分析已成為電腦輔助設計 (Computer Aids Design ; CAD) 不可或缺的部分 (李銚鋒，1997；康淵、陳信吉，2006；Rao，陳昭昌編譯，1989)。

本文中所介紹之瓦楞紙板的等效剛性性質

(Equivalent stiffness properties) 是以有限元素模型 (Finite elements model) 建立瓦楞紙板之局部不連續模型後，再以正交殼元素重建紙張的實際性能。

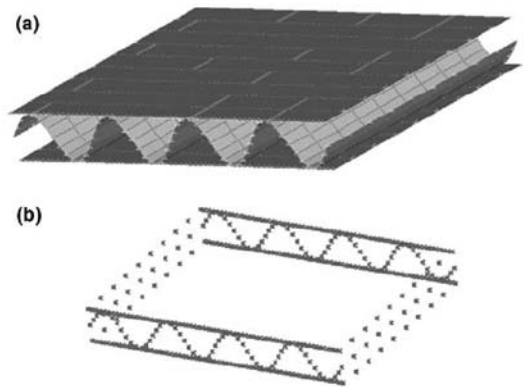


圖 5. 有限元素模型的微觀幾何外形 (a) 和邊界節點 (b) (Biancolini, 2005)

Fig. 5. FE model of microgeometry (a) and boundary nodes (b).

瓦楞紙板的等效彈性性質 (Equivalent elastic properties) 是藉由均質程序 (Homogenization procedure) 而求得；其為一種可以擷取“瓦楞紙板”等效元素，並與詳細模型具備相同性能的一種方法。均質程序是一種不受限制的方法，可自有限元素所建構的模型中隨意擷取出等效薄板。完成微觀力學模型的均質程序可以達成模型簡化的目標；簡化後的模型只需分析邊界節點 (Node) 的自由度，再經由能量平衡的方法在等效剛性矩陣與有限元素模型簡化矩陣之間建立等式，便能求出近似解。圖 5 為瓦楞紙板的有限元素模型。

均質化過程的第一步驟為靜態簡化 (Static condensation)，是將內部各點移除僅留下外部節點。進而利用簡化剛性矩陣，由邊界節點之位移量計算出邊界節點的載重。圖 5 (b) 所示為外部節點，為有限元素模型邊界上之全數節點，構成等效薄板的邊緣。

假設內部點的載重為 0，可以簡化剛性矩陣藉由邊界節點之位移量計算出邊界節點的載重，其推導過程如下 (Biancolini, 2005)：

由虎克定律

$$[\bar{K}] \cdot \{u_e\} = \{F_e\}$$

將 $[\bar{K}]$ 矩陣改寫為

$$[\bar{K}] = [K_{cc}] - [K_{ci}] \cdot [K_{ii}]^{-1} \cdot [K_{ic}]$$

將整個剛性矩陣分割成四個次矩陣：

$$\begin{bmatrix} K_{cc} & K_{ci} \\ K_{ic} & K_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_e \\ u_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e \\ 0 \end{Bmatrix}$$

假設位移向量為 $\{u_e\}$ ，則儲存於物體內的總彈性能為

$$E = \frac{1}{2} \cdot \{u_e\}^T \cdot \{F_e\}$$

為了在有限元素模型與等效平板之間建立能量等式，必須定義一個位移場。在邊界上每個節點的位移可以直接藉由一個轉換矩陣 (5N 列，6 行) 而與薄板的應變向量建立關聯。依據克希荷夫假設，應變場可視為

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix}$$

進行平面內位移場的積分計算

$$u(x, y, z) = \frac{y}{2} \gamma_{xy}^0 + \frac{yz}{2} k_{xy} + \varepsilon_x^0 x + xzk_x$$

$$v(x, y, z) = \frac{x}{2} \gamma_{xy}^0 + \frac{xz}{2} k_{xy} + \varepsilon_y^0 y + yzk_y$$

由曲率定義

$$\begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix}$$

在第一次積分之後，得到角旋轉場

$$\phi_y(x, y) = -\frac{\partial w}{\partial x} = xk_x + \frac{y}{2} k_{xy}$$

$$\phi_x(x, y) = \frac{\partial w}{\partial y} = -yk_y - \frac{x}{2} k_{xy}$$

經進一步積分，得到垂直位移場

$$w(x, y) = -\frac{x^2}{2} k_x - \frac{xy}{2} k_{xy} - \frac{y^2}{2} k_y$$

就節點在邊界上的位置及其固定的應變向量而論，每個節點的位移量為

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ u_x \\ u_y \\ u_z \\ \phi_x \\ \phi_y \\ \vdots \end{pmatrix}_j = \begin{bmatrix} \vdots \\ [A_e]_j \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

經簡化可得

$$\{u\}^T = [A_e] \cdot \{k\}$$

上式中與向量 (x^j, y^j, z^j) 內某單一節點 j 的次矩陣為

$$[A_e]_j = \begin{bmatrix} x^j & 0 & \frac{y^j}{2} & x^j z^j & 0 & \frac{y^j z^j}{2} \\ 0 & y^j & \frac{x^j}{2} & 0 & y^j z^j & \frac{x^j z^j}{2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{x^j x^j}{2} & -\frac{y^j y^j}{2} & -\frac{x^j y^j}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y^j & -\frac{x^j}{2} \\ 0 & 0 & 0 & x^j & 0 & \frac{y^j}{2} \end{bmatrix}$$

不連續模型之應變能的定義為

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \cdot \{u_e\}^T \cdot [\bar{K}] \cdot \{u_e\} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \{k\}^T \cdot [A_e]^T \cdot [\bar{K}] \cdot [A_e] \cdot \{k\} \end{aligned}$$

就薄殼受到彎曲作用而論，其產生的內部應變能為

$$E = \frac{1}{2} \cdot \{k\}^T \cdot [ABD] \cdot \{k\} \cdot \{area\}$$

則可以擷取薄板的整體剛性矩陣成為不連續的剛性矩陣 ABD

$$[ABD] = \frac{[A_c]^T \cdot [\bar{K}] \cdot [A_c]}{\{area\}}$$

在技術文獻中，等效元素近似古典層疊板理論 (Classical Laminated Plate Theory; CLPT)，即假定瓦楞芯紙是一種等效正交的薄板 (Equivalent orthotropic lamina)。不過，此種方法忽略了瓦楞紙板之等效薄板在彎曲與伸展上的材質差異，及瓦楞芯紙與裱面紙板的結合並非是全面性的膠合在一起。

在有限元素分析的商業軟體中，Biancolini 選用 MSC/Nastran 軟體為之；它可執行薄殼及複合材料等特性的分析 (李鈞鋒, 1997)。首先，等效複合矩陣 (Equivalent composite matrix) 對材料厚度作積分計算 (此過程為前處理)，接著將數據輸入可處理不同材質的”殼元素 (Shell element) 選項”以求得其彎曲 (Flexure)、伸展 (Extension)、彎曲-伸展聯合及橫向剪力 (Transverse shear) 等特性。在採用的方法中，

$$ABD_n = \begin{pmatrix} 1.024 \times 10^6 & 1.747 \times 10^5 & 0 & 1792.71 & 305.704 & 0 \\ 1.747 \times 10^5 & 5.206 \times 10^5 & 0 & 305.704 & 909.796 & 0 \\ 0 & 0 & 2.496 \times 10^5 & 0 & 0 & 436.402 \\ 1792.71 & 305.704 & 0 & 3.145 & 0.536 & 0 \\ 305.704 & 909.796 & 0 & 0.536 & 1.597 & 0 \\ 0 & 0 & 436.402 & 0 & 0 & 0.766 \end{pmatrix}$$

表 9 右側為理論與數值分析結果的比較，最大變異約為 0.4%。

第二項測試是組合之夾芯結構，它是由齒型瓦楞芯紙夾在兩層裱面紙板之間所組成。依據 Buannic 等人 (2003) 所提出的參考方法進行 T2 平板的研究；經由測試得到其最大偏差值小於 2.5%，見表 9 左側。

(三) 有限元素分析與試驗結果的比較

目前利用有限元素分析的途徑，可概分為

均質階段取代了前處理階段，並將得到之最終矩陣直接輸入”殼”的特性項目中。

Nastran 軟體先計算求得封閉形式解 (Closed form solution) 以驗證有限元素模型的可行性，接著再利用此模型完成不同紙板的參數分析。為了正確地重現整體剛性，因此需要每一層材料的係數 (包括紙張縱向楊氏係數 (E_L)，紙張橫向楊氏係數 (E_T)，紙張波松比 (ν_{LT})，紙張剪力楊氏係數 (G) 和每一層的厚度 (t)、瓦楞的高度 (h_c) 與瓦楞的投影長度 (p)、及實際的瓦楞外形 (曲線長度 l_c) 等參數。起楞率 (ψ) 是一種常用於瓦楞結構的幾何參數，為瓦楞實際長度與投影長度的比值 (l_c / p)。

2. 均質化的驗證

驗證的方法是將預測結果直接與理論值或實驗測值作比對，以檢驗數值方法的收斂性。Biancolini (2005) 是以兩個簡單的實例進行驗證：首先以簡化平面的平移 (Offset) 建立單一正交薄板的模型；第二個是參考 Buannic 等人 (2003) 的夾芯構造研究。

就單一薄板而論，擷取正方形裱面紙板 KL5 (材料的詳細資料參見表 13) 的 ABD 矩陣如下，數值小於 10^{-10} 者以 0 表示。

兩類；一者使用者自行撰寫分析程式；其優點為可自行掌控關鍵技術，減少元素誤用而發生錯誤分析的機會，並且不用購買昂貴的商業套裝軟體；但須有高深的學識為基礎。學者 Urbanik 即應用有限元素法預測瓦楞紙板的側向抗壓強度。另一者則是使用商業套裝軟體，如 ANSYS、NASTRAN、...等。

一般以商業套裝軟體進行有限元素分析的流程，可概分為三個階段 (吳佳璋、黃俊銘，

表 9. 驗證結果 (Biancolini, 2005)

Table 9. Validation results.

		Corrugated structure			Isolated lamina		
		Buannic	Model	Diff. %	CLPT	Model	Diff. %
A ₁₁	Pa m	1.11E+09	1.11E+09	0.54	1.02E+06	1.02E+06	0.10
A ₂₂	Pa m	1.36E+09	1.38E+09	1.47	5.21E+05	5.21E+05	-0.12
A ₁₂	Pa m	3.32E+08	3.41E+08	2.47	1.75E+05	1.75E+05	-0.23
A ₃₃	Pa m	4.12E+08	4.11E+08	-0.27	2.49E+05	2.50E+05	0.08
D ₁₁	Pa m ³	9.20E+05	9.20E+05	0.08	3.141	3.145	0.13
D ₂₂	Pa m ³	9.82E+05	9.93E+05	1.08	1.6	1.597	-0.19
D ₁₂	Pa m ³	2.76E+05	2.77E+05	0.47	0.538	0.536	-0.37
D ₃₃	Pa m ³	3.22E+05	3.27E+05	1.58	0.766	0.766	0.00
B ₁₁	Pa m ²				1790.924	1792.71	0.10
B ₂₂	Pa m ²				912.154	909.796	-0.26
B ₁₂	Pa m ²				306.484	305.704	-0.25
B ₃₃	Pa m ²				436.516	436.402	-0.03

2006；康淵、陳信吉，2006)：第一為前處理，此階段之工作項目為選用適當的元素、定義元素特性及材料性質、建立分析標之實體模型及產生有限元素模型等。第二階段為分析或求解，此階段之工作項目為確定分析方式及其解法選項、設定拘束邊界條件、設定外力或能量源的邊界條件、設定輸入輸出控制及求解。最後為後處理，係將分析所得的數據除保有原來之文字形式外，並轉為易於解讀的圖形模式，以作為判斷分析之用。

實際操作上，Aboura等學者採用配備AMD Duron 850 MHz處理器的電腦及Reflex-v有限元素程式，使用基本的三節點三角形板殼元素建構瓦楞紙板三點抗彎強度的試樣模型。瓦楞

紙板的外形參數如表 10 所示。三節點三角形板殼元素以克希荷夫假說(Kirchhoff hypotheses)為依據，結合等應變三角形(Constant strain triangle；CST)平面應力及不連續克希荷夫(Discrete Kirchhoff Theory；DKT)彎曲平板元素。利用高斯積分法(Gauss quadrature rule)將面積座標整合出剛性矩陣。為了求得各個元素位於局部座標的元素剛性矩陣，乃將元素上每一個節點的大區域座標轉換為局部座標以簡化計算；然後將計算得到之局部座標的剛性矩陣轉換回大區域座標。就計算簡化、位移與應力計算效率及結果可靠度等整體評估而言，DKT板殼元素應屬最佳選項。

表 10. 瓦楞紙板的外形參數，A 楞 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Table 10. Geometric parameters of corrugated board, A-flute.

厚度 Thickness (mm)	楞形投影長度 Flute step (mm)	裱面紙板厚度 Liner thickness (mm)	1 公尺之瓦楞數量 Nbre of flute by meter
4.01	8	0.16	125 (A 楞)

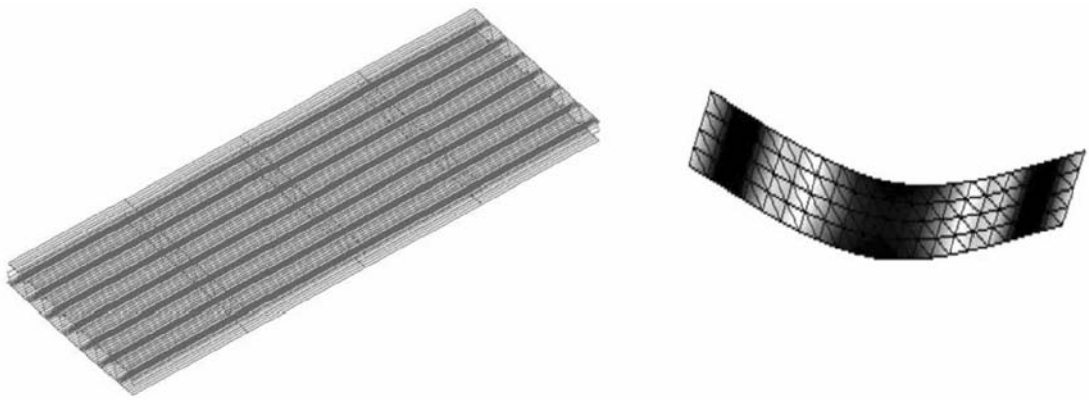


圖 6. 三維 (左) 及二維 (右) 之瓦楞紙板有限元素模型 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Fig. 6. 3D (left) and 2D (right) finite element model of corrugated board.

Aboura等學者尚進行詳細模型——利用3D殼建構法(3D shell approach)，與簡化模型——利用2D板建構法(2D plate approach)的比較。前者是以薄殼元素選項中的DKT平板元素及CST膜片元素建構瓦楞紙板的裱面紙板與瓦楞芯紙；裱面紙板與瓦楞芯紙的膠合則假設為良好的結合，即模型中瓦楞芯紙與裱面紙板之相接位置為共用相同的節點。利用3D殼建構法建立模型須使用較多的元素數量及自由度；例如橫向的試樣模型是由900個元素，1070個點構成。2D板建構法則是將瓦楞紙板視為均質的合板，分別以40、160、及360個DKT平板元素建構模型，藉以探討網格大小對FEA結果的影響。圖6為3D殼建構法與2D板建構法之有限元素模型。

Biancolini及Brutti兩位學者則是使用MSC公司Nastran 70.5版及FEMAP 7.0前處理器進行瓦楞紙板及紙箱的強度分析。其依據方向性材料法則，使用二維(2D)4節點之殼元素，依照KLSKL 595C瓦楞紙板實際橫斷面的圖像，模擬裱面紙板及瓦楞芯紙以進行完整詳細的等效元素模型分析。然後再依此元素模型產生尺寸為100 mm × 25 mm之等效瓦楞紙板模型(圖7)，進行側向抗壓強度試驗之模擬。該模型是由4225個CQUAD4殼元素，4251個

點組成。

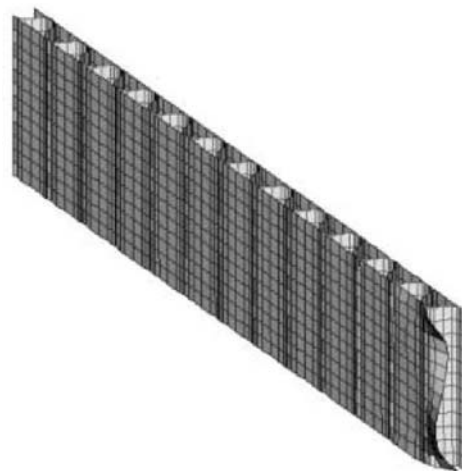


圖 7. 模擬ECT試驗之有限元素模型 (Biancolini and Brutti, 2003)

Fig. 7. Finite element model for ECT simulation.

為了計算模型的等效剛性矩陣，Biancolini及Brutti將模擬側向抗壓強度之結果，以1126個CQUAD4殼元素，1167個點構成32 mm × 25 mm之KLSKL 595C瓦楞紙板模型，進行平面剪應力、拉伸應力及平面外彎曲與扭轉的分析。

KLSKL 595C 瓦楞紙板為單層瓦楞紙板，
材質為 KL5 裱面紙板及 S9 瓦楞芯紙，瓦楞芯

紙製成 C 楞規格。KLSKL 595C 瓦楞紙板的外
形參數如表 11 所示。

表 11. 瓦楞紙板的外形參數，C 楞 (Modified from Biancolini, 2005)

Table 11. Geometric parameters of corrugated board, C-flute.

厚度 Thickness (mm)	楞形投影長度 Flute step (mm)	裱面紙板厚度 Liner thickness (mm)	1 公尺之瓦楞數量 Nbre of flute by meter
3.8	8	0.29	125 (C 楞)

表 12 為 Aboura 等學者的試驗結果與分析
值的比較。除拉伸彈性係數 (E_{MD}) 及紙機方向
波松比 (ν_{xy})，其他項目的分析值與試驗結果的
誤差值均在 5% 以下。造成拉伸彈性係數 (E_{MD})
及紙機方向波松比 (ν_{xy}) 誤差較大的原因，乃係
模型的外形為一靈敏之參數；稍有差異便對分
析結果造成很大的影響。影響模型外形參數的
因子包括瓦楞的投影長度、裱面紙板的厚度及
瓦楞紙板的厚度等。以裱面紙板的厚度為例，

當量測誤差為 10%，亦即僅相當於 0.016 mm
時，亦對彈性係數及剪彈性係數造成相同程度
的影響。

Biancolini 及 Brutti 取尚未加工的 KLSKL
595C 瓦楞紙板進行側向抗壓強度試驗，其有
限元素分析值與試驗值分別為 7.85 kN/m 及
7.74 kN/m (試驗值誤差 5.17%)，相對誤差為
1.42%；分析結果相當接近試驗數據。

表 12. 試驗結果與分析值之比較 (Modified from Aboura *et al.*, 2004)

Table 12. Comparison between analytical and experimental results.

	Analytical results	Experimental results	(Anal. -Exp.)/Exp. (%)
Tensile E_{MD} (MPa)	954.34	863.05	10.57
Tensile E_{CD} (MPa)	552.02	554.97	-0.53
Tensile ν_{xy}	0.314	0.271	15.87
Shear G_{xy} (MPa)	274.58	267.834*	2.51
Bending rigidity MD- D_{11} (MPa)	4347.60	4537.60	-4.19
Bending rigidity MD- D_{22} (MPa)	3104.00	3254.84	-4.63

* 由 Baum's 關係式 $G_{xy}^B = 0.387\sqrt{E_x E_y}$ 計算而得

表 13. 瓦楞紙板用紙之參數 (Biancolini, 2005)

Table 13. Corrugated board paper parameters.

Name	E_L (MPa)	E_T (MPa)	G_{LT} (MPa)	ν_{LT}	ρ (g/m ²)	t (mm)
S-6	3226	1610	825	0.34	150	0.25
S-9	2614	1532	724	0.32	175	0.30
KL-3	3940	1656	925	0.37	150	0.20
KL-5	3326	1694	859	0.34	200	0.29
KL-6	3292	1853	894	0.32	230	0.32
T-5	2500	1256	641	0.34	185	0.29

Biancolini 進一步研究不同材質組合、瓦楞外形 (起楞率) 及厚度對瓦楞紙板剛性的影響。實驗以 KLSKL595C 瓦楞紙板為基準材料；依據義大利瓦楞紙板製造同業公會 (Gruppo Italiano Fabbricanti Cartone Ondulato, GIFCO) 規範, KLSKL595C 係單層瓦楞紙板, 材質為 KL5 裱面紙板及 S9 瓦楞芯紙, 瓦楞芯紙製成 C 楞規格。試驗用紙板之力學性質, 如表 13 所

示。

Biancolini 選用厚度 3.8 mm 瓦楞紙板作為對照組材料, 楞形投影長度 8 mm。瓦楞紙板斷面實際起楞率為 1.435, 並記錄瓦楞的波形。

圖 8 為瓦楞的原物外形 (a)、正弦曲線外形 (b) 及鋸齒外形 (c) 等有限元素模型；瓦楞的高度及楞形的投影長度均相同。

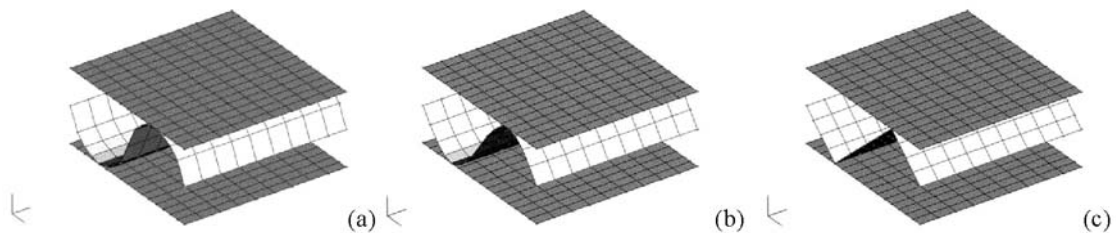


圖 8. 瓦楞紙板之有限元素模型 (a) 實物剖面；(b) 正弦函數剖面；(c) 鋸齒剖面 (Biancolini, 2005)
Fig. 8. FE model of corrugated board. (a) actual profile; (b) sine profile; (c) sawtooth profile.

此外, 以不同厚度之瓦楞紙板為材料, 如 3.5 mm 及 4.1 mm, 但均保持固定的楞形投影長度及外形尺寸。並進行瓦楞芯紙及裱面紙板之材料差異分析, 即瓦楞紙板是用最差的瓦楞芯紙 (KLSKL565C), 或最差的裱面紙板 (TST595C), 或前述兩者之組合 (TST565C) 及

使用較佳的裱面紙板 (KLSKL696C) 等製成。結果如表 14 所示。以 KLSKL595 對照組為基準, TST565 之彎曲剛性下降最多, 平均值為 -27.77%；而厚度 4.1 mm 之 KLSKL595 性能最佳, 增加 18.04%；彎曲剛性之絕對值分別為 3.731 Pa m³ 及 6.096 Pa m³。

表 14. 參數之分析結果 (Biancolini, 2005)

Table 14. Parametric analysis results.

Parameter	Unit									
Thickness	mm	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.5	4.1
Shape		Base	Saw tooth	Sine	Base	Base	Base	Base	Base	Base
Composition		KLSKL595	KLSKL596	KLSKL597	KLSKL565	TST565	TST595	KLSKL696	KLSKL595	KLSKL595
A ₁₁	Pa m	2,124,000	2,158,000	2,130,000	2,119,000	1,608,000	1,613,000	2,314,000	2,131,000	2,118,000
A ₂₂	Pa m	1,696,000	1,660,000	1,676,000	1,607,000	1,344,000	1,433,000	1,920,000	1,671,000	1,722,000
A ₁₂	Pa m	368,300	379,900	371,700	365,300	280,800	283,600	426,100	369,600	367,300
A ₃₃	Pa m	671,400	677,600	674,000	650,100	523,100	544,300	743,600	677,300	665,900
D ₁₁	Pa m ³	6.438	6.37	6.408	6.069	4.593	4.874	7.266	5.393	7.577
D ₂₂	Pa m ³	4.143	3.824	4.025	3.793	3.03	3.335	4.985	3.449	4.905
D ₁₂	Pa m ³	1.103	1.092	1.099	1.037	0.793	0.845	1.324	0.924	1.298
D ₃₃	Pa m ³	1.779	1.655	1.73	1.648	1.28	1.388	2.074	1.49	2.093
$\sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}$	Pa m ³	5.165	4.935	5.079	4.798	3.731	4.032	6.018	4.313	6.096
$\Delta \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}$	%	0.00	-4.44	-1.66	-7.10	-27.77	-21.93	16.53	-16.49	18.04

表 14 中倒數第二橫列為縱向與橫向彎曲剛性的幾何平均值。此參數與單一支承平板的挫曲載重成比例；此結果與 1963 年 McKee 等人之研究結果相同，可作為紙箱壓縮強度的指標。同表中最後橫列則列出各試驗組材料之縱橫向彎曲剛性幾何平均值與對照組者 (厚度 3.8 mm 之 KLSKL595) 之相對變異參數。

表 14 可得剛性參數有些微差異之結果。此差異主要是因使用不同的裱面紙板。雖然原形的瓦楞似乎有最佳的彎曲剛性，惟其他瓦楞外形之彎曲剛性的下降 (鋸齒外形為 4.44%，正弦函數外形為 1.66%) 亦與其起楞率的相對下降有關。表示外形性能的下降，一部份可反應在降低成本。但此並未考慮裱面紙板與瓦楞芯紙之貼合強度的影響。

改變瓦楞芯紙的種類會加大彎曲剛性的差異。例如將 S9 改成較差的 S6 時會造成強度下降約 7% (KLSKL595 與 KLSKL565 間減少 7.10%，TST595 與 TST565 間減少 7.47%)。

在使用相同瓦楞芯紙的條件下，瓦楞紙板剛性會隨裱面紙板種類而有很大的差異，下降最多者是 KLSKL595/TST595 (-21.93%)；增加者則是 KLSKL595/KLSKL696 (+16.53%)。

另裱面紙板之影響程度也會受到瓦楞紙板平均厚度的影響。瓦楞紙板厚度由 3.8 mm 增

加 0.3 mm (3.8 mm/4.1 mm, +18.04%) 時，與裱面紙板由 KL5 改成 KL6 的效果 (KL5/KL6, +16.53%) 大約相同。相較於厚度由 3.8 mm 下降到 3.5 mm (3.8 mm/3.5 mm, -16.49%) 與裱面紙板由 KL5 改成 T5 (KL5/T5, -21.93%) 者，亦有相同的趨勢。

(四) 元素類型及其尺寸對 FEA 的影響

表 15 探討 2D 模型之分割數量與有限元素分析結果。理論上，在相同的模型尺寸條件下，建構模型的元素數量愈多，分析值 (解析解) 會愈接近實驗值 (正解)；但元素數量愈多亦意味著計算將愈複雜繁瑣，需耗費愈多的計算時間。表 15 之模型以不同分割數量進行紙機方向及橫向的變形分析，結果無明顯差異；因此，以 160 個 2D 板元素建構抗彎強度試驗之試樣模型，已可獲得很好之分析結果。表 16 將使用 2D 板元素及 3D 殼元素之分析結果與實驗值進行比較。就橫向的結果而論，3D 殼元素的誤差值為 7.9%，2D 板元素的誤差值為 11.9%。3D 殼元素構成的模型雖有較佳的計算結果，但其計算時間則約 2D 板元素 10 倍。因此，在設計初期，可運用簡單的 2D 板元素建構模型以快速求得近似解答；視需求再採用 3D 殼元素以求得更準確的數值。

表 15. 模型分割數量與有限元素分析結果 (Aboura *et al.*, 2004)

Table 15. Various mesh number of model and FEA results.

N×M	2×10	4×20	6×30
D.o.f.	99	315	651
MD deflection (mm)	1.3479	1.3563	1.3562
CD deflection (mm)	2.4650	2.4788	2.4787

表 16. 有限元素與試驗結果之比較 (Aboura *et al.*, 2004)

Table 16. Comparison between FE and experimental results.

	Plate FE		Shell FE CD	Exp. CD	Exp. MD
	MD	CD			
Bending rigidity (N/mm)	3.68	2.017	2.47	2.29±0.09	3.39±0.36
CPU time (s)	0.3	0.3	3	—	—

五、結語

- (一) 欲利用有限元素分析預測瓦楞紙板的力學行為，應進行基礎試驗以擷取厚度、縱向彈性係數 (E_L 或 E_x)、橫向彈性係數 (E_T 或 E_y)、波松比 (ν_{LT}) 及剪彈性係數 (G_{LT} 或 G_{xy}) 等參數。
- (二) 利用有限元素分析的途徑，可概分為兩類，即使用者自行撰寫分析程式及使用商業套裝軟體。
- (三) 以商業套裝軟體進行有限元素分析的流程，可概分為三個階段 (前處理、分析或求解及後處理)。
- (四) 影響有限元素分析的因子包括元素的種類和尺寸及實物之外形參數等。
- (五) 瓦楞紙板之外形參數包括瓦楞的投影長度、裱面紙板的厚度及瓦楞紙板的厚度等。
- (六) 紙箱的性能與瓦楞紙板的剛性有關。
- (七) 瓦楞之外形及瓦楞之材質對瓦楞紙板剛性參數的影響較小，主要是由裱面紙板材質的強度及瓦楞紙板的厚度所構成。
- (八) 在設計初期，可運用簡單的 2D 板元素建構模型以快速求得近似的解答；視需求再採用殼元素以求得更準確的數值。

六、參考文獻

- 台灣區造紙工業同業公會 (2006) 台灣造紙工業統計。台灣區造紙工業同業公會，台北市。第 16 頁。
- 李銓鋒 (1997) 電腦輔助工程應用—有限元素分析—。高立圖書有限公司。第 1-3 頁。
- 周守正 (1982) 工業包裝技術資料第 2 輯—瓦楞紙箱。中華民國對外貿易發展協會，台北市。第 2 頁、第 31-33 頁。
- 吳佳璋、黃俊銘 (2006) MSC.FEA (MSC. Patran + MSC. Nastran) 有限元素結構分析：基礎與實例演練。全華科技圖書有限公司。

1-2 至 1-9 頁。

- 陳昭昌 編譯 (1989) 有限元素法—工程上之應用。復文書局。第 2-3 頁。
- 康淵、陳信吉 (2006) ANSYS 入門，修訂三版。全華科技圖書有限公司。1-7 至 1-15 頁。
- 經濟部標準檢驗局 (2005) 中華民國國家標準 CNS1454 瓦楞紙板 (外裝紙箱用)。經濟部標準檢驗局，台北市。
- 經濟部標準檢驗局 (2005) 中華民國國家標準 CNS1455 裱面紙板。經濟部標準檢驗局，台北市。
- 經濟部標準檢驗局 (2005) 中華民國國家標準 CNS2955 瓦楞芯紙。經濟部標準檢驗局，台北市。
- Aboura, Z., N. Talbi, S. Allaoui, and M.L. Benzeggagh (2004) Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling. *Compos. Struct.* 63 : 53-62.
- Biancolini, M. E. and C. Brutti (2003) Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages. *Packag. Technol. Sci.* 16 : 47-60.
- Biancolini, M. E. (2005) Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board. *Compos. Struct.* 69 : 322-328.
- El Damatty AA, Mikhail A, Awad AA. (2000) Finite element modeling and analysis of a cardboard shelter. *Thin-Walled Struct.* 38 : 146, 148.
- Nyman, U. and P. J. Gustafsson (2000) Material and structural failure criterion of corrugated board facings. *Compos. Struct.* 50 : 79-83.
- Urbanik., T. J. (1996) Machine direction strength theory of corrugated fiberboard. *J. Compos. Technol. & Res.* 18(2) : 80-88.

林業研究季刊徵稿簡約

- 一、本刊為學術性刊物，每年發行一卷四期，提供林業相關人士發表研究成果、書評、論述及林業資訊。
- 二、文稿書寫注意事項：
 - (一) 文稿須用 Microsoft Windows Word 軟體編輯，文字由左至右，中文採細明體、英文採 Times New Romans 12 號字，雙行高，圖形檔亦請使用與 Windows 相容軟體編輯。
 - (二) 投稿時，請檢送文稿三份，審查接受後，另附磁碟片乙份。
 - (三) 書寫順序：
 - 中文稿者：中文題目、著者、摘要、關鍵詞；英文題目、著者、摘要、關鍵詞；本文。
 - 英文稿者：英文題目、著者、摘要、關鍵詞；中文題目、著者、摘要、關鍵詞；本文。
 - 著者介紹：於文稿第一頁下方以”註腳”註明著者服務單位名稱、職稱及住址，並標示通訊作者，且中英文併列。
 - (四) 本文格式按一般論文寫作方式，稿件以不超過二十頁為原則。
 - (五) 本文敘述之順序為：
 - 中文用：一、；(一)；1.；(1)
 - 英文用：I；(I)；a；(a)
 - (六) 單位請採 SI 制，如 m；m²；m³；ha；g；kg；…等。
 - (七) 插圖需附送圖形檔之磁片；若附送照片，需要原始攝影之光面黑白相片。如須印製彩色頁時，由編審委員決定。
 - (八) 圖片之標題在下方，表格之標題在上方，標題須中英文併列。本文中圖表順序中文用 圖 1.；圖 2.；…；表 1.、表 2.、…。英文以 Fig. 1.、Fig. 2.、…；Table 1.、Table 2.、…等表示。
 - (九) 引用文獻，請在引用處後，以括弧標示著者姓名與發表年份。例：(劉業經，1982；Bonnor, 1972；Winner *et al.*, 1997)。
 - (十) 參考文獻排列順序：先列中文，次列日文，後列西文；書寫次序：著者、年份、題目、刊物名稱、卷、期及頁次。
 - 例：劉正字、劉昭吟 1994 聚醋酸乙烯乳膠性質改良之研究。國立中興大學實驗林研究報告 16(1)：29-40。
 - Bonnor, G. M. 1972 A test of 3-P sampling in forest Inventories. *Forest Science* 18(3)：198-204.
 - (十一) 文稿排版後，由著者自行校對。
- 三、投稿本刊無稿酬，經刊印者，致贈送抽印本 50 本。
- 四、來稿請寄國立中興大學農業暨自然資源學院實驗林管理處研究發展組 (臺中市 40227 國光路 250 號，電話：04-22840397 轉 118，FAX：04-22861455)。