

應用機械應力分等技術評估 臺灣杉製材品等級之初探

陳盈全^{1*}、林志憲²、塗三賢²、林振榮¹

近年來，全球氣候變遷日趨嚴重，世界各國對於氣候變遷議題的關注度越來越高，為了減緩氣候變遷所帶來的災害衝擊，全球已有許多國家將增加森林碳匯視為重要的一項策略，藉由樹木吸收二氧化碳經光合作用轉化為碳水化合物，再經木質化過程形成木材。因此，若將木材製成木製產品，就能將碳持續固定在其中，減緩二氧化碳回到大氣中的速度，對環境保護及減緩全球暖化均有正面效益。但木材屬天然的有機材料，其物理機械性質受樹種、生育地環境狀況及經營撫育等因子影響，即使同一樹種在同一生育地，或者同一棵樹不同部位之木材，其機械性質也會有差異。所以在利用木材作為結構用材時，需要透過製材品的分等來降低木材間各項性質的變異性和不確定性，從而確保木材的各項機械工程性能。因此，如何準確判斷木材製材品的強度性質，並有效應用在結構設計上是相當重要的課題。

¹ 林業試驗所林產利用組

² 林業試驗所六龜研究中心

* 通訊作者 (ycchen1209@tfri.gov.tw)

目前對於製材品的分等主要採目視分等和機械分等為主。目視分等主要針對木材外觀的生理特徵和材面缺點進行目視評估，比如節、弧邊、環裂、纖維傾斜比、腐朽、彎曲、翹曲等缺點。由於是外觀上的缺點評估，倚賴於檢測人員的經驗和目視觀察，易受到主觀因素影響，且對於木材內部的缺陷如裂縫、節子等難以準確識別，導致木材品質評估不夠準確，影響木材在結構應用中的可靠性和安全性。而機械分等則是利用量測抗彎彈性模數 (modulus of elasticity, MOE) 等物理性質來作為木材分等的依據。由於MOE與木材強度之間具有高度相關性，因此可以用來推估木材的強度性質，對結構安全設計有很大的幫助。另外透過機械分等的各等級製材品的MOE之間變異性也較目視分等等級為低，可更加確保結構設計上之安全性。

機械應力分等 (Machine Stress Rated, MSR)

傳統的機械檢測分等為通過對木材樣本進行破壞性測試來測量其彈性模數與強

度，再根據測試結果進行分等。這種方法雖然精確，但操作繁瑣且耗費時間，不適合大規模生產，隨著科技的發展，機械應力分等 (Machine Stress Rated, MSR) 已成為一種更精確和高效的方法。機械應力分等技術是一種基於非破壞性測試的木材分等方法，其原理是利用機械設備對木材施加應力並測量其響應，以此來評估木材的機械性能。MSR技術架構 (圖1) 主要包括以下幾個步驟，首先製材品於輸送過程中利用兩組載重元 (Load cell) 檢測系統對材面正反兩側施加縱向應力，以固定變位量方式測定載重，並透過光電感測系統啟動及終止載重元的資料擷取，再根據應力和變形量計算木材的彈性模數 (MOE)，最後根據計算得到的彈性模數再與預設標準比對來進行木材分等。

相對於傳統的木材分等方法，MSR技術具有以下優勢，MSR技術可以精確測量木材的彈性模數，分等結果更加準確；MSR技術不會破壞木材樣本，適合大規模生產和連續性檢測；MSR系統可以實現自動化操作，提高生產效率和檢測速度；MSR技術可以減少

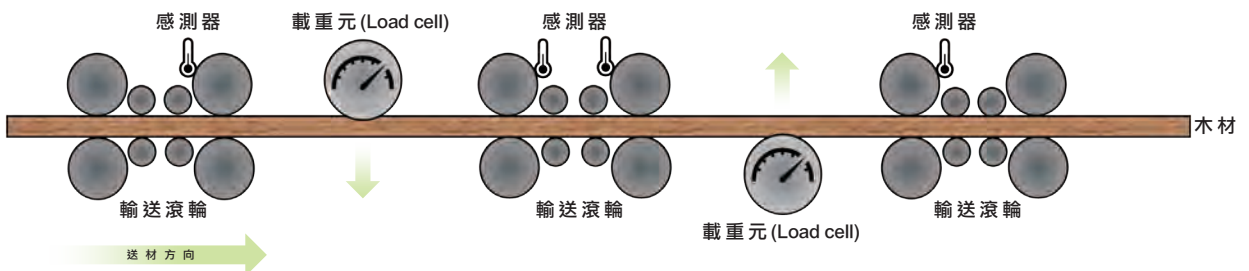


圖1 木材機械應力分等技術架構運作示意圖。(陳盈全 繪)

人工分等的主觀性和誤差，提高木材製品機械性質的可靠性。MSR技術已經在全球多個地區廣泛應用，特別是在木材工業發達的國家，例如北美地區是全球最大的木材生產和消費市場之一，MSR技術在北美地區的木材加工廠廣泛應用於生產高品質的樑、柱和地板等結構用木材；歐洲地區對木材品質要求嚴格，因此MSR技術被廣泛應用於建築木材和家具製造之中，特別是在北歐的國家中，MSR技術已成為木材分等的標準方法；隨著亞洲地區木材工業的快速發展，MSR技術也在逐漸普及，中國、日本和韓國等國家已開始採用MSR技術進行木材分等，以提高木材產品品質和競爭力。

臺灣杉製材品之MSR分等評估

為響應提升國產材自給率目標，本所近年來針對所轄之六龜研究中心營林區種植的臺灣杉林分進行疏伐撫育作業，以利林分的健全發展與生產材積及形質更優良之木材。為瞭解利用MSR分等技術進行製材品品質分等之可行性，並比較與傳統機械分等結果之相關性，本研究使用六龜林區第12林班伐採的臺灣杉原木，先依據CNS 442標準對原木進行品等區分，再以框鋸切法製材，製材品再以CNS 14630標準進行等級分等，最終取厚寬尺寸為2" by 4"之製材品材料進行MSR分等，使用連續式機械等級區分機 (SSR-7001, Advanced technology associates Co., Ltd., Japan)



圖2 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處木材利用實習工廠連續式機械等級區分機。(林志憲 攝)

進行量測，本設備為國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處配合農業部林業及自然保育署計畫購置，為國內第一台連續式機械應力量測設備 (圖2、3)，具有量測密集且快速分析之效能。機台設定參數為跨距1200 mm，送料速度為80 m/min，取樣率為0.5 mm/data，可獲得每支製材品之抗彎彈性模數

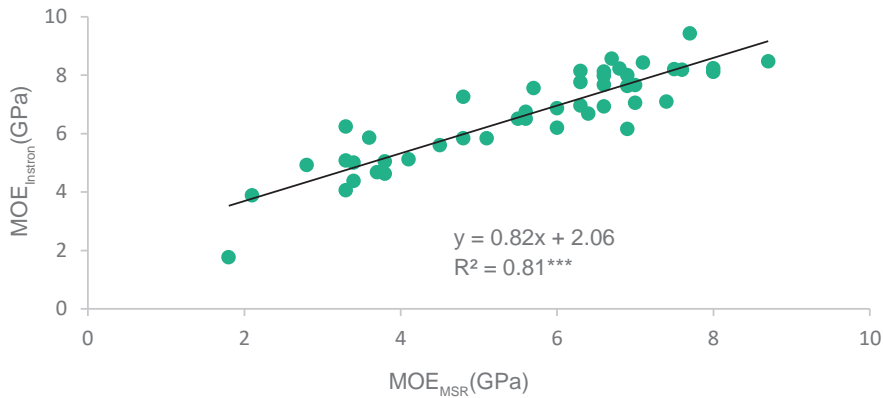


圖3 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處木材利用實習工廠連續式機械等級區分機參數設定及應力感測控制單元。(林志憲 攝)

(MOE) 之平均值、最大值和最小值 (表1) , 再依據CNS 16114標準 (表2) 進行強度分等。

另將相同材料利用本所所屬之萬能強度試驗機設備 (4400R, 150 kN, Instron Corp., Canton, MA, USA) 進行中央集中載重之比例限界內抗彎彈性模數量測, 其結果如 (表1) 所示。由結果可看出, 以中央集中載重方式

測量之抗彎彈性模數高於MSR量測的平均值而小於MSR最大值, 顯示中央載重試驗可能較侷限於製材品部分區域之性質且受潛變影響程度較大; 而利用MSR動態量測則較能反映材料整體受缺點之影響, 雖MSR彈性模數平均值較低, 但藉由較全面均衡的評估數據來進行結構強度設計時, 更可提升木材結構



$MOE_{Instron}$ ：代表利用強度試驗機進行中央集中載重所量測之彈性模數

MOE_{MSR} ：代表利用MSR進行彈性模數量測之平均值

***：代表迴歸分析p value < 0.001

圖4 臺灣杉製材品之MSR與中央集中載重彈性模數之相關性迴歸分析。(陳盈全 製)

表1 臺灣杉製材品之基本性質及抗彎彈性模數量測結果

CNS強度等級	M30A	M60A	Total
樣本數	25	29	54
含水率(%)	14.92 (3.74)*	14.43 (2.22)	14.66 (3.00)
密度 (kg/m ³)	440 (58)	423 (46)	431 (52)
MSR $MOE_{avg.}$ (GPa)	4.14 (1.19)	6.87 (0.67)	5.60 (1.66)
MSR $MOE_{max.}$ (GPa)	5.93 (1.47)	8.31 (0.85)	7.21 (1.67)
MSR $MOE_{min.}$ (GPa)	2.91 (1.61)	5.72 (0.76)	4.45 (1.86)
$MOE_{Instron}$ (GPa)	5.63 (1.56)	7.65 (0.79)	6.72 (1.57)

*括號內數值為標準偏差

$MSR MOE_{avg.}$ ：各樣本MSR平均彈性模數量測值之平均值、 $MSR MOE_{max.}$ ：各樣本MSR最大彈性模數量測值之平均值、 $MSR MOE_{min.}$ ：各樣本MSR最小彈性模數量測值之平均值、 $MOE_{Instron}$ ：各樣本利用強度試驗機測得中央集中載重彈性模數之平均值

樣本尺寸：2" (3.85 cm厚度) × 4" (8.66 cm寬度) × 178 cm (長度)

(陳盈全 製)

表2 CNS 16114標準之MSR區分A類構成強度等級

等級區分機之等級	抗彎彈性模數(GPa)		抗彎強度(MPa)		抗拉強度(MPa)	
	平均值	下限值	平均值	下限值	平均值	下限值
M120A	12.0	10.0	42.0	31.5	25.0	19.0
M90A	9.0	7.5	34.5	26.0	20.5	15.5
M60A	6.6	5.0	27.0	20.0	16.0	12.0
M30A	3.0	2.5	19.5	14.5	11.5	8.5

(陳盈全 製)

在環境中使用的安全性與耐久性。進一步將兩者量測結果進行相關性分析，可得到決定係數 $R^2=0.81$ (p value < 0.001)***的高度正相關性 (圖4)；而經過迴歸分析結果顯示兩者抗彎彈性模數之顯著值佳，顯示MSR分等技術可有效應用於木材強度的評估。

MSR技術的挑戰與未來發展

儘管MSR技術具有眾多優勢，但其推廣應用也面臨一些挑戰，首先是MSR設備價格較高，對於一些中小型企業來說，初期投資成本較大；再者操作MSR設備需要專業知識和技能，企業需要投入資源進行員工的培訓。另有關標準的制定，不同地區和國家對木材分等的標準存在差異，需要制定統一的MSR分等標準。未來，隨著科技的不斷進步，MSR技術有望得到更廣泛的應用，比如現今AI人工智慧技術蓬勃發展，可望引入人工智慧和機器學習的技術，實現MSR系統的智能化與自動化，提高分等效率和準確性。現階段MSR分等標準主要是依據量測的彈性模數，未來如能引入其他參數，如木材製品的密度、含水率等數據，來進行多參數綜合測量的分等技術，更可精準的獲得不同等級製材品來進行更準確的結構強度設計。另鑒於現階段MSR設備價格較高，未來可朝向生產成本較低的機械設備或開發可攜式MSR設備，方便現場檢測和小批量生產之應用。

結語

本研究藉由使用臺灣杉製材品探究MSR分等技術應用於木材製材品之可行性，結果顯示使用MSR技術可以得到更具代表性的抗彎彈性模數，與傳統機械分等技術的數值分析具顯著的良好相關性，且更為快速而有效。因此，機械應力分等 (MSR) 技術可為木材分等提供一種高效、精確和可靠的方法，與傳統的分等方法相比，MSR技術具有非破壞性、高精度和自動化等優勢，儘管其推廣應用面臨一些挑戰，但隨著技術的進步和應用範圍的擴大，MSR技術將在木材工業中發揮更重要的作用。未來政府、企業和學研機構更可加強合作，共同推動MSR技術的創新與國產材的應用，進一步提升整體木材產業的技術水平與市場競爭力。

本研究所使用之MSR分等機是由國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處提供使用及技術協助，本文方可以完成，特此表達最誠摯的謝意。⊗