

FFT 頻譜分析及摩擦係數應用於紙張平滑度 評估之可行性研究

蘇裕昌^{1,3)} 黃彥三²⁾ 陳欣欣²⁾

摘要

評估以觸針式表面粗糙度計測試法並以 FFT 頻譜測試紙張表面平滑性及以摩擦係數法做為評估紙張表面平滑度的方法的可行性。比較以此等方法與一般常用洩氣式 Bekk 平滑度測試法測試塗佈紙與非塗佈紙之表面平滑度，探討各測試法間相關性。

檢討粗糙度值與 Bekk 平滑度的相關性，顯示在低平滑度範圍粗糙度法之 Ra 值或 Rtm 值與 Bekk 平滑度有相當程度的相關性存在，中平滑度紙張則此二法之相關性較低，高平滑度範圍則此二法間無相關性存在。觸針式粗糙度與 Bekk 平滑度二者間之相關係數為 0.74，Bekk 平滑度測試法及粗糙度法可適用於低平滑度範圍之測定，高平滑度範圍紙張之測定則有賴 FFT 頻譜分析來判定。

以觸針式粗糙度計就高平滑度紙樣測定粗糙度值 Ra 及紙張表面粗糙程度之剖面曲線，並以濾波器去除紙面之起伏波形粗糙度剖面曲線，再利用 FFT 頻譜將剖面波形轉換成振幅頻度分佈，由凹凸深淺之頻度分佈及累積頻度曲線，藉以區分紙張平滑度之差異，此法可以避免因紙樣皺摺，捲曲而造成平滑度測試之差異。

Bekk 平滑度與紙張表面摩擦係數之四次迴歸曲線其相關係數為 0.86。若去除低平滑度範圍(Bekk 平滑度 60 sec/10 mL 以下)，則其相關係數為 0.90 以上。摩擦係數與粗糙度值對數之二次迴歸曲線其相關係數為 0.94，若以去除高粗糙度範圍(即低平滑度範圍 $Ra > 3 \mu m$; Bekk 平滑度約為 70 sec/10 mL)，則其相關係數可達更高，因此摩擦係數法適宜做為評估高平滑度紙張表面平滑度的方法。

關鍵詞：平滑度、粗糙度、FFT 頻譜分析、摩擦係數法。

蘇裕昌、黃彥三、陳欣欣 1997 FFT 頻譜分析及摩擦係數應用於紙張平滑度評估之可行性研究。台灣林業科學 12(3) : 291-297。

Feasibility Study on Evaluation of Paper Smoothness by Using FFT Spectrum Analysis and Friction Coefficient

Yu-chang Su,^{1,3)} Yan-san Huang²⁾ and Shin-shin Chen²⁾

【 Summary 】

This study aimed to establish novel methods for testing paper surface smoothness with roughness tester method followed by FFT spectrum analysis, and with a friction coefficient method. Comparisons were made with a conventional smoothness test method, the Bekk smoothness test, for 20 commercial coated and uncoated papers.

1) 台灣省林業試驗所木材纖維系，台北市南海路 53 號 Division of Wood Cellulose, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

2) 台灣省林業試驗所森林利用系，台北市南海路 53 號 Division of Forest Utilization, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

3) 通訊作者 Corresponding author

1996 年 12 月送審 1997 年 4 月通過 Received December 1996, Accepted April 1997.

Comparison of roughness values (Ra or Rtm) of these papers with those of Bekk smoothness suggests that, in the lower smoothness range (below 100 Bekk smoothness values), there was a fair degree of correlation between them. For semi-smooth papers (Bekk values of 200 to 500), the 2 methods had low correlations, whereas there appeared to be no distinct correlation for specimens in the high smoothness range (Bekk values of 500 and above). The coefficient of correlation (COC) between the 2 methods was 0.74. Based on the experimental results, the roughness method appears to be suitable for measuring specimens in the low smoothness range, whereas FFT spectrum analysis is more appropriate for measuring papers with high smoothness.

After surveying the surface profiles of the high smoothness specimens, the profile was filtered to remove the waviness of the paper surface roughness profile obtained. Transformation of this profile to the FFT spectrum was made. From the frequency distributions of the depths of the concaves and convexes and the accumulative frequency curve, smoothness of the paper surfaces was thus determined. This method avoids deviations arising from waves, folds, creep, or rolling of the paper surfaces.

Second-order polynomial regressions between the Bekk smoothness values and the surface friction coefficients of the specimens gave a COC 0.86. If the lowest smoothness range (Bekk values of 60 or less) was excluded, however, then the COC shot up to a much higher value. The second-order polynomial regression between the friction coefficients and the logarithm of roughness values gave a COC of 0.94. If again, the lowest smoothness or the highest roughness range (with Ra values $> 3 \mu\text{m}$ which are equivalent to Bekk values $< 70 \text{ sec}/10 \text{ mL}$) was excluded, then the COC increased to a higher value. Based on these results, we conclude that the friction coefficient method is fairly suitable for the measurement of specimens with smooth paper surfaces.

Key words: smoothness, roughness, FFT spectrum analysis, friction coefficient method.

Su, Y. C., Y. S. Huang, and S. S. Chen. 1997. Feasibility study on evaluation of paper smoothness by using FFT spectrum analysis and friction coefficient. *Taiwan J. For. Sci.* 12(3): 291-297.

一、緒言

紙張表面性質中之平滑度為評估高級印刷用紙品質之重要因素之一，一般是採用印刷油墨的轉移性、光學的方法及空氣通過洩氣式如 Bekk 測試法及 Bendtsen 法等(長谷川等, 1965)(桂徹, 1985)。Bekk 平滑度測試法(CNS P3017, TAPPI T479, JIS 8118)為此等方法中操作最簡單, 可迅速求得結果之測試法, 但以此法測定平滑度僅限於在某一個平滑度範圍內才能得到相當程度之精確度, 並無法測出如纖維間隙等微細構造所形成之細微凹凸、中等程度凹凸或紙張捲曲之大幅度紙面凹凸起伏, 因而影響紙張之評估結果, 而且以 Bekk 平滑度儀測試無法在抄紙機或塗佈機上直接操作, 無法在抄製紙張之同時立即反應製備紙張操作條件之缺點。為克服此等缺點, (江前敏晴等, 1990、1991)曾以觸針式粗糙度計對此平滑度測試法進行評估, 且認為與 Bekk 平滑度有若干相關關係, 但尚未有精確之結果。

本論文採用觸針式表面粗糙度測試儀、摩擦係數法、Bekk 平滑度測試法等三種方法測試市售之各種文化用紙之平滑度, 並對觸針式平滑度(粗糙度)測試值與 Bekk 平滑度進行測試結果比較, 並將粗糙度波形進行 FFT 頻譜分析以為判定粗糙度之方法。同時進行各種平滑度等級紙張之摩擦係數的測定, 比較各測試法之相關關係, 以為建立客觀評估紙張平滑度測定法的基礎。

二、材料與方法

(一)試驗材料

市售不同基重、模造紙、道林紙、牛皮紙(黃色、白色)、銅版紙、單面銅版紙等 20 種。每種紙樣各選五張試樣。

(二)試驗方法

1. 觸針式平滑度(粗糙度)測定

以觸針式表面粗糙度測試儀(Surfest 211 Surface roughness tester)測試各種紙樣, 正反面、兩方向(縱

向、橫向)之粗糙度 Ra及 Rtm。參照黃等(1990)測試木材表面粗糙度之方法採用 ISO, JIS 標準, 分割長度(cut off length)分別為的 0.8 mm 及 0.25 mm。測試條件觸針尖端半徑 5 μm 觸針移動、速度 0.25 mm/sec、觸針移動距離 20 mm 就各紙樣之表面測定粗糙度(Ra、Rtm)及紙張表面粗糙度之剖面曲線(surface profile), 再以濾波器去除去表面之波狀起伏(waviness)即為粗糙度剖面曲線圖(roughness profile), 由此可判定紙張之平滑度。

2. 利用 FFT 頻譜分析之解析法

利用濾波器除去紙張表面波狀起伏, 再將所得之粗糙度曲線利用FFT 將剖面波形轉換成傅立葉振幅頻度分佈圖(FFT spectrum), 並將波形中不同凹凸深度所出現之相對頻度繪出, 更進一步積分運算, 繪出成頻度累積曲線, 並比較不同平滑度紙張之凹凸深度及頻度累積曲線, 由此判定紙張之平滑度。

3. Bekk 平滑度

依據 CNS P3017 紙張 Bekk 平滑度測試法進行, 測試不同紙樣之平滑度, 如正反面、紙機方向、橫方向等平滑度。

4. 摩擦係數之測定

利用壓電式三方向動力計 (piezo electric type 3 components dynamometer; Kistler 9257 B型)如 Fig. 1 所示, 以玻璃為基準面, 將欲測定之紙樣置於光面玻璃上, 紙樣上放置直徑約 70 mm, 重 750 g 之圓形鐵塊, 以 0.25 mm/sec 之移動速度水平拉動紙樣, 測定其滑動拉力(T)即阻止紙張移動之摩擦力, 以下式計算紙面與玻璃間之動摩擦係數(μ_k)。

$$\mu_k = \frac{T}{N}$$

μ_k: 動摩擦係數

T: 摩擦力(滑動拉力(gf))

N: 垂直荷重(gf)

三、結果與討論

(一) Bekk 平滑度與觸針式平滑度測試法之比較

Fig. 2 為 Bekk 平滑度測試儀之主要測試構造部分, 在標準表面中央, 有一中空環形面積為 10 cm², 中央之空洞連結空氣槽, 進行平滑度測試時, 以一定之壓力導入一定量體積之空氣, 測試自標準面與紙樣間通過所需之秒數。此方法之優點為操作簡

單、測試表面為一個面, 而非一點、或一條線而能得到較高的精確度及重覆性, 並可迅速求得結果。但測定只適用在某一個平滑度範圍內, 如高平滑度紙張之測定時須花費相當的時間, 一個高平滑度紙樣之一個測點甚至需 1 小時才能測出, 一個紙樣一般測十個重覆則須時 10 小時, 現實上是不可能的。而且可能會因紙樣捲曲、皺摺或大幅凹凸起伏時影響紙張之評估結果, 無法精確測出紙面的平滑度。

以 Fig. 3 之觸針式表面粗糙度計, 以尖端半徑為 5 μm 之觸針在紙樣上移動其移動速度 0.25 mm/sec、移動距離 20 mm, 測定各紙樣之表面粗糙度值 Ra 及 Rtm。以此法測試時之優點為可克服因紙張捲曲、皺摺、大幅凹凸所造成之波浪起伏, 所形成之試驗誤差, 並可精確的測出紙面如纖維間隙等微細構造所形成的細微凹凸起伏。

(二) 粗糙度與 Bekk 平滑度的相關性

比較觸針式粗糙度計與傳統洩氣式之 Bekk 平滑度測試法測定結果顯示, 前者之測定與紙機方向平行(縱向)之結果較無相關性, 但測定方向與紙機方向垂直(橫向)則有較佳之相關性, 其原因可推論為紙張具異方性, 紙機橫向與縱向之性質有相當大之差異, 觸針式粗糙度計所測之值僅顯示線之性質, Bekk 法量取平滑度時為測試面之平均值, 橫向之方向性較縱向小, 因而有較佳的相關性。

Fig. 5 顯示直接讀取粗糙度值(分割長度 Cut off = 0.8 mm), 做為平滑度數值上的表示。在高粗糙度(低平滑度)範圍(Bekk 平滑度100 sec/10 mL 以下), 粗糙度法之 Ra 值或 Rtm 值均與 Bekk 平滑度值有相當程度的相關性。但對中平滑度紙張(Bekk 平滑度 200-500 sec/10 mL)則二測試法之測試結果相關性較低。高平滑度範圍(Bekk 平滑度 500 sec/10 mL 以上)則二法之結果毫無相關性存在。Fig. 6 顯示粗糙度

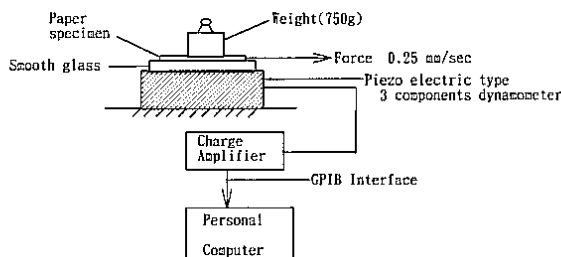


Fig. 1. Diagram for determination of friction coefficient.

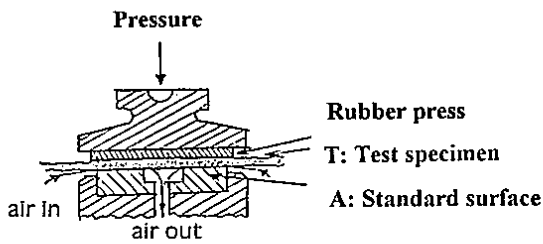


Fig. 2. Principle for Bekk smoothness testing.

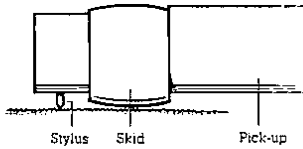


Fig. 3. Diagram illustrating roughness testing apparatus.

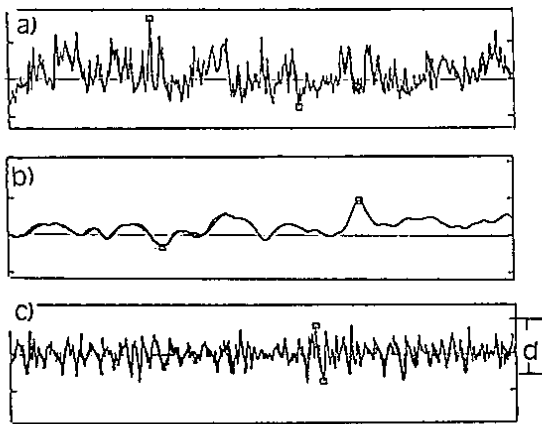


Fig. 4. Example of scanning profiles of paper surface.
Note: a) surface profile, b) waviness profile, c) roughness profile (=a-b), d) roughness.

(Ra)與 Bekk 平滑度的相關性,明顯顯示在中低平滑度範圍二法之測試結果有較佳的相關, Bekk 平滑度 0-1600 sec/10 mL 時兩法之相關係數為 0.74, 若以 Bekk 平滑度 0~120 sec/10 mL 左右為限則其相關係數為 0.90以上, 所以 Bekk 平滑度法及粗糙度法可適用於低平滑度範圍之測定, 高平滑度範圍之測定則有賴粗糙度法(Ra)或 FFT 頻譜分析來判定。R_{tm}

與 Ra 有類似之相關性因而不加以討論。觸針式粗糙度測試法採用更細的觸針應可提高精確度及相關係數, 因設備限制無法再行討論。

(三) FFT 頻譜分析

將紙張表面粗糙度波形曲線, 轉換成振幅頻度分佈, 並將不同凹凸深度所顯示之相對頻度繪成頻度累積曲線, 並比較不同平滑度紙張之頻度累積曲線, 再由凹凸深度及累積頻度判定紙張之平滑度。Fig. 7 為比較紙面凹凸深度之頻度分佈及累積頻度藉以區分紙張之平滑度之結果。a)組為非塗佈紙之比較例, Bekk 平滑度分別為 9.1 及 33.5 sec/10 mL, 而其相對粗糙度 Ra則分別為 4.95 μm 及 2.85 μm , 經 FFT 頻譜之分析顯示後者有較高的累積頻度及較小的凹凸起伏, 所得結果與上述二法相當一致。b)組的數據為塗佈紙之比較例, Bekk 平滑度及粗糙度分別為 Bekk 1507sec/10 mL; Ra 0.73 μm 及 Bekk 186 sec/10 mL; Ra 1.03 μm , FFT 頻譜顯示有相同之平滑度差異。c)組的數據則顯示二張紙樣的 Bekk 平滑度與粗糙度測定的結果並不一致, 分別為 Bekk 1507 sec/10 mL; Ra 0.73 mm 及 Bekk 368 sec/10 mL; Ra 0.55 μm , 但經 FFT 頻譜分析結果則顯示二者的平滑度應極為相似, 而非如上述兩法所測之結果。相同粗糙度之紙張, 因紙面之起伏不同, 而會呈現不同之 Bekk 平滑度, 其原因可能為由於紙張之起伏波形影響凹凸深度之測試值。高平滑度紙張如以 Bekk 平滑度測試法則因波狀起伏影響導致之 Bekk 平滑度值。但並非 Bekk 平滑度法測試值不正確, 只是對試樣之要求較為嚴格, 不能有皺摺及大幅度的凹凸波浪起伏而需要。低平滑度紙張影響較不明顯, 高平滑度紙張以此法量取平滑度時易受紙張之起伏影響測試結果, 而以 FFT頻譜分析則因已除去較大的起伏波形, 測出凹凸深度頻度分佈及累積頻度, 二者之平滑度應為相當。此結果可以以相同平滑度(或粗糙度)之二試樣, 一試樣經皺摺處理後, 測二試樣之 Bekk 平滑度及粗糙度, 則 Bekk 平滑度會因此有所變化, 但粗糙度值雖稍有變化, 但相對變化值較 Bekk 平滑度減少很多, 顯示粗糙度值較 Bekk 平滑度有較佳之準確度。

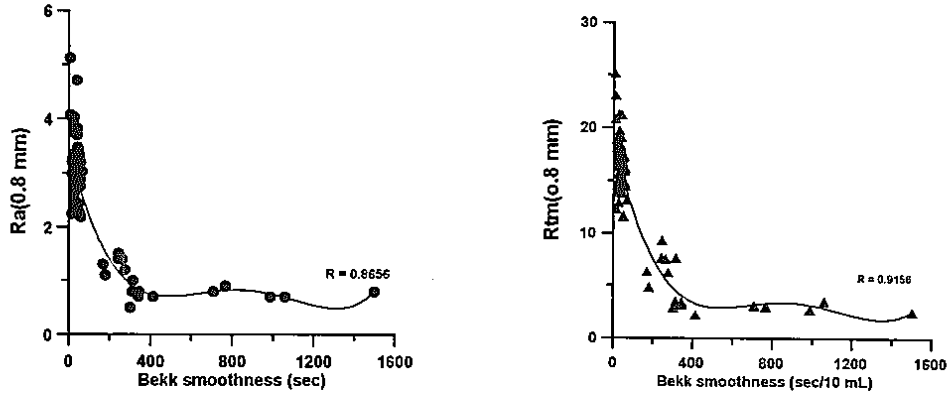


Fig. 5. Relationship between roughness and Bekk smoothness.

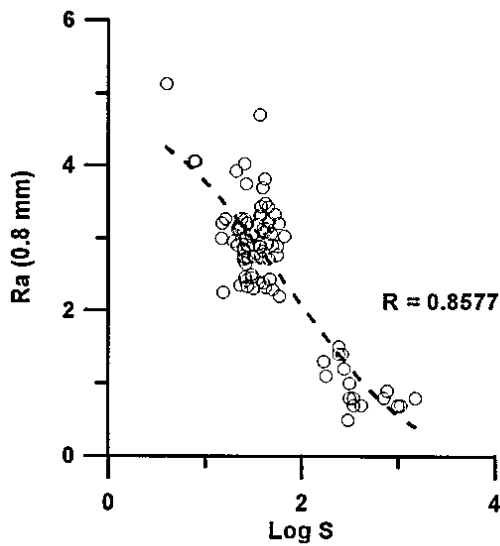


Fig. 6. Correlation between roughness and logarithmic Bekk smoothness.

Note: Ra: roughness, S: Bekk smoothness.

(四)紙張表面摩擦係數與平滑度之關係

在紙樣上放置砝碼，以一定之移動速度水平方向拉動紙樣，測定其滑動拉力，計算紙面與玻璃間之動摩擦係數，動摩擦係數是指為了阻止紙移動的摩擦力與在紙表所加之垂直力之比值(JIS, P8147)高平滑度紙張有較高之摩擦係數。Fig.8 為 Bekk 平滑度與紙張表面摩擦係數之二次迴歸曲線其相關係數為 0.80，若去除低平滑度範圍(Bekk 平滑度 60 sec/10 mL 以下)則其相關係數為 0.90以上。Fig. 9 為摩擦係數與粗糙度值對數之二次迴歸曲線其相關係數為

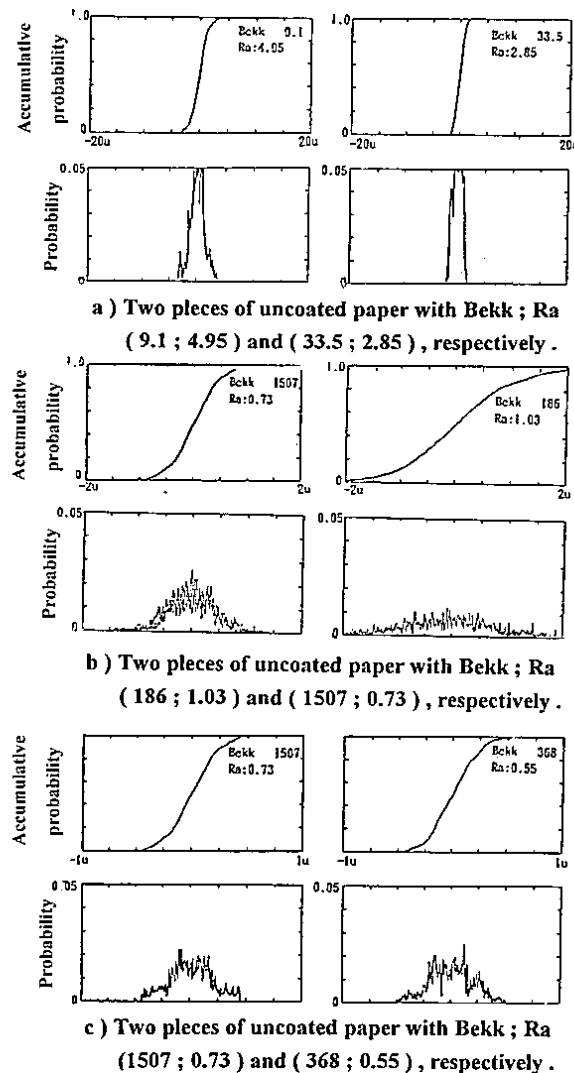


Fig. 7. Probability distribution of depth of concaves and convexes on a paper surface.

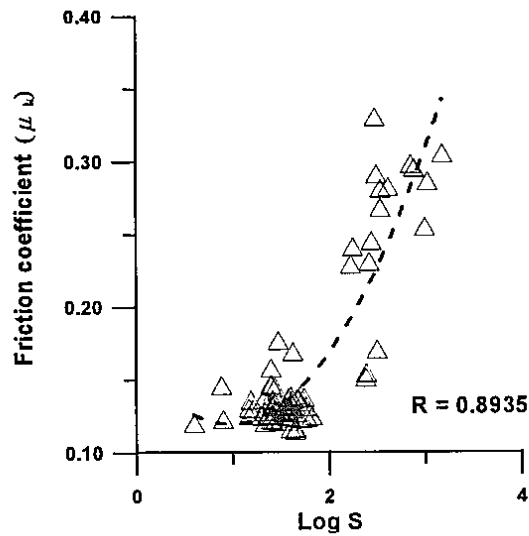


Fig. 8. Correlation between friction coefficient and logarithmic Bekk smoothness.

Note: μ_k : friction coefficient, S: Bekk smoothness.

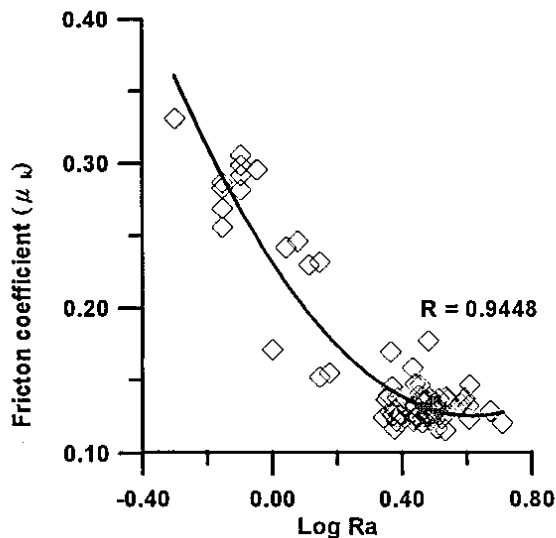


Fig. 9. Correlation between friction coefficient and logarithmic roughness.

Note: μ_k : friction coefficient, Ra: roughness.

0.94, 若以去除高粗糙度範圍即低平滑度範圍(去除 $Ra > 3 \mu m$; 約 Bekk 平滑度 $< 70 \text{ sec}/10 \text{ mL}$), 則其相關係數可達更高, 以上結果顯示摩擦係數法之重覆性及正確度亦可做為評估紙張表面平滑度的方法, 且適合做為評估高平滑度紙張之測試方法。

四、結論

比較以觸針式粗糙度測試法與傳統透氣式之平滑度測試法(Bekk 平滑度測試法)測定紙張表面平滑度, 並以觸針式表面粗糙度計測試所得之 FFT 頻譜判定紙張表面平滑的程度。並探討以摩擦係數法做為評估紙張表面平滑度的方法。比較、評估各測試法間之相關關係, 綜合試驗結果如下:

- (一) 以觸針式粗糙度計測試法來測定紙張之縱向的結果與 Bekk 平滑度測試法所得結果較無相關性, 橫向則有較佳之相關性, 其原因可推論為紙張具異方性之故。
- (二) 比較粗糙度值與 Bekk 平滑度此二法之測定值, 顯示在低平滑度範圍(Bekk 平滑度 $100 \text{ sec}/10 \text{ mL}$ 以下)粗糙度法之 Ra 值或 R_{tm} 間與 Bekk 平滑度有相當程度的相關。中平滑度紙張(Bekk 平滑度 $200-500 \text{ sec}/10 \text{ mL}$)則此二法之相關性較低, 高平滑度範圍(Bekk 平滑度 $500 \text{ sec}/10 \text{ mL}$ 以上)則此二法之結果毫無相關性存在。粗糙度與 Bekk 平滑度的相關性(Bekk 平滑度 $0-1600 \text{ sec}/10 \text{ mL}$), 二者間之相關係數為 0.74, 若以 Bekk 平滑度 $120 \text{ sec}/10 \text{ mL}$ 左右為測試界限, 則其相關係數為 0.90 以上。Bekk 平滑度測試法及粗糙度法較適用於低平滑度範圍之測定, 高平滑度範圍之測定則有賴 FFT 頻譜分析來判定, 粗糙度試驗法對測試紙張之要求不若 Bekk 平滑度測試法, 後者在試樣有皺摺、捲曲, 波狀起伏時易產生試驗誤差。
- (三) 紙面通常具有較大的起伏(彎曲起伏, 或紙張捲曲、皺縮等原因)及細微的凹凸。以粗糙度評估平滑度時紙面上細微凹凸以濾波器除去較大之起伏, 所得之表面粗糙度波形曲線轉換成 FFT 振幅頻度分佈曲線, 再由凹凸深度頻度分布及累積頻度曲線可明顯區分平滑度。
- (四) Bekk 平滑度與紙張表面摩擦係數之二次迴歸曲線其相關係數為 0.80, 若去除低平滑度範圍(Bekk 平滑度 $60 \text{ sec}/10 \text{ mL}$ 以下)則其相關係數為 0.90 以上。摩擦係數與粗糙度的對數的二次迴歸曲線其相關係數為 0.94, 若以去除高粗糙度範圍即低平滑度範圍(去除 $Ra > 3 \mu m$; 約 Bekk 平滑度 $< 70 \text{ sec}/10 \text{ mL}$), 則其相關係數可達更高, 摩擦係數法可做為評估高平滑度紙張表面平滑度的方法。

引用文獻

- 黃彥三、陳欣欣 1990 FFT 頻譜分析應用於砂光面粗糙度評估之研究。林產工業 9(2): 61 ~ 70。
- 江前敏晴、石田銃一郎、臼田誠人 1990 紙の平滑性のスペクトル解析(第一報)塗工紙之平滑度評估。第 12 回纖維聯合研究發表會講演要旨。126 頁。
- 江前敏晴、臼田誠人 1991 紙の平滑性のスペクトル解析(第二報)未塗工紙相關法による解析。日本木材學會講演要旨。343 頁。
- 桂徹 1985 塗工紙の外観に關連する平滑性のア

プローチ。紙パ技協誌 39(9): 870 ~ 876.

長谷川信夫、知野悌二 1965 紙の物理試験法"紙パルプの種類とその試験法"。日本紙パルプ技術協會編集兼發行。東京。185 ~ 191 頁。

CNS P3017 紙之平滑度試験法。

JIS P8119 紙及び紙板のベック試験器による平滑度試験方法。

JIS P8147 紙及び紙板の摩擦係數試験方法。

TAPPI Standard. T479. Smoothness of paper (Bekk method).