

## 光劣化塗膜之紅外線光譜分析技術之比較

張上鎮 顧文君

### 摘要

塗料之功能為保護與美化木質製品，但是卻很容易受光影響而產生化學變化，本試驗以三種紅外線光譜分析技術，即傳統穿透透明塗膜、穿透溴化鉀圓板、衰減全反射(MIR)，分析受光影響後之硝化棉與聚胺基甲酸酯塗料的化學變化。試驗分析結果得知，傳統以紅外光穿透透明塗膜與穿透溴化鉀圓板二種分析方法適用於分析經過長時間光劣化塗膜之化學變化，而衰減全反射則為一種極之非破壞性分析技術，適用於偵測塗膜於光劣化初期時所產生輕微的表面化學變化，並可分析傳統穿透式分析技術所無法分析的不透明塗膜之化學結構變化。此外，三種紅外線光譜分析技術之優劣點及其特性亦於文中詳細討論與比較。

關鍵詞：塗膜光劣化、硝化棉塗料、聚胺基甲酸酯塗料、紅外線光譜分析、穿透式分析、衰減全反射分析、溴化鉀圓板、化學變化。

張上鎮、顧文君 1991. 光劣化塗膜之紅外線光譜分析技術之比較. 林業試驗所研究報告季刊, 6(1):45-56.

### Comparison of IR Spectroscopic Techniques for The Analysis of Coating Film Degraded by UV-light

Shang-Tzen Chang and Wen-Jun Ku

#### [Summary]

Although clear coatings perform protection and decoration function, they are susceptible to photodegradation after exposure to ultraviolet light. In order to improve the photostability of clear coatings the light-induced degradation mechanisms should be elucidated. Infrared spectroscopy has played an important role in the analysis of protective coatings. Therefore, in this study three different infrared sample preparations including transmission film, KBr disc and multiple internal reflectance (MIR) were applied to monitor the variations of infrared spectra of nitrocellulose and polyurethane coatings degraded by ultraviolet light ( $\lambda > 275\text{nm}$ ). Experimental results indicate that MIR is an excellent non-destructive surface analytical technique for early detection of subtle chemical changes occurring at top surface of coatings after a short-term exposure period. The others are insensitive for the detection of the early indications of coating deterioration, but are useful for monitoring the surface changes in composition after exposure to ultraviolet light for longer periods. The nature of the infrared analytical data provided by these three different techniques is compared in

1991年 1月送審

1991年 3月通過

details in the study.

**key words:** Nitrocellulose, polyurethane, coating, photodegradation, infrared spectroscopy, transmission spectrum, MIR spectrum, KBr disc, chemical change.

**Shang-Tzen Chang and Wen-Jun Ku.** 1991. Comparison of IR Spectroscopic Techniques for The Analysis of Coating Film Degraded by UV-light. Bull. Taiwan For. Res. Inst. New Series. 6(1):45-56.

## 一、緒 言

透明塗料(clear coatings)深為世人所喜愛而經常使用作為木質家具、壁板等之塗料，這是因為它不但具有保護功能，亦能顯現甚或強調木材紋理與色澤之特色。然而，一般而言透明塗料很容易受光之影響而劣化(張上鎮，1984；Ashton, 1980；Feist, 1984)，失去其原有的保護與美化之功效。塗膜受光之影響所產生的初期劣化，首先由肉眼觀察到的就是表面變色(discoloration)，大部份的塗膜都產生黃化(yellowing)，逐漸失去其透明性，然後再導致裂紋(checks)、或起泡，終至剝落，而完全失去其保護之功能。塗膜初期的表面變色，主要是因為塗膜表面受光影響而產生了化學結構變化，因此為了防止透明塗料受光影響而產生劣化，必需先了解其劣化反應機構，而塗膜之光劣化反應機構則可由其化學結構變化而得知。

塗膜劣化之化學結構變化可以各種光譜分析方法予以分析，如紅外線光譜分析(infrared spectroscopy)、紫外線光譜分析(ultraviolet spectroscopy)、核磁共振分析(nuclear magnetic resonance)、光電光譜分析(electron spectroscopy for chemical analysis)、電子順磁共振分析(electron paramagnetic resonance)等等。其中，紅外線光譜分析為了解塗膜化學結構變化最方便且常用之分析方法之一，它的基本原則是偵測化合物中分子振動之變化，不同之分子振動需要吸收不同的能量，因此不同官能基的分子振動或旋轉會出現在紅外線光譜特定的位置，由這些特定的吸收峰可以判定分子的官能基，除了定性官能基變化的判斷外，亦可由吸收峰的強度作為官能基之定量分析比較。

紅外線光譜分析對於固體、液體、氣體之樣品均可以分析，以往以紅外線光譜分析塗膜之化學變化，最常用的方法就是以透明塗膜(trans parent film)方式予以分析，或是與溴化鉀(pota-

ssium bromide, KBr)等鹼金屬鹵化物一起磨成粉，再以高壓壓製成透明的圓板(disc)予以分析。最近，一種嶄新的分析塗膜化學變化的方法已被應用，即衰減全反射(attenuated total reflectance, ATR)，ATR-IR之分析可以分為一次反射或多次內反射(multiple internal reflectance, MIR)兩種方式，其中較適宜且常用的為多次內反射。分析時只需將塗膜置於一片內反射晶片(internal reflection element)之兩個側面，夾緊後置於多次內反射附件上(圖1)即可置入紅外線光譜儀內分析，當紅外光進入晶片後即在晶片與塗膜表面間產生內反射，然後再進入光譜儀偵測器解析而得到紅外線光譜圖。晶片的種類有KRS-5(thallium bromide iodide)、Ge (germanium)、ZnSe(zinc selenide)等等，由於其各自特定的折射率，再加上晶片厚度與角度等因子的不同，紅外光滲透入塗膜表層的深度亦有所不同，一般而言MIR分析所得的紅外線光譜代表了塗膜表面約0.1  $\mu\text{m}$  ~ 4  $\mu\text{m}$  深之夾層化學結構。

以上所述的分析固體試樣之三種紅外線光譜分析技術各有其特性，而筆者也曾利用其中之一方式—即衰減全反射分析硝化纖維素塗膜劣化後之官能基變化(張上鎮，1989)，獲得良好之結果，然而，究竟那一種分析方法較適宜分析塗膜劣化後之化學變化尚有待探討比較。因此本試驗的研究目的係將光劣化後之塗膜，以溴化鉀圓板、透明塗膜及MIR三種分析方法進行分析，比較三種分析方法的優、劣點及適用性，以供他日研究塗膜劣化相關化學變化分析之用。

## 二、材料與方法

### (一)試材製備

本試驗所分析之塗料為西德Lignal之NC拉卡(nitrocellulose lacquer，硝化棉塗料)與PU塗料(polyurethane，聚胺基甲酸酯塗料)兩種。為了使塗膜厚度均勻，本試驗以Braive B-4000自動

塗佈機配合定厚之塗佈器進行塗裝。透明塗膜之製備係將塗料塗佈於矽酮離型紙上(silicone release paper, Leneta Co.)，待塗膜完全乾燥後再

小心剝離成膜，經測量得知INC乾膜之厚度為15  $\mu\text{m}$ ，而PU乾膜之厚度為30  $\mu\text{m}$ 。同時為了便於MIR分析，亦將塗料塗佈於市售之Xerox影印紙上成膜。

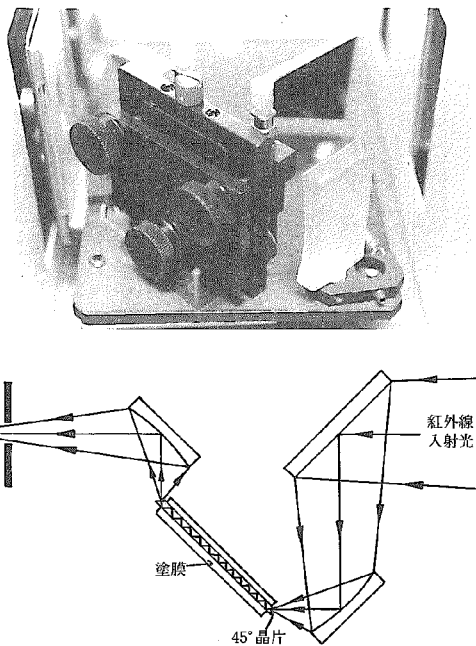


圖1. 衰減全反射(MIR)裝置及其原理  
Figure 1. Multiple internal reflectance (MIR) accessory and its principle.

〔耐光性試驗〕

完全乾燥後之塗膜置於美國Atlas UVCON耐光性試驗機內進行照光試驗，所使用之燈源為FS-40太陽燈(sunlamp, Philip Co.)，此種燈源之

能量分佈曲線如圖2所示，由於含有豐富的紫外光，可加速耐光性試驗。塗膜經過一定時間照光後即取出貯存於恆溫恆溼之環境下以備從事紅外線光譜分析。

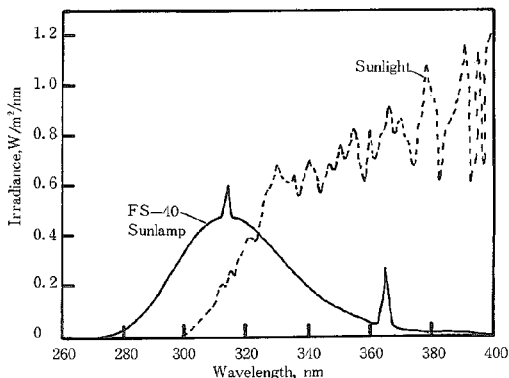


圖2. FS-40 太陽燈之能量分布曲線

Figure 2. Spectral energy distribution of irradiation energy from FS-40 sunlamp.

### 紅外線光譜分析

本試驗所使用之紅外線光譜儀為Perkin-Elmer Model-783，配有電腦以便儲存及處理光譜資料。透明塗膜置於自黏式硬紙固定片內進行分析；而溴化鉀圓板分析技術係將塗膜表面以解剖刀輕輕刮下成粉末，然後與適量之溴化鉀充分混合均勻，再以高壓打片機壓製成透明的圓板後置入紅外線光譜儀分析；MIR之分析則使用多次內反射之裝置，所使用的晶片為KRS-5，晶片角度為 $45^\circ$ 角，塗膜裁成與晶片一樣大小，將兩片塗膜分別置於KRS-5晶片的兩側，為了確保塗膜與晶片緊密地貼覆在一起，再覆上兩片橡膠墊，然後以一定的壓力固定後即置於多次內反射裝置架上，以 $45^\circ$ 角之分析角度進行分析。以此種條件進行塗膜分析時，紅外光在塗膜表面的反射次數為25次。紅外線光譜分析之範圍為 $4000\text{cm}^{-1} \sim 200\text{cm}^{-1}$ 。

### 三、結果與討論

NC拉卡經過太陽燈照射後，以透明塗膜方式直接置入紅外線光譜儀分析，所得之光譜圖如圖3所示。圖3A為未照光NC拉卡之紅外線光譜圖，

其中位於 $1660\text{cm}^{-1}$ ， $1280\text{cm}^{-1}$ 及 $840\text{cm}^{-1}$ 三處之吸收峰分別為NC拉卡中硝酸酯之 $\text{NO}_2$ 非對稱伸縮振動， $\text{NO}_2$ 對稱伸縮振動及 $\text{O}-\text{NO}_2$ 伸縮振動之吸收，而位於 $1730\text{cm}^{-1}$ 之吸收峰為醃類官能基( $\text{C}=\text{O}$ )之特性吸收， $2925\text{cm}^{-1}$ 與 $2850\text{cm}^{-1}$ 之吸收峰則為 $\text{C}-\text{H}$ 非對稱伸縮振動與對稱伸縮振動， $3500\text{cm}^{-1}$ 之吸收峰則為纖維素中氫氧基( $\text{O}-\text{H}$ )伸縮振動之吸收。

NC拉卡經過1天太陽燈照射後，以紅外光穿透透明塗膜方式分析，其結果如圖3B所示，代表硝酸酯之特性吸收峰，即位於 $1660\text{cm}^{-1}$ ， $1280\text{cm}^{-1}$ 及 $840\text{cm}^{-1}$ 三處吸收峰之強度呈現些微之減弱，經過4天照光後，硝酸酯吸收峰即出現明顯的減弱，經過8天照光後則呈現更顯著的減弱，由此得知NC拉卡中硝酸酯之特性吸收峰受光的影響而破壞，其吸收強度隨照光時間之增加而減弱。伴隨著硝酸酯官能基吸收峰強度之減弱，由紅外線光譜中亦可得知位於 $1730\text{cm}^{-1}$ 與 $3500\text{cm}^{-1}$ 兩個吸收峰的強度，隨著照光時間之增加而增強且變得寬廣些，這顯示已出現了羧酸類( $\text{COOH}$ )衍生物，由此得知NC拉卡中硝酸酯受光影響產生光氧化反應，使得硝酸酯被破壞而產生羧酸類劣化衍生物。

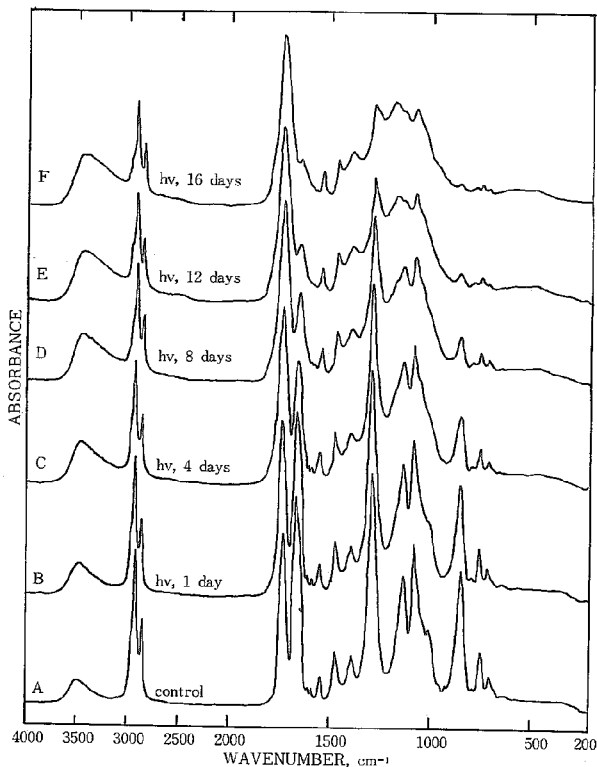


圖3. 以穿透透明塗膜方法分析光劣化NC塗膜所得之紅外線光譜圖  
 Figure 3. IR transmission spectra of nitrocellulose lacquer film degraded by ultraviolet light.

如果將塗膜的外層刮成粉末與溴化鉀均勻混合，再壓製成透明的圓板後分析，其結果如圖4所示。紅外線光譜圖受光影響而產生的變化與圖3類似，代表硝酸酯的特性吸收峰， $1600\text{cm}^{-1}$ ， $1280$

$\text{cm}^{-1}$ 及 $840\text{cm}^{-1}$ 的吸收強度隨照光時間之增加而明顯的減弱，而位於 $1730\text{cm}^{-1}$ 與 $3500\text{cm}^{-1}$ 處之兩個吸收峰強度增強且增寬，這表示塗膜的表層受光影響而產生了很多羧酸類衍生物。

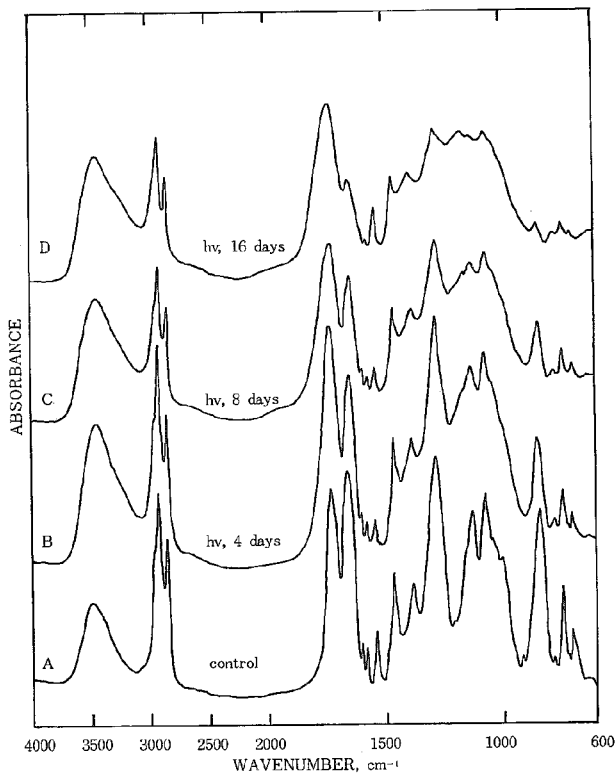


圖4. 以穿透溴化鉀圓板方法分析光劣化NC塗膜所得之紅外線光譜圖  
 Figure 4. IR transmission spectra of UV-degraded nitrocellulose lacquer obtained by using KBr disc technique.

如果將塗膜以MIR方式分析，所測得之紅外線光譜圖如圖5所示，圖5A為未照光前NC拉卡之反射式紅外線光譜曲線，此與上述傳統穿透式紅外線光譜曲線十分相似，僅在短波處（光譜圖左邊）之吸收峰強度較弱，而在長波處之吸收峰強

度則較強，故各吸收峰之相對強度有所不同；又各吸收峰的位置產生了些許的位移，C-H伸縮振動之吸收位於 $2921\text{ cm}^{-1}$ 與 $2848\text{ cm}^{-1}$ 處，酯類羰基之吸收峰位於 $1724\text{ cm}^{-1}$ ，而代表硝酸酯的特性吸收峰則位於 $1648\text{ cm}^{-1}$ ， $1278\text{ cm}^{-1}$ 與 $835\text{ cm}^{-1}$ 處。

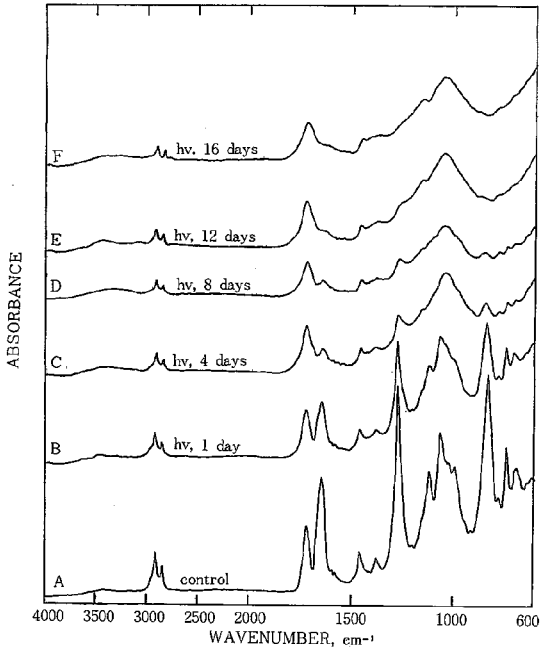


圖5. 以衰減全反射方法分析光劣化NC塗膜所得之紅外線光譜圖  
Figure 5. Infrared MIR spectra of nitrocellulose lacquer film degraded by ultraviolet light.

以MIR方式分析，僅僅經過短短一天的光照後，即可輕易地測出其表面之化學變化，位於 $1648\text{cm}^{-1}$ ， $1278\text{cm}^{-1}$ 與 $835\text{cm}^{-1}$ 三個代表硝酸酯之特性吸收峰強度相對地呈明顯地減弱（圖5B），而位於 $1724\text{cm}^{-1}$ 吸收峰則變寬，經過四天光照後，硝酸酯的三個代表性吸收峰強度更顯著地減弱（圖5C），而於 $1040\text{cm}^{-1}$ 出現寬廣之吸收峰，此乃為C-OH之特性吸收。經過12天光照後，此三個硝酸酯之吸收峰就消失不見了（圖5E），而 $1724\text{cm}^{-1}$ 吸收峰則變得更為寬廣。

比較紅外線光譜圖中各吸收峰的相對強度，位於 $2925\text{cm}^{-1}$ 處C-H伸縮振動之變化受光影響的較

為輕微，以此作為標準吸收峰，分別將 $1660\text{cm}^{-1}$ ， $1280\text{cm}^{-1}$ 及 $840\text{cm}^{-1}$ 三個代表硝酸酯吸收峰之強度與 $2925\text{cm}^{-1}$ 吸收峰之強度比較，計算其相對比率則可以作定量分析。由三種上述紅外線分析技術，即紅外光穿透透明塗膜、紅外光穿透溴化鉀透明圖板及MIR內反射方式所獲得的紅外線圖譜吸收圖，分別計算 $A_{1660} / A_{2925}$ ， $A_{1280} / A_{2925}$ 及 $A_{840} / A_{2925}$ 之相對比率，其結果如表1所示，三種分析方法中， $1660\text{cm}^{-1}$ ， $1280\text{cm}^{-1}$ 與 $840\text{cm}^{-1}$ 三個吸收峰的相對強度均隨光照時間之增長而降低。如以未光照前之相對強度為基準，分別計算經過一定時間光照後各相對強度之留存率，其結

果如圖6、圖7與圖8所示。由圖6比較A<sub>1660</sub> / A<sub>2925</sub>相對強度留存率之結果得知，塗膜經過四天照光後所產生的化學變化，以穿透透明塗膜分析方法所求得之值為66.7%，以穿透溴化鉀圓板分析方法所得之值為79.0%，而以MIR反射方式所求得之相對強度留存率為24.8%。由此得知，MIR反射式紅外線光譜分析較其他二種方法靈敏，可以在較短的劣化時間內即快速地偵測塗膜表面的化學劣化變化，即使在短短的一天照光時間後，NC拉卡塗膜之化學變化如以MIR反射式方法分析，A<sub>1660</sub> / A<sub>2925</sub>之相對強度留存率為76.8%，如果以穿透透明塗膜方式分析，其值為95.3%，這是因為穿透透明塗膜方式分析所獲得之紅外線光譜圖實代表塗膜總體(bulk)的化學變化，而以MIR反射方式分析所獲得之光譜圖則為塗膜表面0.1~4 μm深的化學變化，而塗膜受光影響而產生之光劣化反應，初期產生於塗膜表面，因此欲以紅外線光譜分析塗膜經過短期照光而產生之輕微化學變化，唯有以MIR分析技術才能得知。

如果分析塗膜經過較長照光時間後所產生之化學變化，則以傳統穿透式分析方法亦可得知，這是因為長時間之照光使得塗膜產生明顯的化學變化。又由圖6、圖7與圖8中曲線之變化來看，以MIR方式所獲得的結果較為穩定且一致。

以紅外光穿透溴化鉀圓板方式分析塗膜光劣化之化學變化，由於需要刮取粉末，因此試樣準備工作較為繁複，所刮下之粉末亦非真正代表塗膜的表面。對塗膜而言，它亦為一種破壞性(destructive)的分析方法，試樣分析後難以回收或作後續之分析。而MIR分析方法則為一非破壞性(nondestructive)分析技術，分析前試樣之準備工作十分簡單，只需要將塗膜置於晶片之兩側，以固定的壓力夾緊後即可分析，分析完後塗膜可再進行照光劣化試驗，然後再取出予以繼續分析，此方法可以避免分析時受試樣之變異性而產生之誤差，又MIR分析方法所得到的化學結構變化實為塗膜表面約0.1~4 μm深之化學變化。

表1 NC拉卡光劣化後以三種紅外線光譜分析方法測得之三個代表硝酸酯特性吸收峰之相對強度變化值

Table 1. Changes in the relative intensities of three nitrate peaks appeared in the infrared spectra of UV-degraded NC lacquer films.

吸收峰強度比	分析方法	照 光 時 間 , 天					
		0	1	4	8	12	16
A <sub>1660</sub> / A <sub>2925</sub>	穿透式透明塗膜	1.20	1.14	0.80	0.50	0.21	0.13
	穿透式溴化鉀圓板	0.76	-	0.60	0.56	-	0.29
	反射式, (MIR)	2.42	1.86	0.60	0.50	-	-
A <sub>1280</sub> / A <sub>2925</sub>	穿透式透明塗膜	1.35	1.33	1.27	1.00	0.63	0.39
	穿透式溴化鉀圓板	0.88	-	0.68	0.56	-	0.36
	反射式, (MIR)	4.42	3.58	1.40	1.00	-	-
A <sub>840</sub> / A <sub>2925</sub>	穿透式透明塗膜	0.80	0.71	0.47	0.25	0.13	0.04
	穿透式溴化鉀圓板	0.80	-	0.44	0.44	-	0.14
	反射式, (MIR)	3.67	2.71	0.80	0.50	-	-



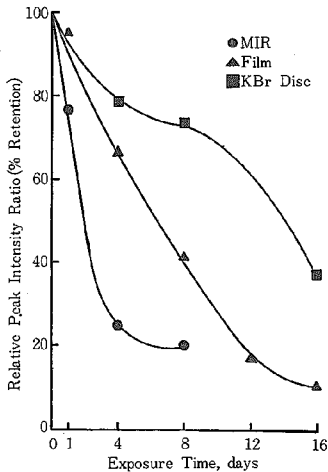


圖6. 以不同紅外線光譜分析方法分析光劣化NC塗膜所得紅外線光譜中A1660/A2925 相對強度之留存率

Figure 6. Relative peak intensity (A1660/A2925) retention of IR transmission (▲), KBr disc (■) and MIR (●) spectra of UV-degraded nitrocellulose lacquer.

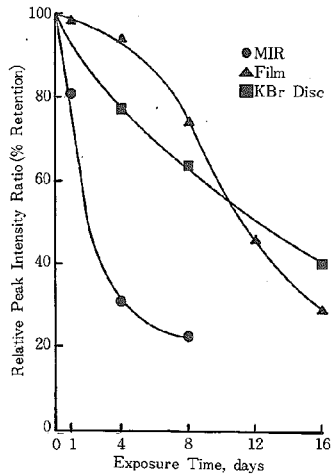


圖7. 以不同紅外線光譜分析方法分析光劣化NC塗膜所得紅外線光譜中A1260/A2925 相對強度之留存率

Figure 7. Relative peak intensity (A1260/A2925) retention of IR transmission (▲), KBr disc (■) and MIR (●) spectra of UV-degraded nitrocellulose lacquer.

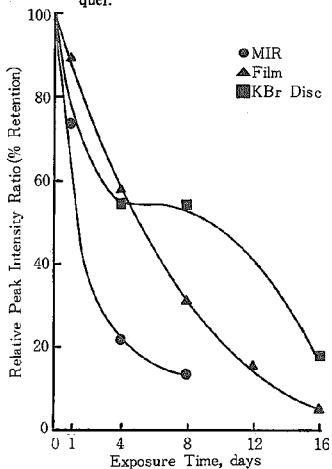


圖8. 以不同紅外線光譜分析方法分析光劣化NC塗膜所得紅外線光譜中A840/A2925 相對強度之留存率

Figure 8. Relative peak intensity (A840/A2925) retention of IR transmission (▲), KBr disc (■) and MIR (●) spectra of UV-degraded nitrocellulose lacquer.

三種紅外線光譜分析方法除了應用於光劣化後NC塗膜之化學變化外，亦嘗試分析光劣化後PU塗膜之化學變化。本試驗所使用之西德Lignal PU塗料為芳香族異氰酸鹽系列(aromatic isocyanates)，因此經由照光後很容易產生黃化(yellowing) (張上頌, 1989)，這是因為塗膜表面之化學結構產生變化，Schollenbeger等(1976)的報告曾建議是由於PU塗料中之芳香族胺基甲酸酯(urethane)產生光氧化作用而產生醌亞胺類(quinone imides)的結構。本試驗將芳香族胺基甲酸酯塗膜置入UVCON太陽燈下照光，的確很快就產生黃化現象，以穿透透明塗膜方式分析塗膜

受光影響之化學變化，其結果如圖9所示。圖中位於 $2270\text{cm}^{-1}$ 處之吸收峰為異氰酸鹽的特性吸收，其強度隨照光時間之增長而減弱，這是因為照光促使PU塗膜之硬化反應更完全，故異氰酸鹽之特性吸收逐漸消失，除此之外，短時間光照斜之PU塗膜的紅外線光譜吸收幾乎沒有變化，而經過照光12天後，僅在位於 $1725\text{cm}^{-1}$ 處醌類羰基( $\text{O}=\text{C}-\text{O}-$ )特性吸收峰出現了微弱的肩帶(shoulder)，使得 $1725\text{cm}^{-1}$ 吸收峰稍稍地加寬些，同時位於 $3150\text{cm}^{-1}$ 與 $3600\text{cm}^{-1}$ 間之吸收峰亦稍稍地加寬些，至於醌亞胺類之特性吸收卻無法於紅外線光譜圖中辨識。

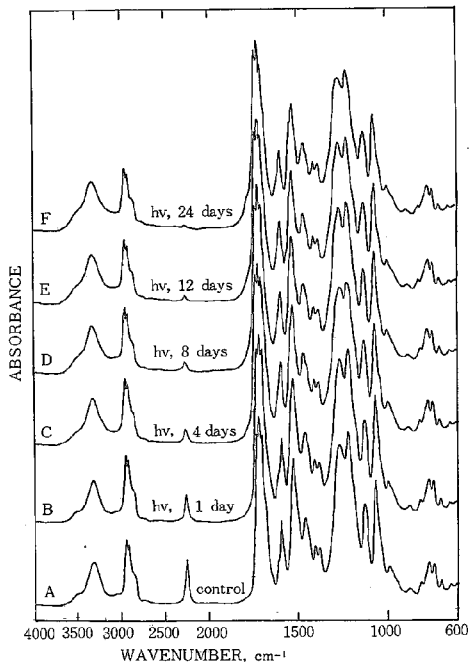


圖9. 以穿透透明塗膜方法分析光劣化PU塗膜所得之紅外線光譜圖  
Figure 9. IR transmission spectra of polyurethane coating film de-graded by ultraviolet light.

雖然以傳統紅外線穿透透明塗膜分析方法難以得知PU塗膜受光影響而產生之化學變化, 如果以MIR反射方式分析, 所得到之紅外線光譜圖如圖10所示。塗膜僅經過1天的照光時間後, 由其MIR紅外線光譜(圖10B)可以得知, 位於 $1721\text{ cm}^{-1}$ 處脂類羰基特性吸收峰變寬了, 且位於 $1531\text{ cm}^{-1}$ 處胺基甲醯基中N-H屈曲(bending)振動之特性吸收峰之強度明顯地降低, 由此MIR光譜分析可得知PU塗膜中胺基甲醯基受到光之影響而劣化, 產生羧酸類衍生物。經過4天與8天之照光後, 以MIR紅外線光譜分析更可以很清楚地看出其化學結構變化, 即位於 $1531\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰之強度很明

顯地減弱, 而位於 $1721\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰不但明顯地變寬且強度相對地增強, 同時位於 $3150\text{ cm}^{-1}$ 與 $3600\text{ cm}^{-1}$ 亦出現寬廣之吸收。

由以上之分析再度顯示, MIR分析技術極適宜作為分析塗膜受光劣化後之表面化學變化, 且即使是短時間照光所產生之初期化學變化, MIR紅外線光譜分析亦可以很容易地偵測得知。

如果欲以紅外線光譜分析了解有顏色的不透明塗膜之化學結構, 由於光的穿透性較差或無法穿透, 難以傳統穿透塗膜方式分析其紅外線光譜, 而以MIR方式分析紅色與灰色PU塗膜, 其結果如圖11所示, 不但簡單方便, 且特性的吸收峰均十分清晰, 容易辨識。

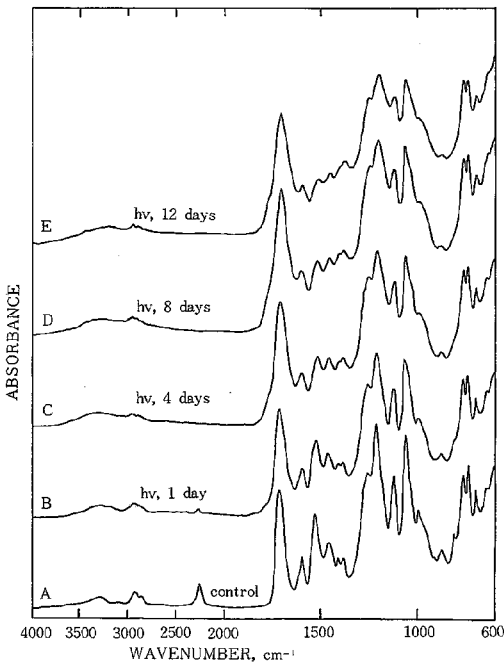


圖10. 以衰減全反射方法分析光劣化PU塗膜所得之紅外線光譜圖  
Figure 10. Infrared MIR spectra of polyurethane coating film degraded by ultraviolet light.

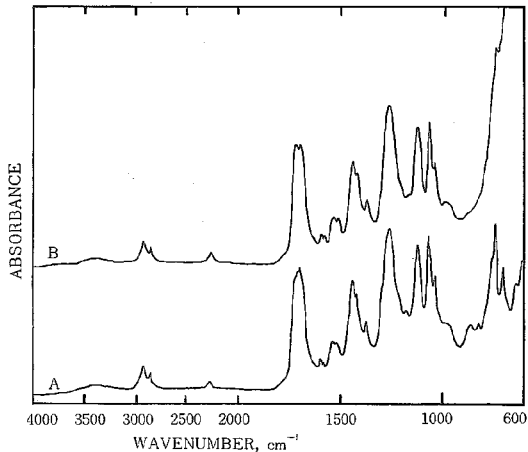


圖11. 紅色PU塗膜(A)與灰色PU塗膜(B)之衰減全反射紅外線光譜圖

Figure 11. MIR infrared spectra of polyurethane red paint film (A) and gray paint film (B).

#### 四、結論與建議

透明塗料很容易受光影響而產生劣化，劣化所產生的化學變化可以紅外線光譜儀器以分析而了解，本試驗以傳統穿透透明塗膜、穿透溴化鉀圓板及衰減全反射(MIR)三種分析技術進行分析，三種分式均可以偵測到塗膜劣化後化學變化，其中，傳統穿透式分析方法較適用於分析經過長時間光劣化塗膜之化學變化，而MIR則為一靈敏之非破壞分析技術，試樣分析前之準備工作簡單，很容易偵測塗膜經由短時間光劣化所產生之輕微化學變化。以往，從事塗膜劣化或比較塗料之耐久性，均需要長時間之試驗比較分析，如以MIR分析技術分析塗膜劣化的化學變化，由於其靈敏性，可以縮短塗膜劣化試驗所需之時間。此外，紅外線MIR分析技術可用來分析傳統穿透式分析技術所無法分析的不透明塗料之化學結構。

#### 引用文獻

張上鎮 1984. 木材用透明塗料的耐光性. 林產

工業 3(4): 31-41.

張上鎮 1989. 硝化纖維素塗料劣化後之表面化學性質變化分析. 林業試驗所研究報告季刊 4(3): 123-136.

張上鎮 1991. 光安定劑對PU透明塗料耐光性之影響. 林業試驗所研究報告季刊 撰寫中.

Ashton, H.E. 1980. Predicting Durability of Clear Finishes for Wood from Basic Properties. Journal of Coating Technology. 52(663):63-71

Feist, W.C. 1984. Painting and Finishing Wood for Use Outdoor. Proceedings of Seventh Annual Educational Conference: New Ideas Materials Procedures. Baltimore, MD. Washington, DC. A1-A27.

Schollenberger, C.S. and F.D. Stewart. 1976. Thermoplastic Polyurethane Elastomer UV Stabilization. Journal of Elastomers and Plastics. 8:11-29.