

# 화염 열복사의 파장별 선택적 반사를 위한 도료 코팅에 대한 수치적 연구

변도영\* · 백승욱\*\*

(1997년 10월 4일 접수)

## Numerical Study of a Coating with Pigment to Selectively Reflect the Thermal Radiation from Fire

Do-Young Byun and Seung-Wook Baek

**Key Words :** Coating with Pigment (도료 코팅), Fire Safety (화염 방재), Infrared Thermal Radiation (적외선 열복사), Anisotropic Scattering (비등방성 산란), Mie Theory (Mie 이론), Dependent Scattering (종속 산란), Absorption by Binder (고착제의 복사 흡수), Internal Reflectance (내부 반사), Conductive and Radiative Heat Transfer (전도 및 복사 열전달)

### Abstract

The infrared reflection coatings with pigment can be used to protect the surfaces of combustible materials exposed to fire. To obtain high reflectivities in the infrared range (0.5-10 $\mu$ m) important to fire, several dielectric pigments, such as titanium dioxide, iron oxide, and silicon, can be synthesized to polymer coatings. The theoretical analysis shows that the coating design with particles diameter in the 1.5 to 2.5 $\mu$ m range and volume fraction in the 0.1 to 0.2 range is estimated to be optimal. In the analysis of the radiation, the dependent scattering, absorption by polymeric binder, and the internal interface reflection are considered. In addition, the temperature distribution in the semi-transparent coating layer and an opaque substrate (PMMA) is also presented.

기 호 설 명	
$a_n, b_n$ : 확장계수 (expansion coefficient)	$P_n$ : Bessel 함수
$C$ : 비열 (specific heat)	$q_r$ : 복사 열유속
$d$ : 도료 지름 (diameter of pigment, $\mu$ m)	$Q_{sca}$ : 산란 단면효율 (scattering cross section efficiency)
$f_v$ : 체적분율 (volume fraction)	$Q_{ext}$ : 소멸 단면효율 (extinction cross section efficiency)
$k$ : 흡수 굴절율 (absorptive refractive index)	$R$ : 반사율 (Reflectance)
$I$ : 복사강도 ( $W/m^2$ sr)	$S_1, S_2$ : 복소 진폭 함수 (complex amplitude functions)
$m$ : 복소 굴절율, $n-ik$	$t$ : 시간
$n$ : 굴절율 (refractive index)	$y$ : 좌표 (coordinate)

\*회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

YL : PMMA 두께

#### 그리스문자

- $\delta_c$  : 코팅 두께  
 $\delta_b$  : 경계층 두께  
 $\beta$  : 소멸계수 (extinction coefficient)  
 $\epsilon$  : 표면방사율 (emissivity)  
 $\chi$  : 흡수계수 (absorption coefficient)  
 $\sigma_s$  : 산란 계수 (scattering coefficient)  
 $\Phi$  : 산란위상함수 (scattering phase function)  
 $\Theta$  : 산란각 (scattering angle)  
 $\Omega$  : 입체각 (solid angle)  
 $\rho$  : 밀도, 표면반사율 (reflectivity)  
 $\chi$  : 크기 매개변수 (size parameter),  $\frac{\pi d}{\lambda}$   
 $\lambda$  : 파장 (wavelength,  $\mu\text{m}$ ), 열 전도도 (thermal conductivity)  
 $\zeta_n, \Psi_n$  : Riccati-Bessel 함수

#### 아래첨자

- $ap$  : 입자  
 $ab$  : 고착제 (binder)  
 $g$  : 가스  
 $c$  : 코팅 (coating)  
 $s$  : 기층 매질 (substrate)

## 1. 서 론

화염 방재 측면에서 화염에 노출되어 있는 가연성 고체를 열복사의 영향으로부터 보호하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 점화 현상 및 화염 전파 속도가 대류 등의 유체 운동에 의한 열전달뿐만 아니라 복사열전달에도 크게 의존하기 때문이다. Quintiere<sup>(1)</sup>는 실내 화재에서의 화염 전파에 있어서 화염으로부터의 열복사가 화염전파 속도의 급격한 증가를 야기한다고 하였다. 이러한 열복사에 노출된 가연성 고체의 표면을 보호하기 위해서는 표면 코팅이 매우 효과적인 방어 방법으로 고려된다.

지난 수 십년 동안 페인트와 코팅에 대한 연구는 종이와 건축에 대한 응용에서부터 우주선에 이르기 까지 광범위하였으나 대부분 부식 방지, 탄산화 작용 방지 등이 그 목적이었다.<sup>(2)</sup> 이들 연구에서도 금속 도료 (pigment)의 첨가가 습기나 부식성 가스의 침투를 효과적으로 차단할 수 있음을 제시하였

다. 더불어 첨가되는 도료의 적당한 선택은 입사되는 열복사에 대하여 상당한 정도의 파장 선택적인 반사를 가능하게 한다는 것이 많은 연구들을 통해 밝혀지면서,<sup>(3)</sup> 이를 화염 방재에 응용하고자 하는 연구가 Berdahl<sup>(4)</sup>에 의하여 제시되었다. 그는 도료를 포함하는 코팅이 화염으로부터 방사되는 복사열에 대하여 적외선 영역의 반사를 증가시켜 가연성 물질을 보호할 수 있다고 하였다. 그러나 그는 해석의 편리를 위하여 복사열의 단일 입자에 의한 비중속 산란 (independent scattering)만을 고려한 이론을 채택하였기 때문에 반사율이 과다 예측되었으며 또한 매질 내에서의 다중 산란 (multiple scattering)을 고려하지 않는 이론이었기 때문에 입자의 크기, 체적 분율 등에 대한 코팅 디자인의 결과가 명확하지 않게 제시되었다. 특히 고착제 (binder)에 의한 복사 흡수를 고려하지 않아 그 특성의 중요성이 무시되었으며 고착제의 굴절율에 의한 내부 반사도 고려하지 않았다.

본 논문은 입사되는 복사열을 적외선 영역에서 효과적으로 반사시키기 위한 코팅의 설계 방식에 대한 이론적 연구이다. 이를 위하여 Berdahl<sup>(4)</sup>이 도료로써 적합하다고 제시한  $\text{TiO}_2$  (rutile)를 해석의 주된 도료로써 선택하였으며 산란 계수 (scattering coefficient)를 종속 산란 이론 (dependent scattering theory)<sup>(5)</sup>으로 구하고 고착제의 흡수, 내부 반사 등을 고려하여 코팅의 파장별 반사 특성을 해석하였다. 기존의 다공성 매질에서의 복사열전달 해석은 Two-Flux 방법<sup>(6)</sup>으로 주로 수행되었으나 이 방법은 등방성 산란을 내재적으로 가정하기 때문에 강한 비등방성 산란의 매질에는 적용할 수 없다.<sup>(7)</sup> 따라서 본 연구에서는 유한체적복사해법 (Finite Volume Method, FVM)<sup>(8)</sup>를 이용하였다. 코팅의 파장별 반사 특성 해석과 더불어 화염 방재 연구에 주로 사용되는 PMMA의 표면에 코팅이 있을 경우를 가정하여 비정상 상태의 전도, 복사방정식을 계산하였으며 내부 온도 분포와 표면 온도의 추이를 관찰하여 코팅의 효용성을 제시하였다.

## 2. 이론적 해석

코팅의 반사율 계산은 코팅 층에 대하여 Mie이론과 종속 산란 이론으로부터 도출되는 파장별 비회색체 물성치를 이용하여 수행되며, PMMA에 코팅을 고려하였을 때의 전도, 복사 열전달의 해석은

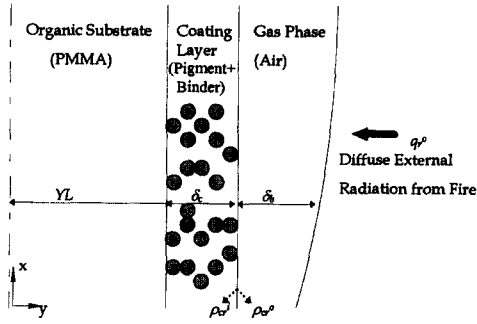


Fig. 1 Schematic diagram of a plane parallel slab for incident radiant energy from fire.

파장을  $2\mu\text{m}$ 로 고정하여 회색체로 가정하여 수행되었다. 일반적인 화염의 온도가  $1500\text{K}$ 이므로 이 온도의 흑체 복사 강도중에서 가장 강한 지역이  $2\mu\text{m}$ 이므로 이 파장대에 대한 계산으로 온도 추이를 추정할 수 있다. 이러한 해석에 있어서의 물리적 개략도가 Fig. 1에 도시되어 있다. PMMA를 불투과성(opaque) 물질로 가정하면 열전도만이 존재하며 반 투명체인 코팅 내부에는 강한 비등방성 산란과 흡수, 방사가 존재하는 복사, 전도 열전달이 존재한다. 가스의 자연 대류에 의한 열손실을 고려하기 위하여 가스장의 열전도 해석이 첨가된다.

2.1 도료와 코팅의 복사 물성치

구형 입자의 복사 산란은 크기 매개변수,  $\chi = \pi d/\lambda$ , 에 의존하며 이 크기에 따라 다양한 이론을 적용할 수 있다.<sup>(9)</sup> 코팅에서 주로 사용되는 도료(pigment) 입자의 크기는 Mie 산란의 영역이기 때문에 Mie 이론은 입자들의 복사 특성과 반사를 계산에 자주 이용되어 왔다.<sup>(3,4)</sup> 그리고 다공성 매질에서의 복사 열전달 해석을 많은 연구자들이 수행하였는데 비종속 산란(independent scattering)과 종속 산란(dependent scattering)의 경계를 입자들의 크기 매개변수와 체적 분율을 이용하여 제시하였다.<sup>(5)</sup> 이 구분 결과는 입자의 지름이  $1\mu\text{m}$  내외이고 체적분율이 약 0.1이며 해석하고자 하는 복사의 파장대가 적외선 영역이면 종속산란 이론을 적용하여야 함을 제시한다. 따라서 Berdahl<sup>(4)</sup>은 비종속 산란으로 해석하였으나 코팅의 도료 입자들의 복사특성을 정확하게 계산하기 위해서는 종속 산란 이론을 이용하여야 한다.<sup>(5)</sup> Mie 이론은 Maxwell 방정식의 구형좌표에 대한 해를 바탕으로 하여 산

란, 흡수에 대한 물성치를 이론적으로 제공한다. 구형입자에 입사되는 복사의 산란에 있어서 Legendre 다항식, Riccati-Bessel 함수, Bessel 함수, Neumann 함수와 확장 계수(expansion coefficient,  $a_n, b_n$ )를 이용하여 두 수직 평면에 편광된 복사의 성분을 표현할 수 있으며 확장 계수인  $a_n, b_n$ 을 아래와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$a_n = \frac{\Psi'_n(m\chi) \Psi_n(\chi) - m \Psi_n(m\chi) \Psi'_n(\chi)}{\Psi'_n(m\chi) \zeta_n(\chi) - m \Psi_n(m\chi) \zeta'_n(\chi)} \quad (1)$$

$$b_n = \frac{m \Psi'_n(m\chi) \Psi_n(\chi) - \Psi_n(m\chi) \Psi'_n(\chi)}{m \Psi'_n(m\chi) \zeta_n(\chi) - \Psi_n(m\chi) \zeta'_n(\chi)} \quad (2)$$

이때  $\zeta_n, \Psi_n$ 는 Riccati-Bessel 함수이며  $\chi$ 는 크기 매개변수,  $m$ 은 복소 굴절율(complex refractive index)이다. 그리고 산란된 파의 복소 진폭 함수(complex amplitude function)는 아래와 같다.

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (4)$$

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{dP_n(\cos \theta)}{d \cos \theta} \quad (5)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \cos \theta \pi_n(\cos \theta) - \sin^2 \theta \frac{d\pi_n(\cos \theta)}{d \cos \theta} \quad (6)$$

$P_n$ 은 Legendre 다항식이며 최종적으로 산란, 소멸 단면효율(cross section efficiency :  $Q_{sca}, Q_{ext}$ )과 산란위상함수(scattering phase function)를 구할 수 있다.

$$Q_{sca} = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (7)$$

$$Q_{ext} = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (8)$$

$$\Phi(\theta) = \frac{2(|S_1|^2 + |S_2|^2)}{\chi^2 Q_{sca}} \quad (9)$$

윗 식들을 풀면, 단일 구형 입자에 대한 비종속 산란의 소멸, 산란 계수와 산란 위상함수를 구할 수 있으며,<sup>(9)</sup> 비종속 산란에 대한 결과이므로 입자들의 상호 간섭 효과를 Tien과 Drolen<sup>(6)</sup>이 제안한 모델인 Modified liquid 모델로써 고려할 수 있다. Fig. 2는 여러 종속 산란 모델들을 이용한 비종속 산란 단면효율과 종속 산란 단면효율의 비를 보여 주고 있다. 이중에서 Modified liquid 모델의 결과

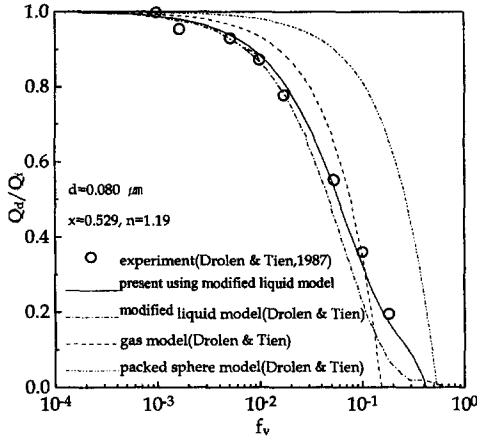


Fig. 2 Reduction in scattering efficiency due to dependent scattering.

가 실험 결과와 매우 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 모델을 이용하였으며 이 모델로 단면효율과 산란 위상함수를 보정한다. 보정한 단면 효율을 이용하여 아래와 같이 산란, 흡수 계수를 구할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\sigma_s = 1.5 Q_{sca} f_v / d \quad (10-1)$$

$$\chi_{ap} = 1.5 (Q_{ext} - Q_{sca}) f_v / d \quad (10-2)$$

TiO<sub>2</sub>, Si, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 고착제인 Alkyd resin의 복사 물성치인 복소 굴절율, 흡수 계수 등은 Kunitomo 등<sup>(3)</sup>의 결과와 Salzberg와 Villa<sup>(11)</sup>의 결과를 이용하였다. TiO<sub>2</sub>의 흡수 굴절율은 적외선 영역(0.5-10 μm)에서는 매우 작아 무시 가능하다. 따라서 도료 입자는 비등방성 산란에만 관여하며 흡수는 고착제에 의해서만 일어난다. 고착제의 복사 흡수 특성도 파장에 의존하기 때문에 이를 고려하면 반사 경향이 변화할 것이다.

## 2.2 지배방정식

코팅 층에서의 복사열전달을 해석하기 위한 복사 전달 방정식은 아래와 같다. 이 식은 회색체 매질에 대한 방정식이나 반사율을 계산할 때는 각 파장에 대하여 반복 계산한다.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -(\chi_a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) + S_R(\vec{r}, \vec{s}) \quad (11)$$

이때,

$$S_R(\vec{r}, s) = \chi_a I_b(\vec{r})$$

$$+ \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega'} I(\vec{r}', \vec{s}') d\Omega' \quad (12)$$

$$\chi_a = \chi_{ap} + (1 - f_v) \chi_{ab}, \quad \beta = \chi_a + \sigma_s \quad (13)$$

위 식 (11)은 유한체적복사해법을 이용하여 해석되며 식 (13)의 물성치들은 위에서 언급한 물성치들을 이용한다.

PMMA층과 코팅 층의 온도 분포를 계산하기 위한 에너지 보존방정식은 아래와 같다.

기층 매질(substrate, PMMA)에 대한 에너지 보존 방정식 :

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (14-1)$$

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{dq_r}{dy} \quad (14-2)$$

식 (14-1)은 기층 매질 위에 코팅이 존재할 때 기층 매질을 불 투과성으로 가정한 에너지 방정식이고, 식 (14-2)는 코팅이 없을 때 기층 매질인 PMMA를 반 투과성 물질로 고려하여 내부 침투 복사(in-depth radiation)를 첨가한 에너지 방정식이다.

코팅 층에 대한 에너지 보존 방정식 :

$$\rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{dq_r}{dy} \quad (15)$$

가스장에 대한 에너지 보존 방정식 :

$$\rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (16)$$

또한 위 식들을 계산하기 위한 초기 및 경계 방정식은 아래와 같다.

$$t \leq 0 : T = T_\infty \quad (17)$$

$$t > 0 :$$

$$y = 0 : T = T_\infty \quad (18)$$

$$y = YL ; -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} - \varepsilon q_r, T|_{s, YL} = T|_{c, YL} \quad (19)$$

$$I(\vec{r}_w, \vec{s}) = \frac{\varepsilon}{\pi} I_b(\vec{r}_w) + \frac{1 - \varepsilon}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{s} < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n} \cdot \vec{s}'| d\Omega' \quad (20)$$

$$y = YL + \delta_c ; -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} = -\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y}, T|_{c, YL + \delta_c} = T|_{g, YL + \delta_c} \quad (21)$$

$$I(\vec{r}_w, \vec{s}) = \frac{1 - \rho_{cr}^0}{\pi} q_r^0 + \frac{\rho_{cr}^1}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{s} < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n} \cdot \vec{s}'| d\Omega' \quad (22)$$

**Table 1** Physical properties in this study.

$C_s$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1005
$C_{TiO_2}$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]*	853
$C_{Alkyd\ resin}$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]*	1130
$C_s$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1420
$\lambda_g$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0.0261
$\lambda_{TiO_2}$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]*	4.995
$\lambda_s$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]*	0.218
$\lambda_s$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0.19
$\rho_g$ [kg m <sup>-3</sup> ]	1.1719
$\rho_{TiO_2}$ [kg m <sup>-3</sup> ]*	4240
$\rho_{Alkyd\ resin}$ [kg m <sup>-3</sup> ]*	1340
$\rho_s$ [kg m <sup>-3</sup> ]	1194
$\epsilon$	0.92

\* Property of two-phase mixtures<sup>(14)</sup> :

$$\frac{\phi_{coating}}{\phi_{medium}} = \frac{\phi_{pigment}/\phi_{medium} + 2 - 2f_v(1 - \phi_{pigment}/\phi_{medium})}{\phi_{pigment}/\phi_{medium} + 2 - f_v(1 - \phi_{pigment}/\phi_{medium})}$$

$$y = YL + \delta_c + \delta_b ; T = T_\infty \quad (23)$$

위 식 (11)의 결과를 이용하여 아래와 같이 반사율을 계산할 수 있다.

$$R = \rho_{cr}^2 + \frac{1}{q_r^2} \int_{\vec{s} \cdot \vec{s} > 0} I(YL + \delta_c, \vec{s}) d\Omega \quad (24)$$

식 (21)에서  $\epsilon$ 은 PMMA의 표면 반사율이며 식 (23)의  $\rho_{cr}^i, \rho_{cr}^o$ 는 외부 공기의 굴절율과 코팅의 굴절율 차이에 의한 표면 내, 외부 반사율이다. 이 표면 반사율은 Fresnel관계식으로부터 구할 수 있으며 방향성이 없는 난반사로 가정하여 계산하였다.<sup>(10)</sup> 고착제인 고분자 물질은 복사흡수를 하기 때문에 복소 굴절율( $m = n - ik$ )에서 허수항의 값을 지닌다. 그러나  $k = x\lambda/4\pi$ 의 관계로부터 고찰해보면 파장별로 값이 다르지만 약 0.1 이하의 값으로서 매우 작다. 따라서 고착제의 복사 흡수는 무시할 수 없으나 내부 반사를 고려함에 있어서는 흡수 굴절율을 무시할 수 있다.

수치해석은 유한차분법으로 수행하였으며 PMMA 층( $YL=1.5$  cm), 코팅 층( $\delta_c=100$   $\mu$ m), 기체장( $\delta_b=10$  cm)에 대하여 각각 400, 50, 800개의 격자를 이용하여 격자에 따른 해의 오차를 제거하였고 계산 시간 간격은 10<sup>-3</sup> sec로 설정하였다. 그리고 복사전달방정식을 유한차분복사해법으로 해석할 때 사용된 총 방향의 수는 16개로 설정하였는데 Mie 산란 위상함수가 방향에 대하여 연속적 특

성을 보였기 때문에 적용이 가능하였다. 총 방향의 수를 42개로 계산한 결과와 비교하였을 때 큰 오차를 보이지 않았다. 수치해석에 사용된 각 층의 물성치는 Table 1에 제시되어 있다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 파장별 반사율

코팅 층에서 복사전달방정식만을 해석하여 파장별 반사율(Spectral Reflectance)을 도료의 크기와 체적 분율, 코팅의 두께에 따라 계산하였다. 코팅이 얹혀있는 기층 매질은 흡수(흑체) 물질로 가정함으로써 기층 매질의 굴절율과 반사 특성에 따른 영향을 제거하여 코팅만의 반사율을 고찰할 수 있다. Fig. 3은 Berdahl<sup>(4)</sup>의 결과와 비교하면서 파장별 반사율을 보여주고 있으며 아래부분에 1500 K의 흑체 복사의 파장별 분포를 같이 도시하고 있다. 도료 입자의 지름이 0.22  $\mu$ m, 1.5  $\mu$ m 일 때, 고착제의 복사 흡수, 중속 산란, 내부 반사의 반사율에 대한 영향을 보여주고 있는데 모두가 반사율을 감소시켜 반사의 효율을 떨어뜨림을 알 수 있다. 비중속 산란으로 계산한 결과가 Berdahl의 결과보다 반사율이 더 큰 것은 다중 산란(multiple scattering)의 효과이다. 그러나 이 반사율은 다시 중속 산란, 내부 반사, 복사 흡수의 영향을 고려함에 따라 크게 작아지며 입자의 지름이 큰 (b)의 경우에 이 영향들을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 특히 복사 흡수에 있어서 유기 고분자 물질들은 C-H의 진동모드(stretching vibration)때문에 3.4  $\mu$ m부근에서 강한 흡수특성을 갖는다. 그리고 카르보닐기(C=O)와 C-C 결합체는 각각 5.75  $\mu$ m와 6.1  $\mu$ m 근처에서 복사 흡수 특성을 보여준다.<sup>(4)</sup> 본 연구의 고착제(Alkyd resin)의 복사흡수 특성도 2-4  $\mu$ m에서 강한 흡수 특성을 보이고 5.5  $\mu$ m 이상에서는 더욱 강한 흡수 특성을 보인다.<sup>(3)</sup> 화염 방재에 있어서 적외선 영역은 주된 관심 파장 영역이므로 유기 고분자 물질을 코팅의 고착제로 이용하면 고착제의 복사흡수에 의한 반사율의 감소를 고려해야만 한다. (a)에서 고착제의 흡수 영향이 미미하게 보이고 있는 것은 입자의 지름이 작아서 산란이 약하기 때문에 경로가 짧게 되고 고착제의 흡수가 주로 일어나는 2-4  $\mu$ m 부근에서 반사량이 작기 때문이다. 올바른 코팅의 효과 예측을 위해서는 다중 산란, 중속 산란, 내부 반사, 고착제의 흡

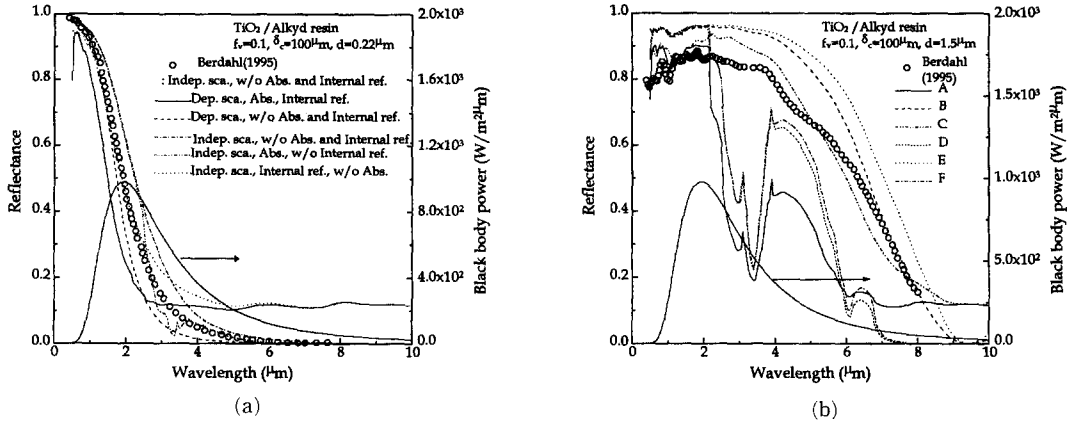


Fig. 3 Spectral reflectance computed for 100  $\mu\text{m}$  thickness layers with 0.1 volume fraction of rutile pigment: (a) pigment diameter 0.22  $\mu\text{m}$ , (b) pigment diameter 1.5  $\mu\text{m}$  (A : dependent scattering, absorption by binder, internal reflectance, B : dependent scattering, C : dependent scattering, internal reflectance, D : dependent scattering, absorption by binder, E : independent scattering, F : independent scattering, absorption by binder).

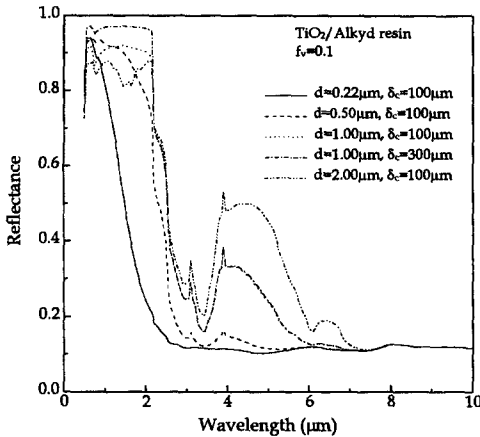


Fig. 4 Spectral reflectance computed for 100  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$  thickness layers with 0.1 volume fraction of rutile pigment, for diameters of 0.22, 0.5, 1.0, 1.5  $\mu\text{m}$ .

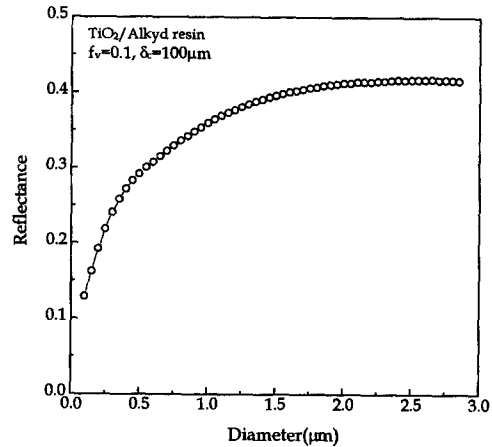


Fig. 5 Effect of pigment diameter on reflectance computed for 100  $\mu\text{m}$  thickness layers with 0.1 volume fraction of rutile pigment.

수 영향 등을 고려해야 한다.

Fig. 4는 같은 체적 분율의 조건에서 입자의 크기와 코팅의 두께에 따른 파장별 반사율을 보여주고 있다. 입자의 지름이 클수록 역산란(back scattering)의 강화때문에 반사율이 증가하는 경향을 보여주고 있으나 두께의 영향은 100  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ 일 경우의 결과에 큰 차이가 없음을 제시하고 있다.

도로 입자의 지름, 체적 분율, 코팅의 두께가 반사율에 미치는 영향에 대한 정리된 결과가 다음의 Fig. 5-Fig. 7에 도시되어 있다. 적외선 영역인

0.5-8  $\mu\text{m}$ 에 대하여 파장별 반사율을 계산한 후, 이를 적분하여 평균값을 구하는 방법으로 반사율을 비교하였다. Fig. 5로부터 화염 방재에 있어서 최적화된 입자 크기는 1-3  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

도로 입자 크기의 최적화에 의한 반사율은 입자의 체적 분율을 증가시키거나 코팅의 두께를 증가 시킴으로써 반사율을 크게 할 수 있을 것이다. 그러나 코팅에 첨가하는 도로의 체적 분율과 코팅 두께의 최적화 크기도 존재한다. 입자의 크기에 따라 조금 다르지만 체적 분율이 적어도 0.1 이상이면 1500 K의 복사 열원을 최대로 반사할 수 있음을

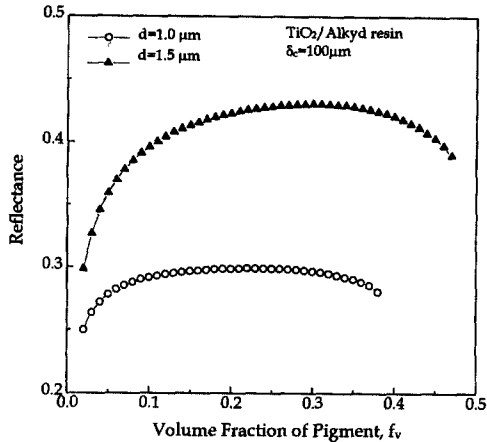


Fig. 6 Effect of pigment volume fraction on reflectance computed for 100  $\mu\text{m}$  thickness layers with 1.0 and 1.5  $\mu\text{m}$  diameter of rutile pigment.

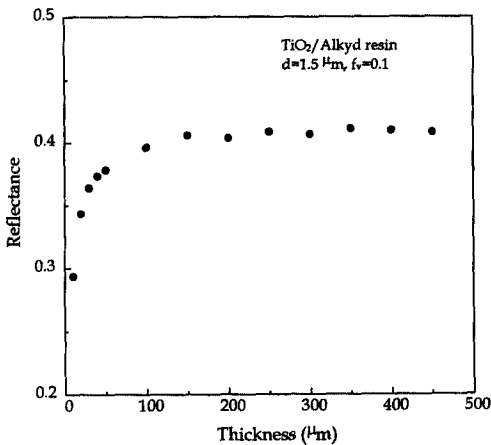


Fig. 7 Effect of coating thickness on reflectance computed for coating layers with 1.5  $\mu\text{m}$  diameter of rutile pigment and 0.1 volume fraction.

Fig. 6에서 알 수 있다. 도료 입자들이 증가할수록 산란 계수가 증가하므로 반사율도 증가한다. 그러나 열복사의 반사는 역산란(back-scattering)에 의하여 발생하는데 체적 분율이 증가할수록 산란 계수는 증가하지만 동시에 종속 산란의 영향도 증가하여 산란 계수가 감소한다. 이 두 가지의 상반된 기대가 어떤 최적화 값을 형성하게 되는 것이다.

Fig. 7은 코팅 두께가 100  $\mu\text{m}$  이상이면 반사율의 차이가 크지 않음을 보여준다. 이는 최적 두께가 약 100  $\mu\text{m}$  정도이며 이 두께에서는 열복사가 코팅으로 입사하는 초기 부분에서 반사가 대부분

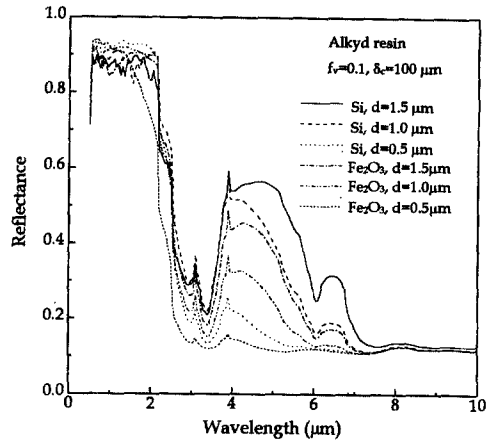


Fig. 8 Spectral reflectance computed for 100  $\mu\text{m}$  thickness coating layers with 0.1 volume fraction of silicon and ironoxide pigment, for diameters of 0.5, 1.0, 1.5  $\mu\text{m}$ .

일어나고 더 깊이 진행되는 복사량은 고착제에 흡수됨을 의미하고 더 두꺼운 코팅 층이 필요하지 않다는 사실을 제시하고 있다. 이러한 임의 코팅 두께 이상에서 반사율이 변화하지 않는 사실은 한편 기층 매질의 반사율이 그리 중요한 요소가 되지 못함을 의미한다. 왜냐하면 기층 매질의 반사 또는 흡수가 반사율에 미치는 영향은 기층 매질까지 도달하는 복사 열유속에 의존하는데 코팅 두께가 충분히 크게 되면 그 열유속이 작게 되기 때문이다.

또 다른 도료 입자들에 대한 해석도 수행되었다. Si와  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 를 이용하였는데 이들도  $\text{TiO}_2$ 와 같이 적외선 영역에서는 무시 가능할 정도로 작은 흡수 특성을 지니며 Si의 경우에는 매우 큰 굴절율(약 3.45)을 지니고 있어 큰 반사율을 기대할 수 있다. Fig. 8은 이를 이용한 반사율 결과를 보여주고 있으며  $\text{TiO}_2$ 를 이용한 결과인 Fig. 4와 비교할 때 더 효율적인 반사가 가능함을 보여준다. 특히 실리콘은 큰 굴절율로 인한 반사 특성을 명확히 보여주고 있으며 이를 사용한다면 최적 입자 크기는 감소할 것이다.

### 3.2 온도 분포 특성

앞 장에서의 코팅 연구를 바탕으로 코팅이 PMMA 표면 위에 적용되었음을 가정하여 그 온도 분포를 해석하였다. 우선 해석에 사용된 코드의 검증과 코팅의 영향에 의한 결과와 비교하기 위하여 코팅이 없이 열복사에 노출된 PMMA의 표면 온도

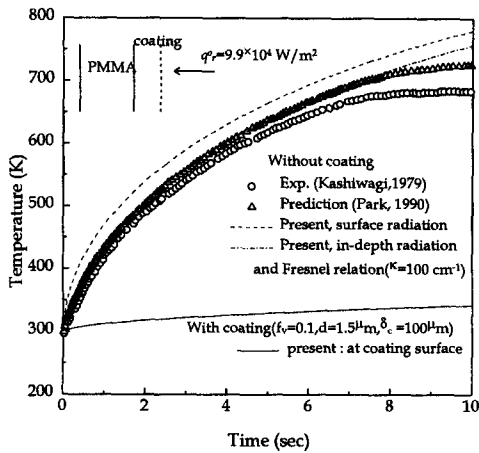


Fig. 9 Comparison of surface temperature rise.

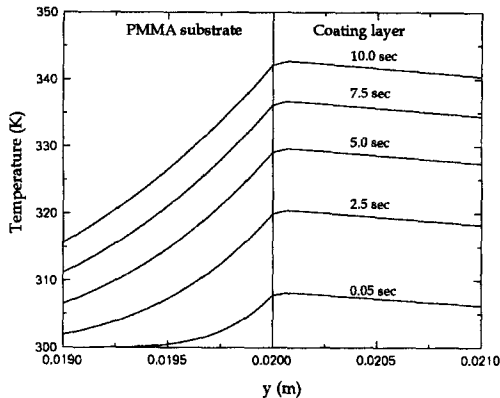


Fig. 10 Temperature distributions of opaque substrate and the semi-transparent 100  $\mu\text{m}$  thickness coating layer with 0.1 volume fraction and 1.5  $\mu\text{m}$  diameter of pigment.

를 해석하였다. Fig. 9는 코팅이 적용되었을 때와 적용되지 않았을 때의 PMMA와 코팅의 표면 온도 변화이다. 코팅이 적용되지 않았을 때, 실험 결과와 유사하게 빠른 속도로 표면 온도가 상승함을 관찰할 수 있다. 이 때 PMMA도 반 투과성으로 고려하여 내부 복사전달(in-depth radiation)을 해석하여야 정확한 해를 얻을 수 있음을 알 수 있고 Park과 Tien<sup>(13)</sup>의 수치해와 본 연구 결과가 약 8 초 이후에 차이가 나는 것은 온도 증가에 따른 열분해와 연소와 그로 인한 기체 복사 열전달이 이 연구에서 고려되지 않았기 때문이다. 코팅이 존재할 때에는 해석의 간편성을 위해서 PMMA를 불투과성으로 가정하여 복사전달방정식을 코팅 내부에서만 해석하였다.  $\text{TiO}_2$  도료를 이용하였고 앞에서 최적화 조건이라고 결과로써 얻은 바와 같이 도

료 지름이 1.5  $\mu\text{m}$ , 체적 분율이 0.1이 되게 하여 두께가 100  $\mu\text{m}$ 인 코팅을 PMMA 표면에 적용하였다. 에너지 보존 방정식을 계산하는데 있어서 PMMA의 물성치는 Park과 Tien<sup>(13)</sup>의 값들을 이용하였다. 코팅 내부의 복사 해석에서 코팅의 복사 특성들은 파장이 2  $\mu\text{m}$ 일 경우의 값들을 사용하였다. 코팅이 없을 때에는 같은 조건에서 약 8초 후에 활발한 열분해가 발생하는 온도에 접근하지만 코팅이 존재할 때에는 350 K도 초과하지 않을 정도로 온도 상승 지연효과, 즉 화염 방재 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 10의 내부 온도 분포는 Fig. 9와 같은 조건에서 외부 열복사에 의한 PMMA의 가열과 코팅 외부에서 자연 대류에 의한 열손실을 보여 주고 있다. 코팅의 복사 흡수가 고려되지 않는다면 코팅의 온도 분포는 외부 방향으로 더욱 급격히 감소할 것이다. 코팅이 복사열에 대한 적외선 영역의 반사를 증가시켜 가연성 물질을 보호하지만 코팅의 온도도 한계 조건이 되기 때문에 코팅의 온도 변화도 중요한 해석 내용이 되며 특히 복사 흡수가 존재할 때는 더욱 중요해진다.

#### 4. 결 론

도료를 포함하는 코팅을 화재 방재에 응용하는 것이 반사를 통한 가연성 물질의 보호 측면에서 매우 유용한 방법일 수 있음을 제시하였다. 코팅의 복사 전달 해석에 있어서 종속 산란과 내부 반사는 고려되어야 하며 특히 고차계의 복사 흡수는 파장별 반사 특성을 변화시키므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 또한 비정상적 전도, 복사 열전달의 해석을 통한 내부 온도 분포와 표면 온도 추이는 코팅으로 가연성 물질의 점화 지연 또는 화염 전파 속도를 크게 감소시킬 수 있음을 예측할 수 있게 한다.

#### 참고문헌

- (1) Quintiere, J., 1984, "A Perspective on Compartment Fire Growth," *Combustion Science and Technology*, Vol. 39, pp. 11~54.
- (2) Paul, S., 1996, "Paint Properties and Their Evaluation, in Surface Coatings: Science and Technology," 2nd ed., Paul, S., ed., Wiley,



- New York.
- (3) Kunitomo, T., Shafey, H. M., and Teramoto, T., 1979, "Theoretical Study on Radiative Properties of a Painted Layer Containing Spherical Pigment," *Bulletin of JSME*, Vol. 22, No. 173, pp. 1587~1594.
  - (4) Berdahl, P., 1995, "Pigments to Reflect the Infrared Radiation From Fire," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 355~358.
  - (5) Tien, C. L., and Drolen, B. L., 1987, "Thermal Radiation in Particulate Media With Dependent and Independent Scattering," *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Chawla, T. C., ed., Vol. 1, pp. 1~32.
  - (6) Hottel, H. C., Sarofim, A. F., Dazell, W. H., and Vasalos, I. A., 1971, "Optical Properties of Coatings. Effect of Pigment Concentration," *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 10, pp. 1895~1898.
  - (7) Brewster, M. Q., and Tien, C. L., 1982, "Radiative Transfer in Packed Fluidized Beds : Dependent Versus Independent Scattering," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 573~579.
  - (8) Kim, M. Y., and Baek, S. W., 1996, "Numerical Analysis of Conduction, Convection, and Radiation in a Gradually Expanding Channel," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 29, pp. 725~740.
  - (9) Bohren, C. F., and Huffman, D. R., 1996, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, New York.
  - (10) Siegel, R., and Spukler, C. M., 1993, "Refractive Index Effects on Radiation in an Absorbing, Emitting, and Scattering Laminated Layer," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 194~200.
  - (11) American Institute of Physics Handbook, 1972, Third ed., p. 6~41.
  - (12) Kashiwagi, T., 1979, "Experimental Observation of Radiative Ignition Mechanisms," *Combustion and Flame*, Vol. 34, pp. 231~244.
  - (13) Park, S. H., and Tien, C. L., 1990, "Radiation Induced Ignition of Solid Fuels," *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 7, pp. 1511~1520.
  - (14) Poirien, D. R., and Geiger, G. H., 1994, *Transport Phenomena in Materials Processing*, A Publication of TMS, p. 210.