

Kubelka-Munk 모델을 이용한 피부 분광반사율 연구

조 아 라 · 김 수 지* · 이 준 배* · 심 건 영 · 백 민 · 조 은 슬 · 장 지 희* · 장 은 선* · 김 연 준* · 유 권 종* · 한 정 우†

서울시립대학교 화학공학과, *코스맥스 R&I Center
(2015년 12월 19일 접수, 2016년 2월 2일 수정, 2016년 3월 15일 채택)

A Study of Skin Reflectance Using Kubelka-Munk Model

A Ra Cho, Su Ji Kim*, Jun Bae Lee*, Geon Young Sim, Min Back, Eun Seul Cho, Ji Hui Jang*, Eunseon Jang*,
Youn Joon Kim*, Kweon Jong Yoo*, and Jeong Woo Han†

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea
*Cosmax R&I Center, Gyeonggi-do 13486, Korea

(Received December 19, 2015; Revised February 2, 2016; Accepted March 15, 2016)

요약: 빛은 피부에서 개개인마다 상이한 반사, 흡수 및 산란 등의 광학적 거동을 보여준다. 특히, 피부에서 빛의 반사는 분광반사율이라는 물리량 측정을 통해 개인의 피부 밝기 지표로 널리 활용되어 왔다. 따라서 피부에서 빛의 반사 거동 연구는 개인 맞춤형 화장품, 특히 메이크업 제품 개발에 있어 좀 더 효율적인 처방 개선에 기여하거나 새로운 평가법에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 Kubelka-Munk 모델을 이용하여 개인의 피부 특성에 따른 빛의 분광반사율 거동에 대해 다각적인 분석을 수행하였다. 또한, 상기 모델과 기존에 알려진 문헌 정보를 이용하여 개인의 피부 분광반사율에 영향을 줄 수 있는 피부 두께 및 헤모글로빈 등의 다양한 파라미터들에 대한 기여도 분석을 수행하였다. 이를 통해, 일반적인 여성의 피부에서의 분광반사율 이론치를 계산하였고, 분광반사율 실측을 통해 이론치와 실측치 간의 유사성을 확인하였다. Kubelka-Munk 모델을 이용한 피부 분광반사율 연구는 향후 새로운 개인 맞춤형 메이크업 화장품 개발에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: Light shows various optical behaviors such as reflection, absorption, and scattering on skin for individuals. In particular, reflection of light from the skin has been widely used as the brightness index of the skin of individuals through the measurement of the physical quantity of spectral reflectance. Therefore, the study of light behavior on skin would be useful for the preparation of new evaluation method in the development stage of make-up products. In this study, multi-dimensional analysis for spectral reflectance behavior of light on individual skin was performed using Kubelka-Munk model. Also, we analyzed the contribution of skin parameters such as skin thickness and hemoglobin, which could affect the spectral reflectance, using above model and literature information. Base on this, we calculated the theoretical reflectance of normal women for visual light, which showed good agreement with the measured reflectance. Our study of light propagation in skin based on Kubelka-Munk model provides useful insight for the development of personalized cosmetic in the near future.

Keywords: Kubelka-Munk theory, skin optics, reflectance of skin tissue, cosmetics

† 주 저자 (e-mail: jwhan@uos.ac.kr)
call: 02)6490-2373

1. 서론

최근 IT기술의 진보와 함께 많은 산업 분야에서 개인 맞춤형 제품 또는 개인 맞춤형 서비스 개발에 대한 활발한 연구가 진행 중에 있다. 화장품 분야 역시 개인의 유전자 또는 피부 특성을 고려한 많은 연구 활동이 수행되고 있다. 특히, 메이크업 화장품은 개인의 피부상태와 메이크업에 대한 성향이 매우 다양하기 때문에 개인 맞춤형 화장품에 있어 가장 적합한 화장품 분야라고 할 수 있다. 과거 1990년대까지 메이크업 화장품은 피부 결점을 최대한 차폐하는 것이 가장 주된 기능이였다. 하지만, 이러한 진한 메이크업은 피부가 인위적이고 부자연스럽게 보이는 단점이 있었다. 이에 비해 최근 한국, 일본 및 중국 등의 아시아 여성 소비자들은 피부 결점을 커버함과 동시에 투명하고 화사한 피부 표현 효과를 구현해 줄 수 있는 자연스러운 메이크업 제품을 요구하고 있다[1]. 이러한 니즈를 충족시키기 위해 다양한 소재 및 화장품 제형 기술들이 요구되고 있다.

상기와 같은 전통적인 접근 방법 이외에 최근 피부에서의 빛의 거동을 고려한 피부광학 분야가 많은 주목을 받고 있다. 피부 광학 분야는 피부에서 빛의 반사, 흡수, 산란에 대한 거동을 세포 수준까지 발전시킨 학문으로 피부과 시술에 최초로 이용되었다. 피부 광학을 이용한 피부과 시술은 주로 육안으로 관찰하기 어려운 피부상태를 편광 광학장비를 이용하여 관찰하는 용도로 많이 이용되었다[2].

피부 광학분야는 시뮬레이션 기법을 이용한 화장품 제품개발 및 피부 상태 예측 연구가 본격화된 이후, 화장품 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 시세이도는 파운데이션 연구에 시뮬레이션 기법을 적용하여 실험횟수를 줄이고, 최적 처방을 찾을 수 있는 새로운 방법을 개발하였다[3]. 또한, 시뮬레이션 기법은 피부 상태 예측 연구 분야에서도 매우 많은 주목을 받아왔다. 특히, Monte Carlo 시뮬레이션 기법과 Kubelka-Munk 모델이 가장 대표적인 시뮬레이션 기법으로 사용되었다. Monte Carlo 시뮬레이션은 피부에서 빛의 거동을 잘 설명해 줄 수 있는 모델로 피부 분광반사율 이론치 계산에 많이 활용되었다[4,5]. 하지만, 복잡한 모델식과 시뮬레이션 과정에서 많은 시간이 필요한 단점이 있다. 이에 따라, 최근에는 상대적으로 단순한 모델식을

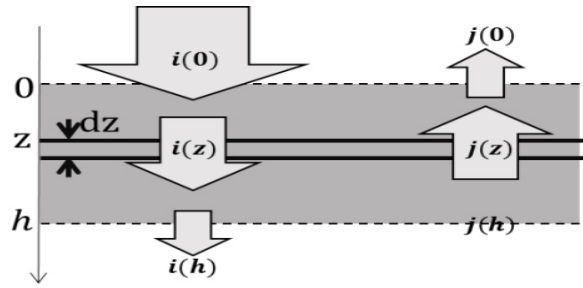


Figure 1. Upward and downward fluxes crossing a sub-layer of thickness, z .

가지면서 시뮬레이션 운영 시간도 비교적 짧은 Kubelka-Munk 모델이 피부 분광반사율 연구에 많이 활용되고 있다[6-8].

본 연구에서는 Kubelka-Munk 모델을 이용하여 피부 분광반사율 연구를 통해 피부 분광반사율에 영향을 주는 다양한 파라미터들에 대한 분석을 수행하였다. 비록, 시뮬레이션을 위해 필요한 다양한 파라미터 수치들은 기존 문헌자료를 통해 수집하였지만, 이를 근거로 얻은 분광반사율 이론치와 실측치 간의 유사성을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 시뮬레이션의 결과로 피부 분광반사율에 영향을 주는 다양한 파라미터들에 대한 기여도 분석을 할 수 있었다. 이러한 기여도 분석 결과는 향후 개인 맞춤형 메이크업 화장품 개발에 있어 기존 시행착오 방식보다 많은 비용과 시간을 줄일 수 있는 가능성이 있다고 사료된다.

2. 재료 및 방법

2.1. Kubelka-Munk 모델

Kubelka-Munk 모델은 하나의 층에서 발생하는 빛의 거동을 설명하는 모델이다[2]. 이때, 빛의 거동은 단면층의 법선 방향만 고려하게 된다. 들어간 빛의 양은 단면층에서 흡수와 산란에 의해 줄어들고 난 뒤, 다시 반사되어 나온다. 이러한 Kubelka-Munk 모델을 수식으로 표현하기 위해 미소 두께의 내부 층을 출입하는 두 방향의 빛의 거동을 고려한다. 나가는 방향의 빛을 $j(z)$ 라 하고, 들어가는 방향의 빛을 $i(z)$ 이라 한다. 층의 두께는 $h[\mu\text{m}]$, 흡수 계수는 $A[\text{cm}^{-1}]$ 그리고 산란 계수는 $S[\text{cm}^{-1}]$ 라 한다.

Figure 1에서 미소한 두께 dz 를 가지는 층을 살펴보

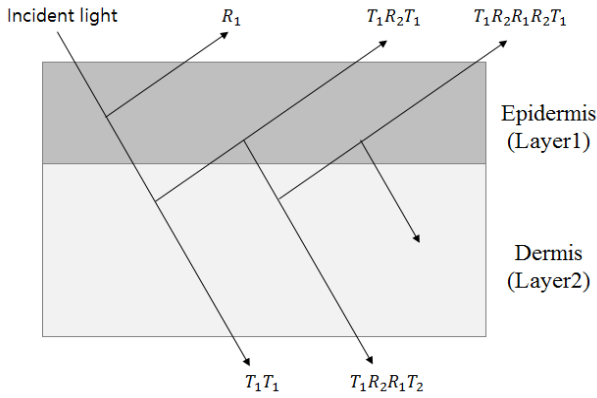


Figure 2. Reflectance and transmittance for two-layered model.

면, 층의 윗면으로 들어오는 빛은 $i(z)$, 층의 아랫면에서 들어오는 빛은 $j(z+dz)$ 이다. 이때, 산란 및 흡수에 의해서 빛을 잃거나 얻게 되는데, 잃게 되는 빛의 양은 층의 두께와 들어오는 빛의 양, 그리고 흡수 계수(A) 및 산란 계수(S)에 비례하게 된다. 먼저 층의 위쪽에서 들어오는 빛 $i(z)$ 는 $Ai(z)dz$ 만큼 층에 흡수되고, $Si(z)dz$ 만큼 산란하게 된다. 다음으로 층의 아래쪽에서 들어오는 빛인 $j(z+dz)$ 를 고려해 보면, $Aj(z+dz)dz$ 만큼 층에 흡수되고, $Sj(z+dz)dz$ 만큼 산란이 일어난다. 이를 종합하면 들어오는 빛의 양과 나가는 빛의 양에 관한 밸런스 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} i(z+dz) = i(z) - Ai(z)dz - Si(z)dz + Sj(z+dz)dz \\ j(z) = j(z+dz) - Aj(z+dz)dz - Sj(z+dz)dz + Si(z)dz \end{cases} \quad (1)$$

Eq. (1)을 정리해 준 뒤, dz 로 나누어주고 dz 의 값이 0에 가까워질 때

$$\begin{cases} \frac{di(z)}{dz} = -(A+S)i(z) + Sj(z) \\ \frac{dj(z)}{dz} = -Si(z) + (A+S)j(z) \end{cases} \quad (2)$$

Eq. (2)를 Kubelka-Munk 식이라 부른다. 이 식을 통해 $i(z)$ 와 $j(z)$ 를 얻기 위해서 Laplace transform을 적용하면

$$\begin{cases} i(z) = i(0)\cosh(bSz) + \frac{1}{b}[j(0) - ai(0)]\sinh(bSz) \\ j(z) = j(0)\cosh(bSz) + \frac{1}{b}[aj(0) - i(0)]\sinh(bSz) \end{cases} \quad (3)$$

$$a = \frac{A+S}{S}, \quad b = \sqrt{a^2 - 1} \quad (4)$$

을 얻게 된다. Eq. (3)이 Kubelka-Munk 식의 해가 된다. Eq. (3)은 층에서의 경계 조건인 $z=0$ 과 $z=h$ 에서의 값들에 의해 더 구체적인 값을 가질 수 있다. 따라서 경계 조건들은 아래와 같다.

$$\begin{cases} i(0) = I_0 \\ j(h) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

분광반사율이 표면에서 들어간 빛에 대한 표면에서 나온 빛이므로 $\frac{j(0)}{I_0}$ 인 것을 고려하여 Eq. (3)과 Eq. (5)를 이용하여 풀면

$$R = \frac{\sinh(bSh)}{b \cosh(bSh) + a \sinh(bSh)} \quad (6)$$

마찬가지로 투과율이 표면에서 들어간 빛에 대한 내부에 들어간 빛이므로 $\frac{i(h)}{I_0}$ 인 것을 고려하면

$$T = \frac{b}{b \cosh(bSh) + a \sinh(bSh)} \quad (7)$$

$$a = \frac{A+S}{S}, \quad b = \sqrt{a^2 - 1} \quad (4)$$

가 된다. 따라서 흡수 계수 A , 산란 계수 S 및 피부의 두께 h 를 알면, Eq. (6)과 (7)를 통해 분광반사율 R 과 투과율 T 를 구할 수 있게 된다.

2.2. 피부 모델

피부는 다층 구조로 크게는 가장 바깥쪽의 표피와, 진피 그리고 피하조직으로 이루어져 있다. 이 중, 피부색을 크게 결정짓는 발색단은 표피의 멜라닌과 진피의 혈액이다. 본 연구에서는 사람의 피부색을 시뮬레이션을 통해 분광반사율로 나타내는 것을 목적으로 하기 때문에 피부를 간단하게 표피와 진피의 두 층으로 모델링하였다. 원래의 Kubelka-Munk 식은 하나의 층만을

고려한 식이다. Figure 2는 두 개의 층에 대한 모식도와 각 층에서 발생하는 반사와 투과를 고려한 빛의 경로를 나타낸 것이다. 따라서 피부 모델의 표피와 진피에서 각각 계산된 분광반사율을 전체 피부층의 값으로 합쳐야 한다.

빛이 들어올 때 Layer 1에서 발생하는 분광반사율 R_1 에 의해 빛이 나가게 되고, 일부는 Layer 1에 대한 투과율 T_1 에 의해 투과한다. Layer 1을 투과하여 Layer 2에 들어간 빛은 Layer 2에 대한 분광반사율 R_2 에 의해 반사되고, 일부는 다시 Layer 2에 대한 투과율 T_2 에 의해 투과한다. 이런 식으로 반복하여 일부는 투과하고, 일부는 반사되면서 전체 분광반사율 R_{total} 값은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_{total} = R_1 + T_1^2 R_2 (1 + R_1 R_2 + \dots) = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{1 - R_1 R_2} \quad (8)$$

또한, 전체 투과율 T_{total} 값은 다음과 같다.

$$T_{total} = T_1 T_2 (1 + R_1 R_2 + \dots) = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \quad (9)$$

Eq. (8)와 Eq. (9)를 통해 표피와 진피에서 구한 분광반사율과 투과율을 전체 피부 모델에 대한 분광반사율과 투과율로 나타낼 수 있다.

2.3. 흡수 계수와 산란 계수

각 층에서 발생하는 분광반사율과 투과율을 알기 위해선 흡수 계수와 산란 계수, 그리고 층의 두께가 필요하다. 각 층에서 흡수 계수와 산란 계수에 영향을 주는 요소로는 각각 표피에서는 멜라노솜에 의해 생산되는 멜라닌을, 진피에서는 혈액에 의한 헤모글로빈을 들 수 있다. 따라서 이 연구에서의 관찰대상은 발색단인 표피에서의 멜라닌과 진피에서의 헤모글로빈, 그리고 발색단 이외의 부분, baseline으로 한정할 수 있다[9,10].

2.3.1. 표피에서의 흡수 계수

표피는 발색단인 멜라닌과 baseline으로만 구성되어 있다고 가정하여 흡수 계수를 계산하였다. baseline의 경우, 발색단이 없기 때문에 흡수 계수를 직접적으로

측정하는 것이 매우 어렵다. 그렇기 때문에 Jacques가 피가 없는 생쥐를 이용하여 얻은 실험적인 근사식 Eq. (10)를 이용하였다.

$$A_{base}(\lambda) = 0.244 + 85.3e^{-\frac{(\lambda-154)}{66.2}} \quad (10)$$

위 식에서의 흡수 계수는 파장에 관한 값으로 파장 350 ~ 1100 nm에서 유효하다. Eq. (11)는 멜라닌의 흡수 계수식으로, 마찬가지로 파장과 관련이 있는 식이다[9].

$$A_{mel}(\lambda) = 6.6 \times 10^{11} \times \lambda^{-3.33} \quad (11)$$

표피의 흡수 계수는 멜라닌의 부피분율 f_{mel} 값에 의해 결정되며, 사람의 피부에 따라 다르다. 최종적으로 표피의 흡수 계수 $A_{epi}[cm^{-1}]$ 는 아래 식 Eq. (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{epi}(\lambda) = (1 - f_{mel})A_{base}(\lambda) + f_{mel}A_{mel}(\lambda) \quad (12)$$

2.3.2. 진피에서의 흡수 계수

진피의 흡수 계수는 헤모글로빈과 baseline에 의해 영향을 받는다. 표피와 마찬가지로 진피에서의 baseline도 실험적 결과에 의해 Eq. (10)에 따른다.

헤모글로빈의 흡수 계수는 헤모글로빈의 몰 당 흡광 계수를 단위 환산을 통해서 얻어지게 되며, 이때 몰 흡광 계수 $e(\lambda)[cm^{-1}(mol/l)^{-1}]$ 는 파장에 대한 값이다. 헤모글로빈을 포함하는 혈액의 흡수 계수 A_{blood} 는 아래와 같다.

$$A_{blood}(\lambda) = 0.0054 e(\lambda) \quad (13)$$

하지만, 실제로 헤모글로빈은 산소와 결합한 oxy-hemoglobin과 산소와 결합하지 않은 deoxyhemoglobin이 있으며, 두 경우, 흡수 계수가 달라지게 된다. 따라서 oxyhemoglobin의 분율, 즉 산소 포화도 S_{oxy} 를 고려하여 혈액의 흡수 계수를 나타내면 아래와 같다.

Table 1. Consideration of Reflectance and Transmittance for Multiple Layer

	$a[cm^{-1}]$	b	$a'[cm^{-1}]$	f_{Ray}	b_{Mie}
Dermis	45.3	1.292	43.6	0.41	0.562
Epidermis	68.7	1.161	66.7	0.29	0.689

Reference: [9] S. L. Jacques

Table 2. Skin Parameter for Asian

Skin parameters	Range	Reference
Melanin Volume Fraction	11 ~ 16%	[10] S. L. Jacques
Epidermis thickness	71.5 ~ 124.9 μm	[12] Y. Lee et al.
Dermis thickness	851.6 ~ 1 301.6 μm	[12] Y. Lee et al.
f_{blood} , Vol fraction of blood	2 ~ 5%	[10] S. L. Jacques
S_{oxy} , Oxygen saturation	95 ~ 100%	[13] A. krishnaswamy et al.

$$A_{blood}(\lambda) = S_{oxy}A_{oxy} + (1 - S_{oxy})A_{deoxy} \quad (14)$$

여기서 oxyhemoglobin의 흡수 계수 A_{oxy} 와 deoxy-hemoglobin의 흡수 계수 A_{deoxy} 는 각각의 물 흡광 계수의 값을 단위 환산을 통해서 얻게 된다. 이번 연구에서는 Eq. (14)를 이용하여 헤모글로빈의 흡수계수를 나타냈다.

표피와 마찬가지로 진피의 흡수 계수를 얻기 위해서는 혈액의 부피 분율을 알아야 한다. 피부 내 혈액의 부피 분율은 사람과 피부 부위에 따라 다양한 값을 가지며, 문헌에 따르면 대략 2 ~ 5%로 볼 수 있다[10]. 혈액의 부피분율 f_{blood} 를 고려한 진피의 흡수 계수 $A_{der}[cm^{-1}]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{der}(\lambda) = (1 - f_{blood})A_{base}(\lambda) + f_{blood}A_{blood}(\lambda) \quad (15)$$

2.3.3. 표피와 진피에서의 산란 계수

진피는 대부분이 콜라겐 섬유로 이루어져 있으며, 전체 피부의 90%의 무게를 차지한다. 진피에서의 흡수는 헤모글로빈에 의해서 이루어지지만, 산란은 주로 콜라겐 섬유에 의해 이루어진다. 반면, 표피는 매우 얇기 때문에 산란의 정도가 약해서 측정하기 힘들다. 하지만 표피를 구성하는 케라틴 섬유는 진피의 콜라겐 섬유와 유사하므로 표피의 산란계수를 진피의 산란계수와 유사하다고 가정할 수 있다[11].

인체 조직에서의 산란 계수 $S[cm^{-1}]$ 는 Eq. (16)를

따른다. 아래 식은 파장에 대한 산란식이며, 레퍼런스 파장인 500 nm에서의 Rayleigh와 Mie scattering식을 종합하여 나타낸 식이다[9,10].

Eq. (16)에서 a' 는 Eq. (18)의 식에서 파장이 500 nm 일 때의 산란 계수이고, b 는 scattering power로 파장에 대해 영향을 받게 된다.

$$S(\lambda) = a' \left(f_{Ray} \left(\frac{\lambda}{500(nm)} \right)^{-4} + (1 - f_{Ray}) \left(\frac{\lambda}{500(nm)} \right)^{-b_{Mie}} \right) \quad (16)$$

$$a' = a \left(\frac{\lambda}{500(nm)} \right)^b \quad (17)$$

(16)의 $a' f_{Ray} (\lambda/500(nm))^{-4}$ 는 Rayleigh scattering을 나타내는 항이고, $a' (1 - f_{Ray}) (\lambda/500(nm))^{-b_{Mie}}$ 는 Mie scattering을 나타내는 항이며, f_{Ray} 은 Rayleigh scattering의 fraction이다. 이 식은 400 ~ 1300 nm의 파장에서 빛의 산란을 잘 모사하기 때문에 진피와 표피의 산란 계수를 계산할 수 있다. Table 1을 통해 진피와 표피에서의 정확한 흡수 계수와 산란 계수 값을 얻을 수 있다.

2.3.4. 분광반사율 측정

실제 사람 피부에 대한 파장별 분광반사율 측정을 위해 분광색차계 Spectrophotometer[®] CM-2500d (Konica Minolta, USA)를 이용하였다. 어린이 11명(평균 10.2세) 피부에 대한 결과를 100으로 하고 상대 면적비를 이용

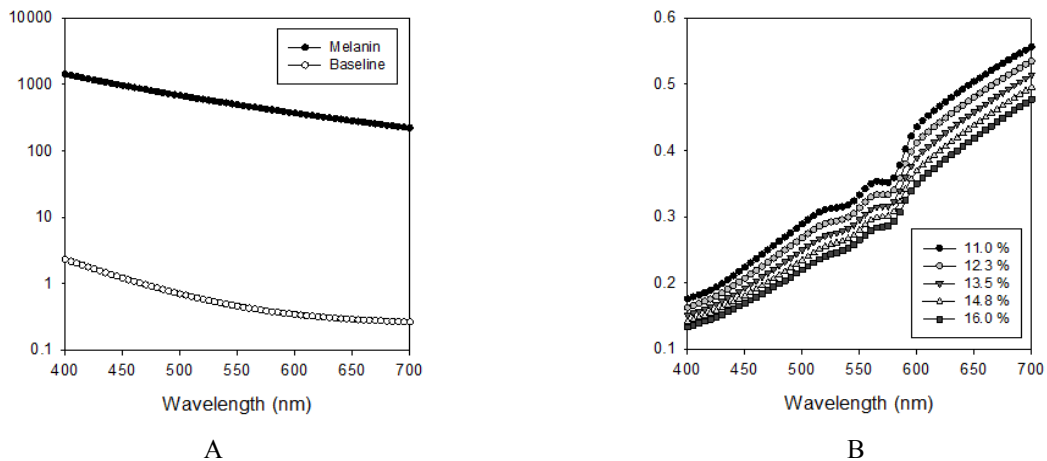


Figure 3. The calculated (A) absorption coefficient of melanin and baseline within visible wavelength and (B) reflectance with variation of the epidermis melanin volume fraction from 11 to 16%.

하여 제품 사용 전후에 따른 성인(21 ~ 40세, 21명) 피부의 변화를 평가하였다. 제품 사용 전과 사용 20 min 후 시점에서 안면 뺨 정면 부위의 분광반사율 값을 3회 측정 후 각 파장대별 평균값을 구하였다. 또한, 성인 피부와 어린이 피부에서의 분광반사율 결과의 X-Y 좌표 데이터(X축: 파장, Y축: 반사율)를 구분구적법을 이용하여 파장대별로 각각의 면적을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 피부 파라미터의 기여도

분광반사율과 투과율을 계산하기 위해서는 다양한 피부 파라미터가 필요하다. 이 파라미터의 종류에는 표피에 영향을 주는 멜라닌 부피 분율, 표피 두께와 진피에 영향을 주는 진피 두께, 혈액의 부피 분율 및 산소 포화도가 있다. 각 피부 파라미터의 기여도를 계산하기 위해서 아시아인의 파라미터 값(Table 2)을 이용하였으며 해당 범위 내의 각 요소가 전체 분광반사율에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 이러한 계산을 통해 개개인마다 다르게 나타나는 피부 파라미터 값을 Kubelka-Munk 모델에 적용하여 정량적인 피부 평가를 할 수 있고, 각 파라미터의 기여도를 측정하여 어떤 파라미터가 피부의 분광반사율에 핵심적인 역할을 하는지 알 수 있다. 또한, 결과를 통해 피부를 개선하기 위해서는 화장품을 통한 어떤 변화가 필요한지 알 수 있다.

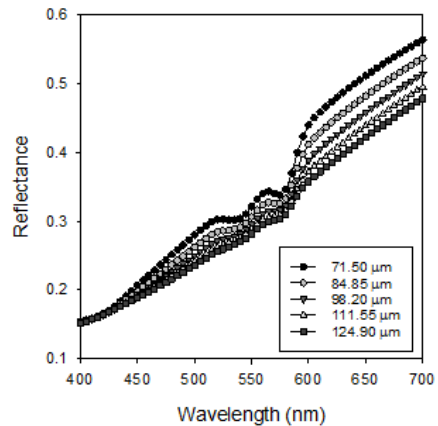


Figure 4. The calculated reflectance with variation of the epidermis thickness from 71.50 to 124.90 μm .

3.1.1 멜라닌의 부피 분율

Figure 3은 가시광선 영역에서의 멜라닌과 baseline의 흡수 계수와 멜라닌의 부피분율이 11%에서 16%로 증가함에 따라 변하는 분광반사율의 계산값을 나타낸 그래프이다. Figure 3B를 보면 표피의 멜라닌 부피 분율이 증가함에 따라 분광반사율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 밝은 피부는 높은 반사율을 나타내고 어두운 피부는 낮은 반사율을 가지는 것을 의미한다. Figure 3A의 그래프가 진동 없이 매끄러운 그래프를 보이므로 멜라닌 농도별 파장에 따른 반사율 그래프에서 나타나는 ‘W’모양이 멜라닌에 의한 것이 아님을 알 수 있다. ‘W’모양의 곡선은 혈액 속 헤모글로빈의 흡

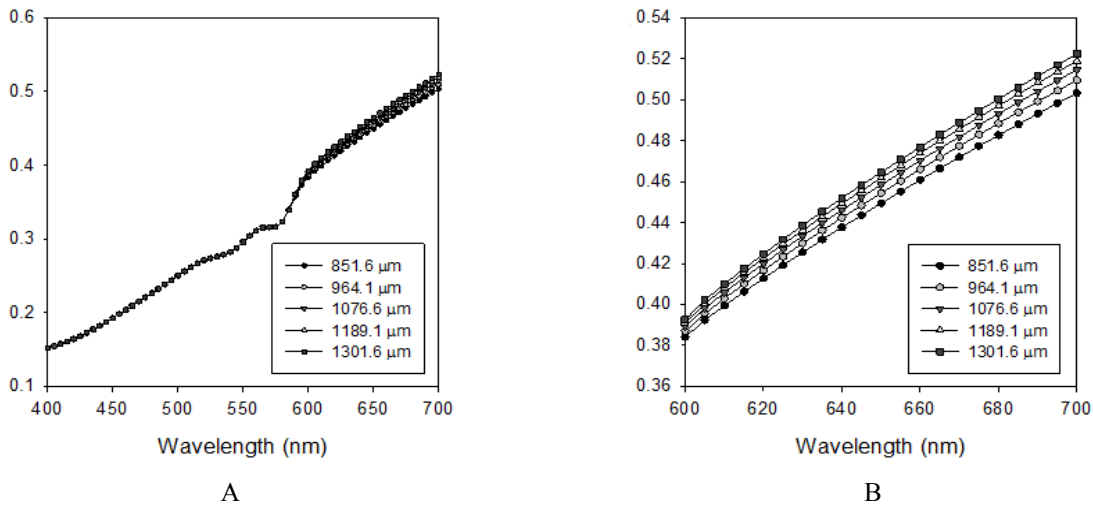


Figure 5. The calculated reflectance with variation of the dermis thickness (A) from 851.6 to 1301.6 μm and (B) enlarging only in the range of 600 ~ 700 nm.

수계수에 기인한 것이다. 멜라닌의 영향이 감소하면 혈액에 의한 기여가 상대적으로 증가하면서 헤모글로빈에 의한 ‘W’모양을 띠도록 하기 때문이다.

3.1.2 표피 두께

$$R = \frac{\sinh(bSh)}{b \cosh(bSh) + a \sinh(bSh)} \quad (6)$$

$$T = \frac{b}{b \cosh(bSh) + a \sinh(bSh)} \quad (7)$$

$$R_{total} = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{1 - R_1 R_2} \quad (8)$$

Eq. (6)에서 분광반사율의 경우 층의 두께가 분자와 분모에 모두 기여하지만 다른 모든 변수가 고정되었을 때 두께가 증가하면 분광반사율이 증가하였다. 반면에 투과율의 경우 Eq. (7)에서 두께가 분모에만 기여하는데 두께가 증가할수록 투과율이 감소하였다. Eq. (8)을 보면 표피의 두께가 증가하면 표피의 분광반사율 R_1 이 증가해서 R_{total} 을 증가시키고, 표피의 투과율 T_1 이 감소해서 R_{total} 을 감소시킨다.

계산을 통해 표피의 두께가 71.5 μm 에서 124.9 μm 까지 증가함에 따른 파장별 분광반사율을 Figure 4에

나타내었다. 표피의 두께가 증가할수록 분광반사율이 감소함을 알 수 있다. 이에 따라서 표피 두께의 증가에 따른 R_1 증가의 영향보다 T_1 감소의 영향이 더 커서 전체 분광반사율의 감소를 가져옴을 알 수 있다.

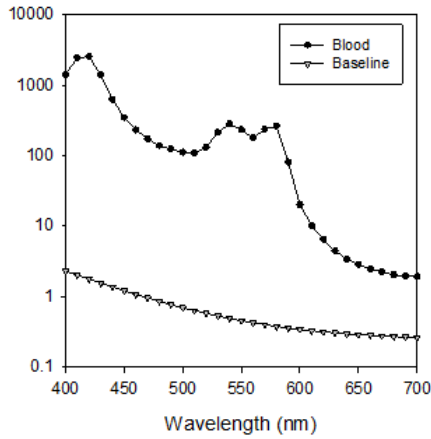
멜라닌 성분의 빛에 대한 높은 흡수 때문에 표피의 두께가 증가하면 반사율이 감소한다. 표피의 두께가 증가하면 적은 양의 빛이 진피에 도달하게 되고 진피 속의 헤모글로빈에 의한 기여가 상대적으로 감소하면서 ‘W’모양이 사라지게 된다.

3.1.3 진피 두께

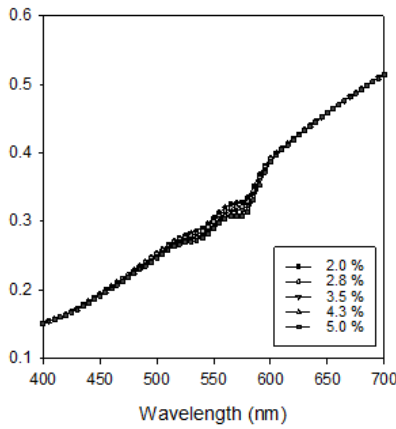
Figure 5는 진피두께가 851.6 μm 에서 1301.6 μm 로 증가함에 따라 변하는 분광반사율의 계산값을 가시광선 영역에 대해 나타낸 것이다. 표피 두께가 감소할수록 분광반사율이 증가하는 것과 반대로 진피 두께의 증가는 전체 분광반사율의 증가를 가져왔다. 특히, Figure 5B를 보면, 파장 600 ~ 700 nm 구간에서의 분광반사율을 확대시킨 구간으로 파장 600 nm 이하의 파장에는 변화가 거의 없었으며 그 이후의 파장에 대하여 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다.

3.1.4 혈액의 부피 분율

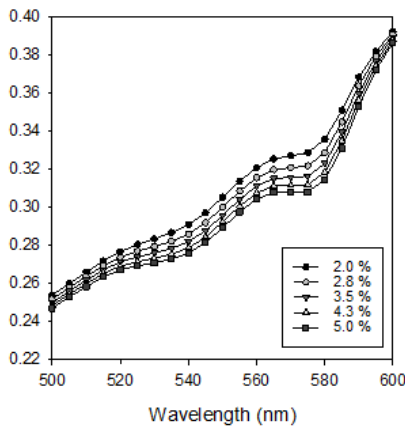
Figure 6A는 Eq. (13)과 Eq. (14)을 이용하여 가시광선 영역에 대한 baseline과 혈액의 흡수계수의 값을 구한 것이다. 혈액의 흡수계수는 500 ~ 600 nm 영역에서 특징



A



B



C

Figure 6. The calculated (A) absorption coefficient of baseline and blood, (B) reflectance of skin in terms of the f_{blood} vol fraction of blood, and (C) especially focusing in the range of 500 ~ 600 nm.

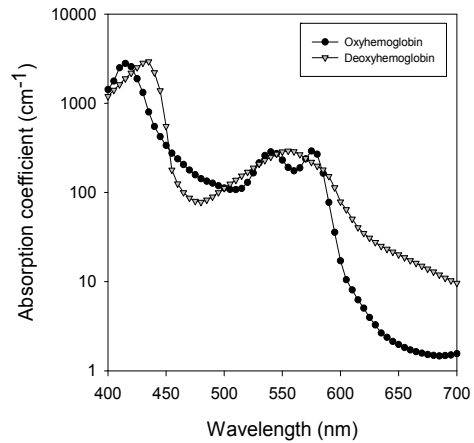


Figure 7. The calculated absorption coefficient of oxygenated hemoglobin and deoxygenated hemoglobin.

적인 모양을 가지는데 이러한 모양이 같은 파장 범위에서 혈액의 부피 분율에 따른 분광반사율에 영향을 준다. Figure 6B는 혈액의 부피 분율을 2%에서 5%까지 변화시켰을 때의 분광반사율을 나타낸 것이다. 500 ~ 600 nm 이외의 영역에서는 혈액의 부피 분율의 증가가 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. Figure 6C는 500 ~ 600 nm 구간을 확대한 그래프이다. 혈액의 부피 분율이 증가할수록 혈액의 흡수계수의 영향을 받아 500 ~ 600 nm에서 나타나는 ‘W’모양이 더 두드러지게 된다.

3.1.5. 산소포화도

진피와 피하조직에 존재하는 혈액 중 헤모글로빈은 흡수 계수에 많은 영향을 미친다. 헤모글로빈에는 산소와 결합한 oxyhemoglobin과 산소와 결합하지 않은 deoxyhemoglobin이 있다. 이 두 헤모글로빈 중에서 oxyhemoglobin의 분율을 나타낸 것이 산소 포화도 S_{oxy} 이다. Figure 7을 보면, Eq. (17) 을 이용하여 oxyhemoglobin과 deoxyhemoglobin의 파장에 따른 흡수계수를 계산하여 나타낸 것이다. oxyhemoglobin 에서도 500 ~ 600 nm 구간에서 혈액의 흡수계수와 유사한 모양을 보인다. 즉, 산소 포화도가 높을수록 oxyhemoglobin이 많은 것이고 혈액의 흡수 계수는 oxyhemoglobin의 흡수 계수에 가까워진다.

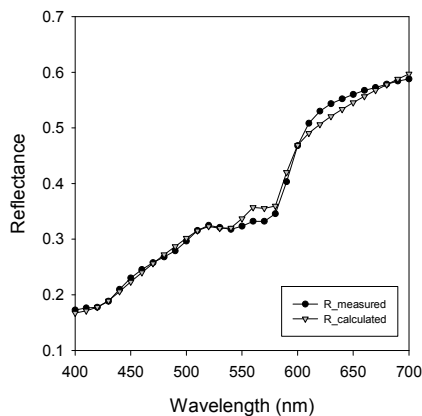
진피의 흡수계수를 결정하는 피의 흡수계수는 산소 포화도에 따라 결정된다. 산소포화도 비율은 95 ~ 100%이며, 이 범위 사이에서는 전체 분광반사율에는 큰 변화가 없었고, 약 530 nm에서 580 nm 사이의 구간

Table 3. Difference of Reflectance between Maximum and Minimum Values and Sensitivity Rate

Skin parameters	R	Sensitivity (%)
Melanin volume fraction	0.085	46.7
Oxygen saturation	0.001	0.6
Blood fraction	0.006	3.2
Epidermis thickness	0.082	44.9
Dermis thickness	0.008	4.6
Total	0.183	100

Table 4. Optimized Skin Parameter Values within Asian Range

Skin parameters	Range	Optimization value
Melanin volume fraction	11 ~ 16%	12%
Epidermis thickness	71.5 ~ 124.9 μm	71.5 μm
Dermis thickness	851.6 ~ 1301.6 μm	1300 μm
f_{blood} , Vol. fraction of blood	2 ~ 5%	4%
S_{oxy} , Oxygen saturation	95 ~ 100%	95%

**Figure 8.** The measured reflectance and calculated reflectance using optimized skin parameter values.

에서 극히 미소한 변화가 있었다.

3.2. 민감도분석

각 파라미터들의 변화가 분광반사율에 끼치는 영향이 어느 정도인지 계산하기 위해서 Table 2의 다섯 개의 변수 중 다른 네 개의 변수는 아시아인 범위의 평균 값으로 고정시키고, 다른 하나의 변수를 최소 및 최대 로 정하였을 때의 차이를 구하였다[10,12,13].

파라미터들의 변수 변화에 따른 분광반사율의 변화는 문헌 값과 상응하는 결과를 보여주었다[14]. Table 3

은 아시아인의 파라미터 범위에서 각 파라미터의 최소 값과 최대값을 대입하였을 때, 전체 분광반사율 변화를 나타낸 것이다. 이때, 각 변화가 파라미터들 중 차지하는 비율이 어느 정도인지 구하였다. 그 결과, 멜라닌 농도가 약 46.7%로 매우 높았고, 표피의 두께가 약 44.9%로 거의 동등한 비율이었다. 멜라닌 농도와 표피의 두께는 분광반사율 변화에 있어 진피의 두께에 의한 영향보다 약 10배 이상의 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

우리는 기여도 분석을 통해 파장별 분광반사율의 변화를 살펴보고, 이를 토대로 하여 실제로 측정된 분광반사율과 거의 일치하는 특정 파라미터 값을 유추해 내었다(Table 4). Figure 8는 실제 측정된 분광반사율과 기여도 분석을 바탕으로 최적화한 파라미터를 Kubelka-Munk 모델에 대입하여 구한 분광반사율 그래프이다. 측정된 분광반사율과 계산을 통해 구한 분광반사율을 구분구적법을 통해 면적을 구한 뒤 차이를 비교한 결과, 오차율이 0.07%로 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 따라서 Kubelka-Munk 이론을 기반으로 한 시뮬레이션 모델은 실제 피부 상태를 잘 모사할 수 있다고 할 수 있다.

자연스러운 메이크업 효과는 제품 도포 전과 후의 분광반사율이 유사한 것이 핵심이다. Figure 9는 Kubelka-Munk 모델을 이용한 개인 맞춤형 화장품 개발 연구의

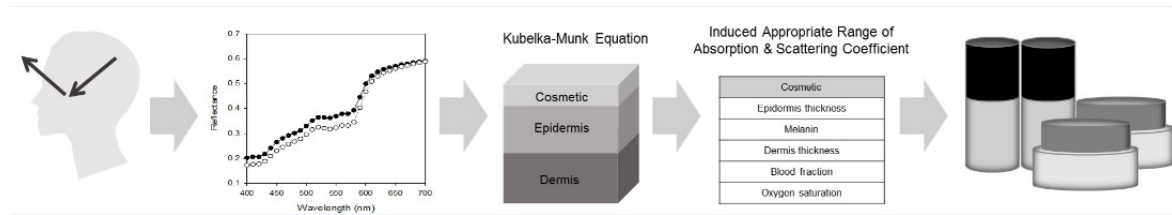


Figure 9. Schematics for the development of cosmetic product using Kubelka-Munk model.

모식도이다. 화장품을 도포한 피부의 이상적인 분광반사율에 대하여 Kubelka-Munk 식을 이용한 계산을 통해 흡수 계수와 산란 계수를 유도한다. 또한, 원료의 투과율과 분광반사율을 알게 되면 그 계수를 구할 수 있으므로, 유도한 흡수 계수와 산란 계수의 범위에 적합한 화장품의 원료를 선별하여 후보군으로 제시할 수 있다. 이러한 방법을 이용한 이용하면 향후 개인 맞춤형 메이크업 화장품 개발에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Kubelka-Munk 모델을 이용하여 피부에서 빛의 거동을 해석할 수 있도록 분광반사율에 영향을 줄 수 있는 다양한 파라미터들과 그들의 기여도에 대한 분석을 수행하였다. 멜라닌의 부피분율이 감소하고, 표피의 두께가 얇아지고, 진피의 두께가 두꺼워지고, 헤모글로빈의 부피분율이 감소함에 따라 피부의 분광반사율이 증가하였으며, 산소포화도의 농도와는 큰 연관이 없음을 확인하였다. 또한 멜라닌의 부피분율과 표피의 두께가 변함에 따라 분광반사율의 변화율이 크게 작용하였으며, 따라서, 멜라닌 농도와 표피의 두께가 분광반사율을 결정짓는 중요한 파라미터라는 것을 확인하였다. 또한, Kubelka-Munk 모델을 통해 얻어진 분광반사율 이론치와 실제 피부에서의 측정치가 거의 유사한 것으로 확인할 수 있었다. 기존 메이크업 화장품 개발 방법과 달리 본 시뮬레이션 모델을 이용할 경우, 개개인의 피부톤에 적합한 자연스러운 메이크업 효과를 구현해 줄 수 있는 개인 맞춤형 화장품 개발에 한 걸음 더 다가갈 수 있다. 개인 맞춤형 화장품은 향후 화장품 산업의 새로운 성장동력이 될 것으로 예상되며, 본 연구는 개인 맞춤형 화장품을 구현할 수 있는 중요한 이론적 근거를 제공하였다.

Acknowledgement

This study was supported by a grant of the World Class 300 Project, Small and Medium Business Administration (SMBA), Republic of Korea (Grant no. 2341055).

Reference

1. 4th Global Cosmetics Market Trends Seminar, Foundation of Korea Cosmetic Industry Institute (2014).
2. R. R. Anderson and J. A. Parrish, The optics of human skin, *J. Invest. Dermatol.*, **77**, 13 (1981).
3. K. Hasegawa, The analysis of particles behavior during drying and practical use of computational simulation for the formula design, IFSCC Conference (2015).
4. T. Osawa, Smile and smooth skin for everyone : development of a cosmetic product for deep asperity using optical simulations, IFSCC congress (2014).
5. T. Maeda, N. Arakawa, M. Takahashi, and Y. Aizu, Monte Carlo simulation of spectral reflectance using a multilayered skin tissue model, *Optical Review*, **17**, 223 (2010).
6. M. J. Kim, An image-based color appearance analysis of makeup and image synthesis based on Kubelka-Munk model, *J. Korea. Multimed. Soc.*, **18**, 349 (2015).
7. P. Kubelka, New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. part 1, *J. Opt. Soc.*, **38**, 448 (1948).
8. P. Seroul, M. Hebert, and M. Jomier, Hyperspectral imaging system for *in vivo* quantification of skin pig-

- ments, IFSCC Congress (2014).
9. S. L. Jacques, Skin optics, Oregon Medical Laser Center News (1998).
 10. S. L. Jacques, Optical properties of biological tissues: a review, *Phys. Med. Biol.*, **58**, 37 (2013).
 11. G. Poirier, Human skin modelling and rendering, University of Waterloo, Canada (2003).
 12. Y. Lee, K. Hwang, Skin thickness of Korean adults, *Surg. Radiol. A. nat.*, **24**, 183 (2002).
 13. A. Krishnaswamy and G. V. G. Baranoski, A biophysically-based spectral model of light interaction with human skin, *Eurographics*, **23**, 331 (2004).
 14. R. Jolivot, Development of an imaging system dedicated to the acquisition analysis and multispectral characterisation of skin lesion, Other. Universite de Bourgogne, English (2011) <NNT : 2011DIJOS051>. <tel-00695305>.