

생물의 구조성 발색과 바이오미메틱스 섬유

권오경¹⁾ · 고재운²⁾ · 최영희¹⁾ · 이상아¹⁾

- 1) 신흥섬유(주) 기술연구소
- 2) 한국섬유기술연구소

1. 서 언

구조색에 대한 연구의 시작은 Hooke(1661)의 *Micrographia* : 관찰 36 ; “공작, 오리 및 색이 변하는 깃털”로 거슬러 간다. 또, Newton(1666)의 *Optiks*에도 마찬가지로 공작의 꼬리털의 관찰에서 입사각의 각도를 바꾸면 색이 변화한다고 하는 지적이 나타나고 양자 모두 구조색 자체의 정의는 없었으나 현상에 대한 관찰이 논술되어 있다. 현재로는 이들 2가지 논문이 구조색 자체의 연구에 대한 시초라고 생각된다. 이러한 17세기 후반부터 18세기 초까지는 빛의 다층막에 의한 간섭현상이라는 가 회절격자에 의한 회절현상 등의 파동광학의 이론적 해명은 아직 착수되어 있지 않고 오로지 편상의 퇴적물의 존재에 의한 결과는 아닐까라고 하는 지적과 이것이 입사각 변화에 대응하는 색의 변화의 결과라고 지적하는데 그치고 있다.

편상의 퇴적물로부터의 반사, 투과광의 시뮬레이션은 Stokes(1862)로부터 시작되었다고 생각된다. 나중에 빛의 파동 현상의 이론적 전개에 다대한 공헌을 한 Rayleigh의 간섭, 회절 이론이 일반적으로 된 것은 1910년대로써 Rayleigh가 다른 곤충과 꽃에 관한 짧은 논문(1874)에는 구조에 의한 파동 현상 등의 지적은 일체 없었다.

그 후 편상 또는 다층막 구조로부터 빛의 반사, 투과 등의 시뮬레이션은 오로지 광학 박막 분야에서 구조색과는 관계없이 전개되었다. 구조색 분야에서 파동 현상으로부터의 이론적 전개가 재개된 것은 Huxley(1968) 부터이고, 특히 광학 박막의 관점에서 구조색을 언급한 것은 Auwaerter(1980) 가 최초라고 생각되고, 그 후 Steinbrecht 등(1980)이 이어서 광학 박막과 구조색의 양자를 종합적으로 검토하는 모습으로 된 것은 비교적 최근의 일이다.

즉, 19세기부터 20세기 후반까지 흥미의 대상은 오로지 생체에서 관측되는 빛의 파장과 같은 정도의 규칙적인 구조 : 다층막, 회절격자 및 미소 산란 입자의 관찰에 시종일관한 감이 있다. 단, 당초의 광학현미경에서 투과형 및 최근의 고분해능 주사전자현미경의 채용에 의하여 빛의 파장과 같은 정도인지 또는 나노미터 영역의 완전한 규칙적인 구조가 얻어지게 되었다. 그리고 다층막으로부터 간섭이론과 동일한 관점에서 현상을 이론적으로 해석할 수 있게 된 것은 광학 박막의 진전에 수반하는 결과이고 향후에는 다층막으로부터의 간섭 이론과 회절격자

로부터의 회절이론을 합체시킨 3차원의 임의점에 대한 광강도의 시뮬레이션이라고도 해야 할 정식화가 급선무라고 생각된다.

구조색의 발색 메커니즘을 응용하여 종래에는 없는 특질을 지닌 소재를 만들어 간다고 하는 것이 상품화를 향한 연구 개발 노력이었다. 염료 또는 안료 등 최근의 화학합성품을 사용하지 않고 발색할 수 있다면 하는 관점은 환경에 우수한 재료라고 하는 점에서도 또 천연의 피부에 어울리는 색 맞춤을 하면서 제품의 장식에 뛰어난 점도 디자인의 관점에서도 바람직하다. 도장, 섬유 소재, 화장품 또는 보석장식품으로써 각각 표면 가공에 관한 신규성을 찾아서 여러 가지 구조색을 나타내는 시료를 자연계에서 찾아내고 또 각각의 시료의 구조색 발색 메커니즘을 밝히려는 시도가 이어져 왔다. 그리고 상품화의 동향도 기업에서 이어지고 있다.

이에 본 고에서는 생물의 구조성 발색 메커니즘과 섬유에의 응용방법을 이해하기 위하여, 물포나비를 중심으로 구조발색성 발현과 관련하여 자세히 고찰하고 이미 상품화 되고 있는 나노구조제어 광간섭 섬유를 언급함으로써 바이오미메틱스섬유의 연구에 다소나마 도움을 주고자 한다.

2. 생물의 구조성 발색

자연계의 곤충은 다양한 색으로 채색되어 있으며, 그 빛나는 색은 마이크로인 구조에 의해 발현되는 것으로 알려지고 있다. 이러한 색을 구조색이라고 부르고 있는데, 여기에서는 자연계의 생물 중 물포나비의 구조성발색과 그 메커니즘에 대해 상세히 알아보고, 그 외에 몇 가지 곤충의 구조색을 간단히 언급하기로 한다.

2.1. 물포 나비(Morpho didius)

물포나비 날개의 현미경사진 : 날개의 표면은 0.1 mm 정도의 크기의 인분(비늘)으로 감싸져 있다. 인분은 가루와 같은 것이라고 생각되고 있으나 실체는 단조롭다. 물포 나비의 인분을 광학 현미경으로 관찰하면 청색으로 빛나 보이지만 보통 인분은 빛나지 않는다(그림 1).

*Morpho didius*의 날개를 자세하게 조사해 보면 위쪽에는 얇은 인분(상층비늘)이, 아래쪽에는 조금 단단한 인분(하층비늘)이 있고 인분에는 세세한 줄기가 달리고 있는 것이 관찰된다

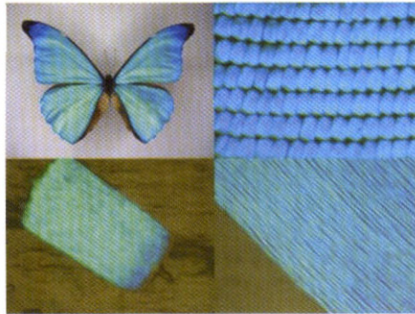


그림 1. 몰포(Morpho rhetenor)나비 날개의 현미경 사진.

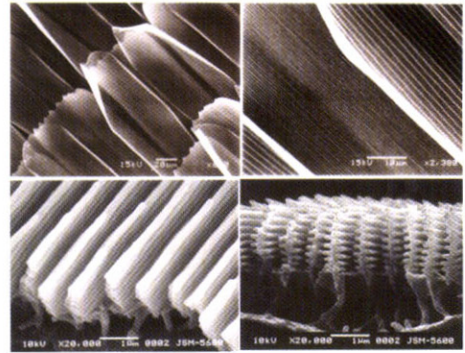


그림 2. 몰포(Morpho didius)나비 날개의 주사형 전자 현미경사진.

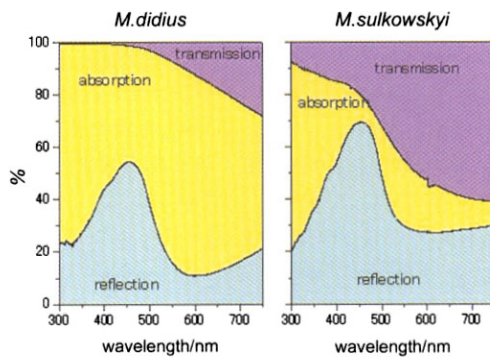


그림 3. 몰포나비의 반사, 흡수, 투과의 파장 분포.

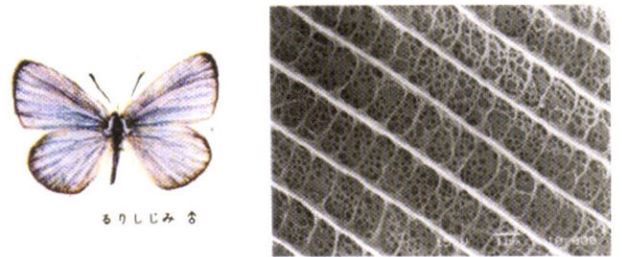


그림 4. 물빛숫돌나비와 날개의 현미경사진.



그림 5. 풍뎅이의 구조발색.

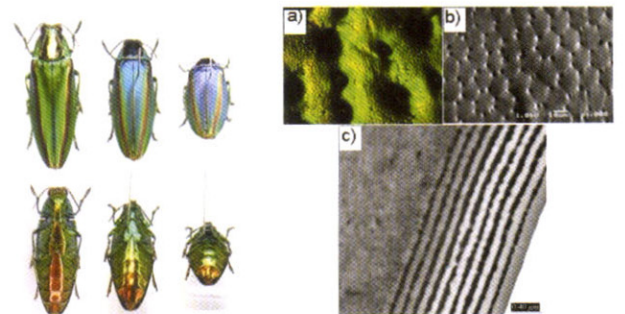


그림 6. 비단벌레의 구조발색과 다층막 구조.

(그림 2).

다층막 모델 : 구조에 의한 색은 옛날부터 주목되어 왔다. 옛날에는 물리의 세계에서 유명한 Newton(1799)나 Hooke(2003)도 구조색에 대해 기술하고 있다. 그러나 본격적으로 구조색 연구가 이루어지게 된 것은 19세기말경 부터이다. 전자기학이 발달하고 간섭의 문제를 엄밀하게 취급할 수 있게 되었기 때문이다. 최초로 Rayleigh(1917)나 Michelson(1911)이라고 한 유명한 물리학자가 이러한 문제를 취급했는데 그 때, 색이 부여되는 원인으로서 다음의 3가지가 생각되고 있었다. 제1은 얇은 막의 겉과 뒤에서 반사한 빛이 서로 간섭한다고 하는 박막 간섭에 의한 색이다. 비눗방울의 색이나 안경을 기울여 보면 색



그림 7. 구조발색섬유로 만든 코트와 자켓(Shinpung,2006).

이 붙어 보이는 것은 박막 간섭에 의한 것이다. 제2는 박막이 많이 배열되어 있는 다층막에 의한 간섭이다. 1개 1개의 막에서 반사한 빛이 간섭한다. 최근에는 반짝반짝 빛나는 랩핑 페이퍼 등에서 빈번히 사용되게 되었다. 제3은 작은 구멍이나 구조가 주기적으로 배열되어 있는 회절격자에 의한다고 하는 생각이다. 이것은 CD가 무지개색으로 보이는 것과 같은 원리이다.

이러한 결과를 살펴보면 청색의 빛(파장 480 nm 부근)은 중심이 강하고 자색의 빛(파장 420 nm 부근)은 주변이 강하게 되어 있는 것을 알 수 있다. 날개를 비스듬히 관찰하면 자색으로 보이는 것은 이미 말한바 있는데 그것은 간섭 효과이다. 청색은 바로 위에서 빛을 조사할 때에 간섭의 결과가 강한 것이지만 자색은 오히려 소멸하고 있다. 비스듬히 할 때는 자색이 오히려 강하다고 하는 간섭효과가 나오기 때문에 이러한 색의 변화가 나타나는 것이다.

색소의 효과 : 물포나비에도 여러 가지 종류가 있어 청색이 진한 종이든가 투명감이 강한 종이 알려져 있다.

*Morpho sulkowskyi*와 *Morpho didius*의 선반 구조는 거의 같으나 보이는 색은 완전히 다르다. 그 차이는 구조색 그 자체의 차이가 아니고 청색의 콘트라스트를 증강하는 색소를 가지고 있는가 없는가에 달려 있다.

물건을 강조할 때 사진에서도 검은 배경으로 한다. 배경을 진한 색으로 하면 한가운데가 돌출해 보인다. 그것과 같은 원리이다. 청색을 강조하는 경우 청색 이외의 여분의 빛을 차단하면 청색을 확실히 할 수 있다. 만약 차단하지 않으면 청색 이외의 빛이 청색의 빛과 동시에 들어와 인간의 눈에는 희게 비친다. 실제로 날개가 어떠한 빛을 흡수하기도 하고 투과하기도 하고 있는가는 반사, 흡수, 투과의 파장 분포를 측정하면 즉시 알 수 있다. 2 종류의 물포나비에 대해서 각각 기여하고 있는 파장 분포를 그림 4에 나타냈다. 300 nm는 자외선의 부분에서 700 nm는 적외선에 가까운 파장이다. reflection이라고 쓰여

있는 부분은 날개에 빛이 입사했을 때 그 중 반사하는 비율을 나타내고 있다. transmission라고 쓰여 있는 부분은 투과하는 비율로 남은 부분이 흡수가 된다.

이러한 2종류의 나비가 압도적으로 다른 점은 그림에서도 곧바로 알 수 있듯이 *Morpho sulkowskyi*에서는 흡수 부분의 면적이 작고 투과 부분의 면적이 비정상적으로 크다고 하는 점이다.

2.2. 물빛숫돌나비(청색)

물포 나비의 예를 들었는데 구조색은 물포 나비만이 아니다. 다양한 곳에 등장한다. 주변 가까운 것에서 청색의 물빛숫돌나비(그림 4)를 조사하면 앞서와 같은 규칙바른 구조는 없고, 일면에 뜨게질 코와 같이 섬세한 불규칙 모양을 볼 수 있다. 이러한 구조에 빛이 닿으면 빛은 산란되지만 단파장의 빛이 산란되기 쉽기 때문에 청색이 눈에 띈다. 한편, 장파장의 빛은 산란되지 않고 비늘을 투과해 최종적으로는 흡수된다. 이 색은 틴덜 블루라고 하는 산란에 의한 색이다. 하늘의 푸름과도 관계하고 있는 색이라고도 하지만 물포나비와 같이 높은 반사율은 가지고 있지 않다.

2.3. 비단벌레

구조색 대표 격은 비단벌레이다. 비단벌레는 보는 방향에 따라서 등쪽도 배쪽도 색이 변화한다(그림 6 왼쪽). 비단벌레는 속날개(鞘翅)라고 하는 까투리 용수철이 있고 코레스테릭 액정으로 되어 있으나 그 뿐만 아니라, 표면에 큐티클라에 의한 20층 정도의 주기적인 층이 형성되고 있어 그것이 다층막의 역할을 하고 있다(그림 6 우측). 날개의 표면을 자세하게 조사하면 한 면에 육각 형상의 얇은 요철 구조가 비늘과 같이 되어 있다. 비단벌레는 이러한 다층막구조와 요철 구조가 합쳐져 독특한 구조색을 만들어내고 있다. 즉, 요철 구조가 다층막을 만족시켜 여러 가지 방향으로 빛을 반사하는 구조로 되어 있다. 공작의 날개에도 초승달 상태로 만족한 소의사(小羽系)라고 하는

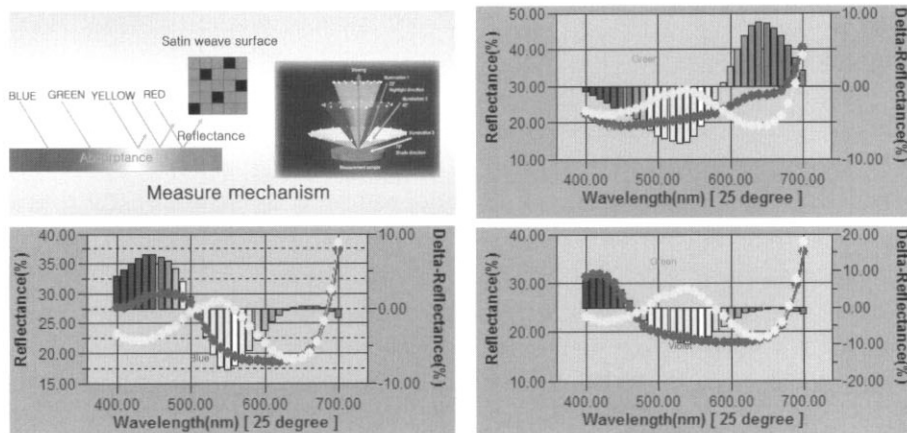


그림 8. 구조발색 섬유 최대 반사 파장 그래프(Kwon etc., 2006).

섬유상의 구조가 있고 그 중에 멜라닌 과립이 결정상으로 배열되어 있다. 이러한 결정상의 구조가 특정의 색을 반사함과 동시에 흡수체의 역할도 하고 있다.

2.4. 풍뎅이

투구벌레의 날개의 색은 이러한 다층막뿐만이 아니라, 그림 5의 풍뎅이와 같은 타입도 있다. 이 투구벌레의 날개는 코레스테릭(Cholesteric) 액정이 농축하여 만들어진 나선상의 구조를 하고 있다. 이러한 나선상의 구조를 가지고 있는 것에 빛이 들어오면 산란될 것이다. 빛은 횡파라고 말해지지만 이렇게 진동하는 방향을 편광 방향이라고 부르고 있다. 진동 방향이 시간과 함께 일정한 속도로 지꾸자꾸 변화해 나가는 빛을 원편광이라고 부르고 있다. 변화하는 방향이 우회전인가 좌회전인가로 원편광에는 오른쪽 원편광과 왼쪽 원편광이 있다. 이에 대한 한 방향으로만 진동하는 빛을 직선 편광이라고 부르고 있다. 벡터를 이하는 사람은 우회전과 왼쪽 주위의 원편광의 진동 방향을 벡터로 쓰고, 합성했을 때의 방향을 써 보면 곧바로 알 수 있는데, 직선 편광의 빛은 오른쪽 원편광과 왼쪽 원편광의 빛을 합침에 의하여 만들 수 있다.

코레스테릭 액정에 빛이 닿으면 나선 방향에 있던 원편광은 나선 구조와 상호작용을 하고 그 주기의 2배와 빛의 파장이 일치한 빛은 다층막과 갈게 반사되므로 결국 안으로 들어올 수 없다. 나선 방향에 맞지 않는 원편광은 상호작용 하지 않고 그대로 빠져 나가 버린다. 따라서 반사광은 어느 쪽인가의 원편광만으로 된다. 따라서 사진 우측과 같이 원편광을 통하지 않는 편광판을 두면 새까맣게 되어 버린다.

3. 구조색을 응용한 바이오미메틱스 섬유제품

구조색의 연구로 특히 빛의 파장 정도의 규칙적인 구조; 다층막이라든가 회절격자를 밝히는데 투과형 전자현미경이 완수한 역할은 획기적이었다. 예를 들면 Steinbrecht 등(1980)은 완전한 구조색을 나타내는 *Euploea core*의 황금색 번데기의 표피 단면으로 다층막의 존재를 나타냈다. 또 Schultz & Rankin (1985)은 딱정벌레의 표피에 관한 다층막 단면 구조를 보고하였다.

단, 투과형 전자현미경에서의 관찰은 시료의 전처리 또는 레플리카의 제작에 어려움이 있다. 그러한 점에서 1975년경부터 도입된 주사전자현미경의 위력은 더욱이 절대적이었다. 주사전자현미경이 형태의 연구에 완수한 역할은 섬유기계학회지에서도 1979년에 “주사형 전자현미경 특집”을 마련하여 ① 천연의 미묘 ② 인공에도 질서가 ③ 기법 천연을 목표로 및 ④ 실, 천, 종이를 보는 관점에서 140여점에 미치는 완전한 사진이 게재되어 있기 때문에 주사전자현미경의 위력을 이해하고 있는 사람도 많다고 생각한다. 구조색의 분야에서도 상황은 거의 마찬가지로 Ghiradella(1991)는 나비의 인분(*Caligo memnon*)의 3차원적인 다층막 단면 구조를 처음으로 보고하였다. 종래의 광

학현미경으로는 불충분한 배율을 극복하고 또 투과형 전자현미경에 필수인 관측 전의 생체의 번잡한 화학적 전처리라든가 레플리카의 제작이 불필요하게 되고 또한 피사체 심도가 큰 미세 구조의 관찰이 비교적 용이하게 되었기 때문이다.

이러한 배경 하에서 오늘날의 구조색은 새로운 섬유 소재로써 뿐만이 아니라 다양한 분야에서 활발한 응용 전개가 정력적으로 추진되고 있다.

빛의 간섭으로 발색하는 구조발색섬유는 굴절률이 다른 2종류의 폴리머(폴리에스터와 나일론)를 수 십나노 수준단위로 61층 쌓인 무거운 다층적층구조를 하고 있다. 적층두께를 광학사이즈(나노수준)로 이끄는 것에 의해 발색시킨다. 기본색은 적·녹·청·자주의 4색으로 이론적으로는 7색까지의 표현이 가능. 광선의 각도 강도에 의해 여러 가지 표정을 볼 수 있다.

발색시키기 위해서는 층의 두께와 층수 등 고도의 제어가 필요하고 이 구조설계기술과 섬유를 방지하기 위한 구금설계 및 고도의 가공기술과 제사기술에 의해 「물포텍스」의 제조가 실현가능하게 되었다. 공동개발에 관해서는 닛산자동차가 전체를 총괄함과 동시에 섬유의 구조설계 평가·해석 등을 데이진이 제조기술을 다나카금속공업이 섬유를 제조할 때의 구금의 개발을 담당했다.

한편 Kwon 등(2006)은 바이오미메틱스섬유를 활용한 상품화 연구를 수행하고, 이를 바탕으로 제직조건의 표준화 및 봉제성을 규명하고, 조직별 색상발현 방법을 그림 9과 같이 제시하였으며, 코트와, 자켓, 넥타이 등을 제품화(farfalla)하여 Preview in Daegu 2006에서 전시하였다. 그림 7에 그 결과를 보였다.

최근에는 화장품으로써 첨가 티탄의 피막의 두께를 제어하여 무한의 색 맞춤을 하는 인피니트 컬러라고 하는 구조발색성 안료(養生堂)라든가 포마드와 같이 염색하지 않고 칠하여 흰 머리카락 염색 정발료 블루 컨디셔너 V05(선스타) 등이 상품화되고 있다. 특히 비교적 최근 McPhedran은 황금 비늘의 체모라든가 가시나무 등의 섬유상 체표에 신선한 구조색을 나타내고 있어 향후 섬유에 관련한 구조색 응용에 새로운 국면을 열어갈 것이라고 기대된다.

4. 결 언

이상에서와 같이 여러 가지 생물의 구조색을 조사해 가면 자연계의 구조색 원리를 섬유에 응용할 수 있을 것이다. 구조색 본질은 무엇인가 하면 규칙성과 불규칙성의 공존과 구조색과 색소의 협조라는 말로 나타낼 수 있을 것이다.

구조색은 다양한 분야와 관계하고 있다. 규칙성이라고 하는 의미에서는 최근에는 포트닉스 기술과 관계가 깊다고 할 수 있다. 그러나 자연계에서는 규칙성보다 불규칙성에 의해서 자신을 어필하는 편에 중점을 두고 있는 것이 많은 듯하다. 이러한 구조가 어떻게 생성되었는지는 생물학적으로는 발생이나 진화의 문제로서 파악할 수 있으나, 물리학적으로는 비평형계로의

질서 형성과 결부하여 생각할 수 있을 것이다. 또 이러한 구조 색을 생물은 어떻게 인식하는가 하는 면에서 생각하면 생물학적으로는 시각의 문제나 동물행동학적인 문제와 결부하여 생각할 수 있다. 시각이라고 하는 문제에서는 인간의 시각에도 많이 관계하고 있으므로 시각에 관계한 다양한 산업계에도 큰 관심을 갖게 될 것이다.

특히 바이오미메틱스 섬유분야에서의 나노구조제어에 의한 광간섭 섬유의 구조발색 상품은 다음과 같은 특징으로 용도가 확산될 것으로 전망된다.

- (1) 굴절률이 다른 폴리머의 다층적층구조로 되어있고, 염료를 전혀 사용하는 일이 없이 어디까지나 빛의 굴절을 이용하여 발색시키는 섬유이다.
- (2) 염료, 안료를 사용하지 않고 색상을 발현하는 지구환경에 우수한 섬유이다.
- (3) 빛의 굴절의 차이로 발색되기 때문에 보는 각도라든가 빛의 강도에 따라서 미묘하게 색이 달라지기 때문에 패션 용도로써 범위가 넓은 섬유이다.

참고문헌

Anderson, T.F. and Richards, A.G. (1942) *J. Appl. Phys.*, **13**, 748
 Auwaeter, M. (1980) Duenne Organische Schichten, *Acta Physica Acad. Hungaricae*, **49**, 7-22.
 Ghiradella, H. (1991) Light and color on the wing: structural colors in butterflies and moths, *Appl. Opt.* **30**, 3492-3500.
 Hooke, R.(1961) Micrographia or some physical descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquires thereupon, pp 167-169, Dover Publ. Inc. New York.
 Hooke, R. (2003) *Micrographia*, reprinted by Dover Publications, Inc., New York.
 Huxley, A. (1968) A theoretical treatment of the reflection of light by multilayer structures, *J. Exp. Biol.*, **47**, 227-245.
 Kwon, O.K., Choi, Y.H. and Lee, S.A. (2006) Reflectance of Farfalla fabric. (Poster presentation), 2007 Spring/Summer international textile fair : Preview in Daegu, March 15-17, 2006, Daegu EXCO, Korea
 Mason, C.W. (1927) *J. Phys. Chem.*, **31**, 1856.
 Michelson, A.A. (1911) *Phil. Mag.*, **21**, 554.
 Newton, I. (1952) Opticks; Book 2 Part 3: Prop. V, pp.251~254, Dover Publ. Inc.
 Newton, I. (1979) *Opticks*, reprinted by Dover Publications, Inc., New York.

Rayleigh, L. (1917) *J. W. S., Proc. Roy. Soc.*, **A93**, 565
 Rayleigh, L. (1874) Insects and colours of flowers, *Nature*, **11**, 6.
 Schultz, T.D. and Rankin, M.A (1985) The ultrastructure of Epicuticular interference reflectors of Tiger Beetle(*Cicindela*), *J. exp. Biol.*, **117**, 87-110.
 Shinpung Textile (2006) 2007 Spring/Summer international textile fair :Preview in Daegu, March 15-17, 2006, Daegu EXCO, Korea
 Steinbrecht, R.A., Mohren, W., Pulker, H.K. and Streider, D. (1980) Cuticular interference reflectors in the golden pupae of danaine butter-flies, *Proc. R. Soc.*. London, **R226**, 367-390.
 Stokes, G. (1862) On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates, *Proc. R. Soc.*, **11**, 546-556.



권오경(Oh-Kyung Kwon)

인하대학교 섬유공학과 졸업
 대구가톨릭대학교 대학원(이학박사)
 의류기술사, 산업자원부 기획평가단 위원
 현재 : 신풍섬유(주) 기술연구소장
 Tel. +82-53-591-4585, Fax. +82-53-591-4584
 E-mail: okkwon@shinpungtex.co.kr



고재운(Jae-Oon Kouh)

전남대학교 섬유공학과 졸업
 대구대학교 대학원(경영학석사)
 현재 : 한국섬유기술연구소 시험분석부장
 Tel. +82-2-3451-7040, Fax. +82-2-3451-7174
 E-mail: jokouh@kotiti.re.kr



최영희(Young-Hee Choi)

금오공과대학교 섬유패션공학과 졸업
 금오공과대학교 대학원(공학석사)
 현재 : 신풍섬유(주)기술연구소 연구원
 Tel. +82-53-591-4585, Fax. +82-53-591-4584
 E-mail: yhchoi@shinpungtex.co.kr



이상아(Sang-A, Lee)

경북대학교 의류학과 졸업
 현재 : 신풍섬유(주)기술연구소 연구원
 Tel. +82-53-591-4585, Fax. +82-53-591-4584
 E-mail: salee@shinpungtex.co.kr