

자연모사의 구조적 색상 원리 및 응용

손원근, 박원호*

충남대학교 신소재연구소, *유기소재·섬유시스템전공

1. 서론

자연에서 색은 재료의 고유 색상에 의한 것이 대부분이지만 일부는 빛의 산란 혹은 간섭과 같은 순수 물리적 원인에 의한 것도 있다. 이들은 구조적 색상(structural color 혹은 iridescence)이라고 불리며 오랫동안 과학적인 흥미의 대상이 되어 왔다. 최근 구조적 색상은 페인트, 자동차, 화장품, 섬유 산업과 같이 시각과 관련된 많은 분야에서 응용이 급속히 진행되어 오면서 상당한 관심을 끌어들였다. 그러나 연구가 진행되면서 구조적 색상은 초현대적인 나노기술을 활용하여도 거의 모방하기 어려운 놀랄 만한 미세구조의 존재 때문이란 것이 밝혀지고 있다. 본질적으로 대부분의 구조적 색상은 박막간섭(thin-film interference), 다층 간섭(multilayer interference), 회절격자 효과(diffraction grating effect), 광 결정(photonic crystal), 광 산란(light scattering) 등에 의해 나타나는 기본적인 광학적 과정으로부터 생긴다. 그러나 눈의 인식을 높이기 위해 자연의 생물체는 진화 과정에서 특정파장 범위에서 높은 반사율과 동시에 넓은 각도로 빛을 확산할 수 있도록 다양한 디자인을 만들어 왔다. 언뜻 보기에는, 이 두 가지 특성은 일반적인 광학적 관점에서 서로 상반되는 것처럼 보이지만 구조의 규칙성과 불규칙성을 적절히 조합함으로써 가능해진다. 본 총설에서 우리는 구조적 색상의 바탕이 되는 기본적인 광학적 성질은 지면 관계상 생략하고, 구조의 규칙성과

불규칙성의 관점에서 자연의 신비함을 알아보고자 하였다. 그리고 구조적 분리체계에 근거한 구조적 색상들의 일반적인 원리를 제시하고 그 응용 예를 설명하고자 한다.

2. 몰포(Morpho)나비의 구조적 색상

2.1. 역사적 배경

날개에서 파란 빛을 내는 몰포나비는 자연계에서 구조적 색상의 복잡한 양상을 설명하거나 또한 색상에 대한 규칙성과 불규칙성의 중요성을 이해하는데 가장 적합한 생물이다.

몰포 종류는 중남미에서 넓게 분포하고 있으며 수컷은 특히 반짝인다. 우리는 Figure 1에 전형적인 예를 나타내었다. 지금까지 몰포의 종류가 50-80종으로 분류되었지만 보다 체계적인 분류는 아직도

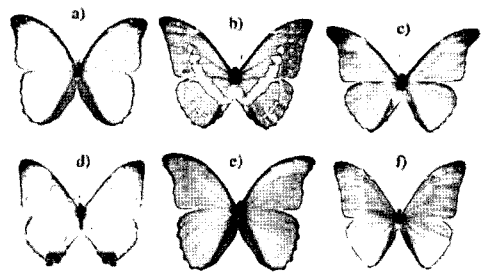


Figure 1. 몰포나비. a) *M. menelaus* (날개길이=110 mm), b) *M. cypris* (120 mm), c) *M. rhetenor* (120 mm), d) *M. sulkowskyi* (85 mm), e) *M. didius* (155 mm), and f) *M. adonis* (95 mm).

진행되고 있다[1]. 약 120년 전에 Walter[2,3]는 공기 중에서는 녹색 빛을 갖는 파란색으로 강하게 반짝이고, 에테르 (n=1.36)에서는 순수한 녹색을 갖고 극히 약하게 빛나고, 클로로포름 (n=1.45)에서는 노란색을 띠는 녹색으로 약하게 빛나며, 벤젠 (n=1.52) 혹은 이황화탄소 (n=1.64)에 담갔을 때 어두운 장소에서 직접 햇빛에 닿으면 노란 빛의 초록색을 띠는 *M. menelaus* 비늘(scale)에 대한 관찰 결과를 보고하였다. Walter는 굴절지수가 벤젠 혹은 이황화탄소와 일치하는 키틴에서 염료의 효과에 대한 이들 현상을 기술하였다. Michelson은 보통 입사각에서 *M. aega*의 파랑색 날개로부터 반사의 위상변화를 측정하였고, 날개의 배향과 더불어 위상이 변하는 것을 발견하였다[4]. 그는 이 변화가 날개에 존재하는 많은 털에 의한 빛의 회절이 원인인 것으로 생각하였고, 파란색의 본질적인 원인은 표면색이었다고 결론지었다.

다른 한편 Rayleigh[5]는 화려한 색상에 대한 다층 간섭의 가능성을 강력히 제시하였다. Onslow[6]는 *M. menelaus*의 비늘을 조사하여, 비늘의 두 층이 화려한 초록색을 띤 푸른색 빛의 형태로 결합되어 있는 것을 확인하였다. 하부의 깃털은 키틴질 판에서 주기적으로 0.85-0.9 μm 정도 떨어져 있는 투명한 판이고 반짝임이 없는 깃털과 비교될 만큼 길게 되어 있다. 그러나 그가 관찰한 분리 판들은 너무 길어서 어떠한 간섭현상도 일으키기 어렵다고 생각하였다. 더 체계적인 연구는 *M. menelaus*의 깃털을 조사한 Mason[7]에 의해 이루어졌고 얇은 조각이 많은 깃가지로 구성되어져 있고, 그 자체 하나의 비늘이 화려한 반사의 원인이 되는 것을 알았다. 그는 또한 반사되는 면이 비늘의 면에 평행하지 않다는 것을 확인하였다. 그는 박막 간섭과 더불어 광학적 특성들을 비교하여 유사성을 발견하고 그의 논문에서 몰포 비늘에 대한 놀랄만하게 정확한 삽화가 삽입되어 있는 것을 Figure 2(a)에 나타내었다.

몰포 비늘의 구조적 분석은 전자현미경의 발견 후에 최종적으로 결론이 났다. Anderson과 Richards는 처음으로 *M. cypris* 비늘의 전자현미경 이미지

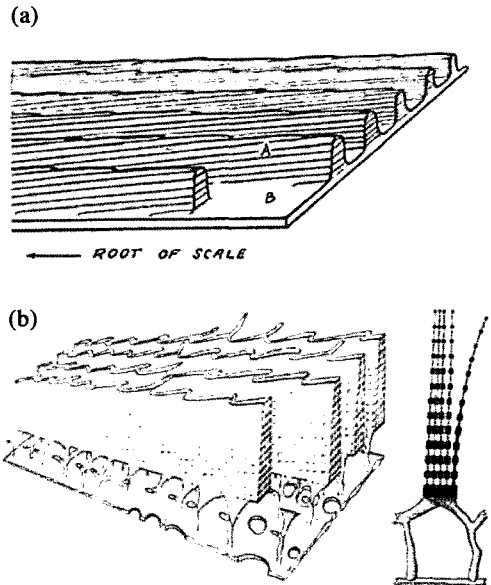


Figure 2. (a) *M. menelaus*의 비늘에 대한 Mason이 제시한 설명[7]과 (b) *M. cypris*의 비늘에 대해 Anderson과 Richards에 의해 제시된 설명[8](1942).

를 관찰하여, 그것은 직선의 두꺼운 것이 0.2 μm 떨어져서 있는 수백 개의 정교한 얇은 조각으로 구성되어 있으며 파란빛의 반사를 강화하는 것으로 보고한 바 있다(Figure 2(b))[8]. 또한 화학적 실험을 통해 얇은 조각들이 키틴 뿐만 아니라 “대부분의 곤충들의 표면 부분의 주된 조성” 즉 상피로 이루어졌다는 것을 알게 되었다. 후에 Ghiradella[9-13]는 전자현미경을 사용하여 인시류(lepidopteran) 비늘의 다양한 형태를 조사하여 비늘의 위치에 따라 구조적 색상을 분류하였다. 그는 몰포 나비의 얇은 조각을 용기관 형태로 분류하였고 또한 비늘의 진화를 조사하였다[11,14,15].

몰포 나비에 대한 구조적 생물학적 연구의 진전에 비해 그 구조적 색상의 물리적 해석은 1920년대에 다층 간섭 가설의 확립 후 그리 많이 진행되지는 않았다. 그러나 1990년대에 들어서서 페인트, 자동차, 섬유, 화장품과 같은 다양한 산업에서 표시물질(display material)로서 구조적 색상에 대해 물리적인 관점으로부터 다시 몰포 나비에 대한 연구가 진행되

었다. Tabata 등은 *M. sulkowskyi*와 *M. adonis* 날개의 화학적 및 광학적 분석을 수행하면서, 날개의 각도와 파장에 대한 반사율의 변화를 측정하여, 그 결과를 다층간섭 이론을 사용하여 분석하였다[16]. 한편, Vukusic 등은 *M. rhetenor*와 *M. didius*의 비늘에 대한 정교한 치수측정을 수행하였다[17]. 첫 번째로 그들은 공기에서와 이소프로필 알콜 (n=1.38) 혹은 브로모포름(bromoform) (n=1.58)에서 *M. rhetenor*의 하나의 깃털로부터 투과된 것과 반사된 빛의 산란각을 조사하였다. 또한 *M. didius* 비늘의 표면과 내부를 측정하였고, 비록 *M. rhetenor*의 비늘이 둘로 나누어져 있다 할지라도 투과된 빛이 주기적으로 분리된 용기와 정확히 일치하는 명확한 회절 점이 나타내는 것을 확인하였다. 반면에 반사된 빛은 넓은 각 의존성을 보이는 것도 확인하였다. 그들은 다양한 파장에 대해 한 비늘로부터 절대적인 반사율을 측정한다음, 다층간섭 이론을 사용하여 설명하였다.

2.2. 파란 채색의 물리적 해석

우리는 물포 나비의 파란 채색이 색소와 조합된 빛의 간섭과 회절의 결합 작용으로 설명할 수 있다[18,19]. 이 부분에서 우리는 위에서 기술된 관찰과 함께 물리적 메커니즘을 간단히 설명하고자 한다. 커다란 파란색 날개를 갖고 있는 전형적인 물포 종류의 예로 *M. didius*를 선택하였다. 우선 보는 입사각이 변하게 될 때와 날개를 높은 굴절지수를 갖는 용액에 침지시켰을 때 관찰한 색상이 변하는 것을 단순히 색소로 설명될 수 없는 것을 쉽게 알 수 있다.

날개의 보다 상세한 관찰을 통해 파란 색상으로부터 자줏빛으로의 변화가 나타나는데, 보통의 입사각하에서 날개 면을 보는 각도에 따라, 또한 우리의 눈을 비늘의 긴 측면에 대해 수직으로 옮겼을 경우 관찰할 수 있다. 그러므로 파란색은 이 방향에서 큰 각도 범위에서 지속된다. 한편, 날개의 긴 측면에 대해 평행한 쪽으로 옮겼을 때는 반사가 오히려 빠르게 사라지는 것을 알게 된다. 이는 반사가 단지 작은 각도 범위에서 일어나는 것을 의미한

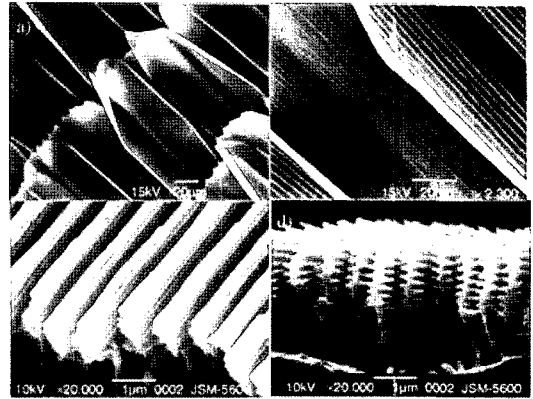


Figure 3. a)와 b)는 *M. didius* 표면과 내부의 얇은 조각, c)와 d)는 내부의 얇은 조각의 주사전자현미경 사진.

다. 그러므로 확산성과 이방성을 갖는 강한 파란색 반사는 물포 날개의 특성이다.

광학현미경과 전자현미경 관찰을 통해 *M. didius*의 앞·뒤 날개 모두 비늘이 표면과 내부의 2가지 형태로 이루어진 것을 확인할 수 있다(Figure 3). 비늘 표면에서 중심적인 역할을 하는 것처럼 보이는 *M. adonis*와 같은 몇몇의 종을 제외하고, 대부분의 물포 종류에서 비늘의 내부는, 구조적 색상에 대한 주된 원인이 된다. 대부분의 종류에서 비늘의 표면은 일정한 크기를 보이며 특별한 기능을 갖는 종에서 종으로 변화한다. 두 비늘 모두는 비늘의 긴 측면을 따라 많은 등거리 용기를 가지고 있다, 각 비늘은 높은 배율에서 파란색으로 빛난다. 전형적인

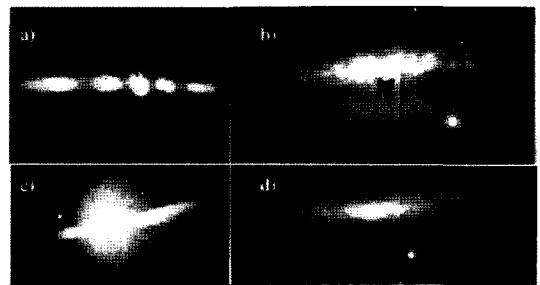


Figure 4. *M. didius*의 a), b) 표면 비늘과 c), d) 내부 비늘에 대한 백색광 조명에서 얻어진 a), c)투과와 b), d)반사의 무늬[18,20].

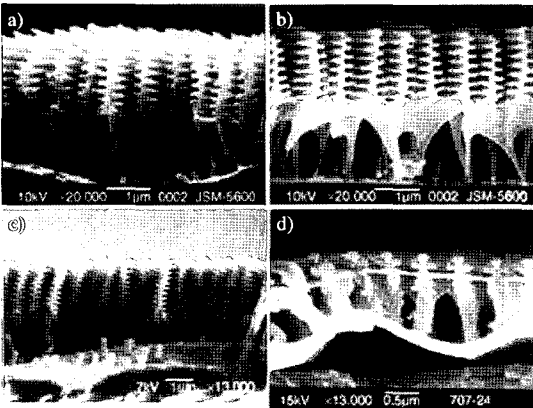


Figure 5. a) *M. didius*, b) *M. sulkowskyi*, c) *M. rhetenor*의 내부 비늘과 d) *M. adonis*의 표면 비늘에 대한 주사전자현미경 사진[19].

용기의 간격은 약 1 μm 이다.

규칙적으로 배향된 용기들은 회절격자로 작용할 것이라고 생각된다. 그러나 vukusic 등은 단일 비늘의 투과와 반사 연구에서 보였던 것처럼 Figure 4에서 나타낸 것과 같이 회절 점은 단지 투과 쪽에서는 보이지만 반사 쪽에서는 보이지 않는다[17]. 이것은 용기들 사이의 공간이 회절격자로 작용한다고 제시하였지만 용기 자체는 그렇지 않다. 이는 나비에서의 구조적 색상의 기본적인 형태를 이해하기 위해 매우 중요하다.

고배율 전자현미경으로 관찰한 결과, 상피와 공기의 층들이 교대로 구성되어 있는 얇은 판상구조들이 각각의 용기 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있으며(Figure 5), 또한 표피층은 Figure 4c)에서 나타낸 바와 같이 비늘의 평면에 비스듬하게 놓여 있다. 용기가 비스듬하게 보이는 것은 상피 층의 위쪽 가장자리가 비늘의 전체에 자유롭게 분포되어 있기 때문이다[19]. 그러므로 용기의 높이는 광학적으로 볼 때 그렇게 규칙적이지는 않고 0.2 μm 이내의 층간 간격을 가지면서 분포되어 있다. 만일 이것이 사실이라면 각 용기에서 회절된 빛은 균일하지 않게 겹쳐지게 될 것이고, 어떠한 간섭도 일어나지 않을 것이다. 다시 말해서 간섭과 회절의 특성은

하나의 용기에 의해 측정된다. *M. rhetenor*의 비늘에서 관찰된 반사모형의 갈라짐은 용기의 기둥에 관한 비대칭성 층상 구조로부터 나온 결과들은 용기의 단면을 fourie 분석함으로써 쉽게 증명된다[17].

이 정교한 구조의 물리적 중요성은 분명하다. 용기 내에서 판상 구조는 정교한 다층 간섭의 원인으로 작용하지만, 높이가 다른 용기의 좁은 폭은 인접 용기들 사이의 간섭 없이 빛을 회절시킨다. 상피 ($n=1.56$)와 공기 ($n=1$) 사이의 굴절지수의 차이가 큰 것과 거의 이상적인 다층을 만족하는 층의 두께는 큰 진폭을 갖는 높은 반사율을 초래한다. 그러므로 몰포 나비는 동시에 넓은 파장 범위에서 높은 반사율을 갖고 넓은 각도 범위에서 산란되는 빛을 생성하게 된다. 우선 이들 2가지 특성은 보통 광학적 관념에서 서로가 상반되는 것처럼 보인다. 그러나 몰포 나비는 규칙성과 불규칙성을 적당한 양으로 조합함으로써 이들이 외관상 서로 상반된 것으로 보이게 된다.

몰포 날개의 신비함은 위의 결론에서 끝이 아니다. Figure 5a)와 b)에서 보는 바와 같이 *M. didius*와 *M. sulkowskyi*의 두 몰포 나비의 날개 색상이 완전히 다를 지라도 미세 용기-판상 구조는 본질적으

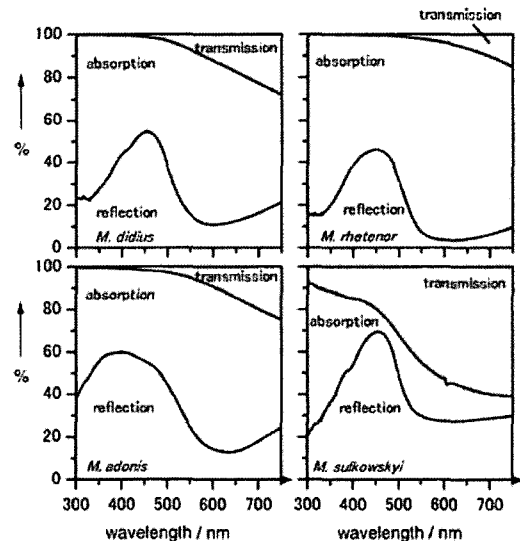


Figure 6. *M. didius*, *M. rhetenor*, *M. adonis*와 *M. sulkowskyi*의 날개의 투과, 흡수, 그리고 반사의 특성[19].

로 같다. 즉, *M. didius*는 광택이 없이 짙은 푸른 날개로 보이는 반면, *M. sulkowskyi*는 진주 같은 흰색의 광택 날개를 가진다. 이들 두 종류의 광학적 응답 차이는 날개의 투과/반사 특성에 의해 잘 설명된다[19]. Figure 6은 다양한 몰포 종류의 날개에 대한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림은 보통 입사 빛에서 날개의 광학적 응답이 투과, 반사, 그리고 본래의 안료에 의한 흡수의 관계로 나누어진다. *M. sulkowskyi* 날개의 흡수가 적다는 것을 즉시 알 수 있다. 그러나 단지 눈으로 감지할 수 있는 빛이 반사된 부분이라고 생각한다면 *M. sulkowskyi*가 피크 파장에서의 반사율이 다른 파장에서보다 더 높다는 것을 알 수 있다. 실제로 현저한 차이점은 약 600 nm의 푸른색을 보강하는 색상 근처의 반사율이다. *M. sulkowskyi*는 30%의 매우 높은 반사율을 보이는 반면 다른 것들은 5-15%의 반사율을 가진다. 특히, 가장 반짝이는 푸른 날개를 나타내는 *M. rhenenor*는 매우 낮은 반사율을 보인다. 그러므로 안료가 다른 색을 흡수함으로써 푸른 색상의 명암을 높인다.

안료의 또 다른 중요한 역할은 미시적 구조변화에 의한 손실 없는 반사로 막과 배면 비늘에서 산란된 빛의 흡수에 의한 색조의 변화이다. 몰포 나비는 흰점들이 본질적으로 날개의 형태를 혼란시키는 것과 관계없이 적당한 배면에 놓여 있기 때문에 *M. cypris*에서 파란색 날개의 등 쪽에 흰점의 부가는 이 효과를 이용하려는 목적인 것처럼 보인다.

마지막으로 표면 비늘의 역할은 최근 S. Kinoshita 등에 의해 검토되었다[20]. 표면 비늘의 본질적인 특성은 그 구조에 기인한다. 표면 비늘은 판상 구조를 갖고 잘 분리된 용기와 그들 사이의 막으로 구성되어 있다. 이 두 요소는 앞에서의 정교한 다층 간섭과 뒤에서의 박막 간섭의 구조적 색상의 개별적 원인으로 거동한다. 놀랍게도 이들 두 요소의 반사율은 비록 그들의 메커니즘이 완전히 다르다 할 지라도 본질적으로 470 nm의 같은 피크 파장을 나타낸다. 더욱이 비스듬하게 놓인 평판에 의한 반사방향은 총 반사율에 대해 거의 균일한 기여를 하며 박막 간섭

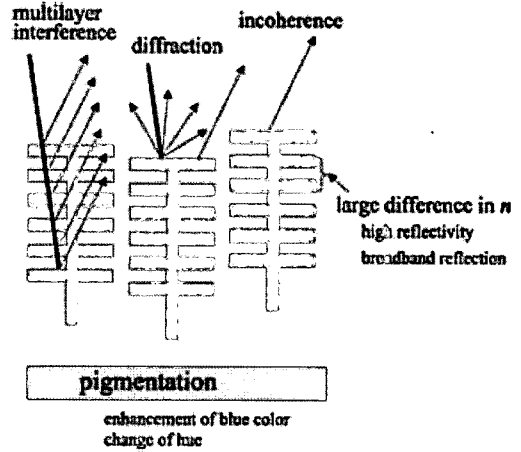


Figure 7. 몰포 나비에서 푸른 색상의 원리.

으로부터 16°C의 차이가 난다. 그러므로 표면 비늘은 파장 선택적인 광학분산기의 역할을 한다. 표면 비늘 없이도 파란색 빛깔은 반사율이 높은 내면 비늘에 의해 발현되기 때문에 표면비늘은 날개의 광택을 내기 위한 조절기의 역할을 한다고 할 수 있다.

요약하면 Figure 7에서 보는 바와 같이 색소와 더불어 정교한 구조는 몰포 나비의 날개에서 상당히 많은 광학적 현상을 나타내게 한다. 즉, 1) 정교한 다층 간섭 때문에 파란색 영역에서 높은 반사율, 2) 용기의 좁은 폭과 불규칙한 높이 때문에 널리 퍼지는 반사, 3) 파란색 명암을 높이거나 구조의 손실 없이 색조변화를 위한 색소, 4) 광학적 분광기로 투명 비늘을 덮음으로써 조절되는 날개의 광택.

그러므로 규칙성과 불규칙성의 조합 및 색소와 더불어 구조적 색상의 조절은 몰포 색의 핵심으로 볼 수 있다. 우리는 이들 두 양상이 자연에서 구조적인 색상을 이해하기 위한 기본적인 것이라고 생각한다.

3. 구조적 색상에서 박막 간섭

3.1. 다층 간섭

다층 간섭과 연관된 구조적 색상은 자연계에서 가장 흔히 발견되는 것이지만 박막 간섭은 파장의

반사율과 선택성이 일반적으로 낮기 때문에 일부 보조적인 방법으로 사용된다. 딱정벌레 시초들(elytra)로부터의 금속성 반사는 가장 잘 알려진 다층 간섭의 예 중 하나이다[6,7,21-23].

Figure 8은 식용식물인 팽나무 열매의 주위에서 수집될 수 있는 *Chrysochroa fulgidissima*로 반짝임 때문에 일본 보석 딱정벌레로 불리는 딱정벌레의 사진을 나타낸 것이다. 시초의 몸통에서부터 꼬리까지 보는 각도의 변화에 따라 노란 색상을 갖는 초록에서 짙은 파란색까지 현저한 색상변화를 나타내는 반면, 배면은 적갈색에서 녹색까지 색상 변화를 보인다. 이러한 변화는 몰포 나비의 경우와 다르게 더 연속적이다. 그러므로 박막 간섭의 특성이 보는 각도에 따라 의존성을 갖고 있다는 것이 분명히 관찰되었다. 고배율의 현미경 관찰로부터 시초는 모든 부위에 약 10 μm의 작은 무늬들로 덮여 있는 것을 알 수 있으며, 주사전자현미경으로 더 쉽게 확인할 수 있다(Figure 9b)). 모양은 각각의 끝에 홀(hole)을 갖는 오각형 혹은 육각형이 조합된 것처럼 보인다. 다각형을 포함하고 있는 면의 배향은 마치 면의 평탄성을 파괴하는 것처럼 얇게 분포되어 있다.

Kurachi 등은 투과전자현미경을 사용하여 다양한 딱정벌레의 시초들의 단면을 조사하였고, 바깥쪽과

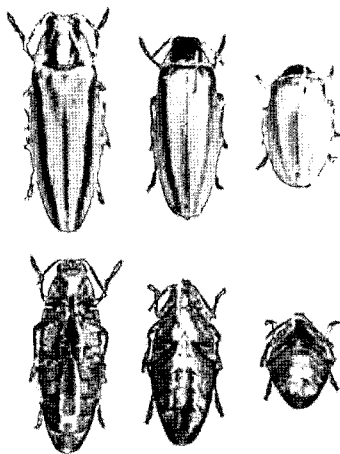


Figure 8. 다양한 보는 방향에 따라 *Chrysochroa fulgidissima* 즉, 일본 보석 딱정벌레의 등과 배면.

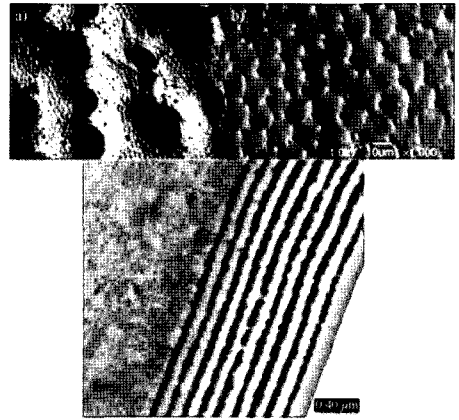


Figure 9. 일본 보석 딱정벌레인 반짝이는 시초(elytron: *Chrysochroa fulgidissima*)표면에 대한 a) 광학현미경 사진, b) 주사전자현미경 사진과 c) 투과전자현미경으로 관찰한 단면의 사진[23].

안쪽에는 각각 외피와 내피로 구성되어 있는 것을 알아냈다[22]. *Plateumaris sericea*의 잎벌레의 경우에 각 부위(외피와 내피)의 두께가 각각 0.3-0.5와 10 μm이다. 외피는 시초의 외관상의 색상에 의존하고 어두운 파란색으로부터 빨간색으로 변화하며 두께는 다섯 개의 교대 층으로 구성되어 있다. 이러한 종류의 반사 스펙트럼을 실험하여, 이들 두 층이 1.4와 1.7의 굴절지수를 가질 때 색상이 잘 발현되는 것을 확인하였다. 또한 보석 딱정벌레의 시초를 관찰하여 20개의 교대 층이 외피 영역에 존재하는 것을 알았다[24]. 다층간섭 이론에 대한 분석으로 1.5와 1.7의 굴절지수를 갖는 것을 사용하여 반사 스펙트럼을 나타내었다. 그러므로 보석 딱정벌레의 구조적 색상은 본질적으로 다층 간섭에 기인된다.

그러나 간단한 다층 모델은 단지 특정 반사를 갖게 되어 그 결과 시초가 거울과 같이 되는 것을 쉽게 알 수 있다. 거울의 존재를 주장할 수는 없지만 단지 주위 배경을 반사하는 것이다. 만일 생물이 스스로 빛을 낸다는 것을 주장할 수 있었다면, 스스로 빛을 방출하는 장치를 가지게 되는 것이다. 보석 딱정벌레는 시초의 평탄성을 파괴하기 위해서 많은 불규칙한 구조를 발생시킴으로 이를 가능하게

하였다. 그러므로 다층과 다각형 구조는 곤충에서 규칙성과 불규칙성의 역할을 하게 된다.

다층 구조는 비록 물리적 관점에서 조사가 잘 이루어지지 않았지만 동물뿐만 아니라 식물 세계에서 널리 분포되어 있다[25]. 나비와 나방은 본래 다층간섭에서 아주 중요한 생물이다. Mason은 이미 광학현미경을 사용하여 나방의 일종인 *Uraniidae* 비늘을 도식적으로 설명하였다[7]. 다층은 평면에 평행한 비늘의 아래 부분에 위치해 있고 5-15개의 필름이 존재하는 것을 발견하였다. 다층간섭의 매우 흥미로운 변화는 최근 인도네시아산 녹색 나비인 *Papilio palinurus*에서 확인되었다[26]. 이 나비의 녹색 비늘은 직경 4-6 μm , 깊이 0.5-3 μm 정도의 오목한 것이 규칙적으로 2차원적인 배열을 하고 있으며 용기들 사이는 넓은 공간을 보인다(Figure 10).

등근 요철부의 아래에는 표피와 공기가 약 20개 교대 층으로 구성하고 있는 휘어진 다층이 나타나 있다. 백색광이 이 구조에 입사되었을 때 요철의 바닥에 직접적으로 부딪치는 노란색 빛이 선택적으로 반사되는 반면 요철의 측면에 부딪치는 파랑색 빛은 반사되어 다시 요철 벽의 반대 측면을 부딪치고 그때 역방향으로 검은색 반사를 하게 된다. 그러므로 단지 노란색과 파란색은 색의 혼합에 의해 사람의 눈에 녹색을 만드는 것으로 선택적 반사가 된다.

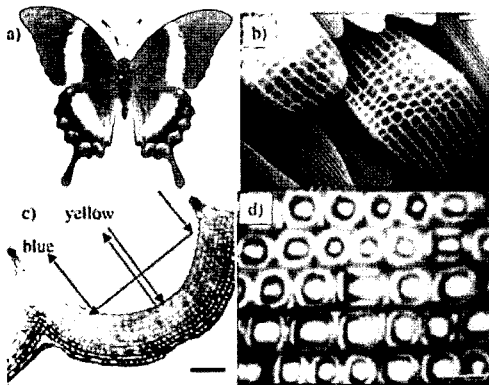


Figure 10. a) *Papilio palinurus* (날개길이=100 mm)의 비늘에서 요철 때문에 색상 혼합의 메커니즘[26]. b-d) 각각 비늘의 SEM, TEM과 광학현미경 사진.

요철의 벽에서 파란색의 경사면 반사 때문에 빛의 편광과 함께 색상의 변화가 또한 관찰된다. 다른 한편 *Papilio butterflies*와 유사한 *P. ulysses*[26]와 *P. blumei*[27]보다 요철이 얇고, *Uraniidae*에서와 같이 보통 다층 반사가 관찰되었다. 이들 나비에서 빛의 산란성은 오목한 층에 의해서 발생됨을 알 수 있다.

3.2. 반사체와 비반사체

다층 반사의 또 하나의 중요한 역할은 동물 세계에서 일반적으로 분포되어 있는 소위 생물학적 반사체이다[3,28-32]. 엄밀히 말하면 이것은 구조적 색상으로 분리될 수 없지만 작은 구조들과 더불어 빛의 작용에 결정적인 역할을 하기 때문에 자주 인용된다.

*Danaidae*와 *Nymphalidae*의 나비 종류에 속하는 애벌레는 금 혹은 은색과 같은 특이한 금속성 색상을 보이는 종류가 존재한다(Figure 11). 이들 애벌레는 Poulton에 의해서 설명되었다[28]. 그는 *Vanessa urticae*의 애벌레가 금속과 같은 외관의 광택을 갖기 위해서는 습기가 필요하다고 보고하였다. Lord Rayleigh는 가능한 원인으로 표면 아래의 깊숙한 부분에 높은 굴절지수의 키틴성 얇은 막과 낮은 굴절지수의 액체로 구성된 조합 층 때문에 빛의 간섭이 되는 것으로 설명하였다[3]. 뒤에 Steinbrecht 등은

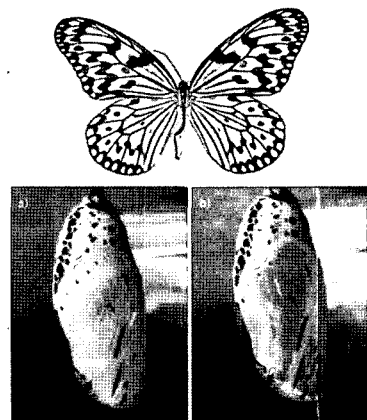


Figure 11. Tree nymph의 애벌레(날개=120 mm). 애벌레가 된 후 2일내에 a) 노란색에서 b) 금색으로 색상변화.

전자 현미경의 관찰을 수행하였고, *Amauris*와 *Euplorea*는 반사 표피가 거울처럼 70% 이상 반사하는 것을 알아냈다[29]. 내피 층은 전자현미경 사진에서 짙고 밝은 층이 250쌍이나 교대로 구성되어 있었고, 밝은 층의 두께는 먼저 바깥쪽이 증가하면 그때 안쪽이 감소하는 등 체계적으로 변한다. 그러므로 많은 층수와 층 두께의 변화는 넓은 파장 범위의 전역에서 높은 반사율을 나타낸다. 이 곤충에서 불규칙성은 변장기능을 부여하는 거울과 같은 다층 간섭을 만드는 것을 알 수 있다.

반사체에 대한 완전한 역기능은 동물 세계에서도 넓게 분포되어 있다. 규칙적으로 구성된 표면은 비 반사체로 작용하여 표면의 광학적 투과성을 높인다. Bernhard 등은 야간나방의 복합 눈 표면이 간격과 높이를 각각 170과 200 nm를 갖는 각막유두의 원뿔형태 돌기로 육각형 배열을 하고 있는 것을 알았다[33]. 그들은 굴절과 일치하는 것이 표면의 규칙성의 조절로 생각하였다. 그리고 표면에서 반사율은 유두 각막을 갖지 않은 것과 비교해서 크기가 2 차수 정도로 감소하는 것을 발견하였다. 유두에서의 감소 원인은 규칙적인 간격을 갖고 미세융기로 성장되어 있기 때문에 야기되는 것으로 나타났다. 더욱이 조합의 정도와 밀접한 관계를 갖고 있는 유두의 형태는 극초단파 실험과 일치하는 것으로 확인되었다. Yoshida는 유사한 돌기가 매 나방인 *Cephonodes hylas*의 투명한 날개에 존재하는 것을 발견했고, 반사율은 인위적으로 평탄화한 표면이 표면을 연마함에 따라 증가되는 것을 확인하였다 (Figure 12)[34-36]. 규칙적이고 파장 이하 크기의

비늘을 가지는 표면구조의 광학적 특성은 공기와 매질의 평균 굴절지수를 갖는 층으로 작용할 수 있고, 그때 유두의 배열은 표면에 대한 반반사성 (antireflective) 코팅으로 거동한다.

4. 광-결정-형태 구조적 색상

20세기 초반에 Mason은 많은 종류의 새 깃털에 대하여 자세하게 조사하여 박막으로부터 반짝이는 색상에 대한 유사성을 검토하였다[37]. 이후 전자현미경 연구는 공작, 벌새, 꿩과 오리의 깃털에서 놀라운 미소구조를 발견하였다. 이 새들에서 멜라닌 입상은 광학적 간섭의 원인으로 생각할 수 있는 가시광선의 파장에 필적하는 주기성을 갖는 미세 주기적인 구조를 형성하고 있다[38-43]. 이 구조는 새로운 광 결정이라 불린다. 그러한 주기적 유전성 (dielectric) 구조와 함께 전자기파의 상호작용에 대한 연구들은 모든 전자기파가 결정 내에서 전파 뿐만 아니라 존재조차도 억제되는 광학적 bandgap에 대한 조사가 최근 10년간 급속히 진행되어 왔다. 막대한 노력이 2차원적 및 3차원적인 주기적 구조에서 모든 광학적 bandgap을 얻기 위한 이론적, 실험적 연구가 이루어졌다. 그러므로 현재 주된 관심은 완전한 광학적 결정이 이론적, 실험적인 관점에서부터 실제화를 어떻게 하는 가이다. 이 연구개발은 반도체 개발과정과 매우 유사하다. 한편, 자연계의 진화과정에서 나타나는 완전히 다른 하나의 개념은 빛과 주기적 유전성 물질사이의 상호작용이다. 이 상호작용은 주로 생물의 지각작용을 자극하려는 경향이 있고 여기서 광범위한 불규칙성의 변화는 오히려 결정과 관련이 깊다.

Figure 13은 공작에서의 광 결정의 예를 나타낸 것이다[42]. 공작의 깃털은 작은 깃가지(barbule)이라 불리는 수많은 가지를 가지는 깃가지(barb)로 구성되어 있다. 작은 깃가지들은 긴축을 따라 휘어져 있고 날개의 밑뿌리로부터 약간 뒤틀려 있다. 각 작은 깃가지는 전형적으로 20-30 μm 정도의 말안장

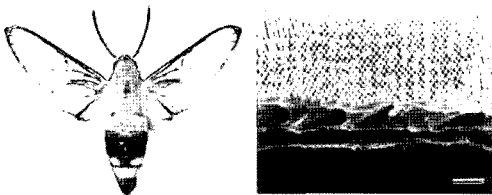


Figure 12. 매 나방의 투명한 날개 표면의 전자현미경 사진(날개= 55 mm)[34].

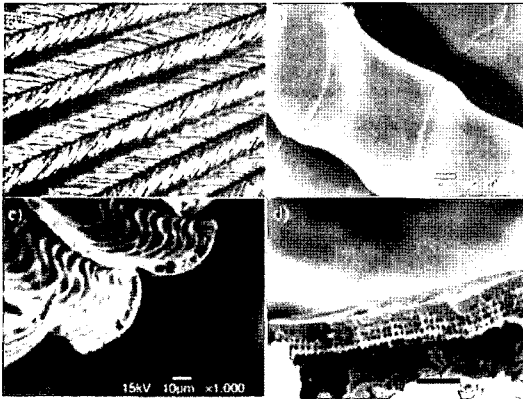


Figure 13. 공작 깃털의 작은 깃가지들의 a) 광학과 b-d) 전자주사현미경 사진.

처럼 약간 굽혀진 표면이 연결된 부분의 형태를 가지고 있다. 현미경 조사를 통해 그것의 횡단면이 초승달 모양으로 되어 있고, 빛나는 색상은 작은 깃가지에서 조각들로부터 발생된다는 것을 알 수 있다. 고배율에서 주기적인 배향을 하고 있는 입자들로 구성된 여러 층이 표면층의 아래에서 관찰되었다. 이 격자구조는 직경이 110-130 nm가 되는 것으로 알려진 입자들로 8-12 층들을 구성하고 있다. 층 간격은 깃털의 색상에 의존한다. 즉 파란, 초록, 노란색 깃털들은 각각 140-150, 150, 165-190의 층간 간격에서 나타낸다[42,44]. 격자구조의 아래에 입자들은 오히려 자유롭게 분포되어 있다. 가로축 방향과 현저히 다르게 입자들은 세로의 방향에 자유롭게 배향하고 있으며 0.7 µm 길이 정도 늘어진 형태를 가진다. 길쭉한 입자들은 멜라닌 입자들이고 작은 깃가지가 어두운 갈색이 되는 원인이 된다. 그러므로 공작에서 광 결정은 2차원에서 거의 정사각형 격자를 형성한다. 초승달 형태의 작은 깃가지가 표면을 따라 휘어진 격자구조를 만들고 있다는 것을 또한 알 수 있다.

공작 깃털의 광학적 특성은 앞의 구조적 특성에 의해 잘 설명된다. 보통 입사각에서 반사 스펙트럼의 최고점 파장은 격자구조의 조건으로 설명된다. Rayleigh-Gans의 근사값 가정 하에서 빛의 입사 평

면파가 2차원에서 서로 입자에 의해 산란되고 산란된 빛은 넓은 범위에서 간섭되는 것으로 생각하였다. 이를 시뮬레이션으로부터 4-8층까지 띠 너비에 대한 의존성의 원인을 알아내었다. 왜냐하면 멜라민 안료의 존재는 층수의 효과를 감소시키는 기능을 갖기 때문이다. Zi 등은 정사각형 격자를 갖는 무한한 2차원 광 결정의 광학적인 띠구조를 계산하였고 두 편광 방향에 대한 부분적인 광학적 bandgap를 알아내었다. 그들은 깃털의 색상에 적용되는 한정된 층수에 대한 반사율 스펙트럼을 계산하여 다양한 작은 깃가지들로부터 반사 스펙트럼을 정교하게 표현하였다[44].

그러나 이 같은 단순한 계산으로는 정확한 반사 강도의 각도 의존성을 재현하지 못하였고, 격자구조를 겹쳐놓은 초승달 형태의 미세구조가 양적인 일치에 대한 이유로 생각되었다. 격자배향의 분포를 고려함으로써 반사율의 각도 의존성을 상당히 잘 나타내게 된다[42]. 그러므로 광 결정성 때문에 규칙성과 거시적인 변형에 일치하는 불규칙성은 안료와 함께 깃털의 색 대비를 높인다. 몰포 나비에서 발견된 구조적 색상의 원리는 다시 공작에서도 만족된다. 재미있게도 공작에서 멜라닌 안료는 규칙적인 구조와 함께 존재하지만 몰포 나비에서 안료는 비늘의 규칙적인 구조 아래에 분포되어 있다. 광 결정성 형태의 구조적 색상은 나비, 딱정벌레, 바다 동물에서도 여러 차례 보고된 바 있다.

5. 구조적 색상에서 배향된 빛 산란

빛의 산란은 다층간섭과 혹은 광 결정 형태와 완전히 다른 구조적 색상의 다른 하나의 원인이 된다. 그것은 구조적 불규칙성에 기반을 두고 있기 때문이다. 빛 산란은 극히 다양한 매질에서 파란 색상을 내는 원인으로 생각된다. 파란 하늘의 원인은 대기 분자들에 의한 빛의 산란 때문으로 Lord Rayleigh에 의해 처음으로 설명되었다. 작은 콜로이드 입자들을 포함하고 있는 현탁액의 색상은 틸들 파랑

(tyndall blue)으로 불리어진다. 이 경우에 파란 색상은 산란 단면이 빛의 주파수에 대한 제4의 힘에 의존하며 직각에서 산란된 빛이 큰 범위로 편광된다는 사실을 기초로 한다. Mie 산란은 입자의 크기가 증가함에 따라 일어나고 파장의 의존성은 Rayleigh 산란의 파장 의존성과는 상당히 다르다. 그러므로 다른 색상이 나타날 수 있다. Mie 산란의 가장 유명한 예는 지구의 파란색에 대조되는 빨간색의 화성에 대한 일몰의 색상이다.

빛의 산란은 구조적 색상의 전형적인 예로서 문헌에 자주 보고되었다. Mason은 몇몇 곤충의 색상들이 틴들 파랑 때문이고 *Mesothemis simplicicollis*의 잠자리의 몸체와 *Libellula pulchella*의 날개가 예로 보고되었다[7]. Huxley는 아프리카 나비인 *Papilio zalmoxis*에서 파란 비늘의 색상이 공기가 채워진 작은 구멍에서의 부분적 틴들 산란과 최하부의 얇은 판에서의 부분적 박막 간섭을 일으키기 때문이라고 설명하였다[45]. Parker 등은 파란색의 미묘한 변화를 측정하여 입자 크기와의 관계로 파랑부터 흰색까지 단계적인 변화를 설명하였다[46]. 그는 전반적으로 어둡게 자리한 외피의 세포들은 일시적으로 색상이 없는 입자들에 의해 틴들 산란을 일으키기 때문인 것으로 *L. pulchella*의 날개와 *Orthetrum caledonicum*의 잠자리 몸체를 예로 설명하였다. 동물에서 틴들 파랑의 많은 설명에도 불구하고 산란 단면과 그 편광특성의 파장 의존성을 양적으로 측정하여 보고한 것은 전혀 없다. 그러므로 순수 틴들 산란이 그 색상을 결정하는 것 인지는 아직까지 확실치 않다.

한편, 빛의 산란이 어쨌든 배향되고 색상에 영향을 미치는 것이 점차 분명하게 되었다. 잉꼬와 감색의 목을 한 *cotinga*의 새 깃털 깃가지에서 발견된 해면질 골수의 케라틴 모체들은 케라틴 ($n=1.54$)과 공기의 표면에서 일어나는 Rayleigh 산란 때문으로 널리 알려졌다(Figure 14). 그러나 이 모델은 자주색으로부터 파란색 영역까지 피크를 가지기 때문에 그 반사 스펙트럼으로 설명하는 것은 무리가 있었다.

Prum 등은 전자현미경 사진의 공간적인 Fourier

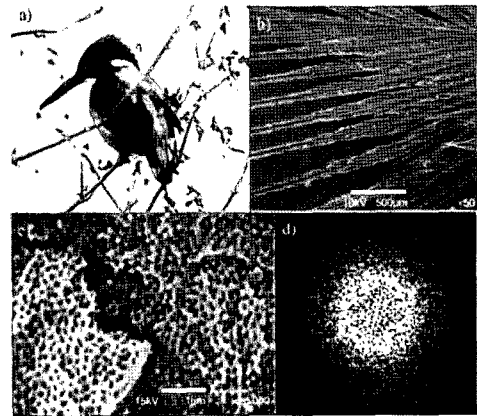


Figure 14. 보통 a) 물총새의 b) 깃가지에서 발견된 c) 해면 골수 모체(날개길이=150 mm) d) 단면의 TEM 사진.

변형을 수행하여[47], 역학적인 공간에서 분명한 링 구조를 발견하였다. 만일 다양한 범위의 크기를 갖는 해면구조로 분포되어 있다면 Gaussian 분포를 낚은 운동공간의 중심에 위치를 얻게 될 것이다. 고리 구조는 기체의 특성크기가 오히려 균일하고 어두운 다층들로 각을 이루고 있도록 분포된 모형이란 것을 의미한다. 층의 두께는 공기구멍과 케라틴 연결 다리의 두께와 일치한다. 그들은 또한 평행한 콜라겐 섬유들과 유사한 배향을 하는 것으로 보이며 다

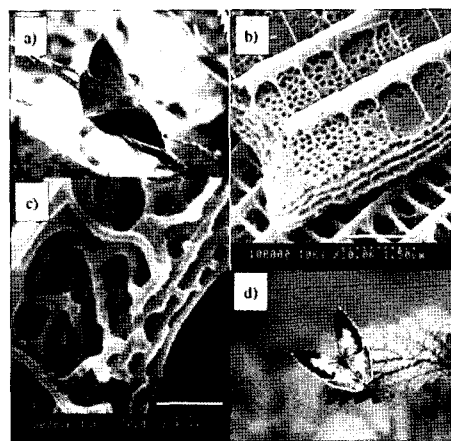


Figure 15. *licaenid* 나비들의 반짝이는 비늘의 주사전자현미경 사진. a,b) *Narathura japonica japonica* (날개길이= ~50 mm)와 c,d) *Celastrina argiolus ladonides* (날개 길이=~35 mm).

양한 종류의 조류 피부에서 유사한 구조가 조사되었고, 유사한 공간 배열을 확인하였다[48]. 이것은 해면 기질의 외견상 랜덤 구조가 넓은 범위로 빛을 반사시키며 일관성 없는 빛의 산란이 일관성 있는 산란으로 변화하는 균일한 특정 크기를 실제로 가지게 된다. 그러므로 비 규칙성 구조 때문에 구조적 색상이 안쪽의 규칙적인 구조의 조합으로 강조된다.

유사한 모형은 또한 *Licaenidae* 종 나비들의 비늘 아래 부분에 위치한 층 구조에서 발견되었다(Figure 15).

6. 구조적 색상의 공업적 응용

우리는 그 구조적 기원에 따라 2종류로 구조적 색상을 분류할 수 있다. 첫 번째로 그것은 빛의 파장보다 약간 작은 치수의 규칙적인 구조에 의해 생긴다. 다층 간섭과 광 결정 형태(몰포 나비)는 이 종류에 속한다. 두 번째로 구조적 색상은 일반적으로 빛의 파장보다 작거나 필적하는 불규칙성 구조로부터 생기고, 확산성 빛의 방출에 기인된다. 한편, 파장보다 약간 작은 주기적인 규칙성 구조는 산란과 파장에서 선택적으로 빛의 반사를 훨씬 큰 범위

에서 지속한다.

효과적인 구조적 색상을 만들기 위해 다양한 반사를 일으키는 다층간섭이나 광 결정과 같은 어떤 과정이 필요하다. 박막 간섭과 혹은 빛의 산란과 같은 단순 광학적 진행과정들은 스스로 일으키기는 어렵다. 회절격자 형태의 구조적 색상은 비록 격자의 주기적인 구조 때문에 진행 될지라도 자연계에서는 드물다. 이는 특정색상을 고집하는 것이 아니라 다양한 색상을 나타내기 때문이다.

위 분류는 이들 구조의 독자적 크기를 비교할 때 우선적으로 측정이 어렵기 때문에 정밀하지 않고 때때로 복잡하다. Figure 16에 여러 가지 전형적인 동물이 가지고 있는 구조적 색상에 대한 특성의 크기를 나타내었다. 둘째는 주파수가 지속되는 곳에서 연속적인 길이와 면적이다. 연속적인 길이가 너무 짧을 때 회절과 같은 빛의 파동성은 중요하다 반면, 기하학적인 광학성은 길이가 훨씬 길었을 때 지배적이다. 그러므로 구조의 분류체계는 이들 동물에서 혼한 양상이다. 비록 그러한 구조적 분류체계의 물리적 의미는 명확하지 않을지라도 만일 그러한 분류체계 구조들이 각 분류체계에서 시각적인 독특한 효과를 나타내면 구조적 색상은 분류체계 없이 언급될 수 없다.

그러나, 불규칙적인 것을 기초로 하는 구조적인 색상조차도 유사한 분류체계가 존재하는 것처럼 보인다. 규칙성의 지속적인 길이는 *lycaenid* 나비들에 비하여 큰 반면 새의 깃털에서 발견된 해면골수에서 불규칙성의 크기와 규칙성의 지속적인 길이 사이의 구별은 더욱 어렵다.

문명 이래 구조적 색상은 인간의 삶과 더불어 밀접하게 연관되어 왔다. 그것은 장신구와 액세서리와 가구의 장식물로 흔히 사용되어 왔다. 오팔과 진주는 구조적 색상을 이용하는 가장 잘 알려진 천연적인 보석중의 하나이다. 일본에서 보석 딱정벌레의 날개와 새의 깃털이 수천 년 전부터 장식물로 사용되어 왔다. 7세기에 새워졌고 모든 기둥들이 보석 딱정벌레의 날개로 장식된 불교의 채색 사원은 일본

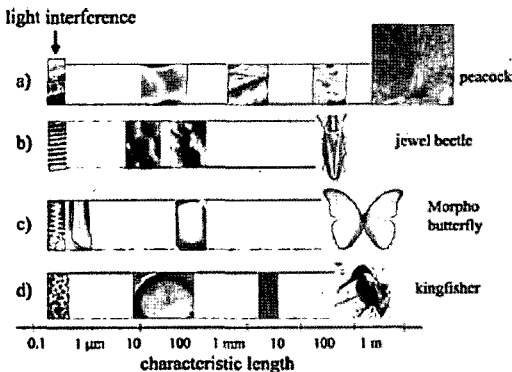


Figure 16. 구조적 색상에 기여하는 구조의 분류체계. 가장 기본적인 비늘이 약 0.2 μm 빙의 간섭을 가는 것임. 빛의 간섭에 기여하는 규칙적인 구조는 회색 부분으로 가리키는 범위 내에서 유지됨. 만일 이 범위가 좁으면 빛의 회절은 중요한 역할을 하는 반면 넓으면 기하학적인 광학 성질이 지배적임. 어느 경우에 이 범위는 확산 빛을 만드는 데 도움이 됨.

에서 가장유명하다. 칠기 기물의 장식을 위해 진주 층의 겹질 판의 사용은 8세기에 중국으로부터 유래되었다. 우크라이나에서 17-18세기에 번창한 운모 분말은 초상화 배경의 광택을 내기 위해 사용되었다.

그러나 그것의 화려함을 높이기 위한 공업적 응용은 최근 10년 동안 급격히 증가되어 왔다. 구조적 색상을 나타내는 대부분의 물질들은 가루형태로 처리되었고, 안료와 혼합한 후 사용되었다. 유명한 것 중 하나는 운모조각의 표면 반사율을 높이기 위해 TiO₂ 필름으로 코팅된 “진주 안료”이다. 운모조각의 넓은 띠와 낮은 반사율 때문에 코팅은 충분한 진주 빛 광택을 발생시킬 수 있도록 반사율을 증가시키기 위해 필요하다. 반사율과 파장의 선택성을 증가시키기 위해 TiO₂ 층의 두께가 박막간섭의 조건과 일치하도록 적당해야 하며, “간섭성 진주 안료”로 불린다. 더욱 효과를 높이기 위해 광학적으로 다양한 새로운 안료가 선보였다. 그것은 높은 반사성 금속 코팅으로 덮여진 실리카 조각을 이용한 것이다. 안료의 이러한 형태는 보다 높은 금속성 반사율을 나타내고 강한 색상이 보는 각도의 변화와 더불어 변한다.

더 정교한 섬유소재는 몰포 나비의 비늘 구조의 모방을 통해 Iohara 등에 의해 제시되었다[49]. 이 섬유는 폴리에스터로 만들어졌고, 70-90 nm의 두께를 갖는 나일론 6과 폴리에스터의 61개 층으로

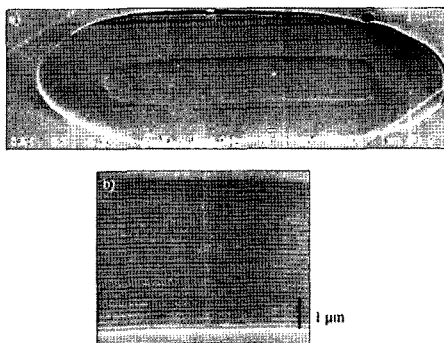


Figure 17. a) 몰포 나비를 모방한 평면화된 폴리에스터 섬유의 단면의 주사현미경 사진이고, b)는 70-90 nm의 두께를 갖는 나일론 6과 폴리에스터가 61층 교대로 쌓여진 섬유.

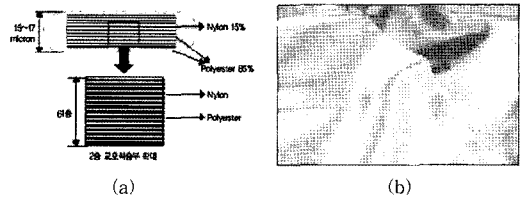


Figure 18. Morphotex사의 (a)단면 모식도와 (b)직물.

조합된 15-17 μm 두께의 평평한 형태를 가진다(Figure 17,18). 다층 구조 때문에 파장 선택적 반사와 보는 각도에 따른 변화가 일어났다. 게다가 섬유는 평평한 형태는 효과적인 반사율을 증가시키는 다층의 방향으로 놓는 것이 가능하였다. 이 특성은 섬유를 사용하여 웨딩드레스를 제조함으로써 확인되었다. 그러나 층을 구성하는 고분자물질이 유사한 굴절지수를 가지기 때문에 높은 반사율 범위는 몰포 나비와 현저히 다른 작은 파장범위로 한정되었다.

금속성의 광택과 심색을 모방하고자 하여 (주)구라레는 특수단면 섬유인 멀티스피럴사 직물을 개발하였다. 이 섬유의 단면과 직물 중의 구조는 Figure 19와 같다. 그림과 같이 다중편평 단면을 갖는데, 열수축률의 차이가 있는 고분자를 섬유단면 중앙부에 붙여 복합사를 구성하였다. 열처리에 의해 접합된 고분자의 열수축으로 주기적인 비틀림이 발생되고 편평섬유가 직물의 표면에서 연이어 떠오르는 구조를 만든다. 그림에 표시한 것과 같이 이 섬유의 평행부분과 수직부분에서 광이 복잡하게 굴절되어 깊이 있는 광택을 발현시킨다. 박지 직물에 있어서도 벨벳과 같은 심색과 광택을 얻을 수 있다.

Saito 등은 이 구조적 색상의 원리를 이용하기 위

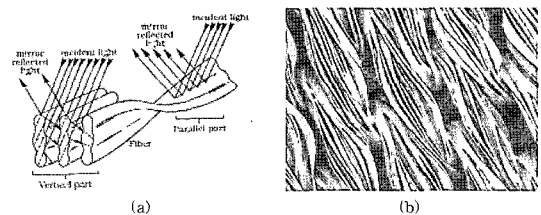


Figure 19. 구라레의 특수섬유 (a) 단면과 (b) 멀티스피럴 섬유사 직물.

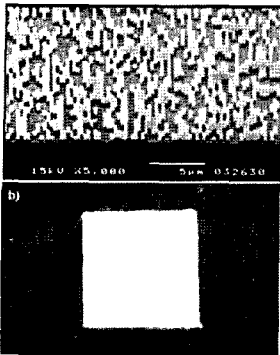


Figure 20. a) 표면에 균일하지 않은 틈을 갖고 있는 유리 기체의 전자주사 현미경사진과 b) 몰포 날개와 유사하게 빛나도록 SiO₂와 TiO₂로 구성하고 있는 다층 코팅물.

한 몰포 기재를 제조하였다[50,51]. 전자빔(electron-beam) 기술에 의한 건식 에칭(dry etching)을 사용함으로써 평면에 0.3×2 μm 단위의 틈이 배향되어 있는 6×6 mm² 크기의 기재를 제조하였다. 짧고 긴 측면의 길이는 각각 용기의 폭(0.3 μm)이고 용기에서 판과 근접한 위쪽 끝 사이의 평균 길이(2 μm)에 해당한다. 용기의 일정치

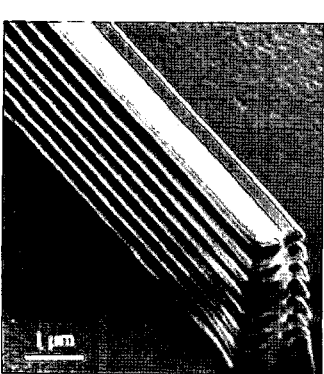


Figure 21. 중점 이온빔 화학적 증착(FIB-CVD) 기술로 만들어진 몰포 비늘을 모방한 용기 구조.

않은 높이를 표현하기 위해 단위의 높이는 2가지의 자유 가변성을 가진다. 높이의 차이는 0.44 μm의 일반적인 반사 빛에 대한 상쇄간섭을 만들기 위해 0.11 μm로 조절되었다. 제조된 기재에 대한 SEM 사진은 Figure 20a)에 나타내었다. SiO₂ (n = 1.47)와 TiO₂ (n = 2.4)의 14개 교대된 층의 발산은 넓은 띠폭을 갖는 높은 반사율을 초래했다. Figure 20b)에서 보는 바와 같이 이렇게 직조된 기재는 반사율, 색상, 띠폭, 각도 의존성과 이방성이 몰포 날개를 닮았다. 이러한 접근은 몰포 날개의 구조 모방 뿐

만 아니라 규칙성과 불규칙성의 조합에 의한 원리도 이용되었다. 몰포나비의 비늘 모방의 하나로 완전히 다른 접근방법은 용기의 완전한 구조를 재생하기 위해서 집중 이온빔 화학적 증착(FIB-CVD) 기술

을 이용한 것으로 Matsui 등에 의해서 개발되었다. 그들은 적당히 조절하여 얇은 박막의 거리를 몰포 나비의 거리와 일치하게 만들었고, 앞에서 기술한 것과 같이 얇은 박막의 교대 구조를 재생할 수 있었다(Figure 21). 백색광 복사는 현미경관찰 하에서 파랑이 자주 빛으로 실제적으로 빛나는 것을 알아 내었다. 그러므로 최근 급격히 발전한 나노기술은 자연계에서 가장 정교한 구조들조차도 제조가 가능하다는 것을 입증하는 것으로 구조적 색상에 대한 연구는 앞으로 대단히 유망할 것으로 보인다.

참고문헌

1. C. M. Penz, P. J. DeVries, American Museum Novitates, No. 3374, American Museum of Natural History, New York, 2002.
2. B. Walter, Die Oberflächen-oder Schillerfarben, Braunschweig, 1895.
3. Lord Rayleigh, *Philos. Mag.*, **37**, 98(1919).
4. A. A. Michelson, *Philos. Mag.*, **21**, 554(1911).
5. Lord Rayleigh, *Roy. Soc. Proc.*, **A93**, 565(1917).
6. H. Onslow, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, **B211**, 1(1921).
7. C. W. Mason, *J. Phys. Chem.*, **31**, 321(1927).
8. T. F. Anderson, A. G. Richards, Jr., *J. Appl. Phys.*, **13**, 748(1942).
9. H. Ghiradella, W. Radigan, *J. Morphol.*, **150**, 279(1976).
10. H. Ghiradella, *Ann. Entomol. Soc. Am.*, **77**, 637(1984).
11. H. Ghiradella, *Appl. Opt.*, **30**, 3492(1991).
12. H. Ghiradella, *Microsc. Res. Tech.*, **27**, 429(1994).
13. H. Ghiradella in *Microscopic Anatomy of Invertebrates*, Vol. 11A (Eds.: F. W. Harrison, M. Locke), Wiley-Liss, New York, p.257(1998).
14. H. Ghiradella, *J. Morphol.*, **142**, 395(1974).
15. H. Ghiradella, *J. Morphol.*, **202**, 69(1989).
16. H. Tabata, K. Kumazawa, M. Funakawa, J. Takimoto, M. Akimoto, *Opt. Rev.*, **3**, 139(1996).
17. P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence, R. J. Wootton, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **B266**, 1403(1999).
18. S. Kinoshita, S. Yoshioka and K. Kawagoe, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **B269**, 1417(2002).
19. S. Kinoshita, S. Yoshioka, Y. Fujii, N. Okamoto, *Forma*, **17**, 103(2002).
20. S. Yoshioka, S. Kinoshita, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **B271**, 581(2004).
21. A. C. Neville, *J. Insect Physiol.*, **23**, 1267(1977).
22. T. Hariyama, Y. Takaku, M. Hironaka, H. Horiguchi, Y. Komiya, M. Kurachi, *Forma*, **17**, 123(2002).

23. S. Kinoshita, *Cell Tech.*, **22**, 1113(2003)(in Japanese).
24. A. C. Neville, S. Caveney, *Biol. Rev.*, **44**, 531(1969).
25. D. W. Lee, *Am. Sci.*, **85**, 56(1997).
26. P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence, *Nature*, **404**, 457(2000).
27. H. Tada, S. E. Mann, I. N. Miaoulis, P. Y. Wong, *Appl. Opt.*, **37**, 1579(1998).
28. E. B. Poulton, *Trans. Ent. Soc. Lond.* 515, 1888.
29. R. A. Steinbrecht, W. Mohren, H. K. Pulker, D. Schneider, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **B226**, 367(1985).
30. E. Denton, *Sci. Am.*, **224**, 64(1971).
31. M. F. Land, *Sci. Am.*, **239**, 88(1978).
32. A. R. Parker, *Am. Sci.*, **87**, 248(1999).
33. W. H. Miller, A. R. Moller, C. G. Bernhard in *The Functional Organization of the Compound Dye* (Ed.: C. G. Bernhard), Pergamon Press, Oxford, 1966.
34. A. Yoshida, M. Motoyama, A. Kosaku, K. Miyamoto, *Zool. Sci.*, **13**, 525(1996).
35. A. Yoshida, *Forma*, **17**, 75(2002).
36. A. Yoshida, M. Motoyama, A. Kosaku, K. Miyamoto, *Zool. Sci.*, **14**, 737(1997).
37. C. W. Mason, *J. Phys. Colloid Chem.*, **27**, 201(1923).
38. C. H. Greenwalt, W. Brandt, D. D. Friel, *J. Opt. Soc. Am.*, **50**, 1005(1960).
39. H. Durrer, *Verh. Naturf. Ges. Basel*, **73**, 204(1962).
40. W. J. Schmidt, H. Ruska, *Z. Zellforsch. Mikrosk. Anat.*, **57**, 1(1962).
41. E. Rutschke, *Z. Zellforsch. Mikrosk. Anat.*, **73**, 432(1966).
42. S. Yoshioka, S. Kinoshita, *Forma*, **17**, 169(2002).
43. S. Yoshioka, O plus E 2001, 23, frontispiece (in Japanese).
44. J. Zi, X. Yu, Y. Li, X. Hu, C. Xu, X. Wang, X. Liu, R. Fu, *Proc. Natl. cad. Sci.*, **100**, 12576(2003).
45. a) J. Huxley, *J. Entomol.*, **50**, 9(1975).
46. A. R. Parker, *J. Opt. A*, **2**, R15-R28(2000).
47. R. O. Prum, R. H. Torres, S. Williamson, J. Dyck, *Nature*, **396**, 28(1998).
48. R. O. Prum, R. Torres, *J. Exp. Biol.*, **206**, 2409(2003).
49. K. Iohara, M. Yoshimura, H. Tabata, S. Shimizu, *Chem. Fibers Int.*, **50**, 38(2000).
50. S. Yoshioka, S. Kinoshita, A. Saito, *Oyo Butsuri*, **73**, 939(2004).
51. A. Saito, S. Yoshioka, S. Kinoshita, *Proc. SPIE*, 5526, 188(2004).

저자 프로필



손원근

1987. 충남대학교 재료공학과 졸업
 1993. 충남대학교 공업화학과(석사)
 1996. 충남대학교 고분자공학과(박사)
 1996-1997. 한국화학연구원 재료실 (Post-Doc.)
 1997-1999. 충남대학교 국책전임교수
 1999-2001. 한밭대학교 전임연구원
 2001-현재. 충남대학교 전임연구교수



박원호

1985. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1987. 서울대학교 섬유공학과(석사)
 1993. 서울대학교 섬유공학과(박사)
 1996-1997. 미국 University of Massachusetts at Amherst (Post-Doc.)
 1993-1999. 금오공과대학교 고분자공학과 부교수
 1999-현재. 충남대학교 유기소재·섬유 시스템전공 교수
 (305-764)대전 유성구 궁동 220
 전화: 042-821-6613, Fax: 042-823-3736
 e-mail: parkwh@cnu.ac.kr