

구조색, 다층막과 회절격자 구조에 의한 발색

1. 서 언

반사광이나 투과광을 자유롭게 제어하는 광기능 소자로서 광학 박막을 응용한 다층막 구조라든가 회절 격자 구조가 널리 이용되고 있는 것은 주지의 사실이다. 이를 위한 제조 기기라든가 프로세스도 최근에는 나노미터 영역에 달하여 제조 기기의 가격도 비싸질 뿐이다. 그렇게 인위적으로 나노 가공을 하는 것과는 달리 우리를 둘러싼 자연계에는 어떠한 고가의 기계를 전혀 사용하지 않고 유전자 정보를 통하여 나노미터 차원에서 가공을 행하고 개체의 유지와 생존을 천문학적인 시간의 경과와 시행착오의 결과로써 획득하고 있다고 추측되는 생체나 생체의 가공물이 존재한다는 것을 알게 되었다. 이러한 천문학적인 시간을 통한 시행착오와 과학기술의 정수를 집결한 과학 기기의 어느 쪽이 더 고가인지 간단하게 결정하기 어려운 경우도 있다. 구체적으로는 나비나 나방의 인분(鱗粉), 투구벌레의 표피, 물고기의 비늘, 진주, 화석 보석품인 레인보우 암모나이트(rainbow ammonite) 등의 시료에 관찰광의 파장과 같은 정도의 규칙적인 구조가 존재하는 것이 알려지게 되었다. 이들 모든 예에서는 그러한 가공을 하기 위한 새로운 기법의 개발이라고 하기보다도 어느 사이에 몸에 겸비한 형태로써 생각지 않는 표면 가공이 존재하고 있었던 점에서 인지된 표면 내지 단면의 구조이다. 따라서 여기에서는 먼저 구조색이 자연계에서 발견된 경위를 간단히 다루고 이어서 구조색이 어떠한 특성을 갖는가, 즉 빛의 파장 정도의 규칙적인 다층막 구조라든가 회절격자 구조를 갖는 것을 관찰되고 있는 예를 통하여 소개하고 그러한 구조의 특색을 구조가 관찰된 시료의 특질과 연관시켜 고찰한다.

또 시료의 특질과 대응한 표면 가공 상태를 알기 위하여 필연적으로 얻어진 새로운 측정법을 밝히고 구조색의 응용 예를 살펴보면서 다른 표면가공 분야에 참고가 될 것이라는 관점에서 가공에 관한 최신 동향을 다루어 본다.

2. 구조색의 발현과 현재까지의 전개

구조색의 존재를 다룬 가장 오래된 문헌은 R. Hooke의 Micrographia : 관찰 36 ; “공작, 오리 및 색이 변하는 깃털”(1665)로 거슬러 간다. 또, I. Newton의 Optiks에도 마찬가지로 공작 꼬리털의 관찰에서 입사각의 각도를 바꾸면 색이 변한다고 하는 지적이 있고 양자 모두 구조색 자체의 정의는 없었으나 현상에 대한 관찰이 논술되어 있다. 현재로는 이들 두 가지 논문이 구조색 자체의 발견에 관한 가장 오래된 문헌이라고 생각된다. 이러한 17세기 후반부터 18세기 초까지는 빛의 다층막에 의한 간섭 현상이라든가 회절 격자에 의한 회절 현상 등의 파동광학에 대한 이론적 해명은 아직 착수되지 않고 오로지 판상 퇴적물의 존재에 의한 결과는 아닐까라고 하는 지적과 이것이 입사각 변화에 대응하여 색이 변화한 결과라고 지적하는데 그치고 있다.

판상 퇴적물로부터의 반사·투과광의 시뮬레이션은 G. Stokes(1862)로부터 시작되었다고 생각된다. 나중에 빛의 파동 현상에 대한 이론적 전개에 많은 공헌을 한 Rayleigh의 간섭·회절 이론이 일반적으로 된 것은 1910년대로써 Rayleigh가 다룬 곤충과 꽃에 관한 짧은 논문(1874)에는 구조에 의한 파동 현상 등의 지적은 일체 없었다. 그 후 판상 또는 다층막 구조로부터 빛의 반사·투과 등의 시뮬레이션은 오로지 광학 박막 분야에서 구조색과는 관계없이 전개되었다. 구조색 분야에서 파동 현상으로부터의 이론적 전개가 재개된 것은 A. Huxley(1968)부터이고 특히 광학 박막의 관점에서 구조색을 언급한 것은 M. Auwaerter가 최초라고 생각되고 그 후 Steinbrecht가 이어서 광학 박막

과 구조색의 양자를 종합적으로 검토하는 모습으로 된 것은 비교적 최근이다.

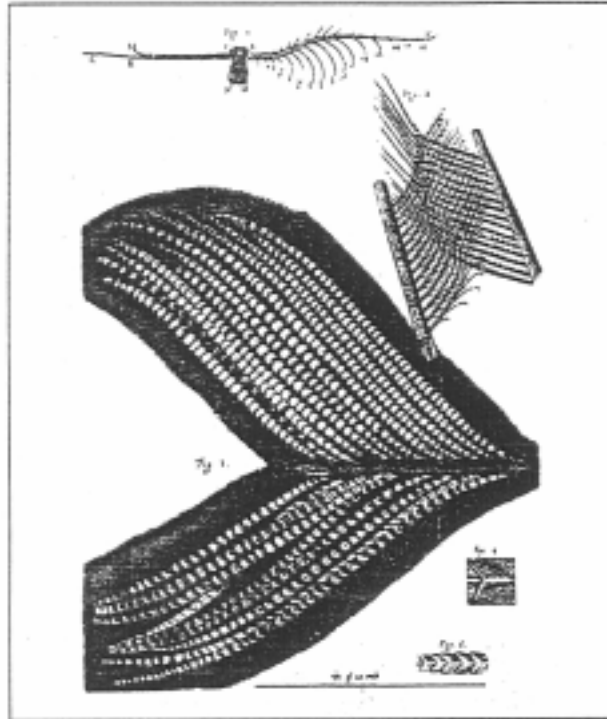
즉, 19세기부터 20세기 후반까지 흥미의 대상은 오로지 생체에서 관측되는 빛의 파장과 같은 정도의 규칙적인 구조 : 다층막, 회절 격자 및 미소 산란 입자의 관찰에 시종일관한 감이 있다. 단, 당초의 광학 현미경에서 투과형 및 최근의 고분해능 주사 전자 현미경의 채용에 의하여 빛의 파장과 같은 정도인지 또는 나노미터 영역의 완전한 규칙적인 구조가 얻어지게 되었다. 그리고 다층막으로부터 간섭 이론과 동일한 관점에서 현상을 이론적으로 해석할 수 있게 된 것은 광학 박막의 진전에 수반하는 결과이고 향후에는 다층막으로부터의 간섭 이론과 회절 격자로부터의 회절 이론을 합체시킨 3차원 임의점에 대한 광강도의 시뮬레이션이라고도 해야 할 정식화가 급선무라고 생각된다. 이들 구조색 연구의 경과에 대하여는 이미 “자연계에 나타나는 구조색(小倉, 大藪, 2004)”에 상세하게 논술하고 있다.

3. 다양한 구조색의 예와 표면가공으로써의 의의

3.1 구조색의 다양한 예

구체적으로 구조색을 나타내는 시료로 어떤 것이 있는 것일까? 여기에서 간단하게 다루어 본다. 앞에서 다룬 바와 같이 구조색 그 자체로써 관찰된 것은 <그림 1>에 나타낸 바와 같이 새털, 특히 공작의 꼬리털이었다. Hooke 라든가 Newton이 공작을 어디에서 보고 날개의 구조와 나타내는 색의 입사각 변화로 정색이 변화하는가에 기를 기울인 것은 다른 흥미 있는 문제이다. 또 당시 영국에서는 구조색을 뜻하는 용어가 iridescent colour였는데 또 한편의 미국에서는 structural color가 일관되게 사용되어 온 것이 양자 공히 구조

색이라고 하는 의미로 사용되어온 점을 지적하고 싶다.

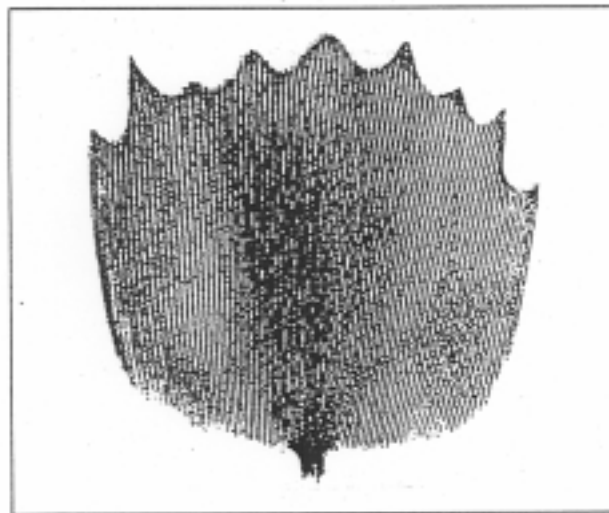


<그림 1> 초기의 광학현미경으로 얻어진 우모의 깃털 축에 관한 최초의
구조 관찰 예

그 후 <그림 2>에 나타내듯이 Mallock은 고배율의 광학현미경을 사용하여 나비 인분의 표면구조를, 또 Michelson은 진주 조가비라든가 곤충에서 나타나는 금속색에 대하여 보고하여 흥미의 중심은 주로 나비라든가 투구벌레로 옮겨져 오늘에 이르고 있다.

또 한 가지 다루고 싶은 것은 일본에서 구조색이 언제부터 검토되었는지인데 가장 초기에 일본에 소개된 것은 Folsom의 저서(1911)를 통해서 이었다. 그는 파리의 날개와 비누막이 나타내는 무지개 색을 비교하여 투명한 날개의 박막 간섭으로 무지개 색이 생긴다고 지적하였다.

또 나비에서는 인분의 가늘고 뺑뺑하게 평행한 조선(條線)에 의한 회절로 구조색이 생긴다고 하는 오늘날의 구조색과 거의 같은 정의를 이미 공표하고 있었는데 어떤 연유에서인지 일본의 생물 관계자라든가 응용 물리 관계자에게 오랫동안 무시되어 왔다. 일본에서 구조색에 다시 주목한 것은 실로 1969년 鹿兒島 大學의 Hirata와 Oshako였다. 다만 이 사이에 구조색이라고 명기하지 않은 채로 별도로 진주의 광택에 관한 연구는 양식 진주가 생겨난 나라인 일본에서 蓮, 金井, 蓮沼 등에 의하여 실시된 점에 대하여는 지적해 두고 싶다.

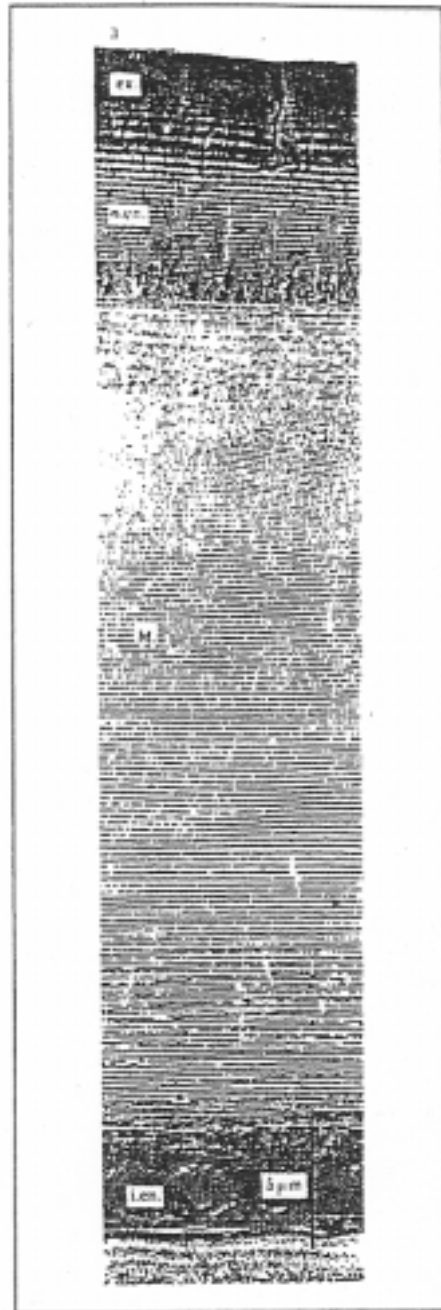


<그림 2> 고배율 광학현미경에 의한 나비의 인분의 표면 관찰

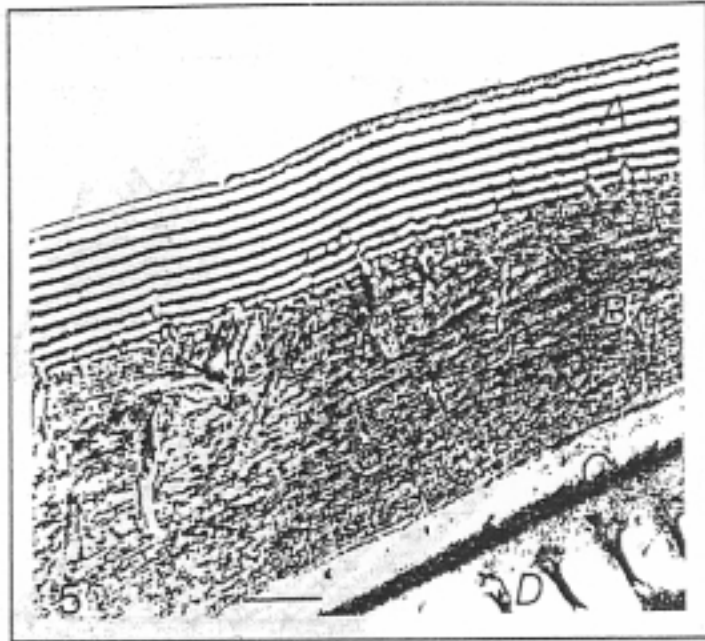
시료 : *Oraithoptera Poseidon* 배율 : $\times 1,170$

구조색의 연구로 특히 빛의 파장 정도의 규칙적인 구조 ; 다층막이라든가 회절격자를 밝히는데 투과형 전자 현미경이 완수한 역할은 획기적이었다. 예를 들면 R. Steinbrecht는 완전한 구조색을 나타내는 *Euploea core*의 황금색 번데기의 표피 단면으로 <그림 3>에 나타내는 다층막의 존재를 나타냈다. 또

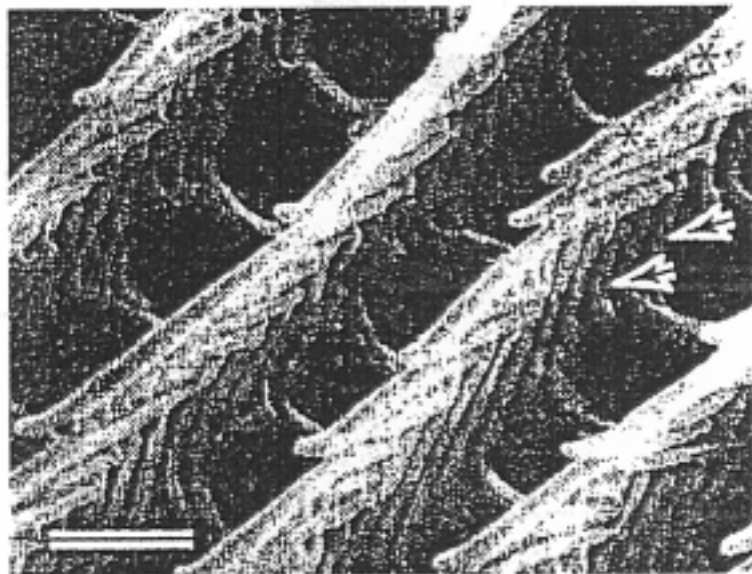
Schultz & Rankin은 <그림 4>에 나타난 딱정벌레의 표피에 관한 다층막 단면 구조를 보고하였다.



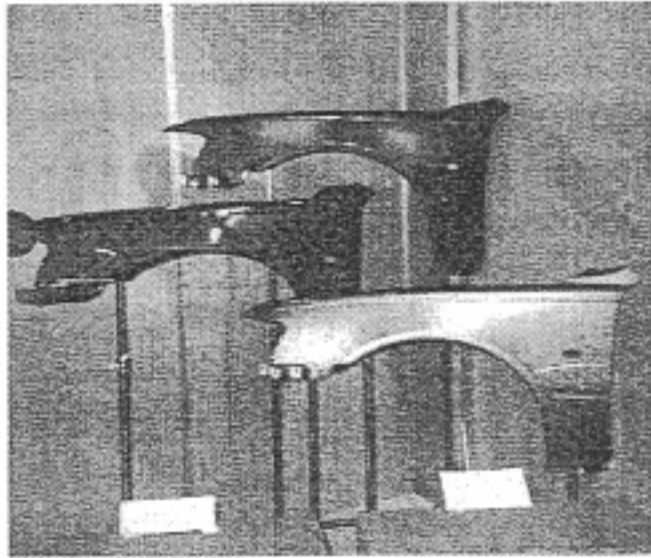
<그림 3> 투과형 전자 현미경에 의한 구조의 단면
시료 : 나비의 번데기(Euploea core)



<그림 4> 투과형 전자 현미경에 의한 구조의 단면
시료 : 딱정벌레(Tiger beetle : *Cicindela*)

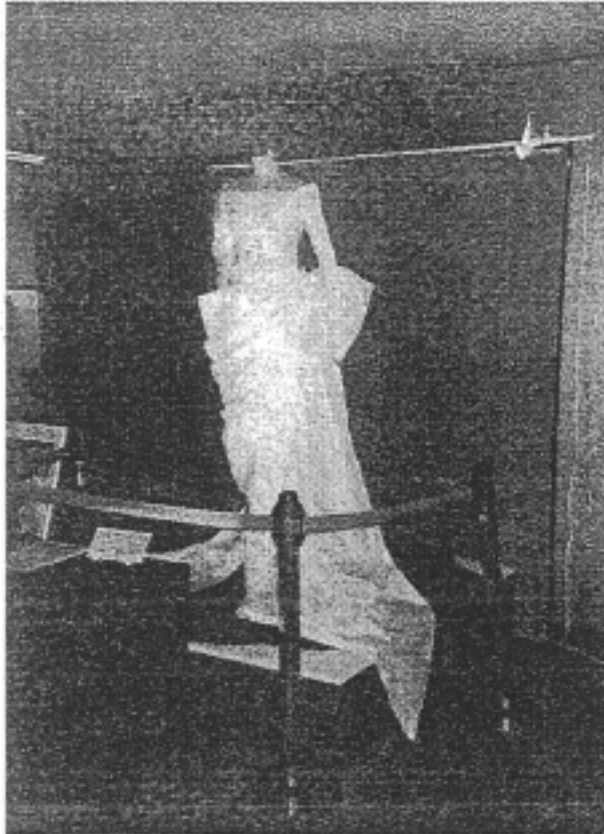


<그림 5> 주사형 전자 현미경에 의한 단면관찰
시료 : 나비(*Exyphanis aesacus*)



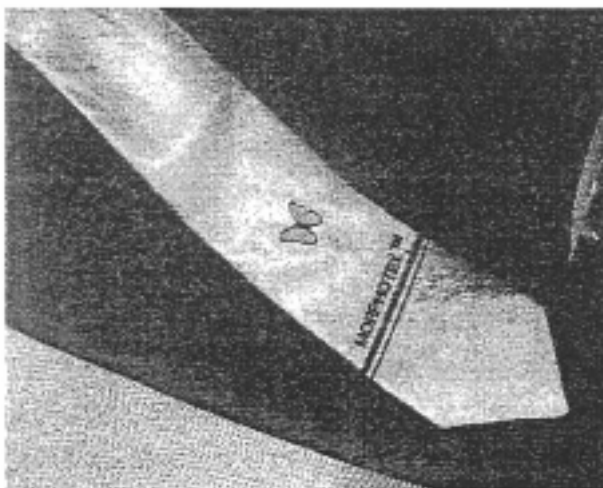
<그림 6> 구조색 도장재 : 모포톤을 응용한 자동차의 차체 도장 예
(日産自動車)

단, 투과형 전자 현미경에서의 관찰은 시료의 전처리 또는 레플리카의 제작에 어려움이 있다. 그러한 점에서 1975년경부터 도입된 주사 전자 현미경의 위력은 더욱이 절대적이었다. 주사 전자 현미경이 형태의 연구에 완수한 역할은 일본섬유기계학회지에서도 1979년에 “주사형 전자 현미경 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 주사 전자 현미경의 위력을 이해하고 있는 사람도 많다고 생각한다. 구조색 분야에서도 상황은 거의 마찬가지로 H. Ghiradella는 <그림 5>에 나타내는 나비 인분(*Caligo memnon*)의 3차원적인 다층막 단면 구조를 처음으로 보고하였다. 종래의 광학 현미경으로는 불충분한 배율을 극복하고 또 투과형 전자 현미경에 필수인 관측 전의 생체의 번잡한 화학적 전처리라든가 레플리카의 제작이 불필요하게 되고 또한 피사계 심도가 큰 미세 구조의 관찰이 비교적 용이하게 되었기 때문이다.



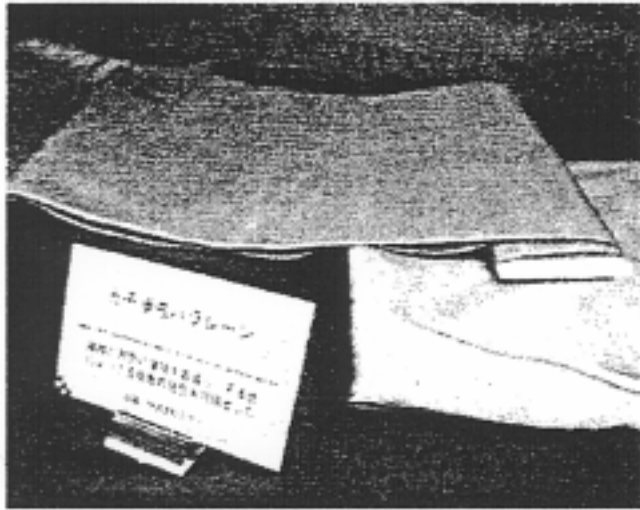
<그림 7> 구조색 섬유 : 모포텍스를 응용한 텍스타일 재료(日産自動車)

(a) 드레스

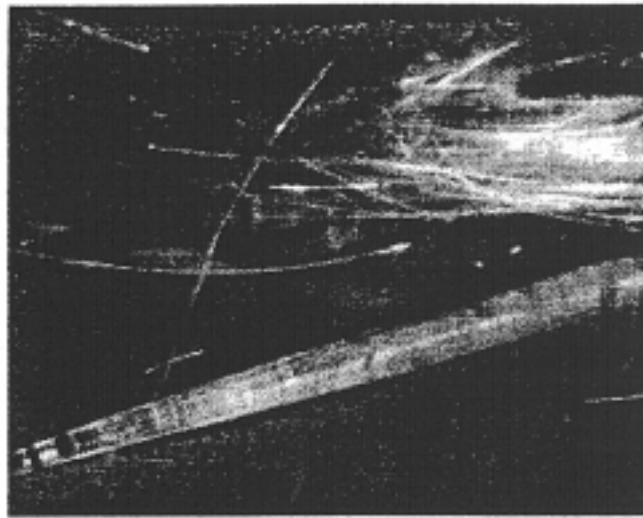


<그림 7> 구조색 섬유 : 모포텍스를 응용한 텍스타일 재료(日産自動車)

(b) 넥타이



<그림 8> 비단 벌레 색 섬유재(구라레)



<그림 9> 황금 비늘의 체모, 편모의 구조색

이러한 배경 하에서 오늘날의 구조색은 새로운 섬유 소재로써 뿐만이 아니라 다양한 분야에서 활발한 응용 전개가 정력적으로 추진되고 있다. 여기에서는 대표적인 예로 2002년에 일본의 兵庫縣에서 세운 “인간과 자연의 박물관”에서 개최된 “원더풀 컬러”에 전시된 예를 소개한다. <그림 6>은 자동

차 차체의 도장에 모포린이라고 하는 구조색을 응용한 예(日産自動車)와 고급 좌석 시트재 ; 모포텍을 드레스재로 사용한 예(日産自動車)를 <그림 7(a)>, 또 동 재료를 넥타이에 응용한 예를 <그림 7(b)>에 나타냈다. 이외 <그림 8>에는 비단벌레의 구조색이 나오는 섬유(구라레)를 나타냈다. 이 외에 최근에는 화장품으로써 첨가 티탄의 피막의 두께를 제어하여 무한의 색 맞춤을 하는 인피니트 컬러라고 하는 구조발색성 안료(資生堂)라든가 포마드와 같이 염색하지 않고 칠하여 흰 머리카락 염색 정발료 블루 컨디셔너 V05(선스타) 등이 상품화되고 있다. 특히 비교적 최근 McPhedran은 <그림 9>에 나타내는 황금 비늘의 체모라든가 가시나무 등의 섬유상 체표에 신선한 구조색을 나타내고 있어 향후 섬유에 관련한 구조색 응용에 새로운 국면을 열어갈 것이라고 기대된다.

3.2 구조색의 발색 기구

구조색이 왜 생기는 것인지에 대하여는 시료의 빛의 파장 정도의 규칙적인 구조의 해명과 빛의 파동에 기초하여 이론 해석으로부터 거의 밝혀져 왔다. 상세는 이미 많은 문헌이나 해설에서도 나타냈기 때문에 도시하지는 않는다. 그 중에서도 가장 알려진 광학현상으로는 비눗물의 단층막인 비눗방울이 있다. 또 고저 2종류의 굴절율의 교호 다층막으로 구성된 광학박막에서의 간섭 또는 CD반, 홀로그램 시트에서의 회절 등과 유사한 현상이다.

여기에서 미세 구조가 빛의 파장과 같은 정도의 치수에서 규칙적으로 반복되고 있는 경우에 구조색이 어떻게 나타나는지 간단하게 논술한다. 인코히런트한 백색광이 규칙적인 구조에 입사되면 두 가지 다른 굴절율의 교호층으로 구성되는 다층막의 경우에 각각의 광학막 두께가 거의 일정하면 반사율 극한치는 어느 파장에서 현저한 피크를 나타낸다. 만일, 각층의 막 두께

가 층별로 다르면 어느 파장 범위에서 낮은 피크가 생기고 구조색도 현저하게 되지 않는다. 즉 현저한 구조색으로써 나타내기 위해서는 교호층 각층의 막 두께가 고저 굴절을 층 각각에 일정하게 배열하는 것이 필요하다. 한편, 규칙적인 구조가 회절 격자인 경우에는 일정한 피치로 격자가 구성될수록 관측점 또는 입사각을 고정하면 휘도가 높은 단일한 회절광이 얻어진다. 다른 피치가 있으면 있을수록 각각의 피치에 대응한 회절광은 넓어져 그 결과 휘도는 저하한다.

3.3 표면가공으로써의 신규성

구조색의 발색 메커니즘을 응용하여 종래에는 없는 특질을 지닌 소재를 만들어 간다고 하는 것이 상품화를 향한 영구 개발 노력이었다. 염료 또는 안료 등 최근의 화학 합성품을 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 보석 장식품으로써 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. 여기에서는 그 중에서 비교적 외부에 공개된 예를 몇 가지 소개하고 싶다. 하나는 田端, 高橋, 熊澤의 자동차 시트재에 관한 간섭 발색 섬유로써 제품 예에서도 이미 원더풀 컬러전에서 소개되었다. 논문으로써는 제품과 합치하는지는 불명하지만 모포 설코우스키(Morpho sulcoskyi) 나비 날개의 발색 기구의 해명과 그의 광학 모델을 기초로 하여 두 종류의 굴절률이 다른 고분자 폴리머의 사용을 가정하여 염색하지 않고 간섭 발색 섬유 단면 구조의 실용적 설계를 시도하였다.

최근 吉岡, 木下, 齊藤은 모포 나비의 정색 발색 기구에 대하여 이미 다른 다층막이라든가 회절 격자 등의 규칙적인 구조에 가하여 불규칙적인 구조도 그리고 발색에 관해서도 흥미 있는 시도를 하였다. 석영 기판 위에 전자선 묘화와 드라이 에칭을 한 불규칙 구조를 의도적으로 형성하여 그 위에 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 14층의 교호 다층막을 탑재하였다. 그 결과 모포 나비의 청색과 같은 높은 반사율, 각도 의존성, 색 맞춤, 휘도 등의 특성을 나타내는 시험 제작에 성공하였다. 향후 광택에 대한 검토를 포함하여 별도로 진행 중인 진주의 광택 등의 유사 현상에도 새로운 해명이 진행된다고 기대된다.

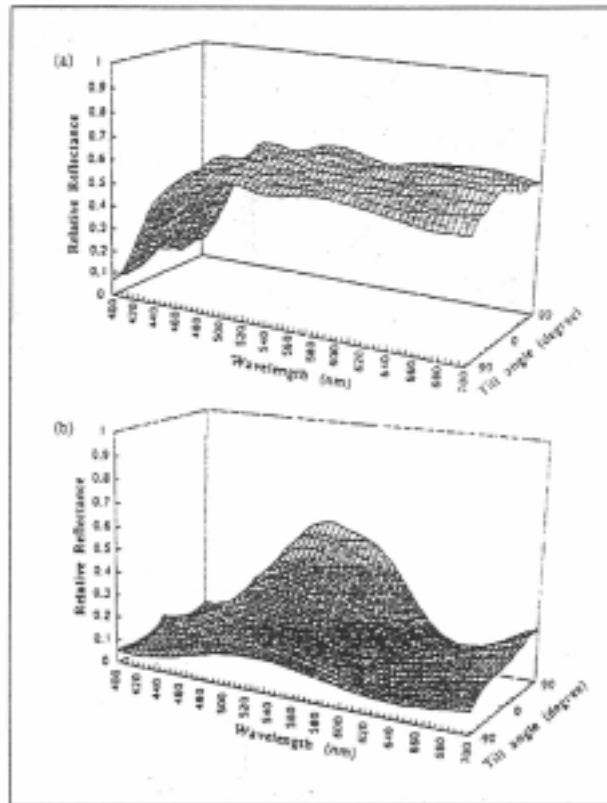
4. 측정으로부터의 새로운 전개

이상과 같이 현재까지 검토되어 온 다양한 구조색에 대하여 소개하였는데 구조색을 자유자재로 가공면에서 실현하기 위하여 필요한 기술의 개요를 파악하였다고 기대한다. 여기에서는 가공과 구조색 자체에 관하여 밝혀진 새로운 측정 기술의 몇 가지를 간단하게 소개한다. 지금까지 다양한 구조색을 관찰하기 위하여 채용하여 온 기술이고 향후에도 시료에 따라서 새로운 방법을 부득이 취하지 않을 수 없는 상황이기 때문이다.

구조색을 밝혀가는 데는 빛의 파장 정도의 형태와 색의 양쪽을 관찰광의 시료에 대한 입사각을 바꾸면서 검토할 필요가 있었다. 또 모포 나비라든가 진주와 같이 시료면 전면에 한결같은 구조색을 나타내는 시료와 많은 투구 벌레라든가 레인보우 암모나이트와 같은 면내에 섬세한 형태 및 색채의 패턴을 나타내는 시료의 양자가 있었다. 그 중 형태에 대하여는 현재까지 주사 전자 현미경의 발전에 의하여 비교적 용이하게 검토할 수 있게 되었다는 점은 이미 논술한 바이다. 한편, 색 또는 색채에 대하여는 기존의 색채계라든가 분광 측색계를 그대로 사용하는 것은 대부분의 시료에서 불가능하였다.

기존의 측색계의 대부분은 광속 폭이 6~10mm ψ 정도로 넓고 시료면이 한결 같은 경우를 제외하고 전면으로 또한 국부적인 동시 측광이 불가능하였다. 측색 광속을 1mm 정도로 압축하여 입사각 고정에서의 측색을 위한 개선이 먼저 이루어지고 이어서 <그림 10>에 얻어진 결과를 나타낸 3차원의 측색계를 확립하고 더욱이 <그림 11>에 나타낸 미놀타제 2D 측색계 CI-1040i에서는 0.1 $\times$ 0.1mm 정도의 미소한 픽셀별 측색이 40 $\times$ 40mm 정도의 면 전체에 걸쳐 가능하게 되었다. 그림에서 유사 컬러로 나타낸 (L^* , a^* , b^*)의 값은 실제 시료의 색을 그대로 나타낸 값이 아니고 L^* , a^* , b^* 각각의 축에 나타낸 값에 대응한 거짓 색 맞춤, 즉 유사 컬러를 설정하여 알아보기 쉽게 변환한 후의 색채 표시인 점에 주의한다. 더욱이 <그림 12>에 나타낸 올림퍼스제 미소면 면적분광계 USPM-RU-II에서의 27~50 μ m ψ 정도의 미소 면적에서의 분광 측색도 가능하게 되었다. 단, 최후의 미소 면적 시료에 대한 측색에서는 입사각도를 자유롭게 변환할 수는 없고 수직 입사에 한정되어 있다. 한편 미놀타의 CI-1040i 장치에서는 입사각을 0, 10, 20°로도 가능하게 되도록 개발되어 있다.

이 외에 관련 기술로써는 <그림 13>에 결과를 나타내듯이 진주 시료와 같은 구상(<10mm)으로 그 곡률 반경이 작은 경우의 시료면에서의 표면 거칠음을 측정할 수 있는 엘리오닉스사에서 만든 거칠음 측정기 ERA-8000도 개발되어 있다. 또 진주 시료와 같은 곡률 반경이 박은 시료에 대하여 반사율이 라든가 투과율을 임의의 어떤 입사각 범위에 대하여만 측정할 수 있는 낙사 조명 광학계(落射照明光學計)를 도입한 아폴로맥사제 분광 광도계의 시도도 진주의 선별 분야에서는 이미 행해지고 있다. 향후 새로운 구조색의 발색 기구라든가 구조색을 발현하는 새로운 개발에 관계하는 여러분이 가공법뿐만이 아니라 가공이 올바르게 시행되고 있는가의 검토를 위한 목적에 합당한 측정기를 입수하는 것은 필수이다.



<그림 10> 3차원 측색계의 측정 예

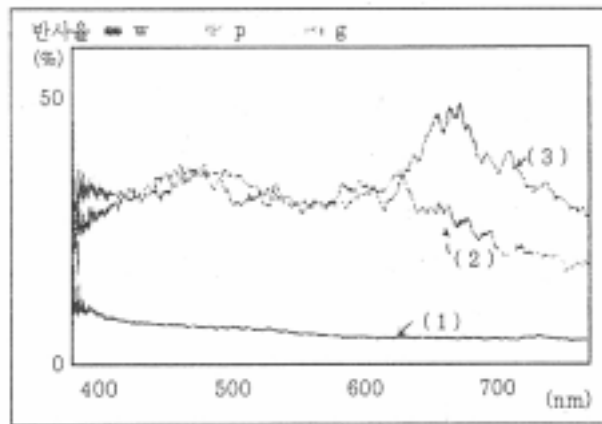
(a) 시료 : 나비의 인분(*P. rapae* L)

(b) 시료 : 나비(*C. ataxus kirishimaensis*)

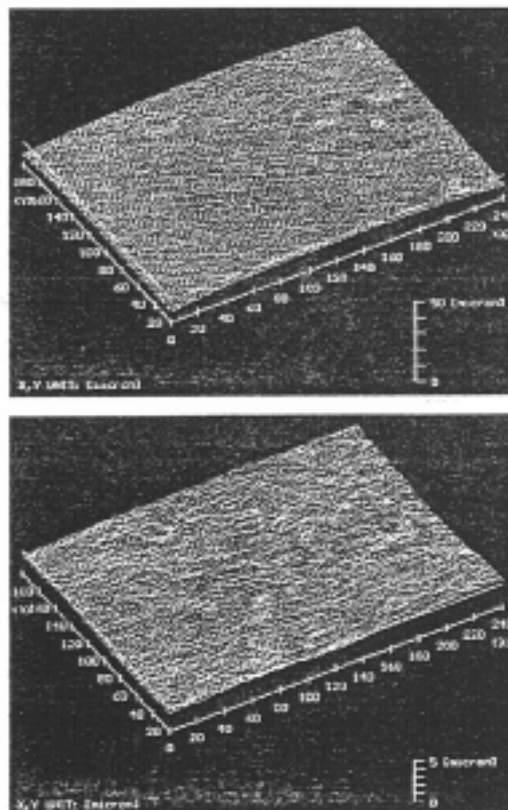


<그림 11> 2차원 측색계(미놀타제 CI-1040i)에 의한 2D 유사 컬러 표시 예

시료 : 투구벌레(*Stemocera laevigata*)



<그림 12> 미소 면적 분광계(올림퍼스사제 USPM-RU-II)에 의한 진주 구조색의 계측 예 [시료 : (1): 백진주 (2): 핑크색 진주 (3): 금색 진주]



<그림 13> 곡률이 작은 진주 표면 거칠음을 엘리오닉스사제 ERA-800으로 계측한 예[시료 : 양식 백진주 (a) 곡률 보정전 (b) 곡률 보정후]

5. 결 언

도장, 섬유 재료, 화장품 등의 업계에서 현재 왕성하게 개발이 진전되고 있는 구조색의 발색 기구를 응용한 다양한 제품이 예로부터 흥미를 가지고 탐구되어 온 우리 주변의 시료에서 관찰된 예에서 시작하고 있다는 점을 소개하였다. 또, 그 과정에서 종래에 없는 반사라든가 투과율 또는 미지의 광택 등의 감성으로 이어지는 광학 특성의 해명이 향후의 과제라는 점도 다루었다.

섬유 업계는 섬유 재료에 구조색을 응용하는 점에서는 선구적인 역할을 하여 왔다고는 할 수 있으나 향후 제품 전개에 다소라도 역할이 된다면 다행이다. ♣