



Silk 류의 기능성과 그 응용

남 중 희

서울대학교 농업생명과학대학

1. 서 론

1972년 콜럼비아 대학의 브레스로우 교수는 효 소기능연구로 생체모방기술(biometrics)을 제창하였 다. 그러나 섬유분야의 경우는 1960년대 초반부터 천연섬유의 기능을 나타낼 수 있도록 합성섬유를 개발할 목적으로 많은 연구가 수행되었다. 특히 합 성섬유의 역사는 자연모방기술의 역사로 기록되어 있어 미래에도 인간이 입을 의류소재 개발은 필연 코 생체모방기술에 의존할 것으로 확신한다. 현재 까지 생체모방기술로 개발된 기술은 생물이 가지고 있는 생체구조 뿐만이 아니고 극히 정교한 생체기 능을 해명한 결과를 합성섬유 재료설계에 응용하여 합성섬유가 개발된 사례가 많다.

한 예로 양모의 conjugate구조에서 권축(curl) 섬 유를, 면의 중공구조에서 비롯된 중공섬유는 인공 투석막 등 각종 분리막으로 응용되고 있다. 그리고 실크의 꽃잎형 이형단면구조를 모방하여 명주소리 (scoop)를 실현시켰다. 그 외 토란과 연꽃잎이 물방울을 튕겨 내는 특성을 모방하여 초발수성 섬유가 개발되었고, 나비 날개의 미세구조를 모 방하여 구조성 발색섬유가 개발되었고, 나방의 각막속의 요철구조를 해명하여 짙은 광택섬유 와 불투명성 수영복을 개발한 것도 생물 특유 의 구조를 이용하여 광을 차단한 것이다. 그리고 소취섬유는 효소의 초미세구조에서 유래되 었고, 인공가죽은 천연피혁의 고차구조에서 유

래되는 등 수 많은 제품이 개발 되어 왔다.

이와 같이 개발된 제품은 모두 초기능 섬유로 명 명되었는데 모방요소기술은 생물의 복합구조, 이형 구조, 표면구조, 형태 및 촉매기능을 모방한 결과들 이다[1]. 생체모방기술을 응용한 기능성 섬유의 예 를 Table 1에 나타내었다.

이러한 기능모방기술은 자연계의 생체구조와 그 기능을 섬유제조기술에 접목시켜 개발된 기술로 섬 유연구에 있어서는 생체모방기술의 중요성이 강조 된다. 본 고에서는 생체모방기술을 응용한 실크 섬 유의 방사와 실크 섬유의 특성을 개괄적으로 설명 하고 앞으로의 실크섬유의 개발방향을 요약하고자 한다.

2. 본 론

동물성 섬유로 대표적인 실크는 고치실이 방사된 후 실크 단백질이 어떻게 배열되어 섬유화되는지는

Table 1. Biometrics를 응용한 기능섬유의 실례

년대	자연계의 구조	섬유의 기능성
1953	양모의 콘주게이트 구조	레이온의 curl 구조
1964	표피의 근사복합구조	인공피혁
1965	천연피혁의 초극세 섬유속	인공 suede
1978	나비의 각막구조	초심색, 광택섬유
1980	실크의 이형단면구조	명주소리 합섬
1980	수목의 모세관 흡수 현상	다공, 중공 흡수성 섬유
1983	연꽃, 토란잎의 구조	초발수성섬유
1983	나비의 날개구조	구조성 발색섬유
1992	생물의 특유구조	투시방지용 수영복

아직도 밝혀져 있지 않다. 그리고 실크의 흡습성과 염색특성도 신비로 남겨진 채 모방이 어려운 실정이다[2]. 1세기 이전에 등장한 인조 화학섬유는 실크를 모방하여 레이온이 처음으로 개발되었다. 즉 단섬유의 셀룰로스를 실크와 같은 필라멘트의 장섬유로 방사한 것이다. 이어서 반세기 전에는 나일론(nylon)이 등장하였다. 실크의 아미노산 결합을 분자중에 배열시켜 최초로 합성섬유에 아미드결합을 도입시킨 것이다. 그리고 반세기 후인 1988년에는 실크보다 우수한 촉감을 이수축 혼섬사 직물에 의하여 달성시켰다. 그러나 실크의 특성 전부를 실현시키지는 못하였다. 특유의 광택, 흡습성 및 염색성을 재현시키지 못한 것이다.

2.1. 실크의 방사

만약 누에의 방사과정이 밝혀지면 현 수준의 합성섬유의 제조공정도 크게 변화가 생길 것이 확실하다. 뽕잎을 먹은 누에가 고치실을 만드는 현상은 흥미롭고 신비로워서 많은 연구가 수행되었다. 아미노산이 들어 있는 뽕잎이 단백질의 합성공장인 누에실샘(silk gland)에 들어온다. 실샘 세포막에서 유전자를 제어시켜 2층 구조의 단백질을 실온에서 합성한다. 실샘은 겔(gel) 상태의 피브로인(fibroin) 용액을 만들지만, 뽕으로부터 얻은 칼슘 이온과 공기 중에 있는 이산화탄소에 의하여 겔을 졸(sol) 상태로 변화시킨다. 이어서 가늘고 긴 관 속에서 액정상태로 만든 다음 서서히 유동시키면서 방사관을 통하여 고치실을 방사한다.

합성섬유공정으로 보면 실샘을 합성장치, 세포막은 방사탱크로서 효소의 작용으로 실크단백질을 합성하는 것과 같다[3].

앞서와 같이 고도의 기술을 구사하여 고치실을 섬유화 시킨다. 특히 gel에서 sol로의 전이 과정에서 이산화탄소를 칼슘과 결합시켜 섬유 중에 고정하는 일은 인간이 모방 할 수 없으며 정교한 분자 배열을 제어하는 누에의 방사기구는 경이롭기만 하다. 21세기가 가기 전에 생물의 방사기구가 해명되

어 생물방사시스템의 개화가 기대된다. 앞서 설명한 바와 같이 누에는 단순히 입(토사구)으로 실을 토하는 것으로 생각하는 사람이 많았으나 현재는 누에의 섬유화에 관한 견해는 다르다. 실제 누에가 고치를 지을 때에는 머리 부위를 8자 혹은 s자 모양으로 움직이면서 계속 실을 토해 내는 동작을 볼 수 있다.

여기서 중요한 것은 방사구를 이동하는 소위 이동방사를 하는 것이다. 결국 현재의 합성방사에서는 방사노즐을 고정하고 있는데 반하여 누에는 방사구 즉, 누에의 토사구를 이동하면서 이동방사를 하고 있는 것이다. 이동방사에 의하여 고치실은 curl을 형성하면서 동시에 고치실의 집합으로 풍부한 volume감을 나타내어 실크의 보온, 흡습 및 촉감기능을 좋게 한다. 이와같이 순간의 연속동작으로 단일섬유형태가 이루어지는 효과를 동조성 섬유(synchronized fiber)라 하며 이와 같은 섬유는 초기 섬유인 것은 틀림이 없다[4].

2.2. 고치의 색상과 색고치의 이용

2.2.1. 새로운 실크 소재로서의 색고치

일반적으로 짐누에는 흰색 고치를 짓지만 야외에서 자생하는 야생누에는 각각 중 특유의 다양한 형태의 고치와 색고치를 짓는다. 생사의 대량생산을 위해 누에는 품종이 개량되어 생산효율이 높은 흰색 고치를 짓는 누에 품종만이 대부분 사육되어 왔다. 따라서 실크제품의 특색을 지배하는 극세 섬도의 품종이나 여러 가지 색고치 품종의 사육은 제한되어 왔다. 즉 부가가치를 낼 수 있는 품종특성의 이용은 없었다. 최근에는 부가가치가 높은 세섬도 품종을 비롯하여 3면화잠 그리고 색고치에 의한 차별화에 관한 관심이 고조되어 이를 소개한다.

염색분야의 경우 천연염색의 중요성이 높아지면서 색고치에 대한 중요성이 강조되고 있다. 실제 고치색은 황색, 등색 및 녹색 등 다양하며 색조는 농, 담 등 다양하다. 최근 실크와 양모 등 동물섬유의 경우 염료를 사용하지 않고 구성 단백질인 triptophane

을 화학적으로 개질시켜 염색하는 연구도 시도되고 있다. 본래 유색고치는 실용형질(고치실량과 그 품질)이 나빠서 이용되지 않았으나 최근 황색의 원종과 백색의 누에품종을 교배시켜 대형고치를 생산하고 있다. 특히 열대와 아열대지방에는 품종이 개량되지 않은 특색있는 재래종이 사육되고 있어 새로운 소재로 이용이 시작되고 있다. 현재 알려진 고치 색소로는 carotinoid, flavonoid, phycocyanine, 및 xanthophyllin 등 여러 가지가 있다.

이들 색소가 고치실 어느 부위에 존재하느냐가 문제였다. 그 이유는 색소가 세리신에만 존재하고 피브로인에는 존재하지 않기 때문에 정련 과정에서 세리신을 용해하면 색은 소실되기 마련이다. 현재에는 인위적으로 색소를 피브로인에 착색시켜 색고치를 생산하기에 이르렀다.

2.2.2. 색소를 먹은 색고치

뽕잎이나 인공사료에 색소를 첨가시켜 누에에 먹이면 색고치가 이루어지는 사실은 예전부터 알려져 왔다. 그러나 색상이 불균일하여 실용화는 어려웠다. 최근에는 뽕잎을 포함하는 인공사료를 개발하고 그 속에 여러 가지 색소를 혼합한 사료를 급여시켜 착색된 유색고치를 짓는 기술을 개발하였다. 유색고치 생산에 효과가 있는 염료는 많지만 현재 알려져 있는 색소는 Table 2와 같다.

이중에서 neutral red 와 rhodamine B를 먹은 누에를 해부하여 그 실샘을 관찰하면 고치실의 피브로인을 분비하는 후부실샘과 피브로인을 피복하고 있는 세리신을 분비하는 중간실샘이 염색되어 피브로인과 세리신에 색소의 존재를 알 수 있다. 반면

dylon navy의 경우는 가운데 실샘은 짙게 착색되고 후부실샘은 착색되지 않는다.

따라서 색소는 피브로인에는 없고 세리신에만 존재한다. 세리신은 정련에 의하여 제거되어 색소는 소실된다. 그러므로 생체 내에서 특정 부위에 착색되는 염료를 개발하게 되면 생체 내에서 착색된 특수한 섬유소재를 개발할 수 있다[5].

2.3. 중합형성의 자연방사기술

인간의 모발과 양모 및 거미줄의 경우에도 신비로운 것들이 많은데, 모발과 양모가 성장하는 과정에 대한 해석은 없다. 다만 중합방사로 해석하고 단량체(monomer)인 아미노산을 공급하면서 중합하는 것으로 정의한다. 중요한 것은 중합과 동시에 방사가 일어나는데 고분자쇄가 엉키지 않고 이어져서 섬유화되고 이상적인 성질을 갖게 되는 현상이다. 인위적으로는 불가능한 일이지만 새로운 섬유재료의 개발에 대한 생체기능을 모방하는 과제를 제기한다.

현재 모발재생에 관한 연구도 진척되어가고 있다. 모발의 증식기능을 담당하는 papilla세포를 시험관 내에서 증식하는 실험이 가능하여 모발이 형성되는 원리가 해명되기에 이르렀다. 또 양모재생의 연구로부터 인공양모가 제조될 날도 멀지 않았다고 한다. 현재 일본의 모발 치료 분야에서 육모제로 1천 억엔, 증모법으로 약 800억엔, 그리고 가발 등에도 큰 시장이 형성되고 있다고 알려져 있다.

Spider silk(거미실크)에서도 배울 것이 많아 언급한다. 한 예로 섬유의 강도와 신도와의 문제는 표리적인 관계와 같다. 즉 강도를 높게 하려면 한 방향으로 분자를 배열시켜야 하나 분자배향을 높이면 신도는 떨어진다. 거미실크의 경사에 해당하는 실의 강도는 아라미드 섬유에 상당하고 신도는 35%를 상회하는 우수한 섬유이다. 거미실크의 위사에 해당하는 실은 먹이 곤충을 포착하기 위하여 점성을 가지고 있고 비에 젖으면 고무와 같이 늘어난다. 이러한 성질이 어느 구조에서 발현되는가는 아직 밝

Table 2. 유색 고치에 효과가 있는 염료

색 소 명	농 도(ppm)
Neutral Red	500
Rhodamine B	300
Acridine	500
Dylon Navy	1,500
Dylon purple	1,500
Dylon emerald green	1,500

혀져 있지 않다. 이를 해명하고자 선진 여러 나라에 서는 거미연구자가 많아지고 있다[1].

2.4. 실크는 건강소재

2.4.1. 체험적으로 건강효과가 인정된 실크

실크는 체험적으로 건강에 좋은 기능소재로 잘 알려져 있다. 그 예로 셀러리맨이 실크양말을 신으면 무좀발생을 예방할 수 있으며, 실크 속옷은 아토피성 피부염에 효과가 있고 겨울철에 실크 이불을 덮으면 감기에 걸리지 않는 것으로 알려져 있다. 중국의 절강의과대학과 서안의과대학의 공동연구결과 노인성 피부가려움증과 임신부 가려움증에 대한 실크 속옷의 착용은 좋은 효과가 있는 것으로 보고 되고 있으나 임상적으로는 밝혀진 것이 없다.

다만 의류소재로서 실크가 건강에 좋은 이유는 transportation 특성에 기인한 것으로 설명하는 학자가 많다. 즉 사람의 몸에서는 수분이 항상 증발한다. 이러한 환경 하에서 쾌적한 의복 내 기후는 온도 $32\pm 1^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50\pm 10\%$ 가 알맞다. 그리고 의복내의 온도와 습도가 높아지면 불쾌감을, 습열이 계속되면 더위를 느낀다. 이러한 때에 건강의류의 조건은 몸으로부터 땀을 빨리 흡수하고 이를 밖으로 전송하는 흡습과 투습성이 좋을 것이 필수조건이다. 실크는 다른 종류의 섬유보다 transportation 성능이 좋아서 건강에 좋은 소재로 평가된다[6].

2.4.2. 고치의 자외선과 세균의 방어기능

고치를 짓는 여러 종류의 누에는 애벌레에서 번데기, 번데기에서 성충이 되기까지 변태와 탈피를 거듭 한 후 성충이 되어 밖으로 나온다. 탈피 후의 표피는 저항성이 극히 약하기 때문에 고치를 짓고 그 속에서 변태와 탈피를 한다. 이 때 고치층은 외선과 외계로부터의 천적이나 세균의 침입을 방지하는 역할을 한다. 오랜 동안의 진화과정에서 누에는 혹독한 자연 환경에서 살아남기 위해 천적, 자외선 그리고 세균으로부터 몸을 보호하기 위하여 기능성이 좋은 실을 토하여 고치를 짓고 그 속에서 생활

하는 것으로 생각한다.

실제 누에의 종류에 따라서 고치를 짓는 형태는 개별로 고치를 지어 하나의 고치 속에 한 마리의 누에가 생활하는 품종과 사회성 특성을 나타내는 야생종은 수백 마리의 누에가 외각에 공동으로 실을 토하여 고치층을 형성하고 그 속에 각 자의 누에는 자기 고유의 고치를 짓는 사회성 품종이 있는 것을 보면 자연환경에 적응하는 곤충의 지혜로부터 배울 점이 많다는 것을 느낀다.

2.4.3. 높은 자외선 차단기능

누에고치층은 여러 가지 기능으로 누에를 보호한다. 그 기능 중에서 자외선 차단효과를 증명하기 위하여 이루어진 실험내용은 다음과 같다. 자외선 차단효과를 조사하는 방법으로 집누에고치실, 야잠고치실 그리고 다펀 섬유로 종이를 만들고 종이의 두께와 일정한 면적에 대한 무게(밀도)를 같게 하여 자외선 차단효과를 비교분석 하였다. 서로 다른 소재로 된 종이의 자외선 투과율은 다펀 섬유, 집누에고치실, 야잠고치실 순으로 차단효과를 나타내었다. 그리고 그 효과가 자외선의 산란 반사에 의한 것인지 아니면 흡수에 따른 것인지를 알아보기 위하여 자외선 흡수율을 조사한 결과 그 효과는 고치실의 자외선 흡수로 밝혀 졌다[7].

실크의 UV흡수율이 높은 이유가 섬유의 물리적 구조에 따른 것인지 아니면 화학조성 즉 아미노산 조성에 원인이 있는지의 여부도 밝혀졌다. 실크의 피브로인은 18종의 아미노산으로 이뤄졌다. 그 중에는 4종의 아미노산 즉 알라닌, 글리신, 티로신 및 세립의 함량이 많아서 이들 아미노산을 기초로 품종이 다른 피브로인과 비교 시험한 것이다(Table 3).

특이한 현상은 집누에 고치실 피브로인에는 글리신과 알라닌의 점유율이 70-80%로 엮고 글리신(42.8%)이 많았는데 야잠 피브로인에는 알라닌의 점유율이 높았다. 이런 결과로 편향된 피브로인의 아미노산 조성은 실크의 기능성과 관계가 있는 것으로 생각할 수 있다.

Table 3. 여러 가지 누에 피브로인의 아미노산 조성(%)(Komatsu, 1980)

	알라닌	글리신	티로신	세린
집누에	32.4	42.8	11.8	14.7
작잠누에	50.5	23.8	8.8	11.3
천잠누에	49.5	22.7	8.1	11.0
에리잠누에	50.5	27.8	10.7	7.0
아나페누에	62.8	41.3	1.7	1.2

개개의 아미노산의 생리작용에 대해서 보면 글리신과 세린은 혈액 중의 콜레스테롤을 저하시키는 작용이 있고 알라닌은 알콜의 대사를 촉진하며 티로신은 치매를 예방하는 효과가 있어서 피브로인은 기능성 소재(비섭유)로도 여러 가지 용도가 확대되고 있다.

2.4.4. 실�크류의 항균성

예로부터 신선한 생선이나 고급 과일을 보관하거나 운반할 때 누에고치를 넣으면 부패를 예방하여 신선도를 연장시키는 사례가 있어 왔다. 이러한 실�크의 항균성을 증명하기 위하여 셀룰로스와 실�크로 만든 종이로 찹쌀떡을 포장하여 곰팡이의 증식상태를 관찰하였다. 셀룰로스제 종이로 포장한 떡에서는 2-3일 후에 크고 작은 곰팡이가 발생하였지만 야잠실과 집누에실종이 포장의 경우는 곰팡이의 발생을 억제시켰다. 또한 셀룰로스와 실�크를 분쇄시켜 찹쌀떡 표면을 피복시킨 때는 셀룰로스의 경우는 2일 후에 곰팡이가 발생하고 7일 후에는 대형 곰팡이가 나타났다. 반대로 야잠실 분말의 경우는 10일 경부터 곰팡이가 발생하기 시작한 것으로 미루어 곰팡이에 대한 억제효과가 인정되었다. 이러한 결과에서 섭유나 분말상태에서 제균성을 보였는데 섭유의 미세구조에 따른 효과인지 아니면 화학적 특성에 의한 효과인지는 밝혀져 있지 않다[8].

Table 4. 왕새우의 저장과 K값 및 체색의 변화

	저장 전	실크	폴리에스터	면	마	합성
K 값	2.3	15.9	22.8	24.8	27.1	29.5
머리색	-	-	+++	++	-	++
꼬리색	-	-	++	+	-	-

* K값: 수치가 작을수록 신선도 좋음[6].

최근에 일본에서는 어류와 육류의 신선도와 관련하여 ATP(adenosine triphosphate) 관련물질과 ATP 분해물질(K값)과의 상관관계로부터 신선도 유지효과가 판명되었고 실크부직포가 포장재로서 가장 적합한 것으로 보고되었다(Table 4).

2.4.5. 실크의 식품소재화

인간이 곤충을 식품으로 이용한 역사는 오래다. 그 예로 야생인 작잠누에의 번데기는 크고 무거워서 고급식품으로 이용되어 오고 있다. 그러나 누에 체내에서 성장 발달한 단백질은 분자량이 약 35만 이상으로 식용의 경우는 흡수·소화는 불가능하다. 따라서 실크 피브로인을 합성섭유 가공제로 응용하려는 목적으로 피브로인을 물리적인 방법으로 분말로 만들거나 가수분해법으로 분말로 만들게 되었다. 현재는 효소분해법과 고온, 고압법 등 여러 가지 방법이 수립되었다. 피브로인의 분말화가 가능하게 됨에 따라 식품화의 이용이 시작된 것이다.

가잠 피브로인의 수용성 분말을 흰쥐에 투여하고 혈중 콜레스테롤량과 혈당량을 측정하였다. 두 성분의 함량이 현저히 감소하였으며 체중에서 인슐린의 분비를 촉진시킨 결과도 얻었다. 그리고 혈중 알콜 농도에 대한 피브로인의 효과도 검증되었다. 즉 쥐에 피브로인을 투여한 후 40분이 지나서 에탄올을 먹인 경우 에탄올의 농도는 낮게 나타났다.

또한 치매와 같은 성인병에 대한 피브로인의 효과도 인정되었다. 그리고 집누에를 비롯하여 야잠 피브로인과 세리신의 가능성도 중요시 되고 있다. 인간의 성인병과 스트레스에도 실크의 기능성에 대한 많은 연구가 시도되고 있다[9].

2.4.6. 바이오 섭유의 개발

거미실크는 방탄용으로 쓰일 수 있는 강도와 30% 이상의 신도를 나타내는 기능성 섬유이다. 계산상으로 직경이 연필심 굵기이면 비행 중에 있는 첩보기를 정지시킬 수 있는 강도를 갖는 것으로 알려졌다. 거미(Nephila clavipis)는 7종류의 실을 토하고 그 거미줄은 날아다니는 곤충의 충격에너지를 기계적인 이력(hysteresis) 현상으로 그 에너지의 70%를 열로 변환시켜 흡수하는 특이한 실크로 알려졌다. 거미가 밑으로 늘어 뜨리는 dragline실크를 인공적으로 만들 목적으로 거미의 유전자를 대장균에 도입하는 연구가 많이 수행되고 있다.

최근 캐나다의 Nexia Biotechnology사는 핵이식에 의한 3마리의 양을 세계 최초로 탄생시킨 것이 한 예로서, 양의 우유가 거미 단백질을 만들게 한 것이다. 그리고 2002년에는 2종의 거미유전자를 포유동물 세포에 발현시켜 가용성 dragline단백질을 만들어 응고용액 속에서 방사하여 직경 10-40 μm의 필라멘트를 제조하였다. 이 실은 천연의 거미줄과 비슷한 특성을 나타냈다.

한편 독일의 Institute for Plant Genetics & Crop Plant Research는 감자에 거미 유전자를 도입하여 실크단백질을 얻는데 성공했다고 발표하였다. 거미실크는 뛰어난 강도와 유연성 그리고 가벼운 특성과 생분해성을 나타내기 때문에 의료분야와 정밀공업분야의 최고의 생체소재로 인정된다[10].

3. 결 론

지구 위에 생존하는 곤충은 특이한 생체기능을

가지고 있다. 그 중에서 누에와 거미가 실크를 방사하는 기능을 합성섬유 제조 원리에 도입하게 되면 21세기에는 꿈의 섬유가 탄생할 것으로 기대해 본다.

참고문헌

1. 本宮達也, "High-Tech の 世界", 日刊工業新聞社, 1999.
2. 赤井 弘, 染織と Alpha, No. 262, Kyoto, 2003.
3. 馬越 淳 外, 纖維誌, 53(87), 1997.
4. 赤井 弘, 染織と Alpha, No. 256, Kyoto, 2002.
5. 堂の脇 外, 加工技術, 35(4), (2000).
6. 小林勝利 外, "Silk の はなし", 技報堂, 1993.
7. 小松計一, "Silkへの 招待", Science House, 1980.
8. 角田聖帝 外, 中央水研報, 7, 1993.号 Tokyo.
9. Silk Science 研究會, "Silk 科學", 朝創書店, Tokyo, 1994.
10. (株)纖維社, 纖維産業革新への 挑戦, Osaka, 2002.

저자 프로필



남 중 희

1960. 서울대학교 농과대학 졸업
 1963. 서울대학교 대학원(석사)
 1973. 서울대학교 대학원(농학박사)
 1965-2003. 서울대학교 농업생명과학대학
 전임강사, 조교수, 부교수, 교수
 2003-현재. 서울대학교 농업생명과학
 대학 명예교수