

누에 고치색 유전자 발현의 다양성 검정 및 색채과학적 해석

한명세 · 박현로 · 한상미 · 남기수 · 권순하 · 임종성 * · Mau Tuan Nguyen**
경북대학교 농과대학, * 국제식량농업기구, ** 베트남 람동 농림시험연구소

Genetic Expression of Color Approved by Color Qualities of Munsell System on the Cocoon of Silkworm, *Bombyx mori*

Myung Sae Han, Hyun Ro Park, Sang Mi Han, Ki Soo Nam, Soon Ha Kwon, Jong Sung Lim* and Mau Tuan Nguyen**

College of Agriculture, Kyungpook National University, Daegu, 702-701 Korea

*AGSI, FAO of the United Nations, via delle Terme di Caracalla, Rome, Italia

**Lam Dong Agriculture & Forestry Research and Experiment Center 03
Quang Trung St., Bao loc, Lam Dong, Vietnam

ABSTRACT

Color qualities investigated on the basis of Munsell code and Korean standard color code for the cocoons from various strain of mulberry silkworm, *Bombyx mori*. 16 of different color qualities were identified from 21 of original silworm strains, and determined international name with the revision of Korean color name for cocoon. The various cocoon color confirmed on the sphere from 567 to 593 nm wavelength, 78% of those located at the region about 580 nm (575~584) of sensitive "color difference limen". Y gene engaged broad ranges of wavelength (575~593 nm) in the color expression, by contrast with other genes of Pk (593 nm), F (584~593), Grc and relative G group (567~570 nm), on the transmission of carotenoid or flavonoid color substance. YC gene expression by original silkworm strain was also distinguished by those variation of specific yellow than other colors from Grc, GaGb, Gc, and YPkF. Appearance of chrome yellow cocoon was dominant than other yellow in the cross among vivid yellow group. F1 of pink×green produced the cocoon of yellow such as "additive mixture" as color light, however, most of the hybrid between yellow cocoon showed the color similar to "subtractive mixture" as a mixture of dyestuff. Hybrid cocoons among yellow or green colors were decreased their hue, value, and chroma, than those of parent. Diallel cross among the strain of various green cocoon suggest the existence of Grc, Ga, Gb, Gc genes. Cream colored cocoon of *B. mandarina* was differed from other yellow cocoon of *Bombyx mori*. Y^A with Ymc showed the similar role of Y with C, therefore, segregated yellow cocoon from the *B. mori*×*B. mandarina* ($+^Y C/Y^A Ymc$). YC expression of $Y^A Ymc$ genes might be suppressed by deficiency of outer layer sericin on the middle division of silk gland in the *B. mandarina*.

Key words : Color gene expression, Cocoon color name, Silkworm cocoon

서 론

집누에는 곤충유전 및 생리학 연구에 매우 유용한 생물종으로서, 지금까지 400여종의 돌연변이 유전자가 알려져 있다(Fujii, H. *et al.*, 1996). 그 중에서

고치색에 관여하는 유전자는 약 20종으로서 (Nakajima, M. *et al.*, 1986), 고치색의 발현에는 2종 또는 그 이상의 유전자 조합이 필요하며, 공존하는 우성 및 열성 유전자가 직접 또는 간접적으로 발현 및 억제작용에 관여한다(Sakaguchi, 1984). 이는 carotinoid binding protein이 관련된 생체내 물질수송 (Fujii, *et al.*, 1988) 등 현대 생물학의 과제인 생체

막계에서 특정 분자의 전이에 관한 연구 및 유전자 작용기구의 해명에 유용한 수단을 제공할 것이다. 또한, 견섬유 가공분야에서도 최근에 발표된 고치의 형광색을 비롯하여 (Han, 1997) 고치색 형질을 이용한 특수 견소재 생산 및 가공기술 개발에 관련된 새로운 시도가 주목받고 있다(Hata and Kato, 1996). 집누에고치는 일반 백색견사의 황변에 관하여 (Matsubara, et al., 1993), 야잠견사는 정련에 관하여 (Nakajima, et al., 1993) 미세한 색택의 변화가 확인된 바 있다. 그러나, 계통별 차이가 현저한 유색견 누에 품종의 고치색에 관하여는 정밀조사가 시도된 바 없으며, 여러 양잠국가에서는 직감에 의존한 관용 색 이름이 사용되고 있다. 따라서, 개인의 견해나 국가별 언어의 차이를 초월하여 보편적으로 통용될 수 있는 색이름이나 과학적 표색법을 전제로한 고치색의 재검토가 필요하다. 본 연구는 고유의 형질이 균일한 보존용 누에를 대상으로 각 계통별 고치색의 변이와 표준 색이름을 명확하게 규정짓고, 색채과학적 입장에서 검토하는 한편, 차대 교잡종의 고치색 및 이와 대응하는 유전자의 작용과 특이적 발현양식을 구명하였다.

재료 및 방법

1. 시험용 누에계통 및 검색대상 유전자

계통보존용 집누에 *Bombyx mori mori* 및 아종인 *Bombyx mori mandarina*를 포함하여 (이하 *Bombyx mori* 및 *Bombyx mandarina*로 略記) 유색견 누에 품종 28계통의 누대사육을 통하여 고치색 발현이 유전적으로 균일한 21 계통을 선정하였다. 유색견과의 대조 및 교잡에 사용한 백색견은 유전자 조합이 +^YC인 일본계 및 중국계 표준 원종으로서 잠107 유래의 일본계통 Aj07에서 분리 육성한 청색형광계통 Ab07 및 잠108 유래의 Bc08 (Han, 1997) 또는 그 교잡종을 공시하였다. 고치색 발현에 관련된 조사 및 검색대상 유전자는 형광색을 제외한 19종으로서, 유전자명, 유전자기호 (연관군-좌위)는 아래와 같다 : 外層黃繭, C(12~7.2)/淡黃繭, C^D(2~25.6)/內層黃繭, C^I(12~7.2)/靛色繭, C^S(12~7.2)/肉色繭, F(6~13.6)/笹色繭, Grc(-)/笹色繭a, Ga(-)/笹色繭b, Gb(7~7.0)/笹色繭c, Gc(15~?) /黃血抑制, I(9~16.2)/煤煙體色劣性黃血抑制, I^S(9~16.2)/綠繭抑制, Ign-1(6~7.5)/紅色繭, Pk(2~?) /銹色繭, Rc(2~31.8)/黃血, Y(2~25.6)/땃누에黃血, Y^A(2~25.6)/淡黃血, Y^D(2~25.6)/땃누에淡黃血,

Ymc(6~18.7)/茶褐色繭, Yr(6~18.7).

2. 누에 고치색의 조사 및 색채과학적 검토

누에계통별 고치색의 조사는 인간의 색채식별역(color difference limen) 차이를 충분히 극복할 수 있는 수준을 고려하여 표준색사전(Park, 1991)에 근거한 색상 명도 채도를 결정하였다. 특히 고치의 색채의 조사는 상족 후 10일 이상 경과한 고치를 사용하고, 직사광선을 피하고 자연광 조건의 실내에서 표준색과 대조하여 강한 반사광 및 그늘에 의한 색채의 영향이 최소한도가 되도록 하였다. 육안 관찰에 의해 표준색과 일치하는 누에고치 색채를 확인한 다음 Munsell 표색법(Park, 1995)으로 나타내고, 한국어 및 영어 표준색이름을 결정하였다. 누에 고치색은 표준색과장 표에 근거한 색상별 파장을 구하여 제시하는 한편 계통색에 따라 정리하고, 한국표준색 번호를 명시하였다. 교잡 원종과 차대 누에의 유전자 조합 및 2면교배에 따른 고치색의 발현을 혼색이론을 적용하여 비교 검토하고, 색과장 및 색채의 변동에 관련된 유전자의 상호작용을 고찰하였다.

결과 및 고찰

1. 누에고치 색채의 분류와 색이름 정리

각종 누에고치의 색채는 Pink 系, Orange Yellow 系, Yellow 系, Yellow Green 系, White 系 등 5 系統으로 크게 분류할 수 있고, 다시 계통색으로 세 분류되며, 각 계통색에 포함되는 누에고치 색을 판정하여 Munsell 부호로 표기하고 일반 색이름을 규정하였다(Table 1). 여기서 일반색이름은 표준이 되는 개정 색이름으로서 특정 고치색 마다 고유의 색상 명도 채도에 상응하는 한국 표준색표 일련번호(KS Code)와 함께 영어명도 함께 명시하였다. 먼저, Pink 系인 “繭色赤”의 누에고치는 지금까지 紅色 淡赤色 또는 粉紅色이라는 관용 색이름으로 통용되었으나, 정확하게는 복숭아색 계통에 속하는 “노랑띵 분홍색”으로 밝혀졌다. Orange Yellow 系는 “매우 진한 등황색 계통” “등황색 계통” “밝은 등황색 계통” “엷은 등황색 계통” 등이 있고 이러한 계통색에 속하는 고치색으로서 등황색, 금잔화색, 치자 색, 계란색, 등이 확인되었다. Yellow 系 고치색에는 “매우 진한 노랑 계통” “노랑 계통” “밝은 노랑 계통” “엷은 노랑 계통”의 4계통색 내에 위치한 해바라기색, 노른자색, 노랑, 벼색, 네이플즈 옐로, 황수선화색, 땅콩색, 크림색,

Table 1. Color names and system for the cocoons produced by various strains of mulberry silkworm, *Bombyx mori*

Silkworm		Color code		Color name			Color system		
Strain	Origin	Munsell system	KS code	Customal	KBS manual	International	Korean	International	Color class
Pk	Red Cocoon	10R 8/6	KS0130	담적색	노랑면분홍	Peach	복숭아색	Moderate yellowish pink	Pink
Yg	G 7	10YR7/14	KS0302	농황색	등황색	Orange yellow	매우 진한 등황색	Vivid orange yellow	
Za	Zebra	7.5YR7/12	KS0260	적황색	금잔화색	Marigold	진한 등황색	Strong orange yellow	
Fk	Askori-A	7.5YR8/8	KS0253	황갈색	치자색	Gamboge	밝은 등황색	Light orange yellow	Orange Yellow
Fn	Abenari-N	7.5YR8/8	KS0253	황갈색	치자색	Gamboge			
Fe	Abenari-E	7.5YR8/8	KS0253	황갈색	치자색	Gamboge			
Fc	C 27	7.5YR8/4	KS0251	육색	계란색	Eggshell	엷은 등황색	Pale orange yellow	
Rc	RY	2.5Y8/14	KS0341	금황색	해바라기색	Chrome yellow			
Yp	AP-(p)	2.5Y8/14	KS0341	금황색	해바라기색	Chrome yellow			
ZB	Blackzebra	2.5Y8/14	KS0341	금황색	해바라기색	Chrome yellow	매우진한 노랑	Vivid yellow	
Yc	C 7	2.5Y8/12	KS0340	황색	노른자색	The Yolk of An Egg			
Le	L.T	5Y8.5/16	KS0375	황색	노랑	Yellow			Yellow
Ym	Chunmoon	2.5Y8/6	KS0337	고색	벼색	Cream yellow	노랑	Moderate yellow	
Qe	Q	2.5Y8.5/8	KS0332	담황색	네이플즈옐로	Naples yellow	밝은 노랑	Light yellow	
Ww	Yulguk	5Y8.5/8	KS0372	담황색	황수선화색	Primrose yellow			
Ye	E 27	2.5Y8.5/4	KS0330	담황색	땅콩색	Peanut	엷은 노랑	Pale yellow	
My	Wild silkworm	5Y9/4	KS0366	담황색	크림색	Cream			
N7	N 74	2.5GY8/8	KS0498	농녹색	청포도색	Yellow green	선명한 연두	Brilliant yellow green	
Xe	G1042	2.5GY8/8	KS0498	농녹색	청포도색	Yellow green			
Eg	White Egg (I)	5GY9/4	KS0524	담녹색	백연두색	Light yellow green	밝은 연두	Light yellow green	Yellow green
Tg	Baghdad	2.5GY9/2	KS0492	담녹색	백합꽃색	White lily			
Ab07	J107 (bf)	N 9.5	-	흰색	흰색	White	흰색	White	White

등이 있었다. 일반적으로 알려진 綠色繭은 모두 Yellow Green 系로서 “선명한 연두계통”의 청포도색,

“밝은 연두 계통”의 백연두색, “엷은 연두 계통”의 백합꽃색이 관찰되었다.

백색견을 제외한 유색 누에고치에 대한 관행 표색법은 담적색, 농황색, 적황색, 금황색, 담황색, 황갈색, 육색, 연두색, 연미색 등 9종으로 제한되지만, 실제로는 Pink系 1종, Orange Yellow~Yellow系 12종, Yellow Green系 3종으로서 16종류의 고치색이 확인되었다. 그 중에서 육색(肉色)은 표준 색이름으로 살색에 해당되지만, 실제로 육색견(肉色繭)의 표준 색이름은 살색이 아니라 계란색이 더 바람직한 것으로 밝혀졌다. 색채의 3속성에 따라서 색상 명도 채도를 고려할 때, 국제 표준 살색은 “밝은 노랑뽕 분홍 계통”으로서 Pink系의 색채로 규정하고 있으나 (Park, 1991), 동방에서 주도해온 잠사업 분야에서는 Orange Yellow系의 “엷은 등황색 계통”에 속하는 계란색을 살색으로 인식하고 있었다는 사실은 흥미롭다. 살색(5YR 8/4)과 계란색(7.5YR 8/4)이 계통은 다르지만 명도와 채도가 같고, 단지 주파장의 차이가 3 nm에 불과한 근연색으로서 식별하기 어려운 점을 감안할 때, 동양인 고유의 색감각으로 Pink系가 아닌 Orange Yellow系 색채로서 살색을 인식하는 것은 당연하다. 세색견(笹色繭)은 濃綠色 및 淡綠色이 있으며, 濃綠色은 청포도색이며, 淡綠色은 백연두색 및 백합꽃색으로 세분할 수 있었다. 다갈색견(茶褐色繭)은 Yellowish Brown系의 황갈색으로서, “진한 황갈색 계통”의 금갈색이나 호박석색 또는 “밝은 황갈색 계통”의 호두색과 유사한 고치색으로 추정되지만, 공시한 누에계통 중에서 고치색 형질 간의 대응관계는 불확실하다. 수색견(銹色繭)은 외층이 담황갈색이라면 (Nakajima *et al.*, 1986), 다갈색과 같은 Yello-wish Brown系에 속하지만 다갈색견(茶褐色繭)보다는 명도가 높고 채도가 낮은 “밝은 황갈색” ~ “엷은 등황색” 계통인 점에 차이가 있다. 그러나, 다갈색견(茶褐色繭)과 수색견(銹色繭)의 색상은 모두 7.5YR~10YR의 범주에 속하게 되므로 명도와 채도가 다를 뿐 색파장의 영역은 같은 부류에 포함되었다. 한편, 고색견(靛色繭)의 표준 색이름은 벼색에 해당하지만, 땅콩색, 크림색 등은 누에 계통에 따른 벼색의 변이로 보인다. 그러나 이러한 변이계통의 발현에 관여하는 인자에 대하여는 쉽게 결론짓기 어려우며, C^m와 Y 유전자 및 기타 누에계통별로 고치색 발현에 관여하는 유전형질의 존재 가능성에 대한 검토가 필요하다.

2. 특이 색파장과 고치색 유전자 간의 관계

459 nm~630 nm의 가시광선 스펙트럼 상에서 Fraunhofer 線의 D후선(589 nm)을 전후하여 누에고치

색파장이 위치하며, 최장 593 nm에서 최단 567 nm 사이의 영역에 분포하였다. 고치색 파장은 593, 584, 580, 578, 575, 570, 567(nm) 등 7종이 인정되므로, 7종의 색상을 바탕으로 명도와 채도를 달리하는 요인이 작용하여 발현되는 유색견의 고치색은 공시 원종에서 밝혀진 16종과 교잡종에서 새롭게 발현되는 2종류를 포함하여 18종이 확인되었다. 특히, 고치색 파장이 위치하는 총 26 nm의 구간 중 580 nm의 색파장을 중심으로 575 nm~584 nm까지 9 nm의 범위에서 고치색 발현빈도가 제일 높았으며, 공시 유색견 누에 23계통 중 78%인 18계통이 여기에 포함되었다. 다수의 고치색 파장이 위치한 580 nm 부근은 색채識別閾(color difference limen)이 매우 예민한 1.3 nm로서 (Kim, 1991), 미소한 색파장 변화에 따라 다양한 색이 분별되는 영역이다. 누에는, 뽕잎의 색소물질 중 최소의 색파장 차이에 의해 다른 색채로 인식되는 물질을 이용한 결과, 한정된 색파장 영역에서 계통에 따라 다양한 고치색이 발현되는 것으로 설명할 수 있다. 고치색 유전자에 따라 색파장 발현에 관여하는 범위에 차이를 보였으며, Pk는 복숭아색에 국한된 593 nm, F는 밝은 등황색과 엷은 등황색 및 복숭아색 계통에 이르는 580~593 nm, 녹색견과 관련된 Grc 및 기타 G 부류의 유전자는 567~570 nm였고, 황혈유전자 Y는 가장 폭넓은 575~593 nm로서 18 nm 구간의 색파장에 관여하였다(Fig. 1).

노랑뽕 분홍 Pk(10YR8/6)과 청포도색Xe(2.5GY 8/8) 고치는 색파장 차이가 23 nm로서 유전자 조합이 YPKF/Grc인 정역 교잡종(F1)은 땅콩색(2.5Y8. 5/4)이었다. 이질적 고치색 유전자 조합에서 황색계의 발현은 Y 및 C 유전자 기능에 상당하는 형질이 Grc에 존재할 가능성을 의미한다. F1은 양친의 중간색인 동시에 명도가 증가하여 色光의 혼합에서 특징적인 加法混色(additive mixture)의 효과가 인정되었다. 주파장 간의 차이가 18 nm 정도로서 황혈유전자 Y가 중복되는 노랑뽕 분홍(10YR8/6)과 노랑(5Y8.5/16)의 F1이 양친의 중간인 치자색(7.5YR8/8)으로 발현된 것은 유전자 조성 YPKF/YC로부터 예상되는 YF의 작용으로 판단된다. 계란색(7.5YR8/4)의 Fc 계통에서와 같이 580 nm 색파장의 진한 등황색 Yg는 물론, 584 nm의 금잔화색 Za, 치자색 Fk, Fn, Fe등 Orange Yellow계의 모든 고치색은 YF 유전자 발현을 반영하는 결과로 해석할 수 있었다. Pk(10R8/6)×Le(5Y8.5/16)의 고치색은 명도가 양친의 평균보다 감소하여 色料의 혼합과 유사한 減法混色(subtractive mixture)의

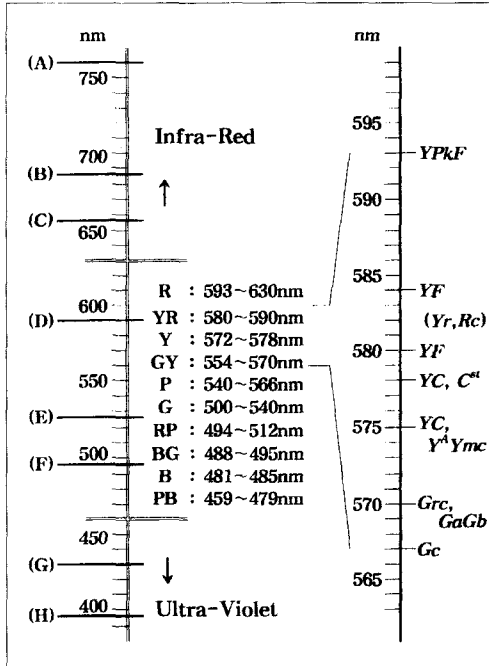


Fig. 1. Location of cocoon color wavelength with relative genes on the standard spectrum of sunlight. *Italics* represent cocoon color genes; (A) to (H), specific black bands of light spectrum originated from the sun.

결과로서, Pk×Xe에서 관찰된 加法混色 효과와는 상반된 특징을 보였다. 한편, 노랑(5Y8.5/16)과 청포도색(2.5GY8/8) 간의 교잡종(LexXe)은 노랑(5Y8.5/16) 및 근연계통인 바나나색(2.5Y8/10)의 두 종류로 분리되었으나, 반복수 및 개채수의 한계로 정확한 분리비가 확정되지는 않았다. 그러나 청포도색(2.5GY8/8) 고치의 Xe 계통에 Le 계의 YC 발현에 관련된 형질의 존재 가능성을 입증하기에 충분한 결과로 생각된다. 백색(N9.5)과 해바라기색(2.5Y8/14) 간의 교잡종 Ab07×Yp는 유전자 조합이 +^Y/Y로서 황혈이며, 고치는 전부 네이플즈 옐로(2.5Y8.5/8)였다. 모계의 매우 진한 노랑과 비교할 때, +^YC/YC으로 예상되는 유전자 조성의 고치색은 파장에 변화가 없으나 명도가 높고 채도는 저하되었으며, 백견과 황견의 교잡종은 그 중간형질을 나타내어 F1 고치는 모계의 고치색 보다 옅어진다는 일반적인 이론(Sakaguchi, 1984)과 같은 경향을 보였다(Table 2).

멧누에황견 (My)과 열성 백혈백색견인 집누에계통 (Ab07)의 F1의 고치색 관련 유전자 조성 +^YC/Y^AYmc로 부터 기대되는 결과는 옅은 황색견의 출현이다. 그러나, 예상과 달리 양친 중 멧누에 고유의 크림색 고치와 흰고치 및 황수선 화색과 병아리색 등으로 분리되는 경우가 확인되었으며, 이는 멧누에와 관련된 곤충생리 및 생태 탐구에 새로운 단서를 제

Table 2. Appearance of cocoon colors by crossing between silkworm strains with pink, green, yellow, and white cocoons

Parent cocoon in cross	Hybrid cocoon		
	Munsell code	Color name	Frequency
Pk × Xe (10R8/6) (2.5GY8/8)	2.5Y8.5/4	Peanut	100%
Le × Pk (5Y8.5/16) (10R8/6)	7.5YR8/8	Gamboge	100%
Yp × Ab07 (2.5Y8/14) (N9.5)	2.5Y8.5/8	Naples yellow	100%
My × Ab07 (5Y9/4) (N9.5)	5Y8.5/8	Primrose yellow*	varied
	5Y 9/4	Cream	
	7.5Y9/6	Citron yellow	
	N 9.5	White	
Xe × Le (2.5GY8/8) (5Y8.5/16)	2.5Y8/10	Banana	44%±
	5Y8.5/16	Yellow	56%±
Fn × Le (7.5YR8/8) (5Y8.5/16)	2.5Y8.5/8	Naples yellow	80%±
	2.5Y8.5/4	Peanut	20%±

공한다. 누에 고치색은 병잎성분 중의 carotenoid 계 또는 flavonoid 계 색소에 유래하며, 황견일 경우 누에 腸管 내에서 증장세포의 흡수는 +^Y유전자에 의해 차단되며, Y 유전자일 경우 腸管벽을 통과하여 中腸 세포를 통과하여 혈액으로 이행된다. 증장세포에서는 I 유전자가 혈액으로의 운반을 차단하지만, +^I 유전자는 혈액 까지 운반할 수 있고, C 유전자가 존재하면 색소물질이 혈액에서 견사선으로 이동하여 세리신과 함께 고치실로 분비되며, +^C의 경우 견사선 세포로 이행되지 않는다(Fujii *et al.*, 1988). 멧누에는 중부 견사선의 외층세리신이 없으므로 (Dai, 1994), 세리신에 함유되는 색소물질의 분비에 C 유전자가 충분히 관여할 수 없기 때문에 고치색 발현은 장애를 받을 것이다. 그렇지만, 집누에와의 교잡종은 중부 견사선에 외층 중층 내층 세리신이 모두 정상이기 때문에 C 유전자가 작용하여 집누에 황색견이 발현될 수 있다는 가설이 성립된다. 본 시험에서 집누에와 멧누에의 F1인 +^YC/Y^AY^mc 조합에서 밝은노랑 계통의 고치색이 분리되었으므로, YC 기능이 정상적으로 발현됨을 입증하는 결과로 해석된다(Fig. 2). +^YC/Y^AY^mc에서 출현한 황수산화색(5Y8.5/8) 누에고치는 전형적인 +^YC/YC 또는 YC/YC에서 발현되는 고치색 변이에 포함되며, 10세대 이상 선발로 멧누에 유충무늬 황수산화색(5Y8.5/8) 고치의 누에계통으로 고정되었다. Y^AY^mc는 1차적으로 증장에서 carotenoid 투과성이 Y^A에 의해 변경되고, 2차적으로 중부견사선 외층세리신 부전으로 C 유전자 발현에 필수적인 전제요건을 갖추지 못한 결과, 고치색 발현에 변경인자로 작용하여 크림색 고치가 발현된 것으로 해석할 수 있었다. 황색견의 변이가 누에계통별로 고유한 형질의 영향에 기인한다면 Le 계통의 YC는 YC^{Le}, Y^{Le}C, Y^{Le}C^{Le}, 중의 어느 한 경우로 표기할 수 있다. 그러므로 연관군 및 좌위가 2~25.6로서 Y와 같은 멧누에의 Y^A 및 집누에의 Y^D는, 색소운반 및 물질 투과성에 Y와 특이적으로 관련된 인자의 작용에 기인한다는 사실을 반영한다. 이러한 배경에서, C(12~7.2)와 동일한 연관군 및 좌위로 밝혀진 집누에의 C^D와 C^S 역시 근본적으로는 같고 누에계통에 따라 물질운반 및 투과성에 관여하는 변경인자에 따라 변이가 존재할 것이다. Y^AY^mc, Y^DC^D, YC^D, YC^S 등의 발현 특성은 결국 유전자 발현에 특이적으로 관련된 요인에 따른 변이로서 YC, Y^AC, Y^AC^A 등으로 표기될 수 있는 성질의 유전자 조성이라는 주장을 뒷받침한다. 한편, 멧누에 채집종의 실내사육에서 드물게 집누에 황

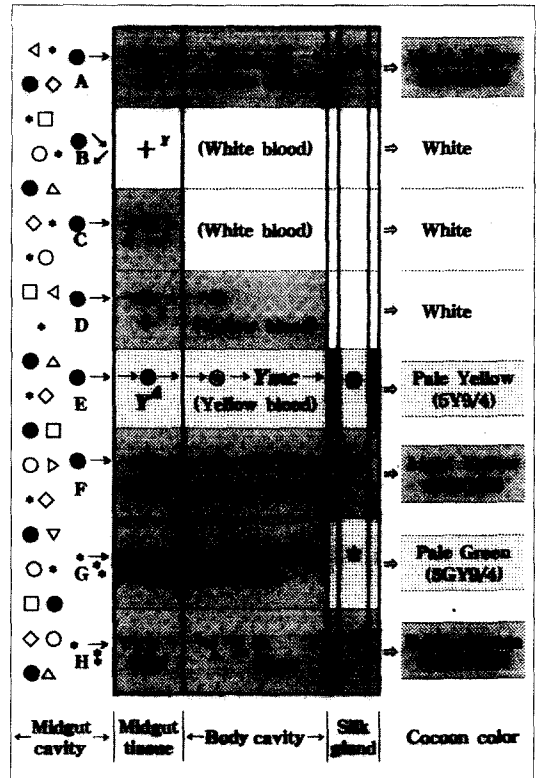


Fig. 2. Schematic expression for the transmission of carotenoids (●) or flavonoids (★) from midgut cavity to cocoon in the various silkworm strain with cocoon color. A, yellow cocoon expression by Y with C genes. B, inhibition of carotenoids uptake by the midgut with +Y. C, the transmission stopped at midgut cell by Yellow inhibitor of I. D, inhibition of carotenoid uptake by +^I at silk gland. E, YAYmc in the B. mandarina deficient expression of YC. F, recovered expression of YC/YAYmc construction in the F1 hybrid. G, biosynthesis or modification of flavonoids (★) from precursors(★) cooperative function of Ga and Gb in the midgut cell. Gb acts alone for the synthesis in the blood system. Only the yellow green flavonoids could transport from blood to cocoon (★), Ga transport those from blood to silk gland, while, Gb participate in transmission from midgut to blood. H, metabolism and transmission of flavonoids controlled by Grc, both of yellow green and yellow brown flavonoids (★) were transmittable to the cocoon. The cocoon of white (B,C,D), yellow (A,E,F), and green (G,H) as the result of different gene expression.

색견과 유사한 고치색 또는 두터운 견층이 발현되는 개체가 발견되므로, 야생 멧누에는 집누에와의 혼혈

계통으로서 짚누에 고치색에 관여하는 열성 유전형질이 내재할 가능성 또한 배제할 수 없다.

3. 원종 및 교잡종 고치색의 속성과 변이

녹색견 계통 유전형질의 규명과 유전자 발현 특성을 조사하기 위하여 공시한 濃綠色 및 淡綠色 원종의 유전자는 가칭 G-1에서 G-4까지의 4종으로서, G-1 및 G-2는 청포도색, G-3는 백연두색, G-4는 백합꽃색이었다. 청포도색인 G-1 및 G-2는 두 원종 간의 교잡종에서도 고치색의 변화가 없고, 고치색의 특성상 Grc에 상응하는 특징을 보이며 G-4와의 F1에서도 색채 변화 정도는 동등하였다. 그러나, G-1 및 G-2는 G-3와의 교잡에서 상이한 색채가 발현되므로, 누에계통에 따라 상이한 요인이 녹색견 유전자에 관여하는 것으로 밝혀졌다. G-3은 G-1에 대하여 열성으로서 G-1의 발현으로 녹색이 증가하였지만, 다른 G 계통 간의 교잡에서는 고유색의 변화가 인정되지 않으므로 G-3는 독립유전 녹색견 유전자 Gc(15~?) 일 가능성이 높았다. G-4는 매우 옅은 연두색 계통으로 G-1,2,3 등의 유전자와 협력적으로 작용하여 녹색이 증가한 백연두색이 발현되므로, 이들 누에계통에는 고치색 발현에 상가적으로 작용하는 인자 또는 조건유전자가 내재성이 입증되고, G-4는 Ga(-) 또는 Gb(7~7.0)로 추정되었다(Table 3). Grc는 증장 및 혈액에서의 flavonoid 수식 및 견사선으로의 운반에 이르기까지 고치색 발현의 전 과정에 단독으로 관여하지만, Ga 및 Gb는 증장세포에서의 flavonoid 생합성 또는 수식에 협력적으로 작용하고 Gb는 혈액 중에서 단독으로 그 기능을 발휘한다. GaGb의 녹색견 발현은 증장세포에서 혈액중으로의 flavonoid 투과는 Gb가 지배하지만, 혈액으로부터 견사선으로의 투과성은 다시 Ga에 의존하게 되므로, 두 유전자의 공존은 필수적이며, 그 중 하나가 결여된 유전자 조성에서는

흰색고치가 된다는 것이 일반적인 견해이다(Fig. 2). 그러나, 색 이론을 적용하지 않은 종래의 색깔각으로는 백합꽃색도 흰색으로 간주되므로 笹色 薺a,b,c 속하는 G 그룹의 발현에 관하여는 연관군 검색을 병행한 상세한 규명이 필요하다. 한편, 곤충 체내에서 flavonoid의 metabolism이나 conjugation에 관한 보고와 함께 생합성에 관한 부정적인 견해도 제시되고 있으나(Harbone and Grayer, 1994), 곤충의 flavonoid 합성 또는 수식능에 관한 연구가 미흡하여 그 가능성은 완전히 배제될 수 없다. 특수한 누에계통의 경우 식물 유래의 flavonoid 골격을 이용한 합성대사의 가능성 또는 수식에 관하여는 곤충기능 개발의 차원에서 보다 적극적인 검토가 요구된다.

Yellow 系 간의 F1 교잡종 Yc/Rc 및 Yg/Rc는 양친의 고치색 중 Rc계통의 해바라기색이 발현되었으며, F, Pk, Grc 등 이질적인 고치색 유전자의 개입이 없을 경우, 해바라기색 발현을 지배하는 YC 조합이 노른자색이나 등황색을 지배하는 YC' 보다 우위를 입증한다. 네이플즈 옐로(2.5Y8.5/8)와 해바라기색(2.5Y8/14) 간의 교잡종 Qe/Rc는 모두 노른자색(2.5Y8/12)이 발현되어 F1 고치색은 주파장이 양친과 같으면서 명도는 두 양친의 평균보다 낮은 중간색으로서 Le/Pk에서와 같은 감법혼색 효과가 인정되었다. Qe/Rc의 유전자 조합은 단순한 YC/YC가 아니라, 엄밀하게는 양친 고유의 인자가 개입된 YC의 조합인 YC/YC'로 판단된다. 이와같이 황견계통에서 밝혀진 고치색의 변이도 YC 유전자 발현에 밀접하게 관련된 누에계통별 고유의 형질이 관여하기 때문일 것으로 생각된다. 일반적으로 고치색이 상이한 계통 간의 교잡종에서 양친의 평균과 비 교할 때, 색상(hue)은 주파장이 단파장 쪽으로 이동하는 특징이 뚜렷하고, 명도(value)는 감소하는 경우가 더 많으며, 채도(chroma)에서도 현저하게 감소하는 경향을 보였다(Table 4). 누에 고치색은 장기간의 노출 또는 열풍건조 조건에(70°C, 12hr) 영향을 받았던점이 형광색(Han, 1997)의 경우와 차이가 있었으나, 고치색 고정기술이 확립된다면(Hata and Kato, 1996) 유색견사는 특수견소재 생산 등 견사분야의 새로운 가공기술 개발에 이용될 수 있을 것이다.

누에고치의 색은 곧 색을 지닌 물질을 의미하는 동시에 함유성분의 특성을 가지적으로 표출한다. Table 1에서 밝혀진 계란색 등의 Orange Yellow계 고치색은 β-carotinoide의 존재를 나타내고, Pk 유전자가 도입된 노랑뿔 분홍색 고치는 배열입체이성질체인 cis-β-

Table 3. Expression of cocoon color by diallel cross among the silkworm strains of G group (G-1 to G-4) with various green of cocoon

	Male	G-1	G-2	G-3	G-4
Female					
G-1 (N7)	2.5GY8/8	2.5GY8/8	2.5GY8/8	5GY9/4	
G-2 (Xe)	2.5GY8/8	2.5GY8/8	5GY9/4	5GY9/4	
G-3 (Eg)	2.5GY8/8	5GY9/4	5GY9/4	5GY9/4	
G-4 (Tg)	5GY9/4	5GY9/4	5GY9/4	2.5GY9/2	

Table 4. Comparison of cocoon colors between the original parent and hybrid silkworms following color qualities of hue, value, and chroma

Parent cocoon	Hybrid cocoon ¹⁾	Color change in hybrid ²⁾			Note ³⁾
		hue	value	chroma	
Yc × Rc (2.5Y8/12) (2.5Y8/14)	Yc/Rc (2.5Y8/14)	nm (0)	(0)	+1	Y*Y
Yg × Rc (10YR7/14) (2.5Y8/14)	Yg/Rc (2.5Y8/14)	-1	+0.5	(0)	Y*Y
Qe × Rc (2.5Y8.5/8) (2.5Y8/14)	Qe/Rc (2.5Y8/12)	(0)	-0.25	+1	Y*Y
Le × Pk (5Y8.5/16) (10R8/6)	Le/Pk (7.5YR8/8)	0	-0.25	-3	Y*P
Xe × Pk (2.5GY8/8) (10R8/6)	Xe/Pk (2.5Y8.5/4)	-3.5	+0.5	-3	G*P
Tg × Xe (2.5GY9/2) (2.5GY8/8)	Tg/Xe (5GY9/4)	(-3.0)	+0.5	-1	G*G
N7 × Tg (2.5GY8/8) (2.5GY9/2)	N7/Tg (5GY9/4)	(-3.0)	+0.5	-1	G*G
N7 × Xe (2.5GY8/8) (2.5GY8/8)	N7/Xe (2.5GY8/8)	(0)	(0)	(0)	G*G

¹⁾Difference of hue, value, and chroma in contrast with the mean of parent cocoon, the "hue" was compared by color weavelength

²⁾Numbers in parentheses represent the same grade of which introduced in crossing

³⁾Silkworm strain pared with specific cocoon color between yellow (Y*Y), yellow and pink (Y*P), green and pink (G*P), green (G*G)

carotenoid로의 전환을 의미하는 동시에, 중부견사선 後區의 물질 투과성을 반영한다. 또한, 해바라기색 등 Yellow계 고치는 xanthophyll 류인 lutein과 violaxanthin의 존재를 의미하는 동시에, 색조에 따라 중부 견사선 전반부 후반부 또는 全域의 물질 투과성이 입증된다. 즉, 외층 농황색 고치는 중부견사선 中區 전반부의 물질투과성과 C 유전자의 작용, 외층담황 내 층농황색 고치는 중부견사선 中區 후반부의 물질투과성과 C' 유전자의 작용, 전 층 담황색 고치는 중부 견사선의 中區 전 부위의 물질투과성과 C^D 유전자의 작용을 나타낸다. 한편, Yellow Green계 고치는 누에 증장세포 및 혈액 중에서 quercitrin, rutin, quercetin을 전구체로 하는 flavonoid 합성 또는 수식능을 나타내는 지표로서, 소화관 및 견사선의 세포막 투과성을 비롯한 특이 물질의 생합성능에 관련된 유전자의 기능은 고치색 발현 양상에 따라 용이하게 판별될 수

있다. 누에 고치색 발현에 관여하는 유전자의 작용과 고치색 이름을 규명한 본 연구 결과는, 특이 분자의 생체막 수송 및 유전자 발현 해명 등 곤충유전 생리학의 입장에서 누에의 활용가치와 새로운 방법론의 유용성을 입증하였다.

적 요

각종 고치색을 검정하여 Pink계, Orange Yellow계, Yellow계, Yellow Green계, White계 등 5계통으로 정리하고, Munsell 부호와 한국표준색표 일련번호를 명시하는 동시에 영어 및 한국어 색이름을 규정하였다. 色 이론을 도입한 표색계에서는 공시한 21종의 유색견 고치색은 Pink계 1종, Orange Yellow~Yellow계 12종, Yellow Green계 3종으로서 16종이 확인되었다. Pink계는 노랑뽕 분홍색; Orange Yellow

계는 등황색, 금잔화색, 치자색, 계란색; Yellow 계는 해바라기색, 노른자색, 노랑, 벼색, 네이플즈 옐로, 황수선화색, 땅콩색, 크립색; Yellow Green계는 청포도색, 백연두색, 백합꽃색이 확인되었다. 관용 색이름인 肉色繭은 F 유전자가 지배하는 치자색 및 살색으로 세분되며, 葉色繭은 C^a는 벼색, 땅콩색 등을 포함하는 부류로 간주할 수 있었다. 고치색 유전자와 관련된 색파장 범위는 Pk가 593 nm, F는 580~593 nm, Grc 및 Ga Gb Gc 계열은 567~570 nm였으며, Y 유전자는 가장 폭넓은 575~593 nm의 색파장에 관여하였다.

가시광선 스펙트럼 593~567 nm 범위에 7종의 파장을 기본으로 18종 이상의 고치색이 성립되며, 특히 575~584 nm 영역은 유색견 21계통 중 78%가 포함되어, 580 nm를 중심으로 色彩識別閾이 예민한 색파장 영역에서 최소폭의 변화로 다양한 고치색 발현이 가능한 것으로 밝혀졌다. 중부견사선 외층세리신이 정상인 멧누에와 집누에 교잡종(+^Y+^C/Y^AY^{mc})은 고유의 멧누에고(5Y9/4) 외에 황수선화색(5Y8.5/8)이 분리되었다. YC 발현에서 Y와 동일한 연관군 및 좌위(2~25.6)인 Y^A, Y^D 등은 누에계통별 특이 인자가 관여한 결과로 추정되며, 이와같이 C^a, C^b도 C와 동등한 유전자일 가능성이 제기되었다. 녹색견은 Grc와 관계되는 2종의 청포도색, 독립유전 녹색견 Gc와 유사한 백연두색, Ga 또는 Gb와의 관련성이 추정되는 백합꽃색이 확인되었다. Pink계×Yellow계 고치색은 가법혼색의 경향을 보이고, Yellow계의 “매우 진한 노랑” 고치 간의 교잡에서는 해바라기색이 우위로 발현되었다. 그러나, 일반적으로 유색견 원종 간의 F1 고치색은 감법혼색의 결과와 유사하며, 교잡종 고치색은 양친의 평균과 비교하여 색파장은 단파장 쪽으로 이동하고 명도와 채도가 저하되는 경향을 나타내었다.

인용문헌

Dai, P., Iwashita, Y., and Kawasaki, H. (1994)

- Differences in silk protein secretion among the silk gland of the silkworm, *Bombyx mori*, the Chinese wild silkworm, *Bombyx mandarina* and their hybrid. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **63**: 149-156.
- Fujii, H. et al. (1988) Existence of carotenoids binding protein in larval hemolymph of the yellow blood strain of *Bombyx mori*. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **57**: 94-99.
- Fujii, H. et al. (1996) Genetical studies on the “contractile” mutant of *Bombyx mori* and revision of the genetical map of the 15th linkage group. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **65**: 452-455.
- Han, M. S. (1997) Variation and sex limited expression of fluorescent color by ultraviolet spectrum on the silkworm cocoon. *Korean J. Seric. Sci.*, **39**: 22-29.
- Harborne, J. B. and Grayer, R. J. (1994) Flavonoids and insects. in “The flavonoids: advances in research” J. B. Harborne ed., Chap & Hall, London, pp. 589-618.
- Hata, T. and Kato, H. (1996) Degumming method for silk thread reeled from yellow cocoon filament of sex-limited variety “Ouhaku”. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **65**: 494-499.
- Kim, K. J. (1991) Color science. Dae Gwang Press. Seoul. pp. 1-111.
- Matsubara, F. et al. (1993) Study on yellowing of cocoon filament obtained from the silkworm reared on artificial diets and mulberry leaves. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **62**: 162-164.
- Nakajima, M. et al. (1986) The name and symbol of silkworm genes. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **55**: 95-111.
- Nakajima, S. et al., (1993) Hue and glossiness of wild silk fibers degummed with enzyme. *J. Seric. Sci. Jpn.*, **62**: 165-167.
- Park, D. Y. (1995) Practical color science. Bando Press. Seoul. pp. 1-119.
- Park, K. J. (1991) Concise manual of color names. KBS Color Research Institute ed. pp. 1-119.
- Sakaguchi, B. (1984). Physiology and biochemistry in the silkworm mutant (Silkworm biochemistry, Ito, T. ed.), Shoukabou, Tokyo. pp. 310-341.