

중등교육현장에서 초파리를 이용한 실험교육 I. 멘델의 분리의 법칙

김규태^{1,2}, 전상학^{2*}

¹서울과학고, 서울특별시 110-530

²서울대학교 생물교육과, 서울특별시 151-742

Experimental Education Using *Drosophila melanogaster* in Middle and High Schools I. Mendel's Principle of Segregation

Kyu-Tae Kim^{1,2} and Sang-Hak Jeon^{2*}

¹Seoul Science High School, Seoul 110-530, Korea

²Department of Biology Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

요약

멘델의 유전 원리는 유전학의 근간을 이루고 있으며, 그 중요성으로 인해 중학교 및 고등학교 교육과정에서도 큰 비중을 차지하고 있다. 그러나 학교 현장에서는 그 중요성을 인식하면서도 여러 가지 제약 조건으로 인해 실제로 멘델의 유전 원리를 확인하는 교배 실험을 수행하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 초파리를 이용하여 분리의 법칙을 확인하는 교배 실험을 수행하는데 지침이 될 수 있는 매뉴얼을 개발하고자 하였다. 본 연구는 서울 소재의 과학고에서 30 모듈의 학생을 대상으로 수행되었다. 눈 색깔(*sepia*, *se*) 및 체색(*ebony*, *e*) 형질을 이용하여 대립 형질간에 교배 실험을 통해 분리의 법칙을 수행하였다. 실험 과정에 필요한 초파리 배양, 교배, 기간의 설정, 실험 과정 등을 구체적으로 기술하였으며, 실제 상황에서 얻어진 결과에 대한 통계적인 분석 방법 등을 제시하였다. 대립 형질에 대해 암수를 바꾸어 실험을 수행하였는데 대부분의 경우 5% 유의수준에서 분리의 법칙을 따르는 것으로 나타났다. 분리의 법칙을 확인하는 교배 실험은 1시간 내에 끝나는 실험이 아니기 때문에 과학고나 계발활동의 생물반 혹은 대학의 학부 실험에 적용할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 제공한 기술적인 측면들을 고려하면 일반계 중고등학교의 정규 수업시간에도 이용이 가능하며, 교사가 관심을 가지고 실험을 수행한다면 유전 수업에 대한 흥미의 유발과 함께 우성 및 열성의 확인, 분리의 법칙에 대한 교육 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

주제어 : 분리의 법칙, 유전학 실험, 초파리 돌연변이

서론

어머이의 형질이 자손에게 전해지는 유전 현상의 규칙성은 멘델에 의해서 처음으로 규명되었다. 멘델은 1865년에 8년 동안의 완두 실험 결과를 정리하여 「식물 잡종에 관한 연구 (1865)」라는 제목으로 논문을 발표하여 유전의 원리를 설명하였다. 멘델은 완두콩의 7가지 대립 형질을 찾아내어 교배 실험

을 진행하였는데, 멘델이 생각한 대립 형질은 한 종류의 유전 형질에 대해 서로 대립되는 특성의 표현형을 의미하는 것으로, 둥근 형질과 주름진 형질, 키가 큰 형질과 작은 형질 등과 같이 그 표현형이 서로 뚜렷이 구별되는 것이었다.

멘델은 순종으로 확인된 키 큰 완두와 키 작은 완두 사이에서 나올 수 있는 잡종 1대는 모두 키가 큰 경우, 모두 키가 작은 경우, 키가 큰 것과 작은 것이 섞여 있는 경우, 중간 정도의 키가 되는 경우 등 여러 가지로 예측할 수 있었다. 그런데 실제 실험 결과는 잡종 1대에서 모두 키 큰 완두만 나왔다. 이 때

*교신저자: jeonsh@snu.ac.kr

•2008년 7월 9일 접수, 2009년 2월 12일 통과.

잡종 1대에서 나타나는 형질을 우성, 나타나지 않는 형질을 열성이라고 하였다. 나아가 잡종 1대의 키 큰 완두를 심어서 자가 수분시켰을 때 잡종 2대에서는 키 큰 완두와 키 작은 완두가 3:1로 나왔다. 멘델은 이 결과를 바탕으로 분리의 법칙을 이끌어 냈다(Ricky, 2005). 한 형질에 대한 한 쌍의 대립 유전자는 생식 세포 형성 중에 분리되어 다른 배우자로 들어가며, 그 결과 난세포 또는 정세포는 체세포에 있는 두 가지 대립 유전자 중에서 하나만 받게 된다. 이것은 염색체와 관련하면 감수분열 때 상동염색체가 다른 배우자로 들어가는 것과 일치한다. 잡종 1대에 있는 2개의 대립 유전자는 생식 세포에서 분리되어 절반은 키 큰 유전자를 가지고, 나머지 절반은 키 작은 유전자를 가지게 된다. 따라서 자가 수분을 하면 각각의 배우자는 무작위로 결합을 하게 되므로 자손 2대에서 1/4은 두 개의 키 큰 대립 유전자를 물려받으므로 이 완두는 키 큰 완두가 될 것이고, 1/2은 1개의 키 큰 유전자와 1개의 키 작은 유전자를 물려받으므로 이 완두는 키 큰 완두가 될 것이며, 나머지 1/4은 2개의 키 작은 유전자를 물려받으므로 이 완두는 키 작은 완두가 될 것이다. 이와 같이 한 쌍의 대립 유전자가 분리되어 다음 대에 유전되는 현상을 분리의 법칙이라고 한다(Campbell, 2003). 잡종 2대에서 우성과 열성 형질이 3:1로 나타나는 현상은 분리의 법칙에 따른 결과일 뿐이다.

멘델의 분리의 법칙을 이해하는데 필요한 핵심적인 개념들은 순계 및 잡종, 우성과 열성, 표현형과 유전자형, 대립 형질 및 대립 유전자 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이러한 핵심 개념들을 초파리를 이용한 분리의 법칙 확인 실험을 통해서 이해하고자 한다.

멘델의 유전 원리는 7차 교육과정의 중학교 3학년 과학의 8단원에서 다루고 있지만(교육부, 1997), 실험을 통해서 멘델의 분리의 법칙을 이해하고자 하는 노력은 어느 교과서에서도 제시되어 있지 않다. 현 교과서에서 유전현상을 이해하기 위한 접근법을 소개하면 다음과 같다. 중학교 3학년 과학의 8단원을 살펴보면, 잡종 1대의 키 큰 완두를 자가 수분시켜 얻어지는 잡종 2대의 여러 표현형에 대한 개체수를 제시하고 이로부터 분리비가 얼마인지를 구하는 활동, 모형을 이용한 가상적인 교배 실험에 그치고 있다(이광만 외, 2003). 고등학교 선택 과목인 생물I(박희송 외, 2003)과 생물II(김윤택 외, 2003)에서도 실험적 접근을 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 초파리를 이용하여 분리의 법칙을 이해하기 위한 초파리 배양 및 교배, 교배 결과에 대한 통계적 처리 과정

에 대하여 구체적인 실험 매뉴얼을 제공함으로써 교육 현장에서 초파리를 이용한 유전 교육의 가능성을 제시하고, 또한 유전의 원리를 파악하는데 필요한 핵심 개념들을 실험을 통해서 이해할 수 있는 기회를 제공하고자 하였다. 본 실험 활동을 통해 학생들은 분리의 법칙과 같은 유전 원리에 대해 보다 명확하고 구체적인 이해를 할 수 있으며, 나아가 학생들의 문제 해결력을 신장시킬 수 있을 것으로 생각된다.

실험 재료, 시약 및 기구

실험 재료

초파리 야생형, 검은 체색 돌연변이(*ebony*, *e*), 암갈색 눈 돌연변이(*sepia*, *se*).

시약

에테르(ethyl ether), 이산화탄소(CO₂), 옥수수가루(corn meal), 한천(agar), 효모추출물(yeast extract), 생효모, 백설탕(sucrose), 메틸-4-히드록시벤조산(methyl-4-hydroxybenzoate), 알코올, 프로피온산(propionic acid)

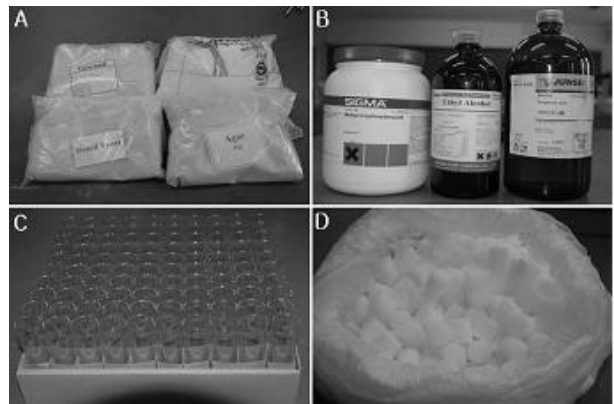


그림 1. 옥수수 배지를 만들 때 필요한 물품들. (A) 배지에 들어가는 옥수수 가루, 설탕, 효모 추출물, 한천(왼쪽 위부터 시계방향으로), (B) 방부제로 쓰이는 메틸-4-히드록시벤조산, 에탄올, 프로피온산(왼쪽부터), (C) 초파리를 배양하는 관병, (D) 관병을 막는 솜마개.

기구 및 기타 재료

실체현미경, 붓, 마취병, 초파리 사육 관병, 주스병, 솜마개, 메스실린더, 비이커, 냄비, 페트리 접시, 여과지, 마취 깔대기

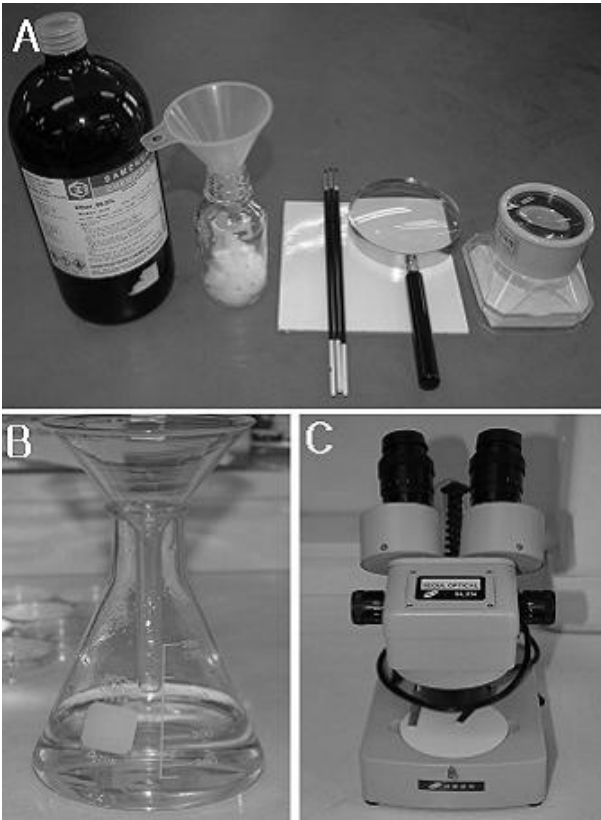


그림 2. 초파리 마취 및 관찰에 쓰이는 기구들. (A) 초파리 마취에 필요한 물품들. 왼쪽부터 에테르, 마취병, 타일, 붓, 돋보기, 루베. (B) 필요한 초파리를 제거하는 장치. 삼각플라스크와 깔대기를 이용한다. (C) 학생용 실체 현미경(줌 기능이 있어서 초파리의 여러 형질을 명확하게 볼 수 있다).

실험 방법

초파리를 이용하여 분리의 법칙을 확인하는 교배 실험을 진행하기 위해서는 첫째, 초파리 배양을 위한 배지를 만들어야 한다. 배지는 학생, 교사 혹은 조교가 만들 수 있다. 둘째, 초파리의 구조를 관찰하거나 교배시킬 때에는 반드시 마취 과정이 필요하므로 학생들은 초파리를 마취하는 방법을 익혀야 한다. 셋째, 야생형 초파리의 기본 구조를 알아야 한다. 이를 근거로 여러 가지 돌연변이 초파리의 형질을 구분할 수 있으며, 교배 결과 나온 자손들의 형질을 구분할 수 있다. 넷째, 암수 구별 및 미교배 암컷을 구할 수 있어야 한다. 충분한 미교배 암컷 초파리를 준비하면 교배 실험은 쉽게 이루어진다. 다섯째, 상세한 교배 계획을 세워야 한다. 어떤 형질을 가진 초파리를 부모 세대로 선정하여 교배시킬 것인가? 교배 후 부모 세대 및 자손 1대는 어느 시기에 제거할 것인가? 등에 대한 구체적인 교배

계획의 수립이 필요하다.

가. 초파리 배양에 필요한 옥수수 배지 만들기

초파리 배지는 옥수수 가루를 이용하여 만든다. 배지의 조성은 표 1에 있다. 배지를 만들 때 늘지 않도록 계속 저어준다. 배지가 완성되면 관병에 배지를 부어야 하는데, 배지가 사육병 마개 부분과 벽면에 묻지 않도록 주의한다. 그리고 거즈와 같이 구멍이 매우 촘촘한 천으로 관병을 덮어 초파리가 못들어 가게 한 후 약 하루 정도 말린다. 관병의 벽에 물기가 마른 것을 확인한 후에 솜마개 혹은 스폰지 마개를 사용하여 닫는다. 관병을 사용할 때 마다 건조 생효모를 약간 뿌려준 후 초파리를 넣어 배양한다.

다음은 1L의 옥수수 배지를 만드는 방법이다.

- ① 옥수수 가루 84g, 백설탕 37.5g, 효모분말(yeast extract) 24g을 준비하여 1L의 비커에 넣는다.
- ② 증류수 500mL을 메스실린더로 측정하여 ①의 비커에 넣은 후, 유리막대로 잘 저어준다. (교반기가 있을 경우 magnetic bar를 넣어 저어준다.)
- ③ 500mL의 증류수가 들어있는 냄비에 한천 가루 7.5g을 넣고, 계속해서 저어주면서 끓인다.
- ④ 한천 가루가 완전히 녹으면 냄비에 ②에서 준비한 것을 넣고 죽처럼 끓인다. (계속 저어주어야 한다.)
- ⑤ 불을 끄고 프로피온산 5.7mL와 메틸-4-히드록시벤조산 (14mL의 에탄올에 메틸-4-히드록시벤조산 2.5g을 녹인 것)을 차례대로 넣고 잘 저어준다.

표 1. 옥수수가루 배지의 구성

D. W	500 mL	1000 mL	2000 mL	3000 mL
Corn meal	42g	84g	168g	252g
Sucrose	18.75g	37.5g	75g	143g
Yeast (dry type)	12g	24g	48g	72g
Agar (rod type)	3.75g	7.5g	15g	22.5g
Propionic Acid	2.85mL	5.7mL	11.3mL	17mL
methyl 4-hydroxy benzoate	1.25g/ 7mL EtOH	2.5g/ 14mL EtOH	5g/ 28mL EtOH	7.5g/ 40mL EtOH

*배지가 들어 있는 관병은 상업적으로 구입하여 이용할 수도 있다.

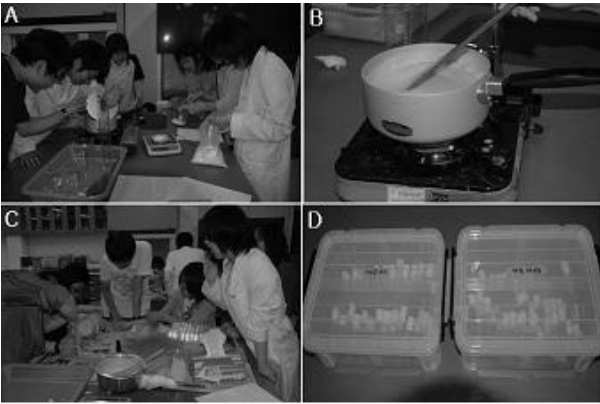


그림 3. 배지를 만드는 과정. (A) 배지에 들어갈 재료를 준비하는 모습, (B) 녹인 한천에 옥수수가루, 설탕, 효모추출물의 혼합액을 부은 후 저으면서 끓이는 모습, (C) 만든 옥수수 배지를 관병에 붓고 있는 모습, (D) 만든 초파리 배지와 사용한 배지의 보관.

- ⑥ 관병이나 유리병에 적당량 붓고, 2-3겹의 거즈로 덮어 수분을 증발시킨다.
- ⑦ 다음 날 아침에 마개를 막아, 밀폐된 용기에 보관한다.

나. 초파리 마취하기

초파리의 마취는 크게 두 가지 방법으로 할 수 있다. 첫째, 뚜껑이 있는 마취병에 숨을 넣고 약간 숨을 적실 정도의 에테

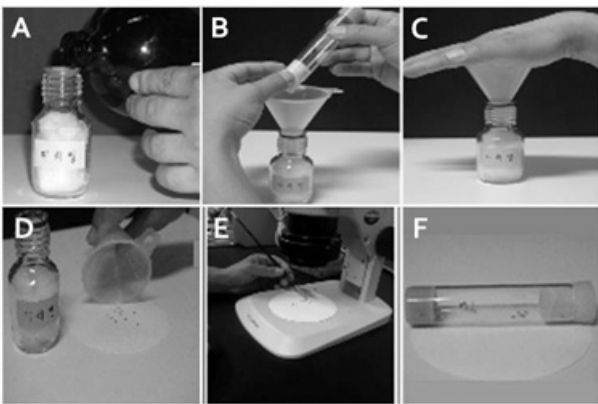


그림 4. 초파리를 마취하는 과정. (A) 마취병에 숨을 넣고 숨이 젖을 정도로 에테르를 붓는다. (B) 끝이 망으로 씌워진 깔대기를 마취병에 얹은 후, 야생형 초파리가 들어 있는 관병을 거꾸로 잡고 숨마개를 빼어 관병을 손으로 쳐주면서 초파리를 깔대기로 떨어 넣는다. (C) 초파리가 깔대기로 떨어지면 손으로 깔대기의 입구를 감싸서 공기가 통하지 않게 하여 초파리를 2~3분 정도 마취시킨다. (D) 마취병에서 초파리를 꺼내어 거름 종이나 타일 위에 놓는다. (E) 돋보기나 해부 현미경으로 관찰하면서 초파리의 특징을 기록한다. (F) 관찰이 끝난 초파리는 관병에 담은 후 누워 놓는다. 그 후 초파리가 움직이면 세워 보관한다.

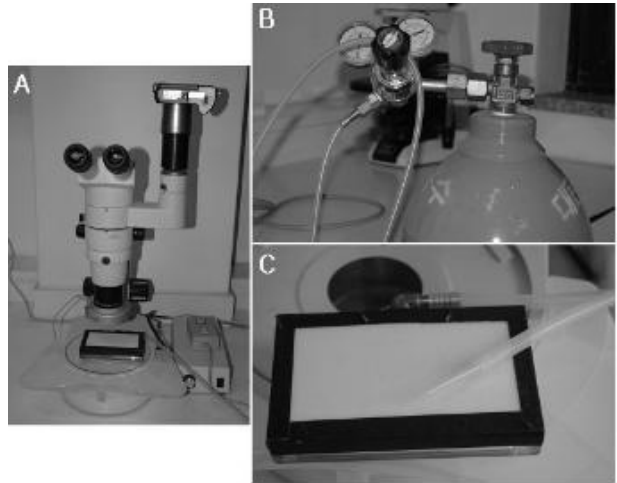


그림 5. CO₂ 가스통에 연결된 실체 현미경. (A) 디지털 카메라가 부착된 실체 현미경, 재물대에는 CO₂ 가스가 지속적으로 공급되는 관찰용판이 놓여져 있다. (B) 압력 조절기가 부착된 CO₂ 가스통. (C) 관찰용판으로 공급되는 CO₂ 가스는 관찰할 때 초파리를 지속적으로 마취시켜주며, 별도의 노즐을 통해 공급된 CO₂ 가스는 초파리를 마취하는데 사용된다.

르를 부은 후, 촘촘이 구멍이 뚫린 천 등으로 끝이 막혀 있는 깔때기에 초파리를 부어 초파리를 마취시킨다. 이 때 에테르를 많이 부어 병 속에서 고여 있는 정도가 되지 않도록 한다. 약 2~3분이면 마취가 되며 오랫동안 마취를 하면 죽을 수가 있으므로 주의한다. 마취된 초파리가 깨어나는데 약 10여분 이상이 걸린다. 만약 관찰 중에 초파리가 깨어나면 다시 마취를 시킨 후 관찰한다. 초파리를 없애고자 하면 그림2B처럼 수돗물이 들어있는 삼각플라스크나 시약병에 세제 3~4 방울을 떨어뜨리고 이 병에 초파리를 떨어 넣는다.

둘째, 이산화탄소를 이용한다. 이산화탄소는 주변의 가스 회사에서 쉽게 구입할 수 있는데 초파리를 빨리 마취시킬 수 있고, 냄새가 없어 대학 실험실에서 선호한다. 마취 후 1~2분이 지나면 깨어나기 때문에 지속적으로 이산화탄소 가스를 주입하여야 한다. 이산화탄소 가스를 이용할 경우 가스통, 압력 조절기, 호스를 통해 이산화탄소 가스가 공급되는 마취판 등의 별도의 장치가 필요하기 때문에 중고등 학생들을 위한 실험용으로는 적합하지 않다. 단지, 교사가 학생용 실험이나 개인적인 연구를 위해 초파리를 배양하는 경우 이와 같은 장치를 구비하면 편리하게 실험을 진행할 수 있다.

다. 야생형 및 돌연변이 초파리 관찰

초파리의 성체는 크게 머리, 가슴, 배로 구성되는데, 머리에

는 안테나, 눈 등이 있다. 가슴은 3개의 체절로 구성되어 있는데, 각 체절마다 한 쌍의 다리가 나온다. 2번째 가슴 체절에 한 쌍의 날개가 있고, 3번째 가슴 체절에서는 날개의 흔적기관인 평균곤(haltere)이 한 쌍 있다. 그리고 배는 8개의 체절로 구분된다. 다음은 야생형 및 돌연변이 초파리를 관찰하는 방법이다.

- ① 야생형 초파리를 에테르와 마취기구를 이용하여 마취시킨다.
- ② 마취된 초파리를 살레의 여과지 위에 올려놓는다.
- ③ 돋보기나 루페 혹은 실체 현미경으로 관찰한다.
- ④ 머리, 가슴, 배의 전체적인 구조와 각 부위에 존재하는 눈의 모양과 색깔, 날개의 모양 및 길이, 체색, 체표면의 털, 더듬이, 성줄(sexcomb) 등을 주로 관찰한다.
- ⑤ 야생형 초파리의 관찰이 끝나면 교배 실험에 이용할 돌연변이 초파리 관찰을 통해 교배에 필요한 형질을 익힌다.

라. 암컷과 수컷, 미교배 암컷 초파리(virgin) 선별하기

교배 실험을 하기 위해서는 가장 먼저 암수를 구별해야 한다. 암·수 구별은 다음과 같다.

첫째, 수컷은 배의 등쪽면의 5, 6번째 체절의 전 표면이 검은 색깔을 띠고 있는 반면, 암컷은 각 체절의 끝부분에만 검은 줄이 나타난다. 하지만 바로 태어난 수컷의 경우 등면의 색깔이 매우 옅으므로 이 시기에 등면의 색깔을 이용하는 것은 바람직하지 않다.

둘째, 암컷과 달리 수컷의 생식기관은 복부 끝에서 뚜렷하게 관찰되는데, 수컷의 복부 끝은 둥글고 복잡하게 생겼으며, 암컷

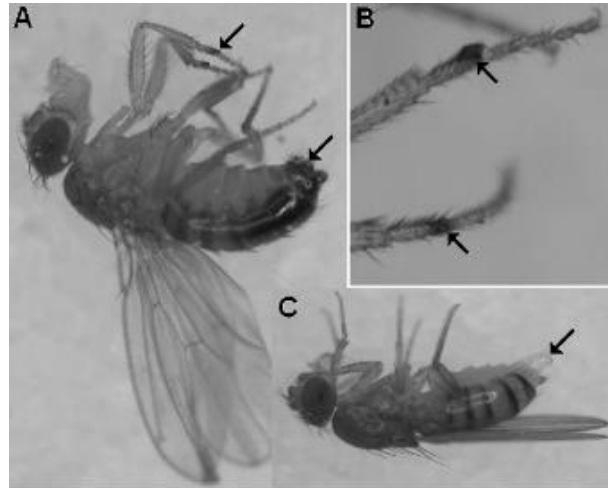


그림 7. 초파리의 성줄과 생식기. (A) 수컷의 생식기. 복부 끝에 존재하는데 어렵게 보인다. 그리고 첫 번째 다리의 마지막 마디에는 한 쌍의 성줄이 관찰된다. (B) 확대된 성줄. (C) 암컷의 생식기. 복부 끝에 존재하는데 흰색으로 밝게 보인다. 이 곳을 통해 수정란이 방출된다.

의 복부 끝은 뾰족하게 생겼다.

셋째, 수컷은 첫 번째 한 쌍의 다리에 굵은 털들이 모여 있는 성줄(sex comb)이 관찰된다.

또한 교배 실험에 필수적인 것이 미교배 암컷(virgin)을 고르는 일이다. 바로 태어난 초파리는 배의 복면이 투명한 관개로 내장이 검게 비친다. 이러한 초파리 중에서 암컷을 골라 새로운 관병에 몇 시간 혹은 하루 정도 보관하였다가 교배에 이용한다. 초파리가 깨어 나오면 바로 암수를 교배하여도 무방하다. 일반적으로 많은 수의 미교배 암컷 초파리를 얻고자 할 때는 25℃에서 4시간마다 암컷 초파리를 골라내면 쉽게 많은 수의

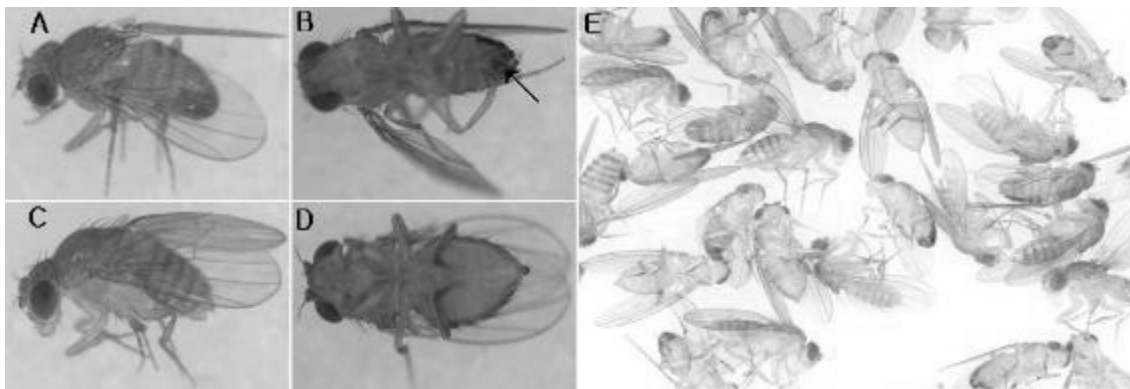


그림 6. 야생형 초파리. (A) 수컷의 등쪽. 각 체절의 끝에서 검게 보이며, 특히 끝부분 체절의 모든 부분이 검게 보인다. (B) 수컷의 복부쪽. 복부끝이 둥글게 보이며, 끝부분(화살표)에 생식기가 보인다. (C) 암컷의 등쪽. 각 체절의 끝에서만 검게 보인다. (D) 암컷의 복부쪽. 복부끝이 뾰족하다. (E) 야생형 초파리 집단.

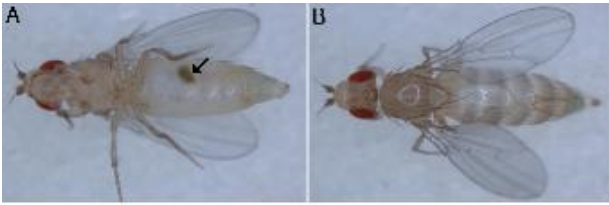


그림 8. 미교배 암컷 초파리. (A) 미교배 암컷 초파리의 복부. 번데기에서 갓 깨어난 성체는 복부가 투명하게 보이기 때문에 내장이 검게 보인다. (B) 미교배 암컷 초파리의 등쪽. 복부와 마찬가지로 투명하게 보인다.

미교배 암컷을 얻을 수 있다. 그래도 미심쩍으면 미교배 암컷만 골라 놓은 관병에서 유충이 생기는지를 관찰함으로써 미교배 암컷인지를 확인해 볼 수 있다.

마. 분리의 법칙을 확인하기 위한 교배 과정

교배시킬 부모 세대의 형질이 결정되면, 미교배 암컷 초파리를 골라낸다. 이 때 야생형으로부터 암컷을 고르고, 돌연변이로부터 수컷을 구하여 교배하거나 혹은 반대로 야생형에서 수컷을, 돌연변이에서 암컷을 골라 교배를 시킬 수 있다. 멘델이 수행하였던 방법에 따르면 두 경우를 동시에 실시하여 두 과정에서 차이가 없는지 확인하는 것이 가장 좋다고 생각된다.

초파리의 대립 형질은 구별이 쉬운 것을 고르는 것이 필요하다. 중고등학생 및 대학생을 대상으로 실험을 수행한 바에 의하면 야생형 초파리의 우성 형질과 대립 관계에 있는 암갈색 눈(sepia eye, 3번 염색체 열성) 혹은 검은 체색(ebony, 3번 염색체 열성) 초파리를 이용하는 것이 분리의 법칙을 확인하는데 편리하다는 것을 확인하였다.

분리의 법칙을 확인하는 교배 과정을 정리하면 그림 10과 같다.

- ① 교배시킬 부모 세대의 초파리 순종을 약 15일 전부터 5일 간격으로 계대 배양하여 많은 수의 관병을 준비한다.
- ② 부모 세대 중 한 쪽의 미교배 암컷 5마리를 골라서 다른 대립 형질을 갖는 수컷 5마리와 교배시킨다. (가급적 수컷보다 암컷 초파리를 많이 넣어준다. 멘델이 수행하였던 것처럼 암컷과 수컷을 바꿔서 상호교배할 수 있다.)
- ③ 4-5일 후 부모 초파리를 다른 관병으로 옮기든지 아니면 제거한다. (이 과정을 통해 부모와 자식이 섞이는 것을 방지한다.)
- ④ 교배 후 10일이 경과되면 자손 1대가 깨어나는데, 이 자손 1대 초파리를 새로운 관병에 넣어 배양한다. (④에서 새로이 깨어나는 자손 1대를 새로운 관병에 넣어 배양하면 통계 처리에 충분한 더 많은 수의 자손 2대를 얻을

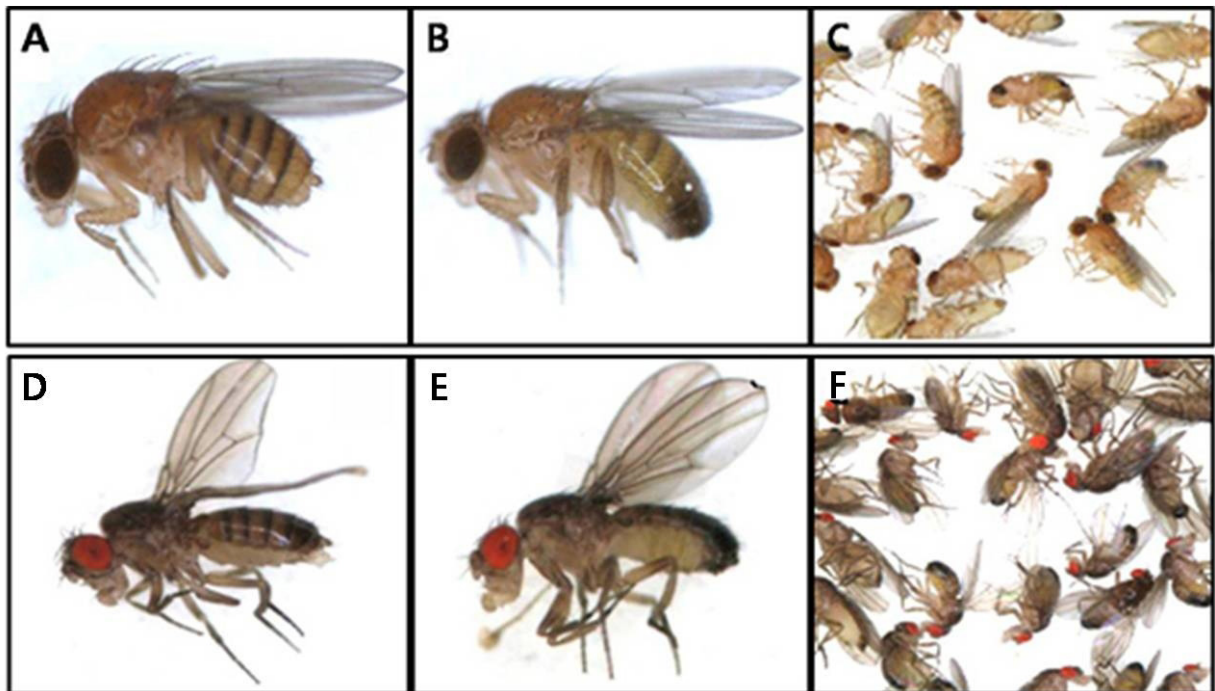


그림 9. 암갈색 눈(sepia)과 검은 체색 초파리(ebony). (A) 암갈색 눈 암컷 초파리. (B) 암갈색 눈 수컷 초파리. (C) 암갈색 눈 초파리 집단. (D) 검은 체색 암컷 초파리. (E) 검은 체색 수컷 초파리. (F) 검은 체색 초파리 집단.

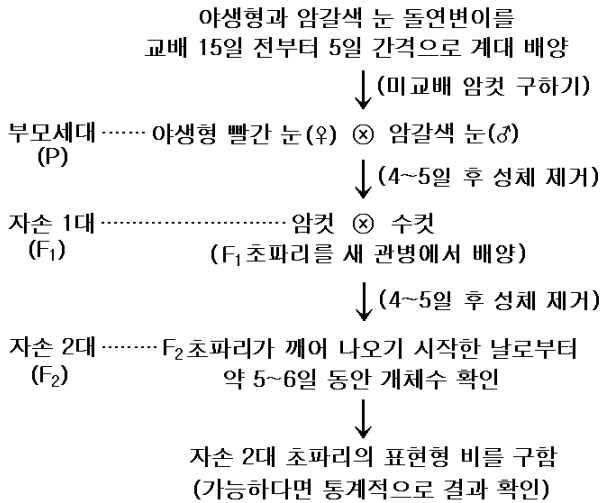


그림 10. 분리의 법칙을 확인하기 위한 교배 과정.

수 있다.)

- ⑤ 4-5일 후 교배시킨 초파리 관병에서 자손 1대의 성체를 제거한다.
- ⑥ 자손 2대가 깨어나면 표현형을 관찰하고, 그 개체수를 확인한 후 초파리를 제거한다 (자손 2대의 개체수 측정은 자손 3대가 깨어 나와 실험 결과에 영향을 주는 것을 배제하기 위해 깨어 나오기 시작한 날로부터 5-6일간만 확인한다).

연구 결과 및 논의

가. 초파리 배양용 배지 제조 및 보관

초파리를 배양하기 위한 가장 기본적인 과정은 배지를 만드는 것이다. 배지에 들어가는 옥수수 가루, 백설탕, 효모 분말은 효모를 배양하기 위한 영양공급원이고, 프로피온산과 메틸-4-히드록시벤조산은 방부제 역할을 한다. 방부제 없는 배지에서도 초파리를 키울 수 있지만 곰팡이가 생기는 경향이 있다. 초파리를 배양하기 위해서는 배지가 들어있는 관병에 생효모를 넣어주는데, 효모는 배지의 영양물질을 이용하여 증식하게 되고, 초파리는 이 효모를 먹이로 살아간다.

본 연구에서는 실험 준비실에 배지 제조에 필요한 여러 재료와 기구를 준비하고, 옥수수 배지를 만드는 방법을 부착하여 반별로 또는 모듈별로 학생들 스스로 배지를 만들게 하였다. 이런 경험을 통해 학생들에게 실험에 대한 흥미를 유도하고 시약

과 실험 기구를 다루는 법을 익히는 기회를 제공할 수 있었다. 만약 시간적인 제약 때문에 학생들이 만들기 어렵다면 교사 혹은 실험 조교를 통해 일괄적으로 만들어 학생들에게 제공할 수도 있으며, 현실적으로 어려움이 있다면 상업적으로 제공되는 것을 구입하여 이용할 수도 있다.

배지를 만든 후 관병이나 주스병에 적은 양을 붓고 반드시 하루 정도 아주 구멍이 가는 천으로 덮어 두어 병이 마르도록 하는 것이 필요하다. 이 때 천으로 잘못 덮게 되면 초파리가 병으로 들어가 알을 낳을 수 있기 때문에 많은 주의를 필요로 한다. 이렇게 만든 배지는 상온에서 7~10일 정도 보관하면서 사용하는 데 어려움이 없었으며, 밀폐된 용기에 배지를 보관하는 경우에는 2주까지 사용할 수 있었다.

나. 초파리 마취 및 구조 관찰

초파리를 관찰하기 위해서는 마취 과정이 필수적이다. 본 실험을 수행하는 동안 대부분의 학생들이 초파리 마취를 처음으로 시도해 보았기 때문에 많은 실수를 하였다. 따라서 교사가 반드시 마취 과정을 시범적으로 보여주는 것이 필요하였다. 초파리를 마취시켜 관찰을 할 때는 다음 유의 사항을 학생들에게 주시시킬 필요가 있었다.

첫째, 관병을 비스듬히 잡고 쳐주면서 초파리를 관병의 마개로부터 아래로 이동하도록 한 후, 빠르게 관병을 거꾸로 엮은 후 마개를 급히 빼고 초파리를 마취병 위의 깔대기 속으로 털어 넣는다. 이 때 초파리를 아래로 이동시키기 위해 너무 세게 치면 초파리가 빠져 죽는다. 또한 깔대기 속으로 털어 넣을 때 너무 세게 관병을 치면 배지가 거꾸로 떨어져 초파리가 배지와 마개 사이에서 압사하는 경우가 발생하였다.

둘째, 초파리를 관찰하면서 움직여 보고자 하면 반드시 붓을 이용한다. 초파리는 연약하여 핀셋 등을 이용하면 상처를 입는 경우가 빈번하게 발생하였다.

셋째, 조그만 페트리 접시에 여과지를 얹고 초파리를 관찰하는 것이 편리한데, 이 경우 초파리가 바람이나 입김에 날리는 것을 방지할 수 있었다.

넷째, 관찰이 끝난 초파리를 관병에 넣은 후, 초파리가 깨어 날 때까지는 관병을 옆으로 누워서 보관하였다. 배지가 젖어 있으면 관병을 똑바로 세울 경우 초파리가 빠져 죽을 수가 있기 때문이었다. 빈 관병에 초파리를 담아 마취가 깨면 원래의 병으로 옮기는 것도 좋은 방법이었다.

다섯째, 여러 종류의 돌연변이 초파리를 관찰할 때 교사의 지시에 따라 차례대로 관찰하도록 하여 서로 다른 돌연변이 초파리가 섞이는 일이 없도록 지도하는 것이 필요하였다.

다. 교배에 필요한 형질의 관찰

멘델이 교배 실험을 시작하면서 사전에 파악한 내용은 대립 형질에 대한 개념이었다. 즉, 노란 콩 및 녹색 콩, 둥근 콩 및 주름진 콩, 키 큰 완두 및 키 작은 완두 등 7가지 대립 형질을 확인하였으며 이러한 대립 형질을 이용하여 교배 실험을 수행할 수 있었다. 따라서 학생들은 교배 실험 전에 대립 형질에 대한 개념을 이해하고, 실제 실험에 이용된 초파리로부터 대립 형질을 파악해 보아야 한다.

학생들은 야생형 초파리 관찰을 통해 눈의 모양 및 색깔, 날개의 형태, 체색 등 야생형의 특징을 관찰하도록 하였다. 야생형 관찰이 끝나면 돌연변이 초파리 관찰을 통해 대립 형질을 찾도록 하였으며, 돌연변이 초파리의 표현형을 참고로 각 형질을 결정하는 유전자의 이름을 짓도록 하였다. 유전자에 대한 이름은 돌연변이 표현형을 참조하여 짓는 경향이 있다. 예를 들어 흰 눈 유전자(*white*, *w*)는 흰 눈 돌연변이를 관찰한 후에 붙여진 이름이다. *w⁺*는 야생형의 빨간 눈, *w*는 흰 눈의 돌연변이를 나타낸다. 돌연변이 관찰을 통해 학생들은 야생형의 빨간 눈과 돌연변이의 암갈색 눈, 야생형의 갈색 체색과 돌연변이의 검은 체색이 각각 서로 대립되는 형질이라는 사실을 파악하였으며, 이로부터 대립 형질의 개념을 보다 명확하게 이해할 수 있었다. 나아가 대립 형질을 결정하는 유전자가 대립 유전자라는 개념을 쉽게 이끌어낼 수 있었다. 단순히 돌연변이 형질만 관찰하는 것보다 각 돌연변이 형질에 대한 유전자의 이름을 결정하고, 야생형의 형질과 비교하여 대립 형질의 개념을 이끌어내는 활동은 학생들로 하여금 대립 유전자의 개념을 이해하는데 큰 도움이 되었는데, 이것은 김규태(2008)의 결과와 일치한다.

학생들이 이름을 붙인 후에 학생들과 실제 유전자의 이름을 비교하였으며, 분리의 법칙을 확인하는 교배 실험을 위해 각 돌연변이 형질을 결정하는 유전자가 몇 번 염색체에 존재하는지를 조사하도록 과제로 부여하였다. 초파리에 대한 수많은 정보들은 인터넷 주소 <http://www.flybase.net>로 들어간 후 “Resources → interactive fly → gene index”로 차례로 들어가 유전자를 검색하면 각 유전자에 대한 정보를 매우 상세하게 알 수 있다.

다음은 교배에 이용하기 위하여 학생들이 관찰한 여러 돌연변이 형질 및 이를 결정하는 유전자가 존재하는 염색체와 우열 관계를 나타낸 것이다.

표 2. 여러 돌연변이 초파리의 유전자 위치 및 우열 관계

구분	종류 및 특징	유전자 위치 및 우열 관계
정상	· 야생형(wild type)	정상, 우성
돌연변이	· 암갈색 눈(sepia eye)	3번 염색체, 열성
	· 검은 체색(ebony)	3번 염색체, 열성

학생들에게 교배 실험을 진행하기에 앞서 특정 형질을 가진 초파리를 부모 세대로 선정할 이유를 모둠별로 발표하게 하였다. 그리고 자손 1대 및 자손 2대를 얻는 교배 계획을 발표시켰다. 이러한 활동을 통해 학생들은 분리의 법칙에 대한 유전의 원리를 보다 명확하고 구체적으로 이해할 수 있었으며, 이를 통해 학생들의 문제 해결력을 신장시킬 수 있는 기회를 제공할 수 있었다.

라. 초파리의 교배

초파리의 교배 실험이 성공적으로 이루어지기 위한 중요한 요인으로는 미교배 암컷의 선별 및 적절한 관리가 필요하였다. 이미 실험 과정에서 설명한 것처럼 교배 실험을 수행하기 위해서 야생형과 선정한 돌연변이 초파리로부터 미교배 암컷을 고를 수 있도록 실험 한 달 전부터 초파리를 배양을 시작하였으며 4-5일마다 새로운 관병으로 옮기면서 배양 관병 수를 늘려 증식시켰다. 초파리의 한살이는 온도에 영향을 받는데 25℃에서 10일, 20℃에서는 15일이 되어야 성체가 되기 때문에 온도를 감안하여 배양 계획을 세우는 것이 필요하다. 초파리 교배 과정은 실험 방법에서 설명한 것처럼 수행하였다.

교배 계획을 학생들의 수업 일정에 맞추어서 미교배 암컷 초파리를 구하는 가장 좋은 시기를 선택할 수 있었다. 학생들은 등교하자마자 관병에 들어있는 초파리 성체를 모두 제거한 후, 점심시간에 실험실에 와서 미교배 암컷을 골랐으며, 방과 후 4시 혹은 5시경에 미교배 암컷을 다시 한 번 구함으로써 1-2일만에 충분한 미교배 암컷 초파리를 구할 수 있었다.

통계 처리를 위해 많은 수의 자손 2대 초파리를 얻는 것이 중요하기 때문에 이를 위해서 더 많은 자손 1대를 얻어서 자가 교배시킬 필요가 있었다. 부모 세대를 교배시킨 관병에서 4-5

일 후 성체를 제거하였으며, 이 성체를 새로운 관병에 넣어 교배시킨 결과 더 많은 수의 자손 1대를 얻을 수 있었다. 10일 후에 자손 1대가 깨어 나오면 암컷과 수컷 초파리를 새로운 관병에 넣어 자가 교배를 시켰다. 부모 세대를 교배시켰던 관병에서 계속해서 자손 1대의 초파리가 깨어 나왔는데, 하루 간격으로 깨어 나온 자손 1대의 성체를 새로운 관병으로 옮겨주어 배양을 한 결과 더 많은 수의 자손 2대를 얻을 수 있었다.

마. 교배 결과 및 통계적 처리

1학년 학생 30 모듬을 대상으로 분리의 법칙을 확인하는 단성잡종 교배 실험을 진행하였다. 24개 모듬의 학생들이 야생형 초파리(wt)와 암갈색 눈 초파리(se)를 부모 세대로 선정하였고, 6개 모듬의 학생들은 야생형 초파리와 검은 체색 초파리(e)를 부모 세대로 선정하여 교배를 진행하였다. 각 경우에 있어서 부모의 형질을 바꾸어 상호 교배를 진행하였다. 교배 후에는 그 결과가 분리의 법칙을 따르는 지 알아보기 위해 “자손 2대의 결과는 3:1의 비율에 일치한다.”라는 가설을 세웠다. 이를 검증하기 위해 자손 2대에서 얻은 데이터에 대해 χ^2 -검증(전상학역, 2003; 한국유전학회, 2004)을 하였다. 학생들은 모듬별로 얻은 데이터를 분석하여 보고서를 제출하였으며, 본 연구에서는 학생들이 제출한 자료를 수합하여 χ^2 -검증을 이용하여 통계 처리 하였다.

표본분포와 이론분포가 일치하는지를 검증하는 경우 χ^2 -검정(chisquare test)을 이용한다. χ^2 검정은 실험값과 이론값 사이의 편차 정도에 기본을 두지만, 편차로써 검증하는 데는 몇 가지의 불합리한 점이 있어 다음과 같은 식을 이용하여 χ^2 값을 구한다.

$$\chi^2 \text{ 검정} = \sum(O-T)^2/T \quad (O: \text{실험값}, T: \text{이론값})$$

계산된 χ^2 값은 χ^2 -분포표에 있는 χ^2 값과 비교하게 된다. χ^2 -분포표에는 자유도(degree of freedom, df)와 확률(p)의 표시가 있다. 자유도란 실험값의 항목수에서 1을 뺀 수를 말하는데, 본 연구의 자손 2대에서는 두 가지 형질만 나오기 때문에 자유도는 1이다. 그리고 대체로 유의성 판정 기준인 유의수준(p)은 보통 0.05(5%)로 정하는데, 실험에서 얻은 계산된 χ^2 값의 확률이 5% 이상이면 이는 실험값과 이론값 사이의 편차가 우연에 의해 생긴 것으로 보고 두 값이 일치한다는 가설을 받아들인다.

반면 계산된 χ^2 값의 p 가 5% 미만이면 두 값 사이의 차가 유의한 것으로 보고 가설을 받아들이지 않는다.

wt(♂) ⊗ se(♀)의 경우 자손 1대에서는 모두 야생형 초파리만 나왔다. 이 결과를 통해 학생들은 야생형의 빨간 눈과 돌연변이의 암갈색 눈이 대립 형질이고, 야생형의 빨간 눈이 암갈색 눈에 대해서 우성 형질임을 파악할 수 있었다. 그리고 자손 2대에서는 야생형 1056마리, 암갈색 눈 387마리를 얻었으며, χ^2 -검증을 한 결과 자유도=1에서 $\chi^2=2.498$ 로 나왔는데, $p > .05$ 에서 분리의 법칙을 따르는 것으로 나타났다(표 3). 상호교배를 시킨 결과에서도 $p > .05$ 에서 분리의 법칙을 따르는 것으로 나타났다.

표 3. wt(♂) ⊗ se(♀)의 교배 결과

모듬	부모		wt(♂) ⊗ se(♀)		χ^2
	자손 1대		자손 2대		
	wt	se	wt	se	
1	30	0	45	24	3.522
2	65	0	36	20	3.429
3					
4					
5					
6					
23	38	0	23	7	0.044
24	29	0	42	18	0.800
합계	1,149	0	1,056	387	2.498

wt(♂) ⊗ e(♀)의 경우 자손 1대에서는 모두 야생형 초파리만 나왔는데, 이로부터 학생들은 야생형의 갈색 체색이 검은 체색에 대해서 우성 형질임을 파악할 수 있었다. 그리고 자손 2대

표 4. wt(♂) ⊗ e(♀)의 교배 결과

모듬	부모		wt(♂) ⊗ e(♀)		χ^2
	자손 1대		자손 2대		
	wt	e	wt	e	
1	37	0	31	19	4.507
2	81	0	34	13	0.177
3	79	0	33	13	0.61
4	29	0	57	21	0.69
5	104	0	79	22	0.558
6	19	0	24	7	0.097
합계	349	0	258	95	0.742

에서는 야생형 258마리, 검은 체색 95마리를 얻었으며, χ^2 -검증을 한 결과 자유도=1에서 $\chi^2=0.742$ 로 나와 $p > .05$ 에서 분리의 법칙을 따르는 것으로 나타났다(표 4). 상호교배를 시킨 결과에서도 $p > .05$ 에서 분리의 법칙을 따르는 것으로 나타났다.

이러한 교배 결과를 통해서 볼 때 e 및 se를 이용한 분리의 법칙은 교육 현장에서도 통계적으로 의미있게 적용할 수 있다는 것을 보여주었다.

결론 및 제언

본 연구에서는 초파리 야생형과 암갈색 눈 돌연변이 혹은 야생형과 검은 체색 돌연변이를 이용하여 멘델의 분리의 법칙을 성공적으로 확인할 수 있었기 때문에 본 연구 결과는 유전 단위 학습 시 수행이 가능할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 초파리를 이용한 교배 실험을 통해 분리의 법칙을 이해하고자 할 때 예상되는 문제점을 최대한으로 극복하여 학교 현장에서 적용이 가능한 형태로 개발하였다. 본 연구 과정은 다음과 같은 목적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

첫째, 초파리의 배양을 통해 초파리에 관한 다음과 같은 여러 가지 지식적이고 기술적인 내용을 학습할 수 있다. 배지 만들기, 계대 배양, 초파리의 구조 및 생활사, 초파리의 암수 구별 및 미교배 암컷 초파리 구하기, 돌연변이 관찰 등의 내용을 초파리 배양을 통해 자연스럽게 학습할 수 있다. 이와 같은 초파리 배양이 가능하다면 다음 단계로 교배 실험을 진행할 수 있다. 특히 돌연변이 관찰을 통해서 야생형의 형질에 대해 변화된 형질을 파악하여 대립 형질에 대한 개념을 쉽게 가질 수 있으며, 나아가 이러한 형질에 대한 대립 유전자의 개념까지도 이끌어낼 수 있기 때문이다.

둘째, 분리의 법칙을 알아보는 교배 실험의 F₁ 단계에서 우열 관계를 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 야생형과 다른 형질을 가진 순종의 초파리를 교배시켰을 때 F₁에서 발현된 형질이 우성 형질이고, 발현되지 않은 형질이 열성 형질이라는 우열 관계에 대한 개념을 이해하는데 도움이 된다. 이와 같은 우열 관계를 확인하는 교배 실험은 개별적으로도 가능하지만 준비상의 어려움 때문에 모듈별로 실험을 수행하는 것이 보다 타당하다. 본 연구에서 제공하는 매뉴얼을 이용하여 각 시기별로 수행해야 할 단계를 구체적으로 명시한다면 중학교 3학년에서 우열 관계 뿐만 아니라 F₂ 단계까지 진행하여 분리의 법칙을 확인하는 실험을 진행할 수 있다.

셋째, 보다 발전된 단계의 교배 실험으로 교사가 분리의 법칙을 확인하는 실험에 적합한 부모 세대를 학생들에게 알려주고, 학생들이 교배 계획을 세운 다음 이를 진행하는 방법이다. 이 경우 학생들은 초파리의 생활사를 바탕으로 부모 세대 및 자손 1대 초파리를 제거하는 시기 등을 포함한 교배 계획을 세워야 하며, 미교배 암컷 초파리를 구할 수 있어야 한다. 미교배 암컷 초파리를 구할 수 있으면 교배 실험은 매우 수월하게 진행할 수 있다. 이 방법은 중학교 3학년의 상위 수준의 학생이나 고등학교 학생에 적용할 수 있다.

넷째, 가장 심화된 단계의 교배 실험으로 교사는 가이드 역할만 하고 학생들이 스스로 문제를 해결하는 방법이다. 학생들은 수업 시간을 통해 학습한 분리의 법칙에 대한 이해를 바탕으로 어떤 형질의 초파리를 부모 세대로 선정하여 교배시킬 것인가에 대한 고민부터 시작해야 한다. 교배의 목적에 적합하게 부모 세대가 선정되면 교배 계획의 설계 및 미교배 암컷 초파리 구하기 등은 '셋째'에서 언급한 방법과 동일하다. 이 방법을 통한 교배에서는 학생들이 스스로 문제점을 파악하고 이를 해결하는 문제 해결력을 요구하며, 실험을 통해 문제 해결력이 신장된다는 점이다. 이 방법은 고등학교 상위 수준의 학생이나 과학고 학생들에게 적용할 수 있다.

다섯째, 초파리를 이용한 실험은 대학에서의 실험 교육에서도 광범위하게 쓰이기 때문에 본 연구 내용은 대학에서의 유전 실험 교육에도 기여할 것으로 생각된다. 특히 대학에서는 실험 시간이 보다 유연하게 구성될 수 있기 때문에 전 과정을 학생 스스로 독자적으로 수행할 수 있다.

중등교육 현장에서 초파리를 이용한 교배 실험을 수행하는데 있어서 가장 큰 어려움은 여러 가지 실험 재료 및 기구의 구입, 시약 구입 및 용액 준비를 비롯하여 실험을 준비하는 과정이다. 그러나 요즘에는 돌연변이 초파리, 초파리 배지를 비롯한 여러 물품이 상업적으로 시판되고 있다. 따라서 교사의 의지만 강하다면 본 연구에서 제시한 매뉴얼을 이용하여 분리의 법칙을 알아보는 교배 실험을 원활하게 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

ABSTRACT

The principle of heredity by Mendel forms the basis of genetics and is used extensively in the genetics unit of the 9th grade science textbook of the middle school curriculum and Biology I textbook of high school. However, because of several

restrictions the experiments to verify the principle of genetics are complicated. This study develops the manual for experiments to verify the principle of segregation in middle and high schools. The experiment was conducted by 30 groups of students in a Science High School in Seoul. The *Drosophila melanogaster* was used as the model organism. We developed the essential protocols for culturing, crossing, time table, and statistical estimation in detail, and suggested the statistical estimation to verify the cross results. Reciprocal crosses between wild type and *sepia* (or *ebony*) mutant flies were carried out to verify the Mendelian principle of segregation, which showed statistically satisfied results at the level of $p=0.05$. As this experiment cannot be finished within 1 hour because of many procedures, it can be applied in Science High Schools or the extra-curriculum of general high schools. As each step is explained in detail, the program may be used even in the regular class of middle and high school.

Key words: principle of segregation, genetics experiment, *Drosophila* mutant

참고문헌

교육부 (1997) 과학과 교육과정. 교육부 고시 1997-15호.

김규태 (2008) 2007 교사현장연구(AR) 결과 보고서 -과학영재의 창의적 문제 해결력 신장을 위한 유전 및 발생 실험 프로그램의 개발-. 한국과학재단

김윤택, 김정호, 김남일, 백수관, 김병인, 백인호, 배미정, 이용철 (2003) 고등학교 생물II. (주)중앙교육진흥연구소.

박희송, 이홍우, 조경주, 백운성, 김학현 (2003) 고등학교 생물 I. (주)금성출판사.

이광만, 허동, 이경운, 정문호, 방태철, 이기성, 안태근, 정상윤, 복완근, 정익현, 박병훈, 박정일, 정수도, 김경수, 박지극, 송양호, 이천기 (2003) 중학교 과학 3. (주)지학사.

전상학, 권혁빈, 나종길, 정민걸, 조은희 (2003) 유전학의 이해. 라이프사이언스.

한국유전학회 (2004) 유전학실험서. 라이프사이언스

Campbell LA and Reece JB (2006) Biology 7th Ed. Benjamin Cummings.

Ricki Lewis (2005) Human Genetics 6th Ed, McGRAW·HILL.