

잊혀진 전통과 신화화된 ‘고립’: 미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구 활동*

정성욱

서울대학교 과학사 및 과학철학 협동과정

- | | |
|--|--|
| I. 맥클린톡과 그녀에 관한 신화들 | III. 맥클린톡과 옥수수 세포유전학: 초파리 |
| II. 옥수수 유전학 형성의 미국적 맥락:
육종실험가들의 유전학 | 유전학과 공존 그리고 멀어짐 |
| | IV. ‘조절인자’: 보편적 생명원리에 대한
신념, 그리고 ‘고립’ |

I. 맥클린톡과 그녀에 관한 신화들

바바라 맥클린톡(Barbara McClintock, 1902-1992)은 1902년 6월 16일 코네티컷의 하트포트에서 태어나 1992년 9월 2일 뉴욕의 헌팅턴에서 사망하기까지 20세기 미국 유전학의 역사를 온전히 살았던 옥수수 유전학자였다. 평생을 옥수수와 씨름했던 맥클린톡은, 코넬 대학에서 식물유전학으로 박사학위를 받은 1927년부터 옥수수에서 전이인자(transposable element)¹⁾를 발견한 1950년대까지 유전학사에 길이

* 이 글의 초고는 2008년에 열린 과학사학회와 2009년에 열린 ISHPSSB에서 발표한 바 있다. 이 글을 작성하는 데 날카로운 비판과 격려를 해주신 홍성욱, 임종태, 정혜경, 선생님과 박민아, 김봉국, 서민우, 정동욱, 김자경 학형에게 감사드린다. 그리고 논지를 정교하게 다듬는 데 도움을 주신 익명의 심사위원들께도 감사드린다.

1) 오늘날의 생물학 교과서에서 전이인자는 보통 트랜스포손(transposon)이라는 명칭으로 소개된다. 하지만 트랜스포손은 전이인자가 옥수수 이외의 다른 많은 생명체에서 발견

남을 많은 업적을 남겼으며, 1983년에는 전이인자를 발견한 공로로 노벨 생리의학상을 수상했다.²⁾

맥클린톡의 삶은 그녀의 전기를 다룬 켈러(Evelyn F. Keller)의 책 『생명의 느낌(*A Feeling For the Organism*)』이 1983년에 출판되면서 대중에게 널리 알려졌다. 현대 분자생물학을 비판적인 시각으로 보았던 켈러는 맥클린톡의 과학 활동을 묘사함으로써 분자생물학을 대체할 새로운 생물학의 모습을 그려내고자 했다. 그녀는 분자생물학의 특징을 이성적, 조작주의적, 환원주의적이라고 규정하고 맥클린톡이 추구했던 과학을 직관적, 자연주의적, 전일주의적이라고 규정함으로써 후자를 대

되면서 새롭게 붙여진 명칭이다. 1950년대 초 옥수수에서 전이인자가 발견되었을 때, 맥클린톡은 이를 처음에는 전이인자로 그리고 얼마 뒤에는 조절인자(controlling element)로 이름 붙였다. 그녀가 전이인자 대신 조절인자라는 용어를 사용한 것은 전이인자가 발생을 조절하는 역할을 한다는 강한 믿음 때문이었다. 이 글에서는 오늘날에 사용되는 트랜스포손 대신 당시에 쓰였던 전이인자라는 용어를 주로 사용할 것이다. 하지만 맥락상 조절이 강조될 경우에는 조절인자라는 용어를 사용할 것이다. 전이인자에 대해서는 4절에서 구체적으로 설명할 것이다.

- 2) 지금까지 두 권의 맥클린톡 전기가 출판되었으며, 모두 번역되었다. 이블린 폭스 켈러 지음, 김재희 옮김, 『생명의 느낌』 (양문, 2001) [Evelyn F. Keller, *A Feeling For the Organism: The Life and Work of Barbara McClintock* (New York: Freeman, 1983)]; 나타니엘 C. 컴포트 지음, 한국유전학회 옮김, 『옥수수 발의 처녀 맥클린톡』 (전과과학사, 2005) [Nathaniel C. Comfort, *The Tangled Fidd: Barbara McClintock's Search for the Patterns of Genetic Control* (Cambridge: Harvard Univ. Press, 2001)]. 이 중 『생명의 느낌』은 비교적 잘 번역되어 있으나, 『옥수수 발의 처녀 맥클린톡』은 오역과 빠진 부분이 많다. 그래서 본 논문에서는 켈러의 책은 주로 번역본을, 그리고 컴포트의 책은 주로 원서를 참조했으며, 이 글에서는 컴포트 책의 제목을 『맥클린톡의 옥수수 발』이라고 번역했다. 맥클린톡의 과학 연구를 분석한 논문으로는 다음의 것들이 있다. Nathaniel C. Comfort, *Breakage, Fusion, Bridge: The Discovery and Reception of Barbara McClintock's Controlling Elements* (Ph.D. Dissertation, State University of New York, 1997); Comfort, ““The Real Point is Control”: The Reception of Barbara McClintock's Controlling Elements,” *Journal of the History of Biology* 32 (1999), pp. 133-162; Carla Keirns, “Seeing Patterns: Models, Visual Evidence and Pictorial Communication in the Work of Barbara McClintock,” *Journal of the History of Biology* 32 (1999), pp. 163-196. 맥클린톡이 사망한 해인 1992년에 그녀의 업적을 기념하는 책이 출판되었다. Nina Fedoroff and David Botstein, eds., *The Dynamic Genome: Barbara McClintock's Ideas in The Century of Genetics* (Cold Spring Harbor, N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1992) 여기에는 맥클린톡과 옥수수 유전학에 대한 회고, 맥클린톡의 주요 논문 및 노벨상 강연문, 그리고 맥클린톡의 주요 업적인 전이현상에 대한 분자생물학적 분석을 담은 동료 유전학자들의 글 등이 수록되어 있다. 미 국립보건원(NIH)의 인터넷 홈페이지에는 맥클린톡의 출판 논문, 서신, 연구 노트 등의 아카이브가 대부분 올라와 있다. “Profiles in Science, The Barbara McClintock Papers”, <http://profiles.nlm.nih.gov/LL/> (2010. 6. 2 접속)

안적 생물학의 특징으로 제시했다.³⁾

그러나 켈러의 책은 맥클린톡의 목소리를 거의 무비판적으로 수용했다는 중요한 약점을 가지고 있었다. 이는 켈러가 맥클린톡의 연구 활동이 가진 특징을 그려나가는 데 있어, 맥클린톡의 연구노트와 논문에 대한 분석이 아닌 그녀와의 인터뷰에만 주로 의존했기 때문에 생긴 문제였다. 이로 인해 켈러의 책은 두 가지 비판을 피할 수 없게 되었다. 하나는 당시 주류 유전학계를 비판적으로 묘사했던 맥클린톡의 언급을 그대로 수용함으로써 그녀가 당시 유전학과 거의 분리되어 있었던 것처럼 서술했다는 것이고, 다른 하나는 맥클린톡의 유전학이 가진 특징을 스스로 강조했던 ‘옥수수과 일체감을 느낀’ 그녀의 내적 성향으로만 설명하려 했다는 것이다. 즉 켈러는 맥클린톡의 고립이 “사물을 이해하고 지식을 얻는 [맥클린톡의] 방식 자체가 위낙 독특”한 데서 비롯되었다고 주장했다.⁴⁾



〈그림 1〉 바바라 맥클린톡
[출처: http://profiles.nlm.nih.gov/LL/B/B/Q/Q/_/llbbqq.jpg.]

컴포트(Nathaniel C. Comfort)는 켈러의 책이 가진 이런 문제들을 인식하고, 이로 인해 생긴 맥클린톡의 ‘신화’를 벗겨내고자 했다. 그는 맥클린톡이 남긴 방대한 양의 자필 메모와 발표된 논문 그리고 서신 등을 꼼꼼하게 분석하여, 2001년에 맥클린톡의 삶을 재조명한 『맥클린톡의 옥수수 밭(The Tangled Field)』을 출판했다. 컴포트는 켈러의 책이 만든 맥클린톡의 신화를 맥클린톡 자신이 만들어낸 ‘사적 신화’와 여성주의자들이 만들어낸 ‘공적 신화’로 구분했다. 전자가 맥클린톡 자신의 비전이자 다른 사람에게 보이고 싶어 한 자신의 모습이라면, 후자는 맥클린톡을 새로운 과학자의 표상으로 삼고자 한 여성주의자들 혹은 일부의 과학자들이 ‘사적 신화’를 자신들의 방식으로 변형한 것이다. 그는 진실과 허구가 혼재되어 있는

3) 많은 여성주의자들은 켈러의 책에서 ‘남성적’인 근대과학과 뚜렷이 대비되는 새로운 과학의 모습을 읽었으며, 그것을 여성주의 과학이라고 생각하지만, 켈러 자신은 그녀가 제안한 대안적 과학에 여성주의 과학이라는 딱지가 붙는 것을 경계하며, 자신은 남성주의 과학과 여성주의 과학을 구분하고 후자를 긍정한 것이 아니라 젠더를 초월한(gender-free) 과학의 모습을 그리고자 했다고 말했다. Evelyn Fox Keller, “A World of Difference,” *Reflections on Gender and Science* (New heaven and London: Yale University Press, 1985), pp. 158-178.

4) 켈러, 『생명의 느낌』, 250쪽.

맥클린톡의 ‘신화’를 벗겨내기 위해서는 맥클린톡의 과학에 대한 구체적인 내용적 이해가 필수적이라고 주장했다.⁵⁾

컴포트는 맥클린톡의 연구 내용을 구체적으로 분석함으로써 그녀가 당시의 주류 유전학계와 분리되어 있었던 인물이 아니라 오히려 그 핵심 일원 중 한명이었음을 보였다. 그가 그린 맥클린톡의 모습은 크게 두 가지 측면에서 켈러의 그림과 대비된다. 첫째, 맥클린톡의 주요업적인 전이인자가 당시 유전학계에서 완전히 무시되었다고 주장한 켈러와 달리, 컴포트는 전이인자가 완전히 무시되지는 않았다고 주장했다. 컴포트에 따르면, 당시 상당수의 유전학자들이 전이인자를 수용했다. 둘째, 맥클린톡의 ‘전일주의적’ 연구 방법론을 당시 주류 유전학자들의 ‘환원주의적’ 연구 방법론과 대조시켰던 켈러와 달리, 컴포트는 맥클린톡이 당시의 여느 과학자들과 마찬가지로 합리적인 경험주의자였으며 조작과 분석에 능한 실험주의자였다고 주장했다. 그에 따르면, 실험재료를 인위적으로 선별하고 조작한 그녀의 방법론은 다른 과학자들과 본질적으로 다르지 않았다. 이를 통해 컴포트의 연구는 맥클린톡이 당시 주류 유전학과 깊이 연관되어 있었음을 보여주는 데 어느 정도 성공을 거두었다.⁶⁾

그러나 컴포트는 전이인자가 발견된 이후의 맥클린톡의 행보에 관해서는 켈러와 같은 종류의 신화를 만들어 내는 한계를 보였다. 그는 맥클린톡이 전이인자를 발견한 이후 태도를 완전히 바꾸었다고 주장했는데, 이는 다음과 같은 언급에서 확인할 수 있다.

통합론자들(lumpers)은 생명체 혹은 현상들 사이에서 연관관계를 보려는 경향이 있다. 그들은 데이터를 그룹화하여 이론으로 종합시킨다. 세분론자들(splitters)은 차이를 본다. 그들은 분석가이자 관찰자이다. 맥클린톡은 세분론자로서 명성을 쌓아왔다. 그녀의 예리한 눈에는 따라올 사람이 없었고, 독특한 유전적 현상을 파헤치는 실험을 고안하는 데 탁월한 기술을 가지고 있었다. 그러나 그녀는 점점 통합론자가 되어갔다. 아마도 그것은 그녀의 자연적인 성향(natural bent)이었고, 특별히 그녀가 대학에서 배운 전통적인 박물학과 발생 메커니즘에 의해 촉진되었을 것이다.⁷⁾

이러한 언급은 컴포트가 켈러와 마찬가지로 맥클린톡의 고립을 그녀의 내적 성

5) Comfort, *The Tangled Field*, pp. 1-16.

6) Comfort, *The Tangled Field*, pp. 8-10.

7) Comfort, *The Tangled Field*, p. 124.

향으로 설명하고 있음을 보여준다. 전이인자가 실험적으로 증명된 것은 그것이 ‘움직이는 유전자’라는 사실 뿐이지만, 맥클린톡은 실험적 증거 없이 상상력을 발휘하여 그것을 발생을 조절하는 ‘조절인자’라고 주장했고, 그것은 맥클린톡의 ‘자연적인 성향’에서 비롯되었다는 것이다.

결국 컴포트는 맥클린톡이 전이인자를 발견하기 전인 1940년대까지 그녀가 주류 유전학의 일원으로 활동했음을 보여줌으로써 켈러가 만든 전일주의 혹은 여성주의 신화를 벗겨냈지만, 전이인자를 발견한 이후 즉 맥클린톡 자신이 ‘고립’되었다고 느낀 시기를 설명할 때는 켈러와 마찬가지로 맥클린톡 개인적 특성이나 내적 성향에 의존하는 모습을 보였다. 이런 설명이 문제가 되는 이유는 내적 성향에 의존했다는 것 자체에 있는 것이 아니라, 그런 성향을 가지게 된 원인을 충분히 설명하지 못했다는 데 있다.

컴포트가 맥클린톡의 내적 성향만을 강조한 신화 만들기에서 완전히 벗어나지 못한 이유는 무엇일까? 그것은 컴포트가, 켈러와 마찬가지로, 발생에 대한 맥클린톡의 관심이 당시 주류 유전학에서는 찾아 볼 수 없는 독특한 것이었다는 인식을 가지고 있었기 때문인 것으로 보인다. 이에 더해서 컴포트는 ‘조절인자’에 대한 맥클린톡의 주장이 다른 유전학자들에게 받아들여지지 않은 것은 ‘그것이 실험적으로 증명되지 못했기 때문’이라고 단순히 설명하고 있는데, 이는 과학자 사회에 대한 컴포트의 인식이 지나치게 소박하다는 인상을 준다. 즉, 컴포트는 과학자 사회를 합리적이고 실증적인 실험 증거만이 수용되고, 그것에 의해 발전하는 ‘동질적인 집단’으로 인식함으로써 실험재료와 연구 방법에 따라 크고 작은 견해차를 보였던 당시 유전학계의 복잡한 실상을 이해하지 못했고, 또 그것을 가리는 결과를 낳았던 것이다.⁸⁾

따라서 맥클린톡이 속해 있었던 20세기 초중반 미국의 유전학계를 자세히 살펴봄으로써 그것이 하나의 동질적인 집단이 아니었음을 보여주는 것은 맥클린톡의 연구 활동, 특히 그녀의 ‘고립’을 설명하는 데 중요한 열쇠가 될 것이다. 실제로 당시 미국의 유전학계에는 적어도 두 개의 전통이 존재했다. 하나는 옥수수를 재료로 삼았던 옥수수 유전학 전통이고 다른 하나는 초파리를 재료로 삼았던 초파리 유전학 전통이다. 두 유전학 전통은 전통을 구성하는 세 가지 요소, 즉 제도적

8) Comfort, *The Tangled Fidd*, pp. 157-186. 라스무센도 이와 비슷한 비판을 제기했다. John Beatty and Nicolas Rasmussen and Nils Roll-Hansen and Nathaneil C. Comfort, “Untangling the McClintock Myths,” *Metascience* 11 (2002), pp. 291-292.

기반, 이론적 관심 그리고 실험재료에서 모두 차이를 보였다. 우선, 초파리 유전학은 대학의 생물학 실험실에서 탄생했던 데 반해 옥수수 유전학은 육종실험을 주로 했던 농업시험소에서 출발했다. 둘째, 초파리 유전학의 주요한 이론적 관심은 유전자의 위치 및 그것의 표현형적 특성을 결정하는 데 있었던 데 반해 옥수수 유전학은 염색체의 행동과 형질변화의 관계에 있었다. 그리고 셋째 초파리와 옥수수의 생물학적 특성은 두 유전학을 서로 다른 방향으로 이끌어 갔다. 이처럼 초파리 유전학과 옥수수 유전학이 서로 다른 성격을 가지고 있었음에도 불구하고, 지금까지 미국의 옥수수 유전학 전통은 거의 연구된 바가 없었다.

이에 나는, 미국 유전학사에서 가려진 옥수수 유전학 전통을 드러내고 맥클린톡을 그 전통 속에 위치지음으로써 맥클린톡과 초기 미국 유전학의 모습을 재조명하고자 한다. 구체적으로, 20세기 초에 형성된 미국 옥수수 유전학 전통을 드러내고, 맥클린톡을 그 맥락에 위치시킬 때 켈러와 컴포트가 잘 설명하지 못했던 발생에 대한 그녀의 관심, 전이인자의 동시발견, 그리고 맥클린톡의 ‘고립’ 등을 자연스럽게 설명할 수 있다는 것을 보여줄 것이다. 더불어, 이 논문을 통해 나는, 미국 유전학의 역사를 여러 유전학 전통이 서로 경쟁하고 공존하면서 발전해온 역사로서 서술할 수 있는 가능성을 열어놓고자 한다.

II. 옥수수 유전학 형성의 미국적 맥락: 육종실험가들의 유전학

최근에 발표된 몇몇 과학사학자들의 연구는 20세기 초에 재발견된 멘델법칙이 미국과 프랑스, 독일 등에 수용되는 데에 육종실험가들의 공헌이 매우 컸음을 보여주었다.⁹⁾ 이들의 연구는 미국에서 옥수수 유전학이 형성되던 과정의 특징을 살

9) 멘델리즘의 수용과 유전학의 형성과정을 각 나라의 농업제도 및 육종실험가들의 활동의 맥락에서 조명한 연구로는 다음의 것들이 있다. Christophe Bonneuil, “Mendelism, Plant Breeding and Experimental Cultures: Agriculture and the Development of Genetics in France,” *Journal of the History of Biology* 39 (2006), pp. 281-308; Jonathan Harwood, “National Styles in Science: Genetics in Germany and the United States between the World Wars,” *Isis* 78 (1987), pp. 390-414; Diane B. Paul and Barbara A. Kimmelman, “Mendel in America: Theory and Practice, 1900-1919,” Ronald Rainger, Keith R. Benson, Jane Maienschein, eds., *The American Development of Biology* (New Brunswick and London: Rutgers University Press, 1988), pp. 281-300; Paolo Palladino, “Wizards and Devotees: On the Mendelian Theory of Inheritance and the

피는 데 좋은 길잡이가 된다. 옥수수 유전학의 형성만큼 국가적 맥락과 육종실험가들의 역할이 중요했던 사례는 찾아보기 어렵기 때문이다. 미국에서 옥수수 유전학이 형성되던 과정을 살펴볼 때 중요하게 지적해야 할 미국적 특징은 두 가지이다. 하나는 미국에서는 유럽과 달리 19세기 말까지도 생물학이 대학에 안정적으로 자리 잡지 못했다는 것이고,¹⁰⁾ 다른 하나는 19세기 말부터 막대한 재정적 지원을 바탕으로 농업 과학화 정책이 진행되었다는 것이다.¹¹⁾ 이러한 배경에서 미국의 육종실험가들은 유럽과 달리 대학의 생물학자들과 큰 갈등을 빚지 않고 자신들의 방식대로 멘델리즘을 수용할 수 있었으며, 동시에 국가로부터 풍부한 재정적 지원도 받을 수 있었다.¹²⁾ 이러한 배경에서 활동한 옥수수 유전학자들에게 유전학과 육종, 즉 이론연구와 그 적용은 서로 분리된 것이 아니었다. 초기 옥수수 유전학자들은 거의 대부분 옥수수 육종에 대한 관심을 유전현상에 대한 이론적 관심으로 확장시킨 인물들이었으며, 이들이 형성한 옥수수 유전학에는 육종전통의 영향이 강하게 남아 있었다.¹³⁾ 옥수수 유전학 전통의 이러한 분위기를 살펴

Professionalization of Agricultural Science in Great Britain and the United States, 1880-1930,” *History of Science* 32 (1994), pp. 409-444; Palladino, “Between Craft and Science: Plant Breeding, Mendelism Genetics, and British University, 1900-1920,” *Technology and Culture* 34 (1993), pp. 300-323; Thomas Wieland, “Scientific Theory and Agricultural Practice: Plant Breeding in Germany from the Late 19th to the Early 20th Century,” *Journal of the History of Biology* 39 (2006), pp. 309-343.

10) Philip J. Pauly, “The Appearance of Academic Biology in Late Nineteenth-Century America,” *Journal of the History of Biology* 17 (1984), pp. 369-397.

11) 19세기 말과 20세기 초의 미국의 농업정책(육종정책)에 관해서는 다음의 논문을 참조하라. Charles E. Rosenberg, “Science, Technology, and Economic Growth: The Case of the Agricultural Experiment Station Scientist, 1875-1914,” *No Other Gods: On Scientific and American Social Thought* (Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press, 1976), pp. 153-172; Margaret W. Rossiter, “The Organization of the Agricultural Sciences,” Alexandra Oleson & John Voss, eds., *The Organization of Knowledge in Modern America, 1860-1920* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1979).

12) Harwood, “National Styles in Science”; Bonneuil, “Mendelism, Plant Breeding and Experimental Cultures”.

13) 미국의 유전학 형성에 관한 연구는 다음의 것들이 있다. Charles E. Rosenberg, “The Social Environment of Scientific Innovation: Factors in the Development of Genetics in the United States,” *No Other Gods*, pp. 211-224; R. Falk, “The Struggle of Genetics for Independence,” *Journal of the History of Biology* 28 (1995), pp. 219-246; Scott F. Gilbert, “Cellular Politics: Ernest Everett Just, Richard B. GoldSchmidt, and the Attempt to Reconcile Embryology and Genetics,” *The American Development of Biology* (New Brunswick and London: Rutgers University Press, 1988), pp. 311-346; Paul and Kimmelman, “Mendel in America”.

보는 것은 맥클린톡을 이해하는 데 중요한 배경지식을 제공해 준다.

농업 과학화 정책과 농업시험소: 옥수수 유전학의 제도적 기반

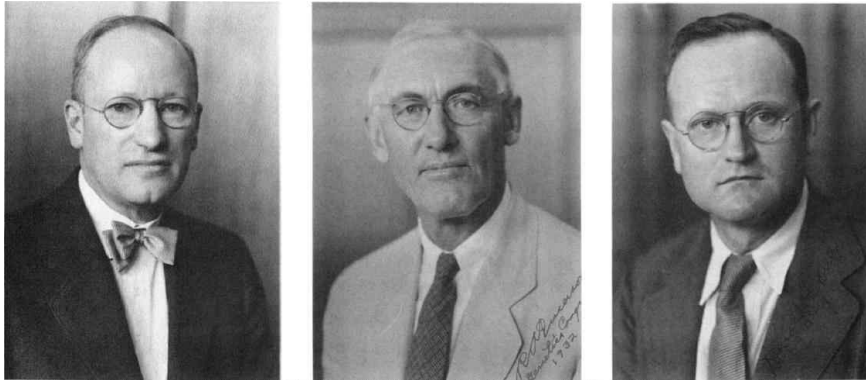
육종에 대한 관심에 기반을 둔 옥수수 유전학 전통은 19세기 말 미국에서 진행된 농업 과학화 정책을 기반으로 형성되었다. 미국 정부가 농업의 과학화를 적극적으로 추진하게 된 계기는 1884년에 발생한 세계적인 밀 가격 폭락이었다. 밀 생산에 편중된 미국 농업이 가격 폭락으로 인해 심각한 경제적 손실을 입게 되자 정부는 밀 생산 위주의 농업을 지양하고, 품목의 다양화와 품종 개량을 위한 농업 과학화 정책을 추진하기 시작했다. 이는 주로 미 농무부(United States Department of Agriculture), 농업대학(Agriculture College), 농업시험소(Agricultural Experiment Station)에 대한 재정 지원으로 나타났다.¹⁴⁾

이중 농업시험소는 옥수수 유전학 전통을 형성하는 데 중요한 영향을 미쳤다. 농업시험소의 초기 설립 목적은 농업을 합리적으로 체계화하여 농산물의 시장 경쟁력을 높이는 것이었다. 따라서 농업시험소 연구자들의 활동은 농민들의 요구와 직접적으로 연결되어 있었고, 이들이 연구에 투자할 수 있는 시간은 매우 부족했다. 그들은 이러한 문제를 극복해 보고자 19세기 말부터 농업 발전을 위해서는 순수연구(original research)가 중요하다는 것을 강조하기 시작했으며, 이를 관철시키기 위해 여러 정치적 활동을 펼쳤다. 그러나 그들의 주장이 받아들여지는 데는 한계가 있었다.¹⁵⁾

순수연구의 중요성을 강조한 농업시험소 연구자들의 주장이 점차 수용되기 시작한 것은 20세기에 들어서면서부터였다. 1900년에 재발견된 멘델법칙이 육종실험가들에 의해 미국에 수용되고, 이것이 육종의 이론적 토대가 될 것이라는 기대

14) 1880년대에 미 농무부에 지원된 특별지출금(appropriation bill)은 크게 증가했으며, 1875년 코네티컷에 처음 설립된 이후로 많은 지역에서 농업대학의 부속 연구기관으로 설립되던 농업시험소 역시 1887년에 통과된 해치 법안(Hatch Act)에 따라 연간 1만 5천 달러를 지원받게 되었다. 1890년에 농업대학을 지원하기 위한 제2차 해치 법안(second Hatch Act)이 통과되고, 1906년에 농업시험소에 대한 연간 지원을 3만 달러로 늘린 아담스 법안(Adams Act)이 통과되면서 농업의 과학화에 대한 정부의 지원은 절정에 달했다. Paul and Kimmelman, "Mendel in America".

15) Rosenberg, "Science, Technology, and Economic Growth," pp. 153-158.



〈그림 2〉 왼쪽부터 이스트(E. M. East), 에머슨(R. A. Emerson), 존스(D. F. Jones). 1932년 코넬 대학에서 열린 국제 유전학 대회(International Congress of Genetics)에 참석했을 때 찍은 사진 [출처: Oliver E. Nelson, “A Notable Triumvirate of Maize Geneticists,” *Genetics* 135 (1993), p. 938.]

가 농부들 사이에서 확산되자, 농업 발전을 위해서는 순수연구가 필수적이라는 이들의 주장이 강한 설득력을 가지게 된 것이다. 결국 농업시험소에 대한 지원금이 순수연구에 사용되어야 한다는 내용을 포함한 아담스 법안(Adams Acts)이 1906년에 통과되었고, 이후 농업시험소는 농부들에게 자문을 제공하는 ‘모델 농장’에서 유전학을 연구하는 공간으로 변모하게 되었다. 이러한 과정에서 소속 연구자들의 관심은 점차 육종실험에서 유전이론으로 확장되었다.¹⁶⁾

미국의 옥수수 유전학 전통은 바로 이 시기에 형성되었다. 옥수수 유전학의 양대 학파를 창시한 이스트(E. M. East)와 에머슨(R. A. Emerson)이 농업시험소에 자리 잡고 유전학에 관심을 가지기 시작했던 시기가 바로 그 무렵이었던 것이다. 이스트와 에머슨은 모두 1900년경에 농업시험소에 자리를 잡았으며 1910년 이전까지는 주로 육종실험에 관한 논문을 발표했으나, 옥수수의 양적유전이 멘델법칙으로 설명될 수 있음을 깨달은 1910년 이후부터는 멘델법칙을 육종에 적용하는 데 점차 깊은 관심을 보이며 유전학 분야에 발을 들여놓기 시작했다.¹⁷⁾ 이스트와 에머

16) Rosenberg, “Science, Technology, and Economic Growth,” pp. 158-172.

17) E. M. East, “The Practical Use of Mendelism in Corn Breeding,” *Annual Report to Connecticut Agricultural Experiment Station* (1907), pp. 406-418. 이 논문은 옥수수 육종에 멘델법칙을 적용하려 했던 이스트의 태도를 잘 보여준다. 이스트가 발표한 논문의 목록은 존스가 쓴 이스트에 대한 짧은 전기의 말미에 수록되어 있다. D. F. Jones, “Edward Murray East,” *National Academy of Science: A Biographical Memoirs* 23 (1944), pp. 234-242. 로즈는 에머슨이

슨은 각각 1909년과 1914년에 농업시험소를 떠나 하버드 대학과 코넬 대학에 자리를 잡고 옥수수 유전학의 양대 학파인 이스트 학파(East School)와 에머슨 학파(Emerson School)를 만들었다.¹⁸⁾

이중 에머슨은 옥수수 유전학 전통이 만들어지는 데 특히 중요한 역할을 했다. 옥수수 유전자의 연관 지도를 작성하고 옥수수 육종 작업의 이론적 토대를 제공하는 데 옥수수 유전학자들 간의 협동 작업이 필수적이라고 생각한 그는, 1928년 12월에 열린 미국과학진흥협회의 연례 모임에 참석한 약 20여 명의 옥수수 유전학자들을 중심으로 옥수수 유전학 협동 그룹(Maize Genetics Cooperation, 이하 옥수수 유전학 그룹)을 만들었다. 옥수수 유전학 그룹은 『옥수수 유전학 협동 그룹 소식지(Maize Genetics Cooperation News Letter)』(이하 『옥수수 그룹 소식지』)를 발간하여 옥수수 유전학에 관련된 미출판 논문을 포함한 여러 정보를 공유하고 연구 과제를 분담했다. 또한 코넬 대학에 옥수수 저장 센터(Maize Stock Center, 이하 종자 센터)를 만들어 실험에 필요한 옥수수 종자를 보관하고 분배했다. 옥수수 유전학자들은 옥수수 유전학 그룹을 만듦으로써 실험재료와 연구 방법 및 관심을 공유했던 것이다.¹⁹⁾

1902년에 발표한 논문인 “Preliminary Account of Variation in Bean Hybrids,” *Annual Report to Nebraska Agricultural Experiment Station* (1902)는 에머슨이 당시 멘델법칙을 깊이 이해하고 있었음을 보여준다고 언급했다. M. M. Rhodes, “Rollins Adams Emerson,” *National Academy of Science: A Biographical Memoirs* 25 p. 315. 에머슨의 발표 논문 목록은 다음을 참조하라. Rhodes, “Rollins Adams Emerson,” pp. 320-323.

18) 이스트와 에머슨에 관해서는 다음을 참고하라. Jones, “Edward Murray East,” pp. 217-242; Rhodes, “Rollins Adams Emerson,” pp. 313-323; Oliver E. Nelson, “A Notable Triumvirate of Maize Geneticists,” *Genetics* 135 (1993), pp. 937-941.

19) 『옥수수 그룹 소식지』는 지금까지도 계속 발간되고 있으며, 현재는 온라인 데이터베이스가 구축되어 있다. “MaizeGDB, Maize Newsletter Archives”, <http://www.maizegdb.org/mn1.php> (2010. 6. 2 접속). 『옥수수 그룹 소식지』의 초대 편집장은 비들(G.W. Beadle)이 맡았으며, 일 년 뒤에 비들이 코넬을 떠나자 로즈가 그 자리를 이었다. 맥클린톡 역시 옥수수 그룹의 초대 회원이었다. 옥수수 저장 센터 설립과 『옥수수 그룹 소식지』의 출판은 록펠러 재단의 지원을 받아 이루어졌으며, 록펠러 재단의 지원은 1953년까지 지속되었다. 그 해에 옥수수 저장 센터는 코넬 대학에서 일리노이 대학으로 이전되었으며 이때부터는 NSF의 지원을 받았다. 『옥수수 그룹 소식지』의 출판은 종자회사로부터도 재정적 지원을 받았다. 옥수수 그룹과 『옥수수 그룹 소식지』의 역사에 관해서는 다음을 참조하라. Lee B. Kass, Christophe Bonneuil, Edward H. Coe, Jr., “Cornfest, Cornfabs and Cooperation: The Origins and Beginnings of the Maize Genetics Cooperation News Letter,” *Genetics* 169 (2005), pp. 1787-1797.

이스트와 에머슨은 농업시험소를 벗어나 대학에 자리를 잡고 옥수수 유전학을 정립시키는 과정에서 유전이론에 점차 많은 관심을 보였지만, 육종은 이들에게 여전히 중요한 관심사였다. 이를 보여주는 가장 뚜렷한 증거는 이들이 20세기 미국 농업 과학화 정책의 최고 성과물이라고 일컬어지는 잡종옥수수 개발에 핵심적인 공헌을 했다는 사실이다.²⁰⁾ 이스트와 에머슨 그리고 이스트의 제자였던 존스(D. F. Jones)는 잡종옥수수의 개발 과정에서 이론적으로 중요한 공헌을 한 동시에 육종프로그램을 만듦으로써 잡종옥수수를 생산하는 데에도 핵심적인 공헌을 했다.²¹⁾ 이들이 잡종옥수수 개발의 일등공신이었다는 사실은 초기 옥수수 유전학자들에게 유전이론과 육종실험이 서로 분리된 문제가 아니었음을 보여준다. 즉 미국의 초기 옥수수 유전학자들은 옥수수 육종의 과학화를 위해 멘델리즘을 수용했으며, 그렇게 수용된 멘델리즘은 육종실험에 적용될 수 있는 형식으로 수정되었고, 이는 다시 옥수수 유전학 형성되는 데 이론적 토대가 되었던 것이다.

육종실험가들의 멘델법칙 수용: 육종을 위한 이론적 도구

오스트리아의 성직자이자 잡종실험가였던 멘델(Gregor J. Mendel)은 완두콩의 잡종실험을 통해 얻은 결과를 몇 가지 법칙으로 정리하여 이것을 1866년 『브린 자연사학회지(*Proceedings of the Natural History Society of Brinn*)』에 “식물의 교잡에 관한 실험”이라는 제목으로 발표했으나, 별다른 주목을 받지 못했다. 이후 30여년이 흐른 1900년 멘델의 논문은 휘호 더프리스(Hugo De Vries)와 칼 코렌스(Carl Correns)에 의해 ‘재발견’되었다.²²⁾ 그러나 멘델의 잡종실험과 그 목적에 대한 해석이 매

20) 유전학자이자 유전학사가인 던(L. C. Dunn)은 잡종옥수수 개발을 유전학의 최고 성과로 평가했다. L. C. Dunn, *A Short History of Genetics: The Development of Some of The Main Lines of Thought: 1864-1939* (New York: McCraw-Hill, 1965), p. 125. 잡종옥수수 개발의 역사에 대한 자세한 내용은 다음을 참조하라. M. T. Jenkins, “Maize Breeding During The Development And Early Years of Hybrid Maize,” David B. Walden, ed., *Maize Breeding and Genetics* (New York: John Wiley&Sons, 1977), pp. 13-28; H. K. Hayes, *A professor's story of hybrid corn* (Minneapolis: Burgess, 1963); F. D. Richey, “Corn Breeding,” *Advances in Genetics* 3 (1950), pp. 159-192; M. T. Jenkins, “Corn Improvement,” *U. S. Department of Agriculture Yearbook of Agriculture* (1936), pp. 455-522.

21) Paul C. Mangelsdorf, “Donald Forsha Jones,” *National Academy of Science: A Biographical Memoirs* 46 (1975), pp. 136-138.

우 다양했기 때문에 더프리스의 업적을 단순히 멘델법칙의 ‘재발견’이라고 평가하기는 어렵다. 더프리스가 ‘재발견’했다고 알려진 멘델법칙 역시 그에 대한 더프리스의 해석이라고 볼 수 있기 때문이다.²³⁾ 즉 멘델법칙은 단순히 ‘재발견’된 것이 아니라 수용자에 의해 해석된 측면이 크다.²⁴⁾ 초기 옥수수 유전학자들이 멘델리즘을 수용한 방식도 이러한 관점에서 바라볼 수 있다.

20세기 초 미국에서 멘델법칙을 적극적으로 수용한 이들은 주로 육종실험가들이었다. 1902년 뉴욕에서는 8월 30일에서 9월 2일까지 나흘간의 일정으로 ‘식물 육종과 잡종에 관한 국제 학술회의’(International Conference on Plant Breeding and Hybridization)가 열렸는데,²⁵⁾ 이를 주도했던 베이트슨(William Bateson)은 회의에 참석한 육종실험가들에게 멘델법칙을 과학적 육종을 위한 기초지식으로 교육했다. 멘델법칙이 과학적 육종의 이론적 토대가 될 수 있음을 인식한 육종실험가들은

22) 멘델법칙을 재발견한 인물은 보통 더프리스와 코렌스 그리고 체르막(Erich Tschermak von Seysenegg)으로 알려져 있지만, 슈테른(Curt Stern)과 셔우드(Eva R. Sherwood)는 더프리스, 코렌스와 달리 체르막은 멘델법칙을 제대로 이해하지 못했다고 그를 재발견자의 자리에서 빼 버렸다. Curt Stern and Eva R. Sherwood, *The Origin of Genetics* (San Francisco: Freeman, 1966), p. 61.

23) 샵(Jan Sapp)은 이를 “그레고리 멘델의 아홉 가지 삶”이라는 제목으로 표현한바 있다. Jan Sapp, “The Nine Lives of Gregor Mendel,” H. E. LeGrand, ed., *Experimental Inquiries* (Dordrecht: Kluwer, 1990), pp. 137-166. 유전학의 창시자들인 더프리스, 베이트슨(William Bateson), 요한센(Wilhelm L. Johannsen), 모건(Thomas H. Morgan) 등을 재평가한 파크(Falk)는 멘델의 실험에 대한 해석이 그 주제로 씌어진 논문의 수만큼이나 다양하다고 말했다. Raphael Falk, “The Struggle of Genetics for Independence,” p. 219. 1990년과 1991년에는 모나핸과 콜커스(Monaghan&Corcos) 그리고 파크와 사카(Falk&Sarkar) 사이에 멘델의 실험에 대한 논쟁에 있었다. 모나핸과 콜커스는 멘델의 실험이 유전법칙이 아니라 잡종발생의 법칙을 발견하기 위한 데이터를 제공한 것이었다고 평가했으나, 파크와 사카는 이러한 견해에 반대하여 멘델은 분명히 자신이 행한 실험의 이론적 의미를 알고 있었으며, 보편적 가설의 틀 내에서 유전법칙을 공식화하려고 했다고 주장했다. 덧붙여 그들은 멘델이 실험 데이터로부터 보편적인 결론을 추론하는 데 본래적인 한계가 있음도 깨달았다고 말했다. Floyd Monaghan and Alain Corcos, “The Real Objective of Mendel’s Paper,” *Biology and Philosophy* 5 (1990), pp. 267-292; R. Falk and S. Sarkar, “The Real Objective of Mendel’s Paper: A Response to Monahan and Corcos,” *Biology and Philosophy* 6 (1990), pp. 447-451.

24) Raphael Falk, “The Struggle of Genetics for Independence,” pp. 225-235.

25) 폴과 김멜만은 이 컨퍼런스에 대한 정보를 캐넌(Cannon)의 리뷰에서 얻었다고 밝히고 있다. Paul and Kimmelman, “Mendel in America,” pp. 282-283, p. 303. 캐넌의 리뷰는, Walter A. C. Cannon, “Review of Proceedings: International Conference on Plant Breeding and Hybridization, Memoirs of the Horticultural Society of New York,” *Tarrega* (1905), pp. 12-14.

1903년 미국육종가협회(American Breeders Association, 이하 육종가협회)를 만들었고, 멘델법칙을 육종에 적용하기 위해 많은 노력을 기울였다. 미 농무부와 농업시험소 역시 육종실험가들에게 멘델법칙을 교육하고 그 중요성을 알리는 데 앞장섰다.²⁶⁾

이스트가 본격적으로 육종실험을 시작한 것은 육종가협회와 미 농무부 등을 통해 멘델법칙이 육종실험가들에게 널리 알려지기 시작했을 무렵인 1905년이였다. 1907년부터 육종실험에 관련된 논문을 발표하기 시작했던 그는, 이듬해에 멘델법칙을 육종에 적용하는 것에 관한 논문을 발표했다.²⁷⁾ 그러나 이스트는 1910년 이전까지 멘델법칙을 육종에서 그다지 중요하게 생각하지 않았다. 1909년에 발표한 “동계교배에서 유전과 발생 사이의 차이”²⁸⁾라는 논문은 당시까지 이스트가 멘델법칙 보다는 발생에 더 주요한 관심을 가지고 있었음을 보여준다. 이는 이스트가 멘델법칙이 질적형질의 유전만을 설명할 수 있을 뿐, 육종에서 중요한 양적형질의 유전을 설명하지 못한다고 생각했기 때문이었다.

이러한 이스트의 생각이 극적으로 바뀐 것은 이듬해인 1910년이였다. 그 해 “표면상 연속적으로 보이는 변이에 대한 멘델주의적 해석”이라는 논문을 발표한 그는, 옥수수 종자의 과피 색깔의 명도와 NOR(numbers of rows)²⁹⁾같은 양적형질의 유전을 멘델법칙으로 설명하려고 시도했다.³⁰⁾ 옥수수 종자의 색깔과 NOR에 관한

26) 미 농무부 시험소국은 베이트슨이 멘델의 실험에 대해 『왕립원예학회지(Journal of Royal Horticultural Society)』에 발표한 논문을 기초로 멘델의 실험에 대한 개괄적인 내용을 담은 『시험소 기록 Experiment Station Record』을 1902년에 출판하여 이를 농업시험소 연구자들이 이용할 수 있도록 했다. 『시험소 기록』은 미농무부 시험소국이 정기적으로 각 농업시험소에 보급한 정보지였으며, 1901년에 출판된 멘델법칙에 관한 베이트슨의 논문을 요약한 내용은 1902년에 출판된 『시험소 기록』에 게재되었다. Paul and Kimmelman, “Mendel in America,” pp. 282-290. 베이트슨의 1901년 논문은, William Bateson, “G. Mendel: Experiments in Plant Hybridisation,” *Journal of Royal Horticultural Society* 26 (1901), pp. 1-32. 이를 요약한 내용을 게재한 『시험소 기록』은 1902년에 출판되었다. U. S. Department of Agriculture, Office of Experiment Stations, Abstract of G. Mendel, “Experiments in Plant Hybridization,” *Experiment Station Record* 13 1901-1902 (Washington, D.C.: Government Printing Office, 1902), p. 744.

27) E. M. East, “The Practical Use of Mendelism in Corn Breeding,” *Annual Report to Connecticut Agricultural Experiment Station* (1908), pp. 406-418.

28) East, “The Distinction between Development and Heredity in Inbreeding,” *The American Naturalist* 43 (1909), pp. 173-181.

29) NOR이란 옥수수 열매에 붙어 있는 옥수수 알맹이(kernels)의 열(row)의 수를 말한다. 쉽게 말해서 옥수수 열매를 단면으로 잘라서 보았을 때, 옥수수 열매의 중심대의 가장자리에 붙어서 원을 이루고 있는 옥수수 알맹이의 개수를 말하는 것이다.

잡종실험 결과를 멘델법칙으로 설명할 수 있음을 확인한 이스트는, 양적형질의 유전이 멘델법칙으로 설명될 수 있음을 깨달았다. 그는 이때부터 멘델법칙에 본격적인 관심을 가지기 시작했으며, 1913년에는 에머슨과 함께 “양적 형질의 유전”이라는 방대한 논문을 발표했다.³¹⁾

멘델법칙이 질적형질 뿐만 아니라 양적형질의 유전까지도 설명할 수 있다면, 그것은 모든 유전현상을 설명하는 보편적인 법칙이며, 멘델법칙이 가정하는 단위 유전인자인 유전자도 실재하는 것이라고 생각될 수 있었다. 실제로 더프리스와 베이트슨은 유전자를 생명체 내에 실재하는 것으로 인식했고, 그것을 주요 연구 대상으로 삼았다.³²⁾ 그러나 이스트의 견해는 이들과 달랐다. 그가 1912년에 발표한 “생리학적 사실에 대한 설명으로서의 멘델주의 기호법”³³⁾이라는 논문은 그가 멘델리즘을 어떻게 이해했는지 잘 보여준다. 논문의 첫 부분에서 그는 멘델법칙을 수학적식과 화학식에 비유하며 이렇게 말했다.

멘델리즘은 단지 대수학이나 화학에서 사용하는 것과 같은 개념적 기호이다. ... 그것이 실제로 광범위하게 기초해 있고 일련의 유전적 사실을 설명한다고 할지라도, 우리는 그것을 수학적, 화학적 기호처럼 사용해야한다.³⁴⁾ (고딕체는 필자의 강조)

30) E. M. East, “A Mendelian Interpretation of Variation that is Apparently Continuous,” *The American Naturalist* 44 (1910), pp. 65-82. 이 논문에 대한 자세한 설명은 아래 논문을 참조하라. 정성욱, “미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동” (서울대 석사학위 논문, 2008), 24-27쪽.

31) E. M. East and R. A. Emerson, “Inheritance in Quantitative Characters” 같은 해에 코네티컷 농업시험소의 해이즈(H. K. Hayes)도 담배의 특정 양적형질의 유전을 멘델리즘으로 설명하는 논문을 발표했다. H. K. Hayes, “The Inheritance of Certain Quantitative Characters in Tobacco,” *Molecular and General Genetics* 10 (1913), pp. 115-129.

32) 더프리스는 1889년에 『세포내 범생설 *Intracellular Pangenesis*』이라는 책을 출판했는데, 여기서 그는 각각의 세포 안에, 특히 핵 안에 유전의 근본 입자인 광젠(pangenes)이 존재할 것이라고 제안했다. 광젠이 특정 형질을 발현시키는 인자라고 생각한 그는, 단위형질의 존재를 증명해주는 멘델법칙이 자신의 이론(pangenesis theory)을 지지해 줄 것으로 생각했다. 더프리스는 특정 형질과 특정 광젠이 1:1 관계를 갖는 것으로 생각했다. 더프리스에게 멘델법칙은 세포 내에 광젠이 존재함을 증명해주는 것이었다. 더프리스의 이론에 영향을 받은 베이트슨 역시 더프리스와 유사한 입장을 가지고 있었다. P. Falk, “The Struggle of Genetics for Independence,” pp. 228-232.

33) E. M. East, “The Mendelian Notation as a Description of Physiological Facts,” *American Naturalist* vol 46 (1912) pp. 633-655.

34) East, “The Mendelian Notation as a Description of Physiological Facts,” pp. 633-634.

이처럼 이스트는 육종실험을 설명하고 예측하기 위한 이론적 도구로서 멘델법칙을 수용했다. 이스트에게 중요한 것은 육종실험을 통해 나타난 사실이지 멘델법칙 그 자체가 아니었다.³⁵⁾ 이스트를 비롯한 초기 옥수수 유전학자들은 육종실험을 통해 드러나는 결과를 해석할 수 있는 이론적 도구가 필요했고 멘델법칙이 그 역할을 할 수 있다는 것만으로 충분했던 것이다. 초기 옥수수 유전학자들의 관심은 이와 같이 멘델법칙이 아닌 육종실험을 통해 관찰되는 유전현상 그 자체에 있었으며, 결국 멘델법칙은 이를 설명할 수 있는 한해서만 그 유용성을 인정받을 수 있었다.³⁶⁾

그러나 멘델법칙이 양적형질의 유전을 설명할 수 있다는 사실은 이스트와 에머슨을 비롯한 옥수수 육종실험가들을 점차 옥수수 유전학의 영역으로 이끌어갔다. 옥수수는 매우 복잡한 형질을 많이 가지고 있었기 때문에 멘델법칙으로 이러한 형질의 유전을 설명하고자 한 육종실험가들은 점차 유전현상에 대한 설명 그 자체에 흥미를 느끼기 시작했던 것이다. 1920년대 이후 초기 옥수수 유전학자들이 주목하기 시작한 복잡한 형질발현 현상 중 대표적인 것은 옥수수 배젖(endosperm)의 호분층과 과피의 무늬패턴이었다. 옥수수 배젖의 무늬패턴은 매우 복잡했기 때문에 이를 설명하기 위해서는 복잡한 유전이론이 필요했으며 이에 더하여 염색체의 행동을 이해하는 것도 중요했다. 처음으로 이 문제에 본격적인 관심을 가진

35) 그는 “단위인자를 입자로 말하기 시작하면, 네겔리, 스펜서 그리고 바이스만에 의해 야기된 것과 유사한 혼란에 빠지게 될 것”이라고 경고했다. East, “The Mendelian Notation as a Description of Physiological Facts,” p. 635.

36) 멘델리즘의 진위여부가 아니라 유기체의 실제 발현양상에 관심을 가졌던 초기 유전학자들에게 형질의 발현에 영향을 주는 환경변화와 발생은 멘델리즘만큼이나 중요했다. 이스트는 단위인자를 동일하거나 유사한 환경에서 항상 동일한 개체발생을 일으키는 것이라고 정의함으로써, 육종실험 결과를 단순하고 정확하게 설명할 수 있을 것이라고 생각했다. 이는 그가 형질의 발현이 환경변화에 의해 바뀔 수 있다는 것도 인식했음을 의미한다. 이스트는 환경변화를 외적 환경변화와 내적 환경변화로 구분했는데, 외적 환경변화는 비유전적변이(non-inherited fluctuation)를 일으키며, 내적 환경변화는 발생이 진행되는 동안 단위인자의 작용을 변화시킨다고 생각했다. 그는 발생이 일어나는 동안에 단위인자들 사이에 상호작용이 일어나며, 이러한 상호작용은 환경에 의해 바뀔 수 있다고 생각한 것이다. 이러한 견해에 따르면 동일한 단위인자도 환경의 변화에 따라 발현양상의 변화를 보일 수 있다. 따라서 발생 동안 일어나는 단위인자들 사이의 상호작용, 그리고 여기에 영향을 주는 환경 역시 육종실험에서 중요하게 고려해야 할 사항이었다. East, “The Mendelian Notation as a Description of Physiological Facts,” pp. 648-649. 3절에서 논의하겠지만, 발생에 대한 맥클린톡의 관심은 초기 옥수수 유전학자들의 이러한 관심의 연속선상에서 이해될 수 있다.

인물은 에머슨이었고, 그의 뒤를 이어 옥수수 배젖의 무늬패턴을 연구한 인물이 바로 그의 제자 맥클린톡이었다. 그리고 맥클린톡이 정립한 옥수수 세포유전학의 독특한 성격은 그녀가 옥수수 배젖 무늬패턴의 원인을 추적하는 과정에서 형성되었다.

Ⅲ. 맥클린톡과 옥수수 세포유전학: 초파리 유전학과의 공존 그리고 멀어짐

기존의 유전학사는 세포유전학의 기원을 대개 모건 학파의 초파리 유전학에서 찾는다. 본래 유전자의 존재를 부정하며 멘델주의를 거부했던 모건(T. H. Morgan)은 1910년에 우연히 발생한 초파리의 흰 눈 돌연변이가 멘델법칙에 따라 유전됨을 확인한 이후 멘델주의를 수용했고, 동시에 유전자와 염색체를 연결시켜 세포유전학 분야를 개척했다.³⁷⁾ 초파리 세포유전학의 가장 중요한 성과는 염색체 지도였다. 염색체 지도는 초파리의 염색체에 X선 등의 물리적 자극을 가하여 돌연변이를 유도하고, 이 돌연변이와 연관된 유전자가 염색체 상에 자리한 위치를 염색체의 교차율(cross-over rate)을 이용하여 결정하는 과정을 거쳐 작성되었다. 이런 과정은 초파리 세포유전학의 두 가지 중요한 특징을 보여준다. 하나는 염색체의 교차, 즉 염색체의 특정 행동이 염색체 지도 작성에 중요한 도구로 이용됐다는 것이고, 다른 하나는 유전자가 이론적 도구가 아닌 물리적 실체로 인식되었다는 것이다.³⁸⁾ 이는 초파리 세포유전학의 주요 관심이 염색체가 아니라 유전자와 그것의 물리·화학적 특성에 있었음을 보여준다.

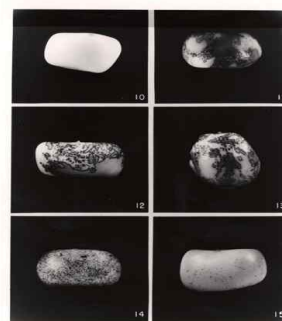
37) 콜러(Robert E. Kohler)는 초파리가 어떻게 모건을 발생학과 실험진화학에서 유전학으로 이끌어 갔는지 보여주었다. Robert E. Kohler, "Drosophila: A Life in the Laboratory," *Journal of the History of Biology* 26 (1993), pp. 281-310.

38) 이러한 특징은 모건학파의 일원이었던 멀러(H. J. Muller)에게서 잘 드러난다. 1927년에 초파리 유전학 연구에 X선 조사법을 도입한 멀러는 X선에 의해 돌연변이가 일어나는 것은 유전자가 물리화학적 실체임을 보여주는 증거라고 생각했으며, 유전학은 유전자의 물리화학적 본성을 밝히는 방향으로 나아가야 한다고 주장했다. Evelyn Fox Keller, "Physics and the Emergence of Molecular Biology: A History of Cognitive and Political Synergy," *Journal of the History of Biology* 23 (1990), pp. 389-409. 좀더 구체적인 이야기는 다음 소절에서 이루어질 것이다.

그러나 이것이 초기 세포유전학의 일반적인 특징은 아니었다. 맥클린톡에 의해 정립된 옥수수 세포유전학은 이러한 초파리 세포유전학과 상반된 특징을 가지고 있었다. 옥수수 세포유전학은 염색체의 특정 행동을 도구삼아 유전자의 위치를 결정했던 초파리 세포유전학과 달리, 염색체 상의 특정 위치에 있는 유전자를 도구삼아 염색체의 행동 패턴을 탐구했으며, 또한 유전자를 물리적 실체로 인식하고 이것의 물리·화학적 특성에 관심을 가졌던 초파리 세포유전학과 달리, 유전자를 이론적 도구처럼 인식했다. 이러한 차이로 인해 초파리 세포유전학과 옥수수 세포유전학은 서로 다른 방향으로 발전해 나갔다.

옥수수 세포유전학의 탄생: 염색체의 행동을 관찰하기 위한 실험적 기반

1920년대에 이르러서 옥수수의 복잡한 형질발현은 많은 옥수수 유전학자들의 관심을 육종에서 순수 유전학으로 이끌었다. 그 무렵 옥수수의 배젖에 나타나는 잡색 무늬패턴에 관심을 가졌던 에머슨은 1921년 논문에서 가변유전자(mutable gene)로 이 현상을 설명했으며, 또한 1923년에는 옥수수의 잡색무늬가 색깔에 관련된 여러 유전자들 간의 조합과 상호작용에 의해 형성됨을 보였다.³⁹⁾ 유전자의 변화와 상호작용을 통해 배젖에 나타나는 잡색 무늬패턴을 설명하는 에머슨의 이 논문들에서 유전자를 실재가 아니라 현상을 설명을 위한 이론적 도구로 다룬 흔적을 발견하기란 어려워 보인다.



〈그림 3〉 옥수수 알맹이의 잡색 무늬 [출처: http://profiles.nlm.nih.gov/LL/B/B/R/T/_/llbbrt.jpg.]

그렇다면 유전자를 도구적인 개념으로 인식했던 초기 옥수수 유전학자들의 태도는 1920년대에 이르러 완전히 사라졌던 것일까? 그렇지 않았다는 증거를 우리는 에머슨의 또 다른 논문을 통해 확인할 수 있다. 그는 가변유전자에 관한 논문

39) 로즈와 컴포트는 P 유전자에 대한 연구를 에머슨의 가장 중요한 연구업적으로 꼽았다. 로즈는 옥수수의 색깔, 특히 알록달록한 잡색을 돌연변이유발 유전자인 *P*로 설명한 것을 에머슨의 가장 중요한 업적으로 언급했으며, Rhodes, “Rollins Adams Emerson,” p. 317. 컴포트는 P 유전자에 대한 에머슨의 연구를 맥클린톡의 조절인자(controlling elements)와 연결시켰다. Comfort, *The Tangled Fidd*, pp. 69-71.

을 썼던 1921년에 옥수수 배젖의 잡색무늬에 관한 또 다른 논문을 발표했다. 『미국식물학회지(*American Journal of Botany*)』에 “옥수수 배젖의 염색체 이상 행동에 대한 유전적 증거”라는 제목으로 발표된 이 논문은 유전적 표지(genetic marker)를 이용한 육종실험을 바탕으로 염색체의 이상 행동(aberrant chromosome behavior)이 잡색무늬의 원인임을 증명한 것이었다.⁴⁰⁾

이 논문은 두 가지 중요한 사실을 알려준다. 하나는 에머슨이 옥수수 배젖의 잡색무늬를 유전자의 작용으로만 설명했던 것이 아니라는 사실이다. 그는 염색체의 이상 행동이 옥수수 알맹이의 잡색을 일으키는 원인임을 실험을 통해 증명했다. 에머슨에게 염색체의 행동은 옥수수의 현상을 설명하는 데 중요하게 고려해야 할 대상이었던 것이다. 다른 하나는 그가 옥수수 알맹이의 잡색이 유전자 변이 때문인지 아니면 염색체 이상 행동 때문인지를 시험하기 위해서 연관된 두 개의 특정한 유전자를 유전적 표지(genetic marker)로 삼았다는 것이다. 이 논문에서 에머슨은 유전자를 이론적 도구로 사용했다. 이 논문에서 드러나는 유전자에 대한 에머슨의 태도는 멘델리즘을 양적형질의 유전을 설명하기 위한 이론적 도구로 삼았던 이스트의 태도와 유사했다.

염색체의 행동에 대한 에머슨의 관심과 유전적 표지를 이용하여 정교한 육종 실험을 계획한 그의 연구방법은 코넬 대학에서 그의 지도를 받아 식물유전학을 공부했던 맥클린톡에게 중요한 영향을 미쳤다. 그녀는 옥수수 세포유전학의 기반을 세우고 이를 정립시켜 나가는 과정에서 유전자 보다는 염색체의 행동에 더 큰 관심을 보였는데, 여기에는 에머슨으로부터 받은 영향이 크게 작용했던 것이다.

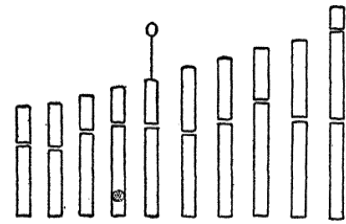
코넬 대학에 있을 때, 맥클린톡은 그녀의 연구 활동에 가장 기반이 되는 두 가지 연구방법을 배우고 정립했으며, 이 둘을 연결시켜 옥수수 세포유전학의 토대를 마련했다. 그것은 옥수수 육종실험과 새로운 세포핵 관찰 기법이었다. 전자는 에머슨에게서 배우고 익힌 것이었고,⁴¹⁾ 후자는 맥클린톡 자신이 발전시키고 정립

40) R. A. Emerson, “Genetic Evidence of Aberrant Chromosome Behavior in Maize Endosperm,” *American Journal of Botany* 8 (1921), pp. 411-424. 이 논문에 대한 자세한 설명은 아래 논문을 참조하라. 정성욱, “미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동”, 24-27쪽.

41) 콤포트는 오늘날 이뤄지는 옥수수 육종실험을 관찰하고 이를 토대로 맥클린톡이 행했을 옥수수 육종실험을 재구성하여 묘사했다. Comfort, *The Tangled Fidd*, pp. 87-89. 오늘날 옥수수 육종가들이 사용하는 옥수수 교배과정에 대한 자세한 내용은 다음을 참조하라. 최병한, 『옥수수란 무엇인가?』, 431-438쪽. 자세한 내용은 아래 논문을 참조하라. 정성

한 것이었다. 맥클린톡이 새로운 세포핵 관찰 기법을 정립할 수 있었던 것은 두 가지 새로운 세포학적 기술을 도입한 덕택이었다. 한 가지는 중기(metaphase)의 염색체를 관찰했던 이전까지의 유전학자들과 달리, ‘굵은섬유기’라고도 불리는 태사기(pachytene, 太絲期)의 염색체를 관찰한 것이었다. 그녀는 태사기의 염색체를 관찰함으로써 각 염색체의 길이와 형태 차이를 식별할 수 있었다.⁴²⁾ 다른 한 가지는 현미경 관찰을 위한 염색체 표본제작 기술을 개선한 것이었다. 그녀는 1926년 벨링이 개발한 새로운 염색체 염색 및 고정 기법인 철-아세토카민 방법(iron-aceto-carmin method)을 개선하여, 전체 염색체를 한꺼번에 관찰할 수 있는 영구적인 프레파라트의 제작법을 고안했다.⁴³⁾

맥클린톡은 자신이 고안해낸 두 가지 새로운 세포학적 기술을 이용하여 옥수수의 염색체를 자세히 관찰했고, 곧 옥수수 염색체 각각을 그 형태에 따라 구분할 수 있게 되었다. 결국 그녀는 옥수수 염색체의 형태적인 차이를 도식적으로 그리고 이를 간략히 설명한 논문을 1929년 『사이언스(Science)』에 발표함으로써 그동안 베일에 싸여 있었던 옥수수 염색체의 전체 모습을 처음으로 밝혔다.⁴⁴⁾



〈그림 4〉 맥클린톡이 1929년 사이언스지에 발표한 옥수수 염색체의 핵형도 [출처: Barbara McClintock, "Chromosome Morphology in Zea Mays," *Science* 69 (1929) p. 629.]

염색체 표본을 만들어 옥수수의 핵형을 동정하는 데 탁월한 재능을 보였던 맥클린톡은 세포핵을 관찰하는 것에 점차 익숙해짐에 따라 남들이 인식하기 어려운 염색체의 작은 변화까지도 볼 수 있게 되었는데, 이는 그녀가 옥수수 세포유전학을 개척하고 발전시키는 데 필수적인 능력이었다. 그녀의 이러한 재능이 세포유전학 연구에 처음으로 발휘된 것은 염색체의 교차를 세포학적으로 증명한 1931년 논문이었다. 초파리 유전학자들은 이미 1910년대에 염색체에서 교차가 일어남을 예상하고 있었지만 이러한 예상은 돌연변이의 양상을 통해 유전자의 변화를 추론하는 과정에서 나온 것이었지 세포학적으로 직접 관찰되고 증명된 것은 아니었

육, “미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동”, 37-39쪽.

42) Comfort, *The Tangled Field*, pp. 50-51.

43) Barbara McClintock, "A Method for Making Aceto-Carmin Smears Permanent," *Stain Technology* 4 (1929), pp. 53-56.

44) Barbara McClintock, "Chromosome Morphology in Zea Mays," *Science* 69 (1929), p. 629.

다. 맥클린톡과 그녀의 동료였던 크레이튼(H. B. Creighton)은 이 논문에서 두 개의 세포학적 표지(cytotic marker)와 두 개의 유전적 표지를 이용해서 교차를 세포학적으로 증명했다.⁴⁵⁾

맥클린톡은 에머슨이 1921년에 행했던 실험보다 훨씬 복잡하고 정교한 실험을 바탕으로 염색체의 교차를 세포학적으로 증명했으며, 이로써 세포유전학의 새로운 지평을 열었다. 이 논문은 맥클린톡이 세포학적 표지와 유전적 표지를 이용하여 염색체의 행동을 얼마나 효과적으로 추적할 수 있었는지를 잘 보여준다. 그녀는 염색체의 미묘한 형태학적 차이와 이미 알려진 유전자 좌위를 이용하여 염색체의 행동을 추적하는 육종실험을 설계하고 수행하는 데 능숙했다. 이러한 능력은 대부분의 초파리 유전학자들에게서는 찾아보기 어려운 것이었다. 초파리의 성 염색체에서 일어난 돌연변이를 통해 멘델인자, 즉 유전자의 존재를 확신했던 모건과 그의 제자들에게 중요했던 것은 염색체의 행동이 아니라 유전자의 성질이었기 때문이다. 처음에는 작은 것처럼 보였던 맥클린톡과 이들의 차이는 점차 더욱 뚜렷이 드러나게 되었다. 1930년에 환형 염색체가 발견된 이후, 맥클린톡은 더욱 복잡한 염색체의 행동을 연구하기 시작했으며, 초파리 세포유전학과는 점점 다른 방향으로 나아갔다.

초파리 유전학과의 멀어짐: 염색체 행동 패턴의 발견

1920년대까지 초파리 유전학자들과 옥수수 유전학자들의 가장 중요한 관심 중 하나는 염색체 지도의 작성이었다. 이처럼 당시까지 두 전통에 속한 유전학자들은 관심 주제와 연구 방법에서 많은 부분을 공유하고 있었다. 그러나 이들은 점차 서로 다른 연구 주제에 집중하기 시작했다. 초파리 세포유전학이 유전자를 독립된 물리적 실체로 인식하고 그것이 다음세대에 어떻게 안정적으로 전달되는지를 주요 연구 주제로 삼았던 데 반해, 옥수수 세포유전학은 유전자의 전달보다는 형질의 발현 과정에서 염색체의 행동을 추적하는 것을 주요 연구 주제로 삼았던 것이다. 이로써 두 유전학 전통은 다른 방향으로 발전하기 시작했다.

두 세포유전학의 관심 주제가 달라졌던 중요한 원인은 옥수수와 초파리의 생물

45) 이 논문에 대한 자세한 설명은 아래 논문을 참조하라. 정성욱, “미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동”, 42-44쪽.

학적 특징에 있었다. 옥수수는 많은 수의 뚜렷한 형질을 가지고 있고 분화된 조직의 크기가 커서 형질을 관찰하기가 용이했으며, 조직의 양이 많아서 치사시키지 않고도 세포핵을 관찰할 수 있었다. 게다가 다양한 수의 염색체 쌍, 즉 단수체(monoploid), 2배체(diploid), 3배체(triploid)를 가진 조직을 모두 가지고 있기 때문에 정교한 육종실험을 계획할 수 있었고, 생장기간이 길었기 때문에 생장기간 동안 변화하는 발현 양상을 관찰하고 이를 염색체의 행동변화와 연결시켜 볼 수 있었다. 반면, 초파리는 뚜렷한 형질을 거의 가지고 있지 않았고 크기가 작아서 세세한 형질의 변화를 관찰하기 어려웠으며, 옥수수처럼 다양한 수의 염색체 쌍을 가지고 있지 않았기 때문에 정교한 교배실험을 계획하기도 어려웠다. 게다가 세포핵을 관찰하기 위해서는 초파리를 치사시켜야했기 때문에 발생과정 동안 유전자의 발현이나 염색체의 행동변화를 관찰하기 어려웠다. 대신에 초파리는 생장기간과 세대기간이 짧고 자손의 수가 많았기 때문에 돌연변이를 일으켜서 그것과 관련된 유전자를 찾는 실험에는 적합한 실험재료였다.⁴⁶⁾

옥수수 세포유전학과 초파리 세포유전학의 이러한 차이는 환형 염색체(ring-shaped chromosome)가 발견된 1930년 이후 점점 더 커지게 되었다. 1930년 버클리 대학의 오노(Susumu Ohno)는 특이한 잡색 줄무늬 잎을 가진 식물의 염색체를 관찰하던 중 작은 염색체가 사라지는 것을 발견했고, 특이한 잡색 줄무늬는 바로 사라진 작은 염색체 때문에 생겼을 것이라고 추측했다. 그리고 얼마 뒤, 오노가 발견한 작은 염색체는 ‘동그라미’ 모양을 한 환형 염색체임이 밝혀졌다.⁴⁷⁾

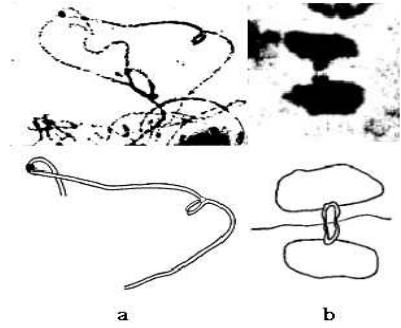
오노의 논문을 통해 이 특이한 염색체의 존재를 알게 된 맥클린톡은 그 때부터 환형 염색체에 깊은 관심을 보이기 시작했다. 1931년 미국연구위원회 장학생이 된 맥클린톡은 미주리 대학의 옥수수 유전학자인 스태들러(L. J. Stadler)와 함께 X 선을 이용하여 옥수수에 돌연변이를 유도하며 환형 염색체의 행동을 연구하기 시작했다. 스태들러는 이스트에게서 옥수수 유전학을 배웠고, 1920년대 후반부터 코넬 대학의 옥수수 세포유전학자들과 함께 연구하기 위해 정기적으로 이타카를 방

46) 폴러는 초파리는 진화유전학(evolutionary genetics)과 발생유전학(developmental genetics)을 연구하기에 적합한 재료가 아니었음을 언급하면서, 초파리의 이러한 한계에 불만을 느낀 몇몇 초파리 유전학자들이 어떻게 다른 연구 분야로 옮겨갔는지를 보여주었다. Robert E. Kohler, *Lords of The Fly* (Chicago&London: The University of Chicago Press, 1994), pp. 173-207.

47) Comfort, *The Tangled Fidd*, p. 58; 켈러, 『생명의 느낌』, 117-119쪽.

문했던 인물이었다. 당시 스태들러는 X선을 이용한 옥수수 유전학 실험을 수행하기 시작했는데, 이때 그의 연구를 도왔던 맥클린톡은 곧 X선을 이용한 그의 연구에 흥미를 느끼게 되었고, 연구 장학생이 된 이후 스태들러와 함께 X선을 이용해 환형 염색체를 연구하기로 결심했던 것이다.⁴⁸⁾

맥클린톡은 1932년 환형 염색체와 옥수수에 서 나타나는 특이한 잡색 줄무늬가 서로 연관되어 있다는 사실을 실험을 통해 증명했고,⁴⁹⁾ 환형 염색체가 형성되는 메커니즘을 알아내기 위한 정교한 육종실험을 계획했다. 환형 염색체에 대한 맥클린톡의 연구는 1938년에 발표



〈그림 5〉 맥클린톡이 찍은 염색체 사진과 그것을 그린 염색체 모식도 [출처: Barbara McClintock, "The Production of Homozygous Deficient Tissues with Mutant Characteristics by Means of the Aberrant Mitotic Behavior of Ring-Shaped Chromosomes," *Genetics* 23 (1938), p. 322, p. 325, p. 326, p. 327.]

한 방대한 분량의 논문에 정리되었다.⁵⁰⁾ 복잡한 실험과정과 추론 때문에 이해하기 까다로운 이 논문에는 맥클린톡의 연구방법이 집약되어 있다. 그녀의 연구방법은 세 단계로 구성되어 있다. 우선 여러 세포학적 표지와 유전적 표지를 이용한 정교한 실험을 통해 염색체의 행동을 예측하고, 둘째, 그것을 실제 관찰된 염색체의 형태 및 행동과 비교하고, 셋째, 이를 나타난 표현형과 연결지었다. 맥클린톡은 이 복잡한 과정을 반복하며 환형 염색체의 행동을 추적했다. 특히 이 논문에서 그녀는 여러 가지 유전적 결핍을 가지는 막대형 염색체와 환형 염색체들을 서로 조합하여, 각각의 경우에 표현형이 어떻게 나타나는지, 어떤 염색체가 기능을 하는지 못

48) 1927년 모건학과의 일원이었던 멀러(H. J. Muller)는 초파리에 X선을 쬔으로써 변이율을 150배나 높이는 데 성공했다. X선의 도입으로 이전에는 발견할 수 없었던 새로운 돌연변이가 쏟아져 나왔고, 염색체에서 생기는 변화도 관찰할 수 있게 되어 초파리 유전학은 새로운 활력을 얻었다. 스태들러가 X선을 이용하여 옥수수에 돌연변이를 일으키는 실험을 시작한 것은 멀러의 논문이 발표된 직후였다. Comfort, *The Tangled Field*, pp. 56-57.

49) Barbara McClintock, "A Correlation of Ring-Shaped Chromosomes with Variegation in *Zea Mays*," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 18 (1932), pp. 677-681. 이 논문에 대한 자세한 설명은 아래 논문을 참조하라. 정성욱, "미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동", 48-49쪽.

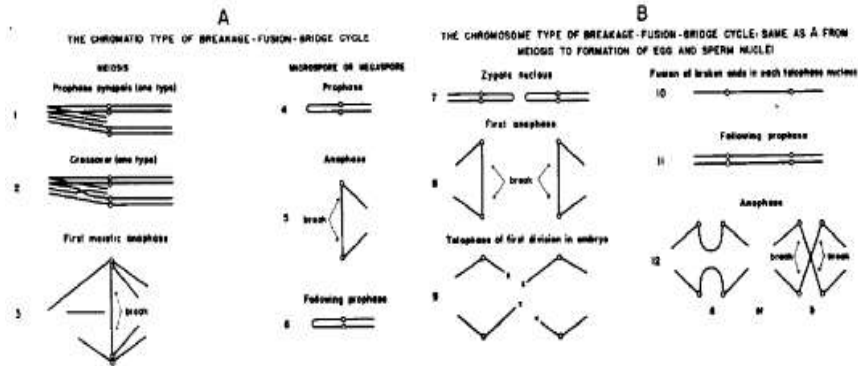
50) McClintock, "The Production of Homozygous Deficient Tissues with Mutant Characteristics by Means of the Aberrant Mitotic Behavior of Ring-Shaped Chromosomes," pp. 315-376.

하는지, 염색체가 어떻게 행동하는지를 추적했다. 그리고 이를 통해 특정한 염색체 결실을 가지는 상동염색체를 만드는 방법을 고안하기도 했다. 드러나는 염색체의 행동이 복잡해짐에 따라 그것을 추적하는 맥클린톡의 실험도 점점 복잡해지고 정교해졌다. 아마 옥수수 유전학 실험에 익숙하거나 맥클린톡의 연구에 대해 어느 정도 지식이 있는 경우가 아니라면, 당시에 어떤 유전학자라도 맥클린톡의 논문을 쉽게 이해하지 못했을 것이다.⁵¹⁾

염색체의 행동보다는 유전자에 더 깊은 관심을 가져왔던 초파리 유전학자들은 환형 염색체에 거의 관심을 가지지 않았다. 환형 염색체는 초파리에서도 발견되었으나 환형 염색체의 행동을 추적하는 데 관심을 보인 유전학자는 아무도 없었다. 염색체의 행동보다는 유전자에 더 깊은 관심을 가져왔던 초파리 유전학자들이 환형 염색체의 행동에 관심을 가지지 않았던 것은 어쩌면 당연했다. 초파리는 크기가 작고 세대기간이 짧으며, 염색체의 행동을 추적할 때 지표로 삼을만한 뚜렷한 형질도 가지고 있지 않아서 옥수수처럼 정교한 교배실험을 하는 데 적합한 실험재료가 아니었기 때문이다. 초파리는 본래 멘델법칙을 시험해 볼 수 있는 명확한 형질이 없고, 길들여지지 않았기 때문에 진화실험이나 적합하지 유전현상의 탐구에는 부적합한 것으로 여겨진 재료였다. 초파리에서 뚜렷한 형질은 돌연변이를 통해서만 나타났기 때문에 초파리 유전학 실험은 정교한 교배실험이 아닌 돌연변이에 의존할 수밖에 없었다.⁵²⁾ 그것은 다른 재료를 이용했던 유전학자들도 마찬가지였다. 맥클린톡은 “1930년대 이후로 많은 유전학자들이 초파리, 연령초(Trillium), 메뚜기(Locusta), 완두콩(Pisum), 자주달개비(Tradescantia), 튤립(Tulipa), 담배(Nicotiana) 등에서 환형 염색체를 발견했지만 어느 누구도 환형 염색체가 세포 분열 시에 보이는 행동에 대한 세포학적인 연구를 하지 않았다”고 비판했다. 그녀가 보기에 환형 염색체의 행동은 초파리 등에서 발견된 여러 현상들을 설명할 수 있었다. 그 무렵 초파리 유전학자들 사이에서 중요한 이슈였던 위치효과(position

51) 1959년에 『유전학의 고전논문(Classic Paper in Genetics)』을 편집한 피터스(James A. Peters)는 맥클린톡과 크레이턴의 1931년 논문을 수록하면서 “그들의 논문은 분석하는 동안에 기억해야 할 항목들이 많기 때문에 따라가기에 쉽지 않다. 그리고 어떤 흐름이라도 놓친 경우에는 이해하기가 거의 불가능해진다”라고 말했다. James A. Peters, ed., *Classic Papers in Genetics* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1959), p. 156. Comfort, *The Tangled Fidd*, p. 56에서 재인용. 1938년과 그 이후의 논문은 1931년에 비해 훨씬 더 복잡하고 이해하기 어려웠다.

52) Kohler, “Drosophila: A Life in the Laboratory,” pp. 291-295.



〈그림 6〉 맥클린톡이 그린 염색체 분절-접합-다리 주기 모식도

[출처: Barbara McClintock, "Chromosome Organization and Gene Expression," *Colo Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 16 (1951), p. 14.]

effect)도 그 중 하나였다.⁵³⁾ 맥클린톡의 이러한 비판은 이미 초파리 유전학자들의 관심 방향이 그녀와 상당히 달라져 있었음을 보여주는 것이었다. 그들은 유전자에 관심을 집중하고 있었고, 맥클린톡은 점점 더 복잡한 염색체의 행동 패턴에 접근하고 있었다.

맥클린톡은 환형 염색체를 연구하면서 발견한 염색체의 분절된 말단의 행동을 더 깊이 탐구하기 시작했다. 그녀는 1938년에 발표한 논문에서 감수분열 시에 동시에 분절된 두 염색체 말단이 서로 접합하여 형성된 2동원체 염색체(dicentric chromosome)를 발견했는데, 세포분열이 일어날 때 이 염색체에 있는 두 개의 동원체는 각기 다른 극으로 이동하게 되고, 이 때문에 세포분열이 진행되는 동안 이 염색체의 동원체 사이가 가는 실처럼 늘어나는 현상이 일어났다. 맥클린톡은 이것을 ‘염색체 다리’라고 불렀다.⁵⁴⁾ 그녀는 염색체가 분절되고 분절된 말단이 서로

53) 1923년 초파리의 막대는 유전자(bar)를 연구하던 스티티반트에 의해 처음 발견된 위치 효과는 유전자의 위치에 따라 그것의 발현양상이 달라지는 현상이다. 초파리 유전학자들은 위치효과가 유전자는 어떤 것에도 영향을 받지 않는다는 기존의 유전자 자율성 개념을 위협하는 것이라고 생각했다. 1936년 술츠는 유전자가 유전적 활성이 없는 이질 염색질(heterochromatin)과 이웃하게 될 때 그 활성을 잃어 버리는 현상을 설명하기 위해 위치효과 개념을 수정했다. 맥클린톡은 특정 부분이 결핍된 여러 종류의 막대형 염색체와 환형 염색체의 조합 실험을 통해 위치효과를 설명할 수 있다고 주장했다. McClintock, "The Production of Homozygous Deficient Tissues with Mutant Characteristics by Means of the Aberrant Mitotic Behavior of Ring-Shaped Chromosomes," pp. 368-373.

54) Barbara McClintock, "The Fusion of Broken Ends of Sister Half-Chromatids Following

다시 접합하여 2동원체 염색체를 형성하고, 이것이 세포분열이 진행되는 동안 염색체 다리를 형성하는 과정을, 복잡한 육종실험을 통해 수년간 추적하여, 결국 1942년에 ‘분절-접합-다리 주기(breakage-fusion-bridge cycle, 이하 BFB 주기)’라고 이름붙인 염색체의 특정 행동 패턴을 발견했다.⁵⁵⁾

맥클린톡이 염색체의 행동 패턴을 발견한 것은 유전학사에서 중요한 의미를 가진다. 맥클린톡이 주류 유전학자로서 활발하게 활동했던 1930년대까지만 하더라도 옥수수 유전학과 초파리 유전학은 어느 정도 관심사를 공유하고 있었다. 맥클린톡이 유전학계에 자신의 이름을 알린 염색체 교차를 세포학적으로 증명한 1931년의 연구는 독일의 초파리 유전학자인 슈테른(Kurt Stern)과 거의 동시에 진행된 것이었다. 맥클린톡이 슈테른보다 논문을 일찍 발표할 수 있었던 것은 모건의 도움 덕분이었다.⁵⁶⁾ 뿐만 아니라, 맥클린톡이 환형염색체를 연구하는 데 주요한 방법론으로 사용한 X선을 이용한 돌연변이 유도는 초파리 유전학에서 사용되던 방법론을 도입한 것이었다. 그러나 X선을 이용하여 환형염색체를 연구하는 과정에서 맥클린톡의 관심은 점차 염색체의 행동 패턴을 찾는 데 고정되었고, 이는 X선을 이용하여 특정 유전자가 가지는 표현형적 특성을 밝히는 데 주력했던 초파리 유전학자들과의 관심과는 완전히 동떨어진 것이었다. 다소간의 차이에도 불구하고 1930년대까지 서로 소통하고 있었던 옥수수 유전학과 초파리 유전학은 이제 완전히 분리된 길을 걷기 시작한 것이다.⁵⁷⁾

옥수수 유전학과 초파리 유전학이 서로 점차 멀어지는 상황에서 당시 유전학계의 분위기는 초파리 유전학에 유리한 방향으로 기울기 시작했다. 1930년대 중반 이후 유럽의 많은 물리학자들은 닐스 보어와 슈뢰딩거의 영향을 받아 생물학으로 방향을 돌렸다. 그 중에는 훗날 파지그룹을 형성하여 유전자의 물리화학적 본성

Chromatid Breakage at Meiotic Anaphases,” *Missouri Agricultural Experiment Station Research Bulletin* 290 (1938), pp. 1-48; Comfort, *The Tangled Field*, pp. 71-72 참조.

55) 맥클린톡이 BFB 주기를 발견하게 되기까지의 자세한 과정은 아래 논문을 참조하라. 정성욱, “미국의 옥수수 유전학 전통과 바바라 맥클린톡의 연구활동”, 54-57쪽.

56) 켈러, 『생명의 느낌』, 104-119쪽.

57) 1930년대 이후 초파리 유전학은 진화론이나 발생학과 연결될 수 없는 방향으로 발전하기 시작했다. 콜러는 초파리는 진화유전학(evolutionary genetics)과 발생유전학(developmental genetics)을 연구하기에 적합한 재료가 아니었음을 언급하면서, 초파리의 이러한 한계에 불만을 느낀 몇몇 초파리 유전학자들이 어떻게 다른 연구 분야로 옮겨갔는지를 보여주었다. Robert E. Kohler, *Lords of The Fly*, (Chicago&London: The University of Chicago Press, 1994), pp. 173-207.

을 탐구했던 델브뤽(Max Delbrück)도 포함되어 있었다. 생물학으로 방향을 바꾼 물리학도들은 주로 X선 결정법이나 초원심분리기 등의 기구를 이용해서 생체고분자의 구조를 분석하기 시작했으며, 이를 위해서 단순한 구조를 가지는 생명체를 실험재료로 삼았다. 록펠러 재단은 막대한 재정적 지원을 통해 이러한 흐름을 지원했다. 이런 분위기 아래서 1940년대에 들어서면서 유전학자들의 관심은 유전자로 모아지기 시작했고, 유전자의 물리화학적 본성을 밝히는 것이 곧 생명의 비밀에 도달할 수 있는 열쇠라는 인식이 생겨나기 시작했다. 분자유전학이 태동하기 시작했던 것이다.⁵⁸⁾

이런 분위기에서 맥클린톡이 발견한 염색체의 행동 패턴은 초파리나 그보다 더 단순한 실험재료를 사용했던 유전학자들 사이에서 크게 주목받지 못했다. 맥클린톡은 이러한 분위기를 예민하게 감지하면서도 염색체의 행동에 대한 자신의 연구를 더욱 발전시켜 나갔다. 그녀는 이제 옥수수의 발생과정에서 염색체의 행동이 어떻게 조절되는지의 문제로 관심을 돌리기 시작했고 이는 전이인자의 발견으로 이어졌다. 전이인자의 발견은 맥클린톡에게 좌절과 영광을 동시에 안겨주었다. 맥클린톡은 전이인자를 발견한 이후 주류 유전학계로부터 자신이 ‘고립’되었다고 느꼈으나, 30여 년이 지난 후 그녀는 이를 발견한 업적으로 노벨 생리학상을 수상함으로써 명예를 회복했다. 그렇다면 전이인자를 발견하고 그 업적으로 노벨상을 받기까지의 30여 년간 맥클린톡이 주류 유전학으로부터 무시를 당했다고 느꼈던 이유는 무엇일까? 다음 절에서 나는 켈러 그리고 컴포트의 설명과는 다른 방식의 설명을 시도할 것이다.

58) 분자생물학의 역사를 다룬 책이나 논문들 중 주요한 것으로는 다음과 같은 것들이 있다. Robert Olby, *The Path of the Double Helix* (London: Macmillan, 1974); Franklin H. Portugal and Jack S. Cohen, *A Century of DNA* (Cambridge, Mass., and London: MIT Press, 1977); James D. Watson, *The Double Helix* (New York: Atheneum, 1968); Horace F. Judson, *The Eighth of Day of Creation*, (New York: Simon and Schuster, 1979); idem, “Reflections on the Historiography of Molecular Biology,” *Minerva* 18, (1980), pp. 369-421. 국내에 번역된 책으로는 미셸 모랑쥬 지음, 강광일, 이정희, 이병훈 옮김, 『분자생물학: 실험과 사유의 역사』(몸과마음, 2002)과 호레이스 F. 젯슨 지음, 하두봉 옮김, 『창조의 제8일: 생물학 혁명의 주역들』(범양사, 1984) 등이 있다. 분자생물학의 형성과 록펠러재단의 관계에 대해서는 다음 논문을 참조하라. Prina Abir-Am, “The Discourse of Physical Power and Biological Knowledge in the 1930’s: A Reappraisal of the Rockefeller Foundation’s Policy in Molecular Biology,” *Social Studies of Science* 12 (1982), pp. 341-382.

IV. ‘조절인자’: 보편적 생명원리에 대한 신념, 그리고 ‘고립’

오늘날의 모든 생물학 교과서는 맥클린톡의 최대 업적을 트랜스포손이라 이름 붙인 전이인자의 발견으로 소개한다. 하지만 맥클린톡 자신은 전이인자 대신 조절인자(controlling element)라는 용어를 사용했다. 자신이 발견한 것은 단순히 움직이기만 하는 인자가 아니라 염색체의 행동을 조절하는 인자라는 것이다.⁵⁹⁾ 그녀는 BFB 주기를 발견한 이후 염색체의 이러한 행동 패턴이 어떻게 조절되는가하는 문제에 집중하면서 조절인자를 가장 중요한 연구 주제로 삼았고, 1950년 경 Ds(dissector)와 Ac(activator)라고 이름붙인 두 종류의 조절인자를 찾아냈다. Ds는 염색체를 분절시켜 BFB 주기를 유도함으로써 변이를 일으키는 인자이며, Ac는 Ds의 활성을 조절하는 조절인자이다. Ds는 Ac가 있어야 분절을 일으킬 수 있으며, Ac의 양에 따라 분절의 빈도가 달라진다. 이후 그녀는 또 다른 조절인자인 Spm체계(Suppressor-mutator system)를 발견했고, 이 두 조절체계를 ‘두-인자 조절체계(two-element controlling system)’라고 일반화시켜 명명했다.⁶⁰⁾

맥클린톡은 1950년 이후, 조절인자에 대한 자신의 연구를 네 차례에 걸쳐 발표했다. 1950년 『미학술원회보(Proceedings of the National Academy of Science)』에 Ds와 Ac를 간략히 소개했던 맥클린톡은, 이듬해인 1951년에 열린 콜드 스프링 하버 심포지엄에서는 조절인자에 대한 주장을 입증할 수 있는 실험 데이터를 충실히 준비하여 긴 분량의 발표문을 만들어 발표했다. 그런데 2시간 여 동안의 발표가 끝난 후 그녀는 자신의 발표가 완전히 무시되었다고 느꼈다. 훗날 켈러와의 인터뷰에서 맥클린톡은 심지어 “무슨 소린지 도무지 알 수가 없군. 저 여자 도대체 뭐라는 거야?”라는 소리가 들려오기도 했다고 회상했다. 그녀는 연구 내용을 다시 정리해서 1953년에 『유전학회지(Genetics)』에 발표했고, 1956년 콜드 스프링 하버 심포지엄에서 또 한 번 발표했지만, 자신의 연구를 이해하지 못하겠다는 다른 유전학자들의 냉소적인 반응은 나아지지 않았다고 느꼈다.⁶¹⁾

59) 전이인자와 조절인자는 같은 대상을 가리키는 용어이지만, 단순한 전이가 아닌 조절이 강조되는 이 절에서는 주로 조절인자라는 용어를 사용할 것이다.

60) 맥클린톡이 전이인자를 발견하게 된 구체적인 과정은 다음을 참조하라. Comfort, *The Tangled Fidd*, pp. 84-125; Nina Fedoroff, “Maize Transposable Elements: A Story in Four Parts,” *The Dynamic Genome*, pp. 389-415.

61) 켈러, 『생명의 느낌』, 236-250쪽; Comfort, *The Tangled Fidd*, pp. 157-169.

맥클린톡이 당시 유전학계로부터 고립감을 느꼈던 것은 분명하다. 그런데 그 원인에 대한 켈러와 컴포트의 설명에는 약간의 차이가 있다. 켈러는 전이인자 자체가 수용되지 않았다고 주장했던 반면, 컴포트는 전이인자는 수용되었으나 그것을 ‘조절인자’라고 해석한 맥클린톡의 주장은 수용되지 않았다고 주장했다. 컴포트는 전이인자가 수용되지 않았다는 켈러의 주장을 반박하는 근거로 맥클린톡이 전이인자에 대한 연구를 발표한 심포지엄에 참석했던 학자들의 인터뷰를 통해서, 그리고 전이인자에 대한 그녀의 1950년, 1951년, 1953년 논문이 1964년까지 주로 옥수수 유전학자들에 의해 186번이나 인용되었다는 증거를 제시함으로써, 적어도 당시 대부분의 옥수수 유전학자들은 전이인자의 존재를 받아들였음을 보여주었다.⁶²⁾

이러한 차이에도 불구하고, 켈러와 컴포트는 맥클린톡과 거의 같은 시기에 전이인자를 발견했던 또 다른 옥수수 유전학자인 브링크(R. Alexamder Brink)와 피터슨(Peter A. Peterson)조차 전이인자가 발생을 조절하는 인자라는 맥클린톡의 주장을 받아들이지 않았다는 데에 의견일치를 보였다. 그들은 전이인자의 동시발견을 인정하면서도, 동시발견자들 중 어느 누구도 이를 발생 조절의 관점에서 이해하지는 않았음을 강조했다. 켈러와 컴포트가 이 흥미로운 동시발견 사례를 두고 동시발견이 어떻게 가능했느냐는 질문 보다는 이들 간의 견해 차이만을 강조했던 근본 바탕에는, 옥수수 유전학자들을 포함해서 당시 거의 모든 유전학자들에게 발생의 문제는 관심 밖의 문제였다는 인식이 깔려있다.⁶³⁾

그러나 이러한 인식은 사실과 잘 부합되지 않는다. 우선, 전이인자의 동시발견자인 브링크와 피터슨 역시 전이인자를 발생 조절 관점에서 보았다는 증거가 있다. 브링크는 1920년대부터 옥수수의 발생에 관심을 가지고 있었다. 그는 1924년에서 1929년 사이에 화분립(pollen grain)의 발생과 관련해, 유전자가 어떻게 발현되는지 또한 그것은 환경에 어떻게 영향을 받는지에 대한 선구적인 논문을 『유전학

62) Comfort, *The Tangled Fidd*, p. 181.

63) 켈러는 “브링크와 피터슨 ... 의 작업은 놀랍게도 맥클린톡의 작업과 대단히 비슷한 방향으로 가고 있었”으나 “이들이 생각하는 방식은 전혀 다른 차원이었다”고 언급했다. 켈러, 『생명의 느낌』, 243쪽. 컴포트는 “피터슨과 브링크는 ... 둘 다 “조절”이라는 용어를 사용하는 것과 그들의 전이체계를 발생 조절로서 탐구하는 모든 논의를 피했다”며, 전이는 수용되었지만 전이인자가 염색체의 행동을 조절한다는 주장은 결국 그녀가 노벨상을 받을 때까지도 수용되지 않았다고 언급했다. Comfort, ““The Real Point is Control”,” p. 148.

회지(*Genetics*)』 등에 출판했다. 1920년대 중반부터 브링크는 종자의 발생유전학에 관심을 가지고 있었던 것이다.⁶⁴⁾ 발생유전학에 대한 그의 관심은 전이인자를 발견한 1950년대 이후에 더욱 강하게 드러났다. 브링크는 1962년 발생유전학의 폭넓은 주제에 관한 자신의 생각을 정리한 리뷰 논문인 “고등 식물에서의 상변화와 체세포 유전(Phase Change in Higher Plants and Somatic Cell Heredity)”을 출판했다. 이 논문에서 그는 “염색체는 발생이 진행될 때 유전자의 작용을 일차적으로 조절하기 위한 장치”라는 대담한 주장을 하며, “앞으로의 연구는 발생으로부터 유전을 분리시키는 오늘날의 트렌드와 반대의 경향을 보일 것이며, 두 분과는 합쳐지게 될 것”이라고 전망했다.⁶⁵⁾ 전이인자를 발견한 무렵, 브링크가 염색체를 일종의 조절 장치로 보았다는 것은 그 역시 맥클린톡과 마찬가지로 발생의 문제, 즉 염색체 행동의 조절에 강한 관심을 가지고 있었음을 보여준다.

또 다른 동시발견의 주인공이자 콜드 스프링 하버 연구소에서 맥클린톡과 함께 연구한 경험이 있는 피터슨의 경우에는 전이인자를 조절인자로 이해한 명백한 증거가 존재한다. 그는 1977년에 출판된 『옥수수 육종과 유전학』에 “조절인자: 옥수수의 A2와 C좌위에서의 변이성 유도 (Controlling Elements: The Induction of Mutability at the A2 and C Loci in Maize)”라는 제목의 리뷰 논문을 썼다. 맥클린톡과 브링크 그리고 자신을 비롯한 여러 옥수수 유전학자들이 발견한 전이인자와 그것의 행동을 정리한 이 리뷰 논문에서 그는 분명 조절인자라는 용어를 사용했다. 뿐만 아니라 그는 맥클린톡이 조절인자라고 묶어서 표현한 Ds와 Ac를, 변이를 직접 조절하는 Ds는 조절인자로 그리고 Ds의 활성을 조절하는 Ac는 통제인자(regulatory gene)로 세분했다.⁶⁶⁾

이러한 사실은, 컴포트의 주장과는 달리, 전이인자를 조절인자로서 이해한 인물이 단지 맥클린톡 혼자만은 아니었으며, 발생 조절 문제가 적어도 옥수수 유전학자들 사이에서는 널리 공유된 관심 주제였음을 단적으로 보여준다. 윌리엄 셰리든(William F. Sheridan)은 옥수수 발생유전학의 성과 및 연구방법 등을 정리한

64) Oliver Nelson and Ray Owen, “Royal Alexander Brink, 1897-1984,” *National Academy of Science: A Biographical Memoirs* 66 (1995), pp. 24-43.

65) R. Alexander Brink, “Phase Change in Higher Plants and Somatic Cell Heredity,” *The Quarterly Review of Biology* 37 (1962), pp. 1-23. 인용한 부분은 pp. 19-20.

66) P. A. Peterson, “Controlling Elements: The Induction of Mutability at the A2 and C Loci in Maize,” Walden, *Maize Breeding and Genetics*, pp. 601-631.

1988년 논문에서 형태발생(morphogenesis)이 옥수수 유전학자들의 오래된 관심 주제였다고 말했다. 그에 따르면, 옥수수는 형태발생을 연구하기에 매우 적합한 재료였는데, 그 이유는 옥수수의 생물학적 특징이 형태발생 연구에 매우 적합했으며, 종자 센터는 형태발생을 연구하기 위한 실험에서 표식자로 이용할 수 있는 많은 종류의 상호 전좌된 종자(reciprocal translocation stocks)를 제공했기 때문이다.⁶⁷⁾ 이에 더하여 셰리든은 전이인자가 특정한 유전자 좌위에 변이를 일으키거나 분리(isolation), 복제(cloning)할 수 있는 방법을 제공함으로써 발생유전학 연구를 위한 실험적 도구가 되었음을 강조했다.⁶⁸⁾ 발생 조절의 문제가 오래전부터 옥수수 유전학자들의 주요 관심사 중 하나였으며, 전이인자의 발견이 옥수수 발생유전학의 발전에 중요한 계기가 되었음을 보여준 셰리든의 리뷰 논문은 맥클린톡이 전이인자를 발견한 1950년대 이후, 전이인자와 발생 조절의 문제가 옥수수 유전학자들 사이에서 널리 공유된 관심사였다는 하나의 정황적 증거를 제공한다. 결국, 켈러와 컴포트의 주장과 달리 전이인자를 발생 조절의 관점에서 인식한 것은 맥클린톡만이 아니었다. 전이인자의 동시 발견자인 브링크와 피터슨은 물론이고, 당시의 옥수수 유전학 전통에서 발생에 대한 관심은 일반적인 것이었기 때문이다.

발생에 관한 관심이 그리고 전이인자를 발생 조절의 관점에서 이해한 것이 맥클린톡만이 아니었다면, 맥클린톡은 왜 고립감을 느꼈던 것일까? 나는 맥클린톡의 ‘고립’이 당시 옥수수 유전학이 초파리 유전학에서 분자유전학으로 넘어가는 주류 유전학으로부터 분리되고 고립되는 상황과 연결하여 이해될 필요가 있다고 생각한다. 옥수수 유전학자로서 주류 유전학계에서 높이 인정받고 있었던 맥클린톡은 분자유전학의 흐름이 형성되기 시작한 1930년대 후반 이후 자신이 주류 유전학으로부터 점점 분리되고 있었다고 느끼기 시작했다. 이는 그녀가 ‘보편적 생

67) 셰리든은 옥수수의 각 조직(배아, 잎, 미성숙 알맹이 등등)은 상대적으로 크기가 커서 단면을 잘라서 관찰하기에 용이하고, 조직의 양이 많아서 죽이지 않고도 많은 양의 재료를 얻을 수 있으며, 생장기간 또한 길기 때문에 옥수수는 식물의 형태발생에 관여하는 유전자의 역할을 연구하기에 매우 적합하다고 말했다. 특히 그는 생장기간이 긴 것은 유전학 재료로서 단점으로 지적되는 것이지만 발생유전학에서는 중요한 장점이라고 강조했다. William F. Sheridan, “Maize Developmental Genetics: Genes of Morphogenesis,” *Annual Review of Genetics* 22 (1988), pp. 335-385. 형태발생 연구에 적합한 옥수수의 생물학적 특징에 대해서는 pp. 256-258 참조.

68) 전이인자가 발생유전학을 위한 실험에 구체적으로 어떻게 이용되는 지에 관해서는 다음을 참조하라. Sheridan, “Maize Developmental Genetics: Genes of Morphogenesis,” pp. 376-379.

명원리’를 강조하며, 그것을 통해 옥수수 유전학과 다른 유전학을 연결하려는 시도를 한 것에서 드러난다. 1938년의 논문에서 맥클린톡은 “돌연변이의 기저에 있는 메커니즘은 기본적으로 모든 생명체에서 동일하다”⁶⁹⁾고 주장하면서 옥수수에서 발견한 생명원리를 다른 실험재료에서 발견된 현상을 설명하는 데 적용하려고 노력했다.⁷⁰⁾

이러한 그녀의 노력은 DNA의 이중나선 구조가 발견되면서 분자유전학이 꽃피우기 시작한 1950년대 이후 더욱 적극적으로 변했다. 그녀는 1956년 논문에서 “비록 옥수수 이외의 생명체에서는 조절인자가 발견되지 않았으나, 그것의 존재는 추측된다”고 말하며, “파지(phage), 박테리아, 원생동물(protozoa), 그리고 많은 고등식물과 동물에 조절인자가 존재한다는 몇몇 증거가 제시되었다”고 주장했다.⁷¹⁾ 나아가 그녀는 프랑스의 유전학자 모노(Jacques L. Monod)와 자콥(François Jacob)이 1959년에 박테리아의 유전자 발현 조절 단위인 오페론(Operon)을 발견하자, 오페론과 전이인자를 비교하는 논문을 1961년에 출판했다. 그 논문에서 맥클린톡은 오페론의 작동자(operator)와 Ds를, 그리고 조절자(regulator)와 As를 병치시키며, 박테리아와 옥수수 모두 두-인자 조절체계를 가졌다고 주장하면서, “옥수수의 모든 두-인자 조절체계는 박테리아의 그것과 닮았다고” 요약하고, 자신이 옥수수에서 발견한 두-인자 조절체계가 모든 유기체가 공유하고 있는 기본적인 조절체계일 가능성이 있음을 논지시 언급했다.⁷²⁾

맥클린톡의 이런 노력은 말년까지 이어졌다. 그녀는 1983년의 노벨상 수상 기념강연에서 ‘조절인자’를 유전, 발생, 진화를 통합하는 생명현상의 보편원리로 확장하려 했던 자신의 생각을 다시 한 번 드러냈다. 이 강연에서 맥클린톡은 옥수수의 조절체계를 그 무렵에 밝혀진 스트레스에 대한 세포 반응체계(response system)와 비교했다. 그녀는 “세포에는 어떤 스트레스에 대한 반응이 이미 프로그램 되어 있다”고 말하며, “이 스트레스 신호는 식물 세포로 하여금 완전히 새로운 구조를 만들게 한다”고 주장했다. 만약 어떤 자극이 식물의 유전체(genome)를 재프로그래밍할 경우,

69) McClintock, “The Origin and Behavior of Mutable Loci in Maize,” p. 345.

70) McClintock, “The Production of Homozygous Deficient Tissues with Mutant Characteristics by Means of the Aberrant Mitotic Behavior of Ring-Shaped Chromosomes,” pp. 368-373.

71) Barbara McClintock, “Intranuclear Systems Controlling Gene Action and Mutation,” *Cold Spring Harbor symposia on Quantitative Biology* 21 (1956), pp. 58-74. 인용한 부분은 p. 69.

72) Barbara McClintock, “Some Parallels Between Gene Control Systems in Maize and in Bacteria,” *The American Naturalist* 95 (1961), pp. 265-277. 인용한 부분은 p. 275.

그 식물은 새로운 구조를 형성하게 될 수 있다. 결국, 유전체에 프로그램 되어있는 유전자 조절체계는 생명체의 발생을 조절하며, 그것이 재프로그램 될 경우 새로운 생명체를 만들어냄으로써 진화를 조절하기도 한다는 것이다.⁷³⁾

맥클린톡이 ‘보편적 생명원리’가 존재한다는 것을 전제로 ‘조절인자’를 생명체의 보편적인 발생조절 인자로 주장한 것은, 컴포트의 언급했던 것처럼 충분한 실험적 근거가 결여되어 있었던 것이다. 게다가 오페론 그리고 세포반응체계를 ‘조절인자’와 연결하려 한 맥클린톡의 시도는 잘못된 것이었다. 하지만 중요한 것은 맥클린톡이 왜 이렇게 무리한 주장을 하면서까지 전이인자가 발생을 조절하는 인자라고 주장했는가 하는 점이다. 나는 그 이유가 발생에 대한 맥클린톡의 고유한 관심에서 비롯된 것이라고 설명한 켈러 그리고 컴포트와 달리, 옥수수 유전학이 주류 유전학으로부터 분리되고 고립됨에 따라서 자신의 발견이 옥수수에서만 해당되는 특수한 발견으로 평가절하 되었던 당시 유전학계의 분위기에 대한 맥클린톡의 저항감에서 비롯된 것이라고 생각한다. 맥클린톡은 ‘보편적 생명원리’가 존재한다는 믿음을 근거로 ‘조절인자’를 통해 옥수수 유전학과 주류 유전학을 연결시키고자 했던 것이다.

사실 옥수수 유전학이 주류 유전학으로부터 분리되고 있음을 예민하게 감지했던 옥수수 유전학자는 맥클린톡만이 아니었다. 코넬대에서 그녀와 옥수수 유전학 연구를 함께 했던 비들(G.W. Beadle)과 데메렉(M. Demerec)도 이러한 변화를 감지했다. 그러나 이들은 맥클린톡과 달리 다른 실험재료를 선택하는 방법을 택했다. 비들이 택한 것은 붉은빵곰팡이(neurospora)이고, 데메렉이 선택한 것은 초파리였다. 비들은 1유전자-1효소 가설로 1958년에 노벨상을 받았으며, 데메렉은 맥클린톡이 있었던 콜드 스프링 하버 연구소 소장을 지냈다. 그들은 실험재료를 바꿈으로써 성공적으로 주류 유전학계에 속할 수 있었던 것이다.

그러나 이들과 달리 맥클린톡은 옥수수를 이용한 유전학 연구를 고집했으며, 옥수수에서 발견한 생명원리를 보편적인 것으로 만들려고 노력했다. 그렇지만, 맥클린톡의 이러한 노력은 결국 다른 유전학자들에게 받아들여지지 않았다. ‘조절인자’를 통해 옥수수 유전학과 주류 유전학 사이의 연결다리를 만들어 내고 이로써 옥수수 유전학에 대한 관심을 다시금 불러일으키려 했던 맥클린톡의 시도는

73) Barbara McClintock, “The Significance of Responses of the Genome to Challenge,” *Novel Lecture* (1983), pp. 174-192. 인용한 부분은 pp. 187-188.

결국 실패로 끝났던 것이다. 맥클린톡의 ‘고립’은 바로 이런 실패에서 비롯된 것으로 이해될 수 있다. 이런 맥락에서 볼 때, 맥클린톡이 느낀 철저한 고립감은 다른 유전학 전통과의 소통을 향한 그녀의 열망의 크기를 보여주는 동시에 1940년대 이후, 상이한 실험재료를 사용한 서로 다른 유전학 전통 사이의 간격이 얼마나 큰 것인가를 보여주는 척도가 된다.

결국 전이인자를 발견한 이후 맥클린톡이 고립감을 느꼈던 것은 켈러의 주장처럼 거의 모든 유전학자들이 전이인자를 무시했기 때문도 아니었고, 컴포트의 주장처럼 유전과 발생을 연결시키고자 한 그녀의 ‘자연적 성향’에서 기인한 것으로 보기도 어렵다. 맥클린톡의 고립감은 20세기 중반, 옥수수 유전학이 초파리 유전학을 비롯한 주류 유전학으로부터 분리·고립되기 시작한 상황에 대한 그녀의 저항감에서 비롯되었다고 보는 것이 타당하다. 요컨대, 일평생 옥수수 유전학 전통을 벗어나지 않으면서도, 다른 유전학 전통과의 소통을 강하게 원했던 맥클린톡의 열망은 그녀를 미국의 서로 다른 유전학 전통이 빚어낸 분열과 갈등의 역사를 극적으로 드러낸 인물로 만들었다.

논문 투고일: 2010년 5월 26일

논문 수정일: 2010년 6월 10일

게재 확정일: 2010년 6월 21일

<ABSTRACT>

Revisiting Barbara McClintock: The Forgotten Tradition of American Maize Genetics

JUNG Sung Uk

Program in History and Philosophy of Science
Seoul National University

The aim of this paper is reframing Barbara McClintock's research activities in the context of American maize genetics tradition. McClintock received the Nobel Prize for discovery of transposable elements in the maize chromosome. Interestingly, many historians of science who had an interest in McClintock have emphasized that the discovery isolated her within the genetics community, based on McClintock's unique personality, especially her ardent interest in developmental biology. It is important that their term, "contemporary geneticists" refers to the major stream of geneticist, like drosophila geneticists, and that they implicitly accepted the single and linear history of American genetics from drosophila genetics to molecular genetics.

However, by giving the example of maize genetics, I will show that there had been, at least, another major area besides drosophila genetics in early 20th century genetics. At the beginning of the history of genetics, drosophila and maize genetics evolved through much communication and collaboration, but the difference in research material resulted in diverging research direction and methods, until eventually interaction between the two fields disappeared. McClintock tried to integrate both traditions against the current by upgrading the genetic principles of maize genetics to the general principles of life, transposable elements being her last trial. However, her efforts were not accepted by the American genetics community, and transposable elements, in that sense, can be read as a symbol of internal differentiation and confliction within American genetics community in the first half of the 20th century.

Key words: Barbara McClintock, Maize genetics, Drosophila genetics, Agricultural Experiment Station, E. M. East, R. A. Emerson, Transposable Element, Controlling Element