

대학 교양교육 과정의 일반생물학에서 올바른 물질대사 교육을 위한 연구 : 중고등학교 생명과학 교과과정과 연계를 위하여*

윤혜섭** · 박돈하*** · 장수철****

목 차	
I. 서 론	III. 연구 결과
II. 연구 방법	IV. 결론 및 제언

국문초록

본 연구는 생물학의 중요한 주제 중 하나인 물질대사와 관련된 교과과정을 돌아보고, 이를 토대로 올바른 물질대사의 개념 전달을 위한 시사점을 제공하고자 한다. 이를 위해 대학 교양교육 과정의 일반생물학 성격 교과목의 교재와 중학교, 고등학교의 관련 단원을 비교 분석하였고 생명과학 I 과 생명과학 II 수업을 다년간 수행한 교사 5명을 대상으로 심층 설문조사를 수행, 분석하였다. 대학의 일반생물학 성격 교과목 교재는 학생들이 물질대사에 관한 체계적인 이해를 돕기 위해 개념들이 원자와 분자, 전자에너지, 탄소 화합물, 생체 거대분자, 이화작용과 동화작용, 에너지의 종류, 열역학 법칙, ATP, 효소, 화학 삼투, 산화환원 반응, 산화적 인산화, 광인산화 등으로 순차적으로 배치하고 있으며 거의 모든 핵심개념에 관한 설명을 포함한다. 그러나 중학교, 고등학교에 이르는 일련의 교과과정에서는 이러한

* 이 논문은 연구재단(NRF-2022S1A5C2A04093488)의 지원을 받아 작성되었음.

** 제1저자, 건국대학교 상허생명과학대학 생명과학특성학과 부교수,
hsyun@konkuk.ac.kr

*** 공동저자, 연세대학교 학부대학 부교수, parkdh@yonsei.ac.kr

**** 교신저자, 연세대학교 학부대학 부교수, schang@yonsei.ac.kr

물질대사에 관한 개념들이 생명과학 I 교과목에 포함하지 않는다. 따라서 이들을 포함한 생명과학 II를 수강하지 않는 학생들은 물질대사의 핵심적이고 본격적인 교육을 받지 못할 가능성이 크다. 따라서 대학에서 학생들이 생명현상을 물질대사라는 중요한 시각으로 이해하고, 화학과 생물학의 융합적 사고를 갖추기 위해서는 대학의 교양 생물학 수업에서 고등학교 교과과정을 감안한 수업과 수강 지도를 통해 체계적이고 올바른 물질대사 교육을 위한 노력이 필요하다.

[주제어] 교양으로서의 일반생물학, 생명과학, 화학, 물질대사, 2015 개정 과학과 교육과정

I. 서 론

생명과학은 생명현상을 다루는 학문이다. 이 학문의 매우 큰, 어쩌면 가장 커다란 주제는 ‘진화’일 수 있다. 유전학자 도브잔스키가 천명한 것처럼 ‘진화’라는 원리를 고려하지 않고는 생명과학은 발견된 사실의 나열에 불과할 것이다.¹⁾ 그런데 미국의 대학 생물학 교육 관계자인 연구자, 교수, 교사, 행정 인력 등 많은 관계자가 모여 대학 생물학의 주요 주제, 지향할 역량 등을 포함한 교육의 미래를 위해 토론한 내용에 따르면,²⁾ 생명과학 교육에는 ‘진화’와 더불어 학생들이 이해해야 할 핵심개념으로 ‘서열적 구조와 창발성’, ‘유전 정보의 발현과 전달’, ‘에너지와 물질의 전달과 변환’, ‘다양한 상호작용’ 등이 제시되어 있다. 본 연구는 이들 중 ‘에너지와 물질의 전달과 변환’에 주목하여 ‘물질대사’를 중심으로 생명과학 교육을 살펴보고자 한다.

-
- 1) Dobzhansky, Theodosius, “Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution”, *American Biology Teacher*, 35(3), 1973, pp. 125-129.
 - 2) American Association for the Advancement of Science, *Vision and Change in Undergraduate Biology Education. A Call to Action*, Brew CA and Smith D, AAAS, 2011과 Campbell 등, *Biology: A Global Approach*, 12th ed., Pearce Education Inc., 2021의 두 책의 내용을 발췌해 정리하였다.

물질대사는 생명의 특징이기도 하다. 모든 생물에게 적용되는 것인지에 관하여 논란의 여지가 있지만, 생명의 특성으로 ‘규칙적 정렬’, ‘진화적 적응’, ‘조절’, ‘에너지 교환’, ‘생장과 발달’, ‘환경에 대한 반응’, ‘생식’ 등을 나열할 수 있다. 이 내용은 Campbell Biology 12판 1단원을 인용한 것인데³⁾ 다른 일반생물학 성격의 여러 교재가 생명의 특성에 관하여 묘사한 내용도 대동소이하다.⁴⁾ 이 중 ‘에너지 교환’이 포함되어 있어 에너지대사 또는 물질대사가 생명의 중요한 특징으로 생명과학의 주요 주제 중 하나가 될 수 있음을 지지한다. 또한, 생명에 대한 정의를 내릴 때 위와 같은 특성을 나열하는 것이 문제가 있는 것은 아니지만, 굳이 간단한 정의를 요구받는다 면, 많은 생물학자는 여러 특성 중 2가지 특성, 즉 대사와 번식을 꼽을 것이다. 요컨대, 생명과학을 연구하거나 학습할 때, 가장 중요하게 간주해야 하는 주제 중의 하나가 에너지대사 또는 물질대사임은 틀림없다.

심규철 등(2003)의 7차 교육과정 국민 공통 기본교육과정 과학과에 관한 분석에 따르면 초, 중등, 고등 교과를 비교하여 학교의 급이 올라감에 따라 점차적으로 구체적 개념에 대한 형식적 개념의 비율이 감소하는 것으로 나타났다⁵⁾ 이 연구는 단원과 학습 내용의 수직적 연계성을 고려한 구성이 필요함을 제언하였다. 비록 이 연구가 2015 개정 교육과정에 관한 직접적인 연구는 아니지만, 학생들의 물질대사에 대한 교육이 다시 구성되어야 할 필요가 있음을 나타낸 연구로서 의미가 있는 것으로 보인다. 김미영(2013)은 7차 교육과

3) Campbell 등, 위의 책, 51쪽

4) 데이비드 사다바· 데이비드 힐스· 크래그 헬러· 메이 베렌바움, 『생명, 생물의 과학 9판』, 강해묵 외 역, (주)라이프사이언스, 2012; 로버트 브루커· 에릭 위드마이어· 린다 그래험· 피터 스티링, 『브루커의 생명과학』, 최준호 외 역, 홍릉과학출판사, 2014; Freeman Scott, Quillin Kim, Allison Lizabeth, Black Michael, Podgowski Greg, Taylor Emily, Carmichael Jeff, *Biological Science*, 6th ed. Pearson, 2017 등 세 권의 교재를 분석한 결과이다.

5) 심규철·이부연·김현섭, 「국민공통 기본교육과정 과학과의 생명 영역 물질대사에 관련한 학습개념 분석」, 『한국과학교육학회지』 제23권 제6호, 한국과학교육학회, 2003, 627~633쪽.

정과 2009 개정 교육과정을 비교하면서 생명과학 I에서 본격적으로 물질 대사를 다루지 않는 점을 지적하였다.⁶⁾ 이 결과는 본 연구에서 2015 개정 교육과정의 물질대사를 살펴보고 내린 결론과 일치하는 것으로 이전의 교육과정과 비교하여 편재를 살펴보는 데에 도움이 될 것으로 판단하였다. 광합성에 관한 연구에서 이보나(2016)는 2009 개정 교육과정에 따른 고등학교 생명과학 II 내 ‘광합성’ 단원과 대학교 일반생물학 교재의 ‘광합성’ 단원을 각각 분석하였고, 이를 바탕으로 고등학교 교육과정과 대학교 교육과정의 수직적 연계성을 분석하였다.⁷⁾ ‘광합성’ 단원이 생태계 구성의 기초가 되는 식물의 물질대사를 다루며 생태계 전반의 에너지 흐름에 관한 내용임을 제시하지만, 해당 단원 사이의 연계성에 관한 분석은 진행되지 않았다. 또한, 광대오 등(2004)은 세포호흡과 관련된 부적절한 정교화는 교과서를 읽는 많은 학생이 세포호흡과 관련된 개념을 이해하는 데 있어 장애 요인으로 작용할 가능성이 크기 때문에 향후 교과서 편찬 시 수정, 보완되어야 한다고 주장하였다.⁸⁾ 이외에도 김보람(2010)의 물질대사에 관한 연구에서는, 이 주제가 체계적으로 기술되어 있지 않고 암기 위주라는 지적이 있고,⁹⁾ 박진아는 6차 또는 7차 교육과정의 경우 미국 교과서보다 삽화가 부족한 점을 지적하기도 하였다.¹⁰⁾ 물질대의 탐구 활동에 관한 분석을 다룬 박재근의 연구도 보고되었지만,¹¹⁾ 이러한 연구들은 모두 2015 개정 교육

6) 김미영, 「제7차 교육과정 생물 I과 2009 개정 교육과정 생명과학 I 교과서의 물질대사 단원 비교 분석」, 『생물교육』 제41권 제2호, 한국생물교육학회, 2013, 211~ 224쪽.

7) 이보나, 「2009 개정 교육 과정에 따른 고등학교 생명과학 II와 대학교 일반생물학 교재 연계성 분석 : ‘광합성’ 단원을 중심으로」, 석사논문, 연세대학교 교육대학원, 2016.

8) 광대오, 하수현, 김호진, 「고등학교 생물 II 교과서 5종의 세포호흡 관련 내용에 나타난 개념들의 정교화」, 『교육과정평가연구』 제7권 제2호, 한국교육과정평가원, 2004, 343~359쪽.

9) 김보람, 「김인정 교과서와 한국창의재단 교과서의 고등학교 생물 물질대사 비교 분석」, 석사논문, 목포대학교 교육대학원, 2010.

10) 박진아, 「고등학교 생물교과서의 삽화체제 분석 : 물질대사 영역을 중심으로」, 석사논문, 고려대학교 교육대학원, 2005.

과정 이전의 물질대사에 관한 것이다.

2015 개정 교육과정은 창의융합형 인재 양성의 사회적 요구를 반영하고 이전 교육과정의 문제점을 개선하기 위해 이전의 교육과정이 개정되어 고시된 것이다. 물질대사도 예외는 아니어서 이와 관련한 연구가 진행되었을 것으로 기대할 수 있다. 예컨대, 권현석(2020)은 본 연구와 비슷한 접근을 시도하였다.¹²⁾ 다만, 이 연구는 2015 개정 교육과정에서 물질대사에 관한 연구이지만 세포호흡 단원만을 대상으로 생명과학 II만 분석하였다. 따라서 고등학교까지의 전 과정에서의 물질대사 교육이 어떻게 설계되어 있으며 이를 바탕으로 물질대사 교육이 올바르게 진행되고 있는지를 분석한 연구가 없으므로 2015 개정 교육과정 전체를 대상으로 물질대사에 관한 연구가 필요해 보인다. 더불어 최근에 발표된 2022 개정 교육과정도 물질대사와 관련해서 살펴보았다.

본 연구에서는 에너지의 획득과 소모, 생명체 구성 성분의 획득과 소모 등을 모두 포함하여 물질대사로 정의하여 기술함으로써 포괄 범위가 큰 ‘물질대사’를 핵심 주제로 하였다. 본 연구는 이러한 물질대사에 관한 개념을 학생들이 올바르게 이해하는 데에 도움을 제공하고자 한다. 이를 위해 기존의 연구를 살펴보고, 대학 교양교육 과정의 일반생물학 성격 교과목 교재와 중학교와 고등학교의 관련 단원의 교과 내용을 비교 분석하며 이에 따른 교육의 방향과 방법 등을 살펴보고자 한다. 궁극적으로 이러한 비교를 통해 대학의 학생들이 물질대사의 본질을 올바르게 배울 수 있도록 교육이 체계적으로 이루어지고 있는지를 판단하고 문제점이 있다면 해결을 위한 도움을 제공할 수 있을 것이다.

11) 박재근, 「제 7차 교육과정에 따른 고등학교 생물 II교과서에서 물질 대사 단원에 대한 탐구 활동의 비교 분석」, 『생물교육』 제32권 제2호, 한국생물교육학회, 2004, 124~124쪽.

12) 권현석, 「2015 개정 교육 과정에 따른 생명과학II, 고급 생명과학 교과서와 대학교 일반 생물학 교재 연계성 분석 : 세포 호흡 단원 중심으로」, 석사논문, 고려대학교 교육대학원, 2020.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구를 위하여 『과학과 교육과정』, 교육부 고시 제2015-74호를 주로 분석하였고, 일부는 『과학과 교육과정』, 교육부 고시 제2022-33호의 내용도 살펴보았다. 또한, 필요에 따라 <표 1>에 제시된 고등학교 생명과학 I 8종과 생명과학 II 5종을 살펴보았다.

<표 1> 고등학교 생명과학 교과서

교과서	출판사	저자
생명과학 I	교학사	권혁빈 외 5
	비상	심규철 외 5
	미래엔	오현선 외 5
	천재교육	이준규 외 5
	지학사	전상학 외 7
	금성출판사	심재호 외 5
	동아출판사	김윤택 외 4
	와이비엠	이용철 외 3
생명과학 II	교학사	권혁빈 외 5
	비상	심규철 외 5
	미래엔	오현선 외 5
	천재교육	이준규 외 5
	지학사	전상학 외 7

물질대사 관련 개념과 내용의 분석을 위해 참고한 대학 일반생물학 교재는 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 본 연구에서 분석 대상으로 사용한 일반생물학 교재

교과서	출판사	저자
Biology, 3판	McGraw Hill	Brooker 외
Biology, A Global Approach 12판	Pearson Education Inc.	Campbell 외 5명
Biological Science 6판	Pearson Education Inc.	Freeman 외 6명
What I Life?: A Guide to Biology w/ Physiology 5판	Macmillan Learning	Phelan ¹³⁾
Life, The Science of Biology 9판	W.H.Freeman & Company	Sadava 외 3명

2. 대학 일반생물학 교재에 근거한 물질대사 관련 기본 개념 정리

고등학교까지의 우리나라 생명과학 전 과정에서의 물질대사 교육 내용을 살펴보기 위한 틀을 마련하고자 물질대사를 이해하는데 필요한 대부분 개념을 포함하고 있는 대학 교양교육 과정의 일반생물학 성격 교과목에 사용되는 교재를 분석하였고, 물질대사와 관련된 단원들의 비중, 배열 체계와 각 단원이 포함하는 주요 개념을 살펴보았다.

주요 개념은 원자와 분자, 전자에너지, 탄소 화합물, 생체 거대분자, 이화작용과 동화작용, 에너지의 종류, 열역학 법칙, ATP, 효소, 화학 삼투, 산화환원 반응, 산화적 인산화, 발효, 광인산화 등을 포함한다.

3. 고등학교 교사 대상 인터뷰 조사

생명과학 I 과 생명과학 II 등의 교과목 교육을 15년 이상 수행한 경험

13) Phelan, Jay, *What Is Life?-A Guide to Biology*, 5th ed., Macmillan, 2021.

을 지닌 5명의 교사를 대상으로 다음의 설문을 제시하고 의견을 얻어 분석을 수행하였다.

■ 설문 :

1. 생명체가 가지고 있는 공통적인 특징 중 하나는 물질대사를 수행하는 것이며, 생명체의 대표적인 물질대사 과정은 광합성과 세포호흡입니다. 그런데 고등학교 교육과정에서 생명과학 II를 선택하지 않은 학생들은 광합성과 세포호흡 과정을 본격적으로 배우지 않습니다. 이 경우, 물질대사에 관한 학생들의 이해 정도는 충분하다고 보십니까? 이 질문에 대한 답과 그 이유를 말씀해 주시기 바랍니다.

2. 다음은 광합성과 세포호흡 학습 흐름과 범위에 대한 질문입니다. 이 질문에 대한 답과 그 이유를 말씀해 주시기 바랍니다.

- 1) 대학의 일반생물학 교과과정에서는 광합성과 세포호흡 단원보다 앞선 단원에서 원자 구조, 분자 합성 등과 관련하여 전자에너지에 관한 내용을 포함합니다. 이러한 체계적 배열은 광합성과 세포호흡의 본질을 이해하는 데에 도움이 됩니다. 고등학교의 경우, 이러한 내용을 화학 교과에서 담고 있는데 이 내용을 생명과학 수업에서 포함 또는 활용해야 한다고 생각하십니까?
- 2) 고등학교 생명과학 교과과정에서 광합성과 세포호흡에 관한 학습에서 이 두 과정이 기본적으로 산화환원 반응인 점을 학생들이 알아야 된다고 생각하십니까? 만약 그렇다면, 광인산화와 산화적 인산화를 위한 전자에너지를 사용한 수소 이온 수송 과정도 알아야 된다고 보십니까?
3. 현재의 생명과학 교과과정에서 물질대사에 관하여 개선할 점 또는 제안할 점이 있다면 의견을 말씀해 주십시오.

III. 연구 결과

1. 대학 일반생물학 교재에서의 물질대사 관련 기본 개념

생명체의 화학적 반응을 포괄하여 생명체의 물질대사는 “열역학 법칙의 지배하에서 물질과 에너지를 변형시키는 것”으로 정의할 수 있다. 이 정의를 통해 알 수 있듯이 매우 중요한 개념인 물질대사는 대학에서 일반생물학 교과목 수업에 사용되는 여러 교재(〈표 2〉 참조)에 공통적으로 기초 화학, 세포호흡과 광합성, 영양방식, 식물과 동물의 영양 등 여러 단원에 포함되어 있다¹⁴⁾(〈표 3〉).

주목할 점은 50개 이상의 단원으로 구성된 일반생물학 교재에서 10개 이상의 단원이 물질대사를 포함하여 물질대사가 차지하는 비중이 크다는 점도 있지만, 〈표 3〉과 같이, ‘유기적인 연결성을 갖는 단원의 배열’이다. 이는 물질대사의 본질을 이해하는 데에 매우 중요하다. 그 이유는 첫째, 생명을 이해하기 위해 여러 수준에서 생명현상을 학습해야 하는데 분자 수준의 화학과 생명과학이 가장 기본이 되기 때문이다. 이와 관련하여 둘째, 가장 기초부터 시작하여 기본적인 물질대사의 개념, 더 나아가 생물이 물질대사를 수행하는 방식 등 큰 윤곽을 이해할 수 있도록 체계적인 학습이 가능하기 때문이다. 물질대사와 관련하여 〈표 3〉에 나열된 단원과 개념에 관한

14) 〈표 3〉은 Campbell, Neil A, Urry, Lisa A, Cain, Michael L, Wasserman, Steven A, Minorsky, Peter V, Orr, Rebecca B, *Biology: A Global Approach*, 12th ed., Pearce Education Inc., 2021의 2, 4, 5, 6, 10, 11장을 중심으로 하여 다음 4권의 해당 장을 조사하여 작성함. 다음: 데이비드 사다바·데이비드 힐스·크래그 헬러·메이 베렌바움, 『생명, 생물의 과학 9판』, 강해묵 외 역, (주)라이프사이언스, 2012; 로버트 브루커·에릭 위드마이어·린다 그래험·피터 스틸링, 『브루커의 생명과학』, 최준호 외 역, 흥릉과학출판사, 2014; Freeman Scott, Quillin Kim, Allison Lizabeth, Black Michael, Podgoski Greg, Taylor Emily, Carmichael Jeff, *Biological Science*, 6th ed. Pearson, 2017; Phelan, Jay, *What Is Life?-A Guide to Biology*, 5th ed., Macmillan, 2021.

〈표 3〉 여러 대학에서 채택한 일반생물학 교재에서
제시한 물질대사 관련 핵심개념과 내용

영역	단원	개념
기초 화학	원자와 분자	원소, 원자, 화학 결합의 종류
	탄소와 분자 다양성	탄소 화합물의 구조, 다양성, 작용기와 ATP
	생체 거대 분자	단위체와 중합체, 탄수화물, 지질, 단백질, 핵산
	에너지학	열역학 법칙, 반응의 자유에너지 변화, ATP의 역할과 작용 기작, 효소의 정의와 기능, 효소 활성 조절
세포생물학	세포호흡	산화환원반응 - 산화적 인산화, 해당 과정, 피루브산 산화, 시트르산 회로, 화학 삼투, 발효, 세포 호흡 조절 기작
	광합성	빛에너지의 본질, 빛에너지의 전환, 명반응, 캘빈 회로, 탄소 고정 기작의 진화
생명 다양성	원핵생물	영양방식과 대사 과정
	균류	영양방식
	동물 다양성	영양방식
식물의 구조와 기능	식물의 영양	필수 원소와 결핍증, 다른 생물체와 상호관계
동물의 구조와 기능	동물의 몸	열 조절과 항상성, 에너지 요구의 조건
	동물의 소화계	필수영양소, 식이 결합, 에너지 저장의 조절

의미와 간단한 설명은 다음과 같다.

‘원자와 분자’ 단원에서 원자 구조에 관한 이해는 가장 기본적이며 중요한데 그 이유는 우선 전자에너지에 대한 개념을 배우고 원자와 원자의 결합을 이해하는 데에 필요하기 때문이다. 전자에너지를 이해하면 분자를 형성하기 위해 원자끼리 결합할 때 분자가 갖게 되는 에너지를 이해할 수 있다. 따라서 학생들은 생물체 내에 이렇게 에너지를 가진 다양하고도 많은

분자가 있음을 이해하게 된다. 요컨대 전자에너지는 물질대사를 이해하는 데에 가장 기본적이고 매우 중요한 기초 개념이다.

‘탄소’ 단원은 생물의 몸을 구성하는 탄소 화합물의 다양성을 강조한다. 이와 함께 잊지 않아야 하는 것은 아무리 다양하더라도 모든 탄소 화합물은 탄소 원자들로 구성된 뼈대에 수소 원자가 결합한 구조를 기본적인 구조로 갖고 있다는 점이다. 이는 탄소 화합물이 탄소-탄소, 탄소-수소를 결합하고 있는 전자에너지를 보유함을 의미한다. 이에 대한 이해는 탄수화물과 지질 등 생체 거대분자의 에너지에 대한 이해에 기초를 제공한다. 이들을 이루는 주요 결합은 탄소-수소 결합이다. 탄수화물의 경우, 기본 분자식인 $n(\text{CH}_2\text{O})$ 에서 볼 수 있듯이, 탄소-수소 결합과 함께 일정한 수의 산소도 탄소와 결합한다. 이는 분자량을 기준으로 탄소-수소 결합이 더 많은 지질이 탄수화물과 비교해 에너지의 비가 4:9로 더 큰 이유이다.

생물의 물질 또는 에너지대사를 이해하는 데에 필요한 기본 개념은 ‘생물에너지학’ 단원에서 제공된다. 이 단원에서 접하는 몇 가지 기본 개념은 물질대사, 이화작용, 동화작용, 에너지, 운동에너지, 위치에너지 등과 열역학 법칙의 이해에 필요한 계, 환경, 닫힌계, 열린계 등이다. 이 단원에서 무엇보다 중요한 내용은 열역학 법칙이다. 이 법칙의 요점은, 에너지의 양은 변하지 않지만, 질은 변화하고 화학반응은 엔트로피 증가를 동반한다는 점으로 이는 생명에게도 예외가 아니라는 것이다. 이 열역학 법칙을 근거로 하여 화학반응의 자발성과 비자발성의 근거가 제시되고, 이와 관련하여 생명체에 필수적인 비자발적 반응이 일어나도록 하는 데에 ATP가 필요하다는 점이 설명된다. 이 단원에 포함된 모든 개념과 법칙이 중요하지만, ‘ATP가 생물이 사용할 수 있는 가장 주요한 에너지 형태’라는 개념은 생물의 물질대사를 이해할 때 가장 중요하고도 기본적인 개념이다. 이외에도 이 단원에는 화학반응을 촉매하는 효소에 대한 여러 개념도 포함되어 있다.

‘세포호흡’ 단원에서는 화학 삼투를 통한 산화적 인산화 과정이 핵심이다. 이 두 과정을 통해 포도당으로부터 얻은 전자의 이동에 따른 대부분의 ATP 합성이 설명된다. 또한, 이 단원에서는 산소가 없는 환경에서도 전자

에너지를 이용하여 ATP를 생성할 수 있는 발효과정을 포함하고 있다.

광합성의 본질은 빛에너지를 화학에너지로 전환하는 것이다. 더불어 이 단원에서 주목할 점은, 세포호흡과 마찬가지로, 전자가 전달되는 산화환원 반응을 거쳐 ATP가 합성된다는 점이다. 그래서 광합성은 태양에너지를 획득해서 화학에너지로 에너지의 형태를 전환하고 이 과정에서 산소를 발생시키는 명반응과 화학에너지를 이용해서 이산화탄소를 당으로 환원시키는 캘빈회로로 이루어져 있다. 그 결과, 광합성은 대기에 산소를 제공할 뿐 아니라 지구 생명체 대부분이 에너지원으로 사용하는 탄수화물을 만들어낸다.

요컨대, 대학의 일반생물학 교재는 전자에너지라는 가장 기본적인 개념에 토대를 두고 분자 구조, 열역학 법칙, ATP와 효소에 관한 설명을 이어간다. 이후 이에 대한 이해를 기초로 하여 본격적으로 세포호흡과 광합성이라는 물질대사를 다룬다. 이 두 물질대사 과정의 본질이 전자를 주고받는 산화환원 반응인 점은 이와 같은 기본 개념에 관한 이해를 전제로 함을 보여준다. 이처럼 대학의 교재들은 물질대사 관련 개념들을 순차적으로 배치하고 있으며 이에 따른 설명은 매우 체계적이다. 따라서 본 연구에서는 고등학교 이하의 물질대사 관련 교과과정에 이러한 개념들이 포함되었는지와 포함되었다면 체계적으로 제시되었는지를 살펴보고자 한다.

2. 과학과 교육과정에서 물질대사 관련 개념 배치 체계

초등학교와 중학교 교육과정에서 물질대사와 관련된 교과 내용을 살펴보았다. <표 4>는 초등학교와 중학교 과정에서 물질대사와 관련된 교과 내용을 정리한 것이다. 초등학교에서는 물질대사와 관련하여 광합성에 대한 현상적 이해를 요구하는 정도이다. 물질대사와 관련해서 본격적으로는 중학교 과정에서 에너지와 물질 관련 개념들을 꽤 많이 제시한다. 에너지의 정의와 종류, 열역학 법칙과 에너지 전환, 물질의 구성, 광합성과 호흡 등 물질대사 이해에 필수적인 개념들이 해당한다.

〈표 4〉 초등학교와 중학교의 물질대사 교육 내용

과정	핵심개념	일반화된 지식	내용 요소
중학교	역학적 에너지	마찰이 없는 계에서 역학적 에너지는 보존된다.	중력에 의한 위치 에너지, 운동 에너지, 역학적 에너지 보존
	열역학 법칙	에너지는 전환되는 과정에서 소모되거나 생성되지 않는다.	소비 전력
	에너지 전환	에너지는 다양한 형태로 존재하며, 다른 형태로 전환될 수 있다.	일, 에너지 전환
	물질의 구성 입자	물질은 입자로 구성되어 있다.	원소, 원자, 분자, 원소 기호, 이온, 이온식
	에너지 출입	물질의 변화에는 에너지 출입이 수반된다.	화학 반응에서의 에너지 출입
	광합성과 호흡	광합성을 통해 빛에너지가 화학 에너지로 전환된다.	광합성에 필요한 물질, 광합성 산물, 광합성에 영향을 미치는 요인
호흡을 통해 생명 활동에 필요한 에너지를 얻는다.		식물의 호흡과 광합성의 관계	
초등학교	광합성과 호흡	광합성을 통해 빛에너지가 화학 에너지로 전환된다.	광합성

물질대사 관련 개념들의 배치 체계를 더 살펴보기 위해 통합과학, 생명과학 I, 생명과학 II에서 물질대사 관련 단원을 정리하였다(〈표 5〉). 모든 고등학생이 수강해야 할 통합과학에서 대사와 관련하여 학습해야 할 내용 요소는 생물의 에너지 원천인 화학 결합과 관련한 이온 결합과 공유결합이 있고 에너지대사의 재료로 사용할 수 있는 생명체 주요 구성 물질이 있다. 생명체 주요 구성 물질은 구체적으로 탄수화물과 지질, 단백질을 포함한다. 또한, 물질대사, 효소, 산화와 환원 등의 내용 요소도 있다.

〈표 5〉 2015 개정 교육과정에 근거한 고등학교 생명과학 교과서에 실린 물질대사 관련 핵심 개념과 내용

교과서	핵심 개념	내용 요소
통합과학	물질의 규칙성과 결합	이온 결합, 공유 결합
	자연의 구성 물질	지각과 생명체 구성 물질의 규칙성, 생명체 주요 구성 물질
	생명 시스템	물질대사, 효소
	화학 변화	산화와 환원
생명과학 I	동물의 구조와 기능	물질대사, ATP, 노폐물의 배설 과정
생명과학 II	세포의 특성	탄수화물, 지질, 단백질, 핵산
		세포막을 통한 물질 수송, 효소 작용
	광합성과 호흡	엽록체의 구조와 기능, 광계를 통한 명반응, 광합성의 탄소 고정 반응 미토콘드리아, 산화적 인산화, 화학 삼투, 산소 호흡과 발효, 전자 전달계

생명과학 I에서는 ‘동물의 구조와 기능’ 단원에서 물질대사, ATP, 노폐물의 배설 과정 등의 내용 요소를 포함한다. 따라서 통합과학에서 화학 결합과 생명체 주요 구성 물질, 효소, 산화와 환원에 대한 학습은 생명과학 I에서 제시한 내용 요소를 배우는 데에 도움이 될 것으로 보인다. 다만, 물질대사에 대한 설명을 동물 위주로 하고 있어 광합성에 대한 이해는, 다루는 범위와 심도는 서로 다르지만, 중학교 교과과정과 생명과학 II에서 가능하다.

생명과학 II에서는 생명체를 이루는 거대분자, 효소 작용, 광합성과 호흡을 내용 요소로 포함한다.¹⁵⁾ 거대분자와 효소는 통합과학보다 더 상세하게

15) 2022 개정 교육과정의 경우, 선택 중심 교육과정에 있는 세포와 물질대사, 생물의 유전, 기후변화와 환경생태 등의 진로 선택 과목들이 2015 개정 교육과정의 생명과학 II 교과에 해당한다.

설명되어 있다. 통합과학과 생명과학 I을 모두 학습한 학생들은 광합성과 호흡을 이해할 수 있도록 이 내용 요소를 포함한 단원이 배치되어 있다.

물질대사에 관한 과학과 교과과정 체계를 살펴보았다. 이를 통해서 알 수 있는 것은, 첫째, 과학과 전체 교과과정은 대학의 생물학 교재처럼 물질대사에 관련된 개념들을 비교적 체계적으로 배치하였다는 점이다. 그러나 <표 6>에서 대학교양의 일반생물학 교과와 비교한 결과의 4번째 줄까지의 내용에서 보듯이, 생명과학 I과 II에 이들 개념 모두가 포함된 것은 아니므로 물질대사에 관한 기초를 든든하게 학습하기 위해서는 관련 내용 요소들을 복습하기 위한 안내와 교사들의 노력이 더 필요한 것으로 판단된다. 둘째, 대부분 학생은 통합과학을 수강하고 많은 수의 학생들은 생명과학 I을 수강한다. 또 생명과학 I을 수강한 학생들 중 상당수는 생명과학 II를 수강할 가능성이 크지만, 일부 학생들은 생명과학 II를 수강하지 않는다. 어쨌든 문제는 통합과학과 생명과학 I은 물질대사를 다루는 본격적인 단원이 포함되어 있지 않다는 점이다. <표 6>의 5, 6번째 줄에서 볼 수 있듯이 대부분의 내용 요소는 생명과학 II에 포함되어 있다. 따라서 2015 개정 교과서에서, 광합성의 경우, 여러 관련 내용이 유기적으로 잘 연결되어 있다는 연구¹⁶⁾가 있더라도 생명과학 II를 제외한다면 현실적으로는 그 의미가 감소할 수 있다. 게다가 2022 개정 교육과정의 경우, 선택 중심 교육 과정에 생명과학 II 대신 세포와 물질대사, 생물의 유전, 기후변화와 환경 생태 등의 진로 선택과목들이 있어서 학생들은 세포와 물질대사를 수강할 확률은 생명과학 II의 경우보다 더 낮을 가능성이 크다. 셋째, 물질대사의 근본을 이루는 전자에너지 개념이 교과과정에 없기 때문에, 기본에 충실한 이해가 아닌 단편적인 지식에 대한 이해와 암기 중심의 교육이 야기될 가능성이 있는 것으로 보인다.

16) 김영신, 박신아, 임수민, 「제7차, 2009 개정, 2015 개정 교육 과정에 따른 광합성 관련 개념의 수평적, 수직적 연계성」, 『생물교육』 제49권 제3호, 한국생물교육학회, 2021, 399~416쪽.

〈표 6〉 고등학교 과학 교과과정의 내용요소와 교양교육 과정 일반생물학의 주요 개념 비교

영역	세부 영역	내용요소	교양교과 과정 일반생물학의 개념
기초 화학	원자와 분자	원자와 분자, 이온 결합, 공유결합	원소, 원자, 화학 결합의 종류
	탄소 화합물		탄소 화합물의 구조, 다양성, 작용기와 ATP
	거대 분자	지각과 생명체 구성 물질의 규칙성, 생명체 주요 구성 물질	단위체와 중합체, 탄수화물, 지질, 단백질, 핵산
	에너지학	물질대사, 효소, ATP ¹ ,	열역학 법칙, 반응의 자유에너지 변화, ATP의 역할과 작용 기작, 효소의 정의와 기능, 효소 활성 조절
세포 생물학	세포호흡	산화와 환원, 물질대사 ¹ , 미토콘드리아 ² , 산화적 인산화 ² , 화학 삼투 ² , 산소 호흡과 발효 ² , 전자 전달계 ²	산화환원반응 - 산화적 인산화, 해당 과정, 피루브산 산화, 시트르산 회로, 화학 삼투, 발효, 세포호흡 조절 기작
	광합성	엽록체의 구조와 기능 ² , 광계를 통한 명반응 ² , 광합성의 탄소 고정 반응 ²	빛에너지의 본질, 빛에너지의 전환, 명반응, 캘빈회로, 탄소 고정 기작의 진화

1은 생명과학 I, 2는 생명과학 II에 포함된 내용 요소임. 나머지는 통합과학에 속함.

3. 과학과 교과과정에서 물질대사 관련 핵심 또는 주요 개념에 대한 설명 분석

본 연구는 2015 개정 교육과정을 연구하였다. 그러나 이 연구에서 살펴본 성취기준은 모두 성취기준은 최근에 결정된 2022 개정 교육과정에서도 발견되고 관련 해설도 유사하여 물질대사에 관련해서는 본질적으로는 큰 차이가 없다고 판단하였다.¹⁷⁾ [9과08-02]는 에너지 측면에서 물질대사를

이해하기 위한 매우 기본적인 개념을 포함한다. ‘원자는 핵과 전자로 구성됨’을 이해하기 위해서는 원자 구조가 핵과 전자 사이의 전자기력을 전제로 함을 알 수 있다. 바로 이 전자기력을 구성하는 전자에너지가 생물 에너지의 근원이라 할 수 있다. 그러나 이는 성취기준 해설, 교수·학습 방법 및 유의 사항, 평가방법 등에 명시되어 있지 않는데, 이 개념을 이해하기 위해서 더 높은 수준의 물리 또는 화학 원리의 학습이 필요하기 때문인 것으로 보인다.

성취기준 [9과11]과 [9과12]는 식물과 동물의 에너지에 관한 전반적인 내용을 포함하며 각각 광합성과 세포호흡의 의미를 포괄한다. 예컨대, 광합성에 대한 설명에서 과학과 교육과정은 광합성의 의미와 영향, 증산 작용과의 관련성, 호흡과의 관련성, 광합성 산물의 생성, 저장, 사용 과정 등을 포함한다¹⁸⁾. 이에 대한 학습 요소, 성취기준 해설, 평가방법 등을 살펴보면, 광합성의 재료와 산물, 빛에너지의 이용 등에 대한 설명이 제시될 수 있지만, ‘광합성의 본질 중의 하나인 광인산화가 전자 이동이 동반되는 산화환원반응’이라는 개념을 이해하기는 쉽지 않아 보인다. 이는 세포호흡에 대한 설명에서도 마찬가지이다. 이 두 중요한 과정의 본질이 산화환원반응이라는 점은 통합과학에서 언급되며, 이 산화환원반응에 대한 상세한 설명은 생명과학 II에서 다룬다. 성취기준 [9과08-02]와 연계해 본다면, 광합성과 세포호흡은 전자전달이라는 과정을 포함하여 전자에너지를 사용하는 과정임을 알 수 있지만, 본격적인 내용은 생명과학 II에서 발견할 수 있다.

성취기준 [9과17-06]의 내용은 화학반응에서 에너지의 출입에 관한 것이다.¹⁹⁾ 화학반응은 생명현상을 구성하기 때문에, 이에 대한 이해는 생물

17) 본 연구에서 언급한 2015 개정 과학 교과과정의 성취기준 [9과08], [9과11], [9과12], [9과17], [9과19], [10통과02], [10통과05], [10통과06], [12생과I 02], [12생과II 02], [12생과II03] 등은 각각 2022 개정 과학 교과과정의 성취기준 [9과11-02], [9과12], [9과13], [9과16], [9과19], [10통과1-02], [10통과1-03], [10통과2-01], [12생과01], [12세포01], [12세포03] 등에 해당한다.

18) 교육부, 『과학과 교육과정』, 교육부 고시 제2015-74호 (별책 9), 2015, 68~70쪽

19) 교육부, 앞의 책, 75쪽.

의 물질대사를 이해하는 데에 중요하다. 다만 이 성취기준은 중학교 수준의 화학반응 내용이 갖는 한계에 유의해야 하고 생물의 물질대사와의 관련성이 따로 언급되어야만 물질대사 이해에 도움이 될 수 있다.

성취기준 [9과19-03]에서는 일, 위치에너지, 운동에너지에 대한 정의를 소개하고 있다. 학생들이 이 개념을 이해하면 향후 생물의 물질대사의 본질을 이해하는 데에 기초 개념으로 도움이 될 것이다. 또한, 핵심개념인 에너지 전환은 에너지 보존, 에너지 전환 등을 담고 있어²⁰⁾ 이에 대한 이해 역시 생물의 물질대사를 이해하는 데에 필수적이다. 다만, 중학교 과학과 성취기준 표에 ‘열역학 법칙’이 표기되어 있지만, 성취기준 내용에는 이 용어를 찾아볼 수 없다. 대신 에너지 전환에 대한 설명이 포함되어 있다.

요컨대, 중학교 과학 교과과정은 열과 에너지 영역과 물질의 변화 영역에서 에너지에 대한 기본 개념을 학습하고, 생물의 구조와 에너지 영역에서 광합성과 호흡을 다룬다. 이러한 원리와 개념은 높은 급의 학습에서 물질대사를 이해하는 데에 바탕이 될 것으로 보인다. 이러한 연계를 위해서는 다음이 필요한 것으로 보인다. 첫째, 물질대사 이해에 기본적으로 필요한 개념으로, 제시된 성취기준을 조합하여 전자에너지는 위치에너지라는 개념을 학습할 기회가 필요해 보인다. 둘째, 광합성과 호흡을 제외한 다른 개념들은 생물의 물질대사와의 관련성에 대한 뚜렷한 언급이 없는 경우가 많아서 생물의 물질대사와의 관련성을 파악하여 연결하는 데에 부가적인 노력이 필요하다. 즉, 학생들이 생명 시스템에서 일어나는 물질대사를 체계적으로 이해하기 위해서는 학생 자신 또는 교사의 노력이 필요해 보인다.

통합과학의 핵심개념을 살펴보면 다음과 같다. 이온 결합과 공유결합 등의 내용 요소의 경우, 성취기준 내용은 화학 결합의 원리에 관한 것이다. 성취기준 해설에 따르면 성취기준 [10통과01-04]은 “주요 원소들이 화학 결합을 형성하는 이유를 안정성을 지닌 원소의 예로 설명한다.”이고 평가방법은 “원소의 성질 비교하기, 화학 결합의 종류에 따른 물질의 성질 비교하

20) 교육부, 앞의 책, 78쪽.

기, 이온 결합 및 공유결합 물질 찾아보기 등”이다.²¹⁾ 학생들은 이러한 과정을 통해 화학의 기초 원리를 이해할 수 있고 적절한 설명이 더해진다면 생물들의 에너지대사에 대한 기초적인 개념을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

핵심개념 ‘자연의 구성 물질’에서는 지각과 생명체를 구성하는 물질을 다룬다. 성취기준 [10통과02-01]은 생물과 관련해서 물질의 다양성은 이온 결합이나 공유결합과 같은 원소들의 다양한 화학반응을 통해 이루어지고 이를 바탕으로 생명체를 구성하는 탄소 화합물이 원소 간의 규칙적인 화학 결합을 통해 만들어진다고 설명한다.²²⁾ 그리고 성취기준 [10통과02-02]는 탄소 화합물 중 단위체와 중합체의 개념으로 설명되는 거대분자인 단백질과 핵산에 대한 학생들의 이해에 도움을 주고 있다.²³⁾ 이를 통해 학생들은 생명체 주요 구성 물질이 일정한 구조를 가진 단위체들의 다양한 배열을 통해 만들어지며 여러 가지 구조와 기능을 획득한다는 개념을 얻을 수 있을 것이다.

성취기준 [10통과05-02]은 물질대사에 관한 이해의 기초 개념 중의 하나이다. 이 성취기준의 내용 요소는 화학반응에서 촉매의 역할을 이해하고 왜 생물에게 효소가 중요한지를 설명한다. 효소의 중요성은 탐구 주제에 효소 활성 측정의 예시가 여럿 포함된 것으로도 볼 수 있다. 효소 활성에 관한 이해가 중요한 만큼 효소 활성과 분자 결합 또는 분해에 관한 내용 요소가 학습될 수 있는 체계가 필요하다. 효소는 다음에 기술할 핵심개념과도 연결하여 학습이 필요한 내용이기 때문에 보다 중요성을 가진다.

핵심개념 ‘화학 변화’는 지구와 생명체에 영향을 미치는 다양한 화학반응을 다룬다. 이와 관련하여 성취기준 [10통과06-02]는 특히 생명현상에서 나타나는 산화환원반응의 예로 미토콘드리아의 세포호흡과 엽록체의 광합성을 제시한다. 더불어 산소 또는 전자의 이동을 다룰 것을 요구하고 있다. 그러나 교수·학습 방법과 평가방법 등에서 제시된 내용에 따르면 세포호

21) 교육부, 앞의 책, 92~93쪽.

22) 교육부, 앞의 책, 94쪽.

23) 교육부, 앞의 책, 95쪽.

흡과 광합성과 관련하여 산화환원반응은 상당히 간단히 다루는 것으로 보인다.²⁴⁾

생명과학 I의 성취기준 [12생과 I 02-01]과 [12생과 I 02-02]는 동물의 구조와 기능 단원에서 생명 활동 유지를 위해 필요한 에너지가 일련의 물질대사 과정을 거쳐 생성됨을 나타냄으로써 생명체에서 일어나는 물질대사에 대해 이해시키고자 한다.²⁵⁾ 이러한 의도를 담기 위해 생명과학 I 교과서들은 물질대사 과정에서 생산된 에너지가 ATP로 저장되고 사용됨과 소화·순환·호흡·배설의 과정을 통합적으로 다루며 물질대사의 중요성을 이해시키고자 물질대사와 관련된 질병의 사례를 다루고 있다. 구체적으로는 사람의 물질대사 단원에서 물질대사, 동화작용, 이화작용 등에 관한 설명을 가장 앞에 배치하고 세포호흡에 관한 간략한 언급, 호흡·순환·소화·배설의 유기적 관계, 대사성 질병과 건강 등에 대한 설명 등을 순서대로 담고 있다. 그러나 이 단원에서는 과학과 교과과정의 지침에 따라 물질대사의 가장 핵심에 해당하는 세포호흡과 광합성을 본격적으로 다루지 않는다.

생명과학 II에서는 우선 탄수화물, 지질, 단백질, 핵산 등의 거대분자에 대한 성취기준이 제시되어 있다([12생과 II 02-02]).²⁶⁾ 이에 대해서는 이미 통합과학에서 언급되었기 때문에, 학생들은 거대분자들의 구조와 기능에 관하여 심도 있게 학습을 진행할 수 있을 것으로 보인다. 물질대사 측면에서, 학생들은 탄수화물과 지질이 에너지가 풍부한 분자임을 아는 것이 중요하다. 이와 더불어 물질대사와 관련하여 주목해야 할 성취기준 [12생과 II 02-06]은 효소 작용에 대한 것으로 이 역시 통합과학보다 더 심도 있는 이해가 가능할 것이다.

생명과학 II는 본격적으로 세포호흡과 광합성을 다룬다(성취기준 [12생과II03]의 5개 항목). 즉, 미토콘드리아와 엽록체의 전자현미경적 구조와 기능을 살펴보고 전자 전달계를 비교 대상으로 한 세포호흡과 광합성의 관

24) 교육부, 앞의 책, 101쪽.

25) 교육부, 앞의 책, 169쪽.

26) 교육부, 앞의 책, 181~182쪽.

계 및 물질대사를 설명한다. 그리고 각각, 산화적 인산화와 광인산화 과정을 설명함으로써 세포호흡과 광합성이 본질적으로 전자전달을 동반하는 산화환원반응임을 제시한다. 그러므로, 전자에너지에 대한 이해는 이 과정을 이해하는 데에 매우 큰 도움이 될 것이다. 또한, 최초로 화학 삼투라는 개념을 제시하여 산화적 인산화와 광인산화의 메커니즘을 설명하고 있다.

광합성의 경우에는 한 가지 주목할 만한 점이 있다. 이는 캘빈회로를 탄소 고정 반응과 동일하게 간주한 점이다. 이는 우리가 참조한 5종의 고등학교 생명과학 II 교과서 모두에서 발견된다. 즉, 탄소 고정, 환원, RuBP 재생 등 3단계를 포함하는 캘빈회로를 탄소 고정 반응이라 명명하여 혼란을 초래하는 것이다. 따라서 학생들은 C4와 CAM 식물들이 탄소 고정 반응과 캘빈회로가 분리되어 작동하는 특징을 이해하는 데에 혼란을 초래할 위험성이 있다.

중학교 교과과정은 물론, 고등학교 통합과학의 '화학 결합'에 대한 설명에서 전자에너지에 대한 언급이 부족하여 학생들은 생명체의 에너지 흐름을 기본에 근거하지 않은 채 이해해야 하는 어려움을 겪을 수 있다. 또한, 통합과학 과정의 '산화환원반응'에서 전자 이동이 일어나는 단계와 에너지 대사에서 차지하는 역할과 비중에 대한 설명도 전자에너지에 대한 이해가 필요하다. 다만, 이 개념들은 고등학교 화학과 물리 교과목에 포함되어 있기 때문에 고등학교 때에 이 두 교과목을 수강한 학생들은 물질대사의 본질적 이해에 필요한 기본을 갖추었다고 볼 수 있다.²⁷⁾ 이에 대해서는 생명과학 II에서 본격적으로 다루고 있어 통합과학만 수강한 학생들은 산화환원반응이 본질이 세포호흡과 광합성의 구체적인 내용과 의미를 접하지 못할 수 있다. 생명과학 I 과정에서는 동물, 즉 인간의 세포호흡만 간략하게

27) 물리와 화학 교과과정이 전반적으로 필요하지만, 2015 개정 과학교육과정에서 물질대사의 본질적인 이해에 비교적 직접적인 관련성이 있는 성취기준을 보면, 물리의 경우, [12물리 I 02-01]과 [12물리 I 02-02], 화학의 경우, [12화학 I 02-01], [12화학 I 02-02], [12화학 I 02-03], [12화학 I 04-05], [12화학 II 03] 등이 해당한다고 볼 수 있다.

다루고 있어서 세포호흡의 본질은 물론 광합성과의 연계성에 관한 이해가 부족할 수 있다.

4. 고등학교와 대학의 교과과정을 고려한 학생들의 물질대사 개념 이해

앞에서 살펴본 것처럼 대학에서 사용하는 일반생물학 교재들은 하나같이 학생들이 물질대사의 원리를 체계적으로 이해할 수 있도록 단원들이 고안되고 배치되어 있다. 그러므로 대학 교양교육 과정에 개설된 일반생물학 성격의 교과를 수강한다면, 물질대사에 관한 체계적 이해가 가능하다. 그런데, 우리나라의 많은 대학에서 생물학 관련 전공이 아닌 학생들은 이러한 일반생물학 또는 기타 생물학 관련 교과목을 수강하지 않아도 졸업이 가능하다. 그래서 대학의 많은 졸업생의 물질대사에 대한 이해 정도는 고등학교 교과 내용에 그치게 된다. 그리고 고등학교에서 인문계의 많은 학생은 모두 통합과학을 수강하고 많은 수가 생명과학 I까지 수강하기 때문에, 대다수 학생은 물질대사에 관한 이해가 생명과학 I 수준에 그치게 된다.

이 학생들은 물질대사에 관하여 다음과 같은 특징을 나타낼 것으로 보인다. 첫째, 가장 기본적인 개념인 ‘전자에너지’에 대한 개념의 형성이 충분하지 않은 상태에서 물질대사와 관련된 여러 개념을 접하게 된다. 둘째, 분자구조, 열역학 법칙, ATP와 효소, 세포호흡과 광합성으로 이어지는 순차적이고도 체계적인 이해가 쉽지 않을 수 있다. 왜냐하면, 이들 개념을 다루는 성취기준이 고등학교 전체 과학 교과과정에 분산되어 있기 때문이다. 셋째, 생명과학 II를 수강하지 않은 꽤 많은 학생은 세포호흡과 광합성의 기본적인고도 상세한 메커니즘에 대한 이해가 부족할 가능성이 크다. 특히 ‘화학삼투’는 학생들에게 생소한 개념이 될 것이다. 즉, 우리나라의 고졸 또는 많은 대졸 학생들 가운데 일부는 세포호흡과 광합성의 본질을 모르는 채 사회로 진출하게 되는 일종의 교육적 한계가 발생하게 된다.

5. 인터뷰 결과 분석과 의미

본 연구의 내용에 관한 고등학교 교사들의 의견을 정리하면 다음과 같다. 생명과학 II에서만 본격적으로 광합성과 세포호흡을 소개하는데 통합과학과 생명과학 I 수강만으로 물질대사에 대한 이해가 충분한지에 관한 질문에 2명은 충분하다, 3명은 충분하지 않다고 하였다. 충분하다고 답한 이유는 이 정도만으로도 예컨대, 광합성과 세포호흡의 차이와 생태계 유지를 위한 물질대사 등과 같은 물질대사에 관한 기본적인 내용 학습할 수 있다는 점과 일반 시민으로서 알아야 할 정도의 기본 개념으로 적절한 것으로 간주하기 때문이었다. 또한, 생명과학 II는 물질대사를 분자 화학적 과정에 초점에 맞추었다는 점도 언급하였다. 반면 충분하지 않은 이유는 이 정도로는 물질대사에 관한 깊이 있는 이해가 부족할 수 있다는 점과 통합과학에 포함된 여러 화학 관련 개념(원소, 화합물, 산화환원반응, 생체 고분자) 등이 생명과학 I과 II의 물질대사와의 연결 고리가 미약하다는 점 등이었는데 이는 본 연구의 결론과 일정 정도 일치한 것으로 판단된다.

광합성과 세포호흡 등 물질대사를 이해하기 위해 고등학교 교육 과정에서 원자 구조, 분자 합성, 전자에너지 등이 수업에 포함 또는 활용되어야 하는지에 관한 질문에 4명은 동의하였고 1명은 동의하지 않았다. 동의한 이유는 이러한 기본 화학적 개념은 물질대사의 본질을 이해하는 데에 도움이 되기 때문이라는 점이다. 반대 이유는, 이 내용의 수업 필요성은 인정하지만, 시수와 진도 등을 감안할 때 현실적으로 수업하기 어려울 수 있다는 점이었다. 요컨대, 5명 교사 모두 원칙적으로는 본 연구의 주장에 동의한다고 볼 수 있다. 교사들은 이런 점을 극복하기 위해 교과과정의 재구성과 화학 또는 물리학과 융합 수업을 제안하였다.

광합성과 세포호흡 반응이 기본적으로 산화환원 반응이고 그 메커니즘인 화학삼투라는 점을 학생들이 이해할 필요성이 있는지에 대한 질문에도 역시 4명이 동의하였고 1명은 동의하지 않았다. 동의 이유는 생명현상 또는

정의에 대한 본질적인 이해를 하는 데에도 도움이 된다는 점이였다. 동의하지 않는 이유는 앞과 동일하였다.

물질대사와 관련하여 생명과학 교과과정에 관하여 개선할 점을 묻는 질문에 대해서는 다음과 같은 여러 의견이 제시되었다. 한 의견은 CAM 식물과 사람 이외의 동물들의 물질대사를 포함하고 세포의 구조와 기능을 생명과학 I에 포함하는 등 생명체에 대한 거시적인 시각과 체계적인 이해력을 가질 수 있는 교과과정의 큰 틀의 변화가 필요하다는 제안이다. 다른 의견은 복잡한 화학반응 경로와 다양한 에너지 전환 패턴에 대한 이해가 필요하다는 점이다. 또 다른 제안은 실생활 또는 인체생리학과 연관된 다양한 사례와 설명이 더 포함되어야 한다는 점이였다.

각 질문에 대하여 응답자들의 답은 다르더라도 각각의 답에 대한 배경과 근거에는 공통점이 있었다. 그 점은 광합성과 세포호흡 등 물질대사에 관하여 묘사된 현상에 대한 원리 수준의 이해가 필요하다는 것이다. 그래야 물질대사가 제대로 이해될 수 있다는 것이다. 이는 생명과학의 다른 영역도 마찬가지일 수 있다. 이러한 학습이 가능한 교육 방법 그리고 더 나아가 교육과정이 제공된다면 생물학은 외우는 교과목이 아닌 흥미를 유발하는 이해의 과학 교과목으로 발전하는 데에 더 도움이 될 것이다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 2015 개정 과학과 교육과정에서 물질대사와 관련된 개념들이 어떻게 다루어지고 있는지와 현장 교사들의 의견을 청취한 내용을 분석하고 이를 토대로 체계적이고 올바른 물질대사 교육 방향을 제시하고자 하였다.

대학 이전의 교육과정에서 물질대사와 관련된 단원들에서 찾을 수 있는 몇 가지 특징은 다음과 같다. 첫째, 중학교, 고등학교에 이르는 일련의 교

과과정에서 물질대사의 본질을 이해할 수 있는 원자와 분자의 구조, 전자에 너지 등의 개념과 광합성, 세포호흡 단원이 곳곳에 산재되어 있어서 물질대사의 본질을 체계적으로 이해하려면 추가적인 노력이 필요할 수 있다. 게다가 현 교육과정을 고려한다면 문과의 많은 학생은 공통과목인 통합과학과 선택과목인 생명과학 I만을 배우게 되는데, 광합성과 세포호흡은 생명과학 II에서만 다룬다.²⁸⁾ 즉 이 학생들은 물질대사의 핵심적인 이 두 작용에 대한 본격적인 학습을 경험하지 못하게 된다. 더불어 대학에서 인문사회계 학생들(선택과목으로 생명과학 II 또는 생명과학 I과 II 모두를 택하지 않은 학생들)은 대학에서 교양교육 과정에 개설된 일반생물학 성격의 교과목을 수강하지 않는다면 기초적인 원리에 근거한 물질대사 개념을 갖기 어렵게 된다. 둘째, 광합성 과정에서 캘빈회로와 탄소 고정을 구분하여 설명하고 있지 않다. 따라서 다양한 환경 조건에 적응하기 위해 다양한 식물체들이 서로 다른 탄소고정 방식을 진화시켜오며 대기에 산소를 제공하고 지구 생명체에게 에너지원을 제공하는 과정을 이해하는 데에 어려움이 있을 수 있다. 셋째, 최근의 연구에 따르면, 세포호흡의 해당작용 뿐만 아니라 화학삼투도 모든 생물의 공통 조상이 지녔을 가능성이 제시되고 있다.²⁹⁾ 또한, 내부 공생과 막의 합입에 의한 진핵생물의 탄생에 물질대사의 관련 가능성도 제시되었다.³⁰⁾ 이러한 연구결과는 생물의 기원과 관련하여 중요한 시사점을 제공할 가능성이 있어서 물질대사에 관한 체계적 교육의 절실함이 더욱 필요한 것으로 보인다.

많은 학생이 물질대사에 관한 이해를 할 때 고려해야 하는 저해 요소는 또 있다. 현재의 생명과학은 유전학, 분자생물학에 집중된 내용을 다루고 있어서 이를 접하는 학생들은 생명에 관한 이해에 매우 중요한 물질대사를

28) 2022 개정 교육과정에서는 생명과학 I이 생명과학으로 바뀌었고 선택 중심 교육 과정에 있는 세포와 물질대사, 생물의 유전, 기후변화와 환경생태 등의 진로 선택 과목들이 2015 개정 교육과정의 생명과학 II 교과에 해당한다.

29) 닉 레인, 『미토콘드리아』, 김정은 역, 뿌리와이파리, 2009, 149~162쪽.

30) 닉 레인, (2016) 『바이털퀘스천: 생명은 어떻게 탄생했는가?』, 김정은 역, 까치, 2016, 234~242쪽.

경시하는 경향이 생기기 쉽다는 점이다. 이러한 특징을 감안한다면, 체계적이고 올바른 물질대사 교육을 위해서 이에 대한 개선이 필요해 보인다. 우선, 과학과 교육과정 내 성취기준이 지닌 장단점을 파악하여 대학에서 학생들이 체계적으로 교육하는 데에 참고할 필요가 있다. 이를 통해 생명체에서 일어나는 복잡한 물질대사 과정을 단순한 암기가 아닌 전반적인 에너지 관점에서의 이해를 통해 습득할 수 있도록 해야 한다.

고등학교 교과과정이 지닌 장단점을 전제로 하여 대학에서 교양으로서 생물학 수업 운영할 때 몇 가지 점을 유의하여야 한다. 첫째, 분자와 원자, 거대분자, 에너지학, 광합성, 세포호흡으로 이어지는 물질대사 단원들의 체계적인 배치의 중요성을 인지하여 수업에 적용하여야 한다. 이는 학생들이 물질대사에 관한 개념 형성에 든든한 기초를 제공할 것이다. 둘째, 고등학교에서 에너지학, 광합성과 세포호흡 등에서 상세한 내용을 학습하지 않는 학생들이 많은 점을 감안하여 해당 단원의 수업 난이도를 조절해야 한다. 셋째, 무엇보다도 ‘물질대사’라는 주제가 학생들이 생명을 정의하는 커다란 특징이고 따라서 생명현상을 이해하는 데에 얼마나 중요한지를 인식할 수 있도록 노력을 기울일 필요가 있다.

물질대사에 관한 체계적인 이해는 생명현상을 올바르게 균형 있는 시각으로 이해하는 데에 전제 조건이라 할 수 있다. 더불어 화학과 생물학의 융합적 사고에 도움을 줄 것으로 판단된다. 지구온난화 기후변화에 대응한 탄소 중립에 전 세계의 관심이 집중되는 현 상황을 볼 때 특히나 물질대사 중 광합성은 지구권의 탄소 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있어 이에 대한 이해가 얼마나 중요하며 생명 시스템에서의 에너지 흐름에 대한 이해가 얼마나 필수적인지에 대한 논쟁의 여지는 없어 보인다. 이러한 점들을 고려한다면, 본 연구는 생명에 대한 학생들의 이해에 일정 정도 생각해야 할 점을 제공한다는 측면에서 의미가 있다고 판단된다.

참고문헌

- 곽대오 · 하수현 · 김호진, 「고등학교 생물 II 교과서 5종의 세포호흡 관련 내용에 나타난 개념들의 정교화」, 『교육과정평가연구』 제7권 제2호, 한국교육과정평가원, 2004, 343~359쪽.
- 교육부, 『과학과 교육과정』, 교육부 고시 제2015-74호 (별책 9), 2015.
- 교육부, 『과학과 교육과정』, 교육부 고시 제2022-33호 (별책 9), 2022.
- 권현석, 「2015 개정 교육 과정에 따른 생명과학 II, 고급 생명과학 교과서와 대학교 일반 생물학 교재 연계성 분석 : 세포 호흡 단원 중심으로」, 석사논문, 고려대학교 교육대학원, 2020.
- 김미영, 「제7차 교육과정 생물 I과 2009 개정 교육과정 생명과학 I 교과서의 물질대사 단원 비교 분석」, 『생물교육』 제41권 제2호, 한국생물교육학회, 2013, 211~224쪽.
- 김보람, 「검인정 교과서와 한국창의재단 교과서의 고등학교 생물 물질대사 비교 분석」, 석사논문, 목포대학교 교육대학원, 2010.
- 김영신 · 박신아 · 임수민, 「제7차, 2009 개정, 2015 개정 교육 과정에 따른 광합성 관련 개념의 수평적, 수직적 연계성」, 『생물교육』 제49권 제3호, 한국생물교육학회, 2021, 399~416쪽.
- 닉 레인, 『미토콘드리아』, 김정은 역, 뿌리와이파리, 2009.
- 닉 레인, 『바이털퀘스천: 생명은 어떻게 탄생했는가?』, 김정은 역, 까치, 2016.
- 데이비드 사다바 · 데이비드 힐스 · 크래그 헬러 · 메이 베렌바움, 『생명, 생물의 과학 9판』, 강해묵 외 역, (주)라이프사이언스, 2012.
- 로버트 브루커 · 에릭 위드마이어 · 린다 그레험 · 피터 스틸링(2014) 『브루커의 생명과학』, 최준호 외 역, 홍릉과학출판사, 2014.
- 박재근, 「제 7차 교육과정에 따른 고등학교 생물 II 교과서에서 물질 대사 단원에 대한 탐구 활동의 비교 분석」, 『생물교육』 제32권 제2호, 한

- 국생물교육학회, 2004, 124~124쪽.
- 박진아, 「고등학교 생물교과서의 삽화체제 분석 : 물질대사 영역을 중심으로」, 석사논문, 고려대학교 교육대학원, 2005.
- 심규철 · 이부연 · 김현섭, 「국민공통 기본교육과정 과학과의 생명 영역 물질대사에 관련한 학습개념 분석」, 『한국과학교육학회지』 제23권 제6호, 한국과학교육학회, 2003, 627~633쪽.
- 이보나, 「2009 개정 교육 과정에 따른 고등학교 생명과학 II와 대학교 일반생물학 교재 연계성 분석 : ‘광합성’ 단원을 중심으로」, 석사논문, 연세대학교 교육대학원, 2016.
- 최종근 · 유명제, 「대학입시와 과학교육」, 『화학공학회지』 제21권 제2호, 한국화학공학회, 2003, 220~227쪽.
- American Association for the Advancement of Science, *Vision and Change in Undergraduate Biology Education. A Call to Action*, by Brew CA and Smith D, AAAS, 2011.
- Campbell, Neil A, Urry, Lisa A, Cain, Michael L, Wasserman, Steven A, Minorsky, Peter V, Orr, Rebecca B, *Biology: A Global Approach*, 12th ed., Pearce Education Inc., 2021.
- Dobzhansky, Theodosius, “Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution”, *American Biology Teacher*, 35 (3), 1973, pp.125-129.
- Freeman Scott, Quillin Kim, Allison Lizabeth, Black Michael, Podgoski Greg, Taylor Emily, Carmichael Jeff, *Biological Science*, 6th ed. Pearson, 2017.
- Phelan, Jay, *What Is Life?-A Guide to Biology*, 5th ed., Macmillan, 2021.

접 수 일 : 2024년 01월 30일
심사완료 : 2024년 03월 21일
게재결정 : 2024년 03월 21일

Abstract

Exploring Ways to Improve the Correct Metabolism Education in General Biology Based Upon Middle and High School Life Science Curriculum

Yun, Hye Sup(Konkuk University)

Park, Don Ha(Yonsei University)

Chang, Soo Chul(Yonsei University)

The aim of this study is to explore the Life Science curriculum of Korean middle and high school related to metabolism, one of the important topics of biology and to suggest ways for better teaching on metabolism. For this study, we compared and analyzed the differences between university general biology textbooks and middle and high school science curriculum. A questionnaire was presented to 5 teachers who had a lot of experience in subject education such as life science I and life science II, and an analysis was performed by obtaining answers. In general biology textbooks adopted by many universities the concepts are arranged sequentially and explanations of almost all key concepts are included to help students systematically understand metabolism. However, in Korean universities, it is possible to graduate without taking any general biology-related courses, so the understanding of metabolism of many graduates can be limited to the contents of subjects up to high school. Therefore, education related to metabolism up to high school is very important. But the concepts about metabolism are scattered and there is room for misunderstanding in several concepts in the science education curriculum which covers middle and high school science

textbooks. In addition most students who do not take Life Sciences II will not get the education in the core of metabolism. According to this research, it will be necessary to make more efforts for systematic and correct metabolism education to help students understand life phenomena from the perspective of metabolism and to have a convergent thinking between chemistry and biology.

[Key Words] general biology as a liberal education, life science, chemistry, metabolism, Korean science curriculum