

‘패턴 형성’ 연구로 생명의 신비 벗긴다

글 | 전상학 _ 서울대학교 생물교육과 교수 jeonsh@snu.ac.kr

생물학 역사에서 큰 변화의 분기점이 되었던 것은 왓슨과 크릭이 DNA 이중나선 구조를 규명하면서부터라고 할 수 있다. 유전물질이라는 것이 복잡한 형태가 아니라 두 가닥의 나선 형태로 꼬여 있는 아주 단순한 형태의 물질이라는 놀라운 발견이 이후 분자생물학의 발달을 가져왔으며, 이는 또한 생물학 전반에 걸쳐 대변혁을 주도하게 되었다. 특히 전통적인 유전학 기술과 분자생물학이 결합한 분자유전학은 현대 생물학의 발전에 지대한 공헌을 해오고 있다. 이러한 분자유전학이 가져온 큰 변화 중의 하나는 동물의 패턴 형성에 대한 연구다. 패턴 형성이란 각 동물이 자신의 독특한 형태로 발달하는 것으로, 이 과정을 통해 사람이 사람의 모습으로, 원숭이는 원숭이의 모습으로 발달하는 것이다. 패턴 형성 과정이 잘못되면 어떻게 될까?

패턴 형성 이상시 돌연변이 · 기형 탄생

얼마 전에 상영된 영화 ‘괴물’은 큰 흥미를 불러일으키면서 흥행 기록을 세웠다. 괴물은 작은 물고기에서 돌연변이가 일어나 사람의 키를 훌쩍 넘기는 몸체로 자라게 되며, 우연히 자살한 사람의 시체를 먹게 되고 그 후 사람을 먹이로 여기고 마치 사냥하듯 사람을 해치게 된다. 이 동물의 형태를 보면 어류처럼 지느러미가 있어 수영을 하고, 발과 같은 지느러미로 육상에서 빠른 속도로 뿔 수 있으며, 먹이를 통째로 먹은 뒤 소화시키는 파충류의 특징을 보여준다. 이러한 괴물은 패턴형성 과정에 관여하는 유전자에 돌연변이가 생김으로써 태어날 수 있다고 보이지만 여러 동물의 특징이 한꺼번에 섞인 형태의 돌연변이는 자연상태에서는 불가능하다. 이는 각 동물의 패턴 형성 기작이 오랜 세월이 흐르면서 정착되었기 때문이며,

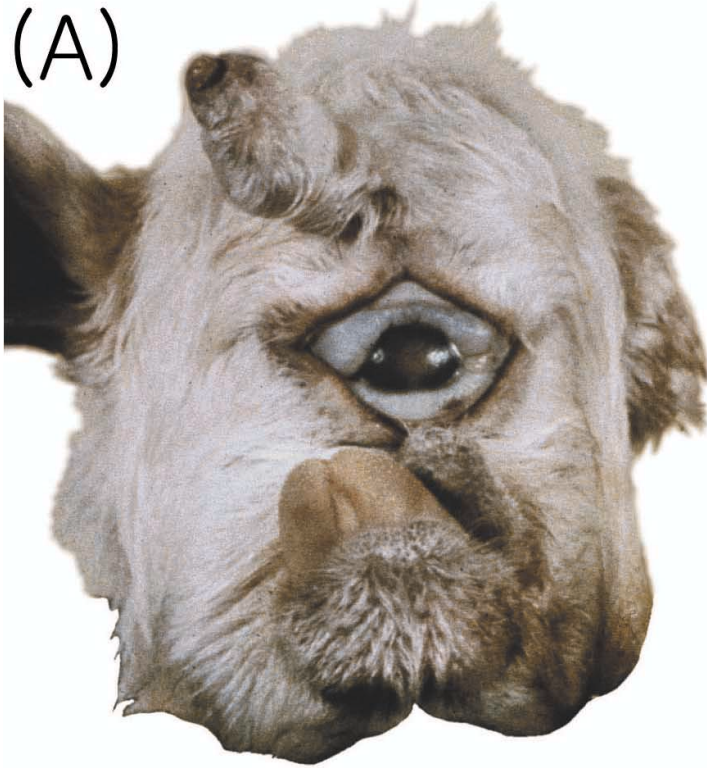
설령 변화가 보인다고 하여도 한계가 분명하게 존재하기 때문이다.

예로부터 사람이 어떻게 생겨났을까에 대한 관심을 많이 가져왔지만, 학문적으로 관심을 갖게 만든 것은 사람이나 동물에서 간혹 태어나는 기형아였다. 사람들이 상상으로 만들어낸 기형 형태는 날개가 있어서 마음대로 날아다니는 페가수스, 머리에 많은 뱀이 달려 있는 메두사, 눈이 하나 밖에 없는 사이클롭스 등 이루 헤아릴 수 없이 많다. 하지만 이러한 괴기한 형태 중에는 실제로 현실에서도 나타나는데 미국 유타 주에서는 한때 사이클롭스 양이 5~7% 가까이 태어난 적이 있다. 이 질병은 임신중인 양이 ‘베라트룸 칼리포니쿰’이라는 식물을 섭취했을 때 자주 일어나는 것으로 알려져 있다. 사람에서는 1950년대말에 임산부가 메스꺼움을 치료하기 위해 탈리도마이드를 복용하였는데 이로 인해 팔다리가 없는 아이가 태어났다.

이러한 예는 실제로 패턴 형성의 이상으로 인해 기형이 태어난 것이다. 학문적으로 이러한 기형 형성에 관심을 가졌던 사람은 19



영화 괴물의 괴물 전신. 물고기 몸체에 다리와 꼬리가 달려있고 이빨도 가지고 있다.



기형의 모습. (A) 사이클롭스시의 양 (b) 탈리도마이드 복용으로 팔이 없이 태어난 아이들

세기말의 베이트슨을 들 수 있다. 그는 곤충에서 안테나가 다리로 바뀌거나 여분의 난관 등을 갖는 것을 확인하고 이러한 기형들이 유전에 의한 것인지 아니면 물리적인 손상에 의한 것인지를 확인함으로써 패턴 형성에 대한 기작을 밝히는 것에 대한 아이디어를 제공해 주었다고 볼 수 있다.

포유류 패턴 형성 과정 분자적으로 규명

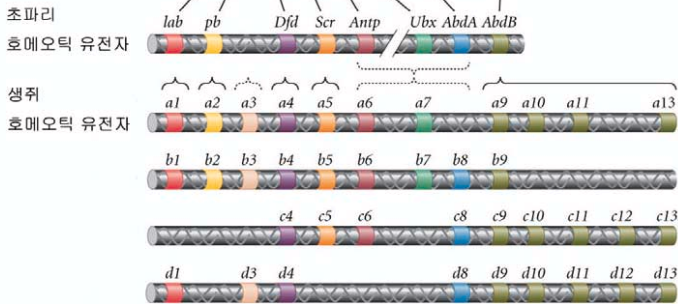
20세기 들어 꾸준하게 패턴 형성 과정을 이해하기 위하여 많은 노력들이 수행되었지만 연구가 비약적으로 발전하게 되었던 것은 1980년대를 전후하여 뉴슬라인 폴하르트와 비사우스에 의한 체계적인 연구 결과 덕분이라고 할 수 있다. 이들의 연구 전략은 초기 패턴 형성에 관여하는 유전자를 대량으로 발굴하여 연구하면 동물의 패턴 형성 기작을 분자생물학적으로 이해할 수 있을 것으로 생각하였다. 오늘날에는 기술의 발달로 이러한 대담한 연구 방법이 일반화되어 있지만 당시에는 매우 무모하면서도 용감한 도전이었다. 이들은 먼저 유전학적으로 가장 훌륭한 모델 시스템인 초파리를 이용하여 대규모적으로 돌연변이를 생산하였다. 이것이 가능했

던 것은 1900년대초에 모건이 초파리를 실험 재료로 발굴한 뒤부터 쌓여온 훌륭한 유전학적인 기술들이 있었기에 가능하였다. 초파리에 EMS라는 강력한 돌연변이 유발물질을 먹인 후 초기 발생 과정에 영향을 주는 돌연변이들을 골라냈으며, 이 돌연변이들을 이용하여 관련 유전자들을 대규모로 발굴하였다.

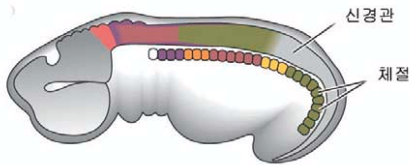
이들의 연구에 따르면 동물의 패턴 형성은 유전자들이 단계적으로 작용하여 수정란의 단순한 형태로부터 전-후 및 배-복 축이 형성되고, 이러한 큰 틀이 결정되면 다음으로 체절이 결정되고, 그 다음으로 각 체절로부터 성체의 구조들이 결정되는 순서를 밟는다는 것이다. 초파리에서 패턴 형성에 관여하는 유전자들이 사람을 포함하는 포유류에서도 발견됨으로써 패턴 형성에 관여하는 유전자들이 진화적으로 보존되어 있다는 것을 알게 되었다. 대표적인 예는 호메오틱 유전자들이다. 초파리에서는 한 염색체 유전자 그룹이 존재하는데 포유류에서는 이러한 유전자의 배열 패턴이 복제되어 네 개의 염색체에 존재한다.

호메오틱 유전자는 패턴 형성 과정에서 매우 중요한 역할을 하는 유전자인데 이들 유전자들은 각 체절로부터 특정한 구조가 만들

초파리 배아
(10시간)



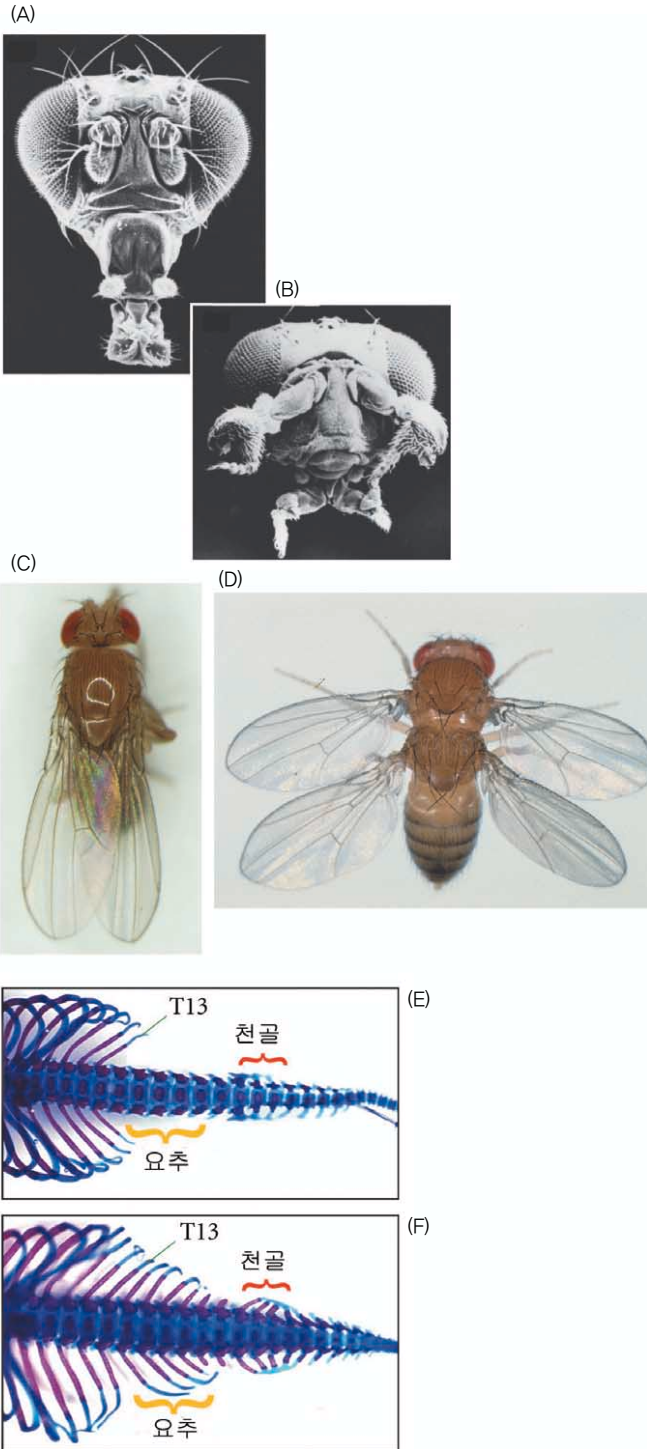
생쥐 배아
(12일)



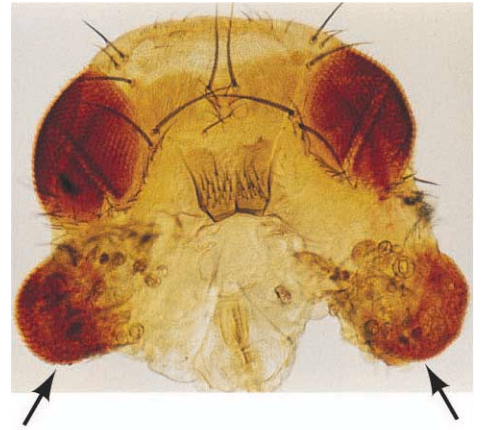
초파리와 포유류의 호메오틱 유전자의 비교

어지도록 하며, 이들 유전자에 돌연변이가 생기면 기형이 나타난다. 초파리에서는 독특한 유전자 이름이 있지만 포유류에서는 Hox 유전자로 불리며, Hoxa, Hoxb, Hoxc, Hoxd 그룹이 있다. 초파리에서 호메오틱 유전자 돌연변이로 대표적인 것이 Antp 돌연변이와 Ubx 돌연변이가 있다. Antp 돌연변이는 안테나가 다리, Ubx 돌연변이는 평균곤이라는 작은 구조가 날개로 전환되는 특징을 보여준다. 사람에서 특정 유전자를 돌연변이시켜 그 결과를 볼 수 없기 때문에 포유류에 속하는 생쥐에서 유전자를 파괴시켜 그 기능을 살펴봄으로써 사람의 패턴형성 과정을 이해하는 경향이 있다. Hox 10이라는 유전자를 파괴시킨 생쥐에서 놀랍게도 허리부분의 척추에 갈비뼈가 붙어 있는 생쥐가 태어났다. 이처럼 호메오틱 유전자는 신체의 구조를 결정하는데 결정적인 역할을 하기 때문에 패턴형성 과정의 핵심적인 유전자라고 한다.

호메오틱 유전자는 식물에서도 발견되며, 돌연변이가 일어날 때 동물에서와 같이 기형적인 구조가 만들어지는 것으로 보아 호메오틱 유전자는 생물계에서 매우 중요한 유전자로 그 기능이 보존되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 체계적인 연구 덕분에 사람을 포함



호메오틱 유전자 돌연변이에 의한 형질전환. (A) 초파리 야생형 안테나 (B) 초파리 Antp 돌연변이 안테나다리 (C) 한 쌍의 날개를 가진 야생형 초파리 (D) 초파리 Ubx 돌연변이에서의 두 쌍의 날개 (E) 야생형 생쥐의 골격 (F) Hox 10 유전자 돌연변이 생쥐. 요추 부분에 갈비뼈가 생김



인위적인 eyeless 유전자 발현에 의한 눈의 형성. eyeless 유전자를 눈 형성 이외의 지역에서 발현되게 하여 여분의 눈이 생기게 함

한 포유류의 패턴 형성 과정을 분자적으로 규명할 수 있는 기회를 갖게 된 공로로 호메오틱 유전자에 대한 연구를 주도한 미국의 루이스 박사와 함께 독일의 뉴슬라인 폴하르트, 비샤우스 박사는 1995년에 패턴 형성에 연구 공로로 노벨 생리의학상을 수상하게 되었다.

줄기세포연구 · 장기이식 등으로 난치병 치료 기대

패턴 형성에 대한 연구를 포함하여 발생에 대한 연구가 비약적으로 이루어짐으로써 발생 공학이라는 새로운 산업이 탄생하게 되었으며, 21세기의 주도적인 산업 중의 하나가 될 것으로 보인다. 줄기세포 연구는 난치병을 치료할 수 있는 희망으로 떠오르고 있다. 줄기세포 연구의 큰 관심은 어떻게 특정한 세포로 분화를 시켜 임상에 이용하느냐다. 이를 위해서는 특정 세포로의 분화에 관여하는 유전자를 발굴하여 이 유전자를 인위적으로 발현시켜 세포 분화를 유도하는 것인데 이러한 유전자의 상당 부분이 패턴 형성에 관여하는 유전자들이다. 또한 장기 이식도 치료의 한 대안으로 떠오르고 있는데 세포 분화를 통해 장기를 형성시키는 기술들이 속속 개발되고 있다. 특히 장기 형성은 바로 패턴 형성에 관여하는 유전자가 매우 중요한 역할을 하고 있다.

패턴 형성에 관여하는 하나의 유전자만으로도 하나의 기관을 형성할 수 있다는 것은 참으로 놀라운 일이다. 예로 초파리의 아이리

스 유전자는 포유류에서 Pax 6 유전자와 매우 유사한데, 이 아이리스 유전자를 초파리의 가슴, 안테나 혹은 주둥이 부위 등에서 발현시키면 이 부위에서 눈이 형성되는 드라마틱한 변화를 볼 수 있다.

또한 식물에서는 패턴 형성에 관여하는 유전자를 인위적으로 조절함으로써 새로운 변이를 만드는 시도를 하고 있다. 식물의 꽃받침, 꽃잎, 수술, 암술 등은 형태는 달라도 해부학적 구조로 볼 때 잎과 비슷한데 이들은 호메오틱 유전자의 발현에 의해 그 위치가 결정된다. 따라서 호메오틱 유전자의 돌연변이를 통해 이들의 위치에 변화를 주어 희귀한 형태를 만들어 농업적으로나 원예학적으로 매우 가치가 높은 식물 변이를 만들어 상업적으로 이용할 수 있을 것이다. 생명체의 형성에 비밀이 밝혀지는 날까지 패턴 형성에 대한 연구는 계속될 것이며, 이러한 연구를 통해 생명의 신비가 벗겨질 날이 앞당겨 질것으로 확신한다. ㉔



글쓴이는 아이오와 주립대에서 박사학위를 받았다. 한국생물과학협회 총무간사를 지냈으며, 한국유전학회 편집위원장을 겸임하고 있다.

‘분자에서 행동까지’

소우주 신비 밝힌다

글 | 김경진 _ 서울대 생명과학부 교수 kyungjin@snu.ac.kr

인간의 뇌는 멜론 크기 정도다. 말랑말랑한 순두부와 같은 뇌의 무게는 약 1300~1500g 정도이며 단단한 두개골 속에 자리 잡고 있다. 신경계의 구조와 기능의 단위는 신경세포(혹은 뉴론)이다. 뇌에는 약 1천억 개의 신경세포가 있으며 한 개의 신경세포는 1천개 정도의 다른 신경세포와 연결(시냅스)을 이루고 있다. 신경세포는 시냅스의 좁은 틈으로 도파민과 같은 신경전달물질을 분비하고, 전기화학적 신호에 의해서 다른 신경세포와 서로 대화를 한다. 신경계의 복잡성은 밤하늘에 빛나는 별보다도 많은 우주와 같다고 하여 소우주라고도 말한다. 아무리 고성능인 컴퓨터라 할지라도 뇌 신경회로망의 구조적 복잡성과 기능적 정교함에는 비교가 되지 않는다.

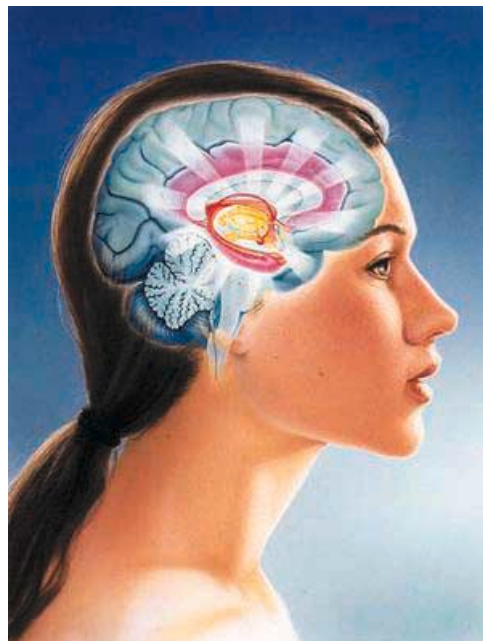
최근 15년간 혁명적인 발전 이룬 뇌연구

지난 30년 동안 뇌연구는 많은 독창적인 연구기법의 출현으로 새로운 발견이 있었으며, 이에 따라 새로운 이론이 탄생하였다. 1990년은 뇌연구 역사에서 기념비적인 해로 기억된다. ‘뇌연구 10년’이라는 법안이 미국 의회에서 통과했고, 곧이어 유럽연합은 ‘유럽연합 뇌연구 10년’을, 일본은 ‘뇌연구 세기’를 선언하여 국가적 차원에서 뇌연구에 박차를 가하고 있다. 우리나라도 이와 같은 세계적인 추세에 부응하여 1998년 ‘뇌연구촉진법’을 마련한 이래, 뇌연구 관련 3개 국책사업단과 뇌기능 프론티어사업단을 출범시키는 등 국가적 투자를 가속화하고 있다. 아무튼 전세계 신경과학은 ‘뇌연구 10년’이 선언된 이래 지난 15년 동안 가히 혁명적인 발전을 하였다.

과학의 발달에서 노벨상이 차지하는 위치는 대단하다. 노벨상은

늘 독창적이고 창의적인 선구자적인 연구업적에 주어져 왔다. 뛰어난 연구업적을 낸 수많은 과학자들의 업적을 간과해서는 안 되지만 노벨생리의학상의 업적을 중심으로 신경과학의 전반적인 발달사를 살펴볼 수 있다.

19세기에 이르러서도 신경계는 ‘원형질의 그물망’ 정도로밖에 인식되지 않았으나 20세기초에 이르러서야 비로소 현대 신경과학은 학문으로서의 체계와 기반이 구축되었다. 신경세포와 신경섬유를 놀라울 정도로 정밀히 기술한, 아마도 인류 역사상 가장 위대한 신경해부학자인 카할(1906년 노벨생리의학상 수상)과 걸출한 신경생리학자인 세링턴(1932년 노벨생리의학상 수상)에 의해서 바야흐





신경과학 관련 노벨상 수상자 (1906 ~ 70년)

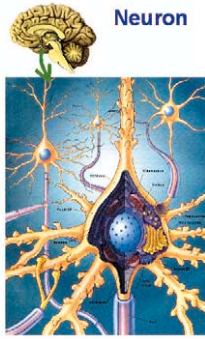
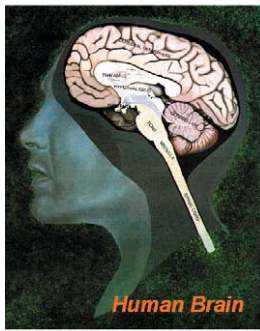
로 뉴론독트린이 완성되었으며, 신경세포간의 연결인 시냅스 개념이 탄생하였다. 즉, 신경해부학과 신경생리학이 통합된 것이다. 1920~30년대 뤼이와 데일은 신경정보의 화학적 매개체인 아세틸콜린과 같은 신경전달물질을 발견하여 신경약리학 분야를 열었으며, 이 공로로 뤼이와 데일은 1936년 노벨생리의학상을 수상하였다. 그 당시 영이 오징어의 거대신경 축색을 신경과학 연구의 재료로 도입한 이래, 거대신경 축색에서 활동전위를 유발하고 이 때 신경세포막의 저항이 변화되는 것을 측정하는 것은 기념비적인 연구업적이었다.

축색에서 전위전도 기작을 밝히려는 연구는 신경활성의 이온가설로 이어져, 호지킨과 헉슬리는 전압고정측정방법을 개발하여 이온가설을 증명해냈으며 에클스는 신경과 근육의 연결부위인 신경근 접합부에서 시냅스 전, 후 전위에 관한 전기생리학적 연구로 신경과학 발전에 커다란 기여를 하였다. 호지킨, 헉슬리, 에클스 3인은 1963년 노벨생리의학상을 공동 수상하였다. 또한 카츠는 시냅스의 신호전달기작을 밝히는 괄목할 만한 연구를 수행하였으며, 폰

오일러와 악셀로드는 신경전달물질의 생화학적 경로를 밝히는 연구를 수행하였다(카츠, 폰 오일러, 악셀로드 3인은 1970년 노벨생리의학상 공동수상).

지금부터 30년 전, 질레민과 셸리는 헤리스가 내세운 신경액성 가설을 입증한 공로로 1977년 노벨생리의학상을 공동 수상하였다. 그들은 시상하부에서 합성, 분비되는 신경호르몬의 화학적 정체를 밝힘으로써 두뇌 밑에 위치한 내분비계의 중심기관인 뇌하수체를 뇌가 직접적으로 통제한다는 오랜 가설을 입증하여 신경내분비학이라는 새로운 분야가 탄생되었다. 그들의 선구자적 연구를 필두로 다양한 신경호르몬, 신경펩타이드가 발견되었으며 신경생리학적 기능을 밝히는 연구가 뒤따랐다.

스페리는 1960년대 대뇌 반구의 기능적 분화에 관한 연구의 선구자였다. 그는 인간의 오른쪽 뇌와 왼쪽 뇌를 연결하는 2억 개의 신경섬유로 이루어진 뇌량의 중요성을 밝혔으며 추후 고등 뇌인지 기능 연구의 효시가 되었다. 비슷한 시기에 후벨과 위셀은 시각정보를 뇌가 어떻게 해독하고 통합하는지에 관한 시각중추 연구의 선



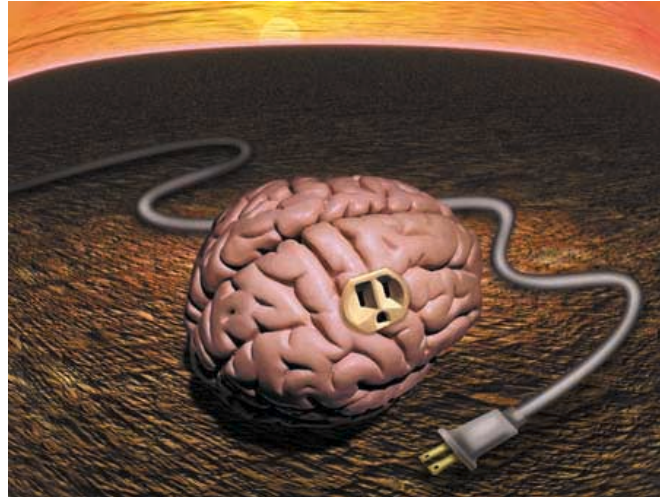
신경과학은 결국 인간의 뇌를 이해하고 각종 뇌질환을 예방, 치료하는 것을 목적으로 한다. 뇌의 기본단위는 신경세포(뉴론)이기에 뇌가 3000억개 이상의 신경세포(뉴론)로 구성되어 있고 하나의 신경세포는 1000개 이상의 다른 신경세포와 시냅스로 연결되어 있어 구조적으로 매우 복잡하지만 단일 신경세포를 자세히 연구함으로써 결국 복잡한 신경계를 이해할 수 있다. 따라서 뇌연구는 단일 신경세포의 분자세포생물학적 연구 → 신경망 연구 → 시스템 수준의 연구 → 개체 수준의 인지, 행동연구 등을 포괄적으로 포함한다.

구자였으며 대뇌 시각피질의 생리학적 연구의 근본적인 틀을 마련하였다. 이 공로로 스페리, 후벨, 위셀 3인은 1981년 노벨생리의학상을 공동수상하였다. 이와 같은 특정 감각신경계의 기능을 심도 깊게 분석하는 연구는 최근 후각 수용체의 발견과 후각 신경계의 시스템연구로 액셀과 버크가 2004년 노벨생리의학상을 공동수상한 것으로 이어졌다.

1986년에 노벨생리의학상을 공동수상한 레비-몬탈시니와 코헨에 의한 신경성장인자의 발견은 신경발생학의 새로운 지평선을 열었다고 생각된다. 이 시기에는 새로운 신경해부학 기술의 출현과 분자생물학적 연구기법이 생명과학 제분야로 침투하기 시작하여 신경해부학을 비롯한 신경과학의 여러 분야가 새롭게 태어나게 되었다. 따라서 신경세포의 증식, 이동, 분화, 축색의 경로 찾기, 신경세포의 죽음 등 현상에 분자세포생물학적 해석이 가능해졌다.

네어 · 자크먼, 분자수준의 신경생리학 길 열어

네어와 자크먼은 단일이온채널의 활성을 측정할 수 있는 독창적인 패치고정기법을 개발하여 1991년 노벨생리의학상을 공동수상하였다. 이 연구기법은 아마도 신경과학 발달사에서 가장 획기적인 업적으로 분자수준에서의 신경생리학의 길을 열었다고 생각된다. 1980년대로 들어서면서 분자생물학의 발전에 힘입어 수많은 이온채널과 수용체의 유전자 구조가 규명되었다. 나아가 분자적 기능을 탐색하는 연구가 광범위하게 이루어졌으며, 각종 신경질환의 분자생물학적, 신경유전학적 접근이 가능해졌다. 매키넨은 원래 저명한 전기생리학자였으나, 이온 채널의 구조생물학적 해석 없이는 이


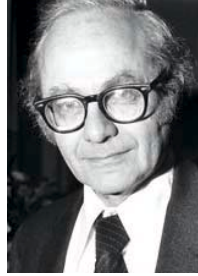

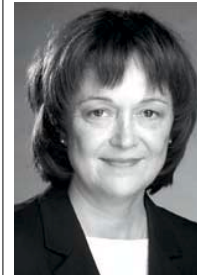


온채널의 분자적 기능을 규명할 수 없다는 생각에서 구조생물학을 배워 포타슘(K⁺) 이온채널의 구조생물학적 특성을 규명하여 3차원에서 포타슘 이온이 세포막의 이온채널을 어떻게 통과하는지를 규명하였다. 그는 이 연구업적으로 2003년 노벨화학상을 수상하였다.

2000년 노벨생리의학상은 칼슨, 그린가드, 그리고 캔델 등 3명의 저명한 신경과학자에게 주어졌다. 칼슨은 일찍이 퇴행성뇌질환인 파킨슨씨병의 병인이 도파민의 결핍에 의한다는 사실을 밝힌 선구자적인 업적을 쌓았으며, 파킨슨씨병은 물론 항정신분열증, 항우울증 등 신경정신질환의 치료를 위한 신약개발에도 크게 기여하였다. 그린가드는 신경계의 신호전달과정을 규명한 공로를 인정받았으며, 특히 도파민이 막수용체와 결합한 후 일련의 신호전달과정을 거치는데, 이 때 도파민조절단백질인 DARPP-32의 인산화 및 탈인산화의 자세한 메커니즘을 규명한 것이다. 캔델은 군소라는 바다달팽이를 신경과학 연구재료로 도입하여 단순한 실험모델에서 학습과 기억의 분자세포생물학적 기작을 규명한 공로를 인정받았다.

현대 신경과학의 한 축은 앞서 설명한대로 분자세포생물학적 실험기법에 기반을 둔 분석적 접근으로 뇌기능의 메커니즘을 밝히려는 것이다. 또 다른 하나의 축은 추론, 판단, 언어, 기억 등 그간 형이상학적 언어로 설명하던 인간의 각종 고등인지기능을 신경생물학적 언어로 설명하려는 분야다. 이 분야가 바로 인지신경과학으로 신경과학과 인지과학의 경계분야다. 최근 인지과학의 발달은 양전자방출단층촬영기(PET), 자기공명영상장치(fMRI) 등 첨단영상기

지난 30년, 학계를 뒤흔든 새 이론과 실험들

 질레민(1977)	 설리(1977)	 후벨(1981)	 위셀(1981)	 스페리(1981)	 레비-몬탈시니(1986)
 코헨(1986)	 네어(1991)	 자크먼(1991)	 칼슨(2000)	 그린가드(2000)	 칸델(2000)
 부초리히(2002)	 라우테버르(2003)	 맨스필드(2003)	 매किन(2003)	 액셀(2004)	 버크(2004)

신경과학 관련 노벨상 수상자 (1977년 ~ 2004년)

법 등 기술적인 진보에 크게 기인하고 있다. 2003년 노벨의학상은 뇌영상장치를 개발한 공로로 라우테버르와 맨스필드에게 주어졌다. 이에 앞서서 핵자기공명현상을 규명한 공로로 1991년 노벨화학상은 언스트에게, 핵자기공명기술에 의한 생물분자의 3차원적 연구에 대한 공로로 2002년 노벨화학상은 브츠리히에게 주어졌다. 이와 같이 인지신경과학은 뇌영상기법의 발달과 함께 앞으로 크게 발달할 것으로 보인다.

다학제적인 21세기 최후의 첨단과학

많은 학자들은 신경과학이야말로 21세기 과학과 기술의 가장 중요한 도전이자 최후의 프론티어라고 말한다. 소우주의 신비를 밝히려는 시도는 아마도 인류가 당면한 가장 중요한 분야이기 때문이

다. 현대 신경과학은 다학제적이다. 즉, 신경해부학, 신경발생학, 신경생리학, 신경약리학, 신경분자생물학, 신경유전학, 시스템신경과학 등 전통적인 학문의 구획이 사라지고, 현대 신경과학은 연구방법을 공유하여 융합되었다. 뇌는 최근까지도 블랙박스로 여겨졌고 그 정체는 여전히 신비의 베일에 싸여 있으나, 블랙박스의 한 모퉁이가 무너지기 시작한지 오래다. 유전자 재조합 기법, 단일이온채널의 활성을 측정하는 전기생리학적 방법 등을 통해서 신경전달물질과 수용체, 이들을 조절하는 유전자들의 놀랍도록 정교한 분자협주곡을 통하여 인간의 사고와 정신활동의 단서를 찾으려 한다. 따라서 오늘날 신경과학의 추세를 한마디로 요약하면 '분자에서 행동까지' 라고 말할 수 있다.

지난 30년 동안의 연구결과를 종합해 보면, 신경과학의 여러 분

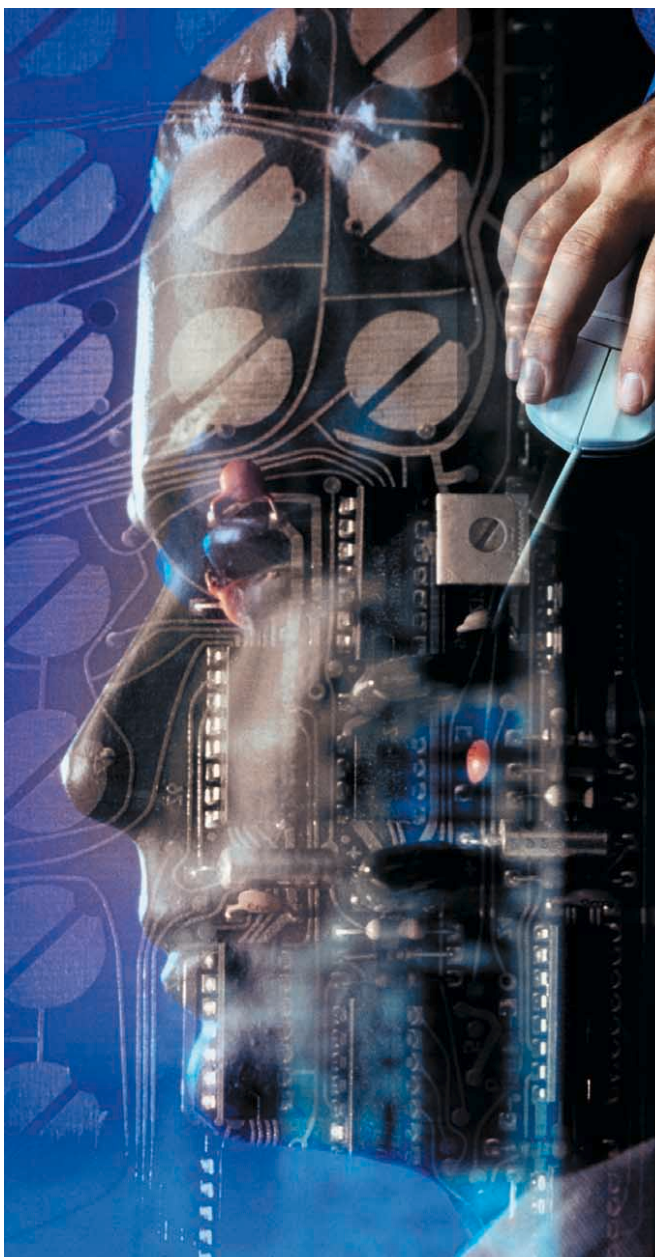
야에서 다양한 이론이 성립되었으나 아직도 신경계의 모든 현상을 분자세포 수준에서 시스템, 고등인지수준까지 일괄적으로 설명할 수 있는 일반이론은 수립되지 않았으며 이에 대한 도전은 계속되고 있다. 중요한 변화의 하나는 100여 년 전 신경과학의 틀이 잡힌 이래, 믿어져 왔던 도그마가 최근에 허물어진 것이다. 그간 신경계는 신경세포로 분화된 이후 더 이상 증식하거나 신경세포로 분화하지 않는다고 믿어져왔다. 즉, 성숙한 성체의 뇌는 안정적이며 변화하

지 않고 신경세포의 수는 고정되어 있다는 것이었다. 이것이 바로 카할의 도그마인데 최근 성체줄기세포의 발견으로 이 도그마는 폐기되었다. 성체의 신경계에도 다양한 신경세포로 분화할 수 있는 능력을 가진 신경줄기세포가 존재한다는 실험적 증거가 속속 밝혀지고 있기 때문이다.

이에 반하여 시냅스의 가소성 이론은 최근까지도 실험적 지지를 받고 있으며, 현대 신경과학의 중요한 이론 중 하나로 자리 매김하고 있다. 신경계의 신경회로망 밀그림은 발생유전학적 프로그램에 따라 결정되는 것은 사실이지만, 성체가 되어서도 신경계는 구조, 기능적으로 가변적이며, 많은 환경, 경험적 요인에 의해서 역동적으로 재구성될 수 있다는 것이다. 다시 말하면, 뇌 신경회로망은 컴퓨터의 하드웨어에 의해 운용되는 소프트웨어와 같은 성질을 가지고 있고, 프로그래밍에 따라 가변적으로 변화하는 소프트웨어처럼 외부자극에 의해 변조될 수 있다. 이러한 시냅스 가소성 이론은 학습과 기억 등 다양한 뇌기능을 시냅스의 효율성의 변화로 설명할 수 있으며, 뇌 손상과 뇌질환에도 관여할 가능성이 부각되고 있다.

뇌연구는 기초과학적 기여뿐만 아니라 공학적으로 실용화될 것으로 기대된다. 즉, 최근 뇌의 정보처리 메커니즘을 컴퓨터나 기계적 구동에 활용하려는 이른바 뇌-컴퓨터 접속기술 혹은 뇌-기계 접속기술의 연구가 활발하기 때문이다. 고집적 병렬신경활성도 측정방법과 초고속 소형 컴퓨터의 발달로 과거에 치료가 불가능했던 척수손상은 물론 뇌질환의 재활 가능성, 그리고 새로운 의료용구 개발 가능성이 멀지않은 장래에 열릴 것으로 추정된다. 생체공학적으로 미세 뉴로칩을 이식하여 외부에서 뇌기능을 조절하고 운동을 제어하려는 연구가 시도되고 있다.

소우주와 같은 뇌, 스마트한 뇌의 메커니즘을 이해하고, 나아가 뇌질환의 예방과 진단, 치료기술을 개발하고, 인간의 사고과정과 유사한 지능적 정보처리기술을 개발하여 산업적으로 활용하고자 하는 시도는 21세기 과학의 가장 중요한 도전인 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대 문리대 동물학과를 졸업 후 미 일리노이대(어버나-샘페인)에서 이학박사학위를 받았다. 현재 21세기 뇌기능 프론티어 사업단 단장을 겸임하고 있다.