

운동제어의 신경생리학적 기초

Chapter 3

운동시스템

- 운동제어
 - 인간 움직임의 원인과 본질 이해
 - 신경계과 근골격계의 조화로운 협동을 통해 이루어짐
 - 신경계: 목표행동 성취를 위한 제반 정보의 수집과 통합
 - 근골격계: 동작의 실행 담당

운동시스템의 구성

- **지각시스템과 동작시스템으로 구성**
 - **지각시스템**
 - 감각의 수용과 해석에 관계하는 신경구조체
 - **동작시스템**
 - 동작의 계획과 실행에 관여하는 신경구조체
- 정보처리를 위계적 병렬적으로 이루어짐

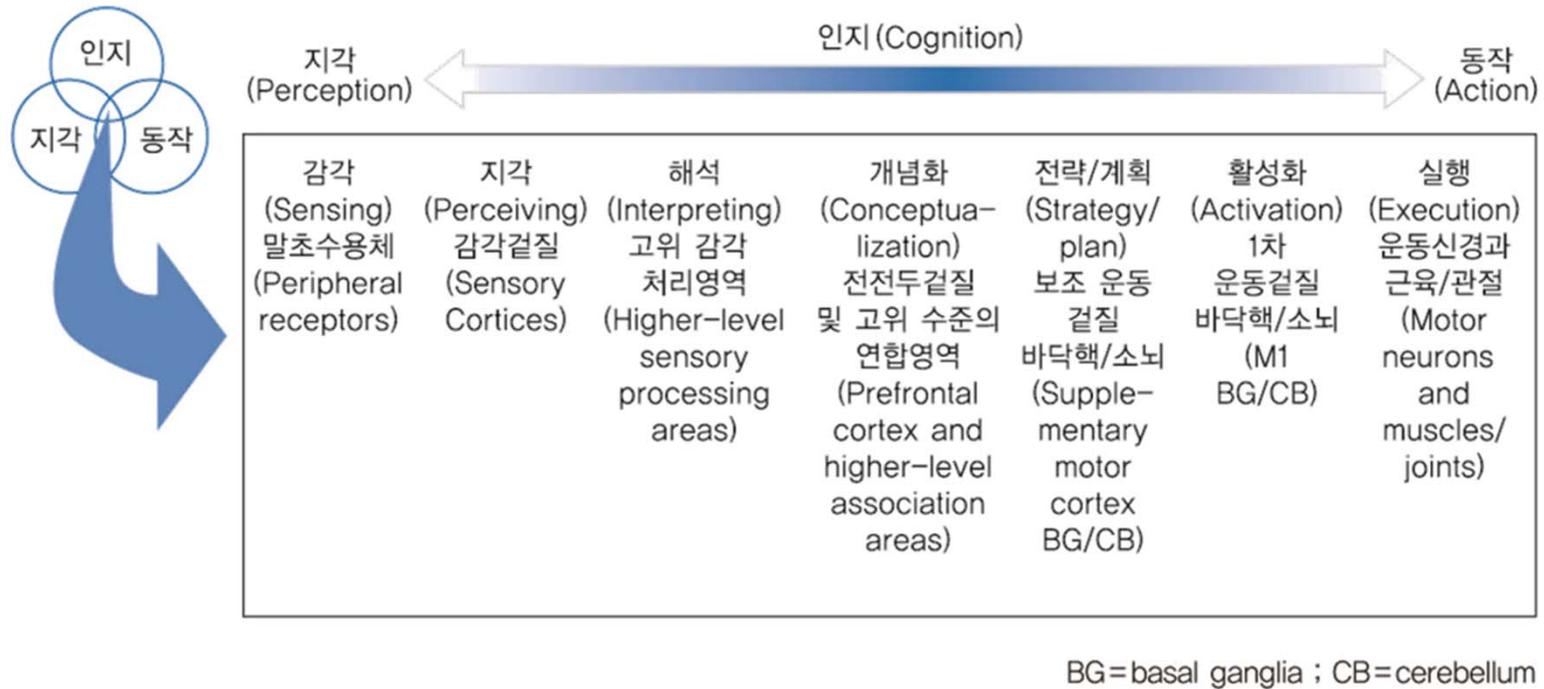
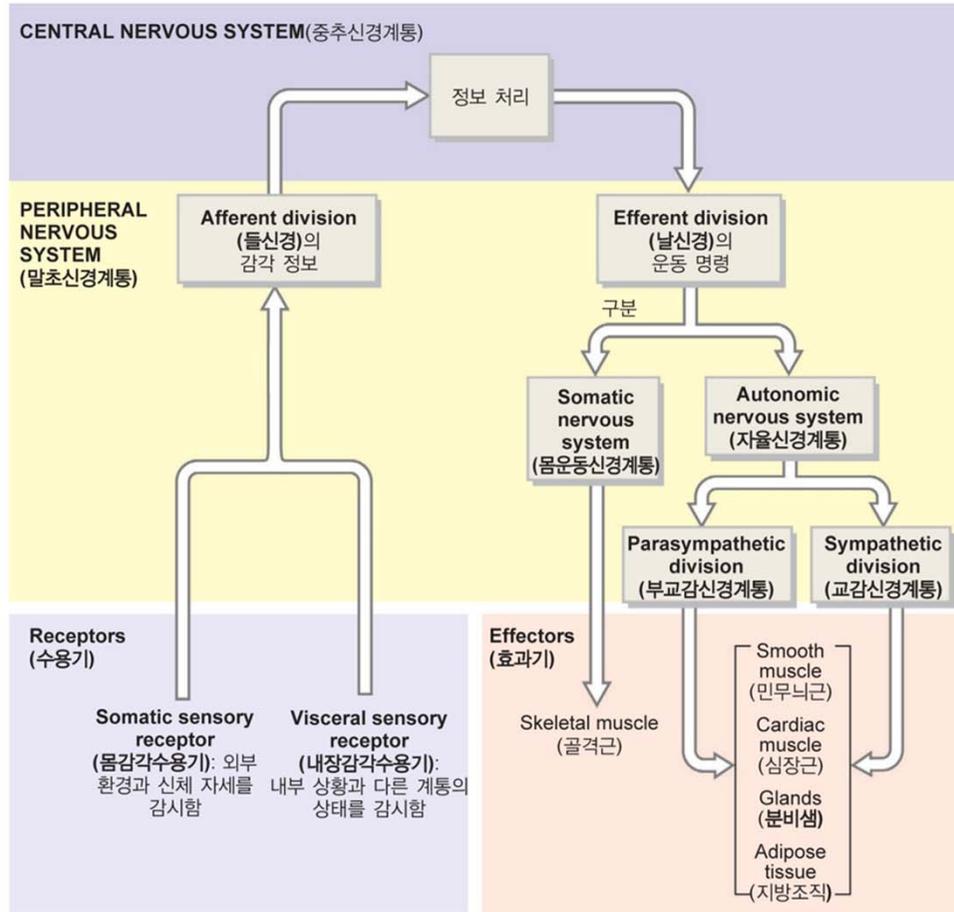


그림 3-1 운동제어에 포함되는 지각, 동작과 인지 처리과정 사이의 상호관계에 대한 모형(출처: Shumway-Cook 등, 2007)

신경계의 구조

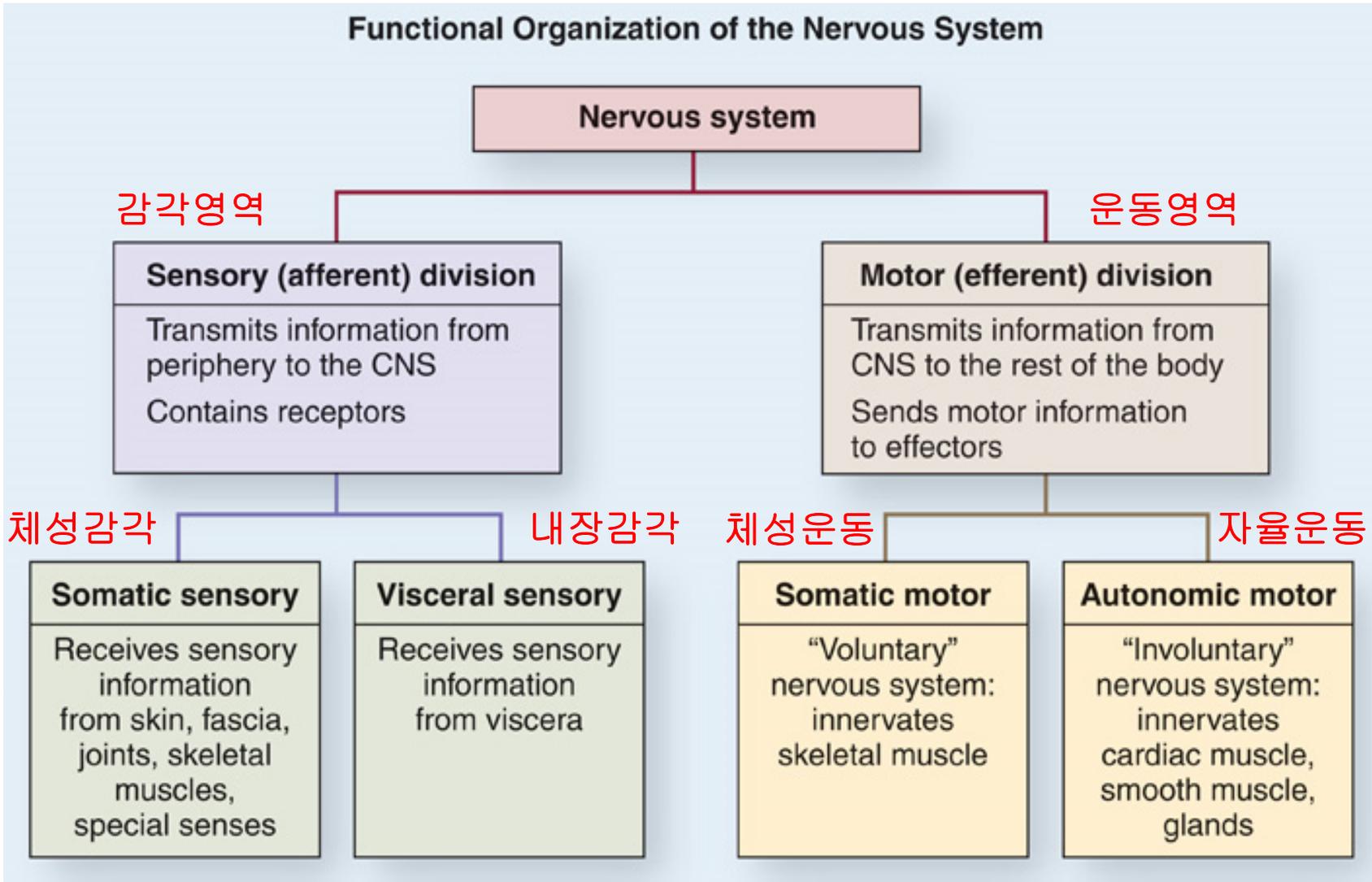


● 그림 8-1 신경계통의 기능 요약.

신경계의 기능

1. 내부 및 외부 환경의 변화를 감시
2. 감각정보를 통합
3. 인체의 여러 계통에서 일어나는 수의 반응 및 불수의 반응 조절

신경계의 기능적 분류



1) 중추 신경계(Central nervous system: CNS)

- 구성

- 뇌, 척수 (개재 뉴런)

- 기능

- 모든 자극을 통합, 수정, 동작 유발, 정보저장

- 과정

- 말초신경계에서의 자극과 신호 받아 통합

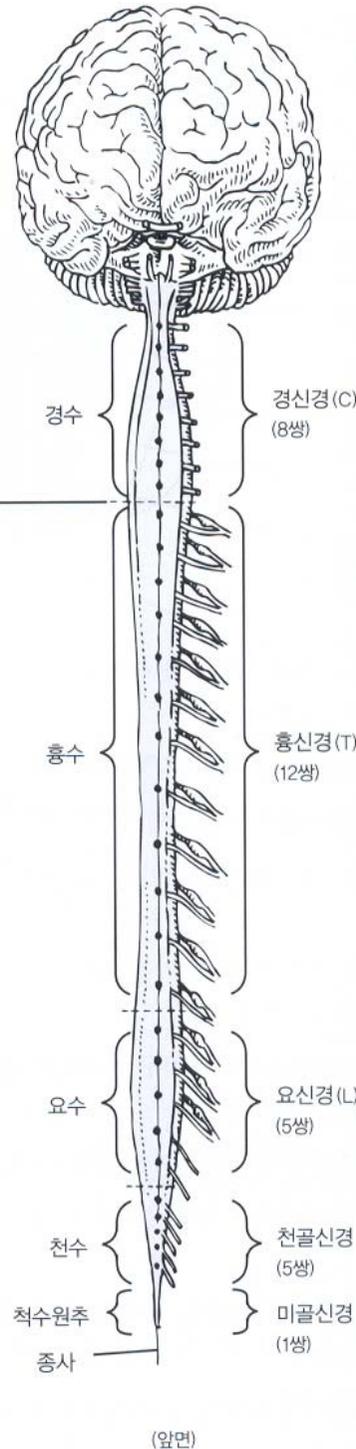
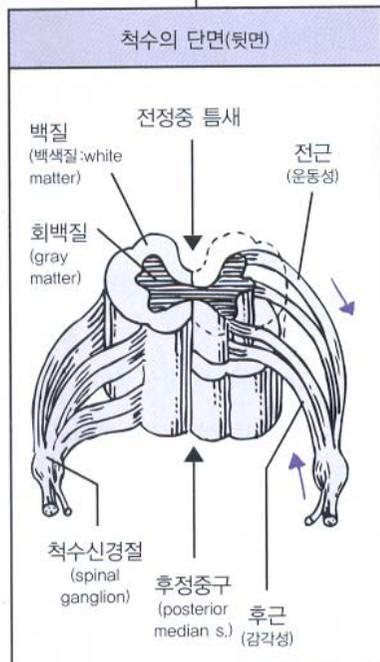
- 운동신경을 통해 골격근에 명령

- 적절한 반응

- 예) 야구 투구, 테니스 발리, 뜨거운 난로에서 손을 떼는 것

2) 말초 신경계(Peripheral nervous system; PNS)

- 자율신경계 (autonomic nervous system)
 - 교감 신경
 - 내장(심장, 소화기관)과 말초(피부 분비선, 혈관, 골격근 소동맥)의 표적에 신경 분포
 - 부교감 신경
 - 폐, 심장, 소화관 등의 내장 기관에 분포(but, 신장기관에는 적게 분포)
- 체성신경계 (somatic nervous system)
 - 구심성
 - 감각신경(피부, 미각, 촉각, 골격근, 관절)
 - 원심성
 - 운동신경(골격근 흥분)



•척수신경이란 척수를 드나드는 31쌍의 말초신경을 말하며,

•신체 각 부위로부터 받은 감각 신호는 척수의 후근(감각섬유가 주행한다)에서 구심성으로 들어가 대뇌로 전달되며,

•신체를 움직이는 명령이 되어 척수의 전근(운동섬유가 주행한다)에서 나와 근육으로 전달된다.

•감각섬유는 피부에서 온각, 냉각, 통각, 촉각을 대뇌로 전달한다.

척수신경 (31쌍)

척수신경은 몇 개로 중복되어 **신경총**을 형성하고, 사람의 운동이 신경의 분포와 지배를 통해 일어나도록 절묘하게 기능하고 있다.

손가락을 움직여서 물건을 잡기 위해서는 여러 가지 근육의 움직임이 필요하다.

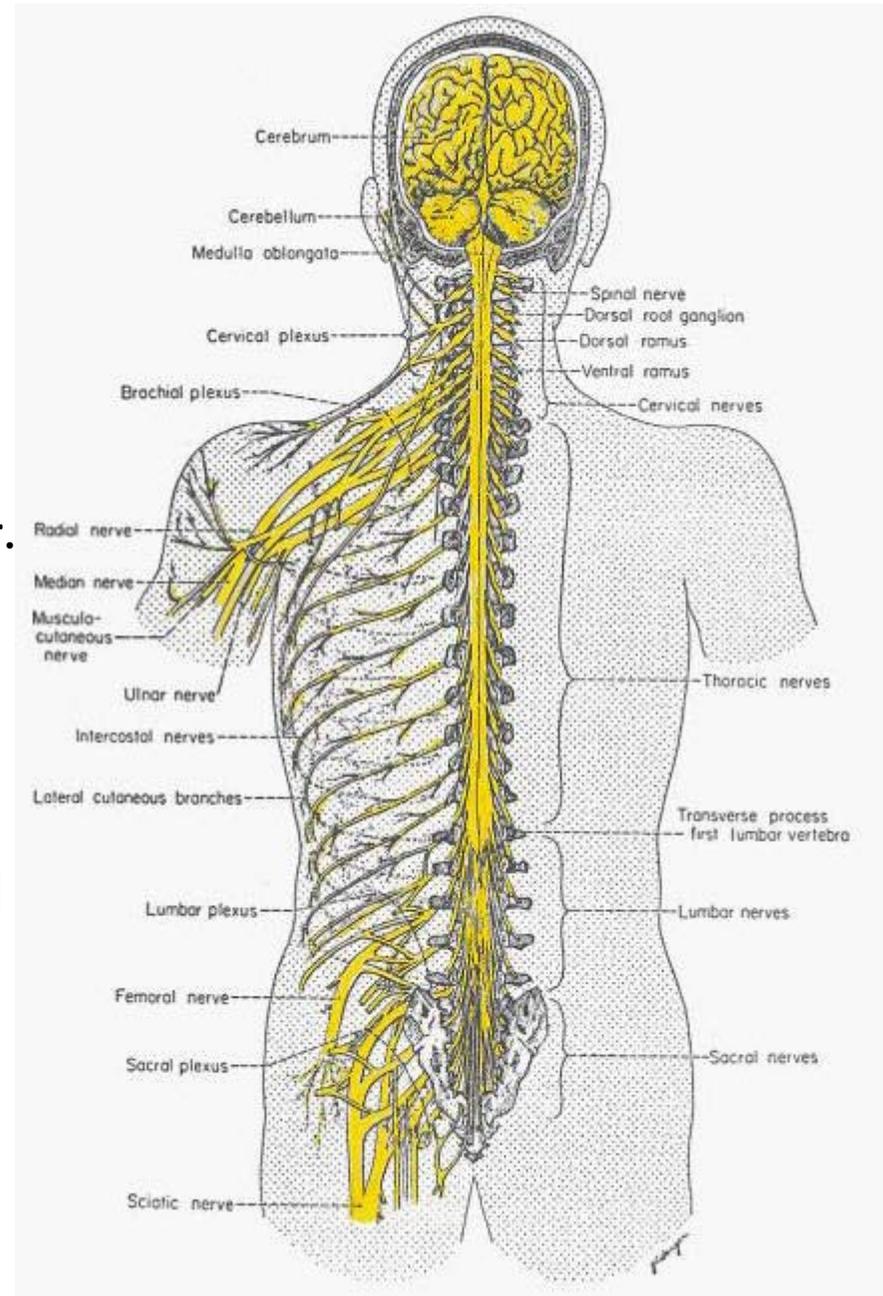
·경신경 8쌍은 주로 **경부, 횡격막, 팔**을 지배한다.

·흉신경 12쌍은 주로 **늑간부**를 지배한다.

·요신경 5쌍은 **주로 하지**를 지배한다.

·천골신경 5쌍은 주로 **둔부, 음부, 항문부**를 지배한다.

·미골신경 1쌍은 **항문부근과 외음부**를 지배한다.



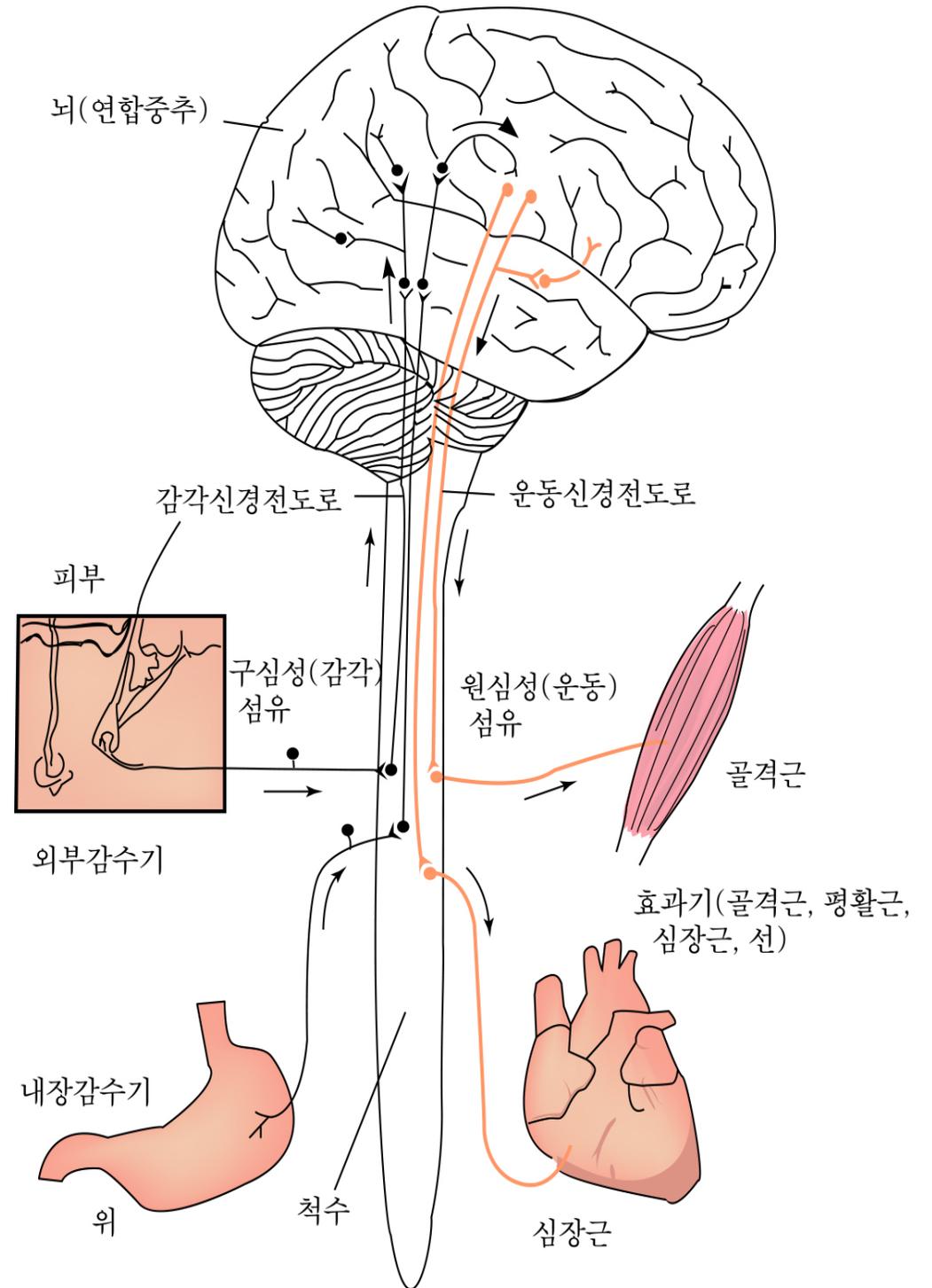
신경계의 기능

구 분						기 능
중추신경계 (central nervous system)				불수의적	뇌(대뇌, 간뇌, 중뇌, <u>뇌교</u> , 연수, 소뇌), 척수	신체의 중심 조절 체계, 감각 수용기로부터 정보를 받아 근육과 선(glands)으로 신호를 보내 운동이 가능하도록 한다. 또한 생각, 학습, 기억 등의 기능도 가지고 있다.
말초신경계 (peripheral nervous system)	자율 신경계	교감신경	원심성 신경			구심성 신경, 원심성 신경을 가진 뇌신경 및 척수 신경
		부교감신경		수의적	중추에서 효과기에 전달하기 위해 2차적인 신경 연접이 필요한 신경 섬유	
	체성 신경계	운동신경	구심성 신경			
		감각신경				

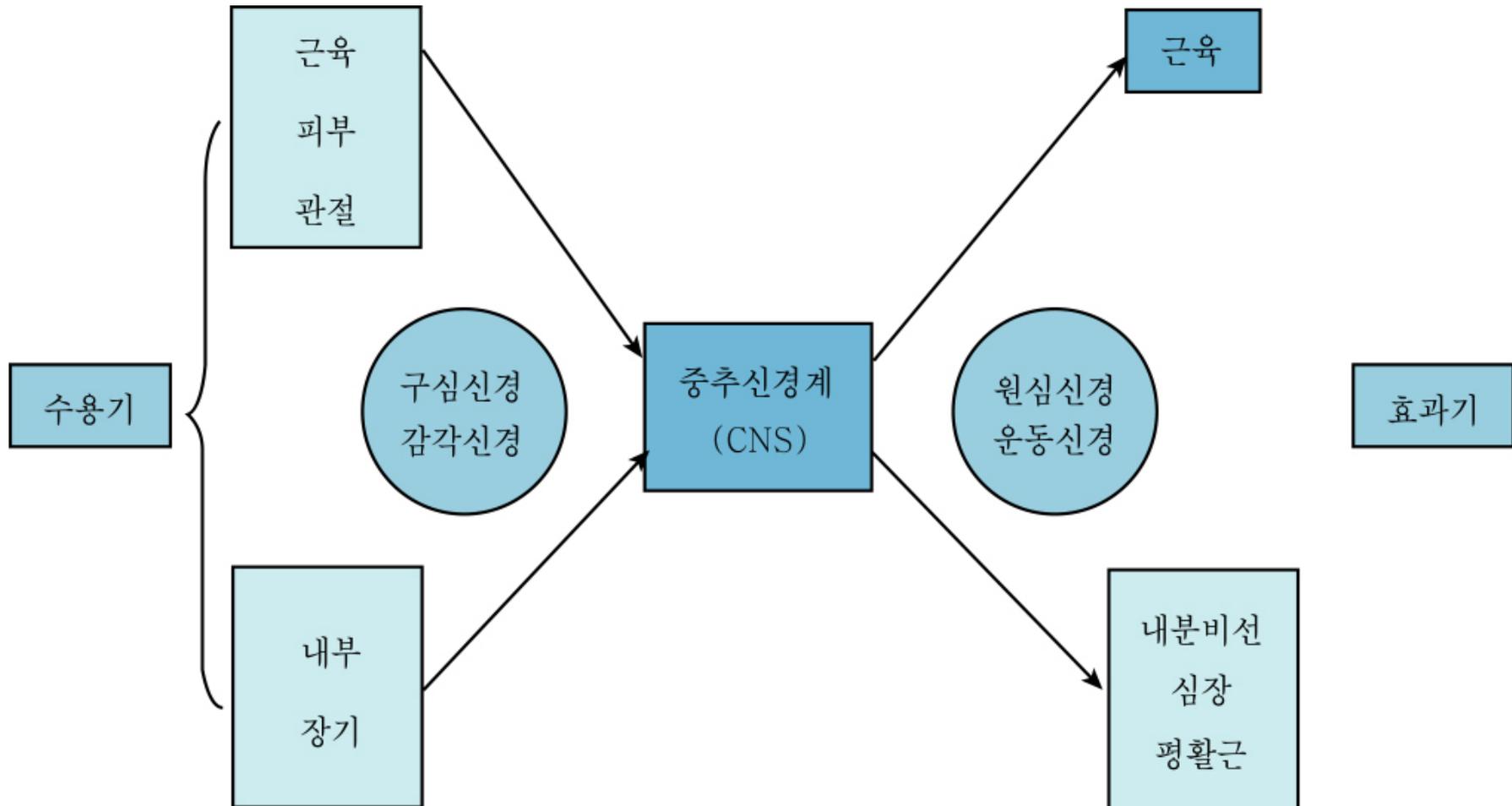
3) 중추신경계와 말초신경계의 연계

- 감각 신경과 운동신경(근육)의 조화로운 정보 교환
 - 예) 100m달리기에서 총소리 듣고 출발
- 감각 정보의 입력
 - 척추 수준에서의 연계 - 운동반사
 - 뇌간 수준에서의 연계 - 잠재 의식적인 운동 반응
 - 소뇌 수준에서의 연계 - 운동제어, 협응
 - 시상 수준에서의 연계 - 다양한 감각 구분
 - 대뇌 피질 수준에서의 연계 - 주위와 종합하여 반응

신경계 구조

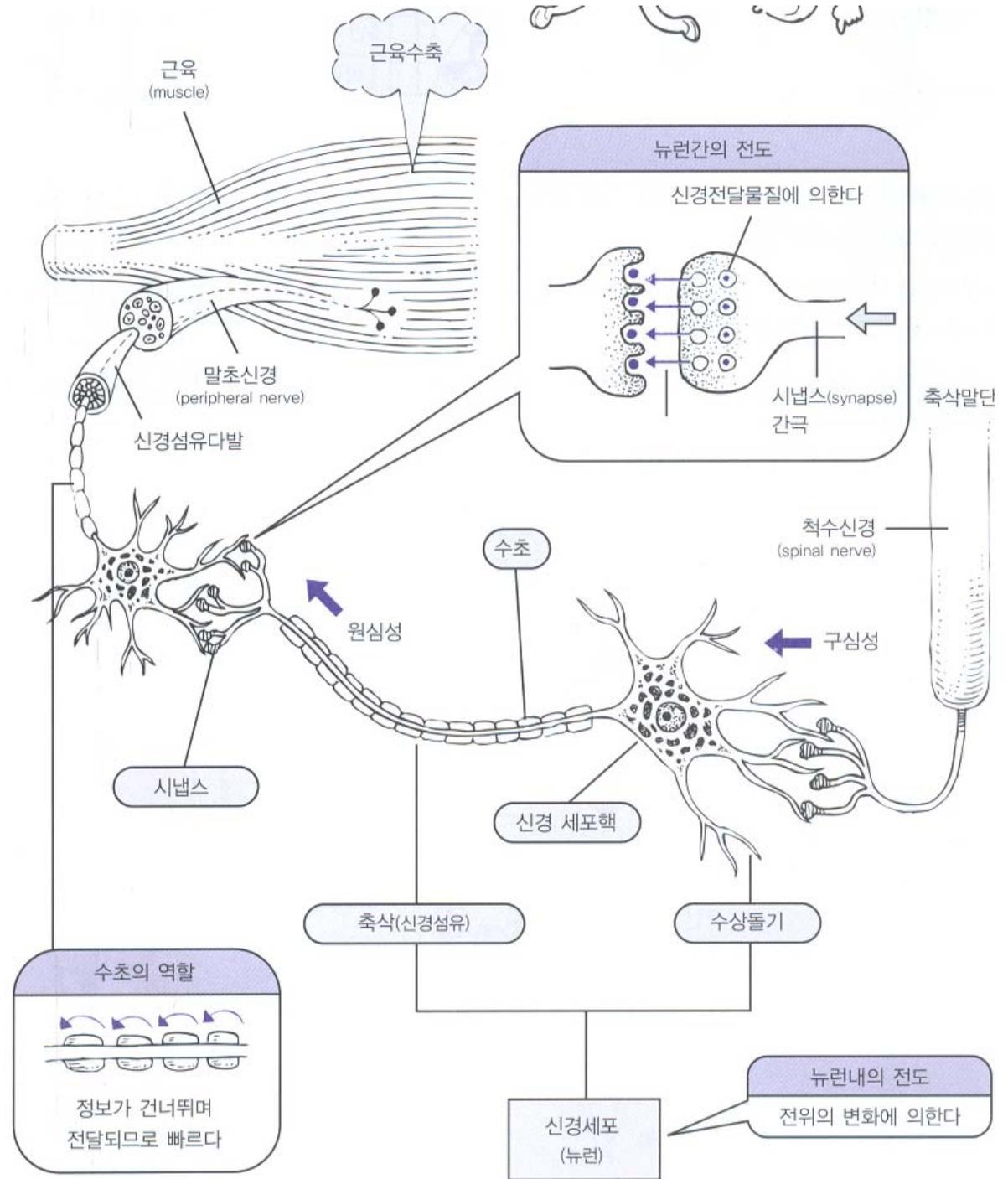


3) 중추신경계와 말초신경계의 상호 교신 체계



2. 신경 세포와 자극의 전도

신경은 어떻게 전달되는가?

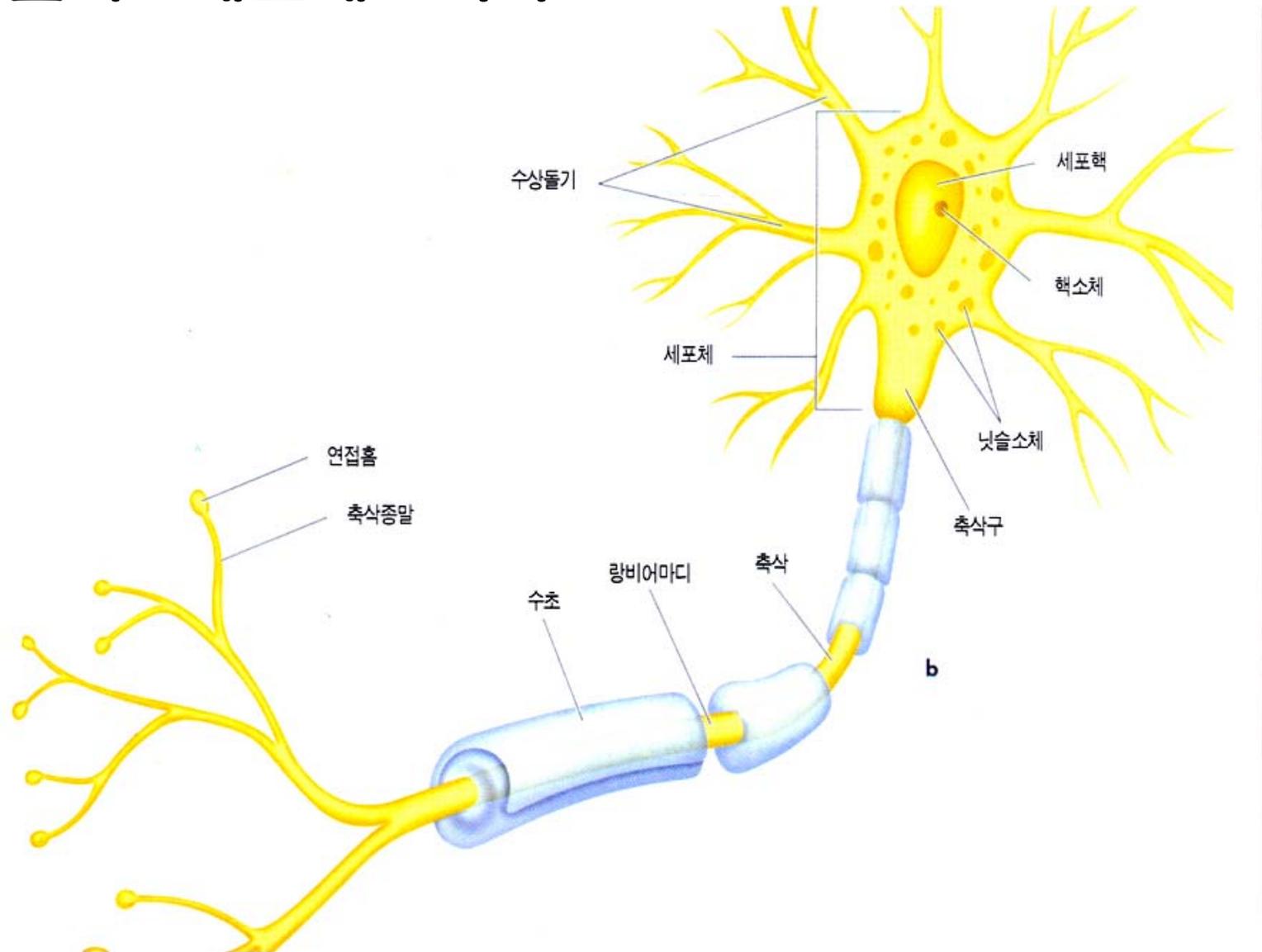


1) 신경 세포의 구조와 종류

(1) 신경 세포의 구조

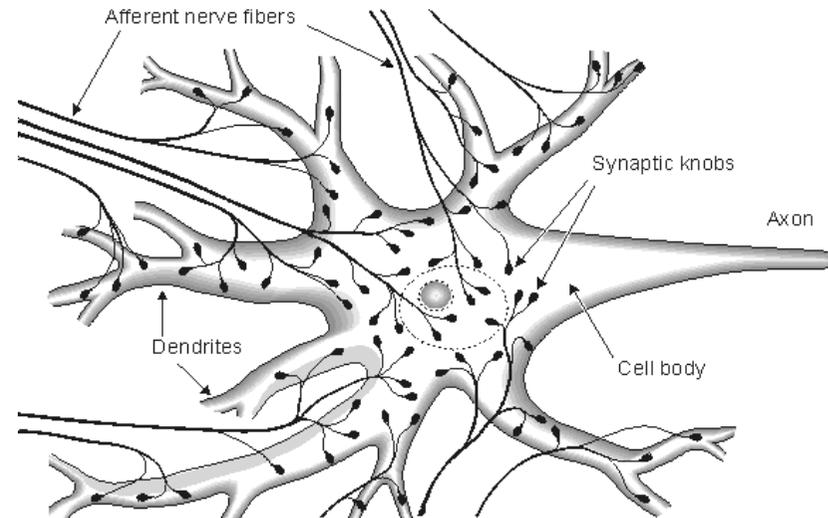
- 수상돌기
 - 세포체에서 뻗어 나온 나뭇가지 모양
 - 세포체로 자극을 전달
- 자극→축삭을 따라 전도→축삭말단에서 화학물질 방출
- 미엘린 수초(myelin sheath)
 - 보다 빠른 자극전달
- 랑비에 결절(nodes of Ranvier)

- **신경세포의 구조와 종류**
- 수상돌기+ 세포체+ 축삭



1) 신경 세포의 구조와 종류; 구심성 신경세포(afferent nerve cell)

- 구심성 신경계는 구심성 신경세포로 구성
- 말단에 자극의 특수한 형태에 반응- 활동전위 유발하는 감각수용기 있음
- 자극 정보 교환 활발
 - 세포체가 적수와 연결
 - 긴 축삭말단은 수용기⇒세포체로 뻗어 있음
 - 짧은 축삭은 세포체⇒적수로 뻗어 있음
- 말초신경계의 주된 신경

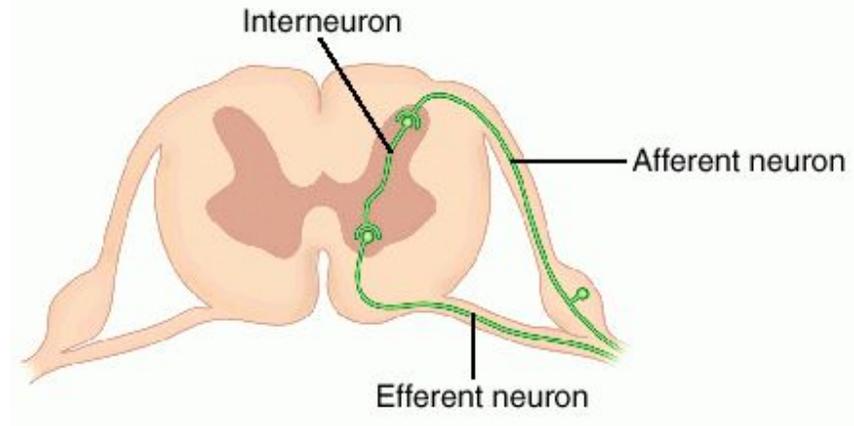


1) 신경 세포의 구조와 종류; 원심성 신경세포(efferent nerve cell)

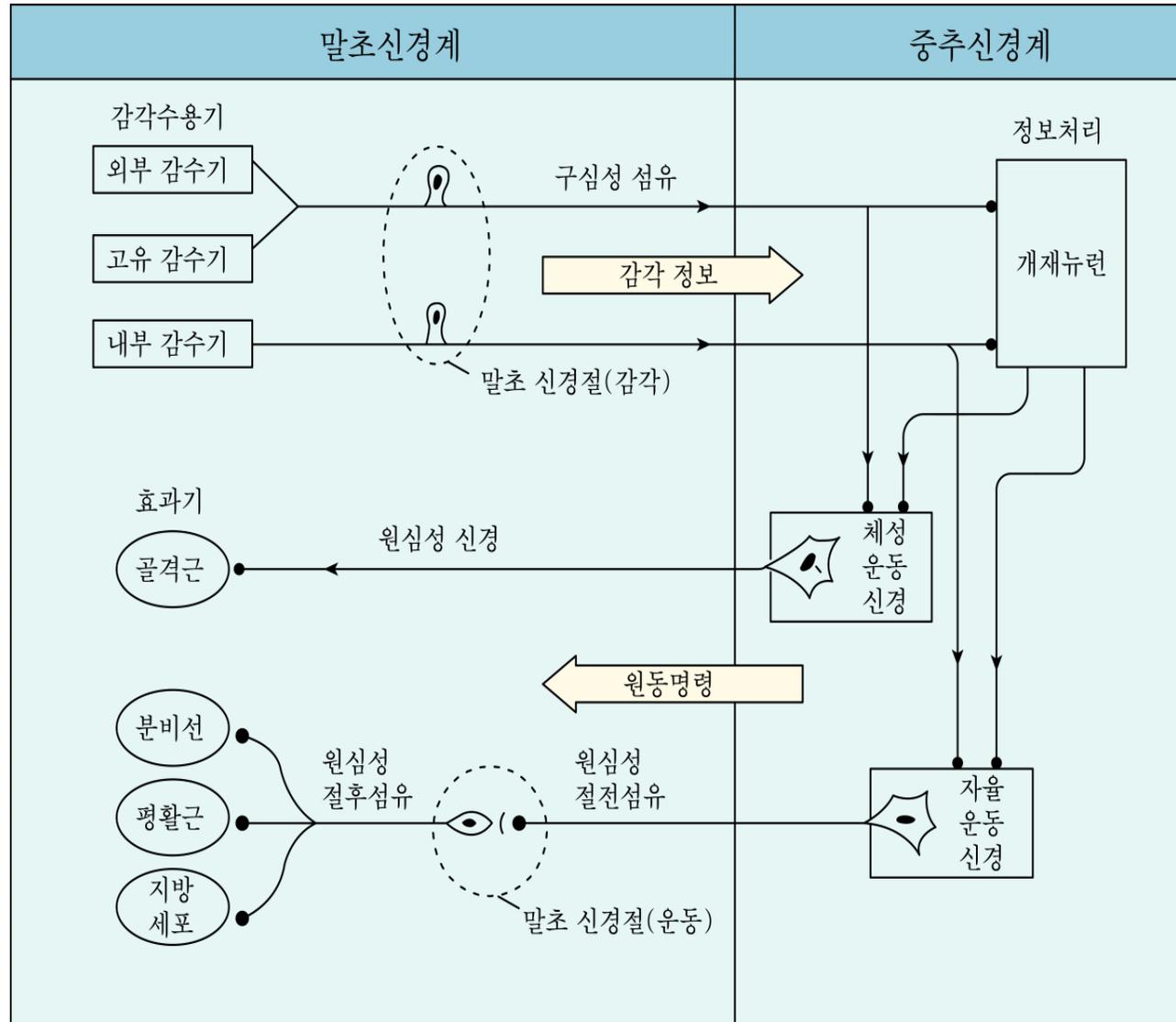
- 원심성 신경계의 구성 세포
- 세포체는 중추신경계 안에 위치
- 중추신경계에서 정보를 효과기로 전달
- 원심성 축삭은 중추신경계 내에 존재
- 원심성신경이 지배하는 근육으로 연결되어 효과기에 통합된 결과를
보냄

1) 신경 세포의 구조와 종류; 개재 신경세포 (interneuron)_사이신경세포

- 구심성과 원심성 사이를 말함
- 말초신경계의 정보를 통합하는 역할



신경 세포의 종류와 위치



홀극신경세포 (unipolar cell)
 두극신경세포 (bipolar cell)
 못극신경세포 (multipolar cell)

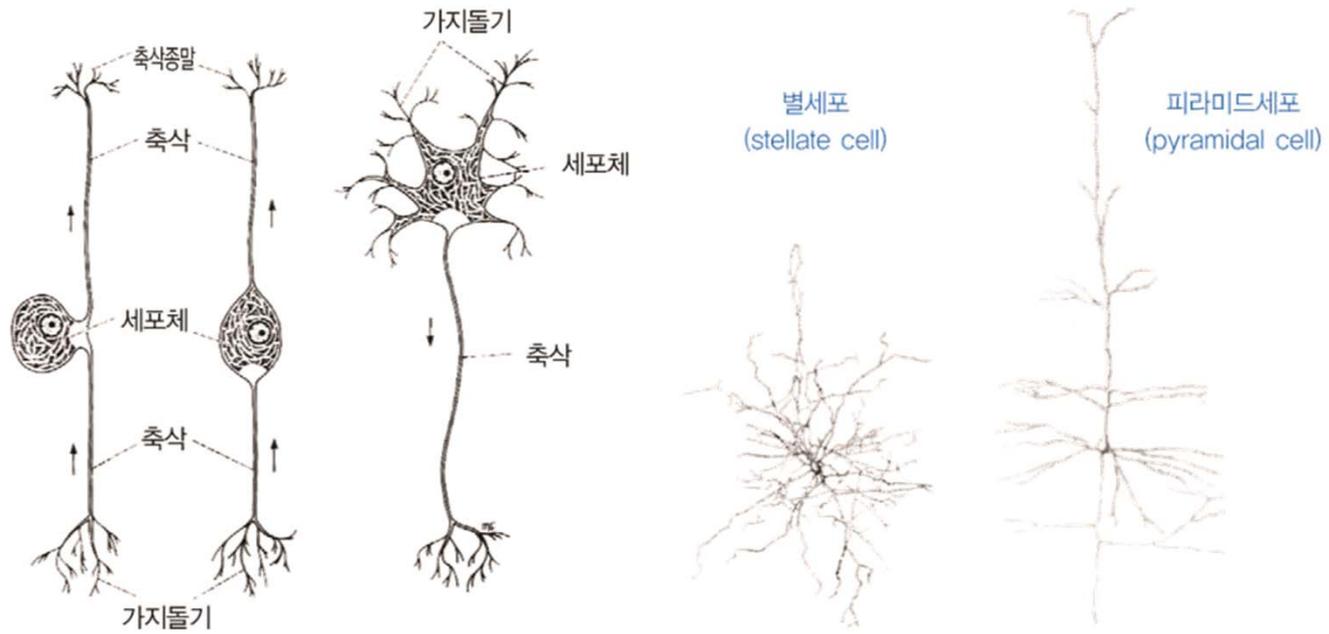


그림 3-3 신경세포의 구조 및 해부학적 분류

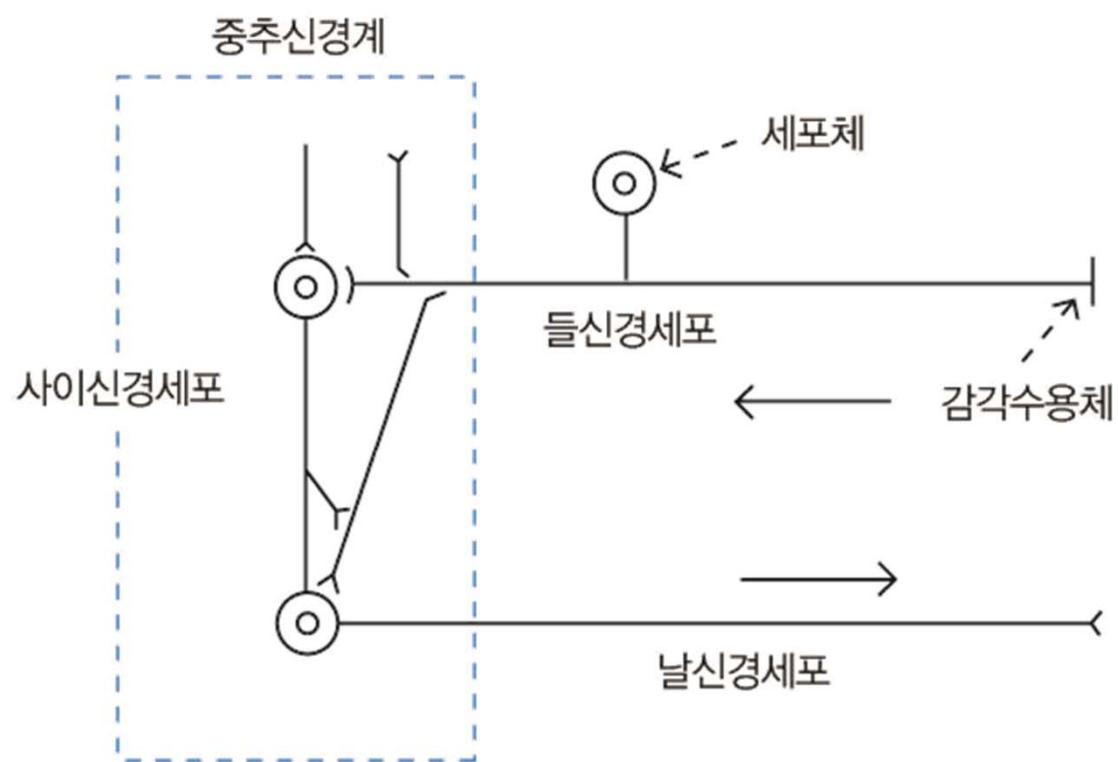


그림 3-4 신경세포의 기능적 분류

뇌의 구성

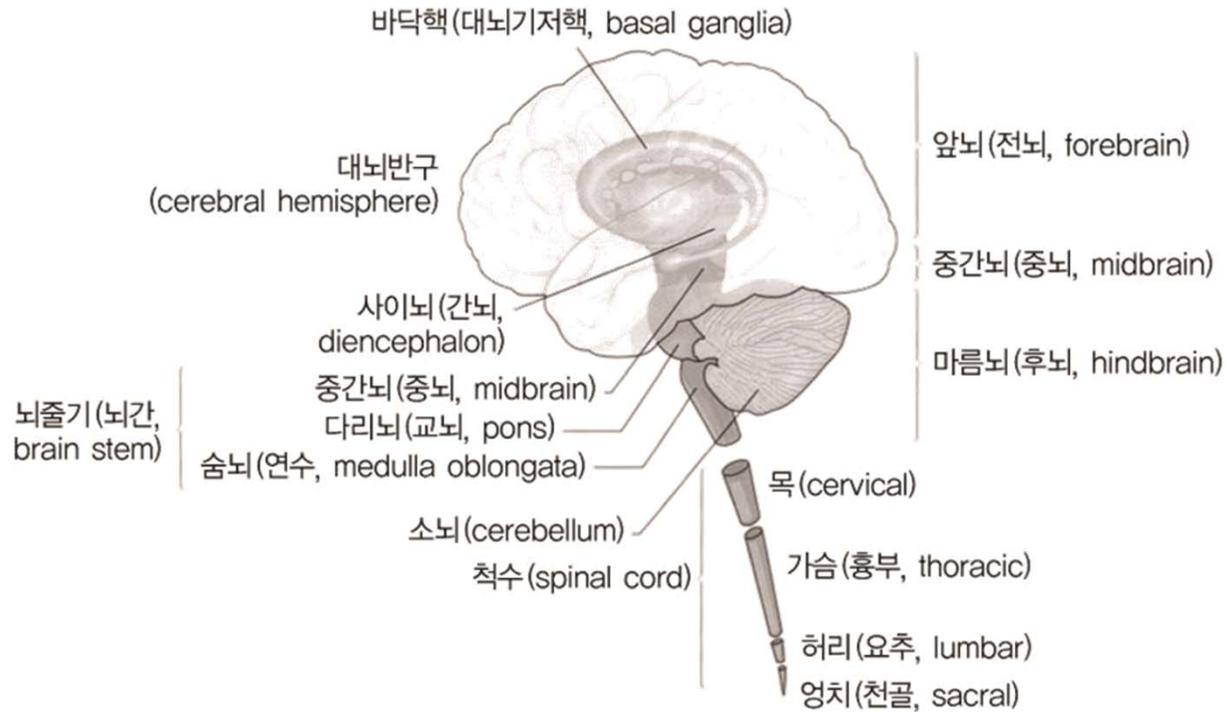
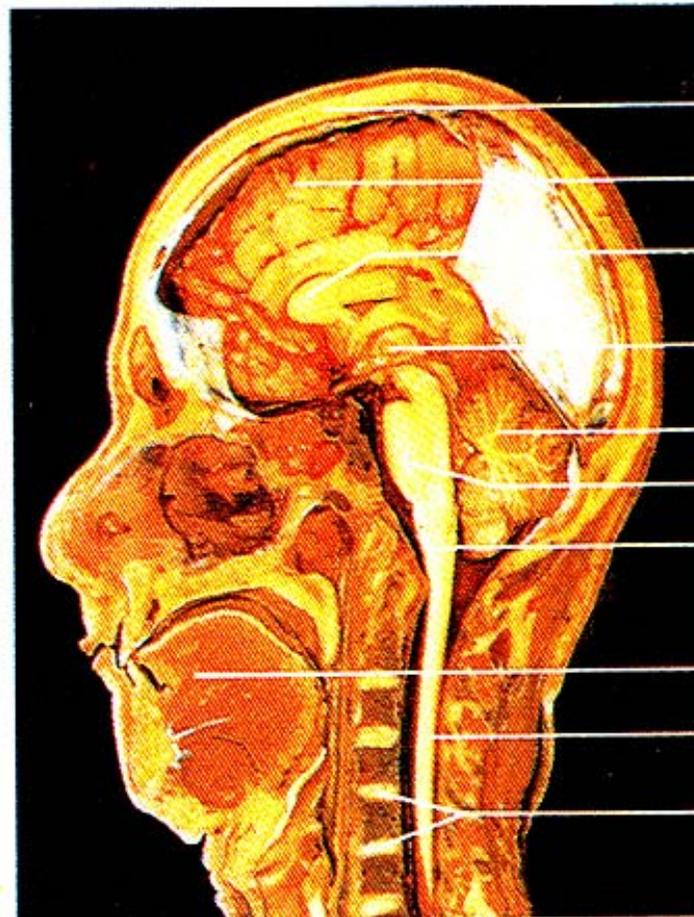
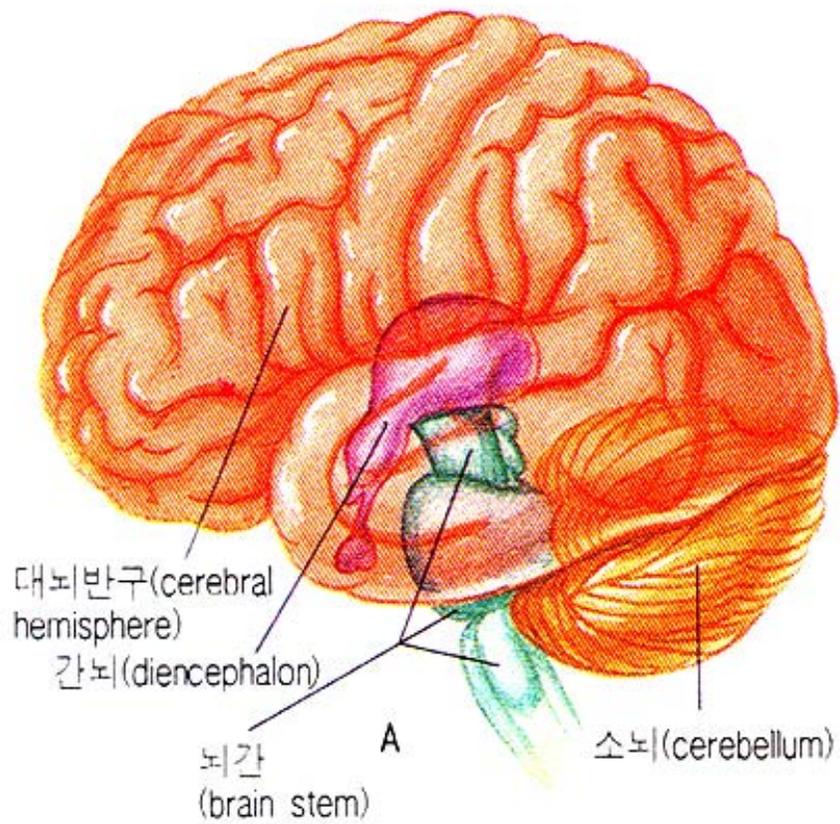


그림 3-5 중추신경계의 구성

1) 대뇌의 운동조절

- 대뇌의 주운동피질은 운동을 수의적으로 조절
- 추체로
 - 직접 척수의 운동뉴런에 연결
 - 운동피질에서 자극을 척수의 전근으로 보내는 통로 역할
 - 추체외로
 - 나머지 원심로를 통틀어

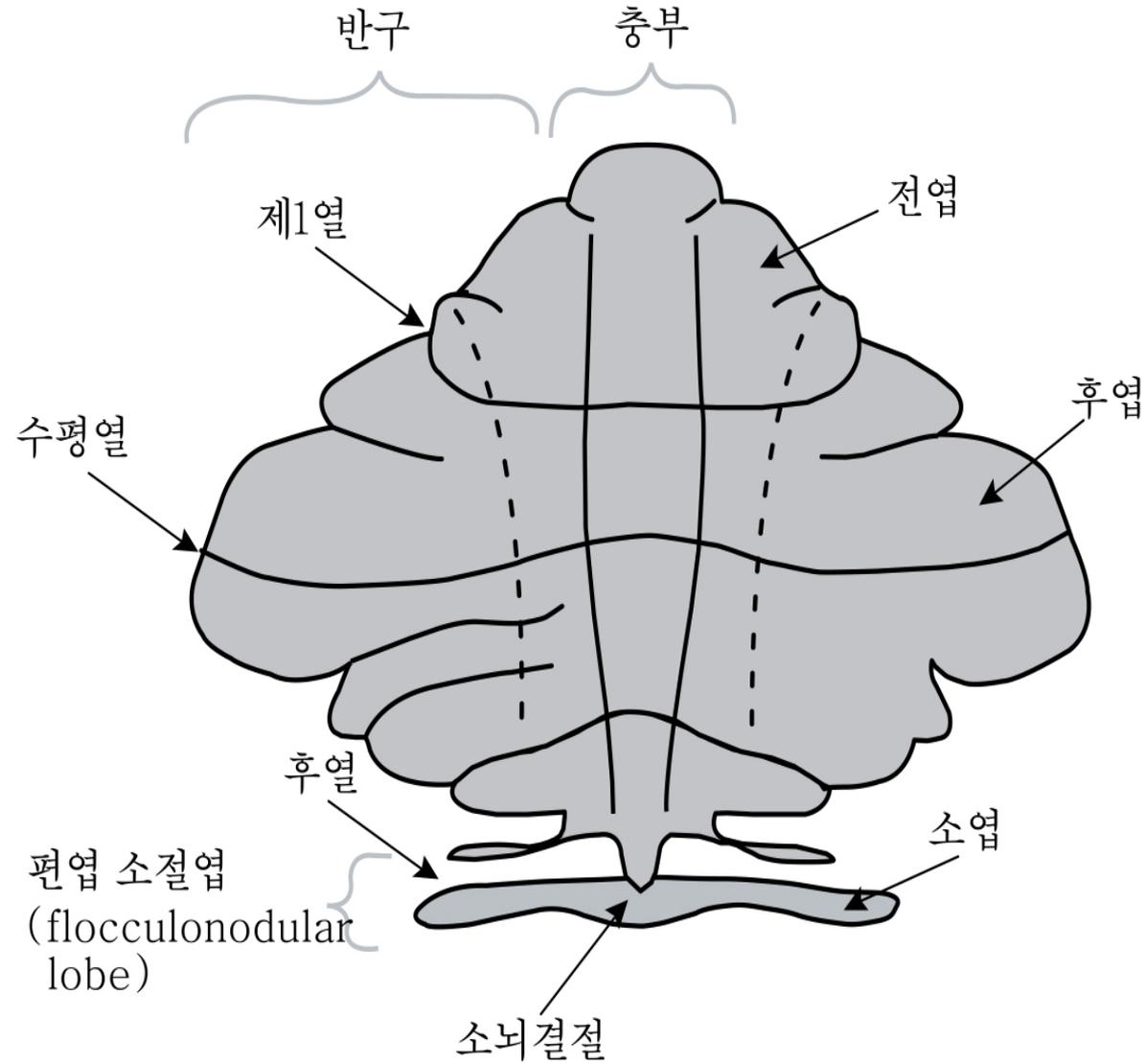


- 두정골 (parietal bone)
 - 대뇌반구(cerebral hemisphere)
 - 뇌량(corpus callosum)
 - 제3뇌실(third ventricle)
 - 소뇌(cerebellum)
 - 교(pons)
 - 연수 (medulla oblongata)
 - 혀(tongue)
 - 척수(spinal cord)
 - 추간판(inter-vertebral disc)
- } 뇌간

(2) 소뇌(cerebellum)

- 신체 평형과 자세 조정, 운동 조절에 관여
- 대뇌의 자문기관 구실
- 대뇌피질에서 형성된 수의운동의 계획, 준비, 시동을 보완해주는 역할
- 소뇌의 구조
 - 대뇌 후방, 뇌간 위에 위치
 - 전정소뇌 : 근긴장과 수의운동기술조절
 - 척주소뇌 : 수의운동을 계획하고 시작
 - 대뇌소뇌 : 균형 유지, 안구 운동 조절 담당

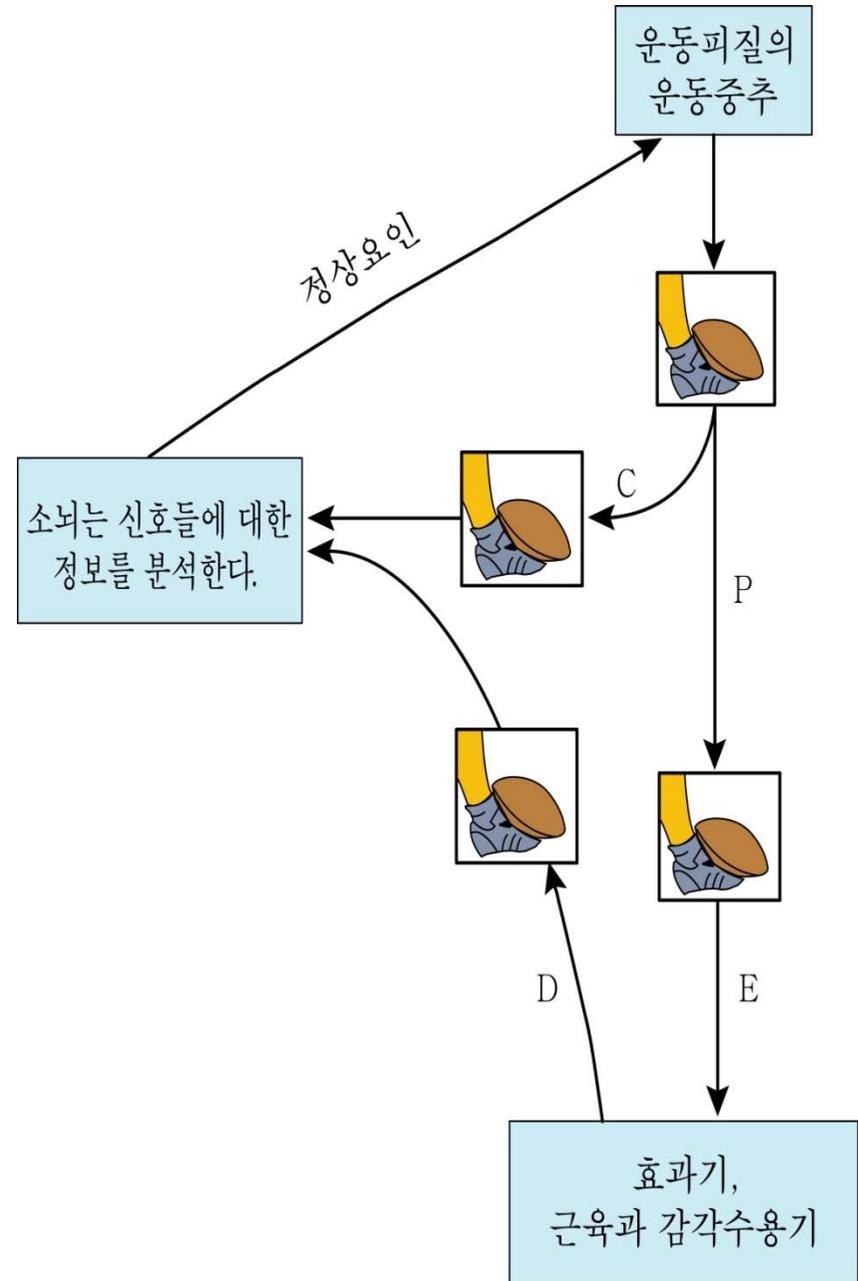
소뇌의 구조



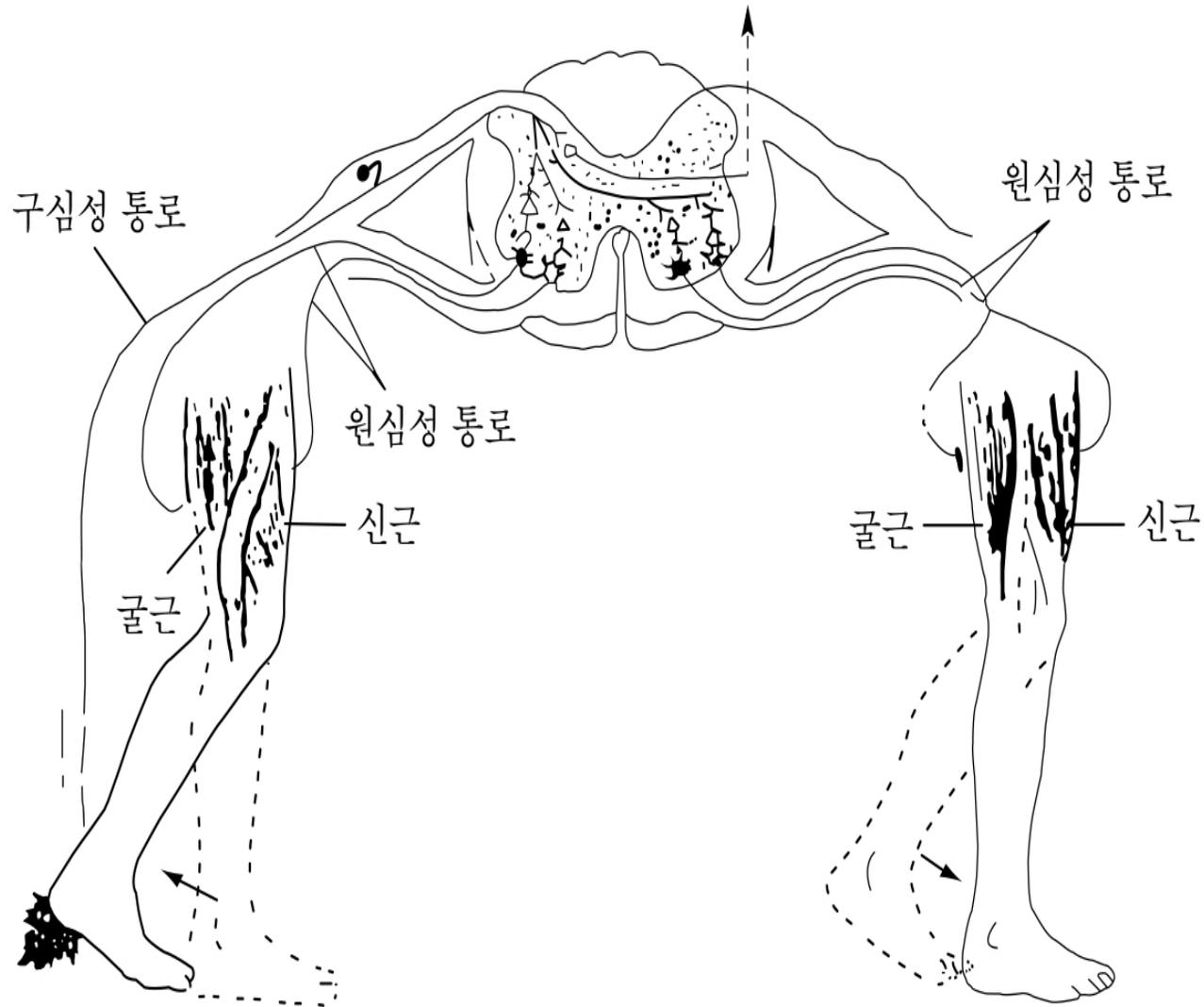
소뇌의 기능

- 자극은 추체로를 거쳐서(P)
- 근육에 적절한 흥분을 초래(E)
- 소뇌에 대뇌피질의 의도된 운동계획 전달(c)
- 운동 수행 후 고유수용기 정보가 척수소뇌를 거쳐 소뇌로 보내진다(d)
- 효과기로 부터 구심성 흥분(d)과 대뇌피질로부터의 원심성 흥분(c) 이 소 뇌에 폭주
- 소뇌에서 운동상황이 비교, 분석
- 제동효과
 - 위치, 속도, 방향 예측 :사지를 원하는 지점에서 멈추도록
- 스피드의 지각
 - 테니스 공 맞추기, 물체와 충돌하지 않기, 야구 공 잡기

소뇌의 신경 조절



도피반사와 결합된 신전반사



(3) 지각의 입력과 운동기술

- 잠재기억

- 숙달된 기술은 대뇌의 감각영역에 기억 되었다가 즉시 재생
- 고유수용기 -> 소뇌 -> 대뇌피질의 감각영역 -> 운동피질로 연결되어 있음
- 일단 학습되면 잠재기억에 존재하다 사용가능
- 축적된 잠재기억과 차이가 있으면 소뇌를 통해 수정
- 유리컵에 담긴 물컵을 잡아서 마실 때
- 빠른 동작은 운동영역에 축적되어 감각신경 피드백 없이도 사용 가능

2) 자율 신경 조절

- 호흡, 순환, 소화, 대사, 분비, 체온, 생식 등
- 무의식적으로 조화롭게 자율적으로 처리
- 감각 및 운동 신경계와 상호작용, 대뇌에서 통합

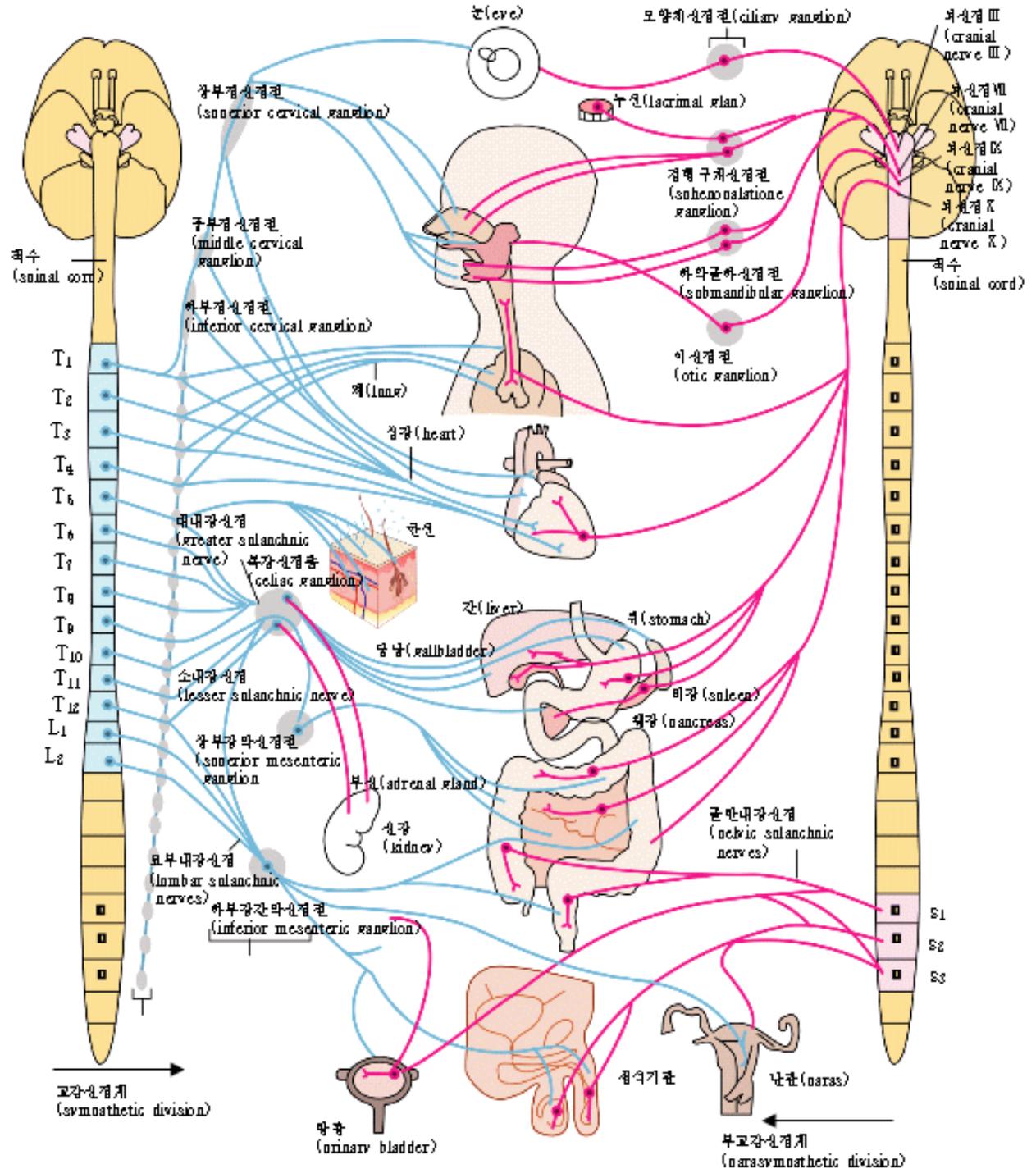
(1) 교감 및 부교감 신경계

- **교감신경**
 - 싸우느냐 달아나느냐를 결정하는 신경(fight-or-flight)
- **부교감신경**
 - 휴식 및 소화 신경(resting & digesting)
- **자율신경절**
 - 뉴런 세포체 집합으로 중추신경계 밖에 위치
- **절전뉴런(preganglionic neuron)**
 - 세포체는 중추신경계, 축삭은 자율신경절 위치
- **절후뉴런(postganglionic neuron)**
 - 세포체는 자율신경절에, 축삭은 효과기 위치

교감 신경계 및 부교감 신경계의 영향

구 분		교감 신경계	부교감 신경계
심장	<u>심박수</u> 심근 수축력 심장 혈관	증가 증가 이완	감소 감소 수축
허파	기관지 기관지 혈관	이완 수축	수축 이완
혈관	혈압 복부 피부 골격근	증가 수축 증가 이완	무영향
간	<u>글루코스 방출</u>	자극 증가	
세포	<u>대사율</u>	증가	
지방 세포	<u>지질대사율</u>	자극 증가	
땀샘	발한	자극 증가	
부신 수질	에피네프린, 노르에피네프린	분비 자극	
소화계	연동 운동 소화액 분비 괄약근	억제 수축	촉진 이완
신장	혈관	수축	<u>무영향</u>

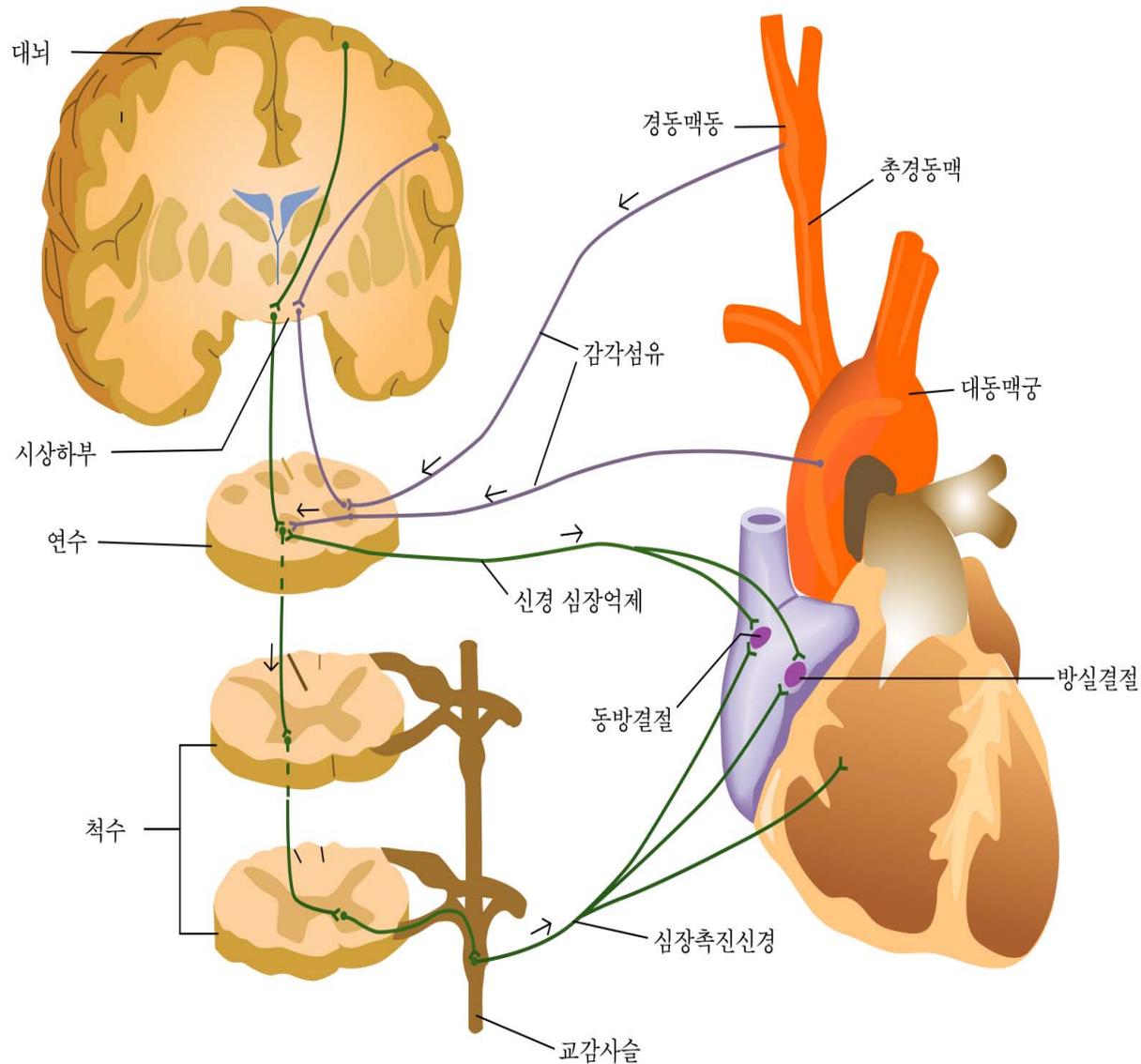
자율신경의 체계



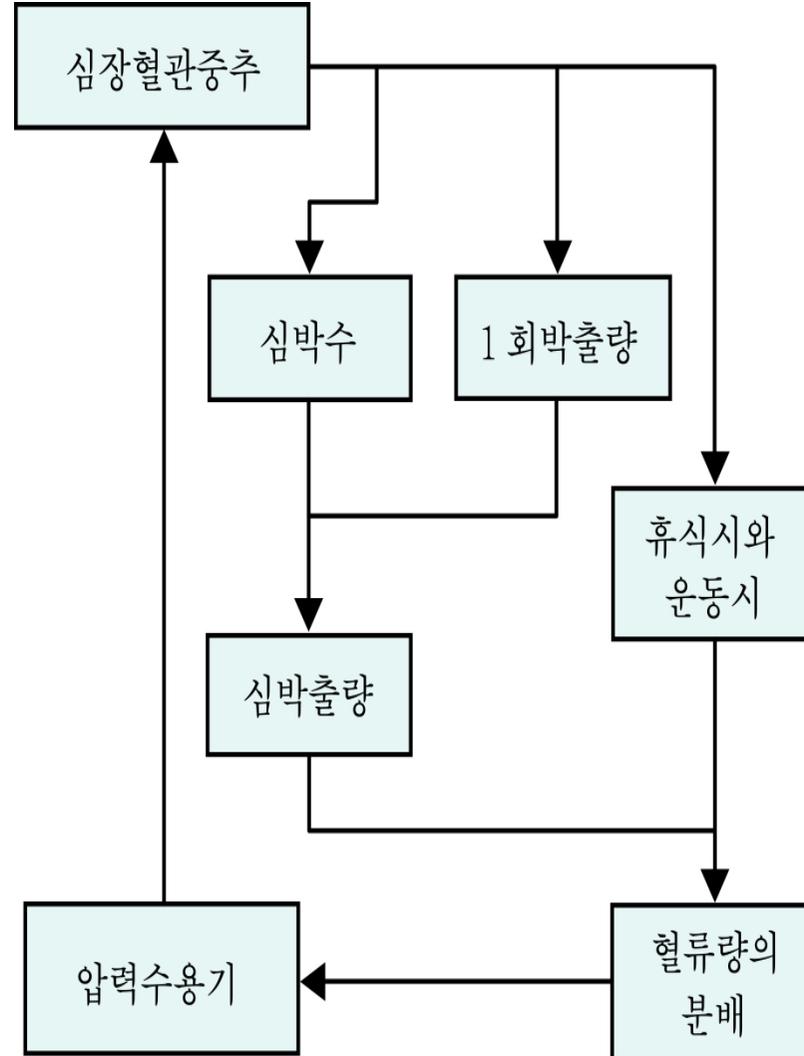
(2) 중추 신경성 조절

- 동맥압의 조절
 - 적정 혈압 유지 : 산소와 영양분 공급과 노폐물 제거 위한 혈액 순환에 중요
 - 구심성 정보
 - 혈관벽의 수용기 → 연수의 심장혈관 중추로 전달
 - 원심성 정보
 - 교감/부교감신경 → 심장 → 심박수와 수축력 조절
 - 교감신경
 - 심박수, 수축력 증가, 혈관수축
 - 부교감신경
 - 심박수 감소

심장의 자율신경계 조절



혈압 조절



(3) 운동시 골격근의 혈류량 조절

- 운동시에는 20% 정도 가던 혈액이 거의 90%까지 증가
- 단, 뇌로 가는 혈액량은 변화하지 않는다.
- **혈류 재분배**
 - 운동에 불필요한 내장기관 혈관수축, 골격근 혈관 확장

감각-지각 시스템

- **몸감각 시스템(체성감각계: somatosensory system)**
 - 신체 자체에 대한 정보를 주로 전달
 - 고유수용체(proprioceptor)
 - 운동감각에 매우 중요한 역할을 담당
- **근방추**
 - 방추속 근육세포
 - 감마운동신경세포, 감마운동신경세포(I a, II)분포
 - 방추바깥 근육세포
 - 알파운동신경분포
 - 근육의 길이 변화 감지

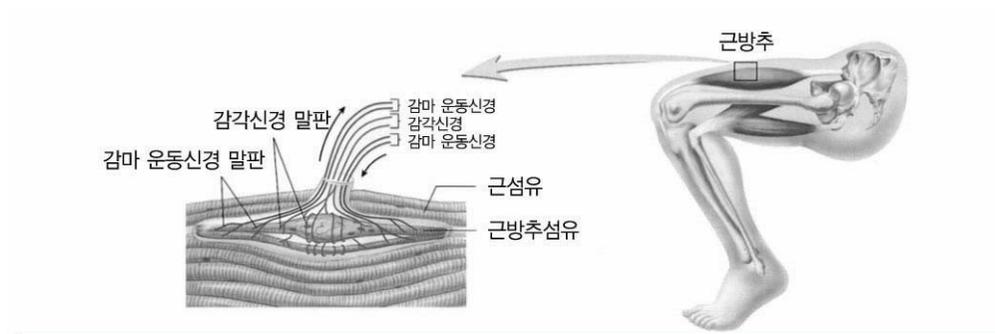


그림 3-8 근방추의 구조와 위치

- **골기건기관**

- 근육말단(방추바깥근육세포)과 건의 접합부에 위치
- 근육의 수축이나 신전에 따른 장력의 변화 감지
- 감각신경세포만 있고 운동신경세포가 존재하지 않
으므로 중추신경계의 지배를 받지 않음
- 근방추: 근육의 길이 변화에만 활성화
- 골기건 기관: 등척성 수축에도 활성화

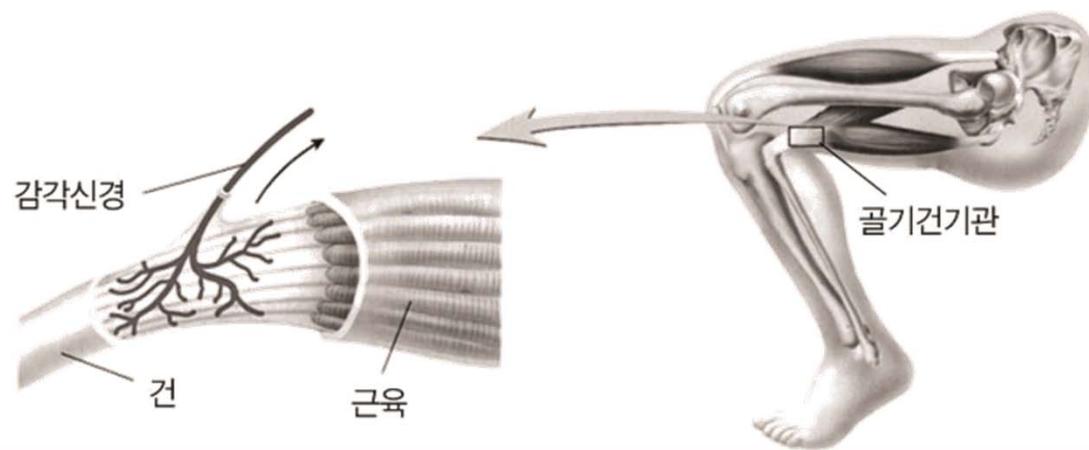


그림 3-9 골기건기관의 구조와 위치

- **관절수용체(joint receptor)**

- 하나로 정의된 기관이 아님
- 분포 위치에 따라
 - 관절 주머니, 인대, 결합조직

- **유형**

- 루피니종말, 굴기종말, 파치니 소체, 자유신경종말

- » 루피니종말

- 관절의 각변위, 각속도, 관절 내부의 압력감지

- » 굴기종말

- 굴기건기관과 비슷, 한계 운동범위에서 인대의 장력감지

- » 파치니소체

- 관절의 각가속도 감지

- » 자유신경종말

- 관절의 통증 감지

- **피부수용체**

- 외부 환경 정보를 감지
- 역학수용체, 열수용체, 통각수용체로 구분

- **역학수용체**

- 파치니소체, 머켈원판, 마이스너소체, 루피니종말 등
- 역학적 정보를 감지

- **열수용체**

- 온도의 변화를 감지

- **통각수용체**

- 피부의 통증을 감지

- 손끝과 같은 곳은 1평방 센티미터 당 2500여 개 존재
 - » 착지반사
 - 발바닥의 넓고 약한 자극에 다리를 펴는 동작
 - » 철회반사
 - 날카롭고 집중적인 자극을 가하면 다리를 굽히는 동작

몸감각 정보의 전달

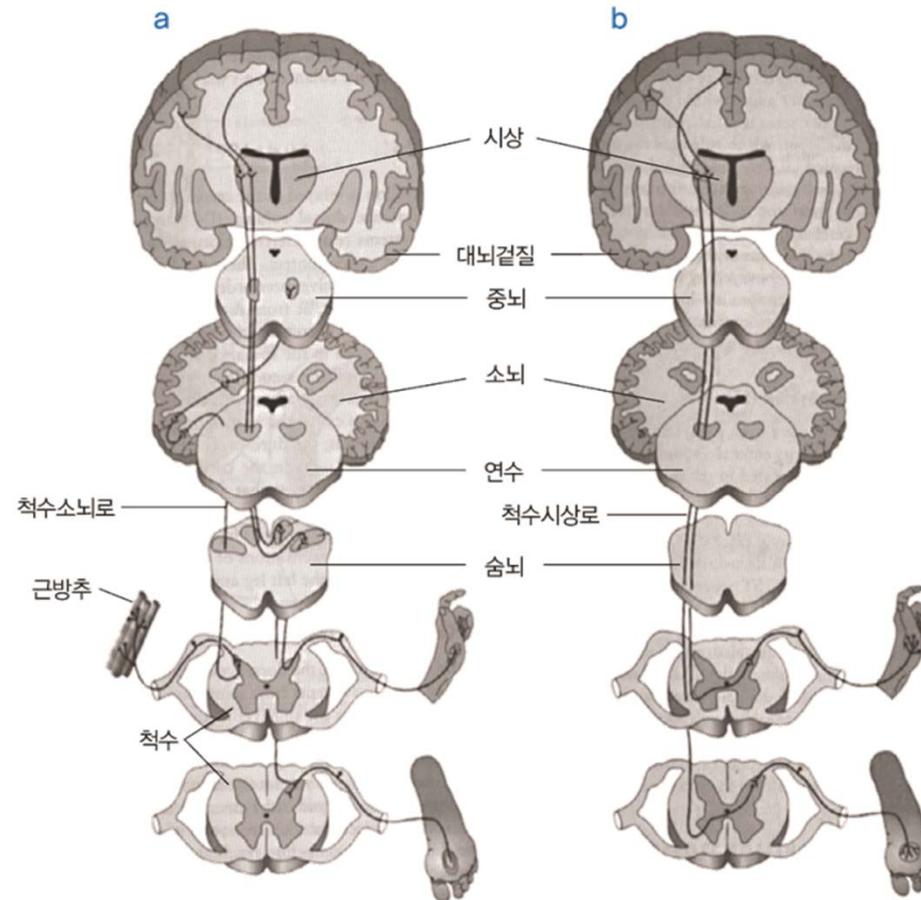


그림 3-10 등쪽기둥로 (a)와 척수시상로 (b)

- **등쪽기둥로**

- 관절, 피부, 근육 수용기에서 시작된 감각신경세포의 축삭 포함
- 짧은 가지는 척수에서
- 긴가지는 뇌줄기의 숨뇌까지 뻗어 있음.
- 마지막으로 대뇌 겉질에 연결
- 초당 80-100m의 속도로 전달, 빠른 운동수행 가능

- **척수시상로**

- 통증, 온도, 촉각
- 초당 1-40m의 느린 속도로 전파

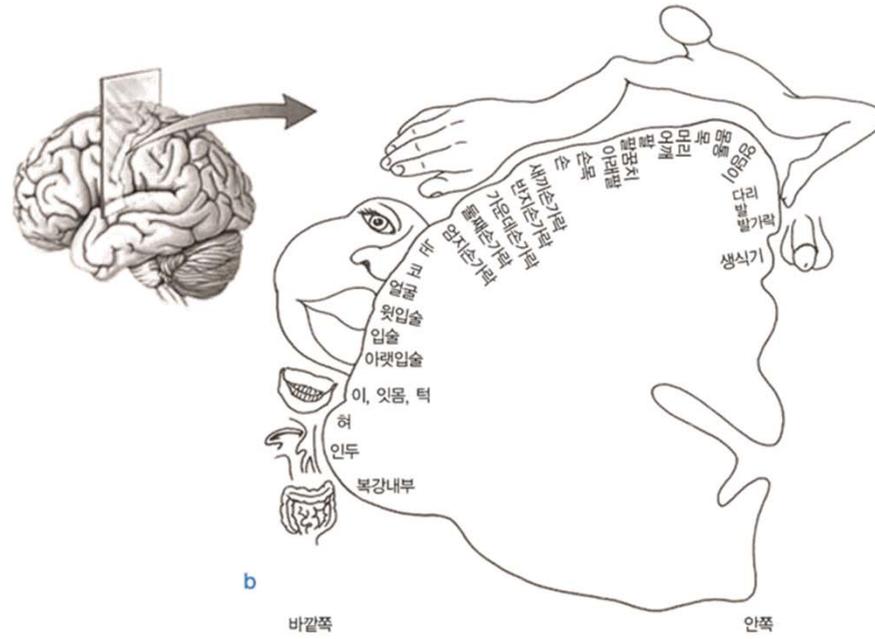
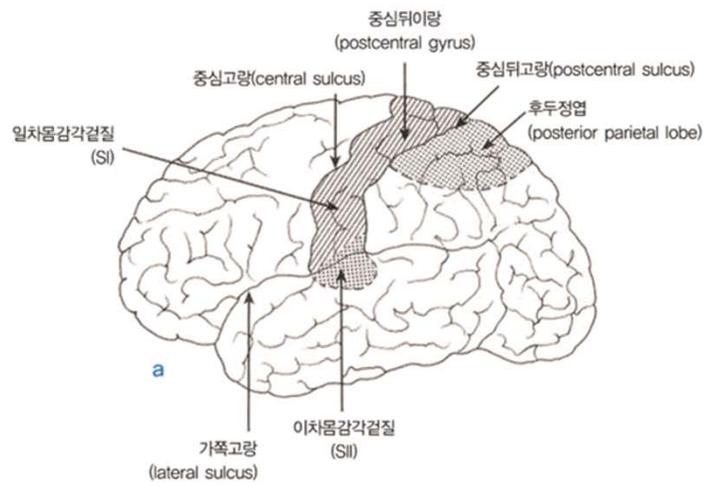
시상, 몸감각겉질, 연합지각

- **시상(Thalamus)**

- 양쪽 오름 몸감각기관을 통해 들어온 정보는 시상을 거쳐 상위 영역으로 전달
- 기저핵과 소뇌를 포함하는 뇌의 수많은 다른 영역의 정보를 받아 처리하고 대뇌겉질로 전달
- 감각과 운동시스템에서 중요한 역할을 담당

- **몸감각겉질(Somatosensory cortex)**

- 모든 몸감각 정보의 처리 담당, 몸감각의 의식적인 인식에 중요한 역할
- 일차 몸감각겉질
- 이차 몸감각겉질
- 관절수용체, 근방추, 피부수용체로부터 온 정보를 통합하여 필요한 신체영역에 움직임에 대한 정보제공



- **연합겉질(Association cortices)**
 - 지각에서 동작으로 전이하는 현상을 처음 볼 수 있음
 - 마루엽, 관자엽, 뒤통수엽에 있는 연합겉질은 고위 수준의 감각처리과정을 위한 중추로서 고위 수준의 추상적 인지 처리과정을 함께 수행함

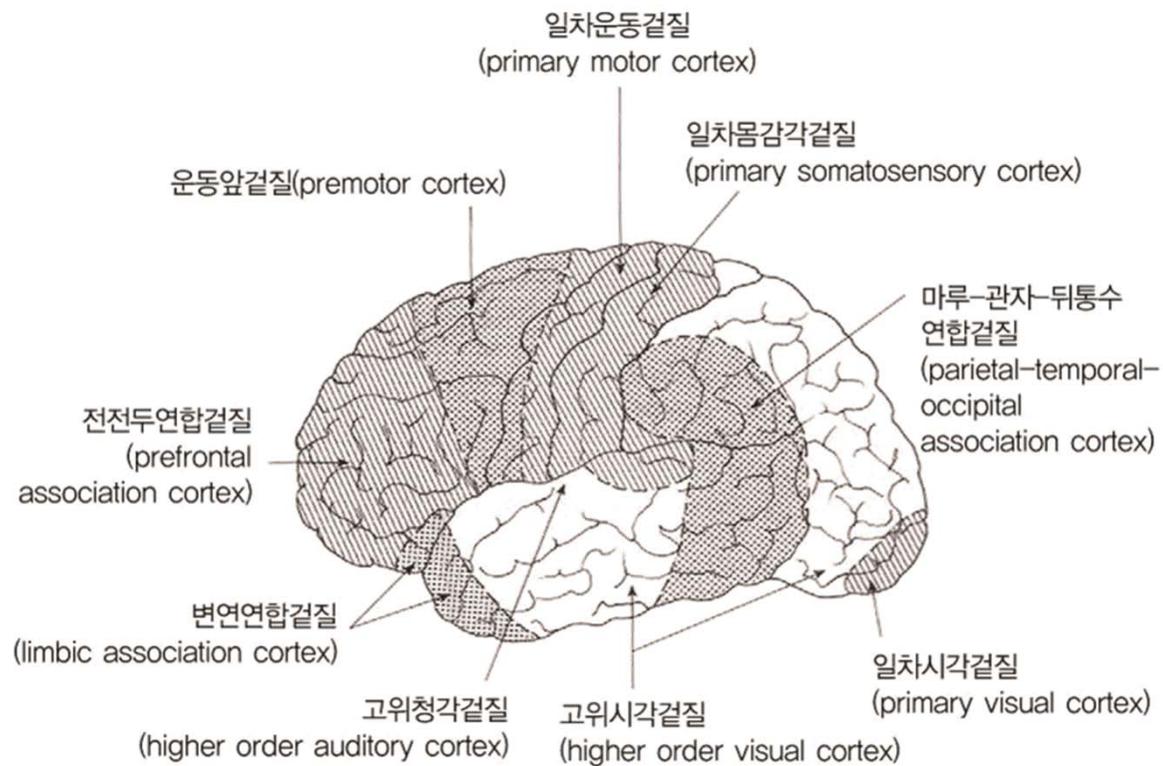


그림 3-12 감각영역 및 연합겉질 위치

시각시스템

- **빛수용체**

- 각막 - 동공 - 수정체 - 망막에 도달
- 빛수용체에서 전기신호로 바뀌어 대뇌에 전달
- 막대세포
 - 수정체 근처의 망막 가장자리에 집중, 아주 약한 빛에도 반응
- 원뿔세포
 - 손오목에 집중적으로 분포, 강한 빛에 반응, 물체의 미세한 특성을 파악
- 원뿔세포가 집중되어 있는 망막의 가운데는 초점시, 막대세포가 집중되어 있는 망막의 가장자리는 주변시를 담당
- 막대세포가 상실: 야맹증
- 원뿔세포가 상실: 시력상실 또는 저하

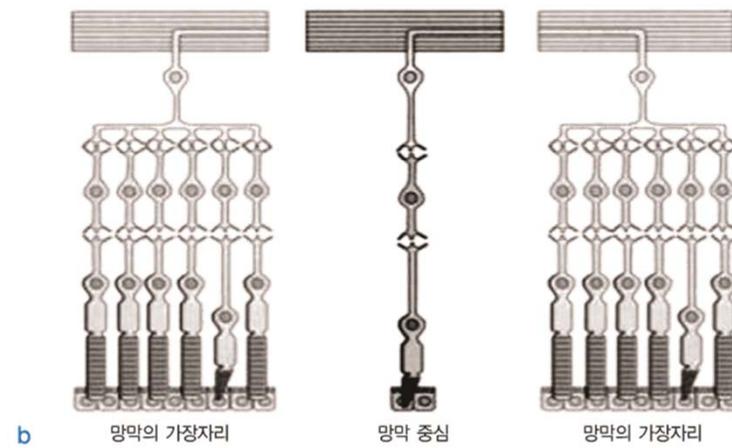
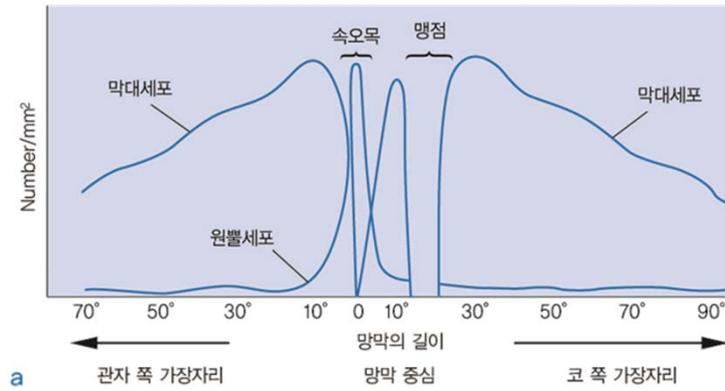


그림 3-13 빛수용체의 종류와 분포형태(출처: Bear 등, 2007)

• 중추시각통로

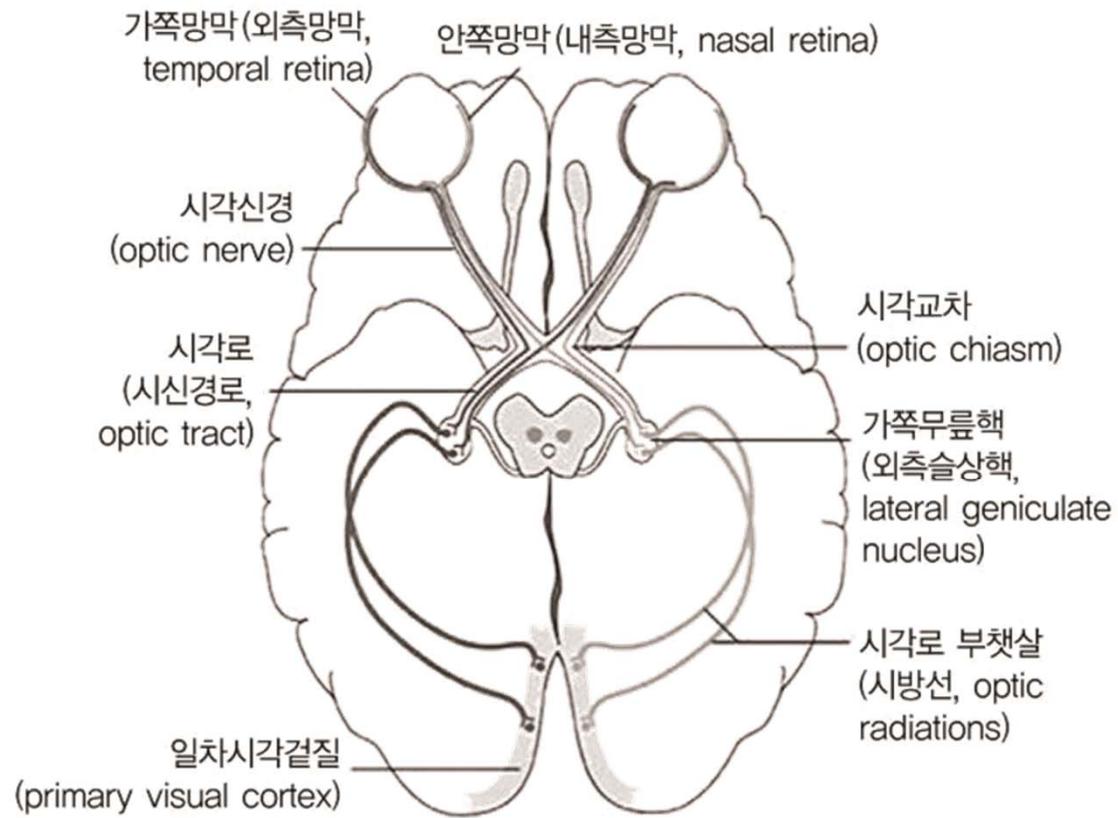


그림 3-14 시각시스템의 구조

안뜰시스템

- 속귀의 막미로를 형성
- 두 개의 주머니
 - 타원주머니, 둥근주머니
 - 정적인 머리 위치와 머리 운동의 선가속도에 좀 더 민감
- 세 개의 반고리관으로 형성
 - 시상면, 관상면, 횡단면상에 위치
 - 내부의 액체로 채워져 있음
 - 머리가 회전하거나 회전 후 정지하면 관성에 의해 팽대능 선마루 내부의 털세포를 자극 - 머리의 각가속도를 감지
- 안뜰 기관의 정보 - 소뇌, 숨뇌 등으로 전달
- 자세유지, 머리 운동, 눈 운동 등의 제어에 사용

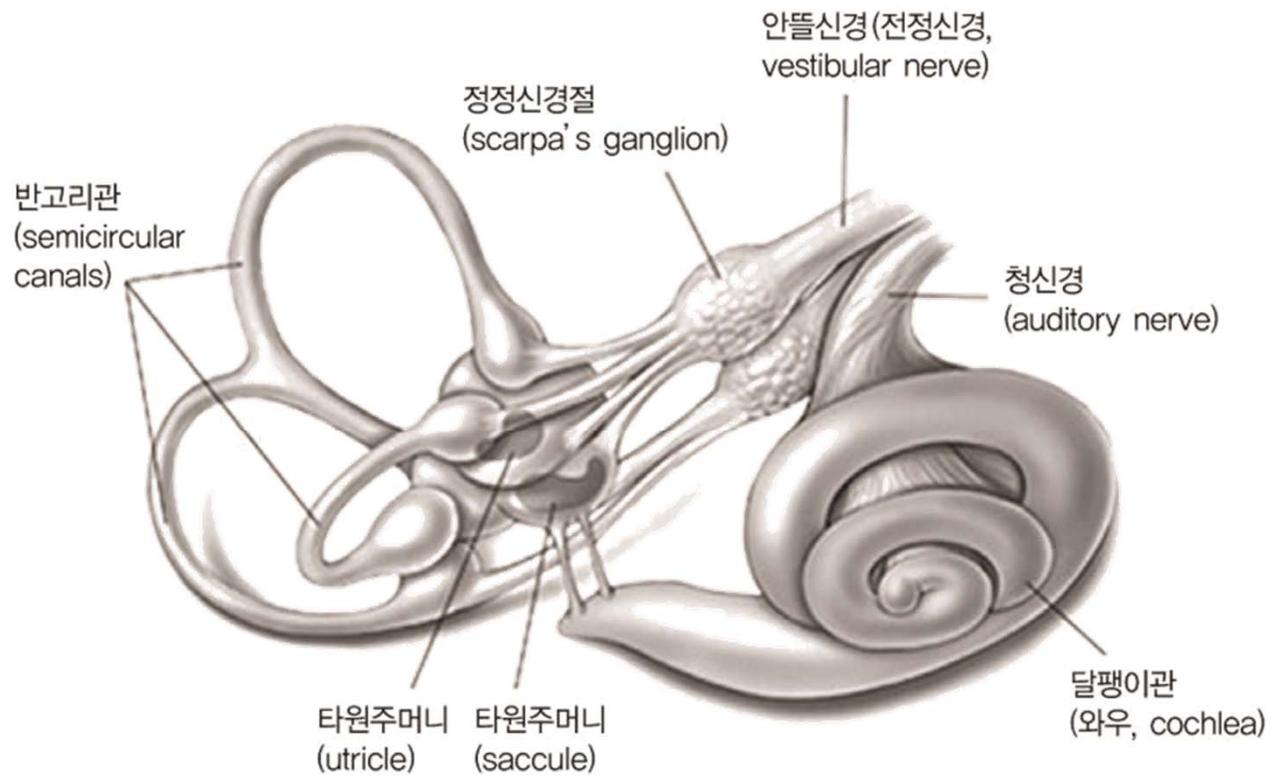


그림 3-15 안들시스템

동작시스템

- **인간의 모든 운동행동?**
 - 신경계와 근골격계의 상호작용
 - 인간의 운동제어 - 뇌에만 국한되지 않고 중추신경계 전반에 걸쳐 이루어짐

인지적 수준의 운동제어

- 지각시스템을 통해 들어온 정보 – 인지적 수준에서 처리, 동작을 계획하고 실행하는데 활용
 1. 동작의 의사결정
 2. 일반계획의 수립
 3. 세부 계획의 수립
 4. 동작계획의 실행

- **동작의 의사결정**
 - 테니스의 베이스라인으로 공 리턴동작
- **일반계획의 수립**
 - 경험, 초기평가의 적절성
- **세부계획의 수립**
 - 운동 매개변수(힘, 속도, 변위)의 수립
- **동작계획의 실행**
 - 다양한 근골격계의 하위 구성요소를 통해 실행 – 동작 결과가 생성

신경학적 수준의 운동제어

- **변연계**

- 환경의 요구에 반응하여 동작의 욕구를 유발
- 대뇌의 뇌줄기 윗부분을 감싸는 신경 구조체에서 시작
- 정서와 동기여 관련

- **연합겉질**

- **송출계**

- **척수계**

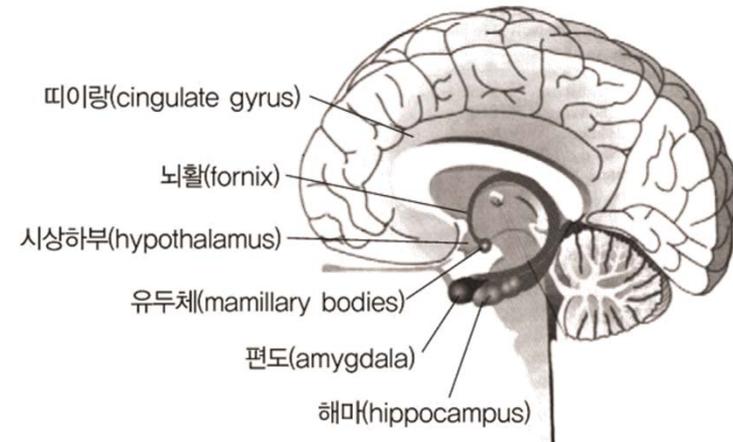


그림 3-16 변연계

• 연합겉질

- 몸감각겉질, 시각겉질, 청각겉질에서 전달된 감각 정보들의 지각과 기억 담당
- 대뇌 앞 운동연합겉질에서 통합되어 동작의 계획이 수립되고 운동 명령이 구성됨

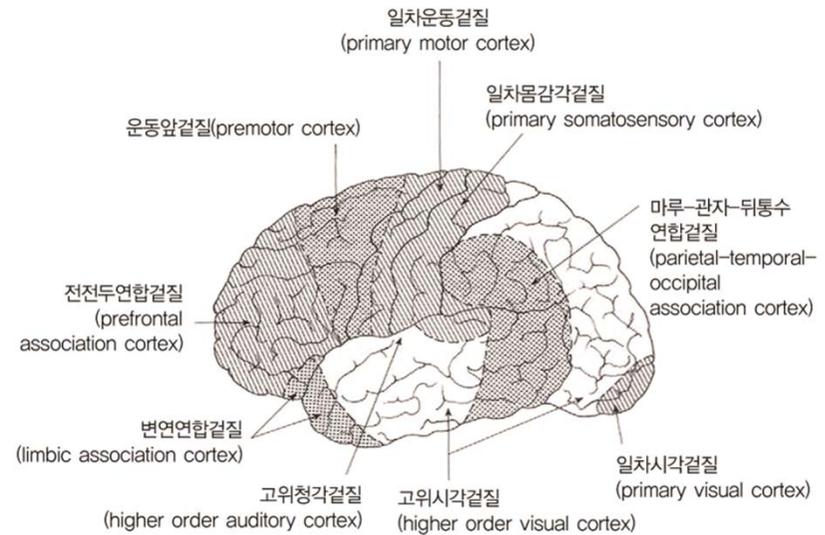


그림 3-12 감각영역 및 연합겉질 위치

- **송출계**

- **중뇌와 걸질 구조체들로 구성**
- **동작의 실행에 대한 인지과정이 이루어짐**
- **동작의 실행방법을 결정**
- **바닥핵, 소뇌, 운동걸질**

- **운동걸질**

- 동작의 계획과 실행에 필수 기능 담당
- 숙련된 동작의 생성
- 정교한 판단이 요구되는 손과 손가락의 동작 등에 선택적으로 관여

- **손뇌**

- 동작의 제어에 매우 중요한 기능 담당
- 생성될 동작의 조절 기능 뿐만 아니라 동작의 오차의 감지와 수정을 담당
- 동작의 청사진, 원심성 명령의 복사본

- **바닥핵**

- 동작을 준비하고 동작의 구체적인 매개변수(속도, 방향, 진폭)를 적도화하는 역할 담당

- 척수계
- 피라미드론
 - 인간의 중추신경계에
서 가장 긴 축삭 중 하나
- 피라미드바갈론
 - 느린속도로 정보 전달
 - 많은 연접을 형성하고
있기 때문

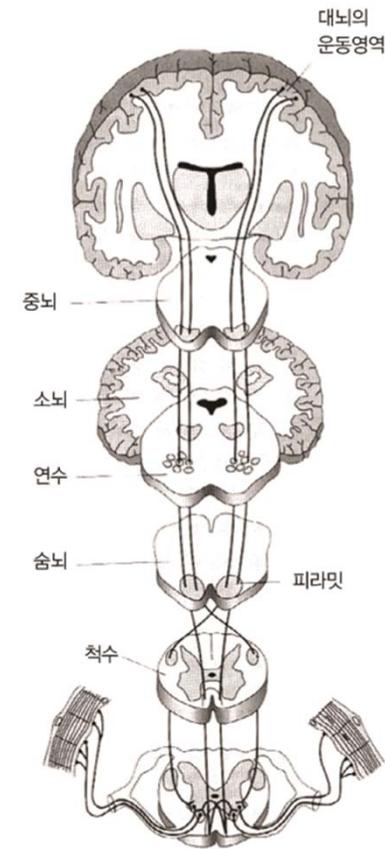


그림 3-20 피라미트

운동제어의 기초

- **근수축과 힘의 생성**
 - 운동단위가 근수축에 동원되는 방법
 - 각각의 운동신경세포가 활성화되는 빈도
- **운동단위의 동원**

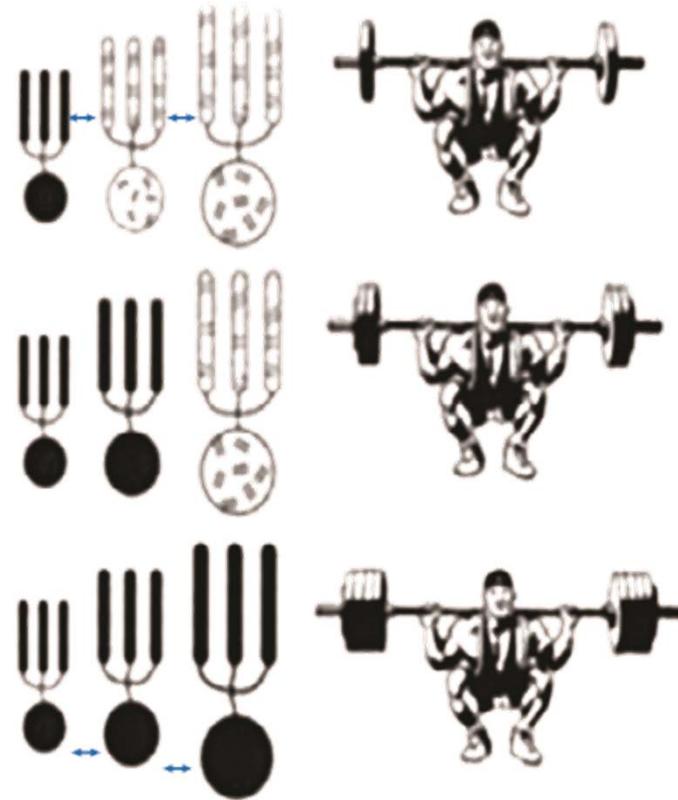


그림 3-21 운동단위 동원

• 활성화 빈도

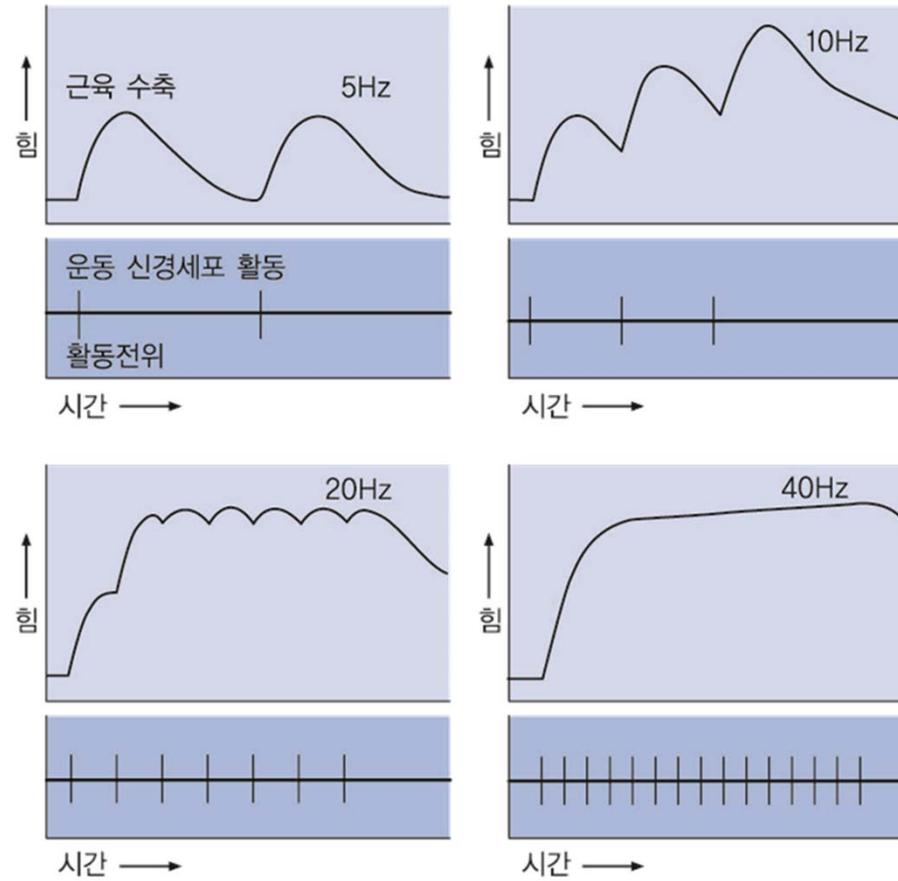


그림 3-22 활성화 빈도와 힘의 생성(출처: Bear, Connors, 그리고 Paradiso, 2006)

- 반사운동

- 비자발적이고 생각지 못했던 근육의 길이 변화 유발
- 중추신경계의 하위 수준에서 이루어지는 반의식적 운동으로 운동제어의 가장 단순한 형태 중 하나

- **단일연접 신전반사**
 - 척수 수준에서 하나의 연접만 형성하는 반사 회로로 구성된 운동 반응
- **예**
 - 무릎반사(슬개건반사), 50ms
 - 팔반사
 - 자세제어

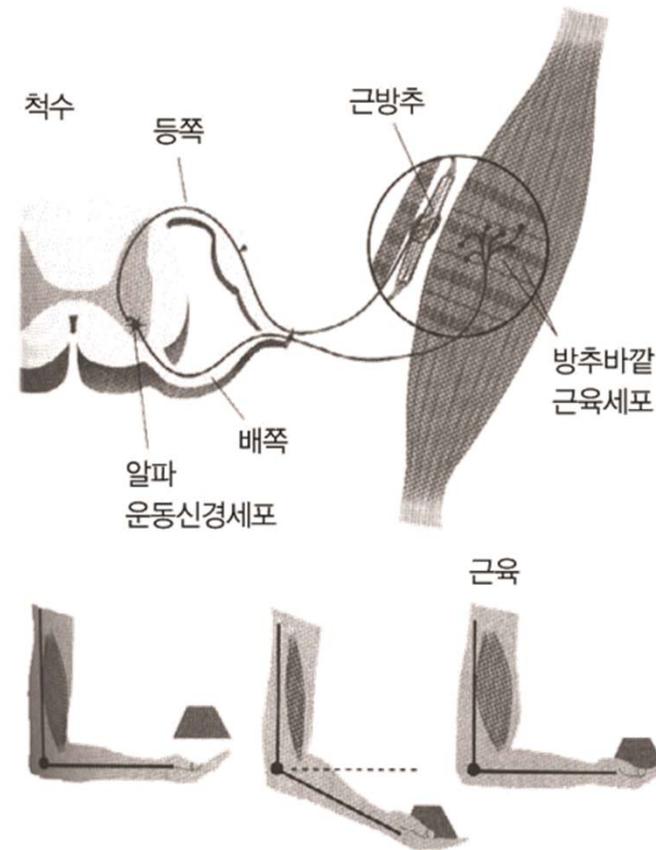


그림 3-23 단일연접 신전반사

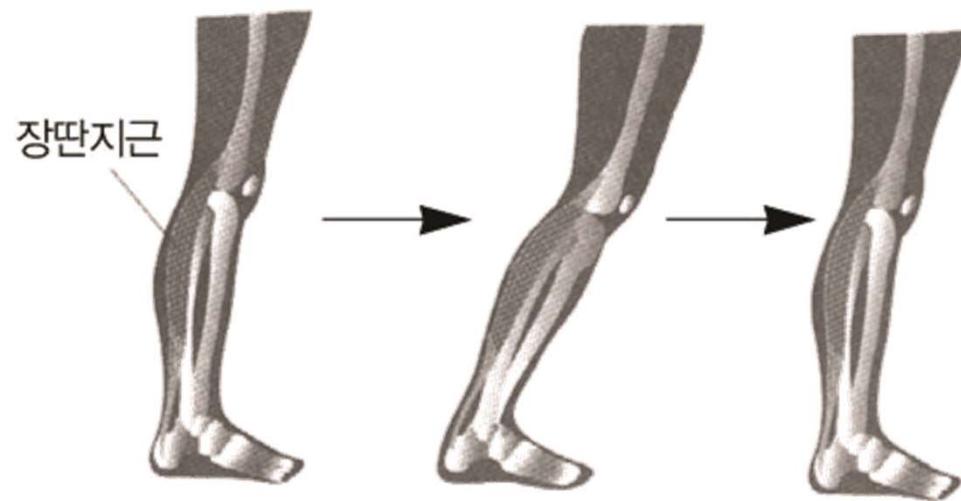


그림 3-24 자세제어

- **감마운동시스템**

- 근방추, 감마운동신경세포 존재
- 뇌는 감마 운동시스템을 통해 근방추의 길이를 말초적으로 제어함으로써 중추적 제어의 부담을 덜어 내는 물론 더욱 빠른 반응을 생성할 수 있음

- **다중 연접반사**

- 여러 개의 연접을 일으키는 반사
- 철회반사, 사정반사

- 철회반사_{con}

- 감각신경세포의 가지돌기에서 가시에 찔리는 통증 감지 - 축삭을 통해 전도되어 척수수준에서 두 번째 사이신경세포 활성화 - 알파운동신경 자극 - 손을 거두어 들임.

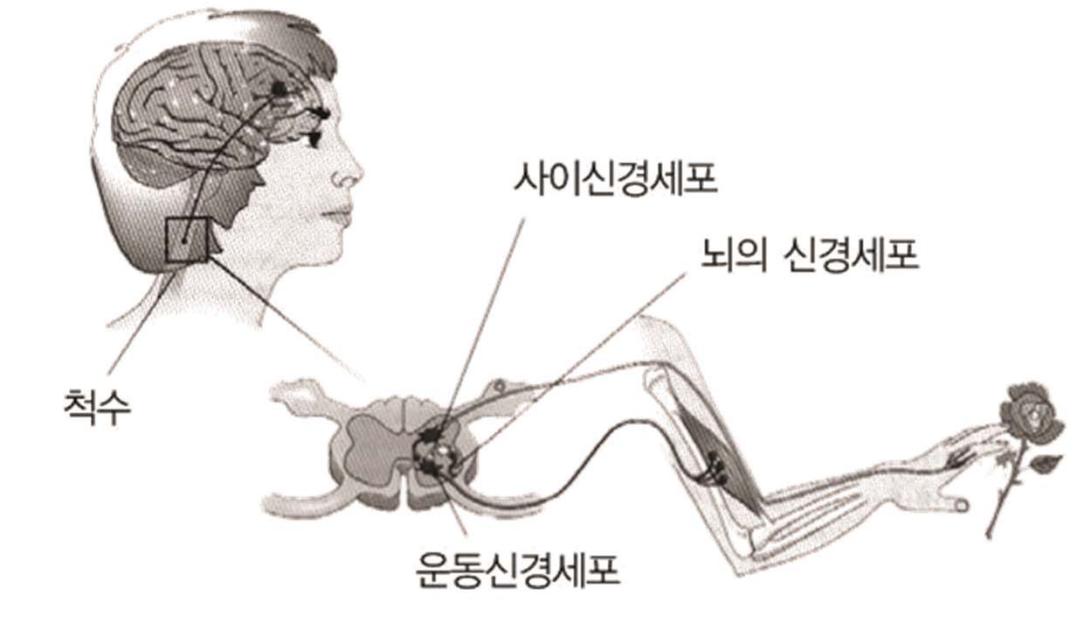


그림 3-25 철회반사

- 억제성 골기건기관의 반사운동

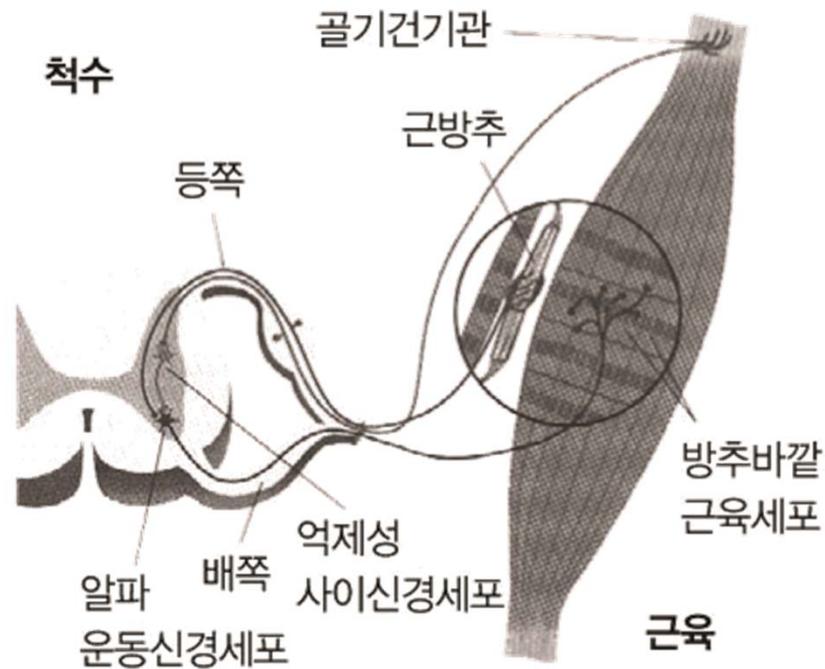


그림 3-26 억제성 다중연접반사