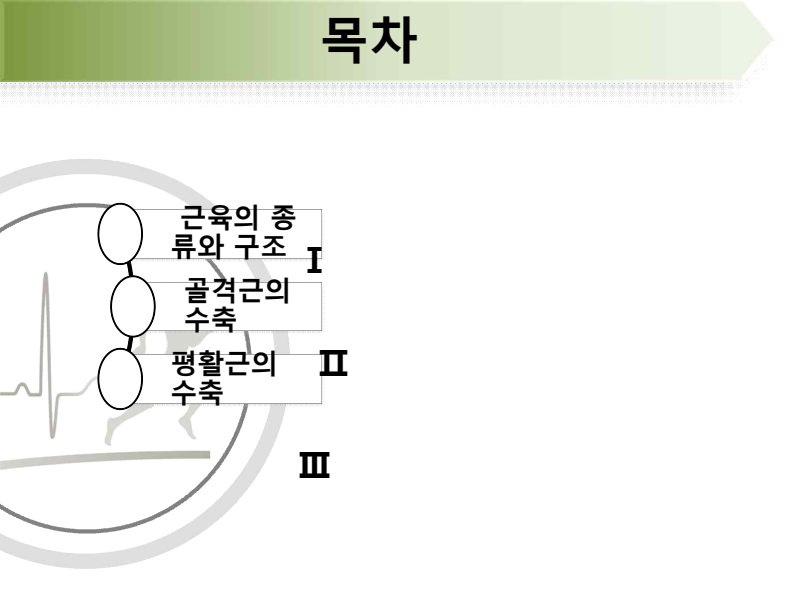


## CHAPTER 11

# 근육



# 목차



근육의 종류와 구조

I

골격근의 수축

평활근의 수축

II

III

# I

## 근육의 종류와 구조

- 구조와 기능이 서로 다른 세 종류의 근육(골격근, 평활근, 심근)으로 구성됨
- 골격근: 모든 신체 동작을 가능하게 함
  - 골격에 접속되어 있는 근육
  - 양쪽 끝 부분이 **건**(힘줄, tendons)에 의해 골격에 부착
  - **줄무늬**: 횡문근
- 평활근: 음식물의 섭취, 호흡, 배뇨 등 생리기능을 수행
  - 속이 비어 있는 내장기관의 벽 형성 근육
  - 줄무늬 없음: 평활근
  - 불수의근
- 심근: 혈액을 순환
  - 심장벽 형성 근육
  - 줄무늬
  - 불수의근



# 근육의 분류

그림 11-1 근육의 분류

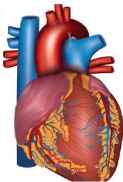
줄무늬근

비줄무늬근

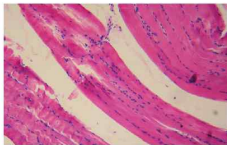
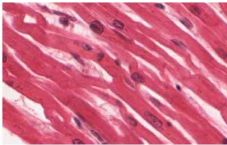
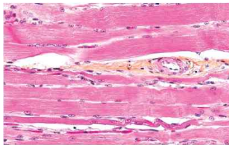
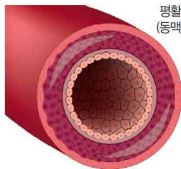
골격근  
(심두박근)



심근



평활근  
(동맥벽)



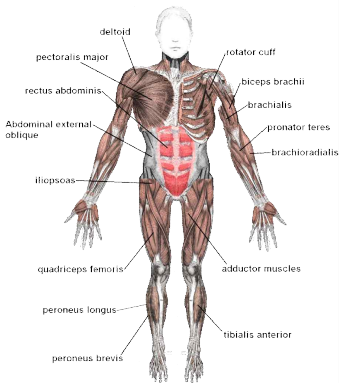
수의 운동

불수의 운동

# I 감각기의 일반적 특성

## 골격근 (skeletal muscles)

- 근 수축으로 **장력** 발생:
  - 관절을 이루고 있는 뼈를 움직임
  - 신체동작 가능:
    - 걷기, 뛰기, 말하기, 글쓰기
- 650여 개 골격근:
  - 외양근: 눈, 매우 작은 근육
  - 사두박근: 다리, 대단히 큰 근육
  - 각 골격근은 근막으로 덮여있음.



### 운동단위

- 하나의 체성 (운동)신경이 지배하는 골격근
  - 체성신경의 활성화로 수축
  - 실무율
  - 지배비율 (innervation ratio): 운동신경 대 근섬유 비율
    - 지배비율이 낮은 운동단위: 약하고 작은 수축, 동안근
    - 지배비율이 높은 운동단위: 강하고 큰 수축, 비복근
  - 동원 (recruitment):
    - 큰 수축이 요구될 때 여러 개의 운동단위가 활성화되는 현상
- 외안근 지배비율: 1:13
  - 비복근 지배비율: 1:수백~수천

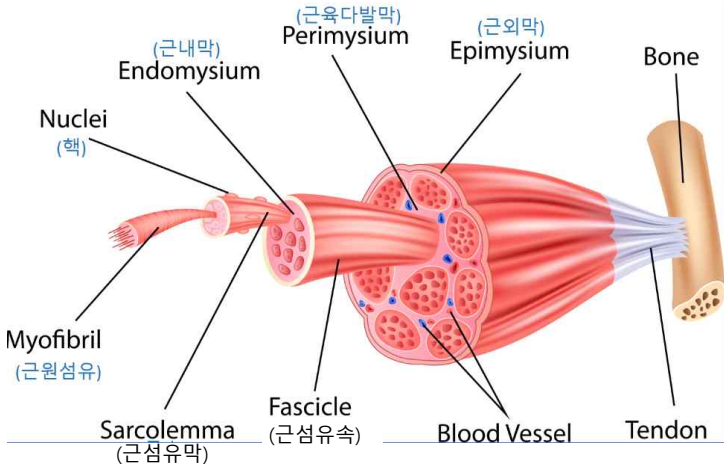
# I 감각기의 일반적 특성

## 골격근섬유와 골격근의 형태

- 근육(골격근)
  - 여러 근섬유속의 집합으로 근외막으로 덮여 있음.
- 근섬유속
  - 많은 근섬유로 구성됨.
  - 각각의 근섬유속은 근육다발막이라는 결합조직 보호막에 둘러싸여 있음.
- 근원섬유 (muscle fiber) = 근육세포 (muscle cell)
  - 수많은 근원섬유의 융합으로 근섬유막에 둘러싸임.
  - 다핵세포이며, 미토콘드리아 다수, 분화 시 세포분열 불가능  
(근육이 상해를 입어 파괴되면, 복구되지 않음, 인접한 미분화세포의 분화로 부분적인 대체는 가능함)
  - 평형으로 배열되어 근다발을 이루고 근다발이 모여 하나의 골격근형성.
  - 가는 원통형: 직경 x 길이 ( $10-100\ \mu\text{m}$ ) x ( $0.75-7\ \text{cm}$ )
  - 근육의 종단축으로 배열
- 힘줄, 근육외막, 근주위막, 근내막의 결합조직이 연결되어 있기 때문에 근원섬유는 수축 시 힘줄에서 빠지지 않음.

# I 감각기의 일반적 특성

근외막, 근섬유속(근육다발막), 근(원)섬유(근섬유막)과 근내막

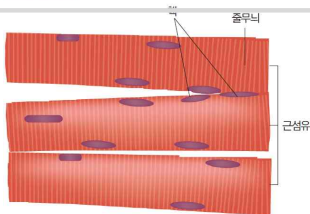




# I 감각기의 일반적 특성

## 근원섬유 (myofibril)

그림 11-3 골격근의 근섬유



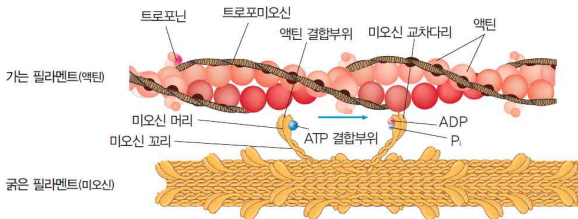
- 근섬유의 세포질에는 핵이 여러 개 있고
  - 미토콘드리아가 많으며, 섬유상 단백질인 근세사(액틴, 미오신)로 채워짐.
  - 근원섬유의 직경은  $1\ \mu\text{m}$ 로
  - 굵은 필라멘트(**미오신**, myosin, 어두운 A띠)와 가는 필라멘트(**액틴**, actin, 밝은 I띠)이 규칙적으로 배열되어 묶음을 형성
  - 기타: 트로포닌(트로포미오신에 부착), 트로포미오신(액틴 두줄 사이에 부착)
  - 이들 필라멘트의 반복적 배열로 줄무늬 형성
- 가로무늬 (횡문, striated): 어두운 A띠와 밝은 I띠(중앙에 Z선)의 연속무늬

# I 감각기의 일반적 특성

## 미오신과 액틴의 구조

- 미오신(굵은 필라멘트): 동근 머리 2 개와 긴꼬리 2 개가 서로 감겨있는 형태
  - 동근 머리에 **액틴 결합부위** 및 **ATP 결합부위** 존재
- 액틴 (가는 필라멘트)구성: 구형의 단일 폴리펩티드
  - 수백 분자의 액틴이 중합체를 이루어 두 가닥이 나선형으로 꼬인 구조.
  - **미오신의 머리와 결합하는 부위가 존재**

그림 11-4 액틴과 미오신 분자



# I 감각기의 일반적 특성

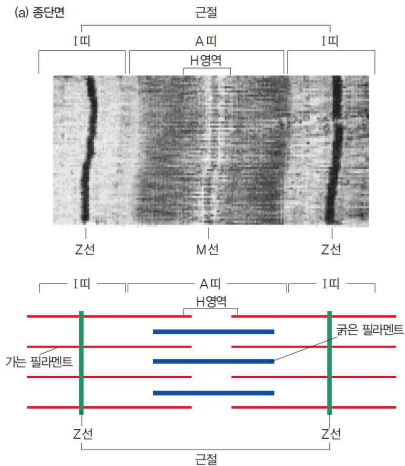
## 근(원)절 (sarcomere)

- 근세사에서 반복되는 한 단위를 근절이라고 함 (Z선에서 Z선까지)
- 근절은 골격근의 기능적 단위
- 굵은 필라멘트 (미오신):
  - 근절 중앙에 위치하여 넓고 어두운 띠를 형성, **암대 (A band)**
  - A 띠 중앙의 더 밝은 부분을 H 띠(H Band; 굵은 필라멘트만 구성)라고 함.
  - H band 중앙에 어두운 M선이 존재: 근절의 중앙선으로 인접한 굵은 필라멘트를 연결하는 단백질.
- 가는 필라멘트 (액틴):
  - 근절의 양 끝에 위치: 좁고 밝은 띠, **명대 (I band)**
  - 암대(A band)의 중앙부까지 뻗어 있어 중첩되어 있음 (A띠의 끝이 중앙보다 더 검게 보임)
  - I 띠 중앙에 검은 Z선이 존재
  - 양 끝은 Z선에 연결: 명대는 Z선으로 반으로 나뉘어 있음

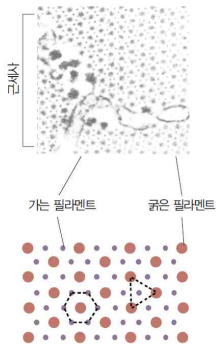


## 근절 내 필라멘드의 배열

그림 11-5 근절 내 필라멘트의 배열



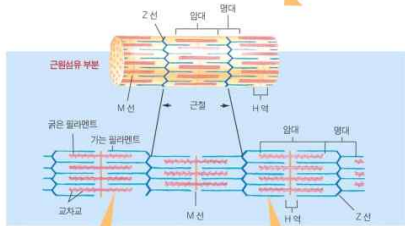
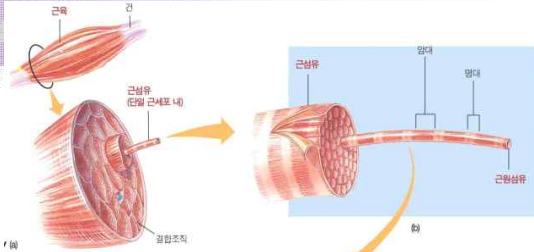
(b) 횡단면(Z판)



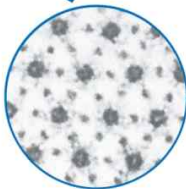
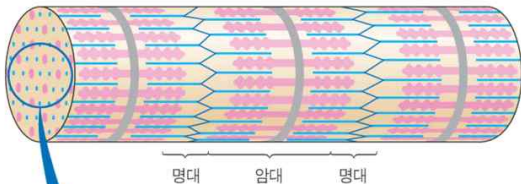


심장

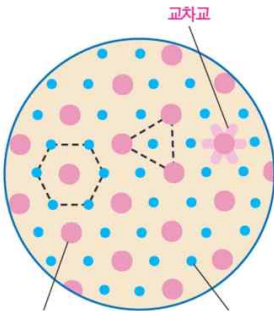
근육



도



(a)



굵은 필라멘트

가는 필라멘트

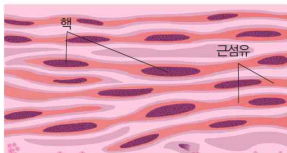
굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 단면도

# I 감각기의 일반적 특성

## 평활근 (smooth muscle)

- 내장기관의 벽 형성:
  - 소화관, 요관, 정(난)관: 이중층 (환상근 + 종주근)
  - 혈관, 세기관지: 단일층 (환상근)
- 근 수축으로 장력 발생:
  - 환상근 수축: 내장기관의 직경 감소
  - 종주근 수축: 내장기간의 길이 감소
- 근섬유의 형태:
  - 방추형: 직경 ( $2-100\ \mu\text{m}$ ) x 길이 ( $50-400\ \mu\text{m}$ )
  - 단일 핵
  - 상해 시 세포분열이 가능
  - **간극접합**으로 인접 근섬유 연결: 단일 기능단위로 수축

그림 11-6 평활근의 근섬유



# I 감각기의 일반적 특성

## 근세사와 조밀체 (dense body)

### ■ 근세사:

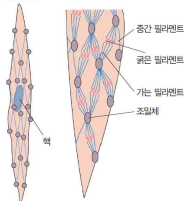
- 굵은 필라멘트: 미오신
  - 골격근보다 많음
- 가는 필라멘트: 액틴
  - 골격근보다 길고 대각선 배열  
➡ 다이아몬드 배열
- 기타: 트로포미오신 (트로포닌 없음)
- 중간 필라멘트: 세포형태 유지
- **줄무늬 없음**: 평행배열 안 함

### ■ 조밀체 (치밀체 or 농염체): 평활근 섬유의 특징.

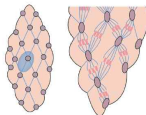
- 액틴과 연결 (Z선과 유사)
- 중간 필라멘트에 의해 서로 연결

그림 11-7 평활근의 근섬유의 구조와 수축상태

이완 상태



수축 상태

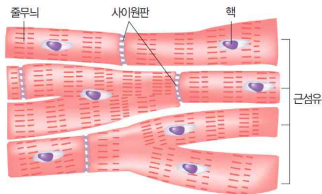




## 심장근 (cardiac muscle)

- **근 섬유: 짧고 가지 많음**
- **근세사 필라멘트:**
  - 미오신과 액틴: 줄무늬
  - 기타: 트로포닌, 트로포미오신
- **틈새연접 (gap junctions):**
  - 사이원판:
    - 인접세포 연결 부위
    - 콘넥신 단백질로 구성됨
    - 근섬유 끝 부분에 집중
  - 활동전위 전달
  - 평활근처럼 단일 기능단위로 행동: 모든 세포가 동시에 수축

그림 11-8 심근의 근섬유



## II

## 골격근의 수축 (contraction)

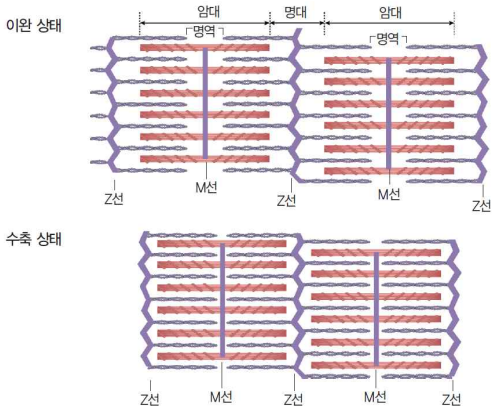
- 수축: **필라멘트 활주기전** (sliding filament theory)
  - **교차다리** 형성으로 발생한 장력 → 필라멘트 활주
  - 가는 필라멘트가 굵은 필라멘트 사이로 미끄러져 들어감
  - 근절의 길이 단축:
    - 명대와 암대 중첩, 명대와 명역 단축, 암대 불변
- 교차다리 (crossbridge):
  - 미오신과 액틴의 결합으로 형성
  - ATPase 작용: 교차다리 형성 및 해지에 ATP 필요
- 교차다리 주기:
  - 단일 수축주기: 매우 짧으며, 근섬유 길이 1%정도 단축
  - 동시작용 (synchronous action): 정지된 시간에 50% 교차다리 결합

▶ 알아두기 : 교차다리 기능 및 주기

## II 골격근의 수축 (contraction)

### 필라멘트 활주기전

그림 11-9 필라멘트 활주 상태

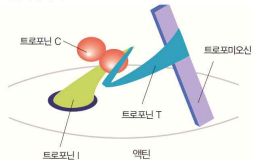


## II 골격근의 수축 (contraction)

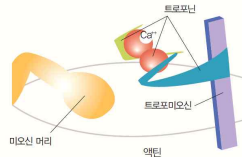
### 트로포닌과 트로포미오신의 작용

- 수축조절 단백질:
  - 미오신과 액틴이 결합하지 못하도록 협동적으로 차단
- 트로포미오신:
  - 막대 모양, 40-60개 분자의 중합체
  - 길이: 액틴 분자 7개와 동일
  - 액틴의 두 줄 사이에 위치
- 트로포닌:
  - 작은 구형, 300-400개 분자의 중합체
  - 트로포미오신에 결합하는 트로포닌 T
  - 교차다리가 액틴에 결합하는 것을 억제하는 트로포닌 I
  - **Ca와 결합하는 트로포닌 C**

이완(차단) 상태



수축(결합) 상태

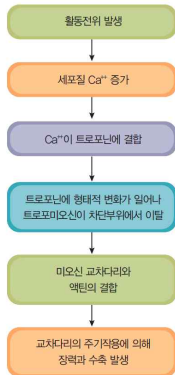


## II 골격근의 수축 (contraction)

### 세포질 $\text{Ca}^{2+}$ 의 역할

- 근섬유의 흥분과 수축의 연결고리 작용
- 근 수축:
  - 활동전위 발생
  - 근형질 세망 (소포체)에서  $\text{Ca}^{2+}$  방출
  - 세포질 내  $[\text{Ca}^{2+}]$  상승
  - 트로포닌에  $\text{Ca}^{2+}$  결합
  - 트로포미오신과 액틴의 결합 해지
  - 액틴의 미오신 결합부위 노출
  - 교차다리 형성 ➡ 근 수축
- 근 이완:
  - $\text{Ca}^{2+}$ 이 근형질 세망으로 능동수송 회수
  - 세포질 내  $[\text{Ca}^{2+}]$  저하
  - 트로포닌과  $\text{Ca}^{2+}$  결합 해지
  - 교차다리 형성 차단 ➡ 근 이완

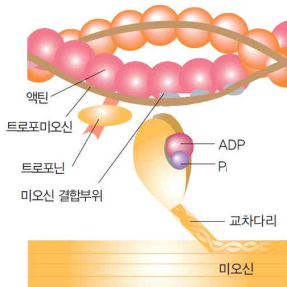
그림 11-12 세포질 내 칼슘이온 작용에 의한 골격근 근섬유의 수축



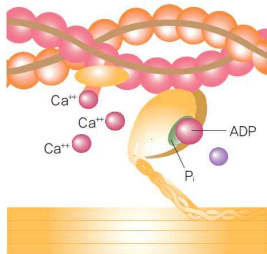
## II 골격근의 수축 (contraction)

### 세포질 $\text{Ca}^{2+}$ 의 역할

이완 상태



수축 상태



## II 골격근의 수축 (contraction)

### 흥분과 수축의 연관

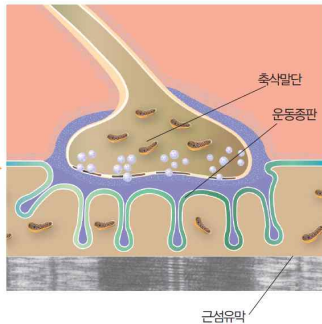
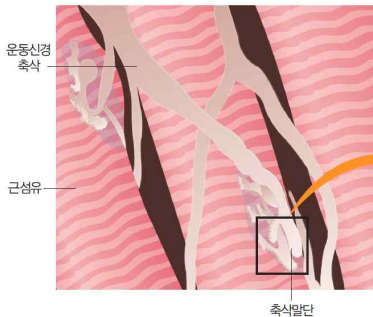
- **근섬유의 세포막은 흥분성 막으로 활동전위를 생성, 전파할 수 있음.**
- $\text{Ca}^{2+}$ 은 근섬유의 흥분과 수축의 연결고리로 작용
- **근섬유막에서 활동 전위가 발생하면 근섬유의 세포질 내 근소포체에 있는 총합 수조에 저장되어 있던  $\text{Ca}^{2+}$ 가 세포질로 방출됨.**
- **이를 흥분-수축 연관이라고 함.**

#### 1) 운동신경과 근육신경의 접합

- **근섬유막에서 발생하는 활동전위는 근육의 수축을 촉발하는 신호로 작용**
- **골격근을 지배하는 운동신경의 자극이 근섬유막에 활동전위를 발생시킴.**
- **축삭말단: 운동신경의 축삭돌기가 가지를 만들어 축삭말단을 가지고 있음.**
- **운동종판: 축삭말단 바로 밑의 근 섬유막 부위**
- **신경-근 접합부: 축삭말단과 운동종판 사이의 작은 틈**



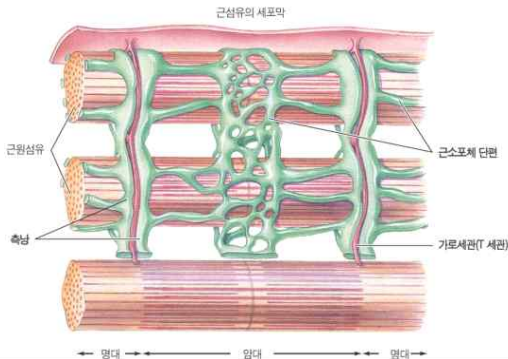
그림 11-13 신경-근 접합부







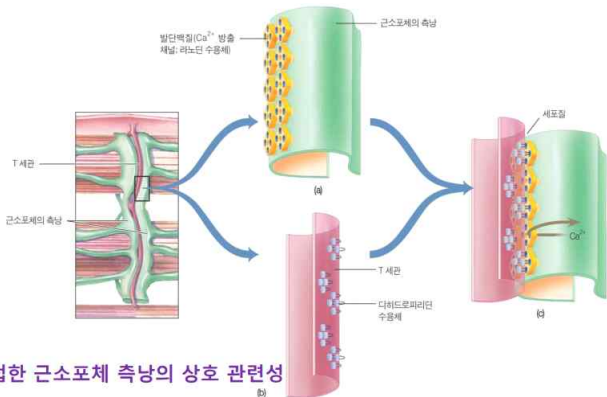
1. 운동뉴런 말단과 근섬유 사이의 신경-근 접합부에서 ACh(acetylcholine)이 방출되면 골격근은 수축
2. 활동전위는 가로세관(T 관)을 따라 아래로 이동
  - 암대와 명대 접합부에는 근섬유와 연결된 세포막 통로인 가로세관(T 세관)이 존재하여 세포막 표면에서 근섬유 중앙 부분으로 수직 연결
  - 세포막 표면에서 생성된 활동전위는 T 세관을 통해 빠르게 근섬유로 전파
3. 근소포체에서 칼슘 방출

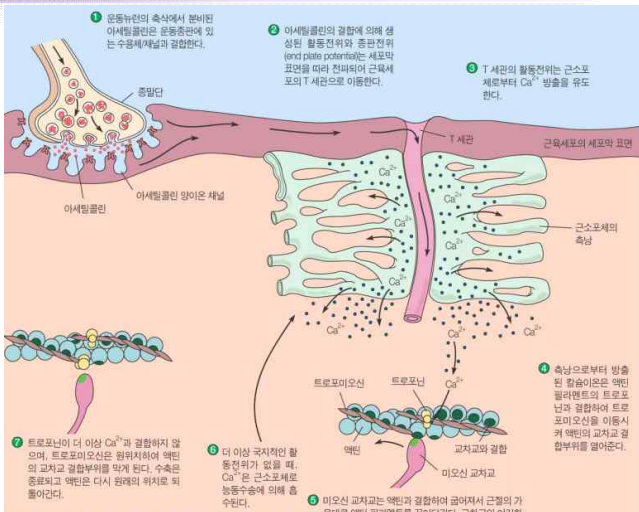


근원섬유와 관련한  
T 세관과 근소포체



### 3. 근소포체 측낭에 $\text{Ca}^{2+}$ 이 저장되어 있고 활동전위가 도달하면 세포질로 $\text{Ca}^{2+}$ 을 방출





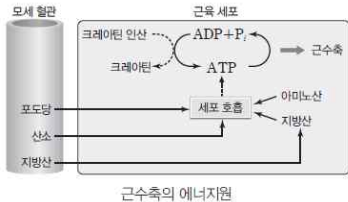
**흥분 수축 짝 지음에서 칼슘의 방출**

방출된  $\text{Ca}^{2+}$ 은  
troponin과  
tropomyosin  
분자들의 위치  
변화를 유도하여  
actin과  
myosin이  
교차결합

## II 골격근의 수축 (contraction)

### 골격근의 에너지 대사

- 근 수축과 이완에 모두 ATP 필요
  - 액틴과 미오신이 서로 결합 및 해리
  - 근소포체에서 방출된  $\text{Ca}^{2+}$ 의 회수
- 골격근의 근섬유는 ATP를 많이 요구하며, 필요량이 순간적 증가하는 특성.
  - 그러나, 근섬유 내 ATP 함량 낮음
  - 격렬한 활동이 지속될 때
    - 골격근의 근섬유는 많은 양의 저장된 인산크레아틴에서 인산크레아틴의 인산기가 ADP에 제공되어 ATP를 생성할 수 있음.



## II 골격근의 수축 (contraction)

### 근섬유 유형

- 골격근 섬유의 유형
  - 산화력과 ATPase 활성에 따라 느린-연축 근섬유와 빠른-연축 근섬유로 구분
  - 산화력은 미토콘드리아 수, 모세혈관 발달 정도, 미오글로빈 함량에 따라 달라짐.
  - ATPase 활성은 고활성 ATPase 비율이 얼마나 높느냐에 따라 결정됨.
  - 일반인은 느린-연축 근섬유의 비율이 50% 정도
  - 운동으로 단련된 사람들은 빠른-연축 근섬유가 상대적으로 더 많음
  - 지구력 운동으로 단련된 사람들은 느린-연축 근섬유가 상대적으로 더 많음

## II

## 골격근의 수축 (contraction)

### 근섬유 유형별 에너지 대사

- 느린-연축 근섬유: 형 근섬유(지근섬유; Type I)
  - 미토콘드리아(필요한 모든 ATP를 호기성 호흡으로 공급하는 역할) 많고, 풍부한 모세혈관, 호기성 호흡 효소와 미오글로빈(산소를 운반해 주는 역할)의 함량 높아 호기적 대사를 수행하는 능력이 큼.
  - 고농도의 미오글로빈 때문에 적색섬유라고도 함.
  - 고효율 ATPase 비율이 낮아 느린 수축반응을 일으키는 대신 긴 시간 동안 수축할 수 있으며, 산소를 이용하는 능력이 높아서 피로를 쉽게 느끼지 않음
  - 에너지 효율이 높아 단위 근육당 에너지 소비량이 가장 적음.

## II 골격근의 수축 (contraction)

### 근섬유 유형별 에너지 대사

- 빠른-연축 근섬유: 느린-연축 근섬유보다 수축 속도가 더 빠름(속근섬유)
  - 느린-연축보다 모세혈관과 미토콘드리아가 더 적고 미오글로빈 수가 더 적기 때문에 백색섬유라고도 함.
  - 수축에 필요한 모든 ATP를 글리코겐의 분해에서 나온 포도당의 해당작용(무기호흡)에 의해 얻게 됨.
  - 고농도의 글리코겐과 해당과정 촉매 효소를 많이 가지고 있어서 혐기성 대사를 할 수 있음.
  - 고효율 ATPase 비율이 높아 단기간에 큰 힘을 내며 수축속도가 빠른 대신 무기호흡을 하므로 쉽게 피로를 느끼며 짧은 시간 동안만 사용됨.

## II

## 골격근의 수축 (contraction)

### 근섬유 유형별 에너지 대사

- 빠른-연축 근섬유: 두 종류로 나누어짐(Type IIa, Type IIb)
  - Type IIb는 미토콘드리아의 수가 적고 피로에 대한 저항능력이 낮기 때문에 유산소성 대사능력은 낮지만, 에너지원인 글리코겐 함량과 해당과정 효소가 풍부하여 무산소성 대사능력이 높다.
  - Type IIa 섬유는 피로에 대한 저항능력이 다른 두 근섬유의 중간 정도.
  - 운동이나 식사 섭취 등의 외부조건에 따른 이들 근섬유 조성비율의 변화를 통해 유산소성 또는 무산소성 운동능력의 변화를 평가할 수 있음.

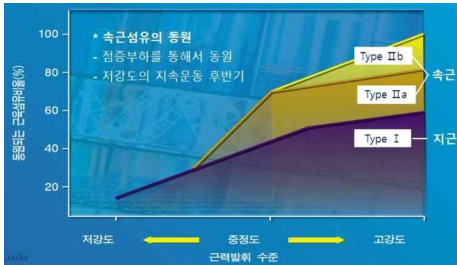


## II 골격근의 수축 (contraction)

표 1. 근섬유 종류에 따른 특징

특성	Type I (지근)	Type IIa (속근)	Type IIb (속근)
단면적	작음	중간	큼
글리코겐 함량	낮음	중간	높음
피로에 대한 저항력	높음	중간	낮음
모세혈관 분포	많음	많음	적음
미오글로빈 함량	높음	높음	낮음
호흡	호기성	호기성	혐기성
산화력	높음	높음	낮음
해당능력	낮음	높음	높음
연속속도(twitch rate) <sup>1)</sup>	느림	빠름	빠름
미오신 ATPase 활성	낮음	높음	높음

1) 근섬유가 자극을 받아 수축했다가 원래상태로 돌아오는 속도



## II

# 골격근의 수축 (contraction)

### 근피로와 산소부채

- **근피로:** 골격근의 근섬유가 반복적으로 자극되면 근섬유는 피로하게 됨.
  - 근섬유에 의해 발생하는 장력이 줄어들어 수축 속도가 떨어지고 이완속도도 저하되며 수축을 요하는 다른 자극에 반응하지 못하게 됨.
  - 근육의 종류, 수축활동의 강도와 시간, 개인의 상태에 따라 상이
  - 짧은 시간에 고강도 근육활동(역도)에 사용되는 빠른-연축 근섬유는 피로를 빨리 느끼나 회복은 빠름(인산트레아틴이 충전되고 산소부채가 해결되면 바로 회복)
  - 장시간에 낮은 강도의 운동에 사용되는 느린-연축근 근섬유는 피로발생이 느리며 회복도 천천히 이루어짐(심하게 고갈된 글리코겐의 보충에 많은 시간이 필요)
- **근피로의 원인**
  - 글리코겐이나 포도당이 젖산으로 분해되면서 ATP를 생성.
  - ATP 고갈: 그러나 ATP 농도 저하는 현저하지 않음
  - 근육 내 글리코겐 고갈, 저혈당으로 인한 근육으로의 포도당 공급 감소, 탈수는 근피로를 증가시키는 원인.

## II 골격근의 수축 (contraction)

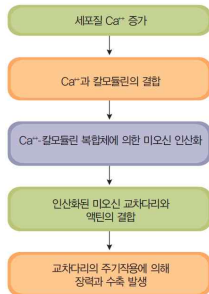
### 근피로와 산소부채

- 산소부채 (oxygen debt)
  - 근육활동을 하고 난 뒤 근섬유에는 안산크레아틴과 글리코겐의 함량이 감소되고,
  - 이를 회복하기 위해서 산화적 인산화 경로를 통해 ATP를 생산해야 하므로 산소가 필요함.
  - 또 축적된 젖산을 대사하고 혈액과 체액의 산소농도를 운동하기 전 상태로 되돌리기 위해서도 산소가 필요함.
  - 수축활동이 끝난 후에도 근섬유의 산소 소비 증가
  - 근육활동 이후에 증가되는 산소소모량을 산소부채라고 함.

- 수축활동 기본 원리: 골격근과 동일
  - 동일한 점: 세포질 내  $[Ca^{2+}]$  증가로 수축
  - 차이점: 트로포닌 대신에 **칼모듈린** 작용
- 칼모듈린 (calmodulin)이  $Ca^{2+}$ 과 결합
  - $Ca^{2+}$ -calmodulin 복합체:
    - 미오신 키나아제 (myosin kinase) 활성화
    - 미오신 머리 **인산화** → 교차다리 형성
  - 인산가수분해효소 (phosphatase):
    - 미오신 머리 **탈인산화** → 교차다리 해지
- 세포질  $[Ca^{2+}]$ 의 근원:
  - 근소포체 저장분: 골격근 보다 적음, 수축의 초기단계에 작용
  - 세포외액의  $Ca^{2+}$ : 세포막의 탈분극으로 칼슘채널이 열려 들어옴

그림 11-19

칼슘이온의 작용에 의한  
평활근 근섬유의 수축



### Ⅲ

## 평활근의 수축

### 흥분과 수축의 연관

- 특징
  - 자율신경의 지배
  - 기타 다양한 국소인자 영향
  - 일부 평활근: 박동원 세포가 조율기 전위 발생 ➡ 자동흥분
- 운동종판: 발달되어 있지 않음
- 자율신경의 절후 축삭
  - 평활근으로 들어가 분지: 한 축삭이 여러 근섬유 지배
  - 각 분지에 팽대부 발달: **축삭류**
  - 축삭류: 신경전달물질 분비
  - 한 근섬유에 교감신경과 부교감신경의 절후 축삭: 인접부위에 위치

수축 상태

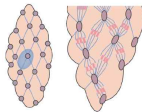
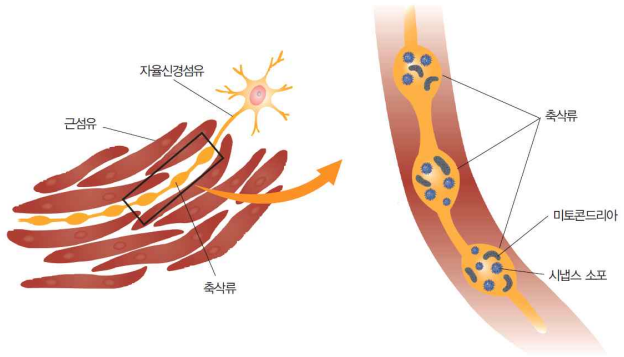




그림 11-20 자율신경 절후섬유의 평활근 지배와 축삭 말단의 팽대부



### Ⅲ

## 평활근의 수축

### 축삭류와 신경전달물질

- 축삭류와 신경전달물질:
  - 축삭류에 신경전달물질 함유 소포 발달
- 신경전달물질의 작용:
  - 막 흥분 or 저하:
    - 신경전달물질에 따라 수축활동 증대 or 감소
    - 자율신경의 종류에 따라 장력 증가 or 저하
    - 동일 신경전달물질도 평활근 종류에 따라 장력 증가 or 저하:
  - 수용체 상이
    - NE : 교감신경 절후 축삭에서 분비
      - 혈관벽 평활근: 수축, 알파-아드레날린 수용체
      - 세기관지벽 평활근: 이완, 베타-아드레날린 수용체

### Ⅲ

## 평활근의 수축

### 평활근의 에너지 대사

- 평활근 수축은 느리고 경제적:
  - 수축 느리게 진행
    - ATP: 산화적 인산화 과정으로 충분히 공급
    - O<sub>2</sub> 부족 시 해당과정에서 ATP 생산
    - 인산 크레아틴 : 불필요
  - 한번의 수축: 오랫동안 유지
- 미오신의 ATPase:
  - 활성 낮음: ATP 분해속도 느림