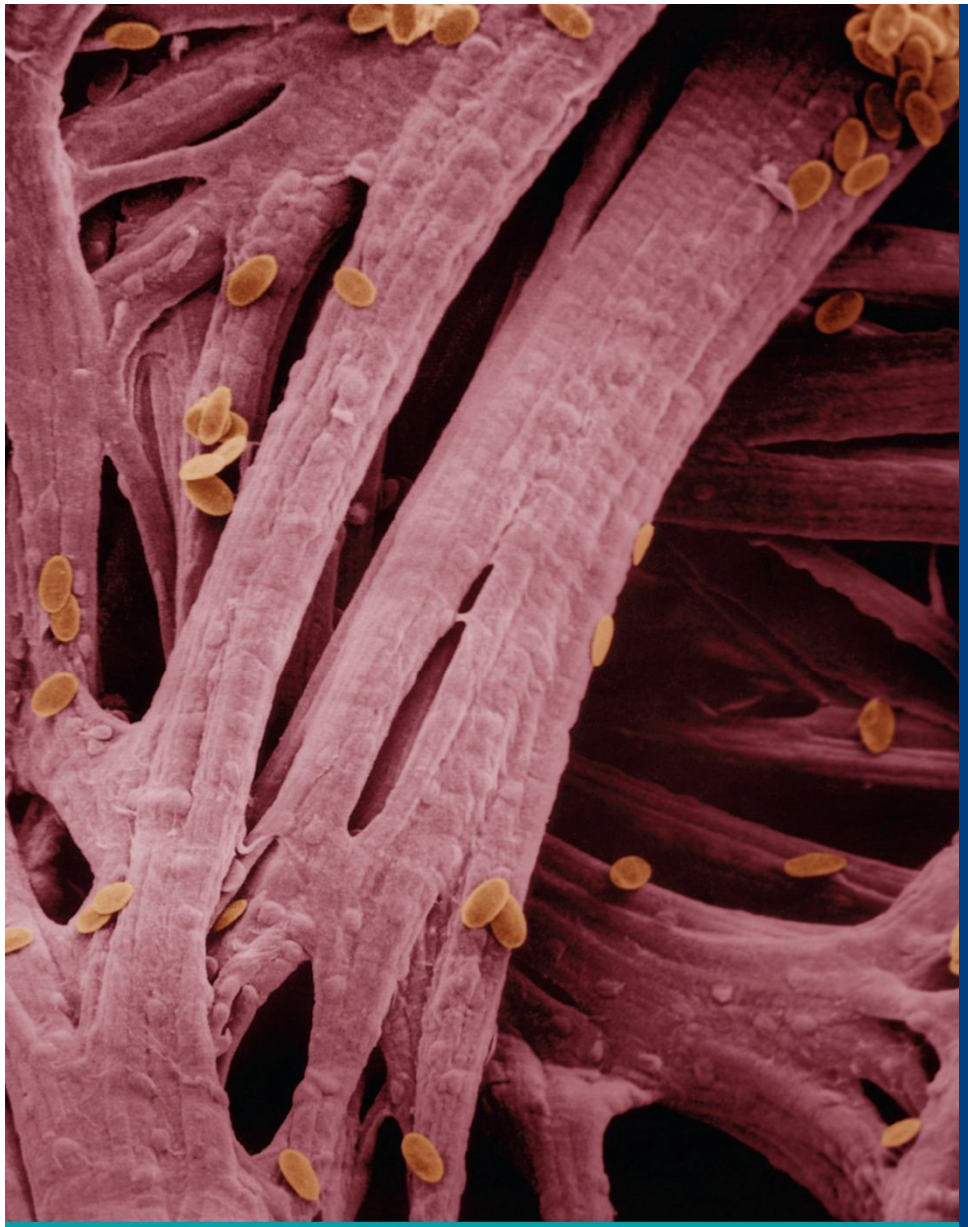


심근세포의 현미경 사진

12

근육생리학

Part A

Copyright © 2012 Biosciencepublishing, Inc

Chapter Outline

I. 골격근의 구조
II. 근육의 힘 발생 기작
III. 골격근 수축의 역학
IV. 골격근섬유의 형태
V. 골격근활동의 조절
VI. 평활근과 심근

골격근의 구조

- 골격근
- 평활근
- 심근

I. 골격근의 구조

- 세포수준에서의 구조
- 분자수준에서의 구조

골격근의 구조

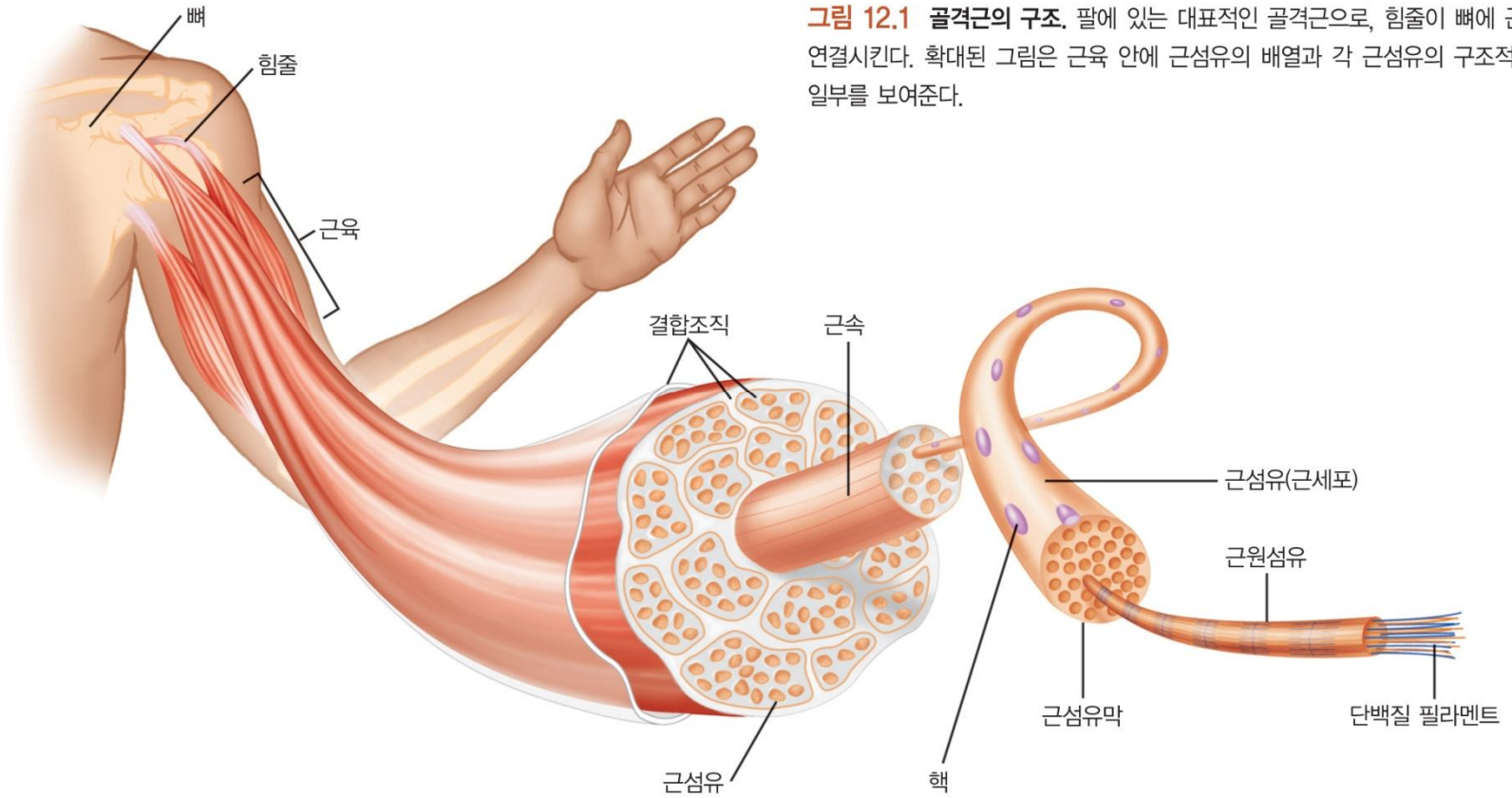


그림 12.1 골격근의 구조. 팔에 있는 대표적인 골격근으로, 힘줄이 뼈에 근육을 연결시킨다. 확대된 그림은 근육 안에 근섬유의 배열과 각 근섬유의 구조적 특징 일부를 보여준다.

- 근육=근속 집단
- 근섬유가 힘줄에서 힘줄까지 근육의 길이를 따라 뻗어있다

근섬유의 성분

- 결합조직에 의해 둘러싸인 근섬유
- 근섬유막
    - 원형질막
- 다핵
- 근형질
    - 세포질

근섬유의 성분

- 근원섬유를 많이 포함
- 근소포체
  - 활면소포체
- 미토콘드리아를 많이 포함 – 고에너지
- 가로소관
  - T 소관

골격근섬유

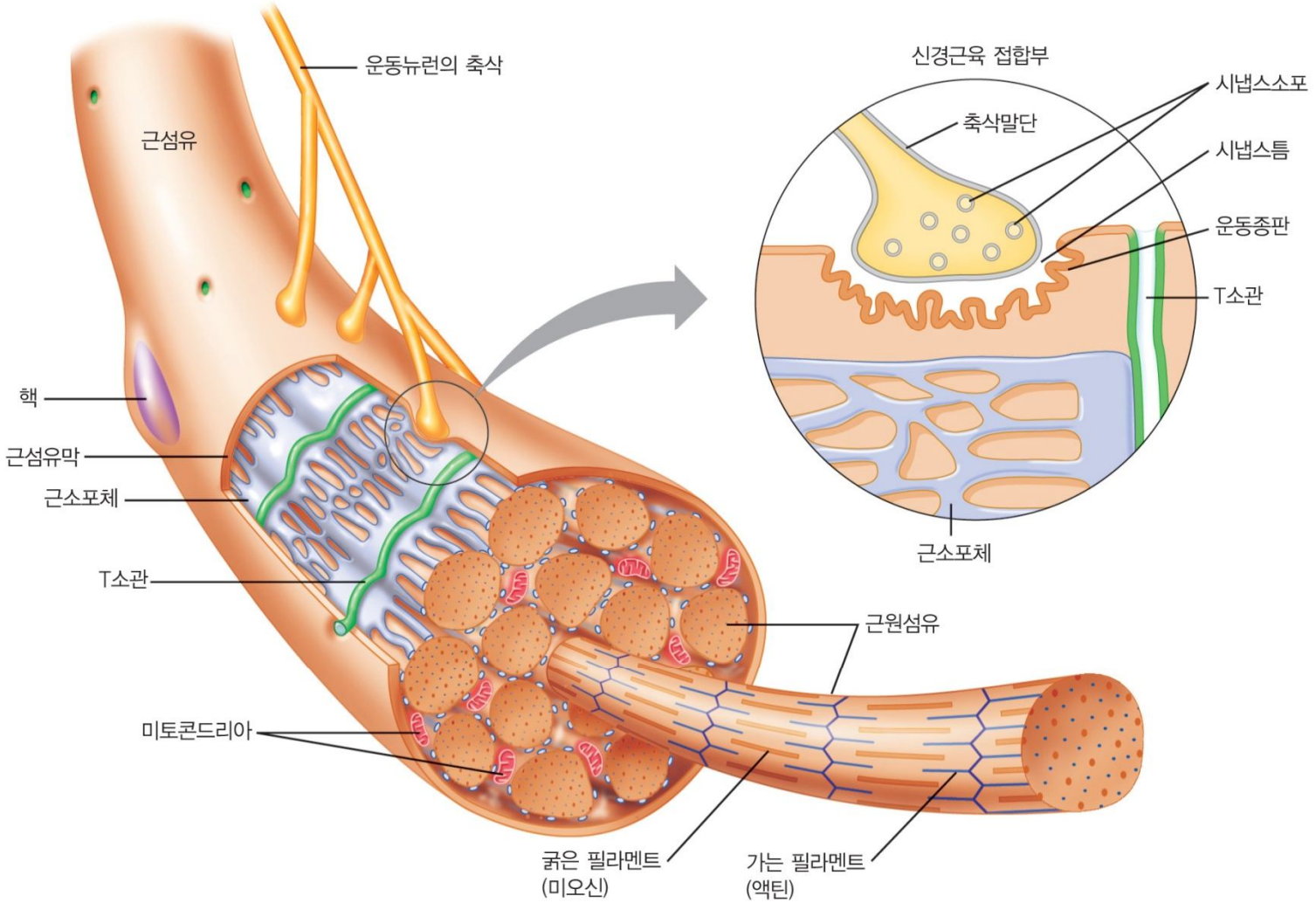


그림 12.2 골격근섬유의 구조. 근섬유를 이루는 주요한 내부 구성요소. 근섬유에서 단일 근원섬유를 끌어내 확대하여 그 안에 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 배열을 보여준다. 확대한 그림은 신경근 접합부를 나타낸 것이다.

근원섬유

- 근원섬유는 골격근과 심근이 줄무늬 모양을 나타내게 한다
- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 정돈된 배열
  - 액틴
  - 미오신

분자수준에서의 구조

- 줄무늬는 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트가 장축에 평행 배열하기 때문이다
- 필라멘트는 근절을 형성

근절의 구조

- A띠
  - 암대
  - 굵은 필라멘트
- H띠
  - 굵은 필라멘트
  - 겹치지 않음
- M선
  - 굵은 필라멘트와 연결
- I띠
  - 명대
  - 가는 필라멘트
  - 겹치지않음
- Z 선
  - 가는 필라멘트와 연결
- 근절
  - 기능적 단위
  - Z선에서 Z선까지

근절의 구조

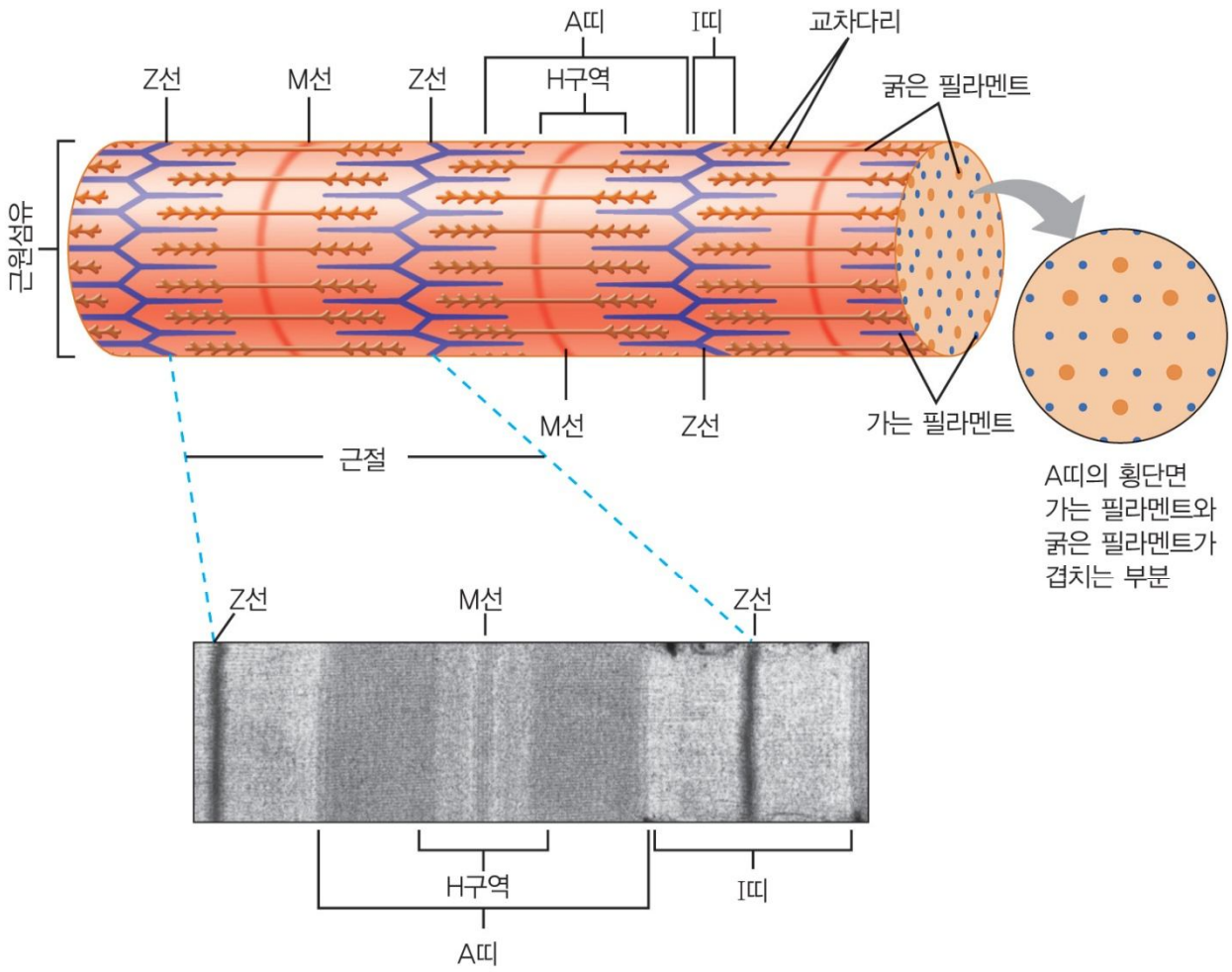


그림 12.3 근절의 구조. 근원섬유 그림으로, 근절 안에 단백질 필라멘트의 규칙적인 배열을 보여준다. 아래 현미경 사진은 가로무늬근의 전형적인 띠형태를 나타낸다. 오른쪽 사진은 근원섬유의 A띠의 횡단면으로, 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 입체적인 배열을 명확히 볼 수 있다.

가는 필라멘트

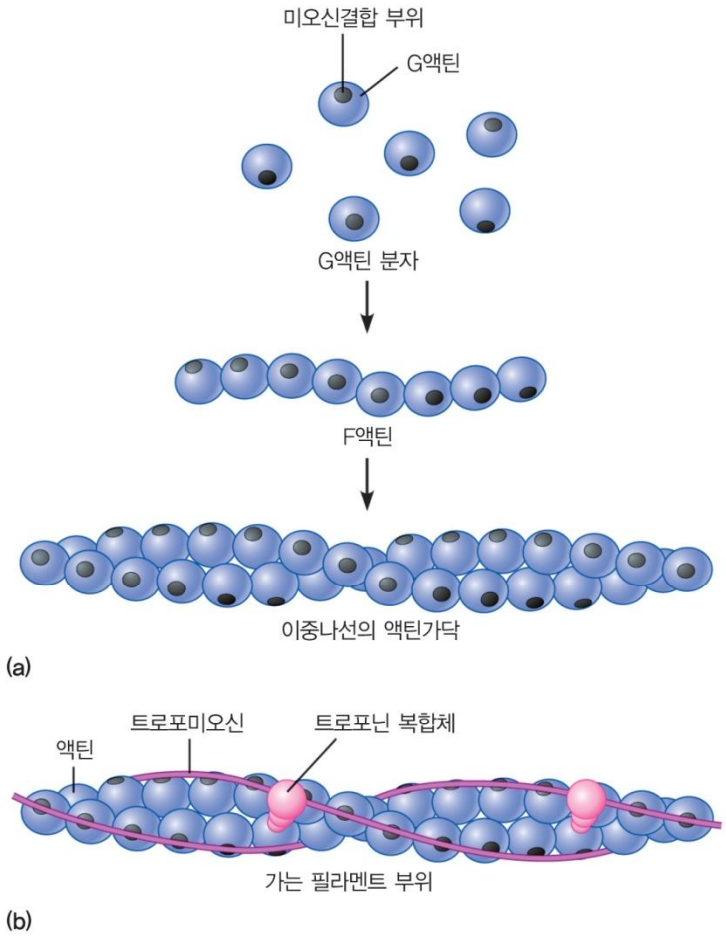


그림 12.4 가는 필라멘트의 구조. (a) 가는 필라멘트는 중합체를 이루는 액틴분자들이 두 가닥을 만들어 이중나선으로 감겨 있다. 각 액틴분자(G 액틴)의 미오신 결합 부위는 검은 점으로 표시되어 있다. (b) 가는 필라멘트의 일부로 액틴가닥 위에 정상적으로 위치한 트로포닌과 트로포미오신이 보인다. 근육세포가 안정상태에서는 액틴의 미오신결합 부위를 트로포미오신이 덮고 있다.

액틴

- 수축성 단백질
- G 액틴은 미오신 결합 부위를 가지고 있다

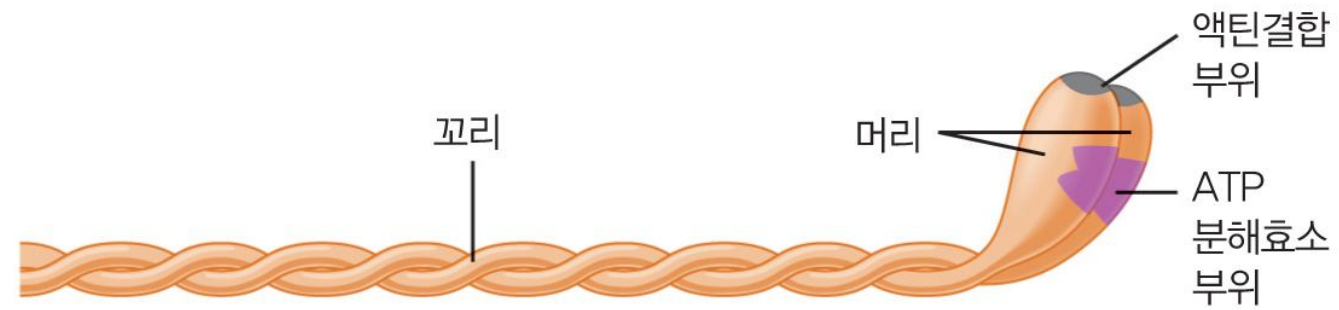
트로포미오신

- 조절 단백질
- 액틴의 미오신 결합부위와 겹친다

트로포닌

- 조절 단백질
- 3가지 단백질 복합체
  - 액틴과 결합
  - 트로포미오신과 결합
  - 칼슘과 가역적으로 결합
- 칼슘이 트로포닌과 결합하여 골격근 수축을 조절한다

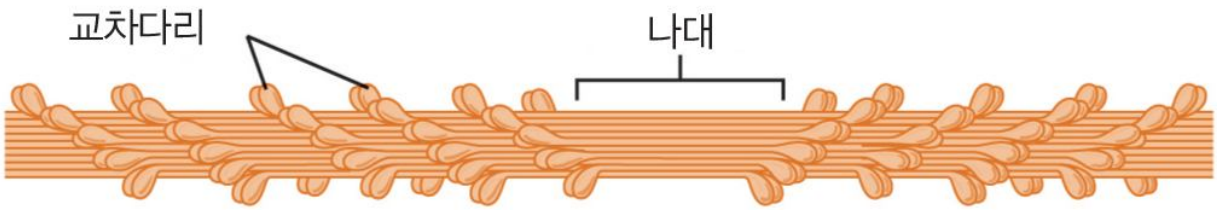
굵은 필라멘트



(a) 미오신 분자

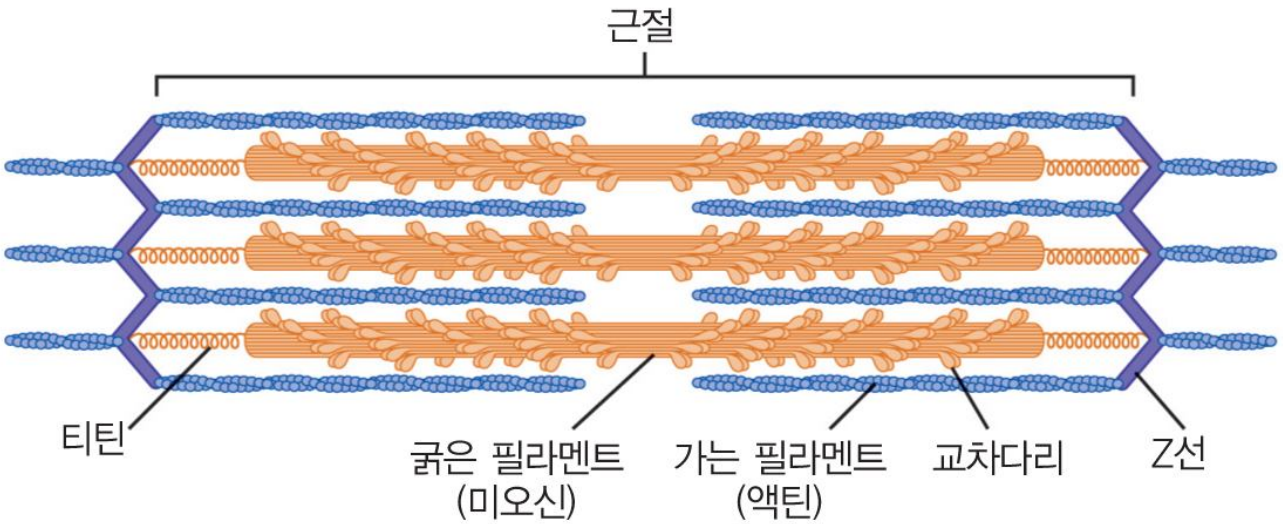


(b) 꼬리끝에서 결합되어 있는 미오신 분자

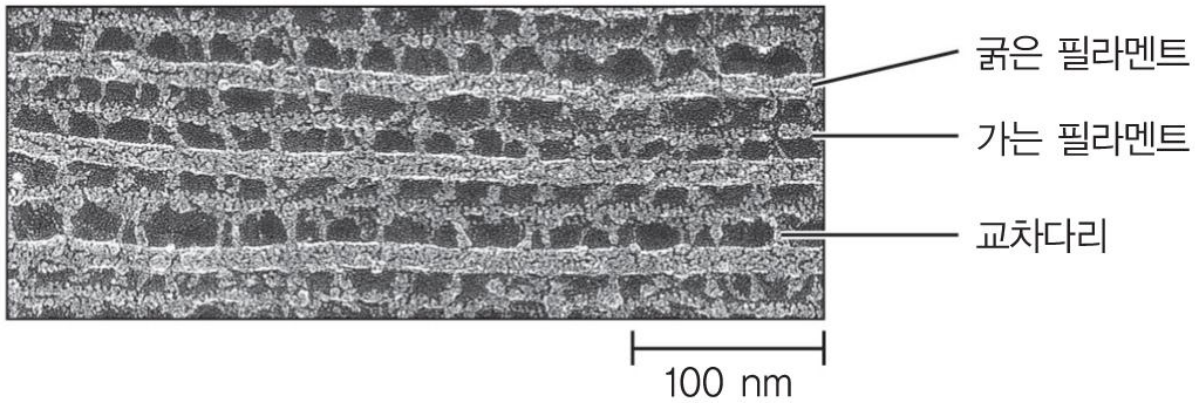


(c) 굵은 필라멘트 부위

굵은 필라멘트



(d) 근절



(e) 근절의 전자현미경 사진

굵은 근원섬유

- 미오신 꼬리는 M선을 향해 있다
- 미오신 머리는 I띠를 향해 있다
- 미오신 머리 결합부위
  - 액틴 결합부위
  - ATP 결합부위와 ATP분해효소부위

티틴

- 매우 탄력성이 강한 단백질
- 근육에서 단백질을 지지
- M선과 Z선 사이에서 굵은 필라멘트를 고정
- 구조적 지지와 탄력성 부여

II. 근육의 힘 발생 기작

- 필라멘트 활주모델
- 교차다리 주기 : 근육이 힘을 발생시키는 방법
- 흥분 수축 짝지음 : 근육의 수축은 어떻게 시작하고 어떻게 멈추는가
- 근육세포의 대사 : 근육세포가 교차다리 주기를 작동시키기 위하여 어떻게 ATP를 공급하는가

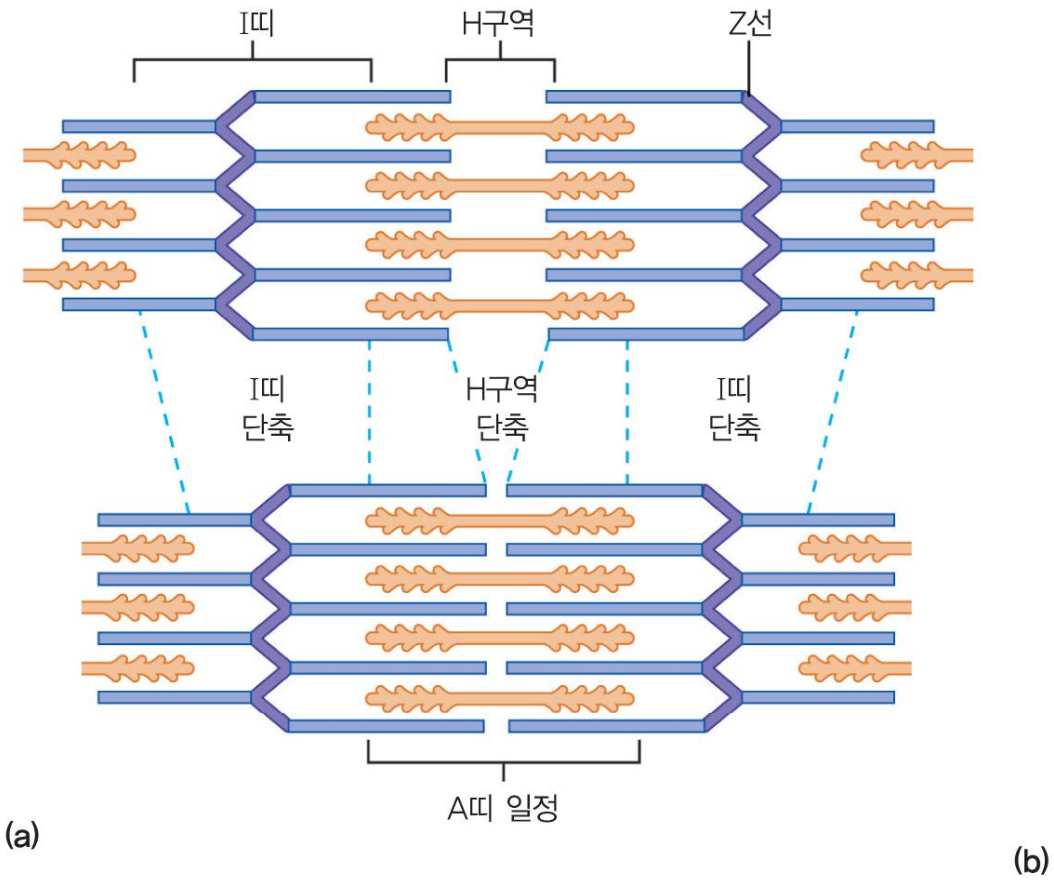
필라멘트 활주모델

- 근육수축
  - 근육의 단축
- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 겹침
- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트는 짧아지지 않는다.
- 필라멘트가 서로를 지나 활주한다.

필라멘트 활주모델

- 수축하는 동안 근절에서는
  - A띠는 길이가 변하지 않음
  - I띠는 짧아짐
  - H띠는 짧아짐
  - 근절은 짧아짐
- 활주는 주기적으로 교차다리가 생성되고 끊어지기 때문이다 = 교차다리 주기

필라멘트 활주



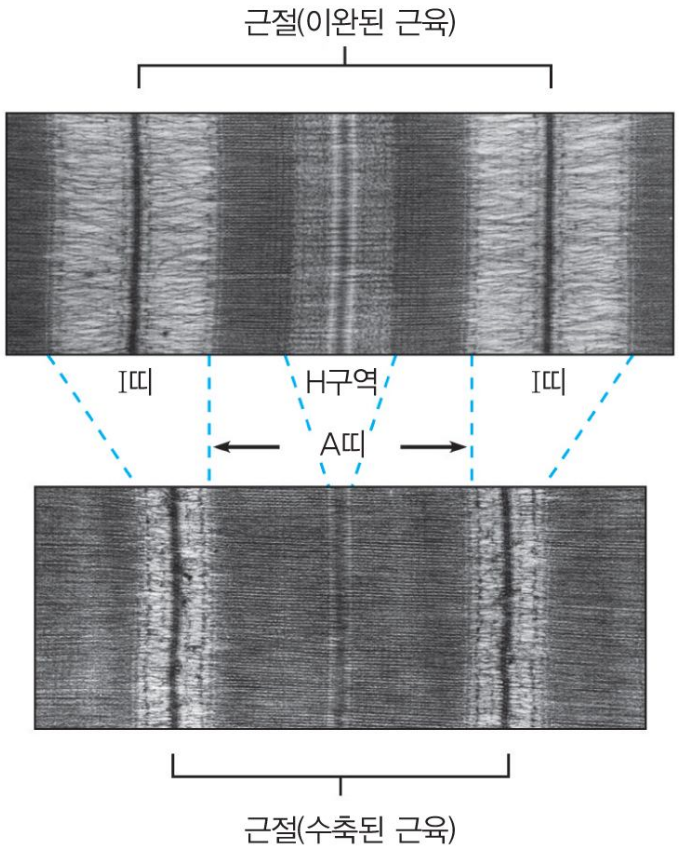


그림 12.6 가로무늬 형태가 어떻게 변하는지 근육수축의 필라멘트 활주모델로 설명된다. **(a)** 개략도. **(b)** 이완된 근육(위)과 수축된 근육(아래)의 근절에서 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 상대적인 위치를 보여준다.

교차다리 주기

액틴과 미오신 사이에 주기적으로 형성되는 연결고리는
가는 필라멘트가 근절의 M선을 향해 활주하게 한다

교차다리 주기

- 미오신 머리는 전후 왕복운동을 위해 구조적 변화를 겪는다
  - 고에너지형
    - ADP와 Pi가 미오신에 결합
    - 액틴과 높은 친화력
  - 저에너지형
    - ATP가 미오신에 결합
    - 액틴과 낮은 친화력
- ATP 가수분해에 의존

교차다리 주기

- 물에서 보트를 젓는 것과 유사
- 노=교차다리
- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 연결(노와 물과의 접촉)

교차다리 주기

- 파워스트로크-가는 필라멘트가 근육의 중심 쪽으로 나아가도록 미오신 머리가 움직인다(보트를 추진하는 노의 움직임)
- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트가 떨어진다 (노와 물과의 접촉이 끊어짐)
- 미오신 머리가 초기 위치로 돌아온다 (노가 새로운 위치로 이동하여 주기가 다시 시작한다)

교차다리 주기

PLAY **A&P Flix: Contraction Part 3: The Crossbridge Cycle**
(A&P Flix : 수축 part 3: 교차다리 주기)

교차다리 주기

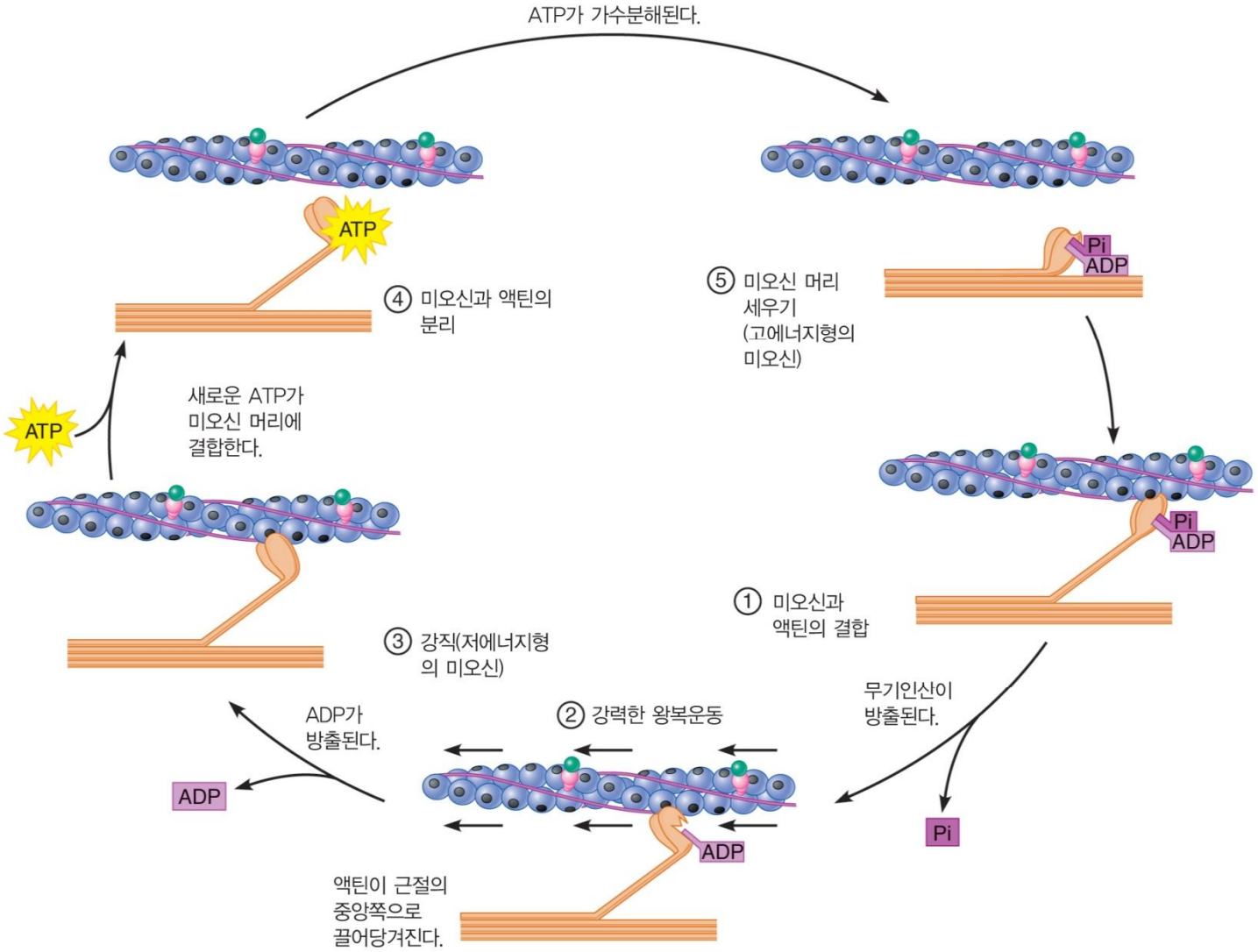


그림 12.7 **교차다리 주기.** 각 단계는 본문에 설명되어 있다.

비동시다발적 주기

- 근육세포는 수축 동안 지속적으로 힘을 생성한다.
- 다른 미오신 분자의 교차다리주기는 서로 맞게 작동하지 않는다.
    - 수축기동안 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트 사이의 결합은 절대 끊어지지 않는다

흥분수축 짝지음

근섬유내의 활동전위가 수축을 유발하는 일련의 사건

- 운동뉴론으로부터의 신경 입력에 의존
- 근소포체로부터 칼슘 방출 필요

수축에서 칼슘의 역할

- 칼슘 부재시 - 트로포닌이 액틴의 미오신 결합부위를 덮고 있는 트로포미오신을 잡고 있다
  - 액틴과 미오신 사이에 교차다리가 형성되지 않는다.
  - 근육이 이완

수축에서 칼슘의 역할

- 칼슘 존재시 – 칼슘이 트로포닌과 결합,
  트로포닌과 트로포미오신의 이동을 유발하여
  액틴의 미오신 결합부위가 노출
  - 액틴과 미오신 사이에 교차다리가 형성
  - 주기가 시작되어 근육이 수축

흥분수축 짝지음 단계

1. 근섬유막에서 활동전위
2. 활동전위가 T소관을 따라 전달
3. T 소관의 DHP 수용체가 측낭의 근소포체막에 있는 칼슘 통로(리아노닌 수용체)를 연다

흥분수축 짝지음 단계

4. 세포질내 칼슘증가
5. 칼슘이 트로포닌에 결합, 트로포미오신 이동
6. 교차다리 주기 발생

Excitation-Contraction Coupling(흥분수축 짝지음)

PLAY **A&P Flix: Contraction Part 2: Excitation-Contraction Coupling**

흥분수축 짝지음

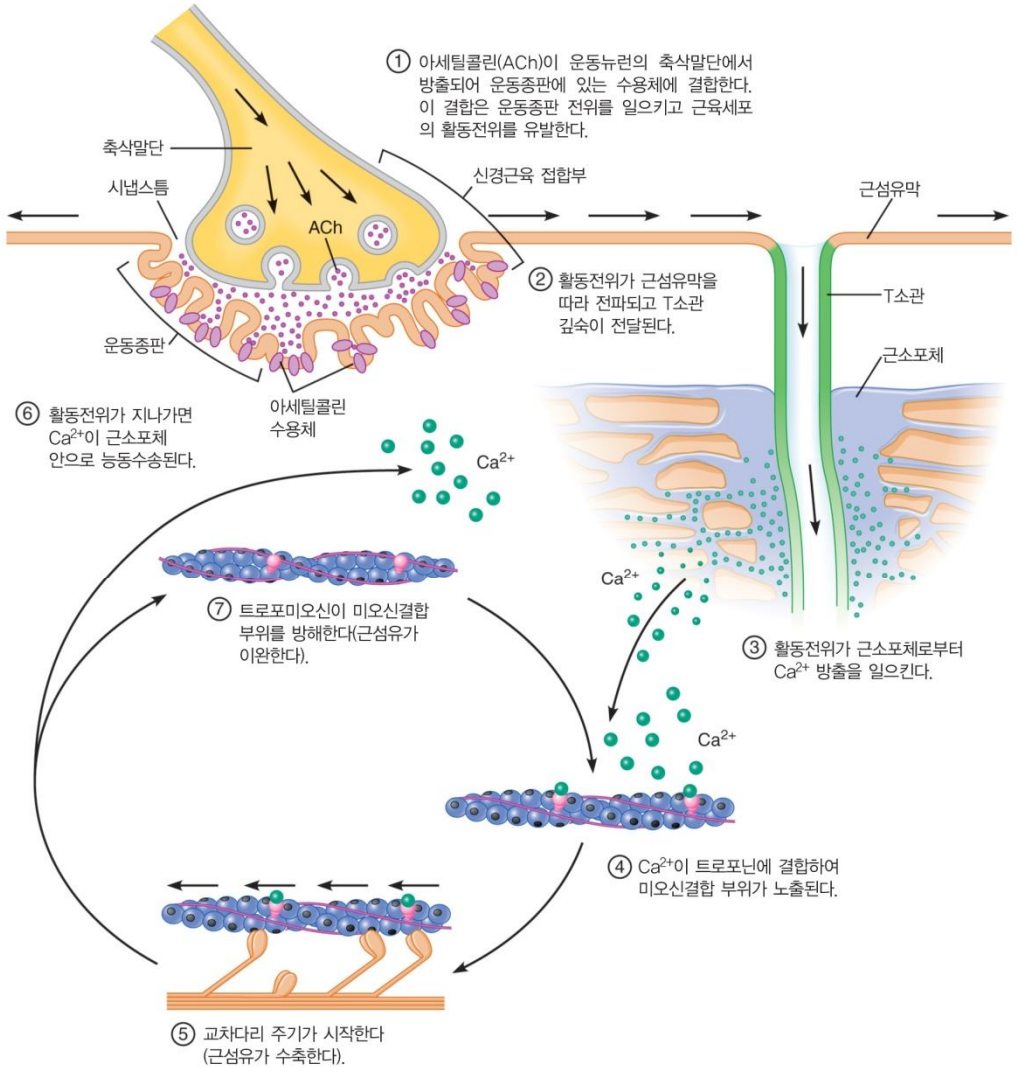


그림 12.8 흥분수축 짝지음. 골격근섬유의 수축은 운동뉴런의 축삭말단에 활동전위가 도착함으로써 시작하고 유지된다. 활동전위가 멈추고 칼슘이 근소포체 안으로 다시 들어가면 수축은 멈추고 근섬유는 이완한다.

트로포닌과 트로포미오신의 작용

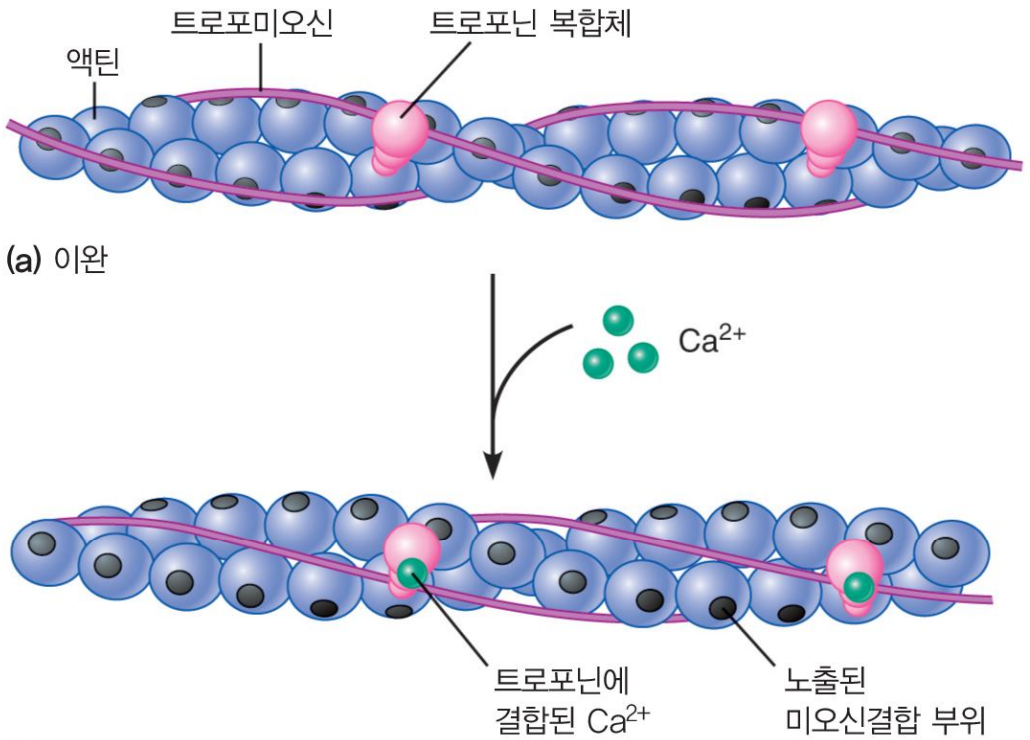


그림 12.9 흥분수축 짝지음에서 트로포닌과 트로포미오신의 작용. **(a)** 이완된 근육에서 트로포닌은 액틴의 미오신결합 부위를 덮고 있어 교차다리 주기가 일어나지 않도록 한다. **(b)** 칼슘이온이 근소포체로부터 방출되어 트로포닌에 결합하면 트로포닌 복합체의 구조적 변화를 일으켜 액틴 트로포미오신 위치를 바꾸고 미오신결합 부위를 노출시킨다.

근소포체 칼슘통로의 개폐

- 전압의존성 개폐
  - 리아노딘 수용체와 DHP 수용체에 의해 T소관과 연결
- 칼슘에 의한 개방
- 칼슘에 의한 폐쇄

근소포체 개폐

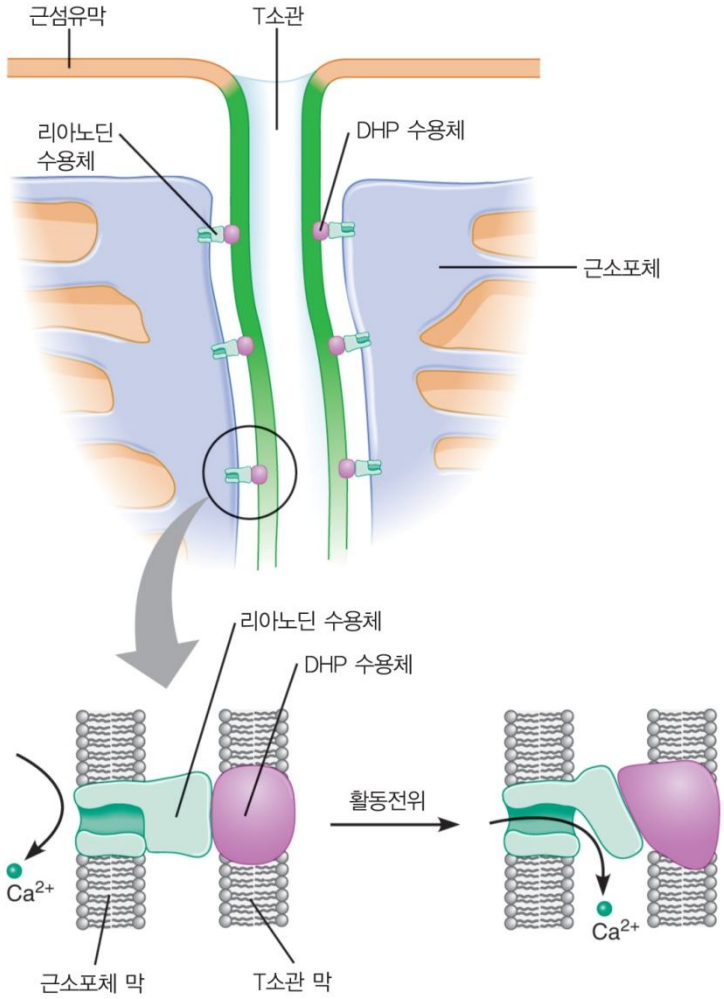


그림 12.10 근소포체의 칼슘통로의 개폐. T소관에 위치한 전압의존성 DHP 수용체가 근소포체 막에 있는 리아노딘 수용체에 연결되어 있다. 활동전위가 T소관을 따라 이동하다 DHP 수용체에 감지되면 리아노딘 수용체의 칼슘통로가 열린다.

수축의 종결

- 트로포미오신이 액틴의 미오신 결합부위를 덮을 수 있도록 칼슘이 트로포닌에서 떨어져야한다
- 세포질로부터 칼슘을 제거하려면
  - 근소포체의 칼슘 ATP분해효소
  - 칼슘을 세포질로부터 근소포체로 수송

근육세포의 대사 : 근육세포가 교차다리 주기를 작동시키기 위해 어떻게 ATP를 공급하는가

- 근육에 의해 사용된 ATP
- ATP가 교차다리 주기를 이끈다.
  - 미오신 ATP분해효소에 의한 ATP의 분해(파워스트로크)
  - 새로운 ATP가 미오신에 결합하면 액틴으로부터 분리된다

APT 공급

- 소량 저장된 ATP가 근육 활동의 개시때 이용가능하다
- 즉시 보충되어야 한다

ATP 공급원

1. 크레아틴 인산에 의한 ADP의 인산화
2. 미토콘드리아에서 ADP의 산화적 인산화
3. 무산소성 해당

크레아틴/크레아틴 인산계

- 크레아틴 인산화효소

크레아틴 인산 + ADP ↔ 크레아틴 + ATP

- 질량작용의 법칙
  - ATP의 사용은 반응을 오른쪽으로 진행시킨다.

크레아틴 인산 에너지 저장

- 크레아틴 인산 = ATP의 첫 공급원
- 안정시 세포에 존재하는 ATP양의 4-5배를 제공할 수 있음
- 매우 빠른 한 단계 과정
- 매우 제한적인 양 – 빠르게 사용됨

산화적 인산화

- 가벼운 운동이나 적당한 운동을 하는 동안 초기 에너지 공급
  - 산소공급이 적절
  - 예 : 호기성 운동
- 적절한 산소공급을 유지하려면
  - 환기의 증가
  - 심장박동수와 심장수축의 증가
  - 근육 혈관의 확장

산화적 인산화를 위한 에너지 공급

- 근육은 한정된 양의 포도당을 글리코겐으로 저장
  - 산화적 인산화의 기질로 30분간 이용됨
- 포도당과 지방산이 혈액을 통해 근육으로 이동
  - 주로 30분 후 이용됨

무산소성 해당

- 근육으로 산소공급이 제한적일 때(격렬한 운동시), 무산소성 해당과정 = ATP의 초기 공급원
- 빠른 ATP 공급원
  - 포도당 1분자당 2 ATP
  - 포도당 이용의 제한
  - 젖산의 축적(타는듯한 감각)
- 고강도(무산소성)운동기간으로 제한됨

운동 후

- 운동 후, 산화적 인산화가 계속되므로 호흡은 증가된 상태이다.
  - 크레아틴 인산과 글리코겐 저장량을 보충
  - 젖산을 피부르산으로 전환

대사 경로

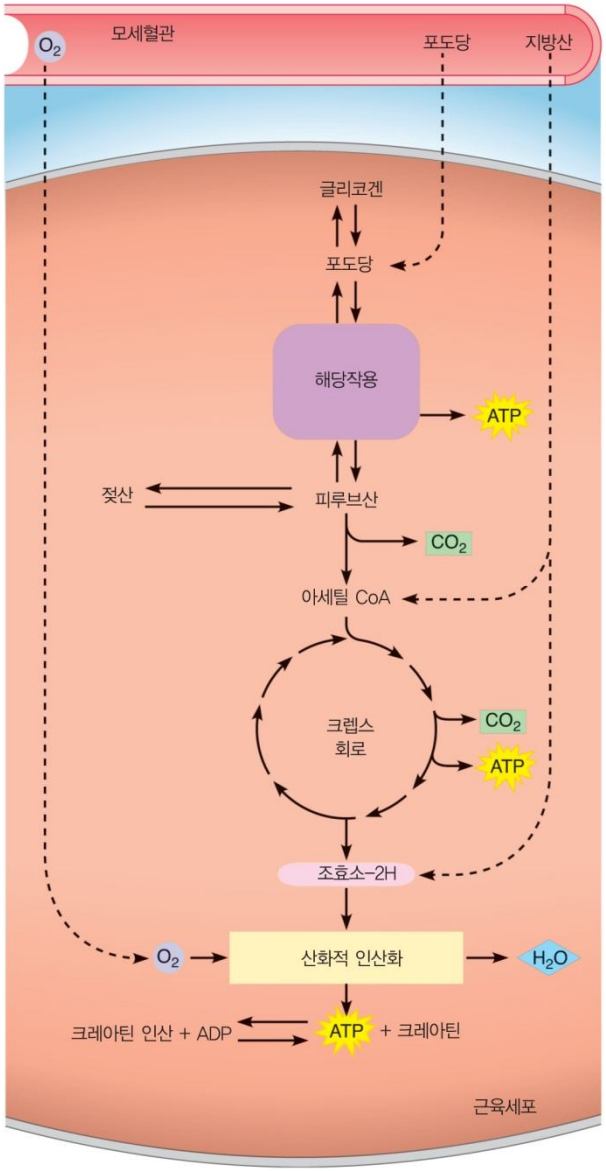


그림 12.11 골격근의 대사 경로. 골격근에서 초기의 ATP 저장고는 크레아틴 인산이다. 다음은 저장된 글리코겐을 이용한다. 산소가 충분하다면 혈액을 통해 운반된 포도당과 지방산을 이용할 수 있다.