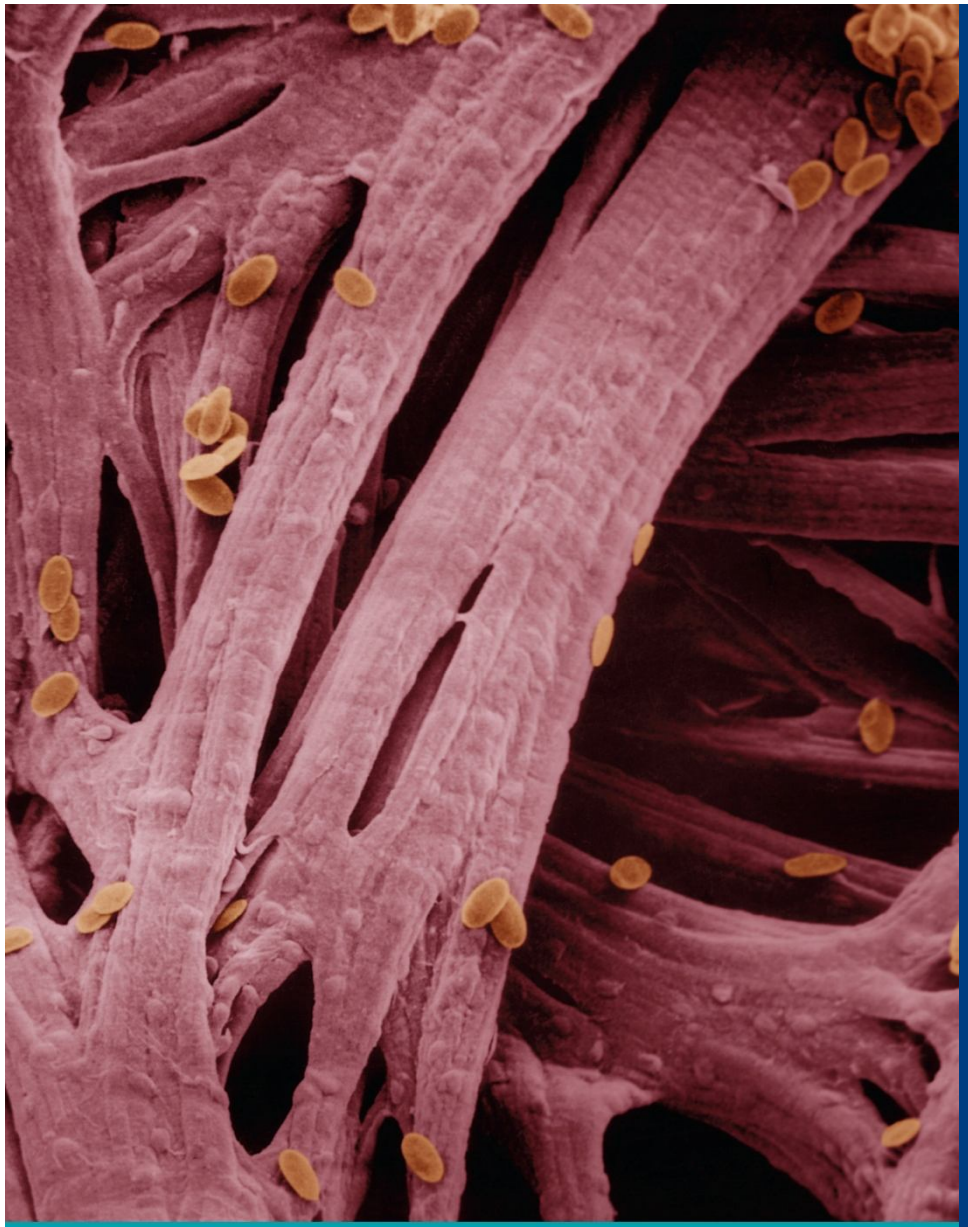


심근세포의 현미경 사진

12

근육생리학

Part B

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

III. 골격근 수축의 역학

- 연축
- 단일 근섬유가 발생하는 힘에 영향을 미치는 요인
- 근육전체에서 발생하는 힘의 조절
- 단축 속도

근육 역학

- 골격근은 다양한 힘과 속도로 수축할 수 있다.

연축 수축

단일 활동전위에 대한 반응으로 한 근육세포에서 발생되는 수축

- 연축은 안정시 정해진 근섬유에서 실무율을 따라 일어난다
- 연축은 근섬유, 운동단위 또는 전체 근육 수준에서 정의될 수 있다

연축 단계

- 잠복기
  - 근육세포의 활동전위와 수축의 개시 사이의 지체기간(수밀리초)
  - 흥분수축 짝지음
- 수축기
  - 근육의 장력이 증가(10-100 밀리초)
  - 교차다리 주기

연축단계

- 이완기
  - 장력이 제로로 떨어지는 기간(수축기보다 김)
  - 칼슘의 재흡수

근육 연축 단계

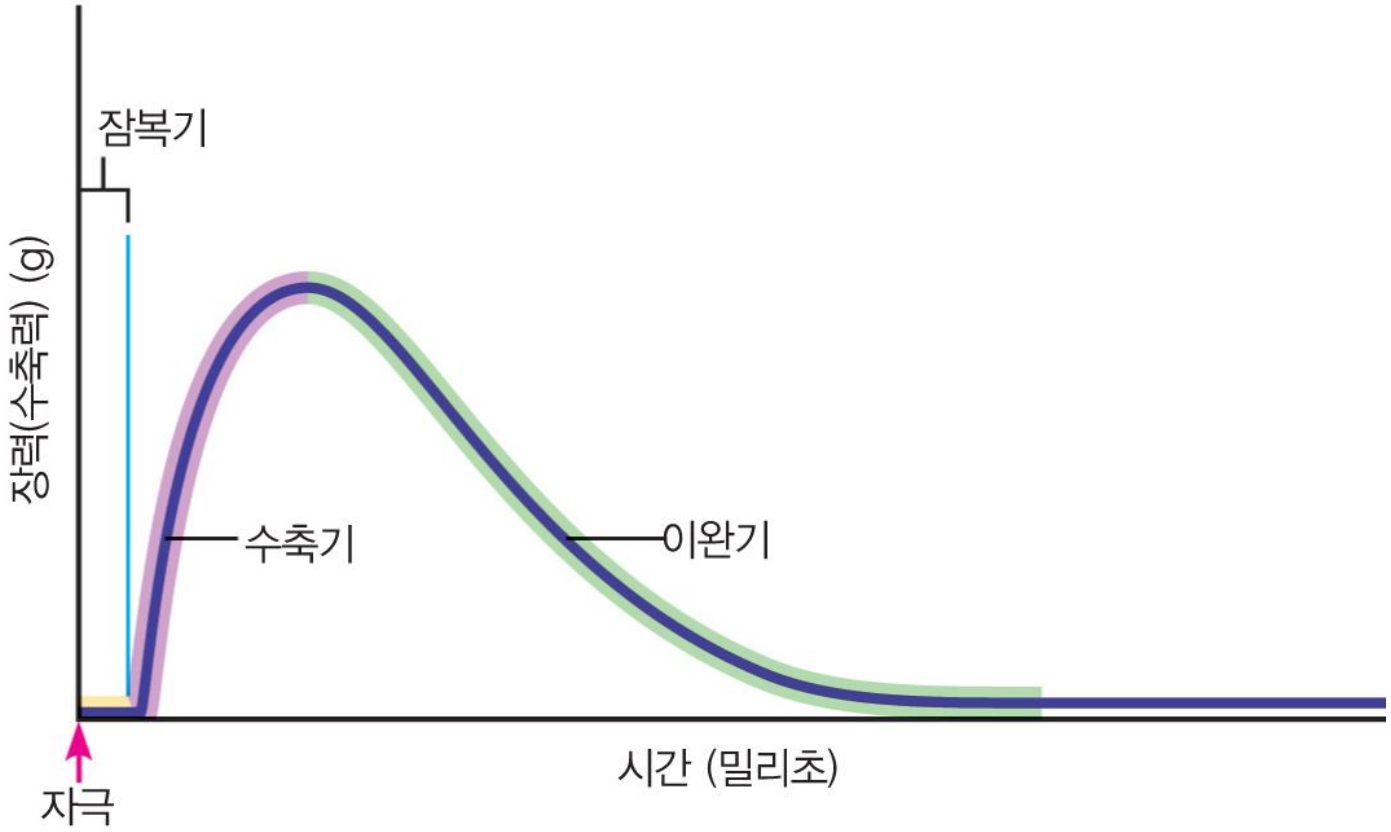


그림 12.12 연축단계. 근육이 단일자극에 반응하여 능동적으로 발생할 수 있는 장력을 시간경과에 따라 그림으로 나타낸 것이다.

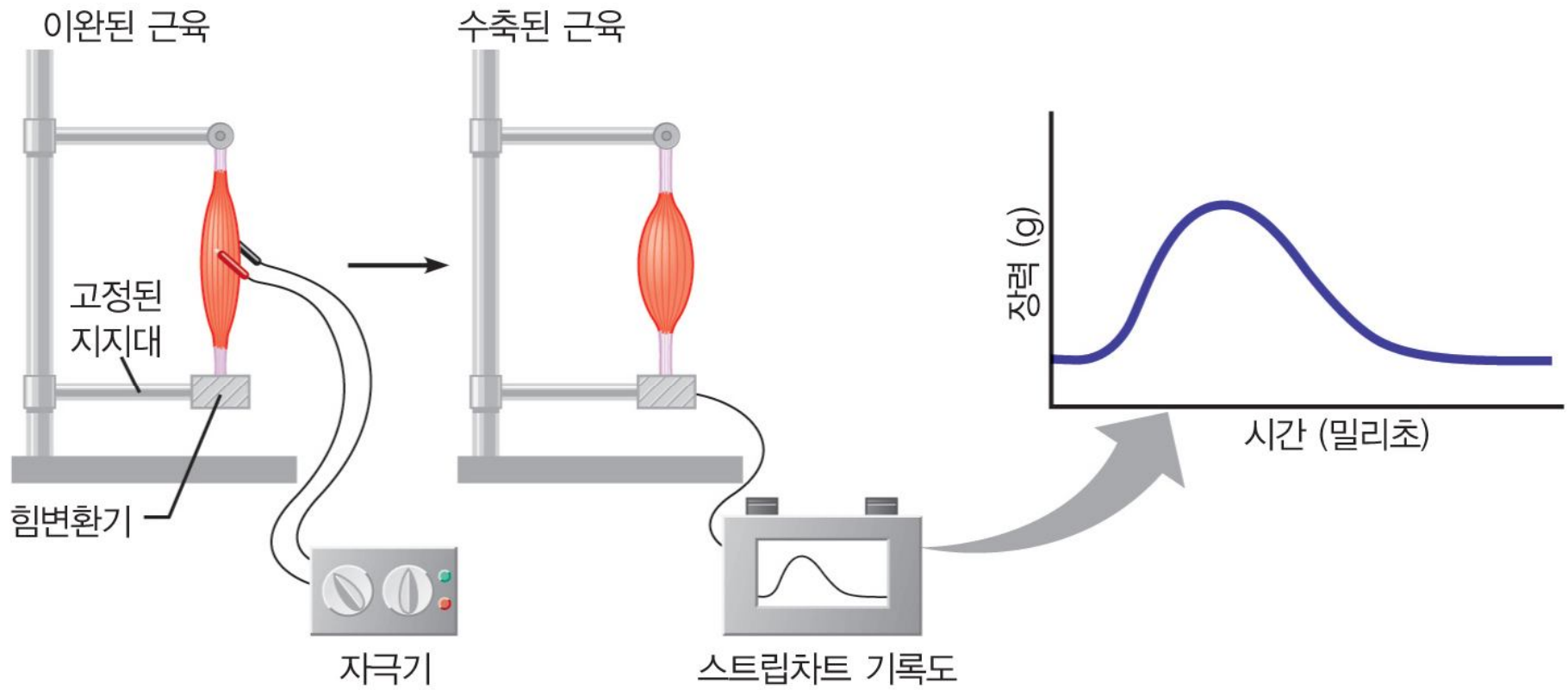
등척성 연축과 등력성 연축 : 근육의 구성성분

- 탄성 요소 = 근절
- 직렬 탄성 요소 = 결합조직, 힘줄
- 수축하는 근육에서 발휘되는 힘 = 장력
- 수축에 반하는 힘(예를 들어 움직이려는 무게) = 부하

등척성 연축

- 길이는 일정
- 탄성요소는 수축하여 장력 발생
- 부하>장력일 때
  - 직렬탄성 요소의 신장
  - 근육이 **짧아지지 않고**, 부하는 올려지지 않는다.

등척성 수축

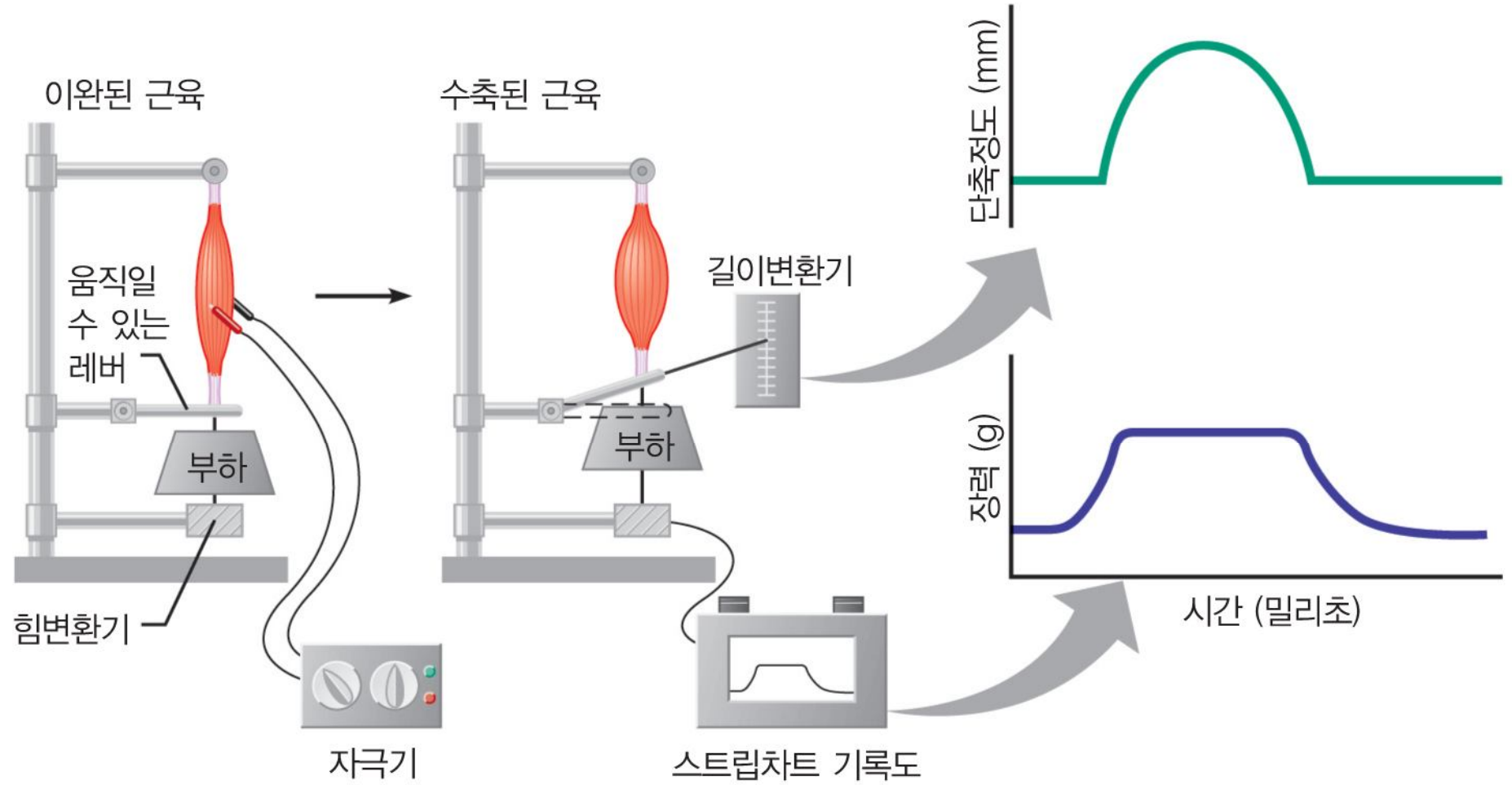


(a) 등척성 근육수축

등력성 연축

- 장력이 일정
- 장력>부하일 때
    - 근육이 짧아질 때 부하가 들어올려진다.

등력성 수축



(b) 등력성 근육수축

장력에 대한 부하의 효과

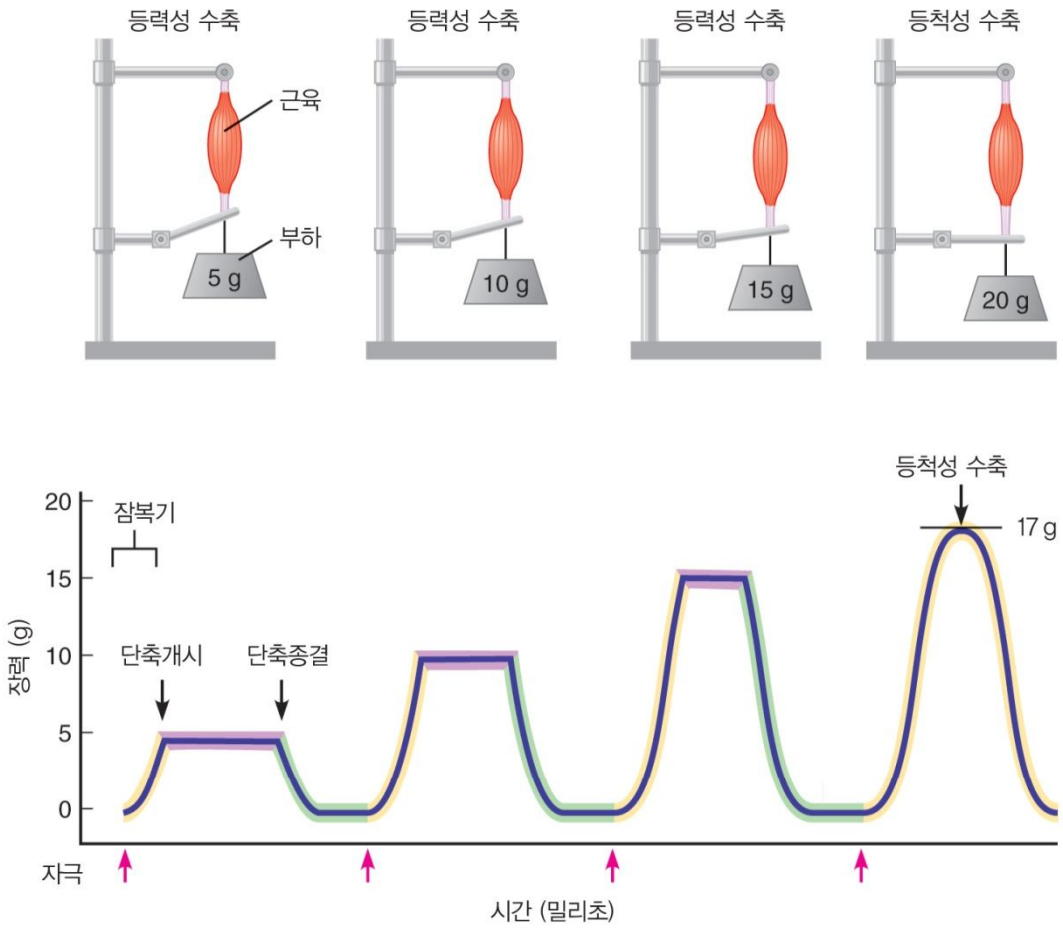


그림 12.14 등력성 연축에서 최고 장력에 대한 부하의 효과. 서로 다른 네 가지 부하를 근육에 걸어 자극에 대한 반응을 그림으로 나타내었다. 부하가 5, 10, 15 g일 때 근육은 등력성 수축을 하며, 이러한 경우 근육의 장력은 부하와 동일한 수준에서 고평부를 이룬다. 그러나 부하가 20 g일 때 근육은 짧아질 수 없는데 이것은 근육이 단일연축시 발생할 수 있는 최고장력(17 g)을 부하가 넘어서기 때문이며, 따라서 근육은 등척성 수축을 한다. 부하가 증가할 때 근육의 단축기간은 감소하고 근육단축 개시 전의 잠복기는 증가한다.

정상적인 근육활동

- 완전 등척성 연축이 일어날 수 있다
- 완전 등력성 수축은 드물다
  - 부하가 일정하더라도 등척성 단계가 등력성 수축에 앞서 일어난다
  - 장력이 부하를 넘어설 때까지 등척성 수축이 지속된다(장력이 증가한다)
  - 그 다음 등력성 수축이 시작된다
  - 근육이 단축될 때 장력은 일정하게 유지된다
- 일반적으로 부하는 일정하지 않다
  - 팔, 다리 위치가 변화함에 따라 부하는 변한다

점진적 근육수축

두 가지 요인에 의존한다

- 각 근섬유에서 발생한 장력
- 수축하는 근섬유의 수

단일 근섬유가 발생하는 장력의 결정요인)

- 액틴과 결합하는 활성화된 교차다리의 수
  - 결합한 교차다리가 많을수록 → 더 큰 힘

단일 근섬유가 발생하는 힘에 영향을 미치는 요인

- 자극빈도
- 섬유의 직경
- 섬유길이의 변화
- 피로도

자극빈도

근섬유에서 활동 전위의 빈도가 증가하면 두 가지 방법으로 장력을 증가시킨다

- 계단현상
- 가중

계단현상

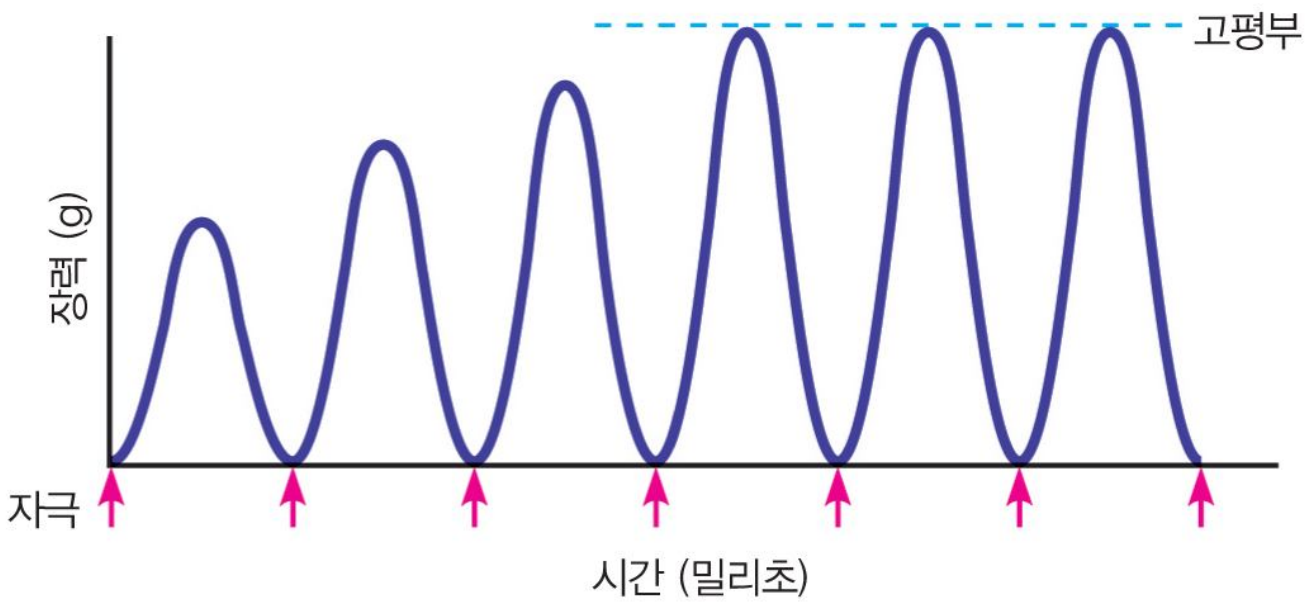


그림 12.15 **계단현상.** 충분히 자주 반복자극(화살표)을 주면 등척성 수축을 하는 근육의 최고장력은 처음 몇 개의 연축에서는 증가하다가 결국 고평부에 도달한다.

가중의 기초

- 활동전위
  - 2 밀리초
- 수축
  - 100-200 밀리초
- 수축은 겹쳐져 합해질 수 있다

등척성 연축기간

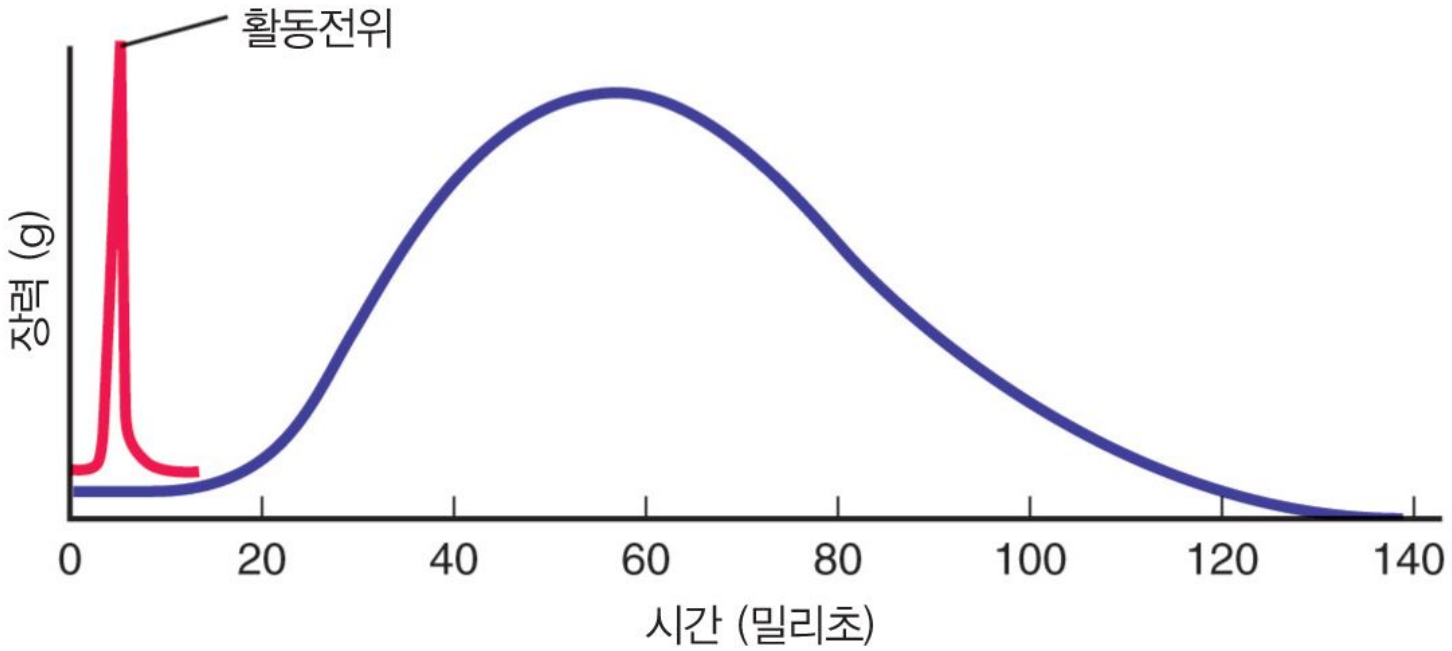


그림 12.16 등척성 연축기간. 근섬유의 연축은 그 활동전위보다 훨씬 오래 지속된다.

가중과 강축

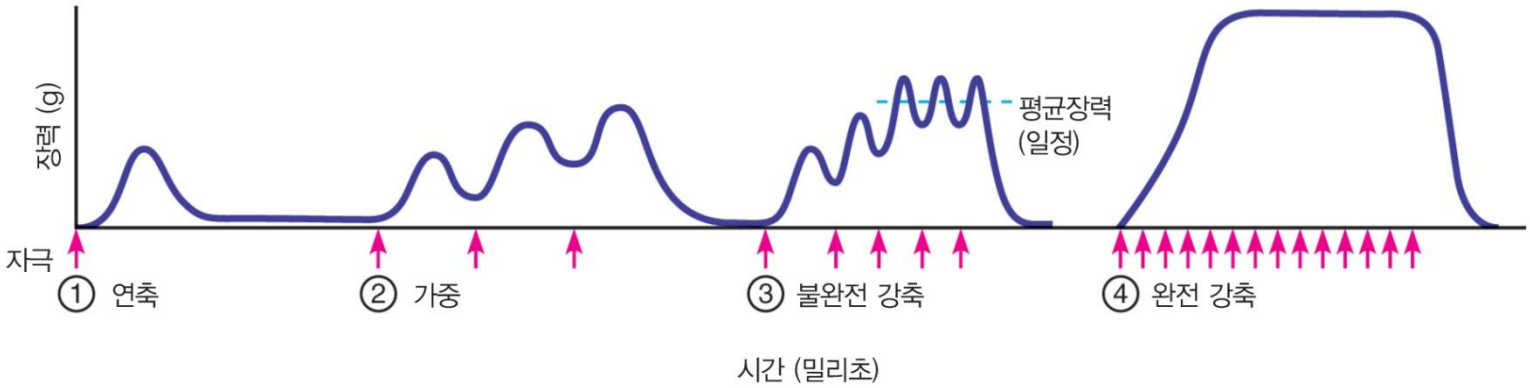


그림 12.17 높은 빈도로 자극한 효과: 가중과 강축. 연속적인 반복자극(화살표)에 반응하여 근연축은 서로 겹쳐져 가중에 이른다. 더 높은 빈도로 반복자극을 하면 각 연축의 장력이 점점 올라가다 불완전강축에 이르는데, 특징적인 것은 고평부에서 각 연축을 구별할 수 있다는 것이다. 훨씬 더 높은 빈도로 자극을 하면 완전강축을 만드는데, 힘은 빠르게 증가하여 고평부에 이르고 각 연축을 더 이상 구별할 수 없게 된다.

가중과 강축의 원인

- 발생한 장력의 양은 트로포닌에 결합하는 칼슘의 양에 의존한다
- 높은 빈도에서, 칼슘의 방출은 재흡수를 넘어선다
  - 세포질내 칼슘 증가
- 결국 계는 포화된다
  - 모든 트로포닌이 칼슘과 결합
  - 교차다리 주기가 최대한도에 달함
  - 최대 강축 수축

섬유의 직경

- 힘 발생력=근육이 본래 가지고 있는 힘을 내는 능력
- 힘 발생력은 각 근절의 교차다리 수와 근절의 기하학적인 배열에 의존한다
  - 많은 교차다리/근절 → 더 큰 힘
  - 많은 병렬식의 근절 → 더 큰 힘

섬유 직경

- 굵은 필라멘트와 가는 필라멘트의 수/단면적= 일정
  - 섬유직경은 다양
  - 큰 직경 → 더 많은 필라멘트 → 더 큰 힘

섬유길이

- 수축이 개시될 때 근섬유의 길이는 발생하는 힘에 영향을 준다

길이-장력 곡선

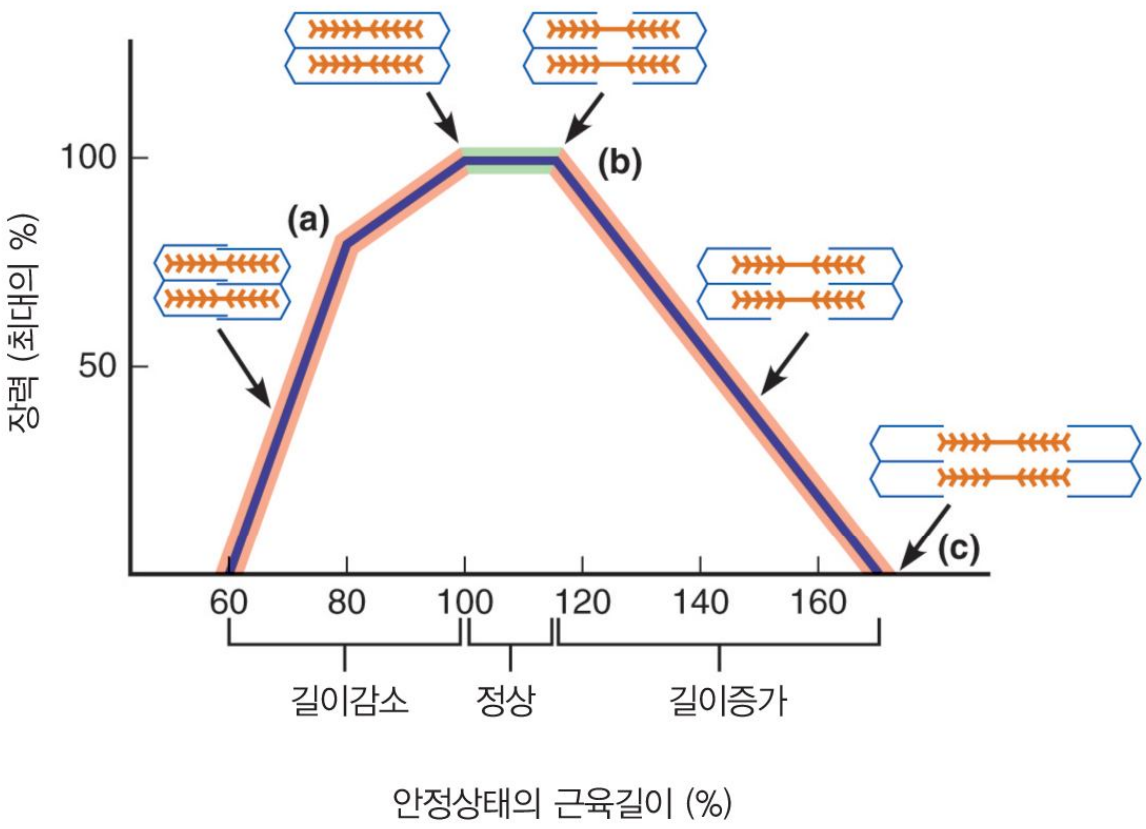


그림 12.18 **길이-장력 곡선.** 이 곡선은 근육의 안정 길이에 따라 근육에서 발생되는 장력을 나타낸 것이다. 중앙의 중괄호 범위는 원위치에 있는 정상적인 근육길이에 해당한다.

최적 길이

- 근섬유가 최대량의 장력을 발생할 수 있는 안정시 근육의 길이
- 굵은 필라멘트 교차다리와 가는 필라멘트가 최대로 겹치기 때문이다
- 본래 대부분의 근육은 최적길이에 있다

비최적길이

- 최적길이보다 길 때
  - 겹치는 교차다리 감소
- 최적길이보다 짧을 때
  - 가는 필라멘트가 서로 겹침
  - Z선이 굵은 필라멘트와 접촉

근육수축에 영향을 미치는 요인 : 수축하는 근섬유의 수

- 더 많은 근섬유가 수축할수록, 더 큰 힘이 발생한다

동원

더 많은 근섬유가 수축하도록 자극된다

- 근육 = 근섬유의 다발
- 더 많은 근섬유가 수축할수록 전체적인 근육의 장력이 커진다
- 동원은 운동단위 수준에서 발생한다

운동단위의 동원

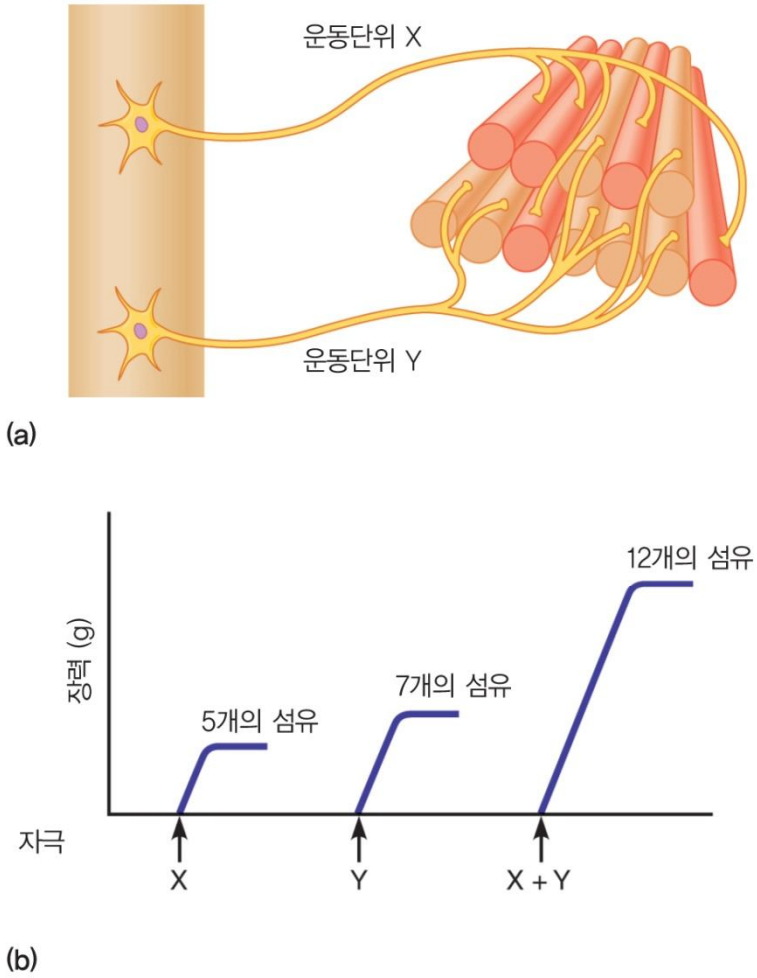


그림 12.19 운동단위의 동원으로 힘발생 증가. (a) 운동단위 X, Y는 각각 5개, 7개의 섬유를 갖고 있다. **(b)** 운동단위 X, 운동단위 Y, 운동단위 X와 Y에서 각각 발생하는 장력.

운동단위 동원

- 더 많은 섬유가 수축 → 더 큰 장력
- 운동단위의 동원
  - 운동뉴런의 활성화는 그 운동단위의 모든 근섬유를 활성화
  - 장력의 증가는 운동 단위의 크기에 비례해 발생

운동단위 동원

- 섬세한 운동을 위한 근육
  - 작은 운동단위
- 힘을 위한 근육
  - 큰 운동단위

운동단위 크기

- 운동단위의 수는 근육에 따라 다양하다
- 운동단위의 크기는 다양하다
  - 정교한 움직임은 작은 운동단위
  - 힘이 관여된 움직임은 큰 운동단위
- 섬유직경(따라서 힘)은 운동단위에서 다양하다
  - 약한 운동에는 작음
  - 강한 운동에는 큼

운동단위 크기

- 운동단위의 크기와 섬유의 직경은 관련이 있다
  - 작은 운동단위 → 작은 섬유
  - 큰 운동단위 → 큰 섬유

크기 원리

운동단위가 동원되는 순서는 운동단위의 크기와 관련이 있다

- 작은 운동단위가 먼저 동원
- 큰 운동단위는 나중에 동원

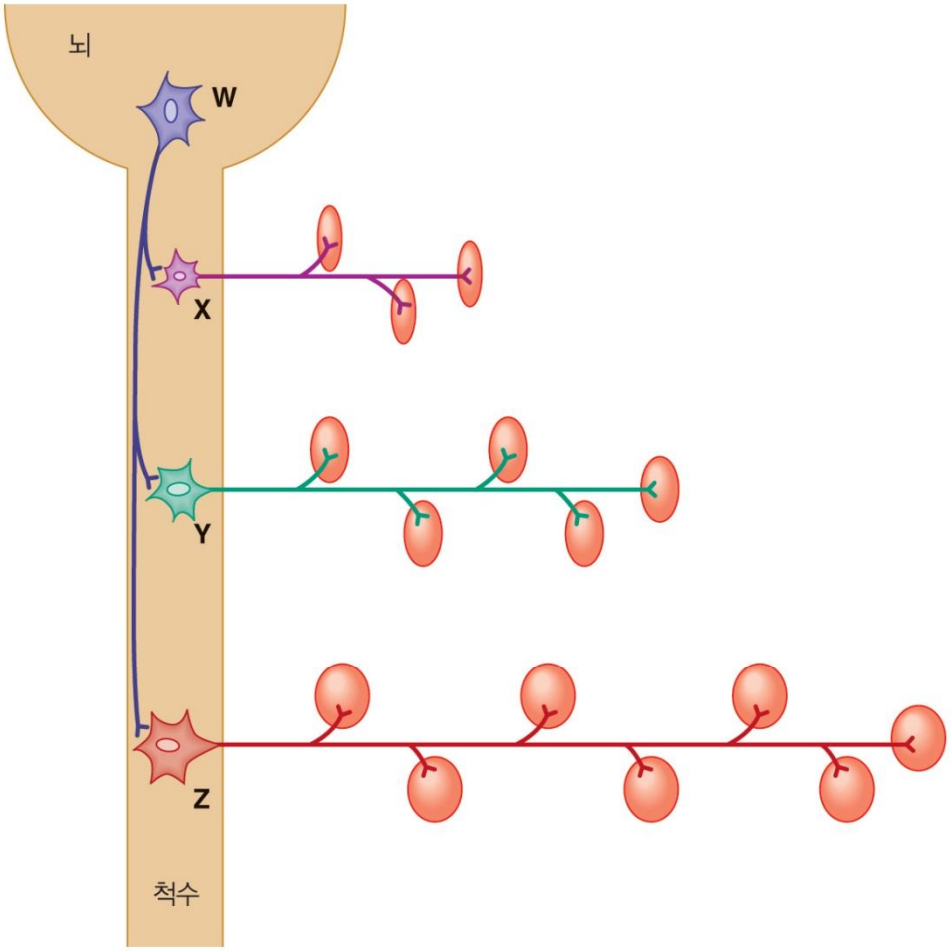
동원 기작

- 큰 운동단위
  - 큰 운동뉴런 세포체
  - 큰 축삭 직경
- 작은 운동단위
  - 작은 운동뉴런 세포체
  - 작은 축삭 직경

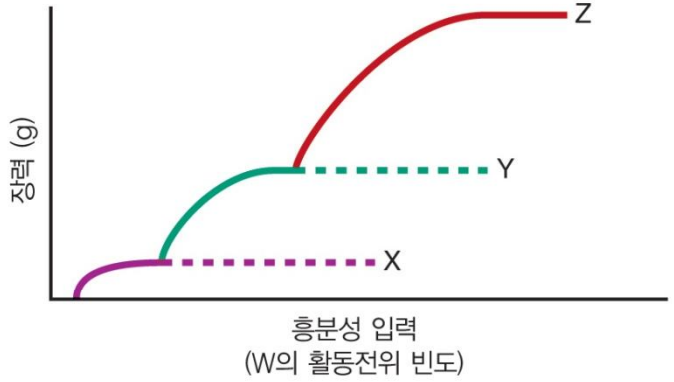
동원 기작

- 큰 뉴런은 탈분극되어 역치에 이르기가 더 어렵다
  - 더 많은 시냅스 입력이 필요
  - 작은 뉴런이 먼저 흥분되고 (낮은 입력), 이어서 큰 뉴런이 흥분(높은 입력)

운동단위 크기 원리



(a)



(b)

그림 12.20 **크기원리.** **(a)** 중추신경계내 흥분성 뉴런 W와 크기가 다른 세 운동뉴런(X, Y, Z)과의 구조관계 **(b)** 뉴런 W의 활동전위빈도가 증가할 때 활성화되는 운동단위의 순서는 가장 작은 X로부터 가장 큰 Z 순이다.

근육 단축과 부하

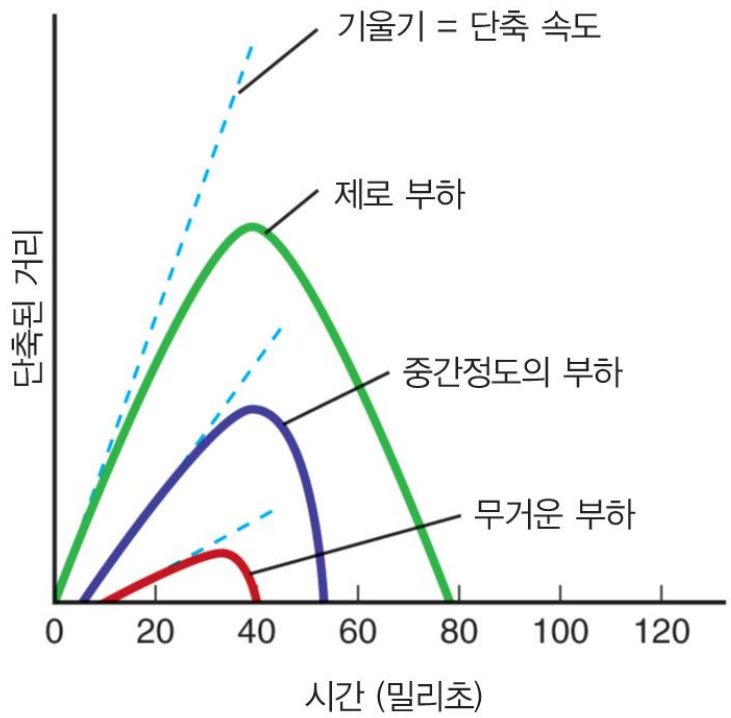


그림 12.21 근육단축에 미치는 부하의 효과. 근육이 등력성 수축시 짧아진 거리를 서로 다른 세 부하에 따라 나타내었다. 점선은 곡선의 초기 기울기로, 근육의 단축 속도의 측정치다.

부하-속도 곡선

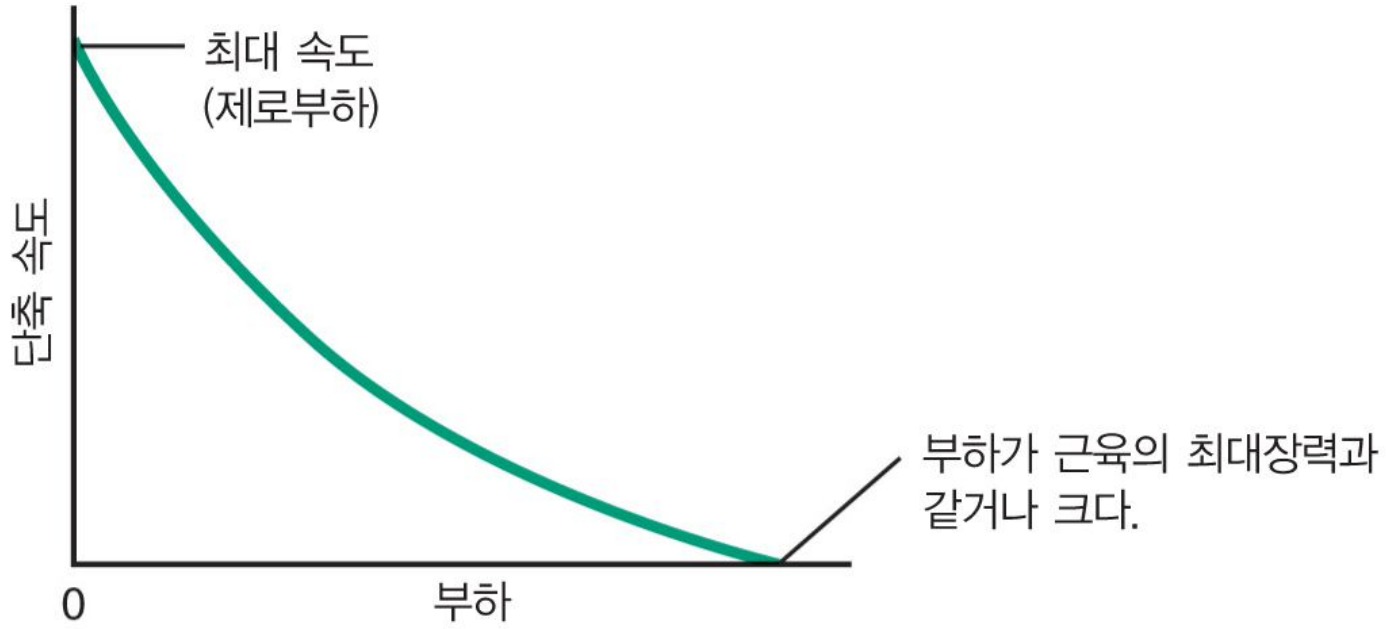


그림 12.22 부하-속도 곡선. 이 곡선은 단축 속도(그림 12.21)를 부하에 따라 나타낸 것이다.