

## **4. 에너지대사 적응과 운동 시 연료의 이용**

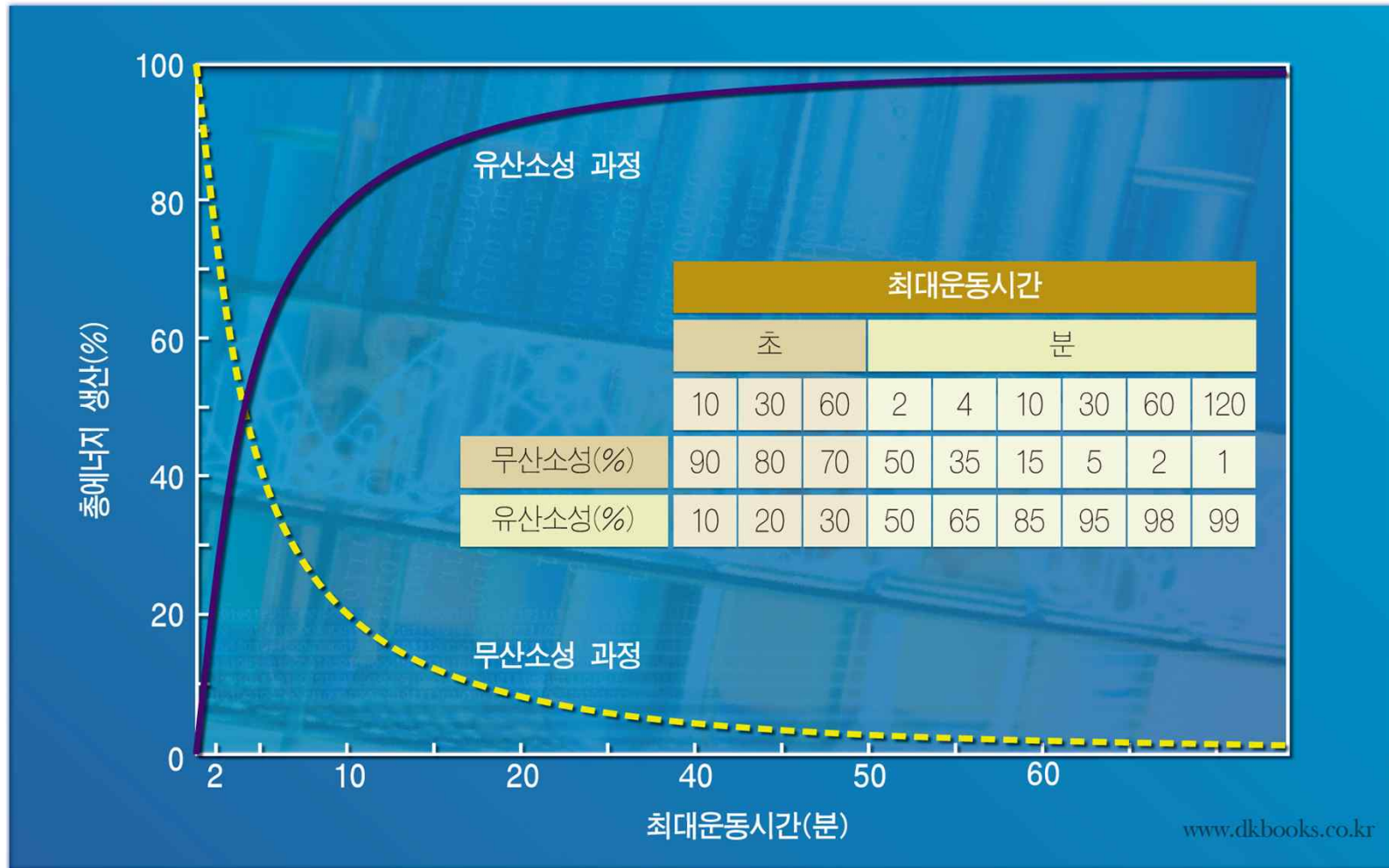
### **Metabolic Adaptations and Energy systems used during Exercise**

교재 : 정일규, 휴먼퍼포먼스와 운동생리학 4판, 대경북스, 2011



## 학 습 목 표

- ❖ 운동에 따른 대사적 반응을 설명할 수 있다.
- ❖ 인체 에너지 대사의 특징과 적응을 설명할 수 있다.
- ❖ 운동 유형에 따른 에너지 대사 기여 비율을 설명할 수 있다.
- ❖ 트레이닝의 지구성 개선 기전을 설명할 수 있다.
- ❖ 운동 시 연료의 이용과 피로를 설명할 수 있다.
- ❖ 대사 기능에 운동이 미치는 효과를 설명할 수 있다.



탈진에 도달하기까지의 최대운동시간(운동강도)에 따른  
유·무산소성 에너지 공급의 상대적 공헌도

## 운동에 따른 대사적 반응: 강도와 지속시간의 영향

✓1~5초 운동 시: ATP-PC 체계

✓5~6초 이상 격렬한 운동: 무산소 해당작용

✓45초 이상 운동 유지: 3개 에너지체계

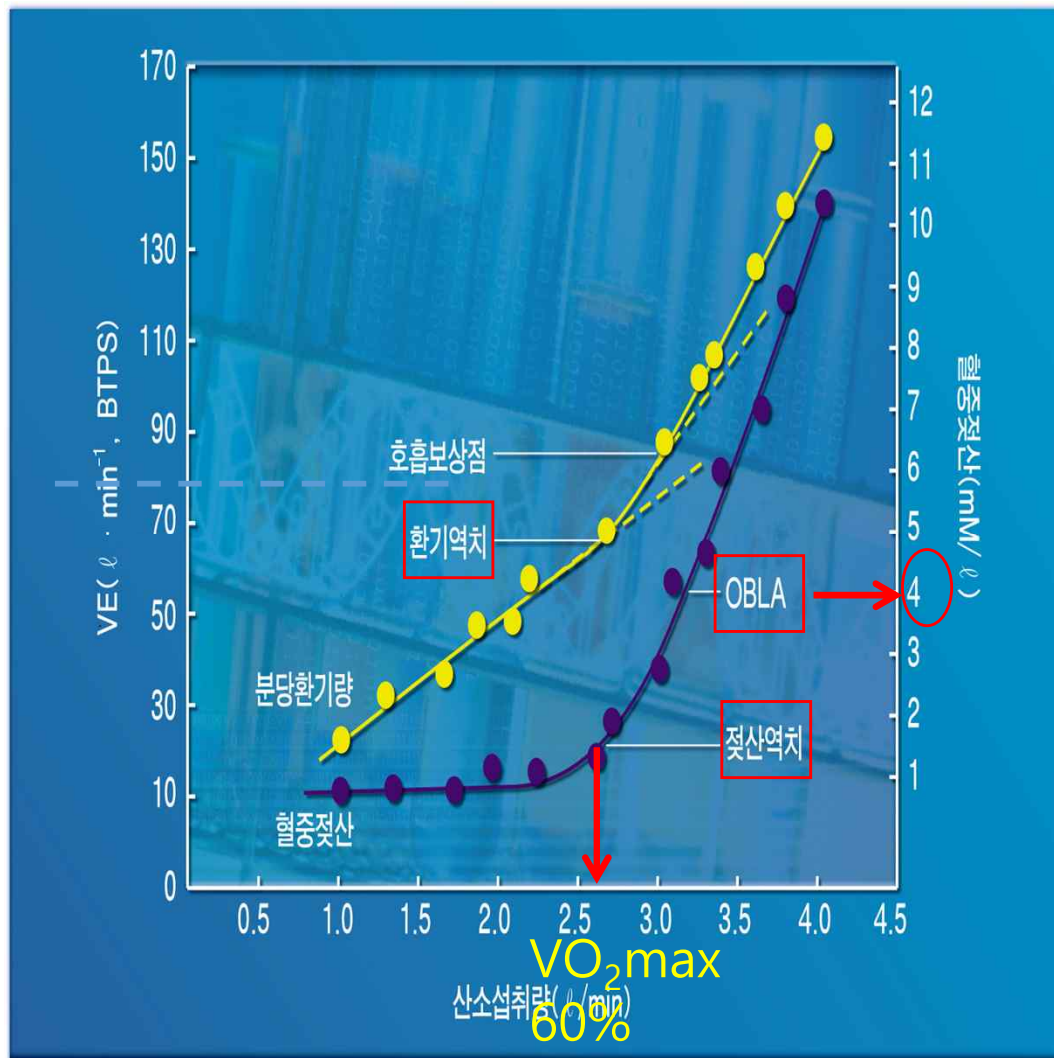
(ATP-PC 체계, 무산소 및 유산소 해당작용)

✓60초 격렬한 운동: 70(무산소):30(유산소)

✓2분 이상 운동: 50(무산소): 50(유산소)

✓10분 이상: 유산소 해당 작용

## 점증부하 운동 시 젖산농도



휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

➤ **젖산역치**(lactate threshold):

젖산농도가 급격히 증가하는  
시점

➤ **혈중 젖산 축적시점**(onset of

blood lactate accumulation:

OBLA): 혈중 젖산이 리터당

4밀리몰(mmol/L)에 도달할 때

산소섭취량 또는 운동강도

cf. 무산소성역치(anaerobic threshold)

= 환기역치



젖산역치가 높다는 것은?

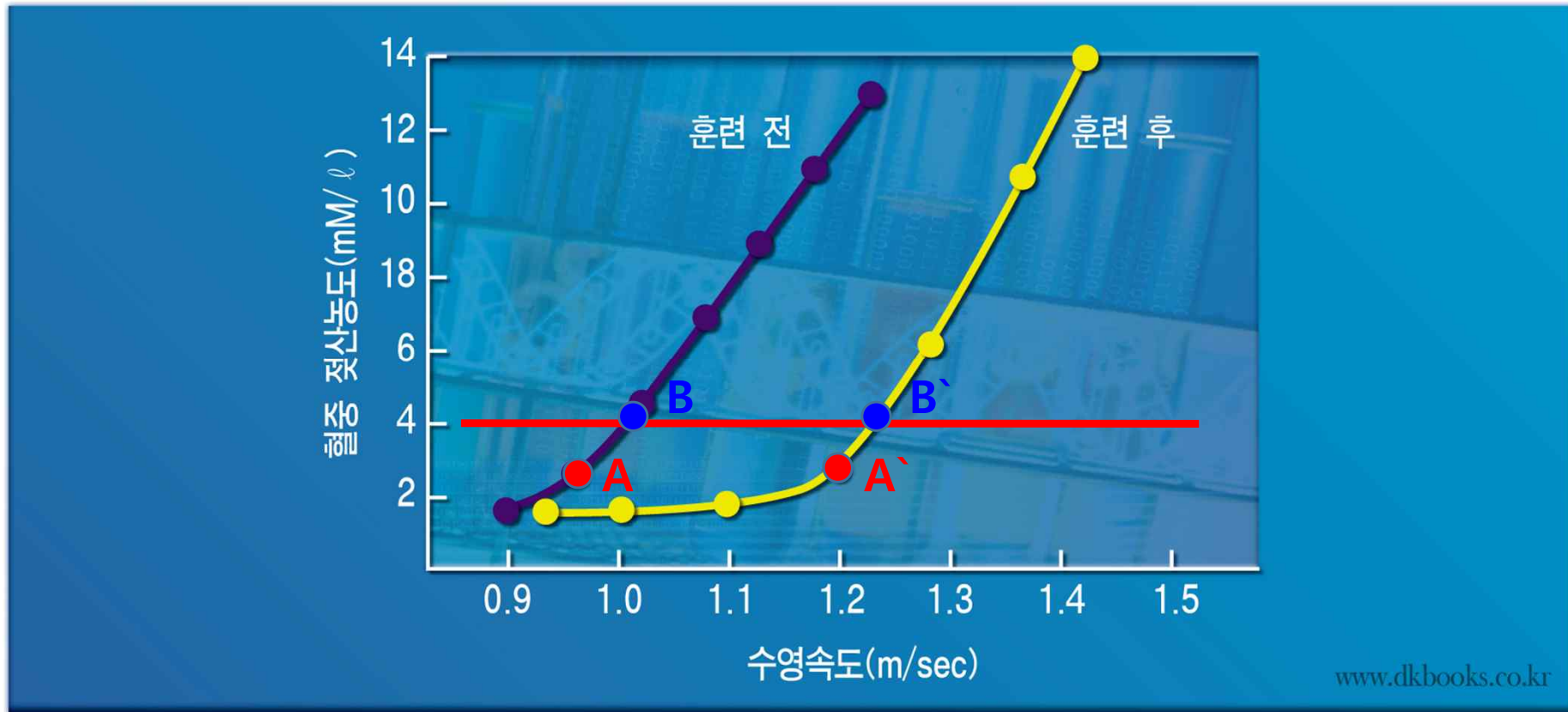


그림 4-6 5개월간의 훈련 전후 수영속도에 따른 혈중젖산 축적의 변화

**젖산역치가 늦게 나타난다 → 젖산역치가 높다**



지구성 훈련을 하면 동일한 강도의 운동 수행 시 혈중 젖산 농도가

감소될까요?

- 근육의 모세혈관의 밀도 증가로 혈류속도 ↓

--> 작업근의 산소섭취 ↑

- 동일 운동 시 교감신경의 흥분 ↓

→ 에피네프린 & 노에피네프린의 분비 ↓

→ 운동으로 인한 내장 쪽 혈류 감소량 ↓

→ 간으로 젖산운반 ↑

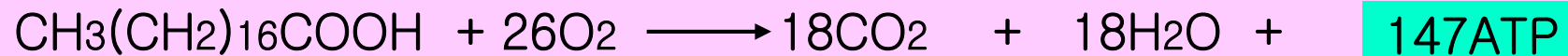
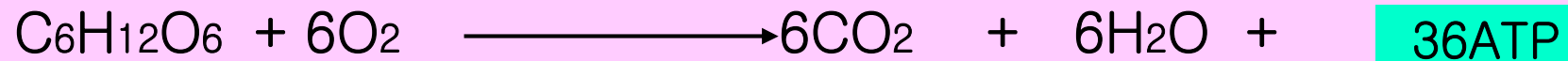
# 인체 에너지대사의 특징과 적응

## 연료선택의 결정요인들

- 건강한 사람이 균형적인 식사를 하면 지방과 탄수화물이 주 에너지원
- 탄수화물보다 **지방**이 연료로 더 많이 사용되려면?
- ✓ 식이: 지방   >   탄수화물
- ✓ 운동강도: 저강도   >   고강도
- ✓ 운동 지속시간: 단시간   <   장시간
- ✓ 운동 참여자의 지구력 훈련 상태 : 비훈련자   <   훈련자



## 탄수화물과 지방 에너지 대사의 차이는?



1. 1 ATP 생성 당 산소소비량 = 탄수화물(휘발유) < 지방(석유)

지방 12% ↑

2. 저장량 : 탄수화물(간, 근육, 혈당) < 지방(지방조직)

3. 단위 시간당 에너지 소비가 높은 운동(운동강도) : 탄수화물 > 지방

혈중 글루코스(혈당) = 뇌, 신경세포가 사용하는 유일한 에너지원  
장시간 운동 시 혈당을 보존하기 위해 지방의 연소비율이 증가

## 운동의 유형에 따른 기여비율

표 4-1 ▶ 운동종목과 주에너지 공급과정

www.dkbooks.co.kr

| 소요시간    | 주에너지시스템     | 해당 운동종목                                             |
|---------|-------------|-----------------------------------------------------|
| 30초 이내  | 인원질과정       | 투포환, 100m 달리기, 야구에서 도루, 높이뛰기, 넓이뛰기, 테니스에서 스트로크 등    |
| 30~90초  | 인원질과정, 젖산과정 | 200m 달리기, 400m 달리기, 100m 수영, 500m 스피드스케이팅 등         |
| 90~180초 | 젖산과정, 유산소과정 | 800m 달리기, 체조의 마루운동, 200·400m 수영, 복싱, 유도, 태권도, 레슬링 등 |
| 180초 이상 | 유산소과정       | 마라톤, 1500m 수영, 크로스컨트리 스키                            |

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

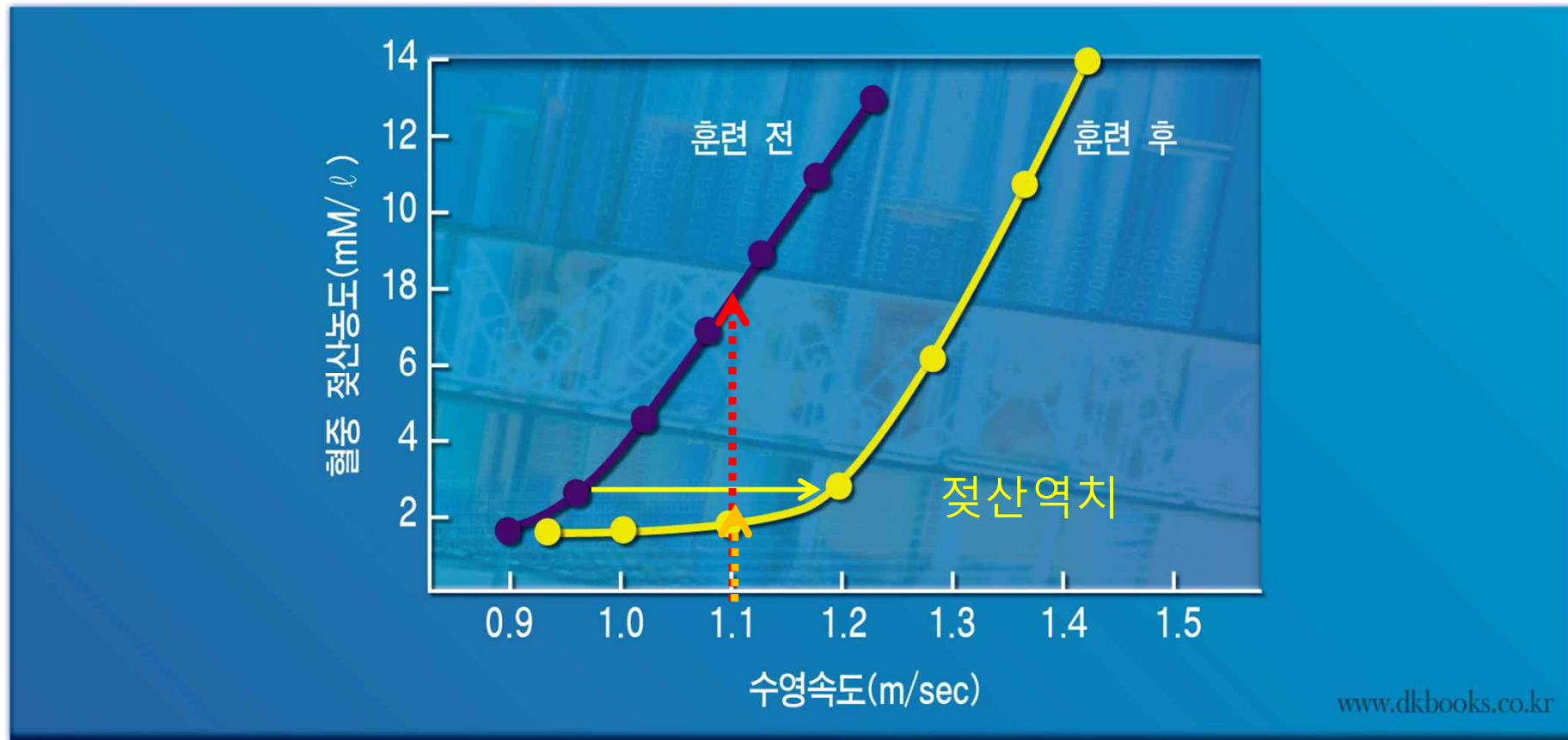
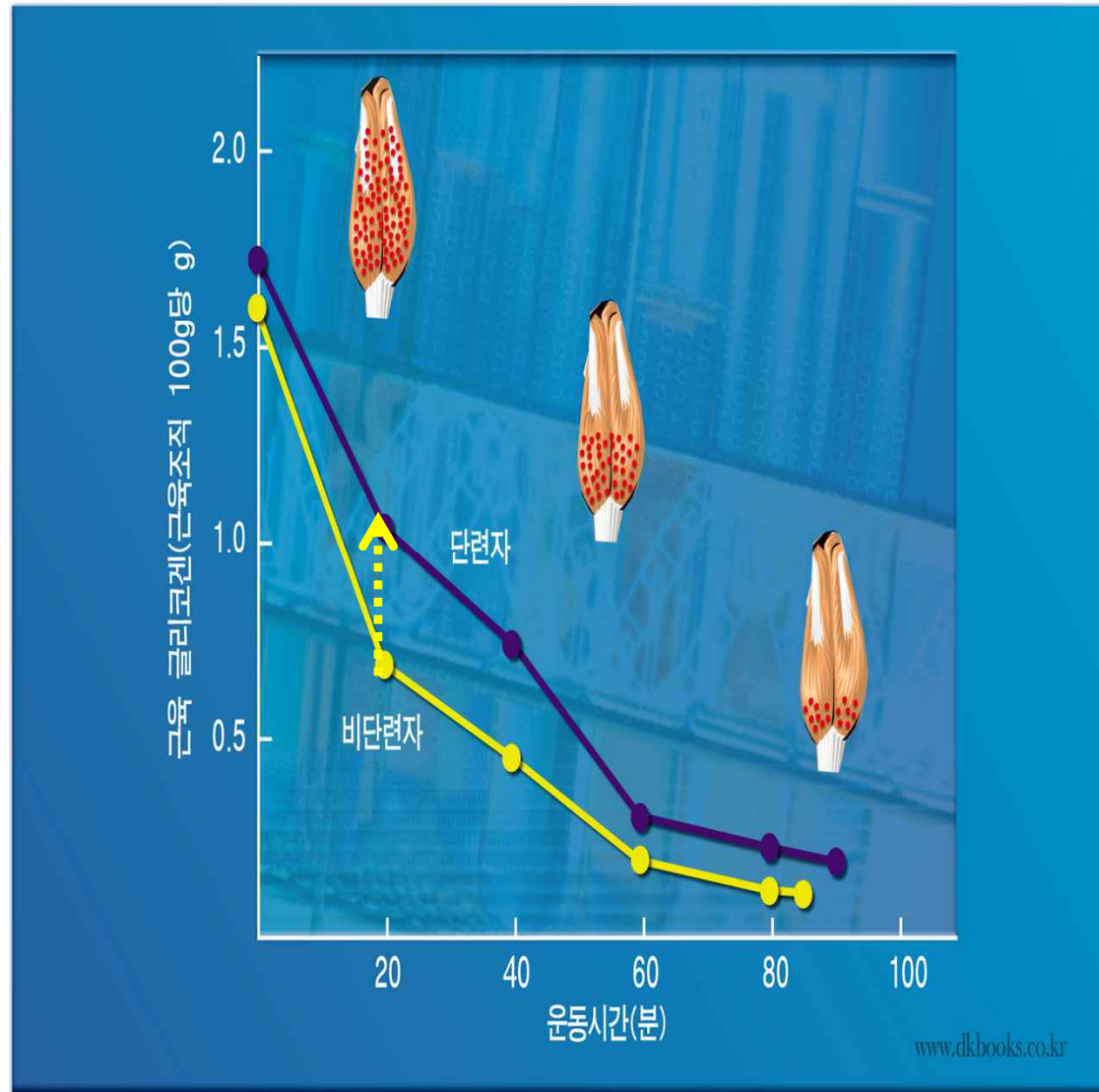


그림 4-6 5개월간의 훈련 전후 수영속도에 따른 혈중젓산 축적의 변화

➤ **훈련자는 동일한 최대하 운동시 유산소 과정에 더욱 의존**

## ➤ 훈련자의 동일부하 운동 시 연료이용 : 탄수화물 < 지방



Q. 지구성 훈련에 의한 지질의 이용능력 개선의 요인은?

- 근육의 모세혈관 밀도 ↑
- 미토콘드리아 수 ↑
- 미토콘드리아 총표면적 ↑
- 유리지방산(fat free acid, FFA)를 운반하는 카르니틴 전이효소의 양 ↑
- 미토콘드리아 수 ↑
- FFA의 산화과정(베타 산화과정) 효소 활성화도 ↑
- ➔ 탄수화물절약효과

그림 4-7 장시간 운동 시 단련자와 비단련자의 글리코겐저장량 변화

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

## 트레이닝에 따른 지구력의 개선

심장혈관계통의 적응

1. 심장의 형태적·기능적 개선(심장의 펌프효율 개선)
2. 총적혈구수 및 Hb 함량 증가(산소운송수단의 증가)
3. 뼈대근육 모세혈관밀도 증가(산소 수송로의 발달)

근육조직의 적응

1. 뼈대근육 내 마이오글로빈 함량 증가(산소저장능력 개선)
2. 미토콘드리아수 및 크기 증가(유산소적 ATP 생산공장 증가)
3. 뼈대근육 내 산화효소활성도 증가(유산소적 ATP 생산성 증대)

동일부하의 운동 시 유산소과정에 더욱 의존

젖산축적률의 감소  
체액의 산성화 감소

에너지대사과정의 억제 감소

리파제활성도 증가  
지방조직에서 지방산동원 증가  
혈중유리지방산 증가

에너지원으로 지방참여비율 증가  
(탄수화물 절약효과)

근육 및 간 글리코겐 고갈 지연  
혈당 저하 지연

피로의 개선  
지구력 개선

그림 4-8 트레이닝에 따른 지구력 증가의 기전

- 단련자는 최대 젖산생성능력(**젖산내성**)이 높음
- 트레이닝은 근세포 내 PCr, 글리코겐 저장량 증대
  - 말초조직세포의 인슐린수용체 민감도 ↑ → 글루코스유입 ↑
  - 근세포 크기 ↑
  - 글리코겐생성에 관여하는 효소의 활성화도 ↑

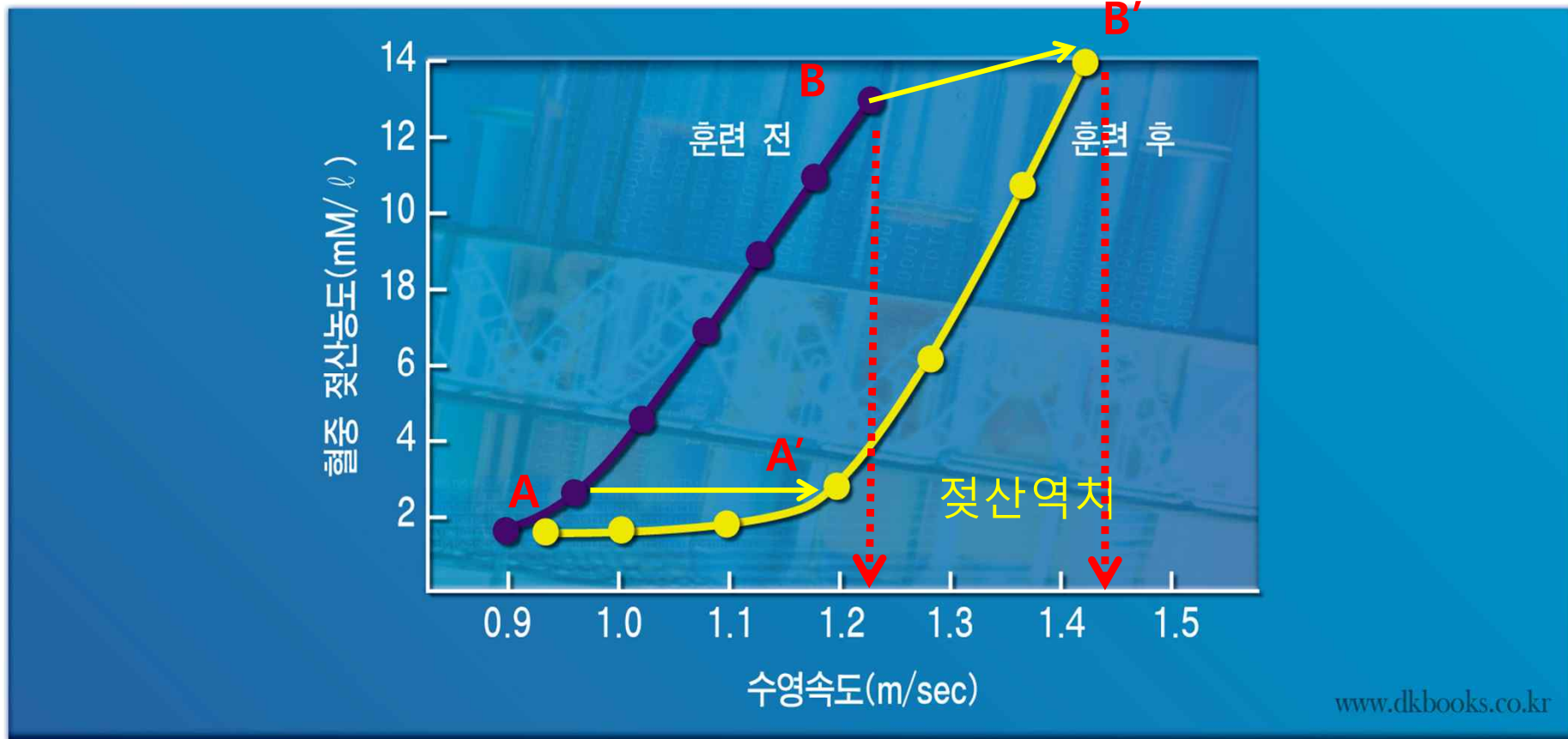


그림 4-6 5개월간의 훈련 전후 수영속도에 젓산 축적의 변화



간단하게 정리해 보세요.

\* 훈련자가 동일한 최대하 운동 시 지방을 더 에너지원으로 사용하는 이유를 설명하시오.

\* 훈련을 통해 지구력이 개선되는 기전을 설명하시오

## 운동 시 연료의 이용과 피로

1. 단시간 최대운동 1-2분 내 탈진: 인원질( PCr)

인원질( PCr, ATP) 고갈

2. 3분 - 15분내 탈진 운동: 인원질( PCr)과 글리코겐

젖산 축적 : 해당과정 및 유산소과정 효소활성 저하, 연결교(cross bridge) 작용 억제

3. 15분 - 60분 사이에 탈진: 유산소 및 무산소 근글리코겐 분해

젖산축적, 근글리코겐 고갈 + 체온상승 + 탈수 등

4. 60분 - 150분 사이에 탈진: 근글리코겐, 글루코스, 지방산 유산소분해

근글리코겐 고갈 + 체온상승 + 탈수 등

5. 150분 이상 수행하는 탈진운동: 근세포내 저장지방과 혈중지방산

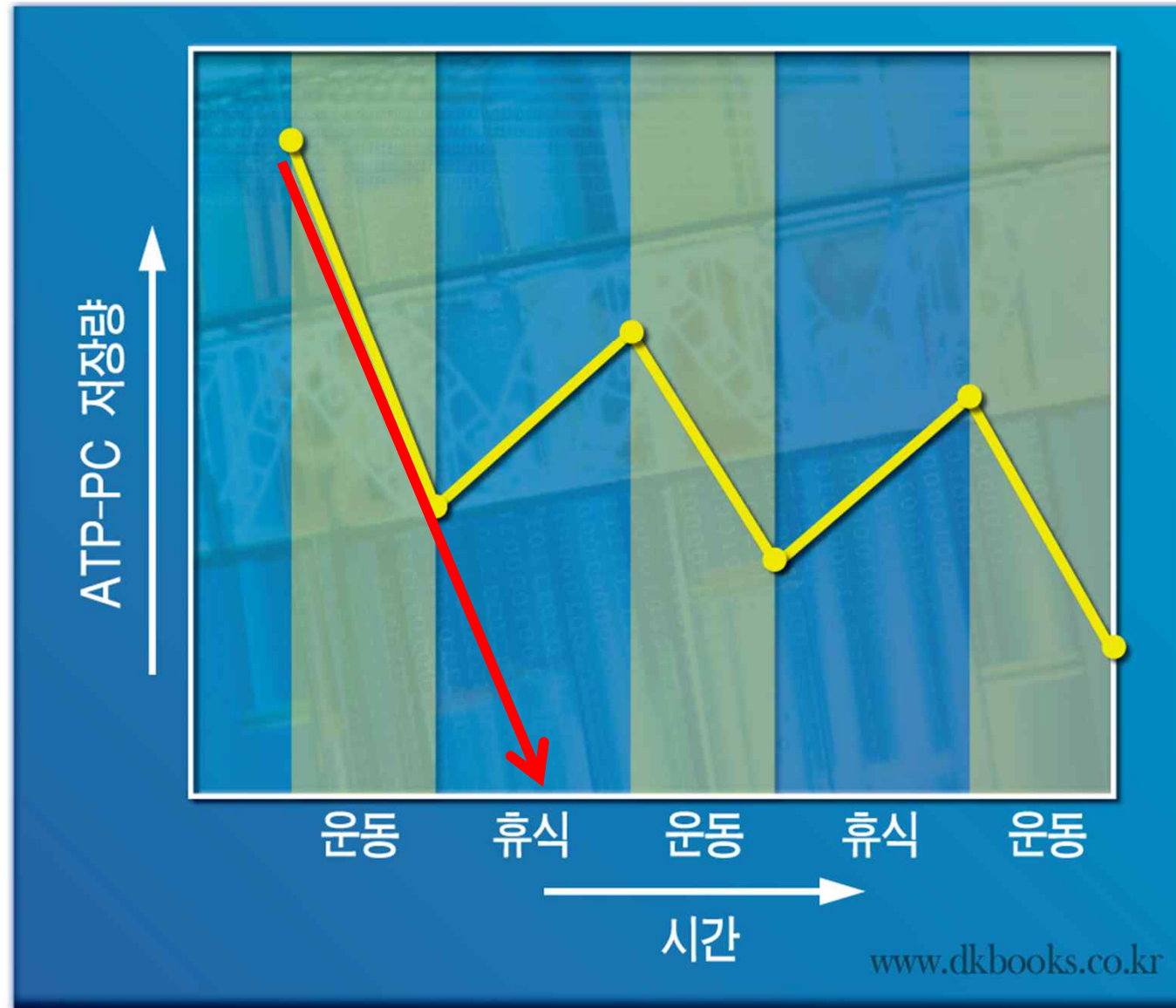
근글리코겐 고갈 + 혈중 글루코스 저하 + 체온 상승 + 탈수 등

표 4-2 ▶ 운동 중 각 연료로부터의 최대에너지생성률

www.dkbooks.co.kr

|              | 최대에너지생성률<br>(mmol/sec/kg) | 근육의 이용가능용량<br>(mmol/kg) | 최대에너지생성률<br>(kcal/hr/kg) | 최대수행시<br>고갈속도 |
|--------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|
| ATP          | 6.0                       | 6                       | 92.6                     | 10초           |
| PCr          | 6.0                       | 18                      | 92.6                     | 30초           |
| 무산소성 해당작용    | 1.5                       | 76.5                    | 23.1                     | 90초           |
| 유산소성 글루코스 분해 | 0.5                       | 3,000                   | 7.7                      | 100분          |
| 지방산분해        | 0.24                      | 무제한                     | 3.7                      | 무제한           |

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)



## 특정 에너지대사능력의 향상을 위한 인터벌트레이닝

표 4-4 ▶ 인터벌트레이닝과 운동량

www.dkbooks.co.kr

| 운동-휴식   | 총달린 거리(m) | 평균 산소소비량( $\ell/\text{min}$ ) | 혈중젖산농도( $\text{mg}\%$ ) |
|---------|-----------|-------------------------------|-------------------------|
| 4분 지속운동 | 1300      | 5.6                           | 150                     |
| 10초~5초  | 6667      | 5.1                           | 44                      |
| 10초~10초 | 4998      | 4.4                           | 20                      |
| 15초~30초 | 3329      | 3.6                           | 16                      |

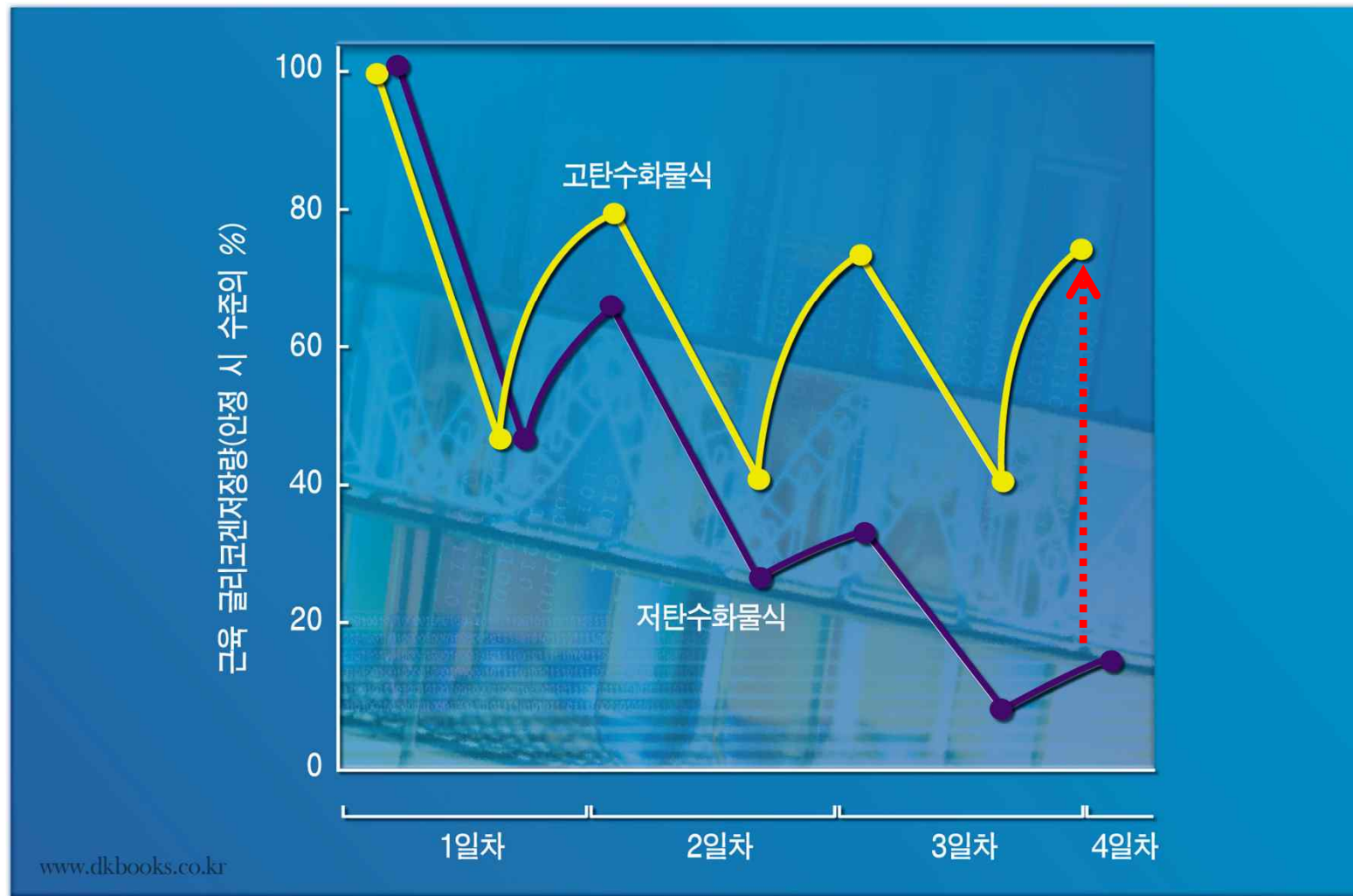


그림 4-11 3일간의 지구성훈련 시 탄수화물이 각각 40%와 70% 포함된 식사를 섭취했을 때 근육글리코겐저장량의 변화

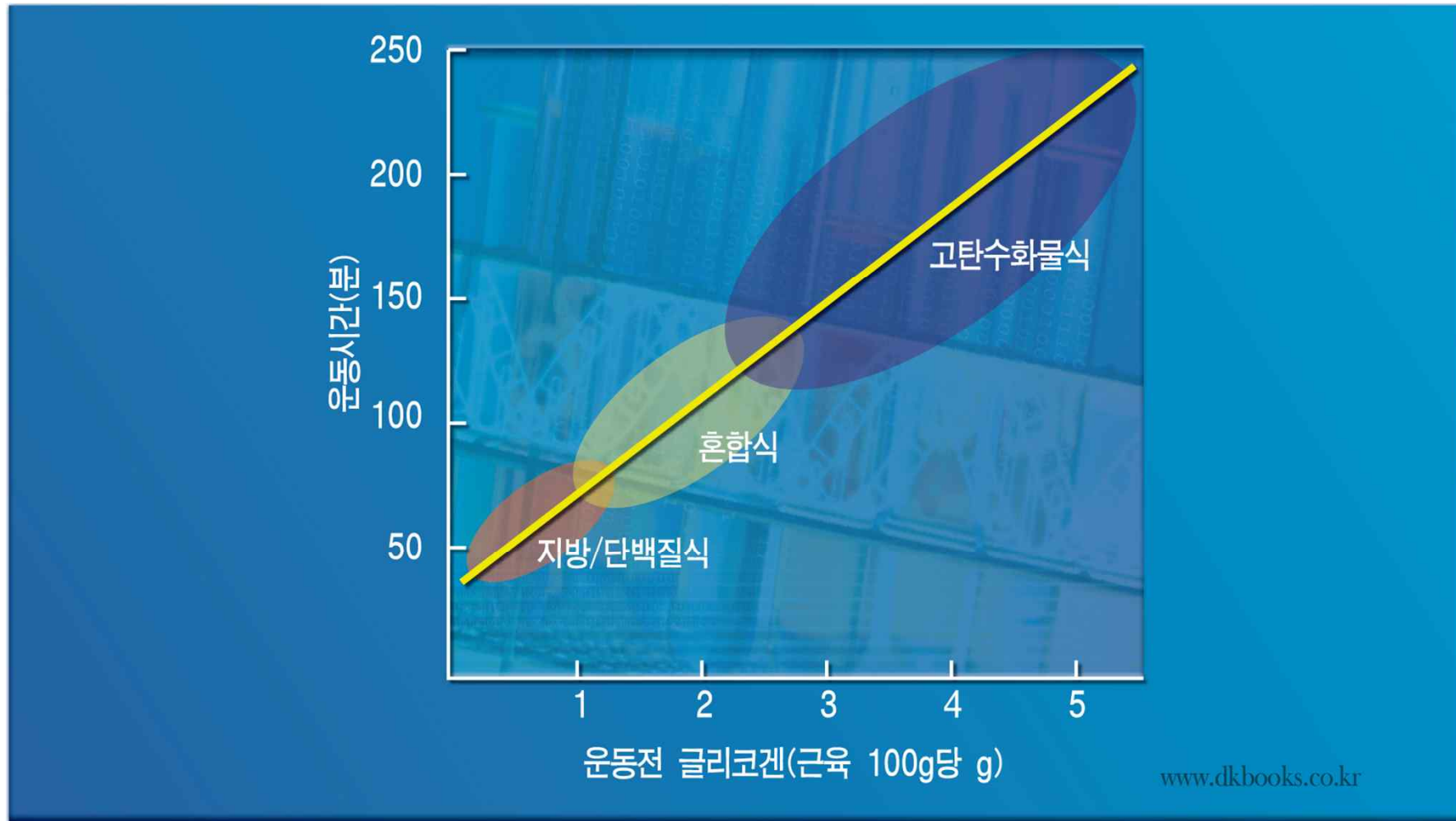


그림 4-12 근육글리코겐이 지구력에 미치는 영향

## 탄수화물 과보상

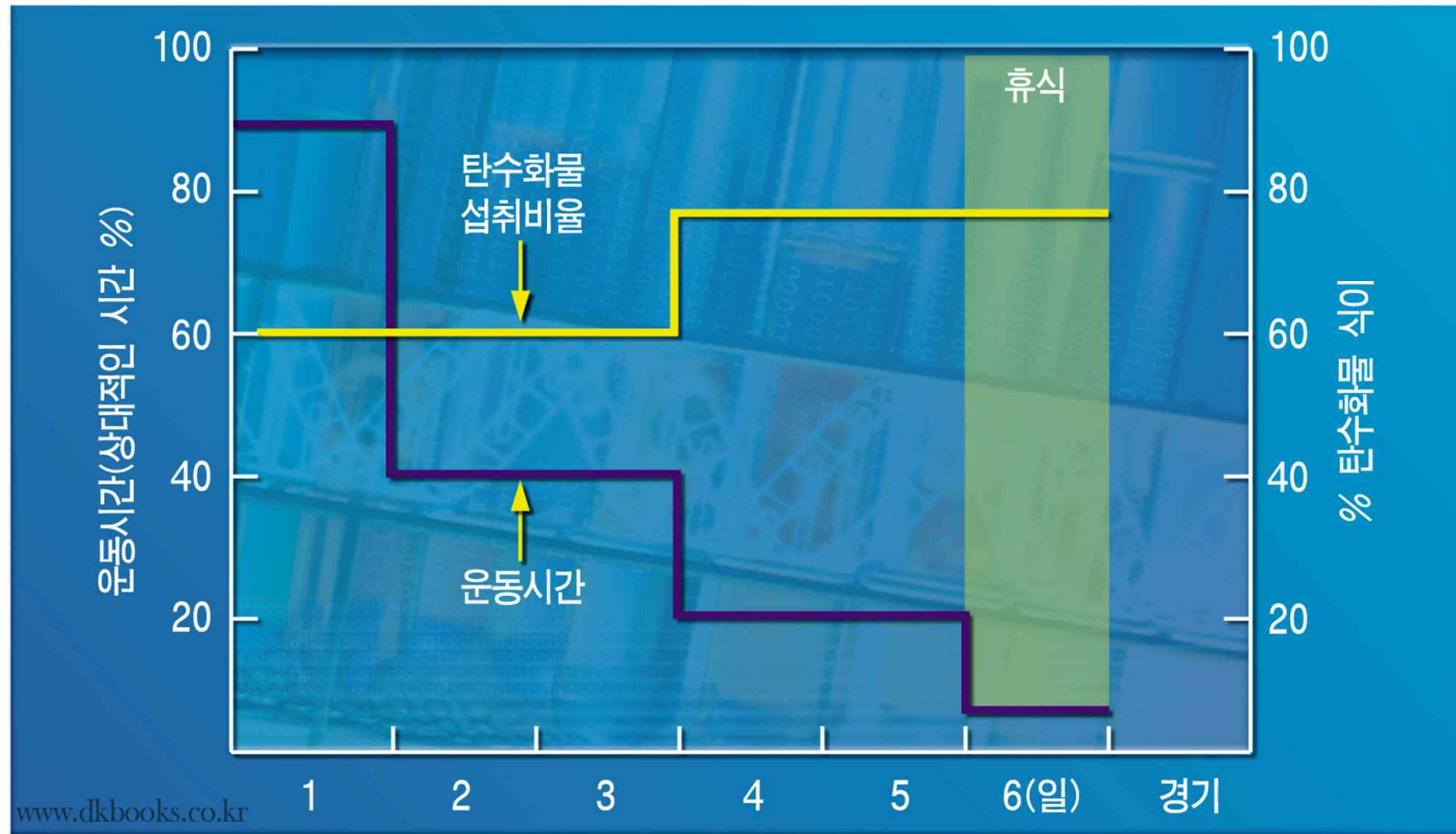


그림 4-13 경기를 1주 앞둔 탄수화물 부하(loading) 방법의 권장(예)

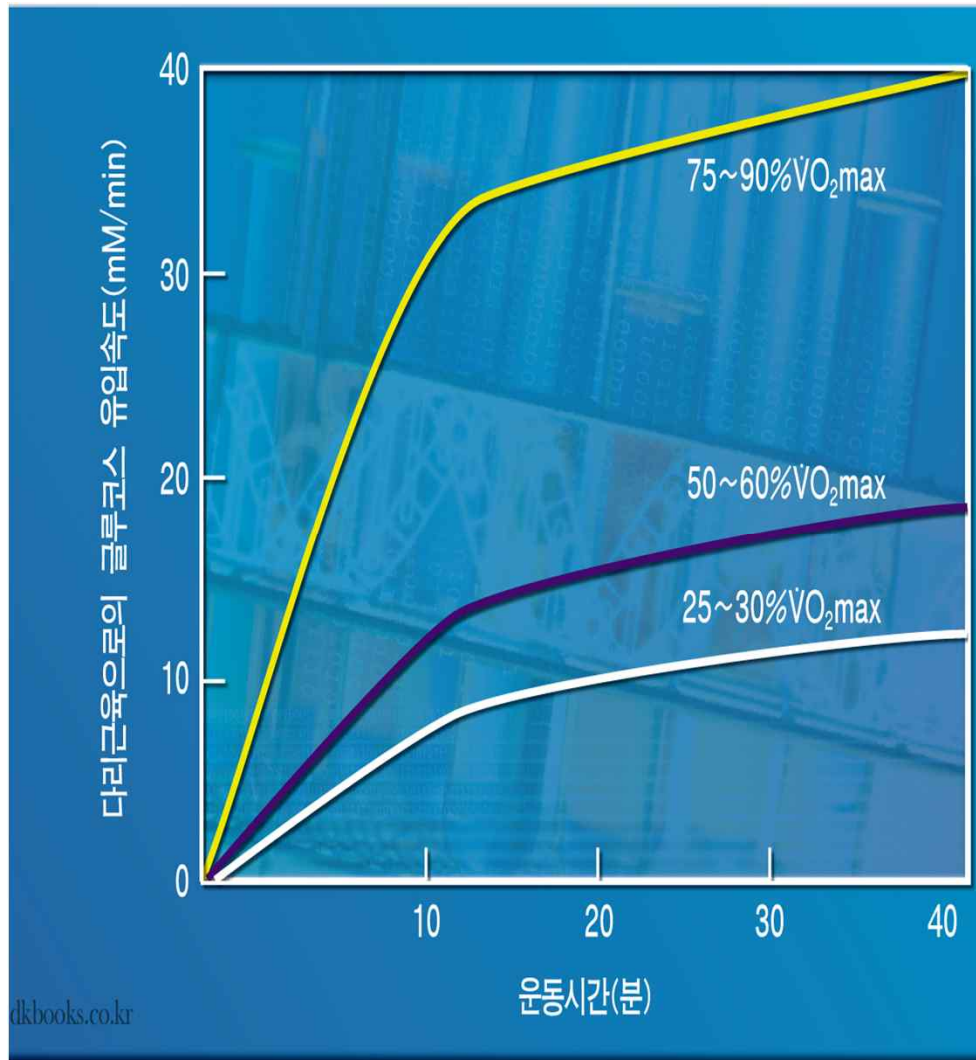
표 4-5 ▶ 여러 유형의 운동 시 저장연료의 고갈 정도

www.dkbooks.co.kr

| 운동유형           | 크레아틴인산 | 근육 글리코겐 | 혈중글루코스<br>간 글리코겐 | 근육중성지방<br>혈중지방산 |
|----------------|--------|---------|------------------|-----------------|
| 단시간 최대운동       | 크다     | 약간      | 거의 없다            | 거의 없다           |
| 정적 근육수축운동      |        |         |                  |                 |
| 간헐적 고강도운동      | 매우 크다  | 중간 정도   | 약간               | 약간              |
| 15분 이내 탈진운동    | 중간-크다  | 중간 정도   | 약간               | 거의 없다           |
| 15~60분의 탈진운동   | 중간 정도  | 중간 정도   | 중간 정도            | 거의 없다           |
| 60~150분의 탈진운동  | 중간 정도  | 중간-크다   | 중간-크다            | 약간              |
| 150분 이상의 고강도운동 | 중간 정도  | 매우 크다   | 크다               | 약간              |
| 가벼운 운동         | 거의 없다  | 거의 없다   | 약간               | 약간              |

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

## 탄수화물 이용에 영향을 미치는 요인



### ① 운동강도

→ 강도가 높을수록

→ 글루코스유입 속도  $\uparrow$

### ② 운동형태

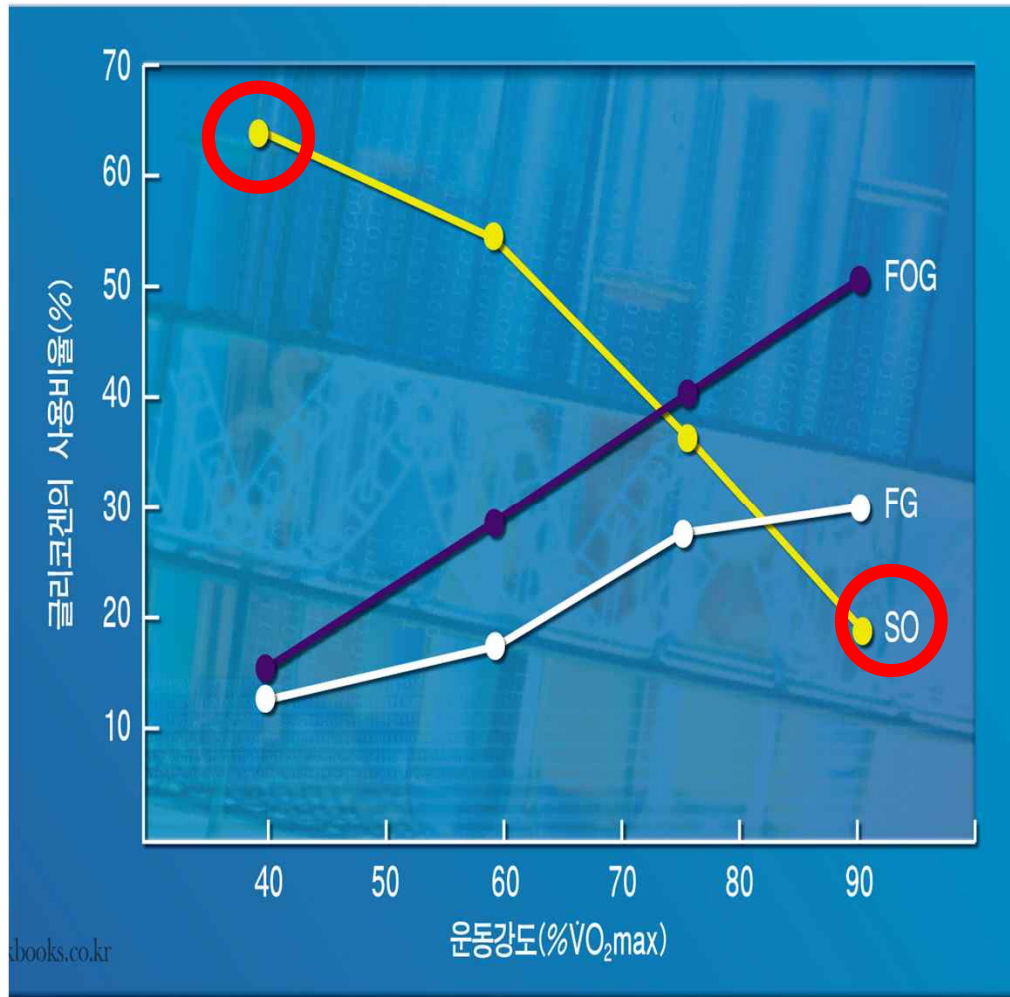
동일한 운동강도라도 운동형태에 따라 글리코겐 사용량 다름

예) 트레드밀 수평달리기보다  
경사달리기에서 글리코겐  
사용량이 더 큼

그림 4-14 세 가지 운동강도에서 사이클운동 시 다리근육으로의 **글루코스** 유입속도

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

## 탄수화물 이용에 영향을 미치는 요인



### ③ 근육섬유의 유형 - 글리코겐 사용비율

SO (slow twitch oxidative)

Type I → 낮은 강도 ↑

FOG(fast twitch oxidative glycolytic)

Type IIa

FG(fast twitch glycolytic)

Type II → 높은 강도 ↑

그림 4-15 VO<sub>2</sub>max의 40%, 60%, 75%, 90%에서 운동 시 근육섬유 유형별 글리코겐 사용 비율

## 운동 시 탄수화물의 섭취

1. 운동 전 탄수화물의 섭취 : 적어도 2시간 30분 이전 섭취

경기직전 인슐린 수준이 정상으로 회복

cf. 운동 1시간 전 탄수화물섭취 → 15~45분 이내 흡수

→ 혈중 글루코스 수준 ↑

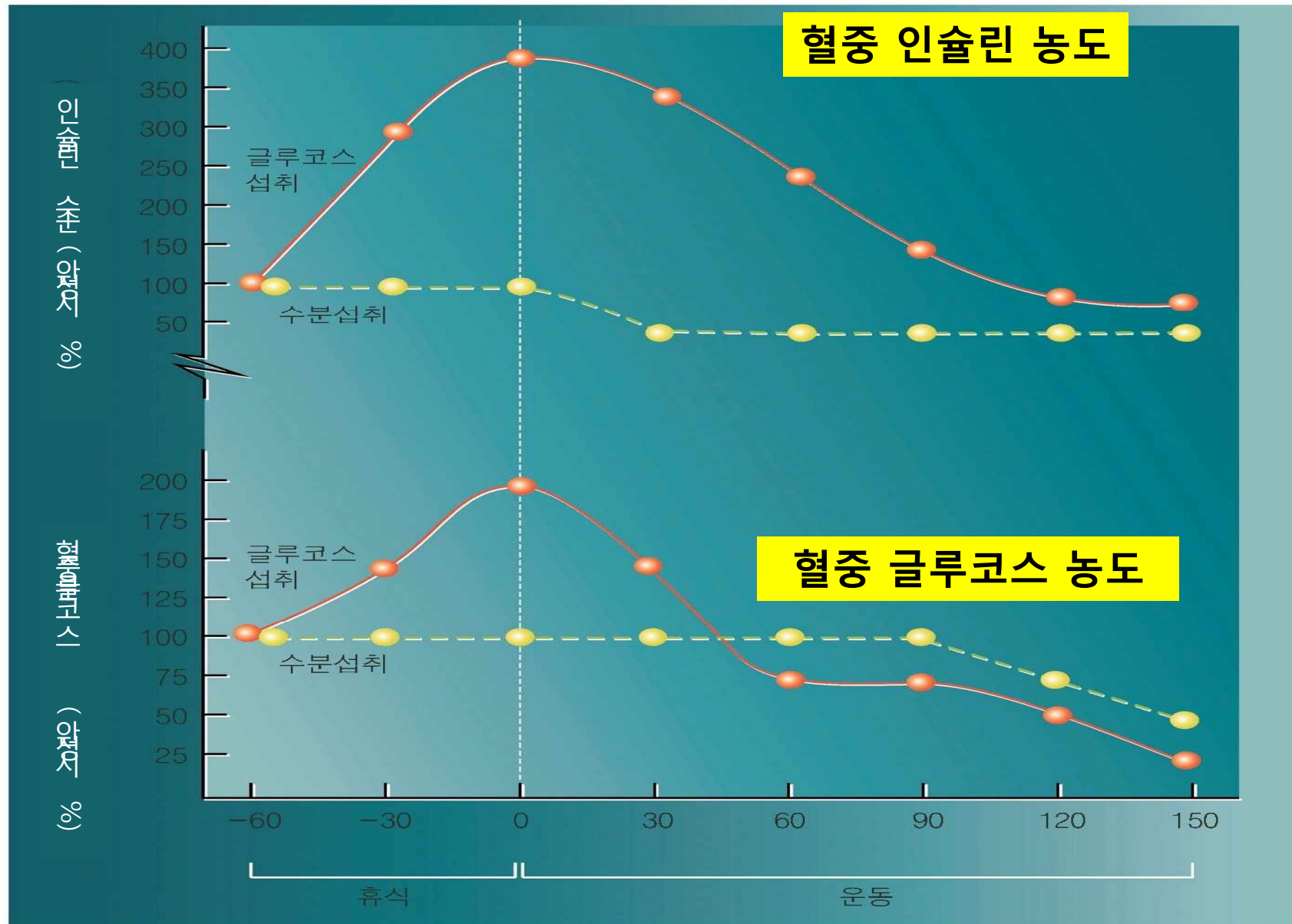
→ 인슐린 분비 ↑

→ 지방산의 동원 억제 & 근육글리코겐 고갈 촉진

2. 운동 중 탄수화물의 섭취 : 피로 예상시간 30분 전 섭취

3. 운동 후 탄수화물 섭취 : 가급적 경기 후 바로 섭취

글리코겐 합성효소(glycogen synthase)의 활성도 ↑



휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

그림 3-18. 운동 1시간 전 탄수화물 섭취가 혈중 글루코스와 인슐린에 미치는 영향

2. 운동 중 탄수화물의 섭취 : **피로 예상시간 30분 전** 섭취

→ 운동 중에는 교감신경계통의 흥분 → 인슐린분비 억제

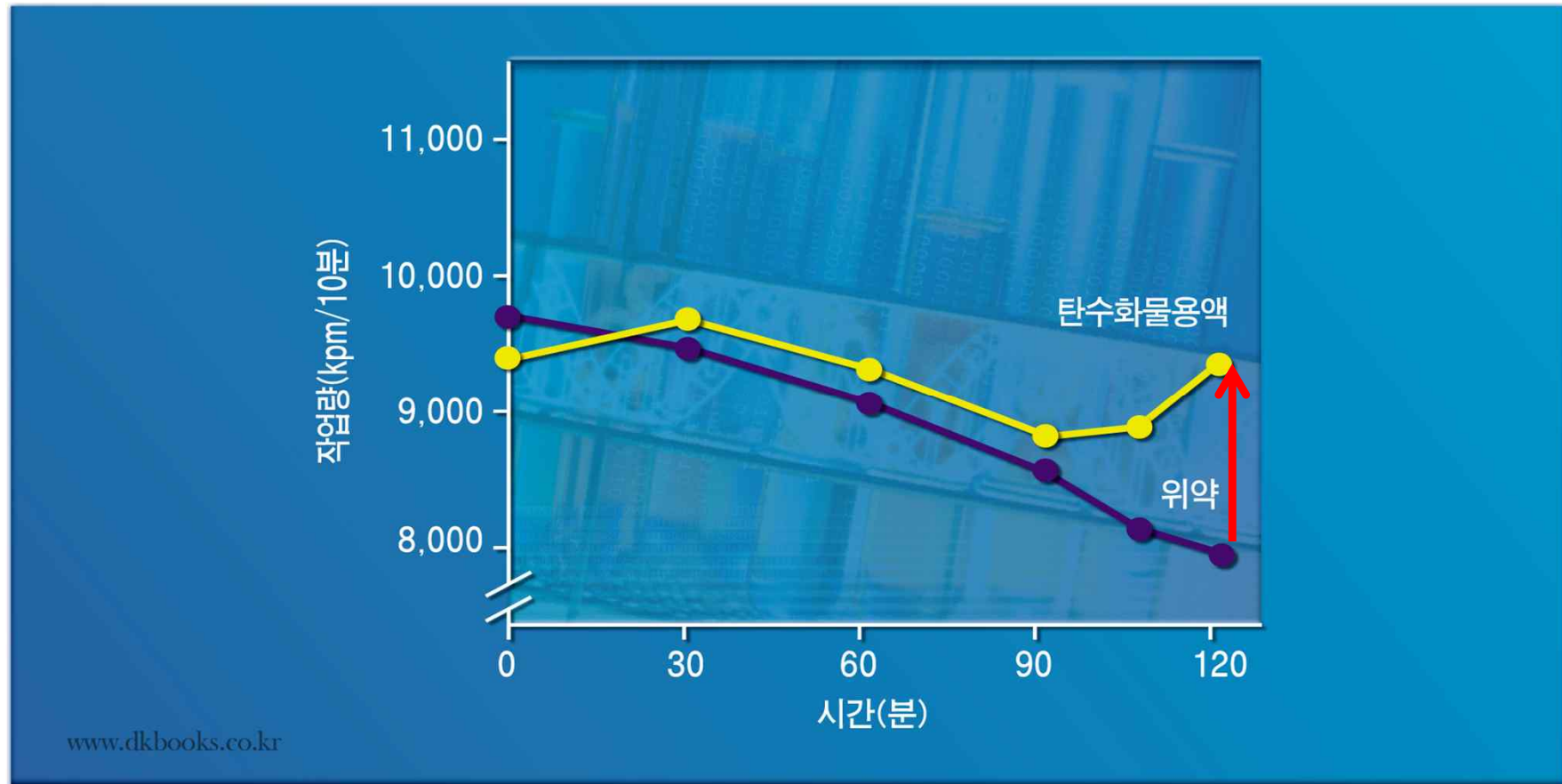


그림 4-16 탄수화물과 위약 투여가 2시간의 자전거타기 성적에 미치는 영향

3. 운동 후 탄수화물 섭취 : **가급적 경기 후 바로 섭취**

→ 운동 직후 글리코겐 합성효소(glycogen synthase)의 활성화도 최대

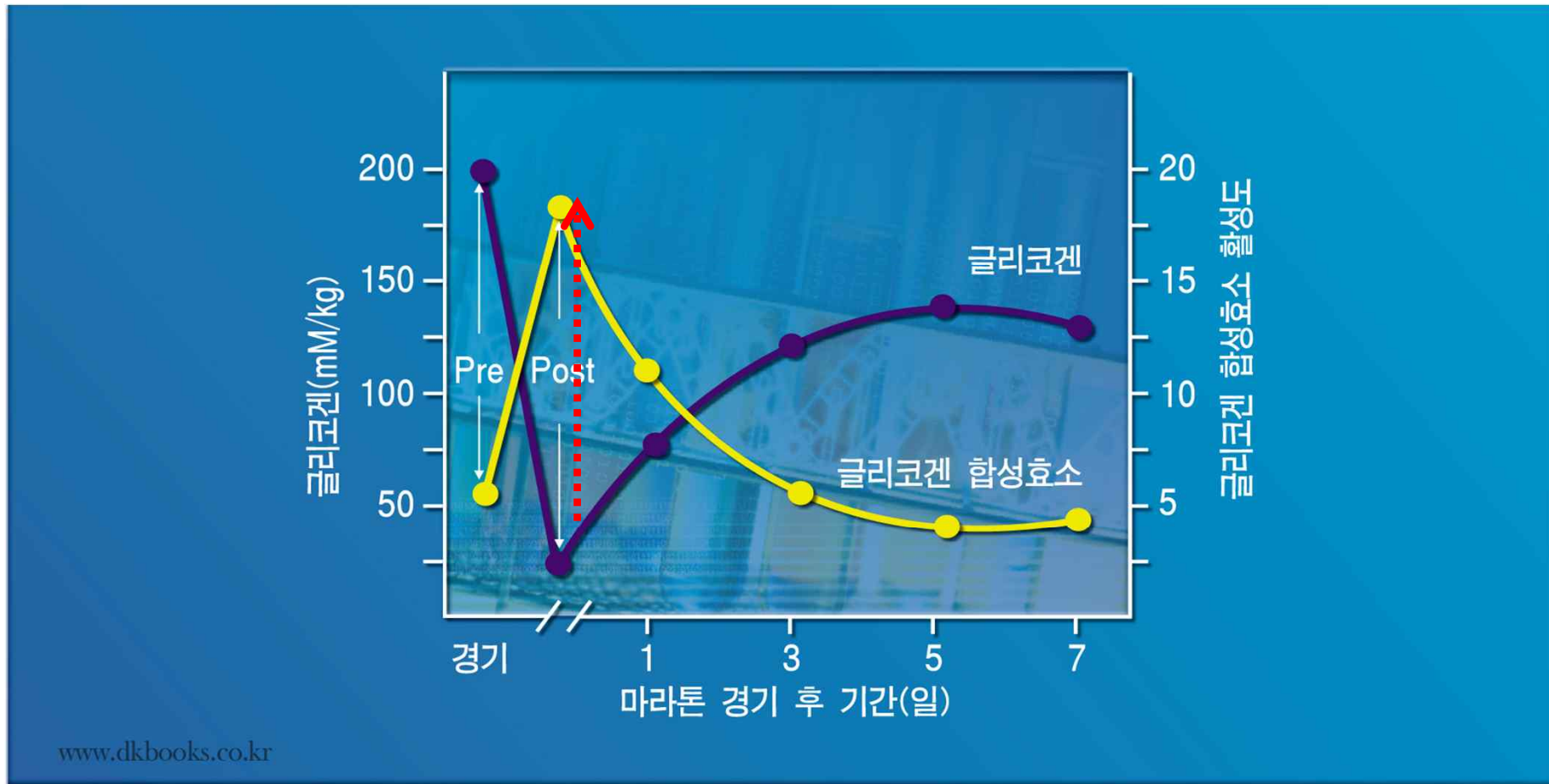
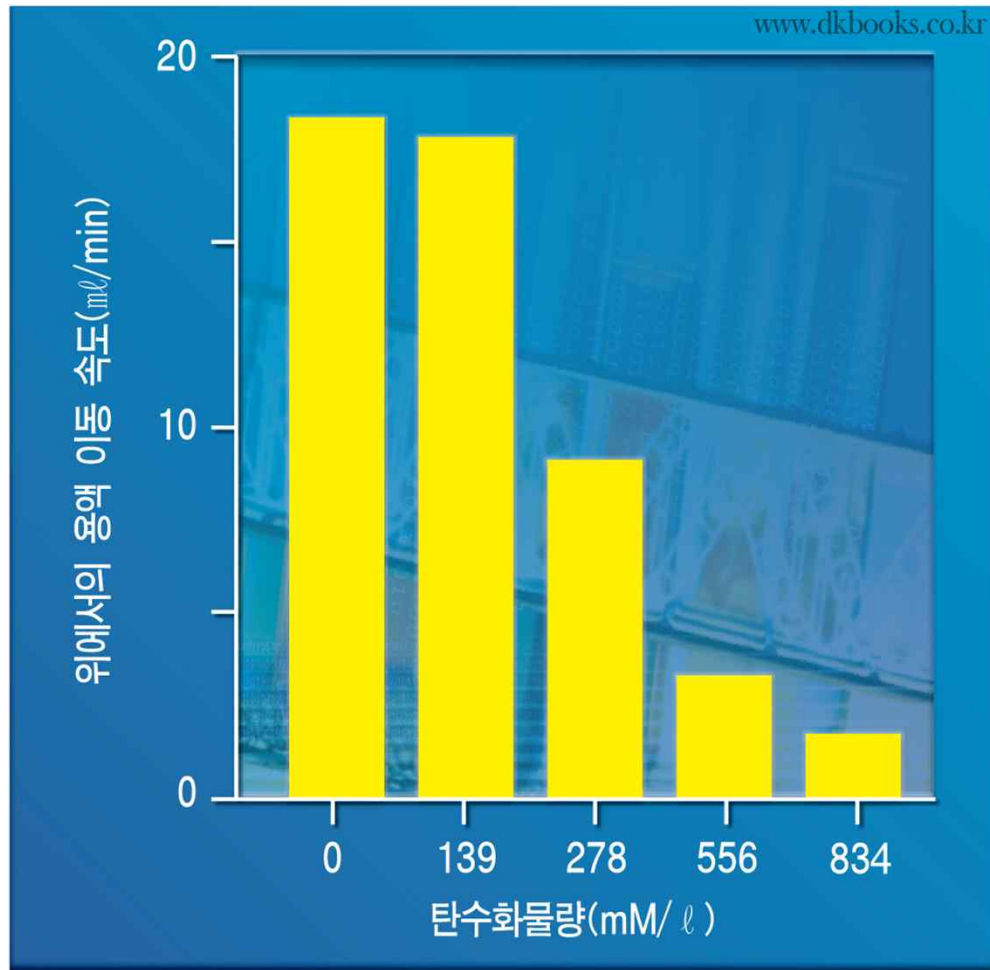


그림 4-17 마라톤경기 후 근육 글리코겐의 회복양상과 글리코겐 합성효소의 활성화도 변화

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

## 4. 탄수화물용액의 섭취방법

위배출속도(gastric emptying rate)는 용액의 분자농도(osmolality)와 관련



- 경기 수행 30~1시간 전 섭취는 운동 수행력 저하
- 다량의 체액손실이 우려되는 **열환경**에서는 1~3%의 **저농도글루코스** 용액의 섭취가 권장
- 장시간 운동 중 **탄수화물의 보충이 주목적일 때는 5~10% 용액**의 섭취가 권장

그림 4-18 용액의 탄수화물 농도와 위배출속도의 관계

휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

# 대사기능에 미치는 운동의 효과

## 1. 탄수화물 대사 기능의 개선

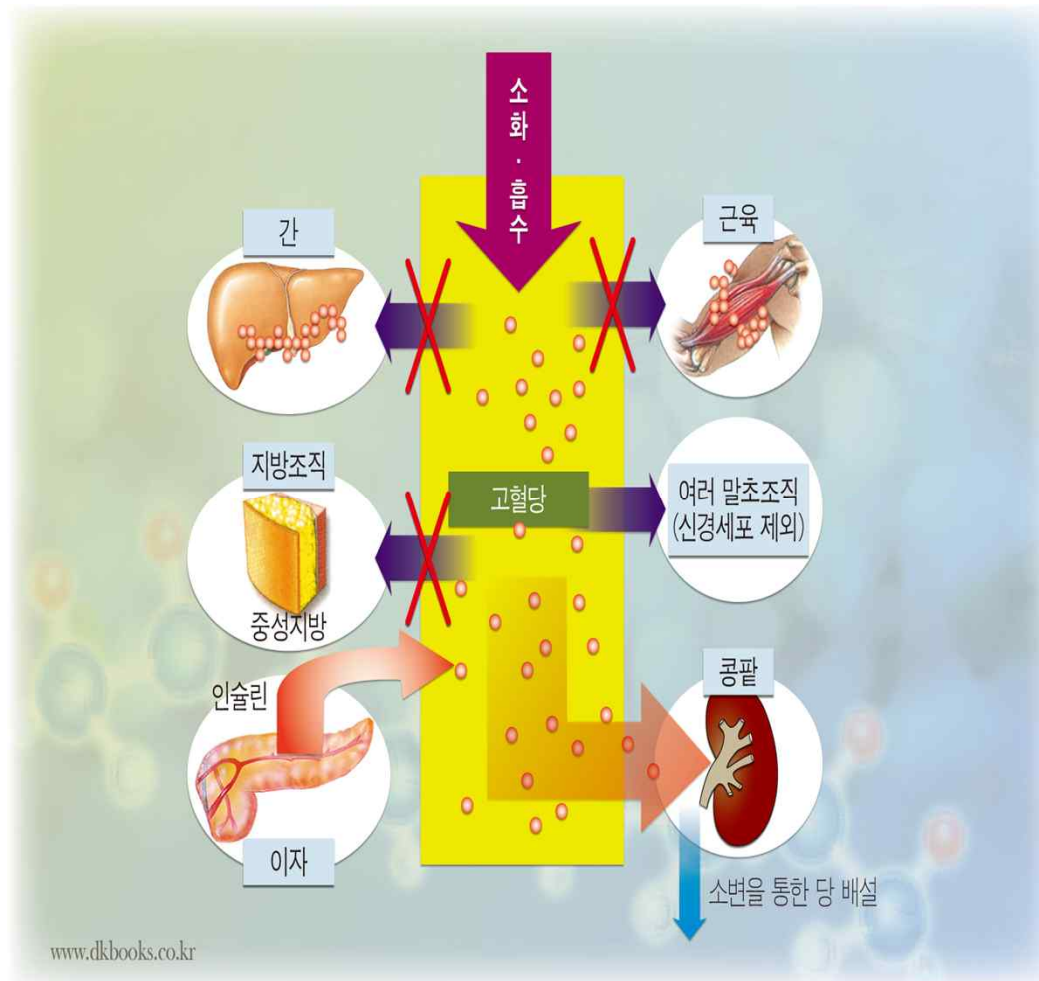


그림 4-19 인슐린저항성과 고혈당

### - 글루코스수송단백체

(glucose transporter: GLUT)

① 인슐린 의존성 경로

② **인슐린 비의존선성 경로**

운동 → AMPK 효소 활성화

(AMPK: AMP activated protein kinase)

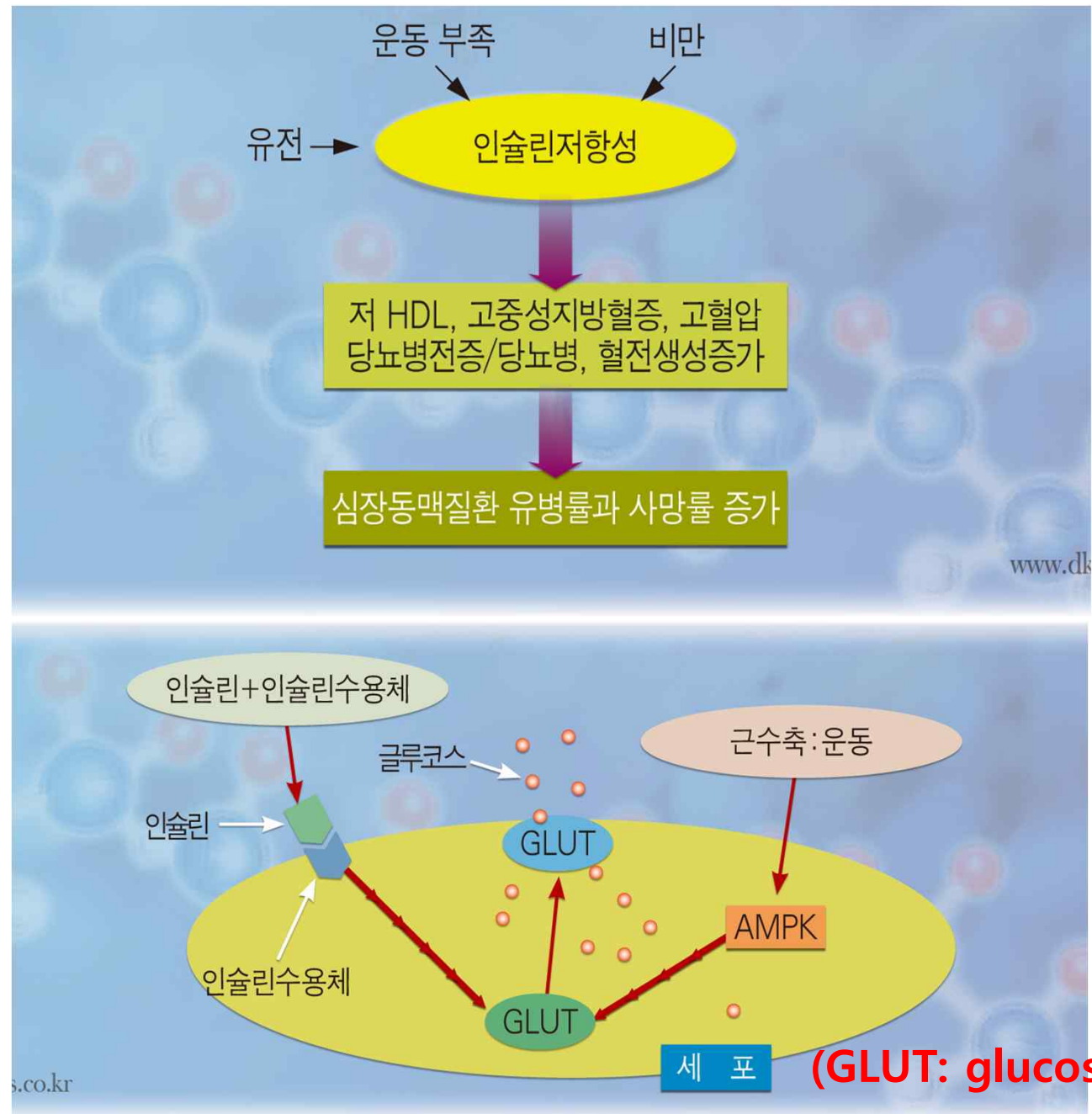




그림 4-22 운동에 의한 GLUT4의 세포막이동과 전사 촉진효과

## 대사기능에 미치는 운동의 효과

### 2. 지질대사 기능의 개선

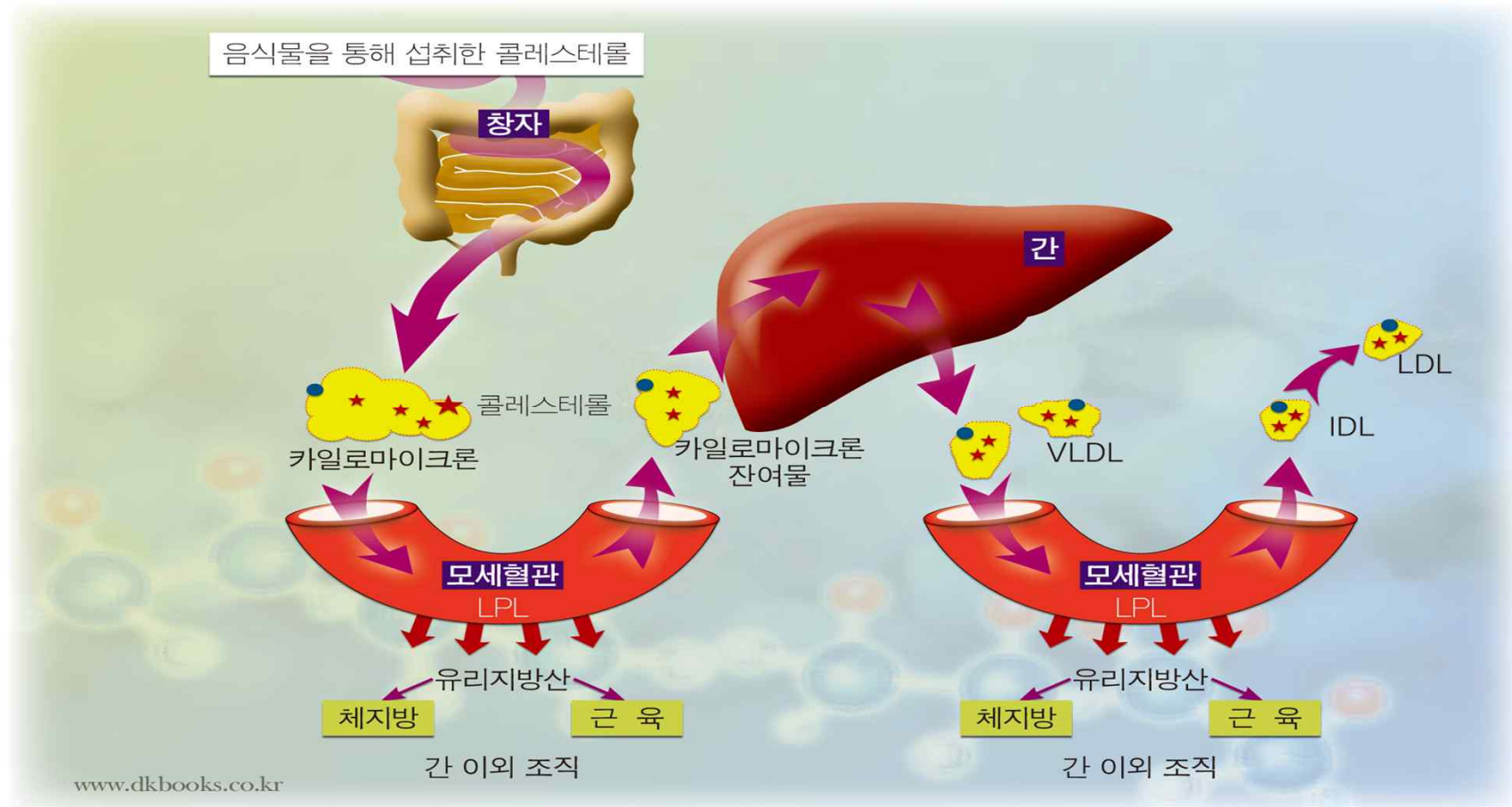


그림 4-23 지단백질의 체내 순환경로

표 4-6 ▶ 혈중지단백질의 종류와 특성

www.dkbooks.co.kr

| 종류                                   | 주요 생성장소   | 특징                                                                                       |
|--------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 카일로마이크론                              | 작은창자      | 식후 작은창자에서 합성되며 중성지방을 주로 운반한다. 생성 후 빠르게 분해되므로 공복상태에서는 존재하지 않는다.                           |
| VLDL<br>Very-low-density lipoprotein | 간         | 간에서 합성되는 밀도가 낮은 지단백질로 주로 <u>중성지방을 말초조직으로 운반한다.</u>                                       |
| LDL<br>Low-density lipoprotein       | 혈액 내에서 전환 | VLDL이 중성지방을 말초조직으로 제공한 후 LDL로 전환되는데, 효소(LCAT)의 작용에 의해 HDL로부터 <u>콜레스테롤을 받아 조직으로 운반한다.</u> |
| HDL<br>High-density lipoprotein      | 간         | <u>조직에서 간으로 콜레스테롤을 운반하며, 동맥벽에 침착된 콜레스테롤 등을 싣고 간으로 보내 재처리하게 하므로 동맥경화를 예방하는 작용을 갖고 있다.</u> |

반복적인 심폐지구성 운동

→ 지단백질분해효소(LPL)의 활성화도 ↑

- 혈중중성지방 ↓, 혈중총콜레스테롤 ↓, LDL-C ↓, HDL - C ↑

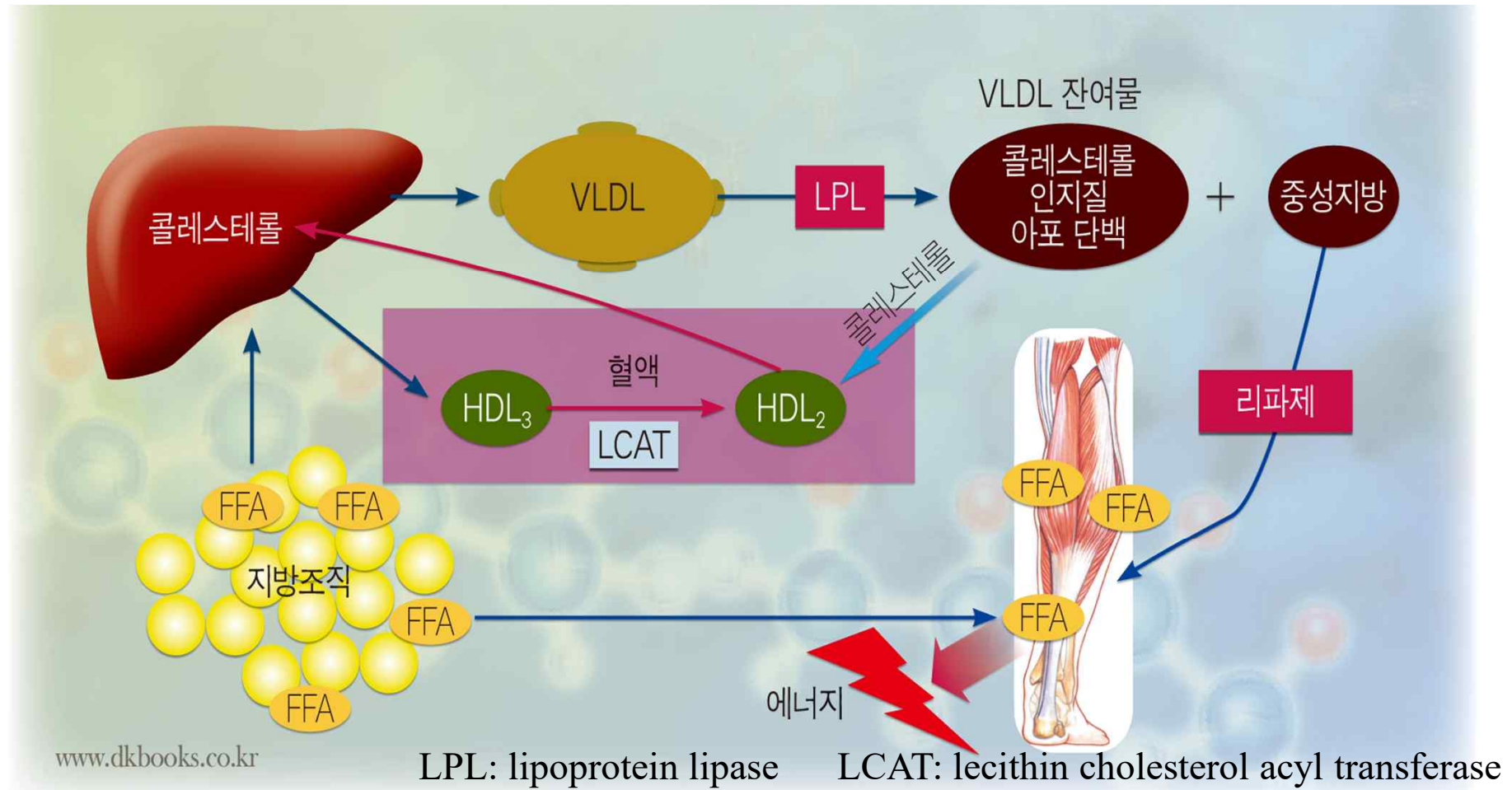


그림 4-25 운동을 통한 혈중지질상태의 개선기전



## 간단하게 정리해 보세요.

1. 단시간 최대운동 1-2분 내 탈진: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_고갈
2. 3분 - 15분내 탈진 운동: **인원질( PCr)**과 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_**축적** : 해당과정 및 유산소과정 효소활성 저하, 연결교(cross bridge)  
 작용 억제
3. 15분 - 60분 사이에 탈진: **유산소 및 무산소 근글리코겐 분해**  
**젖산축적**, \_\_\_\_\_**고갈** + **체온상승** + **탈수** 등
4. 60분 - 150분 사이에 탈진: **근글리코겐, 글루코스, 지방산 유산소분해**  
**근글리코겐 고갈** + **체온상승** + **탈수** 등
5. 150분 이상 수행하는 탈진운동: **근세포내 저장지방과 혈중지방산**  
**근글리코겐 고갈** + **혈중 글루코스 저하** + \_\_\_\_\_**상승** +  
 \_\_\_\_\_**등**



간단하게 정리해 보세요.

➤ 운동 시 탄수화물의 섭취는?

1. 운동 전 탄수화물의 섭취 : 적어도 \_\_\_\_\_이전 섭취
2. 운동 중 탄수화물의 섭취 : 피로 예상시간 \_\_\_\_\_전 섭취
3. 운동 후 탄수화물 섭취 : 가급적 경기 후 \_\_\_\_\_ 섭취