

지구성 운동훈련이 흰쥐의 하지 골격근 유리아미노산 조성에 미치는 영향

임현정 · 송영주* · 박태선[§]

연세대학교 생활과학대학 식품영양학과, 고려대학교 의과대학 생리학교실*

Effect of Endurance Exercise Training on Free Amino Acid Concentrations in Skeletal Muscles of Rats

Lim, Hyun Jung · Song, Youngju* · Park, Taesun[§]

Department of Food and Nutrition, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
Department of Physiology, College of Medicine,* Korea University, Seoul 136-705, Korea

ABSTRACT

The purpose of present study was to evaluate the effect of endurance exercise training on skeletal muscle free amino acid concentrations, and differences in free amino acid concentration between soleus muscle which consists of mostly slow twitch oxidative fiber and extensor digitorum longus muscle which consists of fast twitch oxidative glycolytic fiber. Sixteen male SD rats (4 weeks old) were randomly divided into two groups, and fed a purified AIN-93M diet with or without aerobic exercise training according to the protocol (running on the treadmill at 25 m/min for 60 min, 5 days a week) for 6 weeks. Exercise-training for 6 weeks significantly reduced the cumulative body weight gain ($p < 0.05$) and food efficiency ratio ($p < 0.01$) of rats. The result showing mitochondrial citrate synthase activity of soleus muscle was significantly higher in exercise-trained rats compared to the value for control animals ($p < 0.01$) indicates aerobic exercise-training was successfully accomplished in the trained group. No difference was found in the muscle aminogram pattern between soleus muscle and extensor digitorum longus muscle of control animals. However, free amino acid concentrations of soleus muscle were from 1.2 to 3.9 times of those found in extensor digitorum longus muscle of control rats, depending on an individual amino acid. Intermediate level of endurance exercise training for 6 weeks did not influence concentrations of most of free amino acid in soleus muscle of rats collected at an overnight fasted and rested state. In contrast, isoleucine and leucine concentrations in extensor digitorum longus muscle of exercise-trained rats were significantly lower than those for control animals. These results indicate that aerobic energy metabolism had not been efficiently conducted, and thereby the utilization of BCAA for energy substrate was enhanced in fast twitch oxidative glycolytic fibers of extensor digitorum longus muscle of rats followed exercise-training protocol for 6 weeks. (*Korean J Nutrition* 35(10) : 1031~1037, 2002)

KEY WORDS: endurance exercise training, free amino acid concentrations, soleus muscle, extensor digitorum longus muscle, rats.

서 론

당질과 지방을 주된 에너지원으로 이용하는 유산소 운동 훈련은 개체의 최대산소 섭취량을 증가시키고,^{1,2)} 인슐린 감수성을 개선하며^{3,4)} 포도당수송체 (GLUT4) 활성을 증가시키므로써 당질대사 기능을 촉진시키는 것으로 알려져 있다.^{5,6)} 또한 지방의 산화와 관련하여 유산소운동은 근육세포막의 지방산 수송단백질 (fatty acid binding protein of plas-

ma membrane FABPpm)의 활성을 증가시키고,⁷⁾ 유리 지방산의 이용률 및 근육내 TCA 회로 효소의 활성을 증가시키는 것으로 보고되었다.⁷⁻¹⁰⁾

한편, 지구성운동이 단백질대사에 미치는 영향을 살펴보면 중등 강도의 지구성 운동을 수행하는 경우 골격근의 수축을 위한 에너지원으로 단백질이 직접 이용되지는 않지만, 운동 후 일어나는 포도당 생합성과정을 위해 운동수행 중 아미노산 분해율이 증가되는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 특히, 골격근에서 주로 이용되는 BCAA (branched chain amino acid)는 운동 수행 중 근육내 글리코젠이 고갈되는 시기에 그 이용이 증가하며, 이러한 BCAA의 이용을 증가시키기 위해 BCKDH (branched chain α -keto acid dehy-

접수일: 2002년 9월 30일

채택일: 2002년 11월 27일

[§]To whom correspondence should be addressed.

drogenase)의 활성 또한 증가하는 것으로 보고되고 있다.¹²⁾ 이러한 현상은 장기간 규칙적인 지구성 운동훈련을 받은 동물이나 인체에서 더욱 두드러지게 나타나는데, 이는 포도당 생합성을 위한 기질로 BCAA를 이용하려는 능력이 운동훈련에 의해서 증가되었음을 의미한다. 규칙적인 지구성 운동훈련을 받은 흰쥐를 대상으로 24시간 절식상태에서 채취한 근육의 BCKDH 활성을 측정된 연구결과¹³⁾에 의하면 운동훈련군의 경우 비훈련대조군에 비해 근육조직의 BCKDH 활성이 유의하게 증가하였음이 관찰되었다. 또한, 운동 중 혈중 유리아미노산 농도의 변화를 살펴본 연구결과에 의하면 운동을 수행함에 따라 혈중 BCAA 대 AAA (aromatic amino acid: tyrosine, phenylalanine) 농도의 비율이 감소함이 보고되었다.¹⁴⁾ 특히 운동시간이 길어질수록 혈중 BCAA 농도는 감소하고 AAA 농도는 증가하는데, 이와 같은 현상은 운동수행에 따른 중추 피로감의 원인이 되는 것으로 풀이되고 있다.¹⁵⁾

장기간의 규칙적인 지구성 운동훈련이 하지 골격근의 유리아미노산 조성에 미치는 영향에 관한 연구는 아직까지 많이 보고되어 있지 않다. 골격근 섬유에 따른 근육내 유리아미노산 농도의 차이를 평가한 선행연구에 의하면, 일반적으로 지근섬유의 경우 속근섬유보다 유리아미노산 농도가 더 높은 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 현재까지의 연구보고에서는 속근을 대표하는 근육으로 주로 비복근의 유리아미노산 농도에 관한 연구가 진행되었고, 실제로 속근섬유의 비율이 비복근에 비해 더 높은 장지신근의 유리아미노산 농도에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구는 지근섬유의 비율이 높은 가자미근과 속근섬유의 비율이 높은 장지신근을 대상으로 이들 근섬유의 종류에 따른 유리아미노산 농도의 차이를 비교·분석하고, 아울러 장기간의 지구성 운동훈련이 근육의 유리아미노산 조성에 미치는 영향을 근섬유 종류별로 평가하고자 시도되었다.

재료 및 방법

1. 실험동물의 사육 및 지구성 운동훈련의 실시

6주령의 Sprague-Dawley (SD)계 흰쥐 16마리를 1주일간 예비 사육하여 실험실 환경에 적응시킨 후 운동훈련 유무에 따라 대조군 (control group, C)과 운동훈련군 (exercise-trained group, E)의 두 군으로 분류하였다. 동물 사육실의 환경은 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$ 로 조정하였고, 12시간 명암주기를 유지하였다. 대조군과 운동훈련군의 사육에 이용된 식이는 AIN-93M에 준해 조제된 정제사료이며, 물과 함께 자유급식시켰다. 매일 일정한 시각에 식이

량을 측정하였으며, 몸무게는 1주일에 한번씩 측정하였다. 식이효율은 총식이섭취량을 총체중증가량으로 나눈 값으로 구하였다.

운동훈련군의 경우 실험식으로 사육하면서 매일 아침 일정한 시각 (오전 10시)에 소동물용 트레드밀 (Dual-treadmill, 대종기기)을 이용하여 운동 부하훈련을 6주간 실시하였다. 지구성 운동훈련을 시작하는 첫 주에는 실험동물은 운동 부하훈련에 적응시키기 위하여 15 m/min의 속도로 20분간 주행운동을 실시케 하였고, 점차로 주행속도와 시간을 증가시켜 최종적으로 25 m/min의 속도에서 60분씩 주당 5회의 빈도로 실험동물에게 주행 운동훈련을 실시하였다. SD 흰쥐에 있어서 25 m/min의 운동강도는 최대산소섭취량의 약 70%에 해당하는 운동강도인 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾

2. 조직의 채취

6주간의 실험식이 사육 및 지구성 운동훈련을 마친 후 18시간 공복상태에서 에테르 마취 하에 실험동물을 희생시켰다. 운동훈련군의 경우, 해부 48시간 전에 운동을 종료함으로써 일시적인 운동에서 오는 영향을 배제하였다.

하지의 골격근 중에서 가자미근 (soleus muscle)과 장지신근 (extensor digitorum longus muscle)을 각기 적출하였으며, 액체질소를 이용하여 급속 동결시킨 후 아미노산 조성 및 효소 활성을 분석할 때까지 -80°C 에 보관하였다.

3. Citrate synthase 활성의 측정

Citrate synthase (CS) 활성의 측정을 위해 일정량의 가자미근을 100 mM KHPO_4 완충용액에 균질화한 후 미토콘드리아막을 파괴하기 위하여 동결 용해를 3회 반복하고, Srere¹⁷⁾의 방법에 준하여 효소 활성을 측정하였다. 즉 0.1M KHPO_4 0.6 ml, 3 mM acetyl Co A 0.1 ml, 1 mM DTNB 0.1 ml, 근육 효소액 0.1 ml를 각기 혼합한 후 30°C , 340 mm에서 흡광도를 측정하였으며, 여기에 다시 5 mM oxaloacetate 0.1 ml를 반응시켜 흡광도의 변화를 측정하였다. 효소의 활성은 $\mu\text{mol/g tissue}$ 로 제시하였다.

4. 근육의 유리아미노산 농도 측정

일정량의 가자미근과 장지신근을 0.05M potassium phosphate buffer (pH 6.8)에서 균질화하여 10% (w/v) 균질액을 형성하였으며, 4°C $20,000 \times g$ 에서 30분간 원심분리한 후 상층액을 모아서 유리아미노산 농도 분석 시까지 -70°C 에 냉동 보관하였다. 근조직의 유리아미노산 농도를 측정하기 위해 1.5 ml microeppendorf tube에 근육시료 100 μl 를

취하고, internal standard로 사용된 1 mM norleucine (Sigma Chemical Co., U.S.A.) 20 µl과 10% sulfosalicylic acid 25 µl을 가하여 세계 혼든 후 4°C에서 1시간 동안 방치하였다. 12,000 × g에서 5분간 원심분리하여 단백질을 제거시킨 후 상층액을 깨끗한 tube에 옮겨놓고, 아미노산 농도를 분석하기 직전에 0.2 µm filter (Gelman aerodisc LC PVDF)를 통해 여과시켰다.

시료의 아미노산 농도는 ion-exchange chromatography¹⁸⁾에 입각한 아미노산 전용분석기 (Biochrom 20, Pharmacia Biotech, Cambridge, England)를 사용하여 측정하였다. Lithium high performance column으로부터 근육 조직에 함유된 각 생체 유리아미노산을 성공적으로 분리시키기 위해서 이동상으로 pH와 이온 농도를 단계적으로 증가시킨 lithium citrate buffer를 25.0 ml/h의 유속에서 사용하였다 (0.2M, pH 2.80; 0.30M, pH 3.00; 0.50 M, pH 3.15; 0.90M, pH 3.50; and 1.65M, pH 3.55). Column을 통해 분리된 각 아미노산을 ninhydrin과 반응시켜 보라색의 착색물을 형성한 후 440 nm와 570 nm에서 흡광도를 각기 측정하였다. 산성이 강한 phosphoserine이 가장 먼저 column을 빠져나오고 taurine과 phosphoethanolamine이 그 뒤를 이었으며, 염기성이 강한 arginine이 마지막으로 분리되기까지 총 125분이 소요되었고, column을 씻어내고 재정비하여 다음 sample이 주입되기까지는 총 150여 분이 소요되었다.

반복실험의 오차계수 (coefficient of variation)는 5% 이내이었으며, internal standard를 시료에 첨가시키므로써 시료의 전처리 및 분석과 정에서 발생하는 손실을 보정하였다. 근육의 유리아미노산 농도는 µmol/g tissue로 제시하였다.

5. 통계처리

모든 분석수치는 SPSS/PC 10.0 프로그램을 이용하여 Mean ± SEM으로 나타내었다. 대조군과 운동훈련군 간의 평균값의 차이에 대한 유의성은 unpaired Student's t-test를 이용하여 p < 0.05, p < 0.01 및 p < 0.001 수준에서 각기 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 체중 증가량 및 식이효율

실험기간동안 각 군별 일일 식이섭취량, 체중 증가량, 식이효율 및 하지 근육중량에 대한 결과가 Table 1에 나타나 있다. 실험을 시작할 당시의 체중은 대조군과 운동훈련군

Table 1. Daily food intake, food efficiency ratio and muscle weights of control rats and exercise-trained rats

	C	E
Food intake (g/day)	17.3 ± 0.49	16.2 ± 0.25
Initial body weight (g)	176 ± 2.1	176 ± 1.8
Final body weight (g)	342 ± 7.6	296 ± 8.8*
Weight gain (g/6 wks)	116 ± 7.4	79.8 ± 1.2**
FER	0.187 ± 0.007	0.133 ± 0.007*
Soleus muscle wt (mg/100 g BW)	41 ± 1.2	44 ± 1.2
Extensor digitorum longus muscle wt (mg/100 g BW)	43 ± 0.6	46 ± 1.6

Values are mean ± SEM of 8 rats.

C : non exercised control rats

E : exercise-trained rats (running on the treadmill at 25 m/min for 60 min, 5 days a week)

*, **: Significantly different compared to the value for control rats by unpaired Student's t-test at *: p < 0.05, and **: p < 0.01, respectively.

FER (Food efficiency ratio) =

$$\frac{\text{Body weight gain for experimental period (g/day)}}{\text{Food intake for experimental period (g/day)}}$$

간에 차이가 없었으나, 6주간의 실험사육 및 운동훈련이 종료된 후 대조군과 운동훈련군의 체중은 각기 342 ± 7.6 g 과 296 ± 8.8 g으로 나타나 운동훈련에 의한 유의한 체중 감량효과가 나타났다 (p < 0.05). 일일 식이섭취량은 대조군 (17.3 ± 0.49 g/day)과 운동훈련군 (16.2 ± 0.28 g/day)간에 유의한 차이가 없었으나, 식이효율에 있어서는 운동훈련군이 0.13 ± 0.004로 대조군 (0.19 ± 0.007)에 비하여 유의하게 더 낮았다 (p < 0.01). 이와같이 본 실험에서 운동훈련군이 대조군에 비해 체중증가량 및 식이효율이 더 낮게 나타난 것은 최대산소 섭취량의 70% 전후에 해당되는 운동강도로 6주간 실시한 유산소 운동훈련에 의해 체지방의 연소가 일어났기 때문인 것으로 생각된다.

체중 100 g당 하지 골격근의 무게를 측정한 결과, 대조군의 경우 가자미근의 중량이 4.1 ± 1.2 mg/100 g body wt, 그리고 장지신근의 중량이 43 ± 0.6 mg/100g body wt로 나타났다. 통계적으로 유의한 수준은 아니었으나 운동훈련군의 가자미근 및 장지신근 중량이 모두 대조군에 비해 높은 경향을 나타내, 규칙적인 유산소성 운동훈련에 의해 골격 근육량의 증가가 일어났음을 짐작할 수 있다.

2. 근육의 Citrate synthase 활성

6주간의 지구성 운동훈련을 실시한 후 공복상태에서 채취한 하지 골격근의 citrate synthase (CS) 활성을 측정 한 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. CS 효소는 미토콘드리아 내에서 진행되는 TCA 회로의 첫 단계에서 citrate를 합성

하는 과정을 촉매하며, 일반적으로 유산소성 운동에 의하여 그 활성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 6주간 실시된 운동훈련 프로토콜이 유산소성 운동훈련의 효과를 나타냈는지를 판정하는 지표로서 가자미근의 CS 활성을 이용하였다.

지근섬유의 비율이 높아 유산소성 운동 시 주로 사용되는 가자미근을 이용하여 CS 활성을 측정한 결과, 운동훈련군의 경우 ($56.8 \pm 4.0 \mu\text{mol/g tissue}$) 대조군 ($42.9 \pm 1.9 \mu\text{mol/g tissue}$)에 비해 유의적으로 더 높게 나타나 ($p < 0.01$) 선행 연구결과¹⁹⁾와 일치하였으며, 결과적으로 운동훈련군의 경우 충분한 유산소성 운동훈련이 이루어진 것으로 생각되어 진다.

3. 근섬유의 종류에 따른 유리아미노산 조성의 차이

속근섬유와 지근섬유에 따른 유리아미노산 조성의 차이를 평가하기 위하여 운동훈련을 받지않은 대조군을 대상으로 장지신근과 가자미근의 유리아미노산 농도를 측정하여 aminogram을 작성한 결과가 Fig. 2에 제시되어 있다.

장지신근의 경우 taurine이 $43.8 \mu\text{mol/g tissue}$ 로 가장

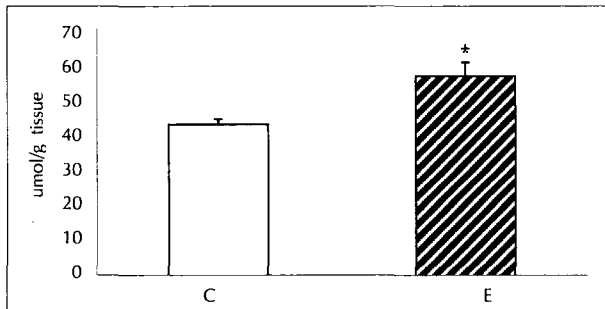


Fig. 1. Citrate synthase activities in soleus muscle of control rats and exercise-trained rats. Values are mean \pm SEM of 8 rats. C: non exercised control rats. E: exercise-trained rats (running on the treadmill at 25m/min for 60min, 5 days a week). *: Significantly different compared to the value for control rats by unpaired Student's t-test at $p < 0.01$.

높았고, 그 다음이 alanine ($22.6 \mu\text{mol/g tissue}$), glutamine ($13.1 \mu\text{mol/g tissue}$), asparagine ($8.1 \mu\text{mol/g tissue}$), 그리고 serine ($8.0 \mu\text{mol/g tissue}$)의 순으로 나타났으며, isoleucine, aspartate, methionine, tyrosine, cystine 및 ornithine 등은 $1.7 \mu\text{mol/g tissue}$ 이하로 존재하여 상대적으로 그 함량이 매우 낮은 패턴을 보였다. 가자미근의 경우에도 유리아미노산 중 taurine 농도가 $73.0 \mu\text{mol/g tissue}$ 로 가장 높았고, 그 다음이 alanine, glutamate, glutamine, 그리고 serine의 순으로 나타났으며, isoleucine, methionine, tyrosine, cystine 및 ornithine의 농도는 상대적으로 매우 낮아 장지신근에서와 유사한 aminogram 패턴을 보였다. 즉, 근섬유의 조성과 무관하게 골격근의 유리아미노산 조성은 일정한 패턴을 나타냄을 알 수 있었다.

근섬유의 종류에 따른 유리아미노산 농도의 차이를 살펴보면, aminogram 패턴에는 차이가 나타나지 않았으나 가자미근이 장지신근보다 유리아미노산 농도가 유의적으로 더 높았고, 따라서 가자미근의 유리아미노산풀이 장지신근보다 더 크다는 것을 알 수 있었다. Arginine (2.5배), lysine (2.0배), penylalanine (2.1배), aspartate (3.9배), asparagine (2.0배), citrulline (2.6배), glutamate (3.6배), ornithine (2.1배), 그리고 serine (2.1배) 등의 아미노산은 가자미근에서 장지신근의 2배 이상 함유되어 있었고, alanine (0.9배)을 제외한 나머지 대부분의 유리아미노산도 가자미근에서 장지신근의 1.2~1.9배 농도로 발견되었다.

흰쥐에 있어서 가자미근은 80% 이상이 지근섬유 (slow twitch oxidative fiber) 또는 type I 섬유로 구성되어 있는 한편, 장지신근의 경우에는 약 4~6%만이 type I 섬유로 구성되어 있으며, 나머지는 type II, 속근섬유 (fast twitch oxidative glycolytic fiber)이고, 더 세분화하면 type II a 섬유가 18~32%, type II b 섬유가 41~49%, 그리

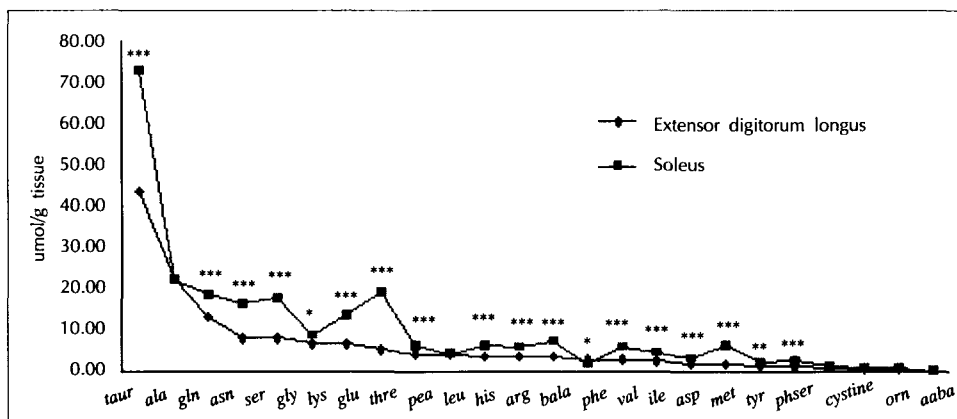


Fig. 2. Comparison of skeletal muscle aminogram between soleus and extensor digitorum longus muscles of control rats. Values are mean of 8 rats. *, **, ***: Significantly different by unpaired Student's t-test compared to the value for extensor digitorum longus muscle at *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ and ***: $p < 0.001$, respectively.

고 type II x 섬유가 19~23%로 구성되어 있다.^{16,20,21)} 골격근을 조성하는 섬유의 종류에 따라 운동 시에 동원되는 골격근 및 에너지기질의 종류에 차이가 나타나고 있다. 즉, 가자미근은 유산소운동 시 가장 많이 동원되는 근육으로서 TCA 회로에 관여하는 효소의 활성이 속근에 비해 월등히 높고, 반대로 장지신근의 경우에는 유산소운동 시 동원되는 근육의 비율이 낮고 해당과정에 관여하는 효소의 활성이 지근섬유에 비해 더 높다.^{22,23)}

근섬유의 조성이 근육의 유리아미노산 조성에 미치는 영향을 평가한 Turinsky²⁰⁾ 등은 지근섬유의 비율이 높은 가자미근의 경우 속근섬유의 비율이 높은 족저근 또는 비복근에 비하여 histidine, glutamine, aspartate 및 serine 등의 농도가 57~81% 정도 더 높고 taurine, citrulline, phosphoserine 및 ornithine 농도는 32~78% 정도 더 높은 것으로 보고하여 본 연구의 결과와 일치하고 있다. 이상을 종합해 볼 때 골격근의 유리아미노산 농도는 근섬유의 조성에 의해 영향을 받는 것으로 생각되며, 운동 중에 에너지기질

로 많이 이용되는 BCAA을 포함하여 대부분의 필수아미노산 농도가 가자미근에서 장지신근보다 더 높게 나타남을 알 수 있다.

4. 지구성 운동훈련이 하지 골격근의 유리아미노산 농도에 미치는 영향

흰쥐를 대상으로 한 규칙적인 유산소성 운동훈련이 가자미근 및 장지신근의 유리아미노산 농도에 미치는 영향이 Table 2에 제시되어 있다. 가자미근의 경우 cystine 농도가 운동훈련군에서 대조군에 비해 유의하게 낮은 것을 제외하고는 지구성 운동훈련에 따른 근육내 유리아미노산 농도에 유의적인 차이가 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 운동프로토콜과도 관계가 있는 것으로 생각되어 진다. 지근섬유에서 단백질 합성 및 분해율에 차이가 나타나는 것은 고강도 운동을 실시하는 경우에만 가능한 것으로 알려져 있고, 따라서 본 실험에서 중등도 강도로 실시한 운동훈련은 지근섬유내의 유리아미노산 농도에 유의적

Table 2. Effect of endurance exercise training on amino acid composition of soleus and extensor digitorum longus muscles of rats

	Soleus muscle		Extensor digitorum longus muscle	
	C	E	C	E
	μmol/g tissue			
EAA				
Arg	7.1 ± 0.28	7.3 ± 0.38	2.8 ± 0.12	2.8 ± 0.12
His	6.0 ± 0.53	6.6 ± 0.24	3.4 ± 0.25	3.2 ± 0.30
Ile	3.3 ± 0.22	3.1 ± 0.17	1.7 ± 0.13	1.4 ± 0.03*
Leu	6.3 ± 0.23	6.5 ± 0.30	3.4 ± 0.32	2.5 ± 0.11*
Lys	13.6 ± 0.68	6.2 ± 0.29	6.7 ± 0.26	6.2 ± 0.29
Met	2.2 ± 0.12	2.2 ± 0.10	1.5 ± 0.15	1.3 ± 0.28
Phe	6.0 ± 0.32	5.8 ± 0.38	2.8 ± 0.21	2.5 ± 0.24
Thr	6.3 ± 0.31	6.5 ± 0.24	4.2 ± 0.33	4.7 ± 0.43
Val	4.6 ± 0.21	4.8 ± 0.36	2.5 ± 0.17	2.3 ± 0.17
NEAA				
Ala	22.3 ± 2.0	19.2 ± 1.9	22.6 ± 2.3	19.8 ± 1.4
Asn	16.2 ± 1.5	14.5 ± 0.86	8.1 ± 0.79	7.4 ± 1.0
Asp	6.3 ± 0.44	5.3 ± 0.19	1.6 ± 0.12	1.6 ± 0.09
Cit	1.2 ± 0.05	1.0 ± 0.10	0.46 ± 0.09	0.58 ± 0.12
Cys	0.68 ± 0.18	0.17 ± 0.04*	0.49 ± 0.19	0.35 ± 0.19
Gln	18.8 ± 0.85	18.4 ± 1.3	13.1 ± 0.93	11.9 ± 0.90
Glu	18.9 ± 1.1	18.6 ± 1.0	5.2 ± 0.36	5.4 ± 0.25
Gly	8.5 ± 0.61	7.2 ± 0.47	6.7 ± 0.29	7.8 ± 0.41
Orn	0.83 ± 0.21	0.34 ± 0.10	0.38 ± 0.08	0.43 ± 0.04
Ser	17.5 ± 1.2	14.9 ± 0.69	8.0 ± 0.46	8.4 ± 0.58
Tau	73.3 ± 2.2	72.7 ± 2.0	43.8 ± 1.8	38.8 ± 0.90
Tyr	2.3 ± 0.11	2.2 ± 0.13	1.2 ± 0.12	0.73 ± 0.06

Values are mean ± SEM of 8 rats.

C : non exercised control rats

E : exercise-trained rats (running on the treadmill at 25 m/min for 60 min, 5 days a week)

*: Significantly different compared to the value for control rats by unpaired Student's t-test at p < 0.05.

인 영향을 미치지 않은 것으로 추측된다.

한편, 장지신근의 경우에는 운동훈련군에서 대조군에 비하여 isoleucine (20% 감소, $p < 0.05$) 및 leucine (26% 감소, $p < 0.05$) 농도가 유의하게 더 낮았으며, valine의 경우에도 유의한 수준은 아니나, 운동훈련군에서 더 낮은 경향을 나타냈다. 이와같이 지구성 운동훈련이 골격근의 BCAA 조성에 미치는 영향이 가자미근과 장지신근에서 서로 상이하게 나타나는 것은 지근섬유와 속근섬유의 차이에 의한 결과로 추측된다. 지근섬유의 경우 중등도 강도의 운동시 유산소성 대사에 의한 에너지 형성이 가능하지만, 속근에서는 같은 운동강도에서 유산소성 대사가 충분히 이루어 질 수 없음을 간접적으로 시사하는 것이라 할 수 있다. 이에 관한 단적인 증거로 지근섬유와 속근섬유 간에 TCA 회로에 관계하는 효소의 활성에 차이가 있음을 들 수 있다. 즉, 지근인 가자미근에 비하여 속근인 장지신근의 경우 citrate synthase 활성이 상대적으로 매우 낮고, 미토콘드리아의 수도 적으며, 모세혈관의 양도 적어 유산소성 운동을 수행하기에 부적합한 근섬유라고 할 수 있다. 따라서, 유산소 운동을 장시간 수행하게 되면 장지신근의 경우 유산소성 대사가 충분하게 진행되지 못하고, 결과적으로 에너지 기질로 지방보다는 BCAA의 이용이 활발해져서 안정 시 BCAA 농도가 가자미근에 비해 상대적으로 더 낮게 나타난 것으로 풀이된다.

본 연구에서와 유사한 운동프로토콜로 유산소성 운동훈련을 실시한 후 골격근의 유리아미노산 농도의 변화를 측정 한 선행 연구는 현재까지 보고된 바가 없어 본 연구의 결과를 직접적으로 비교할 수 없음이 아쉽다. Ji 등²⁶이 흰쥐를 대상으로 고강도 유산소성 운동훈련 (트레드밀 상에서 15% 경사, 27 m/min 속도로 하루에 1시간씩 주당 5회 수행시킴)을 실시한 후 안정 시와 운동 직후 혈장의 유리아미노산 농도를 측정 한 결과, 안정 시 BCAA농도는 비훈련대조군과 유의적인 차이가 없었으나 운동 직후의 혈장 BCAA 농도는 운동훈련군에서 대조군에 비해 유의하게 감소되었다. 한편 Dohm²⁸ 등이 흰쥐를 대상으로 28 m/min의 속도로 트레드밀에서 탈진 시까지 수행시킨 직후 비복근의 유리아미노산 농도를 평가한 결과에 의하면 비운동대조군에 비해 isoleucine 및 leucine 농도가 유의하게 더 높은 것으로 나타났다. 이상의 선행 연구결과와 본 연구의 결과를 종합해 볼 때 운동프로토콜의 내용, 근섬유의 종류 및 근육 시료를 채취한 시점에 따라 운동훈련이 골격근의 BCAA 농도에 미치는 영향은 서로 다르게 나타남을 알 수 있다.

요약 및 결론

장기간의 지구성 운동훈련이 하지 골격근의 유리아미노산 조성에 미치는 영향을 평가하고, 아울러 근섬유의 종류에 따른 유리아미노산 조성의 차이를 평가하고자 SD 흰쥐를 대조군과 운동훈련군으로 나누고, 후자의 경우 6주간의 지구성 운동훈련을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 6주간의 지구성 운동훈련은 체중증가량 ($p < 0.05$) 및 식이효율 ($p < 0.01$)을 유의하게 감소시키고, 가자미근과 장지신근의 중량을 증가시키는 경향을 초래하였다.

2) 유산소성 운동훈련의 효과를 판정하기 위해 가자미근의 citrate synthase (CS) 활성을 측정 한 결과, 운동훈련군의 경우 대조군에 비해 유의적으로 더 높은 CS 활성이 관찰되었고 ($p < 0.01$), 따라서 충분한 유산소성 운동훈련이 이루어진 것으로 생각된다.

3) 대조군을 대상으로 근섬유의 종류에 따른 유리아미노산 농도의 차이를 살펴본 결과의 경우 패턴에는 차이가 관찰되지 않았으나, 가자미근에서는 장지신근에서 발견된 유리아미노산 농도의 1.2~3.9배에 해당되는 아미노산이 함유되어 있었고, 따라서 가자미근의 유리아미노산풀이 장지신근에서보다 유의적으로 더 크다는 것을 알 수 있었다.

4) 중등도의 지구성 운동훈련이 하지 골격근의 유리아미노산 농도에 미치는 영향을 근섬유 종류별로 살펴본 결과 지근섬유의 비율이 높은 가자미근에서는 운동훈련에 의한 유의적인 차이가 관찰되지 않았으나, 속근섬유의 비율이 높은 장지신근의 경우 운동훈련에 의해 isoleucine, leucine 등의 BCAA 농도가 유의적으로 감소하였다 ($p < 0.05$).

Literature cited

- 1) Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 32: 70-84, 2000
- 2) Crawford MH. Physiologic consequences of systemic training. *Cardiol Clin* 10: 209-218, 1982
- 3) Kraegen EW, Clark PW, Jenkins AB, Daley EA, Chisholm DJ, Storlien LH. Development of muscle insulin resistance after liver insulin resistance in high-fat-fed rats. *Diabetes* 40: 1397-1403, 1991
- 4) Song YJ, Sawamura M, Ikeda K, Igawa S, Nara Y, Yamori Y. Training in swimming reduces blood pressure and increases muscle glucose transport activity as well as GLUT4 contents in stroke-prone spontaneously hypertensive rats. *Appl Human Sci* 17: 275-80, 1998
- 5) Ploug T, Stallknecht BM, Pederson O, Kahn BB, Ohkuwa T, Vinten J, Galbo H. Effect of endurance training on glucose tran-

- sport capacity and glucose transporter expression in rat skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 259: E778-E786, 1990
- 6) Slentz CA, Gulve EA, Rodnick KJ, Henriksen EJ, Youn JH, Holloszy JO. Glucose transporters and maximal transport are increased in endurance-trained rat soleus. *J Appl Physiol* 73: 486-492, 1992
 - 7) Turcotte LP, Swenburger JR, Tucker MZ, Yee A. Training-induced elevation in FABPpm is associated with increased palmitate use in contracting muscle. *J Appl Physiol* 87: 285-293, 2000
 - 8) Kiens B, Essen-Gustavsson B, Christensen NJ, Salton B. Skeletal muscle substrate utilization during submaximal exercise in man: effect of endurance training. *J Physiol (Lond)* 469: 459-478, 1993
 - 9) Turcotte LP, Richter EA, Kiens B. Increased plasma FFA uptake and oxidation during prolonged exercise in trained vs. untrained humans. *Am J Physiol* 262(Endocrinol Metab 25): E791-E799, 1992
 - 10) Dudley GA, Abraham WM, Terjung RL. Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 53: 844-850, 1982
 - 11) Henriksson J. Effect of exercise on amino acid concentration in skeletal muscle and plasma. *J Exp Biol* 160: 149-165, 1991
 - 12) Shimomura Y, Suzuki T, Satoh S, Tasaki Y, Harris RA, Suzuki M. Activation of branched-chain alpha-keto acid dehydrogenase complex by exercise: effect of high-fat diet intake. *J Appl Physiol* 68: 161-165, 1990
 - 13) Shimomura Y, Fujii H, Suzuki M, Murakami T, Fujitsuka K, Nakai N. Branched-chain alpha-keto acid dehydrogenase complex in rat skeletal muscle: regulation of the activity and gene expression by nutrition and physical exercise. *J Nutr* 125: 1762S-1765S, 1995
 - 14) Okamura K, Matsubara F, Yoshioka Y, Kikuchi N, Kikuchi Y, Kohri H. Exercise-induced changes in branched-chain amino acid /aromatic amino acid ratio in rat brain and plasma. *Japan J Pharmacol* 45: 243-248, 1987
 - 15) Chauloff F, Elighozi JL, Guezennec Y, Laude D. Effects of conditioned running on plasma, liver and brain tryptophan and on brain 5-hydroxytryptamine metabolism of the rat. *Br J Pharmacol* 86: 33-41, 1985
 - 16) Turinsky J, Long CL. Free amino acids in muscle: effect of muscle fiber population and denervation. *Am J Physiol (Endocrinol Metab)* 258: E485-E491, 1990
 - 17) Sreere PA. Citrate synthase. *Methods in enzymology* 13: 3-11, 1969
 - 18) Moore S, Stein WH. Chromatographic determination of amino acids by the use of automatic recording equipment. In: Colowick SP, Kaplan NO, eds. *Methods in Enzymology*, pp.819-831, Academic Press, New York, Vol. 6, 1963
 - 19) Martinez B, Staba EJ. The physiological effects of aralia, panax and Eleutherococcus on exercised rats. *Jpn J Pharmacol* 35: 79-85, 1984
 - 20) Bobinac D, Malnar-Dragojevic D, Bajek S, Soic-Vranic T, Jerkovic R. Muscle fiber type composition and morphometric properties of denervated rat extensor digitorum longus muscle. *Croat Med J* 41: 294-297, 2000
 - 21) Yoriko A, Toro K, Masuda T, Hatta H. Fiber-type-specific α B-crystallin distribution and its shifts with T3 and PTU treatments in rat hind limb muscles. *J Appl Physiol* 88: 1355-1364, 2000
 - 22) Arino MA, Armstrong RB, Edgerton VR. Hindlimb muscle fiber population of five mammals. *J Histochem Cytochem* 21: 51-55, 1973
 - 23) Bobinac D, Malnar-Dragojevic D, Bajek S, Soic-Vranic T, Jerkovic R. Muscle fiber type composition and morphometric properties of denervated rat extensor digitorum longus muscle. *Croat Med J* 41: 294-297, 2000
 - 24) Ji LL, Miller RH, Nagle FJ, Lardy HA, Stratman FW. Amino acid metabolism during exercise in trained rats: The potential role of carnitine in the metabolic fate of branched-chain amino acids. *Metabolism* 36: 748-752, 1987
 - 25) Dohm GL, Beecher GR, Warren RQ, Williams RT. Influence of exercise on free amino acid concentrations in rat tissues. *J Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol* 50: 41-44, 1981