

철분과 운동이 흰쥐의 헴 생합성과 지질 대사에 미치는 영향

최지영 · 김혜영(A)[†]

용인대학교 식품영양학과

Effect of Dietary Iron and Exercise on Heme Biosynthesis and Lipid Metabolism of Rats

Jee-Young Choi and Hye-Young P. Kim[†]

Dept. of Food and Nutrition, Yongin University, Yongin 449-714, Korea

Abstract

This study was performed to investigate the effect of dietary iron and exercise on heme biosynthesis and lipid metabolism of rats. Rats were divided into 4 groups according to dietary iron supplement (Fe-, 5 ppm vs. Fe+, 50 ppm) and exercise status (control vs. exercise). The experiment continued for 8 weeks. Regular treadmill exercise (6°, 28 m/min, 30 min duration, 5 days/week) was given to exercise groups. The aminolevulinic dehydrase activity of red blood cell, the marker of heme biosynthesis, was significantly increased in the exercise group. Regular aerobic exercise reduced body weight and epididymal fat pad gain. Regular exercise also significantly decreased the plasma triglyceride, cholesterol and HDL-cholesterol of the rats. Meanwhile, the iron deficiency decreased the hematocrit and hemoglobin concentration and increased the accumulation of liver cholesterol.

Key words: iron, exercise, heme biosynthesis, triglyceride, cholesterol, rats

서 론

체내에서 철을 함유한 헴은 적혈구의 헤모글로빈 뿐만 아니라, 근육의 myoglobin, 전자전달계의 헴 함유 효소인 cytochrome 등의 구성 성분으로도 쓰인다. 적혈구의 주성분인 헤모글로빈은 헴과 글로빈으로 구성되는데, 헴의 생합성 과정은 처음에 succinyl-CoA와 glycine이 합쳐서 δ -aminolevulinic acid(ALA)가 되고 aminolevulinic dehydrase(ALAD) 효소에 의해 porphobilinogen을 형성한 후, 몇 단계를 거쳐 미토콘드리아에서 ferrochelatase의 작용에 의해 철분 이온(Fe^{2+})을 받아 heme을 형성하게 된다.

ALAD 효소는 헴 생합성의 조절 효소로써 헴의 생성 정도를 알 수 있는 좋은 지표이다(1-4). 체내에 적혈구가 부족할 경우에는 ALAD 활성이 증가되어 헴 생성이 증가되지만, 헴의 농도가 충분할 경우에는 ALAD의 활성이 저하되는 것으로 사료된다. 운동으로 인해 헴의 필요량이 증가하면 ALAD의 활성도 증가할 것으로 생각되지만, 철이 부족한 경우의 ALAD 활성 변화에 대해서는 연구된 바가 별로 없는 실정이다(1,4-7).

지구력을 요하는 운동이 규칙적으로 수행될 때, 체내에서는 무산소대사와 유산소대사가 동시에 진행된다. 이때 에너

지원으로는 탄수화물과 지방질이 쓰여서 혈중 포도당의 제거율이 높아진다(8). 적절한 유산소운동은 중성지방 수준을 저하시키고 HDL-cholesterol을 높인다고 보고되었다(9). 콜레스테롤은 세포막과 신경전달물질의 구성성분이고 steroid와 같은 성호르몬의 전구체이며, triglyceride와 함께 fatty acid pool의 기능을 담당하여 lipolysis를 통한 유산소성 대사에 관여한다. 한편, 철분이 부족할 경우 지질대사에 영향을 주어 철 부족시 혈중지질 농도가 높아졌다는 보고가 있다(10).

운동 시 체내 심박출량이 늘어나고 조직으로의 산소 운반을 위하여 많은 양의 헤모글로빈이 소비되므로 혈액 내 철분이 부족해질 수 있다. "스포츠 빈혈(sports anemia)"이란 고강도의 운동 진행시에 혈액의 혈색소 농도가 떨어지는 빈혈 현상을 일컫는 것으로, 이 경우 운동을 하면 운동 수행 능력이 감소하는 것으로 보고되었다(11-13). 그러나, 철분이 부족한 상태에서 규칙적으로 유산소 운동이 이루어졌을 경우 헴 생합성도의 변화와 체내 지질 대사에 미치는 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 흰쥐를 대상으로 식이철의 수준을 달리하고 규칙적인 운동을 수행하였을 때, ALAD의 활성도를 측정하여 헴의 생합성 정도를 평가하고 체내 지질 대사의 변화를 살펴봄으로써 철분과 운동이 헴 생합성과 지질 대사에 미치는 영향을 알아보려 수행되었다.

[†]Corresponding author. E-mail: hypkim@yongin.ac.kr
Phone: 82-31-330-2755. Fax: 82-31-330-2886

재료 및 방법

실험동물 및 식이조성

실험동물은 생후 5주된 Sprague-Dawley 중 수컷 흰쥐를 한림실험동물연구소로부터 구입하여서, 실험시작 전 1주일 동안 고형배합사료(삼양사료)로 적응시키고 체중에 따라 난괴법(randomized complete block design)에 의해 10마리씩 4군으로 나누었다. 실험 시작 시 실험동물의 평균체중은 166.1 ± 18.9 g이었고, 실험동물은 한 마리씩 stainless steel cage에 격리하여 사육하였다. 사육조건은 온도 23 ± 2°C, 상대습도 55 ± 7% 이내로 조절하였다.

본 실험에서는 철(5 ppm)이 부족하면서 운동을 하지 않는 대조군(Fe-, Control)과 운동을 하는 군(Fe-, Exercise) 또는 철(50 ppm)이 충분하면서 운동을 하지 않는 대조군(Fe+, Control)과 운동을 하는 군(Fe+, Exercise)의 총 4군(n=40)으로 분리하였다. 운동군은 쥐용 트레드밀(Rat Dual Treadmill, 대종기기)을 이용하여 매일 오후 일정한 시간에 운동을 실시하였다. 첫 주에는 경사 0°에서 10 m/min의 속도로 10분 동안 주행 운동을 시켜서 적응시키고 점차 주행 속도와 시간, 경사를 증가시켜 2주 째에는 경사 2°에서 15 m/min으로 15분, 3주 째에는 경사 4°에서 20 m/min으로 20분간 운동을 수행하였다. 4주 째부터는 경사 6°에서 28 m/min의 속도로 30분간 주행하도록 하여 8주 째까지 운동을 수행하였다.

실험동물은 제조된 실험 식이로 8주간 사육하였고, 식이와 물은 자유롭게 섭취할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 실험식이 AIN-93식을 토대로 제조하였으며, 본 실험에서 사용한 식이의 구성은 Table 1과 같다.

실험동물의 체중과 식이 섭취량 측정

실험동물의 체중은 1주일에 1회씩 측정하였으며, 식이 섭취량은 1주일에 3회씩 측정하였다. 실험동물의 식이 섭취량과 체중을 이용하여 실험 기간의 체중 증가량을 같은 기간에 섭취한 식이 섭취량으로 나누어 식이 효율(feed efficiency ratio, FER)을 산출하였다.

실험동물의 혈액 및 장기의 채취

실험동물의 혈액은 실험기간 종료 전 15시간 절식시킨 실험동물을 chloroform으로 마취하여 심장관자법으로 주사기를 이용하여 채취하였다. 채취된 혈액은 heparin이 들어있는 원심분리관에 담아 3,000 rpm에서 20분간 원심분리하여서 혈장을 얻은 후 생화학적 분석을 위해 -20°C에서 냉동보관하였다. 혈액을 채취한 후 실험동물의 간, 신장, 부고환지방(epididymal fat pad, EFP), 가자미근(soleus), 비복근(gastrocnemius)을 채취하여 무게를 달고 -20°C에서 냉동 보관하였다.

헤마토크리트, 헤모글로빈, 헴 생합성 정도의 측정

혈액을 채취한 후 바로 전혈에서 헤마토크리트와 헤모글로빈 농도를 측정하였다. 적혈구 용적비는 micro-hematocrit centrifuge(Hawksley, England)에서 5분간 원심분리하

Table 1. Composition of experimental diet (g/kg diet)

Ingredients	Fe- (5 ppm)	Fe+ (50 ppm)
Corn starch	529	529
Casein	200	200
Sucrose	100	100
Soybean oil	70	70
Cellulose	50	50
Mineral mixture ¹⁾	35	35
Vitamin mixture ²⁾	10	10
L-Cysteine	3	3
Choline bitartrate	2.5	2.5
tert-Buthylhydroquinone (mg)	14	14
Ferric citrate (mg)	21.9	219.0

¹⁾AIN-93 mineral mixture without iron (g/kg Mix): Calcium phosphate anhydrous 357.00; Potassium phosphate monobasic 196.00; Potassium citrate, tripotassium 70.78; Sodium chloride 74.00; Magnesium oxide 24.00; Zinc carbonate 1.65; Sodium meta-silicate · 9H₂O 1.45; Manganous carbonate 0.63; Cupric carbonate 0.30; Chromium potassium sulfate · 12H₂O 0.275; Boric acid 81.5 mg; Sodium fluoride 63.5 mg; Nickel carbonate 31.8 mg; Lithium chloride 17.4 mg; Sodium selenate anhydrous 10.25 mg; Potassium iodate 10.0 mg; Ammonium paramolybdate · 4H₂O 7.95 mg; Ammonium vanadate 6.6 mg; Powdered sucrose 215.02.

²⁾AIN-93G vitamin mixture (g/kg Mix): Thiamin-HCl 0.6; Riboflavin 0.6; Pyridoxine-HCl 0.7; Nicotinic acid 3.0; Calcium pantothenate 1.6; Folic acid 0.2; Biotin 0.02; Cyanocobalamin (Vitamin B-12) 0.025; Retinyl palmitate (Vitamin A) 0.8; dl- α -Tocopheryl acetate 15 g; Cholecalciferol (Vitamin D-3) 0.25; phyloquinone (Vitamin K-1) 0.075; Powdered sucrose 974.655 g.

여 microhematocrit reader로 전체 혈액에 대한 packed red cell volume의 백분율(%)을 구하였다. 헤모글로빈의 분석은 cyanmethemoglobin법을 이용하여 측정하였다(영동제약, 헤모글로빈 kit). 적혈구의 delta-aminolevulinate dehydrase 활성은 Sassa의 방법(14)으로 분석하였다. 먼저 heparin 처리된 적혈구는 증류수로 4배 희석하였고, 간은 phosphate buffer에 20배 희석한 후 delta-aminolevulinate를 넣어 37°C에서 30분간 배양하였다. 그 후 10% trichloroacetic acid (TCA)를 넣어 반응을 멈추게 한 후 12,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상등액을 취하고 Ehrlich's reagent를 넣어 553 nm에서 비색정량하였다.

혈장과 간의 지질 농도 분석

혈장과 간의 총 cholesterol농도와 혈장 HDL-cholesterol 농도는 cholesterol 산화효소를 포함하는 kit(영동제약)을 이용하여 반응시킨 후 spectrophotometer(HP 8452, USA)를 이용하여 500 nm에서 비색정량하였고, LDL-cholesterol은 Friedwald법에 의해 계산하였다. 혈장 중성 지방 농도는 혈액분석기인 DTSC(Johnson & Johnson, USA)를 사용하여 측정하였다. 간의 총 지방 농도는 Biligh & Dyer법(Bligh, 1959)을 이용하여 측정하였다. 간의 중성 지방 농도는 lipo-protein lipase를 포함하는 효소법 kit(영동제약)을 이용하여 546 nm에서 비색정량하였다.

통계처리

본 연구의 분석결과는 SPSS program을 이용하여 각 군의 평균과 표준편차를 계산하였고, 철 수준과 운동에 따른 효과 판정은 $p < 0.05$ 수준에서 two-way analysis of variance로 하였고, 각 실험군의 평균치 간의 유의성은 Duncan's multiple range test에 의해 검정하였다.

결과 및 고찰

체중 변화와 식이효율 및 장기의 무게

실험 동물의 실험 초기 체중, 실험 종료 시 체중 및 식이섭취효율은 Table 2에 나타내었다. 실험 시작 시 체중은 4군간의 차이가 없었으나 8주 후의 체중과 체중 증가량은 운동의 영향을 받아 운동을 한 군에서 유의적으로 감소하였고, 철이 충분한 대조군이 가장 무거운 것으로 나타났다. 한편, 식이섭취량과 식이 효율은 군간에 유의적인 차이가 없었다.

간과 신장의 무게(Table 3)는 철이 충분한 군에서 유의적으로 더 무거웠다. 한편, 부고환지방의 무게는 운동을 실시한 군에서 유의적으로 낮게 나타나서 운동으로 인해 체지방에 현저한 감소가 있음을 보여주었다. 가자미근과 비복근의 경우, 철이 충분한 대조군이 철이 부족한 대조군보다 유의적으로 무거웠으나, 운동을 시킨 경우에는 철 수준에 따라 다리 근육의 무게에 차이가 없었다.

헤마토크리트와 헤모글로빈

실험 동물의 헤마토크리트와 헤모글로빈 농도는 Fig. 1에 나타나 있다. 헤마토크리트는 식이 철 함량의 영향을 받아 철이 충분한 군에서 유의적으로 높았고, 운동 유무에

따른 차이는 나타나지 않았다. 헤모글로빈 농도도 헤마토크리트와 마찬가지로 식이 철이 충분한 군에서 유의적으로 매우 높게 나타났고($p < 0.001$), 운동을 한 군에서 대조군보다 증가하는 경향으로 나타났다($p < 0.11$). 따라서, 식이 철의 함량이 헤마토크리트와 혈색소 함량을 결정짓는 가장 중요한 역할을 하지만, 운동을 하는 경우 체내 산소요구량의 증가와 함께 헤모글로빈의 농도도 약간 증가하는 것으로 사료된다.

Aminolevulinate dehydrase 활성

Aminolevulinate dehydrase(ALAD) 활성 정도에 대한 결과는 Table 4에 제시하였다. 적혈구 내에서 ALAD 효소 활성은 운동 유무의 영향을 받아서, 운동을 한 군에서 유의하게 높아진 것으로 나타났다. 반면, 간에서의 ALAD 활성도는 운동의 영향으로 대조군에 비해 유의적으로 감소하는 것으로 나타났고 철분 상태에 따른 차이는 없었다.

적정 수준의 운동은 TCA cycle을 통한 유산소 대사를 활성화시키며 이 때 전자전달계의 활발한 활동을 위해 cytochrome의 생성이 증가된다. Cytochrome은 heme을 포함하고 있는 단백질로, 운동량의 증가는 cytochrome의 증가를 가져와서 체내에서 철 pool의 재편성을 가져오게 된다(15-17). Abraham과 Terjung(1)은 흰쥐를 대상으로 대조군과 지속적으로 90분간 treadmill 운동을 수행시킨 운동군에서 심실의 혈액을 채취하여 ALA(aminolevulinate)의 활성도를 측정할 결과, 운동군에서 그 농도가 유의적으로 증가함을 보였다. 이는 대조군과 비교하여 운동으로 인한 cytochrome 양의 증가로 인해 heme의 필요량이 증가한 결과로 보았다. 운동은 쥐의 심실을 확장시키고 그 양과 비례하게 cytochrome total pool이 증가되어 ALA의 활성이 커지고 이에

Table 2. Initial body weight, final body weight and feed efficiency ratio of the rat

	Fe ⁻		Fe ⁺		ANOVA ³⁾
	Control	Exercise	Control	Exercise	
Initial BW (g)	165.3 ± 18.3 ¹⁾	164.4 ± 19.8	164.2 ± 18.1	170.9 ± 22.3	NS
Final BW (g)	355.6 ± 37.7 ²⁾	349.3 ± 50.0 ^a	404.0 ± 41.9 ^b	352.1 ± 29.8 ^a	Ex*
FER ⁴⁾	0.16 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.20 ± 0.03	0.16 ± 0.04	NS

¹⁾Mean ± SD.

²⁾Values with different alphabets within the column are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

³⁾Significant difference by 2-way ANOVA (NS: Not significantly different, Ex: Effect of exercise, * $p < 0.05$).

⁴⁾FER: feed efficiency ratio = body weight gain (g/d)/food intake (g/d).

Table 3. Organ weight of the rats

(g)

	Fe ⁻		Fe ⁺		ANOVA ³⁾
	Control	Exercise	Control	Exercise	
Liver	11.0 ± 1.9 ^{1)a2)}	10.7 ± 2.3 ^a	13.2 ± 1.8 ^b	11.7 ± 0.7 ^{ab}	Fe*
Kidney	2.55 ± 0.25 ^{ab}	2.71 ± 0.35 ^a	2.91 ± 0.38 ^b	2.77 ± 0.23 ^{ab}	Fe*
EFP ⁴⁾	7.78 ± 2.06 ^{ab}	5.74 ± 1.96 ^{bc}	9.05 ± 3.22 ^a	5.38 ± 1.63 ^c	Ex***
Soleus	0.13 ± 0.02 ^a	0.16 ± 0.03 ^{ab}	0.18 ± 0.02 ^b	0.13 ± 0.04 ^a	Cross***
Gastrocnemius	2.14 ± 0.17 ^a	2.29 ± 0.30 ^{ab}	2.47 ± 0.26 ^b	2.28 ± 0.20 ^{ab}	Fe*, Cross*

¹⁾Mean ± SD.

²⁾Values with different alphabets within the column are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

³⁾Significant difference by 2-way ANOVA (Fe: Effect of iron, Ex: Effect of exercise, * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$).

⁴⁾EFP: epididymal fat pad.

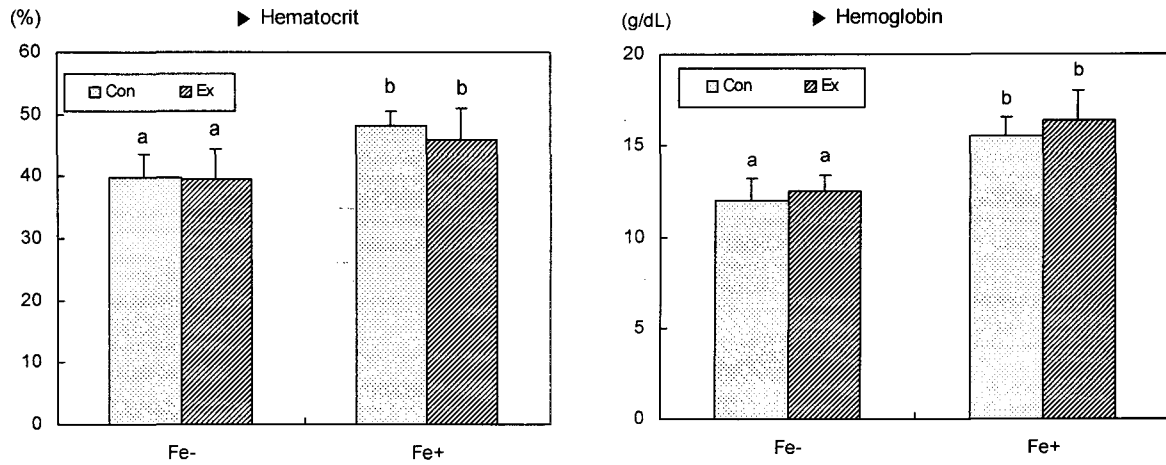


Fig. 1. Hematocrit and hemoglobin concentration of the rat. Values with different alphabets are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

Table 4. Aminolevulinatase dehydrase activity of the rat RBC and liver (U/L)

	Fe-		Fe+		ANOVA ³⁾
	Control	Exercise	Control	Exercise	
RBC	2.01 ± 0.89 ^{1)ab2)}	2.89 ± 1.42 ^{bc}	1.45 ± 0.47 ^a	3.32 ± 1.07 ^c	Ex ^{***}
Liver	5.50 ± 0.60 ^a	4.68 ± 0.92 ^b	5.55 ± 0.60 ^a	4.87 ± 0.41 ^b	Ex ^{***}

¹⁾Mean ± SD.

²⁾Values with different alphabets within the column are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

³⁾Significant difference by 2-way ANOVA (Ex: Effect of exercise, *** $p < 0.001$).

따라 heme 합성이 많이 이루어진다. 또한 Holloszy와 William (18)도 흰쥐를 대상으로 운동이 근육 내 δ -aminolevulinic acid synthase에 미치는 영향을 알아본 실험에서 treadmill running 수행이 근육의 ALA 합성 능력을 유의적으로 증가시켰으며 이는 운동으로 인해 골격에서 cytochrome이 많이 축적되어 heme의 합성이 촉진된 것으로 보고하였다.

Abraham과 Terjung(1)은 철의 결핍과 운동이 골격근육의 미토콘드리아 효소에 미치는 영향을 살펴본 연구에서, 철이 충분할 경우 안정시와 운동시는 차이가 나타나지 않았으나 철 결핍시에는 안정시에 비해 운동시 cytochrome의 생성이 증가함을 보였다. 이는 철 결핍시 운동에 의해 증가된 heme을 함유한 cytochrome의 증가로 ALAD의 합성이 이루어졌다고 사료된다. 한편, 철분 수준에 따라 운동이 흰쥐 골수의 heme 합성에 미치는 영향을 살펴본 연구에서는 철분 결핍이 심할수록 운동이 효과적으로 ALAD의 수준을 향상시켰다고 보고하였다(19,20). 본 연구 결과에서도, 운동을 하는 경우 산소요구량의 증가로 산소운반에 필요한 헴의 생합성이 증가하기 때문에 헴 생합성의 rate limiting step인 ALAD 활성이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 철 결핍으로 인한 영향은 크게 나타나지 않았다. 한편, 간에서의 ALAD 활성은 오히려 운동시에 낮아졌는데 이는 신체의 총 heme pool에서 적혈구 세포의 활발한 헴 생합성을 위해 간에서의 활성을 낮추었기 때문으로 사료된다.

혈장 중성 지방, cholesterol, HDL-cholesterol 및 LDL-cholesterol의 농도

혈장 지질농도는 Table 5에 나타내었다. 혈장 중성지방의 경우 운동은 혈장 중성지방의 수준을 현저하게 낮추었으며, 식이 철분에 따른 유의적인 차이는 없었으나 철 결핍군에서 혈장 중성지방이 높은 경향을 나타내었다. 철 결핍 비운동군의 중성지방 농도가 가장 높게 나타났으며 철충분 운동군에서 가장 낮게 나타났다. 혈장 cholesterol 역시 철분에 따른 유의적인 영향은 없었으나 운동의 영향으로 인해 유의적으로 감소하였다. 또한 HDL-cholesterol도 철분에 따른 유의적인 변화는 나타나지 않았으나, 두 군 모두 운동에 의해 유의적으로 상승하는 것으로 나타났다.

철과 지질대사와의 관계를 살펴본 동물 연구에서 Roug-head 등(21)도 철분을 결핍시킨 군(7 ppm)과 철분이 적당한 군(45 ppm)에서 혈장의 콜레스테롤과 중성지방 농도에 차이가 나지 않았다고 보고하였다. 한편, 여자축구선수들을 대상으로 철분 상태가 혈청 지질에 미치는 영향을 알아본 연구에서 운동선수들의 적혈구 세포수가 많을수록 중성지방 농도가 낮고, 평균 적혈구 용적이 클수록 HDL-cholesterol 농도가 높아져 선수들의 철분 상태가 바람직할수록 혈액 지질 상태가 바람직하다고 보고하였다(22).

인체를 대상으로 한 다른 연구에서는 트레이닝 기간 중에 중성지방과 혈청 cholesterol의 수준이 감소한다고 밝혔다

Table 5. Plasma triglyceride (TG), cholesterol (Chol), HDL and LDL-cholesterol of the rat

	Fe-		Fe+		ANOVA ³⁾
	Control	Exercise	Control	Exercise	
TG (mg/dL)	71.1±47.5 ^{1)a2)}	38.1±15.8 ^b	55.1±26.1 ^{ab}	32.8±9.61 ^b	Ex**
Chol (U/L)	59.0±15.1 ^{ab}	47.0±13.7 ^a	65.7±22.8 ^b	50.8±11.3 ^{ab}	Ex*
HDL-Chol	12.8±4.5 ^a	17.2±5.7 ^{ab}	14.0±3.8 ^{ab}	17.9±3.9 ^b	Ex*
LDL-Chol	58.7±17.3	58.4±14.5	68.7±24.9	63.3±13.6	NS

¹⁾Mean ± SD.

²⁾Values with different alphabets within the column are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

³⁾Significant difference by 2-way ANOVA (Ex: Effect of exercise, NS: Not significantly different, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$).

Table 6. Total lipid, triglyceride (TG) and cholesterol (Chol) concentration of the rat liver (mg/g)

	Fe-		Fe+		ANOVA ³⁾
	Control	Exercise	Control	Exercise	
Total lipid	49.82±24.89 ¹⁾	48.71±16.46	53.98±11.11	54.04±17.88	NS
TG	7.28±5.62	5.82±5.62	4.29±2.34	6.12±4.28	NS
Chol	6.18±2.04 ^{a2)}	4.43±2.15 ^{ab}	3.68±2.17 ^b	3.67±2.08 ^b	Fe*

¹⁾Mean ± SD.

²⁾Values with different alphabets within the column are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

³⁾Significant difference by 2-way ANOVA (NS: Not significantly different, Fe: Effect of iron, * $p < 0.05$).

(23). 이는 장시간의 유산소 운동시간 및 근육의 glycogen이 운동 중 고갈됨에 따라 fatty acid pool, 즉 근육과 순환 혈액 중의 중성지방으로부터 지방산의 유리가 증가되어 지방이 에너지원으로 이용되기 때문이라고 보고하였다. 본 실험 결과에서도 운동군에서 혈장 중성 지방과 cholesterol 및 부고환지방 함량이 현저하게 감소하였고, 혈중 HDL-cholesterol 은 증가하여 규칙적인 유산소 운동의 효과를 보여주었다.

간의 총지방, 중성지방 및 cholesterol

간에서의 총지방과 중성지방 및 cholesterol 측정은 Table 6에 나타내었다. 총 지방과 중성지방은 철분과 운동의 영향을 크게 받지 않은 것으로 나타났다. 한편, 콜레스테롤은 철분에 의한 유의적인 차이($p < 0.05$)를 보여 철분이 충분할수록 간의 콜레스테롤의 수치가 낮아짐을 보였다. 철 부족 대조군에서 콜레스테롤의 수치가 가장 높았으며 이때 운동이 병행되면 다소 낮아지는 경향을 보였다.

요 약

본 연구는식이 철과 운동이 흰쥐의 헴 생합성과 지질대사에 미치는 영향을 살펴보고자 수행되었다. 쥐는 식이 철의 수준에 따라 철결핍군(Fe-, 5 ppm)과 철 충분군(Fe+, 50 ppm)으로 나누고 규칙적인 운동 여부에 따라 운동군과 대조군으로 나누었다. 실험 식이의 공급과 운동을 시킨 기간은 8주였으며, 운동군은 경사 6도에서 28 m/min의 속도로 1회 30분씩 일주일에 5회씩 트레이드밀 운동을 시켰다. 그 결과 흰쥐의 헴 생합성 정도는 운동을 한 군에서 유의적으로 증가하는 것으로 나타났다. 운동은 또한 체중 증가량을 낮추고, 부고환지방량을 감소시켰으며, 혈중 중성지방과 콜레스테롤 수치를 낮추고 HDL-콜레스테롤의 수치를 증가시켰다.

한편, 식이 철의 부족은 헤마토크리트와 헤모글로빈 농도를 감소시켰으며, 간 콜레스테롤의 축적을 증가시켰다. 앞으로 인체를 대상으로 철분 수준이 다른 상태에서의 운동이 헴의 생합성, 지질대사 및 젖산 농도 등에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 더 많이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R05-2004-000-10609-0)에 의해서 이루어진 연구 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

문 헌

1. Abraham WM, Terjung RL. 1978. Increased δ -aminolevulinic acid synthetase activity in rat ventricle after acute exercise. *J Appl Physiol* 44: 507-511.
2. Beattie DS. 1971. The possible relationship between heme synthesis and mitochondrial biogenesis. *Arch Biochem Environ Biophys* 147: 136-142.
3. Matsuo T, Mizushima Y, Fujie M, Suzuki M. 1999. Effect of voluntary resistance exercise on mitochondrial heme biosynthesis in rat liver. *J Clin Biochem Nutr* 27: 151-159.
4. Matsuo T, Kang SH, Suzuki H, Suzuki M. 2002. Voluntary resistance exercise improves blood hemoglobin concentration in severely iron-deficient rats. *J Nutr Sci Vitaminol* 48: 161-164.
5. Granick S. 1966. The induction *in vitro* of the synthesis of δ -aminolevulinic acid synthetase in chemical porphyria: a response to certain drugs, sex hormones and foreign chemicals. *J Biol Chem* 241: 1359-1375.
6. Granick S, Urata G. 1963. Increase in activity of δ -aminolevulinic acid synthetase in liver mitochondria induced by feeding of 3,5-dicarboxy-1,4-dihydrocollidine. *J Biol Chem* 238: 821-827.

7. Weaver CM, Rajaram S. 1992. Exercise and iron status. *J Nutr* 122: 782-787.
8. Scjokman CP, Ingrid H, Rutishauser E, Wallace RJ. 1999. Pre- and post-game macronutrient intake of a group of elite Australian football players. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 9: 60-96.
9. Foster C, Thompon NN, Dean J, Kirkendall DT. 1986. Carbohydrate supplementation and performance in soccer players. *Med Sci Sports Exerc* 18(suppl): S12.
10. Boggs TR, Morris RS. 1909. Experimental lipemia in rabbits. *J Exp Med* 11: 553-560.
11. Weight LM, Jacobs P, Noakes TD. 1992. Dietary iron deficiency and sports anaemia. *Br J Nutr* 68: 253-260.
12. Finch CA, Cook JD. 1984. Iron deficiency. *Am J Clin Nutr* 39: 471-477.
13. Kim HYP, Lee PY, Jang YA. 1998. Iron status of female athletes involved in aerobic sports. *Nutr Sci* 1: 29-33.
14. Sassa S. 1982. δ -aminolevulinic acid dehydratase assay. *Enzyme* 28: 133-145.
15. Chan SK, Reibling A, Mahaffey WL, Lin CC. 1973. The δ -aminolevulinic acid synthetase activity and the effect of exogenous δ -aminolevulinate on the synthesis of cytochrome c in the thoracic muscles of the tobacco horn worm during adult development. *Biochem Biophys Acta* 329: 251-255.
16. Granick S, Sassa S. 1971. δ -aminolevulinic acid synthetase and the control of heme and chlorophyll synthesis. In *Metabolic regulation*. Vogel HJ, ed. Academic, New York. Vol 5, p 77-141.
17. Prasad MK, Pratt CA. 1990. The effects of exercise and two levels of dietary iron on iron status. *Nutr Res* 10: 1273-1283.
18. Holloszy JO, William WW. 1979. Induction of δ -aminolevulinic acid synthase in muscle by exercise or thyroxine. *Am J Physiol* 236: R180-R183.
19. Zhong MQ, De SX, Qin KL, Kwok PH. 2001. Effect of different durations of exercise on transferrin-bound iron uptake by rat erythroblast. *J Nutr Biochem* 13: 47-54.
20. Kang HS. 2002. Effect of long-term voluntary resistance exercise on heme biosynthesis. *Proceedings of 2004 Fall Korean Nutritional Science Meeting*. p 89.
21. Roughead ZK, Johnson LK, Hunt JR. 1999. Dietary copper primarily affects antioxidant capacity and dietary iron mainly affects iron status in a surface response study of female rats fed varying concentration of iron, zinc and copper. *J Nutr* 129: 1368-1376.
22. Kim HYP, Kang HS. 2003. Effect of iron supplementation and training on serum lipid and lipoprotein cholesterol profile. *Korean J Environ Biology* 21: 189-193.
23. Chung IK. 1986. The changes of blood iron, lipid and exercise capacity during summer training period. *MS Thesis*. Korea Univ., Korea.

(2005년 2월 28일 접수; 2005년 5월 17일 채택)