

흰쥐에서 고혈당 및 고지질혈증이 운동 중 골격근 당원이용에 미치는 영향

영남대학교 의과대학 정형외과학교실, 생리학교실*
안종철 · 이동우 · 손욱진 · 이석강*

The Effects of Hyperglycemia and Hyperlipidemia on Muscle Glycogen Utilization during Exercise in Rats

Jong Chul Ahn, Dong Woo Lee
Oog Jin Shon, Seuk Kang Lee*

*Department of Orthopedic Surgery and Physiology**
College of Medicine, Yeungnam University, Taegu, Korea

Abstract -

The effects of hyperglycemia and hyperlipidemia on utilization of muscle glycogen during 45 minute session of treadmill running(26 m/min, 8 % grade) were evaluated using Sprague Dawley rats, and the characteristics of the 4 different type of muscles, i.e., soleus, white and red gastrocnemius, and plantaris, on glycogen utilization were simultancously investigated.

Hyperglycemia was induced by 145-165 mg/dL of oral glucose administration, and hyperlipidemia was induced by combined treatment of intraperitoneal heparine injection of 444 uEq/L and 10 % intralipose oral administration.

During the hyperglycemic trial, the glycogen utilization of plantaris muscle was decreased by 13 % in 45 minute session of treadmill running compared to the control trial ($p < 0.05$), and the glycogen utilization of white gastrocnemius was also decreased. The sparing tendency of glycogen was observed in soleus and red gastrocnemius by 5-13 % during 30 and 45 minute session of treadmill running in hyperglycemic trial.

There was no glycogen sparing effect of hyperlipidemia in soleus, red gastrocnemius and plantaris muscle subjected in this experiment during exercise. However, only a slight sparing tendency of white gastrocnemius muscle was observed.

In summary, the glycogen sparing effect of hyperglycemia during exercise was observed in plantaris and white gastrocnemius muscles in rats. However, there was no glycogen sparing

effect of hyperlipidemia in the 4 hindlimb muscles. It was observed that the glycogen sparing effect of hyperglycemia is more prominent in fast glycolytic muscle fibers.

Key Words: Hyperglycemia, Hyperlipidemia, Muscle

서 론

당원이 활농근의 중요한 에너지원이라는 것은 잘 알려진 사실이며 (Richter와 Galbo, 1986; 인주철 등, 1987; Friedman 등, 1991; 이용주 등, 1995), 지속적인 운동부하에 의한 근육내 저장 당원의 고갈은 골격근 수축의 제한인자로 인식되고 있다 (Bergstrom 등, 1967). 그러므로 운동중 골격근에 저장되어있는 당원의 효과적인 이용 혹은 절약은 근 수축에 따른 에너지원의 효율적인 관리라는 측면에서 중요한 명제라 할 수 있을 것이다.

골격근은 자극에 의해서 sarcoplasmic reticulum으로부터 Ca^{2+} 이 유리되며 Ca^{2+} 은 phosphorylase kinase b를 활성화하여 phosphorylase b를 활성형 당원분해효소인 phosphorylase a로 전환시켜 골격근내 당원을 에너지원으로 이용한다 (Newsholme and Leech, 1983). 저장 당원의 운동 중 소모량은 골격근의 수축 빈도, 수축기간 등에 의해서 결정된다. 한편 골격근내 당원의 축적은 골격근 섬유 막의 당에 대한 투과도 증가 (인슐린 혹은 골격근의 수축), 당의 지속적인 공급, 당원 합성효소인 glycogen synthase I의 활성도 증가, 당원 분해효소의 활성도 억제 등에 의해서 증가하는 것으로 알려져 있다 (Friedman 등, 1991). 당원이 운동 중 골격근의 중요한 에너지원이라는 것은 잘 알려진 사실이지만 지방도 안정상태 골격근의 에너지원으로 이용되는 것은 물론 장시간의 지구력을 요하는 운동의 중요한 에너지원으로 이용되고 있다 (Costill 등, 1977; Hickson 등, 1977). 운동 중 골격근의 에너지 공급은 체내저장 에너지원과 운동 중 외부로부터 공급되는 에너지원으로 구분 할 수 있으며 외부로부터 공급되는 에너지원의 이용이 효율적으로 이루어 질 수 있다면 체내 저장형 에너지원의 절약 효과는 물론 외부로부터 에너지원의 추가공급이라는 차원에서 생리적으로 중요한 의의가 있다고 할

수 있을 것이다.

중등도 이하 강도 (30-60% VO_{2max})의 지속적인 운동중 고혈당을 유지하였을 때 에너지원으로 골격근에 저장된 당원의 절약효과 (glycogen sparing effect)가 있다고 하며 이때 당원의 절약효과는 혈당 농도가 높을수록 높다고 한다 (Ahlbrog와 Felig, 1976; Pirnay 등, 1977; Pallikarakis 등, 1986; Wasserman 등, 1989). 그러나 강한 운동시 고혈당이 골격근 당원의 절약효과에 관한 연구는 비교적 많지 않으며 Coyle 등 (1991)은 최대산소소비량의 73%에 해당되는 강한 운동을 부하하는 동안 혈당농도를 10am의 고농도를 유지하였으나 골격근의 당원 절약효과는 없었다고 하였다. 이와 같이 운동의 강도 혹은 혈당농도 등의 여러 가지 인자의 변동에 따라 저장 에너지원의 절약효과에 관해서는 아직도 논란의 여지가 많다. 또한 흥미로운 것은 지방의 효율적인 이용에 따른 당원의 절약효과에 대한 Ivy 등 (1979)의 연구결과인데 Ivy 등 (1979)은 caffeine을 경구 투여하여 혈중 유리지방산의 농도를 높인 후 운동을 부하하여 혈당을 높인 군과 운동 수행능력을 비교한 결과 caffeine군에서 더 효율적이었다고 하였으나 유리지방산의 당원 절약효과에 대해서는 연구결과가 많지 않는 편이다. 본 연구에서는 중등도의 운동을 단시간동안 부하한 흰쥐에서 고혈당과 고지질혈증이 체내 저장 에너지원인 골격근의 당원 절약효과가 있는지 여부를 규명하고자 하였으며 특히 골격근을 구성하고 있는 근 섬유에 따른 차이를 규명함으로써 각 골격근 섬유의 에너지 대사의 특성을 아울러 규명하고자 하였다.

대상 및 방법

본 실험은 체중 150gm 내외의 Sprague Dawley 종 흰쥐 암컷을 대상으로 하여 답자 운동검사

(Treadmill exercise test)로 달리기 운동을 부하하여 운동 중 하지근의 당원농도의 감소를 관찰하고 이때 혈당, 유리지방산의 농도를 측정하여 고혈당과 고지질 혈증이 수축근의 당원대사에 미치는 영향을 관찰하였다. 본 연구에 사용한 하지근은 가자미근(soleus), 백색 및 적색 비복근(white and red gastrocnemius), 및 족척근(plantaris)이며 각 근육의 근섬유 구성은 그림 1에서 보는 바와 같이 가자미근은 대부분이 slow oxidative fiber(SO)로 구성되어 있는 서근이며(Amstrong과 Phelps, 1984), 백색 비복근은 대부분이 fast glycolytic fiber(FG)로 구성된 속근이다. 적색 비복근과 족척근은 다같이 속근에 해당되지만 근 섬유의 구성으로 볼 때 서근과 속근의 중간적 특성의 근육으로서 적색 비복근은 SO 근섬유와 fast oxidative glycolytic fiber(FOG)가 많아서 생리적으로 서근에 더 가깝고, 족척근은 FG와 FOG가 많아서 속근에 더 가깝다.

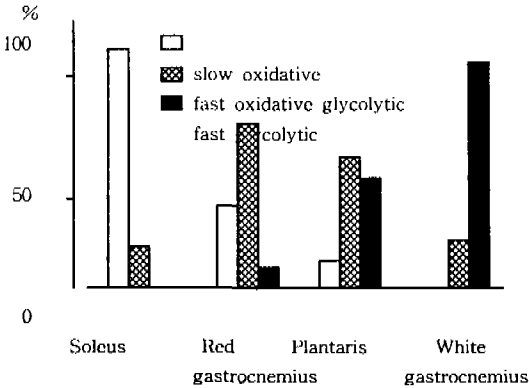


Fig. 1. The muscle fiber composition of rat hindlimb muscles.

운동부하와 고혈당과 고지질혈증의 유도: 모든 운동부하 흰쥐는 운동부하 전 3일간의 적응훈련을 실시하였으며 적응훈련은 무작위적으로 취한 실험동물을 하루 중 적당한 시간에 20-26m/min의 속도로 경사 3도에서 10-20분간 답차 운동검사로 달리기 운동을 실시하였다. 적응훈련이 끝난 실험동물을 고혈당의 영향을 관찰하기 위하여 고혈당군과 대조군으로 구분하였으며 다시 각군을 운동부하 0, 30 및 45분군으로 세분하였다. 또 고지질혈증의 영향을 보

기 위하여 대조군, 대조운동군 및 고지질혈증운동군으로 구분하였으며 운동부하는 45분간 실시하였다. 모든 실험군에서 운동부하 전 근육내 당원농도를 높이기 위해서 40%의 glucose용액을 체중 100gm당 1ml을 실험전 경구 투여하였다. 고혈당군에서는 고혈당을 유도하기 위하여 25%의 glucose용액을 체중 100gm당 1ml을 추가로 경구 투여하여 혈당농도는 평균 155 mg/dL이 되게 하였다.

고지질혈증은 복강내 500 IU의 heparin투여와 10% 인트라리포즈(한국, 녹십자)의 경구투여로 유도하였으며(Boden 등, 1995), 이때 혈중 유리지방산농도는 평균 444 uEq/L였으며 대조 및 대조운동군에서는 각각 평균 247 및 260 uEq/L였다.

운동 중 당원 감소 양상을 보기 위한 운동부하는 흰쥐에서 최대산소소비량의 50-60%에 해당하는 중등도 강도의 답차 운동검사로 달리기 운동을 부하하였으며 이때 답차 운동검사의 속도는 26 m/min, 경사 8도에서 시행하였다. 본 연구에 사용된 답차 운동검사는 흰쥐용 EXER-4(미국, Columbus Instrument)이었다. 본 실험의 구체적인 방법은 그림 2에서 보는 바와 같다.

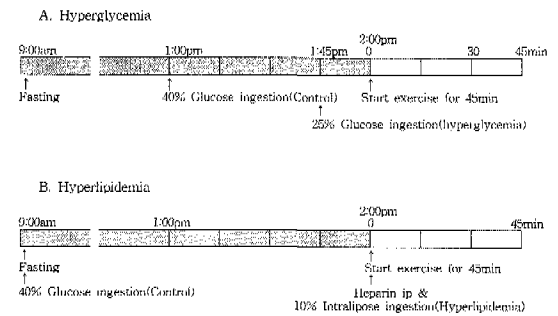


Fig. 2. Experimental protocol of hyperglycemia and hyperlipidemia studies in rats.

시료의 채취 및 분석: 모든 실험군에서 시료의 채취를 위하여 먼저 실험동물을 pentothal sodium (40 mg/kg)을 복강내투여하여 마취한 후 복강을 개복하여 복대동맥으로부터 약 5ml의 혈액을 채취하여 혈당을 분석하였으며 나머지 혈액은 원심분리하여 혈장을 얻은 후 유리지방산을 측정할 때까지 액체질소탱크에 보관하였다.

시료의 분석은 당원농도는 Lo 등(1970)의 방법

으로, 혈당은 미국 YSI제품 1500 Sidekick 혈당분석기로, 유리지방산은 효소법을 이용한 kid(일본 영연화학)를 사용하여 분석하였다.

실험성적의 분석은 평균과 표준오차로 하였으며 통계처리는 SPSS PC/+를 이용하여 t-test를 실시하여 유의수준은 $p < 0.05$ 로 하였다.

성 적

고혈당과 고지질혈증이 운동 중 골격근의 저장 당원의 절약효과가 있는지 여부를 관찰한 실험성적은 다음과 같다.

대조군에서 가자미근의 운동부하 전 당원농도는 $7.17 \pm 0.42 \text{ mg/100 gm wet wt.}$ 였으며 운동부하 30분에는 $3.60 \pm 0.38 \text{ mg/100 gm wet wt.}$ 로써 운동부하 전에 비해서 약 50% ($p < 0.001$)로,

45분에서는 $2.74 \pm 0.26 \text{ mg/100 gm wet wt.}$ 로써 약 38%로 감소하였다 ($p < 0.001$). 고혈당군에서는 운동부하 30분 및 45분에 각각 운동부하 전에 비해서 59% 및 50%로 모두 유의하게 감소 ($p < 0.001$)하였다. 고혈당군의 감소정도와 대조군의 그것들을 비교한 결과 고혈당군에서 감소의 정도가 낮은 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 적색 비복근에서는 대조군에서 30분 및 45분에 각각 67% 및 53%로 모두 감소 ($p < 0.001$)하였으나 고혈당군에서는 각각 72% 및 62%로 감소(각각 $p < 0.01$, $p < 0.001$)하였으며 고혈당군과 대조군을 서로 비교한 결과 가자미근의 그것과 비슷한 경향을 보였다(표 1). 한편 백색 비복근에서는 대조군에서는 운동부하 30 및 45분군에서 각각 90% 및 85%였으며 45분군은 통계적으로 유의하게 감소 ($p < 0.05$)였으나, 고혈당군에서는 각각 95% 및 94%로서 통계적으로 변화가 없어서 고혈당에 의한 당원절약

Table 1. Effects of hyperglycemia on glycogen utilization of soleus and red gastrocnemius muscles during treadmill running in rats

Duration of running, min	Glycogen concentration, mg/100gm wet wt.			
	Soleus		Red gastrocnemius	
	Control	Hyperglycemia	Control	Hyperglycemia
0	7.17 ± 0.42	6.92 ± 0.43	7.24 ± 0.26	7.00 ± 0.47
30	$3.60 \pm 0.38^{**}$	$4.11 \pm 0.24^{**}$	$4.86 \pm 0.26^{**}$	$5.02 \pm 0.28^*$
45	$2.74 \pm 0.26^{**}$	$3.50 \pm 0.37^{**}$	$3.82 \pm 0.26^{**\#}$	$4.31 \pm 0.30^{**}$

Values are means \pm SE for 8-11 rats, * $p < 0.01$, ** $p < 0.001$ vs 0 min., # $p < 0.05$ vs 30 min.

Table 2. Effect of hyperglycemia on glycogen utilization of plantaris and white gastrocnemius muscles during treadmill running in rats

Duration of running, min	Glycogen concentration, mg/100gm wet wt.			
	Plantaris		White gastrocnemius	
	Control	Hyperglycemia	Control	Hyperglycemia
0	6.14 ± 0.21	5.27 ± 0.40	5.36 ± 0.14	4.93 ± 0.30
30	$4.44 \pm 0.38^*$	4.76 ± 0.33	4.80 ± 0.21	4.70 ± 0.25
45	$4.21 \pm 0.29^{**}$	$4.32 \pm 0.21^{**}$	$4.56 \pm 0.27^{\#}$	4.61 ± 0.21

Values are means \pm SE for 7-10 rats, * $p < 0.01$, ** $p < 0.001$, # $p < 0.05$ vs 0 min., $^{\#}p < 0.05$ vs control.

Table 3. Blood glucose concentration of hyperglycemia group of exercise loaded rats

	Blood glucose concentration, mg/dL		
	Duration of exercise, min		
	0	30	45
Control	110 ± 7.0	129 ± 5.3	127 ± 3.6
Hyperglycemia	145 ± 7.4*	164 ± 6.2*	156 ± 6.8*

Values are mean ± SE for 6-10 rats. *p<0.01 vs control

Table 4. Effect of hyperlipidemia on glycogen utilization of hindlimb muscles during treadmill running in rats

	Glycogen concentration, mg/100gm wet wt.				FFA, uEq/L
	Soleus	Red gastroc.	Plantaris	White gastroc.	
Control	5.96 ± 0.55	5.67 ± 0.44	5.83 ± 0.48	5.80 ± 0.40	247 ± 41.1
Control-E	2.29 ± 0.19**	3.84 ± 0.21*	4.31 ± 0.17 [†]	4.98 ± 0.38	260 ± 58.6
HL-E	2.26 ± 0.30**	3.64 ± 0.19*	4.31 ± 0.35 [‡]	5.45 ± 0.42	444 ± 23.1**

Values are mean ± SE for 7-8 rats. Control-E, HL-E, FFA and gastroc. mean control exercise, hyperlipidemia exercise, free fatty acid and gastrocnemius, respectively. [†]p<0.05, *p<0.01, **p<0.001 vs control. [‡]p<0.05 vs Control-E.

효과가 운동부하 45분군에는 있었다. 생리적으로 속근에 더 가까운 족척근은 대조군에서 운동부하 30 및 45분에 운동부하 전에 비해서 각각 72% 및 69%로 감소(각각 p<0.01, p<0.001) 하였으나 고혈당군에서는 각각 90% 및 82%였다. 대조군의 운동부하 45분군과 고혈당군의 운동부하 45분군을 서로 비교한 결과 고혈당군에서 통계적으로 유의하게 높아서 고혈당에 의한 당원절약효과를 볼 수 있었다 (p<0.05) (표 2).

대조군과 고혈당군의 혈당농도는 대조군에서 운동부하 전 및 운동부하 후 30 및 45분군에서 각각 110 ± 7.2, 129 ± 5.3 및 127 ± 3.6 mg/dL였으며 고혈당군은 각각 145 ± 7.4, 164 ± 6.2 및 156 ± 6.8 mg/dL로서 대조군의 그것들과 비교하여 고혈당군에서 통계적으로 유의하게 높았다 (p<0.01) (표 3).

운동부하 중 근당원의 소모에 미치는 고지질혈증의 영향에 관한 실험성적은 다음과 같다. 대조군에서 가자미근과 적색 비복근의 당원농도는 각각 5.96 ± 0.55 및 5.67 ± 0.44 mg/100gm wet wt.였으며

족척근과 백색 비복근의 그것들은 각각 5.83 ± 0.48 및 5.80 ± 0.40 mg/100gm wet wt.였다. 45분간 운동을 부하한 대조운동군의 당원농도는 가자미근과 적색 비복근에서 각각 대조군의 38 및 68%로 감소하였으며 (p<0.001, p<0.01), 족척근의 당원농도는 74%로 감소 (p<0.05) 하였고 백색 비복근의 당원농도는 86%였다. 고지질혈증군에서 대조군과 같이 45분간 운동을 부하한 후 가자미근과 적색 비복근의 당원농도는 각각 38 및 64%로 감소하여 대조운동군의 그것들과 유의한 차이가 없었다. 족척근과 백색 비복근의 당원농도는 각각 74 및 94%로 감소하여 족척근은 대조운동군과 비교하여 차이가 없었으나 백색 비복근의 당원농도는 대조운동군에서 86%로 감소하였는데 비해서 고지질혈증군에서는 94%로 감소하여 당원 절약의 경향을 보였다 (그림 3).

대조군에서 혈중 유리지방산농도 (uEq/L)는 247 ± 41.1이였으며 45분간 운동을 부하하였을 때 혈중 유리지방산 농도는 260 ± 58.6이였다. 고지질혈증을 유도하기 위해서 heparin을 복강내로 투여하고 동시

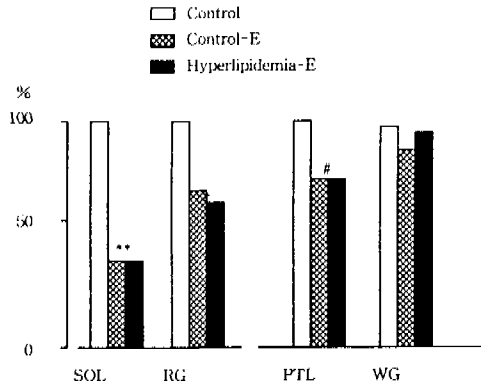


Fig. 3. Effect of hyperlipidemia on muscle glycogen utilization during 45 minutes treadmill running in rats.
[#]p<0.05, ^{**}p<0.01, p<0.001 vs control.

에 인트라리포즈를 경구투여하여 45분간 운동을 부하하였을 때 혈중 유리지방산농도는 444 ± 23.1로서 대조 및 대조운동군에 비해서 각각 유의하게 높았다 (p<0.05, p<0.01) (표 4).

고 찰

본 연구에서 유도한 고혈당군의 운동부하직 후 측정된 각군의 혈당농도는 145-164 mg%로서 대조각군의 110-129 mg%보다는 유의하게 높았다. 고지질혈증군의 유리지방산 농도는 운동 부하직 후 측정된 값이 평균 444 uEq/L로서 대조군과 대조운동군의 각각의 평균 247 및 260 uEq/L보다 통계적으로 유의하게 높았다. 고지질혈증군에서 운동부하직 후 측정된 유리지방산 농도가 특별히 높지 않은 것은 근당원을 과축적시키기 위해서 운동부하 전에 포도당을 경구 투여한 것과 실험동물을 단시간만 절식시킨 결과인 것으로 생각된다 (Randle 등, 1963; 이석강 등, 1986).

본 연구의 중요한 실험결과는 지속적으로 유지된 고혈당에 의해서 운동부하 직후 측정된 근당원의 농도가 근육에 따라 차이가 있었지만 모든 근육에서 정상혈당군의 그것들보다 5-18% 높은 값을 보였으며 특히 족척근에서는 45분간 운동을 부하하였을 때 고혈당군에서 약 13%의 당원 절약효과가 있었으며

이것은 대조군의 그것보다 통계적으로 유의하게 높았다. 또한 백색 비복근에서 각 운동부하시간의 고혈당군과 대조군 사이의 당원농도를 비교한 결과 통계적으로 유의한 차이를 발견할 수 없었으나 대조군에서는 운동부하 45분에 운동부하 전에 비해서 유의한 감소를 보였으나 고혈당군에서는 운동부하 45분의 당원농도가 운동부하 전에 그것과 통계적으로 차이가 없는 것은 고혈당에 의한 백색 비복근의 당원 절약효과를 할 수 있다. 고지질혈증군에서 각 근육의 운동부하 후 당원농도는 대조운동군의 그것들과 비교하여 통계적으로 유의한 차이가 없어서 고지질혈증에 의한 당원 절약효과를 발견할 수 없었으나 다만 백색 비복근에서 고지질혈증군에서 대조군보다 당원농도가 약 8% 높은 경향을 보였다.

고혈당군에서 관찰한 족척근의 당원농도가 대조군의 그것보다 통계적으로 유의하게 높았으며 그외 가자미근, 적색 및 백색 비복근에서 다같이 높은 경향을 보인 것은 Bagby 등(1978), Bergstrom과 Hulman(1967) 및 Winder 등(1988)의 실험 결과와 유사하였다. 이들이 10-30 mM의 고혈당상태에서, 1-2시간동안의 비교적 장시간 운동 중 근당원의 절약효과를 보았다고 하였으나 본 연구에서는 8-9 mM의 낮은 고혈당과 45분이라는 비교적 단시간의 운동부하 중에서도 근당원의 절약효과를 나타내었다고 할 수 있다. 고혈당이 근당원의 절약요인으로 작용할 수 있는 기전은 운동 중 당원분해의 억제 (reduced glycogenolysis) 나 당원의 합성증가 (increased glycogen synthesis)로 생각할 수 있지만 Constable 등(1984)과 Kuipers 등(1987)의 연구결과-운동부하에 의해서 근당원의 농도가 감소하였을 때 충분한 양의 포도당이 공급된다면 운동부하 중에도 근당원이 합성된다를 볼 때 후자에 의한 결과가 아닌가 생각된다. 본 연구와 병행하여 시행한 연구(미발표)에서 운동부하 전 경구투여한 ¹⁴C glucose가 운동부하 후 골격근에 잔존한 양이 고혈당군이 대조군에 비해서 낮았으며 이는 수축근 내로 섭취된 포도당의 이용이 증가된 결과 당원분해가 억제된 것도 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 본 실험의 결과만으로는 운동 중 당원 합성이 그 원인이라고 단정하기는 어려울 것으로 생각된다.

Coyle 등(1991)은 사람을 대상으로하여 10mM의 고혈당을 유지하면서 최대산소소비량의 73%의 강한 운동을 2시간동안 부하하였을 때 당원의 절약효과는 발견할 수 없었으나 당 대사는 항진되었으며 결과적으로 운동의 지속시간을 연장할 수 있었다고 하였으며 Hargreaves와 Briggs(1988) 및 Vissing 등(1988)은 정상 혈당을 유지하는 수준의 당투여로는 당원의 절약효과가 없었다고 하였다.

한편 고혈당에 의한 수축근의 당원 절약효과가 생리적으로 수축근의 특성이 강한 족척근이나 백색 비복근이 서근의 특성이 강한 가자미근이나 적색 비복근에 비해서 큰 것은 흥미로운 결과로서 본 실험에서는 각 근육의 당원섭취, 당원분해 및 합성효소 등을 관찰하지 않아서 정확한 원인을 언급하기 어려우나 Bonen과 Homonko(1994)와 그의 연구자들(McLanc and Holloszy, 1979; Talmadge 등, 1989; Talmadge 등, 1991)의 연구결과를 참조하여 부분적으로 설명할 수 있을 것으로 생각된다. 골격근의 당원은 주로 포도당으로부터 합성되지만 상당히 많은 부분의 근 당원은 당대사 산물인 lactate로부터 당원이 신생(gluconeogenesis)되며 그 정도는 서근에서보다 수축근에서 더 많다고 하며 특히 운동부하 후 높다고 하여 lactate에 의한 당원 신생이 항진된 것이 부분적인 원인으로 작용 할 수 있을 것으로 생각된다. 본 실험의 조건 중 짧은 운동부하 시간과 낮은 정도의 고혈당 등의 조건을 바꾸어서 더 높은 고혈당과 장시간의 운동을 부하한다면 더 확실한 당원 절약 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

고지질혈증군에서는 운동부하 중 근당원의 절약 효과를 볼 수 없었으며 다만 백색 비복근에서 약간의 절약 경향을 발견할 수 있었다. Costill 등(1977)과 Rennie 등(1976)은 혈중 유리지방산농도를 대조군에 비해서 약 5배 높였을 때 약 40%의 당원절감효과를 보았다고 하였으며 서근에서 더 저명한 효과가 있었다고 하였다. 그러나 본 실험의 결과는 위 연구자들의 결과와 일치하지 않았으며 그것은 Ivy 등(1991)의 운동부하 60분이후 유리지방의 이용이 증가된다는 실험결과와 비교할 때 본 연구는 운동부하 45분까지 관찰한 결과라서 절약효과가 없었는지 혹은 유리지방산농도가 대조군의 그것보다 단지 2배정도만 높은 고지질혈증 때문인지 구체적으

로 설명하기는 어렵다. 이상의 결과로 미루어 보아 흰쥐에서 비교적 낮은 정도의 고혈당에서도 운동부하 중 근당원의 절약효과를 관찰할 수 있었으며, 고지질혈증으로는 운동 중 당원의 절약효과를 발견할 수 없었다. 또한 수축근의 근육에서 고혈당에 의한 당원절약효과가 서근에서보다 뚜렷하였다.

요 약

고혈당과 고지질혈증이 운동 중 골격근의 당원 절약효과가 있는지 또는 골격근섬유의 특성에 따른 차이가 있는지를 규명하기 위해서 흰쥐(Sprague Dawley)를 대상으로 실험한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 고혈당에 의한 결과는 하지근 중 족척근의 운동부하 45분군의 당원농도가 고혈당군에서 대조군의 그것보다 약 13% 높아서 고혈당에 의한 족척근의 당원절약효과를 관찰할 수 있었으며 또한 백색 비복근의 운동부하 45분군에서 절약효과를 관찰할 수 있었다. 그러나 서근인 가자미근과 서근의 특성이 강한 적색 비복근에서는 모든 실험군에서 5-13%의 절약경향이 있었다. 이때 고혈당군의 혈당농도는 운동부하 전, 운동부하 30 및 45분후에 각각 145.7 ± 7.4 , 164 ± 6.2 및 156 ± 6.8 mg/dL로서 대조각군의 혈당농도보다 유의하게 높았다.

고지질혈증은 복강내 heparin투여와 10% 인트라리포즈를 경구 투여하여 유도하였으며 대조군, 대조운동부하군 및 고지질혈증군에서 유리지방산 농도(μ Eq/L)가 247 ± 41.1 , 260 ± 58.6 및 444 ± 23.1 로서 고지질혈증군이 다른 양 군보다 유의하게 높았다. 고지질혈증에 의한 근당원절약효과가 있는지 여부를 관찰한 결과 가자미근, 적색 비복근 및 족척근 등에서 통계적으로 유의한 절약효과를 관찰할 수 없었으나 백색 비복근에서 절약의 경향을 보였다.

이상의 결과로 보아 흰쥐에서 비교적 단시간의 운동부하 중 평균 155 mg/dL의 고혈당을 유지하였을 때 족척근과 백색 비복근에서 근 당원이 절약되었으며 고지질혈증에 의해서는 근당원의 절약효과가 없었다. 또한 수축근의 근육에서 고혈당에 의한 당원절약효과가 서근보다 뚜렷하였다.

참 고 문 헌

- 이석강, 인주철, 안종철, 이영만, 김종연, 이동철: 절식흰쥐에서 운동부하기간의 차이에 따른 체내저장 glycogen과 유리지방산의 이용양상. 대한스포츠의학회지 4: 77-83, 1986.
- 이용주, 김종연, 안종철, 이석강: 석고고정 후 회복기 골격근의 당원대사. 대한정형외과학회지 30: 787-793, 1995.
- 인주철, 김세동, 이동철, 이석강, 이영만, 김종연: 골격근의 초기 Glycogen함유량 정도와 glucose 경구투여가 근 glycogen의 재축적에 미치는 영향. 대한정형외과학회지 22: 349-355, 1987.
- Ahlbrog G, Felig P: Influence of glucose ingestion on fuel hormone response during prolonged exercise. *J Appl Physiol* 41: 638-688, 1976.
- Armstrong RB, Phelps RO: Muscle fiber type composition of the rat hindlimb. *Am J Anat* 171: 259-272, 1984.
- Bagby G, Green H, Katsuto S, Gollnick P: Glycogen depletion in exercising rats infused with glucose, lactate or pyruvate. *J Appl Physiol* 45: 425-429, 1978.
- Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B: Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 71: 140-150, 1967.
- Bergstrom J, Hultman E: A study of glycogen metabolism during exercise in man. *Scand J Clin Invest* 19: 218-228, 1967.
- Boden G, Chen X, Rosner J, Barton M: Effects of a 48-h fat infusion on insulin secretion and glucose utilization. *Diabetes* 44: 1230-1242, 1995.
- Bonen A, Homonko DA: Effect of exercise and glycogen depletion on glyconeogenesis in muscle. *J Appl Physiol* 76: 1753-1758, 1994.
- Constable SH, Young JC, Higuchi M, Holloszy JO: Glycogen resynthesis in leg muscles of rats during exercise. *Am J Physiol* 247 (Regulatory Integrative Comp Physiol 16: 880-883, 1984.
- Costill DL, Coyle E, Dalsky G, Evans W, Fink W, Hoopes D: Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J Appl Physiol* 43: 695-699, 1977.
- Coyle EF, Hamilton MT, Alonso JG, Montain SJ, Ivy JL: Carbohydrate metabolism during intense exercise when hyperglycemia. *J Appl Physiol* 70: 834-840, 1991.
- Friedman JE, Neuffer PD, Dohm GL: Regulation of glycogen resynthesis following exercise. Dietary consideration. *Sports medicine* 11: 232-243, 1991.
- Hargreaves M, Briggs CA: Effect of carbohydrate ingestion on exercise metabolism. *J Appl Physiol* 65: 1553-1555, 1988.
- Hickson RC, Rennie MJ, Conlee RK, Winder WW, Holloszy JO: Effect of increased plasma fatty acids on glycogen utilization and endurance. *J Appl Physiol* 43: 829-833, 1977.
- Ivy JL, Costrill DL, Fink WJ, Lower RW: Influence of caffeine and carbohydrate feedings on endurance performance. *Med. Sci. Sports* 11: 6-11, 1979.
- Kuipers H, Keizer HA, Brouns F, Saris HM: Carbohydrate feeding and glycogen synthesis during exercise in man. *Pfluegers Arch* 410: 652-656, 1987.
- Lo S, Russel JC, Taylor AW: Determination of glycogen in small tissue sample. *J Appl Physiol* 28: 234-236, 1970.
- McLane JA, Holloszy JO: Glycogen synthesis from lactate in three types of skeletal muscle. *J Biol Chem* 254: 6548-6553, 1979.
- Newsholme EA, Leech AR: *Biochemistry for the Medical Sciences*. Wiley, New York, 1983, pp 178, 184, 339-346.
- Pallikarakis N, Jandrain B, Pirnay F, Lacroix M, Luyckx AS, Lefebvre PJ: Remarkable metabolic availability of oral glucose during long-duration exercise in human. *J Appl Physiol* 60: 1035-1042, 1986.
- Pirnay F, Lacroix M, Mosora F, Luyckx A, Lefebvre PJ: Effect of glucose ingestion on energy substrate utilization during prolonged muscular exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 36: 247-254, 1977.
- Randle PJ, Garland PB, Hales CN, Newsholme EA: The glucose fatty acid cycle. Its role for insulin sensitivity and the metabolic disturbance of

- diabetes mellitus. *Lancet* 13: 785-789, 1963.
- Rennie M, Winder WM, Holloszy JO: A sparing effect of increased free fatty acids on muscle glycogen content in exercising rat. *Biochem J* 156: 647-655, 1976.
- Richter EA, Galbo H: High glycogen levels enhance glycogen breakdown in isolated contracting skeletal muscle. *J Appl Physiol* 61: 827-831, 1986.
- Talmadge R, Scheide J, Silverman H: Glycogen synthesis from lactate in a chronically active muscle. *J Appl Physiol* 66: 2231-2238, 1989.
- Talmadge R, Silverman H: Glyconeogenic and glycogenic enzymes in chronically active and normal skeletal muscle. *J Appl Physiol* 71: 182-191, 1991.
- Vissing J, Sonne B, Galbo H: Regulation of hepatic glucose production in running rats studies by glucose infusion. *J Appl Physiol* 65: 2552-2557, 1988.
- Wasserman DH, Rice DE, Geer R, Flakoll PJ, Hill JO, Abumrad NN: Interaction of exercise and insulin in the regulation of carbohydrate, fat and amino acid metabolism in man (abstract). *Med Sci Sports Exercise* 21: 266, 1989.
- Winder WW, Arogysami J, Yang HT, Thompson KG, Nelson LA, Kelly KP, Han DH: Effects of glucose infusion in exercising rats. *J Appl Physiol* 64: 2300-2305, 1988.