

## <sup>14</sup>C-glucose를 이용한 시험관 실험에서 비후 골격근의 glycogen 합성능

영남대학교 의과대학 생리학교실  
김용운, 김종연, 이석강

### 서 론

골격근은 fast twitch white근, fast twitch red근 및 slow twitch red근 등 3가지 종류의 근섬유로 구성되어 있으며 이들은 수축하는 속도, 해당 및 산화 과정에 관여하는 효소의 활동도(activity) 등에서 큰 차이가 있다는 것은 잘 알려진 사실이다.<sup>1-4)</sup> 또한 최근의 보고에 의하면 각 근섬유의 insulin binding<sup>5)</sup> 및 insulin sensitivity도 차이가 있어서<sup>6,7)</sup> red 근섬유의 insulin에 의한 glucose 섭취 및 glycogen합성의 증가가 white근섬유의 그것보다 3-4배에 이른다고 한다<sup>8)</sup>.

한편 여러 운동부하에 대한 각 근섬유의 반응양상도 서로 달라서 내인성 운동에서는 slow twitch근섬유가 주로 관여하며<sup>9,10)</sup> 그와같은 훈련에 의해서 산소이용능력이 증가하게 된다<sup>11-15)</sup>. 그러나 역도, 단거리달리기와 같은 심한 훈련을 할때는 fast twitch 근섬유가 주로 관여하며 그 결과 근비후가 초래된다<sup>16)</sup>. 그러나 실험동물에서 달리기운동이 내인성운동의 모델로 사용될 수 있는데 비해 근비후를 초래할 수 있는 방법은 한정되어 있어서 이제까지 협력근의 절제를 통해서 근비후를 유도하여 비후근의 실험에 이용하고 있는 실정이며 이와같이 유도한 비후근은 협력근 절제 4주후에 효소의 활동도나 근 단백질

량에 있어서 안정상태에 도달한다고 하며<sup>17,18)</sup> 비후의 원인은 지속적인 과부하로 인한 근의 긴장에 있는 것으로 보인다<sup>18)</sup>. 아직까지 이와같은 대상성 비후근의 대사성 특성에 관하여는 논란이 많으나<sup>19,20)</sup>, 박등<sup>21)</sup>의 연구에서는 협력근 절제 4주후 대상성 비후근의 대사능을 glycogen의 소모 및 재축적 양상으로 평가한 결과에 따르면 fast twitch근인 extensor digitorum longus근은 정상 수준으로 회복한데 비해 slow twitch 근은 정상 수준에 못미치는 것으로 나타났었다.

근 glycogen이란 운동수행에 꼭 필요한 에너지원으로 이의 변동은 근육의 활동도를 짐작하는 지표로 많이 이용되고 있으며 그 합성은 glucose 섭취를 반영하는 glucose-6-phosphate의 근육세포내 농도와 glycogen농도 및 glycogen synthetase의 activity에 크게 좌우되며<sup>22)</sup> 일반적으로 glycogen합성능은 slow twitch, fast twitch red, fast twitch white근의 순으로 알려져 있다<sup>23)</sup>.

저자등은 산소이용능력이 높은 slow twitch 근섬유로 구성된 soleus근과 수축력이 높은 fast twitch근섬유로 구성된 plantaris근<sup>24)</sup>에 일반적으로 glucose 섭취 및 glycogen 합성을 증가시키는 것으로 알려진 운동부하, insulin 및 전기자극육가함으로서 시험관에서의 이들인자에 대한 각 근섬유의 반응을 규명하였으며 아울러 gastroc-

Table 1. The hypertrophy of soleus(slow twitch) and plantaris(fast twitch) at 4 weeks after removal of synergistic gastrocnemius muscles of both legs in rats

	Soleus		Plantaris	
	Control	Hypertrophy	Control	Hypertrophy
Body wt. gm	215±26 (9)	260±21 (9)	215±26 (9)	260±21 (9)
Wet wt. mg	91±10 (9)	173±15 (9)	190±35 (9)	417±111 (9)
Wet wt./BW % value	0.43±0.05 100 (9)	0.65±0.03 151 (9)	0.89±0.14 100 (9)	1.62±0.38 182 (9)
Dry/Wet wt.	0.29±0.02 (5)	0.27±0.01 (5)	0.27±0.01 (8)	0.27±0.01 (4)

Values are means±SD ; Values in parentheses are number of cases.

Table 2. The in vitro effect of pre-loaded exercise(E), insulin(I), direct electrical stimulation (EST) and the combinations of the stimuli on glucose incorporation into glycogen of slow twitch(soleus) and fast twitch(plantaris) muscles in control rats

nmol glucose/mg/30 min.

	R	E	I	EST	E+I	I+EST	E+EST	E+I+EST
Sol.	2.1±0.4 (7)	2.4±0.5 (7)	3.4±0.5* (7)	2.9±0.9# (6)	3.9±0.4** (7)	3.9±0.6** (6)	4.1±0.8* (6)	6.1±1.1** (6)
plant.	1.4±0.3 (7)	1.5±0.3 (7)	1.5±0.4 (7)	1.3±0.4 (6)	1.8±0.3 (7)	1.4±0.4 (6)	2.0±0.4# (6)	2.3±0.6## (6)

Values are means±SD ; Values in parentheses are number of cases ;

\*P<0.001, \*\*P<0.0001, #P<0.01, vs resting(R).

nemius라는 협력근을 제거함으로써 지속적인 과부하를 가하여 대상성 근비후를 유도한후 이 들에도 위의 인자들을 같은 방법으로 가하여 glycogen의 합성능을 측정함으로써 지속적인 과부하에 따른 각 근섬유의 반응을 평가하였다.

### 재료 및 방법

실험동물은 Sprague-Dawley 종 숫컷 흰쥐를 사용하였으며 근육의 비후는 gastrocnemius근을 절제하여 soleus와 plantaris근의 비후를 유도하

여 수술후 4주 후에 실험을 시행하였으며 실험에 앞서 표준화를 위해 전날 오후 5시부터 약 15시간 절식시켰다.

실험군은 대조군과 비후군으로 나누었으며 대조군에서는 soleus및 plantaris근에서 각각 안정군, 운동부하군, insulin첨가군, 전기자극군, 운동부하+insulin첨가군, 운동부하+전기자극군, 전기자극+insulin첨가군 및 운동부하+전기자극+insulin첨가군 등 8개 군으로 구분하였으며 비후군에서는 운동부하군, 운동부하+insulin첨가군, 운동부하+전기자극군, 및 운동부

Table 3. The in vitro glucose incorporation into glycogen molecules of hypertrophied slow twitch(soleus) and fast twitch(plantaris) muscles of rats ; effects of pre-loaded exercise and combining of insulin(I) and direct electrical stimulation(EST) with E

	HYPERTROPHY			
	E	E+I	E+EST	E+EST+I
Soleus	1.7±0.2 (6)	2.4±0.1*,# (6)	2.0±0.3* (8)	2.6±0.4**,## (8)
Plantaris	1.4±0.3 (6)	1.5±0.2 (6)	1.8±0.5 (8)	2.3±0.6@,@@ (8)

Values are means±SD ; Values in parentheses are number of cases ;

\*P<0.05 E+EST vs E ; \*\*P<0.001 E+EST+I vs E ; \*P<0.005 E+I vs E ; ##P<0.05 E+EST+I vs E+EST ; @P<0.01 E+EST+I vs E ; @@P<0.05 E+EST+I vs E+I.

하+전기자극+insulin 첨가군등 4개 군으로 나누었다.

운동의 부하는 treadmill에서 1.0km/hr의 속도로 30분간 달리기를 시켰으며 insulin(Velosulin, Nordisk, Denmark)의 첨가는 Krebs-Henseleit Buffer media 1ml당 20mU로 하였고 전기자극은 10volt의 강도, 초당 2회의 빈도, 자극시간 1msec로 1분간씩 10분동안 가하였으며 각 자극기간 사이에 1분간 휴식을 시켰다.

근표본은 secobarbital sodium으로 마취시킨후 soleus와 plantaris근을 노출한후 생체내의 긴장도로 2개의 pin이 달린 전극에 고정하고 25-35mg 무게의 근표본을 떼어 내었다. Incubation media로 16mMol glucose와 <sup>14</sup>C-glucose가 든 Krebs-Henseleit완충용액에 95% O<sub>2</sub>-5% CO<sub>2</sub> 혼합가스를 주입한 것을 사용하여 근표본을 넣은후 37°C 진탕 수조에서 30분간 incubation하였다.

Glycogen으로 incorporation된 glucose양을 알아보기 위하여 30분간 incubation후에 근표본을 ice cooled saline으로 수회 씻은후 30% KOH용액으로 녹이고 95% alcohol을 첨가하여 glycogen을 침착시켜서 방사능을 측정하였다. 방사

능은 침착된 glycogen에 xylose가 든 liquid scintillation cocktail을 넣고 Rackbeta liquid scintillation counter로 측정하였으며 glycogen으로 incorporation된 glucose의 양은 media내의 glucose 농도와 방사능의 비에 glycogen내의 방사능에서 blank의 방사능을 뺀값을 곱해서 구했다.

Incubation직전의 glycogen양을 알아보기 위하여 같은 근육에서 Lo등<sup>25)</sup>의 방법으로 근glycogen을 분석하였다.

## 성적

근비후 : 협력근 절제 4주째의 근육의 무게는 체중과 비교하여 볼때 soleus가 151%, plantaris근이 182%로 fast twitch근인 plantaris에서 더 많이 비후되었으며, 두 근 모두 근육내 수분의 함량이 대조군에 비해 차이가 없는 것으로 보아 근실질의 증가에 의한 근비후임을 알 수 있었다.

근glycogen : incubation직전의 glycogen농도는 먼저 대조군에서, soleus는 안정상태의 2.6±0.5 (mg/gm wet tissue, 이하 단위 생략)에서 30분간 운동부하 후 1.5±0.1로 감소하였으며 planta-

ris는 안정상태에서  $3.4 \pm 0.6$ 이었으며 운동부하 후  $2.6 \pm 0.3$ 로 감소하였다. 비후군에서는 30분간 운동부하 후의 결과가 soleus 및 plantaris에서 각각  $2.1 \pm 0.6$ ,  $3.1 \pm 0.7$ 이었다.

Glycogen의 합성 : 대조군의 안정상태에서의 glycogen으로 incorporation된 glucose의 양은 slow twitch근인 soleus가  $2.1 \pm 0.4$ (nMol glucose/mg/30min., 이하 단위 동일)로 fast twitch근인 plantaris의  $1.4 \pm 0.3$ 보다 더 많았다. Soleus근에 운동부하, insulin첨가, 전기자극등을 가했을때의 glycogen합성은 운동부하만으로  $2.4 \pm 0.5$ , insulin첨가만으로  $3.4 \pm 0.5$ ( $P < 0.001$ ), 전기자극만으로는  $2.9 \pm 0.9$ ( $P < 0.05$ )로 되어서 insulin과 전기자극에 의하여 glycogen의 합성이 증가함을 볼수 있었으나 운동부하 자체에 의해서는 glycogen합성이 유의하게 증가하지 않았다. 그러나 운동부하에 insulin을 첨가하거나 전기자극을 더하여서 각각  $3.9 \pm 0.4$ ( $P < 0.0001$ ),  $4.1 \pm 0.8$ ( $P < 0.0001$ )로 증가하였으며 전기자극에 insulin을 첨가한 경우는  $3.9 \pm 0.6$ ( $P < 0.0001$ )으로 증가하였고, 이들요소를 모두가하였을때는  $6.1 \pm 1.1$ ( $P < 0.0001$ )로 크게 증가하였다.

한편 plantaris근의 이들 요소에 대한 반응은 운동부하와 전기자극을 가한 군에서  $2.0 \pm 0.4$ ( $P < 0.05$ ), 모든 자극을 가한 군에서  $2.3 \pm 0.6$ ( $P < 0.01$ )로 증가하였을뿐 다른 자극을 가한 군은 안정군과 비교하여 유의한 차이가 없었다.

비후군에서 이들 자극에 의해 soleus근이 운동부하만으로  $1.7 \pm 0.3$ , insulin을 첨가하여  $2.4 \pm 0.1$ , 전기자극을 더하여  $2.0 \pm 0.3$ , insulin과 전기자극을 더하여  $2.6 \pm 0.4$ 로 운동에 의한 다른요소들의 효과 증폭현상은 보였으나 대조군의 값들과 비교할때 훨씬 못미치는 정도이다. 그러나 비후plantaris근에서는 운동부하만으로  $1.4 \pm 0.3$ , insulin을 첨가하여  $1.5 \pm 0.2$ , 전기자극을 더하여  $1.8 \pm 0.5$ , insulin과 전기자극을 더하여  $2.3 \pm 0.6$ 으로 그 양상이 대조군의 그것들

과 비교하여 볼때 매우 비슷하였다.

## 고 찰

근육은 운동을 수행하는 능력 즉 수축에 못지 않게 glucose를 섭취함으로써 혈당조절에 중요한 역할을 하며 이 glucose 섭취와 근육 수축의 중요한 에너지원인 glycogen의 합성간에는 비례 관계가 있는 것으로 알려져 있다. Glucose 섭취 및 glycogen 합성을 증가시키는 인자들로 운동, insulin등이 있으며<sup>26-31)</sup> 이들 두 인자는 서로 다른 기전에 의해 작용하며<sup>32)</sup> glucose transporter, glycogen synthetase, phosphorylase 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>28,33)</sup>. 또한 이들 두 인자사이에는 서로 상승 작용이 있어서 운동이 insulin의 sensitivity를 증가시켜 당뇨병의 치료에 운동요법이 첨가되고 있다.

한편 근육은 twitch character에 따라 slow twitch, fast twitch로 구분된 근섬유들로 구성되어 있으며 이들 근섬유는 twitch양상뿐 아니라 여러 대사성 특성에서도 차이가나며 최근 많이 보고되고 있는 glucose섭취정도의 차이<sup>6)</sup>와 insulin binding capacity와 insulin responsiveness의 차이 등은 매우 재미있는 현상으로 이의 차이를 규명한다는 것은 당뇨병의 이해에 도움이 될것이다. 이번 실험에서 운동부하, insulin외에 in vitro에서의 수축을 가하여서 이들 인자들이 glycogen합성에 미치는 영향을 살펴본 결과 주로 slow twitch근섬유로 구성된 soleus에서 그 효과가 잘 나타났다. 아무런 자극도 가하지 않고 단지 overnight fasting 효과만 있는 안정상태의 glycogen합성은 soleus가 plantaris근 보다 더 많았는데 이는 이제까지 발표된 여러 연구결과의 일치하는 내용이며<sup>5,34)</sup> soleus근에서 운동부하후의 glycogen의 합성이 유의한 증가를 보이지 않다가 insulin, 전기자극등 다른 인자의 효과를 증폭시키는 작용을 한것은 흥미로운 결과로 이는 운동이 그자체로의 효과뿐 아니라 insulin sensi-

tivity를 증가 시키는 효과를 나타낼 수 있다는 것으로 볼 수 있으며<sup>6, 35-37)</sup>, 단 한번의 운동으로도 이와같은 효과를 나타낼 수 있다는 것은 당뇨병의 치료에 운동요법을 첨가함에 있어서 중요한 의미를 지닌다<sup>38-40)</sup>.

Plantaris근의 운동, insulin, 전기자극에 대한 반응은 soleus근과 비교하여 모든 군에서 저조하며 특히 insulin에 대한 예민도가 낮았다.

이와같은 결과로 볼때 slow twitch근과 fast twitch근 사이에는 대사성 특성에 있어서 많은 차이(heterogeneity)가 있으며 이것의 차이를 규명한다는 것은 당뇨병의 극복에 도움이 되리라 사료되며 앞으로도 많이 추구해 나가야 할 것이다.

한편 생체내에서의 근수축과 직접적인 전기자극으로 인한 시험관내에서의 수축의 차이란 본 실험의 결과를 통해서 볼때 전기자극은 그 자체만으로도 soleus근에서 glycogen의 합성을 증가시켰으나 운동부하는 그렇지 못했다는 데 있으며 이는 전기자극이 그 강도와 근섬유에 직접 영향을 미친다는 점에서 운동과는 차이가 있었기 때문으로 사료된다.

근육의 비후란 과부하에 따른 근의 적응현상으로 역도나 단거리 달리기와 같은 순간적으로 큰 힘을 발휘하는데 도움을 주며 그때의 에너지는 주로 해당과정에서 얻기 때문에 오래동안 운동하기란 어려우며 아직까지 비후가 근의 산소이용능력의 향상과 동시에 일어나는 것은 불가능한 것으로 알려져 있다<sup>41)</sup>. 이에 저자들은 산소 이용능력이 좋은 slow twitch근과 큰 힘을 내기에 적합한 fast twitch근에 협력근의 절제로 과부하를 가하여 각 근섬유에서 같은 정도의 과부하에 어떻게 반응하는지를 관찰한 결과 양근 모두 근의 비후는 일어났으나 그 정도는 fast twitch근이 더 심했으며 glycogen 합성은 slow twitch근인 soleus에서는 각 인자에 대한 반응 양상은 비슷하였으나 그 절대량에서 대조군의 그것에 크게 못미치나 fast twitch근인 plantaris

에서는 대조군의 그것들과 매우 유사한 양상을 나타내었다.

이와같은 결과로 보아 협력근 절제 4주후에 여러 효소의 활동도가 안정상태에 이른다는 여러 보고로<sup>17, 18)</sup> 미루어볼때 지속적인 과부하로 slow twitch soleus에서는 근의 비후는 유도되었으나 그 glycogen합성능으로 평가한 대사성 기능은 오히려 떨어진 반면 fast twitch plantaris근은 대사성기능의 감소없이 비후가 유도되어 지속적 과부하는 slow twitch근 보다 fast twitch근에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

## 요 약

Slow twitch soleus와 fast twitch plantaris근의 운동, insulin, 전기자극에 대한 반응을 시험관내에서 <sup>14</sup>C-glucose를 이용한 glycogen합성능으로 비교하고 협력근 절제 4주후에 유도한 대상성 비후근의 glycogen의 합성능을 같은 방법으로 평가하여 지속적인 과부하에 따른 각 근섬유의 반응을 비교하고자 한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

대조군의 soleus에서는 glycogen으로 incorporation되는 glucose양으로 볼때 운동에 의한 증가는 없었으나 insulin, 전기자극등의 인자에 의해서는 증가하였으며 운동이 이들 인자들과 합쳐 졌을때는 이들의 작용을 증폭 시켰다. 그러나 plantaris에서는 운동과 전기자극을 합한 군과 모든자극을 함께 가한 군에서만 유의한 증가를 보여서 insulin이나 glucose대사의 관점에서 볼때 soleus가 훨씬 활동적임을 알수 있었다. 협력근 절제로 인한 4주간의 과부하로 인한 비후근의 glycogen합성능은 soleus에서 대조군의 그것과 양상은 비슷하였으나 그 절대량에서 크게 못미쳤으며 plantaris에서는 대조군과 매우 유사한 반응을 나타내었다.

이와같은 결과로 볼때 협력근 절제 4주후에 여러 효소의 활동도가 안정상태에 이른다는 여

러 보고에 기초하면 지속적인 과부하에 대한 각 근섬유의 반응양상이 차이가 나서 fast twitch근의 근활동이 더 향상되는 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- Baldwin, K. M., Klinkerfuss, G. H., Terjung, R. L., Mole, P. A., and Holloszy, J. O. : Respiratory capacity of white, red, and intermediate muscle : adaptative response to exercise. *Am. J. Physiol.*, 222(2) : 373-378, 1972.
- Baldwin, K. M., Winder, R. L., Terjung, R. L., and Holloszy, J. O. : Glycolytic enzymes in different types of skeletal muscle : adaptation to exercise. *Am. J. Physiol.*, 33 : 312-319, 1972.
- Peter, J. B., Barnard, R. J., Edgerton, V. R., Gillespie, C. A., Stempel, K. E. : Metabolic profiles of three fiber types of skeletal muscle in guinea pig and rabbits. *Biochemistry*, 11 : 2627-2633, 1972.
- Barnard, R. J., Edgerton, V. R., Furu-kawa, T., and Deter, J. B. : Histochemical, biochemical and contractile properties of red, white, and intermediate muscle : adaptive response to exercise. *Am. J. Physiol.*, 222 : 373-378, 1972.
- Bonen, A., Tan, M. H., and Watson-Wright, W. M. : Effect of exercise on insulin binding and glucose metabolism in muscle. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 62 : 1500-1504, 1984.
- Ploug, Thorkil, Galbo, Henrik, Vinten, Jorgen, Jorgensen, Merete, and Richter, Erik A. : Kinetics of glucose transport in rat muscle : effects of insulin and contractions. *Am. J. Physiol.*, 253 (Endocrinol. Metab. 16) : E12-E20, 1987.
- James, David E., Zorzano, Antonio, Boni-Schnetzler, Marianne, Nemenoff, Raphael A., Powers, Alvin, Pilch, Paul F., and Ruderman, Neil B. : Intrinsic differences of insulin receptor kinase activity in red and white muscle. *The Journal of Biological Chemistry*, 261(32) : 14939-14944, 1986.
- James, D. E., Jenkins, A. B., and Kraegen, E. W. : Heterogeneity of insulin action in individual muscles in vivo : euglycemic clamp studies in rats. *Am. J. Physiol.*, 248 : E567-E574, 1985.
- Baldwin, K. M., Campbell, P. J., and Cooke, D. A. : Glycogen, lactate, and alanine changes in muscle fiber types during graded exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 43(2) : 288-291, 1977.
- Gollnick, P. D., Karin, R., and Saltin, B. : Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *Am. J. Physiol.*, 241 : 45-57, 1974.
- Idstrom, Jan peter, Elander, Anna, Soussi, Bassam, Schersten, Tore, and Bylund-Fellenius, Ann-Christin : Influence of endurance training on glucose transport and uptake in rat skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 251(Heart Circ. Physiol. 20) : H903-H907, 1986.
- Chi, M. M. Y., Hintz, C. S., Coyle, E. F., Martin III, W. H., Ivy, J. L., Nemeth, P. M., Holloszy, J. O., and Lowry, O. H. : Effects of detraining on enzymes of energy metabolism in individual human muscle fibers. *Am. J. Physiol.*, 224(Cell Physiol. 13) : C276-C287, 1983.

13. Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saltin, B., Saubert IV, C. W., Sembrowich, W. L., and Shepherd, R. E. : Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.*, 34 : 107-111, 1973.
14. Henriksson, J., and Reitman, J. S. : Time course of changes in human skeletal muscle succinate dehydrogenase and cytochrome oxidase activities and maximal oxygen uptake with physical activity and inactivity. *Acta Physiol. Scand.*, 99 : 91-97, 1977.
15. Holloszy, J. O., and Coyle, E. F. : Adaptations of skeletal muscle to endurance training and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol.*, 56(4) : 831-838, 1984.
16. Holloszy, J. O. : Biochemical adaptations in muscle. Effects of exercise on activity in skeletal muscle. *J. Biol. Chem.*, 242 : 2278-2282, 1967.
17. Ianuzzo, C. David, and Chen, Victor : Metabolic character of hypertrophied rat muscle. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 46(4) : 738-742, 1979.
18. Goldberg, Alfred L., Etlinger, Joseph D., Goldspink, David F., and Jablecki, Charles : Mechanism of work-induced hypertrophy of skeletal muscle. *Medicine and Science in Sports*, 7(4) : 248-261, 1975.
19. Baldwin, K. M., Cheadle, W. G., Martinez, O. M., and Cooke, D. A. : Effect of functional overload on enzyme levels in different types of skeletal muscle. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 42(2) : 312-317, 1977.
20. Carlo, John W., Max, Stephen R., and Rifkenberck, David H. : Oxidative metabolism of hypertrophic skeletal muscle. *Experimental Neurology*, 48 : 222-230, 1975.
21. 박미영, 김용운, 김종연, 이석강 : 대상성 비후하지근에서 근섬유의 특성에 따른 glycogen 재축적량. *대한의학협회지*, 32(1) : 61-66, 1989.
22. Bogardus, C., Lillioja, S., Stone, K., and Mott, D. : Correlation between muscle glycogen synthase activity and in vivo insulin action in man. *J. Clin. Invest.*, 73 : 1185-1190, 1984.
23. Terjung, R. L., Baldwin, K. M., Winder, W. W., and Holloszy, J. O. : Glycogen repletion in different types of muscle and in liver after exhausting exercise. *Am. J. Physiol.*, 226(6) : 1387-1391, 1974.
24. Ariano M. A., Armstrong, R. B., and Edger-ton, V. R. : Hindlimb muscle fiber populations of five mammals. *The Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 21(1) : 51-55, 1973.
25. Lo, Siu, Russel, J. C., and Taylor, A. W. : Determination of glycogen in small tissue samples. *J. Appl. Physiol.*, 28 : 234-236, 1970.
26. Ivey, Pamela A., and Gaesser, Glenn A. : Postexercise muscle and liver glycogen metabolism in male and female rats. *J. Appl. Physiol.*, 62(3) : 1250-54, 1987.
27. Ivy, J. L., and Holloszy, J. O. : Persistent increase in glucose uptake by rat skeletal muscle following exercise. *Am. J. Physiol.*, 241(Cell Physiol. 10) : C200-C203, 1981.
28. Young, Douglas A., Uhl, Jennifer J., Car-tee, Gregory D., and Holloszy, John O. : Activation of glucose transport in muscle by prolonged exposure to insulin. Effects of glucose and insulin concentrations. *The Journal of Biological Chemistry*, 261(34) :

- 16049-16053, 1986.
29. Idstrom, Jan Peter, Rennie, Michael J., Schersten, Tore, and Bylund-Fellenius, Ann-Christin : Membrane transport in relation to net uptake of glucose in the perfused rat hindlimb. *Biochem. J.*, 233 : 131-137, 1986.
  30. Fell, R. D., Terblanche, S. E., Ivy, J. L., Young, J. C., and Holloszy, J. O. : Effect of muscle glycogen content on glucose uptake following exercise. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 52(2) : 434-437, 1982.
  31. Young, Douglas A., Wallberg-Henriksson, Harriet, Sleeper, Mark D., and Holloszy, J. O. : Reversal of the exercise-induced increase in muscle permeability to glucose. *Am. J. Physiol.*, 253(Endocrinol. Metab. 16) : E331-E335, 1987.
  32. Richter, Erik A., Ploug, Thorkil, and Galbo, Henrik : Increased muscle glucose uptake after exercise. No need for insulin during exercise. *Diabetes*, 34 : 1014-1048, 1985.
  33. Mandarino, Lawrence J., Wright, Kimberly S., Verity, Larry S., Nichols, Jeanne, Bell, Jo Marie, Kolterman, Orville G., and Beck-Nielson, Hinning : Effects of insulin infusion on human skeletal muscle pyruvate dehydrogenase, phospho-fructokinase, and glycogen synthase. *J. Clin. Invest.*, 80 : 655-663, 1984.
  34. Tan, M. H., Bonen, A., Watson-Wright, W., Hood, D., Sopper, M., Currie, D., Bierce, A. N. : Muscle glycogen repletion after exercise in trained normal and diabetic rats. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 57(5) : 1404-1408, 1984.
  35. Bonen, A., Tan, M. H., Clune, P., and Kirby, R. L. : Effects of exercise on insulin binding to human muscle. *Am. J. Physiol.*, 248(Endocrinol. Metab. 11) : E403-E408, 1985.
  36. Dohm, G. Lynis, Sinha, Madhur K., and Caro, Jose F. : Insulin receptor binding and protein kinase activity in muscles of trained rats. *Am. J. Physiol.*, 252(Endocrinol. Metab. 15) : E170-E175, 1987.
  37. Zorzano, Antonio, Balon, Thomas W., Goodman, Michael N., and Ruderman, Neil B. : Glycogen depletion and increased insulin sensitivity and responsiveness in muscle after exercise. *Am. J. Physiol.*, 251(Endocrinol. Metab. 14) : E664-E669, 1986.
  38. Richter, E. A., Garetto, L. P., Goodman, M. N., and Rudman, N. B. : Muscle glucose metabolism following exercise in the rat. Increased sensitivity to insulin. *J. Clin. Invest.*, 69 : 785-793, 1982.
  39. Richter, E. A., Garetto, L. P., Goodman, M. N., and Rudman, N. B. : Enhanced muscle glucose metabolism following exercise modulation by local factors. *Am. J. Physiol.*, 246 : E476-E482, 1984.
  40. Garetto, L. P., Richter, E. A., Goodman, M. N., and Ruderman, N. B. : Enhanced muscle glucose metabolism after exercise in the rat : the two phases. *Am. J. Physiol.*, 246 : E471-E475, 1984.
  41. Brooks, George A., Fahey, Thomas D. : *Exercise physiology. Human bioenergetics and its applications.* John Wiley and Sons, New York, 1984, p. 355.



—Abstract—

## Glucose incorporation into glycogen molecules of hypertrophied slow and fast twitch muscles in vitro

Yong Woon Kim, Jong Yeon Kim, Suck Kang Lee

*Department of Physiology  
College of Medicine, Yeungnam University  
Taegu, Korea*

This investigation was undertaken to clarify the in vitro effect of the various stimulations, such as exercise(E), insulin(I), direct electrical stimulation(EST) and the combinations of the above, on the glucose incorporation into glycogen molecules (glycogen synthesis) of the normal slow(soleus) and fast twitch(plantaris) muscles, and the different responses of slow and fast twitch muscles to persistent overloads causing compensatory muscle hypertrophy.

In resting state, slow twitch muscle has greater capacity for glycogen synthesis than fast twitch muscle, and responses of different muscle to various stimuli were differ as follows : In slow twitch muscle, the glycogen synthesis was increased by insulin, and electrical stimulation but not increased by exercise ; exercise increased insulin sensitivity and the effect of electrical stimulation. Whereas the glycogen synthesis in fast twitch muscle was increased only by the stimuli combined with E and EST, and E,I, and EST.

As the result of removal of synergistic muscle, both muscles were hypertropied, and the degree of hypertrophy in response to persistent overload was higher in fast twitch muscle(182%) than slow twitch muscle(151%). In hypertrophied muscles, glycogen synthesis of soleus in any groups was lower than that of the control, but similar in plantaris.

In conclusions, there were marked heterogeneity in defferent muscle fiber in the effects of exercise and insulin addition and electrical stimulation on muscle glycogen synthesis, and fast twitch muscle may be adapted more easily to that kind of persistent overload than slow twitch muscle.

---

Key words : compensatory hypertrophied muscle ; glycogen synthesis ; different muscle fibers