

복합 운동 훈련이 인간 골격근의 형태학적 변화와 유산소 대사관련 효소 활성화에 미치는 영향

이길우¹, 이종삼², 이장규^{3*}

¹한국체육대학교 체육학과, ²대구대학교 체육과학연구소, ³단국대학교 운동처방재활학과

Effect of combined endurance and weight training on muscle morphology and oxidative enzyme activities in human skeletal muscle

Kil-Woo Lee¹, Jong-Sam Lee² and Jang-Kyu Lee^{3*}

¹Department of Physical Education, Korea National Sport University

²Research Center for Exercise Sciences, Daegu University

³Department of Exercise Prescription and Rehabilitation, Dankook University

요약 이 연구의 목적은 건강한 남자 14명을 대상으로 단기간의 지구성 훈련과 지구성 운동에 웨이트 운동을 병행한 복합훈련이 골격근 섬유형의 형태 및 골격근 내 산화적 효소의 활성화에 미치는 영향을 구명하고자 하였다. 지구성 트레이닝 집단은 최대심박수의 70~80% 에서 40분간 자유형으로 수영을 6주간 실시하였으며 복합 트레이닝 집단은 동일한 수영을 실시한 후 웨이트 트레이닝을 추가로 실시하였다. 근섬유 횡단면적에 있어 복합훈련 집단과 지구성 훈련 집단 간에 차이가 나타나지 않았으며 훈련기간에 따라 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단보다 증가한 것으로 나타났다. 모세혈관 수에 있어서도 집단 간 차이는 나타나지 않았으며 훈련기간에 따라 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단보다 증가한 것으로 나타났다. 유산소성 대사 효소 중 CS, β -HAD 그리고 CPT의 활성화도는 훈련형태에 따른 차이는 통계적으로 나타나지 않았으나 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단에서 보다 더 큰 증가의 폭을 나타냈다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때 유산소성 훈련만을 실시할 때 보다 유·무산소 운동이 복합적으로 구성되어 있는 훈련의 수행이 근섬유의 에너지 대사 관련 효소들의 활성화 증가와 근 세포 모세혈관의 발달에 보다 효과적이라는 결론을 도출할 수 있었다.

Abstract The purpose of this study was to investigate the effect of either endurance training only or endurance and weight training on muscle morphology and oxidative enzyme activities in human skeletal muscles. Fourteen healthy males were randomly divided into one of two experimental training groups, either swim exercise training (n=7, ST) or combined exercise training (swim and resistance exercise training; n=7, SWT). The change of muscle fiber type was not significantly different between ST and SWT following 6 weeks of exercise training. Mean cross sectional areas as well as the numbers of capillary of different types of muscle fiber were not also significantly different from baseline for both exercise training groups ($p>.05$) although the tendency of increase were more notable in SWT. All oxidative enzyme activities (i.e., β -hydroxyl acyl dehydrogenase, citrate synthase, and carnitine palmitoyl transferase) were marginally higher in SWT compared to ST even though statistical power did not reach the level of significance. Based on these results, it was concluded that performing of combined (swimming and weight) exercise training could be the better modality for improving muscle morphological changes and oxidative enzyme activities than performing of only single aerobic exercise intervention in young healthy human skeletal muscles.

Key Words : Combined exercise training, Muscle morphology, Oxidative enzyme activities

*Corresponding Author : Jang-Kyu Lee(Dankook Univ.)

Tel: +82-41-550-3816 email: kyu1216@hanmail.net

Received December 18, 2013

Revised (1st December 30, 2013, 2nd January 3, 2014)

Accepted January 9, 2014

1. 서론

규칙적인 운동을 통해 인체의 골격근은 운동 자극에 의한 기능적 요구나 대사적 요구에 적응하게 된다. 이러한 적응들은 미토콘드리아의 크기와 수의 증가, 유·무산소성 대사관련 효소의 활성화, 그리고 세포내로의 지방산과 포도당과 같은 에너지원 기질분자의 이동촉진과 같은 결과를 동반하게 된다.

세포내 유·무산소성 에너지 대사를 조절하는 효소의 촉매작용은 운동 시 대사기질의 이용을 결정하는 주요한 요인이 된다. 또한 반복되는 운동 시 동원되는 에너지 기질의 형태에 따라 근섬유 내 효소의 활성화도 증가 양상이 다르게 나타난다[1-3].

지구성 트레이닝으로 유도되는 유산소 대사계의 적응은 미토콘드리아의 크기와 수적 증가[2,4-6], β -HAD(β -hydroxyl acyl dehydrogenase)와 CPT(carnitine palmitoyl acyl transferase)와 같은 지방산 산화 효소[7-11], 그리고 SDH(succinate dehydrogenase)와 CS(citrate synthase)와 같은 시트릭산 회로의 산화 관련 효소[9,11-15]의 활성화 증가를 나타내게 한다. 또한 이러한 변화는 유산소 대사 관련 효소 합성과 활성의 증가를 자극하며 궁극적으로 운동 시 더 많은 에너지를 유산소적 경로를 통해 생성하게 한다[2,16].

근력 운동에 따른 유산소성 대사관련 효소의 활성화도를 관찰한 연구에서 Tesch 등[17]은 근력 트레이닝을 실시한 군과 훈련을 실시하지 않은 실험군 모두 속근섬유와 지근섬유에서의 CS와 β -HAD 활성이 동일하게 낮은 수준을 나타냈다고 보고하였다. 그러나 MacDougall 등[18]의 연구에 의하면 고강도의 사이클 스포르티드 운동을 실시한 후, HK(hexokinase)와 PFK(phosphofructokinase) 같은 해당과정을 조절하는 효소의 활성화도뿐만 아니라 CS, SDH, CPT 등과 같은 유산소성 대사조절 효소들의 활성화도도 증가하였음을 보고하여 고강도의 근력 트레이닝도 미토콘드리아 내 효소 증가에 영향을 미친다고 보고 하였다.

복합 트레이닝이란 저항성 트레이닝과 유산소성 트레이닝의 효과를 동시에 얻기 위하여 두 가지 트레이닝을 복합적으로 실시하는 것을 의미한다. 최근 운동과학 분야에서 복합훈련의 효과를 강조하면서 스포츠 선수들의 운동 수행능력 향상[19-20] 뿐만 아니라 상해 및 심장질환, 대사성중후군의 개선에 대한 복합운동의 효과가 각각으로 연구가 진행되고 있다[21-24].

Sale 등[23]과 Hunter 등[24]의 연구에 따르면 저항성 운동에 지구성 운동을 추가한 복합트레이닝이 근 기능 향상에 부가적인 효과를 나타내지 못했다고 보고한 반면, McCarthy 등[25]은 복합 트레이닝이 지구성 운동만을 실

시한 그룹에서와 유사한 정도의 최대산소섭취량과 근 기능의 향상을 이끌어 낸 것으로 보고하였다.

이상의 선행연구에서 보는 바와 같이 근력 트레이닝과 지구성 트레이닝을 병행한 복합 트레이닝의 실시가 근 기능의 부분적인 변화를 가져온다는 연구는 보고된 바 있으나, 근육의 형태학적인 관점에서 복합 트레이닝이 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 국내·외의 연구결과를 망라해 아직까지 보고된 바 없다. 이와 함께 근력 트레이닝이 유산소성 대사관련 효소들에 미치는 영향을 보고한 연구 결과들이 아직까지 불일치하고 있어 지구성 트레이닝에 근력 트레이닝을 병행 실시하는 것이 유산소성 효소의 활성화에 보다 효과적이지에 대해서도 밝혀져야 할 것이다. 따라서 이 연구에서는 단기간의 지구성 훈련과 지구성 운동에 웨이트 운동을 병행한 복합훈련이 골격근 섬유의 형태 및 골격근 내 산화적 효소의 활성화도에 미치는 영향을 구명하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상

이 연구에서는 과거 2~3년간 규칙적인 운동경험이 없으며 특이할 만한 임상적 질병이 없는 20~23세의 건강한 남자 14명을 대상으로 선정하여 지구성 트레이닝 집단(swimming training : ST)과 복합 트레이닝 집단(swimming and weight training : SWT)으로 7명씩 무선배정 하였다. 피험자의 신체적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

[Table 1] The characteristics of subjects

Group	Age(yrs)	Height(cm)	Weight(kg)
ST	20.4±1.0	178.2±4.6	65.7±3.2
SWT	21.1±1.2	174.0±6.6	68.7±7.3

Values are means±S.D. ST, swimming training; SWT, swimming and weight training.

2.2 훈련 방법

지구성 트레이닝 집단은 적응을 위해 처음 1주 동안은 최대심박수의 60%에서 30분간 수영을 실시하였으며 2주째부터는 최대심박수의 70~80%에서 40분간 자유형(free style)으로 수영을 실시하였다. 복합 트레이닝 집단은 동일한 수영을 실시한 후 leg curl, leg extension, leg press와 Parallel squat 중목의 웨이트 트레이닝을 추가로 실시하였다. 훈련 첫 주에는 최대 근력(one-repetition

maximum; 1RM)의 60% 무게로 일일 2세트(세트 당 10회)를 실시하였으며 2주째는 최대근력의 70% 무게로 하루 3세트(세트 당 10회)를 실시하였다. 모든 훈련은 총 6주간 주당 3회씩 실시하였으며 체내 대사주기의 변화를 고려해 하루 중 같은 시간에 훈련을 실시하였다. 훈련기간 중 훈련 이외 다른 신체활동에의 참여를 엄격하게 통제하였다.

2.3 실험절차 및 방법

운동방법과 훈련기간에 따른 골격근 섬유형, 모세혈관 밀도, 그리고 산화성효소 활성도의 변화를 구명하기 위해 훈련 전과 훈련 후 3주차와 6주차에 근육생검을 실시하였다.

2.3.1 근육적출

피험자를 침대에 눕히고 10분 정도 안정을 취하게 한 후 70% 알코올을 이용해 근육 생검이 이루어질 외측광근(vastus lateralis)의 부위를 소독하였다. 적출부위를 lidocaine adrenalin을 사용해 국소마취 시킨 후 수술용 칼날(surgical)을 이용해 0.5cm 가량 절개 하였다. 절개된 부위에 근육생검 바늘을 삽입한 후 약 100mg의 근육샘플을 적출하였다[26]. 적출된 각 근육 조직샘플을 대략 절반씩으로 나누어 근섬유 모세혈관의 조직-화학적 분석과 효소 활성도 분석에 사용했으며 근 표본의 적출 후 액체 질소에서 급냉동 후 분석 시까지 초냉동기(-80℃)에 보관하였다.

2.3.2 근육의 조직화학적 분석

조직화학적 분석을 위해 근육 샘플을 -20℃의 냉동절단기(Cryocut, Denmark)에서 10μm의 두께로 절단하였다. 절단된 근육표본을 산성과 알칼리성 사전 배양액의 경향에 따라 type I, type IIa, type IIx 섬유로 분류하였다. 알칼리 사전 배양액(pH 10.3)에서 배양 후 일련의 화학반응을 거치는 동안 근원섬유가 검게 염색되는 부위를 type II 섬유로 분류하였으며 나머지 부위를 type I 섬유로 분류하였다. 이와는 반대로 산성 사전 배양액 (pH 4.37 과 pH 4.6)에서 배양한 후 일련의 화학반응을 거쳐 근원섬유가 검게 염색된 부위를 type I 섬유로 분류하고 흰색으로 나타나는 부위를 type II 섬유로 분류 하였다. Type II 섬유에 대한 하위집단 (type IIa와 type IIx) 구분은 pH 4.6에서 가시화 하였다. 먼저 pH 4.37과 pH 10.3으로 type I, type II 섬유를 확인한 후 pH 4.6에서 type IIa(흰색)와 type IIx(암갈색)를 구분해 내었다[27].

모세혈관수의 변화를 알아보기 위해 Amylase-periodic

acid-Schiff (PAS) staining을 하였으며[28] 영상분석기(Comfas, Scan-Bean, Denmark)를 이용하여 단위면적과 근 섬유당 모세혈관 수와 근섬유 형태별 모세혈관 수를 분석하였다.

2.3.3 β-Hydroxyacyl CoA Dehydrogenase(β-HAD) 활성도 분석

β-HAD 활성도 분석을 위해 근육샘플(5~10mg)을 cryostat (-20℃)내에서 자른 후 potassium을 함유한 homogenizing buffer에서 조직을 분쇄한 후 액체 질소에서 동결과 해빙을 3회 반복하며 mitochondria의 막을 파괴하였다. 5분간의 원심분리 후 상층액(50μl)을 반응용액(1M Tris-HCL (pH 7.0), EDTA(200mM), NADH(5mM), Triton x-100(10%), Acetyl-CoA(5mM))에 첨가한 후 spectrophotometer(340nm)에서 NADH의 소멸율을 관찰함으로써 활성도를 계산하였다[29].

2.3.4 Citrate Synthase(CS) 활성도 분석

CS의 활성도 측정은 Sreer[30] 방법에 근거하여 CoASH가 DTNB(5,5'-dithio-bis-2-nitro benzoate)와의 반응에서 생성되는 색의 변화를 spectrophotometer(412nm)에서 관찰하였다. -80℃에서 냉동 보관된 근육표본을 -20℃의 cryostat 내에서 절편(5~10mg)한 후 homogenize하여 분석에 이용하였다. KCL(1.3046g)과 EDTA(2mM)를 혼합해 100mL의 dH₂O와 섞은 potassium buffer 용액 (pH 7.4)을 homogenizing buffer로 사용하였다. 반응용액으로 tris-base buffer(pH 8.3, 100mM)와 DTNB 용액(1mM) 및 acetyl CoA 용액(3mM)이 사용되었다. Spectrophotometer (@412nm)를 이용하여 무효 샘플로부터 분당 흡광도 변화를 살핀 후 실제 샘플로부터 매 30초 마다 분당 흡광도를 관찰하였다.

2.3.5 Carnitine palmitoyl transferase(CPT) 활성도 분석

CPT의 분석은 반응을 통해 생성되는 CoASH에 의해 DTNB(5,5'-Dithio-bis[2-Nitro Benzoic Acid])가 환원되는 것을 측정함으로써 이루어졌다. Spectrophotometer를 이용해 412nm의 파장에서 색의 변화를 측정하였으며 DTNB에 대한 millimolar 소멸계수(extinction coefficient; 13.6)를 이용해 최종 활성도를 계산하였다[31].

2.4 자료처리 방법

모든 자료는 SPSS 통계 프로그램(ver.18.0)을 이용해 평균과 표준편차를 산출하였다. 운동방법(ST, SWT)과

[Table 2] Mean distribution of different fiber types after 6 weeks of training program(%)

	Type I		Type IIa		Type IIx	
	ST	SWT	ST	SWT	ST	SWT
Before	37.1±19.4	39.1±11.0	30.9±14.6	35.6±11.9	24.5±11.6	25.1±11.1
3wk	43.3±6.8	44.5±12.9	38.6±7.8	35.3±8.7	17.9±7.2	20.0±5.5
6wk	40.6±11.2	40.4±12.4	38.2±11.0	37.0±8.5	21.2±9.6	22.5±9.1

Values are means±S.D.

훈련기간(훈련전, 훈련 3주 후, 훈련 6주 후)에 따른 평균 차 검증은 반복측정에 의한 이원변량분석(repeated two-way ANOVA)을 이용하였으며 훈련기간에 따른 유의차는 LSD를 이용하여 사후검증을 하였다. 통계적 유의 수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

3. 연구결과

3.1 훈련방법과 기간에 따른 근섬유 형태의 변화

3.1.1 근섬유 분포비율의 변화

훈련방법에 따른 근섬유의 분포비율은 Table 2에서 보는 바와 같이 훈련 전과 훈련 3주와 6주후에 두 집단 간 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p>0.05$). 훈련 기간에 따른 근섬유 형태의 변화는 유의한 차이를 나타내지 않았으나 훈련 3주 후 Type I 섬유의 분포비율은 ST집단 37.1%로 부터 43.3%와, SWT 집단(39.1%로 부터 44.5%) 모두에서 뚜렷한 증가 양상을 나타냈다. 동일 훈련 시점에서의 Type IIa의 분포비율은 ST의 경우 뚜렷한 증가(7.9%) 양상을 나타낸 반면, SWT에서는 변화가 없었으며 Type IIx에서는 두 훈련군 모두에서 전반적으로 감소하는 양상을 나타냈다. 하지만 훈련 6주 후에는 두 집단 모두에서 더 이상의 변화를 나타내지 않고 훈련 후 3주의 수치를 유지하거나 훈련전의 수치로 회귀하는 경향을 보였다.

3.1.2 근섬유 횡단면적의 변화

훈련기간에 따른 집단별 근섬유 횡단면적 변화는 유의하게 나타나지 않았다. 그러나 SWT 집단의 Type I 섬유의 횡단면적은 훈련 전 $5869.1\mu m^2$ 에서, 훈련 3주 후 $5221.0\mu m^2$ 로 유의한 감소를 나타냈으나($p<0.05$) 훈련 6주 후에는 $6270.3\mu m^2$ 를 나타내 훈련전의 수치를 회복했다($p<0.05$). Type IIa 섬유의 횡단면적 역시 훈련 전 $6475.8\mu m^2$ 에서 훈련 3주 후 $5697.8\mu m^2$ 로 유의한 감소를 나타냈으나($p<0.05$) 훈련 6주 후 $6423.4\mu m^2$ 로 훈련전의 수치를 회

복하였다. ST 집단의 Type I 섬유와 Type IIa 섬유는 훈련 3주 후, 증가되는 경향을 나타냈으나 훈련 6주 후에 Type I 섬유는 $6006.2\mu m^2$ 에서 $5094.2\mu m^2$ 로, Type IIa 섬유는 $6387.8\mu m^2$ 에서 $5836.5\mu m^2$ 로 유의한 감소를 나타냈다($p<0.05$; Table 3).

3.1.3 근섬유 모세혈관의 변화

훈련방법에 따른 모세혈관의 변화는 Table 4에서 보는 바와 같이 집단 간에 유의한 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$). 하지만 훈련 6주 후 SWT 집단의 모든 근섬유에서 모세혈관수가 ST 집단에 비해 높게 나타났다. 특히 Type I 섬유에서 ST 집단은 훈련 전 $4.2\mu m^2$ 에서 훈련 6주 후 $4.4\mu m^2$ 로 4.7%의 증가에 그친 반면, SWT집단에서는 훈련 전 $4.6\mu m^2$ 에서 훈련 6주 후 $5.4\mu m^2$ 로 17.4% 증가한 결과를 나타내었다.

3.1.4 근섬유 확산면적의 변화

근섬유의 확산면적은 훈련 6주 후 모든 근섬유에서 감소하는 경향을 나타냈을 뿐 훈련 방법이나 훈련기간에 따라 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$; Table 5).

3.2 훈련방법과 기간에 따른 산화적 효소 활성도의 변화

3.2.1 β -Hydroxyacyl-CoA Dehydrogenase(β -HAD)의 변화

훈련방법에 따른 집단 간 β -HAD의 활성도에는 차이를 나타내지 않았다($p>0.05$). 훈련 기간에 따른 효소활성도의 변화를 살핀 결과, ST 집단에서는 훈련 전 ($4.4\text{mmol/kg wet muscle/min}$)에서 훈련 3주($4.2\text{mmol/kg wet muscle/min}$), 6주($4.4\text{mmol/kg wet muscle/min}$)를 거치는 동안 활성도가 유지된 반면, SWT 집단에서는 훈련 전 $4.8\text{mmol/kg wet muscle/min}$ 에서 훈련 3주 후에 $5.4\text{mmol/kg wet muscle/min}$ 로, 훈련 6주 후에는 $5.5\text{mmol/kg wet muscle/min}$ 을 나타낸 점진적인 증가를 나타냈다[Fig. 1].

[Table 3] Mean cross-sectional area among different fiber types after mono-type and combined exercise of training(μm^2)

	Type I		Type IIa		Type IIx	
	ST	SWT	ST	SWT	ST	SWT
Before	5568.7 ±673.4	5869.1* ±509.1	5679.4 ±730.7	6475.8* ±670.1	4465.2 ±1308.2	5483.7 ±566.4
3wk	6006.2 [#] ±669.8	5221.0 [#] ±614.7	6387.8 [#] ±628.0	5697.8 ±1415.9	5236.5 ±479.5	4973.2 ±632.6
6wk	5094.2 ±980.3	6270.3 ±1156.6	5836.5 ±1264.3	6423.4 ±1006.5	4896.2 ±984.1	5372.0 ±549.3

Values are means±S.D. *Significant difference between before and 3 weeks. [#]Significant difference between 3 wk and 6 wk.

[Table 4] The changes of capillary numbers surrounding muscle fiber types after mono-type and combined exercise(μm^2)

	Type I		Type IIa		Type IIx	
	ST	SWT	ST	SWT	ST	SWT
Before	4.2±1.9	4.6±0.4	3.7±1.7	3.8±0.3	3.2±1.3	3.5±0.3
3wk	4.7±0.6	4.5 [#] ±0.5	4.4±0.4	4.1±0.4	3.7±0.3	3.5±0.5
6wk	4.4±0.7	5.4±0.4	4.1±0.7	4.8±0.1	3.4±0.6	3.9±0.9

Values are means±S.D. [#]Significant difference between 3 wk and 6 wk.

[Table 5] Different diffusional area in different muscle fiber types after 6 weeks of training(μm^2)

	Type I		Type IIa		Type IIx	
	ST	SWT	ST	SWT	ST	SWT
Before	1256.2 ±273.5	1275.5 ±102.4	1441.0 ±375.2	1507.2 ±204.6	1398.0 ±443.8	1407.3 ±226.4
3wk	1134.9 ±548.3	1167.9 ±164.1	1270.7 ±611.7	1381.6 ±207.5	1289.1 ±650.3	1552.0 ±235.6
6wk	1146.2 ±203.8	1154.7 ±173.5	1408.7 ±204.4	1291.7 ±250.6	1442.4 ±164.9	1365.7 ±215.1

Values are means±S.D.

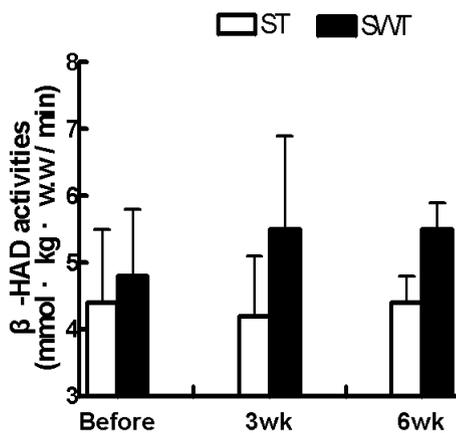


Fig 1. The changes of β - HAD activities after 6 weeks of training

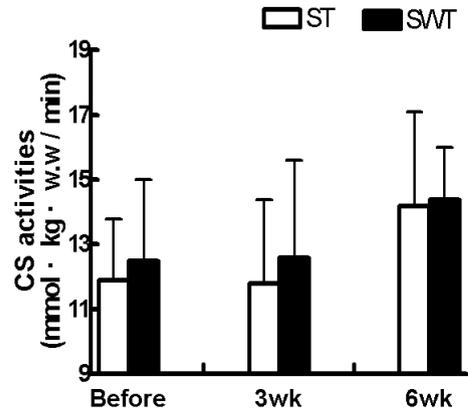


Fig 2. The changes of CS activities after 6 weeks of training

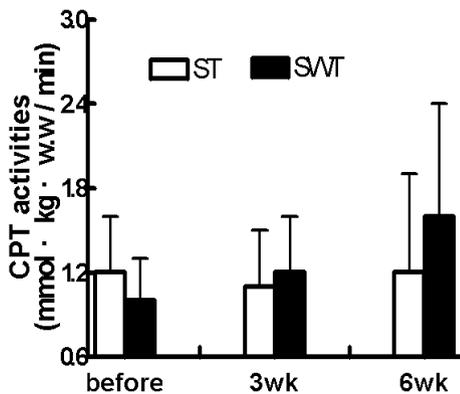


Fig 3. The changes of CPT activities after 6 weeks of training

3.2.2 Citrate synthase(CS)의 변화

Fig. 2에서 보는 바와 같이 훈련방법에 따른 CS 활성도의 변화는 집단 간 유의한 차이를 나타내지 않았다 ($p>.05$). 하지만 훈련기간에 따른 변화를 살펴 결과 훈련 3주 까지는 훈련 전(ST: 11.9±1.9, SWT: 12.5±3.5)의 활성도를 유지한 반면, 훈련 6주 후에는 ST 집단에서 19.3% (14.2mmol/kg wet muscle/min)로, SWT 집단은 15.3%(14.4mmol/kg wet muscle/min)의 증가를 나타내 훈련 후 두 집단모두에서 증가하는 경향을 나타냈다.

3.2.3 Carnitine palmitoyl acyl transferase(CPT)의 변화

훈련방법에 따른 CPT 활성도 차이를 살펴 결과 집단 간 차이를 나타내지 않았다. ST 집단의 CPT 활성도는 훈련기간(훈련 전[1.2mmol/kg wet muscle/min], 훈련 3주 후[1.1mmol/kg wet muscle/min], 훈련 6주 후[1.2mmol/kg wet muscle/min])에 따라 일정하게 유지된 반면, SWT 집단에서는 훈련 전 1.0mmol/kg wet muscle/min, 훈련 3주 후 1.2mmol/kg wet muscle/min, 훈련 6주 후 1.6mmol/kg wet muscle/min을 나타내 70.5%의 증가를 나타냈다[Fig. 3].

4. 논의

규칙적인 운동은 근섬유의 횡단면적, 모세혈관의 수 및 직경 변화. 근섬유의 분포비율 등의 변화를 야기한다. 일반적으로 인체의 골격근은 규칙적인 운동과 함께 운동

의 형태(즉, 지구성 유산소 운동 및 저항성 운동)와 무관하게 Type IIb 근 섬유의 비율을 감소시키는 반면에 저항 운동으로 근섬유 횡단면적은 증가하고 지구성 운동으로 감소하는 것으로 알려져 있다[28,30-33], 그러나 상호 길항적 특성을 나타내는 지구성 운동과 저항성 근력 운동을 병행 실시하였을 때, 인체의 골격근에서 발생하는 근육의 형태학적 적응 현상에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 골격근은 85%가 근원섬유로 이루어져 있으며 나머지 15%가 세포질이나 콜라겐 같은 물질로 이루어져 있다. 수분의 증가에 의한 일시적인 근비대와는 달리 근원섬유의 증가에 의한 만성적인 근비대의 양상은 운동의 형태와 강도 그리고 운동량 등에 밀접한 관련을 맺고 있다.

운동 자극이 규칙적으로 근육에 가해지면 자극에 적응하기 위해 근원섬유 증가를 위한 단백질 합성이 일어나 근비대(hypertrophy)를 나타내지만 자극이 장기간 지속적으로 가해지거나 운동의 자극 빈도와 강도가 낮아지게 되면 항성장 유전자(antigrowth gene) 발현이 증가해 단백질분해효소(protease)의 활성이 증가하게 되며 이러한 단백질 분해효소는 근원섬유의 분해를 유발해냄으로써 근섬유 횡단면적의 감소와 근 위축(hypotrophy)을 유도한다 [34,35].

이 연구의 결과에서 훈련 3주 후 근섬유의 분포 비율이 두 집단 모두에서 Type I 섬유와 Type IIa에서 높게 나타나 두 훈련의 형태가 유산소성 특성을 나타내는 Type I 섬유와 Type IIa 섬유를 선택적으로 동원하고 있음을 알 수 있다. 흥미롭게도, 두 집단에서 Type I 섬유와 Type IIa 섬유의 분포비율 증가폭이 Type IIx 섬유의 분포비율 감소폭과 비슷하게 나타났는데, 이러한 결과는 건강한 남자를 대상으로 저항 운동과 지구성 운동을 함께 실시한 Kraemer 등[19]의 연구 결과와 일치하는 것으로 지구성 훈련과 복합훈련이 근섬유 형태를 Type IIb에서 Type IIa로의 전환을 유도할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다. 또한 이 연구에서는 복합훈련이 Type I 근섬유의 횡단면적 증가를 유도해냈는데 이러한 결과는 선행연구들의 결과와 일치하는 것이라 하겠다[36,37].

복합훈련 6주 후의 근섬유 횡단면적은 Type I 섬유와 Type IIa 섬유에서 점차적으로 증가하여 Staron 등[33]의 연구 결과와 일치하였으나 수영 훈련만 실시한 집단에서는 복합훈련을 실시한 집단과 상이한 결과를 나타내어 3주 후의 근섬유 횡단면적에서 Type I 섬유와 Type IIa 섬유에서 증가하였다가 훈련 6주 후에 다시 감소함을 보여주었다. 이 연구의 훈련형태에 따른 골격근 횡단면적의 변화에 대한 결과는 두 가지 측면에서 살펴볼 수 있다. 첫째, 지구성 훈련 3주 후에 Type I 섬유와 Type IIa 섬유의 횡단면적을 증가시키는 것은 지구성 운동에 적응하기

위한 운동 초기의 적응현상에 의한 근비대였으며 훈련 6주 후에 다시 근섬유의 횡단 면적이 훈련 3주 때와 비교해 감소하는 것은 만성적 운동자극에 대해 적응단계에서 나타내는 현상이라 사료된다. 둘째, 복합훈련 집단이 지구성훈련 집단보다 전반적으로 더 많은 훈련량을 가지기 때문에 초기의 적응과정이 지구성훈련 집단보다 빠른 시기인 훈련 3주 이전에 나타났을 것으로 생각되며 훈련 6주에는 만성적인 적응과정이 나타난 것으로 생각된다. 이러한 가정은 골격근 횡단면적의 만성적인 적응으로 나타나는 근비대가 최소 6~8주의 규칙적인 운동에 의해 이루어진다는 Staron 등[33]의 연구 결과에 의해 지지될 수 있다.

일반적으로 지구성 훈련을 통해 인체는 활동하는 근육으로의 충분한 산소와 영양물질의 공급과 함께 노폐물 제거를 위해 활동근 내 모세혈관 망이 발달하게 된다. 그러나 Tesch 등[17]은 장기간의 근력 운동과 파워 리프팅(power lifting)을 한 선수들의 모세혈관 수가 지구성 운동을 한 선수보다 적다고 보고하여 무거운 중량을 이용하는 근력 운동과 같은 운동 형태는 모세혈관의 증식에 별다른 영향을 미치지 않는다고 주장하였다. 그러나 Jensen 등[22]과 Hickson 등[36]은 지구성 운동과 복합적으로 실시되는 근력 운동은 ST 섬유 동원의 특성이 요구되는 지구성 운동 수행 능력을 향상시킨다는 연구결과를 제시하여 지구성 훈련의 효과를 상승시키기 위한 방법으로 지구성 운동과 근력 운동을 병행해 실시하는 복합운동의 효과를 강조하였다. 이 연구의 결과에서도 지구성 훈련 집단에서는 훈련 3주와 6주 후에 모세혈관의 수에 변화가 나타나지 않았지만 복합훈련 집단의 모세혈관은 훈련 6주 후에 Type I 섬유와 Type IIa 섬유에서 증가하는 것으로 나타나 Jensen 등[22]과 Hickson 등[36]의 연구결과와 일치하였다. 이러한 결과는 훈련기간 동안 지구성 훈련 집단이 여전히 훈련에 적응해 가는 과정에 있는 것으로 생각되며 반면, 복합훈련 집단에서는 훈련에 이미 적응한 것으로 생각할 수 있다. 또한 이상의 선행연구에서 살펴본 복합훈련 효과에 대한 상이한 결과의 원인으로 첫째, 전체적인 운동량을 통제하지 못하여 복합운동에서 더 많은 절대 운동량이 가해져 발생했을 가능성과, 둘째, 지구성 운동 후에 실시되는 근력 운동 시 이미 생리적·심리적으로 피로한 상태에 놓여있음으로 단순히 지구성 수영 운동만을 실시할 때 보다 상대적으로 낮은 운동 강도가 적용되었을 수 있다는 점 등이 고려되어야 할 것이라 보여진다. 따라서 동일한 운동량으로 지구성운동과 근력 운동을 교차하여 복합운동을 실시하는 등의 방법을 구상하여 연구를 진행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

규칙적인 운동은 그 운동에 적절하게 작용하는 에너지

시스템의 활성을 나타내 골격근 내 대사적 적응을 일으킴과 동시에 에너지 시스템에 관여하는 효소의 활성도를 증가시키는 것으로 알려져 있다. 규칙적으로 지구성 훈련과 근력 훈련을 병행 실시한 복합훈련 후 지구력 운동수행 능력의 증가가 지구력 훈련만을 실시했을 때와 비교해 유사하게 증가하지만 근력의 운동수행 역량 향상의 정도는 근력 훈련만 실시했을 때와 유사한 증가 양상을 나타내지는 않는다고 여러 선행연구에서 보고한 바 있다 [25,36,38]. 이 연구의 결과에서 유산소성 대사 효소인 CS, β -HAD, 그리고 CPT의 활성도는 훈련형태에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았으나 복합훈련 집단에서 지구성훈련 집단에서 보다 더 많이 증가한 것으로 나타나 복합훈련이 유산소성 대사 효소에 미치는 효과가 Sale 등[23]의 연구와 Fitts 등[39]의 연구에서 추가적 트레이닝을 실시한 근육의 SDH, CS, β -HAD, 그리고 CPT 등의 활성도가 증가하였다는 결과와 일치하고 있음을 나타냈다. 이러한 연구 결과를 통해 유무산소 운동을 병행해 수행하는 것이 지구성 운동만을 실시한 경우와 비교해 근섬유 내 에너지 대사관련 산화효소들의 증가에 보다 효과적일 수 있음을 제시할 수 있겠다.

5. 결론

이 연구는 스포츠 선수들의 운동 수행능력 향상뿐만 아니라 상해와 심장관련 질환의 개선을 위한 운동방법으로 이용되고 있는 복합훈련의 효과를 구명하기 위하여 규칙적인 지구성 훈련과 지구성운동에 웨이트 운동을 병행한 복합훈련의 실시가 골격근 섬유의 형태 및 유산소성 대사를 조절하는 효소 활성화도에 미치는 효과를 알아 보기 위해 수행되었다.

근섬유 횡단면적에 있어 복합훈련 집단과 지구성 훈련 집단 간에 차이가 나타나지 않았으며 훈련기간에 따라 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단보다 증가한 것으로 나타났다. 모세혈관 수에 있어서도 집단 간 차이는 나타나지 않았으며 훈련기간에 따라 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단보다 증가한 것으로 나타났다. 유산소성 대사 효소 중 CS, β -HAD 그리고 CPT의 활성도는 훈련 형태에 따른 차이는 통계적으로 나타나지 않았으나 복합훈련 집단에서 지구성 훈련 집단에서 보다 더 큰 증가의 폭을 나타냈다. 이와 같은 결과를 종합해 볼 때 유산소성 훈련만을 실시할 때 보다 유·무산소 운동이 복합적으로 구성되어 있는 훈련의 수행이 근섬유의 에너지 대사 관련 효소들의 활성도 증가와 근 세포 모세혈관의 발달에 보다 효과적이라는 결론을 도출할 수 있었다. 이 연구의

제한점으로는 운동시간 이외의 실험대상자의 활동은 통제할 수 없었으며 실험대상자의 수가 작아 이 실험의 결과를 일반화하는데 제한이 있을 것으로 생각된다.

Reference

- [1] Chilibeck P. D, Syrotuik D. G, Bell G. J, "The effect of strength training on estimates of mitochondrial density and distribution throughout muscle fibres", *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 80, no 6:604-609, Nov-Dec, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s004210050641>
- [2] Holloszy J. O, Coyle E. F, "Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences", *J. Appl. Physiol.* 56:831-838, Apr, 1984.
- [3] Kranioy Y, Cameron-Smith D, Misso M, Collier G, Hargreaves M, "Effects of exercise on GLUT-4 and glycogenin gene expression in human skeletal muscle", *J. Appl. Physiol*, 88, no 2:794-796, Feb, 2000.
- [4] Holloszy J. O, "Biochemical adaptations in muscle. Effects of exercise on mitochondrial oxygen uptake and respiratory enzyme activity in skeletal muscle", *J. Biol. Chem*, 242:2278-2282, May, 1967.
- [5] Holloszy J. O, Booth F. W, "Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle", *Annu. Rev. Physiol*, 38:273-291, 1976.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ph.38.030176.001421>
- [6] Soar P. K, Davies C. T. M, Fentem P. H, Newsholme E. A, "The effect of endurance training on the maximum activities of hexokinase, 6-phosphofructokinase, citrate synthase, and oxoglutarate dehydrogenase in red and white muscles of the rat", *Biosci. Rep.* 3:831-835, Sep, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01133781>
- [7] Young J. C, Garthwaite S. M, Bryan J. E, Cartier L. J, Holloszy J. O, "Carbohydrate feeding speeds reversal of enhanced glucose uptake in muscle after exercise", *Am. J. Physiol. Regul. Integ. Comp. Physiol*, 245:R684-R688, Nov, 1983.
- [8] Green H. J, Reichmann H, Pette D, "Fiber type specific transformations in the enzyme activity pattern of rat vastus lateralis muscle by prolonged endurance training", *Pflugers Arch*, 399:216-222, Nov, 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00656718>
- [9] Holloszy J. O, "Biochemical adaptations to exercise: aerobic metabolism", *Exerc. Sport Sci. Rev.* 1:45-71, 1973.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1249/00003677-197300010-00006>
- [10] Mole P. A, Oscai L. B, Holloszy J. O, "Adaptation of muscle to exercise. Increase in levels of palmitoyl CoA synthetase, carnitine palmityl transferase, and palmitoyl CoA dehydrogenase, and in the capacity to oxidize fatty acids", *J. Clin. Invest*, 50 no 11:2323-2330, Nov, 1971.
- [11] Baldwin K. M, Klinkerfuss G. H, Terjung R. L, Mole P. A, Holloszy J. O, "Respiratory capacity of white, red, and intermediate muscle: adaptative response to exercise", *Am. J. Physiol*, 222, no 2:373-378, Feb, 1972.
- [12] Helge J. W, Ayre K, Chaunчайyakul S, Hulbert A. J, Kiens B, Storlien L. H, "Endurance in high-fat-fed rats: effects of carbohydrate content and fatty acid profile", *J Appl Physiol*, 85, no 4:1342-8, Oct, 1998.
- [13] Holloszy J. O, Oscai L. B, Don I. J, Mole P. A, "Mitochondrial citric acid cycle and related enzymes: adaptive response to exercise", *Biochem Biophys. Res. Commun*, 40 no 6:1368-1373, Sep, 1970.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0006-291X\(70\)90017-3](http://dx.doi.org/10.1016/0006-291X(70)90017-3)
- [14] Osman A. A, hancock J, Hunt D. G, Ivy J. L, Mandarino L. J, "Exercise training increases ERK2 activity in skeletal muscle of obese Zucker rats", *J. Appl. Physiol*, 90, no 2:454-460, Feb, 2001.
- [15] Simi B, Sempore B, Mayet M. H, Favier R. J, "Additive effects of training and high-fat diet on energy metabolism during exercise", *J. Appl. Physiol*, 71, no 1:197-203, Jul, 1991.
- [16] Saltin B, Gollnick P. D, *Skeletal muscle adaptability: Significance for metabolism and performance*, In: *Handbook of Physiology-skeletal muscle*, Edited by L. D. Peachy, Sir Adrian, Am. Physiol. Soc, Bethesda, MD, p.555-631, 1983.
- [17] Tesch P. A, Thorsson A, Kaiser P, "Muscle capillary supply and fiber type characteristics in weight and power lifters", *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol*, 56 no 1:35-38, Jan, 1984.
- [18] MacDougall J. D, Hicks A. L, MacDonald J. R, Mckelvie R. S, Green H. J, Smith K. M, "Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training", *J. Appl. Physiol*, 84, no 6:2138-2142, Jun, 1998.
- [19] Kraemer W. J, Patton J. F, Gordon S. E, Harman E. A, Deschenes M. R, Reynolds K, Newton R. U, Triplett N. T, Dziados J. D, "Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations", *J. Appl. Physiol*, 78, no 3:976-989, Mar, 1995.

- [20] Bell G. J, Syrotuik D, Socha T, MacLean I, Quinney H. A, "Effect of strength training and concurrent strength and endurance training on strength, testosterone and cortisol", *J. Strength Cond. Res*, Italic :57-64, 1997.
- [21] Ahn-Na Y, Kim K. J, "Differences of body composition, physical fitness, and metabolic syndrome's risk factors after 12 week combined exercise program between obese and non-obese middle school students", *KAHPERD*, 48, no 3:553-566, May, 2009.
- [22] Bae J. C, Kim M. K, Kim S. C, Kim H, "Effects of 16-week combined exercise on body composition, cardiovascular function, and maximal muscle strength in old-old elderly male", *Exercise Science*, 19, no 4:381-390, 2010.
- [23] Bell G. J, Syrotuik D, Martin T. P, Burnham R, Quinney H. A, "Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans", *Eur. J. Appl. Physiol*, 81, no 5:418-427, Mar, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s004210050063>
- [24] Jensen J, Jacobsen S. T, Hetland S, Tveit P, "Effect of combined endurance, strength and sprint training on maximal oxygen uptake isometric strength and sprint performance in female elite handball players during a season", *Int. J. Sports Med.*, 18, no 5:354-358, Jul, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1055/s-2007-972645>
- [25] Sale D. G, Jacobs I, MacDougall J. D, Gamer S, "Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training", *Med. Sci. Sports Exerc*, 22, no 3:348-356, Jun, 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-199006000-00012>
- [26] Hunter G, Demment R, Miller D, "Development of strength and maximum oxygen uptake during simultaneous training for strength and endurance", *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 27, no 3:269-275, Sep, 1987.
- [27] McCarthy J. P, Agre J. C, Graf B. K, Pozniak M. A, Vailas A. C, "Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training", *Med. Sci. Sports Exerc*, 27, no 3:429-436, Mar, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1249/00005768-199503000-00021>
- [28] Bergstrom J, "Muscle electrolytes in man", *Scand. J. Clin. Lab Invest.(Suppl)*, 68:1-110, 1962.
- [29] Brooks M. H, Kaiser K. K, "Three Myosin ATPase systems: The mature of their pH liability and sulfhydryl dependence", *J. Histochem Cytochem*, 18, no 9:670-672, Sep, 1970.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/18.9.670>
- [30] Andersen P, Henriksson J, "Training induced changes in the subgroups of human type II skeletal muscle fibers", *Acta Physiol. Scand*, 99, no 1:123-125, Jan, 1977.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-1716.1977.tb10361.x>
- [31] Lee J. K, Lee J. S, Park H, Cha Y. S, Yoon C. S, Kim C. K, "Effect of L-carnitine supplementation and aerobic training on FABPc content and beta-HAD activity in human skeletal muscle", *Eur J Appl Physiol*, 99, no 2:193-9, Jan, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00421-006-0333-3>
- [32] Srere P. A, "Citrate synthase", *Methods in Enzymology*, 13:3-11, 1968.
- [33] Lee J. S, Bruce C. R, Spriet L. L, Hawley J. A, "Interaction of diet and training on endurance performance in rats", *Exp Physiol*, 86, no 4:499-508, Jul, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1113/eph8602158>
- [34] Adams G. R, Hather B. M, Balwin K. M, Dudley G. A, "Skeletal muscle myosin heavy chain composition and resistance training", *J. Appl. Physiol.*, 74, no 2:911-915, Feb, 1993.
- [35] Chesley A, MacDougall J. D, Tarnopolsky M. A, Atkinson S. A, Smith K, "Changes in human muscle protein synthesis after resistance exercise", *J. Appl. Physiol*, 73:1383-1388, 1992.
- [36] Harridge S. D. R, *The contractile system and its adaptation and training*, In: *Human Muscular Function During Dynamic Exercise*, edited by P. Marconnet, B. Saltin, P. Komi, V. Poortmans, Basel: Karger, p.82-94, 1996.
- [37] Staron R. S, Karapondo D. L, Kraemer W. J, Fry A. C, Gordon S. E, Falkel J. E, Hagerman F. C, Hikida R. S, "Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women", *J. Appl. Physiol*, 76, no 3:1247-1255, Mar, 1994.
- [38] Hakkinen K, Pakarinen A, Hannonen P, Hakkinen A, Airaksinen O, Valkeinen H, Alen M, "Effects of strength training on muscle strength, cross-sectional area, maximal electromyographic activity, and serum hormones in premenopausal women with fibromyalgia", *J. Rheumato.*, 29, no 6:1287-1295, Jun, 2002.
- [39] Nader G. A, Hornberger T. A, Esser K. A, "Translational control: implications for skeletal muscle hypertrophy", *Clin. Orthop.*, 403(Suppl):S178-S187, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00003086-200210001-00021>
- [40] Hickson R. C, Dvorak, B. A, Gorostiaga E. M,

Kurowski T. T, Foster C, "Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance", *J. Appl. Physiol*, 65, no 5:2285-2290, Nov, 1988.

[41] Ferketich A. K, Kirby T. E, Alway S. E, "Cardiovascular and muscular adaptations to combined endurance and strength training in elderly women", *Acta Physiol. Scand*, 164 no 3:259-267, Nov, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-201X.1998.00428.x>

[42] Dudley G, Djamil R, "Incompatibility of endurance and strength training modes of exercise", *J. Appl. Physiol*, 59, no 5:1446-1451, Nov, 1985.

[43] Fitts R. H, Brimmer C. J, Heywood-Cooksey A, Timmerman R. J, "Single muscle fiber enzyme shifts with hindlimb suspension and immobilization", *Am. J. Physiol*, 256(5Pt1): C1082-C1091, May, 1989.

이 장 규(Jang-Kyu Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국체육대학교 대학원 운동생리학전공(이학 박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 운동처방재활학과 강사

<관심분야>

의·생명공학, 스포츠의학, 운동생리학

이 길 우(Kil-Woo Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국체육대학교 대학원 운동생리학전공(이학 박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 대전광역시 시민체력증진센터 운영

<관심분야>

의·생명공학, 스포츠의학, 운동생리학

이 종 삼(Jong-Sam Lee)

[정회원]



- 2002년 5월 : 호주 RMIT대학교 운동생리학전공(이학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 체육학과 교수

<관심분야>

의·생명공학, 스포츠의학, 운동생리학