

규칙적인 운동습관이 남자 성인의 적혈구내 항산화효소활성과 혈장 항산화능력(TRAP)에 미치는 영향*

강명희[§] · 박은주**

한남대학교 이과대학 식품영양학과
Department of Nutritional Science, University of Vienna, Austria**

Effects of Regular Physical Exercise Habits on the Activities of Erythrocyte Antioxidant Enzyme and Plasma Total Radical-trapping Antioxidant Potential in Healthy Male Subjects*

Kang, Myung-Hee[§] · Park, Eun Ju**

Department of Food and Nutrition, Han Nam University, Taejon 306-791, Korea
Department of Nutritional Science,** University of Vienna, Althanstrasse 14, A-1090, Vienna, Austria

ABSTRACT

In the present work we investigated the effect of regular physical exercise on the activities of erythrocyte antioxidant enzyme, plasma total radical-trapping antioxidant potential(TRAP) and plasma level of lipid peroxidation(malondialdehyde, MDA) in 64 healthy male, aged 34 - 67 years. The study population were divided in two groups: small amount of exerciser(exercise time less than 10 min/d) and moderate amount of exerciser(exercise time more than 20 min/d) according to their physical exercise habits measured by a questionnaire. Erythrocyte superoxide dismutase(SOD), glutathione peroxidase(GSH-Px) and catalase(CAT), plasma TRAP, as well as plasma MDA were determined. Erythrocyte GSH-Px and plasma TRAP were higher in moderate amount of exercisers than those in small amount of exercisers by 17% and 26%, respectively. No significant differences were observed in erythrocyte SOD, CAT and plasma MDA between the two groups. Mean exercise time was positively correlated with the erythrocyte GSH-Px activity and plasma TRAP significantly. The results would suggest that regular moderate exercise enhances antioxidant defences against reactive oxygen species and may increase the likelihood of a healthier life span. (*Korean J Nutrition* 33 (3) : 289~295, 2000)

KEY WORDS: regular exercise habits, erythrocyte antioxidant enzymes, superoxide dismutase, glutathione peroxidase, catalase, total radical-trapping antioxidant potential, malondialdehyde.

서론

Superoxide radical($O_2 \cdot^-$), hydrogen peroxide(H_2O_2)와 hydroxy radical($OH \cdot$) 등의 활성산화물질(Reactive oxygen species, ROS)은 산소의 체내 대사 과정 또는 흡연, 환경오염 등의 외부인자로부터 생성되며 일부는 매우 중요한 역할도 하고 항산화 방어기전에 의해 제거되면서 균형을 유지하게 된다.¹⁾ 세포내 방어 기전은 ROS 제거 항산

화 효소인 superoxide dismutase(SOD), glutathione peroxidase(GSH-Px), catalase 등에 의해 수행되며,²⁾ glutathione과 ascorbate도 세포 내 ROS의 독성을 중화시키는데 중요한 역할을 담당한다.³⁾ 세포외의 ROS 중화는 주로 혈장과 간질액에 고농도로 존재하는 비 효소계 방어 기전, 특히 ascorbate 및 지용성 항산화 비타민(vitamin E, carotenoids)들에 의해 이루어지고 있다.^{4,5)}

ROS는 세포가 나이를 먹는다는 것, 흡연, 자외선, 환경오염에 노출이 증가되든지 또는 부적절한 운동 등의 원인에 의해 그 생성속도가 높아진다고 알려져 있다.^{6,8)} 증가한 ROS 농도가 항산화계의 방어한계를 넘어서면 oxidative stress 현상이 일어나며 그 결과로 세포의 단백질, 탄수화물, 지질 뿐만 아니라 DNA까지 손상을 입혀 심혈관계질

채택일 : 2000년 4월 4일

*This research was supported by 1999 research grants from Hannam University.

[§]To whom correspondence should be addressed.

환, 압 등의 질병에 이르게 된다.⁹⁾

특히 격렬한 근육 운동을 할 경우 운동시 증가된 산소의 섭취량에 의해 세포내 미토콘드리아 전자 전달계, xanthine oxidase, polymorphoneutrophil에 의한 ROS 생성이 증가하고 이로 인해 세포내 prooxidant-antioxidant homeostasis에 혼란이 와서 그 결과로 세포막 지질의 과산화(lipid peroxidation)가 증가하며 체내 항산화 방어체계에 손상이 온다고 보고되고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 이와는 반대로 적당한 양의 규칙적인 운동은 체내 면역체계와 항산화 방어체계를 향상시킴으로써 심혈관계질환¹³⁾ 및 여러 종류의 암을 예방할 수 있다고 알려져 있다.¹⁴⁾¹⁵⁾

이제까지 대부분의 운동과 ROS, 항산화체계에 관한 연구는 운동선수들을 대상으로 또는 짧은 시간에 격렬한 운동을 시키고 난 뒤 변화를 관찰하는 것으로 한정되어 있으며 그 결과가 운동의 종류, 정도 및 조사대상자의 나이 등에 따라서 현재 많은 논란이 되고 있다. 일반인을 대상으로 규칙적인 운동이 지질과산화수준 또는 항산화체계에 미치는 영향에 대해서는 자료가 미미한 실정이며, 국내에서는 아직 이에 관한 연구가 보고된 바 없다.

따라서 본 연구는 성인 남성을 대상으로 적당한 양의 규칙적인 운동습관이 체내 항산화체계를 향상시킬 수 있는지의 여부를 조사하기 위해 적혈구내 항산화 효소활성(SOD, GSH-Px, catalase)과 혈장내 총 유리기 포집 항산화능(TRAP, total radical-trapping antioxidant potential), malondialdehyde(MDA)로 나타나는 혈장의 지질 과산화수준을 측정하였다.

연구대상 및 방법

1. 대상자 선정

본 연구는 대전 지역에 거주하는 34~67세 사이의 성인 남자 64명을 대상으로 실시되었다. 설문지의 내용은 나이, 건강상태 등 일반사항, 신장과 체중, 흡연에 관한 사항, 비타민 영양제 복용 여부, 알코올 섭취 여부 등으로 구성하였다. 회수된 설문지를 검토하여 설문지 대답이 불성실한 사람과 비타민 영양제를 복용하고 있는 사람은 대상자에서 제외하였다. 대상자들의 운동습관은 일주일에 규칙적인 운동을 몇 회나 하는지, 한 번 운동할 때의 운동시간은 얼마나 되는지를 질문지로 조사하여 1일 운동 시간으로 환산하였다. 1일 운동 시간에 따라 대상자를 다음의 두 군, 즉 운동을 전혀 하지 않거나 운동시간이 하루 10분 이하인 저운동군(small amount of exerciser, n = 35), 하루 20분 이상 운동을 하는 적정운동군(moderate amount of exerciser,

n = 29)으로 나누어 적혈구내 항산화 효소활성, 혈장 총 유리기 포집 항산화능(TRAP)과 혈장 지질 과산화물(MDA)을 측정하였다.

2. 채혈 및 생화학적 분석

1) 혈액 채취

총 64명의 대상자로부터 본인의 동의를 얻어 채혈을 하였다. 대상자들은 채혈하기 전 8시간 이상 음식을 먹지 않도록 지도하였으며 이들로 부터 약 5ml의 혈액을 제공받아 분석에 사용하였다. 대상자들의 혈액은 채혈 후 즉시 혈장을 원심분리하여 미리 foil로 씌운 tube에 넣어 분석할 때까지 -80℃에서 냉동 보관하였다. 적혈구는 isoosmotic phosphate buffered saline으로 처리하여 적혈구 현탁액을 만든 후 질소를 채운 뒤 항산화효소 분석을 위해 -80℃ 냉동고에 보관하였다.

2) 적혈구내 항산화 효소활성 측정

적혈구내 SOD, GSH-Px, catalase 등의 항산화효소의 분석은 UV/VIS spectrometer에 의해 측정하였다. SOD는 적혈구 현탁액을 증류수로 용혈시킨 후 ethanol과 chloroform을 가하고 이를 3000U/min, 2분간 원심 분리하였다. 그 상층액을 여러 농도로 나누어 37℃에서 10분간 배양한 후 20μl의 pyrogallol를 첨가한 후 320nm에서 180초간 측정하였다. 적혈구내 SOD의 활성은 pyrogallol의 자동산화를 50% 억제하는 antioxidant capacity로 정의하였다.¹⁶⁾ GSH-Px는 과산화물(t-butylhydroperoxide)에 의해 glutathione이 산화되는 반응을 촉매한다. 이 때 산화된 glutathione은 glutathione reductase와 NADPH의 존재 하에 다시 glutathione으로 환원되고 NADPH는 NADP로 산화된다. 이를 이용해 용혈된 적혈구에 glutathione, glutathione reductase, NADPH를 첨가하고 37℃, 10분간 배양한 뒤 t-butylhydroperoxide를 넣어 반응시켰으며 이 때 감소된 NADPH농도를 340nm에서 90초간 측정함으로써 GSH-Px의 항산화정도를 측정하였다.¹⁷⁾ Catalase의 활성은 용혈된 적혈구에 50mM phosphate buffer(pH 7)와 hydrogen peroxide를 첨가한 후 hydrogen peroxide의 감소량을 240nm에서 30초간 측정하였다.¹⁸⁾

3) 혈장 TRAP 측정

혈장 중 TRAP은 Rice-Evans and Miller¹⁹⁾의 inhibition assay 법에 따라 분석하였다. 이 방법은 ABTS(2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline 6-sulfonate), 150μM)와 metmyoglobin(2.5μM)을 H₂O₂(75μM)로 황산화시킴으로써 생성된 ferryl myoglobin radical species와의 상

호 작용에 의해 형성된 ABTS radical cation의 absorbance를 측정하는데 기초를 두고 있으며 그 absorbance의 억제 정도는 sample(0.84% plasma)에 들어 있는 antioxidant capacity에 비례하게 된다. Sample을 6분 동안 30℃에서 배양한 후 UV/VIS spectrometer로 740nm의 파장에서 absorbance를 측정하였다. 혈장의 TRAP 농도는 trolox의 calibration curve를 이용하여 계산하였으며 TEAC(Trolox equivalent antioxidant capacity, mM)로 표현하였다.

4) 혈장 MDA 측정

지질과산화의 최종산물인 MDA는 Wong 등²⁰⁾의 방법에 따라 측정하였다. Sample에 phosphoric acid와 thiobarbituric acid(TBA)를 첨가한 후 100℃에서 60분간 반응시켜 혈장 지질과산화물을 가수분해시키고 분홍색의 MDA (TBA)₂ adduct를 얻었다. 이를 차가운 얼음물에서 10분간 냉각시킨 뒤 methanol을 처리해 혈장 단백질을 침전시켰다. 이중 20μl를 취해 HPLC column(Column: Merck, LichroCART 250-4 Lichrospher 100 RP-18, Flow rate: 1.3ml/min, Detection: 532nm, Mobile phase: MeOH/Phosphate buffer(40/60, v/v))에 주입하여 방해물질을 제거하고 fluorescence detector로 532nm의 파장에서 absorbance를 측정하였다. 혈장 MDA 농도는 tetraethoxypropan의 calibration curve를 이용하여 계산하였다.

3. 자료의 처리

모든 자료는 MS의 excel database system을 이용하여 입력한 후 SPSS-PC⁺ 통계 package(version 7.0)를 사용하여 처리하였다. 각 항목에 따라 백분율과 평균치 ± 평균 오차(SE)를 구하였으며 운동량에 따라 나눈 두 그룹간의 평균치에 대한 유의적인 차이는 Student t-test로 검증하였다. Two-way ANCOVA로 운동과 흡연의 영향을 알아보았으며 대상자들의 나이를 covariate로 하여 통제하였다. 각 군간의 표본 분포의 비교는 χ^2 -test에 의해 알아보고 변수들 간의 관계를 검증하기 위해 Pearson's correlation coefficient와 simple linear regression 분석을 이용하였다.

결 과

총 64명의 대상자들 중 운동을 전혀 하지 않거나 운동시간이 하루 10분 이하인 저운동군은 35명, 하루 20분 이상 운동을 하는 적정운동군은 29명이었다(Table 1). 평균나이는 저운동군이 51.6세, 적정운동군이 52.9세로 두 그룹간의

차이가 없었다. 저운동군의 BMI는 23.4, 적정운동군은 23.8로 두 그룹 다 성인남성의 정상범위에 속해 있었다. 저운동군의 흡연자 비율은 34%로 하루에 평균 12.5개피를 피우며, 평균 흡연력은 14.5년, 흡연량과 흡연력을 감안하여 하루에 한 갑(20개피)를 피우는 것을 기준으로 하여 계산한 흡연력(packyears)은 8.9년이였다. 적정운동군의 경우 흡연자의 비율이 38%, 하루 평균 흡연량은 12.7개피, 평균 흡연력은 15.7년, packyears는 10.7년이였다. 음주자의 비율은 저운동군이 59%, 적정운동군은 62%로 두 그룹간의 차이가 없었다. 저운동군의 하루 평균 운동시간은 4.2분, 적정운동군은 34.5분이였다.

규칙적인 운동이 적혈구내 항산화효소활성, 혈장 총 유리기 포집 항산화능(TRAP) 및 혈장 지질과산화물(MDA)에

Table 1. Demographic characteristics of the study population grouped by exercise level¹

	Small amount of exercisers(n = 35)	Moderate amount of exercisers(n = 29)
Age(yrs)	51.6 ± 1.6 (34 - 67)	52.9 ± 1.3 (36 - 67)
BMI(kg/m ²)	23.4 ± 0.5 (17.9 - 29.4)	23.8 ± 0.5 (17.5 - 28.7)
Smokers(%)	34	38
Cigarettes smoked/day	12.5 ± 1.3 (5 - 15)	12.7 ± 2.3 (5 - 30)
Years smoked	14.5 ± 2.2 (7.5 - 30)	15.7 ± 2.1 (7.5 - 25)
Pack years ²	8.9 ± 1.5 (2 - 19)	10.7 ± 3.1 (2 - 38)
Alcohol drinkers(%)	59	62
Exercise time(min)	4.2 ± 0.7 (0 - 9.6)	34.5 ± 3.4 (20 - 90)***

¹Mean ± SE(range)

²Calculated by multiplying the number of packs smoked per day the years smoked

***p < 0.001

Table 2. The effect of exercise on erythrocyte antioxidant-enzyme activities, plasma TRAP and MDA¹

	Small amount of exercisers(n = 35)	Moderate amount of exercisers(n = 29)
SOD(U/l) ²	1921.4 ± 34.0	1931.8 ± 44.7
GSH-Px(U/gHb) ³	36.9 ± 1.7	44.2 ± 2.2**
Catalase(U/gHb)	60.1 ± 2.2	63.1 ± 1.8
TRAP(mmol/l) ⁴	0.39 ± 0.03	0.53 ± 0.03**
MDA(μmol/l) ⁵	2.3 ± 0.3	2.2 ± 0.2

Mean ± SE

²Superoxide dismutase

³Glutathione peroxidase

⁴Total radical-trapping antioxidant potential

⁵Malondialdehyde

**p < 0.01

미치는 영향은 Table 2에 제시하였다. 적정운동군의 경우 적혈구내 GSH-Px의 활성은 $44.2 \pm 2.2\text{U/gHb}$ 로 저운동군($36.9 \pm 1.7\text{U/gHb}$)에 비해 유의적으로 높았다.

혈장 내 총 항산화 능력을 측정하는 TRAP 수준은 적정운동군($0.53 \pm 0.03\text{mmol/l}$)이 저운동군($0.39 \pm 0.03\text{mmol/l}$)보다 유의적으로 높게 나타났다. 적혈구내 SOD와 catalase의 활성은 적정운동군의 경우 각각 $1931.8 \pm 44.7\text{U/l}$, $63.1 \pm 1.8\text{U/gHb}$ 로써 $1921.0 \pm 34.0\text{U/l}$, $60.1 \pm 2.2\text{U/gHb}$ 를 보인 저운동군보다 약간 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의적인 차이는 없었다.

혈장내 지질의 과산화를 나타내는 MDA 농도는 적정운동군과 저운동군이 각각 $2.2 \pm 0.2\mu\text{mol/l}$, $2.3 \pm 0.3\mu\text{mol/l}$ 로써 운동습관에 따른 차이가 없었다.

이러한 결과는 대상자들을 비흡연군과 흡연군으로 나누어 관찰했을 경우에도 비슷한 것으로 나타났다(Table 3).

즉 흡연군내에서 운동습관에 따라 두 그룹으로 나누었을 경우 적혈구내 GSH-Px 활성과 혈장 TRAP 수준은 적정운동군에서 저운동군보다 유의적으로 높게 나타났다. 비흡연군의 경우 적정운동군이 저운동군보다 혈장 TRAP 수준은 유의적으로 높았으며 적혈구내 GSH-Px의 활성은 유의적이지는 않았지만 높은 경향을 보였다. Two-way ANCOVA 결과 적혈구내 항산화 효소활성, 혈장 TRAP 수준 및 혈장 MDA 농도에 대한 흡연의 영향은 나타나지 않았으며 운동의 효과는 GSH-Px의 활성과 혈장 TRAP 수준에 대해서만 유의적인 것으로 나타났다. 또한 모든 변수에서 나이에 따른 영향은 보이지 않았으며 운동과 흡연의 상호작용효과도 없는 것으로 나타났다.

대상자들의 나이, BMI, 운동시간 및 흡연습관과 적혈구내 항산화 효소 활성, 혈장 TRAP 및 MDA 수준과의 상관관계는 Table 4와 같다. 나이, BMI, 흡연력(pack years)

Table 3. Effects of smoking and exercise on erythrocyte antioxidant-enzyme activities, plasma TRAP and MDA¹

	Nonsmokers ²		Smokers ³		Two-way ANCOVA(p-value)		
	Small amount of exercisers (n = 23)	Moderate amount of exercisers (n = 18)	Small amount of exercisers (n = 12)	Moderate amount of exercisers (n = 11)	Exercise effect	Smoking effect	Interaction
SOD(U/l) ⁴	1913.4 ± 44.4	1898.4 ± 56.0	1937.3 ± 52.4	1986.5 ± 74.5	NS ¹¹	NS	NS
GSH-Px(U/gHb) ⁵	38.3 ± 2.1	42.4 ± 2.1	34.4 ± 2.7	47.0 ± 4.6 ^{9*}	0.009	NS	NS
Catalase(U/gHb)	60.3 ± 2.5	62.6 ± 1.9	59.8 ± 4.1	64.0 ± 4.1	NS	NS	NS
TRAP(mmol/l) ⁶	0.43 ± 0.04	0.54 ± 0.03 ^{8*}	0.32 ± 0.04	0.51 ± 0.04 ^{10**}	0.001	NS	NS
MDA(μmol/l) ⁷	2.2 ± 0.3	2.3 ± 0.2	2.4 ± 0.6	2.1 ± 0.4	NS	NS	NS

¹ Mean ± SE

² Currently not smoked

³ Smoked 10 or more cigarettes/d for 6 months or longer

⁴ Superoxide dismutase

⁵ Glutathione peroxidase

⁶ Total radical-trapping antioxidant potential

⁷ Malondialdehyde

⁸ Significantly different from small amount of exercisers within nonsmokers by Student t-test

^{9,10} Significantly different from small amount of exercisers within smokers by Student t-test

¹¹ Not significant

*p < 0.05, **p < 0.01

Table 4. Pearson correlation coefficients between age, BMI, exercising and smoking habit, and erythrocyte antioxidant-enzyme activities, plasma TRAP and MDA(n = 64)

	Age(yr)	BMI(kg/m ²)	Exercise time(min)	Pack years ⁵
SOD(U/l) ¹	0.209	-0.031	-0.067	0.081
GSH-Px(U/gHb) ²	-0.156	0.103	0.286*	0.010
Catalase(U/gHb)	-0.053	-0.039	0.088	-0.045
TRAP(mmol/l) ³	0.044	-0.141	0.280*	-0.232
MDA(μmol/l) ⁴	-0.190	0.141	-0.016	-0.070

¹ Superoxide dismutase

² Glutathione peroxidase

³ Total radical-trapping antioxidant potential

⁴ Malondialdehyde

⁵ Calculated by multiplying the number of packs smoked per day the years smoked

*p < 0.05

고찰 및 요약

규칙적인 운동은 건강을 유지시킬 수 있을 뿐만 아니라 심혈관계질환, 암 등의 질병을 예방하거나 진행속도를 늦출 수 있는 잇점이 있다.²¹⁾ 그러나 운동선수들처럼 극심한 훈련을 받거나 평소에 운동을 하지 않다가 갑작스럽게 격렬한 운동을 하는 경우 에너지 요구량을 충족시키기 위해 운동을 하지 않을 때보다 산소요구량이 10~40배 정도로 증가하게 되고²²⁾ 증가된 산소는 대사과정 중 superoxide, hydroxyl radical과 같은 ROS의 생성을 증가시키며 이로 인해 근육의 피로, 근육조직의 손상이 나타나게 된다.^{23,24)} 또한 운동이 끝난 후에는 손상된 근육조직을 제거하거나 회복시키기 위해 neutrophil과 macrophage에 의해 inflammatory response가 일어나게 되는데 이 과정에서 또 다시 ROS가 생성된다고 알려져 있다. 격렬한 운동으로 인한 산화적 스트레스(oxidative stress)는 thiobarbituric reactive substance (TBARS)와 MDA와 같은 지질의 과산화 수준을 증가시키고 vitamin E와 C와 같은 항산화의 농도를 감소시킨다고 보고되었다.^{25,26)} 이러한 운동의 역효과는 평소에 규칙적으로 적당한 운동의 실시함으로써 극복할 수 있음이 몇몇의 연구자들에 의해 밝혀졌다.^{26,27)} 반면, 운동을 전혀 하지 않거나 불규칙적으로 운동을 하는 사람의 경우 antioxidant, oxidative capacity가 감소되어 있었다.²⁶⁻²⁸⁾

이에 관하여 본 연구에서는 34세에서 67세까지의 성인남자 64명을 대상으로 운동습관에 따라 운동을 전혀 하지 않거나 하루 평균 운동시간이 10분 이하인 군(저운동군)과 하루 20분 이상 규칙적으로 운동하는 군(적정운동군)으로 나누어 체내 항산화 상태와 지질의 과산화 수준을 비교하였다.

적정운동군의 경우 저운동군에 비해 적혈구내 항산화 효소인 GSH-Px의 활성이 17% 정도 유의적으로 높게 나타났다. 일반인을 대상으로 규칙적인 운동에 따른 적혈구 항산화 효소 활성의 변화를 살펴본 연구는 거의 없다. 다만 몇몇 연구자는 동물을 대상으로 한 실험에서 적당한 운동의 운동을 규칙적으로 하도록 훈련시켰을 경우 혈장, 간, 심장조직의 항산화 효소 활성이 증가하였음을 보고하였고²⁹⁻³²⁾ 이는 운동을 지속적으로 할 경우 신체는 운동으로 인한 습관적인 스트레스에 대한 적응의 일환으로 항산화 효소 활성이 증가한다고 설명하였다.²⁵⁾ 또한 운동을 지속적으로 할 경우 신체는 산화적 스트레스의 증가비율에 따라 항산화 효소활성이 증가하는 반면 평소에 운동을 하지 않으면 산화적 스트레스가 증가하더라도 항산화 상태는 개선되지 않는다고 한

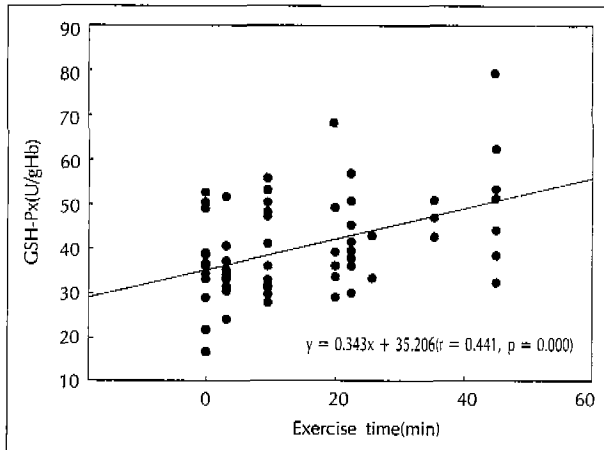


Fig. 1. Correlation between exercise time and erythrocyte glutathione peroxidase.

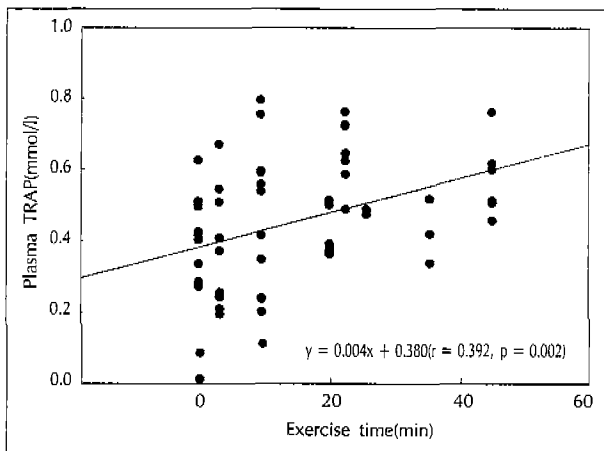


Fig. 2. Correlation between exercise time and plasma total radical-trapping antioxidant potential.

은 각 변수들과 아무런 상관관계를 보이지 않았으며 하루 평균 운동시간과 적혈구내 GSH-Px 활성($r = 0.286$) 및 혈장 TRAP 수준($r = 0.280$) 사이에 각각 유의적인 양의 상관관계를 보였다. 하루 평균 운동 시간이 60분이 넘는 대상자들($n = 3$)을 제외한 경우 그 상관관계는 더 높게 나타났다(운동시간과 적혈구 GSH-Px의 활성 $r = 0.441$, 운동시간과 혈장 TRAP 수준 $r = 0.392$) 그 결과로 단순회귀 분석을 실시했을 때 평균 운동 시간과 적혈구내 GSH-Px 활성과 혈장 TRAP 수준은 각각 다음과 같은 관계식으로 설명될 수 있었다(Fig. 1, 2).

적혈구내 glutathione peroxidase 활성
 $= 0.343 \times \text{exercise time} + 35.2 (r = 0.441, p = 0.000)$
 혈장 TRAP 수준
 $= 0.005 \times \text{exercise time} + 0.38 (r = 0.392, p = 0.002)$

다.³⁵⁾ 본 연구 결과 운동습관에 따른 적혈구의 GSH-Px 활성의 변화가 비흡연군보다 흡연군에서 더 크게 나타난 것은 이와 관련하여 설명될 수 있을 것이다(Table 3). 즉 흡연이라는 산화적 스트레스를 겪지 않는 비흡연군에서는 적정운동군의 GSH-Px의 활성이 저운동군에 비해 유의적인 차이가 없었던 반면 흡연군내에서는 적정운동군의 GSH-Px 활성이 저운동군에 비해 유의적으로 높게 나타났다. 이는 흡연자가 평소에 적당량의 운동을 할 경우 흡연에 의한 산화적 스트레스에 대처하기 위해 적혈구내 GSH-Px 활성이 증가하였지만, 운동을 거의 하지 않을 경우 흡연에 의한 산화적 스트레스에 대해 항산화 효소의 활성이 개선되지 않았음을 의미한다.

최근에 개발된 TRAP 측정법은 혈장내 α -tocopherol, ascorbate, urate, protein sulfhydryl groups 등의 항산화제들의 복합된 활성을 측정하여 혈장의 총 유리기 포집 항산화능을 나타내므로 시간과 노력을 절약할 수 있는 매우 유용한 방법이다. 본 연구 결과 혈장 TRAP 수준은 저운동군에 비해 적정운동군에서 26% 정도 유의적으로 높게 나타났으며, 아직까지 정상인에서 규칙적인 운동과 TRAP 수준간의 관련을 본 연구는 수행되지 않았다. 다만 Brites 등³⁶⁾은 규칙적인 훈련에 참가하는 축구선수들은 운동을 하지 않는 사람들에 비해 산화적 스트레스가 증가하기는 하나 이에 따라 혈장 TRAP 농도도 25% 정도 높아져 있음을 보고하였다. 운동 선수들은 운동의 강도나 시간이 일반인들과 차이가 있어 본 연구의 결과와 비교하는 것은 무리가 있기는 하지만 운동을 하지 않는 사람들에 비해서 규칙적인 운동에 참가하는 사람들이 혈장 총 항산화능이 높아져 있다는 점에서는 일치한다고 할 수 있다.

규칙적인 운동으로 인해 혈장 총 항산화능이 증가한 것은 다음과 같은 이유로 설명될 수 있을 것이다. 첫째, 과도한 운동으로 인해 근육조직이 손상되면 이를 제거하고 회복시키기 위해 neutrophil과 macrophage가 근육조직으로 다량 투입되어 inflammatory response가 일어난다. 이 과정에서 neutrophil과 macrophage는 $O_2 \cdot^-$, H_2O_2 , $OH \cdot$ 와 같은 ROS를 생성하여 손상된 근육조직을 제거하는데 도움을 주지만 ROS의 생성이 항산화 방어체계를 넘어서면 prooxidant-antioxidant homeostasis에 혼란을 주며 건강한 조직까지 손상시키게 된다. 그러나 규칙적인 운동은 neutrophil과 macrophage에 의한 ROS 생성을 감소시키고 항산화 체계의 적응을 유도해 운동으로 인한 산화적 스트레스를 최소화시킬 수 있다고 한다.³⁴⁾ 둘째, 규칙적인 운동을 할 경우 미토콘드리아 및 cytochrome c, a와 같은 미토콘드리아의 구성물질이 배로 증가하게 된다. 전자전달체

계 산화환원효소인 cytochrome은 산소에 전자 4개와 수소를 공급하여 H_2O 로 환원시켜 산소가 $O_2 \cdot^-$, H_2O_2 , $OH \cdot$ 와 같은 ROS로 산화되지 않도록 막아주는 역할을 한다. 따라서 규칙적인 운동에 의한 cytochrome의 증가는 ROS의 생성을 감소시키고, ROS를 중화시키는데 쓰이지 않게 된 항산화제들은 그 농도가 증가하게 되는 것이다.²⁸⁾

규칙적인 운동이 ROS의 생성을 낮춘다면 체내 ROS의 농도를 간접적으로 반영한다고 알려진 지질 과산화의 대사산물인 MDA의 농도도 감소해야 하지만 본 연구에서는 규칙적인 운동이 혈장 MDA 농도에 미치는 영향은 없었다. 이는 여성들에게 적당한 양의 운동을 규칙적으로 시켰을 경우 혈장 MDA의 변화를 관찰하지 못했다고 보고한 Hernandez 등³⁵⁾의 결과와 일치하는 반면 규칙적인 운동은 MDA와 conjugated dienes 등의 지질 과산화 수준을 낮춘다고 보고한 Clarkson²⁹⁾의 결과와는 상반된 결과를 나타냈다. 이와 같이 규칙적인 운동이 지질 과산화 수준에 미치는 영향에 대해서는 아직 많은 논란이 있으며, 더욱이 MDA가 실제로 체내 ROS의 양을 얼마나 잘 반영하는지는 많은 연구자들이 회의적이다. Holley 등³⁰⁾은 MDA는 지질 과산화의 아주 미미한 대사산물이며 쉽게 대사되기 때문에 지질 과산화를 측정하는데 있어서 좋은 지표는 아니라고 밝혔다. 현재까지는 실제적인 지질 과산화 수준을 정확히 측정할 수 있는 방법은 없으므로 지질 과산화로 ROS를 간접적으로 측정할 때는 MDA 외에 conjugated dienes나 lipid hydroperoxides와 같은 다른 변수를 같이 측정한다면 좀 더 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구 결과 적혈구 GSH-Px의 활성, 혈장 TRAP은 하루 운동하는 시간과 유의적인 양의 상관관계를 보여 주었으며 하루 운동시간이 60분이 넘는 대상자들을 제외한 경우 그 상관관계의 r 계수가 증가하였다. 이는 운동을 하루에 1시간 이상씩 많은 양을 하는 것보다는 적당하게 하는 것이 항산화 상태에 더 좋은 영향을 미칠 것이라는 가능성을 제시하고 있으며 이에 관해서는 앞으로 더 연구해 보아야 할 것으로 생각된다.

본 연구 결과를 요약하면 적당한 양의 운동을 규칙적으로 할 경우 운동을 전혀 하지 않거나 운동량이 적은 사람들에 비해 적혈구내 GSH-Px와 혈장 TRAP으로 측정된 체내 항산화 상태가 향상되었으며 특히 흡연자가 규칙적인 운동에 참가할 경우 담배로 인한 산화적 스트레스에 대처할 수 있도록 체내 항산화 상태가 개선되어 있었다. 따라서 담배를 끊는데 어려움이 있는 흡연자들의 경우 담배로 인한 체내 항산화 상태의 손상을 최소화하기 위해서는 적당량의 운동을 규칙적으로 실시해야 할 것이다. 연구대상자들의 항산

화 상태를 평가하는데 있어서 항산화와 관련된 영양소들의 섭취량을 고려하지 않았다는 제한점이 있기는 하나, 규칙적인 운동으로 인한 항산화 효소나 비효소계의 방어작용. 지질 과산화물을 병행해서 분석함으로 보다 객관적인 결과를 제시할 수 있었다는 점에서 이 연구의 의의를 발견할 수 있다고 본다. 또한 이제까지의 항산화에 관한 연구시 주를 이루었던 흡연의 영향대신 대상자의 운동습관을 초점으로 관찰함으로써 흥미로운 결과를 얻을 수 있었으며 앞으로 이에 관한 연구가 계속적으로 이루어져야 할 것이다.

Literature cited

- 1) Ames BN, Shigenaga MK, Hagen TM. Oxidants, antioxidants and the degenerative diseases of aging. *Proc Natl Acad Sci USA* 90:7915-7922, 1993
- 2) Fanton JC, Ward PA. Role of oxygen-derived free radicals and metabolites in leukocytes-dependent inflammatory reactions. *Am J Pathol* 107:397-418, 1982
- 3) Bergsten P, Amitai G, Kehrl J, Levine M. Ascorbic acid content of human B and T lymphocytes and monocytes. *Ann NY Acad Sci* 587:275-277, 1990
- 4) Frei B, Sticker R, Ames BN. Anti-oxidant defenses and lipid peroxidation in human blood plasma. *Proc Natl Acad Sci USA* 85:9748-9752, 1988
- 5) Burton GW, Ingold KU. β -carotene: an unusual type of lipid antioxidant. *Science* 224:569-573, 1984
- 6) Pryor WA, Stone K. Oxidants in cigarette smoke: radicals, hydrogen peroxide, peroxyhydrate, and peroxyhydrate. *Ann NY Acad Sci* 686:12-18, 1993
- 7) Epe B. Genotoxicity of singlet oxygen. *Chem Biol Interact* 80:239-260, 1991
- 8) Ji LL. Oxidative stress during exercise: implication of antioxidant nutrients. *Free Radic Biol Med* 18:1079-86, 1995
- 9) Gutteridge JMC, Halliwell B. Antioxidants in Nutrition, Health, and Disease. Oxford University press, Oxford, 1994
- 10) Ji LL. Antioxidants and oxidative stress in exercise. *Proc Soc Exp Biol Med* 222(3):283-292, 1999
- 11) Powers SK, Hamilton K. Antioxidants and exercise. *Clin Sports Med* 18(3):525-536, 1999
- 12) Sen CK. Oxidants and antioxidants in exercise. *J Appl Physiol* 79(3):675-686, 1995
- 13) Berlin JA, Colditz GA. A meta-analysis of physical activity in the prevention of coronary heart disease. *Am J Epidemiol* 132:612-628, 1990
- 14) Lee IM. Exercise and physical health: cancer and immune function. *Res Q Exerc Sport* 66:286-291, 1995
- 15) Kiningham RB. Physical activity and the primary prevention of cancer. *Prim Care* 25:515-536, 1998
- 16) Marklund S, Marklund G. Involvement of the superoxide anion radical in the autoxidation of pyrogallol and convenient assay for superoxide dismutase. *Eur J Biochem* 47:469-474, 1974
- 17) Beutler E. Glutathione peroxidase. In: Red cell metabolism: A manual for biochemical methods, pp.71-73, Verlag Grune and Stratton. New York, 1984
- 18) Aebi H. Catalase. In: Bergmeyer HU, ed. Methods of enzymatic analysis, pp.673-678, Verlag Chemie. Weinheim, 1974
- 19) Rice-Evans C, Miller N. Total antioxidant status in plasma and body fluids. *Methods in Enzymol* 234:279-293, 1994
- 20) Wong SHY, Knight JA, Hopfer SM, Zaharia O, Leach CN, Sunderman FW. Lipoperoxides in plasma as measured by liquid chromatographic separation of malondialdehyde-thiobarbituric acid adduct. *Clin Chem* 33:214-220, 1987
- 21) Blair SN, Kohl HW, Paffenbarger RS, Clark DS, Cooper KH, Gibbon LW. Physical fitness and all cause mortality. *J Am Med Assoc* 262:2395-2401, 1989
- 22) Aw TY, Andersson BS, Kennedy FG, Jones DP. Intracellular O₂ supply to support mitochondrial function. In: Benzi G, Packer L, Siliprandi N, eds. Biochemical Aspects of physical Exercise, pp.101-113, Elsevier Scientific Publishers. Amsterdam, 1986
- 23) Giuliani A, Cestaro B. Exercise, free radical generation and vitamins. *Eur J Cancer Prev* 6(Suppl 1):S55-67, 1997
- 24) Clarkson PM. Antioxidants and physical performance. *Crit Rev Food Sci Nutr* 35:131-141, 1995
- 25) Ji LL. Exercise and oxidative stress: role of the cellular antioxidant systems. In: Holloszy JO, ed. Exercise and sports sciences reviews. No. 23, pp.135-166, Williams & Wilkins, Baltimore, 1995
- 26) Sen C. Oxidants and antioxidants in exercise. *J Appl Physiol* 79:675-686, 1995
- 27) Kitamura Y, Tanaka K, Kiyohara C, Hirohata T, Tomita Y, Ishibashi M, Kido K. Relationship of alcohol use, physical activity and dietary habits with serum carotenoids, retinol and alpha-tocopherol among male Japanese smokers. *Int J Epidemiol* 26:307-314, 1997
- 28) Alessio HM, Blasi ER. Physical activity as a natural antioxidant booster and its effect on a healthy life span. *Res Q Exerc Sport* 68:292-302, 1997
- 29) Venditti P, Meo SD. Antioxidants, tissue damage, and endurance in trained and untrained young male rats. *Arch Biochem Biophys* 331:63-68, 1996
- 30) Hammeren J, Powers S, Lawler J, Criswell D, Martin D, Lowenthal D, Pollock M. Exercise training-induced alterations in skeletal muscle oxidative and antioxidant enzyme activity in senescent rats. *Int J Sports Med* 13:412-416, 1992
- 31) Alessio HM, Goldfarb AH. Lipid peroxidation and scavenger enzymes during exercise during exercise: adaptive response to training. *J Appl Physiol* 64:1333-1336, 1988
- 32) Kanter MM, Hamlin RL, Unverferth DV, Davis HW, Merola AJ. Effect of exercise training on antioxidant enzymes and cardiotoxicity of doxorubicin. *J Appl Physiol* 59:1298-1303, 1985
- 33) Brites FD, Evelson PA, Christiansen MG, Nicol MF, Basilio MJ, Wikinski RW, Llesuy SF. Soccer players under regular training show oxidative stress but an improved plasma antioxidant status. *Clin Sci (Colch)* 96:381-385, 1999
- 34) Niess AM, Dickhuth HH, Northoff H, Fehrenbach E. Free radicals and oxidative stress in exercise-immunological aspects. *Exerc Immunol Rev* 5:22-56, 1999
- 35) Hernandez R, Mahedero G, Caballero MJ, Rodriguez J, Manjon I, Rodriguez I, Maynar M. Effects of physical exercise in pre-and postmenopausal women on lipid peroxidation and antioxidant systems. *Endocr Res* 25:153-161, 1999
- 36) Holley AE, Cheeseman KH. Measuring free radical reactions in vivo. *Brit Med Bull* 49:494-505, 1993