

□ 원 저 □

최대운동시의 호흡성 가스교환 및 환기기능

경북대학교 의과대학 내과학교실

조 용 근 · 정 태 훈

= Abstract =

Respiratory Gas Exchange and Ventilatory Functions at Maximal Exercise

Yong Keun Cho, M.D. and Tae Hoon Jung, M.D.

Department of Internal Medicine, School of Medicine, Kyungpook National University, Taegu, Korea

Background: Although graded exercise stress tests are widely used for the evaluation of cardiorespiratory performance, normal standards on respiratory gas exchange and ventilatory functions at maximal exercise in Koreans have not been well established. The purpose of this study is to provide reference values on these by sex and age, along with derivation of some of their prediction equations.

Method: Symptom-limited maximal exercise test was carried out by Bruce protocol in 1,000 healthy adults consisting of 603 males and 397 females, aged 20~66 years. Among them VC, FEV₁ and MVV were also determined in 885 cases. All the subjects were members of a health center, excluding athletes. During the exercise, subjects were allowed to hold on to front hand rail of the treadmill for safety purpose.

Results: The $\text{VO}_2 \text{ max/m}^2$, $\text{VCO}_2 \text{ max/m}^2$ and $\text{V}_E \text{ max/m}^2$ were greater in males than in females and decreased with age. The RR max in men and women was similar but decreased slightly with age. The $\text{V}_T \text{ max}$ was markedly greater in men but showed no significant changes with age in either gender. The mean of $\text{V}_T \text{ max/VC}$, $\text{V}_E \text{ max/MVV}$ and BR revealed that there were considerable ventilatory reserves at maximal exercise even in older females. The regression equations of the cardinal parameters obtained using exercise time(ET, min), age(A, yr), height(Ht, cm), weight(W, kg), sex(S, 0=male; 1=female), VC(L), FEV₁(L) and $\text{V}_E \text{ max(L)}$ as variables are as follows: $\text{VO}_2 \text{ max/m}^2(\text{L/min})=1.449+0.073 \text{ ET}-0.007\text{A}+0.010\text{W}-0.006\text{Ht}-0.209\text{S}$, $\text{VCO}_2 \text{ max/m}^2(\text{L/min})=1.672+0.063\text{ET}-0.008\text{A}+0.010\text{W}-0.005\text{Ht}-0.319\text{S}$, $\text{V}_E \text{ max/m}^2(\text{L/min})=58.161+1.503\text{ET}-0.315\text{A}-9.871\text{S}$ or $\text{V}_E \text{ max/m}^2(\text{L/min})=47.873+6.548 \text{ FEV}_1-5.715 \text{ S}$, and $\text{V}_T \text{ max(L)}=1.497+0.223\text{VC}-0.493\text{S}$.

Conclusion: Respiratory gas exchange and ventilatory variables at maximal exercise were studied in 1,000 non-athletes by Bruce protocol. During exercise, the subjects were allowed to hold on to hand rail of the treadmill for safety purpose. We feel that our results would provide ideal target values for patients and healthy individuals to be achieved, since our study subjects were members of a health center whose physical fitness levels were presumably higher than ordinary population.

Key Words: Maximal exercise, Respiratory gas exchange, Ventilatory function

본 연구는 대구 유성스포츠프라자 스포츠과학연구소의 협조로써 이루어 졌음.

서 론

최대운동부하검사를 통해서 얻을 수 있는 여러 가지 정보 가운데 최대산소섭취량($VO_2 \text{ max}$)은 체육계와 의학계에서 오래전부터 개체의 유산소능력(aerobic capacity)을 평가하는데 널리 이용되어 왔다^{1~3)}. 그리고 임상에서는 이들 검사가 여러 질환 특히 심폐질환의 진단과 중증도의 평가, 치료효과의 판정이나 병태생리의 규명을 위해서 뿐만 아니라 호흡곤란의 원인을 밝히고 운동을 제한하는 요인을 분석하는 데에도 이용되고 있다^{4~9)}. 그리하여 국내 의학계에서도 건강인 및 심폐질환 환자들을 대상으로 한 이 방면에 관한 몇몇 보고가 있었다^{10~12)}.

그러나 종전에 발표된 거의 모든 연구는 $VO_2 \text{ max}$ 에 초점이 맞추어져 있고, 운동부하나 질환에 따른 환기기능의 변화에 대해서 검토된 것은 국내외적으로 매우 드물다. 뿐만 아니라 국내에서 발표된 보고들은 앞서 박 등¹³⁾ 및 안 등¹⁴⁾이 각각 700여명의 성인 남녀를 대상으로 최대운동시의 호흡성 가스교환과 환기기능의 지표를 10세 단위로 비교관찰한 업적을 제외하면 거의 모두가 제한된 연령층을 대상으로 한 단편적인 것 이거나 대상자의 예수가 적어 일반 한국인의 정상치에 대한 기초자료로 활용하기에는 많은 제한이 있으며, 특히 여성을 대상으로 한 보고는 더욱 그러하여 우리나라에서는 아직 최대운동부하시의 가스교환이나 환기기능 지표의 정상치가 수립되어 있지 않은 실정에 있다.

이에 저자들은 건강한 국민 1,000명에서 얻은 최대운동시의 호흡성 가스교환과 환기기능의 성적을 5세 단위로 세분하여 연령과 성별에 따른 차이를 비교 관찰하고 아울러 최대운동시의 이들 지표의 추정정상치를 산출하는 회귀방정식을 구하여 그 성적을 보고하는 바이다.

대상 및 방법

1. 대 상

대구 「유성 스포츠 플라자」의 「스포츠 과학 연구소」에서 의학적 검사를 받은 20대에서 60대(20~66세)의 남성 603명, 여성 397명, 합계 1,000명을 대상으로 하

였다. 이들은 모두 전문 체육인은 아니었으나 스포츠센터의 회원으로서 건강과 운동에 대해 일반인보다는 관심이 많은 편에 속하는 사람들이었고, 대상자들의 신체적 조건은 Table 1과 같다.

이들은 ① 심폐기능이나 최대운동부하 검사에 영향을 미칠만한 병력이나 진찰소견이 없고 ② 혈액소, 일반 요검사 및 폐기능 검사에 특기할 만한 소견이 없으며, ③ 흉부 X-선 사진, 안정시 및 최대운동부하 심전도에도 이상이 없는 사람들이었다.

2. 방 법

단계적 운동부하검사(graded exercise test, GXT)는 Bruce법⁹⁾으로 증상제한성(symptom-limited) 최대운동을 시켰다. 이때 트레드밀은 Q-55(미국 Quinton사)를 사용하였고 심전도의 감시 및 기록은 Q-5000(미국 Quinton사)으로 하였다. 그리고 Bruce법의 7단계(21분) 이상 계속 운동을 할 수 있었던 예에서는 7단계 때의 트레드밀의 속도와 경사도를 그대로 유지하였다. 운동 중 트레드밀의 손잡이는 몸의 균형을 유지하는데 필요한 최소한만 잡도록 권장하였으나 모든 예에서 운동의 마지막 단계에 가까워질수록 손잡이를 힘껏 잡게 되었으며 이는 안전상의 문제 때문에 불가피한 것이었다.

운동중과 회복기동안 호기의 분석과 양의 측정에는 Q-Plex I(미국 Quinton 사)으로 하였으며, 분당 심박수(HR), 산소섭취량(VO_2), 이산화탄소배출량(VCO_2), 호기량(VE), 호흡수(RR), 호흡교환비(RER), 그리고 상시호흡량(VT) 등의 성적을 매 20초 마다 Ex-800 Epson(일본 Fujitsu 사) 프린터로 출력하였다.

최대운동시의 이들 지표의 성적판정은 최대운동을

Table 1. Physical Characteristics of Subjects

	Male	Female
Number	603	397
Age (yr)	38.4 ± 10.47	37.5 ± 11.40
Height (cm)	170.7 ± 5.30	158.7 ± 5.09
Weight (kg)	68.7 ± 8.55	55.2 ± 6.06
BSA (m ²)	1.80 ± 0.12	1.56 ± 0.09
BMI	23.6 ± 2.58	21.9 ± 2.32

Values are mean ± SD. BSA: body surface area.
BMI: body mass index.

Table 2. Major Ventilatory Functions

Age Group	No.	VC	FEV1	MVV
Male (n=541)				
20~24	48	5.73 ± 0.765	4.92 ± 0.647	204.19 ± 33.710
25~29	58	5.63 ± 0.580	4.61 ± 0.521	199.07 ± 31.091
30~34	63	5.18 ± 0.850	4.22 ± 0.715	181.72 ± 35.504
35~39	101	5.14 ± 0.814	4.04 ± 0.626	173.88 ± 35.452
40~44	101	4.93 ± 0.670	3.78 ± 0.495	166.17 ± 29.768
45~49	93	4.75 ± 0.746	3.53 ± 0.588	153.40 ± 31.316
50~54	47	4.57 ± 0.726	3.39 ± 0.576	151.57 ± 34.088
≥ 55	30	4.53 ± 0.672	3.25 ± 0.536	133.42 ± 22.422
Female (n=344)				
20~24	66	3.88 ± 0.526	3.35 ± 0.495	135.60 ± 19.515
25~29	27	3.85 ± 0.408	3.35 ± 0.303	133.00 ± 19.307
30~34	19	3.85 ± 0.215	3.16 ± 0.279	124.73 ± 15.512
35~39	71	3.68 ± 0.489	2.99 ± 0.407	123.91 ± 19.792
40~44	53	3.56 ± 0.457	2.81 ± 0.380	118.62 ± 19.900
45~49	43	3.40 ± 0.352	2.62 ± 0.258	106.18 ± 15.038
50~54	36	3.32 ± 0.488	2.58 ± 0.385	105.23 ± 20.973
≥ 55	29	3.02 ± 0.436	2.29 ± 0.390	94.33 ± 17.166

Values are mean ± SD in liter. Definitions of pulmonary symbols in this and following tables are as in ACCP-ATS committee on pulmonary nomenclature¹⁵⁾.

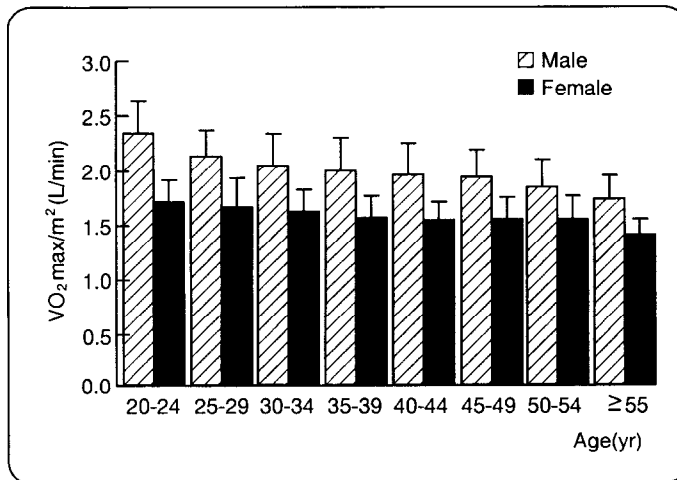


Fig. 1. Maximal oxygen uptake by sex and age.

중지한 순간을 중심으로 해서 그 직전과 직후의 성적 가운데 VO_2 가 많은 순간의 값을 최대치(max)로 간주 하였는데, RER max는 회복기를 제외한 전 운동기간 중의 최고치를 택하였다. 그리고 최대운동부하검사에

서 전력을 다하지 않았다고 생각되는 예는 물론, HR max가 추정치인 [220-나이] 보다 11 이상 적고, RER max가 1.05 미만인 예는 연구대상에서 제외하였다.

한편 폐활량(VC), 노력성 폐활량의 1초치(FEV₁) 및

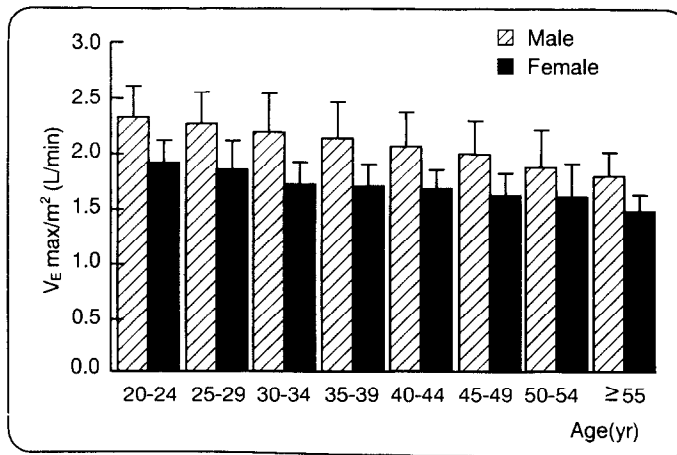


Fig. 2. Minute ventilation at maximal exercise by sex and age.

Table 3. Exercise Times on the Treadmill by Bruce protocol

Age Group	Male (n=541)		Female (n=344)	
	n	Exercise Time	n	Exercise Time
20~24	48	17.3±2.34	66	13.9±1.47
25~29	58	16.6±2.63	27	13.7±1.44
30~34	63	15.3±2.18	19	13.4±1.35
35~39	101	14.9±2.17	71	12.9±1.56
40~44	101	14.6±1.87	53	12.6±1.59
45~49	93	14.4±1.75	43	12.4±1.72
50~54	47	14.1±1.81	36	11.8±2.05
≥ 55	30	12.6±1.98	29	11.8±1.91

Values are mean±SD expressed in min.

최대환기량(MVV)은 Q-Plex I에 내장되어 있는 spirometry program을 이용하여 측정하였다. 그리고 이들 환기기능의 성적은 885명에서만 이용할 수 있었다.

본 연구에서 성적의 통계학적 처리는 SPSS/PC⁺ (Version 4.0)로 하였다.

결 과

안정시 폐환기 기능검사의 성적은 Table 2와 같이 VC, FEV₁ 및 MVV가 모두 남성에서 여성보다 컸고 연령이 증가함에 따라 감소하여 20대 초반의 남성에서 가장 컸으며 55세 이상의 여성에서 가장 작았다.

Bruce법에 의한 최대운동시간은 Table 3과 같이 20대 초반의 남자에서 가장 길었고 55세 이상의 여성에서 가장 짧았으며, 전체적으로는 남녀의 평균 운동시간이 각각 15.1분 및 12.9분으로 연령과 성에 따른 차이가 뚜렷하였다.

최대운동시의 체표면적(m²)당 분당 VO₂ max, VCO₂ max 및 V_E max 즉 VO₂ max/m², VCO₂ max/m² 및 V_E max/m² 그리고 RR max와 V_T max의 성적은 Table 4와 같다. 즉 VO₂ max/m²는 연령이 증가함에 따라 남성에서는 연간 약 15ml, 여성에서는 연간 약 8ml 감소하였으며(Table 6), 전체적으로는 여성의 VO₂ max/m²는 남성의 약 76% 정도였다. 한편 VCO₂ max/m²도 VO₂ max/m²와 마찬가지로 연령이 증가함에 따라 감소하였으며 그 양은 남성에서는 연간 약 15ml, 여성에서는 연간 약 9ml 정도였고(Table 6), 전체적으로는 여성의 VCO₂ max는 남성의 약 76%이었다. 이들을 그림으로 나타내면 Fig. 1 및 2와 같다.

최대운동시의 주요 환기기능의 지표 가운데 V_E max/m²는 연령이 증가함에 따라 남성에서는 연간 약 0.50 L, 여성에서는 연간 0.38 L 정도 감소하였다(Table 6). 그러나 V_E max/m²는 같은 연령군에서도 상당한 개인차가 있었다.

한편 RR max는 성별에 따른 차이는 거의 없었으나 나이가 많아짐에 따라 감소하는 경향이 있어 남녀에서 다같이 연간 약 0.3회 감소하였다(Table 6). 그리고 V_T

Table 4. Respiratory Gas Exchange and Ventilatory Variables at Maximal Exercise

Age Group	No.	VO ₂ /m ² (L/min)	VCO ₂ /m ² (L/min)	VE/m ² (L/min)	RR/min	VT (L)
Male (n=603)						
20~24	77	2.33 ± 0.289	2.47 ± 0.300	76.1 ± 10.97	54.1 ± 8.11	2.57 ± 0.417
25~29	63	2.12 ± 0.239	2.34 ± 0.261	74.3 ± 9.98	51.9 ± 8.69	2.62 ± 0.377
30~34	69	2.01 ± 0.279	2.26 ± 0.313	71.6 ± 11.32	49.8 ± 8.23	2.64 ± 0.480
35~39	104	1.96 ± 0.309	2.17 ± 0.332	69.3 ± 11.88	49.2 ± 8.00	2.59 ± 0.404
40~44	107	1.92 ± 0.304	2.12 ± 0.318	67.4 ± 11.37	48.0 ± 7.30	2.58 ± 0.420
45~49	98	1.89 ± 0.251	2.08 ± 0.274	64.7 ± 10.44	45.2 ± 6.07	2.59 ± 0.408
50~54	53	1.81 ± 0.240	1.97 ± 0.264	60.8 ± 10.73	44.2 ± 6.14	2.49 ± 0.385
≥ 55	32	1.69 ± 0.223	1.88 ± 0.285	57.9 ± 9.08	43.1 ± 5.34	2.39 ± 0.304
Female (n=397)						
20~24	79	1.69 ± 0.217	1.79 ± 0.245	61.9 ± 9.06	54.8 ± 7.23	1.78 ± 0.279
25~29	40	1.64 ± 0.263	1.76 ± 0.289	60.8 ± 8.98	52.8 ± 5.92	1.75 ± 0.286
30~34	28	1.60 ± 0.182	1.74 ± 0.223	55.7 ± 8.65	49.2 ± 7.36	1.82 ± 0.307
35~39	79	1.53 ± 0.192	1.63 ± 0.217	54.9 ± 8.37	49.2 ± 7.86	1.76 ± 0.248
40~44	56	1.51 ± 0.162	1.63 ± 0.187	54.0 ± 6.68	47.5 ± 6.29	1.81 ± 0.292
45~49	47	1.51 ± 0.198	1.59 ± 0.208	52.3 ± 8.28	46.8 ± 6.71	1.77 ± 0.226
50~54	38	1.50 ± 0.229	1.59 ± 0.229	52.0 ± 10.49	45.1 ± 6.50	1.85 ± 0.308
≥ 55	30	1.34 ± 0.148	1.43 ± 0.187	47.2 ± 6.40	45.6 ± 6.01	1.63 ± 0.191

Values are mean ± SD. RR: respiratory rate.

Table 5. Ventilatory Variables related to Ventilatory Reserve at Maximal Exercise

Age Group	No.	VT/VC	VE/MVV	BR (L)
Male (n=541)				
20~24	48	0.45 ± 0.076	0.67 ± 0.135	71.22 ± 36.588
25~29	58	0.47 ± 0.058	0.68 ± 0.148	66.54 ± 34.799
30~34	63	0.52 ± 0.076	0.74 ± 0.169	51.73 ± 37.416
35~39	101	0.51 ± 0.071	0.75 ± 0.166	47.15 ± 33.563
40~44	101	0.53 ± 0.082	0.75 ± 0.155	44.98 ± 31.182
45~49	93	0.55 ± 0.086	0.78 ± 0.166	37.46 ± 30.256
50~54	47	0.54 ± 0.082	0.74 ± 0.171	43.80 ± 34.121
≥ 55	30	0.54 ± 0.064	0.78 ± 0.117	31.32 ± 18.284
Female (n=344)				
20~24	66	0.46 ± 0.069	0.72 ± 0.144	40.02 ± 22.984
25~29	27	0.47 ± 0.074	0.71 ± 0.125	39.96 ± 20.478
30~34	19	0.44 ± 0.066	0.68 ± 0.139	41.11 ± 20.661
35~39	71	0.48 ± 0.067	0.71 ± 0.147	38.08 ± 22.714
40~44	53	0.50 ± 0.060	0.73 ± 0.141	34.23 ± 21.141
45~49	43	0.52 ± 0.069	0.78 ± 0.164	24.46 ± 18.542
50~54	36	0.56 ± 0.085	0.80 ± 0.184	23.21 ± 21.552
≥ 55	29	0.55 ± 0.082	0.80 ± 0.171	20.53 ± 17.694

Values are mean ± SD. BR : breathing reserve(MVV-VE max).

Table 6. Regression Equations of Parameters Relating Gas Exchange and Ventilatory Function at Maximal Exercise, using Age with or without Sex as a Variable(s)

Variable	Sex	Regression	Equation	R	SEE
VO ₂ /m ² (L/min)	M & F	2.448 - 0.012 A - 0.436 S		0.70	0.253
	M	2.570 - 0.015 A		0.50	0.277
	F	1.860 - 0.008 A		0.42	0.202
VCO ₂ /m ² (L/min)	M & F	2.650 - 0.012 A - 0.536 S		0.73	0.273
	M	2.756 - 0.015 A		0.47	0.298
	F	1.982 - 0.009 A		0.40	0.225
RR (/min)	M & F	60.172 - 0.303 A + 0.648 S		0.42	7.183
	M	60.802 - 0.319 A		0.41	7.352
	F	60.031 - 0.282 A		0.42	6.919
VT (L)	M & F	2.663 - 0.002 A - 0.801 S		0.74	0.362
	M	2.698 - 0.003 A		0.08	0.410
	F	1.818 - 0.001 A		0.05	0.272
VE/m ² (L/min)	M & F	85.689 - 0.447 A - 13.280 S		0.62	9.963
	M	87.772 - 0.501 A		0.44	10.823
	F	69.797 - 0.377 A		0.45	8.439

M: male, F: female, A: age in years. S: sex coded 0 for males and 1 for females.

max는 남녀 모두에서 연령의 증가에 따른 일정한 경향의 변화가 없었으며, 전체적으로 보아 여성의 성적은 남성의 약 69%에 해당하였다.

최대운동시의 환기예비를 반영하는 여러 지표들의 성적은 Table 5와 같다. 즉 V_T max/VC 및 V_E max/MVV의 평균은 남녀에서 다같이 연령이 낮은 군에서보다 연령이 높은 군에서 높은 경향이 있었으나 연령증가나 성별에 따른 일정한 경향의 차이는 없었다. 그리고 VT max/VC는 남녀의 모든 연령군에서 그 평균이 0.56 이하였고, V_E max/MVV는 0.81 이하였다. 한편 MVV와 VE max의 차이인 환기예비량(breathing reserve, BR) 역시 남녀에서 다같이 연령증가에 따른 일정한 경향의 차이를 볼 수 없었으나 연령이 많은 군에서 적은 군에 비해 높은 경향이 있었다. 그리고 남녀를 비교하면 남성의 BR은 같은 연령군의 여성의 약 150% 정도였고 BR의 평균이 가장 낮았던 55세 이상의 여성에서도 그 값이 20.53 L나 되었다.

저자들의 성적을 토대로 대상자들의 신체적 조건, 성

별, 그리고 운동시간을 변수로 하여 단계적 방식(step-wise)으로 VO₂ max/m² 및 VCO₂ max/m²의 다중회귀방정식(multiple regression equation)을 구해보면 Table 7에서와 같이 이들 지표는 성별을 제외하면 운동시간과 가장 밀접한 관계가 있었다. 그리고 VCO₂ max/m²를 구하는 회귀방정식의 변수로서 V_E max를 추가하는 경우는 VE max만이 변수로 채택되었으며 상관계수도 남녀를 합한 경우 0.85나 되었다.

또한 여러 환기기능 지표의 회귀방정식을 구해보면 Table 8과 같다. 즉, 대상자들의 신체적 조건과 성별, 그리고 운동시간을 변수로 해서 위에서와 같은 방법으로 V_E max 및 V_E max/m²의 회귀방정식을 구해보면 이들 지표 역시 성별을 제외하면 신체적 조건보다 운동시간과 훨씬 더 밀접한 상관관계가 있었다. 그러나 V_E max 및 V_E max/m²의 회귀방정식의 변수로서 FEV₁을 첨가하는 경우는 FEV₁만이 변수로 채택되었다. 그리고 V_T max의 경우는 회귀방정식의 변수로서 VC를 첨가하는 경우는 VC만이 변수로 채택되었다.

Table 7. Regression Equations for Respiratory Gas Exchange at Maximal Exercise

Variable	Sex	Regression	Equation	R	SEE
VO ₂ /m ² (L/min)	M & F	1.449 + 0.073 ET - 0.007 A + 0.010 W - 0.006 H - 0.209 S		0.80	0.215
	M	1.803 + 0.074 ET - 0.008 A + 0.010 W - 0.008 H		0.68	0.237
	F	0.457 + 0.063 ET - 0.005 A + 0.009 W		0.63	0.173
VCO ₂ /m ² (L/min)	M & F	1.672 + 0.063 ET - 0.008 A + 0.010 W - 0.005 H - 0.319 S		0.79	0.246
	M	2.050 + 0.061 ET - 0.009 A + 0.009 W - 0.006 H		0.59	0.272
	F	0.527 + 0.064 ET - 0.006 A + 0.010 W		0.60	0.198
VCO ₂ /m ² (L/min)	M & F	0.838 + 0.011 VE max - 0.127 S		0.85	0.209
	M	0.868 + 0.011 VE max		0.72	0.234
	F	0.644 + 0.012 VE max		0.74	0.164

ET: exercise time in min, W: weight in kg, H: height in cm, S: sex coded 0 for males and 1 for females.
Other abbreviations are as in Table 6.

고 찰

단계적 운동부하검사(graded exercise test, GXT)는 임상에서는 흔히 허혈성 심질환의 진단이나 중증도의 평가에 이용되나⁹⁾, 그 밖에도 개체의 유산소능력을 평가하고 하는데 널리 이용되어 왔다^{1~3)}. 또한 GXT는 일반인이나 심폐질환 환자의 운동능력을 정량적으로 평가하거나 호흡곤란이나 운동을 제한하는 요인을 정확히 규명하며⁴⁾, 최대부하 이하의 운동에서 최대부하 시의 반응을 예측하고^{16,17)}, 장애의 정도 및 치료에 대한 반응을 평가하거나⁶⁾, 동반 질환의 유무를 확인하는⁷⁾ 등의 여러 방면에 오랫동안 이용되어 왔으며, 특히 GXT를 통해 측정된 VO₂ max는 심폐기능의 객관적이고 종합적인 지표로서 널리 인정을 받고 있다³⁾.

일반적으로 VO₂ max는 20대에서 가장 크고 연령이 증가함에 따라 감소하는 것으로^{1,2,12)} 알려져 있다. 본 연구에서도 VO₂ max/m²가 연령이 증가 할 수록 감소하였고 그 감소의 정도는 남성에서 여성에 비해 높았다. 그리고 저자들의 성적에서 여성의 VO₂ max/m²는 남성의 약 80% 정도로 Åstrand¹⁾의 보고와 거의 일치하였으며 VCO₂ max/m²도 VO₂ max/m²와 유사한 변화를 보였다.

연령에 따른 VO₂ max의 감소는 보통 남녀에서 각각 약 60세와 50세를 고비로 그 이전에는 감소의 폭이 작

다가 그 이후부터는 급격히 감소한다고 한다^{1,2,18,19)}. 그러나 본 연구에서는 남녀 모두에서 20대와 30대 사이에서 VO₂ max의 감소가 가장 심하였고 30대와 40대 사이에서는 VO₂ max의 감소가 가장 작았으며, 이는 외국의 다른 연구에 비해 고령자의 대상이 적었기 때문으로 생각된다. 연령에 따른 VO₂ max의 변화는 연구 방법에 의해서도 영향을 받는다고 한다. 종전의 대부분의 VO₂ max에 관한 연구는 횡적(cross-sectional)이었으며 종적(longitudinal) 연구는 드물고 또한 거의가 대상의 크기도 작았다. 대부분의 횡적 연구^{1,18,20)}에서는 체중 kg당 VO₂ max의 감소가 연간 0.3~0.4ml 정도인데 비해 종적 연구^{20~22)}에서는 평균 연간 감소가 0.6~0.9 ml 정도로 그 폭이 훨씬 크며 VO₂ max의 연간 감소는 연령이외에 평소의 운동습관^{20,22)}, 흡연²²⁾ 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 개인간의 차가 크다고 한다. 횡적 연구인 본 연구에서는 남성에서는 연간 체중 kg당 0.44ml씩, 여성에서는 0.32ml씩 감소하였고 이를 체표면적당으로 나타내면 연간 남성에서는 약 15ml, 여성에서는 약 8ml의 감소가 있어 다른 횡적 연구와 유사한 결과를 보였으며, VCO₂ max/m²도 남성에서는 연간 약 15ml, 여성에서는 약 9ml가 감소하였다. 이와 같이 횡적 연구에 비해 종적 연구에서 VO₂ max의 감소가 많은 것은 오랜 기간에 걸친 종적 연구에서는 신체적성이 낮은 대상이 질병이나 사망 등으로 인하여 GXT를 재검할 수 없게 되는 반면 신체적성이 좋은 대

Table 8. Regression Equations for Ventilatory Variables at Maximal Exercise

Variable	Sex	Regression Equation	R	SEE
VE (L/min)	M & F	28.581 + 2.873 ET - 0.590 A + 1.084 W - 16.341 S	0.79	16.585
	M	32.628 + 2.831 ET - 0.653 A + 1.070 W	0.58	18.712
	F	11.406 + 2.749 ET - 0.521 A + 1.082 W	0.59	12.703
VE (L/min)	M & F	69.928 + 13.147 FEV ₁ - 22.341 S	0.75	17.817
	M	69.438 + 13.270 FEV ₁	0.47	20.055
	F	48.701 + 12.771 FEV ₁	0.45	13.957
VE/m ² (L/min)	M & F	58.161 + 1.503 ET - 0.315 A - 9.871 S	0.66	9.555
	M	59.948 + 1.462 ET - 0.346 A	0.51	10.393
	F	46.581 + 1.534 ET - 0.280 A	0.52	8.127
VE/m ² (L/min)	M & F	42.157 + 6.458 FEV ₁ - 5.715 S	0.61	9.978
	M	43.019 + 6.243 FEV ₁	0.42	10.799
	F	34.484 + 7.119 FEV ₁	0.41	8.651
VT (L)	M & F	1.497 + 0.223 VC - 0.493 S	0.81	0.318
	M	1.468 + 0.229 VC	0.50	0.361
	F	1.071 + 0.203 VC	0.46	0.241

FEV₁ and VC in liters. Other abbreviations are as in Tables 6 and 7.

상만이 재검을 받을 수 있었던 것²²⁾도 한가지 이유라고 생각된다.

운동습관에 따른 VO₂ max의 변화도 상당하여, 보통 1주에 3마일 이상 달리기를 하는 대상에서는 그렇지 않은 대상에 비해 VO₂ max가 많고, 연령에 따른 VO₂ max의 감소도 작으며 그 차이를 연령으로 환산하면 약 10세 정도에 해당한다고 한다^{18,20)}. 그 밖에도 정적인 생활을 하던 대상에 3~16주간의 운동을 시킨 후에 VO₂ max가 5~25%까지 증가하였다는 보고^{23~26)}도 많다. 그리고 이들 성적은 운동방법, 기간, 운동횟수, 강도 및 운동방식과 검사방식 등에 차이가 많아 직접적인 비교는 곤란하나 수개월간이라는 비교적 단기간의 운동으로도 VO₂ max가 상당히 증가할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 VO₂ max로 개체의 신체적성을 평가할 때에는 연령과 습관적인 육체적 활동의 두가지 인자를 반드시 고려해야 하겠다¹⁸⁾.

운동방식에 따라서도 VO₂ max에 차이가 있어 트레드밀에서는 자전거 ergometer에 비해 VO₂ max가 약 10% 정도 높게 측정된다고 한다^{27,28)}. 그리고 Taylor

등³⁾은 트레드밀에서 최대 운동을 하고 있는 동안에 손으로 crank를 돌리게 하여 VO₂가 분당 200ml 가량 더 증가함을 관찰하였다. 또한 Koyal 등²⁹⁾은 같은 부하에서도 트레드밀에서 보다 자전거 ergometer에서 혈중 젖산 농도가 더 높고 중탄산염의 감소가 심하여 대사성 산증이 더 심하게 나타남을 관찰하고 이는 자전거 ergometer에서는 트레드밀에 비해 적은 양의 근육이 활동함으로 단위 근육당 대사율이 훨씬 높기 때문일 것이라하여 운동에 참여하는 근육의 양이 중요한 요인일 것임을 시사하였다. 이 밖에도 VO₂ max에 영향을 주는 요인으로 운동시간을 들 수 있겠는데, 대상의 신체적성에 따라 부하의 양이나 트레드밀의 경사도를 적절히 조절하면 운동시간을 어느 정도 조절할 수 있고 이에 따라 VO₂ max가 가장 높게 측정되는 조건을 구할 수 있다고 하며^{3,27)}, Buchfuhrer 등²⁷⁾은 자전거 ergometer나 트레드밀로 GXT를 10±2분에 끝낼 것을 권장하였다. 이러한 VO₂ max에 대한 운동시간의 영향을 고려해 볼 때, 순환기 분야에서 널리 쓰이는 GXT protocol의 일부는 불필요하게 운동시간이 길고 부하의 증

가가 적절하지 않아 심근의 허혈을 보기에는 적당할지라도 VO_2 max를 측정할 목적으로 사용하기에는 부적당한 면도 없지 않다고 생각된다. 본 연구에서의 전체적인 운동시간은 남성에서 평균 15.1분, 여성에서는 12.9분이었으나 20대 남성에서는 약 17분에 달하였다는 아쉬움이 있다.

과거에 GXT를 실시하는 동안 복잡한 호기 가스의 채취와 분석을 모두 수작업으로 할 수밖에 없어서 1분보다 더 짧은 간격으로는 VO_2 를 측정하기가 어려웠던 1950년대에 Taylor 등³⁾은 VO_2 max를 정의하기를 트레드밀의 경사도를 2.5% 높였을 때 VO_2 가 150ml, 혹은 체중 kg당 2.1ml 이상 증가하지 않을 때의 VO_2 라고 하였다. 그러나 최근에는 의공학의 놀라운 발달로 인하여 호기가스의 분석을 즉각적이고 자동적으로 할 수 있게 됨에 따라 호기의 채취 및 분석을 얼마의 시간 간격으로 해야 하는가 하는 문제가 대두되었다. 그리하여 동일인에서 호기의 분석간격을 다르게 하여 VO_2 를 측정해보았던 바 분석간격이 짧을 수록 VO_2 의 변이도가 커진다는 보고도 있다³⁰⁾. 본 연구에서는 20초 간격으로 여러 지표의 분석을 하였는데 이는 매호흡마다의 분석을 하였을 경우에는 수치의 변동이 너무나 심하여 정확한 분석을 할 수 없어 수치의 변동을 어느 정도 수용할 만하면서도 시간 간격을 가능한 짧게 하기 위해서였다. 분석간격에 따른 변이도에 관해서는 아직도 상당한 연구가 더 필요할 것으로 생각되며 과거의 결과를 최근의 결과와 비교할 때에는 이런 점을 염두에 두어야 하겠다.

본 연구에서 얻은 VO_2 max/ m^2 는 다른 여러 연구^{1,2,12,18,22)}에 비해 상당히 높고, 일부 현역 운동선수의 그것보다도 높은 편이었다. 그러나 이와 같은 높은 성적을 인종적으로 한국인의 산소섭취능이 외국인보다 우수하기 때문이라고만 생각하기는 어렵다고 하겠다. 그 이유로는 본 연구의 대상자들은 스포츠센터의 회원들로서 평소 건강과 운동에 관심이 많은 부유층으로 '선택된 대상'이었다는 점을 비롯해서, Bruce Protocol을 사용하여 VO_2 를 측정할 때 10~20%의 오차가 발생할 수 있다는 점³²⁾, VO_2 max의 측정에 관심과 경험이 많은 검사자가 피검자로 하여금 최선을 다하도록 격려했고, HR max나 RER max를 기준으로 전력을 다하지 않았다고 생각되는 예는 연구대상에서 제외하였

으며, 거기에도 안전상의 문제 때문에 불가피하게 모든 예에서 운동 마지막 단계에 가까워서는 트레드밀의 손잡이를 힘껏 잡는 것을 허용하였기 때문에 이로 인해서 운동시간이 길어졌다는 등^{31,32)}을 원인으로 들 수 있겠다. 저자들의 성적은 안 등¹⁴⁾의 그것과 비교해서도 체중 kg당 VO_2 max가 남녀의 각 연령군에서 10~15% 정도 더 높았는데, HR max가 안 등¹⁴⁾의 그것보다 분당 6~10회 정도 많았던 것으로 미루어 본 연구에서의 부하강도가 보다 적절했다고 할 수 있겠다.

수많은 VO_2 max에 관한 연구에 비해 운동시의 환기량에 관한 연구는 양이나 질적인 면에서 미흡한 듯하다. 그리고 그 주된 이유는 정상인에서는 환기예비가 크기 때문에 VO_2 max가 환기기능이 아닌 순환기능에 의해 제한을 받으며^{12,16,26)}, 만성폐질환 환자에서는 환기장애에 의해서 운동이나 VO_2 max가 제한을 받기는 하나^{10,11,16,17,33)}, 이런 환자에게 GXT를 실시하여 VO_2 max를 측정하는 것은 힘이 들고 또한 안정시의 폐기능 검사 만으로 어느 정도 예측이 가능하다고 생각했기 때문인 것 같다¹⁷⁾.

그러나 일반적으로 MVV와 V_E max 사이에는 상당한 차이가 있으며^{5,6,11,16,33)}, 정상인에서도 호흡근의 피로로 인한 환기기능의 저하로 VO_2 max가 제한을 받을 수 있을 뿐만 아니라, 호흡근의 훈련으로 환기기능과 VO_2 max의 양자를 다같이 증가시킬 수 있다는 보고들^{5,34~36)}이 나오면서 환기량에 대한 관심이 다시 고조되고 있는 것 같다.

한편 V_E max도 여러 요인에 의해 영향을 받는다. V_E max는 보통 20대 이후부터는 연령이 증가함에 따라 감소하는데 연령에 따른 V_T max의 감소가 거의 없는 것으로 보아 V_E max의 감소는 거의 RR max의 감소에 의한 것으로 생각되고 있으며^{1,2,12)}, 이는 본 연구의 결과와도 대체로 일치한다.

평소에 운동을 하는 군과 운동을 거의 하지 않는 군 사이에 V_E max를 비교한 연구는 찾을 수 없었으나 운동을 하지 않던 대상에 8~16주동안 자전거 타거나 달리기를 시킨 후에 V_E max가 10~31% 증가하였다는 보고가 있다^{23~26)}. 따라서 호흡근에 비특이적인 달리기 같은 전신운동으로도 호흡근의 힘과 지구력이 증가하며 환기기능이 개선될 수 있음을 알 수 있으며, 이 밖에도

호흡근에 특이적인 운동만으로 환기지구력을 증가시킬 수도 있다고 한다³⁷⁾. 그러나 $VO_2 \text{ max}$ 가 운동부하방식에 따라 뚜렷한 차이를 보이는 데 비하여 $VE \text{ max}$ 는 운동부하방식에 따른 뚜렷한 차이는 없는 것 같다^{27~29)}.

본 연구에서는 운동시간이나 신체적 조건, 그리고 안정시에 측정된 폐환기기능 검사성적 등을 변수로 해서 단계적 방식으로 $VO_2 \text{ max/m}^2$, $VCO_2 \text{ max/m}^2$ 및 $VE \text{ max/m}^2$ 의 회귀방정식을 구하였는데 남녀를 합한 경우에는 이들 방정식의 상관계수가 모두 0.7 이상으로 상관성이 상당히 좋았으나 남녀를 따로 구한 방정식에서는 그 상관계수가 다소 낮았다.

호흡근의 피로에 관해서는 20분간의 격렬한 운동⁵⁾이나, 마라톤³⁴⁾, 또는 지속적인 과호흡^{36,38)}, 전후에 나타난 성적들이 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있고 특히 Martin 등³⁶⁾은 이 때에 $VO_2 \text{ max}$ 도 같이 감소함을 관찰하고, 호흡근의 피로가 정상인에서 운동능력에 영향을 줄 수 있음을 제시하였다. 그 밖에도 건강한 청년에서 단기간의 격렬한 운동으로 발생한 횡경막의 피로가 산소 흡입으로써 경감 내지 지연될 수 있음을 횡경막의 근전도 변화를 통해 증명한 보고³⁹⁾도 있다.

이와 같이 건강인에서도 호흡근의 피로로 인해서 안정시에 측정된 MVV와 $VE \text{ max}$ 사이에 차이가 있으리라는 것은 어느 정도 예상할 수 있으며, 여러 연구^{5,24,27,36~39)}에서의 MVV와 $VE \text{ max}$ 와의 관계를 종합해보면 15분간의 최대운동부하 검사에서는 MVV의 약 70~80%를 이용한다고 하며, Freedman³⁸⁾은 MVV는 오랫동안 유지될 수 없기 때문에 MVV로 부터 $VE \text{ max}$ 를 예측하는 것은 옳지 않다고 하였다. 그리고 지속적인 운동에서 MVV를 유지하지 못하는 이유로는 호흡근의 피로 외에도 과호흡에 따르는 호흡근의 과도한 산소 소모와 과호흡으로 초래되는 개체의 불쾌감이 작용하기 때문이라고 한다⁵⁾. 이 밖에도 최근 Mancini 등⁷⁾은 만성심부전 환자에서 호기 및 흡기근의 최대능은 비교적 잘 유지되어 있음에도 불구하고 호흡근의 지구력이 감소되어 있음을 증명하여, 심부전 환자에서의 운동제한이 단순히 순환기능의 저하에 의한 것이 아님을 밝힌바 있다. 앞으로 심부전 환자의 운동제한 요소로서의 환기기능에 관해서는 보다 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 이 밖에 화학 수용체의 예민도(che-

moresponsiveness)와 운동시의 환기량 사이에도 밀접한 관계가 있어 화학 수용체가 이산화탄소에 대해 예민하게 반응한 대상에서는 운동중의 환기량의 증가가 컸다는 보고들도 있다^{27,40,41)}.

환기예비를 반영하는 $V_T \text{ max/VC}$, $VE \text{ max/MVV}$ 및 BR은 다같이 연령증가에 따른 일정한 경향의 변화가 없었으나, 전체적으로 보아 연령이 많은 군에서 환기예비가 적은 경향이 있었다. 그러나 이들의 성적은 최대 운동시에도 남녀의 모든 연령군에서 상당한 환기예비가 있음을 보여 주었다.

본 연구의 한계점으로는 다음과 같은 것을 들 수 있겠다. 우선, 대상들이 건강과 체력에 대한 관심이 일반인보다 많고, 비교적 부유층에 속하는 스포츠센터의 회원들이었기 때문에 진정으로 한국인의 표준이 될 수 있는지에 대한 의문이 있을 수 있겠고, 다음으로는 평소의 운동 습관이나 흡연에 대한 고려가 되어 있지 않다는 점을 들 수 있겠다. 거의 설문지에 의존하게되는 이런 요인들을 대상들의 체계적이지 못한 답변으로 이들을 정확하게 정량화하기에는 많은 어려움이 있어 고려하지 못하였던 아쉬움이 있다.

그러나 본 연구에서는 의학적 검사를 통해서 GXT의 성적에 영향을 미칠만한 대상을 제외했을 뿐만 아니라 건강과 체력에 대해서 일반인보다 관심이 많은 1,000명에 달하는 건강한 한국인을 대상으로 동일한 기기와 방법으로 실시한 검사인 만큼 이 자료들은 앞으로의 운동과 가스교환 및 환기에 대한 연구에 참고자료로 활용될 수 있는 동시에 한국인의 이상치를 제시한 것으로도 생각된다. 향후 이 방면의 연구는 생활양식이나 경제적으로 '선택된 대상'이 아니고 한국인의 평균에 보다 가까운 대상을 평소의 육체적인 활동이나 흡연여부에 따라서도 분류하여 대상자들의 신체적성을 감안한 적절한 운동부하법을 이용하여 장기간에 걸친 반복검사를 통해 전향적인 연구로 발전하여, 임상에서 더욱 유용하게 사용될 수 있는 자료를 제공할 수 있어야 할 것으로 생각한다.

요 약

연구배경: 최대운동부하 검사는 심폐기능의 종합적

인 평가를 위하여 널리 이용되고 있으나 아직 우리나라에는 최대운동시의 호흡성 가스교환이나 폐기능의 정상치가 제대로 확립되어 있지 않은 실정이다. 본 연구의 목적은 한국성인에서 최대운동시의 이들 지표의 연령과 성별에 따른 정상치 내지 참고치를 마련하는 동시에 이들 중 일부지표의 추정정상치를 산출하는 회귀방정식을 구하는데 있다.

방법: 건강한 성인 남성 603명, 여성 397명, 합계 1,000명(20~66세)을 대상으로 Bruce법으로 증상제한성 최대운동부하 검사를 실시하였으며, 이중 885명에서는 VC, FEV₁ 및 MVV도 측정하였다. 대상자들은 모두 전문체육인이 아닌 스포츠센터의 회원이었으며, 운동부하검사 중에는 안전상의 문제 때문에 부득이 트레드밀의 손잡이를 잡는 것을 허용하였다.

결과: VO₂ max/m², VCO₂ max/m² 및 VE max/m²는 모두 남성에서 뚜렷이 컸으며, 남녀에서 모두 연령의 증가에 따라 감소하였다. 한편 RR max는 성별에 따른 차이는 없었으나, 연령의 증가에 따라 약간씩 감소하였으며, V_T max는 남성에서 월등히 많았으나 남녀에서 다같이 연령에 따른 일정한 경향의 변화는 없었다. 그리고 V_T max/VC, V_E max/MVV 및 BR의 평균은 최대운동시에 나이가 많은 여성에서도 상당한 환기예비가 있음을 보여주었다. 저자들의 성적을 토대로 운동시간(분), 나이(세), 신장(cm), 체중(kg), 성별(남=0, 여=1), VC(L), FEV₁(L) 및 VE max(L) 등을 변수로 해서 구한 주요 지표들의 회귀방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{VO}_2 \text{ max/m}^2(\text{L/min}) &= 1.449 + 0.073 \times \text{운동시간} - 0.007 \times \text{연령} + 0.010 \times \text{체중} - 0.006 \times \text{신장} - 0.209 \times \text{성별}, \\ \text{VCO}_2 \text{ max/m}^2(\text{L/min}) &= 1.672 + 0.063 \times \text{운동시간} - 0.008 \times \text{연령} + 0.010 \times \text{체중} - 0.005 \times \text{신장} - 0.319 \times \text{성별}, \\ \text{V}_E \text{ max/m}^2(\text{L/min}) &= 58.161 + 1.503 \times \text{운동시간} - 0.315 \times \text{연령} - 9.871 \times \text{성별} \text{ 또는 } \text{V}_E \text{ max/m}^2(\text{L/min}) = 47.873 + 6.458 \times \text{FEV}_1 - 5.715 \times \text{성별} \text{ 및 } \text{V}_T \text{ max(L)} = 1.497 + 0.223 \times \text{VC} - 0.493 \times \text{성별}. \end{aligned}$$

결론: 본 연구에서 얻은 최대운동시의 호흡성 가스교환 및 환기기능에 관한 성적은 건강과 체력에 대해서 일반인보다 관심이 높을 것으로 생각되는 스포츠센터 회원들을 대상으로 한 것이기 때문에, 안전상의 문제로 트레드밀의 손잡이를 잡고 검사를 해야하는 환자나 건

강인을 위한 이상적인 목표치 내지 정상치를 제공한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문의 실험, 자료정리 및 논문 작성에 이르기까지 지도해주신 박희명 명예교수께 충심으로 감사드리며 자료정리를 도와주신 이봉렬 선생에게 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) Åstrand I: Aerobic work capacity in men and women, with special reference to age. *Acta Physiol Scand* 49(Suppl. 169):1, 1960
- 2) Robinson S: Experimental studies of physical fitness in relation to age. *Arbeitsphysiologie* 10: 251, 1938
- 3) Taylor HL, Buskirk E, Henschel A: Maximal oxygen intake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *J Appl Physiol* 8:73, 1955
- 4) Oren A, Sue DY, Hansen JE, Torrance DJ, Wasserman K: The role of exercise testing in impairment evaluation. *Am Rev Respir Dis* 135: 230, 1987
- 5) Shephard RJ: The maximum sustained voluntary ventilation in exercise. *Clin Sci* 32:167, 1967
- 6) Raimondi AC, Edwards RHT, Denison DM, Leaver DG, Spencer RG, Siddon JA: Exercise tolerance breathing a low density gas mixture, 35% oxygen and air in patients with chronic obstructive bronchitis. *Clinical Science* 39:675, 1970
- 7) Mancini DM, Henson D, LaManca J, Levine S: Evidence of reduced respiratory muscle endurance in patients with heart failure. *J Am Coll Cardiol* 24:972, 1994
- 8) Brischetto MJ, Millman RP, Peterson DD, Silage

- DA, Pack AI: Effect of aging on ventilatory response to exercise and CO₂. *J Appl Physiol* 56:1143, 1984
- 9) Bruce RA, Blackmon JR, Strait G: Exercise testing in adult normal subjects and cardiac patients. *Pediatrics* 32:742, 1963
- 10) 유 빈, 김영환, 한성구, 심영수, 김건열, 한용철: 만성폐색성폐질환 환자에서 운동부하 폐기능검사를 이용한 운동능력의 평가. *대한내과학회잡지* 36: 348, 1989
- 11) 김상위, 고윤석, 김우성, 김재중, 박성욱, 박승정, 이종구, 김원동: 만성폐색성폐질환과 승모판협착증 환자에서의 운동부하검사. *대한내과학회잡지* 41:60, 1991
- 12) 심완주, 서순규: 정상 한국남자의 운동부하시험과 산소섭취량에 관한 연구. *대한내과학회지* 30:290, 1986
- 13) 박희명, 김유진, 김유영, 김종석, 김창호, 이봉렬, 박재용, 채성철, 전재은, 정태훈, 박의현: 한국인의 최대운동부하에 대한 심·폐기능의 반응에 관한 연구. *대한스포츠의학회지* 12:1, 1994
- 14) 안의수, 이재구, 이석인, 김홍인: 한국인의 최대산소섭취량 추정을 위한 노모그램 고안. *한국체육학회지* 34:226, 1995
- 15) ACCP-ATS Joint Committee: Pulmonary terms and symbols. *Chest* 67:583, 1975
- 16) Pineda H, Haas F, Axen K, Haas A: Accuracy of pulmonary function tests in predicting exercise tolerance in chronic obstructive pulmonary disease. *Chest* 86:564, 1984
- 17) Spiro SG, Hahn HL, Edwards RHT, Pride NB: An analysis of the physiological strain of submaximal exercise in patients with chronic obstructive bronchitis. *Thorax* 30:415, 1975
- 18) McDonough JR, Kusumi F, Bruce RA: Variations in maximal oxygen intake with physical activity in middle-aged men. *Circulation* 41:743, 1970
- 19) Drinkwater BL, Horvath SM, Wells CL: Aerobic power of females, ages 10 to 68. *J Gerontol* 30:385, 1975
- 20) Dehn MM, Bruce RA: Longitudinal variations in maximal oxygen intake with age and activity. *J Appl Physiol* 33:805, 1972
- 21) Åstrand I, Åstrand P-O, Hallbäck I, Kilbom Å: Reduction in maximal oxygen uptake with age. *J Appl Physiol* 35:649, 1973
- 22) Dill DB, Robinson S, Ross JC: A Longitudinal Study of 16 champion runners. *J Sports Med* 7:4, 1967
- 23) Ekblom B, Åstrand P-O, Saltin B, Stenberg J, Wallström B: Effect of training on circulatory response to exercise. *J Appl Physiol* 24:518, 1968
- 24) Davis JA, Frank MH, Whipp BJ, Wasserman K: Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *J Appl Physiol* 46:1039, 1976
- 25) Saltin B, Hartley LH, Kilbom Å, Åstrand I: Physical training in sedentary middle-aged and older men. I. Oxygen uptake, heart rate, and blood lactate concentration at submaximal and maximal exercise. *Scand J Clin Lab Invest* 24: 323, 1969
- 26) Hartley LH, Grimby G, Kilbom Å, Nilsson NJ, Åstrand I, Bjure J, Ekblom B, Saltin B: Physical training in sedentary middle-aged and older men. III. Cardiac output and gas exchange at submaximal and maximal exercise. *Scand J Clin Lab Invest* 24:335, 1969
- 27) Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ: Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol* 55:1558, 1983
- 28) Fairshter RD, Salness K, Walters J, Minh V-D, Wilson A: Relationships between minute ventilation, oxygen uptake, and time during incremental exercise. *Respiration* 51:223, 1987

- 29) Koyal SN, Whipp BJ, Huntsman D, Bray GA, Wasserman K: Ventilatory responses to the metabolic acidosis of treadmill and cycle ergometer. *J Appl Physiol* **40**:864, 1976
- 30) Myers J, Walsh D, Sullivan M, Froelicher V: Effect of sampling on variability and plateau in oxygen uptake. *J Appl Physiol* **68**:404, 1990
- 31) Manfre MJ, Yu GH, Varma AA, Mallis GI, Keamey K, Karageorgis MA: The effect of limited handrail support on total treadmill time and the prediction of VO_2 max. *Clin Cardiol* **17**:445, 1994
- 32) ACSM: Guidelines for exercise testing and prescription. 4th. p60, Philadelphia, Lea & Febiger 1991
- 33) Jones NL, Jones G, Edwards RHD: Exercise tolerance in chronic airway obstruction. *Am Rev Respir Dis* **103**:477, 1971
- 34) Loke J, Mahler DA, Virgulto JA: Respiratory muscle fatigue after marathon running. *J Appl Physiol* **52**:821, 1982
- 35) Robinson EP, Kjeldgaard JM: Improvement in ventilatory muscle function with running. *J Appl Physiol* **52**:1400, 1982
- 36) Martin B, Heintzelman M, Chen H-I: Exercise performance after ventilatory work. *J Appl Physiol* **52**:1581, 1982
- 37) Leith DE, Bradley M: Ventilatory muscle strength and endurance training. *J Appl Physiol* **41**:508, 1976
- 38) Freedman S: Sustained maximum voluntary ventilation. *Respir Physiol* **8**:230, 1970
- 39) Bye PTP, Esau SA, Walley KR, Macklem PT, Pardy RL: Ventilatory muscles during exercise in air and oxygen in normal men. *J Appl Physiol* **56**:464, 1984
- 40) Rebuck AS, Jones NL, Campbell EJM: Ventilatory response to exercise and to CO_2 rebreathing in normal subjects. *Clin Sci* **43**:861, 1972
- 41) Martin BJ, Weil JV, Sparks KE, McCullough RE, Grover RF: Exercise ventilation correlates positively with ventilation chemoresponsiveness. *J Appl Physiol* **45**:557, 1978