

# Treadmill 최대 운동시 Impedance 심장기록법의 개선에 의한 마라톤 선수의 심박출량과 산소소비량과의 관계

연세대학교 의과대학 생리학교실 및 의용공학과\*

강두희 · 황수관 · 연동수 · 유선희 · 김덕원\*

(1990년 10월 10일 접수)

= Abstract =

## Relationship between Oxygen Uptake and Cardiac Output on Maximal Treadmill Exercise in Marathoners by Improved Impedance Cardiography

Doo Hee Kang, Soo Kwan Hwang, Dong Soo Yeon, Seon Hee Yuh and Deok Won Kim\*

*Department of Physiology, Department of Medical Engineering\* Yonsei University College of Medicine*

Maximal cardiac output and oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ) were measured during treadmill exercise for seven top-class marathoners and nine non-athletes using impedance cardiograph developed by one of the authors (DW Kim). Results of this study are summarized as follows.

1) New shoes with sponge and silicon rubber attached to the soles were developed to reduce motion artifact during treadmill exercise. Ensemble averaging technique with the developed shoes was also used to improve the measurement of stroke volume using impedance cardiography.

2) Maximal cardiac output of the athletes, 14.98 L/min, was significantly higher than that of the non-athletes, 13.46 L/min. As maximal heart rate of the marathoners is lower than that of non-athletes, stroke volume of the former is significantly larger than that of the latter.

3)  $\dot{V}O_{2max}$  of the marathoners, 59.38 ml/kg/min, was higher than that of the non-athletes, 40.22 ml/kg/min. At the anaerobic threshold,  $\dot{V}O_2$  of the former was 62.3% of  $\dot{V}O_{2max}$  and this was significantly higher than that of the non-athletes, 57.2%. This results indicates that the marathoners have higher aerobic capacity than the non-athletes.

4) The marathoners showed larger  $\dot{V}O_2$  than the non-athletes at the same cardiac output, indicating that a-v  $O_2$  of the former is higher than that of the latter.

5) Maximal systolic pressure of the marathoners was higher than that of the non-athletes, and so was maximal rate-pressure products.

These results indicate that heart oxygen consumption rate ( $h\dot{V}O_2$ ) of the marathoner is higher than that of the non-athletes is mainly due to higher stroke volume. And higher oxygen consumption of the marathoners is due to higher stroke volume. And higher oxygen consumption of the marathoners is due to their larger a-v  $O_2$ . The marathoners show both higher threshold and  $\dot{V}O_{2max}$ . Especially, measurement of cardiac output during treadmill exercise by improved impedance cardiography is expected to contribute in study of cardiac function of athletes.

**Key Words:** Impedance cardiography, Maximum oxygen uptake, Cardiac output, Stroke volume, Anaerobic threshold

## 서 론

운동부하를 증가시킴에 따라 산소 소비량( $\dot{V}O_2$ )은 운동부하량에 비례하여 증가하다가 최대 운동에 이르면  $\dot{V}O_2$ 는 더 이상 증가 하지 않는데, 이 때의  $\dot{V}O_2$ 를 최대 산소 소비량( $\dot{V}O_{2max}$ )이라 하며, 이  $\dot{V}O_{2max}$ 가 높을수록 aerobic capacity, 즉 지구력은 우수한 것이다. 운동 선수는 비선수보다  $\dot{V}O_{2max}$ 가 높으며, 운동선수중에서도 고도의 지구력이 요구되는 마라톤 선수에서  $\dot{V}O_{2max}$ 가 가장 높은 것이다 (Astrand & Saltin, 1961; Saltin & Astrand, 1967).

이  $\dot{V}O_{2max}$ 는 심박출량과 조직의 산소 이용 능력에 의해 결정되는 것 (Kajiser 1970)이긴 하나, Blomqvist (1983)는 심박출량이  $\dot{V}O_{2max}$  즉 aerobic capacity를 결정하는 주된 요인이 된다고 하였다.

$\dot{V}O_{2max}$ 를 결정하는 주된 요인인 심박출량은 일회 박출량과 심박수의 곱에 의해 좌우되며, 일회 박출량은  $\dot{V}O_{2max}$ 의 40% 운동부하에서 거의 최대값에 도달하고, 운동선수가 비선수에 비해 더 높은 값을 나타낸다. 심박수는 운동선수가 vagal tone의 영향으로 서맥을 나타내며, 운동중에도 선수의 심박수는 서서히 증가한다 (Rosiello et al, 1987). 이로써 선수와 비선수간에 일회 박출량과 심박수의 증가가 운동부하 증가에 따라 다르며, 이 결과 운동중에 심박출량의 증가양상도 다르게 나타남을 알 수 있다.

이와 같이 심박출량은 중요한 의미를 갖고 있으나, 이의 측정 방법중의 대부분이 피검자에게 고통을 주는 관혈적인 (invasive) 방법이 아니면, 측정상에 고도의 기술이 필요하기 때문에, 임상에서 환자를 대상으로는 측정이 가능하지만 정상인 이나 운동 선수를 대상으로 운동중에 측정하기란 매우 어려운 일이다.

운동중에는  $CO_2$  재호흡법 (Denison et al, 1969)으로 심박출량을 주로 측정하고 있으나, 이 방법은 고농도의  $CO_2$ 가 포함된 가스로 호흡을 해야하며, 매 심장 수축시 마다 (beat-by-beat) 일회 박출량의 측정이 불가능하므로 심박출량을 측정하여 평균 일회 박출량을 구할 수 밖에 없는 등 측정상의 어려움 때문에 연구에 많은 제한을 받고 있다.

이와 같이 측정하기 어려운 심박출량을 피검자에

게 고통을 주지 않는 비관혈적인 (non-invasive) 방법으로, 안정시는 물론 운동중에서도 계속적으로 간편하게 측정할 수 있는 방법이 절실히 요구되었다. 이에 따라 최근에, 흉곽저항의 변화를 기록하여 측정하는 impedance 심장기록법이 개발되어 널리 이용하게 되었다 (Kubicek et al, 1966; Swanson & Webster, 1982a; Swanson & Webster, 1982b; Qu et al, 1986; Qu et al, 1986; 김등, 1988). 이로써 임상에서 환자의 심장기능은 물론 스포츠계에서 운동선수의 심장기능을 연구하는데 크게 기여하게 되었다.

이 방법은 김등(1988) 및 황등(1989)에 의해 더욱 개선되어 신체를 움직일때 생기는 motion artifact를 감소시켜 운동중에도 측정이 가능하게 되었으나, 이 방법으로는 운동중 상체의 움직임이 적은 자전거 ergometer 운동중에서 어느 정도 가능할 뿐, 가장 효율적인 운동기구인 treadmill 상에서는 전신운동이 이루어 지므로 motion artifact가 크게 나타나 정확한 측정이 어렵기 때문에, treadmill 운동시의 심박출량의 변화에 대한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 전신운동이 이루어지는 treadmill 운동중에도 심박출량의 정확한 측정을 가능하게 하기 위하여 운동화 쿠션을 좋게 하고, impedance 파형을 ensemble average 하여 motion artifact를 최소화 하였다.

이와 같이 개선된 impedance 심장기록법에 의해 심장 순환기능이 우수한 마라톤 선수를 대상으로 최대 운동시 심박출량을 측정하고, 또한 심박출량과  $\dot{V}O_{2max}$ 와의 상관관계를 측정함으로써 심장기능이 aerobic capacity에 미치는 영향을 구명하였고, 아울러 심장의 산소 소비량 ( $h\dot{V}O_2$ )과 anaerobic threshold를 측정하여 의의있는 결과를 얻었기에 보고하는 바이다.

## 실 험 방 법

### 1. 연구대상 및 운동부하

연구대상은 심폐질환이 없는 건강한 남자 마라톤 선수 7명과 비선수 9명을 선정하였다. 이들의 신체적 특성은 Table I에서 보는 바와 같다. 마라톤

**Table 1.** Physical characteristics of the subjects

	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	HR (min <sup>-1</sup> )	SV (ml)	CO (L/min)	$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	No. of subjects
Control	22.42 ±0.42	173.42 ±1.51	68.08 ±2.35	72.92 ±2.92	55.88 ±2.57	4.45 ±0.09	5.51 ±0.18	9
Marathoner	23.43 ±1.25	173.29 ±1.91	61.43 ±2.51	64.42** ±2.53	64.42* ±3.41	4.55 ±0.12	6.73** ±0.32	7

Values are means and standard errors.

Significantly different from the control: \*p<0.05, \*\*p<0.01.

HR: Heart rate, SV: Stroke volume, CO: Cardiac output

수의 신장은 비선수에 비해 차이가 없으나 체중은 다소 낮은 값을 보였다. 안정시 심박수는 마라톤 선수가 유의하게 낮았고, 일회 박출량은 마라톤 선수가 유의하게 높았다.

심박출량은 마라톤 선수가 다소 높았으며,  $\dot{V}O_2$ 도 마라톤 선수에서 높았다.

운동부하는 treadmill (model 1800, Marquette Co.)을 이용하여 Bruce 방법 (1973)에 따라 적용하였다. 이 방법은 먼저 treadmill 속도 1.7 mph (mile per hour)로, 경사 10%에서 3분간 운동을 한 후, 매 3분마다 treadmill 경사를 2%씩 올리면서 속도는 2.5, 3.4, 4.2, 5.0, 5.5 및 6.0 mph로 증가시키는 방법이다. 이와 같이 운동부하를 점진적으로 증가시켜 최대운동에 이르기까지 운동을 부과하였으며, 최대운동은  $\dot{V}O_2$ 가 더 이상 증가하지 않을 때를 기준으로 하였다.

## 2. 심박출량의 측정

**1) Impedance cardiograph의 개선 :** 서론에서 논한대로 impedance 심장기록법은 피검자에게 고통을 주지않는 비관혈적인 방법으로써 심박출량을 간편하게 측정할 수 있는 방법을 몇번의 과정을 거쳐 개선하였다.

즉 김등(1988) 및 황등(1989)은 motion artifact에 덜 민감한 청동망으로 된 band electrode를 사용하고, 여기에 땀을 잘 흡수하는 천을 첨부하여, 운동중에 발한으로 인하여 피부와 전극사이에 접촉불량이 생기는 것을 제거하는 등 motion artifact를 감소시킴으로써, 상체를 덜 움직이는 자전거 ergometer 운동에서는 측정이 가능하게 하였다.

그러나 전신운동이 이루어 지는 treadmill 운동에서 motion artifact 때문에 impedance 파형을 분석하기가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 심박출량을 treadmill 운동중에서도 측정할 수 있게 하기 위해서, 먼저 운동화를 발에 잘 맞는 것으로 선택하게 하였고, 운동화 밑창에 sponge와 silicon 고무를 부착하여 쿠션을 좋게 하였다. 이로써 motion artifact를 크게 감소시킬 수 있었으며, 더우기 impedance 파형을 ensemble average 함으로써 파형을 보다 정확히 분석할 수 있었다.

**2) 심박출량의 측정 :** Impedance 심장 기록법은 김등(1988)의 연구에 의해 개선 제작된 impedance cardiograph를 통하여 흉곽의 저항(impedance)변화를 기록하고 polygraph (Grass Model 7)와 연결하여 심전도를 기록하여 일회 박출량과 심박수를 측정하여 심박출량을 구하였다. 먼저 impedance 측정법은 피검자에게 청동망(meshed brass)으로 만든 4개의 band 형태의 전극을 이용하여, 전극 1은 이마에 부착하고, 전극 2는 목에, 전극 3은 흉골하단에, 그리고 전극 4는 전극 3에서 10 cm 아래 복부에 부착하였다. 전극 1과 4를 통해서는 고주파(100 KHz) 정전류(4 mA)를 흘려주고, 전극 2와 3을 통하여서 흉부내의 혈량 변화에 의한 저항을 감지하였다. 이는 심장 수축시 대동맥의 혈류량 증가로 전극 2와 3 사이의 흉부 저항이 감소하는 것을 이용하는 원리로서 Ohm 법칙 ( $R = \rho \cdot L/A$ )에 근거를 두고 있다.

이와 같이 기록된 흉곽의 impedance를 Fig. 1과 같이 미분한 파형(dz/dt)과 심전도 파형을 통해 Kubicek 등(1966)이 고안한 다음 공식에 의해서 일회 박출량(SV)을 산출하였다.

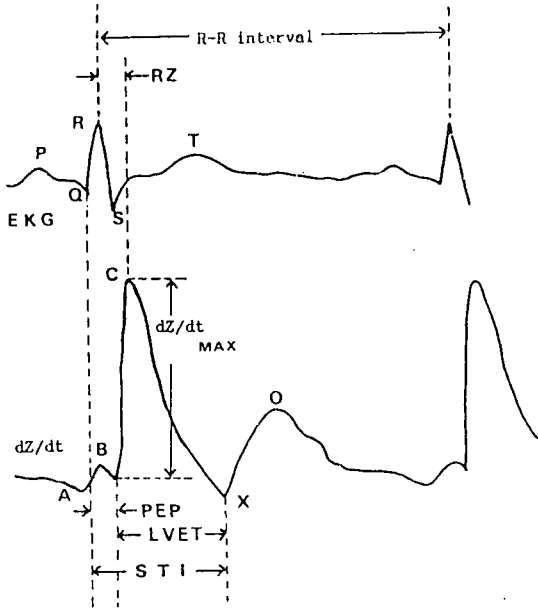


Fig. 1. Typical waveforms of ECG and dz/dt by impedance cardiography.

$$SV = \rho b (L/Z)^2 \times LVET \times dz/dt \text{ max}$$

$\rho b$ : 혈액저항 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

L: 내측 전극사이 거리(cm)

LVET: 좌심실 구혈 시간(sec)

Z: 흉곽의 평균 저항( $\Omega$ )

dz/dt<sub>max</sub>: 흉곽저항 변화의 최대율( $\Omega/\text{sec}$ )

혈액 저항( $\rho b$ )에서 Kubicek 등 (1966)은 각 개인의 혈액의 고유저항이 일정하다는 전제하에 150  $\Omega \text{ cm}$ 로 정해두고 있으나, 본 연구에서는 각 개인의 hematocrit (Hct) 치가 다르고, 또한 운동 중에는 Hct가 증가되므로, 혈액의 고유저항에도 차이가 있다는 점을 감안하여 Tanaka 등 (1970)이 고안한 다음 식을 이용하여 혈액저항을 구하였다.

$$\rho b = 66 (3 + 1.9 \text{ Hct}) / (3 - 3.9 \text{ Hct})$$

심전도 기록은 3개의 전극을 흉골 상부, C<sub>5</sub> 위치 및 C<sub>5</sub>의 반대 우측 위치에 각각 부착하여 lead V<sub>5</sub>와 거의 같은 파형을 기록하여, 운동중의 심전도 변화를 관찰하였고, R-R interval로 심박수를 구했으며, Q파의 시작점을 수축시작점으로 간주하여 수축기 시간간격을 구하였다.

### 3. 산소 소비량 ( $\dot{V}O_2$ ) 측정

운동중  $\dot{V}O_2$ 의 측정은 O<sub>2</sub> 분석기(model CD-SE Ametek)와 gas flowmeter (flow transducer K520, KL Engineering)를 이용하여 측정하였다.

O<sub>2</sub> 분석기에는 가스중에 O<sub>2</sub> 농도를 감지할 수 있는 sensor가 있으며, 이 sensor는 O<sub>2</sub> 분압에 따라 생성되는 voltage의 크기가 다른 zirconium (Zr)-yttrium (Y)을 이용하여 제작되어 있다. 이 O<sub>2</sub> 분석기로 호기중의 O<sub>2</sub> 농도를 측정하면서, 동시에 flowmeter를 이용하여 호출된 기체의 양을 측정하여 이를 computer에 연결시켜 운동기간중에 지속적으로  $\dot{V}O_2$ 를 측정하였으며, 이와 동시에 환기량( $\dot{V}_E$ )을 측정하였다.

### 4. Anaerobic threshold (AT) 측정

운동부하가 최대운동에 이르기까지  $\dot{V}O_2$ 는 비례하여 계속 증가하나, lactic acid가 급증하는 시점 또는 이와 관련되어 기체교환에 급격한 변동이 일어나는 시점에서의 산소 소모량을 무산소 역치 즉 anaerobic threshold (AT) 라 정의하며 (Wasserman et al, 1973), 본 연구에서는 이 AT를 운동부하 증가에 따라 환기량 ( $\dot{V}_E$ ) 이 급격히 증가하는 시점으로 하였다.

### 5. Rate-pressure products (RPP)

심장의 산소 소비량 ( $\dot{V}O_2$ )을 간접적으로 용이하게 측정할 수 있는 심박수 (HR) 와 수축기혈압 (SBP)의 곱인 RPP (rate-pressure products) 를 구하였다(즉 RPP = HR × SBP).

## 실 험 성 적

### 1. 심박출량

개선된 impedance cardiograph 를 이용하여 일회 박출량과 심박수를 측정하여 심박출량을 구하였으며, 측정 결과는 Table 2와 같다. 마라톤 선수의 최대심박수는 186.14회로서 비선수의 195.08회보다 유의하게 낮았으며, 일회 박출량은 마라톤 선수가 82.59 ml로서 비선수의 73.41 ml에 비해 유의하게 높았다. 따라서 심박출량의 최대치는 마라톤 선수

가 14.98 L/min 로서 비선수의 13.46 L/min에 비해 유의하게 높은 값을 나타내었다.

심박수 (HR)와 심박출량 (CO)의 상관관계는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 마라톤 선수의 경우 상관계수는 0.970으로 상관성이 매우 높았으며, 비선수의 경우도 마라톤 선수보다는 낮았으나 0.923으로 상관성이 높았다. 마라톤 선수의 경우 관계식은  $CO = -1.94 + 0.090 HR$  이었고, 비선수의 경우는  $CO = -2.11 + 0.081 HR$  이었다.

## 2. $\dot{V}O_{2max}$ 와 $\dot{V}_{Emax}$

마라톤 선수와 비선수의  $\dot{V}O_{2max}$ 와 최대 환기량 ( $\dot{V}_{Emax}$ )은 Table 3과 같이, 마라톤 선수의  $\dot{V}O_{2max}$ 는 59.38 ml/kg/min로써 비선수의 40.22 ml/kg/min에 비해 유의하게 높았으며,  $\dot{V}_{Emax}$ 도 마라톤 선수가 103.29 L/min 로서 비선수의 89.42 L/min에 비해 유의하게 높았다.

Anaerobic threshold (AT)는 Fig. 3에 나타내었다. 즉 마라톤 선수의 AT는 37 ml/kg/min이었고, 비선수는 23 ml/kg/min 이었으며, 이는 각각  $\dot{V}O_{2max}$  62.3% 및 57.2%이었다.

## 3. 심박출량과 $\dot{V}O_2$ 사이의 상관관계

심박출량과  $\dot{V}O_2$  사이의 상관관계는 Table 4 및 Fig. 4와 같다. 먼저 심박수와  $\dot{V}O_2$  사이의 상관관계를 보면 마라톤 선수의 경우 상관계수는 0.908로서 상관성이 매우 높았으며, 비선수의 경우도 마라톤 선수보다는 낮으나 상관계수가 0.885로 상관성이 높았다. 마라톤 선수의 경우 관계식은  $HR = 75 \pm 1.87 \dot{V}O_2$  이었고, 비선수의 경우는  $HR = 89.3 \pm 2.41 \dot{V}O_2$  이었다.

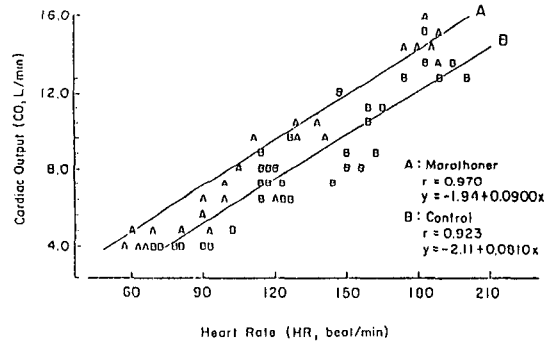


Fig. 2. Correlation of heart rate with cardiac output in the subjects.

Table 2. Maximal cardiac output (heart rate  $\times$  stroke volume) during maximal exercise in the subjects

	Heart rate (min <sup>-1</sup> )		Stroke volume (ml)		Cardiac output (L/min)		No. of subjects
	Rest	Max	Rest	Max	Rest	Max	
Control	72.92 $\pm 2.92$	195.08 $\pm 1.49$	55.88 $\pm 2.57$	73.41 $\pm 2.01$	4.45 $\pm 0.09$	13.46 $\pm 0.36$	9
Marathoner	64.42* $\pm 2.53$	186.14** $\pm 1.16$	67.62* $\pm 3.41$	82.59** $\pm 1.79$	4.55 $\pm 0.12$	14.98** $\pm 0.25$	7

Values are means and standard errors.

Significantly different from the control: \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ .

Table 3. Maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ) and ventilation ( $\dot{V}_{Emax}$ ) during maximal exercise in the subjects

	$\dot{V}O_2$ ml/kg/min)		$\dot{V}E$ (L/min)		No. of subjects
	Rest	Max	Rest	Max	
Control	5.51 $\pm$ 0.18	40.22 $\pm$ 1.17	12.17 $\pm$ 0.73	89.42 $\pm$ 3.94	9
Marathoner	6.73 $\pm$ 0.32	59.38 $\pm$ 0.97	11.43 $\pm$ 0.73	103.29 $\pm$ 3.54	7

Values are means and standard errors.

Significantly different from the control: \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ .

심박출량과  $\dot{V}O_2$  사이의 상관관계를 보면 마라톤 선수의 경우 상관계수는 0.945로서 상관성이 매우 높았으며, 비선수의 경우도 마라톤 선수의 경우보다는 낮으나 상관계수가 0.898로 상관성이 높았다. 마라톤 선수의 경우 관계식은  $CO=4.53+0.180 \dot{V}O_2$

이었고, 비선수의 경우는  $CO=4.78\pm 0.215 \dot{V}O_2$  이었다. 본 실험에서 일회 박출량과  $\dot{V}O_2$  사이의 상관은 마라톤 선수와 비선수 양자의 경우 모두 심박수에 비해 낮았으며, 상관계수는 각각 0.664 및 0.535 이었다.

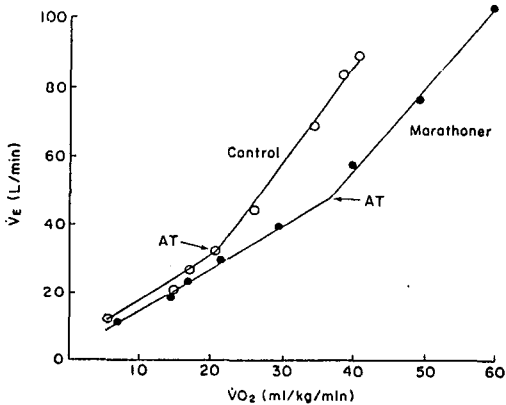


Fig. 3. Anaerobic threshold (AT) and the minute ventilation ( $\dot{V}_E$ ) during incremental exercise to the maximum.

Table 4. Regression equation and correlation coefficients between  $\dot{V}O_2$  and cardiac output (CO) in the subjects

Control	Marathoner
$CO=4.78+0.215\dot{V}O_2$	$CO=4.53+0.180\dot{V}O_2$
$r=0.898$	$r=0.945$
$HR=89.3+2.41\dot{V}O_2$	$HR=75.0+1.87\dot{V}O_2$
$r=0.885$	$r=0.908$
$SV=56.7+0.399\dot{V}O_2$	$SV=65.0+0.302\dot{V}O_2$
$r=0.535$	$r=0.664$

#### 4. Rate-pressure products (RPP)

심박수와 수축기혈압의 곱으로 심장의 산소 소비량 ( $h\dot{V}O_2$ )을 추정하는 rate-pressure products (RPP)의 성적은 Table 5에서 보는 바와 같다. 최대 운동시 수축기혈압은 마라톤 선수는 215.3 mmHg로서 비선수의 168.2 mmHg에 비해 유의하게 높았다. 이에 따라 마라톤 선수의 RPP는  $40.05 \times 10^{-3}$  mmHg · bpm로서 비선수의  $32.80 \times 10^{-3}$  mmHg · bpm에 비해 유의하게 높았다. 심박수는 최대 운동시 마라톤 선수는 186.14회로 비선수의 195.08회에 비해 오히려 낮았으므로 (Table 2 참조), 최대 운동

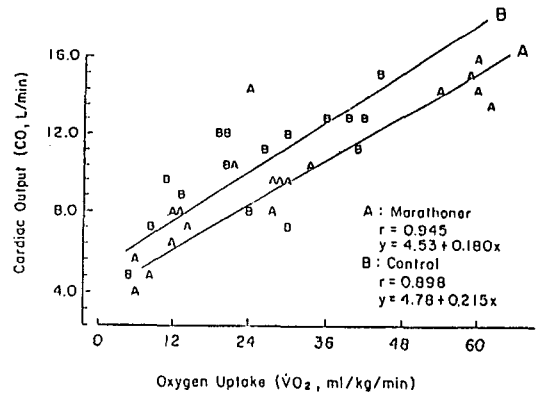


Fig. 4. Correlation of oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) with cardiac output in the subjects.

Table 5. Rate-pressure products (RPP)<sup>+</sup> on maximal exercise in subjects mmHg.bpm  $\times 10^{-3}$

	SBP		RPP		No. of subjects
	Rest	Max	Rest	Max	
Control	$126.5 \pm 1.53$	$168.2 \pm 5.02$	$8.65 \pm 0.74$	$32.80 \pm 0.99$	9
Marathoner	$126.9 \pm 4.15$	$215.3 \pm 8.91$	$6.68 \pm 0.46$	$40.05 \pm 1.60$	7

RPP=Heart rate (HR)  $\times$  Systolic blood pressure (SBP).

Values are means and standard errors.

Significantly different from the control: \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ .

시에 마라톤 선수의 RPP가 높은 것은 수축기혈압이 비선수보다 더 높기 때문이다.

## 고 찰

장기간 지구력훈련을 통해 체력이 향상된다는 것은 최대 운동능력이 증가됨을 의미하며, 이는 최대 심박출량과 최대 동정맥 산소분압의 차(a-v O<sub>2</sub>)의 증가에 의해 최대 산소 소비량 ( $\dot{V}O_{2max}$ )이 증가되기 때문이다. 따라서 aerobic capacity가 가장 높은 마라톤 선수의 최대 심박출량과  $\dot{V}O_{2max}$ 의 관계를 밝히는 것은 의의있는 일로 사료된다.

안정시 심박출량은 장기간 훈련에 큰 영향을 받지 않으나, 최대 운동시에는 운동선수의 심박출량이 비선수에 비해 크게 높으며, 특히 장거리 선수의 최대 심박출량은 비선수의 2배정도 된다고 한다. O'Carroll 등(1968)은 장기간 지구력훈련에 의한 혈장량의 증가로 혈액량이 증가되어 안정시 심박출량도 다소 증가한다고 하였다. 본 연구에서는 마라톤 선수의 안정시 심박출량이 4.55 L/min으로 비선수의 4.45 L/min에 비해 다소 높은 경향을 보이고 있으며, 최대 운동시에는 선수가 14.98 L/min로서 비선수의 13.46 L/min에 비해 유의하게 높음을 보여 주었다.

심박출량은 심박수와 일회 박출량에 의해 결정되며, 운동선수의 심박수는 비선수에 비해 낮고, 일회 박출량은 높은 것이 특징이다. 따라서 비록 운동선수의 심박출량이 비선수와 같다 하더라도 운동선수의 심박출량은 일회 박출량에 영향을 더 많이 받는데 반해, 비선수는 심박수에 영향을 더 받게 되는 것이다.

운동선수의 심박수는 비선수보다 15-25회나 낮은 서맥을 나타내는데(Van Ganse et al, 1970; Viitasalo et al, 1982), 이것은 동방결절에서 미주신경 긴장도 (vagal tone)가 항진되고, 교감신경 항진도 (sympathetic tone)가 감소(Lewis et al, 1980)되기 때문인 것으로 알려져 있다. Ector 등(1986)은 운동선수중에 안정시 심박수가 50회 이하인 서맥이 64.9%나 되며, 40회 이하가 27%나 됨을 보고하고 있다. 본 연구에서도 마라톤 선수의 심박수가 64.42회로 비선수의 72.92회에 비해 유의하게 낮은 것을 볼

수 있는데, 이들 피검자의 심박수가 양자 모두에서 다소 높은 것은 treadmill 위에서 운동시작 바로 직전에 선 자세에서 심박수가 증가된 상태에 측정된 것이기 때문이다. 즉 마라톤 선수의 심박수를 누운 자세에서 측정한 결과 평균 심박수가 51.6회로 나타났다. 운동선수중에 특히 장거리 선수는 소위 좌심실 비대로 스포츠 심장이 되어, 심장의 수축력이 강하여 일회 박출량이 증가되기 때문에 서맥이면서도 심박출량이 오히려 높은 것이다. 최대 운동시에 최대 심박출량도 최대 심박수와 최대 일회 심박출량에 의해 결정되는데, 이중에 최대 심박수는 지구력 훈련에 별 영향을 받지 않기 때문에 운동선수와 비선수 사이에 별 차이가 없는 것이다. McArdle 등(1978) 및 Pechar 등(1974)은 지구력 훈련을 장기간하면 최대 심박수가 오히려 감소한다고 하였다. 본 연구에서도 마라톤 선수의 최대 심박수가 186.14회로 비선수의 195.08회보다 낮은 값을 볼 수 있었다. 따라서 마라톤 선수의 최대 심박출량이 비선수에 비해 더 높은 것은 바로 최대 일회 심박출량이 더 높기 때문이다.

마라톤 선수의 최대 일회 심박출량이 높은 것은 좌심실 용적이 커서 안정시나 운동중에 preload에 해당되는 확장기 용적(end-diastolic volume)이 증가하기 때문이고, 또한 좌심실 벽이 비대해서 수축력이 증가하므로 cardiac emptying이 잘 이루어져 afterload에 해당되는 수축기 용적(end-systolic volume)이 감소하기 때문이다 (Keul et al, 1981; Longhurst et al, 1981). 확장기 용적이 증가하게 되면 심근섬유가 신전 되므로 심근의 수축력이 증가하게 된다. 심장 수축시 수축기 용적의 50% 정도이며, 이것이 심장의 기능적 잔기용적이 되는 것이다. 운동중에는 교감신경계 호르몬인 epinephrine과 norepinephrine이 증가하므로 심근섬유의 수축력이 증가되어 systolic emptying이 잘 이루어져 수축기 용적이 감소되어 일회 박출량이 증가하게 된다. 이 일회 박출량은 최대 운동의 40-50%의 운동강도에 거의 최대값에 이르며, 본 연구에서는 최대 일회 박출량이 비선수는 73.41 ml, 마라톤 선수는 82.59 ml에 달함을 볼 수 있다.

Peronnet (1981)는 20주 지구력 훈련후 심장의 용적이 커지고 좌심실 벽이 다소 두꺼워짐을 보고하였

다. Saltin (1969)은 50일 지구력 훈련 결과 지구력 운동능력이 증가함을 보고하면서, 이는 일회 박출량이 증가된 결과이며, 최대 일회 박출량은 운동중에 심박수 110-120회 정도의 운동강도일 때 최대값에 도달한다고 하였고, 운동선수의 심박수는 운동중에서 서서히 증가하므로 심박출량의 증가에 미치는 영향이 비선수보다 적으며, 이에 반해 일회 박출량은 비선수보다 심박출량에 더 큰 영향을 미치게 된다고 하였다.

이와 같이 선수는 운동중에 수축기 용적이 비선수에 비해 더 증가할 뿐 아니라, 말초저항도 더 낮아지기 때문에 같은 혈압에서도 심박출량이 더 높은 것이다 (Blomqvist & Saltin, 1983). 이와 같이 운동중에 선수의 심박출량이 더 높기 때문에 말초저항이 더 감소되어도 혈압이 비선수보다 더 낮지 않은 것이다 (Saltin 1986).

심박출량의 증가는 활동근의 혈류량을 증가시키며 (Saltin 1986), a-v O<sub>2</sub>를 또한 증가시킨다. 따라서 장기간 훈련을 통해 활동근에 myoglobin이 증가하고, 모세혈관 밀도가 증대되며, 모세혈관수의 증가에 의한 O<sub>2</sub>의 확산경사가 증가하여 활동근의 O<sub>2</sub> 이용이 크게 증가함과 동시에 모세혈관과 활동근 사이에 영양물질과 대사 산물의 교환이 원활하게 이루어지게 된다 (Hudlicka, 1982; Saltin et al, 1977).

Musch 등 (1987)의 보고에 의하면 지구력 훈련을 받은 선수는 최대 운동시 내장 및 신장의 혈류량이 활동근으로 이동하는 능력이 더 높으므로 활동근에 O<sub>2</sub>의 이용이 증대된다고 하였으며, 장기간 훈련시에는 mitochondria의 수와 크기가 증가되고 succinate dehydrogenase (SDH) 및 malic dehydrogenase (MDH)와 같은 산화효소의 활성도가 증가되어 aerobic 대사가 증대하게 된다 (Holloszy 1975). 따라서 훈련후에는 운동중에 유리 지방산의 이용율은 증가되고 상대적으로 포도당의 이용율은 감소되므로 체내에 저장되어 있는 glycogen을 운동중에 오랜 시간동안 이용할 수 있다. 마라톤과 같은 장시간 운동에서 피로의 원인은 주로 glycogen의 고갈에 있으므로 이 경우 경기 후반까지 glycogen 이용이 가능하므로 기록을 향상시킬 수 있는 것이다.

최대 운동시 심박출량은 20 L정도로 안정시 4 L보다 5배정도 증가한데 비해,  $\dot{V}O_{2max}$ 는 5 L/min 정도

로서 안정시의 0.25 L/min 보다 무려 20배나 증가하는데 이는 안정시 a-v O<sub>2</sub>가 혈액 1 L당 40 ml 정도인데 비해 최대 운동시에는 a-v O<sub>2</sub>가 160 ml로 4배 정도 증가하기 때문에 최대 운동시 심박출량이 5배 정도 증가되어도 이 a-v O<sub>2</sub>의 증가로 보상되는 것이다 (Astrand & Rodahl, 1986). 이때 운동중에 Bohr effect에 의해 Hb의 산소해리곡선이 우측으로 이동되므로 a-v O<sub>2</sub>가 증가되어 더 많은 산소를 이용할 수 있는 것이다. 또한 안정시는 심박출량의 15% 정도가 골격근에 분포되나 최대 운동시에 심박출량의 80-85%가 활동근에 분포하기 때문에 보다 많은 산소를 공급할 수 있는 것이다.

본 연구에서 마라톤선수와 비선수의  $\dot{V}O_2$ 와 심박출량의 상관을 비교해 보면 (Fig. 4), 마라톤 선수에서 같은  $\dot{V}O_2$ 의 운동강도에 심박출량이 더 낮은 값을 보이고 있다. 이는 선수군의 a-v O<sub>2</sub>가 비선수군에 비해 더 높음을 알 수 있다. 즉 마라톤 선수는 적은 심박출량으로 많은 O<sub>2</sub>를 이용할 수 있어 효율성이 더 우수한 것 (Andrew et al, 1966; Hanson et al, 1968)으로 해석된다. Ekblom 등 (1968)의 연구에서도 16주 훈련후에 산소 1.0-2.0 L 소비되는 운동강도에서 심박출량은 훈련전보다 1.1-1.5 L 정도 낮은 값을 보였는데, 이것은 훈련으로 인해 a-v O<sub>2</sub>가 더 증가된 결과이며, 최대 운동시 심박출량도 24.2 L로 훈련전 22.4 L보다 증가하였다.

Rowell 등 (1966)은 운동은 평소에 하고 있는 사람과 운동은 하지 않지만 건강한 사람을 대상으로 하여, 최대 운동시 이들 간에  $\dot{V}O_{2max}$ 의 차이가 최대 일회 박출량의 차이와 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 운동근의  $\dot{V}O_{2max}$ 가 비운동근에 비해 62.5%나 더 높았을 때, 최대 일회 박출량도  $\dot{V}O_{2max}$ 와 마찬가지로 60%정도 더 높은 값을 보였다. 또한 이들간의 최대 심박수는 거의 같으므로 최대 일회 박출량의 차이는 바로 최대 심박출량의 차이인 것이다.

심근의 산소 소비량 ( $h\dot{V}O_2$ )은 심박수와 수축기 혈압의 곱인 RPP (rate-pressure products)에 의해 간접으로 추정되며 (Gobel et al, 1978), 운동중에 심박수와 혈압이 증가하므로, 따라서 RPP가 증가되어, 심근의  $\dot{V}O_2$ 의 증가가 나타난다. 장기간 운동을 하면 운동중에 심박수와 혈압이 서서히 증가하므로 운동부하가 같은 경우는 운동선수의 RPP가 더 낮



은 값을 나타낸다 (Clausen 1976). 본 연구에서도 마라톤 선수의 안정시 RPP는  $6.68 \times 10^{-3} \text{ mmHg} \cdot \text{bpm}$  으로 비선수의  $8.65 \times 10^{-3} \text{ mmHg} \cdot \text{bpm}$ 에 비해 유의하게 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 장기간 운동을 통해 심장근육의 효율성이 증가되어 더 적은 에너지를 이용하면서도 더 많은 일을 할 수 있음을 보여준다.

최대 운동시에는 훈련에 의해 최대 심박수는 큰 차이가 없는 대신 혈압은 비선수에 비해 더 높기 때문에 최대 RPP는 선수가 더 높다. 본 연구결과에서도 마라톤 선수의 최대 RPP는  $40.05 \times 10^{-3} \text{ mmHg} \cdot \text{bpm}$ 로서 비선수의  $32.80 \times 10^{-3} \text{ mmHg} \cdot \text{bpm}$ 보다 유의하게 높은 값을 보이고 있다. 최대 운동시 운동선수의 혈압이 215.3 mmHg로서 비선수의 168.2 mmHg보다 더 높은 것은 바로 수축기 용적이 더 많고 심장의 수축력이 더 높아 일회 박출량이 더 크기 때문이다.

이 심근의 산소 소비량 ( $\dot{V}O_2$ )인 RPP는 관상동맥 혈류량에 따라 결정되며, 이 관상동맥혈류량은 심박출량의 약 5%를 차지한다 (Jansson & Sylven 1981). 심근은 안정시에도 혈중 산소의 extraction이 매우 높아, 안정시 골격근의 산소이용이 혈중산소의 20%에 지나지 않는데 비해 심근은 무려 70-80%를 이용하므로, 심근의 산소 extraction은 골격근에 비해 3-4배나 더 높음을 보여 주고 있다. 골격근에서는 운동중에 더 많은 산소를 이용하기 위해서 혈류량이 더 증가되지 않더라도 a-v  $O_2$ 를 증가시켜서 산소 이용을 증가시킬 수 있으나, 심장근에서는 안정시에 이미 심근의 a-v  $O_2$ 가 높기 때문에 운동중에 더 많은 산소를 심근에 공급하기 위해서는 관상동맥 혈류량이 증가되어야만 한다. 따라서 운동중에 RPP의 증가는 바로 관상동맥 혈류량의 증가를 의미한다. 본 연구에서 마라톤 선수의 RPP는 최대 운동시 6.0배 증가하였고, 비선수는 3.8배 증가한 것으로 보아, 최대 운동시는 장시간 지구력 훈련을 한 운동선수의 심근에 혈류량이 더 증가함을 알 수 있다.

Anaerobic threshold (AT)는 운동부하가 증가함에 따라 포도당의 무산소대사에 의해 lactate 농도가 급증하는 aerobic과 anaerobic의 분기점을 말하며, 이때 환기량 ( $\dot{V}_E$ ) 및 혈중  $CO_2$ 는 급증하고,  $HCO_3^-$

및 pH는 급감하게 된다 (Wasserman et al, 1973). 이 AT 이상의 운동이 계속되면 lactate 축적으로 인해 더 이상 운동을 지속할 수 없게 되므로 마라톤과 같은 장거리 운동에서는 AT 이하의 운동 즉 aerobic 대사에 의한 운동이 이루어져야 운동을 지속할 수 있는 것이다.

$\dot{V}O_{2max}$ 가 높은 경우에는 운동능력, 특히 지구력을 요구하는 경기에 더 좋은 기록을 내는 것이 사실이나,  $\dot{V}O_{2max}$ 가 같아도 AT가 높을 경우에는 장거리 기록이 더 좋을 것이다 (Neumann 1983). 따라서 장거리 기록을 향상시키기 위해서는  $\dot{V}O_{2max}$ 의 증진은 물론 AT를 높이는 것이 매우 중요한 것이다.

AT의 측정은 운동중에 혈중 lactate 농도로 주로 알 수 있으나, 이는 피검자에게 고통을 주는 관혈적인 방법이고, 운동중에 계속적으로 직접 관찰 할 수 없는 결점이 있다. 따라서 운동중에 환기량의 변화를 이용하여 AT를 측정하게 되면 비관혈적으로 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 운동중에 직접 측정이 가능한 것이다 (Naimark et al, 1964; Orr et al, 1980). 이를 일명 ventilation threshold 라고도 하며, 이는 lactate 측정을 통한 AT와 상관이 매우 높으므로 ( $\gamma=0.95$ ) (Reinhard et al, 1979) 이를 이용하는 것이 편리하다.

본 연구에서도 이  $\dot{V}_E$ 를 이용하여 AT를 측정된 결과 (Fig. 3), 마라톤 선수의 AT는 37 ml/kg/min로 비선수의 23 ml/kg/min에 비해 유의하게 높았고, 이 AT의  $\dot{V}O_{2max}$ 에 대한 백분율도 마라톤 선수는 62.3%로서 비선수의 57.2%보다 더 높았기 때문에, 마라톤 선수가 더 높은 aerobic capacity를 갖고 있음을 알 수 있다. 즉 마라톤 선수는  $\dot{V}O_2$  37 ml/kg/min 운동강도까지는 lactate 증가없이 aerobic 상태에서 운동을 지속할 수 있는데 반해, 비선수는 AT가  $\dot{V}O_2$  23 ml/kg/min 이므로, 이 이상의 운동강도로는 aerobic 상태에서 운동을 지속할 수 없는 것이다.

Farrell 등 (1979)은 마라톤 선수의 AT는  $\dot{V}O_{2max}$ 의 70-80%에 이르는데 반해, 비선수는 50-60%정도라고 하면서, 마라톤 선수의 경기력과 AT는 상관이 매우 높음을 ( $\gamma=0.98$ ) 보고하였고, Davis 등 (1979)은 9주 훈련후 ventilation threshold가 49%에서 57%까지 증가되었고,  $\dot{V}O_{2max}$ 도 25% 증가되었

음을 보고하였다. 이에 반해 Skinner 및 McLennan (1980)은 장기간 훈련을 쌓으면  $\dot{V}O_{2max}$ 가 증가하기 때문에 AT시의  $\dot{V}O_2$ 는 높지만  $\% \dot{V}O_{2max}$ 는 훈련전과 큰 차이가 없다고 보고하고 있다.

Costill 및 Fox (1969)에 의하면 세계적인 마라톤 선수는  $\dot{V}O_{2max}$ 의 80-90% 운동 강도로 10 km를 완주하더라도 혈중 lactate가 33-46 mg% 정도밖에 측정되지 않음을 보고하였다. 이는 AT가 높아  $\dot{V}O_{2max}$ 에 거의 가까운 운동을 할 수 있음을 나타내고 있다.

이와 같이 선수군에서 AT가 높은 것은 근섬유와 모세혈관이 발달되고, 근육의 산화능력이 증대된 결과이며 (Farrell et al, 1979; Wasserman et al, 1981), 이는 장기간 훈련을 통해서 mitochondria의 크기와 수가 증대되어 더 많은 ATP를 함유 할 수 있고, 모세혈관이 발달되어 에너지대사가 활발하고 노폐물 제거가 왕성하기 때문으로 본다 (Hickson, 1981; Farrell, 1979; Holloszy, 1973). 이로 인해 선수군에서는 운동중의 lactate 제거율이 더 높으므로 lactate의 축적을 감소시킬 수 있는 것이다 (Donovan & Brooks, 1983).

### 결 론

국가 대표급 마라톤 선수 7명과 비운동 선수 9명을 대상으로 본 연구진에 의해 개발된 impedance 심장기록법을 이용하여 treadmill 상에서 최대 운동시 심박출량을 측정하여,  $\dot{V}O_{2max}$ 와의 관계를 구명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Impedance 심장기록법의 개선에 있어서 treadmill 운동중에 motion artifact 를 감소시키기 위하여 운동화 밑창에 sponge와 silicon 고무를 부착하여 쿠션을 좋게 하였고, impedance 파형을 ensemble average 함으로써 파형을 보다 정확히 분석할 수 있었다.

2) 마라톤 선수 및 비선수의 최대심박수는  $186.14 \pm 1.16$  및  $195.08 \pm 1.49$ 회이었고, 최대 일회박출량은  $82.59 \pm 1.79$  및  $73.41 \pm 2.01$  ml 이었으며, 최대 심박출량은  $14.98 \pm 0.25$  및  $13.46 \pm 0.36$  L/min 이었다.

3)  $\dot{V}O_{2max}$ 는 마라톤선수가  $59.38 \pm 0.97$  ml/kg/

min이었고, 비선수가  $40.22 \pm 1.17$  ml/kg/min이었으며, anaerobic threshold는 마라톤선수가  $\dot{V}O_{2max}$ 의 62.3%, 비선수가 57.2%이었다.

4) 심박출량 (Y, L/min)과  $\dot{V}O_{2max}$  (X, ml/kg/min) 양자간에 관계는 마라톤선수의 경우  $Y = 4.53 + 0.180X$  ( $\gamma = 0.945$ ), 비선수의 경우  $Y = 4.78 + 0.215X$  ( $\gamma = 0.898$ )이었다.

5) 최대 rate-pressure product (RPP)은 마라톤선수 및 비선수는 각각  $40.05 \pm 1.60$  및  $32.80 \pm 0.99 \times 10^{-3}$  mmHg · bpm이었다.

이상의 결과로 미루어 보아 마라톤 선수의 최대 심박출량이 비선수에 비해 높은 것은 주로 일회 심박출량이 높은 결과이며, 동일한 심박출량에서 더 많은  $O_2$ 를 소비할 수 있음은 바로 a-v  $O_2$ 가 더 크기 때문이다. 또한 마라톤선수에서  $\dot{V}O_{2max}$ 가 높을 뿐 아니라 anaerobic threshold가 더 높은 점 등은 의의 있는 결과이다. 더우기 impedance 심장기록법의 개선으로 운동중에 심박출량의 측정을 가능하게 한 점 등은 운동선수의 심장기능 연구에 기여함이 클 것으로 기대하는 바이다.

### REFERENCES

Andrew GM, Guzman CA & Becklake MR (1966). Effect of athletic training on exercise cardiac output. *J Appl Physiol* 21, 603-608

Astrand PO & Rodahl K (1986). Textbook of work physiology. 3rd ed NY McGraw-Hill, p187-192

Astrand PO & Saltin B (1961). Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Appl Physiol* 16, 971-976

Blomqvist CG (1983). Cardiovascular adaptation to physical training. *Ann Physiol* 45, 169-189

Blomqvist CG & Saltin B (1983). Cardiovascular adaptation to physical training. *Annu Rev Physiol* 45, 169-189

Bruce RA, Kusumi F & Hosmer D (1973). Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *Am Heart J* 85, 546-556

Clausen J (1976). Circulatory adjustments to exercise and effect of physical training in normal subjects and in patients with coronary artery disease. *Prog Cardiovasc*

- Dis 18, 459-495
- Costill DL & Fox EL (1969). Energetics of marathon running. *Med Sci Sports* 1, 81-86
- Denison D, Edward RHT, Jones G & Pope H (1969). Direct and rebreathing estimates of the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> pressure in mixed venous blood. *Respir Physiol* 7, 326-334
- Donovan CM & Brooks GA (1983). Endurance training effects lactate clearance, not lactate production. *Am J Physiol* 244 (5), E505-512
- Ector H, Bourgois J, Verlimden M, Hermans L, Vanden EE, Fagard R & De Geest H (1986). Bradycardia, ventricular pauses and sports. In: *Sports cardiology. Fagard RH and Bekaert IE* (Eds). Dordrecht. Martinus Nijhoff Publishers. pp33-40
- Eklblom B, Astrand PO & Saltin B (1968). Effect of training on circulatory response to exercise. *J Appl Physiol* 24, 518-528
- Farrell PA, Wilmore SH, Coyle BF, Billing JE & Costill DL (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performances. *Med Sci Sports* 11, 338-343
- Goble FL, Nordstorm LA, Nelson RR, Torgensen CR & Wang Y (1978). The rate-pressure product as an index of myocardial oxygen consumption during exercise in patients with angina pectoris. *Circ* 57, 549-556
- Hanson JS, Tabakin BS & Levy AM (1968). Long-term physical training and cardiovascular dynamics in middle aged men. *Circ* 38, 783-799
- Hickson RC (1981). Skeletal muscle cytochrome C and myoglobin, endurance and frequency of training. *J Appl Physiol* 51, 746-749
- Holloszy JO (1973). Biochemical adaptation to exercise, aerobic metabolism. In: *Exercise and science review*, Editor Wilmore, J Acad Press Vol 1
- Holloszy JO (1975). Adaptation of skeletal muscle to endurance exercise. *Med Sci Sports* 7, 155-164
- Hudlicka O (1982). Growth of capillaries in skeletal and cardiac muscle. *Circ Res* 50 (4), 451-461
- Jansson E & Sylven E (1981). Myoglobin in human heart and skeletal muscle in relation to oxidative potential as estimated by citrate synthase. *Clin Physiol* 1, 596-604
- Keul J, Dickhuth HH, Simon G & Lehmann M (1981). Effect of status and dynamic exercise on heart volume, contractility and left ventricular dimensions. *Circ Res* 48, 1162-170
- Kubicek WG, Karnegis JN, Patterson RP, Witsoe DA & Mattson RH (1966). Development and evaluation of an impedance cardiac output system. *Aerospace Medicine* 37, 1208-1212
- Lewis SF, Nylander E, Gad P & Areskog NF (1980). Nonautonomic component in bradycardia of endurance trained men at rest and during exercise. *Acta Physiol Scand* 109, 297-305
- Longhurst JC, Kelly AR, Gonyea WJ & Mitchell JH (1981). Chronic training with static and dynamic exercise: Cardiovascular adaptation and response to exercise. *Circ Res* 48, 1171-178
- McArdle WD, Magel JR, Delio DJ, Toner M & Chase JM (1978). Specificity of run training on VO<sub>2max</sub> and heart rate changes during running and swimming. *Med Sci Sports* 10, 16-20
- Musch TI, Haidet GC, Ordway GA, Longhurst JC & Mitchell JH (1987). Training effects on regional blood flow response to maximal exercise in foxhounds. *J Appl Physiol* 62, 1724-1732
- Naimark A, Wasserman K & McIlroy MB (1964). Continuous measurement of ventilatory exchange ratio during exercise. *J Appl Physiol* 19:644-652
- Neumann G (1983). Metabole Regulation bei Langzeitausdauerleistungen, *Med Sport* 23, 169
- Orr GW, Green HJ, Hughson RL & Bennett GW (1980). A computerized technique for determination of anaerobic threshold (abstract). *Med Sci Sports* 12:86
- Oscari LB, Williams BT & Hertig BA (1968). Effect of exercise on blood volumes. *J Appl Physiol* 26:622-624
- Pechar GS, McArdle WD & Katch FL (1974). Specificity of cardio-respiratory adaptation to bicycle and treadmill training. *J Appl Physiol* 36:753-756
- Peronnet F (1981). Echocardiography and the athletes' heart. *Phys Sports Med* 9, 102
- Qu M, Zhang Y, Webster JG & Tompkins WJ (1986). Motion artifact from soft and band electrodes during impedance cardiography. *IEEE Trans BME* 33, 1029-1036
- Qu M, Zhang Y, Webster JG & Tompkins WJ (1986). Cardiac output monitoring by impedance cardiography during treadmill exercise. *IEEE Trans BME* 33, 1037-1042

- Reinhard U, Mueller PH & Schmuelling RM (1979). Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respir* 38, 36-42
- Rosiello RA, Mahler DA & Ward JL (1987). Cardiovascular responses to rowing. *Med Sci Sports Exerc* 19, 239-245
- Rowell LB, Marx HJ, Bruce RA, Conn RD & Kusumi F (1966). Reductions in cardiac output, central blood volume and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J Clin Invest* 45, 1801-1816
- Saltin B (1969). Physiological effects of physical conditioning. *Med Sci Sports* 1, 50-56
- Saltin B (1986). Physiological adaptation to physical conditioning: Old problems revisited. *Acta Med Scand* (Suppl) 711, 11-24
- Saltin B & Astrand PO (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol* 23, 553-558
- Saltin B, Enrikson J, Nygaard E & Andersen P (1977). Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Ann Ny Acad Sci* 301, 3-29
- Swanson DK & Webster JG (1982a). Simple design for an impedance plethysmography. *Med Biol Eng Comput* 20, 461-465
- Swanson DK & Webster JG (1982b). Error in four-electrode impedance plethysmography. *Med Biol Eng Comput* 21, 674-680
- Tanaka K, Kanai H, Nakayama K & Ono N (1970). The impedance of blood: the effects of red cell orientation and its application. *Japan J Med Eng* 8, 436-443
- Van Ganse W, Versee L, Eyllenbosch W & Vuylsteek K (1970). The electrocardiogram of athletes: comparison with untrained subjects. *Brit Heart J* 32, 160-164
- Viitasalo MT, Kala R & Eisalo A (1982). Ambulatory electrocardiographic recording endurance athletes. *Brit heart J* 47, 213-220
- Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN & Beaver WL (1973). The anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35, 236-243
- 김덕원, 김정열, 고한우, 김남현, 김원기 (1988). 임피던스 심장기록법을 이용한 심장기능의 측정. *의공학회지* 9, 109-115
- 황수관, 김덕원, 연동수, 고성경, 김정열, 이정희, 강두희 (1989). 운동시 임피던스 심장기록법을 이용한 운동선수의 심장기능의 변화. *대한 스포츠 의학회지* 7 (1), 35-50