

# Elliptical Trainers(ET)를 이용한 공학교육 - 평균자유거리에 의한 심폐기능의 반응

## Engineering Education by Elliptical Trainers(ET) - Cardiorespiratory Responses by the Mean Free Path

황 운 학\*

Un Hak Hwang\*

요 약

공학교육의 좋은 예제로써 ET 운동 시 신체가 반응하는 Respiratory Exchange Ratio (호흡교환률 RER, epm)와 Heart Rate (심장박동률 HR, bpm)의 변화분석이다. 에너지소비량, 운동속도, 그리고 체중감량이 달라질 경우 이에 반응하는 혈관순환계에 대한 Health Training Cardiorespiratory 반응을 통해 호흡교환률(RER)과 심장박동률(HR)의 변화에 대해서 연구되어졌다. 연구결과에 따르면 (1)열소비량이 늘어날수록 호흡교환률(RER)은 지속적으로 일정하게 상승하는 반면 심장박동률(HR)은 서서히 상승하다가 임계점을 지나면 갑자기 크게 증가함을 볼 수 있었다. 그리고 그 임계점이 대략 275 Cal 였다. (2)운동속도가 서서히 증가함에 따라서 RER은 역시 서서히 증가하는 반면 HR은 임계점(약 6.7km/h)까지는 서서히 증가하지만 이후에서는 급격한 증가를 보인다. (3)체중감량이 서서히 증가할 때 (또는, 대사 소비량이 늘어남에 따라서) RER은 역시 서서히 증가하였으나 HR은 체중감량과는 무관함을 보였다.

**Key Words** : Elliptical Trainers, Health Cardiorespiratory, Heart Rate, Respiratory Exchange Ratio.

### ABSTRACT

The elliptical trainers(ET) can be a good tool for educating engineers by analyzing physical responses in terms of Respiratory Exchange Ratio (RER, epm) and Heart Rate (HR, bpm). For the various energy expenditure, exercise speed, and weight loss both RER and HR are studied in order to study the blood circulations based on the health training cardiorespiratory. As the results, (1) RER increases gradually as the energy expenditure, however, HR increases gradually up to a critical value and then increases rapidly. The critical value of the energy expenditure in our studies was 275 Cal. (2) RER increases gradually as the ET speed increases, however, HR increases gradually up to a critical value and then increases rapidly. The critical value of the ET speed in our studies was about 6.7km/h. (3) RER increases gradually as the weight loss increases (or, the metabolic cost increases), however, HR is almost nothing to do with the increase of the weight loss.

---

\* 한국기술교육대학교(uhhwang@kut.ac.kr)

제1저자(First Author) : 황운학

교신저자 : 황운학

접수일자 : 2011년 11월 09일

수정일자 : 2011년 12월 08일

확정일자 : 2011년 12월 30일

## 1. 서론

Elliptical Trainer(ET) 운동기구는 강약조절 가능하고 동시에 상체 및 하체 근육운동이 가능할 뿐 아니라 누구에게나 선택적으로 극대 근육강화와 열량연소가 가능한데 15단계의 저항 중에서 선택하여 체력, 근력, 및 근육 세우기의 향상을 연속적으로 달성할 수 있다. 또한, 관절에 과대한 부하 없이 충격 상해를 감소시키며 걷기와 뛰기를 하는 지면에 고정된 운동기구이며 저항강도를 조절함으로써 심혈관계에 부하를 주지 않는 운동을 할 수 있다.

ET는 최초로 1990년대에 상업적으로 등장하였지만 Larry와 Miller가 더욱 작게 개선하여 2004년에 미국 특허를 출원하였다.[1] 대부분의 ET는 상체와 하체를 다 사용하는 운동기구이고 근육 만들기 운동기구보다는 심혈관계 운동기구인데, 가장 큰 장점은 최소의 충격을 가하면서도 체중이 실리는 자세를 갖는 운동이라는 것이다.

ET는 세가지 형태가 있는데 가장 고전적인 것이 후미 구동형이고 그 뒤에 나온 형태가 전방 구동형이며 가장 최신 기구는 중간 구동형이다. 어떤 형태는 페달 부분을 조절하여 경사를 다르게 하도록 되어 있어 다리의 여러 근육에 걸리는 부하를 다르게 하도록 고안 되었다. 일부 메카트로닉스 공학적 모델은 경사도, 저항력, 왕복거리 등을 조절하는 프로그램이 장착되기도 하며 전방진행 뿐 아니라 후방진행하기도 한다. 대부분의 ET는 발에 의해 구동되지만 양팔로 핸들을 저어 팔운동뿐만 아니라 제2차 구동력을 주도도록 되어 있다.

ET는 전동걷기기구(Treadmill=TM)와 맞먹는 다리와 심장운동을 요한다. 체자리자전기타기와 TM사이 중간 정도의 다리운동을 하는 기구로 알려져 있다. 다리뿐 아니라 손 운동까지 병행하기 때문에 열량을 더 많이 소모하는 기구라는 주장도 있다. 더 많은 종류의 근육을 더 짧은 시간에 사용하기 때문이다. 보통 ET는 오감인지도(PRE)가 더 낮다고 가정하지만 이 운동의 효과는 열소비율, 산소보존력, 유산생성, 심장박동, 오감인지력, 그리고 생리적 반응에 있어서 TM과 거의 비슷한 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

최근 들어 ET운동이 활발히 보급되고 있는 이유는 TM처럼 발바닥을 기구에서 들어서 걷거나 달리지 않고 같은 효과를 가지면서도 발바닥을 페달에 붙인 채 양팔로 안전하게 핸들을 앞뒤로 저어 우아하게 운동하고 또한 이 때 소음이 발생하지 않아 다른 사람

에게 전혀 피해를 주지 않기 때문이다. ET는 용접된 금속골격이라 비록 딱딱한 구조라 하더라도 운동 모습은 부드럽고 편안함을 주는데 이것은 크고 쿠션 있는 인체공학적페달이 관절 식으로 우리인체처럼 움직이기 때문이다.

모든 ET의 기본구성은 구동시스템, 저항시스템, 그리고 수평왕복대이다. 구동시스템은 전방구동과 후방구동의 두 개로 구성되어 있다. 전방구동장치는 부드럽게 회전하는 원형회전체가 관성모멘트를 제공하며 후방 구동체는 마찰이 거의 없이 금속바퀴가 다른 금속 위를 미끄러지며 왕복운동을 한다.

오늘날 저항시스템은 3가지 형태가 있는데 저가격대인 수동식과 중간가격대인 모터브레이크식, 그리고 고가이며 정확하고 부드러운 eddy current brake system으로 되어 있다. 수평왕복대 (Stride length)는 저 가격대에서는 공장에서 이미 확정되어 출고되지만 중간가격대나 고가의 제품인 경우 수시로 이용자가 바꿀 수 있도록 하여 최대의 유연성을 갖는다.

그밖에 고가의 ET의 경우 입력기능, feedback기능, 모니터링기능, 그리고 운동안내 기능까지 갖는 제어판을 단 기구가 있으며 이것은 보통 건전지로 작동된다. 개인의 조건에 맞도록 운동프로그램을 짤 수도 있으며 이미 짜여 저장되어 있는 여러 개의 프로그램을 수시로 선택하며 운동할 수 있도록 되어있다. 심지어 모니터를 통해 심장박동수를 보며 최대효과 운동영역을 유지하며 운동이 가능하고 손바닥으로 쥐었을 때 심장박동세기를 알려주고 짐게 식 고정 핀을 통해 귀, 손목관절과 ET를 연결되어 있다.

인체생물학적 연구를 위해 TM처럼 수동식 또는 전동식으로 경사도를 조절하여 운동 강도를 측정할 수 있고 수평 보폭(stride length=SL) 거리를 임으로 늘이거나 줄이며 극대운동효과를 측정하기도 한다.

ET운동은 “충격 없는” 체중지탱운동기구인데 이 같은 체중지탱운동은 중요한 골다공증 예방운동이다. 즉 체중지탱운동은 골밀도를 증가시키는 운동인 것이다. 정확한 체중지탱운동의 정의는 몸을 떠받치고 있는 중력에 대항하여 몸을 솟구치는 운동을 말한다. 이런 의미에서 수영이나 자전거타기 운동에 비해 ET, 걷기, 달리기, 등산, 줄넘기운동 등은 좋은 체중지탱운동이고 골밀도를 높이며 따라서 골다공증 예방에 좋은 운동이 된다. ET운동 시 골밀도 증가는 달리기 때의 골밀도 증가량과 비슷한 것으로 알려졌다. 운동생리학자들에 따르면 빠른 압력이 가해지면 조골세포(뼈를 형성하는 세포)를 생성시켜 골밀도를 높이는 것으로 알려졌다. 나이가 들수록 조골세포의 형성

은 어렵기 때문에 가능하면 나이가 적을 때 관련운동을 많이 하여 골밀도를 높이는 것이 중요하다. 골다공증 정도는 폐경기 여성에 가장 큰데 폐경직후부터 5년~7년 내에 뼈 질량이 20%나 감소하는 것으로 알려져 있다(미국 골다공증 국가재단).

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 ET 운동학에 대하여 알아본다. 제 III장에서는 실험결과에 대해 알아본다. IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 혈관 내에서의 평균자유거리

혈액은 폐로 들어온 산소와 소화기관으로 흡수한 영양소를 전신의 모든 세포에 공급하는 역할을 한다. 이때 세포에서 만들어진 탄산가스와 노폐물을 운반해 몸 밖으로 배설되게끔 하는 것도 혈액이다.

혈액은 적혈구·백혈구·혈소판·혈장으로 이뤄진 액체다. 적혈구는 산소와 영양분을 공급하는 역할을 한다. 백혈구는 외부에서 침입한 해로운 미생물과 이물질을 죽인다. 혈소판은 피를 멈추게 하며, 혈장은 수분과 영양소·노폐물을 운반하는 액체다. 혈액은 체중의 약 8%를 차지하며 성인은 보통 4~6L의 혈액량이 있다. 사고로 피를 너무 많이 흘리지 않는 한 혈액량은 일정하게 유지된다.

나이가 들면서 콜레스테롤과 당이 늘어나 혈액의 성분이 변할 수는 있다. 성인의 혈액은 추골·홍골·늑골 등 뼈 속에서 만들어진다. 혈액은 성분에 따라 수명이 다르다. 적혈구는 100~120일, 백혈구는 2주, 혈소판은 며칠, 림프구는 몇 시간을 버티다 파괴된다. 생성과 소멸을 반복하며 혈액을 건강하게 유지한다. 혈액은 맑고 깨끗해야 순환이 잘 된다. 혈액에서 가장 문제가 되는 것은 지방의 과잉이다. 콜레스테롤이나 중성지방 등, 지질(기름)이 많아져 걸쭉해진 혈액은 혈관 안을 빠르게 흐르기 어렵다. 심장이 더 강한 힘으로 혈액을 밀어내야 하므로 혈압이 상승한다. 또한 우리가 흔히 피떡이라 부르는 혈전(혈액덩어리)을 만들기 쉽다.

혈액의 상태가 직접적인 증상을 일으키기보다 혈관에 영향을 주면서 문제가 되는 경우가 많다. 건강한 혈관은 고무호스처럼 유연하나 나이를 먹으면 혈관이 딱딱해지고 약해진다. 그 길로 걸쭉한 혈액이 흐르다가 혈관 내벽에 상처가 나면 콜레스테롤이 쌓인다. 혈관 내벽이 점차 부풀다가 동맥경화가 가속화되면 심근경색이나 협심증, 뇌졸중 등 뇌혈관 질환과 심혈

관 질환을 일으키는 것이다.

콜레스테롤은 에너지가 되지 않는 지질 성분으로서 혈액에 의해 운반된다. 70~80%는 간에서 만들어지고 나머지는 음식물로 섭취된다. 과식하면 혈액 속 콜레스테롤이 증가한다. 우리 몸은 원래 콜레스테롤을 일정하게 조절하는 기능이 있다. 그러나 과식과 과음·운동부족·스트레스 등이 반복되면 혈액 속에 콜레스테롤이 쌓이기 시작한다. 혈액에 포도당(혈당)이 필요 이상으로 축적된 상태인 당뇨병과 고혈압·비만 등의 생활습관병도 혈액을 탁하게 하는 주범들이다.

좀 더 과학적인 연구를 위하여 혈관 내부에서 여러 가지 원인에 의해 혈당이나 세포파편 등에 의한 혈관 치석이 서서히 쌓이는 과정이 그림1에 나와 있다. 그림1에는 5단계로 나누어 커지는 혈관치석이 혈관을 막는 과정이 나와 있고 그 치석 위로 혈액이 응고되어 쌓이는, 이른바 혈액 응고괴(blood clot)의 생성과 성장과정을 나타내고 있다. 이 때 혈관치석이나 응고괴가 파편으로 혈관 내에 분포하여 충돌에 의하여 혈구의 흐름을 방해하게 된다.

예를 들면, 암모니아처럼 냄새가 강한 유체가 방 전체로 저 퍼나가는 데는 체 1분도 걸리지 않는다. 그 이유는 상온에서 유체(기체)분자의 평균속력이 보통 초당 수백 미터이므로 방 안에서 냄새가 퍼지는데 체 1초도 되지 않기 때문이다. 보통 유체 분자는 체적이 있어 서로 충돌하므로 관을 통과해 한 쪽에서 다른 쪽으로 진행할 때 직선운동을 할 수 없어 시간이 더 걸린다(그림2).

그림2는 그림1에서 언급된 혈구가 혈관 속을 진행하는데 혈관 프라크와 충돌하여 진행이 더디어지는 이른바 동맥경화를 나타내는 모형이다. 이런 불규칙적인 충돌현상을 random walk process라 부른다. 이때 하나의 유체분자가 다른 분자와 충돌하기 전까지 일정한 속력으로 직선운동을 (이것을 유동속도  $v_d$  라 한다.[2]) 하고 이러한 충돌과 충돌 사이에 분자가 움직인 평균거리를 평균자유거리(mean free path)라 한다. 각 분자의 운동경로는 불규칙하며 그림2와 유사하다. 이 평균자유거리는 유체분자 크기와 유체의 밀도와 연관되어 있다.

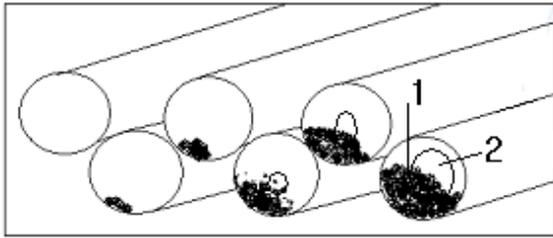


그림1.혈관 내부에서의 일련의 동맥경화를 일으키는 동맥경화 플라크(atherosclerosis plaque)과 파열된 동맥경화 플라크에서 만들어지는 혈액 응고피(blood clot)에 대한 생성과 성장과정을 나타내는 모형. 1=동맥경화 플라크; 2=혈액 응고피.

Fig.1. Series demonstrates the process and growth of an atherosclerosis plaque and the development of a blood clot at the site of a ruptured plaque. 1=Atherosclerosis Plaque ; 2=Blood Clot.

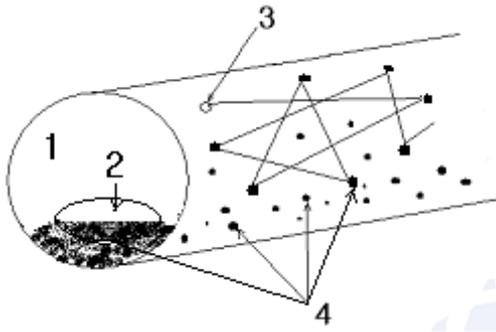


그림2. 1= 혈관, 2=혈액 응고피, 3=혈구, 4=동맥경화 플라크 또는 세포 파편.

Fig.2. 1=Artery, 2=Blood Clot, 3=Blood Cells, 4=Atherosclerosis Plaques, or Cell Segments.

혈관을 흐르는 혈구가 지름 d인 구형이라 하고 그림2에서 혈관단면과 수직 운동을 고려할 때 혈관 플라크 사이의 거리가 d보다 크면 충돌하지 않고 진행할 수 있다. 편이상 혈관 플라크의 지름도 d라 하면 <하나의 혈구와 하나의 혈관치석>이 맞대고 붙어서 진행할 경우 이 모형분자의 지름은 2d가 되고 이것은 시간 Δt초 동안 혈관 속을 거리 v<sub>d</sub> Δt 만큼 움직이며 원통을 만들며 휩쓸고 진행하므로 이때 원통의 단면적은 πd<sup>2</sup> 이고 길이가 v<sub>d</sub> Δt 이므로 그 부피는 πd<sup>2</sup> v<sub>d</sub> Δt 가 된다. 단위부피당 혈관 플라크의 개수를 n이라 하면 모형분자가 휩쓸고 지나가는 동안 원통내부의 총 혈관 플라크 수는 (πd<sup>2</sup> v<sub>d</sub> Δt)n 이 된다. 지름 2d인 모형분자가 Δt초 동안 움직이면서 원통

내부의 모든 혈관 플라크와 충돌하게 되므로 따라서 Δt초 동안 이 모형분자가 다른 혈관 플라크와 충돌하는 횟수는 원통내부의 혈관 플라크 수인 (πd<sup>2</sup> v<sub>d</sub> Δt)n 와 같다.

평균자유거리(mean free path) L은 시간 간격 Δt 동안 평균이동거리 v<sub>d</sub> Δt 를 Δt 동안 일어난 충돌횟수로 나눈 값과 같으므로

$$L = (v_d \Delta t) / [(\pi d^2 v_d \Delta t) n] = 1 / (\pi d^2 n) \quad (식1)$$

식1에서 L이 클수록 체내에서 피 흐름이 건강하고 작을수록 혈관 경화가 크다는 것을 의미한다. 중요한 사실은 평균자유거리는 혈구의 유동속도 v<sub>d</sub>와 무관하다는 것인데 이는 동맥경화는 선천적으로 타고난 심장의 펌핑 능력과 무관하고 후천적으로 혈관 내에 찌꺼기로 쌓이는 (그림1) 혈관 플라크가 결정적인 영향을 미친다는 의미이다. 동일한 크기의 혈구일 때 혈관 플라크의 체적밀도 n이 클수록 그리고 혈관 플라크의 직경 d가 클수록 피 흐름이 더디게 된다. 여기서 L은 식(1)에서 혈관 플라크, 또는 혈전의 직경 d의 제곱에 반비례하므로 어느 정도 커진 혈전에서 피 흐름이 거의 중지되어 뇌혈관의 경우 뇌경색(cerebral infarction)이 발생 한다 (그림3).



그림3. 평균자유거리 L이 매우 짧아져서 피 흐름이 거의 중지된 상에서 나타나는 뇌경색(cerebral infarction)이나 심근경색(myocardial infarction).[3]

Fig.3. A cerebral infarction or a myocardial infarction due to lack of blood supply because mean free path of blood L is minimal.[3]

한편, Δt 동안 충돌횟수가 (πd<sup>2</sup> v<sub>d</sub> Δt)n 이므로 단위 시간 동안 일어난 충돌횟수, 즉 충돌진동수(collisational frequency) f는 다음과 같다.

$$f = \pi d^2 v_d n \quad (\text{식2})$$

충돌 진동수의 역수는 평균 자유 시간(mean free time) T 이라는 충돌과 충돌 사이의 시간 간격이 된다.

$$T = 1/(\pi d^2 v_d n) \quad (\text{식3})$$

일반적으로 혈관 프라크 생기는 장소는 심장혈관(관성 동맥), 뇌로 가는 경동맥, 대동맥, 일부말초동맥인데 이중에서 가장 가는 것이 심장혈관(직경 2~3mm)이고 제일 가늘어 잘 막히고 이를 협심증이라 한다. 두 번째 가는 것이 뇌동맥(직경 8~10mm)인데 이곳에서는 프라크가 너털너털하다가 떨어져 나와 뇌혈관 말단부분(좁은)에 가서 막아버리는데 이를 뇌경색(그림3)이라 하고 이것이 중풍을 일으킨다. 반면 이것이 터지면 뇌출혈이라 한다. 한편, 대동맥(직경 3cm)은 굵어서 여간해서 프라크에 의해 막히지는 않으나 늘어남에 의해 동맥류가 발생할 수 있고 만약 늘어나서 직경이 5cm가 넘으면 터질 수 있다.

지금까지 평균자유거리(mean free path) L은 원통 내부에 있는 혈관 프라크들이 모두 정지해 있다는 전제하에 고찰한 것이다. 이는 혈구에 비해 혈관 프라크들이 상당히 더 무겁기 때문에 타당하다고 본다. 만약 혈관 프라크들이 움직인다고 가정하면 평균자유거리(mean free path) L', 충돌진동수(collisional frequency) f', 그리고 평균 자유 시간(mean free time) T'은 각각 다음과 같다.

$$L' = 1/[(\sqrt{2})\pi d^2 n] \quad (\text{식4})$$

$$f' = (\sqrt{2}) \pi d^2 v_d n = v_d /L' \quad (\text{식5})$$

$$T' = 1/[(\sqrt{2})\pi d^2 v_d n ] = L'/ v_d \quad (\text{식6})$$

혈액이 끈적거리는 점성이 있을 때를 고려해보자. 보통 정상 혈압은 80mmHg(수축압력, diastolic pressure)에서 120mmHg(수축압력,systolic pressure)까지가 정상이다. 하지만 꿀처럼 점성이 커질 때 혈압 상승은

$$\Delta P= 8\pi \eta (vL)/A \quad (\text{식7})$$

만큼 커지는데  $\eta$ 는 점성계수(2.7\*10<sup>-3</sup> Ns/m<sup>2</sup>), v는

혈류속도를, L는 혈관의 길이, 그리고 A는 혈관의 단면적을 나타낸다. 예를들어 대동맥일 때 점성에 의해 혈압이 높아지는 정도를 계산해보면 혈관반경이 1cm, 혈액흐름율이 분당 25리터이므로 혈관 길이 L=cm에서 높아지는 혈압 상승은 2.93 Pascal이 된다. 한편, 소동맥(arteriole)인 경우 혈관의 평균반경을 0.05mm 그리고 혈류의 평균속력을 1cm/s라 가정하면 점성에 의한 혈압상승은 혈관 1cm 당 무려 864 Pascal 에 이르러 대동맥보다 300배 이상 커진다.

또 한 가지 문제는 혈관내부의 프라크 조각들이 있어 이것들의 크기와 속도가 혈액 흐름을 방해하기도 한다. 이것의 이해를 돕기 위해 아래 그림4에 프라크 조각의 크기(그림4-(a))와 그 속도(그림4-(b))에 의한 혈관 막힘이 나와 있다. 그림4-(a)에서 찌꺼기 알맹이가 큰 경우 흐름이 쉽게 막힐 수가 있음을 보여주고 그림4-(b)에는 동일한 사이즈라 해도 속도가 더 빠르면 (폭이 좁아지면 빨라짐. 그림2 및 그림5) 더 쉽게 막힌다.

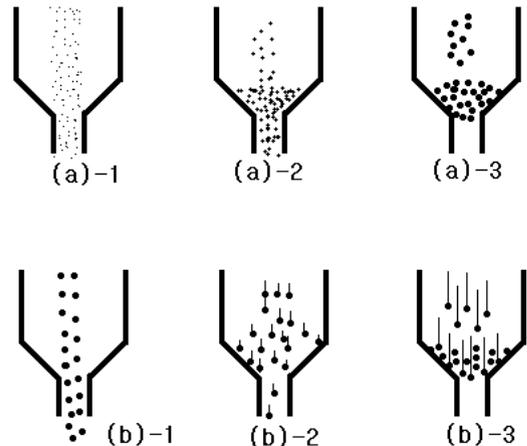


그림4. (a) 동일한 직경의 혈관이라 해도 찌꺼기 알맹이 크기가 크면 혈관이 더 막히기 쉬워짐. (b) 같은 알맹이 크기가 하더라도 속도가 빠르면 더 쉽게 막힘  
Fig.4. (a)For the same cross section of artery, the larger balls block better. (b). For the same cross section artery and for the same size of balls, the ball with higher speed blocks better.

혈류의 속도는 매우 중요한 변수인데 왜냐하면 산소를 공급해주기 때문이다. 제2장에서 ET 운동 중 호흡교환률(RER)과 심장박동률(HR)에 대한 측정과 분석이 이루어졌고 이것들은 혈류속도와 밀접한 관계가 있다.

유체의 연속방정식[2]

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{상수} \quad (\text{식8})$$

에서 혈관이 굵기와 속도가 반비례하므로 굵기가 갑자기 줄면 속도가 증가 한다 .(그림5)

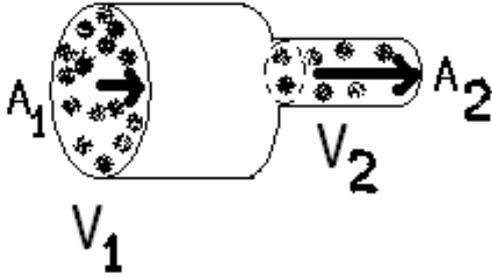


그림5. 유체의 연속방정식 ; 단면적이 크면 혈류속도는 느리지만 단면적이 작아지면 혈류가 빨라진다.  
Fig.5. Equation of Continuity in the Fluids ; The larger the cross section, the slower the blood speed.

한편,  $V = \frac{p}{m}$  를 속도(운동량 p의 질량밀도)라 하면 속도차이는 다음 식에 따라 혈관 벽에 가해지는 충격량이 된다[3] :

$$V_2 - V_1 = \frac{p_2 - p_1}{m} = \frac{\Delta p}{m} = \frac{I}{m} \quad (\text{식9})$$

여기서  $\frac{I}{m}$  는 충격량 I의 질량밀도에 해당되며 따라서 어떤 내부 원인에 의해 혈관의 굵기가 달라지면 속도변화에 의한 충격량으로 인해 내부 혈관이 파열될 확률이 커진다. 또한 앞에서 언급한 혈관 내부의 동맥경화 플라크 때문에 혈관 굵기가 작아지고 (그림 2) 이 때문에 내부혈관에 있는 동맥경화 플라크가 파열돼 혈액 응고괴가 쏟아져 나와 혈관을 막으면 피 흐름이 막혀(그림4) (심장형관에서 막히면 심근경색이라 하며, 뇌혈관에서 막히면 뇌경색이라 함) 근처의 정상세포가 죽어 긴급한 조치를 취하지 않는 한 한 시간 이내에 사망할 가능성이 높아진다. (그림3)

### III. 실험 결과

ET 같은 유산소 운동은 동맥경화 플라크를 방지하는 좋은 운동으로 알려져 있다. 의외로 근력운동은 기초체력을 향상시키는 효과는 있다하더라도 심장이

나 너에서 경색으로 인한 순간적인 사망을 예방하는 효과가 거의 없는 것으로 알려져 있다.[13]

2010년3월부터 6월까지 총27회에 걸쳐 연구자가 매회 1시간동안 그림6의 Elliptical Trainers(ET) 헬스기구를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험에 사용된 기구명은 Horizon Fitness™ 인데 이 기구의 특징은 그림1의 B 내부에 내장된 Ceramic Magnetic Resistance (CMR) 시스템이 내마모성이고 마찰이 없으며 22파운드의 질량을 갖는 중력회전체로써 최고의 작동과 반복성을 갖도록 고안되었다. 또한 Silence Spin™이라는 동력전달 시스템이 왕복운동에 도입되어 정교하게 운동하도록 하였고 체인형에 비해 벨트 또한 부드럽고 조용하며 깨끗하게 작동된다.

기구 저항도는 매번 최고 등급인 15에 맞추었다. 강철로 된 구조물과 쿠션 있는 고무 패드는 강도 있는 운동이 진행되는 동안에도 안정감을 준다.

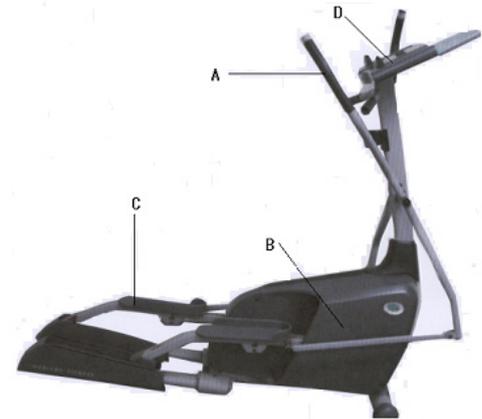


그림6. 실험에 사용된 ET의 제원. 기호 A는 상체운동용 핸들, B는 중력회전체 박스, C는 수평 운동 전달 장치, D는 전자계기판.  
Fig.6. Elliptical Trainer Used in This Studies : A=Handle, B=Gravitational Rotator, C=Stride Length, D=Instrument Panel.

#### 1. 에너지 소비량과 RER 및 HR

기초 대사량을 늘려주는 근육강화운동은 여러 가지 혈관 질환을 예방하는 중요한 운동이다. ET운동을 통하여 발생하는 에너지 소비량과 RER 및 HR과의 연관성을 실험한 결과가 그림7에 나타나 있다.

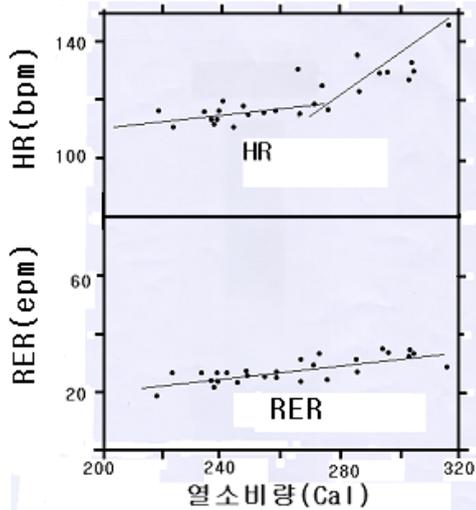


그림7 열소비량에 따른 호흡교환률(RER)과 심장박동률(HR).  
Fig.7. Respiratory Exchange Ratio (RER) and Heart Rate (HR) against the caloric exhaustion

그림7에서 열소비량은 소비된 에너지를 나타내며 열소비량을 계산하는 운동속도 단위가 시속km이므로 매번 한 시간씩 실험운동을 수행함으로써 운동거리가 곧 평균속도가 되어 열소비량 측정은 매우 정확하다고 볼 수 있다. 이 이유 때문에 매회 한 시간씩 실험운동을 수행하였으며 기구 저항도는 매회 최고등급인 15단계를 유지하였다. 그림7에 나타난 매우 중요한 결과는 열소비량이 늘어날수록 호흡교환률(RER)은 지속적으로 일정하게 상승하는 반면 심장박동률(HR)은 서서히 상승하다가 임계점을 지나면 갑자기 크게 증가함을 볼 수 있다. 그림7에서 그 임계점은 대략 275 Cal 이다. 즉 운동을 서서히 하던지 시간을 줄여 이 임계점이 도달되기 전에 멈추지 않으면 앞의 II장에서 언급한 것처럼 혈류 흐름에 장애가 생겨 그림 4처럼 알갱이들이 막히게 되고 또는 혈관에 강한 충격량을 주어 파열이 일어나게 된다.

ET 운동 시 산소소비량 (Oxygen Consumption, VO<sub>2</sub>, ml/kg/min), 또는 호흡교환률(RER), 또는 심장박동률(HR)과 연관된 최근 연구가 다수 있다.

우선 Armour[5] 등은 ET 운동을 3분마다 강도를 상향시키며 (단계당 21-25와트씩) 분당 100회전하여 최대산소소비량(VO<sub>2</sub> max)에 대한 다음과 같은 식을 얻었다: VO<sub>2</sub> max = 71.14 - 11.875\*X + 2.362\*Y - 0.273\*Z (여기서 X=성별을 나타내는데 남성이면 1 여성이면 2; Y = 종료 강도 단계, and Z = 몸무게 kg).

또한 Dennis 등은[6] 다양한 보폭과 기기 저항 등급이 산소소비량(Oxygen Consumption, VO<sub>2</sub>, ml/kg/min), 호흡교환률(RER), 심장박동률 (HR, bpm) 그리고 인지발휘율 (Ratings of Perceived Exertion, RPE)에 미치는 영향을 연구하였다. 이 연구에서는 저항단계를 1단에서 3단까지 올리는 동안에 보폭과는 무관하게 HR, VO<sub>2</sub>, RPE, 및 RER은 각각 증가하였다. 한편 저항을 일정하게 유지할 때 HR와 VO<sub>2</sub> (ml/kg/min)는 보폭이 증가할 때 각각 증가하였다. VO<sub>2</sub> (ml/kg/min)은 26.2 (큰 보폭에서), 24.2 (중간 보폭에서), 23.4(작은 보폭에서) 였는데 이 연구와 매우 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 RPE 와 RER는 왕복거리와 거의 무관하였다. 이 연구는 결론에서 보폭 증가는 심폐기능 향상을 위한 유효한 운동법이고 에너지 소모가 더 큼을 밝혀 그림7과 비슷한 결과를 얻었다.

또 다른 연구는 Brennan 등에[7] 의해 이루어졌는데 그들은 상대적인 운동 강도의 척도로써 오감 인지력(Perceived Exertion)을 사용하였고 TC(계단오르기 운동기구)는 TM(Treadmill. 걷기기구)에 비해 산소 소비량이 25% 적은데 (낮은 kcal) 아마도 그 이유는 ET에서와 같이 몸무게 지탱 때문인 것 같다고 결론 지었다. TC 운동 중 상당히 높은 혈압인 반면에 심장압력은 두 배로서 TM과 ET에서와 거의 동일했는데 이는 매우 낮은 HR 때문이다 고 주장하였다. TC와 ET에 비해 TM은 상대적으로 에너지 소모율은 더 좋는데 TC에 비해 혈압을 덜 상승시킨다. 얻어진 수치적 결과로써 VO<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>/kg/min)에 대한 측정결과는 TM=38.2±3.9 > ET=31.7±5.1 > TC=28.6±3.9이었고, HR(bpm)에 대한 측정결과는 각각 TM=174.8±9.8, ET=171.5±12.1, TC=148.4±14.4 이었으며, 혈압(mmHg)의 순서는 TC (149.1±15.9) > TM(135.1±4.4) > ET(132.7±2.4)이었다. 이들 수치상 수치상의 결과는 이 연구와 일치하며 다만 훨씬 강도 높은 단시간의 운동에 따른 결과이다.

여러 가지 운동기구에 대해 산소소비량과 연관된 종합적인 연구는 Hughes 등에[8] 의해 이루어졌다. 그들은 4가지 서로 다른 기기 ET, 팔다리용 자전거 (Dual Recumbent Bike, DB), TM, 및 팔 자전거 (Single Recumbent Bike, SB)를 이용한 7가지 서로 다른 운동 기기에서 오감 인지력 평가(RPE), VO<sub>2</sub>, 및 HR의 측정치들을 비교하였다.

그 결과를 보면 VO<sub>2</sub> 에서는 4개의 운동기기 사이에 다음 량 차이가 없었다(ET= 31.1±6.2; DB= 32.9±6.1; SB=30.8 ± 6.2; TM= 30.6±3.0). 다만 HR의 결과를

보면  $ET=164\pm 17$ ;  $DB=166\pm 16$ ;  $SB=167\pm 15$ ;  $TM=159\pm 16$  이었고 RPE의 결과는  $ET=11\pm 2$ ;  $DB=12\pm 2$ ;  $SB=12\pm 3$ ;  $TM=11\pm 3$ 이었다. 그들은 결론적으로 RPE으로 볼 때 ET 운동 시 유사 신진대사량이 SB 또는 DB에 비해 적었으며, 이 연구 결과를 이용하여 운동집중력 향상을 꾀할 수 있는 운동을 선별할 수가 있었다고 주장하였다.

한편 Desch 과 Deitrick은[9] ET와 TM 운동 시 각각 심장대사 반응을 비교하는 실험을 하였는데 동일한 RPE일 때 TM운동 시 산소에 대한 상대소모량과 절대소모량은 ET 운동 때 보다 훨씬 컸음을 알았다. 그 비율은  $38.7\pm 3.9$  대  $31.4\pm 4.8$  ml/kg/min 혹은  $2760\pm 250$  대  $2250\pm 150$  ml/min 였다. HR 역시 TM운동이 ET운동보다 훨씬 컸다. 그 비율은  $176.3\pm 9.3$  대  $161.5\pm 28.4$  bpm이었다. 그러나 수축 심장압력(SBP)은 TM운동과 ET운동이 거의 차이가 없었다 ( $TM=134.4\pm 4.7$  대  $ET=133.6\pm 3.7$  mmHg). 이 연구를 통해 다음의 연구주제를 TM으로 잡게 되었다.

Wallace와 동료들[10] 또한 ET와 TM을 가지고 앞서 언급한 Desch 과 Deitrick[9]의 연구와 비슷한 실험을 하였다. 그들은 적절한 RPE에서 ET와 TM의 에너지 소모율을 비교하였는데 그 결과 선정된 인지 발휘율에 대해 남녀에 대한 최고 강도 및 고강도 운동을 EM과 TM에 대해 각각 실시하여 산소소비량과 심장박동수를 측정하여 에너지 소비율을 알아보았다. 최고강도 및 고강도 실험에서 모두 TM운동이 ET운동에 비해 산소소비량과 심장박동수가 높았고 따라서 에너지 소비량이 컸다. 이 결과는 남자와 여자의 성별차이는 없었다. EM운동은 점잖고, 저충격을 주는 운동법이라고 하였다.

Turner는[11] 다른 형식을 가진 2개의 ET들의 운동 방식에서 생리반응과 통증반응의 비교하였고 결론적으로 평범한 ET와 저충격 ET를 비교했을 때 산소소비량은 비슷했으나 전자는 불편함이 컸고 후자는 관절환자에게 좋은 기구임을 알았다.

마지막으로 BURNFIELD과 그 동료들은[12] 심장혈관에 미치는 ET 운동효과를 알아보기 위해 평면압력 변화를 측정하였다. 그 결과에 따르면 ET 운동 시 발앞꿈치의 최고압력은 213kPa로써 걸을 때(253)나 뛸 때(251)보다 낮았고 발바닥중간 아치부에서의 102kPa이었고 뒷꿈치에서의 압력은 94kPa로써 걸을 때(215)나 뛸 때에 비해 188) 충격이 매우 작음을 알 수 있었다. 가장 낮은 운동은 기대어 자전거타기(RB)로써 25kPa이었다. 발 앞꿈치의 보호가 중요할 때 (당뇨에 의한 발 염증 방지) ET운동은 뒷꿈치

에 힘을 가하지 않을 경우 걷기나 뛰기에 비해 계단 오르기과 누워서 자전거타기와 더불어 좋은 운동이 될 수 있다고 주장하였다.

## 2. 운동 속도(운동 강도)와 RER 및 HR

그림(8)에는 운동속도 증가에 따른 RER과 HR의 변화를 나타냈다. 그림(8)에서 우선 속도가 서서히 증가함에 따라서 RER은 역시 서서히 증가하는 반면 HR은 임계점(약 6.7km/h)까지는 서서히 증가하지만 이후에서는 급격한 증가를 보인다. 이것은 그림7에서 임계 열소비량 이후 급격히 증가하는 것과 같은 모습이다. 열소비량이 운동속도와 운동 시간 량과 깊은 연관이 있지만 임계점의 존재가 전자인 운동속도와 직접적인 연관이 있음을 보여주는 예이다. 따라서 준비운동 없는 급격한 운동과 신체의 한계를 초과하는 과격한 고속운동은 심혈관에 매우 위험함을 보여준다.

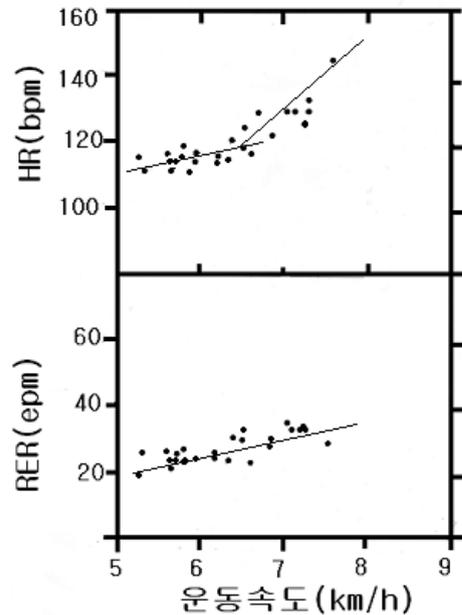


그림8 운동속도 에 따른 호흡교환률(RER)과 심장박동률 (HR)

Fig.8. Respiratory Exchange Ratio (RER) and Heart Rate (HR) against the speed of ET

## 3. 대사 소비량과 RER 및 HR

아래 그림(9)에 체중감량에 따른 RER과 HR의 변화를 나타냈다. 체중감량은 주로 장시간 균일한 운동에 따른 대사소비량이다. 그림(9)에서 우선 에너지소비가 증가함에 따라 체중감량이 커지고 그에 따라서 RER은 비교적 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그

러나 HR은 에너지 저소비(저속운동) 운동이라 해도 크게 증가함을 알 수 있다. 이것은 그날의 신체적 조건과 상관관계가 있는 것으로 보이며 즐거운 마음으로 운동을 할 경우 비록 고속운동을 해도 HR이 크게 오르지 않는 반면 스트레스를 받는 상태에서는 비록 저속운동이라 해도 HR이 크게 높아져 운동효과가 크지 않음을 보여준다.

다음 연구는 장기간 ET운동 (2년 이상)을 할 경우 에너지 소비량과 대사소비량, 그리고 이에 따른 호흡교환률(RER)과 심장박동률 (HR)의 변화를 연구할 것이다.

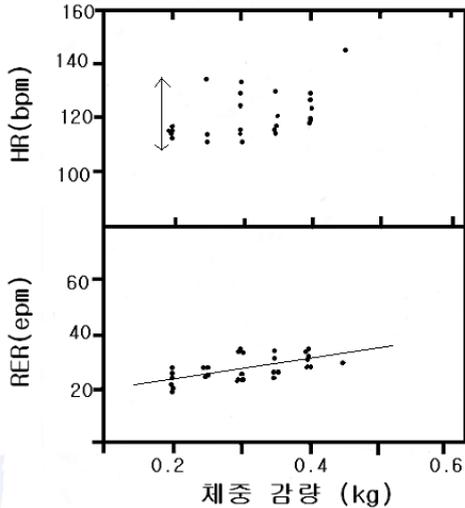


그림9. 체중감량에 따른 호흡교환률(RER)과 심장박동률 (HR).

Fig.9. Respiratory Exchange Ratio (RER) and Heart Rate (HR) against the weight loss.

#### IV. 결과 및 결론

##### 1. 에너지 소비량과 RER 및 HR

열소비량이 늘어날수록 호흡교환률(RER)은 지속적으로 일정하게 상승하는 반면 심장박동률(HR)은 서서히 상승하다가 임계점을 지나면 갑자기 크게 증가함을 볼 수 있다. 이 연구에서는 그 임계점이 대략 275 Cal 였다. 즉 운동을 서서히 하던지 시간을 줄여 이 임계점이 도달되기 전에 멈추지 않으면 혈류 흐름에 장애가 생겨 혈관에 나쁜 영향을 줄 있다.

##### 2. 운동속도(운동강도)와 RER 및 HR

속도가 서서히 증가함에 따라서 RER은 역시 서서히 증가하는 반면 HR은 임계점(약 6.7km/h)까지는

서서히 증가하지만 이후에서는 급격한 증가를 보인다. 이것은 임계 에너지 소비량 이후 급격히 증가하는 것과 같은 모습이다. 열소비량이 운동속도와 운동 시간 량과 깊은 연관이 있지만 임계점의 존재가 전자인 운동속도와 직접적인 연관이 있음을 보여주는 예이다. 따라서 준비운동 없는 급격한 운동과 신체의 한계를 초과하는 과격한 고속운동은 심혈관에 매우 위험함을 보여준다.

#### 3. 대사 소비량과 RER 및 HR

체중감량이 서서히 커질수록, 즉 고속운동일수록 그에 따라서 RER은 비교적 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 HR은 에너지 저소비(저속운동) 운동이라 해도 크게 증가함을 알 수 있다. 이것은 그날의 신체적 조건과 상관관계가 있는 것으로 보이며 즐거운 마음으로 운동을 할 경우 비록 고속운동을 해도 HR이 크게 오르지 않는 반면 스트레스를 받는 상태에서는 비록 저속운동이라 해도 HR이 크게 높아져 운동효과가 크지 않음을 보여준다.

ET 운동은 다른 기구와 다르게 상체운동을 병행한다. 주의해야 할 것은 오랜 운동시간이 지남에 따라 인지도(RPE)가 떨어질 때 양손에 의한 헨들의 왕복 운동이 자신의 RER(산소배출)을 따라하는 경향이 있어 숨쉬기가 빨라지면서 혈압이 본인도 모르게 급격히 올라감을 주의해야 한다. 이 같은 현상은 MP3를 들으며 운동할 경우에도 빠른 비트의 음악일 경우 헨들 진동수가 자신도 모르게 음악처럼 빨라져 고혈압 환자의 경우 주의할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011-2012년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥비의 지원을 받은 것입니다.

#### 참고 문헌

- [1] US Patent 6726600-Compact, Elliptical exercise device, July 27, 2004.
- [2] 황운학 외, 대학물리학(서울:북스힐), 제14장, 2009년 3월
- [3] 황운학 외, 대학물리학(서울:북스힐), 제9장, 2009년 3월
- [4] Rebecca Richards-Kortum, Biomedical Engineering for Global Health, Cambridge University Press, 2010.

- [5] A. Armour, Andrew Lawson, Lorraine Brilla, Gordon Chalmers, A; T. Michael, R. Zabik, Y. Liu, M. Dawson, D. Carl, "Development of A Submaximal Exercise Test To Predict Vo2 Max Using An Elliptical Trainer", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 35, 5, S310, May 2003.
- [6] Dennis Dolny, Nikki J. Hughes, Ricky Caylor, Kathy Browder, "Energy Expenditure Measurement: Effect of Varying Stride Length on Cardiorespiratory Response during Elliptical Trainer Exercise", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 36, 5, p S250, May 2004.
- [7] Colleen L. Brennan, Ronald W. Deitrick, Michael J. Welikonich, Lauren M. Puzen, "Physiological Comparison of Tread Climber versus Treadmill and Elliptical Trainer Exercise", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 38, 5, p S499, May 2006.
- [8] Nikki J. Hughes, Dennis G. Dolny, Kathy D. Browder, Brian Cowin, Michelle Hadley, Collin Jasper, Tarah McAllister, Christy Stewart, Becca Terrell, "Rating s Of Perceived Exertion (RPE, ) Durin g Elliptical Trainer, Treadmill And Recumbent Bike Exercise", *Medicine & Science In Sports & Exercise* 37, 5, p S103, May 2005.
- [9] Michael P. Desch, Ronald W. Deitrick, Michael Welikonich, "Cardiometabolic Comparison Of Elliptical And Treadmill Exercise Responses", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 37, 5, p S105, May 2005.
- [10] Brian P. Wallace, Gary A. Sforzo, Thomas Swensen, "Energy Expenditure: Elliptical v. Treadmill Exercise at Selected RPE ", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 36, 5, p S249, May 2004.
- [11] Michael J. Turner, Alison B. Williams, Amy L. Williford, Mitchell L. Cordova, "A Comparison Of Physiological And Pa in Responses Between Exercise Modalities", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 41, 5, p 266, May 2009.
- [12] JUDITH M. BURNFIELD, AMY G. JORDE, TANNER R. AUGUSTIN, TATE A. AUGUSTIN, GREGORY R. BASHFORD, "Variations in Plantar Pressure Variables across Five Cardiovascular Exercises.", *Medicine & Science in Sports & Exercise* 39, 11, pp 2012-2020, November 2007.
- [13] <http://krblog.yahoo.com/health.blog/8403>

**황운학 (Un Hak Hwang)**

**정희원**



1981년 2월 : 연세대학교 이학사  
 1985년 12월 : 미국 미주리대학교 이학석사  
 1989년 8월 : 미국 미주리대학교 Ph.D.(물리학)  
 1992년 3월~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수

<관심분야> 플라즈마 물리학, 자유전자레이저, Thin Film Depositions, 핵융합 이론, 공학기초 물리학.