

운동종류에 따른 골대사의 차이

경북대학교¹, 일본 쓰쿠바대학교²
이상직¹, 이수천¹, 스즈끼 마사시게²

I. 서론

최근, 인구의 증가와 더불어 고령자의 생활의 질(quality of life: QOL)을 향상시켜야 한다고 지적되어 오고 있으며, 그 중 노화에 의한 골량감소와 골다공증에 대한 대책이 크게 대두되고 있다. 따라서 골량감소에 의한 골다공증을 예방하기 위해서는 식사와 운동을 중심으로 하는 Life style을 개선하여 성장기에 최대골량(peak bone mass: PBM)을 가능한 한 높여서 중년 이후의 골량 감소율을 작게 하는 것이 무엇보다 중요하다. 그 예방책의 하나로서 운동은 골밀도, 골형태 및 골강도에 영향을 미친다고 보고하고 있으며 특히, 갑스고정이나 신경절개에 의한 국소적인 골량감소가 일어나는 연구결과를 보면 골에 주어지는 운동부하가 골대사를 조절하고 있다는 것을 시사하고 있다. 그러나, 그 작용기전은 아직 정확하게 해명되어 있지 않은 상황이다.

한편, 고령자에게 많이 일어나는 골다공증은 골절에 의한 활동부족과 그에 의한 생활습관병을 유발하기 때문에 문제가 되며, 골절방지에 가장 중요한 것은 골강도의 유지 및 증대이다. 그럼에도 불구하고 최근까지 골에 관한 여러 가지 증상의 평가는 주로 골밀도에 의해 평가되어 왔다. 그 이유는 생체내의 골강도 측정이 불가능하고 실제로 골밀도가 골강도와 밀접한 관계가 있다고 보고되어 왔기 때문이다. 그러나 골밀도만으로 골강도를 평가하는 것은 타당하지 않다는 것이 많은 연구보고에서 지적되고 있다. 실제로 골밀도가 낮은 사람 중에서도 골절발생률이 낮은 사람수가 골절 발생자수보다 많으며 골밀도가 높은 사람 중에서도 쉽게 골절을 일으키는 경우가 많이 있는 실정이다. 이와 같은 현실을 고려 할 때 골절을 예방하는 골강도의 평가를 규명하기 위해서는 골밀도와 함께 골강도를 좌우하는 요소의 하나인 골형태 및 미세구조를 중요한 지표로서 검토하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

골조직은 그 생리적 역할과 관련하여 볼 때 딱딱한 조직으로 보이지만 운동부하를 받으면 화학적조성, 물리적형태 및 강도의 변화를 일으킨다. 이와 같은 사실을 해명하기 위해 동물을 이용한 많은 연구가 이루어져 왔으며 이러한 연구에는 운동이 골량의 증대에 유효하다는 보고와 골량 증대에는 그다지 중요하지 않다고 하는 상반된 보고가 있는 등 일관된 견해를 보이지 않고 있다. 이것은 역학적 부하의 종류, 강도, 시간 등 여러 가지 요소에 의해서 골대사의 변화에 미치는 영향이 틀리기 때문이다. 또한 운동이 골에 미치는 영향에 관해서 많은 연구가 있으며 골에 주어지는 강도가 크면 클수록 골강도 증대에는 보다 효과적이라고 보고되고 있다. 예를 들면 사람의 경우 단시간에 높은 강도의 부하를 점증하는 웨이트트레이닝이 골밀도 및 골강도 증대에 효과적이다. 그러나 이런 고강도의 저항성운동이 사람의 골에 미치는 영향에 관해서는 골의 적출이 불가능하기 때문에 혈 중이나 요 중의 골대사 지표와 골밀도와의 관계를 평가하는 정도 밖에 하지 못하는 제한점이 있다. 그에 비해 동물실험에서는 골을 적출 할 수 있기 때문에 운동과 골에 관한 직접적인 연구가 가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 운동부하의 타입, 강도, 시간 등의 조건이 다른 운동부하에 의해 골절방지에 가장 중요하다고 알려져 있는 골강도가 어떤 매카니즘에 의해 변화하는가를 검토함으로써, 운동에 의한 골다공증 및 그에 의한 골절예방의 구체적인 방법을 제시하고자 한다.

II. 본론

1. 레지스턴스(무산소) 운동과 골 변화

골에 주어지는 역학적 부하는 골량의 유지 및 증대에 필수적이며 골에 대한 부하가 강할수록 골강도가 높

아진다는 것이 알려져 있다. 사람의 경우 골량 증대를 일으키는 최적의 조건은 고 강도로서 단시간의 부하를 점증하는 웨이트트레이닝과 같은 운동이라고 인정되어 있다. 그러나 동물을 이용한 많은 연구는 그 트레이닝 방법으로서 트레드밀 운동을 적용하고 있으며 그 대부분이 에너지 대사의 정도(% VO₂max)를 운동강도의 지표로서 설정하고 있다. 그러나, 실제로 골조직의 영향을 검토하기 위한 운동강도는 골이 받는 역학적 부하가 어느 정도인가가 중요하다. 따라서 부하를 받는 부분의 최대근력을 기준으로 한 부하(% 1RM) 및 근육에 대한 저항력(moment)을 그 지표로서 부하강도를 설정하는 것이 간접적이긴 하나 골에 대한 역학적 자극을 잘 반영하고 있다고 생각된다. 또한 골강도가 증대하는 것은 골량의 증가 뿐 만 아니라, 형태의 변화에도 의존하고 있다고 알려져 있으나 상세한 메카니즘은 아직 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점들을 규명하기 위해 우선 흰쥐용 레지스턴스 운동장치를 제작하였다. 흰쥐에게 자켓과 벨트를 착용시켜 뒷다리만으로 지면에 선 상태에서 장치에 고정하였다. 장치와 스티뮬레이터(SEN-3301)를 전선으로 연결하여 연결봉 위에 일정한 중량을 올려놓은 상태에서 흰쥐의 꼬리에 전기자극(10V, 100Hz으로 0.3초간)을 부과하였다. 그 결과 10마리의 쥐가 동시에 하지를 신전하여 굴신운동 즉 Squat 운동을 하도록 유도하였다. 운동부하는 우선 동물의 최대근력을 결정하고 그 근력의 65~70%에 해당하는 중량을 부하로 하여 1일 15회 × 8세트, 주3~4회의 트레이닝을 8주간 적용시켰다(Fig. 1).

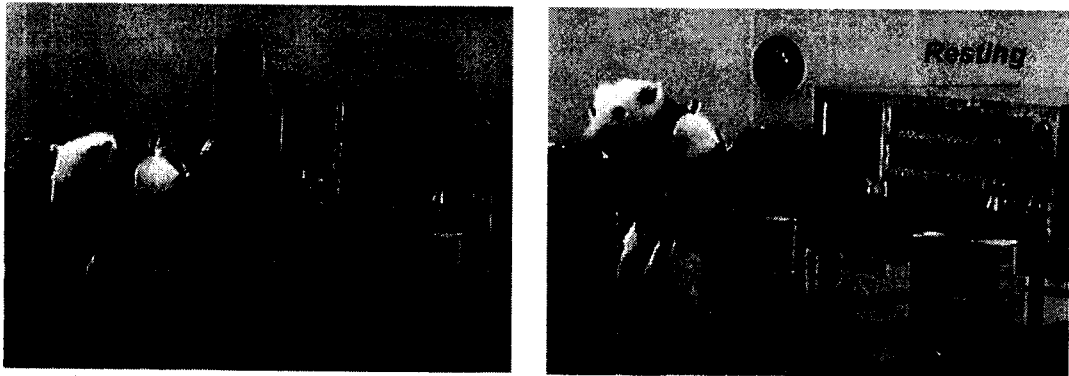


Fig. 1. A squat exercise for rat.

본 연구에서 사용한 골밀도 측정방법인 pQCT (Peripheral Quantitative Computed Tomography)법은 골구조를 3차원적으로 재 구축하는 것이 가능하며, 2차원 평면에 투영된 골의 X선 화상을 분석하는 종래의 DXA (Dual-energy X-ray absorptiometry)법 등에서는 측정이 불가능했던 최적 골밀도를 얻을 수 있다. 레지스턴스 운동에 의해 대퇴골의 최적 골밀도는 유의차를 보이지 않았다. 이것은 운동에 의한 칼슘량의 증대와 함께 최적도 크게되어 결과적으로는 최적골밀도의 유의한 차를 보이지 않았다고 사료된다. 또 해면골(cancellous bone)의 골강도와 골구조를 살펴본 결과 고강도의 레지스턴스 운동에 의해 해면골은 骨梁幅(trabecular thickness: Tb.Th)의 증대보다도 骨梁數(trabecular number: Tb.N)를 증가시키는 등의 대응을 보여 골강도를 증대시키는 것이 판명되었다. 즉 해면골의 골량(bone mass)이 동일하더라도 가는 骨梁數가 많을수록 骨梁幅이 두꺼우면서 그 양이 적은 것에 비하여 골질의 빈도가 적었다고 보고하고 있는 선행연구와 동일한 결과를 나타낸다. 이것은 해면골의 골강도를 유지하기 위한 골미세구조의 변화를 규명했다는 점에서 의의가 있으며 종래에 사용했던 트레드밀운동에 의한 흰쥐의 骨梁幅의 증대와 다른 대응을 보인다는 것을 새롭게 확인했다는 점에 있어서도 중요하다(Fig. 2).

레지스턴스 운동에 의한 피질골(cortical bone) 단면의 형태변화를 살펴보기 위하여 내막과 외막의 골형성·골흡수 변화를 검토하였다. 그 결과 내막에 있어서는 석회화속도(mineral apposition rate: MAR)가 증가하는 경향과 흡수면(eroded surface: ES)이 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 내막에서는 골흡수(bone resorption)의 증가 및 내경의 확대현상이 일어나는 것을 확인하였다. 이것은 mechanical stimulation이나 트레드밀 운동에 의해 내막의 골형성(bone formation)이 증대하는 것을 밝힌 선행연구와는 상반된 결과를 나타내었다. 이것은 외부로부터 주어지는 운동의 종류 및 강도에 따라 내막에서의 골반응이 틀린다는 것을 시사한다. 한편 외막에 있어서는 이중표식면(double labeling surface: dLS) 및 석회화표면(mineralizing surface: MS)의 증가에 의한 골형성률이 증대되어 그 결과 외경이 크게 되는 것을 증명하였다. 이것은 피질골 단면의 내경과 외경

이 동시에 확대하는 형태변화(modeling drift)를 일으켜 외부의 강한 운동자극에 대응하는 것을 시사한다. 즉 radical expansion에 의한 대상 기전을 잘 설명하고 있다고 할 수 있다(Table 1, 2).

Table 1. Bone formation and resorption parameters of the trabecular bone in squat exercise rats.

Group	sLS/BS (%)	dLS/BS (%)	MS/BS (%)	MAR ($\mu\text{m}/\text{day}$)	BFR/BS ($\times 10^{-2} \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2/\text{day}$)	Oc.S/BS (%)	Oc.N/BS (%)
1. Basal control	47.6 \pm 2.26	20.4 \pm 0.96	44.2 \pm 1.42	1.63 \pm 0.04	72.1 \pm 2.78	9.15 \pm 0.47	4.65 \pm 0.22
2. 4wks control	30.0 \pm 1.68	12.4 \pm 0.83	27.4 \pm 1.32	1.68 \pm 0.03	46.3 \pm 2.80	6.84 \pm 0.35	3.59 \pm 0.11
3. 4wks training	30.2 \pm 1.58	16.9 \pm 0.96**	31.9 \pm 1.44*	1.75 \pm 0.05	56.2 \pm 3.52*	5.37 \pm 0.41**	2.68 \pm 0.16**
4. 8wks control	27.9 \pm 1.12	8.9 \pm 0.75	22.7 \pm 0.97	1.50 \pm 0.05	34.2 \pm 2.13	5.57 \pm 0.32	3.14 \pm 0.16
5. 8wks training	34.9 \pm 2.31*	13.7 \pm 1.62*	31.1 \pm 2.35**	1.53 \pm 0.04	48.1 \pm 4.26**	4.09 \pm 0.10	2.24 \pm 0.23**

Values are mean \pm SEM. sLS, single labeled surface; BS, bone surface; dLS, double labeled surface; MS, mineralizing surface; MAR, mineral apposition rate; BFR, bone formation rate; Oc.S, osteoclast surface; Oc.N, osteoclast number.

* p<0.05

**p<0.01: significantly different from the control group at the same point.

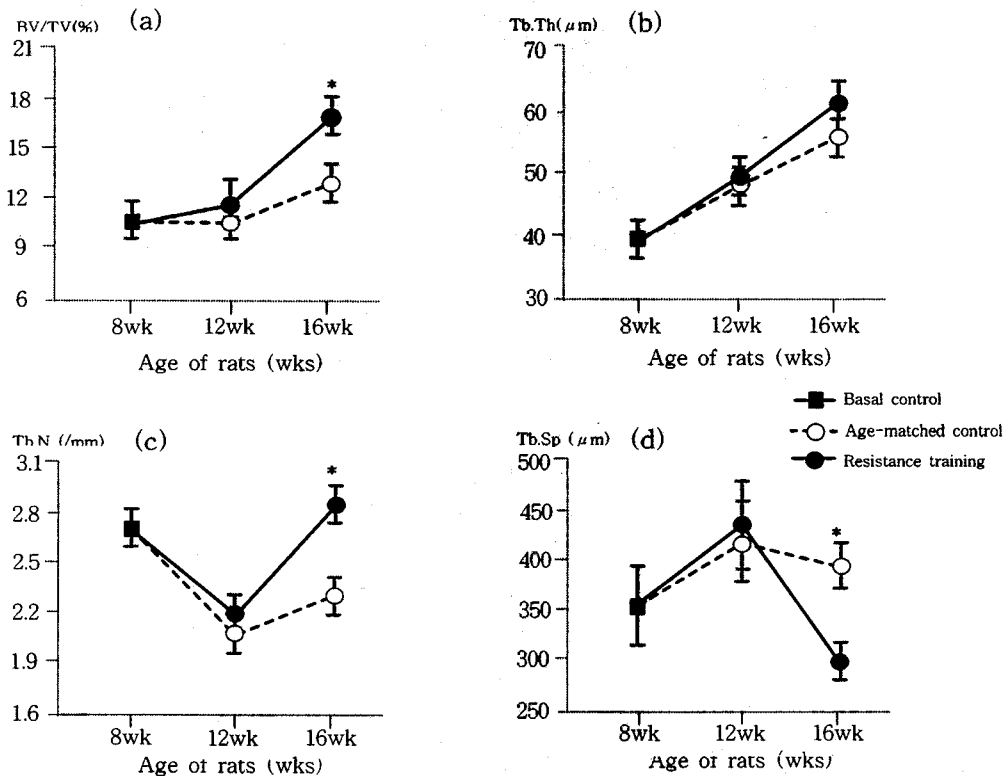


Fig. 2. Structural indices of the proximal tibial metaphysis in squat exercise rats. (a) Bone volume(BV/TV, %), (b) trabecular thickness(Tb.Th, μm), (c) trabecular number (Tb.N, /mm), (d) trabecular separation (Tb.Sp, μm). Values are mean \pm SEM.

* p<0.05 : significantly different from the control group at the same point.

Table 2. Structural indices of the midfemoral cortex in squat exercise rats.

Group	Bone mineral density (mg/cm ²)	Total cross-sectional area (mm ²)	Cortical bone area (mm ²)	Bone marrow area (mm ²)	Bone strength (N)
1. Basal control	724±38	10.2±0.28	5.01±0.14	5.23±0.32	124±3.8
2. 4wks control	733±24	11.4±0.23	5.85±0.08	5.60±0.18	198±4.5
3. 4wks training	738±40	11.9±0.28	6.12±0.06	5.75±0.26*	227±6.4*
4. 8wks control	774±28	12.4±0.21	6.79±0.06	5.58±0.21	228±4.2
5. 8wks training	788±36	13.5±0.19**	7.26±0.09*	6.21±0.16**	277±5.9**

Values are mean±SEM.

* p<0.05

**p<0.01: significantly different from the control group at the same point.

여기서 중요한 것은, 인간과는 달리 흰쥐의 피질골에서 일어나고 있는 골형성·골흡수의 대사양식은 성장기 골에서 일어나는 현상과 같은 modeling 현상을 보이고 있다는 것이다. 즉 피질골은 remodeling과 같이 골흡수에서 골형성으로의 연쇄작용은 일어나지 않으며 어떤 부위에서는 골형성만 일어나며, 또 다른 곳에서는 골흡수만 일어나고 있다는 것이다. 따라서 강한 역학 부하를 받은 골은 외막에 있어서의 골형성이 내막에 있어서의 골형성보다 항상 크게되며 결과적으로 외경을 크게 하고 골수공을 확대시켜 어느 일정한 방향으로 형태를 수정하게 된다. 이와 같은 형태의 변화가 골강도를 증대시키는데 있어서의 가장 큰 원인이 되는지에 관해서는 보다 많은 검토가 필요하다.

2. 수영(유산소) 운동과 골 변화

전술에서는 레지스턴스 운동과 같은 저항성운동에 의해 피질골은 주어진 운동의 량과 강도에 의존하여 내경과 외경을 확대하여 골강도가 증대되는 것이 증명되었다. 한편 레지스턴스 운동과는 달리 유산소 운동은 건강유지를 위한 운동으로 널리 이용되어 왔다. 대표적인 유산소 운동인 수영운동이 골에 미치는 영향에 관해서는 오래 전부터 연구되어 왔으며 레지스턴스 운동에 비하여 골량 및 골강도의 증대효과는 그다지 크지 않다고 보고되어 왔다. 또 수영운동은 골밀도의 증대에는 그다지 영향을 미치지 못하지만 전신의 근력을 강화시켜 골절방지에 유효한 운동으로 알려져 있으며, 특히 운동강도가 약하기 때문에 류마티스, 관절염 등이 있는 고령자에게 널리 이용되어 오고 있다.

한편 흰쥐에 수영운동을 부하하여 대퇴골의 골밀도가 증대되며 그것이 골형성의 증대에 기인한다고 보고되어 왔다. 그러나 골밀도의 증대를 가져오는 운동으로서 수영운동은 그다지 효과가 없다는 보고도 있으며 그 원인은 골변화를 유발할 정도의 강도에 미치지 못한다는 것이 지배적이다. 이와같은 결과를 종합하여 볼 때 수영운동의 강도, 시간 등에 의존하여 정도의 차이는 있으나 골은 특이적인 형태변화를 일으키며 골변화를 일으키기 위한 최소한의 운동강도가 필요하리라 사료된다. 또한 이와 같은 수영운동이 골형태 및 골강도에 미치는 영향에 관한 구체적인 연구는 되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 골에 미치는 운동부하가 비교적 약한 수영운동을 흰쥐에 부하하여 대퇴골의 골밀도, 골형태 및 골강도에 관하여 검토해 보았다.

수영운동은 흰쥐를 34~35℃의 물을 부은 특수 제작한 수조에 넣은 뒤 20min/day, 5day/week의 수영운동을 8주간 부하 하였다. 운동 중에는 Air compressor(Oil Free Bebicon, HITACHI, Japan)을 이용하여 25m/min의 수류를 만들었으며, 3.4~4.0g의 무게를 목에 달아줌으로서 운동강도를 점증시켰다.

수영운동에 의해 대퇴골의 최적 골밀도는 유의차를 보이지 않았다. 해면골의 骨梁 미세구조를 살펴본 결과 저강도의 수영운동에 의해 해면골은 骨梁幅, 骨梁數 모두 유의한 증가는 보이지 않았다. 단지 骨梁幅이 증가하는 경향을 보여 고강도의 레지스턴스 운동과는 다른 변화양상을 나타내었다(Fig. 3).

Table 3. Structural indices of the midfemoral cortex in swim exercise rats.

Group	Bone mineral density (mg/cm^2)	Total cross-sectional area (mm^2)	Cortical bone area (mm^2)	Bone marrow area (mm^2)	Bone strength (N)
1. Sedentary	668±27	12.4±1.75	5.9±0.35	5.9±0.54	188±8.9
2. Swimming	665±21	13.7±1.44	6.6±0.27*	5.6±0.36	191±7.1

Values are mean±SEM.

* p<0.05 : significantly different from the sedentary group.

수영운동에 의한 대퇴골의 체적 골밀도의 증대는 나타나지 않았다. 이것은 수영운동에 의하여 골밀도에 관계하는 골염량 및 골체적의 변동이 레지스틴스 운동과는 다른 양상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 골단면의 형태를 살펴보면 수영운동으로 피질골 면적은 유의하게 커졌으나 횡단면적 및 골수공 면적은 변하지 않았으며 골강도도 유의한 증대를 보이지 않았다. 이것은 피질골 면적이 커지더라도 골의 외경이 커지지 않으면 골강도는 증대하지 않는다는 것을 시사하고 있다. 따라서 수영운동에 의해 비교적 저강도의 부하를 받은 대퇴골의 피질골은 단면의 내경·외경을 확대할 정도는 아니나 그 부하의 량과 질에 대응하여 골형태를 변동하는 것이 시사되었다(Table 3).

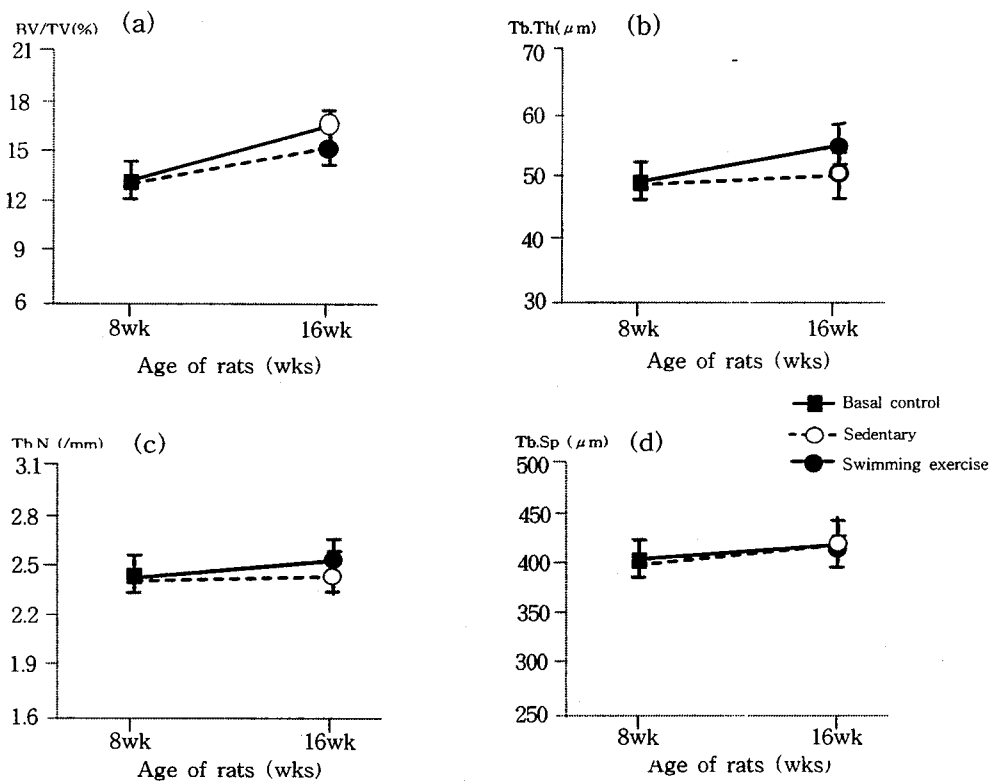


Fig. 3. Structural indices of the proximal tibial metaphysis in swimming exercise rats. (a) Bone volume(BV/TV, %), (b) trabecular thickness(Tb.Th, μm), (c) trabecular number (Tb.N, /mm), (d) trabecular separation (Tb.Sp, μm). Values are mean±SEM.

이와 같은 결과에서 알 수 있는 것은 하중운동인 레지스턴스 운동과 비 하중 운동인 수영운동 사이에는 골반응에 있어서 분명하게 상이점이 있다는 것이다. 즉 운동부하와 골대사의 사이에는 부하에 의해 주어지는 Strain 및 반응부위 사이에 특이한 관계가 존재한다고 할 수 있다. 따라서 골강도의 증대효과를 고려한다면 수영운동은 레지스턴스 운동에 비하여 유효하다고는 할 수 없지만 유산소 에너지 대사능력을 증대시키고 전신근력을 강화시킬 수 있으므로 고령자의 운동으로는 유효하다고 할 수 있다.

3. 클라이밍(저항성) 운동과 골 변화

최근 인구의 고령화와 함께 골다공증에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 이와 같은 현상은 사회의 고령화가 빨리 진행되고 있으며 그에 따른 고령자의 생활의 질(quality of life: QOL)을 향상시킬 필요가 있다는 것이 여러 가지 측면에서 요구되고 있다는 것을 반영하고 있다. 골다공증에 대한 대책으로서 가장 중요한 것은 골감소를 예방하는 것 보다 초기에 치료하는데 있다. 그 예방책의 하나로서 신체적 활동이 골형성을 촉진하여 골량을 증대시키며 그 중 골량을 증대시키는데는 레지스턴스 운동이 에어로빅 운동보다 유효하다는 것이 확인되었다. 앞에서 설명한 것과 같이 본 연구에서는 고강도로서 단시간에 부하를 점증시키는 레지스턴스 운동 모델을 확립하여 골량구조 및 형태의 변화 등 부하에 대한 반응이 런닝 운동과는 다르다는 것을 판명하였다. 그러나 이와 같은 사실에서 외부로부터 주어지는 운동부하가 강할수록 항상 골량이 증대하며 미세구조가 강화한다고 단순히 결론을 내리는 것은 어렵다. 즉 골은 주어진 부하가 강할수록 골밀도 등의 양적 변화보다는 형태·구조·골강도 등의 질적변화를 보여서 대응하고 있다. 이것은 완전히 증명된 것은 아니나 매우 흥미 있는 가설이라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 인공적 고강도가 아닌 레지스턴스 운동을 일상적으로 행할 수 있는 방법을 고려한 클라이밍 운동 방법을 개발하였으며 그에 따른 골의 양·질적 변화를 검토하였다.

클라이밍 운동은 흰쥐를 금속망으로 된 원통형의 tower cage(높이 2m, 직경20cm, 상부에 물병을 설치)에서 일상화시키는 방법으로 하였다. 예비사육 기간 중 모든 쥐를 tower cage에 이동하여 흰쥐가 적응 할 때까지 물병의 높이를 순차적으로 높여, 최종적으로는 2m의 높이에서 고정하여 자발적으로 클라이밍 운동을 부하하였다. 흰쥐를 24시간의 운동상황을 CCD camera를 이용하여 1주간씩 분석하였으며, 클라이밍의 거리(m)와 타워에 매달려 있는 동작을 포함한 운동시간(sec)을 측정하였다.

그 결과 클라이밍 운동에 의해 대퇴골의 골미네랄량은 유의하게 증가하였으나, 최적 골밀도의 증대는 보이지 않았다. 이것은 앞에서 설명한 고강도의 레지스턴스 운동에 의한 결과와 다른 양상을 나타낸다. 단 최적 골밀도가 증대경향을 보이고 있으며 비교적 저 강도의 클라이밍 운동에 의해서 골은 질적 변화와 함께 양적 변화도 보이는 것을 확인하였다. 따라서 저강도의 레지스턴스 운동이 대퇴골의 외경을 확대하여 골강도를 높이는 유효한 운동이라고 사료되며 내막의 골형성이 증가하는 런닝 운동과는 다른 형태변화를 보이는 것을 알 수 있다(Table 4).

Table 4. Structural indices of the midfemoral cortex in climbing exercise rats.

Group	Bone mineral density (mg/cm^2)	Total cross-sectional area (mm^2)	Cortical bone area (mm^2)	Bone marrow area (mm^2)	Bone strength (N)
1. Sedentary	782±22	14.7±1.02	8.7±0.35	6.2±0.47	187±6.2
2. Swimming	798±18	18.2±1.22*	11.5±0.30*	6.0±0.44	224±4.9*

Values are mean±SEM.

* p<0.05 : significantly different from the sedentary group.

한편 해면골의 강도와 골량 구조에 관해서 살펴보면, 클라이밍 운동에 의해 해면골에서는 骨梁幅의 증대와 함께 骨梁의 간격이 좁아져 그 결과 골강도를 증대시키는 대응을 보였다. 이러한 사실은 종래의 런닝 운동에 따른 결과와 일치하고 있으며 고강도의 레지스턴스 운동과는 틀린 骨梁구조의 변화를 보인다는 것을 의미한다. 따라서 운동부하를 받은 골은 그 부하의 종류와 강도의 차이에 의존하여 각기 다른 골대사기전을 동원하

는 등의 변화를 보이는 것을 알 수 있으며, 골은 역학부하의 강도에 대응하여 그 형태나 내부구조를 변화시킨다고 주장한 Wolff의 이론을 잘 뒷받침하는 결과를 보이고 있다(Fig. 4).

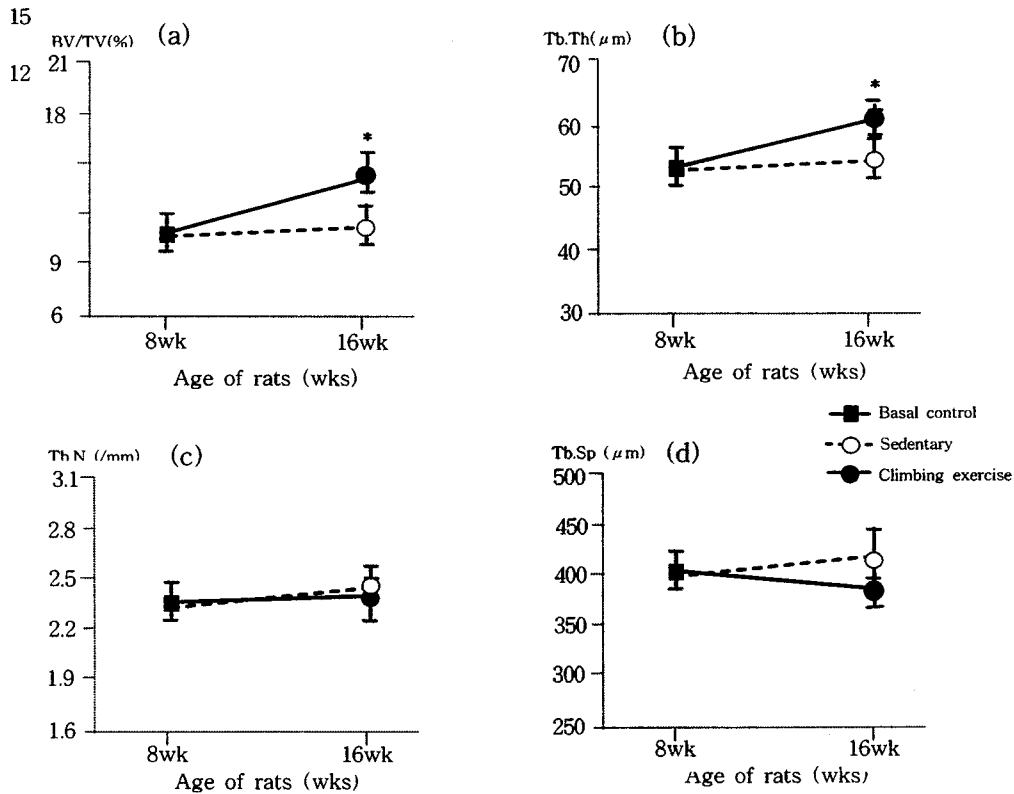


Fig. 4. Structural indices of the proximal tibial metaphysis in climbing exercise rats. (a) Bone volume(BV/TV, %), (b) trabecular thickness(Tb.Th, μm), (c) trabecular number (Tb.N, /mm), (d) trabecular separation (Tb.Sp, μm). Values are mean \pm SEM.

* $p < 0.05$: significantly different from the sedentary group at the same point.

III. 결론

본 연구에서는 운동부하의 타입, 강도, 시간 등의 조건이 다른 고강도 레지스턴스 운동, 유산소 운동인 수영 운동 및 저강도 레지스턴스 운동을 흰 쥐에 부하하여 골절방지·예방에 가장 중요한 요소인 골강도가 어떤 매카니즘에 의해 변화하는가를 검토하였다.

그 결과를 운동에 의한 골강도의 증가는 피질골단면의 외경확대에 의존하고 있으며 유산소 운동보다는 레지스턴스 운동이 보다 유효한 것이 판명되었다. 또한 해면골의 骨梁구조를 검토한 결과 고강도의 레지스턴스 운동에 의해 해면골은 骨梁幅(trabecular thickness: Tb.Th)의 증대보다도 骨梁數(trabecular number: Tb.N)를 증가시키는 등의 대응을 보여 골강도를 증대시키는 것이 판명되었으며, 저강도에서는 骨梁幅의 증대와 함께 骨梁의 간격이 좁아져 그 결과 골강도를 증대시키는 대응을 보였다. 또한 유산소 수영운동에 의해 해면골은 骨梁幅, 骨梁數 모두 유의한 증가는 보이지 않았다. 따라서 외부로부터의 운동부하에 의해 골은 그 부하의 종류, 강도, 지속시간 등에 의존하여 각기 다른 골대사기전을 동원하여 형태나 내부구조를 변화시키는 것이 판명되었다.

최근, 골밀도 및 골형태·구조에 대한 측정방법이 발달하여 운동부하에 의한 골변화를 보다 정확하게 평가하는 것이 가능하게 되었으며, 골량 및 골강도를 증대시키는데는 최적의 운동강도가 반드시 존재한다. 이 분야에서의 연구가 활발하게 진행된다면 골다공증의 예방 및 치료를 위한 운동모델을 작성하는 데에 크게 공헌할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- Ashizawa, N., K. Nonaka, S. Michikami, T. Mizuki, H. Amagai, K. Tokuyama, and M. Suzuki. Tomographic description of tennis-loaded radius: reciprocal relation between bone size and volumetric BMD. *Appl. Physiol.* 86: 1347-1351, 1999.
- Bhasin, S., D. J. Sartoris, L. Fellingham, M. D. Zlatkin, M. Andre, and D. Resnick. Three-dimensional quantitative CT of the proximal femur: relationship to vertebral trabecular bone density postmenopausal women. *Radiology* 167: 145-149, 1988.
- Booth, F. W., and E. W. Gould. Effect of training and disuse on connective tissue. *Exerc. Sports Sci. R* New York: Academic, 3:83-112, 1975.
- Bourrin, S., S. Palle, R. Pupier, L. Vico, and C. Alexandre. Effects of physical training on bone adaptation three zones of the rat tibia. *J. Bone Miner. Res.* 10: 1745-1752, 1995.
- Bourrin, S., C. Genty, S. Palle, C. Gharib, and C. Alexandre. Adverse effects of strenuous exercise densitometric and histomorphometric study in the rat. *J. Appl. Physiol.* 76: 1999-2005, 1994.
- Carter, D. R. Mechanical loading histories and cortical bone remodeling. *Calcif. Tissue Int.* 36: S19-S24, 1984.
- Chen, M. M., J. K. Yeh, J. F. Aloia, and J. M. Tierney. Exercise enhanced tibial cortical bone mass stimulated periosteal bone formation and suppressed endosteal bone resorption in female adult aged rat (abstract). *Am. J. Physiol.* 7: S249, 1992.
- Frost, H. M. Structural adaptations to mechanical usage (SATMU) : 1. Redefining Wolf's law: The bone modeling problem. *Anat. Rec.* 226: 403-413, 1990.
- Frost, H. M., and W. S. S. Jee. On the rat model of human osteopenias and osteoporosis. *Bone Miner.* 227-236, 1992.
- Karlsson, M. K., O. Johnell, and K. Obrant. Bone mineral density in weight lifters. *Calcif. Tissue Int* 212-215, 1993.
- Klitgaard, H. A model for quantitative strength training of hindlimb muscles of the rat. *J. Appl. Physiol* 1740-1745, 1988.
- 李相直, 鈴木正成 運動による骨の變化 : 動物モデルにおいて運動が骨に及ぼす働きについて. *THE BOINE* 1 35-38, 2000.
- Lee, S. J., A. Imai, T. Ishii, and M. Suzuki Effect of resistance exercise training on femur bone mineral density of growing male rats. *J. Exer. and Sports Physiol.* 7: 19-27, 2000.
- Lee, S. J., A. Imai, T. Ishii, K. Niikura, and M. Suzuki Effects of resistance exercise training on bone mineral density and mechanical strength in growing male rats. *J. Appl. Physiol.* (In press)
- Marcus, R. Exercise and the regulation of bone mass. *Arch. Intern. Med.* 149: 2170-2171, 1989.
- Matsuda, J. J., R. F. Zernicke, A. C. Vailas, A. V. Pedrini, A. Pedrini-Mille, and J. A. Maynard. Structural mechanical adaptation of immature bone to strenuous exercise. *J. Appl. Physiol.* 6: 2028-2034, 1986.
- Notomi T., S. J. Lee, H. Okimoto, T. Nakamura, and M. Suzuki Effects of resistance exercise training on mass, strength, and local turnover of lumbar vertebra and mid femur in growing rats. *Eur. J. Appl. Physiol.* 82 : 268-274, 2000.
- Pirnay, F., M. Bodeus, J. M. Crielaard, and P. Franchimont. Bone mineral content and physical activity. *In Sports Med.* 8: 331-335, 1987.
- Raab, D. M., E. L. Smith, T. D. Crenshaw, and D. P. Thomas. Bone mechanical properties after exercise

- training in young and old rats. *J. Appl. Physiol.* 68: 130-134, 1990.
- Taaffe, D. R., C. Snow-Harter, D. A. Connolly, T. L. Robinson, M. D. Brown, and R. Marcus. Different effect of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status in eumenorrheic athletes. *J. Bone Miner. Res.* 10: 586-593, 1995.
- Tamaki, T., S. Uchiyama, and S. Nakano. A weight-lifting exercise model for inducing hypertrophy of hindlimb muscles of rats. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: 881-886, 1992.
- Umemura, Y., T. Ishiko, T. Yamauchi, M. Kurono, and S. Mashiko. Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. *J. Bone Miner. Res.* 10: 550-557, 1997.
- Westerlind, K. C., J. D. Fluckey, S. E. Gordon, W. J. Kraemer, P. A. Farrell, & R. T. Turner. Effect of resistance training on cortical and cancellous bone in mature male rats. *J. Appl. Physiol.* 84: 459-466, 1998.
- Wolff J. *Das Gesetz der Transformation der Knochen*. A. Hirschwald, Berlin, 1892.
- Yeh, J. K., J. F. Aloia, J. M. Tierney, and S. Spritz. Effect of treadmill exercise on vertebral and tibial bone mineral content and bone mineral density in the aged adult rat: determined by dual energy X-ray absorptiometry. *Calcif. Tissue Int.* 52: 234-238, 1993.
- Yeh, J. K., M. M. Chen, J. F. Aloia, J. M. Tierney, and S. Spritz. Effect of treadmill exercise on the bone turnover of trabeculae in the proximal tibia of the aged adult rat (abstract). *J. Bone Miner. Res.* S257, 1992.