

8주간의 저항성 운동이 쥐 골격근에서 *Mustn1* mRNA 발현에 미치는 영향

한양대학교 체육과학연구소 운동생리학교실

오 승 렬

Effect of Resistance Exercise Training on *Mustn1* mRNA Expression in Rat Skeletal Muscle

Seung Lyul Oh, PhD

Research Institute for Sports Science, Hanyang University, Seoul, Korea

The aim of this investigation was to determine if resistance exercise improved musculoskeletal embryonic nuclear protein 1 (*Mustn1*) mRNA expression in skeletal muscle of rat. Thirty-two male Sprague-Dawley rats were separated into sedentary (control group, CON; n=16) and exercise-trained groups (resistance exercise group, REG; n=16). CON and REG subsequently were separated into 4 weeks group (4 weeks CON, 4 weeks REG) and 8 weeks group (8 weeks CON, 8 weeks REG). The rats in the resistance exercise group were trained to climb a 1-m vertical (85 degree incline) ladder with weights secured to their tail, and they climbed the ladder 10 times 3 days per week for 8 weeks progressively. After weeks of exercise, skeletal muscle was taken from the flexor halucis longus. After separating the total ribonucleic acid (RNA) of each group, quantitative polymerase chain reaction was used to analyze RNA quantitatively. After 4 weeks of resistance exercise, *Mustn1* mRNA expression increased significantly in REG compared to CON ($p < 0.001$). Additionally, there was a significant increase of *Mustn1* mRNA expression in 8 weeks REG compared to 8 weeks CON ($p < 0.01$). Interestingly, there was a significant difference in *Mustn1* mRNA between 4 weeks REG and 8 weeks REG ($p < 0.01$). In the REG, *Mustn1* mRNA increased by 3.7-fold and 2.1-fold relative to CON, respectively. In conclusion, the resistance training increased *Mustn1* mRNA expression in skeletal muscle of rat. This shows that the *Mustn1* mRNA expression gives positive effect on myogenesis and muscle regeneration in skeletal muscle of rat results from resistance ladder exercise.

Key Words: Resistance training, *Mustn1*

서 론

저항성 운동은 근골격계 발달을 위한 가장 효과적인 운동방법으로 알려져 있으며, 신경과 근육 사이의 상호작용을 증진시킬 수 있도록 신체를 자극시킨다. 저항성 운동으로 인한 근육의 커짐 현상을 근비대(muscle hypertrophy)라 부르며, 이는 주로 근섬유의 횡단면적 증가를 의미한다. 근비대의 진행은

접수: 2011-9-2 수정: 2011-11-1 승인: 2011-11-14

책임저자: 오 승 렬

133-791, 서울시 성동구 행당동

한양대학교 체육과학연구소 운동생리학교실

Tel: 02-2220-1502

E-mail: hyriss@hanyang.ac.kr

단순히 섬유의 횡단면적만을 증가시키는 것이 아니라 근원섬유 내의 수축 단백질인 액틴(actin)과 마이오신 세사(myosin filament)의 합성 증가, 근섬유 내의 근원섬유 숫자의 증가와 관련되며, 결국 근비대는 근력의 향상을 유도하게 된다¹⁾. 즉, 규칙적인 저항성 운동으로 인한 운동단위 동원의 증가와 근비대 현상이 일어나게 되면 근세포의 성장 및 근력의 발달을 효과적으로 촉진시키게 되고, 특히 저항성 운동은 성장호르몬의 분비를 유발하여 세포막을 통한 아미노산의 수송을 촉진하고 핵 내 전사(transcription) 작용에 영향을 주어 messenger RNA (mRNA)의 양을 증가시킴으로써 단백질의 합성을 촉진시키게 된다^{2,3)}.

한편 musculoskeletal embryonic nuclear protein 1 (*Mustn1*)은 골격근, 뼈, 건을 제외한 대부분의 성인 조직에서는 비활성화되지만, 정상 성인 골격근과 건에서 압도적으로 높은 발현을 보이기 때문에 musculoskeletal-specific gene으로 제시되어 왔다⁴⁾. 특히 골 재형성 기간과 배아발생(embryogenesis) 시 골, 연골, 골격근 계통(i.e., preosteoblast, proliferation condrocyte, myoblast and mesenchymal cell)에서 *Mustn1*의 활성도는 크게 증가하는 것으로 나타났다^{5,6)}. Lombardo 등⁷⁾은 생쥐를 골절시킨 후 callus에서 골 재형성 과정에 관여하는 유전자를 조사하였는데, *Mustn1*이 골절 3일째 22배, 5일째 54배의 높은 증가를 보인 것으로 보고하였으며, Hadjiargyrou 등⁸⁾도 transcriptional profiling 연구에서 *Mustn1*을 골 재형성 관여하는 후보 유전자로 보고하였다. 이렇듯 *Mustn1*은 골과 연골에서 재형성에 관여를 하며, 골격근에서 발현의 증가를 보이지만 그 기능에 대해서는 아직 알려져 있지 않다⁵⁾. 그러나 최근 Liu⁶⁾는 *in vitro* myogenesis model (C2C12 cells myogenic differentiation)에서 *Mustn1* 발현을 확인하고, *Mustn1*을 골격근계 연구에 대한 새로운 marker로 제시하였다. 이와 같이 골 재형성과 배아발생 및 연골재생 등과 같은 골관절계에 높은 관여를 보이는 *Mustn1* 유전자는 단백질 합성과 골격근 형성과 같은 기능에 대해 명확하게 밝혀진 바는 없으나 저항성 운동 시 단백질의 합성을 높이고 근육형성을 유도하는 등 골격근에 긍정적인 효과를 보인다는 연구 보고⁵⁾가 발표된 바 있다. 그럼에도 불구하고 규칙적인 저항성 운동에 따른 *Mustn1* 발현에 대한 연구가 여전히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 흰쥐를 대상으로 8주간의 사다리를 이용한 점증적 저항성 운동을 통한 근비대의 유발 후 골격근에서의 *Mustn1* mRNA의 발현을 분석하고자 하였다.

연구 방법

1. 연구대상

본 연구 대상은 10주령의 Sprague-Dawley계 수컷 흰쥐(Semtaiko Inc., Osan, Korea)로 최초 32주를 분양 받은 후 통제집단(control group, CON; n=16)과 저항성 운동집단(resistance exercise group, REG; n=16)으로 구분하였다. 그리고 이들 집단은 다시 4주차와 8주차 집단으로 구분하여 총 4집단으로 구성하였다: 1) 4주차 통제집단(4 weeks CON; n=8), 2) 8주차 통제집단(8 weeks CON; n=8), 3) 4주차 운동집단(4 weeks REG; n=8), 4) 8주차 운동집단(8 weeks REG; n=8). 모든 동물에게 일주일간의 식이 및 실험실 환경 적응기간을 부여한 후, 일주일간의 추가 운동 적응기간을 동일한 시간대에 제공하였다.

2. 실험동물 처치

1) 실험동물 사육

실험동물은 S시 소재 H대학교 의과대학 동물실험실에서 스틸 게이지(steel cage)를 이용하여 3마리씩 사육하였다. 사육실의 온도는 22°C±1°C, 습도는 상대습도의 50%±2%로 일정하도록 조절하였으며, 12시간(08:00-20:00)을 주기로 명암을 조절하였다. 또한 실험동물에게는 실험기간 동안 시판되는 고형생각(단백질 22.5%, 지방 3.5%, 저섬유 7.0%, 회분 9.0%, 칼슘 0.7%, 인 0.5%; Samyangfeed, Seoul, Korea)와 고압 증기로 멸균한 물을 충분히 공급하였다.

2) 체중 및 골격근의 무게 측정

주차별 체중의 변화는 전자저울(mettler instrument AG CH-8606, Greifensee, Switzerland)을 이용하여 측정하였으며, 골격근의 무게는 최대한 기시점과 부착점에 가깝게 절단하여 적출하고, 지방조직과 결합조직을 제거한 후 정밀계량기(Sartorius, Goettingen, Germany)를 이용하여 계량하였다. 골격근의 무게는 절대적인 무게(mg)와 함께 근육 적출 직전 체중에 대한 골격근의 상대적인 무게 비율(mg/g)을 산출하였다⁹⁾.

3) 시료 채취

분석을 위한 시료 채취는 운동 4주와 8주 후, 총 2회에 걸쳐 실시하였고, 저항성 운동은 조직 채취 24시간 전에, 고형생각은 조직 채취 당일 아침에 중단하여 4시간의 공복을 유지

Table 1. Resistance exercise program

Condition	Reps	Set	Load	Rest (min)	Duration (min)	Frequency (day/wk)	Period (wk)
Adaptation period	Max. 3	1	Weight bearing	1	10	4	1
Exercise period	Max. 10	1	50%/body weight, every trial+15%	2	30	3	8

한 채 물만 공급하였다. 조직 채취는 동물용 마취제인 Zoletil (50 mg/kg; Virbac, Carros, France)과 Rompun (5-10 mg/kg; Bayer, Seoul, Korea)을 5:1의 비율로 혼합하여 복강 내 주입시켜 마취 시킨 후 사다리 운동에서 주동근¹⁰⁻¹⁴⁾으로 작용하는 장무지굴근(flexor hallucis longus)의 양측 동일한 부위를 적출하였다.

3. 저항성 운동 방법

일주일간의 환경 적응기간과 일주일간의 추가 운동 적응기간을 가진 운동 집단의 12주령 동물은 자체 제작한 쥐 전용 사다리(100×12 cm, 2 cm grid, 85° incline)를 이용하여 8주간의 저항성 운동을 실시하였다. 저항성 운동 프로그램은 Table 1과 같다.

저항성 운동 방법은 중량을 달고 사다리를 오르는 저항성 사다리 운동 방법을 사용하였다¹⁴⁾. 첫 일주일의 운동 적응기간으로 동일 시간대에 부하 없이 사다리를 오르는 훈련에 적응시킨 다음, 부하를 달고 높이 100 cm와 경사도 85%의 자체 제작된 사다리를 오르는 운동을 주당 3일, 1일 10회씩 점진적인 과부하 하에서 실시하였으며, 모든 운동은 최대 12회를 넘기지 않도록 통제하였다. 저항성 운동 부하는 최대중량의 50% (최초 체중의 50%)부터 시작하여 매회마다 처음 지정된 무게에서 15%씩 부하를 증가시켰고, 반복 간 2분간의 휴식 시간을 가졌다. 세트가 끝나는 시점인 10번째 중량을 최대중량으로 기록하였다. 그러나 세트가 끝나기 전에 운동 수행이 불가능하게 되면 바로 전 시점의 중량으로 세트를 완료하였으며, 더 이상 운동을 할 수 없게 되기 전 시점의 중량을 최대중량으로 기록하였다.

4. 분자 생화학적 분석방법

1) Total RNA 분리

적출한 골격근을 최대한 빠른 시간에 액화질소(liquid nitrogen)로 동결시킨 후 BioPulverizer (Biospec 59013N, Bartlesville, OK, USA)를 이용하여 최대한 분쇄시켰다. 조직 50-100 mg당 1 mL의 Tri Reagent (Molecular Research Center, Inc., Cincinnati, OH, USA)를 첨가하여 균질화 시켰다. Chloro-

form (Sigma, St. Louis, MO, USA)과 isopropanol (Sigma), 75% ethanol을 이용한 RNA 추출, 침전, 세척 과정을 거친 후 건조된 pellet에 nuclease-free water 30 μ L를 첨가하여 total RNA를 분리한 후 Spectrophotometer (NanoDrop, Wilmington, DE, USA)를 이용하여 흡광도(absorbance)와 정제도(purity)를 측정하였다. 또한 2% agarose gel를 이용해서 전기영동을 실시하고, UV transilluminator (Bio Rad, USA)를 통해서 total RNA의 quality를 측정하였다.

2) Real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR)

RNA를 정량 분석하기 위하여 SYBR Green을 이용한 qPCR을 실시하였다. 유전자의 최적의 primer set는 하버드 대학의 primerBank에서 탐색하여 합성하였으며, 합성한 primer set와 cDNA 샘플을 SYBR Green supermix와 혼합하여 iCycler를 이용한 qPCR을 실시하고 정량 분석하였다. qPCR data는 house-keeping gene인 *Gapdh*와 비교한 상대적인 수치($dCt = \text{gene} - \text{Gapdh}$)를 이용하여 normalization한 *Gapdh* 대비 상대적인 유전자 발현의 비율(2^{n-dCt})을 의미한다. 구체적인 qPCR 방법은 iQ SYBR Green Supermix (Bio Rad)를 이용하여 total volume이 50 μ L (iQ SYBR Green Supermix, Primer 1, Primer 2, Sterile water, DNA template)가 되게 만들고, qPCR 반응 조건을 denaturation (95°C, 40s), annealing (58°C, 40s), extension (70°C, 40s)으로 설정하여 실시하였다. 유전자의 primer sequence는 *Gapdh* sense; F 5'-GGGTGTGAACACGAGAAAT-3', antisense; R 5'-ATGGCATGGACTGTGGTCAT-3' (146 bp), *Mustn1* sense; F 5'-GGGAGTCTGTCCAAGAACCA-3', antisense; R 5'-TTGGCTTCTCGAAGACTGT-3' (137 bp)이다.

5. 자료처리

모든 측정치에 대한 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)를 산출하였으며, 운동집단과 통제집단의 체중, 골격근 무게의 변화, *Mustn1* mRNA 발현의 변화를 분석하기 위해서 대응표본 T-검정(paired samples t-test)을 적용하였다. 이상 결과 자료에 대한 통계치 검증은 SPSS ver. 18.0 (SPSS Inc.,

Chicago, IL, USA) 프로그램을 이용하였고, 모든 통계치의 유의수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

결 과

1. 체중과 골격근 무게의 변화

주차별 체중의 변화를 살펴보면, Fig. 1과 같이 최초 집단별 체중의 유의한 차이는 보이지 않았고(4 weeks CON, 393.5 ± 14.0 g; 4 weeks REG, 394.7 ± 17.3 g; 8 weeks CON, 397.3 g; 8 weeks REG, 388.0 ± 9.7 g; $p > 0.05$), 4주차 집단군과 8주차 집단군의 통제집단과 저항성 운동집단은 서로 비슷한 양상을 보이며 증가하였다. 그리고 4주차 집단(CON, 484.2 ± 22.6 g; REG, 458.9 ± 17.9 g)에서는 운동집단에 비하여 통제집단에서 더 높은 체중의 증가를 보였으나, 집단간 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 그러나 8주차 집단(CON, 532.8 ± 17.2 g; REG, 462.7 ± 15.0 g; $p < 0.01$)에서는 운동집단이 통제집단에 비해 유의한 체중의 감소가 나타난 것으로 나타났다(Fig. 1).

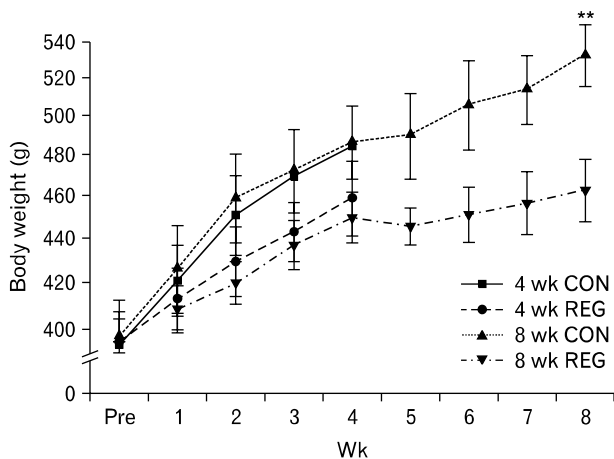


Fig. 1. Changes of the body weight. **Significant difference between control group (CON) and resistance exercise group (REG). Significant at $**p < 0.01$.

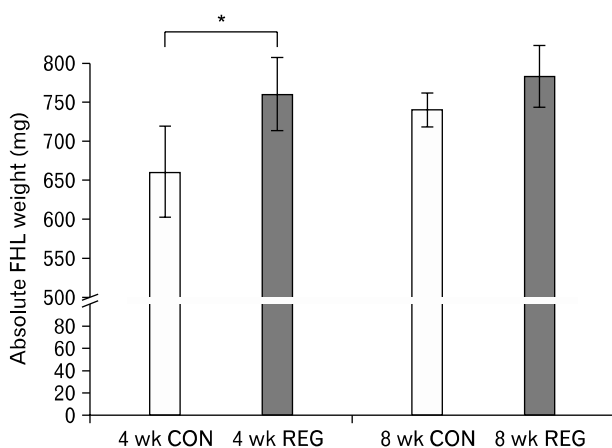


Fig. 2. Absolute flexor halucis longus (FHL) weight. *Significant difference between control group (CON) and resistance exercise group (REG). Significant at $*p < 0.05$.

458.9 \pm 17.9 g)에서는 운동집단에 비하여 통제집단에서 더 높은 체중의 증가를 보였으나, 집단간 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 그러나 8주차 집단(CON, 532.8 ± 17.2 g; REG, 462.7 ± 15.0 g; $p < 0.01$)에서는 운동집단이 통제집단에 비해 유의한 체중의 감소가 나타난 것으로 나타났다(Fig. 1).

주차별 골격근 무게의 변화를 살펴보면 전체적으로 증가하는 양상을 보이고 있다(Figs. 2, 3). 절대적인 골격근의 무게는 저항성 운동에 따라 증가하는 양상을 보였고, 4주차 집단군에서 유의한 차이가 나타났다(CON, 660 ± 58.3 mg < REG, 760 ± 47.0 mg; $p < 0.05$). 반면에 상대적인 골격근의 무게(mg/g)는 4주차 집단군(CON, 1.33 ± 0.1 < REG, 1.7 ± 0.1 ; $p < 0.01$)과 8주차 집단군(CON, 1.4 ± 0.1 < REG, 1.7 ± 0.1 ; $p < 0.01$) 모두에서 유의한 차이를 보였다. 따라서 8주간의 저항성 사다리 운동은 골격근 무게를 증가시키는 것으로 나타났다.

2. *Mustn1* mRNA 발현의 변화

쥐 전용 사다리를 이용한 저항성 사다리 운동은 쥐 골격근에서 *Mustn1* mRNA 발현을 유의하게 증가시키는 것으로 나타났다(Fig. 4). 4주차 운동집단(CON, 0.088 ± 0.006 ; REG, 0.330 ± 0.029 ; $p < 0.001$)과 8주차 운동집단(CON, 0.109 ± 0.027 ; REG, 0.234 ± 0.0033 ; $p < 0.01$) 모두 통제집단에 비해 *Mustn1* mRNA 발현의 유의한 증가를 보였고, 4주차 운동집단(4 weeks REG)이 8주차 운동집단(8 weeks REG) 보다 *Mustn1* mRNA 발현의 유의한 증가가 나타났다($p < 0.01$).

또한 Fig. 5는 통제집단의 대한 *Mustn1* mRNA 발현의 비율을 의미하는데, 4주차 운동집단은 4주차 통제집단에 비해 약 3.7배, 8주차 운동집단은 8주차 통제집단에 비해 약 2.1배의 *Mustn1* mRNA 발현이 증가한 것으로 나타났다. 즉, 저항성

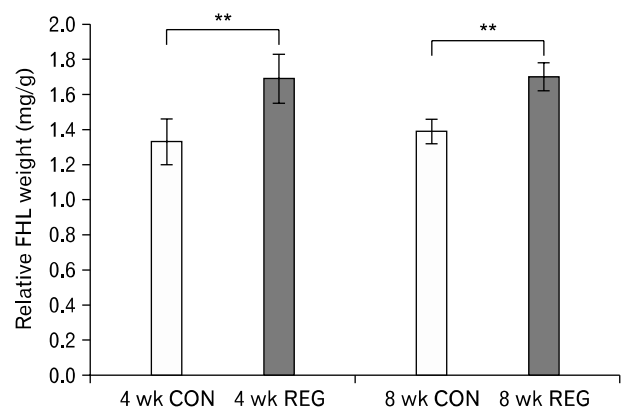


Fig. 3. Relative flexor halucis longus (FHL) weight. **Significant difference between control groups (CON) and resistance exercise groups (REG). Significant at $**p < 0.01$.

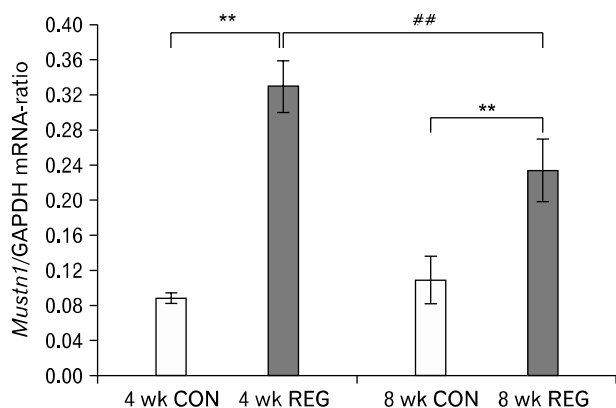


Fig. 4. Musculoskeletal embryonic nuclear protein 1 (*Mustn1*) messenger ribonucleic acid (mRNA) expression. *GAPDH*: glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase. **Significant difference between control group (CON) and resistance exercise group (REG). ##Significant difference between 4 weeks REG and 8 weeks REG. Significant at ** $p < 0.01$, ## $p < 0.01$.

운동은 *Mustn1* mRNA 발현을 유의하게 증가시키는데, 4주간의 운동이 8주간의 운동 보다 더 높은 발현의 증가를 보이는 것으로 나타났다.

고 찰

*Mustn1*은 골 성장과 재생⁶⁾뿐만 아니라 연골형성¹⁵⁾과 관련된 musculoskeletal-specific gene이다. 특히 *Mustn1* 유전자는 골격근과 건, 연골에서 높은 발현을 보임에도 불구하고 대부분의 *Mustn1* 연구들은 골 재형성의 효과만을 보고하고 있다. 이에 본 연구자는 흰쥐를 대상으로 8주간의 저항성 사다리 운동을 실시하여 근비대를 유도한 후¹⁰⁾, 골격근에서 4주차와 8주차별 *Mustn1* mRNA 발현을 분석하여 골격근에서 *Mustn1* 유전자의 동화작용 효과를 제안하고자 하였다. 그 결과 본 연구의 주요 변인인 *Mustn1* 유전자의 발현은 저항성 운동에 따라 유의하게 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 통제집단과 비교하였을 때, 저항성 4주차 집단(3.7배)이 8주차 집단(2.1배)보다 더 높은 발현의 증가를 보였고, 두 집단간 *Mustn1* 유전자의 유의한 발현의 차이가 나타났다. 그리고 주차별 체중의 변화를 살펴보면 모든 집단에서 주차별로 체중이 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 4주차 운동집단과 8주차 운동집단 모두 통제집단에 비하여 체중의 증가의 폭이 더 낮은 양상을 보였으며, 특히 8주간의 저항성 운동은 통제집단에 비하여 체중의 증가 폭이 유의하게 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과로 체중에 대한 골격근 무게의 비율인 상대적인 골격근의

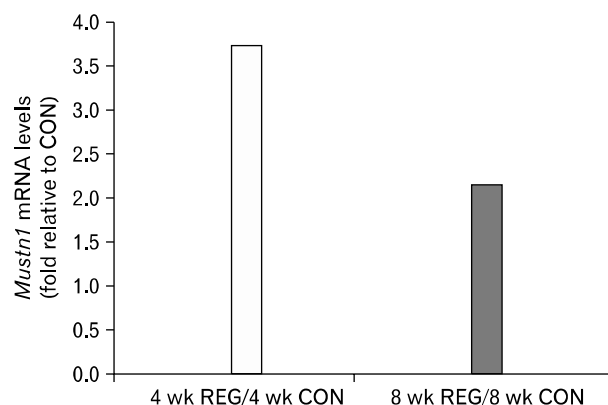


Fig. 5. Musculoskeletal embryonic nuclear protein 1 (*Mustn1*) mRNA expression in contrasts with 4 weeks control groups (CON) and 8 weeks CON.

무게는 저항성 운동집단에서 유의하게 높게 나타난 것으로 생각된다. 그러나 저항성 운동을 실시한 결과 절대적인 골격근의 무게는 모든 운동집단에서 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 4주간의 저항성 운동은 골격근의 무게를 유의하게 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 적절한 과부하의 저항성 운동으로 4주차까지는 근비대가 이루어졌으나, 이에 비하여 4주차 이후에는 적절한 과부하가 이루어지지 않은 것으로 생각된다.

*Mustn1*은 배아발생(embryogenesis) 동안 높은 발현을 나타내지만 골격근과 건을 제외한 정상 성인의 대부분의 조직에서는 비활성화 된다. Postfracture (PF) 연구에서 *Mustn1*은 뼈의 재생 과정에서 신속하게 발현이 증가하는 것으로 나타났다⁷⁾. 치유골(healing callus)에서 *Mustn1* mRNA 발현은 PF 3일째 22배, 5일째 54배의 현저한 증가를 나타내었다⁷⁾. 이러한 결과는 *Mustn1*이 조골세포(osteoblast)와 연골세포(chondrocyte)에 작용할 뿐만 아니라, 근골격계 성장과 재생에 주요한 역할을 하는 후보 유전자임을 뒷받침한다⁵⁾. 실제로 저항성 운동 후 근육과 건에서 근원섬유와 콜라겐 단백질은 비슷한 양상을 보이며 증가하기 때문에⁵⁾, *Mustn1*은 골에서 뿐만 아니라 골격근에서도 동화작용의 역할을 할 것으로 생각된다.

한편 상자(height=0.55 cm)를 이용한 단발성 stepping up & down 운동(체중의 25% 중량 옮기기)은 대퇴사두근에서 *Mustn1* 유전자 발현의 증가를 유도하였고, 특히 회복 24시간에 원심성 수축이 구심성 수축 보다 4.1배의 *Mustn1* 유전자의 발현 증가를 제시하였다⁵⁾. 이는 *Mustn1* 유전자가 근육 성장뿐만 아니라 원심성 수축 시 근손상에 대한 치료 과정에서 발현이 증가되는 것으로 보여진다. 최근 연구를 살펴보면 *Mustn1* 유전자가 근원세포 분화 과정에서 발현이 증가될 뿐만 아니라 근육형성 전구 세포(myogenic progenitor cell) 기능에 중요한

역할을 하며, 골격근의 성장과 비대, 그리고 재생을 위한 필수적인 작용을 하는 것으로 보고되었다¹⁶⁾. 또한 Liu 등¹⁶⁾은 *Mustn1* 유전자의 결핍은 근육발생의 결합(fusion)과 분화를 저해시켜 그 결과 근육발생(myogenesis)을 억제하는 것으로 보고하였다. Zheng 등¹⁷⁾은 *Mustn1*을 골격근 성장을 위한 중요한 유전자로 제시하였으며, Callipyge 유전자의 돌연변이 양에서도 근비대 동안에 *Mustn1* 유전자가 증가하는 것으로 보고되었다¹⁸⁾. 이러한 연구결과들은 규칙적인 저항성 운동으로 인한 근비대에 따른 *Mustn1* mRNA 발현의 증가를 보인 본 연구 결과를 뒷받침한다. 즉 골격근의 성장을 유도하는 저항성 운동은 *Mustn1* 유전자의 발현을 증가시키는 것으로 생각된다.

결론적으로 규칙적인 저항성 운동에 따른 근비대는 쥐 골격근에서 *Mustn1* mRNA 발현을 증가시켰으며, 이는 근원세포 분화 과정에서뿐만 아니라 실제 운동으로 유도된 근비대 과정에서도 *Mustn1* 유전자가 근골격계의 발생과 재생에 관여함을 시사한다.

참 고 문 헌

1. Baechle TR, Earle RW. Essentials of strength training and conditioning. 2nd ed. Champaign (IL): Human Kinetics; 2000.
2. Fry AC, Allemeier CA, Staron RS. Correlation between percentage fiber type area and myosin heavy chain content in human skeletal muscle. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1994;68:246-51.
3. Kraemer WJ. Endocrine responses to resistance exercise. Med Sci Sports Exerc 1988;20:S152-7.
4. Liu C, Hadjiargyrou M. Identification and characterization of the Mustang promoter: regulation by AP-1 during myogenic differentiation. Bone 2006;39:815-24.
5. Kostek MC, Chen YW, Cuthbertson DJ, et al. Gene expression responses over 24 h to lengthening and shortening contractions in human muscle: major changes in CSRP3, MUSTN1, SIX1, and FBXO32. Physiol Genomics 2007;31:42-52.
6. Liu C. Functional characterization of Mustn1 during skeletal myogenesis [dissertation]. New York (NY): Stony Brook Univ.; 2007.
7. Lombardo F, Komatsu D, Hadjiargyrou M. Molecular cloning and characterization of Mustang, a novel nuclear protein expressed during skeletal development and regeneration. FASEB J 2004;18:52-61.
8. Hadjiargyrou M, Lombardo F, Zhao S, et al. Transcriptional profiling of bone regeneration. Insight into the molecular complexity of wound repair. J Biol Chem 2002;277:30177-82.
9. Kobayashi J, Mackinnon SE, Watanabe O, et al. The effect of duration of muscle denervation on functional recovery in the rat model. Muscle Nerve 1997;20:858-66.
10. Hornberger TA Jr, Farrar RP. Physiological hypertrophy of the FHL muscle following 8 weeks of progressive resistance exercise in the rat. Can J Appl Physiol 2004;29:16-31.
11. Jung DM. Effects of resistance and hGH injection on muscle function and related gene expression of aged SD rats [dissertation]. Seoul: Graduate School, Kyung Hee Univ.; 2006.
12. Kwon YE, Chung DM, Park H. Effects of the chronic application of hGH and climbing to the aged female SD rats on their morphological and enzymological properties especially in FHL. Korean J Exerc Nutr 2004;8:37-42.
13. Lee S, Barton ER, Sweeney HL, Farrar RP. Viral expression of insulin-like growth factor-I enhances muscle hypertrophy in resistance-trained rats. J Appl Physiol 2004;96:1097-104.
14. Oh SL, Hwang IG, Oh SD. Effects of regular resistance exercise on IGF-1 and UCP-3 mRNA expression in the rats. J Korea Sports Med 2009;27:192-9.
15. Gersch RP, Hadjiargyrou M. Mustn1 is expressed during chondrogenesis and is necessary for chondrocyte proliferation and differentiation in vitro. Bone 2009;45:330-8.
16. Liu C, Gersch RP, Hawke TJ, Hadjiargyrou M. Silencing of Mustn1 inhibits myogenic fusion and differentiation. Am J Physiol Cell Physiol 2010;298:C1100-8.
17. Zheng Q, Zhang Y, Chen Y, Yang N, Wang XJ, Zhu D. Systematic identification of genes involved in divergent skeletal muscle growth rates of broiler and layer chickens. BMC Genomics 2009;10:87.
18. Vuocolo T, Byrne K, White J, et al. Identification of a gene network contributing to hypertrophy in callipyge skeletal muscle. Physiol Genomics 2007;28:253-72.