

일회성 등속성 운동이 심장 자율신경 조절 및 근속성에 미치는 영향

박수경¹ · 박시은^{2*}

¹우송대학교 보건복지대학 물리치료학과 교수, ^{2*}구미대학교 물리치료과 교수

Effect of Transient Isokinetic Exercise on Cardiac Autonomic Nervous Modulation and Muscle Properties

Soo-Kyoung Park, PT, Ph.D¹ · Si-Eun Park, PT, Ph.D^{2*}

¹*Dept. of Physical Therapy, College of Health and Welfare, Woosong University, Professor*

^{2*}*Dept. of Physical Therapy, Gumi University, Professor*

Abstract

Purpose : The aim of this study was to identify the influence of transient isokinetic exercise on cardiac autonomic modulation and muscle properties in healthy male subjects.

Methods : Twenty-eight healthy males underwent isokinetic exercise of both knee joints using a Biodex systems 3 isokinetic dynamometer with an angular velocity of 60 °/sec. The changes in activity of the autonomic nervous system, as determined by heart rate variability (HRV), and in muscle properties were evaluated at three times: pre-exercise, immediately post-exercise, and 10 min post-exercise.

Results : The time domain analysis of HRV revealed significant changes in the beat count and mean and minimal heart rate (HR) measured at pre-exercise, immediately post-exercise, and 10 min post-exercise ($p < .001$). The beat count and mean HR were markedly increased immediately post-exercise compared to pre-exercise, but then significantly decreased at 10 min post-exercise ($p < .001$). All parameters of the frequency domain were significantly altered by isokinetic exercise ($p < .01$). The low frequency/high frequency (LF/HF) ratio, as an index for the sympathovagal balance, was elevated by exercise and remained at a similarly high level at 10 min post-exercise ($p < .01$). The muscle properties of rectus femoris were changed as follows: Muscle tone and stiffness were significantly increased between pre-exercise and immediately post-exercise ($p < .001$), and between pre-exercise and at 10 min post-exercise ($p < .001$). Whereas, the elasticity showed no significant change.

Conclusion : These results demonstrated that transient isokinetic exercise could induce changes in cardiac autonomic control and muscle properties. In particular, up-regulation of LF/HF ratio after exercise signifies thus enhanced sympathetic modulation by isokinetic exercise. Therefore, it is needed to understand the cardiovascular risks that may arise during isokinetic exercise for providing the basic evidence to establish appropriate isokinetic exercise protocols as effective rehabilitation exercises.

Key Words : autonomic nervous system, isokinetic exercise, muscle properties, rehabilitation

*교신저자 : 박시은, si-yaa@hanmail.net

제출일 : 2023년 8월 8일 | 수정일 : 2023년 9월 14일 | 게재승인일 : 2023년 9월 22일

I. 서 론

저항운동은 주로 근육뼈대계 기능 향상 및 재활의 목적으로 이용되어왔으나(Lee, 2015), 최근 심혈관계에 대한 보호 효과가 있음이 밝혀짐에 따라 심혈관질환자의 재활 운동프로그램에 저항운동을 주요소로 포함시킬 것이 권장되고 있다(Fan 등, 2021; Hammill 등, 2010). 특히, 등속성 운동(isokinetic exercise)은 장비를 사용하여 정해진 속도로 근수축 운동을 실시하는 것으로, 운동을 통해 근육의 길이가 짧아짐으로써 최대 장력을 증가시키는 운동법이다(Kim, 2016). 이러한 등속성 운동은 기존의 운동 방법인 등척성 및 등장성 운동의 단점을 보완할 뿐만 아니라, 움직임 동안 근육이 동일한 최대 부하를 받으며 운동할 수 있으므로 근력 향상에 더욱 효과적이라고 보고되고 있다(Ryu & Jung, 2010). 최근에는 운동선수 뿐만 아니라 일반인들에게도 진단 및 재활 운동 처방의 목적으로 등속성 운동을 광범위하게 이용하고 있으므로, 등속성 운동을 보다 안전하고 효율적으로 적용하기 위해서 등속성 운동에 의해 유발되는 인체의 운동생리학적 변화 및 심장의 조절 반응 등을 다방면으로 분석할 필요가 있다.

일반적으로 운동 시 또는 운동 후에는 심박수 및 혈압 상승과 같은 심혈관계통의 변화가 나타나는데, 특히 운동으로 인한 심박수(heart rate; HR) 증가는 가장 대표적인 운동 반응 중 하나이다. 심박수는 교감신경과 부교감신경(미주신경)의 지속적인 상호작용에 의해 조절되는데, 운동 시작 시에는 교감신경에서 카테콜아민을 분비하여 심박수를 증가시키며 운동 종료 시에는 부교감신경에서 아세틸콜린을 분비하여 심박수를 감소시킨다(Kingsley & Figueroa, 2016). 이러한 심박수의 생리학적 변동 정도를 정량화한 것이 심박변이도(heart rate variability; HRV)이다(Li 등, 2022; Liu 등, 2022; Nenna 등, 2017). 즉, 심박변이도는 심박수의 변동 정도를 시간 및 주파수로 정량화한 것으로 자율신경계의 양상을 평가하는 유용한 지표이며, 수 분 동안의 단기적 기록만으로도 교감신경과 부교감신경의 상호작용을 평가할 수 있다(Grässler 등, 2021). 이 외에도 운동 후 심박수의 회복율은 주로 부교감신경의 빠른 활성화 정도를 나타내

기 때문에 심박수 회복을 또한 심장의 자율신경계의 조절 기능을 알아볼 수 있는 지표로 사용될 수 있으며, 유산소성 체력과 심혈관계통과도 연관성이 있다(Byun 등, 2016).

심박변이도는 적용되는 운동 방법 및 운동 강도에 따라 심장에서 발생하는 생리적 변화를 측정할 수 있다. Machado-Vidotti 등(2014)은 저항운동 시 부하에 따라 심장의 자율신경성 조절에 변화가 나타난다고 하였는데, 벤치 프레스(bench press)와 레그 프레스(leg press) 운동 시 부하를 1RM(one-repetition maximum)의 10 %에서 30 %까지 적용했을 때, 두 운동 모두 1RM의 30 %에서 부교감신경의 활성도를 나타내는 RMSSD가 감소하고, 교감신경의 항진을 의미하는 LF와 LF/HF ratio가 증가함을 보고하였다. 특히 이러한 변화는 팔 운동인 벤치 프레스 운동에서 더 두드러지게 나타났다. Shiro 등(2012)은 최대 강도로 등척성 운동을 실시하였을 때 교감신경은 활성화되고 부교감신경의 활성은 감소된다고 보고하였으며, Kim과 Lee(2020)는 동심성 저항운동과 편심성 저항운동이 자율신경계 반응에 미치는 영향을 알아보았을 때 편심성 저항운동이 동심성 저항운동에 비해 교감신경의 활성을 더욱 증가시켰다고 보고하였다. 반면 Lee(2015)의 연구에서는 저항운동의 강도에 따른 심장 자율신경계 변화를 측정하였을 때, 모든 강도에서 운동 후 심박변이도의 시간 영역과 주파수 영역 결과에서 교감신경 활성 증가와 부교감신경 활성 감소가 나타났으나 운동 강도 간의 유의한 차이는 나타나지 않았다. 등속성 운동의 경우 운동 시 전체 관절가동범위에 걸쳐 근육이 최대 부하를 받기 때문에(Ryu & Jung, 2010) 자율신경계의 활성화에 더욱 많은 영향을 줄 것이라고 예상되지만, 현재까지 등속성 운동에 의한 심박변이도 변화를 분석하거나 운동 이후의 자율신경 조절 변화에 대해 분석한 연구는 부족한 실정이다.

최근 선행연구에서는 등속성 운동이 근육의 기계적 특성인 근속성(muscle properties) 변화에도 영향을 줄 수 있다고 보고하였다. Kim과 Kim(2021)의 연구에서는 등속성 장비를 이용하여 최대 편심성 운동 후 위팔두갈래근의 중간 부위와 먼 부위에 대한 근속성을 측정하였을 때 운동 전과 비교 해 운동 후 24시간까지 근긴장도와

경직도가 증가한다고 보고하였으며, Kim 등(2018)의 연구에서는 전신진동운동과 한쪽 다리 등속성 운동을 적용한 이후 넙다리곧은근의 근속성을 측정하였을 때, 운동 직후 근긴장도와 경직도 값은 증가하였으며, 점탄성은 감소하였다. 이러한 근속성은 근육의 긴장도와 유연성을 포함한 근육의 생체 역학을 나타내는 것으로, 비침습적이며, 반복적으로 측정이 가능하다(Pruyn 등, 2014). 또한 근속성은 근육의 역학적 특성을 의미하기 때문에 스포츠 의학이나 재활훈련에 있어서도 유용하게 사용할 수 있다. 현재까지 근속성과 관련된 선행 연구들은 주로 전신진동운동이나 등장성 운동과 관련하여 이루어진 반면(Kim 등, 2018; Park & Kim, 2021), 등속성 운동과 관련하여 근속성 변화를 알아본 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 무릎 관절 부위에 등속성 운동을 적용하였을 때 근속성에 대한 변화를 알아보았다. 무릎 관절은 등속성 운동 시 가장 일반적으로 적용되는 부위로, 무릎 관절을 중심으로 굽힘과 폼에 대한 최대 토크를 측정하거나 하지의 근력을 강화시키는 훈련을 주로 실시하기 때문에, 본 연구에서도 무릎 관절 부위에 굽힘과 폼에 대한 등속성 훈련을 적용하였다.

따라서 본 연구에서는 등속성 운동을 통해 유발되는 심장에 대한 자율신경계 조절 변화를 알아보하고자 하였으며, 특히 운동으로 인한 교감과 부교감신경 활성도의 균형 변화에 대해 규명하고자 하였다. 동시에 다리 근육에 대한 근속성을 측정하여 등속성 운동과 근육의 기계적 속성에 대한 연관성을 밝히고자 하였다. 이를 통해 등속성 운동이 심장에 대한 자율신경계의 활성도와 근

속성에 어떠한 영향을 미치는지 운동생리학적 기초자료를 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상자

본 연구는 D광역시에 소재한 W대학교에 재학 중인 건강한 20대 성인 남성 30명을 대상으로 하였고, 연구 대상자에게 연구의 목적과 절차에 대해 충분히 설명하였다. 또한, 연구에 참여하지 않거나 중도에 포기하더라도 어떠한 불이익이 없으며 익명성 보장 및 개인정보 비밀 유지에 대한 정보를 제공하였다. 이후, 자발적으로 본 연구에 참여하기를 동의한 대상자들에게 사전 동의서를 받은 다음 본 연구를 실시하였다. 본 연구의 실험은 우송대학교 보건복지대학 기관생명윤리위원회의 승인(1041549-210413-SB-118)을 받아 진행하였다. 대상자 선정과정에서 20대 성인 남성을 선택한 이유는 체성분, 근속성 및 자율신경계 활성화 분석의 결과 값에 대한 편향을 최소화하기 위해서이다. 또한, 대상자 선정 시 연구 결과에 영향을 줄 수 있는 심장 및 허파 질환이 있거나, 최근 6개월간 다리의 정형외과적, 신경학적 손상이 있거나 허리통증 및 근육뼈대계 질병이 있는 경우 연구 대상자에서 제외하였다. 이러한 기준에 따라, 2명의 대상자가 제외되었고 최종적으로 28명의 대상자가 본 연구에 참여하였다. 본 연구에 참여한 대상자의 일반적인 신체적 특성과 체성분 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. General physical characteristics and body composition factors

Variables	Subjects (n=28)
Age (years)	22.39±2.14
Height (cm)	173.48±5.26
Weight (kg)	77.80±11.96
BMI (kg/m ²)	25.71±3.56
Skeletal muscle mass (kg)	32.89±3.31
Body fat mass (kg)	19.70±7.82
Percent body fat (%)	24.38±6.04
Waist-hip ratio	.89±.04

Values are presented as mean±standard deviation

2. 연구절차

본 연구에서는 20대 성인 남성을 대상으로 오른쪽 및 왼쪽 무릎 관절 부위에 굽힘과 폼에 대한 등속성 운동을 적용하였으며, 운동 전, 직후, 운동 10분 후로 구분하여 자율신경계 활성 및 근속성 변화에 대해 알아보았다(Fig 1). 양쪽 무릎 관절 부위의 등속성 운동은 Isokinetic dynamometer(Biodex system 3™, Biodex medical systems Inc., USA)를 사용하였다. 대상자가 등속성 기구의 시트에 앉은 후, 검사자는 회전축이 대상자의 무릎관절 축과

일치되도록 조절하고, 발목 부위는 스트랩으로 고정하였다. 또한 운동 중 불필요한 움직임이 나타나지 않도록 몸통, 골반, 넓다리 부위를 스트랩으로 고정하였다. 무릎 관절의 굽힘과 폼에 대한 등속성 운동 강도는 60 °/sec를 적용하였다. 즉, 60 °/sec에서 5회를 적용하였으며, 총 3세트를 실시하였다. 세트 사이의 휴식시간은 20초로 설정하였으며, 우성측 다리의 운동을 먼저 실시한 다음, 비우성측 다리의 운동을 실시하였다(Fig 2A).

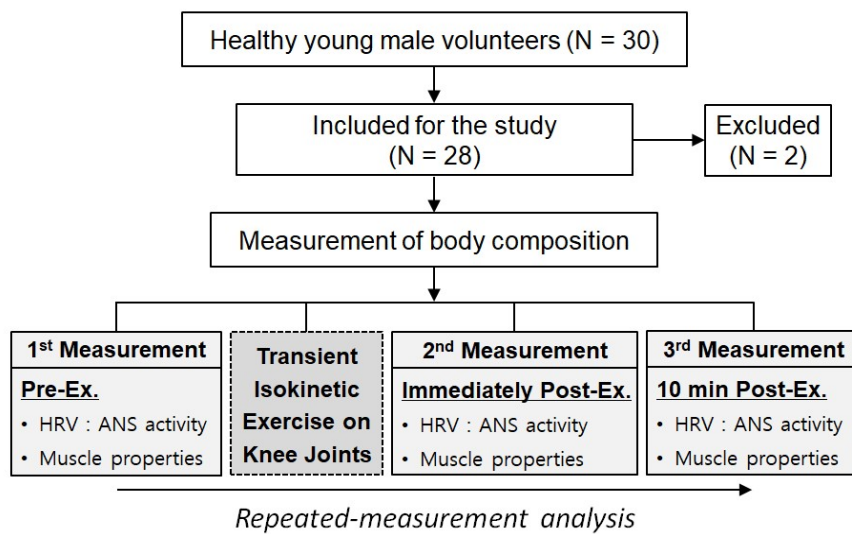


Fig 1. Experimental scheme of present study

3. 측정 도구 및 방법

1) 자율신경계 활성 측정

본 연구에서 자율신경계의 활성도는 심박변이도 측정 장비(BACS ADVANCE, TAOS institute Inc., Japan)를 사용하여 분석하였다(Fig 2B). 이 장비는 대상자의 손가락에 측정 센서인 체적기록기(finger plethysmography)를 부착하여 혈액의 흐름을 측정하여 자율신경계 활성을 분석하는 도구이다. 자율신경계 활성은 이 측정 도구를 이용하여 5분 동안 측정하였고, 시간 영역 지표(time domain parameters)와 주파수 영역 지표(frequency domain parameters)로 구분하여 분석하였다. 첫 번째, 시간 영역 지표는 심박수 사이의 R-R(심박동과 심박동) 간격을 통계적으로 분석한 것을 나타내며, 전체 심박수(beat

count), 평균 심박수 및 최소와 최대 심박수, SDNN, RMSSD, CVRR 측정 지표가 포함된다. SDNN(standard deviation of the node to node intervals)은 전체 R-R 간격의 표준편차를 의미하며, 이는 교감과 부교감신경의 영향을 모두 반영하는 지표로서, 심혈관계의 상태와 심박수의 리듬을 나타낸다. RMSSD(root of the mean squared difference of successive R-R intervals)는 연속적인 R-R 간격의 평균 제곱 차이의 제곱근을 의미하며, CVRR(coefficient of variation of R-R interval of the heart rate)은 심박수의 R-R간격의 변동 계수를 의미한다. 이러한 RMSSD와 CVRR은 모두 부교감신경의 활동을 나타내는 지표가 된다. 두 번째 주파수 영역 지표는 파워 스펙트럼 분석을 통해 얻어지며, TP, HF, LF, VLF, LF/HF

ratio가 포함된다. TP(total power)는 전체 주파수 영역의 합으로 자율신경계의 전체적인 활성을 의미한다. HF(high frequency band)는 .16-.4 Hz 사이의 고주파 영역을 나타내는 것으로 부교감 신경의 활성을 의미하며, 반면 LF(low frequency band)는 .04-.15 Hz 사이의 저주파 영역을 나타내는 것으로 장기 측정 시 교감신경계 활성 지표로 사용할 수 있다. VLF(very low frequency band)는

.003-.4 Hz 사이의 매우 낮은 주파수 영역을 나타내며, 교감신경과 부교감신경 모두의 영향을 받지만 긴 주기와 명확하지 않은 생리학적 메커니즘 때문에 종종 임상적 해석에서 제외된다. LF/HF ratio는 부교감신경에 대한 교감신경의 상대적인 활성도를 의미하는 것으로 자율신경계의 균형을 나타낸다(Park & Park, 2023).

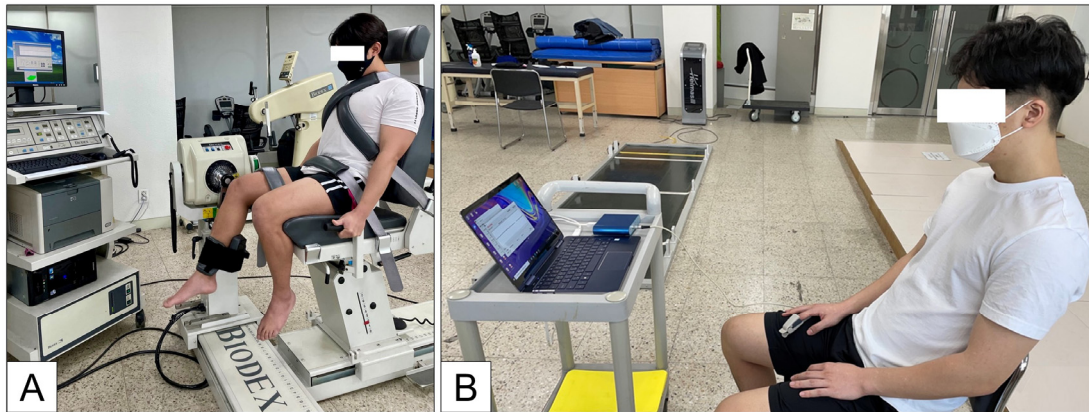


Fig 2. Experimental instruments. (A) Isokinetic exercise using Biodex System 3 (B) Measurement of ANS activity using BACS ADVANCE

2) 근속성 측정

본 연구에서는 디지털 측정기인 근육 탄성 측정기(Myoton®PRO, Myoton AS, Estonia)를 사용하여 넙다리곧은근(rectus femoris)의 근속성을 측정하였다. Myoton PRO는 3축 가속도 센서를 장착한 접촉식 연부조직 측정기로 프로브(poly carbonate probe, 3 mm)를 통해 근육의 기계적 속성을 측정할 수 있다. Myoton PRO의 Multi-scan mode에서 임펄스 전달 시간은 15 msec, 전달 간격을 .8초로 설정하였다. 프로브는 측정 근육의 근복(muscle belly) 중앙 부위에 수직에 되도록 설정하여 압력을 적용하였으며, 이를 통해 근긴장도(frequency, Hz), 경직도(stiffness, N/m), 점탄성(elasticity, log)을 추출하였다. 넙다리곧은근의 측정 부위는 줄자를 이용하여 엉덩뼈의 위앞엉덩뼈가시(ASIS)와 무릎뼈(patella) 중앙 사이의 1/2 지점 부위를 근복으로 설정하여 측정하였다. 측정 시 대상자는 의자에 앉은 상태에서 긴장하지 않고 최대한 이완된 상태에서 측정을 실시하였다. 측정은 일회성 등속

성 운동을 적용하기 전, 운동 직후, 운동 10분 후로 구분하여 측정하였으며, 각각 2회씩 측정하여 그 평균값을 데이터로 사용하였다(Kim 등, 2018).

4. 자료 분석

본 연구의 데이터는 SPSS 27.0 for window 프로그램을 이용하여 통계처리를 실시하였다. 연구 대상자의 일반적 특성 및 체성분은 기술통계를 이용하여 평균과 표준편차로 나타내었으며, 수집된 모든 자료에 대해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 이용하여 정규성 검정을 실시하였으며, 대부분의 변수가 정규성을 만족하였다($p > .05$). 등속성 운동 전, 운동 직후, 운동 10분 후에서 대상자의 자율신경계 활성도와 근속성 변화를 알아보기 위해서는 일원반복측정 분산분석(one-way repeated measure ANOVA)을 이용하였으며, 사후검정은 Bonferroni 검정을 적용하였다. 모든 통계 분석의 유의수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

III. 결 과

1. 자율신경계 활성화도 변화

1) 시간 영역 지표(time domain parameters) 변화

등속성 운동 전, 운동 직후, 운동 10분 후에 측정된 심박변이도 결과에서 시간 영역 지표 변화는 다음과 같다(Table 2). 전체 심박수(beat count)와 평균(mean HR) 및 최소 심박수(mini HR)는 운동 전, 운동 직후, 그리고 운동 후 10분에서 유의하게 변화하였다(p=.000). 특히, 전체 심박수와 평균 심박수는 운동을 수행하기 전보다 운동 직후에 유의하게 증가하였다가, 운동 10분 후에서 감

소하였다. 반면에, 최소 심박수는 운동 전보다 운동 직후에 유의하게 감소하였다가 운동 10분 후에서 다시 회복하는 모습을 보였다. 최대 심박수(Max HR), SDNN, RMSSD 및 CVRR은 등속성 운동 직후에 증가하였지만, 통계학적 유의성은 보이지 않았다. 사후검정 결과에서 전체 심박수와 평균 심박수는 운동 전과 직후(p=.000), 그리고 운동 전과 운동 10분 후(p=.000) 사이에서 유의하게 증가하였으며, 운동 직후와 운동 후 10분 사이에서 유의하게 감소하였다(p=.000). 최소 심박수는 운동 전과 운동 직후 사이에서 유의하게 감소하였다가(p=.000), 운동 전과 운동 10분 후 사이에서 유의하게 증가하였다(p=.000).

Table 2. Changes in time domain parameters of HRV before and after transient isokinetic exercise

Variables	Pre-Ex	Immediately Post-Ex	10 min Post-Ex	F	p
Beat count (bpm)	341.04±39.03	441.39±70.78	390.25±67.62	44.37	.000 ^a
Mean HR (bpm)	86.37±9.99	114.85±15.87	102.14±12.82	110.90	.000 ^b
Mini HR (bpm)	72.82±11.34	70.73±33.00	71.45±28.08	18.73	.000 ^c
Max HR (bpm)	101.45±10.75	165.36±49.95	157.87±65.22	.06	.943
SDNN (ms)	44.64±16.04	118.34±249.41	133.86±438.57	.93	.379
RMSSD (ms)	31.72±17.04	141.65±365.46	170.05±613.50	1.08	.335
CVRR (%)	6.29±1.95	23.49±49.90	20.98±63.78	1.47	.239

Pre-Ex; pre-exercise, Immediately Post-Ex; immediately post-exercise, 10 min Post-Ex; 10 min post-exercise

^a; Beat count was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000), Immediately Post-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000)

^b; Mean HR was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000), Immediately Post-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000)

^c; Mini HR was significant Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000)

2) 주파수 영역 지표(frequency domain parameters) 변화

등속성 운동 전, 운동 직후, 운동 10분 후에 측정된 심박변이도 결과에서 주파수 영역 지표 변화는 다음과 같다(Table 3). TP(p=.000), HF(p=.000) 및 LF(p=.000)와 VLF(p=.001) 및 LF/HF ratio(p=.006)는 등속성 운동 전, 운동 직후, 그리고 운동 10분 후에서 각각 유의하게 변화하였다. TP, HF, LF 및 VLF는 등속성 운동 전보다 운동 직후에 유의하게 감소한 반면, 교감신경의 상대적인 활성도를 나타내는 LF/HF ratio는 운동 전보다 운동 직

후에 유의하게 증가하였고, 운동 10분 후에서도 계속 증가된 상태를 나타냈다. 사후검정 결과에서 TP와 HF는 운동 전과 직후(p=.000), 그리고 운동 전과 운동 10분 후(p=.000) 사이에서 유의하게 감소하였다. LF는 운동 전과 운동 직후(p=.000), 그리고 운동 전과 운동 10분 후(p=.002) 사이에서 각각 유의하게 감소하였으며, 운동 직후와 운동 10분 후(p=.007) 사이에서는 유의하게 증가하였다. VLF는 운동 전과 운동 10분 후(p=.002), 그리고 운동 직후와 운동 10분 후(p=.001) 사이에서 유의하게 감소하였으며, LF/HF ratio는 운동 전과 운동 10분 후 사이에

서 유의하게 증가하였다($p=.008$).

3) 카오스 끌개궤적 이미지(chaotic attractor image)와 파워 스펙트럼 특성 변화의 예시

그림 3은 심박변이도를 측정하는 동안 얻어지는 카오스 끌개궤적 이미지와 주파수 대역의 파워 스펙트럼을 분석한 결과로서, 본 연구의 심박변이도 결과를 가장 전형적으로 나타내는 연구 대상자의 데이터를 분석한 결과이다(Fig 3). 결과 분석에 사용한 연구 대상자의 LF/HF ratio는 등속성 운동 전에 2.18이었지만, 운동 직후에 4.80으로 증가하였고 운동 후 10분에서도 4.61로 증가된

상태를 나타냈다. 이와 같은 맥락으로 카오스 끌개궤적의 각 이미지를 분석하였을 때, 등속성 운동을 하기 전보다 운동 직후 카오틱 끌개궤적의 크기와 불규칙성이 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 맥락 파형의 불안정성은 운동 후 10분에서도 지속되었다(Fig 3A). 또한 심박변이도에서 주파수 대역의 파워스펙트럼을 분석한 결과에서는 등속성 운동 직후에 HF 대역의 파워가 감소하는 것으로 확인되었는데, 이는 부교감신경의 활성이 저하됨을 나타낸다(Fig 3B). 이는 연구 대상자 개인의 결과이므로, 전체에 대하여 일반화 시킬 수는 없지만 본 연구의 결과를 대표적으로 보여주는 예시라고 할 수 있다.

Table 3. Changes in frequency domain parameters of HRV before and after transient isokinetic exercise

Variables	Pre-Ex	Immediately Post-Ex	10 min Post-Ex	F	p
TP (ms^2)	1829.86±1187.71	730.57±491.69	694.48±566.83	27.72	.000a
HF (ms^2)	442.99±320.82	92.20±159.44	135.29±185.79	30.29	.000b
LF (ms^2)	697.69±582.33	108.68±105.48	254.44±275.66	20.67	.000c
VLF (ms^2)	660.22±617.78	508.77±369.55	288.59±218.99	10.16	.001d
LF/HF ratio	1.80±.75	2.84±2.33	2.74±1.65	5.55	.006e

Pre-Ex; pre-exercise, Immediately Post-Ex; immediately post-exercise, 10 min Post-Ex; 10 min post-exercise

^a; TP was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex ($p=.000$), Pre-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.000$)

^b; HF was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex ($p=.000$), Pre-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.000$)

^c; LF was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex ($p=.000$), Pre-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.002$), Immediately Post-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.007$)

^d; VLF was significant between Pre-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.002$), Immediately Post-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.001$)

^e; LF/HF ratio was significant between Pre-Ex and 10 min Post-Ex ($p=.008$)

2. 근속성의 변화

등속성 운동 전, 운동 직후, 운동 10분 후 넙다리곧은근의 근긴장도(muscle tone), 경직도(stiffness), 점탄성(elasticity)을 측정한 결과는 다음과 같다(Table 4). 넙다리곧은근의 근긴장도에서는 왼쪽과 오른쪽 모두 운동 전보다 운동 직후 유의하게 증가하였으며, 운동 10분 후에도 운동 전에 비해 증가하였다. 사후검정 결과, 왼쪽 넙다리곧은근의 근긴장도에서 운동 전과 운동 직후($p=.000$), 그리고 운동 전과 운동 10분 후($p=.001$) 사이에서 각각 유의하게 증가하였으며, 오른쪽 넙다리곧은근의 근긴장도에서도 운동 전과 운동 직후 ($p=.000$), 그리고 운동 전과 운동 10분 후($p=.002$) 사이에서 각각 유의하게

증가하였다. 넙다리곧은근의 경직도에서는 왼쪽과 오른쪽 모두 운동 전보다 운동 직후 유의하게 증가하였으며, 운동 10분 후에도 운동 전에 비해 증가하였다. 사후검정 결과, 왼쪽 넙다리곧은근의 경직도에서 운동 전과 운동 직후($p=.000$), 그리고 운동 전과 운동 10분 후($p=.000$) 사이에서 각각 유의하게 증가하였다. 오른쪽 넙다리곧은근의 경직도에서는 운동 전과 운동 직후($p=.000$), 그리고 운동 전과 운동 10분 후($p=.002$) 사이에서 각각 유의하게 값이 증가하였으며, 추가적으로 운동 직후와 운동 10분 후 사이에서도 유의하게 값이 감소하였다. 반면, 넙다리곧은근의 점탄성에서는 양쪽 모두 유의한 차이가 나타나지 않았다.

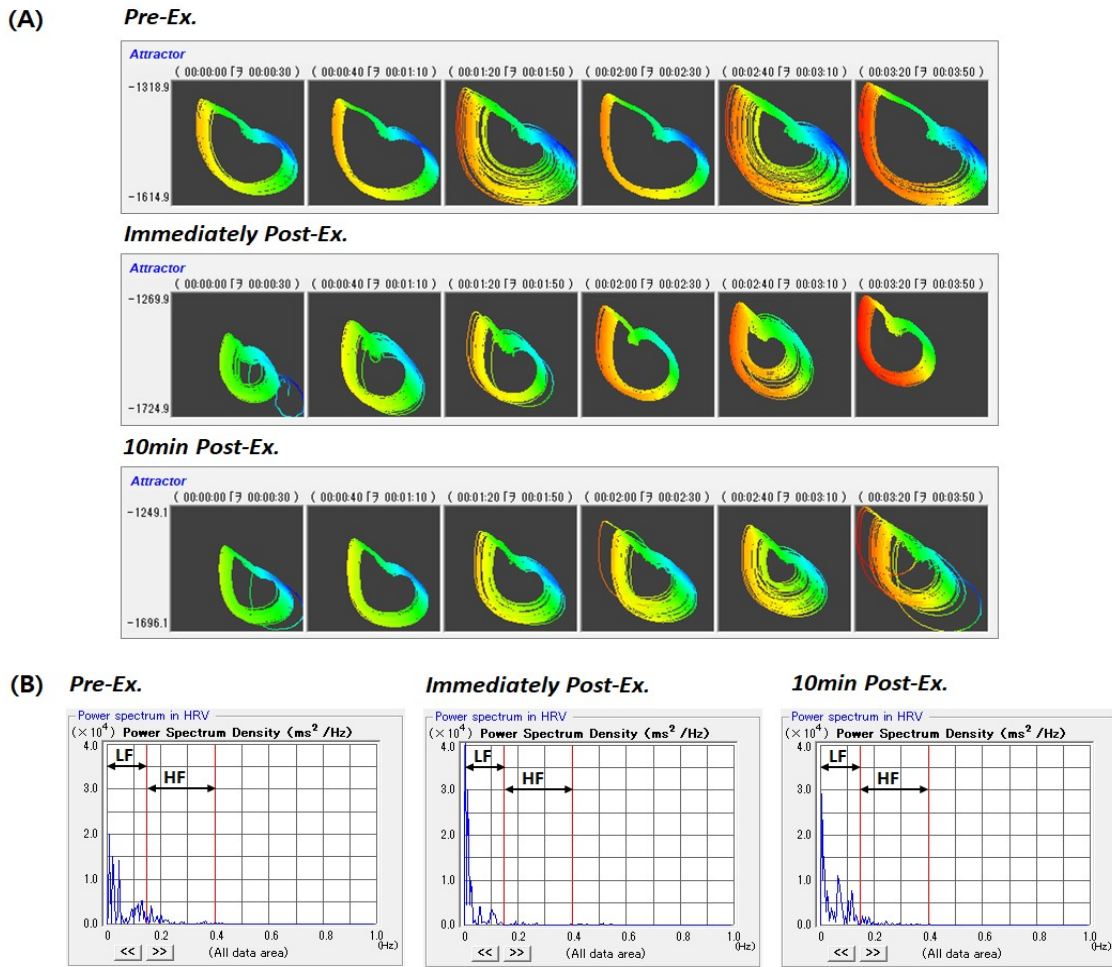


Fig 3. Case of ANS activity via HRV in the subjects before and after transient isokinetic exercise. (A) An illustration of chaotic attractor image in HRV. The irregularity of chaotic attractor image was increased immediately Post-Ex. and 10 min Post-Ex. (B) An example of power spectrum in HRV. After isokinetic exercise, HF, indicating parasympathetic nerve activity was reduced. 0~.15 Hz (LF), sympathetic nervous system; .15~.4 Hz (HF), parasympathetic nervous system

Table 4. Changes in muscle properties of rectus femoris before and after transient isokinetic exercise

Variables		Pre-Ex	Immediately Post-Ex	10 min Post-Ex	F	p
Muscle tone (Hz)	Lt.	19.79±2.43	22.56±3.09	21.52±2.85	18.38	.000 ^a
	Rt.	19.90±2.64	22.11±2.23	21.47±3.03	13.10	.000 ^b
Stiffness (N/m)	Lt.	353.35±46.36	433.89±78.51	404.64±73.09	26.87	.000 ^c
	Rt.	358.39±54.31	427.46±51.36	397.10±73.07	23.12	.000 ^d
Elasticity (log)	Lt.	1.18±.21	1.25±.19	1.21±.20	1.19	.311
	Rt.	1.18±.20	1.18±.20	1.24±.18	1.00	.325

Pre-Ex; pre-exercise, Immediately Post-Ex; immediately post-exercise, 10 min Post-Ex; 10 min post-exercise

^a; Left side of Muscle tone was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.001)

^b; Right side of Muscle tone was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.002)

^c; Left side of Stiffness was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex(p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.000)

^d; Right side of Stiffness was significant between Pre-Ex and Immediately Post-Ex (p=.000), Pre-Ex and 10 min Post-Ex (p=.003), between Immediately Post-Ex and 10 min Post-Ex (p=.036)

IV. 고 찰

저항운동은 유산소 및 지구력 운동과 비교했을 때 단 기간-고강도로 진행되는 특성으로 인해 심장에 대한 자율신경계의 조절에 변화가 크게 발생할 수 있다(Kim, 2011). 특히, 대표적 저항운동인 등속성 운동에 의해 자율신경계 활성화도는 유의하게 변화할 것으로 예상되지만, 그에 대한 구체적인 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 건강한 20대 성인 남성을 대상으로 등속성 운동을 적용했을 때 심장에 대한 자율신경계 활성화도 변화에 대해 규명하고자 하였으며, 이와 함께 다리 근육에 대한 근속성 변화를 측정하여 등속성 운동과 근육의 기계적 속성 간의 관련성도 알아보려 하였다. 등속성 운동은 양쪽 무릎 관절에 일회성으로 적용하였으며, 운동 전, 운동 직후, 10분 후에서 반복 측정한 심박변이도와 근속성 값을 비교·분석하였다.

본 연구에서 측정한 심박변이도의 시간 영역 지표 중에서 전체 심박수와 평균 심박수는 안정 시 보다 등속성 운동 직후에 증가하였다가, 운동 10분 후에서 감소하였다. 반면 최소 심박수는 운동 전에 비해서 운동 직후에 감소하였다가, 운동 10분 후에서 다시 회복하는 모습을 나타냈다. 운동 직후에 이러한 최소 심박수의 감소는 운동으로 인해 심장 박동의 변이가 증가했음을 의미하는데, 운동 전의 최소 및 최대 심박수 차이보다 운동 직후에 최소 및 최대 심박수의 차이가 더 크게 나타났다. 일반적으로 심장박동은 교감신경에 의해서 빨라지고, 부교감신경의 활동에 의해서 느려지는데, 이러한 교감 및 부교감(미주)신경 사이의 상호작용에 의해 심박수는 상황과 환경에 맞춰 안정적으로 조절되어진다(Nenna 등, 2017). 특히, 자율신경계는 신체 운동에 따른 심혈관계 적응에서 중요한 역할을 담당하는데 건강한 성인의 경우 운동 시 교감신경의 활성이 증가되면서 심박수를 증가시키는 동시에 미주신경에 의해 조절되는 동성부정맥 (sinus arrhythmia)의 양을 감소시킴으로써 심박수간 시간 변동이 감소하게 된다(Lee, 2015). 본 연구에서도 저항운동인 등속성 운동을 적용하고 난 이후에, 교감신경의 활성을 통하여 심박수가 증가된 것으로 나타났다. 반면에 유산소 운동을 지속적으로 하는 사람들의 경우에는 부

교감신경의 활성화도가 높게 나타나기도 하는데(Prado 등, 2010), 10~13세 남학생의 경우 운동 시간이 증가할수록 밤 동안의 부교감신경이 활성화 되는 것으로 보고되고 있다(Radtke 등, 2013). 이는 장기간의 운동이 안정 시 교감신경의 활성화도를 낮추고, 동시에 부교감신경을 더욱 빨리 활성화시킴으로써 운동 이후 심장이나 혈관을 안정화 시키는 중요한 요인으로 작용함을 시사한다(Byeon & Jeong, 2013). 한편, 등속성 운동에 의해 심박변이도의 시간 영역 지표에서는 심박수가 민감하게 변화를 보인 반면 SDNN, RMSSD 및 CVRR은 등속성 운동 직후에 증가하였지만 유의한 변화는 보이지 않았다. SDNN은 교감 및 부교감신경의 활성을 모두 반영하는 지표로서 자율신경계의 조절능력을 나타내는데, SDNN의 감소는 자율신경계가 환경의 변화에 적절하게 반응하지 않음을 의미한다(Liu 등, 2022). Li 등(2022)은 여대생에게 8주 동안 저항 훈련을 적용한 결과 SDNN의 유의한 증가를 보고하였는데, 본 연구에서는 등속성 운동 직후 SDNN이 증가되었으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 이러한 결과의 차이는 Liu 등(2022)의 연구에서는 신체의 적응 반응을 유도하기에 충분한 운동 중재 기간이 있었던 반면, 본 연구에서는 일회성 운동을 적용하였기 때문으로 사료된다. 따라서 신체 운동을 통해 자율신경계의 교감 및 부교감신경 모두의 변화를 유도하기 위해서는 운동 기간 및 강도 등의 다양한 조건을 고려해야 할 것이다.

생리적인 심박수간 변동성을 분석하는 심박변이도는 장기 및 단기 분석으로 나뉘지는데, 평균적으로 10분 미만의 분석은 일반적으로 단기 분석으로 간주되며, 주파수 영역의 지표가 단기 분석에서 좀 더 민감하게 변화를 보이는 것으로 알려져 있다(Xhyheri 등, 2012). 본 연구에서는 5분 동안 심박변이도를 분석한 단기 분석을 실시하였으며, 연구 결과에서 주파수 영역 지표들은 등속성 운동 전, 운동 직후, 그리고 운동 10분 후에서 각각 유의하게 변화하였다. 특히, 주파수 영역에서 자율신경계의 전체적인 활성도를 나타내는 TP와 부교감신경의 활성을 나타내는 HF는 등속성 운동을 실시하기 전보다는 등속성 운동 직후에 감소하는 경향을 보였고, 교감신경의 활성을 의미하는 LF/HF ratio는 증가하였다. 자율신경계의 이러한 변화는 무릎관절의 동심성 및 편심성 저항운동, 벤치 프레스, 암컬(arm curl), 스쿼트(squat), 고정식 싸이

클 에르고미터를 실시한 선행 연구들에서도 동일하게 확인되었는데(Kim & Lee, 2020; Lee, 2015; Lee 등, 2012), 이를 통해 저항성 등장성 및 등속성 운동 모두 부교감신경 활성도를 낮추고, 교감신경성 조절을 증가시킬 수 있었다. LF/HF ratio는 자율신경계의 전체적인 균형(sympathovagal balance) 상태를 반영하는 지표로서 .5~2.0은 정상 범위를 나타내지만, 교감신경의 활성이 항진되거나 부교감신경의 활성이 억제될 때 이 지표의 값은 증가하게 된다(Kingsley & Figueroa, 2016; Liu 등, 2022; Xhyheri 등, 2012). 본 연구에서는 등속성 운동을 실시하기 전, 운동 직후, 그리고 운동 10분 후에서 LF/HF ratio가 유의하게 증가하였는데 이는 단기간-고강도로 진행되는 저항성 등속성 운동의 특성을 잘 보여주는 결과이다. Lee(2015)는 저항 강도에 따라 LF/HF ratio가 유의하게 증가함을 보고하였고, Lee 등(2012)의 연구에서는 저항운동 종목에 따라 LF/HF ratio를 안정 시와 비교했을 때 벤치 프레스를 실시한 경우 LF/HF ratio가 가장 높게 나타남을 보고하였다. 반면, 여대생에게 저항 훈련을 8주간 실시했던 Li 등(2022)의 연구에서는 LF/HF ratio가 유의하게 감소하였는데 장기간의 저항 훈련은 교감신경의 상대적인 활성도를 감소시키며, 나아가 자율신경계 활성의 불균형을 개선하는데 긍정적인 효과가 있음을 나타낸다. 신체 운동 중에는 자율신경계의 교감신경과 부교감신경 모두에 변화가 일어나는데, 특히 운동 강도와 자율신경 변화에는 양-반응 관계가 존재해서 운동의 강도가 높을수록 교감신경의 흥분과 부교감신경 활성의 위축이 비례해서 발생하게 된다(Lee & Jeong, 2013). 본 연구에서 LF/HF ratio의 사후검정 결과를 살펴보면, 등속성 운동 직후에 증가한 LF/HF ratio가 운동 10분 후에도 2.74±1.65로 여전히 증가된 상태로 남아 있음이 확인되었고, 이를 통해 60 °/sec의 각속도를 적용한 등속성 운동은 교감신경의 항진을 지속시킬 수 있었다. 등속성 운동을 심혈관질환자에게 안전하게 적용하기 위해서 이러한 자율신경계의 불균형이 각속도에 따라 어떠한 패턴으로 나타나는지, 혹은 운동 이후 자율신경계 조절이 회복되는 시점 등에 대한 규명이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 등속성 운동 전-후의 근속성 변화를 알아내기 위해 넵다리골은근의 근긴장도, 경직도, 점탄성

을 측정하였다. 근긴장도(muscle tone)는 근수축이 없는 상태의 진동을 주파수로 표기하는 것으로 근육의 탄력 특성을 나타내며, 경직도(stiffness)는 근조직의 뻣뻣함을 수동적으로 늘일 때 근육의 저항으로 정의되며, 점탄성(elasticity)은 조직이 수축 후 형태를 회복하는 능력을 의미한다(Park & Kim, 2021). 본 연구에서 근긴장도와 경직도는 양쪽 넵다리골은근 모두 운동 전보다 운동 직후에 유의하게 증가하였으며, 운동 10분 후에는 운동 직후보다 감소하였으나, 운동 전에 비해 유의하게 증가된 값을 유지하였다. 반면 점탄성은 양쪽 넵다리골은근 모두에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 본 연구 결과에서 등속성 운동 후 근긴장도와 경직도가 증가한 것은 운동으로 인한 혈류량 증가와 관련이 있다고 판단된다. Lee 등(2017)은 주파수 지표인 근긴장도는 근육의 기계적 특성뿐만 아니라 근육에 공급되는 혈류량을 나타내는 지표라고 하였으며, Kim 등(2018)의 연구에서는 전신진동운동과 등속성 운동을 적용한 이후 넵다리골은근의 근긴장도와 경직도 값이 증가한 것은 운동 적용으로 인한 동맥경직도의 변화가 근속성에 영향을 미친 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 직접적으로 혈류량을 측정한 것은 아니지만, 근속성 지표와 혈류량이 연관성이 있다는 선행연구를 바탕으로 등속성 운동으로 인한 동맥경직도의 감소가 근긴장도와 경직도를 증가시키는데 영향을 미친 것으로 사료된다. 그러나 현재까지 등속성 운동에 따른 동맥경직도 변화를 알아본 연구는 거의 이루어지지 않았기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 한편, Jang 등(2020)은 태권도 선수를 대상으로 일회성 저항운동 후 가쪽넓은근(vastus lateralis)의 근속성을 측정하였을 때 근긴장도와 경직도가 증가되었다고 보고하여, 일회성 운동이 근속성 변화에 영향을 줄 수 있다는 본 연구 결과와 유사하게 나타났다. Wang(2017)의 연구에서는 건강한 남성을 대상으로 다양한 강도의 저항운동을 15분간 적용한 후, 장딴지근(gastrocnemius)의 근긴장도를 측정하였을 때 장딴지근의 근긴장도가 증가되었으나, 운동 강도가 근긴장도에 영향을 미치지 않았다고 보고하였다. Jang 등(2020)의 연구에서도 운동 강도보다는 저항성 운동 자체가 근긴장도에 영향을 준다고 보고하였다. 본 연구에서는 등속성 운동 강도를 구분하여 근속성을 측정하지는 않았으나 선행연구

구를 보았을 때, 근속성 변화에 있어서 운동 강도보다는 저항운동 적용 자체가 근속성에 더욱 영향을 주는 것으로 생각된다. 반면, 본 연구 결과에서 점탄성에서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 점탄성은 근육이 지속적으로 수축과 신장할 때 조직 이완에 작용하여 외부 저항력을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문에 (Jang 등, 2020), 본 연구 결과에서 유의한 차이는 나타나지 않았으나 등속성 운동 시 근육의 수축과 신장 시 조직 이완에 영향을 주었을 것으로 사료되며, 추후 연구에서는 등속성 운동에 대한 기간 또는 강도를 다르게 설정하여 이에 대한 점탄성 변화를 알아보는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이와 함께 추후 연구에서 등속성 운동 시 혈류 변화나 동맥경직도를 함께 측정하는 것도 근속성 변화에 대한 요인을 규명하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

하지만, 본 연구는 20대 건강한 남성을 대상으로 선정하였기 때문에 본 연구의 결과를 일반화하는데 어려움이 있으며, 등속성 운동을 일회성으로 적용하였다는 제한점이 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 등속성 운동에 대한 심장의 자율신경성 조절 및 근속성에 대한 연구가 충분하지 않으므로, 일반 성인들을 대상으로 실시한 본 연구의 결과는 등속성 운동과 관련된 운동생리학적 기초 자료를 제공하는데 있어서 의의가 있다고 생각된다.

V. 결론

본 연구에서는 무릎관절에 등속성 운동을 일회성으로 적용했을 때, 심장의 자율신경성 조절 및 다리 근육의 근속성 변화에 대해서 알아보았다. 연구 결과, 등속성 운동 전보다 운동 직후에 부교감신경의 활성도는 유의하게 감소한 반면, 부교감신경에 대한 교감신경의 상대적인 활성도는 유의하게 증가하였고, 운동 10분 후에서도 계속 증가된 상태를 유지하였다. 또한, 등속성 운동 후 양쪽 넙다리곧은근의 근긴장도와 경직도는 운동 전과 비교하여 운동 직후와 운동 10분 후 유의하게 증가하였으나, 점탄성은 유의한 차이를 보이지 않았다.

결론적으로, 등속성 운동은 심장의 부교감신경 조절은 감소시키고 교감신경 조절을 강화시킬 뿐만 아니라, 다리 근육의 기계적 속성 변화에도 관련이 있음을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과는 등속성 운동 중에 발생할 수 있는 잠재적인 심혈관계의 위험을 이해하고, 효과적인 근재교육을 위한 재활운동으로서의 운동 프로토콜을 확립하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 추후 연구에서는 다양한 각속도의 적용과 충분한 운동 증재 기간에 따른 심박변이도 및 근육의 기계적 속성 변화에 대한 정확한 규명이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Byeon JK, Jeong SJ(2013). The relationship between parasympathetic nervous system activity after peak exercise, cardiovascular disease risk factors and inflammatory markers in obese children. *Exerc Sci*, 22(1), 61-73. <https://doi.org/10.15857/ksep.2013.22.1.61>.
- Byun JJ, Hwang BG, Lee JH(2016). The effect of physical activity on heart rate variability and heart rate recovery in young male adults. *J Sport Leisure Stud*, 66, 723-732. <https://doi.org/10.51979/KSSLS.2016.11.66.723>.
- Fan Y, Yu M, Li J, et al(2021). Efficacy and safety of resistance training for coronary heart disease rehabilitation: a systematic review of randomized controlled trials. *Front Cardiovasc Med*, 8, Printed Online. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.754794>.
- Grässler B, Thielmann B, Böckelmann I, et al(2021). Effects of different exercise interventions on cardiac autonomic control and secondary health factors in middle-aged adults: a systematic review. *J Cardiovasc Dev Dis*, 8(8), Printed Online. <https://doi.org/10.3390/jcdd8080094>.
- Hammill BG, Curtis LH, Schulman KA, et al(2010). Relationship between cardiac rehabilitation and long-term risks of death and myocardial infarction among elderly Medicare beneficiaries. *Circulation*,

- 121(1), 63-70. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.109.876383>.
- Jang JO, Kim EH, Lee BG, et al(2020). The effects of acute resistance exercise intensity on pain perception and muscle mechanical properties of Taekwondo athletes. *Exerc Sci*, 29(3), 281-290. <https://doi.org/10.15857/ksep.2020.29.3.281>.
- Kim C(2011). Cardiovascular diseases and sports medicine. *J Korean Med Assoc*, 54(7), 674-684. <https://doi.org/10.5124/jkma.2011.54.7.674>.
- Kim CG(2016). Acute effect of isokinetic knee muscle contraction at slow & fast speed on heart rate & oxygen uptake in middle school students. *Exerc Sci*, 25(3), 183-188. <https://doi.org/10.15857/ksep.2016.25.3.183>.
- Kim CS, Kim MK(2021). Regional differences of mechanical properties in a biceps brachii following eccentric exercise. *Exerc Sci*, 30(3), 327-335. <https://doi.org/10.15857/ksep.2021.30.3.327>.
- Kim SD, Lee HH(2020). Effect of eccentric and concentric resistance exercise determined by electromyogram on cardiac autonomic responses. *Korea J Sports Sci*, 29(1), 629-638. <https://doi.org/10.35159/kjss.2020.02.29.1.629>.
- Kim SD, Kim MH, Park JS, et al(2018). The changes of arterial and muscle stiffness after isokinetic single leg exercise and whole body vibration application. *J Sport Leisure Stud*, 71, 583-594. <https://doi.org/10.51979/KSSLS.2018.02.71.583>.
- Kingsley JD, Figueroa A(2016). Acute and training effects of resistance exercise on heart rate variability. *Clin Physiol Funct Imaging*, 36(3), 179-187. <https://doi.org/10.1111/cpf.12223>.
- Lee HH(2015). Effect of resistance exercise intensity on cardiac autonomic system. *J Sport Leisure Stud*, 61, 561-568. <https://doi.org/10.51979/KSSLS.2015.08.61.561>.
- Lee HH, Kim SD, Jeong IG(2017). The effect of myofascial release on heart rate variability and stiffness of rectus femoris after ergometer exercise. *J Sport Leisure Stud*, 67, 497-507. <https://doi.org/10.51979/KSSLS.2017.02.67.497>.
- Lee HH, Jeong IG(2013). Effects of time of day on cardiac autonomic responses to exercise. *J Sport Leisure Stud*, 51(2), 803-811. <https://doi.org/10.51979/KSSLS.2013.02.51.803>.
- Lee HH, Oh MJ, Jeong IG(2012). Effect of resistance exercise on heart rate variability. *J Sport Leisure Stud*, 47, 1023-1031.
- Li R, Yan R, Cheng W, et al(2022). Effect of resistance training on heart rate variability of anxious female college students. *Front Public Health*, 10, Printed Online. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1050469>.
- Liu KY, Elliott T, Knowles M, et al(2022). Heart rate variability in relation to cognition and behavior in neurodegenerative diseases: a systematic review and meta-analysis. *Ageing Res Rev*, 73, Printed Online. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2021.101539>.
- Machado-Vidotti HG, Mendes RG, Simoes RP, et al(2014). Cardiac autonomic responses during upper versus lower limb resistance exercise in healthy elderly men. *Braz J Phys Ther*, 18(1), 9-18. <https://doi.org/10.1590/s1413-35552012005000140>.
- Nenna A, Lusini M, Spadaccio C, et al(2017). Heart rate variability: a new tool to predict complications in adult cardiac surgery. *J Geriatr Cardiol*, 14(11), 662-668. <https://doi.org/10.11909/j.issn.1671-5411.2017.11.005>.
- Prado DM, Silva AG, Trombetta IC, et al(2010). Exercise training associated with diet improves heart rate recovery and cardiac autonomic nervous system activity in obese children. *Int J Sports Med*, 31(12), 860-865. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1267158>.
- Park JC, Kim YN(2021). The effect of 30 Hz whole body vibration exercise on the thickness and mechanical properties of the erector spinae. *J Korea Acad-Industr Cooper Soc*, 22(1), 45-51. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.45>.
- Park S, Park S(2023). The influence of sleep quality on the body composition, selective attention, and autonomic nervous system activity in healthy individuals. *Chronobiol Med*, 5(1), 31-40. <https://doi.org/10.33069/>

- cim.2022.0036.
- Pruyn EC, Watsford M, Murphy A(2014). The relationship between lower-body stiffness and dynamic performance. *Appl Physiol Nutr Metab*, 39(10), 1144-1150. <https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0063>.
- Radtke T, Khattab K, Brugger N, et al(2013). High-volume sports club participation and autonomic nervous system activity in children. *Eur J Clin Invest*, 43(8), 821-828. <https://doi.org/10.1111/eci.12112>.
- Ryu JK, Jung BO(2010). The effects of isokinetic exercise program on the muscle strength and blood constituent by the relatively angular velocities. *J Exp Biomed Sci*, 16(2), 113-118.
- Shiro Y, Arai YCP, Matsubara T, et al(2012). Effect of muscle load tasks with maximal isometric contractions on oxygenation of the trapezius muscle and sympathetic nervous activity in females with chronic neck and shoulder pain. *BMC Musculoskelet Disord*, 13, Printed Online. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-146>.
- Wang JS(2017). Therapeutic effects of massage and electrotherapy on muscle tone, stiffness and muscle contraction following gastrocnemius muscle fatigue. *J Phys Ther Sci*, 29(1), 144-147. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.144>.
- Xhyheri B, Manfrini O, Mazzolini M, et al(2012). Heart rate variability today. *Prog Cardiovasc Dis*, 55(3), 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2012.09.001>.