

젊은 성인에서 허혈성 전처치가 최대운동수행능력에 미치는 영향

서울시립대학교 스포츠과학과

윤 은 선 · 제 세 영

Effect of Remote Ischemic Preconditioning on Maximal Exercise Tolerance in Young Adults

Eun Sun Yoon, Sae Young Jae

Department of Sport Science, University of Seoul, Seoul, Korea

Purpose: Remote ischemic preconditioning (RIPC), induced by repeated bouts of ischemia followed by reperfusion of the arm or leg is a noninvasive strategy to protect a target organ against oxidative stress and injury caused by ischemia and reperfusion. Interestingly, recent evidence suggests that RIPC may also improve exercise performance by increasing maximal oxygen consumption, but such finding remain equivocal. As such, the purpose of the study was to examine the effect of RIPC on exercise performance in healthy individuals.

Methods: In a randomized cross-over design, 17 healthy male participants (age, 23±3 years) were exposed to either a sham control (six cycles of 5 minutes bilateral thigh cuff occlusion at 20 mm Hg) or RIPC (six cycles of 5 minutes bilateral thigh cuff occlusion at 180 mm Hg) an hour before a maximal exercise test. We measured maximal oxygen consumption, power output, heart rate, blood pressure, and blood lactate as exercise performance parameters during a maximal exercise test performed on an upright bicycle.

Results: Compared with the sham control, RIPC improved maximal oxygen consumption (7.4%, $p=0.025$) and maximal power output (11.5%, $p=0.010$), whereas other exercise performance parameters remained unchanged with RIPC ($p>0.05$).

Conclusion: Taken together, the improvements in maximal oxygen consumption and maximal power output induced by RIPC may suggest that RIPC should be considered as a method for improving exercise performance.

Keywords: Blood circulation, Exercise tolerance, Ischemic preconditioning, Oxygen consumption

Received: April 16, 2018 Revised: May 25, 2018 Accepted: May 28, 2018

Correspondence: Sae Young Jae

Department of Sport Science, University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

Tel: +82-2-6490-2953, Fax: +82-2-6490-2949, E-mail: syjae@uos.ac.kr

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea in 2015 (NRF-2015 S1A5B5A07044395).

Copyright ©2018 The Korean Society of Sports Medicine

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

협심증, 심근경색 및 뇌졸중과 같은 허혈성 심뇌혈관질환에서 차단된 혈류를 다시 공급하는 재관류 치료는 매우 중요하다. 그러나 재관류 과정에서 활성산소 생성의 증가, 염증성 물질의 세포 내 침윤, 세포 내 젖산 및 칼슘 이온이 축적되는 추가적인 손상이 동반된다¹. 임상에서는 허혈 후 치료과정에서 불가피하게 발생하는 재관류 손상을 예방하기 위한 비침습적 치료법 중 하나로 허혈성 전처치를 이용해 오고 있다. 허혈성 전처치란 조직 손상이 유발되지 않을 정도의 짧은 시간 동안 허혈 발생 부위에 직접 또는 팔, 다리 부위에 압력을 높여 인위적으로 허혈과 재관류를 반복하는 치료방법이다. 선행 연구에 따르면 이러한 허혈성 전처치는 허혈에 의한 조직손상을 예방하고 재관류 시 기능회복이 촉진됨을 보고하였다². 흥미로운 점은 허혈성 전처치의 주요 조직 손상 보호기전이 운동수행력 향상 요소와 유사한 기전을 갖는다는 것이다. 운동 중 활동근의 대사 요구량 증가에 따른 산소와 기질 운반 능력 향상은 운동수행력 증진에 있어 매우 중요하다. 허혈성 전처치는 아데노신(adenosine), 산화질소(nitric oxide) 생성량 증가 및 adenosine triphosphate (ATP)-민감성 칼륨 채널(K_{ATP})을 활성화시켜 처치 부위로 혈류량을 증가시킨다³, 이러한 기전으로 운동수행력 향상 가능성이 제시되고 있다.

허혈성 전처치가 운동 수행능력을 증가시킨다는 연구는 de Groot 등⁴에 의해 처음 증명되었다. 자전거 에르고미터(ergometer)를 이용한 최대운동부하검사 전, 커프(cuff)를 이용하여 좌우 대퇴 부위에 약 220 mm Hg의 압력으로 5분간 각 3회씩 혈류를 차단하는 허혈성 전처치를 실시한 결과 최대 산소섭취량이 3% 증가하였으며, 최대운동량이 1.6% 증가하였다. 이후 운동수행력 향상의 보조역할로서 허혈성 전처치에 대한 관심이 증대되어 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 아직 허혈성 전처치의 운동능력 향상 효과에 대한 연구결과는 명확하지 않으며, 이러한 원인은 연구 마다 다른 허혈성 전처치 프로토콜과 피험자 특성 및 운동수행력 측정 지표 차이에 기인된 것으로 생각한다⁵.

이제까지 대부분의 연구는 운동수행력 증진에 효과적인 허혈성 전처치 방법에 대한 증명 없이 초기 de Groot 등⁴의 연구에서 이용한 220 mm Hg의 압력을 동일하게 적용하였는데 이는 심근 괴사 예방을 위해 사용되었던 압력으로 대퇴 부위에 적용할 경우 통증이 심하다는 단점을 갖고 있다. 최근 Sharma 등⁶은 사람 연구에서 혈류 측정을 통해 통증이 적게 수반되면서 보다 효율적인 허혈 유발 압력 범위를 제시하였다. 이에

본 연구에서는 생리적 반응 및 효과성이 증명된 허혈성 전처치 프로토콜을 기반으로 한 허혈성 전처치가 최대운동검사 지표에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

연구 방법

1. 연구 대상

본 연구의 참여자는 20대 건강한 성인 남성 총 17명으로 하였으며, 기초의학설문지 및 심전도를 통해 심혈관계 질환과 근골격계 질환이 없는 비흡연자로 하였다. 본 연구는 서울의료원 생명윤리위원회 심의를 받아 시행되었으며(IRB No. 2015-100), 자발적 연구 참여를 희망하는 자에게 실험 절차에 관해 충분히 설명하고, 동의서를 작성한 후 실시하였다. 본 연구 대상자의 특성은 Table 1에 제시하였다.

2. 실험 설계 및 절차

본 연구는 무작위 배정, 단일 맹검, 교차실험설계로 진행되었다. 모든 피험자는 일주일 간격으로 허혈성 전처치(remote ischemic preconditioning)와 통제처치(sham control)에 모두 참여하였으며, 각 처치 후 60분간 휴식을 취한 뒤 최대운동검사를 하였다. 이는 허혈성 전처치의 초기 보호 효과는 3시간 이내에 나타나며, 운동검사 직전에 허혈성 전처치를 시행한 연구에서는 운동수행력이 향상되지 못한 반면, 운동 전 30-90분에 실시한 경우 운동수행력을 향상했다는 선행연구를 토대로 설정하였다⁵. 위약 효과를 예방하기 위해 연구 참여 전 피험자에게는 허혈성 전처치의 이론적 배경에 대해 알리지 않았으며, 최대운동검사에 대한 적응 효과를 방지하기 위해 무작위 순서로 8명은 통제처치에 먼저 참여하고, 9명은 허혈성 전처치에 먼저 참여하도록 하였다. 최대운동검사 시 운동수행력 및 최대산소섭취량에 영향을 줄 수 있는 혼란 변수를 통제하

Table 1. Physical characteristics of the subjects (n=17)

Variable	Mean±SD
Age (yr)	23±3
Body mass index (kg/m^2)	24.0±1.7
Body fat (%)	17.3±3.6
Muscle mass (kg)	52.3±5.8
Systolic blood pressure (mm Hg)	118.9±5.4
Diastolic blood pressure (mm Hg)	65.4±4.5
Resting heart rate (bpm)	63.4±6.5

SD: standard deviation.

기 위해 실험실 온도 20°C-23°C, 습도 40%-50%를 유지하였으며, 모든 피험자는 검사 3시간 전 음식 및 카페인 섭취를 제한하고, 12시간 전에 과도한 신체활동 참여를 제한하였다. 본 연구의 실험절차는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 허혈성 전처치 및 통제처치

허혈성 전처치를 위한 압력은 허혈 과정 동안에 혈중 산소, 이산화탄소 및 젖산이 순환적 변화를 일으키며, 통증이 적게 수반되면서 혈류 흐름을 차단하는데 최적의 압력 범위라고 제시된 180 mm Hg으로 설정하였다⁶. 누운 자세에서 한쪽 대퇴부위에 13×85 cm 압력 커프(Hokanson Inc., Bellevue, WA, USA)를 감고 180 mm Hg까지 압력을 올려 5분간 혈류를 차단하여 허혈을 유발하고 이후 즉시 압력을 풀어 5분간 재관류시켰다. 한쪽 대퇴부위에서 재관류되는 동안에 반대쪽 대퇴부위에 동일한 방법으로 허혈을 유발한 후 재관류시켰다. 이러한 처치를 좌우 각각 3회씩 총 6회 실시하였다. 통제처치는 혈류의 흐름에 영향을 미치지 않은 압력인 20 mm Hg까지만 증가시켰으며, 그 외 허혈 유발 및 재관류 시간과 순서는 허혈성 전처치와 동일하게 실시하였다.

4. 최대운동검사

최대운동검사는 허혈성 전처치 또는 통제처치 60분 후에 실시하였으며, 자전거 에르고미터를 이용하여 de Groot 등⁴ 연구에서 시행한 방법을 참고로 하였다. 1단계에서 50 watt 부하 강도로 3분간 실시하고, 이후 3단계까지 50 watt씩 증가시켜 각 3분간 실시하였다. 이후로는 탈진 시까지 1분마다 20

watt씩 부하를 증가시켰으며, 검사 동안 자전거 페달 속도는 50-60 rpm을 유지하도록 하였다. 최대 도달 시점은 운동자각도 17 이상, 호흡 교환율 1.10 이상, 운동강도가 증가하여도 산소섭취량이 증가하지 않는 경우, 나이 예측 최대심박수(220-나이)±10 bpm 도달 중 하나라도 해당하며 피험자가 중단을 요구한 경우로 하였으며, 최대 도달 이후 2분간 25 watt에서 동적 회복을 하였다(Fig. 1). 최대운동수행력 지표로서 운동검사 동안 호흡가스분석기(TrueOne 2400; Parvo Medics, MURRAY, UT, USA)를 이용하여 최대산소섭취량(mL/kg/min)을 측정하였으며, 최대운동강도(watt)와 최대운동시간(sec)을 구하였다. 운동 중 심박수는 무선심박수 측정계(RS800CX; Polar, Kempele, Finland)로 측정하였으며, 혈압은 좌측 상완에서 수은 혈압계를 이용하여 측정하였다. 수축기혈압은 Korotkoff 제1음으로 하고, 이완기 혈압은 제5음으로 정의하였다. 혈압측정은 30-60초 사이에 이루어지도록 하였으며, 측정자 간에 발생할 수 있는 오류를 배제하기 위해 숙련된 연구원 1인에 의해 측정되었다. 운동 중 피로도를 알아보기 위해 운동검사 중 매 단계마다 Borg scale (7-20점 척도)을 이용하여 운동자각도를 측정하였으며, 혈중 젖산농도는 최대운동검사 전, 검사 종료 직후, 검사 종료 후 3분에 손가락 끝을 이용하여 측정하였다(Accutrend Plus, Roche, Berlin, Germany).

5. 자료 처리

측정된 모든 자료는 평균과 표준편차로 표기하였다. 허혈성 전처치에 의한 최대운동수행력 및 회복능력을 알아보기 위해, 허혈성 전처치와 통제처치 간 최대산소섭취량, 최대운동강도,

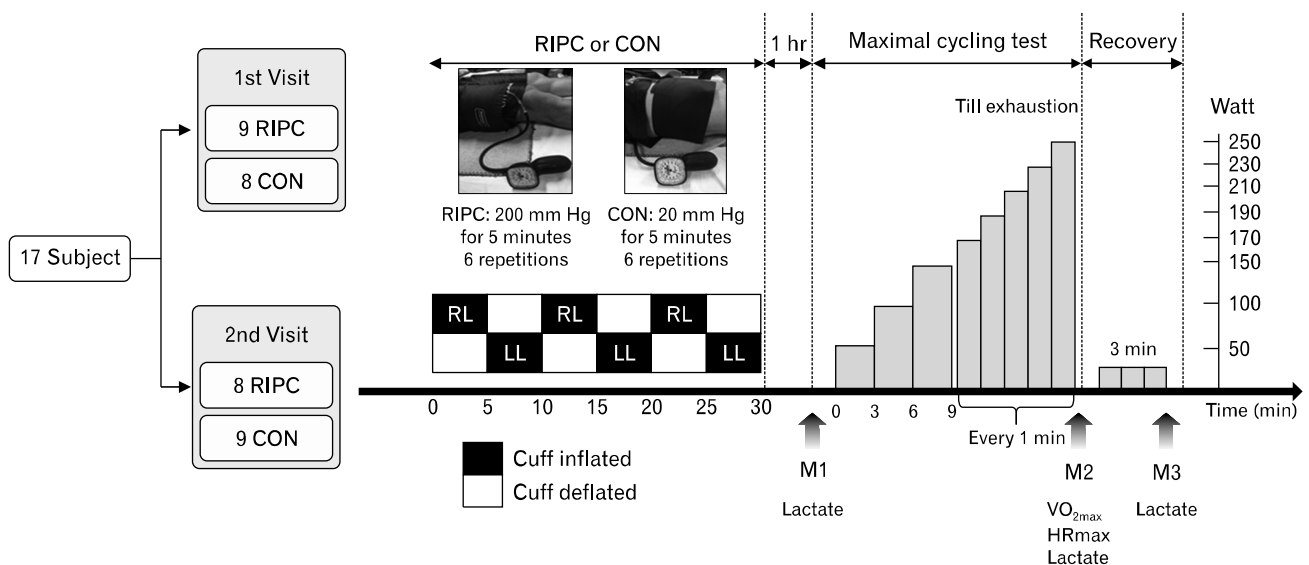


Fig. 1. Experimental design. RIP: remote ischemic preconditioning, CON: control, RL: right leg, LL: left leg, HR: heart rate.

운동시간 변인에 대해 종속 t 검정을 실시하였다. 운동검사 단계별 운동자각도와 혈중 젖산농도 변화는 처치와 측정시간을 독립변인으로 하는 반복측정 이원변량 분석을 하였다. 모든 통계 처리는 IBM SPSS ver. 23.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하였으며, 유의수준 (α)은 ≤ 0.05 에서 검정하였다.

결 과

최대산소섭취량은 통제처치보다 허혈성 전처치 후 7.4%

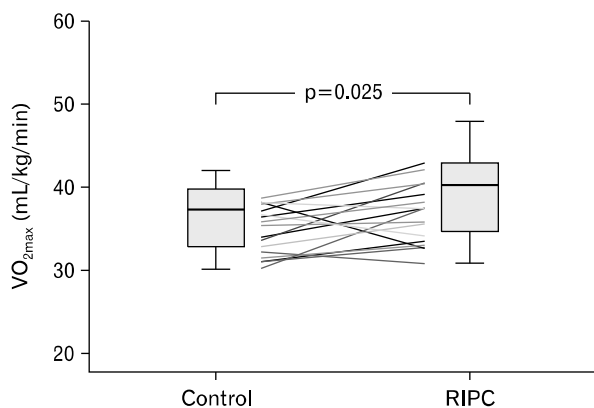


Fig. 2. Mean and individual maximal oxygen consumption during the maximal exercise test without and with ischemic preconditioning. Control, 36.45 ± 4.06 mL/kg/min; RIPC, 39.20 ± 5.06 mL/kg/min. RIPC: remote ischemic preconditioning.

통계적으로 유의하게 증가하였다(통제처치: 36.5 ± 4.1 mL/kg/min, 허혈성 전처치: 39.2 ± 5.1 mL/kg/min; $p=0.025$) (Fig. 2). 운동검사 총 수행 시간도 통제처치 717.1 \pm 92.2초에서 허혈성 전처치 후 761.4 \pm 93.8초로 44.3 \pm 64.0초 유의하게 증가하였으며($p=0.012$), 또한 최대운동수행 강도는 통제처치 194.7 \pm 26.0 watt에서 허혈성 전처치 후 217.7 \pm 32.4 watt로 22.4 \pm 31.5 watt 유의하게 증가하였다($p=0.010$). 운동 자각도는 두 처치 모두 매 단계 증가하였으며, 최대 도달 시점에서는 두 처치 간 차이를 보이지 않았지만, 최대하 강도에서 허혈성 전처치는 통제 처치에 비해 낮게 증가하는 경향을 보였다(interaction effect, $p=0.052$). 혈중 젖산 농도는 두 처치 모두 최대운동 도달 시점에서 유의하게 증가하였다(time effect, $p=0.001$). 그러나 최대운동 도달 시점에서 허혈성 전처치가 통제처치보다 혈중 젖산 농도가 적게 증가하고, 운동 후 회복기 3분대 낮은 농도를 보였으나 두 처치 간 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다($p < 0.05$) (Table 2).

고 찰

본 연구에서는 건강한 성인을 대상으로 허혈성 전처치가 최대운동수행력에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다. 연구 결과, 허혈성 전처치는 운동수행력의 지표인 최대산소섭취량, 운동 수행시간 및 최대운동강도를 증가시켰다. 이러한 결과는 허혈성 전처치 후 운동검사에서 최대산소섭취량 증가

Table 2. Effect of RIPC on the parameters of maximal exercise performance during and recovery after exercise test

Variable	Control	RIPC	p-value
VO _{2max} (mL/kg/min)	36.5 \pm 4.1	39.2 \pm 5.1	0.025
Exercise time (sec)	717.1 \pm 92.2	761.4 \pm 93.8	0.012
Maximal power output (watt)	194.7 \pm 26.0	217.1 \pm 32.4	0.010
HR max (bpm)	179.2 \pm 15.1	183.1 \pm 11.2	0.161
SBP max (mm Hg)	208.8 \pm 10.4	204.9 \pm 12.6	0.132
DBP max (mm Hg)	92.6 \pm 15.0	83.0 \pm 15.9	0.902
RPE stage 1	7.4 \pm 0.9	7.4 \pm 1.1	*
RPE stage 2	10.3 \pm 1.5	10.3 \pm 1.7	*
RPE stage 3	13.6 \pm 1.4	13.4 \pm 1.4	*
RPE stage 4	15.2 \pm 1.7	14.4 \pm 1.5	*
RPE max	18.3 \pm 0.8	17.9 \pm 0.9	0.163
Lactate base (mmol/L)	2.4 \pm 1.0	2.2 \pm 0.6	†
Lactate max (mmol/L)	10.3 \pm 5.5	9.0 \pm 2.2	†
Lactate recovery (mmol/L)	9.1 \pm 4.8	8.2 \pm 2.1	†

Values are presented as mean \pm standard deviation.

RIPC: remote ischemic preconditioning, HR: heart rate, SBP: systolic blood pressure, DBP: diastolic blood pressure, RPE: rating of perceived exertion.

By two-way repeated analysis of variance for RPE and lactate changes: *Time, < 0.001 ; trial, 0.319; interaction, 0.052;

†Time, < 0.001 ; trial, 0.501; interaction, 0.854.

를 보고한 de Groot 등⁴과 최대운동부하량 및 총 운동 수행시간 증가를 보고한 Crisafulli 등⁷의 연구와 동일한 결과이다. 최근 허혈성 전처치의 운동수행력 효과에 관한 메타분석에서 따르면 허혈성 전처치는 무산소 운동에 비해 유산소성 능력 향상에 더 효과적인 것으로 나타났다⁵. 하지 최대 근력⁸과 윙게이트 검사 지표⁹에서는 개선 효과가 없었으며, 수영거리¹⁰, 자전거¹¹ 및 달리기 시간 단축¹²과 같은 유산소 운동수행력에서 유의한 향상 효과가 나타났다.

본 연구는 유사한 실험 조건의 선행연구에 비교해 최대산소 섭취량이 더 많이 증가하였다. 트레드밀 검사로 최대산소섭취량을 측정한 Kaur 등¹³의 연구에서는 허혈성 전처치 후 유의한 개선 효과가 나타나지 않았으며, de Groot 등⁴의 연구에서는 최대산소섭취량이 1.6%, 운동 수행 강도가 3% 증가한 반면, 본 연구에서는 최대산소섭취량과 운동 수행 강도가 각각 7.4%, 11.5%로 더 높은 증가 효과를 나타냈다. 이러한 효과 정도의 차이는 허혈성 전처치와 운동검사와의 시간 간격 차이에 기인된다고 생각한다. Kaur 등¹³은 허혈성 전처치 후 15분에, de Groot 등⁴은 허혈성 전처치 직후 최대운동검사를 실시하였으며, 본 연구에서는 허혈성 전처치 60분 후에 운동검사를 실시하였다. 허혈성 전처치의 운동 수행 효과를 증대하기 위해서는 직후보다는 처치 40분 이후에 운동을 실시하는 것이 효과적이라고 제시되고 있으며^{6,14}, 허혈성 전처치 2시간 이후에는 이러한 효과가 감소하는 것으로 알려져 있다¹⁵. 그러나, 본 연구에서 적용한 허혈성 전처치 후 60분에 운동검사를 시행한 것이 최대운동수행력을 증가시키기 위한 최적 시간인지에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

허혈성 전처치의 운동수행력 향상 효과는 피험자의 훈련상태에 따라 다르게 나타날 수 있다. 일반적으로 초기 체력상태가 높거나 운동선수들은 훈련 또는 처치에 향상 효과가 낮은 것으로 알려져 있다¹⁶. 일반 건강한 성인을 대상으로 한 연구^{4,7,12}에서는 허혈성 전처치 후 최대운동수행력이 향상된 반면 운동 선수를 대상으로 한 연구^{9,17-19}에서는 상대적으로 낮은 효과 또는 감소 효과를 나타냈다. 본 연구 피험자는 특별한 운동에 참여하고 있지 않은 건강한 성인을 대상으로 하였으며, 이러한 피험자의 특성은 허혈성 전처치 후 운동수행력 향상 효과를 높인 것으로 생각한다. 그러나 추후 동일한 허혈성 전처치 프로토콜 및 운동검사를 사용하여 피험자 훈련상태에 대한 독립적인 효과 비교 필요할 것으로 생각된다.

아직 허혈성 전처치가 어떻게 운동수행력을 향상하는지에 대한 기전은 명확하지 않으나, adenosine, nitric oxide, 및 K_{ATP} 활성화를 통한 활동근으로의 혈류량 증가가 운동수행력을

증가시키는 중요한 기전으로 제시되고 있다^{3,20-23}. 그 중 K_{ATP} 채널 활성 증가는 혈관 이완 효과를 가져오며, 운동 중 활동근으로의 기능성 교감신경 차단(functional sympatholysis)을 증가시키는 것으로 알려져 있다²⁴. 기능적 교감신경차단이란 운동 중 효율적인 혈류 재분배를 의미한다. 운동이 시작되면서 활성화된 교감신경은 혈관을 수축시키지만, 운동을 지속하게 되면 골격근에 대사물질이 축적되고 이는 활동근에서 교감신경에 의한 혈관 수축 반응을 둔하게 만든다. 결과적으로 활동근으로 혈류량이 증가하고, 대사 요구량을 충족시킴에 따라 운동수행력이 향상될 수 있다²⁰. 비록 본 연구와 다른 형태의 운동이었지만, Horiuchi 등²⁵의 연구에서는 허혈성 전처치 후 상대적으로 높은 강도에서의 등척성 악력 운동 시 ‘기능적 교감신경 차단’ 개선 효과를 보고하였다. 따라서 허혈성 전처치는 적절한 혈류 재분배를 통해 증가한 대사 요구량을 충족시킴으로 운동수행력 향상에 도움을 주는 것으로 제시되고 있다²⁰. 다음으로 허혈성 전처치 후 증가한 아데노신과 산화질소의 영향을 고려해 볼 수 있다. 아데노신과 산화질소는 잠재적인 혈관 이완 물질이며, 허혈성 전처치 후 증가한 아데노신은 혈관 이완을 통해 운동 중 원활한 혈류 공급에 있어 도움을 줄 수 있다²¹. 아데노신 차단제를 이용한 동물연구에서 허혈성 전처치 후 혈관 이완 반응이 감소하였다고 보고하였으며²⁶, 건강한 젊은 성인에서는 허혈성 전처치 후 산화질소 활성 기능이 개선되었고²⁷, 고강도 운동 후 혈관 기능 감소를 억제하기도 하였다²⁸. 마지막으로 허혈성 전처치의 에너지 요구량 감소에 따른 운동수행력 개선 효과를 고려해볼 수 있다. 에너지 요구량 감소는 운동 수행에 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 일부 연구에서 허혈성 전처치의 ATP 절약 효과에 대한 증거를 제시하였는데, 허혈성 전처치 동안 앞에서 살펴본 내인성 물질 즉 아데노신, 산화질소는 K_{ATP} 채널을 활성화함으로 불필요한 펌핑을 감소시키고 전위 에너지 보유를 증가시키는데 도움을 준다고 제시하였다²².

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 제한점이 있다. 첫 번째 본 연구는 피험자에게 처치에 대한 맹검을 실시할 수 없었다. 그러나 운동검사는 측정자의 의지에 영향을 받을 수 있으므로 위약효과를 배제하기 위해 연구 참여 전 피험자에게 허혈성 전처치의 운동수행력 향상에 대한 이론적 배경을 설명하지 않았다. 두 번째, 본 연구는 건강한 성인 남성을 대상으로 하였다. 이러한 결과는 엘리트 선수에서는 다르게 나타날 수 있으며 향후 운동수행력 향상이 요구되는 엘리트 운동선수를 대상으로 한 추가적인 연구가 필요하다고 생각한다. 세 번째로 본 연구는 허혈성 전처치의 일시적 초기 보호 효과만을 증명하

였다. 따라서 반복적 허혈성 전처치의 효과 및 지연성 보호 효과 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다. 네 번째로 본 연구에서 안정 시 혈중 젖산농도가 높게 측정되었는데 이에 대한 원인으로 검체와 이동식 측정 장비의 영향을 고려해 볼 수 있다. 말초 모세혈관에서 측정한 젖산 농도는 혈장 또는 동맥혈에서 측정한 젖산 농도보다 높게 측정될 수 있으며, 본 연구에서 사용한 이동식 측정 장비는 낮은 농도 범위에서 높게 측정될 수 있다고 제시하고 있어²⁹ 향후 관련 연구에서는 이에 대해 고려가 필요할 것으로 생각한다. 마지막으로 본 연구는 허혈성 전처치의 유산소성 능력 향상 효과만을 증명하였다. 다른 건강 관련 체력 및 기능 관련 체력에 대한 효과에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다. 이러한 제한점에도 불구하고 본 연구는 운동수행력 증진을 위한 허혈성 전처치의 효과를 증명한 국내의 첫 번째 연구라는 점에서 그 의의가 있을 것이다. 운동수행력 증진은 오랜 시간 스포츠과학이 탐색해 온 분야 중 하나이다. 그동안 스포츠과학자들은 선수들의 체력과 경기력을 증진하기 위해 다양한 훈련방법을 모색해 왔으며, 심폐지구력 및 근파워 향상과 회복력 개선은 운동수행력 향상에 있어 중요한 목표라 할 수 있다. 허혈성 전처치는 약물 도핑이 아닌 자기보호기전을 통한 에르고제닉 효과를 나타내며, 비침습적이고 장소와 시간 제약이 없으며 부작용 없이 누구나 신체 부위에 적용할 수 있다는 장점이 있으므로 스포츠 현장에서 그 활용도가 높을 것으로 생각한다. 이상의 내용을 종합해 보면, 허혈성 전처치는 건강한 성인 남성의 유산소성 운동수행력을 향상했으며, 본 연구 결과는 운동수행력을 향상하기 위한 보조적 도구로서 허혈성 전처치가 유용하게 사용될 수 있다는 근거를 제시할 수 있을 것이다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Carden DL, Granger DN. Pathophysiology of ischaemia-reperfusion injury. *J Pathol* 2000;190:255-66.
2. Eisen A, Fisman EZ, Rubenfire M, et al. Ischemic preconditioning: nearly two decades of research. A comprehensive review. *Atherosclerosis* 2004;172:201-10.
3. Laude K, Beauchamp P, Thuillez C, Richard V. Endothelial protective effects of preconditioning. *Cardiovasc Res* 2002;55: 466-73.
4. de Groot PC, Thijssen DH, Sanchez M, Ellenkamp R, Hopman MT. Ischemic preconditioning improves maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 2010;108:141-6.
5. Salvador AF, De Aguiar RA, Lisboa FD, Pereira KL, Cruz RS, Caputo F. Ischemic preconditioning and exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Int J Sports Physiol Perform* 2016;11:4-14.
6. Sharma V, Cunniffe B, Verma AP, Cardinale M, Yellon D. Characterization of acute ischemia-related physiological responses associated with remote ischemic preconditioning: a randomized controlled, crossover human study. *Physiol Rep* 2014;2. pii: e12200.
7. Crisafulli A, Tangianu F, Tocco F, et al. Ischemic preconditioning of the muscle improves maximal exercise performance but not maximal oxygen uptake in humans. *J Appl Physiol* (1985) 2011;111:530-6.
8. Beaven CM, Cook CJ, Kilduff L, Drawer S, Gill N. Intermittent lower-limb occlusion enhances recovery after strenuous exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* 2012;37:1132-9.
9. Paixao RC, da Mota GR, Marocolo M. Acute effect of ischemic preconditioning is detrimental to anaerobic performance in cyclists. *Int J Sports Med* 2014;35:912-5.
10. Jean-St-Michel E, Manliot C, Li J, et al. Remote preconditioning improves maximal performance in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43:1280-6.
11. Kido K, Suga T, Tanaka D, et al. Ischemic preconditioning accelerates muscle deoxygenation dynamics and enhances exercise endurance during the work-to-work test. *Physiol Rep* 2015;3. pii: e12395.
12. Bailey TG, Jones H, Gregson W, Atkinson G, Cable NT, Thijssen DH. Effect of ischemic preconditioning on lactate accumulation and running performance. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44:2084-9.
13. Kaur G, Binger M, Evans C, Trachte T, Van Guilder GP. No influence of ischemic preconditioning on running economy. *Eur J Appl Physiol* 2017;117:225-35.
14. Patterson SD, Bezodis NE, Glaister M, Pattison JR. The effect of ischemic preconditioning on repeated sprint cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:1652-8.
15. Hausenloy DJ, Tsang A, Mocanu MM, Yellon DM. Ischemic preconditioning protects by activating prosurvival kinases at reperfusion. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2005;288:H971-6.
16. Hopkins WG, Hawley JA, Burke LM. Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:472-85.
17. Kjeld T, Rasmussen MR, Jattu T, Nielsen HB, Secher NH. Ischemic preconditioning of one forearm enhances static and

- dynamic apnea. *Med Sci Sports Exerc* 2014;46:151-5.
18. Clevidence MW, Mowery RE, Kushnick MR. The effects of ischemic preconditioning on aerobic and anaerobic variables associated with submaximal cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 2012;112:3649-54.
19. Gibson N, White J, Neish M, Murray A. Effect of ischemic preconditioning on land-based sprinting in team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 2013;8:671-6.
20. Riksen NP, Smits P, Rongen GA. Ischaemic preconditioning: from molecular characterisation to clinical application: part I. *Neth J Med* 2004;62:353-63.
21. Vander Heide RS, Reimer KA, Jennings RB. Adenosine slows ischaemic metabolism in canine myocardium in vitro: relationship to ischaemic preconditioning. *Cardiovasc Res* 1993;27:669-73.
22. Maldonado C, Pushpakumar SB, Perez-Abadia G, Arumugam S, Lane AN. Administration of exogenous adenosine triphosphate to ischemic skeletal muscle induces an energy-sparing effect: role of adenosine receptors. *J Surg Res* 2013;181:e15-22.
23. Pan SJ, Li LR. Adenosine A2 receptors are involved in the activation of ATP-sensitive K⁺ currents during metabolic inhibition in guinea pig ventricular myocytes. *Can J Physiol Pharmacol* 2011;89:187-96.
24. Keller DM, Ogoh S, Greene S, Olivencia-Yurvati A, Raven PB. Inhibition of KATP channel activity augments baroreflex-mediated vasoconstriction in exercising human skeletal muscle. *J Physiol* 2004;561(Pt 1):273-82.
25. Horiuchi M, Endo J, Thijssen DH. Impact of ischemic preconditioning on functional sympatholysis during handgrip exercise in humans. *Physiol Rep* 2015;3. pii: e12304.
26. Rubio R, Ceballos G, Balcells E. Intravascular adenosine: the endothelial mediators of its negative dromotropic effects. *Eur J Pharmacol* 1999;370:27-37.
27. Kimura M, Ueda K, Goto C, et al. Repetition of ischemic preconditioning augments endothelium-dependent vasodilation in humans: role of endothelium-derived nitric oxide and endothelial progenitor cells. *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 2007;27:1403-10.
28. Bailey TG, Birk GK, Cable NT, et al. Remote ischemic preconditioning prevents reduction in brachial artery flow-mediated dilation after strenuous exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2012;303:H533-8.
29. Baldari C, Bonavolonta V, Emerenziani GP, Gallotta MC, Silva AJ, Guidetti L. Accuracy, reliability, linearity of Accutrend and Lactate Pro versus EBIO plus analyzer. *Eur J Appl Physiol* 2009;107:105-11.