



Original Article

Effect of Acute Beetroot Juice Supplementation on Metabolic Function, Skeletal Muscle Oxygenation, and Cardiac Function During Endurance Exercise in Healthy Men

Jae-Ho Choi¹, Younghwan Oh¹, Wonil Park², and Hun-Young Park^{1,3*}

¹Department of Sports Medicine and Science, Konkuk University

²Department of Sport Science, Korea Institute of Sport Science

³Physical Activity and Performance Institute, Konkuk University

Article Info

Received 2025. 11. 04.

Revised 2026. 03. 25.

Accepted 2026. 04. 09.

Correspondence*

Hun-Young Park

parkhy1980@konkuk.ac.kr

Key Words

Beetroot juice, Nitrate, Workload, Metabolic function, Skeletal muscle oxygenation, Cardiac function

This work was supported by the Konkuk University KU Research Professor Program and by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-S1A5B5A17089358).

PURPOSE This study aimed to examine the physiological effects of acute beetroot juice (BRJ) supplementation on metabolic function, skeletal muscle oxygenation, and cardiac performance during endurance exercise at 70% of maximal heart rate (HRmax) in healthy young men. **METHODS** Ten healthy men took part in a randomized, double-blind, crossover study. Each completed two 30-minute cycling sessions at 70% HRmax, after consuming either a placebo or a BRJ supplement with 400 mg of nitrate. During these sessions, workload, perceived exertion (RPE), metabolic parameters (VE, VO₂, VCO₂, RER, O₂pulse), skeletal muscle oxygenation (oxHb, dxHb, toHb, StO₂), and cardiac metrics (HR, SV, CO) were recorded. **RESULTS** Compared to placebo, BRJ supplementation notably enhanced exercise workload and VO₂, with a significant rise in O₂pulse ($p < 0.05$). However, there were no significant changes in skeletal muscle oxygenation or cardiac function measures. RPE scores remained unchanged between the conditions. **CONCLUSIONS** Acute BRJ ingestion led to a higher exercise workload at the same heart rate during endurance exercise, along with an increase in VO₂. This was also accompanied by an increase in O₂pulse, a marker of circulatory oxygen transport, suggesting that acute BRJ intake could affect physiological responses associated with endurance performance in healthy young men.

서론

산화질소(nitric oxide, NO)는 생리적으로 혈류 조절, 신경신호전달, 글루코스 및 칼슘의 항상성, 근육 수축과 미토콘드리아 기능을 포함하여 인체에서 다양한 기능을 갖는 신호분자로 알려져 있다(Cooper & Giulivi, 2007; Dejam et al., 2004; Lee et al., 2015). 일반적으로 NO는 NO 합성효소(nitric oxide synthases)에 의해 촉매되는 반응인 L-arginine의 산화에 의해 생성되지만, 이와 함께식이 질산염(dietary inorganic nitrate)을 통한 질산염-아질산염-산화질소 경로(nitrate(NO₃⁻) nitrite(NO₂⁻) NO pathway) 역시 중요한 생합성 경로로 인식되고 있다(Lundberg et al., 2008).

이러한 경로를 기반으로 스포츠 현장에서는 NO₃⁻이 풍부한 비트 뿌리 주스(beetroot juice, BRJ)를 섭취하여 NO 생체이용률(bioavailability)을 높여 경기력을 향상시킬 수 있는 영양 보충제로 널리 활용되고 있다(Senefeld et al., 2020; Shannon et al., 2022). BRJ 섭취에 의해 생성된 NO가 운동능력 향상에 기여하는 기전은 일반적으로 두 가지 측면에서 설명되고 있다(Bailey et al., 2009). 첫째, 운동 중 활성화된 근조직에서 발생하는 국소적 저산소증(local hypoxia)은 BRJ 섭취로 인해 증가된 NO₃⁻ 및 NO₂⁻의 환원 반응을 촉진하여 NO 생성을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Bailey et al., 2009; Cermak et al., 2012). 이러한 NO 생성 증가는 운동 중 활성화된 골격근으로의 산소 공급을 조절하여 국소 혈류를 근육의 산소 요구량과 보다 정밀하게 일치시키는 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다(Bailey et al., 2009; Cermak et al., 2012). 둘째, NO 및 NO₂⁻는 세포 수준에서 산소 이용 효율을 조절하는 역할을 수행한다. NO는 미토콘드리아 시토크롬 옥시다제(cytochrome oxidase)

© 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.

의 활성을 억제하고(Brown & Cooper, 1994), 미토콘드리아 양성자 펌프의 미끄러짐(slippage)을 감소시켜 산화적 인산화 효율을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Clerc et al., 2007). 또한 NO_2^- 는 저산소 조건에서 세포호흡(cell respiration) 과정에서 산소의 역할을 부분적으로 대체할 수 있는 대체 전자 수용체(alternative electron acceptor)로 작용할 수 있어(Bateman et al., 2002), BRJ 섭취가 활성화된 근조직에서의 산소 이용 효율성을 향상시키고 지구성 운동능력 향상에 기여할 수 있는 주요 기전적 근거로 제시되고 있다(Larsen et al., 2007).

다수의 선행연구에서는 BRJ 섭취가 지구성 운동능력 향상에 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였다. Bailey et al.(2009)은 6일간의 BRJ 섭취(500mL/day, 11.2mmol NO_3^-)가 중·고강도 운동 시 산소 동역학(oxygen kinetics)을 개선하고 지칠 때까지의 시간을 연장시킨다고 보고하였으며, Lee et al.(2015)은 15일간의 BRJ 섭취(70mL/day, 400mg NO_3^-)가 최대운동부하검사(graded exercise test) 중 NO 생성 및 혈관기능을 유의하게 향상시킨다고 보고하였다. 또한 Porcelli et al.(2015)은 6일간의 BRJ 섭취(5.5mmol NO_3^-)가 유산소 능력이 낮은 참가자에게서 3km 경기기록을 유의하게 개선시켰다고 제시하였다. 이외에도 BRJ 섭취는 지구성 운동뿐만 아니라 고강도 간헐적 운동(high-intensity intermittent exercise)과 근력 기반 운동(strength-based exercise) 수행능력 개선에도 효과적이라고 보고되고 있다(Coggan et al., 2015; Mosher et al., 2016; Wylie et al., 2013). 이러한 결과들은 BRJ 섭취가 단순히 지구성 운동뿐만 아니라 다양한 운동 형태에서 산소 이용 효율과 에너지 대사 기능을 개선함으로써 전체적인 운동 수행능력을 향상시킬 가능성을 시사한다.

그러나 선행연구 결과들은 대상자의 유산소 능력, 훈련 상태, 섭취 용량 및 기간에 따라 일관되지 않은 경향을 보이고 있다. 특히, Shannon et al.(2022)의 전문가 합의 연구에서는 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 가 45mL/kg/min 이하인 경우 급성 및 만성 BRJ 섭취 모두가 지구성 운동능력 개선에 효과적이었으나, 60mL/kg/min 이상에서는 급성보다는 장기적 섭취에서만 유의한 효과가 관찰된다고 보고하였다. 또한 일부 선행연구에서는 운동 2-3시간 전에 5mmol 이상의 급성 BRJ 섭취가 지구성 운동능력 개선에 잠재적인 효과를 나타낸다고 보고하였으나(Maughan et al., 2018; Senefeld et al., 2020), 다른 연구에서는 다양한 집단의 특성에 따른 급성 BRJ 섭취 효과를 명확히 규명하기에는 근거가 부족하다고 제시하였다(Shannon et al., 2021, 2022). 이와 같이 BRJ 섭취 효과에 대한 연구들은 주로 수행능력 변화에 초점을 두어 보고되어 왔으나, 동일한 상대강도 조건에서 나타나는 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능을 포함한 생리적 기전을 통합적으로 검증한 연구는 제한적인 실정이다.

따라서 다양한 실험연구를 바탕으로 일회성의 BRJ 섭취가 지구성 운동능력에 미치는 영향을 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능의 분석을 통해 종합적으로 규명하는 것은 BRJ 섭취 효과에 대한 중요한 기전적 근거를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

연구방법

연구대상자

본 연구의 대상자는 비흡연자이며, 최근 6개월 동안 근골격계, 대사계, 심혈관계 및 폐 질환에 대한 병력이 없는 건강한 성인 남성 10명으로 구성되었다. 모집된 대상자의 건강 상태는 연구 참여 전 2020 PAR-Q+(Physical Activity Readiness Questionnaire for Everyone)를 이용한 사전 스크리닝을 통해 확인하였으며, 건강상 문제가 없는 것으로 판단된 경우에만 연구 대상으로 포함하였다(Park et al., 2022).

본 연구는 검정력이 80%를 초과하도록 표본 크기를 산정하였다. 선행 연구의 결과를 바탕으로 순환 NO_3^- 수준의 변화를 반복측정 분산분석(repeated-measures ANOVA)으로 분석한 Garnacho-Castaño et al.(2018)의 연구에서 보고된 효과크기(partial $\eta_p^2 = 0.647$)를 참고하여 표본 수를 산출하였다. 유의수준(α) 0.05, 검정력 ($1-\beta$) 0.90을 기준으로 G*Power를 이용하여 분석한 결과, 해당 조건을 충족하기 위한 최소 표본 크기는 총 8명으로 계산되었다. 그러나 탈락자를 고려하여 총 10명의 연구 참여자를 모집하였다.

연구 대상자의 신체적 특성은 <Table 1>에 제시하였다. 본 연구는 K대학교 기관생명연구윤리위원회(institutional review board, IRB)로부터 승인을 받았으며(7001355-202401-HR-742), 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki)의 지침에 따라 수행되었다.

Table 1. Selected anthropometric data of subject

Variables	Healthy men (n = 10)	Minimum	Maximum
Age (years)	25.2 ± 2.3	21.0	29.0
Height (cm)	179.2 ± 4.4	172.1	185.2
Weight (kg)	77.0 ± 5.5	69.2	86.6
BMI (kg/m ²)	24.0 ± 1.3	21.1	26.1
Free fat mass (kg)	65.8 ± 5.4	57.3	76.3
Fat mass (kg)	11.1 ± 2.9	6.4	16.0
Percent body fat (%)	14.4 ± 3.5	7.7	19.7
70%HRmax (bpm)	136.4 ± 1.5	134.0	139.0

Note. Data are expressed as mean ± standard deviation, BMI: body mass index, HRmax = maximal heart rate.

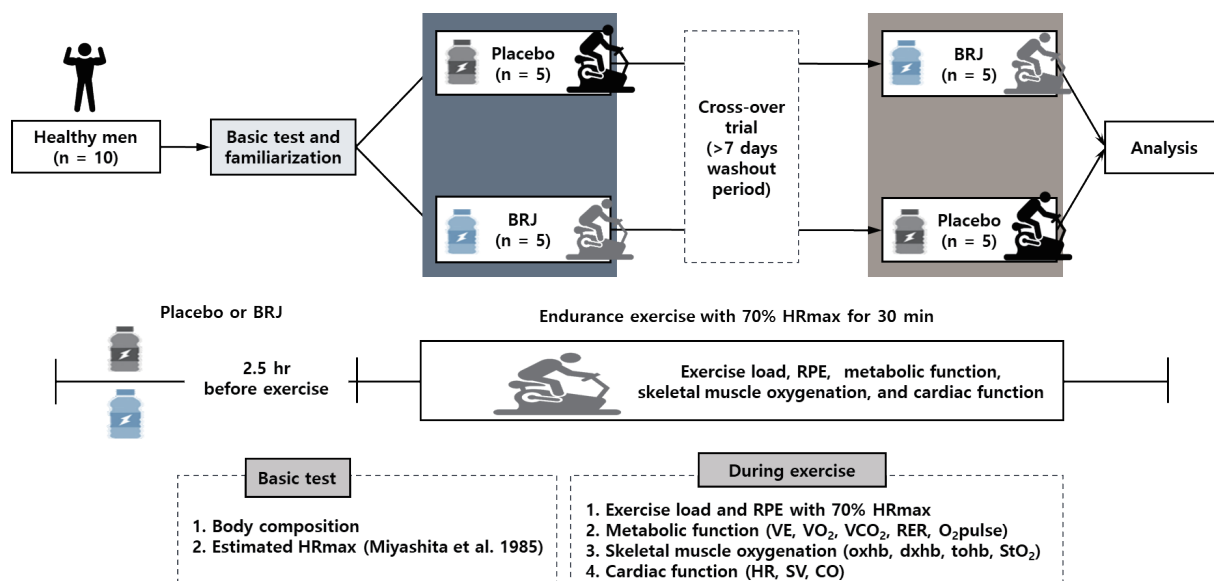


Fig. 1. Study design

연구 설계

본 연구의 연구 설계는 <Fig. 1>에 제시하였다. 실험 기간 동안 모든 대상자들은 총 3번 실험실에 방문하였으며, 무작위(randomized), 이중 맹검(double-blind), 교차 설계(crossover design)를 적용하여 수행되었다. 모든 대상자는 BRJ 섭취 조건과 플라시보 섭취 조건에 각각 1회씩 참여하였으며, 처치 순서는 컴퓨터 기반 난수 생성(random number generation)을 이용하여 무작위로 배정되었다. 대상자 10명 중 5명은 첫 번째 실험에서 BRJ를 섭취하고 나머지 5명은 플라시보를 섭취하도록 할당되었으며, 각 방문 간에는 일주일의 세척 기간(washout period)을 두고 반대 조건의 처치를 수행하였다. 대상자와 결과 측정에 관련한 연구자는 섭취 음료의 종류에 대해 모두 맹검 상태를 유지하였다.

첫 번째 방문에서 모든 연구 대상자들은 4시간 이상의 금식과 48시간의 격렬한 신체활동을 금지한 후 아침에 실험실을 방문하였으며, 방문 후 충분한 안정을 취한 다음 신장과 신체구성을 측정하였다. 그런 다음 연구 대상자들은 본 연구수행에 앞서 운동 프로토콜에 대한 친숙화(familiarization) 과정을 수행하였다. 운동 프로토콜은 Miyashita 공식(남성: $209 - 0.69 \times \text{연령}$)에 의해 추정된 최대 심박수(maximal heart rate, HRmax)(Miyashita et al, 1985)의 70%에 해당되는 강도로 자전거 에르고미터(Aerobike 75XLII; Konami Corporation, Tokyo, Japan)를 이용하여 총 30분간 최대하 지구성 운동을 실시하였다(Park et al., 2022). 자전거 에르고미터를 이용한 최대하 지구성 운동 시 연구 대상자들의 목표 심박수는 136.4 ± 1.5 bpm에 해당 되었으며, 해당 심박수 수준을 유지하기 위해 자전거 에르고미터의 심박수 제어 기능을 활용하여 운동 중 심박수가 목표 수준에 도달할 때까지 운동부하(와트)를 점진적으로 증가시킨 후, 운동 수행 중 심박수 변화에 따라 운동부하를 지속적으로 증감 조절하였다. 두 번째와 세 번째 방문에서 모든 연구 대상자들은 방문 전에 12시간 동안 금식을 하였으며, 검사 전 24시간 동안 신체활동을 자제

하도록 지시하였다. 연구 참여 기간 동안 연구 대상자들은 NO₃⁻ 함량이 높은 식품(비트, 샐러리, 시금치 등)과 BRJ의 체내 흡수를 억제할 수 있는 양배추 종류(브로콜리, 콜리플라워, 적양배추 등)의 섭취를 제한하도록 사전에 교육받았으며, 연구자는 주기적으로 연락을 통해 이를 확인하였다.

연구 대상자들은 아침에 실험실에 방문한 후 본 운동을 수행하기 2시간 30분 전에 NO₃⁻가 함유되지 않은 70mL의 플라시보(placebo) 또는 NO₃⁻가 400mg (6.4mmol)이 포함된 70mL의 BRJ를 섭취하였다.

<Fig. 2>에서 보는 바와 같이 본 연구에서 플라시보는 무시할 수 있는 NO₃⁻ 수준과 BRJ 섭취제와 유사한 구성성분 및 색상으로 인해 자두 주스(Sunsweet Growers Inc., Kingston upon Hull, UK)를 선택하였다(Berry et al., 2015). BRJ 섭취제는 앞에서 언급한 바와 같이 선행연구를 바탕으로 NO₃⁻가 400mg (6.4mmol)이 포함된 70mL의 비트주스(Beet-It Sport Shot 400; James White Ltd, Ashbocking, UK)를 선택하였다(Jones et al., 2019). 연구에서 사용될 플라시보와 BRJ 섭취제는 선행연구에서 탄수화물과 섬유질의 함량은 비슷하며, 생리적 차이를 나타내지 않는 것으로 보고되고 있다(Berry et al., 2015). 플라시보 또는 BRJ 섭취 2시간 30분 후에 모든 연구 대상자들은 HRmax의 70%에 해당되는 강도로 자전거 에르고 미터(Aerobike 75XLII; Konami Corporation, Tokyo, Japan)를 이용하여 총 30분간 최대하 지구성 운동을 실시하였다. 최대하 지구성 운동 동안에 운동부하, 주관적 자각도(rating of perceived exertion, RPE), 대사 기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능을 측정하였으며, RPE는 5분마다 측정을 수행하였다. 나머지 모든 변인들은 매 분마다 측정하였다.

모든 연구수행은 K대학교 내에 위치한 환경조절챔버(NCTN-1, Nara Control, Seoul, Korea)에서 수행하였으며, 환경조건은 일정한 온도 및 습도(온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $50 \pm 5\%$)를 유지하였다.

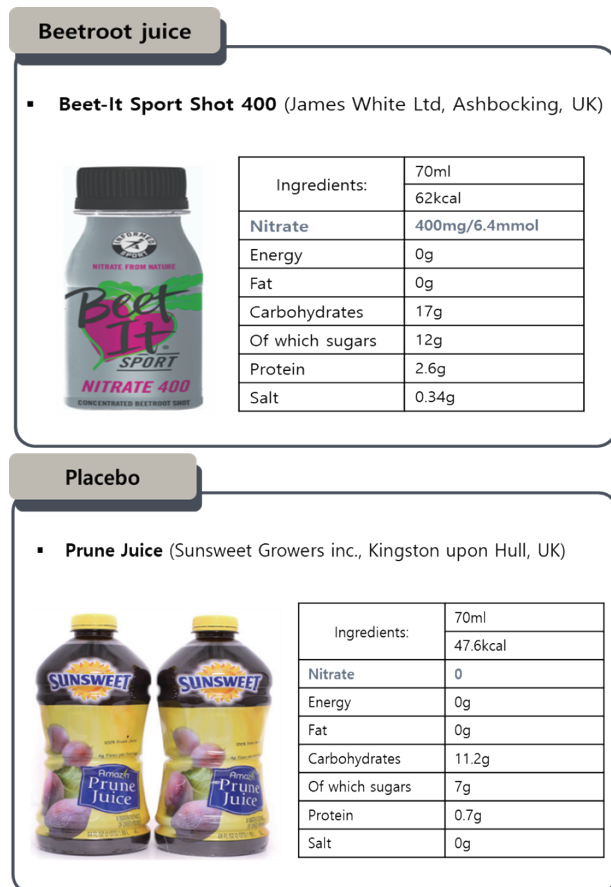


Fig. 2. Ingredient of placebo and BRJ supplement (Jones et al., 2019)

측정 항목 및 방법

1. 신체구성

신체구성은 가벼운 옷차림 상태로 자동 신장계 BSM 330 (Inbody, Seoul, Korea)과 체성분 분석기 Inbody 770 (Inbody, Seoul, Korea)을 이용하여 분석하였다. 모든 대상자들은 최소 4시간 이상의 금식과 48시간의 격렬한 신체활동을 금한 후 오전에 실험실에 방문하여 신체구성을 측정하였다. 모든 대상자는 몸에 부착된 금속성 물질을 제거한 후 측정 장치에 맨발로 올라서서 신장을 측정한 후 발판 전극을 밟고 올라서서 측정된 체중과 나이를 입력한 후 손잡이를 양 손으로 잡고 직립 자세로 팔과 다리를 약간 벌린 자세로 신체구성을 측정하였다. 측정 항목으로 신장(cm), 체중(kg), BMI(kg/m²), 체지방량(kg), 체지방률(kg), 체지방률(%)을 측정하였다.

2. 지구성 최대하 운동 중 운동부하 및 RPE

본 연구에서 지구성 최대하 운동 중 운동부하는 자전거 에르고미터(Aerobike 75XLII; Konami Corporation, Tokyo, Japan)에서 HRmax의 70% 강도로 30분간 최대하 운동을 수행하는 동안에 기기에 의해 매분마다 자동 계산되었으며, RPE는 6-20 Borg 스케일을 이용하여 5분마다 평가하였다.

3. 지구성 최대하 운동 중 대사기능

본 연구에서 지구성 최대하 운동 중 대사기능은 안정시 및 자전거 에르고미터(Aerobike 75XLII; Konami Corporation, Tokyo, Japan)에서 HRmax의 70% 강도로 30분간 최대하 운동을 수행하는 동안에 자동호흡대사분석기(K5, Cosmed, Rome, Italy) 및 안면 마스크 형태의 호흡 밸브를 이용하여 매분마다 분당 환기량(minute ventilation, VE), 산소섭취량(oxygen uptake, VO₂), 이산화탄소배출량(carbon dioxide excretion, VCO₂), 호흡교환률(respiratory exchange ratio, RER), 산소맥(oxygen pulse, O₂pulse)을 측정하였다. O₂pulse는 안정시 및 매분에서 측정된 VO₂를 심박수(heart rate, HR)로 나누어 계산하였으며, 나머지 항목은 기기에 의해 자동 측정되었다.

4. 지구성 최대하 운동 중 골격근 산소화 농도

본 연구에서 지구성 최대하 운동 중 골격근 산소화 농도는 근육조직에 대한 NIRS 시스템(Astem, Mizonokuchi, Japan)을 이용하여 우측 외측 광근(vastus lateralis muscle)에서 산화 헤모글로빈 농도(oxygenated hemoglobin, oxHb), 탈산화 헤모글로빈 농도(deoxygenated hemoglobin, dxHb), 총 헤모글로빈 농도(total hemoglobin, toHb), 조직 산소화 농도(tissue oxygenated saturation, StO₂)를 측정하였다. 정확한 측정을 위해 무릎 10-15cm 위쪽에 위치하는 우측 외측광근에 NIRS를 부착한 후 안정시부터 30분의 최대하 운동이 종료될 때까지 10초 간격으로 데이터를 기록하였으며, 측정값은 1분간의 평균값을 활용하였다.

5. 지구성 최대하 운동 중 심장기능

본 연구에서 지구성 최대하 운동 중 심장기능은 6개의 전극을 부착하여 심장주기 동안 흉부의 임피던스 변화를 감지하는 흉부 생체전기 임피던스 장치인 PhysioFlow PF-05(Manatec Biomedical, Paris, France)를 사용하여 HR, 일회박출량(stroke volume, SV), 심박출량(cardiac output, CO)을 매분마다 측정하였다. 6개의 전극은 목 왼쪽 기저부의 쇄골상와(supraclavicular fossa) 위에 배치된 2개의 임피던스 심전도 전극, ECG 기록에 사용되는 2개의 심전도 전극 및 칼둘기에 배치된 2개의 전극으로 구성된다.

통계 처리

본 연구에서 획득된 모든 자료는 SPSS 28(SPSS Institute, IBM Corp., Armonk, NY, USA) 통계 프로그램을 이용하여 각 항목별 평균(Mean)과 표준편차(Standard Deviation)를 산출하였다. 모수통계 분석을 위한 정규성과 등분산성에 대한 가정은 모든 종속 변인에 대해서 Shapiro-Wilk test를 통해 검증하였다. 시기와 처치에 따른 상호작용 효과 및 식이처치에 따른 주효과를 검증하기 위해 반복이원 분산분석(repeated two-way ANOVA)을 실시하였으며, 유의한 상호작용효과 및 식이 처치에 따른 주효과가 나타나는 경우 처치에 따른 효과 차이를 검증하기 위해 사후검증으로 Bonferroni를 실시하였다. 모든 통계처리에 대한 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

연구결과

운동부하 및 RPE의 변화

플라시보 및 BRJ 섭취에 따른 지구성 운동 중 운동부하 및 RPE의 변화는 <Fig. 3>에서 보는 바와 같다. 운동부하와 RPE 모두에 있어서 시간 및 처치에 의한 유의한 상호작용효과가 나타나지 않았지만, 운동부하에 있어서 유의한 처치간 주효과($p=0.035$, $\eta^2=0.406$)가 나타났다. 이에 대한 사후분석을 실시한 결과 일회성의 BRJ 섭취는 플라시보 섭취에 비해 지구성 운동 중 유의하게 더 높은 운동부하($p<0.05$)를 나타냄을 확인할 수 있었다.

대사기능의 변화

플라시보 및 BRJ 섭취에 따른 지구성 운동 중 대사기능의 변화는 <Fig. 4>에서 보는 바와 같다. 모든 대사기능 관련 변인에 있어서 처치와 시간에 따른 유의한 상호작용효과는 나타나지 않았지만, VO_2 ($p=0.048$, $\eta^2=0.367$)와 O_2 pulse($p=0.033$, $\eta^2=0.413$)에 있어서 유의한 처치간 주효과가 나타났다. 이에 대한 사후분석을 실시한 결과 일회성의 BRJ 섭취는 플라시보 섭취에 비해 지구성 운동 중 유의하게 더 높은 VO_2 ($p<0.05$)와 O_2 pulse($p<0.05$) 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, VE, VCO_2 , RER에 있어서는 지구성 운동 중 플라시보 및 BRJ 섭취에 따른 차이는 나타나지 않았다.

골격근 산소화 농도의 변화

플라시보 및 BRJ 섭취에 따른 지구성 운동 중 골격근 산소화 농도의 변화는 <Fig. 5>에서 보는 바와 같다. 모든 골격근 산소화 농도 관련

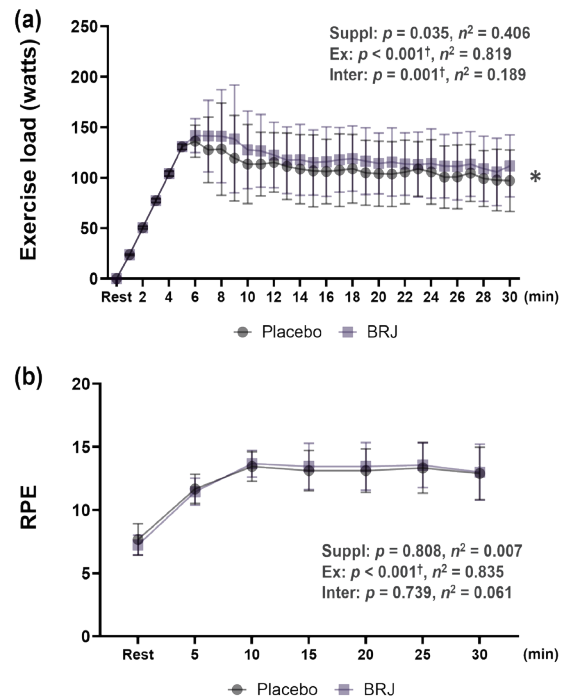


Fig. 3. Change of exercise load and RPE during endurance exercise between placebo and BRJ trial. (a) change of exercise load, (b) change of RPE. BRJ = beetroot juice, Suppl = supplementation, Ex = exercise, Inter = interaction, RPE = rating of perceived exertion. † Significant interaction or main effect within supplement or exercise, $^\dagger p < 0.05$. *Significant difference between the placebo and BRJ supplement, $*p < 0.05$.

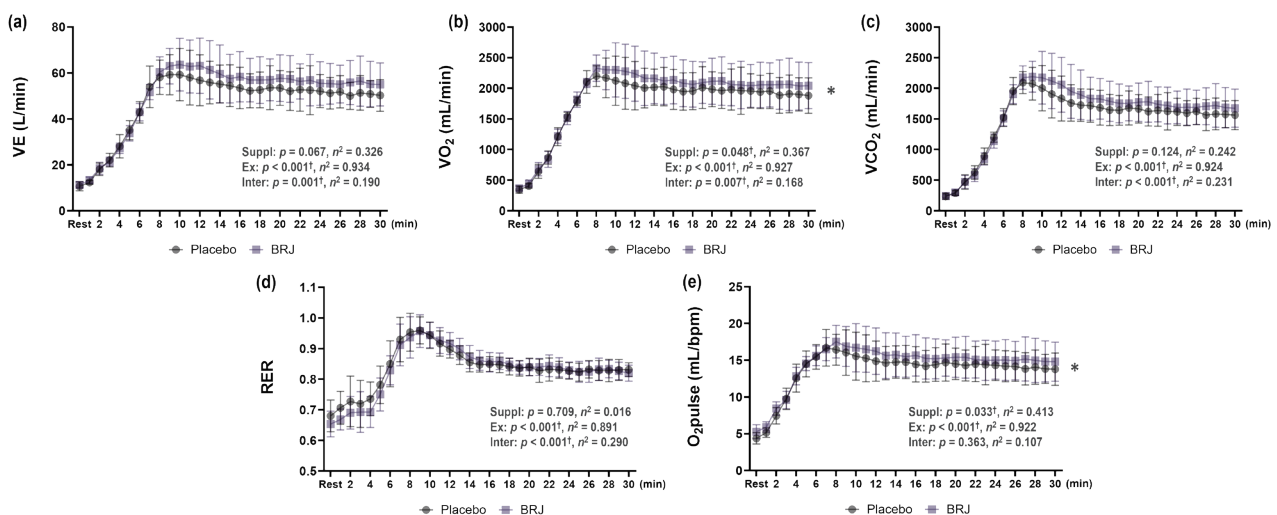


Fig. 4. Change of metabolic function during endurance exercise between placebo and BRJ trial. (a) Change of VE, (b) Change of VO_2 , (c) Change of VCO_2 , (d) Change of RER, (e) Change of O_2 pulse. BRJ = beetroot juice, Suppl = supplementation, Ex = exercise, Inter = interaction, VE = minute ventilation, VO_2 = oxygen uptake, VCO_2 = carbon dioxide excretion, RER = respiratory exchange ratio, O_2 pulse = oxygen pulse. † Significant interaction or main effect within supplement or exercise, $^\dagger p < 0.05$. *Significant difference between the placebo and BRJ supplement, $*p < 0.05$.

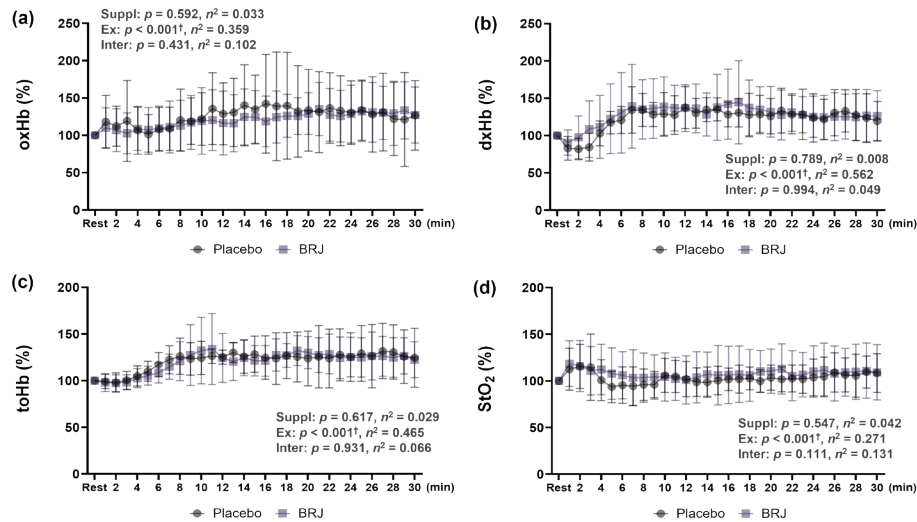


Fig. 5. Change of skeletal muscle oxygenation during endurance exercise between placebo and BRJ trial. (a) Change of oxHb, (b) Change of dxHb, (c) Change of toHb, (d) Change of StO₂. BRJ = beetroot juice, Suppl = supplementation, Ex = exercise, Inter = interaction, oxHb = oxygenated hemoglobin, dxHb = deoxygenated hemoglobin, toHb = total hemoglobin, StO₂ = tissue oxygenated saturation. [†]Significant interaction or main effect within supplement or exercise, [†] $p < 0.05$.

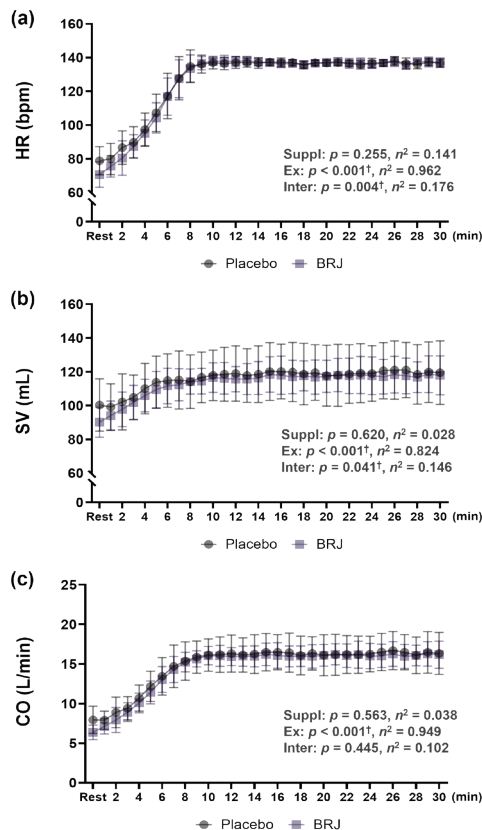


Fig. 6. Change of cardiac function during endurance exercise between placebo and BRJ trial. (a) Change of HR, (b) Change of SV, (c) Change of CO. BRJ = beetroot juice, Suppl = supplementation, Ex = exercise, Inter = interaction, HR = heart rate, SV = stroke volume, CO = cardiac output. [†]Significant interaction or main effect within supplement or exercise, [†] $p < 0.05$.

변인에 있어서 처치와 시간에 따른 유의한 상호작용효과와 처치에 따른 주효과가 나타나지 않았다. 이에 지구성 운동 중 골격근 산소화 농도에 있어서 플라시보 및 BRJ 섭취의 효과 차이는 나타나지 않았다.

심장기능의 변화

플라시보 및 BRJ 섭취에 따른 지구성 운동 중 심장기능의 변화는 <Fig. 6>에서 보는 바와 같다. 모든 심장기능 관련 변인에 있어서 처치와 시간에 따른 유의한 상호작용효과와 처치에 따른 주효과가 나타나지 않았다. 이에 지구성 운동 중 심장기능에 있어서 플라시보 및 BRJ 섭취의 효과 차이는 나타나지 않았다.

논 의

본 연구는 무작위, 이중맹검, 교차설계를 적용하여, 일회성 BRJ 섭취가 70% HRmax의 지구성 운동 중 운동부하, RPE, 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, BRJ 섭취 조건에서는 동일한 상대강도(70% HRmax) 하에서 더 높은 운동부하와 이에 상응하는 산소섭취량($\dot{V}O_2$)의 증가가 관찰되었으며, 이러한 반응은 산소 운반 효율을 반영하는 간접 지표로 활용되는 산소 맥동(O_2 pulse)의 증가와 함께 나타났으며, 이는 순환계 수준에서의 산소 전달 효율이 변화했을 가능성을 시사한다. 그러나 활동근으로의 산소유입과 관련된 골격근 산소화 농도와 심장기능 관련 변인에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다.

본 연구결과는 Cermak et al.(2012)과 Shannon et al.(2017)이 보고한 바와 같이, BRJ 섭취가 지구성 운동능력을 향상시킬 수 있다는 선행연구들과 일치한다. Cermak et al.(2012)은 12명의 사이클 선수를 대상으로 6일간 NO₃⁻이 농축된 BRJ를 섭취한 결과, 운동부하 및 time trial performance가 향상되었다고 보고하였으며,

ergogenic 효과를 극대화하기 위해서는 일반 BRJ 보다 NO_3^- 가 고 농축된 제품이 효과적이라고 제시하였다. Shannon et al.(2017)은 러너 및 트라이애슬론 선수를 대상으로 BRJ 섭취 후 time trial performance의 유의한 개선을 확인하였으며, 이는 근조직에서의 혈류 및 산소 전달 증가를 통해 Type I뿐 아니라 Type II 근육에 O₂ 전달을 증가시키고, 이러한 변화가 조직에서의 산소분압을 증가시켜 골격근에서의 대사산물(예, PCr 저하, ADP 및 Pi의 축적)의 축적을 감소시킴으로써 지구성 운동 중 더 높은 운동부하를 나타낸 것으로 판단된다.

이러한 결과에도 불구하고, 본 연구에서는 70% HRmax 수준에서 운동부하가 증가하였음에도 RPE의 변화는 나타나지 않았다. 이는 Hogwood et al.(2023)의 결과와 유사하게, 참가자들이 동일한 상대강도(70% HRmax)에 대응하는 운동을 수행하였기 때문으로 보인다. 즉, 실제 절대 운동부하는 증가하였으나, 심박수에 기반한 상대적 강도가 일정하게 유지되어 인지된 노력 수준(RPE)이 유사하게 나타난 것으로 해석된다.

Thompson et al.(2014)은 급성 BRJ 섭취 후 다양한 강도(50%, 70%, 90% $\text{VO}_{2\text{peak}}$)에서 지구성 운동을 수행한 결과, 중강도(50% $\text{VO}_{2\text{peak}}$)에서는 VO_2 감소 경향을 보였으나, 고강도(70-90% $\text{VO}_{2\text{peak}}$)에서는 차이가 없다고 보고하였다. 이들은 BRJ 섭취가 중강도 및 고강도 운동 중 산소 동역학(oxygen kinetics)에 영향을 미칠 수 있으나, 최대 산소섭취량($\text{VO}_{2\text{max}}$)에는 직접적인 영향이 제한적이라고 제시하였다. 반면, de Castro et al.(2019)은 13명의 남성 러너를 대상으로 한 연구에서 BRJ 섭취 후 VO_2 , velocity associated with $\text{VO}_{2\text{max}}$ ($\text{vVO}_{2\text{max}}$), peak velocity (V_{peak})가 향상되었다고 보고하였다. 이러한 결과는 BRJ 섭취가 운동 중 산소 이용과 관련된 생리적 반응에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 본 연구에서도 유사하게, BRJ 섭취 후 최대하 운동(70% HRmax) 중 더 높은 운동부하와 이에 따른 VO_2 증가가 확인되었다. 비록 골격근 산소화 농도(oxHb, dxHb, toHb, StO₂)와 심장기능 변수(HR, SV, CO)에서는 차이가 나타나지 않았으나, 70% HRmax에 해당하는 부하로 수행된 clamped heart rate submaximal endurance exercise에 있어서 O₂pulse의 유의한 증가는 순환계의 반응을 반영하는 지표로 해석될 수 있다(American College of Sports Medicine [ACSM], 2020; Mezzani et al., 2009)

골격근 산소화 반응과 관련하여, de Oliveira et al.(2020)은 전투 스포츠 선수들을 대상으로 한 연구에서 beetroot-based gel 섭취 후 골격근 산소화 농도에 변화는 없었지만, 근육의 피로 내성(time to exhaustion)이 증가하였다고 보고하였다. Jo et al.(2019) 역시 건강한 성인을 대상으로 한 연구에서 BRJ 섭취 후 평균 파워와 time trial 성능은 개선되었으나, 골격근 산소화 농도의 변화는 관찰되지 않았다고 보고하였다. 골격근에는 NO_3^- 과 NO_2^- 이 존재하며, 이러한 음이온의 기본 농도는 혈장보다 골격근에서 더 높게 나타난다. 따라서 BRJ 섭취에 따른 운동수행능력의 향상은 근육 내 NO_3^- 의 흡수, 근육 내 NO_2^- 농도의 증가, 그리고 NO_2^- 의 NO 전환에 의해 매개될 가능성이 제시된다(de Oliveira et al., 2020). 그러나 근육의 NO_3^- 농도는 개인 간 차이를 보일 수 있으며, 이는 다양한 단백질(xanthine oxidoreductase, aldehyde oxidase, sialin 등)의 발현 차이와 관련이 있다. 이러한 요인은 근육 내 NO 생성의 효율과 생체이용률을 결정하여, BRJ 섭취 후 관찰되는 운동 성능의 개인차에 기여할 수 있다(Larsen et al., 2011; Wylie et al., 2016).

심장기능 측면에서, Bond et al.(2014)은 건강한 성인을 대상으로 한 연구에서 급성 BRJ 섭취 후 HR, CO, SV에 유의한 변화가 없음을 보고하였으며, 이는 BRJ 섭취가 운동 중 혈장 내 NO를 증가시키고 VO_2 를 감소시켰지만 심장기능에는 영향을 미치지 않았다고 보고하였으며, 젊고 건강한 참가자들의 안정적인 심혈관 조절 능력 때문이라고 제시하였다. 또한 Oggioni et al.(2018)은 급성보다는 장기적인 BRJ 섭취가 심장기능 개선에 더 큰 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다. 본 연구에서도 BRJ 섭취 후 70% HRmax에서 더 높은 운동부하를 나타냈음에도 심장기능 변수에서 차이가 없었는데, 이는 단기 섭취의 한계이거나, 상대적 강도(70% HRmax)를 일정하게 유지한 설계 특성 때문으로 판단된다.

결론적으로, 본 연구는 일회성 BRJ 섭취가 70% HRmax의 최대하 지구성 운동 중 동일한 상대강도 조건에서 더 높은 절대 운동부하와 이에 따른 VO_2 증가가 관찰되었으며, 이는 O₂pulse의 증가와 함께 관찰되었다. 반면, 골격근 산소화 및 주요 심장기능 지표에서는 유의한 변화가 나타나지 않아, 이러한 반응은 상대강도 기반 설계 특성을 고려한 조건부 해석이 필요함을 시사한다. 그러나 본 연구는 동일한 상대강도 조건에서 BRJ 섭취가 더 높은 운동부하 수행을 가능하게 했다는 점에서, 지구성 운동 수행과 관련된 생리적 반응을 이해하는 데 의미 있는 근거를 제공한다.

결론 및 제언

본 연구는 무작위, 이중 맹검, 교차 설계를 적용하여 20대의 건강한 성인 남성을 대상으로 일회성 BRJ 섭취가 70% HRmax 강도의 지구성 운동 중 운동부하와 RPE, 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능 개선에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, BRJ 섭취 조건에서는 동일한 상대강도 하에서 더 높은 운동부하가 수행되었으나, RPE는 플라시보와 유사하게 나타났다. 또한 VO_2 및 O₂pulse가 유의하게 증가하였으며, 이는 동일한 상대강도 조건에서 관찰된 순환계 산소 운반과 관련된 반응의 변화를 시사한다. 반면, 골격근 산소화 농도(oxHb, dxHb, toHb, StO₂)와 심장기능(HR, SV, CO)에서는 유의한 변화가 관찰되지 않았다.

이러한 결과를 종합하면, 건강한 성인 남성에서 일회성 BRJ 섭취는 지구성 운동 중 동일한 상대강도 조건에서 더 높은 절대 운동부하와 이에 상응하는 VO_2 반응을 유도할 수 있으며, O₂pulse의 증가는 이러한 실험 조건 하에서 나타난 순환계 반응을 반영하는 지표로 해석될 수 있다. 그러나 본 연구는 일회성 BRJ 섭취와 중강도 운동 프로토콜에 한정되어 수행되었기 때문에, 향후 연구에서는 섭취 기간과 운동 강도를 다양화하여 BRJ 섭취가 운동능력에 미치는 영향을 보다 폭넓게 검증할 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 혈관기능을 직접적으로 평가하지 않았으므로, 향후 연구에서는 혈관반응 관련 지표를 포함하여 BRJ 섭취의 생리적 효용성을 다각도로 검토할 필요가 있다. 더불어 연구의 신뢰도와 일반화를 높이기 위해, 보다 충분한 표본 크기(sample size)를 확보한 후속 연구가 요구된다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: H.-Y. Park, J.-H. Choi; Data curation: H.-Y. Park, J.-H. Choi, Y. Oh; Formal analysis: J.-H. Choi; Investigation: J.-H. Choi; Methodology: H.-Y. Park, J.-H. Choi, W. Park; Project administration: J.-H. Choi, Y. Oh; Validation: J.-H. Choi; Visualization: J.-H. Choi, W. Park; Writing – original draft: J.-H. Choi; Writing – review & editing: H.-Y. Park, W. Park.

참고문헌

- American College of Sports Medicine. (2020). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Wolters Kluwer.
- Bailey, S. J., Winyard, P., Vanhatalo, A., Blackwell, J. R., Dimenna, F. J., Wilkerson, D. P., Tarr, J., Benjamin, N., & Jones, A. M. (2009). Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 107(4), 1144–1155. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00722.2009>
- Bateman, R. M., Ellis, C. G., & Freeman, D. J. (2002). Optimization of nitric oxide chemiluminescence operating conditions for measurement of plasma nitrite and nitrate. *Clinical Chemistry*, 48(3), 570–573.
- Berry, M. J., Justus, N. W., Hauser, J. I., Case, A. H., Helms, C. C., Basu, S., Rogers, Z., Lewis, M. T., & Miller, G. D. (2015). Dietary nitrate supplementation improves exercise performance and decreases blood pressure in COPD patients. *Nitric Oxide*, 48, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2014.10.007>
- Bond, V., Jr., Curry, B. H., Adams, R. G., Millis, R. M., & Haddad, G. E. (2014). Cardiorespiratory function associated with dietary nitrate supplementation. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(2), 168–172. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0263>
- Brown, G. C., & Cooper, C. E. (1994). Nanomolar concentrations of nitric oxide reversibly inhibit synaptosomal respiration by competing with oxygen at cytochrome oxidase. *FEBS letters*, 356(2–3), 295–298. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(94\)01290-3](https://doi.org/10.1016/0014-5793(94)01290-3)
- Cermak, N. M., Gibala, M. J., & van Loon, L. J. (2012). Nitrate supplementation's improvement of 10-km time-trial performance in trained cyclists. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 22(1), 64–71. <https://doi.org/10.1123/ijnsnm.22.1.64>
- Clerc, P., Rigoulet, M., Leverve, X., & Fontaine, E. (2007). Nitric oxide increases oxidative phosphorylation efficiency. *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 39(2), 158–166. <https://doi.org/10.1007/s10863-007-9074-1>
- Coggan, A. R., Leibowitz, J. L., Kadkhodayan, A., Thomas, D. P., Ramamurthy, S., Spearie, C. A., Waller, S., Farmer, M., & Peterson, L. R. (2015). Effect of acute dietary nitrate intake on maximal knee extensor speed and power in healthy men and women. *Nitric Oxide*, 48, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2014.08.014>
- Cooper, C. E., & Giulivi, C. (2007). Nitric oxide regulation of mitochondrial oxygen consumption II: Molecular mechanism and tissue physiology. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 292(6), C1993–2003. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00310.2006>
- de Castro, T. F., de Assis Manoel, F., Figueiredo, D. H., Figueiredo, D. H., & Machado, F. A. (2019). Effects of chronic beetroot juice supplementation on maximum oxygen uptake, velocity associated with maximum oxygen uptake, and peak velocity in recreational runners: a double-blinded, randomized and crossover study. *European Journal of Applied Physiology*, 119(5), 1043–1053.
- de Oliveira, G. V., do Nascimento, L. A. D., Volino-Souza, M., do Couto Vellozo, O., & Alvares, T. S. (2020). A single oral dose of beetroot-based gel does not improve muscle oxygenation parameters, but speeds up handgrip isometric strength recovery in recreational combat sports athletes. *Biology of Sport*, 37(1), 93–99. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2020.92518>
- Dejam, A., Hunter, C. J., Schechter, A. N., & Gladwin, M. T. (2004). Emerging role of nitrite in human biology. *Blood Cells, Molecules, and Diseases*, 32(3), 423–429. <https://doi.org/10.1016/j.bcmd.2004.02.002>
- Garnacho-Castano, M. V., Palau-Salva, G., Cuenca, E., Munoz-Gonzalez, A., Garcia-Fernandez, P., Del Carmen Lozano-Estevan, M., Veiga-Herreros, P., Mate-Munoz, J. L., & Dominguez, R. (2018). Effects of a single dose of beetroot juice on cycling time trial performance at ventilatory thresholds intensity in male triathletes. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0255-6>
- Hogwood, A. C., Ortiz de Zavallos, J., Weeldreyer, N., Clark, J. R., Mazzella, V., Cain, L., Myaing, D., Love, K. M., Weltman, A., & Allen, J. D. (2023). *Journal of Applied Physiology*, 135(5), 1070–1081. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00559.2023>
- Jo, E., Fischer, M., Auslander, A. T., Beigarten, A., Daggy, B., Hansen, K., Kessler, L., Osmond, A., Wang, H., & Wes, R. (2019). The effects of multi-day vs. single pre-exercise nitrate supplement dosing on simulated cycling time trial performance and skeletal muscle oxygenation. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(1), 217–224. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001958>
- Jones, T., Dunn, E. L., Macdonald, J. H., Kubis, H. P., McMahon, N., & Sandoo, A. (2019). The effects of beetroot juice on blood pressure, microvascular function and large-vessel endothelial function: A randomized, double-blind, placebo-controlled pilot study in healthy older adults. *Nutrients*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/nu11081792>
- Larsen, F. J., Schiffer, T. A., Borniquel, S., Sahlin, K., Ekblom, B., Lundberg, J. O., & Weitzberg, E. (2011). Dietary inorganic nitrate improves mitochondrial efficiency in humans. *Cell Metabolism*, 13(2), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2011.01.004>
- Larsen, F. J., Weitzberg, E., Lundberg, J. O., & Ekblom, B. (2007). Effects of dietary nitrate on oxygen cost during exercise. *Acta Physiologica*, 191(1), 59–66. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2007.01713.x>
- Lee, J. S., Stebbins, C. L., Jung, E., Nho, H., Kim, J. K., Chang, M. J., & Choi, H. M. (2015). Effects of chronic dietary nitrate supplementation on the hemodynamic response to dynamic

- exercise. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 309(5), R459–466. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00099.2015>
- Lundberg, J. O., Weitzberg, E., & Gladwin, M. T. (2008).** The nitrate–nitrite–nitric oxide pathway in physiology and therapeutics. *Nature Reviews Drug Discovery*, 7(2), 156–167. <https://doi.org/10.1038/nrd2466>
- Maughan, R. J., Burke, L. M., Dvorak, J., Larson–Meyer, D. E., Peeling, P., Phillips, S. M., Rawson, E. S., Walsh, N. P., Garthe, I., Geyer, H., Meeusen, R., van Loon, L., Shirreffs, S. M., Spriet, L. L., Stuart, M., Vernec, A., Currell, K., Ali, V. M., Budgett, R. G. M.,...Engebretsen, L. (2018).** IOC consensus statement: Dietary supplements and the high–performance athlete. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(2), 104–125. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0020>
- Mezzani, A., Agostoni, P., Cohen–Solal, A., Corra, U., Jegier, A., Kouidi, E., Mazic, S., Meurin, P., Piepoli, M., Simon, A., Laethem, C. V., & Vanhees, L. (2009).** Standards for the use of cardiopulmonary exercise testing for the functional evaluation of cardiac patients: a report from the Exercise Physiology Section of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation. *European Journal of Preventive Cardiology*, 16(3), 249–267. <https://doi.org/10.1097/HJR.0b013e32832914c8>
- Miyashita, M., Mutoh, Y., Yoshika, Y., & Sadamoto, T. (1985).** Effects of physical training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1(1), 3–5.
- Mosher, S. L., Sparks, S. A., Williams, E. L., Bentley, D. J., & McNaughton, L. R. (2016).** Ingestion of a nitric oxide enhancing supplement improves resistance exercise performance. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(12), 3520–3524. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001437>
- Oggioni, C., Jakovljevic, D. G., Klonizakis, M., Ashor, A. W., Ruddock, A., Ranchordas, M., Williams, E., & Siervo, M. (2018).** Dietary nitrate does not modify blood pressure and cardiac output at rest and during exercise in older adults: A randomised cross–over study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 69(1), 74–83. <https://doi.org/10.1080/09637486.2017.1328666>
- Park, H. Y., Jung, W. S., Kim, S. W., Seo, J., Sun, Y., Choi, J. H., Kim, J., & Lim, K. (2022).** Effects of acute moderate hypoxia versus normoxia on metabolic and cardiac function and skeletal muscle oxygenation during endurance exercise at the same heart rate level. *Metabolites*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/metabo12100975>
- Porcelli, S., Ramaglia, M., Bellistri, G., Pavei, G., Pugliese, L., Montorsi, M., Rasica, L., & Marzorati, M. (2015).** Aerobic fitness affects the exercise performance responses to nitrate supplementation. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(8), 1643–1651. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000577>
- Senefeld, J. W., Wiggins, C. C., Regimbal, R. J., Dominelli, P. B., Baker, S. E., & Joyner, M. J. (2020).** Ergogenic effect of nitrate supplementation: A systematic review and meta–analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(10), 2250–2261. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002363>
- Shannon, O. M., Allen, J. D., Bescos, R., Burke, L., Clifford, T., Easton, C., Gonzalez, J. T., Jones, A. M., Jonvik, K. L., Larsen, F. J., Peeling, P., Pikhova, B., Siervo, M., Vanhatalo, A., McGawley, K., & Porcelli, S. (2022).** Dietary inorganic nitrate as an ergogenic aid: An expert consensus derived via the modified delphi technique. *Sports Medicine*, 52(10), 2537–2558. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01701-3>
- Shannon, O. M., Barlow, M. J., Duckworth, L., Williams, E., Wort, G., Woods, D., Siervo, M., & O’Hara, J. P. (2017).** Dietary nitrate supplementation enhances short but not longer duration running time–trial performance. *European Journal of Applied Physiology*, 117(4), 775–785. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3580-6>
- Shannon, O. M., Easton, C., Shepherd, A. I., Siervo, M., Bailey, S. J., & Clifford, T. (2021).** Dietary nitrate and population health: A narrative review of the translational potential of existing laboratory studies. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 13(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00292-2>
- Thompson, K. G., Turner, L., Prichard, J., Dodd, F., Kennedy, D. O., Haskell, C., Blackwell, J. R., & Jones, A. M. (2014).** Influence of dietary nitrate supplementation on physiological and cognitive responses to incremental cycle exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 193, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2013.12.015>
- Wylie, L. J., Bailey, S. J., Kelly, J., Blackwell, J. R., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2016).** Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, 116(2), 415–425. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3296-4>
- Wylie, L. J., Mohr, M., Krstrup, P., Jackman, S. R., Ermotadis, G., Kelly, J., Black, M. I., Bailey, S. J., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2013).** Dietary nitrate supplementation improves team sport–specific intense intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, 113(7), 1673–1684. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2589-8>

일회성 비트뿌리 주스 섭취가 건강한 남성의 지구성 운동 중 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능에 미치는 영향

최재호¹, 오영환², 박원일³, 박훈영^{4*}

¹건국대학교 스포츠의과학과 박사과정

²건국대학교 스포츠의과학과 석사

³한국스포츠과학원 스포츠과학실 연구위원

⁴건국대학교 스포츠의과학과 부교수

*교신저자: 박훈영(parkhy1980@konkuk.ac.kr)

[목적] 본 연구는 건강한 성인 남성을 대상으로 일회성 비트뿌리주스(beetroot juice, BRJ) 섭취가 70% 최대심박수(HRmax) 강도의 지구성 운동 중 운동부하, 주관적 운동자각도(rating of perceived exertion, RPE), 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능에 미치는 생리적 영향을 규명하고자 하였다.

[방법] 건강한 남성 10명을 대상으로 무작위, 이중 맹검, 교차 설계를 적용하였다. 참가자들은 플라시보 및 BRJ(400 mg nitrate) 섭취 후 각각 70% HRmax 강도로 30분간의 자전거 지구성 운동을 수행하였다. 운동 중 운동부하 및 RPE, 대사기능(VE, VO₂, VCO, RER, O₂pulse), 골격근 산소화 농도(oxHb, dxHb, toHb, StO₂), 및 심장기능(HR, SV, CO)을 측정하였다.

[결과] BRJ 섭취는 플라시보와 비교하여 유의하게 높은 운동부하($p < 0.05$)와 VO₂($p < 0.05$)를 나타냈으며, O₂pulse($p < 0.05$)가 유의하게 증가하였다. 반면, 골격근 산소화 지표와 심장기능 관련 변인에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. RPE는 두 조건 간 차이가 없었다.

[결론] 일회성 BRJ 섭취는 지구성 운동 중 동일한 심박수 수준에서 더 높은 운동부하와 이에 상응하는 VO₂ 반응을 유도하였다. 이러한 반응은 순환계를 통한 산소 운반과 관련된 지표인 O₂pulse의 증가와 함께 관찰되었으며, 일회성 BRJ 섭취가 건강한 성인 남성의 지구성 운동 수행과 관련된 생리적 반응에 영향을 미칠 가능성을 시사한다.

주요어

비트뿌리 주스, 질산염, 운동부하, 대사기능, 골격근 산소화 농도, 심장기능

※ 이 논문은 건국대학교 KU연구전임 프로그램에 의해서 수행되었으며, 2023년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-S1A5B5A17089358).