

일시적 가상현실 운동게임이 선천성 심장병 소아 청소년들의 혈관기능에 미치는 영향

서울시립대학교 스포츠과학과¹, 서울시립대학교 도시보건대학원²

최태구^{1,*} · 김현정^{1,*} · 조민정¹ · 김재엽¹ · 정용준¹ · 제세영^{1,2}

Acute Effects of Virtual Reality Exergame on Vascular Function in Children and Adolescents with Congenital Heart Disease: A Single-Arm Trial

Tae Gu Choi^{1,*}, Hyun Jeong Kim^{1,*}, Min Jeong Cho¹, Jae Yeop Kim¹, Yong Joon Jung¹, Sae Young Jae^{1,2}

¹Department of Sport Science, University of Seoul, Seoul,

²Division of Urban Social Health, Graduate School of Urban Public Health, University of Seoul, Seoul, Korea

Purpose: Regular aerobic exercise improves exercise capacity and quality of life in children with congenital heart disease (CHD), but it remains unclear whether aerobic exercise would improve vascular function in children with CHD. We tested the hypothesis that acute bout of virtual reality (VR) exergame would improve vascular function in children with CHD.

Methods: In a single-arm study, eight children (age, 9±1 years; five males) with CHD participated in VR exergame (30 minutes at 40% of heart rate reserve) using a stationary cycle ergometer with a head mount display. Endothelial function and arterial stiffness as surrogate markers of vascular function were assessed via reactive hyperemia index (RHI) and augmentation index (Alx) using peripheral arterial tonometry at baseline and 30 minutes after VR exergame.

Results: Compared to baseline, VR exergame improved in RHI (1.08 [0.96–1.30] to 1.16 [1.09–1.36], $p < 0.05$) and natural log transformed RHI (0.07 [−0.04–0.26] to 0.15 [0.09–0.31], $p < 0.05$). However, no significant changes were observed for decrease Alx (−1.00 [−9.00–9.50] to −7.00 [−14.00–8.75], $p = 0.547$) and Alx@75 (−6.50 [9.75–3.50] to −4.50 [−13.00–4.50], $p = 0.735$) (all index values are reported as median [interquartile range]).

Conclusion: These findings suggest that a single bout of VR exergame has the potential to improve vascular endothelial function in children with CHD.

Keywords: Congenital heart disease, Exergaming, Arterial stiffness, Vasodilation

Received: January 27, 2023 Revised: April 19, 2023 Accepted: April 27, 2023

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

*These authors contributed equally to work as co-first authors.

Copyright ©2023 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

선천성 심장병 소아 청소년들은 심혈관계 질환 위험인자 증가로 인해 2차적 심혈관질환이 성인기에 종종 발생하는 것으로 보고되고 있다¹. 혈관 내피세포 기능(endothelial function)과 동맥 경직도(arterial stiffness)는 혈관기능을 나타내는 심혈관계 위험 지표이며 심혈관질환 발병 및 사망에 대한 강력한 예측인자로 제시된다^{2,3}. 선천성 심장병 소아 청소년들은 심장의 구조적 문제와 수술 후의 혈액역학적(hemodynamic) 변화 및 만성적인 저산소증(chronic hypoxia) 등과 같은 여러 원인으로 인해 혈관기능이 감소되어 있다⁴⁻⁷. 따라서 2차 심혈관질환을 예방하기 위해서는 소아 청소년기부터 혈관 내피세포 기능 및 동맥 경직도와 같은 조절 가능한 심혈관계 위험 인자를 개선해야 한다.

선천성 심장병 소아 청소년들에게 조절 가능한 심혈관계 위험 요인 개선의 방법으로, 생활습관 및 운동과 같은 비약물적 요인들의 중요성이 강조되고 있다⁸. 이에 따라 특별히 운동이 제한된 일부 선천성 심장병 소아 청소년을 제외하고 규칙적인 신체활동과 운동이 권고된다⁸. 규칙적인 신체활동과 운동은 선천성 심장병 소아 청소년의 삶의 질을 개선하고 운동능력을 향상하는 것으로 잘 알려져 있다⁹. 그러나 운동이 이들의 혈관기능에 미치는 영향은 잘 알려져 있지 않다. 비록 일부 연구에서 신체활동량이 높을수록 동맥 경직도가 낮다는 상관관계를 제시한 단면적 연구가 보고되었으나¹⁰, 운동 중재가 직접적으로 선천성 심장병 소아 청소년의 혈관기능에 미치는 영향을 검증한 연구는 매우 부족하다.

운동게임(exergame)은 운동과 게임이 결합된 형태로, 캐릭터를 조작하여 운동을 할 수 있는 게임이다. 이러한 운동게임은 사용자의 흥미와 참여도를 높이는 데 효과적이며 운동과 유사한 효과를 기대할 수 있다¹¹. 또한 가상현실(virtual reality, VR)을 활용한 운동게임인 VR 운동게임은 가상 공간에서 캐릭터를 조작하면서 체계적인 운동을 가능하게 하여, 게임을 즐기면서 적극적으로 신체활동에 참여할 수 있는 방법으로 제시되고 있다¹². 일부 선행연구에서 운동게임이 혈관기능을 개선한다는 결과를 보고하고 있으나^{13,14}, 선천성 심장병 소아 청소년을 대상으로 VR 운동게임의 혈관기능 개선 효과를 검증한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 일시적 VR 운동게임이 선천성 심장병 소아 청소년의 혈관 내피세포 기능과 동맥 경직도에 미치는 영향에 대해 알아보고자 한다.

연구 방법

1. 연구 대상

본 연구 참여 대상자는 운동 참여에 제한이 없고 고정식 자전거 이용이 가능한 7-12세의 선천성 심장병 소아 청소년으로 하였으며, 연구 대상자들은 한국선천성심장병환우회 홈페이지와 서울대학교 어린이병원의 모집공고를 통해 모집하였다. 본 연구는 심장의 구조적 결함이 비교적 단순한 단순 심장질환자와 구조적 결함이 다소 복잡하게 연결되어 있는 복합 심장질환자를 포함하였다¹⁵. 총 8명의 참여자(남자 5명, 여자 3명)를 모집하였으며, 선천성 심장질환 관련 특성은 병원 진단명을 기준으로 분류하였다.

본 연구는 서울시립대학교 생명윤리위원회의 승인을 받았으며(No. UOS IRB 2022-04-001-001), 모든 참여자와 보호자로부터 연구 참여에 동의를 받은 후 연구를 진행하였다.

2. 실험 설계 및 측정 항목

1) 실험 설계

VR 운동게임이 선천성 심장병 소아 청소년의 혈관 내피세포 기능과 동맥 경직도에 미치는 영향을 검증하기 위해 연구 참여자들은 30분간 VR 운동게임에 참여하고, 참여 전후에 지표의 변화를 측정하였다. 전반적인 실험 설계는 Fig. 1에 제시하였다.

2) 신체적 특성 측정

모든 참여자는 측정 전 최소 4시간 이상 공복 상태에서 실험실에 방문하여 안정을 취한 뒤 신체조성, 안정 시 심박수, 혈압, 혈중 산소포화도를 측정하였다. 신체조성은 생체전기저항 기기(InBody BWA 2.0; InBody)를 이용하여 측정하였으며, 심박수, 혈압은 자동 혈압계(JPN601; Omron)를 이용하였고 혈중 산소포

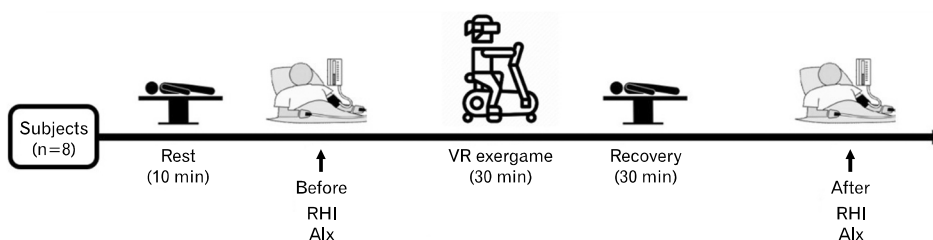


Fig. 1. Experimental design. VR: virtual reality, RHI: reactive hyperemia index, Alx: augmentation index.

화도는 산소포화도 측정기(Nonin 8000A, Nonin Medical)로 측정하였다.

3) 신체활동량 측정

참여자들의 기저 신체활동량을 평가하기 위해 3축 가속도계 기기인 GENEActiv (Activinsights)를 사용하여 신체활동량을 측정하였다. GENEActiv는 신체활동 측정의 타당도 및 신뢰도가 검증된 기기로 신체활동량을 객관적으로 측정할 수 있는 평가 도구이다¹⁶. 신체활동량은 기기를 착용하여 7일간 측정하였고, 샤워하거나 목욕할 때를 제외하고 24시간 손목에 착용하도록 하였다. 측정된 자료 중 600분 이상 착용한 날이 3일 이상인 자료만을 분석에 사용하였다.

4) 혈관 내피세포 기능 및 동맥 경직도

혈관기능 측정은 말초 동맥 측정법(peripheral arterial tonometry, PAT)을 이용한 미세혈관 내피 기능 검사 기기인 Endo-PAT 2000 (Itamar Medical)을 사용하였다. 말초 동맥의 맥파 증폭 변화(pulse wave amplitude)를 관찰하여 반응성 충혈지수(reactive hyperemia index, RHI)와 파형 증가지수(augmentation index, AIx)를 측정하였다. 해당 검사는 소아 청소년들의 혈관기능 측정에 타당도가 검증되었으며¹⁷, PAT로 측정한 RHI는 미세혈관 내피세포 기능을 나타내는 지표 중 하나이다¹⁸.

혈관기능 검사는 실내 온도(21–24 °C), 빛, 소음이 차단된 환경에서 실시하였다. 누운 자세에서 우측 전완에 혈압 커프를 감싸고, 양손 검지에 프로브를 착용하여 5분간 기저 상태를 측정하였다. 커프의 압력을 200 mm Hg까지 상승하고 5분간 전완을 압박하여 혈류를 차단하였다. 5분 후, 즉시 커프의 압력을 0 mm Hg로 감압하여 5분간 과혈류 상태를 측정하였다. 양손 검지의 프로브에서 측정된 맥파 증폭 변화를 통해 구한 RHI와 AIx를 장비 내 저장되어 있는 알고리즘으로 자동으로 분석하였다.

3. 가상현실 운동게임

VR 운동게임에 참여하기 위해 소아 청소년들도 사용 가능한

기기인 Oculus Quest 2 (Meta Quest)를 착용하였다(Fig. 2A). VR 운동 프로그램은 VZfit Play (VirZoom)를 사용하였는데(Fig. 2B), 이것은 고정식 자전거의 페달에 장착된 가속도계 센서와 연동되어 상체의 움직임과 함께 페달을 밟으며 실시하는 VR 운동게임 프로그램이다. 구체적인 VR 운동게임 종목은 연령을 고려하여 단순하고 난이도가 높지 않은 VR에서의 자전거 타기, 자동차 경주, 말 타기로 구성된 세 가지 종목으로 구성하였다. 각 세 종목의 VR 운동게임을 8분씩 실시하고 2분간 휴식하여 총 30분으로 구성하였다. 유럽심장학회의 선천성 심장병 신체활동 가이드라인에 따르면 매일 60분 이상의 중강도 이상의 신체활동을 권장하고 있지만, 대상자의 특성과 상황에 따라 유동적으로 적용할 것을 권고하고 있다⁸. 본 연구 참여자의 연령이 낮으며 복합 심장질환자가 포함된 것을 고려하여 VR 운동게임의 시간을 30분으로 설정하였다. 운동 강도는 여유 심박수(heart rate reserve, HRR)의 40%인 저·중강도 수준으로 구성하였다. VR 운동게임을 실시하는 동안 스마트 워치(Galaxy Smart Watch 3; Samsung)를 사용하여 심박수 모니터링을 실시하였으며, VR 운동게임의 평균 심박수를 측정하였다.

4. 자료 처리

정규분포를 보인 자료는 평균과 표준편차로 제시하였으며, 정규분포를 이루지 못한 자료는 중앙값과 사분위수로 표시하였다. VR 운동게임 전후의 심박수 및 혈압 변화는 대응표본 t-검정으로 분석하였고, 혈관 내피세포 기능 및 동맥 경직도 지표인 RHI, 로그 변환 RHI (logarithmic transformed RHI, LnRHI), AIx, 심박수 보정 AIx (AIx@75)는 정규분포를 이루지 못해 비모수 통계인 Wilcoxon 부호 순위 검정을 통해 분석하였다. 모든 통계 처리는 IBM SPSS version 27.0 (IBM Corp.) 프로그램을 이용하였다.

결 과

참여자의 특성은 Table 1과 같다. 참여자들의 평균 연령은 9.1±1.4세이다. 선천성 심장질환의 진단 유형에 따라 단순 심장질

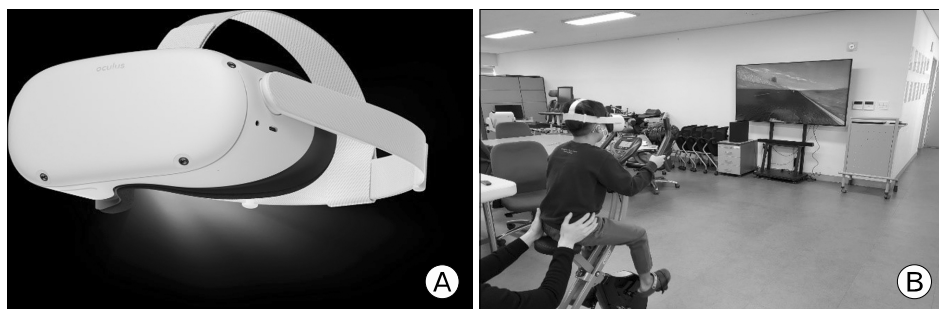


Fig. 2. Virtual reality exergame. (A) Oculus Quest 2 (Meta Quest). (B) VZfit Play (VirZoom).

Table 1. Participants' characteristics

Characteristic	Data
No. of patients	8
Age (yr)	9.1±1.4
Sex, male:female	5:3
Height (cm)	135.9±9.4
Weight (kg)	35.6±5.5
Body mass index (kg/m ²)	19.2±2.1
Skeletal muscle mass (kg)	12.4±3.0
Body fat mass (kg)	11.3±3.0
Percentage body fat (%)	31.8±7.8
Heart rate (beats/min)	82±13
Systolic BP (mm Hg)	104±11
Diastolic BP (mm Hg)	69±6
SpO ₂ (%)	93±7
Diagnosis	
Simple CHD*	1
Complex CHD	7
DORV, PS	1
Ebstein's anomaly type C	1
Fontan	2
TGA, VSD, PA	1
TOF	1
VSD, ASD, PDA, RVOT	1
Medication	5
Aspirin/antithrombotic	2
Warfarin/antiplatelet	1
Antihypertensive	1
Antidiuretic	1
Moderate-to-vigorous physical activity	7
Time (min/day)	152±98
METs/day	649±440

Values are presented as number only or mean±standard deviation.

BP: blood pressure, SpO₂: saturation of percutaneous oxygen, CHD: congenital heart disease, DORV: double outlet right ventricle, PS: pulmonary stenosis, TGA: transposition of the great arteries, VSD: ventricular septal defect, PA: pulmonary atresia, TOF: tetralogy of fallot, PDA: patent ductus arteriosus, RVOT: right ventricular outflow tract, MET: metabolic equivalent of task.

*Atrial septal defect.

환자 1명과 복합 심장질환자 7명으로 구분하였으며¹⁵, 참여자들의 자세한 진단명은 Table 1에 제시하였다. 8명 중 4명이 1개 이상의 약물을 복용 중이었다.

참여자들의 하루 평균 중·고강도 신체활동(moderate-to-vigorous intensity physical activity, MVPA)은 152±98분이었으며, 649±440 METs (metabolic equivalent of task)로 나타났다. 신체활동 측정 지표는 불충분하게 측정된 자료 1건을 제외한 7명의 데이터를 사용하였다. VR 운동게임 전후의 혈관 내피세포 기능과

동맥 경직도 변화는 Fig. 3에 나타났다. 혈관 내피세포 기능 지표인 RHI의 중앙값(사분위수)는 VR 운동게임을 실시한 뒤 1.08 (0.96–1.30)에서 1.16 (1.09–1.36)으로 통계적으로 유의하게 개선되었다($p=0.042$) (Fig. 3A). 마찬가지로 LnRHI의 중앙값(사분위수)도 0.07 (–0.04–0.26)에서 0.15 (0.09–0.31)로 통계적으로 유의하게 개선되었다($p=0.042$) (Fig. 3B). 동맥 경직도 지표인 AIx의 중앙값(사분위수)는 –1.00 (–9.00–9.50)에서 –7.00 (–14.00–8.75)로 감소하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지 않았다($p=0.547$) (Fig. 3C). 반대로 AIx@75의 중앙값(사분위수)는 –6.50 (–9.75–3.50)에서 –4.50 (–13.00–4.50)로 증가하는 경향을 보였으나 역시 통계적으로 유의하지 않았다($p=0.735$) (Fig. 3D). VR 운동게임의 운동 강도는 평균 심박수 135±13회/분이며, 참여자들의 안정 시 심박수와 연령으로 추정된 최대 심박수(maximal heart rate; 220–연령)를 통해 계산하여 HRR의 40±9%로 나타났다. VR 운동 게임에 참여하기 전과 30분 후의 심박수 및 혈압은 Table 2에 제시하였으며, 운동 전후 부정맥이나 저혈압과 같은 부작용을 호소한 사례는 없었다.

고 찰

일시적 운동의 효과를 평가하는 것은 지속적인 운동을 통한 만성적인 적응(chronic adaptation) 가능성을 예측하는 데 중요하다¹⁹. 이에 본 연구는 선천성 심장병 소아 청소년에서 일시적 VR 운동게임이 혈관기능 개선에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 하였다. 본 연구 결과, 선천성 심장병 소아 청소년에서 일시적 VR 운동게임은 혈관 내피세포 기능을 통계적으로 유의하게 개선하였다. 이러한 결과는 VR 운동게임이 선천성 심장병 소아 청소년들의 혈관기능을 개선할 수 있는 가능성을 제시할 수 있을 것이다.

VR 운동게임의 혈관 내피세포 기능 개선 효과가 나타난 본 연구 결과는 일반인을 대상으로 한 일부 선행연구와 일치하는 결과이다. Bond 등²⁰과 Kranen 등²¹은 건강한 청소년을 대상으로 사이클 에르고미터를 이용한 30분간의 중강도 유산소운동이 미세혈관 내피세포 기능의 개선에 효과가 있음을 제시하였다. 따라서 이러한 선행연구 결과를 확장하여 일시적 VR 운동게임이 선천성 심장병 소아 청소년에게도 혈관 내피세포 기능 개선에 효과가 있음을 제시할 수 있다.

본 연구에서 일시적 VR 운동게임이 혈관 내피세포 기능을 개선하는 기전을 명확히 알 수 없지만, 유산소운동이 혈관 기능에 미치는 기전과 밀접한 관련성이 있을 것이다. VR 운동게임 중 나타난 유산소성 운동의 생리학적 반응으로 인해 혈류(blood flow)와 전단응력(shear stress)이 증가하고, 이로 인해 혈관 내피세포

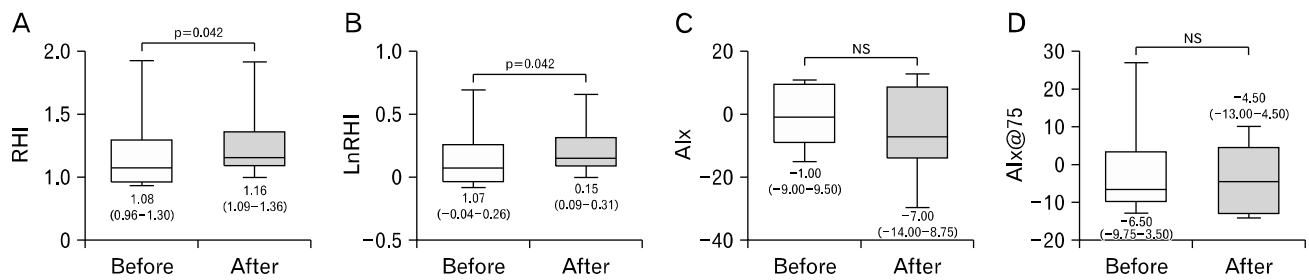


Fig. 3. Comparison of endothelial function and arterial stiffness 30 minutes after virtual reality (VR) exergame. (A) RHI response to VR exergame. (B) LnRHI response to VR exergame. (C) AIx response to VR exergame. (D) AIx@75 response to VR exergame. RHI: reactive hyperemia index, LnRHI: logarithmic transformed RHI, AIx: augmentation index, AIx@75: heart rate-corrected augmentation index.

Table 2. Hemodynamic changes before and after virtual reality exergame

Variable	Before	After	p-value
Systolic BP (mm Hg)	104±11	102±12	0.348
Diastolic BP (mm Hg)	69±6	70±7	0.550
Heart rate (beats/min)	84±14	87±16	0.029

Values are presented as mean±standard deviation.
BP: blood pressure.

포의 산화질소(nitric oxide) 생산성을 높여 혈관 내피세포 기능을 향상하는 것으로 생각된다¹⁹. 또한 미세혈관 내피세포 기능은 산화질소 외에도 아데노신과 같은 대사물질을 매개로 하는 혈관 이완 기전에도 영향을 받는 것으로 알려져 있어¹⁸, 이러한 기전이 작용했을 것으로 추측된다. 그러나 정확한 기전을 알기 위해 기전과 관련된 추가적인 연구가 필요하다.

일반적으로 운동 강도가 높을수록 혈관 내피세포 기능의 개선 효과가 나타난다고 알려져 있다²². 그러나 흥미로운 것은 본 연구에서 적용한 VR 운동게임의 운동 강도는 HRR의 40±9% (135±13회/분)로 저·중강도 수준에서 혈관 내피세포 기능의 개선 효과가 나타났다는 점이다. 따라서 이러한 결과는 중·고강도 이상의 운동이 제한되는 일부 중증 복합 심장질환자들에게도 VR 운동게임을 적용할 수 있다는 것을 시사한다.

한편으로 본 연구에서 VR 운동게임이 동맥 경직도의 지표인 AIx는 감소하고 심박수가 보정된 AIx@75는 증가하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다. 이러한 결과는 선행연구들과 일부 불일치한다. Mutter 등²³의 체계적 문헌고찰 연구에서는 젊은 성인에서 AIx는 유산소운동 후에 감소하고 AIx@75는 운동 직후에는 증가하였다가 이후 감소하였으며, 이러한 변화는 젊은 성인뿐만 아니라 청소년들을 대상으로도 유사한 경향이 나타났다²⁴. 이러한 선행연구에 비해 본 연구에서 VR 운동게임이 동맥 경직도 개선에 통계적으로 유의한 변화를 나타내지 못한 이유를 정확하게 알 수는 없지만 두 가지를 고려해 볼 수 있다.

첫째로, 일시적 운동 후 동맥 경직도의 개선 효과가 나타난다고 보고한 대부분의 선행연구들은 중강도 및 고강도 유산소운동을 적용하였으며, 본 연구의 운동 강도보다 높은 것을 확인할 수 있다^{23,24}. 따라서 본 연구의 운동 강도가 동맥 경직도 감소에 충분한 생리학적 반응을 유발하지 못했기 때문에 동맥 경직도의 유의한 변화가 나타나지 않았을 수 있을 것이다.

둘째로, 선천성 심장병 소아 청소년들은 신체활동량이 높을수록 동맥 경직도가 낮다는 상관관계가 보고되고 있다¹⁰. 본 연구 참여자들의 하루 평균 MVPA는 152±98분이며 약 71% (7명 중 5명)가 현 세계보건기구의 신체활동 가이드라인(하루 60분 이상의 MVPA²⁵)을 충족하는 신체활동 대상자였다. 따라서 이미 낮은 동맥 경직도를 갖고 있어 바닥효과(floor effect)로 인해 효과가 미비했을 수 있다²⁶. 추후 연구에서는 선천성 심장병 소아 청소년을 대상으로 동맥 경직도를 개선시킬 수 있는 적정 운동 강도 및 기저 신체활동 수준을 고려하여 추가적인 연구를 진행해야 할 것이다.

일반적으로 선천성 심장병 소아 청소년들은 건강한 대조군에 비해 신체활동 수준이 낮은 것으로 알려져 있으며, 약 54%만이 가이드라인을 만족한다고 보고된다²⁷. 그러나 모든 연구에서 이들의 신체활동 수준이 낮다고 나타나는 것은 아니며, 본 연구와 같이 신체활동 수준이 높게 나타난 일부 연구 결과도 보고되고 있다. Brady 등²⁸의 연구는 162명의 선천성 소아 청소년 중 약 84%가 신체활동 권장량을 충족한다고 보고하였다. 이와 같이

신체활동 수준이 높게 나타날 수 있었던 이유로는 측정 방법과 도구의 차이를 제시해 볼 수 있다. 신체활동 측정은 설문지를 이용한 주관적 측정법과 가속도계를 이용한 객관적 측정법이 있으며, 두 방법 간의 신체활동 측정 결과가 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다²⁷. 또한 가속도계를 이용한 객관적 측정법의 경우, 측정 기기의 착용 위치(손목 또는 몸통)에 따라라도 결과에 차이가 나타날 수 있다²⁹. 이러한 이유로 인해 본 연구 참여자의 신체활동 수준이 높게 나타났다고 추측해볼 수 있다.

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 연구의 대상자 수가 적었고, 단일 집단 연구로 통제군의 부재로 인하여 연구 결과를 일반화하기에 어려움이 있다. 둘째, 연구 대상자의 선천성 심장질환의 이질성(heterogeneity)이 있으며, 복용하는 약물의 영향 및 운동 중 나타날 수 있는 심박수변동 부전(chronotropic incompetence) 등을 고려하지 않았다. 셋째, 연구 대상자의 기저 신체활동 수준을 고려하지 못하였기 때문에 비활동적인 대상자에서는 운동에 대한 혈관 반응이 다르게 나타날 수 있다. 향후 이와 같은 제한점을 고려하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이러한 연구의 제한점에도 불구하고, 본 연구는 선천성 심장병 소아 청소년을 대상으로 일시적 VR 운동게임이 혈관기능에 미치는 영향을 검증한 첫 번째 연구라는 의의가 있다. 이를 바탕으로 VR 운동게임을 선천성 심장병 소아 청소년들의 혈관 건강을 개선하기 위한 운동 방법으로 제시할 수 있을 것이다. 또한 향후 선천성 심장병 소아 청소년들을 대상으로 VR 운동게임의 장기적 중재 효과와 지속 가능성에 대한 추가 연구가 필요하다.

Conflict of Interest

Sae Young Jae is the Editor-in-Chief of *The Korean Journal of Sports Medicine* and was not involved in the review process of this article. All authors have no other conflicts of interest to declare.

Acknowledgments

None.

ORCID

Tae Gu Choi <https://orcid.org/0000-0002-0422-9692>

Hyun Jeong Kim <https://orcid.org/0000-0001-5159-9525>

Min Jeong Cho <https://orcid.org/0000-0002-5562-4609>

Jae Yeop Kim <https://orcid.org/0000-0002-0096-3689>

Yong Joon Jung <https://orcid.org/0000-0002-7992-4569>

Sae Young Jae <https://orcid.org/0000-0003-0358-7866>

Author Contributions

Conceptualization: TGC, HJK, SYJ. Data curation, Investigation: TGC, HJK, MJC, JYK, YJJ. Formal analysis, Resources, Visualization: TGC, HJK. Methodology: TGC, HJK, MJC, JYK, YJJ, SYJ. Project administration, Supervision: SYJ. Writing-original draft: TGC, HJK. Writing-review & editing: TGC, HJK, SYJ.

References

1. Verheugt CL, Uiterwaal CS, van der Velde ET, et al. Mortality in adult congenital heart disease. *Eur Heart J* 2010;31: 1220-9.
2. Bonetti PO, Lerman LO, Lerman A. Endothelial dysfunction: a marker of atherosclerotic risk. *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 2003;23:168-75.
3. Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Stefanadis C. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with arterial stiffness: a systematic review and meta-analysis. *J Am Coll Cardiol* 2010;55:1318-27.
4. de Groot PC, Thijssen D, Binkhorst M, Green DJ, Schokking M, Hopman MT. Vascular function in children with repaired tetralogy of Fallot. *Am J Cardiol* 2010;106:851-5.
5. Jin SM, Noh CI, Bae EJ, Choi JY, Yun YS. Impaired vascular function in patients with Fontan circulation. *Int J Cardiol* 2007;120:221-6.
6. Sandhu K, Pepe S, Smolich JJ, Cheung MM, Mynard JP. Arterial stiffness in congenital heart disease. *Heart Lung Circ* 2021;30:1602-12.
7. Sabri MR, Daryoushi H, Gharipour M. Endothelial function state following repair of cyanotic congenital heart diseases. *Cardiol Young* 2015;25:222-7.
8. Takken T, Giardini A, Reybrouck T, et al. Recommendations for physical activity, recreation sport, and exercise training in paediatric patients with congenital heart disease: a report from the Exercise, Basic & Translational Research Section of the European Association of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, the European Congenital Heart and Lung Exercise Group, and the Association for European Paediatric Cardiology. *Eur J Prev Cardiol* 2012;19:1034-65.

9. Duppen N, Takken T, Hopman MT, et al. Systematic review of the effects of physical exercise training programmes in children and young adults with congenital heart disease. *Int J Cardiol* 2013;168:1779-87.
10. Lopez JR, Voss C, Kuan MT, Hemphill NM, Sandor GG, Harris KC. Physical activity is associated with better vascular function in children and adolescents with congenital heart disease. *Can J Cardiol* 2020;36:1474-81.
11. Oliveira CB, Pinto RZ, Saraiva BT, et al. Effects of active video games on children and adolescents: a systematic review with meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports* 2020;30:4-12.
12. Qian J, McDonough DJ, Gao Z. The effectiveness of virtual reality exercise on individual's physiological, psychological and rehabilitative outcomes: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17:4133.
13. Kircher E, Ketelhut S, Ketelhut K, et al. Acute effects of heart rate-controlled exergaming on vascular function in young adults. *Games Health J* 2022;11:58-66.
14. Graf DL, Pratt LV, Hester CN, Short KR. Playing active video games increases energy expenditure in children. *Pediatrics* 2009;124:534-40.
15. Baumgartner H, De Backer J, Babu-Narayan SV, et al. 2020 ESC Guidelines for the management of adult congenital heart disease. *Eur Heart J* 2021;42:563-645.
16. Ohkawara K, Oshima Y, Hikiyama Y, Ishikawa-Takata K, Tabata I, Tanaka S. Real-time estimation of daily physical activity intensity by a triaxial accelerometer and a gravity-removal classification algorithm. *Br J Nutr* 2011;105:1681-91.
17. Selamet Tierney ES, Newburger JW, et al. Endothelial pulse amplitude testing: feasibility and reproducibility in adolescents. *J Pediatr* 2009;154:901-5.
18. Rosenberry R, Nelson MD. Reactive hyperemia: a review of methods, mechanisms, and considerations. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2020;318:R605-18.
19. Dawson EA, Green DJ, Cable NT, Thijssen DH. Effects of acute exercise on flow-mediated dilatation in healthy humans. *J Appl Physiol* (1985) 2013;115:1589-98.
20. Bond B, Hind S, Williams CA, Barker AR. The acute effect of exercise intensity on vascular function in adolescents. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:2628-35.
21. Kranen SH, Oliveira RS, Bond B, Williams CA, Barker AR. The acute effect of high- and moderate-intensity interval exercise on vascular function before and after a glucose challenge in adolescents. *Exp Physiol* 2021;106:913-24.
22. Siasos G, Athanasiou D, Terzis G, et al. Acute effects of different types of aerobic exercise on endothelial function and arterial stiffness. *Eur J Prev Cardiol* 2016;23:1565-72.
23. Mutter AF, Cooke AB, Saleh O, Gomez YH, Daskalopoulou SS. A systematic review on the effect of acute aerobic exercise on arterial stiffness reveals a differential response in the upper and lower arterial segments. *Hypertens Res* 2017;40:146-72.
24. Ansell SK, Jester M, Tryggestad JB, Short KR. A pilot study of the effects of a high-intensity aerobic exercise session on heart rate variability and arterial compliance in adolescents with or without type 1 diabetes. *Pediatr Diabetes* 2020;21:486-95.
25. World Health Organization (WHO). WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour. WHO; 2020.
26. Montero D, Breenfeldt-Andersen A, Oberholzer L, Haider T. Effect of exercise on arterial stiffness: is there a ceiling effect? *Am J Hypertens* 2017;30:1069-72.
27. Acosta-Dighero R, Torres-Castro R, Rodríguez-Núñez I, et al. Physical activity assessments in children with congenital heart disease: a systematic review. *Acta Paediatr* 2020;109:2479-90.
28. Brudy L, Hock J, Häcker AL, et al. Children with congenital heart disease are active but need to keep moving: a cross-sectional study using wrist-worn physical activity trackers. *J Pediatr* 2020;217:13-9.
29. Yang CC, Hsu YL. A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring. *Sensors (Basel)* 2010;10:7772-88.