

경피신경전기자극기를 이용한 비지각적 감각자극 강도가 뇌혈류에 미치는 영향

Effect of Non-perceptual Sensory Stimulation Intensity Using Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation on Cerebral Blood Flow

정주연¹ · 강창기^{2†}

Ju-Yeon Jung¹ · Chang-Ki Kang^{2†}

Abstract

In this study, we aimed to determine the effect on cerebral blood vessels of various stimulus intensities using transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS). In particular, we wanted to monitor changes in blood flow and structural changes in the blood vessels in the common carotid artery (CCA) through low-intensity electrical stimulation that can cause non-perceptual sensory stimulation. Twenty-four healthy adults in their 20s participated in this study. Three stimulus intensities (below the sensory threshold, at the sensory threshold, and above the sensory threshold) were applied in random order. Changes in blood flow velocity according to the intensity of TENS stimulus were measured by placing the Doppler ultrasound transducer 1 cm below the CCA bifurcation, and the vascular structure was measured using B-mode imaging. C-mode Doppler and B-mode images were acquired before, during, and after the intervention for each stimulus, and changes in blood pressure were measured in each session. As a result, it was confirmed that peak systolic velocity (PSV) decreased significantly after the intervention in non-perceived sensory stimulation below the threshold, compared to other thresholds ($p = .008$). In particular, the PSV decreased by 3.04% on average compared to before stimulation ($p = .011$). However, there was no significant change in the CCA diameters before and after stimulation at all intensities. It was found that short-term, non-perceptual sensory stimulation was effective in reducing the blood flow rate without causing significant changes in either the blood vessel diameter or blood pressure. This change appears to be caused by a decrease in blood flow due to the effect of subtle vasodilation at non-perceptual sensory stimulation, and at stimulation intensity higher than that, the sympathetic nerves in the blood vessels are stimulated excessively and the blood vessels constrict. Therefore, this study can be rated as an important attempt to control blood flow through stimulation without such a psychological burden and sensory discomfort in the carotid area.

Key words: Common Carotid Artery, Non-perceptual Stimulation, Peak Systolic Velocity, Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, Vascular Dilation

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2020R1A2C1004355).

¹ 정주연: 가천대학교 휴먼보건과학융합연구소 연구교수

^{2†} (교신저자) 강창기: 가천대학교 의과대학 방사선학과 부교수 / E-mail: ckkang@gachon.ac.kr / TEL: 032-820-4110

요약

본 연구에서는 경피신경전기자극(TENS)을 이용하여 다양한 자극 강도에 따른 뇌혈관에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 특히 비지각적 감각의 전기자극을 통해 총경동맥(CCA)에서의 혈류 변화 및 혈관의 구조적인 변화를 확인해 보고자 한다. 본 연구에는 20대의 건강한 성인 24명이 참여하였다. 자극 강도는 감각 역치 미만, 감각 역치, 그리고 감각 역치 초과 세 가지를 각각 랜덤 순서로 적용하였다. 측정위치는 CCA 분기점의 1cm 하단에서 측정하였고, 혈류속도는 C-mode 도플러, 혈관의 구조는 B-mode 영상을 통해 측정하였다. 측정은 각각의 자극별로 중재 전, 중재 중, 그리고 중재 후에 수행하였고 각 세션마다 혈압의 변화를 측정하였다. 그 결과 최고 수축기 속도(PSV)는 역치 미만의 비지각적 감각자극에서 중재 후 유의하게 감소함이 확인되었다($p = .008$). 역치 미만의 자극 후 PSV는 자극 전보다 평균 3.04% 유의하게 감소한 것으로 나타났다($p = .011$). 반면 CCA의 혈관 직경의 변화는 모든 강도에서 자극 전후 유의한 변화가 나타나지 않았다. 본 연구에서 적용한 단시간의 비지각적 전기자극이 혈관의 직경이나 혈압의 유의한 변화를 주지 않으면서 즉각적인 혈류속도 감소에 효과가 있음을 발견했다. 따라서 본 연구는 경동맥 부위에 환자의 불편함과 부작용이 없는 전기자극을 통해 뇌혈류의 조절이 가능하다는 것을 보여주는 중요한 시도로 평가될 수 있다.

주제어: 경동맥, 비지각 자극, 수축기 최대 혈류속도, 경피신경전기자극기, 혈관 확장성

1. 서론

일반적으로 대뇌혈류의 증가는 포도당이나 산소의 공급 증가로 인식되어 뇌기능을 증진시킬 수 있다고 여겨 대뇌혈류를 증가시키기 위한 다양한 뇌혈관 자극 기법 및 장치 개발 연구가 이루어지고 있다(Yi et al., 2023; Pulgar, 2015). 반면 대뇌혈류의 감소는 허혈성 뇌졸중과 알츠하이머병과 같은 퇴행성 뇌질환 등과 관련되어 있다고 알려져 있다(Markus, 2004). 이에 대부분의 대뇌혈류 연구들은 혈류증진을 위한 목적으로 수행되고 있고, 현재까지 과도하게 증가된 혈류속도에 대한 위험성은 고려되지 않고 있는 실정이다. 혈류속도는 신진대사의 촉진 혹은 혈전증 발생과도 밀접한 관련이 있어 혈액의 순환과 혈관 건강에 중요한 역할을 한다(Yamashita et al., 2003). 특히 과도한 혈류속도 증가로 인한 여러 문제가 알려지고 있는데, 빠른 혈류는 심장과 혈관의 부하를 증가시켜서 심혈관 질환으로 인한 고혈압을 유발할 수도 있다고 보고되고 있다(Madaminjonovna, 2024). 게다가 고혈압으로 인해 과도하게 증가된 혈류속도는 혈관 내피 세포 손상으로 이어져 혈관염으로 인한 난류의 발생, 혈행의 방해, 혹은 혈전증 유발로 인한 뇌졸중의 원인이 될 수도 있다(Alba et al., 2011; Berlit, 2010; Chandra et al., 2017; Redekop, 2008). 이에 적절한 혈류속도의 조절이 혈관 건강에 중요하며, 특히 혈관의 유

연성은 혈관저항을 감소시켜 혈류속도를 감소시키면서도 혈류량을 증가시킬 수 있기 때문에 순환기 건강에 중요한 진단 지표로 여겨진다(Belfort et al., 2001; Jin et al., 2017).

치료용 전기자극에는 경피전기 신경자극(TENS)과 전기근육자극(EMS)등이 통증 조절과 신체적 기능 개선을 목적으로 사용되고 있다(Choi, et al., 2021; Kim, et al., 2022). 특히 TENS는 자율신경계(ANS)와 연관되어 심혈관계에도 영향을 줄 수 있음이 보고되어, 자율신경계와 심혈관계 질환에 대한 TENS 중재의 효과가 다수 보고되었다(Franco et al., 2014; Vieira et al., 2012). 이전 연구에 따르면 TENS가 교감-미주신경 불균형 치료에 효과가 있음이 보고되었고, 특히 심혈관계 질환의 대표적인 위험 인자인 고혈압 치료에 효과가 있음이 보고되었다(Nitz, 2003; Vieira et al., 2012). 그러나 현재까지 대부분 말초혈관에서의 효과가 보고되었으며 중추혈관인 대뇌혈류에 대한 효과는 TENS 전극 패드의 부착 위치 및 전기자극에 대한 환자의 불편함과 거부감 등으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있지 않다.

대뇌에 혈액을 공급하는 공급원으로써 총경동맥(CCA)은 뇌로 혈류를 전달하는 내경동맥(ICA)에 혈류를 공급하고 있기 때문에 CCA의 혈류 조절은 뇌 혈류 조절에 효과적일 수 있다. 또한 혈관에는 교감신경이 분지하고 있어 전기자극 시 혈관의 긴장도에 즉각적인

영향을 기대할 수 있다. 그러나 현재까지 뇌 혈류의 가장 중요한 기점인 CCA가 위치하는 목은 TENS를 적용하기에 부담스러운 부위로 여겨져 많은 연구가 이뤄지지 않았다. 이는 TENS의 중재가 일반적으로 역치 이상 강도가 사용되어 목 부분에 적용하기에 적절하지 않고, 특히 경동맥동 자극 시 과도한 저혈압 반응이 나타나거나 후두 신경자극에 의해 후두 경련이 나타날 수 있어 많은 주의가 필요하기 때문이다(Johnson, 2007). 따라서 효과적인 뇌 혈류 조절을 위한 CCA 전기자극을 위해서 안전하고 불편함이 없는 중재 방법의 개발과 효과에 대한 검증이 필요하다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 TENS의 강도와 지속시간을 조절하여 뇌 혈류의 원활한 순환을 위해 목 부위에 안전하게 적용할 수 있는 최적의 프로토콜을 제안하고자 한다. 특히 진단용 초음파를 이용하여 자극 위치를 명확하게 하고, 단시간 전기자극을 통해 TENS에 의한 부작용을 최소화하고자 하며, 자극 강도별 효과를 비교 분석해 가장 효과적인 자극 기법을 제안하고자 한다. 이는 혈류속도 조절 효과를 단시간에 극대화시키고 동시에 TENS로 인한 부작용 및 불편함을 줄이는 데 도움이 될 수 있다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 저주파 TENS를 역치 이하의 낮은 자극 강도부터 역치 감각자극 강도 및 역치 이상의 높은 자극 강도 총 3가지의 강도를 나눠 CCA에 중재하고, 최고 수축기 속도(PSV)와 혈관의 크기를 측정하고 중재 전후의 변화에 대해 분석하여 그 효과를 확인하고자 한다.

2. 실험 방법 및 분석

2.1. 피험자 모집

24명의 건강한 20대 성인은 기관연구심의위원회의 승인을 받은 연구 내용에 대하여 연구 참여에 대한 서면 동의서를 작성하고 연구에 참여했다(Male = 11; Female = 13). 모든 피험자는 혈관 또는 자율신경계에 영향을 줄 수 있는 약물 또는 카페인 섭취를 실험 전 24시간 동안 통제하여 영향을 제한하였고, 실험에 영향을 줄 수 있는 심혈관계, 신경계 및 근골격계 질환이나 통증이 있는 피험자는 제외되었다. 그리고 TENS 전

극패드(PROTENS, Bio Protech, Korea)를 부착하는 것에 무리가 없도록 피부에 상처가 있거나 피부 자극에 예민한 피험자 또한 제외 대상자에 포함하였다.

본 실험에 앞서 피험자들의 혈압(BP)과 심박동(HR)을 측정하여 정상 범위에 해당함을 확인하였다. 혈압과 심박동은 웨어러블 스마트 워치(Galaxy Watch3, Samsung, Korea)를 이용하여 측정되었고, 정상 BP의 범위는 수축기 BP (SBP) 120mmHg와 이완기 BP (DBP) 80mmHg 미만으로 선정하였다(Chobanian et al., 2003). 정상 범주에 속하지 않지만, 맥압(PP)이 정상치에 해당하는 경우 SBP를 주의 혈압 단계인 최대 130mmHg까지 허용하였다(Jeong et al., 2018). 마지막으로 HR의 범위는 60-90bpm로 정하였다(Avram et al., 2019). 모집된 피험자의 신체 정보 및 생체 신호는 Table 1에 표기하였다.

Table 1. General characteristics of participants (n = 24)

Variables	Mean ± SD	Variables	Mean ± SD
M : F (N)	11 : 13	SBP (mmHg)	112.09 ± 6.79
Age (years)	22.83 ± 1.82	DBP (mmHg)	67.52 ± 4.94
Height (cm)	168.33 ± 6.45	HR (bpm)	69.13 ± 8.28
Weight (kg)	61.42 ± 9.39	BMI (kg/m ²)	21.55 ± 1.96

Abbreviations: BMI, body mass index; DBP, diastolic blood pressure; HR, heart rate; SBP, systolic blood pressure.

2.2. 실험 절차

실험에 앞서, 참가자들은 실험 시작 전 검사용 베드에서 5분간 누워 안정 상태를 유지했다. 그런 다음 알코올 솜으로 목 부위를 소독한 다음 전극 패드를 부착하고 초음파 겔에 젖지 않도록 절연 테이프로 주변을 감싸주었다. 전극 패드는 관심 혈관을 국소적으로 자극하기 위하여 혈관 면적에 맞추어 절단하여 사용하였다. 부착 위치는 쇄골 위 CCA 주행경로에 맞추어 부착하였고, 부착 시 쇄골에 닿지 않도록 주의했으며 전극 패드는 음극(-)을 하단, 그리고 양극(+)을 상단에 위치시켰다. 이는 혈류의 이동 방향과 전자의 이동방향을 일치시키고 양극 전도 차단 이론에 따라 양극 위치에 과분극을 유도하기 위함이다(Allison et al., 2022). TENS(ITO, JAPAN)의 자극 주파수와 폭은 2Hz와 50 μ s로 고정되었으며 일정한 자극 모드를 사용하였고, 자극 강도

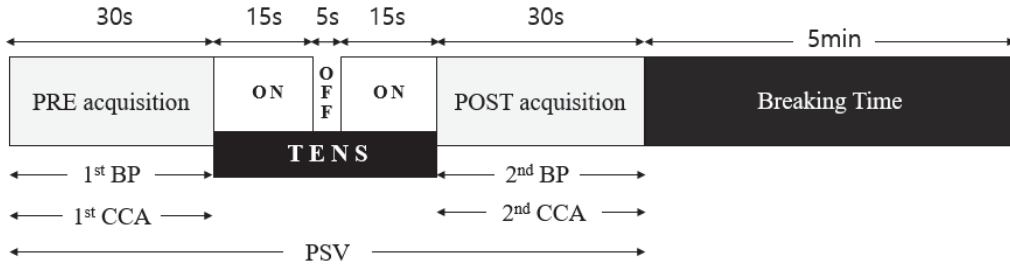


Fig. 1. Ultrasound acquisition protocols in pre, during, and post TENS stimulus

는 감각적 역치 이하 자극, 역치 자극, 역치 이상 자극으로 3가지 강도를 설정하였다. 먼저 처음으로 전기감각이 느껴지는 강도를 확인하여 역치 자극 단계를 설정하고(ex, 4 level), 역치 자극보다 한 단계 아래를 역치 이하(ex, 3 level) 그리고 역치 자극보다 한 단계 위를 역치 이상(ex, 5 level)으로 설정하였다. 참가자 개별로 역치 수준을 사전에 확인하였고, 3가지의 역치 강도는 순서 효과를 배제하기 위해 랜덤으로 중재 되었다.

실험은 다음의 순서에 맞추어 진행되었다(Fig. 1). 먼저 자극 전 30초 동안 혈관의 직경, 혈압 그리고 PSV를 측정하였다. 이후 TENS를 중재하였으며, 자극에 대한 중첩 효과를 위해 자극 중재시간보다 자극을 주지 않는 시간이 짧은 간헐적 자극 중재 방법을 선택하였다.

본 연구의 자극 중재 시간은 15초 2회 중재로 진행되었고, 자극 사이 간격(interstimulus interval)을 5초로 설정하였다. 총 35초 간의 TENS 중재 구간 동안 PSV를 측정하였고, 중재 이후 30초 동안의 혈관 직경, 혈압 그리고 PSV를 측정하였다. 이후 이전의 자극에 대한 잔류 반응을 완전히 제거하기 위해 5분의 휴식시간이 경과한 이후 다음 자극 강도를 사용하여 앞과 동일한 방법의 실험을 진행하였다.

2.3. 측정

본 연구는 단시간 TENS 중재 시 자극 강도 별 PSV 변화를 확인하기 위해 도플러 초음파(RS85, Samsung, Korea)를 사용하였다. 그리고 모든 데이터는 피험자의 오른쪽으로 측정 방향을 고정하였다. 초음파 측정 위치는 경동맥동 자극을 방지하기 위하여 진단용 초음파로 CCA 분지점을 확인하고 분지점 아래 1cm에 배치하였다. 또한 생체신호의 반복 측정을 위하여 초음파용 탐촉자의 위치를 마킹하였다. 그런 다음 절연 테이프를

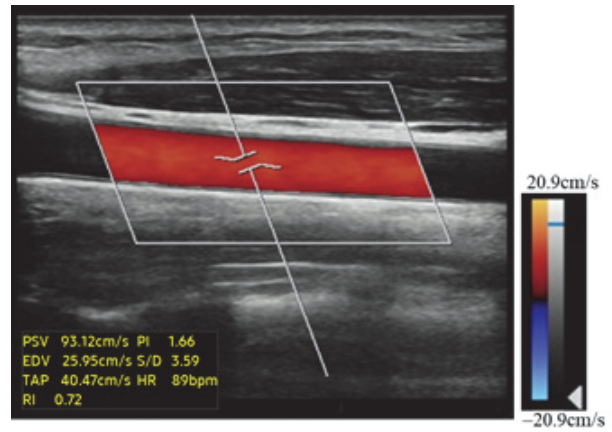


Fig. 2. A representative image of the blood flow velocity at CCA using C-mode ultrasound

사용하여 전극 패드 주변에 초음파 젤이 스며들지 않도록 하였다.

CCA 직경을 측정하기 위해 초음파의 B-mode에서 CCA의 횡단면 영상을 획득하였고, 이후 PSV 측정을 위해 CCA의 시상면에서 C-mode를 통해 실시간 PSV를 획득하였다. 이후 획득한 영상을 Radiant DICOM Viewer (Mediant, Poznan, Poland)를 사용해 동맥 측정 기준법에 따라 CCA의 외경(OD)을 기준으로 DICOM 영상에서 혈관 확장과 수축 상태에서의 직경을 측정하였다(Terminology and Diagnostic Criteria Committee, 2009).

PSV는 초음파 모니터를 통해 실시간으로 기록하기 위해 C-mode를 활성화한 다음 2 - 14 MHz의 주파수대역을 가진 탐촉자(LA2-14A, Samsung Medison, Seoul, Republic of Korea)를 사용해 총 95초 동안의 PSV를 수집하였다(Fig. 2). 이후 초당 1회의 PSV를 기록하여 총 95개의 PSV를 획득하였고, 각 PSV 수치는 TENS 자극 전(30s), TENS 자극 중(35s), 그리고 TENS 자극 후(30s)로 나눠 정리하였다. 이후 자극 전, 중, 후의 PSV 평균값을 사용하여 TENS 자극에 따른 변화를 분석하였다.

BP은 혈관을 압박하지 않고, 30초 이내로 측정되며 TENS 중재 후 빠르게 재측정이 가능한 웨어러블 스마트 워치를 사용했다. 이에 따라 혈압은 PSV와 동시에 획득이 가능했고 TENS 중재 전과 후에 수집되었으며, 측정된 데이터는 사용 지침에 따라 앱을 사용해 데이터를 자동 기록화 하였다.

2.4. 통계 분석

통계분석은 프리웨어 프로그램인 Jamovi (<https://www.jamovi.org/>)를 이용하여 수행하였다. 모든 피험자는 총 3가지 세션(역치 이상의 자극 강도, 역치 자극 강도, 역치 이하의 자극 강도)을 수행하였다. 그리고 각 세션 별로 TENS 중재 자극 강도에 대한 PSV 변화를 조사하기 위해 자극전, 자극중, 및 자극후에 대한 반복 측정 분산분석을 수행하였다. PSV의 변화율은(자극후-자극전)/자극전x100에 대한 중재 강도의 차이를 계산하여 도출된 값으로 표현하였다. 사후 검정은 Tukey HSD 검정을 사용하여 수행되었다. 통계적 유의성에 대한 검정은 모든 분석에 표준 기준인 $p < 0.05$ 를 적용하였다. 혈압과 CCA직경의 변화는 자극 전과

자극 후에서만 획득하였고, 총 세 가지 세션에 대한 자극 전과 후 효과를 비교하기 위해 대응표본 T 검정을 수행하였다.

3. 연구 결과

3.1. 전기자극에 대한 PSV의 변화

강도별 TENS 중재 전후의 PSV 변화는 다음과 같이 나타났다(Table 2). 먼저 모든 강도에서 PSV가 중재 후에 평균적으로 감소하는 경향이 나타났다. 먼저 역치 이상의 자극 강도(High_THRES)에서는 자극 중재 전 PSV가 96.1cm/s 였으나, 자극 중재 중과 후 PSV는 94.2cm/s와 94.4cm/s로 중재 전 보다 모두 감소하였다. 역치 자극 강도(THRES)에서는 자극 중재 전 PSV는 93.7cm/s이었고 자극 중재 중에서도 93.7cm/s로 평균적으로 동일하게 나타났으며 자극 중재 후에 92.8cm/s로 감소했다. 그러나 이러한 역치 이상 강도 자극과 역치 강도 자극에서의 PSV 변화는 중재에 대한 유의한 차이를 보이지 않았다($p = .231$ 및 $p = .942$). 반면 역치

Table 2. Comparison of PSV (cm/s) changes during pre-task, task and post-task at each intensity level

		Repeated Measure Comparisons			Post Hoc Comparisons (Tukey)		
	Variables	Mean ± SD	F	p	Variables	T	p
High_THRES	PRE	96.1 ± 14.9	1.53	0.231	PRE-TENS	2.64	0.038
	TENS	94.2 ± 14.5			PRE-POST	1.08	0.534
	POST	94.4 ± 12.9			TENS-POST	-0.36	0.933
THRES	PRE	93.7 ± 13.9	0.03	0.942	PRE-TENS	-0.18	0.983
	TENS	93.7 ± 14.2			PRE-POST	0.06	0.998
	POST	92.8 ± 14.2			TENS-POST	0.29	0.955
Low_THRES	PRE	94.5 ± 14.1	6.38	0.008*	PRE-TENS	2.00	0.134
	TENS	93.1 ± 12.6			PRE-POST	3.18	0.011*
	POST	90.8 ± 11.9			TENS-POST	1.91	0.157

Abbreviations: POST, post task; PRE, pre task; THRES, threshold.

Table 3. Comparison of the changing rate (pre - post) in PSV at each stimulation

		Repeated Measure Comparisons		
Outcome Variable	Variables	ΔDIFF ± SD (%)	F	p
PRE - POST	High_THRES	-1.11 ± 7.55	1.21	0.300
	THRES	0.71 ± 13.49		
	Low_THRES	-3.04 ± 6.20		

Abbreviations: DIFF, difference value; POST, post-task; PRE, pre-task; THRES, threshold.

이하의 자극 강도(Low_THRES)에서는 자극 중재 후 유의한 PSV 감소가 나타났다($p = .008$). 역치 이하 강도의 자극 전 PSV는 94.5cm/s이고, 자극 중재 중에 93.1cm/s로 감소했으며 자극 중재 후에도 90.8cm/s로 지속적인 감소가 나타났으며, 특히 중재 전보다 중재 후에 유의하게 감소한 것으로 나타났다($p = .011$).

자극 강도별 자극 전, 중, 후에서 역치 이하의 자극 강도에서 자극 후를 제외하고는 유의한 변화가 나타나지 않았다. 이에 추가적으로 자극 후 PSV 변화량의 크기를 산출하여 강도별 변화량의 크기를 비교해 보았다. 그 결과, 자극 전과 비교하여 자극 후에서의 PSV 차이는 다음과 같았다(Table 3). 자극 후에 PSV는 모든 강도에서 감소되는 경향이 나타났다. 자극 중재가 끝난

후 역치 이상 강도에서 PSV 변화율은 1.11%의 감소가 나타났고, 역치 강도에서 PSV 변화율은 0.71% 증가, 그리고 역치 이하 강도에서는 평균 3.04% 감소한 PSV 변화율이 나타났다. 즉 중재 후에는 역치 이하에서 PSV의 감소 변화율이 평균적으로 가장 크게 나타났으나 통계적으로 유의하지는 않았다($p = .300$).

3.2. 전기자극에 대한 혈관 직경의 변화

자극 강도별 자극 전과 후에서 CCA 직경의 변화는 다음과 같았다(Table 4). 직경의 변화는 강도별 혹은 자극 전후로 유의하게 나타나지 않았다. 역치 이상 강도에서 수축기 직경의 변화를 제외한 모든 강도의 수축

Table 4. Comparison of the systolic and diastolic vascular diameter between pre and post at each stimulation

Variables			Mean ± SD	T	p
Systolic Diameter (mm)	High_THRES	PRE	5.85 ± 0.39	-0.79	0.438
		POST	5.89 ± 0.53		
	THRES	PRE	5.97 ± 0.62	1.15	0.266
		POST	5.87 ± 0.57		
	Low_THRES	PRE	5.88 ± 0.54	0.57	0.575
		POST	5.85 ± 0.52		
Diastolic Diameter (mm)	High_THRES	PRE	6.58 ± 0.54	0.56	0.582
		POST	6.55 ± 0.64		
	THRES	PRE	6.65 ± 0.68	1.06	0.302
		POST	6.59 ± 0.65		
	Low_THRES	PRE	6.64 ± 0.65	1.11	0.282
		POST	6.56 ± 0.52		

Abbreviations: POST, post-task; PRE, pre-task; THRES, threshold.

Table 5. Comparison of the systolic and diastolic blood pressure between pre and post at each stimulation

Variables			Mean ± SD	T	p
Systolic blood pressure (mmHg)	High_THRES	PRE	107.42 ± 23.87	-0.17	0.870
		POST	107.50 ± 24.18		
	THRES	PRE	107.88 ± 23.86	-0.25	0.802
		POST	108.00 ± 24.06		
	Low_THRES	PRE	107.50 ± 23.80	-0.11	0.917
		POST	107.54 ± 23.67		
Diastolic blood pressure (mmHg)	High_THRES	PRE	64.71 ± 14.64	0.00	1.000
		POST	64.71 ± 14.62		
	THRES	PRE	64.92 ± 14.65	-0.48	0.637
		POST	65.21 ± 14.95		
	Low_THRES	PRE	64.58 ± 14.48	0.35	0.732
		POST	64.50 ± 14.61		

Abbreviations: POST, post-task; PRE, pre-task; THRES, threshold.

기 및 이완기 직경은 자극 전보다 자극 후 감소하는 경향이 나타났다. 역치 이상 강도에서는 자극 후 평균 0.04mm의 수축기 직경 증가, 0.04mm의 이완기 직경 감소가 나타났고, 역치 강도에서는 0.10mm의 수축기, 0.06mm의 이완기 직경 감소, 그리고, 역치 이하 강도에서는 0.04mm의 수축기, 0.08mm의 이완기 직경의 감소가 나타났다. 즉 역치 강도와 역치 이하 강도에서는 수축기 혈관 수축력이 자극 이후 증가하였으나 이완기에서의 혈관 확장 정도는 감소하는 경향이 나타났고, 역치 이상 강도에서는 자극 후 수축 정도 감소와 확장 감소가 나타났으나 모두 유의한 변화를 보이지는 않았다.

3.3. 전기자극에 대한 혈압의 변화

자극 강도별 자극 전과 후에서 혈압의 유의한 변화는 나타나지 않았다(Table 5). 수축기 혈압과 이완기 혈압 모두 1mmHg 내외의 전후 차이를 보여 전기자극에 대한 변화가 나타나지 않았다.

4 논의

TENS 전기자극 중재 이후의 PSV 변화는 모든 강도에서 평균적으로 감소된 경향이 나타났다. 특히, 비지각적 감각자극인 저강도의 전기자극 이후 PSV가 통계적으로 유의하게 감소한 것으로 나타남으로써 유의한 혈류속도 감소를 확인할 수 있었다. 이는 혈관에 대한 전기자극이 산화질소(NO)라는 혈관확장의 매개체의 영향을 받기 때문인 것으로 보인다(Petrofsky et al., 2007). 이전 연구에 따르면, 전기자극으로 인한 세포막에서의 이온 흐름은 NO 분비의 계기가 된다고 보고하였다. 전기자극에 의해 활성화된 칼슘 이온채널은 칼슘 투과성을 감소시키고 막 전위를 크게 변화시키며 NO 분비가 나타나게 된다(Bolotina et al., 1994). 그리고 분비된 NO는 혈관의 평활근을 이완시켜 혈관 확장을 유발하게 된다. 실제로 저강도 전기자극 이후 NO 분비에 의해 혈관 평활근 긴장이 감소하고 혈관 확장에 의한 맥파속도가 유의하게 감소한 결과가 보고되었다(Oda et al., 2022).

역치 및 역치 이상의 자극 강도로 TENS 중재를 수행

한 경우 중재 후 PSV의 감소 경향이 나타났으나 유의한 차이는 발견되지 않았다. 이러한 현상은 역치 이상 전기자극이 혈관에 분비한 교감신경을 과도하게 자극하기 때문으로 보인다. 선행 연구에 따르면 TENS는 자율신경계와 관련된 반사 작용에 영향을 미칠 수 있다(Sanderson et al., 1995). 자율 심혈관 반사는 심혈관계를 조절하는 중추신경계의 핵심 메커니즘이며, 교감신경과 부교감신경을 통해 심장과 혈관 저항을 조절하여 항상성을 유지하는 기능이다(Heesch, 1999). 특히 혈관은 자율신경 조절에 의해 혈관의 수축이 조절된다(Thomas, 2011). 역치 및 역치 이상의 자극 강도에서 혈류속도가 감소하는 경향은 나타났지만, 유의한 변화는 나타나지 않았고, 특히 역치 이상의 자극 중재 동안 PSV 감소가 가장 크게 나타났지만 중재 이후에는 PSV 감소율이 줄어드는 현상이 나타난 것으로 보아, 전기자극으로 인해 혈관의 교감신경 활성이 작용하면서 혈관 수축을 유발하고 혈류속도의 유의한 변화를 저해한 것으로 보인다.

반면 혈관의 직경의 변화는 모든 전기자극 중재 강도에서 유의한 변화를 주지 않았다. 20분 이상의 전기자극을 중재한 이전 연구와는 다르게 역치 이하 강도에서 비지각적 전기자극은 혈관 직경에 유의한 영향을 주지 않았다. 이는 본 연구에서의 자극 중재시간은 35초로 중재되어 혈관이 확장되기 충분한 NO의 분비가 이뤄지지 않았기 때문으로 보인다. 즉 35초의 단시간 역치 이하 강도의 전기자극이 중재됨에 따라 유의한 혈관 확장의 변화를 나타낼 수 있는 전기자극이 적용되지 않았기 때문으로 보인다. 즉 단시간의 저강도 전기자극은 혈관 유연성에는 영향을 줄 수 있으나 혈관 확장에는 영향을 줄 수 없게 되고 이러한 자극이 결국 혈류속도 감소로 나타나게 된 것으로 확인된다.

5. 제한점

본 연구는 20대의 건강한 피험자를 대상으로 하였기 때문에 TENS 자극의 임상적 효능을 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 특히 혈류 속도 및 혈관의 직경만을 활용하여 비감각적인 전기자극의 효과를 분석하였기 때문에 국한된 정보로 인하여 이러한

현상에 대한 기전을 설명하기에는 부족한 정보들이 있었다. 추후에는 혈관의 탄성도나 경직도 등의 추가적인 정보 수집이 필요할 것으로 보인다. 또한, 고혈압과 동맥경화 등 평균 혈류 속도가 높은 심혈관 질환 환자를 대상으로 TENS 중재를 수행하는 경우보다 뚜렷한 혈류속도 감소 효과가 나타날 것으로 기대한다. 또한 본 연구에서는 기존 TENS의 적용 방법과 달리 일반적으로 기피되는 목 앞쪽의 CCA 혈관 위치에 전극을 부착하였다. 이에 전기자극으로 인한 부작용을 최소화하기 위해 일반적으로 TENS 중재에서 사용되는 자극 변수가 아닌 TENS 장비의 최소 주파수와 최소 펄스폭으로 중재 파라미터를 설정하였다. 따라서 추후 연구에서는 혈관에 대한 최적의 전기자극 파라미터를 확인하는 연구가 필요하다. 마지막으로 본 연구는 TENS 강도별 중재의 효과의 여부를 확인해 보기 위한 초기 연구로 중재에 대한 전후 효과 비교를 목적으로 수행했다. 따라서 추후 강도별 효과 차이에 대한 분석을 수행해 TENS 강도에 대한 통계적 비교를 수행할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서 CCA에 TENS 중재를 이용하여 전기자극이 대뇌혈관에 미치는 영향에 대한 효과를 확인하였다. 그 결과 혈류속도는 비지각적 감각자극의 전기자극에서 중재 후 유의하게 감소하였다. 반면, 감각자극과 고강도 감각자극에서도 혈류속도가 감소하는 경향은 나타났으나 유의한 변화는 나타나지 않았다. 이는 역치 이하의 비지각적 감각자극의 전기자극에서만 혈관 확장 매개체인 NO분비의 효과가 적용되고 그 이상의 강도에서는 NO분비보다 혈관의 교감신경 자극에 의한 혈관 수축이 혈류속도 저하를 방해하기 때문인 것으로 보인다. 이에 35초의 단시간 역치 이하의 비지각적 감각자극의 전기자극은 혈관기능에 영향을 주지 않으면서 즉각적인 혈류속도 저하에 효과가 있음을 발견했다. 이러한 본 연구의 전기자극 기법은 혈관 저항성을 낮추고 고혈압과 동맥경화와 같이 빠른 혈류속도로 인해 발생 가능한 혈관 손상의 위험을 예방하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Alba, M. A., Espígol-Frigolé, G., Prieto-González, S., Tavera-Bahillo, I., García-Martínez, A., Butjosa, M., Hernández-Rodríguez, J., & Cid, M. C. (2011). Central nervous system vasculitis: Still more questions than answers. *Current Neuropharmacology*, 9(3), 437-448. DOI: 10.2174/157015911796557920
- Allison, D. W., D'Amico, R. S., & Silverstein, J. W. (2022). Misconceptions in IONM Part II: Does anodal blocking occur and is bipolar stimulation necessary with intraoperative somatosensory evoked potentials? *The Neurodiagnostic Journal*, 62(3), 164-177. DOI: 10.1080/21646821.2022.2107862
- Avram, R., Tison, G. H., Aschbacher, K., Kuhar, P., Vittinghoff, E., Butzner, M., Runge, R., Wu, N., Pletcher, M. J., Marcus, G. M., & Olgin, J. (2019). Real-world heart rate norms in the Health eHeart study. *Npj Digital Medicine*, 2(1), Article 1. DOI: 10.1038/s41746-019-0134-9
- Belfort, M. A., Tooke-Miller, C., Allen JR., J. C., Saade, G. R., Dildy, G. A., Grunewald, C., Nisell, H., & Herd, J. A. (2001). Changes in flow velocity, resistance indices, and cerebral perfusion pressure in the maternal middle cerebral artery distribution during normal pregnancy. *Acta Obstetricia et Gynecologica Scandinavica*, 80(2), 104-112. DOI: 10.1034/j.1600-0412.2001.080002104.x
- Berlit, P. (2010). Review: Diagnosis and treatment of cerebral vasculitis. *Therapeutic Advances in Neurological Disorders*, 3(1), 29-42. DOI: 10.1177/1756285609347123
- Bolotina, V. M., Najibi, S., Palacino, J. J., Pagano, P. J., & Cohen, R. A. (1994). Nitric oxide directly activates calcium-dependent potassium channels in vascular smooth muscle. *Nature*, 368(6474), 850-853. DOI: 10.1038/368850a0
- Chandra, A., Stone, C. R., Li, W. A., Geng, X., & Ding, Y. (2017). The cerebral circulation and cerebrovascular disease II: Pathogenesis of cerebrovascular disease. *Brain Circulation*, 3(2), 57-65. DOI: 10.4103/bc.bc_11_17
- Chobanian, A. V., Bakris, G. L., Black, H. R., Cushman,

- W. C., Green, L. A., Izzo, J. L., Jr, Jones, D. W., Materson, B. J., Oparil, S., Wright, J. T., Jr, Roccella, E. J., Joint National Committee on Prevention, Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure. National Heart, Lung, and Blood Institute, & National High Blood Pressure Education Program Coordinating Committee (2003). Seventh report of the joint national committee on prevention, detection, evaluation, and treatment of high blood pressure. *Hypertension*, 42(6), 1206-1252. DOI: 10.1161/01. HYP.0000107251.49515.c2
- Choi, Y.-J., Park, J.-H., & Kim, J.-Y., (2022). A study on the effect of EMS wrist guards for wrist tunnel syndrome in lure-fishing participants. *Korean Society for Emotion and Sensibility*, 25(1), 115-128. DOI: 10.14695/KJSOS.2022.25.1.115
- Franco, O. S., Paulitsch, F. S., Pereira, A. P. C., Teixeira, A. O., Martins, C. N., Silva, A. M. V., Plentz, R. D. M., Irigoyen, M. C., & Signori, L. U. (2014). Effects of different frequencies of transcutaneous electrical nerve stimulation on venous vascular reactivity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 47(5), 411-418. DOI: 10.1590/1414-431X20143767
- Heesch, C. M. (1999). Reflexes that control cardiovascular function. *Advances in Physiology Education*, 27(6), S234. DOI: 10.1152/advances.1999.27.6.S234
- Jeong, J.-W., Shin, G., Kim, D. S., Kim, G.-H., Cho, M.-C., Kang, S.-M., Pyun, W. B., Lee, H.-Y., Chung, W.-J., Ihm, S.-H., Kim, K. I., Cho, E. J., Sohn, I.-S., Park, S., Shin, J., Sung, K. C., Ryu, S. K., Sung, J., Kim, D. J., ... Hypertension Epidemiology Research Working Group. (2018). Korea hypertension fact sheet 2018. *Clinical Hypertension*, 24(1), 13. DOI: 10.1186/s40885-018-0098-0
- Jin, H.-K., Hwang, T.-Y., & Cho, S.-H. (2017). Effect of electrical stimulation on blood flow velocity and vessel size. *Open Medicine*, 12(1), 5-11. DOI: 10.1515/med-2017-0002
- Johnson, M. (2007). Transcutaneous electrical nerve stimulation: Mechanisms, clinical application and evidence. *Reviews in Pain*, 1(1), 7-11. DOI: 10.1177/204946370700100103
- Kim, D.-Y., Park, J.-H., & Kim, J.-Y., (2021). Effects of EMS compression belts with different muscular patterns on lumbar stabilization. *Korean Society for Emotion and Sensibility*, 24(2), 81-92. DOI: 10.14695/KJSOS.2021.24.2.81
- Madaminjonovna, K. Z. (2024). Etiological factors causing hypertension disease and measures to control it. *American Journal of Pediatric Medicine and Health Sciences* (2993-2149), 2(1), Article 1.
- Markus, H. (2004). Cerebral perfusion and stroke. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 75(3), 353-361. DOI: 10.1136/jnnp.2003.025825
- Nitz, J. C. (2003). Haemodynamic Response to TENS applied to the upper thoracic nerve roots in normal subjects. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, 21(1), 58-61. DOI: 10.1016/S1013-7025(09)70041-7
- Oda, H., Fujibayashi, M., Matsumoto, N., & Nishiwaki, M. (2022). Acute effects of low-intensity electrical stimulation on segmental arterial stiffness. *Frontiers in Physiology*, 13. DOI: 10.3389/fphys.2022.828670
- Petrofsky, J., Hinds, C. M., Batt, J., Prowse, M., & Suh, H. J. (2007). The interrelationships between electrical stimulation, the environment surrounding the vascular endothelial cells of the skin, and the role of nitric oxide in mediating the blood flow response to electrical stimulation. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 13(9), CR391-397.
- Pulgar, V. M. (2015). Direct electric stimulation to increase cerebrovascular function. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9. DOI: 10.3389/fnsys.2015.00054
- Redekop, G. J. (2008). Extracranial carotid and vertebral artery dissection: A review. *Canadian Journal of Neurological Sciences*. *Journal Canadien Des Sciences Neurologiques*, 35(2), 146-152. DOI: 10.1017/S0317167100008556
- Sanderson, J. E., Tomlinson, B., Lau, M. S. W., So, K. W. H., Cheung, A. H. K., Critchley, J. A. J. H., & Woo, K. S. (1995). The effect of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) on autonomic

- cardiovascular reflexes. *Clinical Autonomic Research*, 5(2), 81-84. DOI: 10.1007/BF01827467
- Terminology and Diagnostic Criteria Committee, J. S. of U. in M. (2009). Standard method for ultrasound evaluation of carotid artery lesions. *Journal of Medical Ultrasonics*, 36(4), 219-226. DOI: 10.1007/s10396-009-0238-y
- Thomas, G. D. (2011). Neural control of the circulation. *Advances in Physiology Education*, 35(1), 28-32. DOI: 10.1152/advan.00114.2010
- Vieira, P. J. C., Ribeiro, J. P., Cipriano, G., Umpierre, D., Cahalin, L. P., Moraes, R. S., & Chiappa, G. R. (2012). Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation on muscle metaboreflex in healthy young and older subjects. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4), 1327-1334. DOI: 10.1007/s00421-011-2084-z
- Yamashita, A., Asada, Y., Sugimura, H., Yamamoto, H., Marutsuka, K., Hatakeyama, K., Tamura, S., Ikeda, Y., & Sumiyoshi, A. (2003). Contribution of von Willebrand factor to thrombus formation on neointima of rabbit stenotic iliac artery under high blood-flow velocity. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 23(6), 1105-1110. DOI: 10.1161/01.ATV.0000077206.35631.B2
- Yi, K.-K., Park, C., Yang, J., Lee, Y.-B., & Kang, C.-K. (2023). Quantitative thermal stimulation using therapeutic ultrasound to improve cerebral blood flow and reduce vascular stiffness. *Sensors*, 23(20), Article 20. DOI: 10.3390/s23208487

원고접수: 2024.04.19

수정접수: 2024.05.21

게재확정: 2024.05.22