

물리치료 바이오피드백의 정의 및 범위와 활용법: 체계적 문헌고찰

오종선 · 이경진 · 김성길^{1†}

선문대학교 물리치료학과 일반대학원

¹선문대학교 물리치료학과

Definition, Scope, and Applications of Physiotherapy Biofeedback: Systematic Reviews

Jong-Seon Oh, PT · Kyung-Jin Lee, PT · Seong-Gil Kim, PT, PhD^{1†}

Department of Physical Therapy, General Graduate School, Sunmoon University

¹Department of Physical Therapy, Sunmoon University

Received: October 12 2023 / Revised: October 19 2023 / Accepted: November 5 2023

© 2023 J Korean Soc Phys Med

| Abstract |

PURPOSE: The definition and scope of biofeedback are broad and lack a clear framework. Therefore, efforts are needed to clearly understand the exact range and definition of biofeedback based on the research and development conducted to date. Thus, the purpose of this study was to arrive at the definition and scope of biofeedback through a literature review and analysis of its application methods.

METHODS: This study is a systematic literature review conducted to understand the various types and effects of biofeedback. International databases such as Google Scholar and PubMed were used. Domestic databases utilized for keyword searches included the Research Information Sharing Service (RISS) and the National Digital Science Library

(NDSL). Quality assessment of the selected studies in the selection process was done using the Cochrane risk of bias, and the research was analyzed according to the population, intervention, control, and outcomes (PICO) format.

RESULTS: Studies conducted between 2019 and 2021 were selected, with 4 papers falling under physiological classifications and 7 under biomechanical classifications. The quality assessment results showed that random sequence generation, allocation concealment, performance bias, and reporting bias were unclear. Detection bias was moderate, and attrition bias and other biases were low. Out of the 11 papers, 9 dealt with physical function outcomes, 5 with daily life activities, and 3 with mental functions.

CONCLUSION: Physiological biofeedback tended to influence psychological factors more than physical functions, while biomechanical biofeedback tended to have a positive impact on physical functions.

†Corresponding Author : Seong-Gil Kim
niceguygil@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2487-5122>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Key Words: Biofeedback, Electromyography, Heart rate, Inertial sensor, Ultrasound

I. 서론

50년 전 바이오 피드백(Biofeedback)은 개인의 생리적 반응을 기계나 장치를 이용해 실시간으로 측정하고 피드백하는 기술적 접근법으로 사용되어져 왔다[1]. 이러한 접근법은 심박수, 근전도, 피부 전도도와 같은 생리적 지표를 포함한다[2-5]. 최근 들어서는 움직임에 따른 힘, 신체 자세 등의 생체역학적 지표를 활용하는 바이오 피드백 연구들이 활발히 이루어지고 있다[6-12]. 사용자는 이런 실시간 정보를 통해 자신의 현재 상태와 반응을 직접 확인할 수 있다. 이 정보는 사용자가 원하는 방향으로 생리적 및 생체역학적 반응을 조절하거나 개선하는 데 도움을 준다[13].

바이오 피드백의 활용은 다양한 분야에서 볼 수 있다. 의학과 심리학에서는 스트레스와 불안을 조절하거나 관리하고[14,15], 다양한 질환 및 증상 치료에도 활용되고 있다[16]. 스포츠 분야에서는 선수들의 훈련 및 성능 향상과 심리적 부분에 있어 중요한 피드백 도구로 인식되고 있다[12,17,18]. 실제 예시로, 척수 손상 후 회복 과정에서 바이오 피드백은 근육의 활동을 모니터링하는 치료 도구로 활용되고 있다. 척수 손상은 환자에게 움직임 및 근육 제어의 어려움을 초래하므로, 정확한 근육 활동의 피드백이 필요하다. 표면 근전도 바이오 피드백은 환자들에게 근육의 전기적 활동을 실시간으로 표시하여, 타겟 근육의 근수축을 직접 확인할 수 있게 해준다[19,20].

기업에서도 바이오 피드백의 중요성이 부각되고 있다. 특히 제조업에서 노동자들은 장시간 동안 반복되는 동작이나 부적절한 작업 자세로 인해 직업 관련 질병의 위험에 처해 있다[21]. 바이오 피드백 장치는 신체의 자세나 허리의 굽힘 각도 등을 실시간으로 측정하여, 노동자가 자신의 동작 문제점을 즉각 교정할 수 있게 도와준다[10,11,22]. 이를 통해, 노동자는 장기적인 건강 문제의 위험을 감소시키는 동시에 생산성도 향상할 수 있다[23].

기술의 발전과 함께 바이오 피드백을 활용한 웨어러블 기기는 지속적인 연구와 발전을 통해 다양한 분야에서 적용 가능성을 탐색하고 있다. 현재 웨어러블 기기로 다발성 경화증 환자들의 보행 패턴 분석, 신체 각도의

미세한 측정 기술, 그리고 심박수의 정확한 측정 등 다양한 기술적 발전이 진행되고 있으나[24-26], 바이오 피드백이라는 개념은 그 정의와 범위가 아주 넓어서 명확한 틀이 존재하지 않는다. 이러한 이유로 현재까지 이루어진 연구와 발전을 근거로 바이오 피드백의 정확한 범위와 정의를 명확히 파악하기 위한 노력이 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 PICO형식을 따른 문헌고찰을 통해 바이오피드백의 정의와 범위를 정리하고, 활용법을 분석하는 것이다.

II. 연구방법

1. 연구 설계

본 연구는 바이오 피드백의 다양한 종류와 그 효과에 대한 이해를 위해 수행된 체계적 문헌고찰 연구이다.

2. 연구선정

1) 데이터베이스

본 연구에서는 국외 및 국내 학술 논문 중 실시간 바이오 피드백을 사용한 실험논문을 분석하였으며, 국제적 데이터베이스로는 Google Scholar, PubMed를 사용하고, 국내 데이터베이스로는 Research Information Sharing Service (RISS)와 National Digital Science Library (NDSL)를 사용하였다.

2) 검색어

‘바이오 피드백(Biofeedback)’, ‘표면 근전도 바이오 피드백(Surface Electromyography(sEMG) Biofeedback)’, ‘초음파 바이오 피드백(Ultrasound Biofeedback)’, ‘심박동 바이오 피드백(Heart Rate Biofeedback)’, ‘호흡 바이오 피드백(Respiratory Biofeedback)’, ‘포스 플랫폼 바이오 피드백(Force Platform Biofeedback)’, ‘압력 바이오 피드백(Pressure Biofeedback)’, ‘웨어러블 바이오 피드백(Wearable Biofeedback)’, ‘관성 센서 바이오 피드백(Inertial Sensor Biofeedback)’, ‘3D 모션 바이오 피드백(3D motion capture camera biofeedback)’을 주요 검색어로 사용하였다.

3) 선정 기준은 다음과 같다.

- 첫째, 실험연구 (Experimental study)
- 둘째, 실시간 바이오 피드백 기기를 사용한 연구
- 셋째, 최근 5년 이내에 발행된 연구
- 넷째, 객관적인 결과 수치가 나타난 연구

4) 배제 기준은 다음과 같다.

형식이 중복되는 연구, 주제에 부적합한 연구 결과가 제시된 연구는 제외시켰다.

3. 연구선정 과정

본 연구에서 정한 검색어 및 검색전략을 이용하여 연구들을 각 데이터베이스별로 검색한 결과 2019년부터 2023년에 출판된 논문 2,811편이 수집되었으며, 제목이 중복되는 연구 120건을 배제했고, 초록 스크리닝 (Screening)으로 2,603편을 배제하였고, 본문 적합도 평가로 형식이 중복되는 연구 6편과 주제에 부적합한 연구 결과가 제시된 연구 71편을 배제하였다. 총 2,800편을 배제했고 그 중 본 연구의 취지인 실시간 바이오 피드백 장치를 사용한 실험 연구인 논문 11편을 선정하였다(Fig. 1).

4. 자료분석

데이터베이스에 게재된 연구를 대상으로 연구의 객관성을 유지하기 위해 바이오 피드백과 관련된 연구를 수행한 연구원 2인이 각각 데이터베이스에 검색어, 선정 기준과 배제 기준으로 검색했다. 연구는 Cochrane risk of bias(ROB)를 이용해 질평가를 하였다. Cochrane ROB는 임상시험의 결과를 평가할 때 사용되는 도구로, 연구의 편향을 평가하는 데 사용한다. 7가지 영역을 고려하여 연구의 편향을 평가하며, 그 영역으로는 무작위 배정 순서 생성, 배정 순서 은폐, 실행 비뮌림, 결과확인 비뮌림, 탈락 비뮌림, 보고 비뮌림, 기타 비뮌림이다. 연구의 설계와 방법을 검토하여 위의 7가지 영역에 대한 정보를 수집하고, 각 영역에 대해 “편향 위험이 낮음”, “편향 위험이 높음”, “편향 위험이 불분명함” 중 하나로 평가한다[27].

각자 검색해 온 연구들은 회의를 걸쳐 제목 검토, 초록 확인, 확인이 필요한 경우 원문을 확인하였고, 이견이 있으면 토론을 통해 결정하였다. 대상자, 대조군, 평가 방법에 제한을 두지 않고, 실험군에서 실시간 바이오 피드백 기기를 사용한 연구만 포함하였다. 선정 과정을 통과한 연구는 PICO(Patient, Intervention, Comparison,

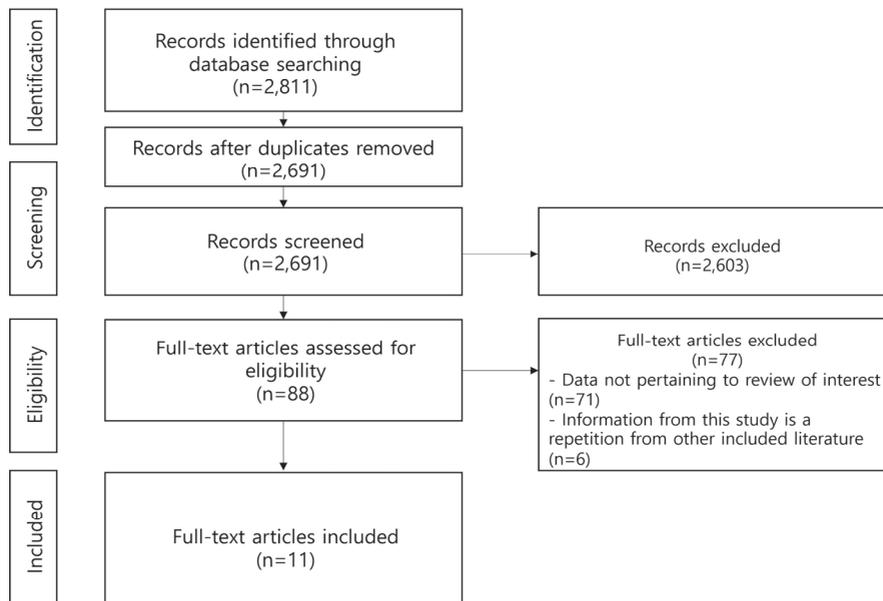


Fig. 1. Flow diagram for the study selection process.

Outcome) 형식에 따른 대상자의 정보, 실험군, 대조군, 평가 방법 및 결과를 중심으로 구분하였다. 선정된 연구는 Microsoft Excel(Office 365, Microsoft Corporation, USA)에 데이터 양식을 만들고, 추출된 데이터를 저장하고 분석하였다.

III. 연구결과

1. 선정된 연구의 일반적인 특성

본 연구에 포함된 연구들은 모두 바이오 피드백 기기를 사용한 연구들로서, 문헌고찰에 포함된 총 11편의 연구를 분석하였다. 출판연도는 2023년 및 2022년은

없고, 2021년 3편(27.2%), 2020년 4편(36.3%), 2019년 4편(36.3%)이었다. 생리학적인 바이오 피드백을 다룬 논문은 4편이었고, 생체역학적 바이오 피드백을 다룬 논문은 7편이었다. 생리학적인 요소로는 근 수축, 심 박동, 호흡이 있었고, 세부적으로는 표면 근전도를 사용한 연구 2편(18.1%), 초음파를 사용한 연구 1편(9%), 심박동을 사용한 연구 1편(9%), 호흡을 이용한 연구 1편(9%)이었다.

생체역학적 요소로는 힘, 움직임, 자세 조절이 있었고, 세부적으로는 포스 플랫폼을 사용한 연구 4편(36.3%), 압력을 사용한 연구 1편(9%), 관성 센서를 이용한 연구 2편(18.1%), 3D motion을 사용한 연구 1편(9%)이었다. 바이오 피드백의 감각 수용체에 따른 분류로는 시각을 사용한 연구 9편(81.8%), 청각을 사용한 연구 2편

Table 1. General characteristics of the subjects

No.	Authors	Type of biofeedback	Participants	Intervention Group(IG)	Comparator Group(CG)
1	Hagen (2020)	sEMG	n = Age(years) 600 47.7 ± 11.5	EMG + PFMT	PFMT
2	Kwong (2021)	Ultrasound sEMG	n = Age(years) 38 25.3 ± 2.42	Ultrasound	EMG
3	Blum (2019)	VR : HRV	n = Age(years) 31/29 33.5 ± 9.4	VR-HRV BF	Standard-HRV BF
4	Rockstroh (2021)	VR : Breath	n = Age(years) 45 22.9 ± 5.4	Mobile VR headset	-
5	Zhang (2020)	FP	n = Age(years) 40 67.2 ± 4.6	FP balance training	Conventional balance training
6	Hyun (2021)	FP	n = Age(years) 30 60.3 ± 14	FP sit to stand	Classic sit to stand
7	Bäcker (2021)	FP	n = Age(years) 20/15 64 ± 9.3	FP Q-setting exercise	Regular physiotherapy
8	Lee (2019)	PB	n = Age(years) 21/20/21 22.1 ± 2.5	PB	2 group (MT / stretching)
9	Cordella (2019)	IMU	n = Age(years) 10 27.2 ± 3.8	IMU	Non-IMU
10	Boocock (2019)	IMU	n = Age(years) 18/16 25.6 ± 4.8	IMU	Non-IMU
11	Diekfuss (2020)	3D motion	n = Age(years) 17/13 15.9 ± 0.9	3D motion + NMT	Non-NMT

*sEMG = surface Electromyography, VR = Virtual Reality, HRV = Heart Rate Variability, BF = Biofeedback, FP = Force Platform, BT = Balance Training, PB = Pressure Biofeedback, MT = Manual Therapy, IMU = Inertial Measurement Unit, NMT = Neuromuscular Training

(18.1%), 촉각을 사용한 연구 1편(9%)이었다. 시각을 사용한 연구 9편 중 디스플레이(Display)를 사용한 연구 6편(66.6%), 가상현실(Virtual reality)을 사용한 연구 2편(22.2%), 시각적 수치(Visual indicator)를 이용한 연구 1편(11.1%)이었다(Table 1).

2. 연구의 비플립 위험 평가 결과

총 11편의 질 평가 결과는 다음과 같다. ‘무작위 배정 순서 생성’은 6편(54.5%)의 연구가 불확실로 평가되었고, ‘배정 순서 은폐’는 9편(81.8%)의 연구가 불확실로 판정되어 비플립 위험 불확실로 평가하였다. ‘실행 비플립’도 9편(81.8%)의 연구가 불확실로 판정되어 비플립 위험 불확실로 평가되었다. ‘결과확인 비플립’은 5

편(45.5%)이 낮음으로 평가되어 비플립 위험 중간으로 평가되었고, ‘탈락 비플립’은 낮음으로 평가된 연구가 8편으로 비플립 위험 낮음으로 평가되었다. 보고 비플립은 9편(81.8%)의 연구가 불확실로 평가되어 보고 비플립은 불확실로 평가하였다. 그 외 기타 비플립은 11편(100%) 모두 비플립 위험 낮음으로 평가되어 기타 비플립 위험 낮음으로 평가하였다.

3. 연구에서 사용된 종속변수에 따른 분류

선정된 총 11편의 논문 중 신체기능 결과를 다룬 논문은 9편(81.8%), 일상생활활동(ADL : Activities of Daily Living)결과를 다룬 논문은 5편(45.4%), 정신 기능을 다룬 논문은 3편(27.2%)이었다. 신체기능 종속변수

Table 2. Effects of biofeedback on physical activity

No.	Outcome	Result
2	Accuracy about Mendelsohn maneuver	Comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
3	HRV	Both the IG and the CG showed significant increases in HRV. When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
5	BBS TUG	Both the IG and the CG showed significant increases in BBS & TUG. When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
6	BBS TUG 10MWT COP	Both the IG and the CG showed significant increases in BBS, TUG, COP. Both the IG and the CG showed significant decreases in 10MWT. When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
7	Knee AROM Knee PROM	There was no significant difference.
8	Craniovertebral angle	Both the IG and the CG showed significant increases in CVA. When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
9	Tout Treact	The IG exhibited a significant reduction in Tout & Treact.
10	Lumbosacral flexion angle	As the task progressed, the IG exhibited a smaller lumbosacral flexion angle compared to the CG
11	Peak knee abduction moment	The IG showed significant decreases in Peak knee abduction moment.

*EMG = Electromyography, VR = Virtual Reality, HRV = Heart Rate Variability, BF = Biofeedback, FP = Force Platform, BT = Balance Training, PB = Pressure Biofeedback, MT = Manual Therapy, IMU = Inertial Measurement Unit, NMT = Neuromuscular Training

*Tout : which represents the time the user's trunk and head are outside the defined boundaries, normalized with respect to the total time needed by each subject to perform the tasks

*Treact: represents the time needed by the subjects to return to the correct posture after receiving the feedback.

로는 심박 변이도 데이터(HRV : Heart rate variability data), 멘델슨 기법 정확도(Accuracy about Mendelsohn maneuver), 버그 균형 검사(BBS : Berg balance scale), 일어서서 걷기 검사(Time up and go test), 압력중심점(COP : center of pressure), 10미터 보행 검사(10 meter walk test), 가동범위(ROM : Range of motion), 두 개척추각(CVA : Craniovertebral angle) 등이 있었다(Table 2).

일상생활활동 종속변수는 요실금의 심각도를 보는 ICIQ-UI SF(International consultation on incontinence questionnaire-short form), 바델 지수(BI : Barthel index), 기능적 보행지수(FAC : Functional Ambulation category), 뇌졸중 삶의 질 평가(SS-QQL : Stroke-specific quality

of life), 무릎 손상과 무릎관절염 결과 척도(KOOS : Knee injury and osteoarthritis outcome score), 무릎 사회 척도(KSS : Knee society score), 헨리 포드 두통 장애 지수(HDI : Henry Ford headache disability inventory), 두통 영향 평가(HIT-6 : Headache impact test 6) 등이 있었다(Table 3).

정신 기능 종속변수로는 상태-특성 불안 척도(STAI-S : State trait anxiety inventory), 인지적 방해 설문지(CIQ : Cognitive interference questionnaire), 마음상태 척도(SMS : State mindfulness scale), 인지 스트레스 척도 10 항목(PSS-10 : Perceived stress scale), 코펜하겐 번아웃 척도(CBI : Copenhagen burnout inventory) 등이 있었다. 분류 이외로는 통증 아날로그 척도(VAS : Visual analogue

Table 3. Effects of biofeedback on activities of daily living

No.	Outcome	Result
1	ICIQ-UI SF	Both the IG and the CG showed significant decreases in ICIQ-UI SF. There was no significant difference between the groups.
5	BI FAC	Both the IG and the CG showed significant increases in FAC & BI When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
6	SS-QOL	Both the IG and the CG showed significant decreases in SS-QOL. When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG.
7	KOOS KSS	There was no significant difference.
8	HDI HIT-6	When comparing between the groups, IG showed a significant difference in comparison to the CG. (2 weeks after the intervention)

*ICIQ-UI SF = International consultation on incontinence questionnaire-short form, BI = Barthel index, FAC = Functional Ambulation category, SS-QQL = Stroke-specific quality of life, KOOS = Knee injury and osteoarthritis outcome score, KSS = Knee society score, HDI = Henry Ford headache disability inventory, HIT-6 = Headache impact test 6

Table 4. Effects of biofeedback on mental function

No	Outcome	Result
3	STAI-S CIQ SMS	Both the IG and CG exhibited reductions in mind wandering as measured by CIQ. However, when comparing the two groups, the IG demonstrated a significantly higher focus on the present moment, as indicated by the SMS scores, compared to the CG.
4	Relaxation-related self-efficacy PSS-10 CBI	Following the intervention, there was a decrease in PSS-10 and CBI scores, while Relaxation-related self-efficacy saw an increase.
8	Attention Stress:	The intervention group showed more effective improvements in attention compared to the control group. There was no significant difference in stress.

* STAI-S = State trait anxiety inventory, CIQ = Cognitive interference questionnaire, SMS = State mindfulness scale, PSS-10 = Perceived stress scale, CBI = Copenhagen burnout inventory

scale), 운동자각도(RPE : Rated Perceived Exertion), 바이오 피드백 기기 사용성 평가 등이 있었다(Table 4).

IV. 고찰

1. 카테고리 분류

본 연구에서는 Giggins 등[13]의 바이오 피드백 분류 카테고리를 따와 물리치료에서 사용될 수 있는 바이오 피드백을 생리학적 및 생체역학적으로 분류했다. 생리학적 바이오 피드백은 주로 심박동, 근전도, 호흡과 같은 인체 내부 생리적 신호를 측정하며, 이는 스트레스와 같은 심리적 요인과 신경근 활성도를 알 수 있다[2-5]. 반면, 생체역학적 바이오 피드백은 움직임 자세, 움직임 시 전달되는 힘과 같은 신체 외부 데이터를 측정해 재활, 자세 교정 및 운동 효율 향상에 활용된다[6-12]. 이러한 분류는 바이오 피드백의 다양한 응용 분야와 그에 따른 측정 목적의 차이를 명확히 하기 위함이다. 생리학적 및 생체역학적 데이터는 각각 다른 해석 및 피드백 방법을 필요로 하며, 그 결과로 인해 주는 치료적 효과나 교육적 효과도 다를 수 있다. 따라서 이 두 분야를 구분함으로써, 물리치료에 있어 특정 상황에서 가장 효과적인 바이오 피드백 방법을 선택하고 적용할 수 있게 된다.

2. 표면 근전도 바이오 피드백

표면 근전도는 근육의 전기적 신호를 측정하는 기술로, 전기적 신호를 실시간으로 모니터링할 수 있으며, 바이오 피드백 형태로도 활용된다[28,29]. 측정하고자 하는 근육 위 피부 표면에 전극을 부착하기 전, 전기적 저항을 줄이기 위해 털을 밀고 피부를 깨끗이 해야 한다[29]. 전극이 부착된 상태에서 움직임이나 근 수축을 시도할 때 실시간으로 미가공 데이터(raw data) 그래프를 통해 근육 활성도를 확인할 수 있다. 근전도 데이터의 그래프 진폭의 기준값 설정 방법으로는 MVIC (Maximum Voluntary Isometric Contraction)를 활용할 수 있다. MVIC를 측정하여 그래프 진폭의 기준값으로 설정해, 그 값을 넘을 경우 올바른 근수축으로 정상적으로 근육 활성화가 되었다고 확인할 수 있다[30-32].

Hagen 등[2]의 연구에서는 근전도 바이오 피드백으로 요실금 문제를 가진 대상자들에게 골반 기저근(Pelvic floor muscle)의 전기적 활동을 실시간으로 보여주며, 이를 통해 골반 기저근 훈련을 진행하였다.

3. 초음파 바이오 피드백

초음파 바이오 피드백은 방사선을 사용하지 않는 비침습적인 영상 기술로써, 실시간으로 근육과 같은 연부조직의 활동 및 구조를 시각적으로 확인하는 데 사용되는 기술이다[33]. 피부 표면을 깨끗이 한 후, 초음파 젤(gel)을 초음파 프로브나 피부에 바른 후 목적으로 하는 근육을 디스플레이에 투영시켜, 실시간으로 근 수축을 교육할 수 있다[34]. Kwong 등[3]의 연구에서는 초음파 바이오 피드백으로 대상자에게 목뿔뼈(Hyoid bone)와 방패연골(Thyroid cartilage)의 움직임을 시각적으로 제공하여, 멘델슨 기법의 학습을 도왔다.

4. 심박동 바이오 피드백

심박동 바이오 피드백은 심장 박동의 빈도를 실시간으로 측정하고 이를 피드백으로 제공하는 방법이다[35]. 장비는 가슴 스트랩, 손가락 클립, 손목 밴드 등의 형태로 디스플레이를 통해 피드백을 전달하며[26,36,37], 심장 박동 사이의 변동인 심박 변이도를 측정해 심리 상태를 조절할 때 사용된다[38]. 부교감 신경이 활성화될수록 심박동 간격이 길어지며, 호흡이 심박 변이도에 영향을 미치는데, 들숨 시 심박수를 증가시키고, 날숨 시 심박수를 감소시키는 경향이 있어, 전통적으로 디스플레이를 보며 느린 속도의 호흡으로 심박 변이도를 조절해왔다[39]. Blum 등[4]의 연구에서는 가상 현실을 활용하여 심박동 바이오 피드백을 제공하는 방법을 모색하였다. 가상의 자연환경을 사용하여, 대상자가 현재 상황에 집중하게 만들며, 음성 안내에 따라 분당 6회의 속도로 호흡의 시작과 끝을 안내하였다.

5. 호흡 바이오 피드백

호흡 바이오 피드백은 대상자의 호흡 패턴을 실시간으로 모니터링하고, 이를 통해 호흡의 질을 개선하는 방법론이다[40]. 이는 주로 스트레스, 불안, 고혈압 등의

건강 문제와 관련된 호흡의 효율성 향상에 사용되어 왔다 [40,41]. Rockstroh 등[5]의 연구에서는 가상현실 게임을 통해 횡격막 호흡을 유도하는 호흡 바이오 피드백을 사용하였다. 가상현실 핸드 컨트롤러를 대상자 복부에 부착하여 호흡의 움직임을 감지하고, 이 정보는 게임 내에서 색깔 변화로 시각적 피드백을 제공하였다. 이를 통해 대상자는 색 변화 속도에 맞춰 호흡을 조절할 수 있다.

6. 포스 플랫폼 바이오 피드백

포스 플랫폼 바이오 피드백은 몸이 서있거나 움직일 때 발생하는 지면 반발력(Ground reaction force)을 측정하는 장치로, 균형, 보행 등의 생체역학의 매개 변수 정량화에 사용된다[42]. Zhang 등[6]의 연구에 따르면, 뇌졸중 환자들을 대상으로 포스 플랫폼 위에 20분 동안 서서 화면에 표시되는 피드백에 따라 자신의 몸의 위치와 중심을 조절하는 훈련을 진행하였다. 포스 플랫폼은 참가자의 체중 이동을 감지하고, 이 정보를 화면에 시각적으로 표시하여 참가자가 자신의 균형 상태를 실시간으로 확인할 수 있게 하였다. 앞선 연구와 비슷하게 Hyun 등[7]의 연구에 따르면, 대상자가 포스 플랫폼 위에 서서 화면에 표시되는 피드백에 따라 앉았다 일어 서기 훈련을 진행하였다. 같은 포스 플랫폼을 사용한 Backer 등[8]의 연구에 따르면, 무릎 아래에 포스 플랫폼을 두고 넵다리네갈래근 운동을 진행하였다. 운동 시 측정된 힘은 블루투스를 통해 앱으로 전송되어 실시간 시각 피드백이 제공되었다. 프로그램은 최대 수축 또는 무릎을 공중에 띄우는 운동을 진행하였다.

7. 압력 바이오 피드백

압력 바이오 피드백은 목과 허리의 안정화 운동을 보조하기 위해 개발된 기술로, 차타누가 스테빌라이저(Chattanooga Stabilizer Pressure Biofeedback, Chattanooga, USA)와 같은 장비를 통해 실시간으로 피드백을 제공한다[43]. Lee 등[9]의 연구에서는 이 기술을 활용하여 머리의 뒷통수뼈 아래에 20mmHg로 팽창된 에어백을 배치하고, 대상자가 목뼈 C0-C1 부위를 굽히는 목 굽힘 동작을 수행하도록 하였다. 대상자는 깊은 목 굽힘 근육(Deep neck flexor) 수축을 목적으로, 시각적 수치를 보며,

2-4mmHg 단위로 등척성과 등장성 운동을 진행하였다.

8. 관성 센서 바이오 피드백

관성 센서 바이오 피드백은 관성 측정 장치(IMU: Inertial measurement unit)를 활용하여 착용자의 움직임과 자세를 실시간으로 모니터링하며 피드백을 제공하는 기술이다[44]. 이 장치는 가속도계와 자이로스코프를 포함하여 신체의 선형 및 회전 움직임을 측정한다. 이러한 센서는 움직임과 관련된 다양한 매개 변수를 정밀하게 측정할 수 있으며, 이 정보를 바탕으로 대상자에게 즉각적인 피드백을 제공하여 움직임의 질을 개선하거나 재활보조 수단으로 사용된다[45]. Boocock 등[11]의 연구에서는 대상자들이 허리뼈 L1과 엉치뼈 S1에 관성 센서를 부착한 상태로 20분 동안 13kg의 상자를 분당 10회의 속도로 반복하여 들어 올렸다. 허리와 엉치 부분이 과도하게 굽히면 청각 피드백을 통해 대상자들의 자세 교정을 유도하였다. 비슷한 맥락에서 Cordella 등[10]의 연구에서는 참가자들이 머리와 몸통에 각각 관성 센서를 부착하고, 1.5kg의 물체를 들어 올리는 9가지 동작을 수행하였다. 머리와 몸통의 굽힘, 펌, 돌림 각도가 특정 기준 값을 초과하면 센서에서 진동 피드백을 제공하여 자세 교정을 유도하였다.

9. 3D 모션 바이오 피드백

3D 모션 바이오 피드백은 카메라를 활용하여 대상자의 움직임과 자세를 실시간으로 모니터링하고, 이를 통해 피드백을 제공하는 기술이다. 이 기술은 3D 모션 분석과 포스 플랫폼을 통해 신체의 움직임을 정밀하게 측정하며, 이러한 정보를 바탕으로 대상자에게 즉각적인 피드백을 제공한다[46]. 이는 움직임의 질을 개선하거나 재활보조 수단으로 활용될 수 있다. Diekfuss 등[12]의 연구에서는 대상자들이 3D 모션 바이오 피드백을 활용하여 실시간으로 상호작용하는 디스플레이를 통해 동작을 피드백하는 신경근육 훈련을 받았다. 훈련 동작으로는 스쿼트(Squat), 피스톨 스쿼트(Pistol squat), 한 발 로마니안 데드 리프트(One leg romanian deadlift), 오버헤드 스쿼트(Overhead squat), 스쿼트 점프(Squat jump), 퍽 점프(tuck jump) 등이 포함되었다.

10. 시사점 및 제한점

본 연구를 통해 다양한 바이오 피드백 연구들을 검토하였으며, 이러한 연구들 간에는 몇 가지 공통점과 차이점이 확인되었다. 대다수의 연구들이 바이오 피드백 기기의 활용성을 중심으로 진행되었고, 체계적 문헌고찰을 통해 바이오 피드백의 다양한 종류를 탐색하는 방식이 주를 이루었다. 그러나 연구마다 중점을 둔 바이오 피드백의 종류가 상이하였으며, 일부는 실시간 바이오 피드백에, 다른 연구들은 다양한 바이오 피드백 기법에 초점을 맞추었다. 바이오 피드백의 기본 원리와 효과를 탐구한 연구와 특정 질환 또는 상황에서의 바이오 피드백 활용을 중점적으로 다룬 연구로 구분될 수 있었다. 마지막으로, 연구들은 각기 다른 발행 연도를 기준으로 하여, 그 시기의 연구 결과와 트렌드를 반영하고 있음을 확인하였다.

본 연구의 제한점으로는 선정된 논문은 최근 5년 이내에 발행된 것으로 한정하였다. 이로 인해 일부 연구의 결과나 오래된 연구의 중요성이 반영되지 않았을 가능성이 있다.

V. 결론

본 연구는 바이오 피드백에 관련된 최신 동향을 분석하고, 다양한 분야에서 그 효과와 적용 가능성을 탐색했다. 실시간 바이오 피드백을 적용한 연구를 연구 선정 기준에 맞춰 선별해 11편의 논문을 선정하였다. 선정된 논문들을 평가하고, 분류해 최신 경향과 발전 방향을 파악했다. 생리학적 바이오 피드백은 신체 기능보다는 심리적 요인에 영향을 미치는 경향이 있었고, 생체역학적 바이오 피드백은 신체 기능에 긍정적인 영향을 미치는 경향이 확인되었다.

References

- [1] Gartha IV. What is biofeedback?. *Can Fam Physician*. 1976;22:105-6.
- [2] Hagen S, Elders A, Stratton S et al. Effectiveness of pelvic floor muscle training with and without electromyographic biofeedback for urinary incontinence in women: multicentre randomised controlled trial. *BMJ*. 2020;371:m3719.
- [3] Kwong E, Ng KK, Leung M et al. Application of ultrasound biofeedback to the learning of the mendelsohn maneuver in non-dysphagic adults: A pilot study. *Dysphagia*. 2021;36:650-8.
- [4] Blum J, Rockstroh C, Göritz AS. Heart rate variability biofeedback based on slow-paced breathing with immersive virtual reality nature scenery. *Front Psychol*. 2019;10:2172.
- [5] Rockstroh C, Blum J, Göritz AS. A mobile VR-based respiratory biofeedback game to foster diaphragmatic breathing. *Virtual Real*. 2021;25:539-52.
- [6] Zhang M, You H, Zhang H et al. Effects of visual feedback balance training with the pro-kin system on walking and self-care abilities in stroke patients. *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(39): e22425.
- [7] Hyun S, Lee J, Lee B. The effects of sit-to-stand training combined with real-time visual feedback on strength, balance, gait ability, and quality of life in patients with stroke: A randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(22):12229.
- [8] Bäcker HC, Wu CH, Schulz MR et al. App-based rehabilitation program after total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021:1-8.
- [9] Lee E, Lee S. Impact of cervical sensory feedback for forward head posture on headache severity and physiological factors in patients with tension-type headache: A randomized, single-blind, controlled trial. *Med Sci Monit*. 2019;25:9572.
- [10] Cordella F, di Luzio FS, Lauretti C et al. A biofeedback-based posture correction system for working environments. *IEEE*. 2019:405-9.
- [11] Boocock M, Naudé Y, Taylor S et al. Influencing lumbar posture through real-time biofeedback and its effects

- on the kinematics and kinetics of a repetitive lifting task. *Gait Posture*. 2019;73:93-100.
- [12] Diekfuss JA, Grooms DR, Bonnette S et al. Real-time biofeedback integrated into neuromuscular training reduces high-risk knee biomechanics and increases functional brain connectivity: a preliminary longitudinal investigation. *Psychophysiology*. 2020;57(5):e13545.
- [13] Giggins OM, Persson UM, Caulfield B. Biofeedback in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*. 2013;10:1-11.
- [14] Lalanza JF, Lorente S, Bullich R et al. Methods for heart rate variability biofeedback (HRVB): A systematic review and guidelines. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2023:1-23.
- [15] Yu B, Funk M, Hu J et al. Biofeedback for everyday stress management: a systematic review. *Front ICT*. 2018;5:23.
- [16] Kondo K, Noonan KM, Freeman M et al. Efficacy of biofeedback for medical conditions: An evidence map. *J Gen Intern Med*. 2019;34:2883-93.
- [17] Jimenez Morgan S, Molina Mora JA. Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2017;42:235-45.
- [18] Bonnette S, DiCesare CA, Kiefer AW et al. A technical report on the development of a real-time visual biofeedback system to optimize motor learning and movement deficit correction. *J Sports Sci Med*. 2020;19(1):84.
- [19] De Biase M, Politti F, Palomari ET et al. Increased EMG response following electromyographic biofeedback treatment of rectus femoris muscle after spinal cord injury. *Phys Ther*. 2011;97(2):175-9.
- [20] Gutierrez A, Sepulveda-Munoz D, Gil-Agudo A et al. Serious game platform with haptic feedback and EMG monitoring for upper limb rehabilitation and smoothness quantification on spinal cord injury patients. *Appl. Sci*. 2020;10(3):963.
- [21] Franco G. Commentary: Work-related musculoskeletal disorders: A lesson from the past. *J. Epidemiol*. 2010; 21(4):577-9.
- [22] Cerqueira SM, Da Silva AF, Santos CP. Smart vest for real-time postural biofeedback and ergonomic risk assessment. *IEEE Access*. 2020;8:107583-92.
- [23] Summers K, Jinnett K, Bevan S. *Musculoskeletal disorders, workforce health and productivity in the united states*. London, The center for workforced health and performance. 2015.
- [24] Ibrahim AA, Küderle A, Gaßner H et al. Inertial sensor-based gait parameters reflect patient-reported fatigue in multiple sclerosis. *J Neuroeng Rehabil*. 2020; 17(1):1-9.
- [25] Manivasagam K, Yang L. Evaluation of a new simplified inertial sensor method against electrogoniometer for measuring wrist motion in occupational studies. *Sensors*. 2022;22(4):1690.
- [26] Gillinov S, Etiwy M, Wang R et al. Variable accuracy of wearable heart rate monitors during aerobic exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2017;49(8):1697-703.
- [27] Kim SY, Park DA, Seo HJ et al. Methodology for health technology assessment: systematic review. Korea. NECA. 2020.
- [28] Duarte-Moreira RJ, Castro KV, Luz-Santos C et al. Electromyographic biofeedback in motor function recovery after peripheral nerve injury: An integrative review of the literature. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2018;43:247-57.
- [29] Hruby LA, Sturma A, Aszmann OC. Surface electromyographic biofeedback as a rehabilitation tool for patients with global brachial plexus injury receiving bionic reconstruction. *JoVE*. 2019;151:e59839.
- [30] Meldrum D, Cahalane E, Conroy R et al. Maximum voluntary isometric contraction: Reference values and clinical application. *Amyotrophic Lat Scler*. 2007;8(1): 47-55.
- [31] Escamilla RF, Andrews JR. Shoulder muscle recruitment patterns and related biomechanics during upper extremity

- sports. *Sports Med.* 2009;39:569-90.
- [32] Gámez AB, Hernandez Morante JJ, Martínez Gil JL et al. The effect of surface electromyography biofeedback on the activity of extensor and dorsiflexor muscles in elderly adults: A randomized trial. *Sci Rep.* 2019;9(1):13153.
- [33] Huang Q, Zeng Z. A review on real-time 3D ultrasound imaging technology. *Biomed Res Int.* 2017;2017:20.
- [34] Ter HG. Therapeutic ultrasound. *Eur J Ultrasound.* 1999;9(1):3-9.
- [35] Lehrer PM, Gevirtz R. Heart rate variability biofeedback: How and why does it work?. *Front Psychol.* 2014;756.
- [36] Ebben MR, Kurbatov V, Pollak CP. Moderating laboratory adaptation with the use of a heart-rate variability biofeedback device (StressEraser®). *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2009;34:245-9.
- [37] Corrado J, Halpin S, Preston N et al. HEART rate variability biofeedback for long COVID symptoms (HEARTLOC): Protocol for a feasibility study. *BMJ open.* 2022;12(11):e066044.
- [38] Goessl VC, Curtiss JE, Hofmann SG. The effect of heart rate variability biofeedback training on stress and anxiety: A meta-analysis. *Psychol Med.* 2017;47(15):2578-86.
- [39] Prinsloo GE, Rauch HL, Lambert MI et al. The effect of short duration heart rate variability (HRV) biofeedback on cognitive performance during laboratory induced cognitive stress. *Appl Cogn Psychol.* 2011;25(5):792-801.
- [40] Purwandini SA, Abdul WMN, Mat ZN. Resonant breathing biofeedback training for stress reduction among manufacturing operators. *Int J Occup Saf Ergonomics.* 2012;18(4):549-61.
- [41] Brammer JC, Van Peer JM, Michela A et al. Breathing biofeedback for police officers in a stressful virtual environment: challenges and opportunities. *Front Psychol.* 2021;12:586553.
- [42] Nelson LA. The role of biofeedback in stroke rehabilitation: past and future directions. *Top Stroke Rehabil.* 2007;14(4):59-66.
- [43] Paula LPO, Oliveira RR, Costa LOP et al. Measurement properties of the pressure biofeedback unit in the evaluation of transversus abdominis muscle activity: a systematic review. *Physiotherapy.* 2011;97(2):100-6.
- [44] Ahmad N, Ghazilla RAR, Khairi NM et al. Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications. *Int. J. Signal Process. Syst.* 2013;1(2):256-62.
- [45] Bowman T, Gervasoni E, Arienti C et al. Wearable devices for biofeedback rehabilitation: A systematic review and meta-analysis to design application rules and estimate the effectiveness on balance and gait outcomes in neurological diseases. *Sensors.* 2021;21(10):3444.
- [46] Kiefer AW, Kushner AM, Groene J et al. A commentary on real-time biofeedback to augment neuromuscular training for ACL injury prevention in adolescent athletes. *J Sports Sci Med.* 2015;14(1):1.