

운동 학습의 개념과 이론

¹서울대학교 의과대학 재활의학교실, ²분당서울대학교병원 재활의학과

백남종^{1,2} · 신준호²

Motor Learning: Basic Concept and Theories

Nam-jong Paik, M.D., Ph.D.^{1,2} and Joon Ho Shin, M.D.²

Department of Rehabilitation Medicine, ¹Seoul National University College of Medicine,

²Seoul National University Bundang Hospital

Motor learning is defined as a relatively permanent change in the capability for skilled motor performance as a result of practice or experience. Neurorehabilitation is fundamentally a process of motor learning or re-learning with a disrupted neural network. There are many theory models to explain learning and performance. Recent studies demonstrate motor learning is associated with neuronal plasticity. In a viewpoint of motor learning, neurorehabilitation should be geared towards an active and task-specific treatment. (Brain & NeuroRehabilitation 2010; 3: 57-63)

Key Words: motor learning, plasticity, rehabilitation

서 론

운동 학습(motor learning)이란 운동 조절(motor control) 이론의 관점에서는 훈련(training)을 통해 수행(performance)에서 보이는 오류(error)를 수정하는 기술의 습득하는 것으로 이해한다. 운동 학습 이론에서는 훈련이나 치료 후에도 그 효과가 지속되는 '후 효과(after effect)'가 일어나는데, 이는 중추신경계가 운동 신호를 받아 변화한다는 증거가 된다. 다시 말해 이러한 내적 모델(internal model)의 개념은 중추신경계의 상태가 계속 변화하면서 새로운 모델링을 한다는 개념이다. 이는 뇌의 가소성(plasticity)의 개념과도 일치하는데, 예를 들어 점자를 읽는 사람에게서 점자를 해독하는 손가락의 운동 지배 영역 활성도가 높아지는 뇌가소성의 변화가 이러한 내적 모델의 개념과 일치한다. 따라서 재활의 과정은 단순한 동작의 반복이 아니라 적절한 내적 모델을 형성하는데 주안점을 두어야 한다.¹

현재까지 이러한 운동 학습을 이해하기 위한 많은 연구들이 있었고 이에 따른 다양한 이론들이 제시되었다. 따라서 본 고찰에서는 이러한 운동 학습의 개념 및 과정, 분류

등에 관하여 살펴보고 뇌의 가소성과의 연관성 등에 관하여 논하고자 한다.

본 론

1) 운동 학습의 정의

운동 학습은 다양하게 정의되는데 Schmidt와 Lee²는 일반적으로 아래 네 가지의 특징을 공통적으로 가진다고 설명하였다.

(1) 학습은 숙련된 움직임을 위한 능력을 획득하는 과정이다.

훈련과 학습은 동반되어 일어나는 유사한 과정으로 간주되는데, 이를 통해 움직임의 능력이 습득된다. 훈련을 통한 학습이 일어나기 위해서는 일련의 과정을 거쳐야 한다. 정확히 구체화하기 어려운 이 과정의 본질을 이해하기 위해 많은 학습 이론들은 각기 다른 설명들을 해왔다.

(2) 학습은 훈련을 통해 이루어진다.

운동 학습의 과정을 통해 특정한 상황에서 숙련된 움직임을 만들어낼 수 있는 능력을 갖추게 된다. 학습은 행위의 직접적인 변화를 일으키는 것이 아니라 능력의 변화를 일으키는 것이다. 즉, 훈련의 목적은 힘과 강도 증가 등의 내적인 상태 변화를 통해 향후 기술 능력을 극대화하는 것이다. 즉, 능력이 충분하여야 외적인 조건 즉 동기(motivation)나 다른 환경 인자들의 영향이 있더라도 숙련된 행위가 일어날 수 있다는 것이다. 한편 수행의 관점

교신저자: 백남종, 경기도 성남시 분당구 구미로 166
 ☎ 463-707, 분당서울대학교병원 재활의학과
 Tel: 031-787-7731, Fax: 031-712-3913
 E-mail: njpaik@snu.ac.kr

에서 보면 수행의 변화 가운데 소수만이 내적인 능력 변화로 일어난다. 이런 개념은 학습과 수행을 구분하게 되는 근거가 된다.

(3) 학습은 직접적으로 측정될 수 없고 행동을 통해 간접적으로 평가된다.

능력의 변화는 감각 정보나 근활성화 패턴의 변화 등의 중추 신경계에서 복잡하게 일어나는 과정이다. 따라서, 직접 측정은 힘들고 운동 수행의 변화를 통해 간접적으로 유추해야만 한다.

(4) 학습은 행위의 상대적으로 영속적인 변화를 만들어 낸다.²

감정의 변화 등에 따라 나타나는 행동의 일시적인 차이 등은 운동 학습과 구분하여야 한다. 상대적으로 영속적인 변화라는 것의 의미가 모호하지만 확실한 것은 학습은 지속적인 효과를 가지고 있어야만 한다는 것이다.

이 네 가지의 개념을 종합하면, 운동학습은 훈련과 경험의 결과로 일어난 숙련된 운동 수행 능력의 상대적인 영속적 변화로 정의할 수 있다.³ 또한, 지각된 감각과 운동 정보를 정확히 연관 짓는 내적 모델의 확립과정으로 정의하기도 한다.⁴

운동 학습 이론에서는 운동 기술을 구성하고 있는 요인들을 분석, 규명하여 가상적인 운동 행동 모델을 구성하여 운동 행동의 습득과정을 이해하고 더 나아가 효율적인 기술 습득의 방법을 고안하는데 관심을 둔다. 또한 습득된 운동의 파지(retention)와 망각, 운동에 대한 기억을 수행하고자 하는데 이용되는 방법, 운동 기능 습득에 영향을 주는 변인, 운동 행동의 의도된 목적에 대한 기여도 등을 측정하는데 초점을 둔다. 이런 개념은 운동 과정 이상으로 확대되어 감각, 인지, 행동 등의 복합적인 과정을 포함하여, 움직임과 감각에 대한 새로운 전략을 학습하는 것들을 포함한다. 따라서 운동 학습이란 과제와 환경과의 상호작용을 통해 해답을 구하는 능동적인 과정이라고 볼 수도 있다.

운동 학습은 전통적으로는 병을 가지고 있지 않은 대상들이 움직임을 습득하고 변경하는 것을 일컬어왔다. 반면, 손상을 통해 잃어버린 움직임의 재획득은 기능의 회복이라고 생각하였다. 과거에는 기능의 회복과 운동 학습을 별개로 보아왔지만, 최근에는 두 개의 개념은 유사한 점이 매우 많아서 운동학습이라는 용어로 두 경우를 다 설명하기도 한다.⁵

2) 학습과 수행

운동 학습은 직접적인 측정이 불가능하기 때문에 일반적으로 학습이 이루어졌는가의 판단은 수행에 대한 평가로 이루어진다. 수행은 특정한 시간과 상황에서의 기능 수

행을 의미하며, 훈련의 직접적인 결과로 일어나는 것이다. 그러나 상대적으로 영속적인 변화라는 운동 학습의 정의에서 보면 성숙이나 성장, 일시적인 요인들에 의한 수행의 변화는 학습과는 분리하여 생각해야 한다. 즉, 영속적 변화를 뜻하는 학습과, 훈련으로 인한 능력의 일시적 변화를 의미하는 수행은 구분되어야 한다.

수행의 평가는 일반적으로 시간에 따른 수행척도를 반영하는 수행곡선(performance curve)을 이용한다. 그러나 이 곡선은 학습에서의 개인적인 차이나, 전략의 변화와 같은 중요한 정보들을 다 포함하지 못하는 한계가 있다. 따라서 수행으로부터 학습을 평가하는 데에는 주의를 기울여야 한다. 또 다른 방법으로 파지나 전이(transfer)를 이용하여 학습을 평가하기도 한다. 전이란 과거의 경험이 현재의 새로운 환경과 새로운 과제의 학습과 수행에 영향을 미치는 것으로 정의되고, 재활치료의 중요한 개념이 된다.⁶ 훈련 이후 일정 시간 경과후의 수행을 평가하여 파지를 구하고, 특정 훈련의 공통 과제 혹은 비슷한 과제에 대한 적용을 통해 전이에 대한 평가를 한다. 이외에도 협응 패턴의 일관성과 안정성을 평가하여 학습을 간접적으로 평가하기도 한다.^{7,8}

3) 운동 학습의 단계

운동 학습은 끝나지 않는, 진행 과정이다. 학습의 과정은 다섯 개의 구분되는 단계를 거치게 된다. 초기의 빠른 학습 단계에서는 한번의 훈련에서도 상당한 수행의 증진을 보인다. 느린 후기 단계에서는 수 차례의 훈련을 거쳐야 이득을 얻게 된다. 강화단계에는, 훈련이 끝난 후 6시간 이상의 잠재기 이후에도 수행이 증진되거나, 약 4~6시간 정도의 중요한 시간 이후에는 다른 과제에 의한 간섭을 받지 않게 된다. 자동화 단계에서는 적은 인지 수준으로 숙련된 행위가 가능해지고 간섭(interference)과 시간의 영향을 적게 받게 된다. 유지 단계에서는 더 이상의 훈련 없이 오랜 시간이 흘러도 운동 기술이 쉽게 수행될 수 있다.⁹ 한편, 간섭이란 기억 인출의 방해로서, 특정 사항의 회상이 다른 사항의 회상을 방해함에 따라 망각이 일어나는 것을 의미한다. 따라서 간섭이 일어나면 학습이 느려지고 기억력의 문제가 일어나게 된다.

운동 학습을 외현 학습에서 자동적인 암묵 학습의 단계로 넘어가는 세 단계로 나누기도 한다. 초기 단계에는 감각의 지도가 필요하고, 수행이 느리게 일어나고, 불규칙적인 형태의 움직임과 다양한 수행 시간을 보인다. 중간 단계에는 감각-운동 지도의 점진적인 학습이 일어나고 속도도 증가한다. 후기에는, 빠르고 자동적인 숙련된 수행이 일어나고 주기적인 움직임이 일어나며 모든 감각 조절이

가능 하게 된다.⁷

공통적으로 운동기술 학습의 단계의 이론들은 시간의 흐름에 따라 학습이 어떻게 일어나는지를 설명하는데, 기본적인 개념은 다음과 같다. 시행착오를 통한 학습의 초기 단계에는 정확한 움직임 명령과 그로 인한 감각 신호의 관계를 확립하여 바른 움직임을 찾고자 한다. 따라서 이 단계에서는 감각신호를 찾는 것이 중요하다. 어떤 움직임을 시작할지 결정해야 하고, 피드백이 주어지는 경우 그 반응을 기억에 저장해야 한다. 새로운 감각운동 관계를 확립하는 것은 주의 집중, 움직임의 선택, 감각 피드백, 작업 기억들과 밀접히 관련되어 있다. 바른 움직임을 찾게 되면, 감각운동지도의 전이가 일어난다. 감각 자극은 작업기억의 단계에서 유지되어 운동출력으로 전이되어야 한다. 이 단계에서의 행동 수행은 느리고 숙련도가 떨어지며, 피드백과 주의집중이 중요한 역할을 한다. 훈련을 통해 감각운동의 관계는 더욱 강력해져서 장기기억으로 저장된다. 시각적 단서 또한 정확하고 빠르게 만들어져서 정확한 운동 반응으로 이어진다. 이런 과정을 통해, 행동은 집중을 덜 요구하는 감각 피드백 과정으로 더 빠르게 이루어진다. 오랜 기간이 걸리는 이런 과정을 통해 움직임은 자동적이고 빠르고 정확하게 수행되어 진다.¹⁰

이러한 운동 학습은 연습과 그에 의한 습득, 기억 강화(consolidation), 회상(recall), 또 한번의 기억 강화의 과정을 거쳐 일어난다. 연습을 통한 기억 형성, 중추신경계 내의 표상화를 통해 습득의 과정을 거치게 되고 기억 강화의 단계로 넘어가게 된다. 기억 강화란 더 이상의 훈련이 없더라도 경쟁 또는 방해하는 인자로부터의 간섭에 대해 저항성을 가져서 기억이 안정화되는 것을 의미한다.^{11,12} 이러한 기억 강화는 최근 들어 기억의 증진에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.¹³ 기억 강화는 지각의 범위를 벗어나서 추가적인 훈련이나 자극에 노출되지 않은 채로 일어나게 되는데 이러한 단계에 수면(sleep)이 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며¹⁴ 수면 가운데에서도 stage 1 NREM 수면을 제외한 모든 수면 단계에서 기억 강화가 일어나는 것으로 알려져 있다.¹²

4) 학습의 분류

운동 학습에서 인지의 역할은 지시를 이해하고 따르는 것인데, 지시는 목표 설정과 달성을 위해 필요한 세부 사항들에 대한 지시가 중요하다.⁷ 이 지시가 명시적인 경우 외현 학습이라 하고, 목표가 드러나지 않고 인식하지 못하면서 학습이 일어나는 경우 암묵 학습이라고 한다(Fig. 1).^{5,15,16}

서술적인 언어로 기술할 수 있어 서술적 학습이라고도 불리는 외현 학습은 의식적으로 회상할 수 있는 학습으로, 인식, 주의 집중과 같은 요소들을 필요로 한다. 이 과정을 통해 사실에 기반을 둔 지식을 기억, 학습하는 능력을 갖추게 된다. 부호화, 응고, 저장, 인출의 네 단계로 이루어지는 외현 학습은 감각연합피질과 내측두엽, 해마, 해마이행부(subiculum) 등에서 일어난다. 외현학습은 심상훈련 등과 같이, 기존의 학습과정과 다른 방법으로 연습할 수 있는 장점을 가진다.

비서술적 학습이라고도 불리는 암묵적 학습은 많은 반복적 자극에 의해 형성된 반사적이고, 자동적인 무의식적 학습 반응이다. 대부분의 운동 학습은 이러한 암묵기억에 의한 학습에 의해 일어난다. 암묵적 기억은 자극과 반응의 관계에 따라 크게 세 가지 형태로 분류한다.

비연합 학습(non-associative forms of learning)은 단일 자극이 반복되는 경우에 나타난다. 습관화(habituation), 민감화(sensitization)가 가장 단순한 유형이다. 습관화는 무해한 자극에 반복적으로 노출된 결과로 반응이 감소되는 것이다. 습관화 동안 감각 신경원에 의해 생긴 흥분성 시냅스 후 전위(excitatory postsynaptic potential)의 감소가 일어난다. 학습의 초기에는 이런 변화가 수 분 지속되고, 학습이 지속되면 감각 세포의 구조적 변화, 감각 신경원과 사이 신경원간의 시냅스 연결 수 감소, 연결간 능동전도의 수적 감소 등의 변화로 시냅스 효율성이 영구히 변화하여 장기기억으로 변환된다. 민감화는 위협적이거나 유해한 자극에 대한 반응이 증가되는 것을 말한다. 단기간의 민감화는 존재하던 단백질 변화에 의해 일어나고,

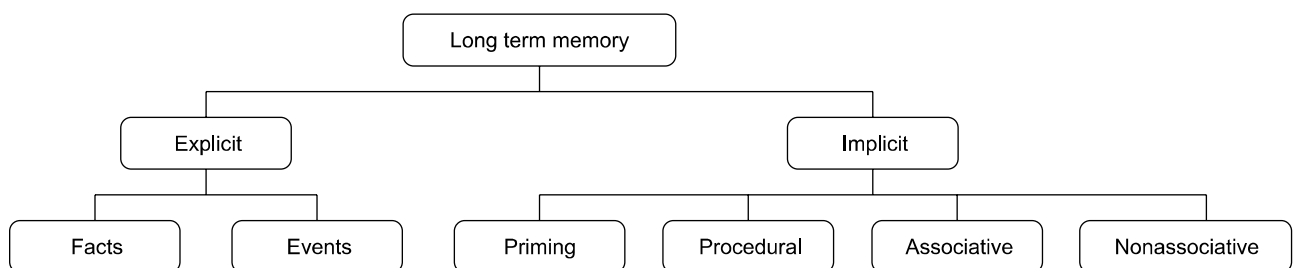


Fig. 1. Classification of memory (adapted from Kandel ER et al¹⁵).⁷

장기간의 민감화는 새로운 단백질의 생성을 통해 일어난다.

연합 학습(associative learning)은 연관관계 예측에 대한 학습으로, 행위와 환경과의 연관성을 알게 된다. 연합 학습은 복잡한 네트워크 없이 시냅스 효율성의 단순한 변화를 통해 일어난다. 연합학습은 기간에 상관 없이 공통의 세포 과정을 거치게 된다. 초기에 두 뉴런이 동시에 활성화되면, 시냅스 효율성의 변화를 일으키는 두 개의 뉴런 내 단백질의 변형이 일어난다. 장기적인 연합 반응 단계에서는 새로운 단백질 물질의 형성이 일어나고 이어서 뉴런 사이 시냅스의 연결이 일어나게 된다. 연합 학습에는 자극과 다른 자극의 관계를 학습하는 고전적 조건 형성(classical conditioning)과 행동과 결과의 관계를 학습하는 조작적 조건 형성(operant conditioning)이 있다.

절차학습(procedural learning)은 습관처럼, 주의집중이나 의식적인 사고 없이 자동적으로 과제 수행을 배우는 것으로 많은 연습을 통해 천천히 형성되고 과제 수행의 증진으로 표현된다. 반복을 통해 운동 프로그램의 저장에 일어나는 초기 습득 단계를 거쳐, 유사한 환경과 조건 하에서 반복이 일어난다면 절차적인 기술로 변화할 것이다. 궁극적으로 에러는 감소하고, 기술은 세련되어 질 것이다. 지속적인 훈련을 통하여 프로그램은 유지 단계에 다다르게 되고 다른 환경으로의 전이도 가능할 것이다. 이런 계속되는 변화와 수행 능력의 향상이 절차 학습의 핵심이 된다. 절차 학습은 양측 두정엽, 전두엽, 보조 운동 영역, 소뇌, 기저핵에서 일어나는 것으로 알려져 있다.^{17,18}

5) 운동학습 이론

역사적으로 운동학습을 설명하기 위해 다양한 이론들이 개발되었는데 폐쇄 고리 이론과 스키마 이론이 가장 대표적이다. 1971년 Jack Adams에 의해 발표된 폐쇄 고리 이론(closed loop theory)은 감각 피드백과 운동조절의 폐쇄 고리 과정을 골자로 한다. 움직임으로부터 나온 감각 피드백과 원하는 움직임에 대한 기억간의 비교가 중추신경계에서 일어난다. 움직임을 선택하고 시작하는 기억 흔적(memory trace)과 연습을 통해 만들어진 행동 수정의 내적 기준이 되는 지각 흔적(perceptual trace)이라는 두 유형이 있다. 기억 흔적에 의해 움직임이 시작되고 지각 흔적은 움직임을 수행하고 오류를 찾아낸다. 훈련을 통해 올바른 지각 흔적이 강화되고, 올바르지 않은 지각 흔적이 감소되는 과정을 학습으로 보았다. 따라서 올바른 학습을 위해서는 정확한 움직임은 반복하고 오류는 피해야 한다고 가정하였다. 그러나 이 이론은 감각 피드백 없이 새로운 움직임을 만드는 현상에 대해서 설명할 수 없었다. 또한

모든 움직임이 지각 흔적을 만들어낸다면 저장해야 할 용량이 너무 커진다는 점과 다양한 훈련을 시행한 군에서 더 나은 수행을 보였던 점이 이 이론에 대한 의문을 품게 하였다.^{19,20}

Schmidt¹⁹는 1975년 도식 이론(schema theory)을 발표하였다. 도식이라는 용어는 본래 한 종류의 대상들이 가지고 있는 다양한 표현에 대한 기억으로 저장된 추상적인 표상을 의미한다.²¹ 예를 들면, 여러 종류의 개를 본 후 개의 특성에 대한 일련의 추상적 규칙, 즉 도식을 가지게 되고 그 이후 개를 보게 되면 개로 인식할 수 있게 된다. 도식 이론은 느린 움직임은 피드백, 빠른 움직임은 프로그램에 의해 만들어진다고 가정하였다. 학습을 통해 도식이 형성되고 그로 인해 새로운 움직임이 일어나는 열린 고리(open-loop) 조절 과정과 일반화된 운동 프로그램(generalized motor program) 개념이 강조되었다. Schmidt는 운동 프로그램을 움직임의 세부적인 항목들을 포함하는 것이라기보다는 다양한 경우에 같은 동작을 만들어낼 수 있는 일반화된 규칙이라고 하였다.

움직임 이후 만들어진 단기 기억은 회상 도식(recall schema)과 인지 도식(recognition schema)으로 변환된다. 회상 도식은 반응 생산을 담당하는 것으로 특정 반응을 선택하는데 사용된다. 이는 여러 번의 시도에 의해 만들어진 결과이다. 회상 도식은 움직임의 초기 상태를 결정하고 희망하는 목표로 이용된다. 인지 도식은 과거의 감각 경험에 의한 결과로서 반응을 평가한다. 운동 학습은 이들 도식을 갱신하는 과정으로 생각할 수 있다. 도식이론은 Adams의 폐쇄 고리 이론에서 제기된 기억 저장 공간에 관한 문제 및 새로운 움직임을 만들어내는 운동 프로그램에 대한 해답을 제공해주었다.²² 그러나 다양한 형태의 훈련이 가장 효과적인 도식, 즉 운동 프로그램을 만든다고 하였으나 성인에서는 상충되는 결과를 보이고, 일반화된 운동 프로그램이 만들어지는 방법에 대해서도 설명할 수 없는 제한점을 지니고 있다.

위계적인 운동 조절 관점(hierarchical motor control perspective)은 기술의 조절이 위계적으로 높은 수준의 조절 과정에서 운동 프로그램을 포함하는 낮은 수준의 과정으로 전이가 일어난다고 보았다. 훈련을 통해 운동 프로그램이 만들어지고, 그로 인해 스스로의 오류를 파악하고 주관적인 지원을 끌어낼 수 있는 능력의 변화가 일어난다는 관점이다.

Karl Newell²³이 만든 생태학적 이론은 시스템과 생태학적 운동조절이론으로부터 만들어졌고, 과제 해결을 모색하는 전략의 개념에 기초를 두고 있다. 학습은 최적의 지각 작업공간(perceptual workplace)과 운동 작업공간(motor

workplace)을 탐색하여 각각 최적의 해결책을 찾아내는 과정이다. 생태학적 이론의 운동 학습은 지각과 행동의 과제와 관련된 적절한 전략을 찾는 것이고 규칙에 의존하는 것은 아니다. 즉, 지각 작업공간과 운동 작업공간의 역동적 탐색활동을 중요시한다. 부적절한 신호와 적절한 신호를 구분하고 적절한 운동신호와 관련된 지각을 적절한 운동 전략과 연결 짓는다.

6) 뇌의 가소성

가소성은 시간 경과에 따라 행동의 변화를 유도하는 신경계의 변화를 의미하며, 뇌의 초기의 발달, 학습 및 기억 뿐 아니라 뇌 손상 후의 재구성화 등과도 관련되어 있다. 가소성을 통해 단기간의 시냅스 연결의 강도와 효율성의 변화가 일어나고, 장기적으로 신경세포간의 연결의 수의 변화와 재구성화가 일어난다. 이러한 가소성은 학습에 의해 일어나고 기능의 회복으로 이어진다. 새로운 운동 기술의 학습은 대뇌피질 내 연결의 가소성과 연관되어 있고, 이러한 대뇌피질의 변화는 동작에 특이적으로 일어난다. 이런 대뇌 피질의 변화는 새로운 기술을 학습할 때 일어나고 단순한 반복만으로는 변화가 일어나지 않는다.²⁴ 이런 학습의 기전은 장기적 활성화(long term potentiation)로 설명할 수 있다.²⁵ NMDA 수용체 차단제나 GABAA 수용체를 자극하는 약을 이용하여 사용 의존성 가소성을 차단한 실험을 통해 장기적 활성화가 운동 학습과 연관된 재조직화에 필수적이라는 결과를 뒷받침할 수 있었다.²⁶ 앞서 기술한 수면에 의한 기억 형성과 학습 또한 뇌의 가소성에 의존하고 있다.^{27,28}

한편, Brain-derived neurotrophic factor (BDNF)는 운동 훈련에 대한 반응으로 운동피질에서 증가하는 데, 이를 조절하는 유전자는 시냅스의 가소성을 조절하는데 있어 중요한 요소로 알려져 있다.^{29,30} 즉 BDNF 유전자의 코돈(codon) 66에서 valine-methionine 치환을 일으키는 BDNF의 단일 염기 다양성(BDNF val66met polymorphism)은 비정상적인 피질 형태, 기억력 장애, 감소된 내측 측두엽 활성화³¹⁻³³와 연관이 있는 것으로 알려져 있으며, 비정상적인 경험-의존적 가소성과 연관이 있을 것으로 생각되고 있다.³⁴ 또한 이러한 다양성은 반복적자기자극과 같은 치료에 대한 반응도의 차이와도 연관이 있다.

7) 뇌졸중에서의 운동 학습

뇌졸중 환자에서 운동 학습 능력이 저하되어 있는지에 대한 연구는 부족하며 그 결과 또한 확실하지 않다. 그 이유는 연구의 수가 부족하며, 많은 유형의 운동 학습이 손상 부위에 따라 다른 양상의 운동 학습이 일어날 수 있으

며, 또한 수행이 저하된 환자에게 학습이 이루어졌는지에 대한 판단을 내리기가 힘든 경우가 많기 때문이다. 또한 뇌졸중 이후의 회복이 운동 학습에 기인하는 것인지 판단하는 것 또한 쉽지 않다. 다만, 뇌손상 후 회복 중에 일어나는 뇌의 재조직화 과정이 뇌의 발달과 운동학습으로 인한 뇌의 가소성 변화와 겹치는 부분이 많다. 다만, 자발적으로 일어나는 생물학적인 회복은 모든 영역 과제의 능력 회복과 관련되고, 운동 학습에 의한 회복은 과제-특이적인 양상을 보이는 차이가 있다.¹

학습은 회복과 보상 모두에 필수적이다.^{35,36} 아직까지, 단순한 과제의 반복이 의미 있는 대뇌 피질의 재조직화를 유발하기에 충분한지 더 어려운 과제가 필요한지에 대한 답은 명확하지 않다. 다만 모든 재활은 운동 학습의 형태를 취하기에, 회복과 보상 모두를 이끌어낼 수 있다. 운동 학습의 원리를 이용한 건축 상지 운동 제한 치료법, 근전도 유발 신경근 자극, 가상 환경 기술을 이용한 재활, 상호작용 로봇 치료 등의 재활 치료가 이용되고 있다.¹

훈련시간이 훈련 중간의 휴식시간보다 긴 경우 집중 훈련(massed practice)이라고 정의하고, 훈련 중간의 휴식시간이 훈련시간보다 더 길거나 비슷한 경우 분산 훈련(spaced practice)이라고 한다. 불연속적인 과제에 있어서는 각각의 과제에 따라 집중 훈련과 분산 훈련의 효과가 다른 것으로 알려져 있으나, 연속적인 과제에 있어서는 집중 훈련이 수행의 효과를 현저히 저하시키는 것으로 알려져 있고, 분산 훈련은 학습에 미미한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.² 따라서 분산 훈련이 수행과 학습에 더욱 효과적이라고 보기도 한다.¹

결론

재활은 근본적으로 손상된 뇌신경망을 이용한 재학습의 과정으로, 학습을 통해 기능 수준의 회복을 가져오게 된다. 최근의 신경계 장애를 가진 환자들에 대한 재활치료는 능동적인 학습에 초점을 맞추고 있다. 이를 통해 능동적인 움직임 유도하여 기능의 호전을 기대하고 최종적으로는 환자들이 어떠한 환경에서건 모든 기능적 행위를 스스로 조절하는 것을 목표로 한다. 운동 학습의 과정을 통해 환자의 움직임은 의식의 집중을 요구하는 외현적인 형태에서 암묵적인 형태로, 수동적인 움직임에서 능동적인 움직임으로 바뀌어야 한다.

현재까지 운동 학습에 관해 많은 연구가 있었지만, 뇌졸중 환자를 비롯한 신경계의 문제를 보이는 환자의 운동 학습에 관한 연구는 아직 많이 부족하다. 움직임에 대한 정밀한 분석을 통해 학습과 자연적인 회복을 구분하는 것

이 필요하고 운동 학습의 관점에서 움직임을 이해하려는 노력이 필요하다. 이를 통해 신경계의 문제를 가지고 있는 대상의 운동 학습에 대해 이해할 수 있을 것이고 근거에 입각한 운동 학습을 제공할 수 있는 토대를 마련할 수 있을 것이다.

운동 학습의 과정은 운동 기술뿐 아니라 인식 능력, 인지 능력 등에 의해서도 영향을 받게 된다. 또한 각성 수준, 주의, 동기, 기억, 필요한 운동의 유형, 훈련 일정, 훈련의 종류 뿐 아니라 환경적인 인자 등 많은 요인들도 운동 학습에 영향을 줄 수 있다. 따라서 향후 운동 학습을 적용하는 재활 과정에서 이러한 인자들에 대한 세심한 고려가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Krakauer JW. Motor learning: Its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Curr Opin Neurol*. 2006; 19:84-90
- 2) Schmidt RA, Lee TD. *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human kinetics; 2005.
- 3) Schmidt RA. *Motor learning and performance: from principles to practice*. IL, USA: Human Kinetics; 1991
- 4) Wolpert DM, Ghahramani Z, Jordan MI. An internal model for sensorimotor integration. *Science*. 1995;269:1880-1882
- 5) Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor control: translating research into clinical practice*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2006
- 6) Ellis HC. *The transfer of learning*. New York: The Macmillan Company; 1965
- 7) Schmidt RA. *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics Inc; 1988
- 8) Magill RA. *Motor learning and control: concepts and applications*. New York: McGraw-Hill; 2006
- 9) Doyon J, Benali H. Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol*. 2005;15:161-167
- 10) Sailer U, Flanagan JR, Johansson RS. Eye-hand coordination during learning of a novel visuomotor task. *J Neurosci*. 2005;25:8833-8842
- 11) McGaugh JL. Memory--a century of consolidation. *Science*. 2000;287:248-251
- 12) Walker MP, Stickgold R. Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron*. 2004;44:121-133
- 13) Walker MP. A refined model of sleep and the time course of memory formation. *Behav Brain Sci*. 2005;28:51-64
- 14) Walker MP, Brakefield T, Hobson JA, Stickgold R. Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature*. 2003;425:616-620
- 15) Kandel ER, Jessell TM. *Principles of neural science*. New York: McGraw-Hill Medical; 2000
- 16) Green RE, Shanks DR. On the existence of independent explicit and implicit learning systems: an examination of some evidence. *Mem Cognit*. 1993;21:304-317
- 17) Doyon J, Owen AM, Petrides M, Sziklas V, Evans AC. Functional anatomy of visuomotor skill learning in human subjects examined with positron emission tomography. *Eur J Neurosci*. 1996;8:637-648
- 18) Daselaar SM, Rombouts SA, Veltman DJ, Raaijmakers JG, Jonker C. Similar network activated by young and old adults during the acquisition of a motor sequence. *Neurobiol Aging*. 2003;24:1013-1019
- 19) Schmidt RA. A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*. 1975;82:225-260
- 20) Shea CH, Kohl RM. Specificity and variability of practice. *Res Q Exerc Sport*. 1990;61:169-177
- 21) Shumway-Cook A, Woollacott MH. *Motor control: Theory and practical applications*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2000
- 22) Schmidt RA. Motor schema theory after 27 years: reflections and implications for a new theory. *Res Q Exerc Sport*. 2003;74:366-375
- 23) Newell KM. Motor skill acquisition. *Annu Rev Psychol*. 1991;42:213-237
- 24) Plautz EJ, Milliken GW, Nudo RJ. Effects of repetitive motor training on movement representations in adult squirrel monkeys: role of use versus learning. *Neurobiol Learn Mem*. 2000;74:27-55
- 25) Rioult-Pedotti MS, Friedman D, Hess G, Donoghue JP. Strengthening of horizontal cortical connections following skill learning. *Nat Neurosci*. 1998;1:230-234
- 26) Butefisch CM, Davis BC, Wise SP, Sawaki L, Kopylev L, Classen J, Cohen LG. Mechanisms of use-dependent plasticity in the human motor cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2000;97:3661-3665
- 27) Maquet P, Laureys S, Peigneux P, Fuchs S, Petiau C, Phillips C, Aerts J, Del Fiore G, Degueldre C, Meulemans T, Luxen A, Franck G, Van Der Linden M, Smith C, Cleeremans A. Experience-dependent changes in cerebral activation during human rem sleep. *Nat Neurosci*. 2000;3:831-836
- 28) Ribeiro S, Goyal V, Mello CV, Pavlides C. Brain gene expression during rem sleep depends on prior waking experience. *Learn Mem*. 1999;6:500-508
- 29) Lu B. Bdnf and activity-dependent synaptic modulation. *Learn Mem*. 2003;10:86-98
- 30) Klintsova AY, Dickson E, Yoshida R, Greenough WT. Altered expression of bdnf and its high-affinity receptor trkb in response to complex motor learning and moderate exercise. *Brain Res*. 2004;1028:92-104
- 31) Pezawas L, Verchinski BA, Mattay VS, Callicott JH, Kolachana BS, Straub RE, Egan MF, Meyer-Lindenberg A, Weinberger DR. The brain-derived neurotrophic factor val66met polymorphism and variation in human cortical morphology. *J Neurosci*. 2004;24:10099-10102
- 32) Egan MF, Kojima M, Callicott JH, Goldberg TE, Kolachana BS, Bertolino A, Zaitsev E, Gold B, Goldman D, Dean M, Lu B, Weinberger DR. The bdnf val66met polymorphism

- affects activity-dependent secretion of bdnf and human memory and hippocampal function. *Cell*. 2003;112:257-269
- 33) Hariri AR, Goldberg TE, Mattay VS, Kolachana BS, Callicott JH, Egan MF, Weinberger DR. Brain-derived neurotrophic factor val66met polymorphism affects human memory-related hippocampal activity and predicts memory performance. *J Neurosci*. 2003;23:6690-6694
- 34) Kleim JA, Chan S, Pringle E, Schallert K, Procaccio V, Jimenez R, Cramer SC. Bdnf val66met polymorphism is associated with modified experience-dependent plasticity in human motor cortex. *Nat Neurosci*. 2006;9:735-737
- 35) Nudo RJ, Milliken GW. Reorganization of movement representations in primary motor cortex following focal ischemic infarcts in adult squirrel monkeys. *J Neurophysiol*. 1996;75:2144-2149
- 36) Nudo RJ, Wise BM, SiFuentes F, Milliken GW. Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct. *Science*. 1996;272:1791-1794