

## 운동 학습을 위한 새로운 치료적 접근법: 가상현실과 로봇

국립재활병원 뇌졸중재활과

박 시 운

### Motor Learning by Novel Therapeutic Approaches: Virtual Reality and Robotics

Si-Woon Park, M.D., MSCR

Department of Stroke Rehabilitation, National Rehabilitation Center

Recent emphasis on motor learning approach and advances in rehabilitation engineering facilitated new development of therapeutic systems in neurorehabilitation. Virtual reality and robotic technology has been applied to provide stimulating and challenging environment in which participants can practice tasks repetitively, to augment feedback of performance, and to guide precise and repetitive movement. Virtual reality is a computer-based technology that provide real-time interactive and multisensory simulated environment. It has been adopted in upper limb rehabilitation, gait training, and driver retraining. Virtual reality can be either immersive or nonimmersive depending on the components used in the system, and immersive environment seems to be more effective in rehabilitation. By providing enhanced feedback, environments offering motivation and tasks meaningful to participants, virtual reality can facilitate motor learning. Robotic systems can be classified into 2 types: exoskeleton and end-effector. A lot of robotic systems have been developed and used for upper limb exercise and gait training. Studies revealed those systems are beneficial to enhance arm motor function and walking ability. Application of robotics in rehabilitation has several advantages: enabling massed practice by increasing therapy intensity and amount; provision of force feedback; possibility of automating therapy sessions; setup of therapy specific to individuals; precise, objective and reliable assessment of motor function. Combination of virtual reality and robotics would make it possible to develop better rehabilitation systems that could enhance motor learning in more effective way. (Brain & NeuroRehabilitation 2010; 3: 77-85)

**Key Words:** motor learning, rehabilitation, robotics, virtual reality

## 서 론

운동(movement)은 개체와 과업, 그리고 환경의 상호작용에 의하여 발생한다. 운동 조절에 대한 이해에 따라 운동기능의 재활을 위해 사용하는 전략들도 변천해 왔다. 신경 재활(neuro-rehabilitation)에 있어서 과거에는 중추신경계의 계층적 구조와 반사작용을 기반으로 감각적 자극을 가함으로써 운동을 유발하는 운동치료 기법, 즉 Bobath의 자세 반응, Brunnstrom의 central facilitation, Rood의 감각 자극 치료법 및 Proprioceptive Neuromuscular Facilitation (PNF) 등으로 대표되는 신경발달적 접근(neuro-developmental approach)이 주축을 이루었으나, 근래에는 개체를 환경과의 관계 속에서 변화하고 적응해가는 존재

로 파악하는 시스템 이론에 바탕을 둔 운동 학습 접근법(motor learning approach)이 점차 강조되고 있다. 운동 학습은 과업과 환경적 제약에 조화되도록 개체가 지각과 활동의 협력을 증진시켜가는 과정이라고 할 수 있다.<sup>1</sup> 운동 학습이론의 원리에 따르면 재활이라는 것은 근본적으로 필요한 동작을 성공적으로 수행해내는 방법을 재학습해가는 과정이다. 기술 습득은 연습을 통해 과오를 줄여가는 과정으로 이해된다. 운동학습이론에 의하면 수행의 향상은 연습의 양에 비례한다. 따라서 과제특이적(task-specific)인 반복적 연습이 강조된다. 연습은 단일 과제의 밀집된 반복적 연습보다는(massed practice) 시간적 간격을 두고 반복적 연습을 수행할 때(distributed practice) 학습효과가 더 크다. 항상 똑 같은 과제(constant practice) 보다는 다양하게 변형된 과제를 연습하는 것(variable practice)이 기술 습득 시에는 더 어려울 수 있지만 습득된 기술을 보존하는데는 더 도움이 되며, 새로운 과제를 배우기 위한 일반화(generalization)에도 유리하다. 단일 과제만을 연습하는 것(blocked practice) 보다는 여러 가지 과제들을 무작위

교신저자: 박시운, 서울 강북구 가오리길 111  
 ☎ 142-884, 국립재활병원 뇌졸중재활과  
 Tel: 02-901-1607, Fax: 02-902-3835  
 E-mail: seank05@yahoo.co.kr

순서에 따라 연습하면(random practice) 일정 시간 후에 각 과제들을 더 잘 수행할 수 있다(contextual interference).<sup>2</sup> 운동 학습의 원리를 치료에 적용할 때 과제의 수행을 독려 하면서 보상적 행동에 적응하지 않도록 억제시키는 것이 치료의 목표가 된다. 이를 위해 올바른 과제 수행 방법을 구두로 가르치거나 시범을 보여서 환자로 하여금 배워야 할 동작이 무엇인지 분명히 지각하게 하고, 수기를 통해 올바른 동작 수행을 돕고, 수행한 동작에 대해 적절한 시점에 정확한 피드백을 주는 것이 중요하다.

재활 분야에서 운동학습이론의 도입과 의공학 기술의 발달은 신경 재활의 영역에 새로운 장을 열어 주었다. 재활 대상자가 특정한 과제를 반복적으로 연습할 수 있도록 자극적이고 도전적인 환경을 만들어 주고, 수행하는 동작에 대한 피드백을 확대하며, 과제의 반복적이고 정확한 수행을 가이드 하기 위한 방법으로 가상현실(virtual reality)과 로봇을 재활치료 분야에 적용하게 되었다. 본 종설의 목적은, 신경 재활 분야에서 지금까지 소개된 가상현실 및 로봇 시스템의 종류와 그 효과에 대한 문헌을 고찰하고, 운동 학습의 측면에서 그 적용 방향을 논의하고자 한다.

## 본 론

### 1) 가상현실과 재활

가상현실은 컴퓨터를 기반으로 하여 대화식의(inter-

active) 다감각적(multisensory) 모의 환경을 실시간으로 제공하는 기술이다. 현실감을 줄 수 있도록 3차원적이고 몰입될 수 있는 환경을 제공하는 것이 중요한데, 현실감을 주는 정도에 따라 몰입적(immersive) 가상현실과 비몰입적(nonimmersive) 가상현실로 구분할 수 있다(Table 1). 몰입적 가상현실에는 대형 스크린이나 머리 부분 탑재형 디스플레이(head-mounted display, HMD), 또는 cave system, video capture system 등을 사용한다. 비몰입적 가상현실은 컴퓨터 마우스나 탭틱, 또는 조이스틱 등을 사용한다.<sup>3</sup> 재활의학 분야에서 가상현실은 자세 균형과 수부 기능 등의 운동 재활과 인지 재활, 그리고 일상생활 동작의 훈련 및 운전 재활의 분야에서 주로 활용되어 왔다.<sup>4</sup>

#### (1) 가상현실과 상지 재활

가상현실을 재활치료에 적용한 다양한 장비들이 개발되어 있으며 그 치료 효과에 대해서도 적지 않은 연구들이 이미 수행되었다. 장 등<sup>5</sup>은 video capture system과 cyber glove를 사용한 가상현실 시스템을 이용하여 만성 뇌졸중 환자들의 운동기능 향상과 대뇌피질의 재구성을 조사하였다. 가상현실 시스템은 피험자의 영상을 대형 모니터에 투사하여 몰입적인 현실감을 구현하고 cyber glove를 이용하여 피험자의 움직임이 모니터에 나타나는 치료용 게임과 상호 작용이 가능하도록 구성되었다. 그 결과 Fugl-Meyer Assessment, 수부기능검사(Manual Function Test) 및 Berg 균형검사에서 가상현실 치료군이 대조군보다 유

**Table 1.** Virtual Reality Applications in Rehabilitation

Type of VR	Components	Purposes	References
Immersive	Video capture system	Arm rehabilitation	5, 12, 13
	Cyber glove	Balance and gait training	
Immersive	3-D display	Arm and hand rehabilitation	6
	Haptic system		
Immersive	HMD	Arm rehabilitation	7
	Cyber glove		
Immersive	3-D display	Arm and hand rehabilitation	8
	Magnetic tracker		
Immersive	3-D display	Arm and hand rehabilitation	9
	Cyber glove		
	Force feedback glove		
Immersive	HMD	Gait training	14
	Treadmill		
Immersive	Wide screen	Gait training	17
	Treadmill		
Immersive	Wide screen	Driver rehabilitation	18, 19
	Driving simulator		
Nonimmersive	Telerehabilitation system	Arm and hand rehabilitation	10, 11
Nonimmersive	Desktop display	Ankle rehabilitation	15, 16
	Ankle robot		

VR: virtual reality, HMD: head-mounted display

의하게 나은 결과를 보였으며, 가상현실 치료 후 기능적 자기공명영상에서 병변반대측(contralesional) 운동피질의 활성화가 감소되고 병변측(ipsilesional) 피질의 활성화가 증가하여 병변측 피질 쪽으로 편재화(lateralization)가 증가되는 변화를 보였다. Broeren 등<sup>6</sup>은 햅틱을 이용한 가상현실 시스템을 뇌졸중으로 인한 편마비 환자의 상지 재활에 적용하여 수부의 기민성과 장악력 및 상지 운동조절 능력의 향상을 보인 사례를 보고하였다. 이 때 사용한 가상현실 시스템은 3차원 입체 디스플레이를 컴퓨터 모니터에 구현하고 햅틱을 이용하여 가상의 물체를 조작할 때 감각적 피드백이 제공되도록 구성되었다. Subramanian 등<sup>7</sup>은 HMD와 cyber glove를 이용한 몰입적 가상현실을 뇌졸중 환자의 상지 재활에 적용하였고, Stewart 등<sup>8</sup>은 3차원 입체 영상을 제공하는 디스플레이와 손가락에 장착하는 자기 트래커(magnetic tracker)를 이용하여 상지와 수부 기능의 재활을 위해 개발한 가상현실 시스템을 소개하였다. Merians 등<sup>9</sup>은 가상현실에 로봇을 결합하여 상지와 손가락의 움직임을 지지하면서 힘을 감지하는 센서를 통해 피드백을 제공하는 시스템을 개발하여 소개하였다. 한편 컴퓨터를 이용하는 가상현실 치료를 인터넷에 연결하여 치료사의 감독을 원격으로 받으면서 집에서 치료를 할 수 있는 원격 재활(telerehabilitation) 시스템도 소개되었다.<sup>10</sup> 경미한 상지 운동기능 장애가 있는 뇌졸중 환자들을 대상으로 원격 재활을 고식적 치료와 비교하였을 때 두 군 다 상지 기능의 유의한 향상을 보였고 Fugl-Meyer 점수는 원격 재활 군에서 유의하게 향상되어 가정에서의 재활치료의 잠재적 가능성을 시사하였다.<sup>11</sup> 이외에도 다양한 가상현실 시스템이 뇌졸중 환자의 상지 재활을 목적으로 개발되었으나 그 효과에 대한 근거를 제공할 만한 연구는 아직 미흡한 실정이다. Henderson 등<sup>3</sup>은 뇌졸중 상지 재활을 위한 가상현실 시스템을 몰입형과 비몰입형으로 나누어 체계적 고찰을 시도하였는데, 몰입형 가상현실 치료는 아무런 치료도 하지 않은 대조군과 비교 시에는 우세한 상지 기능의 향상이 있다는 결론을 무작위 대조군 연구를 통해 얻을 수 있었으나 기존의 치료를 받는 대조군과 비교한 연구는 없었고, 비몰입형 가상현실 치료는 기존의 치료를 받는 대조군과 비교 시에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났고 아무런 치료를 받지 않은 대조군과의 비교에서도 상반된 결과들이 보고되어 효과 여부를 결론 내리기 어려운 것으로 나타났다.

## (2) 가상현실과 보행 재활

가상현실을 하지 및 보행 기능의 개선을 위한 재활에 적용한 시스템과 그 치료 효과들도 다수 소개되었다. 유 등<sup>12</sup>은 앞서 소개한 장 등<sup>5</sup>의 연구에서 이용한 것과 같은

가상현실 장비를 만성 뇌졸중 환자의 보행 기능의 개선을 위해 적용하여 보행 기능의 개선 및 기능적 자기공명영상에서도 병변반대측의 활성화가 감소하는 결과를 보고하였다. 김 등<sup>13</sup>도 동일한 가상현실 치료를 통해 만성 뇌졸중 환자의 동적 균형과 보속, 보장이 유의하게 향상된 것을 보고하였다. Jaffe 등<sup>14</sup>은 HMD를 착용하고 트레드밀 상에서 가상 장애물을 넘는 보행 훈련 시스템을 개발하여 보행 속도와 보장 등 보행 능력이 개선된 것을 보고하였다. Deutsch 등<sup>15</sup>은 발목의 운동을 위한 로봇을 가상현실과 연결한 시스템을 개발하여 뇌졸중 환자에게 적용한 결과 발목의 힘과 보행 속도 및 지구력이 향상된 것을 보고하였다. 같은 장비를 이용하여 가상현실을 제외하고 로봇에 의한 힘 피드백만 제공하는 것과 가상현실에 의한 시각적, 청각적, 그리고 햅틱에 의한 피드백을 같이 제공하는 것을 비교하였을 때 보행 속도와 거리 등 보행 능력의 개선이 가상현실을 제공한 치료에서 유의하게 나온 것으로 나타났다.<sup>16</sup> Yang 등<sup>17</sup>은 대형 스크린을 트레드밀에 장착하여 옥외보행의 현실감을 제공하는 가상현실 시스템을 개발하였는데, 뇌졸중 환자들의 실제 지역사회에서의 보행 능력이 가상현실을 이용하지 않은 군보다 유의하게 향상된 것을 보고하였다.

## (3) 가상현실과 운전 재활

한편, 운전 재활에 있어서 가상현실은 운전 적성의 평가에 있어서 인지능력 검사나 가상현실을 적용하지 않은 운전 시뮬레이터 등 다른 검사들 보다 정확도가 뛰어나고 실제 도로에서의 평가 시에 우려되는 사고의 위험성이 없고 안전하여 좋은 대안적 방법이라고 할 수 있다. 국립재활원에서는 가상현실 운전 시뮬레이터를 개발하여 장애인의 운전 능력 평가 및 재활에 활용하고 있으며, 뇌손상 장애인에게 가상현실 시뮬레이터를 이용한 운전 연습을 시행한 결과 정상인 운전자와 동등한 정도의 운전능력을 획득하는 것을 보고하였다(Fig. 1).<sup>18</sup> Cox 등<sup>19</sup>도 외상성



Fig. 1. Virtual reality driving simulator.

뇌손상을 입은 군인들에게 가상현실 운전 시뮬레이터를 이용한 훈련을 실시하여 운전 수행이 향상된 것을 보고하였다. 가상현실 운전 시뮬레이터는 신체적 장애로 자동차 운전을 위한 보조도구를 장착하여 새로운 방식의 운전 연습이 필요한 장애인에게 실제 도로로 나가기 전 단계에서 적응 훈련으로 유용하게 활용될 수 있다.

가상현실은 대상자에게 중요하고 의미 있는 과제를 치료 공간 안으로 들여오므로써 재활의 동기와 흥미를 유발할 수 있는 환경을 제공하고, 다양하게 변형된 과제를 구현할 수 있고, 과제 수행에 따른 결과를 증강된 피드백으로 제공하며, 결과적으로 반복적인 과제 수행 연습을 가능하게 한다는 점에서 운동학습의 원리를 재활치료에 적용한 치료 방법이라고 할 수 있다. 가상현실을 이용하여 운동학습 효과를 극대화하기 위해서는 현장감을 구현하는 것이 가장 중요한 영향을 줄 것으로 생각된다. 하지만 몰입형 가상현실이 우수한 현장감을 제공하는 반면 어지럼증, 오심, 두통, 발한, 지남력 장애, 눈의 피로감 등의 소위 사이버멀미(cybersickness)가 부작용으로 나타난다는 것이 제한점이다.<sup>4</sup> 또한 가상현실에서의 훈련이 실제 환경에서의 과제 수행에도 전이효과가 있을지에 대한 논란의 여지가 있으며, 가상현실 시스템 만으로는 운동 수행에 대한 피드백은 제공하지만 근력이 저하된 환자들의 운동 수행을 보조할 수는 없다는 한계가 있다.

## 2) 로봇과 재활

재활 치료에서 로봇의 원형들은 약화된 근력을 보조하거나 강화시키기 위한 목적으로 사용된 부목이나 팔 지지대, 오버헤드 슬링, 스케이트보드 및 등속성 운동장비 등

여러 가지 보조도구들에서 찾아볼 수 있다. 기술이 발달하고 기능이 발전된 치료 장비들이 개발되면서 로봇이라는 이름으로 등장하게 되었는데, 치료사의 손을 대신할 수 있을 가능성이나 안전성에 대해서는 논란이 있어왔다.<sup>20</sup> 하지만 점차 다양한 로봇들이 개발되면서 이제 로봇은 재활의 중요한 도구로 떠오르고 있다. 로봇은 그 구조에 따라 외골격형(exoskeleton)과 말단장치형(end-effector)으로 구분할 수 있다.<sup>21</sup> 재활 치료에 있어서 로봇 시스템 적용의 목적은 치료의 양과 강도를 증가시키고, 지속적인 치료를 가능하게 하며, 정밀하고 반복적인 힘을 사용하여 운동을 돕기 위함이다.<sup>22</sup> 지금까지 많은 수의 재활 로봇들이 개발되었으며 그 임상적 효과를 규명할 수 있는 연구가 요구된다(Table 2).

### (1) 로봇과 상지 재활

상지 운동기능의 재활을 위한 로봇 시스템 중 가장 잘 알려진 MIT-Manus (InMotion2)는 어깨와 팔꿈치 관절의 운동을 위해 개발되었는데, 수동 운동, 능동보조 운동, 그리고 저항성 운동을 제공하며 팔을 목표지점까지 뻗는 운동을 반복하게 하는 2 자유도(degree of freedom)를 가진 로봇 팔 시스템이다. 이를 만성 뇌졸중 환자들에게 적용하였을 때 같은 강도로 치료사가 제공하는 치료와 유사한 정도의 상지 운동기능의 호전을 보였다.<sup>23</sup> 다기관 무작위 대조군 연구<sup>24</sup>에서 127명의 만성 뇌졸중 환자들을 대상으로 MIT-Manus를 이용한 로봇 치료를 치료사가 같은 강도의 고식적 치료를 제공하는 고강도 치료 및 통상적인 치료와 비교하였는데, 12주간의 치료 후 로봇 치료군이 통상적 치료군에 비해 나은 효과를 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았고 삶의 질에서는 유의하게 나은 효과를 보고

**Table 2.** Robotic Applications in Rehabilitation

System	Type of robot	Characteristics	References
MIT-Manus	End-effector	Shoulder and elbow	23, 24, 25
ARM Guide	End-effector	Shoulder and elbow	26, 38
GENTLE/s	End-effector	Shoulder and elbow	27
ARMin	Exoskeleton	Shoulder and elbow	28
REHAROB	Exoskeleton	Shoulder, elbow, forearm	29
MIME	End-effector	Bilateral shoulder and elbow	30
Bi-Manu-Track	End-effector	Bilateral forearm and wrist	31
ADLER	End-effector	ADL training	32
T-WREX	Exoskeleton	Shoulder and elbow	33
VRROOM	End-effector	Whole arm	34, 40
ARAMIS	Exoskeleton	Shoulder, elbow, wrist	35
Myomo e100	Exoskeleton	Elbow, EMG-controlled	36
Electromechanical gait trainer	End-effector	Gait training	41, 42, 50
Lokomat	Exoskeleton	Gait training	43~48
KineAssist	Exoskeleton	Gait training	51

하였으며, 36주 후 추적 조사에서는 로봇 치료군이 통상적 치료군 보다 상지의 운동기능이 유의하게 나은 결과를 보였으나 고강도 치료군과는 유의한 차이가 없었다. 치료 비용을 분석 결과에서는 장기간 치료 비용이 로봇 치료군에서 고강도 치료군과 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.<sup>25</sup> 한편 InMotion3은 전완과 손목 관절의 운동을 위해 개발된 시스템이다.<sup>22</sup> 이 외에 어깨와 팔꿈치 관절의 운동을 돕는 로봇 시스템들로, ARM (Assisted Rehabilitation and Measurement) Guide는 중력을 완화하여 팔 운동을 지지하고 수동 운동, 능동보조 운동, 그리고 저항성 운동을 제공하며,<sup>26</sup> GENTLE/s system은 시각적 피드백과 햅틱 피드백을 제공한다.<sup>27</sup> 또한 ARMin은 중력을 완화하고 수동 운동과 능동보조 운동 및 시청각적, 감각적 피드백을 제공하며,<sup>28</sup> REHAROB은 수동 운동을 제공하여 경직을 완화시키기 위한 목적으로 개발된 로봇 시스템이다.<sup>29</sup> 양측 상지를 이용하도록 개발된 로봇 시스템으로 MIME (Mirror Image Motion Enabler)은 양측 어깨와 팔꿈치 관절의 대칭적 운동을 제공하며,<sup>30</sup> Bi-Manu-Track (Reha-Stim)은 전완과 손목의 대칭적 운동을 제공한다.<sup>31</sup> 그 외에 기계적으로 운동을 제공하는 것 외에 다른 기능을 추가하여 개발된 로봇 시스템들도 있다. ADLER (Activities of Daily Living Exercise Robot)는 실제 일상생활동작 훈련과 로봇을 이용한 훈련을 결합하여 치료 효과의 carryover를 증진시키기 위해 개발된 로봇 시스템이다.<sup>32</sup> T-WREX (Therapy Wilmington Robotic Exoskeleton)은 중력을 완화한 상태에서 기계적 운동은 제공하지 않고 환자가 스스로 컴퓨터를 통해 능동적으로 운동을 하도록 고안된 시스템인데, 이를 만성기 뇌졸중 환자에 적용시킨 무작위 대조군 연구에서 테이블에서 로봇의 보조 없이 유사한 운동만 시행한 대조군에 비해 장기간 지속되는 상지 운동기능 향상의 효과가 있는 것으로 나타났다.<sup>33</sup> 가상현실을 로봇과 결합한 시스템으로 VRROOM (Virtual Reality Robotic and Optical Operation)은 상지 로봇에 몰입형 디스플레이와 햅틱, 자기 트래커를 결합하여 개발되었고,<sup>34</sup> ARAMIS (Automatic Recovery Arm Motility Integrated System)는 외골격 로봇과 HMD로 구성되었다.<sup>35</sup> 그 외에 기능적 전기자극을 이용한 H200과<sup>22</sup> 근전도에 의해 제어되는 Myomo e100 등도 개발되어 있다.<sup>36</sup>

로봇을 뇌졸중 환자의 상지 재활에 적용한 효과를 조사한 Cochrane 그룹의 연구<sup>37</sup>에서는 총 11개의 무작위 대조군 연구를 메타분석 하였는데, 급성기부터 만성기까지 다양한 뇌졸중 대상군에서 시행한 연구를 분석한 결과, 로봇 상지 재활치료를 시행하였을 때 다른 재활치료에 비해 일상생활동작 수행능력의 향상에는 차이가 없었으나 상지

의 운동기능과 근력의 향상에는 로봇 상지 재활치료가 우수한 효과를 보인 것으로 보고하고 있다.

상지 운동에 있어 로봇의 주된 기능은 근력이 약한 환자의 운동을 보조하는 것이라고 볼 수 있다. 대부분의 상지 로봇들이 수동 운동, 능동보조 운동 및 저항성 운동을 제공할 수 있는데, 어떠한 운동을 치료에 적용할 지 적절한 프로그램을 선택하기 위해서는 운동 학습에 대한 이해가 필요하다. Kahn 등<sup>38</sup>은 만성 뇌졸중 환자를 대상으로 ARM Guide를 이용하여 능동보조 운동을 실시한 군과 로봇의 도움 없이 능동적 운동만을 실시한 군을 비교하였을 때 두 군 간에 차이가 없는 것을 보고하였다. 반면 Takahashi 등<sup>39</sup>은 뇌졸중 환자들의 손 운동(grasp-release)을 돕는 로봇 시스템을 개발하여 능동보조 운동과 로봇의 보조가 없는 능동운동의 효과를 비교하였는데, 능동보조 운동의 운동 기능 개선 효과가 더 크고 기능적 자기공명영상에서의 동일한 동작을 수행할 때의 대뇌피질 활성화도도 증가하는 것을 보고하였다. 이러한 차이는 단순히 기계적인 보조를 제공하는 것과 환자의 동작을 감지하여 능동적 운동이 부족한 부분에서만 도움을 제공하는 치료 방식의 차이에서 기인한 것으로 추정되며<sup>39</sup> 따라서 로봇의 활용에 있어서도 운동 학습의 원리를 잘 적용하는 것이 중요함을 보여주는 예라 하겠다. 로봇을 이용해 운동을 보조하기 보다는 방해하는 방향으로 힘을 적용하여 치료 후의 잔존효과(after-effect)를 유도하는 방법이 제안되었는데, VRROOM을 이용하여 로봇의 보조를 통해 에러를 감소시키기 보다는 에러를 확대시켰을 때 치료효과가 더 나은 것으로 나타났다.<sup>40</sup> 여기에서 활용된 Whole Arm Manipulator (WAM)는 7 자유도를 가진 기민성이 뛰어난 로봇으로 재활 분야에서 응용할 가능성이 많을 것으로 보인다(Fig. 2).



Fig. 2. Whole arm manipulator (WAM).

## (2) 로봇과 보행 재활

하지 기능과 보행 재활을 위하여 로봇 시스템을 적용한 예로는 전동식 보행훈련기(Electromechanical Gait Trainer)와 Lokomat이 있다(Fig. 3, 4). 전동식 보행훈련기는 부분 체중부하와 함께 정상 보행주기의 궤적에 맞게 발목의 운동을 제공하는 장비이다. 운동 학습의 원리에 따라 반복적 보행 훈련을 자극하기 위한 치료 방법으로 부분체중부하 트레드밀 보행훈련이 제안되었으나 2명의 치료사의 과도한 노동력을 요구하는 문제를 개선하기 위해 전동식 보행훈련기가 개발되었고, 부분체중부하 트레드밀과 비교하였을 때 보행훈련 효과가 더 나은 것으로 보고되었다.<sup>41</sup> 보행이 불가능한 급성기 뇌졸중 환자에게 적용하였을 때 같은 고강도의 집중 보행훈련을 실시한 대조군과는 유사한 결과를 보였으나 고식적 치료 보다는 나은 결과를 보였다.<sup>42</sup> 전동식 보행훈련기는 고관절과 무릎의 운동을 위해서는 치료사의 보조와 지도가 필요하다. Lokomat은 부분 체중부하와 트레드밀에 고관절과 무릎관절을 제어하는 로봇 시스템을 결합시킨 장비이다. 거기에다가 모니터를 통한 피드백과 가상현실이 제공된다. Lokomat의 효과에 대해서는 하지의 기능 및 보행 능력을 개선시킨다는 보고<sup>43</sup>가 있는 반면, 보행능력 자체는 다른 치료와 유의한 차이가 없으나 보행의 대칭성의 개선과 유산소운동 효과가 있다는 보고도 있고,<sup>44</sup> 치료사와 함께하는 기존의 치료와 비교해 효과가 차이가 없거나<sup>45</sup> 오히려 못하다는 엇갈리는 보고들도 있다.<sup>46,47</sup> 국내에서도 정 등<sup>48</sup>은 만성 뇌졸중 환자에서 Lokomat을 적용한 보행 훈련이 고식적 보행훈련에 비해 운동 기능, 보행 양상, 신체조직구성 및 우울감에 더 나은 결과를 보고하였다. 뇌졸중 환자에서 로봇 시스템

을 이용한 보행 훈련의 효과에 대한 Cochrane 그룹의 메타분석<sup>49</sup>에서는 기존의 물리치료만 시행했을 때에 비해 로봇을 이용한 보행훈련을 시행했을 때 독립적 보행 기능을 회복할 기회가 3배 정도 상승하는 것으로 나타났다. 이는 독립적 보행이 불가능한 뇌졸중 환자 4명 중 1명 가량은 로봇을 이용한 보행훈련을 통해 독립적 보행의 획득이 가능하다는 뜻으로 해석된다. 보행의 속도나 지구력은 유의한 차이가 없었다. 이 메타분석에서는 전동식 보행훈련기와 Lokomat을 모두 포함하여 분석하였으므로 해석에 유의할 필요가 있다. 한가지 고려할 점은 대부분의 연구가 대조군에게 동일한 강도의 치료를 제공하도록 설계되었으므로, 로봇의 가장 큰 장점의 하나가 치료의 양을 증가시킬 수 있다는 점임을 생각할 때 더 많은 양의 치료를 로봇을 통해 제공했을 때의 효과와 순응도, 비용 등에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 이들 로봇 보행훈련기들은 특히 중증 장애나 동반 질환 등으로 치료사에 의한 보행 훈련이 어려운 경우에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.<sup>50</sup> 이 외에 환자의 이동을 따라가면서 몸통을 지지하고 자세를 조절하며 치료사의 수기도 동시에 가능하게 하는 새로운 로봇 시스템으로 KineAssist가 개발되어 있다.<sup>51</sup>

로봇 시스템을 재활에 적용할 때의 이점은 첫째, 치료의 강도와 시간을 늘려서 집중적인 반복 연습(massed practice)을 가능하게 한다는 것과, 둘째, 치료사가 제공하기 어려운 피드백을 제공할 수 있다는 점, 셋째, 치료 세션을 자동화할 수 있다는 점, 넷째, 각 환자에 개별화된 특이적 치료 제공 및 치료의 진행이 가능하다는 점, 다섯째, 더욱 정밀하고 객관적이고 신뢰성 있는 운동 기능의 평가가 가능하다는 것이다. 그러나 실제 생활 환경과의 괴리가 있다는



Fig. 3. Electromechanical gait trainer



Fig. 4. Lokomat.

점과 시스템의 비용이 비싸다는 점 등은 로봇 시스템의 적용하기 위해 극복해야 할 과제라고 할 수 있다.<sup>22</sup>

## 결론

이상에서 살펴본 바를 요약하자면, 가상현실은 상지 기능과 보행 및 운전 재활에 유용하게 적용되어 왔으며, 물입형 가상현실일수록 효과적인 것으로 보인다. 로봇도 상지 기능과 보행 재활을 위해 적용되어 왔으며, 로봇의 종류에 따라 차이가 있겠으나 전반적으로 상지 기능의 개선과 보행 기능의 획득에 긍정적인 효과가 있는 것으로 나타났다.

가상현실과 로봇은 서로 보완적으로 결합될 때 운동 학습의 측면에서 보다 나은 재활치료 장비로 개발될 수 있을 것으로 보인다(Fig. 5). 가상현실은 학습에 필수적인 피드백을 제공하고 동기를 유발하며 실제 생활환경에서 적용이 가능해지도록 모의 환경을 제공할 수 있다. 로봇은 집중적인 반복 훈련을 가능하게 하고 정확한 동작을 수행할 수 있도록 유도하는 보조적 힘을 제공한다. 가상현실과 로봇의 특성을 잘 조합하여 신체기능 장애의 정도에 따라 상이한 치료 프로토콜을 적용할 수도 있을 것이다. 또한 대부분의 로봇 시스템은 집중적 반복 훈련과 명시적 학습을 제공하도록 고안되었으나 로봇 시스템에 가상 현실을 도입함으로써 암시적 학습을 가능하게 할 수도 있다. 가상현실이나 로봇을 재활치료에 적용함에 있어서, 과제를 다양하게 변형시키거나, 여러 가지 과제를 무작위로 배열하여 연습하게 하거나, 로봇의 장점을 잘 살려서 연습량을 고식적인 치료보다 대폭 늘리는 등, 운동학습의 원리를 고려하여 활용함으로써 그 효과를 더 높일 수 있을 것이다.

가상현실과 로봇은 이미 일상생활에 밀접하게 다가와 있는 기술이며, 앞으로 신경 재활의 분야에서도 널리 활용

될 것은 의심의 여지가 없다. 이러한 기술을 임상에서 유용하게 적용하기 위해서는 재활의학과 재활공학 간의 학제간 협력과 연구가 요구되며, 재활의학 분야의 전문가들이 가상현실이나 로봇을 이용한 재활 시스템의 개발에 초기부터 적극적으로 참여하는 것이 중요하다. 또한 개발된 기술이 임상 현장에 보급될 수 있으려면 임상적 효능 검증과 비용효과 분석을 위한 임상 연구와 더불어 건강보험 측면에서의 제도적, 정책적 지원도 있어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 1) Shumway-Cook A, Woollacott MH. Motor control. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2007.
- 2) Krakauer JW. Motor learning: Its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Curr Opin Neurol.* 2006;19:84-90
- 3) Henderson A, Korner-Bitsensky N, Levin M. Virtual reality in stroke rehabilitation: a systematic review of its effectiveness for upper limb motor recovery. *Top Stroke Rehabil.* 2007;14: 52-61
- 4) Crosbie JH, Lennon S, Basford JR, McDonough SM. Virtual reality in stroke rehabilitation: still more virtual than real. *Disabil Rehabil.* 2007;29:1139-1146
- 5) Jang SH, You SH, Hallett M, Cho YW, Park CM, Cho SH, Lee HY, Kim TH. Cortical reorganization and associated functional motor recovery after virtual reality in patients with chronic stroke: an experimenter-blind preliminary study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86:2218-2223
- 6) Broeren J, Rydmark M, Sunnerhagen KS. Virtual reality and haptics as a training device for movement rehabilitation after stroke: a single-case study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85: 1247-1250
- 7) Subramanian S, Knaut LA, Beaudoin C, McFadyen BJ, Feldman AG, Levin MF. Virtual reality environments for post-stroke arm rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil.* 2007;4:20
- 8) Stewart JC, Yeh SC, Jung Y, Yoon H, Whitford M, Chen SY, Li L, McLaughlin M, Rizzo A, Winstein CJ. Intervention to enhance skilled arm and hand movements after stroke: a feasibility study using a new virtual reality system. *J Neuroeng Rehabil.* 2007;4:21
- 9) Merians AS, Tunik E, Fluet GG, Qiu Q, Adamovich SV. Innovative approaches to the rehabilitation of upper extremity hemiparesis using virtual environments. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2009;45:123-133
- 10) Holden MK, Dyar TA, Dayan-Cimadoro L. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2007;15:36-42
- 11) Piron L, Turolla A, Agostini M, Zucconi C, Cortese F, Zampolini M, Zannini M, Dam M, Ventura L, Battauz M, Tonin P. Exercises for paretic upper limb after stroke: a combined virtual-reality and telemedicine approach. *J Rehabil Med.* 2009;41:1016-1102
- 12) You SH, Jang SH, Kim YH, Hallett M, Ahn SH, Kwon YH,

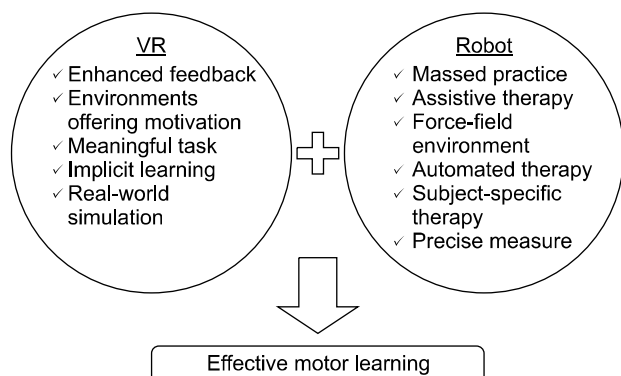


Fig. 5. Strengths of virtual reality and robotics as strategies to enhance motor learning.

- Kim JH, Lee MY. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study. *Stroke*. 2005;36: 1166-1171
- 13) Kim JH, Jang SH, Kim CS, Jung JH, You JH. Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: a double-blind, randomized controlled study. *Am J Phys Med Rehabil*. 2009;88:693-701
- 14) Jaffe DL, Brown DA, Pierson-Carey CD, Buckley EL, Lew HL. Stepping over obstacles to improve walking in individuals with poststroke hemiplegia. *J Rehabil Res Dev*. 2004; 41:283-292
- 15) Deutsch JE, Merians AS, Adamovich S, Poizner H, Burdea GC. Development and application of virtual reality technology to improve hand use and gait of individuals post-stroke. *Restor Neurol Neurosci*. 2004;22:371-386
- 16) Mirelman A, Bonato P, Deutsch JE. Effects of training with a robot-virtual reality system compared with a robot alone on the gait of individuals after stroke. *Stroke*. 2009;40: 169-174
- 17) Yang YR, Tsai MP, Chuang TY, Sung WH, Wang RY. Virtual reality-based training improves community ambulation in individuals with stroke: a randomized controlled trial. *Gait Posture*. 2008;28:201-206
- 18) Yang H-C, Park S-W, Jang S-J, Kim K-M, Park CW, Kim JH, Kim HC, Yi SH, Lee YS. Rehabilitation of drivers with brain injury using virtual reality based driving simulator. *J Korean Acad Rehab Med*. 2009;33:271-275
- 19) Cox DJ, Davis M, Singh H, Barbour B, Nidiffer FD, Trudel T, Mourant R, Moncrief R. Driving rehabilitation for military personnel recovering from traumatic brain injury using virtual reality driving simulation: a feasibility study. *Mil Med*. 2010;175:411-416
- 20) Reinkensmeyer DJ. Robotic assistance for upper extremity training after stroke. *Stud Health Technol Inform*. 2009;145: 25-39
- 21) Pignolo L. Robotics in neuro-rehabilitation. *J Rehabil Med*. 2009;41:955-960
- 22) Brewer BR, McDowell SK, Worthen-Chaudhari LC. Poststroke upper extremity rehabilitation: a review of robotic systems and clinical results. *Top Stroke Rehabil*. 2007;14:22-44
- 23) Volpe BT, Lynch D, Rykman-Berland A, Ferraro M, Galgano M, Hogan N, Krebs HI. Intensive sensorimotor arm training mediated by therapist or robot improves hemiparesis in patients with chronic stroke. *Neurorehabil Neural Repair*. 2008;22:305-310
- 24) Lo AC, Guarino P, Krebs HI, Volpe BT, Bever CT, Duncan PW, Ringer RJ, Wagner TH, Richards LG, Bravata DM, Haselkorn JK, Wittenberg GF, Federman DG, Corn BH, Maffucci AD, Peduzzi P. Multicenter randomized trial of robot-assisted rehabilitation for chronic stroke: methods and entry characteristics for va robotics. *Neurorehabil Neural Repair*. 2009;23:775-783
- 25) Lo AC, Guarino PD, Richards LG, Haselkorn JK, Wittenberg GF, Federman DG, Ringer RJ, Wagner TH, Krebs HI, Volpe BT, Bever CT Jr, Bravata DM, Duncan PW, Corn BH, Maffucci AD, Nadeau SE, Conroy SS, Powell JM, Huang GD, Peduzzi P. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *N Engl J Med*. 2010;362:1772-1783
- 26) Reinkensmeyer DJ, Kahn LE, Averbuch M, McKenna-Cole A, Schmit BD, Rymer WZ. Understanding and treating arm movement impairment after chronic brain injury: progress with the arm guide. *J Rehabil Res Dev*. 2000;37:653-662
- 27) Amirabdollahian F, Loureiro R, Gradwell E, Collin C, Harwin W, Johnson G. Multivariate analysis of the fugl-meyer outcome measures assessing the effectiveness of gentle/s robot-mediated stroke therapy. *J Neuroeng Rehabil*. 2007;4:4
- 28) Nef T, Mihelj M, Riener R. Armin: a robot for patient-cooperative arm therapy. *Med Biol Eng Comput*. 2007;45: 887-900
- 29) Fazekas G, Horvath M, Troznai T, Toth A. Robot-mediated upper limb physiotherapy for patients with spastic hemiparesis: A preliminary study. *J Rehabil Med*. 2007;39: 580-582
- 30) Lum PS, Burgar CG, Van der Loos M, Shor PC, Majmundar M, Yap R. Mime robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: a follow-up study. *J Rehabil Res Dev*. 2006;43:631-642
- 31) Hesse S, Werner C, Pohl M, Rueckriem S, Mehrholz J, Lingnau ML. Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stroke: a single-blinded randomized trial in two centers. *Stroke*. 2005;36: 1960-1966
- 32) Wisneski KJ, Johnson MJ. Quantifying kinematics of purposeful movements to real, imagined, or absent functional objects: Implications for modelling trajectories for robot-assisted adl tasks. *J Neuroeng Rehabil*. 2007;4:7
- 33) Housman SJ, Scott KM, Reinkensmeyer DJ. A randomized controlled trial of gravity-supported, computer-enhanced arm exercise for individuals with severe hemiparesis. *Neurorehabil Neural Repair*. 2009;23:505-514
- 34) Patton J, Dawe G, Scharver C, Mussa-Ivaldi F, Kenyon R. Robotics and virtual reality: a perfect marriage for motor control research and rehabilitation. *Assist Technol*. 2006;18: 181-195
- 35) Colizzi L, Lidonnici A, Pignolo L. The aramis project: a concept robot and technical design. *J Rehabil Med*. 2009; 41:1011-1101
- 36) Stein J, Narendran K, McBean J, Krebs K, Hughes R. Electromyography-controlled exoskeletal upper-limb-powered orthosis for exercise training after stroke. *Am J Phys Med Rehabil*. 2007;86:255-261
- 37) Mehrholz J, Platz T, Kugler J, Pohl M. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2008:CD006876
- 38) Kahn LE, Zygmant ML, Rymer WZ, Reinkensmeyer DJ. Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled



- pilot study. *J Neuroeng Rehabil.* 2006;3:12
- 39) Takahashi CD, Der-Yeghiaian L, Le V, Motiwala RR, Cramer SC. Robot-based hand motor therapy after stroke. *Brain.* 2008;131:425-437
  - 40) Patton JL, Stoykov ME, Kovic M, Mussa-Ivaldi FA. Evaluation of robotic training forces that either enhance or reduce error in chronic hemiparetic stroke survivors. *Exp Brain Res.* 2006;168:368-383
  - 41) Werner C, Von Frankenberg S, Treig T, Konrad M, Hesse S. Treadmill training with partial body weight support and an electromechanical gait trainer for restoration of gait in subacute stroke patients: a randomized crossover study. *Stroke.* 2002;33:2895-2901
  - 42) Peurala SH, Airaksinen O, Huuskonen P, Jakala P, Juhakoski M, Sandell K, Tarkka IM, Sivenius J. Effects of intensive therapy using gait trainer or floor walking exercises early after stroke. *J Rehabil Med.* 2009;41:166-173
  - 43) Mayr A, Kofler M, Quirbach E, Matzak H, Frohlich K, Saltuari L. Prospective, blinded, randomized crossover study of gait rehabilitation in stroke patients using the lokomat gait orthosis. *Neurorehabil Neural Repair.* 2007;21:307-314
  - 44) Husemann B, Muller F, Krewer C, Heller S, Koenig E. Effects of locomotion training with assistance of a robot-driven gait orthosis in hemiparetic patients after stroke: a randomized controlled pilot study. *Stroke.* 2007;38:349-354
  - 45) Westlake KP, Patten C. Pilot study of lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke. *J Neuroeng Rehabil.* 2009;6:18
  - 46) Hornby TG, Campbell DD, Kahn JH, Demott T, Moore JL, Roth HR. Enhanced gait-related improvements after therapist-versus robotic-assisted locomotor training in subjects with chronic stroke: a randomized controlled study. *Stroke.* 2008;39:1786-1792
  - 47) Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, Brady K, Campbell DD, Kahn JH, Hornby TG. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the lokomat in subacute stroke. *Neurorehabil Neural Repair.* 2009;23:5-13
  - 48) Jung KH, Ha H-G, Shin HJ, Ohn SH, Sung DH, Lee PKW, Kim Y-H. Effects of robot-assisted gait therapy on locomotor recovery in stroke patients. *J Korean Acad Rehab Med.* 2008;32:258-266
  - 49) Mehrholz J, Werner C, Kugler J, Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2007;CD006185
  - 50) Park SW, Choi YN, Wee HM, Jang SJ, Kim HI, Kim YH. Electromechanical gait trainer for gait rehabilitation for patients with stroke. *J Korean Acad Rehab Med.* 2004;28:182-183
  - 51) Patton J, Brown DA, Peshkin M, Santos-Munne JJ, Makhlin A, Lewis E, Colgate EJ, Schwandt D. Kineassist: design and development of a robotic overground gait and balance therapy device. *Top Stroke Rehabil.* 2008;15:131-139