

노화 관련 뇌인지 변화와 운동의 긍정적 영향: 인지신경과학적 연구 개관

신 은 삼[†]

연세대학교 인지과학 연구소

한국 사회에서 고령 인구가 지속적으로 증가하고 있는 추세에 발맞추어 본 논문은 노화 과정에서 일어나는 뇌의 구조, 기능적 변화 및 인지 기능의 저하를 살펴보고, 고령화 대처의 한 방안으로 제안되고 있는 운동의 효과에 관하여 인지신경과학적 연구를 중심으로 개관하였다. 정상 노화 과정에서 일어나는 뇌의 변화는 전전두엽과 측두엽(해마 포함)의 부피 변화와 함께 인지 과제 수행 시 과잉활성화와 같은 현상들이다. 이러한 뇌의 변화와 함께 인지 기능의 저하도 관찰되는데 주로 억제 및 기억 기능의 저하가 노화를 특징짓는 인지 기능의 변화로 알려져 왔다. 이와 같은 노화 관련 뇌인지의 퇴행적 변화에 대응할 수 있는 보호적 요인 중 하나가 운동이다. 실제 노인을 대상으로 장기간 운동 프로그램을 실시한 연구 결과들은 참가 노인들의 전두엽과 측두엽, 특히 해마의 위축이 개선되고 억제와 기억 기능 역시 향상되었음을 보고하였다. 이러한 결과는 뇌세포 단위에서의 변화로부터 시작하여 노화하는 뇌 역시 변화할 수 있고, 운동이 이러한 긍정적인 변화를 유도할 수 있음을 보여준다.

주요어 : 정상 노화, 전전두엽, 해마, 운동, 신경 가소성

[†] 교신저자: 신은삼, 연세대학교, (120-749) 서울시 서대문구 연세로 50, 위당관 619호

Tel: 02-2123-4059, E-mail: eunsam.shin@yonsei.ac.kr

통계청에서 발간한 2012년 고령자 통계에 의하면, 2012년 전체 인구 중에서 65세 이상의 인구가 차지하는 비율이 전체인구의 약 12%로 한국은 이미 고령화 사회(aging society)에 진입한 상태이다[1]. 현재의 저출산과 동시에 나타나는 노인 인구의 증가 추세는 2050년에 생산가능인구(15-64세) 1.4명이 1명을 부양해야 할 것이라는 예측도 가능케 한다[1]. 이러한 한국 사회의 고령화 추세를 맞이하여 노화에 대한 개인, 사회적 대책 마련이 심각하게 요구되고 있는 가운데 성공적 노화에 대한 관심 역시 점점 뜨거워지고 있다.

노화와 함께 찾아오는 변화 중 가장 큰 것이 신체 기능이 저하되어 질병에 취약해 지는 것이다. 우리나라 노인들 역시 여기에서 예외일 수 없다. 연령이 증가하면서 겪는 큰 어려움으로 건강문제를 꼽고, 가장 받고 싶은 복지서비스가 건강검진이라고 대답한 통계 결과[1]에서도 알 수 있듯이 건강의 유지와 관리는 이들에게 있어서 지대한 관심거리이다. 따라서 요즘에는 개인의 건강관리를 위해 규칙적인 운동을 하는 노인들을 주변에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 노인들이 규칙적인 운동을 함으로써 얻게 되는 이점들에는 여러 가지가 있겠으나, 본 논문에서는 신체 건강관리를 위해 실천하는 운동이 그들의 뇌인지 기능에 어떤 긍정적 영향을 미칠 수 있는지에 관하여 집중적으로 소개하고자 한다. 노화에 수반하는 여러 인지, 신경학적 변화에 대해서는 이미 타 논문에서 자세하게 다뤄진 바 있기 때문에(예, [2, 3]), 본 논문에서는 운동 효과와 밀접한 관련이 있는, 그러나 동시에 노화에 취약하기도 한 뇌 구조와 기능, 그리고 이와 관련된 인지 변화들을 선별하여 정리한 후 노인들을 대상으로 한 운동 효과 연구들을 소개하고자 한다.

시작에 앞서 본 논문 구성에 중점이 되었던 사항들을 밝히면 다음과 같다. 첫째, 임상적 문제없이 정상 노화 과정에 있는 노인들에게서 관찰되는 뇌와 인지 기능의 변화를 정리하였다. 둘째, 행동 자료를 넘어 뇌의 해부적, 기능적 활동의 변화를 보여주는 연구들을 개관하되 동물이 아닌 사람을 대상으로 한 연구들만을 모아 정리하였다. 과거에는 뇌손상 환자가 아닌 정상인을 대상으로 뇌를 연구하기가 어려웠다. 그러므로 인간의 뇌를 이해하기 위해 행동신경과학 분야에서 행해진 동물 실험 결과들을 바탕으로 인간의 뇌 활동과 기능을 유추하였다. 그러나 기능적 자기공명 영상법(functional magnetic resonance imaging, 이하 fMRI), 양전자 방출 단층촬영술(positron emission tomography, 이하 PET), 사건관련전위(event-related potential, 이

하 ERP)와 같은 뇌영상법이 발달하면서 정상인을 대상으로 그들의 뇌 구조와 활동에 대한 연구가 가능하게 되었다. 이러한 인지신경과학적 연구 방법의 발달에 힘입어 이전 동물 연구에서 밝혀진 결과들을 재확인하기도 하고, 동물 연구에서는 불가능했던 방식의 연구들을 실시하게 되었다. 따라서 본 논문은 인간의 노화 관련 뇌 구조, 기능 변화에 대해 소개하고 이와 관련된 인지 변화 그리고 이러한 뇌 인지적 변화와 맞물려 운동에서 얻는 이득에 관하여 최근 10여 년간 발표된 인지신경과학적 노화 연구를 중심으로 개관하였다.

각 연구마다 차이는 있었으나 소개될 연구들의 참여 노인은 최소 55세 이상이었고 65세 이상의 노인들이 대부분이었다. 이들의 참여 당시 건강 상태는 특별한 질병이 없는 상태로 우울감이 크지 않았고(예, 노인용 우울 척도에서 3점 미만[4]) 인지 기능도 정상이었다(예, 수정된 소-정신 상태 검사에서 51점 이상[5]). 또한 뇌 손상 경험이나 신경과적 질병 또는 장애를 갖고 있지 않았다. 간혹 연구자에 따라 신경계에 영향을 끼칠 수 있는 약물(예, 항우울제, 항불안제, 신경이완제, 베타 차단제) 복용을 제한하는 경우가 있었고, PET을 이용한 연구나 운동 효과를 보기 위한 연구에서는 혈관 장애나 당뇨와 같은 질병을 제한한 경우도 있었다.

노화에 따른 뇌의 변화

뇌 구조의 변화

자연스럽게 진행되는 성장, 노화 과정을 겪으면서 인간은 뇌의 해부적, 기능적 변화를 경험하게 된다. 인간의 뇌 구조 및 활동의 변화를 연구하기 위해서는 비침습적(non-invasive) 방법이 사용될 수밖에 없는 조건에서 fMRI와 같은 뇌영상법의 발전은 뇌 연구에 큰 원동력이 되었다. 특히 노화 연구에서는 노화와 관련된 뇌의 해부적, 구조적 변화에 관한 비교적 자세한 지식을 얻을 수 있게 되었다. 다시 말해, 노화와 관련된 뇌의 해부적 변화가 단순히 회백질의 부피가 감소된다는 인상형성에서 한 걸음 더 나아가, 뇌의 어떤 특정 영역에서 나타나거나 또는 연령 증가에 따라 선택적으로 일어나는 변화들을 관찰할 수 있게 되었다.

특히 자기공명 뇌영상 이미지를 이용해서 수동적 방법이나 형태계측술(voxel-based morphometry)과 같은 반자동화된 방법으로 뇌의 부피를 측정할 수도 있게 되

었다. 그 결과 연령이 증가하면서 뇌의 후측(posterior) 부위 보다는 전측(anterior) 부위에서 두드러지는 변화가 나타났다[6-11]. 예를 들어, 연령이 증가하면서 뇌량(corpus callosum)의 부피가 감소하는데 이 현상이 후측 부위인 팽대(splenium)보다는 전측 부위인 슬부(膝部, genu) 및 그 주변의 줄기(trunkus)에서 더 크게 관찰된다[11]. 대뇌피질 또한 노화가 진행되면서 전전두엽(prefrontal)과 측두엽(temporal)의 부피가 감소하는데, 특히 전전두엽 회질(gray matter)에서 가장 큰 감소가 나타난다[6]. 전전두엽 다음으로 측두엽, 특히 해마(hippocampus)가 노화에 영향을 크게 받는데 그 부피는 10년마다 2-3% 정도로 감소한다[12, 13]. 이에 비해 일차 시각 피질이나 하측(inferior) 두정엽(parietal lobe) 부근은 비교적 변화가 없다[7, 8]. 확산 텐서 영상법(diffusion tensor imaging)은 뇌의 각 영역을 연결해주는 백질(white matter)의 조직이 얼마나 일정 방향으로 잘 나열되어 있는가 즉, 백질 조직의 통합성(integrity)을 관찰하는데 사용된다. 이 방법을 이용한 연구 역시 후측에서 전측으로 갈수록 뇌량의 통합성이 떨어지고, 전두엽의 백질 특히 복내측(ventromedial)의 통합성이 크게 떨어진다고 보고하였다[10]. 이상의 연구 결과들은 노화 과정에서 전측 부위가 후측 부위보다 더 부정적으로 영향을 받는다는 것을 일관되게 지적해 주고 있다.

뇌 기능의 변화

뇌의 구조적 변화와 더불어 뇌 활동 패턴의 변화도 fMRI, PET, ERP와 같은 기법을 통해 연구되어 왔다. 주로 노인들이 특정 인지 과제를 수행하는 동안 위의 뇌 영상법들을 이용하여 뇌 신호를 기록한 다음, 이들이 수행한 과제에서 각 조건별로 나타난 뇌 활동을 해당 조건에서 관찰된 청년들의 뇌 활동과 비교하는 방식으로 연구한다. 이러한 연구들에서 나타난 노화 관련 뇌 활동의 특이 현상 중 하나가 과잉활성화(overactivation)이다[14-16]. 이 과잉활성화는 특히 전전두엽에서 양측(bilateral) 활성화로 나타나는 경향이 많다[14, 16]. Cabeza 등[14]은 PET을 이용하여 단어 회상시 노인 참가자들(평균 나이 70세)이 청년 참가자들(평균 나이 26세)과 비교하여 뇌의 활성화가 어떻게 나타나는지 관찰하였다. 그 결과 청년 참가자들은 우측 전전두엽 영역에서 활성화를 보인 반면, 노인 참가자들은 이 영역뿐만 아니라 이에 상응하는 좌측 영역에서도 활성화를 보였다. 이러한 양측 반구의 활성화는 실험 과제의 특정정보보다는 노인들에게서 일반적으로 나타나는 뇌 반

응인 것으로 추측되고 있는데 이 이유에 관하여 보상(compensation)이나 탈차별화(dedifferentiation)와 같은 이론이 제안되어 왔다[15, 17-24].

보상은 연령 증가에 따른 인지적 결함을 보상하고자 뇌의 활성화를 증가시킨다는 가설이다. 이 보상 가설을 뒷받침하는 증거가 뇌의 양측 활성화를 보인 노인 참가자들이 그렇지 않은 참가자들보다 더 빠른 행동 반응을 보인다는 것인데[16], 같은 맥락에서 Reuter-Lorenz는 CRUNCH(compensation-related utilization of circuits hypothesis)라 불리는 가설을 제안하였다[17]. 이 가설에 따르면 정보처리의 비효율화로 노인들이 청년들과 비슷한 수준의 과제 목표를 달성하기 위해서 더 많은 신경적 자원을 수집한다는 것이다. 과제의 신경적 자원 요구가 낮은 수준에서는 보상적 활성화가 효과적이지만 그 요구가 증가할수록 자원의 한계에 다다라 포화 상태가 되므로 비효율적 처리가 일어나고 퇴화 현상이 나타나게 된다. CRUNCH 가설은 이런 이유로 과제가 요구하는 신경적 자원에 따라 청년과 노인의 뇌 활동에서 차이가 나타난다고 설명하는데 스티븐버그의 기억 추적 과제와 같이 기억해야 할 자극의 수를 이용해 부하량을 조절한 연구들[18, 19]에서 지지 증거들이 발견되었다. 한 예로, Schneider-Garces 등[19]은 기억의 부하량을 2부터 6까지 늘리면서 노인 참가자들의 뇌의 활성화 정도가 청년 참가자의 활성화 패턴과 어떤 차이가 있는지 연구하였다. CRUNCH 모형에서 예측하듯이, 작업 기억의 부하량이 4, 5, 6으로 증가할 때 청년 참가자들이 보인 뇌 활성화가, 부하량 2, 3, 4로 증가할 때 노인 참가자들이 보인 활성화와 비슷한 양상으로 나타났다. 이는 곧 부하량 2, 3, 4, 조건에서 노인 피험자들의 과도한 신경적 자원 수집이 일어났고 이러한 패턴의 뇌 활동은 비효율적인 보상적 활성화로 간주된다.

과잉활성화를 설명하기 위해 제기된 보상 이론과 더불어 제안된 탈차별화 이론은 Lindenberger와 Baltes[20]가 시각이나 청각과 같은 감각 기능이 인지 과제 수행 능력과 밀접한 관계가 있다는 결과를 발표하면서 구체화되었다. 노인들 특히 80세 이상의 고령 노인을 대상으로 할 때, 시각이나 청각과 같은 감각 기관의 능력 차이가 지각 속도, 추론, 기억, 지식과 같은 여러 인지 기능들에서의 공통된 변량 차이를 매개한다는 것이다[20, 21]. 이 감각 능력과 인지 기능의 밀접한 상호관계는 청, 장년층보다는 고령층에서 두드러지게 나타나고, 인지과제 유형, 인지과제 수행 수준, 뇌 병리의 유무와 관계없이 관찰된다[21, 재인용]. 결국 이 밀접한 관계는 감

각 능력과 인지 기능 모두에 공통적으로 그리고 뇌 기능 전반에 걸쳐 영향을 미치는 기제를 제안한다[21]. 인지 신경적 측면에서 볼 때 초기 발달 기간 동안 특수화되었던 인지 신경적 기제가 노화가 진행되면서 점점 그 특수성을 잃어가는 것으로 해석되는데(예, [22-24]), 저하된 특수성은 뇌의 특정 영역 보다는 전반적인 영역에서 나타나는 활성화로 반영된다. 한 예로, 얼굴, 장소, 단어와 같은 시각적 자극들은 그 범주에 따라 활성화되는 영역이 복측 시각 피질 내에서도 서로 다르다[25-27]. 그러나 이 범주 특정적 활성화의 정도가 연령이 증가하면서 감소한다[22]. 이 현상이 의미하는 것은 젊은 성인들은 과제 수행을 위해 필요한 특정 기제들을 선별적으로 그리고 목적에 맞게 사용하는 반면, 노인들은 이러한 목적에 맞는 기제들이 점차 쇠퇴하면서 차별화된 뇌 활동 보다는 비차별적 뇌 활성화를 보인다는 것이다. 따라서 이 탈차별화 이론에서 바라보는 뇌의 과잉활성화는 개체가 (보상과 같이) 어떤 특수 목적이 있어 나타나는 현상이라기보다는 생물학적 노화가 진행되면서 시스템의 전체적 통합성이 떨어지기 때문에 나타나는 현상이라 할 수 있다.

노화에 따른 인지 기능의 저하

앞서 기술한 연령에 따른 뇌의 구조, 기능적 변화는 인지 기능도 함께 변화함을 의미하며 그러한 변화는 인지 기능의 쇠퇴로 나타난다. 보통, 인간의 인지 기능은 20대에 정점에 다다른 후 지속적인 하향세를 보인다[28]. 이러한 하향세가 두드러지는 부분은 인지 처리의 속도, 억제, 작업 기억과 같은 집행적 통제 기능, 그리고 장기 기억 능력이다[18, 19, 29-36]. 노화에 수반하는 광범위한 뇌인지적 변화에 대해서는 박태진[2], 정혜선[3] 등의 논문에서 이미 자세하게 다뤘기 때문에, 여기에서는 앞서 소개했던 노화에 취약한 뇌 구조, 기능과 관련하여 자주 논의되는 인지 변화만을 추출하여, 그 인지 기능의 저하와 이에 수반되어 나타나는 뇌반응을 중심으로 간략히 정리하였다.

억제기능의 저하

노화 과정에서 가장 치명적으로 영향을 받는 뇌 영역이 전전두엽이라는[6] 사실은 이미 밝힌 바 있다. 이 전전두엽의 쇠퇴가 노화로 인한 인지, 행동 변화 중 집행

행적 통제 능력의 감소와 함께 나타나는 것은 우연이 아닐 것이다. 집행적 통제 능력의 감소 중 노화가 진행되면서 가장 두드러지게 나타나는 것이 억제기능의 저하이다[30-33, 35]. 연구자들은 스트룹이나 플랭커(flanker) 과제와 같이 상충되는 반응을 일으키는 상황에 처하거나, 현재 수행하고 있는 과제를 방해하는 자극이 제시될 때 노인 참가자들이 청년 참가자들에 비해 어떤 수행력과 뇌 반응을 보이는지 관찰하였다[30, 35]. Fabiani 등[30]은 실험 참가자 자신이 선택한 책을 실험실에서 읽도록 하고 그 시간 동안 이들에게 반복적인 소리 자극을 제시하여 ERP가 각 소리 제시 때마다 어떻게 나타나는지 관찰하였다. 특히 소리 자극 제시 후 100ms 이내에 나타나는 N100의 진폭에 초점을 두어 ERP 반응을 관찰하였다. 그 결과, 청년 참가자들은 같은 소리가 반복 제시되면서 N100가 감소한 반면, 노인 참가자들(65세 이상)은 반복되는 소리에도 N100가 가장 처음에 제시되었을 때와 비슷한 진폭으로 지속적인 반응을 보인다는 사실을 발견하였다. 이 실험에서 제시되었던 소리는 실험 과제인 책 읽기와 아무 관계가 없으므로 소리에 대한 반응을 억제하는 것이 과제 수행에 도움이 되는 것이다. 그러나 N100 결과가 반영하듯이 젊은 참가자들은 이내 소리에 대한 반응을 억제하고 책 읽기에 몰두하였지만, 노인 참가자들은 소리에 대한 반응을 억제하지 못하고 지속적으로 주의가 산만해져 있었던 것이다.

기억의 쇠퇴

노화가 진행되면서 대부분의 사람들이 기억력의 저하를 경험하게 된다. Park 등[28]에 따르면 작업 기억, 장기 기억 모두 20대를 정점으로 하여 그 이후부터 점차 쇠퇴한다고 한다. 이렇게 기억 기능들이 쇠퇴하면서 뇌의 활성화 양상도 달라져 과잉활성화[14-16]를 보이는데 이에 대해서는 이미 언급한 바 있다. 이 과잉활성화가 주로 신피질(neocortex) 영역에서 관찰되는 현상이라면 피질하부(subcortex)에서는 해마와 관련하여 기억력의 쇠퇴가 나타난다. 해마는 기억의 각 구성 요소들이 결합되어 하나의 통합된 기억이 형성되는 장소이다[37]. 그러므로 기억의 개별적 구성 요소보다는 그 구성 요소들의 관계를 부호화하고 인출하는 기억 과제 상황에서 중요한 역할을 한다. 따라서 해마가 손상되어 기억 장애가 있다면 항목(item) 기억 과제 보다는 연합(association) 기억 과제에서 더욱 저하된 수행 결과를 보일 것이다.

그리고 사건의 유무에 대한 막연한 느낌의 친숙성에 기초한 인출 보다는 구체적인 맥락 정보까지 인출되어야 하는 회상 과제에서 더욱 저하된 수행 결과를 보일 것이다. 이러한 가설은 노화에 그대로 적용된다. 다시 말해, 노인이 청년보다 연합이 내[34], 회상 기억 과제[39]에서 저하된 수행을 보인다. 이것은 노인들이 기억의 구성 요소들을 결합하는 능력이 떨어진다는 것을 보여주는데, 이러한 행동 결과와 일치하게 뇌영상법을 이용한 기억 연구에서 해마의 부피와 활성화가 연령에 따라 다르게 나타난다는 결과들이 보고되었다[38-40].

Dennis 등[38]은 얼굴, 자연 경관을 개별적으로 기억하는 항목 기억 과제와 얼굴-자연 경관을 연합시켜 기억하는 연합 기억 과제를 청년과 노인 참가자들에게 실시하고 fMRI를 이용해 뇌의 활성화 정도를 관찰하였다. 예상대로 연령에 따른 가장 큰 차이를 보인 것이 연합 기억 과제에서 부호화 시간 동안 관찰된 해마의 활성화 정도였다. Yonelinas 등[39]은 연령이 증가하면서 감소하는 해마의 부피가 친숙성의 저하에는 영향을 미치지 않지만 회상력 저하를 예측한다고 보고하였고, Daselaar 등[40]도 회상과 관련하여 해마가 활성화되는 정도가 연령 증가에 따라 감소한다는 비슷한 결과를 발표하였다.

Grady 등[41]은 해마 자체의 활성화보다는 해마와 다른 영역간의 기능적 연결성(functional connectivity)을 연구하였다. 여기서 기능적 연결성이란 공간적으로 떨어져 있는 영역들이 활성화되는 시간의 일치성을 가리키는 것으로 뇌의 각 영역들에서 나타나는 활성화 수준의 상관성에 의해서 결정되는 것이지 해부적 연결성을 항상 가정하지는 않는다. Grady 등[41]은 해마 중 전측 부위에서 관찰되는 활성화가 자극의 부호화 시간 동안 다른 영역의 활성화와 어떤 상관관계를 갖는지, 각 영역간의 상관적 활성화가 기억 과제 수행 결과와 어떤 관련이 있는지에 관하여 연구하였다. 이 연구의 참가자들은 부호화 시간 동안 제시되는 그림이나 글자가 생물인지 무생물인지를 판단하였고, 인출 과제로 제시되는 자극이 이전에 제시되었던 것인지 아닌지를 재인하였다. 나이에 따른 차이를 비교한 결과, 청년 집단은 기억 자극 부호화시 해마의 활성화가 복측(ventral) 전전두엽과 선조외피질(extrastriate) 영역에서의 활성화와 관계가 있는 반면, 노인 집단은 배측(dorsal) 전전두엽과 두정엽 영역에서의 활성화와 관계가 있는 것으로 나타났다. 나아가 두 연령 집단 모두 기능적으로 연결성이 높은 영역들에서 활성화가 증가할수록 높은 재인 점수를 보였

다. 흥미롭게도, 연령에 따른 기능적 연결성의 상이한 패턴에도 불구하고 두 집단 사이의 기억 점수에는 유의미한 차이가 없었다. Grady 등[41]의 연구는 곧, 뇌의 소통 연결망도 나이와 더불어 변화한다는 점과 동시에 각 연결 마디의 이상이 그와 연결되어 있는 다른 마디 기능에도 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다. 결국 노인들의 배측 전전두엽에서 주로 관찰되는 과잉활성화가 해마의 역할과 동떨어진 현상이 아님을 시사하는 것이다.

노화와 운동의 관계

지금까지 연령 증가에 따른 뇌인지의 퇴행적 변화들을 살펴보았다. 그렇다면 이런 변화들을 극복하기 위해 어떤 일들을 할 수 있는가? 뇌인지 기능 저하의 속도를 늦추고 그 심각성을 완화시켜 줄 수 있는 것들로 몇 가지(예, 운동, 인지 구성요소 훈련, 생활 스타일에 대한 접근)가 대두되어 왔다. 이들 중 인지신경과학적 접근 방법을 이용하여 운동의 효과를 검증한 연구들이 지난 10여 년간 발표되었다. 뇌영상법 개발이 임상현장 뿐만 아니라 연구 활동에 도입되면서 운동의 뇌인지적 혜택에 대한 연구가 동물이 아닌 인간을 대상으로 옮겨갈 수 있게 되었다. 그리하여 인간을 대상으로 한 운동 효과에 대한 직접적 평가가 가능하게 되었고 그 평가 결과도 긍정적인 것으로 귀결되고 있다. 이와 더불어 운동은 개인적 의미만 있다면 특별한 시설 또는 경제적 부담 없이 누구든지 간편하게 생활 속에서 실천해 나갈 수 있는 것이다. 즉 운동의 개별성, 경제성, 간편성 등을 감안할 때 이것이 노화에 주는 효과를 집중적으로 조명해 볼 필요가 있다. 이 두 가지 이유로, 저자는 노화와 관련하여 운동에서 얻는 이점을 앞서 논의한 뇌인지적 변화와 연계하여 지난 10여 년간 보고된 인지신경과학적 연구 성과들을 모아 정리하고자 한다.

여기에 소개되는 연구들은 인간을 대상으로 실제 운동 프로그램을 실시하여 그 효과를 뇌반응과 행동에서 확인한 연구들로 제한되어 있다. 이유는 이러한 방식의 연구들이 정상적인 뇌인지 노화에 미치는 운동의 효과를 가장 직접적으로 그리고 다차원적으로 보여준다고 판단했기 때문이다. 실제 운동 프로그램을 장기간 실시한 후 그 효과를 검증하기에는 많은 시간과 노력, 인력 등이 필요하다. 그러므로

기존의 많은 연구들은 개인의 심폐기능을 측정된 후 그 수치에 따라 신체적 건강 (fitness) 지수가 높은 집단과 낮은 집단으로 나눠 비교하는 횡단적 연구 방식을 채택해왔다(예, [42, 43]). 보통 VO_2 로 나타내는 최대 산소 섭취량(maximal oxygen uptake)을 신체적 건강 상태를 나타내는 기준으로 삼아 VO_2 수치가 높은 집단을 상위 건강 집단으로 VO_2 수치가 낮은 집단을 하위 건강 집단으로 나누어 연구해왔다. 그러나 몇몇 연구자들이 장기적 운동 프로그램을 실시하기 시작하면서 그 효과에 대한 종합적인 평가가 시작된 것이다[44-47].

운동과 뇌의 구조적 변화

운동이 노화에 미치는 영향에 관한 연구들 중에서 몇몇의 연구들이 유산소 (aerobic) 운동의 긍정적 뇌 구조 효과를 보고하였다[44, 45]. 여기서 유산소 운동이란 산소 소비를 유발하여 심장혈관의(cardiovascular) 기능을 강화해 주는 운동을 말하는데 빨리 걷기, 조깅, 수영 같은 것들이 있다. 노인들을 대상으로 유산소 운동 프로그램을 실시할 때는 주로 걷기 운동을 이용한다. Colcombe 등[44]은 60-79세 노인들을 대상으로 빨리 걷기 유산소 운동과 근육단련 비유산소 운동 두 집단으로 나누어 6개월간 실시하였다. 두 집단 모두 일주일에 1시간씩 세 번 전문 훈련가의 도움을 받아 운동하였다. 유산소 운동 참가자들은 빨리 걷기 훈련을 통하여 심장 박동 예비력(heart rate reserve)을 점차 증가시켰고, 비유산소 운동 참가자들은 근육을 긴장시키거나(toning) 신장시키는(stretching) 훈련으로 유연성을 증가시켰다. 운동 전과 후의 뇌 구조 변화는 MRI를 이용한 형태 측정술을 통해서 분석하였다. 운동 시작 6개월 후 유산소 운동 집단이 고무적인 운동 효과를 보였는데, 구체적으로 전측 백질에서의 부피 증가뿐만 아니라 전측 대상회, 보조 운동 영역(supplementary motor cortex), 우측 하전두회(inferior frontal gyrus)와 같은 전두엽 영역의 백질에서 비유산소 운동 집단과 비교하여 유의미한 부피 증가를 보였다.

전두엽 다음으로 연령 증가의 영향을 크게 받는 영역이 측두엽이다[12, 13]. 그러나 위 단락에 소개한 Colcombe 등[44]은 좌측 상측두회(superior temporal gyrus)에서 유의미한 유산소 운동 효과가 있었음을 보고하였다. 즉 운동 시작 6개월 이후 이 영역에서 유산소 운동 집단이 비유산소 운동 집단보다 유의미한 부피 증가를 보인 것이다. Erickson 등[45]은 유산소 운동이 해마에도 구조적 변화를 일으킨다는 사실

을 발견하였다. 평균 연령 66세의 노인 참가자들을 대상으로 유산소 운동과 비유산소 운동 집단으로 나눠 Colcombe 등[44]의 훈련과 비슷한 방식으로 1년 동안 프로그램을 실시하였다. 운동 처치 전, 처치 시작 6개월, 처치 종료 후로 나누어 MRI를 이용한 해마 부피 측정을 하였다. 결과는 비유산소 운동 참가 노인들의 전측 해마 부피가 운동 전 수준에 비하여 오히려 감소한데 반해, 유산소 운동에 참가한 노인들의 전측 해마 부피는 운동 전과 비교하여 6개월, 1년에 걸쳐 지속적으로 증가한 것으로 나타났다. 이 결과는 VO₂를 이용하여 상위 건강 집단과 하위 건강 집단으로 나누어 관찰한 해마 부피 차이[42, 45]와도 일치하는 것으로 운동이 해마와 기억에 긍정적인 효과를 가져 온다는 사실을 더욱 공고히 한다.

운동과 뇌의 기능적 변화

뇌의 구조적 측면에서의 향상은 기능적 측면에서의 향상과도 그 맥을 같이 하고 있듯이 위에 소개한 Colcombe 등[44]의 유산소 운동 프로그램 실시는 뇌의 기능적 변화도 함께 가져왔다[46]. 이들은 플래커 과제를 이용하여 컴퓨터 모니터 한가운데 제시되는 화살표에 대한 반응이 그 양 옆에 제시되는 자극들에 의해서 방해 받는 정도를 운동 프로그램 실시 전과 후로 나누어 비교하였다. 반응 속도에서 유산소 운동 집단이 운동 전과 비교하여 방해받는 정도가 유의미하게 저하되었으나 비유산소 운동 집단은 유의미한 저하를 보이지 않았다. 이것은 운동 처치 후 유산소 운동 참가자들이 방해 자극으로 인한 간섭을 효율적으로 처리하게 되었다는 것을 의미한다. 뇌 활동에서도 간섭의 효율적 처리를 시사하는 증거가 발견되었다. 전두엽의 중전두회(middle frontal gyrus), 상전두회(superior frontal gyrus)와 두정엽의 상두정소엽(superior parietal lobule)과 같은 주의 관련 네트워크에서 유산소 운동 집단이 비유산소 운동 집단보다 큰 활성화를 보였다. 반면 방해받는 정도가 클수록 더 활성화가 되는 전측 대상회(anterior cingulate)에서는 비유산소 운동 집단이 유산소 운동 집단 보다 더 큰 활성화를 보였다. 이 중단적 운동 처치 효과는 횡단적으로 본 효과와 비슷하였다. Colcombe 등[46]은 같은 과제를 사용하여 VO₂로 분류된 상위 건강 집단과 하위 건강 집단의 행동과 뇌 활동을 비교하였다. 역시 상위 건강 집단이 반응 속도에서 방해 자극을 억제하는 능력이 하위 건강 집단보다 유의미하게 높았고 이들의 뇌 활동 역시 유산소 운동 집단이 운동 처치 후 보여준

패턴과 비슷하였다.

Colcombe 등[46]의 연구에 사용된 fMRI는 뉴런의 직접적인 활동을 측정하기 보다는 혈류역학의 원리에 의해서 나타나는 신호를 측정한다. 그러므로 ERP와 같이 직접적인 뇌 활동 측정치를 이용한 연구에서도 일치하는 결과가 나온다면 유산소 운동이 뇌 기능에 가져오는 긍정적 효과가 더욱 설득력을 얻을 것이다. 이에 Themanson 등[48]은 플래커 과제 수행시 노인들에게서 나타나는 에러관련부적과(error-related negativity, 이하 ERN)[49, 50]의 반응을 관찰하였다. ERN은 ERP에서도 출되는 특수 파형으로 전측 대상회 주변에서 나오는 신호로 추측되고[51-53], 상충되는 정보에 의해 방해받는 정도가 클수록 큰 진폭을 보이는 것이 특징이다. 그러므로 VO₂가 낮은 집단이 높은 집단 보다 더 큰 ERN을 보일 것이라 예상된다. Themanson 등[48]은 이러한 예상과 일치하는 결과를 발견하였고, 이것은 Colcombe 등[46]의 횡단적 연구에서 관찰된 전측 대상회에서의 집단 간 차이와 동일한 방향으로 나타난 것이다.

한편 Erickson 등[45]의 연구에서 나타난 유산소 운동의 해마 부피에 대한 긍정적인 영향은 행동 반응에서도 함께 나타났다. 이들은 작업 기억 과제를 이용하여 시공간 기억 능력을 측정하였는데, 부하량을 1, 2, 3으로 하여 점(들)을 기억 화면에 제시하고 3초 후 점 하나를 제시하여 참가자들이 제시된 하나의 점이 이전 기억 화면에서 제시되었던 점(들)의 위치와 일치하는지를 판단하도록 하였다. 유산소 운동 집단과 비유산소 운동 집단 모두 처치 1년 후 향상된 기억 능력을 보였으나, 유산소 운동 집단에서만 유의미한 해마 부피 증가가 관찰되었고 이 부피 증가는 참가자들의 향상된 시공간 기억 능력과 유의미한 상관관계가 있었다. 이것은 해마 부피와 기억 능력 간의 밀접한 관계를 보여줌과 동시에 해마 부피를 증가시키는데 유산소 운동이 기여하였음을 제안한다.

뇌의 특정 영역이 활성화 되는 정도가 운동의 결과로 변화할 수 있다는 보고와 함께, 뇌 영역 간의 기능적 연결성을 측정한 연구에서도 유산소 운동의 긍정적 효과가 보고되었다. Voss 등[47]은 1년간의 운동 프로그램 실시가 참가 노인들의 뇌 영역 간 기능적 연결성에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 연구하였다. 노인들의 당시 기능적 연결성이 장기간의 운동 참여 이후 더욱 강화되는지 아니면 젊은 참가자들이 보이는 연결 패턴과 비슷하게 변화하는지가 이들의 관심 주제였다. 이들

은 초기 양식 망(default mode network), 전두 집행 망(frontal executive network), 전두 두정 망(frontal parietal network)에서의 변화를 관찰하였다. 유산소 운동 집단은 운동 시작 1년 후 초기 양식 망 중 전두와 측두 영역 간의 연결성과 전두 집행 망에서 변화가 나타난 반면, 비유산소 운동 집단은 운동 시작 6개월 후에는 초기 양식 망에서 1년 후에는 전두 두정 망에서 변화를 보였다. 두 집단이 다소 다른 양상의 변화를 보였음에도 불구하고 공통적으로 두 집단 모두 젊은 참가자들에게서 관찰된 기능적 연결성에 가까운 연결 패턴으로 변화하였다. 이 변화들을 종합적으로 볼 때 운동 프로그램의 처치가 고등적 인지 기능을 담당하는 영역들의 효율적인 상호작용을 증진시킨 것으로 평가된다. 이 기능적 연결성에서의 변화가 집행적 기능을 측정하는 행동 과제에서 관찰된 향상된 수행결과와 상관관계가 있음은 이러한 평가를 지지한다.

운동 효과의 뇌신경학적 기초

지속적인 운동이 위축되는 뇌의 구조적 향상과 더불어 인지 기능에도 긍정적인 효과를 불러 올 수 있다는 사실을 살펴보았다. 이 고무적인 결과는 곧 운동이 뇌의 가소성(plasticity)을 증진시킨다는 점을 지적하는 것인데, 그렇다면 유산소 운동이 왜 이러한 효과를 가져 올 수 있는 것인가? 이 질문에 답하기 위해서는 신경계의 기본 단위인 뉴런 수준에서의 변화에 주목할 필요가 있다. 주로 쥐를 이용한 동물 연구에서 운동과 뉴런발생(neurogenesis)과의 관계가 발표되어 왔다[55-58]. 한 예로, van Praag 등[57]은 자극이 풍부한 환경에서 자발적으로 바퀴돌리기를 하며 운동을 한 성인 쥐의 해마 치상회(dentate gyrus)에서 뉴런의 수가 증가하였음을 발견하였다. 이러한 연구들은 운동이 뉴런 단위에서의 변화를 유도한다는 점을 지적해 주고 있다. 그렇다면 뉴런 단위에서의 변화를 야기하는 것은 무엇일까? 지금까지 가장 유력한 변화 요인으로 부각되는 것이 신경영양인자(neurotrophic factor)이다 [54, 59-60].

신경영양인자는 세포의 생존, 유지, 발달에 관여하는 단백질 분자를 일컫는 것으로 뇌-파생적 신경영양인자(brain-derived neurotrophic factor, 이하 BDNF), 신경성장인자(nerve growth factor)와 같은 것들이 있다. 운동이 이 인자들의 생산을 증진시키고 뉴런발생을 유도한다[54-58, 60]는 사실들이 발견되면서, 이 인자들 중 BDNF와

유산소 운동의 효과를 인간을 대상으로 관찰한 연구가 발표되었다[45]. 참고로 BDNF는 뇌 세포의 보호, 생존 증진, 성장, 시냅스(synapse)의 가소성까지 관여하는 신경영양인자로 인간을 대상으로 연구할 때는 혈액에서 추출하는 혈청 BDNF의 수준으로 그 변화 여부를 가늠할 수 있다. 이 점을 이용하여 Erickson 등[45]은 1년간 운동 프로그램에 참가한 노인들의 혈청 BDNF의 변화를 관찰하였다. 그 결과 유산소 운동 참가 노인들의 해마 부피가 증가하였고 이 증가한 부피가 혈청 BDNF의 변화와 유의한 상관이 있음을 발견하였다.

운동 중 특히 유산소 운동이 전두엽과 측두엽 기능에 긍정적 효과를 가져 오는 것은 신경영양 인자의 증가로 인한 뉴런 단위에서의 변화가 큰 원동력이 되겠으나 이와 더불어 나타는 혈관계(vasculature)에서의 변화와도 밀접한 관련이 있다. Louissaints 등[59]은 새의 일종인 성인 명금(鳴禽, songbird)을 대상으로 신경영양인자, 뉴런발생, 혈관발생(angiogenesis)간의 관계를 연구하였다. 이들은 테스토스테론을 명금의 상위 음성 중추에 주입하였는데 혈관내피성장인자(vascular endothelial growth factor)와 그 수용기가 증가하면서 내피 세포가 빠른 속도로 분열하고 새로운 뉴런들이 출현하는 것을 관찰하였다. 또한 테스토스테론 수준에 따라서 BDNF의 증가 정도가 다르다는 것을 발견하였다. 이 일련의 결과들은 테스토스테론으로 유도된 혈관발생이 BDNF의 증가에 의해 뉴런발생으로 이어졌음을 보여준다. 지금까지 소개된 인간 대상의 운동 효과도 운동이 혈관계의 긍정적 변화를 유도하고 신경영양인자 증가를 매개하는 신경계의 긍정적 변화로 이어지는 일련의 생물학적 변화를 야기하기 때문에 나타난 것이 아닌가 추측해 본다.

맺는말

그림 1에 요약되어 있듯이, 저자는 본 논문을 통해서 정상 노화와 관련되어 퇴행적으로 나타나는 뇌의 구조적, 기능적 변화, 그리고 이 변화와 관련된 인지 기능의 쇠퇴에 대하여 소개하였다. 나아가 이러한 노화 과정을 극복할 수 있는 하나의 대응책으로 운동의 효과에 대해서도 살펴보았다. 구체적으로, 노화 과정에서 전두엽과 측두엽은 위축되고 그 활성화에 있어서도 과잉활성화와 같은 특이 반응 양식

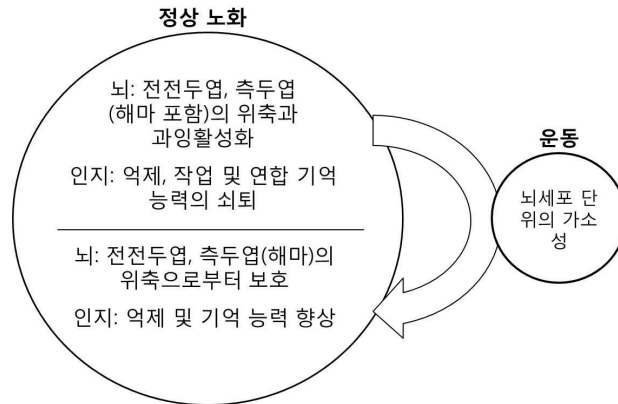


그림 1. 정상노화와 운동의 관계

이 나타나기도 한다. 이러한 뇌의 변화는 그 취약 영역과 밀접한 관계가 있는 인지 기능들, 특히 억제 및 기억 능력의 저하로 나타난다. 그러나 운동 특히 유산소 운동의 장기적 실시는 세포 단위의 변화를 이끌어 내어 뇌와 인지의 퇴행적 변화로부터 보호한다. 연구 결과들을 종합해 보면, 유산소 운동으로 전두엽의 위축은 감소하고 그 기능은 오히려 활성화되어 보다 효율적인 억제 반응을 유도하고, 해마의 부피를 증가시켜 기억력 향상에도 기여한다. 유산소 운동이 가져오는 뇌와 인지기능에 대한 이로운 영향은 노화의 영향을 가장 크게 받는 뇌 영역과 관련 인지 기능들이라는 사실은 매우 흥미롭다. 이는 곧 노화 과정 속에서도 뇌가 변화할 수 있고, 운동이 그 변화를 촉진시킨다는 것을 의미한다. 이렇듯 신체 건강관리를 위해 시작하는 운동이 그 일차적인 목적을 뛰어넘어 그 이상의 성과를 거둘 수 있다는 사실은 고무적이고 희망적이다.

서두에서 언급하였듯이 한국 사회도 이제 고령 인구에 대한 대책 마련에 눈을 돌릴 시기가 되었다. 연령 증가에 대한 개인적 대책 마련과 함께 사회적 대책 마련이 필요한 이 시점에서 삶의 질을 고려하고 성공적인 노화를 위해서 노화의 생물학적 변화뿐만 아니라 인지신경과학적 변화에 대한 이해 역시 필요하다. 이런 취지에서, 본 논문은 성공적 노화, 나아가 삶의 질을 향상시키기 위해 우리 스스로가 어떤 노력을 기울일 수 있는지에 관한 방안을 제시하는 인지신경과학적 연구의 좋은 사례를 제공한다.

참고문헌

- [1] 통계청 (2012), 2012 고령자통계, <http://kostat.go.kr>
- [2] 박태진 (2004), 노화의 인지신경기전, **한국심리학회지: 실험**, 16, 317-336.
- [3] 정혜선 (2004), 노화가 학습 능력에 미치는 영향, **한국심리학회지: 실험**, 16, 435-450.
- [4] Sheikh, J. I., & Yesavage, J. A. (1986), Geriatric Depression Scale (DGS): Recent Evidence and Development of a Shorter Version, In *Clinical Gerontology: A Guide to Assessment and Intervention* (pp.165-173), New York: The Haworth Press.
- [5] Stern, Y., Sano, M., Paulsen, J., & Mayeux, R. (1987), Modified Mini-mental State Examination: Validity and Reliability, *Neurology*, 37, 179.
- [6] Raz, N., Gunning, F. M., Head, D., Dupuis, J. H., McQuain, J., Briggs, S. D., Loken, W. J., Thornton, A. E., & Acker, J. D. (1997), Selective Aging of the Human Cerebral Cortex Observed In Vivo: Differential Vulnerability of the Prefrontal Gray Matter, *Cerebral Cortex*, 7, 268-282.
- [7] Raz, N. (2000), Aging of the Brain and Its Impact on Cognitive Performance: Integration of Structural and Functional Findings, In F. I. M. Craik, T. A. Salthouse (Eds.), *Handbook of Aging and Cognition II* (pp.1-90), Mahwah, NJ: Erlbaum.
- [8] Raz, N. (2004a), The Aging Brain Observed In Vivo: Differential Changes and Their Modifiers, In R. Cabeza, L. Nyberg, D. C. Park (Eds.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (pp.17-55), New York: Oxford University Press.
- [9] Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Williamson, A., Dahle, C., Gerstorff, D. & Acker, J. D. (2005), Regional Brain Changes in Aging Healthy Adults: General Trends, Individual Differences and Modifiers, *Cerebral Cortex*, 15, 1676-1689.
- [10] Salat, D. H., Tuch, D. S., Hevelone, N. D., Fischl, B., Corkin, S., Rosas, H. D., Dale, A. M. (2005), Age-related Changes in Prefrontal White Matter Measured by Diffusion Tensor Imaging, *Annals of New York Academy Sciences*, 1064, 37-49.
- [11] Weis, S., Kimbacher, M., Wenger, E., & Neuhold, A. (1993), Morphometric Analysis

- of the Corpus Callosum Using MR: Correlation of Measurements with Aging in Healthy Individuals, *American Journal of Neuroradiology*, 14, 637-645.
- [12] Raz, N., Rodrigue, K. M., Head, D., Kennedy, K. M., & Acker, J. D. (2004b), Differential Aging of the Medial Temporal Lobe: A Study of a Five-year Change, *Neurology*, 62, 433-438.
- [13] Raz, N., Gunning-Dixon, F., Head, D., Rodrigue, K. M., Williamson, A., & Acker, J. D. (2004c), Aging, Sexual dimorphism, and Hemispheric Asymmetry of the Cerebral Cortex: Replicability of Regional Differences in Volume, *Neurobiology of Aging*, 25, 377-396.
- [14] Cabeza, R., Grady, C. L., Nyberg, L., McIntosh, A. R., Tulving, E., Kapur, S., Jennings, J. M., Houle, S., & Craik, F. I. M. (1997), Age-related Differences in Neural Activity during Memory Encoding and Retrieval: A Positron Emission Tomography Study, *Journal of Neuroscience*, 17, 391-400.
- [15] Cabeza, R. (2002), Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults: The HAROLD Model, *Psychology and Aging*, 17, 85-100.
- [16] Reuter-Lorenz, P. A., Jonides, J., Smith, E., Hartley, A., Miller, A., Marshuetz, C., & Keoppe, R. (2000), Age Differences in the Frontal Lateralization of Verbal and Spatial Working Memory Revealed by PET, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 174-187.
- [17] Reuter-Lorenz, P. A., & Cappell, K. A. (2008), Neurocognitive Aging and the Compensation Hypothesis, *Current Directions in Psychological Science*, 17, 177-182.
- [18] Cappell, K. A., Gmeindi, L., & Reuter-Lorenz, P. A. (2010). Age Differences in Prefrontal Recruitment during Verbal Working Memory Maintenance Depend on Memory Load, *Cortex*, 46, 462-473.
- [19] Schneider-Garces, N., Gordon, B. A., Brumback-Peltz, C. R., Shin, E., Lee, Y., Sutton, B., Maclin, E., Gratton, G., & Fabiani, M. (2010), Span, CRUNCH, and beyond: Working Memory Capacity and the Aging Brain, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 655-669.
- [20] Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1994), Sensory Functioning and Intelligence in Old Age: A Strong Connection, *Psychology and Aging*, 9, 339-355.

- [21] Baltes, P. B., & Lindenberger, U. (1997), Emergence of a Powerful Connection between Sensory and Cognitive Functions across the Adult Life Span: A New Window to the Study of Cognitive Aging? *Psychology and Aging*, 12, 12-21.
- [22] Park, D. C., Polk, T. A., Park, R., Minear, M., Savage, A., Smith, M. R. (2004), Aging Reduces Neural Specialization in Ventral Visual Cortex, *Proceedings of National Academy of Science*, 101, 13091-13095.
- [23] Park, J., Carp, J., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., Bischof, G. N., Huang, C.-M., Rieck, J. R., Polk, T. A., & Park, D. C. (2012), Neural Broadening or Neural Attenuation? Investigating Age-related Dedifferentiation in the Face Network in a Large Lifespan Sample, *The Journal of Neuroscience*, 32(6), 2154-2158.
- [24] Payer, D., Marshuetz, C., Sutton, B., Hebrank, A., Welsh, R. C., Park, D. C. (2006), Decreased Neural Specialization in Old Adults on Working Memory Task, *NeuroReport*, 17, 487-491.
- [25] Kanwisher, N., Chun, M. M., McDermott, J., & Ledden, P. J. (1996), Functional Imaging of Human Visual Cognition, *Cognitive Brain Research*, 5, 55-67.
- [26] Epstein, R., & Kanwisher, N. (1998), A Cortical Representation of the Local Visual Environment, *Nature*, 392, 598-601.
- [27] McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003), The Visual Word Form Area: Expertise for Reading in the Fusiform Gyrus, *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 293-299.
- [28] Park, D. C., Lautenschlager, G., Hedden, T., Davidson, M. S., & Smith, P. K. (2002), Models of Visuospatial and Verbal Memory across the Adult Life Span, *Psychology and Aging*, 17, 299-320.
- [29] Salthouse, T. A. (1996), The Processing-speed Theory of Adult Age Differences in Cognition, *Psychological Review*, 103, 403-428.
- [30] Fabiani, M., Low, K. A., Wee, E., Sable, J. J., & Gratton, G. (2006), Reduced Suppression or Labile Memory? Mechanisms of Inefficient Filtering of Irrelevant Information in Older Adults, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 637-350.
- [31] Fabiani, M., & Gratton, G. (2009), The Assessment of Cognitive Efficiency and Brain Plasticity in Old Age, In W. Chodzko-Zajko, A. F. Kramer, W. Spirduso, & L. Poon

(Eds.), *Aging, Exercise, and Cognition: Volume III. Enhancing Cognitive and Brain Plasticity of Older Adults*. Human Kinetics: Champaign, IL, USA.

- [32] Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988), Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View, In G. H. Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 22, pp.193-225). New York: Academic Press.
- [33] Hasher L., Stoltzfus, E. R., Zacks, R. T., & Rypma, B. (1991), Age and inhibition, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 163-169.
- [34] Naveh-Benjamin, M. (2000), Adult age differences in memory performance: Test of an Associative Deficit Hypothesis, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26, 1170-1187.
- [35] West, R. (2004), The Effects of Aging on Controlled Attention and Conflict Processing in the Stroop Task, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 103-113.
- [36] Light, L. L., Prull, M. W., La Voie, D. J., Healy, M. R. (2000), Dual-process Theories of Memory in Old Age, In Perfect T. J., Maylor, E. A. (Eds.), *Models of Cognitive Aging* (pp.238-300). New York: Oxford University Press.
- [37] Konkel, A., & Cohen, N. J. (2009), Relational Memory and the Hippocampus: Representations and Methods, *Frontiers in Neuroscience*, 3, 166-174.
- [38] Dennins, N. A., Hayes, S. M., Prince, S. E., Madden, D. J., Huettel, S. A., & Cabeza, R. (2008), Effects of Aging on the Neural Correlates of Successful Item and Source Memory Encoding, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 34, 791-808.
- [39] Yonelinas, A. P., Widaman, K., Mungas, D., Reed, B., Weiner, M. W., Chui, H. C. (2007), Memory in the Aging Brain: Doubly Dissociating the Contribution of the Hippocampus and Entorhinal Cortex, *Hippocampus*, 17, 1134-1140.
- [40] Daselaar, S. M., Fleck, M. S., Dobbins, I. G., Madden, D. J., & Cabeza, R. (2006), Effects of Healthy Aging on Hippocampal and Rhinal Memory Functions: An Event-related fMRI study, *Cerebral Cortex*, 16, 1771-1782.
- [41] Grady, C. L., McIntosh, A. R., & Craik, F. I. M. (2002), Age-related Differences in the Functional Connectivity of the Hippocampus during Memory Encoding, *Hippocampus*,

13, 572-285.

- [42] Erickson, K. L., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S., White, S. M., Wojcicki, T. R., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2009), Aerobic Fitness Is Associated with Hippocampal Volume in Elderly Humans, *Hippocampus*, 19, 1030-1039.
- [43] Shin, E., Brumback-Peltz, C., Gordon, B. A., McAuley, E., Gratton, G., & Fabiani, M. (2012), The Effects of Aging and physical Fitness on Working Memory Capacity, *The Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, 24, 107-126.
- [44] Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., Elavsky, S., Marquez, D. X., Hu, L., Kramer, A. F. (2006), Aerobic Exercise Training Increases Brain Volume in Aging Humans, *Journal of Gerontology: MEDICAL SCIENCES*, 61A, 1166-1170.
- [45] Erickson, K. I., Voss, M., Prakash, R., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J., Heo, S., Alves, H., White, S., Wojcicki, T., Mailey, E., Viera, V., Martin, S., Pence, B., Woods, J., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2011), Exercise Training Increase Size of Hippocampus and Improves Memory, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 3017-3022.
- [46] Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., Webb, A., Jerome, G. J., Marquez, D. X., & Elavsky, S. (2004), Cardiovascular Fitness, Cortical Plasticity, and Aging, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 3316-3321.
- [47] Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S., Alves, H., Heo, S., Szabo, A. M., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., Gothe, N., Olson, E. A., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2010), Plasticity of Brain Networks in a Randomized Intervention Trial of Exercise Training in Older Adults, *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 1-17.
- [48] Themanson, J. R., & Hillman, C. H. (2006), Cardiorespiratory Fitness and Acute Aerobic Exercise Effects on Neuroelectric and Behavioral Measures of Action Monitoring, *Neuroscience*, 141, 757-767.

- [49] Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., Blanke, L. (1991), Effects of Crossmodal Divided Attention on Late ERP Components: II. Error Processing in Choice Reaction Tasks, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, 447-455.
- [50] Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. J., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993), A Neural System for Error Detection and Compensation, *Psychological Science*, 4, 385-390.
- [51] Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994), Localization of a Neural System for Error Detection and Compensation, *Psychological Science*, 5, 303-305.
- [52] Miltner, W. H. R., Lemke, U., Weiss, T., Holroyd, C., Scheffers, M. K., Coles, M. G. H. (2003), Implementation of Error-processing in the Human Anterior Cingulate Cortex: A Source Analysis of the Magnetic Equivalent of the Error-related Negativity, *Biological Psychology*, 64, 157-166.
- [53] van Veen, V., & Carter, C. S. (2002), The Timing of Action-monitoring Processes in the Anterior Cingulate Cortex, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.
- [54] Cotman, C. W., & Berchtold, N. C. (2002), Exercise: A Behavioral Intervention to Enhance Brain Health and Plasticity, *Trends in Neurosciences*, 25, 295-301.
- [55] Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., Sloan, R., Gage, F. H., Brown, T. R., & Small, S. A. (2007), An In Vivo Correlate of Exercise-induced Neurogenesis in the Adult Dentate Gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 5638-5643.
- [56] van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999a), Running Enhances Neurogenesis, Learning, and Long-term Potentiation in Mice, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96, 13427-13431.
- [57] van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. (1999b), Running Increases Cell Proliferation and Neurogenesis in the Adult Mouse Dentate Gyrus, *Nature Neuroscience*, 2, 266-270.
- [58] van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005), Exercise Enhances Learning and Hippocampal Neurogenesis in Aged Mice, *Journal of Neuroscience*, 25, 8680-8685.
- [59] Louissaint, A., Jr., Rao, S., Leventhal, C., & Goldman, S. A. (2002), Coordinated

Interaction of Neurogenesis and Angiogenesis in the Adult Songbird Brain, *Neuron*, 34, 945-960.

- [60] Vaynman, S., Ying, Z., Gomez-Pinilla, F. (2004), Hippocampal BDNF Mediates the Efficacy of Exercise on Synaptic Plasticity and Cognition, *European Journal of Neuroscience*, 20, 2580-2590.

1 차원고접수 : 2013. 1. 24

2 차원고접수 : 2013. 3. 18

최종게재승인 : 2013. 3. 21

(Abstract)

**Age-related neurocognitive changes and
exercise-induced benefits:
A review of cognitive neuroscientific research**

Eunsam Shin

The Center for Cognitive Science, Yonsei University

The elderly population continues to increase in Korea and there has been a growing interest in understanding normal aging. In response to this public interest, the present paper reviewed human aging research focusing on recently published neuroimaging studies. For the first half of the paper, I reviewed the effects of aging on the brain and cognition. In normal aging, structural changes in the brain include atrophy and volume reduction in the prefrontal and temporal cortices. Functional changes are exhibited in the form of overactivation of the brain. Moreover, age-related cognitive decline is particularly observed in inhibition and memory, which are also associated with the age-related structural changes in the brain. For the second half of the paper, I introduced physical exercise studies showing that exercise played a protective role in the age-related neurocognitive decline. More specifically, engaging in physical exercise (particularly, aerobic exercise) for a relatively long period of time (e. g., > 6 mon.) protected older adults from volume loss in the prefrontal cortex and the hippocampus, and induced better inhibition and memory. These exercise-induced benefits appear to be associated with changes in neuronal levels, indicating that the aging brain is still plastic and this plasticity can be enhanced by physical exercise.

Key words : normal aging, prefrontal cortex, hippocampus, exercise, neural plasticity

수정

‘노화 관련 뇌인지 변화와 운동의 긍정적 영향: 인지신경과학적 연구 개관(신은삼, 24권 1호, 1~23쪽)’ 논문의 사사 정보가 누락되어 아래와 같이 추가합니다.

* 본 논문은 2011년 정부재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음. (NRF-2011-354-H00011)