

운동이 청소년의 정신건강, 뇌 구조 및 학습능력에 미치는 영향

The roles of exercise in ameliorating mental health, brain structure and academic achievement during adolescence

구정훈(한국체육대학교 교수) · 전유정(한국체육대학교 교수) · 장용철*(한국체육대학교 교수)

Jung-Hoon Koo *Korea National Sport Univ* · Yoojeong Jeon* *Korea National Sport Univ* · Yongchul Jang* *Korea National Sport Univ*

요약

청소년기의 신체 활동 감소와 좌식 생활의 증가는 세계적인 문제로 발전되고 있다. 특히 우리나라의 경우 운동부족으로 분류된 학생의 비율이 세계적으로 심각한 것으로 나타났다. 운동은 청소년기의 뇌의 성장과 발달을 통해 뇌 기능을 향상시키고, 이는 성인과 노인으로 이어지는 뇌 건강에 중요한 요인이다. 운동은 청소년의 신체 능력을 향상시키고 심혈관계질환 및 비만, 제 2형 당뇨병 등과 같은 대사성 질환의 발생을 감소시키는 것으로 보고되고 있다. 또한 규칙적인 신체활동은 청소년기의 불안·우울과 같은 정신질환을 완화하는 효율적인 방법으로 권장되고 있다. 특히 유산소 운동은 청소년기의 뇌의 구조적 변화와 학습 능력은 물론 기억력, 주의력, 계획, 문제 해결 능력을 향상시키는 운동 방법으로 제시하고 있다. 따라서 본 고찰은 운동이 청소년의 정신건강, 뇌 구조 및 학습능력에 미치는 주요기전에 대한 근거를 제공할 것이다.

Abstract

The decrease in physical activity and the increase in sedentary life in adolescence are developing into a global problem. In Korea, the proportion of students classified as lack of exercise was found to be serious worldwide. Exercise improves brain function through brain growth and development in adolescence, which is an important factor in brain health leading to adults and the elderly. Exercise has been reported to improve adolescents' physical abilities and reduce the incidence of cardiovascular diseases and metabolic diseases such as obesity and type 2 diabetes. In addition, regular physical exercise is recommended as an efficient way to ameliorate the mental diseases such as anxiety and depression in adolescence. In particular, aerobic exercise is suggested that improves memory, attention, planning, and problem-solving skills as well as structural changes and learning ability of the brain in adolescence. Therefore, in this review, we focused on the main mechanisms of exercise-mediated adolescents' mental health, brain structure, and academic achievement.

Key words : adolescence, physical exercise, mental health, academic, brain structure, achievement

* yjang28@knsu.ac.kr

I. 서론

청소년기는 아동기에서 성인기로 신체적, 정신적으로 성장·발전하는 시기이다. 2021년 청소년 통계에 의하면 청소년기의 스트레스와 우울감은 점차 낮아지는 추세이지만, 2020년 중·고등학생의 34.2%는 평상시에도 스트레스를 느끼며, 25.2%는 최근 1년간 우울감을 경험한 것으로 보고하여 여전히 높은 수치가 나타났다(통계청, 2021). 규칙적인 신체활동은 신체기관의 생리적 기능향상과 스트레스와 우울증을 개선시키는 효과적인 방법이다. 세계보건기구는 어린이와 청소년(5~17세) 시기에 최소 하루 60분 이상의 신체활동을 실행해야 한다고 제시하면서 운동의 중요성을 강조하였다(WHO, 2020). 하지만, 전 세계적으로 81%의 어린이와 청소년들이 이를 만족하지 못하고 있으며, 특히 한국은 운동 부족으로 분류된 학생의 비율이 94.2%(146개국 중 세계 1위)로 운동부족이 심각한 것으로 나타났다(WHO, 2020). Sacker and Cable (2006)은 어린이와 청소년시기의 운동부족은 성인으로 이어질 수 있기 때문에 어린시절 활동적인 행동은 성인기에 더 좋은 건강상태를 나타낼 수 있다고 제시하였다.

여러 가지 운동 형태(유산소, 저항성, 복합(유산소+저항성)) 가운데 유산소 운동은 심폐기능을 향상시키는 효과적인 운동 방법이며, 걷기, 달리기, 수영 등과 같은 운동은 근육과 세포에 효과적으로 산소를 공급하여 에너지 대사를 증가시킨다(Pinckard, Baskin, & Stanford, 2019). 특히, 심혈관계질환 및 비만, 제 2형 당뇨병과 같은 대사성 질환의 발생을 감소시키는 것으로 보고되고 있다(Tian & Meng, 2019; Chiu et al., 2017; Kirwan, Sacks, & Nieuwoudt, 2017). 또한 유산소 운동은 뇌의 기억력과 학습능력에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며(Stillman, Esteban -Cornejo, Brown, Bender, & Erickson, 2020), 동물 연구를 통해 유산소 운동은 뇌 신경세포의 증식(cell proliferation), 생존(survival) 및 분화(differentiation)를 증가시키는 것을 확인하였다(Kobilo, Yuan, & van Praag, 2011). 특히 유산소 운동은 insulin-like growth factor-1 (IGF-1), brain-derived neurotrophic factor (BDNF)와 Vascular endothelial growth factor(VEGF) 같은 신경영양인자의 증가로 인해 새로운 신경세포의 생성과 신경전달(neural transmission)이 가속화되어 기억능력이 향상된다고 보고되고 있다(Maass et al. 2016).

규칙적인 신체활동은 청소년시기의 우울감을 감소하는 것으로 알려져 있으며, Philippot et al. (2022)은 52명의 청소년을 대상으로 주 4회 6주간 신체활동을 수행한 결과 운동그룹에서 불안과 우울감을 나타내는 점수(Hospital Anxiety Depression Scale (HADS))의 감소를 보고하였다. 또한, Herting & Chu (2017)은 높은 신체활동의 수준은 학습능력에 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였으며, Fox, Barr-Anderson, Neumark-Sztainer, & Wall. (2010)은 중·고등학생을 대상으로 스포츠 활동 참여가 높은 학생일수록 더 좋은 성적을 나타낸다고 보고하였다. 특히, 운동은 학습능력 뿐만 아니라 기억력, 집중력, 계획, 문제 해결, 작업기억 능력을 증가시킨다고 보고하였다(Dishman, Dowda, McIver, Saunders, & Pate, 2017).

운동은 청소년, 성인등과 같이 다양한 연령에서 뇌 기능을 향상

시키는 것으로 보고되고 있으나, 뇌의 성장과 발달이 이루어지는 청소년기의 운동은 다른 연령 즉 성인과 노인보다 신경세포의 신호전달을 촉진시켜 뇌의 성숙(maturation)을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Spear, 2013). 이러한 관점에서 청소년 시기 규칙적인 신체활동으로 인한 뇌 기능 향상은 정신건강과 학습능력 향상뿐만 아니라 성인과 노인으로 이어지는 뇌 건강에 중요한 요인이 될 것이다.

많은 선행 연구를 통해 신체활동은 청소년시기 뇌 건강을 향상시킨다고 보고되고 있다. 따라서 본 고찰은 운동이 청소년기의 정신건강, 뇌 구조(기능) 및 학습능력에 미치는 영향을 제시하는데 그 목적이 있다.

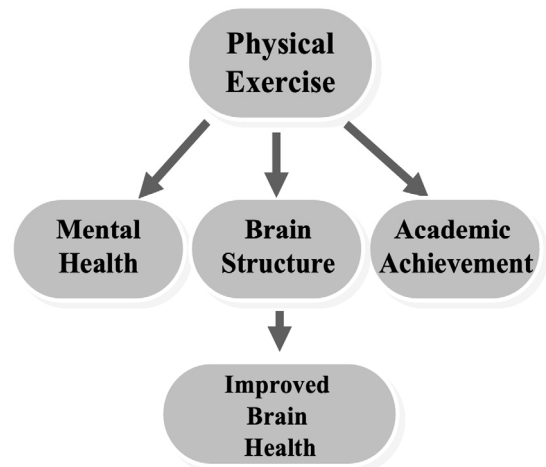


Fig.1. The mechanisms of physical exercise-induced brain health of adolescents

II. 운동과 정신건강

세계보건기구는 전 세계적으로 청소년(10~19세)의 25%가 정신건강문제를 경험하고 있다고 보고하면서 그 심각성을 강조하였다(WHO, 2020). 정신건강 문제는 청소년의 신체건강에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(Carney et al. 2021), Eapen & John, (2011)은 정신건강 문제를 겪는 청소년에서 체중증가, 비만과 같은 대사성질환에 영향을 주는 것으로 보고하였다. 또한 흡연, 알콜, 영양불균형, 신체활동의 부족 등의 위험요소를 증가시키는 것으로 나타났다(Carney et al. 2021).

운동은 우울감, 불안, 주의력 결핍/과잉행동 장애(Attention Deficit /Hyperactivity Disorder)등을 예방 혹은 치료하는 부작용이 없는 비약물적방법이다. 최근 35,000명의 학생을 메타 분석한 결과 규칙적인 신체활동은 청소년들의 우울감과 불안감을 해소 시키는 것으로 보고하였다(Biddle & Asare, 2011). Rothon et al. (2010)은 주당 1시간의 신체활동을 늘릴 경우 우울증 유병률을 8% 감소시킬 수 있을 것으로 제시하였으며, 또한 신체활동은 청소년들의 삶의 만족도가 높아져 정신건강에 도움이 되며(Pascoe & Parker, 2019), 성인기의 우울증과 정신질환 유병률을 감소시키는 것으로 보고되

고 있다(Firth, Schuch, & Mittal, 2020). Eime, Young, Harvey, Charity, & Payne. (2013)은 청소년기의 운동은 사회성 강화, 자아 인식(self-perception), 자기 효능감(self-efficacy)을 증가시키며, 단체 스포츠가 인간관계와 심리적 건강에 효과적인 운동형태라고 제시하였다.

Firth, Schuch, & Mittal, (2020)은 신체활동이 높은 학생일수록 우수한 정신건강 상태가 나타난다고 보고하고 있으며, 특히 중·고강도의 유산소 운동은 우울감, 불안을 해소하는 효과적인 운동 방법으로 제시하고 있다(Nyström, Neely, Hassmén, & Carlbring, 2015). Jarbin, Höglund, Skarphedinsson, & Bremander. (2021)은 32명의 우울증을 겪고 있는 청소년을 대상으로 최대심박수의 70%이상의 운동 강도로 14주간 유산소 운동을 실시한 결과 우울감과 불안의 감소를 보고하였고, Lee, Boaf, Greenham, & Longmuir, (2019)는 정신질환을 가지고 있는 청소년을 대상으로 고강도 인터벌 운동은 집중력 향상과 충동을 억제하는 것으로 나타났다.

이처럼 청소년과 정신건강에 관한 많은 선행연구들은 중·고강도의 유산소 운동 혹은 고강도 인터벌 운동에 대한 연구들이 많이 보고하고 있으며(Pascoe & Parker, 2019), 반면 요가, 걷기 등의 저강도 운동이 학생의 정신건강에 미치는 연구는 매우 제한적이다. Philippot et al. (2019)은 27명의 학생(9-11살)을 대상으로 주 4회 5주간의 저·중강도 운동과 고강도 운동을 비교한 결과 저·중강도 운동그룹에서 불안증상과 우울감이 감소하였고, 반면 고강도 운동 그룹은 차이가 나타나지 않은 상반된 연구도 보고되었다. 하지만 이 연구는 적은 대상자의 수, 나이(아동), 학생의 신체적 수준을 고려하지 않은 점의 제한점이 있다. 그럼에도 불구하고 Conn. (2010)은 고강도 유산소 운동 뿐만 아니라 유연성 운동이나 저항성 운동 역시 우울증을 개선시키는 효과적인 운동방법으로 제시하였다. 결과적으로 운동은 청소년의 불안, 우울감, 스트레스 등과 같은 정신건강을 개선 시켜주는 것으로 생각된다.

우울장애가 나타나면 청소년의 뇌의 전전두엽의 발달장애와 혈류량의 감소가 나타난다(Davey, Yücel, & Allen, 2008; Luciw, Toma, Goldstein, & MacIntosh, 2021). 운동이 청소년의 정신건강에 미치는 긍정적인 기전에 대해 살펴보면, 운동은 많은 혈류량을 뇌로 전달하여 대사를 증가 시키는 것으로 알려져 있다. 특히 신경성장인자(nerve growth factor)를 증가시키며, 대표적으로 신경세포의 성장과 발달에 중요한 역할을 하는 BDNF와 혈관내피성장인자인 VEGF를 증가시켜 새로운 혈관을 생성하여 신경을 보호하며, 시냅스 가소성과 새로운 신경세포의 생성(neurogenesis)을 촉진시켜 우울장애를 개선시키는 것으로 보고하였다(Bolijn & Lucassen, 2015). 또한 운동은 신경세포의 미토콘드리아의 기능향상, 산화스트레스 및 염증관련인자의 개선을 통해 항우울효과를 나타내는 것으로 보고하였다(Khorjahani, Peeri, & Azarbayjani, 2020).

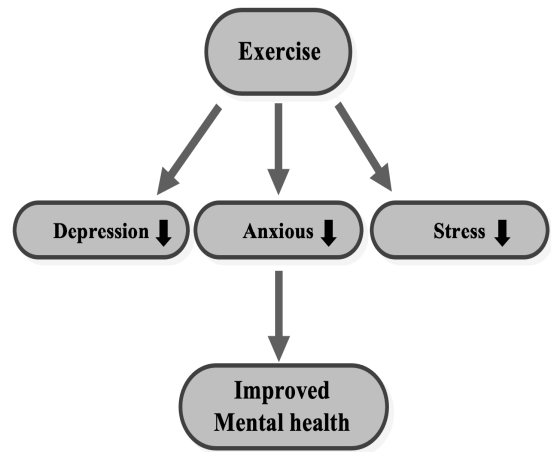


Fig.2. The mechanisms of physical exercise-induced mental health of adolescents

III. 운동과 뇌 구조

규칙적인 신체활동은 목표를 수행하기 위해 자발적으로 생각하고 행동하는 자기조절(self-regulation)을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Castonguay, Miquelon, & Boudreau, 2018). 출생 후 뇌는 완전히 성숙되어있지 않은 상태이며, 어린이, 청소년 시기까지 감정과 행동을 조절하는 뇌의 부위는 발달하기 시작한다. 뇌의 가장 큰 부분을 차지하는 대뇌피질(cortical regions)은 다양한 행동과 상황을 인식하는 감각운동(sensorimotor)과 대뇌피질 하의(subcortical)의 편도체(amygdala), 해마(hippocampus), 선조체(striatum)등과 같은 곳의 정보를 처리한다(Belcher et al. 2021).

규칙적인 신체활동은 청소년의 뇌의 구조와 기능을 변화시키는 것을 알려져 있으며, 두정골(parietal), 상측 측두엽(superior temporal), 후두부(occipital regions) 부위의 회색질(gray matter)을 증가시키며, 하측두피질(inferior temporal), 방추상회(fusiform gyrus) 부위의 백색질(white matter)을 증가시킨다(Belcher et al. 2021). 특히, 신체활동은 대뇌피질 하의 해마와 기저핵(basal ganglia)의 변화를 주며, 기억의 부호화(memory encoding)와 작업기억(working memory)을 향상시킨다(Chen, Zhu, Yan, & Yin. 2016). 해마와 기저핵은 백색질과 연결되어 행동, 사고, 운동기능, 감정조절, 시각조절(visual stimuli) 같은 자기조절을 증가시킨다(Etkin, Büchel, & Gross, 2015).

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging)은 전자기파를 측정하여 인체의 내부 상태를 2차원 또는 3차원으로 영상화 시키는 장치이다. 그로인해 자기공명영상은 신체활동이 뇌 구조(대뇌 피질(cortical)의 두께, 넓이, 피질과 피질하(subcortical)의 크기)에 미치는 영향을 구체화 또는 객관화 시킬 수 있다. Herting & Nagel. (2012)은 34명의 청소년(15-18세)을 대상으로 자기공명영상을 통해 최대산소섭취량이 높은 학생일수록 학습과 기억을 담당하는 뇌의 해마크기의 증가를 확인하였고, Herting, Keenan, & Nagel. (2016)은 신체활동이 높은 학생일수록 의사결정과 집행을 담당하는 전전

두엽 피질(prefrontal cortex), 우측 설상엽(right cuneus), 중간 페리캘칼린(medial pericalcarine), 좌측 췌기앞소엽(left precuneus)의 크기 증가를 보고하였다. Ross, Yau, & Convit. (2015)은 15-21세 사이의 79명의 비만학생과 51명의 일반학생 총 130명의 학생을 대상으로 최대산소섭취량이 높을수록 감정과 기억을 전두엽으로 전달시키는 안와전두엽(orbital frontal cortex)의 크기의 증가를 보고하였다.

또한 물 분자가 백색질의 관을 따라 얼마나 잘 이동하는지를 나타내는 분한 비등방도(fractional anisotropy (FA)) 값을 측정한 결과 신체활동이 많은 청소년일수록 분한 비등방도 값이 높게 나타났다. Kochunov et al. (2007)은 분한 비등방도가 높을수록 신경세포가 모여 있는 회색질의 두께가 증가하였고, Kantarci. (2014)은 분한 비등방도가 낮을수록 알츠하이머 질환과 같은 인지기능의 저해와 뇌의 해마부위의 위축(atrophy)이 나타날 수 있다고 보고하였다. 결과적으로 신체활동이 높을수록 백색질의 관을 따라 물 분자가 여러 방향으로 잘 이동하여 뇌 건강을 향상시키는 것으로 나타났다.

많은 선행연구를 바탕으로 운동은 뇌의 다양한 부위의 크기를 변화시키며, 이러한 결과는 다른 연령대(유아기, 성인기, 노년기)에도 비슷한 결과를 나타낸다. Chaddock et al. (2010)은 신체활동이 높을수록 9-10세의 어린이에서 해마의 부위의 증가를 보고하였고, Whiteman, Young, Budson, Stern, & Schon. (2016)은 18-30세의 성인에서 내후각피질(entorhinal cortex)과 설회(lingual gyrus)의 증가와 55세 이상에서 노년에도 해마부위의 증가를 보고하였다(Colcombe et al. (2006).

결과적으로 규칙적인 신체활동은 청소년의 뇌의 피질, 피질하부와 회색질, 백색질의 구조를 변화시켜 뇌 건강을 향상시키는 것으로 생각된다.

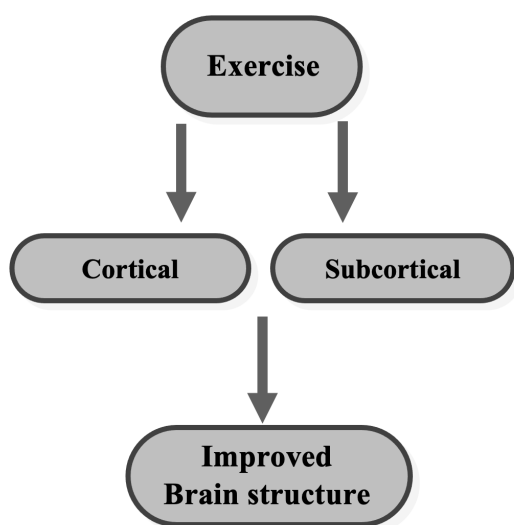


Fig.3. The mechanisms of physical exercise-induced brain structure of adolescents

IV. 운동과 학습능력

많은 선행연구들을 바탕으로 규칙적인 신체활동은 청소년의 학습능력과 인지기능을 향상시키는 것으로 보고되고 있다. 김정호과 정정욱(2012)은 우리나라 중·고등학생 72,399명을 대상으로 체육수업이 많을수록 학생들의 상위권 및 중상위권을 유지할 가능성이 높았으며, 다른 나라의 경우에도 Fox et al. (2012)은 4746명의 중·고등학생을 대상으로 학교의 체육수업과 팀 스포츠의 참여가 높을수록 높은 학업성취도(academic achievement)를 나타내었고, Zhang, Hong, Chen, & Liu. (2022)은 2633명의 어린이와 청소년(8-19세)을 대상으로 신체활동과 학업성취도를 분석한 결과 신체활동이 많을수록 학업성취도에 긍정적인 영향을 미쳤으며, 특히 중학교 여학생에게 큰 효과를 나타냈다.

신체활동은 학업능력 뿐만 아니라 인지능력(cognitive abilities)에도 영향을 미치는 것을 보고되고 있다. 규칙적인 신체활동은 집중, 문제해결, 계획, 작업기억, 억제능력(inhibitory control)등과 같은 자기의 행동을 조절 제어하는 종합 인지능력인 실행기능(executive functions)을 향상시키며(Diamond, 2013), 이러한 요인들은 학업능력 향상에 중요한 역할을 하는 것으로 보고하고 있다(Best, Miller, & Naglieri. 2011). Huang et al. (2015)은 525명의 청소년을 대상으로 유산소성 능력이 좋은 학생일수록 주위 간섭자극을 무시하고 집중하는 능력을 평가하는 플랭커 과제(flanker task)에 높은 점수를 나타냈고, Ross, Yau, & Convit. (2015)은 청소년을 대상으로 웨슬러기억검사(Wechsler Memory Scale)를 통해 인지능력을 테스트한 결과 최대산소섭취량이 높을수록 시공간작업기억(visual working memory)의 향상이 나타났다. 또한 Lee et al. (2014)은 91명의 청소년을 대상으로 최소 2달 이상 수영, 달리기, 트라이애슬론을 실시한 결과 비교 집단에 비해 학습과 인지적 유연성(cognitive flexibility)과 억제능력의 향상을 보고하였다. 특히 이러한 결과는 BDNF와 VEGF 같은 신경영양인자의 수준과 상관이 있는 것으로 보고하였다.

선행 연구를 통해 운동은 청소년의 인지 수준을 향상시키는 것으로 보고하고 있지만 인지 기능을 향상시키는 효과적인 운동 형태에 관한 연구는 매우 제한적이다. Ardoy et al. (2014)은 70명의 청소년을 대상으로 4개월간의 체육활동을 실시하여 어떠한 형태의 운동 강도와 빈도가 인지기능에 영향을 미치는지 확인 하였다. 그 결과 주 4회, 분당 120이상 심박수의 높은 운동강도가 주 2-4회, 낮은 운동강도보다 인지기능에 영향을 주는 것으로 나타났다. 하지만 Tarp et al. (2016)은 632명의 청소년(12-14세)을 대상으로 60분간 20주 동안 학교체육을 실시한 결과 인지기능과 학습능력에 차이가 나타나지 않았다. 이러한 상이한 결과는 운동 강도, 기간, 대상자의 특성(나이, 성별)에 따라 나타나는 것으로 보고하였다.

결과적으로 운동이 청소년의 학습능력과 인지력에 미치는 효과적이 운동 강도와 기간에 대해 추후 연구가 필요할 것으로 생각되나 선행연구들을 통해 고강도의 유산소 운동은 청소년의 학습능력과 인지기능을 향상시키는 것으로 생각된다.

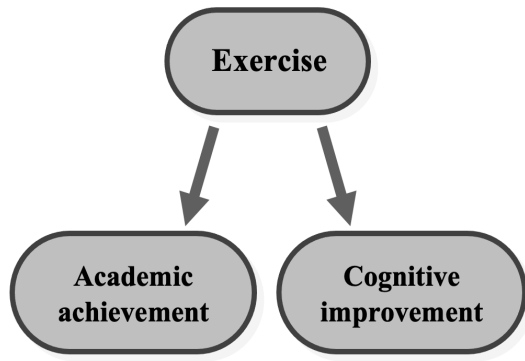


Fig.4. The mechanisms of physical exercise-induced academic achievement of adolescents

V. 결론 및 제언

운동은 청소년의 심폐기능 향상과 비만, 당뇨 등과 같은 대사성 질환을 예방하는 효과적인 방법이다. 특히 유산소 운동은 청소년의 정신건강, 뇌 구조 및 학습능력을 향상시키는 효과적인 방법이다. 하지만 아직까지 그 정확한 기전에 대한 연구는 부족한 실정이며, 향후 청소년에게 적합한 운동 강도와 시간에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

김정호, 정정옥(2012). 한국 청소년들의 체육수업과 신체활동 수준에 따른 정신건강 및 학업성적과의 관련성. 한국체육과학회지, 21(6). 533-570.

2021 청소년 통계(2021), 통계청

Arday, D. N., Fernández-Rodríguez, J. M., Jiménez-Pavón, D., Castillo, R., Ruiz, J. R., & Ortega, F. B. (2014). A physical education trial improves adolescents' cognitive performance and academic achievement: the EDUFIT study. *Scand J Med Sci Sports*, 24(1), e52-61.

Belcher, B. R., Zink, J., Azad, A., Campbell, C. E., Chakravarti, S. P., & Herting, M. M. (2021). The Roles of Physical Activity, Exercise, and Fitness in Promoting Resilience During Adolescence: Effects on Mental Well-Being and Brain Development. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging*, 6(2), 225-237.

Best, J. R., Miller, P. H., & Naglieri, J. A. (2011). Relations between Executive Function and Academic Achievement from Ages 5 to 17 in a Large, Representative National Sample. *Learn Individ Differ*, 21(4), 327-336.

Biddle, S. J., & Asare, M. (2011). Physical activity and mental health in children and adolescents: a review of reviews. *Br J Sports Med*, 45(11), 886-895.

Bolijn, S., & Lucassen, P. J. (2015). How the Body Talks to the Brain; Peripheral Mediators of Physical Activity-Induced Proliferation in the Adult Hippocampus. *Brain Plast*, 1(1), 5-27.

Carney, R., Firth, J., Pedley, R., Law, H., Parker, S., & Lovell, K. (2021). The clinical and behavioral cardiometabolic risk of children and young people on mental health inpatient units: A systematic review and meta-analysis. *Gen Hosp Psychiatry*, 70, 80-97.

Castonguay, A., Miquelon, P., & Boudreau, F. (2018). Self-regulation resources and physical activity participation among adults with type 2 diabetes. *Health Psychol Open*, 5(1), 2055102917750331.

Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., Vanpatter, M., & Kramer, A. F. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Res*, 1358, 172-183.

Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., & Kramer, A. F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 61(11), 1166-1170.

Conn, V. S. (2010). Depressive symptom outcomes of physical activity interventions: meta-analysis findings. *Ann Behav Med*, 39(2), 128-138.

Chiu, C. H., Ko, M. C., Wu, L. S., Yeh, D. P., Kan, N. W., Lee, P. F., & Ho, C. C. (2017). Benefits of different intensity of aerobic exercise in modulating body composition among obese young adults: a pilot randomized controlled trial. *Health Qual Life Outcomes*, 15(1), 168.

Davey, C. G., Yücel, M., & Allen, N. B. (2008). The emergence of depression in adolescence: development of the prefrontal cortex and the representation of reward. *Neurosci Biobehav Rev*, 32(1), 1-19.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annu Rev Psychol*, 64, 135-168.

Dishman, R. K., Dowda, M., McIver, K. L., Saunders, R. P., & Pate, R. R. (2017). Naturally-occurring changes in social-cognitive factors modify change in physical activity during early adolescence. *PLoS One*, 12(2), e0172040.

Eapen, V., & John, G. (2011). Weight gain and metabolic syndrome among young patients on antipsychotic medication: what

- do we know and where do we go? *Australas Psychiatry*, 19(3), 232-235.
- Etkin, A., Büchel, C., & Gross, J. J. (2015). The neural bases of emotion regulation. *Nat Rev Neurosci*, 16(11), 693-700.
- Firth, J., Schuch, F., & Mittal, V. A. (2020). Using exercise to protect physical and mental health in youth at risk for psychosis. *Res Psychother*, 23(1), 433.
- Fox, C. K., Barr-Anderson, D., Neumark-Sztainer, D., & Wall, M. (2010). Physical activity and sports team participation: associations with academic outcomes in middle school and high school students. *J Sch Health*, 80(1), 31-37.
- Herting, M. M., & Chu, X. (2017). Exercise, cognition, and the adolescent brain. *Birth Defects Res*, 109(20), 1672-1679.
- Herting, M. M., Keenan, M. F., & Nagel, B. J. (2016). Aerobic Fitness Linked to Cortical Brain Development in Adolescent Males: Preliminary Findings Suggest a Possible Role of BDNF Genotype. *Front Hum Neurosci*, 10, 327.
- Herting, M. M., & Nagel, B. J. (2012). Aerobic fitness relates to learning on a virtual Morris Water Task and hippocampal volume in adolescents. *Behav Brain Res*, 233(2), 517-525.
- Huang, T., Tarp, J., Domazet, S. L., Thorsen, A. K., Froberg, K., Andersen, L. B., & Bugge, A. (2015). Associations of Adiposity and Aerobic Fitness with Executive Function and Math Performance in Danish Adolescents. *J Pediatr*, 167(4), 810-815.
- Jarbin, H., Höglund, K., Skarphedinsson, G., & Bremander, A. (2021). Aerobic exercise for adolescent outpatients with persistent major depression: Feasibility and acceptability of moderate to vigorous group exercise in a clinically referred sample. *Clin Child Psychol Psychiatry*, 26(4), 954-967.
- Kantarci, K. (2014). Fractional anisotropy of the fornix and hippocampal atrophy in Alzheimer's disease. *Front Aging Neurosci*, 6, 316.
- Khorjahani, A., Peeri, M., & Azarbayjani, M. A. (2020). The Therapeutic Effect of Exercise on Anxiety and Bowel Oxidative Stress in the Maternal Separation Animal Model. *Basic Clin Neurosci*, 11(1), 69-78.
- Kirwan, J. P., Sacks, J., & Nieuwoudt, S. (2017). The essential role of exercise in the management of type 2 diabetes. *Cleve Clin J Med*, 84(7 Suppl 1), S15-S21.
- Kobilo, T., Yuan, C., & van Praag, H. (2011). Endurance factors improve hippocampal neurogenesis and spatial memory in mice. *Learn Mem*, 18(2), 103-107.
- Kochunov, P., Thompson, P. M., Lancaster, J. L., Bartzokis, G., Smith, S., Coyle, T. & Fox, P. T. (2007). Relationship between white matter fractional anisotropy and other indices of cerebral health in normal aging: tract-based spatial statistics study of aging. *Neuroimage*, 35(2), 478-487.
- Lee, J. S., Boaf, A., Greenham, S., & Longmuir, P. E. (2019). The effect of high-intensity interval training on inhibitory control in adolescents hospitalized for a mental illness. *Mental Health and Physical Activity*, 17, 100298.
- Luciw, N. J., Toma, S., Goldstein, B. I., & MacIntosh, B. J. (2021). Correspondence between patterns of cerebral blood flow and structure in adolescents with and without bipolar disorder. *J Cereb Blood Flow Metab*, 41(8), 1988-1999.
- Maass, A., Düzel, S., Brigadski, T., Goerke, M., Becke, A., Sobieray, U. & Düzel, E. (2016). Relationships of peripheral IGF-1, VEGF and BDNF levels to exercise-related changes in memory, hippocampal perfusion and volumes in older adults. *Neuroimage*, 131, 142-154.
- Nyström, M. B., Neely, G., Hassmén, P., & Carlbring, P. (2015). Treating Major Depression with Physical Activity: A Systematic Overview with Recommendations. *Cogn Behav Ther*, 44(4), 341-352.
- Pascoe, M. C., & Parker, A. G. (2019). Physical activity and exercise as a universal depression prevention in young people: A narrative review. *Early Interv Psychiatry*, 13(4), 733-739.
- Philippot, A., Dubois, V., Lambrechts, K., Grogna, D., Robert, A., Jonckheer, U. & De Volder, A. G. (2022). Impact of physical exercise on depression and anxiety in adolescent inpatients: A randomized controlled trial. *J Affect Disord*, 301, 145-153.
- Philippot, A., Meerschaut, A., Danneaux, L., Smal, G., Bleyenheuft, Y., & De Volder, A. G. (2019). Impact of Physical Exercise on Symptoms of Depression and Anxiety in Pre -adolescents: A Pilot Randomized Trial. *Front Psychol*, 10, 1820.
- Pinckard, K., Baskin, K. K., & Stanford, K. I. (2019). Effects of Exercise to Improve Cardiovascular Health. *Front Cardiovasc Med*, 6, 69.
- Ross, N., Yau, P. L., & Convit, A. (2015). Obesity, fitness, and brain integrity in adolescence. *Appetite*, 93, 44-50.
- Sacker A, and Cable N.(2006). Do adolescent leisure-time physical activities foster health and well-being in adulthood? Evidence from two British birth cohorts. *Eur J Public Health*, 16(3):332-336.
- Spear, L. P. (2013). Adolescent neurodevelopment. *J Adolesc Health*, 52(2 Suppl 2), S7-13.
- Stillman, C. M., Esteban-Cornejo, I., Brown, B., Bender, C. M., &

-
- Erickson, K. I. (2020). Effects of Exercise on Brain and Cognition Across Age Groups and Health States. *Trends Neurosci*, 43(7), 533-543.
- Tian, D., & Meng, J. (2019). Exercise for Prevention and Relief of Cardiovascular Disease: Prognoses, Mechanisms, and Approaches. *Oxid Med Cell Longev*, 2019, 3756750.
- Whiteman, A. S., Young, D. E., Budson, A. E., Stern, C. E., & Schon, K. (2016). Entorhinal volume, aerobic fitness, and recognition memory in healthy young adults: A voxel-based morphometry study. *Neuroimage*, 126, 229-238.
- WHO, physical activity (2020). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>. Searched on Dec 23, 2020.
- WHO, Insufficiently active(2020). [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO-insufficiently-active-\(crude-estimate\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO-insufficiently-active-(crude-estimate)) Searched on Dec 23, 2020.
- Zhang, D., Hong, J., Chen, S., & Liu, Y. (2022). Associations of physical activity with academic achievement and academic burden in Chinese children and adolescents: do gender and school grade matter? *BMC Public Health*, 22(1), 1496.