

## 아동·청소년기 뇌 구조의 성숙과 이에 대한 지능의 영향\*

조 수 현<sup>†</sup>

중앙대학교 심리학과

뇌의 해부학적 구조에는 개인의 인지적 특성에 대한 많은 정보가 반영된다. 본 연구는 아동과 청소년을 대상으로 생물학적 성숙과 지능의 개인차와 관련된 대뇌의 구조적 변화와 특성을 관찰한 연구들을 종합적으로 개관하였다. 본 연구의 목적은 아동과 청소년의 뇌 구조의 발달 과정을 이해함과 동시에 개인의 지능에 따라 뇌 구조가 발달하는 패턴이 어떠한 차이가 있는지를 알아보는 것이다. 첫 번째 단원에서는 뇌의 구조적 특성에 대한 측정치들(전체 뇌의 크기나 부피, 영역 별 회백질/백질의 부피와 밀도, 피질 두께, 피질 표면적 등)과 부피소기반 계측법 및 구조적 공분산성 분석 등의 연구 방법들을 설명한다. 두 번째 단원에서는 생물학적 성숙에 따른 뇌 구조의 발달적 변화와 이에 영향을 미치는 변수와 조절 변인들(성별, 정신/발달 장애, 환경 요인, 영역 별 피질의 층 구조)을 설명한다. 세 번째 단원에서는 지능의 두정-전두 통합 이론을 소개하고 뇌 구조 및 뇌의 구조적 공분산성, 기능적 연결성의 발달적 변화가 지능의 개인차에 따라 어떻게 달라지는지에 대한 연구 결과들을 개관한다. 끝으로, 결론 부분에서는 현재까지 이루어진 연구들을 기반으로 하여 후속 연구의 방향과 이 분야 연구의 사회적 가치를 논한다.

주제어 : 뇌 구조, 발달, 성숙, 회백질, 피질 두께, 지능, 개인차, MRI, 아동, 청소년

\* 이 연구는 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2017RID1A1B03032115). 본 연구는 2017년도 중앙대학교 연구년 결과물로서 제출됨.

<sup>†</sup> 교신저자: 조수현, 중앙대학교 심리학과, (156-756) 서울시 동작구 흑석동 중앙대학교  
연구분야: 인지 신경 과학

Tel: 02-820-5816, E-mail: soohyun@cau.ac.kr

## 서 론

뇌가 클수록 지능이 높을까? 19세기 후반 Alfred Binet의 연구를 위시로 하여 뇌의 구조적 특성과 지능과의 관계성에 대한 관심은 꾸준히 이어지고 있다. 최근 뇌 영상 기술의 발달에 힘입어 뇌의 구조와 기능이 지능의 개인차와 어떠한 관계를 가지는지에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 현재까지 연구된 바에 의하면, 뇌가 클수록 지능이 높은지에 대한 답은 단순하지 않다. 뇌 구조와 지능 간의 관계는 개인의 연령, 성별, 질병 여부 및 세부 뇌 영역 등에 의해 달라진다는 것이 확인되고 있다.

본 연구는 생물학적 성숙(maturation)<sup>1)</sup>에 따라 아동·청소년의 뇌 구조가 어떻게 발달하는지, 아동·청소년의 지능의 개인차에 따라 뇌 구조의 발달이 어떻게 영향을 받는지에 대한 연구들을 개관하였다. 이를 통해 이 분야에서 현재까지 이루어진 성과들을 진단하고 이 분야의 발전에 필요한 후속 뇌 발달 연구의 주제와 방향을 제안하는 것이 본 개관 연구의 궁극적 목표이다. 연령이 증가함에 따른 아동·청소년기 뇌의 생물학적 성숙 과정을 정확하게 이해하기 위해서는 이에 영향을 미칠 수 있는 성별, 부모의 사회 경제적 지위, 지능 등 기타 변인들과는 독립적으로 연령의 영향을 분석하여야 한다. 마찬가지로, 뇌 발달에 대한 지능의 영향은 연령, 성별 등에 따라 달라질 수 있으므로, 지능의 독립적인 영향을 이해하기 위해서는 성별이나 연령대 별 자료 분석 혹은 성별, 연령 등의 기타 변인을 통제한 분석이 필요하다. 그러나, 한 연구 내에서 수많은 기타 요인들의 영향을 모두 배제하면서 독립변인의 영향을 분석하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구는 연령에 따른 뇌의 생물학적 성숙과 이에 대한 지능의 영향에 초점을 두어 논문들을 개관하였고, 뇌 구조의 발달에 영향을 미칠 수 있는 여러 기타 변인들에 대해서는 2.2와 3.5 단원에서 따로 다루었다.

본 연구는 다음과 같은 순서로 구성되었다. 먼저 첫 번째 단원에서는 뇌의 구조적 특성을 수치화하기 위한 측정치와 분석 방법들을 설명한다. 두 번째 단원에서는 생물학적 성숙에 따른 뇌 구조의 발달적 변화에 대한 연구들을 개관한다. 세 번째 단원에서는 지능의 개인차와 관련된 뇌 발달의 차이에 대한 연구 결과들을 개관한다. 본 논문은 신경과학을 전공하지 않은 독자들을 고려하여 뇌의 해부학적 구조와 관련한 기초 지식과 용어들을 그림과 함께 부록에 간단히 설명하였다.

본 개관 논문에 소개된 연구들은 웹 오브 사이언스(Web of Science)와 구글 스칼라(google scholar) 검색 엔진을 통해 'intelligence', 'brain structure', 'MRI', 'VBM', 'cortical thickness', 'structural covariance' 등의 단어들을 사용한 검색 결과에 포함된 연구들과 해당 연구들에서 인용되었던 논문들을 포함한다.

---

1) 생물학적인 성숙이란, 연령이 증가함에 따라 신체가 성장하고 신체를 구성하는 모든 생물학적 구조가 성인과 유사한 상태로 변화하는 발달 과정을 의미한다.

본 개관 연구는 아동과 청소년을 대상으로 성숙과 지능의 개인차에 따른 대뇌 피질(cerebral cortex)의 발달적 변화와 특성을 관찰한 연구들에 초점을 두고 있다. 본 연구의 목적은 아동·청소년기 뇌 구조의 발달 과정을 이해함과 동시에 지능의 개인차에 따라 뇌 구조가 발달하는 패턴이 어떻게 달라지는지를 알아보는 것이었다(따라서, 중년 이후 성인기 및 노년기 대상 연구, 뇌의 기능적 활동성 및 백질의 구조적 변화와 관련한 연구는 제한적으로 다룰 것이다).

아동과 청소년의 뇌 구조의 발달과 이에 대한 지능의 영향을 구체적으로 이해하게 되면, 궁극적으로 유전 혹은 질병의 영향으로 인한 비정상적인 뇌 발달을 조기에 진단하고, 아동과 청소년의 적성을 판단하고 진로를 설계하는 데에 도움이 될 것으로 기대된다.

## 뇌 구조에 대한 연구 방법

### 뇌 구조의 측정

뇌 구조에 대한 초기 연구들은 대부분 부피(volume)를 중심으로 이루어졌다. 대뇌의 부피는 회백질(gray matter)의 부피, 백질(white matter)의 부피, 뇌실(ventricle)의 부피 등으로 구분할 수 있다 [부록 그림 3]. 한편, 부피 대신 회백질이나 백질 등의 밀도(density)를 측정하기도 하는데 이는 특정 뇌 영역 내에서의 회백질이나 백질의 상대적인 비율을 나타낸다(Mechelli et al., 2005b). 그러나 밀도는, 부피나 이후에 언급될 피질의 두께 등 물리적 크기를 나타내는 측정치와 비교할 때 직관적으로 해석하기 어려운 지표라 할 수 있다(Sowell et al., 2004). 부피소-기반 계측법(voxel-based morphometry, VBM)은 뇌를 수많은 부피소(voxel)로 나누어 각 부피소 내에 속한 뇌 조직의 종류(회백질, 백질, 뇌척수액)를 확률적으로 판단하는 자동화된 방법으로서 회백질과 백질의 부피와 밀도를 이용한 뇌 구조 연구를 활성화시키는 데에 기여하였다.

그러나 최근 연구들에서는 VBM을 이용한 부피나 밀도 측정보다는 피질 두께(cortical thickness)나 표면적(surface area) 등 대뇌 피질의 특성을 측정하는 방법을 주로 사용하고 있다. 대뇌 피질이 전체 뉴런의 67%를 포함하고 있는 만큼, 피질의 구조적 특성은 대뇌 정보 처리의 용량(capacity)과 매우 밀접한 관련이 있을 것으로 예측되고 있다. 최근 연구들에서는 대뇌 피질의 부피를 결정하는 두 가지 요인인 피질의 두께와 피질의 표면적을 별도로 측정하여 각각의 발달적 변화를 추적하기 시작하였다(Raznahan, 2011). 대뇌 피질의 두께는 뇌 세포 층의 구조적 특성(cytoarchitecture)을 잘 반영하는 지표로 여겨지고 있으며(Deary et al., 2010), 약 1.5~4.5 mm 정도로 측정된다(Narr et al., 2005).

대뇌 피질은 전체적으로 주름이 잡혀있는데, 굴곡이 있는 표면에서 바깥으로 솟아오른 부분과 속으로 접혀 들어간 부분을 각기 이랑(gyrus, 한자어로 ‘회’라고도 함)과 고랑(sulcus, 한자어로 ‘구’라고도 함)이라 일컫는다[부록 그림 4]. 따라서, 피질의 표면적은 세부적으로 이랑 면적(gyrus area or convex hull area)과 고랑 면적(sulcus area)으로 구성된다. 피질이 주름 잡힌 정도[컨벌루션

(convolution)]를 측정하기 위한 방법의 하나로, 대뇌 피질의 표면적과 이랑 면적 간의 비율을 사용하기도 하는데 이를 이랑화 지표(gyrification index, 이하 GI)라 한다. GI와 유사한 지표로 고랑의 깊이(sulcal depth)를 측정한 연구도 있으며, 평균 곡률(absolute mean curvature)을 사용하여 피질의 컨벌루션을 계산한 연구들도 있다(Im et al., 2006; Luders et al., 2009; Yang et al., 2013). 뇌의 크기를 고정하였다고 가정할 때, 피질의 표면에 굴곡이 많을수록 피질의 표면적이 더 넓어진다. 피질의 표면적은 뇌 세포가 분포하는 공간을 의미하므로 정보처리 용량과 직결될 것으로 예측할 수 있다. 유인원(primates) 대상 연구에서도 더 진화된 종(species)일수록 대뇌 피질의 굴곡이 더 많다고 한다(Zilles 1989).

#### 뇌의 구조적 공분산성(structural covariance)

뇌 구조에 대한 최근 연구들은 개별 뇌 영역의 특성을 측정하는 데에서 한 걸음 더 나아가 여러 뇌 영역에서 나타나는 구조적 변화 간의 관계성 즉, 구조적 공분산성에 대한 분석 결과를 보고하고 있다(Mechelli et al., 2005a; Lerch et al., 2006). 뇌의 구조적 공분산성이란, 특정 뇌 영역의 개인차가 또 다른 뇌 영역의 개인차와 공분산성(covariance)을 지니는 현상을 말한다(Alexander-Bloch et al., 2013). 쉽게 말해, 구조적 공분산성은, 특정 뇌 영역의 구조적 특성(e.g., 피질 두께)이 다른 뇌 영역의 구조적 특성(e.g., 피질 두께)과 공분산성/상관관계가 있는지를 검증하는 분석을 말한다. Lerch 와 동료들(2006)은 이를 MACACC; Mapping Anatomical Correlations Across Cerebral Cortex라고 명명하였다(여기서 공분산과 상관관계의 통계적 계산법의 미세한 차이는 무시하기로 한다.). 예를 들어, 언어 산출(language production)과 관계된다고 알려진 브로카 영역(Broca's area; 부록 그림 5)의 피질 두께가 두꺼운 사람들은 대체로 언어 이해(language comprehension)와 관계되는 베르니케 영역(Wernicke's area; 부록 그림 5)의 피질 두께 또한 두껍다고 한다(Lerch et al., 2006). 또한, 해마(hippocampus)의 부피는 편도체(amygdala), 해마 주변 피질(parahippocampal cortex) 등 기억 체계 영역들의 부피와 공분산성을 보인다고 한다(Alexander-Bloch et al., 2013에서 재인용; 부록 그림 6). 뇌 영역 간의 구조적 공분산성이 생물학적으로 어떠한 기전에 의해 나타나는지는 아직 명확하게 밝혀지지 않았으나, 1) 해부학적 연결성, 2) 기능적 연결성, 3) 공통 유전 인자의 영향, 4) 공유된 신경 발달적 요인 등을 반영할 것으로 추측되고 있다.

생물학적 성숙(maturation)에 따른 뇌 구조의 변화

#### 뇌 부피의 발달

인간 두뇌의 부피는 일생에 걸쳐 역동적으로 변화한다고 알려져 있다. Hedman과 동료들(2012)의 개관 연구에 따르면, 아동이 성장함에 따라 두뇌의 부피는 꾸준히 증가하여 9세 정도에는 연간 1% 정도의 부피 증가를 보이다가 13세까지는 부피의 큰 변화가 없다가 그 이후부터는 부피

가 감소된다고 한다. 18-35세 사이의 초기 성인기 동안 다시 한 번 부피가 증가되거나 적어도 감소되지 않는 시기를 거친 이후 35세 이후부터 두뇌 부피가 점차 더 급격한 속도로 감소하기 시작하는데, 35세에는 연간 0.2% 정도로 부피가 감소하다가 60세 이후가 되면 연간 0.5% 정도의 속도로 부피가 급격히 감소한다고 한다(Hedman et al., 2012).

뇌 구조의 발달에 대한 초기 횡단 연구에서 대뇌 피질의 부피가 연령, 성별, 인지 능력 그리고 질병과 같은 요인과 매우 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 뇌의 전체적인 크기와 지능 간의 상관관계는 0.3 정도로 보고되었으나(McDaniel et al., 2005; Rushton & Ankney, 2009; Deary, Penke & Johnson, 2010), 연구자들은 뇌의 전체적인 크기로 뇌 기능의 우수성에 대한 판단을 내리는 것을 지양하고 있다(Geidd & Rapoport, 2010).

이후 종단(longitudinal) 연구에서 대뇌 회백질 부피의 발달이 거꾸로 된 U 자 형태의 곡선 추이를 따른다는 것이 밝혀졌다(Geidd et al. 1999). 따라서 대뇌 회백질이 발달하는 양상에 대한 정확한 자료를 얻기 위해서는 횡단 연구가 아닌 종단 연구의 중요성이 부각되었다.

Gogtay와 동료들(2004)은 13명의 아동, 청소년 그리고 청년(4-21세)을 대상으로 8-10년 동안 2년마다 종단적으로 뇌 구조를 촬영하였다. 그 결과 일차적인 감각-운동(sensorimotor) 피질 등 더 기본적인 기능을 담당하는 뇌 영역부터 피질의 부피가 감소하는 양상으로 뇌가 성숙하는 것이 관찰되었고, 더 고등한 기능을 담당하는 영역들은 더 늦은 시기에 두정엽으로부터 전두엽 방향으로 성숙이 진행되었다. 상 측두 피질(superior temporal cortex), 상-외측 전두 피질(dorso-lateral prefrontal cortex) 등 가장 고등한 기능을 담당하는 연합(association) 영역이 가장 늦게 성숙하였다. 전두엽 내에서는 일차 운동 피질(primary motor cortex)이 위치한 전-중심 이랑(pre-central gyrus)의 회백질 부피가 가장 먼저 감소하기 시작하였고 점차 더 앞쪽 전두엽 피질의 부피가 감소하여 전전두 피질(prefrontal cortex)이 가장 늦게 성숙하였다. 단, 후각과 미각 기능을 담당하는 전두극(frontal pole) 영역은 전-중심 이랑과 비슷한 시기에 성숙하기 시작하였다. 두정엽 영역은 일차 체 감각 피질(primary somatosensory cortex)이 위치한 후-중심 이랑(post-central gyrus)이 가장 먼저 성숙하기 시작하였고 이후 두정엽의 외측 영역이 점차 성숙하기 시작하였다. 일차 시각 피질(primary visual cortex)이 위치한 후두극(occipital pole)을 위시로 하여 후두엽은 비교적 이른 시기부터 성숙하기 시작하였다. 측두엽에서는 측두극(temporal pole) 영역이 이른 시기부터 성숙하기 시작하였고, 후측 상 측두 이랑(superior temporal gyrus)은 다른 모든 연합 영역보다 더 늦은 시기에 성숙하기 시작하였다. 이는 후측 상 측두 이랑 영역이 기억 정보의 통합, 청각-시각 연합, 물체 인식 기능 등을 담당하는 상위 다감각적(heteromodal) 연합 영역임을 고려할 때, 다른 하위 연합 영역의 발달이 어느 정도 이루어진 이후에 성숙하기 시작하는 것으로 이해될 수 있다. 이 연구에서 관찰된 또 한 가지 흥미로운 결과는, 진화적으로 더 오래된 기원을 가진 뇌 영역들이 더 이른 시기에 성숙하는 경향이 있었다는 것이다. [이러한 결과는 이후에 소개될 Shaw와 동료들의 2008년도 연구 결과와 일치한다(Shaw et al., 2008).] Gogtay와 동료들은 회백질의 부피가 감소되는 뇌

구조의 성숙 과정이 정확하게 어떠한 생물학적인 현상을 반영하는지를 단정할 수는 없으나 시냅스의 가지치기(pruning), 수초화, 뉴런 크기의 감소, 교세포와 뇌혈관계의 변화 등이 모두 관여될 것으로 추측하였다(Gogtay et al., 2004). 저자들은 또한, 회백질의 감소 정도와 시기 등 성숙의 패턴이 발달 장애와 매우 밀접한 연관이 있을 것으로 예측하였다. 그러나 이 연구는 매우 적은 수의, 지능이 높은(평균 지능 125) 피험자를 대상으로 한 연구였으므로, 일반화 가능성에 제약이 있다.

한편, 비선형적인 회백질 부피의 발달 추이와는 달리, 대뇌 백질의 총 부피는 발달이 진행됨에 따라 로그 함수와 유사한 형태로 꾸준히 증가하는 것으로 보고되었다(Lenroot et al., 2007). 이러한 현상은 뇌 영역 간의 연결성과 통합성의 증가를 반영하는 것으로 해석할 수 있다.

#### 뇌 구조의 발달에 대한 영향 요인 및 조절 변수

##### 성별

회백질 부피의 발달적 변화의 추이는 성별에 따라 매우 다르게 나타난다. Lenroot과 동료들(2007)은 거의 대부분의 뇌 영역에서 발달 추이의 성별 차이를 보고하였다. 대뇌의 총 부피는 남아가 여아에 비하여 10% 더 컸으며, 대뇌 총 부피가 절정에 이르는 시기는 여아의 경우 만 10.5세, 남아의 경우 만 14.5세였다. 대부분의 뇌 영역에서 회백질의 부피는 발달이 진행됨에 따라 증가하다가 감소하는 패턴을 보이는데 최대 회백질의 부피가 관찰되는 나이는 여아에게서 더 이른 시기에 나타났다. 회백질의 총 부피는 여아의 경우 만 8.5세, 남아의 경우 만 10.5세에 절정에 이르렀다. 회백질의 발달 추이는 뇌 영역에 따라 조금씩 차이를 보였다. 전두엽의 회백질 부피가 절정에 이르는 나이는 여아의 경우 만 9.5세, 남아의 경우 만 10.5세였다. 두정엽의 회백질 부피가 절정에 이르는 나이는 여아의 경우 만 7.5세, 남아의 경우 만 9세였다. 측두엽의 회백질 부피가 절정에 이르는 나이는 여아의 경우 만 10세, 남아의 경우 만 11세였다(Lenroot et al., 2007).

Raznahan과 동료들(2011)은 3세부터 30세까지 647명의 피험자를 대상으로 대뇌 부피와 이를 결정짓는 세부 요인인 피질의 두께, 표면적, 고랑 면적, GI 등의 발달적 변화를 성별에 따라 추적하였다(Raznahan et al., 2011). Lenroot과 동료들(2007)의 연구에서와 마찬가지로, 대뇌 부피는 거꾸로 된 U자 형태의 3차 곡선의 모양으로 변화하였으며, 후기 아동기/초기 청소년기에 절정에 이르렀다. Lenroot와 동료들(2007)의 연구에서처럼 남성이 여성보다 대뇌 부피가 절정에 이르는 시기가 더 늦었다. 대뇌의 부피는 절정에 이른 후 점차 줄어들어 30대에 이르러 안정기에 접어들었다. 대뇌 부피를 결정하는 두 가지 요인인 피질의 두께와 표면적 역시 거꾸로 된 U자 형태의 3차 곡선의 모양으로 변화하였으며, 피질의 두께가 표면적보다 이른 시기에 절정에 이르렀다. 피질의 표면적이 절정에 이르는 시기와 연령에 따른 변화 추이에서 성별 간 차이가 나타났다.

피질의 표면적을 결정하는 두 가지 요인인 이랑 면적과 GI 역시 절정에 이르는 시기와 연령에 따른 변화 추이에서 성별 간 차이가 나타났다. 여아의 경우, 아동기 대뇌 부피의 급격한 증가는 피질의 두께와 표면적의 증가에 기인한 반면, 남아의 경우, 대뇌 부피의 급격한 증가는 주로 표면적의 증가에 기인하였다. 초기 청소년기(약 13세) 이후부터 표면적의 성별 차이는 거의 이랑 면적의 차이에 기인하였다. 반면, 후기 청소년기 이후 표면적의 감소는 주로 GI의 감소에 기인하였다(Raznahan et al., 2011). Raznahan과 동료들의 연구는 대뇌 부피의 변화가 더 세부적인 구조적 요인들(피질 두께, 피질 표면적, GI 등) 각각의 역동적인 변화로 인해 발생하며, 성별에 따라 각 세부 구조의 발달 추이가 다를 수 있음을 보여주었다.

### 정신/발달 장애

시간에 따른 뇌 구조의 변화 추이는 심리적 특성 및 정신/발달 장애의 증상과 관계되는 표현형질로 인식되고 있다(Shaw et al., 2006; Giedd et al., 2008). 정신/발달 장애 환자의 경우 정상인과는 다른 뇌 발달 추이를 보인다. 예를 들어, 3세 이전에 발병하는 자폐증의 경우, 2세까지 뇌세포가 비정상적으로 급격히 증식하며, 4세에 전두엽과 측두엽의 부피가 정상 아동에 비하여 크며, 그 후 7세까지 뇌의 성장 속도는 더 느리다고 한다. 남아가 여아보다 자폐증 진단을 받을 확률이 더 높으며, 초기 아동기 자폐증의 발현은 이 시기의 비정상적인 두뇌 부피의 증가와 관계되는 것으로 알려져 있다(Raznahan and Bolton, 2008). 이전 단락에서 언급한 Raznahan과 동료들의 연구(2011)를 고려하면, 남아의 경우 대뇌 부피의 변화는 주로 표면적의 변화에 기인하므로, 남아의 자폐증 발현 및 비정상적인 대뇌 부피 증가가 비정상적인 피질 표면적의 변화와 관계될 가능성이 있다(Raznahan et al., 2011). 그렇다면, 피질의 표면적의 변화에 영향을 미치는 유전, 환경적 요인을 탐색하는 것이 자폐증의 발현과 관계된 원인을 찾는 중요한 시도가 될 수 있다.

한편, 아동기에 발병하는 조현병 환자의 경우, 청소년기에 두정엽의 회백질이 급격히 감소하는 증상을 보이는 반면, 성인기에 발병하는 조현병 환자의 경우 측두엽과 전두엽의 회백질의 변화 추이가 정상인과 다르다고 한다(Gogtay et al., 2004). 조현병 환자의 경우, 후기 아동기 이후 대뇌 회백질의 부피 감소가 정확하게 어떠한 생물학적인 변화를 반영하는지는 후속 연구에서 밝혀야 할 숙제로 남아 있지만, 저자들은 시냅스의 가지치기 혹은 백질 부피의 변화 등을 반영할 것으로 추측하였다.

### 환경 요인

환경적 요인 중 부모의 사회경제적 지위, 영양 공급과 관련된 태내 발달 환경이 뇌 구조의 발달에 영향을 미쳐 나아가, 지능과 학업 성취도를 포함한 뇌 기능에 영향을 줄 수 있다(Ivanovic et al., 2004). Ivanovic 과 동료들의 연구(2004)에서는 부모의 사회 경제적 지위, 머리 둘레, 태내 영양 상태 등이 아동의 머리 둘레에 영향을 미치는 주요한 변인이라고 보고하였다. 부모의 사회 경제

적 지위가 아동 발달에 미치는 영향에 대한 방대한 행동 연구의 수와 비교할 때, 사회 경제적 지위가 뇌 구조의 발달에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 매우 적을 뿐 아니라, 세부 영역 별 뇌 구조에 대한 체계적 연구는 극히 적다(Raizada & Kishiyama, 2010). 기존의 행동 연구들에 의하면, 부모의 사회 경제적 지위에 따라 언어 능력, 기억, 사회-정서적 기능, 인지 통제(cognitive control) 기능 등에 상당한 개인차가 발생한다고 한다(Noble et al., 2012). 따라서 언어, 기억, 사회-정서적 기능, 인지 통제 기능 등과 관련된 뇌 영역의 발달이 사회 경제적 지위에 의해 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 이러한 가설에 기반하여, Noble과 동료들(2012)은 사회 경제적 지위에 포함된 부모의 교육 수준과 소득 등의 개별 요소가 각기 다른 방식으로 뇌 인지 발달에 영향을 줄 수 있음을 보여주었다. 예를 들어, 부모의 교육 수준이 높을수록 편도체의 부피가 감소하였고, 부모의 소득이 높을수록 해마의 부피가 증가하였다. 전자의 경우, 편도체의 부피가 부모의 교육 수준에 따라 아동이 경험하는 스트레스 수준이 달라짐에 기인하는 것으로 해석되었다. 후자의 경우, 부모의 소득이 물질적 자원 공급과 관련되어 해마의 부피에 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 또한, 언어 능력과 관련된 좌반구 상 측두 피질과 하 전두 피질의 부피는 연령이 증가할수록, 부모의 사회 경제적 지위가 높을수록 더 큰 것으로 관찰되었다. 이는 연령이 증가할수록 부모의 교육 수준에 따라 언어적 환경의 영향이 심화되고 누적되는 것으로 해석할 수 있다.

앞서 언급된 뇌 영역뿐 아니라 다른 뇌 영역에서도 이와 마찬가지로, 부모의 사회 경제적 지위가 낮을 경우, 식생활(영양 공급)의 질이 낮아지거나 스트레스 호르몬 수치를 높여 뇌 발달에 부정적인 영향을 줄 수 있고, 반대로, 부모의 교육 수준과 소득이 높을 경우, 자녀에게 제공되는 언어적, 교육적 환경의 질이 높아져 뇌 발달을 촉진할 수 있다.

### 영역 별 피질의 층 구조

뇌 구조의 발달적 변화가 모든 영역에서 항상 거꾸로 된 U자 곡선 형태의 추이를 보이는 것은 아니다. Shaw와 동료들(2008)의 연구에서는 375명의 아동과 성인의 피질 두께의 변화를 종단적으로 관찰하였다. 가장 간단한 층 구조<sup>2)</sup>를 지닌 피질 영역들(예를 들어, 변연계(limbic) 영역 등; 부록 그림 5)은 상대적으로 더 간단한 형태의 선형적 변화 추이를 보인 반면, 더 복잡한 층 구조를 지닌 피질 영역들(예를 들어, 다감각 및 상위 연합 영역 등)은 더 복잡한 발달적 변화 추이(2차 혹은 3차 함수 형태)를 보였다(Shaw et al., 2008). 피질의 두께는 피질 층의 두께에 의해 결정되며, 피질을 구성하는 단위 열(column) 당 세포 수 및 교세포와 수상 돌기의 분포, 혈관의

---

2) 층 구조에 따라 대뇌 피질을 세 가지 종류로 구분할 수 있다. 진화적으로 가장 원초적인 종류의 피질은 allocortex로서 3층 구조를 지닌다. 진화적으로 가장 발달된 종류의 피질은 isocortex로서 보통 6개의 층으로 구성된다. 진화적으로 중단 단계에 해당하는 피질은 transition cortex로서 allocortex와 isocortex의 중간적 특성을 지닌다.



밀도 등에 의해 영향을 받는다(Burgalera et al., 2014). 이와 같은 연구 결과를 고려할 때, 부피나 밀도와 비교하여 피질의 두께는 피질의 층 구조의 복잡성을 반영하는 측정치로서 정상적인 발달뿐만 아니라 발달 장애군에서 나타나는 비 정상적인 뇌 구조의 변화를 미시적으로 탐색할 수 있는 유용한 자료라 할 수 있다.

#### 구조적 공분산성 네트워크의 발달

Lerch와 동료들의 연구(2006)은 292명의 아동, 청소년을 대상으로 브로카 영역을 포함한 하 전두 피질의 44번 Brodmann 영역(BA 24)을 씨드(seed) 영역으로 하여 피질 두께의 영역 간 상관관계를 분석(MACACC)을 분석하였다. 8.8세 이하 아동을 초기 아동기, 8.8-14.2세 사이를 중기 아동기, 14.2세 이후를 후기 아동기 집단으로 나누어 연령 집단 별 MACACC의 강도(선형 회귀선의 기울기)를 비교한 결과, 연령이 증가할수록, BA 44영역과 상 측두 이랑 간의 피질 두께의 상관관계가 높았다(Lerch et al., 2006). 상 측두 이랑은 베르니케 영역을 포함하여 언어 이해와 청각 기능과 깊은 관계가 있는 영역이다. 연령의 증가에 따른 BA 44영역과 상 측두 피질 두께 간의 상관관계 증가는 이 연령대의 언어 능력의 향상과 관계될 것으로 예측할 수 있다.

Zielinski와 동료들(2010)은 5-18세 사이의 아동과 청소년 300명을 대상으로 하여, 뇌 전체의 희백질 기반 구조적 공분산성 네트워크의 발달적 변화를 추적하였다(Zielinski et al., 2010). 이를 위해, 선행 연구에서 휴지기(resting state) 뇌 활동의 기능적 연결성(functional connectivity) 분석에서 관찰된 대규모 기능적 네트워크(large-scale functional network)들의 주요 노드(node)를 씨드 영역으로 사용하였다. 이 연구에서 사용한 대규모 기능적 네트워크에는 다음과 같이 8가지- 일차적 시각 네트워크, 일차적 청각 네트워크, 일차적 운동 네트워크, 말하기 관련 네트워크, 의미적 기억 관련 네트워크, 세일리언스(salience) 네트워크, 집행 기능(executive function) 네트워크, 디폴트 모드(default mode) 네트워크-가 포함되었다. 연령을 초기 아동기(5-8세), 후기 아동기(8.5-11세), 초기 청소년기(12-14세), 후기 청소년기(16-18세)의 네 구간으로 나눈 결과, 일차 시각, 청각 그리고 운동 네트워크에 기반한 구조적 공분산성 네트워크는 초기 아동기에 이미 성인과 유사한 양상으로 관찰되었다. 이는 기초적인 감각-운동 기능과 관련한 영역들이 먼저 성숙하기 시작한다고 보고한 Gogtay 와 동료들의 연구 결과와 일치하는 결과이다(Gogtay et al., 2004). 반면에, 말하기, 세일리언스 그리고 집행 기능 네트워크에 기반한 구조적 공분산성 네트워크는 후기 청소년기에 이르기까지(성인의 네트워크와 비교하여) 여러 영역에 걸쳐 더 분산된 양상으로 발달하였다. 디폴트 모드 네트워크에 기반한 공분산성 네트워크는 초기 아동기부터 확립되는 것으로 관찰되었으나, 후기 청소년기에 이르러서도 성인의 디폴트 모드 네트워크를 구성하는 앞쪽(내측 전두엽 영역)과 뒤쪽(두정엽-후측 대상 피질 영역) 간의 구조적 공분산성이 관찰되지 않았다(Zielinski et al., 2010).

## 뇌 발달에 대한 지능의 영향

이번 단원에서는 지능의 개인차에 따라 아동과 청소년기의 뇌 구조의 발달이 어떻게 영향을 받는지 중점적으로 다룰 것이다. 지능이 무엇인가에 대한 학문적 정의는 인지 심리학의 매우 오래된 논쟁의 대상으로서 학자들마다 이에 대해 다양한 견해를 지닌다. 지능이 무엇인가에 대한 근원적 물음에 대한 논의는 매우 중요하나, 본 연구에서 다룰 수 있는 깊이와 범위를 벗어난다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 인지 신경과학 연구에서 가장 보편적으로 통용되는 조작적 정의에 기반하여 지능을 논하고자 한다. 지능은 목표를 달성하거나 문제를 해결하기 위해 정보를 효율적으로 처리할 수 있는 능력으로 정의할 수 있다(Mackintosh, 2011). 이 때, 정보는 기억된 정보와 환경으로부터 제공되는 정보를 모두 포함한다. 인지 신경과학 연구에서는 지능을 측정하기 위한 표준화된 방법으로 Wechsler 지능 검사를 보편적으로 사용한다(Wechsler, 2014). (이는 연구 간 비교를 용이하게 하는 이점이 있으나 지능의 다양한 측면과 요소들을 간과하게 되는 중대한 한계점이라고도 할 수 있다.)

### 뇌의 구조적 특성과 기능의 관계

회백질의 부피나 밀도가 기능적 특성/우수성과 일관된 정비례 혹은 반비례 관계를 가지지 않는다. 흔히, 뇌의 부피가 크거나 회백질의 밀도가 높으면 정보 처리 능력이 더 우수할 것으로 기대한다. [실제로, 뇌의 크기와 지능 간에는(연구 간의 편차가 매우 크지만) 약 0.3 정도의 상관관계가 관찰된다(McDaniel, 2005; Lange et al., 2010; Gray & Thompson, 2004; Colom et al., 2010).] 그러나, 여러 연구를 통해서 밝혀진 바에 의하면, 뇌가 크면 지능이 높거나 기능이 우수할 것이라는 기대와 일치하는 연구 결과와 그와 반대되는 연구 결과(후자와 같은 현상을 신경적 효율성(neural efficiency)이라 일컬음)이 공존한다(Kanai & Rees, 2011). 예를 들어, 음정의 변화를 인식하지 못하는 장애(amusia)를 가진 사람의 경우 정상인보다 우반구 하 전두 이랑(inferior frontal gyrus)과 이차 청각 피질이 크고 두껍다고 한다. 또한, 편도체(amygdala)의 부피와 개인의 사회적 관계망(social network)의 크기가 정적 상관이 있다고 한다(Bickart et al., 2011). 반대로, 청소년기에 스스로 산출한 사고 표상(self-generated thought)을 조작하는 능력의 향상은 전-외측 전전두 피질(rostromedial prefrontal cortex)의 회백질 부피 감소와 연관된다고 한다(Dumontheil et al., 2010). Li 와 동료들의 연구에서는 Diffusion Tensor Imaging(DTI, 확산 텐서 영상)을 이용하여 그래프<sup>3)</sup> 분석(graph analysis)을 실시한 연구에서 백질 네트워크의 효율성이 지능과 정적 상관이 있다는 것을 발견하였다(Li et al., 2009). 지능과 뇌 구조의 상반된 관계성에 대하여 다음과 같이 두 가지 상반된 해

3) 그래프(graph)란 네트워크에 대한 수학적 모형을 말한다. 그래프는 노드(node)와 연결선(edge)으로 구성된다.

석이 가능하다. 회백질의 부피/밀도와 수행이 정적으로 연관될 때에는 더 많은 수의 뉴런이 정보처리 용량을 높였다고 해석할 수 있고, 반대로, 회백질의 부피/밀도가 수행과 부적으로 연관될 때에는 시냅스 가지치기로 불필요한 연결을 제거함으로써 정보처리의 효율을 높인 것으로 해석할 수 있다(신경적 효율성 이론). 이와 같은 논지는 다음 단원에서 다루어질 뇌 구조의 특성과 지능 간의 관계성에서도 동일하게 적용된다. 후속 단원에서는 연령과 성별에 따라 지능과 뇌 구조의 특성 간에 정적 혹은 부적 상관관계가 공존함을 보여주는 많은 연구 결과들을 소개할 것이다.

### 지능의 두정-전두 통합 이론(Parieto-Frontal Integration Theory of Intelligence, P-FIT)

Jung과 Haier(2007)는 지능에 대한 기능적, 구조적 뇌 영상 연구에 대한 개관을 통해 지능과 관계가 높은 것으로 보고된 뇌 영역들이 서로 다른 연구 간에 매우 일관됨을 확인하였다. 저자들은 이 공통된 영역들을 지능과 추론에 관여되는 신경망으로 해석하여, 지능의 두정-전두 통합 이론(Parieto-Frontal Integration Theory of Intelligence, P-FIT)을 주장하였다. P-FIT 이론에 의하면, 상·외측 전전두 피질, 상, 하측 두정엽, 전대상 피질, 측두엽, 후두엽 영역 및 전두엽과 측두엽을 연결하는 궁상 다발(arcuate fasciculus)이라는 백질 영역이 지능과 추론을 위해 정보를 통합하는 네트워크에 포함된다(부록 그림 7). 그 이후 지능의 신경적 기반에 대한 많은 연구들은 두정-전두 통합 이론을 검증해 왔으며, 본 개관 연구에서 앞으로 다룰 내용을 읽어보면 알 수 있듯이, 현재까지 많은 연구들에서 대체로 두정-전두 통합 이론과 일치하는 결과를 보고하고 있다.

Basten과 동료들(2015)은 성인을 대상으로 한 기능적, 구조적 MRI 연구들을 분석한 메타 분석(meta analysis)에서 지능과 관련한 뇌 영상 연구들에서 일관되게 전두-두정 영역의 중요성이 관찰되어 P-FIT를 대체적으로 지지하는 결론을 얻을 수 있었다. 그러나, 이 메타 분석에서 감각과 관련된 측두엽과 후두엽 영역의 중요성이 발견되지 않은 것은 P-FIT이 예측에서 벗어나는 결과라 할 수 있다. 저자들은, 이와 같은 결과에 대하여, 지능과 관련된 ‘과제’를 중심으로 뇌 영상 연구를 실시할 경우에는 측두엽과 후두엽의 감각 기능 관련 영역이 일관되게 관여됨을 관찰되나, 지능과 관련하여 ‘개인차 중심 접근(individual difference approach)’으로 연구를 실시할 경우에는 감각 영역보다는 고등 인지와 정보 통합 능력과 관련된 전두엽과 두정엽의 중요성이 상대적으로 부각되는 것으로 해석하였다(Basten et al., 2015). 또한, 저자들은 메타 분석을 통해 후측 대상 피질(posterior cingulate cortex, PCC), 섬엽(insula) 및 미상핵(caudate nucleus), 중뇌(midbrain) 등 피질 하 영역이 지능과 관련됨을 발견하였다. PCC 영역은 뇌 신경망 연구에서 여러 뇌 영역을 효율적으로 연결하는 허브 영역으로 밝혀졌으며, 디폴트 모드 네트워크의 일부이기도 하다. 지적 능력을 요하는 과제 수행 시에 디폴트 모드와 관련된 뇌 활동을 신속하게 저하시키는 능력이 높은 지능과 관계가 있을 것으로 해석할 수 있다. 미상핵은 전두엽의 도파민(dopamine) 수준을 조절하는

기전이 존재하는 영역으로 고등 인지 및 지능과 밀접한 관계가 있을 것으로 해석할 수 있으며, 중뇌 역시 중뇌-피질 도파민 체계(mesocortical dopaminergic system)의 일부로서와 동일한 맥락에서 지능과 관계될 것으로 해석할 수 있다. Basten과 동료들(2015)의 메타 분석에서 관찰된 또 한 가지 흥미로운 결과는 기능적 MRI와 구조적 MRI 연구들을 통해 관찰된 뇌 영역들이 세부적으로 일치하지 않았다는 점이다(기능적 뇌 영상 연구들에서 공통적으로 보고된 영역들은 대체로 양반구의 외측, 내측 전두엽과 두정엽, 측두엽 피질에 분포하였고, 구조적 뇌 영상 연구들에서 공통적으로 관찰된 영역들은 외측, 내측 전두엽, 측두엽, 후두엽 피질 및 중뇌, 미상핵 등 피질 하 영역을 포함하였다.). 이는 P-FIT의 예측과 불일치하는 결과이나, Basten과 동료들의 연구가, Brodmann 영역<sup>4)</sup>을 기준으로 분석한 P-FIT 이론보다 더 미시적인 스케일(MNI 표준 공간 좌표 기준)에서 영역 간 일치 여부를 판단한 데에 기인하는 면도 있을 것으로 생각할 수 있다.

#### 지능과 관련한 뇌 구조의 발달 연구

뇌 영상 연구 기법의 발달로 인하여 인간 지능의 생물학적 기반에 대한 연구도 활발하게 이루어지기 시작하였다. 초기에 이루어진 Wilke와 동료들(2003)의 횡단(cross-sectional) 연구에서는 5-18세 아동·청소년 146명을 대상으로 하여 회백질의 부피를 측정한 결과 연령의 증가에 따라 부피가 감소하는 패턴을 발견하였다. 종합적 IQ(full scale IQ, FSIQ) 점수와 뇌 구조의 관련성을 살펴본 결과, 뇌 전체의 회백질의 부피와 종합적 IQ점수 간에 (3차 함수 형태의) 정적 상관관계가 있었다. 회백질 영역 중에서는 특히 대상 피질(cingulate cortex)의 부피와 종합적 IQ점수가 가장 높은 상관관계를 나타냈다. 피험자를 연령대 별로 세 집단(상: 185개월, 중: 131개월, 하: 91개월)으로 나누어 분석한 결과, 지능과 전체 회백질의 부피 간의 상관관계는 연령이 가장 높은 집단에서만 유의하였다. 영역 별 분석에서는, 연령대 별로 다른 결과가 나타났는데, 중/하 연령 집단에서는 피질 하 회백질 부피와 지능 간에 가장 유의한 상관관계가 있었으며, 상 연령 집단에서는 대상 피질의 부피와 지능 간의 상관관계가 가장 높았다(Wilke et al., 2003). 그러나, 이와 같은 횡단 연구의 결과는 피험자 간 차이와 코호트 효과(cohort effect)로 인하여 온전하게 성숙에 따른 뇌 구조의 변화를 보여주는 것으로 확신할 수 없다는 한계점이 있다.

Sowell과 동료들은 5-11세의 아동들을 대상으로 하여 2년 간격으로 뇌 구조를 관찰하는 종단 연구를 실시하였다(Sowell et al. 2004). 뇌의 크기 증가는 전두엽에서 가장 두드러졌으나, 측두엽과 후두엽의 크기도 증가하였다. 회백질의 두께 증가는 언어와 관련된 브로카(Broca's area)와 베르니케(Wernicke's area) 영역 주변 피질에 국한되었다. 그 밖의 우측 전두엽 및 양반구 두정엽 및 후두엽에서는 피질의 두께가 전반적으로 감소하였다. 특히, 좌반구 상측 전두엽과 두정엽의 피

4) Brodmann 영역은 독일의 해부학자인 Korbinian Brodmann이 세포의 구조적 특성 및 분포 상태에 따라 구분한 뇌 영역을 말한다. Brodmann은 각 영역에 숫자를 붙여 명명하였다.

질 두께의 감소는 언어적 지능 점수(어휘 영역)와 상관관계가 있었다. 흥미롭게도, 피질의 두께가 감소된 영역과 뇌의 크기가 증가한 영역이 대체로 일치하였다. 이러한 결과는 피질의 두께 감소가 뉴런의 크기나 수의 감소를 반영하기보다는 수축화로 인한 백질의 증가를 반영할 가능성을 시사한다(Sowell et al. 2004).

Shaw와 동료들은 종단(longitudinal) 연구를 통해 대뇌 피질의 두께 자체보다도 피질 두께의 시간에 따른 변화 추이가 종합적 IQ점수와 매우 밀접하게 연관되어 있다는 연구 결과를 발표하였다(Shaw et al., 2006). 이 연구에 따르면, 초기 아동기(약 7세)에는 지능과 피질의 두께가 부적 상관관계를 보이는 반면, 후기 아동기(약 10세) 이후에는 정적인 상관관계를 보인다고 한다. 이러한 현상은 전전두 피질(prefrontal cortex)과 좌반구 측두엽, 특히 상 측두 이랑(superior temporal gyrus), 중 측두 이랑(middle temporal gyrus)에서 두드러졌다. 또한, 종합적 IQ점수가 높은 아동의 경우 다른 아동에 비하여 전두엽 특히 상 전두 이랑(superior frontal gyrus)과 중 전두 이랑(middle frontal gyrus)의 피질 두께가 더 역동적으로 많이 변화하는 양상을 보였는데, 초기부터 후기 아동기까지 더 오랜 기간 동안 전두엽 피질의 두께가 급격히 증가하다가 청소년기에는 반대로 급격히 감소하였다. 다시 말해, 종합적 IQ점수가 가장 높은 집단의 경우, 전두엽 피질의 두께가 절정에 다다른 시기가 11세 정도로 다른 집단에 비하여 늦게 나타났으며, 전두엽 피질의 두께가 감소하기 시작하는 시기 역시 15세 정도로 다른 집단에 비하여 늦었다. 또한, 종합적 IQ점수가 가장 높은 집단은 다른 집단에 비하여 전두엽 피질의 두께가 증가하는 속도가 현저하게 빨랐으며, 이후에 전두엽 피질의 두께가 감소하는 속도 역시 더 빨랐다. 전두엽 영역들은 다른 영역과 비교할 때 상대적으로 성숙하는 데에 오랜 시간이 걸리는 것으로 알려져 있는데, 지능이 가장 높은 집단에서 전두엽 피질이 더 오랜 기간 동안 급격히 증가하는 현상은 이 집단에서 고등 인지 기능과 관련된 신경 회로 발달의 결정적 시기(critical period)가 더 연장된 것으로 해석할 수 있다(Shaw et al., 2006). Shaw와 동료들의 연구 결과에 의하면, 발달적 변화가 일어나는 동안에는 지능과 피질의 두께 등 해부학적 구조 간의 관계성이 연령에 따라 급격히 달라질 수 있음을 알 수 있다. 지능이 높은 집단에서 지능 발달의 민감기가 더 길다는 Shaw 등의 연구 결과(2006)와 관련하여 Brant와 동료들(2013)은 4-71세의 11000 쌍의 쌍둥이를 대상으로 하여 실제로 지능이 높은 집단에서 지능 발달에 대한 환경(특히, 공유된 가족 환경)의 영향이 더 오랫동안 유지됨을 확인하였다. 아동기에서 성인기에 이르는 발달의 과정 동안 지능 발달에 대하여 환경과 비교한 유전의 영향이 점차 강해지게 되는데, 지능이 높은 집단에서는 환경이 영향을 미치는 기간이 지능이 낮은 집단에 비해 더 오래 지속되었다(Brant et al., 2013).

Shaw와 동료들의 종단 연구(2006) 발표 이후, 뇌 구조 특히 피질 두께의 발달적 추이와 지능 간의 관계에 대한 관심이 높아지고 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지기 시작하였다. 최근 10년 이내에 발표된 자료들에서는 피질의 두께에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

Karama와 동료들(2009)은 6세부터 18세까지 219명의 미국 거주 아동 및 청소년을 대상으로 하

여 피질의 두께와 종합 지능 간의 관계성을 분석하였다. 연구에 사용된 뇌 영상은 미국 전역의 여러 병원 및 MRI 촬영 센터로부터 얻어졌다. 연령, 성별, MRI 장비의 영향을 통제한 회귀분석 결과, 아동과 청소년 집단 모두에서 다감각(multimodal) 연합 영역을 포함한 분산된 여러 뇌 영역의 피질 두께와 지능 간에 정적인 상관관계가 발견되었다. 이러한 결과는 P-FIT에서 거론되는 영역보다 광범위하여 대뇌의 내측(medial) 피질 영역인 췌기 앞 소엽(precuneus), 후측 대상 피질, 상-내측 전전두 피질(dorsomedial prefrontal cortex), 혀 이랑(lingual gyrus), 해마 주변 피질(parahippocampal cortex) 등을 포함한다. 이러한 영역들은 모두 다양한 뇌 영역으로부터 정보를 전달받아 더 고등한 통합적 정보처리를 담당하는 역할을 하는 상위 영역들이다. 선행 연구와 비교할 때, Karama와 동료들(2009)의 연구에서 더 많은 영역이 관찰된 것은 통계적 유의미성을 판단하는 기준이 더 낮았고 더 향상된 방식의 피질 표면 정렬(surface alignment) 프로그램(Lyttelton et al., 2007)을 사용하였기 때문일 가능성이 있다. 이 연구의 장점은 모든 연령대의 피험자들에 대하여 동일한 지능 검사를 실시하였다는 점이다(cf. Shaw와 동료들(2006)의 연구는 연령대에 따라 사용한 지능 검사가 달랐다는 한계점이 있다).

Lange와 동료들(2010)은 4-18세의 아동, 청소년 285명을 대상으로 하여 전체적, 국소적 뇌의 부피와 지능 및 인구통계학적 변인과의 관계성을 연구하였다(Lange et al., 2010). 연구 결과, 부모의 학력과 자녀의 지능 간에 강한 상관관계가 있었으며, 이 상관관계는 전체, 또는 국소 뇌 부피에 의해 매개되지 않았다. 또한, 측두엽의 회백질과 백질, 전두엽의 백질 부피는 각기 종합 지능과 정적인 상관관계가 있었다. 이러한 상관관계는 주로 언어적 지능이 아닌 비언어적 지능에 의해 결정되었고, 세부적인 뇌 영역과 성별에 의해 영향을 받았다. 백질 구조와 지능 간의 상관관계에 대한 성별의 조절(modulation) 효과는 선행 연구 결과와 일치한다(Schmithorst et al., 2005). 종합 지능과 전두엽 백질 부피 간의 상관관계는 남성에게서만 관찰되었다. 머리 둘레는 뇌의 크기를 반영하는 지표로 사용하기에 매우 부정확한 것으로 드러났다. 아동기에서 청소년기로 접어들어 따라 두개골의 둘레와 뇌의 크기 간의 상관관계가 점진적으로 감소되는데, 이는 뇌의 크기 증가가 청소년기에 멈추는 데에 반해, 머리 둘레는 그 이후에도 계속 증가하기 때문이었다. 머리 둘레의 꾸준한 증가는 두개골과 두피의 두께 증가를 반영하였다. Lange와 동료들의 연구는 미국의 내 여러 지역의 아동 청소년 285명을 대상으로 한 연구라는 장점을 지닌 반면, 부모의 학력이 모두 고졸 이상으로 편중되어 있다는 점에서 한계가 있다(Lange et al., 2010).

Ramsden과 동료들(2011)은 12-16세 청소년을 대상으로 언어적(Verbal IQ, 이하 VIQ), 비언어적(Performance IQ, 이하 PIQ) IQ의 종단적인(2년 간격) 변화가 각기 전-중심 이랑과 앞쪽 소녀의 회백질의 밀도 변화와 정적 상관이 있었다고 보고하였다(Ramsden et al., 2011). 이 연구의 저자들은 청소년기에도 IQ의 변화가 일어나며 언어적 지능과 비언어적 지능과 관련한 뇌 기반이 뚜렷하게 구별됨을 강조하였다. 그러나 이 연구는 피험자의 수가 33명뿐이었으며, 이 중 절반 정도가 읽기 장애의 진단 요건을 충족할 정도로 낮은 수준의 언어 능력을 지녀, 연구 결과의 일반화 가

능성에 한계가 있다. 따라서 이 연구 결과는 다른 연구에서 반복 검증되어야 하며, 더 많은 피험자 수에 기반한 연구 결과와 함께 종합적으로 고려되어야 한다.

Menary와 동료들(2013)은 9세에서 24세 사이의 아동과 청소년 182명을 대상으로 피질 두께와 지능 간의 상관관계를 분석하였다. 모든 연령대에 걸친 분석에서 일반 지능 요인(g factor)<sup>5)</sup>과 여러 연합 영역의 피질 두께와 정적인 상관관계가 관찰되었다. 한편, 9세부터 16.5세까지만을 포함한 상대적 저연령 집단만을 대상으로 한 분석에서, 일반 지능 요인의 영향을 배제한(g-residualized) 어휘 검사(Vocabulary) 점수와 피질 두께 간에 부적 상관관계가 관찰되었다. (이는 앞서 소개한 Sowell과 동료들(2004) 연구 결과의 방향성과 일치하는 결과이다.) 반대로, 16.5세부터 24세까지의 상대적 고연령 집단에서는 일반 지능 요인의 영향을 배제한 비언어적 지능 및 블록 디자인(Block Design) 소검사 점수와 피질 두께 간에 정적 상관관계가 관찰되었다(Menary et al., 2013).

Burgaleta와 동료들(2014)은 6세에서 20세 사이의 아동과 청소년 188명을 대상으로 하여 2년 간격으로 지능(종합 IQ, VIQ, PIQ), 피질 두께와 피질 표면적의 종단적인 변화를 분석하였다. 2년 동안 종합 지능의 변화는 좌반구의 전-중심 이랑과 후-중심이랑 및 전두엽 영역의 피질 두께와 유의한 정적 상관관계가 있었다. 지능의 변화 양상을 기준으로 피험자들을 세 집단으로 나누어 분석한 결과, 종합 지능이 증가한 집단에서는 피질 두께에 별다른 변화가 일어나지 않았으나, 종합 지능이 변화하지 않은 집단에서는 피질 두께가 감소하였다. 종합 지능이 저하된 집단에서는 피질 두께가 가장 급격하게 감소하였다. 비언어적 IQ의 변화는 좌반구 전-중심 이랑과 하측 전두 이랑의 피질 두께와 상관관계가 유의하였다. 언어적 IQ의 변화는 하측 전-중심 이랑 영역의 피질 두께의 변화와 상관관계의 경향성만이 관찰되었다. 피질의 표면적의 변화는 지능의 변화와 유의한 관계성을 보이지 않았다(Burgaleta et al., 2014). Burgaleta와 동료들(2014)의 연구와 Ramsden과 동료들(2011)의 연구 결과는 넓게 보아 전-중심 이랑의 구조적 변화가 지능의 발달적 변화와 관계된다는 공통점이 있으나, 앞쪽 소뇌와 지능 간의 관계성 등 세부적인 측면에서 불일치하는 측면도 있다. 이는 부피소-기반(voxel-based) 측정치와 뇌 표면 기반(surface-based) 측정치 및 피험자 연령, 지능 검사 도구 등의 차이에 기인할 것으로 추측된다. Burgaleta와 동료들(2014)의 연구와 Ramsden과 동료들(2011)의 연구에서와 같이 종합적 IQ가 아닌 세부 영역 별 지능의 뇌 기반에 대한 정보는 매우 중요하다고 볼 수 있으나, 언어적 지능과 비언어적 지능 간의 상관관계가 매우 높기 때문에, 영역 별 지능에 대해 연구할 때에는 공유되는 일반 지능 요인의 영향을 통제된 분석을 통해서만이 세부 영역 별 지능의 신경적 기반을 명확하게 분석할 수 있다. (이와 같은 분석 방법을 사용한 연구의 예로, 앞서 언급한 Menary와 동료들(2013)의 연구를 들 수 있다.)

Schnack과 동료들(2015)은 9-60세의 피험자 506명을 대상으로 연령 증가에 따른 피질의 두께와

5) 일반 지능 요인(g factor)란, 심리 측정 연구들로부터 파생된 개념으로서, 여러 인지 검사 간의 정적 상관관계를 집약한 측정치이다. 보편적으로, 여러 인지 검사 점수들 간의 요인 분석에서 첫 번째 주요 요인(first principal factor)으로 구할 수 있다.

표면적의 변화와 지능의 영향에 대한 분석을 실시하였다(Schnack et al., 2015). 주요 결과를 요약하면, 10살 경에 지능이 높은 아동의 피질 두께가(특히 좌반구에서) 더 얇았다. 이러한 현상은 그 이후 더 두드러져 지능이 높을수록 연령에 따라 피질 두께가 감소하는 속도가 더 빨랐다. 이는 초기 청소년기에 지능과 피질 두께 간의 부적 상관관계를 보고한 선행 연구와 일치하는 결과이다(Tamnes et al., 2011). 그러다가 21세 이후 지능이 110 이상인 집단에서는 반대로 지능이 높을수록 좌반구 피질의 두께가 두꺼워져, 42세 즈음에는 지능이 높을수록 피질이 두꺼웠다. 한편, 지능이 110이하인 집단에서는 21세 이후에도 피질 두께가 계속 감소되었다. 정리하면, 지능이 높은 집단에서는 연령 증가에 따라 피질의 두께가 더 많은 변화를 겪는다고 할 수 있다. 흥미롭게도 이러한 피질 두께의 변화는 특히 언어와 깊은 관련이 있는 좌반구의 하 전두 피질과 상측 측두엽 영역에서 두드러졌다. 지능이 높은 집단에서 피질 두께가 더 역동적으로 변화하는 현상은 Shaw et al.(2006)의 선행 연구와 일치하지만, 두 연구는 지능과 가장 깊은 관계가 있는 세 부 뇌 영역 및 피질 두께 변화의 방향성이 반대로 바뀌는 시점 등에서 정확하게 일치하지는 않았다. 이러한 세부적인 결과의 차이는 사용된 지능 검사의 종류와 분석 방법 차이 등에 기인할 것으로 해석할 수 있다. 한편, 피질의 표면적은 10세 경에 지능이 높은 아동에서 더 넓은 것으로 관찰되었다. 피질의 표면적은 아동기 동안 꾸준히 증가하여 청소년기에 절정에 이른다고 한다. 지능이 더 높은 청소년들에게서 더 이른 시기에 피질 표면적의 증가가 완성되는 것이 관찰되었다. 청소년기에 피질의 표면적이 절정에 이른 이후에는 표면적이 감소하기 시작하는데 지능이 높은 청소년들에게서 더 빠른 속도로 감소된다고 한다. 즉, 표면적도 피질의 두께와 마찬가지로, 지능이 높을수록 더 역동적인 변화를 보인다(Schnack et al., 2015). Schnack과 동료들의 연구는 큰 표본 수를 사용하여 넓은 범위의 연령대의 피험자를 대상으로 지능과 관련하여 피질의 두께와 표면적이라는 두 가지 측정치의 변화를 분석하였다는 장점이 있다.

#### 지능과 관련한 뇌의 구조적, 기능적 연결성 연구

Lerch와 동료들의 연구(2006)은 292명의 아동, 청소년을 지능에 따라 상(IQ>120), 중(100<IQ<120), 하(IQ<100) 집단으로 나누어 BA 44를 씨드 영역으로 하여 피질 두께의 상관관계(MACACO)를 분석한 결과, 집단 간 상관관계(회귀선의 기울기)의 차이가 나타난 영역은 상-, 하-외측 전전두엽, 외측 두정엽, 전 대상피질 영역 등이었다. 이 영역들은 P-FIT이론과 일치할 뿐 아니라, 기능적 MRI 에 기반한 선행 연구 결과들과 일치한다(Wilke et al., 2003; Gray et al., 2003). 지능이 높은 집단에서는 BA 44의 두께가 1 mm증가할 때, 전대상피질의 두께가 1.44mm 증가하였다(Lerch et al., 2006).

Khundrakpam과 동료들(2017)은 6-18세 아동과 청소년을 대상으로 지능과 관련한 대뇌 피질 두께의 구조적 공분산성의 변화를 연구하였다(Khundrakpam et al., 2017). 언어적, 비언어적 지능을



기준으로 각기 점수가 높은 집단과 낮은 집단을 구별하여 집단 간에 피질 두께의 영역 간 상관관계(interregional correlation)의 차이를 그래프 분석을 통해 검증한 결과, 언어적 지능이 높은 집단에서 뇌의 글로벌 효율성(global efficiency)<sup>6)</sup>과 모듈성(modularity)<sup>7)</sup>이 높았고, 뇌의 로컬 효율성(local efficiency)<sup>8)</sup>이 낮았다. 이러한 결과는 언어적 지능이 더 높은 집단이 더 최적화(optimal)된 연결성 구조를 가지고 있음을 의미한다. 언어적 지능이 높은 집단에서는 좌반구의 하 전두 이랑 및 상 측두 이랑 등 언어 관련 영역들이 연결 허브(hub)와 같은 역할을 하는 것으로 드러났다. 한편, 동일한 분석을 실시한 결과, 비언어적 지능이 높은 집단과 낮은 집단 간에는 차이가 발견되지 않았다. 이는 전체 뇌 혹은 국소 뇌 영역의 회백질과 백질의 부피가 언어적 지능이 아닌 비언어적 지능과 상관관계가 있었던 선행 연구 결과와 대조되는 결과라 할 수 있다(Lange et al., 2010).

아동 뇌의 구조적 연결성과 관계된 연구는 아니나 그래프 분석을 이용하여 휴식 상태(resting state)인 뇌의 기능적 연결성(functional connectivity)을 분석한 van den Heuvel 과 동료들의 성인 대상 연구(2009)에서도 두뇌 네트워크의 효율성이 지능과 정적으로 상관된다는 것이 확인되었다(van den Heuvel et al., 2009). 이러한 효과는 전두엽과 두정엽에서 가장 두드러졌다. 또한, 휴식 상태에서 두정엽과 전두엽을 포함하는 네트워크의 연결 강도가 지적 능력이 뛰어난 성인들에게서 더 높음을 보고한 연구도 있다(Song et al., 2008). 이러한 연구 결과들은 지적 능력이 우수한 사람과 그렇지 못한 사람은 지능적 정보 처리 활동을 하고 있을 때뿐 아니라 휴식 상태의 뇌 활동에서도 차이가 난다는 것을 보여준다. 휴식 상태의 뇌 활동과 지능 간의 관계를 보고한 연구에서 가장 고등한 인지 처리를 담당하는 두정엽과 전두엽의 중요성이 확인된 것은 매우 흥미롭다.

마찬가지로, 뇌의 구조적 연결성과 관계된 연구는 아니나, Finn과 동료들(2015)은 ‘자료 하나씩 제외하기(leave one out)<sup>9)</sup> 교차 타당화(cross-validation) 기법을 이용하여 연구한 결과, 성인 뇌의 기능적 연결성 패턴이 마치 지문과 같이 개인을 식별할 수 있는 표식(marker)으로 쓰일 수 있으며, 기능적 연결성 정보를 이용하여 개인의 일반 지능을 예측할 수 있음을 주장하였다. 특히, 두정-전두 네트워크의 연결성 정보를 이용할 때 가장 정확하게 개인 간의 구별과 지능 점수의 예측이 가능하였다(Finn et al., 2015). Cole 과 동료들의 연구(2012)에서도 과제 수행 중이거나 휴식 중

6) 글로벌 효율성은 네트워크에 속한 모든 지점(노드) 쌍 간의 평균 최소 경로의 역으로 계산한다.  
 7) 모듈성은 그래프가 하위 그래프로 조직화된 정도를 의미한다.  
 8) 한 지점(노드)의 로컬 효율성은 해당 지점과 그와 연결된 모든 이웃 지점 간의 평균 최소 경로의 역으로 계산한다.  
 9) 자료 하나씩 제외하기(leave one out) 방법은 획득한 자료 중 하나를 제외한 나머지 자료를 이용하여 컴퓨터가 자료의 패턴을 학습한 후, 학습한 정보에 기반하여 제외했던 자료에 대한 판단과 예측을 시도하는 교차 타당화 기법을 말한다.

인 성인 뇌의 외측 전두엽 활동의 기능적 연결성이 유동 지능(fluid intelligence)의 개인차와 선택적으로 높은 상관관계를 보였다(Cole et al. 2012).

### 성별의 영향

현재까지 아동과 청소년을 대상으로 성별에 따른 지능과 뇌 구조의 발달 추이를 비교한 연구는 많지 않다. 앞으로 이에 대한 더 많은 자료가 누적되어야 안정적인 패턴을 찾을 수 있겠지만, 지금까지 보고된 몇몇 구조적, 기능적 MRI 연구 결과들을 소개하기로 한다.

Goh와 동료들(2011)은 7-57세 피험자 105명을 대상으로 한 연구 결과, 성별에 따라 지능과 피질 두께 간의 상관관계가 달라지는 영역들을 보고하였는데, 이 중에 대표적인 영역들은 브로카 영역 주변의 하 전두 피질, 좌반구 대상 피질, 그리고 우반구 상 전두 피질 등이었다. 이 중 좌반구 전대상 피질에서는 여성의 지능과 피질 두께 간에 부적인 상관관계가 관찰되었고, 남성의 지능과 피질 두께 간에는 정적 상관관계가 관찰되었다. 좌반구 전대상 피질을 제외한 영역들에서는 반대로, 여성의 지능과 피질 두께 간에 정적인 상관관계가 관찰되었고, 남성의 지능과 피질 두께 간에는 부적 상관관계가 관찰되었다(Goh et al., 2011). 그러나 이 연구에서 관찰된 성별과 지능 간의 상호 작용은, 연령의 영향을 통제한 분석 결과이므로, 성별과 지능 간의 상관관계의 양상이 연령대 별로 다르게 나타날 가능성이 있다. 후속 연구에서는 연령대별로 성별에 따라 지능에 따른 뇌 구조의 차이를 밝히는 것이 필요하다.

Lange와 동료들(2010)은 4-18세의 아동, 청소년 285명을 대상으로 하여 머리 둘레, 두개골내 부피, 전체적, 국소적 뇌의 부피와 지능과의 관계성을 연구하였다(Lange et al., 2010). 성별 차이에 대해 매우 짧게 기술하여 많은 정보가 보고되지 않았으나, 언급된 바에 의하면, 남아의 경우, 4-11세에 전체 뇌 부피와 비언어적 지능과의 상관관계가 매우 높은(0.32) 반면, 비언어적 지능과 백질과의 상관관계는 상대적으로 낮았다고 한다. 여아의 경우에 대해서는 언급되지 않은 것으로 보아 유의한 상관관계를 발견하지 못하였을 가능성이 있다.

뇌 구조에 대한 연구는 아니나, Schmithorst 와 Holland(2006)은 5-18세의 아동, 청소년 323명을 대상으로 한 기능적 MRI 연구에서 지능 x 성별 간의 2차 상호작용 및 지능 x 성별 x 연령(고/저 집단) 간의 3차 상호작용을 보고하였다. 피험자들이 뇌 활동 촬영 중 수행한 과제는 '소리내지 않고 동사 산출하기(silent verb generation)'였다. 남아의 경우, 좌반구 하 전두 피질과 중, 상-측 측두 피질 활동성과 지능 간에 유의한 부적 상관관계가 나타난 반면, 여아의 경우 이 영역들의 활동성과 지능 간에 정적 상관관계가 나타나, 지능 x 성별 간의 2차 상호작용이 관찰되었다. 남아의 경우, 이 영역들에서 지능과 연령(고연령: 9세 미만/ 저연령: 9세 이상) 간에 정적인 상관관계가 나타난 반면, 여아의 경우, 지능과 연령(고연령:13세 미만/ 저연령:13세 이상) 간에 부적 상

관관계가 나타나 지능 x 성별 x 연령 간의 3차 상호작용이 관찰되었다. 또한 기능적 연결성 분석에서는 남아의 경우, 중 전두 피질, 대상 피질, 췌기 앞 소엽, 중 측두 이랑, 브로카 영역 간의 연결성에서 지능 x 성별 x 연령 간의 3차 상호작용이 관찰되었다. 남아의 경우, 9세 미만의 저연령 집단에서는 이들 영역 간의 연결성과 지능 간에 정적 상관관계가 나타난 반면, 9세 이상의 고연령 집단에서는 부적 상관관계가 나타났다. 반면, 여아의 경우 13세 미만의 저연령 집단에서는 이들 영역 간의 연결성과 지능 간의 상관관계가 유의하지 않았던 반면, 13세 이상의 고연령 집단에서는 정적 상관관계가 나타났다(Schimithorst & Holland, 2006). 그러나 이 연구의 결과는 ‘소리 내지 않고 동사 산출하기’ 과제에 국한된 뇌 활동성을 이용한 분석이라는 점에서 일반화 가능성에 제약이 있다. 또한, 남아와 여아의 연령대를 상대적인 고연령, 저연령 집단으로 나눌 때, 각기 중앙치를 사용(median split)한 결과, 집단을 나누는 기준 연령이 남녀 간에 4년이나 차이가 났다(남: 9세 기준, 여: 13세 기준). 그럼에도, Schimithorst 와 Holland (2006)의 연구는 아동과 청소년의 지능과 관련한 신경 기반이 성별과 연령에 따라 조절되고 변화한다는 것을 보여주는 대표적인 초기 연구로서의 가치가 있다.

#### 백질 구조에 대한 지능의 영향

백질의 구조는 회백질의 구조와 비교할 때 지능과의 상관관계가 상대적으로 더 약하며, 관련 연구의 수도 적은 편이다(Luders et al., 2009). 더욱이 아동과 청소년을 대상으로 백질의 구조와 지능의 관계를 관찰한 연구의 수는 극히 드물다.

Goh와 동료들(2011)은 7-57세 피험자 105명을 대상으로 백질의 영역 별 부피와 지능 간의 관계성을 관찰한 결과, 두 군데의 백질 영역에서 지능과 집단 간의 상호작용이 관찰되었다; 성인 집단에서는 우반구 상-외측 전전두엽의 백질 부피와 지능 간에 부적 상관관계가 있었으나, 아동 집단에서는 유의한 상관관계가 없었다. 또한, 성인 집단에서는 좌반구 뇌실 근처 백질(periventricular white matter) 부피와 지능 간에 부적 상관관계가 있었으나 아동 집단에서는 유의한 상관관계가 없었다(Goh et al., 2011).

Tamnes 와 동료들(2011)은 8-31세 사이의 아동과 청소년 168명을 대상으로 백질의 부피, 미세 구조와 지능 간의 관계성을 관찰한 결과, 백질의 부피와 지능 간에 정적인 상관관계가 관찰되었다(Tamnes et al., 2011). 연령 집단에 따른 지능과 백질의 구조 간의 관계성에 대한 분석에서는 연령을 세 집단으로 나누어 분석한 결과, 가장 연령이 낮은 집단에서만 지능과 백질 부피 간에 정적인 상관관계가 관찰되었다(Tamnes et al., 2011).

한편, 성인 대상 연구에서 백질과 지능 간의 정적인 상관관계는 주로 전두엽, 측두엽 그리고 뇌량에서 나타났다(Haier et al., 2004; 2005; Luders et al., 2009). 뇌량은 좌우 반구 간 통신을 가능

하게 하는 가장 두꺼운 백질 섬유 다발로서 200만 개가 넘는 축색이 지나가는 영역이다(부록 그림 6).

이처럼 현재까지 아동, 청소년기 동안 백질의 구조와 지능과의 상관관계가 연령에 따라 어떻게 변화하는지에 대한 연구는 극히 제한적이므로 많은 후속 연구가 필요한 영역이라 할 수 있다.

## 결론 및 제언

### 결론

아동과 청소년의 뇌는 생물학적 성숙 과정 중에 있으므로, 지능의 개인차와 연합된 뇌 구조의 특성을 연구하기 위해서는 연령에 따른 성숙 과정을 함께 이해해야 한다. 또한, 뇌 구조의 발달은 성별에 따라 다른 양상으로 일어나므로, 지능과 뇌 구조의 관계를 이해하기 위해서는 연령과 함께 성별에 따른 차이도 함께 고려하여야 한다.

본 개관 논문은 현재까지 아동과 청소년을 대상으로 하여 뇌 구조의 성숙과 이에 대한 지능의 영향을 관찰한 연구들을 중점적으로 정리하였다. 초기 연구들은 주로 뇌의 전체적인 크기와 부피를 측정하였고, 그 이후 부피소-기반 계측법의 개발로 영역별 부피와 회백질/백질의 밀도를 측정하였다. 최근 10년 동안에는 피질의 두께와 표면적 등 주로 피질의 특성을 이용한 연구가 주를 이루었다. 여러 종단 연구들에서 지능이 높은 아동과 청소년의 뇌가 더 역동적인 패턴으로 뇌 구조가 급격히 변화함을 보고하였으며, 뇌 발달이 환경에 의해 영향을 받는 민감기가 더 길다는 것을 보여주었다. 종단 연구 결과, 뇌 구조의 발달 추이는 영역 별로 다를 수 있으며, 발달 추이가 선형적이지 않은 경우가 많음을 알 수 있었다. 지능의 신경적 기반에 대한 가장 대표적인 이론은 Jung과 Haier(2007)의 전두-두정 통합 이론이다. 많은 후속 연구에서 대체로 전두-두정 통합 이론과 일치하는 연구 결과를 보고하였다. 몇몇 연구에서 전두-두정 통합 이론과는 달리 지능과 피질 하 영역이 밀접한 관계가 있음을 보고하기도 하였는데, 이는 지능과 관련한 '과제 중심적 접근을 사용한 연구와 지능에 대한 '개인차' 중심 접근을 사용한 연구 간의 차이를 반영할 가능성이 있다. 이처럼, 연구 간 서로 불일치하는 결과들은 연구에 참여한 피험자의 연령대, 사용한 지능 검사의 종류, 뇌 구조에 대한 측정치와 분석 방법 등의 차이에 기인할 것으로 해석할 수 있다. 또한, 뇌 구조와 지능/기능적 우수성 간에 정적인 관계성이 나타나는 경우와 부적인 관계성이 나타나는 경우가 공존하는데, 이러한 상반된 결과에 대해 정보 처리 용량(뇌 구조와 정적 관계)과 신경적 효율성(뇌 구조와 부적 관계) 개념을 이용한 두 가지 상반된 해석이 모두

가능하다. 앞으로는 뇌의 구조적 공분산성 분석 및 머신 러닝을 이용한 교차 타당화 기법으로 뇌 구조를 통한 지능의 예측을 목표로 한 연구가 활발해질 것으로 예측할 수 있다.

#### 후속 연구의 방향

지금까지의 연구 개관을 바탕으로 하여 후속 연구가 뒤따라야 할 아동 대상 연구 주제들을 다음과 같이 제안한다. 첫째, 아동의 뇌 발달 과정의 성별 차이가 매우 크므로, 다양한 측정 지표를 사용하여 피질과 피질 하 영역 및 백질의 발달 과정이 지능의 개인차에 의해 어떻게 영향을 받는지에 대한 종단 연구를 제안한다. 둘째, 일반 지능의 영향을 통제하였을 때, 지능을 구성하는 여러 요소가 각기 뇌의 구조와 구조적 공분산성의 발달과 어떻게 관계되는지에 대한 연구를 제안한다(선행 연구에서 언어적 지능과 비언어적 지능과 관계되는 뇌 구조에 대한 결과들조차 서로 불일치하여 명확한 결론을 내릴 수 없는 상황이다). 셋째, 아동의 휴지기 뇌의 기능적 연결성(특히, 전두-두정 신경망)이 지능의 개인차와 어떻게 관련되는지에 대한 연구를 제안한다. 넷째, 아동기의 한 시점에서 측정한 뇌 구조와 구조적 공분산성에 대한 정보를 이용하여 그 이후 특정 시점(예를 들어, 1-2년 후)까지 지능의 변화 정도를 예측할 수 있는지에 대한 연구를 제안한다. 다섯째, 현재까지 지능과 관련된 대부분의 신경과학 연구는 지능에 대한 제한적인 정의에 기반하여 획일적인 방법으로 지능을 측정하였으므로, 지능의 다양한 측면과 여러 요소에 대한 연구가 이루어지지 못하였다. 추후에는 다양한 지능의 정의에 입각하여 지능의 여러 측면과 여러 요소들이 뇌 구조의 발달과 어떠한 관계가 있는지에 대한 후속 연구가 이루어져야 할 것이다.

대뇌 피질의 특성을 측정하는 피질 두께, 이랑 면적, 고랑 면적, GI 등은 각기 더 세분화된 미시적 요인들에 의해 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 피질의 두께는 피질 층의 두께에 의해 결정되며, 피질을 구성하는 단위 열 당 세포 수 및 교세포와 수상 돌기의 분포, 혈관의 밀도 등에 의해 영향을 받는다. GI는 고랑의 깊이, 고랑의 길이 등에 의해 영향을 받을 수 있으며, 피질 면적은 세포 열의 수 및 열 간 간격과 관계된다. 이와 같이 더 세분화된 지표들에 대한 발달적 변화를 추적하고, 이러한 측정치들이 세포 수준에서 어떠한 생물학적 특성(예를 들어, 세포체, 수상돌기, 축삭, 교세포의 특성)과 관련되는지를 밝혀 뇌 구조 발달에 대한 이해를 더욱 심화시키는 것은 후속 연구의 중요한 숙제이다(Raznahan, 2011; Burgaleta et al., 2014).

또한, 대뇌 구조를 결정하는 다양한 표현 형질들은 각기 다른 진화적, 유전적, 세포생물학적 과정을 반영하기 때문에 질병이나 유전적, 환경적 요인에 의해 각기 다른 방식으로 영향을 받을 수 있다(Panizzon et al., 2009; Rogers et al., 2010; Raznahan, 2011). 뇌 구조의 발달을 세포와 분자 수준에서 이해하고, 이러한 미시적인 뇌 구조의 개인차에 대한 유전과 환경의 영향을 밝히는 것은, 발달/정신 장애의 원인을 밝히고, 조기에 진단하거나 치료할 수 있는 밑거름이 될 것이다.

실제로, Querbes와 동료들(2009)은 피질의 두께를 이용하여 기억 장애가 있는 경도 인지 장애(mild cognitive impairment) 환자들이 이후에 알츠하이머 병을 발현할 것인지를 76% 정확도로 예측하여 피질 두께에 기반한 조기 진단의 가능성을 보여주었다(Querbes et al., 2009).

본 개관 논문에서 소개된 뇌의 구조적 특성과 지능 간의 관계성은 상관관계를 반영할 뿐 인과 관계를 의미하는 것은 아니다. 따라서 특정 뇌 구조와 심리행동적 특성 간의 인과관계를 확립하기 위해서는 뇌 손상 환자 연구, 경두개 자기 자극(Transcranial Magnetic Stimulation) 또는 경두개 직류 자극(Transcranial Direct Current Stimulation), 인지 행동 훈련 혹은 개입(intervention) 등을 이용한 연구를 병행하여야 한다(Kanai & Rees, 2011). 예를 들어, Price 와 동료들은 15-20세의 청소년 33명을 대상으로 하여 뇌 구조의 변화를 측정할 자료를 이용하여 3.5년 이후의 지능의 변화를 예측한 결과, 언어적 지능 변화에 대한 분산의 53%와, 비언어적 지능 변화에 대한 분산의 14%를 예측할 수 있었다(Price et al., 2013). 유사한 방법으로 앞서 소개한 Finn과 동료들(2015)도 뇌의 기능적 연결성 패턴을 이용하여 일반 지능을 예측할 수 있었다. 이처럼, 더 많은 후속 연구를 통해 뇌 구조의 발달적 변화와 지능 발달 간의 상호 인과 관계를 이해하게 되면 뇌 구조를 통해 개인의 영역 별 지능을 예측하고 개인에게 가장 적합한 진로를 탐색하고 개발할 수 있는 교육 컨설팅도 가능해질 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- Alexander-Bloch, A., Giedd, J. N., & Bullmore, E. (2013). Imaging structural co-variance between human brain regions. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(5), 322-336.
- Basten, U., Hilger, K., & Fiebach, C. J. (2015). Where smart brains are different: a quantitative meta-analysis of functional and structural brain imaging studies on intelligence. *Intelligence*, 51, 10-27.
- Bickart, K. C., Wright, C. I., Dautoff, R. J., Dickerson, B. C., & Barrett, L. F. (2011). Amygdala volume and social network size in humans. *Nature neuroscience*, 14(2), 163.
- Brant, A. M., Munakata, Y., Boomsma, D. I., DeFries, J. C., Haworth, C. M., Keller, M. C., ... & Wadsworth, S. J. (2013). The nature and nurture of high IQ: an extended sensitive period for intellectual development. *Psychological science*, 24(8), 1487-1495.
- Burgalata, M., Johnson, W., Waber, D. P., Colom, R., & Karama, S. (2014). Cognitive ability changes and dynamics of cortical thickness development in healthy children and adolescents. *NeuroImage*, 84, 810-819.
- Cole, M. W., Yarkoni, T., Repovš, G., Anticevic, A., & Braver, T. S. (2012). Global connectivity of prefrontal cortex predicts cognitive control and intelligence. *Journal of Neuroscience*, 32(26), 8988-8999.

- Colom, R., Karama, S., Jung, R. E., & Haier, R. J. (2010). Human intelligence and brain networks. *Dialogues in clinical neuroscience*, 12(4), 489.
- Deary, I. J., Penke, L., & Johnson, W. (2010). The neuroscience of human intelligence differences. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(3), 201-211.
- Dumontheil, I., Hassan, B., Gilbert, S. J., & Blakemore, S. J. (2010). Development of the selection and manipulation of self-generated thoughts in adolescence. *Journal of Neuroscience*, 30(22), 7664-7671.
- Finn, E. S., Shen, X., Scheinost, D., Rosenberg, M. D., Huang, J., Chun, M. M., ... & Constable, R. T. (2015). Functional connectome fingerprinting: identifying individuals using patterns of brain connectivity. *Nature neuroscience*, 18(11), 1664-1671.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., ... & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature neuroscience*, 2(10), 861-863.
- Giedd, J. N., Lenroot, R. K., Shaw, P., Lalonde, F., Celano, M., White, S., ... & Gogtay, N. (2008). Trajectories of anatomic brain development as a phenotype. In *Novartis Foundation Symposium* (Vol. 289, p. 101). NIH Public Access.
- Giedd, J. N., & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of pediatric brain development: what have we learned and where are we going?. *Neuron*, 67(5), 728-734.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., ... & Rapoport, J. L. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 101(21), 8174-8179.
- Goh, S., Bansal, R., Xu, D., Hao, X., Liu, J., & Peterson, B. S. (2011). Neuroanatomical correlates of intellectual ability across the life span. *Developmental cognitive neuroscience*, 1(3), 305-312.
- Gray, J. R., & Thompson, P. M. (2004). Neurobiology of intelligence: science and ethics. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(6), 471.
- Haier, R. J., Jung, R. E., Yeo, R. A., Head, K., & Alkire, M. T. (2004). Structural brain variation and general intelligence. *Neuroimage*, 23(1), 425-433.
- Haier, R. J., Jung, R. E., Yeo, R. A., Head, K., & Alkire, M. T. (2005). The neuroanatomy of general intelligence: sex matters. *NeuroImage*, 25(1), 320-327.
- Hedman, A. M., van Haren, N. E., Schnack, H. G., Kahn, R. S., Pol, H., & Hilleke, E. (2012). Human brain changes across the life span: a review of 56 longitudinal magnetic resonance imaging studies. *Human brain mapping*, 33(8), 1987-2002.
- Im, K., Lee, J. M., Yoon, U., Shin, Y. W., Hong, S. B., Kim, I. Y., ... & Kim, S. I. (2006). Fractal dimension in human cortical surface: multiple regression analysis with cortical thickness, sulcal depth,

- and folding area. *Human brain mapping*, 27(12), 994-1003.
- Ivanovic, D. M., Leiva, B. P., Pérez, H. T., Olivares, M. G., Díaz, N. S., Urrutia, M. S. C., ... & Larráin, C. G. (2004). Head size and intelligence, learning, nutritional status and brain development: head, IQ, learning, nutrition and brain. *Neuropsychologia*, 42(8), 1118-1131.
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(2), 135-154.
- Kanai, R., & Rees, G. (2011). The structural basis of inter-individual differences in human behaviour and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(4), 231-242.
- Karama, S., Ad-Dab'bagh, Y., Haier, R. J., Deary, I. J., Lyttelton, O. C., Lepage, C., ... & Brain Development Cooperative Group. (2009). Positive association between cognitive ability and cortical thickness in a representative US sample of healthy 6 to 18 year-olds. *Intelligence*, 37(2), 145.
- Khundrakpam, B. S., Lewis, J. D., Reid, A., Karama, S., Zhao, L., Chouinard-Decorte, F., ... & Brain Development Cooperative Group. (2017). Imaging structural covariance in the development of intelligence. *Neuroimage*, 144, 227-240.
- Lange, N., Froimowitz, M. P., Bigler, E. D., Lainhart, J. E., & Brain Development Cooperative Group. (2010). Associations between IQ, total and regional brain volumes, and demography in a large normative sample of healthy children and adolescents. *Developmental neuropsychology*, 35(3), 296-317.
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S., ... & Thompson, P. M. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *Neuroimage*, 36(4), 1065-1073.
- Lerch, J. P., Worsley, K., Shaw, W. P., Greenstein, D. K., Lenroot, R. K., Giedd, J., & Evans, A. C. (2006). Mapping anatomical correlations across cerebral cortex (MACACC) using cortical thickness from MRI. *Neuroimage*, 31(3), 993-1003.
- Li, Y., Liu, Y., Li, J., Qin, W., Li, K., Yu, C., & Jiang, T. (2009). Brain anatomical network and intelligence. *PLoS computational biology*, 5(5), e1000395.
- Luders, E., Narr, K. L., Bilder, R. M., Szeszkó, P. R., Gurbani, M. N., Hamilton, L., ... & Gaser, C. (2007). Mapping the relationship between cortical convolution and intelligence: effects of gender. *Cerebral Cortex*, 18(9), 2019-2026.
- Luders, E., Narr, K. L., Thompson, P. M., & Toga, A. W. (2009). Neuroanatomical correlates of intelligence. *Intelligence*, 37(2), 156-163.
- Lyttelton O, Boucher M, Robbins S, Evans A. (2007). An unbiased iterative group registration template for cortical surface analysis. *Neuroimage*, 34, 1535-1544.
- Mackintosh, N. J. (2011). *IQ and Human Intelligence*. Oxford University Press.



- McDaniel, M. A. (2005). Big-brained people are smarter: A meta-analysis of the relationship between in vivo brain volume and intelligence. *Intelligence*, 33(4), 337-346.
- Mechelli, A., Friston, K. J., Frackowiak, R. S., & Price, C. J. (2005a). Structural covariance in the human cortex. *Journal of Neuroscience*, 25(36), 8303-8310.
- Mechelli, A., Price, C. J., Friston, K. J., & Ashburner, J. (2005b). Voxel-based morphometry of the human brain: methods and applications. *Current medical Imaging reviews*, 1(2), 105-113.
- Menary, K., Collins, P. F., Porter, J. N., Muetzel, R., Olson, E. A., Kumar, V., ... & Luciana, M. (2013). Associations between cortical thickness and general intelligence in children, adolescents and young adults. *Intelligence*, 41(5), 597-606.
- Narr, K. L., Woods, R. P., Thompson, P. M., Szeszko, P., Robinson, D., Dimtcheva, T., ... & Bilder, R. M. (2006). Relationships between IQ and regional cortical gray matter thickness in healthy adults. *Cerebral cortex*, 17(9), 2163-211.
- Noble, K. G., Houston, S. M., Kan, E., & Sowell, E. R. (2012). Neural correlates of socioeconomic status in the developing human brain. *Developmental science*, 15(4), 516-527.
- Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyer, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale, M., ... & Xian, H. (2009). Distinct genetic influences on cortical surface area and cortical thickness. *Cerebral cortex*, 19(11), 2728-2735.
- Price, C. J., Ramsden, S., Hope, T. M. H., Friston, K. J., & Seghier, M. L. (2013). Predicting IQ change from brain structure: a cross-validation study. *Developmental cognitive neuroscience*, 5, 172-184.
- Querbes, O., Aubry, F., Pariente, J., Lotterie, J. A., Démonet, J. F., Duret, V., ... & Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. (2009). Early diagnosis of Alzheimer's disease using cortical thickness: impact of cognitive reserve. *Brain*, 132(8), 2036-2047.
- Ramsden, S., Richardson, F. M., Josse, G., Thomas, M. S., Ellis, C., Shakeshaft, C., et al. (2011). Verbal and non-verbal intelligence changes in the teenage brain. *Nature*, 479(7371), 113-116.
- Raizada, R. D. S., & Kishiyama, M. M. (2010). Effects of Socioeconomic Status on Brain Development, and How Cognitive Neuroscience May Contribute to Levelling the Playing Field. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 3.
- Rogers, J., Kochunov, P., Zilles, K., Shelledy, W., Lancaster, J., Thompson, P., ... & Glahn, D. C. (2010). On the genetic architecture of cortical folding and brain volume in primates. *Neuroimage*, 53(3), 1103-1108.
- Raznahan, A., & Bolton, P. (2008). Autism spectrum disorder in childhood. *Medicine*, 36(9), 489-492.
- Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., ... & Giedd, J. N. (2011). How does your cortex grow? *Journal of Neuroscience*, 31(19), 7174-7177.

- Rushton, J. P., & Ankney, C. D. (2009). Whole brain size and general mental ability: a review. *International Journal of Neuroscience*, 119(5), 692-732.
- Schmithorst, V. J., Wilke, M., Dardzinski, B. J., & Holland, S. K. (2005). Cognitive functions correlate with white matter architecture in a normal pediatric population: a diffusion tensor MRI study. *Human brain mapping*, 26(2), 139-147.
- Schmithorst, V. J., & Holland, S. K. (2006). Functional MRI evidence for disparate developmental processes underlying intelligence in boys and girls. *Neuroimage*, 31(3), 1366-1379.
- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N. E. E. A., ... & Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature*, 440(7084), 676-679.
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., ... & Giedd, J. N. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neuroscience*, 28(14), 3586-3594.
- Song, M., Zhou, Y., Li, J., Liu, Y., Tian, L., Yu, C., & Jiang, T. (2008). Brain spontaneous functional connectivity and intelligence. *Neuroimage*, 41(3), 1168-1176.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., & Toga, A. W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *Journal of Neuroscience*, 24(38), 8223-8231.
- Tamnes, C. K., Fjell, A. M., Østby, Y., Westlye, L. T., Due-Tønnessen, P., Bjørnerud, A., & Walhovd, K. B. (2011). The brain dynamics of intellectual development: waxing and waning white and gray matter. *Neuropsychologia*, 49(13), 3605-3611.
- van den Heuvel, M. P., Stam, C. J., Kahn, R. S., & Pol, H. E. H. (2009). Efficiency of functional brain networks and intellectual performance. *Journal of Neuroscience*, 29(23), 7619-7624.
- Wechsler, D. (2014). Wechsler intelligence scale for children-fifth edition. Bloomington, MN: Pearson.
- Wilke, M., Sohn, J. H., Byars, A. W., and Holland, S. K. (2003). Brightspots: correlations of gray matter volume with IQ in a normal pediatric population. *Neuroimage* 20, 202-215.
- Yang, J. J., Yoon, U., Yun, H. J., Im, K., Choi, Y. Y., Lee, K. H., ... & Lee, J. M. (2013). Prediction for human intelligence using morphometric characteristics of cortical surface: partial least square analysis. *Neuroscience*, 246, 351-361.
- Zilles, K., Armstrong, E., Moser, K. H., Schleicher, A., & Stephan, H. (1989). Gyrification in the cerebral cortex of primates. *Brain, Behavior and Evolution*, 34(3), 143-150.
- Zielinski, B. A., Gennatas, E. D., Zhou, J., & Seeley, W. W. (2010). Network-level structural covariance in the developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(42), 18191-18196.

조수현 / 아동·청소년기 뇌 구조의 성숙과 이에 대한 지능의 영향

1차 원고 접수: 2017. 08. 21  
1차 심사 완료: 2017. 10. 24  
2차 원고 접수: 2017. 10. 27  
2차 심사 완료: 2017. 10. 31  
최종 게재 확정: 2017. 11. 03

*(Abstract)*

## A Review of Research on the Maturation of Children and Adolescents' Brain Structure and the Influence of Intelligence

Soohyun Cho

Department of Psychology, Chung-Ang University

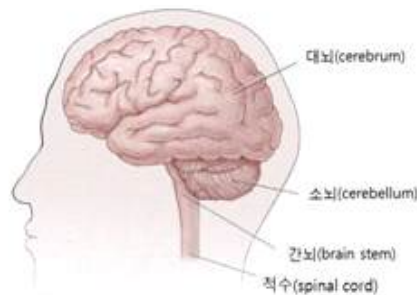
The anatomical structure of the brain reflects a great amount of information about an individual's cognitive ability. The present study reviewed research on developmental changes in brain structure in relation to biological maturation and intellectual growth focusing on children and adolescents. The purpose of the present study was to achieve an understanding of how children and adolescents' brain matures with development and also to examine whether individual differences in intelligence influences the development of brain structure. The first section introduces methods of measurement and analysis of brain structure, such as voxel-based morphometry and structural covariance. The second section reviews studies on the biological maturation of the brain and variables that influence brain development such as sex, environmental factors, and mental disorders, etc. The third section introduces the Parieto-Frontal Integration Theory of intelligence and reviews studies on the association between intelligence and developmental changes of the brain, including changes in structural covariance and functional connectivity. We conclude with a discussion on educational/clinical implications of this work and directions for future studies.

*Key words* : *brain structure, development, maturation, gray matter, cortical thickness, intelligence, individual differences, children, adolescents, MRI.*

## 부 록

### 뇌의 해부학적 구조와 명칭

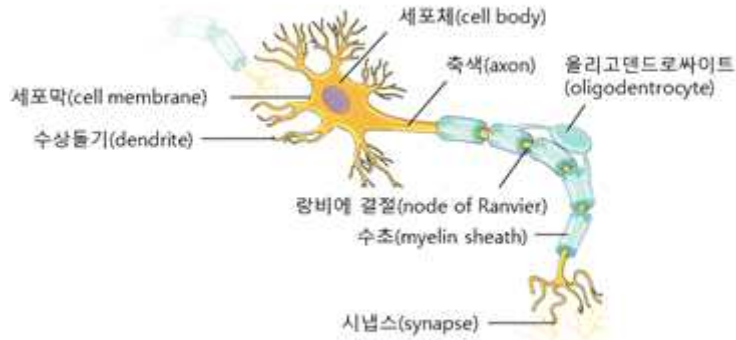
인간의 중추 신경계(central nervous system)는 뇌(brain)와 척수(spinal cord)로 구성되며, 뇌는 대뇌(cerebrum)와 소뇌(cerebellum)로 구성된다[부록 그림 1]. 뇌는 신체의 다른 기관과 마찬가지로 세포 조직으로 구성된다. 뇌를 구성하는 세포는 크게 두 종류로 분류될 수 있는데 하나는 신경세포(neuron, 뉴런)이고 다른 하나는 교세포(glial cell)이다. 교세포에는 여러 종류가 있으며, 그 중에서 대표적인 것으로는 아스트로사이트(astrocyte), 올리고덴드로사이트(oligodendrocyte), 그리고 마이크로글리아(microglia) 등이 있다. 아스트로사이트는 신경 세포 사이의 공간을 메꾸어 주며 세포의 환경을 신경세포가 활동하기에 최적화된 화학적 상태로 유지시켜주는 역할을 한다. 올리고덴드로사이트는 중추신경계 신경세포의 축색을 감싸주어 신경 신호의 전달 속도를 높여준다(부록 그림 2). 마이크로글리아는 신경계의 불순물을 제거해준다. 교세포들은 주로 신경세포의 기능을 보조하는 역할을 하는 것으로 알려져 있으나, 신경세포에 비해 상대적으로 많은 연구가 이루어지지 못하여 그 기능에 대한 이해는 아직 기초적인 수준에 머물러 있다. 최근 연구에 의하면, 학습과 경험에 의해 교세포가 생성(gliogenesis)되며, 이러한 현상이 학습에 의한 회백질의 구조적 변화에 기여한다고 한다(Burgaleta et al., 2014).



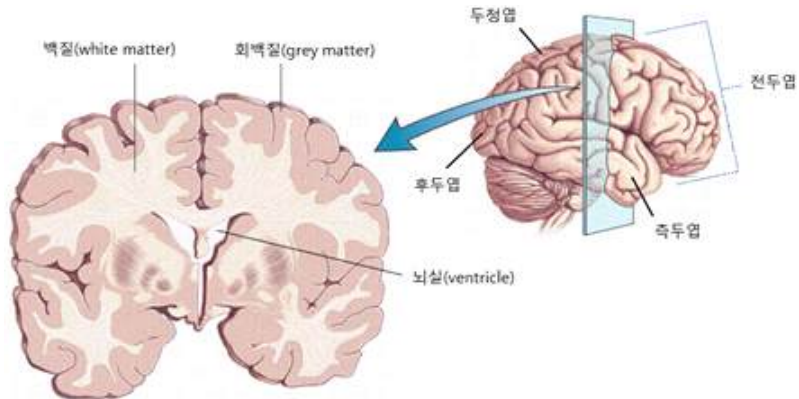
부록 그림 1. 중추 신경계를 구성하는 뇌와 척수

뇌는 거시적으로 신경 세포의 세포체(cell body)가 주로 밀집되어 있는 회백질(gray matter) 영역과 마일린(myelin)에 의해 감싸져 있는 뉴런의 축색(axon) 부분이 주로 밀집되어 있는 백질(white matter) 영역으로 나눌 수 있다[부록 그림 2, 3]. 최근 연구에 의하면 마일린은 신경 세포의 신호 전달 속도를 증진시킬 뿐 아니라, 뇌의 기능적 네트워크를 구현하는 발화 패턴의 타이밍과 동기화를 조절하는 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 마일린은 올리고덴드로사이트가 뉴런을 감싸고 있

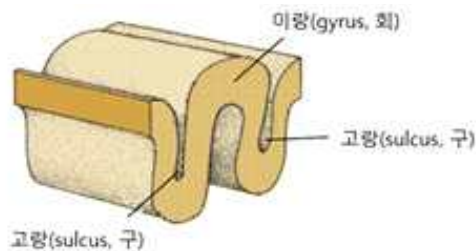
는 부분을 말하며 수초라고 불리기도 한다. 뇌 발달이 진행됨에 따라 점점 더 많은 뉴런의 축색이 수초에 의해 감싸지게 되는데 이와 같은 변화를 수초화(myelination)이라 한다. 수초화 현상은 백질의 부피가 증가하는 주요 원인이라 할 수 있다.



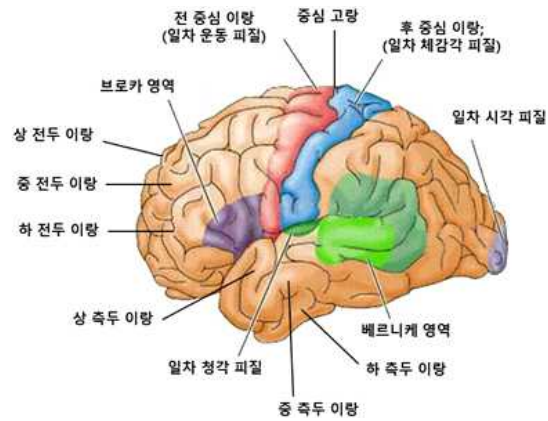
부록 그림 2. 뉴런의 구조와 부위 별 명칭



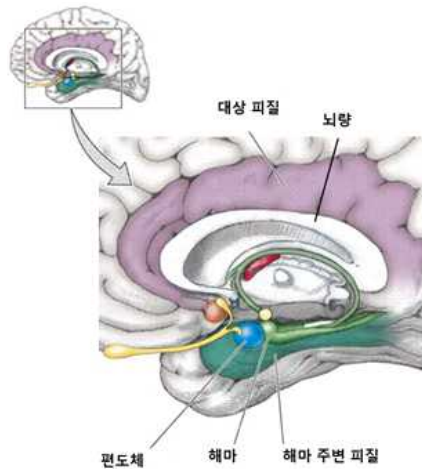
부록 그림 3. 왼쪽 그림은 오른쪽 그림에 나타난 바와 같이 뇌를 자른 단면이며, 회백질은 바깥 쪽의 짙은 색 부분, 백질은 안쪽의 옅은 색 부분, 뇌실은 비어있는 공간을 의미한다.



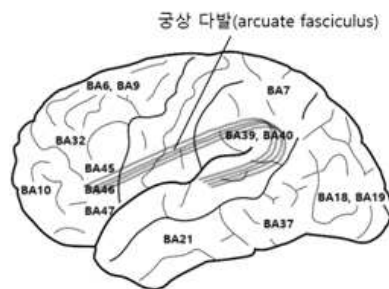
부록 그림 4. 주름진 대뇌 피질 표면의 미랑과 고랑



부록 그림 5. 대뇌 피질 외측 표면의 주요 영역들의 명칭



부록 그림 6. 대뇌 내측 주요 영역들의 명칭.(해마, 대상 피질 등 시상 주변 영역은 변연계(limbic system)의 주요 영역에 속함.)



부록 그림 7. P-FIT 이론의 주요 뇌 영역 (Brodmann Area, BA)