

난독증 연구를 통해서 본 시각 시스템과 읽기 처리 과정의 관계*

주 성 준[†]

읽기는 인간만이 향유하는 상위 인지 기능 중 하나이다. 시각 시스템은 읽기 학습 동안 발생하는 뇌의 학습과 가소성을 연구하기 위해 적합한 뇌의 영역이다. 특히, 상위 시각 영역은 읽기 학습 이전에는 단어에 대해 선택적으로 반응하지 않지만, 성공적인 읽기 학습을 통해 기존의 다른 기능을 담당하는 영역들 사이에서 단어에 대한 선택적 반응을 하는 단어 영역을 형성한다. 또한 시각 시스템은 읽기를 수행하는 동안 읽기 회로 중 가장 먼저 정보처리를 하는 뇌의 영역이다. 하지만 읽기 처리 과정을 위한 시각 시스템의 역할에 대한 연구는 언어 영역 등 상위 인지 영역의 연구에 비해 주목을 받지 못했다. 본 논문에서는 읽기와 밀접한 관계가 있는 시각 시스템의 기능에 대해 개관하고, 읽기 학습 장애인 난독증 연구 결과를 토대로 읽기 처리 과정에 대한 시각 시스템의 기능에 대해 논할 것이다. 끝으로 임의의 시각 자극인 문자 언어와 이에 대응하는 음성 언어를 연합하는 다중 감각 정보처리 과정으로서의 읽기에 대해 논의할 것이다. 본 논문에서 개관하는 선행 연구들은 시각 시스템이 읽기 발달에 매우 중요한 역할을 한다는 것과 시각 시스템의 문제로 인한 난독증 발생의 가능성을 보여주었다. 따라서 읽기에 대한 시각 시스템의 역할을 이해하는 것은 성공적인 읽기 학습을 위한 신경 기제를 규명할 뿐만 아니라 읽기 학습 장애인 난독증 치료를 위한 효과적인 중재 프로그램 개발에 매우 중요한 연구 주제이다.

주제어 : 읽기, 시각 시스템, 난독증, 다중 감각

* 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의해 연구되었음.

† 교신저자: 주성준, 부산대학교 심리학과, 전임교원, 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2,

E-mail: sjoo@pusan.ac.kr

인류의 긴 역사에 비해 인류가 문자 언어를 통해 의사소통을 한 기간은 매우 짧다. 지금까지 발견된 가장 오래된 문자로 알려져 있는 수메르인의 썩기문자(Sumerian Cuneiform)도 약 5,000년 남짓의 역사를 가진다(Kassuba & Kastner, 2015). 발달 과정에서도 읽기는 얼굴 처리, 물체 처리, 음성 언어 처리 등 다른 기능이 이미 형성이 되어 있는 비교적 늦은 시기에 교육을 통해 학습된다. 이러한 사실은 인간의 뇌가 읽기를 위해 발달되어 오지 않았음을 의미하고, 읽기라는 새로운 기능을 형성하기 위해 인간의 뇌는 읽기 학습 동안 뇌의 가소성(plasticity)을 통해 기존의 기능들을 재구성해야만 한다는 것을 의미한다.

시각 시스템은 읽기 학습 동안 뇌 안에서 발생하는 학습과 가소성에 대해 연구할 수 있는 가장 적합한 뇌의 영역이다. 시각 시스템의 상위 시각 영역(Ventral temporal cortex)은 물체의 각 범주에 선택적으로 반응하는 작은 영역으로 구성되어 있다(Grill-Spector & Weiner, 2014; Weiner & Grill-Spector, 2013). 이 중 단어에 선택적으로 반응하는 영역인 단어 영역(Visual word form area, VWFA)은 읽기 학습 이전의 아동들과 읽기 학습 장애인 난독증을 가진 아동 및 성인들(Shaywitz et al., 1998), 문맹인 사람들에게는 발견되지 않는다(Dehaene et al., 2010). 단어 영역은 성공적인 읽기 학습의 결과로 나타나는데, 문맹인 성인들의 성공적인 읽기 학습 후에(Dehaene et al., 2010), 학령기 아동들의 성공적인 읽기 학습 후에(Kubota et al., 2019) 비로소 상위 시각 영역은 다른 일반적인 물체에 비해 단어에 선택적으로 반응하게 된다(Dehaene et al., 2015; Dehaene-Lambertz et al., 2018; Hannagan et al., 2015; McCandliss et al., 2003). 이러한 결과는 시각

시스템의 단어에 대한 신경 활동이 읽기 기능의 발현 및 읽기 능력과 매우 밀접한 관련이 있음을 보여준다.

어떤 신경 기제를 통해 인간의 뇌는 읽기 학습 기간 동안 단어에 선택적으로 반응하는 영역을 생성할 수 있을까? 성공적인 읽기 학습이 되어 있지 않은 뇌의 상위 시각 영역은 시각 자극인 단어 자체에 반응하지 않다기보다는 단어에 대해 반응을 하지만 일반적인 물체와 같이 반응을 하는 듯이 보인다(Kubota et al., 2019). 난독증을 가진 뇌를 대상으로 연구한 선행 연구들은 상위 시각 영역이 단어에 대해 반응하지 않는다고 주장하였지만(Shaywitz et al., 1998), 단어 또한 시각 자극이기 때문에 상위 시각 영역이 단어 자극에 대해 반응하는 것은 어떻게 보면 당연한 결과라 할 수 있다. Kubota 등(2019)의 연구 결과는 읽기 학습 동안 발생하는 가소성의 기제로서 일반적인 물체에 대해 반응하는 영역으로부터 단어에 대해 선택적으로 반응하는 단어 영역을 분화시키는 방식을 제안한다. 또한 같은 연구에서 저자들은 상위 시각 영역의 단어에 대한 선택적 반응의 정도는 아동의 읽기 능력과 강한 정적 상관관계를 갖는다는 것을 보여주었다. 이러한 연구의 결과는 읽기 학습 동안 시각 시스템이 이미 존재하는 여러 기능들을 담당하는 신경 세포를 재구성하여 읽기라는 새로운 기능을 형성하는 매우 중요한 발달 과정을 거친다는 것을 시사한다(Dehaene, 2009; Dehaene & Cohen, 2007).

위의 단락에서 논의한 것처럼 읽기 학습 동안 시각 시스템은 매우 중요한 발달의 과정을 거친다. 또한 읽기를 위한 정보처리는 시각 자극인 문자 또는 단어를 처리하는 시각 정보 처리부터 시작된다. 하지만 이처럼 읽기 처리

과정 중 매우 중요한 역할을 담당하는 시각 시스템에 대한 연구는 언어 처리, 의미 처리, 음운 처리 등의 다른 연구 분야에 비해 미흡하다(Kim & Cho, 2003; Lee & Oh, 2010). 본 논문에서는 읽기와 밀접한 관계가 있는 시각 시스템의 기능들에 대해 개관하고, 읽기 학습 장애인 난독증과 시각 시스템의 기능에 대해 논할 것이다. 또한 임의의 시각 자극인 문자 언어와 이에 대응하는 음성 언어를 연합하는 다중 감각 정보처리 과정으로서의 읽기에 대해 살펴볼 것이다.

시각 시스템의 위계적 구조와 읽기

읽기와 시각 시스템의 관계를 이해하기 위해서 우선 시각 시스템의 시각 정보처리 과정을 이해하는 것이 필요하다. 초기 시각 영역의 신경 세포들은 크기가 작은 수용장(Receptive field)을 가지며 특정 방위, 공간주파수 등에 선택적인 반응을 보인다(De Valois et al., 1982; Hubel & Wiesel, 1968). 시각 시스템은 위계적으로 조직화되어 있는데, 상위 시각 영역으로 갈수록 수용장의 크기가 커지며 하위 시각 영역에서 처리된 시각장(visual field)의 제한된 영역의 시각 특질들을 결합하여 복잡한 시각 패턴들을 처리한다(Riesenhuber & Poggio, 1999).

읽기를 위한 시각 자극인 단어도 다른 물체와 동일한 위계적 시각 정보처리 과정을 거쳐 처리된다고 볼 수 있다. 시각 시스템의 위계 구조 하에서 단어라는 시각 패턴을 구성하는 기본적인 시각 특질들(선, 획, 방위 등)이 초기 시각 영역에서 처리되고, 상위 영역은 시각 특질들을 결합하여 글자, 단어의 형태를 처리한다. 따라서 단어에 대한 선택

적인 반응은 상위 시각 영역에서만 측정할 수 있다. 실제로 기능성자기공명영상(functional magnetic resonance imaging; fMRI)과 피질전도(electrocorticography; ECoG) 기술을 활용한 연구에서 단어에 대한 뇌반응을 측정한 결과, 초기 시각 피질은 단어에 대해 선택적으로 반응하지 않았다. 복측 경로(ventral pathway)의 위계를 따라 복부측두피질(ventral temporal cortex; VTC)에 위치하는 단어 영역은 단어의 형태에 선택적으로 반응하고, 단어 영역 보다 하위 영역은 단어 보다는 글자의 형태에 선택적으로 반응하는 것으로 보인다(Binder et al., 2006; Dehaene et al., 2005; Glezer et al., 2009; Kronbichler et al., 2004; Thesen et al., 2012; Vinckier et al., 2007).

초기 시각 정보처리 과정과 읽기: 중심와 처리(foveal processing)

안구 운동은 읽기와 매우 밀접한 관련이 있다. 글을 읽는 동안 우리는 끊임없이 글자간, 단어간, 줄간 안구 운동을 해야 하기 때문이다. 글 읽기 동안 발생하는 안구 운동 중에는 어떠한 시각 정보처리 과정이 발생하는가? 읽기를 위해서 시각 시스템은 우선 단어를 구성하는 자소, 글자를 해독(decode)해야 한다. 이러한 해독 과정을 위해서 시각 시스템은 초기 시각 정보처리 단계에서 안구 운동을 통해 단어의 상을 망막의 중심와에 맺히도록 해야 한다. 그 이유는 망막의 구조에서부터 찾아볼 수 있다. 망막에 존재하는 빛 수용기(photoreceptor)는 크게 막대세포(rod)와 원뿔세포(cone)로 구분할 수 있다. 빛 수용기들의 신경활동을 통해 생성된 전기 신호는 신경절 세포(ganglion cell)로 전달되고, 시각신경섬유 다

발을 통해 대뇌로 전달된다. 빛 수용기의 수는 신경절 세포의 수보다 많기 때문에 수렴(convergence)이 발생한다(Dowling & Boycott, 1966; Stirling, 2004). 이 수렴 현상은 해상도를 결정하는데, 수렴 정도가 크면 다대일의 연결이 되기 때문에 해상도가 낮고, 반대로 수렴 정도가 작아 일대일의 연결이 되면 해상도가 매우 크다. 다수의 막대세포는 하나의 신경절 세포로 연결되어 수렴이 크고, 원뿔세포는 신경절 세포와 일대일 대응이 될 정도로 수렴이 매우 작다. 수용기들의 분포를 보면, 중심와(fovea)에는 원뿔세포가 밀집해 있고 주변시(periphery)로 갈수록 막대세포의 밀도가 커진다. 따라서 중심와는 해상도가 매우 높고 주변시로 갈수록 해상도는 급격하게 떨어진다. 이러한 망막의 구조 때문에 읽기를 수행하기 위해서 단어의 상이 망막의 중심와에 맞히도록 하는 안구운동이 필요한 것이다.

망막의 구조뿐만 아니라 초기 시각 피질의 겹질 확대(cortical magnification)도 단어에 대한 중심와의 시각 정보처리 과정의 필요성을 요구한다. 겹질 확대란 주변시에 비해 중심와를 처리하는 영역이 시각 피질 내에 더 많이 할당되는 시각피질의 조직화를 의미한다(Van Essen et al., 1984). 망막의 중심와는 망막 전체의 0.01%만을 차지하지만 중심와 영역을 처리하는 초기 시각 피질의 영역은 전체의 8~10%를 차지한다(van Essen & Anderson, 1995). 이는 망막의 중심와로부터 전달되는 높은 해상도의 시각 정보를 처리할 수 있도록 초기 시각 피질이 조직화되어 있음을 의미한다.

망막과 초기 시각피질의 구조는 읽기 학습 동안 안구 운동을 통해 단어의 상이 중심와에 맞히도록 하여 단어가 중심와 시각 정보처리

과정을 통해 처리되도록 하는 것의 중요성을 시사한다. 이러한 초기 시각 정보처리 과정의 특성은 상위 시각 영역에 위치한 단어 영역의 신경세포들의 수용장이 아동들의 발달 과정 동안 중심와 편향(foveal bias)을 갖게 된다는 연구 결과를 예측하게 해 준다(Gomez et al., 2018). 읽기 학습을 하는 아동의 뇌의 상위 시각 영역에서 단어 영역이 형성되는 동안 단어를 중심와에서 처리하는 과정을 통해 단어 영역의 신경 세포들의 수용장이 중심와에 편향되게 형성되어 가는 것이다.

이처럼 초기 정보처리 과정에서부터 시각 시스템과 읽기는 매우 밀접한 관계가 있다. 읽기 학습 동안 시각 시스템은 기본적인 시각 특질(선, 방위 등)을 조합하여 의미있는 단어를 처리하는 것과 높은 해상도를 가진 중심와에서 단어를 처리하기 위해 효율적인 안구 운동을 학습해야만 한다. 하지만 이러한 사실을 통해 정상적이지 않은 안구 운동이 읽기 학습 장애인 난독증의 원인이거나(Pavlidis, 1981, 1983), 안구 운동 훈련을 통해 읽기 학습 장애를 치료할 수 있다고 주장하는 오류에 빠지지 않도록 유의해야 한다. 오히려 난독증을 가진 사람에게서 보이는 비정상적인 안구 운동은 읽기에 어려움을 겪기 때문에 수반되는 것이라고 보는 것이 적합하다(Tinker, 1958; Rayner, 1985).

시각 정보처리 과정과 읽기: 시각 과밀 (visual crowding)

시각 자극의 변화가 읽기 수행에 미치는 영향은 시각 정보처리 과정과 읽기가 밀접한 관계에 있다는 것을 보여주는 직접적인 증거가 될 수 있다. 읽기를 위한 시각 환경은 매우

복잡하다. 좁은 시각장(visual field) 안에 다수의 시각 자극(글자와 단어)이 밀집해 있다. 시각 시스템의 초기 처리 과정은 자극이 밀집해 있는 시각 환경에 제시된 개개의 자극을 처리하는 데에 어려움을 겪는다. 예를 들어, 하나의 글자만 제시되었을 때에는 그 글자를 쉽게 판독할 수 있지만 그 글자가 다른 글자들에 둘러싸여 있을 때에는 그 글자의 판독이 어렵다. 이를 시각 과밀(visual crowding) 현상이라 부른다(Bouma, 1970; Levi, 2008; Pelli & Tillman, 2008; Whitney & Levi, 2011). 이 시각 과밀 현상은 시각 시스템이 시각 환경에 제시된 물체를 처리하는 것에 한계가 있음을 의미한다. 또한 시각 과밀은 단어 또는 글자의 처리 과정과 같은 읽기의 시각 처리 과정에 제약을 준다(Levi, 2008; Pelli & Tillman, 2008; Pelli et al., 2007).

시각 자극인 읽기 환경의 밀집도를 완화시키는 실험적 조작을 통해 시각 과밀 현상과 읽기와의 관계를 조사한 결과, 글자와 글자 사이의 간격을 약간 넓힘으로써 과밀 현상을 완화시킨 단어들을 제시할 때 읽기의 속도와 정확도가 증가하는 것을 관찰하였다(Chung, 2002; Legge et al., 2001; Perea & Gomez, 2012a, 2012b; Perea et al., 2011; Perea, et al., 2012; Yu et al., 2007). 줄 간격을 넓힘으로써 과밀 현상을 완화시키는 조작도 자간 조작과 마찬가지로의 결과를 보였다(Chung, 2004). 이러한 결과는 물체 처리의 한계인 시각 시스템의 시각 과밀이 읽기와도 밀접한 관계가 있음을 시사한다. 한 가지 흥미로운 사실은 읽기 수행을 위한 최적의 자간이 있다는 점이다(Chung, 2002; Legge et al., 2001; Yu et al., 2007). 일정 수준의 자간보다 더 넓은 자간의 단어를 제시하면 읽기 수행이 더 이상 증가하지 않고 오

히려 감소하는데, 최적의 자간은 일반적인 폰트 자간의 기본값인 것처럼 보인다(van den Boer & Hakvoort, 2014).

시각 과밀의 특징을 고려해 보면 자간을 넓히는 것이 순기능적으로만 작용하는 것이 아님을 알 수 있다. 자간을 넓히면 글자가 더 큰 이심률(eccentricity)을 갖는 주변시에 제시되고, 주변시로 갈수록 과밀 영역(crowding zone)이 증가하여 시각 과밀의 영향이 더 커진다(Bouma, 1970). 따라서, 시각 시스템이 가지고 있는 시각 과밀에 의하면 최적의 읽기 수행을 위한 자간이 존재하며, 시각 과밀은 폰트의 개발에 고려해야 할 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 한글 폰트의 글자와 글자 사이, 단어와 단어 사이, 줄 간격을 조절하여 읽기 수행을 조사하는 연구를 통해 한글 읽기 수행을 위한 최적의 조건을 밝히는 것이 필요하다.

지금까지 초기 시각 정보 처리 과정과 읽기의 관계를 살펴본 바에 의하면, 읽기를 위한 자극의 정보 처리 초기 단계에서부터 시각 시스템이 가지고 있는 한계 또는 특성 때문에 읽기의 제약이 발생한다. 글자 재인은 읽기를 위한 기본적인 초기 단계라 할 수 있고(McClelland & Rumelhart, 1981; Pelli, 2003), 읽기를 위한 시각 자극인 글자의 가시성(visibility)은 초기 시각 시스템의 해상도에 따른 시각 민감도(visual acuity)와 초기 시각 정보 처리 과정의 영향으로 인한 시각 과밀에 의해 결정된다. 이러한 시각 시스템의 제약을 극복하기 위해 단어를 구성하는 글자의 정확한 위치를 계열적(serial)으로 처리하는 것이 아니라 병렬적(parallel)이고 전체적으로 처리하는 것이 단어를 효율적으로 처리할 수 있는 방법이 될 수 있다(Grainger, Dufau, & Ziegler, 2016; Snell & Grainger, 2019).

본 논문에서 인용한 글 읽기와 시각 정보 처리 과정의 관계를 밝힌 대부분의 선행 연구들은 로마 알파벳을 사용하는 문자를 사용하여 수행되었다. 로마 알파벳을 사용하는 문자는 풀어쓰기를 하는 반면, 한글은 모아쓰기를 한다. 이러한 중요한 차이 때문에 선행 연구들이 밝힌 시각 밀집과 읽기와의 관계가 한글 읽기에는 적용되지 않을 수 있다. 예를 들어, 로마 알파벳 읽기를 활용한 연구 결과는 단어를 구성하는 글자의 정확한 위치가 중요하지 않다는 것을 보여 준 반면(Frankish & Turner, 2007; Perea & Lupker, 2004; Schoonbaert & Grainger, 2004), 한글 읽기에서는 글자의 정확한 위치가 중요한 역할을 한다(Lee & Taft, 2009, 2011; Rastle et al., 2019). 하지만 한글 읽기와 시각 밀집과의 관계에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 추후 연구를 통해 초기 시각 정보처리와 한글 읽기의 관계를 밝히는 것이 한글 읽기의 기제를 밝히기 위해 반드시 필요하다.

시각 정보처리 과정과 난독증: 시각 과밀 (visual crowding)

읽기와 시각 시스템의 관계는 정상적으로 발달하는 뇌뿐만 아니라 읽기 학습 장애인 난독증을 가진 뇌 연구를 통해서도 살펴볼 수 있다. 난독증은 인구의 약 7%에 영향을 주는 읽기 학습 장애이다(Peterson & Pennington, 2012). 현재까지 주장되어진 난독증의 원인에 대한 여러 이론 중(Ahissar, 2007; Bosse et al., 2007; Goswami, 2003, 2011; Hari & Renvall, 2001; Nicolson & Fawcett, 1990; Nicolson et al., 2001; Snowling, 2000; Ramus & Szenkovits, 2008; Sperling et al., 2005; Stein & Walsh, 1997; Tallal

et al., 1993; Vellutino, 1979; Vidyasagar & Pammer, 2010), 음운처리 과정의 문제에서 그 원인을 찾는 이론이 가장 설득력 있는 이론이다(Boets et al., 2013; Peterson & Pennington, 2012; Snowling, 1998). 하지만 난독증에 존재하는 개인차(individual difference)는 난독증에 여러 하위 유형(subtype)이 존재함을 시사한다. 또한 읽기는 시각 영역, 언어 영역 등의 다양한 수준의 처리 과정과 연관이 되어 있기 때문에 읽기 회로 중 어느 하나의 영역이라도 문제가 생기면 난독증이 발생할 수 있다(Joo et al., 2017; Paulesu et al., 2001; Pennington & Bishop 2009; Pennington, 2006; Peterson & Pennington, 2012; Siok et al., 2004). 따라서 단독적인 난독증의 원인을 규명하려는 시도 보다는 난독증의 원인에는 다양한 요소가 있다고 보는 견해가 더 설득력이 있다(Pennington, 2006; Ramus et al., 2013).

본 논문에서는 초기 시각 정보 처리 과정과 난독증의 관계에 대해서 살펴 볼 것이다. 먼저 읽기의 시각 환경과 관련이 있는 시각 과밀을 완화하기 위해 자간, 단어와 단어 사이, 줄 간격을 증가시켜 만든 텍스트를 사용한 연구에서 시각 시스템과 난독증의 관계를 유추해 볼 수 있다. Zorzi 등(2012)은 이탈리아와 프랑스의 난독증을 가진 8세부터 14세의 아동 74명을 대상으로 일반적인 폰트의 기본 자간으로 인쇄한 텍스트와 자간, 단어와 단어 사이, 줄 간격을 증가시킨 텍스트 읽기 과제 수행을 비교하였다. 연구의 결과는 매우 놀랍다. 아무런 치료 프로그램 없이 단순히 읽기의 시각적 환경만을 변화시켰을 뿐인데, 시각 과밀을 완화한 텍스트 읽기 조건은 기본 자간의 텍스트 읽기 조건에 비해 읽기의 정확도와 속도 모두 증가시키는 효과가 있었다. 이와 비

숫하게 자간을 넓혀 단어 자극을 제시하여 어휘 판단 과제(lexical decision task)를 수행한 결과, 난독증을 가진 아동들은 보통의 자간보다 자간을 넓힌 단어의 어휘 판단 과제를 더 빠르게 수행할 수 있었다(Perea et al., 2012). 또한, 한 추적(longitudinal) 연구에서는 유치원 때의 시각 자극 간 거리를 조작한 시각 탐색 과제의 수행율이 1학년 때의 읽기 능력을 예측한다는 결과를 보여주었다. 자극 간 거리가 작을 때 시각 탐색 과제의 수행율이 좋지 않을수록 정상 발달 아동에 비해 읽기 능력이 떨어지는 것을 관찰하였다(Bertoni et al., 2019).

이러한 연구 결과는 난독증과 시각 과밀이 밀접한 관계가 있음을 시사한다. 실제로 난독증을 가진 성인을 대상으로 시각 과밀 영역(crowding zone, 목표자극을 보고할 수 있는 목표자극과 방해자극 간 최소한의 거리)을 측정 한 결과 읽기 능력이 뛰어난 성인에 비해 난독증을 가진 성인은 시각 과밀 영역이 더 크다는 것이 보고되었다(Martelli et al., 2009). 한편, 난독증을 가진 성인의 시각 과밀이 보통 성인의 시각 과밀과 다르지 않다는 보고도 있다(Doron et al., 2015). 이 두 연구의 상반된 결과는 서로 다른 자극을 사용했기 때문에 발생한 것일 수 있다. Martelli 등(2009)은 글자를 자극으로 사용했고, Doron 등(2015)은 작은 막대를 자극으로 사용했다. 난독증을 가진 참가자에게 글자 자극은 단순한 시각 자극인 막대 자극보다 처리하기 어려운 자극일 수 있다. 또 다른 가능성은 난독증의 다양한 요인에서 찾아볼 수 있다. 즉, 각 연구의 참가자들에 대한 표본 추출 편향(sampling bias)이 발생했을 가능성을 배제할 수 없다. 예를 들어, Martelli 등(2009)의 연구에 참여한 참가자들 중 우연히 시각 과밀 때문에 난독증을 가진 참가자들의

수가 Doron 등(2015)의 연구에 참여한 참가자들의 수보다 더 많았을 가능성이 있다.

실제로 Doron 등(2015)의 개인 데이터를 관찰해 보면, 난독증을 가진 참가자 중 대부분은 시각 과밀이 통제집단과 다르지 않지만 소수의 참가자는 다른 참가자들에 비해 시각 과밀이 심했다. 이 결과가 시사하는 바는 시각 과밀이 심한 소수의 참가자들에게 있어서 난독증의 원인은 비정상적인 시각 과밀에 기인할 수 있다는 것이다.

난독증과 시각 과밀의 관계를 보다 직접적으로 밝히는 방법은 비정상적인 시각 과밀을 가진 난독증 참가자를 대상으로 시각 과밀을 완화하여 제시한 텍스트 읽기 수행시에 읽기 수행율이 증가하는지를 검증하는 것이다(Joo et al., 2018). Joo 등(2018)은 기본적인 시각 자극인 원을 사용하여 시각 과밀 영역을 측정하였고, 시각 과밀 영역의 크기가 커질수록(시각 과밀이 심할수록) 읽기 능력이 감소함을 관찰하였다. 이 연구의 중요한 발견은 시각 과밀 영역이 큰 참가자일수록 자간, 단어 간, 행 간 거리를 넓힌 텍스트 읽기 효과의 크기가 커졌다는 것이다. 이 연구 결과는 난독증의 다양한 원인 중 초기 시각 정보처리 과정의 특성인 시각 과밀의 이상이 포함될 수 있으며, 심각한 시각 과밀을 가진 개인이 시각 과밀을 완화하는 읽기 환경을 제시할 때 읽기의 수행이 좋아질 수 있음을 의미한다.

시각 정보처리 과정과 난독증: 움직임 처리(motion processing)

초기 시각 정보처리 과정과 난독증의 관계에 대한 여러 문제 중 풀리지 않는 한 가지 퍼즐은 움직임 처리와 같은 시각 자극의 빠른

정보처리가 필요한 처리 과정과 난독증 간의 상관관계이다. 시각 시스템의 배측 경로(dorsal pathway)의 처리 과정 중 하나인 움직임 처리와 물체와 같이 복측 경로(ventral pathway)에서 선택적으로 처리가 되는 단어를 읽는 기능이 왜 연관이 있는지 알 수는 없지만, 선행 연구들은 움직임 자극의 민감도가 낮을수록 읽기 능력이 떨어지는 것을 보고하였다(Boets et al., 2011; Demb et al., 1997; Eden et al., 1996; Livingstone et al., 1991; Lovegrove et al., 1980; Talcott et al., 2000).

움직임 처리와 읽기 능력의 상관관계를 둘러싼 두 변인 간의 인과관계에 관한 논쟁은 지금까지도 계속되고 있다. 하나의 이론은 움직임 처리과정과 관련된 뇌의 신경활동의 손상이 난독증을 야기한다고 주장한다(Livingstone et al., 1991; Stein & Walsh, 1997). 신경생리학 연구 방법과 정신물리학(psychophysics) 연구 방법을 활용한 연구들은 움직임 처리과정과 연관된 뇌의 영역에서, 움직임 자극에 대한 민감도를 나타내는 역치(threshold) 측정을 통해 움직임 처리와 읽기 능력 간의 관계를 관찰하였다(Ben-Shachar et al., 2007; Boets et al., 2011; Cornelissen et al., 1995; Demb et al., 1997; Livingstone et al., 1991). 이 이론의 문제점은 움직임 처리와 읽기 능력의 상관관계 결과에 대한 반복검증에 실패한 연구가 보고되었고(Amitay et al., 2002; Paulesu et al., 2014; Skottun, 2000), 난독증 치료에 가장 효과적인 프로그램은 움직임 처리와 관련이 없는 음운처리 훈련 프로그램이라는 사실에 있다(Snowling, 1998; Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004).

움직임 처리와 읽기 능력의 인과관계 논쟁의 다른 이론은 난독증으로 인한 읽기 경험의

부재가 움직임 처리의 문제를 야기한다고 주장한다(Goswami, 2015; Olulade et al., 2013). 이 이론에 따르면 난독증 뇌의 움직임 처리의 문제는 읽기의 어려움 때문에 글 읽기를 하지 않거나, 읽기 발달에 문제가 없는 집단에 비해 현저하게 부족한 읽기 경험 때문에 나타나는 결과일 뿐이다. 이 이론을 뒷받침하는 가장 강력한 실험적 증거는 기능성 자기공명영상(fMRI)을 활용하여 난독증을 가진 아동들을 위한 읽기 훈련 개입(intervention) 프로그램 전과 후의 신경활동 차이를 측정된 연구에서 찾아볼 수 있다. Olulade 등(2013)은 읽기 훈련 전과 후에 뇌의 영역 중 움직임 처리 영역이라고 알려져 있는 MT(middle temporal) 영역의 신경 활동을 측정된 결과, 읽기 훈련 후에 MT의 신경 활동이 읽기 훈련 전에 비해 증가함을 관찰하였다. 이 연구의 저자들은 읽기 훈련을 통한 많은 읽기 경험이 움직임 자극에 대한 신경 활동을 증가시키는 결과를 바탕으로 난독증으로 인한 읽기 경험의 부재가 움직임 처리의 문제를 야기한다고 주장하였다.

그러나 MT의 기능성 자기공명영상 반응은 물리적 자극에 대한 반응을 나타내기도 하지만(Rees et al., 2000; Heeger et al., 2000), 주의와 과제 난이도와 같은 인지적 요소에 의해 조절되기도 한다(Buracas et al., 2005; Huk & Heeger, 2000; Runeson et al., 2013). 따라서 MT의 신경 활동의 증가가 반드시 움직임 자극에 대한 민감도의 증가를 의미하지는 않는다. 오히려 읽기 훈련이 시각 자극에 대한 주의 할당 훈련과 같은 역할을 했을 수도 있고, MT의 신경 활동의 증가가 읽기 훈련 전과 후의 동일한 움직임 자극에 대한 과제 수행으로 인해 발생한 과제 훈련 효과를 반영하는 결과일

수도 있다. 이러한 요인은 읽기 경험의 부재가 움직임 처리의 문제를 야기한다는 주장을 약화시킨다.

읽기 훈련 개입 프로그램 동안 읽기 능력의 향상과 움직임 자극에 대한 민감도의 변화를 동시에 추적 측정하는 것이 움직임 처리와 난독증의 인과관계를 밝히는 가장 좋은 방법일 수 있다(Goswami 2015). Joo 등(2017)은 난독증을 가진 아동들을 대상으로 8주간의 집중적인 읽기 개입 프로그램 동안 읽기 능력의 변화를 추적하여 측정하였다. 또한, 무선 점 움직임 자극(random dot motion stimuli)에 대한 민감도 변화를 역치(threshold) 측정을 통해 추적하여 측정하였다. 만약 읽기 경험의 부재가 움직임 처리의 문제를 야기한다면, 집중적인 읽기 훈련 개입 프로그램을 통해 읽기 능력이 증가함에 따라 움직임에 대한 민감도도 증가해야만 한다.

연구 결과 아동들의 읽기 능력은 읽기 훈련 개입 프로그램 후에 평균적으로 한 학년 수준만큼 상승하였다. 읽기 훈련 개입 프로그램이 단 8주간이었던 것을 고려할 때, 읽기 훈련 개입 프로그램이 난독증을 가진 아동들의 읽기 능력을 효과적으로 증가시킨 것으로 보인다. 하지만, 움직임 민감도는 첫 번째 측정(읽기 훈련 개입 프로그램 전)에서 빠르게 증가하였고, 이후 읽기 훈련 개입 프로그램 도중과 후에는 차이가 없었다. 이 결과는 아동들이 처음 접하는 과제인 무선 점 움직임 자극에 대한 민감도 측정 과제를 매우 빨리 습득하였고(과제 학습, task learning), 읽기 능력 및 읽기 경험의 증가는 움직임 민감도를 향상시키지 못했다는 것을 의미한다.

또한 Joo 등(2017)은 움직임 민감도를 바탕으로 참가자를 두 집단으로 나누어 읽기 능력의

향상을 분석하였다. 읽기 훈련 개입 프로그램을 시작하기 전에는 움직임 민감도가 낮은 집단의 읽기 능력은 움직임 민감도가 높은 집단의 읽기 능력보다 낮았다. 하지만 움직임 민감도가 낮은 집단과 움직임 민감도가 높은 집단의 읽기 능력 상승곡선의 기울기는 같았다. 이 결과는 움직임 처리 과정의 문제가 글 읽기 학습을 방해하지 않는다는 것을 의미한다.

움직임 처리 과정과 난독증의 관계에 대한 선행 연구를 종합해 보면, 움직임 처리의 문제와 낮은 읽기 능력 간에는 아무런 인과관계가 없는 듯이 보인다. 오히려 두 변인을 야기하는 공통적인 기제의 손상이 움직임 처리의 문제와 난독증을 야기할 수 있으며(Cicchini et al., 2015; Galaburda et al., 2006), 움직임 처리의 문제는 단지 난독증을 발생시키는 여러 요인들 중 하나일 수 있다(Pennington, 2006).

읽기: 시각 시스템과 언어 시스템의 상호 작용

읽기는 시각 자극인 단어와 청각 자극인 음성 언어를 처리하여 텍스트에서 전달하고자 하는 의미를 파악하는 다중감각 처리과정이다. 시각 시스템은 읽기를 위한 뇌의 정보처리 과정 중 글자와 단어를 재인하는 매우 중요한 역할을 한다. 하지만 읽기는 단어의 시각 정보처리 과정에 그치는 것이 아니라, 의미처리까지 수반되어야 한다. 시각 자극인 단어의 의미처리를 위해서는 단어와 연합된 음성 언어가 처리되어야만 한다. 따라서 읽기 경험이 많은 성인이 글을 읽을 때에 시각 영역뿐만 아니라 언어 영역이 활성화되는 것은 놀라운 일이 아니다(Klein et al., 2015; Pattamadilok et al., 2017; Paulesu et al., 2001; Poldrack et al., 1999; Price, 2012; Simos et al.,

2009; Turkeltaub et al., 2003; Wilson et al., 2004).

초기 글 읽기 학습 동안 아동은 아무런 의미가 없는 시각 자극인 글자가 어떤 음성 언어로 대응되는가에 대한 연합을 학습한다. 아동의 뇌에서는 시각 자극인 글자 또는 단어와 청각 자극인 음성 언어를 처리하는 뇌의 두 영역이 동시에 활성화된다. 성공적인 읽기 학습을 위해서는 글자와 음성 언어의 연합에 대한 반복 학습이 필요하며, 뇌의 시각 영역과 언어 영역은 반복해서 동시에 활성화 된다. 이러한 과정을 거쳐 마치 헵의 학습(Hebbian learning; Hebb, 1949)과 같이 시각 자극인 단어에 대해 자동적으로 언어 영역이 반응하게 되는 것이다.

그렇다면 언어 영역의 시각 자극인 단어에 대한 자동적인 반응 정도가 성공적인 읽기 학습의 척도가 될 수 있을 것이다. Joo 등(2021)은 뇌자도(Magnetoencephalography, MEG)를 활용하여 다양한 읽기 수준의 아동들을 대상으로 글 읽기 과제(어휘 판단 과제)와 응시점에 제시된 주의 과제를 수행하는 동안 언어 영역의 신경활동을 측정하였다. 주의 과제를 수행하는 동안 제시되는 단어는 읽기 과제와는 무관한 과제이기 때문에, 주의 과제를 수행하는 동안 제시되는 단어에 대한 신경 반응은 단어에 대한 자동적인 반응이다. 연구 결과, 음운 처리 과정과 연관된 뇌의 언어 영역인 상측두회(superior temporal gyrus)에서의 단어에 대한 자동적인 반응과 읽기 능력은 강한 정적인 상관관계를 나타내었다.

맺음말

지금까지의 읽기에 대한 많은 연구는 언어

처리(음운처리) 과정이나 상위 인지 기능(집행 기능 등)과의 관계에 초점을 두었다(Cutting et al., 2009). 하지만 읽기를 위한 자극인 단어의 시각 처리 과정을 담당하는 시각 시스템은 뇌의 읽기 회로의 중요한 한 영역이라 할 수 있다. 본 논문에서는 지금까지 주목받지 못한 읽기 기능과 시각 정보처리와의 관계를 중심으로 선행 연구를 개관하고, 시각 정보처리 기능의 문제와 읽기 학습 장애인 난독증의 관계를 살펴보았다. 선행 연구를 종합해 보면, 시각 정보처리 과정의 초기 단계인 망막 시각 정보 처리 과정에서부터 상위 시각 영역에 이르기까지 읽기와 매우 밀접한 연관이 있을 것을 알 수 있다. 또한 읽기 학습 장애인 난독증과 시각 정보 처리과정의 관계에서 알 수 있듯이 시각 시스템의 문제가 난독증의 원인 중 하나가 될 수 있다.

인류의 역사 속에서 읽기 기능은 비교적 최근에 만들어진 것이며, 인간의 뇌는 읽기를 위해 발달되어 오지 않았다. 따라서 인간의 뇌는 읽기 학습 동안 이미 존재하는 기능들을 활용하여 새로운 기능인 읽기 기능을 형성해야 한다. 예를 들어, 시각 시스템의 상위 영역에 존재하는 단어에 대해 선택적으로 반응하는 단어 영역이 읽기 학습 이전에는 존재하지 않았다가 성공적인 읽기 학습 이후에 형성된다. 단어 영역이 상위 시각 영역에서 어떠한 기제로 형성이 되는지는 아직 밝혀지지 않았다(Dehaene & Cohen, 2007; Kubota et al., 2019). 또한 언어 영역은 읽기 학습 이전에는 청각 신호인 음성 언어를 처리하는 영역이지만, 읽기 학습 이후에는 시각 자극인 단어에 대해서도 반응을 하게 된다. 특히 장기적인 읽기 경험 동안 시각 자극인 단어와 이에 대응하는 음성 언어의 연합은 단어에 대한 자동적인 반

응을 야기하고, 이 자동 반응의 강도는 아동의 성공적인 글 읽기 학습의 척도가 될 수 있다(Joo et al., 2021). 이러한 결과는 시각 시스템에서 처리된 정보가 읽기 회로 안에 존재하는 여러 영역의 신경활동에 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

읽기는 뇌의 많은 영역들의 신경활동의 결과로 나타나는 고등 인지 기능이다. 읽기와 연관된 뇌의 영역 중 하나라도 문제가 생기면 읽기 학습 장애인 난독증이 발생할 수 있다. 음운처리 과정의 문제가 난독증의 주요 원인이라는 이론이 많은 연구자들 사이에서 받아들여지고 있긴 하지만, 본 논문에서 개관한 것처럼 난독증을 가진 사람들 중에는 시각 시스템의 문제와 읽기 학습 장애가 밀접한 연관을 보이는 집단도 있다. 따라서 읽기 처리 과정의 복잡성을 고려해 볼 때, 난독증에 대한 하나의 원인을 찾는 기존의 연구 패러다임에서 벗어나 난독증의 원인을 다수의 요인에 의해 설명하는 모델의 개발이 필요하다(O'Brien & Yeatman, 2020; Ramus et al., 2013; Pennington, 2006, Peterson & Pennington, 2012).

본 개관 논문을 통해서 우리는 읽기와 시각 시스템이 매우 밀접한 연관이 있다는 것을 살펴보았다. 읽기 처리 과정과 시각 시스템의 관계에 대한 연구는 성공적인 읽기 학습을 위한 학습법 개발에 시각 시스템의 연구를 접목시켜야 함을 시사한다. 또한 시각 시스템과 읽기에 대한 연구는 난독증을 가진 아동들의 읽기 능력 향상을 위한 텍스트 환경 개발의 과학적 원리를 제공할 수 있다. 끝으로 종이에 인쇄된 텍스트를 읽는 전통적인 읽기 환경과 최근 증가하고 있는 디지털 매체를 통해 텍스트를 읽는 읽기 환경에서 시각 시스템의 정보처리가 어떻게 다른지 연구함으로써 읽기

에 적합한 디지털 읽기 환경을 개발할 수 있다는 점에서 시각 시스템과 읽기에 대한 연구의 의의를 찾을 수 있다.

참고문헌

- Ahissar, M. (2007). Dyslexia and the anchoring-deficit hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(11), 458-465.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.015>
- Amitay, S., Ben Yehudah, G., Banai, K., & Ahissar, M. (2002). Disabled readers suffer from visual and auditory impairments but not from a specific magnocellular deficit. *Brain*, 125(10), 2272-2285.
<https://doi.org/10.1093/brain/awf231>
- Ben-Shachar, M., Dougherty, R. F., Deutsch, G. K., & Wandell, B. A. (2007). Contrast responsivity in MT+ correlates with phonological awareness and reading measures in children. *Neuroimage*, 37(4), 1396-1406.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.05.060>
- Bertoni, S., Franceschini, S., Ronconi, L., Gori, S., & Facoetti, A. (2019). Is excessive visual crowding causally linked to developmental dyslexia? *Neuropsychologia*, 130, 107-117.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.04.018>
- Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *Neuroimage*, 33(2), 739-748.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.06.053>

- Boets, B., de Beeck, H. P. O., Vandermosten, M., Scott, S. K., Gillebert, C. R., Mantini, D., Bulthe, J., Sunaert, S., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2013). Intact but less accessible phonetic representations in adults with dyslexia. *Science*, 342(6163), 1251-1254.
<https://doi.org/10.1126/science.1244333>
- Boets, B., Vandermosten, M., Cornelissen, P., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2011). Coherent motion sensitivity and reading development in the transition from prereading to reading stage. *Child development*, 82(3), 854-869.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01527.x>
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.05.009>
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226(5241), 177-178.
<https://doi.org/10.1038/226177a0>
- Buracas, G. T., Fine, I., & Boynton, G. M. (2005). The relationship between task performance and functional magnetic resonance imaging response. *Journal of Neuroscience*, 25(12), 3023-3031.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4476-04.2005>
- Chung, S. T. (2002). The effect of letter spacing on reading speed in central and peripheral vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 43(4), 1270-1276.
- Chung, S. T. (2004). Reading speed benefits from increased vertical word spacing in normal peripheral vision. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*, 81(7), 525.
<https://doi.org/10.1097/00006324-200407000-00014>
- Cicchini, G. M., Marino, C., Mascheretti, S., Perani, D., & Morrone, M. C. (2015). Strong motion deficits in dyslexia associated with DCDC2 gene alteration. *Journal of Neuroscience*, 35(21), 8059-8064.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5077-14.2015>
- Cornelissen, P., Richardson, A., Mason, A., Fowler, S., & Stein, J. (1995). Contrast sensitivity and coherent motion detection measured at photopic luminance levels in dyslexics and controls. *Vision Research*, 35(10), 1483-1494.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)98728-R](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)98728-R)
- Cutting, L. E., Materek, A., Cole, C. A., Levine, T. M., & Mahone, E. M. (2009). Effects of fluency, oral language, and executive function on reading comprehension performance. *Annals of dyslexia*, 59(1), 34-54.
<https://doi.org/10.1007/s11881-009-0022-0>
- Dehaene, S. (2009). Reading in the brain. New York.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-398.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4),

- 234-244.
<https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 335-341.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.004>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Kolinsky, R., Morais, J., & Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science*, 330(6009), 1359-1364.
<https://doi.org/10.1126/science.1194140>
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS Biology*, 16(3), e2004103.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1997). Brain activity in visual cortex predicts individual differences in reading performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(24), 13363-13366.
<https://doi.org/10.1073/pnas.94.24.13363>
- De Valois, R. L., Albrecht, D. G., & Thorell, L. G. (1982). Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex. *Vision Research*, 22(5), 545-559.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90113-4)
- Doron, A., Manassi, M., Herzog, M. H., & Ahissar, M. (2015). Intact crowding and temporal masking in dyslexia. *Journal of Vision*, 15(14), 13-13.
<https://doi.org/10.1167/15.14.13>
- Dowling, J. E., & Boycott, B. B. (1966). Organization of the primate retina: electron microscopy. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 166(1002), 80-111.
<https://doi.org/10.1098/rspb.1966.0086>
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., Maisog, J. M., Woods, R. P., & Zeffiro, T. A. (1996). Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature*, 382(6586), 66-69.
<https://doi.org/10.1038/382066a0>
- Frankish, C., & Turner, E. (2007). SIHGT and SUNOD: The role of orthography and phonology in the perception of transposed letter anagrams. *Journal of Memory and Language*, 56(2), 189-211.
<https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.11.002>
- Galaburda, A. M., LoTurco, J., Ramus, F., Fitch, R. H., & Rosen, G. D. (2006). From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, 9(10), 1213-1217.
<https://doi.org/10.1038/nn1772>
- Glezer, L. S., Jiang, X., & Riesenhuber, M. (2009). Evidence for highly selective neuronal tuning to whole words in the “visual word form area”. *Neuron*, 62(2), 199-204.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.03.017>
- Grill-Spector, K., & Weiner, K. S. (2014). The functional architecture of the ventral temporal cortex and its role in categorization. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(8), 536-548.
<https://doi.org/10.1038/nrn3747>
- Gomez, J., Natu, V., Jeska, B., Barnett, M., &

- Grill-Spector, K. (2018). Development differentially sculpts receptive fields across early and high-level human visual cortex. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03166-3>
- Goswami, U. (2003). Why theories about developmental dyslexia require developmental designs. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12), 534 - 540.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.10.003>
- Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3-10.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>
- Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(1), 43-54.
<https://doi.org/10.1038/nrn3836>
- Grainger, J., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2016). A vision of reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(3), 171-179.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.12.008>
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7), 374-382.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.05.006>
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 525-532.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01801-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01801-5)
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley.
- Heeger, D. J., Huk, A. C., Geisler, W. S., & Albrecht, D. G. (2000). Spikes versus BOLD: what does neuroimaging tell us about neuronal activity? *Nature Neuroscience*, 3(7), 631-633.
<https://doi.org/10.1038/76572>
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *The Journal of Physiology*, 195(1), 215-243.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008455>
- Huk, A. C., & Heeger, D. J. (2000). Task-related modulation of visual cortex. *Journal of neurophysiology*, 83(6), 3525-3536.
<https://doi.org/10.1152/jn.2000.83.6.3525>
- Joo, S. J., Donnelly, P. M., & Yeatman, J. D. (2017). The causal relationship between dyslexia and motion perception reconsidered. *Scientific reports*, 7(1), 1-7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04471-5>
- Joo, S. J., Tavabi, K., Caffarra, S., & Yeatman, J. D. (2021). Automaticity in the reading circuitry. *Brain and Language*, 214, 104906.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2020.104906>
- Joo, S. J., White, A. L., Strodtman, D. J., & Yeatman, J. D. (2018). Optimizing text for an individual's visual system: The contribution of visual crowding to reading difficulties. *Cortex*, 103, 291-301.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.013>
- Kassuba, T., & Kastner, S. (2015). The Reading brain. *Frontiers for Young Minds*, 3:5.
<https://doi.org/10.3389/frym.2015.00005>
- Kim, S. O., & Jo, H. S. (2003). The relationship

- between phonological awareness and reading ability in young children. *The Korean Journal of Psychology: General*, 22,(1) 19-43.
- Klein, M., Grainger, J., Wheat, K. L., Millman, R. E., Simpson, M. I., Hansen, P. C., & Cornelissen, P. L. (2015). Early activity in Broca's area during reading reflects fast access to articulatory codes from print. *Cerebral Cortex*, 25(7), 1715-1723.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bht350>
- Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A., Staffen, W., & Ladurner, G. (2004). The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage*, 21(3), 946-953.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.10.021>
- Kubota, E. C., Joo, S. J., Huber, E., & Yeatman, J. D. (2019). Word selectivity in high-level visual cortex and reading skill. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 36, 100593.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.09.003>
- Lee, K. H., & Oh, K. J. (2010). The relation of auditory temporal processing and early reading ability and phonological awareness. *The Korean Journal of Psychology: General*, 29(3), 561-581.
- Lee, C. H., & Taft, M. (2009). Are onsets and codas important in processing letter position? A comparison of TL effects in English and Korean. *Journal of Memory and Language*, 60(4), 530-542.
<https://doi.org/10.1016/j.jml.2009.01.002>
- Lee, C. H., & Taft, M. (2011). Subsyllabic structure reflected in letter confusability effects in Korean word recognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 129-134.
<https://doi.org/10.3758/s13423-010-0028-y>
- Legge, G. E., Mansfield, J. S., & Chung, S. T. (2001). Psychophysics of reading: XX. Linking letter recognition to reading speed in central and peripheral vision. *Vision Research*, 41(6), 725-743.
[https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00295-9)
- Levi, D. M. (2008). Crowding – An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, 48(5), 635-654.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.12.009>
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 88(18), 7943-7947.
<https://doi.org/10.1073/pnas.88.18.7943>
- Lovegrove, W. J., Bowling, A., Badcock, D., & Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, 210(4468), 439-440.
<https://doi.org/10.1126/science.7433985>
- Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, 9(4), 14-14.
<https://doi.org/10.1167/9.4.14>
- 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.

- [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00134-7)
McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological review*, 88(5), 375.
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.5.375>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1990). Automaticity: A new framework for dyslexia research? *Cognition*, 35(2), 159-182.
[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90013-A](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90013-A)
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24(9), 508-511.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01896-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8)
- O'Brien, G., & Yeatman, J. D. (2020). Bridging sensory and language theories of dyslexia: Toward a multifactorial model. *Developmental Science*, e13039.
<https://doi.org/10.1111/desc.13039>
- Olulade, O. A., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2013). Abnormal visual motion processing is not a cause of dyslexia. *Neuron*, 79(1), 180-190.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.05.002>
- Pattamadilok, C., Chanoine, V., Pallier, C., Anton, J. L., Nazarian, B., Belin, P., & Ziegler, J. C. (2017). Automaticity of phonological and semantic processing during visual word recognition. *NeuroImage*, 149, 244-255.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.02.003>
- Paulesu, E., Danelli, L., & Berlingeri, M. (2014). Reading the dyslexic brain: multiple dysfunctional routes revealed by a new meta-analysis of PET and fMRI activation studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 830.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00830>
- Paulesu, E., Démonet, J. F., Fazio, F., McCrory, E., Chanoine, V., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cossu, G., Habib, M., Frith, C. D., & Frith, U. (2001). Dyslexia: Cultural diversity and biological unity. *Science*, 291(5511), 2165-2167.
<https://doi.org/10.1126/science.1057179>
- Pavlidis, G. T. (1981). Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia*, 19(1), 57-64.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(81\)90044-0](https://doi.org/10.1016/0028-3932(81)90044-0)
- Pavlidis, G. T. (1983). The "dyslexia syndrome" and its objective diagnosis by erratic eye movements. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements in reading: Perceptual and language processes* (pp. 441-466). New York: Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-583680-7.5030-8>
- Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423(6941), 752-756.
<https://doi.org/10.1038/nature01516>
- Pelli, D. G., & Tillman, K. A. (2008). The uncrowded window of object recognition. *Nature Neuroscience*, 11(10), 1129-1135.
<https://doi.org/10.1038/nn.2187>
- Pelli, D. G., Tillman, K. A., Freeman, J., Su, M., Berger, T. D., & Majaj, N. J. (2007). Crowding and eccentricity determine reading rate. *Journal of vision*, 7(2), 20-20.
<https://doi.org/10.1167/7.2.20>

- Pennington, B. F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), 385-413.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.04.008>
- Pennington, B. F., & Bishop, D. V. (2009). Relations among speech, language, and reading disorders. *Annual Review of Psychology*, 60, 283-306.
<https://doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163548>
- Perea, M., & Gomez, P. (2012a). Increasing interletter spacing facilitates encoding of words. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(2), 332-338.
<https://doi.org/10.3758/s13423-011-0214-6>
- Perea, M., & Gomez, P. (2012b). Subtle increases in interletter spacing facilitate the encoding of words during normal reading. *PLoS One*, 7(10), e47568.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047568>
- Perea, M., & Lupker, S. J. (2004). Can CANISO activate CASINO? Transposed-letter similarity effects with nonadjacent letter positions. *Journal of memory and language*, 51(2), 231-246.
<https://doi.org/10.1016/j.jml.2004.05.005>
- Perea, M., Moret-Tatay, C., & Gómez, P. (2011). The effects of interletter spacing in visual-word recognition. *Acta Psychologica*, 137(3), 345-351.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.04.003>
- Perea, M., Panadero, V., Moret-Tatay, C., & Gómez, P. (2012). The effects of inter-letter spacing in visual-word recognition: Evidence with young normal readers and developmental dyslexics. *Learning and Instruction*, 22(6), 420-430.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.04.001>
- Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2012). Developmental dyslexia. *The lancet*, 379(9830), 1997-2007.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60198-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60198-6)
- Poldrack, R. A., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *Neuroimage*, 10(1), 15-35.
<https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0441>
- Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *Neuroimage*, 62(2), 816-847.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.04.062>
- Ramus, F., Marshall, C. R., Rosen, S., & van der Lely, H. K. J. (2013). Phonological deficits in specific language impairment and developmental dyslexia: towards a multidimensional model. *Brain*, 136(2), 630-645.
<https://doi.org/10.1093/brain/aws356>
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What phonological deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129-141.
<https://doi.org/10.1080/17470210701508822>
- Rastle, K., Lally, C., & Lee, C. H. (2019). No flexibility in letter position coding in Korean. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 45(4), 458-473.
<https://doi.org/10.1037/xhp0000617>

- Rayner, K. (1985). The role of eye movements in learning to read and reading disability. *Remedial and Special Education, 6*(6), 53-60.
<https://doi.org/10.1177/074193258500600609>
- Rees, G., Friston, K., & Koch, C. (2000). A direct quantitative relationship between the functional properties of human and macaque V5. *Nature Neuroscience, 3*(7), 716-723.
<https://doi.org/10.1038/76673>
- Riesenhuber, M., & Poggio, T. (1999). Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience, 2*(11), 1019-1025.
<https://doi.org/10.1038/14819>
- Runeson, E., Boynton, G. M., & Murray, S. O. (2013). Effects of task and attentional selection on responses in human visual cortex. *Journal of Neurophysiology, 109*(10), 2606-2617.
<https://doi.org/10.1152/jn.00318.2012>
- Schoonbaert, S., & Grainger, J. (2004). Letter position coding in printed word perception: Effects of repeated and transposed letters. *Language and Cognitive Processes, 19*(3), 333-367.
<https://doi.org/10.1080/01690960344000198>
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., Shankweiler, D. P., Liberman, A. M., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Katz, L., Marchione, K. E., Lacadie, C., Gatenby, C., & Gore, J. C. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, *95*(5), 2636-2641.
<https://doi.org/10.1073/pnas.95.5.2636>
- Simos, P. G., Pugh, K., Mencl, E., Frost, S., Fletcher, J. M., Sarkari, S., & Papanicolaou, A. C. (2009). Temporal course of word recognition in skilled readers: A magnetoencephalography study. *Behavioural Brain Research, 197*(1), 45-54.
<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.07.038>
- Siok, W. T., Perfetti, C. A., Jin, Z., & Tan, L. H. (2004). Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature, 431*(7004), 71-76.
<https://doi.org/10.1038/nature02865>
- Skottun, B. C. (2000). The magnocellular deficit theory of dyslexia: the evidence from contrast sensitivity. *Vision Research, 40*(1), 111-127.
[https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00170-4)
- Snell, J., & Grainger, J. (2019). Readers are parallel processors. *Trends in Cognitive Sciences, 23*(7), 537-546.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.04.006>
- Snowling, M. (1998). Dyslexia as a phonological deficit: Evidence and implications. *Child Psychology and Psychiatry Review, 3*(1), 4-11.
<https://doi.org/10.1111/1475-3588.00201>
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia* (2nd ed.). Oxford, UK: Blackwell.
- Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2005). Deficits in perceptual noise exclusion in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience, 8*(7), 862-863.
<https://doi.org/10.1038/nn1474>
- Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences, 20*(4), 147-152.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(96\)01005-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)01005-3)
- Sterling, P. (2004). How retinal circuits optimize

- the transfer of visual information. In L. M. Chalupa & J. S. Werner (Eds), *The visual Neurosciences* (Vol. 1, pp. 234-259). Cambridge, MA: MIT Press.
- Talbot, J. B., Hansen, P. C., Assoku, E. L., & Stein, J. F. (2000). Visual motion sensitivity in dyslexia: evidence for temporal and energy integration deficits. *Neuropsychologia*, 38(7), 935-943.
[https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00020-8)
- Tallal, P., Miller, S., & Fitch, R. H. (1993). Neurobiological basis of speech: a case for the preeminence of temporal processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682, 27-47.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb22957.x>
- Thesen, T., McDonald, C. R., Carlson, C., Doyle, W., Cash, S., Sherfey, J., Felsovalyi, O., Girard, H., Barr, W., Devinsky, O., Kuzniecky, R., & Halgren, E. (2012). Sequential then interactive processing of letters and words in the left fusiform gyrus. *Nature Communications*, 3(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1038/ncomms2220>
- Tinker, M. A. (1958). Recent studies of eye movements in reading. *Psychological bulletin*, 55(4), 215.
<https://doi.org/10.1037/h0041228>
- Torgesen, J. K., Alexander, A. W., Wagner, R. K., Rashotte, C. A., Voeller, K. K., & Conway, T. (2001). Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities: Immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. *Journal of Learning Disabilities*, 34(1), 33-58.
<https://doi.org/10.1177/002221940103400104>
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6(7), 767-773.
<https://doi.org/10.1038/nn1065>
- Vellutino, F. R. (1979). *Dyslexia: Research and theory*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *Journal of child psychology and psychiatry*, 45(1), 2-40.
<https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>
- van den Boer, M., & Hakvoort, B. E. (2015). Default spacing is the optimal spacing for word reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(4), 697-709.
<https://doi.org/10.1080/17470218.2014.964272>
- Van Essen, D. C., & Anderson, C. H. (1995). Information processing strategies and pathways in the primate visual system. In Zornetzer et al. (Eds), *An Introduction to Neural and Electronic Networks* (pp. 45-76). Academic Press.
- Van Essen, D. C., Newsome, W. T., & Maunsell, J. H. R. (1984). The visual field representation in striate cortex of the macaque monkey: Asymmetries, anisotropies, and individual variability. *Vision Research*, 24(5), 429-448.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90041-5)
- Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in*

- Cognitive Sciences*, 14(2), 57-63.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.12.003>
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, 55(1), 143-156.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.05.031>
- Weiner, K. S., & Grill-Spector, K. (2013). Neural representations of faces and limbs neighbor in human high-level visual cortex: evidence for a new organization principle. *Psychological Research*, 77(1), 74-97.
<https://doi.org/10.1007/s00426-011-0392-x>
- Whitney, D., & Levi, D. M. (2011). Visual crowding: A fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(4), 160-168.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.02.005>
- Wilson, S. M., Saygin, A. P., Sereno, M. I., & Iacoboni, M. (2004). Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature neuroscience*, 7(7), 701-702.
<https://doi.org/10.1038/nn1263>
- Yu, D., Cheung, S.-H., Legge, G. E., & Chung, S. T. L. (2007). Effect of letter spacing on visual span and reading speed. *Journal of Vision*, 7(2), 1-10.
<https://doi.org/10.1167/7.2.2>
- Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., Bravar, L., George, F., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109(28), 11455-11459.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1205566109>

1차원고접수 : 2021. 03. 22.

2차원고접수 : 2021. 07. 27.

최종게재결정 : 2021. 09. 07.

On the relationship between visual system in the reading process: learning from dyslexia research

Sung Jun Joo

Pusan National University

Only humans possess the high-level cognitive function of reading. The visual system is the best platform to study learning and plasticity of the brain during learning to read. For example, the high-level visual areas of the illiterate brain do not selectively respond to words, and only after successful reading acquisition, the visual word form area emerges from the already established areas that selectively respond to various object categories. Furthermore, in the reading circuitry, the visual system is at the front end of reading process. However, compared to research on language and high-level cognitive areas, the role of the visual system in reading has attracted little attention. In this review paper, we summarize the reading-related function of the visual system and discuss how deficits in the visual system relate to developmental dyslexia, learning disability in reading based on dyslexia research. Finally, we discuss reading as multi-sensory processing, in which one should associate arbitrary visual symbols with speech sounds. Previous research has shown the important role of the visual system in reading development and suggested deficits in the visual system might cause dyslexia. Our research suggests that intervention programs for dyslexia as well as research on reading development should include the results from research on the visual system.

Key words : reading, the visual system, dyslexia, multi-sensory