한국심리학회지 : 일반
Korean Journal of Psychology: General
2011, Vol. 30, No. 1, 1-22

공감각의 신경기전에 대한 연구 개관*

김 채 연†
고려대학교 심리학과

공감각은 한 양태의 감각 자극이 연관된 감각 경험과 다른 양태의 감각 경험을 동시에 야기하는 특수한 현상이다. 공감각의 진위 여부 및 지각적 실재성에 대한 정신물리학적, 인지심리학적 연구 성과들이 축적되면서, 다양한 신경과학적 방법을 이용하여 공감각의 신경기전을 밝히려는 시도가 증가되어 왔다. 본 논문은 최근 20여 년간 발표된 공감각의 신경기전에 대한 연구 성과들을 다양한 측면에서 조망한다. 공감각의 신경기전과 관련된 연구 주제는 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는 공감각의 발생 원인을 규명하는 것이고, 두 번째는 공감각 경험이 실제 감각 경험을 주관하는 뇌 영역 및 뇌 정보처리 과정과 연관되는지 탐구하는 것이다. 본 논문은 첫 번째 주제와 관련하여 대표적인 신경 모델들을 비교해보고, 유전학적 접근 연구들을 소개한다. 또한 두 번째 주제와 관련하여 다양한 뇌기능 영상화 방법 및 사건관련 전위를 이용한 최근 연구 성과들을 소개하고 비교, 논의한다.

주제어 : 공감각, 신경기전, 유전학, 신경 모델, 뇌기능 영상화, 사건관련전위

---

* 이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2009-332-H00011)

† 교신저자: 김채연, 고려대학교 심리학과 교수, 서울시 성북구 안암동 5가 고려대학교 우당교양관 505호
Tel: 02-3290-2866, E-mail: chaikim@korea.ac.kr

공감각은 한 가지 감각 자극이 그 자극에 적절한 감각 경험과 동시에 다른 감각 경험을 야기하는 현상이다(Cytowic & Eagleman, 2009). 예를 들어, 청각 자극이 청각 경험과 동시에 시각 경험을 유발하는 경우나, 미각 자극이 미각 경험과 동시에 촉각 경험을 유발하는 경우와 같이 감각 간의 연합으로 나타난다(Cytowic, 1989). 또한 글자를 볼 때 색을 경험하는 색-자소 공감각(color-graphemic synesthesia)과 같이, 한 가지 감각 양태 내에서 서로 다른 세부 특징들 간에 발생하기도 한다. 감각 간에 나타나건 감각 내에서 나타나건, 공감각은 유발된 감각 경험에 이를 유발한 "적절한" 물리적 대응 자극이 없다는 점에서 착각 접합(illusory conjunction)의 한 예로 해석될 수 있다. 피아노 건반을 통해 연주된 "도" 음을 들을 때 그 소리에는 "빨간" 것이라고는 아무 것도 없다. 따라서 어떤 공감각자가 "도" 음을 듣고 빨간색을 본다면 그 공감각자의 색 경험은 착시에 가깝다고 볼 수 있는 것이다. 하지만, 공감각에 관한 문헌에서 공감각을 "착각" 지각으로 규정하는 경우는 매우 드물다. 그 이유는 이 조건이 인구 중 일부에서만 경험되고, 공감각자들 개개인의 경험에도 차이가 크기 때문이다. 또한 공감각은 환각(hallucination)이나 심상(mental imagery)으로 규정되지도 않는데, 이는 공감각 경험이 실제 물리적 자극에 의해서만 유발되기 때문이다. 다시 말해서 감각 자극(예를 들어, "도" 음)과 공감각 경험(예를 들어, "빨간" 색)은 일대일로 대응된다. 이렇듯 자극과 경험 간의 설명하기 어려우나 강한 연합이 공감각을 다른 지각 상태와 구별짓는다.

공감각의 존재는 수세기에 걸쳐 알려져 왔으나, 오랫동안 주로 일화적 묘사에 머물러 있었다. 공감각이 과학적 논의의 대상으로 자리잡기 시작한 것은 불과 20여 년 밖에 되지 않았다. 하지만 공감각은 특히 시각 신경과학 분야에서 최근 엄청난 속도로 관심을 불러일으키고 있다. 이에 따라 공감각을 다루는 논문이 주요 학술지를 장식하고, 학술대회에서 공감각을 주제로 한 세션이 빈번히 구성되고 있으며, 학술지의 특별판이 공감각에 할애되기도 하였다(Mattingley & Ward, 2006).

초기의 공감각 연구는 검사-재검사의 일관성 여부를 통해 공감각 현상의 진위를 판별하는 것이 주를 이루었다(Asher, Aitken, Farooqi, Kurmani, & Baron-Cohen, 2006; Baron-Cohen, Harrison, Goldstein, & Wyke, 1993; Baron-Cohen, Wyke, & Binnie, 1987; Mattingley, Rich, Yelland, & Bradshaw, 2001). 더불어, 공감각 경험의 자동성을 입증하기 위해서, 공감각 유발 자극이, 유발되는 공감각 경험과 동일한 물리적 자극과 함께 제시되는 경우, 상이한 물리적 자극과 함께 제시되는 경우에 비해 처리 효율성이 높아짐을 보이는 변형된 스트룹 과제가 활용되기도 하였다(Dixon, Smilek, Cudahy, & Merikle, 2000; Mills, Boteler, & Oliver, 1999; Odgaard, Flowers, and Bradman, 1999; Palmeri, Blake, Marois, Flanery, & Whetsell, 2002; Paulsen & Laeng, 2006; Ward, Huckstep, & Tsakanikos, 2006).

검사-재검사 일관성과 공감각 스트룹 과제들을 통하여 공감각 경험의 존재와 자동성을 입증한 후에, 연구자들은 공감각 경험이 그에 대응되는 실제 지각 경험과 얼마나 유사한지를 비교하였다. 예를 들어, "도"음을 들을 때 느껴지는 빨간색이 실제 빨간색 물감이 종이 위에 칠해진 것을 볼 때의 경험에 비견될 수 있는지가 관심의 대상이 되었다. 많은 연구들을 통해서 공감각 경험이 실제 경험과 같은 지각적 실재성을 지닌다는 점이 밝혀졌다

(Hubbard, Manohar, & Ramachandran, 2006; Laeng, Svartdal, & Oelmann, 2004; Palmeri et al., 2002; Ramachandran & Hubbard, 2001a; Witthoft & Winawer, 2006). 또한 공감각 유발 자극에 대한 의식적 자각 및 주의가 공감각 경험에 미치는 영향에 대한 논의도 활발하게 진행되어 왔다. 일부 연구자들은 유발 자극에 대한 의식적 자각 없이도 공감각 경험이 유발될 수 있다고 주장하였다(Ramachandran & Hubbard, 2001b; Smilek, Dixon, Cudahy, & Merikle, 2001; Smilek, Dixon, & Merikle, 2005a; Wagar, Dixon, Smilek, & Cudahy, 2002). 그러나 또 다른 연구자들은 유발 자극에 대한 의식적 자각이 공감각 경험의 전제 조건이라고 반론을 제기하였다(Mattingley et al., 2001; Rich & Mattingley, 2005).

공감각 경험의 진위와 지각적 실재성에 대한 실험적 증거가 축적됨에 따라, 최근 공감각 연구는 공감각의 원인에 대한 문제로 그 무게 중심이 옮겨지고 있다. 공감각의 신경기전를 연구하는 것도 이러한 질문에 답변을 구하기 위한 시도 중 하나라고 볼 수 있다. 감각 지각의 신경생리학적 기반에 대한 우리의 이해가 공감각 현상에 대한 검증 가능한 이론을 개발할 수 있는 정도까지 진보했기 때문에, 공감각의 신경기전에 대한 연구 성과들이 빠른 속도로 축적되고 있다. 본 논문은 급격히 발전하고 있는 이러한 연구 성과들을 빠짐없이 다루고 논의함으로써, 공감각의 신경기전에 대한 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

공감각의 발생 원인에 대한 신경 모델

공감각의 신경기전에 대한 연구는 근본적으로 공감각이 발생하는 원인에 대한 질문으로부터 출발한다. 일군의 연구자들은 공감각의 신경 기반을 설명하기 위한 이론적 모델을 개발하는 데 전력을 다해왔다. 이 절에서는 공감각의 신경 모델과 관련된 연구 성과들을 먼저 논의하기로 하겠다.

공감각 - 특히 색-자소공감각[1] - 의 신경 기반을 설명하기 위해 고안된 여러 가지 모델들이 있지만, 그 중에서도 가장 널리 수용되고 있는 두 종류의 모델이 있다. 첫째로, Baron-Cohen과 그의 동료들은, 연관 감각 양태 혹은 세부 특징을 담당하는 뇌 영역들 간의 비정상적인 연결성 때문에 공감각이 발생한다는 모델을 제안하였다(Baron-Cohen et al., 1993). 예를 들어 색-자소 공감각자의 경우, 뇌의 색 연관 영역(hV4/V4v)과 자소 연관 영역(좌뇌 후두-측두엽 연결부위) 간에 일반인에게서는 나타나지 않는 시냅스의 연결이 있기 때문에 공감각 경험을 하게 된다는 것이다(그림 1). 이러한 설명은 모든 영아가 태어날 때는, 감각 양태가 뚜렷이 구별되지 않고, 관련 영역들이 상당 수준 연결된 상태라는 관점과 상응한다. 이러한 발달적 관점에 따르면 영아기에는 우리는 모두 공감각자들이며, 성인이 되어서도 나타나는 공감각은 발달 단계 중 신경 분절이 실패한 결과라고 볼 수 있다(Maurer, 1993). 물론 신경 분절의 실패가 뇌 영역 간의 특이한 연결성을 설명하는 유일한 방법은 아니다. 공감각이 새로운 신경 연결의 발생에 기인할 가능성도 있다.

---

[1] 인구 중 공감각자의 비중에 대해서는 인구통계학적 조사 연구가 진행되어 왔다. 가장 최근의 연구에 따르면 공감각자는 인구 23명 중 한 명은 공감각을 경험하며, 인구 90명 중 한 명은 색-자소 공감각자라고 한다(Simner et al., 2005).

둘째로, Grossenbacher와 Lovelace는 기존의 신경 경로상에서 피드백 신호가 억제되지 못하는 것이 공감각의 신경 기반이라는 제안을 내놓았다(Grossenbacher & Lovelace, 2001). 이 모델에 따르면 색-자소 공감각은, 자소와 연관된 신경 활동의 피드백 신호가 억제의 감소로 인하여 다른 경로로 "새어 나가기" 때문에 발생하는 것으로 보인다. 그 결과, 피드백 신호의 억제 감소가 없었다면 독립적이었을 자소 처리 경로와 색 처리 경로가 동시에 활성화되며, 공감각 색 경험이 야기된다는 것이다.

두 모델을 비교해볼 때, 첫 번째 Baron-Cohen 등의 연결성 모델의 경우에는, 공감각자의 뇌에 일반인과 다른 해부적인 특징이 있으며, 이것이 공감각의 발생 원인이라는 관점을 보인다. 반면 Grossenbacher와 Lovelace의 피드백 억제 감소 모델에 따르면, 공감각자의 뇌는 정상인의 뇌와 해부적으로 동일하다. 다만, 신호 처리 과정에서 일반인과 구별되는 기능적인 특징을 보이며, 이로 인해 공감각 경험이 발생한다는 입장이다. 현재까지 발표된 뇌기능 영상화 연구들은 주로 공감각 경험시 색처리 영역과 자소 처리 영역이 동시에 활성화된다는 것을 보여주어, 두 모델 모두와 양립 가능한 결과들을 제시해 왔다. 두 모델을 검증하기 위해서는 뇌 활성화 양상만을 보여주는 기능적 영상화 방법보다는, 영역들 간의 해부적 연결성을 검증할 수 있는 구조적 영상

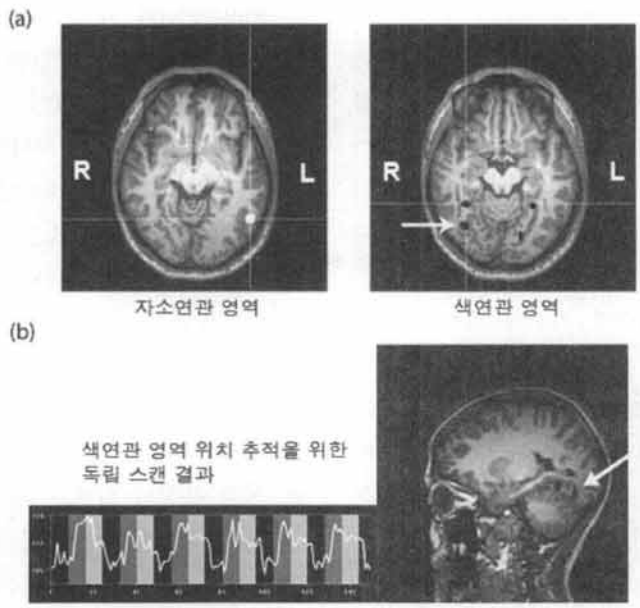

그림 1. 색-자소 공감각 연결성 모델 관련 주요 뇌 영역(저자의 미출간 자료) (a) 글자를 볼 때 유사글자(pseudo-fonts)를 볼 때보다 활성화가 큰 자소연관 영역(좌측 그림 백색 표시) 및 색 자극을 볼 때 무색 자극을 볼 때보다 활성화가 큰 색연관 영역들(우측 그림 흑색 표시). 공감각에 대한 연결성 모델에서는 이 두 영역들 간에 특수한 해부적 연결성의 존재를 가정한다. (b) 색연관 영역 위치 추적을 위한 fMRI 독립스캔 결과. 블록 디자인을 이용하여 1)응시점(좌측 BOLD time series 플롯에서 흑색표시 기간), 2)색자극(진회색), 3)무색자극(연회색) 제시시 뇌 활성화의 변화를 추적함. 이 때 우측 뇌 그림에서 화살표로 표시된 하측두엽 전부와 후부 영역들이 색자극 제시 시 무색자극 제시 시에 비해 더 큰 활성화를 나타내는 색연관 영역(hV4/V8 인접 영역)으로 확인됨.

화 방법, 특히 확산텐서영상(Diffusion Tensor Imaging, DTI) 방법이 가장 결정적인 연구 수단이 될 수 있다. 이들 경험적 연구 방법 및 그 성과에 대해서는 뒷 절에서 다시 자세히 논의하기로 하겠다.

공감각의 발생 원인에 대한 유전학적 접근

공감각의 발생 원인을 규명하기 위해 신경모델을 구축하는 것과 더불어 또 한 가지 가능한 접근 방식은 공감각의 유전적 기반을 밝히는 것이다. 공감각 연구 초기에는 공감각자에 대한 몇 가지 관찰 및 보고들이 공감각 경험과 관련된 유전적 요인을 주목하게 했다. 예를 들어 한 가족 내에서 공감각자가 빈번히 발견되는 점(Galton, 1883), 게다가 보고된 공감각자들 중 여성의 비율이 남성에 비해 높다는 관찰 등이 그것이다. 공감각자 중 여성이 많다는 관찰에서 출발하여, 공감각이 X-염색체 연관 우세 형질(X-linked dominant trait)이라는 가설이 발생하였다(Bailey & Johnson, 1997).

이러한 가설을 검증하기 위해 일란성 쌍생아가 포함된 공감각자 가족에 대한 연구가 진행되었다(Smilek, Moffatt, Pasternak, White, Dixon, & Merikle, 2002; Smilek, Dixon, & Merikle, 2005b; Ward & Simner, 2005). 먼저 여성 일란성 쌍생아에 대한 사례 연구에서 Smilek 등은, 쌍생아 자매 중 한 명은 색-자소 공감각자이고 다른 한 명은 공감각자가 아닌 경우가 존재함을 보고하였다. 이러한 보고는 X-염색체 연관 우세 형질가설에 위배되는 것이었다. 그러나 저자들은, X-염색체의 비활성화(X-chromosome inactivation) 패턴이 이 쌍생아 자매에게서 다르게 나타나서 공감각과 관련된 표현형에서 차이를 나타낼 가능성이 존재함을 들어, 자신들의 연구가 X-염색체 연관 우세 형질가설과 화해할 수 있는 가능성을 열어두었다(Smilek, Moffatt, Pasternak, White, Dixon, & Merikle, 2002). 그러나 이러한 가능성은 2005년에 동일 연구진에 의해 발표된 남성 일란성 쌍생아에 대한 사례 연구를 통해 기각되었다. 하나의 X-염색체만을 지니는 남성일란성 쌍생아의 경우 X-염색체의 비활성화가 발생하지 않는다. 그런데 이 사례 연구에서 쌍생아 형제 중 한 명은 공감각자인 반면 다른 한 명은 공감각자가 아니었다. 따라서 이 사례는 X-염색체의 비활성화 가설, 더 나아가서 공감각의 X-염색체 연관 우세 형질 가설을 반증하였다(Smilek, Dixon, & Merikle, 2005).

쌍생아 연구는 공감각자 중 여성의 비율이 남성에 비해 훨씬 높다는 관찰에 대해 명확한 대답을 제공하지 못하였다. 그렇다면 공감각을 유발하는 유전자가 존재하는가? "공감각 유전자"를 찾아내기 위해 몇몇 공감각 연구 그룹들이 공감각자 가족의 유전자 지도를 탐구해왔다. 마침내 2009년, 공감각 유전자에 대한 최초의 연구가 발표되었다. 청각과 시각 간의 연합을 경험하는 공감각자를 포함한 43가족, 총 196명을 대상으로 한 이 대규모 연구에서, Asher와 동료들은 색청(色聽) 공감각과 2, 5, 6, 그리고 12번 염색체와의 연관성을 보고하였다(Asher et al., 2009). 유전자 스캔 결과를 해석하는 데에는 세심한 주의가 필요하다는 점을 전제로, 저자들은 선행 연구들을 참고하여 이들 염색체들이 연관성을 보인 또다른 기능과 조건들을 논의하였다. 예를 들어, 염색체 2번은 자폐증과도 연관성을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 이 하나의 결과가

공감각자가 자폐증을 경험한다거나, 공감각과 자폐증이 동일한 유전적 기반을 갖는다는 것을 확증하지는 않는다. 공감각과 연관성을 보인 염색체 네 부분들이 구체적으로 어떤 작용을 하여 공감각을 발생시키는지 밝히기까지는 많은 연구가 더 필요할 것이다. 실제로 세계적인 공감각 연구 거점지 및 유전자 연구 거점지에서 공감각에 대한 유전자 지도 연구가 현재 활발히 진행 중이다.

공감각 색 경험에 대한 뇌기능 영상화 연구

공감각의 신경기전을 다루는 데 있어서 유용한 방법 중 하나는 뇌기능 영상화이다. 지금까지 발표된 이 주제에 관한 뇌기능 영상화 연구는 소수에 불과하며, 그중 초기 연구들이 보여주는 결과 또한 일관적이지 못했다(Blake, Palmeri, Marois, & Kim, 2005; Hubbard & Ramachandran, 2005; Rich & Mattingley, 2002). 그러나 최근에는 보다 조심스럽게 고안된 뇌기능 영상화 패러다임을 사용하여 공감각 경험의 신경 기반에 관한 구체적인 주제를 연구하려는 시도가 늘어나고 있다.

공감각에 대한 최초의 뇌기능 영상화 연구는 1995년에 Paulesu와 그의 동료들에 의해 수행되었다(Paulesu, Harrison, Baron-Cohen, Watson, Goldstein, Heather, Frackowiak, & Frith, 1995). Paulesu 등은 색청 공감각자와 비공감각자들에게 헤드폰을 통하여 공감각 색 경험을 유발하는 단어와 공감각 색 경험을 유발하지 않는 순수음을 들려주고, 연관된 뇌 반응을 양전자방출단층촬영 기법(Positron Emission Tomography; PET)을 이용해서 비교하였다. 그 결과, 비공감각자에 비해 공감각자들에게서, 우뇌 중전두회(right middle frontal gyrus), 뇌섬엽(insula), 그리고 좌뇌 하측두엽 후부(left posterior inferior temporal cortex)에서 공감각 유발 자극과 연관된 활성화 증가가 관찰되었다. 그러나 색 처리 영역으로 알려진 hV4 영역을 포함한 초기 시각 처리 영역에서는 공감각자와 비공감각자 간의 차이가 관찰되지 않았다. 연구자들은 이러한 결과를 바탕으로, 상위 시각 연합 피질과 언어연관 영역이 색청 공감각에 관련되는 반면, 정보처리 과정상 초기에 자리한 감각 피질들의 색청 공감각 관련 여부는 명확치 않다고 결론지었다.

이어 2001년에는 기능적 자기공명영상(functional Magnetic Resonance Imaging; fMRI) 방법을 이용하여 색청 공감각에 관여하는 뇌 영역을 보고하는 사례 연구가 두 편 발표되었다. 이 연구들을 필두로, 2000년대에는 fMRI 방법이 공감각의 신경기전을 규명하는 가장 유용한 수단으로 채택되었다. fMRI는 대뇌 피질, 특히 회백질을 둘러싸고 있는 혈류 중 산소헤모글로빈의 농도 변화를 측정하여 간접적인 방식으로 뇌신경 활동을 측정하는 기술이다. 이에 따라 fMRI 신호를 BOLD(Blood Oxygenated Level Dependent) 신호라고 부른다(Nair, 2005).

먼저 Weiss와 그의 동료들은 색청 공감각자의 공감각 색 경험이 양반구의 retrosplenial 피질(bilateral retrosplenial cortex) 및 색 처리 영역을 포함하는 선조외 피질(extrastriate cortex)의 활성화와 연관된다고 보고하였다(Weiss, Shah, Toni, Zilles, & Fink, 2001). 반면 Aleman과 연구자들은 색청 공감각자의 공감각 색 경험이 일차시각피질(V1)의 활성화와 연관된다고 보고하였다(Aleman, Rutten, Sitskoorn, Dautzenberg, & Ramsey, 2001). 이 두 연구는 공감각의 신경기

전에 대한 초기 fMRI 연구로서 그 의의를 지닌다. 하지만 두 연구 모두 한 명의 색청 공감각자를 대상으로 한 사례 연구로서, 그 결과를 일반화하기 어렵다는 결정적인 한계를 지니고 있다. 또한 그 결과에서도 Weiss 등은 선조외피질, Aleman 등은 선조피질(striate cortex, 제 1차 시각 영역)의 활성화를 관찰, 보고함으로써, 대뇌 시각 영역 중 어떤 수준에서 공감각 경험이 반영되는지에 대해 비일관적인 결과 양상을 보여주었다.

본격적인 공감각에 대한 뇌기능 영상화 연구는 2002년 Nunn과 동료들이 발표한 fMRI 연구에서 찾아볼 수 있다. 이전의 연구들에 비하여 연구된 피험자 수에 있어서나 기능적 자기공명영상 방법에서나 한층 향상된 이 연구는, 13명의 색청 공감각자들과 28명의 비공감각자들의 뇌활성화 양상을 비교하였다. 그 결과, 공감각자들에게 공감각 색 유발 단어를 들려준 조건에서는 일반적으로 색 처리를 담당하는 hV4/V8 영역에서 활성화 증가가 관찰되었다. 이러한 패턴은 비공감각자들에게서는 관찰되지 않았다(Nunn, Gregory, Brammer, Williams, Parslow, Morgan, Morris, Bullmore, Baron-Cohen, & Gray, 2002).

2003년에 이르러서야 공감각에 대한 fMRI 연구들이 색-자소 공감각자들을 그 대상으로 삼기 시작하였다. 먼저 Elias와 동료들이 한 명의 색-자소 공감각자와 한 명의 비공감각자를 대상으로 fMRI 연구를 실시하여, 공감각 색 경험이 좌뇌 배측 시각 경로 상의 영역들의 활성화와 연관된다는 결과를 보고하였다(Elias, Saucier, Hardy, & Sarty, 2003). 2005년, Hubbard와 동료 연구자들은 여섯 명의 색-자소 공감각자들과 여섯 명의 비공감각자들을 대조군으로 연구하였다. 연구 결과, 색-자소 공감각자들이 공감각 색 경험을 유발하는 무채색의 자극(즉 글자나 숫자)을 볼 때, 시각적으로 유사하지만 공감각 색 경험을 유발하지 않는 자극을 볼 때에 비해 색 정보에 선택적으로 반응하는 시각 영역에서 활성화가 더 크게 나타났다(Hubbard, Arman, Ramachandran, & Boynton, 2005). 특히 이 연구에서는 색 연관 영역이 독립적인 스캔에 의해 기능적으로 정의되었다는 점에서 활성화 영역의 해부적 정보에 의존했던 이전 연구와 대비되는 장점이 있다. 다시 말해, 실제 색 자극과 무색 자극을 대비하여 색 자극에 선택적으로 반응하는 영역을 기능적으로 먼저 정의하고, 공감각 색 경험에 의해 활성화되는 뇌 영역과의 공간적 일치 여부를 비교한 것이다(그림 1b 참조). 4명의 색-자소 공감각자를 대상으로 한 또다른 fMRI 연구에서 Sperling과 동료 연구자들은, 공감각 색 경험을 유발하는 자극이 비유발 자극에 비해 hV4/V8 영역에서 더 큰 활성화를 야기한다고 보고하였다(Sperling, Prvulovic, Linden, Singer, & Stirn, 2006).

또한 색-자소 공감각자를 대상으로 한 Hubbard와 Sperling의 두 연구는, 공감각 경험에서 나타나는 개인차와 초기 시각 영역에서의 BOLD 신호 변화 강도 간의 상관관계를 규명하고자 했다는 점에서도 의의를 지닌다. 먼저 Hubbard 등의 연구에서는 공감각자 집단 내에서 행동 결과와 fMRI 결과 간에 정적 상관관계를 밝혔다. 구체적으로, 공감각 전경-배경 분리(figure-ground segregation) 과제와 공감각 과밀(crowding)과제에서의 수행이 좋을수록, hV4를 비롯한 초기 시각 영역에서의 BOLD 반응의 강도가 높게 나타났다. 이에 반해서 Sperling 등은 공감각 색 경험이 공간적 위치를 갖는 유형의 공감각자(예를 들어, 글자가 적힌

종이 위에서 공감각 색을 경험하는 투사 공감각자)의 경우 공감각 색이 분산되어 경험되는 공감각자(예를 들어, 마음의 눈으로 색을 느끼는 연합 공감각자)에 비해 약한 BOLD 반응을 보인다고 보고하였다. 두 연구의 결과는 상반된 해석의 여지를 보이고 있다. 일반적으로 공간적 위치를 규정할 수 있는 공감각 색 경험이 색 연관 과제에서 더 높은 수행과 연결되는 경향 때문이다. Hubbard 등의 연구에서는 공감각 색이 연관되는 지각 과제에서 더 좋은 수행을 보이는 공감각자들이 초기 시각 영역에서 BOLD 반응이 더 커진 반면, Sperling 등의 연구는 (공감각 색이 연관되는 지각 과제에서 더 좋은 수행을 보일 가능성이 높은) 투사 공감각자들이 동일한 뇌 영역에서 더 *감소된* BOLD 반응을 나타냈기 때문이다. 더욱이 Weiss 등의 2005년 연구에서는 색 연관 영역인 hV4가 위치한 방추상회 부근에서 공감각 색 경험과 연관된 활성화 자체가 발견되지 않았다(Weiss, Zilles, & Fink, 2005).

이처럼 공감각 색 경험에 대한 뇌기능 영상화 연구 결과들에서 나타나는 비일관성은 여러 가지 원인에 비추어 생각해볼 수 있겠으나, 주된 원인 중 하나는 연구 대상인 공감각자들에 있다. 이 절에서 언급된 연구들 중 상당수가 한 명의 공감각자에 대한 사례연구였다는 점은 주목할 만하다. 즉, 단일 사례에 기반한 뇌기능 영상화 연구는 결과가 그 사례에 국한되며 일반화 가능성이 제한적인 것이다. 또한 다수의 공감각자를 대상으로 하여 집단 분석을 수행한 경우에도 공감각자 표집 수가 Nunn 등의 연구(공감각자 13인, 비공감각자 28인 참여)를 제외하고는 일반적인 뇌기능 영상화 연구에 비해 상당히 적다는 것도 비일관적인 결과의 원인으로 생각할 수 있다. 마지막으로 공감각자 집단 내에서 관찰되는 공감각 경험의 개인차 또한 비일관적인 결과의 한 원인이 된다. 이런 점에서 최근의 연구들이 공감각 경험의 개인차를 뇌기능 영상화 분석에서 주요 요인으로 고려하는 점은 그 의의가 크다고 하겠다(Hubbard et al., 2005; Sperling et al., 2006).

본 절에서 살펴본 공감각 경험에 대한 뇌기능 영상화 연구들은 실제 감각 자극에 반응하는 뇌 영역이 공감각 경험과도 연관되는지 여부에 주된 관심을 두고 있다. 예를 들어 색청이나 색-자소 공감각자들이 공감각 색 경험을 유발하는 무색 자극을 볼 때, 실제 색 자극을 볼 때 활성화되는 뇌 영역이 활성화되는지가 주된 관심의 대상이 되는 것이다. Steven과 동료들은 시력을 잃어 시각 경험이 전무한 색청 공감각자의 경우에도 색 처리 영역을 비롯한 초기 시각 영역이 공감각 색과 연관되는 활성화를 보인다는 특수한 사례를 보고하기도 하였다(Steven, Hansen, & Blakemore, 2006). 또한 색과 연관되지 않는 다른 종류의 공감각 경험에 대해서도 이와 같은 논의를 확장해볼 수 있다. Blakemore와 동료들은 다른 사람이 촉각 경험을 하는 것을 보는 것 만으로도 자신의 몸의 상응하는 부위에 촉각 경험을 느끼는 시각-촉각 연합 공감각 현상을 발견한 바 있다. 이러한 유형의 공감각은 거울상-촉각 공감각(mirror-touch synesthesia)이라 명명되기도 한다. 이러한 공감각을 경험하는 C를 대상으로 한 fMRI 연구에서 연구자들은, 다른 사람의 촉각 경험을 볼 때, C의 뇌에서 시각 영역의 활성화와 더불어 1차 체성감각 영역이 활성화되는 것을 관찰하였다(Blakemore, Bristow, Bird, Frith, & Ward, 2005). 이는 실제 자극을 처리하는 뇌의 감각 영역이, 물리적 대응 자극 없이도 유

표 1. 공감각 색 경험에 관한 뇌기능 영상화 연구

연구	방법	피험자	공감각 연관 활성화 영역
Paulesu et al. (1995)	PET	색청 공감각자 비공감각자	Rt. Middle frontal, insula, Lt. Inferior temporal cortex
Weiss et al. (2001)	fMRI	단일 색청 공감각자	Bt.retrosplenial extrastriate cortex (hV4)
Aleman et al. (2001)	fMRI	단일 색청 공감각자	V1
Nunn et al. (2002)	fMRI	13 색청 공감각자 28 비공감각자	hV4/V8
Elias et al. (2003)	fMRI	1 색-자소 공감각자 1 비공감각자	Left dorsal visual stream(BA 19, 7, 39, 40)
Hubbard et al. (2005)	fMRI	6 색-자소 공감각자 6 비공감각자	hV4 (독립적, 기능적으로 정의)
Weiss et al. (2005)	fMRI	1 색-자소 공감각자	Lt. Intraparietal cortex
Sperling et al. (2006)	fMRI	4 색-자소 공감각자	hV4/V8 (독립적, retinotopically 정의)
Steven et al. (2006)	fMRI	1 맹인 색청 공감각자	Lt.V1(BA17), Bt. BA18, Lt. hV4/V8 Bt. SPL, IPL
Rich et al. (2006)	fMRI	7 색-자소 공감각자 7 비공감각자	Lt. medial lingual gyrus
Rouw & Scholte (2007)	fMRI with DTI	18 색-자소 공감각자 18 비공감각자	Lt. frontal cortex, Rt. cerebellum, Fusiform gyrus

사한 감각 경험이 유발되는 공감각의 신경적 기반이 된다는 점을, 시각 이외의 감각 영역으로 확장하는 증거이다. 그러나 Rich 등은 공감각 경험과 연관된 뇌 활성화 양상이, 물리적 자극이 없이 실제 감각 경험과 유사한 지각적 경험을 야기하는 또다른 현상인 심상 연관 뇌 활성화 양상과 구별되어야 함을 지적하기도 하였다(Rich, Williams, Puce, Syngeniotis, Howard, McGlone, & Mattingley, 2006).

표 1은 현재까지 발표된 공감각 색 경험에 대한 뇌기능 영상화 연구들을 방법, 연구의 대상, 그리고 공감각 경험과 연관된 뇌 영역을 중심으로 요약하여 제시하고 있다.

공감감각자와 비공감각자에 대한 구조적 뇌영상화 비교 연구

앞 절에서 논의한 공감각 색 경험에 대한 뇌기능 영상화 연구들이 공감각 경험과 실제 감각 경험이 동일한 신경기전을 갖는지 살펴보고자 했다면, 가장 최근의 뇌영상화 연구들은 공감각자의 뇌 구조, 혹은 해부적 특징이 일반인과 비교하여 어떻게 다른지 밝히려는 시도를 보이고 있다. 이러한 연구 성과들은 기능적 뇌 영상화 기법을 통해 밝혀진 바를 보완, 강화하는 증거로 사용되기도 하며, 더 나아가 공감각의 발생 원인에 대한 두 가지 신

경 모델을 비교 검증하는데 활용될 수도 있다.

최근의 공감각 관련 뇌 영상화 연구 중 이 분야의 연구자들에게 가장 큰 영향을 준 연구로는 Rouw와 Scholte가 2007년에 발표한 확장 텐서영상(Diffusion Tensor Imaging: DTI)을 이용한 연구를 꼽을 수 있다. 이 연구는 본 논문의 모두에서 언급한 바 있는 Baron-Cohen의 공감각 신경 모델을 검증하고자 수행되었다. 즉 공감각 유발 자극과 관련된 뇌 영역(예를 들어 색-자소 공감각의 경우 자소 연관 영역, 그림 1(a) 좌측 패널)과 유발된 공감각 경험과 관련된 뇌 영역(예를 들어 색-자소 공감각의 경우 색 연관 영역, 그림 1(a) 우측 패널 및 1(b)) 간의 특이한 연결성에 의해 공감각이 발생한다는 가설을 검증하고자 한 것이다. 뇌 영역 간의 연결성은 일반적인 fMRI를 통해서는 밝혀내기 어렵다. DTI는 물분자의 확산 특성을 측정함으로써 살아있는 사람의 뇌에서 백질의 연결 구조를 파악할 수 있는 첨단 뇌 영상화 방법이다(Le Bihan, Mangin, Poupon, Clark, Pappata, Molko, & Chabriat, 2001). Rouw와 Sholte는 18명의 색-자소 공감각자와 18명의 비공감각자에 대해 DTI를 실시하였다. 그 결과 비공감각자에 비해 공감각자들에게서 우뇌 하측두엽(right inferior temporal cortex), 좌뇌 두정엽, 그리고 양반구 전두엽의 제한된 영역에서 일반인에 비해 백질 구조의 방향성이 강하게 나타남을 관찰하였다. 이 영역들 중 특히 주목된 것은 우뇌 하측두엽이었는데, 이 영역은 fMRI를 통해 공감각 색 경험과 연관되는 것으로 밝혀진 색 처리 영역과 매우 인접한 것으로 나타났다. 또한 우뇌 하측두엽의 백질 구조의 방향성은 투사공감각자의 경우, 연합 공감각자의 경우에 비해 더 강하게 나타났다(Rouw & Scholte, 2007). Rouw와 Scholte의 연구는 공감각자가 비공감각자에 비해 특정 부위의 백질에서 강한 연결성을 보일 가능성을 제시했다는 점에서 연결성 모델을 지지하는 최초의 실험적 증거로서 주목을 받았다. 그러나 이 연구는 구체적으로 자소 연관 영역과 색 연관 영역 간의 직접적인 연결 관계를 분석하지는 않았다는 점에서, Baron-Cohen이 제시한 공감각의 발생 원인에 대한 모델에 결정적 증거를 제공하지는 못하였다. fMRI를 이용하여 자소 연관 영역과 색 연관 영역을 정의한 후, 공감각자들의 두 영역 간에 비공감각자들의 뇌에서는 관찰되지 않는 특수한 연결성이 있는지 DTI 섬유 추적(fiber tracking) 방법을 이용하여 분석한다면, 훨씬 더 결정적인 연결성 모델 검증이 가능할 것이다.

2009년, Weiss와 Fink는 Voxel-Based Morphometry (VBM) 방법을 이용하여 공감각자의 백질에서 나타나는 강화된 연결성이 회백질의 변화와 관련될 가능성을 탐구하였다. 18명의 색-자소 공감각자와 18명의 비공감각자를 테스트한 결과, 공감각자의 좌측 IPS(intraparietal sulcus) 후부와 색 연관 영역인 V4v(hV4)를 포함하는 우측 방추상회의 회백질의 부피가 일반인에 비해 크다는 것을 발견하였다(Weiss & Fink, 2009). 특히 공감각자와 비공감각자 간의 회백질의 부피 차이는 언급한 두 영역에서만 발견될 뿐, 두 집단 간에 뇌 전반에 걸친 부피 차이가 나타나지는 않았다. 이러한 결과는 발견된 두 영역에서의 뇌구조의 차이가 공감각의 신경기전일 가능성을 강력하게 시사한다.

Rouw와 Scholte는 Weiss 등의 연구에서 사용된 VBM 방법을 활용하여, 본인들이 2007년 DTI 연구에서 발견한 공감각자들 간의 개인차를 재차 탐구하였다(Rouw & Scholte, 2010). 42명의 색-자소 공감각자와 42명의 비공감각자

의 회백질 부피를 비교한 이 대규모 연구에서는, 공감각자의 뇌에서 회백질 부피에 차이를 보이는 일반적 영역, 및 공감각 경험 유형에 따라 회백질 부피에 차이를 보이는 차별적 영역이 모두 분석되었다. 그 결과, 비공감각자들에 비해 공감각자의 상측 두정엽 후부(posterior superior parietal cortex)에서 회백질 부피의 증가가 관찰되었다. 이 영역은 모든 공감각자들에게서 공통된 특징으로 나타났다. 반면 공감각 경험의 개인차에 따라 차별적인 영역도 관찰되었는데, 물리적 세계에서 공감각 색을 경험하는 투사공감각자의 경우에는 일차시각영역 등 감각 연관 영역에서, 마음의 눈으로 공감각 색을 경험하는 연합공감각자의 경우에는 기억을 관장하는 것으로 알려진 해마 부근에서 회백질의 부피 차이가 발견되었다. Rouw와 Scholte가 2007년, 2010년 연달아 발표한 연구들은, fMRI, DTI, VBM 등 다양한 뇌 연구 방법론들을 활용하여 공감각자에 특수한 신경기전을 통합적으로 밝히고, 공감각 경험의 현상적 차별 특징과 뇌의 기능적, 구조적 특징 간의 상관 관계를 규명하였다는 측면에서 중요한 의의를 지닌다.

경두개 자기자극을 이용한, 공감각 경험에 인과적 영향을 미치는 뇌 영역 연구

fMRI 등을 이용한 기능적 뇌 영상화와 DTI, VBM 등 구조적 뇌 영상화 기법들은 공감각 경험과 상관(correlation)을 보이는 뇌 영역을 찾아내는데 유용한 방법들이다. 하지만 이러한 방법들은 특정 뇌 영역이 공감각 경험을 야기하거나 교란시키는 인과적 영향력(causation)에 대해서는 밝혀주지 못하는 한계를 지닌다. 이러한 측면에서 주목되는 방법이 경두개 자기자극(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)이다. TMS는 뇌 특정 부위에 유도된 자기 자극이 그 영역을 일시적으로 활성화시키거나 억제시켜서 행동에 미치는 영향을 관찰하는 방법으로, 비침윤적으로 일반인의 뇌와 행동 간의 인과관계를 연구하는 기회를 제공한다는 점에서 큰 장점을 보인다(Hallett, 2000).

2006년, Esterman과 동료들은 TMS를 이용한 최초의 공감각 연구를 발표하였다. 이 연구에서 연구자들은, 두 명의 색-자소 공감각자들의 좌, 우뇌 두정엽 후부(posterior parietal cortex; PPC)에 TMS를 가하여, 공감각 스트룹 효과에 미치는 영향을 관찰하였다(Esterman, Verstynen, Ivry, & Robertson, 2006). 공감각 스트룹 과제에서는 공감각을 유발하는 자소 자극이 유발되는 공감각 경험과 상이한 색으로 제시되는 경우, 공감각 색과 물리적 색 간의 간섭으로 물리적 색을 보고하는 반응 시간이 느려진다. 그런데, 우뇌 PPC에 TMS가 가해진 경우에는, 이러한 스트룹 간섭 현상이 줄어들었다. 하지만 이러한 간섭 현상의 감소가 좌뇌 PPC나, 일차 시각 영역 등 다른 영역에 TMS가 가해진 경우에는 나타나지 않았다. 이에 저자들은, 우뇌 PPC가 공감각 경험, 특히 공감각을 야기하는 자소의 형태와 공감각 색 경험 간의 통합을 유발한다고 결론지었다. 또한 이 영역이 일반인에게서 감각 세부 특징 간의 통합에 관여한다는 점에서, 공감각에서 발생하는 감각 연합과 일반 감각 연합이 동일한 신경기전에 기인한다고 논의하였다.

이후 Muggleton과 동료들 역시 감각 연합의 기전으로 알려진 두정엽을 대상으로 한 TMS 연구를 발표하였다(Muggleton, Tsakanikos, Walsh, & Ward, 200). 이 후속 연구에서는 Esterman 등

이 연구한 좌, 우뇌 PPC 영역과 함께, 좌, 우뇌 전측 두정엽(anterior parietal) 등 모두 네 영역에 TMS가 가해졌다. 또한 저자들은 5명의 색-자소 공감각자들을 연구 대상으로 하였는데, 이들 중 1명은 Esterman 연구의 피험자와 같이 투사공감각자였으나, 나머지 4명은 연합 공감각자였다. 연구 결과 Muggleton 등은, 두정엽의 네 영역 중 오직 우뇌 PPC 영역에 대한 TMS 만이 공감각 경험을 교란시킨다는 점을 발견함으로써, Esterman 등의 발견을 재확인하였다. 이에 더하여, 우뇌 PPC의 영향이 두 유형의 공감각자들에게서 일관적으로 나타남을 밝힘으로써, 이 영역의 역할이 특정 유형의 공감각에 국한된 것이 아님을 시사하였다.

TMS를 활용하여 공감각에 인과적 영향을 미치는 신경기전을 확인하는 것은 공감각 연구에 매우 중요한 접근 방식일 수 있다. 그러나, 공감각 연구에 TMS를 활용하는 것이 지니는 한계점 또한 명확하다. TMS는 비침윤적인 방법으로서, 자극 코일은 두피 위에서만 위치를 잡을 수 있다. 따라서. 뇌의 특정 영역 - 예를 들어 중심부 깊은 곳에 위치한 영역이나, 뇌 밑 면의 하부 측두엽 등 - 에 TMS를 가하는 것이 불가능하다. 이는 색-자소 공감각에 대한 기능적, 구조적 뇌 영상화 연구들이 공통적으로 발견해낸 문제 영역, 즉 하부 측두엽의 색 연관 영역이나 자소 연관 영역에 대한 TMS가 근본적으로 불가능하다는 것을 의미한다(그림 1 참조). 현재까지 발표된 두 편의 공감각 TMS 연구들이 PPC 영역에 집중하고 있는 이유도 이러한 방법적 한계에 기인한 측면이 있다.

사건관련전위를 이용한 공감각의 신경기전 연구

앞의 세 절에서 논의된 뇌 연구 방법론들 - 기능적 뇌영상화, 구조적 뇌영상화, TMS - 이 공감각과 연관된 뇌 영역의 위치에 주된 관심을 보인다면, 사건관련전위(Event-related potential, ERP)를 이용한 연구들은 공감각과 연관된 신경 활동의 시간적 요소를 연구하는데 활용될 수 있다. ERP는 자극이나 과제 등과 연관된 뇌파의 작은 전위 변화를 많은 시행을 통한 평균(averaging) 기법을 통해 추적하는 방법으로, 밀리세컨드 단위의 시간해상력을 보인다(Luck, 2005). 따라서, 공감각의 신경기전에 관한 뇌 영상화 연구 성과들이 얼마간 축적된 2007년 무렵부터, 신경기전의 새로운 측면에 대한 탐구를 가능하게 하는 ERP를 이용한 연구들이 급격히 증가하고 있다.

공감각에 대한 최초의 ERP 연구는 1999년 Schiltz와 그의 동료들에 의해 수행되었다(Schiltz, Trocha, Wieringa, Emrich, Johannes, & Münte, 1999). 17명의 색-자소 공감각자들와 연령과 성별이 맞춰진 일반인 피험자를 대상으로 한 이 연구에서는, ERP에서 가장 빈번히 사용되는 패러다임 중 하나인 오드볼(oddball) 패러다임을 활용하였다. 전형적인 오드볼 패러다임에서는 동일한 종류의 자극이 연달아 제시되다가 다른 종류의 자극이 제시되면, P300 ERP 요소의 진폭이 감소한다. 이를 활용하여 연구자들은, 공감각자들에게만 공감각 색 경험을 유발하는 글자나 숫자를 자극으로 선정하여, 이중 일부 자극을 표적으로 실험 전 미리 피험자들에게 알려주고, 일부는 새롭게 실험 중 제시하였다. 그 결과, 공감각자와 일반인 피험자 모두, 미리 알려준 표적 자극

에 비해 새롭게 제시된 자극과 관련된 P300 진폭 감소를 나타내었다. 공감각의 신경기전과 관련된 보다 중요한 결과는, 일반인에 비해 공감각자의 P300 요소가, 특히 전두엽 중심부 부근에서 더 증가된 양극성(positivity)을 나타내었다는 점이다. 연구자들은 이 결과를 앞 절에서 논의된 Paulesu 등의 PET 연구 결과와 연관시키며, 전두엽이 공감각에서 유발자극과 유발된 감각 경험을 결합하는 주의의 작용에 관여한다고 해석하였다. 이 연구는 ERP를 이용한 최초의 공감각 연구라는 점에서 그 역사적 의의를 지닌다. 그러나 표적 자극 리스트를 블록마다 미리 주고, 피험자로 하여금 글자나 숫자를 보게 하는 패러다임으로, 자극과 과제가 공감각 경험의 핵심적인 요소를 반영하지 못하고, 단지 기억과 관련된 뇌 반응을 측정하고 있다는 한계점을 드러내었다.

Schiltz 등의 연구 이후 수년 간 ERP를 이용한 후속 공감각 연구들이 발표되지 않았다. 그러던 중 2007년과 2008년, 두 해에만 여러 편의 본격적인 공감각 ERP 연구들이 발표되며 주목을 받기 시작하였다. 먼저 Beeli와 동료 연구자들은 16명의 색청 공감각자들과 비공감각자들을 연구 대상으로 하였다(Beeli, Esslen, & Jäncke, 2007). 공감각 색 경험을 유발하는 2음절 단어와 비단어, 그리고 글자 자극을 청각적으로 제시하면서 측정한 뇌파 결과에서는, 특히 청각유발 초기 ERP 요소들이 주목되었다. 구체적으로, 공감각자들이 비공감각자들에 비해 N1과 P2 요소에서 더 긴 잠재기(latency)와 더 감소된 진폭을 보였다. LORETA 테크닉을 이용한 ERP의 원천 위치 추적(source localization) 결과, N1과 P2 요소의 차이는 색 연관 영역(hV4)이 위치한 좌뇌 하측두엽 후부 및 안와전두피질(orbitofrontal cortex)에 기인한 것으로 파악되었다. Beeli 등의 연구는 공감각 경험이 유발자극 제시 후 122msec 경에 이미 뇌파에 반영되는 만큼, 빠르고 자동적으로 처리된다는 결론을 내리고 있다. 이러한 결과는 이후에도 ERP를 이용한 공감각의 신경기전 연구에서 중요한 논의점을 제시하고 있다. 공감각 경험이 감각정보 처리과정에서 초기에 발생하는지, 아니면 후기에, 좀더 상위인지적인 처리를 통해 발생하는지에 대한 구분이 그것이다. 이러한 구분은 뇌 영상화 결과에서 hV4 등 하위 시각 영역들이 공감각 색 경험에 관여하는지, 아니면 두정엽 등 보다 상위 뇌 영역이 공감각 색 경험의 신경적 기반인지에 관한 논의와도 연관될 수 있다. Beeli 등의 연구는 전자, 즉 정보처리 과정 중 초기 시각 영역이 공감각의 신경적 기반임을 지지하는 증거가 되고 있다.

정보처리 과정 중 공감각과 연관된 시점을 밝히기 위해, Barnett과 동료들은 조금 다른 접근 방식을 채택하였다(Barnett, Foxe, Molholm, Kelly, Shalgi, Mitchell, & Newell, 2008). 이 연구에서는 15명의 공감각자들과 15명의 일반인들을 대상으로 하여, 공감각 유발 자극이 아닌 기초적인 시각 자극을 제시하고 시각 유발 전위(VEP)를 측정하였다. 구체적으로, 시각 신경정보처리 과정 중 매그노세포(magnocellular) 시스템을 선택적으로 활용하는 대비 조절 자극 및 파보세포(parvocellular) 시스템을 선택적으로 활용하는 공간주파수 조절 자극을 이용하였다. 그 결과, 특히 높은 공간주파수 자극에 대하여, 공감각자들의 C1 VEP 반응이 일반인에 비해 증가됨이 발견되었다. 이는 일반적인 시각 정보처리 시스템 상의 초기, 특히 파보세포 경로에서, 이미 공감각자와 일반인 간의 차이

가 있음을 시사한 결과이다.

Beeli와 Barnett 등의 연구가 공감각이 초기 감각 정보처리 단계와 연관될 가능성을 탐구하였다면, Brang과 동료 연구자들은 공감각 색 경험이 의미 처리와 연관되는 과제를 고안하여 후기 ERP 요소를 측정하였다(Brang, Edwards, Ramachandran, & Coulson, 2008). 8명의 색-자소 공감각자와 8명의 비공감각자들을 대상으로 한 이 연구에서는 "그 맑은 호수는 깨끗하고 아름다운 _____ 빛을 띄었다"와 같이 특정 색을 암시하는 문장들을, 적절하거나 적절하지 않은 1) 단어("푸른", 혹은 "노란"), 2) 실제 색 사각형(파란 색 사각형, 혹은 노란 사각형), 3) 공감각 야기 자극("2" 혹은 "7")과 함께 제시하였다. 색 관련 단어나 실제 색 사각형이 제시된 1), 2) 조건에서는 공감각자와 비공감각자 모두 적절하지 못한 색이 제시된 경우 N400 요소의 증가를 보였다. 그러나 3) 조건에서는 숫자를 볼 때 공감각 색을 경험하는 공감각자들 만이 "색"의 적절성에 따른 N400 효과를 나타내었다. Brang 등의 연구는, 문장 속에서 색 의미 맥락의 중요성을 부각하는 실험적 구성을 통해, 실제 색과 공감각 색의 의미처리와 연관된 ERP를 측정하여 공감각자를 비공감각자와 구별하는 결과를 얻을 수 있었다. 이 연구 결과는 공감각 색과 관련된 N400 요소의 변화를 보임으로써, 공감각 색이 정보처리 과정상 후기와 연관되는 것을 시사하는 결과로 해석될 수 있다. 하지만, 이 연구에서는 색의 의미 처리라는, 본질적으로 지각적 처리가 완결되고 난 후의 처리 과정을 그 대상으로 하고 있기 때문에, 공감각 색 경험 그 자체가 초기에 발생하는지 후기에 발생하는지에 대한 실마리를 제공할 수 없다는 점에서 해석 시 주의를 요한다.

공감각 색 경험의 발생 시점과 관련해서는, 가장 최근에 발표된 공감각 ERP 연구 중 하나인 Goller와 동료들의 연구를 주목할 필요가 있다. 10명의 색청 공감각자와 10명의 비공감각자를 대상으로 한 이 연구에서 연구자들은, Schiltz가 공감각에 대한 최초의 ERP 연구에서 사용하였던 오드볼 패러다임을 공감각 경험에 보다 적절한 방식으로 활용하였다(Goller, Otten, & Ward. 2008). 구체적으로, 공감각을 야기하는 자극(소리)에서의 한 속성(음높이)에 따른 오드볼을 탐지하는 과제에서, 공감각자들은 음높이 상의 오드볼 뿐만 아니라 야기된 공감각(색)에서의 한 속성(밝기)에 따른 오드볼 또한 경험하게 된다. 반면 비공감각자들은 제시된 소리에서의 오드볼 만을 경험하게 된다. 연구자들은 비공감각자들에 비해 공감각자들에게서, 청각유발요소인 N1, P2, 그리고 N2의 진폭이 감소하는 현상을 발견하여, 공감각 경험이 초기 감각 처리 과정과 연관된다는 Beeli 등의 연구 결과와 부합되는 결과를 제시하였다. 그러나 공감각자와 비공감각자 간에 후두엽에 위치한 전극에서 측정되는 시각 관련 초기 요소의 차이는 발견되지 않았다. 따라서 이 결과는, 공감각 유발 자극 연관 영역의 초기 과정에서 반영되는 뇌파의 차이가, 유발된 공감각 경험 연관 영역의 초기 과정의 변화로 치환되는 증거는 제시하지 않았다.

표 2는 현재까지 발표된 공감각 색 경험에 대한 ERP 연구들을 방법, 연구의 대상, 그리고 공감각 경험 연관 위치 및 요소를 중심으로 요약하여 제시하고 있다.

현재까지 발표된 공감각 관련 ERP 연구 성과 및 그 성장 속도를 고려할 때, 앞으로도 지속적인 연구가 수행될 것으로 예상된다. 현재까지의 ERP 연구들은 주로 공감각자들과 비

표 2. 공감각 색 경험에 관한 ERP 연구

연구	방법	피험자	공감각 연관 위치, component, & timing
Schitz et al. (1999)	ERP	17 색-자소 공감각자 17 비공감각자	more positivity in the frontal, central sites, 자극제시후 200msec
Beeli et al. (2007)	AEP	16 색청 공감각자 16 비공감각자	longer latencies in N1, P2, smaller amplitude in P2, inferior temporal source -hV4
Cohen Kadosh et al. (2007)	ERP	1 색-자소 공감각자 6 비공감각자	reduced P300 in Pz for incongruent "color"
Barnett et al. (2008)	ERP	15 색-언어 공감각자 15 비공감각자	P1, N1, P2
Brang et al. (2008)	ERP	8 색-자소 공감각자 8 비공감각자	more negative N400 in response to semantic incongruency
Goller et al. (2008)	ERP	10 색청 공감각자 10 비공감각자	smaller N1, N2 in the frontal site

공감각자 간의 비교와 공감각 경험과 실제 감각 경험 간의 비교에 집중되어 왔다. 하지만 향후 ERP 방법은 공감각 연구 분야에서 매우 중요하나, 지금까지 탐색되지 않은 주제, 즉 공감각 발생의 시간적 요인에 대한 연구에 활용될 수 있을 것이다. 공감각 발생의 시간적 요인이라 함은, 공감각을 유발하는 자극에 대한 처리와, 유발되는 공감각 경험 간의 시간적인 선후관계를 의미한다. 현재까지 이 주제가 직접적으로 다루어진 예는 없지만, 선행 정신물리학, 인지심리학적 연구들에서 공감각 경험이 유발 자극과 *동시에* 처리되는지, 아니면 유발 자극이 의식적으로 처리된 *후에* 처리되는지에 관해 엇갈린 제안들이 나타나고 있는 상황이다. ERP의 높은 시간해상도가 아직 탐구되지 않은 공감각 발생의 시간적 요인에 대한 이해를 증진시키는데 활용될 수 있을 것이다.

또한, 공감각 경험의 개인차 문제도 ERP와 결합되어 연구될 가치가 있다. 앞 절에서, 공감각 관련 뇌 영상화 연구 성과들이 축적되면서 개인차의 문제가 구체적인 연구 주제로 다루어지고 있음을 논의한 바 있다. 그러나 ERP를 이용한 연구에서는 아직 이 주제가 본격적으로 다루어진 예가 없다. 예를 들어 투사 공감각자와 연상 공감각자 간에 정보처리 시점에서의 차별성이 발견된다면, 뇌영상화 결과들과 함께, 공감각 경험의 신경 기반에 대한 통합적인 관점을 제공할 것으로 기대된다.

논의 및 결론

지금까지 지난 20여 년간 심리학과 인지 신경 과학 분야에서 관심이 급증하고 있는 공감각 현상의 신경기전에 대한 연구 성과들을 신경 모델, 유전학적 접근, 뇌 영상화 방법, TMS, ERP 등 다양한 접근 방법들을 중심으로

분류, 소개하고 비판적으로 논의하였다.

인지신경과학적 연구 방법들이 일반적으로 그러하듯이, 어떤 한 가지 접근 방식이 공감각의 신경기전을 밝히는 데 있어서 최선의 방법으로 주목되지는 않는다. 다만, 공감각의 신경 기전과 관련된 구체적인 문제에 대한 해답을 모색하는 과정 중에, 상대적으로 그 문제에 더 적합한 방법이 있을 뿐이다.

개별 방법들이 지니는 장점과 단점들을 보완하기 위해서, 최근에는 두 가지 이상의 방법들을 동시에 사용하여 공감각의 신경 기전에 대한 통합적 이해를 모색하는 시도들이 서서히 늘어나고 있다. 예를 들어, 앞서 소개한 Rouw와 Scholte의 연구들은 각각 DTI와 fMRI(Rouw & Scholte, 2007), 그리고 VBM과 fMRI(Rouw & Scholte, 2010)를 동시에 활용하여, 공감각자에게서 특정한 방식으로 나타나는 뇌 활성화 양상을 각각 백질의 연결성(Rouw & Scholte, 2007) 및 회백질의 부피(Rouw & Scholte, 2010)와 비교, 분석하였다는 측면에서 최근 가장 훌륭한 공감각의 신경 기전에 대한 연구 사례가 되고 있다.

또한 Kohen Cadosh와 동료 연구자들은 fMRI의 공간적 정보 추적 측면의 장점과 ERP의 시간적 정보 구별 측면의 장점을 결합, 활용한 연구를 시도하였다(Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, & Henik, 2007). 연구자들은 숫자를 볼 때 색을 경험하는 동시에, 색을 보는 경우에도 숫자에 대한 개념이 유발되는 '쌍방향 공감각(bidirectional synesthesia)'을 경험하는 공감각자 ES를 연구 대상으로 두 가지 과제를 실시하였다. 먼저 숫자 과제에서는 숫자가, 유발되는 공감각색과 일치하거나(congruent 조건) 불일치하는(incongruent 조건) 색으로 제시되었다. 또한 삼각형 과제에서는 큰 삼각형과 작은 삼각형이 각각 큰 숫자, 작은 숫자에서 유발되는 색으로 제시되거나(congruent 조건) 반대로(inconguent 조건) 제시되었다. 숫자 과제에서의 일치성 효과(congruency effect)는 두정엽에서의 BOLD 신호의 증가 및 P300 ERP 요소에 반영된 반면, 삼각형 과제에서의 일치성 효과는 색 연관 영역이 위치한 선조외 영역에서의 BOLD 신호 증가 및 N170 ERP 요소에 반영되었다. 이러한 결과는 두 가지 인지신경과학적 방법이 각각의 장점이 부각되는 방향으로, 통합적으로 활용된 사례라고 할 수 있다. 물론 앞 절에서 소개된 다른 ERP 연구들의 경우 뇌파 신호의 원천 추적 기술들을 이용하여, ERP만을 이용해서 공감각과 연관된 뇌의 공간적 정보를 추론해 내기도 하였다. 하지만 이런 방법들은 특정한 계산 방식에 의존한 간접적인 추론으로서 fMRI가 더 직접적인 측정을 통해 정확한 뇌 영역의 공간적 위치를 추적하는 데 적합한 방법이라고 하겠다.

본 논문에서 논의된 연구들은 동일 주제에 대해서 상반된 결과들을 제시하고 있다. 예를 들어 실제 색 연관 영역이 공감각 색 경험에 관여하는지에 대해서, 일부 fMRI 연구들은 지지근거를 제시하는 반면(Hubbard et al., 2005; Nunn et al., 2002; Sperling et al., 2006; Weiss et al., 2001), 또 다른 연구들은 반대 증거를 제시한다(Aleman et al., 2001; Paulesu et al., 1995; Weiss et al., 2005). 또한 ERP 연구들에서도 정보처리 과정 상 어떤 시점에 공감각 경험의 특성이 반영되는 지에 대해 비일관적인 연구 결과들이 제시되어 왔다. 공감각의 신경기전에 대한 연구 성과들이 축적되어 감에 따라, 이러한 연구 결과들 간의 불일치의 원인을 규명하는 것이 점차 가능해질 것으로 기대된다. 각 실험에서 사용한 자극, 과제, 절차

등 방법적 측면 및 실험의 대상인 공감각자들 간에 나타나는 개인차 특성들이, 연구들 간에 나타나는 비일관성의 잠재적 원인으로 탐구될 수 있을 것이다.

공감각 연구는 감각 간 연합 및 감각 내 세부 특징의 통합 등, 심리학의 역사를 통해 가장 해결하기 어려운 중요한 난제에 대하여 해결의 실마리를 제공할 수 있다는 점에서 그 중요성이 부각되고 있다(Treisman, 2005). 또한 물리적 자극은 없는데 생생한 의식적 경험이 발생하는 특별한 조건을 제공한다는 점에서 의식 연구에서 중요하게 다루어지기도 한다 (Kim & Blake, 2005). 공감각의 신경 기전에 대한 연구는, 공감각 그 자체에 대한 이해를 증진시킬 뿐 아니라, 앞으로 결합 문제 및 의식과 같은 심리학에서 일반적인 중요성을 가지는 큰 주제들에 대한 신경적 이해를 증진시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

Aleman, A., Rutten, G. J. M., Sitskoorn, M. M., Dautzenberg, G., & Ramsey, N. F. (2001). Activation of striate cortex in the absence of visual stimulation: an fMRI study of synesthesia. *Neuroreport, 12*, 2827-2830.

Asher, J., Aitken, M. R. F., Farooqi, N., Kurmani, S., & Baron-Cohen, S. (2006). Diagnosing and phenotyping visual synaesthesia: A preliminary evaluation of the revised Test of Genuineness (TOG-R). *Cortex, 42*, 137-146.

Asher, J. E., Lamb, J. A., Brocklebank, D., Cazier, J-B., Maestrini, E., Addis, L., Sen, M., Baron-Cohen, S., & Monaco, A. P. (2009). A Whole-Genome Scan and Fine-Mapping Linkage Study of Auditory-Visual Synesthesia Reveals Evidenceof Linkage to Chromosomes 2q24, 5q33, 6p12, and 12p12. *The American Journal of Human Genetics, 84*, 1-7.

Bailey, M. E. S., & Johnson, K. J. (1997). Synesthesia: Is a genetic analysis feasible? In S. Baron-Cohen & J. E. Harrison (Eds.), *Synesthesia: Classic and contemporary readings* (pp.182-207) Cambridge, MA: Blackwell.

Barnett, K. J., Foxe, J. J., Molholm, S., Kelly, S. P., Shalgi, S., Mitchell, K. J., & Newell, F. N. (2008). Differences in early sensory-perceptual processing in synesthesia: A visual evoked potential study. *NeuroImage 43*, 605-613.

Baron-Cohen, S., Harrison, J., Goldstein, L. H., & Wyke, M. (1993). Coloured speech perception: is synesthesia what happens when modularity breaks down? *Perception, 22*, 419-426.

Baron-Cohen, S., Wyke, M., & Binnie, C. (1987). Hearing words and seeing colours: an experimental investigation of a case of synaesthesia. *Perception, 16*, 761-767.

Beeli, G., Esslen, M., & Jäncke, L. (2008). Time course of neural activity correlated with colored-hearing synesthesia. *Cerebral Cortex 18*, 379-385.

Blake, R., Palmeri, T. J., Marois, R., & Kim, C-Y. (2005). On the perceptual reality of synesthetic color. In Robertson, L. C., and Sagiv, N. (Eds.), *Synesthesia: Perspectives from cognitive neuroscience.* Oxford University Press.

Blakemore, S-J., Bristow, D., Bird, G., Frith, C., & Ward, J. (2005). Somatosensory activations

during the observation of thouch and a case of vision-touch synaesthesia. *Brain, 128*, 1571-1583.

Brang, D., Edwards, L., Ramachandran, V. S., & Coulson, S. (2008). Is the Sky 2? Contextual priming in grapheme-color synaesthesia. *Psychological Science 19*, 421-428.

Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., & Henik, A. (2007). The neuronal correlate of bidirectional synesthesia: A combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience 19*, 2050-2059.

Cytowic, R. E. (1989). *Synesthesia: A union of the senses*. New York: Springer-Verlag.

Cytowic, R. E., & Eagleman, D. M. (2009). *Wednesday is indigo blue; Discovering the brain of synesthesia*. MIT Press.

Dixon, M. J., Smilek, D., Cudahy, C., & Merikle, P. M. (2000). Five plus two equals yellow. *Nature, 406*, 365.

Elias, L. J., Saucier, D. M., Hardie, C., &Sarty, G. E. (2003). Dissociating semantic and perceptual components of synaesthesia: Behavioral and Functional neuroanatomical investigations. *Brain Research, Cognitive Brain Research, 16*, 232-237.

Easterman, M., Verstynen, T., Ivry, R. B., & Robertson, L. C. (2006). Coming unbound: Disrupting automatic integration of synesthetic color and graphemes by TMS of the right parietal lobe. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*, 1570-1576.

Galton, F. (1883). *Inquiries into Human Faculty and its Development*, London: Macmillan.

Goller, A. I., Otten, L. J., & Ward, J. (2008). Seeing sounds and hearing colors: An event-related potential study of auditory-visual synesthesia. *Journal of Cognitive Neuroscience 21*, 1869-1881.

Grossenbacher, P. G., & Lovelace, C. T. (2001). Mechanisms of synesthesia: cognitive and physiological constraints. *Trends in Cognitive Sciences, 5*, 36-41.

Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature, 406*, 147-150.

Hubbard, E. M., Arman, A. C., Ramachandran, V. S., & Boynton, G. M. (2005). Individual differences among grapheme-color synesthetes: Brain-behavior correlations. *Neuron, 45*, 975-985.

Hubbard, E. M., Manohar, S., & Ramachandran, V. S. (2006). Contrast affects the strength of synesthetic colors. *Cortex, 42*, 184-194.

Hubbard, E. M. & Ramachandran, V. S., (2005). Neurocognitive mechanisms of Synesthesia. *Neuron, 48*, 509-520.

Kadosh, R. C., Kadosh, C. K., & Henik, A. (2007). The Neuronal Correlate of Bidirectional Synesthesia: A combined Event-related Potential and Functional Magnetic Resonance Imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*, (12), 2050-2059.

Kim, C-Y., & Blake, R. (2005). Psychophysical magic: rendering the visible 'invisible'. *Trends in Cognitive Sciences, 9*, 381-388.

Laeng, B., Svartdal, F., & Oelmann, H. (2004). Does color synesthesia pose a paradox for early-selection theories of attention?

Psychological Science, 15, 277-281.

Le Bihan, D., Mangin, J-F., Poupon, C., Clark, C. A., Pappata, S., Molko, N., & Chabriat, H. (2001). Diffusion tensor imaging: Concepts and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging, 13*, 534-546.

Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press.

Mattingley, J. B., Rich, A. N., Yelland, G., & Bradshaw, J. L. (2001). Unconscious priming eliminates automatic binding of colour and alphanumeric form in synesthesia. *Nature, 410*, 580-582.

Mattingley, J. B., & Ward, J. (2006). *Cognitive neuroscience perspectives on Synesthesia*. Masson. Based on Cortex, Vol 42, February 2006, No. 2.

Maurer, D. (1993). Neonatal synesthesia: Implications for the processing of

speech and faces. In B. de Boysson-Bardies, P. Jusczyk, P. MacNeilage, J. Morton, & S. deShonen Eds.), *Developmental neurocognition: Speech and face processing in the first year of life* (109-124). Dordrecht: Kluwer.

Mills, C. B., Boteler, E. H., & Oliver, G. K. (1999). Digit synaesthesia: A case study using a Stroop-type test. *Cognitive Neuropsychology, 16*, 181-191.

Muggleton, N., Tsakanikos, E., Walsh, V., & Ward, J. (2007). Disruption of synaesthesia following TMS of the right posterior parietal cortex. *Neuropsychologia, 45*, 1582-1585.

Nair, D. G. (2005). About being BOLD. *Brain Research Reviews, 50*, 229-243.

Nunn, J. A., Gregory, L. J., Brammer, M., Williams, S. C. R., Parslow, D. M.,

Morgan, M. J., Morris, R. G., Bullmore, E. T., Baron-Cohen, S., & Gray, J. A. (2002). Functional magnetic resonance imaging of synesthesia: activation of V4/V8 by spoken words. *Nature Neuroscience, 5*, 371-375.

Odgaard, E. C., Flowers, J. H., & Bradman, H. L. (1999). An investigation of the cognitive and perceptual dynamics of a color-digit synesthete. *Perception, 28*, 651-664.

Palmeri, T. J., Blake, R., Marois, R., Flanery, M. A., & Whetsell, W. (2002). The perceptual reality of synesthetic colors. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 99*, 4127-4131.

Paulesu, E., Harrison, J. E., Baron-Cohen, S., Watson, J. D. G., Goldstein, L.,

Heather, J., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (1995). The physiology of coloured hearing: A PET activation study of colour-word synesthesia. *Brain, 118*, 661-676.

Paulsen, H. G., & Laeng, B. (2006). Pupillometry of grapheme-color synaesthesia. *Cortex, 42*, 290-294.

Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2001a). Psychophysical investigations into the neural basis of synesthesia. *Proceedings of the Royal Society of London.Series B, 268*, 979-983.

Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2001b). Synesthesia - a window into perception, thought, and language. *Journal of Consciousness Studies* 8(12), 3-34.

Rich, A. N., & Mattingley, J. B. (2002). Anomalous perception in synesthesia: A cognitive neuroscience perspective. *Nature*

Revieus Neuroscience, 3, 43-52.

Rich, A. N., & Mattingley, J. B. (2002). Can attention modulate color-graphemic synesthesia? In Robertson, L. C., and Sagiv, N. (Eds.), *Synesthesia: Perspectives from cognitive neuroscience*. Oxford University Press, 108-123.

Rich, A. N., Williams, M. A., Puce, A., Syngeniotis, A., Howard, M. A., McGlone, F., & Mattingley, J. B. (2006). Neural correlates of imagined and synaesthetic colours. *Neuropsychologia, 44*, 2918-2925.

Rouw, R., & Scholte, H. S. (2007). Increased structural connectivity in grapheme-color synesthesia. *Nature Neuroscience, 10*, 792-797.

Rouw, R., & Scholte, H. S. (2010). Neural basis of individual differences in synesthetic experiences. *Journal of Neuroscience, 30*, 6205-6213.

Schiltz, K., Trocha, K., Wieringa, B. M., Emrich, H. M., Johannes, S., & Münte, T. F. (1999). Neurophysiological aspects of synesthetic experience. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences, 11*, 58-65.

Simner, J., Ward, J., Lanz, M., Jansari, A., Noonan, K., Glover, L., & Oakley, D. (2005). Non-random associations of graphemes to colors in synaesthetic and normal populations. *Cognitive Neuropsychology, 22*, 1069-1085.

Smilek, D., Dixon, M. J., Cudahy, C., & Merikle, P. M. (2001). Synesthetic photisms influence visual perception. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*, 930-936.

Smilek, D., Dixon, M. J., & Merikle, P. M. (2005a). Binding of graphemes and synesthetic colors in color-graphemic synesthesia. In Robertson, L. C., and Sagiv, N. (Eds.), *Synesthesia: Perspectives from cognitive neuroscience*. Oxford University Press, 74-89.

Smilek, D., Dixon, M. J., a& Merikle, P. M. (2005b). Synaesthesia: Discordant male monozygotic twins. *Neurocase, 11*, 363-370.

Smilek, D., Moffatt, A., Pasternak, J., White, B. N., Dixon, M. J., & Merikle, P. M. (2002). Synaesthesia: A case study of discordant monozygotic twins. *Neurocase, 8*, 338-342.

Sperling, J. M., Prvulovic, D., Linden, D. E. J., Singer, W., & Stirn, A. (2006).

Neuronal correlates of graphemic colour synaesthesia: A fMRI study. *Cortex, 42*, 295-303.

Steven, M. S., Hansen, P. C., & Blakemore, C. (2006). Activation of color-selective areas of the visual cortex in a blind synesthete. *Cortex, 42*, 304-308.

Treisman, A. (2005). Synesthsia: Implications for attention, binding, and consciousness - A commentary. In Robertson, L. C., and Sagiv, N. (Eds.), *Synesthesia: Perspectives from cognitive neuroscience*. Oxford University Press.

Wagar, B. M., Dixon, M. J., Smilek, D., & Cudahy, C. (2002). Coloured photisms prevent substitution masking in digit colour synaesthesia. *Brain and Cognition, 48*, 606-611.

Ward, J., Huckstep, B., & Tsakanikos, E. (2006). Sound-colour synesthesia: To what extent does it use cross-modal mechanisms common to us all? *Cortex, 42*, 264-280.

Ward, J., & Simner, J. (2005). Is synaesthesia an X-linked dominant trait with lethality in males? *Perception 34*, 611-623.

Weiss, P. H., & Fink, G. R. (2009). Grapheme-colour synaesthetes show increased grey matter volumes of parietal and fusiform cortex. *Brain, 132*, 65-70.

Weiss, P. H., Shah, N. J., Toni, I., Zilles, K., & Fink, G. R. (2001). Associating colours with people: a case of chromatic-lexical synaesthesia. *Cortex, 37*, 750-753.

Weiss, P. H., Zilles, K., & Fink, G.R. (2005). When visual perception causes feeling: enhanced cross-modal processing in grapheme-color synesthesia. *NeuroImage, 28*, 859-868.

Witthoft, N., & Winawer, N. (2006). Synesthetic colors determined by having colored refrigerator magnets in childhood. *Cortex, 42*, 175-183.

1차원고접수 : 2010. 10. 10.
수정원고접수 : 2010. 12. 23.
최종게재결정 : 2010. 12. 27.

한국심리학회지 : 일반
Korean Journal of Psychology: General
2011, Vol. 30, No. 1, 1-22

A review on the neural mechanisms underlying synesthesia

Chai-Youn Kim

Korea University, Department of Psychology

Synesthesia is a condition under which a sensory stimulus in a certain modality elicits perceptual experience in another modality along with perceptual experience in the relevant modality. Attempts to unveil neural mechanisms of synesthesia have increased with the accumulation of psychophysical and cognitive psychological studies investigating the authenticity and perceptual reality of synesthesia. This work reviews research on the neural mechanisms of synesthesia for last 20 years or so. First, this work compares representative neural models on synesthesia and introduces genetic approaches to synesthesia to investigate the cause for synesthesia. Second, this work discusses a number of brain imaging and ERP studies to explore whether synesthetic experiences are mediated by the shared neural mechanisms and neural information processing stages underlying real sensory experiences.

Key words : synesthesia, neural mechanism, genetics, neural models, brain imaging, ERP