

얼굴인식에 있어 방사주파수 정보의 뇌 실재성*

김 정 훈[†]

KAIST 인문사회과학부

김 초 복

충남대학교 심리학과

최근 얼굴인식연구에 방사주파수를 이용한 새로운 형태의 합성얼굴이 소개되었다. 본 연구에서는 시각경로의 중간단계인 V4영역의 세포들이 최적으로 반응하는 자극특성에 기반한 방사주파수 합성얼굴이 개인의 실제얼굴에 함유된 중요한 기하적 정보를 충분히 반영하고 있음을 정신물리학 실험으로 밝혔다. 한편, fMRI를 이용해 사진얼굴과 합성얼굴 두 자극에 대한 뇌 활성화 차이를 측정된 실험에서 얼굴인식에 관여한다고 알려진 FFA영역에서의 활성화 차이는 관찰되지 않은 반면, V4영역에서는 합성얼굴에 대해 더 강한 뇌 활성화가 관찰되었다. 또한, 회전, 축척, 그리고 잡음을 첨가한 변형 사진얼굴과 합성얼굴에 대한 선택적 뇌 영역의 활성화를 측정된 결과, 방사주파수 정보의 처리는 얼굴자극의 속성 변화에 민감함을 보여주는 결과를 얻었다. 본 연구에서 관찰한 실험결과를 토대로 얼굴인식에 있어 방사주파수의 처리 실재성과 대상인식과정에 대한 시사점을 논의하였다.

주제어 방사주파수, 합성얼굴, fMRI, V4, FFA

* 이 논문은 2001년 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음 (KRF-2001-042-C00172)

† 교신저자 : 김 정 훈, (305-701) 대전 유성구 구성동 373-1, KAIST 인문사회과학부

E-mail : miru@kaist.ac.kr

시각체계가 형태 및 색상정보처리를 담당하는 V1→V2→V4→IT(inferior temporal cortex, 하측두피질)의 “복측 경로”와 운동정보처리를 담당하는 V1→V2→MT(middle temporal cortex, 중측두피질)→MST(medial superior temporal cortex, 내측상측두피질)의 “배측 경로”라는 두 독립 경로로 구성되어 있음은 여러 연구에 의해 밝혀져 왔다(Ungerleider & Mishkin, 1982; van Essen, Anderson, & Felleman, 1992). 이 중 "what pathway"로 일컬어지는 복측 경로의 초기 단계에서의 정보처리는 방위와 시공간주파수에 동조하는 선형필터와 같은 작용을 하는 것으로 밝혀졌고(De Valois & De Valois, 1988; Graham, 1989), 이 경로의 다른 끝인 IT 영역의 세포들이 얼굴과 같은 복잡한 자극에 반응 특수성을 가짐이 원숭이를 이용한 신경생리학 연구에서 밝혀진 바 있다(Desimone, 1991; Gross, 1992). 그러나, 이 형태 정보처리경로의 중간단계인 V4영역에서 방위, 시공간주파수와 같은 단순 세부특징들을 어떻게 얼굴자극 같은 실제 대상의 인식에 필요한 의미 있는 분석으로 전환하는지에 관해서는 거의 알려진 바가 없다. 형태정보처리의 특성을 그림 1에 제시한 것처럼 시각경로를 따라 요약할 수 있는데, 점선으로 표시한 부분이 아직 밝혀지지 않은 형태정보처리의 부분이다.

복잡한 얼굴자극의 지각에 필수적으로 개입될 중간 단계의 형태 정보처리의 특성에 관한 단서는 V4영역의 많은 세포들이 최적으로 반응하는 패턴이 주로 곡선형이라는 점에서 찾을 수 있다(Gallant, Braun, & van Essen, 1993). 곡선 형태는 자연에 존재하는 대부분의 대상에서 가장 흔히 발견할 수 있는 세부특징으로, 얼굴의 기하학적 형태도 곡선 형태를 많이 포함하고 있다. 대상인식과 비교할 때 얼굴인식이 자극의 윤곽으로 대표되는 전역(holistic)정보에 보다 의존한다는 것은

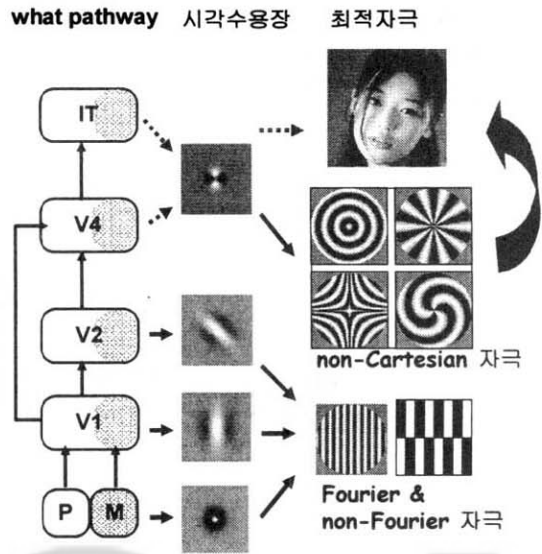


그림 1. 형태시각경로("what pathway")와 각 단계별 시각수용장, 그리고 최적자극. 점선으로 표시한 상호관계와 우측 화살표로 표시한 중간단계에서의 시각정보 변환의 특성은 아직 밝혀지지 않음. P, M: 망막의 parvo, magno 세포.

여러 심리학 연구와 신경심리학 연구에서 보고된 바 있다(configural/holistic과 componential/part에 근거한 얼굴지각과 얼굴인식에서의 논쟁점들의 개관은 Farah(2000), Gazzaniga, Ivry와 Mangun(2002), Peterson과 Rhodes(2003)에서 찾을 수 있다). Wilson과 동료들(Wilkinson, Wilson, & Habak, 1998; Wilson, Loffler, & Wilkinson, 2002)은 원의 변형 형태에 근거한 새로운 자극으로 다양한 곡선 형태를 구성하여 합성얼굴을 만들고, 이 자극을 이용하여 시각체계의 형태 정보처리의 특성을 연구하였다.

Wilson등이 시각과학 연구에 새롭게 소개한 이 합성얼굴의 주된 아이디어는 방사주파수를 이용한 점이다. 방사주파수는 기본 원의 반지름을 극좌표 상에서 각도에 따라 정현파 함수로 변형시

킬 때, 이 정현파의 주파수로 정의한다. 이들이 사용한 기본 원은 아래 식(1)에 기술한 바와 같은 Gaussian의 4차 도함수(D4)이다.

$$D4(r) = C \left(1 - 4 \left(\frac{r-r_0}{\sigma} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{r-r_0}{\sigma} \right)^4 \right) \times \exp \left(- \left(\frac{r-r_0}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$$r(\theta) = r_0(1 + A \sin(\omega\theta + \phi)) \quad (2)$$

위 식에서 r_0 는 원의 평균 반지름이고, C 는 대비를 나타내며, σ 는 절정 공간주파수이다. D4 원의 영상 예는 그림 2의 왼쪽에 제시되어 있는데, 이 D4원 패턴의 평균 반지름 r_0 를 식(2)에 기술한 바와 같이 주파수 ω , 진폭 A , 위상 ϕ 를 달리하며 정현파로 변조시키면 그림 2에 예시한 바와 같은 다양한 형태의 변형 원 형태를 얻을 수 있다.

방사주파수를 이용한 변형 원 패턴들을 조합

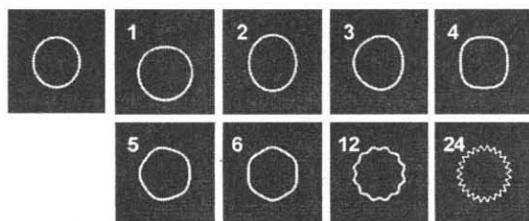


그림 2. 기본 D4원과 방사주파수 1-24 패턴들.

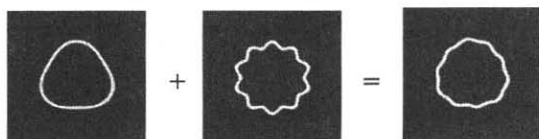


그림 3. 방사주파수들의 결합에 의해 생성된 패턴의 예.

하면, 그림 3의 한 예에서 볼 수 있듯이 자연에 존재하는 대상들의 윤곽과 매우 유사한 형태들을 얻을 수 있다. 이는 Fourier 분석과 합성의 경우 절정 공간 주파수와 위상을 달리하는 정현파 함수들의 합으로 공간패턴을 구성할 수 있는 것과 같은 원리이다. 얼굴의 윤곽 형태도 이렇게 다양한 절정 방사주파수와 위상과 진폭을 갖는 변형 D4패턴을 이용하여 생성할 수 있다.

본 연구는 이 원리로 생성한 합성얼굴을 이용하여, 앞서 기술한 바와 같이, 아직 분명히 밝혀지지 않은 형태시각정보처리의 중간단계인 V4영역에서 얼굴인식에 필요한 어떤 정보처리가 일어나는지를 밝히고자 수행되었다. 기존의 얼굴인식에 사용되어온 자극들은 사진얼굴(예, Bruce & Young, 1998)이거나 선화로 얼굴특징을 반영한 자극(예, Siegal & Logothetis, 2002)들이었는데, 이 자극들은 얼굴인식과 배후 신경기계와의 관계를 밝히기 어렵다는 단점이 있다. 지난 십 여 년 간 fMRI를 이용한 얼굴인식의 인지신경과학 연구를 보더라도, 측두엽의 fusiform gyrus (혹은 fusiform face area: FFA)가 얼굴인식에 깊이 관련되어 있다는 증거를 보여 주었지만(McCarthy, Puce, Gore, & Allison, 1997; Kanwisher, 2000), 얼굴인식에 이르기까지의 정보처리 특성을 밝히기에는 부족하였다. 방사주파수를 이용한 합성얼굴의 이점은 먼저 사진얼굴의 복잡성을 줄이며 수량적으로 단순하게 얼굴의 지각차원을 기술할 수 있다는 점이고, 또한 V4영역의 세포들이 최적으로 반응하는 자극특성이 그대로 반영되어 있는 까닭에 중간단계의 형태정보처리 특성을 직접 밝히기에 용이하다는 점이다. 이에, 본 연구에서는 먼저 방사주파수를 이용한 합성얼굴이 사진얼굴에서 우리가 분명히 지각하는 개인의 얼굴들에 대한 변별도를 충분히 반영하는지를 정신물리학 실험으로 밝히고, fMRI를 이용하여 합성얼굴에 대한

일차시각영역(primary visual area, PVA), V4, 그리고 FFA에서의 선택적 활성을 측정하여 형태시각 정보의 신경적 처리 특성을 규명하고자 하였다.

실험 1

방사주파수 정보가 형태시각경로에서 어떻게 처리되는지를 연구하기에 앞서, 하나의 통제실험을 수행하였다. 실험 1에서는 방사주파수들의 합으로 얼굴형태를 생성하고, 이를 대역 여과(bandpass filtering)한 합성얼굴이 일상생활에서 접하는 얼굴들의 중요한 기하적 정보를 충분히 반영하는지 알아보하고자 하였다.

방법

피험자. KAIST 재학생 중 8명이 실험에 자원하였다.

실험자극. KAIST와 충남대학교 학생들 중 자원한 남녀 각 40 명씩의 얼굴을 디지털카메라로 촬영하고, 그림 4의 예에서 가운데에 있는 얼굴 형태처럼 얼굴의 윤곽만을 추출하여 원 얼굴영상을 마련하였다. 정면얼굴과 아울러 20도 측면

얼굴을 추출하였다. 정면얼굴과 측면얼굴을 구성한 이유는 얼굴의 방향에 따라 방사주파수 정보가 얼굴의 인식에 미치는 영향을 알아보기 위함 이었고, 20도의 측면을 선택한 이유는 얼굴방향에 대한 변별 역치가 20도 정도까지는 일정하다는 이전 연구에 근거하여, 정면얼굴과의 차이가 최대이지만, 얼굴변별의 한계 내에서 자극을 구성하기 위함이었다(Wilson, Wilkinson, Lin, & Castillo, 2000).

합성얼굴의 구성과정은 아래 그림 4에 도식화하여 예시하였다. 정면과 측면의 얼굴 모두의 경우, 콧마루(bridge of nose)를 중심으로 22.5도 간격의 16개 방사선을 만든 후, 이 방사선 상의 얼굴 윤곽의 위치에서 얼굴의 외곽형태 측정치를 얻었고, 얼굴에 드리워진 머리카락의 경계는 9개 위치에서 측정치를 얻었다. 이 측정치들을 얼굴 외곽형태와 머리카락 경계를 최적화(fitting)하는 방사주파수들의 조합에 이용하였다. 구체적으로, 이 측정치들로부터 극좌표상에 얼굴외곽형태를 표상하는 14개의 계수(coefficient)를 결정하였고, 머리카락 경계선을 표상하는 9개의 계수를 결정

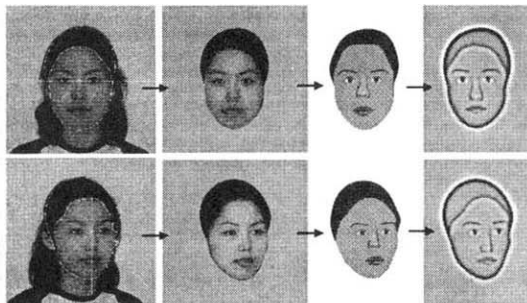


그림 4. 단계별 합성얼굴의 생성과정

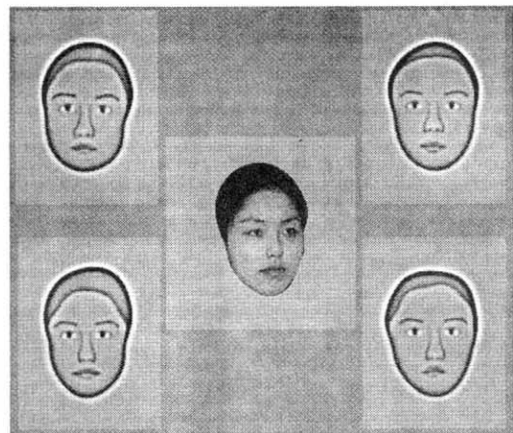


그림 5. 실험 1의 자극판 예 (중앙-측면사진얼굴/주변-정면합성얼굴의 경우)

하였다. 그리고 좌우 눈의 위치와 양 눈 위의 눈썹의 위치, 코의 길이와 넓이, 입의 위치와 넓이, 입술의 두께는 14개의 위치에서 측정하여 결정되었다. 즉, 한 합성얼굴을 표현하는데 총 37개의 측정치가 이용되었다. 각 합성얼굴의 양 눈, 눈썹, 코, 그리고 입의 위치는 원 사진 얼굴에서 얻은 측정치에 의해 위치가 변형되었으나, 그 형태는 모든 얼굴에서 동일하였다. 한편, 이 측정치들은 얼굴외곽형태를 결정짓는 모든 방사주파수 패턴들 지름의 평균에 상대적으로 표준화되었다. 이렇게 구성한 합성얼굴을 10 c/deg에 절정 주파수를 갖고 2 옥타브(octave)의 대역을 갖는 동심원 모양의 Gaussian 필터로 여과하였다. 이는 얼굴변별이 8-13 c/deg에서 가장 민감하다는 이전의 얼굴인식 연구를 바탕으로 한 것이다(Hayes, Morrone, & Burr, 1986; Näsänen, 1999).

절차. 실험은 4개의 대안 강제선택과제(4AFC: 4 alternative forced choice)로서, 화면의 주변에 제시되는 4개의 사진얼굴 혹은 합성얼굴들 중 중앙의 합성 혹은 사진얼굴에 대응하는 얼굴을 찾는 것으로, 정확대응인식률이 측정되었다. 실험의 조건은 중앙에 사진얼굴 혹은 합성얼굴이 제시된 조건과(각각의 경우 주변의 얼굴은 합성얼굴과 사진얼굴), 중앙에 정면얼굴 혹은 측면얼굴이 제시되는 조건들이 쌍을 이루었고, 남녀의 얼굴이 구분되어 시행되어 전체 실험조건은 16조건이었다. 중앙위치에 선택된 한 사람의 목표 얼굴은 전체 시행에서 무선적으로 6번 제시되었고, 이 때 주변의 얼굴은 중앙에 제시된 사람과 동일한 사람의 얼굴과 다른 3 사람의 얼굴로 쌍을 이루어 주변 네 위치에 무선적으로 제시되었다. 한 얼굴의 6번 반복제시 때마다 주변의 얼굴이 반복적으로 쌍을 이루어 나타나는 것을 방지하기 위하여 18개의 주변얼굴이 필요하다. 이에 전

체 얼굴 데이터베이스에서 남녀 각 19개의 얼굴을 무선적으로 선택하였다. 따라서, 실험에서 19개의 모든 얼굴이 6번씩 목표얼굴로 나타났고, 목표얼굴로 선택된 한 얼굴은 실험의 전체시행에서 나머지 18명의 모든 얼굴과 혼동될 수 있는 구성이었다. 관찰자는 정확반응을 위하여 충분한 시간을 가질 수 있었으나, 본 실험에 참가한 8명의 관찰자들의 반응은 3초 이상을 넘지 않았다. 실험의 한 시행에서의 자극판여가 그림 5에 제시되어 있다. 관찰자는 중앙의 얼굴에 대응되는 얼굴을 주변에서 찾아 마우스를 움직여 클릭함으로써 한 시행을 종료하였고, 다음 시행을 위해 마우스를 누르기까지 평균 회색 화면이 제시되었다.

결과 및 논의

실험의 결과는 그림 6에 제시되어 있다. 남녀 얼굴에 대한 관찰자들의 정확대응인식률에서의와, 정면과 측면의 얼굴이 중앙과 주변에 각기 제시될 때의 정확대응인식률에서 큰 차이가 관찰되지 않아 그래프에 한 조건으로 합산하여 정리하였다. 관찰자들의 평균 정확대응인식률은 중앙-사진/주변-합성얼굴의 경우, 정면-정면 얼굴에서 94.6%, 측면-측면얼굴에서 91.7%, 정면-측면 얼굴에서 88.3%이었고, 중앙-합성/주변-사진얼굴의 경우, 정면-정면 얼굴에서 93.7%, 측면-측면얼굴에서 92.7%, 정면-측면 얼굴에서 88.1%로 사진얼굴(중앙 목표얼굴)에 대응하는 합성얼굴의 정확대응인식률과 합성얼굴(중앙 목표얼굴)에 대응하는 사진얼굴의 정확대응인식률에서도 각 얼굴방향 조건에서 차이를 보이지 않았다. 4AFC과제에서 우연수준의 정확대응인식률이 25%인 점을 감안하면, 모든 조건에서의 정확대응인식률이 매우 높은 것을 알 수 있다. 과제수행의 용이성을 감

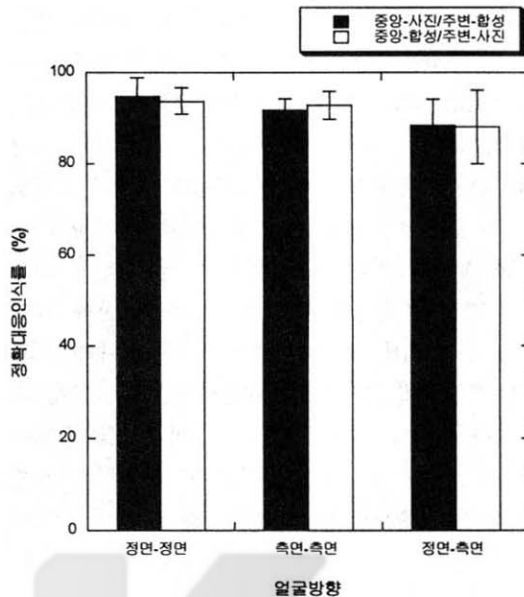


그림 6. 사진-합성얼굴 정확대응인식률

안하더라도, 이 실험의 결과는 이전에 laser scan 한 얼굴로부터 3차원 얼굴의곽형태모델(최소한의 내부 표면결만 갖춘)을 만들어 원 사진얼굴과 대응시키는 과제(Bruce, Healey, Byrton, Doyle, Coombes, & Linney, 1991)에서 보고된 평균 55%의 정확인식률에 비해 월등히 높은 것이다.

본 실험에서 관찰된 정확대응인식률은 Caucasian의 합성얼굴을 이용한 동일한 방식의 실험에서 얻어진 정확대응인식률과 매우 유사한 결과이다 (Wilson *et al.*, 2002). 이 결과는 방사주파수들의 조합으로 생성한 합성얼굴자극이 얼굴방향에 큰 영향을 받지 않고 얼굴의 인식에 있어 중요한 기하적 정보를 충분히 반영하고 있음을 말해 주는 것으로, 이는 합성얼굴자극이 형태시각경로에서의 얼굴 정보처리 특성을 연구하는데 유용함을 시사한다.

실험 2

실험 2에서는 인간 뇌의 V4영역(ventral V4 area, V4v)과 FFA가 방사형 자극(radial grating)에 대해 선택적으로 활성화를 보인다는 최근 fMRI연구들 (Wilkinson, James, Wilson, Gati, Menon, & Goodale, 2000; Gallant, Shoup, & Mazer, 2000)을 바탕으로, 방사주파수를 이용한 합성얼굴의 인식에 관여하는 뇌의 활성이 사진얼굴에 대한 뇌의 활성정도와 차이가 있는지를 fMRI연구를 통해 알아보고자 하였다. 실험 1의 결과는 사진얼굴의 인식과 방사주파수 합성얼굴에 대한 인식의 차이가 없음을 시사해 주었는데, fMRI연구는 이에 더해 각 얼굴자극의 인식에 이르기까지의 여러 뇌 영역의 활성을 비교할 수 있게 함으로써, 뇌에서의 방사주파수정보의 처리 실재성을 규명할 수 있게 하며, 또 나아가 중간단계의 형태시각정보처리의 특성을 밝힐 수 있게 할 것이다.

방법

피험자. KAIST 재학생 중 11명이 fMRI 실험에 자원하였다. 이들은 fMRI실험을 수행하는데 문제가 될 수 있는 보철기 등을 착용하지 않았다.

실험기구. KAIST에 연구용으로 설치되어 있는 fMRI기기를 사용하였다. 이 기기는 Oxford magnet과 Varian console을 국내의 ISOL사가 조립하여 만든 것으로 3.0 T MRI 시스템이다. 본 실험에서 피험자들은 MRI 기기에 누워 머리 부분을 두르는 quadrature headcoil안에서 beam projector로 제시되는 자극을 거울을 통해 보고 요구되는 반응을 자기장에 변화를 주지 않는 마우스를 이용하여 수행하였다.

실험자극. 실험 1에서 사용된 사진얼굴에서 얼굴의 윤곽만 취해 구축한 원 얼굴자극과 방사주파수 합성얼굴이 사용되었다.

절차. 실험은 사진얼굴조건, 합성얼굴조건, 그리고 통제조건 3 block으로 이루어진 무선화된 block design으로 구성되었다. 피험자들은 실험의 시작을 알리는 소리와 함께 15초 동안 중심에 십자표시가 있는 평균 회색화면을 보게 되고, 이후 각 9초 동안 사진얼굴과 합성얼굴이 제시되면, 두 얼굴이 동일인인지 다른 얼굴인지를 판단하는 과제를 수행하였다. 사진얼굴과 합성얼굴은 무선적 순서로 제시되었으며, 각 얼굴자극 후 9초 동안 평균 회색화면이 제시되었다(그림 7). 사진얼굴과 합성얼굴은 동일인의 얼굴인 경우와 다른 사람의 얼굴인 경우가 각 6회씩으로 구성되었다. 동일인 조건을 위해 6명의 사진얼굴과 합성얼굴 자극이 사용되었고, 다른 사람인 조건을 위해 6명의 또 다른 얼굴을 사용하였으며, 이때의 합성얼굴은 동일인의 조건에서 사용되지

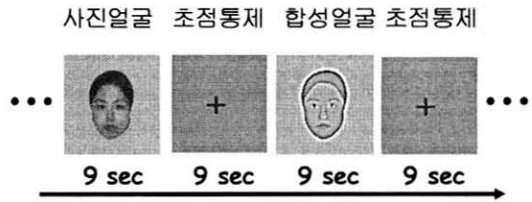


그림 7. 실험 2의 자극제시순서 (동일인의 사진얼굴 선행제시 경우)

않은 얼굴이 선택되었다. 피험자는 제시되는 합성얼굴(혹은 사진얼굴)이 먼저 제시된 사진얼굴(혹은 합성얼굴)과 동일인인지 아닌지를 판단하여 각각의 경우 왼쪽, 오른쪽 마우스 단추를 누르도록 요구받았다. fMRI scan은 Gradient echo sequence에 의한 EPI 영상을 획득하였으며, 전체 run은 149 scan으로 이루어졌다. 영상은 TR 3000ms, TE 35 ms, FOV 220×220 mm, 64×64 matrix, 30 slices(4 mm, no gap), voxel size = 3.44×3.44(in plane)의 조건으로 촬영하였다.

자료분석. fMRI 자료분석 소프트웨어인 SPM99 (statistical parametric mapping, 99 version, Wellcome department of Cognitive Neurology, London, UK)를 이용하여 실험에 사용된 각 얼굴자극에 대한 일차시각영역과 V4v, 그리고 FFA에서의 선택적 뇌 활성화 분석하였다. 각 개인의 뇌영상은 Gaussian kernel을 사용하여 convolution하였으며, 신호대 잡음비(SNR)를 높이기 위해 smoothing(FWHM=8mm)하였다. 모든 영상자료들은 T1 template에 표준화되었다. 활성화된 뇌 영역의 좌표는 mni2tal 알고리즘(M. Brett, Cambridge, Massachusetts)을 적용하여 SPM이 사용하는 MNI(Montreal Neurological Institute)의 좌표들을 Talairach 공간좌표로 변환하였다. 집단분석은 random effect model을 적용하였으며, 분석된 결과영상은 SPM에서 제공하

1) Halgren 등(Halgren, Dale, Sereno, Tootell, Marinkovic, & Rosen, 1999)은 유사한 실험에서 16초의 자극 제시시간을 사용했는데, 한 심사자는 이 정도의 시간이 fMRI BOLD신호의 특성을 제대로 반영할 수 있고, 특히 BOLD신호의 최고점에 최소 8초가 걸림을 지적하였다. 그러나, 얼굴자극과 통제자극의 제시시간을 이들과 다르게 사용한 실험의 예도 찾을 수 있으며(예, 얼굴자극과 통제자극의 각각 9초, 6초 제시, Hansson, Hendler, Bashat, & Malach, 2001), 또한 BOLD신호의 적절한 분석을 위한 자극간 제시시간으로 8초 이하는 무리이고 10-12초가 필요함을 Bandettini와 Cox(2000)가 제안한 바 있다. 이에 각 과제의 특성과 연구자들의 주장들을 고려하면 본 실험에서 사용한 자극제시통제가 이 제약들에서 크게 벗어났다고 볼 수는 없다. 하지만, 심사자가 지적한 바대로, 향후의 실험은 이런 fMRI BOLD신호의 특성을 충분히 고려하여 계획되어야 할 것으로 본다.

는 canonical을 이용하여 제시하였다.

본 실험의 관심은 동일인의 사진얼굴과 합성얼굴에 대한 인식에서 관찰될 것으로 기대하는 여러 뇌 영역에서의 활성화 차이에 있기 때문에, 분석은 동일인 얼굴조건에서의 정확 반응만을 자료로 삼았다. 사진얼굴과 합성얼굴의 부호화와 재인에 관여하는 뇌영역을 관찰하기 위해 두 얼굴조건과 통제조건을 비교하였다. 아울러, 합성얼굴과 사진얼굴에 대한 뇌 영역의 활성화 차이를 관찰하기 위해 사진얼굴과 합성얼굴의 차이를 비교하였다. 선택적 뇌 영역의 활성화를 보다 입체적으로 시각화하기 위해 BrainVoyager™ 2000 (4.9 version, Rainer Gobel & Max Planck Society)를 이용한 분석도 병행하여 실시하였다. BrainVoyager를 이용하면 굴곡된 뇌의 표면을 평면으로 만들어 뇌 영역 간의 상대적 위치를 파악하는 것을 용이하게 하는 이점이 있다.

결과 및 논의

사진얼굴과 합성얼굴에 대한 동일-상이얼굴의 정확대응인식률은 피험자 평균 92%로 실험 1의 결과와 유사하였다. 얼굴자극에 대한 뇌 활성화 측정 결과, 모든 피험자의 평균 뇌 활성을 요약한 그림 8에서 관찰할 수 있듯이, 사진얼굴과 합성얼굴 자극 모두에 대해서 통제조건(얼굴자극이 제시되지 않은 평균 회색화면)과 비교하였을 때, 얼굴인식에 관여한다고 알려진 FFA에서 선택적 뇌 활동이 측정되었다. 이 결과는 실험 1의 정신물리학 실험의 결과와 일치되게 방사주파수의 합성에 의해 생성한 합성얼굴이 실제 사진얼굴의 대부분 정보를 함유하고 있다는 시사를 주는 것이다. 표 1에 각 자극조건에서의 뇌 활성화의 정도를 비교한 결과를 각 뇌 영역별로 정리하였다. 표에서 Talairach좌표에 해당하는 뇌 영역의

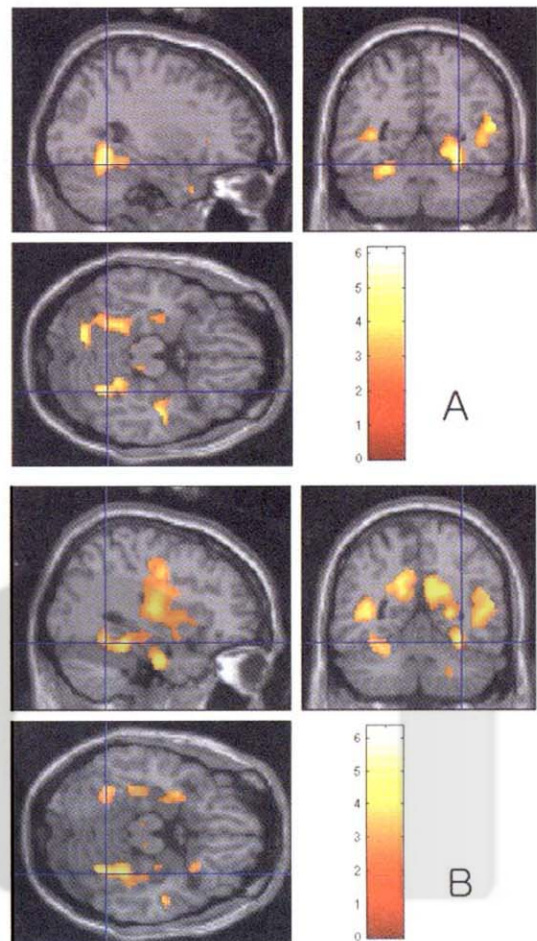


그림 8. FFA에서의 뇌 활성화 비교 (A)사진얼굴)통제조건(Talairach 좌표=(34, -53, -11)), (B)합성얼굴)통제조건(Talairach 좌표=34, -52, -13)

해부학 부위는, 선행 연구들을 참조하여 V1, V2(Brodmann 17, 18), V4v, 그리고 FFA 영역을 규정하였다(Talairach & Tournoux, 1988; Tootell, Hadjikhani, Mendola, Marrett, Dale, 1998; Halgren *et al.*, 1999; van Essen, Lewis, Drury, Hadjikhani, Tootell, Bakircioglu, & Miller, 2001)²⁾. 활성화된 뇌

2) 본 논문에서 FFA영역으로 규정한 Talairach좌표는 개

표 1. 각 얼굴 자극에 대한 뇌 영역의 활성화 비교

	사진얼굴 > 통제조건				합성얼굴 > 통제조건			
	x	y	z*	Z-value [†]	x	y	z*	Z-value [†]
Primary visual areas(V1, V2)	8	-76	2	3.30	12	-69	16	3.12
V4v	-12	-71	6	4.47	-14	-72	-4	4.27
	22	-62	-5	3.27	28	-61	-9	3.37
FFA	-26	-68	-10	3.47	-24	-66	-8	3.28
	34	-51	-13	4.01	34	-51	-13	3.73
	-26	-53	-16	4.33	-35	-51	-11	3.20

*Talairach 좌표, [†]p<.001

영역의 공간적 위치는 개인자료에 대한 Brain Voyager를 이용한 분석에서 보다 정확히 파악할 수 있다(그림 9).

그런데, 관찰된 자료 중 주목할 점은 집단자료에 대한 분석결과인 그림 10에서 볼 수 있듯이, 사진얼굴과 합성얼굴 자극에 대한 뇌 활성화의 차이를 비교하였을 때, 뇌 활성화의 차이가 FFA에서는 관찰되지 않는 것에 반해, V4v영역에서 크게 관찰된다는 점이다. 즉, 이 두 영역에서는 방사주파수 합성얼굴에 대한 뇌 활성화가 사진얼굴에 대한 뇌 활성화보다 더 크게 관찰되었다(Z=2.48, p<.005).

이는 FFA가 얼굴인식에 대응되는 뇌 영역임을 시사하는 이전의 인지신경과학 연구의 결과와, 사진얼굴과 합성얼굴에 대한 정확대응인식률이 정신물리학연구에서도 차이가 없음을 보여주었

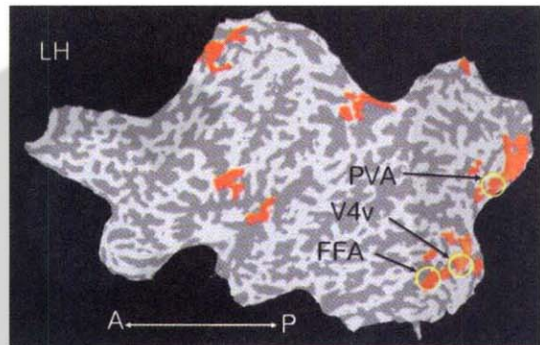


그림 9. 합성얼굴에 대한 각 뇌영역에서의 활성화 (LH: 좌반구, A: anterior, P: posterior)

던 점에 미루어, 두 자극에 대한 정체 인식이 일어날 때 관여하는 상위 수준에서의 뇌 활동의 차이는 없음을 시사해 준다. 그러나, 얼굴자극에 대한 중간 처리과정에서 합성얼굴에 대한 더 큰 뇌 활동이 관찰되는 것은, V4 영역 세포들의 최적 자극이 다양한 형태의 곡선자극임을 보고한 선행연구들의 결과와 함께 고려하면 얼굴인식과정에서의 최적 자극 속성이 방사주파수일 가능성과, 나아가 얼굴인식의 이전 단계에서 얼굴자극의 처리에 방사주파수 정보가 중요한 지각적 처리속성임을 시사해 주는 것이다.

관한 선행 연구들(예, Martínez, 1999 등 20편)에서 보고한 얼굴자극특수영역과 매우 유사하다 (개관논문의 Talairach 평균 좌표는 좌반구의 경우 [-38.5±4.1, -51.6±8.1, -16.1±4.32], 우반구의 경우 [39.4±3.6, -47.3±6.9, -17.9±7.0]이었다. 개관한 선행 연구들의 V4v 평균 좌표는 좌반구의 경우 [-26.4±4.4, -71.3±9.0, -13.1±2.8], 우반구의 경우 [27.2±4.39, -74.6±8.1, -14.9±5.6]이었다.

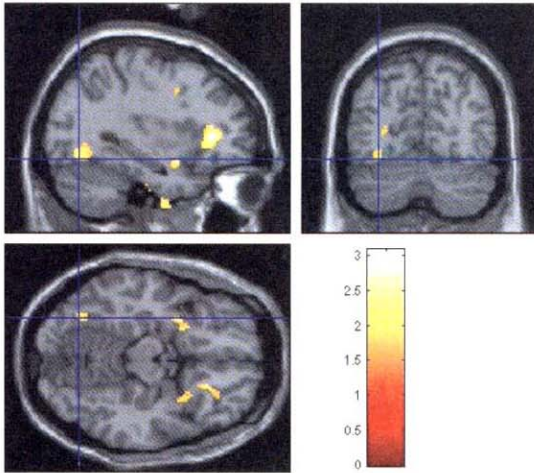


그림 10. 합성얼굴)사진얼굴에 대한 뇌 영역 활성화 비교 (교차선은 V4v 영역, Talairach 좌표=[-32, -68, -8])

실 험 3

앞 선 실험은 방사주파수로 단순화한 합성얼굴이 개인의 얼굴 정체를 파악하는 데에 필요한 정보를 충분히 반영하고 있으나, 이 자극에 대한 배후의 정보처리가 사진얼굴에 대한 정보처리와 차이가 있음을 보였다. 특히, V4v영역에서의 방사주파수정보에 대한 독특한 처리가 얼굴인식 이전 과정에서 일어남을 보여주고 있다. 이에 실험 3에서는 얼굴자극을 변형시켜, 회전된 얼굴, 축척된 얼굴, 또 잡영으로 차폐된 사진얼굴과 합성얼굴을 새롭게 구축하여 이 변형 얼굴자극과 원 얼굴자극들에 대한 뇌 영역에서의 선택적 활성화를 fMRI를 통해 비교함으로써, 얼굴인식의 중간단계에서의 정보처리 특성에 대한 이해를 넓히고자 하였다. 구체적으로 기대한 것은, 실제의 얼굴자극과 유사한 사진얼굴의 경우, 회전, 축척의 변형이 얼굴의 정체 파악에 일상 생활의

경험이 말해주듯이 큰 영향을 주지 않을 것이고, 원 얼굴(upright face)에 대한 뇌 활성화와 비교해도 차이가 없을 것이라는 것이었다. 반면, 합성얼굴의 경우, 변형 얼굴은 원 얼굴과 비교하여 방사주파수를 비롯한 여러 지각 차원에서 속성의 변형을 가져올 것이기에 정확인식률에서 변화가 있을 것이고, 원 얼굴에 대한 뇌 활성화와 비교하였을 때도 차이가 있을 것이라고 기대하였다.

방법

피험자. KAIST 재학생 중 9명이 fMRI 실험에 자원하였다.

실험기구. 실험 2에 기술한 바와 같다.

실험자극. 앞 선 실험에서 사용한 사진얼굴과 합성얼굴들을 45도 시계방향으로 회전시켜 회전얼굴을, 원 얼굴 크기를 62% 축소시켜 축척얼굴을, 원 얼굴에 12%의 무선점을 10 c/degree Gaussian으로 여과시킨 잡영 차폐를 공간적으로



그림 11. 실험 3의 각 조건에서 사용한 얼굴자극들

더하여 잡영 얼굴을 새롭게 구축하였다. 본 실험에서 사용한 각 조건에서의 변형얼굴들은 그림 11에 예시하였다.

절차. 피험자들은 실험의 시작을 알리는 소리와 함께 15초 동안 중심에 십자표시가 있는 평균 회색화면을 보고, 이후 각 9초 동안 원 사진얼굴과 변형 사진얼굴의 순서대로 자극을 보거나, 혹은 순서대로 원 합성얼굴과 변형 합성얼굴을 보았다. 실험 2에서와 같이 각 얼굴자극 후 역시 9초 동안 중앙에 십자가가 있는 평균 회색화면을 보았다. 즉, 회전 사진얼굴조건을 들면, 원 사진얼굴 - 평균 회색화면 - 회전 사진얼굴 - 평균 회색화면 순으로 제시되었다. 실험은 4 block으로 구성된 무선화된 block design이었으며, fMRI scan은 293 scan으로 이루어졌다. 각 block에 제시되는 원 사진얼굴과 변형(회전, 축척, 혹은 잡영) 사진얼굴은 동일인의 얼굴인 경우와 다른 사람의 얼굴인 경우가 각 6번씩이었고, 각 시행들의 제시 순서는 무선적이었다. 또한 이 block들과 무선적으로 섞이어 동일인과 다른 사람 조건의 변형 합성얼굴 시행들이 12번 제시되었다. 회전얼굴, 축척얼굴, 잡영얼굴 실험은 자기 다른 시행이었고 참여한 피험자도(4명, 4명, 1명) 달랐다. 피험자의 과제는 각 block에서 두 번째 제시되는 변형얼굴이 먼저 제시된 원 얼굴과 동일인인지 아닌지를 판단하여 각각의 경우 왼쪽, 오른쪽 마우스 단추를 누르는 것이었다.

자료분석. 자료분석 도구와 자료의 표준화 및 제시방법은 실험 2에 기술한 바와 같다. 단, 앞서와는 달리 각 피험자의 영상을 개인 분석하였다. 변형얼굴의 영향을 관찰하기 위해, 사진얼굴 및 합성얼굴의 원 얼굴과 각 변형얼굴의 차이를 비교하였다.

결과 및 논의

사진얼굴의 경우 회전과 축척에도 불구하고 정확 대응에 오류가 없었다. 합성얼굴의 경우, 회전얼굴과 축척얼굴조건에서의 정확 반응률은 피험자 평균 각각 92%와 94%이었다. 그러나, 잡영얼굴조건에서는 사진얼굴과 합성얼굴의 경우 모두에서 실험에 참여한 한 피험자의 정확 대응 인식률이 70% 이하로 낮았다. 이는 처음에 예상치 못했던 피험자의 수행으로 실험자가 정신물리학적차로 확인했을 때 과제가 매우 어려웠음을 파악하고, 이 경우 얼굴인식과정에 대한 신뢰할 수 있는 자료분석이 어렵다고 판단하여 이 조건은 향후 분석에서 제외하였다.

회전얼굴조건인 경우, 원 사진얼굴에 비해 회전 사진얼굴에 대한 모든 피험자의 V4v, FFA에서의 상대적 활성화의 정도는 차이가 없었다. 이에 반해, 회전 합성얼굴에 대한 두 뇌 영역에서의 활성화는 원 합성얼굴에 대한 활성화보다 작

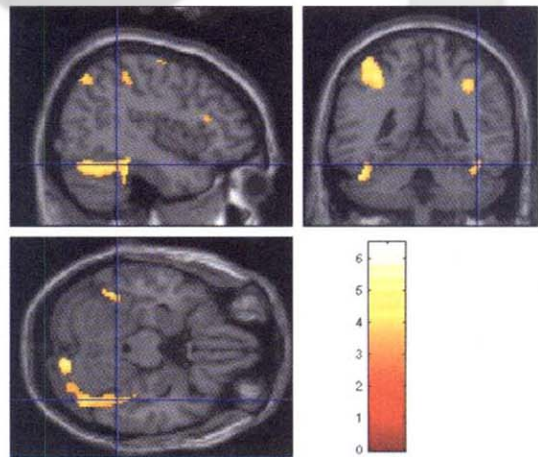


그림 12. 원합성얼굴/회전합성얼굴에 대한 뇌 영역 활성화 비교(교차선은 FFA, Talairach 좌표 = [-42, -45, -16])

은 것으로 관찰되었다. 피험자 평균 뇌 활성화 측정 비교결과는 그림 12에 제시되어 있고, 표 2에 모든 피험자에 대한 각 자극조건에서의 평균적 뇌 활성화 정도의 비교 결과를 각 뇌 영역별로 정리하였다.

한편, 축척얼굴조건의 경우, 사진얼굴과 합성얼굴 모두에서 원 얼굴과 축척얼굴에 대한 V4v와 FFA에서의 상대적 뇌 활성화의 차이는 관찰되지 않았고, 단지 일차시각영역에서만 뇌 활성화의 차이가 관찰되었다. 표 3에 각 자극조건에서의 뇌 활성화의 정도를 비교한 결과를 정리하였다.

실험 3의 결과를 종합해 보면, 회전얼굴의 경우, 얼굴이 거꾸로 되어있지 않는 한(face-inversion

effect) 기울어진 실제 얼굴에 대한 인식에 큰 변화가 없는 경험에 부합되게 사진얼굴에 대해서는 원 얼굴과 회전얼굴에 대한 뇌 영역에서의 활성화 차이가 V4v와 FFA에서 관찰되지 않았다. 그러나, 합성얼굴의 경우, 회전얼굴에 대한 이 영역에서의 선택적 뇌 활성화는 원 얼굴에 비해 큰 차이를 보였는데, 이는 회전에 의해 하위 수준(예, 방위)의 정보 처리 강도가 약화되었을(예, oblique effect)뿐만 아니라, 얼굴인식에 필요한 방사주파수 정보의 적절한 추출이 미약했을 가능성이 있다. 이 결과에 대해 다른 한편으로 고려할 수 있는 점은 얼굴인식에 있어 자극의 친숙성 영향인데, 이 점은 종합논의로 미룬다.

표 2. 회전얼굴 조건에 대한 뇌 영역의 활성화 비교

	원사진얼굴>회전사진얼굴				원합성얼굴>회전합성얼굴			
	x	y	z*	Z-value†	x	y	z*	Z-value†
Primary visual areas(V1, V2)	6±3	-76±2	3±4	3.82	11±3	-77±6	-1±5	3.30
	-4±2	-81±4	1±4	4.40	-7±4	-75±5	2±2	3.36
V4v					20±1	-69±5	-16±2	3.67
					-25±2	-70±2	-14±4	3.42
FFA					30±4	-51±4	-18±3	4.06
					-35±4	-53±5	-20±3	3.80

*Talairach 좌표(mm±SD), †p<.001

표 3. 축척얼굴 조건에 대한 일차시각영역의 활성화 비교

		원얼굴>축척얼굴			
		x	y	z*	Z-value†
Primary visual areas(V1, V2)	사진얼굴	7±3	-86±6	-1±4	4.70
		6±4	-86±4	-4±5	4.47
	합성얼굴	8±2	-83±4	1±7	3.92
		-8±4	-85±5	2±8	4.63

*Talairach 좌표(mm±SD), †p<.001

축척얼굴의 경우, 축척의 자극속성 변화가 사진얼굴과 합성얼굴의 각 경우에서 모두 얼굴인식에는 큰 영향을 주지 않았음을 정확대응인식률과 뇌 활성화의 정도차이에서 알 수 있다. 그러나, 축소된 크기의 사진얼굴과 합성얼굴에 대한 하위 수준(예, 방위자극의 크기)의 정보처리 강도가 약화되었다는 것을 알 수 있다. 이는, 시력 내 거리에 있는 대상의 정체파악을 할 때 크기에 별 영향을 받지 않는 우리 일상생활에서의 경험에 부합되는 것으로 보인다.

실험 3의 결과는 얼굴인식 배후의 정보처리와 신경기제의 관계는 얼굴자극의 속성에 크게 영향을 받음을 보여주고 있으며, 일차시각영역에서 분명히 처리되는 하위 수준의 정보가 자극 속성의 강도나 변화에 민감한 것과 유사한 방식으로 얼굴인식에 이르는 중간단계에서의 방사주파수 정보 처리도 얼굴자극의 속성의 변화에 민감함을 보여주고 있다. 이는 얼굴인식의 중간단계에서 방사주파수 정보의 처리 실재성을 시사해 주는 것이다.

종합논의

본 연구는 지난 삼십 여 년 간 시각연구가 명확히 밝혀지지 못한 형태정보처리의 중간 단계에서의 처리 특성을 규명하고자 수행되었다. 구체적으로, 우리가 일상생활에서 접하는 대상 중 가장 중요한 얼굴자극의 인식 배후에 있는 정보 처리의 특성을 정신물리학과 fMRI 연구를 통해 규명하고자 하였다. 이 연구의 동기를 높인 것은 새롭게 시각연구에 소개된 방사주파수 합성에 의한 얼굴자극의 매력 때문이다. 얼굴인식의 문제는 아주 오래된 연구주제 중 하나이다. 그럼에도 실험에 사용되어온 자극들이 주로 사진이거

나, 혹은 사진영상의 변형이거나, 선화들이었는데, 먼저의 자극들은 그 복잡성 때문에 설혹 얼굴인식과 관련하여 어떤 중요한 현상을 발견하였더라도 그 배후기제를 밝히기 위해 필요한 자극 속성차원에서의 명확한 기술이 어려운 문제점이 있었다. 예로, 어떤 얼굴인식과제에서의 결과가 궁극적으로 얼굴 구성요소간의 관계정보(configural information)에 의한 것인지 아니면 얼굴 세부특징(featural information)에 기인한 것인지(Peterson & Rhodes, 2003)를 구분하기에는 복잡한 얼굴자극의 경우 통제할 수 없는 다양한 정보(예, 얼굴 피부색, 피부 텍스처 등)가 혼합되어 있을 가능성이 있다. 단순한 자극의 경우는 실제 얼굴에 함유되어 있는 정보들을 충분히 반영하지 못한다는 단점이 있다. 이에 반해 방사주파수를 이용한 합성얼굴은 단순하여 지각적 차원에서 양적으로 기술될 수 있고, 또 형태정보처리경로의 중간단계 시각세포의 최적 반응을 유발시키는 자극 속성을 반영하는 생리적 타당성을 함께 갖추고 있다.

본 연구는 얼굴인식 연구에 여러 장점을 지닌 방사주파수 합성얼굴이 개인들의 얼굴을 변별하는데 필요한 실제 얼굴의 중요한 기하적 정보를 함유하고 있음을 정신물리학과 fMRI 연구를 통해 밝혔다. 이 결과는 얼굴인식의 배후 신경과정에서 방사주파수 정보가 주요한 역할을 담당함을 시사해 주는 것이다. 그러나, 본 연구를 통해 방사주파수가 얼굴인식에 필요충분한 정보라는 확증을 갖기에는 논의해야 할 점들이 많이 있다.

먼저, 실험 2에서 합성얼굴에 대한 V4영역에서의 뇌 활성화가 사진얼굴에 대한 뇌 활성화보다 크게 관찰된 것이 구체적으로 얼굴인식 정보처리 의 어떤 특성을 말해 주는 것일까? 방사주파수에 의한 얼굴정보의 추출이 가능한 것은 분명해 보이지만, 이것이 우리가 일상생활에서 접하는 얼

굴을 볼 때 얼굴에 포함된 방사주파수에 기반하여 실제로 그 얼굴의 인식이 이른다고 할 수 있을까? 만약 그렇다면 하더라도 얼굴자극은 방사주파수 이외에 다른 다양한 정보를 포함하고 있을 터이므로 실험에서 사진얼굴에 대한 뇌 영역의 활성화는 오직 방사주파수 정보만을 함유한 (물론 얼굴 구성요소들의 다른 정보들도 반영된 합성얼굴이지만 사진얼굴에 포함된 정보양에 비하면 작을 것이다) 합성얼굴에 대한 활성화 정도보다 더 큰 결과가 얻어졌어야 하지 않을까? 한 가지 가능한 설명은 사진얼굴은 합성얼굴보다 더 많은 noise를 가지고 있고, 이 noise는 이론상 방사주파수 정보에 정규적 확률분포로 영향을 미쳐 사진얼굴의 방사주파수 정보를 약화시킬 것이므로 이런 영향을 받지 않는 합성얼굴에 대한 활성화가 더 컸을 가능성이 있다. 잡영으로 차폐한 얼굴자극은 이 점을 분명히 해 줄 수 있다고 보는데, 본 연구의 실험 3에서는 잡영이 사진얼굴이나 합성얼굴의 정확인식률을 너무 낮추었던 까닭에 성공적이지 못했고, 첨가 잡영의 비율을 낮춘 자극이나 다른 얼굴자극의 구성을 향후 모색해 봐야 할 것이다.

다른 한편으로는, 방사주파수 정보가 얼굴인식 과정의 중간단계에서 주요한 자극속성임을 논의할 때 간과해서는 안될 문제가 대상인식에서의 방위주파수정보의 역할이다. 대상인식과 얼굴인식의 밀접한 관계는 뇌 손상에 따른 실인증 환자들에게서 발견되는 현상이다(예, Farah, 2000). 따라서, 본 연구의 결과는 향후 얼굴자극이 아닌 대상(예, 자동차)의 외곽형태를 방사주파수의 조합으로 합성한 자극들을 이용하여 원 대상과의 대응인식률을 살펴봄으로써 보다 확실한 결론으로 수렴될 것으로 본다.

다른 논의점은 회전, 축척된 사진얼굴에 대한 뇌 영역의 활성화가 전반적으로 원 사진얼굴에 비

해 차이가 없었던 반면, 회전된 합성얼굴에 대한 뇌 영역의 활성화가 원 합성얼굴에 비해 작았던 관찰에서 파생되는 문제이다. 이 관찰은 일차시각영역의 시각세포들이 특정 방위나 공간주파수에 대해 반응이 최적화되어 있는 것(Hubel & Wiesel, 1968; Wilson & Gelb, 1984)과 마찬가지로 V4영역의 시각세포들이 특정 방사주파수에 최적화되어 있을 가능성을 시사하는 점이다. 그런데, 이 관찰은 위에서 언급한 얼굴인식의 연구주제 중 또 다른 오래된 연구주제인 얼굴인식과 대상인식 간의 관계에 대해 시사해 주는 바가 있다. 일반적으로 얼굴자극은 특수하여 일반 대상과 달리 뇌의 특정 영역(예, FFA)이 얼굴자극을 처리하도록 특화되어 있다고 여겨져 왔지만, 최근 얼굴인식과정이 대상인식과정과 다르지 않다는 주장이 제기되고 있다(Gauthier, Behrmann, & Tarr, 1999; Tarr & Gauthier, 2000). 얼굴자극의 처리가 일반대상자극의 처리와 차별화된 이유는 얼굴자극의 상대적 친숙성 때문에 학습의 결과로 나타나는 것일 뿐, 선천적인 구조의 차이나 처리과정의 차이에 기인하는 것은 아니라는 요지의 주장이다. 따라서, 사진얼굴의 경우 원 얼굴이나 회전된 얼굴에 대한 우리의 친숙성은 모두 높아 정확대응인식률이나 뇌 활성화에서 차이를 보이지 않은 반면, 상대적으로 피험자에게 친숙하지 않은 합성얼굴의, 이에 더해, 회전까지 된 합성얼굴에 대한 뇌 영역의 활성화 정도는 원 합성얼굴에 대한 활성화 정도보다 작았을 가능성이 있다. 한편, 실험 3에서는 사진얼굴과 합성얼굴 모두의 경우 똑바로 선 원 얼굴이 항상 변형된 얼굴에 선행하여 제시되었는데, 이로 인해 원 얼굴의 표상을 유지하는 작업기억이 영향을 미칠 수 있었고, 이것이 사진얼굴과 합성얼굴의 경우 다른 영향을 미쳤을 가능성도 있다. 이 문제들은 향후 선행 학습으로 합성얼굴에 대한 재인이 상

당한 수준에 이르도록 한 후 회전된 사진얼굴과 합성얼굴에 대한 선택적 뇌 영역의 활성화를 측정함으로써 문제의 해결을 모색해 볼 수 있다고 생각한다. 이 연구는 위에서 제안한 방사주파로 구성된 대상의 인식정도를 탐구하는 연구와 함께, 다시 한번 방사주파수 합성얼굴자극의 유용성을 부각시켜 준다. 즉, 대상인식과 얼굴인식이 학습의 정도에 의한 차이가 있을 뿐 배경의 처리구조나 처리과정에 차이가 없음을 밝히기 위해서는, 친숙하지 않으나 각 개인의 얼굴을 구분해주는 정보를 충분히 함유하는 자극이 필요한데, 본 연구의 세 실험의 결과는 이런 측면에서 방사주파수 합성얼굴이 얼굴 정보처리의 특성을 연구하는데 적합하다고 본다.

참고문헌

- Bandettini, P. A. & Cox, R. W. (2000). Event-related fMRI contrast when using constant interstimulus interval: theory and experiment. *Magnetic Resonance in Medicine*, 43, 540-548.
- Bruce, V., Healey, P., Burton, M., Doyle, T. Coombes, A., & Linney, A. (1991). Recognizing facial surfaces. *Perception*, 20, 755-769.
- Bruce, V. & Young, A. (1998). *In the eye of the beholder: the science of face perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Desimone, R. (1991). Face selective cells in the temporal cortex of monkeys. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 1-8.
- De Valois, R. & De Valois, K. (1990). *Spatial vision*. NY: Oxford University press.
- Farah, M. J. (2000). *The cognitive neuroscience of vision*. Great Britain: Blackwell Publisher
- Gallant, J. L., Braun, J., & van Essen, D. C. (1993). Selectivity for polar, hyperbolic, and Cartesian gratings in macaque visual cortex. *Science*, 259, 100-103.
- Gallant, J. L., Shoup, R. E., & Mazer, J. A. (2000). A human extrastriate cortical area that is functionally homologous to macaque area V4. *Neuron*, 27, 227-235.
- Gauthier, I. L., Behrmann, M., & Tarr, M. J. (1999). Can face recognition really be dissociated from object recognition? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 349-370.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2002). *Cognitive neuroscience*. New York: Norton & Company Ltd.
- Graham, N. (1989). *Visual pattern analyzer*. Oxford: Oxford University Press.
- Gross, C. G. (1992). Representation of visual stimuli in inferior temporal cortex. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B*, 335, 3-10.
- Halgren, E., Dale, A. M., Sereno, M. I., Tootell, B. H., Marinkovic, K., & Rosen, B. R. (1999). Location of human face-selective cortex with respect to retinotopic areas. *Human Brain Mapping*, 7, 29-37.
- Hasson, U., Hendler, T., Bashat, D. B., & Malach, R. (2001). Vase or face? a neural correlate of shape-selective grouping processes in the human brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 744-753.
- Hayes, T., Morrone, M. C., & Burr, D. C. (1986). Recognition of positive and negative bandpass filtered images. *Perception*, 15, 595-602.
- Kanwisher, N. (2000). Domain specificity in face perception. *Nature Neuroscience*, 3, 759-763.

- Martínez, A., Anllo-Vento, L., Sereno, M. I., Frank, L. R., Buxton, R. B., Dubowitz, D. J., Wong, E. C., Hinrichs, H., Heinze, H. J., & Hillyard, S. A. (1999). Involvement of striate and extrastriate visual cortical areas in spatial attention. *Nature Neuroscience*, 2, 364-369.
- McCarthy, G., Puce, A., Gore, J. C., & Allison, T. (1997). Face specific processing in the human fusiform gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 605-610.
- Näsänen, R. (1999). Spatial frequency bandwidth used in the recognition of facial images. *Vision Research*, 39, 3824-3833.
- Peterson, M. & Rhodes, G. (2003). *Perception of faces, objects, and scenes: analytic and holistic processes*. Oxford: Oxford University Press.
- Siegala, N. & Logothetis, N. K. (2002). Visual categorization shapes feature selectivity in the primate temporal cortex. *Nature*, 415, 318-320.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Coplanar stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme Medical.
- Tarr, M. J., & Gauthier, I. (2000). FFA: A flexible fusiform area for subordinate-level visual processing automatized by expertise. *Nature Neuroscience*, 3, 764-769.
- Tootell, R. B. H., Hadjikhani, N. K., Mendola, J. D., Marrett, S., Dale, A. M. (1998). From retinotopy to recognition: fMRI in human visual cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 174-183.
- Ungerleider, L. G., Mishkin, M. (1992). *Two cortical visual systems*. In: Ingle, D. J., Goodale, M. J., Mansfield, R. J. W. (eds.): *Analysis of visual behaviour* cambridge, MA: MIT Press, 549-586.
- van Essen, D., Anderson, C. Felleman, D. (1992). Information processing in the primate visual processing: an integrated systems prospective. *Science*, 255, 419-423.
- van Essen, D. C., Lewis, J. W., Drury, H. A., Hadjikhani, N. K., Tootell, R. B. H., Bakircioglu, M., & Miller, M.I. (2001). Mapping visual cortex in monkeys and humans using surface-based atlases. *Vision Research*, 41, 1359-1378.
- Wilkinson, F., Wilson, H. R., Habak, C. (1998). Detection and recognition of Radial Frequency Patterns. *Vision Research*, 38, 3555-3568.
- Wilkinson, F., James, T. W., Wilson, H. R., Gati, J. S., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2000). An fMRI study of the selective activation of human extrastriate form vision areas by radial and concentric gratings. *Current Biology*, 10, 1455-1458.
- Wilson, H. R., & Gelb, D. (1984). Modified line-element theory for spatial frequency and width discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, 1, 124-131.
- Wilson, H. R., Wilkinson, F., Lin, L-M., Castillo, M. (2000). Perception of head orientation. *Vision Research*, 40, 459-472.
- Wilson, H. R., Loffler, G., & Wilkinson, F. (2002). Synthetic faces, face cubes, and the geometry of face space. *Vision Research*, 42, 2909-2923.
- 1 차원고접수 : 2003. 10. 30.
2 차원고접수 : 2003. 12. 6.
3 차원고접수 : 2003. 12. 18.
최종게재결정 : 2003. 12. 20.

The radial frequency information in the underlying brain mechanisms of the face recognition

Jeounghoon Kim

School of Humanities & Social Science,
KAIST

Chobok Kim

Department of Psychology,
Chungnam National University

A new class of synthetic face stimuli composed of radial frequency components has been recently introduced for studying visual face processing. Synthetic faces have properties of optimal stimulus to the cells in the V4 area, which is believed to be the intermediate stage of the visual pathway. It has been shown psychophysically in this study that synthetic faces capture a significant portion of the geometric information that individuates faces. Using fMRI, we have also measured the relative strength of activation in selective brain areas to photographic faces and synthetic faces. We have found that there was no difference in activation by both face stimuli in FFA, while there was a relatively strong activation in V4 to the synthetic face stimuli. In addition, we have measured the selective activation of human form vision areas to the various synthetic faces (rotated, scaled, and noise-filtered). The results showed that the aspects of face processing vary depending on the stimulus properties of face. We discussed the role of radial frequency component in face recognition and its possible relevance to object recognition.

Keywords radial frequency, synthetic face fMRI, V4, FFA