

편측성 준비 전위(lateralized readiness potential): 대측 통제를 이용한 운동 관련 전위에 관하여*

신 은 삼[†]

연세대학교 인지과학연구소

신경계의 운동 체계가 대측적으로 조직화되어 있음을 이용하여 개발된 편측성 준비 전위(LRP: lateralized readiness potential)는 사건관련전위(ERP: event-related potential)에서 도출되는 특수 파형으로서 그것의 높은 시간적 해상도를 바탕으로 심리 시간분석법(mental chronometry)적 연구 발전에 큰 공헌을 해왔다. 특히 인간의 정보처리 양식이 동시적이고 연속적이라는 증거를 제공하면서 그 유용성을 확장해왔다. 본 논문에서는 LRP의 발달 배경, 도출 원리, 종류, 분석 및 검증 방법을 개관하였고 LRP를 이용한 응용 연구 또한 소개하였다.

주요어 : 사건관련전위, 대측 통제, 정보처리, 편측성 준비 전위, 심리 시간분석법

* 본 논문은 2011년 정부재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음.
(NRF-2011-354-H00011)

† 교신저자 : 신은삼, 연세대학교 인지과학 연구소, (120-749) 서울시 서대문구 연세로 50
Email : eunsam.shin@yonsei.ac.kr

1960년대 디지털 컴퓨터 시대의 도래로 사건관련전위(event-related potential, 이하 ERP)를 이용한 연구들이 인간의 인지과정을 신경생리학적 측정 결과를 이용해 추론하면서 인지신경과학 분야에서 선도적 역할을 담당해 왔다. 그러나 양전자 방출 단층촬영술(positron emission tomography, 이하 PET)이나 기능성 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging, 이하 fMRI)과 같은 기법들이 높은 공간적 해상력(spatial resolution)을 바탕으로 뇌의 특정 영역에서의 활동을 직접 관찰 가능한 영상으로 제공하면서 ERP를 이용한 연구들이 점차 그 중심적 역할을 양보하고 있다. 다시 말해, 뇌 활동의 공간적 정보를 구체적으로 제공할 수 없다는 ERP 기법의 한계를 극복하는 대안적 방법들이 속속 제시, 발전되면서 인지신경과학적 연구 방법의 중심이 바뀌고 있는 추세이다. 이와 같은 한계와 현 위치에도 불구하고 PET이나 fMRI 기법들과 비교하여 ERP는 1/1000초인 밀리세컨드(ms) 수준의 뛰어난 시간적 해상력(temporal resolution)을 가지고 있고 이를 바탕으로 정보처리의 시간 경과, 소위 심리 시간분석법(mental chronometry; Posner, 1978)이라 불리는 연구 분야에 큰 공헌을 해 왔다. 그러므로 뇌의 특정 영역에서의 활동이 어떤 인지 과정들과 관련되어 어떠한 패턴의 시간 경과를 따르는지에 대한 수렴적 증거를 수집하려 한다면 ERP는 여전히 빠뜨릴 수 없는 중요한 인지신경과학적 연구 방법이다.

ERP의 주요 신호 중 신경해부학적으로도 그 신호에 대한 근거가 타당하고 또한 높은 시간적 해상력을 고스란히 지니고 있는 전위가 있어 본 논문을 통해 소개하고자 한다. 편

측성 준비 전위(lateralized readiness potential, 이하 LRP)라 불리는 전위가 그것인데 운동 체계를 담당하는 신경계가 반대편 반구(contralateral hemisphere)로 조직화되어 있어 대측성 통제를 하고 있음을 이용한다. 이러한 대측적 조직화를 이용하면 양 반구 중 한쪽 반구에서 비대칭적으로 활성화되는 신호를 추출해 낼 수 있다. 또한 신경해부학적으로도 LRP가 유용한 이유는 그 신호가 추출되는 위치(즉 전극의 위치)가 해당 영역이나 인접 영역에서 담당하는 뇌의 특정 기능과 맞아 떨어지기 때문이다.

1965년 Kornhuber와 Deecke가 자발적인 손 반응을 하기 전 약 800ms 부터 운동 피질 부근의 전극에서 부적 전위가 천천히 발달한다는 것을 보고하였는데, 이 전위가 준비 전위(readiness potential, 이하 RP) 또는 Bereitschaftspotentials이다. RP가 과연 무엇을 반영하는 것인지 -전반적인 준비 상태, 아니면 구체적인 운동 반응과 관련된 뇌 활동-에 관한 논란 속에서(Vaughan et al., 1968; Gerbrandt et al., 1973), Kutas와 Donchin(1980)은 자극 제시와 손 반응 간의 관계를 세분화하여 조건별로 RP가 출현하는 양상을 관찰하였다. 그 결과 두 가지 주요 사실을 발견하였다. 그것들은 자극의 출현을 예고하는 경고성 신호(S1)에 이어 실제 손 반응을 요구하는 자극(S2)이 뒤따를 때, 이 자극(S2) 제시 이전 시간대에서 부적 전위가 관찰된다는 것과, 피험자가 어느 손으로 반응할지 미리 알고 있는 경우, 반응 전 발생하는 부적 전위가 반응 손의 반대편에 위치한 전극, 특히 중앙에 위치한 전극(오른손 반응의 경우 C3, 왼손 반응의 경우에는 C4)에서 가장 두드러지게 나타난다는 것이었다.

이러한 발견은 RP가 운동 체계의 준비 과정을 반영한다는 주장을 지지하는 것이었지만, 동시에 LRP의 경험적 기초를 마련하는 결과를 낳기도 하였다. 즉, RP의 편측화를 이용한다면 선택 반응 과제에서 피험자가 특정 손 반응을 준비하였는지, 만약 준비하였다면 언제 하였는지 등에 관해 추론할 수 있으리라는 기대감이 LRP 개발로 이어진 것이다. 그러므로 LRP는 RP에 기초하여 시작되었으나 편측화의 원리를 심분 이용하는, RP¹⁾보다는 좀 더 구체화된 운동 관련 전위로서 손이나 발 반응을 통제하는 운동 영역(motor area)에서 시간의 흐름에 따라 진행되는 운동 과정(motor process)을 보여주는 전위라 할 수 있다.

RP가 운동 체계의 준비 과정을 반영한다는 것은 중요한 발견으로서, 이 전위가 운동 피질을 구성하고 있는 뉴런에서 발생하는 신호라는 연구들(Arezzo & Vaughan, 1975; Deecke 등, 1982; Okada 등, 1982)은 RP가 대뇌 운동 체계의 준비 과정을 반영한다는 추측에 타당성을 부여하였고, 이 전위가 반대편 통제의 원칙을 따른다는 관찰은 LRP 개발의 시발점이 되었으며 그 도출 방법에 있어서도 중요한 원

칙을 제공하였다. 운동 관련 전위로 시작한 RP에서 조금 더 구체화된 LRP의 개발로 인간의 정보처리 및 인지과정의 중요한 법칙들이 규명되어 왔고 앞으로도 LRP를 이용한 응용적 연구의 가능성 또한 크다. 그러나 이 전위가 어떤 원칙에 의하여 도출되는지에 대한 설명이 선행해야 이를 이용한 연구 결과에 대한 이해가 수월해질 것이라 판단하고 그 도출 방법에 관하여 먼저 소개하고자 한다.

LRP 도출 원칙 앞서 언급했듯이 LRP의 도출은 대뇌 운동 기관의 대측 통제(contralateral control) 원칙을 이용한다. 그러므로 운동 피질에 근접한 전극에서 도출된 파형들을 주로 관찰하고 분석한다. 즉 일차 운동 피질과 가까운 전극 C3와 C4에서 도출된 파형을 주로 관찰하고 분석한다. 구체적인 실험 상황으로 옮겨볼 때, 대측 통제의 원칙이란 실험참가자가 실험실 안에서 과제를 수행하기 위해 반응하는 손의 반대편 운동 피질에서의 통제를 가리킨다. 이것은 곧 대측 통제 원리와 같은 어떤 특수 규칙에 의해서 양 반구 중 한쪽 반구의 기능이 편측화(lateralization)되는 것을 말한다. 이러한 반구의 편측화(hemispheric lateralization)는 반구의 특수화(hemispheric specialization)와 구분할 필요가 있다. 반구의 특수화는 어떤 특정 기능에 있어서 양 반구의 역할에 차별성이 있음을 말한다. 예를 들어 언어를 담당하는 중추가 주로 좌반구에 편재되어 있다는 사실은 널리 알려져 있다. 브로카나 베르니케 영역이 그 좋은 예이다(Kolb & Whishaw, 1996). 이러한 기본 지식과 더불어 LRP의 도출에 있어서 한 가지 주목해야 할 것이 있다. 다음의

1) RP를 논의할 때 함께 회자되는 것이 수반성 부적 변화(contingent negative variation, 이하 CNV)이다. CNV(Walter et al., 1964)는 보통 S1-S2 패러다임에서 S2 제시 이전에 발달하는 전위를 가리키는데, 그 발달 초기에는 전두중앙(frontocentral) 영역에서 두드러지게 나타나고 후기에는 주로 중앙두정(centroparietal) 영역에 분포되어 나타난다(Leuthold et al., 2004, 재인용). 어떤 연구자들은 이 후기에 나타나는 CNV가 사전 운동 준비를 반영하는, 결국 RP와 동일한 것으로 추측하기도 한다(Fabiani et al., 2007, 재인용).

실험 상황을 가정해 보자. 실험실 안에서 피험자가 자신에게 주어진 과제 수행 방식에 의거하여 컴퓨터 모니터에 자극이 제시될 때마다 오른손 혹은 왼손의 손가락을 이용하여 키보드 혹은 반응 상자의 특정 버튼을 누른다. 여기에서 주목해야 할 것은 피험자가 제시되는 자극에 대한 반응으로 양 손 중 한 손을 선택해야 한다는 것이다. 그 선택이 특정 손 반응에 의해서 외현적으로 표현될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있으나, 선택 과제의 이용은 LRP 연구에 있어서 반드시 필요한 실험 요건이라 할 수 있다.

그림 1은 LRP의 단계별 도출 방법을 보여주고 있다. 참고로 그림 1은 단지 가상의 파형을 나타낸 것으로 실제 파형의 모양과 다를 수 있음을 미리 밝히고자 한다. 위에서 언급한 바와 같이 편측화는 특수화와 다르므로 참가자가 반응하는 손에 따라서 그 파형이 다르게 나타난다. 왼손과 오른손 바로 하단에 그

려진 두 개의 네모 상자 안의 파형을 보면 반응하는 손에 따라 그 반대편 반구에서 더 큰 전위가 나타남을 보여준다(두번째 언덕). 즉 왼손과 오른손 각 반응 손에 따라 전위의 상대적 크기가 다르다. 이와 더불어 반응 손과 상관없이 한 쪽 반구에만 특수하게 나타나는 활동(첫번째 언덕) 역시 존재한다고 가정해 볼 수 있다. 반응하는 손에 따라 양 반구에서 비대칭적으로 나타나는 전위를 추출하기 위해서 우전극(C4)과 좌전극(C3)의 차이를 왼손과 오른손 각각을 위해 계산하는데, 이 단계에서도 역시 반응하는 손과 관계없이 활성화된 뇌 반응이 여전히 존재한다고 볼 수 있다. 그러나 이 특수화된 활동은 좌우 전극의 차이를 계산하는 과정에서 크기는 같으나 서로 반대 방향의 극성(polarity)을 가진 전위로 남는다. 이 과정이 두 번째 줄 네모 상자에 그려진 파형에 나타나 있다. 이 운동 비관련 활동을 제거하기 위하여 왼손과 오른손 각각에서 추출된 차이 전위의 평균을 계산한다. 이 때 비로소 반응 손과 관련된 편측성 뇌활동을 다른 종류의 활동으로부터 고립시키고 LRP를 도출하게 되는 것이다. 마지막 네모 상자의 파형이 그 결과를 보여준다. 지금까지 설명한 LRP 도출 방법을 하나의 공식으로 나타내면 다음과 같다.

$$LRP = [(C4' - C3')_{\text{왼손}} + (C3' - C4')_{\text{오른손}}] / 2$$

여기에서 C4'와 C3'은 전극 C4와 C3에서 측정된 전위 값을 가리키고 왼손, 오른손은 반응하는 손을 가리킨다. 이 공식을 통해서 도출되는 전위는 양 반구의 '상대적' 차이를

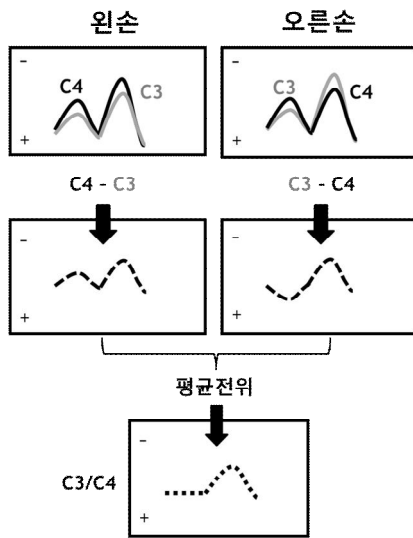


그림 1. LRP 도출 과정

반영한다는 사실에 주목할 필요가 있다. 다시 말해서 양 반구가 동시에 같은 수준으로 흥분하거나 억제되는 경우에는 그 결과 값이 0이 나오게 되므로, LRP가 각 반구의 절대적 활성화나 억제 정도를 반영하지는 않는다는 사실을 인지할 필요가 있다.

LRP는 미국의 일리노이 대학(University of Illinois at Urbana-Champaign)과 네덜란드의 그로닝엔 대학(University of Groningen)에서 각각 독립적으로 개발되었다(Coles & Gratton, 1986; de Jong 등, 1988). 앞서 설명한 도출 공식은 일리노이 대학 그룹에서 주로 사용하였고(Gratton 등, 1988; Coles, 1989), 그로닝엔 대학 그룹은 LRP라는 말 대신 교정된 운동 비대칭성(corrected motor asymmetry, 또는 CMA)이라는 용어를 사용하며 다음과 같은 공식을 이용하였다(de Jong 등, 1988). $CMA = (C3' - C4')_{오른손} - (C3' - C4')_{왼손}$. 이 두 공식은 서로 동등하게 사용될 수 있으나 그로닝엔 그룹의 공식을 사용할 경우에 LRP 진폭이 일리노이 그룹의 공식을 통해 도출되는 전위의 두 배가 된다는 점이 다르다. 간혹 $(C3' - C4')_{왼손} - (C3' - C4')_{오른손}$ 공식을 사용하여 LRP를 도출하는 연구자들도 있는데(Eimer & Schlaghecken, 1998, 2003), 이 경우에 도출되는 LRP는 정적 전위로 나타난다.

위에 소개한 공식들 모두 반응 손(오른손, 왼손)을 기초로 해서 표현이 되어있다. 따라서 잘 통제된 실험을 실시하기 위해 자극과 반응 손 간의 관계(stimulus-response mapping)를 역균형화 시킨다면 위의 공식을 적용하는 방식은 다음과 같다. 예를 들어 H 자극에 대해서는 오른손으로 S 자극에 대해서는 왼손으로 반

응하도록 한다면, 피험자내 수준에서 혹은 피험자간 수준에서 역균형법을 실시할 수 있을 것이다. 피험자내 수준의 역균형법은 현실적으로 효율적이지 않다고 본다. 그 이유는 익숙해진 자극-반응 관계가 실험 중 어떤 시점에서 역전되어 반대의 자극-반응 관계로 새롭게 익숙해져야 하는 과정이 필요하기 때문이다. 이 경우 불안정한 자료를 생산해 낼 가능성이 높고, LRP 도출 과정에 있어서도 반응 방식이 같은 시행들만을 모아서 따로 계산을 해야 하는 번거로운 과정이 필요하다. 대신 피험자들을 두 집단으로 나누어 피험자수의 반은 H 자극에 오른 손을 이용하도록 하고, 나머지 반은 S 자극에 오른 손을 이용하도록 하는 피험자간 수준의 역균형법을 실시할 수 있을 것이다. 이 때 LRP 도출은 이 두 번째 집단(S 자극에 오른 손 반응 집단)에 대해서 앞서 소개되었던 공식의 $C3'$ 와 $C4'$ 를 첫 번째 집단에 적용할 때와 반대 위치로 바꿔주면 된다. 이것은 곧 한 집단에서 특정 자극과 연합된 손 반응으로 활성화되는 반구가 다른 집단에서는 반대쪽 반구임을 나타내 주는 것이다.

LRP를 이용한 대부분의 ERP 연구들이 손 반응을 요구하는 과제를 사용해 왔기 때문에 본 논문은 이러한 연구들을 대상으로 구성되어 있다는 것을 미리 밝혀두고자 한다. 그러나 LRP는 손으로 반응하는 실험에서 뿐만 아니라 발로 반응하는 실험에서도 관찰되어 왔다. 손으로 반응할 때와 다른 점이 있다면 반응하는 쪽의 동측(ipsilateral) 반구에서 부적 전위가 더 크게 나타난다는 것이다(Brunia & van den Bosch, 1984). 이 현상은 언뜻 생각하

기에 우리의 운동 신경 체계가 발 운동에 있어서 대측 구조가 아닌 동측 구조를 갖고 있다는 것을 의미하는 듯하다. 그러나 이 현상은 발 운동 체계의 대측 구조를 부정하는 것이 아니라, 신호가 두 반구를 가르는 종단적 고랑(longitudinal fissure) 근처 깊은 곳에서 비롯되기 때문이다. 신체운동뇌도(motor homunculus)에 따르면, 손이나 손가락 운동을 통제하는 영역은 측면(lateral)에 위치하고 있으나 발 운동 담당 영역은 안쪽(medial)에 위치하고 있다. 이러한 체위상적(somatotopic) 차이로, 손 운동의 경우 EEG에 나타나는 신호가 운동하는 쪽 대측 반구의 측면에 위치한 쌍극자(dipole)가 원천이 되지만, 발 운동의 경우에는 쌍극자가 운동하는 쪽 대측 반구의 내측에서 종단적 고랑 방향으로 기울어져 있으므로 그 반대쪽 반구(즉, 운동하는 쪽과 동측에 위치한 반구)에서 신호가 더 크게 나타나는 것이다 (Brunia & van den Bosch, 1984; Jentzsch & Leuthold, 2002). 발 운동을 이용할 경우에도 앞서 설명한 LRP 도출 공식을 이용하여 오른손을 오른발로 왼손을 왼발로 바꾸어 사용하면 될 것이다. 다만, 이 경우 결과가 손 반응 LRP 도출 때와 반대의 극성으로 나타난다(e.g., Carrillo-de-la-Peña et al., 2006)는 점을 인지해야 할 것이다.

LRP의 종류 LRP는 인간이 감각 기관으로 정보를 받아들여 운동 기관을 통해 외현적인 반응을 보이기까지의 정보처리 과정에서 어떤 양식의 처리 절차를 밟는지에 대한 매우 유용한 정보를 제공해왔다(Gratton 등, 1988; Miller & Hackley, 1992; Osman 등, 1992; Shin 등,

2004). 그 이유는 LRP가 선택 반응 시간 과제(choice reaction-time task)를 이용하는 실험에서 참가자가 특정 손 반응을 미리 준비하는지, 만약 준비한다면 어떤 시점에서 어느 정도의 활성화로 얼마나 빨리, 어떤 방식으로 준비하는지에 대한 추론을 가능케 하기 때문이다. 이러한 추론들은 어떤 시점을 기준으로 하여 LRP의 발달을 관찰하는지에 따라 더 구체화될 수 있다. 보통 자극 제시 시간을 0으로 고정시킨 후 그 발달을 관찰하거나 반응하는 시점을 0으로 하고 그 시점까지 발달하는 형태를 관찰하는데, 이를 각각 자극에 고정된(stimulus-locked) LRP와 반응에 고정된(response-locked) LRP라고 한다. 그림 2는 이 두 유형의 LRP에서 나타날 수 있는 가상의 파형들을 예로 보여주고 있다. 이 파형들은 LRP 도출 방식 첫 번째에 소개한 공식을 사용하는 가정 하에 그려진 것으로, LRP가 점진적으로 발달하는 부적 전위로 나타나 있다.

자극에 고정된 LRP. 정답 반응 시행들만을 포함하여 자극 제시 시간을 0으로 할 때 이 시간으로부터 서서히 발달하는 운동 전위를 자극에 고정된 LRP라고 한다. 보통 자극 제시 이후 200-300ms 사이에 기저선 0으로부터 분리되어 점차 증가하는 전위로 나타난다. 이 전위는 운동 체계의 활성화 전에 일어나는 사전 운동 과정을 관찰하는데 이용되어 왔는데 그 발달 여부, 기저선으로부터 분리되는 시점, 그리고 발달하는 정도나 형태를 통해서 반응 준비 과정을 추론할 수 있다.

그림 2-가는 자극에 고정된 LRP에서 나타날 수 있는 여러 가지 형태의 파형들을 보여준다.

여기에서 (1), (2), (3)의 파형은 반응 체계의 활성화가 역치 수준을 넘어 반응 손 준비를 위한 운동 프로그래밍이 일어나고 실제 외현적 손 반응이 일어난 경우(go response)에 관찰된다. 반면 (4)는 반응 체계의 활성화가 일어나기는 하나 역치 수준을 넘기지 않는, 즉 역치하(sub-threshold) 수준의 활성화로 실제적 손 반응은 일어나지 않은 경우(no-go response)에 관찰될 수가 있다. 참고로 반응 역치(response threshold)의 개념 또한 LRP를 이용한 연구에서 발전된 것으로서, de Jong 등(1990)은 반응 활성화 과정에서 어떤 수준을 넘어 되돌아 올 수 없는 지점(the point of no return)에 다다르게 되면 활성화 과정의 역제가 불가능하고 명백한 손 반응을 피할 수가 없다고 하였다. 물론 양 반구 간의 비대칭적 운동 체계의 활성화가 역치하 수준으로도 일어나지 않는다면 LRP의 발달 역시 전혀 관찰되지 않을 것이고 실제 손 반응도 없을 것이다. 다음 단락에서는 그림 2-가에 그려진 각 파형에 대해 관련 연구들을 예시하며 그 차이점들에 관하여 자

세히 설명하고자 한다.

(1)과 (2)는 충분히 발달하였음에도 불구하고 그 발달 패턴에서 차이가 있다. 그것은 전위가 발달하는 기울기가 다르다는 것이다. 전위가 단위 시간당 발달하는 속도가 달라 각기 최고점에 다다르는 시간이 다른데, 이는 실제 반응 시간 차이와도 관련이 있다. Shin 등(2004)은 스텐버그 기억 추적 과제를 이용하여 기억세트 2와 4의 부호화 이후 제시되는 시험자극(test stimulus)에 대한 기억세트 포함 여부를 추적하는 과정이 운동 준비(motor preparation)와 함께 일어날 수 있는지를 LRP를 통해 연구하였다. 이 연구 결과는 과제를 수행하는 시간이 증가하면서(즉 과제에 대한 훈련이 증가하면서) 기억세트 2 조건에서의 LRP가 기억세트 4 조건보다 더 가파르게 발달하고 더 이른 시간에 최고점을 보이며 반응 시간 역시 더 빠르다는 것이었다. 이와 같이 자극에 고정된 LRP에서 조건 간의 기울기 차이는 운동 체계 활성화의 속도를 반영한다고 볼 수 있다.

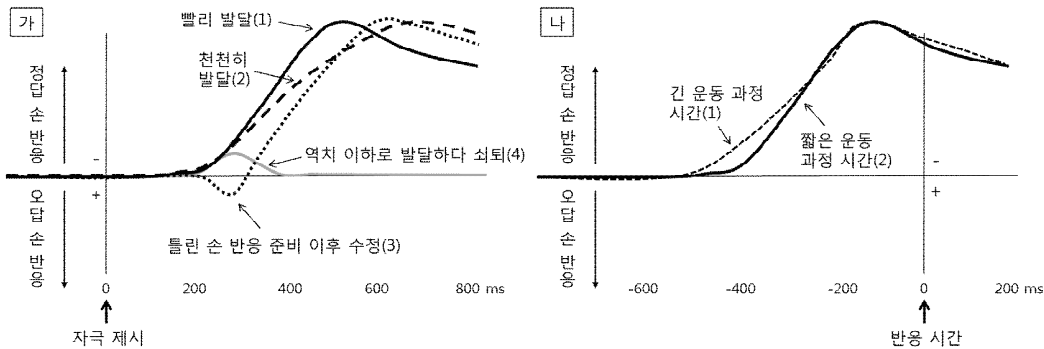


그림 2. LRP의 유형. 자극에 고정된 LRP(가)에서 (1), (2), (3)과 같은 파형은 반응 시행에서 관찰될 수가 있고, (4)와 같은 파형은 비반응 시행에서 관찰되는 경우가 있다. 반응에 고정된 LRP(나)는 실제 행동 반응이 있을 경우에만 도출되므로 (1), (2)와 같은 파형은 반응 시행에서만 관찰된다. 이 그림에서 부적 전위는 위쪽으로, 정적 전위는 아래쪽으로 향하고 있다.

(1), (2), (3) 모두 실제 손 반응이 있을 경우 나타나는 형태의 전위이지만 (3)은 그 시작점이나 발달 형태가 (1), (2)와 다르다. 우선 발달 초기 부적 전위로 발전하기 전 잠시 정적 전위로 발전하는 패턴을 보인다. 이러한 형태의 발달은 주로 양 손 반응의 활성화가 서로 경쟁하며 일어날 때 관찰된다. Gratton 등(1988)은 에릭슨의 수반자극(flanker) 과제(Eriksen & Eriksen, 1974)를 이용하여 한가운데 제시 되는 글자에 따라 반응 손을 선택하도록 하였는데, 이들은 HHHHH나 SSSSS처럼 주변 수반자극이 표적 자극과 부합하는(compatible) 조건과 HHS_uHH나 SSH_uSS와 같이 표적 자극이 주변 수반자극과 부합하지 않는(incompatible) 조건에서 LRP가 발달하는 패턴을 관찰하였고 비부합 조건에서 (3)과 같은 LRP가 관찰될 수 있다는 것을 발견하였다. LRP가 양 반구의 상대적 전위 차이를 나타낸다는 점과 정답인 손으로 반응한 시행들만을 모아 추출할 때 부적 전위로 발달한다는 점을 상기하면 이 초기의 정적 전위 발달은 오답인 손을 통제하는 운동 체계의 순간적 활성화를 반영하는 증거라고 볼 수 있다. 비록 그 활성화의 정도가 역치하 수준이기는 하지만 말이다. 다시 말해, 결국 정답인 손으로 반응을 하지만 반응 체계의 활성화 과정에서 오답 쪽 손에서 잠시 활성화가 일어났음을 보여주는 것이다. 참고로 LRP는 양 반구의 차이에서 나오는 값이므로 항상 비교의 개념으로 이해할 수밖에 없다. 즉 LRP를 통해서 반구 각각에서 일어나는 운동 체계의 활성화 정도에 관해서는 알 수가 없다. 그러므로 (3)의 정적 전위 발달을 오답 손에서 일어나는 운동 준비의 직접적 증거로 보기에 미흡한 면

이 있다. 그러나 이후에 발표된 연구(DeSoto et al., 2001)에서 이러한 가능성에 대한 직접적 증거가 제시되었다. 신경영상법 중 하나인 사건관련광학신호(event related optical signal 또는 EROS) 기법은 시간적 해상력이 뛰어나고 신호의 국재화(localization) 역시 좋다(Gratton & Fabiani, 2001). 이 방법을 이용하여 DeSoto 등(2001)은 스투룹 과제의 일치(congruent) 조건에서는 반응하는 손의 대측 운동 피질에서만 운동 피질의 활성화가 관찰된 반면 불일치(incongruent) 조건에서는 양측 모두에서 동시 활성화가 관찰된다는 것을 발견하였다. 실제 손 반응 이전 약 100 ms 이전부터 나타나기 시작한 이 운동 피질의 활성화가 LRP에서는 순간적 정적 전위 발달로 나타나지 않았나 해석된다.

이러한 반응 체계의 동시 활성화를 Gratton 등(1988)은 주의의 2단계 과정, 즉 초기의 일차적, 병렬적 자극 분석 과정과 이후의 초점적, 연속적 자극 분석 과정(Treisman & Gelade, 1980; Treisman & Gormican, 1988)을 이용하여 설명하였다. 전체 자극에 대한 정보는 병렬적 방식으로 신속하게 처리되나 중앙 자극은 초점주의를 요구하므로 다소 느리게 처리된다는 것이다. 그러므로 부합 조건과 같이 전체 자극(예, HHH_uHH)과 중앙 자극이 동일한 손 반응을 지시하는 경우에는 반응을 준비함에 있어 갈등이 없겠으나, 비부합 조건과 같이 전체 자극(예, HHS_uHH)과 중앙 자극이 서로 반대되는 손 반응을 지시하는 경우에는 반응 준비 과정에서 갈등이 있을 것이다. 이 갈등은 전체 자극에 대한 ‘일차적’ 분석이 중앙 자극에 대한 ‘완전한’ 분석보다 시간적으로 앞서면

서 일차 분석 결과에 대한 부분적 정보(partial information)가 반응 체계를 활성화시키는 것으로 나타난다는 것이다. 이 부분적 정보 전달의 결과로 틀린 손 반응 준비가 있었으나 이내 완전한 분석 결과가 반응 체계에 전달되면서 정답인 손 반응으로 수정하는 과정이 요구되는 것이다. 이러한 수정 과정 때문에 부합 조건과 비교하여 LRP의 발달이 느려지고 최고점에 이르기까지도 시간이 걸리는 것이다. 이와 같이 반응 준비 과정에 대한 뇌 활동의 직접적 증거는 인간의 정보처리 양식을 밝히는 데 큰 공헌을 하였다. 다시 말해 이러한 LRP 연구들은 반응 체계가 부분적 정보에 의해 활성화될 수 있고, 이러한 활성화는 순차적이고 단계적이기 보다는 동시적이고 병행적 양식을 따른다는 증거를 제공하였다.

이러한 동시, 병행적 정보처리에 대한 증거가 여러 연구에서 지속적으로 발견되었는데, (4)와 같은 LRP 발달 역시 이러한 양식의 정보처리에 대한 증거를 제공하였다(Miller & Hackley, 1992; Osman 등, 1992; Shin 등, 2004). (4)의 경우는 실제 손 반응이 요구되지 않았음에도 불구하고 정답인 손에서 반응 준비를 하였다는 흔적을 보여주는 것으로써 다음과 같은 상황을 상상해 보자. 만약 자극이 어떤 손으로 반응해야 하는지에 대한 정보를 미리 제공하고 이 (부분적) 정보가 그 자극을 완전히 분석하기 이전에 반응 체계에 전달된다면, 그 자극이 완전히 분석되는 동안 부분적 정보를 받은 손에서 반응 준비가 일어날 수도 있을 것이다. 이러한 가설 하에 연구자들은 선택과 반응/비반응(choice and go/no-go) 방식으로 수행하는 과제를 이용하여 그 가능성에 대하여 실

험하였다. 여기에서 선택은 둘 중 어느 손으로 반응해야 하는지와 관련되고 반응/비반응은 실제 손 반응이 요구되는지 그렇지 않은지와 관련된다. 보통 자극의 특성 중 쉽고 빠르게 분석될 수 있는 것(예, 글자 크기)은 손 선택과 연관된다. 예를 들어 작은 글자 A가 제시되는 경우 오른손으로 반응한다면, 큰 글자 A가 제시되는 경우에는 왼손으로 반응한다. 반응/비반응 결정은 시간을 요하는 자극 분석(예, 글자의 정체)과 연관된다. 예를 들어, 글자 크기가 작던지 크던지 A가 제시될 경우에는 반응하지만 B가 제시되는 경우에는 반응하지 않는다. 선택과 반응/비반응 방식으로 과제를 수행할 때 (4)와 같은 LRP가 관찰된다면 이것은 시간을 요하는 특성에 대한 자극 분석 과정 동안, 쉽고 빠르게 분석된 정보에 의해 이미 선택된 손에서 운동 준비가 이루어짐을 나타낸다. 이것은 곧 자극에 대한 완전한 분석이 운동 준비와 함께 이루어짐을 보여주는 증거이고 정보의 흐름이 그 단계에서 완성되지 않아도 부분적으로나마 다음 단계로 전달될 수도 있고, 그러므로 여러 단계에서의 처리가 동시에 일어날 수 있음을 보여주는 것이다.

반응에 고정된 LRP. 반응에 고정된 LRP는 정답 반응 시행들만을 수집하여 실제 손으로 반응한 반응 시간(reaction time)을 0으로 할 때 그 반응 시간까지 점차적으로 발달하는 부적 전위로 나타난다. 이 전위는 운동 체계의 활성화에 걸린 시간을 반영하며 보통 그림 2-나와 같은 형태로 나타난다. 이 그림에서 반응 시간 0을 기준으로 볼 때 (1)이 (2)보다 더 멀

리 떨어져 있다. 이것은 (1)이 (2)보다 운동 과정에서 더 오랜 시간이 걸렸음을 의미한다. 앞서 예를 들었던 Shin 등(2004)의 연구에서 기억 추적과 반응 준비가 동시에 일어난 경우 기억세트 4와 2 조건이 각각 (1)과 (2)와 같은 형태로 나타났는데 이는 기억세트 4 조건이 기억세트 2 조건 보다 기억 추적 과정이 오래 걸렸고 따라서 운동 활성화 시간도 더 길었다는 것을 의미한다.

LRP의 분석 및 통계적 검증 LRP를 도출하여 그림 2와 같은 파형을 얻었다고 가정하자. 이 단계에서 필요한 것은 과연 관찰된 전위가 통계적으로 유의하게 발달하였는지, 조건 간에 유의한 차이가 있는지를 결정짓는 일일 것이다. 이 단계에서 제기될 수 있는 질문들을 구체적으로 열거하면 다음과 같다. 첫째, LRP가 통계적으로 유의하게 발달하였는가? 만약 그렇다면 언제부터 그러한가? 둘째, LRP 발달의 정도가 조건X와 조건Y 사이에 유의한 차이가 있는가? 셋째, LRP의 시작잠재기(onset latency)에서 조건X와 조건Y 간에 유의한 차이가 있는가? 넷째, 조건X와 조건Y에서 LRP 발달의 기울기가 다른가? 이 질문들 모두가 자극에 고정된 LRP에서 제기될 수 있고, 마지막 질문은 반응에 고정된 LRP에서도 제기될 수 있다. 위 네 가지 질문들을 크게 두 가지로 구분한다면 LRP 발달의 정도와 LRP 발달의 시간적 추이라고 할 수 있을 것이다. 전자는 LRP의 진폭(amplitude)과 관련된 것이고 후자는 LRP의 시작잠재기나 발달 속도와 관계된 것이다. 아래에서는 LRP를 어떻게 분석하고 검증하는지에 관해 위에 열거한 네 가지 질문에

기초하여 구체적으로 기술하고자 한다.

LRP 발달의 유의성과 그 발달 시점. 그림 2-가의 (1), (2), (3)과 그림 2-나의 (1), (2)와 같이 LRP의 발달이 명백한 경우이나, (4)처럼 역치하 수준으로 발달한 경우이나 관찰된 LRP가 기저선에 비하여 유의하게 발달하였는지에 대한 분석이 필요할 것이다. 일단 (4)의 경우에는 LRP가 발달한 시간 구간(예, 200-350ms)을 정하고 이 구간 내에서 얻어진 전위들의 평균값을 참가자별로 계산하여 절대값 0과 비교하는(Shin 등, 2004) 것이 보편적이다. 통계 패키지 프로그램에서는 단일 표본 *t*-검증(one sample *t*-test)이 이용된다.

(1), (2), (3)의 경우처럼 LRP의 진폭이 점점 커져서 유의한 발달에 대한 확신이 크더라도 확인 분석이 필요할 것이다. 이런 경우 보통 넓은 시간 구획(예, 100-500ms) 내에 작은 시간 단위의 구간(예, 매 50ms)을 설정하여 그 작은 구간마다 통계 검증을 한다. 이 때 얻어진 검증 결과가 분석 이전에 정했던 개수(예, 5번) 이상으로 유의하면 그 조건에서 LRP가 유의하게 발달하였다고 결론 내린다(Ilan & Miller, 1998; van Turenout 등, 1998). 이러한 연속적 검증 과정 중 최초로 유의한 결과가 나오는 구간이 있을 텐데 이 구간에서 LRP의 시작잠재기에 대한 정보를 제공 받는다(Ilan & Miller, 1998; Eimer & Schlaghecken, 1998; Schmitt 등, 2000). 좀 더 구체적으로, 그림 2-가의 (1) 파형을 대상으로 LRP 발달의 유의성을 검증한다고 상상해 보자. 일단 LRP 분석 구간을 100-500ms로 하고 100ms부터 매 50ms마다 그 평균 진폭값을 참가자별로 계산하여 이를 0과

비교하는 단일 표본 *t*검증을 실시한다고 하자. *t*검증 결과가 200-250ms 구간부터 시작하여 연속해서 5번 유의하였다면 (1)의 LRP가 유의하게 발달하였다고 판단하는 것이다. 나아가 이 연속 검증 중 처음으로 유의한 결과를 보인 200-250ms 구간은 LRP가 유의하게 발달하기 시작한 지점이 200ms 이후라고 추정하는 근거를 제공한다. 그림 2-가의 (1)과 (2)에 따르면 LRP의 유의한 시작잠재기가 동일한 것처럼 보인다. 더욱이 *t*검증 결과에서도 두 조건 모두가 같은 구간에서 유의미한 결과를 보였다고 가정하자. 이것은 두 조건 간의 LRP 시작잠재기가 동일하다고 볼 수 있는 증거를 제시하지만 간접적인 증거일 뿐이다. 보다 직접적인 조건 간의 비교가 필요할 텐데 그 직접적인 분석 방법에 대해서는 ‘LRP 발달 시점의 차이’에서 다루고자 한다.

LRP 발달 정도의 차이. 위에 소개한 방법처럼 하나의 시간 구획 내에서 소규모의 단위를 정하고 그 단위별로 정해진 시간 구획을 따라서 연속적으로 검증한다. 그러나 이때 그 비교 대상은 기저값 0이 아니라 조건 간의 평균 진폭이다. 그림 2-가의 (1), (2), (4)를 예로 들어보자. 이 세 조건에서 LRP 발달의 정도가 어떻게 다른지에 대한 분석을 위하여 200ms에서 시작하여 매 50ms 구간마다 평균 진폭을 조건별로 계산하여 이 값들을 서로 비교한다. 피험자내 변량분석과 같은 통계 방법을 사용하여 분석하고 세부 분석이 필요할 경우 사후 검증으로 두 조건 간의 분석도 할 수가 있을 것이다(Eimer & Schlaghecken, 1998). 만약 (1)과 (4)와 같이 두 조건만을 비교한다면, 두

조건 간의 LRP 진폭차를 먼저 계산하고 그 차이가 0보다 유의하게 크지에 대해 검증하는 방식도 가능하다(van Turennout 등, 1998).

연구 목적에 따라 LRP 자체가 기저선에 비하여 유의하게 발달하였는지의 여부가 중요할 수도 있고, 조건 간에 유의한 차이가 있었는지의 여부가 중요할 수도 있다. 따라서 LRP 발달의 유의성을 검증하는 것이 조건 간 LRP 발달의 유의적 차이를 검증하는 것에 반드시 선행해야 한다고 보기는 어렵다. 그러나 비교하는 모든 조건에서 LRP가 유의하게 발달한 경우와 특정 조건에서만 유의하게 발달한 경우, LRP 발달의 조건 간 차이에 관한 검증은 그 검증 결과의 유의성에 상관없이 전달하는 정보에서 차이가 난다. 즉 각 조건에서 관찰된 LRP가 유의하였는지 그렇지 않았는지에 관한 정보가 선행적으로 제공될 때, 독자들이 LRP 발달의 조건 간 차이에 관한 결과를 해석하는 폭이 더 넓어질 수 있다는 것이다. 그러므로 필자는 이 두 가지 분석을 모두 실시하고 결과 보고에 포함시키기를 권장한다.

LRP 발달 시점의 차이. 그림 2-가의 (1)과 (3)을 보자. 앞서 기술한 것과 같이 (3)은 오답인 손을 통제하는 반구에서 운동 체계의 활성화가 잠시나마 더 크게 일어났다가 정답인 손을 통제하는 반구의 운동 활성화가 더 크게 일어났음을 시사한다. 하지만 이 정적 활성화 과정을 논외로 하고 (3)의 부적 전위 발달 시점만을 고려할 때 정답인 손을 통제하는 반구의 활성화가 (1)보다 늦게 발달하기 시작하였음을 알 수 있다. 즉 LRP 시작잠재기가 (3)이 (1)보다 늦다는 것이다. LRP가 조건에 따라 서

로 다른 시점에서 발달하기 시작하였을 경우 그 시작잠재기의 차이가 통계적으로 유의한지 그렇지 않은지에 대한 검증이 필요할 것이다. 이를 위해서는 우선 참가자 개인별로 각 조건에서 관찰된 LRP의 시작잠재기를 추정해야 할 것이다. 그러나 개인내 자료에서 각 조건에 나타나는 LRP의 시작점을 추정하는 것은 간단하지가 않다. 비록 참가자 모두의 자료를 평균한 전체평균 파형(grand-average waveform)에서 시작잠재기가 명확해 보인다 하더라도 개인내 자료에서는 불분명한 경우가 많기 때문이다. 그 이유로 서서히 발달하는 파형이기 때문에 그 시작점이 불분명하지 않을 수도 있고, 신호와 배경 잡음(noise)을 구분하기가 어렵다던가, 또는 관련 시행들을 모아 평균을 계산하다보면 그 계산 과정에서 시작점이 불분명해지는 경향이 있다(Miller 등, 2009). 이러한 어려움에 대한 극복 방안으로 제안된 방법들 중 지난 10여 년간 그 사용과 사용범위가 점점 확대되어 가고 있는 방법이 있다. 잭나이프 방식에 기초한(jackknife-based) LRP 시작잠재기 추정 및 검증 방법(Miller 등, 1998, 2009; Ulrich & Miller, 2001)이 그것이다. 잭나이프 방식에 기초한 ERP 자료의 잠재기 분석 방법은 몇몇 논문을 통해서 그 개념적 배경과 통계적 근거, 유용성에 관하여 이미 발표된 바가 있다(Miller 등, 1998, 2009; Ulrich & Miller, 2001; Kiesel 등, 2008). 본 논문의 목적상 이에 대한 기술은 생략하고 이 방법을 LRP에 적용할 때 필요한 절차와 분석 과정을 간단히 설명하고자 한다.

잭나이프 방식에 기초한 LRP 시작잠재기 추정법에서는 참가자 개인내 자료에서 LRP 시

작점을 추정하기가 어려우므로, 전체 참가자에서 각 1명씩을 제외한 참가자들의 자료를 평균한 파형을 이용한다. 그림 3-가는 참가자수가 여섯 명이라고 가정할 때 이 평균 내기 과정을 도식적으로 보여주고 있다. 여섯-1명의 참가자들만을 포함하여 조건별로 평균을 내는데 각 참가자들은 이 과정에서 한 번씩 제외된다. 그러므로 결국에는 총 참가자수 만큼의 참가자수-1 LRP 평균 파형이 생기게 된다. 이 예에서는 여섯 개의 참가자수-1 LRP 평균 파형이 조건X와 조건Y에서 생긴다. 이 평균 파형들을 가지고 잠재기를 추정하는데 그 추정 방식은 그림 3-나에 도식적으로 나타나 있다. 보는 바와 같이 조건X와 조건Y 각각에서 최대 진폭이 얼마인지를 찾아 그 진폭의 50%에 해당하는 진폭을 계산하고 이 진폭에 해당하는 잠재기가 몇 ms인지를 찾는다. 이런 방식으로 조건X와 조건Y에서 잠재기를 구하고 두 조건 간 잠재기의 차이를 계산한다. 조건 간 잠재기 차이 구하기는 전체평균 파형에도 적용된다. 이 과정을 거친 후 여섯 개의 조건 간 잠재기 차이값들과 전체평균에서 얻어진 조건 간 잠재기 차이값을 이용하여 t 검증을 실시한다. 이 때 기존의 t 검증과 다른 것이 표준오차를 구하는 방식이다. 잭나이프식으로 잠재기를 구할 경우 표준오차를 계산할 때 $n-1$ 의 제곱근으로 나누지 않고 곱한다. 이것은 참가자-1 LRP 평균 파형 구하기 과정에 대한 산술적 보정이다. 구체적 계산 공식에 대해서는 Miller 등(1998)의 부록과 Miller 등(2009)을 참조하기 바란다.

그림 2-나에 그려진 반응에 고정된 LRP는 조건 (1)이 조건 (2)보다 이른 시점에서 발달한

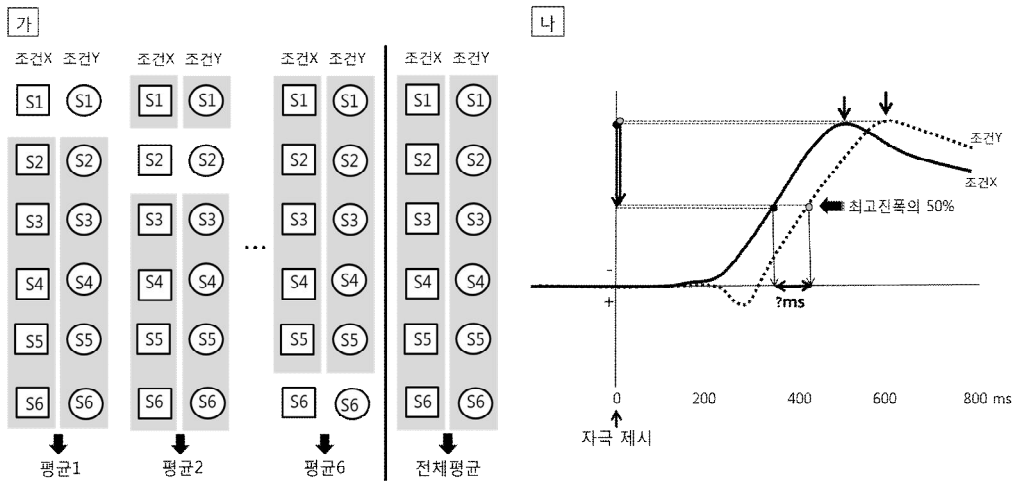


그림 3. 잭나이프식에 기초한 LRP 시작잠재기 추정법

것으로 보인다. 자극에 고정된 LRP 분석과 같이 반응에 고정된 LRP 분석을 위해서도 잭나이프에 기초한 방식을 사용할 수가 있다. 단지 자극에 고정된 LRP 분석 때와 달리 LRP 최대 진폭의 50%가 아니라 최대 진폭의 90%에 해당하는 지점에서 잠재기 차이를 계산해서 추정한다(Miller 등, 1998).

참고로 50%와 90%가 추천되는 이유는, 이 두 기준이 여러 기준을 이용하여 행해진 모의 실험에서 실제 잠재기 차이에 가장 근접한 결과를 나타낸다고 보고되었기 때문이다(Miller 등, 1998). 그러나 이 기준을 적용하는 것이 항상 최적의 검증 결과를 생산한다고 볼 수는 없다. LRP 발달 패턴에 따라 연구자가 융통성 있고 합리적으로 분석 방법을 선택해야할 경우도 있을 것이다. 그러한 예 중 하나가 LRP 발달 속도 차이를 분석할 때이다.

LRP 발달 속도의 차이. LRP 발달 속도의 차이는 LRP 발달의 기울기가 다른 경우를 가

리킨다. 그림 2-가의 (1)과 (2)는 시작잠재기는 같으나 (1)의 발달 속도가 (2)보다 빨라 최고점에 다다른 시간이 더 이른다. 한편 그림 2-나의 (1)과 (2)의 경우에는 서로 최고점이 동일함에도 불구하고 (1)의 발달 속도가 (2)보다 느려 최고점에 다다르기까지 더 오랜 시간이 걸린다. 이러한 발달 속도에서의 차이를 분석하는 일은 현재까지 많은 주목을 받지 못하였고 따라서 딱히 정석(定石)이라 할 수 있는 분석 방법이 없는 상황이다. 그러므로 연구자의 재량에 따라 합리적인 방식으로 기울기의 차이를 분석해야 할 것이다. 그 한 예를 들면 다음과 같다. Shin 등(2004)은 잭나이프에 기초한 LRP 잠재기 추정 방식을 이용하였는데 최고진폭의 25%와 50%를 기준으로 조건 간의 잠재기 차이를 계산하였다. 이 차이값으로 각 기준 %당 1검증을 한 후 두 검증 결과가 서로 다른지를 비교하였다. 이 방식을 그림 2-가 (1)과 (2)에 적용해 보자. 만약 25% 기준을 사용할 때 (1)과 (2) 사이에 유의한 차이가 없었지

만 50% 기준을 사용할 때는 두 조건 간에 유의한 차이가 있었다면 이는 두 조건에서 LRP가 다른 속도로 발달하였다고 결론짓는 근거를 제공해 준다.

LRP를 이용한 응용 연구 1980년대 후반부터 시작된 LRP 연구는 정보처리가 시간 경과에 따라 어떤 과정을 밟는가에 대한 중요한 발견들을 가능케 하였다. 이미 소개된 연구들처럼(Gratton 등, 1988; de Jong 등, 1990; Miller & Hackley, 1992; Shin 등, 2004) 인간의 정보처리 양식에 대한 새로운 조망을 제공함과 동시에 여러 분야에서 LRP를 이용한 다각도의 연구가 진행되어 왔다. 예를 들어, Gratton 등(1992)은 참가자가 과제 수행 과정 중 형성하는 기대감에 따라 반응 활성화가 어떻게 달라지는가에 관하여 연구하였다. 그들의 이전 연구(Gratton 등, 1988)와 마찬가지로 에릭슨의 수반자극 과제를 이용하였는데 연구의 초점은 부합 조건과 비부합 조건에서 나타나는 기대감에 따른 LRP의 패턴을 비교하는 것이었다. 연구 결과는 다음과 같았다. 참가자가 부합 조건이 나올 확률에 대한 기대감이 높아졌으나 실제로는 제시되는 자극이 비부합 자극이면 그림 2-가의 (3)과 같은 패턴의 LRP가 눈에 띄게 나타났고, 반대로 비부합 조건이 나올 확률에 대한 기대감이 높고 실제로도 비부합 자극이 제시되면 (3)과 같은 패턴이 적게 관찰되었다. 이러한 결과는 우리 인간이 과제 수행 과정 중 터득하는 기대감, 즉 하향적(top-down) 방식으로 과제에 대한 전략적 접근을 시도하여 현 과제 수행에 최상의 효과를 내고자 한다는 고차적인 인지 통제 기능을 보

여 주는 것이다.

이러한 전략적 통제의 반응 체계 활성화 현상을 이용하여 Bartholow 등(2009)은 정서 영역에서도 이러한 현상이 관찰되는지 연구하였다. 이들은 정서 점화(affective priming; Hermans 등, 1994) 현상을 이용하여 점화어와 표적어 간의 긍정/부정 정서가 일치하는 확률을 조작하였다. 점화어와 표적어 간의 정서 일치도가 일반적으로 높거나 낮으면 이 두 경우 모두 점화어 자체가 다음에 제시될 표적어의 정서에 대한 정보를 제공해 준다. 그러므로 점화어 제시만으로도 특정 반응에 대한 준비가 가능할 것이라 가정할 수 있다. 이 경우 과연 어느 쪽 손에서 반응 준비가 일어나는지를 LRP를 통해서 관찰하였다. Gratton 등(1992)의 결과와 일치하게 인간의 전략적 반응 통제 경향을 반영하는 결과가 관찰되었다. 구체적으로, 참가자가 점화어와 표적어 사이에 높은 정서 일치도를 예측할 경우에는 점화어 제시 이후부터 이미 점화어 정서(긍정적 또는 부정적)와 연합된 손에서 더 높은 반응 활성화를 보였고, 낮은 정서 일치도를 예측할 경우에는 점화어의 반대 정서와 연합된 손에서 더 높은 반응 활성화를 보였다. 이 결과는 인간의 전략적 반응 통제가 정서 일치성 효과(affective congruency effect; Hermans 등, 2002; Bargh 등, 1996)에서도 관찰됨을 보여준다.

점화 패러다임을 이용하여 의식하(subliminal) 수준에서 지각되는 자극이 반응 과정에 미치는 영향에 관한 연구들도 속속 발표되었다. 과연 점화자극에 대한 의식적 지각이 없더라도 표적자극을 제시하면 점화자극의 영향이 행동, 뇌 반응 상에서 나타나는가? Eimer와

Schlaghecken (1998)은 그들의 연구에서 점화 효과를 발견하기는 하였으나 흥미롭게도 예상과는 정반대로 부적 부합성 효과(negative compatibility effect)가 나타났다. 즉, 점화자극과 표적자극이 같은 편 손 반응을 가리킬 때(부합 조건)는 중성적 점화 자극 후 제시되는 표적자극(중성 조건)에 대한 반응보다 느리고 정확도 역시 떨어지는 손해(cost) 효과가 있었고, 두 자극이 서로 반대되는 손 반응을 가리킬 때(비부합 조건)는 중성 조건보다 빠른 반응과 정확도가 높아지는 이득(benefit) 효과가 있었다. 이러한 행동 결과에 대하여, 함께 관찰한 LRP 결과는 부적 부합성 효과의 원천이 뇌의 운동 반응 과정과 관계있다는 증거를 제시하였다. 그것은 점화자극 제시 이후 점화자극이 가리키는 반응 손과 연합된 LRP가 잠시 발달하다가 표적자극을 인식할 시점에서는 이 초기 LRP 발달이 중단되고 반대편 손과 연합된 LRP가 발달한다는 사실이었다. 이러한 ‘반응 활성화 그 다음 억제’ 패턴의 LRP 발달이 비부합 조건에서는 정답 손 반응을 이끌지만 부합 조건에서는 정답 손 반응을 위해서 한 번의 수정이 더 요구되기 때문에 이 반응 수정 과정으로 인하여 반응 시간과 정확도에서 손해가 발생하는 것이다. Eimer와 Schlaghecken (1998)은 이 두 단계적(biphasic) LRP 발달이 자기-억제적 반응 통제 과정을 보여준다고 해석하였는데, 이들의 후속 연구(Eimer와 Schlaghecken, 2003)에서 자기-억제 반응에 영향을 주는 요인들, 관여하는 뇌 영역 등을 더욱 구체화하였다.

LRP의 높은 시간 해상력은 심리언어학 분야에서도 유용하게 사용되어 왔다. 언어의 구

성 요소들인 의미, 음운, 통사적 특성들이 단어 생성 과정에서 어떤 시간적 관계를 가지고 부호화, 인출되는지를 밝히는 일은 심리언어학에서 중요한 일 중 하나이다. van Turennout 등(1998)은 네덜란드어를 이용하여 특정 명사와 항상 연합되는 관사(즉 통사적 정보)와 그 명사의 음운에 대한 정보가 어떤 시간적 간격을 두고 인출되는지에 관하여 선택과 반응/비반응 과제를 이용하여 연구하였다. 각 단어의 통사적 정보는 선택 반응으로, 음운적 정보는 반응/비반응 방식으로 반응하도록 한 결과, 그림 2-가의 (1) (또는 2)과 (4)와 같이 LRP가 반응과 비반응 시행 모두에서 동시에 발달하기 시작하였고, 그 시작점으로부터 약 40ms이후부터는 비반응 시행에서 (4)처럼 점차 쇠퇴하였다. 이 결과의 의미는 반응 손 선택과 관련된 통사적 정보가 음운 정보에 대한 인출이 끝나기 전에 반응 체계에 전달되어 손 반응과 관련된 운동 체계에서의 활성화를 야기시켰고, 40ms가 경과되는 시점부터는 반응/비반응과 관련된 음운 정보가 반응 체계에 전달되어 최종 활성화 여부를 결정지었다는 것을 의미한다. 이것은 약 40ms의 시간 간격으로 통사적 특성에 관한 정보가 먼저 인출되고 음운적 특성에 관한 정보가 인출된다는 것을 의미한다. 이러한 연구가 네덜란드어(van Turennout 등, 1997, 1998), 독일어(Schmitt 등, 2001)와 같은 서양 언어뿐만 아니라 중국어에도 적용되어 철자법과 성조 처리의 시간적 관계(Zhang 등, 2007), 의미와 음운 부호화에서 나타나는 시간 차이(Zhang과 Yang, 2007)에 관한 연구가 행해진 바 있다.

지금까지 LRP를 이용하여 어떠한 연구들이

진행되어 왔는지에 관하여 소개하였다. 위에 소개된 연구 이외에도 LRP는 파킨슨스병 환자와 같이 움직임에서 장애를 보이는 환자들의 인지-운동 과정에서의 문제를 밝히거나(Low 등, 2002), 특정 심리 현상이 감각 정보 입력에서 행동 반응 발현까지의 과정 중 어느 시간적 위치(locus)에서 발생하는가를 찾는 연구(Shin 등, 2008)등 다양한 분야에서 유용하게 쓰여 왔다.

결언 본 논문을 통해서 LRP의 발달 배경, 도출 원리, 종류, 분석 및 검증 방법, 그리고 이를 이용한 응용 연구들을 개관하였다. 하나의 ERP 컴포넌트에 대한 지나친 지면 할애라는, 즉 논문의 범위가 너무 좁다는 비판도 가능할 것이다. 그러나 LRP는 행동으로 관찰할 수 없는 반응 준비 과정을 밀리세컨드 수준의 시간 단위로 나타내 줄 수 있는 뇌 활동 측정도구로서 그 유용성은 이미 많은 연구들을 통해 증명되었다. 앞서 소개한 것처럼 미국이나 유럽 쪽에서 행해진 많은 LRP 연구들이 심리 시간분석법적 연구뿐만 아니라 인지적 통제나, 정서, 언어, 나아가 신경심리 분야 등에서 다양하게 행해져 왔다. 아시아권에서는 일본과 대만에서 몇몇 학자들이 LRP를 이용한 연구들을 실시해 왔고(Masaki 등, 2000; Hsieh & Yu, 2003; Hsieh & Liu, 2005), 최근 들어 중국에서 활동하고 있는 인지신경과학자들이 LRP를 이용한 연구들을 국제 학술지에 속속 발표하고 있다(Huang & Luo, 2006; Zhang & Yang, 2007; Zhang 등, 2007; Gong, Hu, & Yao, 2012; Gong 등, 2012). 따라서 본 저자는 국내 심리학 분야에서도 좀 더 다양한 ERP 연구가 진행

되고 발표되기를 바라며, 본 논문의 LRP에 대한 포괄적 소개가 국내에서 활동하고 있는 인지/정서 신경과학자들이 그들의 연구 범위를 확장하고 다양화하는데 있어 조금이나마 도움이 되기를 기대해 본다.

참고문헌

- Arezzo, J., & Vaughan, H. G. (1975). Cortical potentials associated with voluntary movements in the monkey. *Brain Research*, 88, 99-104.
- Bargh, J. A., Chaiken, S., Raymond, P., & Hymes, C. (1996). The automatic evaluation effect: Unconditional automatic attitude activation with a pronunciation task. *Journal of Experimental Social Psychology*, 32, 104-128.
- Bartholow, B. D., Riordan, M., Sauls, J. S., & Lust, S. A. (2009). Psychophysiological evidence of response conflict and strategic control of responses in affective priming. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45, 655-666.
- Brunia, C. H. M., & Van den Bosch, W. E. J. (1984). Movement-related slow potentials: I. A contrast between finger and foot movements in right-handed subject. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 57, 515-527.
- Carrillo-de-la-Peña, M. T., Lastra-Barreira, C., & Galdo-Álvarez, S. (2006). Limb (hand vs. foot) and response conflict have similar effects on event-related potentials (ERPs) recorded during motor imagery and overt execution. *European Journal of Neuroscience*, 24, 635-643.
- Coles, M. G. H., & Gratton, G. (1986). Cognitive

- psychophysiology and the study of states and processes. In G. R. J. Hockey, A. W. K. Gaillard, & M. G. H. Coles (Eds.), *Energetics and human information processing*. Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhof, pp. 409-424.
- Coles, M. G. H. (1989). Modern mind-brain reading: Psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology*, 26, 251-269.
- Deecke, L., Weinberg, H., & Brickett, P. (1982). Magnetic fields of the human brain accompanying voluntary movements. Bereitschaftsmagnetfeld. *Experimental Brain Research*, 48, 144-148.
- de Jong, R., Wierda, M., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1988). Use of partial stimulus information in response processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 682-692.
- de Jong, R., Coles, M. G. H., Logan, G. L., & Gratton, G. (1990). In search of the point of no return: The control of response processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 164-182.
- DeSoto, M. C., Fabiani, M., Geary, D. C., & Gratton, G. (2001). When in doubt, do it both ways: Brain evidence of simultaneous activation of conflicting motor responses in a spatial Stroop task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 523-536.
- Eimer, M., & Schlaghecken, F. (1998). Effects of masked stimuli on motor activation: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1737-1747.
- Eimer, M., & Schlaghecken, F. (2003). Response facilitation and inhibition in subliminal priming. *Biological Psychology*, 64, 7-26.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Fabiani, M., Gratton, G., & Federmeider, K. (2007). Event-related brain potentials. In J. Cacioppo, L. Tassinary, & G. Berntson (Eds.), *Handbook of Psychophysiology (3rd Ed.)* (pp.85-119). New York, NY: Cambridge University Press.
- Gerbrandt, L. K., Goff, M. R., & Smith, D. B. (1973). Distribution of the human average movement potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 34, 461-474.
- Gong, D., Hu, J., & Yao, D. (2012). Partial information can be transmitted in auditory channel: Inferences from lateralized readiness potentials. *Psychophysiology*, 49, 499-503.
- Gong, D., Ma, W., Hu, J., Hu, Q., Lai, Y., & Yao, D. (2012). The flexibility of partial information transmission in the auditory channel: The role of perceptual discriminability. *Psychophysiology*, 49, 1394-1400.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., Sirevaag, E. J., Eriksen, C. W., & Donchin, E. (1988). Pre- and poststimulus activation of response channels: a psychophysiological analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 682-692.

- Performance*, 14, 331-344.
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121, 480-506.
- Gratton, G., & Fabiani, M. (2001). Shedding light on brain function: The event-related optical signal. *Trends in Cognitive Science*, 5, 357-363.
- Hermans, D., De Houwer, J., & Eelen, P. (1994). The affective priming effect: Automatic activation of evaluative information in memory. *Cognition and Emotion*, 9, 515-533.
- Hermans, D., Smeesters, D., De Houwer, J., & Eelen, P. (2002). Affective priming for associatively unrelated primes and targets. *Psychologica Belgica*, 42, 191-212.
- Hsieh, S., & Yu, Y. T. (2003). Switching between simple response-sets: interferences from the lateralized readiness potential. *Cognitive Brain Research*, 17, 228-237.
- Hsieh, S., & Liu, L. C. (2005). The nature of switch cost: task set configuration or carry-over effect? *Cognitive Brain Research*, 22, 165-175.
- Huang, Y. X., & Luo, Y. J. (2006). Temporal course of emotional negativity bias: An ERP study. *Neuroscience Letters*, 398, 91-96.
- Ilan, A. B., & Miller, J. (1998). On the temporal relations between memory scanning and response preparation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1501-1520.
- Jentzsch, I., & Leuthold, H. (2002). Advance movement preparation of eye, foot and hand: A comparative study using movement-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, 14, 201-217.
- Kiesel, A., Miller, J., Jolicœur, P., & Brisson, B. (2008). Measurement of ERP latency differences: A component of single-participant and jackknife-based scoring methods. *Psychophysiology*, 45, 250-274.
- Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (1996). *Fundamentals of human neuropsychology (4th ed.)*. New York: W. H. Freeman.
- Kornhuber, H. H., & Deecke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkurbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archives für die gesamte Physiologie*, 248, 1-17.
- Kutas, M., & Donchin, E. (1980). preparation to respond as manifested by movement-related brain potential. *Brain Research*, 202, 95-115.
- Leuthold, H., Sommer, W., & Ulrich, R. (2004). Preparing for action: Inferences from CNV and LRP. *Journal of Psychophysiology*, 18, 77-88.
- Low, K. A., Miller, J., & Vierck, E. (2002). Response slowing in Parkinson's disease: A psychophysiological analysis of premotor and motor processes. *Brain*, 125, 1980-1994.
- Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2000). An electrophysiological study of the locus of the interference effect in a stimulus-response compatibility paradigm. *Psychophysiology*,

- 37, 464-472.
- Miller, J. O., & Hackley, S. A. (1992). Electrophysiological evidence for temporal overlap among contingent mental processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121, 195-209.
- Miller, J., Patterson, T., & Ulrich, R. (1998). Jackknife-based method for measuring LRP onset latency differences. *Psychophysiology*, 35, 99-115.
- Miller, J., Ulrich, R., & Schwarz, W. (2009). Why jackknifing yields good latency estimates. *Psychophysiology*, 46, 300-312.
- Okada, Y. C., Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1982). Magnetic fields of the human sensory-motor cortex. *International Journal of Neurophysiology*, 17, 33-38.
- Osman, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., Donchin, E., & Meyer, D. E. (1992). On the transmission of partial information: Inferences from movement related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 217-232.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Schmitt, B. M., Münte, T. F., Kutas, M. (2000). Electrophysiological estimates of the time course of semantic and phonological encoding during implicit picture naming. *Psychophysiology*, 37, 473-484.
- Schmitt, B. M., Schiltz, K., Zaake, W., Kutas, M., & Münte, T. F. (2001). An electrophysiological analysis of the time course of conceptual and syntactic encoding during tacit picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 510-522.
- Shin, E., Fabiani, M., & Gratton, G. (2004). Evidence of partial response activation in a memory-search task. *Cognitive Brain Research*, 20, 281-293.
- Shin, E., Wan, X. I., Fabiani, M., Gratton, G., & Lleras, A. (2008). Electrophysiological evidence of feature-based inhibition of focused attention across consecutive trials. *Psychophysiology*, 45, 804-811.
- Triesman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95, 15-48.
- Ulrich, R., & Miller, J. O. (2001). Using the jackknife-based scoring method for measuring LRP onset effects in factorial designs. *Psychophysiology*, 38, 816-827.
- van Turenout, M., Hagoort, P., & Brown, C. M. (1997). Electrophysiological evidence on the time course of semantic and phonological processes in speech production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 787-806.
- van Turenout, M., Hagoort, P., & Brown, C. M. (1998). Brain activity during speaking: From syntax to phonology in 40 milliseconds. *Science*, 280, 572-574.
- Vaughan, H. G., Jr., Costa, L. D., & Ritter, W.

- (1968). Topography of the human motor potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 25, 1-10.
- Walter, W. C., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203, 380-384.
- Zhang, Q., & Yang, Y. (2007). Electrophysiological estimates of the time course of semantic and metrical encoding in Chinese speech production. *Neuroscience*, 147, 986-995.
- Zhang, Q., Damian, M. F., & Yang, Y. (2007). Electrophysiological estimates of the time course of tonal and orthographic encoding in Chinese speech production. *Brain Research*, 1184, 234-244.

1 차원고접수 : 2012. 9. 7
수정원고접수 : 2012. 10. 22
최종게재결정 : 2012. 11. 10

**Lateralized Readiness Potential:
On the Movement-Related Potential
That Uses the Contralateral Organization of Motor Control**

Eunsam Shin

The Center for Cognitive Science, Yonsei University

The lateralized readiness potential (LRP) that uses the contralateral organization of motor control is derived from event-related brain potentials (ERPs). Because of the high temporal resolution of the technique, it has been a beneficial research method investigating mental chronometry in human information processing. In particular, studies using the LRP have shown evidence that information flows continuously and concurrently in the brain. In this review, I introduced the background of the LRP emergence, basic principles behind its arithmetic computations, LRP types, data analysis and statistical tests. Finally, I reviewed studies in which the LRP was used and applied for various purposes, and suggested that the LRP can contribute to expanding the scope of brain research in the country.

Key words : event-related potentials, contralateral control, information processing, lateralized readiness potential, mental chronometry