

간질수술전 검사에서 두개강내 뇌파의 유용성

Utility of Intracranial EEG in Presurgical Evaluation

이 상 암
Sang-Ahm Lee, M.D.

서 론

최근 국내 여러 간질센터의 간질수술 건수가 꾸준히 증가하고 있으며, 그 결과 침습적 두개강내 뇌파검사를 이용하는 경우도 크게 늘고 있는 추세이다. 외국에서는 1950년대부터 두개강내 뇌파가 사용되기 시작하여, 한때 일부 간질수술센터에서는 모든 환자에게 적용하였던 적도 있으나, 최근에는 성인간질수술환자의 약 25~50%에서 행하여지고 있다.¹⁾ 하지만 의외로 내측두엽 간질을 제외하면 두개강내 뇌파의 해석에 관한 정보가 크게 부족하여 그 뇌파소견의 임상적 의미에 대한 분석이 힘든 경우가 많다.¹⁻⁶⁾ 또한 침습적 검사가 지닌 간파할 수 없는 여러 단점으로 인해 최근 국외에서는 비침습적 검사의 발달에 힘입어 두개강내 뇌파를 가능한 하지 않으려는 경향이 뚜렷이 나타나고 있다.

난치성 부분간질 환자에서 뇌의 일부를 절제하여 완쾌되는 환자가 있는 반면 실패하여 지속적인 경련발작을 보이는 환자도 있다. 이러한 상반된 결과는 경련발작을 일으키는 부위가 얼마나 적절히 제거되었느냐에 따라 결정된다고 할 수 있다. 그래서 간질수술에서 가장 중요한 개념인 '간질발생부위(epileptogenic area)'의 정의와 그 부위를 어떻게 결정하느냐가 중요하다. '간질발생부위'는 '경련발작을 일으키는데 필요하고 충분한 뇌의 부위'로 정의되며,¹⁾ 따라서 이 부위가 제거되면 경련발작은 더 이상 일어나지 않을 것이다. 하지만 이것은 아직 추상적 개념이어서 간질발생부위의 범위를 결정할 수 있는 방법은 아직 없다. 간질발생부위는 irritative zone(발작간 극파가 발생하는 부위), ictal onset zone(경련발작시 발작뇌파가 시작하는 부위), functional deficit zone(뇌대사, 뇌혈류, 및 인지능력 등이 감소
울산대학교 의과대학 서울중앙병원 신경과학교실
Department of Neurology, Asan Medical Center, Seoul, Korea
교신저자 : 이상암, 138-736 서울 송파구 풍납동 388-1
TEL : (02) 2224-3445 · FAX : (02) 474-4691
E-mail : salee@www.amc.seoul.kr

된 부위), 및 epileptogenic lesion(MRI 또는 CT에서 관찰되는 구조적 병변) 등과 감별되어야 하는데,¹⁻⁶⁾ 이들 부위가 일반적으로 서로 겹쳐있긴 하지만 완전히 간질발생부위와 일치하지는 않는다. 따라서 이들 부위는 서로 보완적인 관계이며, 이들 중 현재로서는 간질발생부위를 가장 정확히 확인할 수 있는 방법은 두개강내 뇌파검사서 기록되는 발작시작부위(ictal onset zone)이다.

본 론

1. 적응증

두개강내 뇌파검사의 유용성은 특정 일부분에 한정되어 있다. 여러 가지 비침습검사로 간질발생부위가 결정되지 않았을 때 두개강내 뇌파검사를 시행하면 간질수술부위를 결정할 수 있을 것이라는 막연한 생각은 잘못이다. 비침습검사의 정보를 검토하여 해결되지 않은 특정 의문점을 갖고 이에 대한 문제해결을 위해 비침습검사 결과에 근거하여 각각의 환자에 적합한 두개강내 뇌파검사를 시행하여야 한다. 이와 같이 두개강내 뇌파검사의 적응증을 충분히 고려하여야 하는 가장 큰 이유는 두개강내 뇌파검사의 경우 두피검사와는 달리 모든 대뇌 부위를 기록할 수 없고, 극히 일부분의 부위에서만 뇌파를 기록할 수 있다는 점이다. 따라서 적절히 두개강내 전극을 배치하지 못한다면, 즉 간질발생부위가 전극 배치 범위에 포함되어 있지 않다면 경련발작시 간질발생부위로부터 퍼져온 발작전위를 보고 엉뚱하게 수술부위를 결정하게 될 가능성이 적지 않다. 또한 뇌출혈, 뇌경색, 감염 등의 침습검사 합병증과 고가의 비용도 두개강내 뇌파검사를 시행할 때 반드시 고려되어야 한다. 두개강내 뇌파검사의 장단점은 Table 1과 같다.⁶⁾

두개강내 뇌파검사의 구체적인 적응증은 각 간질센터마다 다소 다르게 적용되고 있지만(Table 2, 3),⁶⁾ 일반적인 적응증은 공통적으로 Table 4와 같다.¹⁾⁴⁾⁸⁻¹¹⁾

2. 두개강내 전극

두개강내 뇌파검사에서 주로 사용되는 전극에는 침전극(depth electrodes), 경막하 선전극(strip electrodes), 및 경막하 판전극(grid electrodes) 등이 있다. 이들 전극은 다접촉성(multicontact)이고 유연하게(flexible) 만들어져 있다. 각 전극들은 뇌파를 기록할 수 있는 뇌의 부위가 서로 다르다. 침전극은 뇌조직을 뚫고 들어가 위치하기 때문에 해마와 아미그달라(amygdala)와 같은 심부 구조 및 깊숙히 위치한 대뇌 병변의 주위에서 뇌파를 기록하는 데 적당하다. 경막하 선전극은 대뇌의 앞 뒤 부위, 대뇌의 기저 부위, interhemispheric region에서 사용하는 데 적합하며, burr hole을 통해 밀어 넣을 수 있고 제거할 때도 bedside에서 가능하다. 침전극과 선전극은 여러 대뇌엽 및 양 대뇌반구에서 동시에 뇌파를 기록하는 데 사용할 수 있다. 경막하 판전극은 주로 대뇌의 외측면에서 사용하고 functional mapping에 유용하다. 경막하 판전극은 설치하거나 제거할 때 craniotomy가 필요하다. 이와 같이 각 전극의 특성이 다르기 때문에 이들을 적절히 함께 사용함으로써 최적의 sampling을 하는 것이 바람직하다.

3. 두개강내 뇌파의 판독

1) 발작파(Ictal Activity)

(1) 발작파 시작(Onset)

두개강내 뇌파의 최종 목표는 발작시작 부위(ictal onset zone)를 정확히 밝혀내는데 있다. 일반적으로 발작파

시작(seizure onset)의 정의는 "임상적 경련발작을 동반하면서 배경파 또는 발작간 간질양뇌파와 분명히 감별되는 2 Hz 이상으로 규칙적으로 지속되는 변화"이다.⁶⁾ 그러나 두개강내 뇌파의 발작시작 형태가 너무 다양할 뿐만 아니라 이 분야에 대한 체계화된 연구보고도 많지 않아서 현재로서는 그 판독에 많은 어려움이 있다.¹¹⁾¹²⁾ 가장 큰 문제는 이미 언급한 바와 같이 두개강내 뇌파가 제한된 대뇌 부위에서 기록되기 때문에 두개강내 전극이 삽입되어 있지 않은 부위에서 시작되어 퍼져온 뇌파를 어떻게 감별하느냐 하는 점이다. 최근 한 연구논문에서 규칙적인 둥근 모양의 theta-delta파가 전파되어 기록된 파형의 특징이라고 기술하면서도 또 다른 전파 파형은 전혀 감별되지 않는다고 하였다.⁷⁾ 또 하나의 문제는 "electrodecremental response"이다. 이것이 경련발작시 맨 처음 관찰되는 뇌파의 변화인 경우를 흔히 본다. 이것이 실제의 발작파인지 아닌지는 아직 확실히 밝혀져 있지 않다. 일부 연구자들은 발작파의 한 시작 형태로 기술하고 있지만, 또 다른 연구자들은 몇몇 이유로 이것을 발작파로 간주하지 않고 있다. 그 이유는 1) 'electrodecremental response'의 분포(distribution)가 그것에 이어서 발전하는 발작파 보다 너무 광범위하다는 점, 2) 'generalized electrodecremental response'와 수술후 예후는 관련이 없다는 점, 3) 비특이적 각성반응과 육안적으로 감별하기 힘들다는 점 등이다.¹³⁾ 일반적인 견해로는 모두는 아니지만 'electrodecremental response'의 일부 경우는 발작파의 한 부분이라고 생각된다. 따라서 앞으로 해결되어야 할

Table 1. Advantages and disadvantages of intracranial electrodes

Advantages	Disadvantages
Detect signals from buried or concealed cortex	Risk for complications
Record from small pools of neurons	Limited cortical sampling
No attenuation by scalp and skull	Biased by signal from adjacent cortex
No muscle artifact	Dipole angle affects signal
Useful for mapping cortical function	Difficult to replace mal-functioning electrodes

Sperling, Epilepsia, 38 (Suppl. 4) : S6-S12, 1997

Table 2. Temporal lobe epilepsy : indication for invasive EEG in nontumoral patients

Major criteria	Minor criteria
Scalp/sphenoidal EEG : temporal lobe interictal spikes	Wada test : lateralized memory deficit
Scalp/sphenoidal EEG : temporal lobe ictal onset	EEG : interictal focal (>50% of time)
MRI : hippocampal atrophy	SPECT : ictal temporal lobe hyperperfusion
PET : temporal lobe hypometabolism	

1. If two major plus one minor criteria, or one major plus three minor criteria, operation recommended without invasive EEG
 2. If tests are discordant or there are an insufficient number of concordant test results, then invasive EEG is advisable
 Sperling, Epilepsia, 38 (Suppl. 4) : S6-S12, 1997

점은 그것의 감별점을 찾는 것이다. 실제로 매우 높은 주파수를 가진 발작파가 시작할 때 high filter에 의해 그 진폭이 크게 감소되어 'electrodecremental response'를 보일 수 있으며, 이 경우는 일반적으로 그 기간(duration)이 짧고 바로 low voltage fast activity(LVFA)로 연결되는 경향이 있다.

내측두경화증(mesial temporal sclerosis)을 특징적 병리소견으로 하는 내측두엽간질의 발작시작 형태는 다양한 병리소견을 보이는 신피질 간질의 경우와 비교하면 그 파형의 특성이 비교적 잘 알려져 있다. 신피질 간질의 경우 동일 환자에서는 비교적 일정한 부위에서 일정한 형태로 발작이 시작되는 것과는 달리 내측두엽간질의 발작은 그 시작부위가 일정하지 않아서 해마 뿐만 아니라 entorhinal cortex에서도 시작되는 경우가 드물지 않다(Table 5).¹¹⁴⁾ 내측두엽간질의 발작시작 파형은 침전극 사용시 10~16 Hz, 경막하 선전극 사용시 16 Hz 이상의 LVFA로 기록된다.²⁾⁽¹⁰⁾⁽⁵⁾⁽¹⁶⁾ 주기적 극파(periodic spike)는 발작시작 파형이 기록되는 동일한 전극에서 0.5~2 Hz 정도의 빈도로 발작시작 전 5초에서 길게는 100초 이상 지속되며, 약 50% 이상의 경련 발작에서 관찰된다.¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ 이것은 일반적으로 발작파 보다는 발작직전의 전위(preictal discharge)라고 생각되어진다.

Table 3. Extratemporal lobe epilepsy : indications for invasive EEG

Intracranial EEG recording is recommended :
When MRI shows no evidence of a focal structural lesion :
If MRI shows a focal lesion, then use invasive EEG
if ictal symptoms do not correspond to lesion location,
if interictal or ictal scalp EEG is negative, discordant, or suggests multiple foci ;
The lesion is adjacent to a vital region and extraoperative mapping of cortical function is needed

Sperling, *Epilepsia*, 38 (Suppl. 4) : S6-S12, 1997

Table 4. 두개강내 뇌파검사의 일반적 적응증

- 비침습검사 결과상 간질발생부위에 대한 일치 (concordance)가 불충분하여 간질발생부위의 위치를 확실히 결정하지 못하는 경우
 - MRI 상 위축성, developmental, 공간점유성 병소가 있으나 발작간 및 발작 뇌파가 그 부위를 정하여 주지 못할 때 (nonlocalized 소견을 보일 때)
 - MRI 상 정상 또는 nonlocalized 소견이면서 기능성 영상 (PET, SPECT) 및 뇌파소견상 한 부위로의 이상소견이 불충분할 때
- 비침습검사 상 그 결과가 서로 상이하여 (discordance) 하나의 간질발생부위를 증명하여야 할 때
- 간질발생병소가 운동피질, 감각피질, 언어피질 등 중요한 기능을 갖는 피질과 매우 근접하여 있거나 겹쳐있어서 절제수술 전 functional mapping이 필요한 경우

Table 5. Intracranial EEG characteristics in mesial TLE and neocortical epilepsy

	MTLE	Neocortical epilepsy
Location	variable	consistent
Frequency	depth : 10 - 16 Hz, subdural strip : >16 Hz	a combination of slower (4 - 10 Hz)
Periodic Spikes	depth : Yes, subdural strip : less frequent	No

왜냐하면 주기적 극파는 연이어 나오는 발작파 이전 오랜 시간동안 지속되지만 전혀 다른 부위로 전파되지 않고 임상 증상도 동반하지 않기 때문이다. 이것은 병리학적으로 CA1 세포의 소실과 연관되어 있으며, 내측두엽간질에서만 볼 수 있는 특징적인 소견으로 간주되고 있으나,¹⁸⁾ 저자의 경험으로는 신피질 간질에서도 드물지만 관찰되어지는 것으로 생각된다. 요약하면 침전극 사용시 내측두엽간질의 발작시작 형태는 두 가지로 말할 수 있다. 하나는 주기적 극파가 있으면서 10~16 Hz의 LVFA로 연결되는 형태(Fig. 1)와 다른 하나는 주기적 극파 없이 바로 LVFA로 시작되는 형태이다. 두 형태는 동일 환자에서 함께 나타나며, 그 임상적 의미는 아직 밝혀져 있지 않다.

신피질 간질의 두개강내 뇌파의 발작시작 파형은 동일 환자에서 그 시작 부위 및 파형의 형태가 거의 일정하게 나타나는 특징이 있다(Fig. 2). 문헌상 발작파의 시작 주파수(onset frequency)는 4~10 Hz와 40~50 Hz의 서로 다른 주파수의 파형이 함께 관찰되는 것이 특징으로 되어 있다.¹⁶⁾ 일부 연구자들은 낮은 주파수 또는 높은 주파수의 발작시작이 단독으로 보이는 경우 어딘가 다른 곳에서 시작되어 전파된 것이 아닌가 의심해야 한다고 기술하고 있다.¹⁾ 그러나 저자의 경험으로는 이러한 특징은 오히려 드물게 관찰되며, 발작시작 파형의 판독에 큰 도움이 되지 않는 것으로 생각된다. 한 연구자는 신피질 간질의 경우 어떤 형태, 어떤 주파수도 발작 시작에 보일 수 있다고 기술한 바 있다.⁸⁾⁽¹²⁾ 경막하 선전극에서 관찰되는 발작파의 특이한 한 형태로 "start-stop-start" 현상이 있다. 이것은 발작파가 한 부위에서 시작하여 곧 사라지고 1~10초 후 일반적으로 다른 부위에서 다시 발작파가 시작되어 임상적 경련발작으로 이어지는

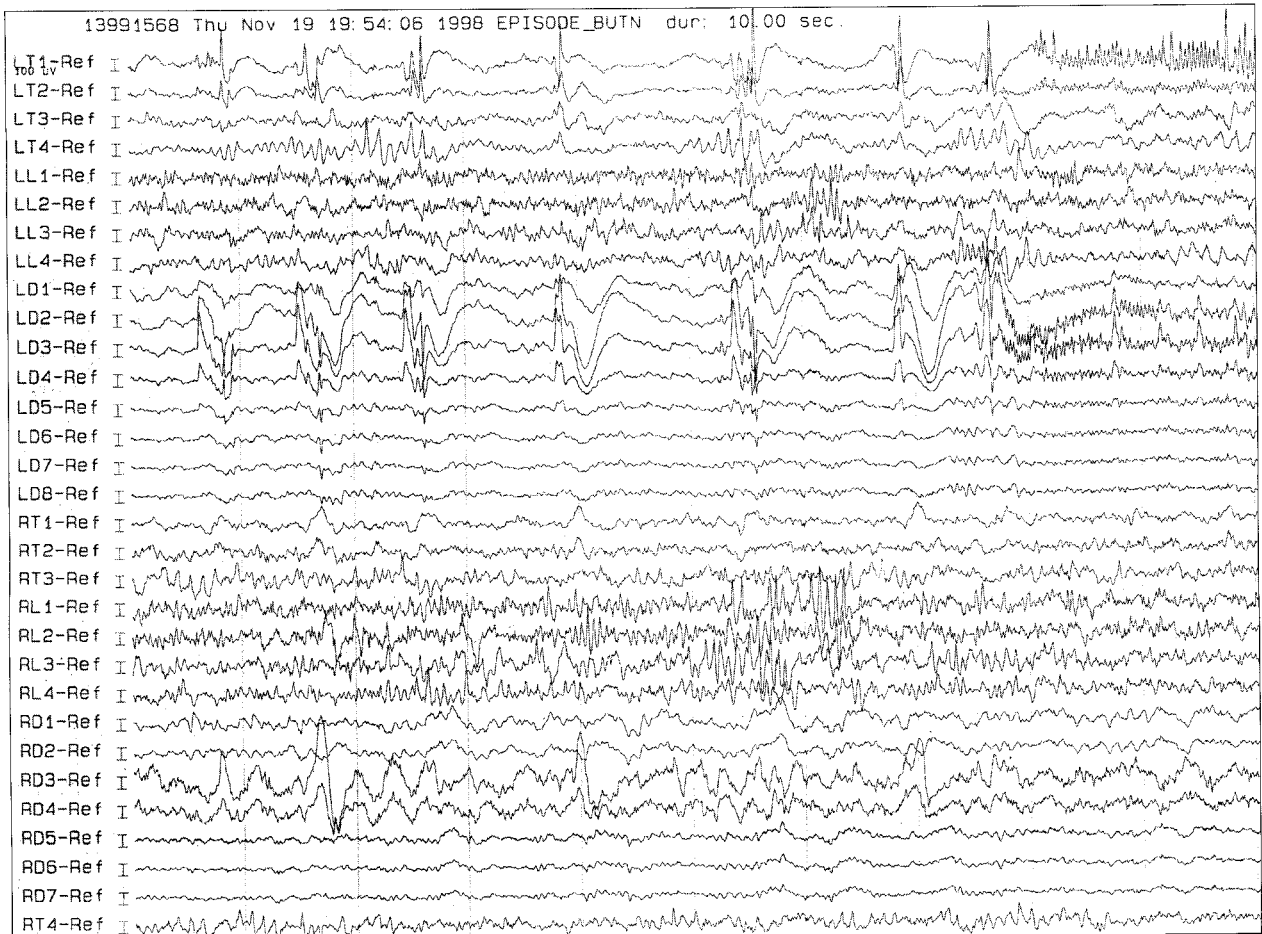


Fig. 1. Intracranial EEG recording of medial temporal seizure onset characterized by periodic spiking and then low voltage fast activity in left depth and subdural strip electrodes. LD : left hippocampal depth electrode, LT : left medial temporal strip, LL : left lateral temporal strip electrode.

현상을 말한다. 이 경우 첫 발작파가 시작되는 부위가 이 현상을 보이지 않는 발작파의 시작부위와 일치한다고 한다.¹⁹⁾

Subclinical seizure activity는 배경파와 명백히 감별되는 발작파가 국소적으로 발생하여 퍼져나가지 않아 임상증상을 동반하지 않는, 뇌파에서만 관찰되는 발작파를 말한다. 이것의 임상적 의미에 대해서는 아직 연구자간에 의견이 모아지지 않는지만 간질수술후 좋은 예후와 연관된다는 보고가 있다. 그 형태는 임상적 경련발작을 동반한 발작파와 동일할 수도 있고, 그 위치 및 파형이 다소 다를 수도 있다 한다.²⁰⁾²¹⁾

내측두엽간질 환자에서 간질발생부위의 측위(lateralization)를 결정할 때 일부 간질센터에서는 침전극 없이 경막하 선전극만을 사용하는 경우가 있다. 일부 보고자들은 이 경우 false lateralization의 가능성을 경고하였지만, 최근에는 경막하 선전극이 올바르게 내측두 기저부에 위치하면 정확히 측위할 수 있다고 보고되고 있다. 다만 그 예민도가 침전극 보다 떨어지기 때문에 해마에서 발생하는 sub-

clinical seizure의 기록에 문제점이 있고, 침전극에서는 가능한 정위(localization)을 때때로 할 수 없는 경우도 있다.¹⁾

(2) 발작파 전파 형태(Propagation Patterns)

발작파가 발생하여 대뇌의 다른 부위로 퍼져나가는 형태 및 시간은 각 대뇌엽에 따라 많은 차이를 보인다. 이것은 각 대뇌엽에서 발생하는 경련발작 임상형태의 특성으로부터도 충분히 짐작할 수 있다. 전두엽간질의 경우 반대쪽 전두엽으로 발작파의 전파속도가 너무 빨라 두개강내 뇌파검사 소견으로도 어느 쪽에서 시작했는지 육안으로 감별하기 힘든 경우가 드물지 않게 있다. 내측두엽간질에서는 전두엽간질의 경우와 달리 반대쪽 해마 및 측두엽으로의 전파속도가 느다. 한쪽 해마에서 반대쪽 해마로 발작파가 전파되는데 20초 이상 소요되면 측두엽절제술후 예후가 좋다.²²⁻²⁴⁾ 이것은 간질발생부위가 해마임을 의미한다. 반면 짧은 시간내 반대측 해마로 발작파가 퍼져가면 상대적으로 예후가 나쁜

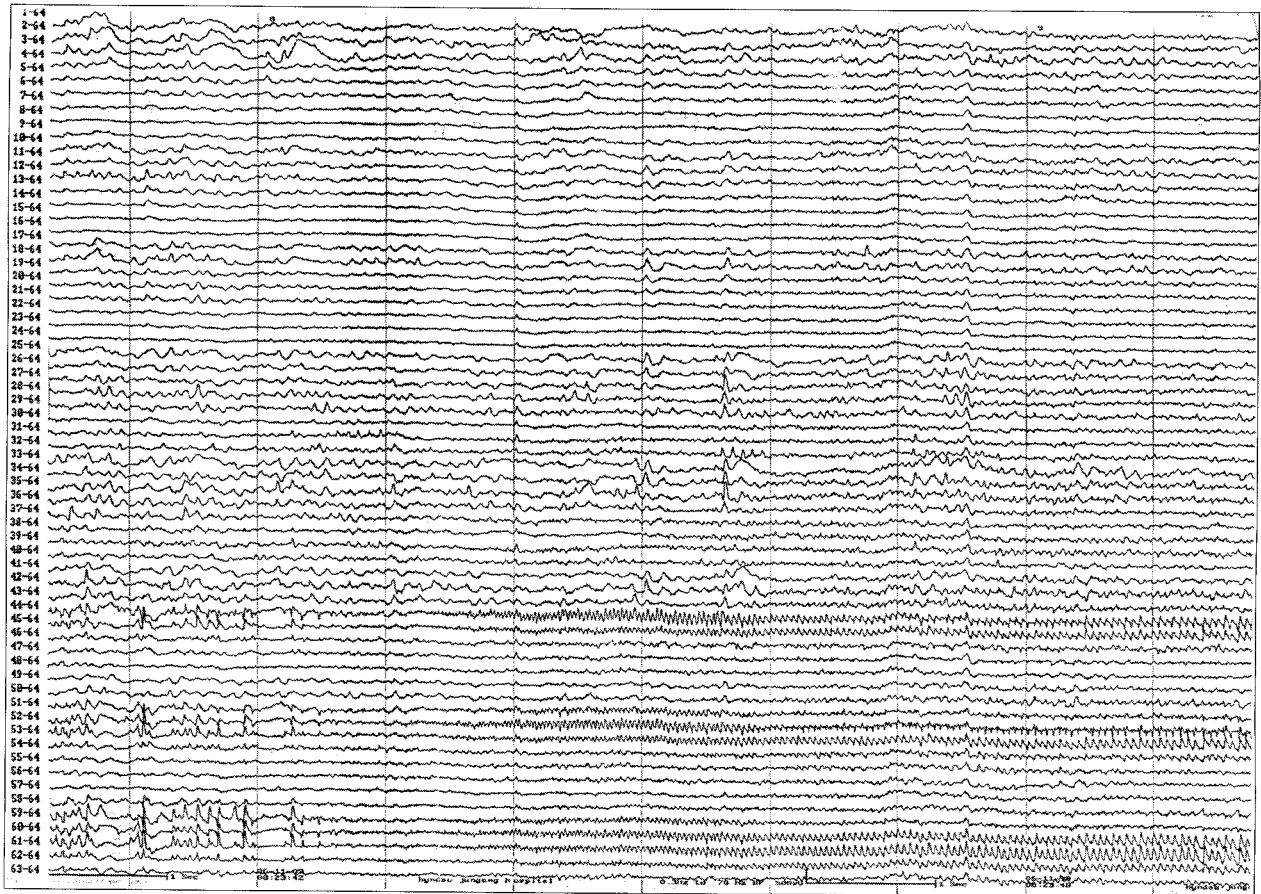


Fig. 2. Intracranial EEG recording of frontal neocortical seizure onset showing regional, fast (gamma) frequency seizure onset with a wave-form of low voltage fast activity in left frontal grid contacts. It was preceded by brief repetitive bursts of spikes. Grid contacts numbered consecutively from 1=inferior posterior. Each division=1 second ; Calibration=500 μ V.

데, 이것은 경련발생부위가 내측두엽이 아닐 가능성을 암시한다. 즉 전두엽이나 후두엽에서 발작파가 시작하여 양쪽 해마로 약간의 시간차를 두고 전파되는 경우일 것이다. 내측두엽간질에서 해마간 전파시간(propagation time)은 CA4의 신경세포 소실의 정도와 연관되어 있다. CA4는 양해마를 연결하는 연결섬유가 시작되는 부위이기 때문에 이곳의 세포소실은 발작파의 전파 과정을 지연시킬 것으로 추정된다.²⁴⁾ 내측두엽간질 발작파의 전파는 해마에서 시작하여 대부분 동측의 측두엽 또는 전두엽으로 먼저 전파되고 다음에 반대측의 해마로 퍼진다. 동측의 측두엽 보다 반대측 해마로 먼저 전파되는 경우는 25% 미만이다.¹⁾

2) 배경파와 발작간 극파(Background and Interictal Activity)

후두부의 알파파, central mu rhythm, frontal beta predominance, sleep spindle 등 두피뇌파검사서 흔히 관찰되는 정상뇌파 소견들이 두개강내 뇌파 검사에서도 당

연히 기록된다. 그러나 반드시 염두에 두어야 하는 점은 두개강내 뇌파검사에서는 두피 및 두개골에 의한 주파수의 filtering이 없고 두피검사보다 적은 국소 부위의 전위가 기록되기 때문에 그 파형이 좀더 날카롭고 전위폭이 크게 기록된다는 점이다. 경우에 따라서는 비정상적인 뇌파소견으로 착오를 일으킬 수 있기 때문에 그 판독에 주의를 요한다. 비대칭적인 서파는 두피검사서와 같은 의미를 갖는다.

발작간 극파는 두피검사에 비해 두개강내 검사에서 더 넓은 부위에서 기록된다. 또한 한 곳의 경련발생부위를 갖는 간질환자에서 다국소성(multifocal) 발작간 극파가 기록되는 경우가 흔히 있다. 따라서 많은 연구자들은 간질발생부위의 정위에 관해 두개강내 뇌파검사서 기록되는 발작간 극파의 의미를 발작파 보다 중요하게 생각하지 않는다.²⁵⁾

결론

두개강내 뇌파검사는 여러 가지 단점에도 불구하고 현재

까지 간질발생부위를 가장 정확히 결정지을 수 있는 방법이 다. 따라서 그 적응증을 충분히 고려하여 신중히 결정된다 면 그 임상적 유용성은 크다고 할 수 있다.

두개강내 뇌파에 관한 체계적인 연구는 최근까지 많지 않 았다. 향후 해결되어야 할 몇몇 문제점이나 의문점들을 살 펴보면, 1) 간질발생부위에서 바로 시작한 발작과와 어디에 선가 시작되어 전파되어온 파형의 정확한 감별, 2) 병리 소

견이 동일한 경우 각 대뇌엽의 서로 다른 특성에 따라 발작 과의 파형이 변형되는가, 3) 병리소견이 서로 다른 경우 간 질수술시 대뇌의 절제 정도를 결정할 수 있는 발작과 형태 의 특성이 있는가 등이다.

중심 단어 : 침습적 검사 · 두개강내 뇌파 · 발작시작 · 간질 수술.

REFERENCES

- 1) Spencer SS, Sperling MR, Shewmon DA. Intracranial electrodes. In: Engel J Jr, Pedley TA, eds. *Epilepsy: A comprehensive textbook*. Philadelphia: Lippincott-Raven Publishers, 1997:1719-47.
- 2) Spencer SS, So NK, Engel J, Williamson PD, Levesque MF, Spencer DD. Depth electrodes. In: Engel J Jr, ed. *Surgical treatment of epilepsies*, 2nd ed. New York: Raven Press, 1993:359-76.
- 3) Spencer SS. Temporal lobectomy: Selection of candidates. In: Wyllie E, ed. *The treatment of epilepsy: Principles and practices*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1993:1062-74.
- 4) Engel J, Crandall PH. Intensive neurodiagnostic monitoring with intracranial electrode. In: Gummit RJ, ed. *Intensive neurodiagnostic monitoring. Advances in neurology*, vol 46. New York: Raven Press, 1986:85-106.
- 5) Alarcon G, Binnie CD, Elwes RDC, Polkey CE. Power spectrum and intracranial EEG patterns at seizure onset in partial epilepsy. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;94:326-37.
- 6) Spencer SS, Guimaraes P, Katz A, Kim J, Spencer DD. Morphological patterns of seizures recorded intracranially. *Epilepsia* 1992;33:537-45.
- 7) Schiller Y, Cascino GD, Busacker NE, Sharrow FW. Characterization and comparison of local onset and remote propagated electrographic seizures recorded with intracranial electrodes. *Epilepsia* 1998;39:380-8.
- 8) Sperling MR. Clinical challenges in invasive monitoring in epilepsy surgery. *Epilepsia* 1997;38(Suppl. 4):S6-12.
- 9) So NK. Depth electrode studies in mesial temporal epilepsy. In: Luders H, ed. *Epilepsy surgery*. New York: Raven Press, 1992:371-84.
- 10) King D, Spencer SS. Invasive electroencephalography in mesial temporal lobe epilepsy. *J Clin Neurophysiol* 1995;12:32-45.
- 11) Spencer SS. Evolving indications and applications of epilepsy surgery. *Clin Neurosci* 1994;2:3-9.
- 12) Sperling MR, O'Connor MJ. Electrographic correlates of spontaneous seizures. *Clin Neurosci* 1994;2:17-46.
- 13) Arroyo S, Lesser RP, Fisher RS, et al. Clinical and electroencephalographic evidence for sites of origin of seizures with diffuse electrodecremental pattern. *Epilepsia* 1994;35:974-87.
- 14) Spencer SS, Spencer DD. Entorhinal-hippocampal interactions in medial temporal lobe epilepsy. *Epilepsia* 1994;35:721-7.
- 15) Javidan M, Katz A, Tran T, Pacia S, Spencer D, Spencer S. Frequency characteristics of neocortical and hippocampal onset seizures. *Epilepsia* 1992;33(Suppl 3):A58.
- 16) Weinand ME, Wyler A, Richey ET, Phillips BB, Somes GW. Long-term ictal monitoring with subdural strip electrodes: Prognostic factors for selecting temporal lobectomy candidates. *J Neurosurg* 1992;77:20-8.
- 17) Townsend JB, Engel JJ. Clinicopathological correlation of low voltage and high amplitude spike and wave mesial temporal SE-EG ictal onset. *Epilepsia* 1991;32(Suppl 3):21.
- 18) Spencer SS, Kim J, Spencer DD. Ictal spikes: A marker of specific hippocampal cell loss. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1992;83:104-11.
- 19) Blume WT, Kaibara M. The start-stop-start phenomenon of subdurally recorded seizures. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993;86:94-9.
- 20) Sperling MR, O'Connor MJ. Auras and subclinical seizures: Characteristics and prognostic significance. *Ann Neurol* 1990;28:320-8.
- 21) Tran TA, Spencer SS. Surgical outcome in patients with and without subclinical seizures: A comparative study. *Epilepsia* 1993;34(Suppl 6):39.
- 22) Lieb JP, Babb TL. Interhemispheric propagation time of human hippocampal seizure: II. Relationship to pathology and cell density. *Epilepsia* 1986;27:294-300.
- 23) Lieb JP, Engel J, Babb TL. Interhemispheric propagation time of human hippocampal seizure: II. Relationship to surgical outcome. *Epilepsia* 1986;27:286-93.
- 24) Spencer SS, Marks DA, Katz A, Kim J, Spencer DD. Anatomical correlates of interhippocampal seizure propagation time. *Epilepsia* 1992;33:862-73.
- 25) Ojemann GA, Engel J. Acute and chronic intracranial recording and stimulation. In: Engel J Jr, ed. *Surgical treatment of epilepsies*. New York: Raven Press, 1987:263-88.