

휴지기 뇌파의 구역별 주파수 분석

Spectral Analysis of Resting EEG in Brain Compartments

이미경

Migyung Lee

■ ABSTRACT

Objectives: Brain maturation involves brain lateralization and asymmetry to achieve efficient information processing and cognitive controls. This study elucidates normal brain maturation change during the gap between ages 6–9 and age 14–17 using resting EEG.

Methods: An EEG dataset was acquired from open source MIPDB (Multimodal Resource for Studying Information Processing in the Developing Brain). Ages 6–9 (n = 24) and ages 14–17 (n = 26) were selected for analysis, and subjects with psychiatric illness or EEG with severe noise were excluded. Finally, ages 6–9 (n = 14) and ages 14–17 (n = 11) were subjected to EEG analysis using EEGLab. A 120-sec length of resting EEG when eyes were closed was secured for analysis. Brain topography was compartmentalized into nine regions, best fitted with brain anatomical structure.

Results: Absolute power of the delta band and theta band in ages 6–9 was greater than that of ages 14–17 in the whole brain, and, also is relative power of delta band in frontal compartment, which is same line with previous studies. The relative power of the beta band of ages 14–17 was greater than that of ages 6–9 in the whole brain. In asymmetry evaluation, relative power of the theta band in ages 14–17 showed greater power in the left than right frontal compartment; the opposite finding was noted in the parietal compartment. For the alpha band, a strong relative power distribution in the left parietal compartment was observed in ages 14–17. Absolute and relative power of the alpha band is distributed with hemispheric left lateralization in ages 14–17.

Conclusion: During the gap period between ages 6–9 and ages 14–17, brain work becomes more complicated and sophisticated, and alpha band and beta band plays important roles in brain maturation in typically developing children. **Sleep Medicine and Psychophysiology 2020 ; 27(2) : 67-76**

Key words: Adolescents · Children · EEG · Spectral analysis.

67

서 론

뇌의 성숙은 인지기능 혹은 운동기능에 관련된 특화된 뇌의 부위가 좌우 혹은 앞뒤의 뇌가 비대칭적으로 특화되는 과정이 동반된다. 이 과정은 유전적, 환경적영향을 많이 받

.....
Received: November 20, 2020 / **Revised:** December 21, 2020

Accepted: December 25, 2020

이 논문은 2020년도 국립정신건강센터 임상연구과제로 진행되어 동일기관에서 연구비 지원을 받아 수행된 과제임.

국립정신건강센터 정신건강의학과

Department of Neuropsychiatry, National Center for Mental Health, Seoul, Korea

Corresponding author: Migyung Lee, Department of Neuropsychiatry, National Center for Mental Health, 127 Yongmasan-ro, Gwangjin-gu, Seoul 04933, Korea

Tel: 02) 2204-0006, Fax: 02) 2204-0395

E-mail: migyunglee37@gmail.com

게 된다. 가장 많이 알려진 것은 뇌의 편측성(lateralization)로, 주로 언어기능에 관련되어 언급된다. 영아시기의 뇌의 비대칭의 분포는 어른의 것과는 완전히 반대되는 양상으로 나타나게 되는데, 예를 들면, 어린이의 왼쪽 좌뇌의 전하방 부위, 오른쪽 측후두엽의 부피가 상대적으로 봤을 때, 어른과는 반대양상이었다(Herbert 등 2005). 이 과정은 생후 20여년간 성숙과 더불어 뇌의 역동적 변화가 일어나게 된다. 성장기 뇌의 비대칭성의 중요성은 발달장애, 즉 자폐증(Rubia 등 2000), 조현병(Crow 1997) 그리고 주의력결핍 과잉행동장애(Herbert 등 2005)와 같은 정신과적 질환과 밀접한 관계를 보인다. 대표적으로, 난독증이 있는 아이들은 정상적인 성장을 거치는 아이들에 비해서 뇌의 왼쪽편측성의 이상으로인한, 시각과 청각기능의 통합의 이상으로 인쇄된 글자를 알아보기 힘들게 된다(Orton 1937).

이미경

학령기와 청소년기 사이의 나이대의 가장 큰 변화는 가장 큰 변화는, 뇌의 왼쪽 편재화의 과정에서 단순한 소리나 단어들에 관련된 언어기능의 발달보다는 복잡한 언어들, 즉, 쓰여진 언어와 관련된 복잡한 뇌기능이 필요로 하는 과정으로 변화하는 매우 특징적인 기간이라 할 수 있다.

언어를 구성하는 요소는 음운적 요소, 의미론적 요소 그리고, 구문론적 요소가 있는데, 특히, 음운체계에 관한 기능, 즉, 초 분절적인 정보(억양 또는 강세) 처리기능에 대한 보고에서, 말의 억양왼쪽 뇌반구의 우세는 3개월 영아의 경우와 어른의 그것과 거의 비슷하다고 보고하였다(Dehaene-Lambertz와 Dehaene 1994). 흥미로운 것은 억양에 관련한 정보 처리는 오른쪽 반구 우성을 보였으며, 이 또한 3개월 영아때부터 이미 어른의 정보처리과정과 별반 다르지 않음이 확인되었다(Friederici 2006). 반면, 언어의 기능적 종류의 하나인, 복잡한 기능을 필요로 하는 문자언어(written language)나 언어의 이해측면은 소아기를 거쳐 청소년기까지 꽤 오랜 시간에 걸쳐 발달하는 것으로 알려져 있으며, 이 정보처리 역시 좌반구에 치우쳐 진다고 보고되고 있다(Spironelli와 Angrilli 2015).

뇌파를 이용한 연구는 주의력결핍 과잉행동장애나 난독증을 가진 아동들을 대상으로 연구가 많이 진행되어 왔으며, 예를 들면 난독증의 경우는 정상적인 발달과정에 있는 아동들에 비해서 서파활동이 증가되어 있거나 알파, 베타와 감마밴드의 활동의 감소가 보고되었다(Papagiannopoulou와 Lagopoulos 2016). 이 소견은 발달의 지연을 의미하며 전두엽 활동량 감소(hypofrontality)를 시사한다(Papagiannopoulou와 Lagopoulos 2016).

휴지기 뇌파의 자발적인 파동들은 발달 과정을 반영하는 뇌내의 변화를 반영한다(Morillon 등 2012). 휴지기 뇌파를 이용한 뇌내의 각 주파수 활동 및 뇌파를 이용한 비대칭성을 연구한 과거 사례를 보면, 뇌가 성숙됨에 따라 서파인 델타파와 세타파의 감소는 일관되게 보고되어지고 있으며(Segalowitz 등 2010 ; Uhlhaas 등 2010), 이 현상을 뇌의 회백질의 감소로 인한 현상으로 해석한 보고도 있다(Whitford 등 2007). 즉, 뉴로파일(neuropile)과 시냅스의 제거(Huttenlocher와 Dabholkar 1997)로, 서파의 파워가 감소하는 것으로 해석한다. 이러한 과정은 뇌의 구역에 따라 정도 차이는 있다(Salat 등 2005). 결과적으로, 위의 모든 과정들은, 뇌의 기능적 효율을 높이는 과정으로 귀결되게 된다(Kharitonova 등 2013).

본 연구는 뇌파를 이용한, 그중에서도 눈을 감은 상태인 휴지기 뇌파를 주파수 분석을 하여, 주파수분석의 파워값의 분포도를 통해, 편측성과 비대칭의 정도를 평가할 예정이다. 피험자의 뇌파는, 일반에게 인터넷 웹에 공개된 자료인

MIPDB [Multimodal Resource for Studying Information Processing in the Developing Brain ; (http://fcon_1000.projects.nitrc.org/indi/cmi_eeg/)]에서 자료중에서, 6~9세의 건강한 남아어린이와 14세에서 15세의 남아 청소년을 대상으로 수집한 휴지기 뇌파를, EEGlab (Delorme와 Makeig 2004)을 통하여 뇌파의 전처리를 한 후에 그 파워값을 절대 파워와 상대파워를 비교분석할 예정이다.

연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

Child Mind Institute에서 MIPDB (Multimodal Resource for Studying Information Processing in the Developing Brain)의 공개된 데이터중 뇌파자료 분석을 위해 다운로드 받았다. 총 126명의 자료가 공개되어 있으며, 6세에서 44세 사이의 피험자로 구성되어 있으며, 나이대 별로 6~9세, 10~11세, 12~13세, 14~17세, 18~24세 그리고, 25~44세로 나뉘어 있다(Table 1).

이 코호트는 Child Mind Medical Practice 환자와 뉴욕시 근처에 거주중인 피험자로 구성되어 있으며, 정신과적 혹은 발달학적 진단을 받은 경우가 25명, 그리고, 그렇지 않은 경우가 101명이 되었다. 모든 피험자들은 1차로, 전화 혹은 직접 면담을 통해서 정신과적 질환으로 과거에 혹은 현재 진단 및 치료를 받은 병력이 있는지, 그리고 신경학적 질환 내지는 경련성 질환의 병력유무를 확인한 뒤에, 직접 Child Mind Institute를 방문하여 인지기능 검사 및 뇌파검사, 설문지등을 작성하였으며, 모든 검사를 완료하는데 걸리는 시간은 총 5시간정도 소요되었다. 일반에 공개된 정보는 구체적 정보, 즉, 진단명이나 자세한 인구학적 정보는 제시되지 않았고, 본 연구에서는 공개된 자료만을 활용하였다.

본 연구에서 활용된 피험자는, 정신과적 질환 병력이 없는, 6~9세 (n = 16)와 14~17세 (n = 22), 두 군을 대상으로 뇌파 분석을 진행하였다(Table 1). 이 연구는 2020년 4월 국립정신건강센터의 임상시험심사위원회(IRB)의 심사를 통과한 후 동일기관의 임상연구과제비를 받아 연구가 진행되었다 (IRB No. 116271-2020-14)

2. 뇌파자료 수집 및 분석방법

모든 뇌파는 EGI 시스템에서 128채널에서 수집된 것이며, 휴지기 뇌파를 총 5~6분정도 시간동안 뇌파를 얻었다. 눈뜨고 눈감고 하는 상태를 번갈아가면서 눈뜨는 상태는 20초 정도 유지하고 눈감은 상태는 30~40초정도 유지하는 방식으로 휴지기 뇌파를 수집하였고, 어린이아이들일 수록 매우

잡파가 심하여 filtering 과정을 거치고, 여러 방법으로 잡파 제거를 실시하였으나, 뇌파자체의 질이 매우 떨어지는 뇌파 데이터도 있어, 연구에 포함되지 못하였다. 따라서, 최종적으로 분석에 이른 피험자수는 6~9세 14명(남 : 10 ; 여 : 4), 14~17세 11명(남 : 3 ; 여 : 8)이었다.

잡파제거 및 뇌파 신호분석은 matlab기반의 EEGLab을 이용하였으며, 필터는 1~45 Hz의 bandpass filter를 이용하였고, 수작업으로 잡파제거를 함과 동시에, 눈의 움직임, 심전도등의 잡파제거는 독립성분분석(Independent Component Analysis, ICA) 방법을 이용하여 잡파를 제거하였다.

Table 1. Participants in child mind institute cohort

Age	Total M/F	Healthy subjects (M/F)	Subjects with psychiatric or developmental illness (M/F)
Age 6-9	24 (15/9)	16 (8/8)	8 (7/1)
Age 10-11	21 (13/8)	16 (11/5)	5 (2/3)
Age 12-13	22 (13/9)	15 (9/6)	7 (4/3)
Age 14-17	26 (13/13)	22 (12/10)	4 (1/3)
Age 18-24	16 (6/10)	16 (6/10)	0
Age 25-44	17 (9/8)	16 (9/7)	1 (0/1)
Total	126	101	25

Shaded area : two age groups for analysis in this paper

뇌를 총 9구간으로 나눠서 분석하였다(Figure 1). 편측성을 평가하기 위해 뇌의 왼쪽 반구 값은 왼쪽 전두엽구획(LF), 왼쪽 중앙구획(LC)와 왼쪽 두정엽구획(LP)의 평균값, 오른쪽 반구값은 오른쪽 전두엽구획(RF), 오른쪽 중앙구획(RC) 그리고 왼쪽 두정엽구획(RP)의 평균값을 절대파워와 상대파워를 각각 구하였다. 뇌파의 주파수대는 델타밴드는 1~3 Hz, 세타밴드는 4~7 Hz, 알파밴드는 8~14 Hz, 베타밴드는 15~30 Hz 그리고, 감마밴드는 38~42 Hz로 정의하였다.

통계 방법은 SPSS version 26을 통해 분석하였고, 피험자의 수가 충분치 못한 관계로, 비모수 검정(Mann-Whitney test ; Wilcoxon rank sum test)을 실시하였다. 그리고, 비대칭의 정도를 측정을 위해 전두엽 부분, 중앙부분, 두정엽 부분의 왼쪽 파워값과 오른쪽 파워값의 차이를 구해서, 반복측정분산분석의 개체내요인을 세 구획으로 정하고, 개체간요인은 그룹으로 정하여 주파수별 비대칭을 알아보았다. 편측성평가는 반복측정 분산분석에서 왼쪽좌반구와 오른쪽 좌반구값을 개체내 요인으로 정하였고, 개체간 요인은 그룹으로 정하였다.

결 과

토달파워는 모든 관측부위에서 6~9세군이 14~17세군에

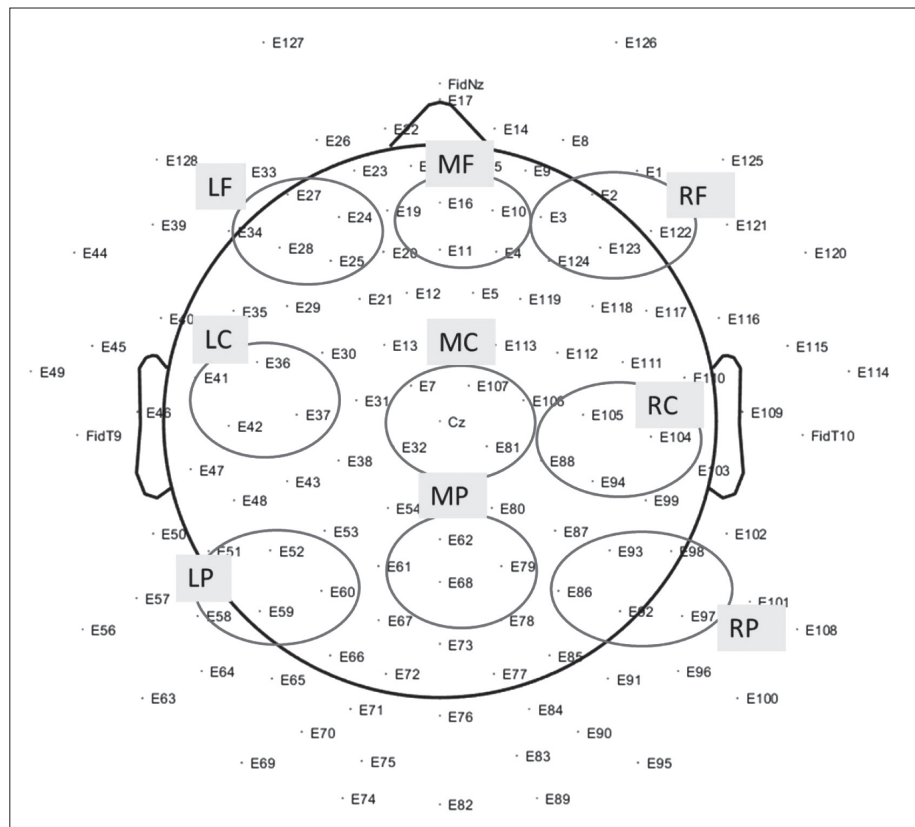


Figure 1. Brain compartments. LC : left central, LF : left frontal, LP : left parietal, MC : mid central, MF : mid frontal, MP : mid parietal, RC : right central, RF : right frontal, RP : right parietal.

비해서 통계적 유의성을 보이며 파워가 크게 측정이 되었고, 특히, 델타밴드 세타밴드의 절대파워는 모두 다 6~9세군의 파워가 컸다(Table 2). 이에 비해 알파밴드의 절대파워는 모든 부분에서 두 군간의 차이는 없었으며, 베타밴드와 감마밴드는 중심부(Central compartment)를 거쳐 두정엽부분(Parietal compartment)에서 절대파워의 두 그룹간 차이가 관찰되었다(Table 2). 알파밴드의 절대파워값의 비교는 두 군간의 차이가 없었으며, 베타밴드는 오른쪽 두정엽 구획과 오른쪽 중앙 구획에서, 그리고, 감마밴드의 그것은 중앙과 두정엽구획에서 그룹간 차이를 보였다. 비대칭 측정의 반복측정 분산분석 결과, 개체내 효과검정에서는 세타밴드와 알파밴드가 각각 구획간차이를 보였으나(세타밴드 Compartment F(2, 46) = 10.28, $p < 0.01$; 알파밴드 Compartment F(2, 46) = 5.57, $p < 0.01$), 이 차이는 교호작용으로 이어지

지 않았고, 개체간 효과검정인 그룹간 차이에서도 유의미한 차이를 보이지 않았다(세타밴드 group F(1,23) = 1.47, $p = 0.24$; 알파밴드 group F(1,23) = 0.11, $p = 0.75$) (Table 4) 구획별로 살펴보면, 세타밴드는 전두엽 구획에서는 오른쪽의 절대파워가 우세하나, 두정엽쪽으로 갈수록 왼쪽의 세타밴드의 절대파워가 우세한 경향을 보이며, 알파밴드는 전두엽 구획내에서는 좌우 비슷한 절대파워 값을 보이나, 두정엽에서는 왼쪽이 우세한 경향을 보이나, 그룹간 차이는 보이지 않았다(Figure 2).

상대파워는 전두엽부분(Frontal compartment)의 델타밴드 상대파워는 6~9세군의 파워가 컸고(LF : $z = -2.14$, $p < 0.05$; MF : $z = -2.03$, $p < 0.05$; RF : $z = -2.19$, $p < 0.05$), 전반적인 베타밴드의 상대파워는 14~17세군이 전두, 중앙, 두정엽부분의 뇌의 전반적 부위에서 높게 측정이 되

Table 2. Absolute power in each compartment

Absolute power (μV^2)	Group	Frontal compartments			Central compartments			Parietal compartments		
		[Mean (SD)]			[Mean (SD)]			[Mean (SD)]		
		Left	Middle	Right	Left	Middle	Right	Left	Middle	Right
Total power	Age 6-9	144.70	144.23	127.58	96.19	131.90	96.77	166.38	144.62	138.34
	(n = 14)	(60.67)	(70.99)	(57.94)	(42.38)	(59.16)	(42.57)	(101.62)	(74.60)	(68.39)
	Age 14-17	65.52	77.93	67.36	44.99	60.44	36.67	92.08	66.08	55.89
	(n = 11)	(27.65)	(46.73)	(43.10)	(35.61)	(32.15)	(22.61)	(83.43)	(48.13)	(33.28)
Z		-3.66 (**)	-2.63 (*)	-2.52 (**)	-2.68 (**)	-2.96 (**)	-3.23 (**)	-1.92 (*)	-2.57 (**)	-2.90 (*)
Delta band	Age 6-9	70.03	60.57	54.15	32.14	54.57	35.04	47.65	49.52	42.82
	(n = 14)	(35.51)	(28.52)	(29.70)	(15.17)	(8.84)	(23.56)	(26.66)	(26.00)	(20.75)
	Age 14-17	24.88	22.91	20.76	10.26	18.35	9.18	16.49	15.46	12.25
	(n = 11)	(15.87)	(13.71)	(11.52)	(7.79)	(8.60)	(5.11)	(15.83)	(10.49)	(6.90)
Z		-3.29 (**)	-3.18 (**)	-3.39 (**)	-3.34 (**)	-3.50 (**)	-3.23 (**)	-3.01 (**)	-3.23 (**)	-3.39 (**)
Theta band	Age 6-9	17.50	21.66	18.30	15.45	19.52	15.92	28.20	23.60	21.07
	(n = 14)	(6.97)	(10.20)	(8.21)	(7.30)	(8.73)	(8.73)	(20.12)	(13.14)	(10.81)
	Age 14-17	7.79	9.17	7.47	6.57	8.68	5.80	9.14	8.63	6.90
	(n = 11)	(4.50)	(4.83)	(4.25)	(6.17)	(6.45)	(4.73)	(8.96)	(7.38)	(5.21)
Z		-3.01 (**)	-3.07 (**)	-2.63 (**)	-2.63 (**)	-3.07 (**)	-3.12 (**)	-2.79 (**)	-2.85 (**)	-3.01 (**)
Alpha band	Age 6-9	27.39	35.55	26.70	28.00	30.64	25.43	58.32	41.98	44.21
	(n = 14)	(24.24)	(33.33)	(21.08)	(19.95)	(23.77)	(18.31)	(52.60)	(30.90)	(32.83)
	Age 14-17	17.58	28.38	24.07	17.91	20.38	13.26	49.35	28.71	25.76
	(n = 11)	(10.74)	(24.60)	(22.21)	(17.31)	(13.76)	(10.81)	(47.89)	(23.88)	(18.68)
Z		-0.77	-0.22	-0.49	-1.26	-1.04	-1.86	-0.77	-1.37	-1.31
Beta band	Age 6-9	10.99	9.57	10.88	6.47	8.18	6.45	8.51	7.72	10.00
	(n = 14)	(8.00)	(7.62)	(8.32)	(3.44)	(5.17)	(3.81)	(4.19)	(4.08)	(8.92)
	Age 14-17	6.78	7.45	6.18	4.02	4.80	3.48	5.90	4.81	4.37
	(n = 11)	(3.54)	(4.59)	(2.52)	(2.46)	(1.81)	(1.82)	(3.69)	(2.46)	(2.01)
Z		-1.70	-0.88	-1.59	-1.64	-1.75	-2.13(*)	-1.48	-1.92	-2.68(*)
Gamma band	Age 6-9	0.99	0.51	0.82	0.37	0.81	0.33	0.39	0.43	1.05
	(n = 14)	(0.65)	(.37)	(0.71)	(0.36)	(1.05)	(.32)	(0.36)	(0.41)	(2.42)
	Age 14-17	0.75	0.67	0.63	0.19	0.32	0.19	0.17	0.24	0.19
	(n = 11)	(0.66)	(0.70)	(0.72)	(0.23)	(0.33)	(.27)	(0.09)	(0.19)	(0.17)
Z		-0.88	-0.27	-0.71	-2.52 (*)	-2.30 (*)	-2.03 (*)	-2.30 (*)	-2.46	-1.64 (*)

Z (Mann-Whitney statistics) ; * : p value < 0.05 ; ** : p value < 0.01

었다(Figure 3). 비대칭을 측정하기 위해 구한 측정치를 이용한 반복측정분산분석의 결과(Table 5), 비대칭의 경향성의 변화를 알 수 있는 통계자료는, 구획과 그룹간의 교호작용이다.

교호작용을 보이는 주파수대는 세타밴드(Table 5 ; $F(2,46) = 4.62, p < 0.05$)와 알파밴드(Table 5 ; $F(2,46) = 4.99, p < 0.05$)였으며, 구획별 차이도 같이 보이는 밴드는

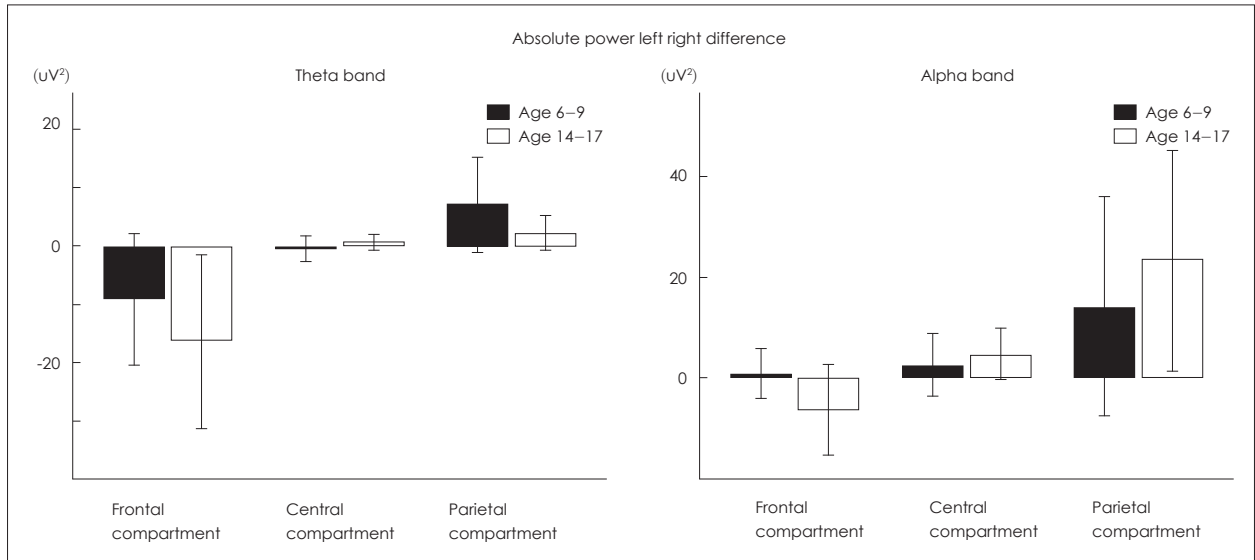


Figure 2. Absolute power difference (left-right) over three compartments. Bar graphs indicates the mean of difference between left power measure and right power measure of each band. Error bar : 95% CI.

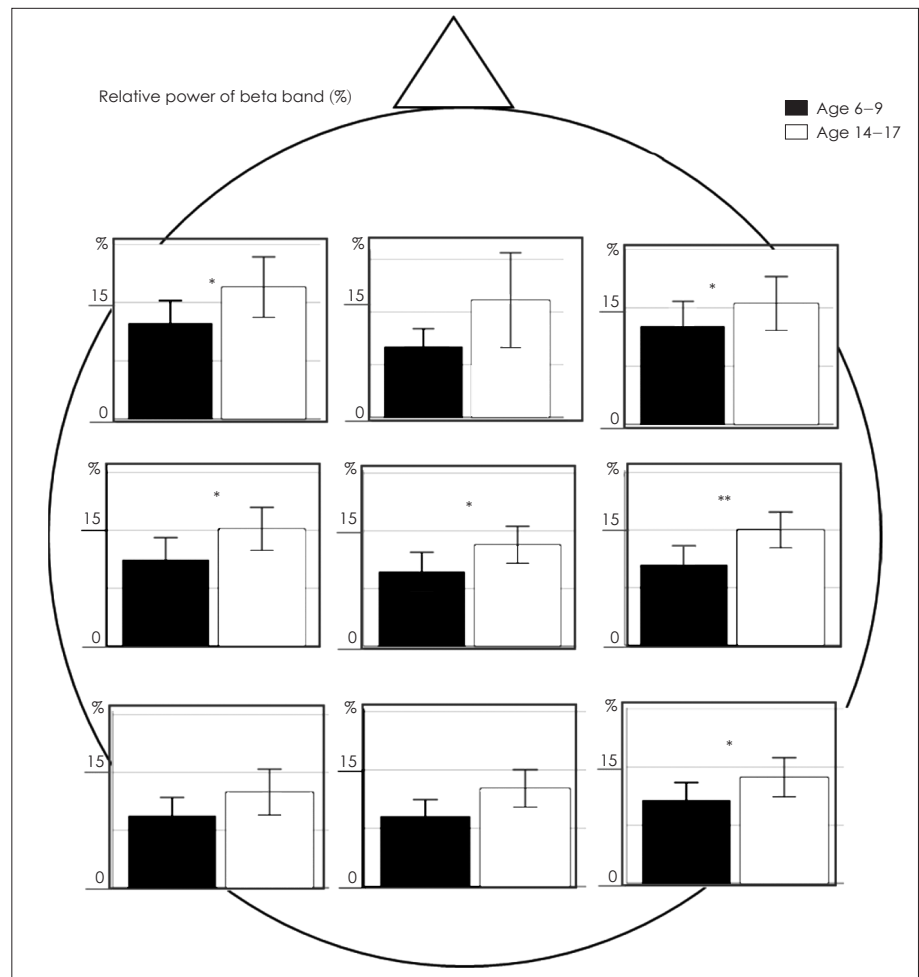


Figure 3. Relative power of beta band in each compartment. * : $p < 0.05$ (Mann-Whitney U test), ** : $p < 0.01$ (Mann-Whitney U test), error bar : 95% CI.

Table 3. Relative power in each compartment

Relative power (%)	Group	Frontal compartments			Central compartments			Parietal compartments		
		[Mean (SD)]			[Mean (SD)]			[Mean (SD)]		
		Left	Middle	Right	Left	Middle	Right	Left	Middle	Right
Delta band	Age 6-9	42.28	42.65	41.90	34.04	40.07	35.24	30.37	34.29	32.58
	(n=14)	(11.62)	(12.72)	(10.80)	(11.87)	(11.22)	(13.89)	(9.35)	(9.07)	(11.10)
	Age 14-17	32.79	30.65	32.88	26.40	31.13	28.59	22.86	27.11	25.99
	(n=11)	(8.20)	(8.73)	(7.73)	(8.50)	(7.60)	(9.55)	(10.14)	(9.32)	(9.26)
	Z	-2.14 (*)	-2.19 (*)	-2.03 (*)	-1.64	-1.97	-1.04	-1.53	-1.31	-1.70
Theta band	Age 6-9	13.87	15.43	14.85	16.09	15.99	16.59	17.01	16.60	15.76
	(n=14)	(3.44)	(4.96)	(4.09)	(3.01)	(4.58)	(4.41)	(5.58)	(4.30)	(4.38)
	Age 14-17	13.09	12.97	12.50	14.96	14.86	15.35	12.00	13.68	13.83
	(n=11)	(4.17)	(4.22)	(5.42)	(5.98)	(5.98)	(5.90)	(6.86)	(6.80)	(6.80)
	Z	-0.55	-0.93	-1.76	-1.48	-0.99	-0.93	-2.41 (*)	-2.14	-1.59 (*)
Alpha band	Age 6-9	21.72	21.87	20.70	27.67	22.92	26.67	32.06	28.35	30.48
	(n=14)	(10.96)	(12.64)	(10.52)	(12.07)	(10.28)	(11.80)	(12.52)	(11.14)	(12.64)
	Age 14-17	29.47	32.44	30.97	34.98	31.98	32.18	45.29	38.10	38.45
	(n=11)	(13.46)	(16.17)	(14.16)	(14.05)	(11.95)	(13.42)	(17.61)	(14.55)	(15.37)
	Z	-1.53	-1.91	-1.97 (*)	-1.15	-2.13 (*)	-1.10	-2.03 (*)	-1.75	-1.42
Beta band	Age 6-9	8.25	6.71	8.45	7.46	6.47	6.99	6.26	6.04	7.16
	(n=14)	(3.37)	(2.96)	(3.58)	(3.30)	(2.91)	(2.86)	(2.73)	(2.45)	(2.63)
	Age 14-17	11.33	11.14	10.39	10.13	8.80	10.01	8.30	8.42	9.12
	(n=11)	(3.86)	(6.69)	(3.44)	(2.76)	(2.38)	(2.31)	(2.96)	(2.39)	(2.51)
	Z	-2.03 (*)	-2.14 (*)	-1.37	-2.35 (*)	-2.52 (*)	-2.79 (*)	-1.92	-2.30 (*)	-1.70
Gamma band	Age 6-9	0.68	0.38	0.63	0.43	0.51	0.33	0.29	0.32	0.46
	(n=14)	(0.48)	(0.22)	(0.39)	(0.36)	(0.40)	(0.20)	(0.22)	(0.22)	(0.53)
	Age 14-17	1.15	1.11	1.16	0.71	0.63	0.79	0.38	0.52	0.60
	(n=11)	(1.08)	(1.16)	(1.72)	(2.13)	(0.73)	(1.43)	(0.38)	(0.52)	(0.90)
	Z	-1.04	-1.10	-0.38	-0.16	-0.33	-1.10	-0.06	-0.82	-0.93

Z (Mann-Whitney statistics) ; * : p value < 0.05, ** : p value < 0.01

Table 4. Repeated measure of ANOVA outputs in absolute power difference over three compartments

Absolute power difference (left-right) (μV^2)	Within subject effect F	Between subject effect F
Delta band difference	Compart F(2, 46) = 1.96 Compart * Group F(2,46) = 1.08	Group F(1.23) = 0.37
Theta band difference	Compart F(2, 46) = 10.28 (**) Compart * Group F(2,46) = 0.58	Group F(1.23) = 1.47
Alpha band difference	Compart F(2, 46) = 5.57 (**) Compart * Group F(2,46) = 0.78	Group F(1.23) = 0.11
Beta band difference	Compart F(2, 46) = 0.07 Compart * Group F(2,46) = 1.14	Group F(1.23) = 2.63
Gamma band difference	Compart F(2, 46) = 1.75 Compart * Group F(2,46) = 1.10	Group F(1.23) = 0.40

Compart : compartment ; * : p < 0.05, ** : p < 0.01

알파밴드였다(Table 5 ; F(2,46)= 6.49, p < 0.01). 세타밴드는 6~9세그룹의 왼쪽 우세경향이 전두엽을 거쳐 두정엽구획으로 가면서 커지는 경향을 보이고, 이와는 반대로, 14~17세 그룹은 왼쪽 우세 경향이 전두엽구획에서 가장 크고, 두정엽구획으로 가면서 점점 감소하는 경향을 보인다. 알파밴드는 전두엽 구획과 중앙구획은 두 그룹간의 차이가 없었으나, 두정엽구획에서 14~17세 그룹이 왼쪽 두정엽구획의

파워의 우세가 두드러진 경향을 보인다.

편측성의 측정의 통계결과중 두 그룹의 편측성 경향의 차이를 보이는 좌우반구 와 그룹간의 교호작용이 있는 경우는 없었다(Table 6, 7). 따라서, 왼쪽 반구의 파워값과 오른쪽 반구의 파워값을 대응표본 비모수검정 Wilcoxon 부호 순위 검정을 두 그룹에서 시행하였다. 절대파워값에서는 편측성이 확인된 주파수는 14~17세그룹의 알파밴드로, 왼쪽

Table 5. Repeated measure of ANOVA outputs in relative difference over three compartments

Relative power difference (left-right)	Within subject effect F	Between subject effect F
Delta band difference	Compart F(2, 46) = 251.98 (**) Compart * Group F(2,46) = 3.39	Group F(1.23) = 9.49 (**)
Theta band difference	Compart F(2, 46) = 0.05 Compart * Group F(2,46) = 4.62 (*)	Group F(1.23) = 1.57
Alpha band difference	Compart F(2, 46) = 6.49 (**) Compart * Group F(2,46) = 4.99 (*)	Group F(1.23) = 2.17
Beta band difference	Compart F(2, 46) = 3.71 (*) Compart * Group F(2,46) = 1.16	Group F(1.23) = 0.26
Gamma band difference	Compart F(2, 46) = 3.78 (*) Compart * Group F(2,46) = 0.35	Group F(1.23) = 0.31

Compart : compartment ; * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

Table 6. Repeated measure of ANOVA outputs in laterality evaluation in absolute power

Absolute power (μV^2)	Within subject effect F	Between subject effect F
Delta band	Hemisphere F(1, 23) = 3.59 Hemisphere * Group F(1,23) = 0.37	Group F(1.23) = 22.09 (**)
Theta band	Hemisphere F(1, 23) = 5.54 (*) Hemisphere * Group F(1,23) = 0.42	Group F(1.23) = 15.09 (**)
Alpha band	Hemisphere F(1, 23) = 8.65 (**) Hemisphere * Group F(1,23) = 0.28	Group F(1.23) = 1.18
Beta band	Hemisphere F(1, 23) = 0.12 Hemisphere * Group F(2,46) = 1.14	Group F(1.23) = 5.35 (*)
Gamma band	Hemisphere F(1, 23) = 0.17 Hemisphere * Group F(1,23) = 0.41	Group F(1.23) = 2.03

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$

Table 7. Repeated measure of ANOVA outputs in laterality evaluation in relative power

Relative power (%)	Within subject effect F	Between subject effect F
Delta band	Hemisphere F(1, 23) = 8.58(**) Hemisphere * Group F(1,23) = 0.69	Group F(1.23) = 3.76
Theta band	Hemisphere F(1, 23) = 2.71 Hemisphere * Group F(1,23) = 1.57	Group F(1.23) = 1.15
Alpha band	Hemisphere F(1, 23) = 14.47 (**) Hemisphere * Group F(1,23) = 2.17	Group F(1.23) = 2.87
Beta band	Hemisphere F(1, 23) = 0.05 Hemisphere * Group F(2,46) = 0.26	Group F(1.23) = 5.41(*)
Gamma band	Hemisphere F(1, 23) = 0.35 Hemisphere * Group F(1,23) = 0.31	Group F(1.23) = 1.22

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

의 우세가 확인되었다($z = -2.67$, $p < 0.01$). 상대파위의 경우 델타밴드($z = -2.49$, $p < 0.05$)와 알파밴드($z = -2.67$, $p < 0.01$)로 모두 14~17세그룹에서 확인되었다(Figure 5).

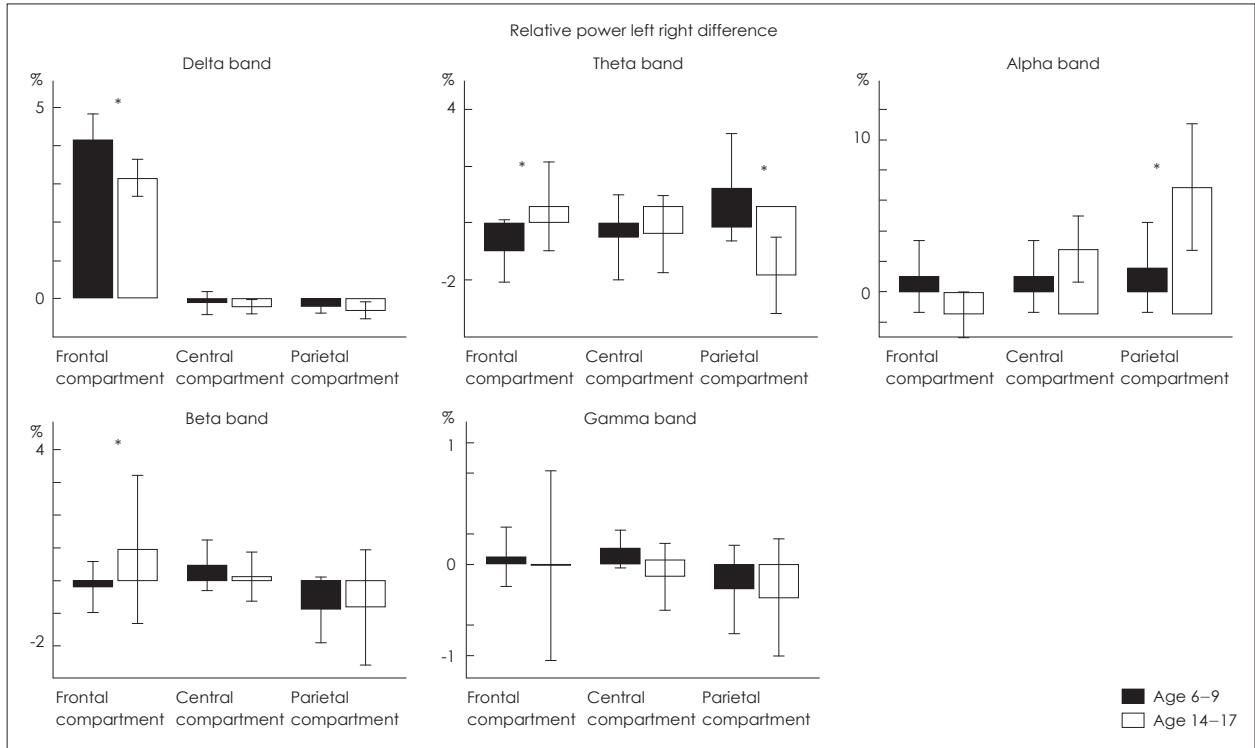
고 찰

이번 연구의 결과는 앞선 여러 선행연구들과 비슷한 결과를 보인다. 각 구역간의 합산한 total 파워의 값은 매우 강한 통계적 유의성을 보이며 나이가 들어감에 따라 총 파워

의 값은 감소하는 경향을 보였다(Segalowitz 등 2010 ; Uhlhaas 등 2010). 그리고, 델타밴드의 절대 파워값이 전두엽 구획에서 과 세타밴드의 절대파워값은 모든 구역에서 6~9세 군 그룹이 14~15세군을 크게 앞서는 파워를 보이고 있으며, 상대파위의 경우에도 델타밴드가 전두엽구획에서, 세타밴드가 두정엽의 왼쪽구획에서 비슷한 경향성을 보였다. 성숙 과정을 거치면서 나타나는 서파파워감소는 앞서도 언급하였듯이 시냅스의 가지치기와 같은 뇌의 정보처리 및 기능의 효율성을 높이기 위한 과정이 진행되면서 나타나게 된다고

알려져 있으며(Huttenlocher와 Dabholkar 1997 ; Khari-
tonova 등 2013), 또는 성장과 같이 일어나는 두개골의 성장
과도 연관이 있을 수 있다고 보고하고 있다(Hagemann 등

2008). 또한, 성숙의 속도는 후두정엽부분이 훨씬 빠르게 진
행되고, 전두엽이 가장 더디게 변화가 일어나는 경향으로
가게 되므로(Niessing 등 2005), 본 연구의 결과중 상대파워



74

Figure 4. Relative power difference (left-right) over three compartments. Bar graphs indicates the mean of difference between left power measure and right power measure of each band. * : $p < 0.05$ (Mann-Whitney U test) ; Error bar : 95% CI.

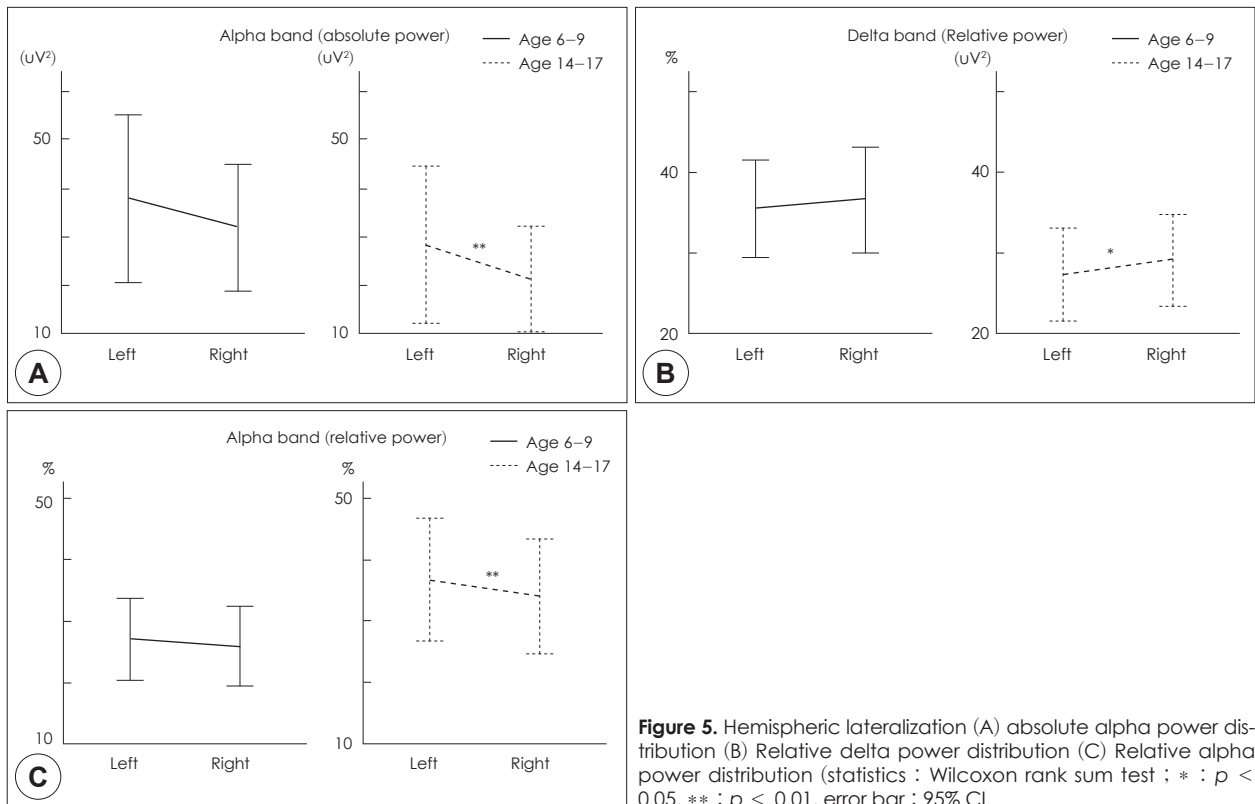


Figure 5. Hemispheric lateralization (A) absolute alpha power distribution (B) Relative delta power distribution (C) Relative alpha power distribution (statistics : Wilcoxon rank sum test ; * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, error bar : 95% CI.

의 결과값중, 델타밴드가 전두엽에서 여전히 큰 우위를 보이는 것도 이 현상을 반영한다고 볼 수 있다.

베타밴드의 절대파워는 오른쪽 중앙 구획과 오른쪽 두정엽 구획에서 6~9세그룹이 통계적으로 유의미하게 크게 측정되고 있으며, 상대파워에서는 거의 모든 구획에서 14~17세그룹의 파워값이 증가되어 있다. 과거의 연구에서도 베타밴드의 상대파워값의 증가는 몇차례 언급된적이 있다. 이 소견은 Anokin 등이 1996년에 발표한 보고에 따르면 7세에서 60세사이의 뇌파의 주파수별 변화에서, 베타파는 증가하고, 그와 더불어 알파파와 세타파는 감소하는 경향을 보인다고 하였다(Anokhin 등 1996). 베타밴드의 상대파워의 증가는, 시냅스가 가지치기 되면서, 효율적으로 뉴런 사이에 연결이 짧은 거리(short range) 및 긴거리(long range)간의 연결이 이뤄지면서 정확성을 가진 수 msec안에 동조가 일어나야 정보전달의 효율성과 정확성을 높을 수 있는데, 이 역할을 하는 주파수가 베타 밴드와 감마밴드(20 Hz~80 Hz)가 하게된다(Womelsdorf 등 2007). 이번 연구의 결과와도 일치하는 소견이다. 전두엽구획감마밴드의 절대파워에서만 두 그룹간의 차이를 보이고, 상대파워에서는 관찰되지 않는다. 감마밴드의 경우는 3~4세경에 가장 크게 증가를 하다가 5~12세를 거치면서 점점 감소하는 경향을 보인다고 한다(Takano와 Ogawa 1998). 특히, 전두엽의 감마밴드의 파워와 언어 및 인지기능의 발달과 연관성을 보인다고 보고되었다(Benasich 등 2008). 본 연구에서는 감마밴드관련하여 통계적 유의성을 보이는 결과는 없다. 추측되는 요인 중 하나는, 본 연구의 피험자들은 이미 6세가 넘어간 상태로, 감마밴드의 파워가 감소하기 시작한 시점인 부분을 들 수 있겠다. 감마밴드같은 고주파수 영역의 파워분석, 특히 5~12세 사이의 분석은 절대파워 분석보다는 상대파워 분석이 각각의 주파수간의 상호작용등을 알아보기가 용이할 것이라고 제안하였는데(Takano와 Ogawa 1998), 본 연구에서도 절대파워 값은 6~9세그룹의 파워값이 14~17세그룹을 훨씬 능가하기 때문에 상대파워값과 같이 비교하면서 평가하는 것이 맞다고 판단된다.

뇌의 비대칭성 분석결과 Figure 2와 Table 4를 보면 알파밴드와 세타밴드의 절대 파워 값에서 두 그룹 모두 개체내 효과분석에서 각각 $compart F(2,46) = 10.28$ 과 $compart F(2,46) = 5.57$ 로 통계적으로 유의한차이를 보였으나 교호작용은 없었다. 두정엽쪽으로 갈 수록 절대파워가 비대칭성을 보이며 증가하는 양상이 통계적으로 유의하나, 두 그룹이 모두 같은 경향으로 증가하여 질적 차이를 찾기는 힘든 분석이었다. 하지만, 상대파워 분석에서는, 세타밴드와 알파밴드가 그룹간 교호작용을 보이며 비대칭성의 질적 차이를 보

였다. 세타밴드는 교호작용을 보였고($Compart * group F(2,46) = 4.99$), 개체내 효과분석에서는 유의미하지 않았다($Compart F(2,46) = 0.05$). 이 결과는 비대칭성이 통계적으로 유의하지 않으나, 6~9세 그룹의 세타밴드파워의 분포는 전두엽 구획에서는 오른쪽이 우세한 경향을, 14~19세그룹은 왼쪽이 우세한 경향을 보이고, 두정엽구획에서는 반대의 경향을 보인다. 세타밴드는 주로 휴지기의 상태의 분석보다는 수행능력과 관련되어 평가되어진 과거 연구가 대부분이다. 14~17세 그룹의 세타밴드파워의 전두엽구획의 왼쪽의 우세 경향은 언어관련한 뇌의 구조들이 위치하여 있기 때문으로 볼 수 있을 것이다. 그리고, 세타밴드의 특성은 수행요구도가 증가할 수록 파워가 증가하고 휴지기 동안에는 감소되는 경향이 있다.

알파밴드는 편측성알파밴드의 결과는 14~17세그룹에서 절대파워 및 상대파워에서 왼쪽우세가 관찰되었다(Figure 5). 그리고, 비대칭성 분석은 14~17세그룹의 두정엽 구획의 매우 강한 좌측우세 비대칭성을 보이고 있다(Figure 4). 알파밴드는 과거의 연구에서도 전반적인 성숙의 정도를 나타내는 지표로 간주되었으며(Somsen 등 1997), 주로 억제기능(inhibitory function)을 담당하는 것으로 알려져 있다(Klimesch 등 2007). 성인의 뇌에서는 후두엽부분에서 매우 강한 알파밴드파워가 관찰이 된다. 알파밴드는 인지기능을 수행하는 동안에 불필요한 자극들에 관련된 구조를 억제하는 기능을 한다고 알려져 있다(Klimesch 등 2007). 나이가 들어감에 따라, 인지기능의 복잡성이 늘어가므로, 알파밴드의 역할은 주의력 유지 및 수행기억(working memory)에 관련되어 역할을 하게 된다(Lenartowicz 등 2018).

본 연구의 제한점은 너무 피험자의 수가 적었고, 언어 혹은 인지기능 관련 수행 결과에 대한 자료가 있었다면 좀 더 정확하게 평가할 수 있었을 것이다. 개방된 자료라는 제한점으로, 자세한 인구학적 변인 자료를 구하지 못해 이 부문에 대해서 분석을 하지 못하였다. 하지만, 적은 수의 피험자임에도 불구하고, 과거의 연구들과 궤를 같이하는 결과를 얻었으며, 6~9세와 14~17세 사이의 휴지기 뇌파의 변화에서 알파밴드와 베타밴드의 변화가 뇌의 성숙과 같이 동반되어 일어나는 현상을 확인하였다. 향후로는 나이대를 다양하게 하여 주파수 변화나 기능적 연결성을 알아보는 등의 뇌의 성숙과정에 대한 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

요 약

목 적 : 뇌가 성숙해감에따라, 비대칭과 편측성역시 기능적, 효율적인 관점에서 볼 때, 성숙과 더불어 정보처리를 효

과적으로 하기 위한 과정이라 할 수 있다. 인지적 복잡성이 높아지는 시기인 6~9세와 14~17세 사이의 뇌의 변화를 휴지기 뇌파를 주파수 분석을 하여 알아 본다.

방 법 : 본 연구는 6~9세(n = 24)와 14~17세(n = 26)의 피험자들의 뇌파는 공개된 자료(Multimodal Resource for Studying Information Processing in the Developing Brain, MIPDB)를 분석하였고, 정신과적 질환이 있거나, 잡파가 심한 뇌파의 피험자는 제외하여 최종적으로 6~9세(n = 14)와 14~17세(n = 11)을 대상으로, EEGlab을 이용하여 뇌파를 분석하였고, 적어도 2분이상의 휴지기 뇌파 중 눈을 감은 상태의 뇌파를 이용하여 주파수 분석을 하였다. 뇌의 구역을 총 9구획으로 나눠서 주파수 분석을 하여, 주파수별 비대칭성과 편측성을 측정하였다.

결 과 : 전반적으로 서파의 파워는 나이가 어릴수록 높았으며, 이 현상은 절대파워와 상대파워에 상관없이 나타났다. 베타밴드의 상대파워는 좌우 편측성없이 14~17세 그룹이 높았다. 비대칭성의 경향은 휴지기 뇌파에서 세타밴드와 알파밴드의 상대파워에서만 두 그룹간의 차이가 관찰되었으며, 세타파는 왼쪽 전두엽 구획에서 14~17세군이 오른쪽 전두엽구획에 비해서 높게 측정되었고, 이 현상은 두정엽 구획으로 갈 수록 반대의 경향, 즉 두정엽 구획에서는 오른쪽 세타밴드파워가 왼쪽의 세타밴드파워에비해서 높게 측정되었다. 알파밴드의 상대파워는 두정엽구획에서 왼쪽의 파워가 오른쪽의 파워보다 높게 측정되었다. 편측성을 보이는 주파수는 알파밴드였으며, 절대파워와 상대파워 모두에서 왼쪽의 알파밴드파워가 오른쪽에 비해서 높게 나타났으며 그 차이가 통계적으로 유의미하였다.

결 론 : 6~9세의 피험자들에 비해서 14~17세의 피험자들은 성장기를 거치며 비교적 수준이 높은 인지기능 및 수행기능을 하게 되고, 이 기능과 관련하여 베타밴드와 알파밴드가 이 변화를 반영한다고 볼 수 있다.

중심 단어 : 휴지기 뇌파 · 비대칭성 · 편측성 · 청소년기.

REFERENCES

Anokhin AP, Birbaumer N, Lutzenberger W, Nikolaev A, Vogel F. Age increases brain complexity. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1996;99:63-68.

Benasich AA, Gou Z, Choudhury N, Harris KD. Early cognitive and language skills are linked to resting frontal gamma power across the first 3 years. *Behav Brain Res* 2008;195:215-222.

Crow TJ. Schizophrenia as failure of hemispheric dominance for language. *Trends Neurosci* 1997;20:339-343.

Dehaene-Lambertz G, Dehaene S. Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants. *Nature* 1994;370:292-295.

Delorme A, Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent compo-

nent analysis. *J Neurosci Methods* 2004;134:9-21.

Friederici AD. The neural basis of language development and its impairment. *Neuron* 2006;52:941-952.

Hagemann D, Hewig J, Walter C, Naumann E. Skull thickness and magnitude of EEG alpha activity. *Clin Neurophysiol* 2008;19:1271-1280.

Herbert MR, Ziegler DA, Deutsch CK, O'Brien LM, Kennedy DN, Filipek PA, et al. Brain asymmetries in autism and developmental language disorder: a nested whole-brain analysis. *Brain* 2005;128(Pt 1):213-226.

Huttenlocher PR, Dabholkar AS. Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *J Comp Neurol* 1997;387:167-178.

Kharitonova M, Martin RE, Gabrieli JD, Sheridan MA. Cortical gray-matter thinning is associated with age-related improvements on executive function tasks. *Dev Cogn Neurosci* 2013;6:61-71.

Klimesch W, Sauseng P, Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis. *Brain Res Rev* 2007;53:63-88.

Lenartowicz A, Mazaheri A, Jensen O, Loo SK. Aberrant modulation of brain oscillatory activity and attentional impairment in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging* 2018;3:19-29.

Morillon B, Liegeois-Chauvel C, Arnal LH, Benar CG, Giraud AL. Asymmetric function of theta and gamma activity in syllable processing: an intra-cortical study. *Front Psychol* 2012;3:248.

Niessing J, Ebisch B, Schmidt KE, Niessing M, Singer W, Galuske RA. Hemodynamic signals correlate tightly with synchronized gamma oscillations. *Science* 2005;309:948-951.

Orton S. *Reading, Writing and Speech Problems in Children*: W W Norton & Co;1937.

Papagiannopoulou EA, Lagopoulos J. Resting state eeg hemispheric power asymmetry in children with dyslexia. *Front Pediatr* 2016;4:11.

Rubia K, Overmeyer S, Taylor E, Brammer M, Williams SC, Simmons A, et al. Functional frontalisation with age: mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neurosci Biobehav Rev* 2000;24:13-19.

Salat DH, Tuch DS, Greve DN, van der Kouwe AJ, Hevelone ND, Zaleta AK, et al. Age-related alterations in white matter microstructure measured by diffusion tensor imaging. *Neurobiol Aging* 2005;26:1215-1227.

Segalowitz SJ, Santesso DL, Jetha MK. Electrophysiological changes during adolescence: a review. *Brain Cogn* 2010;72:86-100.

Somsen RJ, van't Klooster BJ, van der Molen MW, van Leeuwen HM, Licht R. Growth spurts in brain maturation during middle childhood as indexed by EEG power spectra. *Biol Psychol* 1997;44:187-209.

Spirocelli C, Angrilli A. Brain plasticity in aphasic patients: intra- and inter-hemispheric reorganisation of the whole linguistic network probed by N150 and N350 components. *Sci Rep* 2015;5:12541.

Takano T, Ogawa T. Characterization of developmental changes in EEG-gamma band activity during childhood using the autoregressive model. *Acta Paediatr Jpn* 1998;40:446-452.

Uhlhaas PJ, Roux F, Rodriguez E, Rotarska-Jagiela A, Singer W. Neural synchrony and the development of cortical networks. *Trends Cogn Sci* 2010;14:72-80.

Whitford TJ, Rennie CJ, Grieve SM, Clark CR, Gordon E, Williams LM. Brain maturation in adolescence: concurrent changes in neuroanatomy and neurophysiology. *Hum Brain Mapp* 2007;28:228-237.

Womelsdorf T, Schoffelen JM, Oostenveld R, Singer W, Desimone R, Engel AK, et al. Modulation of neuronal interactions through neuronal synchronization. *Science* 2007;316:1609-1612.