Neural Mechanism of Second Language Processing in Korean-English Bilingual Children

한국어-영어 이중 언어 학습 아동에서 제2언어 습득과
연관된 대뇌 영역 활성화 기전

Yun Young Lee, MD¹ , Byung Hyun Baek, MD¹ , Seul Kee Kim, MD² ,
Il-woo Park, PhD¹ , Gwang Woo Jeong, PhD¹ ,
Seunghyun Baek, PhD³ , Woong Yoon, MD^{1*}

¹Department of Radiology, Chonnam National University Medical School, Gwangju, Korea

²Department of Radiology, Chonnam National University Hwasun Hospital, Hwasun, Korea

³Department of English Linguistics and Literature, College of Humanity, Chonnam National University, Gwangju, Korea

Purpose To evaluate the neural mechanism of second language processing in Korean-English bilingual children using functional MRI (fMRI).

Materials and Methods The study was conducted on 20 Korean elementary school children who were learning English as a foreign language. fMRI was performed during short-passage comprehension tasks in Korean and English languages. We analyzed which brain areas were activated according to the language, English proficiency, and task difficulty.

Results Higher activities were observed in the dorsolateral prefrontal cortex, supplementary motor area, precentral gyrus, left basal ganglia, and left temporoparietal and occipital lobes during English comprehension than during Korean comprehension. The low English proficiency group showed higher activities than the high English proficiency group in the frontotemporal cortex, including the prefrontal cortex. Higher activities were observed in the right inferior frontal gyrus and right temporoparietal lobe during the English comprehension task of intermediate difficulty compared to that of low difficulty. However, the brain activities significantly decreased while performing a high-difficulty English task.

Conclusion Brain activities significantly increased during English comprehension in the lower English proficiency group while performing an intermediate-difficulty task. However, brain activation decreased when the task difficulty exceeded the moderate comprehension level. These results suggest that a proper level of education is important to learn a second language.

Index terms Brain; Functional MRI; Multilingualism

Received November 13, 2018

Revised January 3, 2019

Accepted April 5, 2019

*Corresponding author

Woong Yoon, MD
Department of Radiology,
Chonnam National University
Hospital, Chonnam National
University Medical School,
42 Jebong-ro, Dong-gu,
Gwangju 61469, Korea.

Tel 82-62-220-5746

Fax 82-62-226-4380

E-mail radyoon@jnu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID iDs

Yun Young Lee

[https://
orcid.org/0000-0002-1200-9462](https://orcid.org/0000-0002-1200-9462)

Byung Hyun Baek
[https://
orcid.org/0000-0002-8657-1052](https://orcid.org/0000-0002-8657-1052)

Seul Kee Kim
[https://
orcid.org/0000-0002-1508-5057](https://orcid.org/0000-0002-1508-5057)

Il-woo Park
[https://
orcid.org/0000-0001-6022-8363](https://orcid.org/0000-0001-6022-8363)

Gwang Woo Jeong
[https://
orcid.org/0000-0002-0621-3168](https://orcid.org/0000-0002-0621-3168)

Seunghyun Baek
[https://
orcid.org/0000-0002-1907-5163](https://orcid.org/0000-0002-1907-5163)

Woong Yoon
[https://
orcid.org/0000-0002-8598-3127](https://orcid.org/0000-0002-8598-3127)

서론

전 세계적으로 이중 언어 습득은 의사소통의 범위를 넓히고 사회적 활동 영역을 확장시켜 개인 및 국가의 경쟁력을 강화시키기 위한 필수 요소로 인식되고 있다. 세계 인구의 66%가 이중 언어 화자(bilingual) 또는 다중 언어화자(multilingual)이며, 특히 유럽에서는 54%가 2개 이상의 언어를 구사한다고 알려져 있다(1). 국내에서도 이중 언어 습득에 대한 관심도가 나날이 증가하고 있으며, 특히 뇌신경 발달 단계 중 언어 영역의 발달 잠재력이 가장 높은 시기가 7~10세 혹은 그 이전이라는 “결정적 시기론”에 대한 개념(2, 3)이 사회 전반에 확산되면서 조기 영어 교육에 대한 관심 또한 높아지는 추세이다. 그러나 제2언어(영어) 습득이 어떠한 대뇌 신경 활성화 과정을 거쳐 일어나는지, 영어교육 시점이 대뇌 발달 및 활성화에 어떠한 영향을 미치는지 등, 제2언어 습득과 관련된 신경해부학적 기전에 관한 연구는 현재까지도 충분히 이뤄지고 있지 않으며 연구자 간에도 다양한 쟁점들이 존재한다.

뇌와 언어의 관계를 규명하고자 하는 인지신경과학자(cognitive neuroscientist)들의 이중 언어 습득(bilingualism and biliteracy)에 대한 근본적인 쟁점 중 하나는 “모국어와 외국어의 처리 과정이 뇌의 동일한 영역(overlapped region)에서 발생하는가, 그렇지 않으면 분리된 영역(separated region)에서 발생하는가?”이다. 이 질문에 관한 연구는 기능적 신경영상기술(functional neuroimaging technique)의 발전에 힘입어 인지신경과학자들의 주된 관심으로 대두되고 있다. 현재 기능적 신경영상기술에 가장 대표적으로 활용되는 영상기법은 기능적 자기공명영상(functional MRI; 이하 fMRI)으로, 이는 뇌가 활성화될 때 혈류 내의 산소 용존량이 증가된다는 개념을 바탕으로 산소량의 변화에 따른 자기공명 신호의 크기 변화를 측정하여 뇌의 어떠한 부분이 활성화되어 있는지를 찾아내는 기법이다(4). 인지신경과학자들은 이 기법을 이용하여 이중 언어 습득자의 대뇌 활성화영역의 반응을 실시간으로 관찰하고, 그 활성화반응 정도를 정성적, 정량적으로 계산할 수 있게 되었으며, 이에 따라 모국어와 이중 언어 사용 시 또는 이중 언어 습득 전과 후의 변화들의 통계적인 비교 분석이 가능하게 되었다. fMRI를 이용한 최근의 연구결과들은 연구자에 따라 모국어와 제2언어 습득을 위한 뇌 영역의 구조적 차이가 없다는 결론을 제시하기도 하고(5-8), 이와는 상반되게 제2언어의 숙련도, 습득시기, 노출 정도에 따라 제1언어와 제2언어 간에 뇌의 활성화 영역이 상이함을 보여준다는 결과를 발표하는 등(9-12) 제2언어 정보처리와 관련된 뇌신경영상에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다. 또한 지금까지의 연구들은 대부분 English as a second language 언어 환경의 학습자들을 대상으로 한 것으로, 이는 영어를 구사하는 나라에서 생활하나 영어가 모국어가 아닌 학습자들을 말하며, 이들은 생활 속에서 영어에 쉽게 노출되는 환경에 놓여 있다. 그러나 한국과 같은 English as a foreign language (이하 EFL) 환경의 학습자에게 기존의 연구 결과를 그대로 적용시키기에는 어려움이 있으며, 국내에서 진행된 fMRI를 이용한 다중 언어 습득자의 신경기전 연구는 드물고 제한적이다. 특히 기존의 연구들은 성인을 대상으로 언어 발화(language production)와 이해(comprehension) 과제를 음운(phonological), 어휘(lexical), 의미(semantic), 형태/통사(morphosyntactic) 영역으로 각각 분리하여 과제를 수행케 한 후 그 결과를 제시하여 왔으며, 영어를 제2언어로 습득하는 아동을 대상으로 언어이해 및 발화를

분리하지 않고 전체적인 언어활동을 측정하여, 한국어와 영어의 이해 및 발화 과정에서 일어나는 신경 활성의 차이를 비교한 신경영상 연구는 현재까지 보고되어 있지 않다.

따라서 본 연구는 fMRI를 이용하여 EFL 언어 환경에서 제2언어(영어) 습득 초기 단계에 해당하는 한국어-영어 이중 언어 학습 아동이 모국어와 제2언어(영어)의 전체적인 언어활동을 처리하는 과정 중에 일어나는 대뇌의 신경 활성 영역과 활성 정도의 차이를 비교 분석하여, 제2언어(영어) 습득과 연관된 대뇌의 활성화 기전을 알아보고자 하였다.

대상과 방법

대 상

광주광역시에 거주하며 한국어를 모국어로 사용하고 영어를 학습한 적이 있는 한국인 초등학교 20명을 대상으로 하였다(Table 1). 남자가 10명, 여자가 10명이었고 모두 초등학교 고학년에 해당하는 4~6학년으로 나이는 11~13세(평균 12.1세)였다. 참가자들은 실험에 들어가기 전에 Practical English Language Test를 시행하여 영어구사능력에 따라 상위, 하위 집단으로 구분하였으며 상위집단이 9명, 하위집단이 11명이었다. 모든 참가자는 오른손잡이였으며 정신과적, 신경과적 질병의 병력은 없었다.

Table 1. Summary of Participants

Subject No.	Sex	Age (Years)	Grade of Elementary School	English Education Period (Year)	Level of English Proficiency (Learning Level)	Handedness
1	Female	13	6th	1	Low	Right
2	Male	11	4th	1	Low	Right
3	Male	13	6th	2	Low	Right
4	Female	12	5th	1	High	Right
5	Female	11	4th	3	High	Right
6	Male	11	4th	1	Low	Right
7	Male	13	6th	5	Low	Right
8	Female	12	5th	4	Low	Right
9	Female	12	5th	<1	Low	Right
10	Male	13	6th	1	High	Right
11	Male	12	5th	<1	Low	Right
12	Female	11	4th	<1	High	Right
13	Male	13	6th	1	High	Right
14	Male	12	5th	1	High	Right
15	Female	13	6th	2	High	Right
16	Male	12	5th	4	High	Right
17	Female	13	6th	3	High	Right
18	Female	12	5th	2	Low	Right
19	Male	12	5th	2	Low	Right
20	Female	11	4th	1	Low	Right

참가자들은 모두 실험에 앞서 실험 내용과 방법에 대하여 충분한 설명을 들은 후 실험 동의서에 서명하였으며, 동의서는 학부모와 학생들로부터 각각 받았다. 모든 실험 프로토콜은 전남대병원 생명윤리심의위원회(Chonnam National University Hospital Institutional Review Board)의 승인을 획득하였다(IRB No. CNUH-2010-10-169).

기능적 자기공명영상

모든 실험은 3.0 Tesla 자기공명영상장치(Magnetom Tim Trio, Siemens Medical Solutions, Erlangen, Germany)를 사용하였다. 먼저 T1 강조영상(T1-weighted image; 이하 T1WI)과 T2 강조영상(T2-weighted image; 이하 T2WI)을 얻어 해부학적인 참고자료로 사용하였다. T1WI는 반복시간(repetition time; 이하 TR)/에코시간(time to echo; 이하 TE) = 400 msec/8 msec, T2WI는 TR/TE = 4200 msec/103 msec로 하며, 영상범위(field of view; 이하 FOV)는 26 cm × 26 cm, matrix의 크기는 256 × 192, number of excitation (이하 NEX)은 2, 절편두께(slice thickness)는 5 mm, 절편간격은 2 mm로 하여 전교련(anterior commissure)과 후교련(posterior commissure)을 연장한 선에 평행한 횡단면 영상을 얻었다.

fMRI는 Blood Oxygenation Level Dependent (이하 BOLD) 기법을 이용하여 각각의 언어 과제를 수행하는 동안과 휴식기 동안에, 뇌 혈류 내의 산소 소모량을 기준으로 한 대뇌 피질의 활성화 부위와 각 부위의 활성화 정도를 정량 측정하였다. BOLD 영상을 얻기 위한 영상변수로는 TR/TE = 3000 msec/35 msec, FOV, 22 cm × 22 cm; matrix, 64 × 64; NEX, 1; 절편두께, 5 mm; 절편수, 20으로 하고, 이때 사용된 펄스 파형은 경사예코 영상기법(gradient-echo echo planar imaging)을 이용하였다. 획득한 기본적인 MR 데이터를 BOLD-fMRI 영상으로 만들기 위하여 MRI를 통해 실제로 얻은 화소(pixel) 값의 시간에 따른 신호강도 곡선(time-course intensity curve)과 표준 Boxcar 곡선(standard boxcar curve)과의 상관계수 값(correlation coefficient)을 기준으로 하여 통계적으로 처리하여 활성화와 비활성화 상태로 구분한 후, 활성화 상태의 영상들의 총합에서 비활성화 상태 영상들의 총합을 빼서 활성화 지도(activation map)를 얻었다(13).

언어 과제

형태/통사적(morphosyntactic) 지식과 의미적(semantic) 지식을 이용하여 목적 문장을 이해하고 제시된 정보를 사용하여 주어진 문장에 단어를 제시하여 문장을 완성하는 단문 이해(short passage comprehension) 과제를 이용하여 패러다임을 구성하였다. 제1언어(한국어)와 제2언어(영어) 조건으로 각각 10개의 단문을 제시하였으며, 난이도별로 상 4문항, 중 3문항, 하 3문항으로 구성하였다. 예를 들어 영어의 경우 'A clock tells us what ____ it is'를 제시하여 빈칸을 채워 문장을 완성하게 하였고, 같은 방법으로 한국어의 경우 '코끼리는 ____가 길다'를 제시하고 문장을 완성하게 하였으며, 모든 과제는 각각의 언어로 빈칸에 들어갈 단어를 마음속으로 말하게 하였다(Table 2). 한국어 측정 문항은 교과서에 나온 단어와 어휘 및 문장을 고려하여 측정도구를 고안하고 영어 측정문항은 Woodcock-Johnson III Diagnostic Reading Battery (14)에서 발췌하였다. 모든 언어과제는 전남대학교 언어교육연구원에서 제작하였으며, 사전 예비실험을 시행하여 반응

Table 2. The Short Passage Comprehension Task Used in the Experiment

English		Korean
Low level of difficulty		
1	The soup <u>is</u> hot	코끼리는 <u>코</u> 가 길다
2	She fell asleep on the <u>sofa</u>	<u>겨울</u> 에는 눈이 많이 온다
3	The dog walked <u>under</u> the chair	개나리는 <u>노란</u> 색이다
R.T	7 sec	7 sec
Intermediate level of difficulty		
4	A clock tells us what time it is	철수는 강에서 <u>수영</u> 을 한다
5	A is for APPLE. B is for BAT	어머니는 부엌에서 <u>저녁</u> 을 준비하신다
6	A bird has two <u>wings</u>	고래는 <u>바다</u> 에서 산다
R.T	10 sec	7 sec
High level of difficulty		
7	It can go up. It can come <u>down</u>	작은아버지는 아버지의 <u>동생</u> 이다
8	I used my money to but a new sleeping bag. It will be nice and warm when we go <u>camping</u>	울챙이가 크면 <u>개구리</u> 가 된다
9	Chop, chop, chop, went the ax and down fell the tall <u>tree</u>	일곱색깔을 가지고 있는 것은 <u>무지개</u> 이다
10	What is a flood? It' s condition that exists when a river overflows its banks and the <u>water</u> spreads out elsewhere	우리나라에서 가장 큰 섬은 <u>제주도</u> 이다
R.T	20 sec	10 sec

R.T = reaction time

시간 및 난이도를 고려하여 측정문항을 결정하였다.

이 과제들을 일정 휴식기(pause)를 두고 역균형화(counterbalancing) 시켜 제시하였으며, 비디오 파일로 제작한 언어 과제를 자기공명영상 장치 외부에서 프로젝터를 사용하여 촬영실 내에 위치한 반투명 스크린으로 투사시켰다. 실험 참가자는 두부코일 내에 부착된 거울을 통하여 반투명 스크린에 투사되는 영상을 보고 과제를 수행하였으며, 이 과정을 fMRI를 이용하여 측정하였다. 과제의 패러다임은 처음 10초의 휴식기, 61~150초간의 언어과제 수행기, 다시 10초의 휴식기의 세 부분으로 구성되어 있으며 언어과제 수행기는 각각 난이도별로 영어 과제와 한국어 과제가 제시되었다. 한 문항당 배정된 시간은 하, 중, 상 난이도에 따라 영어 과제는 10, 13, 25초였으며, 한국어 과제는 7, 7, 10초였다(Fig. 1). 휴식기에도 fMRI를 얻어 활성화 시기의 fMRI와 비교하였다.

영상 후처리 및 분석

얻어진 데이터의 영상 후처리(post-processing)는 fMRI 분석 소프트웨어인 SPM-8 분석 프로그램(Statistical Parametric Mapping 8, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)을 이용하여 분석하였다. 실험 중에 발생하는 움직임에 의한 오류를 보정하고 표준화된 영상을 얻기 위하여 움직임 보정(motion correction)과 재정렬(realignment) 과정을 거친 후, 개별 데이터들을 표준 뇌 공간으로 정합시키는 정규화(normalization) 과정을 수행하였다. 다음 단계로, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 높이기 위해 Gaussian filter를 이용한 평활화(smoothing) 과정을 거쳐 개인별 자극에 의한 활성화 지도(activation map)를 얻어 이를 화소 단위로 t -test를 시행하였다(13). 이 연구의 경우, 그룹별 분석은 one sample t -test를, 그룹 간 분석에 대해서는 two sample t -test를 시행하였다. Single voxel level에서 유의수준(uncorrected $p < 0.01$ 또는 $p < 0.005$, cluster size > 10)을 기준으로 하여 얻어진 활성화 지도에 대한 표준화된 T1 강조영상으로의 중첩은 MRICron (Chris Rorden, Neuropsychology lab, Columbia SC, USA)을 이용하였다. 이어서 대뇌의 해부학적·기능학적 영역별로 활성화된 영역에 대한 활성화율(activation ratio)과 활성화도(activity)를 구하기 위해서 Quantification of Brain Activation 소프트웨어를 이용하였다. 이때, 활성화율은 대뇌 영역별 총 화소수 중 언어 자극에 대한 활성화수의 비율로써, 두뇌 활성화에 대한 좌우반구 우세도(편재화지수)를 결정하는 데 사용되었으며, 활성화도의 경우는 활성화 영역을 이루는 화소들 중 대뇌 영역별로 뇌 활성화 강도를 최대 t 값으로 나타낸 것이다. 편재화지수는 좌반구에서 활성화된 화소수에서 우반구에서 활성화된 화소수를 빼고 총 활성화된 화소수로 나누어 구하였으며, 편재화 지수가 양(+)의 값이면 좌반구 우세, 음(-)의 값일 경우에는 우반구 우세를 나타낸다.

$$\text{편재화지수(\%)} = \frac{\text{좌반구 활성화 화소수} - \text{우반구 활성화 화소수}}{(\text{활성화된 총화소수})} \times 100$$

Fig. 1. Design paradigm for the visual stimulation of the passage comprehension task.

결과

실험 참가자 20명 모두에서 성공적인 활성화 영상을 얻을 수 있었으며, 전두엽(frontal lobe), 측두엽(temporal lobe), 두정엽(parietal lobe)의 여러 부위에서 통계적으로 유의한 활성화 신호가 나타났다.

그룹별 분석

하 난이도 과제

하 난이도의 영어 과제를 수행할 때 영어구사능력이 높은 군에서는 제2언어 처리에 관여하는 것으로 알려진 중전두회(middle frontal gyrus), 보조운동영역(supplementary motor area), 중심전회(precentral gyrus), 하측두회(inferior temporal gyrus), 방추회(fusiform gyrus), 상두정소엽(superior parietal lobule), 하두정소엽(inferior parietal lobule), 소뇌피질(cerebellar cortex) 등에서 대뇌 활성화가 나타났다. 동일 과제에서 영어구사능력이 낮은 군에서는 더 많은 영역에서 대뇌 활성화가 나타났는데, 중전두회, 하전두회(inferior frontal gyrus), 보조운동영역, 중심전회, 중측두회(middle temporal gyrus), 하측두회, 방추회, 상두정소엽, 하두정소엽, 담창구(globus pallidus), 피각(putamen), 시상(thalamus), 섬엽(insula) 등의 활성화가 관찰되었다.

하 난이도의 한국어 과제에서는 영어구사능력에 관계없이 대뇌 활성화를 보이는 영역이 적게 나타났다. 주로 시각 정보처리와 관계된 후두엽(occipital lobe)의 활성화를 보였다(Fig. 2).

중 난이도 과제

중 난이도의 영어 과제에서 영어구사능력이 높은 군에서는 중심전회, 중심후회(postcentral gyrus) 등에서 활성화를 보였고, 영어구사능력이 낮은 군에서는 중전두회, 하전두회, 보조운동영역, 중심전회, 상측두회(superior temporal gyrus), 중측두회, 하측두회, 방추회, 상두정소엽, 하두정소엽, 담창구, 피각, 미상핵(caudate nucleus), 시상, 섬엽 등에서 활성화를 보였다.

중 난이도의 한국어 과제에서도 영어구사능력에 관계없이 대뇌 활성화를 보이는 영역이 적게 나타났으며 공통적으로 하전두회에서 활성화를 보였다(Fig. 3).

상 난이도 과제

상 난이도의 영어 과제에서, 영어구사능력이 높은 군에서는 중전두회, 하전두회, 방추회 등에서 활성화를 보이고, 영어구사능력이 낮은 군에서는 하전두회, 상측두회, 담창구, 피각, 시상, 섬엽 등에서 활성화가 나타났다.

상 난이도의 한국어 과제에서도 영어구사능력에 관계없이 활성화를 보이는 영역이 적게 나타났으며 공통적으로 하전두회의 활성화가 관찰되었다(Fig. 4).

그룹 간 분석

언어별 분석

영어 과제를 수행할 때 한국어 과제보다 대뇌 활성화가 더 많은 영역에서 높게 나타났으며, 등외측 전전두엽(dorsolateral prefrontal cortex), Broca 영역을 포함한 좌측 전두엽, 좌측 두정측두엽,

Fig. 2. Brain activation map for a direct comparison between the high learning level group (A, C) and the low learning level group (B, D) in the English (A, B) and Korean (C, D) tasks with a low level of difficulty.

우측 보조운동영역, 좌측 중심전회, 좌측 기저핵(basal ganglia) 등에서 활성화가 두드러졌다(Fig. 5, Table 3). 한국어 과제 수행 시 영어 과제보다 더 우월한 대뇌 활성화를 보인 영역은 없었다.

영어구사능력별 분석

영어 과제 수행 시 영어구사능력의 차이에 따라서 활성화 정도가 현저한 차이를 보였다. 즉 영

Fig. 3. Brain activation map for a direct comparison between the high learning level group (A, C) and the low learning level group (B, D) in the English (A, B) and Korean (C, D) tasks with an intermediate level of difficulty.

어구사능력이 높은 군에 비해 영어구사능력이 낮은 군에서 대뇌 활성화 정도가 훨씬 높게 나타났다. 하 난이도의 영어 과제에서, 영어구사능력이 낮은 군에서 높은 군보다 우측 중전두회와 좌측 중측두회에서 활성화가 높게 나타났으며, 중 난이도의 영어 과제에서 영어구사능력이 낮은 군이 높은 군보다 우측 보조운동영역, 좌측 하전두회, 좌측 상측두회, 좌측 중측두회, 우측 두정엽 등에서 활성이 높게 나타났다(Fig. 6, Table 4). 영어구사능력이 높은 군에서 낮은 군보다 더 활성이 높

Fig. 4. Brain activation map for a direct comparison between the high learning level group (A, C) and the low learning level group (B, D) in the English (A, B) and Korean (C, D) tasks with a high level of difficulty.

Fig. 5. Predominant cortical activation areas associated with English comprehension compared to that with Korean comprehension.

게 나타난 영역은 없었다.

과제의 난이도별 분석

과제의 난이도 차이에 따라라도 활성화 정도 차이가 발생하였는데, 하 난이도의 영어 과제보다 중 난이도의 영어 과제에서 대뇌 활성화 정도가 훨씬 높게 나타났으나, 오히려 상 난이도의 영어 과제에서는 영어구사능력에 관계없이 대뇌 활성화 신호가 약하게 발생하였다. 중 난이도의 영어 과제에서 하 난이도의 영어 과제보다 활성화가 더 높게 나타난 영역은 우측 하전두회, 우측 두정측두엽, 피각, 섬엽 등이었다(Fig. 7, Table 5).

고찰

이 연구에서 저자들은 언어처리 과정에 있어서 모국어와 제2언어의 차이점을 비교하고자 하였다. 또한 영어구사능력을 기준으로 높은 군과 낮은 군 간에 대뇌 활성화의 차이를 알아보고, 과제 난이도에 따라서 어떤 활성화 양상의 차이를 보이는지 알아보하고자 하였다.

영어 과제 수행 시 한국어 과제보다 등외측 전전두엽, 보조운동영역, 중심전회, 좌측 기저핵, 좌측 두정측두엽 및 후두엽 등에서 전반적으로 더 많은 활성화를 보였다. 등외측 전전두엽은 전반적인 집행기능, 언어전환, 언어억제 기전에 관여하는 것으로 알려져 있다(7, 8, 15, 16). 따라서, 초기 제2언어 습득자의 경우 제2언어의 동원에 있어서 제1언어(모국어)의 통제가 불가피하며, 이와 관련된 영역의 활성화가 나타나는 것으로 생각해 볼 수 있다. 보조운동영역과 중심전회는 전운동영역(premotor area)으로, 음운 및 음성으로서의 언어 산출 단계와 복잡한 조음과정에 관여하는 것으로 생각된다(17, 18). 제2언어의 생성은 모국어에 비해 자동화가 이루어지지 않아 구음 및 조음 과정에 위와 같은 영역들이 먼저 활성화가 일어나는 것으로 생각해볼 수 있다. 좌측 기저핵에 활성화가 증가된 것은 제2언어 어휘를 선택함에 있어 제1언어의 간섭을 억제하기 위한 것으로 생각되며(15), 그 외 구음 및 조음과정의 조정에도 관여하는 것으로 생각된다(18, 19). 좌측 두정측두엽

Table 3. Brain Regions with Predominant Activity during English Comprehension Compared to that during Korean Comprehension

Anatomical Area	Laterality (%)	Maximum t-Value	MNI Coordinates		
			X	Y	Z
Superior frontal gyrus	-16.8	3.76	30	58	24
Middle frontal gyrus	2.51	3.96	42	26	44
Inferior frontal gyrus	68.12	3.66	-46	32	23
Supplementary motor area	-49.37	3.13	6	28	58
Precentral gyrus	93.07	3.52	-32	-24	52
Superior temporal gyrus	76.83	4.30	-46	-38	23
Middle temporal gyrus	83.62	4.48	44	-72	-4
Inferior temporal gyrus	92.13	4.37	-52	-72	-4
Fusiform gyrus	11.54	6.30	-30	-54	-10
Superior parietal gyrus	77.31	4.05	-42	-42	56
Inferior parietal gyrus	100	4.24	-50	-34	37
Supramarginal gyrus	96.18	4.44	-48	-36	26
Angular gyrus	82.77	3.70	66	-40	24
Precuneus	7.56	3.87	20	-56	6
Postcentral gyrus	100	3.63	-42	-39	58
Superior occipital gyrus	-20.36	3.57	-26	-84	21
Middle occipital gyrus	57.96	4.95	-40	-82	2
Inferior occipital gyrus	-26.88	4.72	36	-69	-9
Lingual gyrus	-8.68	5.65	-27	-54	-8
Cuneus	-41.32	3.05	10	-98	8
Calcarine gyrus	-29.15	3.93	12	-66	12
Hippocampus	33.65	4.12	-30	-40	-3
Parahippocampal gyrus	40.9	4.69	-32	-43	-6
Posterior cingulate gyrus	12.56	3.81	-8	-42	20
Median cingulate gyrus	-29.16	3.67	11	-26	34
Putamen	100	3.21	-30	-16	-4
Globus pallidus	81.12	3.24	-18	-7	0
Head of caudate nucleus	18.92	3.34	-16	-6	19
Body of caudate nucleus	94.74	3.17	-14	-6	22
Thalamus	51.72	3.56	-14	-28	8
Insula	100	3.14	-40	-16	4

MNI = Montreal Neurological Institute

은 전반적인 언어적 기능에 관계된다고 생각되며(20, 21), 후두엽 및 방추회는 어휘와 관련된 형태와 의미 정보를 처리하여, 시각적으로 제시된 정보를 음운 형태로 전환시키는 역할을 한다고 알려져 있다(22). 이와 같이 제2언어를 사용할 때 초기 습득자의 뇌에서는 모국어의 전통적인 언어처리 영역보다 좀 더 광범위한 영역에서 활성화가 일어나게 되는데, 이는 언어처리 과정에서 부족한 언어지식을 보완하기 위해 언어중추 외 다른 기능들이 개입되는 것으로 해석할 수 있겠다.

우리 연구에서는 제2언어(영어) 구사능력 차이에 따른 대뇌 활성화 정도도 의미 있는 차이를 보

Fig. 6. Brain areas of greater activation in the low learning level group compared to that in the high learning level group for the English passage comprehension tasks with low (A) and intermediate (B) levels of difficulty. RAO = right anterior oblique

였다. 언어구사능력이 높을수록 대뇌 활성화 영역은 감소하는 경향을 보였으며, 특히 전전두엽 피질의 활성화가 감소하는 소견을 보였다. 이 영역은 의도적으로 주의 집중을 요하거나 판단을 요구하는 인지과정에 관여하는 영역으로, 따라서 언어 유창성이 높아질수록 언어 통제기전이 좀 더 효율적으로 일어나게 됨을 의미하는 것으로 생각된다(14, 23, 24). 유창성이 낮은 군에서는 전반적으로 전두측두엽 피질에서 활성화가 더 많이 나타나며, 이와 같은 차이는 앞선 제2언어와 모국어의 비교에서와 마찬가지로 인지 통제 기능, 언어 유창성 및 운동제어 능력의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있겠다(24, 25). 중 난이도 및 하 난이도의 영어 과제 모두에서 공통적으로 차이를 보였던 좌측 후방 중측두회는 의미 추출 및 이해와 관계된 영역으로(26, 27), 영어구사능력이 낮은 군에서 과제 난이도와 관계없이 이 부위에 활성화가 더 많이 나타난 것은 제2언어의 의미 파악 및 이해에 상대적으로 신경자원 요구도가 더 높기 때문으로 추측된다.

우리 연구에서, 과제의 난이도 차이에 따라라도 뇌의 활성화 정도 차이가 발생하였는데, 하 난이도의 영어 과제보다 중 난이도의 영어 과제에서 대뇌 활성화 정도가 더 높게 나타난 영역으로는 우측 하전두회, 우측 두정측두엽, 우측 피각, 우측 섬엽 등이 있었다. 특이한 점은 차이를 보인 영역들 모두에서 우뇌의 활성화가 두드러졌다는 것인데, 이는 좌뇌가 대부분 언어적 기능을 대표하는

Table 4. Brain Regions with Predominant Activity in the Low LL Group Compared to that in the High LL Group during the English Passage Comprehension Task with Low and Intermediate Levels of Difficulty

Anatomical Area	Laterality (%)	Maximum t-Value	MNI Coordinates		
			X	Y	Z
Low level of task difficulty (low LL > high LL)					
Middle frontal gyrus	-100	3.15	46	46	-8
Middle temporal gyrus	100	3.38	-66	-32	-8
Intermediate level of task difficulty (low LL > high LL)					
Superior frontal gyrus	-92.14	3.95	9	31	52
Inferior frontal gyrus	79.92	3.90	-52	21	20
Supplementary motor area	-75.89	3.74	8	30	51
Superior temporal gyrus	19.85	3.75	-58	-40	10
Middle temporal gyrus	100	3.63	-57	-41	10
Superior parietal gyrus	-44.35	4.05	34	-50	58
Inferior parietal gyrus	-85.51	4.41	58	-46	39
Supramarginal gyrus	-31.69	4.69	60	-44	40
Angular gyrus	49.26	3.71	58	-48	37
Precuneus	-37.83	4.23	14	-60	62
Postcentral gyrus	49.57	3.72	18	-42	76
Superior occipital gyrus	-100	3.78	20	-74	34
Middle occipital gyrus	-57.8	3.66	40	-77	-2
Median cingulate gyrus	-98.29	3.21	11	-46	55
Insula	-17.89	3.52	-44	-13	2

LL = learning level, MNI = Montreal Neurological Institute

Fig. 7. Brain areas of greater activation during the English task with an intermediate level of difficulty compared to that with a low level of difficulty.

것은 명백한 사실이지만, 우뇌도 구문 복잡성에 상당히 관여하기 때문인 것으로 생각된다(22, 28). 그러므로 난이도가 더 높은 과제에서 대뇌 활성화 정도가 우뇌에서 높았다는 점은 대뇌 언어처리 영역이 좌뇌에 고정되어 있다기보다 과제 난이도에 따라 우뇌의 여러 영역들이 가변적으로 인지 과정에 관여하게 되는 것이라 해석할 수 있겠다.

Table 5. Brain Regions with Predominant Activity during the English Comprehension Task with an Intermediate Level of Difficulty Compared to that with a Low Level of Difficulty

Anatomical Area	Laterality (%)	Maximum t-Value	MNI Coordinates		
			X	Y	Z
Inferior frontal gyrus	-100	3.43	60	18	16
Superior temporal gyrus	-100	3.27	52	-24	-5
Middle temporal gyrus	-99.89	3.77	56	-60	24
Inferior temporal gyrus	-100	3.24	43	-10	-26
Fusiform gyrus	-100	3.33	42	-10	-26
Superior parietal gyrus	-100	3.95	40	-58	54
Inferior parietal gyrus	-97.62	3.64	44	-55	54
Supramarginal gyrus	-100	3.18	64	-46	26
Angular gyrus	-99.87	3.90	43	-58	54
Postcentral gyrus	-100	3.11	44	-28	62
Middle occipital gyrus	-100	3.81	54	-60	26
Cuneus	-77.14	2.96	1	-88	26
Hippocampus	-100	3.76	37	-8	-20
Putamen	-100	3.29	34	-10	-8
Insula	-100	3.13	43	5	11

MNI = Montreal Neurological Institute

본 연구에서 상 난이도의 영어 과제 수행 시 오히려 대뇌 활성화 정도가 영어구사능력과 관계없이 현저히 감소하였는데 이는 기존의 연구 결과(29-32)나, 우리 연구의 하 난이도와 중 난이도 영어 과제를 비교한 결과와도 일치하지 않는다. 그러나 본 연구 참가자들이 EFL 환경의 초기 습득자 수준의 제2언어 구사능력을 가진 아동임을 고려하였을 때 낮은 활성화를 보였던 원인은 참가자들의 문제 이해 수준이 낮음으로 인하여 발생한 것으로 생각해볼 수 있겠다. 그러므로 대뇌 활성화 정도는 과제 난이도뿐 아니라 참가자들의 과제 이해도 또한 밀접하게 연관이 되는 것으로 생각된다. 그러므로 낮은 대뇌 활성화를 보였을 때, 이는 항상 과제가 참가자들에게 쉬웠음을 의미하는 것이 아니라, 오히려 참가자들이 요구되는 과제 수준에 도달하지 못했음을 의미할 수도 있다. 이는 Hasegawa 등(33)의 연구와도 일치하는 결과이다.

fMRI에서 관찰되는 대뇌 활성화 정도가 뇌 용적, 회백질 두께, 백질 섬유 연결성 및 통합성 등의 구조적 변화에 미치는 영향과 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. Brodtmann 등(34)은 뇌 일부분의 활성화가 전반적인 뇌 용적 증가와 연관이 있다고 하였으며, Maguire 등(35)은 뇌의 특정영역에 해당하는 기능의 수행을 통해 그 부위의 국소적인 회백질 용적을 증가시킬 수 있음을 보고하였다. 또한 이러한 뇌 용적의 증가는 상대적으로 높은 지능지수 및 집행 기능을 포함한 다양한 인지 기능의 향상과도 관련되어 있다고 보고되고 있다(36-39). 따라서 뇌의 가소성이 가장 높은 시기의 아동에게 뇌의 활성화를 최대로 이끌어낼 수 있는 적정 수준의 제2언어(영어) 학습은 뇌의 전반적인 용적 증가 및 지능 향상에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 생각해볼 수 있다. 또한 좀 더 넓은 관점에서, 뇌 용적 감소를 보일 수 있다고 알려져 있는 간질(40), 주의력결핍 과다행동장애(41, 42), 폐쇄성 수면 무호흡증(43), 품행장애(44) 등의 질환을 앓고 있는 환아에서 뇌 용적 보존

및 인지 기능의 저하 예방, 또는 외상이나 뇌 허혈 등으로 인해 다양한 정도의 뇌 기능 저하를 겪고 있는 환아들의 재활의 수단으로 적정 수준의 제2언어(영어) 학습이 가질 수 있는 임상적 유용성이 있을 것으로 기대되며, 이에 대해서도 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이 연구의 제한점으로는 먼저 3D T1WI를 얻어 영상 후처리에 사용하지 않았다는 점, 그룹별 분석 및 그룹 간 비교에서 다중비교분석(multiple comparison)을 사용하지 않았다는 점, 영어 학습 수준에 대한 평가가 정밀하게 시행되지 않았다는 점, 소아를 대상으로 한 연구로 행동 통제 및 과제 수행이 정확하게 이루어지지 않았을 가능성이 있다는 점, 또한 과제 수행 결과에 대한 평가가 동시에 이루어지지 않은 점이 있다. 이에 대해서는 앞으로도 많은 연구와 보완이 필요할 것으로 생각된다.

결론적으로, EFL 언어 환경에서 제2언어(영어) 습득 초기 단계에 해당하는 한국어-영어 이중 언어 학습 아동에서 fMRI를 이용하여 제1언어(한국어)와 제2언어(영어)의 정보처리 과정 중에 일어나는 대뇌의 신경 활성화 반응을 분석한 결과, 한국어와 영어 구사에 관련된 대뇌 활성화 영역 및 활성화 정도는 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있었다. 한국어에 비해 영어 과제 정보처리를 수행할 때, 영어구사능력이 상대적으로 낮은 아동에서, 그리고 저 난이도보다 중등도 난이도의 과제를 수행할 때 대뇌 활성화 정도가 훨씬 높게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 실험 참가자의 이해도를 초과하는 고 난이도의 영어 과제를 수행할 때는 오히려 대뇌 활성화도가 낮게 나타남으로써 언어 이해도에 따른 적절한 수준의 제2언어 학습이 중요함을 알 수 있었다. 또한 적절한 수준의 제2언어 학습을 통한 대뇌 활성화 증가는 뇌 용적 증가와 이로 인한 인지 기능 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각되며, 향후 뇌 용적 감소와 관련된 질환을 앓고 있는 환아들의 뇌 기능 저하 예방 혹은 기능 회복을 위한 재활 수단으로서 영어 학습이 가질 수 있는 임상적 유용성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Author Contributions

Conceptualization, Y.W., B.S., J.G.W.; data curation, Y.W., B.S., L.Y.Y.; formal analysis, Y.W., J.G.W., L.Y.Y.; funding acquisition, Y.W.; investigation, L.Y.Y., B.B.H., K.S.K., P.I.; methodology, L.Y.Y., B.B.H., K.S.K.; project administration, Y.W., B.S.; resources, Y.W.; supervision, Y.W.; visualization, L.Y.Y., B.B.H., K.S.K., P.I., J.G.W.; writing—original draft, L.Y.Y.; and writing—review & editing, Y.W., B.S., P.I., J.G.W.

Conflicts of Interest

The authors have no potential conflicts of interest to disclose.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2011-0013870).

REFERENCES

1. European Commission. Special Eurobarometer 386. Europeans and their languages. Available at: http://ec.europa.eu/public_opinion/index_en.htm. Accessed Nov 5, 2018
2. Lenneberg EH. The biological foundations of language. *Hosp Pract* 1967;2:59-67
3. Johnson JS, Newport EL. Critical period effects in second language learning: the influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cogn Psychol* 1989;21:60-99
4. Korean Society of Magnetic Resonance in Medicine. *Magnetic resonance imaging*. Seoul: Ilchokak 2008

5. Chee MW, Caplan D, Soon CS, Sriram N, Tan EW, Thiel T, et al. Processing of visually presented sentences in Mandarin and English studied with fMRI. *Neuron* 1999;23:127-137
6. Illes J, Francis WS, Desmond JE, Gabrieli JD, Glover GH, Poldrack R, et al. Convergent cortical representation of semantic processing in bilinguals. *Brain Lang* 1999;70:347-363
7. Hernandez AE, Martinez A, Kohnert K. In search of the language switch: an fMRI study of picture naming in Spanish-English bilinguals. *Brain Lang* 2000;73:421-431
8. Hernandez AE, Dapretto M, Mazziotta J, Bookheimer S. Language switching and language representation in Spanish-English bilinguals: an fMRI study. *Neuroimage* 2001;14:510-520
9. Kim KH, Relkin NR, Lee KM, Hirsch J. Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 1997;388:171-174
10. Marian V, Spivey M, Hirsch J. Shared and separate systems in bilingual language processing: converging evidence from eyetracking and brain imaging. *Brain Lang* 2003;86:70-82
11. Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J, Cappa SF, Villringer A, Perani D. Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron* 2003;37:159-170
12. Hull R, Vaid J. Bilingual language lateralization: a meta-analytic tale of two hemispheres. *Neuropsychologia* 2007;45:1987-2008
13. Cho JM, Ryoo JW, Choi DS, Shin TB, Chung SH, Kim JE, et al. Functional MRI of multilingual subjects. *J Korean Soc Radiol* 2009;61:351-358
14. Woodcock RW, Mather N, Schrank FA. *Woodcock-Johnson III diagnostic reading battery*. Itasca: Riverside Publishing Company 2004
15. Abutalebi J, Green DW. Control mechanisms in bilingual language production: neural evidence from language switching studies. *Lang Cogn Process* 2008;23:557-582
16. Rodriguez-Fornells A, De Diego Balaguer R, Münte TF. Executive control in bilingual language processing. *Lang Learn* 2006;56:133-190
17. Braun AR, Guillemin A, Hosey L, Varga M. The neural organization of discourse: an H₂ ¹⁵O-PET study of narrative production in English and American sign language. *Brain* 2001;124:2028-2044
18. Wise RJ, Greene J, Büchel C, Scott SK. Brain regions involved in articulation. *Lancet* 1999;353:1057-1061
19. Booth JR, Wood L, Lu D, Houk JC, Bitan T. The role of the basal ganglia and cerebellum in language processing. *Brain Res* 2007;1133:136-144
20. Poeppel D, Hickok G. Towards a new functional anatomy of language. *Cognition* 2004;92:1-12
21. Friederici AD. Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends Cogn Sci* 2002;6:78-84
22. Keller TA, Carpenter PA, Just MA. The neural bases of sentence comprehension: a fMRI examination of syntactic and lexical processing. *Cereb Cortex* 2001;11:223-237
23. Sakai KL, Miura K, Narafu N, Muraishi Y. Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Cereb Cortex* 2004;14:1233-1239
24. Chee MW, Hon N, Lee HL, Soon CS. Relative language proficiency modulates BOLD signal change when bilinguals perform semantic judgments. Blood oxygen level dependent. *Neuroimage* 2001;13:1155-1163
25. Hernandez AE. *The bilingual brain*. Oxford: Oxford University Press 2013
26. Davey J, Thompson HE, Hallam G, Karapanagiotidis T, Murphy C, De Caso I, et al. Exploring the role of the posterior middle temporal gyrus in semantic cognition: integration of anterior temporal lobe with executive processes. *Neuroimage* 2016;137:165-177
27. Noonan KA, Jefferies E, Visser M, Lambon Ralph MA. Going beyond inferior prefrontal involvement in semantic control: evidence for the additional contribution of dorsal angular gyrus and posterior middle temporal cortex. *J Cogn Neurosci* 2013;25:1824-1850
28. Just MA, Carpenter PA, Keller TA, Eddy WF, Thulborn KR. Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 1996;274:114-116
29. Carpenter PA, Just MA, Keller TA, Eddy W, Thulborn K. Graded functional activation in the visuospatial system with the amount of task demand. *J Cogn Neurosci* 1999;11:9-24
30. Grasby PM, Frith CD, Friston KJ, Simpson J, Fletcher PC, Frackowiak RS, et al. A graded task approach to the functional mapping of brain areas implicated in auditory-verbal memory. *Brain* 1994;117:1271-1282
31. Rypma B, Prabhakaran V, Desmond JE, Glover GH, Gabrieli JD. Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *Neuroimage* 1999;9:216-226
32. Fridriksson J, Morrow L. Cortical activation and language task difficulty in aphasia. *Aphasiology* 2005;19:

239-250

33. Hasegawa M, Carpenter PA, Just MA. An fMRI study of bilingual sentence comprehension and workload. *Neuroimage* 2002;15:647-660
34. Brodtmann A, Puce A, Darby D, Donnan G. Regional fMRI brain activation does correlate with global brain volume. *Brain Res* 2009;1259:17-25
35. Maguire EA, Gadian DG, Johnsrude IS, Good CD, Ashburner J, Frackowiak RS, et al. Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2000;97:4398-4403
36. Narr KL, Woods RP, Thompson PM, Szeszko P, Robinson D, Dimtcheva T, et al. Relationships between IQ and regional cortical gray matter thickness in healthy adults. *Cereb Cortex* 2007;17:2163-2171
37. Manard M, Bahri MA, Salmon E, Collette F. Relationship between grey matter integrity and executive abilities in aging. *Brain Res* 2016;1642:562-580
38. Takeuchi H, Taki Y, Nouchi R, Yokoyama R, Kotozaki Y, Nakagawa S, et al. Global associations between regional gray matter volume and diverse complex cognitive functions: evidence from a large sample study. *Sci Rep* 2017;7:10014
39. 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
40. Caplan R, Levitt J, Siddarth P, Wu KN, Gurbani S, Shields WD, et al. Language and brain volumes in children with epilepsy. *Epilepsy Behav* 2010;17:402-407
41. Narr KL, Woods RP, Lin J, Kim J, Phillips OR, Del'Homme M, et al. Widespread cortical thinning is a robust anatomical marker for attention-deficit/hyperactivity disorder. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2009;48:1014-1022
42. Batty MJ, Liddle EB, Pitiot A, Toro R, Groom MJ, Scerif G, et al. Cortical gray matter in attention-deficit/hyperactivity disorder: a structural magnetic resonance imaging study. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2010;49:229-238
43. Joo EY, Tae WS, Lee MJ, Kang JW, Park HS, Lee JY, et al. Reduced brain gray matter concentration in patients with obstructive sleep apnea syndrome. *Sleep* 2010;33:235-241
44. Rogers JC, De Brito SA. Cortical and subcortical gray matter volume in youths with conduct problems: a meta-analysis. *JAMA Psychiatry* 2016;73:64-72

한국어-영어 이중 언어 학습 아동에서 제2언어 습득과 연관된 대뇌 영역 활성화 기전

이윤영¹ · 백병현¹ · 김슬기² · 박일우¹ · 정광우¹ · 백승현³ · 윤 웅^{1*}

목적 제1언어(한국어)~제2언어(영어) 이중 언어 학습 아동에서 기능적 자기공명영상(functional MRI; 이하 fMRI)을 이용하여 제2언어 습득과 연관된 대뇌 활성화 기전을 알아보고자 하였다.

대상과 방법 영어를 배운 적이 있는 초등학교 4~6학년(11~13세) 학생 20명을 대상으로 하였다. 상, 중, 하 난이도로 구분된 단문 이해 과제를 각각 한국어와 영어로 수행하는 동안 fMRI 데이터를 획득하였다. 언어별, 언어구사능력별, 난이도별로 나타난 대뇌 활성화 신호를 각각 비교 분석하였다.

결과 영어 과제 수행 시 한국어 과제보다 등외측 전전두엽, 보조운동영역, 중심전회, 좌측 기저핵, 좌측 두정측두엽 및 후두엽 등에서 더 높은 활성화를 보였으며, 언어구사능력이 낮을수록 전전두엽을 포함한 전두측두엽 피질의 활성이 높게 나타났다. 중 난이도의 영어 과제에서 하 난이도의 과제보다 우측 하전두회, 우측 두정측두엽 등에서 더 높은 활성화를 보였으나, 상 난이도의 과제 수행 시 대뇌 활성 영역 및 정도가 현저히 낮게 나타났다.

결론 한국어에 비해 영어 과제를 수행할 때, 영어구사능력이 낮은 아동에서, 중 난이도의 영어 과제를 수행할 때 대뇌 활성화 범위가 넓고 정도도 높게 나타났다. 그러나 시험자의 이해도를 초과하는 과제 수행 시에는 대뇌 활성이 오히려 낮게 나타남으로써, 적절한 수준의 제2언어 학습이 중요함을 알 수 있었다.

¹전남대학교 의과대학 영상의학교실,

²화순전남대학교병원 영상의학과,

³전남대학교 인문대학 영어영문학과