

# White Matter Connectivity as a Neurophysiological Mechanism for Auditory Comprehension in the Neurologically Normal and Impaired

Seung Jin Lee<sup>a</sup>, Soo Jung Lee<sup>a</sup>, Ji Yeon Song<sup>a</sup>, Ga Young Kim<sup>a</sup>, HyangHee Kim<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Graduate Program in Speech-Language Pathology, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Department of Rehabilitation Medicine & Research Institute of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Correspondence: HyangHee Kim, PhD

Graduate Program in Speech-Language Pathology,  
Yonsei University, 50-1 Yonsei-ro, Seodaemun-gu,  
Seoul 120-749, Korea  
Tel: +82-2-2228-3900  
Fax: +82-2-2227-7984  
E-mail: h.kim@yonsei.ac.kr

Received: December 29, 2014

Revised: January 29, 2015

Accepted: February 3, 2015

**Objectives:** As emerging brain imaging technologies enable research on white matter connectivity, studies have shown the importance of white matter tracts pertaining to auditory comprehension. The present study aimed to review the recent studies by looking at the relationship between white matter connectivity and language comprehension in several populations. **Methods:** A literature search identified 19 studies on the relationship between white matter connectivity and auditory comprehension in normal adults and patients with stroke and primary progressive aphasia. **Results:** Previous studies were analyzed and discussed in terms of phonological, semantic, and syntactic comprehension. Results indicated that dorsal tracts are mainly involved in phonological and syntactic comprehension, while ventral tracts in semantic and syntactic comprehension. In both normal and impaired groups, the arcuate fasciculus is involved in phonological processing, while the uncinate fasciculus, inferior longitudinal fasciculus, extreme capsule, fornix, and arcuate fasciculus are important in semantic comprehension. In syntactic comprehension, the superior longitudinal fasciculus and arcuate fasciculus play an important role. Auditory comprehension problems are affected by the extent to which white matter tracts are damaged. Several limitations of the previous research were also discussed. **Conclusion:** Further studies on the relationship between white matter connectivity and auditory comprehension need to consider such factors as participants, tasks, and scoring systems.

**Keywords:** White matter, Connectivity, Auditory comprehension

청각적 이해를 다룬 신경해부학적 연구들은 전통적으로 베르니케 영역과 같은 우성 반구의 특정한 '피질(gray matter)'에 집중되어 왔다(Dronkers, Wilkins, Van Valin, Redfern, & Jaeger, 2004; Price, 2010; Turken & Dronkers, 2011). 이러한 맥락에서, 신경언어장애 분야에서 피질 병변으로 인한 장애들이 가장 주요하게 다루어지며, 백질(white matter) 병변에 의한 언어장애는 상대적으로 흔히 지엽적인 문제로 간주되어 왔다(Tomić et al., 2009). 19세기 후반 리히타임은 베르니케-리히타임 실어증 도식을 제안함으로써 뇌 영역 간 연결의 중요성을 강조한 바 있다(Kim, 2012). 현대에 이르러서는 뇌영상 기술이 발달됨에 따라 백질 경로의 연결성(connectivity)에 대한 새로운 조망과 기존 언어 이해 모델의 검증이 가능해지면서,

백질 경로는 언어 이해와 관련된 중요한 요소로 주목 받게 되었다(Dronkers et al., 2004; Price, 2010).

대뇌에서 청각적 이해에 기여하는 백질 경로는 주로 전두 피질과 측두 피질을 연결한다(Gierhan, 2013). 이 경로는 크게 등쪽(dorsal) 경로와 배쪽(ventral) 경로로 나뉜다(Friederici, 2012). 등쪽 경로는 다시 직접 경로(direct pathway)와 간접 경로(indirect pathway)로 구분된다. 직접 경로는 전두 피질과 측두 피질을 직접 연결하는 활모양섬유다발(arcuate fasciculus)을 일컫는다. 간접 경로는 두정 피질을 경유하여 전두 피질과 측두 피질을 연결하는 상종단다발(superior longitudinal fasciculus)이다. 배쪽 경로에는 갈고리다발(uncinate fasciculus), 하전두-후두다발(inferior fronto-occipital fas-

ciculus), 하중단다발(inferior longitudinal fasciculus), 중중단다발(middle longitudinal fasciculus)이 있다(Gierhan, 2013). 갈고리다발은 측두엽을 전두엽에, 하전두-후두다발은 후두엽을 전두엽에, 하중단다발과 중중단다발은 후두엽과 두정엽을 각각 측두엽, 전두엽에 연결시킨다(Hixon, Weismer, & Hoit, 2014). 각 경로의 대략적인 위치는 Figure 1에 제시되어 있다.

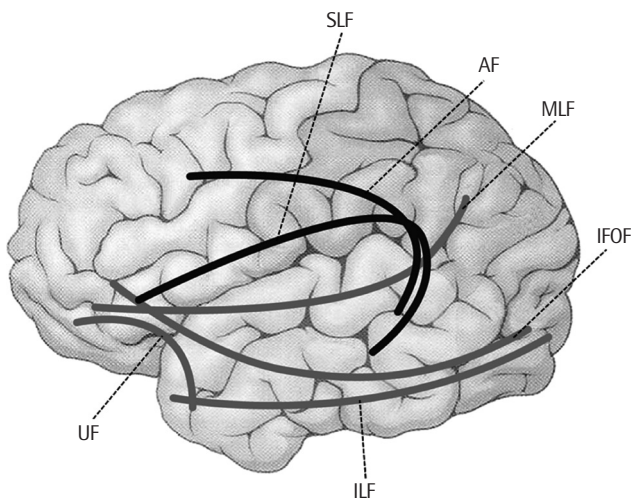
청각적 이해에 중요한 여러 백질 경로의 연결성을 영상화, 수량화하는 것은 최근에서야 비로소 가능해졌다(Bucur et al., 2008). 전통적인 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI)은 백질과 회백질 사이의 구조적인 차이를 잘 보여주지만, 이들을 구성하는 섬유들(fibers)의 경로에 관한 정보를 제공하지 않는다(Hiwatashi, Zhong, Ekholm, & Westesson, 2006). 백질은 회백질에 비해 구성하고 있는 물분자의 비등방성(anisotropy)이 높게 나타난다. 비등방성이란 방향에 따라 물리적 특성이 다르게 나타나는 성질로, 백질 내 물분자는 축삭에 대하여 직각인 경우보다 축삭에 평행한 경우 확산이 더 잘되는 비등방성을 보이게 된다(Chenevert, Brunberg, & Pipe, 1990). 이러한 원리를 이용하여 백질 경로의 구조적 정보를 제공하는 영상기법이 확산텐서영상(diffusion tensor imaging, DTI)이다(Gierhan, 2013). DTI의 장점은 해부학적 정보를 정량적으로 수치화할 수 있다는 것이다. 그 예로는 방사 확산성(radial diffusivity, RD), 평균 확산성(mean diffusivity, MD), 분할 비등방도(fractional anisotropy, FA) 등이 있다(Basser, Mattiello, & LeBihan, 1994). 물분자들의 확산에 대한 방향성 정도를 의미하는 FA는 수치가 클수록 축삭의 조직화 정도와 수초화된 신경섬유(myelinated fibers)

의 밀도가 높다는 것을 의미한다(Alexander, Lee, Lazar, & Field, 2007; Assaf & Pasternak, 2008). 일반적으로 노화가 되면 축삭과 수초가 감소되며, 이로 인하여 세포 외 공간이 확장되어 MD는 증가하고 FA는 감소한다(Bhatnager, 2013; Pfefferbaum et al., 2000). 또한, 정상인에 비해 알츠하이머 치매(Alzheimer's dementia, AD)나 경도인지장애(mild cognitive impairment, MCI) 환자는 측두엽 백질부의 MD가 증가한다(Fellgiebel et al., 2004; Medina et al., 2006).

휴식 상태(resting state)에서 백질 경로의 기능적 자기공명영상(functional magnetic resonance imaging, fMRI)은 특정 과제를 수행하는 동안의 연결성을 설명하는 토대가 되므로 백질 경로 연구에서 중요한 수단이다(Harvey, Wei, Ellmore, Hamilton, & Schnur, 2013). 백질 경로의 활성 정도가 증가하면 산소를 포함하는 헤모글로빈의 농도가 증가하면서 혈액산화수준(blood oxygenation level dependent, BOLD)의 변화에 의한 자기 신호의 차이를 만든다(Macdonell et al., 1999). 이러한 자기 신호의 차이에 의해 특정 과제에 따라 활성화되는 뇌 영역이 어느 부위인가를 확인할 수 있다(Hampson, Peterson, Skudlarski, Gatenby, & Gore, 2002; Harvey et al., 2013).

청각적 이해에 대한 연구에서 백질 경로가 중요하게 고려되어야 할 필요성은 다음의 두 가지 점에서 찾을 수 있다. 첫째, 청각적 이해의 과정에서 말소리 지각, 단어 이해, 문장 이해 등 각각의 단계마다 서로 다른 백질 경로가 기여한다는 점이다. 말소리는 상측두이랑(superior temporal gyrus)에서 자체적으로 음향학적, 음운론적으로 분석되고 처리된다(Friederici, 2012). 이에 반해, 단어 이해 단계 이후부터는 음운론적 입력이 의미 부분과 연결이 되어야 하므로, 배쪽 백질 경로가 관여한다(Friederici, 2012). 한편, 문장의 의미를 이해하는 데에는 우성 반구의 등쪽 백질 경로가 주된 역할을 한다(Wilson et al., 2011). 둘째, 청각적 이해를 돕는 여러 시청각적 단서들(예: 운율, 손 제스처, 입술 움직임, 얼굴 표정 등)을 주어진 청각적 자극의 음향학적인 정보와 통합하기 위해서도 백질을 경유한 피질 간의 원활한 연결이 매우 중요하다는 것이다(Price, 2010).

이러한 필요성을 근간으로 백질 연결성은 정상인에서뿐만 아니라, 다양한 환자군의 청각적 이해 관련 연구에서도 고려되고 있다(Friederici, 2012). 전통적인 실어증 분류에서는 전도실어증(conduction aphasia), 연결피질운동(transcortical motor) 및 연결피질 감각(transcortical sensory) 실어증, 혼합초피질실어증(mixed transcortical aphasia) 등이 대뇌연결성과 관련된 실어증 유형이라 할 수 있다(Bhatnager, 2013). 또한, AD, 혈관성 치매(vascular dementia, VD), 원발성 진행성 실어증(primary progressive aphasia, PPA)과 같은 퇴행성 뇌신경 질환을 다룬 연구들에서, 피질 위축과 더불어



**Figure 1.** Dorsal vs. ventral streams of white matter for auditory comprehension. AF=arcuate fasciculus; IFOF=inferior fronto-occipital fasciculus; ILF=inferior longitudinal fasciculus; MLF=middle longitudinal fasciculus; SLF=superior longitudinal fasciculus; UF=uncinate fasciculus.

백질 경로의 퇴화가 보다 광범위하게 나타난다(Mahoney et al., 2013). PPA의 하위 유형 가운데 비유창형(non-fluent variant)은 좌반구 상 종단다발의 퇴화가 특징적이며, 의미형(semantic variant)은 하중 단다발 및 갈고리다발의 퇴화가 특징적이다(Schwindt et al., 2013). 발화부족형(logopenic variant)은 등쪽 및 배쪽 경로 모두에서 퇴화가 나타나며, 특히 측두-두정엽 부위가 두드러지는데 이는 AD의 백질 손상과 유사한 양상이다(Acosta-Cabronero et al., 2011).

백질 경로를 살펴본 많은 연구들은 세부적인 연구설계에 있어서 서로 다른 점이 많다. 가령, 언어처리의 단계(예: 음운론적, 의미론적, 통사론적 처리), 언어 이해 과제(예: 듣고 이해하여 그림 고르기, 질문에 대답하기), 자극의 단위(예: 단어, 문장), 반응에 대한 종속 변수의 형태(예: 정확도, 반응시간), 백질의 뇌영상(예: DTI, fMRI)에 대한 분석 방법 등에서 차이가 난다. 그러나, 이러한 차이점들을 고려하여 백질 경로의 연결성이 언어 이해 능력과 어떻게 관련되는지를 종합적, 비판적으로 살펴본 연구는 부족한 실정이다. 이와 더불어 각 환자군 간에 언어 이해 장애의 양상을 통합적으로 비교해 본 연구 또한 미진하다.

이에, 본 종설에서는 대뇌백질 연결성이 언어 이해 처리과정과 어떻게 관련되는지를 조망함으로써 대뇌백질이 청각적 이해에서 담당하는 역할과 대뇌백질이 손상될 때 언어 이해에 미치게 되는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 통해 얻을 수 있는 기대효과는 다음과 같다. 첫째, 과제나 종속변수의 형태에 대한 종합적인 검토를 통하여 연구 방법에 대한 최적의 안을 제시할 수 있다. 둘째, 평가에 있어서 임상적으로 등한시할 수 있는 백질 손상 환자에게도 체계적이고 정확한 검사가 필요하다는 데 대한 이론적 근거를 마련할 수 있다. 셋째, 치료에 있어서 백질 손상 환자를 대상으로 언어 재활을 시행할 때 근거기반중재(evidence-based practice)의 토대를 제공할 수 있다. 본 종설의 구체적인 연구문제는 다음과 같다.

첫째, 청각적 이해의 각 처리과정에 따라 어떠한 백질 경로가 관여하는가?

둘째, 정상 및 뇌신경 질환군에 따라 어떠한 백질 경로가 청각적 이해에 관여하는가?

셋째, 언어 이해 처리과정에 따라 각 연구에서 어떠한 연구대상, 과제, 종속변수의 형태가 이용되는가?

## 연구 방법

미국 국립 의학도서관의 검색엔진인 'PubMed'를 통하여 문헌을 수집하였다. 핵심어로는 'white matter, auditory comprehension, speech, language, connectivity' 등을 조합하였다. 검색된 문헌들의

참고문헌과 개별 학술 DB의 연관 문헌들을 선별하였고, 특정 대뇌 피질의 병변이 아닌 백질 경로의 연결성에 대한 연구들 중 최근 10년 동안 이루어진 연구로 국한하여 총 19편의 문헌이 확정되었다.

구체적인 문헌 선정기준은, (1) 언어 이해 처리과정(음운론, 의미론, 통사론) 측면에서 한 가지 이상의 언어 과제를 포함하며, (2) fMRI 혹은 DTI 분석을 통하여 백질 경로의 기능적 혹은 구조적 연결성을 측정하고, (3) 정상군 혹은 뇌신경 질환군을 포함하되, 뇌신경 질환군은 뇌졸중, 기억장애 및 AD, VD, PPA의 퇴행성 뇌신경 질환으로 제한하였고, (4) 대상자의 연령은 성인(만 18세 이상)에 국한하며, (5) 영어로 작성된 문헌만 포함하였으나 연구 과제에 사용된 언어 유형(영어, 독일어, 노르웨이어 등)에는 제한을 두지 않았다. 단, 예외적으로, 백질 경로의 연결성을 다루지는 않았으나 MRI 분석을 통하여 백질의 손상 정도와 언어 이해와의 관련성을 직접적으로 다룬 연구 세 편(Giovannetti et al., 2008; Pillay, Stengel, Humphries, Book, & Binder, 2014; Stenset et al., 2008)은 본 종설에 포함하였다.

## 연구 결과

언어 이해의 과정은 음운론적, 의미론적, 그리고 통사론적 처리 과정을 거친다. 백질 경로와 언어 이해의 연관성을 정확하게 파악하기 위해서는 각 하위 처리과정의 세부 내용과 함께 여러 백질 경로가 연결하고 있는 언어 중추들의 기능을 함께 고려하여야 한다. 이에, 본 종설에서는 각 연구 결과들을 위의 세 가지 하위 처리과정의 측면으로 나누어 기술하고자 한다. 그에 앞서 선행연구들의 연구대상, 연령대, 언어, 과제, 청각적 이해와 관련된 백질 경로들을 Table 1에 정리하여 제시하였다. 과제에 대한 상세한 설명은 각 하위 처리과정 단락에서 기술되었다.

### 음운론적(phonological) 측면

음운이란 말의 뜻을 구별하게 해주는 소리의 가장 작은 단위이다. 음운론적 처리과정은 청각적 자극이 청자의 모국어 음운체계에 부합하느냐의 여부에 따라 그 처리가 이루어지거나 혹은 이루어지지 않을 수 있다. 이는 자극이 의미가 없는 비단어(pseudo-word)일지라도 마찬가지이며, 자극의 길이는 단어 혹은 문장이다. 따라서, 모국어 음운으로 이루어진 청각적 자극과 그렇지 않은 청각적 자극(예: 역전 발화)을 대비시킴으로써 음운론적 처리과정에서 활성화되는 백질 경로를 확인할 수 있다. 여기서 역전 발화(reversed speech)란 발화를 거꾸로 재생하여 음운론적, 의미론적 정보가 사라진 형태를 일컫는다. 구체적인 과제로는 단어 혹은 비단어를 듣

**Table 1.** White matter tracts pertaining to auditory comprehension

Processing stage	Study/language	Group	Age (yr)			Auditory comprehension tasks	White matter tracts pertaining to auditory comprehension		
			M	SD	Range				
Phonological processing	Saur et al. (2010) German	N	34	-	18-71	Sentence-end identifying task (pseudo vs. reversed sentence)	Dorsal Ventral	Lt. SLF, Lt. AF None	
	Rolheiser et al. (2011) English	S	57.5	-	34-76	CSLB phonological relatedness	Dorsal Ventral	Lt. AF None	
	Pillay et al. (2014) English	S	58.8	-	28.1-84.4	Rhyme-matching task		Caudal area of white matter in posterior Sylvian fissure	
Semantic processing	Saur et al. (2008) German	N	34	-	18-71	Attentive listening to aurally presented pseudo vs. real sentences	Dorsal Ventral	None Lt. EC	
	Saur et al. (2010) German	N	34	-	18-71	Sentence-end identifying task (pseudo vs. real sentence)	Dorsal Ventral	None Lt. EC	
	Wong et al. (2011) English	N	25.9	4.8	-	Sound-to-word learning program	Dorsal Ventral	None Lt. ILF, Lt. EC	
	Breier et al. (2008) English	S	58	11	38-77	WAB: auditory comprehension subtests	Dorsal Ventral	Lt. AF None	
	Rolheiser et al. (2011) English	S	57.5	-	34-76	Property knowledge test		Lt. EC	
	Harvey et al. (2013) English	S	63	-	41-83	Auditory word/picture verification task	Dorsal Ventral	None Lt. UF	
	Agosta et al. (2010) English	svPPA	62.6	-	56-67	PPVT	Dorsal Ventral Others	Lt. AF Lt. ILF CC	
	Rohrer et al. (2010) English	nvPPA lvPPA svPPA	71.8 64.1 62.3	6.8 7.4 9.0	- - -	British Picture Vocabulary Scale	Dorsal Ventral Others	None Lt. ILF, Lt. UF Fornix	
	Galantucci et al. (2011) English	nvPPA lvPPA svPPA	66.6 61.6 62.5	5.24 6.69 7.61	- - -	PPVT	Dorsal Ventral	None Bilateral UF, bilateral ILF (svPPA)	
	Schwindt et al. (2013) English	nvPPA svPPA	65.2 67.6	10.8 7.6	- -	PPVT	Dorsal Ventral	Lt. SLF (svPPA) Lt. UF, Lt. IFOF (svPPA, nvPPA) Lt. ILF (svPPA)	
	Mahoney et al. (2013) English	nvPPA lvPPA svPPA	65.7 67.0 63.4	9.4 6.1 6.7	- - -	British Picture Vocabulary Scale	Dorsal Ventral	Lt. SLF (lvPPA) ILF (svPPA, lvPPA) UF (svPPA, lvPPA, nvPPA)	
	Giovannetti et al. (2008) English	WMAM WMAAs	77.76 80.00	6.13 5.21	- -	BDAE: complex ideation subtests		The extent of WMA was not linked to semantic test scores.	
	Stenset et al. (2008) Norwegian	M	69.7	8.9	40-86	Neuropsychological test: comprehension subtests		Parieto-occipital lesions were associated with comprehension.	
	Syntactic processing	Turken & Dronkers (2011) English	N	-	-	-	CYCLE-R	Dorsal Ventral	Lt. AF Lt. ILF, Lt. IFOF, Lt. MLF
		Antonenko et al. (2013) German	N-o N-y	70.4 26.3	3.2 3.2	- -	Forced-choice sentence-picture matching task	Dorsal Ventral	Lt. SLF Lt. UF
Rolheiser et al. (2011) English		S	57.5	-	34-76	Birkbeck Reversible Sentences		Both ventral and dorsal pathways	
Meyer et al. (2014) German		S	A 46-year-old female			Answering Y/N questions after auditory sentence comprehension	Dorsal Ventral	Lt. AF, Lt. SLF None	
Rohrer et al. (2010) English		nvPPA lvPPA svPPA	71.8 64.1 62.3	6.8 7.4 9.0	- - -	TROG	Dorsal Ventral Others	Lt. AF (nvPPA, lvPPA) Lt. ILF (svPPA) Lt. cingulum (lvPPA) Lt. Fornix (svPPA, lvPPA)	
Wilson et al. (2011) English		nvPPA lvPPA svPPA	- - -	- - -	- - -	Two-alternative, forced-choice sentence-picture matching task	Dorsal Ventral	Lt. AF, Lt. SLF Not related with Lt. ECFS, Lt. UF	

(Continued to the next page)

Table 1. Continued

Processing stage	Study/language	Group	Age (yr)			Auditory comprehension tasks	White matter tracts pertaining to auditory comprehension	
			M	SD	Range			
	Charles et al. (2014) English	nvPPA	67.5	10.1	-	Forced-choice sentence-picture matching task	Dorsal	Lt. SLF (nvPPA)
		lvPPA	66.2	9.3	-		Ventral	Lt. IFOF (lvPPA, nvPPA)
		svPPA	60.9	7.9	-		Others	CC (lvPPA, nvPPA)
	Giovannetti et al. (2008) English	WMAm	77.76	6.13	-	BDAE: Syntactic comprehension subtests	The extent of WMA was linked to syntax test scores.	
		WMAs	80.00	5.21	-			

M=patients with memory impairment; N=normal control group; N-o=normal older adults group; N-y=normal young adults group; lvPPA=logopenic variant PPA; nvPPA=non-fluent variant PPA; svPPA=semantic variant PPA; S=stroke; WMAm=mild white matter alteration; WMAs=moderate to severe white matter alteration; BDAE=Boston Diagnostic Aphasia Examination; CSLB=Centre for Speech; Language and the Brain; CYCLE-R=Curtiss-Yamada Comprehensive Language Evaluation; Receptive Language Test; TROG=Test for Reception of Grammar; AF=arcuate fasciculus; ATR=anterior thalamic radiation; CC=corpus callosum; EC=extreme capsule; IFOF=inferior fronto-occipital fasciculus; ILF=inferior longitudinal fasciculus; MLF=middle longitudinal fasciculus; SLF=superior longitudinal fasciculus; UF=uncinate fasciculus.

고 같은 각운 매칭하기(rhyme-matching, 예: 'shoe'와 각운이 같은 단어는 'crow'와 'knew' 중에서 'knew'), 문장을 듣고 문장 종결 확인하기(sentence-end identifying task), 음운 구성이 유사한 단어들을 듣고 음운론적 관련성(The Centre for Speech, Language and the Brain phonological relatedness; Tyler, Randall, & Marslen-Wilson, 2002) 판단하기 등이 있다. 음운론적 측면을 다룬 연구에 포함된 대상은 성인 정상군(1편)(Saur et al., 2010)과 뇌졸중 환자군(2편)(Pillay et al., 2014; Rolheiser, Stamatakis, & Tyler, 2011)이다.

성인 정상군에서는 백질 경로의 활성화 정도가 제시 자극의 특성에 따라 다르다. 즉, 자극의 길이가 단어 혹은 문장 수준인지, 음운론적 혹은 의미론적 정보가 포함되어 있는지의 여부에 따라 다르다. 가령, 음운론적 정보가 포함된 무의미발화와 음운론적 정보가 사라진 역전 발화를 비교한 결과, 역전 발화에 비해 무의미발화에서 활성화되는 정도가 더 크다. fMRI를 통해 분석한 결과, 음운 처리는 등쪽 경로인 상중단다발과 활모양섬유다발을 통해 이루어진다(Saur et al., 2010).

뇌졸중 환자군을 대상으로 한 각운 매칭 과제에서 관찰되는 수행력 저하는 후실비안열(posterior Sylvian fissure)의 백질 꼬리(caudal)가 손상되었을 때 나타난다(Pillay et al., 2014). 단어의 음운론적인 유사성을 판단하는 과제에서는 반응의 정확도가 높아질수록 등쪽 경로 중 특히 활모양섬유다발의 FA가 증가하였다(Rolheiser et al., 2011).

음운 이해에 대한 대뇌백질 연결성을 요약하자면, 성인 정상군과 뇌졸중 환자군 모두에서 음운론적 처리에는 활모양섬유다발이 주된 역할을 하고, 과제에 대한 정확도가 높아질수록 FA가 증가한다.

**의미론적(semantic) 측면**

의미론이란 단어와 그 단어가 갖는 의미 사이의 관계에 대한 지식이다. 따라서, 의미론적 이해의 단위는 주로 단어 수준이다. 의미 이

해를 평가하기 위한 검사로는 영국그림어휘력척도(British Picture Vocabulary Scale; Dunn, Dunn, Styles, & Sewell, 2009), 피바디그림어휘력검사(Peabody Picture Vocabulary Test; Dunn & Dunn, 2007)와 같은 별도의 이해어휘 심화검사가 주로 이용된다. 이 검사들은 주로 청각적으로 제시된 단어의 의미를 이해하여 그림 자극을 가리키는 방식이다. 그 외에도 사물의 특성(예: 고양이에게 수영이 있습니까?, 포크에 피부가 있습니까?)에 대한 질문에 대답함으로써 의미론적 지식을 검사하는 특성지식검사(property knowledge test), 의미론적 자질에 대한 지식을 토대로 의미적으로 가까운 단어를 선택하는 의미매칭 과제(예: 'dog'과 'wolf' 중에서 'coyote'와 의미적으로 가장 가까운 단어 선택하기), 비단어에 새로운 의미를 연결시켜 이해하여 수행하는 과제가 있다. 보스턴실어증진단검사(Boston Diagnostic Aphasia Examination, BDAE; Goodglass, Kaplan, & Barresi, 2001), 웨스턴실어증검사(Western Aphasia Battery, WAB; Kertesz, 2007) 등의 종합적인 실어증 검사도구의 일부 하위검사를 이용하기도 한다. 이 경우, 의미 이해 하위검사 수행력만을 살펴보거나, 전체 언어영역의 수행력을 하나의 변수로 간주하기도 하였다. 이해의 수행력을 평가하는 종속변수의 형태는 모든 연구에서 반응의 정확도였다. 의미론적 측면을 다룬 연구에 포함된 대상은 성인 정상군(3편)(Saur et al., 2008, 2010; Wong, Chandrasekaran, Garibaldi, & Wong, 2011), 좌뇌반구 뇌졸중 환자군(3편)(Breier, Hasan, Zhang, Men, & Papanicolaou, 2008; Harvey et al., 2013; Rolheiser et al., 2011), 퇴행성 뇌신경 질환 환자군(6편)(Agosta et al., 2010; Galantucci et al., 2011; Giovannetti et al., 2008; Mahoney et al., 2013; Rohrer et al., 2010; Schwindt et al., 2013), 기억장애 환자군(1편)(Stenset et al., 2008)이었다.

먼저 성인 정상군에 대한 연구들에서는 배쪽 경로가 의미처리과정에 관여하는 것으로 나타난다(Saur et al., 2008, 2010; Wong et al., 2011). 구체적인 백질 경로는 극모(extreme capsule) 또는 하중

단다발이다. 연령대별로는 18-71세의 광범위한 연령대를 대상으로 한 연구에서는 극포가, 20대를 대상으로 한 연구에서는 극포와 하중단다발 모두가 의미 이해에 관여한다.

좌뇌반구 뇌졸중 환자군에서도 역시 의미 이해에 관여하는 주요 백질 경로는 배쪽 경로이고(Rolheiser et al., 2011), 그중에서도 갈고리다발이 의미 이해와 연관성이 크다(Harvey et al., 2013). 등쪽 경로 중 직접 경로인 활모양섬유다발이 중요하다고 보고한 연구(Breier et al., 2008)도 있으나, 이 연구는 언어 이해 수행력을 측정할 때 의미나 구문 등의 영역에 따라 별도의 과제를 사용하지 않았으므로 해석에 주의가 요구된다.

다음으로 PPA의 하위유형 중 의미형에서 의미 이해의 어려움이 두드러진다(Mahoney et al., 2013; Rohrer et al., 2010; Schwindt et al., 2013). 의미형에서 관찰되는 주된 손상 경로 또한 배쪽 경로이며(Galantucci et al., 2011; Schwindt et al., 2013), 이는 성인 정상군 혹은 좌뇌반구 뇌졸중 환자군의 결과와 유사하다. 구체적으로는 하중단다발(Agosta et al., 2010; Galantucci et al., 2011; Mahoney et al., 2013; Rohrer et al., 2010)과 갈고리다발(Galantucci et al., 2011; Mahoney et al., 2013; Rohrer et al., 2010)이 있으며, 등쪽 경로인 활모양섬유다발(Agosta et al., 2010)이나 양반구 간 경로인 뇌궁(for-nix)(Rohrer et al., 2010)과 뇌량(corpus callosum)(Agosta et al., 2010)이 의미이해와 연관된 것으로 보고한 연구도 있다.

반면, 치매나 기억장애의 경우 결과의 일관성이 떨어지고, 구체적인 경로와 의미 이해의 관련성이 확인된 연구가 부족하다. 가령, AD와 VD 환자를 대상으로 한 연구에서 백질 변성의 정도와 의미 이해를 측정하는 과제의 수행력은 상관관계를 보이지 않는다(Gio-vannetti et al., 2008). 그러나, 기억장애 환자군을 대상으로 한 연구에서는 피질하 백질이 손상되면 의미 이해 과제 수행력이 저하되는 것으로 나타난다(Stenset et al., 2008).

의미 이해에 대한 대뇌백질 연결성을 요약하자면, 성인 정상군이나 뇌신경 질환 환자군에서 갈고리다발, 하중단다발, 극포, 뇌궁, 활모양섬유다발 등이 주로 의미 이해에 관여한다.

### 통사론적(syntactic) 측면

통사론은 문장의 구조나 문장 성분들 사이의 관계 및 배열에 관한 문법적 규칙으로 문장의 의미를 정확하게 파악하기 위한 필수 요건이다. 통사론적 이해를 평가하는 과제로는 문장의 뜻과 일치하는 그림을 고르는 문장-그림 매칭 과제(sentence-picture matching task), 문장을 듣고 예-아니오 질문에 대답하는 과제 등이 있다. 문장-그림 매칭 과제의 예로는 버크백 역전 문장 이해 검사(The Birkbeck Reversible Sentence Comprehension Test; Black, Nickels

& Byng, 1991), 문법 이해 검사(Test for Reception of Grammar, TROG; Bishop, 2003), 커티스-야마다 종합 언어평가-수용언어 검사(Curtiss-Yamada Comprehensive Language Evaluation, receptive language test, CYCLE-R; Curtiss & Yamada, 1988) 등이 있다. 종속변수의 형태는 모든 연구(8편)에서 반응의 정확도를 이용하였고, 그중 일부(2편)는 반응시간(response time)도 함께 측정하였다. 통사론적 측면을 다룬 연구에 포함된 대상은 성인 정상군(2편)(Antonenko et al., 2013; Turken & Dronkers, 2011), 뇌졸중 환자군(2편)(Meyer, Cunitz, Obleser, & Friederici, 2014; Rolheiser et al., 2011), 퇴행성 뇌신경 질환 환자군(4편)(Charles et al., 2014; Giovannetti et al., 2008; Rohrer et al., 2010; Wilson et al., 2011)으로 분류된다.

성인 정상군에서 문장 이해와 관련된 주요 대뇌백질 경로에는 활모양섬유다발의 직·간접 경로, 하전두-후두다발, 중중단다발, 하중단다발 등이 있다(Turken & Dronkers, 2011). 청년층의 통사 이해 능력은 대뇌백질 경로들 중 상중단다발이 주로 담당하나, 노년층은 갈고리다발에 더욱 의존한다. 노년층에서는 백질 경로의 연결성이 우성 반구 내에서가 아니라 양반구 전두엽 간에 두드러지게 나타나는데, 이러한 현상이 통사 이해에 부정적인 영향을 미친다(Antonenko et al., 2013).

한편, 성인 정상군에 비하여 뇌졸중으로 인한 백질 손상 환자는 문법적으로 난이도가 높은 문장(예: 목적어가 주어보다 선행하며 목적어와 주어의 간격이 긴 문장) 이해에서 결함을 보인다. 이러한 결함은 DTI 분석상 활모양섬유다발 및 상중단다발의 손상과 상관성이 있는데, 이는 문장의 통사론적 처리에 주로 백질의 등쪽 경로가 관여함을 의미한다(Meyer et al., 2014). 이에 비해, 만성 뇌졸중 환자군의 통사 이해 능력에는 등쪽 경로와 배쪽 경로가 모두 관여함을 밝힌 연구도 있다(Rolheiser et al., 2011).

다음으로, 퇴행성 뇌신경 질환 환자군 가운데 PPA 환자의 통사 이해 능력과 백질 경로와의 상관성을 살펴본 연구에서도 주로 등쪽 경로의 역할이 두드러진다. DTI 분석상, 문장-그림 매칭 과제의 수행력이 저하될수록 좌반구 등쪽 경로인 상중단다발 및 활모양섬유다발의 손상 정도가 심한 반면, 배쪽 경로인 극포 섬유 체계와 갈고리다발의 손상 정도는 관련성이 없다(Wilson et al., 2011).

반면, PPA의 세 가지 하위 유형 간에 차이를 밝힌 연구들은 결과가 다소 상이하다. 비유창형은 상중단다발의 퇴화가 특징적으로 나타나는데, 발화부족형 및 의미형에 비해 분열문(cleft sentence: 중립문에서 어느 한 정보를 선택하여 초점화한 문장)의 이해 능력이 특히 저하된다. 이는 문장의 통사론적 처리에 전두-측두엽을 잇는 신경경로가 주로 관여함을 의미한다(Charles et al., 2014). 이와

**Table 2.** White matter tracts of language comprehension processing in dorsal vs. ventral streams

White matter tracts	Relatedness	Phonological processing	Semantic processing	Syntactic processing
Dorsal stream	Positively related			
	Lt.	AF (N, S)	AF (A, P, S, SD)	AF (N, S, P)
		SLF (N)	SLF (SD, svPPA)	SLF (N-y, S, P, nvPPA, lvPPA)
	Rt.	NS	SLF (svPPA)	NS
	Bilateral	NS	NS	SLF (bvFTD)
	Negatively related	NS	NS	NS
Ventral stream	Positively related			
	Lt.	NS	EC (N-y, S)	IFOF (N, nvPPA, lvPPA, bvFTD)
			ILF (N-y, lvPPA, svPPA, SD)	MLF (N)
			UF (A, nvPPA, lvPPA, svPPA, SD)	ILF (N, lvPPA, svPPA)
			IFOF (svPPA)	UF (N-o, svPPA)
				EC (S)
Rt.	NS	UF (svPPA)	NS	
Bilateral	NS	UF (svPPA)	NS	
		EC (N)		
Negatively related	NS	NS	NS	
Not related	NS	Lt. ILF (A)	Lt. IFOF (A)	Lt. EC (P)
Others	Positively related			
	Lt.	NS	ATR (svPPA)	Anterior CC (nvPPA)
			Cingulum (lvPPA)	Fornix (svPPA, lvPPA)
			Corona radiata (svPPA)	Cingulum (lvPPA)
			Fornix (lvPPA, SD)	
	Rt.	NS	NS	NS
Bilateral	NS	Forceps minor (svPPA)	CC (bvFTD, lvPPA)	
		CC (svPPA, N)		
Negatively related	NS	NS	Lt. forceps minor (N-o)	
Not related	NS	NS	NS	

NS=not studied; A=patients with aphasia; bvFTD=behavioral variant fronto-temporal degeneration; M=patients with memory impairment; N=normal control group; N-o=normal older adults group; N-y=normal young adults group; P=patients with primary progressive aphasia; lvPPA=logopenic variant PPA; nvPPA=non-fluent variant PPA; svPPA=semantic variant PPA; S=stroke; SD=patients with semantic dementia; AF=arcuate fasciculus; ATR=anterior thalamic radiation; CC=corpus callosum; EC=extreme capsule; IFOF=inferior fronto-occipital fasciculus; ILF=inferior longitudinal fasciculus; MLF=middle longitudinal fasciculus; SLF=superior longitudinal fasciculus; UF=uncinate fasciculus.

는 달리, 발화부족형의 문장 이해 능력이 특히 저하됨을 밝힌 연구도 있다. 이것은 발화부족형이 다른 두 가지 유형에 비해 후측두엽과 두정엽의 회백질 및 연합섬유경로가 더 광범위하게 변화되었기 때문이다(Rohrer et al., 2010).

치매 환자를 대상으로 백질 손상 정도와 통사 이해 능력 간에 상관성을 살펴본 연구(Giovannetti et al., 2008)에서는, 백질 변성 정도에 따라 경도와 중고도 집단으로 환자를 분류하고 BDAE의 통사 이해 하위검사를 시행하였다. 중고도 집단은 경도 집단에 비해 통사 이해 과제에서 유의하게 낮은 점수를 획득하였는데, 이는 백질 변성의 정도가 심할수록 통사 이해 능력이 저하됨을 의미한다.

통사 이해에 대한 대뇌백질 연결성을 요약하자면, 성인 정상군이나 뇌신경 질환 환자군에서 좌반구 등쪽 경로인 상중단다발 및 활모양섬유다발 등이 통사 이해에 주되게 관여한다. 또한, 백질의 손상 정도가 심할수록 통사 이해 능력은 더욱 저하된다.

종합적으로 언어 이해의 하위 처리과정에 관여하는 등쪽, 배쪽 백질 경로들을 관련성이 있는지의 여부에 따라 정리하자면 Table 2와 같다.

### 논의 및 결론

언어 이해에 관여하는 뇌의 기제인 백질의 역할은 언어의 음운론적, 의미론적, 통사론적 측면에서 중요시된다. 본 종설에서 살펴본 바로는, 등쪽 경로들이 주로 음운론적, 통사론적 이해에, 배쪽 경로들은 의미론적, 통사론적 이해에 관여한다. 구체적으로는 등쪽 경로인 상중단다발은 음운(처리) 및 통사론적 이해에 기여한다. 또 다른 등쪽 경로인 활모양섬유다발은 흥미롭게도 음운론, 의미론, 통사론적 처리과정에 모두 관여하는 것으로 확인되었다. 이 활모양섬유다발은 특히 '복잡한' 통사구조 처리에 중요하다.

한편, 백색 경로인 하중단다발, 극포, 갈고리다발은 의미 및 통사론적 이해를 처리한다. 그런데, 뇌궁은 의미론적 이해에만, 중중단다발, 하전두-후두다발 등은 통사론적 이해에만 관여한다. 이 중, 하전두-후두다발과 갈고리다발은 '단순한' 통사 구조 처리에 특히 중요하다.

백질 경로들은 언어 중추에 해당하는 피질 영역들 사이를 서로 연결해주는 역할을 한다. 그런데 언어 이해의 음운론적, 의미론적, 통사론적 처리과정은 각각의 특성상 특정 경로를 경유하게 된다. 예컨대, 의미론적 이해에는 주로 백색 경로가, 통사론적 이해에는 등쪽 경로가 관여한다(Friederici, 2012; Wilson et al., 2011). 따라서, 청각적 이해의 중추에 해당하는 피질이 손상되지 않았다 하더라도 특정 처리과정에 관여하는 백질 경로가 손상될 경우에도 피질 손상과 유사한 언어 이해 문제가 야기될 수 있다. 그러므로, 백질 경로의 연결성을 언어 이해의 세부적인 하위 처리과정의 관점에서 살펴보는 것은 피질 영역에 대한 연구와 함께 언어 이해 과정의 신경생리학적 기제에 대한 보다 심도 있는 이해를 가능하게 해줄 수 있다. 이처럼 언어 이해에 있어서 백질의 역할이 점차로 부각되어 연구되어짐에도 불구하고 선행연구들에서 제한점이 관찰되므로, 본 중설에서는 크게 세 가지 측면, 즉 연구 대상자, 과제, 종속변수의 형태 측면에서 논의점을 제시하고자 한다.

첫째, 연구 대상자 측면에 있어서는 연령대가 하나의 변수가 될 수 있다. 청년층 혹은 노년층을 대상으로 하였는지, 노년층이라도 세부적으로 어느 연령대가 포함되었는지에 따라 연구 결과가 달라질 수 있다. 예컨대, 정상 청년층과 노년층을 비교한 연구(Antonenko et al., 2013)에서는 청년층은 활모양섬유다발이, 노년층은 갈고리다발이 통사 처리과정을 담당하는 주된 백질 경로로 나타났으나, 중년층까지만 포함한 다른 연구(Turken & Dronkers, 2011)에서는 통사에 관여하는 백질 경로로서 활모양섬유다발만이 제시되었다. 이와 같은 현상은 노년층에서 신경학적 처리의 경로가 바뀔 수 있다는 의미이며, 이러한 변화는 대개 기능 저하에 대한 보상 기전으로 여겨진다(Aine et al., 2006; Voineskos et al., 2012). 양반구 간 경로인 뇌량이 언어 이해 역할을 보상하는 것(Antonenko et al., 2013) 또한 이를 반영한다. 이처럼 연구에 포함된 대상군의 연령에 따라 언어 처리과정에 기여하는 주된 백질 경로에 차이가 있다. 또한, 환자 대상군은 연령뿐만 아니라 발병 후 경과기간이나 중증도에 따라 결과가 달라질 수 있다. 만성 좌반구 뇌졸중 환자를 대상으로 한 연구들에서, 대상군의 발병 후 경과기간이 평균 3.5년인 한 연구(Rolheiser et al., 2011)에서는 통사 능력에 백색 경로와 등쪽 경로가 모두 관여하는 것으로 나타난 반면, 발병 후 경과기간이 7.5년인 환자를 정상 대조군과 비교한 연구(Meyer et al., 2014)에서는 등

쪽 경로만이 통사처리에 관여하는 것으로 나타났다. 이러한 결과의 차이에는 대상군의 중증도나 발병 후 경과시간이 영향을 미쳤을 가능성이 있으므로 해석에 주의가 필요하다.

둘째, 과제에 따라 연구결과가 달라질 수 있다. 이는 언어 이해에 사용되는 대뇌피질의 네트워크가 과제에 따라 역동적으로 결정되기 때문이다. 가령, 주어진 청각적 입력에 대하여 의미 지식을 이용한 하향처리(top-down processing)를 필요로 하는 과제에서는 주로 백색 경로가 이용되지만, 그렇지 않은 경우에는 등쪽 경로에서 처리된다(Price, 2010). 그러나, 일부 연구에서 한 가지 처리 능력(예: 음운 처리)을 주로 살펴보고자 하거나, 다른 처리 능력(예: 의미 처리)의 영향을 배제하지 못한 채 과제가 실시된다. 특히, 특정 언어검사 도구(예: WAB)의 일부분인 청각적 이해 하위검사를 사용한 연구(Breier et al., 2008)에서는 좌반구 활모양섬유다발이 주되게 관여함을 확인할 수는 있었지만, 이를 의미, 통사 등의 특정 영역으로 세분하여 해석하기는 어렵다. 또한, 과제를 수행하는 데 있어서 인지능력이 관여하는 것을 배제할 수 없다. 예컨대, 문장을 듣고 이해하기 위해서는 작업기억을 비롯한 여러 인지적 조절체계의 도움을 받아야 하므로, 문장 이해는 언어 이해에 관여하는 전반적인 네트워크를 탐색하는 데 이상적인 반면, 순수하게 언어 이해 과정만을 분리해내기는 어려운 단점도 있다(Turken & Dronkers, 2011). 이러한 관점에서 살펴보면, 의미론적 처리에 대해서는 단어 수준의 이해 과제가, 통사론적 처리에 대해서는 문장의 의미가 동일하되 문법적 형태에서만 차이가 있는(예: 주격 분열문 vs. 목적격 분열문) 비교적 짧은 문장 수준의 이해 과제가 인지능력의 영향을 최소화하면서도 각 영역에서 언어 이해 처리능력을 평가하는 최선의 방법일 수 있다.

동일한 유형의 과제를 사용하였더라도 과제의 난이도에 따라 특정 환자군의 문제를 탐지하거나 혹은 탐지하지 못할 수 있으며, 언어 이해 과정에 관여한 대뇌백질 경로 또한 달라질 수 있다(Price, 2010). 예컨대, 단어 또는 문장을 듣고 이해하여 보기 가운데 고르는 과제에서 경쟁자극의 개수가 변인이 될 수 있다. 또한, 문장을 듣고 이해한 후 단순히 그림과 매칭시키는 과제보다는 다른 문장을 다시 듣고 대답하기 과제가 작업기억이 관여할 여지가 많으므로, 난이도가 더 높다. 더불어, 과제에 사용된 언어 형태에 따라서도 난이도가 달라질 수 있는데, 영어와 독일어 문장의 문법적 차이를 그 예로 들 수 있다. 영어에서 관계문은 'N (명사), which S (주어)+V (동사) ...'의 형태를 가지는 데 반하여, 독일어는 'N, der S+ ... +V'의 형태로 동사가 맨 뒤에 위치하여 이해의 난이도가 상승한다. 난이도가 지나치게 높다면 바닥효과(floor effect), 낮다면 천장효과(ceiling effect)로 인하여 결과가 왜곡될 수 있다. 따라서, 연구목적에 따라 환자군



과 정상 대조군의 변별이 가능하도록 난이도를 선택해야 한다.

셋째, 종속변수의 형태 또한 각 하위 처리능력을 정확하게 측정할 수 있느냐의 여부를 좌우한다. 가령, 의미 이해 과제에 대한 종속변수의 형태로 정확도와 반응시간이 있다. 그런데, 정확도는 정상 노년층이나 MCI와 같이 언어 이해 장애의 정도가 경미한 장애인에서 집단 간의 수행력 차이를 탐지하지 못하는 경우가 많다. 이러한 경우 반응시간을 측정하는 것이 검사의 민감도를 높이는 하나의 방법이 될 수 있다(Kim et al., 2014). 또한, 특정 검사 배터리의 일부를 차용한다면 해당 부분의 수행력만을 고려해야 하며, 전체 검사의 수행력을 특정 영역의 수행력으로 간주하여서는 안 된다. 가령, 의미 이해를 측정하기 위해 WAB의 일부 항목을 선택하였다면, 그 항목들의 수행력만을 측정해야 한다. 그런데, 일부 연구에서는 전체 검사의 수행력을 통해 산출되는 실어증지수(aphasia quotient)를 측정하였다. 결과적으로, 그 연구(Breier et al., 2008)에서만 의미 이해에 등쪽 경로의인 활모양섬유다발이 관여하는 것으로 나타났다. 이는 선행연구들이나 본 종설에서 살펴본 다른 의미 이해 관련 연구들과 상반된 결과이다. 종합해보면, 과제와 종속변수의 형태는 연구목적에 따라 측정하고자 하는 이해 처리과정에만 관여하는 과제를 고르되, 이해 능력의 문제를 가급적 민감하게 탐지할 수 있는 종속변수의 형태를 고르는 것이 바람직하다.

본 종설에서 제시된 내용을 바탕으로 향후 진단평가의 측면에서 다음과 같은 활용 방안이 제시될 수 있다. 청각적 이해와 관련된 피질 병변이 있는 환자뿐만 아니라, 백질 경로에 문제가 있는 환자도 언어 이해 측면에서 중증의 결함을 나타낼 가능성이 있다(Kuljic-Obradovic, 2003; Pillay et al., 2014; Tomić et al., 2009)는 점을 염두에 두고 진단평가와 필요한 경우 중재를 시행하여야 한다. 이때, 구체적으로 어떤 백질 경로가 손상되었느냐에 따라 평가 시 해석에 도움을 받거나, 중재의 초점을 달리할 수 있다. 예를 들어, 좌뇌반구 뇌졸중으로 등쪽 경로가 손상된 환자가 언어 이해 문제를 보인다면, 의미 이해보다는 통사 이해에 초점을 맞추어 다양한 비공식적 평가과제를 추가로 시행할 수 있다. 또한, PPA의 경우, 진행과정에 따라 단순히 하위유형에 따른 의미 또는 통사 영역의 치료뿐만 아니라 손상된 백질 경로에 따라 하위 처리과정에 대한 중재가 이루어질 수 있을 것이다. 아울러 언어 이해력에 대한 중재 전후의 백질 연결성을 영상기술을 통해 비교해보는 연구도 필요할 것으로 생각된다(Lu et al., 2014).

본 종설은 언어 이해의 다양한 언어학적 측면과 관련된 연구 및 임상에서 피질에 비해 상대적으로 등한시되던 백질 연결성을 재조명하였다는 데 의의가 있다. 그러나, 읽기를 통한 언어 이해 측면은 다루지 못하였다는 한계점이 있다. 정상 노년층과 MCI 환자군의

백질 연결성을 언어 이해와 관련지어 비교할 수도 있다. 적절한 과제와 종속변수를 이용한다면, 정상 노년층과 MCI 환자군을 하나의 연속선상에 놓고 이해 과제 수행력과 백질 연결성 수치의 관련성을 살펴보는 것도 의미있는 연구과제가 될 것이다. 나아가, 백질 경로와 피질의 손상 간에 전반적인 중증도와 예후가 어느 정도로 다른지, 또한 회복 정도에 영향을 줄 수 있는 다른 요인은 없는지에 대해서도 탐색이 필요할 것이다.

## REFERENCES

- Acosta-Cabrero, J., Patterson, K., Fryer, T. D., Hodges, J. R., Pengas, G., Williams, G. B., ... Nestor, P. J. (2011). Atrophy, hypometabolism and white matter abnormalities in semantic dementia tell a coherent story. *Brain*, 134, 2025-2035.
- Agosta, F., Henry, R. G., Migliaccio, R., Neuhaus, J., Miller, B. L., Dronkers, N. F., ... Gorno-Tempini, M. L. (2010). Language networks in semantic dementia. *Brain*, 133, 286-299.
- Aine, C. J., Woodruff, C. C., Knoefel, J. E., Adair, J. C., Hudson, D., Qualls, C., ... Stephen, J. M. (2006). Aging: compensation or maturation? *NeuroImage*, 32, 1891-1904.
- Alexander, A. L., Lee, J. E., Lazar, M., & Field, A. S. (2007). Diffusion tensor imaging of the brain. *Neurotherapeutics*, 4, 316-329.
- Antonenko, D., Brauer, J., Meinzer, M., Fengler, A., Kerti, L., Friederici, A. D., ... Flöel, A. (2013). Functional and structural syntax networks in aging. *Neuroimage*, 83, 513-523.
- Assaf, Y., & Pasternak, O. (2008). Diffusion tensor imaging (DTI)-based white matter mapping in brain research: a review. *Journal of Molecular Neuroscience*, 34, 51-61.
- Basser, P. J., Mattiello, J., & LeBihan, D. (1994). Estimation of the effective self-diffusion tensor from the NMR spin echo. *Journal of Magnetic Resonance, Series B*, 103, 247-254.
- Bhatnager, S. C. (2013). *Neuroscience for the study of communicative disorders* (4th ed.). Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins.
- Bishop, D. (2003). *The test for reception of grammar, version 2 (TROG-2)*. London: Pearson.
- Black, M., Nickels, L., & Byng, S. (1991). Patterns of sentence processing deficit: processing simple sentences can be a complex matter. *Journal of Neurolinguistics*, 6, 79-101.
- Breier, J. I., Hasan, K. M., Zhang, W., Men, D., & Papanicolaou, A. C. (2008). Language dysfunction after stroke and damage to white matter tracts eval-

- uated using diffusion tensor imaging. *American Journal of Neuroradiology*, 29, 483-487.
- Bucur, B., Madden, D. J., Spaniol, J., Provenzale, J. M., Cabeza, R., White, L. E., ... Huettel, S. A. (2008). Age-related slowing of memory retrieval: contributions of perceptual speed and cerebral white matter integrity. *Neurobiology of Aging*, 29, 1070-1079.
- Charles, D., Olm, C., Powers, J., Ash, S., Irwin, D. J., McMillan, C. T., ... Grossman, M. (2014). Grammatical comprehension deficits in non-fluent/agrammatic primary progressive aphasia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 85, 249-256.
- Chenevert, T. L., Brunberg, J. A., & Pipe, J. G. (1990). Anisotropic diffusion in human white matter: demonstration with MR techniques in vivo. *Radiology*, 177, 401-405.
- Curtiss, S., & Yamada, J. (1988). *Curtiss-Yamada Comprehensive Language Evaluation (CYCLE)*. <http://thecycletest.com/>.
- Dronkers, N. F., Wilkins, D. P., Van Valin, R. D., Redfern, B. B., & Jaeger, J. J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition*, 92, 145-177.
- Dunn, L. M., & Dunn, D. M. (2007). *Peabody Picture Vocabulary Test-fourth edition (PPVT-4)*. Minneapolis, MN: Pearson Assessments.
- Dunn, L. M., Dunn, D. M., Styles, B., & Sewell, J. (2009). *The British Picture Vocabulary Scale-third edition (BPVS3)*. London: GL Assessment.
- Fellgiebel, A., Wille, P., Müller, M. J., Winterer, G., Scheurich, A., Vucurevic, G., ... Stoeter, P. (2004). Ultrastructural hippocampal and white matter alterations in mild cognitive impairment: a diffusion tensor imaging study. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 18, 101-108.
- Friederici, A. D. (2012). The cortical language circuit: from auditory perception to sentence comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 262-268.
- Galantucci, S., Tartaglia, M. C., Wilson, S. M., Henry, M. L., Filippi, M., Agosta, F., ... Gorno-Tempini, M. L. (2011). White matter damage in primary progressive aphasia: a diffusion tensor tractography study. *Brain*, 134, 3011-3029.
- Gierhan, S. M. (2013). Connections for auditory language in the human brain. *Brain and Language*, 127, 205-221.
- Giovannetti, T., Hopkins, M. W., Crawford, J., Bettcher, B., Schmidt, K. S., & Libon, D. J. (2008). Syntactic comprehension deficits are associated with MRI white matter alterations in dementia. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 14, 542-551.
- Goodglass, H., Kaplan, E., & Barresi, B. (2001). *The Boston Diagnostic Aphasia Examination* (3rd ed.). Baltimore, MD: Lippincott, Williams & Wilkins.
- Hampson, M., Peterson, B. S., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., & Gore, J. C. (2002). Detection of functional connectivity using temporal correlations in MR images. *Human Brain Mapping*, 15, 247-262.
- Harvey, D. Y., Wei, T., Ellmore, T. M., Hamilton, A. C., & Schnur, T. T. (2013). Neuropsychological evidence for the functional role of the uncinate fasciculus in semantic control. *Neuropsychologia*, 51, 789-801.
- Hiwatashi, A., Zhong, J., Ekholm, S. E., & Westesson, P. L. (2006). Fractional anisotropy is higher in Heschl's gyrus than in superior temporal gyrus in normal subjects. *Academic Radiology*, 13, 73-76.
- Hixon, T. J., Weismer, G., & Hoit, J. D. (2014). *Preclinical speech science: anatomy, physiology, acoustics, perception* (2nd ed.). San Diego, CA: Plural Pub.
- Kertesz, A. (2007). *Western Aphasia Battery* (revised ed.). San Antonio, TX: PsychCorp.
- Kim, H. (2012). *Neurologic speech-language disorders*. Seoul: Sigma Press.
- Kim, H., Sung, J. E., Kim, J., Park, E. J., Yoon, J. H., Yoo, H. J., ... Kim, S. R. (2014). Response time measurements in the iOS app-based Token Test, the Brief Token Test in the elderly. *Geriatrics & Gerontology International*, 14, 969-974.
- Kuljic-Obradovic, D. C. (2003). Subcortical aphasia: three different language disorder syndromes? *European Journal of Neurology*, 10, 445-448.
- Lu, H., Wu, H., Cheng, H., Wei, D., Wang, X., Fan, Y., ... Zhang, T. (2014). Improvement of white matter and functional connectivity abnormalities by repetitive transcranial magnetic stimulation in crossed aphasia in dextral. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 7, 3659-3668.
- Macdonell, R. A. L., Jackson, G. D., Curatolo, J. M., Abbott, D. F., Berkovic, S. F., Carey, L. M., ... Scheffer, I. E. (1999). Motor cortex localization using functional MRI and transcranial magnetic stimulation. *Neurology*, 53, 1462-1462.
- Mahoney, C. J., Malone, I. B., Ridgway, G. R., Buckley, A. H., Downey, L. E., Golden, H. L., ... Warren, J. D. (2013). White matter tract signatures of the progressive aphasia. *Neurobiology of Aging*, 34, 1687-1699.
- Medina, D., Urresta, F., Gabrieli, J. D., Moseley, M., Fleischman, D., Bennett, D. A., ... Stebbins, G. T. (2006). White matter changes in mild cognitive impairment and AD: a diffusion tensor imaging study. *Neurobiology of Aging*, 27, 663-672.
- Meyer, L., Cunitz, K., Obleser, J., & Friederici, A. D. (2014). Sentence processing and verbal working memory in a white-matter-disconnection patient. *Neuropsychologia*, 61, 190-196.
- Pfefferbaum, A., Sullivan, E. V., Hedehus, M., Lim, K. O., Adalsteinsson, E.,

- & Moseley, M. (2000). Age-related decline in brain white matter anisotropy measured with spatially corrected echo-planar diffusion tensor imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, 44, 259-268.
- Pillay, S. B., Stengel, B. C., Humphries, C., Book, D. S., & Binder, J. R. (2014). Cerebral localization of impaired phonological retrieval during rhyme judgment. *Annals of Neurology*, 76, 738-746.
- Price, C. J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1191, 62-88.
- Rohrer, J. D., Ridgway, G. R., Crutch, S. J., Hailstone, J., Goll, J. C., Clarkson, M. J., ... Warren, J. D. (2010). Progressive logopenic/phonological aphasia: erosion of the language network. *Neuroimage*, 49, 984-993.
- Rolheiser, T., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2011). Dynamic processing in the human language system: synergy between the arcuate fascicle and extreme capsule. *Journal of Neuroscience*, 31, 16949-16957.
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M. S., ... Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 18035-18040.
- Saur, D., Schelter, B., Schnell, S., Kratochvil, D., Küpper, H., Kellmeyer, P., ... Weiller, C. (2010). Combining functional and anatomical connectivity reveals brain networks for auditory language comprehension. *Neuroimage*, 49, 3187-3197.
- Schwindt, G. C., Graham, N. L., Rochon, E., Tang-Wai, D. F., Lobaugh, N. J., Chow, T. W., ... Black, S. E. (2013). Whole-brain white matter disruption in semantic and nonfluent variants of primary progressive aphasia. *Human Brain Mapping*, 34, 973-984.
- Stenset, V., Hofoss, D., Berstad, A. E., Negaard, A., Gjerstad, L., & Fladby, T. (2008). White matter lesion subtypes and cognitive deficits in patients with memory impairment. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 26, 424-431.
- Tomić, G., Stojanović, M., Pavlović, A., Stanković, P., Zidverc-Trajković, J., Pavlović, D., ... Čovičković-Šternić, N. (2009). Speech and language disorders secondary to diffuse subcortical vascular lesions: neurolinguistic and acoustic analysis. *Journal of the Neurological Sciences*, 283, 163-169.
- Turken, U., & Dronkers, N. F. (2011). The neural architecture of the language comprehension network: converging evidence from lesion and connectivity analyses. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 5, 1.
- Tyler, L. K., Randall, B., & Marslen-Wilson, W. D. (2002). Phonology and neuropsychology of the English past tense. *Neuropsychologia*, 40, 1154-1166.
- Voineskos, A. N., Rajji, T. K., Lobaugh, N. J., Miranda, D., Shenton, M. E., Kennedy, J. L., ... Mulsant, B. H. (2012). Age-related decline in white matter tract integrity and cognitive performance: a DTI tractography and structural equation modeling study. *Neurobiology of Aging*, 33, 21-34.
- Wilson, S. M., Galantucci, S., Tartaglia, M. C., Rising, K., Patterson, D. K., Henry, M. L., ... Gorno-Tempini, M. L. (2011). Syntactic processing depends on dorsal language tracts. *Neuron*, 72, 397-403.
- Wong, F. C., Chandrasekaran, B., Garibaldi, K., & Wong, P. C. (2011). White matter anisotropy in the ventral language pathway predicts sound-to-word learning success. *Journal of Neuroscience*, 31, 8780-8785.

## 국문초록

### 청각적 이해에 대한 신경생리학적 기제로서의 대뇌백질 연결성: 정상 및 뇌신경 질환군을 중심으로

이승진<sup>1</sup> · 이수정<sup>1</sup> · 송지연<sup>1</sup> · 김가영<sup>1</sup> · 김향희<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대학원 언어병리학협동과정, <sup>2</sup>연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 재활의학연구소

**배경 및 목적:** 뇌영상 기술의 발달로 백질 경로의 연결성에 대한 연구가 가능해지면서, 백질 경로는 정상인에서뿐만 아니라 다양한 환자군에서 언어 이해와 관련된 중요한 요소로 주목 받게 되었다. 이에, 본 종설에서는 문헌고찰을 통해 대뇌백질 연결성이 언어 이해 처리과정과 어떻게 관련되는지를 살펴보고자 하였다. **방법:** 성인 정상군과 뇌신경 질환 환자군의 백질 연결성을 다룬 국외 논문 19편을 선정하여 고찰하였다. **결과:** 언어 이해 처리과정을 음운론, 의미론, 통사론으로 나누어 살펴본 바에 의하면, 등쪽 경로들이 주로 음운론적, 통사론적 이해에, 배쪽 경로들은 의미론적, 통사론적 이해에 관여한다. 음운 이해에는 성인 정상군과 뇌신경 질환 환자군 모두에서 활모양섬유다발이, 의미 이해에는 갈고리다발, 하중단다발, 극포, 뇌궁, 활모양섬유다발 등이, 통사 이해에는 상중단다발 및 활모양섬유다발 등이 주로 관여한다. 백질의 손상 정도는 각 하위 이해처리과정의 손상 정도에 영향을 미친다. **논의 및 결론:** 본 종설은 언어 이해와 관련하여 피질에 비해 상대적으로 등한시되던 백질 연결성을 재조명하였다는 데 의의가 있다. 본 종설의 내용을 바탕으로 향후 언어 이해와 백질 연결성의 관련성에 대한 연구에서 대상자, 과제, 종속변수의 형태에 대한 세심한 고려가 필요할 것으로 보인다.

**핵심어:** 백질, 연결성, 청각적 이해

## 참고문헌

김향희(2012). 신경언어장애. 서울: 시그마프레스.