

뇌파를 이용한 작업기억 결손 학습자의 판별*

김순화(金順和)** · 송기상(宋基尙)***

논문 요약

작업기억이란 감각기억, 단기기억, 장기기억과 함께 기억의 한 구성요소로 제한된 시간 동안 저장과 처리가 동시에 일어나는 단기기억의 확장 개념이다. 작업기억은 IQ와 함께 학업 성취도를 결정짓는 요인 중의 하나로 현재 작업기억을 측정을 위한 다양한 프로그램들이 개발되어 있다. 이러한 프로그램을 이용하여 학습자들의 작업기억 결손 여부를 판별하여 작업기억 결손 학습자에게 알맞은 처치를 제공해줌으로써 잠재적 학습 부진을 예방할 수 있다는 연구결과가 보고되고 있다. 하지만 이러한 작업기억 측정 프로그램에 의한 데이터는 측정 당시의 상황과 학습자의 상태, 검사자의 능력에 의해 쉽게 영향을 받기 때문에 보다 정밀하고 객관적인 검사 도구가 필요한 실정이다.

EEG(Electroencephalogram)는 인간의 뇌파를 측정하는 장치로 뇌파는 의식상태의 변화, 정신 활동, 지각 자극, 신체의 생리적 생화학 변화, 뇌내 병적 과정, 질환 상태 등에 따라 다르게 나타난다. 따라서 작업기억에 따라 뇌파의 특성이 다르게 나타날 가능성이 있으며 정상학습자와 작업기억 결손 학습자와의 뇌파 비교를 통해 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 밝힘으로써 작업기억 결손 학습자를 보다 정확히 변별하는 데에 뇌파 데이터가 사용될 수 있다.

본 연구에서는 EEG를 이용하여 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 추출함으로써 작업기억 결손 학습자를 보다 정확한 변별하는 데에 뇌파가 사용될 수 있음을 보이고자 한다. 이를 위하여 정상학습자와 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 비교하기 위해 기준 상태인 눈감고 안정 상태에서 60초 동안의 뇌파를 측정하였고, 암산 과제를 해결하도록 요구한 170초 동안에 나타나는 뇌파를 측정하였다. 두 집단 간의 비교를 위해 측정된 뇌파 데이터는 독립표본 t-검정을 통해 집단 간의 차이를 비교하였고, θ 파, α 파, β 파, γ 파의 상대파워스펙트럼 분석을 실시하였다.

* 본 연구는 한국교원대학교 2008년도 기성회계 학술연구비 지원에 의해 수행되었음

** 한국교원대학교 컴퓨터교육과 대학원생

*** 한국교원대학교 컴퓨터교육과 교수

분석 결과 "눈 감고 안정 상태"에서 측정된 결과에서는 두 집단 간에 차이가 없었으나 "암산 과제 해결 시"에는 두 집단 간에 θ 파, α 파에서 차이가 나타났다. 또한 상대파워스펙트럼 분석 결과 눈 감고 안정 상태에서는 α 파> β 파> θ 파> γ 파의 순서로 활성화되었고, 암산 과제 해결 시에는 α 파> θ 파> β 파> γ 파의 순서로 활성화도가 변화함을 관찰하였다. 이와 같은 결과를 통해 작업기억 결손 학습자가 가지는 뇌파의 특성을 찾아낼 수 있었고, 이 특성을 이용하면 작업기억 결손 학습자를 보다 정확하게 변별하는 데에 뇌파 데이터를 이용할 수 있음을 밝혔다.

■ 주요어 : EEG, 뇌파, 작업기억, 작업기억 결손 학습자

I. 서론

중단기억 이론에서는 인간의 기억체계의 기본 구조가 여러 개의 기억저장고로 되어 있다고 보고 있다(Atkinson & Shiffrin, 1968; Glanzer, 1972; Waugh & Norman, 1965). 이 이론에 따르면 기억 저장고는 정보를 매우 짧은 시간 동안 저장하는 감각기억, 제한된 용량을 가진 단기기억 또는 단기기억의 확장 개념인 작업기억, 용량이 거의 무한대인 장기기억으로 구성되어 있다. 작업기억이라는 명칭은 의식적인 정신적 노력이 가해지는 정신적 작업 공간을 의미한다(Baddeley, 1992; Baddeley & Hitch, 1974). 이정모 등(2008)에 따르면 많은 인지심리학자들은 단기기억이라는 용어보다는 작업기억이라는 용어를 주로 사용하고 있는데 그 이유는 작업기억이 인간의 단기적인 정보처리 현상을 보다 잘 설명해주기 때문이다.(p. 141)

최근에는 학습자의 학업 성취도를 결정짓는 요인으로 작업 기억이 중요한 역할을 한다는 연구결과들이 발표되고 있다. 이들 연구에서는 특히 작업 기억 능력과 학생의 언어적, 수리적 능력과의 밀접한 관련성을 제시하고 있는데(Alloway et al., 2005; Gathercole & Pickering, 2000; Gathercole & Pickering, 2004; Alloway, Banner & Smith, 2008) 이들의 연구 결과에 의하면 작업 기억 결손 학습자의 경우 주로 정보의 저장과 처리를 동시에 수행해야하는 활동들에 어려움을 겪고 있음이 보고되고 있다. 이러한 학습자들이 주로 어려움을 겪는 활동들의 예로는 긴 지시문 따르기, 문장을 쓸 때 단어나 철자 빠뜨리기와 같은 활동을 할 때 작업 기억의 부하로 인하여 실패의 빈도가 잦은 것을 관찰하였다(Gathercole & Alloway, 2005).

과업에 실패하는 주된 이유는 제한된 작업기억으로 인하여 장기기억 속의 지식이 단기기억의 지식과 통합되는 것에 어려움을 겪기 때문으로 밝히고 있다(Swanson & Saez, 2003; Swanson & Frankengerger, 2004). 수업 중 잦은 실패는 곧 학습 목표 도달 실패로 연결되고 이는 곧 낮은 학업성취도로 직결된다. 주목할 만한 점은, 작업기억의 결손 여부만으로도 IQ와 독

립적으로 2년 후 학습 부진아를 예측할 수 있다는 점이다(Alloway, 2008). 그렇기 때문에 취학 전 학습자의 작업기억의 측정과 그에 따른 적절한 대처는 매우 중요하다.

이에 따라, 보다 정확한 작업 기억의 측정을 위해 인지심리학자들은 다양한 평가 도구를 개발하여 적용하고 있다. Daneman과 Carpenter(1980)는 작업기억 전체 용량을 측정하는 과제를 고안했는데 이 검사는 문장을 이해하면서 말미 단어를 기억하는 과제로 이 과제를 읽기폭(reading span) 또는 작업기억폭(working memory span) 과제라고 부른다. 이병택, 김경준, 조명환(1996)은 한국어 읽기폭 과제를 고안하여 읽기폭이 큰 사람과 작은 사람의 언어 이해 능력을 비교하기도 했다. 현재 작업기억의 측정을 위해 고안된 프로그램에는 Alloway(2007)에 의해 개발된 AWMA(Automated Working Memory Assessment)와 Alloway, Gathercole & Kirkwood(2008)에 의해 개발된 WMRS(The Working Memory Rating Scale) 등이 있다. 또한 작업기억 측정 도구는 아니지만 어느 정도 관련성이 있는 측정 도구로는 Conners(2001)에 의해 개발된 학습 장애 아동 선별을 위한 CTRS(Conners Teacher's Rating Scale.), Gioia 등(2000)에 의해 개발된 BRIEF 등이 있다.

하지만 이러한 지필 검사나 컴퓨터 기반으로 작업기억 결손 학습자를 판별할 경우에 학습자의 학력 수준에 따라 다른 과제를 제공해야 하기 때문에 개발된 프로그램 사용 가능 연령대가 제한되어 있어 모든 학습자에게 적용이 어렵다는 점, 교사의 관찰에 의한 CTRS와 같은 측정 도구의 경우, 교사의 주관에 치우치기 쉽다는 점 그 밖에도 측정 당시 학습자의 상태, 환경, 분위기 등 많은 요인들로 인하여 학생의 정확한 작업 기억을 평가하지 못할 가능성 등과 같은 많은 제한점들이 있다(권석원 외, 2007). 특히, 학습 부진으로 직결되는 작업기억 결손은 학부모나 학습자에게 민감한 부분이기 때문에 보다 신뢰할 수 있는 작업기억 검사 방법이 필요한 실정이다.

따라서 연구자들은 생리적 데이터를 인지 능력 측정의 수단으로 사용하게 되었다. 생리적 데이터는 학습자들의 자발적인 반응을 나타내고 객관적이고 양적인 데이터를 제공해주기 때문에 (Michiko & Tsutomu, 2007) 주관적이고 질적인 자료에 의존하여 자료를 처리해야 하는 기존의 검사 방법의 한계점을 효과적으로 보완할 수 있다. 뇌파는 의식상태의 변화, 정신 활동, 지각 자극, 신체의 생리적 생화학 변화, 뇌내 병적 과정, 질환 상태 등에 따라 변화할 수 있기 때문에 ADHD, 알츠하이머병, 뇌혈관 질환, 뇌 종양과 같은 다양한 뇌 관련 질환을 진단하는 데에 사용되고 있을 뿐만 아니라 다양한 종류의 간질을 진단하는 데에 사용되고 있다(윤중수, 2004, pp. 257-293). 최근에는 뇌파의 특성이 IQ와 관련성이 있다는 연구 결과도 보고되고 있다 (Thatcher, North & Biver, 2005). 따라서 작업기억 결손 학습자와 정상 학습자와의 뇌파 특성에도 차이점이 발견될 것이라고 예상할 수 있으며, 뇌파 분석을 통해 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 추출할 수 있을 것이라고 생각한다.

지금까지 작업기억과 EEG와의 연관성을 보여주는 많은 선행 연구들이 이루어져 왔다. 작업기억 부하에 따른 뇌파 특성(Jed et al. 2008; Julie, Arnaud, & Scott, 2005)에 관한 연구나 언어적 작업기억과 시공간적 작업기억 간의 처리 과정에 있어서 나타나는 뇌파의 차이를 중심으로 분석한 Berka 등(2005)의 연구를 들 수 있다. 또한 Dalia 등(2007)의 연구에서는 고등학생의 작업 성취도의 차이에 따른 뇌파 특성과 작업기억과의 관계를 밝혀 작업기억에 따른 뇌파의 차이가 존재할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

이와 같이 뇌파와 작업기억과의 관련성을 보여주는 많은 연구들이 존재했었지만 작업기억 결손 학습자를 변별할 수 있는 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성에 관한 연구는 아직 진행되지 않고 있는 실정이다. 따라서 생물학적인 데이터인 뇌파를 이용하여 작업기억 결손 학습자를 변별해 낼 수 있다면 작업기억 결손 학습자를 보다 정확하게 변별해낼 수 있을 것이라 기대한다.

따라서 본 연구에서는 작업기억 결손 학습자와 작업기억 정상 학습자와의 뇌파 비교를 통해 작업기억 결손 학습자가 가진 뇌파 특성을 추출하고자 하였다. 이를 위한 구체적인 연구문제들은 다음과 같다. 첫째, 작업기억 능력이 암산 능력과 관련성이 있는가를 판단하고, 둘째, 기준 상태와 작업기억 부하 과제를 수행 시에 작업기억 결손 학습자의 뇌파가 작업기억 정상 학습자와 비교했을 때 어떤 차이가 나타나는지 분석하여 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 파악하고자 하였다.

II. 연구 절차 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 충북 소재의 K 대학교 학생을 대상으로 실시되었다. 피실험자는 실험에 대한 충분한 설명을 들은 후 실험에 참여하기를 희망하는 학생들 중에서 총 32명의 학생을 대상으로 하였다. 본 연구에서 사용되는 작업기억 측정 프로그램인 AWMA는 만 4세에서 만 22세 이하의 학습자를 대상으로 하기 때문에 피실험자들은 특별한 인지적·정서적·신체적 이상이 없는 만 20세 이상 만 22세 이하의 대학생으로 선정하였고, 좌뇌와 우뇌의 피실험자 간 개인차와 성별에 따른 개인차를 최소화하기 위하여 오른손잡이인 남학생으로 선정하였다.

2. 연구 절차

피실험자 가운데서 작업기억 결손 학습자를 선별하기 위해 작업기억 검사를 먼저 실시하였

다. 검사 결과를 바탕으로 실험 집단을 분류하였는데 이 때 분류 기준은 암산에 영향을 미치는 것으로 알려진 언어적 작업기억 점수(Ineke, Andre & Evie, 2007; Ineke & Andre, 2007; Ineke, Andre & Stijn, 2007)를 기준으로 하였다. 실험 집단은 작업기억 결손(Working Memory Impairment: WMI)집단과 작업기억 정상(Working Memory Normal: WMN)집단으로 하였다. AWMA report 분석 결과 언어적 작업기억이 평균치에 못 미치는 학습자들의 집단을 WMI집단으로 분류하였고, 평균 이상인 학습자들의 집단을 WMN집단으로 분류하였다.

피실험자를 대상으로 기준 상태의 뇌파 측정을 위해 눈 감고 안정 상태에서 뇌파를 60초 동안 측정하고, 다음으로 작업기억 부하 과제 해결 시의 뇌파를 170초 동안 측정하였다. 이 때 눈으로 유입되는 잡파를 최소화하기 위하여 눈을 감은 상태에서 10개의 암산 과제를 해결하였다.

3. 작업기억 측정 도구

작업기억 측정을 위한 도구로는 AWMA를 사용하였다. AWMA는 작업기억 측정을 위해 영국에서 Alloway(2007)에 의해 개발된 컴퓨터 기반 측정 프로그램으로 측정 가능 연령대는 만4세에서 만 22세까지이다. 이 프로그램은 사용자 친화적인 인터페이스를 통하여 전문가가 아닌 일반 교사들도 편리하게 학습자의 작업기억을 측정할 수 있도록 만들어져 있다.

현재까지 AWMA는 영국의 4,000여개 학교에서 사용되어졌고 작업기억 결손으로 인한 학습부진을 예상하는 데에 있어서 어느 정도 신뢰할만하고 타당한 검사 결과를 보여주고 있다. 즉, AWMA에 의해 작업기억 결손으로 판명된 아동의 98%가 읽기와 수학에서 학업성취 도달에 실패하고 있는 것으로 보아 AWMA는 신뢰할만한 작업기억 검사도구라고 볼 수 있으므로 (Alloway, 2008) 본 연구에서는 실험군 분류를 위해 AWMA를 사용하였다. AWMA 테스트는 크게 3부분으로 구성되어 있으며 각 검사의 상세한 내용은 다음과 같다.

1) AWMA Screener

이 테스트는 모든 학습자를 대상으로 작업기억 결손 학습자를 가려내기 위하여 사용한다. 언어적 작업기억 측정을 위한 Listening Recall Test와 시공간 작업기억 측정을 위한 Spatial Recall Test의 두 부분으로 구성되어 있고 테스트 소요시간은 총 5분~7분이다. 본 연구에서는 모든 학습자를 대상으로 1차적으로 작업기억 결손 학습자를 가려낼 수 있는 AWMA Screener를 이용하여 WMI와 WMN을 구분했다.

2) AWMA Short Form(AWMA-S)

이 테스트는 작업기억 결손이 의심되는 학습자를 대상으로 사용한다. 언어적 작업기억 측정을 위한 Digit Recall, Listening Recall과 시공간 작업기억 측정을 위한 Dot Matrix, Spatial Recall로 구성되어 있고 테스트 소요시간은 총10분~15분이다.

3) AWMA Long Form(AWMA-L)

이 테스트는 심각한 작업기억 결손을 지닌 학습자를 대상으로 사용한다. 언어적 작업기억 측정을 위한 Digit Recall, Listening Recall, Counting Recall, Word Recall, Nonword Recall, Backwards Digit Recall과 시공간 작업기억 측정을 위한 Dot Matrix, Mazes Memory, Odd-one-out, Mister X, Block Recall, Spatial Recall의 총 12개의 영역으로 구성되어 있고 테스트 소요시간은 총 45분정도이다.

4. 뇌파 측정 도구

1) 뇌파 측정용 과제 개발

학습자의 작업기억 부하 과제가 주어졌을 때 발생하는 부하(load)에 따른 뇌파 특성을 분석하기 위하여 먼저 눈 감고 안정상태의 뇌파를 60초 동안 측정한 후, 암산 과제 해결의 단계로 제시하여 발생하는 뇌파를 측정하였다. 작업기억 과제 해결 단계의 뇌파 측정을 위해서 본 연구에서는 암산과제를 사용하였다. 작업기억 과제로 암산과제를 사용하였는데 그 이유는 암산이 작업기억을 사용하는 가장 대표적인 예이기 때문이다(Alloway, 2006; Ineke, Andre & Evie, 2007). 암산을 위해서는 숫자를 기억하고 그에 알맞은 연산을 하는 동시에 받아 올림이 발생하면 그것을 저장하고 다음 연산에 반영하는 등의 과정을 거쳐야 하는데 이러한 과정들은 모두 작업기억을 이용하여야 수행할 수 있는 과정들이다.

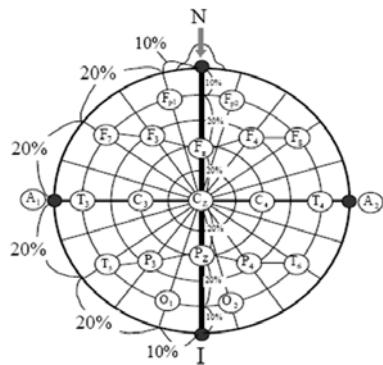
WMI와 WMN의 두 집단 간에 뇌파 특성에 어떤 차이가 나타나는지를 발견하기 위하여 제시된 암산 문제는 총 10문제로 문제의 난이도가 후반으로 갈수록 어려워지도록 제작하였다. 난이도는 덧셈이 이루어진 수의 총합의 크기(The size of outcome)와 받아 올림수의 값(The value of carry)으로 조정하였다(Adams & Hitch, 1997; Ineke, Andre, Stijn, 2007). 제시된 암산 과제 및 타임 테이블은 <표 1>과 같다.

<표 1> 암산 과제 및 타임 스케줄

문항	난이도	암산시작	암산끝	소요시간(초)
눈감기		00:08	1:08	60
1번 5+9=14	하	1:22	1:25	3
2번 23+9=32	하	1:30	1:35	5
3번 127+4=131	하	1:39	1:44	5
4번 53+66=119	하	1:49	1:54	5
5번 296+23=319	중	1:59	2:09	10
6번 365+251=616	중	2:14	2:24	10
7번 628+511=1139	중	2:30	2:40	10
8번 531+725=1256	상	2:45	3:00	15
9번 2834+624=3458	상	3:10	3:25	15
10번 4813+1152=5965	상	3:32	3:52	20

2) 뇌파 측정

본 연구에 사용된 EEG System은 호주 컴퓨메딕(Compumedic)사에서 개발된 E-Series EEG System(Compumedic, 2001)을 사용하였고 뇌파 수집 소프트웨어는 E-Series 3.4 Release version을 사용하였다. 뇌파 측정을 위한 전극 부착 위치는 국제 전극 배치법으로 통용되고 있는 Jasper(1958)의 10-20 system을 따랐다. 부착되는 전극은 좌반구(Fp1, F3, F7, C3, T3, P3, T5, O1), 우반구(Fp2, F4, F8, C4, T4, P4, T6, O2), 그리고 제로선(Fz, Cz, Pz)의 19개 채널로 구성되어 있고(권석원 등, 2007) 부착 위치는 다음 [그림 1]과 같다. 그 외에 접지 및 기준 전극 등을 포함하여 두피에 부착되는 전극은 모두 23개가 사용되었다. 각 전극의 저항은 10Ω이하가 되도록 하였고, Sampling rate는 256Hz로 하였고 뇌파 측정 시에 잡파의 유입을 최소화하기 위하여 과제의 시작부터 끝까지 눈을 감은 상태에서 뇌파를 측정하였다.



[그림 1] 전극 부착 위치

뇌파 측정에 앞서 학습자들은 측정에 관한 충분한 설명을 듣고 안정을 취하는 시간을 가진 후 장비가 있는 조용한 장소에서 1명씩 전극을 부착하고 뇌파 측정을 시작하였다. 과제는 미리 녹음된 오디오 파일을 통해 들려주어 동일한 시점에 과제가 제시될 수 있도록 하였고, 정답을 말하기에 앞서 정답 버튼을 눌러 암산을 끝낸 시점을 표시하였다.

3) 뇌파 분석

뇌파 측정 후 눈 감고 안정 상태에서 60초간 측정된 뇌파와 암산 과제 해결 시 측정된 뇌파를 각각 분석하였다. WMI와 WMN의 뇌파 특성 비교를 위해 독립성분 t-검정을 이용하여 집단 간 차이를 분석하였다. 또한 뇌파 데이터 분석을 위해 분석 결과를 시각화하기에 편리한 Brain Map-3D를 이용하여 뇌파의 활성화 부위 및 활성화 시점을 분석하고 상대파워스펙트럼 분석을 통해 뇌파별 상대적 활성도를 구하여 집단 간 차이를 분석하였다. 뇌파 분석의 절차는 다음과 같다.

(1) Band Pass Filter by FFT

뇌파 분석에 앞서 원 데이터(raw data)의 파형을 보고 잡파(artifacts)의 유입 여부를 확인한 후 잡파가 포함되지 않은 자료에 한하여 Band Pass Filter by FFT를 이용하여 5Hz 미만, 50Hz 이상의 파를 제거한다(권용주, 박지영, 신동훈, 2006). 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)은 시간 도메인으로부터 주파수 도메인으로의 전환에 주로 사용하는 방법으로 계산식은 식 (1)과 같다(Harris, 1998).

$$\begin{aligned}
 G(\nu) &= \sum_{\tau=0}^{N-1} g(\tau) e^{-i2\pi\nu\tau/N} & (1) \\
 &= \sum_{\tau=0}^{N-1} g(\tau) \cos(2\pi\nu\tau/N) - i \sum_{\tau=0}^{N-1} g(\tau) \sin(2\pi\nu\tau/N) \\
 g(\tau) &= \frac{1}{N} \sum_{\nu=0}^{N-1} g(\nu) e^{+i2\pi\nu\tau/N} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{\nu=0}^{N-1} g(\nu) \cos(2\pi\nu\tau/N) + \frac{i}{N} \sum_{\nu=0}^{N-1} g(\nu) \sin(2\pi\nu\tau/N)
 \end{aligned}$$

(유한시간 $\tau = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 에서 표집된 시간함수, N 은 샘플의 총수, ν 는 주파수, 데이터의 수는 2의 제곱수)

(2) 상대 파워 스펙트럼 분석(Relative Power Spectrum Analysis)

상대 파워 스펙트럼 분석은 전체 주파수(5Hz~50Hz)에 대한 해당 주파수별 세기의 비율을 알아보기 위한 분석 기법으로 개개인의 두개골 두께 차이, 측정 당시 긴장 정도 차이 등의 개

인차를 줄일 수 있고, 상대적으로 우세한 뇌파를 계산할 수 있는 방법이다(김용진, 김재영, 권치순, 2005; Knyazev, Savostyanov, Levin, 2004). 본 연구에서는 그룹간의 비교를 위해 개인차를 줄이고 그룹 내에서 공통된 특성을 찾아낼 수 있는 상대 파워 스펙트럼 분석을 사용하였다.

(3) 3D Brain Map

3D Brain Map은 전문 연구자가 아닌 일반인들이 분석 결과에 대하여 보다 이해를 쉽게 하기 위하여 3차원 뇌매핑에 의한 시각화 기술을 이용하여 결과를 나타내 준다. 따라서 3D Brain Map을 이용하여 어떤 종류의 뇌파가 어떤 위치에서 보다 활성화되는지를 보다 쉽게 분석할 수 있다.

(4) 뇌파의 파장대

뇌파는 주파수에 따라 크게 속파(速波: fast wave)와 서파(徐波: slow wave)로 나눌 수 있는데 분석에 사용된 뇌파의 파장대 영역은 δ 파(0.2~4Hz), θ 파(4~8Hz), α 파(8~13Hz), β 파(13~30Hz), γ 파(30~50Hz)로 설정하였다((주)락사 홈페이지). 속파는 주로 고도의 인지처리나 복잡한 계산을 할 때 또는 긴장 상태일 때 발생하고, 서파는 편안한 안정상태일 때나 수면 상태일 때 주로 발생한다. 각 뇌파별 특성을 좀 더 자세히 알아보자면 δ 파는 주로 깊은 수면 중에 발생하고, θ 파는 정서 안정 또는 약간 졸린 상태, 정신 집중 상태일 때 나타난다. α 파는 눈을 감은 편안한 상태에서 주로 발생하고, 눈을 뜨면 억제된다. β 파는 주로 불안한 상태나 복잡한 계산 시에 나타나고, γ 파는 초조한 상태이거나 추리, 판단 등의 고도의 인지 정보 처리와 관련이 깊다.

III. 연구 결과 및 논의

1. 작업기억 검사 결과

작업기억 검사 결과 피실험자 32명의 언어적 작업기억(Verbal Working Memory:VWM) 점수는 94.44로 나타났고, 시공간적 작업기억(Visuo-Spatial Working Memory:V-SWM) 점수는 116.41로 나타났다. 피험자의 언어적 작업기억 능력을 중심으로 WMN그룹과 WMI그룹으로 나누었을 때 두 WMN그룹의 언어적 작업기억 점수는 122, WMI그룹의 언어적 작업기억 점수는 77로 나타났다.

두 집단 간의 WMN과 WMI의 평균 차이를 독립표본 t-검정을 한 결과 <표 2>와 같이 언어적 작업기억에 있어서 유의미한 차이가 있음을 알 수 있고($p < .05$) 시공간적 작업기억에는 유의미한 차이가 없음($p > .05$)을 발견할 수 있다. 따라서 언어적 작업기억을 기준으로 한 집단의 분

<표 2> 집단별 언어적 작업기억과 시공간 작업기억 점수 비교 검정

	WMN	WMI	t	p
VWM	122	77	9.383	0.000
V-SWM	122	127	-1.043	0.349

류는 타당하게 분류되었다고 볼 수 있다.

2. 암산 과제 수행 결과

WMN과 WMI의 암산 결과는 <표 3>과 같다. 암산 결과 총 10문제 중 WMN의 경우는 평균 9개, WMI의 경우는 총 5.8개의 정답률을 보였고, 두 집단 간에 유의미한 차이가 나타났다 ($p < .05$). 이와 같은 암산 과제 수행 결과를 봤을 때 언어적 작업기억이 암산 능력에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이것은 언어적 작업기억이 암산에 영향을 준다는 기존의 연구와 일치하는 결과이다(Ineke, Andre & Evie, 2007; Ineke & Andre, 2007; Ineke, Andre & Stijn, 2007).

<표 3> WMN과 WMI의 정답률 차이 검정

(MD: 집단 간 평균 차, SD: 집단 간 표준 오차)

	MD	SD	t	p
정답률 차이	3.2	.86023	3.720	.006

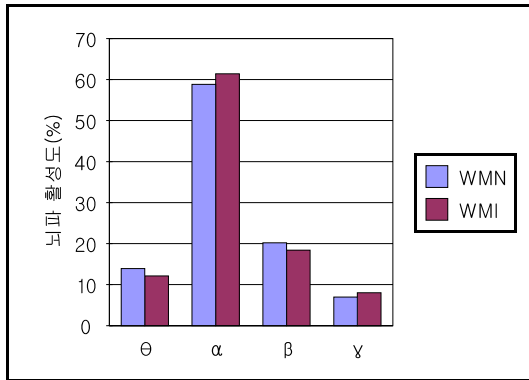
암산 후 피험자들의 구두 인터뷰 결과 WMN의 경우 '쉽다.', '두 자리씩 끊어서 계산하니 잘 되었다.' 등의 긍정적인 반응을 보였고, WMI의 경우 '숫자를 기억하기 힘들다.', '이미지를 이용하여 기억하려고 노력했지만 금방 흐릿해졌다.'라는 대체로 부정적인 반응을 보였다. 특히 WMI의 경우 연상의 방법으로 숫자를 기억하여 암산하려고 시도하는 학생이 많은 것으로 보아 암산에 있어서 필요한 언어적 작업기억의 제한으로 인하여 자연스럽게 시공간 작업기억을 사용하여 암산 과제를 해결하려 했던 것으로 보인다.

3. 뇌파 분석 결과

1) 기준 상태

눈을 감고 안정을 취한 기준 상태에서 WMN과 WMI의 뇌파 활성화도 결과 그래프는 [그림 3]과 같다. 상대 파워 스펙트럼 분석 결과 눈을 감은 상태에서는 $\alpha > \beta > \theta > \gamma$ 의 순으로 활성화가 되

었고, 이 결과는 눈을 감은 상태에서 α 파가 가장 활성화된다는 연구 결과와 일치한다((주)락싸 홈페이지).



[그림 3] 기준 상태에서의 뇌파 활성화도

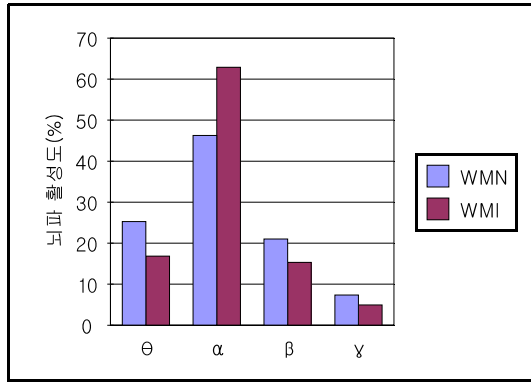
WMN과 WMI 간의 뇌파 활성화도를 비교하여 검정한 결과는 <표 4>와 같다. 모든 파장대에 WMN과 WMI 간에 유의한 차이를 보이지 않았다($p > .05$). 따라서 눈을 감고 안정을 취한 상태, 즉 작업기억을 사용하지 않는 상태에서는 두 집단 간의 뇌파 활성화도에 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러므로 작업기억 결손 학습자의 변별에 눈 감고 안정 상태에서 나타나는 뇌파의 특성을 이용할 수 없다.

<표 4> 기준 상태에서의 WMN과 WMI 뇌파 활성화도 비교 검정
(MD:집단 간 평균 차, SD: 집단 간 표준 오차)

	MD	SD	t	p
θ	1.8	1.09	1.652	0.137
α	-2.58	7.61	-0.339	0.743
β	1.78	5.25	0.339	0.743
γ	-1.08	3.3	-0.327	0.295

2) 작업기억 부하(load) 문제 해결 활동

작업기억 부하 문제 해결 활동 시의 뇌파 활성화도 결과 그래프는 [그림 4]와 같다. 문제 해결 활동 시 발생하는 뇌파의 상대파워 스펙트럼 분석 결과 WMN과 WMI 모두 $\alpha > \theta > \beta > \gamma$ 의 순으로 활성화 되었다.



[그림 4] 문제해결 시 뇌파 활성화도

<표 5>는 WMN과 WMI의 뇌파 활성화도를 비교 검정한 내용으로 α파와 θ파에 뇌파 활성화도에 유의미한 차이가 있음을 발견할 수 있다($p < .05$). 반면 β파와 γ파는 두 집단 간 뇌파 활성화도에 차이가 없음을 알 수 있다($p > .05$). 따라서 작업기억 결손 학습자 변별을 위해서는 작업기억에 부하 과제를 부과한 상태에서 뇌파를 측정하여야 하고, 변별을 위해 사용될 수 있는 뇌파로 α파와 θ파를 고려할 수 있다.

<표 5> 문제해결 시 WMN과 WMI 뇌파 활성화도 비교 검정

(MD: 집단 간 평균 차, SD: 집단 간 표준 오차)

	MD	SD	t	p
θ	8.44	3.47	2.428	0.041
α	0.27	6.11	-2.713	0.027
β	5.68	3.05	1.860	0.100
γ	2.40	1.58	1.520	0.167

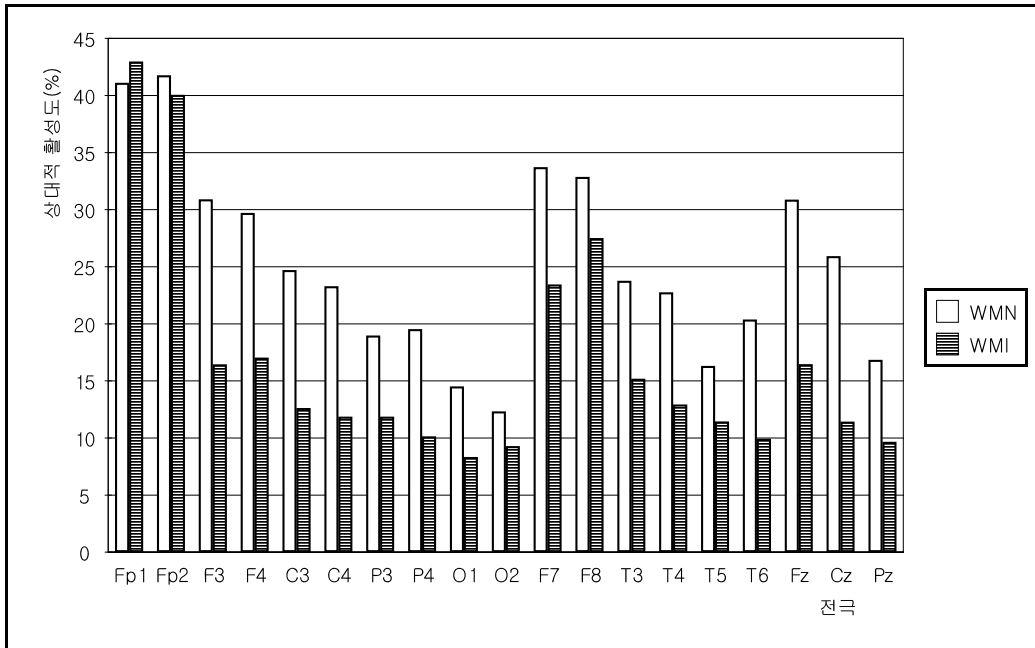
3) 문제해결 시 θ파의 활성화도

θ파는 서파로 정서 안정 상태, 집중 상태 또는 약간 졸린 상태일 때 활성화가 되는 파로 알려져 있는데 WMN과 WMI의 문제해결 시 θ파의 활성화도를 비교해본 결과 [그림 5]와 같은 그래프가 나왔다.

분석 결과에 의하면 WMN의 θ파 활성화도가 Fp1 전극을 제외한 모든 전극에서 WMI보다 높았다. 즉 WMN의 경우 보다 편안한 상태에서 정신 집중을 한 상태에서 암산에 임했음을 알 수

있다. 특히 두 집단 간 θ 파의 활성화 차이는 F3, F4, Fz, Cz에서 모두 12% 이상의 비교적 큰 차이를 나타낸 것으로 보아 다른 부분에 비해 전두엽 부분에 인지부하가 걸린다는 것을 θ 파의 활성화 차이를 통해 추론할 수 있다.

이 결과는 작업기억이 위치한 곳이 전두엽이라는 연구결과와 일치하며 특히 언어적 작업기억이 위치한 곳이 좌반구 전두엽 영역이고 시공간 작업기억이 위치한 곳이 우반구 영역임을 감안해볼 때 뇌파를 이용한 작업기억 결손 학습자 변별 시에 전두엽(F3, F4, Fz, Cz) 부분의 전극을 집중적으로 분석하는 것이 효과적임을 알 수 있다.



[그림 5] 전극별 θ 파의 활성화도 비교

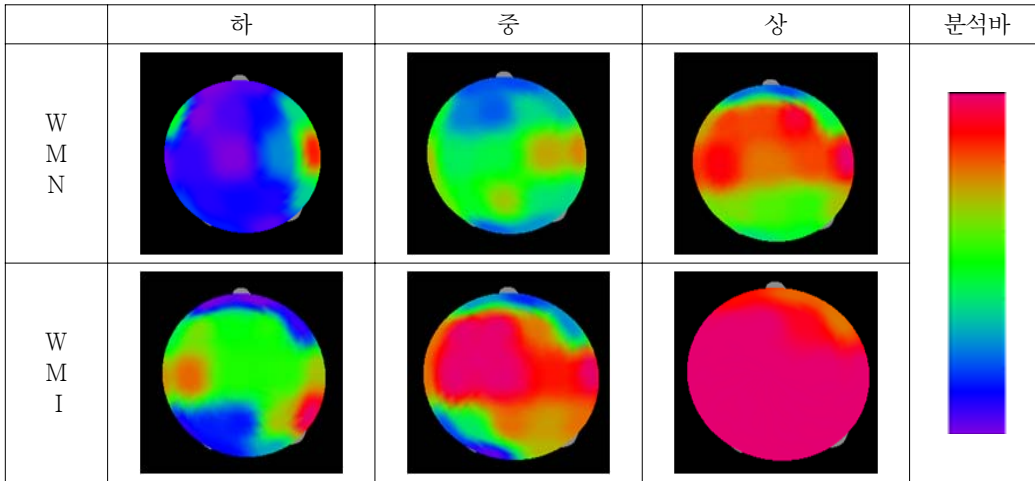
4) 문제의 난이도에 따른 β 파의 활성화도 차이

β 파는 주로 불안한 상태나 복잡한 계산 시에 나타나는 파로서 학습자의 인지부하를 알 수 있는 파이다. 문제의 난이도에 따라 3D Brain Map으로 나타낸 β 파의 활성화 상태는 <표 6>과 같다. 우측 분석바에 의하면 위쪽 붉은 계열로 갈수록 활성화 정도가 높음을 의미하고, 아래쪽 푸른 계열로 갈수록 활성화 정도가 낮음을 의미한다. 두 집단 모두 난이도가 높아짐에 따라 β 파의 활성화 정도가 높아진다는 공통점이 발견되었다. 하지만 WMN의 경우 난이도가 가장 높은 시점에서 β 파의 활성화도가 높아졌고, WMI의 경우 난이도 중간 시점에서 활성화 정도가 높

아졌음을 알 수 있다. 이와 같이 WMI의 경우 β 파가 보다 빠른 시점에 더 많은 영역에서 활성화된다는 것을 발견할 수 있다.

따라서 β 파의 상대적 활성화도에 따라 인지부하 시점을 가늠할 수 있고 인지부하 시점에 적절한 피드백을 제공해주는 학습 콘텐츠를 개발함으로써 학습자의 학습목표 도달에 긍정적인 역할을 할 수 있을 것이라 기대한다.

<표 6> β 파의 활성화 시점 비교



IV. 연구 결과의 적용 및 연구의 제한점

뇌파 분석 결과 눈 감고 안정 상태에서는 WMN과 WMI 간에 별다른 차이가 발견되지 않았지만 작업기억 부하 과제 수행 시에는 두 집단 간에 차이점이 발견되었다. α 파와 θ 파의 활성화 정도에 차이가 있었고, 특히 θ 파의 경우 WMI의 활성화도가 WMN보다 낮은 편에 속하였다. 이 점으로 미루어 볼 때, 작업기억 부하 과제를 이용하여 학습자의 뇌파 중 α 파와 θ 파의 상대적인 활성화도의 차이를 기준으로 작업기억 결손 학습자를 변별할 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 언어적 작업기억을 사용하는 가장 대표적인 예가 암산이므로 암산 문제를 작업기억 부하 과제로 사용하였지만 보다 정밀한 측정을 위해서는 언어적 작업기억 부하 과제 뿐만 아니라 시공간 작업기억 부하 과제 부여 시에 나타나는 뇌파의 차이도 분석하여야 할 것이다. 따라서 시공간 작업기억 부하 과제의 개발 및 뇌파의 분석이 후행 연구로 필요하다고 생각한다.

또한 암산 과제의 난이도에 따라 β 파의 활성화 정도가 점차적으로 높아짐을 두 집단 모두에서 공통적으로 발견할 수 있었다. 그러나 WMI의 경우 β 파의 활성화도가 WMN보다 빠른 시점에서 보다 많이 활성화됨을 보였다. 이는 β 파의 활성화 정도를 통하여 인지부하 시점을 추측할 수 있음을 의미한다. 만일 이 시점이 정확하게 파악된다면 이러닝 콘텐츠 학습 시에 학습자의 인지부하가 발생하는 시점에서 적절한 피드백-문제 다시 들려주기, 더 쉬운 방법으로 학습 내용 제시하기 등-을 제공해 줌으로써 학습에서의 실패를 최소화할 수 있는 적응형 이러닝 시스템의 구현 또한 가능해질 것이다. 하지만 정확한 인지부하 시점이 언제인지에 관한 명확한 정의가 부족한 상태이고 실시간으로 뇌파를 신뢰성 있게 분석하는 기술 또한 부족한 상태라 실시간 뇌파 분석 및 피드백 기술을 컴퓨터 기반 학습 콘텐츠에 반영하는 기술이 필요하다.

V. 결론

이 연구의 목적은 일반 학습자와 구분되는 작업기억 결손 학습자의 변별에 뇌파가 활용될 수 있는가 하는 점을 보고자 한 것이다. 이를 위하여 작업기억을 사용하는 동안의 뇌파 특성을 추출하기 위해서 작업기억을 이용하는 대표적인 과제인 암산과제를 부여하였으며 주로 언어적 작업기억이 암산 능력에 영향을 주기 때문에 실험군을 분류할 때는 언어적 작업기억 능력을 기준으로 하였다. 과제를 수행할 때 발생하는 뇌파의 특징을 비교하기 위해서는 먼저 기준 뇌파를 측정된 뒤에 작업기억 부하 과제를 제시하였다. 즉, 학습자에게 제시된 과제는 1단계의 눈 감고 안정 상태 부분과 2단계의 암산과제 부분으로 구성하였다. 이러한 연구 결과로부터 도출된 이 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, 암산 과제 수행 결과 WMI의 경우 10점 만점에 5.8점, WMN의 경우 10점 만점에 9점이 나와 두 집단 간의 암산 수행 능력에 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있었다($p=0.006$). 따라서 언어적 작업기억이 암산 능력에 영향을 줌을 확인하였다.

둘째, 암산과제 해결 단계로 들어가기 전에 눈 감고 안정 상태의 뇌파를 측정하는데 이 때의 뇌파를 기준 뇌파로 하였다. 눈 감고 안정 상태에서는 두 집단 모두 α 파> β 파> θ 파> γ 파의 순서로 뇌파가 활성화되었다. 따라서 기준 상태에서는 작업기억 결손 학습자의 뇌파와 정상 학습자의 뇌파에 별다른 차이점이 발견되지 않았다. 하지만 암산과제 해결 시 뇌파 특징을 분석한 결과 두 집단 모두 α 파> θ 파> β 파> γ 파의 순서로 뇌파가 활성화되었다. 이 때 WMI와 WMN의 뇌파 차이를 살펴본 결과 α 파와 θ 파에 집단 간 차이가 발생하였고($p<.05$), β 파와 γ 파는 두 집단 간에 차이가 없었다($p>.05$). 이를 통해 작업기억 결손 학습자의 변별에 작업기억 부하 과제 부

여 시 발생하는 α 파와 θ 파의 상대적인 활성도를 사용할 수 있음을 보았다.

셋째, 전극별로 θ 파의 활성도를 비교해본 결과 Fp1 전극을 제외한 모든 전극에서 θ 파의 활성도가 WMN이 WMI보다 높았다. 따라서 WMN의 경우 보다 안정된 상태에서 문제해결에 임했음을 알 수 있다. β 파의 활성도를 비교한 결과 WMI의 경우 활성화 시점이 보다 빨랐고 보다 넓은 영역에서 활성화됨을 알 수 있었다. 특히 전두엽 부분의 θ 파 활성도 차이가 다른 부분 보다 컸는데 이를 통해 암산과제를 해결하는 동안 WMI의 작업기억 부하 정도가 높아짐을 알 수 있다.

넷째, WMN과 WMI의 β 파 활성화 정도와 활성화 시점을 통해 학습자의 인지부하 정도를 추측할 수 있다. β 파는 두 집단 모두 작업기억 부하 정도가 높으면 높을수록 더욱 활성화되는 특징을 보였다. 하지만 두 집단의 β 파 활성화 정도와 활성화 시점은 서로 달랐는데 이를 통해 학습자의 인지부하 시점을 추측하고 그에 따른 알맞은 피드백을 제공해주는 컴퓨터 기반 학습 콘텐츠 개발에 사용할 수 있을 것이다.

작업기억 결손 학습자의 정확한 조기 발견과 그에 따른 알맞은 처치는 학교에서의 학습부진을 예방할 수 있는 좋은 방법이 되리라 생각한다. 본 연구 결과는 작업기억 결손 학습자의 뇌파 특성을 추출해냄으로써 기존의 작업기억 측정 검사에 신뢰성을 더해주었다는 점과 뇌파 기반 작업기억 결손 학습자 변별을 위한 기초를 마련했다는 데 연구의 의의가 있다.

참고문헌

- 권석원, 강민정, 신동훈, 권용주. (2007). 초등학교 과학 영재아의 뇌파 기반 변별 척도 개발, *초등과학교육*, 제25권 제5호(특별호), 556-566.
- 권용주, 박지영, 신동훈. (2006). 가설생성 학습 후에 나타난 초등 예비교사의 뇌파 변화. *초등과학교육*, 제25권 제2호. 159-166.
- 김용진, 김재영, 권치순. (2005). 창의적 과학문제 해결에서 초등학교 과학 영재아와 보통아의 뇌파 활성 차이. *한국생물교육학회지*, 33(1). 23-32.
- 윤중수. (2004). *임상뇌파학*. 고려의학.
- 이병택, 김경중, 조명한. (1996). 읽기폭에 따르는 언어처리의 개인차: 작업기억과 언어이해. *한국심리학회지: 실험 및 인지*, 8, 59-85.
- 이정모 외 17인(2008) *인지심리학*. 학지사.
- Adams, J. W., Hitch, G. J. (1997). Working memory and children's mental addition. *Journal of experimental child psychology*, 67. 21-38.
- Alloway, T. P., Banner, G. & Smith, P. (2008). Working memory and cognitive styles in adolescents' attainment. *Manuscript submitted for publication*.
- Alloway, T. P. (2006). How does working memory work in the classroom?. *Educational research and reviews Vol. 1* (4), 134-139.
- Alloway, T. P. (2008). Effective screening tools for children with working memory
- Alloway, T. P. (2008). Working memory, but not IQ, predicts subsequent learning in children with learning difficulties. *European Journal of psychological assessment*. 10월에 4번째것 출판
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Willis, C. & Adams, A. M. (2005). Working memory and special educational needs. *Educational and Child Psychology*, 22. 56-67.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). *Human memory: A proposed system and its control processes*. In K. W. Spence and J. T. Spence (Eds.), *The Psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (vol. 2). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556-559.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology*

- of learning and motivation. Vol. 8. pp. 47-89. New York: Academic Press.*
- Berka, C., Levendowski, D. J., Davis, G., Lumicao, M. N., Ramsey, C. K., Stanney, K. M, Reeves, L. M., Tremoulet, P. D. & Harkness-Regli, S. (2005). EEG indices distinguish spatial and verbal working memory processing: Implications for real-time monitoring in a closed-loop tactical tomahawk weapons simulation. *Proceedings of the 1st International Conference on Augmented Cognition, Las Vegas. NV. 22-27.*
- Dalia, M., Gloria, A. & Alonso, A. (2007). Relationship of working memory and EEG to academic performance: a study among high school students. *International journal of neuroscience. 117(6). 869-882.*
- Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of verbal learning and verbal behavior, 19, 450-466.*
- Gathercole, S. E. & Pickering, S. J. (2000). *Assessment of working memory in the classroom.* In S. Pickering(Ed.). Working memory and education. Elsevier Press.
- Gathercole, S. E. & Alloway, T. P. (2005). Working memory deficits in neurodevelopmental disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*
- Gathercole, S. E. & Pickering, S. J. (2004). The Structure of Working Memory From 4 to 15 Years of Age. *Developmental Psychology. Vol 40(2), 177-190.*
- Glanzer, M. (1972). *Storage mechanisms in recall.* In G. H. Bower & J. T. Spence(Eds.), The psychology of learning and motivation(Vol. 5, pp. 129-193). New York: Academic Press.
- Harris, C. M. (1998). The fourier analysis of biological transients. *Journal of neuroscience methods. 83. 15-34.*
- Ineke, I. & Andre, V. (2007). The role of phonological and executive working memory resources in simple arithmetic strategies. *European journal of cognitive psychology. 19(6). 910-933.*
- Ineke, I., Andre, V. & Evie, V. (2007). The role of working memory in carrying and borrowing. *Psychological research. 71. 467-483.*
- Ineke, I., Andre, V. & Stijn, D. R. (2007). The role of working memory in the carry operation of mental arithmetic: Number of value of the carry. *The quarterly journal of experimental psychology. 60(5). 708-731.*
- Jasper, H. A. (1958). The ten-twenty system of the international federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology. 10. 371-375.*
- Jed A. M., Hitten P. Z., Irina, I. G., Narcello, M. D., Xenophon, P., Susan, S. S., Dennis, D. S., & Todd, C. (2008). Effects of Working Memory Load on Oscillatory Power in Human

- Intracranial EEG. *Cerebral cortex*, 18. 1843-1855.
- Julie O., Arnaud, D., & Scott, M. (2005). Frontal midline EEG dynamics during working memory. *Neuroimage*. 27. 341-356.
- Knyazev, G. G., Savostyanov, A. N. & Levin, E. A. (2004). Alpha oscillations as a correlate of trait anxiety. *International journal of psychophysiology*. 53. 147-160.
- Michiko, A & Tsutomu, T. (2007). Evaluation Method of e-Learning Materials by α -Wave and β -Wave of EEG. *Human Interface, Part II, HCII 2007, LNCS4558*. pp.252-259.
- Swanson, H. L. & Beebe-Frankenberger, M. (2004). The relationship between working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for math disabilities. *Journal of Education Psychology*, 96(3), 471-491.
- Swanson, H. L. & Saez, L. (2003). *Memory difficulties in children and adults with learning disabilities*. Handbook of learning disabilities, Guilford Press
- Thatcher, R. W., North, D. & Biver, C. (2005). EEG and Intelligence: Relations between EEG coherence, EEG phase delay and power, *Clinical neurophysiology*. 116(9), 2129-2141.
- Waugh N. C. & Norman, D. A. (1965). Primary memory. *Psychological review*. 72. 89-104.
- (주)락싸 홈페이지, 2008. 10. 23. <<http://www.laxtha.com/>>.

* 논문접수 2008년 10월 29일 / 1차 심사 2008년 12월 1일 / 게재승인 2008년 12월 15일

* 김순화: 공주교육대학교를 졸업하고 현재 한국교육대학교 컴퓨터교육과 석사과정에 재학하고 있으며 유성초등학교 교사로 근무하고 있다.

* e-mail: soona6570@gmail.com

* 송기상: 아주대학교 전자공학과를 졸업하고 University of Washington에서 전기공학박사학위를 받았다. 현재 한국국원대학교 컴퓨터교육과 교수로 재직하고 있다. 주요관심분야는 지능형교수시스템, 멀티미디어의 교육적 이용, 증강인지이다.

* e-mail: kssong@cc.knue.ac.kr

Abstract

EEG Based Learner Working Memory Impairment Detection

Kim Soon-Hwa* · Song Ki-Sang**

It is known that working memory represents a crucial factor in the determination of student achievement, and therefore various tests have been developed to measure it. Research has reported that appropriate treatment addressing working memory impairment safeguards against potential study failure. Moreover, these same studies stipulate the importance of measuring one's working memory for enhanced school achievement. Data generated by currently developed programs depend solely on measurement, student condition, and/or measurement of capacity; hence, it is necessary to develop more precise method that are free from environmental conditions.

The electroencephalogram (EEG) is a test measuring human brain wave activity. It records all sensed electrical activity due to awareness, mental behavior, cognitive stimuli, physiological body change, brain disorders, and disease. Since mental behaviors and cognitive stimuli affect brain waves, it is believed that brain wave patterns differ in accordance with working memory. The measurement of working memory impairment via EEG may aid in overcoming aforementioned drawbacks and provide a direct measurement of normal and impairment of working memory.

In this paper, EEG was used to measure working memory. An analysis of main brain wave characteristics between normal and working memory impairment students was performed. The AWMA(Automated Working Memory Assessment) program was applied to the 32 participating male subjects for dividing normal and working memory impairment groups. Each subject was first recorded eye-closed stabilization status for 60 seconds, after that mental arithmetic tasks were given for 170 seconds. As two tasks were given, their theta, alpha, beta and gamma

* Graduate Student, Korea National University of Education Dpt. of Computer education

** Professor, Korea National University of Education Dpt. of Computer education

brain waves were recorded. A t-test and relative power spectrum analysis was used to investigate the brain wave characteristics of these two groups.

Experimentation revealed strong brain waves at the “eye-closed, stabilization state” in the order of $\alpha > \beta > \theta > \gamma$. On the contrary, when solving a mental arithmetic task, the order changed to $\alpha > \theta > \beta > \gamma$, and there existed group difference in the alpha and theta waves. Therefore, it is believed that brain wave measurement may be a very promising tool in working memory impairment measurement.

Key words: EEG, Brain wave, Working memory, Students with working memory impairments