

Science of Memory

심화스터디

Saturday 13th September, 2025

김태현 윤시원 정유경

BCSC 2025

Contents

1 스터디 소개

- 스터디 목표
- 스터디 진행 방식
- 스터디 일정

2 스터디 내용 소개

- 기억의 종류
- 장기 기억
 - Retrieval-induced forgetting fMRI 실험
 - 관련 ERP
 - 관련 Frequency Band
 - 수면 중 역할
- 작업 기억
 - Baddeley's Model
 - 관련 뇌 영역
 - 관련 Frequency Band
 - 실험 패러다임
- 암묵 기억
 - Repetition Priming
 - 뇌 활동 패턴
 - 관련 Frequency Band

3 발표를 맺으며

- 발표서 다루지 아니한 부분
- 소감

4 References

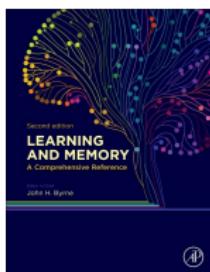
Science of Memory 스터디 소개

스터디 목표

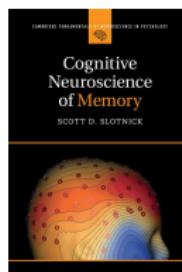
기억의 기본 원리부터 최신 연구 동향,
다양한 응용 분야까지 깊이 있게 탐구

스터디 진행 방식

매주 1회의 대면 활동을 기본으로 진행



(a) Learning and memory



(b) Cognitive Neuroscience of Memory

Figure 1: 스터디 교재

차시	materials	발제 내용	발제자
1	Learning and Memory	1.01 Learning Theory and Behavior: Introduction and Overview	공동
2		1.02 A Typology of Memory Terms	윤시원
3		1.03 Retrieval From Memory	김태현
4		1.15 Memory for Space, Time, and Episodes	정유경
5	Cognitive Neuroscience of Memories	1. Types of Memory and Brain Regions of Interest	윤시원
6		2. The Tools of Cognitive Neuroscience	정유경
7		3. Brain Regions Associated with Long-Term Memory	윤시원
8		4. Brain Timing Associated with Long-Term Memory	공동
9		5. Long-Term Memory Failure	정유경
10		6. Working Memory	윤시원
11		7. Implicit Memory	정유경
12	논문	8. Memory and Other Cognitive Processes	윤시원
13		9. Explicit Memory and Disease	김태현
14		10. Long-Term Memory in Animals	정유경
15	논문	11. The Future of Memory Research	김태현
16		Engram	김태현
17		Memory systems in AI	윤시원
18		Multimodal Brain Imaging in Memory Research	정유경

Table 1: Science of Memory 스터디 일정표

기억의 종류

Consciousness?

Kept in mind during
'delay period'?

Involve previous
episode?

Task
performance:

Subjective
experience:

General term:

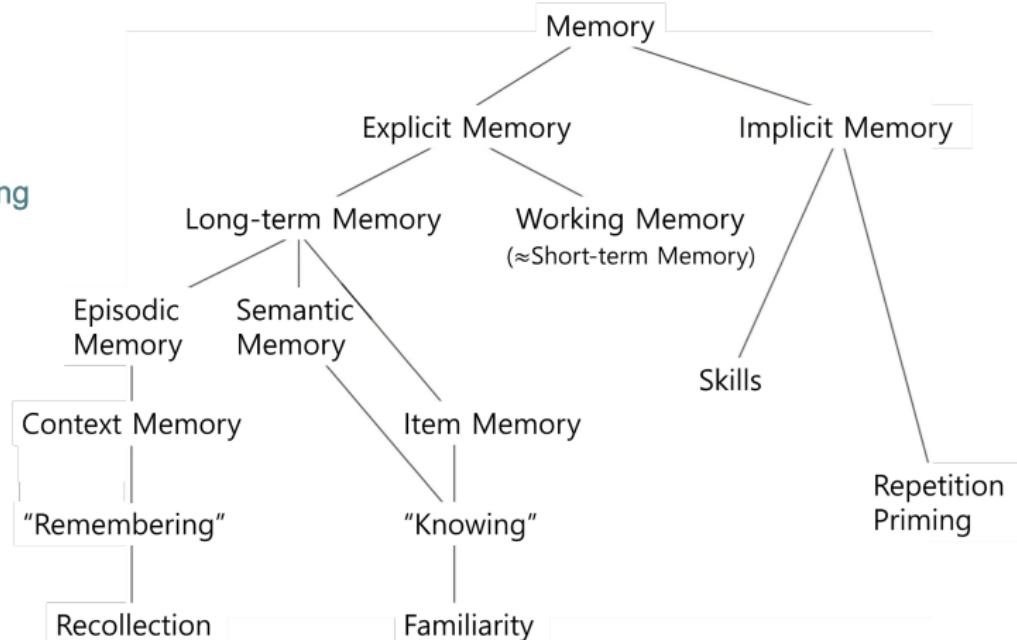


Figure 2: Organization of Memory types

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

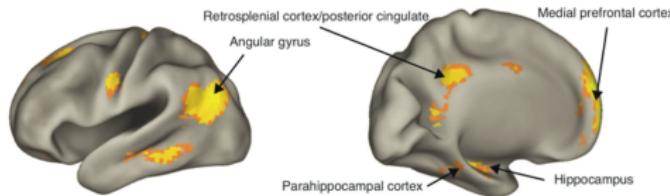
→ Test phase(Old-new recognition)



Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL},
dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

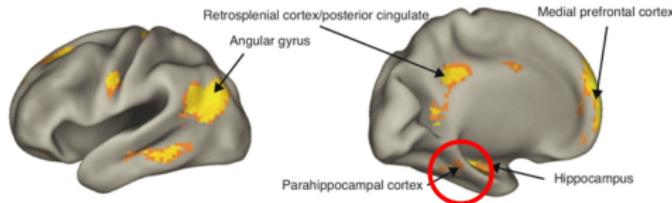
→ Test phase(Old-new recognition)



Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL}, dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

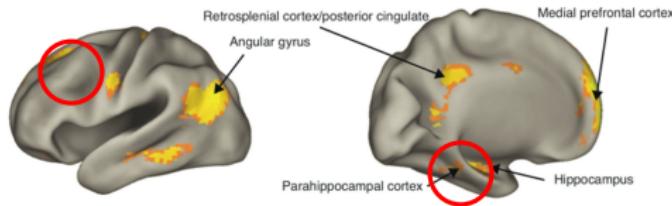
→ Test phase(Old-new recognition)



Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL}, dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

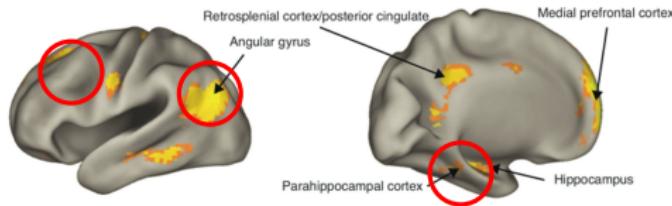
→ Test phase(Old-new recognition)



Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL}, dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

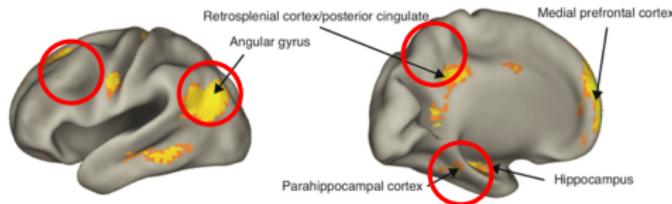
→ Test phase(Old-new recognition)



Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL},
dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

장기 기억 Long-Term Memory

: 오랜 시간 동안 정보를 저장하는 시스템

실험 패러다임:

Study phase

→ Delay period(수분~수시간)

→ Test phase(Old-new recognition)

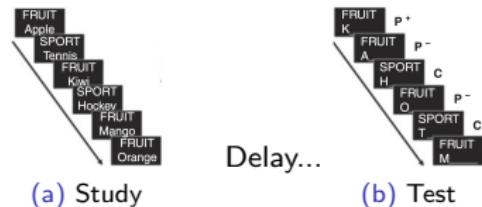
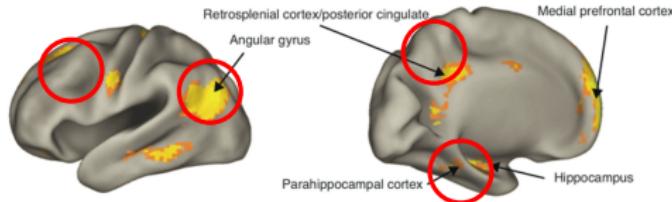


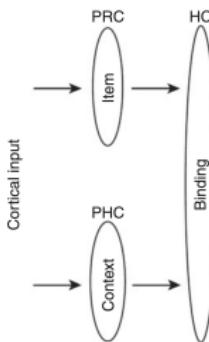
Figure 3: 실험 패러다임

Retrieval 시 활성화 뇌 영역:

감각 영역, 통제 영역(Medial Temporal Lobe^{MTL}, dorsolateral Prefrontal Cortex^{dl-PFC}, Parietal Cortex)



(a) Regions of the brain associated with episodic memory



(b) Model of MTL sub-region function

Figure 4: Retrieval 시 활성화되는 뇌 영역과 해마의 역할

공고화(Consolidation): 새로운 기억을 안정적인 장기 기억으로 전환하는 과정

- 표준 통합 이론(Standard consolidation model): hippocampal-cortical → cortical-cortical interaction
- 다중 흔적 이론(Multiple trace theory): hippocampus is involved in LTM throughout the lifetime

부호화(Encoding): 정보의 습득

- Subsequent memory analysis로 관련 뇌 영역 규명
- Medial Temporal Lobe, dorsolateral Prefrontal Cortex, Parietal Cortex → Retrieval과 차이 有

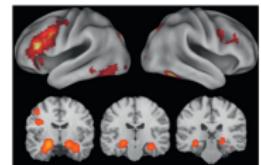
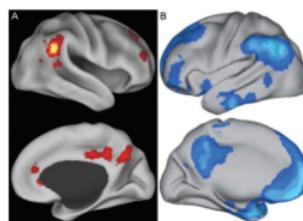


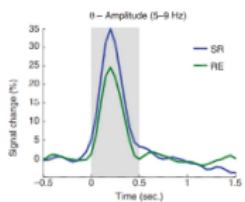
Figure 5: Regions of the brain associated with subsequent memory effects

망각(Forgetting):

- **Typical forgetting:** attention 부족으로 encoding 실패. dlPFC, mPFC, parietal cortex 활성화. DMN과 같은 패턴의 뇌 활성
- **Retrieval-induced forgetting:** 관련 기억의 방해를 받아 회상 실패 (fMRI 실험)
- **Motivated forgetting:** 의도적인 망각



(a) Subsequent forgetting fMRI activity and default network fMRI activity



(b) Retrieval-induced forgetting EEG activity

Figure 6: Forgetting

Retrieval-induced forgetting fMRI 실험

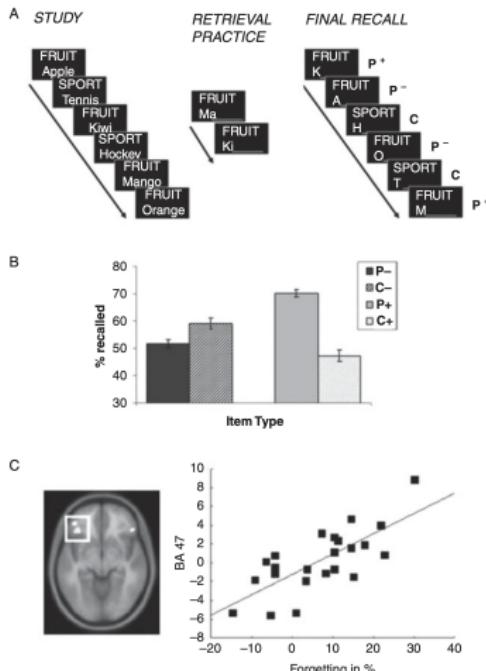


Figure 7: Retrieval-induced forgetting paradigm, behavioral performance, and fMRI activity

Used Paradigm:

- initial study phase: word pairs(category+examplar) presented
- intermediate retrieval practice phase: subset of categories(category+two-letter word cue)
→ non-presented words from this category are inhibited
- final recall phase: word pairs(category+examplar) presented

Examplar 분류:

- 대조군(non-practiced categories): low freq. (C+), high freq. (C-)
- 실험군(practiced categories): low freq. but practiced (P+), high freq. but not practiced (P-)

Result:

- P-는 P+에 의해 억제되어 대조군보다 낮은 연상 빈도를 보임
- P+은 연습의 결과로 대조군보다 높은 연상 빈도를 보임
- comparison from P- to P+: dlPFC의 활성이 클수록, RIF 효과가 더 높은 것으로 나타남

관련 ERP

Familiarity & Recollection

Familiarity (Know)

- mid-frontal old-new effect
- frontal brain activity within 300~500ms
- FN400: negative frontal activity in 400ms

Recollection (Remember)

- left-parietal old-new effect
- parietal brain activity within 500~800ms

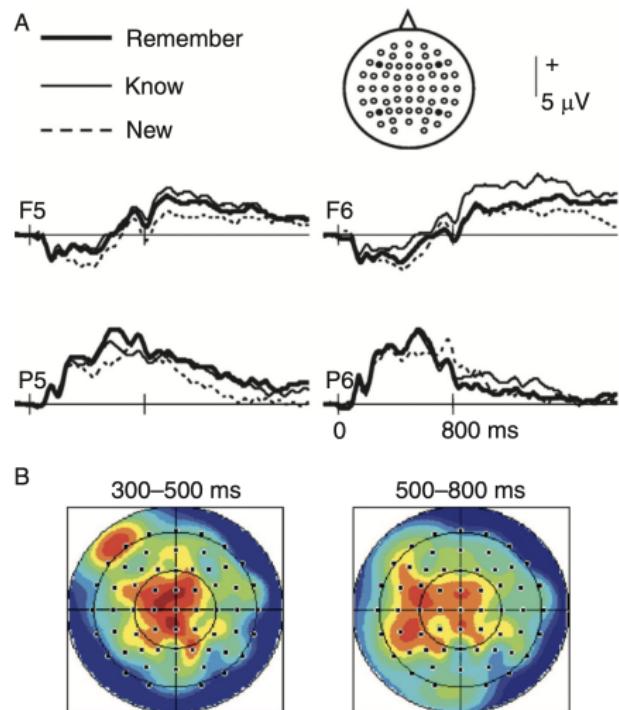


Figure 8: ERP activity associated with recollection and familiarity

관련 Frequency Band

Frequency band

- **gamma(>30Hz)**: 서로 다른 피질 영역의 기능 처리
- **alpha(8~12Hz)**: 피질 영역 활동 억제
- **theta(4~8Hz)**: 해마와 피질 영역 간 상호작용

LTM encoding & retrieval

- gamma increase in **parietal, occipital** regions
- alpha decrease in **anterior, posterior** regions
- theta increase in **frontal** regions, **thalamus**
- cross-frequency coupling^a
b/w **frontal theta** & **parietal-occipital gamma**,
b/w **frontal** & **thalamic theta**

^a두 영역 간 상호작용

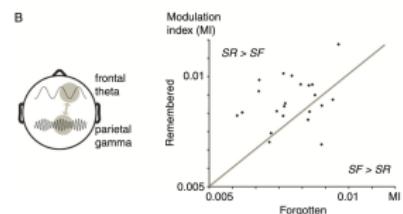
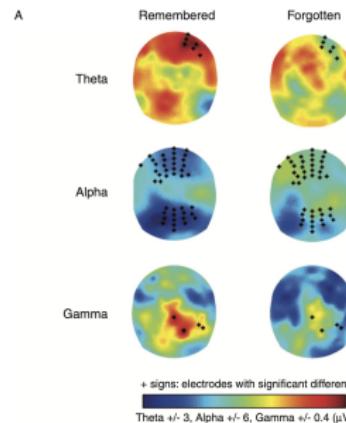


Figure 9: EEG frequency band activity associated with subsequently remembered and forgotten items

수면 중 역할

서파 수면(slow-wave sleep)

- 장기 기억 공고화가 주로 발생하는 시점
- 1Hz 이하 주파수에서의 widespread cortical modulation 수반
- 주로 3 or 4단계 REM 수면, 낮잠 중 발생
- 다른 뇌파(11~16Hz에서 진동하는 thalamic-cortical sleep spindles, 200Hz 근처에서 진동하는 hippocampal sharp-wave ripples^a)와 synchronize되어 기억 공고화에 최적화

^ahippocampal-cortical 상호작용을 조절하여 기억(from the previous waking period)의 replay를 반영

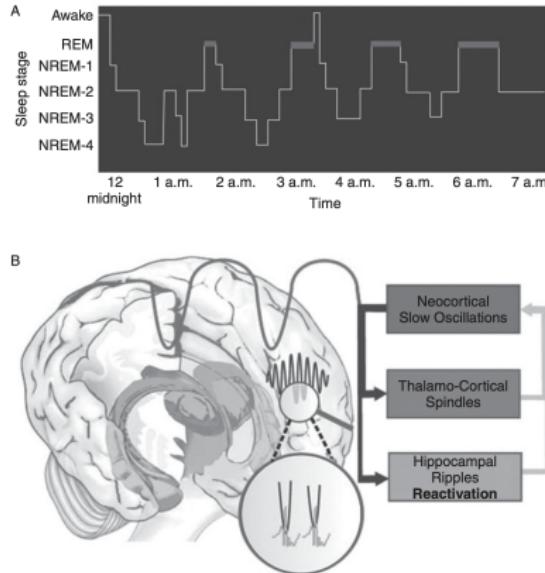


Figure 10: Sleep stages and brain oscillations associated with slow wave sleep and long-term memory consolidation

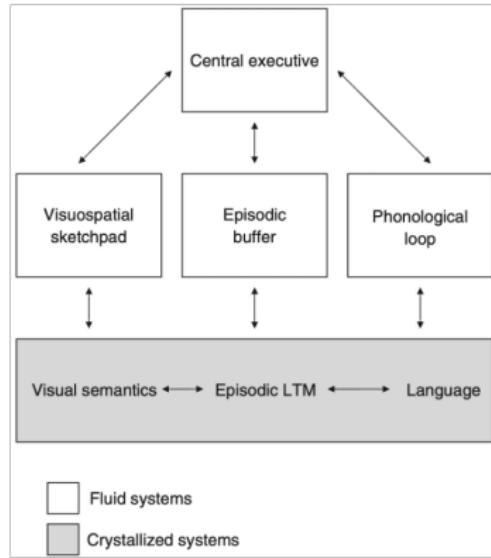
작업 기억 Working Memory

: 짧은 시간 동안 정보를 유지(maintenance)하고, 그 정보를 조작/이용해 현재 과제를 수행하는 인지 시스템

Working Memory vs Short-Term Memory (단기기억, STM)

- 두 용어는 종종 혼용되지만 (본 교재), 현대 인지신경과학에서는 개념적으로 구분하는 경향이다.
- 초기에는 단기 기억으로 불렸으나, 정보의 '능동적 처리' 기능이 강조되면서 작동 기억이라는 용어가 등장했다.
- **Short-Term Memory:**
정보를 짧은 시간동안 단순히 유지하는 것 (수동적)
- **Working Memory:**
정보를 짧은 시간동안 유지할 뿐만 아니라, 그 정보를 **능동적으로 조작하고 활용하는데 쓰인다.**
→ 단기 기억의 저장 특징 + **저장된 정보를 활용(조작/처리)**, 더 포괄적

Baddeley's Model of Working Memory

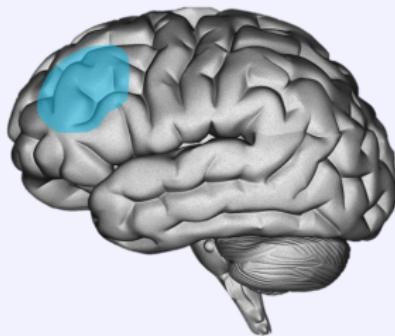


- **Central executive:**
주의력 배분, 하위 시스템의 작업 조율 & 총괄
- **Visuospatial sketchpad:**
시각/공간 정보를 유지하고 조작
- **Phonological loop:**
언어/청각 정보를 일시적 저장 및 되돌 때 관여
- **Episodic buffer:**
서로 다른 종류의 감각 정보들을 하나의 일화로 통합하고, 이 정보를 장기 기억으로 형성하거나 장기 기억 속의 일화를 인출할 때 사용되는 임시 작업 공간

Figure 11: Baddeley's working memory model

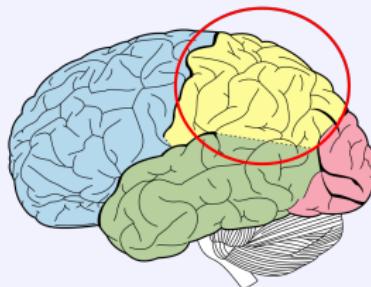
Brain Regions Related to Working Memory

dIPFC

**Control Tower**

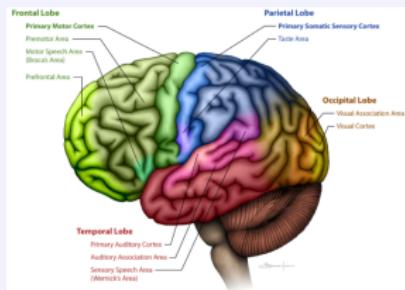
어떤 정보에 주의를 기울이고,
어떻게 처리할지 지시하는 상위
제어 기능을 수행

Parietal Cortex



주로 주의 집중과 정보의
공간적 위치를 파악하는 데
관여

Sensory Processing Regions



작업 기억의 내용이 저장됨

** 기본적이고 단순한 작업기억은 대체적으로 해마에 크게 의존하지 않음

Brain Activity Related to Working Memory

Gamma Activity (>30 Hz):

여러 뇌 영역에 흩어져 있는 정보 조각들을 하나의 의미 있는 기억으로 묶어주는 '정보 통합(Binding)' 역할

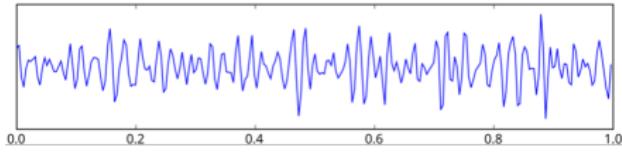


Figure 12: Gamma Activity

Alpha Activity (8~12 Hz):

불필요한 시각 정보 처리를 줄이기 위해 과제와 관련 없는 뇌 영역의 활동을 억제하는 역할

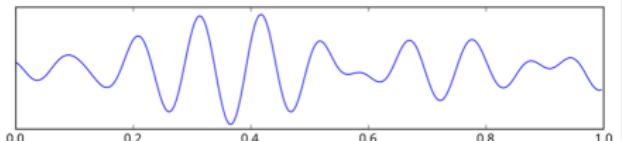


Figure 13: Alpha Activity

실험 패러다임

정보를 (1) 활성화된 상태로 유지하고 (2) 처리하는 능력을 측정함

대부분의 패러다임은 공통적으로 [학습 → 지연 → 검사]의 3단계 구조를 따름

- ❶ **학습 단계 (Study Phase):** 참가자에게 기억해야 할 정보를 제시
- ❷ **지연 기간 (Delay Period):** 몇 초 ~ 몇십 초 동안 아무것도 안 보여줌
→ 참가자는 이 시간 동안 학습한 정보를 마음속으로 적극적으로 유지해야 함
(작업 기억의 핵심적인 측정 구간)
- ❸ **검사 단계 (Test Phase):** 학습한 정보에 대해 질문하여 정확도를 측정함

패러다임 예시:

- ❶ **N-Back Task:** 연속된 자극(예: 자음 문자열)을 듣거나 보면서, 현재 자극이 N개 전에 제시된 자극과 일치하는지 여부를 판단
- ❷ **Operation Span Task:** 산술 문제를 풀면서(정보 조작) 동시에 단어를 기억해야하는(정보 유지) 과제

작업 기억 실험의 예시 (Harrison, S., Tong)

실험 목표: 작업 기억에 유지되는 시각 정보가 뇌의 초기 시각 피질(V1)에도 저장되는지 확인

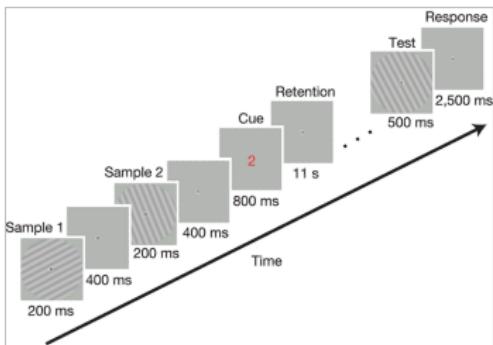


Figure 14: 실험 패러다임

실험 과정

- **자극 제시:** 서로 다른 방향의 격자무늬 두 개를 순차적으로 제시
- **단서 제시:** 두 자극을 모두 본 후, '1' or '2' 단서로 기억할 대상을 지정
- **기억 유지:** 11초 동안 빈 회색 화면 제시
→ 지시 받은 방향들을 적극적으로 유지 (**핵심 측정 구간**)
→ (다중 복셀 패턴 분석 (MVPA)를 이용)
- **test:** 새로운 검사 격자무늬 제시
→ 참가자는 자신이 기억하던 것보다 더 시계 방향 or 반시계 방향으로 돌아갔는지를 판단함

결론: 작업 기억의 정보가 고위피질뿐만 아니라 정보를 처음 처리한 초기 감각 영역(V1 등)에도 저장된다

암묵 기억 Implicit Memory

: 과거의 경험을 의식적인 자각 없이 현재의 과제 수행에 사용하는 기억

특징

- 비의식적: 기억하려는 노력 없이 자동적으로 발현
- 반응시간 감소 및 정확도 증가
- 피질 영역의 활동 감소
⇒ repetition suppression: 뇌가 해당 정보를 처리하는 데 더 적은 신경 자원을 사용함으로써 처리 효율이 높아짐

주요 유형

- Skills: 반복 연습을 통해 의식적 회상 없이 자동화되는 절차적 수행 능력
- Repetition Priming (반복점화): 반복적으로 특정 항목에 노출될 때, 해당 항목에 대해 더욱 효율적이거나 유창하게 처리가 일어나는 현상
 - Perceptual Priming (지각 점화): 동일하거나 유사한 특징이 반복될 때 처리 효율이 올라감
 - conceptual repetition priming (개념 점화): 의미, 범주, 연관성 차원에서 반복되거나 관련 단서가 있을 때 판단이 빨라짐

대표적인 실험 패러다임: Repetition Priming

: 참가자에게 의식적으로 무언가를 기억해내라고 직접적으로 요구하지 않고, 간접적인 과제를 통해 기억의 효과를 측정하는 것

기본 단계

- ① **학습 단계**: 피험자에게 여러 항목들을 제시하고, 각 항목에 대해 지각적 or 개념적 판단을 최대한 빨리 내리도록 지시한다.
이때 나중에 기억해야 한다고 말하지 않는다.
- ② **검사 단계**: 학습 단계에서 제시된 ‘오래된(old)’ 항목과 ‘새로운(new)’ 항목을 섞어 제시하고, 동일한 지각적 또는 개념적 판단을 빠르게 내리도록 한다.

결과

- 행동: 반복된 항목(old)에 대해 반응 시간이 단축함
- 뇌 활동: 반복된 항목(old)이 새로운 항목(new)에 비해 뇌의 피질 활동이 감소했다.

실험 예시 (Koutstaal et al., 2001)

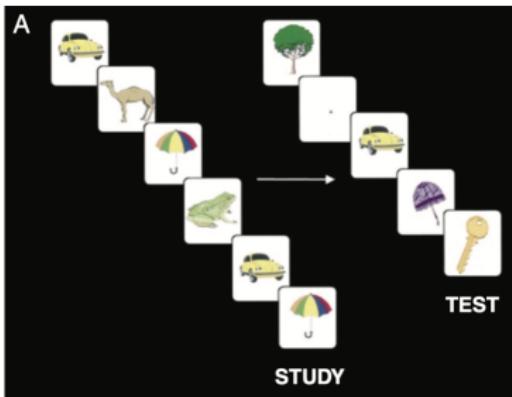


Figure 15: 실험 패러다임

학습: 가로세로 13인치 상자보다 큰지 작은지에 대해 최대한 빨리 답변

검사: 새로운 항목을 추가하여 학습 때와 같은 판단 과정을 지시

- same: 기존 / novel: 아예 다른
- different: same과 이름은 동일. 생긴 게 다른 (same name, perceptually diff)

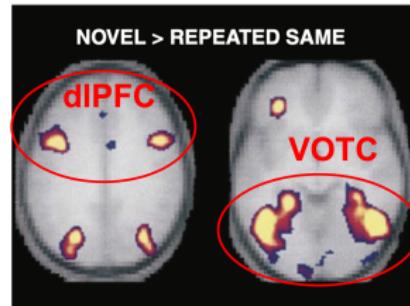


Figure 16: fMRI

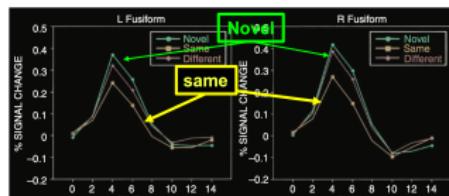


Figure 17: Fusiform의 활성화

dIPFC / Ventral
occipital temporal
cortex / right posterior
lateral temporal cortex
(그림에 X)에서 활성 감소

L/R Fusiform의
조건별 뇌 활동 변화

L: Novel > Diff ≈ Same

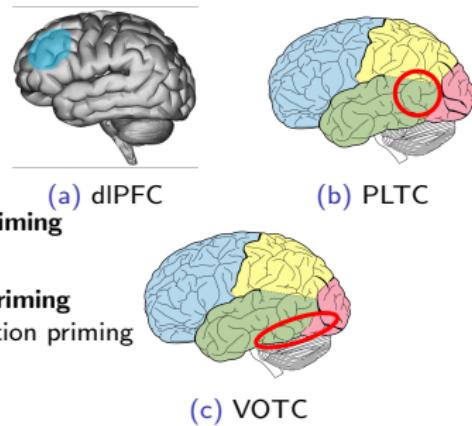
R: Novel ≈ Diff > Same

뇌 활동 패턴

- Repetition Suppression/adaptation

: 반복할수록 피질의 활동이 감소

→ 반복된 물체에 대한 처리를 효율적으로 하기 위한 메커니즘으로 해석



- fMRI 활동 → 피질영역 활동 감소

- DLPFC Posterior lateral temporal cortex

⇒ 개념적/언어적 정보에 대한 repetition priming

- Ventral occipital-temporal cortex (VOTC)

⇒ 지각적인(시각) 정보에 대한 repetition priming

left-VOTC - perceptual & conceptual repetition priming

right-VOTC - perceptual repetition priming

(a) dIPFC

(b) PLTC

(c) VOTC

Figure 18: 관련 뇌 영역

Brain Activity Related to Implicit Memory

Gamma Activity (25~80 Hz):

자극이 반복될수록 posterior 영역에서 활동이 감소하는 경향을 보임

⇒ visual processing region에서 gamma activity가 감소하는 경향 有

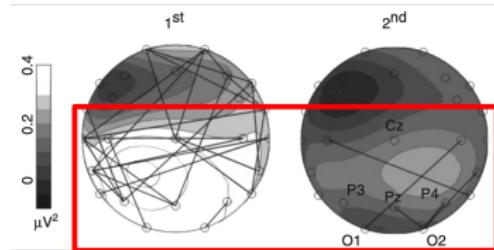


Figure 19: Gamma Activity

Alpha Activity (8~12 Hz):

자극이 반복될수록 inferior temporal cortex (특히 fusiform cortex)와 dlPFC 영역의 활동이 증가하는 경향 有

⇒ visual processing regions & dlPFC에서 alpha activity가 증가하는 경향 有

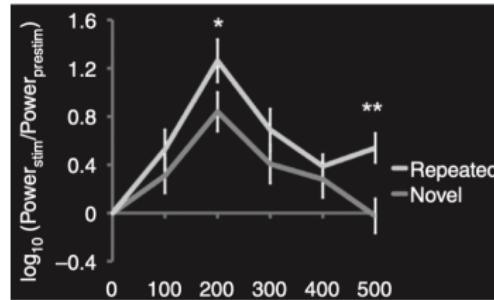


Figure 20: Alpha Activity at rFFG

- Gamma activity는 시각 피질의 처리를 반영한다.
→ 반복 점화 시 시각 처리 영역에서의 gamma activity 감소는 시각 피질 활성의 감소를 반영한다!
- Alpha activity는 억제적인 처리와 연관된다.
→ 반복 점화 시 dlPFC 및 시각 피질 영역에서의 alpha activity 증가와 phase lag는 시각 피질 활동 억제를 매개하는, dlPFC로부터의 top-down 신호라고 볼 수 있다!

발표에서 다루지 않았지만 공부한 것들

교재:

- 기술들
- 여러 세부적인 기억 유형들
- 주의력, 심상, 언어, 감정 등 다른 인지과정과 기억의 관계
- 기억 장애(예: 알츠하이머병, 외상 후 스트레스 장애)
- 동물들의 기억

자신이 관심있는 것들 조사 및 정리 후 공유:

- Multimodal Research
- Engram
- AI에서의 기억 체계

소감

- 단순히 학습 자료에서 얘기하는 바를 그대로 받아들이기보다는 '왜 그럴까'하고 더 생각해보았고, 조원들과 3시간이 부족할 만큼 열정적으로 의견을 주고 받았다. 이를 통해 조금 더 깊은 생각과 확장된 시야를 얻을 수 있었다.
- 스터디를 완주했다고 해도 기억에 대해 완벽히 이해한 것도 아니며, 오히려 아직도 이해가 안 된 부분과 궁금한 점이 많다. 하지만 본 스터디를 통해 기억에 대해 조금 더 다가갈 수 있었고, 기억을 앞으로 더 심화적으로 공부할 수 있게 해줄 밑거름을 쌓은 것 같다. 기억에 관하여 몰랐던 것들을 많이 알게 되어 정말 유익했던 스터디였다.

References

- Byrne, J. H. (Ed.). (2017). *Learning and memory: A comprehensive reference* (2nd ed.). Elsevier.
- Slotnick, S. D. (2025). *Cognitive Neuroscience of Memory* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Harrison, S. A., & Tong, F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. *Nature*, 458(7238), 632–635.
<https://doi.org/10.1038/nature07832>

https://books.byui.edu/bio_264_anatomy_phy_I/1111_cerebral_cortex
https://en.wikipedia.org/wiki/Electroencephalography#Wave_patterns
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1676555>
<https://brainstimulationclinic.squarespace.com/dlpfc/>