

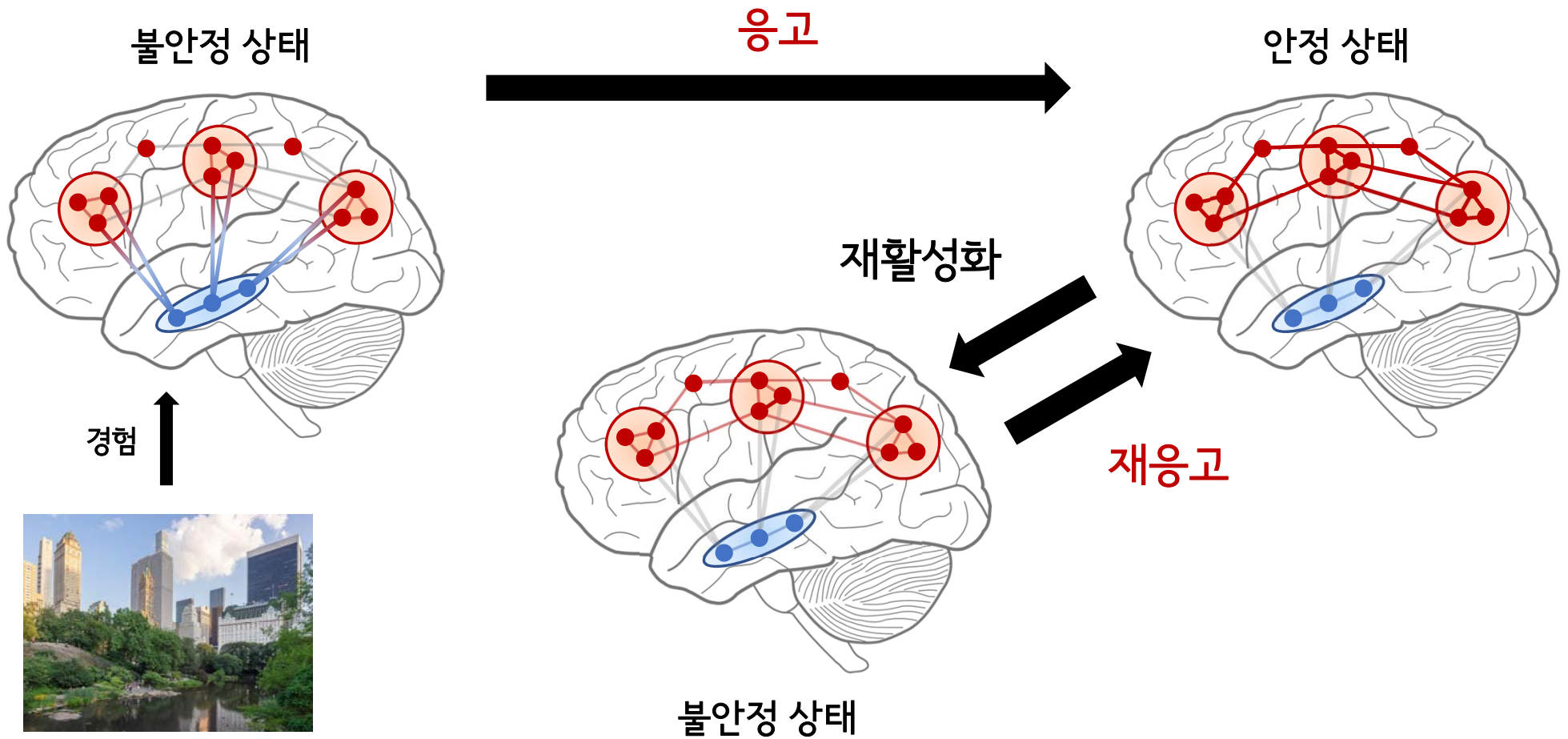
재응고를 통한 일화 기억 갱신에서 예측 오류의 비선형적 효과

Non-linear Effect of Prediction Error on
Episodic Memory Updating through Reconsolidation

김태훈

기억 응고와 재응고 Memory Consolidation & Reconsolidation

Mcgaugh, 2000; Dudai, 2004; Nader, Schafe, & LeDoux, 2000; Hupbach et al., 2013

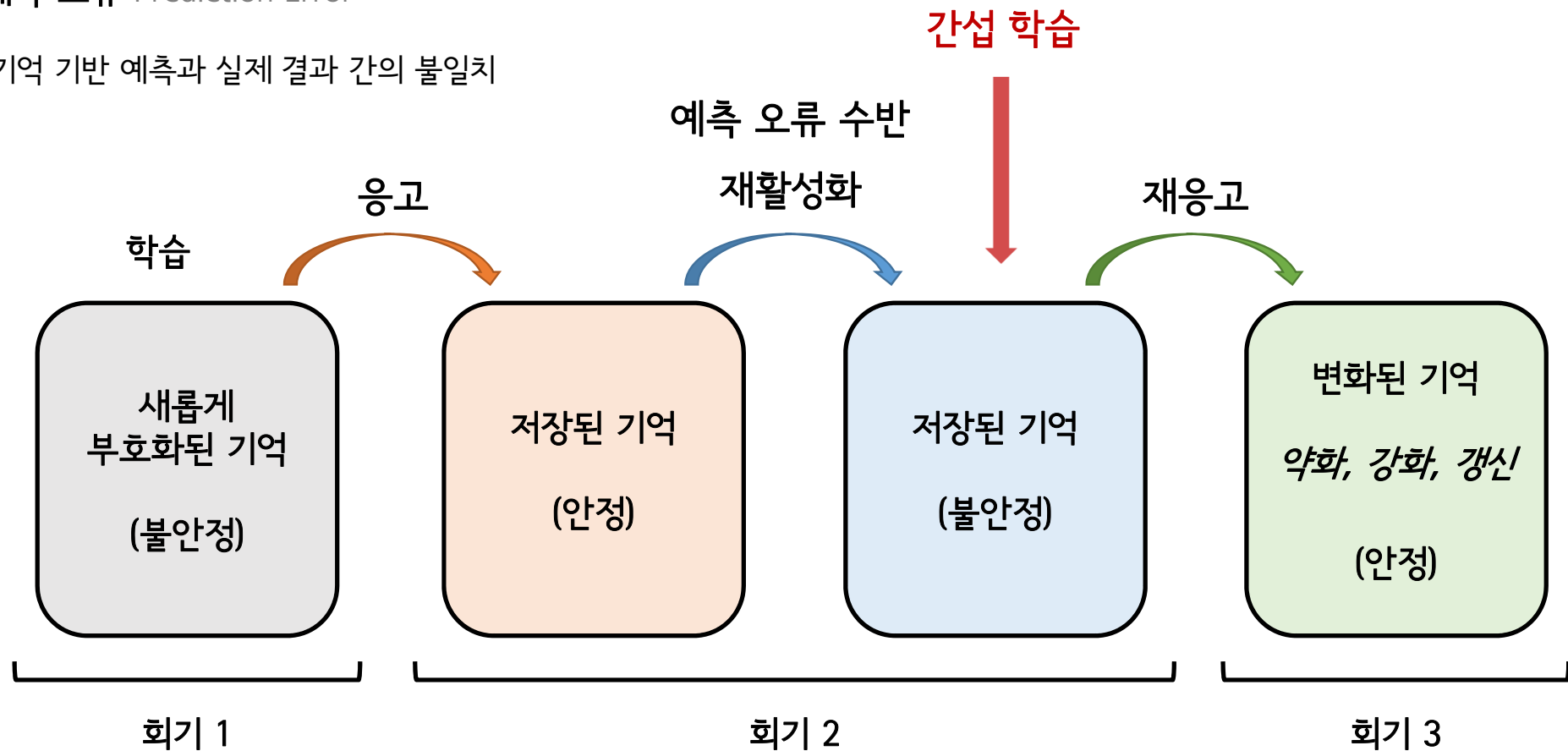


재응고 기반 기억 갱신 실험 패러다임

Nader et al., 2000; Hupbach et al., 2013; Sinclair, & Barense, 2019

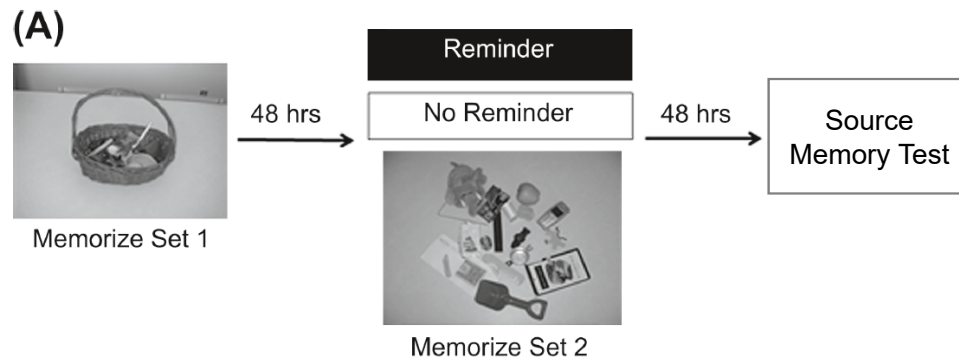
- 예측 오류 Prediction Error

- 기억 기반 예측과 실제 결과 간의 불일치



재응고를 활용한 일화 기억 갱신

Hupbach et al., 2009



맥락 기억 단서



실험 장소



실험자



절차 상기 질문

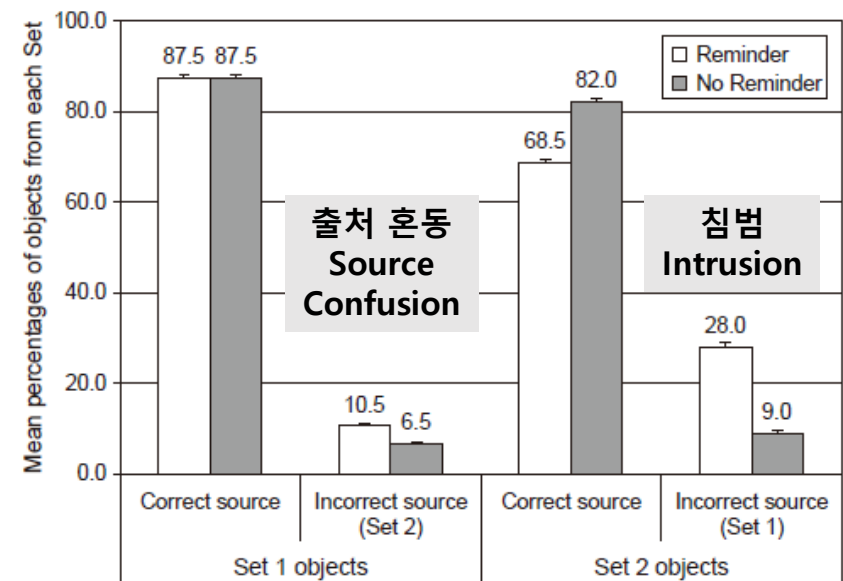
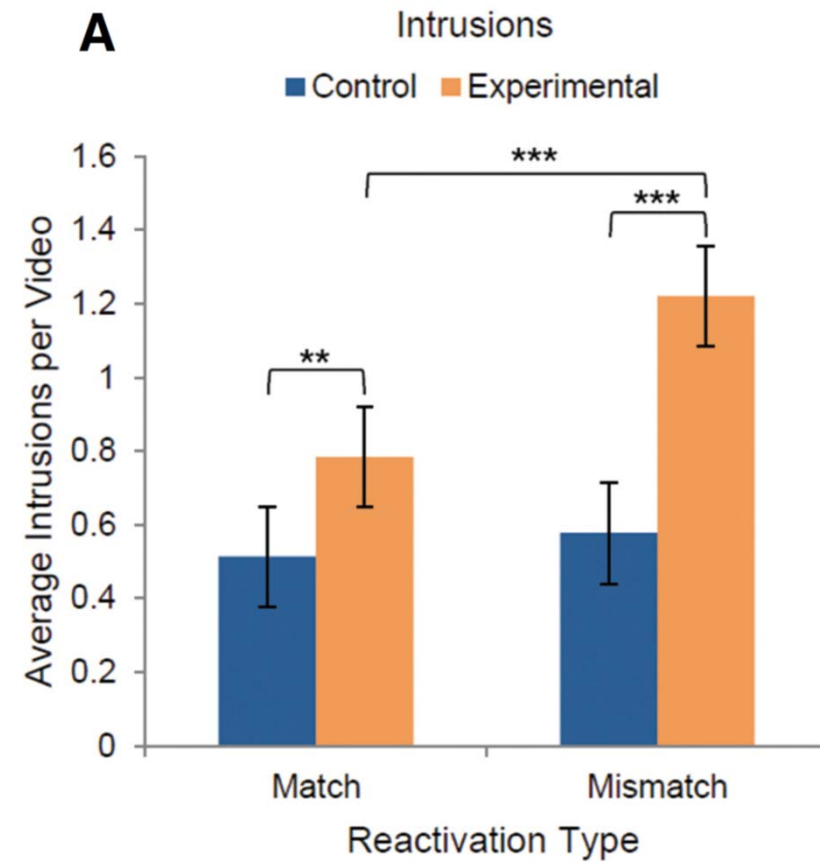
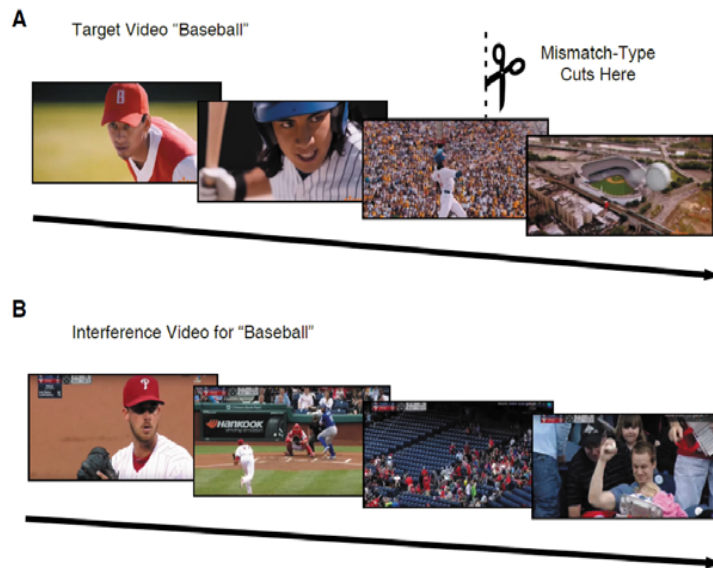
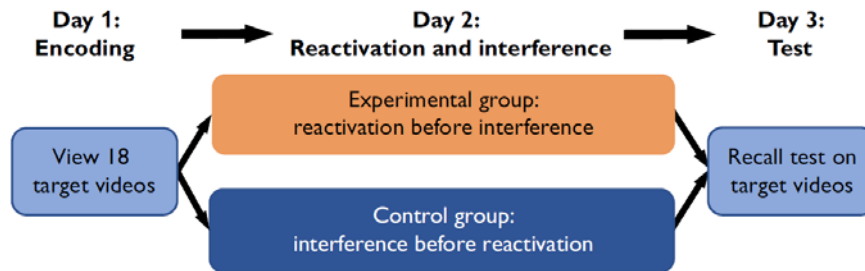


Figure 1. Experiment 1: Mean percentages of objects from Set 1 and Set 2 for which the sources were correctly or incorrectly identified in the reminder and no-reminder groups (error bars represent standard errors of the means).

재응고 과정에서 예측 오류의 필요성

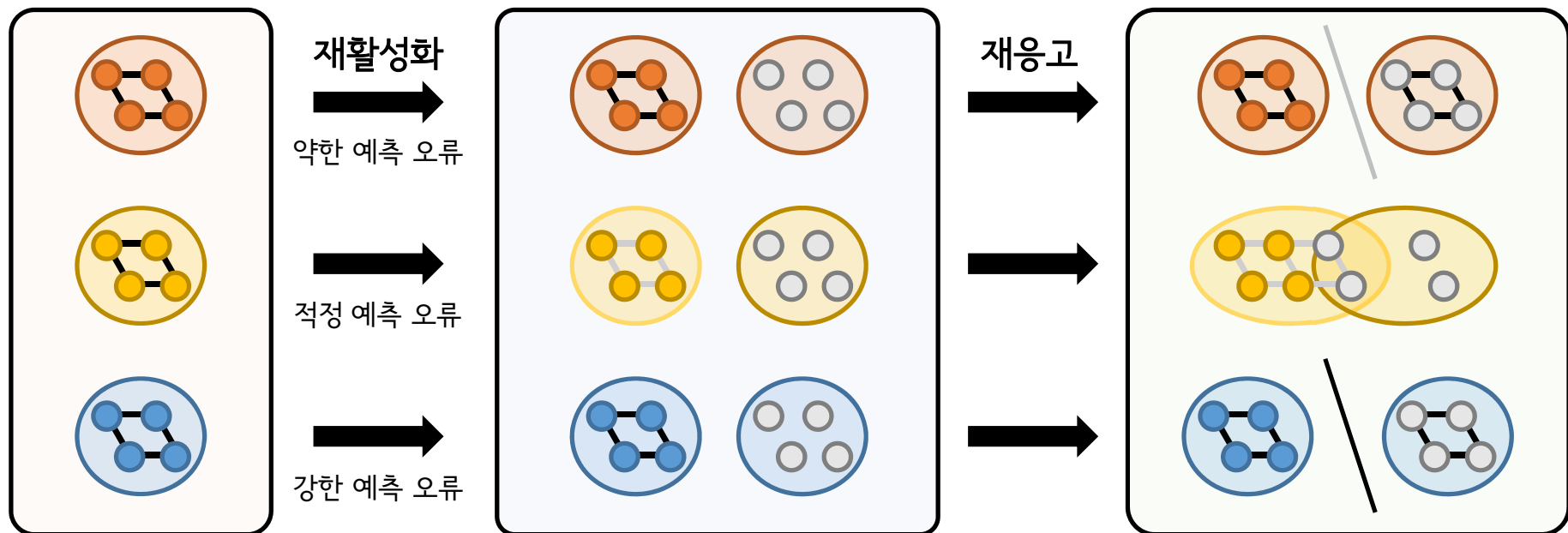
Sinclair & Barense, 2018



연구 질문 및 목표

Q. 예측 오류의 정도와 기억 갱신의 비선형적 관계?

✓ 재응고와 예측 오류의 적응적 역할 (Schacter et al., 2011; Exton-McGuinness et al., 2015; Simon et al., 2017)



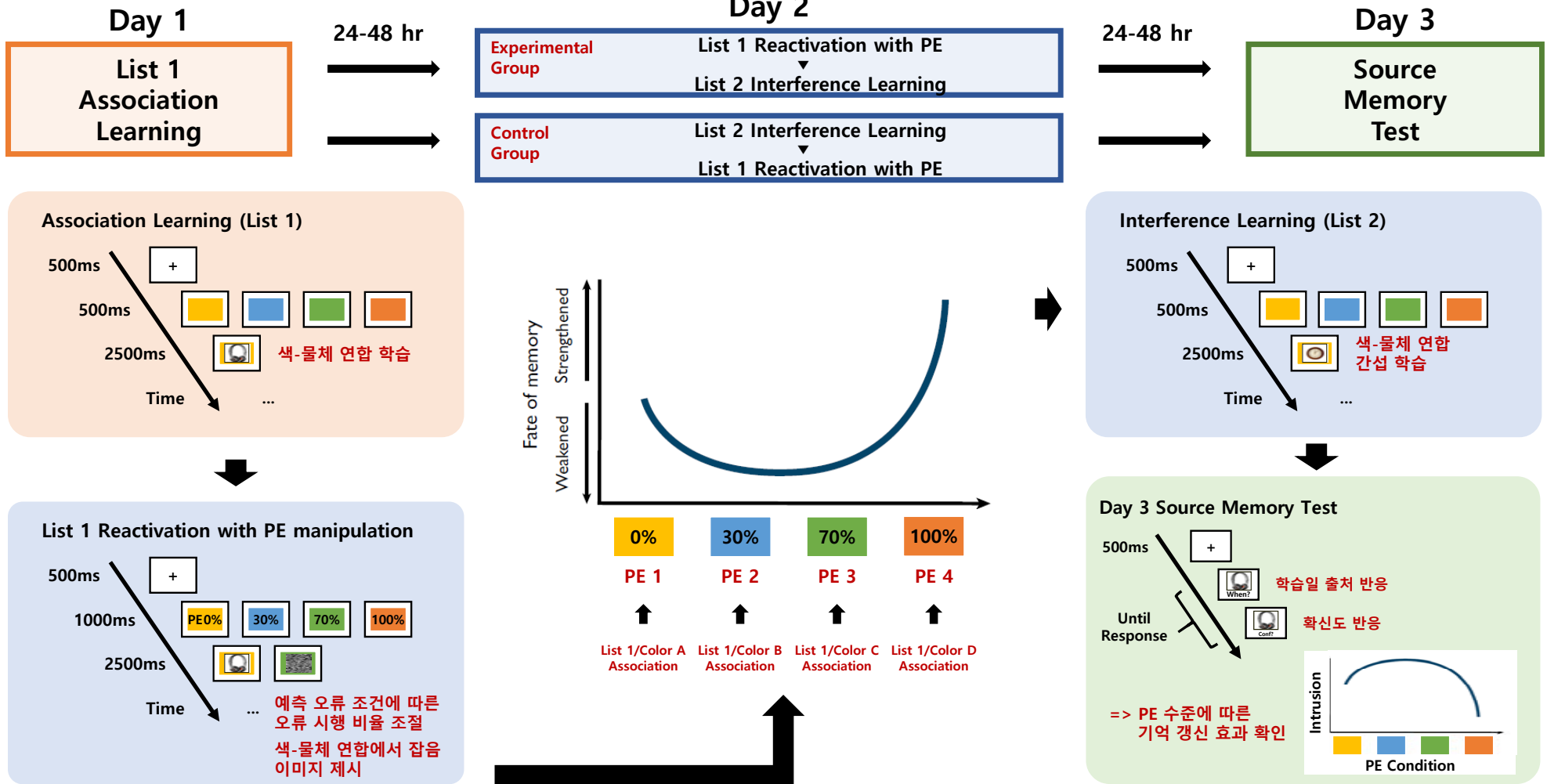
연구 질문 및 목표

Q. 예측 오류의 정도와 기억 갱신의 비선형적 관계?

✓ 재응고와 예측 오류의 적응적 역할 (Schacter et al., 2011; Exton-McGuinness et al., 2015; Simon et al., 2017)

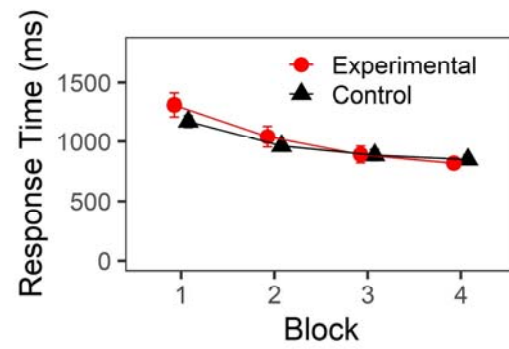
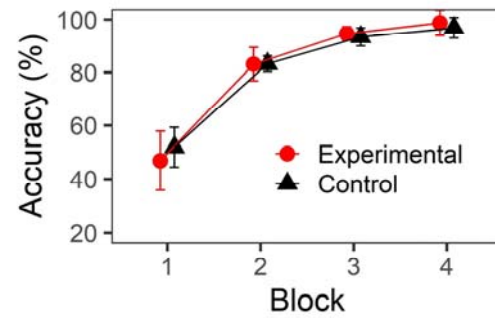
일화 기억의 맥락에서 예측 오류의 정도를 실험적으로 조작하여
예측 오류의 비선형적(역U) 기억 갱신 효과를 검증한다.

실험 1 (N = 16)

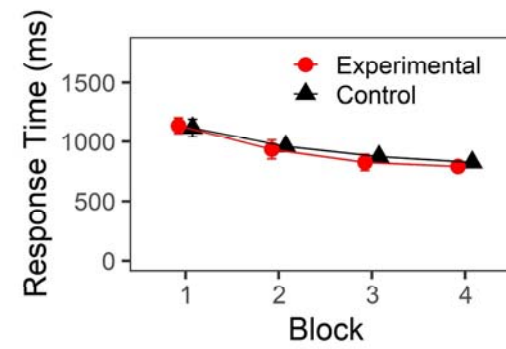
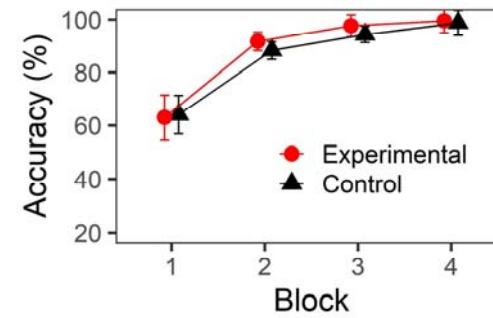


실험 1 (N = 16)

A. List 1

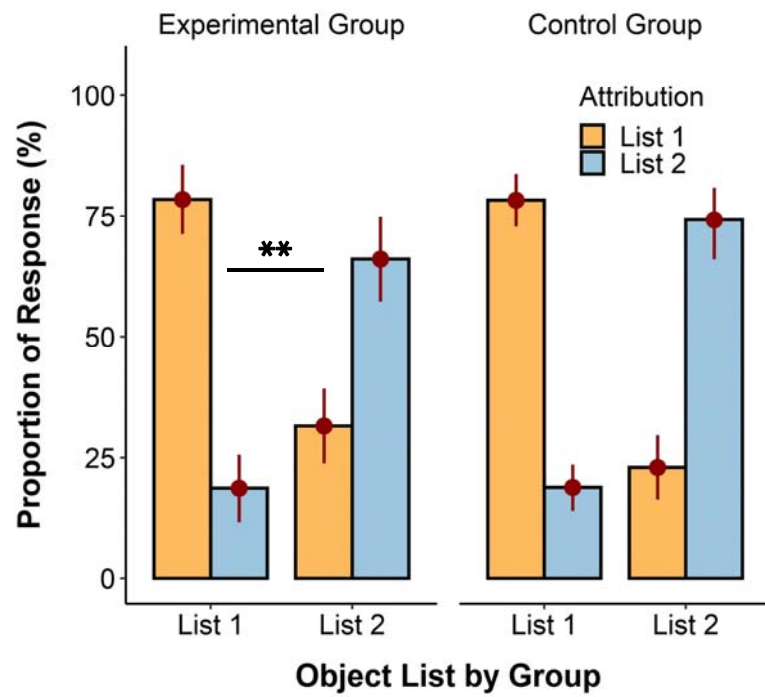


B. List 2

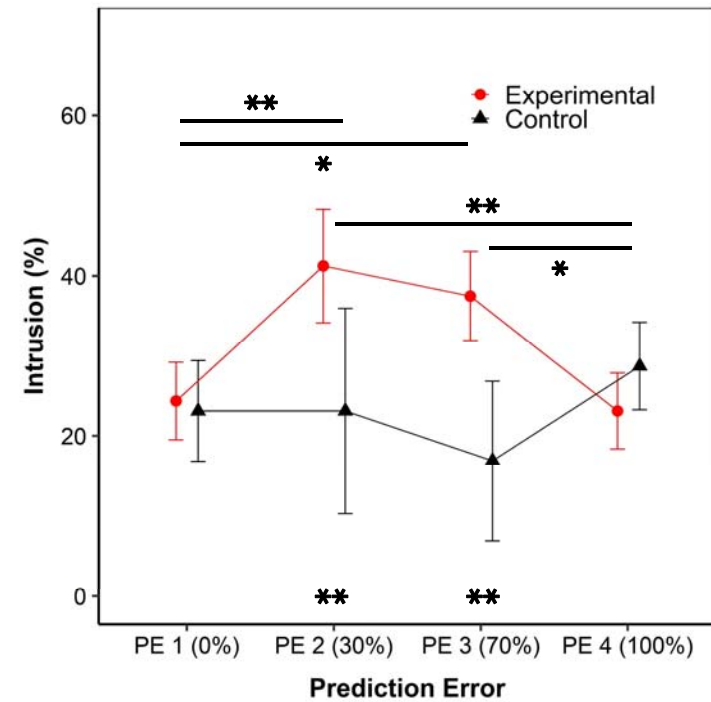


실험 1 (N = 16)

출처 반응의 비대칭적 패턴



예측 오류 조건에 따른 침범 반응



실험 1 결과 및 보완점

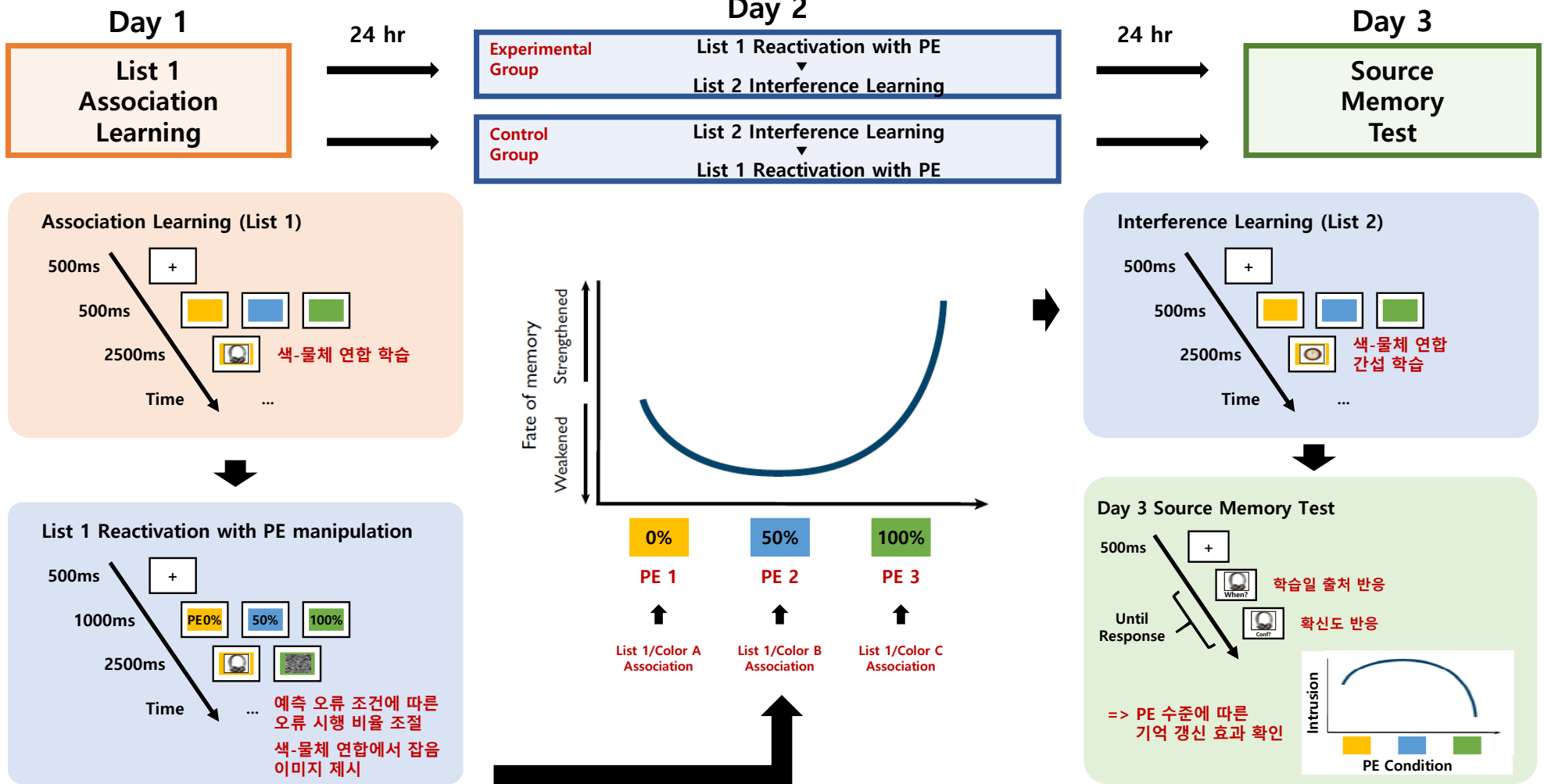
1. 결과

- 1) 예측 오류가 수반된 재활성화로 재응고가 유도된 실험 집단은 기억 갱신의 반응 패턴을 보였음.
- 2) 기억 갱신 효과는 예측 오류의 정도에 따라 비선형적으로 나타났음.

2. 보완점

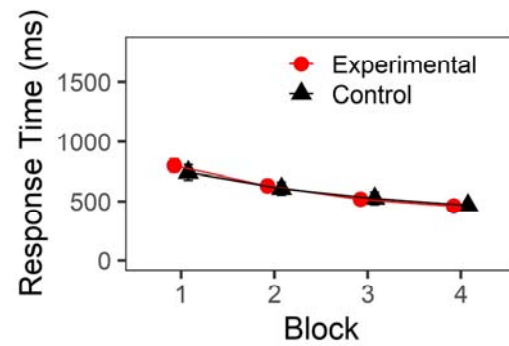
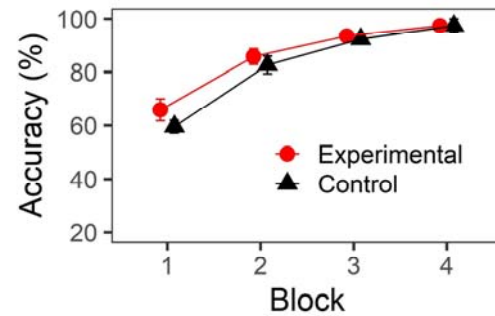
- 1) 실험의 물체 자극 보완
- 2) 예측 오류 조건에 할당되는 물체 수 증가(20 -> 30)
- 3) 네 가지 예측 오류 조건(0, 30, 70, 100%)을 세 가지 조건(0, 50, 100%)으로 축소
- 4) 회기 간 시간 간격을 약 24시간으로 통제.

실험 2 (N = 36)

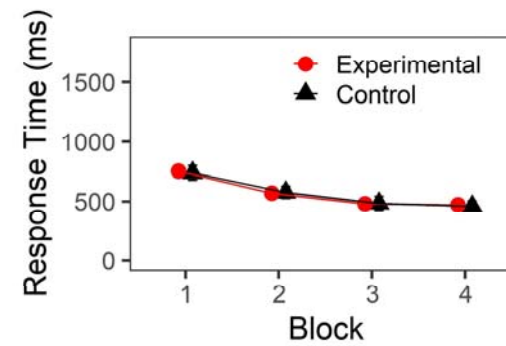
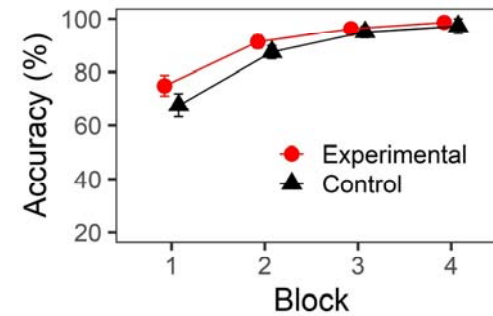


실험 2 (N = 36)

A. List 1

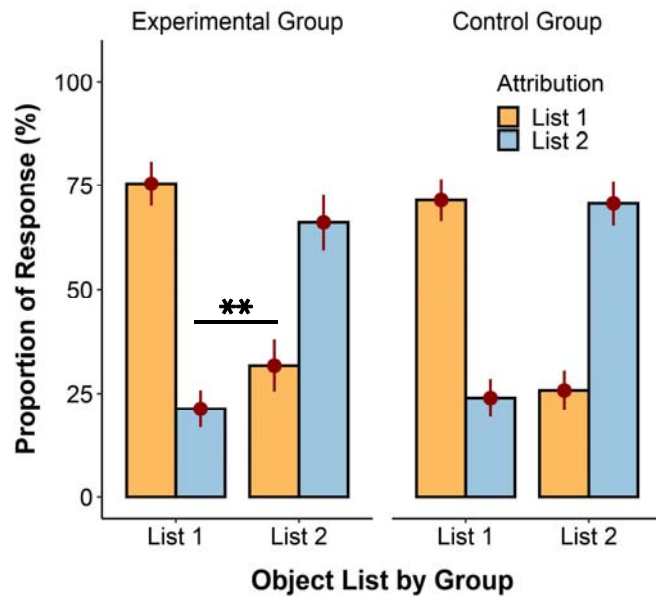


B. List 2

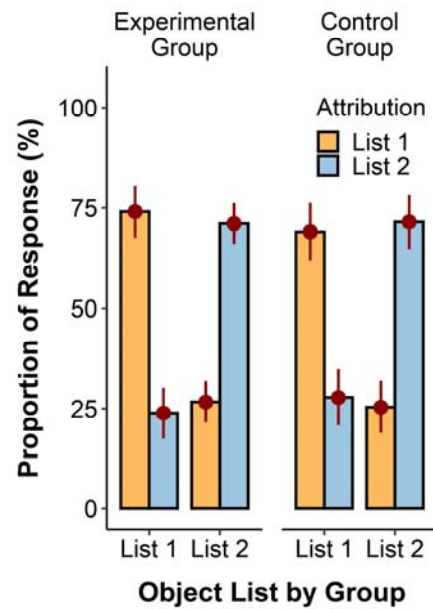


실험 2 (N = 36)

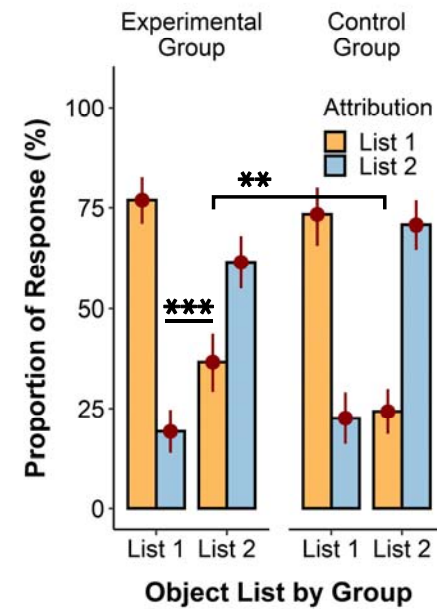
출처 반응의 비대칭적 패턴



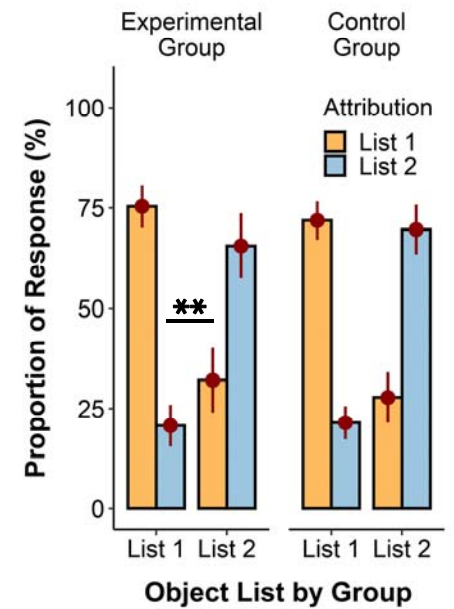
A. PE 1 (0%)



B. PE 2 (50%)

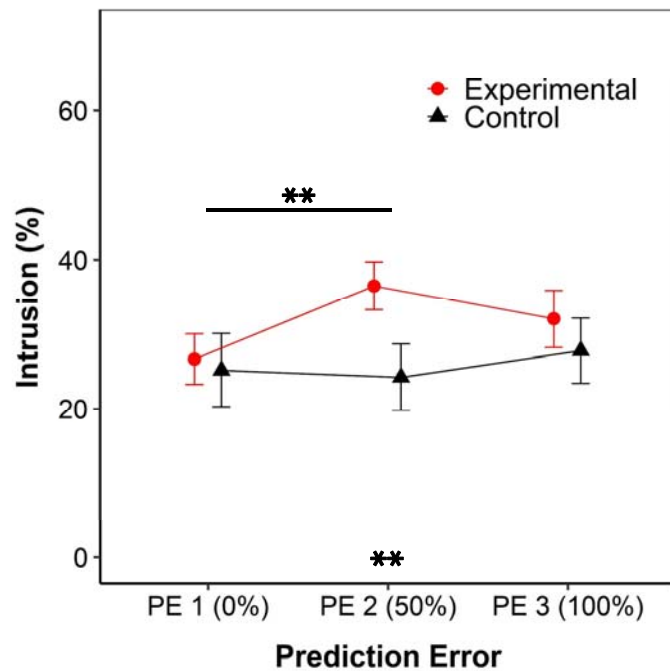


C. PE 3 (100%)





실험 2 (N = 36)

예측 오류 조건에 따른 침범 반응



모형 적합 및 비교

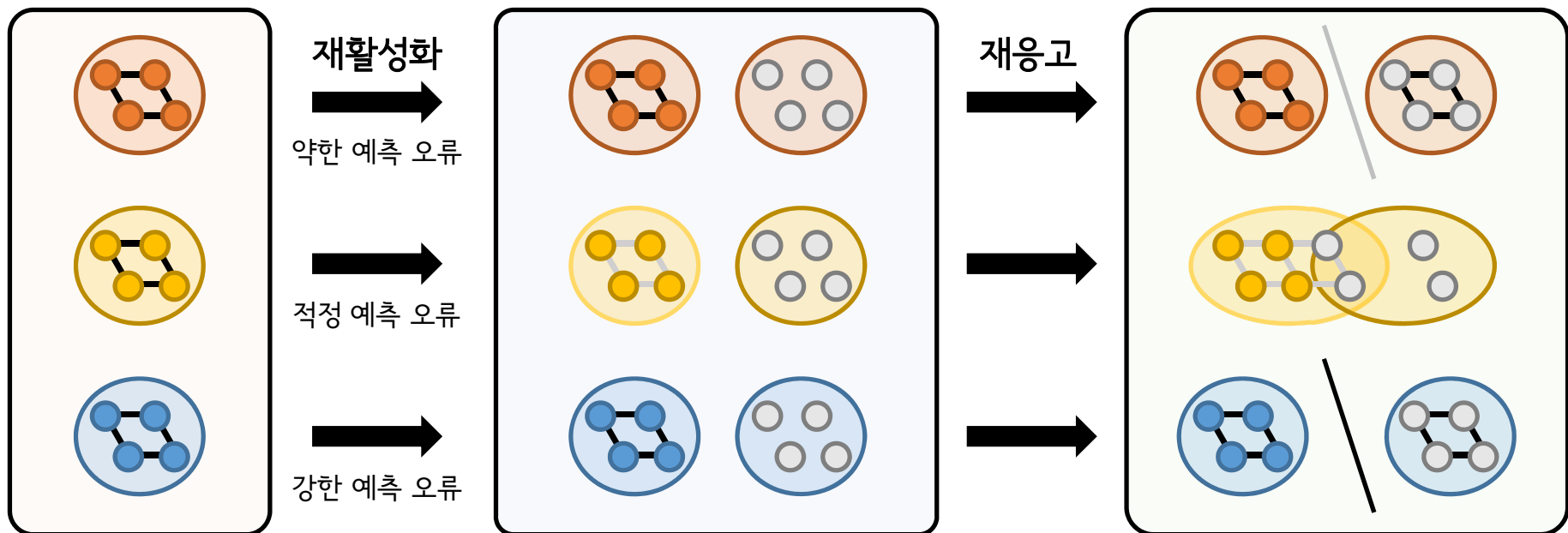
Linear Model  - $y = b_0 + b_1x_1 + (1 | \text{참가자}) + e$

Quadratic Model  - $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + (1 | \text{참가자}) + e$

	모형	AIC	BIC	
실험 집단	Linear	421	429	} $\chi^2(1) = 10.12, p < .001$
	Quadratic	413	423	
통제 집단	Linear	421	429	} $\chi^2(1) = .66, p = .418$
	Quadratic	423	433	

요약

- 예측 오류에 의한 재응고 기반 기억 갱신 효과 관찰
- 예측 오류 정도와 기억 갱신 효과 간 비선형적 관계 확인
- 적응적 기능으로서 재응고 과정과 예측 오류의 역할



종합 논의

- 예측 오류에 의한 재응고 기반 기억 갱신 효과 관찰 (실험 1, 2)
- 예측 오류 정도와 기억 갱신 효과 간 비선형적 관계 확인
 - 예측 오류 조건에 따라 뚜렷한 역U자 형태를 보이는 유의한 침범 반응 패턴 관찰 (실험 1)
 - 예측 오류와 기억 갱신 간 역U자 형태가 뚜렷하지 않았으나, 모형 비교 결과에서 비선형 모형의 적합성 확인 (실험 2)
- 실험 2 결과의 불안정성 원인? -> 실험 1과 2, 색에 연합된 물체 수 차이에 따른 단서의 효과 감소
 - 구별로서의 기억(memory-as-discriminant): 기억 단서의 재활성화 효과는 연합되는 항목의 수에 따라 달라질 수 있음 (Nairne, 2002)
 - 기억 단서에 연합되는 항목의 수가 증가할수록 단서의 인출 촉진 효과 저하 (Poirier et al., 2012; Bramão & Johansson, 2017)
 - 장소 맥락 단서가 친숙할수록 일화 기억 갱신 효과 감소 (Hupbach et al., 2011; Klingmuller et al., 2017)
 - 색-물체 연합의 수가 실험 1 20개에서 실험 2 30개로 증가함에 따라 색 단서의 효과가 불안정해진 것일 가능성이 있음

종합 논의

- **해마의 비선형적 불일치 신호(mismatch signal)와 기억 네트워크의 상호작용**

- 해마는 기억 부호화 및 응고 등 기억 과정에 관여 (Squire et al., 2004). 예측과 결과 간의 불일치에 대한 불일치 신호 생성 (Kumaran & Maguire, 2007)
- 해마의 불일치 신호는 예측과 결과 간의 불일치 정도에 비선형적으로 반응 (Long et al., 2016). 기억이 갱신될 때 해마 반응 증가 (Forcato et al., 2016)
- 해마가 적정 예측 오류에 반응하여 기억 네트워크의 상호 작용을 유발. 재응고를 유도할 가능성이 있음

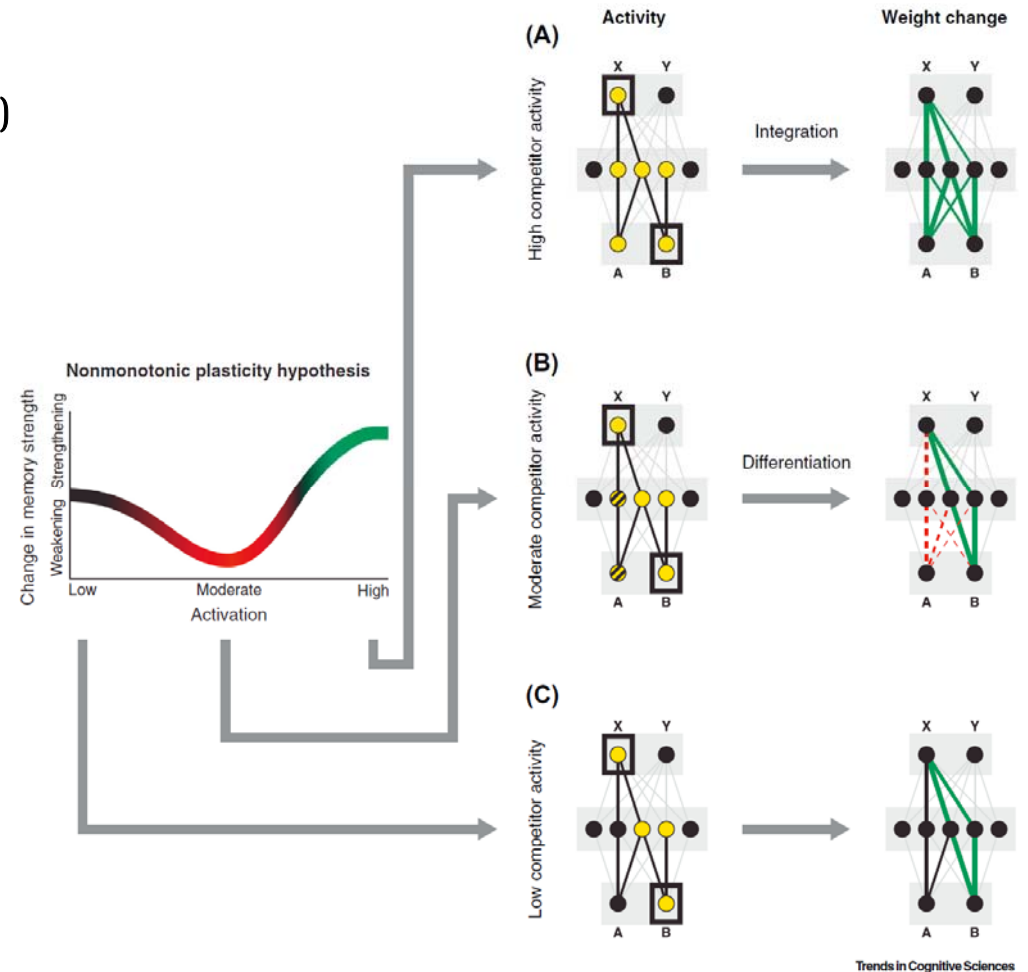
- **비단조적 가소성 가설 (nonmonotonic plasticity hypothesis)**

- 연합 기억 표상은 신경망의 확산 활성화와 시냅스 연결 강도 조절을 통해 변화할 수 있음 (Ritvo et al., 2019)
- 연합 요소의 재활성화는 연결된 요소로 확산되어 요소간 활성화 차이 발생
- 활성화 강도 차이에 따라 시냅스 연결 강도가 조절. 연합의 강화, 약화를 유발.
- 예측 오류는 재활성화 강도를 조절하여 연합 표상의 변화를 유발함으로써, 기존 연합에 새로운 정보가 통합되도록 할 수 있음

종합 논의

• 비단조적 가소성 가설 (nonmonotonic plasticity hypothesis)

- 연합 기억 표상은 신경망의 확산 활성화와 시냅스 연결 강도 조절을 통해 변화할 수 있음 (Ritvo et al., 2019)
- 연합 요소의 재활성화는 연결된 요소로 확산되어 요소간 활성화 차이 발생
- 활성화 강도 차이에 따라 시냅스 연결 강도가 조절. 연합의 강화, 약화를 유발.
- 예측 오류는 재활성화 강도를 조절하여 연합 표상의 변화를 유발함으로써, 기존 연합에 새로운 정보가 통합되도록 할 수 있음



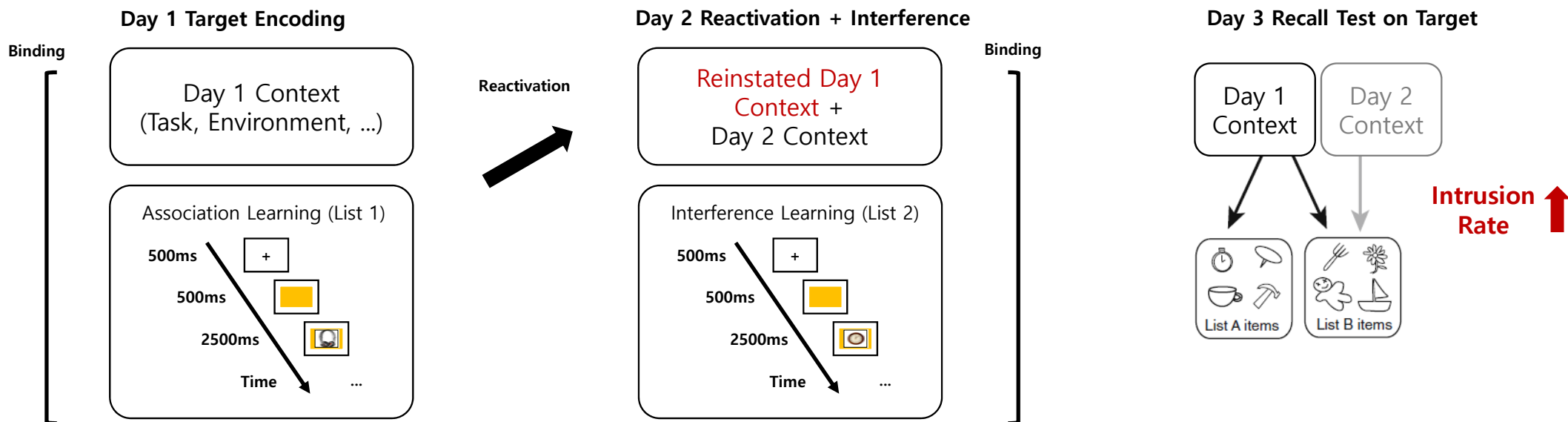
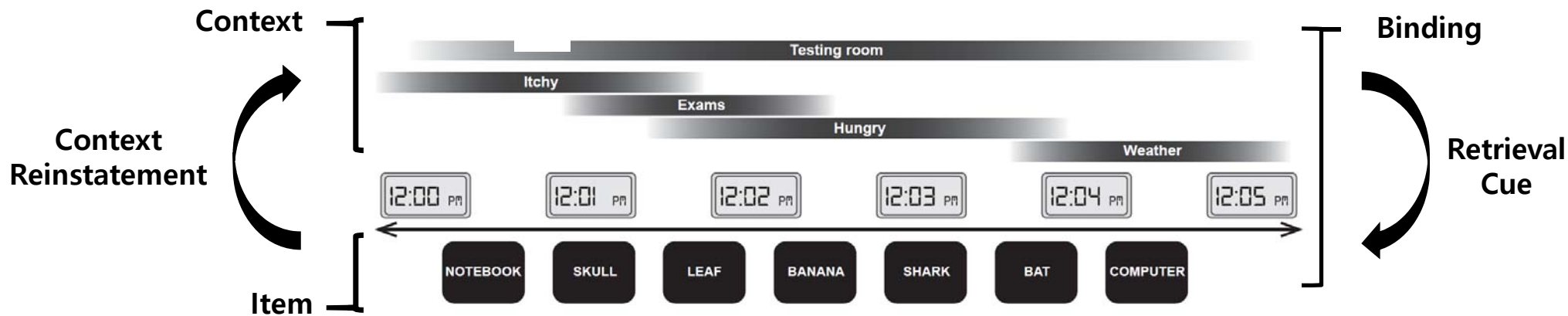
종합 논의

- 시간적 맥락 모형(Temporal Context Model)과 기억 갱신

- 기억은 맥락과 항목의 연합으로 구성, 맥락과 항목은 인출 과정에서 상호 작용하여 기억에 영향 (Howard & Kahana, 2002)
- 기억 갱신은 맥락 재활성화에 의한 비대칭적 맥락 간섭으로 발생하는 출처 혼동일 수 있음 (Sederberg et al., 2011; Gershman et al., 2013)

- 시간적 맥락 모형의 한계

- 본 연구는 색-물체 연합의 ABAC 패러다임. 맥락 간섭이 최대화되는 조건임에도 통제 집단에서는 기억 갱신 효과가 관찰되지 않음
- 기억 갱신 효과는 예측 오류 정도에 따라 비선형적으로 나타났음. 시간적 맥락 모형은 예측 오류의 필요성을 가정하지 않음
- 비대칭적 맥락 간섭은 기억 갱신의 기저 수준을 뒷받침할 수 있음



종합 논의

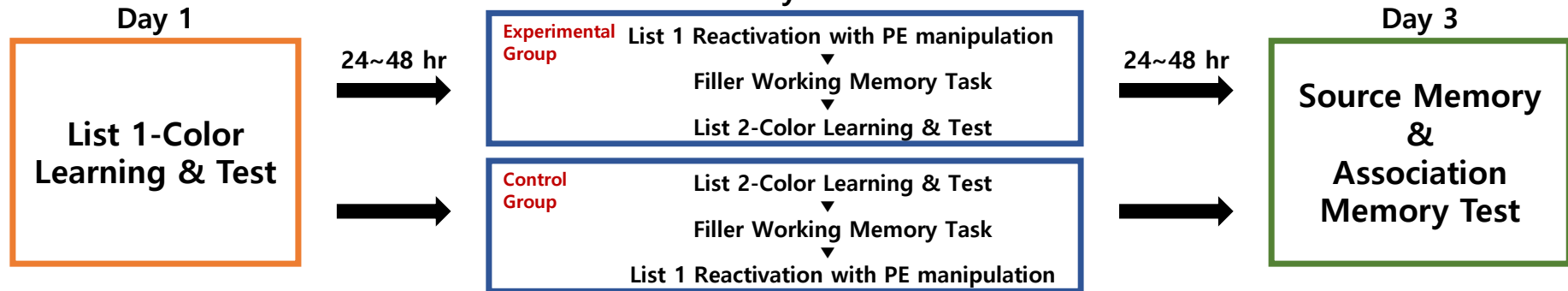
- 본 연구의 한계

- 실험 2 결과의 불안정성. 단서의 효과를 고려하여 색-단서 물체 연합의 수를 조절할 필요성이 있음.
- 조작에 따른 예측 오류, 재활성화 정도를 직접적으로 반영하는 측정치의 부재. 보완적인 신경 측정치 필요.
- 임의의 색-물체 연합 활용. 현실적으로 타당한 연합을 통해 일반화 가능성 확보 필요.

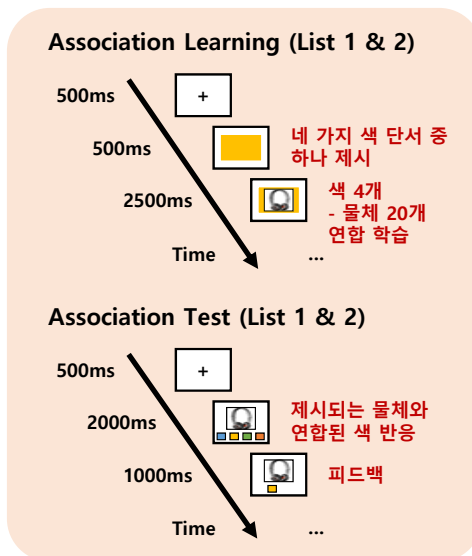
Supplementary material 1

실험 1 (N = 16)

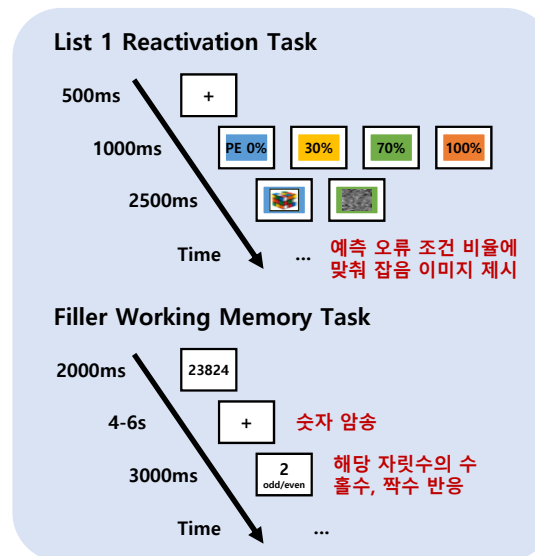
A. 실험 절차



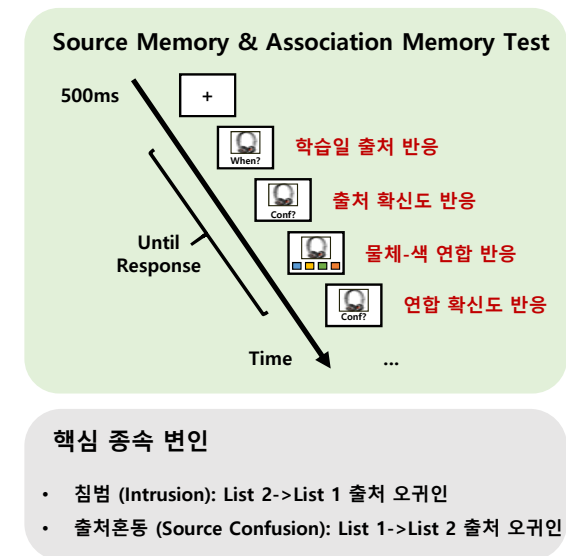
B. 연합 학습 및 검사 과제



C. 재활성화 및 작업기억 과제

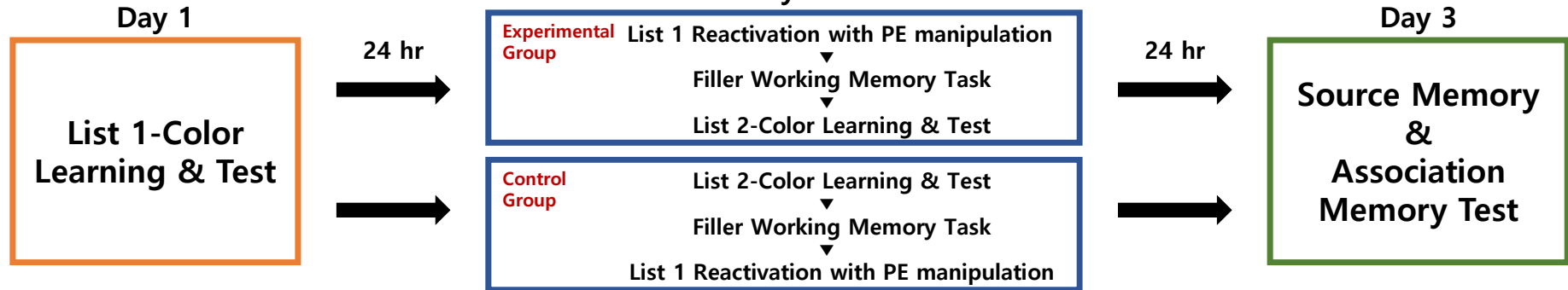


D. 출처 기억 및 연합 기억 검사

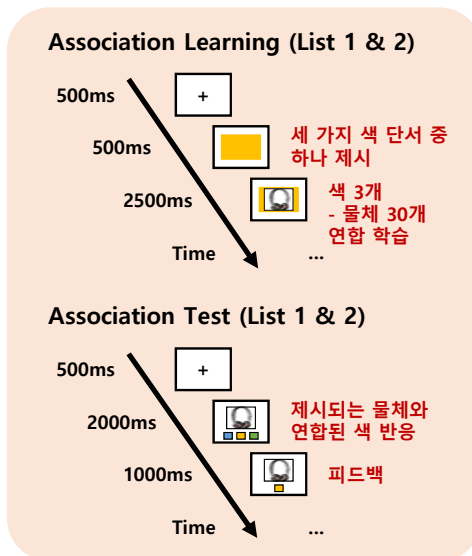


실험 2 (N = 36)

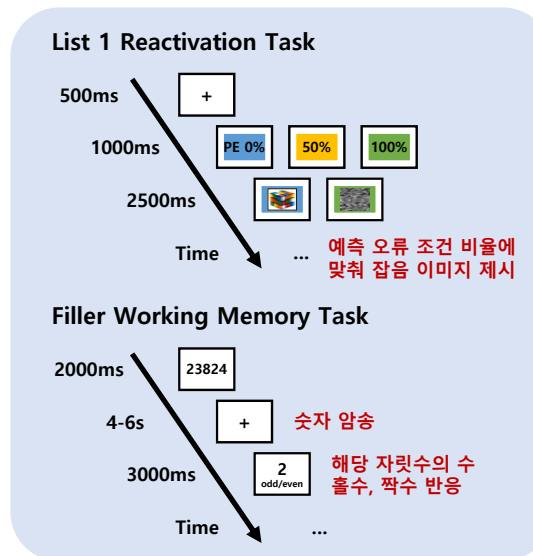
A. 실험 절차



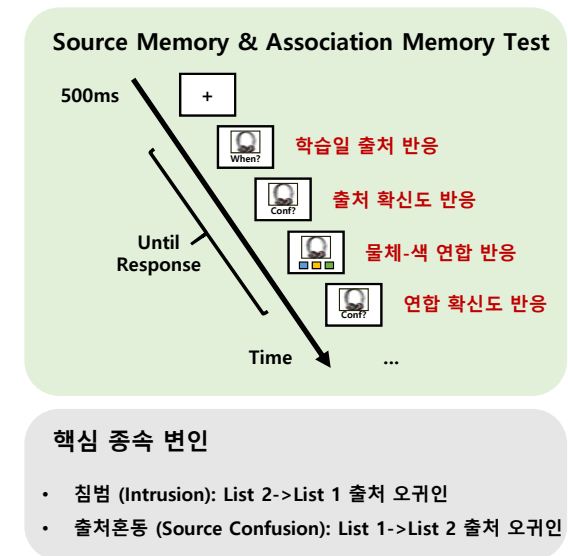
B. 연합 학습 및 검사 과제



C. 재활성화 및 작업기억 과제



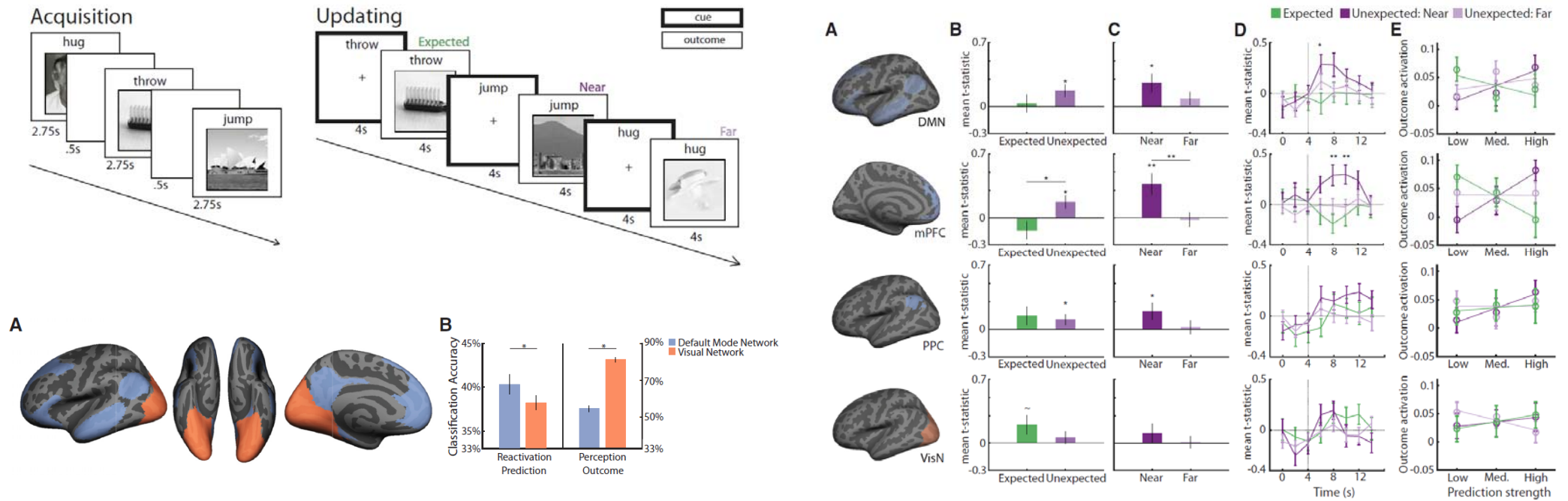
D. 출처 기억 및 연합 기억 검사



Supplementary material 2

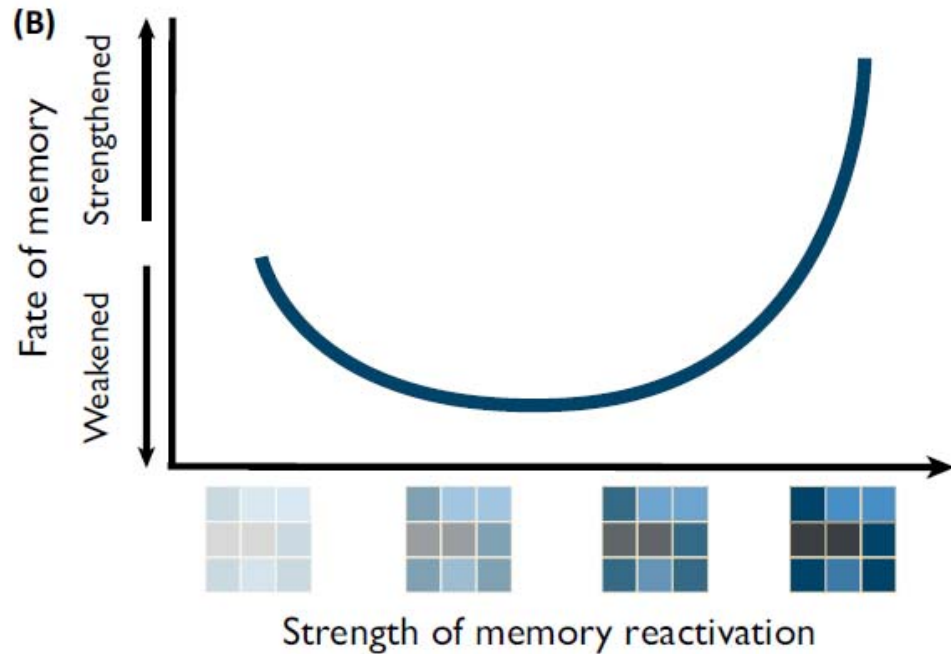
해마의 비선형적 불일치 신호

(Long, Lee, & Kuhl, 2016)

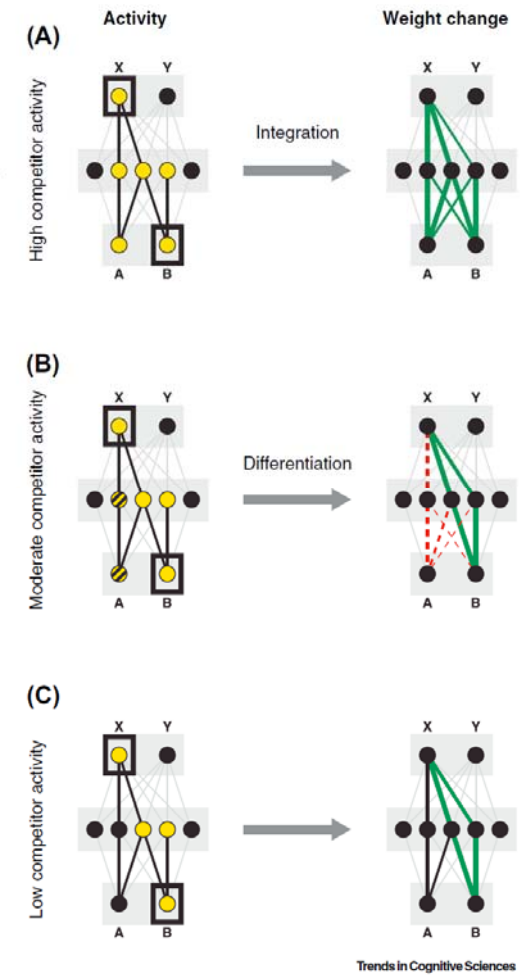
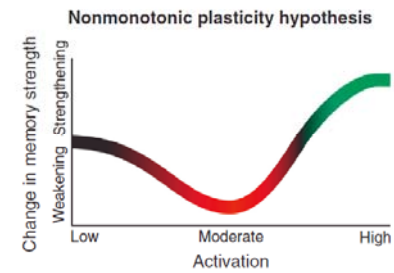


비단조적 가소성 가설

(Ritvo, Turk-Browne, & Norman, 2019; Sinclair, & Barense, 2019)



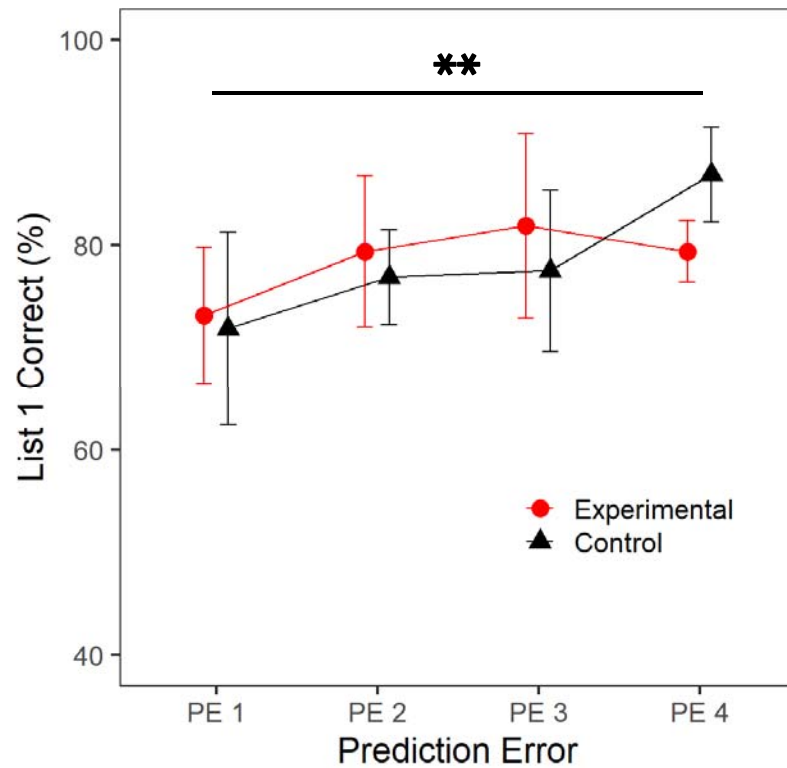
Trends in Neurosciences



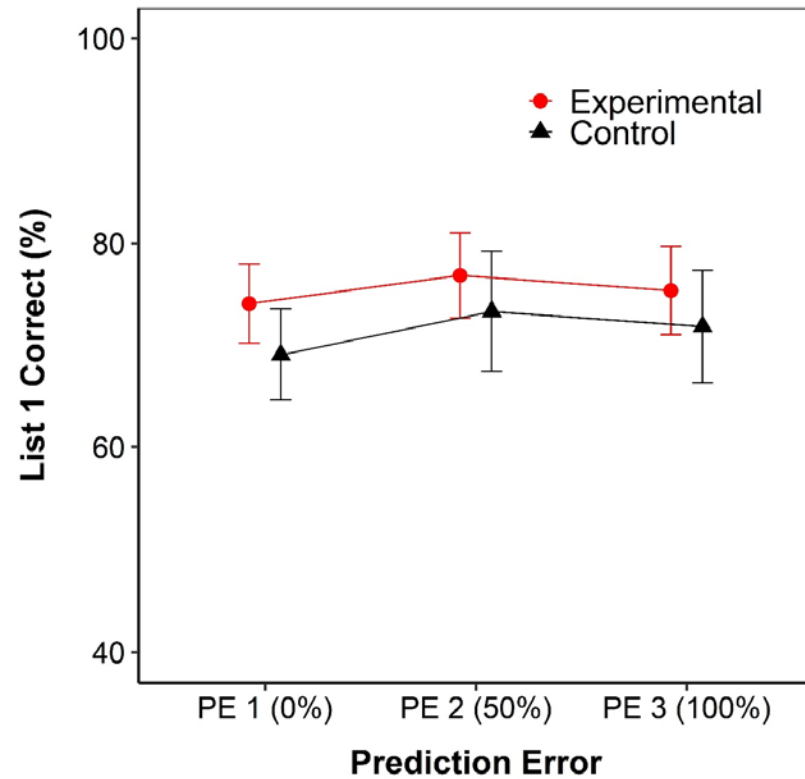
Supplementary material 3

예측 오류 정도에 따른 목록 1 출처 기억 정확도

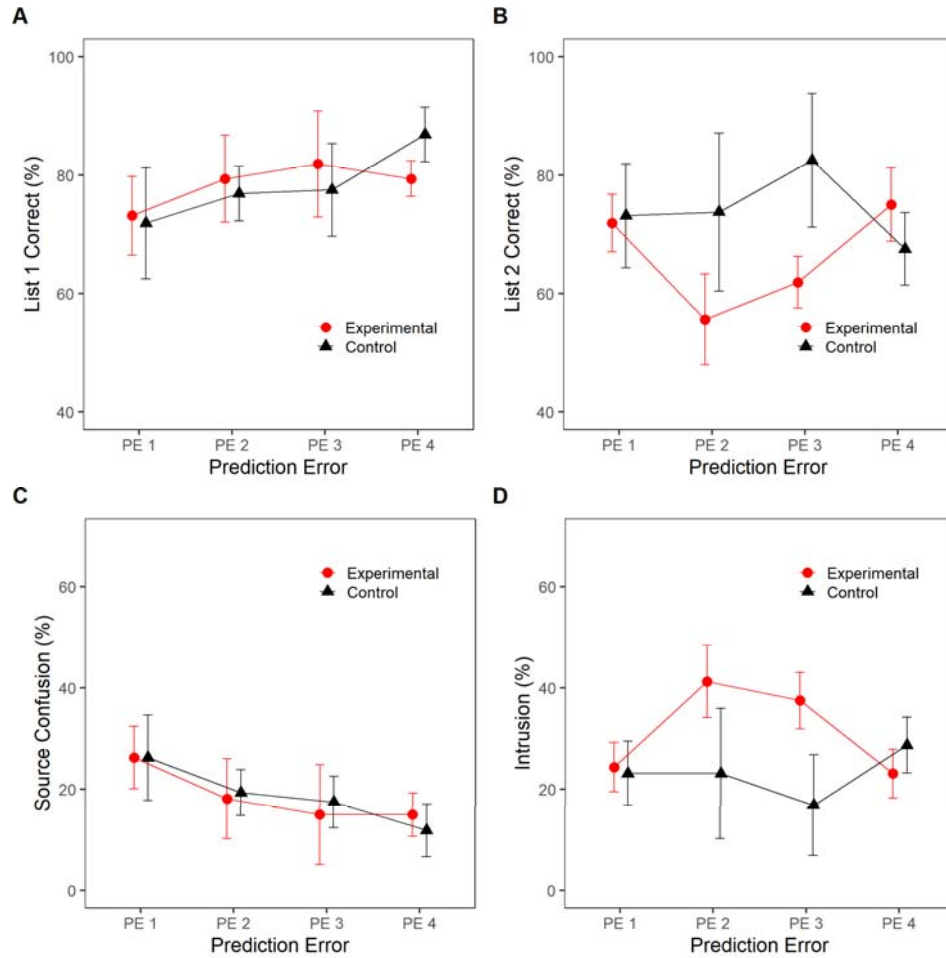
실험 1



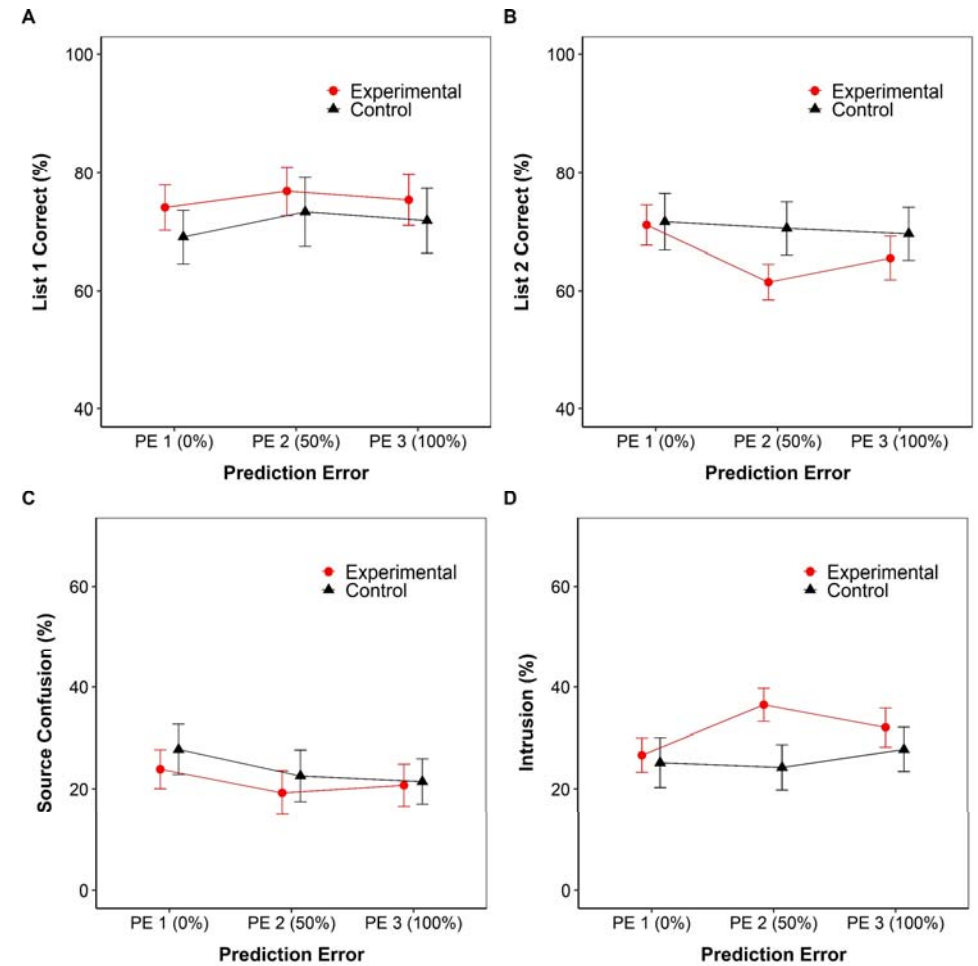
실험 2



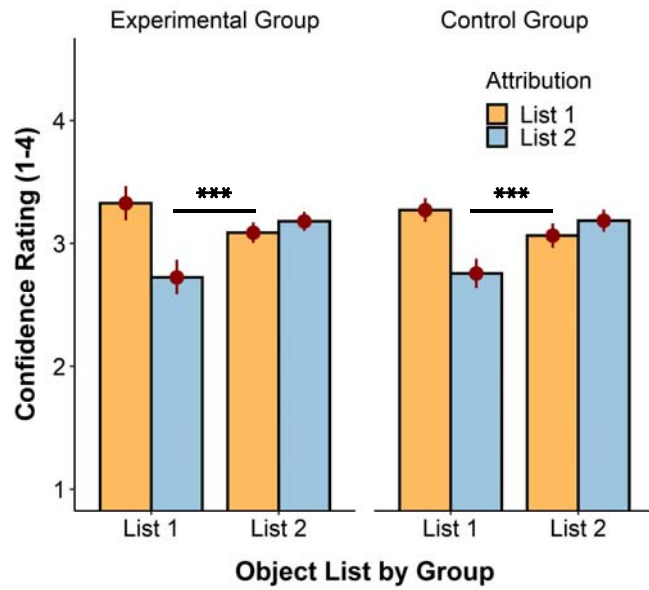
실험 1



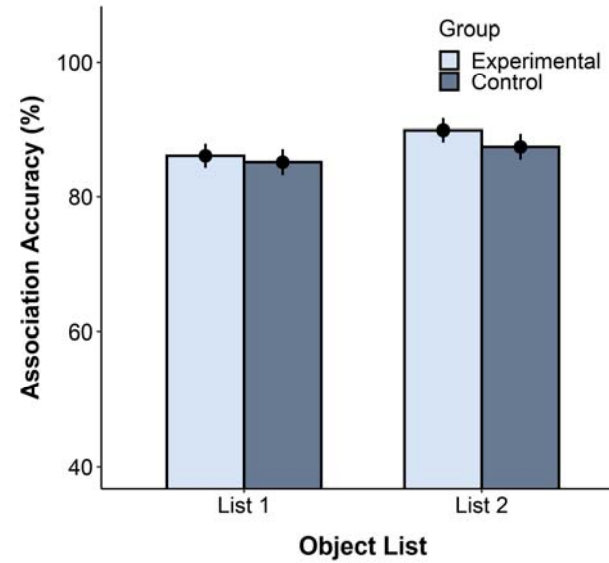
실험 2



출처 반응 확신도



연합 기억 정확도



연합 기억 확신도

