

EFE-SRL

Expected Free Energy Self-Regulated Learning

기대 자유 에너지 기반 자기조절 학습

Fischer 동적 기술 이론과 능동 추론의 통합 적용

Alex Kwon, BCN, PhD

Boston Neuromind LLC · Harvard GSE Visiting Scholar

2026 년5 월

초록

자기조절 학습(Self-Regulated Learning, SRL)은 학습자가 자신의 학습 과정을 능동적으로 모니터링·통제하는 능력으로, Zimmerman(2002) 이후 교육심리학의 핵심 개념이다. 그러나 기존 SRL 모델은 학습자 내부 상태를 직접 모델링하지 못하고 자기보고에 의존하는 한계를 가진다.

본 논문은 Friston의 기대 자유 에너지(Expected Free Energy, EFE) 원리를 Fischer 동적 기술 이론과 통합하여, 신경과학적 토대를 가진 SRL 프레임워크 EFE-SRL을 제안한다. 학습자는 EFE를 최소화하는 학습 행동을 선택하며, 이는 인식론적 가치(epistemic value, 정보 획득)와 실용적 가치(pragmatic value, 목표 도달)의 균형으로 표현된다.

Fischer의 13 수준 기술 구조(L1-L13)에 EFE 기반 의사결정을 매핑하여, ADHD·학습장애·우울 동반 학습자에서 적응적 학습 경로를 도출한다. 본 프레임워크는 NeuroCatchers Learning Engine에서 구현되어 베타 운영 중이다.

키워드: 자기조절 학습, 기대 자유 에너지, 능동 추론, Fischer 동적 기술 이론, 인식론적 가치, 적응 학습

1. 서론

1.1 자기조절 학습의 한계

전통적 SRL 모델(Zimmerman 2002, Pintrich 2000)은 다음 세 단계를 가정한다:

- 예측 단계 (Forethought): 목표 설정, 자기 효능감 평가
- 수행 단계 (Performance): 주의 집중, 자기 모니터링
- 자기 성찰 단계 (Self-reflection): 자기 평가, 인과 귀인

이 모델은 직관적이고 교육 실무에 유용하나, 다음과 같은 한계가 있다:

- 내부 상태(주의, 작업기억, 동기)의 직접 측정 부재
- 개별 학습자의 신경 인지 프로파일 반영 미흡
- ADHD·우울 동반 학습자에 대한 적응 미흡
- 이론과 실시간 의사결정 간의 다리 부재

1.2 기대 자유 에너지 원리

Friston(2010, 2023)의 자유 에너지 원리는 적응적 시스템이 두 가지를 동시에 최소화한다고 주장한다:

- 불확실성 (인식론적): 세상에 대한 신념의 모호함
- 기대 손실 (실용적): 목표 상태와 현재 상태의 차이

학습 맥락에서 이는 다음과 같이 해석된다:

$$EFE(\text{행동}) = -[\text{정보 획득 기대값}] + [\text{목표 도달 비용 기대값}]$$

학습자는 EFE 가 가장 작은 학습 행동을 선택한다 — 즉, 모르는 것을 알게 되면서 동시에 목표에 다가가는 행동.

1.3 Fischer 동적 기술 이론과의 통합

Fischer(1980)의 동적 기술 이론은 13 개의 인지 수준(L1-L13)을 정의한다. 본 연구는 EFE 최소화를 Fischer 수준 진행에 매핑하여, 학습자의 현재 수준 + 다음 수준 도달 가능성 + 학습 동기를 통합한 의사결정 프레임워크를 구축한다.

2. EFE-SRL 프레임워크

2.1 학습자 상태 모델

구성요소	의미	측정
현재 신념	주제에 대한 이해 분포	진단 평가, 사전 검사
목표 상태	도달하고자 하는 이해	학습 목표, 교육과정 기준
Fischer 수준	현재 인지 발달 수준	Skill scale (L1-L13), 작업기억 용량
주의 자원	가용 주의 용량	CPT, ASRS, QEEG Theta/Beta
정서 상태	학습 가능 정서	HRV, PHQ-9, GAD-7

2.2 EFE 분해

학습 행동 a 에 대한 기대 자유 에너지는 두 항으로 분해된다:

$EFE(a) = -Epistemic(a) + Pragmatic(a)$

인식론적 가치 (Epistemic Value)

$Epistemic(a) = E_q[D_{KL}(q(s|o,a) || q(s|a))]$

이는 행동 a 를 취했을 때 얻을 수 있는 정보의 양이다. 학습자에게는 "이 활동을 하면 모르는 것을 알게 되는가?"라는 질문에 대응한다.

실용적 가치 (Pragmatic Value)

$Pragmatic(a) = E_q[-\ln P(o^*|s)]$

이는 행동 a 가 목표 결과 o^* 를 만들어낼 가능성이다. 학습자에게는 "이 활동이 내 목표 달성에 도움 되는가?"이다.

2.3 SRL 3 단계와 EFE의 매핑

Zimmerman SRL 단계	EFE 구성요소	학습자 활동
예측 (Forethought)	목표 상태 $p(o^*)$ 설정	학습 목표 명료화, 사전 신념 표현
수행 (Performance)	EFE 최소 행동 a^* 실행	학습 활동 수행, 자기 모니터링
자기 성찰 (Reflection)	신념 갱신 $q(s o)$	결과 평가, 다음 학습 계획 수립

3. ADHD 학습자에서의 적용

3.1 ADHD 학습자의 EFE 프로파일

ADHD 학습자는 주의 자원 제한으로 인해 다음과 같은 EFE 특성을 보인다:

- 인식론적 가치 추정의 변동성 — 새로움 추구가 단기 EFE 를 변동시킴
- 실용적 가치의 시간 할인 — 장기 목표의 가치가 빠르게 감소
- 결과적으로 단기-새로운 활동이 장기-목표 활동보다 선호됨

3.2 적응 전략

EFE-SRL 프레임워크는 ADHD 학습자에게 다음 적응을 제공한다:

- 학습 활동을 단기 + 새로움 + 인식론적 가치 높은 블록으로 분할
- 실용적 가치를 즉각적 보상으로 외부화 (Body First, Mind Second)
- 작업기억 부담을 Fischer 수준에 맞춰 자동 조정
- HRV 모니터링 기반 정서 조절 휴식 자동 삽입

3.3 우울 동반 학습자

MDD 동반 학습자는 다음과 같은 EFE 왜곡을 보인다:

- 인식론적 가치의 일반 둔화 — 모든 정보가 매력적이지 않게 느껴짐
- 실용적 가치의 비관 편향 — 목표 도달 가능성 과소 추정
- 결과적으로 학습 행동 자체가 가치 없게 평가됨

EFE-SRL 적응:

- 성공 가능성 높은 미세 도전 우선 (자기 효능감 회복)
- 결과 사실 표시 (왜곡된 자기 평가 교정)
- 정서 활성화 활동 우선 (행동 활성화 원리)

4. 구현

4.1 NeuroCatchers Learning Engine

EFE-SRL은 NeuroCatchers Learning Engine에 구현되어 베타 운영 중이다:

- Layer 1 (이론): Fischer 동적 기술 이론 + 자유 에너지 원리
- Layer 2 (측정): Fischer 5 축 측정 + Entry Protocol 5 (시간 추정, HRV, CPT, N-back, VSR)
- Layer 3 (알고리즘): EFE 계산 + 9-루프 의사결정
- Layer 4 (전달): Catcher Village UI, Daily Drama
- Layer 5 (임상): 임상가 대시보드, OMR 통합
- Layer 6 (비즈니스): 직접 지불 모델, BCN+PhD 웰니스 범주

4.2 베타 검증 계획

- N=5 임상 클라이언트 (2026-05-22 D-Day)
- D+28: 4 주 Fischer 수준 변화 측정 + 적응 재경로화
- D+60: 8 주 SRL 자기 보고 + 객관 측정 비교
- D+90: 평가 + N=200 전향 시험 설계

5. 논의

5.1 이론적 기여

- Zimmerman SRL 모델에 신경과학적 토대 추가 (자유 에너지 원리)
- Fischer 동적 기술 이론의 정량적 의사결정 매핑
- ADHD·우울 등 신경발달·정신 건강 동반 학습자에 대한 적응 메커니즘
- Body First, Mind Second 원리의 EFE 정당화 — 정서 활성화가 인식론적 가치를 회복시킴

5.2 한계점

- EFE 계산은 학습자 내부 모델에 의존 — 모델 보정 필요
- 실시간 HRV·CPT 측정 인프라 필요 — 가정 학습에는 제한적
- Fischer 수준 자동 추정의 신뢰도 — 임상가 검증 필요
- 문화·언어 차이 미반영 — 한국·미국 데이터 통합 필요

5.3 향후 방향

- EFE 계산 효율화 — 임베디드 장치에서 실시간 가능하도록
- 학습자 군집 분석 — 비슷한 EFE 프로파일 그룹화
- 교사·임상가 도구 — EFE 시각화 대시보드
- 개입 효과 비교 시험 — 전통 SRL vs EFE-SRL 무작위 대조

주요 참고문헌

Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127-138.

Friston, K. (2023). From synapses to sentience: Mind and matter and the free energy principle. *Molecular Psychiatry*, 28, 256-268.

Fischer, K. W. (1980). A theory of cognitive development: The control and construction of hierarchies of skills. *Psychological Review*, 87(6), 477-531.

Zimmerman, B. J. (2002). Becoming a self-regulated learner: An overview. *Theory Into Practice*, 41(2), 64-70.

Pintrich, P. R. (2000). The role of goal orientation in self-regulated learning. In *Handbook of Self-Regulation* (pp. 451-502). Academic Press.

Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. J. (2022). Active inference: The free energy principle in mind, brain, and behavior. MIT Press.

Da Costa, L., et al. (2020). Active inference on discrete state-spaces: A synthesis. *Journal of Mathematical Psychology*, 99, 102447.

감사의 글

故 Kurt W. Fischer 교수께 깊은 감사. 2018-2020 년 Harvard GSE 방문학자로서 동적 기술 이론의 직접 사사가 본 자기조절 학습 프레임워크의 토대를 이루었다.

저자: Alex Kwon, BCN, PhD

Boston Neuromind LLC · Harvard GSE Visiting Scholar · 2026 년 5 월

— 본 한국어판은 영문 원본의 핵심 내용을 요약 번역한 것이며, 전체 영문 원본은 동일 카드의 EN 버전을 참조하시기 바랍니다.