

studyForest: LLM 기반 학습 환경에서의 인지적 병목 완화를 위한 3-Column 트리 기반 꼬리질문 탐색 엔진 설계 및 구현

A Tree-Based Follow-up Question Exploration Engine for Mitigating Cognitive Bottlenecks in LLM-Based Learning

과목명 Computer Programming
지도교수 유영재 교수님
학과 심리학, 음악정보학
이름 이윤태

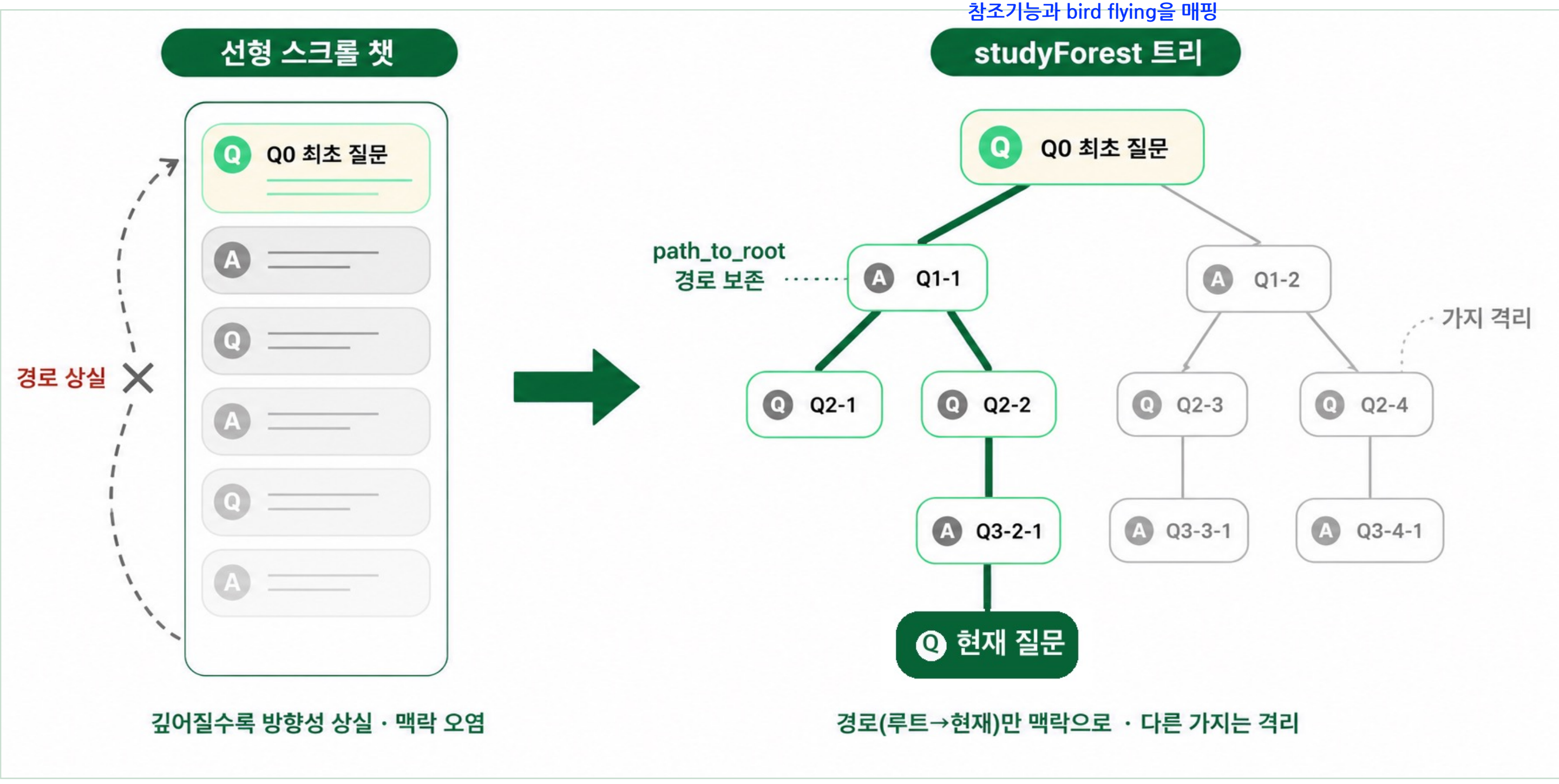
1 연구배경 및 필요성

LLM의 급속한 발전은 학습에도 지대한 영향을 미치고 있다. 과거에 구글링으로 궁금증을 해결하는 것이 당연했듯, 이젠 Claude나 Gemini, ChatGPT와 같은 LLM 서비스를 검색 엔진 삼아 학습에 활용하려는 모습을 아주 쉽게 찾아볼 수 있다.

그러나 LLM은 별도의 프롬프팅이 이루어지더라도 학습자의 배경지식을 완전히 알 수 없기에 개별 질문에 대해 일반화된 형태의 답을 제공할 뿐이며, 그 단일한 답변만 하더라도 다수의 꼬리질문을 낳을 여지가 있다. 학습자는 이러한 지식의 미정렬 상태를 해소하고 새 정보를 자신의 **스키마에 동화시키기** 위해 꼬리질문을 던지며, 이는 학습의 **본질적 동력**이 된다(Ausubel, 1968; Piaget, 1952).

하지만 LLM 서비스의 채팅 환경이 제공하는 선형적 스크롤 UI는 이 과정에서 심각한 인지적 병목을 유발한다. 학습이 꼬리질문을 따라 깊어지고 또 여러 세션에 걸쳐 길어질수록, 학습자는 '내가 원래 무엇을 알고 싶었는가'라는 출발점과 '아까 LLM이 제공한 답변이 무엇이었는데?'가 흐려지는 **맥락의 유실**을 겪는다. 하나의 채팅으로 학습을 이어가면 선형 로그가 과도하게 누적되어 이전 내용을 되찾는 비용이 커지고, 채팅을 새로 나누면 맥락이 아예 단절된다. 분산된 정보를 하나로 엮는 통합(Aha! moment)의 부담은 고스란히 작업기억으로 전가되며, 한정된 작업기억 용량 안에서 (Cowan, 2001; Miller, 1956) 맥락 유지와 신정보 처리가 자원을 경합하면서 **외재적 인지부하(Sweller, 1988)**가 가중된다.

요컨대 이는 LLM 답변 자체의 문제가 아니라, 학습 행위의 구조와 LLM 인터랙션 방식 간의 불일치다.



▲ 선형 스크롤(경로 상실·맥락 오염) vs studyForest 트리(pathToRoot 경로 보존·가치 격리)

이 인지적 병목은 네 가지로 정리된다

- ① 분기

한 답변이 여러 갈래 꼬리질문을 동시에 유발한다.
- ② 방향성 상실

탐구가 길어질수록 최초 질문과 거기까지의 경로를 잃는다.
- ③ 재방문 비용

과거 질문을 다시 찾는 비용이 커 재사용을 포기하게 된다.
- ④ 맥락 오염

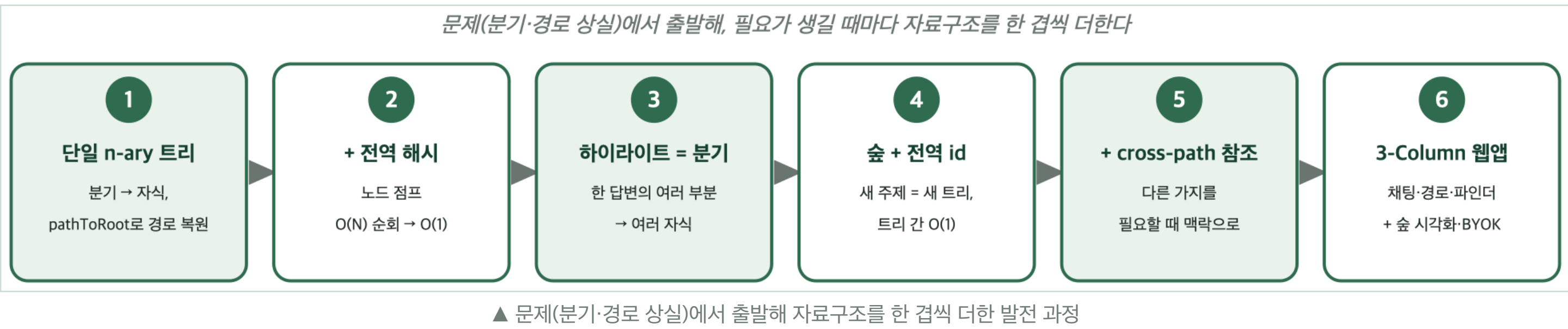
한 줄에 모든 맥락이 섞여 현재 질문에 적합한 답을 얻기 어렵다.

2 프로젝트 진행과정

설계는 연구배경의 네 병목을 자료구조의 언어로 번역하는 일을 출발점으로 삼는다(아래 표). 이후 필요가 제기될 때마다 자료구조를 한 단계씩 도입하여 점진적으로 확장하였다.

문제의식	자료구조 · 연산
① 분기	n-ary 트리 (ArrayList 자식)
② 방향성 상실	3-Column UI + 트리 표시
③ 과거 질문 재방문	HashMap 인덱스 O(1) + 참조
④ 맥락 오염	pathToRoot : 경로만 O(depth)

studyForest 발전 과정: 단일 트리에서 숲으로



▲ 문제(분기·경로 상실)에서 출발해 자료구조를 한 겹씩 더한 발전 과정

초기에는 한 대화를 단일 트리로 표현하였다. 그러나 꼬리질문이 기존 트리에 자식을 더하는 분기인 반면, 중앙 창에서 제기되는 새로운 주제 질문은 **별도의 트리에 해당**한다. 이에 한 대화를 독립 트리들의 **숲(forest)**으로 모델링하였다. 숲에서는 트리마다 독립적으로 부여되던 노드 식별자가 총동하는데, 이를 응용 계층의 복합기로 회화하는 대신 '숲은 트리들의 집합'과 이를 가로지르는 전역 인덱스로 구성된다'는 구조에 따라 식별자를 세션 전역에서 유일하게 정의하고 단일 전역 해시를 도입하여 **어느 트리의 어느 노드든 O(1)에 접근**한다.

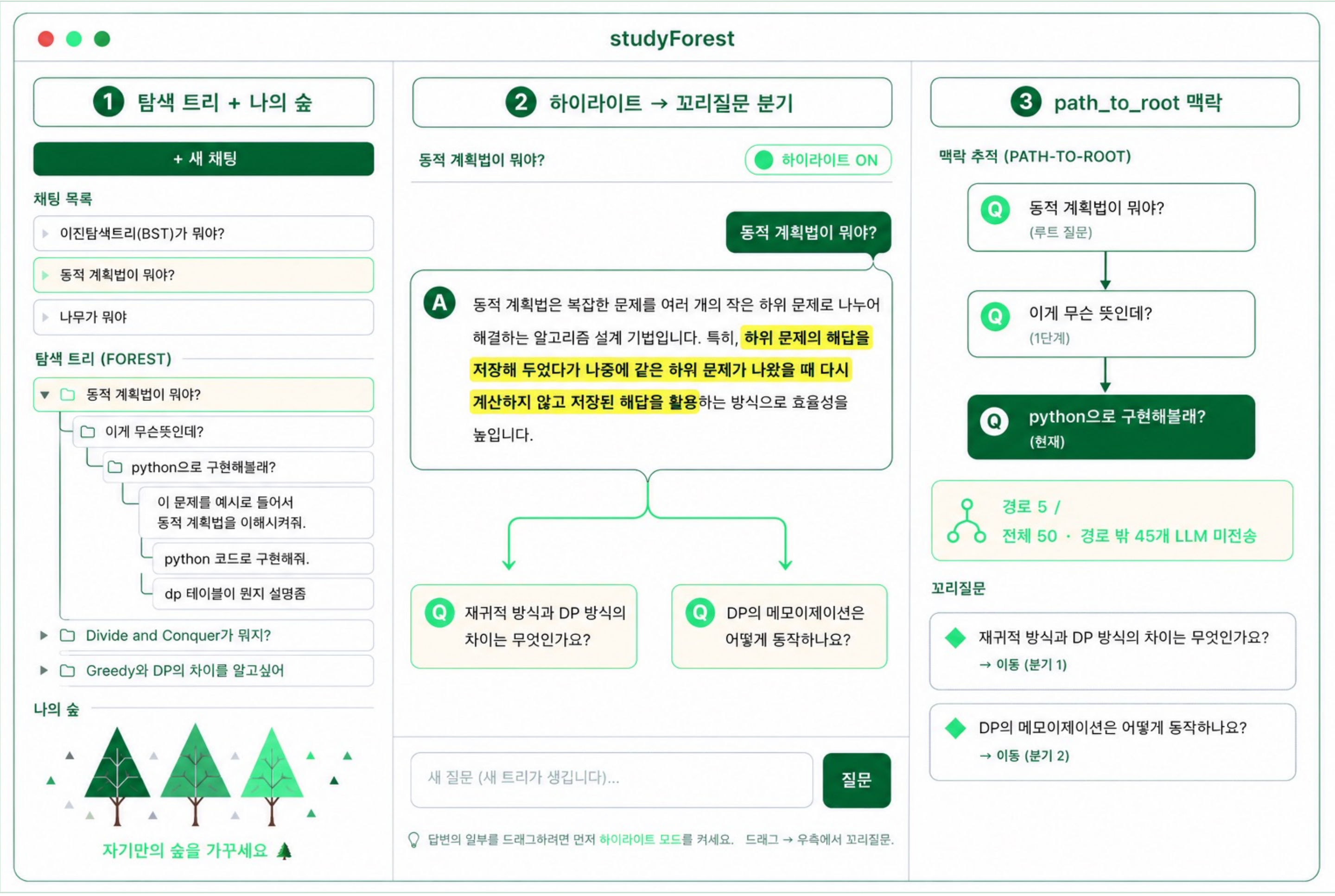
참고문헌

Ausubel (1968) Educational Psychology: A Cognitive View. · Piaget (1952) The Origins of Intelligence in Children. · Miller (1956) Psychological Review 63(2). · Cowan (2001) Behavioral and Brain Sciences 24(1). · Sweller (1988) Cognitive Science 12(2).

Sweller, van Merriënboer & Paas (1998) Educational Psychology Review 10(3). · Koriat & Bjork (2005) J. Exp. Psychol.: Learning, Memory, and Cognition 31(2). · Stadler, Barnett & Sailer (2024) Computers in Human Behavior 160.

3 프로젝트 성과

studyForest는 인지적 병목을 자료구조의 언어로 해소하도록 설계·구현된 3-Column 학습 인터페이스다.



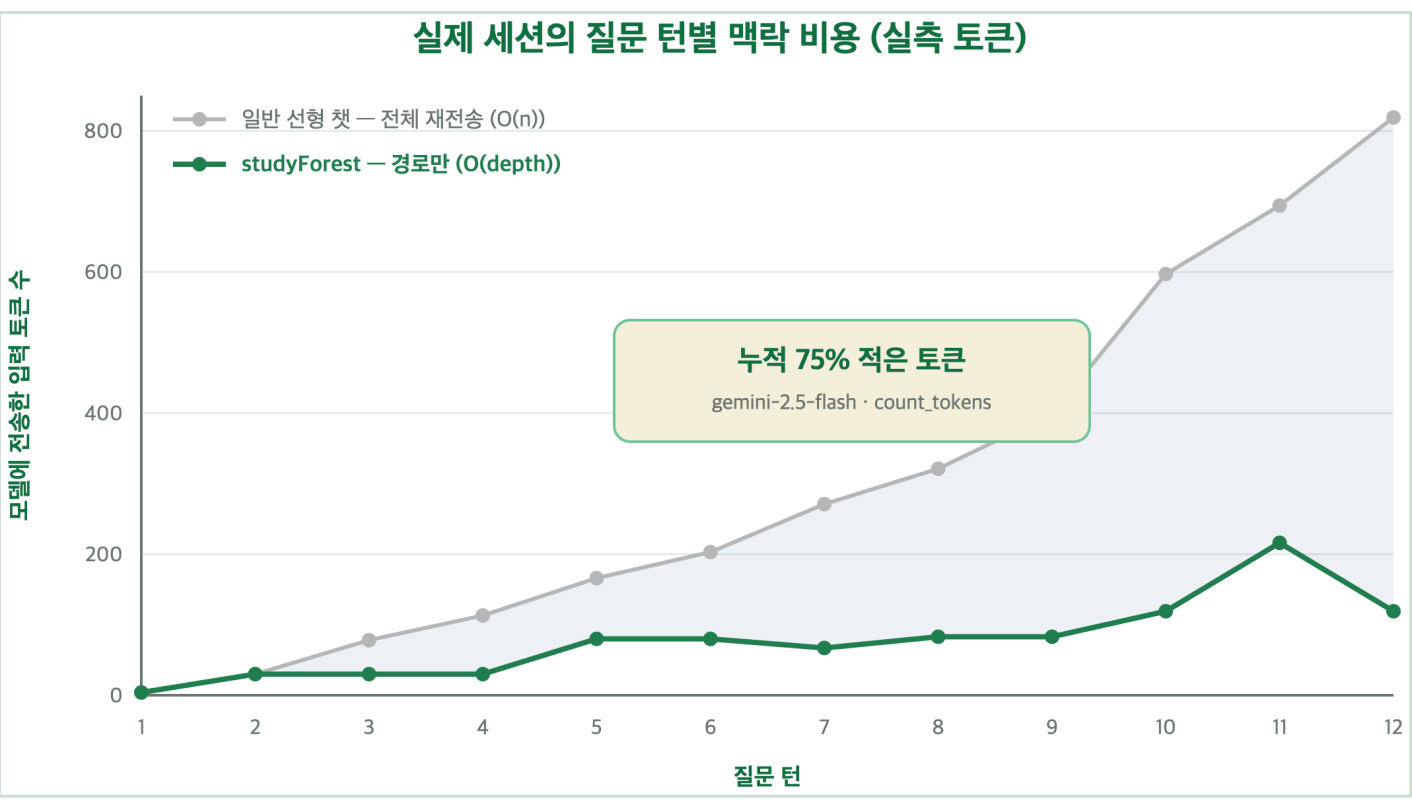
▲ studyForest 3-Column UI · 라이브: studyforest-java.onrender.com

중앙 창은 최초 질문과 답변을 고정해 제시한다. 답변의 일부를 하이라이트로 드래그하면 그 지점이 **영속 저장**되고 **분문**에 표시되며, 거기서 꼬리질문이 우측 창으로 분기해 한 답변의 여러 부분이 각각 자식 노드가 되어 n-ary 트리를 이룬다. 노드는 질문이 **실제 제출될 때에만** 생성되어 빈 하이라이트가 쌓이지 않는다.

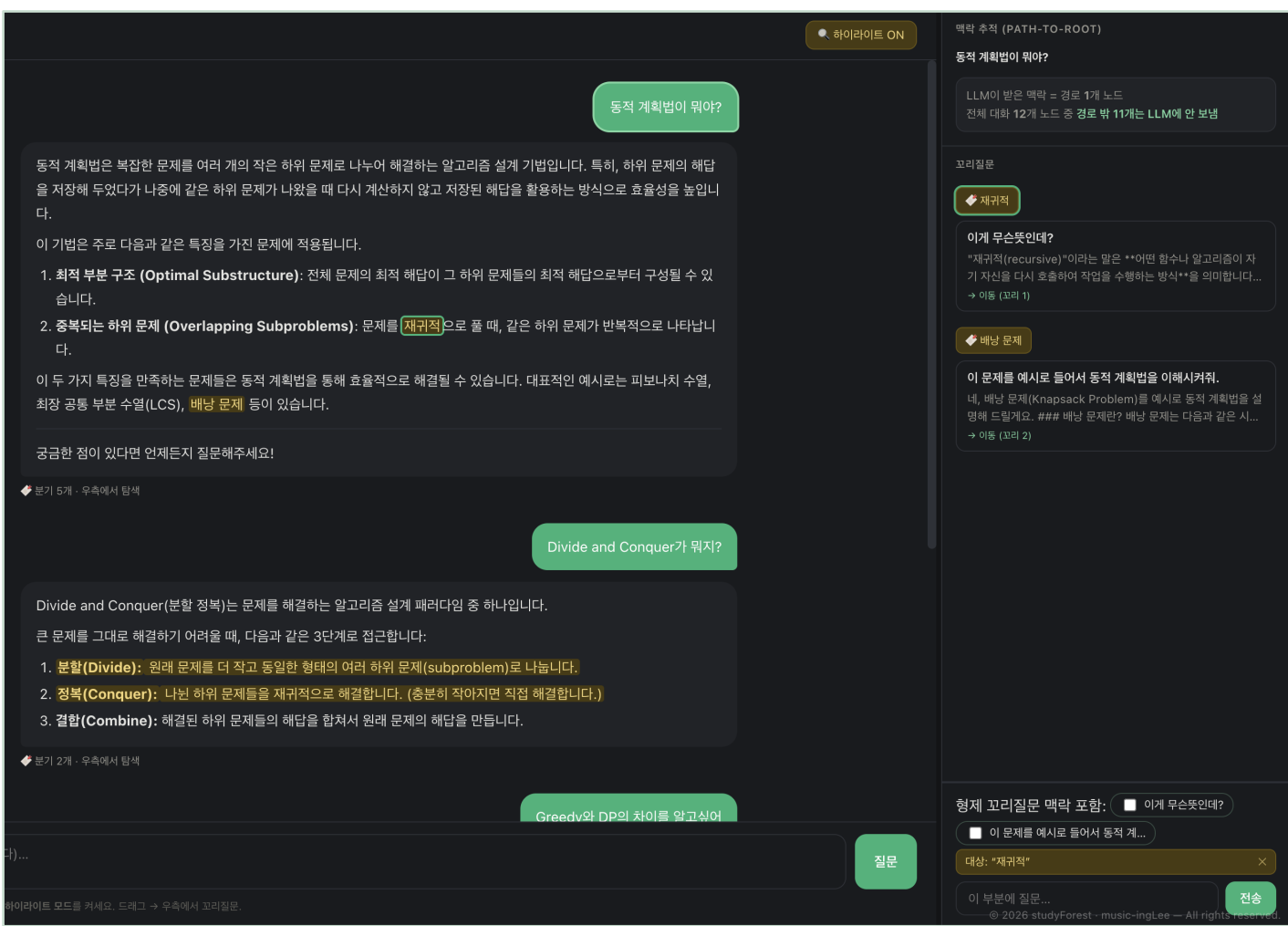
우측 창은 선택 노드의 pathToRoot 경로를 펼쳐 현재 질문이 선 맥락을 보이고, '경로 N개 전송 vs 전체 M개' 지표로 모델에 실제 전달되는 맥락 크기를 실시간 노출한다.

좌측 사이드바는 숲 전체를 트리로 실시간 제시해 방향을 유지하게 하고, 모든 노드는 **전역 해시**로 색인되어 과거 질문으로 즉시 복귀한다(자식이 달린 노드는 무결성을 위해 삭제가 잠긴다). 하단 '나의 숲'은 대화를 나무로 시각화한다. 다중 세션·다크 모드를 지원하며 답변 생성은 BYOK로 동작한다.

이 전역 접근은 경로 밖 노드를 맥락으로 끌어오는 **cross-path 참조**의 토대가 된다. 격리는 고정된 규칙이 아니라 학습자가 통제하는 기본값이다. pathToRoot는 최소 경로만 자동 전송하고, 학습자가 명시적으로 고른 경로 밖 노드(같은 답변에서 갈라진 **형제 꼬리질문 포함**)만 참조로 더한다. 전송 맥락은 언제나 최소 경로에 **선택된 소수 노드**만을 포함하므로(포함 규칙) 비용은 O(depth)를 벗어나지 않는다. 그렇게 함으로써, 무엇이 맥락 오염이고 무엇이 의도된 맥락인지를 가르는 **통제권은 온전히 학습자에게** 부여된다.



▲ 맥락 비용(입력 토큰)의 탄력 추가



▲ 실제 구성 화면

효율성 검증. 동일 세션을 고정하고, 경로만 전달하는 studyForest와 전체 대화를 누적 전달하는 일반 챗의 입력 토큰을 Gemini의 count_tokens로 비교하였다. 일반 챗이 턴마다 선형으로 증가하는 동안 studyForest는 경로 깊이에 묶여 **누적 약 75% 적은 토큰을 사용**하였으며, 이는 O(depth) 대 O(n) 주장을 실측으로 뒷받침한다.

4 프로젝트 기대효과

본 연구는 텍스트의 평면적인 흐름을 3-Column UI를 통한 **공간적 탐색**으로 치환한다. 상위 맥락을 고정하는 중앙 창과 꼬리질문을 해결하는 우측 창을 분리하여, 학습자가 질문의 갈래 속에서도 언제나 **Context Anchoring**을 확인하게 한다. 핵심은 비대칭이다. 시스템은 탐색·맥락관리에서 오는 **외재적 부하**만 대신 짚어지고(Cognitive Offloading), 통합이라는 본유적 부하는 학습자의 몫으로 보존한다. 이로써 비워진 작업기억이 진정한 지식 통합에 쓰이는 학습 환경을 제안한다.

이로써 학습자는 네 가지를 얻는다. 무관한 가지에 오염되지 않은 **정확한 응답**, 다른 탐구를 훼손하지 않는 **탐색의 자율성**, 경로의 가시화로 확보되는 작업기억의 **여유**, 과거 질문으로 즉시 복귀하는 **접근성**이다. 대화가 길어져도 단위 질문의 비용은 경로 깊이에만 비례한다.

이 설계의 의의는 에듀테크의 **현 흐름**에서 분명해진다. LLM의 매끄러운 유창성은 통합 없이도 이해했다고 믿는 **유창성의 착각(fluency illusion; Koriat & Bjork, 2005)**을 낳아 통합의 필요를 소거하고, 실제로 LLM 학습이 인지부하를 낮추는 대신 능동적 처리를 약화시켜 성과를 저해할 수 있음이 보고되었다(Stadler et al., 2024). 이에 학습 도구들이 인지적 마찰을 부여하는 소크라테스식 튜터링으로 선화하면서 대화는 더 길고 복잡해지고, 선형 스크롤의 탐색 병목은 오히려 심화된다. 트리 기반 3-Column UI는 그 부담을 구조로 대신 떠안아, 에듀테크의 방향과 **상충하지 않고 부작용을 보완**하는 **상보적 도구**로 기능한다.

향후 방향은 동일한 숲, 상이한 렌즈다. 가지를 통합하는 '종합', 간격 반복 복습, 탐색 트리로부터의 개념 관계망(지식 지도) 유도, 숲 구조를 통한 메타인지 진단이 모두 같은 숲 데이터를 다른 렌즈로 활용한다.