학습과학 아틀라스

인지부하이론, 정보처리이론, 인지심리학, 체화된 인지에서 뇌과학과 AI까지.
1885년부터 2025년까지 학습과학의 고전과 최신 연구 162편의 의의, 핵심, 비유,
교실 적용, 계보를 한 권으로.

연구 162편 · 클러스터 9개 · 영향 관계 326개 · 투어 10개 · 개념 70개
2026년 11월 · 닷커넥터 김진관 · 인용 수 OpenAlex 기준

차례

1. 행동주의에서 인지혁명으로 (8편)
2. 정보처리 이론과 기억 체계 (29편)
3. 인지부하이론과 멀티미디어 학습 (15편)
4. 기억 전략과 바람직한 어려움 (16편)
5. 구성주의, 사회문화이론, 수업설계 (32편)
6. 메타인지, 동기, 자기조절 (15편)
7. 체화된, 상황적, 확장된 인지 (17편)
8. 뇌과학과 예측하는 뇌 (16편)
9. 학습공학과 AI 시대의 학습 (14편)
10. 투어
11. 개념 사전

읽는 법: 각 연구 카드는 의의 → 핵심 요약 → 쉬운 비유(노란 상자) → 교실 적용 순서이며, 붉은 상자는 후속 연구에서 제기된 비판이나 주의점입니다. 카드 아래에는 이 지도 안에서 영향을 주고받은 연구를 적었습니다.

1. 행동주의에서 인지혁명으로

기억을 처음 측정한 에빙하우스부터 행동주의, 그리고 마음의 내부 구조를 되살린 인지혁명까지. 이후 모든 학습과학의 출발점이다.

기억에 관하여 Ebbinghaus 1885

Hermann Ebbinghaus. Memory: A Contribution to Experimental Psychology (단행본) · 인용 1,285회

의의 기억을 처음으로 실험실에서 정량 측정한 연구다. 학습과학이 "측정 가능한 과학"이 된 출발점으로 꼽힌다.

핵심 에빙하우스는 무의미 철자 목록을 스스로 외우고, 다시 외우는 데 드는 시간이 얼마나 줄었는지(절약법)로 기억을 측정했다. 학습 직후 망각이 가장 가파르고 시간이 지날수록 완만해지는 망각곡선을 그렸다. 같은 횟수라도 반복을 여러 날에 나누면 더 오래 남는다는 사실도 이미 이 책에 나온다.

쉽게 물을 부은 모래성이 처음 몇 분 동안 가장 많이 무너지고, 남은 부분은 오래 버티는 모습과 비슷하다.

교실 새 개념을 배운 당일과 다음 날, 일주일 뒤에 짧게 다시 꺼내 보는 복습 주기를 설계한다.

→ Atkinson 1968, Cepeda 2006, Bjork 1994

동물 지능, 연합 과정의 실험 연구 Thorndike 1898

Edward L. Thorndike. Animal intelligence: An experimental study of the associative processes in animals · doi:10.1037/h0092987 · 인용 1,235회

의의 행동주의 학습이론의 뿌리다. "결과가 행동을 강화한다"는 효과의 법칙은 이후 스키너의 조작적 조건화로 이어진다.

핵심 고양이를 문제 상자에 넣고 탈출하는 데 걸리는 시간을 반복 측정했다. 고양이는 통찰로 한 번에 깨닫기보다 시행착오를 거치며 점진적으로 빨라졌다. 만족스러운 결과를 낳은 반응은 상황과의 연결이 강해진다는 원리를 처음 제시했다. 이 원리는 1905년 "효과의 법칙"이라는 이름을 얻었고 1911년 저서에서 정식화되었다.

쉽게 자판기 버튼을 이것저것 누르다 음료가 나온 버튼을 다음부터 바로 누르게 되는 것과 같다.

교실 즉각적이고 구체적인 피드백이 행동 변화를 만든다는 원리를 연습 활동 설계에 활용한다.

→ Skinner 1954, Barnett 2002

기억하기 Bartlett 1932

Frederic C. Bartlett. Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology (단행본) · doi:10.1111/j.2044-8279.1933.tb02913.x · 인용 7,450회

의의 기억이 녹화가 아니라 재구성이라는 관점을 확립했고 "스키마" 개념을 심리학에 들여왔다. 인지부하이론과 선행조직자 연구가 모두 이 개념 위에 서 있다.

핵심 영국 학생들에게 낯선 북미 원주민 설화 "유령들의 전쟁"을 읽히고 반복해서 회상하게 했다. 회상할수록 이야기는 짧아지고, 낯선 요소는 익숙한 문화적 틀에 맞게 바뀌었다. 사람은 기존 지식 구조(스키마)로 정보를 해석하고 다시 만들어 낸다는 결론을 냈다.

쉽게 전화 게임처럼 이야기가 전달될수록 듣는 사람의 상식에 맞게 다듬어진다.

교실 새 내용을 가르치기 전에 학생이 가진 선지식과 오개념을 먼저 확인한다.

→ Ausubel 1960, Sweller 1988, Barsalou 1999, Rumelhart 1980, Neisser 1967

경험과 교육 Dewey 1938

John Dewey. Experience and Education (단행본) · 인용 6,918회

의의 진보주의 교육의 아버지로 불리는 듀이가 전통 교육과 진보주의 교육 양쪽의 극단을 모두 비판한 짧은 책이다. 경험 중심 학습, 프로젝트 학습 논의의 출발점이다.

핵심 듀이는 모든 경험이 교육적이지는 않으며, 이후의 성장을 막는 "비교육적 경험"도 있다고 경고했다. 좋은 경험은 이전 경험 위에 쌓여 다음 경험을 열어 주고(연속성), 학습자의 내적 조건과 환경이 맞물려야 한다(상호작용). 교사의 역할은 아이를 방임하는 것이 아니라 성장으로 이어질 경험을 설계하는 것이다.

쉽게 "체험학습을 했다"는 사실보다 그 체험이 다음 배움으로 이어지는 다리가 되었는지가 중요하다.

교실 활동 중심 수업을 설계할 때 "이 경험이 다음 차시의 어떤 배움으로 이어지는가"를 먼저 적어 본다.

→ Bruner 1961, Kolb 1984, Papert 1980

쥐와 인간의 인지도 Tolman 1948

Edward C. Tolman. Cognitive maps in rats and men · doi:10.1037/h0061626 · 인용 8,090회

의의 행동주의 전성기에 "머릿속 표상"을 다시 불러온 논문이다. 인지혁명의 전조이자 해마 공간 기억 연구의 출발점이 되었다.

핵심 보상 없이 미로를 돌아다닌 쥐가 나중에 보상이 생기자 곧바로 빠른 길을 찾았다(잠재학습). 막힌 길이 생기면 처음 보는 지름길도 골랐다. 톨먼은 쥐가 자극-반응 연결이 아니라 환경의 지도를 머릿속에 만든다고 해석했다.

쉽게 동네를 산책만 해 둔 사람이 처음 가는 가게도 쉽게 찾아가는 것과 같다.

교실 점수가 없는 탐색 활동도 나중의 수행을 위한 학습이 될 수 있다는 근거가 된다.

→ Newell 1972, O'Keefe 1971

학습의 과학과 교수의 기술 Skinner 1954

B. F. Skinner. The science of learning and the art of teaching · doi:10.1037/11324-010 · 인용 1,140회

의의 실험실 학습 원리를 교실에 적용하자고 주장한 선언문이다. 티칭 머신과 프로그램 학습은 오늘날 적응형 학습과 지능형 튜터의 조상이다.

핵심 딸의 산수 수업을 참관한 스키너는 교사 한 명이 30명에게 즉각적 강화를 줄 수 없다는 점을 문제로 보았다. 학습을 아주 작은 단계로 쪼개고 각 단계마다 즉시 정오 피드백을 주는 기계를 제안했다. 학생은 자기 속도로 나아가고 틀리면 바로 교정받는다.

쉽게 한 단계 깰 때마다 바로 보상이 나오는 게임 레벨 디자인과 같다.

교실 큰 과제를 작은 단계로 나누고 단계별로 즉시 확인할 수 있는 자기점검 장치를 둔다.

← Thorndike 1898 · → Chomsky 1959, Anderson 1995

스키너 「언어 행동」 서평 Chomsky 1959

Noam Chomsky. A review of B. F. Skinner's Verbal Behavior · doi:10.2307/411334 · 인용 4,981회

의의 행동주의에 결정타를 날린 서평으로, 1950년대 인지혁명의 상징이 되었다. 마음의 내부 구조를 연구하는 인지과학의 문을 열었다.

핵심 촘스키는 강화와 자극 같은 행동주의 개념이 언어에 적용되면 의미가 모호해진다고 비판했다. 아이들은 들어 본 적 없는 문장을 무한히 만들고, 부족한 입력만으로 복잡한 문법을 익힌다. 따라서 언어 학습에는 강화 이력만으로 설명할 수 없는 내적 구조가 필요하다고 주장했다.

쉽게 앵무새 흉내만으로는 처음 듣는 질문에 새 문장으로 답하는 아이를 설명할 수 없다는 지적이다.

교실 학습자를 자극에 반응하는 존재가 아니라 규칙을 추론하는 능동적 존재로 보는 관점의 근거다.

← Skinner 1954 · → Newell 1972, Neisser 1967

인지심리학 Neisser 1967

Ulric Neisser. Cognitive Psychology (단행본)

의의 "인지심리학"이라는 분야 이름을 처음 내건 교과서다. 흩어져 있던 지각, 주의, 기억 연구를 하나의 학문으로 묶었다.

핵심 나이서는 인지를 "감각 입력이 변환되고, 축약되고, 정교화되고, 저장되고, 인출되고, 사용되는 모든 과정"으로 정의했다. 지각은 수동적 복사가 아니라 능동적 구성이라는 관점을 강조했고, 컴퓨터 프로그램 비유로 마음의 처리 단계를 설명했다.

쉽게 "마음 안에서 정보가 어떤 공정을 거치는가"를 연구하는 학문의 설립 선언문이다.

교실 학생의 머릿속에서 정보가 어떤 단계를 거치는지 생각하며 수업 흐름을 설계하는 관점의 출발점이다.

주의 나이서는 1976년 『인지와 실재』에서 실험실 중심 정보처리 접근을 스스로 비판하며 생태학적 관점으로 기울었다.

← Chomsky 1959, Miller 1956, Broadbent 1958, Sperling 1960, Bartlett 1932 · → Atkinson 1968

2. 정보처리 이론과 기억 체계

인간을 정보를 받아들이고 저장하고 꺼내는 체계로 본 전통. 감각기억, 작업기억, 장기기억, 전문성 연구가 여기에 속한다.

마법의 수 7±2 Miller 1956

George A. Miller. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information · doi:10.1037/h0043158 · 인용 25,259회

의의 심리학에서 가장 많이 인용된 논문 중 하나다. 작업기억 용량 제한과 청킹 개념은 인지부하이론의 출발점이 되었다.

핵심 밀러는 절대판단 실험과 기억폭 실험 모두에서 7 안팎의 숫자가 나타난다는 점에 주목했지만, 이것이 우연의 일치일 수 있다고 보았다. 그는 두 한계를 구분해, 절대판단은 정보량(비트)에, 즉시기억은 항목 수(청크)에 제한된다고 결론지었다. 그래서 항목을 의미 있는 덩어리(청크)로 묶으면 즉시기억에 담을 수 있는 정보량이 크게 늘어난다.

쉽게 010-1234-5678을 열한 개 숫자가 아니라 세 덩어리로 외우는 것이 청킹이다.

교실 새 정보를 한 번에 너무 많이 제시하지 말고, 의미 단위로 묶어 보여 준다.

주의 이후 Cowan(2001)은 실제 용량을 약 4청크로 재추정했다.

→ Atkinson 1968, Chase 1973, Cowan 2001, Sweller 1988, Neisser 1967

지각과 의사소통 Broadbent 1958

Donald E. Broadbent. Perception and Communication (단행본) · doi:10.1037/10037-000 · 인용 7,071회

의의 인간을 정보가 흐르는 통신 채널로 그린 최초의 정보처리 모형을 제시했다. 정보처리 이론의 흐름도 전통이 여기서 시작된다.

핵심 양쪽 귀에 서로 다른 메시지를 들려주는 양분 청취 실험을 바탕으로, 감각 정보가 용량이 제한된 채널로 들어가기 전에 필터에서 선택된다는 모형을 제안했다. 주의를 받지 못한 정보는 의미 처리 전에 걸러진다고 보았다.

쉽게 시끄러운 파티에서 한 사람 목소리만 골라 듣는 라디오 주파수 맞추기와 같다.

교실 중요한 설명을 할 때는 경쟁하는 자극(소음, 동시 화면)을 줄인다.

주의 이후 칵테일파티 효과 등으로 늦은 선택 모형, 감쇠 모형이 제시되며 수정되었다.

→ Atkinson 1968, Baddeley 1974, Neisser 1967, Kahneman 1973, Treisman 1980

짧은 시각 제시에서 이용 가능한 정보 Sperling 1960

George Sperling. The information available in brief visual presentations · doi:10.1037/h0093759 · 인용 4,683회

의의 감각기억(영상기억)의 존재를 독창적인 실험 설계로 증명했다. 다중저장 모형의 첫 단계가 이 연구로 실증되었다.

핵심 문자 12개를 50ms 동안 보여 주면 사람들은 4개 정도만 보고했다. 그러나 화면이 사라진 직후 소리 신호로 한 줄만 보고하게 하자 어느 줄이든 대부분 맞혔다. 순간적으로는 거의 전부가 저장되지만 1초도 안 되어 사라진다는 뜻이다.

쉽게 불꽃놀이가 사라진 뒤에도 잠깐 눈에 잔상이 남아 있는 상태다.

교실 중요한 시각 정보는 잠깐 띄우고 넘기지 말고, 처리할 시간을 충분히 준다.

→ Atkinson 1968, Neisser 1967

인간 기억, 제안된 체계와 통제 과정 Atkinson 1968

Richard C. Atkinson & Richard M. Shiffrin. Human memory: A proposed system and its control processes · doi:10.1016/S0079-7421(08)60422-3 · 인용 10,307회

의의 감각기억-단기기억-장기기억의 "모달 모형"을 정식화했다. 교과서에 나오는 정보처리 이론 그림의 원형이다.

핵심 기억을 감각등록기, 단기저장고, 장기저장고라는 구조와 시연, 부호화, 인출 같은 통제 과정으로 나누었다. 단기저장고에서 정보를 되뇌면(시연) 장기저장고로 옮겨질 확률이 높아진다. 구조와 과정을 분리해 기억 연구에 수리 모형의 틀을 제공했다.

쉽게 현관(감각기억), 책상 위(단기기억), 서재 책장(장기기억)으로 물건이 옮겨지는 집과 같다.

교실 수업에서 정보가 "책상 위"에 머무는 동안 정리하고 연결할 시간을 준다.

← Ebbinghaus 1885, Miller 1956, Broadbent 1958, Sperling 1960, Neisser 1967 · → Craik 1972, Baddeley 1974, Sweller 1998, Schneider 1977

처리 수준, 기억 연구의 틀 Craik 1972

Fergus I. M. Craik & Robert S. Lockhart. Levels of processing: A framework for memory research · doi:10.1016/S0022-5371(72)80001-X · 인용 11,852회

의의 기억은 저장 장소가 아니라 처리 방식에 달려 있다는 관점 전환을 이끌었다. "깊이 생각한 것이 오래 남는다"는 교육 원리의 이론적 근거다.

핵심 단어의 글자 모양을 판단하는 얕은 처리보다 의미를 생각하는 깊은 처리가 훨씬 잘 기억된다. 크레이크와 록하트는 단기와 장기의 저장고 구분 대신, 처리의 깊이가 기억 흔적의 지속성을 결정한다는 틀을 제시했다.

쉽게 "사과"가 몇 글자인지 세는 것보다 "사과로 무엇을 만들까"를 떠올릴 때 더 오래 기억난다.

교실 단순 반복 암기 대신 "왜 그럴까?", "내 경험과 어떻게 연결될까?" 같은 질문을 붙인다.

주의 "깊이"를 독립적으로 측정하기 어렵다는 순환론 비판을 받았다.

← Atkinson 1968 · → Slamecka 1978, Bjork 1994, Mueller 2014

일화기억과 의미기억 Tulving 1972

Endel Tulving. Episodic and semantic memory · doi:10.1002/(sici)1098-1063(1998)8:3<205::aid-hipo3>3.0.co;2-i · 인용 652회

의의 장기기억을 "언제 어디서"의 일화기억과 일반 지식의 의미기억으로 나눈 고전이다. 이후 기억 시스템 연구의 기본 분류가 되었다.

핵심 털빙은 개인이 경험한 사건을 시공간 맥락과 함께 저장하는 일화기억과, 맥락과 분리된 사실과 개념의 의미기억을 구분했다. 두 체계는 저장 방식과 인출 조건이 다르다. 이 구분은 신경과학에서 해마와 피질의 역할 연구로 이어졌다.

쉽게 "작년 수학여행 때 경주에서 본 첨성대"는 일화기억, "첨성대는 신라 유물"은 의미기억이다.

교실 개념(의미기억)을 기억에 남는 구체적 경험(일화기억)과 함께 가르치면 인출 단서가 늘어난다.

→ Tulving 1973, Baddeley 2000, McClelland 1995, Collins 1975

인간 문제해결 Newell 1972

Allen Newell & Herbert A. Simon. Human Problem Solving (단행본) · 인용 10,787회

의의 인지과학과 인공지능을 함께 세운 기념비적 저작이다. 사고를 기호 처리로 모델링하는 전통과 인지부하이론의 "수단-목표 분석" 개념이 여기서 나온다.

핵심 사람에게 생각을 말하게 하는 사고구술법으로 체스, 논리, 암호 문제를 푸는 과정을 분석했다. 문제해결을 초기 상태에서 목표 상태로 가는 문제공간 탐색으로 정의하고, 현재와 목표의 차이를 줄이는 수단-목표 분석을 핵심 전략으로 보았다.

쉽게 내비게이션이 "목적지까지 남은 거리"를 줄이는 길을 계속 고르는 방식과 같다.

교실 학생에게 풀이 과정을 소리 내어 말하게 하면 사고 과정을 진단할 수 있다.

← Tolman 1948, Chomsky 1959 · → Chase 1973, Sweller 1988, Anderson 1995, Anderson 1996, Gick 1980

부호화 특수성 원리 Tulving 1973

Endel Tulving & Donald M. Thomson. Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory · doi:10.1037/h0020071 · 인용 5,348회

의의 기억이 잘 떠오르려면 인출할 때의 단서가 학습할 때의 부호화와 맞아야 한다는 원리를 세웠다. 시험 상황과 학습 상황을 맞추는 논의의 이론적 근거다.

핵심 약한 연합 단서와 함께 외운 단어는 강한 연합 단서를 주어도 잘 떠오르지 않았다. 심지어 재인보다 단서 회상이 더 나은 경우도 있었다. 무엇이 좋은 단서인지는 단서 자체가 아니라 부호화할 때 함께 저장된 정보에 달려 있다.

쉽게 노래 가사는 첫 소절이 들려야 술술 나오는데, 가사만 따로 물으면 막히는 것과 같다.

교실 개념을 여러 맥락과 표현으로 익히게 해서 다양한 인출 단서를 만들어 준다.

← Tulving 1972 · → Roediger 2006

체스에서의 지각 Chase 1973

William G. Chase & Herbert A. Simon. Perception in chess · doi:10.1016/0010-0285(73)90004-2 · 인용 5,482회

의의 전문성의 핵심이 뛰어난 일반 지능이 아니라 장기기억에 저장된 방대한 패턴이라는 것을 보였다. 전문가-초보자 연구와 인지부하이론의 스키마 개념에 직접 영향을 주었다.

핵심 실제 대국 배치를 5초 본 뒤 첫 시도에서 마스터는 평균 약 16개의 말을 맞게 놓아 A급 선수(약 8개)와 초보자(약 4개)를 크게 앞섰다. 반면 말을 무작위로 놓은 배치에서는 실력에 따른 차이가 없었다(참가자는 수준별 1명씩 3명). 마스터는 수만 개의 의미 있는 패턴(청크)을 장기기억에 저장하고 있어 배치를 몇 덩어리로 인식한다.

쉽게 우리는 한글 문장을 한눈에 읽지만, 처음 보는 문자는 한 획씩 봐야 하는 것과 같다.

교실 전문가처럼 생각하는 능력은 영역 지식이 쌓여야 생긴다. 일반적 "사고력"만 따로 훈련하는 접근을 경계한다.

← Miller 1956, Newell 1972 · → Chi 1981, Sweller 1988, Ericsson 1993, Bransford 2000

주의와 노력 Kahneman 1973

Daniel Kahneman. Attention and Effort (단행본) · 인용 7,060회

의의 주의를 "걸러내는 필터"가 아니라 "나누어 쓰는 한정된 자원"으로 재정의했다. 인지부하와 정신적 노력 측정 연구의 이론적 조상이다.

핵심 카너먼은 사람이 쓸 수 있는 정신적 노력의 총량이 제한되어 있고, 과제 요구에 따라 그 자원이 배분된다고 보았다. 어려운 암산을 할수록 동공이 커지는 현상을 노력의 생리적 지표로 제시했다. 각성 수준, 과제 요구, 의도가 자원 배분을 결정한다.

쉽게 정해진 용돈(주의 자원)을 여러 군데 나누어 쓰는 것과 같아서, 한곳에 많이 쓰면 다른 곳이 모자란다.

교실 새 개념을 설명할 때는 동시에 처리해야 할 다른 과제(필기, 자료 찾기)를 줄여 노력이 한곳에 모이게 한다.

← Broadbent 1958 · → Sweller 1988, Paas 1992, Kahneman 2011, Ophir 2009

작업기억 Baddeley 1974

Alan D. Baddeley & Graham Hitch. Working memory · doi:10.1016/S0079-7421(08)60452-1 · 인용 14,703회

의의 단기기억을 수동적 저장고가 아니라 여러 하위 체계로 이루어진 "작업 공간"으로 재정의했다. 멀티미디어 학습의 양식 효과와 인지부하이론이 이 모형에 기대고 있다.

핵심 숫자를 외우면서 추론 과제를 해도 수행이 생각보다 크게 무너지지 않았다. 배들리와 히치는 말소리 정보를 다루는 음운 루프, 시각 공간 정보를 다루는 시공간 잡기장, 이를 조율하는 중앙 집행기로 이루어진 작업기억 모형을 제안했다.

쉽게 한 사람이 왼손(소리)과 오른손(그림)을 따로 쓰고, 머리(집행기)가 두 손을 지휘하는 모습이다.

교실 그림을 보여 줄 때 설명은 화면 글보다 말로 하면 두 채널을 나누어 쓸 수 있다.

← Broadbent 1958, Atkinson 1968 · → Baddeley 2000, Cowan 2001, Mayer 2003, Sweller 1988, Engle 2002, Mayer 2001

불확실성 속의 판단, 휴리스틱과 편향 Tversky 1974

Amos Tversky & Daniel Kahneman. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases · doi:10.1126/science.185.4157.1124 · 인용 40,230회

의의 인간의 판단이 체계적으로 어긋나는 방식을 보여 준 인지심리학의 고전이다. 행동경제학과 의사결정 연구를 열었다.

핵심 사람은 확률을 정확히 계산하는 대신 대표성(전형적인 모습과 닮았는가), 가용성(얼마나 쉽게 떠오르는가), 기준점과 조정(처음 본 숫자에서 조금 움직이기) 같은 어림법을 쓴다. 이 어림법은 대체로 쓸모 있지만 기저율 무시, 표본 크기 무시 같은 예측 가능한 오류를 낳는다.

쉽게 비행기 사고 뉴스를 많이 보면 자동차보다 비행기가 더 위험하다고 느끼는 것이 가용성 휴리스틱이다.

교실 학생이 "느낌상 맞는 답"과 실제 근거를 구분하도록, 직관 예측 뒤 자료로 확인하는 활동을 넣는다.

→ Kruger 1999, Kahneman 2011

확산 활성화 이론 Collins 1975

Allan M. Collins & Elizabeth F. Loftus. A spreading-activation theory of semantic processing · doi:10.1037/0033-295X.82.6.407 · 인용 9,996회

의의 개념들이 연결망을 이루고, 한 개념이 떠오르면 활성화가 이웃 개념으로 퍼진다는 모형을 제시했다. 점화 효과와 연상 기억 연구의 기본 틀이다.

핵심 장기기억 속 개념은 의미적 거리에 따라 연결된 그물망을 이룬다. "빨강"이 활성화되면 "불", "사과", "장미"처럼 가까운 개념이 함께 활성화되어 더 빨리 인식된다. 연결이 많고 강할수록 활성화가 잘 퍼진다.

쉽게 "여름"을 들으면 바다, 수박, 방학이 줄줄이 떠오르는 머릿속 거미줄이다.

교실 새 개념을 가르칠 때 이미 아는 여러 개념과 명시적으로 연결해 주면 인출 경로가 늘어난다.

← Tulving 1972 · → Anderson 1996

통제적 처리와 자동적 처리 Schneider 1977

Walter Schneider & Richard M. Shiffrin. Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention · doi:10.1037/0033-295X.84.1.1 · 인용 7,883회

의의 충분히 연습한 처리는 주의 자원을 거의 쓰지 않는 "자동적 처리"가 된다는 것을 실험으로 정립했다. 기초 기능의 자동화가 왜 중요한지에 대한 근거다.

핵심 참가자들이 화면에서 목표 문자를 찾는 과제를 수천 번 연습했다. 목표와 방해 자극의 역할이 늘 같은 "일관된 대응" 조건에서는 탐색이 자동화되어 항목 수가 늘어도 속도가 거의 떨어지지 않았다. 역할이 계속 바뀌는 조건에서는 끝까지 느리고 노력이 드는 통제적 처리가 필요했다.

쉽게 처음엔 기어 변속에 온 신경을 쓰지만, 익숙해지면 대화하면서도 저절로 손이 움직인다.

교실 구구단, 해독, 기본 연산처럼 상위 사고의 재료가 되는 기능은 자동화될 때까지 짧고 잦게 연습시킨다.

← Atkinson 1968 · → Anderson 1996, Sweller 1998, Ophir 2009

스키마, 인지의 구성 요소 Rumelhart 1980

David E. Rumelhart. Schemata: The building blocks of cognition

의의 바틀릿의 스키마 개념을 인지과학의 정식 이론으로 다듬었다. 읽기 이해 교육과 배경지식 활성화 전략의 이론적 기반이다.

핵심 스키마는 대상, 사건, 행동에 대한 일반 지식의 묶음으로, 빈칸(변수)과 기본값을 가진다. "식당" 스키마에는 손님, 메뉴, 주문, 계산 같은 칸이 있어, 글에 없는 내용도 기본값으로 채워 이해한다. 이해란 입력에 맞는 스키마를 찾아 칸을 채우는 과정이다.

쉽게 "식당에 갔다"는 한 문장만 들어도 메뉴판과 계산서가 떠오르는 것이 스키마의 힘이다.

교실 글을 읽기 전에 관련 경험을 떠올리게 하면 학생이 빈칸을 채울 스키마를 미리 꺼내 놓는다.

← Bartlett 1932 · → Sweller 1988, Vosniadou 1992

유추적 문제해결 Gick 1980

Mary L. Gick & Keith J. Holyoak. Analogical problem solving · doi:10.1016/0010-0285(80)90013-4 · 인용 2,969회

의의 사람들이 비슷한 구조의 이야기를 방금 읽고도 새 문제에 거의 활용하지 못한다는 것을 보여 주었다. "전이는 저절로 일어나지 않는다"는 교육적 교훈의 고전 근거다.

핵심 참가자들은 병력을 나누어 여러 방향에서 요새를 공격하는 이야기를 읽은 뒤, 방사선을 여러 방향에서 약하게 쏘아 종양을 치료하는 문제(던커의 방사선 문제)를 풀었다. 이야기를 활용하라는 힌트가 없을 때는 약 30%만 해법을 찾았지만, 힌트를 주자 약 75%가 해결했다. 두 사례를 비교하게 하면 추상적 원리(스키마)가 생겨 전이가 늘어난다는 결과는 후속 연구(Gick & Holyoak, 1983)에서 나왔다.

쉽게 요리법을 알고도 재료가 바뀌면 같은 원리를 못 알아보는 것과 같다.

교실 겉모습이 다른 두 사례를 나란히 놓고 "공통 원리는 무엇인가"를 직접 비교하게 한다.

← Newell 1972 · → Gentner 1983, Barnett 2002, Schwartz 1998

특징 통합 이론 Treisman 1980

Anne M. Treisman & Garry Gelade. A feature-integration theory of attention · doi:10.1016/0010-0285(80)90005-5 · 인용 14,089회

의의 주의가 색, 모양 같은 개별 특징을 하나의 대상으로 묶는 "접착제"라는 이론을 세웠다. 시각 주의 연구의 중심 이론이다.

핵심 빨간 원들 사이의 파란 원은 개수와 상관없이 즉시 튀어나와 보인다(특징 탐색). 그러나 빨간 사각형과 파란 원 사이에서 파란 사각형을 찾으려면 하나씩 살펴야 해 개수가 늘수록 오래 걸렸다(결합 탐색). 주의가 주어지지 않으면 특징이 잘못 결합되는 착각 결합도 나타났다.

쉽게 흰 셔츠 무리 속 빨간 셔츠는 바로 보이지만, "빨간 모자에 파란 셔츠"를 입은 친구는 한 명씩 훑어야 찾는다.

교실 자료에서 꼭 봐야 할 부분은 색이나 굵기 하나로 튀게 표시해 학생이 찾느라 주의를 쓰지 않게 한다.

← Broadbent 1958

전문가와 초보자의 물리 문제 범주화 Chi 1981

Michelene T. H. Chi, Paul J. Feltovich & Robert Glaser. Categorization and representation of physics problems by experts and novices · doi:10.1207/s15516709cog0502_2 · 인용 6,202회

의의 전문가와 초보자는 같은 문제를 다르게 "본다"는 것을 실증했다. 전이와 개념 이해 연구의 고전이다.

핵심 물리 문제를 비슷한 것끼리 분류하게 하자 초보자는 "경사면", "도르래" 같은 표면 특징으로 묶었다. 전문가는 "에너지 보존", "뉴턴 제2법칙" 같은 원리로 묶었다. 전문가의 지식은 원리 중심으로 조직되어 있어 문제를 보자마자 풀이 전략이 활성화된다.

쉽게 초보 요리사는 "빨간 음식"끼리, 셰프는 "볶음 요리"끼리 묶는 것과 같다.

교실 겉모습은 다르지만 원리가 같은 문제를 나란히 비교하게 하는 활동이 심층 구조를 보게 한다.

← Chase 1973 · → Chi 1989, Kalyuga 2003, Bransford 2000

구조 사상 이론 Gentner 1983

Dedre Gentner. Structure-mapping: A theoretical framework for analogy · doi:10.1207/s15516709cog0702_3 · 인용 6,722회

의의 좋은 유추는 겉모습이 아니라 관계 구조를 옮기는 것이라는 이론을 세웠다. 비유와 모형을 활용한 과학 교육의 이론적 기반이다.

핵심 "원자는 태양계와 같다"는 유추에서 옮겨지는 것은 "노랗다", "뜨겁다" 같은 속성이 아니라 "중심 물체가 주변 물체를 끌어당기며 돈다"는 관계다. 겐트너는 서로 연결된 관계 체계를 많이 옮길수록 좋은 유추라는 체계성 원리를 제시했다.

쉽게 전기 회로를 물 흐르는 관에 비유할 때 중요한 것은 "물이 젖는다"가 아니라 "압력 차가 흐름을 만든다"는 관계다.

교실 비유를 쓸 때 무엇이 대응되고 무엇은 대응되지 않는지 표로 정리하게 한다.

← Gick 1980 · → Lakoff 2000

해독, 읽기, 읽기 장애 (읽기의 단순 관점) Gough 1986

Philip B. Gough & William E. Tunmer. Decoding, reading, and reading disability · doi:10.1177/074193258600700104 · 인용 5,709회

의의 읽기 이해를 "해독 × 언어 이해"라는 단순한 곱셈으로 설명한 "읽기의 단순 관점(Simple View of Reading)"을 제시했다. 읽기 교육과 진단의 가장 영향력 있는 틀 중 하나다.

핵심 읽기 이해는 글자를 소리와 단어로 바꾸는 해독 능력과, 들어서 이해하는 언어 이해 능력의 곱이다. 둘 중 하나라도 0이면 읽기 이해도 0이 된다. 그래서 읽기 부진은 해독 문제, 언어 이해 문제, 또는 둘 다의 문제로 나누어 진단해야 한다.

쉽게 글자를 술술 읽어도 뜻을 모르면, 뜻을 알아도 글자를 못 읽으면 결국 읽지 못한 것이다.

교실 읽기 부진 학생은 소리 내어 읽기(해독)와 들려주고 질문하기(언어 이해)를 따로 확인해 원인을 나눈다.

→ Panel 2000, Castles 2018

전문적 수행 획득에서 의도적 연습의 역할 Ericsson 1993

K. Anders Ericsson, Ralf T. Krampe & Clemens Tesch-Römer. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance · doi:10.1037/0033-295X.100.3.363 · 인용 12,429회

의의 재능보다 체계적 연습이 전문성을 만든다는 주장으로 교육계와 대중 담론에 큰 영향을 주었다. 말콤 글래드웰이 대중화한 "1만 시간의 법칙"의 근거 자료가 되었지만, 저자들은 정해진 마법의 숫자는 없다고 밝혔다.

핵심 베를린 음악원 바이올린 전공생을 수준별로 나누어 비교하자, 18세까지 누적 혼자 연습 시간은 최상위 집단이 평균 약 7,410시간으로 우수 집단(약 5,301시간)과 음악교사 집단(약 3,420시간)보다 많았다. 1만 시간은 그래프상 20세 무렵의 추정치다. 연구진은 단순 반복이 아니라 약점을 겨냥하고 즉각 피드백을 받으며 집중하는 "의도적 연습"이 핵심이라고 보았다.

쉽게 좋아하는 곡만 반복 연주하는 것이 아니라 틀리는 소절만 골라 천천히 고치는 연습이다.

교실 연습 과제는 학생 수준보다 약간 어렵게, 구체적 목표와 피드백을 함께 설계한다.

주의 Macnamara 등(2014) 메타분석은 연습이 수행 차이의 일부만 설명한다고 보고해 논쟁이 이어졌다.

← Chase 1973 · → Kalyuga 2003, Duckworth 2007

ACT, 복잡한 인지에 대한 단순한 이론 Anderson 1996

John R. Anderson. ACT: A simple theory of complex cognition · doi:10.1037/0003-066X.51.4.355 · 인용 1,116회

의의 복잡한 인지를 수많은 작은 지식 단위의 학습으로 설명하는 인지 아키텍처 ACT-R의 핵심 주장을 정리했다. 인지 튜터와 지식 요소(KC) 기반 학습공학의 이론적 토대다.

핵심 앤더슨은 인지를 "무엇"에 대한 선언적 지식(청크)과 "어떻게"에 대한 절차적 지식(산출 규칙)으로 나누었다. 복잡한 기술은 수많은 작은 규칙의 합이며, 각 규칙은 연습을 통해 하나씩 습득되고 강화된다. 그래서 충분한 연습만 있으면 복잡한 능력도 습득 가능하다는 낙관적 결론을 냈다.

쉽게 운전이라는 복잡한 기술도 "빨간불이면 멈춘다" 같은 수백 개 규칙이 자동화된 결과다.

교실 목표 기술을 작은 지식 요소로 쪼개고 요소별 숙달 정도를 추적한다.

← Newell 1972, Schneider 1977, Collins 1975 · → Koedinger 2012

일화적 완충기 Baddeley 2000

Alan D. Baddeley. The episodic buffer: a new component of working memory? · doi:10.1016/S1364-6613(00)01538-2 · 인용 10,122회

의의 26년 만에 작업기억 모형에 네 번째 요소를 추가했다. 작업기억과 장기기억이 어떻게 만나는지 설명하는 연결고리를 제공했다.

핵심 기존 모형으로는 사람이 문장을 단어 목록보다 훨씬 많이 기억하는 현상이나, 서로 다른 감각 정보를 하나의 장면으로 묶는 능력을 설명하기 어려웠다. 배들리는 여러 출처의 정보를 통합된 일화로 묶어 잠시 유지하는 일화적 완충기를 제안했다.

쉽게 소리와 그림 재료를 한 장면으로 엮어 잠깐 펼쳐 두는 작은 무대다.

교실 말, 그림, 몸동작을 하나의 이야기로 엮어 제시하면 통합된 기억을 만들기 쉽다.

← Tulving 1972, Baddeley 1974 · → Sweller 2019

단기기억의 마법의 수 4 Cowan 2001

Nelson Cowan. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity · doi:10.1017/S0140525X01003922 · 인용 8,161회

의의 밀러의 7±2를 대체해 현재 가장 널리 받아들여지는 작업기억 용량 추정치(약 4청크)를 제시했다.

핵심 코완은 시연과 청킹을 막은 실험들을 폭넓게 검토해, 순수한 저장 용량은 3~5청크, 평균 약 4청크라고 결론지었다. 7이라는 숫자는 사람들이 몰래 묶거나 되뇌어 부풀려진 값이라는 것이다. 이 한계는 주의의 초점이 동시에 붙잡을 수 있는 대상 수로 해석된다.

쉽게 손으로 한 번에 쥘 수 있는 공은 7개가 아니라 4개 정도라는 이야기다.

교실 한 번에 새로 도입하는 요소는 3~4개 이내로 제한한다.

← Miller 1956, Baddeley 1974 · → Sweller 2019

원전이의 분류 체계 Barnett 2002

Susan M. Barnett & Stephen J. Ceci. When and where do we apply what we learn? A taxonomy for far transfer · doi:10.1037/0033-2909.128.4.612 · 인용 2,639회

의의 100년 가까이 혼란스럽던 "전이" 연구를 내용과 맥락 차원으로 정리한 분류 체계다. 전이 연구를 비교 가능하게 만든 기준점이다.

핵심 전이를 "무엇이 전이되는가"(기술의 종류, 수행의 변화, 기억 요구)와 "어디로 전이되는가"(지식 영역, 물리적 맥락, 시간, 기능, 사회적 맥락, 양식)의 아홉 차원으로 나누었다. 같은 "전이 성공" 연구라도 이 차원에서 얼마나 멀리 갔는지가 크게 다르다는 점을 보였다.

쉽게 교실에서 배운 분수를 다음 날 같은 교실 시험에 쓰는 것과, 몇 년 뒤 부엌에서 레시피를 반으로 줄일 때 쓰는 것은 다른 거리의 전이다.

교실 평가 문항을 만들 때 맥락, 시간, 형식을 조금씩 바꾼 "먼 전이" 문항을 일부러 넣는다.

← Gick 1980, Thorndike 1898

실행 주의로서의 작업기억 용량 Engle 2002

Randall W. Engle. Working memory capacity as executive attention · doi:10.1111/1467-8721.00160 · 인용 3,129회

의의 작업기억 용량의 개인차가 단순 저장량이 아니라 방해를 이기고 주의를 통제하는 능력이라는 관점을 정리했다.

핵심 작업기억 용량이 큰 사람은 읽기 이해, 추론, 유동 지능 과제를 더 잘한다. 엥글은 그 이유가 기억 칸 수보다, 자동적 반응을 억제하고 목표를 유지하는 실행 주의에 있다고 보았다. 예컨대 화면에 불빛이 번쩍인 반대쪽을 보라는 과제에서 용량이 큰 사람이 덜 끌려갔다.

쉽게 책상이 넓어서가 아니라 쓸데없는 물건을 잘 치우는 사람이 일을 잘하는 것과 비슷하다.

교실 작업기억이 약한 학생에게는 방해 요소를 줄이고, 목표를 눈에 보이게 적어 두는 지원이 효과적이다.

← Baddeley 1974 · → Sweller 2019, Diamond 2013

미디어 멀티태스커의 인지 통제 Ophir 2009

Eyal Ophir, Clifford Nass & Anthony D. Wagner. Cognitive control in media multitaskers · doi:10.1073/pnas.0903620106 · 인용 2,507회

의의 여러 미디어를 동시에 많이 쓰는 사람이 오히려 방해 자극을 걸러내는 능력이 떨어진다는 결과로, 디지털 환경의 주의 문제 논쟁을 촉발했다.

핵심 대학생들의 미디어 동시 사용 정도를 조사해 상위 집단과 하위 집단을 비교했다. 멀티태스킹을 많이 하는 집단은 무관한 자극을 무시하는 과제, 기억 속 방해 정보를 걸러내는 과제, 심지어 과제 전환에서도 더 나쁜 수행을 보였다. 저자들은 이들이 주의를 넓게 펼치는 대신 걸러내는 통제가 약하다고 해석했다.

쉽게 여러 창을 띄워 놓고 일하는 습관이 "집중력 근육"을 오히려 약하게 만들 수 있다.

교실 과제 시간에는 알림과 다른 탭을 닫는 "한 가지만 하기" 규칙을 함께 정한다.

주의 후속 연구들의 결과는 엇갈려, 멀티태스킹과 주의 통제의 관계와 인과 방향은 아직 논쟁 중이다.

← Kahneman 1973, Schneider 1977

생각에 관한 생각 Kahneman 2011

Daniel Kahneman. Thinking, Fast and Slow (단행본) · 인용 22,332회

의의 빠르고 직관적인 "시스템 1"과 느리고 신중한 "시스템 2"라는 틀로 인간 판단을 설명해 세계적 베스트셀러가 된 책이다. 수십 년의 휴리스틱과 편향 연구를 집대성했다.

핵심 시스템 1은 자동적이고 노력이 들지 않으며 패턴과 인상으로 빠르게 판단한다. 시스템 2는 주의와 노력을 들여 계산하고 검토하지만 게을러서 시스템 1의 판단을 그대로 승인하기 쉽다. 기준점 효과, 가용성, 손실 회피, 계획 오류 등 다양한 편향이 이 두 체계의 상호작용에서 나온다.

쉽게 "2+2=?"은 시스템 1이, "17×24=?"는 시스템 2가 푼다.

교실 학생이 직관적 답을 낸 뒤 "정말 그런가?"를 따져 보는 단계를 넣어 시스템 2를 깨우는 습관을 기른다.

주의 책에 소개된 점화(priming) 연구 일부는 재현에 실패했으며, 카너먼 자신도 이를 인정했다.

← Tversky 1974, Kahneman 1973

읽기 전쟁을 끝내자 Castles 2018

Anne Castles, Kathleen Rastle & Kate Nation. Ending the reading wars: Reading acquisition from novice to expert · doi:10.1177/1529100618772271 · 인용 1,992회

의의 수십 년 이어진 "파닉스 대 총체적 언어" 논쟁을 인지과학 증거로 정리한 종합 개관이다. 초기 해독 교육과 이후의 지식·언어 교육을 함께 강조한다.

핵심 알파벳 문자 체계를 배우는 초기에는 체계적인 파닉스 교육이 강력한 근거를 가진다. 그러나 숙련된 독자가 되려면 많은 읽기 경험을 통해 단어를 즉시 알아보는 능력을 키우고, 어휘와 배경지식, 글 구조 이해까지 갖춰야 한다. 저자들은 초보에서 전문가까지의 단계마다 필요한 교육이 다르다고 정리했다.

쉽게 자전거를 배울 때 보조바퀴(파닉스)가 꼭 필요하지만, 평생 보조바퀴만 달고 다니지는 않는다.

교실 저학년은 해독을 체계적으로 가르치고, 고학년으로 갈수록 폭넓은 독서, 어휘, 배경지식 교육의 비중을 늘린다.

← Gough 1986, Panel 2000, Dehaene 2007

3. 인지부하이론과 멀티미디어 학습

작업기억의 한계를 교수설계의 출발점으로 삼은 이론군. 풀이 예제, 주의 분산, 양식 효과, 전문성 역전 등을 다룬다.

대수 학습에서 문제풀이 대신 풀이 예제 사용 Sweller 1985

John Sweller & Graham A. Cooper. The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra · doi:10.1207/s1532690xci0201_3 · 인용 1,540회

의의 "문제를 많이 풀어야 실력이 는다"는 상식을 뒤집은 실험이다. 인지부하이론에서 가장 탄탄하게 재현된 풀이 예제 효과의 원조다.

핵심 대수 문제를 처음 배우는 학생 중 풀이가 완성된 예제를 공부한 집단이 같은 문제를 직접 푼 집단보다 학습 시간이 짧았고, 비슷한 문제를 더 빠르고 정확하게 풀었다. 초보자에게 문제풀이는 목표에 도달하는 데 인지 자원을 써 버려 스키마를 만들 여유를 남기지 않는다.

쉽게 처음 요리를 배울 때는 혼자 실험하는 것보다 레시피 영상을 따라 보는 편이 빨리 는다.

교실 새 유형은 풀이 예제 → 일부 단계가 빈 완성 문제 → 독립 문제 순으로 넘어간다.

→ Sweller 1988, Paas 1992, Kalyuga 2003, Chi 1989, Kirschner 2006

문제해결 중 인지부하와 학습 Sweller 1988

John Sweller. Cognitive load during problem solving: Effects on learning · doi:10.1207/s15516709cog1202_4 · 인용 17,207회

의의 인지부하이론(CLT)을 처음 공식화한 논문이다. 교수설계 연구에서 가장 영향력 있는 이론 중 하나가 여기서 시작되었다.

핵심 스웰러는 초보자가 쓰는 수단-목표 분석이 현재 상태, 목표, 그 차이, 하위목표를 동시에 붙잡게 해 작업기억을 과부하시킨다고 보았다. 그래서 문제는 풀려도 일반화 가능한 스키마는 남지 않는다. 구체적 목표 대신 "구할 수 있는 것을 모두 구하라"는 목표 자유 문제가 학습에 더 효과적임을 보였다.

쉽게 길을 찾느라 지도만 보며 걷다 보면 동네 구조는 하나도 기억에 남지 않는 것과 같다.

교실 초보 단계에서는 "x를 구하라" 대신 "이 그림에서 알 수 있는 값을 모두 구하라"는 과제를 써 본다.

← Bartlett 1932, Miller 1956, Newell 1972, Chase 1973, Baddeley 1974, Sweller 1985, Kahneman 1973, Rumelhart 1980 · → Chandler 1991, Sweller 1998, Kapur 2008, Sweller 1994

인지부하이론과 교수 자료 형식 Chandler 1991

Paul Chandler & John Sweller. Cognitive load theory and the format of instruction · doi:10.1207/s1532690xci0804_2 · 인용 3,759회

의의 자료의 "배치"만 바꿔도 학습이 달라진다는 것을 보여 준 연구다. 교재와 슬라이드 디자인에 바로 적용되는 원리를 제공했다.

핵심 그림과 설명 글이 떨어져 있으면 학습자는 둘을 머릿속에서 맞춰 보느라 부하가 생긴다(주의 분산). 설명을 그림 속 해당 위치에 통합하자 학습이 좋아졌다. 반대로 그림만으로 이해되는 내용에 글을 덧붙이면 오히려 방해가 되었다(중복 효과).

쉽게 조립 설명서 그림과 번호 설명이 다른 페이지에 있으면 앞뒤로 넘기다 지치는 것과 같다.

교실 도표의 범례를 따로 두지 말고 해당 부분에 직접 라벨을 붙인다. 이미 분명한 그림에 같은 말을 반복하지 않는다.

← Sweller 1988 · → Mayer 2003, Sweller 1998, Mayer 2001, Kalyuga 2003

이중부호화 이론과 교육 Clark 1991

James M. Clark & Allan Paivio. Dual coding theory and education · doi:10.1007/BF01320076 · 인용 2,974회

의의 파이비오의 이중부호화 이론을 교육 전반에 적용한 종합 논문이다. 멀티미디어 학습 이론의 두 축 중 하나다.

핵심 인간의 인지는 언어 정보를 처리하는 체계와 비언어(심상) 정보를 처리하는 체계로 이루어져 있다. 두 체계에 모두 부호화된 정보는 인출 경로가 두 개라 더 잘 기억된다. 구체적인 단어가 추상적인 단어보다 잘 기억되는 이유도 심상을 떠올리기 쉬워서다.

쉽게 "코끼리"는 글자와 그림 두 개의 열쇠로 열 수 있지만 "정의"는 열쇠가 하나뿐이다.

교실 추상 개념에는 구체적 이미지나 사례를 짝지어 준다.

→ Mayer 2003, Mayer 2001

통계 문제해결 전이를 위한 훈련 전략 Paas 1992

Fred G. W. C. Paas. Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach · doi:10.1037/0022-0663.84.4.429 · 인용 2,626회

의의 인지부하를 측정하는 9점 주관적 정신적 노력 척도를 도입했다. 이후 수천 편의 CLT 연구가 이 척도를 쓴다.

핵심 통계 문제를 배울 때 풀이 예제나 완성 문제로 공부한 집단은 문제만 푼 집단과 훈련 시간, 훈련 중 정신적 노력에서는 차이가 없었지만, 전이 문제를 더 잘 풀었고 전이 검사에서 든 노력도 더 적었다. 학습자가 느낀 노력을 한 문항으로 물어 인지부하를 측정할 수 있음을 보였다.

쉽게 "방금 문제를 푸는 데 얼마나 힘들었나요?"라는 한 문항이 인지부하의 온도계가 되었다.

교실 과제 뒤에 1~9점 노력 점수를 적게 하면 난이도 조절의 근거가 된다.

← Sweller 1985, Kahneman 1973 · → Sweller 1998, van Merriënboer 2002

인지부하이론, 학습 난이도, 교수설계 Sweller 1994

John Sweller. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design · doi:10.1016/0959-4752(94)90003-5 · 인용 5,232회

의의 "요소 상호작용성" 개념으로 어떤 내용이 왜 본질적으로 어려운지를 설명했다. 내재적 부하 개념이 이 논문에서 자리 잡았다.

핵심 외국어 단어 뜻처럼 하나씩 따로 배울 수 있는 내용은 요소 상호작용성이 낮아 양이 많아도 이해는 쉽다. 대수 방정식처럼 여러 요소를 동시에 고려해야 하는 내용은 요소 상호작용성이 높아 작업기억 부담이 크다. 교수설계는 이 내재적 어려움을 고려해 외재적 부하를 더 엄격히 줄여야 한다.

쉽게 단어 100개 외우기는 양이 많을 뿐이고, 체스 한 수를 두는 것은 동시에 고려할 관계가 많아서 어렵다.

교실 관계가 복잡한 내용은 요소를 먼저 따로 익히게 한 뒤 전체 관계를 다룬다.

← Sweller 1988 · → Sweller 1998

인지 구조와 교수설계 Sweller 1998

John Sweller, Jeroen J. G. van Merriënboer & Fred G. W. C. Paas. Cognitive architecture and instructional design · doi:10.1023/A:1022193728205 · 인용 7,817회

의의 인지부하이론의 표준 교과서 역할을 한 종합 논문이다. 세 가지 부하 유형과 주요 효과 목록을 정리했다.

핵심 인간 인지 구조를 용량이 제한된 작업기억과 사실상 무한한 장기기억으로 요약하고, 학습은 장기기억에 스키마를 만들고 자동화하는 일이라고 정의했다. 부하를 내용 자체의 복잡성에서 오는 내재적 부하, 나쁜 설계에서 오는 외재적 부하, 스키마 형성에 쓰이는 본유적 부하로 나누었다. 목표 자유, 풀이 예제, 완성 문제, 주의 분산, 양식, 중복, 변이성 효과를 정리했다.

쉽게 짐의 무게(내재적), 불편한 가방(외재적), 근육을 키우는 운동(본유적)으로 나누어 보는 것이다.

교실 내용은 그대로 두고 외재적 부하(불필요한 장식, 흩어진 정보)부터 줄인다.

주의 본유적 부하 개념은 이후 측정과 구분이 어렵다는 비판으로 2019년 개정에서 재정의되었다.

← Atkinson 1968, Sweller 1988, Chandler 1991, Paas 1992, Schneider 1977, Sweller 1994 · → Kalyuga 2003, Kirschner 2006, van Merriënboer 2002, Sweller 2019, Mayer 2003

멀티미디어 학습 Mayer 2001

Richard E. Mayer. Multimedia Learning (단행본) · doi:10.1017/CBO9781139164603 · 인용 5,500회

의의 멀티미디어 학습 인지이론(CTML)을 체계화한 책이다. 교육 영상, 이러닝, 교과서 디자인 연구의 표준 참고서가 되었다.

핵심 사람은 글만 볼 때보다 글과 그림을 함께 볼 때 더 깊이 배운다(멀티미디어 원리). 메이어는 이중 채널, 제한된 용량, 능동적 처리라는 세 가정에서 출발해, 학습자가 단어와 그림을 선택하고 각각 조직한 뒤 선지식과 통합하는 과정을 모형화했다. 수십 건의 실험으로 일관성, 신호, 공간·시간 근접 등의 설계 원리를 도출했다.

쉽게 번개가 생기는 원리를 글로만 읽는 것보다, 단계별 그림과 짧은 설명을 함께 볼 때 훨씬 잘 이해된다.

교실 설명에는 관련 그림을 붙이되, 장식용 사진이나 배경 음악처럼 관련 없는 요소는 뺀다.

← Clark 1991, Baddeley 1974, Chandler 1991 · → Mayer 2003, Fiorella 2016

복합 학습을 위한 설계도, 4C/ID 모형 van Merriënboer 2002

Jeroen J. G. van Merriënboer, Richard E. Clark & Marcel B. M. de Croock. Blueprints for complex learning: The 4C/ID-model · doi:10.1007/BF02504993 · 인용 885회

의의 인지부하이론을 실제 교육과정 설계 모형으로 확장했다. 직업교육과 의학교육에서 널리 쓰인다.

핵심 복합적 기술은 조각내 가르치면 통합과 전이가 일어나지 않는다. 4C/ID 모형은 실제와 같은 전체 학습 과제, 비정형적 측면을 돕는 지원 정보, 반복적 측면을 위한 절차 정보(필요할 때 즉시 제공), 자동화가 필요한 부분 과제 연습의 네 요소로 설계한다. 과제는 쉬운 것부터 어려운 것으로, 지원은 많은 것에서 적은 것으로 줄인다.

쉽게 운전 교육을 이론-핸들-브레이크로 따로 하지 않고, 빈 주차장에서 전체 운전을 해 보며 점점 복잡한 도로로 나가는 방식이다.

교실 프로젝트 수업을 쉬운 전체 과제부터 시작하고 단계마다 비계를 줄여 간다.

← Paas 1992, Sweller 1998 · → Sweller 2019

멀티미디어 학습에서 인지부하를 줄이는 아홉 가지 방법 Mayer 2003

Richard E. Mayer & Roxana Moreno. Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning · doi:10.1207/S15326985EP3801_6 · 인용 5,629회

의의 메이어의 멀티미디어 학습 인지이론을 실천 원리 아홉 가지로 압축했다. 교육 영상과 슬라이드 제작의 사실상 표준 지침이다.

핵심 학습자는 언어와 시각 두 채널로 정보를 처리하고, 각 채널의 용량은 제한되며, 의미 있는 학습에는 선택-조직-통합의 능동적 처리가 필요하다. 이를 바탕으로 양식 전환(글 대신 내레이션), 분절, 사전훈련, 잡음 제거, 신호 주기, 공간 정렬, 중복 제거, 동기화, 개인차 고려(심상을 붙잡아 둘 공간 능력을 갖추었는지 확인하기)의 아홉 방법을 제시했다.

쉽게 좋은 다큐멘터리는 화면에 자막을 빽빽이 띄우지 않고, 장면과 내레이션을 딱 맞춰 보여 준다.

교실 슬라이드에 읽을 문장을 가득 쓰는 대신 핵심 그림과 말 설명을 짝지어 짧게 끊어 제시한다.

← Baddeley 1974, Chandler 1991, Clark 1991, Ausubel 1960, Mayer 2001, Sweller 1998 · → Sweller 2019

전문성 역전 효과 Kalyuga 2003

Slava Kalyuga, Paul Ayres, Paul Chandler & John Sweller. The expertise reversal effect · doi:10.1207/S15326985EP3801_4 · 인용 2,380회

의의 "좋은 설계"가 학습자 수준에 따라 나쁜 설계로 뒤집힌다는 것을 정리했다. 적응형 학습과 비계 제거(페이딩)의 이론적 근거다.

핵심 초보자에게 효과적인 풀이 예제나 통합 설명이 숙련자에게는 이미 아는 정보를 다시 처리하게 해 외재적 부하가 된다. 숙련자는 문제를 직접 풀 때 더 많이 배운다. 따라서 교수 방법은 학습자의 현재 지식 수준에 맞춰 바뀌어야 한다.

쉽게 운전을 처음 배울 때는 옆자리 강사의 설명이 고맙지만, 능숙해지면 오히려 방해가 된다.

교실 같은 반에서도 빠른 학생에게는 예제를 건너뛰고 바로 문제를 풀게 하는 선택지를 준다.

← Chi 1981, Ericsson 1993, Sweller 1985, Sweller 1998, Chandler 1991 · → Kirschner 2006, Sweller 2019

최소 안내 교수가 효과가 없는 이유 Kirschner 2006

Paul A. Kirschner, John Sweller & Richard E. Clark. Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching · doi:10.1207/s15326985ep4102_1 · 인용 9,550회

의의 구성주의 계열 수업(발견, 문제기반, 탐구)을 정면 비판해 학습과학계 최대 논쟁 중 하나를 촉발했다. "명시적 교수 대 탐구" 논쟁의 기준점이다.

핵심 인간 인지 구조를 고려하면, 초보자에게 최소한의 안내만 주고 스스로 발견하게 하면 작업기억 과부하로 학습이 비효율적이 된다. 저자들은 수십 년의 실증 연구가 강한 안내(풀이 예제, 명시적 설명)의 우위를 일관되게 보여 준다고 주장했다. 탐구는 목표가 아니라 전문성이 생긴 뒤의 수단이라는 입장이다.

쉽게 수영을 처음 배우는 아이를 깊은 물에 넣고 "스스로 발견해 봐"라고 하지 않는 것과 같다.

교실 탐구 수업에도 초반 명시적 설명, 풀이 예시, 단계별 안내를 충분히 넣는다.

주의 Hmelo-Silver, Duncan & Chinn(2007)은 문제기반, 탐구 학습도 실제로는 상당한 비계를 제공한다고 반박했다.

← Sweller 1998, Kalyuga 2003, Bruner 1961, Brown 1989, Mayer 2004, Sweller 1985 · → Kapur 2008, Rosenshine 2012, Sweller 2019, Kestin 2025, Hmelo-Silver 2007, Kirschner 2013

진화론에 기반한 교육과학 Geary 2008

David C. Geary. An evolutionarily informed education science · doi:10.1080/00461520802392133 · 인용 417회

의의 왜 말하기는 저절로 배우는데 읽기와 수학은 가르쳐야 하는지를 진화론으로 설명했다. 인지부하이론의 2010년대 재구성에 핵심 개념을 제공했다.

핵심 기어리는 인간이 진화 과정에서 자연스럽게 익히도록 준비된 일차 지식(모국어 말하기, 얼굴 인식, 기초 수 감각)과, 문화가 최근에 만든 이차 지식(읽기, 쓰기, 대수)을 구분했다. 일차 지식은 놀이와 몰입으로 쉽게 습득되지만 이차 지식은 명시적 교수와 노력이 필요하다.

쉽게 걷기는 누가 가르치지 않아도 배우지만 자전거 타기는 누군가 잡아 줘야 하는 것과 비슷하다.

교실 읽기, 수학 같은 교과 지식은 아이가 "자연스럽게" 깨치길 기다리기보다 체계적으로 가르친다.

← Dehaene 2007 · → Paas 2012, Sweller 2019

인지부하이론의 진화적 업그레이드 Paas 2012

Fred Paas & John Sweller. An evolutionary upgrade of cognitive load theory: Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks · doi:10.1007/s10648-011-9179-2 · 인용 663회

의의 인지부하이론과 체화된 인지를 연결한 다리 논문이다. 몸의 움직임과 협력이라는 "공짜" 일차 능력을 이차 지식 학습에 끌어 쓰자고 제안했다.

핵심 몸짓, 손으로 짚기, 몸을 움직이며 배우기, 다른 사람과 함께 생각하기는 진화적으로 익숙한 일차 능력이라 작업기억을 크게 쓰지 않는다. 저자들은 이 능력을 활용하면 수학, 과학 같은 이차 지식 학습의 부하를 줄일 수 있다고 보았다. 실제로 예제를 손가락으로 따라가며 보는 것만으로 학습이 좋아진 연구들이 이어졌다.

쉽게 숫자를 셀 때 손가락을 쓰면 머리가 덜 피곤한 이유를 이론으로 정리한 셈이다.

교실 도형 문제를 볼 때 손가락으로 각을 짚게 하고, 어려운 과제는 짝과 함께 풀게 한다.

← Geary 2008, Goldin-Meadow 2001, Cook 2008 · → Sweller 2019

인지 구조와 교수설계, 20년 후 Sweller 2019

John Sweller, Jeroen J. G. van Merriënboer & Fred Paas. Cognitive architecture and instructional design: 20 years later · doi:10.1007/s10648-019-09465-5 · 인용 3,772회

의의 1998년 논문 이후 20년의 연구를 집대성한 인지부하이론의 최신 정식판이다. 오픈 액세스로 공개되어 입문 문헌으로도 좋다.

핵심 진화적 관점(일차/이차 지식)을 이론의 기초로 들이고, 모든 부하를 "요소 상호작용성"이라는 단일 개념으로 정리했다. 본유적 부하는 별도 부하가 아니라 내재적 부하를 다루는 데 쓰이는 작업기억 자원으로 재정의했다. 일시적 정보 효과, 집단 작업기억 효과, 인간 움직임 효과, 자기관리 효과 같은 새 효과도 정리했다.

쉽게 20년 동안 쓰던 지도를 새 측량 결과에 맞춰 다시 그린 개정판이다.

교실 동영상처럼 금방 사라지는 정보는 일시 정지와 요약 화면을 넣어 부하를 줄인다.

← Baddeley 2000, Cowan 2001, Sweller 1998, Mayer 2003, Kirschner 2006, van Merriënboer 2002, Geary 2008, Paas 2012, Engle 2002, Kalyuga 2003 · → Kestin 2025

4. 기억 전략과 바람직한 어려움

인출 연습, 분산, 교차, 생성처럼 당장은 어렵지만 오래 남는 학습을 만드는 전략과 학습 신화 검증.

생성 효과 Slamecka 1978

Norman J. Slamecka & Peter Graf. The generation effect: Delineation of a phenomenon · doi:10.1037/0278-7393.4.6.592 · 인용 1,995회

의의 스스로 만들어 낸 정보가 읽기만 한 정보보다 잘 기억된다는 생성 효과를 정립했다. 바람직한 어려움 연구의 출발점 중 하나다.

핵심 "빠른-빠?"처럼 규칙에 따라 단어를 직접 완성한 경우가 "빠른-빠름"을 읽기만 한 경우보다 회상과 재인 모두에서 잘 기억되었다. 이 효과는 동의어, 반의어, 운율 규칙 등 다양한 조건에서 나타났다.

쉽게 친구가 알려 준 길보다 내가 직접 찾아간 길이 더 잘 기억나는 것과 같다.

교실 빈칸 채우기, 핵심어 직접 떠올리기처럼 학생이 답을 "만들어 내는" 활동을 넣는다.

← Craik 1972 · → Bjork 1994, Mueller 2014, Fiorella 2016

인간 훈련에서의 기억과 메타기억 고려사항 Bjork 1994

Robert A. Bjork. Memory and metamemory considerations in the training of human beings · doi:10.7551/mitpress/4561.003.0011 · 인용 1,480회

의의 "바람직한 어려움(desirable difficulties)"이라는 개념을 세상에 내놓은 글이다. 학습과학을 교실로 옮긴 가장 영향력 있는 아이디어 중 하나다.

핵심 비요크는 연습 중의 수행과 장기적 학습이 다르다고 강조했다. 분산, 교차, 인출 연습, 맥락 변화처럼 연습을 어렵게 만드는 조건은 당장의 수행을 떨어뜨리지만 오래 남는 학습을 만든다. 학습자와 교사 모두 쉬운 연습을 "잘 배우고 있다"고 착각하기 쉽다는 메타기억 문제도 지적했다.

쉽게 헬스장에서 가벼운 무게를 들면 기분은 좋지만 근육은 무거운 무게에서 자란다.

교실 "잘 안 되는 느낌"이 곧 학습 실패가 아니라는 점을 학생들에게 직접 설명해 준다.

← Ebbinghaus 1885, Craik 1972, Slamecka 1978, Flavell 1979, Nelson 1990 · → Roediger 2006, Kornell 2008, Pashler 2008, Kapur 2008, Dunlosky 2013, Rohrer 2007, Brown 2014, Bjork 2013

시험을 통한 학습 증진 Roediger 2006

Henry L. Roediger III & Jeffrey D. Karpicke. Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention · doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01693.x · 인용 3,892회

의의 시험이 평가 도구일 뿐 아니라 강력한 학습 도구라는 시험 효과를 현대적으로 재조명했다. 인출 연습 붐의 기폭제가 된 논문이다.

핵심 대학생이 산문을 네 번 읽은 집단(SSSS)과 한 번 읽고 세 번 회상 시험을 본 집단(STTT)을 비교했다. 5분 뒤에는 반복 읽기가 앞섰지만 일주일 뒤에는 시험 집단이 훨씬 많이 기억했다. 학생들은 반복 읽기를 더 효과적이라고 예측해 메타인지 착각도 확인되었다.

쉽게 운동 영상을 네 번 보는 것보다 한 번 보고 세 번 따라 해 보는 편이 오래 간다.

교실 수업 끝 3분 "백지에 오늘 배운 것 적기"나 저부담 퀴즈를 정례화한다.

← Tulving 1973, Bjork 1994 · → Karpicke 2011, Dunlosky 2013, Karpicke 2008, Brown 2014, Roediger 2011

분산 연습 메타분석 Cepeda 2006

Nicholas J. Cepeda, Harold Pashler, Edward Vul, John T. Wixted & Doug Rohrer. Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis · doi:10.1037/0033-2909.132.3.354 · 인용 2,553회

의의 100년 넘게 쌓인 간격 효과 연구를 정량 종합한 대표 메타분석이다. "얼마나 간격을 두어야 하는가"에 대한 데이터를 제공했다.

핵심 184편 논문의 317개 실험을 분석한 결과, 같은 양을 공부해도 몰아서 하는 것보다 나누어 하는 것이 장기 기억에 확실히 유리했다. 기억해야 하는 기간이 길수록 최적 학습 간격도 길어졌다.

쉽게 화분에 물을 하루에 한 번 몰아 주기보다 나누어 주는 편이 뿌리가 깊어진다.

교실 단원 끝 총정리 대신 이전 단원 문제를 몇 주에 걸쳐 섞어 다시 다룬다.

← Ebbinghaus 1885 · → Kornell 2008, Dunlosky 2013, Rohrer 2007

수학 문제 섞기가 학습을 향상시킨다 Rohrer 2007

Doug Rohrer & Kelli Taylor. The shuffling of mathematics problems improves learning · doi:10.1007/s11251-007-9015-8 · 인용 471회

의의 수학 교과서의 "유형별 연습"보다 "유형 섞기"가 시험 성적을 크게 높인다는 것을 보여 준 대표 연구다.

핵심 대학생들이 낯선 입체(쐐기, 회전 타원체 등)의 부피 공식을 익혔다. 같은 유형을 몰아서 연습한 집단은 연습 중 정답률이 89%로 더 높았지만, 일주일 뒤 시험에서는 20%에 그쳤다. 여러 유형을 섞어 연습한 집단은 연습 중 60%였지만 시험에서는 63%를 맞혔다. 섞으면 "어떤 공식을 써야 하는지" 고르는 연습까지 하게 된다.

쉽게 연습 때는 쉬워 보이던 몰아서 풀기가 시험장에서는 "이건 무슨 유형이지?"라는 벽에 부딪힌다.

교실 단원 연습문제 끝에 이전 단원 유형을 섞은 "혼합 세트"를 매번 붙인다.

← Bjork 1994, Cepeda 2006 · → Kornell 2008, Dunlosky 2013

개념과 범주 학습, 간격은 귀납의 적인가? Kornell 2008

Nate Kornell & Robert A. Bjork. Learning concepts and categories: Is spacing the "enemy of induction"? · doi:10.1111/j.1467-9280.2008.02127.x · 인용 774회

의의 같은 유형을 몰아 보는 것보다 섞어 보는 교차 학습이 범주 학습에 더 낫다는 것을 보였다. 교차 연습 연구를 대중화했다.

핵심 참가자들이 여러 화가의 그림을 화가별로 몰아서 보거나 섞어서 본 뒤, 처음 보는 그림의 화가를 맞혔다. 섞어서 본 집단의 정답률이 높았지만, 참가자 대다수는 몰아서 보는 방식이 더 좋았다고 답했다.

쉽게 "이건 모네, 이건 고흐"를 번갈아 볼 때 두 화풍의 차이가 선명해진다.

교실 수학 연습문제를 한 유형씩 묶지 말고 여러 유형을 섞어 "어떤 방법을 써야 하는지"부터 고르게 한다.

← Bjork 1994, Cepeda 2006, Rohrer 2007 · → Dunlosky 2013, Brown 2014

생산적 실패 Kapur 2008

Manu Kapur. Productive failure · doi:10.1080/07370000802212669 · 인용 1,307회

의의 명시적 교수를 먼저 하는 것이 항상 최선은 아니라는 반론의 대표 연구다. "탐색 후 교수(PS-I)" 설계의 근거가 되었다.

핵심 인도 수도권 7개 고교의 11학년 학생 309명이 뉴턴 운동학 문제를 3인 모둠으로 채팅하며 풀었다. 비구조화 문제를 아무 지원 없이 푼 모둠은 해답의 질이 낮았다(실패). 그러나 이후 모든 학생이 개별로 문제를 풀었을 때, 이 집단은 처음부터 구조화된 문제를 받은 집단보다 구조화 문제와 비구조화 문제 모두에서 더 잘했다. 실패 과정에서 문제를 다양하게 표상하고 탐색한 경험이 이후 수행의 밑거름이 된다는 해석이다.

쉽게 먼저 혼자 끙끙대며 여러 방법을 시도해 본 경험이, 나중에 비슷한 문제를 만났을 때 쓸 수 있는 재료가 된다.

교실 새 개념 수업 전에 10~15분 정도 학생이 자기 방식으로 먼저 시도해 보게 한 뒤 정식 설명을 한다.

주의 2008년 연구에는 실패 뒤 교수 단계가 없었다. 실패 뒤 체계적 교수를 붙이는 "탐색 후 교수(PS-I)" 설계는 이후 연구에서 정립되었고, 그 설계에서는 뒤따르는 교수가 핵심이다.

← Sweller 1988, Kirschner 2006, Bjork 1994, Schwartz 1998, Hmelo-Silver 2007

학습 양식, 개념과 증거 Pashler 2008

Harold Pashler, Mark McDaniel, Doug Rohrer & Robert Bjork. Learning styles: Concepts and evidence · doi:10.1111/j.1539-6053.2009.01038.x · 인용 3,345회

의의 시각형, 청각형 같은 학습 양식 맞춤 교육에 과학적 근거가 없다는 것을 정리한 결정적 논문이다.

핵심 학습 양식에 맞춰 가르치면 효과가 있다는 "맞춤 가설"을 검증하려면 양식별로 무작위 배정해 상호작용을 확인해야 한다. 저자들이 검토한 결과 이런 설계를 갖춘 연구는 거의 없었고, 있는 연구도 가설을 지지하지 않았다. 교육 자원을 학습 양식 진단에 쓰는 것은 정당화되지 않는다고 결론지었다.

쉽게 "나는 시각형이라 그림으로만 배워야 해"는 혈액형 성격론과 비슷한 수준의 근거라는 뜻이다.

교실 학생 유형보다 내용 유형에 맞춰 표현 방식을 고른다. 지도는 그림으로, 발음은 소리로 가르친다.

← Bjork 1994, Kolb 1984 · → Howard-Jones 2014, Kirschner 2013, Brown 2014

학습에서 인출의 결정적 중요성 Karpicke 2008

Jeffrey D. Karpicke & Henry L. Roediger III. The critical importance of retrieval for learning · doi:10.1126/science.1152408 · 인용 2,234회

의의 한 번 맞힌 항목도 계속 인출해야 오래 남는다는 것을 보여 준 Science 논문이다. 플래시카드를 "외웠으면 빼는" 습관에 정면으로 반대되는 결과다.

핵심 대학생들이 스와힐리어-영어 단어쌍 40개를 학습과 시험을 번갈아 하며 익혔다. 한 번 맞힌 단어를 이후 시험에서 빼 버린 조건은 일주일 뒤 약 35%만 기억했지만, 계속 시험을 본 조건은 약 80%를 기억했다. 반면 맞힌 단어를 다시 공부하는 것은 효과가 거의 없었다. 학생들의 예측은 조건과 상관없이 비슷해, 이 차이를 전혀 알아차리지 못했다.

쉽게 정답을 맞혔다고 단어장에서 지우는 순간 그 단어는 잊히기 시작한다.

교실 퀴즈 앱이나 플래시카드에서 이미 맞힌 문항도 간격을 두고 다시 등장하게 설정한다.

← Roediger 2006 · → Karpicke 2011, Dunlosky 2013

인출 연습은 개념도 작성보다 더 많은 학습을 낳는다 Karpicke 2011

Jeffrey D. Karpicke & Janell R. Blunt. Retrieval practice produces more learning than elaborative studying with concept mapping · doi:10.1126/science.1199327 · 인용 1,435회

의의 Science에 실려 큰 반향을 일으켰다. 인출 연습이 단순 암기뿐 아니라 추론과 이해에도 유리하다는 것을 보였다.

핵심 과학 글을 읽은 뒤 자유 회상(인출 연습)을 한 집단이 개념도를 그리며 공부한 집단보다 일주일 뒤 사실 문제와 추론 문제 모두에서 높은 점수를 받았다. 최종 평가가 개념도 그리기였을 때도 인출 연습 집단이 앞섰다.

쉽게 노트를 예쁘게 정리하는 것보다 책을 덮고 떠올려 보는 것이 이해에도 더 좋다는 결과다.

교실 개념도 활동도 "책을 덮고 기억에서 그리기"로 바꾸면 인출 연습이 된다.

← Roediger 2006, Karpicke 2008 · → Dunlosky 2013

교실에서의 시험 효과 Roediger 2011

Henry L. Roediger III, Pooja K. Agarwal, Mark A. McDaniel & Kathleen B. McDermott. Test-enhanced learning in the classroom: Long-term improvements from quizzing · doi:10.1037/a0026252 · 인용 463회

의의 실험실의 시험 효과가 실제 중학교 교실에서도 나타난다는 것을 보여 준 현장 연구다. 인출 연습의 교실 적용을 이끈 대표 근거다.

핵심 미국 중학교 6학년 사회 수업에서 일부 내용은 수업 전후 저부담 퀴즈로 복습하고, 일부는 퀴즈 없이 또는 다시 읽기로만 복습했다. 퀴즈로 복습한 내용은 단원 시험과 학기말 시험에서 더 높은 점수를 받았다. 단순히 같은 내용을 다시 읽게 한 것으로는 이 효과가 나지 않았다.

쉽게 같은 시간을 써도 교과서를 다시 읽히는 것보다 짧은 퀴즈를 내는 편이 학기말까지 남는다.

교실 성적에 반영하지 않는 짧은 퀴즈를 수업 시작과 끝에 정례화한다.

← Roediger 2006 · → Brown 2014

효과적인 학습 기법으로 학생 학습 향상하기 Dunlosky 2013

John Dunlosky, Katherine A. Rawson, Elizabeth J. Marsh, Mitchell J. Nathan & Daniel T. Willingham. Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology · doi:10.1177/1529100612453266 · 인용 4,610회

의의 학생들이 실제로 쓰는 10가지 공부법의 효과를 증거 기반으로 등급 매긴 종합 보고서다. 교사와 학부모에게 가장 널리 읽힌 학습과학 문헌 중 하나다.

핵심 연습 시험과 분산 연습은 "높은 효용", 정교화 질문, 자기 설명, 교차 연습은 "중간 효용"으로 평가했다. 요약, 밑줄 긋기, 키워드 기억술, 심상화, 반복 읽기는 "낮은 효용"이었다. 학생들이 가장 많이 쓰는 방법이 가장 효과가 낮다는 점이 충격을 주었다.

쉽게 형광펜과 반복 읽기는 "공부한 느낌"을 주지만, 떠올려 보기와 나누어 공부하기가 실제 실력을 만든다.

교실 학기 초에 이 10가지 기법 등급표를 학생과 함께 보고 자기 공부법을 점검하게 한다.

← Bjork 1994, Roediger 2006, Cepeda 2006, Kornell 2008, Karpicke 2011, Chi 1989, Karpicke 2008, Rohrer 2007 · → Brown 2014, Fiorella 2016

학습자가 정말 가장 잘 알까? 교육의 도시 전설 Kirschner 2013

Paul A. Kirschner & Jeroen J. G. van Merriënboer. Do learners really know best? Urban legends in education · doi:10.1080/00461520.2013.804395 · 인용 898회

의의 "디지털 네이티브", "학습 양식", "학습자가 스스로 가장 잘 안다" 같은 교육계의 도시 전설을 연구 근거로 반박한 논문이다.

핵심 요즘 학생들이 디지털 기기와 함께 자라 멀티태스킹에 능하고 새로운 방식으로 배운다는 "디지털 네이티브" 주장은 근거가 약하다. 학습 양식에 맞춘 교육도 효과가 입증되지 않았다. 학습자에게 학습 순서와 내용 선택을 전적으로 맡기는 것도, 학습자가 무엇이 자신에게 효과적인지 잘 모르기 때문에 대개 비효율적이다.

쉽게 스마트폰을 잘 다루는 것과 스마트폰으로 잘 배우는 것은 다른 능력이다.

교실 "요즘 아이들은 원래 그렇게 배운다"는 말을 들으면 그 주장의 연구 근거부터 확인한다.

← Pashler 2008, Kirschner 2006 · → Howard-Jones 2014

펜은 키보드보다 강하다 Mueller 2014

Pam A. Mueller & Daniel M. Oppenheimer. The pen is mightier than the keyboard: Advantages of longhand over laptop note taking · doi:10.1177/0956797614524581 · 인용 1,622회

의의 손 필기가 노트북 필기보다 개념 이해에 유리하다는 주장으로 교실 기기 정책 논쟁에 큰 영향을 주었다. 동시에 재현성 논쟁의 대표 사례가 되었다.

핵심 노트북으로 필기한 학생들은 더 많은 단어를 강의 내용 그대로 받아 적었고, 개념 이해 문항에서 손으로 필기한 학생보다 낮은 점수를 받았다. 저자들은 손 필기는 느려서 내용을 요약하고 재구성하게 만들기 때문이라고 해석했다.

쉽게 속기사처럼 받아 적기만 하면 머리를 거치지 않고 손가락만 바쁘다.

교실 기기 종류보다 "자기 말로 요약하며 적기"를 가르치는 것이 핵심이다.

주의 Morehead, Dunlosky & Rawson(2019), Urry 외(2021)의 재현 연구에서는 손 필기의 이해 우위가 일관되게 나타나지 않았다.

← Craik 1972, Slamecka 1978

어떻게 공부할 것인가 Brown 2014

Peter C. Brown, Henry L. Roediger III & Mark A. McDaniel. Make It Stick: The Science of Successful Learning (단행본) · 인용 1,097회

의의 인출, 분산, 교차, 정교화 같은 학습과학 연구를 일반 독자와 교사를 위해 풀어 쓴 대표 대중서다. 학습과학 대중화의 기폭제가 되었다.

핵심 인지심리학자 두 명과 작가가 함께 쓴 책으로, 반복 읽기와 벼락치기가 "익숙함의 착각"을 만든다고 설명한다. 대신 스스로 시험 보기, 간격 두기, 섞어서 연습하기, 새 내용을 아는 것과 연결하기, 배운 것을 돌아보기를 권한다. 의대생, 비행 조종사, 군인 등 실제 사례로 연구를 풀었다.

쉽게 학습과학 연구실의 결과를 공부법 안내서로 번역한 책이다.

교실 교사 연수나 학부모 안내에서 학습 전략을 소개할 때 입문서로 쓰기 좋다.

← Roediger 2006, Bjork 1994, Dunlosky 2013, Roediger 2011, Pashler 2008, Kornell 2008

생성적 학습을 촉진하는 여덟 가지 방법 Fiorella 2016

Logan Fiorella & Richard E. Mayer. Eight ways to promote generative learning · doi:10.1007/s10648-015-9348-9 · 인용 1,075회

의의 학습자가 스스로 의미를 만들어 내게 하는 "생성적 학습" 전략 여덟 가지를 실증 근거와 함께 정리했다. 교실에서 바로 쓸 수 있는 전략 목록이다.

핵심 요약하기, 개념도 그리기, 그림 그리기, 머릿속으로 그려 보기, 스스로 시험 보기, 자기 설명하기, 남에게 가르치기, 몸으로 표현하기의 여덟 전략을 검토했다. 공통점은 새 정보를 선택하고 조직해 기존 지식과 통합하게 만든다는 것이다. 다만 각 전략은 학습자가 그 전략을 잘 수행할 수 있을 때, 그리고 내용의 성격에 맞을 때 효과가 컸다.

쉽게 읽은 내용을 그림으로 다시 그려 보면, 머릿속에 흩어진 조각들이 하나의 그림으로 맞춰진다.

교실 "한 문단 요약", "그림으로 설명하기", "짝에게 가르치기" 중 하나를 골라 수업 마무리 활동으로 쓴다. 처음에는 전략 사용법을 연습시킨다.

← Slamecka 1978, Chi 1989, Mayer 2001, Dunlosky 2013

5. 구성주의, 사회문화이론, 수업설계

피아제, 비고츠키, 브루너에서 비계, 상황학습, 피드백, 능동적 학습까지. 학습을 지식 구성과 참여로 보는 흐름과 그 실증 검토.

교육목표 분류학 Bloom 1956

Benjamin S. Bloom (Ed.), Max D. Engelhart, Edward J. Furst, Walker H. Hill & David R. Krathwohl. Taxonomy of Educational Objectives, Handbook I: Cognitive Domain (단행본) · 인용 12,539회

의의 교육목표를 사고 수준에 따라 위계적으로 분류한 틀로, 전 세계 교육과정과 평가 문항 설계의 공용어가 되었다.

핵심 인지적 영역의 목표를 지식, 이해, 적용, 분석, 종합, 평가의 여섯 수준으로 나누었다. 여러 대학의 시험 출제자들이 같은 교육목표를 재는 문항을 공유하고 문항 은행을 만들 수 있도록 공통의 분류 틀을 마련하려는 목적에서 출발했다. 2001년 Anderson과 Krathwohl의 개정판은 기억하기, 이해하기, 적용하기, 분석하기, 평가하기, 창안하기로 동사형 범주를 바꾸고 지식 차원을 따로 두었다.

쉽게 "광합성의 정의를 쓰라"와 "광합성 실험을 직접 설계하라"는 서로 다른 층의 사고를 요구한다.

교실 평가 문항을 만든 뒤 각 문항이 어느 수준의 사고를 요구하는지 표시해, 한쪽에 몰리지 않았는지 점검한다.

주의 수준들이 엄격한 위계를 이룬다는 가정은 실증적으로 약하다는 비판이 있다. 기억 수준의 지식이 고차원적 사고의 재료라는 점도 함께 기억할 필요가 있다.

→ Bloom 1984, Black 1998

유의미 언어 자료의 학습에서 선행조직자 사용 Ausubel 1960

David P. Ausubel. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material · doi:10.1037/h0046669 · 인용 1,876회

의의 "학습에 가장 중요한 단일 요인은 학습자가 이미 알고 있는 것"이라는 아우수벨 학습이론의 대표 실험이다.

핵심 대학생들이 낯선 금속공학 글을 읽기 전에 더 일반적이고 추상적인 개관 글(선행조직자)을 읽자, 역사적 배경 글을 읽은 집단보다 내용을 더 잘 기억했다. 새 지식을 붙일 수 있는 상위 개념의 "고리"를 먼저 제공하면 의미 있는 학습이 일어난다는 것이다.

쉽게 퍼즐을 맞추기 전에 상자 겉면의 완성 그림을 먼저 보는 것과 같다.

교실 단원 시작에 전체 구조를 보여 주는 개념 지도나 큰 질문을 먼저 제시한다.

← Bartlett 1932 · → Mayer 2003, Bransford 2000

발견의 행위 Bruner 1961

Jerome S. Bruner. The act of discovery · 인용 2,791회

의의 발견학습 운동의 선언문이다. 1960년대 교육과정 개혁과 이후 탐구 수업 전통에 큰 영향을 주었다.

핵심 브루너는 학생이 스스로 원리를 발견할 때 지적 능력이 늘고, 외적 보상보다 내적 동기가 생기며, 발견의 방법(휴리스틱)을 배우고, 기억이 잘 조직된다고 주장했다. 학습자를 지식의 수용자가 아니라 탐구자로 보는 관점이다.

쉽게 정답지를 받는 대신 직접 실험해서 법칙을 찾아낸 과학자의 기쁨을 학생에게 주자는 제안이다.

교실 개념을 바로 알려 주기 전에 학생이 패턴을 찾아볼 수 있는 사례들을 먼저 제시한다.

주의 이후 Mayer(2004), Kirschner 등(2006)이 "순수 발견학습"의 한계를 실증적으로 비판했다.

← Dewey 1938 · → Wood 1976, Papert 1980, Mayer 2004, Kirschner 2006

공격적 모델의 모방을 통한 공격성의 전이 (보보 인형 실험) Bandura 1961

Albert Bandura, Dorothea Ross & Sheila A. Ross. Transmission of aggression through imitation of aggressive models · doi:10.1037/h0045925 · 인용 2,835회

의의 직접 보상을 받지 않아도 남을 보는 것만으로 행동을 배운다는 관찰 학습을 보여 준 "보보 인형 실험"이다. 사회학습이론과 이후 사회인지이론의 출발점이다.

핵심 생후 37~69개월(약 3~5세) 유아 72명(남녀 각 36명)이 어른이 커다란 오뚝이 인형(보보)을 때리고 던지는 장면, 조용히 노는 장면, 또는 아무 장면도 보지 않은 뒤 놀이방에 들어갔다. 공격적 모델을 본 아이들은 그 행동을 그대로, 때로는 새로운 공격 행동까지 만들어 냈다. 강화 없이도 관찰만으로 학습이 일어난다는 증거였다.

쉽게 아이는 "하지 마"라는 말보다 어른이 하는 행동을 보고 배운다.

교실 풀이 시범, 토론 태도, 실수에 대처하는 모습까지 교사의 행동이 곧 교육 내용이라는 점을 의식한다.

주의 실험 상황(인형은 때리라고 만든 장난감)의 생태학적 타당도에 대한 비판이 있다.

→ Bandura 1977, Rizzolatti 2004

발달과 학습 Piaget 1964

Jean Piaget. Development and learning · doi:10.1002/tea.3660020306 · 인용 3,054회

의의 피아제가 미국 교육자들에게 자신의 발달 이론과 학습관을 직접 설명한 강연문이다. 구성주의 교육관의 핵심 텍스트다.

핵심 피아제는 지식을 대상에 작용하고 변형하는 "조작"으로 보았다. 발달은 성숙, 물리적 경험, 사회적 전달, 그리고 이들을 조율하는 평형화의 네 요인으로 설명된다. 학습은 발달에 종속되며, 아이는 외부에서 주입된 구조가 아니라 스스로 구성한 구조로 이해한다고 주장했다.

쉽게 같은 양의 물을 길쭉한 컵에 옮기면 "더 많아졌다"고 하던 아이가 스스로 따져 보며 생각을 고쳐 가는 과정이다.

교실 학생의 틀린 답을 바로 고치기보다 그렇게 생각한 이유를 묻고 모순을 경험하게 한다.

→ Papert 1980, Bransford 2000, Mayer 2004, Posner 1982, Kolb 1984, Siegler 1996

문제해결에서 튜터링의 역할 Wood 1976

David Wood, Jerome S. Bruner & Gail Ross. The role of tutoring in problem solving · doi:10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x · 인용 14,199회

의의 "비계(scaffolding)"라는 용어를 처음 쓴 논문이다. 교육학에서 가장 많이 쓰이는 개념 중 하나가 여기서 나왔다.

핵심 3~5세 아이가 블록 피라미드를 쌓을 때 튜터가 어떻게 돕는지 분석했다. 효과적인 튜터는 흥미 끌기, 과제 단순화, 방향 유지, 핵심 특징 표시, 좌절 관리, 시범의 여섯 기능을 수행했다. 도움은 아이가 할 수 없는 부분만 맡고 할 수 있게 되면 줄어들었다.

쉽게 건물을 지을 때 세우는 비계(공사용 발판)처럼, 다 지으면 걷어 내는 임시 지지대다.

교실 처음엔 문장 틀, 예시, 체크리스트를 주고 학생이 익숙해지면 하나씩 걷어 낸다.

← Bruner 1961 · → Brown 1989, Rosenshine 2012, VanLehn 2011, Collins 1989, Kestin 2025, Hmelo-Silver 2007

사회 속의 마음 Vygotsky 1978

Lev S. Vygotsky. Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes (단행본) · 인용 53,580회

의의 1930년대 비고츠키의 글을 영어권에 소개한 편집본으로, 사회문화적 학습이론의 원천이다. 근접발달영역(ZPD) 개념이 여기서 널리 알려졌다.

핵심 고등 정신 기능은 먼저 사람들 사이(사회적 수준)에서 나타나고 나중에 개인 안(심리적 수준)으로 내면화된다. 언어와 도구 같은 문화적 매개물이 사고를 형성한다. 아이가 혼자 할 수 있는 수준과 도움을 받아 할 수 있는 수준 사이의 근접발달영역에서 가르침이 발달을 이끈다.

쉽게 혼자는 못 넘는 담장도 친구가 손을 받쳐 주면 넘을 수 있고, 몇 번 넘다 보면 혼자서도 넘는다.

교실 학생이 혼자서는 어렵지만 도움을 받으면 해낼 수 있는 수준으로 과제를 설정하고 모둠을 구성한다.

→ Brown 1989, Lave 1991, Hutchins 1995, Zimmerman 2002, Collins 1989, Scardamalia 1994, Crouch 2001, Johnson 2009, Bransford 2000

마인드스톰 Papert 1980

Seymour Papert. Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas (단행본) · 인용 12,464회

의의 아이가 컴퓨터를 프로그래밍하며 배운다는 비전을 제시한 고전이다. 코딩 교육, 메이커 교육, 스크래치의 사상적 뿌리다.

핵심 페퍼트는 피아제의 구성주의를 이어받아, 아이가 컴퓨터를 프로그래밍하며 스스로 지식을 구성하는 학습을 제안했다. "공유 가능한 것을 만들며 배운다"는 constructionism이라는 용어와 정의는 이후(Papert & Harel, 1991) 정식화되었다. LOGO 언어로 화면 속 거북이를 움직이며 아이들은 자기 몸의 움직임을 기하로 옮긴다("몸과 동조된" 학습). 오류는 고칠 수 있는 "버그"가 된다.

쉽게 "앞으로 100, 오른쪽으로 90"을 직접 걸어 보고 거북이에게 시키면 정사각형의 원리가 몸으로 이해된다.

교실 개념을 설명만 하지 말고 학생이 그 개념으로 무언가를 만들어 보게 한다.

← Bruner 1961, Piaget 1964, Dewey 1938 · → Brown 1989, Scardamalia 1994, Mayer 2004

과학 개념의 조절, 개념 변화 이론 Posner 1982

George J. Posner, Kenneth A. Strike, Peter W. Hewson & William A. Gertzog. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change · doi:10.1002/sce.3730660207 · 인용 7,062회

의의 과학 교육에서 오개념이 어떻게 바뀌는지 설명하는 개념 변화 모형의 고전이다. 수십 년간 과학 수업 설계의 기준이 되었다.

핵심 학생이 기존 개념을 버리고 새 개념을 받아들이려면 네 조건이 필요하다. 기존 개념에 대한 불만족, 새 개념의 이해 가능성, 그럴듯함, 그리고 새 문제를 푸는 데 쓸모 있다는 생산성이다. 과학사에서 패러다임이 바뀌는 과정과 학생의 개념 변화를 나란히 보았다.

쉽게 "무거운 물체가 더 빨리 떨어진다"는 생각은 반례를 보고, 새 설명이 이해되고, 그 설명으로 다른 현상까지 풀릴 때 비로소 바뀐다.

교실 오개념을 바로 고쳐 주기보다 예측-관찰-설명 활동으로 기존 생각의 한계를 먼저 경험하게 한다.

← Piaget 1964 · → Vosniadou 1992, Bransford 2000

2 시그마 문제 Bloom 1984

Benjamin S. Bloom. The 2 sigma problem: The search for methods of group instruction as effective as one-to-one tutoring · doi:10.3102/0013189X013006004 · 인용 3,712회

의의 1:1 튜터링이 일반 수업보다 2 표준편차 높은 성취를 낸다는 주장으로 교육공학의 "성배"를 정의했다. 지능형 튜터와 AI 튜터 연구가 지금도 이 기준을 인용한다.

핵심 블룸의 학생들의 연구에서, 튜터링을 받은 학생의 평균은 일반 학급 학생의 98번째 백분위수에 해당했다(2σ). 완전학습은 약 1σ의 효과를 냈다. 블룸은 교실 한 반 규모에서 튜터링만큼 효과적인 방법을 찾는 것이 교육 연구의 과제라고 제시했다.

쉽게 반 평균 학생도 개인 과외를 받으면 상위 2%까지 올라갈 수 있다는 주장이다.

교실 형성평가와 교정 학습(완전학습)을 결합하면 교실에서도 튜터링 효과의 상당 부분을 얻을 수 있다.

주의 이후 재분석(VanLehn 2011 등)에서는 인간 튜터링 효과가 약 0.8σ로 추정되어 2σ는 과대평가라는 지적이 있다.

← Bloom 1956 · → Anderson 1995, VanLehn 2011, Kestin 2025, Hattie 2009, Wang 2024

경험학습 Kolb 1984

David A. Kolb. Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development (단행본) · 인용 53,472회

의의 듀이, 레빈, 피아제를 잇는 경험학습 순환 모형을 제시해 연수, 직업교육, 성인교육에서 널리 쓰인다.

핵심 학습은 구체적 경험, 성찰적 관찰, 추상적 개념화, 능동적 실험의 네 단계를 도는 순환이다. 경험만으로는 학습이 되지 않고, 경험을 돌아보고 개념으로 정리한 뒤 새 상황에서 시험해 볼 때 배움이 완성된다고 보았다.

쉽게 요리를 해 보고(경험), 왜 짰는지 돌아보고(성찰), "간은 마지막에"라는 원리를 세우고(개념화), 다음 요리에 적용하는(실험) 순환이다.

교실 체험 활동 뒤에 반드시 성찰 질문과 원리 정리, 새 상황 적용 단계를 붙인다.

주의 콜브의 학습 양식 검사(LSI)는 학습 양식 맞춤 교육의 근거로 쓰였지만, 그 맞춤 효과는 실증적으로 지지되지 않는다(Pashler 외, 2008).

← Dewey 1938, Piaget 1964 · → Pashler 2008

상황인지와 학습의 문화 Brown 1989

John Seely Brown, Allan Collins & Paul Duguid. Situated cognition and the culture of learning · doi:10.3102/0013189X018001032 · 인용 18,142회

의의 지식이 활동과 맥락에서 분리될 수 없다는 상황인지론을 교육계에 불러온 논문이다. 인지적 도제 모형의 기반이다.

핵심 학교는 지식을 맥락에서 떼어내 추상적으로 가르치지만, 실제 지식은 그것이 쓰이는 활동과 문화 안에서 의미를 갖는다. 사전 정의만 외운 아이들이 단어를 엉뚱하게 쓰는 사례를 들었다. 학습은 실천 공동체의 활동에 참여하며 도구를 쓰는 방식을 익히는 인지적 도제 과정이어야 한다고 주장했다.

쉽게 요리책만 읽은 사람보다 주방에서 셰프 옆에서 일한 사람이 진짜 요리를 배운다.

교실 개념을 실제 그 분야 사람들이 쓰는 방식(과학자의 실험 노트, 기자의 취재)으로 사용해 보게 한다.

← Wood 1976, Vygotsky 1978, Papert 1980, Collins 1989 · → Lave 1991, Hutchins 1995, Kirschner 2006

자기 설명, 학생이 예제를 공부하고 활용하는 방식 Chi 1989

Michelene T. H. Chi, Miriam Bassok, Matthew W. Lewis, Peter Reimann & Robert Glaser. Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems · doi:10.1207/s15516709cog1302_1 · 인용 3,381회

의의 같은 예제로 공부해도 "스스로 설명하는" 학생이 훨씬 많이 배운다는 자기 설명 효과를 발견했다.

핵심 물리 풀이 예제를 공부하는 대학생들의 사고구술을 분석하자, 성적이 좋은 학생은 각 단계가 왜 그런지 스스로 설명하고 자기 이해의 빈틈을 더 자주 알아차렸다. 성적이 낮은 학생은 예제를 그냥 읽거나 반복했다.

쉽게 레시피를 읽으며 "왜 여기서 소금을 먼저 넣지?"라고 스스로 묻는 사람이 요리 원리를 배운다.

교실 풀이 예제를 줄 때 "이 단계는 왜 필요한가?"를 학생이 직접 적게 한다.

← Chi 1981, Sweller 1985 · → Chi 2014, Dunlosky 2013, VanLehn 2011, Fiorella 2016

인지적 도제 Collins 1989

Allan Collins, John Seely Brown & Susan E. Newman. Cognitive apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics · 인용 1,393회

의의 전통 도제식 교육의 원리를 보이지 않는 "생각의 기술"에 적용한 교수 모형이다. 사고 과정을 드러내 가르치는 수업 설계의 고전이다.

핵심 목공 도제는 스승의 손놀림을 볼 수 있지만, 읽기와 수학의 전문가 사고는 눈에 보이지 않는다. 저자들은 사고를 밖으로 드러내는 여섯 방법을 제시했다. 시범(모델링), 코칭, 비계 설정과 제거, 학생이 자기 생각을 말로 표현하는 명료화, 전문가와 자기 과정을 비교하는 성찰, 스스로 문제를 찾는 탐색이다.

쉽게 선생님이 문제를 풀며 "나는 지금 이걸 먼저 확인하는 중이야"라고 생각을 소리 내어 보여 주는 수업이다.

교실 풀이 시범을 보일 때 판단의 이유와 막혔을 때의 대처까지 소리 내어 말한다.

← Wood 1976, Vygotsky 1978 · → Brown 1989, Lave 1991

상황학습, 합법적 주변 참여 Lave 1991

Jean Lave & Etienne Wenger. Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation (단행본) · doi:10.1017/cbo9780511815355 · 인용 57,073회

의의 "실천 공동체(community of practice)" 개념을 탄생시킨 책이다. 학습을 개인 머릿속 변화가 아니라 공동체 참여의 변화로 재정의했다.

핵심 산파, 재단사, 해군 조타수, 정육점 견습생 같은 도제 사례를 분석했다. 신참은 처음에 주변적이지만 정당한 작업에 참여하고, 점차 중심적 역할로 이동하며 기술과 정체성을 함께 얻는다. 학습은 공동체 안에서 "누가 되어 가는" 과정이다.

쉽게 동아리 신입이 처음엔 짐 나르기를 하다가 어느새 행사를 기획하는 선배가 되는 과정이다.

교실 학급 프로젝트에서 모든 학생이 실제로 의미 있는 역할을 맡도록 역할을 나누고 점차 책임을 넓힌다.

← Vygotsky 1978, Brown 1989, Collins 1989

지구에 대한 정신 모형 Vosniadou 1992

Stella Vosniadou & William F. Brewer. Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood · doi:10.1016/0010-0285(92)90018-W · 인용 2,057회

의의 아이들이 새 정보를 기존 생각과 섞어 독특한 "종합 모형"을 만든다는 것을 보여 주었다. 오개념이 단순한 오류가 아니라 나름의 논리를 가진 구조라는 관점을 확산시켰다.

핵심 초등학생들에게 지구의 모양과 사람들이 어디에 사는지 물었다. "지구는 둥글다"는 말을 들은 아이 중 일부는 둥근 지구 안 평평한 땅에 산다고 그리거나(속이 빈 구), 하늘에 떠 있는 둥근 지구와 우리가 사는 평평한 땅이 따로 있다고 그렸다(이중 지구). 어른이 알려 준 사실과 "땅은 평평하다"는 경험이 결합된 결과였다.

쉽게 "지구는 공 모양"이라는 말과 "땅은 평평해 보인다"는 경험을 둘 다 살리려다 생긴 아이 나름의 해결책이다.

교실 학생에게 생각을 그림으로 그리게 하면 말로는 드러나지 않는 종합 모형을 발견할 수 있다.

← Rumelhart 1980, Posner 1982 · → Bransford 2000

지식 구축 공동체를 위한 컴퓨터 지원 Scardamalia 1994

Marlene Scardamalia & Carl Bereiter. Computer support for knowledge-building communities · doi:10.1207/s15327809jls0303_3 · 인용 2,583회

의의 학급을 연구자 공동체처럼 아이디어를 함께 발전시키는 곳으로 바꾸자는 지식 구축 이론과 그 플랫폼(CSILE, 이후 Knowledge Forum)을 소개했다. 컴퓨터 지원 협력 학습(CSCL)의 선구적 연구다.

핵심 학교는 대개 개인이 이미 있는 지식을 습득하는 곳이지만, 저자들은 공동체가 함께 아이디어를 개선하고 새 지식을 만드는 "지식 구축"을 목표로 삼아야 한다고 주장했다. 학생들은 공유 데이터베이스에 질문, 가설, 근거를 올리고 서로의 노트에 덧붙이며 이론을 다듬었다.

쉽게 반 전체가 함께 쓰는 위키에서 "내 생각은 이렇다", "그 근거는 부족하다"를 주고받으며 이론을 키워 가는 방식이다.

교실 공유 문서나 게시판에 "나의 이론", "새로 알게 된 것", "더 알아야 할 것" 같은 사고 틀을 주고 아이디어를 함께 고치게 한다.

← Vygotsky 1978, Papert 1980 · → Chi 2014

피드백 개입이 수행에 미치는 효과 Kluger 1996

Avraham N. Kluger & Angelo DeNisi. The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory · doi:10.1037/0033-2909.119.2.254 · 인용 7,715회

의의 피드백이 평균적으로는 수행을 높이지만, 셋 중 하나 이상은 오히려 수행을 떨어뜨린다는 것을 보여 준 메타분석이다. "피드백은 무조건 좋다"는 믿음을 깨뜨렸다.

핵심 607개 효과크기를 분석한 결과 피드백의 평균 효과는 d=0.41이었지만, 38%의 경우 피드백이 수행을 낮췄다. 피드백이 과제 자체에서 "나 자신"(칭찬, 비교, 자존감)으로 주의를 옮길수록 효과가 떨어졌고, 과제의 세부와 개선 방법에 주의를 묶어 둘수록 효과가 컸다.

쉽게 "너는 머리가 좋구나"는 과제에서 눈을 떼게 하고, "세 번째 단계에서 부호를 놓쳤어"는 과제로 눈을 돌리게 한다.

교실 피드백은 사람이 아니라 과제와 과정을 향하게 하고, 다른 학생과의 비교는 피하며, 다음에 할 행동을 구체적으로 준다.

→ Black 1998, Hattie 2007

떠오르는 마음, 아동 사고의 변화 과정 Siegler 1996

Robert S. Siegler. Emerging Minds: The Process of Change in Children's Thinking (단행본) · 인용 1,355회

의의 아이의 사고가 계단처럼 단계별로 바뀐다는 피아제식 관점 대신, 여러 전략이 파도처럼 겹치며 서서히 바뀐다는 "중첩 파도 이론"을 제시했다.

핵심 같은 아이도 같은 유형의 문제를 풀 때 여러 전략(손가락 세기, 기억에서 꺼내기, 큰 수부터 세기 등)을 섞어 쓰며, 시간이 지나며 효율적인 전략의 비중이 늘어난다. 이 전략의 다양성 자체가 학습이 일어나고 있다는 신호이며, 변이가 큰 시기에 배움이 빠르다.

쉽게 아이가 어제는 손가락으로, 오늘은 머리로 더하는 것은 퇴보가 아니라 전략들이 경쟁하는 과정이다.

교실 학생이 쓰는 여러 풀이 전략을 공유하고 비교하게 하면 효율적인 전략으로의 이동이 빨라진다.

← Piaget 1964 · → Ramani 2008

설명할 때 Schwartz 1998

Daniel L. Schwartz & John D. Bransford. A time for telling · doi:10.1207/s1532690xci1604_4 · 인용 1,276회

의의 "설명은 언제 해야 효과적인가"에 답한 연구다. 대조 사례 분석으로 준비시킨 뒤 설명하는 방식이 생산적 실패, 탐색 후 교수 연구의 원형이 되었다.

핵심 대학생들이 기억 실험의 대조 사례 자료를 분석한 뒤 강의를 들은 집단은, 교재를 요약한 뒤 강의를 들은 집단이나 사례 분석만 두 번 한 집단보다 새 실험 결과를 더 잘 예측했다. 사례 비교가 학생에게 "무엇을 들어야 할지" 알려 주는 준비를 시킨 것이다.

쉽게 와인 맛을 여러 잔 비교해 본 사람이 소믈리에의 설명을 들으면 그 차이를 바로 알아듣는다.

교실 개념 설명 전에 미묘하게 다른 사례 두세 개를 비교하게 하고, 그다음에 설명한다.

← Gick 1980 · → Kapur 2008, Bransford 2000

평가와 교실 학습 (형성평가) Black 1998

Paul Black & Dylan Wiliam. Assessment and classroom learning · doi:10.1080/0969595980050102 · 인용 13,144회

의의 형성평가가 학업 성취를 크게 높인다는 것을 대규모 문헌 검토로 보여, 전 세계 "학습을 위한 평가" 운동을 일으켰다.

핵심 약 250편의 연구를 검토한 결과, 교사가 수업 중 학생의 이해 상태를 확인하고 그 정보로 가르침을 조정하는 형성평가는 상당한 성취 향상(효과크기 약 0.4~0.7)을 낳았고, 특히 저성취 학생에게 효과가 컸다. 점수와 등급만 주는 평가는 오히려 학습 동기를 해칠 수 있었다. 교사용 요약본 「블랙박스 안에서(Inside the Black Box)」가 널리 읽혔다.

쉽게 시험이 끝난 뒤의 성적표가 아니라, 요리하는 중간에 맛을 보고 간을 맞추는 것이 형성평가다.

교실 수업 중 미니 화이트보드, 출구 카드, 신호등 카드로 이해를 확인하고 그 결과로 다음 설명을 바꾼다.

← Bloom 1956, Kluger 1996 · → Hattie 2007, Hattie 2009, Rosenshine 2012

사람은 어떻게 학습하는가 Bransford 2000

John D. Bransford, Ann L. Brown & Rodney R. Cocking (Eds.). How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School (Expanded Edition) (단행본) · doi:10.17226/9853 · 인용 1,781회

의의 미국 국립연구회의(NRC)가 학습과학 연구를 집대성한 보고서로, "학습과학" 분야의 정체성을 세웠다. 무료 PDF로 공개되어 있다.

핵심 세 가지 핵심 발견을 제시한다. 학생은 선개념을 가지고 오며 이를 다루지 않으면 새 지식이 제대로 자리 잡지 못한다. 역량을 키우려면 사실 지식의 깊은 기초와 개념 틀 속의 조직, 인출 가능한 형태가 모두 필요하다. 메타인지적 접근이 학생 스스로 학습을 통제하게 돕는다. 학습 환경은 학습자, 지식, 평가, 공동체 중심이어야 한다고 정리했다.

쉽게 학습과학의 "지도책" 같은 책이다. 이 아틀라스의 여러 대륙이 이 책 한 권에 요약되어 있다.

교실 수업 설계 때 "학생의 선개념 확인 → 개념 틀 속 지식 조직 → 메타인지 성찰"을 점검표로 쓴다.

← Ausubel 1960, Piaget 1964, Flavell 1979, Posner 1982, Vosniadou 1992, Schwartz 1998, Chi 1981, Chase 1973, Vygotsky 1978 · → Koedinger 2012, Chi 2014

미국 국가읽기위원회 보고서 Panel 2000

National Reading Panel (NICHD). Teaching Children to Read: An Evidence-Based Assessment of the Scientific Research Literature on Reading and Its Implications for Reading Instruction (단행본) · 인용 4,315회

의의 읽기 교육 연구를 체계적으로 검토해 효과적인 읽기 교육의 다섯 기둥을 제시한 보고서로, "읽기의 과학" 논의의 기준점이다.

핵심 음소 인식, 파닉스(체계적인 소리-글자 대응 교육), 유창성, 어휘, 이해 전략 등의 영역에서 효과적인 교수법을 검토했다. 메타분석은 음소 인식, 파닉스, 유창성(일부)에 적용되었고, 어휘와 이해 영역은 질적으로 검토했다. 특히 체계적이고 명시적인 파닉스 교육이 유치원과 1학년에서 읽기 발달에 뚜렷한 효과가 있다는 결론이 이후 미국과 영국의 읽기 정책에 큰 영향을 주었다.

쉽게 아이가 글자를 소리로 바꾸는 열쇠를 체계적으로 받으면, 그다음부터는 혼자서도 문을 열 수 있다.

교실 저학년 읽기 지도에서 소리와 글자의 대응을 체계적으로 가르치고, 유창성과 어휘, 이해를 함께 다룬다.

주의 영어 연구 중심이며, 한글처럼 소리-글자 대응이 규칙적인 문자에서는 해독 습득이 빨라 강조점이 다를 수 있다.

← Gough 1986 · → Castles 2018

동료 교수법 10년의 경험과 결과 Crouch 2001

Catherine H. Crouch & Eric Mazur. Peer Instruction: Ten years of experience and results · doi:10.1119/1.1374249 · 인용 3,381회

의의 대형 강의에서도 학생끼리 설명하게 하면 개념 이해가 크게 좋아진다는 것을 10년 데이터로 보여 준 동료 교수법(Peer Instruction)의 대표 논문이다.

핵심 하버드 물리학 강의에서 교사는 짧게 설명한 뒤 개념 질문을 던지고, 학생은 혼자 답을 고른 다음 옆 사람과 서로 설득하고 다시 답한다. 토론 뒤 정답률이 크게 올랐고, 물리 개념 검사(FCI)의 향상 폭도 전통 강의보다 뚜렷하게 컸다. 방법은 다른 대학과 교과로 널리 퍼졌다.

쉽게 방금 이해한 친구가 설명해 주면, 오래전에 이해한 교수보다 더 잘 통할 때가 있다.

교실 오개념을 겨냥한 선택형 질문을 던지고 "혼자 답하기 → 짝과 설득하기 → 다시 답하기" 순서로 진행한다.

← Vygotsky 1978 · → Freeman 2014

순수 발견학습에 삼진아웃을 적용해야 하는가? Mayer 2004

Richard E. Mayer. Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? · doi:10.1037/0003-066X.59.1.14 · 인용 3,459회

의의 "구성주의 학습 이론"과 "구성주의 교수법"을 구분해야 한다는 핵심 주장을 담았다. 탐구 수업 논쟁의 균형점 역할을 한다.

핵심 메이어는 문제해결 규칙, 보존 개념, 프로그래밍 학습이라는 세 분야의 연구를 검토해, 순수 발견학습이 안내된 발견학습보다 일관되게 효과가 낮았다고 정리했다. 학습자가 인지적으로 능동적인 것이 중요하지, 행동적으로 활발한 것이 중요한 것은 아니라고 주장했다.

쉽게 손을 바쁘게 움직이는 것과 머리를 바쁘게 움직이는 것은 다르다.

교실 활동 중심 수업에서 "학생들이 무엇을 생각하게 되는가"를 기준으로 활동을 점검한다.

← Bruner 1961, Piaget 1964, Papert 1980 · → Kirschner 2006

피드백의 힘 Hattie 2007

John Hattie & Helen Timperley. The power of feedback · doi:10.3102/003465430298487 · 인용 22,258회

의의 교육학에서 가장 많이 인용된 피드백 연구다. 피드백의 효과가 크지만 종류에 따라 크게 달라진다는 것을 정리했다.

핵심 효과적인 피드백은 세 질문에 답해야 한다. 나는 어디로 가고 있는가(목표), 나는 어떻게 하고 있는가(현재 위치), 다음은 무엇인가(다음 단계). 피드백은 과제, 처리 과정, 자기조절, 자기(칭찬)의 네 수준에서 작동하는데, "착하다", "똑똑하다" 같은 자기 수준 피드백은 학습 효과가 가장 낮았다.

쉽게 내비게이션처럼 목적지, 현재 위치, 다음 회전 방향을 알려 주는 피드백이 좋은 피드백이다.

교실 "잘했어" 대신 "근거 문장을 두 개 찾은 점이 좋아. 다음엔 반대 근거도 하나 찾아보자"처럼 말한다.

← Zimmerman 2002, Kluger 1996, Black 1998 · → Rosenshine 2012, Hattie 2009

문제기반·탐구 학습의 비계와 성취 Hmelo-Silver 2007

Cindy E. Hmelo-Silver, Ravit Golan Duncan & Clark A. Chinn. Scaffolding and achievement in problem-based and inquiry learning: A response to Kirschner, Sweller, and Clark (2006) · doi:10.1080/00461520701263368 · 인용 3,987회

의의 Kirschner 등(2006)의 "최소 안내" 비판에 대한 대표 반론이다. 안내 대 탐구 논쟁이 "얼마나, 어떻게 안내하는가"로 옮겨 가는 계기가 되었다.

핵심 저자들은 문제기반학습과 탐구학습이 실제로는 최소 안내가 아니라 질문 촉진, 과정 구조화, 필요할 때의 직접 설명 같은 상당한 비계를 포함한다고 반박했다. 의학교육과 과학교육 연구를 근거로, 잘 설계된 탐구 수업은 지식 습득에서 뒤지지 않고 추론과 자기주도 학습 능력에서 이점이 있다고 정리했다.

쉽게 "아무것도 안 가르치는 탐구"와 "길잡이가 있는 탐구"는 다르다는 반론이다.

교실 탐구 수업에도 탐구 질문 틀, 단계별 체크포인트, 필요한 순간의 짧은 직접 설명을 넣는다.

← Kirschner 2006, Wood 1976 · → Kapur 2008

성공적인 학습의 비밀(Visible Learning) Hattie 2009

John Hattie. Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement (단행본) · 인용 8,517회

의의 800편이 넘는 메타분석을 종합해 교육 요인 138개의 효과크기를 서열화했다. 전 세계 교육 정책과 교사 연수에 가장 큰 영향을 준 책 중 하나다.

핵심 해티는 거의 모든 교육 개입이 어느 정도 효과가 있으므로, 평균 효과크기 0.40을 넘는 것에 주목해야 한다는 "경첩점"을 제안했다. 피드백, 교사의 명료성, 형성평가, 메타인지 전략 등이 상위에 올랐고, 학급 규모 축소, 능력별 편성 등은 상대적으로 낮았다. 핵심 메시지는 교사가 자기 수업의 효과를 학생의 눈으로 "보이게" 확인하라는 것이다.

쉽게 수많은 교육 연구 성적표를 한 장의 순위표로 정리한 책이다.

교실 새 교수법을 도입할 때 "효과가 있다"가 아니라 "다른 선택지보다 얼마나 더 효과적인가"를 묻는다.

주의 성격이 다른 메타분석의 효과크기를 평균 내 비교하는 방법에 대해 통계적 비판(Simpson, 2017 등)이 있다.

← Bloom 1984, Hattie 2007, Black 1998 · → Rosenshine 2012

사회적 상호의존 이론과 협동 학습 Johnson 2009

David W. Johnson & Roger T. Johnson. An educational psychology success story: Social interdependence theory and cooperative learning · doi:10.3102/0013189X09339057 · 인용 4,927회

의의 협동 학습의 이론과 수많은 실증 연구를 정리한 대표 개관이다. 협동 학습이 효과를 내는 조건을 구체적으로 제시했다.

핵심 구성원의 목표가 서로 얽혀 있는 사회적 상호의존 관계에서, 협동적 구조는 경쟁적, 개인적 구조보다 성취, 관계, 심리적 건강에서 대체로 더 나은 결과를 냈다. 효과적인 협동에는 긍정적 상호의존, 개별 책무성, 촉진적 상호작용, 사회적 기술, 모둠 성찰의 다섯 요소가 필요하다.

쉽게 모둠 과제에서 한 명이 다 하고 나머지는 이름만 올리는 것은 협동 학습이 아니다.

교실 모둠 활동에 역할 분담과 개인별 확인 장치(무작위 발표자 등)를 함께 넣어 무임승차를 막는다.

← Vygotsky 1978 · → Chi 2014

수업의 원리, 모든 교사가 알아야 할 연구 기반 전략 Rosenshine 2012

Barak Rosenshine. Principles of instruction: Research-based strategies that all teachers should know · 인용 909회

의의 인지과학, 우수 교사 관찰, 인지 지원 연구를 바탕으로 수업 원리 10가지를 정리했다. 영국과 호주에서 교사 연수의 필독서가 되었다.

핵심 매일 복습으로 시작하기, 새 내용은 작은 단계로 제시하기, 질문을 많이 하기, 모델 제공하기, 안내된 연습, 이해 확인하기, 높은 성공률 확보하기, 어려운 과제에 비계 제공하기, 독립 연습, 주간·월간 복습을 제시했다. 각 원리는 작업기억의 한계와 장기기억 형성 원리에 기대고 있다.

쉽게 학습과학 연구를 교사용 체크리스트 한 장으로 번역한 글이다.

교실 수업 계획서 옆에 10대 원리를 두고 오늘 수업이 몇 개를 담고 있는지 확인한다.

← Kirschner 2006, Wood 1976, Hattie 2007, Hattie 2009, Black 1998

ICAP 프레임워크 Chi 2014

Michelene T. H. Chi & Ruth Wylie. The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes · doi:10.1080/00461520.2014.965823 · 인용 4,149회

의의 "능동적 학습"이라는 모호한 말을 관찰 가능한 행동 수준으로 구분했다. 수업 활동 설계와 평가에 바로 쓸 수 있는 틀이다.

핵심 학습자의 참여를 수동적(Passive, 듣기만), 능동적(Active, 밑줄·따라 하기), 구성적(Constructive, 설명·질문 만들기), 상호작용적(Interactive, 서로의 생각을 이어 만들기)으로 나누었다. 많은 연구를 검토한 결과 I > C > A > P 순서로 학습이 깊어지는 경향이 있었다.

쉽게 강의 듣기 < 필기하기 < 내 말로 정리하기 < 친구와 토론하며 새 아이디어 만들기.

교실 활동지를 만들 때 "따라 쓰기" 문항을 "자기 말로 설명하기", "짝과 비교해 보완하기"로 바꾼다.

← Chi 1989, Bransford 2000, Scardamalia 1994, Johnson 2009 · → Bastani 2025

능동적 학습이 STEM 성취를 높인다 Freeman 2014

Scott Freeman et al.. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics · doi:10.1073/pnas.1319030111 · 인용 13,997회

의의 대학 STEM 수업에서 강의식 대비 능동적 학습의 효과를 보여 준 대규모 메타분석이다. "강의만 하는 수업은 비윤리적일 수 있다"는 논쟁을 불러왔다.

핵심 225편의 연구를 분석한 결과, 능동적 학습 수업의 시험 점수는 평균 약 0.47 표준편차 높았고, 전통적 강의 수업의 낙제율은 능동적 학습 수업보다 약 1.5배 높았다(33.8% 대 21.8%). 효과는 분야와 수업 규모를 가리지 않고 나타났고, 50명 이하 소규모 수업에서 가장 컸다.

쉽게 강의 중간중간 학생이 문제를 풀고 토론하게만 해도 낙제생이 3분의 1가량 줄어든다.

교실 50분 수업을 10~15분 단위로 끊고 사이사이 클리커 질문, 짝 토론, 짧은 문제를 넣는다.

← Crouch 2001 · → Kestin 2025

6. 메타인지, 동기, 자기조절

생각에 대한 생각, 해낼 수 있다는 믿음, 스스로 하고 싶은 마음. 학습자가 자기 학습을 조절하는 힘에 대한 연구.

자기효능감, 행동 변화의 통합 이론 Bandura 1977

Albert Bandura. Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change · doi:10.1037/0033-295X.84.2.191 · 인용 78,325회

의의 "나는 해낼 수 있다"는 믿음이 행동과 성취를 예측한다는 자기효능감 이론을 처음 제시했다. 사회과학 전체에서 손꼽히게 많이 인용된 논문이다.

핵심 반두라는 결과 기대(이 행동이 좋은 결과를 낳을까)와 효능 기대(내가 이 행동을 해낼 수 있을까)를 구분했다. 효능 기대는 직접 성공 경험, 다른 사람의 성공을 보는 대리 경험, 언어적 설득, 생리적·정서적 상태라는 네 원천에서 나온다. 이 중 직접 성공 경험이 가장 강력하다.

쉽게 "공부하면 성적이 오른다"는 알지만 "내가 그만큼 공부할 수 있을까"가 진짜 관건이다.

교실 어려운 단원 초반에 "작지만 확실한 성공"을 설계하고, 비슷한 또래의 성공 사례를 보여 준다.

← Bandura 1961 · → Zimmerman 2002, Blackwell 2007, Dweck 1988, Wigfield 2000, Steele 1995

메타인지와 인지적 점검 Flavell 1979

John H. Flavell. Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive-developmental inquiry · doi:10.1037/0003-066X.34.10.906 · 인용 17,361회

의의 "메타인지"라는 용어와 연구 분야를 정립한 논문이다. 자기조절학습, 학습 전략 교육의 이론적 출발점이다.

핵심 플라벨은 아이들이 자기 기억과 이해를 점검하는 능력이 나이와 함께 발달한다는 연구를 바탕으로 메타인지 모형을 제시했다. 메타인지적 지식(사람, 과제, 전략에 대한 지식), 메타인지적 경험(이해가 잘 안 된다는 느낌 등), 목표, 전략이 서로 작용한다. 어린 아이일수록 자신이 이해하지 못했다는 것을 알아차리지 못한다.

쉽게 "내가 지금 이걸 이해하고 있나?"를 스스로 묻는 생각에 대한 생각이다.

교실 읽기 활동 중간에 "지금까지 이해한 것 한 줄, 헷갈리는 것 한 줄"을 적게 한다.

→ Bjork 1994, Kruger 1999, Zimmerman 2002, Bransford 2000, Risko 2016, Nelson 1990

동기와 성격에 대한 사회인지적 접근 Dweck 1988

Carol S. Dweck & Ellen L. Leggett. A social-cognitive approach to motivation and personality · doi:10.1037/0033-295X.95.2.256 · 인용 12,213회

의의 실패 앞에서 어떤 학생은 무너지고 어떤 학생은 더 도전하는 이유를 목표와 지능관으로 설명했다. 성장 마인드셋 연구의 이론적 출발점이다.

핵심 실패 상황에서 학생들은 포기하고 자기 능력을 탓하는 무기력 반응이나, 전략을 바꾸며 도전을 즐기는 숙달 지향 반응을 보인다. 이 차이는 능력을 증명하려는 수행 목표와 능력을 키우려는 학습 목표의 차이에서 오고, 그 밑에는 지능이 고정되어 있다는 믿음과 키울 수 있다는 믿음이 있다.

쉽게 시험을 "내가 똑똑한지 판정받는 자리"로 보는 학생과 "모르는 걸 찾는 기회"로 보는 학생의 차이다.

교실 평가의 목적을 "현재 위치 확인과 다음 배움"으로 안내하고, 오답 분석을 수업의 정식 활동으로 만든다.

← Bandura 1977 · → Blackwell 2007

메타기억, 이론적 틀과 새로운 발견 Nelson 1990

Thomas O. Nelson & Louis Narens. Metamemory: A theoretical framework and new findings · doi:10.1016/S0079-7421(08)60053-5 · 인용 3,534회

의의 메타인지를 "점검"과 "통제"의 두 흐름으로 구조화한 이론 틀이다. 이후 메타인지 연구의 공통 언어가 되었다.

핵심 인지는 대상 수준(실제 기억하기)과 메타 수준(그 기억에 대한 모형)으로 나뉜다. 정보가 대상 수준에서 메타 수준으로 올라가는 것이 점검(학습 판단, 앎의 느낌 판단 등)이고, 메타 수준이 대상 수준을 조절하는 것이 통제(공부 시간 배분, 학습 중단 결정 등)다. 점검이 부정확하면 통제도 잘못된다.

쉽게 운전자(메타 수준)가 계기판(점검)을 보고 핸들과 페달을 조작(통제)하는 구조다.

교실 학생에게 "얼마나 알았나"를 점검하게 한 뒤, 그 판단으로 다음 공부 계획을 세우게 하는 두 단계를 연습시킨다.

← Flavell 1979 · → Bjork 2013, Zimmerman 2002, Bjork 1994

몰입 Csikszentmihalyi 1990

Mihaly Csikszentmihalyi. Flow: The Psychology of Optimal Experience (단행본) · 인용 12,635회

의의 사람이 시간 가는 줄 모르고 활동에 빠져드는 "몰입" 경험을 체계화했다. 게임 디자인, 교육, 일의 심리학에 두루 영향을 주었다.

핵심 경험 표집법으로 수많은 사람의 일상 경험을 조사한 결과, 과제의 도전 수준과 자신의 기술 수준이 모두 높고 균형을 이룰 때 몰입이 일어났다. 분명한 목표, 즉각적 피드백, 행동과 의식의 합일, 자의식의 소멸, 시간 감각의 변화가 특징이다. 너무 쉬우면 지루하고 너무 어려우면 불안해진다.

쉽게 게임이 레벨마다 조금씩 어려워지며 손을 놓지 못하게 만드는 원리다.

교실 과제 난이도를 학생 수준보다 약간 높게, 목표와 피드백은 분명하게 설계한다.

→ Ryan 2000

고정관념 위협과 지적 수행 Steele 1995

Claude M. Steele & Joshua Aronson. Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans · doi:10.1037/0022-3514.69.5.797 · 인용 10,549회

의의 부정적 고정관념이 떠오르는 상황 자체가 수행을 떨어뜨린다는 "고정관념 위협"을 처음 실험으로 보였다. 평가 상황의 공정성 논의에 큰 영향을 주었다.

핵심 어려운 언어 시험을 "지적 능력을 진단하는 시험"이라고 소개하자 흑인 대학생의 점수가 백인 대학생보다 낮았지만, "능력과 무관한 문제해결 과제"라고 소개하자 차이가 사라졌다(입학 시험 점수를 통제한 결과). 자기 집단에 대한 부정적 고정관념을 확인시킬지 모른다는 걱정이 수행을 방해한다는 해석이다.

쉽게 "여자는 수학을 못한다"는 말을 의식하는 순간, 그 걱정이 작업기억을 차지해 실제 실력이 덜 나온다.

교실 평가 전에 특정 집단의 능력에 대한 언급을 피하고, 시험을 "배움을 확인하는 기회"로 안내한다.

주의 이후 메타분석(Flore & Wicherts, 2015 등)은 출판 편향 가능성과 효과 과대 추정을 지적해, 효과의 크기와 일반성은 논쟁 중이다.

← Bandura 1977 · → Yeager 2019

무능하면서 그것을 모른다 Kruger 1999

Justin Kruger & David Dunning. Unskilled and unaware of it: How difficulties in recognizing one's own incompetence lead to inflated self-assessments · doi:10.1037/0022-3514.77.6.1121 · 인용 9,895회

의의 "더닝-크루거 효과"로 대중에게 가장 잘 알려진 심리학 연구 중 하나다. 낮은 수행자가 자기 능력을 과대평가하는 현상을 보고했다.

핵심 유머, 논리 추론, 문법 시험에서 하위 25% 참가자들은 자신이 상위 40% 정도라고 추정했다. 저자들은 과제를 잘하는 데 필요한 기술과 자기 수행을 평가하는 데 필요한 기술이 같기 때문에, 능력이 부족한 사람은 자기 실수를 알아보지 못한다고 해석했다. 훈련으로 능력이 오르자 자기평가도 정확해졌다.

쉽게 맞춤법을 모르는 사람은 자기 글의 맞춤법 오류도 찾지 못한다.

교실 자기평가 전에 채점 기준표와 우수 예시를 보여 주면 자기평가의 정확도가 높아진다.

주의 일부 패턴은 평균 회귀 같은 통계적 효과로도 설명된다는 비판이 있다.

← Flavell 1979, Tversky 1974

자기결정성 이론과 내적 동기 Ryan 2000

Richard M. Ryan & Edward L. Deci. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being · doi:10.1037/0003-066X.55.1.68 · 인용 68,718회

의의 자기결정성 이론(SDT)을 가장 널리 읽히는 형태로 정리한 논문이다. 동기 연구와 교육 현장에서 표준 틀로 쓰인다.

핵심 인간에게는 자율성, 유능감, 관계성이라는 세 가지 기본 심리 욕구가 있으며, 이 욕구가 충족될 때 내적 동기와 웰빙이 높아진다. 외적 동기도 외적 조절에서 내사, 동일시, 통합으로 이어지는 연속선 위에 있어, 환경이 지지적이면 외부 가치가 점점 자기 것이 된다.

쉽게 "선생님이 시켜서"에서 "중요하니까"를 거쳐 "내가 원해서"로 옮겨 가는 사다리다.

교실 과제 선택권(자율성), 도전 가능한 난이도(유능감), 서로 돕는 학급 분위기(관계성)를 함께 설계한다.

← Csikszentmihalyi 1990 · → Zimmerman 2002

성취 동기의 기대-가치 이론 Wigfield 2000

Allan Wigfield & Jacquelynne S. Eccles. Expectancy-value theory of achievement motivation · doi:10.1006/ceps.1999.1015 · 인용 9,851회

의의 학생의 선택과 노력을 "할 수 있을까"(성공 기대)와 "할 가치가 있을까"(과제 가치)로 설명하는 기대-가치 이론의 대표 정리다. 진로 선택과 과목 선택 연구의 표준 틀이다.

핵심 성취 행동은 성공 기대와 과제 가치에 의해 결정된다. 과제 가치는 자기 정체성에 중요한가(달성 가치), 재미있는가(내재 가치), 쓸모 있는가(효용 가치), 그리고 치러야 할 대가(비용)로 나뉜다. 아동기에서 청소년기로 갈수록 기대와 가치가 모두 낮아지는 경향이 있다.

쉽게 "할 수 있다"는 믿음과 "할 가치가 있다"는 믿음이 함께 높을 때 가장 열심히 움직인다.

교실 배움이 학생의 삶과 진로에 어떤 쓸모가 있는지 스스로 적어 보게 하는 효용 가치 개입을 활용한다.

← Bandura 1977

자기조절 학습자 되기 Zimmerman 2002

Barry J. Zimmerman. Becoming a self-regulated learner: An overview · doi:10.1207/s15430421tip4102_2 · 인용 13,809회

의의 자기조절학습(SRL)의 순환 모형을 교사용으로 압축한 대표 개관이다. SRL 연구에서 가장 많이 인용되는 입문 문헌이다.

핵심 자기조절은 지능이나 학업 기술이 아니라 학습자가 생각, 감정, 행동을 목표를 향해 스스로 조절하는 과정이다. 사전숙고(목표 설정, 계획, 자기효능감), 수행(자기 통제, 자기 관찰), 자기성찰(자기 평가, 원인 귀인, 적응)의 세 단계가 순환한다. 이 기술은 가르칠 수 있다.

쉽게 운동선수가 경기 전 작전을 세우고, 경기 중 몸 상태를 살피고, 경기 후 영상을 보며 고치는 과정과 같다.

교실 과제마다 "목표-점검-돌아보기" 세 칸짜리 학습 일지를 쓰게 한다.

← Vygotsky 1978, Bandura 1977, Flavell 1979, Ryan 2000, Nelson 1990 · → Hattie 2007, Fan 2025, Diamond 2013

지능에 대한 암묵적 이론과 성취 Blackwell 2007

Lisa S. Blackwell, Kali H. Trzesniewski & Carol S. Dweck. Implicit theories of intelligence predict achievement across an adolescent transition: A longitudinal study and an intervention · doi:10.1111/j.1467-8624.2007.00995.x · 인용 4,952회

의의 성장 마인드셋 연구의 대표 실증 논문이다. 지능을 변할 수 있다고 보는 학생의 성적이 시간이 갈수록 올라간다는 것을 보였다.

핵심 미국 중학생 373명을 2년간 추적하자, 지능이 노력으로 성장한다고 믿는 학생은 학습 목표, 노력에 대한 긍정적 신념을 보이며 수학 성적이 상승했고, 고정된 지능관 학생은 정체했다. 두 번째 연구에서 "뇌는 근육처럼 자란다"는 개입을 받은 학생들은 수학 성적 하락이 멈췄다.

쉽게 "나는 수학 머리가 없어"와 "아직 수학 근육이 덜 자랐어"의 차이가 시간이 갈수록 벌어진다.

교실 결과보다 전략과 노력의 과정을 구체적으로 칭찬하고, 실수를 학습의 일부로 다룬다.

주의 이후 대규모 메타분석(Sisk et al., 2018)은 평균 효과가 작다고 보고했고, 효과는 저성취 학생에게서 더 컸다.

← Bandura 1977, Dweck 1988 · → Yeager 2019

그릿, 장기 목표를 향한 끈기와 열정 Duckworth 2007

Angela L. Duckworth, Christopher Peterson, Michael D. Matthews & Dennis R. Kelly. Grit: Perseverance and passion for long-term goals · doi:10.1037/0022-3514.92.6.1087 · 인용 9,315회

의의 "그릿"이라는 개념과 척도를 제시해 교육계의 비인지 능력 열풍을 이끌었다.

핵심 장기 목표를 향한 열정과 끈기를 재는 그릿 척도를 만들고, 그릿이 높은 사람이 교육 수준이 높고, 미 육군사관학교 첫 여름 훈련을 끝까지 버틸 가능성이 크며, 철자 맞히기 대회에서 더 높은 라운드까지 진출한다는 것을 보였다. 그릿은 지능과 거의 상관이 없었다.

쉽게 단거리 달리기 실력보다 마라톤을 끝까지 달리는 힘이 장기적 성취를 예측한다는 주장이다.

교실 끈기를 성격으로 칭찬하기보다 장기 프로젝트에서 중간 목표와 회복 전략을 함께 설계한다.

주의 Credé 외(2017) 메타분석은 그릿이 성실성과 거의 겹치며 성취 예측력이 기대보다 작다고 보고했다.

← Ericsson 1993

자기조절 학습, 믿음, 기법, 착각 Bjork 2013

Robert A. Bjork, John Dunlosky & Nate Kornell. Self-regulated learning: Beliefs, techniques, and illusions · doi:10.1146/annurev-psych-113011-143823 · 인용 1,835회

의의 학생들이 자기 학습을 판단할 때 빠지는 착각을 정리한 Annual Review다. 왜 학생들이 비효율적인 공부법을 고집하는지 설명한다.

핵심 학생들은 내용이 술술 읽히는 "유창성"을 학습의 증거로 착각한다. 그래서 반복 읽기와 몰아서 공부하기를 선호하고, 인출 연습과 분산처럼 당장 어렵게 느껴지는 방법을 피한다. 많은 학생이 효과적인 학습 전략을 배운 적이 없으며, 전략과 함께 "어려움의 의미"를 가르쳐야 한다고 저자들은 주장한다.

쉽게 교과서가 술술 읽히면 다 아는 것 같지만, 책을 덮고 설명해 보면 막히는 경험이 그 착각이다.

교실 공부 직후 "얼마나 기억할 것 같은가" 예측과 실제 시험 결과를 비교하게 해 착각을 직접 체험시킨다.

← Bjork 1994, Nelson 1990 · → Bastani 2025

실행기능 Diamond 2013

Adele Diamond. Executive functions · doi:10.1146/annurev-psych-113011-143750 · 인용 18,697회

의의 실행기능의 구조와 발달, 그리고 교육적 개입을 정리한 Annual Review 대표 개관이다. 실행기능이 학업과 삶의 성공을 예측한다는 관점을 널리 알렸다.

핵심 실행기능은 억제 통제(충동과 방해를 누르기), 작업기억(정보를 붙잡고 조작하기), 인지적 유연성(관점과 규칙을 바꾸기)의 세 핵심 요소로 이루어지며, 이를 바탕으로 추론, 문제해결, 계획 같은 고차 기능이 생긴다. 실행기능은 스트레스, 수면 부족, 외로움, 운동 부족에 특히 취약하다. 반복 연습과 점점 높아지는 도전이 있는 활동이 실행기능 향상에 도움이 될 수 있다.

쉽게 머릿속 교통경찰이 충동을 멈춰 세우고(억제), 신호를 기억하고(작업기억), 상황이 바뀌면 신호 체계를 바꾸는(유연성) 일이다.

교실 규칙이 바뀌는 놀이, 계획-실행-점검 활동, 충분한 신체 활동과 수면 안내로 실행기능을 지원한다.

← Engle 2002, Zimmerman 2002

전국 실험으로 본 성장 마인드셋의 효과 Yeager 2019

David S. Yeager et al.. A national experiment reveals where a growth mindset improves achievement · doi:10.1038/s41586-019-1466-y · 인용 1,954회

의의 미국 전국 대표 표본으로 성장 마인드셋 개입의 효과를 검증한 Nature 논문이다. "효과가 있는가"를 넘어 "누구에게, 어떤 학교에서"를 보여 주었다.

핵심 미국 공립 고등학교 9학년 약 1만 2천 명이 25분짜리 온라인 개입을 두 번 받았다. 저성취 학생의 평균 학점이 약 0.1점 올랐고, 상급 수학 과목 수강도 늘었다. 효과는 또래 문화가 도전을 지지하는 학교에서 더 컸다. 짧고 값싼 개입이 의미 있는 효과를 낼 수 있지만 맥락이 중요하다는 결론이다.

쉽게 같은 씨앗이라도 토양(학교 문화)에 따라 싹트는 정도가 다르다.

교실 마인드셋 메시지는 한 번의 강연보다, 도전을 칭찬하고 실수를 허용하는 학급 문화와 함께 가야 효과가 있다.

주의 효과크기는 작은 편이며, 개입 효과는 저성취 학생과 지지적 학교 맥락에 집중되었다.

← Blackwell 2007, Steele 1995

7. 체화된, 상황적, 확장된 인지

인지는 머릿속 계산만이 아니라 몸, 행동, 도구, 환경에 걸쳐 일어난다는 관점. 어포던스, 은유, 시뮬레이션, 제스처, 인지적 오프로딩.

시지각에 대한 생태학적 접근 Gibson 1979

James J. Gibson. The Ecological Approach to Visual Perception (단행본) · doi:10.2307/429816 · 인용 22,989회

의의 "어포던스(affordance)" 개념을 탄생시킨 책이다. 체화된 인지, 인터페이스 디자인, 로봇공학에 두루 영향을 주었다.

핵심 깁슨은 지각이 망막 이미지를 머릿속에서 복잡하게 재구성하는 과정이 아니라, 움직이는 유기체가 환경의 정보를 직접 집어내는 과정이라고 보았다. 환경은 행위 가능성(어포던스)을 제공한다. 의자는 "앉을 수 있음"을, 손잡이는 "잡을 수 있음"을 직접 드러낸다.

쉽게 문 손잡이 모양만 보고도 밀지 당길지 아는 것이 어포던스다.

교실 교구와 학습 도구는 설명 없이도 "어떻게 써야 할지 보이게" 디자인한다.

→ Glenberg 1997, Wilson 2002, Varela 1991

삶으로서의 은유 Lakoff 1980

George Lakoff & Mark Johnson. Metaphors We Live By (단행본) · doi:10.2307/430414 · 인용 156회

의의 추상적 사고가 몸의 경험에서 나온 은유에 기반한다는 주장으로 인지언어학과 체화된 인지의 초석이 되었다.

핵심 우리는 "시간은 돈이다(시간을 아끼다, 낭비하다)", "논쟁은 전쟁이다(논리를 공격하다, 방어하다)", "많음은 위(물가가 오르다)" 같은 개념적 은유로 생각한다. 이런 은유는 말장식이 아니라 사고 구조 자체이며, 대부분 신체적 경험(위-아래, 안-밖, 앞-뒤)에서 나온다.

쉽게 "기분이 업됐다", "가라앉았다"라는 말은 몸의 위-아래 경험이 감정을 이해하는 틀이라는 증거다.

교실 추상 개념(분수, 전류, 민주주의)을 가르칠 때 학생이 몸으로 겪어 본 비유를 의도적으로 고르고 그 한계도 함께 다룬다.

→ Barsalou 1999, Glenberg 1997, Lakoff 2000

몸의 인지과학 Varela 1991

Francisco J. Varela, Evan Thompson & Eleanor Rosch. The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience (단행본) · doi:10.7551/mitpress/6730.001.0001 · 인용 10,151회

의의 "체화된 마음(embodied mind)"이라는 말을 대중화하고 행화주의(enactivism)를 시작한 책이다.

핵심 인지를 외부 세계의 표상을 계산하는 과정이 아니라, 몸을 가진 존재가 환경과 상호작용하며 세계를 "만들어 내는(enact)" 과정으로 보았다. 인지과학, 현상학, 불교 명상 전통을 연결해, 경험 자체를 과학의 대상으로 삼자고 제안했다.

쉽게 박쥐의 세계와 사람의 세계가 다른 것은 같은 세상을 다른 몸으로 살아가기 때문이다.

교실 학습을 정보 전달이 아니라 학생이 몸으로 세계와 관계 맺는 방식의 변화로 보는 관점을 제공한다.

← Gibson 1979 · → Clark 1998, Wilson 2002, Immordino-Yang 2007

야생의 인지 Hutchins 1995

Edwin Hutchins. Cognition in the Wild (단행본) · doi:10.7551/mitpress/1881.001.0001 · 인용 14,369회

의의 인지가 개인의 머릿속이 아니라 사람, 도구, 환경에 분산되어 일어난다는 분산 인지 이론의 대표작이다.

핵심 허친스는 미 해군 함정의 항해팀을 현장 연구했다. 배의 위치 계산은 어느 한 사람의 머릿속에서 일어나지 않고, 여러 승무원, 해도, 각도기, 통신 절차가 맞물린 체계 전체가 계산을 수행했다. 인지의 단위를 개인에서 사회기술적 시스템으로 넓혔다.

쉽게 주방에서 요리 한 접시는 셰프 혼자가 아니라 주방 동선, 칼, 오더 시스템이 함께 만든다.

교실 모둠 학습을 역할, 도구, 기록 방식까지 포함한 하나의 "생각하는 시스템"으로 설계한다.

← Vygotsky 1978, Brown 1989 · → Clark 1998, Wilson 2002

기억은 무엇을 위한 것인가 Glenberg 1997

Arthur M. Glenberg. What memory is for · doi:10.1017/S0140525X97000010 · 인용 1,984회

의의 기억이 정보를 저장하는 창고가 아니라 행동을 위한 것이라는 체화된 기억 이론을 제시했다. 이후 읽기 이해의 체화 연구로 이어졌다.

핵심 글렌버그는 기억이 세계와 상호작용하는 방식을 부호화하며, 개념의 의미는 그 대상으로 할 수 있는 행동(어포던스)의 패턴이라고 주장했다. 문장 이해는 기호를 조작하는 것이 아니라 묘사된 행동이 가능한지 몸의 수준에서 "맞물려 보는" 과정이다.

쉽게 "신문지를 펴서 바람을 막았다"가 말이 되는 이유는 신문지로 할 수 있는 일을 몸이 알고 있기 때문이다.

교실 읽은 내용을 몸으로 재현하거나 사물로 시뮬레이션해 보게 하면 이해가 깊어진다.

← Gibson 1979, Lakoff 1980 · → Glenberg 2004, Barsalou 2008, Wilson 2002

확장된 마음 Clark 1998

Andy Clark & David Chalmers. The extended mind · doi:10.1093/analys/58.1.7 · 인용 8,542회

의의 마음이 두개골과 피부 밖으로 확장될 수 있다는 도발적 주장으로 철학과 인지과학에 큰 논쟁을 일으켰다. 스마트폰과 AI 시대에 다시 주목받고 있다.

핵심 알츠하이머를 앓는 오토는 노트에 적힌 주소를 보고 미술관에 가고, 잉가는 기억에서 주소를 떠올린다. 저자들은 외부 자원이 머릿속 과정과 같은 역할을 하고 믿을 만하게 쓰인다면 그것도 인지의 일부로 봐야 한다는 동등성 원리를 제시했다.

쉽게 늘 쓰는 스마트폰 메모장은 어떤 의미에서 내 기억의 일부다.

교실 노트, 계산기, AI를 "생각의 일부"로 쓰는 방법과, 무엇은 머릿속에 남겨야 하는지를 함께 가르친다.

← Varela 1991, Hutchins 1995 · → Risko 2016, Clark 2013, Lee 2025

지각적 기호 체계 Barsalou 1999

Lawrence W. Barsalou. Perceptual symbol systems · doi:10.1017/S0140525X99002149 · 인용 7,990회

의의 개념이 감각운동 경험의 재활성화(시뮬레이션)로 표상된다는 이론으로, 체화된 인지의 대표적 인지과학 이론이 되었다.

핵심 전통 인지과학은 개념을 감각과 무관한 추상 기호로 보았다. 바살로우는 대상을 경험할 때 활성화된 감각운동 상태의 일부가 저장되고, 개념을 떠올리면 이를 부분적으로 재현(시뮬레이션)한다고 주장했다. 이런 지각적 기호로도 추상 개념과 조합적 사고를 설명할 수 있다고 보였다.

쉽게 "레몬"을 생각하면 침이 고이는 것은 머릿속 레몬이 맛과 향의 재현이기 때문이다.

교실 개념을 처음 배울 때 실제 감각 경험을 제공하면 이후 떠올릴 수 있는 "시뮬레이션 재료"가 풍부해진다.

← Bartlett 1932, Lakoff 1980 · → Barsalou 2008, Kiefer 2012, Wilson 2002

수학은 어디에서 오는가 Lakoff 2000

George Lakoff & Rafael E. Núñez. Where Mathematics Comes From: How the Embodied Mind Brings Mathematics into Being (단행본) · 인용 1,505회

의의 가장 추상적인 학문인 수학조차 몸의 경험에서 나온 은유 위에 세워졌다고 주장한 도발적 저작이다.

핵심 저자들은 산수를 "물건 모으기", "길 따라 움직이기" 같은 몸의 경험에 근거한 은유로 설명한다. 덧셈은 모으기, 뺄셈은 덜어내기, 수직선은 걸어가는 길이다. 이런 근거 은유가 층층이 쌓여 집합, 무한, 미적분 같은 추상 개념이 만들어진다고 보았다.

쉽게 "0보다 작은 수"가 이해되는 것은 수를 길 위의 위치로 생각하는 몸의 경험 덕분이다.

교실 추상 개념을 가르칠 때 그 개념의 뿌리가 되는 몸의 경험(모으기, 움직이기, 나누기)부터 시작한다.

주의 수학 철학자들로부터 수학적 엄밀성을 지나치게 단순화했다는 비판을 받았다.

← Gentner 1983, Lakoff 1980

수학 설명하기, 몸짓은 부하를 덜어 준다 Goldin-Meadow 2001

Susan Goldin-Meadow, Howard Nusbaum, Spencer D. Kelly & Susan Wagner. Explaining math: Gesturing lightens the load · doi:10.1111/1467-9280.00395 · 인용 1,010회

의의 몸짓이 말하는 사람의 인지부하를 줄인다는 것을 실험으로 보였다. 체화된 인지와 인지부하이론을 잇는 핵심 증거다.

핵심 아동과 성인이 수학 문제 풀이를 설명하는 동안 단어나 글자 목록을 기억하게 했다. 설명하며 몸짓을 한 경우가 몸짓을 못하게 한 경우보다 목록을 더 많이 기억했다. 몸짓이 생각의 일부를 몸으로 옮겨 작업기억 자원을 아껴 준다는 해석이다.

쉽게 길을 설명할 때 손짓을 하면 말이 더 술술 나오는 이유다.

교실 학생이 설명할 때 손짓을 막지 말고, 교사도 핵심 관계를 몸짓으로 함께 보여 준다.

→ Paas 2012, Kiefer 2012, Cook 2008

체화된 인지의 여섯 가지 관점 Wilson 2002

Margaret Wilson. Six views of embodied cognition · doi:10.3758/BF03196322 · 인용 6,115회

의의 혼란스럽던 "체화된 인지" 주장들을 여섯 가지로 나누어 비판적으로 정리했다. 이 분야 입문의 필독 논문이다.

핵심 (1) 인지는 상황적이다, (2) 시간 압박을 받는다, (3) 인지적 일을 환경에 떠넘긴다, (4) 환경은 인지 체계의 일부다, (5) 인지는 행동을 위한 것이다, (6) 오프라인 인지(지금 여기 없는 것을 생각하기)도 몸에 기반한다. 윌슨은 (4)가 가장 문제가 많고 (6)이 가장 강력하지만 덜 주목받았다고 평가했다.

쉽게 "체화"라는 한 단어 안에 서로 다른 여섯 주장이 섞여 있다는 지도를 그려 준 논문이다.

교실 체화 학습을 설계할 때 어느 주장(환경에 부담 넘기기인지, 몸 기반 시뮬레이션인지)을 활용하는지 분명히 한다.

← Gibson 1979, Varela 1991, Hutchins 1995, Glenberg 1997, Barsalou 1999 · → Risko 2016

조작 활동과 상상 활동이 어린이 읽기 이해를 높인다 Glenberg 2004

Arthur M. Glenberg, Tiana Gutierrez, Joel R. Levin, Sandra Japuntich & Michael P. Kaschak. Activity and imagined activity can enhance young children's reading comprehension · doi:10.1037/0022-0663.96.3.424 · 인용 481회

의의 체화된 인지 이론을 교실 읽기 지도로 옮긴 대표 실험이다.

핵심 초등 1~2학년생이 농장 이야기를 읽으며 장난감으로 문장 내용을 직접 움직여 보게 했다. 조작한 아이들은 다시 읽기만 한 아이들보다 기억과 추론이 크게 좋아졌다. 나중에 장난감 없이 "머릿속으로 움직여 보기"를 해도 효과가 이어졌다.

쉽게 "트랙터가 헛간으로 간다"를 읽고 장난감 트랙터를 직접 움직여 보면 문장이 머릿속 장면이 된다.

교실 저학년 읽기에서 문장을 손 인형이나 블록으로 재현하는 활동을 넣고, 점차 "머릿속 재현"으로 옮긴다.

← Glenberg 1997 · → Kiefer 2012

거울 뉴런 시스템 Rizzolatti 2004

Giacomo Rizzolatti & Laila Craighero. The mirror-neuron system · doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230 · 인용 9,260회

의의 남의 행동을 보기만 해도 내가 그 행동을 할 때와 같은 뉴런이 활성화된다는 발견을 정리한 대표 개관이다.

핵심 원숭이 전운동피질의 특정 뉴런은 원숭이가 물건을 잡을 때와 다른 개체가 잡는 것을 볼 때 모두 활성화된다. 사람에게도 비슷한 시스템이 있으며, 연구진은 이것이 행동 이해와 모방의 기반이라고 제안했다.

쉽게 다른 사람이 레몬을 깨무는 모습만 봐도 내 얼굴이 찡그려지는 것과 연결된다.

교실 시범 보이기, 모델링이 왜 강력한지에 대한 신경 수준의 설명 중 하나로 활용한다.

주의 공감, 언어, 자폐까지 거울 뉴런으로 설명하려는 대중적 주장은 과장되었다는 비판(Hickok, 2014)이 있다.

← Bandura 1961 · → Barsalou 2008

근거 기반 인지 Barsalou 2008

Lawrence W. Barsalou. Grounded cognition · doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093639 · 인용 7,811회

의의 체화, 상황, 시뮬레이션 연구를 "근거 기반 인지(grounded cognition)"라는 이름으로 통합한 Annual Review 개관이다.

핵심 인지가 추상 기호가 아니라 감각운동 시뮬레이션, 상황적 행동, 신체 상태에 근거한다는 증거를 지각, 기억, 언어, 사고, 사회 인지 전반에서 검토했다. "체화"는 몸 자체보다 몸과 환경의 경험이 재현된다는 점이 핵심이라 "근거 인지"가 더 정확한 용어라고 제안했다.

쉽게 "망치질"이라는 단어를 읽을 때 뇌의 운동 영역이 살짝 깨어나는 것이 근거 인지의 증거다.

교실 추상 개념도 그것이 실제로 쓰이는 상황과 행동 속에서 소개하면 이해의 뿌리가 생긴다.

← Glenberg 1997, Barsalou 1999, Rizzolatti 2004 · → Kiefer 2012

숫자 보드게임으로 저소득층 아동의 수 지식 높이기 Ramani 2008

Geetha B. Ramani & Robert S. Siegler. Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games · doi:10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x · 인용 904회

의의 일직선 숫자 보드게임 몇 판만으로 유아의 수 감각이 크게 좋아진다는 것을 보였다. 수를 공간과 몸의 움직임으로 연결하는 체화된 수학 교육의 대표 근거다.

핵심 저소득층 유치원생들이 1부터 10까지 일렬로 놓인 칸을 말로 이동하며 숫자를 소리 내어 세는 게임을 2주 동안 15~20분씩 네 번 했다. 이 아이들은 수직선 추정, 크기 비교, 세기, 숫자 읽기에서 모두 향상되었고, 효과는 9주 뒤에도 유지되었다. 숫자 대신 색깔 칸으로 된 게임을 한 아이들은 향상되지 않았다.

쉽게 "뱀 사다리" 같은 놀이판에서 칸을 하나씩 옮길 때마다 수의 크기가 거리로 몸에 새겨진다.

교실 유아와 저학년 수 학습에 일직선 숫자판 게임을 넣고, 이동할 때 숫자를 소리 내어 세게 한다.

← Dehaene 2007, Siegler 1996, Dehaene 1997 · → Kiefer 2012

몸짓은 학습을 오래가게 한다 Cook 2008

Susan Wagner Cook, Zachary Mitchell & Susan Goldin-Meadow. Gesturing makes learning last · doi:10.1016/j.cognition.2007.04.010 · 인용 617회

의의 학습자가 직접 몸짓을 하면 배운 내용이 더 오래 남는다는 것을 보였다. 제스처를 학습 도구로 쓰는 연구의 대표 실험이다.

핵심 초등학생들이 "3+2+8=__+8" 같은 등식 문제의 풀이 전략을 배우며 말로만, 몸짓으로만, 말과 몸짓을 함께 따라 하게 했다. 수업 직후에는 세 집단의 성적이 비슷했지만, 4주 뒤에는 몸짓을 한 두 집단만 배운 내용을 유지했다.

쉽게 "양쪽을 똑같이 맞춰야 해"라고 말하며 양손으로 저울을 그리는 동작이 개념을 몸에 붙여 둔다.

교실 개념을 설명할 때 의미 있는 손동작을 함께 정하고, 학생이 그 동작을 따라 하며 설명하게 한다.

← Goldin-Meadow 2001 · → Paas 2012, Kiefer 2012

체화 이론과 교육 Kiefer 2012

Markus Kiefer & Natalie M. Trumpp. Embodiment theory and education: The foundations of cognition in perception and action · doi:10.1016/j.tine.2012.07.002 · 인용 294회

의의 체화된 인지의 신경과학 증거를 교육 현장 시사점과 직접 연결한 개관이다.

핵심 개념이 지각과 행동 체계에 근거한다는 뇌영상 연구를 정리하고, 교육적 함의를 논의했다. 예를 들어 글자를 손으로 써 본 아이가 키보드로 친 아이보다 글자를 더 잘 인식하고, 손가락 수 세기는 수 개념 발달과 관련된다. 감각운동이 풍부한 학습이 개념 표상을 강화한다고 제안했다.

쉽게 글자를 손으로 써 보는 경험이 뇌 속 "글자 지도"를 더 선명하게 만든다.

교실 저학년 문자, 수 학습에서 손글씨와 손가락 사용을 성급히 디지털로 대체하지 않는다.

← Barsalou 1999, Goldin-Meadow 2001, Glenberg 2004, Barsalou 2008, Cook 2008, Ramani 2008

인지적 오프로딩 Risko 2016

Evan F. Risko & Sam J. Gilbert. Cognitive offloading · doi:10.1016/j.tics.2016.07.002 · 인용 2,611회

의의 메모, 알림, 검색처럼 생각의 부담을 외부로 넘기는 행동을 체계적으로 정리했다. 생성형 AI 시대 학습 연구의 핵심 개념이 되었다.

핵심 사람은 머리를 기울여 회전된 그림을 보거나, 할 일을 알림에 맡기는 등 신체 행동과 외부 도구로 인지 요구를 줄인다. 오프로딩 여부는 내 기억과 능력에 대한 메타인지적 판단에 좌우된다. 오프로딩은 즉각적 수행을 높이지만, 맡긴 정보 자체의 기억은 약해질 수 있다.

쉽게 전화번호를 스마트폰에 저장한 뒤로 가족 번호도 못 외우게 된 경험이 오프로딩의 대가다.

교실 AI나 검색에 맡겨도 되는 것과 머릿속에 반드시 남겨야 할 핵심 지식을 학생과 함께 구분한다.

← Flavell 1979, Clark 1998, Wilson 2002 · → Bastani 2025, Kosmyna 2025, Fan 2025, Lee 2025, Lehmann 2024

8. 뇌과학과 예측하는 뇌

시냅스 가소성, 해마와 피질, 도파민 예측 오류, 예측 처리. 학습을 뇌 수준에서 설명하려는 시도와 신경 신화 비판.

행동의 조직 Hebb 1949

Donald O. Hebb. The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory (단행본) · doi:10.1037/h0049612 · 인용 6,980회

의의 "함께 발화하는 뉴런은 함께 연결된다"로 요약되는 헵의 학습 규칙을 제시했다. 신경과학의 학습 이론과 인공신경망의 공통 조상이다.

핵심 헵은 한 뉴런이 다른 뉴런을 반복적으로 흥분시키면 둘 사이 연결이 강해진다고 제안했다. 이렇게 함께 활성화되는 뉴런 집단(세포 집합체)이 지각과 개념, 기억의 신경 기반이 된다. 이 가설은 1970년대 장기강화(LTP) 발견으로 실험적 지지를 얻었다.

쉽게 풀밭을 여러 번 걸으면 길이 나듯, 자주 함께 쓰인 뇌 회로가 굵어진다.

교실 반복과 연결이 학습의 물리적 기반임을 학생에게 설명할 때 쓰기 좋은 원리다.

→ McClelland 1995, Schultz 1997, Bliss 1973, Rumelhart 1986

공간 지도로서의 해마 O'Keefe 1971

John O'Keefe & Jonathan Dostrovsky. The hippocampus as a spatial map: Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat · doi:10.1016/0006-8993(71)90358-1 · 인용 7,250회

의의 쥐가 특정 장소에 있을 때만 발화하는 해마의 "장소 세포"를 처음 보고했다. 톨먼의 인지도가 뇌에 실재한다는 증거로, 2014년 노벨 생리의학상으로 이어졌다.

핵심 자유롭게 움직이는 쥐의 해마 뉴런 활동을 기록하자, 일부 뉴런은 쥐가 공간의 특정 위치에 있을 때만 강하게 발화했다. 저자들은 해마가 환경의 공간 지도를 만든다고 제안했다. 이후 격자 세포 발견으로 뇌의 위치 측정 체계가 밝혀졌다.

쉽게 뇌 속에 "지금 여기"를 표시하는 지도 핀이 있다는 발견이다.

교실 장소법(기억의 궁전) 같은 공간 기반 기억술이 왜 강력한지에 대한 신경과학적 배경이다.

← Tolman 1948 · → McClelland 1995

장기 강화(LTP)의 발견 Bliss 1973

Tim V. P. Bliss & Terje Lømo. Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path · doi:10.1113/jphysiol.1973.sp010273 · 인용 7,672회

의의 짧은 고빈도 자극이 시냅스 연결을 오래 강화한다는 장기 강화(LTP)를 처음 보고했다. 헵의 가설에 생리학적 근거를 준, 학습의 세포 기전 연구의 출발점이다.

핵심 마취한 토끼의 해마 경로에 짧은 고빈도 전기 자극을 주자, 이후 같은 자극에 대한 반응이 30분에서 최대 10시간까지 강하게 유지되었다(마취하지 않은 토끼를 대상으로 한 동반 연구에서는 며칠까지 유지되었다). 경험이 시냅스의 효율을 지속적으로 바꿀 수 있다는 것을 보인 결과로, 기억의 세포 수준 기전으로 널리 연구되었다.

쉽게 자주 쓰는 길이 넓게 포장되듯, 강하게 함께 쓰인 연결은 오래 굵어진다.

교실 반복과 연습이 실제로 뇌의 연결을 바꾼다는 것을 학생들에게 설명할 때 쓸 수 있는 생물학적 근거다.

← Hebb 1949 · → Kandel 2001, McClelland 1995

오차 역전파로 표상 학습하기 Rumelhart 1986

David E. Rumelhart, Geoffrey E. Hinton & Ronald J. Williams. Learning representations by back-propagating errors · doi:10.1038/323533a0 · 인용 40,553회

의의 다층 신경망이 오차를 거꾸로 전파하며 스스로 내부 표상을 학습할 수 있음을 보인 Nature 논문이다. 연결주의 인지과학과 오늘날 딥러닝, 생성형 AI의 공통 뿌리다.

핵심 출력과 정답의 차이(오차)를 출력층에서 입력층 방향으로 거꾸로 전달하며 연결 가중치를 조금씩 고치는 역전파 학습 절차를 제시했다. 이 과정에서 은닉층이 과제에 유용한 특징을 스스로 만들어 냈다. 규칙을 직접 넣지 않아도 예시로부터 구조를 배우는 학습 모형이 가능해졌다.

쉽게 다트를 던질 때마다 빗나간 정도를 보고 팔 각도를 조금씩 고쳐 가는 학습을 수학으로 만든 것이다.

교실 생성형 AI가 "예시에서 패턴을 배운 시스템"이라는 점을 학생에게 설명할 때 역사적 출발점으로 쓸 수 있다.

← Hebb 1949 · → McClelland 1995, Tenenbaum 2011, Piech 2015

상보적 학습 시스템 이론 McClelland 1995

James L. McClelland, Bruce L. McNaughton & Randall C. O'Reilly. Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex · doi:10.1037/0033-295X.102.3.419 · 인용 6,515회

의의 뇌가 왜 빠른 학습(해마)과 느린 학습(신피질)이라는 두 시스템을 갖는지를 계산 모형으로 설명했다. 수면, 분산 학습, 인공신경망 연구까지 영향을 미쳤다.

핵심 인공신경망은 새 정보를 한꺼번에 학습하면 기존 지식을 덮어써 버리는 파국적 간섭을 겪는다. 연구진은 해마가 새 경험을 빠르게 저장한 뒤, 신피질이 이를 기존 지식과 섞어 천천히 통합한다고 제안했다. 이 교차 재생이 장기 기억의 구조화를 가능하게 한다.

쉽게 메모장(해마)에 빠르게 적어 두었다가 밤마다 백과사전(피질)에 조금씩 옮겨 적는 방식이다.

교실 새 내용을 기존 내용과 섞어 다시 다루는 누적 복습과 충분한 수면이 학습 통합에 중요하다.

← Hebb 1949, Tulving 1972, O'Keefe 1971, Bliss 1973, Rumelhart 1986 · → Diekelmann 2010, Gruber 2014

예측과 보상의 신경 기질 Schultz 1997

Wolfram Schultz, Peter Dayan & P. Read Montague. A neural substrate of prediction and reward · doi:10.1126/science.275.5306.1593 · 인용 10,720회

의의 도파민 뉴런이 "보상 그 자체"가 아니라 "예측과 실제의 차이"를 신호한다는 것을 보였다. 신경과학과 강화학습 AI를 연결한 기념비적 논문이다.

핵심 원숭이에게 예상하지 못한 주스를 주면 도파민 뉴런이 크게 반응했다. 신호 뒤에 주스가 온다는 것을 학습하면 반응은 주스가 아닌 신호 시점으로 옮겨 갔고, 예상한 주스가 오지 않으면 반응이 줄었다. 이 패턴은 기계학습의 시간차(TD) 학습 알고리즘의 예측 오류와 정확히 일치했다.

쉽게 기대보다 좋은 성적표에 기쁘고, 기대한 만큼이면 덤덤하고, 기대보다 나쁘면 실망하는 것과 같다.

교실 학습은 "예측이 틀릴 때" 일어난다. 결과를 먼저 예측하게 한 뒤 확인하는 활동이 효과적인 이유다.

← Hebb 1949 · → Friston 2010, Gruber 2014

수 감각 Dehaene 1997

Stanislas Dehaene. The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics (단행본) · 인용 2,088회

의의 인간과 동물, 아기가 타고나는 "어림 수 감각"과 그 뇌 기반을 소개해 수학 인지 연구와 수 학습 교육에 큰 영향을 준 책이다.

핵심 쥐, 원숭이, 그리고 갓난아기도 적은 수의 차이와 대략적인 양의 차이를 알아챈다. 이 어림 수 감각은 두정엽(특히 두정내구)에 기반하며, 정확한 계산과 수 기호는 문화와 교육이 이 기초 위에 쌓은 것이다. 수 감각이 약하면 수학 학습 장애(난산증)로 이어질 수 있다.

쉽게 우리는 사과 8개와 9개는 헷갈려도 3개와 9개는 세지 않고도 바로 구분한다.

교실 초기 수 학습에서 수 크기를 공간(수직선), 양(블록), 기호(숫자)로 연결하는 활동을 충분히 한다.

→ Dehaene 2007, Ramani 2008

기억 저장의 분자생물학 Kandel 2001

Eric R. Kandel. The molecular biology of memory storage: A dialogue between genes and synapses · doi:10.1126/science.1067020 · 인용 4,496회

의의 단기기억과 장기기억이 분자 수준에서 다른 기전을 가진다는 것을 밝힌 노벨상 강연 논문이다.

핵심 캔델은 바다 달팽이 군소의 단순한 반사 학습을 연구했다. 한 번의 자극은 기존 단백질의 화학적 변화로 몇 분 지속되는 단기기억을 만들지만, 반복된 자극은 유전자 발현과 새 단백질 합성을 거쳐 새로운 시냅스 연결을 키우는 장기기억을 만든다. 반복이 기억을 "구조적으로" 바꾸는 이유가 여기에 있다.

쉽게 단기기억은 연필 메모, 장기기억은 벽돌을 새로 쌓는 공사에 가깝다.

교실 한 번에 몰아 하기보다 간격을 두고 반복하는 것이 장기기억 형성에 유리하다는 생물학적 배경이다.

← Bliss 1973 · → Diekelmann 2010

피질 지도의 문화적 재활용 Dehaene 2007

Stanislas Dehaene & Laurent Cohen. Cultural recycling of cortical maps · doi:10.1016/j.neuron.2007.10.004 · 인용 1,597회

의의 읽기와 산수처럼 최근에 발명된 문화적 능력이 어떻게 진화적으로 오래된 뇌 회로를 "재활용"하는지 설명하는 신경 재활용 가설을 제시했다.

핵심 문자는 수천 년 전에 발명되어 읽기 전용 뇌 영역이 진화할 시간이 없었다. 그런데도 모든 문화권에서 읽기는 같은 좌측 후두-측두 영역(시각 단어 형태 영역)을 쓴다. 저자들은 원래 사물과 얼굴 인식에 쓰이던 회로가 문화 학습으로 용도 변경되며, 원래 회로의 제약이 문화적 발명의 형태까지 제한한다고 주장했다.

쉽게 원래 다른 용도로 지은 창고를 리모델링해 도서관으로 쓰는 것과 같다.

교실 읽기는 자연적으로 생기지 않으므로 체계적인 파닉스와 해독 교육이 필요하다는 근거가 된다.

← Dehaene 1997 · → Howard-Jones 2014, Geary 2008, Ramani 2008, Castles 2018

우리는 느낀다, 그러므로 배운다 Immordino-Yang 2007

Mary Helen Immordino-Yang & Antonio Damasio. We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education · doi:10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x · 인용 2,423회

의의 정서가 학습을 방해하는 잡음이 아니라 사고와 학습의 토대라는 신경과학적 관점을 교육계에 소개해, 정서 교육과 교육신경과학 논의를 크게 바꾸었다.

핵심 전전두엽 일부가 손상된 환자들은 지능 검사 점수는 정상이지만 정서 신호를 활용하지 못해 경험에서 배우지 못하고 일상의 결정을 잘못 내렸다. 저자들은 이성적 사고조차 정서와 신체 반응에 기대고 있으며, 학교에서 배운 지식이 실제 삶으로 전이되려면 정서적 의미가 결합되어야 한다고 주장했다.

쉽게 "재미있다", "중요하다"는 느낌이 기억에 붙는 꼬리표 역할을 한다.

교실 개념을 학생에게 의미 있는 문제, 이야기, 사람과 연결해 정서적 관련성을 만든다.

← Varela 1991 · → Gruber 2014

자유에너지 원리 Friston 2010

Karl Friston. The free-energy principle: a unified brain theory? · doi:10.1038/nrn2787 · 인용 10,917회

의의 지각, 학습, 행동을 "예측 오류 최소화"라는 하나의 원리로 통합하려는 야심 찬 이론이다. 예측하는 뇌 패러다임의 이론적 중심이다.

핵심 뇌는 세계에 대한 생성 모형을 가지고 감각 입력을 예측하며, 예측과 실제 입력의 차이(자유에너지, 예측 오류)를 줄이도록 작동한다. 예측 오류는 모형을 고치거나(지각과 학습), 세계를 바꾸어(행동, 능동적 추론) 줄일 수 있다. 베이지안 뇌, 예측 부호화, 강화학습을 한 틀로 묶으려 했다.

쉽게 뇌는 계속 "다음엔 이럴 거야"라고 예측하고, 틀릴 때만 놀라며 배우는 예측 기계다.

교실 학생의 예측과 결과가 어긋나는 "인지적 놀람"의 순간을 수업에 의도적으로 설계한다.

주의 수학적으로 난해하고 반증 가능성이 낮다는 비판도 함께 받는다.

← Schultz 1997 · → Clark 2013

수면의 기억 기능 Diekelmann 2010

Susanne Diekelmann & Jan Born. The memory function of sleep · doi:10.1038/nrn2762 · 인용 4,657회

의의 잠이 낮에 배운 것을 굳히고 재조직한다는 연구를 집대성한 대표 개관이다.

핵심 잠자는 동안, 특히 깊은 서파 수면에서 해마에 임시 저장된 기억이 재활성화되며 신피질로 옮겨져 장기 기억으로 통합된다(능동적 체계 응고화). 수면은 단순히 망각을 막는 것이 아니라 기억을 선택적으로 강화하고, 숨은 규칙을 발견하게 돕는다.

쉽게 낮에 쌓인 메모를 밤사이 정리해 서랍장(피질)에 분류해 넣는 야간 정리 작업이다.

교실 시험 전날 밤샘보다 충분한 수면이 기억에 유리하다는 점을 학생과 학부모에게 근거와 함께 안내한다.

← McClelland 1995, Kandel 2001

마음을 키우는 법, 통계, 구조, 추상화 Tenenbaum 2011

Joshua B. Tenenbaum, Charles Kemp, Thomas L. Griffiths & Noah D. Goodman. How to grow a mind: Statistics, structure, and abstraction · doi:10.1126/science.1192788 · 인용 2,376회

의의 아이들이 몇 개의 예시만으로 단어와 개념을 배우는 능력을 베이지안 확률 추론과 구조화된 표상으로 설명한 Science 개관이다.

핵심 아이는 말 세 마리를 보고 "말"이라는 단어의 범위를 짐작한다. 저자들은 마음이 가능한 가설들에 대한 사전 지식(구조)과 관찰 증거를 결합해 확률적으로 추론한다고 보았다. 계층적 베이지안 모형은 구체적 사례에서 추상적 원리까지 동시에 배우는 과정을 설명한다.

쉽게 탐정이 몇 가지 단서와 사전 지식을 결합해 가장 그럴듯한 범인을 추론하는 방식으로 개념을 배운다.

교실 다양한 예시와 비예시를 적은 수라도 잘 골라 보여 주면 학생이 개념의 경계를 빠르게 추론한다.

← Rumelhart 1986 · → Clark 2013

다음은 무엇? 예측하는 뇌, 상황 속 행위자 Clark 2013

Andy Clark. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science · doi:10.1017/S0140525X12000477 · 인용 7,329회

의의 예측 처리 이론을 체화·상황 인지와 연결한 영향력 있는 BBS 표적 논문이다. 예측하는 뇌와 확장된 마음을 잇는 다리 역할을 한다.

핵심 클라크는 뇌를 위계적 예측 기계로 보는 예측 처리 이론을 정리하고, 이 틀이 지각, 주의, 행동, 상상을 통합적으로 설명한다고 주장했다. 동시에 예측은 몸과 환경을 적극 활용하는 행위자 속에서 일어나므로, 예측 처리와 체화된 인지가 서로 보완적이라고 보았다.

쉽게 어두운 계단에서 마지막 칸이 있을 거라 예측하고 발을 디뎠다가 휘청하는 순간, 뇌의 예측이 드러난다.

교실 학습자가 가진 기존 예측(선개념)을 드러내고 시험할 기회를 주는 것이 개념 변화의 출발점이다.

← Clark 1998, Friston 2010, Tenenbaum 2011

신경과학과 교육, 신화와 메시지 Howard-Jones 2014

Paul A. Howard-Jones. Neuroscience and education: myths and messages · doi:10.1038/nrn3817 · 인용 1,095회

의의 여러 나라의 교사 조사 결과를 모아 교사들 사이에 퍼진 뇌 신화를 보여 주고, 신경과학이 교육에 줄 수 있는 실제 메시지를 정리했다.

핵심 영국, 네덜란드, 터키, 그리스, 중국에서 이루어진 기존 교사 조사를 모아 보면, "학습 양식에 맞춰 가르치면 효과가 있다", "사람은 뇌의 10%만 쓴다", "좌뇌형·우뇌형이 있다" 같은 신화를 믿는 비율이 높았다. 저자는 신화가 퍼지는 원인을 분석하고, 신경과학과 교육 사이의 대화가 필요하다고 제안했다.

쉽게 "뇌 기반"이라는 말이 붙은 교육 상품이 모두 과학인 것은 아니라는 경고다.

교실 연수나 교육 상품에서 뇌과학 주장을 들으면 원 연구와 효과 크기를 먼저 확인한다.

← Pashler 2008, Dehaene 2007, Kirschner 2013

호기심은 도파민 회로를 통해 해마 학습을 조절한다 Gruber 2014

Matthias J. Gruber, Bernard D. Gelman & Charan Ranganath. States of curiosity modulate hippocampus-dependent learning via the dopaminergic circuit · doi:10.1016/j.neuron.2014.08.060 · 인용 911회

의의 호기심이 높은 상태에서는 궁금했던 답뿐 아니라 그 순간 함께 본 무관한 정보까지 더 잘 기억된다는 것을 보인 Neuron 논문이다.

핵심 참가자들이 상식 퀴즈 문제마다 답이 얼마나 궁금한지 평정한 뒤, 답을 기다리는 동안 무관한 얼굴 사진을 보았다. 호기심이 높았던 문제의 답이 더 잘 기억되었고, 그때 본 얼굴 사진도 더 잘 기억되었다. 뇌영상에서는 호기심이 클수록 도파민 회로(중뇌, 측좌핵)와 해마의 활동과 연결이 강해졌다.

쉽게 궁금증이 켜진 순간 뇌의 "녹화 버튼"이 눌려, 그때 지나가던 장면까지 함께 저장된다.

교실 수업 도입에서 답이 궁금해지는 질문을 먼저 던지고, 답을 알려 주기 전 그 사이에 핵심 내용을 배치한다.

← Immordino-Yang 2007, Schultz 1997, McClelland 1995

9. 학습공학과 AI 시대의 학습

티칭 머신의 꿈을 이은 인지 튜터, 튜터링 메타분석, 그리고 2025년 생성형 AI와 학습에 대한 최신 실험들.

지식 추적 Corbett 1994

Albert T. Corbett & John R. Anderson. Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge · doi:10.1007/BF01099821 · 인용 3,229회

의의 학생이 각 기술을 숙달했을 확률을 실시간으로 추정하는 베이지안 지식 추적(BKT)을 제시했다. 적응형 학습 시스템의 핵심 알고리즘으로 30년간 쓰이고 있다.

핵심 학생의 정답과 오답 기록으로 각 지식 요소의 숙달 확률을 갱신한다. 모형은 처음부터 알고 있을 확률, 한 번의 기회에 배울 확률, 모르는데 맞힐 확률(추측), 아는데 틀릴 확률(실수)의 네 매개변수를 쓴다. 숙달 확률이 기준을 넘을 때까지 해당 기술 문제를 계속 제공하는 숙달 학습이 가능해졌다.

쉽게 "방금 맞혔지만 찍었을 수도 있다"까지 계산하며 학생 실력을 추정하는 계기판이다.

교실 형성평가에서 한 번 맞힌 것으로 숙달을 판단하지 말고 여러 기회에 걸쳐 확인한다.

→ Anderson 1995, Koedinger 2012, Piech 2015

인지 튜터, 얻은 교훈 Anderson 1995

John R. Anderson, Albert T. Corbett, Kenneth R. Koedinger & Ray Pelletier. Cognitive tutors: Lessons learned · doi:10.1207/s15327809jls0402_2 · 인용 2,447회

의의 인지 이론(ACT-R)을 바탕으로 실제 학교에 보급된 지능형 튜터링 시스템의 10년 경험을 정리했다. 학습공학과 AI 튜터의 원형이다.

핵심 LISP 프로그래밍, 기하, 대수 튜터를 만들고 평가하며, 학생의 풀이를 단계마다 인지 모형과 대조하는 모델 추적과, 지식 요소별 숙달 확률을 갱신하는 지식 추적을 개발했다. 튜터를 쓴 학생은 같은 수준에 더 짧은 시간에 도달했다. 문제해결 맥락에서 가르치기, 즉각 피드백, 작업기억 부담 최소화 등 설계 원리 8가지를 제시했다.

쉽게 학생 옆에서 한 줄씩 풀이를 지켜보다 틀린 줄에서 바로 힌트를 주는 과외 선생님을 소프트웨어로 만든 것이다.

교실 AI 튜터를 고를 때 "최종 답만 보는가, 풀이 단계마다 피드백하는가"를 확인한다.

← Skinner 1954, Newell 1972, Bloom 1984, Corbett 1994 · → VanLehn 2011, Koedinger 2012

인간 튜터링과 지능형 튜터링 시스템의 상대적 효과 VanLehn 2011

Kurt VanLehn. The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems · doi:10.1080/00461520.2011.611369 · 인용 3,655회

의의 블룸의 2시그마 주장을 재검토하고, 단계 기반 지능형 튜터가 인간 튜터에 근접한다는 것을 보여 준 메타분석이다.

핵심 튜터링 없음 대비 인간 튜터링의 효과는 d=0.79로 2시그마보다 훨씬 작았고, 단계 기반 ITS는 d=0.76으로 인간 튜터와 거의 같았다. 답만 확인하는 시스템은 d=0.31이었다. 상호작용이 세밀할수록 효과가 커진다는 "상호작용 세분성 가설"은 절반만 맞았다. 답 단위에서 단계 단위로 갈 때는 효과가 커졌지만, 그보다 더 세밀해져도 거의 늘지 않는 "상호작용 고원(plateau)"이 나타났다.

쉽게 최종 답에만 빨간 줄을 긋는 채점보다 풀이 한 줄마다 봐 주는 튜터가 훨씬 낫지만, 한 글자마다 간섭할 필요는 없다.

교실 형성평가 피드백은 최종 답보다 풀이 단계 단위로 준다.

← Wood 1976, Bloom 1984, Chi 1989, Anderson 1995 · → Wang 2024, Jurenka 2024

지식-학습-교수(KLI) 프레임워크 Koedinger 2012

Kenneth R. Koedinger, Albert T. Corbett & Charles Perfetti. The Knowledge-Learning-Instruction framework: Bridging the science-practice chasm to enhance robust student learning · doi:10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x · 인용 1,045회

의의 어떤 교수법이 언제 효과적인지를 "어떤 종류의 지식을 배우는가"로 설명하는 통합 틀이다. 학습공학과 학습 분석의 이론적 기반이다.

핵심 학습 대상을 지식 요소(KC)로 정의하고, 그 복잡도에 따라 필요한 학습 과정이 달라진다고 보았다. 단순 사실은 기억과 유창성, 범주와 규칙은 귀납과 정교화, 원리는 이해와 의미 구성이 필요하다. 그래서 인출 연습, 풀이 예제, 자기 설명 같은 교수법은 지식 유형에 맞게 골라야 한다. 이 틀은 수많은 교실 실험 데이터(LearnLab)로 뒷받침된다.

쉽게 단어 외우기에 좋은 방법과 물리 원리 이해에 좋은 방법이 다른 이유를 정리한 지도다.

교실 수업 목표를 사실, 규칙, 원리로 나누고 각각에 맞는 활동(퀴즈, 예제 비교, 설명하기)을 배치한다.

← Anderson 1996, Bransford 2000, Anderson 1995, Corbett 1994 · → Jurenka 2024

딥 지식 추적 Piech 2015

Chris Piech et al.. Deep knowledge tracing · 인용 1,324회

의의 순환신경망으로 학생의 학습 궤적을 모델링한 연구로, 교육 데이터 마이닝에 딥러닝 시대를 열었다.

핵심 학생의 문제 풀이 기록을 순서대로 순환신경망에 넣어 다음 문제를 맞힐 확률을 예측했다. 전문가가 기술 목록을 정하지 않아도 문제들 사이의 관계를 데이터에서 스스로 찾았고, 공개 데이터셋에서 기존 BKT보다 높은 예측 성능을 보고했다.

쉽게 학생의 풀이 이력 전체를 읽고 "다음 문제는 맞힐까?"를 예측하는 AI 담임이다.

교실 학습 플랫폼의 추천 알고리즘이 무엇을 근거로 판단하는지 교사가 확인하고 설명 가능성을 요구한다.

주의 Khajah 외(2016)는 잘 확장한 BKT나 단순 모형도 비슷한 성능을 낸다고 보고해, 성능 우위가 과장되었다는 지적이 있다.

← Rumelhart 1986, Corbett 1994

교육을 위한 ChatGPT? 대규모 언어모델의 기회와 과제 Kasneci 2023

Enkelejda Kasneci et al.. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education · doi:10.1016/j.lindif.2023.102274 · 인용 14,672회

의의 ChatGPT 등장 직후 교육계의 기회와 위험을 종합한 대표 입장 논문으로, 생성형 AI 교육 연구에서 가장 많이 인용되는 문헌 중 하나다.

핵심 초중등과 고등교육, 교사, 학습자 각각에 대해 대규모 언어모델의 활용 가능성(개인화 피드백, 글쓰기 지원, 수업 자료 생성 등)을 정리했다. 동시에 편향, 부정확성, 과의존, 평가의 공정성, 개인정보, 비용 문제를 짚고, 교사와 학생의 AI 리터러시 교육을 핵심 과제로 제시했다.

쉽게 새로 들어온 강력한 도구의 사용 설명서와 경고문을 함께 붙인 문서다.

교실 AI 활용 수업 전에 "AI가 틀릴 수 있다"를 직접 확인하는 검증 활동부터 시작한다.

→ Bastani 2025, Lehmann 2024

튜터 코파일럿, 인간-AI 협업 튜터링 Wang 2024

Rose E. Wang, Ana T. Ribeiro, Carly D. Robinson, Susanna Loeb & Dora Demszky. Tutor CoPilot: A human-AI approach for scaling real-time expertise · 인용 124회

의의 AI가 학생을 직접 가르치는 대신 초보 튜터에게 전문가 수준의 조언을 실시간으로 제공하는 방식을 대규모 RCT로 검증했다.

핵심 튜터 약 900명과 초중등 학생 약 1,800명이 참여한 실험에서, AI 조언 도구를 쓴 튜터의 학생은 주제 숙달 확률이 4%p 높았다. 평가가 낮은 튜터에게서는 효과가 9%p로 더 컸다. AI 지원을 받은 튜터는 정답을 바로 알려 주는 대신 질문으로 이끄는 전략을 더 많이 썼다. 비용은 튜터 1인당 연간 약 20달러였다.

쉽게 초보 선생님 귀에 베테랑 선생님이 "여기서는 힌트를 주세요"라고 속삭여 주는 이어폰이다.

교실 AI를 학생 대체용이 아니라 교사의 판단을 돕는 조수로 쓰는 설계도 함께 고려한다.

주의 동료 심사 전 워킹페이퍼로 발표되었다.

← VanLehn 2011, Bloom 1984 · → Bastani 2025

교육용 생성형 AI의 책임 있는 개발 (LearnLM-Tutor) Jurenka 2024

Irina Jurenka et al. (Google DeepMind). Towards responsible development of generative AI for education: An evaluation-driven approach

의의 학습과학의 교수 원리를 LLM 개발의 평가 기준으로 삼은 구글 딥마인드의 기술 보고서다. "좋은 AI 튜터란 무엇인가"를 측정 가능한 기준으로 만들려는 시도다.

핵심 연구진은 교사와 학습자, 학습과학자와 함께 좋은 가르침의 원칙(인지부하 관리, 능동적 학습 촉진, 메타인지 자극, 호기심 유발, 학습자 맞춤 등)을 정리하고, 이를 측정하는 정량·정성 평가 체계를 만들었다. 교수법 데이터로 미세조정한 LearnLM-Tutor는 프롬프트만 준 기본 모델보다 여러 교수법 평가 항목에서 대체로 더 좋은 평가를 받았다.

쉽게 "정답을 잘 맞히는 AI"가 아니라 "잘 가르치는 AI"를 만들려면 가르침의 성적표부터 필요하다.

교실 AI 튜터를 고를 때 정답률보다 "바로 답을 주지 않는가, 질문으로 이끄는가, 오개념을 찾아내는가"를 기준으로 평가한다.

주의 개발사의 기술 보고서이며 독립적인 학습 효과 검증은 제한적이다.

← Koedinger 2012, VanLehn 2011

AI가 교실을 만날 때, LLM은 언제 학습을 해치는가? Lehmann 2024

Matthias Lehmann, Philipp B. Cornelius & Fabian J. Sting. AI meets the classroom: When do large language models harm learning? · 인용 137회

의의 사전등록된 두 실험에서는 LLM 사용 자체가 전체 학습 성과에 영향을 주지 않았지만, 탐색적 분석과 현장 연구에서 LLM의 효과가 "어떻게 쓰느냐"에 따라 달라진다는 증거를 제시한 연구다.

핵심 파이썬 프로그래밍을 배우는 학생들을 대상으로 한 현장 연구(네덜란드 대학원 수업)와 사전등록 실험 두 건에서, LLM 사용 여부는 전체 학습 성과에 유의한 차이를 만들지 않았다. 그러나 탐색적 분석에서 LLM을 학습 활동의 대체물(연습문제 풀이를 생성하게 하기)로 쓴 학생은 다룬 주제 수는 늘었지만 이해는 얕아졌고, 보완물(설명을 요청하기)로 쓴 학생은 이해가 깊어졌다. 대체적 사용만 관찰된 현장 연구에서는 장기 학습 성과가 떨어졌다. 또 LLM은 사전지식에 따른 격차를 벌렸고, LLM을 쓴 학생들은 자신이 배운 정도를 과대평가했다.

쉽게 AI에게 숙제를 시키면 숙제는 끝나지만 배움은 시작되지 않고, AI에게 모르는 것을 물으면 배움이 깊어진다.

교실 AI 사용 규칙을 "대신 풀게 하지 않기, 설명과 힌트를 요청하기"로 정하고, AI 사용 뒤에는 AI 없이 확인 문제를 풀게 한다.

주의 프리프린트 단계의 연구이며 특정 과목(프로그래밍) 맥락의 결과다.

← Kasneci 2023, Risko 2016

안전장치 없는 생성형 AI는 학습을 해칠 수 있다 Bastani 2025

Hamsa Bastani, Osbert Bastani, Alp Sungu et al.. Generative AI without guardrails can harm learning: Evidence from high school mathematics · doi:10.1073/pnas.2422633122 · 인용 1,223회

의의 생성형 AI가 연습 성적은 올리지만 실제 학습은 해칠 수 있다는 것을 약 1,000명 대상 현장 실험으로 보였다. AI 교육 정책 논의에서 가장 많이 인용되는 최신 연구 중 하나다.

핵심 튀르키예 고등학교에서 수학 연습 시간에 일반 GPT-4(GPT Base)와 교사용 힌트를 담고 답을 바로 주지 않도록 설계한 GPT Tutor를 비교했다. 연습 점수는 GPT Base가 48%, GPT Tutor가 127% 올랐지만, AI 없이 본 시험에서 GPT Base 집단은 대조군보다 17% 낮았다. GPT Tutor는 이 피해를 대부분 상쇄했다. 학생들이 AI를 답 베끼기용 "목발"로 쓴 것이 원인으로 분석되었다.

쉽게 계산기를 쓰며 숙제는 다 맞혔는데 시험장에서 계산기를 빼앗기자 손도 못 대는 상황이다.

교실 AI를 수업에 넣을 때 바로 답을 주지 않고 힌트와 질문으로 이끄는 설정을 기본값으로 삼는다.

← Chi 2014, Risko 2016, Bjork 2013, Kasneci 2023, Wang 2024 · → Kosmyna 2025

AI 튜터링이 교실 능동학습보다 효과적이다 Kestin 2025

Gregory Kestin, Kelly Miller, Anna Klales, Timothy Milbourne & Gregorio Ponti. AI tutoring outperforms in-class active learning: an RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting · doi:10.1038/s41598-025-97652-6 · 인용 559회

의의 학습과학 원리로 설계한 AI 튜터가 우수한 능동학습 수업보다 더 많은 학습을 낳았다는 하버드 RCT다. Bastani 연구와 함께 "AI는 설계가 전부"라는 메시지를 준다.

핵심 하버드 물리 수업 학생 194명이 교차 설계로 두 주에 걸쳐 한 번은 교실 능동학습, 한 번은 AI 튜터로 배웠다(1주 차 표면장력, 2주 차 유체 흐름). AI 튜터 조건의 학습 향상은 교실 조건의 두 배 이상이었고, 학습 시간은 더 짧았으며, 참여와 동기도 더 높았다. AI 튜터의 시스템 프롬프트는 능동적 학습, 인지부하 관리, 성장 마인드셋을 따르도록 설계되었다. 단계별 비계는 프롬프트만으로 안정적이지 않아 문제를 한 부분씩 안내하는 플랫폼 구조로 구현했고, 정확성을 위해 단계별 모범 풀이를 프롬프트에 넣었다.

쉽게 같은 AI라도 "답 알려 주는 친구"가 아니라 "좋은 과외 선생님"처럼 설계하면 결과가 정반대가 된다.

교실 AI 튜터를 만들 때 이 아틀라스의 원리들(인지부하, 비계, 인출, 피드백)을 시스템 프롬프트에 명시한다.

주의 단일 대학, 단일 과목, 단기 학습 효과라는 한계가 있다.

← Bloom 1984, Freeman 2014, Kirschner 2006, Sweller 2019, Wood 1976

ChatGPT를 쓴 뇌, 인지적 부채의 누적 Kosmyna 2025

Nataliya Kosmyna et al.. Your brain on ChatGPT: Accumulation of cognitive debt when using an AI assistant for essay writing task · doi:10.48550/arxiv.2506.08872 · 인용 1,775회

의의 LLM으로 글을 쓸 때 뇌 연결성과 글에 대한 소유감, 기억이 줄어든다는 MIT 미디어랩의 EEG 연구다. "인지적 부채"라는 말을 퍼뜨리며 큰 대중적 반향을 일으켰다.

핵심 참가자 54명이 LLM, 검색엔진, 도구 없음 조건 중 하나로 4개월 동안 에세이를 썼다. 뇌파 연결성은 도구 없음 > 검색 > LLM 순으로 높았다. LLM 집단은 방금 쓴 글을 인용하지 못하는 경우가 많았고 글에 대한 소유감도 낮았다. 4회차에 LLM을 빼앗긴 참가자는 낮은 연결성을 보였고, 반대로 처음엔 혼자 쓰다가 LLM을 받은 참가자는 높은 연결성을 유지했다.

쉽게 운전을 내비게이션에만 맡기면 길을 못 외우는 것처럼, 글쓰기를 AI에 맡기면 생각한 흔적이 머리에 남지 않는다.

교실 초안과 핵심 논지는 먼저 학생 스스로 만들고, AI는 그 다음 단계(피드백, 다듬기)에서 쓰게 한다.

주의 동료 심사 전 프리프린트이며 표본이 작다(최종 세션 18명). 결과를 일반화할 때 주의가 필요하다.

← Risko 2016, Bastani 2025

메타인지적 게으름을 경계하라 Fan 2025

Yizhou Fan et al.. Beware of metacognitive laziness: Effects of generative artificial intelligence on learning motivation, processes, and performance · doi:10.1111/bjet.13544 · 인용 1,564회

의의 생성형 AI가 과제 결과물은 좋게 만들지만 지식 습득과 전이는 늘리지 못하고, 학습자의 자기조절 과정을 건너뛰게 한다는 "메타인지적 게으름"을 보고했다.

핵심 대학생 117명이 글쓰기 과제를 하며 ChatGPT, 인간 전문가, 작문 분석 도구, 지원 없음 중 하나의 도움을 받았다. ChatGPT 집단은 에세이 점수가 가장 많이 올랐지만 지식 습득과 전이에서는 다른 집단과 차이가 없었다. 학습 과정 분석에서 ChatGPT 집단은 계획, 점검, 평가 같은 메타인지 활동을 AI에 의존하는 경향을 보였다.

쉽게 AI가 대신 노를 저어 주면 배는 빨리 가지만 내 팔 근육은 그대로다.

교실 AI 도움을 받은 과제에도 "내가 무엇을 계획하고, 어디서 점검했는가"를 적는 성찰 단계를 남긴다.

← Risko 2016, Zimmerman 2002

생성형 AI가 비판적 사고에 미치는 영향 Lee 2025

Hao-Ping (Hank) Lee et al.. The impact of generative AI on critical thinking: Self-reported reductions in cognitive effort and confidence effects from a survey of knowledge workers · doi:10.1145/3706598.3713778 · 인용 1,429회

의의 생성형 AI에 대한 신뢰가 높을수록 비판적 사고를 덜 한다는 상관을 보고한 마이크로소프트 리서치와 카네기멜런대의 CHI 2025 연구다.

핵심 지식 노동자 319명이 생성형 AI를 업무에 쓴 실제 사례 936개를 분석했다. AI의 능력을 신뢰할수록 비판적 사고를 덜 했고, 자기 능력에 대한 확신이 클수록 비판적 사고를 더 했다. 비판적 사고의 초점은 정보 수집과 문제 해결에서 AI 응답의 검증, 통합, 관리 쪽으로 옮겨 갔다.

쉽게 자동 조종을 믿을수록 조종사가 계기판을 덜 보게 되는 것과 같다.

교실 AI 결과물을 그대로 쓰지 않고 "근거 확인, 반례 찾기, 내 말로 고치기"를 필수 단계로 둔다.

주의 자기 보고 설문에 기반한 상관 연구라 인과를 단정할 수 없다.

← Risko 2016, Clark 1998

투어, 계보를 따라 읽기

작업기억에서 인지부하이론까지

머릿속 작업 공간이 좁다는 발견이 어떻게 교실 수업 설계의 원리가 되었는지 따라간다.

1. **마법의 수 7±2** Miller 1956
   1956년, 밀러는 사람이 한 번에 붙잡을 수 있는 항목이 7개 안팎이고, 덩어리(청크)로 묶으면 더 많이 담을 수 있다고 정리했다. 모든 이야기는 이 "좁은 문"에서 시작한다.
2. **작업기억** Baddeley 1974
   배들리와 히치는 그 좁은 공간이 하나가 아니라 소리를 다루는 방과 그림을 다루는 방으로 나뉜다고 보았다. 이 구분은 훗날 "그림에는 말로 설명하라"는 원리가 된다.
3. **체스에서의 지각** Chase 1973
   체스 마스터의 비밀은 큰 작업기억이 아니라 장기기억 속 수만 개의 패턴이었다. 전문성은 좁은 문을 넓히는 것이 아니라 문을 통과하는 짐을 크게 묶는 일이다.
4. **문제해결 중 인지부하와 학습** Sweller 1988
   스웰러는 이 두 사실을 합쳤다. 초보자가 문제를 풀며 쩔쩔매는 동안 작업기억이 가득 차, 정작 패턴(스키마)은 남지 않는다.
   인지부하이론의 탄생이다.
5. **인지부하이론과 교수 자료 형식** Chandler 1991
   그렇다면 자료 디자인만 바꿔도 부하를 줄일 수 있다. 그림과 설명을 붙여 놓고, 중복된 글은 빼는 것만으로 학습이 달라졌다.
6. **인지 구조와 교수설계** Sweller 1998
   1998년, 이론은 내재적·외재적·본유적 부하라는 세 범주와 효과 목록을 갖춘 교수설계 이론으로 정식화되었다.
7. **전문성 역전 효과** Kalyuga 2003
   그러나 좋은 설계는 학습자에 따라 뒤집힌다. 초보자에게 꼭 필요한 안내가 숙련자에게는 방해가 된다. 전문성 역전 효과다.
8. **인지 구조와 교수설계, 20년 후** Sweller 2019
   20년 뒤 이론은 진화적 관점과 요소 상호작용성으로 다시 정리되었다. 좁은 문에서 시작한 이야기가 교수설계의 지도가 된 것이다.

인출 연습과 바람직한 어려움

"꺼내 보는 것이 넣는 것보다 강하다"는 생각이 140년에 걸쳐 증명된 과정.

1. **기억에 관하여** Ebbinghaus 1885
   에빙하우스는 스스로 실험 대상이 되어 망각곡선을 그렸고, 반복을 나누면 더 오래 남는다는 것도 이미 알아차렸다.
2. **생성 효과** Slamecka 1978
   100년 가까이 지나, 읽기만 한 단어보다 스스로 만들어 낸 단어가 더 잘 기억된다는 생성 효과가 정립되었다.
3. **인간 훈련에서의 기억과 메타기억 고려사항** Bjork 1994
   비요크는 이 현상들을 "바람직한 어려움"으로 묶었다. 연습을 어렵게 만드는 조건이 당장은 수행을 떨어뜨리지만 오래 남는 학습을 만든다.
4. **시험을 통한 학습 증진** Roediger 2006
   로디거와 카피키는 반복 읽기보다 시험 보기가 일주일 뒤 기억을 크게 높인다는 것을 보였다. 학생들은 정반대로 예측했다.
5. **학습에서 인출의 결정적 중요성** Karpicke 2008
   한 번 맞힌 단어도 계속 시험해야 남는다. 맞혔다고 단어장에서 지우는 습관이 기억을 무너뜨린다.
6. **수학 문제 섞기가 학습을 향상시킨다** Rohrer 2007
   수학 문제도 유형별로 몰아 풀기보다 섞어 풀 때 시험 성적이 세 배 가까이 높았다. 연습 때의 쉬움은 착각이었다.
7. **효과적인 학습 기법으로 학생 학습 향상하기** Dunlosky 2013
   던로스키 연구진은 10가지 학습 기법을 평가해 연습 시험과 분산 연습에 "높은 효용"을 주었다. 학생들이 가장 많이 쓰는 밑줄과 반복 읽기는 "낮은 효용"이었다.

몸으로 생각하기

생각은 머릿속 계산만이 아니라 몸과 행동과 환경에 걸쳐 일어난다는 체화된 인지의 흐름.

1. **시지각에 대한 생태학적 접근** Gibson 1979
   깁슨은 우리가 세계를 "할 수 있는 행동"으로 지각한다고 보았다. 의자는 앉을 수 있음을, 손잡이는 잡을 수 있음을 직접 드러낸다(어포던스).
2. **삶으로서의 은유** Lakoff 1980
   레이코프와 존슨은 "기분이 올라간다", "시간을 아낀다" 같은 말 속에서 추상적 사고가 몸의 경험에 뿌리내리고 있음을 보였다.
3. **기억은 무엇을 위한 것인가** Glenberg 1997
   글렌버그는 기억이 정보 창고가 아니라 행동을 위한 것이라고 주장했다. 문장 이해란 묘사된 행동을 몸 수준에서 맞물려 보는 일이다.
4. **지각적 기호 체계** Barsalou 1999
   바살로우는 개념이 감각운동 경험의 재현(시뮬레이션)이라는 지각적 기호 이론을 세웠다. "레몬"을 생각하면 침이 고이는 이유다.
5. **수학 설명하기, 몸짓은 부하를 덜어 준다** Goldin-Meadow 2001
   교실로 오면, 수학 풀이를 설명하며 몸짓을 한 아이들이 동시에 외운 단어를 더 많이 기억했다. 몸짓이 작업기억의 짐을 덜어 준 것이다.
6. **몸짓은 학습을 오래가게 한다** Cook 2008
   몸짓을 따라 하며 배운 아이들은 4주 뒤에도 배운 것을 기억했다. 몸은 학습을 오래 붙잡아 두는 닻이다.
7. **인지부하이론의 진화적 업그레이드** Paas 2012
   파스와 스웰러는 이 결과를 인지부하이론으로 끌어들였다. 몸의 움직임처럼 진화적으로 익숙한 능력은 작업기억을 적게 쓰며 학습을 도울 수 있다.
8. **체화 이론과 교육** Kiefer 2012
   키퍼와 트럼프는 손글씨, 손가락 수 세기처럼 감각운동이 풍부한 학습이 개념 표상을 강화한다는 교육적 함의를 정리했다.

안내냐 탐구냐, 가장 뜨거운 논쟁

"가르쳐 줄 것인가, 발견하게 할 것인가." 학습과학에서 가장 오래되고 뜨거운 논쟁을 따라간다.

1. **발견의 행위** Bruner 1961
   브루너는 스스로 원리를 발견할 때 지적 능력과 내적 동기가 자란다며 발견학습을 주창했다.
2. **순수 발견학습에 삼진아웃을 적용해야 하는가?** Mayer 2004
   40여 년 뒤 메이어는 연구를 검토해 "순수" 발견학습은 안내된 발견보다 일관되게 효과가 낮다고 정리했다. 손이 바쁜 것과 머리가 바쁜 것은 다르다.
3. **최소 안내 교수가 효과가 없는 이유** Kirschner 2006
   커슈너, 스웰러, 클라크는 한 걸음 더 나아가 최소 안내 교수 전반이 인간 인지 구조와 맞지 않는다고 비판했다. 논쟁에 불이 붙었다.
4. **문제기반·탐구 학습의 비계와 성취** Hmelo-Silver 2007
   반론은 곧바로 나왔다. 문제기반학습과 탐구학습은 실제로는 최소 안내가 아니라 상당한 비계를 갖춘 수업이라는 것이다.
5. **설명할 때** Schwartz 1998
   사실 그 이전에 슈워츠와 브랜스퍼드는 "언제 설명하는가"라는 질문을 던졌다. 대조 사례를 먼저 분석한 학생이 설명을 더 잘 알아들었다.
6. **생산적 실패** Kapur 2008
   카푸르는 지원 없이 먼저 씨름하다 실패한 모둠이 이후 문제를 더 잘 푼다는 "생산적 실패"를 보고했다. 이후 탐색 뒤 교수를 붙이는 설계로 발전했다.
7. **ICAP 프레임워크** Chi 2014
   논쟁은 "안내의 양"에서 "학습자가 무엇을 생각하게 되는가"로 옮겨 간다. ICAP 프레임워크는 그 기준을 행동 수준으로 제시했다.

튜터의 꿈, 티칭 머신에서 AI 튜터까지

모든 학생에게 좋은 개인 교사를. 70년 동안 이어진 꿈과 그 최신 실험 결과.

1. **학습의 과학과 교수의 기술** Skinner 1954
   스키너는 교사 한 명이 30명에게 즉각적 피드백을 줄 수 없다는 문제를 기계로 풀고자 했다. 티칭 머신의 등장이다.
2. **2 시그마 문제** Bloom 1984
   블룸은 1:1 튜터링이 일반 수업보다 2 표준편차 높은 성취를 낸다며, 교실 규모에서 이를 재현하는 것을 교육 연구의 과제로 제시했다.
3. **지식 추적** Corbett 1994
   코벳과 앤더슨은 학생이 각 기술을 숙달했을 확률을 실시간으로 추정하는 지식 추적을 개발했다. 기계가 학생의 마음을 모델링하기 시작했다.
4. **인지 튜터, 얻은 교훈** Anderson 1995
   인지 튜터는 학생 풀이를 한 단계씩 인지 모형과 대조하며 피드백을 주었고, 실제 학교에 보급되었다.
5. **인간 튜터링과 지능형 튜터링 시스템의 상대적 효과** VanLehn 2011
   반레인의 메타분석은 단계 기반 지능형 튜터가 인간 튜터에 거의 근접한다는 것을 보였다. 다만 2시그마는 과대평가였다.
6. **튜터 코파일럿, 인간-AI 협업 튜터링** Wang 2024
   생성형 AI 시대, 한 실험은 AI가 학생 대신 초보 튜터를 돕게 했다. 그 튜터의 학생들이 더 많이 숙달했다.
7. **안전장치 없는 생성형 AI는 학습을 해칠 수 있다** Bastani 2025
   그러나 안전장치 없는 GPT-4를 쓴 고등학생들은 연습 점수는 올랐지만 AI 없는 시험에서 17% 낮은 점수를 받았다. 답을 바로 주는 AI는 목발이 되었다.
8. **AI 튜터링이 교실 능동학습보다 효과적이다** Kestin 2025
   반대로 학습과학 원리대로 설계한 AI 튜터는 우수한 능동학습 수업보다 두 배 넘는 학습 향상을 보였다. 도구가 아니라 설계가 결과를 갈랐다.

AI 시대, 생각을 어디까지 맡길 것인가

마음은 도구로 확장된다. 그렇다면 AI에 맡겨도 되는 것과 머릿속에 남겨야 하는 것의 경계는 어디인가.

1. **확장된 마음** Clark 1998
   클라크와 차머스는 늘 쓰는 노트가 기억의 일부일 수 있다는 "확장된 마음"을 제안했다. 도구와 결합된 사고는 인간 인지의 본성이다.
2. **인지적 오프로딩** Risko 2016
   리스코와 길버트는 메모, 알림, 검색처럼 생각을 바깥으로 넘기는 인지적 오프로딩을 정리했다. 수행은 좋아지지만 맡긴 것은 머리에 덜 남는다.
3. **자기조절 학습, 믿음, 기법, 착각** Bjork 2013
   학습자는 술술 읽히는 느낌을 아는 것으로 착각한다. AI가 만든 매끈한 답은 이 착각을 더 키울 수 있다.
4. **ChatGPT를 쓴 뇌, 인지적 부채의 누적** Kosmyna 2025
   MIT 연구진은 LLM으로 글을 쓴 참가자들의 뇌 연결성이 낮고, 방금 쓴 글도 잘 기억하지 못한다고 보고했다. "인지적 부채"라는 말이 퍼졌다.
5. **메타인지적 게으름을 경계하라** Fan 2025
   다른 실험에서 ChatGPT의 도움을 받은 학생들은 에세이 점수는 올랐지만 지식 습득은 늘지 않았고, 계획과 점검을 AI에 넘기는 "메타인지적 게으름"을 보였다.
6. **생성형 AI가 비판적 사고에 미치는 영향** Lee 2025
   지식 노동자 조사에서도 AI를 믿을수록 비판적 사고를 덜 했다. 생각의 역할이 "만들기"에서 "검증하기"로 옮겨 가고 있다.
7. **안전장치 없는 생성형 AI는 학습을 해칠 수 있다** Bastani 2025
   고등학교 현장 실험은 결론을 분명히 했다. 답을 주는 AI는 학습을 해치고, 힌트로 이끄는 AI는 그 피해를 막는다. 무엇을 맡길지는 설계의 문제다.

학습하는 뇌, 시냅스에서 예측까지

"함께 발화하는 뉴런은 함께 연결된다"에서 "뇌는 예측 기계다"까지, 학습의 신경과학.

1. **행동의 조직** Hebb 1949
   헵은 반복해서 함께 활성화되는 뉴런 사이의 연결이 강해진다고 제안했다. 학습의 신경 이론이 시작되었다.
2. **공간 지도로서의 해마** O'Keefe 1971
   오키프는 쥐가 특정 장소에 있을 때만 발화하는 해마의 장소 세포를 발견했다. 톨먼의 인지도가 뇌 속에 실재했다.
3. **장기 강화(LTP)의 발견** Bliss 1973
   블리스와 뢰모는 짧은 고빈도 자극이 시냅스를 오래 강화하는 장기 강화(LTP)를 보고했다. 헵의 가설이 실험으로 확인되었다.
4. **오차 역전파로 표상 학습하기** Rumelhart 1986
   역전파 알고리즘은 신경망이 오차로부터 스스로 표상을 배울 수 있음을 보였다. 오늘날 딥러닝의 뿌리다.
5. **상보적 학습 시스템 이론** McClelland 1995
   상보적 학습 시스템 이론은 해마가 빠르게 저장하고 신피질이 천천히 통합하는 이유를 설명했다.
6. **예측과 보상의 신경 기질** Schultz 1997
   도파민 뉴런은 보상 자체가 아니라 "예측과 실제의 차이"에 반응했다. 학습은 예측이 틀릴 때 일어난다.
7. **수면의 기억 기능** Diekelmann 2010
   잠자는 동안 해마의 기억이 재활성화되며 피질로 옮겨진다. 수면은 학습의 일부다.
8. **자유에너지 원리** Friston 2010
   프리스턴은 지각, 학습, 행동을 모두 예측 오류 최소화로 설명하는 자유에너지 원리를 제시했다.
9. **다음은 무엇? 예측하는 뇌, 상황 속 행위자** Clark 2013
   클라크는 예측하는 뇌가 몸과 환경을 적극 활용하는 행위자 속에서 작동한다며, 신경과학과 체화된 인지를 연결했다.

학습자 마음의 엔진, 메타인지와 동기

무엇을 아는지 아는 힘, 해낼 수 있다는 믿음, 하고 싶은 마음. 학습을 움직이는 엔진들.

1. **자기효능감, 행동 변화의 통합 이론** Bandura 1977
   반두라는 "나는 해낼 수 있다"는 자기효능감이 행동을 예측하며, 직접 성공 경험이 가장 강력한 원천이라고 보았다.
2. **메타인지와 인지적 점검** Flavell 1979
   플라벨은 생각에 대한 생각, 메타인지라는 연구 분야를 열었다. 어린 아이일수록 자신이 모른다는 것을 모른다.
3. **동기와 성격에 대한 사회인지적 접근** Dweck 1988
   드웩과 레깃은 실패 앞에서 무너지는 학생과 도전하는 학생의 차이를 목표와 지능관으로 설명했다.
4. **메타기억, 이론적 틀과 새로운 발견** Nelson 1990
   넬슨과 나렌스는 메타인지를 "점검"과 "통제"의 구조로 정리했다. 점검이 틀리면 공부 계획도 틀린다.
5. **자기결정성 이론과 내적 동기** Ryan 2000
   라이언과 데시는 자율성, 유능감, 관계성이라는 세 욕구가 채워질 때 내적 동기가 자란다고 정리했다.
6. **자기조절 학습자 되기** Zimmerman 2002
   짐머만은 계획, 수행, 성찰이 순환하는 자기조절학습 모형을 교사들을 위해 압축했다. 이 기술은 가르칠 수 있다.
7. **지능에 대한 암묵적 이론과 성취** Blackwell 2007
   성장 마인드셋을 가진 중학생의 수학 성적이 시간이 갈수록 올랐다는 연구가 큰 반향을 일으켰다.
8. **전국 실험으로 본 성장 마인드셋의 효과** Yeager 2019
   전국 1만 2천 명 실험은 짧은 마인드셋 개입이 저성취 학생에게 작지만 의미 있는 효과를 내며, 학교 문화가 효과를 좌우한다는 것을 보였다.

평가와 피드백, 배움을 보이게 하기

시험은 성적표일 뿐인가? 평가와 피드백이 배움의 엔진이 되기까지의 흐름.

1. **교육목표 분류학** Bloom 1956
   블룸 연구진은 시험 문항이 단순 기억에만 몰려 있다는 문제의식에서 교육목표를 사고 수준별로 분류했다. 무엇을 평가할지에 대한 공용어가 생겼다.
2. **2 시그마 문제** Bloom 1984
   블룸은 형성평가와 교정 학습을 결합한 완전학습이 일반 수업보다 1 표준편차 높은 성취를 낸다고 보고하며, 튜터링 수준의 효과를 교실에서 찾자고 제안했다.
3. **피드백 개입이 수행에 미치는 효과** Kluger 1996
   그런데 피드백이 늘 좋은 것은 아니었다. 메타분석에서 피드백의 38%는 오히려 수행을 떨어뜨렸다. 주의를 과제에서 "나"로 옮기는 피드백이 문제였다.
4. **평가와 교실 학습 (형성평가)** Black 1998
   블랙과 윌리엄은 수업 중 이해를 확인하고 가르침을 조정하는 형성평가가 큰 성취 향상을 낳는다고 정리했다. "학습을 위한 평가" 운동이 시작되었다.
5. **피드백의 힘** Hattie 2007
   해티와 팀펄리는 좋은 피드백이 답해야 할 세 질문(어디로 가는가, 어떻게 가고 있는가, 다음은 무엇인가)과 네 수준을 정리했다.
6. **교실에서의 시험 효과** Roediger 2011
   평가는 측정만 하는 것이 아니다. 중학교 교실에서 저부담 퀴즈를 본 내용은 학기말까지 더 잘 남았다. 시험 자체가 학습이다.
7. **수업의 원리, 모든 교사가 알아야 할 연구 기반 전략** Rosenshine 2012
   로젠샤인의 수업 원리에는 "이해 확인하기"와 "높은 성공률 확보하기"가 들어 있다. 평가와 피드백은 이제 수업의 한가운데 있다.

읽고 셈하는 뇌, 읽기와 수의 과학

말하기는 저절로 배우지만 읽기와 수학은 가르쳐야 한다. 문화적 발명을 배우는 뇌의 과학.

1. **해독, 읽기, 읽기 장애 (읽기의 단순 관점)** Gough 1986
   고프와 턴머는 읽기 이해를 "해독 × 언어 이해"로 설명했다. 둘 중 하나가 0이면 읽기도 0이다.
2. **떠오르는 마음, 아동 사고의 변화 과정** Siegler 1996
   시글러는 아이들이 여러 전략을 겹쳐 쓰며 서서히 더 나은 전략으로 옮겨 간다는 중첩 파도 이론을 제시했다.
3. **수 감각** Dehaene 1997
   드앤은 사람과 동물이 타고나는 어림 수 감각과 그 뇌 기반(두정엽)을 소개했다. 정확한 계산은 그 위에 문화가 쌓은 것이다.
4. **미국 국가읽기위원회 보고서** Panel 2000
   미국 국가읽기위원회는 체계적인 파닉스 교육이 초기 읽기에 뚜렷한 효과가 있다고 결론지었다.
5. **피질 지도의 문화적 재활용** Dehaene 2007
   읽기는 너무 최근의 발명이라 전용 뇌 영역이 진화할 수 없었다. 대신 사물 인식 회로가 문자 인식으로 "재활용"된다.
6. **숫자 보드게임으로 저소득층 아동의 수 지식 높이기** Ramani 2008
   일직선 숫자 보드게임 몇 판이 유아의 수 감각을 크게 높였다. 수의 크기가 공간과 몸의 움직임으로 연결된 덕분이다.
7. **읽기 전쟁을 끝내자** Castles 2018
   읽기 전쟁을 끝내자는 개관은 초기에는 체계적 해독 교육, 이후에는 폭넓은 독서와 어휘, 배경지식이 필요하다고 정리했다.

개념 사전

기억과 인지 구조

작업기억 working memory
지금 이 순간 정보를 붙잡아 두고 조작하는 머릿속 작업대. 용량이 매우 작아(약 4개 덩어리) 학습의 병목이 된다. → Miller 1956, Baddeley 1974, Cowan 2001, Engle 2002

청킹 chunking
여러 정보를 의미 있는 한 덩어리로 묶는 것. 전문가는 큰 덩어리로 묶어 좁은 작업기억을 넓게 쓴다. → Miller 1956, Chase 1973

장기기억 long-term memory
사실상 용량 제한이 없는 지식의 저장소. 학습이란 결국 장기기억의 변화다. → Atkinson 1968, Tulving 1972, Sweller 1998

일화기억과 의미기억 episodic & semantic memory
"언제, 어디서"가 붙은 개인 경험의 기억과, 맥락에서 떨어진 일반 지식의 기억. → Tulving 1972, McClelland 1995

스키마 schema
경험에서 추려진 지식의 틀. 새 정보를 해석하는 렌즈이자 빈칸을 채우는 기본값 역할을 한다. → Bartlett 1932, Rumelhart 1980, Sweller 1988

처리 수준 levels of processing
얼마나 깊이(의미 중심으로) 생각했는지가 기억의 지속성을 좌우한다는 원리. → Craik 1972

부호화 특수성 encoding specificity
배울 때 함께 저장된 단서가 인출할 때 주어져야 잘 떠오른다는 원리. → Tulving 1973

확산 활성화 spreading activation
한 개념이 떠오르면 연결된 개념들도 함께 활성화되는 머릿속 그물망의 작동 방식. → Collins 1975

자동화 automaticity
충분히 연습한 처리가 주의를 거의 쓰지 않고 저절로 일어나는 상태. 기초 기능의 자동화가 고차 사고의 여유를 만든다. → Schneider 1977, Anderson 1996

주의 attention
한정된 처리 자원을 어디에 쓸지 고르는 기능. 필터, 자원, 특징을 묶는 접착제 등으로 설명된다. → Broadbent 1958, Kahneman 1973, Treisman 1980, Ophir 2009

시스템 1과 시스템 2 dual process
빠르고 직관적인 사고와 느리고 신중한 사고의 두 방식. → Tversky 1974, Kahneman 2011

인지부하와 수업 설계

인지부하 cognitive load
학습 중 작업기억에 걸리는 부담. 내용 자체의 복잡성(내재적)과 나쁜 설계에서 오는 부담(외재적)으로 나눈다. → Sweller 1988, Sweller 1994, Sweller 1998, Sweller 2019

요소 상호작용성 element interactivity
동시에 함께 고려해야 하는 요소의 수. 이것이 많을수록 내용이 본질적으로 어렵다. → Sweller 1994, Sweller 2019

풀이 예제 효과 worked example effect
초보자는 문제를 직접 푸는 것보다 완성된 풀이를 공부할 때 더 잘 배운다는 효과. → Sweller 1985, Paas 1992, Kalyuga 2003

주의 분산 효과 split-attention effect
서로 참조해야 하는 그림과 글이 떨어져 있으면 머릿속에서 맞추느라 학습이 방해된다는 효과. → Chandler 1991, Mayer 2003

양식 효과와 이중 채널 modality effect
그림을 볼 때 설명은 화면 글보다 말로 들려줄 때 두 채널을 나눠 써서 더 잘 배운다는 효과. → Baddeley 1974, Mayer 2001, Mayer 2003

이중부호화 dual coding
말과 이미지 두 방식으로 함께 저장된 정보가 더 잘 기억된다는 이론. → Clark 1991, Mayer 2001

전문성 역전 효과 expertise reversal
초보자에게 좋은 안내가 숙련자에게는 오히려 방해가 되는 현상. 비계를 점차 걷어내야 하는 이유다. → Kalyuga 2003

명시적 교수 explicit instruction
목표를 분명히 하고 시범, 안내된 연습, 독립 연습으로 체계적으로 가르치는 방식. → Kirschner 2006, Rosenshine 2012

생산적 실패 productive failure
정식 설명 전에 먼저 문제와 씨름하며 실패해 보는 경험이 이후 학습의 밑거름이 된다는 관점. → Schwartz 1998, Kapur 2008

오래 남는 공부법

인출 연습 (시험 효과) retrieval practice
다시 읽기보다 기억에서 꺼내 보는 연습이 훨씬 오래 남는다는 원리. → Roediger 2006, Karpicke 2008, Karpicke 2011, Roediger 2011

분산 효과 spacing effect
같은 양을 공부해도 몰아서 하기보다 간격을 두고 나누어 할 때 오래 기억된다는 효과. → Ebbinghaus 1885, Cepeda 2006

교차 연습 interleaving
같은 유형을 몰아 연습하지 않고 여러 유형을 섞어 연습하는 방법. "무엇을 써야 하는지" 고르는 힘이 생긴다. → Rohrer 2007, Kornell 2008

바람직한 어려움 desirable difficulties
당장은 수행을 떨어뜨리지만 장기 학습을 높이는 어려움(인출, 분산, 교차 등). → Bjork 1994, Bjork 2013

생성 효과와 생성적 학습 generation effect
스스로 만들어 낸 정보가 읽기만 한 정보보다 잘 기억된다는 효과와, 이를 활용한 요약, 그리기, 가르치기 같은 전략. → Slamecka 1978, Fiorella 2016

학습 착각 illusions of competence
술술 읽히는 느낌(유창성)을 실제로 아는 것으로 착각하는 현상. → Bjork 2013, Kornell 2008, Roediger 2006

학습 양식 신화 learning styles myth
시각형, 청각형처럼 개인 양식에 맞춰 가르치면 효과가 있다는 믿음. 실증 근거가 없다. → Pashler 2008, Kirschner 2013, Howard-Jones 2014

구성과 참여

구성주의 constructivism
지식은 전달되는 것이 아니라 학습자가 기존 지식 위에 스스로 구성하는 것이라는 관점. → Piaget 1964, Bruner 1961, Papert 1980

근접발달영역 zone of proximal development
혼자서는 못 하지만 도움을 받으면 할 수 있는 영역. 가르침이 발달을 이끄는 지점이다. → Vygotsky 1978

비계 scaffolding
학습자가 혼자 할 수 없는 부분만 임시로 돕고, 할 수 있게 되면 걷어 내는 지원. → Wood 1976, Collins 1989

인지적 도제 cognitive apprenticeship
전문가의 보이지 않는 사고 과정을 시범, 코칭, 명료화로 드러내 가르치는 방법. → Collins 1989, Brown 1989

상황학습과 실천 공동체 situated learning
학습은 지식이 실제로 쓰이는 공동체의 활동에 참여하며 일어난다는 관점. → Brown 1989, Lave 1991

개념 변화 conceptual change
기존의 오개념이 과학적 개념으로 바뀌는 과정. 불만족, 이해 가능성, 그럴듯함, 생산성이 조건이다. → Posner 1982, Vosniadou 1992

자기 설명 self-explanation
예제나 글을 공부하며 "왜 그런지" 스스로 설명하는 활동. 깊은 이해를 만든다. → Chi 1989, Fiorella 2016

ICAP ICAP framework
참여를 수동적, 능동적, 구성적, 상호작용적으로 나누고 뒤로 갈수록 학습이 깊어진다는 틀. → Chi 2014

유추와 전이 analogy & transfer
배운 것을 새 상황에 적용하는 것. 겉모습이 아니라 관계 구조를 볼 때 일어나며 저절로 일어나지 않는다. → Gick 1980, Gentner 1983, Barnett 2002

협동 학습 cooperative learning
긍정적 상호의존과 개별 책무성이 갖춰진 모둠 학습. → Johnson 2009, Crouch 2001

관찰 학습 observational learning
직접 보상을 받지 않아도 남의 행동을 보는 것만으로 배우는 학습. → Bandura 1961, Rizzolatti 2004

평가와 피드백

형성평가 formative assessment
수업 중 학생의 이해를 확인하고 그 정보로 가르침을 조정하는 평가. → Black 1998, Bloom 1984

피드백 feedback
현재 수행과 목표의 차이를 줄이는 정보. 과제와 과정을 향할 때 효과적이고, "나"를 향할 때 역효과가 날 수 있다. → Kluger 1996, Hattie 2007

교육목표 분류학 Bloom's taxonomy
기억에서 창안까지 사고 수준에 따라 교육목표를 분류한 틀. → Bloom 1956

학습자의 마음

메타인지 metacognition
자기 생각과 학습을 점검하고 조절하는 "생각에 대한 생각". → Flavell 1979, Nelson 1990, Bjork 2013

자기조절학습 self-regulated learning
계획, 수행 중 점검, 성찰을 스스로 순환하며 학습을 이끄는 과정. → Zimmerman 2002, Fan 2025

실행기능 executive functions
억제 통제, 작업기억, 인지적 유연성으로 이루어진 마음의 관제 기능. → Diamond 2013, Engle 2002

자기효능감 self-efficacy
특정 과제를 해낼 수 있다는 믿음. 직접 성공 경험이 가장 강력한 원천이다. → Bandura 1977

내적 동기와 자기결정성 self-determination
자율성, 유능감, 관계성이 채워질 때 스스로 하고 싶은 마음이 자란다는 이론. → Ryan 2000, Csikszentmihalyi 1990

기대-가치 expectancy-value
"할 수 있을까"와 "할 가치가 있을까"가 선택과 노력을 이끈다는 동기 이론. → Wigfield 2000

성장 마인드셋 growth mindset
능력은 노력과 전략으로 자란다는 믿음. 효과는 작지만 저성취 학생과 지지적 학교에서 의미가 있다. → Dweck 1988, Blackwell 2007, Yeager 2019

고정관념 위협 stereotype threat
자기 집단에 대한 부정적 고정관념을 의식할 때 수행이 떨어지는 현상. 효과 크기는 논쟁 중이다. → Steele 1995

호기심 curiosity
정보의 빈틈을 채우고 싶은 상태. 도파민 회로를 통해 기억을 강화한다. → Gruber 2014

몸과 환경

체화된 인지 embodied cognition
생각은 머릿속 계산만이 아니라 몸의 감각과 행동에 뿌리를 둔다는 관점. → Varela 1991, Wilson 2002, Barsalou 2008

어포던스 affordance
환경이 행위자에게 제공하는 행동 가능성. 손잡이는 "잡을 수 있음"을 드러낸다. → Gibson 1979

개념적 은유 conceptual metaphor
추상적 개념을 몸의 경험(위-아래, 안-밖, 움직임)에 빗대어 이해하는 사고 방식. → Lakoff 1980, Lakoff 2000

근거 인지와 시뮬레이션 grounded cognition
개념을 떠올리는 것은 그 대상을 경험할 때의 감각운동 상태를 부분적으로 재현하는 것이라는 이론. → Barsalou 1999, Barsalou 2008, Glenberg 1997

제스처와 학습 gesture
몸짓이 말하는 사람의 작업기억 부담을 덜고, 배운 내용을 오래 남게 한다. → Goldin-Meadow 2001, Cook 2008

확장된 마음 extended mind
노트, 도구처럼 믿을 만하게 쓰이는 외부 자원도 인지의 일부일 수 있다는 주장. → Clark 1998

분산 인지 distributed cognition
인지가 개인의 머리가 아니라 사람, 도구, 절차가 맞물린 체계 전체에서 일어난다는 관점. → Hutchins 1995

인지적 오프로딩 cognitive offloading
메모, 검색, AI처럼 생각의 부담을 외부로 넘기는 것. 수행은 돕지만 맡긴 것은 머리에 덜 남는다. → Risko 2016, Fan 2025, Lee 2025, Kosmyna 2025

뇌와 계산

시냅스 가소성과 장기 강화 synaptic plasticity, LTP
경험에 따라 뉴런 사이 연결의 세기가 바뀌는 성질. 학습의 세포 수준 기반이다. → Hebb 1949, Bliss 1973, Kandel 2001

기억 응고화 consolidation
갓 배운 기억이 해마에서 피질로 옮겨지며 안정되는 과정. 수면 중에 활발하다. → McClelland 1995, Diekelmann 2010

예측 오류 prediction error
예측과 실제의 차이. 뇌는 예측이 틀릴 때 배운다. → Schultz 1997, Friston 2010, Clark 2013

신경 재활용 neuronal recycling
읽기, 셈하기 같은 문화적 능력이 원래 다른 기능을 하던 뇌 회로를 재사용해 자리 잡는다는 가설. → Dehaene 2007, Dehaene 1997

읽기의 단순 관점과 파닉스 simple view of reading
읽기 이해 = 해독 × 언어 이해. 초기에는 소리-글자 대응을 체계적으로 가르치는 파닉스가 핵심이다. → Gough 1986, Panel 2000, Castles 2018

베이지안 인지 Bayesian cognition

사전 지식과 새 증거를 확률적으로 결합해 추론하고 배운다는 관점. → Tenenbaum 2011

연결주의 connectionism

단순한 단위들의 연결 강도가 학습되며 지식이 표상된다는 관점. 딥러닝의 뿌리다. → Rumelhart 1986, McClelland 1995

신경 신화 neuromyths

"뇌의 10%만 쓴다", "좌뇌형·우뇌형" 같은 근거 없는 뇌 관련 믿음. → Howard-Jones 2014, Pashler 2008

학습공학과 AI

지식 추적 knowledge tracing

학생의 응답 기록으로 각 기술의 숙달 확률을 추정하는 방법. → Corbett 1994, Piech 2015

지식 요소 knowledge component

학습 대상을 이루는 작은 지식 단위. 단위마다 맞는 교수법이 다르다. → Koedinger 2012, Anderson 1996

2 시그마 문제 2 sigma problem

1:1 튜터링 수준의 효과를 교실 규모에서 내는 방법을 찾는 교육공학의 오랜 과제. → Bloom 1984, VanLehn 2011, Kestin 2025

AI 튜터 설계 AI tutor design

답을 바로 주지 않고 질문과 힌트로 이끄는 설계가 학습을 지키는 핵심이다. → Bastani 2025, Kestin 2025, Jurenka 2024, Wang 2024, Lehmann 2024