기술

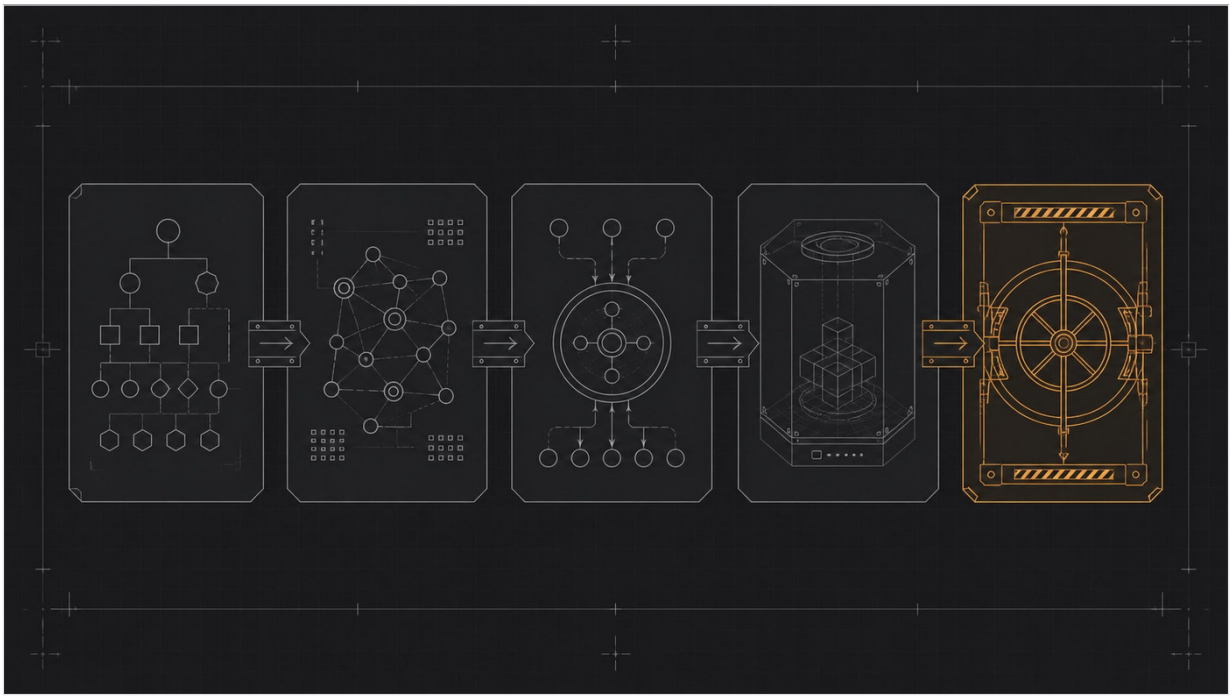
판단이 설비로 나가기까지

VEXPLOR가 인과를 다루는 방법

방동걸 (주)웨이스 대표이사

2026년 8월 19일

앞선 글에서 상관은 알람을 만들고 인과는 결정을 만든다는 이야기를 했습니다. 이 글은 그 구분을 제품에서 어떻게 구현했는지에 대한 기록입니다. 개념이 아니라 구성과 순서, 그리고 아직 안 된 것까지 적었습니다. 웨이스가 공장 운영체제 VEXPLOR를 만들며 직접 거친 과정입니다.



판단은 다섯 관을 지나야 설비로 나갑니다.

1. 인과 하나만 붙일 수는 없다

인과추론 모듈만 따로 사다 붙이면 될 것 같지만 실제로는 그렇게 되지 않습니다. 무엇이 무엇에 영향을 주는지를 계산하려면 그 전에 **무엇이 무엇인지**가 정해져 있어야 하기 때문입니다.

같은 설비를 ERP는 자산번호로, MES는 호기명으로, 현장은 별명으로 부릅니다. 이 상태에서 영향 관계를 계산하면 한 대상이 여러 대상으로 쪼개져 관계 자체가 성립하지 않습니다. 그래서 순서가 정해집니다.
용어를 맞추고, 근거를 찾아오고, 원인을 가려내고, 바꿔서 확인하고, 그다음에 내보냅니다.

VEXPLOR Suite를 6개 모듈로 나눈 것이 이 순서와 맞물려 있습니다. Logic Studio · Core · Insight · Connect · Vision · DataFlows이고, 아래 이야기는 Logic Studio의 온톨로지에서 시작해 Insight · Vision · Core로 이어지는 구간입니다.

---

2. 용어를 하나로 — 온톨로지

크로스 솔루션 온톨로지가 이기종 시스템의 분절된 코드를 의미 그래프로 매핑합니다. 현재 **시맨틱 관계 311개 이상, 관계 타입 22개**로 구성돼 있고, 9개 도메인 온톨로지를 CDC 파이프라인으로 Neo4j에 실시간 반영합니다.

이 단계가 지루해 보여서 건너뛰자는 이야기가 매번 나옵니다. 그런데 건너뛰면 뒤의 모든 단계가 같은 대상을 다른 대상으로 취급하기 시작합니다. 인과 계산의 정확도 문제가 아니라 계산 대상이 사라지는 문제입니다.

---

3. 근거를 찾아온다 — 하이브리드 GraphRAG

판단에는 근거가 필요하고, 근거는 한 곳에 있지 않습니다. 그래서 검색 경로를 나눠 두었습니다. 그래프·SQL·벡터·문서 **4-Way 코어**에 멀티홉 추론을 담당하는 **GoT RAG**를 더한 5경로 구성이고, 질문 유형에 따라 경로 가중치를 Thompson Sampling으로 조정합니다.

여러 경로가 같은 답을 가리키는지를 보고 환각을 걸러내는 구조이기도 합니다. 이 층에 대해서는 **「태그 기반 메타모델을 이용한 실시간 그래프 검색 증강 생성 시스템」(등록 제10-3003470호, 2026.08.06 등록)**으로 권리를 확보했습니다. 트랜잭션이 생기는 시점에 관계형 저장소와 지식그래프에 동시에 적재해 색인 지연을 없애는 방식입니다.

---

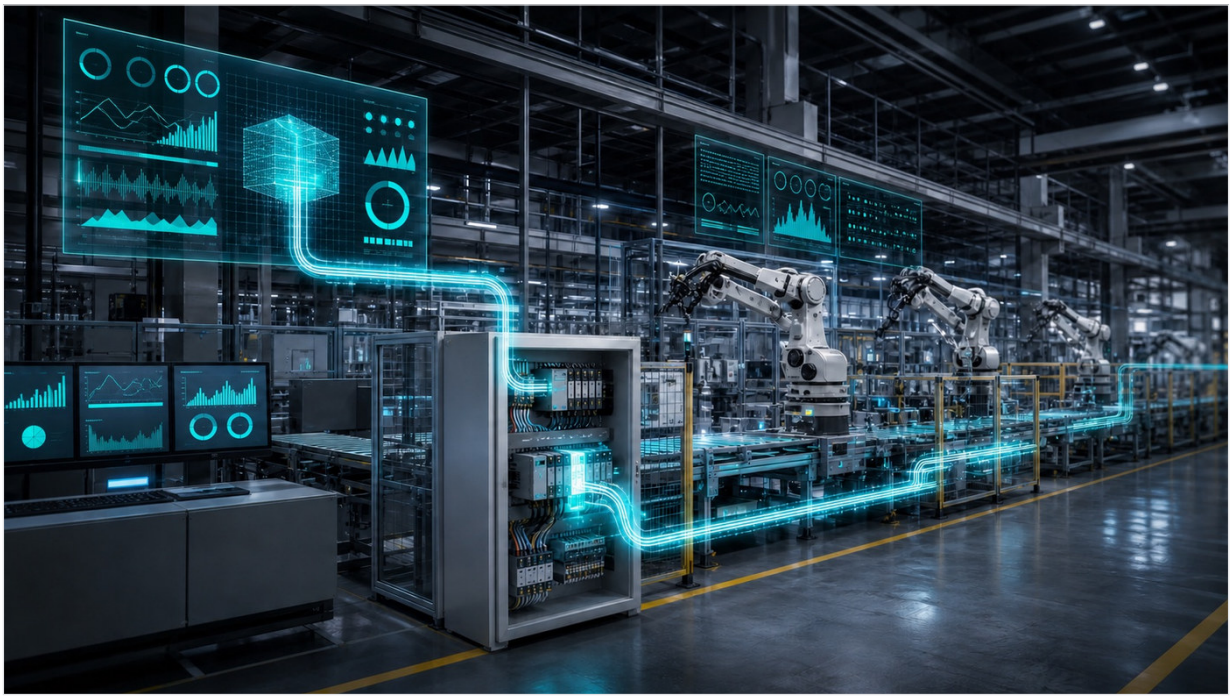
4. 원인을 가려낸다 — 뉴로심볼릭 인과추론

Insight 모듈이 담당하는 구간입니다. Pearl의 구조적 인과모델과 do-calculus를 기반으로 하고, 영향 관계 후보 탐색에 GNN 기반 causal discovery를, 불확실성 처리에 베이지안 네트워크를 사용합니다. 판단 근거를 사람에게 설명하는 데는 SHAP 계열 XAI를 붙였습니다.

여기서 답하려는 질문이 앞선 글의 그 질문입니다. **"이 조건을 바꾸면 불량률이 어떻게 되는가."** 상관 상위 변수를 나열하는 것이 아니라 개입했을 때의 효과를 추정하는 쪽입니다.

이 층을 실제 공급 사양으로 담은 현장이 2곳 있습니다. 도금 공정의 조건 보정에 do-calculus를 적용하는 건과, 구매·자재 영역에 GoT와 인과추론을 적용하는 건입니다. **둘 다 2026년 선정 후 구축 중이고, 아직**

결과 수치가 없습니다. 효과를 숫자로 말할 수 있는 단계가 아니라는 뜻이고, 이 글에서 그 숫자를 만들어 넣지 않았습니다.



트윈에서 통과한 판단만 설비에 닿습니다.

---

5. 바꿔서 확인한다 — 트윈에서 먼저 돌린다

인과를 확인하는 확실한 방법은 바꿔보는 것인데, 돌아가는 라인에서는 그 실험을 허락받기 어렵습니다. 그래서 Vision 모듈의 디지털트윈이 개입 실험을 먼저 받습니다. 이산사건 시뮬레이션과 에이전트 기반 시뮬레이션을 결합한 구성이고, 설비 고장·자재 지연·긴급 투입·병목 같은 What-If 시나리오를 병렬로 비교합니다.

여기에는 실측이 있습니다. **디지털트윈 시뮬레이션(DES) 정확도 85%(스피폭스 실증, 시간·자원·생산량 3지표 종합 산식)** 이고, 같은 현장에서 **프레스 186대·AMR 25대·EMS 6대를 동시 동기화**하는 구성까지 확인했습니다. 실시간 동기화 지연은 500밀리초 이하로 설계했습니다.

한 가지 분명히 해둘 것이 있습니다. 이 85%는 **공인시험 결과가 아니라 해당 현장의 실증값**입니다. 공인 인증은 2027년 일정으로 남아 있습니다.

6. 검증을 통과해야 나간다 — 안전 계층

Core 모듈이 마지막을 맡습니다. 원칙은 한 문장입니다. **검증 없는 제어 없음.** 판단 결과는 디지털트윈 가상 검증에 합격해야 설비로 전송되고, 그 앞에 SHACL 기반 물리 제약 검증이 위반 신호를 차단하도록 설계했습니다.

권한은 5단계로 나눠 두었습니다. 조회, 제안, 승인 후 실행, 정책 범위 내 자동 실행, 긴급 대응입니다. 현장 전개는 대체로 **1년차 제안, 2년차 승인 후 실행, 3년차 자동 실행** 순서를 밟습니다.

이 구조에서 실증을 마친 것은 **AI 판단을 실물 설비 PLC로 직접 내보내는 경로 자체**입니다. 경로가 열려 있다는 것과 사람 승인 없이 도는 상태는 다르고, 후자는 현장별로 아직 과업입니다. 자율 제어는 품질에 직결되는 공정부터, 그 앞에는 AI 판정을 숙련자 판정과 나란히 두고 비교만 하는 구간을 둡니다.

7. 하면서 바뀐 것 3가지

첫째, 인과 그림의 첫 산출물이 모델이 아니었습니다. 현장에 원인 후보를 물으면 어느 시스템에도 기록되지 않은 변수가 먼저 나옵니다. 그래서 실제로 손에 남는 것은 "지금 측정하지 않고 있는 것들의 목록"이고, 이게 나오면 계측 계획이 먼저 바뀝니다.

둘째, 관계마다 근거 등급을 나눠 적게 됐습니다. 화살표에 방향이 그려져 있으면 검토자가 덜 따집니다. 실험으로 확인된 것, 문헌으로 뒷받침되는 것, 현장 경험 기반의 가정을 구분해 표기하지 않으면 가정이 근거로 승격돼 돌아다닙니다.

셋째, 자율화 단계를 시간이 아니라 검증량으로 올리게 됐습니다. 2년차가 됐으니 다음 단계라는 식으로는 올라가지 않습니다. 그 공정에서 트윈 예측과 실제가 얼마나 맞았는지가 쌓여야 올라갑니다.

8. 지금 위치

정리하면 이렇습니다. 용어를 맞추는 층과 근거를 찾는 층은 제품에 들어가 있고, 뒤쪽 층은 권리 확보까지 마쳤습니다. 인과를 다루는 층은 사양으로 확정돼 현장 구축이 진행 중이며 결과 수치는 아직 없습니다. 트윈 검증과 제어 전송 경로는 실증을 마쳤고, 사람 승인 없이 도는 구간은 현장별 과업으로 남아 있습니다. 그래프 검색과 신경기호 추론을 사이버물리 제어에 결합하는 건은 **특허 출원 후 심사 중**이며 아직 등록 전입니다.

인과를 다룬다고 말하려면 이 정도는 어디까지 됐고 어디부터는 아직인지 같이 적어야 한다고 봅니다. 상관과 인과의 차이를 이야기하는 글이 정작 자기 진도에서는 그 구분을 흐리면, 그 글이 하는 말이 성립하지 않습니다.

웨이스가 하는 일이 궁금하시면: wace.me

WACE(웨이스)는 공장이 스스로 판단하고 멈추지 않게 하는 제조 AI 운영체제 VEXPLOR를 만드는 회사다.

원문 blog.vexplor.com/post/how-vexplor-handles-causal-inference
발행 2026년 8월 19일 · 방동걸 (주)웨이스 대표이사

회사 주식회사 웨이스 (WACE Inc.) · 대표이사 방동걸 · 사업자등록번호 439-87-02852
주소 (18462) 경기 화성시 동탄구 동탄영천로 150, 에이동(A동) 1702-1708호 (영천동, 실리콘앨리동탄)
연락처 전화 070-4730-0629 · contact@wace.me
홈페이지 wace.me · linkedin.com/company/wace-inc

원문 홈페이지 링크드인