

파일럿플랜트를 활용한 제어기 실습 및 반복 훈련의 교육 효과에 관한 연구

황승만*

*한국폴리텍대학

e-mail:whang1857@kopo.ac.kr

A Study on the Educational Effectiveness of Repetitive Controller Operation Training Using a Pilot Plant Simulator

Seung-Man Hwang*

*Dept. of Operation and Chemical Process, Korea Polytechnic

요약

This study investigates the design and operational training of a distillation process for normal paraffins (C6 and C7) using the SPM-701 simulator developed by Simtronics. The system realistically replicates industrial operations, including feed preparation, column control, fault simulation, and PID tuning. Learners can safely practice full-cycle operations through dynamic scenarios, enabling a deeper understanding of process behavior and control strategies. The educational outcomes highlight improvements in cognitive understanding, troubleshooting capabilities, and scenario-based decision making. The simulator supports competency-based assessment systems and contributes to practical workforce development in chemical process engineering. Future extensions may include integration with digital twin platforms and immersive VR-based learning tools.

1. 서론

산업 현장에서의 공정 운전은 제품 품질, 에너지 효율, 안전성 확보와 직결되는 핵심 기술로, 이를 체계적으로 훈련할 수 있는 교육 시스템이 필수적이다. 특히 증류탑은 석유화학, 정유, 제약, 정밀화학 등 다양한 산업 분야에서 가장 널리 사용되는 단위 공정 중 하나로, 그 설계와 운전은 열역학, 유체역학, 제어 공학 등 다양한 공정 이해를 요구한다. 그러나 실제 플랜트에서의 운전 교육은 고위험성, 고비용, 제한된 접근성 등으로 인해 충분한 반복 학습이 어렵다. 이에 따라 공정 시뮬레이터를 활용한 교육과 훈련이 새로운 대안으로 부상하고 있다.

Simtronics사의 SPM-701 증류탑 시뮬레이터는 대표적인 실시간 공정 시뮬레이션 시스템으로, 실제 산업 현장의 설비 및 운전 조건을 정밀하게 모사할 수 있도록 설계되었다. 특히 노말파라핀 계열(C6, C7) 혼합물의 분리 공정을 기반으로 구성되어, 화학 및 석유화학 분야의 기본 증류 개념과 제어 전략을 반복 학습할 수 있는 환경을 제공한다. SPM-701은 다양한 설비 구성(C-301 증류탑, E-101 프리히터, E-401 리보일러, E-601 응축기 등)을 포함하고 있으며, 이들 장치 간의 물질 및 에너지 전달 특성을 반영한 실시간 피드백 구조를 가지고 있다. 이를 통해 학습자는 실

제 운전 조건에서 발생할 수 있는 각종 문제(예: 열교환기 fouling, 펌프 고장, 조성 편차 등)를 체험하며, 이에 대한 대응 전략을 실습할 수 있다.

공정 설계 측면에서도 SPM-701은 단순한 교육 도구를 넘어, 플랜트 운전의 초기 조건 설정, 정상상태 운영 조건 분석, 고장 및 비정상 상황 대응 시뮬레이션 등 다양한 활용이 가능하다. 실제 설계된 공정의 조작 변수(압력, 온도, 유량 등)에 대한 영향을 예측하고 제어 구조의 적정성을 사전 검토하는 데 효과적으로 활용될 수 있으며, 이는 안전설계와 최적 운전 조건 확립에 기여한다. 또한 반복 실습을 통해 얻은 운전 데이터는 실제 공정 설계의 참고자료로도 활용될 수 있다. 예를 들어, 리플렉스비, 하부 온도, 피드 위치 변화에 따른 제품 순도 변화를 정량적으로 비교할 수 있어, 증류탑 설계 파라미터 선정 시 실용적인 피드백을 제공한다.

한편, 최근 산업계는 디지털 트랜스포메이션(Digital Transformation)의 일환으로 디지털 트윈(Digital Twin)과 산업용 시뮬레이터의 통합을 적극적으로 도입하고 있다. 전 세계적으로 Shell, ExxonMobil, BASF와 같은 글로벌 기업들은 공정 설계 초기 단계부터 디지털 모델링과 시뮬레이션을 활용하여 플랜트 시운전 시간을 단축하고 운전 최적화를 시도하고 있다. 교

육 분야에서도 미국 NAPTA(North American Process Technology Alliance), 독일 VDMA, 일본 JXTG 등에서는 증류탑, 반응기, 압축기 등의 공정을 가상환경에서 반복 학습할 수 있도록 고급 시뮬레이터 도입을 확대하고 있으며, 이에 따른 국제 자격 인증 시스템도 함께 구축되고 있다.

우리나라 또한 한국산업인력공단, 고용노동부, 한국폴리텍대학을 중심으로 시뮬레이션 기반 교육 인프라 확충 및 과정평가형 자격 시스템을 도입하고 있으며, SPM-701과 같은 고급 시뮬레이터는 이러한 흐름을 선도하고 있다. 특히 과정평가형 자격 대비 교육 과정에서 단순 장치 명칭 암기에서 벗어나, 실제 공정 내에서 발생하는 동적 현상에 대한 이해와 판단능력 평가가 강조되면서, SPM-701의 필요성과 활용성이 더욱 높아지고 있다.

따라서 본 논문에서는 SPM-701 시뮬레이터를 활용하여 노말 파라핀(C6, C7) 혼합물의 분리 공정을 기반으로 한 파일럿플랜트를 설계하고, 해당 시스템의 구성, 제어 전략, 운전 절차 및 시나리오 기반 훈련을 분석함으로써 시뮬레이터 기반 교육이 공정 설계 및 운전 교육에 미치는 효과를 정량적으로 검토하고자 한다. 이를 통해 이론 중심의 기존 교육 방식에서 벗어나, 실제 산업현장에서 요구되는 실무형 인재 양성 체계 구축을 위한 방향성을 제시하고자 한다.

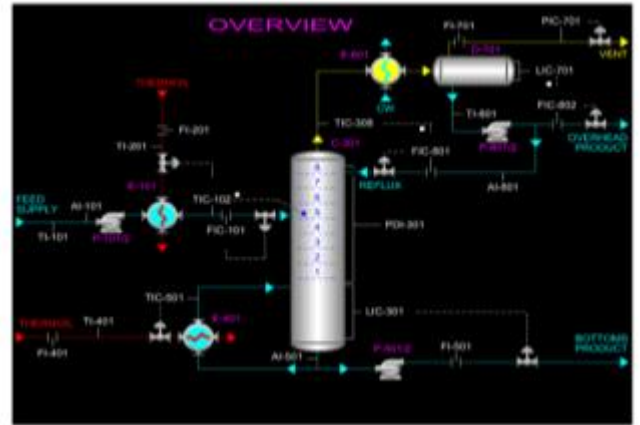
2. 시스템 구성 및 운전 절차

2.1. SPM-701 공정 구조 개요

Simtronics사의 SPM-701 시뮬레이터는 실제 화학 플랜트의 증류 공정을 기반으로 설계된 교육 및 설계용 시뮬레이션 시스템으로, 노말파라핀 계열(헥산과 헵탄)의 분리를 모사한다. 전체 시스템은 투입, 예열, 증류, 응축 및 제품 분리로 이어지는 일련의 공정 흐름을 고도로 구현하고 있으며, 학습자가 안전한 환경에서 실제 운전 조건을 실습해볼 수 있도록 설계되어 있다.

피드 계통은 탱크에서 공급되는 혼합물을 프리히터(E-101)를 통해 목표 온도까지 예열한 후, 증류탑(C-301)의 중간 트레이(기본 값 5번 트레이)에 주입하는 구조로 되어 있다. 예열된 피드는 트레이 내부의 하향 액체와 상향 증기와와의 접촉을 통해 조성 분리를 유도하며, 이 과정은 탑 하부에 위치한 리보일러(E-401)로부터의 열 공급에 의해 유지된다. 탑 상부에서 상승한 증기는 응축기(E-601)를 통해 액화되며, 리플렉스 드럼(D-701)에 모인 후 일부는 리플렉스로 재투입되고 나머지는 상부 제품으로 회수된다. 하부에 남은 고비점 물질은 바텀 펌프를 통해 외부로 배출된다. 이처럼 각 장치가 유기적으로 연결된 구조는 에너지 전달, 조성 변화, 압력 유지 등의 공정 동역학을 실시간으로 체험할 수 있도록 구성되어 있다.

한편, SPM-701 시뮬레이터의 전체 공정 계통은 그림 1에서와 같이 피드, 예열, 증류, 응축, 분리의 단계로 구성된다.

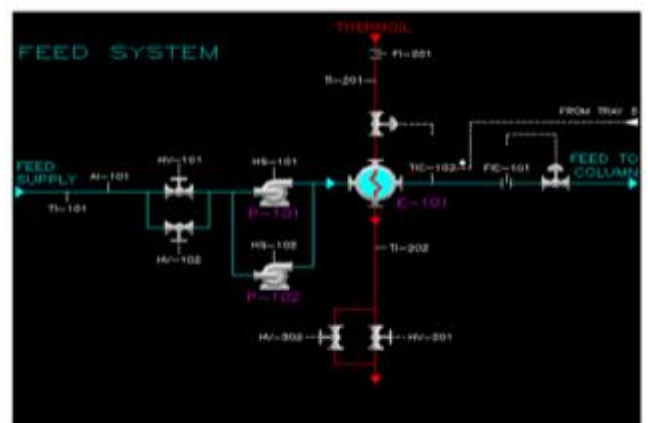


[그림 1] SPM-701 시뮬레이터 공정 계통도 구성도

2.2 제어 및 계측 구성

SPM-701 시뮬레이터는 실제 분산제어시스템(DCS)의 구조와 기능을 충실히 재현하고 있으며, 전체 공정의 안정적인 운전을 위해 다양한 제어 루프가 탑재되어 있다. 예를 들어, 피드 유량은 FIC-101, 프리히터 출구 온도는 TIC-102, 증류탑 하부 레벨은 LIC-301, 리플렉스 유량은 FIC-801, 탑압은 PIC-701에 의해 각각 제어된다. 이들 제어기는 수동(MAN), 자동(AUTO), 캐스케이드(CAS) 모드로 운전할 수 있으며, 제어 신호의 전달 및 반응 속도 또한 실시간으로 구현된다.

제어 루프의 일부는 캐스케이드 구조로 구성되어 상·하위 제어기의 조화로운 동작을 유도한다. 예를 들어, 프리히터의 온도 제어는 피드 트레이의 실제 온도(TI-305)를 기준으로 자동 조절되며, 이는 실제 공정에서의 상호 연계된 제어 전략과 동일한 로직이다. 그림 2는 Feed System의 DCS 화면에 구현된 주요 제어 루프 구성을 보여준다.



[그림 2] Feed System DCS 화면의 제어 루프 구성 예시

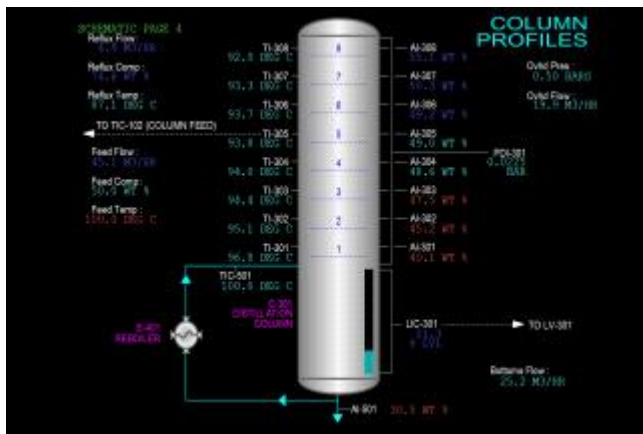
또한, 센서, 계측기, 조절 밸브 등의 계장 시스템은 온도(TI), 압력(PI), 유량(FT), 레벨(LI), 조성(AI) 등의 주요 공정 변수에 대한 데이터를 제어기로 전달하며, 이러한 측정값은 시뮬레이터 내에서 트렌드 모니터링 및 알람 설정 등 다양한 방식으로 활용된다. 특히, 제어기의 파라미터(P, I, D)를 자유롭게 조정할 수 있어 튜

닝의 효과를 학습자가 직접 비교할 수 있으며, 계기의 고장이나 센서 드리프트를 모사함으로써 공정 이상 시나리오에 대한 진단 및 대응 능력을 향상시킬 수 있다.

2.3. 정상 운전 절차

정상 운전은 전체 시스템이 설정된 운전 조건을 안정적으로 유지하고, 주요 변수들이 목표값 근처에서 편차 없이 유지되는 상태를 의미한다. 이를 위해 운전자는 초기 시동 단계에서 유틸리티 공급 확인, 펌프 작동, 열교환기 예열, 피드 투입, 제어기 초기 설정 등의 절차를 순차적으로 수행한다. 이 과정은 약 36단계의 절차로 구성되어 있으며, 시뮬레이터 내부의 절차 화면을 통해 단계별로 수행 여부를 확인할 수 있다.

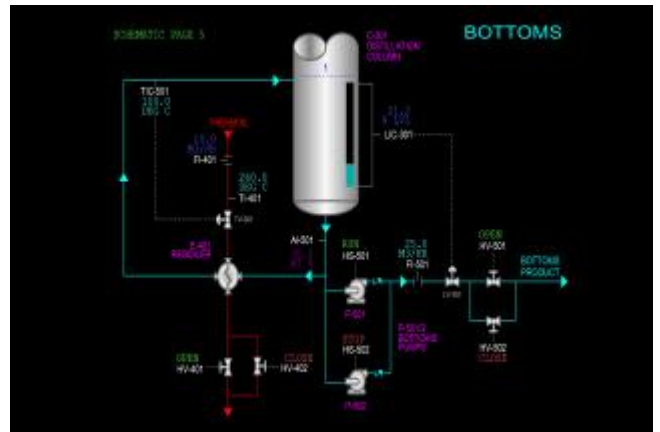
운전 조건은 피드 유량 53.4 m³/h, 프리히터 온도 약 80°C, 리보일러 열매체 유량 약 55 m³/h, 리플렉스 유량 45.4 m³/h, 상하부 제품 유량 각각 28 m³/h와 26 m³/h를 기준으로 하며, 이 조건에서 상부 제품 내 헥산 함량은 약 91.1 wt%, 하부 제품은 약 7.3 wt% 수준을 유지한다. 변수들이 일정 수준 내에서 안정적으로 유지될 경우 이를 정상 상태(Steady State)로 간주하며, 이후 고장 시나리오나 최적화 실험으로 넘어갈 수 있으며, 정상 상태에서의 주요 운전 변수는 그림 3에서 확인할 수 있다.



[그림 3] 정상 상태의 Tower 운전 상태

2.4. 비정상 및 고장 시나리오

실제 플랜트에서는 다양한 비정상 상황이 빈번하게 발생할 수 있으며, SPM-701은 이를 시뮬레이션할 수 있는 다양한 시나리오를 제공한다. 예를 들어, 리플렉스 펌프의 정지 상황은 전력 차단 설정을 통해 구현되며, 이 경우 리사이클 유량이 급감하면서 드럼 레벨이 상승하고, 상부 탑 온도 및 압력이 동시에 변동하게 된다. 이 시나리오는 예비 펌프를 활용한 복구 절차 실습과 함께 운영되고 리플렉스 펌프 고장 시의 공정 반응 특성은 그림 4에 나타나 있다.



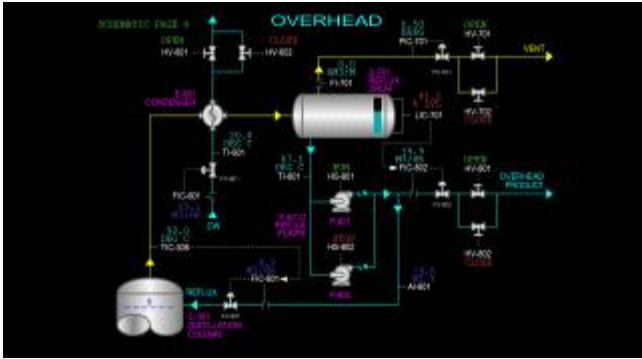
[그림 4] Tower Bottom System 리플렉스 펌프 고장 시 운전 변수의 변화 확인

응축기의 fouling 상태는 열교환기의 열전달계수(UA값)를 인위적으로 감소시켜 구현되며, 이로 인해 탑 상부의 압력 상승과 증류 효율 저하가 발생한다. 또한 조성 분석기나 온도 센서의 오류는 PV 신호에 노이즈나 오차 계수를 삽입하는 방식으로 시뮬레이션할 수 있으며, 학습자는 이를 토대로 진단, 보정, 수동 전환 등의 조치를 익힐 수 있다. 이러한 비정상 운전 시나리오의 교육 효과는 시뮬레이션 결과와 함께 그림 4를 통해 시각화할 수 있다.

2.5. 설계 및 최적 운전 조건 도출

SPM-701 시뮬레이터는 공정 설계에 필요한 변수 간 상호작용 및 최적 운전 조건 분석 기능을 제공한다. 운전자는 리플렉스비, 피드 트레이 위치, 프리히터 온도, 리보일러 열량 등 핵심 조작 변수의 값을 변경하며 공정의 출력 변수(제품 조성, 온도 분포, 에너지 소비 등)에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 예를 들어, 리플렉스비를 증가시키면 상부 제품의 순도는 상승하지만, 리보일러의 열부하가 증가하여 전체 에너지 효율은 감소하는 경향이 있다. 또한 피드 위치를 조정하면 분리 성능과 탑 내 온도 프로파일이 함께 변화하므로, 증류 설계에서 중요한 트레이 선정 문제를 실험적으로 검토할 수 있다. 이러한 실습은 설계의 경제성 및 운전 안정성을 동시에 고려하는 공정 엔지니어의 사고방식을 체득하는 데 큰 도움이 된다.

시뮬레이터에서의 실험 결과는 트렌드 차트, 실시간 지표, 공정 경향 분석을 통해 정량적으로 비교할 수 있으며, 실제 설계 단계에서의 조건 선정, 시운전 계획, 제어기 튜닝 전략 등으로도 연결될 수 있다. 따라서 SPM-701은 공정 설계 교육뿐만 아니라, 설계 검증과 엔지니어링 의사결정을 위한 실용적 도구로 활용 가능하며, 반복 수행 결과에 따른 변수 변화 경향은 그림 5와 같이 제어기 튜닝 전후의 응답 비교를 통해 확인할 수 있다.

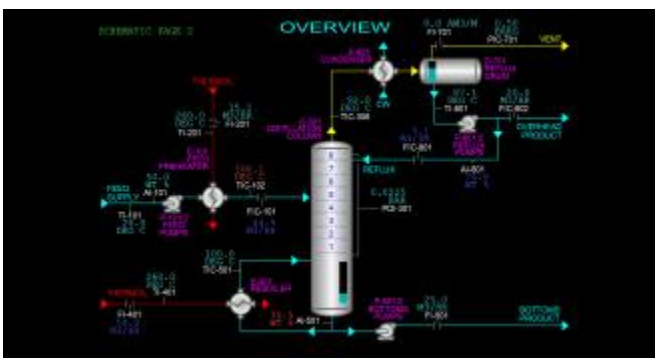


[그림 5] Tower Overhead System 제어기 튜닝 전후의 제어 응답 비교 결과

3. 교육 효과 분석

SPM-701 시뮬레이터는 이론 중심의 전통적인 교육 방식에서 벗어나, 학습자가 실제 공정 운전 상황을 체험하며 문제 해결력을 키울 수 있도록 지원하는 실습 기반 학습 플랫폼으로 설계되었다. 본 장에서는 해당 시뮬레이터를 통한 교육이 학습자의 인지적, 기술적, 행동적 측면에 어떤 영향을 주는지를 분석하고자 한다.

시뮬레이터는 실제 운전 중 발생할 수 있는 변수 변화, 장치 간 상호작용, 경보 발생 상황 등을 정밀하게 반영함으로써, 단순한 조작 실습을 넘어서 종합적 사고력과 위기 대처 능력을 향상시키는 데 효과적이고 학습자 반복 수행에 따른 성취도 향상 결과는 그림 6에 제시되어 있다. 특히 정해진 시나리오에 따라 공정 운전 절차를 수행한 후, 트렌드 분석, 이력 리뷰, 알람 응답 기록 등을 통해 학습자의 수행 결과를 정량적으로 평가할 수 있다는 점에서 기존 강의형 교육과 차별화된다.



[그림 6] 반복 수행에 따른 학습 성취도 향상 결과

3.1. 공정 이해도 및 장치 간 연계성 향상

기존 이론 교육에서는 증류탑, 리보일러, 응축기, 프리히터 등 개별 장치의 역할만을 단편적으로 학습하는 데 그쳤다면, SPM-701은 장치 간 연계된 물질 및 에너지 흐름을 실시간으로

확인할 수 있도록 구성되어 있다. 예를 들어, 피드 온도 조절이 탑 내 온도 분포, 상하부 조성, 리보일러 부하 등에 어떻게 영향을 미치는지를 트렌드 차트를 통해 확인함으로써, 학습자는 장치 간 상호작용의 전체 그림을 이해할 수 있게 된다. 또한, 리플렉스 펌프 고장 시 응축기 작동, 압력 제어 루프, 상부 제품 품질 간의 상관관계를 직접 경험함으로써 공정의 동적 특성과 복잡한 연쇄 반응 구조를 체계적으로 익힐 수 있다.

3.2. 제어기 설정 및 실시간 판단능력 강화

제어기(FIC, TIC, LIC, PIC 등)의 세트포인트 조정, 제어 모드 전환, PID 튜닝 실습을 통해, 학습자는 제어 공학 이론에서 배운 개념을 실제 현장 조건에 적용해볼 수 있다. 특히 센서 오류나 드리프트 발생 시 제어기의 반응을 실시간으로 확인하고, 수동 조작이나 루프 차단 등을 수행하는 과정에서 문제 인식 → 진단 → 조치에 이르는 절차적 사고 능력이 향상된다.

학습자는 시나리오 수행 중 알람 발생, 조치 시간, 조작 정확성 등을 기준으로 점수를 부여받게 되며, 이는 반복 수행을 통한 자기 피드백 및 실력 향상 추적의 지표로 활용된다.

3.3. 위기 대응 및 비정상 상황 인지 훈련

시뮬레이터는 응급 상황 또는 설비 이상 상태를 안전하게 반복 학습할 수 있는 유일한 훈련 수단이다. 예를 들어, 응축기 열전달 저하나 탑압 상승, 리플렉스 드럼 오버플로우 등은 실제 플랜트에서는 위험 상황이지만, 시뮬레이터에서는 반복 실습이 가능하므로 상황 인지와 의사결정 속도를 효과적으로 향상시킬 수 있다. 특히 학습자는 정해진 절차 없이 자율적으로 판단하여 문제에 대응하도록 유도되며, 이 과정에서 자신만의 운전 전략을 수립하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 개선안을 도출할 수 있다.

3.4. 반복학습 및 성취도 기반 피드백 체계

각 시나리오 종료 후에는 학습자의 수행 결과에 따라 정량적 평가가 제공되며, 수행 시간, 제어 편차, 알람 응답 정확성 등의 데이터를 기반으로 한 리포트가 생성된다. 이러한 평가 시스템은 학습자 스스로 자신의 취약한 조작 구간을 파악하고 개선할 수 있는 기회를 제공하며, 지도교사는 이를 바탕으로 개별 피드백과 학습 경로를 설계할 수 있다. 또한 동일 시나리오를 반복 수행함에 따라 학습자의 처리 속도와 판단 정확도가 향상되는 경향이 뚜렷이 나타나며, 이는 시뮬레이션 기반 교육이 반복 가능성(Repetition)을 통해 실무 역량을 단계적으로 향상시킬 수 있음을 의미한다.

4. 결론

본 연구는 Simtronics사의 SPM-701 시뮬레이터를 활용하여 노팔과라핀(C6, C7) 계열의 혼합물 분리를 중심으로 설계된 증류 공정 시뮬레이션 시스템의 구성과 운전 절차, 그리고 이를 기반으로 한 교육 효과를 다각도로 분석하였다. SPM-701은 실제 플랜트의 장치 구성, 제어기 설정, 운전 시나리오 등을 정밀하게 반영함으로써, 학습자에게 실제와 유사한 공정 운전 환경을 제공한다. 이는 높은 교육적 가치와 공정 설계 적용 가능성을 동시에 지닌다.

시뮬레이터는 단순한 조작 교육을 넘어, 장치 간 상호작용에 대한 이해 증진, 제어기 조작 및 튜닝 능력 향상, 비정상 상황 인지 및 대응력 강화 등 공정 운전의 전 주기를 실습할 수 있도록 구성되어 있다. 특히 반복 학습이 가능하다는 점은 학습자의 숙련도 향상에 매우 유리하며, 조작 결과를 정량적으로 평가할 수 있는 시스템은 학습자의 자기주도 학습과 맞춤형 피드백 제공에도 효과적이다.

결과적으로, SPM-701 시뮬레이터는 다음과 같은 교육적, 산업적 시사점을 제공한다. 첫째, 공정 설계 초기 단계에서의 제어 전략 검토 및 조건 설정을 위한 도구로 활용될 수 있다. 둘째, 산업체 재직자 및 예비 엔지니어 교육에 있어 현장 적응력을 향상시키는 실무형 훈련 수단으로 기능한다. 셋째, 과정평가형 자격과 같은 실무 기반 교육 체계 내에서 핵심적인 교육 인프라로 자리매김할 수 있다.

향후 연구에서는 다음과 같은 방향으로의 발전이 필요하다. 첫째, 학습자의 반복 수행 데이터를 기반으로 한 성취도 분석 및 AI 기반 피드백 시스템 개발이 요구된다. 둘째, 다양한 공정(예: 반응기, 압축기, 공정통합 시스템 등)으로의 시뮬레이터 확장이 이루어진다면, 화학공정 전반에 대한 통합 교육이 가능해질 것이다. 셋째, 디지털 트윈 및 VR/AR 기술과의 융합을 통해 몰입형 교육 콘텐츠로 진화시킬 수 있는 가능성도 높다.

본 연구는 시뮬레이션 기반 교육이 이론 중심 교육의 한계를 보완하고, 실무 중심의 공정 운전 능력을 체계적으로 함양할 수 있는 강력한 수단을 확인하였다. 특히 SPM-701과 같은 고도화된 시뮬레이터는 향후 산업교육 분야에서 필수적인 학습 플랫폼으로서의 역할을 지속적으로 확대해 나갈 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Simtronics Corporation, SPM-701 Distillation Simulator Instructor Manual, Version 6.3, USA: Simtronics, 2014.
- [3] 박희준, “증류 공정의 제어기 설계에 대한 시뮬레이션 분석,” 대한화학회지, vol. 69, no. 4, pp. 255–263, 2021.
- [4] Smith, J. M., Van Ness, H. C., and Abbott, M. M., Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 7th ed., New York: McGraw-Hill,

2005.

- [5] Shin, Y. and Park, C., “Design and Application of Real-Time Process Simulators in Chemical Engineering Education,” Korean Journal of Chemical Engineering Education, vol. 27, no. 2, pp. 112–120, 2020.