

공정운전을 위한 분산제어시스템(DCS) 구축 사례 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 presents the design and implementation of a Distributed Control System (DCS) for a laboratory-scale process unit to ensure stable and efficient plant operation. The system was developed through basic and detailed design, control logic programming, FAT, SAT, and commissioning. Key functions such as PID loop tuning, alarm and event management, trend monitoring, and HMI design were emphasized. The application demonstrated improved monitoring, alarm response, and operational reliability. Furthermore, the developed system proved effective as an educational platform, enabling trainees to gain practical experience in process control and to strengthen their problem-solving and decision-making skills.

1. 서론

산업 플랜트 및 생산 현장은 점차 복잡해지고 대형화되면서, 공정 제어 시스템의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있다. 초기의 제어 방식은 단순히 기계적·공기식 제어에서 출발하였으며, 이후 전기적 방식과 전자식 제어로 발전하였다. 그러나 이러한 전통적인 제어 방식은 대규모 플랜트의 안정적인 운전과 신속한 대응을 보장하기에 한계가 존재하였다. 이러한 배경 속에서 1970년대 이후 컴퓨터 기반 제어가 도입되면서, DDC(Direct Digital Control)와 이를 확장·발전시킨 분산제어시스템(Distributed Control System, DCS)이 산업 전반에서 채택되기 시작하였다.

DCS는 기존의 중앙집중식 제어와 달리 제어 기능을 여러 컨트롤러에 분산시켜 수행함으로써, 하나의 제어기에 이상이 발생하더라도 전체 시스템이 중단되지 않고 안정적인 운전이 가능하다. 또한, 네트워크를 통한 통합 제어 및 감시가 가능하여 운전 효율성을 극대화한다. 특히 이중화(Redundancy) 개념을 적용하여 서버, 네트워크, 컨트롤러에 장애가 발생하더라도 시스템이 즉시 전환되어 안정적인 공정 운전이 지속되도록 설계된다. 이러한 특성은 화학, 석유화학, 발전, 제철, 반도체 등 다양한 산업 플랜트에서 필수적인 기반 기술로 자리매김하게 하였다. 최근 들어 플랜트의 안전성 확보와 생산성 향상에 대한 요구가 커지면서, DCS의 역할은 단순한 제어를 넘어 운전 최적화, 알람 관리, 실시간 데이터 수집 및 분석까지 확대되고 있다. 특히 HMI(Human-Machine Interface)를 통한 직관적 운전 환경 제공, 알람 및 이벤트 관리 기능을 통한 이상 상황의 신속한 대응, 그리고 그룹 및 트렌드 디스플레이를 통한 장기적 공정 데이터 분석은 플랜트 운영의 핵심 요소로 부상하였다.

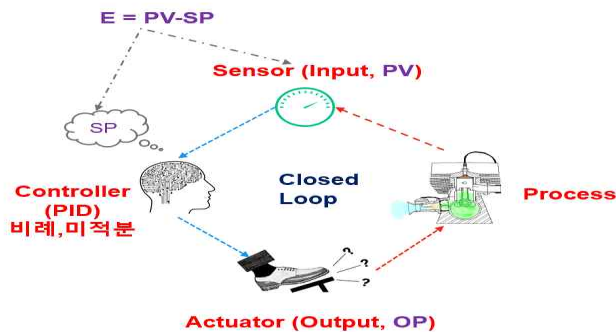
이에 본 연구에서는 실험실 규모의 공정 운전 장치를 대상으로 DCS를 구축하고, PID 기반의 제어 루프 설계, 알람 설정 및 관리, 트렌드 모니터링, 그래픽 디스플레이 설계 등을 통해 실제 운전에 적용한 사례를 제시하고자 한다. 구축된 시스템은 교육용 및 연구용으로 활용될 수 있도록 설계되었으며, 운전자가 직관적으로 공정을 제어하고 실시간 데이터를 분석할 수 있는 환경을 제공한다. 본 논문은 이러한 DCS 구축 사례를 공유함으로써, 학계와 산업계에서 DCS의 활용 가능성을 재조명하고, 향후 인공지능(AI) 및 빅데이터 기반의 고도화된 제어 시스템으로 발전할 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

2. DCS의 기본 구조 및 구성요소

분산제어시스템(Distributed Control System, DCS)은 산업 플랜트의 안정적 운전과 효율적 관리, 그리고 안전 확보를 위해 개발된 통합 제어 체계이다. 기존의 중앙집중식 제어 방식은 단일 고장 시 전체 공정이 중단되는 위험을 가지고 있으며, 공정 데

이터의 복잡성과 규모가 확대됨에 따라 신속한 대응이 어렵다는 한계를 드러냈다. 이에 비해 DCS는 제어 기능을 다수의 컨트롤러에 분산 배치하여 병렬 처리와 이중화를 구현함으로써 시스템 신뢰성과 운전 연속성을 크게 향상시킨다.

그림 1은 DCS의 기본 제어 구조를 나타낸다. 센서가 공정 변수를 측정하여 컨트롤러에 전달하면, 컨트롤러는 설정값(Set Point, SP)과 측정값(Process Variable, PV)의 차이를 계산하고, 이에 따라 제어 신호(Output, OP)를 액추에이터에 전달한다. 액추에이터는 밸브 개도나 펌프 회전수 조절을 통해 실제 공정(Process)에 반영하며, 다시 센서를 통해 새로운 PV가 측정되어 피드백 루프(closed loop)를 형성한다. 이러한 구조를 통해 DCS는 실시간 제어와 안정적인 운전을 가능하게 한다.



[그림 1] DCS의 기본 제어 구조 (센서-컨트롤러-액추에이터-프로세스 간 피드백 루프)

DCS의 또 다른 특징은 제어와 모니터링이 네트워크를 통해 통합적으로 이루어진다는 점이다. 그림 2는 분산제어 및 모니터링 개념을 도시한 것으로, 플랜트 현장 곳곳에 분산된 컨트롤러와 I/O 모듈이 현장 신호를 수집·제어하며, 이를 중앙의 제어실(Control Room)에서 통합적으로 감시·운전할 수 있음을 보여준다. 아울러 그 신호와 디지털 신호가 함께 사용되며, 유지보수 부서(Maint. Dept.) 역시 네트워크에 연결되어 전체 공정을 실시간으로 지원할 수 있다.

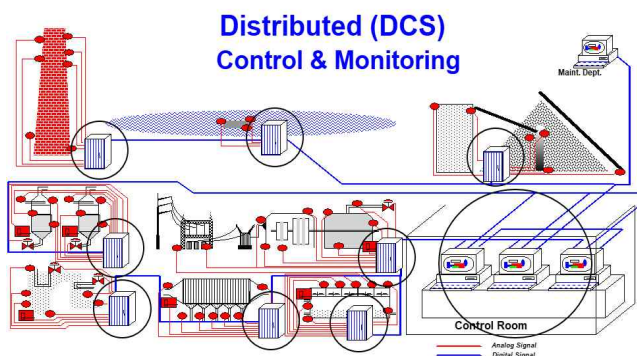


그림 2. DCS를 활용한 분산 제어 및 모니터링 개념도

본 연구에서 구축한 DCS의 아키텍처는 그림 3 DCS의 시스템 아키텍처에 제시되어 있다. HMI(Human-Machine Interface)는 운전자가 공정을 실시간으로 감시하고 제어할 수 있는 직관적

인터페이스를 제공한다. 컨트롤러는 각종 제어 루프를 처리하며, I/O 모듈은 센서와 액추에이터의 신호를 입출력한다. 서버는 알람 데이터, 운전 이력, 공정 로그를 저장하고 관리하는 역할을 하며, 네트워크는 이 모든 구성 요소를 연결해 안정적 통신을 보장한다.

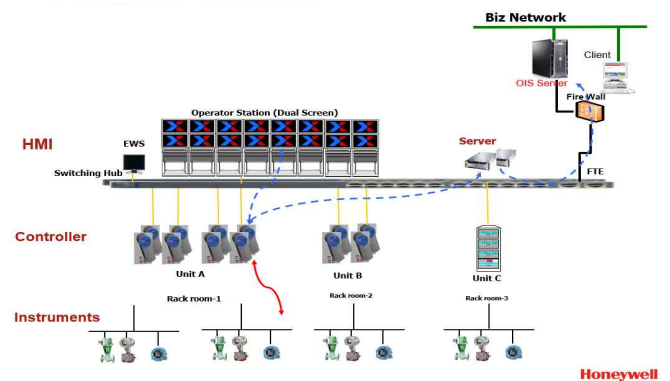


그림 3. DCS 시스템 아키텍처 (HMI, 컨트롤러, 서버, 계측기 연결 구조)

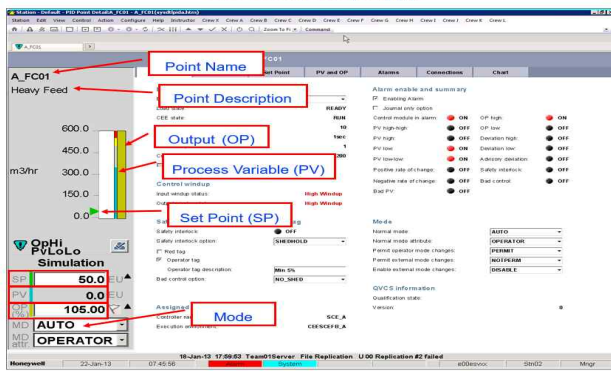
이와 같은 구조는 단순히 제어 기능만 제공하는 것이 아니라, 시스템 확장성, 데이터 관리, 안전성까지 고려된 통합 체계라 할 수 있다. 특히, 산업 현장에서 요구되는 안정적 운전과 신속한 문제 대응, 그리고 장기적인 데이터 분석 기반의 최적화는 DCS의 가장 큰 장점이다. 따라서 DCS는 현대 산업 플랜트에서 필수적인 제어 시스템으로 자리 잡고 있으며, 교육 및 연구 분야에서도 그 활용 가치는 매우 크다.

3. DCS 구축 절차

DCS 시스템 구축은 단순히 하드웨어를 설치하는 수준이 아니라, 설계 단계에서부터 소프트웨어 엔지니어링, 신호 연결, 알람 체계 구축, 그리고 시운전에 이르기까지 전 과정을 포함한다. 본 연구에서의 구축 절차는 기본 설계, 상세 설계, 엔지니어링, FAT(Factory Acceptance Test), SAT(Site Acceptance Test), 그리고 최종 시운전 단계로 이루어졌다.

먼저 기본 설계 단계에서는 공정 변수와 제어 루프를 정의하였다. 각 루프별로 SP(Set Point), PV(Process Variable), OP(Output)를 설정하고, 태그 네임(Tag Name)을 부여하여 관리의 편리성과 확장성을 확보하였다. 또한 공정 안전성을 위해 알람 한계치(high-high, high, low, low-low)를 정의하고, 이를 통해 이상 상황 발생 시 즉각적인 대응이 가능하도록 설계하였다.

세부 제어기 화면은 그림 4는 PID 제어 상세 화면(I)에 나타난다. 이 화면은 루프별로 SP, PV, OP를 동시에 표시하며, AUTO/MANUAL 모드 전환이 가능하다. 학습자 또는 운영자는 이를 통해 제어 상태를 실시간으로 확인할 수 있고, 필요할 경우 수동 제어로 전환하여 직접 개입할 수 있다.



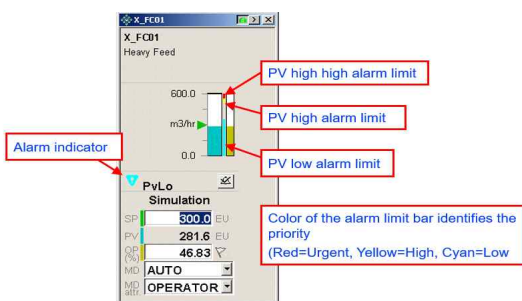
[그림 4] PID 제어 상세 화면(I)

상세 설계 단계에서는 알람 관리 기능을 구체화하였다. 그림 5는 PID 제어 알람 설정 화면(II)은 알람 한계치와 우선순위를 설정하는 과정을 보여준다. PV가 임계값을 벗어날 경우 URGENT, HIGH, LOW 등의 수준에 따라 알람이 발생하도록 구성되며, 지연 시간(On/Off Delay Time)과 Deadband 설정도 가능하다. 이는 불필요한 알람을 줄이고 실질적으로 중요한 알람에 집중할 수 있도록 한다.

Type	Status	Block	Enable	Trip Point	Priority	Severity	On Delay time(Sec)	Off Delay time(Sec)	Deadband value	Deadband units
PV high-high:	OFF	DACA		550.0	URGENT		0	0	1	% EU
PV high:	OFF	DACA		500.0	HIGH		0	0	1	% EU
PV low:	OFF	DACA		350.0	LOW		0	0	1	% EU
PV low-low:	OFF	DACA		200.0	LOW		0	0	1	% EU
Positive rate of change:	OFF	DACA		NaN			0	0		
Negative rate of change:	OFF	DACA		NaN			0	0		
OP high:	OFF	PIDA		95.00	NONE		0	0	1	% EU
OP low:	OFF	PIDA		NaN	NONE		0	0	1	% EU
Deviation high:	OFF	PIDA		NaN	NONE		0	0	1	% EU
Deviation low:	OFF	PIDA		NaN	NONE		0	0	1	% EU
Advisory deviation:	OFF	PIDA		NaN	NONE		0	0	1	% EU
Safety interlock:	OFF	PIDA		NONE			0	0		
Bad control:	OFF	PIDA		NONE			0	0		

[그림 5] PID 제어 알람 설정 화면(II)

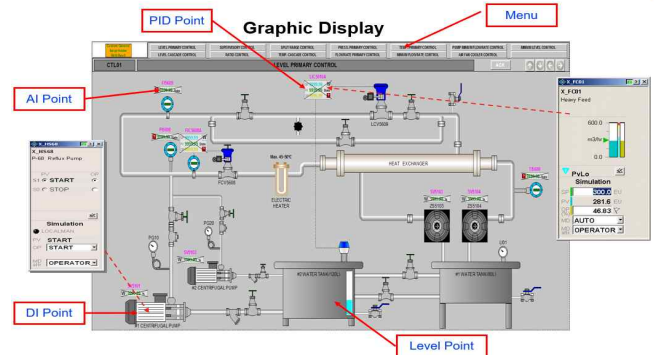
이와 같은 알람 체계는 그림 6은 알람 한계치와 상태 표시에서 시각적으로 확인할 수 있다. 화면에는 알람 발생 여부와 상태가 색상으로 구분되어 표시되며, 이는 운영자가 상황의 심각도를 직관적으로 인지하는 데 도움을 준다.



[그림 6] 알람 한계치와 상태 표시

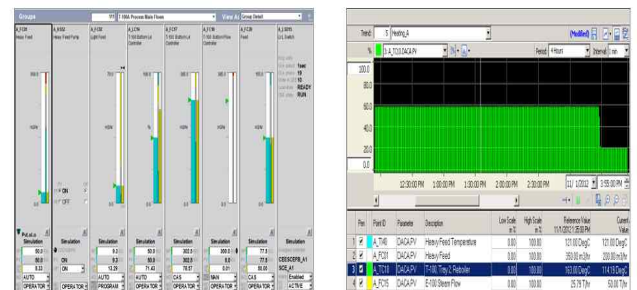
엔지니어링 단계에서는 Control Builder 소프트웨어를 이용하여 제어 로직을 구현하였다. 각 루프에 PID 연산을 적용하고,

시퀀스 제어와 인터록 로직을 추가하여 안전성을 확보하였다. HMI 화면 제작 또한 이 단계에서 수행되었으며, 그림 7은 HMI 기반의 공정 모니터링 화면은 그 결과물의 대표적 사례이다.



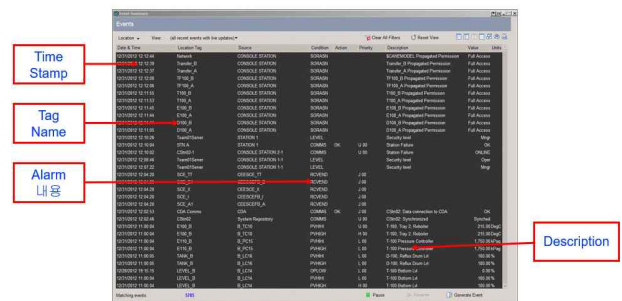
[그림 7] HMI 기반의 공정 모니터링 화면

공정 데이터는 그룹별로 묶여 실시간으로 표시되며, 시간에 따른 변수 변화를 시각화하는 기능은 그림 8은 실시간 그룹 및 트렌드 표시에서 확인할 수 있다. 이는 운전자가 장기 데이터를 바탕으로 공정을 최적화하거나 문제를 조기에 진단하는 데 유용하다.



[그림 8] 실시간 그룹 및 트렌드 표시

또한 알람 관리의 핵심 기능은 그림 9는 알람 요약 화면 구조에 나타나 있다. 알람 발생 시간, 태그명, 알람 내용이 기록되어 이벤트 관리가 가능하다. 이러한 알람 기록은 단순히 즉각 대응뿐만 아니라, 향후 재발 방지를 위한 데이터 분석에도 중요한 자료로 활용된다.



[그림 9] 알람 요약 화면 구조

마지막으로 FAT, SAT, 시운전 단계에서는 구축된 DCS가 실제 조건에서 안정적으로 작동하는지 검증하였다. FAT 단계에서

는 신호 입출력과 제어 로직 동작을 점검하였으며, SAT 단계에서는 실제 공정 모듈과 연결하여 펌프 기동, 밸브 개폐, 탱크 수위 변화 등 다양한 시나리오를 실행하였다. 시운전 결과, 시스템은 안정적인 응답을 보였고, 알람 및 이벤트 기록, 트렌드 분석, 그래픽 디스플레이가 정상적으로 작동하였다. 결국, 본 연구에서 구축한 DCS는 하드웨어와 소프트웨어가 긴밀히 연동되는 통합 시스템임을 확인할 수 있었다. 이는 단순한 장치 제어를 넘어 공정 안정성 확보, 안전 운전 지원, 데이터 기반 최적화까지 가능케 하였으며, 교육용 시스템으로서의 높은 활용 가치를 지니고 있다.

4. DCS 기반 실습 및 교육 적용

본 연구에서 구축된 DCS 기반 실습 장치는 산업 현장의 제어 시스템을 축소·재현한 것으로, 교육적 효과가 매우 높다. 학습자는 이를 통해 실제 플랜트 운전과 유사한 경험을 체득할 수 있으며, 반복 훈련을 통해 문제 해결 능력과 대응 역량을 향상시킬 수 있다. 실습 장치의 전체 모습은 그림 10은 DCS 기반 실습 장치 전경에서 확인할 수 있다. 펌프, 탱크, 배관, 센서, 제어반이 통합 구성되어 있으며, 학습자는 SP를 입력하여 PV가 따라오는 제어 과정을 직접 경험할 수 있다.



[그림 10] DCS 기반 실습 장치 전경

이러한 실습 장치는 단순히 공정 제어를 익히는 데 그치지 않는다. 교육생은 실제 운전자가 직면할 수 있는 비정상 상황을 시뮬레이션하고, 알람 발생 시 올바른 대응 절차를 익힐 수 있다. 또한 반복적 실습을 통해 운전 과정에 대한 이해도를 높이고, 이론 학습을 실제 공정 제어 능력으로 확장할 수 있다. 따라서 본 연구의 실습 장치는 학문적 연구뿐 아니라 현장 실무 교육에도 중요한 기여를 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 분산제어시스템(DCS)의 개념과 구조를 설명하고, 이를 실험 장치에 적용하여 교육용 실습 환경을 구축하였다. 제어기 상세 화면, 트렌드 분석, 알람 관리 기능은 학습자가 실제

산업 현장과 유사한 경험을 할 수 있도록 지원하였다. 구축된 DCS는 안정적 운전과 신뢰성을 확보할 뿐 아니라, 교육적 효과 또한 입증하여 향후 연구 및 현장 실습에 유용한 기반이 될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Simtronics Corporation, SPM-701 Distillation Simulator Instructor Manual, Version 6.3, USA: Simtronics, 2014.
- [2] 김영식 외, 『화학공정 제어』, 서울: 동화기술, 2018.
- [3] 박희준, “중류 공정의 제어기 설계에 대한 시뮬레이션 분석,” 대한화학회지, vol. 69, no. 4, pp. 255-263, 2021.
- [4] 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.
- [5] 황승만, 「과일렛플랜트를 활용한 제어기 실습 및 반복 훈련의 교육 효과에 관한 연구」, 한국산학기술학회 춘계학술발표논문집, 2025, Poster No.184, pp.539-543.