

# 자동제어 설비의 변천 및 발달사

자동제어 설비의 역사를 자동제어 설비에 적용된 제어 이론의 발달과 실제 적용되는 제어기의 종류를 중심으로 소개하고자 한다.

주영덕

(주)나라컨트롤 기술연구소(ydju@naracontrols.co.kr)

김진

(주)나라컨트롤 기술연구소(jkim@naracontrols.co.kr)

사회가 발전하고 생활수준이 향상됨에 따라 자동제어 기술은 건설, 플랜트, 철도, 교통, 선박, 항공, 물류, 농업, 환경 등의 거의 모든 산업 분야에 적극 활용되고 있는 최첨단 기술로서 주목받고 있으며 발전 또한 급격한 성장 추세를 보이고 있다. 특히 산업의 발전에 따른 복잡하고 다양한 시스템의 출현에 따라 이들의 효율적인 운전과 설계의 중요성이 강조되고 있으며 복잡한 시스템의 출현은 필연적으로 여러 가지 공학 분야의 기술이 접목되는 형태의 발전을 가져오게 되며 자동제어는 이러한 여러 공학 분야의 기술이 서로 대치되는 종적인 관계를 가지는데 비하여 직접 관련 기술과의 접목을 통하여 융합되는 횡적인 경계를 취급하는 매개체적인 기술 분야라고 할 수 있을 것이다. 따라서 자동제어의 기술은 인접된 각종 분야의 공학 기술과 접목되며 상호 확산을 통하여 그 경계 영역을 점차 넓혀가고 있다. 본 고에서는 이러한 자동제어를 좀더 정확히 이해하는데 도움이 되고자 자동제어 설비를 중심으로 관련 기술의 변천과 발달사에 대하여 알아보기로 한다.

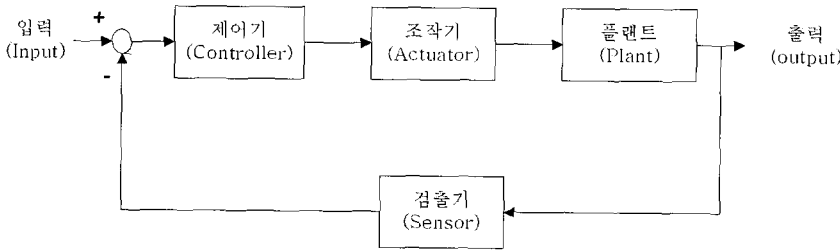
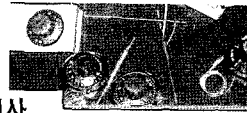
## 자동 제어의 개념

제어란 어떤 대상물을 원하는 상태로 변화시키거나 동작을 하도록 조절하는 것을 의미하며, 예를 들어 목욕물의 온도를 제어한다고 하였을 경우 일단 손을 넣어 물의 온도를 확인하고 이를 개인에게 적

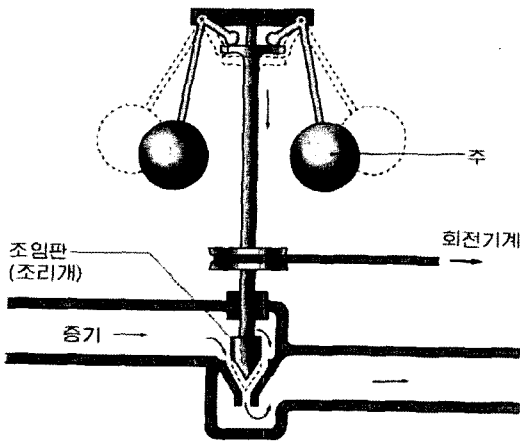
합하도록 온수와 냉수를 섞어서 사용하며 물의 온도가 떨어질 경우 위의 조작 과정을 반복할 것이다. 이와 같이 실생활에서도 기본적인 제어의 동작을 수행하는 것으로 볼 수 있는데 이렇듯 일련의 동작이 행해지는 것을 루프(loop)라고 하며 상기와 같이 연속적인 측정과 이에 대한 수정이 반복되는 것으로 폐루프(closed loop)라고 한다. 인간이 이러한 조작을 행하는 것을 수동 제어라고 하며 이는 인류의 출현 이후 계속적으로 수행되어 왔다. 1900년대 이후 기계와 전기, 전자 기술의 발달은 점차 인간이 하던 일을 대신하게 되었고 근래에 들어서는 컴퓨터의 발달로 인하여 명실상부한 자동 제어로 바뀌고 있다. 자동 제어 루프에서 상기의 온도를 측정하던 인간의 손의 감각을 검출기(sensor), 수온을 판단하는 기능을 하는 것을 제어기(controller), 온수와 냉수를 공급하는 수도를 조작기(actuator), 제어의 대상이 되는 수온을 플랜트(plant)라 하며 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

## 자동 제어 설비의 역사적 배경

자동제어라는 용어를 사용한지는 그리 오래 되지 않았음에도 불구하고 개념 자체는 기원전부터 존재해 왔다고 볼 수 있다. 자동제어가 실질적으로 설비에 적용되기 시작한 것은 1788년 James Watt의 증기기관이라고 볼 수 있다. 초기의 증기 기관은 배수용



[그림 1] 페루프 시스템



[그림 2] 조속기 원리

터빈 등도 발명이 되어 거버너의 기술도 그 응용 범위가 급격히 넓어졌다. 하지만 조속기의 사용에 있어 피드백 제어계가 쉽게 불안정하게 되는 상황, 즉 조속기와 증기 기관 사이의 상호 간섭 작용에 따라 조속기의 회전 속도가 크게 변동하는 현상이 나타나 이 현상을 해결하기 위하여 증기 기관 조속 장치에 대한 역학적 연구가 활발히 일어나게 된다. Maxwell은 이에 대한 연구를 거듭하던 중 시스템의 안정성 판별을 위하여 근을 실제 구하지 않으면서 대수 방정식의 계수로부터 모든 근의 실수부가 음의 값을 갖는지를 알 수 있는 방법에 대한 의문을 제시하였고 이에 답하여 1877년 E. J. Routh가 Routh 안정 판별법을 발견하고 더 나아가 1895년 수학자 Hurwitz가 이 이론을 체계화하여 오늘날에도 많이 사용되고 있는 Routh-Hurwitz 안정 판별법을 만들게 되었으며 이것은 제어기를 기술하는 미분 방정식을 풀지 않고 계의 안정을 판별하는 최초의 방법이 되었다. 안정 판별에 대한 또 하나의 중요한 연구는 1932년 미국의 Bell 전화 연구소에서 근무하던 H. Nyquist가 피드백 루프를 가진 진공관식 증폭기 회로의 안정에 관련된 연구 도중 발표하게 된 주파수 영역에서의 안정 판별법인 Nyquist 안정 판별법이다. 이후 H. W. Bode의 Bode 선도에서 안정 판별법이 제안되면서 자동 제어 이론은 군사용 무기뿐만 아니라 산업용 설비에 적극적으로 도입되기 시작하였다.

19세기 후반부터 20세기 초반에 걸쳐 수력발전이 시작되어 터빈의 실용화에 따라 동력 설비의 대형화로 조속 문제는 더욱 중요화 되었고 그에 따른 유압 제어 설비의 도입 필요성이 발생하게 되었으며 이 때문에 Watt의 조속기와 같은 단순한 강체 기구에

펌프의 운전에서 사용되었는데 당시 증기 기관에는 입력에 의하여 실린더에 들어가는 증기의 밸브를 조작하지 않으면 안되었다. 이를 제어하기 위하여 그림 2와 같은 부하 변동에 따른 속도 변동을 원심추 원리를 응용한 속도 조절기에 처음 적용한 것이 자동 제어 설비의 시초로 보이며 플랜트 설비의 측면에서 보면 1880년경 Edison에 의하여 발명된 전기를 발생시키고 제어하는 발전소의 제어가 가장 오래된 것으로 볼 수 있을 것이다. 하지만 James Watt의 기관의 경우 이론적이라기 보다는 실제적인 현상을 중심으로 개발된 기술로서 이후 1868년에 J. C. Maxwell이 조속기 시스템의 연구를 수행하여 이론적인 해석을 통한 논문을 발표한 것이 최초라고도 한다.

그 후 증기 기관은 널리 보급되기 시작되어 각 산업의 근간 동력으로 활용되었으며 또한 발전용 증기

의한 설비의 제어에서 유체를 이용한 제어 동작으로 보다 복잡한 기능을 수행할 수 있는 제어 설비의 발달이 가능하게 되었다. 또한 미분 방정식에 의해 계(係)의 거동을 해석하고 과도 응답을 구하는 방식이 체계화되어 제어의 목적과 제어 대상의 성질에 의하여 여러 가지 특성을 제어 장치에 구현할 수 있게 되었다. 하지만 이때까지도 화학 공업 설비와 석유 정제 설비 등의 프로세스(process) 제어의 기술 및 이론의 발전은 활발히 이루어지지 못하였으며 상기의 기계 시스템의 제어 기술 및 이론보다는 좀 뒤늦게 발전하게 된다. 실제 20세기 초까지는 주로 프로세스 관련 설비는 모든 조작이 수동으로 이루어지는 실정이었다.

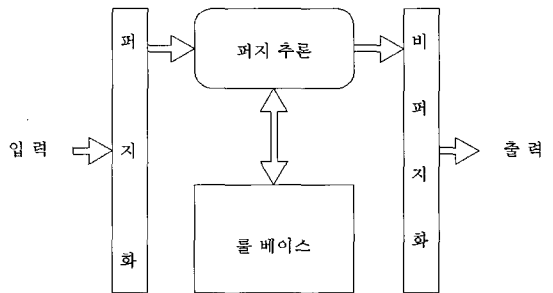
20세기 초에 이르러 석유의 정제 설비 등의 대규모화에 따라 관련 기술도 급속히 발전하게 되는데 프로세스 설비에서 오늘날까지도 적용되고 있는 공기식 제어 기기 등은 1930년대에 이론적으로 완성되었다고 볼 수 있다. 1940년대 세계 제2차 대전을 계기로 산업 설비에 대한 기술이 비약적으로 진보를 거듭하게 되는데 각종 병기의 개발을 위한 다수의 기계 공학, 전자 공학, 통신 공학 등의 전문가들이 설비의 제어에 참가하지 않을 수 없게 되었다. 또한 제어 시스템도 유체를 이용한 제어 시스템에서 전자관을 이용한 것이 대거 출현하게 되었고 전자관식의 아날로그 계산기가 제어계의 해석 및 설계에 있어 사용되게 되었다. 1948년에는 트랜지스터의 발명 상품으로 전자계산기의 최초의 모델이 발표되어 근대 계수제어(計數制御)의 길이 열리기 시작하였다.

1950년대에는 선형연속계의 이론이 완성됨에 따라 해석이 어려운 제어 설비에 대한 접근이 시도되기 시작하였다. 즉 다변수계(多變數係), 비선형계, 불규칙 입력을 갖는 계 등의 이론이 점차 체계화되어 갔다. 또한 목표치에 제어량을 접근시키는 것만이 아닌 최고의 효율을 가지도록 설비의 운전할 수 있는 최적화에 대한 사고도 탄생하게 되었다. 그리고 항공기와 같이 환경 등의 여건에 따라 동특성이 변하는 계에 대해서도 언제나 정상 제어를 행하도록 제어 설비의 성질을 조절하는 적응 제어계에 대한 이론이 출현하게 되었으며 프로세스 설비 분야에 있어서도 중동 지방의 대유전이 연속적으로 발견됨에 따라 에너지 자원이 일약 발전할 것으로 전망됨에 따

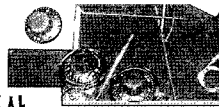
라 프로세스 설비의 제어와 계장도 급격한 진보를 보게 되며 대규모화와 계기의 집중화가 추진됨에 따라서 각종 데이터 처리 장치가 도입, 실제의 동특성에 대한 해석을 수행할 수 있는 배경이 되었다고 볼 수 있다. 또한 시스템 공학이란 용어와 개념이 최초로 제시된 것도 이 때이다.

1950년대 이후의 제어 설비는 반도체 소자의 급격한 발전에 힘입어 전기 전자 중심의 발전을 시작하게 된다. 반도체의 소자의 발달에 따른 전자계산기는 매년 새로운 방식으로 눈부신 발전을 이루었고 1960년대에 들어서서 IC(집적회로) 방식으로 이행이 되었고 이는 설비의 해석 및 제어를 위한 거대한 정보 처리 능력의 기반이 되었다. 동시에 수학과 같은 기초 과학에 대해서도 커다란 혁명 시대가 도래하게 된다. 전산기를 이용함으로써 종래의 방대한 반복 계산이 용이해지고 이를 토대로 전자계산기 이용을 전제로 한 수학을 생각하게 되었으며 근대 제어 이론의 수법을 연구하게 되는 토대가 되었다.

이후 제어 공학에서는 다차원 상태변수 벡터(Vector)를 써서 제어계의 거동을 표현하는 수법이 일반화되었다. 따라서 기존의 안정성 판별법 대신 1892년 Lyapunov가 발표한 이래 빛을 못 보던 Lyapunov의 정리가 근대 제어계의 안정론의 중요한 도구로 등장하게 되었으며 새로이 가관측성(可觀測性, observability)과 가제어성(可制御性, controllability) 등의 개념이 도입되곤 했으며 현대 제어 이론에서 주인공의 역할을 하게 되는 상태(State) 변수의 중요성이 강조되고 시스템의 모든 상태를 측정할 수 없는 관계로 시스템의 입출력 관계로부터 상태를 추정할 필요가 생기게 되어 확률론의 측면에서 칼만



[그림 3] 피지 제어기 구조



필터(Kalman filter) 등이 출현하게 된다. 1970년대 이후에는 전자계산 장치의 발전과 더불어 대규모의 설비를 시스템화하여 이를 통합으로 관리함으로써 시스템과 설비의 운영 효율을 높이는 방향으로 발전되어 왔다고 할 수 있다. 또한 이를 기반으로 인간의 지능을 대신할 수 있는 다양한 수학적 기법을 이용하게 되고 퍼지 제어(Fuzzy control), 신경망 제어(Neural network) 등의 인공지능을 가지는 제어 설비의 출현이 가능하게 되었다.

### 제어기의 발달

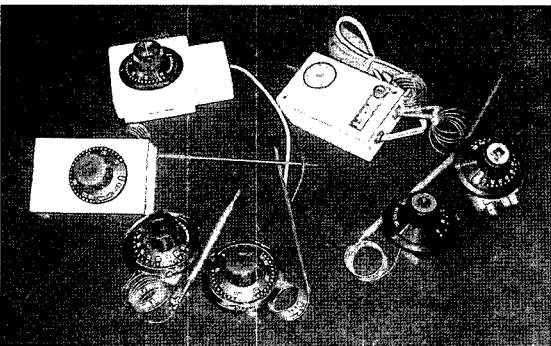
제어기는 앞 절에서 서술한 바와 같이 검출기로부터 측정된 측정값과 제어기에 입력된 입력값과의 오차를 사용하여 제어기에 내장된 제어 알고리즘에 의해 제어 신호를 생성한 후 조작기로 보내는 역할을 수행한다. 최초의 제어기는 기계적인 강체의 일부로 구성이 되어 외부로부터 입력을 받지 않는 자력식(self operation) 방식으로부터 출발하여 유체나 공기를 이용한 공기식 제어기, 전기적인 신호의 교환을 통하여 제어 역할을 수행하는 전기식 제어기, 대상으로부터의 전기적인 신호를 받아 이를 전자 회로를 거쳐 제어 역할을 수행하는 전자식 제어기, 전산기를 기반으로 하여 내장된 알고리즘을 이용한 제어를 수행하는 디지털 제어기의 형태로 발전되어 왔다. 각 제어기의 특징은 다음과 같다.

자력식 제어기는 다양한 형태로 발전되어 왔지만 지금까지도 많이 사용되는 형태는 그림 4와 같은 더모스탯(thermostat)이다. 더모스탯은 제어기와 센

서가 하나로 결합된 것과 같은 역할을 하며 주로 온도 등을 제어할 때 사용된다. 이중 온도 더모스탯은 건물의 야간과 주간과의 경우와 같이 시간에 따라 두 개의 다른 설정 온도로 유지할 필요가 있는 곳에 사용되며 사역대(deadband) 더모스탯은 냉방이나 난방을 위하여 하나의 더모스탯이 요구될 경우 냉방과 난방의 불필요한 전환을 방지하기 위하여 냉방과 난방 사이에 사역대를 설정할 수 있다. 또한 조작기의 작동 단계를 세분화한 다단계 더모스탯과 출력이 공기압인 공기식 더모스탯 등이 있다.

공기식 제어기(pneumatic controller)는 제어 입력력 매체로 공기압을 사용하는 제어기로 더모스탯에 비해 보다 다양한 제어가 가능하고 구조가 단순하며 안전한 장점이 있으나 공기압을 공급하는 별도의 장치가 요구되는 단점이 있다. 1970~80년대부터 많이 적용되기 시작하였으며 최근까지도 전기적인 장치를 사용할 수 없는 방폭(防爆)을 필요로 하는 설비에 적용되기도 한다. 보통 단순화된 소형 시스템보다는 빌딩이나 복잡한 설비 등의 중·대형 시스템에 적합한 제어기로서 2-위치(2-point controller), 비례(proportional controller), 비례-적분(Proportional-integral controller), 비례-적분-미분 제어기(proportional-integral-derivative controller) 등의 형태로 사용한다.

전기회로를 사용하는 전기식 제어기(electrical controller)는 2-위치 제어기, 부유 제어기(floating controller), 펄스 변조 제어기, 비례 제어기 등의 형태로 구분되어 사용된다. 2-위치 제어기는 버너, 펌프, 댐퍼 등과 같이 냉·난방 시스템의 각 구성 요소를 개폐시킬 때 전기 스위치 회로를 사용하여 제어하는 방식이다. 부유 제어기에는 스위치가 접촉되지 않는 중립 영역이 존재하며 일반적으로 느린 응답 특성과 넓은 교축 범위를 가지고 있는 시스템의 제어에 사용한다. 펄스 변조 제어기는 스위치 접촉 지속 시간을 펄스 지속 시간에 의해서 조정하는 방법으로서 좀더 정밀한 제어가 필요할 때 사용하며 측정값이 설정값에 근접하면 짧은 펄스 지속 시간을, 측정값이 설정값에서 멀어지면 긴 펄스 지속 시간을 사용한다. 비례 제어기는 전기 조절기를 통해 오차에 비례하는 전기 신호를 출력하여 출력값이 설정값을 유지하도록 비례적으로 제어하는 방식이다.



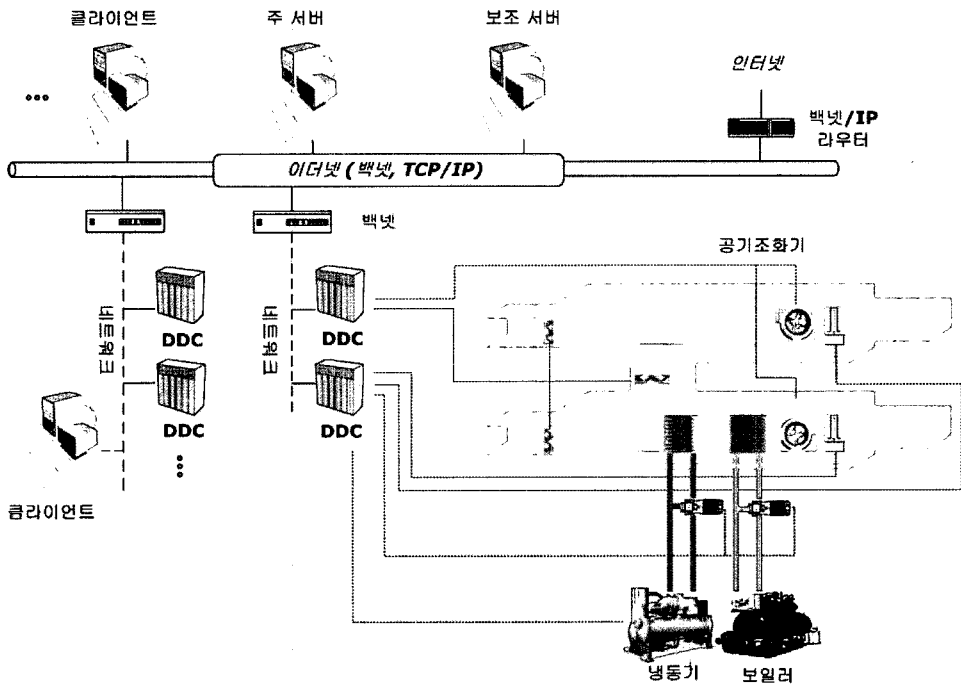
[그림 4] 더모스탯

전자식 제어기(electronic controller)는 전기식 제어기와 동일한 전자 밸브, 릴레이 등을 사용하고 신호의 전송 및 동력을 위하여 일반 상용 전원을 이용하는 점에서는 전기식과 동일하나 전기식이 검출부로부터 직접적인 가변 출력을 발생하는데 비하여 전자식은 온도, 습도, 압력 등의 검출부에서 측정된 값이 전자 회로를 거치면서 설정값과 비교된 보상 출력에 의해 제어 대상을 조작하는 제어기로서 제어성이 향상되어 경제적 운전이 가능하며 원격 제어 장치와 연결이 가능한 장점을 가지고 있어 비교적 복잡한 제어가 가능하며 중·대규모 빌딩의 공조나 기타 정도가 요구되는 산업 제어 설비에 적합한 시스템이다.

디지털 제어기(digital controller)는 제어 시스템에 필요한 제어 알고리즘들을 제어기 내의 메모리에 저장하여 제어하는 방식으로써 전기식 제어기나 공기식 제어기 등에 비해 사용이 간편하고 개선된 제어 알고리즘을 적용하여 보다 우수한 제어를 할 수 있는 장점을 가지고 있으며 대표적인 예로 PLC

(programmable logic controller)와 직접 디지털 제어기(direct digital controller)를 들 수 있으며 DDC를 적용한 빌딩 제어 설비의 예를 그림 5에 나타내었다.

디지털 제어기는 복수의 제어 시스템을 제어할 때 사용할 수도 있으며 다양한 종류의 입력과 출력도 하드웨어 인터페이스를 통해 처리하여 사용할 수 있다. 전압, 전류 등과 같은 다양한 아날로그 입력 신호는 아날로그/디지털 변환기를 통해 디지털화 되고 그 값을 기초로 제어 알고리즘을 통해 제어 값을 계산하여 디지털/아날로그 변환기를 통해 출력하여 밸브나 팬과 같은 구동기를 제어한다. 사용자는 설정값, 계인, 제한값 등과 같은 제어 알고리즘의 각종 파라미터를 다양한 방식으로 입력할 수 있으며 입력된 각종 파라미터는 제어 알고리즘에 의해 적절히 사용된다. 수정이 불필요한 주요 알고리즘은 영구 메모리에 저장되고 수정과 변경이 요구되는 각종 파라미터는 반영구 메모리에 저장하여 필요에 따라 수정이 가능하며 또한 사용자가 제어 알고리즘을 표



[그림 5] 디지털 제어기를 적용한 빌딩 자동 제어 설비



준 언어나 심벌을 사용하여 편리하고 쉽게 재구성할 수 있다. 공기식 제어기나 전기식 제어기는 제어기에 설치된 스위치나 전위차계를 사용하여야만 파라미터 조절이 가능하나 디지털 제어기는 제어기에 설치된 스위치나 전위차계 뿐만 아니라 단말기나 컴퓨터를 통해서도 조정가능하며 특히 원거리에 위치한 메인 작동 장치 또는 다른 제어기의 상위 중앙 컴퓨터에서도 원거리 조절이 가능하다. 최근에는 근거리통신망(local area network : LAN) 또는 광역통신망(wide area network : WAN) 등의 네트워크를 이용해 여러 곳에 분산되어 있는 설비와 제어 시스템을 유기적으로 결합시켜 중앙에서 감시와 원격 조장이 가능한 군관리 제어 시스템이 보편화되고 있으며, 정보 통신의 발달로 인터넷 사용이 보편화됨에 따라 인터넷을 사용한 제어기 인터페이스가 가능하게 되어 인터넷을 지원하는 컴퓨터만 있으면 원격지에서 제어 시스템에 접근하여 제어를 수행할 수 있는 시스템도 이용되고 있다.

### 자동 제어 설비의 향후 전망

최근 자동제어 설비와 관련된 기술은 매우 급격히 발달하고 있으며 이 때문에 향후 자동제어 설비의 발전방향은 어느 방향으로 진전될지 예측하기 매우 어렵다. 하지만 단기간에는 현재의 제어 설비의 강인성에 중점을 둔 연구가 진행될 것으로 예측되고 장기적인 관점에서는 최근 5~6년 사이 적용되기 시작한 인간과 유사한 사고를 수행할 수 있는 인공지능 등의 제어 알고리즘과 연계한 각종 제어 설비의 개발에 관심이 집중될 것으로 생각된다.

이제 자동 제어 설비는 인간의 시간과 정신을 자유롭게 할 수 있는 기반 기술이라 할 수 있다. 이 때문에 자동 제어 설비는 최초의 “있으면 매우 편리한 것”에서부터 “없어서는 안 되는 것”으로 이르게 되었다. 또한 현재의 자동 제어 설비의 발전 속도로 전망하건데 자동제어의 중요성은 날로 커져갈 것이라고 고려된다. (㉔)