

PLC를 이용한 원자력 발전소의 Dual Tower Dryer 운전 적용에 관한 연구

(An Application of a PLC to a Control System for a Dual Tower Dryer
in Nuclear Power Plant)

박종범* · 임화영** · 조 황***

(Jong-Beom Park · Wha-Yeong Yim · Whang Chog)

요 약

본 논문은 CANDU 형 원자력 발전소의 Dual Tower 증수증기 회수 계통을 경제적, 효율적으로 운전하기 위하여 PLC를 사용한 제어기를 개발한다. 기계식 타이머와 릴레이를 사용한 기존의 제어기의 문제점을 분석하고 해결함으로써 향상된 운전 성능을 제공한다. 개발된 제어기는 PLC의 기능을 이용하여 시간제어와 노점제어를 결합한 형태의 제어 알고리즘을 채용하고 각종 감시 및 보호기능을 추가함으로써 더욱 정밀하고 안전한 운전기능을 제공한다. 제안된 제어기를 사용함으로써 운전비용 및 성능 측면에서의 최적화를 얻을 수 있다.

Abstract

A control system using a programmable logic controller (PLC) has been developed for a dual tower dryer (DTD) in a canadian deuterium natural uranium reactor (CANDU) type nuclear power plant. This system will replace the existing DTD control system which was implemented with mechanical timers and relays. The new control system makes it possible for an operator to perform more precise time and dew point control for the DTD, thanks to the high efficiency and flexibility of the PLC. The operational cost for the control system is much reduced compared to the existing system.

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전 및 생활수준 향상으로 새로운 문명의 이기들이 개발되고 사무실 및 공장 그리고 각 가정에서 필요로 하는 전력은 이에 비례하여 증가하는 추세에 있다. 그러나 필요한 전력을

충당하기 위한 발전 설비의 확충은 설비의 규모(장소, 비용 등) 때문에 중·장기 계획에 의해 이루어질 수밖에 없는 현실이다. 따라서 현재 운영중인 발전소의 효율적인 이용을 통한 원활한 전력 수급이 필수적이며 이는 발전설비의 정상적인 가동이 전제되어야 한다. 특히 환경과 자원고갈 등의 여러 요인에 의해 원자력 발전은 점차 그 비중이 높아지고 있고, 국내에서도 원자력 발전의 기저부하를 담당하여 안정적인 전력 공급에 큰 기여를 하고 있다. 그러나 이와 같은 긍정적인 효과에도 불구하고 원자력발전소의

*정회원 · 한전 전력연구원 선임연구원
**정회원 · 광운대학교 제어계측공학과 교수
***정회원 : 광운대학교 제어계측공학과 교수
접수일자 : 2000년 3월 21일

안전성 및 방사능 누출 등을 우려하는 회의적인 시선이 끊이지 않고 있다. 최근에는 발전소 원자로 건물 내 중수누출 사고가 발생하여 사회적 문제로 대두되었으며, 이런 문제점들의 발생으로 안전성 측면을 강화하기 위한 시설 보강에 따르는 부대비용 증가로 인한 경제성 논란도 일고 있는 실정이다.

1980년 이후 전자 및 반도체 기술의 비약적인 발전에 힘입어, 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 제어기들이 산업체 설비, 대형 플랜트 등의 설비자동화에 지금까지 선두자적 역할을 담당하고 있다. 1960년대의 낙후된 기술로 설계된 CANDU형 원자로의 중수증기 회수 계통은 원자로 건물 안의 습분을 고려하지 않고 기계식 타이머를 이용해 일정 시간마다 계통의 운전모드를 전환시키는 시퀀스제어로 설계되어 설비가 비효율적이며 중수회수 능력 저하 및 작업자의 삼중수소 피폭을 증가시키는 등의 결과를 초래하고 있다[1-7].

이러한 기존제어의 문제점들을 해결하기 위해서는 기존 기계식 타이머 방식을 마이크로 프로세서가 내장된 디지털 제어기로 바꾸는 것이 필요하다. 또한, 원자로 건물 안의 습분을 고려한 노점제어 방식을 도입하여 노점 및 온도 기준의 제어 방식을 채택함으로써, 기존의 문제를 해결하고 제어의 정확성과 효율성 향상을 얻을 수 있다 [8,9]. 몇몇 외국의 원자력 발전소에서 기존 기계식 타이머 방식을 디지털 방식으로 개선하여 사용하고 있으나, 기존의 시간 기준의 시퀀스제어 방식을 그대로 채택하고 있어서, 기계식 타이머 방식에서의 기계적 노화에 따른 문제에만 대처하고 있을 뿐 여전히 비효율적으로 운용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 PLC를 사용하여 기존의 문제점들을 해결하고 성능을 향상시킨 중수증기 회수계통의 제어장치를 개발하여 적용한다. 노점제어 방식을 채택한 새로운 형태의 제어방식을 제안하며, 운전원의 선택에 따라 시간 및 노점제어가 가능하도록 한다. 기존의 기계식 타이머 방식의 시퀀스제어 시스템과 PLC 제어를 병렬로 설치하여 계통의 안정성을 높이고, 자체 개발한 여러 가지 사용자 프로그램으로 기존 시스템의 특성을 분석, 진단할 수 있도록 한다. 중수증기 회수 계통은 크게 Single Tower 형태와 Dual Tower 형태로 나누어지는데, 본 논문에서는 Dual Tower 형태에 대해서만 논의한다.

2장에서 중수증기 회수 계통의 특성에 대해 설명

하고, 3장에서 기존시스템의 문제점에 대해 분석하고 또한 새로운 제어시스템 및 제어방법을 제안한다. 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 중수증기 회수 계통의 특성 및 문제점

원자로 건물은 많은 계통과 기기들이 들어있는 운전지역과 출입지역이 있어 원자로 운전중 또는 정지 및 보수기간 중에 중수증기나 액체 중수의 누설이 발생된다. 이러한 지역은 크게 두 개의 지역으로 나누어 삼중수소의 오염을 줄이도록 설계되어 있다[7]. 즉, 중수증기 회수 계통과 환기계통 지역으로 나누어지며 중수 누설가능성이 큰 지역에는 중수증기 회수 계통을 설치하여 오염된 공기를 순환시켜 오염방지는 물론 고가의 중수를 회수하는 반면, 누설 가능성이 작은 지역에는 환기계통을 설치, 오염된 공기를 저장시킨 후 대기로 방출시킴으로써 격납용기내의 삼중수소의 축적을 방지하고 있다. 중수증기 회수 계통의 운전방법은 다음과 같이 설명할 수 있다.

2.1 운전방식

첫째. 흡습모드(Adsorption Mode)

원자로 건물내의 공기를 Blower로 빨아들여 흡습제 베드, 냉각기를 통과시켜 습분을 제거하여 차고 건조한 공기를 원자로 건물 내로 배출시키는 모드이며[10], 기존 시스템은 10시간으로 설정되어 있다.

둘째. 재생모드(Regeneration Mode)

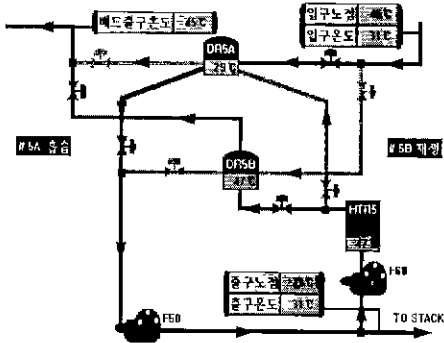
습분을 함유한 흡습제 베드를 건조시키기 위해 가열기가 켜졌을 때부터 베드 내부의 온도가 설정점에 도달하기까지의 기간이며[11], 이때 공기는 Blower, 가열기, 흡습베드 냉각기를 내부 순환(Closed-loop)하는 모드이다.(일반적으로 중수회수 계통에서는 재생모드라 하면 재생모드와 냉각모드를 함께 통칭함)

셋째 냉각모드(Cooldown Mode)

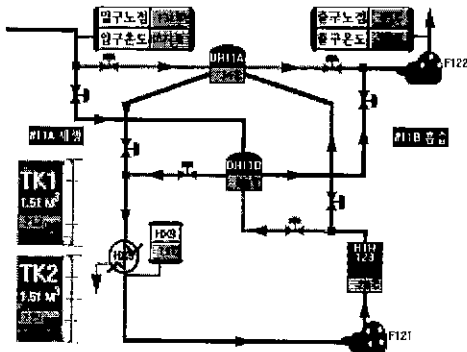
가열기가 꺼진 후 재생모드와 같이 공기가 루프내부를 계속 순환하는 기간을 냉각모드라 한다. 이 모드는 흡습제 베드 내부온도와 냉각기 입구측의 공기 온도를 기준으로 설정되며, 재생모드와 냉각모드를 합쳐 5시간으로 설정되어있다.

2.2 기존시스템의 제어

Dual Tower Drier의 구성은 5A/B, 11A/B 되어 있으며, 그림1은 5A/B, 11A/B를 나타내고 있다. 각 두 개씩 묶여 한 계통을 이루고 재생 5시간, 흡습 5시간으로 고정 설정되어 있다. 또한 이들은 기계식 타이머에 의하여 제어되고 있으며 서로 연동되어 있어 동시에 재생운전 될 수 없으며 재생온도는 175 [°C] 로 설정되어 있다. (계통도에 나타난 기호의 설명문(Full Name)은 다음과 같다. DR : Drier, HTR : Heater, F : Fan)



(a)



(b)

그림 1. Dual tower drier 계통도 (a)5A/B (b)11A/B
Fig. 1. Dual tower drier system (a)5A/B (b)11A/B

그림 2와 같이 기존제어는 기계식 타이머를 이용하여 제어시간을 설정하기 때문에 정확한 시간 설정

이 불가능하므로 이로 인한 오차시간이 여러 주기 동안 누적될 경우 주기가 적은 쪽이 두번 연속 재생 모드에 들어가게 되고, 다른 한편은 인터록으로 인해 상대편 재생이 끝날 때까지 흡습상태로 대기해야 한다[7,14]. 결국 재생시간 만큼 더 흡습 후 재생에 들어가야 하므로 Dryer는 포화상태가 되어 출구노점은 입구노점보다 높아지게 된다 또한, 모드전환의 주요한 기능을 맡고 있는 기계식 타이머의 잦은 점검 고장으로 모드전환이 제대로 이루어지지 않은 채 한 쪽 Dryer는 계속 재생모드, 상대편 Dryer는 계속 흡습모드로 운전되어 Dryer의 성능을 제대로 발휘하지 못한다 즉 Dryer의 성능을 상실한다는 의미이다.

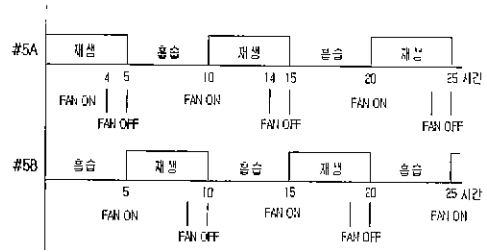


그림 2. 기존제어 알고리즘의 timing diagram.
Fig. 2. The timing diagram of the existing control algorithm.

기존 시스템은 타이머 고장에 대한 경보장치가 설치되어 있지 않아 운전원의 고장 감지가 어려운 실정이며, 또한 Dual tower dryer은 Single tower dryer와는 다른 2가지의 중요기능을 갖는데 이는 다음과 같다.

- 5A/B : 원자로건물 연료장전실(R-107,108)에서 기존의 Single Tower Drier에서 회수하는 설비의 보조역할을 담당한다. 연료장전실은 중수의 누설높이 다른 장소보다도 높으며, 삼중수소 농도도 다른 장소보다 높아 삼중수소 오염의 확산을 최소화시키기 위해서 건물 출입지역보다 압력을 낮게 유지시키는 기능을 담당한다

- 11A/B : 증기발생기실(R-501)을 담당하며 이 지역은 다른 장소보다 중수의 누설이 작으며, 다른 계통과는 다르게 원자로건물 안에 설치되어 있다. 이 지역은 핵연료의 교체가 없으면 운전중 연속적으로 출입이 가능하여 유지보수가 가능하다

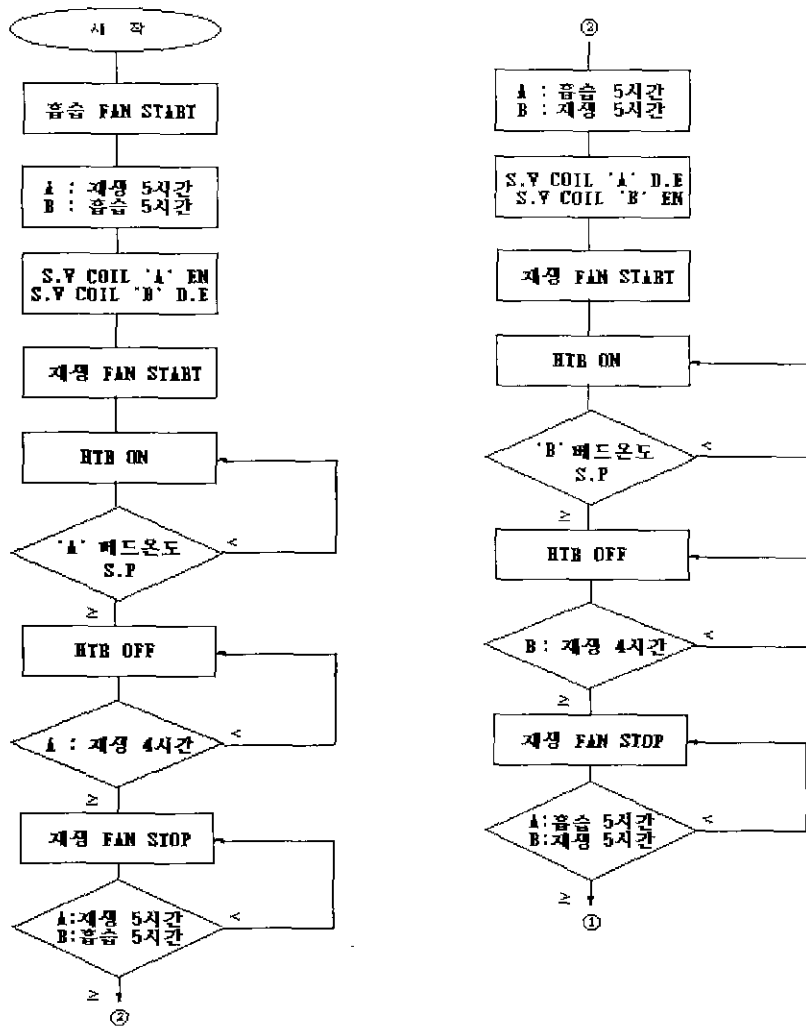


그림 3. 기존 제어 알고리즘의 흐름도.
Fig. 3. Flow chart of existing control algorithm.

즉, Single tower dryer의 정상적인 동작인 가능하도록 도와주는 기능을 수행하며, 그림3은 기존제어 방식의 흐름도를 나타내고 있다.

2.3 기존제어의 문제점

첫째. 재생시간 설정의 부적절

원자로 건물내 습도가 다르다면 같은 시간동안 흡습했을 때 베드가 흡습한 중수량이 다르므로 따라서 재생에 걸리는 시간이 달라지며 베드의 주위온도에 따라서도 재생시간이 1시간 이상 차이가 난다. 이러한 이유로 원자로 건물내의 대기온도가 계절적 영향을 받아 겨울에는 재생과 냉각(베드 40[°C] 기준)시간이

4시간 정도이지만, 여름에는 5시간 정도로 늘어나며 기존시스템은 여름을 기준으로 설정되어 있다. 즉, 같은 계절에 하나의 Dryer가 동일시간 동안 흡습하더라도 입구 노점이 다르면 흡습한 중수량이 다르므로 재생 시간도 1시간 정도 차이가 난다. 기존시스템은 재생시간이 5시간으로 고정 설정되어 있으므로 재생이 끝나고도 1시간 이상 휴지상태로 운전되고 있으며 이로 인한 전력을 낭비하고 있는 실정이다.

둘째. 흡습시간 설정의 부적절

원자로 건물내의 대기습도를 무시한 시간 설정(5시간)으로 장마기에는 Dryer 출구쪽 노점이 입구쪽 노점보다 높아져 Dryer로서의 성능을 잃어버리게 된다. 즉, 출구노점이 입구노점보다도 높다는 의미는 출구쪽에서 이슬점이 높다는 말로 출구쪽에서 흡습한 공기들이 중수가 된다는 것으로 Dryer가 제 기능을 상실했다는 의미이다.

셋째 기계식 타이머의 문제점

현장에 설치된 제어 패널에서 다이얼을 이용하여 시간을 설정하기 때문에 정확한 시간 설정이 어려움으로 인해 양쪽 Dryer의 한주기(재생+냉각+흡습) 시간이 서로 다르며, 이 오차시간이 여러 주기가 누적되면 주기가 적은 쪽이 두 번 연속 재생모드에 들어가게 된다. 이때 다른쪽은 인터록으로 인해 상대방이 재생이 끝날때까지 흡습 상태로 있어야하며, 결국 최대 재생시간(5시간) 만큼을 더 흡습후 재생에 들어가야 하므로 Dryer는 포화상태로 되고, 출구노점은 입구노점보다 높아지게 된다. 또한 모드변환의 중요기능을 갖고 있는 기계적 타이머의 잦은 점접 고장으로 모드전환이 이루어지지 않고, 한쪽 Dryer는 계속 재생모드이고 상대방 Dryer는 계속 흡습모드로 계속 운전되어 Dryer의 성능을 제대로 발휘하지 못하게 된다. 기존시스템에는 타이머 고장을 감지할 수 있는 경보장치가 설치되어 있지 않아 현장운전원들이 현장 조사(Survey)를 할 때나 고장을 감지할 수 있다.

넷째. 원격제어 불가능과 감시설비의 부재

원자로 건물내에 설치되어있는 기기 제어반에 대해서는 비상사고시 원격제어기 불가능하여 신속한 중수회수가 이루어지지 못하며, 또한 중수회수설비의 성능과 변수를 체계적으로 감시, 분석, 저장할 수 있는 설비가 없다

3. 실험장치 및 개발 적용한 알고리즘

3.1 실험장치 구성회로

실험을 위해 개발한 장치의 구성도는 그림 4와 같다. 프로세스 모듈은 PLC 제이기 기본 모듈로서, 시스템관련 기기의 관리 및 운전을 담당하며 16비트 마이크로 프로세서를 내장하고 있고 입출력 가능 신호수는 디지털 신호일 경우 최대 1600점, 아날로그 신호일 경우 최대 100점이다[11,12]. 디지털 입력 모듈의 정격입력전압은 DC 12-24[V]이고, 모듈 1개의 입력점수는 32점이며 극성은 무극성이다. 또한 디지털 출력 모듈은 32점이며, 아날로그 입력캡슐의 입력 신호 전압 범위는 0-10[V]이고, 입력점수는 8점이다. 중수증기 회수 계통의 디지털 신호를 받아들이기 위해 각 접점에 병렬로 설치한 입력 릴레이와 PLC에서의 출력 인터페이스 릴레이 및 기존시스템과 PLC간의 운전 전환 릴레이 보드가 설치되어 있다.

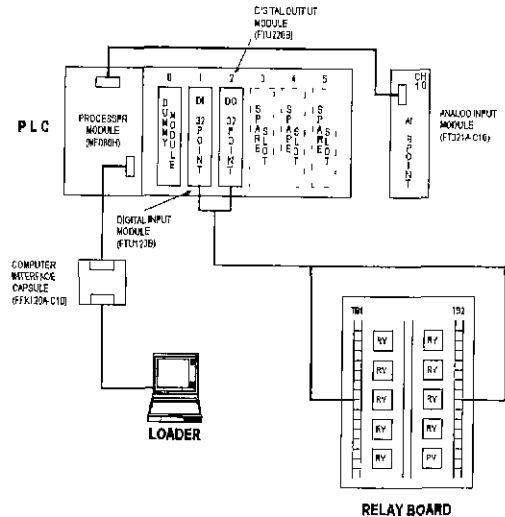


그림 4. 실험장치.
Fig. 4. Experimental apparatus.

3.2 개발한 알고리즘

기존의 제어방법으로 운전할 경우에는 입구노점과 주위온도의 변화에 대해 시스템을 자동운전할 수 없

으므로 Dryer 출구노점은 전혀 제어하지 못할 뿐만 아니라, 원자로 건물내 삼중수소의 농도를 적절히 감소시키지 못한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 그림 4와 같이 구성한 실험장치를 기존시스템과 병렬로 설치하여 여러 조건으로 나누어 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 토대로 하여 출구노점과 베드의 온도를 제어변수로 사용한 제어 알고리즘을 개발하였다. 실험결과에 대한 상세한 내용은 [14] 및 [15]를 참조하기 바란다.

기존 시스템은 재생의 시작, 재생을 위한 가열시간, 가열후의 냉각시간 및 흡습의 시작을 모두 기계식 타이머를 사용한 시간제어 방식을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 상태전환 조건들에 대해 출구노점, 베드온도 및 시간을 결합시켜 실험함으로써 효율적인 상태전환 조건을 찾아내었다.

기존 시스템은 5시간동안 흡습동작을 한 후에 재생을 시작하도록 되어 있다. 흡습설정 5시간동안 출구노점에 대한 조건을 만족시킬 수 있는 입구공기의 노점은 -10℃ 근처이며, 입구노점이 그 이상인 경우에는 운전 요구조건인 출구노점 -34.4[℃]를 만족시키지 못하므로 흡습에서 재생으로의 모드 전환 운전 인자는 출구노점으로 삼았다. 즉, 출구노점을 운전인자로 삼아 운전할 때 흡습시간이 대기습도에 따라 자동가변 되었다. 운전 요구조건인 출구노점 -34.4[℃]에 약간의 여유분을 두고 출구노점이 -40[℃]가 되면 재생을 시작하도록 하였다.

재생시간은 여름철에는 가열 2시간, 베드온도 40[℃]까지 냉각이 3시간 10분으로 총 5시간 10분이지만, 겨울철에는 가열 1시간 30분, 냉각 1시간 45분으로 총 3시간 15분으로 계절(대기온도)에 따라 달라지므로, 베드온도를 재생을 위한 가열시간 및 가열후의 냉각시간 결정 기준으로 하였다.

기존 제어 시스템에서는 재생을 위한 가열 시간을 175[℃]까지 도달하는 시간으로 잡고 있다. 회수율을 증대시키기 위해 재생 설정점을 185[℃]로 높여 노점 제어를 시도해 왔는데, 출구노점, 중수회수량 및 전력소비 측면에서 기존의 설정점 175[℃] 운전때보다 좋지 않다는 것을 알 수 있었다. 실험결과가 표 1에 요약되어 있다. 실험의 수행 기간은 175[℃] 노점 제어 운전은 8월초, 185[℃] 노점 제어 운전은 9월중순에 비슷한 조건을 가지고 수행하였다.

표 1 재생운전 비교 (175[℃]와 185[℃])
Table 1. The comparison of regeneration operation at different temperatures (175[℃] and 185[℃]).

	175℃ 재생		185℃ 재생	
운전시작점이 만날 때까지의 주기 횟수	6		5	
평균 흡착시간(시간) (-36℃ 까지)	13:20		15:20	
재생시간(시간) (1회 가열시간)	#1	#2	#1	#2
	4:10 (1:55)	4:10 (2:20)	4:40 (2:30)	5:10 (3:30)
총 가열시간(시간)	25:30		30:00	
1주기(시간)	13:30		16:00	
총 회수량(kg)	1986.27		1756.39	

재생을 위한 가열 후의 냉각시간은 실험을 통하여 베드온도 40℃부근에서 적당한 시간을 결정할 수 있었다. 베드온도 40℃를 설정점으로 했을 경우 겨울에는 기존시스템으로 운전할 때보다 Dryer 재생이 끝난 뒤 1시간 45분간의 불필요한 재생시간을 감소시킬 수 있었다. 베드온도는 보통 지수 함수적으로 감소하므로 온도가 낮은 부분에서는 냉각 시간이 오래 걸린다. 베드온도가 45℃에서 40℃까지 냉각되는데 50분 가량 걸리고, 베드온도가 45℃에서 재생에서 흡습으로 전환할 경우에도 입·출구 노점에 커다란 영향을 미치지 않으므로 여기에서는 45℃를 설정했다.

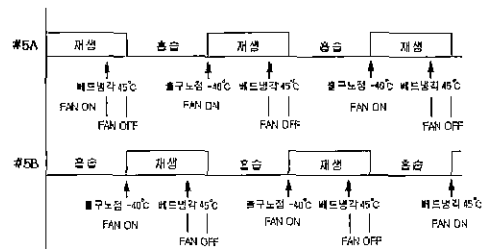


그림 5. 개발한 알고리즘의 timing diagram.
Fig. 5. The timing diagram of the developed control algorithm.

45[℃]로 설정할 경우에는, 재생시간이 일률적으로 5시간으로 고정된 기존 제어 방식에 비해, 여름에 40

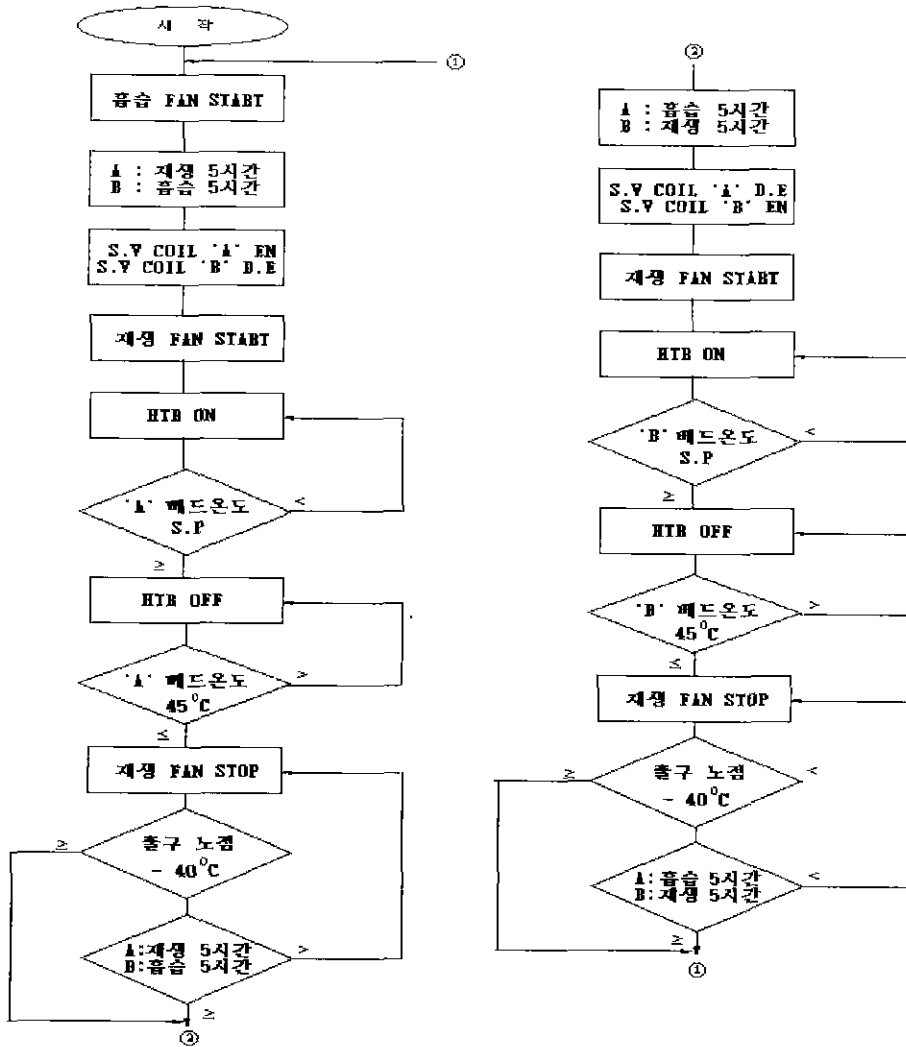


그림 6. 개발한 제어 알고리즘의 흐름도.
 Fig. 6. Flow chart of developed control algorithm.

분간, 겨울에는 2시간 30분 정도의 불필요한 재생시간을 감소시키고 바로 흡습모드로 전환할 수 있어 그만큼 Dryer를 효율적으로 운전할 수 있었다.

다음으로 한쌍으로 되어있는 Dryer들이 동시에 재생상태에 있지 않게 하기 위한 제어방식을 고려한다. 기존 제어기의 경우는 한쌍으로 되어 있는 Dryer들

은 서로 인터록으로 동시에 재생상태에 있지 않도록 하는 단순한 방식을 사용하였다. 본 연구에서는 앞에서 설정한 재생조건에 따라 한쌍의 Dryer가 순차적으로 재생 및 흡습을 반복하도록 함으로써, 한쌍의 Dryer가 동시에 포화상태가 원활한 중수회수 동작이 일어나지 않게 되는 경우를 방지하였다. 동시에, 한

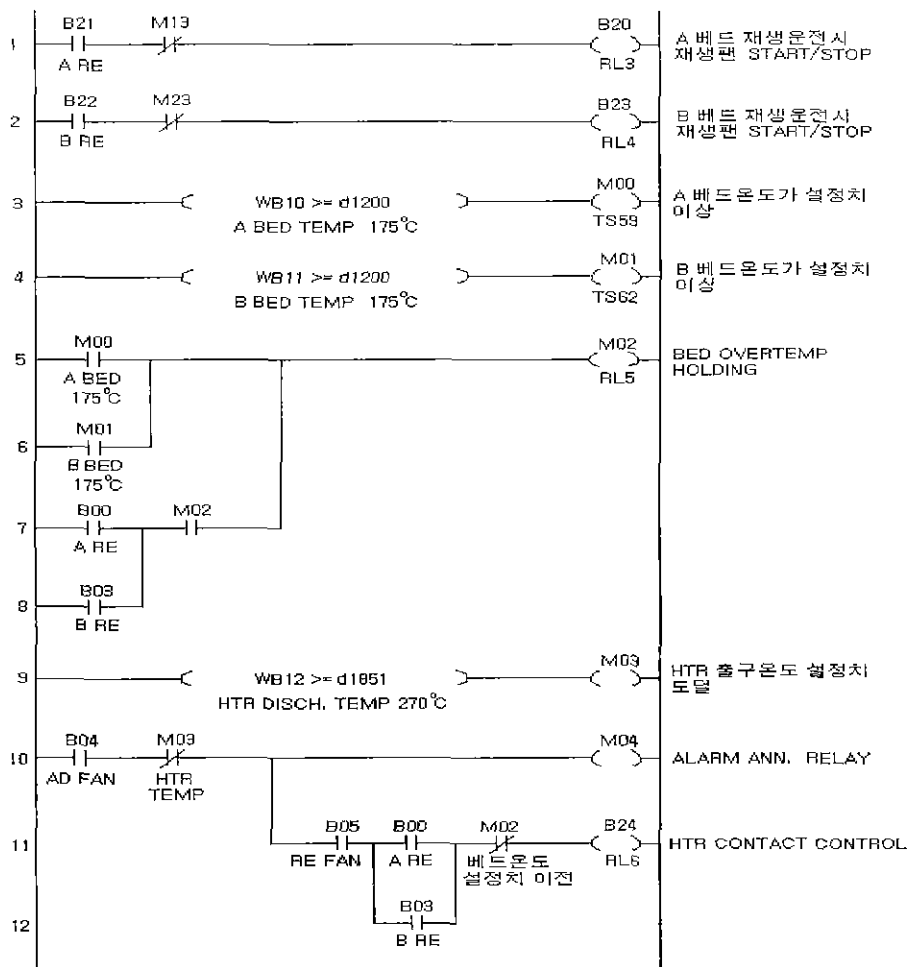


그림 7. PLC ladder diagram 제어알고리즘
 Fig. 7. PLC ladder diagram control algorithm.

번에 한 Dryer만 동작하도록 함으로써 전력절감의 효과를 극대화하였다. 다음으로 한쌍으로 되어있는 Dryer들이 동시에 재생상태에 있지 않게 하기 위한 제어방식을 고려했다. 기존 제어기의 경우는 한쌍으로 되어 있는 Dryer들은 서로 인터록으로 동시에 재생상태에 있지 않도록 하는 단순한 방식을 사용하였

다. 본 연구에서는 앞에서 설정한 재생조건에 따라 한쌍의 Dryer가 순차적으로 재생 및 흡습을 반복하도록 함으로써, 한쌍의 Dryer가 동시에 포화상태가 될만한 중수회수 동작이 일어나지 않게 되는 경우를 방지하였다. 동시에, 한번에 한 Dryer만 동작하도록 함으로써 전력절감의 효과를 극대화하였다.

위에서 열거한 내용을 간략하게 정리하면 흡습에서 재생으로의 운전모드 전환은 Dryer 출구노점을 제어인자로 이용하였으며, 재생 운전모드의 완료는 냉각중일때의 베드 온도를 이용했다. 즉 흡습운전중 시간의 흐름에 따라 베드가 점점 중수증기를 많이 흡습하여 흡착성능이 점차적으로 저하되면 Dryer 출구노점이 상승하게 되고, 설정점 $-36[^\circ\text{C}]$ 에 도달하면 흡습에서 재생모드로 운전 전환하게 된다. 재생모드로 들어가면 가열기가 켜지고, 베드의 온도가 설정점 $175[^\circ\text{C}]$ 에 도달한 후 가열기가 꺼지면 베드가 점차적으로 냉각되기 시작한다. 냉각운전중 베드의 온도가 설정점 $45[^\circ\text{C}]$ 에 도달되면 재생을 완료하도록 하였다. 재생이 완료된 Dryer는 흡습 운전중인 다른 Dryer가 재생조건이 될 때까지 대기상태에 있다가, 이 Dryer가 재생 운전모드로 전환되는 순간 흡습 운전을 시작하도록 하였다 또한, Dryer에는 최대 흡습운전 시간을 설정하여 일정시간이 지나면 재생 작용이 일어나도록 하였다.

이와 같은 방법을 사용하여 개발된 제어 알고리즘의 timing diagram은 그림 5와 같고, 이를 흐름도로 나타내면 그림 6과 같다. 개발된 알고리즘은 PLC 운전 프로그램인 ladder diagram으로 그림 7과 같이 구현하였다.

3.3 개발한 제어기의 적용 및 기존 시스템과의 비교

PLC에 노점제어 알고리즘을 적용하여 개발된 제어기는 기존의 기계식 타이머 방식의 제어기와 병렬로 설치하여 적용하였다. 운전원의 조작에 의하여 기존의 제어기와 개발된 제어기를 선택적으로 사용할 수 있게 하였다. 개발된 제어기로 운전중에 기존 제어기로 전환할 경우에는 각종 타이머를 현재 동작상태에 따라 적절히 재설정된 후에 운전이 계속되도록 하였다. 개발된 제어기에는 고장을 감시할 수 있는 모듈을 설치하여 오동작이 감지되면, 기존의 기계식 제어기로 전환하여 운전을 계속하며 문제를 해결하도록 하였다. 개발된 제어기에서 감시하는 고장의 종류는 다음과 같다.

- 베드온도 및 노점 정보의 오류
- 가열기 및 냉각기 동작의 이상
- 제어기를 연결하는 통신망의 이상
- 제어기의 오동작에 대한 상호 감시

또한, 유지 보수 기능의 강화를 위하여 각종 사용자 프로그램을 추가하였다. 유지 보수를 위한 사용자 프로그램의 기능은 다음과 같다.

- 중수회수장치 상태 정보들의 저장
- 경보의 발생
- 원격 수동 제어 기능

개발한 시스템은 그림 8과 같이 월성원자력 제1발전소에 설치되었다.

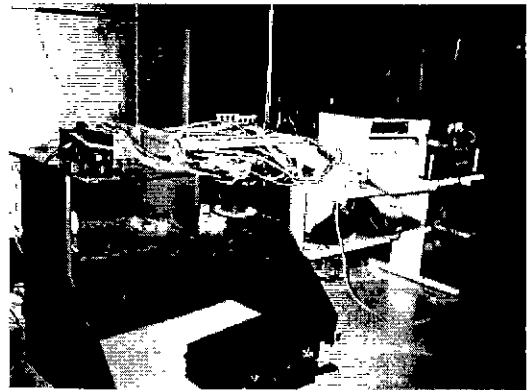


그림 8. 현장설치 장면.
Fig. 8. Local installation of experimental apparatus.

기존 시스템에 대한 성능개선을 평가하기 위하여 다음의 지표들을 사용하였다.

- 중수회수능력
- 전력 손실
- 삼중수소피폭
- 현장 점검 소요시간

1) 중수회수능력

중수회수장치의 출구 노점은 중수회수능력을 평가하는 기준이 될 수 있다. 기본적으로 운전요구조건인 $-34.4[^\circ\text{C}]$ 이하가 되어야 하며, 출구 노점이 낮을수록 원활한 중수회수 동작이 이루어진다. 기존의 제어기에서의 출구노점과 개발한 제어기를 적용한 경우의 출구노점을 측정하여 비교한 결과는 그림 9와 같다. 동시에 양쪽의 제어 시스템을 적용하여 시험할 수 없어서 다음과 같이 비슷한 시기에 순차적으로 시험하였다.

- 기존 제어기: 7월 30일 - 8월 4일
- 개발한 제어기: 8월 5일 - 8월 8일

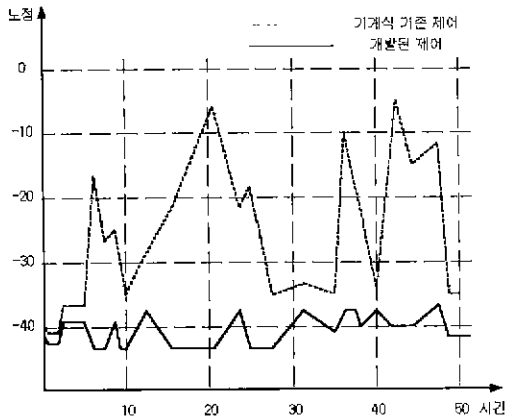


그림 9. 출구노점의 비교.
Fig. 9. Outlet Dewpoint.

결과를 살펴보면 기존의 제어기를 사용한 경우 출구노점에 대한 운전요구조건을 만족시키지 못하는 경우가 종종 발생하였으나, 개발한 제어기의 경우에는 거의 모든 기간동안 운전요구조건을 만족시키는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 개발한 제어기를 적용하면 출구노점이 충분히 낮아서 높은 중수회수율을 가짐을 알 수 있었다.

2) 전력 손실

전력손실은 Dryer의 재생을 위한 히터의 사용 횟수 및 팬의 사용시간을 기준으로 하여 평가할 수 있다. 히터의 사용횟수는 Dryer의 재생횟수와 일치하며, 기존의 제어기와 개발한 제어기에서의 재생횟수는 표 2와 같다. 따라서 히터사용을 위한 전력소비 절감효과는 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 하나의 중수회수장치에 총 8대의 Dryer가 있는 경우를 기준으로하여 계산한다.

$$126\text{회}/1\text{년} \times 200[\text{kW}] \times 2\text{시간} \times 8\text{대} \\ = 403,200 [\text{kWh}/1\text{년}]$$

팬에 의한 전력소비절감도 비슷한 방법으로 얻을 수 있으며, 결과적으로 1년 동안의 팬에 의한 총 소비전력 절감은 977,304[kWh]였다.

히터에 의한 전력소비절감과 팬에 의한 전력소비 절감을 합하면, 1년동안의 총 소비전력 절감은 1,380,504 [kWh]이다. 발전원가 37.36[원/kWh]를 적용하면, 발전비용이 매년 5,157만원씩 절감된다.

표 2. 재생횟수의 비교.

Table 2. Number of regenerations.

Dryer1대의 재생횟수	기존제어기	개발한 제어기	절감횟수
1,2월	96회	51회	45회
3,4,11,12월	192회	122회	70회
5,10월	96회	85회	11회
합계	384회	258회	126회

3) 삼중수소피폭

이번 연구중에는 실험을 행한 지역에 삼중수소 측정기가 설치되어 있지 않아, 정량적인 피폭량 감소에 대해 고찰하지 못했지만, 출구노점을 낮게 유지하여 평균적인 중수회수율을 매우 증가시켰고, 또한, 항상 출구노점을 기준치 이상으로 유지할 수 있어서 중수회수가 실질적으로 중단되는 구간을 제거함으로써, 작업자의 삼중수소 피폭저감에 상당한 기여를 한 것으로 생각한다.

4) 현장 점검 소요시간

현장에 있는 각 기기(Panel)는 동일한 장소에 있는 것이 아니므로, 운전원이 중수증기회수 계통 전체를 점검하기 위해서는 대략 3시간 정도의 시간이 소요된다. 하지만 개발한 제어기를 사용하게되면 약 3분이면 현장의 모든 상태를 점검할 수 있고, 이러한 시간적인 감소는 운전원에게 심리적 부담을 줄일 수 있을뿐더러 타 계통의 점검 시간으로 활용할 수 있어서 원전 안전성에 기여하리라 생각한다.

4. 결론 및 추후과제

본 연구의 시작 및 추진방향은 당초에 문헌검색과 국내·외 기술자료 수집을 통한 중수증기 회수계통의 개선방안 도출 및 타당성 검토였으나 연구방향을 실험장치 개발 및 현장적용으로 바꾸고, 기존시스템과 병렬로 설치하여 실험하는 것으로 변경되었다. 현장에 병렬로 설치한 이유는 중수증기 회수계통에 문제점이 발생할 경우 발전소 정지까지 고려해야하므로 설치한 장치들에 문제가 발생하더라도 기존시스템으로 운전하기 위해서이다. 시뮬레이션이나 실내 실험장치를 이용한 것이 아니며, 실제로 개발한 기기

들을 현장에 설치하여 여러 가지 시험을 수행하였고 현장조건 그대로의 데이터들을 많이 수집할 수 있었다.

아울러 급변 개발된 PLC(MF120S)를 이용한 제어 로 말미암아 기존 기계식의 단순 시간 설정에 의한 제어방식을 노점제어 및 PLC를 사용한 정확한 시간 제어로 운전 가능하게 되었다. 개발된 PLC는 기존설비의 달리 원자로 건물내의 습분량에 따라 흡습시간이 자동 가변될 뿐만 아니라 재생운전이 끝나고도 일정시간 휴지상태로 운전되는 단점을 개선하였고, 기존설비의 일정 주기후 주기가 짧은 Dryer가 2번 연속 재생되는 문제를 PLC 내부의 전자식 타이머의 사용과 환주기마다 양쪽 타이머를 사용자 프로그램에서 리셋시킴으로써 두 타이머간의 시간 누적오차를 없애, 재생이 연속 두 번 운전되는 기계식 타이머의 문제점을 해소할 수 있었다. 또한, 출구노점을 제어변수로 이용함으로써 각 Dryer마다의 시스템 요구조건을 정확히 만족시킬 수 있었으며, 결과적으로 삼중수소의 농도를 감소시킴으로써 작업자의 체내피해를 저감시킬 수 있었다.

본 설비의 효율적, 경제적 운전으로 인해 중수회수 능력을 향상 시켰고, 작업자의 삼중수소 체내피해 최소화 및 전력소비를 연간 11,308,504[Kwh/년] 정도 절감하였으며, 이를 발전원가를 적용하여 계산하면 연간 약 5,157만원 정도를 절약할 수 있었다.

이미 원자력 발전소에서 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 변화하는 추세이고, 이러한 디지털 방식이 현장에서 적용되기 위해서 한국형 표준원전이나, G7 과제로 진행 중에 있는 차세대 원자로에서 설계되어지고 있으며, 노후화된 원전에서도 설비개선 시 디지털 방식으로 적용되고 있다. 본 논문에서 개발된 PLC 기술도 추후 발전소 설개변경시 적극적으로 활용될 것이며, 향후에는 MMI 화면 개발 적용을 통해 PLC로 전 중수증기 회수 계통의 제어 및 상기 효과들의 장점을 극대화 할 수 있을 것으로 예상되며, 취득한 자료의 활용으로 원자력 발전소의 디지털 제어 시스템 적용 및 전력설비 운영에 크게 이바지할 수 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

[1] AECL Proprietary, Reactor Building D2O Vapour Recovery System, DM 59-38310/63831.

[2] AECL Proprietary, Dryers for D2O Vapour Recovery in a Nuclear Power Station, TS-59-38317-1.
 [3] Canadian Fusion, Technology Project, Canadian Tritium Experience, Ontario Hydro, 1984.
 [4] M. Nakshima and E.Tachikawa, "Removal of Tritiated Water Vapour by Molecular Sieves 5A and 13X, Silica Gel and Activated Alumina," J. Nucl. Sci. Tech 19 (7), 1982, pp. 571-577.
 [5] The 3rd CANDU Technology Course Part II D2O, Tritium Management and Health Physics, KAERI Nuclear Safety Center, 1995.
 [6] 신상운 등, 월성 원자력 1호기 삼중수소 제거 방안연구, 한국전력공사, 1989.
 [7] 중수로 개측제어 실무, 한국전력 월성원지력발전소.
 [8] 박종범 등, "월성1호기 중수증기 회수계통 운전원의 운전능력 향상," '96원자력학술회의 논문집, 1996. 10, pp. 121-126.
 [9] 박종범 등, "프로그램형 제어기를 이용한 원자력 발전소 Single Tower Dryer 운전 적용에 관한 연구." 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 12, 1998.
 [10] 吸着 (工場操作 씨리즈) No. 7, 日本化學工業社, 1977.
 [11] 乾燥 (工場操作 씨리즈) No. 2, 日本化學工業社, 1977.
 [12] STARCON-MF PROGRAMMING 기초과정 매뉴얼, LG 신전, 1994.
 [13] STARCON-MF PROGRAMMING 고급과정 매뉴얼, LG 산전, 1995.
 [14] 박익수 등, 중수증기 최적화 방안 연구(I) 최종보고서, 전력연구원, 1995. 5
 [15] 박종범 등, 중수증기 최적화 방안 연구(II) 최종보고서, 전력연구원, 1997. 11.

◇ 저자소개 ◇

박 종 범 (朴鍾範)
 1968년 2월 15일생 1992년 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 1994년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1991년-1995년 한전 월성원자력 발전소계측제어요원 1995년-현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원. 1996년-1999년 동대학원 제어계측공학과 박사수로.

임 화 영 (任化永)
 1947년 3월 18일생. 1973년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1982-1988 광운대학교 전기공학과 교수 1988-현재 동 대학교 공대학장 및 제어계측공학과 교수

조 황 (趙 滉)
 1959년 1월 07일생. 1981년 인하대 기계공학과 졸업. 1985년 University of Texas at Austin 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1989년-현재 광운대학교 제어계측공학과 교수 및 신기술연구소 연구원.