



신고리 3호기의 종합 계측제어 시스템

Daryl Harmon, Ben Romeo, Rob Beasley¹⁾

〈Nuclear Engineering International〉 No.757



원전 통합 디지털 계측제어 시스템을 갖춘 APR1400 신형경수로 초호기 신고리 3호기가 지난해 연말부터 가동되고 있다. 본고는 이 최첨단 원자로의 종합 계측제어 시스템을 상세히 설명하고 있다. 지금 세계의 많은 원전들은 디지털 계측제어 시스템의 확보를 위해 확실하고, 효율적이며, 무엇보다 안전한 기술 혁신을 추구하는데 매진하고 있다. 기술이 밀집되어 복잡하지 않고, 모듈 방식의 개인별 계기반과 전산화된 공정, 그리고 스마트 경보 발령 시스템 등을 갖춘 첨단 제어실은 더욱 간편하고 안전한 업무 환경을 제공해 주고 있다. 신고리 3,4호기의 성공 사례를 통해서 독립형 계측제어 시스템을 성공적으로 통합시킬 수 있는 혁신적인 방법이 확인됨으로써 이제는 종합 디지털 계측제어 시스템을 적시에, 안전하고, 경제적으로 실용화할 수 있다는 것을 보여주고 있는 것이다.

¹⁾ Daryl Harmon 시스템 통합 및 operator interface 분야 건설링 엔지니어 Ben Romeo APR1400 안전시스템 및 functional engineering 분야 선임 엔지니어 Rob Beasley Westinghouse 제어실 설계분야 선임 엔지니어



신고리 3호기 주제어실의 개인별 워크스테이션 배치. 원자로 담당자, 터빈 담당자, 전기 담당자, 작업 조별 관리자 및 교대 발전 책임자의 콘솔(console)들이 배치되어 있다.

대한민국의 신고리 3호기는 2016년 12월, 완전 통합 제어계측 시스템을 갖춘 APR1400 모델로서 최초의 상업적인 가동을 시작하게 되었다. 이 원자로는 APR(Advanced Power Reactor) 설계의 초호기인데 이런 최신형 경수로의 상업적 가동을 위해서 Westinghouse Electric Company가 공급한 최초의 종합 계측제어시스템을 구비하고 있다.

이 첨단원자로의 시스템 구조 설계에서부터 가동에 이르기까지 배후에서 이루어진 완성도 높은 노력의 성과는 앞으로 완전 통합 계측제어 시스템을 원전 업계가 받아드릴 수 있도록 하는데 기여하게 될 것으로 보인다.

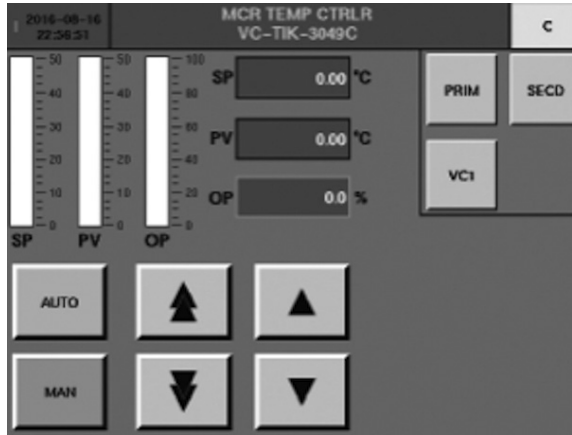
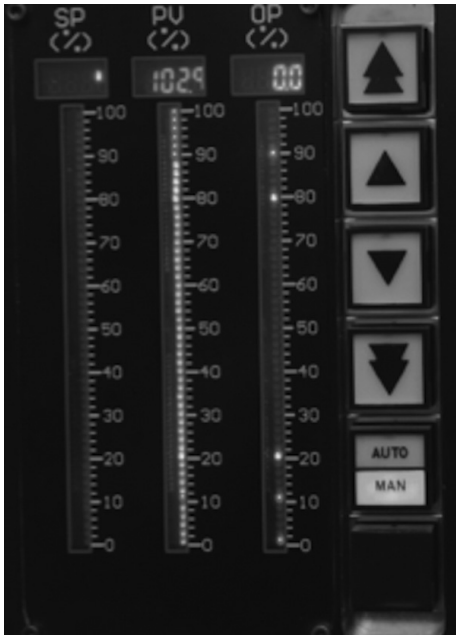
따라서 신고리 3,4호기 원자로는 한국에서 추가로 건설하고 있는 APR1400 원자로뿐만 아니라 UAE의 Barakah 원전에서 공사중인 APR1400 원자로 4기의 기준 발전소 역할을 하고 있다. 역시 Westinghouse가 공급하는 디지털 계측제어 시스템

을 구비한 신고리 4호기는 2018년 초에 가동을 시작할 예정이다.

통합 디지털 계측제어 시스템 Integrated digital I&C systems

계측제어 시스템은 원전의 가동 상태와 관련된 모든 핵심적인 사항을 감시하면서 필요한 제어 작업을 제때 해줌으로써 원자로의 가동을 최적화시키는 데 도움을 주는 시스템이다.

원래 아날로그 방식의 계측제어 시스템으로 가동을 시작했던 원전 가운데 많은 곳들이 노후화되고 있는 계측제어 시스템의 일부 설비들을 디지털시스템으로 교체하고 있지만, 그런 독립형 시스템으로는 종합 디지털 계측제어 시스템의 전체적 성능을 통해 달성되는 이점까지 얻어낼 수가 없다. 그 뿐 아니라 통합 디지털시스템은 높은 신뢰성과 더 나은 성능은 물론



서로 유사하게 디자인 되어 있는 콘솔 하드웨어 및 소프트웨어의 예시

론 시스템 진단 기능까지 기대할 수 있는 것이다.

한국전력기술은 신고리 3,4호기를 위해서 완전한 디지털 방식의 계측제어 구조 설계를 선택했고, 원자로 건설의 주계약자인 두산중공업은 이 시스템을 위해 Westinghouse와 계약했다. 이에 따라 Westinghouse는 부품의 설계와 설비의 제조 및 운영 소프트웨어와 테스트 프로그램을 만들고 안전과 그 밖의 모든 분야에 관련된 디지털 계측제어 시스템의 커미셔닝 과정을 수행하고 지원하는 책임을 맡게 되었다.

Westinghouse에서 신고리 3,4호기에 공급한 시스템은 원전계측제어시스템(MMIS)이다. 이 시스템은 최첨단 소형 워크스테이션을 갖춘 제어실과 Common QTM 및 Ovation™ 플랫폼을 활용하는

디지털 제어 및 방호 시스템으로 이루어져 있다.

이 플랫폼은 데이터 수집, 공정 관리, 정보 처리와 디스플레이, 그리고 원전 보호 기능 등을 제공하고 있다. 이런 방식으로 완전히 디지털화된 플랫폼은 높은 신뢰성 및 가용성이란 목표를 달성하면서도 실시간으로 온라인 진단과 테스트를 할 수 있도록 기능이 통합되어 있다.

디지털 계측제어 시스템은 수많은 부품들의 복합적인 통합과 높은 소프트웨어 의존성을 통해서 이런 고도의 기능을 발휘하게 된다.

이런 특성은 모든 계측제어 시스템에 내재된 단일 지점 고장의 위험성은 회피할 수 있는 반면에 공통 원인 고장이라는 위험성을 키울 가능성이 있다. 한 부분의 고장이 전체적인 시스템에 영향을 미칠 때 단



별개의 제어반을 갖추어 분리되어 있는 예비용 안전계기반

일 지점 고장이 발생한다.

공통 원인 고장은 한 부분 혹은 한 곳 이상에서 일어난 사고가 여러 시스템의 고장을 동시에 유발시키거나 다중 채널 중에 두 곳 이상의 개별 채널에서 동시에 사고가 일어날 경우에 발생하게 된다.

이러한 사고의 위험성을 줄이기 위한 방법에는 다양성(서로 다른 특성을 가진 두 가지 혹은 그 이상의 플랫폼이나 부품으로 동일한 기능을 수행하는 성능), 중복성(대체 시스템 및 부품을 마련하여 다른 시스템이나 부품이 고장 났을 때 필요한 기능을 대신 수행하는 성능), 독립성(전력 공급의 분리, 물리적 분리, 시스템 간의 독립적인 데이터 통신 기능) 등의 확보가 있다. 그러나 이렇게 높은 수준의 심층 방호를 위해서는 시스템이 한층 더 복잡해지기 마련이므로 설계, 운영 및 유지보수 과정에서 발생할만한 사람의 실수도 더 늘어날 수가 있다.

그러므로 신고리 3, 4호기의 시스템구조와 설계에

는 이런 우려할만한 사항에 대한 대책들이 모두 잘 반영되어 있다.

한국전력기술은 계측제어 시스템 구조를 안전 및 비안전 플랫폼으로 구분해서 설계했다.

Westinghouse는 복잡한 시스템 구조를 지원하고 인간적 실수의 가능성을 줄이기 위해서 상업적으로 활용이 가능한 각기 다른 두 가지 플랫폼을 선택했다.

Ovation™ 플랫폼은 계측제어 시스템의 비안전 분야 소프트웨어 기반으로 사용되었는데 이는 정상적 상태의 원전 가동을 위한 것이다. Common Q™ 플랫폼은 시스템의 안전 분야 소프트웨어를 위한 것인데 원전의 보호 및 사고의 완화 기능을 위해 사용되는 것이다.

원전의 광역 데이터망은 안전 채널 내부, 안전 채널 사이, 비안전 서버 시스템 내부의 설비 사이의 통신을 제공하는데, 특별한 경우에는 안전 채널과 비안전 채널 설비 사이의 통신을 제공하기도 한다.



별도로 위치한 원격 �utdown(shutdown) 콘솔

주제어실 Main Control Room

주제어실은 규모가 크지 않고 조밀하게 구성되어 있어 다루기가 수월하고 네트워크로 구성된 수많은 개별 단위 단말기들을 제어하기가 어렵지 않게 되어 있다.

이전의 제어실 설계는 배선으로 연결된 각각의 제어기들과 제어실 내부의 곳곳에 산재된 고정식 계기판 등으로 이루어져 있었지만, 이 최첨단 주제어실은 어떤 상황에서도 더 효율적인 접속이 가능하면서도 접속 방식은 더 간단하다.

통합 네트워크 시스템은 비정상적 운영 상황에서도 정보를 우선 순위화 해서 처리할 수 있으며 모든 시스템 운영요원들이 즉각적으로 접속을 하는 것이 가능하다.

수많은 설비들 사이의 양방향 고속 데이터 통신망은 주제어실의 안전을 위해 능률적이고 확인 가능하며 안정적인 상황 유지를 가능하게 만들어준다. 따라서 시스템 운영요원들이 유지보수와 정기 점검 업무를 주제어실 안에서 수행할 수 있게 되는 것이다.

예를 들면, 시스템 운영요원들이 진단 프로그램에 의한 경보를 통해서 고장난 상황을 알 수 있으며, 계측제어 시스템 장비의 상태를 확인할 수도 있고 위치가 표시된 입출력 지점의 상태를 실시간으로 관찰할 수도 있다.

마찬가지로, 계통-수준과 기기-수준을 검사하는 기능도 주제어실에서 터치스크린을 접속하는 것으로 실행시킬 수 있다. 또한 유지보수 및 테스트 패널을 표시해 주는 화면을 통해서 각 안전 채널의 설정 값을 변경할 수도 있다.

기존 원전에서는 운영요원이 배선으로 연결된 스

위치와 조종 장치가 달린 별도의 패널을 사용해야 했으며 설정 값을 변경하려면 암호화된 값을 기판에서 다시 설정하는 힘든 작업을 거쳐야만 했다.

시스템 운영요원들의 개인별 콘솔에는 안전 및 비안전용 전원이 각각 별도로 설치되어 있으며 여분의 예비용 데이터 연결 장치도 설치되어 있다. 각 콘솔에는 여분의 비안전용 워크스테이션이 각 4개씩 있으며 안전과 관련된 부품을 작동시킬 때(워크스테이션으로 감시하면서 작동 과정을 제어할 수 있지만) 안전을 위해서 반드시 사용해야만 하는 ‘공학적인 안전 설비 소프트웨어 컨트롤 모듈’이 설치되어 있다. 또 이 제어 과정은 단일 방향 접속 방식으로 되어 있다.

전산화된 정보 처리 시스템은 경보 반응 상황에서 뿐 아니라 정상 운전, 비정상 운전, 그리고 비상 사태 시의 운전 상황 등에서도 원전의 실제 데이터를 통합 처리해서 운영요원들에게 정확하게 안내해주게 된다. 아울러 최신 경보 시스템은 원전의 운영 상태와 예상되는 가동 상황에 따라 경보의 우선순위를 매겨 놓고 억제함으로써 해당 업무 담당자들의 업무량을 최소화시켜 준다. 그리고 이 두 시스템은 모두 전체 워크스테이션에서 접속이 가능하고 정보 처리를 간소화할 수 있으므로 시스템 운영요원들의 작업 부담을 줄일 수 있다.

운영요원들은 또한 주제어실 정면 쪽에 설치되어 있는 대형 디스플레이패널에 표시되는 여러 가지 정보 중 어느 것이라도 개별 워크스테이션을 통해서 다른 제어실의 직원들과 공유할 수 있다.

워크스테이션의 고정 정보 표시 화면에는 원전의 핵심 시스템들과 동일한 내용이 표시되기 때문에 직원들은 늘 고정적으로 표시되는 정보를 이용해 언제나 중요한 상황들을 파악할 수 있다.

주제어실의 안전 계기반은 원전 심층 방호 수단으

로서 비상 안전 장치를 다양한 방식으로 작동시키는 별도의 예비 제어반 역할을 한다. 이 제어반은 원전의 가동을 정지시키는 등 모든 비상조치를 시행하는데 사용할 수 있다. 수동 및 자동 워크스테이션에는 여러 가지 예비적 하드웨어를 마련해 놓고 있어 비상 시 업무 담당자들이 보조 급수 유량이나 주증기 대기 방출 밸브 등을 제어할 수 있도록 해주고 있다.

Westinghouse는 원전의 현장 배선을 최소화하고, 안전 및 비안전 시스템의 제어 작업을 단순화시키기 위하여 신호용 다중 통신 장치를 고안했다. 고정 위치 제어반으로 프로세스 모듈들을 광섬유 및 구리선 통신망을 통해 다중 통신 장치에 연결할 수 있게 한 것이다.

주제어실의 안전 계기반 외에도, 또 다른 안전 장치로서는 제한된 수의 고정형 제어반이 달려있는 원격 가동 정지 계기반이 있다. 그리고 모니터링만 가능한 워크스테이션도 원전 안의 여러 곳에 설치되어 있으므로 지원 업무를 담당하는 직원들도 필요한 정보에 접근하는 것이 용이하다.

분산되어 있는 계측제어 시스템 Distributed I&C system

모든 비안전 관련 계측제어 시스템, 원전 컴퓨터 응용 장치, 안전/비안전 계측제어 시스템 사이의 데이터 연결과 접속, 그리고 시스템 간의 통신을 가능하게 하는 통신망 등은 모두 원전 내부에 분산되어 있는 제어 및 정보 시스템의 일부이다.

이 시스템 역시 비상 시를 대비한 고장 허용 시스템 구조인데, 신고리 3,4호기에는 원전 계측제어 시스템의 가동을 위해 중복 설치된 75개의 제어장치가 있다.



계측제어 시스템이 제어하고 있는 것은 가압기의 압력 수준, 증기발생기의 작동 수준, 다양한 화학 반응 과정의 용량 조절 시스템 기능, 디지털 제어봉 제어 계통을 통한 원자로의 출력 수준, 방사성폐기물 관리 시스템, 자동 차단기 및 여러 가지 펌프, 냉각 팬, 밸브 같은 부품류 등이다.

그리고 계측제어 시스템 가운데 두 가지는 심층 방호 계획을 지원하기 위한 안전 관련 예비 시스템 역할을 하고 있다.

최신 경보 시스템 역시 개별 단위로 나누어진 모듈 방식이어서 설정 변경 소프트웨어 기능이 뛰어나고 정보용 예비 서버도 가지고 있다. 경보에 관한 정보는 개인용 워크스테이션과 대형 화면에 함께 표시된다. 전산화된 처리 시스템은 화면에 원전 경보와 관련된 정보들을 처리 순서에 따라 모니터링할 수 있도록 표시되므로 담당자들이 단계적으로 경보 상황을 확인하면서 권장 행동수칙에 따라 처리할 수 있도록 해준다.

이 시스템들은 경보 상황과 관련된 과거의 정보가 수집, 저장되어 있는 정보 처리 시스템으로서 원전에 분산되어 있는 정보 및 제어 시스템의 서브 시스템들이다.

분산되어 있는 제어 및 정보 시스템은 또한 안전과 관련된 계기들과 부품의 정보를 특정 4채널 단일 방향 통신망을 통해 모니터링 하고 있다. 이런 방식을 채택함으로써 누구든지 분산되어 있는 제어 시스템과 정보 관리 시스템 네트워크에 연결된 경보 시스템이나 개인용 워크스테이션 화면 등을 통해서 안전과 관련된 정보에 접근할 수 있는 것이다.

통합 디지털 안전시스템 Integrated digital safety systems

서로 연결되어 있는 정보 처리 체계와 입출력 캐비닛, 그리고 오퍼레이터 인터페이스 등이 통합 구성된 디지털 안전 시스템은 공학적 안전 설비의 완성도를 높여서 효율적인 작동을 가능하게 하고, 사고 발생 이전과 이후의 원전 전체의 안전 상태를 감시하며, 안전용 부품을 개별적으로 관리할 수 있도록 해주면서 전체적인 시스템은 물론 개별적인 부품 차원의 시험을 시행함으로써 원자로를 안전하게 보호할 수 있도록 한다.

이 시스템은 증기 공급 시스템의 주요한 임계치 데이터들을 취합해서 필요에 따라 원자로 정지, 안전 주입 등의 원전 보호 장치를 작동시킨다. 그리고 안전 시스템의 작동 신호를 발동해 시스템 안전성을 지속적으로 자체 감시 할 수 있도록 항상 점검 준비 상태를 유지하고 있다.

Westinghouse가 채택한 소프트웨어는 기본적으로 충실하면서 주문형인 데다가 대용량의 데이터도 데이터망을 통해 공유할 수 있기 때문에 프로그램이 가능한 로직 컨트롤러를 이용해 시스템 관리와 프로그램의 로직을 처리할 수 있다. 또한 이렇게 처리된 데이터를 담당자들에게 바로 전달하는 방식이기 때문에 제어 및 경보를 각각의 워크스테이션에서 발령하는 이날로그시스템 방식으로는 접하기 어려운 경험을 시스템 운영요원들이 해볼 수 있는 장점이 있다.

이 안전시스템은 각 채널 안의 캐비닛 사이에 예비 채널 4개를 확보하는 좀 더 중복적인 구조이다. 그리고 이 시스템의 제어 장치 내부와 제어 장치 사이의 통신 회선은 자체 진단 방식으로 되어 있다.

신고리 3,4호기 역시 공정 제어 캐비닛 안에 예비

용 처리 모듈이 있는 중복적인 구조여서 시스템과 예비용 프로세서의 안정성을 스스로 감시하도록 되어 있기 때문에 고장이 감지되면 사고가 발생하기 이전에 자동적으로 제어 장치가 작동하게 된다.

안전시스템의 인증 Safety system validation

신고리 3,4호기의 안전 시스템은 한국과 미국의 관련 규정과 산업표준에 의거한 확인과 인증을 거쳤을 뿐 아니라 한국수력원자력이 요구하는 합격 요건에도 부합하는 것이었다.

Westinghouse는 두 가지 중요한 부분의 인증 절차를 모두 거쳤는데 설비의 품질 요건과 상용 사용 기준을 포함한 하드웨어 인증 절차, 그리고 테스트와 독자적 확인과 검증을 통한 소프트웨어 인증 절차였다. 이 과정에서 Westinghouse는 단계적인 접근법으로 테스트를 완료하였다.

독립형 시스템의 통합 Integrating standalone systems

Westinghouse는 다른 원전용으로도 여러 가지 독립형 계측제어 시스템의 설계를 마련해 놓고 있었는데 신고리 3, 4호기에 적용된 시스템도 원래 이날로그 방식 계측제어 시스템 상에서 운용하는 독립형 디지털 시스템으로 설계되었던 것이었다.

처음에는 완전 디지털 계측제어 시스템으로 통합하기 위해 전체적으로 다시 설계하는 방법과 각 디지털 시스템을 완전한 디지털 원전 계측제어 시스템 구조로 통합하는 혁신적 방법 등 두 가지의 시스템 중에 하나를 선택하려고 했다. 그런데 첫 번째 방법을

선택하게 되면 한국수력원자력이 부담해야 할 투자 규모가 훨씬 더 커질 수밖에 없었다.

Westinghouse는 분배 조정 시스템과 제어봉 구동 장치를 제어하는 신형 파워 캐비닛에 기반한 신형 로직 캐비닛을 설계해냄으로써 신고리 3,4호기만을 위한 완벽한 디지털 제어봉 제어 시스템의 통합 작업을 할 수 있었다. 그에 더해 Westinghouse는 몇 가지의 상태 감시 시스템까지 통합시켰다. 이렇게 완전히 다시 설계하는 데 따르는 업무와 비용의 부담을 피하면서 시스템을 업그레이드 시켜 통합시키는 것은 원전 계측제어 시스템의 현대화에 있어서 대단한 업적이 아닐 수 없다. 왜냐하면 이 시스템의 경고 정보까지도 원전의 최신 경보 시스템과 통합되었기 때문인데 이는 분리되어 있던 제어실 인터페이스 상태에서 한 걸음 나아가는 진화적 발전 단계를 성취해낸 것이다.

커미셔닝 과정의 문제점 Commissioning challenges

초호기를 만들어내는 모든 노력에 늘 뒤따르는 문제점들이 신고리 3,4호기의 커미셔닝 과정에서도 발생했는데 특히 제어계측 부분과 관련된 문제가 많았다.

예를 들어 보면, 신고리 3호기의 출력 상승 시험(2016. 5. 12.) 과정에는 디지털 제어계측 시스템을 포함해서 모든 주요 설비들의 동적 시험이 총망라되어 있었다. 그런데 원자로 출력 80% 상황에서의 부하 탈락 시험 중에 예상하지 못한 원자로 정지 사태가 발생했다.

시험 과정에서 생긴 의외의 센서 고장은 주증기 바이패스 계통의 동적 반응에 뜻밖의 결과를 가져오고 말았다. 입력 신호를 순조롭게 보내주도록 되어 있는



제어 시스템 체계가 제대로 된 부하 탈락 반응(원자로를 정지시키지 않고 출력만 급감발하는 반응)을 방해한 것이다.

그렇지만 주증기 바이패스 제어 시스템이 각기 다른 다양한 원전 상황을 가정한 시나리오에 대응하는 것을 모델화한 컴퓨터 시뮬레이션 덕분에 Westinghouse와 한국수력원자력은 시스템의 동적 반응 현상을 이해하면서 시스템을 적절하게 조율할 수 있는 경로를 밝혀냈다.

데이터 처리 시스템의 부하 Processor loading

전산화된 제어 장치는 복합 기능을 확실하게 완벽한 것으로 만들어 주지만 각 제어 장치를 통해 실행할 수 있는 데이터의 양은 제어 장치의 처리 능력에 의해서 좌우된다.

이에 따라 Westinghouse는 안전 시스템에서 데이터 처리 시스템의 부하를 최소화하기 위해 각각의 제어 장치 내부의 특정 구간의 데이터 코드 실행 시간을 다르게 하는 방법을 썼다. 확실히 대응 시간에 맞추어야 하는 핵심적 프로그램의 로직은 25~50ms의 더 높은 주파수에서 실행되도록 하였고 나머지는 매 500ms 마다 한 번씩 실행시키는 방식을 취했다. 가장 극단적인 경우에는 이 방식의 원래 제한된 수준을 벗어나는 90%부터 적정 한도 이하인 60% 수준으로 처리 시스템의 부하를 감소시켰다.

이런 단계적 처리로 처리 시스템의 부하를 확실하게 줄이기는 했으나, 그 결과는 순간적 신호 시스템의 신호 시한에 부정적인 영향을 주었다. 종합 공정 시험 과정에서 일부 비동기 제어 신호들이 최종 출력 신호에 전달되지 못할 수도 있게 된 것이다.

Westinghouse 측은 서로 다른 실행 구간 사이에서 신호의 상호 작용을 분석한 결과 높은 주파수 구간에서 발생하는 순간 신호들이 낮은 주파수 구간에서 신호가 실행되기도 전에 종료되는 경향이 있어 신호를 놓쳐버린다는 사실을 밝혀냈다.

이 문제를 해결하기 위해 Westinghouse는 신호의 파동을 늘려서 실행 시간이나 대기 시간을 바꿔줌으로써 신호 경로상에서 신호가 누락되는 현상을 일으키지 않도록 하였다. 특정 신호의 경우, Westinghouse는 로우 레벨 코드에 속한 각 신호들의 파동을 늘려서 신호 전달의 충실도를 확보해야만 했다.

종합 디지털 계측제어시스템을 완성하기 위해서는 이와 같이 각 분야가 하나로 통합된 발전과 시험 환경의 조성이 극도로 중요한 것이다.

디지털 계측제어 시스템의 미래

지금 세계의 많은 원전들은 디지털 계측제어 시스템의 확보를 위해 확실하고, 효율적이며, 무엇보다 안전한 기술 혁신을 추구하는 데 매진하고 있다. 기술이 밀집되어 복잡하지 않고, 모듈 방식의 개인별 계기반과 전산화된 공정, 그리고 스마트 경보 발령 시스템 등을 갖춘 첨단 제어실은 더욱 간편하고 안전한 업무 환경을 제공해 주고 있다. 주문 제작으로 조달할 수 있는 규격화된 설비들은 어떤 기능이라도 수행하는 환경을 만들어 준다.

신고리 3,4호기의 성공 사례를 통해서 독립형 계측제어 시스템을 성공적으로 통합시킬 수 있는 혁신적인 방법이 확인됨으로써 이제는 종합 디지털 계측제어 시스템을 적시에 안전하고 경제적으로 실용화할 수 있다는 것을 보여주고 있는 것이다. 🍌