



# 차세대 원자로 기술개발 현황

최 영 상 전력연구원 신형원전개발센터장

## 1. 머리말

우리나라에서 1978년 4월 고리 1호기의 상업운전을 시발점으로 원자력발전사업 및 기술개발에 대해 끊임없는 노력을 기울여 온 결과 현재 11기의 원전이 전체 전력소비량의 약 40%를 생산하고 있고, 국민경제 발전과 함께 급속히 증가하고 있는 전력소비량을 감당하기 위해 7기의 원전이 추가 건설중에 있다.

한전은 원자력발전의 기술자립에도 많은 노력을 한 결과 1995년에는 마침내 한국표준형원자력발전소의 설계기술을 확보하게 되었다.

한편 그동안 미국의 TMI, 구소련의 체르노빌, 가까이는 일본의 몬주 등 원전에 의한 사고 및 화석연료 사용에 의한 온실효과 등의 영향으로 국내에서도 원전의 안전성에 대한 일반 국민들의 관심도가 과거와는 달리 크게 증대되었다.

세계 각국에서는 이미 기존의 원전보다 그 안전성 및 경제성을 한 차원 더 높은 차세대원자로 설계개발을 목표로 관련 기술개발을 꾸준히 진행해오고 있다.

우리나라에서도 2000년대에 선진국 진입을 목표로 차세대 원자로 기술개발을 G-7프로젝트의 하나로 1992년 12월에 제1단계 연구를 착수하여 1994년 말 성공적으로 끝마쳤으며 지금은 제2단계 연구를 1998년 2월까지 기본설계 완료를 목표로 정부·산·학·연 공동으로 추진중에 있으며 제3단계 연구가 끝나는 2000년 2월까지 표준 상세설계(FOAKE :

First Of A Kind Engineering)가 개발 완료될 것이다.

본고에서는 이러한 차세대원자로 기술개발 과제의 개발 방향과, 1단계 연구결과로 개발된 설계 기본요건을 소개하고, 특히 주제어실 설계에 적용될 새로운 기술개발 내용에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 개발 방향 및 설계 요건

### 가. 개발 방향

차세대원자로 기술개발사업단에서는 제1단계 기간('92.12 ~ '94.12)중에 개량형 경수로(Evolutionary Type)와 피동형 경수로(Passive Type)에 대해 기술성, 안전성, 경제성 및 기타 분야에 대해 비교, 분석 및 평가를 실시하였다. 연구 결과 차세대원자로 기술개발을 개량형 경수로로 추진하는 것이 가장 유리하다는 판단하에 향후 개발방향은 개량형 경수로로 추진하되, 안전성 제고를 위해 피동형 안전개념(Passive Design Features)을 반영하고 국내기술과 최대한 연계가 가능하게 설계하도록 결정하였으며 이에 따른 주요 설계개발 목표를 표 1과 같이 설정하였다.

### 나. 설계 기본 요건

1단계 연구를 통해 세계 각국의 운전 및 개발중인 노형별로

**기술동향**

〈표 1〉 설계 개발 목표

내 용	차세대원자로 설계목표
1. 안전성 ○ 노심손상확률 ○ 설계기준 사고시 운전원 대응시간 ○ 전체 전원상실 사고시 노심손상 대응 시간 ○ 계측제어설비	연 10E-5 이하 30분 이상 ~8시간 디지털 방식
2. 성능 ○ 이용률 ○ 수명 ○ 불시 운전정지빈도	90% 60년 0.8회/년
3. 노심 주기 ○ 핵연료 교체주기	1.5~2년

우수한 설계 특성에 대한 비교 검토를 하여 차세대원전이 갖 추어야 할 기본적인 설비의 특성을 결정하고, 또한 차세대원 전에 적용 가능한 피동안전개념을 선정하여 표 2와 같이 설 계의 기본요건을 결정하였다.

지금까지의 연구 결과를 토대로 차세대원자로 기술개발 방

〈표 2〉 차세대원전 설계의 기본 요건

항 목	기 존 원 전	차 세 대 원 전
〈경제성 및 성능 관련〉 - 발전단가 - 설비용량 - 설계수명 - 건설공기 - 가동률 - 불시정지 - 부하추종운전 능력 - 핵연료 교체주기 - 계측제어방식 - 작업자피폭선량	- 석탄대비 3% 우위 - 100만kW급 - 40년 - 62개월 - 87%(93년 평균) - 연간 1~2건 - 부분적으로 보유 - 아날로그 방식 - 연간 1인당 5Rem 미만	- 석탄대비 20% 우위 - 135만kW급 - 60년 - 48개월 - 90% - 연간 0.8건 미만 - 일일부하추종능력 보유 - 18~24개월 - 디지털 방식 - 연간 1인당 2Rem 미만
〈안전성 관련〉 - 노심 손상빈도 - 격납건물 손상빈도 - 설계기준 - 내진설계 - 핵비 등 여유도 - 운전원 조치여유 - 전원상실시 대처여유 - 격납건물 - 비상노심냉각방식 - 증기발생기 세관 봉쇄 여유도	- 10만년에 1회 미만 (100% 출력시, 내부사건) - 10만년에 1회 미만 - 설계기준 사고 - 0.2g - 8% - 10분 - 4시간 - 단일 격납건물 - 2트레인 자온관 주입 - 8%(Inconel 600)	- 10만년에 1회 미만 (저출력시, 외부사건 포함) - 100만년에 1회 미만 - 설계기준사고+중대사고 - 0.3g - 10~15% - 30분 - 8시간 - 이중 격납건물 - 4트레인 직접주입 - 10%(Inconel 690)

향을 보다 자세히 살펴보면, NSSS분야는 개량형 경수로로 추진하되 촉매식 수소점화기 등 피동형 안전개념을 최대한 반영하여 기존 경수로에 비해 안전성을 제고하고, 터빈 등 BOP(Balance of Plant) 분야에 대한 설계는 울진 3, 4호 기 등 한국표준형 원전에 대한 기술을 설계에 최대한 반영도 록 하는 한편, 계측제어 및 제어실 설비는 인간공학적인 측면 을 고려한 디지털 시스템으로 개발할 계획이다. 또한 원전연 료에 대한 설계는 신연료 사용이 가능하도록 하여 명실공히 차세대 원자로로서 손색이 없도록 추진할 예정이다.

### 3. Advanced Control Complex의 설계 특성

#### 가. 계측제어 시스템

##### (1) 디지털 기술 구현

비약적인 디지털 기술의 발전으로 80년대 이후 각종 산업 및 군사, 우주항공 분야의 디지털 기술 적용은 원자력 분야보다 적극적으로 도입되었다. 디지털 기기는 종래 아날로그 기기가 제공하지 못 하는 여러 가지 장점을 가지고 있는데 Network 을 통한 분산제어, 내고장성(Fault Tolerant) 시스템의 구성, 효과적인 MMI(Man-Machine Interface)구현 등 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 여러 가지 방법들을 제공한다. 차세대 원 자로에서는 이러한 장점을 반영하기 위해 디지털 기술을 최대한 반영할 계획에 있다. 물론 디지털 기술 적용에 따른 우려가 없는 것은 아니다.

디지털 기술은 아날로그 기술과는 달리 소프트 웨어 사용에 따른 복잡성 때문에 설계 및 제작시 발생할 수 있는 오류가 아날로그회로보다 찾아내 기 어렵고, 여러 가지의 공유자원(메모리, Data Base, Network 등)을 사용하기 때문에 한 분야 의 고장이 전체 시스템에 영향을 주는 공동모드 고장(Common Mode Failure:CMF)현상을 발 생할 수도 있다. 또한 원자력 발전소에서의 전자

과 장애, 무선주파수 간섭 현상, 온도, 습도, 접지 등의 운전 환경에 대한 디지털 기기의 민감성에 대한 우려도 일부 있다. 그러나 위와 같은 우려는 현재의 비약적으로 발전한 디지털 기술 수준으로 해결되었거나 해결가능한 것으로 여겨지고 있으며, 이러한 기술 외에도 설계 및 제작 단계의 오류를 줄이고 결과에 대한 신뢰도를 확보할 수 있는 여러 가지의 방안이 제시되고 있고 적용된 사례가 있기 때문에 디지털 기술의 적극적인 반영에는 무리가 없을 것으로 전망하고 있다.

## (2) 상용 기기 및 소프트웨어의 사용

차세대원전 개발의 최대 목표는 안전성 및 경제성이 향상된 원자력 발전소를 개발하는데 있다. 안전성과 경제성은 창과 방패와 같이 둘 사이의 적절한 균형이 반드시 필요하게 된다. 물론 둘 중에서 안전성의 개념이 경제성을 우선하는 것은 당연한 사실이다.

한국표준원자력발전소(KSNP)를 통해 원자력발전소의 수출국으로 성장한 지금 차세대원자력발전소 역시 국제경쟁력을 가지려면 다른 나라의 발전소보다 건설 및 운용에 있어 경제성이 확보되어야 할 것이다. 과거 원자력 발전소의 계속 제어 설비는 고도의 신뢰성 요건 때문에 상용 기기의 활용이 저조하였다. 또한 30~40년에 걸친 원전 수명기간 동안 이러한 설비의 유지보수를 위해 상당량의 예비품을 확보하여야 하고 경우에 따라서는 최초의 기기 공급업체가 도산하거나 업종 변경, 생산 중단 등으로 지속적인 예비품의 확보가 곤란하여 기기의 성능유지에 많은 어려움이 있었다. 최근에는 일반 산업기기 제작사의 제작기술이 과거에 비해 월등히 향상되고 신뢰성 확보에도 보편적인 노력을 기울이고 있다. 대량 생산된 계측제어 기기들은 세계 각지의 다양한 산업현장에서 적용되어 신뢰성이 입증되었고 이러한 상용기기들을 원자력 발전소에 사용하는 것은 경제적으로 여러 가지 이점을 가질 수 있다. 또 최근의 상용 컴퓨터 기기들은 제작사간의 호환성 및 개선이 용이하도록 국제적으로 공개된 제작 규격을 채용하여 제작하는 경향이다(Open Architecture). 이러한 기기를 사용하여 시스템을 구성하게 되면 특정제작사의 기술적 의존성을 방지할 수 있고 시스템의 교체, 변경이 용이하다.

## (3) PLC 사용

PLC(Programmable Logic Controller)는 70년대 말부터 산업현장에서 광범위하게 사용되어져 왔으며 이에 따라 많은 제작, 운용 기술이 축적되어 있다. 특히 80년대 말에서 90년 초에는 PLC를 사용한 원자력분야의 주요 안전계통이 설계되기 시작했고 현재에도 많은 발전소에서 이러한 기기를 사용하여 종래의 아날로그 제어설비를 교체중에 있다. 최근에 국내에서 건설되는 대부분의 화력발전소에는 디지털 제어시스템(Digital Control System : DCS)을 사용하고 있는데 이는 PLC의 개량된 형태로 보다 대용량이고 다양한 기능을 할 수 있는 제어 설비이다. 그러나 원자력 발전소는 앞에서 언급한 바와 같이 기기 고장 방지를 위해 각별히 신경을 써서 설계하는 관계로 소용량의 PLC를 사용한 분산제어 형태의 시스템 구조가 전체 시스템의 고장을 방지할 수 있는 이점이 있어 이를 선호하는 경향이다. 또한 PLC는 간결한 구조를 가지기 때문에 복잡하고 고기능을 가진 DCS보다 기기 자체의 신뢰성을 확보하기가 유리한 기기여서 PLC를 사용하여 차세대 원전의 안전관련 계통을 포함한 전체 제어시스템을 구성하고자 한다. 전체 제어시스템을 동일한 PLC를 사용하여 구성할 때 발생할지도 모르는 공통모드고장(CMF)에 대비하기 위해 안전관련계통과 비안전계통은 서로 다른 마이크로프로세서 및 소프트웨어를 사용하는 제품으로 다양화 설계를 하고 화재, 지진 등에 따른 과급고장을 최소화하기 위해 설치 위치를 물리적으로 이격시키는 분리설계 및 동일 기기 내에서도 한 기능 요소의 고장이 다른 기능 요소에 영향을 미치지 않도록 하는 구획화 설계를 하고 있다.

## 4. Multiplexing 기술 도입

차세대 원전의 안전계통을 포함한 전 계측제어 계통의 현장 신호 전송에는 Multiplexor를 적극적으로 사용할 계획이다. Multiplexing 기술은 현재의 신호전송 분야에서 널리 사용되고 있는 신호전송 기술이며, 차세대 원전에 Multiplexor를 사용하면 현장에 포설되는 신호케이블의 양을 60~70%까지 감소시킬 수 있을 것으로 본다. 필요한 케이블량 감소에 따른 경제적 이점 이외에도 건설공정에서 신호케이블의 포설 및 결선에 소요되는 시간이 줄어들어 건설

## 기술동향

공기 단축에도 큰 도움이 된다. 신호전송 매체로는 전기적 절연특성이 우수한 광 케이블을 사용하여 현장 기기와 원격 설치된 제어기기간의 전기적 파급 고장을 방지할 수 있도록 설계하고 있다.

그러나 일부 신속한 동작 성능의 보장이 필요하거나, 가혹한 환경하에서도 정상적인 기능이 요구되는 특수한 경우에만하여 계측제어신호를 종래와 같이 계측기에서 제어기(또는 지시계)까지 직접 연결하는 방법도 고려하고 있다.

## 5. Network 사용

차세대원전 계측제어시스템의 또 다른 특징은 다양한 Network의 사용이다.

최하부의 Network는 현장의 각종 계측제어 신호를 직접 제어하는 현장제어용 PLC 사이의 Network로 신뢰성이 가장 요구되는 설계를 하여 현장 제어신호의 확실한 전달을 보장하도록 설계한다. 현장 PLC에서 취득된 정보는 또다른 Network를 통해 정보처리 시스템에 연결된다. 이 Network는 대량의 정보가 전달되므로 고속의 신호전송 능력과 현장 제어기와의 전기적 신호격리에 중점을 두어 광 케이블을 이용하여 Network를 구성한다. 정보처리 시스템에서 종합되고 처리된 정보는 최상위의 Network를 통해 주제어실의 운전원 제어용 Graphic CRT에 연결된다. 이들 사이의 연결은 일반적인 컴퓨터 Network(Ethernet)을 이중으로 사용하며 한 쪽에 고장이 나더라도 다른 한쪽으로 100%의 성능을 낼 수 있도록 설계된다.

### 나. 제어실 시스템

#### (1) Compact Workstation형 제어실

급속한 전자기술의 발달과 컴퓨터 기기의 성능 향상에 힘입어 이미 실용화된 선진 제어실 및 설계 개발중인 제어실은 Workstation을 이용한 제어 및 감시 개념을 적극 채택하는 추세로 바뀌고 있다. Compact Workstation형 제어실은 여러 개의 화면표시장치(Video Display Unit : VDU)로 구성되어 운전원이 착석한 상태에서 발전소의 모든 정보에 접근하고 제어를 수행할 수 있는 설비로서, 기존의 다른 산업

플랜트에서 확보한 다양한 사용기술 및 경험에 기반을 두고 있으며 운전원의 운전편의성을 극대화시키고 인적오류를 방지할 수 있는 보다 효과적인 운전지원시스템(Operator Support System : OSS) 및 인간-기계 연계장치(Man-Machine Interface : MMI)를 구현하기 쉬운 장점을 가지고 있다. TMI-2 사고 이후에 밝혀졌듯이 발전소의 비정상 상태시 감시 및 제어 정보를 나열한 기존의 주제어실은 발전소 상태가 갑자기 변하면 대량의 정보가 일시적으로 운전원에게 제공되므로 운전원은 심한 심리적 중압감을 가지게 되고 이러한 상황에서 만일 부정확한 판단 정보가 제공되면 이를 맹목적으로 믿어버릴 수 있는 취약성을 가지고 있었다. 따라서 이러한 사태에 대비하기 위한 설비들이 추가 보완되었다. 차세대원전의 주제어실 설계에서는 이러한 점에 대한 심도있는 분석을 하여 어떠한 발전소 상황하에서도 운전원이 신속하고 정확하면서도 손쉽게 발전소의 상태를 파악하고 안전하게 대응할 수 있도록 한다.

#### (2) 인간공학 원리를 적용한 설계

차세대원전 주제어실 설계의 또 다른 특징은 운전원들이 편안하게 발전소를 운전할 수 있도록 사람(운전원)을 중시하여 설계하는데 있다. 이러한 설계를 하기 위해서는 설계의 매 단계마다 운전원에 대한 고려가 적절히 되었는지를 검토한다. 특히 설계의 초기단계에서 운전원이 수행하여야 할 일에 대한 자세한 분석과 과거의 여러 가지 운전경험 자료를 검토한 후 운전원들이 가장 효과적으로 맡은 바 직무를 수행할 수 있도록 하기 위한 설계 지침을 만들고 이에 따라 표시화면, 제어기, 운전지원시스템 등을 설계한다. 한편 설계자들이 이렇게 운전원을 고려하여 설계하였지만, 실제 운전원들이 얼마나 효과적으로 설계된 시스템을 사용할 수 있을지를 모의 검증설비(4항 참조)를 사용하여 구체적으로 평가한다.

#### (3) 최신 운전지원 기능

TMI-2 사고 이후 운전원에게 효과적으로 발전소 상태를 알려줄 수 있도록 제어실 시스템을 설계하는 것이 중요한 설계 요건으로 확립되어 왔다. 특히 발전소가 비정상적인 상태에 있을 때 운전원들은 많은 심리적 부담을 가지게 되고, 이

때를 대비하여 운전원에게 적절한 지원을 해줄 수 있는 여러 가지 MMI개발이 추진되어 왔다. 이들 중 효용성이 있다고 밝혀진 대형정보표시판(Large Display Panel : LDP)설계를 차세대원전 설계에 도입하였다. 대형정보표시판은 종래의 제어실이 가지는 장점, 즉 운전에 필요한 설비의 공간적 배치를 통해서 얻는 효과를 살리면서 CRT화면을 통해 정보를 표시할 때 간과되기 쉬운 전체적인 발전소의 운전 상황을 한눈에 볼 수 있도록 하는 mimic설비이다. 이 설비가 과거의 mimic과 다른 점은 철저한 기능 분석을 통해 운전에서 꼭 필요하면서도 충분한 정보를 신뢰성 있게 제공한다는 점이다. 이러한 대형표시장치를 통해 운전원은 정상 및 비정상시에도 발전소의 안전과 관련된 모든 상태정보를 일목요연하게 감시할 수 있을 것이다. 또한 사고발생시 운전원의 판단 및 조치를 지원해주는 안전변수표시계통을 운전시스템에 통합하여 개발함으로써 비상시에 운전원의 사고대응 능력을 제고시킬 것으로 기대된다.

LDP설비와 함께 차세대 설비에 처음으로 적용되는 대표적 운전지원시스템이 전산화된 절차서(Computerize Procedures)이다. 과거의 문서로 된 운전 절차서와는 달리 전자화된 절차서는 on-line으로 운전원에게 필요한 작업 절차를 도식화하여(Flow Chart형태) 보여 주고 운전원이 올바른 판단을 할 수 있도록 필요한 모든 정보를 제공해 준다. 이러한 기능은 특히 발전소의 상태가 과도적일 때 매우 효과적일 것으로 생각된다. 위의 2가지 운전지원 시스템이 운전원의 인지적 부담을 감소시키기 위한 설비라면 자동시험 기능, 보수 지원 기능 등을 추가한 설계는 운전원 및 유지보수원의 인적 오류를 방지하는 기능들로 컴퓨터가 수행할 때 더욱 정확하고 안전하게 기능을 수행할 수 있는 분야이다. 이러한 최신 운전지원 기능의 구현도 디지털 및 컴퓨터화에 의해 가능하게 되었다.

#### (4) 검증설비를 통한 설계의 확인 및 검증

원자력 분야에서 디지털기술 적용 실적은 타산업분야에 비해 뒤떨어진 것이 사실이다. 이것은 원자력 특유의 돌다리도 두들겨보고 건너는, 안전성에 대한 확신감이 없이는 쉽게 신기술을 적용하지 않는 보수성 때문이다. 즉 이미 입증된 기술이 아니면 설계에 채택하지 않는 설계의 커다란 원칙이 있다.

새로운 설계개념을 적용하는데 있어 다른 분야와 달리 원자력분야의 특성이 잘 나타나는 것은 설계 검증설비를 통해 사전에 설계된 내용이 실제 발전소에 적용할 때에 적합하게 동작될지를 미리 시험해 본다. 즉 실제 설치될 설계시스템과 같은 규모와 같은 기능의 모사설비를 만들어 놓고 이를 적용할 원자력발전소의 모든 운전거동을 완벽하게 모의하는 전 규모 시뮬레이터(Full Scope Simulator)에 연결한 다음 설계한 시스템이 이상 없이 동작되는지를 철저히 시험하고 확인하는 것을 설계과정에서 반드시 요구하고 있다. 따라서 차세대원전 MMIS기술 개발에서도 새로이 적용되는 설계 개념에 대해서는 실제와 같은 규모와 기능을 가진 모사설비(Mockup)를 제작한 다음 원전 운전에서 적용 가능한지를 확인 및 검증할 계획이다.

## 6. 향후 전망

차세대원자로 기술개발은 앞에서 설명한 바와 같이 3단계로 구분하여 단계별로 추진하고 있다. 1995년부터 수행하고 있는 제2단계 설계개발은 안전규제기관으로부터 설계 인증(Design Certification)을 받을 수 있는 수준의 개념 및 기본설계를 완료하는 것이다. 1998년부터 시작될 예정인 제3단계 설계가 완료되면 부지특성을 제외한 상세설계가 완료되어, 이는 기존 원자력발전소 설계를 기준으로 볼 때 상세설계를 사실상 완료하는 수준에 도달하게 된다.

차세대원자로 기술개발은 우리 나라 과학기술의 수준을 한 차원 끌어올리는 선도기술 개발사업이며, 연구결과를 바로 적용하여 차세대 원자력발전소를 건설하여야 하는 특징을 가지고 있는 연구사업이다. 이러한 연구사업이 성공적으로 완수되면 기존 경수로에 비해 약 10배나 안전성이 향상된 원자력발전소를 건설하게 되며, 이를 위해 한전을 비롯하여 차세대원자로 개발사업단에 종사하고 있는 모든 연구기관은 한치의 차질도 없이 연구업무가 수행되도록 최선을 다하고 있다. 차세대원자로 기술개발이 완료되는 2000년도에는 우리 나라의 원자력기술은 선진국과 어깨를 나란히 함은 물론 표준형원전에 이어 첨단 원전설계기술을 보유한 원자력 수출국으로서의 국제적 위상이 크게 높아질 것이다.