



APR 1400의 향상된 핵증기 공급 계통 설계 특성

이 광 원

한국전력기술(주)유체계통설계처 부장

신형 경수로1400(APR, Advanced Power Reactor 1400)은 한국형 원전 사용주 요건 문서(Korean Utility Requirements Document : KURD)에 명시된 원전 사용주의 안전성 및 경제성 향상 요구와 신규 인허가 현안들을 설계에 반영하기 위해 향상된 설계 특성(Advanced Design Features)들을 갖춘 개량형 경수로이다.

신형 경수로 1400 설계는 1,000MWe급 한국형 표준 원전(Korean Standard Nuclear Power Plant:KSNP)의 설계·건설 및 운전 경험을 통해 축적된 기술을 바탕으로 차세대 원자로(Korean Next Generation Reactor:KNGR) 프로젝트를 통해 개발중에 있다. 이는 KURD에서 요구하는 다양한 향상된 설계 특성을 설계에 반영하였으며 아울러 표준 설계 개념을 채택하였다.

신형 경수로 1400은 현재 표준

설계 인가 신청중이며 곧 이를 획득할 예정이다.

본고에서는 핵증기 공급 계통 설계에 반영된 향상된 설계 특성들의 설계 현황을 주로 소개하고자 한다.

서론

신형 경수로 1400은 열출력 4,000MWt급의 두 개의 원자로 냉각재 유로(loop)를 가진 신형 경수로로서, 원전 사용주의 안전성 향상과 성능 개선 및 운전성 향상 요구에 부응하고 중대 사고 완화 관련 신규 인허가 현안들을 해결하기 위한 새로운 설계 특성을 갖추고 있다.

신형 경수로 1400은 중장기 국가 연구 개발 사업 일환으로 1992년 발족한 차세대 원자로 프로젝트하에서 개발되고 있으며, 2000년대 한국 내 전기 수용 증가를 대비하여 KSNP에서 보다 개량된 대용량의 신형 표준 원전을 설계하고자 하였다.

차세대 원자로 프로젝트는 국내의 원자력 산업계와 연구소·학계와 인허가 기관이 공동으로 참여하여 이를 수행하고 있다.

현재 진행중이며 오는 12월에 종료될 차세대 원자로 프로젝트 3단계에서는 신형 경수로 1400의 설계 최적화가 추진되고 있으며, 표준 안전성 분석 보고서(standard safety analysis report:SSAR)가 표준 설계 인가(standard design approval)를 받기 위해 인허가 기관에 제출되었다.

표준 설계 인가는 미국 NRC의 표준 설계 인증(standard design certification) 제도와 유사하다. 다음 단계는 건설을 위한 상세 설계 단계이며 장기 전원 계획에 따라 2010년에 상업 운전이 계획되어 있다.

신형 경수로 1400은 안전성 향상과 운전 여유도 증가, 운전성 향상 및 경제성 향상을 위해 다양한 새로운 설계 특성들을 채택하였으며, 이

〈표 1〉 Comparison of Major Design Requirements for APR1400 and KSNP

Items	APR1400	KSNP
Capacity	4,000MWt	2,825MWt
Plant design lifetime	60years	40 years
Seismic design	SSE 0.3g	SSE 0.2g/OBE 0.1g
Safety requirements		
- Core damages frequency	< 10 ⁻⁵ /RY	< 10 ⁻⁴ /RY
- Containment failure frequency	< 10 ⁻⁶ /RY	< 10 ⁻⁵ /RY
- Occupational radiation exposure	< 1 man·Sv/Ry	< 1.2man·Sv/Ry
- Operator action time	Min. 30 minutes	Min. 10 minutes
- SBO coping time	Min. 8 hours	Min. 4 hours
- Thermal margin	10-15%	8%
- Hot-leg temperature	323.9°C	327.3°C
- Emergency core cooling system	4-train Direct vessel injection IRWST	2-train Cold-leg injection Outside RWT
Performance requirements		
- Plant availability	90%	87%
- Unplanned trip	< 0.8/year	< 1/year
- Refueling cycle	18-24 months	15-18 months

러한 설계 특성의 설계 현황을 핵증기 공급 계통(nuclear steam supply system:NSSS)을 중심으로 간단히 기술하고자 한다.

핵증기 공급 계통의 향상된 설계 특성에 대한 설계 현황

1. 설계 목표 및 설계 요건

신형 경수로 1400의 설계 목표는 21세기에 국내에서 가동될 신형 차세대 원자로를 개발하는 것이며 안전성·성능 및 운전성이 뛰어나고 타전력원에 비해 가격 경쟁력을 갖춘 대형 원자로를 개발하는 것이다.

신형 경수로 1400를 설계하는 기본 원칙은 〈표 1〉에서는 KURU의 최상위 설계 요건에 해당하는 주요 설계 요건들을 KSNP와 비교하여 제공하였다.

2. 향상된 설계 특성의 설계 현황

신형 경수로 1400의 설계는 현재 가동중인 KSNP들의 입증된 설계 기술에서 개량된 것이므로 핵증기 공급 계통의 기본 구성은 KSNP와 같다.

즉 두 개의 고온관(hot legs)과 증기발생기와 4개의 저온관(cold legs)과 원자로 냉각재 펌프

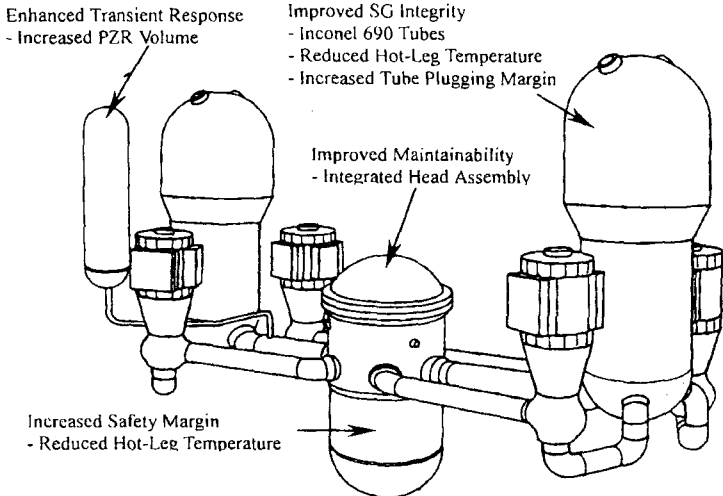
(reactor coolant pumps:RCPs)로 구성되어 있다.

신형 경수로 1400은 규제 요건 및 원전 사용주 설계 요건을 만족하기 위해 다음과 같은 다양한 새로운 설계 특성을 채택하였다.

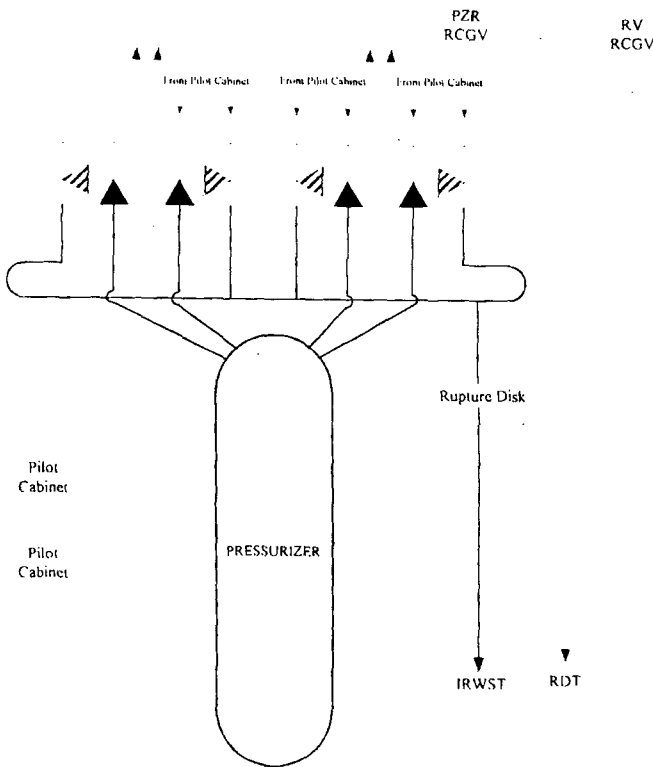
예로, 고온관 온도 감소, 대형 가압기 및 파이롯 구동 안전 방출 밸브(pilot operated safety relief valved:POSRVs)과 직접 원자로 용기 주입(direct vessel injection:DVI), 유량 조절기(fluidic device:FD)를 갖춘 안전 주입 탱크(safety injection tank:SIT), 격납 건물 내 재장전수 저장 탱크(in-containment refueling water storage tank:IRWST), 원자로 용기 외부 냉각 계통(external reactor vessel cooling system:ERVCS)채택, 정지 냉각 펌프(shutdown cooling pump:SCP)와 격납 건물 살수 펌프(containment spray pump:CSP)간의 상호 대체 기능, 일체형 상부 구조물(integrated head assembly:IHA) 채택, 그리고 인간-기계 연계 계통(man-machine interface system:MMIS) 채택 등이 있다. 다음에서 주요 설계 특성의 설계 현황을 간단히 요약하여 소개한다.

가. 원자로 냉각재 계통(RCS)

신형 경수로 1400의 원자로 냉각재 계통에 대한 구성도와 함께 주요 설계 개선 사항이 〈그림 1〉에 나타



〈그림 1〉 Sketch of the APR1400 Reactor Collant System



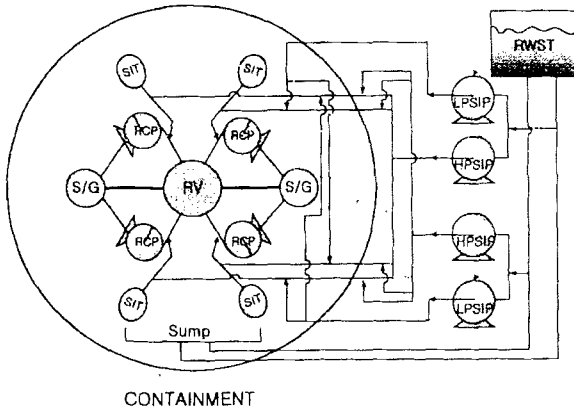
〈그림 2〉 Schematic Diagram of the APR1400 POSRV

나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 KSNP 원자로 냉각재 계통과 구성이 유사하며 터빈/발전기 계통을 통해 1,400MWe의 전기 출력을 얻기 위해 최대 노심 열출력을 4,000MWt에 운전되도록 설계하였다. 현재의 KSNP 설계 대비 가압기 용량을 33% 증가시켜 발전소 과도 상태를 잘 수용하도록 합과 함께 발전소 안전 계통의 불필요한 작동들을 줄이도록 하였다.

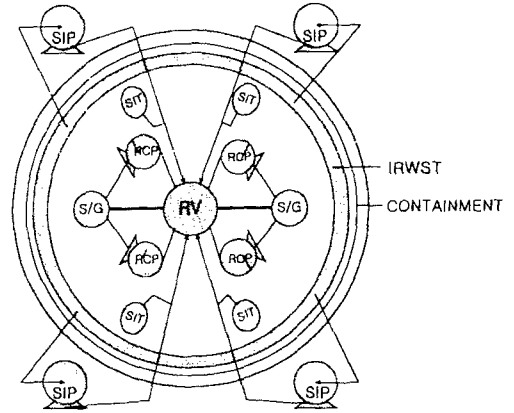
노심 출구 온도, 즉 고온관 온도를 약 3.4°C 감소시켜 노심의 열적 여유도를 증가시켜 운전성을 향상시켰다. 이것은 또한 증기발생기 이차측 냉각수 재고량을 늘려 운전 과도 상태를 완화하고 급수 완전 상실 사고시의 증기발생기 냉각수 고갈 시간(dryout time)을 증가시켰다.

증기발생기는 세관(tube) 재질로 인코넬 690을 사용하여 응력 부식 균열(stress corrosion crack:SCC) 가능성을 줄이고, 10% 관막음(tube plugging) 여유도를 보장하였으며 이차측 냉각수 재고량을 늘려 운전 과도 상태를 완화하고 급수 완전 상실 사고시의 증기발생기 냉각수 고갈 시간(dryout time)을 증가시켰다.

KSNP의 가압기 안전 밸브(pressurizer safety valves:PSVs)와 안전 감압 밸브(safety depressurization system valves:SDSVs)가 〈그림 2〉에 나타난 것처럼 4개의 이중 직렬식(tandem) POSRV로 교체되었다.



KSNP



APR1400

〈그림 3〉 Comparison Sketch of the APR1400 and the KSNP SIS

이러한 변경은 밸브 진동(chattering)과 누설 위험 없이 안정적인 작동과 사고시에 원격 수동 개폐를 허용하기 위함이다.

따라서 POSRV의 기능은 원자로 냉각재 계통 과압 보호 및 급속 감압을 통한 충수 및 방출 운전 그리고 격납 건물 직접 가열(direct containment heating:DCH) 완화이다.

나. 안전 주입 계통(SIS)

신형 경수로 1400의 핵증기 공급 계통 설계에서 KSNP 설계와 비교하여 가장 큰 변화가 있는 것은 바로 안전 주입 계통이다.

주요 설계 개념은 보다 높은 신뢰도와 좋은 성능을 얻도록 계통의 단순화 및 다양화를 구현하는 것이다.

안전 주입 배관을 〈그림 3〉에서 보여준 바와 같이 주입 배관 간의 연결 지관(tie branch) 없이 기계적으로 4계열(train)로, 전기적으로 2구역(division)을 구성하여 단

순성과 도립성을 확보하였다.

DVI 배관 크기(내경 206mm)보다 큰 냉각재 상실 사고(loss of coolant accident:LOCA)를 위해 각 계열은 최소 주입 유량의 50%를 제공하고 이보다 작은 LOCA 사고를 위해서는 각 계열이 요구 유량의 100%를 제공하도록 설계하였다.

KSNP의 안전 주입 계통에 있던 공통 모관(common header)과 저압 안전 주입 펌프(low pressure safety injection pump:LPSIP) 기능은 제거되었고 따라서 안전 주입과 정기 냉각 기능이 분리되었다.

신형 경수로 1400의 안전 주입 계통 각 계열은 하나의 안전 주입 탱크와 IRWST로부터 물을 흡입하여 DVI 노즐로 방출하는 안전 주입 펌프로 구성되어 있다.

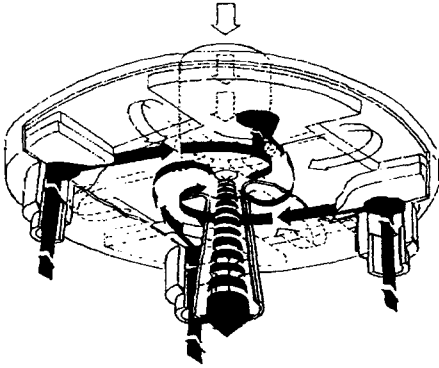
4개의 DVI 노즐은 저온과 중심선에서 2.11미터 높이의 원자로 용기 환형 부위에 기준 고온관을 중심

으로 45도, 135도, 225도, 315도 각도로 대칭적으로 설치되어 있다.

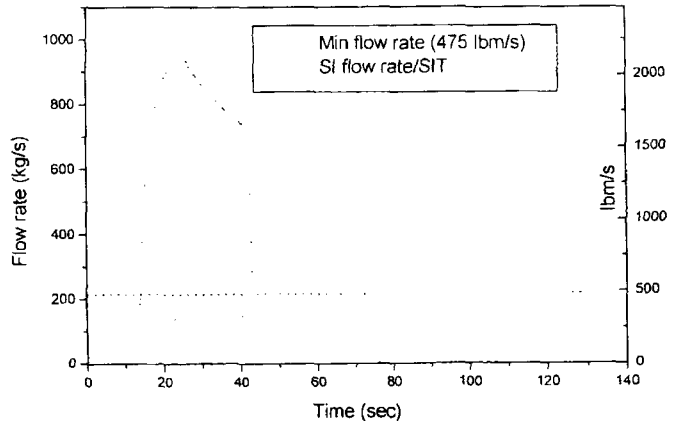
이러한 DVI 개념은 저온관 파단 사고시 파단 부위로의 물넘침을 대비하여 저온관 주입시에 요구되는 주입 유량 균형을 위한 각종 오리피스나 밸브 조절이 필요 없어져서 보다 단순한 그리고 신뢰도가 높은 계통 성능을 제공한다.

이는 또한 관련 밸브 수를 줄여서 부주의한 밸브 오배열(misalignment) 가능성과 유지 보수에 대한 부담을 최소화할 수 있다. 게다가 저온관 주입시 예상되는 저온관 파단 부위로의 주입된 유량의 물넘침 가능성을 제거할 수 있다.

IRWST 계통을 도입함으로써 KSNP 안전 주입 계통의 고압 주입, 저압 주입 및 재순환 운전 모드가 하나의 안전 주입 모드로 통합되었으며, 이로 인해 공통 모관 및 관련 밸브들, 저압 안전 주입 펌프 및 격납 건물 밖의 냉각수 공급에서



〈그림 4〉 Schematic of Fluid Device(FD)



〈그림 5〉 Flow Delivery Curve of SIT with FD

내부 저장조(containment sump)로의 전환 운전이 제거되었다. 이러한 설계 변경을 통해 KSNP 대비 노심 손상 빈도(CDF)가 약 10배 정도 줄게 되었다.

DVI 개념 적용시 문제점은 UPTF(upper plenum test facility) 실험 결과에서 보여주듯이 저온관 파단 대형 LOCA 사고시 초기의 취출(blowdown) 단계나 재충수(refill) 및 재관수(reflood) 단계에서 비상 노심 냉각수의 우회(bypass)로 인한 주입 능력 저하이다.

10 CFR 50 부록 K에 따라 수행되는 LOCA 해석에서는 취출 단계 완료 전에 원자로 용기로 안전 주입 탱크 물이 전달되는 것을 인정하지 않으므로 취출 단계에서의 주입 능력 저하는 이러한 해석 방법에서는 영향을 없다. 그러나 재충수 및 재관수 단계에서의 비상 노심 냉각수 우회는 저압 안전 주입 펌프가 없는 신형 경수로 1400 안전 주입 계통에서는 큰 영향을 미칠 수 있다.

10 CFR 50 부록 K에 근거한 평가 모델(evaluation model:EM)

로 분석한 결과, 신형 경수로 1400 안전 주입 계통은 침투 피복재 온도(peak cladding temperature :PCT)를 줄이는 데 효과적인 것으로 나타났다.

그러나 EM 해석 방법에서는 대형 LOCA 사고 동안 DVI 강수관(downcomer) 내의 열수력 현상을 모사할 적합한 모델이 없고, 최적 분석 모델(best estimate model :BEM)인 RELAP5/MOD3나 TRAC-M/F77 코드를 사용한 분석에서는 재충수 및 재관수 동안의 심각한 비상 노심 냉각수 우회로 침투 피복재 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 BEM 코드 검증용 실험 자료와 DVI 강수관 열수력 현상을 이해하기 위해 다양한 축소된 DVI 실증 실험이 한국원자력연구소(KAERI)와 대학교 실험실에서 수행되고 있다.

다. 유량 조절기를 갖춘 안전 주입 탱크(SIT/FD)

안전 주입 탱크 방출관에 설치되는 피동형 유량 조절기(FD)는 원자로 냉각재 계통으로 2단계의 안전

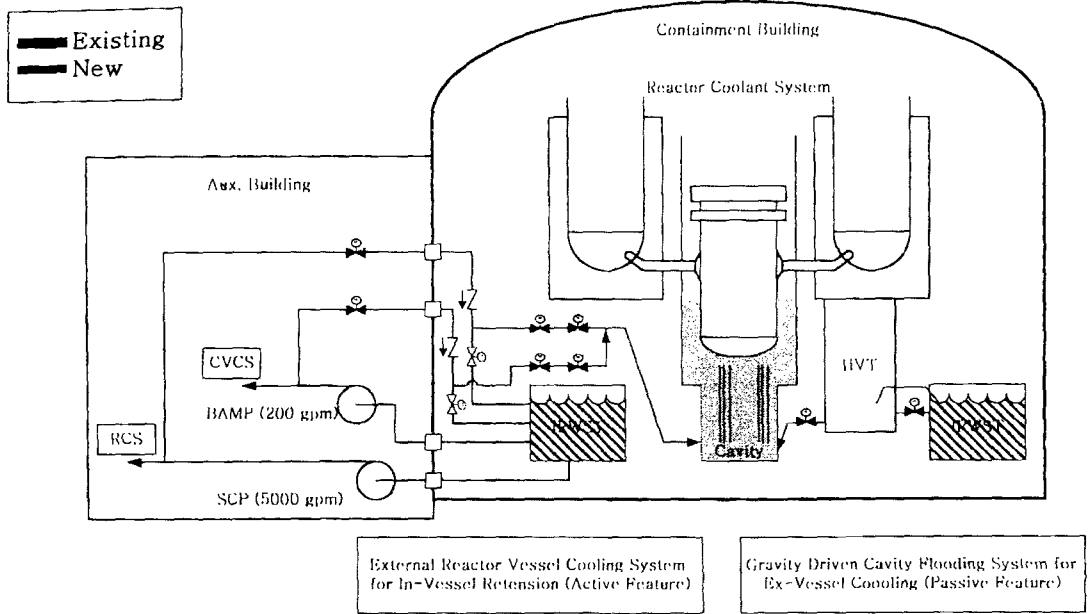
주입수를 제공하여 LOCA 사고시의 안전 주입 탱크 내의 봉산수를 보다 효과적으로 사용할 수 있도록 한다.

일단 LOCA 사고가 나면 유량 조절기는 처음에는 고유량의 주입수를 일정 시간 내보내고 그 다음에는 고유량의 약 30%에 해당하는 유량을 내보내도록 한다.

유량 조절기는 〈그림 4〉에 보인 바와 같이 와류 격실(vortex chamber), 주통로(main port), 제어 통로(control port), 출구 통로(exit port), 그리고 입식 배관(stand pipe)으로 구성되어 있다.

와류 격실은 얇은 원통형 모양으로 안전 주입 탱크의 중앙선 축에 수평으로 설치된다. 4개의 주통로와 4개의 제어 통로는 와류 격실에 90도 각도로 대칭적으로 연결되고, 서로 약간의 각도를 두고 설치되어 있다. 입식 배관은 안전 주입 탱크 중심축에 위치하면서 주통로와 연결되어 있다.

〈그림 5〉에 나타난 유량 전환 시간 및 감량비(turndown ratio)는 EM 해석 방법론에 따라 적절히 정



〈그림 6〉 Sketch of the APR1400 ERVCS

해진 값이며 주로 입식 배관의 길이에 의해 조절된다.

고유량은 수위가 입식 배관보다 높을 경우에 주통로 및 제어 통로를 통해 제공되고 수위가 이보다 낮을 경우에는 오직 제어 통로로만 소유량이 제공되게 된다.

고유량이 제공될 때는 유로가 작은 저항을 받게 되며 소유량이 제공될 때는 와류 격실에서 강한 와류(swirl)가 발생하여 큰 저항을 받게 된다.

유량 조절기의 채택으로 안전 주입 탱크 고갈 시간을 지연시켜 재고량을 장기간에 걸쳐 효과적으로 사용할 수 있어 대형 LOCA 사고시의 안전 주입 펌프 유량 요건에 대한 부담을 최소화할 수 있다. 이를 입증하기 위한 실규모(full-scale) 유량 조절기 실험이 KAERI에 의해 수행되고 있다.

라. 정지 냉각 계통(SCS)

신형 경수로 1400의 정지 냉각 계통 설계에 있어서 주된 설계 개선 사항은 정지 냉각 펌프(SCP)와 격납 건물 살수 펌프(CSP)간의 교체 사용을 가능케 하여 사고 후와 부분 충수 운전(mid-loop operation) 중에 각 계통의 신뢰도를 향상시키는 것이다. 그리고 정지 냉각 펌프의 저압 안전 주입 펌프 기능을 제거함으로써 정지 냉각 계통의 운전을 단순화한 것이다.

KSNP 정지 냉각 계통 설계에 대비하여 신형 경수로 1400 설계에서는 충수 및 방출 운전시의 IRWST 냉각 기능과 원자로 용기 외부 냉각을 위한 충수 기능이 새롭게 추가되었다.

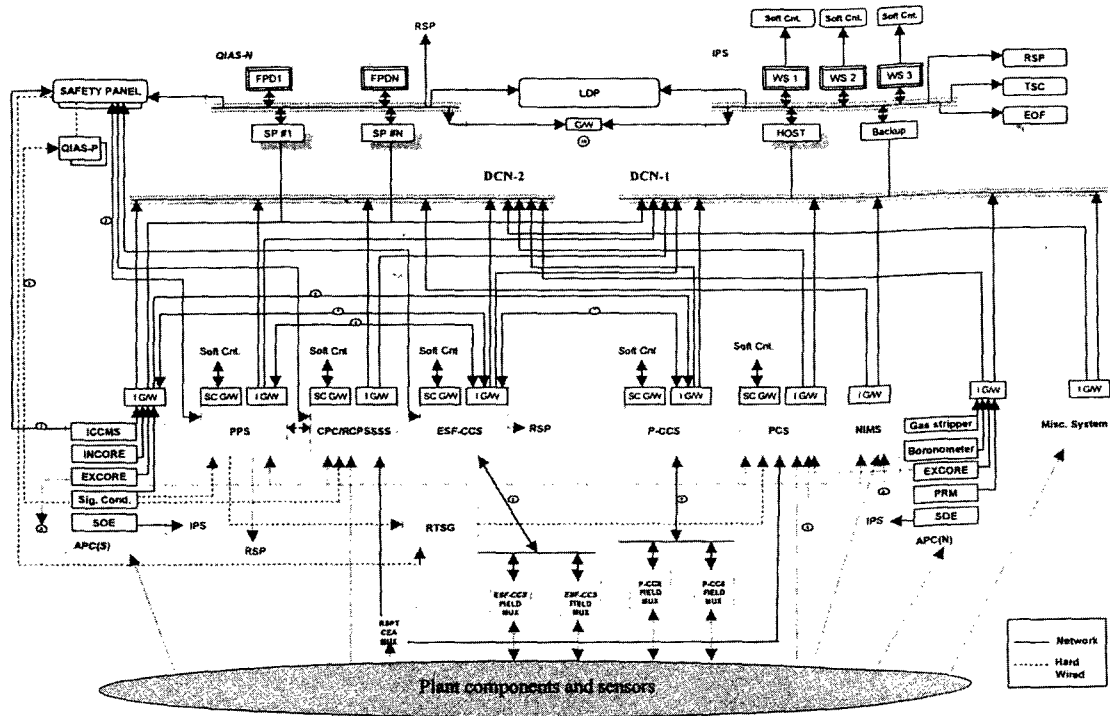
신형 경수로 1400 설계에서는 아울러 원자로 냉각재 계통에 연결된 모든 연결 계통의 계통간 LOCA(inter-system LOCA) 위협을 줄이기 위해 연결 계통의 설계 압력을

63.3kg/cm²g까지 높이고 관련 격리 밸브와 압력 방출 밸브를 설치하였다.

마. 원자로 용기 외부 냉각 계통(ERVCS)

원자로 용기 외부 냉각 계통은 노심 용융을 수반하는 가상 사고 동안 노심 용융물(corium)의 원자로 용기 내 억류(retention)를 목적으로 한 중대 사고 완화 계통으로 설치된다. 따라서 이 계통은 중대 사고시에만 사용되고 안전 여유도 기준(safety margin basis)에 따라 설계된다.

〈그림 6〉에 나타난 바와 같이 정지 냉각 펌프와 관련 배관·밸브 및 계측 제어(I&C) 기기가 포함된 정지 냉각 계통 한(1) 계열이 원자로 용기 외부 냉각을 위해 초기 원자로 공동(reactor cavity) 건물을 물로 고온관 바닥 높이만큼 채우는 데 사용된다.



〈그림 7〉 I&C Overview Diagram of the APR1400

또한 붕산 보충 펌프(boric acid makeup pump: BAMP) 중 하나가 관련 배관·밸브 및 I&C 기기와 함께 노심 용융물의 잔열(decay heat)에 의해 비등하여 줄어드는 양만큼 재충수하는 기능을 하게 된다. 이러한 펌프들의 수원(water resource)은 IRWST이다.

중대 사고를 제외한 정상 출력 운전, 발전소 기동, 정지 냉각 운전, 그리고 설계 기준 사고 후 운전에도 원자로 용기 외부 냉각 계통은 정지 냉각 계통으로부터 격리되어 운전이 안되도록 하여야 한다. 이 계통은 노심 출구 온도가 649°C에 도달하면 수동으로 작동된다.

적절한 운전 절차가 중대 사고 해석과 확률론적 안전성 평가(PSA) 연구에 의해 개발되고 있다.

바. 보조 계통

신형 경수로 1400의 화학 체적 제어 계통(chemical and volume control system: CVCS)은 유출(letdown) 및 충전(charging) 계통에서 설계 개선에 이루어졌으며, 특히 유출 유동 제어 장치(letdown flow control device)가 유출 열교환기 후단에 설치되어 감압 전에 유출수의 과냉각(subcooling)으로부터 유출 밸브 및 오리피스(s)의 수명 단축과 유지 보수 필요성을 크게 줄일 수 있게 되었다.

또한 유출 열교환기를 격납 건물 안에 설치하여 ALARA 관점에서의 장점과 격납 건물 밖에서의 고에너지 배관 파단 가능성을 줄이는 효과를 얻게 되었다.

사. 인간-기계 연계 계통(MMIS)

신형 경수로 1400의 계측 제어(I&C) 계통은 진보된 MMIS를 설계함에 있어 KURD에서 요구하는 인적 오류 가능성을 줄일 수 있는 설계 요건을 모두 만족하도록 설계하였다.

이러한 I&C 계통 설계는 진보된 주제어실(main control room: MCR) 설계를 충분히 반영하였고, 발전소 전반의 자료 통신 전산망(data communication network: DCN), 분산된 디지털 처리 과정(distributed digital processing), 새로운 정보(alarm) 및 지시(display) 처리 과정, 향상된 운전원 지원 기능, 신호의 다중 송신화(signal multiplexing) 및 soft control 개념 등이 설계에 반영되었다.

MCR의 다양한 MMIS를 통합함에 있어 위에서 밑으로의 설계 개념(top-down design concept)이 적용되었다. MCR에는 두 대의 운전원 워크스테이션(workstations)과 한 대의 보조 워크스테이션이 있으며 대형 지판(large display panel:LDP)과 검증된 지시 및 경보 계통(qualified indication and alarm system:QIAS)이 구비되어 있다.

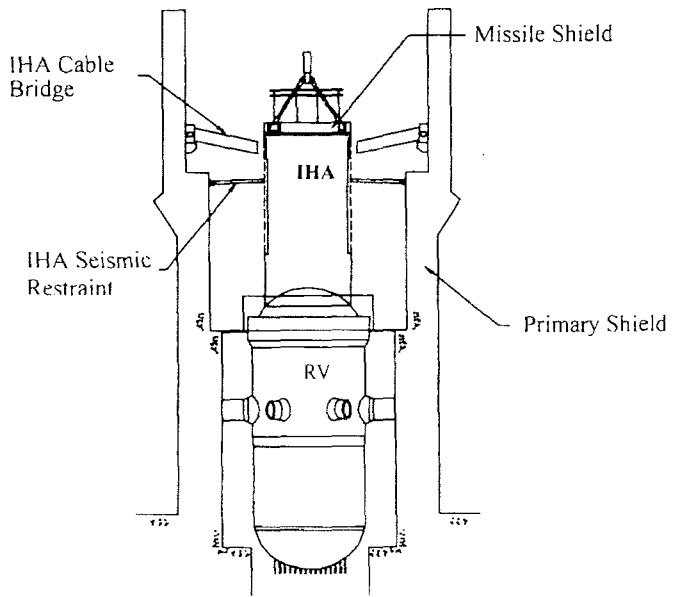
〈그림 7〉에서 전반적인 신형 경수로 1400의 I&C 계통을 보여주고 있으며 이러한 향상된 설계 특성으로 KSNP에 대비하여 보다 향상된 운전성을 보장할 것으로 기대된다.

아. 일체형 상부 구조물(IHA)

KSNP의 원자로 용기 상부 지역에는 매 재장전 운전 정지 기간(refueling outage)마다 분해해서 분리 보관한 후 다시 조립해야 하는 많은 기기들로 구성되어 있다.

이러한 복잡한 절차를 간소화하고 복잡한 상부 구조물을 단순화하기 위해 신형 경수로 1400에서는 〈그림 8〉에 나타난 바와 같은 일체형 상부 구조물 개념을 채택하였다.

IHA에는 KSNP에서처럼 원자로 용기 상부(upper head), 제어봉 구동 장치(control element driving mechanisms:CEDMs), Heated Junction Thermocouples(HJTC)와 상부 인양 장치(head lifting)를 포함하고 있고 뿐



〈그림 8〉 Sketch of the APR1400 Intergrated Head Assembly

만 아니라 지금부터 패키지로 다루어질 Head Area cable Tray (HACT), 미사일 방벽(shield), 지진 억제 장치(seismic restraints), 그리고 CEDM 냉각팬 및 환풍로 등이 포함되어 있다. CEDM 냉각 공기 유동이 덮개(enclosing shroud) 내부로 형성되게 하고 냉각팬을 미사일 방벽판에 설치함으로써 간소하게 설계하였다.

주 기둥 및 인양 프레임 설계는 NUREG-0612 요건을 만족하고 각 기기들은 쉽게 이송되고 설치되도록 하였다. 이러한 IHA 설계는 작업자 피폭량을 줄이고 아울러 재장전 운전 정지 기간을 단축시키는 데 기여한다.

결론

신형 경수로 1400은 다양한 향상된 설계 특성들을 가진 두 개의 계

통 유로로 구성된 전기 출력 1,400MWe급의 개량형 가압경수로이다. 설계는 차세대 원자로 개발 프로젝트하에서 개발되고 있으며 KSNP 설계 기술로부터 개량되었고 표준 설계 개념을 채택하고 있다.

현재 신형 경수로 1400 설계는 표준 설계 인가를 받기 위한 최종 단계에 와 있다.

본 논문에서는 신형 경수로 1400의 NSSS 설계에 있어서 주요 개량된 설계 특성들의 최근 설계 현황을 간략히 소개하였다.

현재의 신형 경수로 1400 표준 설계로 KSNP보다 노심 손상 빈도가 10배나 작을 정도의 안전성과 운전 여유도를 얻었다. 이러한 고도의 설계 개선은 향후 한국뿐만 아니라 세계 어디에나 건설될 원전으로 충분한 가능성을 보증한다고 판단된다. ☞