금상

신형경수로1400의 안전 요건 개발과 활용

설 광 원
한국원자력안전기술원 원자로안전해석실 책임연구원

원자력발전소의 안전성을 향상시키고, 국가 경제와 원자력 산업의 지속적인 발전을 위해 차세대 원자로 기술 개발 사업이 국가 선도 기술 개발 사업(G-7 Project)의 일환으로 1992년부터 시작하여 2001년까지 약 10년 동안 수행되었다.

필자는 차세대 원자로 설계 기술 개발과 공동으로 추진된 안전 규제 기술 개발 사업에 핵심적인 연구를 수행하였으며, 신형경수로1400(차세대 원자로의 공식 인 · 허가 명칭) 설계의 표준 설계 인가 심사에 참여하였다.

다음은 필자가 10년이 넘게 신형경수로1400 안전 규제에 참여하면서 수행한 주요 연구 개발과 안전성 평가 내용을 요약한 것이다.

안전 규제 연구의 기획

1991년 한국전력공사는 한국 표준형 원전 이후 우리 나라의 원자로형 전략을 원자력위원회에서 보고한 바 있다. 미국에서 개발하고 있는 신형경수로(Advanced Light Water Reactor), 즉 ABB-CE의 System 80+와 웨스팅하우스의 AP600과 비슷한 수준의 우리 나라 차세대 원자로를 개발하기 위한 것이었다.

이는 국내 원전 설계 기술 능력을 한 단계 향상시키고 경제성을 제고시키기 위한 국가 전략의 일환이었지만, 원전의 안전성을 획기적으로 증진시켜 TMI 및 체르노빌 원전 사고 이후 낮아진 국민의 신뢰도를 향상시키는 노력의 일환이기도 했다.

과학기술부는 같은 해 짧지만 6개월간의 기획 사업을 통해 향후 10년간의 연구 개발 내용과 추진 체계를 기획하여 「차세대 원자로 기술 개발 추진 계획」을 수립하였다.

최종 사업 목표는 2001년까지 차세대 원자로의 표준 상세 설계를 개발하고 과학기술부로부터 표준 설계 인가를 획득하는 것이었다.

다음 해 1992년 6월, 국가 종합과학심의회에서는 제한적인 국내 재원과 역량을 결집하고 정부의 개발 의지와 적극적인 지원을 위해 본 사업을 국가 선도 기술 개발 사업(G-7 Project)으로 확정하였다.

본 사업을 위해 기술개발추진위원회를 구성, 운영하였으며, 주관 부처로 산업자원부, 협조 부처로 과학기술부, 그리고 주관 연구 기관으로 차세대원자로 기술개발사업단, 협조 기관으로 안전성 평가를 위한 원자력안전기술원이 참여하였다. 그리고 실질적인 기술 개발은 국내 최고의 전문 기관들이 참여하고 있는 차세대원자로 기술개발사업단에서 추진하도록 구성하였다. 본 사업은 그 해 12월 공식적으로 시작되었다.

안전 규제 연구의 개발 내용

차세대 원자로 설계 기술 개발과 병행하여 추진된 차세대 원자로 안전 규제 기술 개발 사업은 당시 활성화된 사업은 아니었으나, 원전의 안전성 확보와 관련하여 종합적인 안전 규제의 법적 · 제도적 장치를 마련하고, 체계적인 안전 요건 체계를 구축하자는 공동의 목표하에 추진되었다. 기존의 부족한 안전 규제 요건을 보완하고 향후 원전의 안전성 증진을 위한 법적 기틀을 구비하자는 것이었다.

이에 따라 차세대 원자로 안전 규제 기술 개발 사업의 일반적인 목표를 다음과 같이 설정하였다.

- 차세대 원자로 상용화에 대비하여 안전 규제 기술 능력을 확보
- 차세대 원자로 안전성 증진을 위한 국제 수준의 안전 규제 기술 기준 개발
- 차세대 원자로 설계 안전성 측면에서 사업자에게 기술 지원

좀 더 구체적인 안전 규제 기술 개발의 범위를 정리해 보면 다음과 같다.

- 표준 설계의 안전성 검토를 위한 인 · 허가 절차 및 제도 개발
- 차세대 원자로의 부지, 설계, 운전, 품질 보증 분야의 안전 요건 및 기술 기준 개발
- 설계 단계에서 핵심 안전 현안을 도출하여 조기에 해결 방안을 모색함으로써 차세대 원자로 인 · 허가의 안정성 증진
- 사업자 기술 지원의 일환으로 차세대 원자로 설계의 사전 안전성 평가 수행

〈표 1〉 차세대 원자로 안전 규제 기술 개발 사업의 주요 연구 내용

	차세대 원자로 설계 기술 개발	차세대 원자로 안전 규제 기술 개발
1단계 1992.12~1994.12	• 개발 노형 확정 • 개념 설계 개발	• 차세대 원자로 안전 규제 요건 체계 개발 • 안전 규제 기본 요건: 안전 목표 및 원칙 개발
2단계 1995.3~1999.2	• 기본 설계 개발 • 표준 안전성 분석 보고서 작성 • 원자로 계통 주요 기기 사양 작성	• 안전 규제 일반 안전 요건 개발 • 안전 규제 상세 안전 요건 개발 • 핵심 기술 현안 도출 및 해결 방안 연구 • 표준 설계 인 · 허가 제도 및 절차 개발
3단계 1999.3~2001.12	• 표준 설계 인가 취득 • 최적화 설계 • 장기 소요 항목 기술 개발	• 안전 규제 지침 개발 • 안전 심사 지침 개발 • 인 · 허가 절차 및 안전 규제 요건의 법제화 • 안전 규제 요건의 전산화

〈표 1〉은 차세대 원자로 설계 기술 개발과 안전 규제 기술 개발 사업의 주요 사업 내용을 단계별로 요약한 것이다. 1단계 설계 개발에서 개발 노형 선정에 초점을 맞추고 있듯이 안전 규제 연구에서도 우리 나라 여건에 적합한 체계적인 안전 규제 요건의 개발 방향 수립에 초점을 맞추었다.

이를 위해 국내외 신형 원자로 설계 및 규제 기술의 일반 현황을 분석하였고, 국내외 신형 원자로의 주요 안전 현안들을 분석 · 평가하였으며, 각국의 안전 규제 요건 체계들을 비교 · 분석하였다. 일부 안전 기본 요건에 대한 개발도 이루어졌다.

2단계는 설계 기술 개발과 마찬가지로 본 사업에서 가장 중요한 안전 요건들을 개발한 시기였다. 먼저, 1단계에서 개발한 안전 규제 요건 체계도를 수정 · 보완하여 완성도를 높였으며, 개발된 안전 목표 및 원칙으로부터 가장 핵심이 되는 일반 안전 요건과 상세 안전 요건을 전 분야에 걸쳐 종합적이고 체계적으로 개발하였다.

이 개발 내용은 매우 방대한 양으로 본 사업의 핵심 개발 내용이므로 아래 안전 규제 요건의 법제화 장에서 좀 더 자세히 소개하고자 한다.

이 시기에는 또한 핵심 기술 현안을 해결하기 위한 심층적인 연구가 산 · 학 · 연의 공동 노력으로 수행되었으며, 표준 설계 인가 절차와 사전 안전성 평가 제도 등에 대한 연구도 집중적으로 수행되었다.

3단계에서는 2단계에 개발한 안전 규제 요건을 수정 · 보완하고 기

존 원자력 법령상의 기술기준들과 비교 · 분석하여 법제화를 추진하는 것이 주요 업무중의 하나였다. 또한 차세대 원자로의 안전 규제 지침으로서 표준 안전성 분석 보고서의 작성 지침과 설계 · 시공 및 성능 검증 지침서를 개발하여 사업자의 설계 문서 개발을 지원하기도 하였다.

이 시기에는 이러한 안전 규제 요건 개발과 병행하여 신형경수로 1400의 안전성 평가를 위한 규제 기관의 안전 심사 지침도 개발되었으며, 인 · 허가 일환으로 사전 안전성 검토도 수행되었다.

신형경수로1400의 사전 안전성 검토는 주요 핵심 기술 현안을 조기에 도출하여 건설 및 운영 허가 이전에 기술적 해결 방안을 모색함으로써 인 허가의 안정성을 조기에 확보하자는 데 목적이 있었다.

신형경수로1400의 안전 요건 개발

차세대 원자로 안전 규제 기술 개발은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 반복 건설을 목표로 하는 표준 설계의 인 · 허가 제도와 절차를 개발하는 것이고, 다른 하나는 신형경수로1400의 안전성을 확보하기 위해 준수해야 할 안전 요건 및 기술 기준을 개발하는 것이다.

본 절에서는 후자에 해당되는 차세대 원자로 안전 규제 요건 개발의 주요 연구 결과들을 간략히 소개한다.

차세대 원자로의 안전 규제 요건 개발은 기존 한국 표준형 원전과 일관성이 있으면서, 기존 규제 요건의 미진한 부분을 개선 · 보완하고, 향후 상용화될 차세대 원자로의 부지 · 설계 · 운영 · 품질 보증 등 종합적인 체계를 갖도록 개발하고자 했다.

특히 체계적인 안전 규제를 위하여 궁극적인 안전의 지향 목표로부터 구체적인 안전 규제 방법론에 이르는 일련의 계층을 구성하여 안전 요건을 개발하였다.

국내외 기존 안전 요건을 근간으로 차세대 원자로의 안전성 증진을 위한 추가적 안전 요건을 고려하여 우리 나라에 적합한 안전 기준을 개발하고자 했으며, 향후 연구 개발 내용도 체계적으로 반영할 수 있도록 융통성을 가지도록 하였다.

즉 신형 원자로의 획기적인 안전성 증진, 방사선 위험도의 최소화, 그리고 공공의 신뢰도 증진을 목표로 기존 안전 요건의 개선 · 보완뿐만 아니라, 국제적 수준의 안전 기준을 확립할 수 있도록 분야별 · 계층별로 구분된 안전 요건을 개발하였다.

〈표 2〉는 본 사업에서 체계적으로 개발한 안전 규제 기술 요건과 기존의 체계를 비교하여 제시한 것이다. 국내 원자력법령뿐만 아니라 미국 원자력규제위원회(USNRC)의 상세 기술 기준, 국제원자력기구(IAEA)의 안전 요건 체계, 기타 원자력 선진국들의 규제 요건들을 참조, 분석하여 반영하였음을 보여준다.

본 사업 기간 동안에 개발된 주요 안전 요건 체계 및 기술 기준은 〈표 3〉에 제시한 다양한 기술 보고서로 발간되었으며 상세한 연구 개발 내용은 해당 보고서를 참조할 수 있다. 여기서는 각 계층의 안전 요건들을 간략히 설명하고자 한다.

1. 신형 원자로의 안전 목표

원전 작업 종사자들과 대중 보호, 사회 시설과 자연 보호를 위한 일반 안전 목표와 방사선 방호 목표를 설정하였으며, 사고 예방 및 완화를 위한 기술 안전 목표, 그리고 노심 손상 빈도와 방사능 대량 누출 빈도로 구성된 정량적 보조 목표를 개발하여 제시하였다.

안전 목표는 안전 원칙과 함께 「원자력안전정책성명」과 「중대사고 정책성명」에 반영되었으며, 향후 정책 성명 제 · 개정 작업에도 활용될 것이다.

2. 신형 원자로의 안전 원칙

안전 목표를 달성하기 위해 원칙적으로 다루어져야 할 안전의 주안점으로서 안전 관리, 품질 보증 계획의 수립 및 이행, 안전성 평가 및 검증 등 6개의 일반 안전 원칙, 심

〈표 2〉 국내외 안전 규제 기술 요건의 체계 비교

차세대 원자로 안전 규제 기술 요건 체계	기 존 체 계				
	대한민국	미 국	일 본	독 일	국제원자력기구
안전 목표 및 원칙	원자력법 원자력법 시행령	원자력법 신형로 관련 정책 성명	원자력기본법 원자로등 규제법	원자력법 방사선방호령	Safety Fundmt'ls INSAG-3, -10 TECDOC-801
일반 안전 요건	원자력법 시행령 - 위치, 성능, 구조 설비, 운영, 품질 보증 등	10CFR20 방사선 방호 10CFR50 App.A GDC 10CFR50 App.B QA 10CFR73 물리적 방호 10CFR100 부지 선정	통상산업성령 원자력안전위원회 지침 - 발전용 경수형 원자로 시설에 관한 안전 지침	BMI 성령 - 원자력발전소 안전 기준	Safety Standards - SS 50-C-D - SS 50-C-S - SS 50-C-O - SS 50-C-QA
상세 안전 요건	장관 고시, 훈령 등	10CFR (Standard) SRP (Acceptance Criteria)	원자력안전위원회 지침 (통상산업성 고시)	RSK 지침 (KTA 기준)	Safety Guides - 50-SG-D1… - 50-SG-O1… - 50-SG-QA1…
안전 규제 지침		Regulatory Guides	원자력안전위원회 지침	RSK 지침	Safety Practices
안전 심사 지침		SRP (Review, Method, Procedures)	원자력안전위원회 지침	BMU 지침	

층 방어의 강화 및 입증 기술의 사용 등 2개의 설계 안전 원칙, 운전 절차서의 수립, 보수/시험/검사 등 4개의 운전 안전 원칙, 그리고 부지 안전 원칙 등 총 13개 항목으로 개발되었다.

3. 신형 원자로의 일반 안전 요건

안전 원칙을 만족시키기 위해 준수해야 할 일반 안전 요건은 안전성 확신을 위한 전반적이고 함축적인 개념을 바탕으로 설정되었다.

크게 5개 분야, 즉 부지/환경(6개 항목), 설계(33개 항목), 운전(19개 항목), 품질 보증(3개 항목) 및 해체(추후 개발) 분야로 구성되었으며, 하위 요건인 상세 안전 요건의 기본적인 근간을 제공하도록 개발하였다.

특히 설계 분야에는 안전 기능, 설계 기준 및 중대 사고, 인간 공학, 신뢰도, 각 계통별 안전 요건 등 안전성 증진 요소들이 체계적으로 반영되었다. 개발된 일반 안전 요건은 과학기술부령으로 법제화되었다.

4. 신형 원자로의 상세 안전 요건

안전 원칙을 만족시키기 위해 준수해야 할 기술적 세부 요건으로서 안전 규제에서 요구되는 기술 요건의 최종 명시 단계이다. 상위 요건인 일반 안전 요건과 직접적인 연계를 가지면서 필요에 따라 안전 규제 지침 및 산업 기술 기준과 연계되도록 개발하였다.

전체 체계는 일반 안전 요건과 일관성 있게 5개 분야, 즉 부지/환경, 설계, 운전, 품질 보증 및 해체로 구성하였으며, 총 23장, 429개 항목으로 개발되었다. 개발된 상세 안전 요건은 일부 안전 규제 지침과 함께 과학기술부 고시로 법제화가 추진중에 있다.

5. 안전 규제 지침 및 안전 심사 지침

필수적인 안전 규제 요건을 반영 혹은 준수하기 위해 선택적으로 제

〈표 3〉 안전 규제 기술 개발 사업의 주요 기술 보고서

단 계	기술 보고서 제목	보고서 번호
1단계 개발 ('92.12~'94.12) 【1차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 기술 개발	KINS/GR-052, '93.6
	• 개량형원자로 공학적 안전 계통의 안전성	KINS/GR-069, '94.3
	• 개량형원자로 원자로 계통의 안전성	KINS/GR-070, '94.3
	• 개량형원자로 냉각재 계통의 안전성	KINS/GR-071, '94.3
【2차년도】	• 개량형원자로 구조 설계의 안전성	KINS/GR-072, '94.3
	• 신형원자로 안전 현안 평가	KINS/GR-073, '94.5
	• 일반안전현안의 신형로 적용 타당성 평가	KINS/GR-075, '94.6
	• 발전용원자로 안전 규제 기술요건의 현황 및 체계 평가	KINS/GR-087, '94.9
	• 차세대원자로 안전 규제 기술 요건 개발 방향	KINS/GR-090, '94.1
2단계 개발 ('95.3~'99.2) 【1차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 기술 요건 개발	KINS/GR-112, '96.7
	• 차세대원자로 안전 규제 요건 체계 개발	KINS/GR-114, '96.7
	• 차세대원자로 안전 목표 및 안전 원칙 개발	KINS/GR-115, '96.7
	• 차세대원자로 일반 안전 요건 개발	KINS/GR-116, '96.7
	• 차세대원자로 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-117, '96.7
【2차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 기술 요건 개발(II)	KINS/GR-141, '97.11
	• 차세대원자로 안전목표 및 안전 원칙 개발(II)	KINS/GR-142, '97.11
	• 차세대원자로 일반 안전 요건 개발(II)	KINS/GR-143, '97.11
	• 차세대원자로 상세 안전 요건 및 안전 규제 지침 개발	KINS/GR-144, '97.11
	• 차세대원자로 핵심 기술 현안 해결 방안	KINS/GR-145, '97.11
	• 차세대원자로 위탁 연구 및 기술 자문	KINS/GR-146, '97.11
	• 차세대원자로 안전 규제 요건 개발(영어판)	KINS/GR-147, '97.11
【3차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 기술 요건 개발(III)	KINS/GR-149, '98.6
	• 차세대원자로 부지/환경 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-150, '98.6
	• 차세대원자로 설계 공통 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-151, '98.6
	• 차세대원자로 계통 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-152, '98.6
	• 차세대원자로 해석 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-153, '98.6
	• 차세대원자로 운영 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-154, '98.6
	• 차세대원자로 품질보증 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-155, '98.6
	• 차세대원자로 안전 규제 지침 개발	KINS/GR-156, '98.6
	• 차세대원자로 핵심 기술 현안 해결 방안(II)	KINS/GR-157, '98.6
【4차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 기술 개발(2단계 최종)	KINS/GR-172, '99.2
	• 차세대원자로 안전 목표 및 안전 원칙 개발	KINS/GR-173, '99.2
	• 차세대원자로 일반 안전 요건 개발	KINS/GR-174, '99.2
	• 차세대원자로 부지/환경 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-175, '99.2
	• 차세대원자로 설계 공통 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-176, '99.2
	• 차세대원자로 계통 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-177, '99.2
	• 차세대원자로 해석 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-178, '99.2

시되는 허용 가능한 방법론 혹은 사양들을 명시하는 안전 규제 지침이 전 분야에 걸쳐 개발되었다. 총 163개의 안전 규제 지침을 개발하였으며, 사고 해석의 최적 방법론 등 3개는 핵심 기술 현안으로 분류하여 추가 연구를 수행하고 있다.

한편 차세대 원자로의 안전성 심사를 일관성 있고 효율적으로 수행하기 위해 안전 심사 범위, 심사 방법 및 분야별 연계성을 제시한 안전 심사 지침을 개발하여 안전 기술원의 내부 지침으로 활용하고 있다.

이밖에도 기존 안전 규제 요건과 차이가 나거나 쟁점이 예상되는 안전 현안들과 상당한 정책적/기술적 판단을 요구하는 현안들에 대해서는 심층 분석과 인 허가시에 확인을 요구하는 핵심 기술 현안으로 분류하여 별도로 관리하였다.

이 중에 새로운 안전 계통 설계에 따른 비상 노심 냉각 성능 현안에 대해서는 국내 산 학 연의 공동 연구와 협력으로 기술적 해결 방안을 강구한 좋은 사례이므로 뒤에서 자세히 기술하고자 한다.

안전 규제 요건의 법제화

본 규제 기술 개발 사업의 또 하나 의미 있는 개발 결과물은 표준 설계인 신형경수로1400의 인 · 허가 절차와 제도의 개발이다. 새로운 설계 개념을 반영한 신형경수로

	• 차세대원자로 운영 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-179, '99.2
	• 차세대원자로 품질 보증 상세 안전 요건 개발	KINS/GR-180, '99.2
	• 차세대원자로 안전 규제 지침 개발	KINS/GR-181, '99.2
	• 차세대원자로 핵심 기술 현안 해결 방안	KINS/GR-182, '99.2
	• 표준 설계 안전성 분석 보고서 작성 지침 개발	KINS/GR-183, '99.2
	• 차세대원자로 안전규제기술개발 위탁 연구 및 기술 자문	KINS/GR-184, '99.2
3단계 개발 ('99.3~' 01.12) 【1차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 요건 개발 (III-1)	KINS/GR-191, '00.2
	• 차세대원자로 상세 안전 요건 개발 (III-1)	KINS/GR-192, '00.2
	• 차세대원자로 표준안전성 분석보고서 작성 지침 개발 (III-1)	KINS/GR-193, '00.2
	• 차세대원자로 안전 심사 지침 개발 (III-1)	KINS/GR-194, '00.2
	• 차세대원자로 국내외 위탁 및 기술 자문 (III-1)	KINS/GR-195, '00.2
	• Safety and Regulatory Requirements and Guides for KNGR (III-1)	KINS/GR-196, '00.2
【2차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 요건 개발 (III-2)	KINS/GR-213, '01.2
	• 차세대원자로 안전 규제 요건 법제화 (III-2)	KINS/GR-214, '01.2
	• 차세대원자로 상세 안전 요건 개발 (III-2)	KINS/GR-215, '01.2
	• 차세대원자로 안전 규제 지침 개발 (III-2)	KINS/GR-216, '01.2
	• 표준 설계 인 허가 제도 요건 및 표준 설계 기술서 (설계 · 시공 · 성능 검증계획) 작성 지침 개발 (III-2)	KINS/GR-217, '01.2
	• 차세대원자로 안전규제요건의 IAEA 전문가 평가 (III-2)	KINS/GR-218, '01.2
	• 차세대원자로 안전 규제 기술 개발 위탁 연구 및 기술 자문 (III-2)	KINS/GR-219, '01.2
【3차년도】	• 차세대원자로 안전 규제 요건 개발 (III)	KINS/GR-224, '01.12
	• Safety and Regulatory Requirements and Guides for Korean Next Generation Reactor (III)	KINS/GR-225, '01.12
	• 차세대원자로 안전 규제 요건 법제화 (III)	KINS/GR-226, '01.12
	• 표준설계 인 · 허가 제도 요건 및 표준설계기술서 개발 (III)	KINS/GR-227, '01.12
	• 표준설계 안전성분석보고서 작성 지침 개발 (III)	KINS/GR-228, '01.12
	• 차세대원자로 일반 안전 요건 개발 (III)	KINS/GR-229, '01.12
	• 차세대원자로 상세 안전 요건 개발 (III)	KINS/GR-230, '01.12
	• 차세대원자로 안전 규제 지침 개발 (III)	KINS/GR-231, '01.12
	• 차세대원자로 위탁 연구 및 기술 자문 (III)	KINS/GR-232, '01.12

1400은 표준 설계에 의한 반복 건설을 목표로 하고 있어 사업 초기부터 시급히 표준 설계에 대한 효율적이고 능동적인 법적 인 · 허가 절차와 제도를 개발하도록 요구하였다.

이와 관련하여 본 사업에서는 사전 안전성 검토 제도, 표준 설계 인가 제도, 통합 인 · 허가 제도, 조기 부지 허가 제도, 그리고 관련된 규제 요건을 조사 · 분석하여 우리 나라 환경에 적합한 규제 요건을 개발하였다.

이 중 사전 안전성 검토 제도는 표준 설계 인가 제도가 법적으로 구비되기 전에 차세대 원자로 안전성 평가에 한시적으로 적용된 바 있으며, 표준 설계 인가 제도는 신형경수로1400 설계에 적용되어 지난 2002년 5월에 표준 설계 인가를 발급한 바 있다.

본 사업의 일환으로 개발된 표준 설계 인가 절차와 규제 요건은 원자력법과 관계 법령의 초안으로 작성되어 과학기술부 · 한국전력공사 · 유관 기관과의 협의를 거쳐 수정 · 보완되었으며, 원자력안전위원회 심의를 거쳐 법제화의 절차를 밟게 되었다.

최종적으로 2001년 1월 16일 표준 설계 인가 제도를 신설하는 원자력법 개정 법률안이 공고되어 법적 위상을 부여받았으며, 계속적으로 동 법 시행을 위한 이행 지침들이 원자력법 시행령과 시행규칙에 반영되어 2001년 7월 28일 개정 법률안 공고와 함께 법제화가 마무리되었다.

이후 동 법에 따라 한국전력공사는 신형경수로1400의 표준 설계 인가를 신청하였으며, 과학기술부와 원자력안전기술원은 국내에서 개발한 안전 요건을 근거로 국내 기술력으로 안전 심사를 수행하였다.

차세대 원자로 기술 개발 사업이

〈표 4〉 표준설계인가 제도 도입에 따라 신설된 원자력 관계법령

법 령	해당 조문	특기 사항
원자력법	제12조의2 (표준 설계 인가) 제12조의3 (표준 설계 인가의 취소)	- 표준 설계 인가의 신청, 범위, 유효 기간, 취소 등
원자력법 시행령	제21조의3 (허가의 처리 기간) 제24조 (표준 설계 인가의 신청) 제25조 (표준 설계 변경 인가의 신청) 제26조 (표준 설계 인가 제외 대상)	- 건설/운영 허가 처리기간 - 과학기술부 장관에게 신청 - 신기술의 반영, 안전성 확인 불가능 사항은 제외 등
원자력법 시행규칙	제11조의2 (표준 설계 인가 신청 등) 제11조의3 (표준 설계 인가 첨부 서류의 작성) 제11조의4 (표준 설계 인가의 기준) 제11조의5 (표준 설계 인가의 유효 기간) 제11조의6 (검증 계획 이행) 제11조의7 (표준 설계 인가 변경의 신청) 제11조의8 (경미한 사항의 변경 신고)	- 신청서식지, 표준설계기술서 및 표준설계안전성분석 보고서의 기술 사항 등 - 표준 설계의 기술 기준 등 - 건설 및 운영 허가 신청자의 검증 계획 이행 등

시작된 지 꼭 11년 만의 일로 우리나라 최초의 표준 설계 인가를 발급하는 업적을 남겼으며, 향후 신형 원자로의 조기 안전성 확보를 위한 법적 · 제도적 기반을 마련했다고 볼 수 있다.

한편, 신형경수로1400의 표준 설계 인가와 건설 운영 허가를 위한 기술 기준에 해당하는 것이 일반 안전 요건이며 이에 대한 법제화도 이루어졌다.

법적으로 허가 기준에 해당하는 일반 안전 요건은 본 사업의 핵심 연구 결과물로서 수 차례의 유관 기관 전문가들의 검토 · 자문을 거쳐 수정 · 보완되었으며, 공동 노력의 결과 신설된 과학기술부령으로 지난 2001년 법적 위상을 부여받았다.

과학기술부령 제31호로 제정된 「원자로시설등 기술기준에 관한 규칙」은 기존 기술 기준의 개선뿐만 아니라 안전성 증진과 관련된 신규 조항들도 다양한 분야에 걸쳐 포함하고 있어, 향후 원전의 안전성 증진에 상당히 기여할 것으로 본다. 또한 그 동안 미비했던 국내 원자력 기술 기준의 법적 근거를 체계적으로 마련함으로써 사업자와 규제자의 이해 폭도 향상될 것으로 예상된다.

이밖에도 개발된 상세 안전 요건과 안전 규제 지침은 과학기술부 고시로 단계적인 법제화를 추진중에 있으며, 일부는 원자력안전기술원의 규제 지침으로 활용되고 있다.

그리고 새로운 표준 설계 인가 제도에서 요구하는 표준 설계 안전성 분석 보고서 작성 지침과 표준 설계 기술서(설계 시공 성능 검증 계획) 작성 지침을 개발하여 사업자가 참조할 수 있도록 하였으며, 안전성 심사에 기준과 범위가 되는 안전 심사 지침을 개발하여 원자력 안전 기술원의 업무 지침으로 사용하도록 하였다. 다음은 상기 안전 규제 요건의 법제화 내용을 간단히 정리한 것이다.

1. 원자력법에 표준 설계 인가 제도 신설

표준 설계 인가 제도의 도입 목적은 표준 원전에 대한 인 · 허가의 효율성을 제고하고, 원자력 안전성에 대한 대외 공신력을 증진시키며, 결과적으로 원자력산업의 진흥과 경쟁력을 향상시키는 데 있다.

이 제도는 기존의 인·허가 제도와 별도로 법령에 규정함으로써 사업자가 선택적으로 활용할 수 있으며, 한번 심사된 내용은 안전성에 영향을 미치지 않는 한 계속적인 효력을 갖게 함으로써 사업자와 규제자 모두에게 이득이 될 수 있는 제도이다.

표준 설계 인가 제도 도입에 따라 신설된 혹은 개정된 원자력 관계 법령의 법 조항은 〈표 4〉에서 보는 바와 같으며 주요 내용은 다음과 같다.

- 신청 절차: 원자로 및 관계 시설의 표준 설계에 대해 인가를 받고자 하는 자는 표준 설계 기술서, 표준 설계 안전성 분석 보고서 등의 제출 서류와 함께 과학기술부 장관에게 신청하여야 함
- 신청 서류의 상세도: 설계·건설, 운영에 대한 종합적인 안전성이 확인될 수 있도록 충분한 수준의 설계 완성도와 체계성을 갖춘 문서가 제출되어야 함
- 효력: 표준 설계 인가를 받은 설계에 대해서는 10년간 법적 유효기간을 부여함
- 검증 계획의 이행: 표준 설계 기술서의 주요 내용인 설계·시공·성능 검증 계획은 발전소를 건설·운영하는 자가 운영 허가 시점까지 이행하여야 함

2. 과학기술부령에 기술기준 제정

일반 안전 요건을 법제화한 과학기술부령 제31호 「원자로시설 등 기술기준에 관한 규칙」은 신형 원자로의 안전성 증진 요소를 포함하고 있지만 기존 기술 기준과 일관성을 유지하면서 체계성을 갖추기 위해 기존으로부터 상당 부분 개편하였다.

기존 원자력법 시행령의 「제3관 운영에 관한 안전조치(제102조부터 제112조)」와 원자력법 시행규칙 「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙: 제1절 위치, 제2절 구조 및 설비, 제3절 성능, 제4절 품질보증」을 재구성하여 신설된 과학기술부령 제31호 「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙: 제1절 위치, 제2절 구조 설비 및 성능, 제3절 운영, 제4절 품질보증」으로 단일화하여 체계화하였다.

기술 기준의 내용 측면에서는 앞서 언급하였듯이 기존 항목과 본 사업을 통해 개발된 일반 안전 요건을 비교·분석하여 조항을 통폐합하거나 신설하였다.

일반 안전 요건에는 우리 나라 원전에 이미 적용하고 있는 기술 도입국, 미국의 안전 요건, 10CFR과 일반 설계 기준(General Design Criteria)이 체계적으로 반영되었으며, 신형 원자로에서 요구하는 국제원자력기구의 안전 기준들도 안전성 증진 측면에서 종합적으로 반영되었다.

이러한 관점에서 새롭게 신설된 과학기술부령 제31호는 신형경수로1400 설계에서 요구하는 기술기준을 종합적이고 체계적으로 반영했다고 볼 수 있으며, 국내 신형원자로에 적용 가능한 국내 고유의 기술 기준을 마련했다고 볼 수 있다. 향후 개발될 기술 기준도 또한 쉽게 반영할 수 있도록 되어있다.

원자로시설 등의 기술 기준에 관한 규칙의 개정 전후의 비교는 〈표 5〉에 제시하였으며, 여기에는 진한 글씨로 표시된 약 25개의 신설 조항과 개정이 이루진 조항들이 비교되어 있다.

3. 과학기술부 고시 및 원자력정책성명의 제정

안전 규제 요건의 최상위 요건으로 개발된 안전 목표와 안전 원칙은 지난 2001년 8월 29일 원자력안전위원회의 의결을 거쳐 「중대사고정책성명」으로 공포된 바 있다.

이의 후속 조치로 사업자는 중대사고 관리 이행 계획서를 제출하여 규제 기관의 검토를 받고 있는 상태이다. 또한 신형 원자로의 안전 목표와 원칙은 지난 1994년에 발행된 「원자력안전정책성명」의 개정 작업에 활용될 것으로 보인다.

이밖에도 발전소의 전 분야, 즉 부지/환경·설계·운영 및 품질 보증 분야에 대해 개발된 방대한 양의 상세 안전 요건도 법적 위상을 부여

〈표 5〉 원자로시설등 기술기준에 관한 규칙의 개정 내역

개정전(원자력법 시행령/시행규칙)	변경내용	개정후(과학기술부령)
제1장 총칙		제1장 총칙
제1조 (목적)	개정:1조	제1조 (목적)
제2조 (정의)	개정:2조	제2조 (정의)
제2장 원자로시설의 기술기준		제2장 원자로시설의 기술기준
제1절 원자로시설의 위치		제1절 원자로시설의 위치
제3조 (적용범위)	개정:3조	제3조 (적용범위)
제4조 (지질 및 지진)	개정:4조	제4조 (지질 및 지진)
제5조 (위치제한)	개정:5조	제5조 (위치제한)
제6조 (기상조건)	개정:6조	제6조 (기상)
제7조 (수문)	개정:7조	제7조 (수문 및 해양)
제8조 (사고의 영향)	개정:8조	제8조 (인위적 사고에 의한 영향)
제9조 (자연현상)	삭제:6,7조	**제9조 (비상계획의 실행 가능성)**
제10조 (다수기 건설)	현행:10조	제10조 (다수기 건설)
제2절 원자로시설의 구조 및 설비		제2절 원자로시설의 구조 · 설비 및 성능
제11조 (적용범위)	개정:11조	제11조 (적용범위)
제12조 (방호시설의 설치등)	삭제:13조	**제12조 (안전등급 및 규격)**
제13조 (화재에 의한 손상의 방지)	개정:14조	**제13조 (외적요인 설계기준)**
제14조 (내진성)	삭제:13조	제14조 (화재방호에 관한 설계기준 등)
제15조 (진동에 의한 손상의 방지)	개정:15조	제15조 (환경영향 등에 관한 설계기준)
제16조 (울타리 등의 시설)	삭제:66조	**제16조 (설비의 공유)**
제17조 (급경사지의 붕괴방지)	개정:39조	**제17조 (원자로설계)**
제18조 (원자로시설의 구조등)	삭제:17,41,32조	**제18조 (원자로 고유보호)**
제19조 (안전설비)	삭제:15,16,44조	**제19조 (원자로출력 및 출력분포 진동제어)**
제20조 (성능검증 부품의 사용)	현행:40조	제20조 (계측 및 제어장치)
제21조 (재료 및 구조등)	삭제:12조	제21조 (원자로 냉각재 압력경계)
제22조 (안전밸브등)	개정:37조	제22조 (원자로 냉각계통 등)
제23조 (내압시험등)	삭제:23조②,	제23조 (원자로 격납건물 등)
제24조 (감시시험편)	삭제:21조③	제24조 (전력공급설비)
제25조 (원자로의 노심등)	개정:35조	제25조 (제어실 등)
제26조 (열차폐체)	삭제:35조	제26조 (원자로 보호계통)
제27조 (1차냉각재)	삭제:22조	제27조 (다양성 보호계통)
제28조 (순환장치등)	삭제:29조	제28조 (반응도 제어계통)
제29조 (원자로냉각재 압력경계)	개정:21조	제29조 (잔열제거 설비)
제30조 (비상노심냉각장치)	개정:30조	제30조 (비상노심 냉각장치)

하는 작업을 추진중에 있다.

현재 안전 요건을 준수하기 위해 선택적으로 제시하는 허용 가능한 방법론이나 사양들을 명시한 안전 규제지침과 함께 과학기술부 고시로 법제화가 진행중에 있다.

그러나 개발된 상세 안전 요건의 방대한 양과 기존 고시나 현재 사업자가 준용하고 있는 미국의 규제 지침(Regulatory Guides)과 일관성 및 체계성을 유지하기 위해서는 좀 더 시간과 검토가 필요한 상태이다.

현재 상세 안전 요건을 근거로 개발된 과학기술부 고시안은 29개이며, 안전 규제 지침은 163개로 일부 시급성이 요구되는 사항은 개별적으로 법제화를 추진하고 있다.

신형경수로1400의 안전성 검토

신형경수로1400의 표준 설계 인가를 위한 안전성 검토는 2000년 1월부터 2년이 넘게 원자력안전기술원에서 수행되었다.

초기에는 사전 안전성 검토 제도하에서 수행되었으나 앞서 언급하였듯이 2001년 7월에 표준 설계 인가 제도가 법제화되면서 이후 이 제도하에서 안전성이 검토되었다.

신형경수로1400 표준 설계의 안전성 검토 과정에서는 새로운 설계와 관련된 많은 쟁점 현안들이 제기되었으며, 사업자와 심사자 그리고 국내외 전문가들의 심층적인 토의

제31조 (1차냉각재의 배출)	삭제:22조	**제31조 (최종 열제거 설비)**
제32조 (역류방지밸브의 설치)	삭제:22,32조	제32조 (방사성폐기물의 처리등)
제33조 (계측장치)	개정:20조	제33조 (연료취급장치 및 저장설비)
제34조 (경보장치등)	현행:38조	**제34조 (방사선방호 설비)**
제35조 (원자로 보호계통)	개정:26조	제35조 (원자로의 노심 등)
제36조 (다양성 정지계통)	개정:27조	제36조 (제어재 구동장치 등)
제37조 (제어계통)	개정:28조	제37조 (과압방지)
제38조 (제어재구동장치)	개정:36조	제38조 (경보장치 등)
제39조 (원자로제어실등)	개정:25조	제39조 (급경사지의 붕괴방지 등)
제40조 (연료저장시설)	개정:33조	제40조 (성능검증 부품의 사용)
제41조 (연료취급장치)	삭제:33조	**제41조 (시험,감시,검사 및 보수)**
제42조 (작업자 보호장치)	삭제:34조	**제42조 (설계기준사고)**
제43조 (환기설비)	삭제:46조	**제43조 (기동,정지,저출력 운전보호설계)**
제44조 (오염방지 시설)	삭제:46조	**제44조 (신뢰성)**
제45조 (폐기물처리설비등)	개정:32조	**제45조 (인적요소)**
제46조 (방사성폐기물저장설비)	삭제:32조	**제46조 (방사선방호의 최적화)**
제47조 (원자로격납시설등)	개정:23조	제47조 (비상대응시설 및 설비)
제48조 (전기설비)	개정:24조	**제48조 (운전제한조건의 설정 및 조정)**
제49조 (방사선비상대응시설등)	개정:47조	**제49조 (초기시험)**
제3절 원자로시설의 성능		
제50조 (적용범위)	삭제,개정:제2절	
제51조 (비상용 안전장치등)		
제52조 (반응도효과등)		
제53조 (원자로용기의 압력)		
제54조 (방사성물질의 농도)		
제55조 (방사성물질의 취급시설등)		
제56조 (원자로격납시설등)		
제57조 (반응도펄스운전시의 적산열출력)		
제3관 운영에 관한 안전조치등		제3절 원자로시설의 운영
제102조 (적용범위)	개정:50조	제50조 (적용범위)
제103조 (방사선관리구역등에의 조치)	개정:51조	제51조 (방사선관리구역등에의 조치)
제104조 (피폭방사선량등에 관한 조치)	개정:52조	제52조 (피폭방사선량등에 관한 조치)
제105조 (원자로시설의 순시 및 점검)	개정:63조	제53조 (운영기술지침서의 준수 등)
제106조 (원자로의 운전)	개정:53조	제54조 (운영조직)
제107조 (원자로시설의 자체점검)	개정:63조	제55조 (자격 및 훈련)
제107조의2 (원자로시설 가동중 점검,시험)	개정:63조	**제56조 (운영절차서)**

와 협의에 의해 해결 방안이 모색된 바 있다. 일부 쟁점 현안들은 심층적인 연구와 산 · 학 · 연의 공동 노력으로 해결 방안이 강구되기도 하였다.

이 중에서 본 저자가 참여하여 안전성 평가를 수행하고, 국내외 연구개발을 바탕으로 해결 방안을 제시한 신형경수로1400 안전 주입 계통(SIS)의 비상 노심 냉각(Emergency Core Cooling) 성능 현안에 대해 간단히 소개하고자 한다.

1. 안전 주입 계통의 설계 특성

〈표 6〉에서 보는 바와 같이 신형경수로1400 안전 주입 계통은 기존 한국표준형원전(KSNP)과 상당히 다른 설계 특성을 가지고 있다.

기존의 저온관 주입 방식과 달리 안전 주입 탱크(SIT)와 안전 주입 펌프(SIP)로부터 냉각수를 원자로 압력 용기 DVI(Direct Vessel Injec tion) 노즐을 통해 원자로 용기 상부에 직접 주입하는 방식을 채택하고 있다.

DVI 노즐은 저온관 중심으로부터 상부 82.75 인치에 저온관과 15° 어긋나게 설치하고 있다.

또한 안전 주입 탱크 내부에는 유량 조절 장치(Fluidic Device)를 설치하여 냉각수 주입 유량을 시간 혹은 수위에 따라 피동적으로 조절하는 방식을 채택하고 있다. 안전 주입 펌프도 기존의 저압 안전 주입

제107조의3 (원자로용기의 감시)	개정:63조	**제57조 (인적요소의 관리)**
제108조 (사업소안의 운반)	개정:64조	**제58조 (운전경험 반영)**
제109조 (사업소안의 방사성물질등의 저장)	개정:65조	**제59조 (화재방호계획)**
제110조 (사업소안의 방사성폐기물의 처리.배출 및 저장)	개정:66조	**제60조 (원자로 정지운전)** 제61조 (노심관리 및 핵연료 취급)
제112조 (적용배제)	개정:50조	**제62조 (방사선방호계획)**
(시행령102조에서 부령 위임사항)		제63조 (시험,감시,검사 및 보수)
1.방사선관리구역등에의 조치	개정:51조	제64조 (사업소안의 운반)
2.피폭방사선량등에 관한 조치	개정:52조	제65조 (사업소안의 방사성물질등의저장)
3.원자로시설의 순시 및 점검	개정:63조	
4.원자로의 운전	개정:53조	**제66조 (방사성폐기물관리계획)**
5.원자로시설의 자체점검	개정:63조	
6.원자로시설의 가동중 점검 및 시험	개정:63조	
7.원자로용기의 감시	개정:63조	
8.사업소안의 운반	개정:64조	
9.사업소안의 방사성물질등의 저장	개정:65조	
10.사업소안의 방사성폐기물 처리.배출.저장	개정:66조	
제4절 원자로시설의 건설 및 운영에 관한 품질보증		제4절 원자로시설의 건설 및 운영에 관한 품질보증
제58조 (적용범위)	개정:67조	제67조 (적용범위)
...	현행:	...
제76조 (감사)	68조-85조	제85조 (감사)

펌프 대신에 총4대의 고압 안전 주입 펌프를 설치하여 안전 주입 설계 유량을 최적화하였고, 냉각수원도 기존 집수조(Sump)와 핵연료 재장전수 저장 탱크(RWST)의 기능을 함께 수행하는 격납 건물 내의 수원, IRWST(In-containment RWST)로부터 공급하도록 하여 설계를 단순화하고 운전 절차도 간소화하였다.

이러한 새로운 안전 주입 계통의 설계는 계열간의 독립성과 단순화된 계통에 의해 비상 노심 냉각 계통(ECCS)의 신뢰성을 향상시키고 결과적으로 안전성을 증진시킬 것으로 예상된다.

그러나 한편으로는 새로운 안전 계통에 의한 안전성능이 실험적·해석적 방법으로 건설·운영 허가 이전에 입증되어야 하며, 규제 기관에 의해 검토됨으로써 안전성이 확인되어야 한다.

2. LBLOCA PIRT 개발

신형경수로1400 안전 주입 계통의 설계 기준 사고는 가상 사고인 대형 파단 냉각재 상실 사고(Large Break Loss Of Coolant Accident, LBLOCA)이다. 앞서 논의한 바와 같이 안전 주입 계통의 설계 특성 때문에 LBLOCA 이후 발전소 거동은 달라질 것으로 예상이 된다.

따라서 LBLOCA 이후 발전소의 주요 거동 및 열수력 현상을 도출하고 중요도를 부여하기 위한 PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table) 개발을 착수하였다.

미국 아이다호 국립연구소(INEEL)와 공동으로 수행한 본 연구는 ABB-CE형 및 웨스팅하우스형 원전의 PIRT 개발 경험이 많은 국제적 전문가들로 구성하여 추진하였다. 국내 연구진도 전문가 혹은 실무자로 참여하여 최적 코드를 이용한 민감도 분석과 PIRT 개발 과정에 중요한 역할을 수행하였다.

신형경수로1400 LBLOCA PIRT는 기존 원전의 열수력 현상과 최근 국내외적으로 수행된 신형원자로 관련 연구 결과들을 기초로 개발되었다.

특히, 신형경수로1400에 고유한 안전 계통 설계에 근거한 한국원자력안전기술원의 최적 코드 해석 결과와 한국원자력연구소의 강수부 열수력 현상에 대한 실험 결과들은

〈표 6〉 신형경수로와 표준형원전 안전 주입 계통의 설계 사양 비교

주요 설계 항목	표준형원전 (KSNP)	신형경수로(APR1400)
총열출력	2825 MWt	3983 MWt
냉각수원	RWST 및 Sump: 502,760 gal	IRWST: 545,800 gal
고압안전주입(HPSI) 펌프	2대: 설계유량 815 gpm/대	4대: 설계유량 815 gpm/대
저압안전주입(LPSI) 펌프	2대: 설계유량 3850 gpm/대	없음
안전주입탱크(SIT): 유량조절기(FD)	4개, 체적 1858 ft^3: 없음	4개, 체적 1858 ft^3: 채택
안전주입방식	저온관 주입 (CLI)	원자로용기 직접주입 (DVI)

* CLI: Cold Leg Injection
FD: Fluidic Device
HPSI: High Pressure Safety Injection Pump
SIT: Safety Injection Tank
DVI: Direct Vessel Injection
IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank
LPSI: Low Pressure Safety Injection Pump

신형경수로1400의 고유한 PIRT 개발에 결정적인 기여를 한 바 있다.

PIRT 개발을 통해 밝혀진 LBLOCA 이후 대표적인 열수력 현상 혹은 거동은 다음과 같다.

- LOCA 후 재관수 기간 중에 안전 주입수가 감소된 이후 안전 주입수의 ECC 우회(Bypass) 및 강수부 냉각수의 끌려나감(Sweep-out) 현상
- 원자로 용기, 내부 구조물 등에 저장된 열에너지에 의한 강수부 냉각수의 비등 현상
- 상기 열수력학적 현상들에 의해 나타나는 강수부의 수위 감소 거동 등

상기 열수력 현상 및 거동들은 미국 원자력규제위원회가 신형경수로인 System 80+ 설계 심사를 할 때도 명확히 분석되지 않은 사항으로 국내 열수력 분석 기술력이 상당한 수준에 있음을 보여주는 사례이기도 하다.

현재 개발된 LBLOCA PIRT는 다양한 목적으로 활용되고 있다. 신형 경수로 안전 계통의 성능을 평가하는 데 근거 자료를 제공할 뿐만 아니라 향후 요구되는 열수력 실험과 해석적 연구의 방향을 제시해 주기도 한다. 본 현안과 관련하여 국내 산·학·연에서도 협동으로 다양한 후속 연구를 수행하고 있다.

이러한 연구 개발은 가상 사고 이후 발전소 거동을 실제적으로 이해하고, 필요한 해석 모델을 개발 가능하게 함으로써 신형경수로1400의 안전성 확보에 중요한 기여를 할 것으로 본다. 또한 국내 열수력 및 사고 해석 기술을 한 단계 향상시킬 것으로 믿어진다.

3. 사고 해석에서 최적 코드 활용

신형경수로1400 안전 계통의 성능을 확인하기 위해 최적 코드인 RELAP5와 TRAC-M을 사용하여 독립적인 검증 계산을 수행하였다. 본 최적 코드는 국제 공동 연구로 미국 원자력규제위원회 주도하에 개발하고 있는 규제 검증용 코드이다.

PIRT 개발 결과에서 밝혀졌듯이 신형경수로1400은 LBLOCA 이후 기존 표준형 원전에서 나타나지 않는 열수력 현상이 발생 가능하며, 이는 기존 비상 노심 냉각 성능 해석 방법론의 전체적인 보수성에도 불구하고 최적 해석 방법론의 활용, 운전 여유도의 확보 등을 위해 추가적인 고려가 필요한 중요 사항이다.

원자력안전기술원은 이와 관련하여 자체적인 검증 계산과 더불어 미국 원자력규제위원회와 공동 연구를 수행하였다. 미국 원자력규제위원회는 System 80+를 대상으로 LBLOCA를 분석하고 원자력안전기술원은 신형경수로1400을 대상으로 사고 해석을 수행하여 강수부의 비등 가능성과 비상 노심 냉각 성능에 미치는 영향 등을 상호 비교·분석하여, 가상 사고 후 발전소 거동에 대한 이해의 폭을 넓히고자 하였다. 실제로 신형경수로1400은 System 80+를 참조로 하여 설계하였기 때문에 본 현안은 두 설계에 모두 적용되는 공동의 현안이기도 하다.

한편 독립 검증 계산을 위해 필수

적으로 요구되는 신형경수로1400용 RELAP5와 TRAC-M 입력 자료를 개발하는 데는 국내 연구진의 많은 도움이 있었다. RELAP5에 대해서는 한국전력기술(주)(KOPEC)과 한국원자력연구소(KAERI) 연구진들의 도움이 컸으며, TRAC-M에 대해서는 한전전력연구원(KEPRI)의 도움이 매우 컸다.

개발된 입력 자료와 미국 원자력규제위원회의 최근 코드를 사용하여 안전 계통 성능에 관련된 다양한 민감도 분석을 수행하였다.

유량 조절기 설치 여부에 따른 노심 냉각 능력,IRWST에 의해 영향받는 격납 용기 압력의 영향, DVI 노즐 위치의 영향, 안전 주입 펌프 용량이 노심 냉각 성능에 미치는 영향, 수치 해석 방법의 영향, 코드의 모델 및 상관식에 의한 영향 등을 분석하였다.

결과적으로 신형경수로1400의 비상 노심 냉각 성능을 정량적으로 평가하기 위한 다양한 해석적 자료들이 생산되었으며, 이전의 국내외 연구 결과와 함께 신형경수로1400 안전 계통의 성능을 평가하는 기술적 근거 자료로서 중요한 역할을 수행하게 되었다.

특히 신형경수로1400에 설치된 안전 주입 탱크 내의 유량 조절기는 LOCA 이후 장기간 안전 주입수를 공급할 수 있어 System 80+보다 우수한 비상 노심 냉각 성능을 제공해주고 있다는 사실도 밝혀졌다.

또한 소형 파단의 경우는 원자로 용기 직접 주입 방식이 기존 보다 많은 안전 주입수를 노심에 공급해 줄 수 있어 비상 노심 냉각 성능에 긍정적인 영향을 준다는 것도 밝혀졌다.

그러나 최적 코드의 해석 결과는 다소의 불확실성을 가지고 있다. 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 향후 필요하며, 이는 산·학·연의 공동 노력이 절실히 요구되는 사항이기도 하다.

수상 소감

신형경수로1400 기술 개발 사업이 시작되던 1991년에는 국내에서 운영중인 발전소가 9기(고리 4기, 영광 2기, 울진 2기, 월성 1기)였다. 지금은 18기(영광 4기, 울진 2기, 월성 3기 추가)로 10년 만에 두 배가 증가하였다. 이러한 증가 추세(울진 2기, 신고리 2기, 신월성 2기, 신형경수로 2기 등)는 당분간 계속될 것으로 보인다.

원전 운전 기수의 증가는 경제 성장에 부흥하여 필요한 에너지를 안정적으로 공급한다는 국가 발전에 필수적 요소이지만, 한편으로는 원전의 사고나 고장 발생 빈도를 증가시켜 국민의 안전성 강화 요구를 증대시킬 것이다.

예로서, 최근 운영중인 원자력발전소의 비계획 원자로 정지(Unplanned Reactor Scram) 횟수는 전체 호기 평균으로 감소하는 추세를 보이나, 국민이 체감하는 발생 빈도는 상대적으로 빈번하게 느껴져 발전소 감시를 강화하도록 요구받고 있는 것이 사실이다.

원자력발전소의 안전성은 경제성 제고뿐만 아니라 국민의 신뢰도 향상에 필수적 요소이다. 이러한 안전성은 원전의 운영뿐만 아니라 설계·건설·해체 등 원전의 전 수명기간에 걸쳐 체계적으로 확보되어야 한다.

지난 10년이 넘게 수행된 신형경수로1400 안전 규제 기술 개발 사업은 설계 기술 개발뿐만 아니라 안전 규제 기술 개발에서도 많은 성과를 남겼다. 효율적인 인·허가 절차와 제도의 개발, 안전성 확보를 위한 기술 기준의 체계적 정립, 열수력 현상 및 사고 해석 분석 기술의 향상 등 다양한 분야의 다양한 규제 기술들이 개발되었다. 이는 정부와 산·학·연의 공동 노력으로 이루어졌음은 두 말할 필요가 없다.

앞으로도 설계 기술 개발과 함께 규제 연구에도 지속적인 투자가 이루어져 국민의 원전 신뢰성이 향상되기를 기대하며, 원자력기술상을 수상하여 이 글을 쓸 수 있게 해주신 많은 분들께 진심으로 감사드린다.