

06 _ 원자력 안전기술 발전동향

‘기술중립 규제체제’로 제4세대 원전 대비한다

글 | 신원기 _ 한국원자력안전기술원장

사람이 살아가는 우리 사회에는 여러 종류의 리스크들이 있다. 리스크는 어떤 일이 일어날 가능성과 그 부정적 영향의 크기를 조합하여 나타낸다. 원자력 안전에 대한 논의는 곧 원자력 시설의 운영에 따른 방사선으로 인한 리스크에 대한 논의이기도 하다. 전세계의 원자력시설에서 수많은 작은 고장과 사건들이 있었지만 안전성에 심각한 우려를 가져다 준 것은 1978년의 TMI사고와 1986년의 체르노빌사고였다. 세계적으로 큰 충격을 안겨 준 이 사건들을 계기로 원자력안전성에 대한 수많은 논의가 진행되었고 안전성향상을 위한 많은 조치들이 이루어졌다. 2006년 4월 26일은 체르노빌사고 발생 20주년이 되는 날이다. 이를 계기로 원자력시설의 안전성을 확보하는 여러 가지 방법론과 관련 기술의 발전을 살펴본다.

원자로 압력용기 · 격납건물로 이중방벽 심층방어

원자력의 이용에 따른 위험은 방사선을 방출하는 방사성물질 혹은 방사선 발생장치에 기인한다. 방사선은 생명체에 작용해 조직 세포를 죽이거나 변이를 일으켜서 장애를 유발할 수 있다. 원자력 발전소에서는 핵연료의 핵분열 반응으로 방사성물질이 발생하는데, 이렇게 발생된 방사성물질이 미량이라도 환경으로 유출되는 것을 막기 위하여 원자로의 핵연료를 중심으로 여러 겹의 물리적인 방벽을 설치한다. 그러나 이들 물리적 방벽도 기기 고장이나 조작의 실수로 그 기능이 저하될 수 있으며 이럴 경우 방사성물질이 외부로 누출되는 사고가 발생할 수 있다. 이 때 외부로 누출된 방사성

물질이 주위 환경과 인간에게 방사선 피폭을 일으키게 된다. 따라서 그 사회가 수용할 수 있는 안전수준으로 원자력시설로부터 발생하는 방사성물질의 외부 누출에 의한 위험 발생 가능성을 줄이는 것을 원자력의 안전성을 확보하는 것이라고 정의할 수 있다.

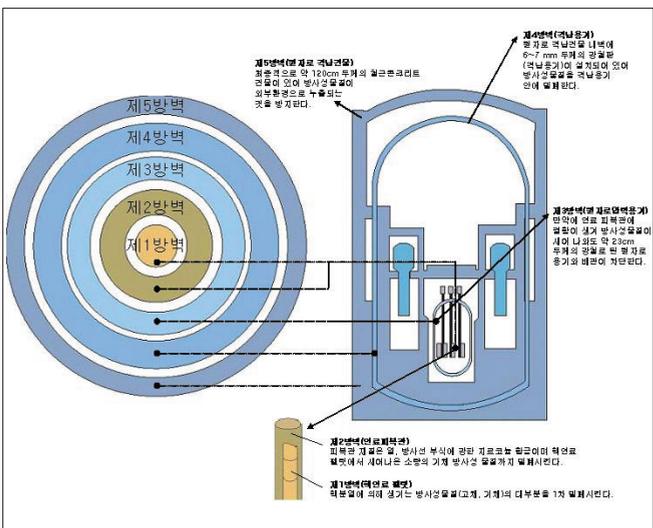
원자력시설, 특히 원자력발전소가 갖추어야 할 안전수준과 그 확보 방법은 오랫동안 발전, 진화되어 왔다. TMI원전 사고나 체르노빌원전 사고 이후에는 정성적 및 정량적 안전 목표가 개발되고, 이를 달성하기 위한 여러 가지 기술적 요건들이 제시되었다. 이 중에서 심층방어는 무엇보다 중요한 안전성 확보 전략인데, 이는 기기의 고장이나 운전원의 실수가 발생하더라도 안전조치가 중첩 수행되게 하는 다단계 방호를 통해 개인이나 공중에 큰 피해를 가져오지 않도록 하는 것이다. 다단계 방호는 기기의 ‘이상 작동이나 고장의 방지’에서부터 ‘소외 비상대응’에 이르기까지 크게 5단계로 이루어진다. 다단계 방호는 방사성 물질을 가두기 위해 설치하는 물리적 다중방벽과 연계되어 복합적인 안전성 확보 개념을 형성한다. 일반적인 경수형 원자로의 물리적 다중방벽은 <그림1>과 같다.

다중 방벽이 손상되는 것을 방지하기 위하여 설계, 건설 및 운전의 전과정에 걸쳐 여러 가지의 원칙이 적용된다. 설계단계에서는 방벽의 건전성을 확보하기 위하여 다중성, 다양성, 물리적 분리, 독립성, 고장시 안전, 연동 등의 원칙이 사용되고, 건설단계에서는 입증된 공학기술, 품질보증, 보수적 안전여유도 등이, 운전단계에서는 인적요소, 운전경험반영, 안전관리 등의 원칙이 적용되고 있다.

자동차가 일정한 충돌에 견딜 수 있도록 설계, 제작되는 것과 같이 원자력발전소도 발생 가능한 여러 가지 사고에 견딜 수 있도록 설계된다. 이렇게 발전소 설계의 기준이 되는 사고를 '설계기준사고'라고 하는데, 이 설계기준을 초과하여 핵연료가 용융되는 심각한 손상이 발생하는 사고를 '중대사고'라고 부른다. 미국의 TMI 원전 사고나 체르노빌원전 사고가 일어나기 전까지 중대사고는 가상의 사고였으며, 현실에서는 발생하지 않는 것으로 받아들여졌다. 그러나 이들 사고가 실제 발생하자 이를 계기로 핵연료를 가두는 원자로 압력용기(그림 1의 제3방벽)와 방사능의 환경으로의 유출에 대비한 격납용기/격납건물(그림 1의 제4/5방벽)의 중요성이 재인식되었으며, 다양한 설계대안과 사고관리 방안을 강구하게 되었다.

서방세계의 원자력발전소와는 달리 체르노빌 원전은 최후의 물리적 방벽인 격납용기 및 격납건물이 없어 대량의 방사능 유출을 막지 못하였다. 이후 세계 각국은 핵연료 용융이 발생하더라도 원자로 압력용기 내부에 가두어 냉각을 시키거나, 혹시 원자로 압력용기조차도 파손되어 핵연료 용융물질이 용기 밖으로 나오더라도 격납건물 내부에 감금하는 방안을 개발하여 기존 발전소 또는 신형 원자로의 설계에 반영하고 있다.

우리 나라에서는 원자력안전위원회가 2001년 8월에 의결한 중대사고정책에 따라 전원자력발전소에 대해 잠재적인 중대사고 취약점을 찾아 설계 또는 운전에 대한 개선 조치를 하고 사고관리 계획을 수립하도록 하였다.



(그림 1) 심층방어 개념의 다중 방벽

'PSA'로 발전소 중대사고 취약점 정량적 평가

원자력발전소의 리스크를 종합적으로 다루기 시작한 것은 1975년 미국의 원자력규제위원회(USNRC)가 발간한 '미국원자력 안전성 보고서(WASH-1400)'부터이다. 이 보고서는 사건수목, 고장수목, 사고발생 경위와 확률론적 해석 방안 등을 포함하고 있는데 오늘날 발전소 안전수준의 정량적 평가와 안전관리 최적화 등에 널리 활용되는 확률론적 안전성평가(PSA)의 효시이다.

TMI와 체르노빌 원전사고를 계기로 WASH-1400에서 가정한 중대 사고들이 현실적으로 가능하다는 인식하에, 전세계적으로 PSA 수행을 통해 발전소의 중대사고 취약점을 정량적으로 평가하고 안전성을 개선하기 위한 기술개발에 노력하여 현재 원자력발전소 설계, 제작, 운전, 보수과정에서의 안전성 평가 및 규제사결정 등에 활용하고 있다. 특히 원자력발전소에 대한 규제 의사결정 과정에서 기존의 전통적인 규제방법으로 인한 규제자원의 낭비 및 안전성 확보의 불완전성을 개선하기 위하여 리스크에 미치는 영향이 큰 분야 또는 행위에 규제를 집중하는 리스크정보활용규제(RIR)가 도입되고 있다. 리스크정보를 취득하는 PSA 기술자체의 불확실성 때문에 PSA를 통해 생산되는 리스크 정보를 기존의 전통적인 규제를 보완하는 개념으로 활용하고 있다. 우리나라에서도 최근 리스크정보 활용규제를 위해 기본계획을 수립하여 원자력발전소 규제감사예의 적용을 추진하고 있다.

체르노빌원전 사고의 분석결과 시설 자체의 설계 결함 외에 절차 위반에 따른 운전원의 심각한 실수가 큰 원인으로 밝혀졌다. 옛 소련 체르노빌의 운전원들은 사고 전에 설계 결함들을 알면서도 개선 조치를 취하지 않았고, 사고 상황에서는 정해진 운전 순서를 따르지 않는 실수를 범하였다. 이를 계기로 국제원자력기구(IAEA)는 공학기술의 발전만으로는 안전성을 확보하는 데 한계가 있다는 인식하에 안전성을 최우선으로 하는 마음가짐과 태도로 정의되는 '원자력 안전문화'라는 개념을 정립하고 이의 정착과 확산을 위한 다양한 방법론을 제안하였다. 운전조직의 안전문화 자체평가와 개선노력 등이 이루어지고, 최근에는 미국 등 선진국이 안전문화를 규제활동에 반영하고자 하는 노력을 경주하고 있다. 미국의 NRC는 원자력사업자의 안전문화 행태를 평가하고 개선요구를 하기 위해 규제감독절차에 이에 대한 점검을 반영할 예정이다. 우리나라에서도 안전문화 평가지표 및 평가방법을 개발하여 원전전에 대한 안전문화평가가 수행된 바 있는데 안전문화는 향후 원자력시설 안전관리에 있어서 지속적으로 중요한 역할을 할 것이다.

실전적 현장방재지원시스템 체계도



(그림 2) 방사능방재 지원체제

IAEA, 원자력 안전 국제규범 발효, 한국도 가입

TMI 원전사고와 체르노빌원전 사고 이후 원자력사고 피해의 광역성에 근거하여 지구적인 원자력안전성의 확보를 위한 여러 국제 규범이 제정되고 있다. 인접국에 대한 피해를 국제적 차원에서 해소하기 위해 사고시 인접국에 통보하도록 '원자력사고 조기통보 및 사고지원에 관한 협약'을 제정하였고, 사고 이전부터 존재하던 '원자력손해배상에 관한 비엔나협약'을 개정하여 피해보상한도를 향상시키고자 국제원자력기구(IAEA)는 '원자력안전협약'을 1996년 10월에 발효하였으며, 자매협약인 '사용후핵연료관리의 안전 및 방사성폐기물관리의 안전에 관한 공동협약'은 2001년 6월에 발효되었다. 이들 협약에 의해 체결국들은 자국내 원자력 시설의 안전성에 대한 보고서를 제출하여 상호 검토하는 방식으로 지속적으로 안전성을 향상시켜야 한다.

근래에는 미국의 9.11 테러사건을 계기로 '핵물질의 물리적 방호에 관한 국제협약'을 강화하여 핵물질 및 원자력시설에 대한 사보타주와 테러에 대비할 수 있도록 개정하였다. 우리 나라는 이들 국제협약에 가입하고 서명 및 이행을 통해 국제신인도의 제고를 위해 노력하고 있다.

원자력시설에서 만의 하나 큰 사고가 발생하면 방사성물질이 외부로 유출되어 최악의 경우에는 주변 환경과 일반대중에게 방사선 피폭을 일으킬 수 있다. 따라서 최악의 경우까지 고려하여 사고로 인한 방사능재난을 예방하고 완화하기 위한 설비를 구비하고, 사고 대응을 위한 체계적인 계획을 갖추어 놓는 것이 대단히 중요하다. 체르노빌 원전사고 이후 전 세계는 방사능재난에 대비한 비상계획과 비상대책을 재평가하고 개선하는 노력을 하고 있다. 우리 나라는 국내의 원자력 사고시 피해를 최소화하기 위한 국가 방사능방재 기술지원 전산체제(CARE)를 1994년부터 개발하기 시작하여 현재 세계적으로 인정받는 방재지원 시스템으로 완성되어 운영되고 있다. CARE는 원자력 시설의 방사선 사고 시 상황 파악, 기상자료의 수집 및 분석, 대기확산 및 방사선 영향 평가와 피해지역 예측 등을 수행하여 주변 지역 주민을 포함한 국민들을 방사선으로부터 보호하는 조치를 신속히 수행할 수 있도록 한다. 이와 더불어 주기적인 실전적 방재훈련의 실시와 방재체제에 대한 점검을 통해 철저한 방사능재해 대책을 강구하고 있다(그림 2 참조).

방사능재난에 보다 조직적으로 대비하기 위하여 2003년에는 '원자력시설의 방호 및 방사능방재대책법'을 제정하여 재난 발생시 효과적인 방사능재난 관리체제를 가동하도록 하여 국민의 생명과 재

산을 보호하고 있다. 또한 전국토의 환경방사능 감시의 일환으로서 환경방사선자동감시망(IERNet)을 구축하여 전국 12개 지방측정소와 울릉도 및 백령도에 설치된 25개 간이측정소 등 전국 37개소의 방사능을 실시간으로 감시하고 있다. 한편 미국의 9.11 테러 이후 방사선을 이용한 탈취, 테러 및 분실에 대비하여 GPS를 이용한 산업용 방사선조사기 방사선원 위치추적 시스템을 도입하여 운영하고 있다. 이는 방사선원에 의한 방사선 사고로부터 국민을 보호하기 위한 세계 최초의 시도라는 점에서 국제적인 관심을 끌고 있다.

‘기술중립 규제체제’, ‘국제적 설계 인증’ 전환

2020~2030년을 목표로 제4세대 원전 시스템이 국제협력을 바탕으로 개발되고 있다. 4세대 원전은 1950년대 도입된 초창기 1세대 원전, 60년대부터 시작되어 지금 세계적으로 운전되고 있는 2세대, ‘한국표준형원전’과 같이 80년대 이후 선보인 3세대를 지나 안전성과 경제성이 획기적으로 향상된 신개념 원자로이다. 현재 우리 나라와 미국, 프랑스, 일본 등 10개국이 참여한 4세대 원전개발 국제포럼(GIF)에서 개념선정 및 개발이 진행되고 있다.

4세대 원전은 특별한 안전조치가 필요 없는 안전시스템 장착으로 일반 대중이 수용하는 안전성 및 신뢰성을 확보할 것, 에너지 공급이 지속적이고 폐기물 발생량이 적을 것, 운전비용을 낮춰 높은 경제성을 실현할 것, 핵 물질 전용을 방지해 핵 확산을 막을 것 등의 4대 원칙을 목표로 현재 6개의 후보 원자로형이 선정된 상태이다.

제4세대 노형은 기존 경수형 원전과는 다른 개념과 설계 특성을 가지며, 따라서 안전성 확보를 위한 접근법도 기존의 것보다 더욱 발전시킬 필요가 있다. 미국은 이미 4세대 원전을 대비하여 자국의 규제체제를 기술중립의 체제로 전환, 발전시키는 국가적 노력을 경주하고 있다. USNRC는 올해 초 기존 원전의 인허가 규제체제(10 CFR Part 50)의 대안이 될 새로운 규정 ‘10 CFR Part 53’을 개발할 것을 제안한 바 있다. 이는 전통적인 안전성 확보방법인 심층방어에 리스크정보 개념을 도입하여 ‘10 CFR Part 50’을 리스크정보 성능기반으로 완전 개정하자는 제안이다. 경수로뿐만 아니라 4세대 원전 후보 노형을 모두 포괄할 수 있도록 기술중립의 규제체제, 규제요건, 규제지침 등을 개발하고, 안전·방호·방재를 통합하여 규정할 계획이다.

이러한 기술중립 체제로의 개편은 기존 경수로 중심의 규제체제가 보편 업 방식으로 구성되어 통일성과 일관성이 부족한 점을 극

복하고 안전성 확보에서도 효과성을 높이기 위해 리스크정보 규제 기술을 적극 활용하는 tap다운 방식으로 개발하는 것이다. 또한 다양하게 개발되는 노형에 적용될 수 있는 일관된 규제체제를 갖춤으로써 안전성, 방호성, 방재성을 향상시킨다는 목표를 갖고 있다.

미국은 이와 함께 제4세대 원자로의 국제적인 설계인증을 위해 다국간설계인증프로그램(MDAP)을 제안하고 있다. 한국제 자동차가 미국이나 유럽의 차량 안전기준을 충족시키면 그 나라에서 운행될 수 있는 것처럼 원자로도 국제적인 안전기준을 충족시키면 어디에서나 쉽게 건설, 운전될 수 있도록 하자는 것이 국제적인 설계인증의 취지이다.

MDAP의 기본개념은 2005년 3월 개최된 4세대원전개발 국제포럼 고위규제자 회의에서 처음 제안된 이후 세계 여러 나라가 호응하고 있으며, 제4세대 원전의 안전성 확보 방법으로 채택될 것으로 전망된다. MDAP는 신규 원전 도입을 추진하고 있으나 안전규제 인프라가 취약한 개도국에서도 국제적인 안전기준을 갖춘 원자로를 건설할 수 있게 한다는 측면에서 큰 의미가 있다.

세계적으로 에너지문제가 다시 부상하면서 원자력에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 TMI와 체르노빌 같은 사고가 또 한번 발생하면 에너지원으로서의 원자력의 역할은 기대할 수 없다. 보다 안전한 원전을 개발하기 위한 노력은 기술중립적 규제체제와 국제적 설계인증이라는 두 개념으로부터 전개될 것이다.

TMI사고와 체르노빌 사고는 대중에게 큰 충격을 주었지만 각국이 이를 교훈 삼아 함께 연구하고 노력하여 안전기술은 계속 진보할 수 있었고, 그 결과 체르노빌원전 사고 이후 지금까지 심각한 노심용융사고는 일어나지 않고 안전하게 운전되어오고 있다. 정보통신기술의 발달과 세계화는 원자력기술자들이 어느 때보다도 지구적 안전성확보라는 목표를 위하여 상호 협력할 수 있는 분위기를 조성하고 있다. 원자력안전을 위해서는 안전기술의 발전뿐만 아니라 제도와 조직과 이를 관리하는 정부에 대한 신뢰, 상호 커뮤니케이션 등, 보다 포괄적이고 광범위한 안전성 확보전략이 필요하다. 또한 다음 세대의 원전은 안전성이 획기적으로 향상되고, 이의 안전성 검증은 기술중립의 규제체제와 국제적 설계인증을 통해 수행됨으로써 원자력의 안전성은 더욱 높아질 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 원자력공학과 졸업 후 동대학원에서 석사·박사학위를 받았다. 한국원자력안전기술원 규제부장, 평가부장, 기획부장, 전문위원을 거쳤다.