

1. 서 론

원자력안전성 고찰



박 군 철

(서울대 공대 원자핵공학과 교수)

세계 최초의 상업용 원자력발전소인 Calder Hall 이 1956년 영국에서 운전을 개시한 이래로 40년이란 세월이 흘렀으며, 1978년 국내 최초로 고리 1호기가 가동된지도 20년이 되어 간다. 그 동안 원자력은 발전을 거듭하여 온 결과, 420여기의 원자력발전소가 30여개 국가에서 운영되고 있어 세계 에너지 총 소비량의 7%를 그리고 전력 생산량의 17%를 담당하게 되었다. 에너지 해외 의존도가 95%에 달하는 우리나라의 경우는 총 에너지 소비량의 11.5% 그리고 전력 생산량의 약 50%를 10기의 원자력발전소를 통해 얻고 있다.

최근 미국의 TMI 와 구 소련의 Chernobyl 원전의 사고로 원자력산업이 침체 국면으로 접어들기는 하였으나, 세계 에너지 시장은 화석연료의 유한성, 에너지 자원의 지역적 편재성, 산유국의 정정불안, 개도국의 잠재적인 에너지 수요 등의 불안 요인을 안고 있는데다가, 최근 유엔을 중심으로 한 국제환경규제가 주요 쟁점으로 등장하고 있는 실정 이어서 국제적으로 원자력의 선택을 재평가하기에 이르렀다. 지구 온난화 문제에 대한 대책을 논의하기 위해 1988년 캐나다에서 개최된 “대기변화 : 지구의 안전보장에 미치는 의미”라는 회의에서는 “원자력 선택에 대해 재고할 필요가 있다. 만일 안전성, 폐기물, 핵확산 문제가 해결된다면 원자력은 이산화탄소 배출을 감소시키는데 중요한 역할을 담당할 수 있다.” 는 결론을 내리기에 이르렀다. 이는 그간 많은 타당성 연구와 고심 끝에 결국 대안을 찾지 못했음을 의미하고 있다.

따라서 에너지와 환경 문제를 해결하기 위한 유일한 대안인 원자력의 안전성을 재고해 보고자 한다. 먼저 원전 사고 사례를 검토하고 현재 적용되고 있는 안전 개념과 수단을 살펴 보기로 하겠다. 그리고 안전성의 증진을 전제로 제시되고 있는 차세대 원전의 설계를 위해 연구되고 있거나 제안되고 있는 새로운 기술과 개념을 소개하고자 한다.

2. 원자력 발전소 사고 사례

1979년 미국의 상업용 원전 운전 역사상 최악의 사고인 TMI 사고가 발생하였다. 이 사고는 증기발생기에 물을 공급하는 급수계통의 고장으로 급수펌프가 긴급정지되면서 부터 시작하였다. 이로 인하여 원자로 냉각수의 온도가 증가하고 압력이 상승하자 이를 완화시키기 위하여 가압기의 방출밸브가 자동 개방되어 냉각재가 방출되었다. 이러한 냉각재 상실사고에 대비하여 원자로에는 비상노심냉각 계통이 자동으로 작동하여 냉각수를 주입함으로써 수위와 압력을 조절하도록 되어 있다. 그러나 당시에 이 비상계통은 정상적으로 작동하고 있었지만 운전원이 판단 착오를 일으켜

1952년 7월 29일생. 1975년 서울대 원자력공학과 졸업. 1979년 동 대학원 원자핵공학과 졸업(석사). 1983년 RPI, U.S.A. (공박). 1978년 9월-78년 8월 서울대 조교. 1983년 8월-88년 8월 서울대학교 조교수. 1983년 9월-85년 6월 한국에너지연구소 기술자문. 1986년 7월-88년 8월 동 연구소 위촉연구원. 1988년 9월-94년 9월 서울대학교 부교수. 1988년 9월-89년 8월 Wisconsin대학 교환교수. 1994년 10월-현재 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 교수.

가압기가 만수위라 인식하고 비상급수 펌프 4대를 모두 작동정지 시킴으로써, 핵연료가 냉각수 부족으로 과열되고 증기로 인해 연료봉이 산화현상을 일으키게 되었으며 방사성 물질이 냉각수 및 증기와 혼합되어 압력용기 밖으로 누출되었다. 그러나 다행히도 모든 방사성 물질은 격납용기 내에 밀폐되었으며 주변 환경에 어떠한 피해도 미치지 않았다.

반면에, 1986년 구소련에서 발생한 Chernobyl 원전사고는 소련은 물론 인접국가에 까지 인명과 환경에 피해를 끼친 대형사고였다. 사고 당시 Chernobyl 원전에서는 터빈 발전기가 정지될 때 즉시 멈추지 않고 관성에 의해 계속 회전되는 원리를 이용하여 정전시 발전소 소내 비상전력의 공급이 가능한지를 실험하고 있었다. 수냉각 흑연감속형 원자로인 Chernobyl 의 경우 원자로가 정지하면 재가동하는데 수십 시간이 걸리므로 운전원들은 원자로를 정지시키지 않고 실험을 반복하기 위해 원자로 이상시 작동되도록 되어있는 비상정지 계통을 인위적으로 차단하였다. 이와 같이 중대한 안전상 절차를 위반한 상태에서 실험을 계속하자 출력이 급등하고 냉각수가 기화되어 수증기가 대량 발생하였고 원자로는 계속 가동되어 결국은 증기압에 의한 폭발이 일어나기에 이르렀다. 이 고온의 증기는 다시 핵연료 및 감속재로 사용하고 있는 흑연과 화학반응을 일으켜 수소를 발생시켰으며, 이 수소로 인해 다시 폭발이 일어나고 원자로가 손상되어 다량의 방사성물질이 외부로 누출되었다. TMI 와는 달리 격납용기가 없었던 이 발전소의 경우는 누출된 방사능 물질이 곧바로 주위 환경으로 확산되는 결과를 빚었다.

3. 원자력 발전소의 안전 개념과 수단

모든 기술 문명의 혜택이 그러하듯이 원자력 역시 인류에 대한 공헌과 재앙의 양면성을 지니고 있다. 그리고 원자력의 이용, 개발 역시 그 전제는 안전성의 확보이며, 안전성의 확보가 없는 원자력 이용이나 개발은 어떠한 이유에 의해서도 허용되어서는 안된다.

그러면 안전은 얼마만큼 안전하여야 안전하다고 할 수 있는가?(How safe is safe enough?) 물론 인간이 영위하는 의식주 및 사회생활 어느 경우에도 100% 안전은 있을 수 없다. 그러나 모든 활동에 위험이 존재함에도 불구하고 생활이 가능한 이유는 사람들이 위험을 인식하지 못하고 있거나 우리는 혜택에 비해 용인될 수 있는 정도라 판단하기 때문일 것이다. 이렇게 사람들이 받아 들일 수 있는 위험의 정도를 “허용 한도”라 일컫는데 그 정도는 개인에 따라 다르므로 주관적인 문제이다. 그러나 허용한도는 최소한의 요구이기 때문에 현재의 기술과 합리적인 방법으로 위험이 최소가 되도록 “안전목표”를 설정하여야 한다.

원전의 안전성 확보란 결국 방사선 재해의 방지를 의미하며, 어떠한 사고하에서도 방사성 물질을 인간과 환경으로부터 격리시키는 데서 출발한다. 이를 위해 “심층방어개념”이라는 기본 방호개념이 적용된다. 이 개념은 먼저 방사선의 누출을 가져올

수 있는 이상사태의 발생을 원천적으로 억제하고, 만약 이상사태가 발생할 시에는 그 사태가 확대되는 것을 방지하며, 이상사태가 발전하여 사고로 확대되었을 시는 그 영향을 완화하고 대중을 적절하게 보호하는 3단계로 이루어진다.

이러한 심층방어개념을 뒷받침하는 개념으로 “다중밀폐의 원칙”과 “실증기술적용의 원칙”이 있다. 다중밀폐의 원칙은 원전에서 다루고 있는 방사성 물질과 그로부터 방출되는 방사선의 외부 누출을 극소화하기 위한 안전 개념으로 여러겹의 물리적 장벽을 두는 것을 말한다. 국내에 도입된 원전은 핵연료 피복재, 원자로 압력용기, 차폐콘크리트, 격납용기 내부철판, 격납용기 등 5중의 방호벽을 두고 있으며, 특히 최종 방호벽인 격납용기는 가능한 모든 사고로부터 대중을 완전 격리하는 Isolated Island 개념을 실현한 것이다. 실증기술적용의 원칙은 새로이 개발된 기술의 시범적 적용을 배제하여 기술의 모험을 금지함을 뜻한다. 이 외에도 이러한 기본적인 개념을 보조하기 위한 원칙으로, 중요한 기능을 수행하는 설비의 작동 불능에 대비한 “다중성”, 기술적으로 상이한 원리를 채택하여 동일원인에 의한 동시 고장을 방지하는 “다양성”, 그리고 주요 안전설비의 검증을 금지하는 “독립성”의 원칙이 있다.

이상의 안전개념을 현실화하기 위해 법적, 제도적 장치를 통한 안전규제가 뒤따르게 되는데, 건설 및 운영 인허가의 심사, 그 이행 여부에 대한 정기적인 점검 등이 그것이다. 특히, 각 발전소는 가정할 수 있는 최악의 사고인 “설계기준사고”에 대한 방호능력이 충분하다고 평가받아야만 건설 및 운영에 대한 인허가가 발급된다. 설계기준 사고로서는 대형 냉각재관 파단사고나 주증기관 파단사고 등이 있으며 이들의 발생 확률은 원자로 가동년당 10^{-4} 으로 가정하고 있다. 그리고 이러한 극한 사고 방호용으로 발전소에는 비상노심냉각계통과 같은 “공학적 안전설비”가 구비되어 있다.

그러나, 1979년과 1986년에 발생한 TMI 와 Chernobyl 사고 이후 원자력 관계자들은 노심의 용융 가능성을 심각히 재고하게 되었으며 중대사고를 안전성 문제에서 중요한 요소로 고려하게 되었다. 이에 따라 기존의 사고평가 기준과 인허가 요건을 재평가하게 되었다. IAEA 의 INSAG 보고서에서는 기존 원전에 대한 원자로의 노심용융 확률은 원자로 가동년당 10^{-4} 이하이어야 하고, 외부의 방호조치를 필요로 하는 사고의 확률은 10^{-5} 이하일 것을 제안하고 있다.

우리나라에서는 PSA 방법을 이용해 신규 원전 뿐만 아니라 기존 원전에 대해서도 개별 발전소 평가 작업을 진행하여 안전성을 재평가하고 있으며 중대사고 현상에 대한 연구를 수행하여 발생 예방 및 사고 발생시 그 영향의 완화를 위한 노력을 기울이고 있다.

4. 차세대 원자력 발전소의 안전성 증진

대기 환경 보전을 위해 가까운 장래에 전력생산의 구조 조정이 불가피하고 개도국의 전력 수요가 급증할 것으로

예견되며 많은 수의 기존 원전이 운전수명에 도달해 감에 따라, 미국 전력회사들은 안전성 증진에 대한 요구에 부응하고 침체된 원자력 발전계의 활성화를 도모하기 위하여 기존의 발전소를 진보적으로 개량하는 프로그램을 수행하고 있다. EPRI의 주도로 1985년 부터 진행해 오고 있는 개량형경수로에 관한 프로그램은 미국 뿐만 우리나라 현전을 비롯한 대만, 일본 그리고 여러 유럽제국이 참여하고 있다. 그리고 어떤 나라들은 독자적인 프로그램을 개발하고 있다.

이 프로그램에서는 다음과 같은 차세대 원전에 대한 기본철학을 세워 놓고 있다.

- (1) 설계는 반드시 안전성과 신뢰성을 보장하면서 단순하여야 한다. 그리고 동시에 경제성을 위해 공기는 단축되어야 한다.
- (2) 설계는 반드시 노심손상 확률이 $10^{-5}/RY$ 이하일 것 등을 제시해 놓고 있는 EPRI LRD를 만족시켜야 하며, 그간 운전경험중 나타난 설계개선 필요사항을 적극 수용하여야 한다.
- (3) 설계는 반드시 직선적 안전해석이 가능하여야 하며 아직 미해결된 안전 문제는 NRC와 합동으로 연구, 해결하여 인허가의 안전성을 피하여야 한다.

안전성 문제를 해결하기 위해 전체적인 새로운 기초설계는 설계 및 안전해석에 소요되는 엄청난 제산과 실증실험 때문에 결코 경제적이라 할 수 없다. 따라서 개량형경수로는 그간 원전 설계와 건설 경험에서 쌓인 기술을 최대한 활용하여 현행 경수로의 기본 시스템은 변경시키지 않고, 요구되는 안전요건을 만족시키기 위해 노심의 저중심화(사고시 관수 유지), 안전계통의 피동화(비상노심냉각계통 주입펌프의 제거, 중력주입 및 축압주입 등의 채택), 붕괴열 제거의 피동화(자연순환 냉각 격납용기) 등의 기능을 부가한 노형이다.

현재까지 대표적으로 개발되고 있는 개량형 경수로로는 미국 Westinghouse사의 AP1000, 미국 CE사의 SYSTEM 80+, 러시아의 VVER-1000, 영국의 Sizewell B 그리고 프랑스의 N4 원자로등이 있다. 그리고 이들은 사용자의 친숙도를 증대시키는데도 관심을 기울이고 있는데, 이는 TMI 및 Chernobyl 사고의 가장 큰 요인이 운전원의 오류에 있었기 때문이다. 개선된 전자공학을 제어실에 적용하여, 마이크로 프로세서와 시청각 전시단위를 광범위하게 활용하는데 관심을 기울이고 있다. 그리고 정도는 다르지만 이들 설계에는 운전원들의 발전소 상태 감시와 비정상 운전 조건의 조기 탐지 기능을 돕기 위한 인공지능 방법을 수용하고 있다.

그러나 이러한 기존 경수로의 개량은 새로운 설비의 추가동으로 인해 설계 개념을 더욱 복잡하게 만들고 안전해석에 어려움을 부가시킬 가능성이 있다. 따라서 사고의 가능성을 기존의 원전보다 혁신적으로 줄일 수 있는 새로운 개념의 피동형 원자로 개발을 시도하고 있다.

피동형 안전로는 원자로의 기본적인 안전성 확보 기능을 달성시키기 위한 수단으로, 동적기구나 인간판단에 의존하는 비율을 적극적으로 극소화시키고 반응도계수, 중력, 열

용량 등의 자연법칙을 기초로 한 피동적 안전기능에 의존하는 개념을 채택하고 있다. 이러한 피동형 안전로는 안전확보를 피동적 수단에 의존하는 특성상 원자로 압력용기나 격납용기의 크기에 제한이 있고 대출력화는 곤란하므로 중소형로를 대상으로 개발이 추진되고 있으나 소형화에 뒤따른 경제성 문제가 대두된다. 따라서 이러한 양면성을 극복하기 위해 중소형 피동 안전로는 갖을 수 있는 다음과 같은 장점을 살려야 한다.

- (1) 원자로 시스템의 단순화와 모듈화에 의한 양산효과로 소형화의 단점을 극복할 수 있다.
- (2) 전력 네트워크의 규모에 대한 적절한 발전 설비 용량에 적합한 원자로 도입 수요에 대응하기 쉽다.
- (3) 원자로 시스템의 간소화로 운전 및 보수관리 수행상의 경제적 및 인적 부담이 감소된다.
- (4) 피동 안전로는 원자로 안전 확보 개념이 종래의 원자로에 비해 일반 대중이 인지하기 쉬운 원리에 기초하기 때문에 PA 관점에서 유리하다.

그리고 또 하나 가장 큰 유혹은 초기 시설 투자가 적으므로 경제적 위험도가 적고 자본이 부족한 소규모 전력회사나 개발도상국의 접근이 용이하다는 점이다.

이러한 개념과 특성으로 제안되고 있는 대표적인 피동 안전 경수로형의 특성중 중요한 부분만 간단히 소개하면, AP-600은 기존 2-루프 Westinghouse PWR을 개량한 것으로 Canned Mortar가 달린 원자로 냉각재 펌프를 사용하여 종래 원전에서 가장 문제가 된 펌프 Seal 누수문제를 해결하였으며 피동 안전설비는 피동적 안전주입계통과 피동적 격납용기냉각계통으로 구분되어 계통이 간단하고 신뢰도가 높으며 운전원의 개입을 필요로 하지 않는다. 또한 광섬유에 의해 연결된 마이크로 프로세서를 기본으로 하는 기술을 활용하여 계측제어계통을 개선하였다. 그리고 SIR은 아예 12개의 작은 증기발생기를 원자로 압력용기 내부에 배치하고 원자로를 풀속에 넣는 구조를 갖는다. 또한 중대사고시 격납용기 압력억제계통인 압력억제수조를 격리된 상태에 있는 원자로의 열제거원으로 사용하고 있다.

이러한 새로운 원전의 안전성 향상과 설계 기술 자립을 위하여 1992년 부터 정부 및 산업체의 주도로 장기적인 연구 계획을 수행하고 있다. 주요 수행과제로 중대사고 현상 연구, 확률론적 안전성 평가기술 개발, 첨단 계측제어 기술 개발 등 기존 원자로에 적용될 안전성 향상 기술 개발 뿐만 아니라 차세대 원전의 설계와 이에 대한 안전 규제 기술 개발에 필요한 과제들이 선정되어 2001년 까지 1조 9800억의 예산이 계획되어 있으며 올해에는 1793억이 투입될 계획이다.

5. 원자력의 사회적 수용성 확보

원자력의 평화적 이용에 대한 사회적 수용에 장애를 주는 가장 큰 이유는 아마도 원자력에너지가 상업적으로 이

용되기에 앞서 살상용 전쟁 무기로 사용되었다는 사실일 것이다. 그런 만큼 대중이 다른 기술을 사회적으로 수용하는데 있어서 나타내는 반응 보다 원자력은 불리한 입장에 처해 있다고 할 수 있다. 그리고 우리나라의 경우에 60-70년대 정부주도로 경제개발이 강력히 추진되던 시기에는 에너지 정책이 지나치게 일방적으로 시행되었으며 국민들에게 장점만을 부각하는 홍보정책으로 일관되어 왔다가 1980년대에 들어 국민들의 다양한 욕구가 분출되는 과정에서 일방적인 홍보속에 가려져 왔던 원자력의 부정적인 면이 알려지게 되면서 피해의식이 싹트게 되고 원자력에 대한 반감이 표출되기 시작했다. 더우기 최근 들어 집단적인, 지역적인 이기주의의 심화로 합리적인 의견마저 무시되는 사태가 발생하기도 하며 사회적 합리성보다는 편협한 감정이 우선하는 현상이 나타나게 되었다.

그러나 어떠한 기술도 국민적인 합의 없이는 궁극적인 사회적 수용이 불가능하다. 특히 대중의 인식속에 본능적인 불안감이 잠재되어 있는 원자력의 경우는 더욱 심하다 할 수 있다. 아무리 연구 개발을 통해 기술적으로 안전함이 입증되었다 하더라도 대중이 받아들이는 위험한도인 "허용한도"를 만족시키지 못한다면 원자력의 사회적 수용은 한계에 부딪힐 수 밖에 없다.

1993년 한국 갤럽조사연구소가 성인남녀를 대상으로 조사한 바에 의하면 대다수가 원전의 필요성(85%)과 원전 추가 건설(75%)에 찬성하고 있지만 34%는 원전의 안전성에 긍정적인 반면에 41%는 부정적인 견해를 나타내고 있다. 한편, TMI 사고를 경험한 미국에서 같은 해에 실시된 여론조사 결과에서는 50%정도가 긍정적, 27%가 부정적인 인식을 갖고 있는 것으로 조사된 사실과 비교하면 우리의 원자력 에너지 정책은 아직도 상당기간 국민의 이해를 구해야 할 위치에 처해있다.

국민적 이해를 증진시키기 위해 정부와 관련 기관에서는 현재 PA 전담기구를 설치하여 운영하고 있다. PA(Public Acceptance)란 어떤 사안에 대하여 국민을 이해시키고 그

것을 받아들여도록하는 일체의 행위로서 국민의 이해증진 또는 국민적 합의 형성을 위한 정책, 전략, 활동을 통칭하는 말이다. PA가 PR과 다른 점은 PR이 상대방을 설득하고 이해시키는 일방적인 홍보활동인데 비하여 PA는 사업주체의 생각을 상대방에게 알리고 이해를 구하면서 동시에 상대방의 생각도 받아들이고 이해하는 상호이해, 상호수용이라는 점이 다르다.

원자력 안전에 대한 국민이해 증진시켜 사회적 수용성을 확보하는 사업은 그 성과가 신속히 나타나지 않으므로 지속적으로 끈기있게 추진하는 방법 밖에 없다. 결국은 원전 사업자 및 안전규제집단이 기술력과 건전한 상식을 갖춘 집단으로 구성되어 있어서 원자력 안전을 최우선으로 생각하고 원자력시설을 건설, 운전, 규제하고 있다는 신뢰감을 국민에게 심어줄 수 있을 때 원자력 안전에 대한 국민의 이해문제는 해결될 수 있을 것이다.

6. 결 론

원자력 에너지는 보다 환경보전적이고 보다 안전하며 보다 경제적인 새로운 에너지원이 개발되기까지는 인류의 에너지 문제를 해결해 줄 수 있는 유일한 대안이다. 그러나 현재의 원자력 발전은 기존 원전의 안전성 개선과 안전성과 효율성이 제고된 개량 또는 신개념의 노형을 개발하기 위한 노력과 더불어 사용후핵연료의 처리, 처분 등에 대한 국민적 합의 도출이라는 풀어야 할 숙제도 안고 있는 것이 사실이다. 따라서 이를 위해서는 국내 원자력에 관련된 모든 산업계의 긴밀한 협조와 꾸준한 기술개발 노력이 필요하며, 동시에 국민적인 신뢰를 획득할 수 있는 지속적인 활동이 요구된다. 이러한 노력만이 국가적인 에너지안보와 환경보전이라는 요건을 충족시키는 안전한 에너지원의 확보를 보장할 것이다.