

소련 체르노빌 원자력발전소 사고원인과 교훈



한국가스안전공사

수석연구위원
경영학 박사 康宗權

소련의 체르노빌 원자력 발전소에서 1986년 4월 26일 발생한 전리방 사선누설 사고는 원자력 개발사상 미증유의 것이었다.

이 사고로 많은 사상자를 냈을뿐 아니라 향후 수 10년간 계속해서 막대한 인명피해가 일어날 것이라고 예견한 소련의 미생물학자가 있는가 하면, 서독의 한 과학자는 서독에서만 4천명에서 2만 3천명의 암환자가 새로 발생하고 9만명의 유전장해자가 생길 것으로 염려하고 있을 정도로 그영향은 지구 북반구 전체에 미치게 될 것으로 예상되고 있다.

체르노빌 발전소는 소련 우크라이나 공화국의 키예프시 북동쪽 130 km에 위치하고 있으며 그 주변 30 km안에 약 13만명의 주민이 살고 있었다.

사고가 일어난 원자로는 소련이 독자적으로 개발한 특수한 형태의 원자로로서 설계특성 등이 이번 사고의 원인(遠因)이 되었다고 한다. 특히 운전요원의 규측위반 등이 사고의 주요인이었다는 데서 더 큰관심을 자아내고 있으며, 더우기 발전소 운전요원의 안전의식이 낮았던 탓이라고 국제원자력기관-원자력 안전자문그룹(IAEA-INSAG)도 안전문화(Safety Culture)배경의 결여를 주 사고 원인으로 지적하고 있다.

과연 우리나라의 원자력발전소의 안전대책은 어떠하며 우리 운전요원의 안전의식은 어떠한가? 막대한 발전투자와는 대조적으로 안전대책은 소홀하고 안전의식은 보잘것이 없다는 지적도 나와 있다.

이번 일본 안전공학협회를 통하여 소련의 체르노빌 원자력발전소 사고에 관한 기술정보를 입수하여 사고의 경위의 원자로의 개요, 사고원인 및 평가와 IAEA-INSAG가 전해준 사고의 귀중한 교훈 등을 소개하면서 우리나라의 원자력발전소의 안전문제를 독자여러분과 같이 생각하는 기회로 삼기를 바란다.¹⁾

주 1) 조선일보, 사설 “원전사고 무서운 출몰” 1988. 2.18

1. 사고의 개요

1986년 4월 26일 체르노빌 원자력발전소 제 4호기에서 전리방사선 누설사고가 발생되었다. 처음 이 사고에 관한 정보가 흘러나온 곳은 소련이 아니고 스웨덴이었다. 4월 27일 스웨덴의 스톡홀름에서 얼마 안 떨어진 곳에 있는 포슈말크 원자력발전소 주변에서 이상한 방사물질을 검출한데서 비롯됐다.

처음에는 자가시설에서 이상이 생긴것으로 의심하여 운전요원을 긴급 피난시킨 뒤 조사 하였으나 별 이상을 발견하지 못하였다. 스웨덴 정부는 곧 소련을 포함한 인접국에 사고 발생 유무를 문의하게 되었다. 그러나 하나같이 부정적인 회답만이 들어왔을 뿐이었다.

4월 29일 사고가 발생한지 4일만에 드디어 소련은 체르노빌 발전소에서 사고가 발생하여 원자로 1호가 손상을 입었다고 짧막하게 발표하기에 이르렀다.

사고의 원인이나 상황등에 관하여는 거의 언급조차 하지 않았으나 소련에 인접한 나라의 일부 외신은 사망자가 2,000 명을 넘는다고 재해뉴스를 전해 주기도 하였다.

5월 상순에 이르러서 국제원자력기관(유엔의 한기관: IAEA)의 사무총장인 브릭스(Blix)가 소련을 방문하여 사고현장 상황을 시찰하므로써 비로소 사고에 관한 상세한 정보의 제공을 소련당국에 요청하게 되었다.

다행히 소련이 이 요청을 원칙적으로 잘받아들여 8월 25일서 부터 5일간 비인의 IAEA 본부에서 국제회의가 열리게 되었고 사고의 일부 윤곽이 밝혀지게 되었다. 소련은 사고가 난지 4개월이 경과된 뒤인 그때 조사한 내용의 일부를 밝혔다.

원자로는 대파되어 접근이 거의 불가능 하였으며 사고당시 현장에서 원자로를 운전하던 요원은 거의다 사망한 것으로 알려졌다.

세계 각국과 국제원자력기관은 소련이 제시한 사고보고에 근거하여 사고원인을 분석 평가하고 나름대로의 교훈을 찾는 데 주력하게 되었다. 보다 상세한 사고원인은 앞으로 발표 될 소련의 성의있는 진상보고에 의존하는 길 밖에는 별 도리가 없는 것이 현재의 실정이라 하겠다.

2. 체르노빌 원자력발전기 제 4 호기의 특징

사고가 일어난 제 4 호기는 소련이 독자적으로 개발한 기종의 하나였으며 1973년 이래 소련 원자력발전소의 주축을 이뤘은 정격 전기출력 1,000MW의 대표적 로형이었다.

그 특징은 흑연 감속, 경수냉각형, 압력관형이었다.

감속재로서 흑연을 사용하게 되어있어 노심에서 일어나기 쉬운 중성자의 흡수현상이 잘 일어나지 않아 중성자의 경제적 이용이 가능하고 압력관형이므로 운전중 연료교환이 용이

하여 연소계획을 적절하게 결정할 수 있어 비교적 저 농축도의 연료를 써서도 높은 연소 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 경제적으로도 바람직 할 뿐 아니라 우라늄자원의 효율적 이용이란 면에서도 뛰어난 장점이 있었다. 또한 노심냉각을 위하여 경수비등 냉각방식을 채택하므로서 흑연 감속방식을 쓸때에도 비교적 높은 출력밀도를 얻을 수가 있었던 점도 있다. (일본 동해 1호로의 약 7 배 출력밀도라고 한다)

그러나 장점만 있는것이 아니고 일반적으로 대형이고 출력밀도가 높아 노심은 핵분열생성물의 하나인 Xe의 효과에 의거 출력분포의 공간안정성이 나빠지는 흠이 있었다. 이로써 경우 출력분포의 안정을 위하여 노심제어 시스템이 대단히 복잡한 구조로 되어 있었던 점이 취약점이었다.

특히 노내반응점 조작여유를 나타내는 사고로의 정지용 제어봉(制御棒)수가 제어반에도 나타나지 않게 되어 있었을 뿐만 아니라 긴급시의 경고나 자동 정지시스템도 갖추어져 있지 않아 안전장치의 다중화(Redundancy)가 설계상 소홀히 다루어져 있어 이번 사고의 중대한 원인을 이룬것으로 추정되고 있다. 또한 저출력시 안정성이 저하되는 결함도 있었다.

3. 사 고 의 경 위

1986년 4월 25일 체르노빌 제 4호기는 정기점검을 받기 위하여 섰다운되게 되어 있었고, 또한 섰다운 기간중 일련의 시험도 함께 계획되어 있었다.

그 시험은 터빈에 증기공급을 중단했을 때 타성에 의거 회전을 계속하는 동안 발생하는 전력을 안전시스템의 일부 전력으로 단시간동안 사용하게 되어있는 설계효과를 실증하려는 것이었다. 이 시험은 이전에도 시도된 바 있으나 당시 발전기의 전압강하가 너무 빨리 진행되어 실패하였으므로 이번에는 여자회로(勵磁回路)를 개량하여 재차 시험을 하였던 것이다.

시험은 순수한 전기적인 것이었으므로 원자로의 안전을 충분히 감안하지 아니하였고 따라서 시험계획도 정식으로 승인을 받지 아니한 것으로 알려졌다.

4월 25일 오전 1시, 정격 열출력 3,200MW에서 출력이 급격히 저하되기 시작하여 오후 1시경에는 1,600MW까지 떨어져 터빈 1기(이로에는 50만 KW의 터빈발전기 2기 부착)를 정지시키게 되었다.

원래 이 시험은 열출력이 700~1000MW의 범위에 있을때 시작하여 계속 출력을 저하시켜 가면서 실시할 예정이었는데 갑자기 송전지령이 다시 떨어져 오후 11시 넘게까지 50% 출력으로 발전을 계속하지 않을 수 없었다. 오후 11시 10분경 출력저하현상이 다시 나타났다. 이것은 제어시스템에서 결함이 생겼던 탓인지는 확실치 않으나 출력이 30MW까지 강하해 버렸다. 운전요원은 목표치까지 출력을 상승시키려고 안간힘을 다 썼으나 겨우 200MW까지 밖에는 올릴 수가 없었다.

앞서 로의 특징에서 언급한 바와 같이 저출력 상태에서 불안정하게 되므로 평소 운전은 엄격히 제한을 가하곤 하였으나 운전요원은 그 규칙을 거의 무시하곤 하였던 것이다. 그러는 동안 긴급시 반응조작용 제어봉은 상한까지 전부 빼내어 반응도 제어의 여유가 6~7분(통상 30분 이상필요)까지 저하 되었던 것으로 보인다.

운전요원은 계산기에서 빼낸 프린트아웃을 보아 거의 여유가 없어진 사실을 알고 있으면서도 규칙을 위반하면서까지 로를 세우지 않은 채 시험을 강행하였다.

시험중 안전절차에 따라 운전요원은 대기중에 있던 냉각펌프를 작동시켰는데 출력이 너무 낮은 때라 오히려 과냉(過冷)현상만 조성하게 되었고 냉각시스템이 극히 불안정한 상태로 되어 아주 적은 변동에도 노심의 증기체질이 크게 변화되는 예민한 상태에 빠져 들게 되었다.

운전요원은 원자로의 자동정지를 피하려고 운전규칙도 위반해 가면서 기(氣)수분리시의 수위 및 압력에 관한 긴급정지 신호를 바이패스 시켜 버렸다.

시험은 운전계속중 1기의 터빈발전기를 트립(trip)시키므로써 시작하였다.

원자로에는 터빈 2기가 정지되면 스크램을 하도록 설계되어 있었으나 운전요원은 만일 시험이 실패되면 다시 한번 반복할 셈으로 처음 나타난 스크램 신호를 넘겨 버렸다.

4월 26일 오전 1시 23분 터빈에 트립이 일어나고 발전기에 접속되어 있는 냉각재 펌프의 회전수가 저하되면서 냉각재의 유량도 저하되기 시작하자 노심의 증기체적이 증가되어(+)로 보이드계수가 돌아선만치 출력도 증가되게 되었다.

오전 1시 23분 40초, 운전요원이 스크램 단추를 눌렀으나 반응도 조작여유가 극도로 저하되어 있었으므로 정지 제어시스템의 기능을 충분히 해내지 못하고 마침내 출력의 증가를 억제할 수가 없게 되었던 것으로 보인다.

출력계수가(+)로 변하면서 출력이 가속도적으로 상승하여 폭주반응 상태를 일으켰고 1시 23분 44초경에는 정격출력의 약 100 배에 이른 것으로 추정되었다.

노심의 연료의 상당부분이 파괴되어 미세화되므로 냉각재에 접촉하여 급격히 대량의 증기를 발생케 되었다. 이리하여 냉각시스템내의 압력은 상승되고 시스템은 과압파손된 것으로 추정된다. 누출된 증기때문에 노심 및 그 주변압력이 상승되고 노심의 상부 차폐물(직경 10수m, 중량 약 1000ton)이 위로 솟구쳐 올라 옆으로 도피되므로써 압력관은 거의 다 파괴되었다.

원자로 건물은 아마도 노심의 급속과 물이 반응을 일으켜 생긴 수소가 폭발되면서 크게 파괴된 것으로 여겨진다.

건물 밖에 있던 목격자의 증언에 따르면 이때 수초 간격으로 2회에 걸쳐 폭발이 일어났으며 고온물질이 불꽃처럼 공중으로 날아 흩어졌다고 한다. 이때 방사선 물질의 비산을 방지하기 위하여 마련된 방호장벽이 거의 다 파괴되었고 노심에 있던 흑연이 연소될 때 상승기류를 일으키면서 대량의 전리방사선 물질이 같이 어울려 대기중으로 방출되었다. 또한 노심부에서 나온 고온의 물질이 비산되어 건물 도처에서 화재가 발생되었던 것이다.

건물화재는 출동한 소방요원에 의하여 오전 5 시까지는 진화되었으나 소방요원중에는 대량의 전리방사선에 노출된 자가 많아 많은 사상자를 낳게 되었다.

노심부에서 전리 방사선 물질의 방출은 시작한후 약 10 일간 계속되었다.

그간 헬리콥터를 동원하여 보론(B), 납, 드로마이트, 점토 등 약 5000 ton의 물질을 투하하여 노심상부를 폐쇄함과 동시에 노심하부로 부터 질소를 주입하였다.

천연방사선에 의한 공간선량율은 지역에 따라 차가 있지만 대량 0.01 mR/h 정도인데 그것과 비교해 보면 엄청난 선량율을 나타내고 있음을 쉽게 알수가 있다.

이 사고결과 1986년 8월 현재 사망자 31명 중상자 203명 등 많은 희생자가 생겼다.

4. 사고원인과 평가

소련당국은 1986년 IAEA본부에서 열린 회의에서 처음으로 사고의 원인을 다음과 같이 발표하였다.

사고의 직접원인은 운전요원의 중대한 규칙 위반이었다고 하여 안전을 등한히 하는 원자력발전소의 폐습의 한 단면을 보여 주었다.

그 규칙 위반내용을 살펴보면 실로 경악을 금치 못한다.

첫째, 반응도 조작여유가 없을 정도로 그 수위가 저하되었는데도 원자로를 정지하지 않았다.

둘째, 계획보다 낮은 출력상태에서 시험을 함으로써 원자로를 불안정하게 하였다.

셋째, 대기중의 냉각제 펌프를 노심사고의 상태를 확인도 않고 켜 규정치를 넘는 유량내 내 보내므로서 노심의 과냉상태를 조성하였다.

넷째, 터빈 2기가 정지하면 자동 정지되도록 되어 있는 신호를 바이패스시켰다.

다섯째, 공기·물분리기의 수위 및 압력에 관한 스크램 신호를 바이패스 시켰다.

여섯째, 시험도중 중대한 안전시스템(ECCS)를 분리 시킨채 발전을 재개 했다.

특히 네번째의 경솔한 조치는 치명적인 결과를 초래하였던 것으로 보인다.

이런 위반사항이 없었으며 시험개시와 동시에 원자로는 자동정지가 되었을 것으로 전문가들은 보고 있기 때문이다.

또한 여섯째, 4월 25일 오후 1시경 ECCS(긴급노심냉각시스템)을 처음 분리 하였는데 그 후 예정이 변경되어 50% 출력운전을 계속 할 때에 그것을 리셋(reset)해야 했는데 이것을 하지 아니한 것은 시험 절차상 불필요한 것으로 되어 있었기 때문이다.

ECCS의 분리가 노심과냉의 중요 원인이 되었던 것이다.

위에서 언급한 대부분의 위반사항이 명백히 의도적인 위반이었던 것은 특기할 만 하다. 다시말하면 위반을 하고 있을 때 원자로가 극히 위험한 상태에 빠지고 있는지를 누구도 분명히 인식하지 못하고 있었던 것이 사실인가 아니면 변조된 내용이 아닌가 하는 의구심이

풀리지 않는다. 전자가 사실이라면 운전요원의 교육은 물론 원자로와 사람과 환경 시스템의 상호작용이 설계단계에서부터 무시되고 필요한 최소한의 안전성조차 고려되지 못한 것으로 여겨진다.

반응도조작 여유에 대한 제어반상의 표시경보 및 패일세이프(Fail Safe) 장치조차 갖추지 못하고 있었던 것이 밝혀지고 있다.

이런 점에서보면 단순히 운전요원의 불안정한 행동만이 사고의 직접 요인이 아니었음을 알 수 있다. 오히려 허술한 사고 원자로의 설계나 그 특성을 간과할 수는 없을 것 같다.

또한 정상적인 수속절차를 밟지 않은 시험계획 시행을 비롯하여 수많은 고의적 규칙위반, 필수적인 안전시스템의 확보를 소홀히 하면서 바이패스를 시킬 수 있었던 기강의 문제도 결코 과소평가 할 수 없는 문제로 보인다.

그리고 그간 체르노빌 제 4 호기가 별 사고없이 잘 운전되어 왔다고 하여 운전요원에 대하여 과신을 해왔거나 혹은 어떤 타성에 빠져 원자로가 갖는 잠재적 위험성에 대한 감각이 부지불식간에 둔화되어 버렸던 탓이 아닌가 하는 평이 나오고 있어 주목을 끌고 있다.

특히 인간시스템에만 치중하여 기계시스템이나 환경시스템을 등한히 하여 지나치게 인간에게 스트레스를 주는 잘못을 저지르지 않았나 하는 지적도 나올법하다.

IAEA-INSAG이 소련의 운전요원의 안전의식이 결여 즉, 안전문화(Safety Culture)의 빈곤을 이번 사고의 중요요인으로 보고 있는 점도 귀 담아 듣고 타산지석으로 삼아야 할 것이다.

5. 사고의 교훈

1979년 스리마일 아일랜드(TMI)의 원자력 발전소에서 연료봉 용융사고가 일어나자 그런 일은 절대로 있을 수 없다고 주장하던 원자력 전문가들이 그 순간 설망을 완전히 잃어 버렸던 일은 아직도 기억에 생생하다.

특히 고리 원자력 발전소가 스리마일 아일랜드의 설계와 같다고 하여 세인의 큰관심을 끌었던 일도 엇그제의 일 같다.

다행히 그때는 압력용기나 배관의 파괴 등이 일어나지 않았다. 그러나 별 큰 문제가 없었다고 있어 버리기에는 그 사고는 너무나 큰 충격적인 원자력발전소 사고였다. 스리마일 아일랜드 사고를 계기로 서방 선진제국은 OECD-NEA(경제협력개발기구, 원자력기관)을 중심으로 원자력발전소의 안전확보를 위한 노력을 지금까지 계속하여 왔던 것은 불행 중 다행하고도 가치있는 일이었다고 평가하고 있다.

사고의 재발을 방지하기 위하여 실제로 나타났던 사고현상의 원인을 규명하여 그것을 거울삼아 안전대책을 수립한다는 것은 중요한 일이다.

소련 당국은 이번 사고에서 30 개소 이상에서 발생한 화재를 진화하는데 주력하였으며 수시간이 지난 뒤에는 방사성 물질의 방출을 저지하기 위하여 합계 5,000 톤의 붕소, 점토, 드로마이트, 납 등을 헬리콥터로 투하하였으며, 저온 질소를 노심 하부로 부터 주입하

였고 사고뒤 조치로서 콘크리트 약 30 만㎏ 및 6 만톤의 금속으로 된 특수 구조물로 밀폐하였다고 한다.

사고가 나고 급하면 누구나 다 조치할 수 있다고 평소 장담하는 사람들도 한번쯤 심각히 생각해 볼만한 일이라고 여겨진다.

그런 막대한 물량의 중화제를 단시간내에 효율적으로 긴급시에 사용하기 위해서는 미리 준비하는 이상의 다른 방법이 있을 수 없다.

또한, 인간의 과실 또는 규칙위반이 사고의 원인이었다고 사람만 잘 통제하면 된다는 식의 단일한 생각도 안전을 위하여는 금물이라고 생각된다.

압력용기나 열교환기의 수위가 크게 떨어지고 불안정해 지거나 자동적으로 개방되어야 할 밸브가 열려지지 않고 중대한 결함이 제어반의 표시도 되지 않으며 자동정지 시스템이 정상을 이탈한다면 결과적으로 적정한 행동만을 사람에게 강요하여 과연 안전을 도모할 수 있느냐 하는 사람과 기계의 언밸런스 문제의 위험성을 드러내 보여주고 있다. 인간의 대표적 위험성이 전망중이라는 지적이 있다.

앞에서 언급하였지만 체르노빌 원자력발전소는 운영실적이 뛰어나 그간 무재해기록을 유지하여 왔으므로 당국에서 굳게 믿은 탓으로 승인도 받지않고 섣다운시 일부 발전효과 시험을 독자적으로 실시하여 전반적인 원자로 운영상에 혼선과 지장을 초래하였을 뿐 아니라, 원자로 전 시스템의 안정성 평가를 전혀 고려하지 못했다. 인간시스템과 기계시스템과 환경시스템을 개별적 일원론적 차원에서 다루어 인간, 기계 및 환경시스템의 상호작용(intekaction) 속에서 시스템의 안전을 확보하지 못하므로써 어이없는 세기적 일대 참사를 빚어냈다고 하겠다.

특히 이번 사고가 안전성 유지에 불가결한 하나의 통제수단인데, 운전요원에 대한 규제만이 중요원인으로 부각된 것은 사후 약방문 같은 느낌이 없지 않다.

소련의 이번 사고를 계기로 국제적인 협력과 연구를 더욱 진보시켜 나가야 할 것이다.

다행히 우리나라에 도입된 원자로 시설은 다중방호형 설계로 되어 있으나 시스템 안전성 확보란 견지에서 어느 한쪽에만 치우쳐 사람만 가지고 지나치게 통제 한다거나 그 반대로 기계쪽만 중시하는 일이 있어서는 전체시스템적으로 안전성을 유지하지 못한다는 것을 유념해야 할 것이다.

사고 뒤에 소련 당국에서 취한 일반주민을 위한 방호조치도 거울삼아 제반대책을 세워 놓아야 할 것으로 여겨진다.

일차적으로 옥내로 대피시켰고 옥소제의 배급, 주민의 피난 및 음식물 섭취제한 등에 대한 조치 등은 좋은 참고가 될 것으로 믿는다.

발전소에서 가장 가까운 “쁘리삐아치” 시에서는 옥내대피를 시키면서 옥소제를 배급하였는데 뒤에 조사해본 바에 의하면 주민의 갑상선피폭선량이 옥소제 투여를 하지 않을 경우보다 낮게 역제가 되었고 큰 부작용도 없었다고 한다.

음식물에 대하여도 ¹³¹I 에 대하여는 소아갑상선의 피폭선량이 연간 30 ren, ¹³⁷CS 등

장수명의 핵종에 대하여는 최초 1년 선량이 5rem을 넘지 않도록 제한 기준만 겨우 세워 놓는데 그쳤던 것을 알수 있다. 대비없이 만난 불의의 사고의 처참함을 실감하게 하고 있다.

앞서도 지적하였지만 지난 87 년에도 26 건의 국내 원전사고가 있었고 그간 원자력 발전소에서 모두 45 건의 위반사항이 발견되어 경고되었다는 보도도 심각하게 받아들여야 한다.

어딘들 결함이 없을 수가 없겠지만 안전의식면의 폐습이 원자력 분야라하여 산업안전보다 더 나을리가 없다는 생각이 앞선다.

소 잃고 외양간 고치는 진지한 노력없이 안전을 결코 저절로 이룩될 수 없다는 것을 새삼 느껴야 할 것이다.

IAEA - INSAG에서도 소련의 사고원인을 안전문화의 낙후성이라고 단적으로 지적하였지만 우리도 깊이 재음미해 보아야 할 지적사항이 아닐까 여겨진다.

주춧돌 주변에 핵연료 폐기물이 방치될 정도라면 우리 안전문화도 그 뿌리가 거의 없는 것이 아닐까?

参 考 文 献

- 1) Internationall Nuclear Safety Advisory Group; Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident.
Safety Series № 75 INSAGI(1986)
- 2) USSR State Committee on the Utilization of Atonic Energy; The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and its Consequences(Aug. 1986).