

02 _ 체르노빌 복구

방사능 오염 생태계 대부분 회복

반감기 긴 방사선동위원소 Cs 137, Sr 90이 문제

글 | 이병일 _ 한국수력원자력(주) 방사선보건연구원 선임연구원 leebi@khnp.co.kr

체르노빌 사고가 발생한 지 20년이 되었지만 체르노빌 영향에 관한 논란은 아직도 끊이지 않고 있다. 이에 국제원자력기구(IAEA)는 2003년에 체르노빌 사고로 인한 방사선의 건강과 환경영향에 대하여 누구나 신뢰하고 공감할 수 있는 보고서를 작성하고자 벨로루시, 러시아, 우크라이나 및 세계보건기구(WHO) 등과 협력하여 체르노빌 포럼을 설립하였다. 체르노빌 포럼의 '건강'과 '환경' 2개 그룹에 100명이 넘는 전문가들이 참여하여 체르노빌 사고영향에 대하여 평가하였으며, 2005년에 체르노빌 포럼의 회원국 및 회원기구의 공통적인 입장을 정리한 2건의 보고서를 발간하였다.

체르노빌 포럼이 발간한 '건강영향' 보고서에서도 기존의 발표

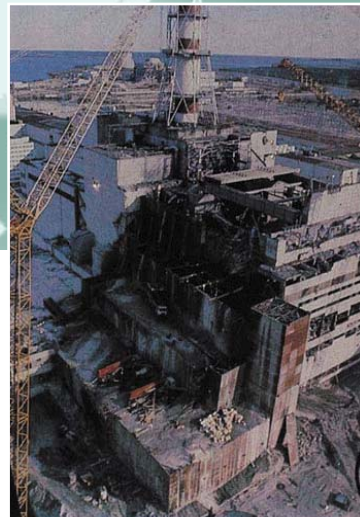
자료와 같이 체르노빌 사고로 인한 초기 사망자는 31명이고, 그 중 급성방사선증후군으로 사망한 사람은 28명으로 발표되었

으며, 이들은 모두 발전소 정화작업에 투입된 사람들이었다. 그 외 3명은 각각 폭발로 인한 외상, 화상, 관상동맥혈전으로 사망하였다. 한편 이 보고서는 소아 갑상선암 발병률이 증가한 것을 제외하고는 현재 거주민들에게서 백혈병과 기타 암의 발병률이 증가했다거나 기형아의 출산이 증가했다는 증거가 없다고 밝히고 있다. 체르노빌 인근 거주민들에게 나타나는 가장 큰 건강상의 문제는 사고로 인한 정신적인 충격이다. 체르노빌 사고는 대규모 주민이동, 경제적 안정의 상실로 이어졌고 이는 곧 정신적, 육체적 균형감각의 상실과 혼돈현상을 불러왔다.

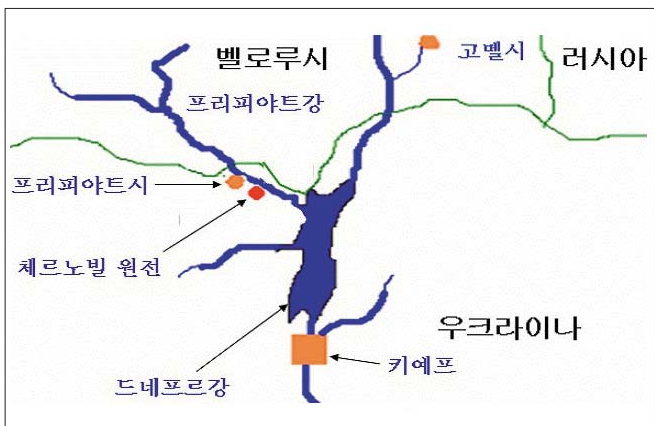
체르노빌 포럼이 발간한 또 하나의 보고서는 '환경영향'을 다루고 있다. '환경영향' 보고서를 위주로 사고 후 생태계와 체르노빌 4호기의 실태 및 복구과정에 대해 알아보자.

벨로루시, 러시아, 우크라이나 등 20만㎢ 오염

체르노빌 원자력발전소는 우크라이나 수도 키예프 북방 100km, 드네프르강의 지류인 프리피야트강 주변에 위치해 있다. 1986년 4월 26일 4호기에서 원자로와 원자로건물 지붕이 파손되면서 고온, 고방사능의 파편들이 공중 1km까지 치솟았다. 무거운 물체들은 부



파손된 상태의 체르노빌 4호기 모습



체르노빌원전 위치도



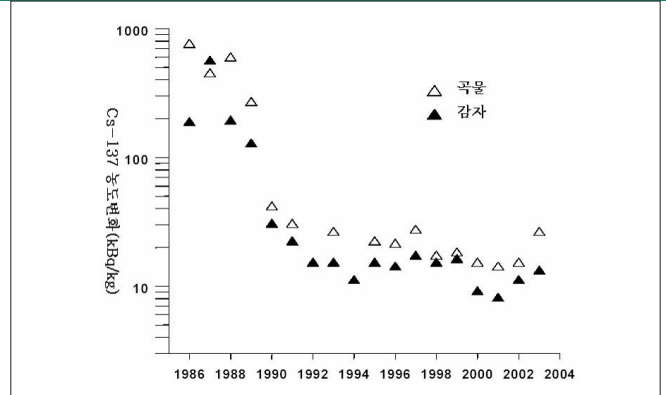
완공된 석관의 모습

지 근처에 떨어졌지만 불활성기체를 포함한 가벼운 입자들은 서북쪽으로 이동하였다. 사고 첫째 날에 방사성물질이 대량으로 방출된 다음 감소 추세를 보이다가 7일째부터 다시 증가하였으며 10일째 급격하게 감소되었다. 7일과 10일 사이에 방출량이 증가한 것은 원자로내 연료의 용융에 도달한 높은 온도가 주원인이었으며, 10일 후에 방출량이 급격하게 감소된 것은 이 용융물이 원자로내의 다른 물질들과의 상호작용으로 급격히 냉각되었기 때문이었다. 5월 6일 이후에도 소규모의 방출은 있었지만 무시할 정도였다.

방출된 방사성물질의 총량은 약 14 EBq(1 EBq = 10^{15} Bq)에 달한다. 주로 요오드(I 131) 1.8 EBq, 세슘(Cs) 0.085 EBq, 스트론튬(Sr 90) 0.01 EBq, 플루토늄(Pu) 0.003 EBq가 방출되었으며, 불활성기체가 전체 방출량의 약 50%를 차지하였다. 방사성물질이 대기를 이동하는 정도는 대기확산계수, 입자크기, 강우량 등에 영향을 받는다. 스트론튬과 플루토늄을 함유한 큰 연료입자들은 대부분 원자로로부터 100km 이내에 침적되었다. 이 사고로 유럽의 20만 km^2 가 넘는 지역이 오염되었으며, 그 중 71%가 벨로루시, 러시아, 우크라이나 3개국에 집중되었다. 3개국의 방호법령에 따라 Cs 137이 37 kBq/m^2 이상 침적된 곳을 방사능에 오염된 지역으로 분류하였다. 방출된 대부분의 방사성동위원소는 물리적 반감기가 짧아 단기간에 붕괴되어 없어졌다. 사고 초기에는 반감기가 짧고 방출량이 많은 I 131과 텔루륨(Te 132)이 주요 오염원이었으며, 수년간은 ^{134}Cs 도 중요한 방사성동위원소였다. 현재는 물론, 앞으로도 관심을 가져야 할 방사성동위원소는 반감기가 긴 Cs 137과 Sr 90이다.

원자로 반경 30km 이내 출입 제한, 주민 소개

사고발생 36시간이 지난 4월 27일 오후 2시경에 프리피야트 주민 4만 명에 대한 소개가 개시되었다. 5월 2일부터는 소개지역을 원자로 반경 30km까지 확대했으며 5월 6일까지 7만여 명의 지역민



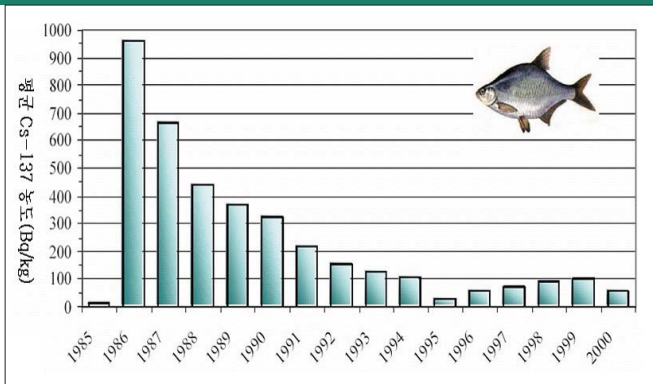
러시아 브란스크 주에서 생산된 농작물(곡물, 감자)의 Cs 137 농도변화

을 추가로 소개하고 이 구역을 출입제한구역이라 불렀는데 이 구역은 20년이 지난 지금도 존재한다. 1986년 이후에도 3개국에서 약 20만 명이 추가로 이주되었다. 4월 27일부터 노출된 원자로 상부에 40톤의 붕소(임계방지), 2천400톤의 납(방사선차폐), 1천800톤의 진흙과 모래(방사성물질 방출차단), 600톤의 백운석(열 흡수)이 투하되었으나 후일의 평가는 이런 물질들이 적절한 위치에 투하되지 못했고 열 발산을 차단해 원자로심의 과열을 초래했을 것으로 보고 있다. 노심 용융물이 하루 지층까지 침투하지 못하도록 5월 9일부터 15일간 400여 명이 동원되어 원자로 하부를 굴착하고 냉각계통을 가진 강화 콘크리트판을 설치하였다. 10층 높이의 철근콘크리트 구조물로 4호기 잔해를 둘러싸는 공사를 신속히 착수하여 1986년 11월 중순에 완공하였는데 이를 '석관'이라 부르고 있다.

도시지역에서는 잔디밭, 공원, 거리, 도로, 광장, 건물 등이 오염되었으며, 특히 프리피야트강에 근접한 주거지역에는 고방사능의 물질이 침적되기도 하였다. 1986년부터 1989년까지 1천 개의 거주지역에서 1만여 채의 주택과 공공빌딩, 1천여 개 이상의 농장에 대한 건물 세척, 거주지역 청소, 오염된 토양 제거, 도로청소, 식수원 제염작업 등을 광범위하게 실시하였다. 방사성 먼지의 형성을 억제하기 위해 유기용액을 오염된 표면 위에 발라 방사성입자를 흡착시킨 다음 얇은 판으로 건조시켜 떼어내는 방법도 사용되었다. 깨끗이 정화된 지역에서는 이후 이차적인 오염이 관측되지 않았으며, 현재는 주거지역 대부분이 사고 이전의 자연 선량률 수준으로 회복되었다.

일부지역 제외 오염 농경지 대부분 회복

농업환경에 영향을 주는 방사성동위원소로는 농작물에 흡수가 용이하거나 반감기가 긴 I 131, Cs 137, Cs 134, Sr 90 등이 있다. 이들이 농작물을 오염시키는 생태학적 이동경로는 복잡한데, 방사성동위원소의 물리·화학적 특성뿐만 아니라 토양의 형태, 경작 및



키예프 저수지에서 채집한 물고기의 Cs 137 농도변화

수확체계, 기후, 계절, 가축의 생물학적 반감기에 영향을 받는다. 사고초기에는 표면에 직접 침적되었던 방사성물질이 동식물의 주 오염원이었다. 특히 I 131에 대한 우려가 많았으나 물리적 반감기가 8일이어서 약 2개월 동안 문제가 되었다. 이후에는 토양으로부터 식물에 흡수되는 Cs 137이 부각되었다. 풍화작용, 물리적 붕괴, 토양 속으로의 이동 등으로 Cs 137의 동식물 전이가 사고 초기에는 크게 감소하였으나 지난 10년 동안에는 매년 3~7%의 비율로 완만하게 감소하였다.

벨로루시의 고멜, 우크라이나의 지토미르, 러시아의 브란스크 같은 일부지역을 제외하고는 오염되었던 대부분의 지역에서 생산되고 있는 농산물의 오염도는 현재 각국의 조치준위보다 낮은 상태를 보이고 있다. Sr 90은 체르노빌 원전 인근 경작지를 제외하고는 영향이 없으며, 플루토늄은 침적량과 흡수율이 낮아 무시할 수 있는 수준이다.

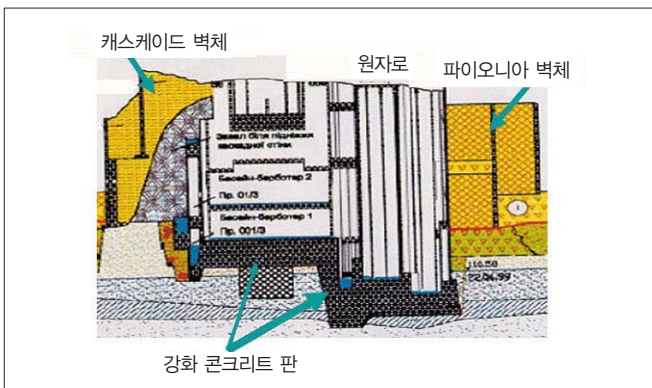
초기단계에서 가장 효과적으로 시행한 대책은 사료용 오염 목초와 우유를 폐기하는 일이었다. 이와는 별도로 많은 가축을 도살하였으나 방사선학적 관점에서 볼 때 정당성이 확보되지 않았으며, 위생 및 경제적인 측면에서도 바람직한 방법은 아니었다. 장기적으로는 청정사료와 세습 결합제(프러시안 블루)를 가축에게 먹이고, 갈륨비료와 석회를 사용해 토지를 개량하는 등 오염지역의 동물사육과 식물재배에 관한 대규모 대책을 시행하였으며, 가축, 농작물, 사료, 경작지의 세습농도도 지속적으로 감시하였다. 30억 헥타르가 넘는 농지에 이와 같은 농업대책을 지속적으로 적용함으로써 방사능농도가 조치준위를 초과하는 농산물의 생산을 최소화할 수 있었다. 2004년 현재 3개국에서 사용이 금지된 경작지 중 3만3천 헥타르는 사용이 가능하도록 허가했다.

지금도 '달힌 호수' 물 유입·방출 제한

산림에는 동식물군이 기후, 토양특성, 지형 등과 서로 복잡하게

얽혀 있어 방사능의 이동경로가 더욱 복잡하다. 산림지역은 높은 유기성분을 가지고 있고 토양이 안정하여 토양-식물간에 방사성 동위원소의 전이가 크다. 농작물의 방사능량은 전반적으로 감소하고 있는 반면 임산물의 오염도는 높은 수준을 유지하고 있는데, 특히 버섯, 딸기, 과일 및 야생동물의 Cs 137 흡수량이 높게 나타나고 있다. 3개국과 스칸디나비아 반도 일부 국가에서는 재식림, 잔디 깎기와 같은 먼지 방지대책과 더불어 주민들의 산림 접근제한, 야생식물과 딸감의 채취제한, 야생동물의 사냥 제한조치가 시행되고 있다. Cs 137이 토양 속으로 이동하거나 물리적으로 붕괴됨으로써 향후 수십 년간 임산물의 오염도는 서서히 감소될 것이다.

수자원과 관련해서는 사고 직후 키예프 저수지에서 취수한 음용수의 방사능농도가 가장 큰 관심사였으나, 희석 또는 붕괴되거나 바닥으로 침적됨으로써 오염도가 주수일내에 크게 낮아졌다. 사고 직후인 '86년 5월초에는 프리피야트강(10kBq/l)과 드네프르강(4kBq/l)의 Cs 137 농도가 높게 나타났지만 '89년 키예프 저수지의 농도는 0.4Bq/l로 현저하게 감소되었다. 현재 지표수를 농업용수로 사용하는 것은 문제되지 않고 있으나 3개국의 '달힌 호수'로부터 물이 유입되지 않도록 하기 위한 지속적인 대책과 감시는 필요한 실정이다. 소위 '달힌 호수'라 불리는 호수들은 Cs 137과 Sr 90의 농도가 높아 지금도 물의 유입, 방출과 민물고기의 섭취를 제한하고 있다. 사고 이후 몇 년에 걸쳐서 오염된 토양에서 수역으로 방사성물질이 이동되는 것을 막기 위한 수많은 대책들이 실시되었지만 이러한 대책들은 비효율적이고 많은 비용이 소요되었다. 가장 효과적인 조치는 초기에 음용수의 취수를 제한하고 물 공급원을 대체한 것이었으며, 민물고기 섭취 제한조치도 일부 지역을 제외하고는 효과가 있었다.



체르노빌 4호기 및 석관 단면도

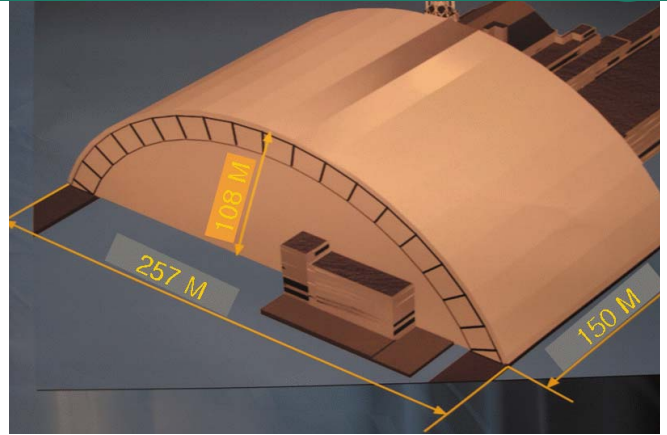
체르노빌 4호기 폐로 전망

체르노빌 원전 1,2,3호기는 폐로할 목적으로 폐쇄되어 있으며, 거의 완공 단계에 있었던 5, 6호기 원자로도 1986년 사고발생 직후 사용계획이 취소되었다. 사고 초기에 원자로건물 잔해와 노심파편, 표층토양을 함께 수거했는데 수천 입방미터에 이르는 이 폐기물들은 원자로 주변에 설치한 파이오니아 벽체(남쪽, 서쪽, 북쪽 3군데)와 캐스캐이드 벽체(동쪽 1군데)에 매몰시켰으며 이 작업으로 선량률이 최대 1/20까지 완화되었다.

1986년 5월부터 11월까지 사고 원자로의 선량률을 감소시키고 방사성물질의 환경방출을 방지할 목적으로 석관을 축조하였다. 석관은 주로 철재 빔과 철판을 이용하여 건설되었으나 부분적으로는 4호기 구조물도 사용되었다. 4호기 구조물의 안전성을 종합적으로 확인하지 못한 상태에서 석관을 완성하였기 때문에 석관이 지진 같은 자연 재해를 견딜 수 있을지는 불확실한 실정이다. 게다가 석관이 축조된 지 20년이 지나면서 내구성에 대한 잠재적 위험이 나타나고 있는데 가령 지붕의 균열을 통해 빗물이 유입되어 석관 구조물이 부식됨으로써 잠재적인 붕괴가능성을 증가시키고 있는 것이다. 하지만 최악의 상황을 가정하여 석관지붕이 붕괴된다 하더라도 대기중으로 분출될 모든 방사성물질이 원자로 반경 30km 출입제한구역 안에 침적될 것으로 예측하고 있다.

최근 들어 여러 국가의 지원으로 석관의 붕괴 가능성을 감소시키기 위한 조치들이 취해졌다. 환기 굴뚝과 배출공기 자동제어 시스템의 설치, 버팀대의 설치, 빔의 강화, 접근통제 시스템의 개선, 먼지발생 억제시스템의 현대화, 구조 안정화 작업이 이루어졌다. 또한 석관내부 통제시스템을 전산화함으로써 감마 방사선, 중성자속, 온도, 열속, 수소농도, 산화탄소, 대기중 습도, 구조물의 기계적 안정성 등을 감시할 수 있게 되었다. 체르노빌 방호시설 기금을 지원한 국가로는 프랑스, 독일, 영국, 미국 등이 있고, 한국과 포르투갈 등이 추가되었다.

석관의 안전성을 15년에서 40년 정도 늘리기 위한 추가적인 조치가 준비되고 있으며, 장기적으로는 석관 위를 덮는 신축안전봉쇄시설(NSC)을 건설할 예정이다. 100년 이상의 수명을 가진 신축안전봉쇄시설이 완공되면 기존의 석관을 해체함과 동시에 연료함유물질을 제거하고 최종적으로는 4호기를 폐로하는 수순을 밟게 된다. 출입제한구역을 산업단지 또는 자연보호구역으로 개발하는 것은 4호기를 생태학적으로 안전한 시스템으로 전환하기 위한 향후 전략에 달려있다.



신축안전봉쇄시설(NSC) 설계도

방사능 영향보다 정신적 충격 더 큰 게 문제

필자는 몇몇 관계자들과 함께 지난 연말에 현장의 목소리를 듣기 위하여 체르노빌 원전 및 관련 연구기관들을 돌아보았다. 방문 기간 중에 체르노빌 이주민들의 보건관리를 맡고 있는 책임자를 만날 수 있었는데, 그는 “나는 유엔의 연구결과에 동의하지 않는 부분이 있다. 방사능영향을 떠나 현재 상태가 체르노빌 사고에서 비롯됐으므로 국제사회가 체르노빌 사고 이후 겪고 있는 어려움에 대해 관심을 가져주기를 바라며 이따금 이러한 상황을 언론을 통해 알린다” 고 하였다. 그 외에도 많은 체르노빌 관계자들을 만날 수 있었는데, 그들 또한 체르노빌 사고로 인해 유발된 모든 부정적 상황을 마치 방사선에 의한 영향인 것처럼 이야기하고 이슈화하였다. 체르노빌 복구에 막대한 비용이 지출되고 있는데 이를 감당하기 어려운 우크라이나의 경제사정이 그 배경임을 느낄 수 있었으며, 국제사회의 적극적인 협조가 필요한 때인 것만은 분명해 보였다.

이주민들은 체르노빌 사고에 대한 영향의 크기와 관계없이 사고 자체를 위협한 것으로 인식하고 있었으며, 이런 인식으로 인해 실제 많은 유럽국가에서 인공유산이 증가하는 등 심리적 불안이 고조된 적이 있다. 또한 결과가 예상했던 것만큼 크지 않았음에도 불구하고 이주민들이 느끼는 방사선에 대한 두려움은 이보다 훨씬 크다는 것이다. 체르노빌 포럼이 발간한 보고서에서도 이주민들의 방사선영향에 대한 보건상의 문제보다 그 밖에 나타나고 있는 정신적 충격 등과 같은 문제를 크게 강조하고, 방사선에 대한 정확한 정보를 지속적으로 주어야 한다고 한 것이 어떤 의미를 가지고 있는지 알아야 할 것이다. ⑤



글쓴이는 한양대학교에서 공학석사학위를 받았다.