

라듐 산업이 남긴 교훈

주 승 환

기술사(방사선 관리) · 원자력공학 박사

원자력 산업이 오늘의 모습들을 갖추기 이전에는 어떠했을까? 지금에야 누구나 원자력은 원자력 발전, 전략 무기 생산 그리고 방사성 동위원소 생산과 이용 부분들을 쉽게 이해할 것이다. 하지만 처음에는 지금과는 전혀 다른 모습으로 한동안 세계 곳곳에서 붐을 타고 번창했었다.

‘라듐 산업’이란 표현이 적절하겠지만, 라듐 방사능을 이용했다는 점에서는 그것도 원자력 산업의 여러 모습들 중의 하나임에는 틀림없다. 딱 잘라 말하자면, ‘라듐 산업’은 지금의 원자력 산업이 안고 있는 모든 이슈들의 시발점이 되었고, 그것들의 조상이기도 하다.

그런 점에서 본다면, 지금의 방사성 쓰레기 이슈를 다룸에서도 반드시 한 번쯤은 라듐 산업이 남긴 교훈을 되새겨 봐야 될 것이다. 뿐만 아니라, 오늘의 원자력 산업의 바탕인 우라늄 광산의 개발 붐으로도 이어져, 지금 세계가 보유한 대

부분의 우라늄 광산들은 그 시기에 발견됐다.

원자력산업의 조상

라듐 산업은 우리에게 많은 유산들을 남겼다. 그들 중에서도 백미(白眉)는 역시 마담 퀴리가 세계 처음으로 고안했던 라듐 분리 기술인 ‘분별 결정법’일 것이다. 지금의 원자력 산업에서 바탕 물질들을 분리시키는 데 기본 모델로 쓰였으며, 현대 원자력 산업의 모태였고, 기초이기도 하다.

원자력 산업이라면, 우리의 머릿속을 스쳐가는 것은 우라늄 원소일 것이다. 하지만, 우라늄이 핵폭탄에서 원자력 발전의 연료로 쓰이기 이전이던 1930년대는 암의 치료에 쓰이던 라듐 원소가 주역이었다.

그 때의 우라늄은 라듐 원소를 뽑고 나면, 일종의 방사성 쓰레기에 지나지 않았다. 거의 대부분의 우라늄은 쓸모가 없었고, 극히 일부만이

겨우 도자기의 색을 내는 데 불순물 정도의 첨가제로써 쓰였을 뿐이다.

순도 높은 우라늄 광석 1톤(ton)을 정련해야 겨우 그램(g) 정도의 라듐을 추출해 낼 수 있다. 알기 쉽게 견준다면, 쌀 한 가마니에 담긴 쌀 알 수효는 대략 420만 개이다. 쌀 한가마니(피치브랜드) 속에 쌀알 4.2 개 정도가 라듐이다. 모래 한 가마니 속에서 쌀 몇 낱알들을 골라 내기란 그리 쉽지 않다.

자료에 따르면, 그때 1g의 라듐 값이 \$180,000이었다고 한다(당시 런던의 고급 호텔 숙박료(1일 3식 포함)는 일주일에 5.5 파운드 정도). 라듐은 주로 암 치료용 치료기의 선원으로 쓰였으며, 수많은 의약품들의 첨가제로, 그리고 일부는 인의 화합물에 섞여 야광 시계 표시판의 도료에도 이용됐다.

세계 연간 라듐 생산량이 가장 많은 때는 수백 그램 정도를 정제할 수 있었다고 한다. 우라늄 광석에 들어있는 라듐 양이 극미량이므로

그 정도의 양을 정제하려면, 엄청난 규모의 시설과 일꾼들이 필요했을 것이다.

선택된 광석에 따라서는 400톤의 광석을 정제해도 1g의 라듐을 추출해 내기도 힘들 정도였다니 라듐 수백 그램을 생산하려면 그 시설들의 규모를 어림할 수 있을 것이다.

우라늄 광석들의 채광은 5 개 대륙들에서 이뤄졌고, 회사들은 경쟁적으로 라듐을 추출해냈다. 물론 정부의 지원을 받는 국영 기업도 경쟁적으로 참여했다.

필자는 20여 년 전에 읽었던 한 논문(44)을 다시 찾아내 읽으면서, 라듐 산업이 안고 있었던 방사성 쓰레기 문제의 시조를 되새겨 본다. 이 글에서 인용된 대부분의 자료들은 그 논문에서 발췌된 것들이다.

라듐 원소 발견

오스트리아-헝가리 제국 시대에 세계적인 은광산이던 보헤미아 주의 성 요아킴스탈(Joachimsthal)은 15세기에 발견되어 19세기 말까지 품질 좋은 은광석을 캐냈다(미국 화폐 단위인 '달러' 이름이 거기에서 유래됨). 이 곳의 은광맥에서 피치브렌드가 발견되었다. 인류 최초의 라듐은 바로 거기서 캐낸 광석으로부터 추출되었다.

1898년 4월에 부부인 피에르(Pierre) 그리고 마리 퀴리(Marie

Curie)는 라듐 원소를 발견했다. 베크렐이 1896년 우라늄에서 방사선을 발견한 지 2년 후이다.

마리 퀴리의 실험실은 야외 노출된 곳에 폴로 지붕을 덮은 오두막으로 그녀의 남편 피에르와 같이 쓰게 된다. 그들은 요아킴스탈 은광석들에 섞여진 금속들을 채집하여 금속 복합 광물들을 분리시키는 연구를 하고 있었다.

틀림없이 우라늄과는 다른 높은 방사능 물질이 피치브렌드 광물 속에 들어있을 것이란 생각으로 그것을 찾으려고 애를 태웠다. 그들은 분리된 광물들 중에 있던 피치브렌드 광물에서 아주 센 방사능 물질이 공기를 이온화시킴을 발견하게 된다.

라듐의 동위원소들은 지금까지 25개나 발견되었다. 그들 중에서 라듐-226은 라듐 원소를 대표한다. 그것은 우라늄-238에서 생겨난다. 그리고 또 다른 라듐-228(처음에는 '메소토륨'으로 불렸음) 동위원소는 토륨-232인 어미(母) 원소에서 생겨난 것이다. 라듐 동위원소의 종류들이 많은 것은 라듐 어미 원소들의 종류가 많기 때문이다.

라듐은 천연에서 여러 가지 화학 물질의 모습들로 나타난다. 잘 녹지 않는 탄화물 그리고 황화물로 나타나기도 하고, 잘 녹는 염화물 그리고 질산 화합물로 나타나기도 한다. 이런 차이점들은 우라늄으로부터 순수한 라듐을 추출해 내는 데 어려

움이 따름을 보여주는 것이다.

라듐이 지각 물질들 중에서 차지하는 평균 천연 존재 비율은 10^{12} 분의 1 정도이다. 라듐의 주된 광물은 우라늄 광물이며, 라듐-226은 천연에서 우라늄-238의 결정 속에 갇혀있다.

본지의 지난 호에 실린 글에 천연 라듐의 방사능 얘기가 있다(45). 라듐 관련 내용이므로 필자는 주의 깊게 읽었다. 그 글의 「과장된 가상 기사 2번」의 소재목에서 자연 방사능의 세기가 아주 높게 나타나는 특정 지점을 예를 들고, 방사능 테러 사건으로 넓은 지역에 높은 세기의 방사능이 오염될 수 있을 것임을 전제로, 그런 지역들에 대비하여 새 방사선 안전 관리 모델을 개발해야 될 필요성을 제안하고 있다.

필자는 지역에 따라 천연 방사능의 세기가 심하게 달리 분포한다는 사실은 인정하지만, 그 글에서 예시된 이란 오아시스 도시인 람사르 지역에서 측정된 높은 천연 방사능의 주범이 라듐-226이라는 점에 대해서는 동의할 수 없다.

라듐-226은 우라늄-238 원자 붕괴 계열 중에서 생겨나는 한 핵종이다. 우라늄 계열에 묶여 아주 느리게 생겨나고 그리고 쪼개지면서 라듐-222로 바뀌면서 '방사 평형'을 이룬다.

천연에서 라듐의 산출 모습들은 우라늄 계열 핵종들과 함께 묶여있



어 그 계열 밖을 빠져나가 독립하여 비평형 모습인, 라듐 원자의 소계열을 이루려면 엄청난 지각 변동이 수백만 년 동안 계속된 곳에 있어야 할 뿐만 아니라, 천연에서 소계열을 이를 확률(해양 퇴적물인 경우는 쉽게 비평형 상태를 이룸)은 아주 낮다.

따라서 그 지역의 천연 방사능이 특별히 높은 까닭이 라듐 원자만이 아닌, 주변에 다른 강력한 어떤 감마선의 소서가 함께 섞인 경우일 것으로 짐작된다.

마담 퀴리의 실험

그녀는 처음 100g의 피치브랜드로 라듐 분리를 시작하였지만, 그 양은 턱없이 부족했다. 피에르는 연구에 필요한 더 많은 양을 구하려고 유럽·영국 그리고 미국의 친구들 그리고 광물 거래인들에게 편지를 썼다.

이를 알게 된 미국 연방지질연구소(USGS)는 공짜로 500g의 피치브랜드를 그들에게 지원해 주었다. 그 양으로 실험한 결과, 그램 단위의 순수한 라듐을 얻으려면, 톤 단위의 우라늄 광석을 처리해야 된다는 셈이 나왔다.

비엔나 대학의 Eduard Seuss와 계약하여 적은 양의 요아킴스탈 피치브랜드를 얻고, 실험하면서 그 주변에 아무렇게나 마구 버려졌던, 은 광석을 선광해 낸 찌꺼기(복대기:

광물을 골라내고 남은 쓰레기)들 속에 우라늄 광물이 많이 들어있다는 사실을 알게 되었다.

Seuss의 중재로 비엔나 정부는 100kg의 우라늄 복대기도 지원하였다. 1898~1902년 동안 그녀는 사비를 들여 11톤의 찌꺼기를 그녀의 실험실로 운송했다. 구입비란 운송비였다. 그들의 첫 라듐 공장은 보잘 것 없는 오두막이 전부였고, 공장장도 노동자도 오로지 퀴리 혼자가 겸임하였다.

그녀는 처음 시작된 8톤의 쓰레기와 씨름하여 드디어 1g 정도의 라듐을 분리해냈다. 이 양은 라듐의 본바탕을 밝힐 수 있는 충분한 양이다. 라듐의 원자량은 1902년 봄에 처음 농집된 라듐 1g의 1/10 로 측정됐다.

라듐은 빛 에너지를 넘으로 식별된다. 그 빛을 다이아몬드에 비취 인광을 만들어내었다. 그 광선들은 종이 그리고 목화 섬유를 꿰뚫고 피부에 상처를 입혔으며, 활동하던 암세포를 괴멸시킬 수도 있었다.

그녀가 고안했던 라듐 추출법은 1903년 그녀의 소르본느(Sorbonne) 대학 박사 학위 논문에 자세히 설명돼 있다. 라듐 산업이 번창했던 때의 라듐 생산의 주된 프로세스는 마담 퀴리 실험실의 공정으로 이뤄졌다.

처음 라듐 분리에 쓰인 기술을 「분별 결정법fractional crystallization」이라고 부른다. 퀴리가 개

발했던 그 분리 방법은 그 후에 각각 물질에 혼적으로 들어있는 희토류 원소들을 분리해 내는 기술의 기본 모델이 되었다.

원자력을 평화적으로 이용하기 시작한 후기의 원자력 산업에서도 이 분리 방법은 원자력의 연료 물질의 분리 그리고 태운 원전 연료에서 타고 남은 우라늄, 플루토늄을 포함하여 의료·농업·산업 그리고 비파괴 부문에서 쓰이는 대부분의 분열 생성물(fission product)들(방사성 동위원소들)을 분리하는 균분리 기술(46)의 모델이 된다.

분별 결정법의 핵심은 비슷한 과정을 수도 없이 반복하면서 혼적으로 있던 금속 물질들의 농도를 목표 값에 이르게 차츰 높여가면서 추출해 내는 기술이다. ‘한술 밥에 배부르랴’ 는 우리 속담은 분별 결정법을 잘 표현한다.

분별 결정법은 분리할 원소에 따라 수없이 많은 비슷한 응용 기법들이 개발될 수 있다. 앞으로 우리의 방사성 쓰레기를 처리하는 데 한 아이디어로서 이런 기법의 한 모델을 활용할 수도 있을 것이란 점에서는 우리의 관심을 끈다. 지금부터 100년 전에 마리 퀴리가 개발했던 라듐의 분리 공정을 더듬어보자.

분별 결정법

성 요아킴스탈 광산의 한 기술에

지어졌던 한 채의 오두막 실험실은 광물 복대기들을 탄산나트륨 그리고 황산으로 녹여 우라늄을 분리시키던 퀴리의 실험실이다. 라듐은 그런 산(酸) 종류들과의 화학적 결합으로 우라늄 계열 또는 토륨 계열의 영구 평형 상태를 벗어나 비평형 상태인 탄산나트륨-염 그리고 황화-염들 속에 섞여 들어가 침전물로 가라앉게 된다.

이들 침전물을 끓인 탄산나트륨으로 다시 녹이면 황화물들은 탄산염 속으로 옮겨간다. 그 후에 염산으로 탄산염을 또다시 녹이면 물에 녹을 수 있는 염화물로 옮겨간다. 용액을 여과시켜 관계없는 물질들을 걸러낸다. 그런 후에 첨가물로서 황산을 조금 넣으면, 라듐은 황화물로 다시 전환되면서 한 결정인 침전물로 남게 된다.

성 요아킴스탈의 광산 찌꺼기(쓰레기)들의 1톤 광석을 처리하면, 10~20kg의 라듐, 바륨 그리고 칼슘들이 포함된 한 정제 안된(crude, 조(粗)) 황화물을 얻게 된다. 이 속에는 높은 방사능 물질이 들어있어 그것의 방사선 세기는 우라늄의 그것보다 30~60 배나 높다.

조-황화물은 대규모로 칼슘을 생산하는 공정들과 비슷한 다단계 시리즈들을 거치면서 정제된다. 조-황화물 1톤을 처리하면, 바륨 그리고 라듐의 염화물들, 약 8kg이 남게 된다.

이것을 용액으로 만들면, 대부분이 바나듐 염화물의 용액이고 나머지는 아주 적은 부분을 차지하는 라듐 염화물 용액이다.

두 용액들이 섞인 혼성 용액에서 그들의 미세한 용해도 차이로 라듐 결정을 뽑아내게 된다. 염화물이 녹아있는 용액을 부분적으로 증발시키면 결정이 만들어진다. 염화바륨의 용해도는 염화라듐의 것보다 더 크므로 앞쪽이 먼저 녹고 뒤따라 염화라듐은 녹지 않고 침전되어 밑바닥에 가라앉게 된다. 그 결정을 다시 녹이고 그래서 여러 번 되풀이 과정들을 거치면 순도 높은 염화라듐의 결정을 얻을 수 있다.

바륨에 대한 라듐 비율이 높아지면서 무색인 결정들이 황색에서 옐렌지색으로, 경우에 따라서는 핑크색을 띠게 되다가 다시 무색으로 바뀐다. 분별 결정법을 여러 번 되풀이하고 나면, 드디어 용해될 뻔한 모든 빠져나가고 순도 높은 염화라듐 결정만이 남는다.

퀴리는 거의 4년 동안 요아킴스탈 주변에 흩어진 복대기 8톤을 처리하여 조-황화물을 걸러냈다. 반응 용기는 손으로 짓는 가마솥을 썼다. 반응 용기에서 나오는 증기 그리고 연무들은 파리 공기로 그대로 뽑아냈다. 그 후부터 라듐의 순도 높이기 그리고 분별 결정법이 세상에 알려지게 된다.

라듐 광상 조사

오늘의 우라늄 광상들은 앞서 한 얘기대로 대부분이 라듐 광석을 찾으려고 노력하면서 발견된 것들이다.

그때에 발견된 우라늄 광물들은 피치블렌드(pitchblende, 브라운에서 거무스레한 색을 띤 여러 가지 종류의 우라늄 산화물들이 약간의 라듐·토륨 그리고 희토류 원소들을 불순 물질들로 함유), 그리고 카노타이트(carnotite, 여러 가지 산화물들 중에서도 특히 포타슘 화합물 속에 우라늄 산화물들과 바나듐 산화물들이 함께 결합된 복합 광물, 강력한 방사능을 냄. 선명한 노란-녹색이며 라듐이 많이 들어있음), 그밖에 우라늄 광물들은 누에고치의 모양새로 이뤄진 것들도 있었으며, 이것을 「pods」라 불렀다.

지질층과 지형이 잘 조화된 곳에 침전된 편암류로 채워진 것이며, 보통 산출된 모습들은 시멘트로 굳어진 샌드스톤(sandstone, 주로 콜로라도 분지), 아스팔트(유타 그리고 옛 연못이던 매더개스커(Madagascar)) 등이 주된 광상들이다.

우라늄 광산이라면, 적어도 우라늄의 양이 광석의 무게 비율로 일천분의 일(0.1%=1,000ppm) 정도 포함돼야 광산으로 취급된다(우리나라의 옥천계 속에 배태된 우라늄

은 1970년 대 말경에 조사된 것이며, 우라늄의 평균 품위는 500 ppm 정도로 낮다.)

1903년 말경에 오스트리아 정부는 요아킴스탈에서 채광되는 광물 그리고 북대기의 수출을 금지한다고 발표했다. 공공 단체들 그리고 과학 단체들 양쪽은 라듐 치료법의 잠재성에 매료됐고, 세계적으로는 라듐의 수요가 급상승하였기 때문이다.

그래서 무대는 요아킴스탈이 아닌 다른 세계로 라듐 광석 탐사가 뻗혀졌다. 유럽·아시아·호주 그리고 북미에 라듐 추출 공장들이 우후죽순처럼 설립되기도 했었다.

라듐 광체의 탐사는 대부분의 경우, 탐색하는 사람들이 선명하게 색을 띤 노두(지표에 나타난 광맥)에 신경을 썼다. 간단한 화학 시험(정성 시험)법으로도 우라늄이 들어있는 증거를 확인할 수 있었다.

예컨대, 황색 카노타이트 광석에 진한 염산 몇 방울을 떨어트려 우라늄이 있으면 붉은 갈색이 나타난다. 그 후에 물로 씻어내면 녹색으로 바뀌면서 색이 완전히 사라져 버린다.

라듐의 함량 시험(정량 시험)은 여러 가지 계측기들을 써서 시료에서 방사능을 측정해야 신뢰할 수 있었다. 여러 종류의 측정 기구들은 원광석들과 파쇄된 혼합 광석들로부터 농집된 우라늄 광물을 선광하고 분석하는 데 쓰였다.

예컨대, 빛이 차단된 종이로 싸 여진 사진 건판은 어떤 방사선의 노출이라도 빠지 않고 기록했다. 방사선경(radioscope)은 아연 황화물을 발라놓은 유리병이며, 알파 입자가 들어와서 부딪히면 빛을 낸다. 비슷한 인광 스크린을 스피ن새리스코프(spintariscope)에 부착시킨 확대경은 시료의 방사능을 셈 할, 광선의 펄스를 셀 수도 있었다. 또 다른 기구인 전자 확대경은 퀴리 시대로부터 1940년대를 거쳐 라듐 분석의 일차 도구였다.

방사능의 검사 기구는 금속 포일에 대전시킨 정전기의 전하가 다른 반대쪽의 하전 표면에서 반발하는 원리를 썼다. 라듐 시료에서 나오는 알파 입자들이 가까운 주위의 공기를 이온화시켜 생겨나는 전자들을 주위에 흩뜨리면 대전된 포일이 정전기로 벌어졌던 모습이 서서히 좁혀지면서 처음 자리로 오므라든다. 되돌리는 속도가 빠를수록 곧 시험 시료 속에 든 라듐 양이 많다는 증거이다.

세계 라듐 산업

퀴리는 그들의 라듐 추출 공정을 특허 출원하지 않고, 그 대신 그들은 다른 협력자들과 세부적으로 몫을 나뉘었다. 1904년 퀴리의 조수였고, 프랑스 산업 공학자이던 Armet de Lisle는 파리의 동쪽

Nogent-sur-Marne에 한 공장을 세웠다. 공정은 퀴리가 오두막에서 한 방법과 비슷했지만, 1907년까지 북대기의 초기 처리의 부분은 빠졌고, 분별 결정법 시스템의 효율은 염산을 브롬으로 바꿈으로서 높아졌다. 새로운 라듐 광석들도 찾아냈다.

세계 최초의 라듐 공장은 1902년, 프랑스 대학의 과학 아카데미에서 20,000프랑(약 \$4,000)을 지원받아 파리에 Central Chemical Products Co.란 공장 규모의 라듐 생산 시설을 갖추고 비영리로 공장을 운영하였다. 공장의 운영은 퀴리의 동료였던 Andre Louis Debierne(그는 후에 악티늄 원소를 발견함)가 맡았다.

Nogent-sur-Marne의 공장은 세계 여러 곳으로부터 캐낸 광물들, 예컨대 헝가리·스웨덴 캐나다 그리고 콜로라도에서 피치브랜드, 프랑스 Autun 그리고 포르투갈에서 카노타이트, 보헤미아에서 칼코라이트(chalcolite, 일명 torbernite, 방사능을 띤 녹색 사각 모양 결정), 포르투갈 그리고 유타에서 카노타이트, 그리고 실론에서 토리아니트(thorianite, 강력한 방사능을 띤 ThO2 광물이며 우라늄 그리고 희토류 원소를 불순 물질로 함유)들을 처리했다.

• 오스트리아 정부는 바로 요아킴스탈에 라듐 추출 공장을 설립하

여 라듐 정광을 생산했다. 1910년 까지 총 13g을 생산했고, 1922년경에는 유럽에서 최대의 생산 공장 규모로 커졌다.

- 영국은 1910년에 British Radium Corporation이 라듐 시장에 뛰어 들었다. 그 회사는 Cornwall의 성 Ives 영토에 Trenwith 광산을 운영했고, 런던으로 광석을 운반하여 공정을 거쳤다.

- 프랑스는 포르투갈, 마다파스카 그리고 Cornwall에서 들어온 광석들을 파리 근교의 두 개 공장에서 처리하여 라듐을 추출했다. 그리고 La Societe Industrielle du Radium은 1913년에 Cornwall에 있는 성 Austell 근방의 South Terras 광산을 구입했고, 광석을 파리 근교의 다른 공장에 보냈다. 1922년 한 공장은 South Terras 광산 부지에 세워지고 1925년까지 낮은 품위의 광석을 처리했다.

- 스웨덴은 자국 안에서 우라늄이 든 명반 세일을 채광 그리고 노르웨이로부터 온 피치브랜들도 스톡홀름 부근의 공장에서 함께 라듐을 선광하였다.

- 호주에서는 남호주로부터 온 광석을 시드니 그리고 애들레이드로 운반해서 라듐을 추출했다. 토리아나이트 광석은 일본에서도 채광됐다.

- 러시아도 1910년경에 라듐 시

장에 뛰어 들었다. 희토류 원소들을 생산하던 사기업인 Fergana사가 터키의 Fergana로부터 저품위 광석을 다루기 시작했다. 채광은 1914년까지 계속되었으나 혁명 이후는 정부 운영 추출 공장이 Kama 강에 건설되었고, 1931년 모스크바에 새로운 공장을 세웠다.

미국의 라듐 산업

미국은 카노타이트 우라늄 광산을 중심으로 라듐 산업이 시작됐다. 상업적인 라듐 생산은 1906년 Stephen I. Lockwood Co.가 처음 시도했으나 그의 회사인 Rare Metals Reduction Co.는 1908년까지만 생산했다.

카노타이트에서 라듐의 회수율은 낮은 편이었고, 부산물인 우라늄 그리고 바나듐 수요도 거의 없으므로 Lockwood 회사는 적정한 양의 광석을 처리할 입장이 되지 못했다. 비록 그의 초기 벤처 회사는 실패했지만, 콜로라도 그리고 유타에 풍부한 카노타이트 광산을 소유하게 되었다.

1910년에 전임 피츠버그 기업인이던 Joseph M. Flannerly는 Standard Chemical Co.를 설립하여 서부 카노타이트 광석으로부터 라듐을 추출하였다. 1913년까지 펜실베이니아 주 Canonsburg 공장에서 라듐 생산은 계속됐고, 피츠

버그 근교에서 제련하였다.

Standard Chemical Co.는 미국에서 라듐 산업을 주도하는 회사로서 아메리카 드림 시대의 마지막까지 그 지위를 유지했다. 다른 추출 회사들이 콜로라도·일리노이·뉴저지 그리고 펜실베이니아 주들에 설립됐고, 그래서 미국은 국제적 라듐 시장으로 커졌다. 미국에서 1913~1923년 사이에 196g의 라듐이 생산되었다.

미국 대학들과 교수들은 라듐 산업에서 주된 기술 개발에 큰 도움을 주었다. 프린스턴·컬럼비아 그리고 예일 대학들의 조교수들은 Rare Metals Reduction Co.에 라듐 산업의 기술 지침을 제공하였다.

시카고 대학의 Herbert N. McCoy는 추출 기술학파에서 교육을 받았고 나중에는 그의 Carnotite Reduction Co.를 설립했다. McCoy의 한 학생이던 Charles Viol은 Standard Chemical Co.의 주임 화학자가 됐다. 미주리 대학의 Herman Schlundt는 미국 광무국과 표준국을 포함한 미국 정부 기관들과 그리고 미국 라듐 회사를 포함한 몇몇 상업 관련 기관들에 라듐 추출에 관한 기술 자문을 했다.

1914~1915년 프린스턴 대학의 방사선 연구소에서 피츠버그 대학의 Henry Koenig과 하이델베르크 Willy A. Schesinger 등과의 공동

협력 사업으로 덴버에 콜로라도 라듐 회사를 설립하였다. 덴버 금-부호였던 Thomas Walsh가 자금을 출연한 콜로라도 스쿨오브마인이 덴버의 카노타이트 광상의 지질 그리고 야금 기술들을 지도했다.

국립 라듐 연구소는 1913년에 미국 광무국, 뉴욕 광산 산업가인 James Douglas 그리고 Hopkins 의과대학의 교수였던 Howard A. Kelly 세 곳들이 협약으로 설립됐다. 3년 후에 폐쇄 되기까지 8.3 kg를 생산했다.

미국의 라듐 산업은 우라늄의 품위가 낮은 카노타이트 광상이 주를 이루고 있었으므로, 미국에서 라듐 생산은 1922년 중반기에 벨기에의 Oolen에서 생산이 시작되면서 영향을 받게 되었고, 미국에서 라듐 추출 공장들의 대부분이 가동을 멈췄다. 미국의 규모 큰 Standard Chemical Co. 그리고 Radium Company of Colorado, 둘은 아마도 Oolen 공장 설립을 지도하였을 것이며, 나중에는 미국 내에서 벨기에의 라듐 판매 대리점으로 영업했다.

전형적인 미국 카노타이트 광석의 300-400톤 사이를 정련해야 겨우 라듐 1g를 생산할 수 있었지만, Kantaga 광석(뒤에 설명)으로서는 10톤 미만으로도 1g 라듐을 생산했다. 광무국 화학자의 한 사람은 "Oolen 공장은 실제의 야금 공

장보다도 더 정밀한 한 제련실과 같았다" 라고 설명했다.

세계에서 가장 큰 두 우라늄 광산들

세계적으로 알려진 유명한 피치브랜드 광산은 1913~1915년 사이에 벨기에-콩고의 Haut Katanga 지구에서 발견됐다. 제1차 세계 대전 기간, 콩고로부터 구리의 최대 생산 독려 때문에 휴전에 이르기까지 거기에 피치브랜드 탐사를 금지했다. 1921년 Union Miniere du Haut Katanga는 아주 높은 품위의 우라늄 광물(평균 약 50% 산화우라늄)을 벨기에 엔트워프 항 근교의 Oolen 공장으로 운송해서 라듐을 생산했다.

공정 과정에서 나온 찌꺼기들은 다른 방사성 핵종들을 미래에 회수할 수 있게 저장됐다. 품위가 높은 광석 그리고 우라늄과 맥석이 황산과 탄화나트륨 처리로 우라늄을 제거시킨 완성품이기 때문에 8톤의 광석의 처리에서 나온 잔여물은 50갤 배럴 속에 저장될 수 있었다. 1922~1933년 사이에 라듐의 새로운 재고량의 수요는 심하게 들쭉날쭉 했다. Oolen에서 연간 생산은 6g에서 60g 범위를 나타냈고, 10년 남짓 동안 총생산량은 326g이 나왔다.

세계적으로 벨기에 회사인 Oolen과 경쟁할 수 있었던 유일한

다른 라듐 광산은 북 캐나다 Great Bear Lake의 해안을 따라 넓게 매장된 우라늄 광상이다. 1900년에 지질조사소가 발견했다. 1931년 발표된 자료에 따르면, 그곳 피치브랜드의 산화우라늄 함량은 30~60%나 됐다. 온타리오 Port Hop 추출 공장은 1932년 말경에 약 2g/월의 라듐 생산 규모로 건설되었고, 1938년에는 두 배로 확장되기에 이른다. Oolen 그리고 Port Hope에서 쏟아져 나온 많은 양으로 라듐 값은 가파르게 떨어졌다. 1938년 캐나다 그리고 벨기에에는 라듐 세계 시장을 서로 분할해서 그 값을 \$40,000/g으로 유지하기 위해 이른다.

라듐 의약품들

1930년대에 생산된 모든 라듐은 의약품에 쓰였다. 암 환자들의 외과적 치료용의 개체 또는 부속물로서 라듐 치료 기술들은 20세기 초기에 실제로 많은 암 환자들의 구세주였다. 의약품에 대한 혜택이었다.

라듐을 채운 주사 바늘, 튜브 또는 플라스크들은 일시적으로 꽂아 넣고, 장식으로 매달고 또는 영향을 주게 될 조직에 갖다대었다. 라듐으로 채운 골드 캡슐('seeds')들은 종양의 외과적 치료 기간 동안 끼워있게 했다. 그들은 반감기가 약 4일이므로 떼어낼 필요는 없었다.

1930년대 라듐 공급이 많아지고 값이 떨어짐으로써 병원들은 암 ‘치료기’ 용 시설을 설치하였다. 한 대의 치료기에 4~10g(라듐 1g의 방사능 세기는 1퀴리, 4~10 퀴리의 선량)의 라듐 소서를 썼다.

몇몇의 내과 의사들 그리고 광기로부터 호흡 곤란에 이르는 모든 증상들을 치료한다는 야바위들은 라듐의 의료적 그리고 화장품용의 이용 부문을 촉진시키는 데 한 몫을 했다.

그들의 성과들은 미심쩍은 이득 이면서도 실제로는 잠재적인 장애였다. 한 치료기는 간단하게 라돈이 포함된 공기를 채운 흡입기인 것도 있었고, 그리고 어떤 것들은 라듐과 라돈이 녹은 물의 주사 또는 관장용으로 쓰였다.

필자와 공동으로 쓴 책(19, 76 쪽)은 미국에서 실제로 일어났던 ‘최대 라듐 스캔들’에 관한 얘기를 소개한다.

라듐은 천연에 있는 원소라는 생각 때문에 지금의 방사능 핵종이란 개념과는 달리 초기에는 식품의약품국이 라듐을 섞은 과자류, 수많은 의약품들(바르는 연고들도 포함), 드링크제 등을 별로 거부감 없이 상품으로 허가했다. 그 피해로부터 “‘법으로 방사선을 규제해야 된다.’는 착상 그리고 「의약품도 안전이 입증되기 전까지는 위험하다.는 개념들이 라돈 스캔들들로부터 나

왔다.”고 지적한다.

방사선의 장해

미확인된 라듐의 의료 손해 보상 청구들은 마침내 1926년 미국 농무성 화학국이 발표한 정부의 행위 그리고 경고들을 언론은 다음과 같이 전했다.

“라듐이 포함된 것으로 분석된 생산품들은 머리카락 양모제류, 좌약류, 목욕용 화장품류, 세포조직 크림류, 양모제 알약류, 얼굴 파우더류, 연고류, 입가심류, 진통제류, 진정제류, 안약 용액류, 치료용 패드(pad)류 그리고 기타 고체, 세미 고체 그리고 액체로 된 모양새들의 제조물들은 방사능의 손해 보상 청구에 포함된다. 당국의 발표로는 치료용 약품들임을 고려한다면, 그들을 보상해야 할 충분한 라듐 양이 들어있는 방사능 생산품들은 단지 5%이고, 그들 중의 다수는 크게 문제되지 않는다. 높이 과장된 치료상의 클레임들은 분명히 구매자가 라듐을 거의 함유하지 않은 생산품들의 대다수에 대하여 구매자가 오도하려고 기획됐다. 예컨대, 짧은 유리봉의 한쪽 끝에 황색 물질을 칠해서 봉입한 유리구로 실험한 예를 보자. 그 구는 침상에 가까이 드리우게 하여 ‘모든 상상들 그리고 일에 두려움 그리고 괴로움들을 분산시켜, 흡족, 만족 그리고 곧 평화롭

고 평온을 되찾는 몸체의 평안’ 들을 되찾게 하였다.

‘실제의 라듐 방사선은 건강보다는 유력한 유해 물질이므로 당연히 주의를 많이 기울려 관리돼야 하기 때문에, 방사선이 높은 생산품들 그리고 수용액 또는 높은 방사성 물질들을 정제시키는 기구들의 차별화 또는 적절한 감독 없이 일반 대중에게 유통시킴은 그의 타당성이 의심적이다.’”

방사성 동위원소의 이용

사람 치료에 쓰일 양 외에도 라듐의 조달업자들은 그들이 공장을 널릴 생각으로 라듐이 든 매개물을 팔려고 애를 썼다. 매개물은 라듐 처리 끝부분에서 나온 찌꺼기였다. 어떤 경우, 보통 매개물에 섞였다. 농무성의 토양국은 부인했지만, 미국 그리고 프랑스에서는 비료로도 쓰였다.

1903년 초만 해도 소량의 라듐이 섞인 황화아연 결정 혼합물은 빛을 내는 것을 볼 수 있었다. 황화아연 그램마다 25~300 마이크로그램을 포함한 발광 혼합물들이 조제돼 시계의 표시판 상품 항공기 기구들의 슬리퍼 밑바닥, 회전 휠들 그리고 낚시 미끼 등의 상품들에 쓰였다. 다이얼 도료 공들의 입술로 붓끝을 빨던 비운의 희생자들도 잘 알려졌다.

다른 산업적 응용들은 공기를 이



온화시켜 정전기를 흘뜨리는 라듐 소서의 기능을 이용했다. 1920년대 말에 라듐 반대 억압자가 러시아 공장에서 고용되어 고무 코팅 섬유가 제조돼 스파크의 장해 그리고 가연성 증기들의 발화를 교습시켰다. 1930년대 중반까지 라듐의 적은 양이 TV 상품, 지금은 정전기 섬유인 '정전기 제거기 (static cling)' 이란 상품들이 미국에서 제한적으로 생산됐다.

라듐의 발견 후 10년도 못되어 라듐 연구소들과 공장들에서 많은 장해들이 나타나기 시작했다. 라듐 염이 든 치료기를 차폐시키지 않았던 용기들로 받은 피부 상처들은 이미 헨리 베크렐 그리고 퀴리 등이 아주 이른 초기부터 지적했었다.

라듐의 주사와 라돈 그리고 그것의 방사능 부산물들의 흡입 효과는 더욱 민감해졌고, 1920년대까지는 나타나지 않았으나 라듐 다이얼 페인트 공원들의 턱 괴사병 그리고 우라늄을 캐던 광부들의 폐암률이 높게 나타나 라듐의 장해 연구를 부추겼다. 라듐 염의 조제에서 초기의 많은 작업자들은 마리 퀴리를 포함하여 아마도 오랜 방사능 피폭으로 사망했을 것이다.

1930년대 접어들면서 라듐 산업의 작업 조건들은 많이 개선됐다. 농집된 라듐 조제실의 차폐는 좋아졌고, 라듐 정제 연구실들의 환기는 개선됐다.

작업자들은 정기적으로 빈혈증 그리고 라듐으로 상처를 입은 증상으로 걸러냈다. 후에는 배타낸 호흡에서 라돈을 측정하는 시험 수단을 써서 걸러냈다. Great Bear Lake 광산에서 터널들은 광부들의 라돈 장해를 줄이기 위하여 특별히 설계되기도 했다.

라듐 그리고 방사성 쓰레기들

제2차 세계 대전 기간 중에는 라듐보다는 우라늄의 추출이 더 화급했다. 우라늄의 핵분열 반응이 군사적 목적에 쓰일 것이란 기대 속에 우라늄 산업이 새롭게 부상했다. 라듐 산업 개척자들의 대부분은 우라늄의 핵분열 그리고 그의 응용들을 주목했다.

전쟁 후에도 우라늄의 핵분열이 앞으로 원자력 산업을 주도할 것이란 전망을 하면서도 한편으로는, 1954년까지 캐나다에서 그리고 1960년까지 벨기에에서 라듐의 생산은 계속 이어졌다.

전에 추출된 라듐의 정제와 억제는 계속되었고, 라듐 소서들은 그대로 암 치료기에 장착되었다. 특히 피부, 입, 코의 점막 그리고 생식기 통로의 종양 치료에는 라듐 공급이 말렸다.

하지만, 라듐 그리고 라돈 부산물의 우세했던 시장의 큰 몫은 입자 가속기와 원자로에서 방사성 핵종

들의 생산 쪽으로 넘어갔다.

코발트-60, 세슘-137, 탄탈-182, 이리듐-192 그리고 금-198들과 같은 방사성 핵종들은 지금도 방사선 치료용 선원으로 쓰이며, 트리튬(수소 방사성 동위원소) 그리고 프로메튬-147은 발광체의 장치에서 라듐을 압도시켰다.

20세기 초의 라듐 산업을 주도했던 개척자적인 노력들은 지금의 우라늄 채광과 선광 산업 그리고 방사선 치료 분야들 그리고 산업적 방사선 투과 시험들의 뿌리이기도 하다. 오늘날 핵 활동의 지침인 방사선 건강의 많은 표준들은 라듐 산업 그리고 의학에서 일한 그들의 회고 의학 연구로 거슬러 올라간다.

지금은 라듐 저장량이 남아돈다. 긴 반감기의 핵종이고 그리고 의학용 또는 산업 목적으로 더 이상 추출될 필요가 없어졌기 때문이다. 오히려 지금은 라듐을 하나의 방사성 쓰레기로 분류하여 한 데 모아 긴 기간 동안 적정한 매장용 형태로 고정시킬 방도를 찾고 있다. 라듐은 한 세기도 채 안돼 귀한 보물에서 쓰레기로 진화되고 말았다.

라듐 산업이 남긴 교훈

모든 산업이 그랬듯이, 호황이면 반드시 몰락도 뒤를 잇는다. 에너지 산업의 구조에서 이런 부침은 반드시 되풀이 된다. 우리는 태백 지구

의 무연탄 생산 붐이 살아져버린 이후를 기억한다. 1960년대 초에 우리가 안고 있던 에너지 문제는 모든 국가 사업들 중에서도 최우선 해결 과제였다. 우리의 생활이 윤택해지고 남미 국가들이 부러워하는 푸른 산림을 가꿀 수 있었던 배경에는 분명히 태백 지구의 무연탄도 한 몫을 했다.

정부의 주도로 추진하던 기간산업에 사람들이 '태백 드림'의 꿈을 품고 거기에 몰려들었다. 하지만 약 40년이 지난 지금은 어떤가? 에너지의 주역이 바뀌면서 무연탄의 퇴조는 지역 경제도 뒤따라 몰락해버렸다. 우리의 정서에도 부정적인 카지노 사업을 정부가 어쩔 도리 없이 거기에 허락해야 할 난감한 처지가 되고 만 것도 우리는 이해함이 당연하다.

20세기의 1/3 기간 동안 세계적인 붐을 타던 라듐 산업도 예외일 순 없었다. 한 산업에서 성장과 몰락은 한 사이클로 묶임으로 모든 산업들이 안고 있는 필연의 순환 과정이며 피해갈 수 없다. 라듐에서 우연히 장애들이 알려지긴 했어도, 그런 장애들이 알려지면 질수록 그 원소의 진귀한 가치는 차츰 시들어 갔다. 핵분열 원자로에서 라듐을 대체시킬 더 값싸고 더 효율적인 방사성 물질들을 만들어 낼 수 있었던 것도 라듐 산업의 몰락을 더욱 부추겼다.

원자력 산업에서 기본적으로 따

라다니는 두 가지 안전성 그리고 방사성 쓰레기- 부정적인 문제들도 라듐 산업에서 이미 경험했다. 오늘의 라듐은 더 이상 값진 일용품이 아니다. 의학용이든 산업용이든 라듐의 이용은 라듐 산업이 한창일 때의 우라늄 처지가 되고 만 것이다. 라듐 이용은 지극히 제한적이고 급기야는 그것을 처분할 묘안을 찾는 일로 골치가 아프다.

오늘도 우리 언론들은 부안 주민들의 원전 센터 건립을 반대하는 격렬한 시위 현장을 전한다. 원자력이 가져다 준 부정적인 한 모습이고 필자의 가슴이 예리한 침으로 찢리는 것처럼 느껴오는 아픔이다. 원자력 산업도 언젠가는 라듐 산업처럼 무너져 내릴 것이다.

오늘 한 신문이 다룬 기사는 충격적이다(47). 노 대통령은 부안 사태에 대한 정부의 실수를 인정했다고 전한다. 정부의 에너지 정책 실무 책임자가 속한 부서는 산업자원부다. 당연히 그 장관이 발표할 것을 대통령이 그토록 그 사업에 깊숙이 관여하고 사과해야 할 까닭이 없다. 장관을 보좌하는 정책 실무 책임자의 그림자는 어디에 숨었는가?

한 나라의 에너지 정책은 먼 훗날을 예지한 바탕에서 기획되고 그리고 돌다리도 두드리는 심정으로 추진해야 한다. 과연 우리의 참여 정부의 에너지 정책 책임자는 이런 철학으로 정책을 다루고 있는지도 의

심스럽다. 언젠가는 원자력 산업도 뒤안길로 사라질 것이다. 그 때를 대비한 대책이 우리의 에너지 정책에 반영되고 있는가를 라듐 산업에 묻고 있다. 성장과 몰락은 실과 바늘처럼 한 사이클이다. 필연이고 숙명이다. 땀질하는 정책으로서는 감당하지 못한다.

“앞을 내다보지 못하는 자는 목이 말라야 우물을 파기 시작한다.” (41). ☼

〈참고 자료〉

44. E. R. Landa, “The First Nuclear Industry”, Scientific Americans, November 1982, pp. 154-163

45. 홍장희, “방사능 테러는 막을 수 있다”, 원자력 산업, 2003(11), 40-47, 한국원자력산업회의

46. 주승환, “태운 원전 연료 처분에 따른 긴 수명 핵종들의 군-분리 필요성”, 2003년도 춘계 학술발표회 논문집, 대한방사성방호학회

47. 최 훈, “정부가 오판한 것 같다: 노, 부안 선정 착오 첫 인정”, 중앙일보, 2003. 11. 27, 3쪽, 중앙일보사

* 본고는 지난해 12월호에 게재될 예정이었으나 본지의 사정으로 이번 호에 게재되는 바 내용상 시차가 있습니다. <편집자>