

## 우라늄 자원의 부존 및 개발현황

이길재

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

우라늄은 화석연료사용으로 인한 환경오염이 갈수록 심한 현시점에서 가장 비중이 큰 청정 에너지자원이다. 우리나라는 2006년 12월 20기의 원자로(총 설비용량 17,716 MWe)를 보유하고 있으며, 국내 전체 발전량의 39%를 차지한다(OECD/NEA & IAEA, 2008). 현재 네 개의 한국표준형 핵발전소(OPR 1000)을 건설 중에 있다. 신고리 1호와 2호는 각각 2010년과 2011년에 완공예정이다. 신월성 1호와 2호 역시 각각 2012년과 2013년 완공예정이다, 신고리 3호와 4호(ARP 1400)도 각각 2012년과 2013년에 발전을 시작한다. 또한 신울진 1호와 2호 (APR 1400)은 2013년과 2014년에 가동을 시작할 예정이다(IAEA, 2007). 핵발전소의 발전 가용량이 늘어나는 것은 우라늄 원료의 수요 증가를 의미한다. 하지만 국내는 우라늄의 생산이 전무하다.

국내에 약 40,000tU의 우라늄 매장량이 부존된 것으로 확인되었으나, 원광석의 품위( $U_3O_8$  0.039%)가 낮고 넓은 지역에 분포하고 있어 경제적 채산 타당성은 없다. 하지만 최근 우라늄 가격의 상승으로 광물자원공사에 의해 충남 금산 지역을 대상으로 재탐사가 수행 중에 있다. 현재는 전량 수입에 의존한다.

### 우라늄 광상 유형

총 6개국의 전문가들과 국제원자력기구(IAEA)의 협력하에 OECD / NEA-IAEA Red Book (OECD/NEA & IAEA, 2008)내에 광상분류를 하였다. 책에서 전세계 총 582개의 광상들의 정보를 수록하였다. 위치, 현상태(가행중, 휴광, 채진 등), 자원량, 평균품위, 지질학적연대, 모암, 구조적 규제 등의 정보를 수록하였다. 우라늄광상의 형태는 지질배치에 의해 14가지로 분류하여 국제적으로 통용되고 있다. 나열은 경제적 중요도에 의한 순서이다(표 1). 전 세계 우라늄광상 목록(북한제외)에 등재된 총 692개 광상의 유형별 분포 비는 표 1과 같다(OECD/NEA & IAEA, 2000). 이는 단순히 광상의 수적 비율로써 매장량과는 별개이다. 예를 들면 부정합형 광상의 수적 분포 비는 3.6%에 불과하나, 가채매장량(WOCA의 우라늄자원)은 33%나 된다. 자원량이 많은 순으로 부정합형, 사암형, 석영-역암형, 맥상형 등이 있다.

#### 부정합형

부정합형 관련 광상은 괴상의 포드상(pods), 맥상, 우라나이트가 부정합면과 공간적으로 관

표 1. 우리나라광상의 형태별 분류

순위	분 류	광상수	분포비 (%)	자원량 (%)	대표적 광상 또는 광산
1	부정합형 (Unconformity type)	25	3.6	33	자비루카(호주), 키레이크(캐나다)
2	사암형 (Sandstone)	269	38.9	18	하이랜드(와이오밍), 칸주간(카자흐)
3	석영-역암형 (Quartz-pebble Conglomerate)	22	3.2	13	발리프스(남아공), 스텐레이크(캐나다)
4	맥상형 (Veins)	138	24.5	9	아르공스코예(러시아), 마그낙(프랑스)
5	각력복합체형 (Breccia complex)	1	0.2	-	올림픽맥(호주)
6	관입형 (Intrusive)	15	2.2	-	로싱(나미비아), 마다와스트카(캐나다)
7	인회토 형 (Phosphorite)	10	1.5	-	우란(모로코), 센트럴폴로리다(폴로리다)
8	함몰각력파이프형 (Collapse breccia pipe)	9	1.5	-	학개논(아리조나), 아리조나 I(아리조나)
9	화산성형 (Volcanic)	60	8.7	-	도로노드(몽골), 장산(중국, 강서성)
10	지표형 (Surficial)	20	2.9	4	에리리(호주), 랭거해인리히(나미비아)
11	교대형 (Metasomatite)	26	3.8	-	메리카스린(호주), 에스핀하라스(브라질)
12	갈탄형 (Lignite)	40	5.8	-	유쥬노부라틴스코예(러시아)
13	흑색셰일형 (Black shale)	9	1.3	-	옥천대(한국), 알름세일(스웨덴)
14	기타 (Others)	13	1.9	-	스테프노예(러시아), 멜로보예(카자흐)
계		692	100		

련되어 산점상으로 나타난다. 주 부정합면을 경계로 고원생대 변성질 기저암과, 그 위의 고원생대에서 중원생대의 규질 쇄설성 분지로 나뉜다. 기저암은 라테라이트 풍화(lateritic weathering)의 영향으로 깊이에 따라 변성정도가 다르게 나타난다. 기저암과 부정합면 생성이후 형성된 암석들은 광화대와 밀접하게 관련되어 강한 변질작용을 받았다. 부정합면 위를 덮고 있는 분지 퇴적물들은 보통 관상으로, 변질 받지 않은 하상 붉은색 층으로 나타난다. 우리나라는 보통 핏치블랜드)로 산출하며, 단금속(monometallic) 광상과 다금속(polymetallic)

광상에서 모두 산출한다. 단금속광상과 다금속광상은 Ni, Co, As, Pb의 함량이 다양하며, 미량으로 Au, Pt, Cu등도 수반한다. 단금속광상들은 기저부 변성암에 배태되고, 다금속광상은 일반적으로 사암과 고-풍화(paleo-weathered) 받은 풍화면의 기저부에 배태된다.

층서와 구조적 규제에 따라 두 가지의 광상 형이 있다.

- 열극 규제형(Fracture controlled) : 대부분 기저암에 배태된다. 대표적 광상으로는 캐나다의 McArthur River, Rabbit Lake, Eagle

1) 미정질 우라나이트를 가리킨다. UO<sub>2</sub>, 구리, 철, 납, 코발트, 니켈 비스무트의 황화물과 공생하는 비정질 광물이다. 포도상 콜로이드 구조를 보이며 우리나라의 주요 광석 광물이다. 큰 규모의 광상은 퇴적암 중에 침전 광상을 형성하고, 사암이나 역암의 교질물로서 황철석과 함께 산출된다.

Point, McClean Lake, Dominique-Peter와 호주의 Jabiluka, Ranger, Nabarlek, Koongarra가 있다. 이러한 광상들은 전형적으로 고각에서 중간정도의 경사를 갖고 부정합면 아래의 기저암내에 400m 이상 연장되는 전단대, 열극, 각력을 따라 형성된다. 대부분의 구조는 역단층이며, McArthur River, Koonarra, Ranger가 여기에 속한다. 광화작용은 광염상과 괴상의 우라나이트나 핏치블렌드로 열극내 각력 기질내에 발달한다.

- 점토 경계형(clay bounded) : 괴상의 광체가 부정합면의 바로 위를 덮고 있는 사암이나 아래를 따라 발달한다. 대표적 광상으로는 캐나다의 Cigar Lake, Key Lake, Collins Bay A, B and D zones, Midwest, McClean, Cluff Lake D가 있다. 부정합면 하부의 기저 사암을 따라 선상, 파이프, 시가(cigar)형의 광체를 형성한다. 전형적인 특징은 높은 품위를 보이는 중심부(1-15% U)와 주변부가 낮은 품위를 보이는 것이다. 광화작용은 부정합면을 덮는 사암내에 발달하는 쇠설성 각력암과 열극을 따라 연장되기도 한다. 대부분의 광체들은 뿌리모양으로 부정합면 아래 기저부에 발달한다.

## 사암형

사암형 우라늄광상들은 탄산염±황철석을 포함하는 하성퇴적물(해성퇴적물은 드뭅), 잡사암, 중립-조립질의 사암(투수성이 적은 층이 인접하거나 호층을 이루는)에서 배태된다. 주된 우라늄광물은 핏치블렌드, 코피나이트(coffinite)이며 바나데이트(vanadates)와 인산염광물이 소량 포함된다. 우라늄은 사암내에 포함된 다양한 환원재(탄물질, 황화물, 탄화수소, 녹니석과 같은 철-마그네슘 광물)에 의해 야기된 환원 환경 하에서 침전한다. 큰 사암형 광상은 고생대-제3기에 형성된다. 작은 규모의 탄산염광물과 관

련된 선캄브리아기의 광상도 있다.

사암형 우라늄 광상은 다음의 네 가지로 구분될 수 있다.

- Roll-front 광상 : 우라늄이 기질을 형성하는 대(帶)이다. 이 대는 투수성이 덜 좋은 상·하부 사이에 발달하며, 사암층리를 끊고 수직적으로 연장된다. 단면에서 보면, 그믐달 모양이고 아래 방향으로 볼록한 형태이다. 우라늄 자원량은 수백-수천톤, 평균품위 0.05~0.25%이다. 대표적인 광상으로는 카자흐스탄의 Moynkum, Inkay, Mynkuduk, 미국의 Crow Butte, Smith Ranch, 우즈베키스탄의 Bukinay, Sugrally, Uchkuduk 이 있다.
- Tectonic/lithologic deposits : 주변의 층서를 끊고 발달하는 광상이다. 쇠설성 퇴적물에 근접하여 혀모양으로 투수성 단층대를 따라 배태된다. 또한 혀모양으로 단층대에서 주변 모암까지 연장하여 발달한다. 두껍고, 경사가 급한 광체는 스택(stack)으로 일컬어지며, 우라늄의 단층과 투수층으로의 재분산의 결과로 형성된다. 이러한 과정은 Grant 우라늄 벨트에서 발견되어 진다. 이러한 광상들은 최대 길이 100m, 폭 40m, 품위 0.15-0.5%U, 5,100tU이다.
- Basal channel deposits: 광상을 배태하는 고(古)배수 시스템은 수백 미터 폭의 하도로 구성되며, 두꺼운 투수성 충적층과 하성퇴적물로 채워져 있다. 우라늄 광화작용은 평면상으로 길쭉한 렌즈상이나, 리본상인 광체내 식물 쇠설물과 관련된다. 개개의 광상은 수백-20,000tU, 0.01-0.10%U의 품위를 갖는다. 전형적인 광상은 러시아의 Dalmatovskoye deposit, Transural region and Khiagdinskoye, Vitim district와 호주 남부의 Beverley가 있다.
- Tabular deposits : 우라늄이 기질부에 스며들어 발달하고, 광체의 형태는 불규칙한 렌즈상 괴상으로 환원환경의 퇴적암내에 발달

한다. 광화대는 대체적으로 퇴적방향과 평행하게 발달한다. 개개의 광상은 수백톤, 최대 150,000톤의 우라늄을 포함한다. 평균품위 0.05%~0.5%, 최대 1%이다. 대표적인 광상은 호주의 Westmoreland, 중국의 Nuhetting, 체코의 Hamr-Stráz, 니제르의 Akouta, 미국의 Arlit, Imouraren과 Colorado Plateau 가 있다.

### 적철석 각력복합형 광상

적철석이 풍부한 각력에 배태되며 구리, 금, 은, 희토류원소와 공생하며 우라늄이 발달한다. 대표적인 광상은 남호주의 올림픽덤 광상(2,570-1,000Ma)이고 이러한 유형으로 유력한 광상으로는 호주의 Prominent Hill, Ernest Henry(-1,480Ma), Starra(-1,500Ma), Osborne(4,540Ma), 남미의 Candelaria(-1,100Ma), Salobo(2,570-1,880Ma?), Sossego, 캐나다의 Michelin and Sue-Dianne가 있다. 몇몇의 광상은 미량-극미량의 우라늄을 함유하지만, 올림픽덤이 유일하게 큰 규모의 원생대 광상으로 경제적 개발이 가능한 우라늄광상이다. 이들은 리프트(rift), 섭입대, 분지함몰대 등 다양한 판구조에서 발견된다.

올림픽덤 동-우라늄-금 광상은 세계에서 가장 많은 자원량과 낮은 채산비용을 갖는다. 최초 자원량은 1,552Mt, 평균품위 0.34kg/t U(0.034% U)이었다. 탐사 시추를 통해 남동쪽으로의 주광체의 확장을 발견하여 자원량이 증가하였다. 2006년 예상광량은 총 4,430Mt(1.1% Cu, 0.4kg/t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, 0.5g/t Au, 2.2g/t Ag), 우라늄의 자원량은 1,503Mt이다. 주로 우라늄, 구리, 금, 은을 대상으로 생산한다. 올림픽덤은 또한 상당량의 희토류원소(La, Ce)와 26%의 철 함량을 보인다.

올림픽덤의 2006년 12월까지 누적 생산량은

34,875tU이다. BHP Billiton이 광산의 소유주이며, 갱내채굴을 통해 모든 광종이 생산되어진다. 연간 우라늄 생산 가능량은 3,930tU이다. 노천채굴을 고려중에 있으며, 2013년 까지 노천채굴과 갱내채굴을 병행하여 생산 가능량을 12,720tU으로 확장할 계획에 있다.

### 석영-역암형 광상

조기 원생대 크라톤내 분지(>2.3-2.4Ga)에 제한적으로 나타난다. 이러한 분지는 시생대의 화강암을 포함하는 기저암이 위치하는 아래쪽으로 휘어져 발달한다. 모암은 전형적으로 트러프에 발달하는 사층리가 발달하는 층과 황철석 기질이 규암과 규질점토암과 교호하는 비순환 석영-역암층으로 구성된다. 이러한 암석군은 하성내지 삼각주 망류하천계의 바닥에서 형성된다.

표사 우라늄광상은 국부적으로 금, 희토류± 다른 쇄설성 산화금속 및 황화광물과 관련된다. 다양한 광석광물 조합은 지질학적 근원물질의 차에 기인한다. 우라늄의 하성 퇴적환경에서의 이동과 집적은 환원환경과 관련된다. 퇴적이후의 재분산과 속성작용에 의한 광물 결정화는 자생광물(authigenic ore)과 브라너라이트(brannerite), 금홍석, 아나타세(anatase), 코피나이트, 황철석과 같은 광물로 구성된 표사광상을 형성한다. 경제적으로 개발 가능하다고 지금까지 알려진 광상은 다금속형(Au+U, 남아프리카의 Witwatersrand Basin)과 단금속형(캐나다의 Blind River/Elliot Lake 지역)이 있다.

### 맥상형 광상 (화강암 관련 광상)

화강암관련 광상들은 화강암과 관련되는 광상을 비롯하여 구분되지 않는 다른 광상들 또한 포함된다. 화강암 관련 광상으로 명칭하는

것은 특정 지질학적 환경과 암석을 포함하여 연상하는데 도움을 주기위해 도입되었다. 우라늄을 포함하는 맥들은 다양한 암석과 지질환경에서 형성된다. 예를 들어 화강암과 같은 산성 관입암, 화산암, 변성퇴적암, 퇴적암에 발달한다. 그러므로 맥상광상은 그러한 광상들의 지질학적 연관성을 유추하는데 어려움이 있어 특정 모암인 화강암과 관련된 광상으로 불리는 것이 합당하다. 화강암관련 광상은 화강암류 심성암과 주변모암의 공간적 관계에 따라, 다음의 두 가지 유형으로 다시 분류할 수 있다. 1) 변성퇴적암류내에 배태되는 Endo 화강암 광상(단금속 Bohemian과 다금속 Erzgebirge형), 2) 변성암과의 접촉부(Iberian 형)이 있다.

화강암관련 광상의 산출은 1) 화강암내부, 변성암과 접촉부, 변성퇴적암 접촉부에 맥상, 망상세맥상이나, 2) 광염상이나 점이적인 맥상으로 epi-섬장암(episyenite; 화강암이 dequartzified, 즉 SiO<sub>2</sub>성분이 감소하는 작용, 운모화, 정동질 변질작용으로 만들어짐)체내에 발달 한다. 유럽의 Hercynian 조산대에서 이러한 유형의 광상은 후기 마그마티즘이나 자생변성작용 과정에 의해 형성된 과알루미나형 우백질화강암의 큰 저반과 관련되어 나타난다. 우라늄 광화작용은 화강암 관입체내 혹은 근접한 부분에서 일어난다.

알려진 화강암관련광상의 생성시기는 원생대-제3기이다. 우라늄 광물은 보통 맥석과 변질 광물과 수반되는 핏치블랜드, 코피나이트이다. 간단한 광물조합을 보이는 광상은 핏치블랜드와 다양한 양의 황철석/백철석, 석영, 적철석, 탄산염암과 미량의 기초금속 광물(base metal minerals)등과 공생한다. 복잡한 광물조합을 갖는 광상은 중요한 기본 기초금속 광물 광화시기를 갖는다(주로 Co-Ni-As 광화시기). 대부분 핏치블랜드는 조기에 생성된다. 화강암 관련

광상의 특징인 맥과 망상맥계의 규모, 배열 및 복잡성은 매우 다양하다.

### 관입형 광상

관입암이나 아나텍틱(anatectic) 암석내에 우라늄 광상들은 초생광물인 우라나이트(uraninite), 우라노토리아나이트(uranothorianite) ± 우라노토라이트(uranothorite)가 광염상으로 발달한다. 이러한 광상들은 대부분 낮은 품위(20-500ppm)를 갖지만, 상당량의 자원량(100 ktU 이상)을 갖기도 한다. 모암의 종류에 따라 다섯 가지 유형으로 나눌 수 있다.

- 알라스카이트형 : 광염상 우라늄은 중립 내지 매우 조립의 알라스카이트 암체(우백질, 석영과 정장석이 풍부한 화강암)내에 발달한다. 알라스카이트 암체는 주변을 둘러싼 습곡과 고변성작용, 미그마타이트화 된 퇴적암 층을 끊거나(discordant), 평행하게(concordant) 발달한다. 알라스카이트 암체들은 작은 렌즈상, 판상 암맥, 큰 암주, 수백 미터의 돛형태로 발달한다. 우라늄 광화작용과 관련한 변질작용은 없다.
- 화강암, 몬조나이트형 : 매우 낮은 품위의 우라늄 광염이 화강암에서 석영-몬조나이트까지 다양하게 분화된 암석내에서 발달한다. 매우 낮은 우라늄 함량 때문에 오직 구리 퇴적침출(heap leaching)에 의한 부산물로 회수된다. 대표적인 광상은 미국 유타주의 Bingham Canyon이 있다.
- 과알칼리형 섬장암형 : 낮은 품위의 우라늄 광염이 과알칼리형 섬장암 돛이나 암주내에 발달한다. 대표적인 광상으로는 그린랜드의 Kvanefjeld가 있다.
- 카보나타이트형 : 광염상 우라노토리아나이트는 구리함유 카보나타이트는 복합체내에 산출한다. 2002년까지 우라늄은 구리생산의

부산물로 회수되었다. 대표적인 광상으로는 남아프리카의 Phalaborwa가 있다.

- 페그마타이트형 : 우라니나이트와 우라늄(U)-토륨(Th) 광물들은 화강암질 내지 섭장암질 페그마타이트 암맥 내에 발달한다. 페그마타이트는 퇴적암, 화성암, 각섬암상 변성암 모암내에 발달한다. 변형과 교대변성작용은 변질작용에 기인하여 쉽게 형성된다. 적철석은 변질작용의 특징적인 산물이다. 최대 평균 0.08%U이지만 자원량은 대부분 적다(수tU-수백tU). 대표적인 광상으로는 캐나다 온타리오의 Bancroft 지역이 있다.

### 칼데라 관련 화산형 광상

화산성 칼데라내 혹은 인접하여 발달한다. 화산성 칼데라는 염기성 내지 산성의 화산암과 협재된 쇄설성 퇴적암들로 구성된다. 광화작용은 대체적으로 구조와 관련되어 형성된다. 관입 맥상이나 화산성 관입암, 다이아트림(diatreme), 화산류, 층상 화쇄류 내에 맥상이나 망상세맥으로 나타난다. 작은규모의 광상은 층상의 광화대를 광염상으로 존재하거나, 투수층, 화산류 각력, 응회암, 화쇄류와 쇄설퇴적물의 교호층 내에 기질부를 형성한다. 우라늄 광화작용은 인접하는 열극이 발달하는 화강암과 변성암과 같은 기저암까지 연장된다. 주 우라늄광물은 피치블랜드와 코피나이트이고 몰리브덴-황화광물과 황철석과 수반하여 산출한다. 기타 수반 금속 원소는 극미량의 As, Bi, Hg, Li, Pb, Sb, Sn, W이다. 수반 맥석광물은 형석, 석영, 탄산염암, 중정석, 자로사이트(jarosite)이다.

주요광상으로는 러시아의 Streltsovsk district와 몽골의 Dornot complex가 있다.

### 교대형 광상

알카리(Na, K) 교대 변성암류와 관련되는 광

상형이다. 교대 변성암류는 오랜 기간 지속되었던 고대 단층에 의해 형성된 망상세맥이 형성되어 있는 고대 선상지에서 발달한다. Na-교대 변성암류는 주로 알바이트로 구성되고, 미량의 탄산염암과 알칼리 각섬암류와 휘석류를 포함한다. K-교대 변성암류는 주로 정장석을 포함하며, 미량의 엘코나이트(elkonites)와 같은 탄산염암으로 구성된다. 가장 큰 Na-교대 변성암류내에 형성되는 우라늄 광상은 우크라이나의 Kirovograd 광상구이며, K-교대 변성암류내에 형성되는 우라늄광상은 러시아의 Elkon Horst가 대표적이다.

### 지표형 광상

지표형(surficial)은 연대가 젊고(제3기-현재), 퇴적물이나 토양내에 집적되는 광상으로 넓게 정의된다. 이러한 광상은 방해석, 석고, 돌로마이트, 함철산화물, 암염(halite)과 같은 이차 교결 광물들을 포함한다. 칼크레트(calcrete; Ca-Mg 탄산염암)내의 우라늄광상은 지표형 중 가장 큰 규모이다. 칼크레트 암체들은 제3기 모래, 점토와 교호한다. 칼크레트 광상은 우라늄이 다량 함유되어 있는 화강암이 반건조에서 건조한 기후에서 깊이 풍화 받은 곳에서 발달한다. 서호주에서 지표형 칼크리트 관련 우라늄광상은 제3기 하천을 따라 계곡을 채우며 발달(예: Yeelirrie)하거나 플라야(playa) 호수 퇴적물(예: Lake Maitland)에 형성된다. 이러한 광상들은 원생대 화강암과 일간지괴(Yilgarn Craton)의 북쪽에 발달하는 그린스톤 기저암 위에 발달한다. 주된 우라늄광물은 카노타이트(carnotite;  $K_2(UO_2)_2V_2O_8$ )이다. 칼크레트 우라늄광상은 또한 나미비아의 중앙 나미브사막에도 존재한다.

### 함몰각력파이프형 광상

수직적으로 굴뚝형태를 갖으며 아래쪽으로

떨어진 쇠설물로 채워져 있다. 우라늄 광화작용은 파이프내에 배태된다. 상승하는 지하수의 유입에 기인한 우라늄 광화작용은 온도±압력의 변화와 관련한 화학적 환경에 의해 침전하여 형성한다. 각력 쇠설물과 주변 모암과 각력이 채워져 있는 파이프와의 경계부 고리 모양의 링에 형성된 균열 사이에서 형성된다. 대표적인 광상으로는 미국 아리조나주 북부의 Hack Canyon deposit complex, Orphan 광상이 있다.

### 인회토형 광상

퇴적물과 동시에 생성(syn-sedimentary), 층상, 광염상의 우라늄이 해성 인산이 풍부한 암석이나 대륙붕환경에서 생성된 인회토광상내에 발달한다. 우라늄 광화작용은 은미정질 F-탄산염질 인회석 내의 Ca성분을 치환하여 형성된다. 인회토 광상은 큰 규모의 자원량을 갖지만 낮은 품위(25-150ppm)를 보인다. 인산염암은 세계 화학비료 산업에서 중요한 천연재료이다. 그러므로 우라늄은 인산의 생산에서 부수적으로 회수될 수 밖에 없다. 대표적인 광상으로 미국의 New Wales Florida, 모로코의 Gantour, 요르단의 Al-Abiad가 있다.

### 흑색 셰일형 광상

우라늄을 함유한 흑색 셰일형 광상은 동시성(syngenetic), 유기물이나 유기물이 풍부하고 황철석이 풍부한 해성 셰일 내의 점토입자에 광염상으로 흡착하여 발달한다. 유기물은 해성 플랑크톤질 조류와 육상 식물 잔해에서 기인한 부니-역청질이나 휴믹질, 탄질이다. 석회석, 사암/실트스톤, 셰일층으로 이루어진다. 주 우라늄 광물은 존재하지 않고, 미량의 금속들(Cu, Cr, Mo, Mn, Re, V, P)을 수반한다.

## 생산추이

2007년도 각국의 광산에서 생산한 우라늄은 U 41,282톤(World Nuclear Association, 2009)이며, 캐나다(세계 생산량의 20.5%), 카자흐스탄(19.4%), 호주(19.2%) 순으로, 이 세 나라의 생산량은 약 60%를 차지한다(표 2). 2009년 예상 생산량은 8개의 새로운 광산이 생산에 들어감에 따라 U 49,375톤(World Nuclear Association, 2009h)으로 증가될 것이다.

채광방법 별로는 1990년도에는 총 생산량의 55%가 갭내에서 이루어 졌지만 1999년에는 33%이하로 현저하게 감소되었다. 2000년부터는 캐나다의 새 광산 개발이 활발해지고 올림픽담의 생산이 거의 절반으로 줄어들어 원지침출법(ISL: In Situ Leaching) 채광비율이 꾸준히 증가하고 있다(표 3). 1990년에는 우라늄 생산회사도 인수합병이나 폐쇄 등에 의해 통합정리 되었고, 2008년에는 세계 우라늄광산 생산 상위 10개회사가 87%의 생산기록을 세웠다(표 3).

우라늄의 생산추이는 주 생산국인 캐나다, 호주, 그리고 구 소련 4개국 주도로 증가하고 있으며, 현재 최선두 주자인 캐나다는 8개의 새로운 광산이 생산에 돌입했다. 서방 10개 우라늄 광산의 현황은 표 4와 같다.

광산회사들간의 인수합병이나 폐쇄로 인해 2001년도에 비해 2008년에 10대 광산이 많은 변화가 있었다. 코제마(Cogema)사의 클러레이크(Cluff Lake) 광산과 앵글로 아메리칸(Anglo American)사의 앵글로 골드(Anglo gold) 광산이 2008년에 10대 광산에서 빠졌고, ARMZ사의 Kraznokamensk 광산과 Uranium One사의 Akdala 광산이 새로이 순위권에 진입하였다. 10대 회사가 전세계 우라늄생산에서 차지하는 비율이 2001년 72.5%에서 2008년 62%로 낮아졌다.

우라늄 자원의 부존 및 개발현황

표 2. 국별 우라늄 광석 생산량 (톤 U)

국가명	Pre-2004	2004	2005	2006	2007	2008
아르헨티나	2,512	1	0	0		
호주	113,305	8,982	9,512	7,593	8,611	8,430
벨기에	686	0	0	0		
브라질	1,599	159	110	200	299	330
불가리아	16,357	0	0	0		
캐나다	375,107	11,597	11,628	9,862	9,476	9,000
중국	27,689	730	750	750	712	769
콩고	25,600	0	0	0		
체코	108,649	412	409	375	306	263
핀란드	30	0	0	0		
프랑스	75,965	6	4	3	4	5
가봉	25,403	0	0	0		
독일	219,240	77	94	65	41	0
헝가리	21,043	2	3	2		
인도	7,963	230	230	230	270	271
이란	0	0	0	5		
일본	84	0	0	0		
카자흐스탄	98,409	3,719	4,346	5,281	6,637	8,521
마다가스카르	785	0	0	0		
멕시코	49	0	0	0		
몽고	535	0	0	0		
나미비아	78,736	3,038	3,146	3,067	2,879	4,366
니제르	94,137	3,185	3,322	3,443	3,153	3,032
파키스탄	961	38	40	40	45	45
폴란드	650	0	0	0		
포르투갈	3,717	0	0	0		
루마니아	17,989	90	90	90	77	77
러시아	123,036	3,290	3,285	3,190	3,413	3,521
남아프리카 공화국	153,253	747	673	534	539	566
스페인	5,028	0	0	0		
스웨덴	200	0	0	0		
우크라이나	9,900	855	830	808	846	800
미국	356,482	943	1,171	1,805	1,654	1,430
소련	123,086	0	0	0		
우즈베키스탄	23,682	2,087	2,300	2,260	2,320	2,338
유고슬라비아	380	0	0	0		
잠비아	102	0	0	0		
계	2,112,349	40,188	41,943	39,603	41,282	43,764
percentage of world demand				65%	63%	68%

자료원 : IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand ("Red Book") and WNA Market Report data 2008.



표 3. 우라늄 광산 채광 방법 (2008년)

분류	비율
Conventional underground & open pit	62%
In Situ Leaching (ISL)	28%
By-product	10%

표 4. 서방 세계의 2008년 10대 우라늄 생산 광산 현황 (World Nuclear Association, 2009h)

Mine	Country	Mine owner	Type	2001 Production (tU) & % of world	2008 Production (tU) & % of world
McArthur River	Canada	Cameco	underground	6,937 (19.4%)	6,383 (15%)
Ranger	Australia	ERA (Rio Tinto 68%)	open pit	3,564 (10.0%)	4,527 (10%)
Rossing	Namibia	Rio Tinto (69%)	open pit	2,239 ( 6.3%)	3,449 ( 8%)
Olympic Dam	Australia	BHP Billiton	by-product/ underground	3,693 (10.3%)	3,344 ( 8%)
Kraznokamensk	Russia	ARMZ	underground	-	3,050 ( 7%)
Arlit	Niger	Areva/Onarem	open pit	1,069 ( 3.0%)	1,743 ( 4%)
Rabbit Lake	Canada	Cameco	underground	1,755 ( 4.3%)	1,368 ( 3%)
Akouta	Niger	Areva/Onarem	underground	2,027 ( 5.7%)	1,289 ( 3%)
McClellan Lake	Canada	Areva	open pit	2,512 ( 7.0%)	1,249 ( 3%)
Akdala	Kazakhstan	Uranium One	ISL	-	1,034 ( 2%)
Total (top 10)				25,942 (72.5%)	27,436 (62%)

카메코(Cameco)사의 맥아더(McArthur Lake) 광상은 막대한 고품위 우라늄이 매장되어 있으며 갭내 채광에 의해 2001년 연간 6,937톤(19.4%)에서 2008년 6,383톤(15%)로 생산량이 낮아졌지만 여전히 가장 많은 우라늄 광석을 생산하는 광산이다. 카메코사의 시가레이크 광산은 갭내에서 트럭으로 80km 떨어진 맥크린레이크와 래빗레이크 광산의 선광장으로 운반하여 처리하게 되며 2005년부터는 연간 7,000톤의 우라늄을 생산하게 된다.

캐나다의 광산들은 2008년 10대 광산에서 3개가 들어있으며, 광석 생산량은 9,000톤으로 21%의 세계생산량 점유율을 보이고 있다. 캐나

다 Cigar Lake에서 2011년 생산을 시작하려고 Cameco사에서 준비 중이며, 연간 7,000톤의 우라늄 광석을 생산할 수 있을 것이다. 호주의 광산들은 2008년 7,900톤으로 전세계 생산량의 18%의 우라늄 광석을 생산했다. 호주는 2010까지 연간 16,000톤으로 생산량을 늘리려는 계획을 가지고 있다. 카자흐스탄의 많은 용액채광(ISL: In Situ Leaching) 광산들에서 2010까지 15,000톤으로 생산을 증량하려 준비하고 있다.

세계 우라늄생산 회사는 2008년 Rio Tinto가 전세계 생산량의 18%로 가장많은 점유율을 보이고 있으며, 상위 4개 회사의 전세계 우라늄광석 생산량 비율은 60%에 육박한다(표 4).

### 우라늄 자원량

현재 확인된 전 세계의 회수 가능한 우라늄 자원량은 약 5백50만 톤이며 호주, 캐나다, 카자흐스탄, 러시아가 반 이상을 차지하고 있다 (표 5, 그림 1). 이 자원량은 생산비가 1kg당 130US\$ 이하에 해당되는 총량을 의미한다.

IAEA에서는 우라늄 자원량은 확정 자원량

(Identified Resources), 준확정 자원량(Reasonably Assured Resources; RAR), 추정 자원량(Inferred Resources)로 분류하여 집계하였으며 그 결과는 표 6, 7, 8과 같다. 확정자원량은 준확정자원량과 추정자원량의 합을 의미한다. 이 양은 지금까지 사용되고 있는 일반 원자로의 경우 최소한 50년은 쓸 수 있고 확인된 자원 중 대부분의 일반광물보다는 높은 수준이다.

표 5. 세계의 회수가능 우라늄자원\*

국명	Tonnes U	Percentage	국명	Tonnes U	Percentage
호주	1,243,000	23%	니제르	274,000	5%
카자흐스탄	817,000	15%	우크라이나	200,000	4%
러시아	546,000	10%	요르단	112,000	2%
남아프리카	435,000	8%	우즈베키스탄	111,000	2%
캐나다	423,000	8%	인디아	73,000	1%
미국	342,000	6%	중국	68,000	1%
브라질	278,000	5%	몽고	62,000	1%
나미비아	275,000	5%	기타	210,000	4%
총계	5,469,000	100%			

\* RAR과 Inferred resources가 US130\$/kgU까지 포함, 2007년 1월1일 현재(OECD NEA & IAEA).  
 자료원 OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand("Red Book").

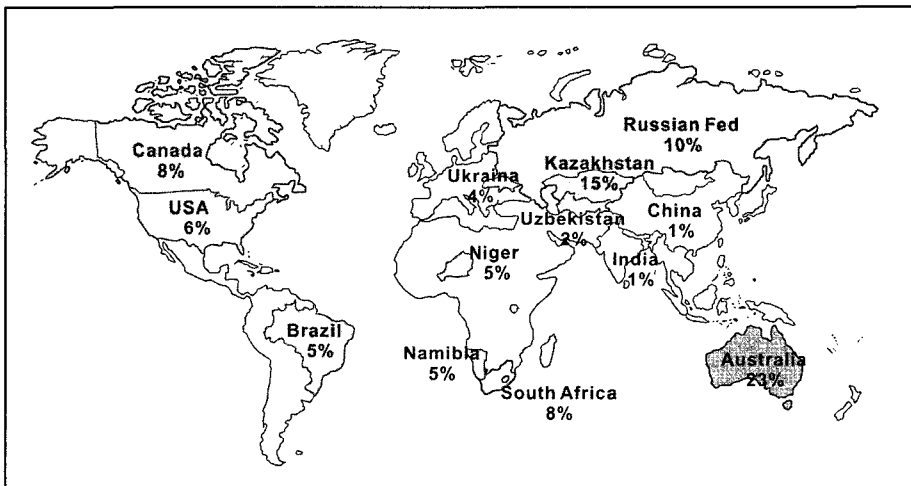


그림 1. 세계 우라늄 자원 분포도(총 확정광량 (<130US\$/kgU) : 5,47Mt) (자료원: OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand, "Red Book").

표 6. 국별 우라늄 광석 부존량 (Identified; RAR+Inferred)

국가명	cost ranges			국가명	cost ranges		
	<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU		<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU
알제리	NA	19,500	19,500	말라위	NA	9,600	11,600
아르헨티나	7,100	11,000	12,000	멕시코	0	0	1,800
호주	1,196,000	1,216,000	1,243,000	몽고	16,300	62,000	62,000
브라질	139,600	231,000	278,400	나미비아	116,400	230,300	275,000
캐나다	352,400	423,200	423,200	니제르	34,200	75,200	274,000
중앙아프리카 공화국	NA	6,000	12,000	페루	0	2,900	2,900
칠레	NA	NA	1,500	포르투갈	0	5,700	7,200
중국	39,300	61,900	67,900	루마니아	0	0	6,700
콩고	NA	2,700	2,700	러시아	83,600	495,400	545,600
체코	0	700	700	슬베니아	0	3,300	5,500
덴마크	0	0	32,300	소말리아	0	0	7,600
핀란드	0	0	1,100	남아공	234,700	343,200	435,100
프랑스	0	0	11,700	스페인	0	2,500	11,300
가봉	0	0	5,800	스웨덴	0	0	10,000
독일	0	0	7,000	터키	0	7,300	7,300
그리스	1,000	7,000	7,000	우크라이나	34,100	184,100	199,500
인도	NA	NA	72,900	미국	NA	99,000	339,000
인도네시아	0	300	5,800	우즈베키스탄	86,200	86,200	111,000
이란	0	0	1,600	베트남	NA	800	6,400
요르단	111,800	111,800	111,800	짐바브웨	NA	1,400	1,400
카자흐스탄	517,300	751,600	817,300	계	2,970,000	4,456,400	5,468,800

자료원: OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand, "Red Book", 2007년 1월 1일 기준, tonnes U, rounded to nearest 100 tonnes, NA: data not available.

IAEA 분류기준에 의거한 국가별 우라늄 자원의 분포비는 그림 2와 3과 같다. kg 당 US\$ 40 이하 생산비 범주에 속하는 우라늄 확정 자원량은 호주, 캐나다, 카자흐스탄, 브라질 순이며 호주의 비중이 압도적으로 크다(그림 2, 3). US\$ 40-60 생산비 범주에 속하는 우라늄 자원량은 미국, 카자흐스탄, 남아프리카공화국, 러시아, 나미비아, 우크라이나에서 많은 양이 부존된 것으로 알려져 있다(그림 2, 3). US\$ 80-130 생산비 범주에 속하는 우라늄 자원량

은 미국, 니제르, 남아프리카공화국, 카자흐스탄, 러시아 및 브라질에 주로 분포한다(그림 2, 3).

탐사가 진행되고, 높은 가격이 유지되며, 지금까지의 지질학적인 지식에 의하면 현재로는 장차 자원도 다 고갈 될 것으로 본다. 현 상태에서 우라늄가격이 2배 상승된다면 회수가능한 자원은 약 십 배가량 증가 될 것으로 WNA (World Nuclear Association)은 예견하고 있다.

국제원자력기구(IAEA)에서 제시한 숫자가 사실이라면 확보된 모든 전통 우라늄자원은

표 7. 국별 우라늄 광석 부존량 (RAR; reasonably assured resources)

국가명	cost ranges			국가명	cost ranges		
	<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU		<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU
알제리	NA	19,500	19,500	카자흐스탄	235,500	344,200	378,100
아르헨티나	5,100	9,000	9,000	말라위	NA	9,600	11,600
호주	709,000	714,000	725,000	멕시코	0	0	1,300
브라질	139,600	157,400	157,400	몽고	8,000	46,200	46,200
캐나다	270,100	329,200	329,200	나미비아	56,000	145,100	176,400
중앙아프리카 공화국	NA	6,000	12,000	니제르	21,300	44,300	243,100
칠레	NA	NA	800	페루	0	1,400	1,400
중국	31,800	44,300	48,800	포르투갈	0	4,500	6,000
콩고	NA	1,400	1,400	루마니아	0	0	3,100
체코	0	600	600	러시아	47,500	172,400	172,400
덴마크	0	0	20,300	솔베니아	0	1,000	1,000
핀란드	0	0	1,100	소말리아	0	0	5,000
가봉	0	0	4,800	남아공	114,900	205,900	284,400
독일	0	0	3,000	스페인	0	2,500	4,900
그리스	1,000	1,000	1,000	스웨덴	0	0	4,000
인도	NA	NA	48,900	터키	0	7,300	7,300
인도네시아	0	300	4,600	우크라이나	27,400	126,500	135,000
이란	0	0	500	미국	NA	99,000	339,000
이탈리아	NA	4,800	4,800	우즈베키스탄	55,200	55,200	72,400
일본	0	0	6,600	베트남	NA	NA	1,000
요르단	44,000	44,000	44,000	짐바브웨	NA	1,400	1,400
계	1,766,400	2,598,000	3,338,300				

자료원: OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand, "Red Book", 2007년 1월 1일 기준, tonnes U, rounded to nearest 100 tonnes, NA: data not available.

1,620만 톤이고 이것을 오늘날의 수준으로 소모한다면 250년은 공급할 수 있다. 아직 기술적인 문제로 무시하고 있지만 일반적으로 사용하고 있지 않는 인광(2천2백만톤) 및 해수(40억톤)중의 우라늄도 우라늄 시세가 현재보다 10~15배가 되면 추출 할 수 있다.

고속증식로가 사용되면 우라늄의 효율은 60배 이상 증가될 것이라고 한다(WNA, 2009b). 이 원자로는 일반원자로에서 사용하는 핵연료

중에 U<sup>238</sup>이 중성자를 흡수하여 만들어진 핵분열성 물질인 Pu<sup>239</sup>와 일반원자로에 사용하는 우라늄의 농축과정에서 생기는 감손 우라늄을 활용하기 때문이다. 이와 같이 핵연료 주기의 과정에서 생겨난 산물을 사용하기 때문에 우라늄의 활용 효율이 매우 높다. 핵연료 주기란 우라늄광석의 채광부터 정련, 변환, 농축, 성형가공, 원자로가동, 사용 후 재처리, 재사용과 폐기 등의 순환과정을 의미한다.

표 8. 국별 우라늄 광석 부존량(Inferred resources)

국가명	cost ranges			국가명	cost ranges		
	<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU		<USD 40/kgU	USD 40-80/kgU	USD 80-130/kgU
아르헨티나	2,000	2,000	3,000	카자흐스탄	281,800	407,400	439,200
호주	487,000	502,000	518,000	멕시코	0	0	500
브라질	0	73,600	121,000	몽고	8,300	15,800	15,800
캐나다	82,300	94,000	94,000	나미비아	60,400	85,200	98,600
칠레	NA	NA	700	니제르	12,900	30,900	30,900
중국	7,500	17,600	19,100	페루	NA	1,500	1,500
콩고	NA	1,300	1,300	포르투갈	0	1,200	1,200
체코	0	100	100	루마니아	0	0	3,600
덴마크	0	0	12,000	러시아	36,100	323,000	373,300
프랑스	0	0	11,700	솔베니아	0	2,300	4,500
가봉	0	0	1,000	소말리아	0	0	2,600
독일	0	0	4,000	남아공	119,800	137,300	150,700
그리스	NA	6,000	6,000	스페인	0	0	6,400
인도	NA	NA	24,000	스웨덴	0	0	6,000
인도네시아	0	0	1,200	우크라이나	6,700	57,600	64,500
이란	0	0	1,100	우즈베키스탄	31,000	31,000	38,600
이탈리아	0	0	1,300	베트남	NA	800	5,400
요르단	67,800	67,800	67,800	계	1,203,600	1,858,400	213,600

자료원: OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand, "Red Book", 2007년 1월 1일 기준, tonnes U, rounded to nearest 100 tonnes, NA: data not available.

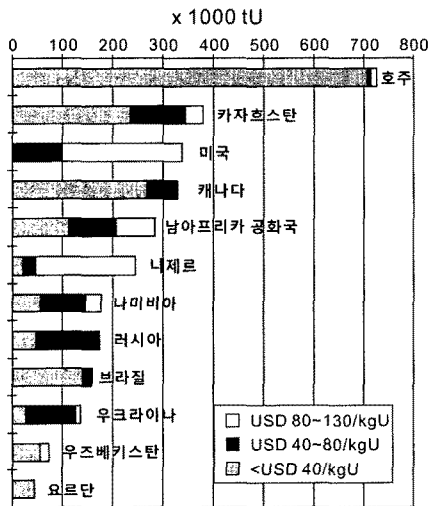


그림 2. 국별 우라늄 광석 부존량 (Identified; RAR+Inferred).

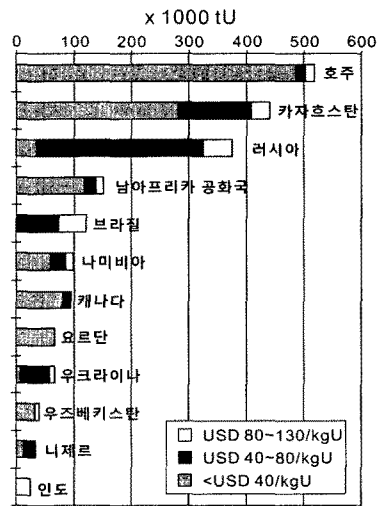


그림 3. 주요부존 국가별 Inferred resources(자료원 OECD/NEA & IAEA, Uranium 2007 : Resources, Production and Demand, "Red Book").

## 결 언

우라늄 광상은 지질학적 특징에 따라 14가지로 분류한다(OECD/NEA & IAEA, 2000). 이 중 부정합형, 사암형, 석영-역암형, 맥상형 광상이 전세계 자원량의 73%를 차지한다.

2007년도 세계 우라늄 생산량은 U 약 41,000톤이며 캐나다, 카자흐스탄, 호주 순으로 이 세 나라의 생산량은 약 60%를 차지한다. 2008년 원자력 발전을 위한 우라늄 소비량은 U 약 65,000 톤이다. WNA에서는 2015년도에는 연간 약 74,000톤의 수요를 예측하고 약한 증가세를 지속할 것으로 전망하고 있다.

우리나라 2007년 수요량은 U 약 3,200 톤이며 2030년도에는 5,300 톤이 필요할 것으로 예측하고 있다. 이는 현재 20개의 원자로에서 10여개 원자로가 더 증설될 계획에 의거한다. 우리나라에서 2008년 수입된 우라늄은 총 U 888톤으로서 약 7천억불에 해당된다. 금액대비 비율로는 러시아, 우즈베키스탄, 캐나다 순이다.

현재 확인된 전 세계 회수 가능한 우라늄 자원량은 약 5백50만 톤이며 호주, 캐나다, 카자흐스탄, 러시아가 반 이상을 차지하고 있다.

## 시 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 “천연 방사성 산업물질 실태조사(09-6607)” 과제에서 지원되었습니다.

## 참고문헌

- IAEA (2009) World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification.
- OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency (2008) Uranium 2007: Resources, Production and Demand.
- OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency (2000) Uranium 1999: Resources, Production and Demand.
- World Nuclear Association (2009a) Australia's Uranium.
- World Nuclear Association (2009b) Nuclear Power in Korea.
- World Nuclear Association (2009c) Uranium in Canada.
- World Nuclear Association (2009d) Uranium in Africa.
- World Nuclear Association (2009e) Uranium in Central Asia.
- World Nuclear Association (2009f) Uranium in Namibia.
- World Nuclear Association (2009g) Uranium in Niger.
- World Nuclear Association (2009h) World Uranium Mining.