

논 단

첨단 산업과 희유금속 : 인듐 활용과 수급전망

최 선 규¹⁾ · 김 창 성¹⁾ · 김 성 용²⁾

¹⁾고려대학교 지구환경과학과

²⁾한국지질자원연구원

20세기 말부터 첨단과학기술이 급진적으로 발전됨에 따라 선진국들은 IT, NT 분야의 경쟁력 있는 고부가 첨단산업을 집중 육성하고 있으며, 첨단 산업계의 급속한 발전은 희유금속과 같은 소재자원에 대한 수요가 기하급수적으로 확대됨에 따라 수년전부터 금속가격이 급등하는 추세에 있다. 세계 각국은 이러한 21세기 산업구조의 변화에 부응하기 위하여 국가산업경제의 유지 발전에 필수 불가결한 요소로 광물자원의 경제적 중요성을 재인식하게 되었고, 첨단산업의 소재원료가 되는 한정된 희유금속 및 광물자원의 수급 불안정을 타개하기 위한 지속적인 장·단기 자원수급정책을 수립하고 있다.

인듐은 1863년 독일 프라이버그(Freiberg)광산의 아연광석에서 처음 발견되었고, 분광분석을 사용하여 확인된 청색 스펙트럼선으로부터 라틴어의 Indicum(인디고 블루)에서 유래되어 인듐이라고 명명되었다. 인듐은 갈륨(Ga)과 탄탈륨(Ta)과 같이 휘발성이 강한 친동원소로서 대부분 섬아연석, 스타나이트 등 황화광물 내에서 단지 극미량이 함유될 뿐이며, 수권·생물권에는 거의 존재가 발견되지 않는다. 인듐은 지각에 평균적으로 0.027 ppm, 대륙지각에 약 0.05 ppm, 해양지각에 0.072 ppm 이 각각 포함되어 있으며

(Taylor and McLennan, 1985), 로퀘사이트(roquesite)와 같은 극소수 광물만이 독립된 광물상으로 존재하며, 주로 섬아연석을 비롯하여 Zn, Cu, Fe, Sn의 황화광물/황염광물로부터 제련과정에서 회수되고 있다.

인듐과 같은 희유금속은 세계적으로 첨단 산업 분야에서 기존 용도의 수요뿐만 아니라, 신규 첨단소재와 관련된 반도체(InP), LCD(ITO), 태양 전지 등 다양한 연구개발이 진행되고 있어 지속적으로 실용화 가능성이 확대되고 있다. 즉, 인듐 소비량에 대한 통계자료(Roskill Information Services; Carlin, 2006)에서 제시된 바와 같이, 인듐수요가 1987년까지 약 100 톤 미만으로 보고되었으나, 2000년 약 220 톤, 2005년에는 약 920 톤으로 대폭 증가되는 추세를 보이고 있으며, 2003년부터 다양한 LCD용 소재개발은 급격한 수요 확대를 유도하고 있다. 이러한 첨단 산업계의 폭발적인 수요증가에 기인하여 최근에는 인듐의 수급 불안정과 함께 급격한 가격상승이 초래됨으로써 IT, NT 산업계에서는 인듐의 안정공급을 위한 자원 확보전에 접어들고 있다. 이러한 인듐 금속가격은 2006년도 은(약 400 \$/kg)과 비교하여 인듐이 약 1,000~800 \$/kg로서 2배 이상 높은 가격대가 형성되어 있다.

암석 광물학적 특성

인듐은 지각에 평균적으로 0.027 ppm으로 극미량 함유되어 있는 반면, 마그마 결정분화작용의 말기 단계에서 불호정성 원소로 잔류되는 특징을 보이고 있다. 인듐광화작용은 자원지질학적 측면에서 마그마 분화과정의 최후단계인 탈가스화작용시 휘발성 특성을 갖는 친동원소와 함께 정출되는 특징을 보이고 있다. 인듐은 표 1에 제시된 바와 같이 로퀘사이트(roquesite)와 같이 극소수 광물만이 독립된 광물상으로 확인되는 반

면 산출빈도는 전반적으로 매우 미비한 양적관계를 보이고 있다. 인듐이 함유된 광물(In-bearing mineral)은 섬아연석(sphalerite), 방연석(galena), 황동석(chalcopyrite), 스타나이트(stannite), 스타나노다이트(stannoidite), 에나자이트(enargite), 사면동석(tetrahedrite), 석석(cassiterite)과 같은 광물에 치환되어 있으며, 인듐 함유량은 전반적으로 미량(수십~수백 ppm) 함유되지만 산출빈도가 매우 높은 양적관계를 보이고 있어 인듐의 주요 공급원으로 인식되고 있다(표 2).

표 1. 인듐을 주성분으로 하는 광물.

광물명	화학조성	Mineral group
Roquesite	$CuInS_2$	Chalcopyrite
Laforetite	$AgInS_2$	Chalcopyrite
Indite	$FeIn_2S_4$	Linnaeite
Tolovkite	$InSbS$	Cobaltite
Petrukite	$(Cu,Zn,Fe)_3(Sn,In)S_4$	
Sakuraiite	$(Cu,Zn,Fe,Ag)_3(Sn,In)S_4$	
Dzhalindite	$In(OH)_3$	
Yixunite	$PtIn$	

표 2. 인듐 원소의 물리화학적 특성.

특성	값
원소 기호	In
원소 번호	49
원소 중량	114.82
밀도	$7.30g/cm^3$
경도 (모호 스케일)	1.2
녹는 점	$156.6^\circ C (429.66^\circ K)$
끓는 점	$2080^\circ C (2353^\circ K)$
비열	$0.233 J/(g \cdot K)$
동위원소	In-115 (95.67%), In-113 (4.33%)
전하 구조	$[Kr]4d^{10}5s^25p^1$
주요 원자가	In(III), In(I)
이온 반경	In(III): [VI] = 0.88; [VIII] = 1.00
전기음성도	1.7
1차 이온화 퍼텐셜	5.786 eV
표준 퍼텐셜	0.34 V
스펙트럼 파장	$\lambda_{In} = 451.14nm; 410.18nm$

이러한 합인듐 광물은 섬아연석-로퀘사이트 계열 광물에서 $2Zn^{+2} \rightleftharpoons Cu^{+1} + In^{+3}$ 의 쌍치환관계를 보이고 있으며, 섬아연석-스타나이트 계열 광물에서 $2(Zn,Fe) \rightleftharpoons CuIn$ 또는 $Cu_2Sn \rightleftharpoons 2(Zn,Fe)$ 와 같은 복합적인 고용체 치환관계를 보이고 있다. 이러한 인듐의 원소특성은 자연계에서 독립된 광물상보다는 섬아연석, 스타나이트와 같은 황화광물에 함유되어 있어, 주로 아연 제련 과정에서 부산물로 회수되고 있다.

인듐광화작용은 환태평양 지역의 섭입대 조구조대를 중심으로 반암형 Sn-W 광상, 화산성 괴상황화물 광상(VMS), 퇴적성 괴상황화물 광상(SEDEX), 다금속 맥상광상, 천열수광상, 반암형 Cu광상 및 스카른광상과 같은 다양한 광상 유형에서 부존되며(Schwarz-Schampera and Herzig, 2002), 이러한 관계화성암의 유형은 칼크-알칼리계열 산성-중성 천부 마그마활동과 직접적으로 연계되어 있다(그림 1). 이러한 광상 유형 중 인듐의 주요 공급원이 되는 광상은 화

산성 괴상황화물 광상(Kidd Creek, 캐나다; Neves-Corvo, 포르투갈)과 맥상~스카른 광상(Toyoha, Akenobe, 일본; 볼리비아)으로 양분된다(Sinclair et al., 2006). 이러한 광상 유형으로부터 생산된 광석은 아연정광과 동-주석 정광에 해당되며, 제련과정에서 인듐이 추출되고 있다. 또한 국내에서도 울산 광산이 후자에 속한 스카른형 광상유형으로 로퀘사이트와 섬아연석(0.88-2.11 wt.% In)이 보고된 바 있다(Imai and Choi, 1984).

주요 용도

인듐은 주기율표상 제3A족 원소에 속하는 은백색 광택을 띠는 금속원소로 1863년 독일의 F. 라이히와 H.T. 리히터가 발견하였으며, 상온에서 안정된 무른 금속으로 낮은 온도에서 높은 소성을 갖는 물성과 함께 156.6℃의 비교적

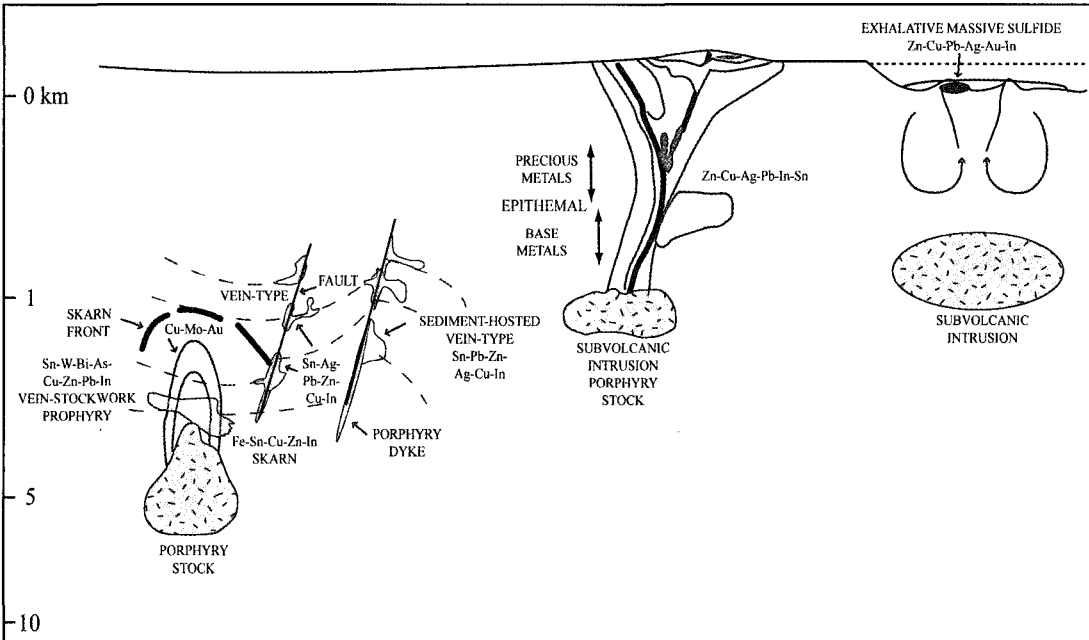


그림 1. 인듐 광화작용과 관련된 광상 생성모델(from Schwarz-Schampera and Herzig, 2002).

낮은 용융 온도를 갖고 있다. 알칼리 수용액과는 반응하지 않으나 산과는 반응하여 녹는 특징을 보이고 있으며, 상온에서는 산화되지 않고 단지 적열상태에서 연소하여 삼산화물(In_2O_3)이 형성되며, 가열하면 타금속(비소, 안티몬, 셀레늄, 텔루르) 및 수소, 황, 인 등과 반응하는 특징을 보인다(표 3).

인듐의 용도는 산업적으로 1920년대에 은을 비롯한 금속 코팅용으로 주로 이용되기 시작하

였고, 1934년에는 인듐이 갖고 있는 높은 소성 특성과 함께 피부 접촉 시 인체에 무독한 화학성이 인식되어 치과용 합금으로 활용되기 시작하였다. 인듐은 최근까지 인듐 합금을 중심으로 하여 전기·전자산업용에서 트랜지스터, 다이오드, 정류기, 특수강 투입재, 나트륨 가스램프(sodium vapor lamp)의 내부 코팅제 및 원자로 조절봉 등 다양한 용도로 사용되었으나, 소비량은 비교적 소량에 불과하다(표 4). 90년대 후

표 3. 인듐 화합물의 주요 활용도.

형 태	인듐 생산물	주요 용도	비고
산화주석인듐(ITO)	투명 전도 전극	평면화면	LCD
산화인듐	투명 적외선 필터	저압나트륨 및 저복사능 창유리	
인듐 금속	도금	베어링	
인듐 합금	저온 합금	멤납	
	은-인듐-카드뮴	핵반응로 조절봉	
	금 및 팔라듐 합금	치과용 합금	
인듐 화합물	박막필름, Single crystal	반도체, TV 오시콘(촬상관)	
	Wafers	반도체 레이저	

Data from The Economics of Indium, 8th edition(Roskill Information Services, 2003).

표 4. 인듐의 세계 생산량.

(단위 : 톤)

국가명	2000	2001	2002	2003	2004	비고
벨기에	40	40	40	30	30	
캐나다	45	45	45	50	50	
중국	200	159	110	150	200	
프랑스	65	65	65	10	10	
독일	10	10	10	10	10	
이탈리아	5	5	5	5	5	
일본	55	55	60	70	70	
카자흐스탄	NA	NA	NA	NA	NA	
네덜란드	5	5	5	5	5	
페루	5	4	6	6	6	
러시아	15	15	15	15	15	
우크라이나	NA	NA	NA	NA	NA	
영국	5	5	5	5	5	
합계	450	408	366	356	406	

Data from Mineral Commodity Summaries 2004(USGS).

반부터 투명성, 전기 전도체, 열적 반사도의 탁월한 물성을 유지하고 있는 ITO(Indium Tin Oxide)는 LCD(Liquid Crystal Display: 액정 디스플레이)에 활용되어 수요가 급증하는 추세에 있으며, 최근에는 빌딩용, 자동차용 유리에 코팅기술을 적용하여 유리의 투명성과 함께 광선을 통과시키는 전기전도성을 이용한 단열효과에 적합한 소재로 인식되어 관련 산업분야에서 실용화를 위한 다각적인 연구가 진행되고 있다.

주요 매장국과 제련 과정

인듐은 주로 캐나다, 중국, 일본, 페루, 러시아, 카자흐스탄, 우크라이나에 부존되어 있으며, 벨기에, 프랑스, 독일, 이탈리아, 화란, 영국, 미국은 제련과정에서 회수되는 것으로 알려져 있다. 희유금속인 인듐은 광화작용시 급격한 물리화학적 조건에서 농축되는 지화학적 특성에 따라 천부환경의 광상 유형에 편중된 농집현상을 보이고 있으며, 2000년 이후부터 발표된 통계자료에 의하면 인듐의 주요 부존 및 생산국은 중국, 캐나

다, 일본, 벨기에, 프랑스, 러시아로 알려져 있다 (표 5, 그림 2). 자연계에서 인듐은 황화광물에 불순물로 미량 함유되고 있어 아연-연-동 제련과정에서 회수하기 위한 다단계 특수추출설비가 요구되고 있다. 전 세계의 아연광상으로부터 평가된 일차 인듐 매장량(Reserves)은 약 2,800 톤 (Reserve base 약 6,000 톤)으로 예측되고 있으며, 아연제련 시 2005년 기준으로 약 400 톤이 부산물로 회수된 것으로 보고되고 있다 (George, 2005). 또한, 아연제련과정에서 1차 부산물로 회수되는 인듐은 2008년까지 최대생산량은 약 500 톤 미만으로 예측되고 있다.

캐나다

캐나다는 각력상 주석-비철금속 광상인 'Mount Pleasant' 광산과 화산성 괴상황화물 광상인 'Kidd Creek' 광산, 'Brunswick' 광산으로부터 약 1,000 톤의 인듐 매장량(잠재 매장량 2,000 톤)으로 추정되며, 2004년 제련과정에서 부산물로 회수되는 인듐생산량은 약 50 톤으로 보고되고 있다(Schwarz-Schampera and Herzig, 2002).

표 5. 인듐의 전 세계적 용도별 소비량.

(단위 : 톤)

용 도	소비량				전망치
	1990	1995	1998	2000	2006
디스플레이디바이스	37	70	104	144	1,008
저용용접 합금 및 뿔납	28	30	31	20	100
반도체	10	18	19	20	17
투명열반사	8	12	13	15	0
인광물질	11	12	12	8	65
MinorAlloys	11	9	10	8	0
도금 및 베어링	9	7	7	2	0
핵 조절봉	3	2	2	0	0
기타	6	3	2	3	18
합계	123	163	200	220	1208

Data from The Economics of Indium, 8th edition(Roskill Information Services, 2003).

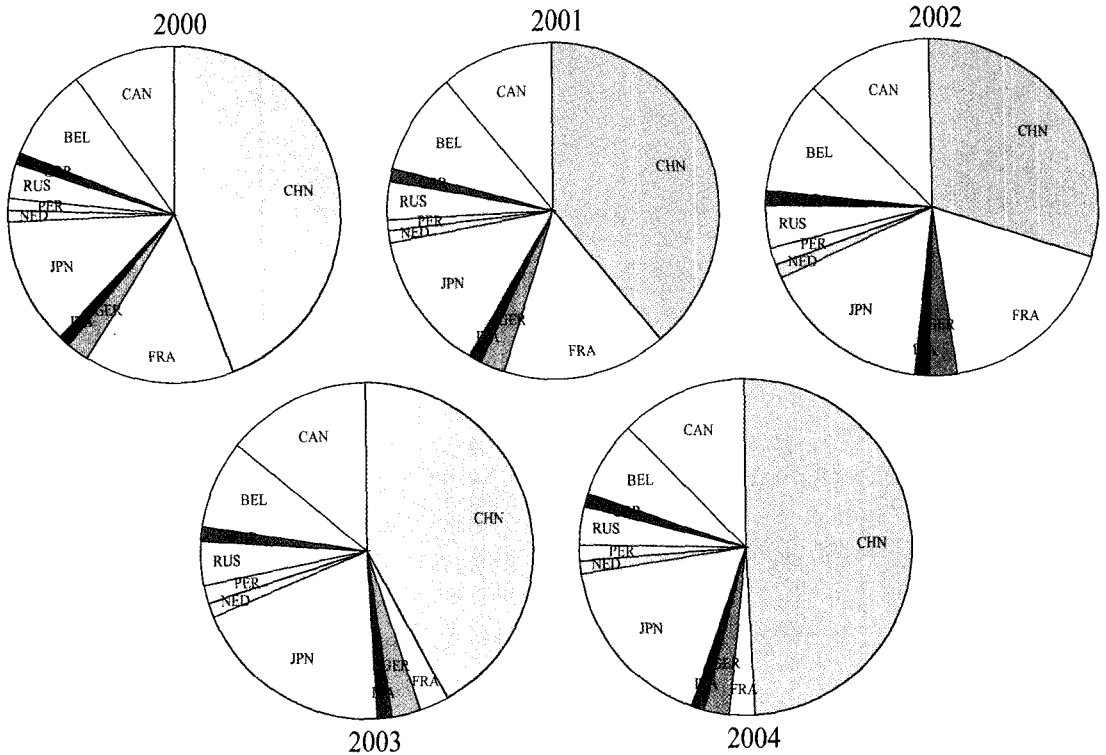


그림 2. 국가별 인듐 생산량의 최근 통계자료.

중국

중국은 주로 'Laochang-Changning-Menglian' 광화대의 화산성 괴상황화물 광상과 'Dachang' 광화대의 스키르광상으로부터 약 280 톤의 인듐 매장량(잠재 매장량 1,300 톤)으로 추정되고 있으나, 예측 불가능한 요소가 내재되어 있다. 2004년 제련과정에서 부산물로 회수되는 인듐 생산량은 약 200 톤으로 보고되고 있으며, 현재 중국의 인듐 생산 및 수출량이 세계 인듐 시장에 지대한 영향을 미치고 있다(표 5).

일본

일본은 'Toyoha' 광산, 'Akenobe' 광산, 'Ikuno' 광산과 같은 다금속 맥상광상에서 인듐

잠재 매장량이 매우 높은 추정되고 있으나, 'Toyoha' 광산을 제외하고 대부분 외국에서 수입된 광석으로부터 2004년 정련 인듐생산량은 약 70 톤으로 보고되고 있다(표 5). 특히 'Toyoha' 광산은 최근까지 연간 최대 약 70 톤을 생산하여 전 세계의 주요 공급원으로 보고되었으나, 2006년부터 생산이 중단됨으로써 일본 국내에서 생산된 인듐은 급격하게 감소될 것으로 예측된다.

러시아

러시아는 약 60 광장에서 부존 가능성이 확인되었고, 주로 우랄(Ural)지역 화산성 괴상황화물 광상(Gaiskoye)과 극동지역 다금속 맥상광상으로부터 수천톤의 인듐 잠재 매장량이 추정되고 있으나, 예측 불가능한 요소가 내재되어 있다.

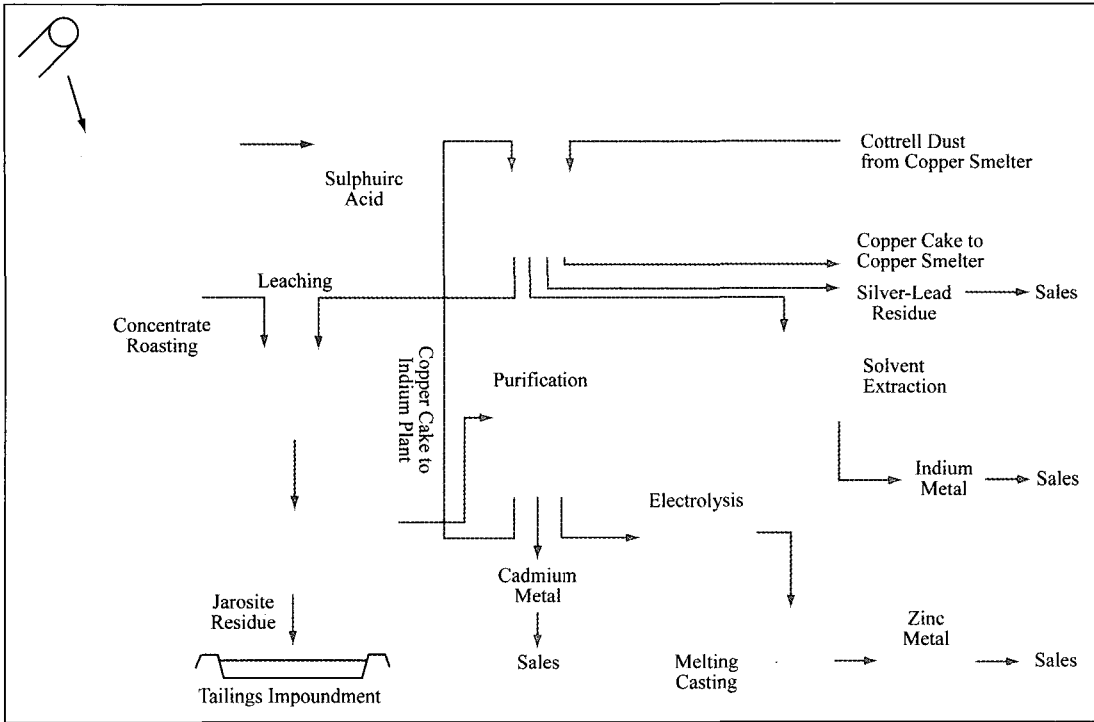


그림 3. 인듐의 제련 과정 모식도(from Jorgenson and George, 2004).

2004년 인듐의 기타 주요 생산국은 벨기에와 프랑스로서 대부분 수입광석으로부터 제련과정에서 부산물로 회수된 정련 인듐이다. 인듐의 회수방법은 원료광석의 특성에 따라 상이한 방법으로 적용되고 있으나, 현재 인듐 회수가 가능한 원료광물로서 연·아연광의 분진, 슬래그 및 잔여물과 합금 등에서 회수되고 있다(그림 3). 인듐의 회수기술은 제련회사의 기밀로서 인듐을 회수하는 가장 보편적인 방법은 아연광석을 제련하고 남은 슬래그로부터 인듐을 추출하는 방법이다. 아연을 제련하고 남은 슬래그를 전해 처리 회수한 후, 이를 황산이나 염산과 섞어 가열처리한 다음, 침출공정을 통하여 인듐화합물이 제조된다. 또한, ITO 제조과정에서 폐기된 스크랩으로부터 리사이클링공정을 통하여 회수되고 있다.

인듐은 반 정련된 인듐, 스크랩, 표준 품위(99.97 % In)의 주괴 등의 형태로 국제적으로

교역되는 반면, 고순도의 인듐은 주로 일본, 미국, 독일, 영국, 벨기에 등지에서 생산되며 비가공의 인듐보다 고가이다. 특히, 박막 ITO 제조용으로 사용되는 고순도 인듐은 교역량이 급격하게 증가하고 있으며, 인듐소재 반도체 웨이퍼는 주로 일본에서 생산되어 미국과 유럽으로 수출되고 있다. 미국은 캐나다로부터 반정련된 인듐, 제련폐기물, 스크랩을 수입하여, 정련-가공된 99.99999 %의 고순도 인듐을 제조하여 재수출하고 있다.

국외·국내 수급 전망

인듐은 IT, NT 첨단 산업분야에서 가장 광범위하게 사용되는 대표적인 희유금속으로 자원지질학 측면에서 검토된 바에 의하면 전 세계의 매

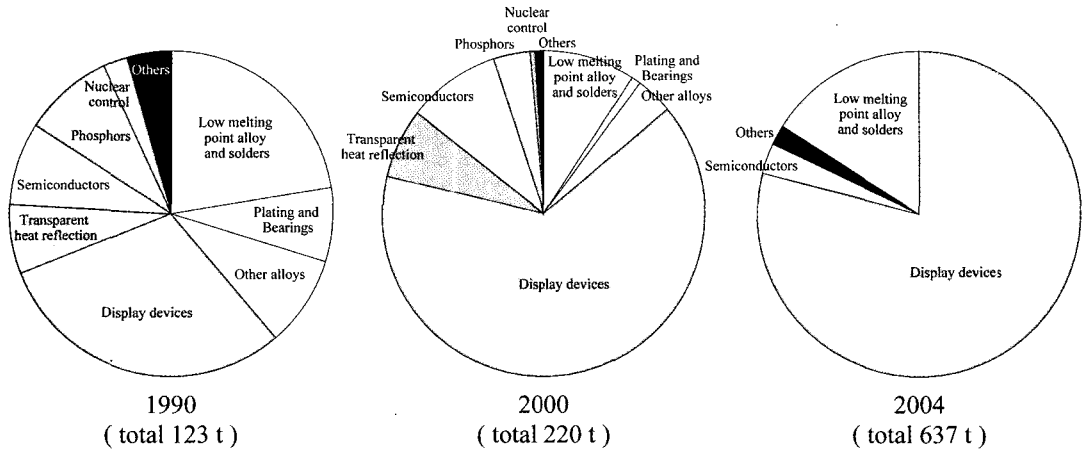


그림 4. 인듐의 주요 용도별 소비량.

장량이 극히 제한된 광물자원으로 인식되고 있으며, 주로 아연제련과정에서 부산물로 회수되고 있어 정련 인듐 생산국도 일부 국가에 제한되어 있다. 인듐은 주로 ITO, 인듐 Plating, 인듐합금, 인듐화합물(InP, CuInSe₂, CuInS₂, InAs)의 소재물질로 사용되고 있다.

인듐 수요는 1990년도 총 123 톤 중 디스플레이

이 용도로 약 37 톤이 사용되었으나, 2000년도에는 총 225 톤 중 디스플레이 용도로 전기·전자산업분야에서 약 140 톤으로 급증하는 추세에 있다(그림 4, 표 6). 2004년부터 시작된 CRT-TV에서 LCD-TV로 교체되는 변화추이와 함께 디스플레이 대형화에 따른 세계 소비성향을 통하여 인듐 수요량은 지속적으로 확대될 것으로 예상

표 6. 인듐의 국제 가격 추이.

(단위 : US\$/kg)

년 월	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1	170	110	80	86	357	884	800
2	170	110	80	90	420	981	960
3	170	110	70	105	523	1008	980
4	170	110	70	130	594	1007	940
5	159	110	70	148	598	989	910
6	154	104	70	163	571	906	790
7	141	104	70	180	553	859	775
8	131	100	70	180	579	977	741
9	130	100	70	180	748	989	708
10	113	100	70	194	856	936	708
11	110	91	70	263	857	880	720
12	110	90	74	302	844	800	720

Metal bulletin, 한국지질자원연구원(2005) 자원총람
주) MB free market 기준 최저가격임.

되고 있다. 향후 첨단 산업계의 첨단기술 변화에 따른 인듐의 주요 용도는 ITO를 사용한 FPD(Flat Panel Display), LCD(STN(SuperTwisted Nematic), TFT(Thin Film Transistor)), PDP(Plasma Display Panel, 플라즈마 디스플레이), EPD(Electrophoretic Display), ELD (Electroluminescent Display), EC(Electochromic Display), FED(Field Emission Display), CRT(Cathode Ray tube, 음극선관), SC(Solar Collector) 첨단 전자제품의 소재부품 및 첨단 단열성 유리(빌딩, 자동차용)에 기본원료로 확대될 것으로 예측되고 있는 반면, 향후 ITO가 보유한 광학적, 전기적, 물리적 특성을 대체할 소재물질이 개발되는데 장기간(10년 이상) 소요될 것으로 예상되고 있다.

인듐의 미래 수급전망은 긍정적인 측면에서 리사이클링에 의한 인듐 생산량의 확대와 함께 TFT의 신기술 적용에 따른 원료절감 효과가 고려되는

반면 첨단 산업 및 ITO의 수요확대와 함께 정광급광량의 부족으로 제련과정에서 회수된 일차 생산량의 공급 불안정이 부정적인 측면에서 검토되고 있다. 2006년도 예상된 인듐의 공급량은 제련시 정련된 일차 생산량 약 410 톤과 ITO리사이클링과정에서 회수된 약 600 톤으로 추정되는 반면, 인듐의 수요는 약 1,200 톤(ITO의 수요량; 약 1000 톤)으로 예상되고 있다. 인듐 가격은 2003년까지 약 200 \$/kg이었으나, 2005년부터 약 800~1,000 \$/kg의 급격한 가격변동을 보이고 있다(그림 5, 표 7). 세계적으로 인듐의 수급전망은 2005년부터 연간 약 100 톤의 공급부족현상을 보이고 있으며, 2008년에는 약 400 톤 이상 부족할 것으로 예상되고 있다.

우리나라는 일본과 함께 세계 최대의 LCD생산국으로 전세계 인듐의 50% 이상을 사용하고 있으며, IT, NT 분야의 경쟁력 있는 첨단산업을 지속적으로 집중육성하기 위하여 인듐의 안

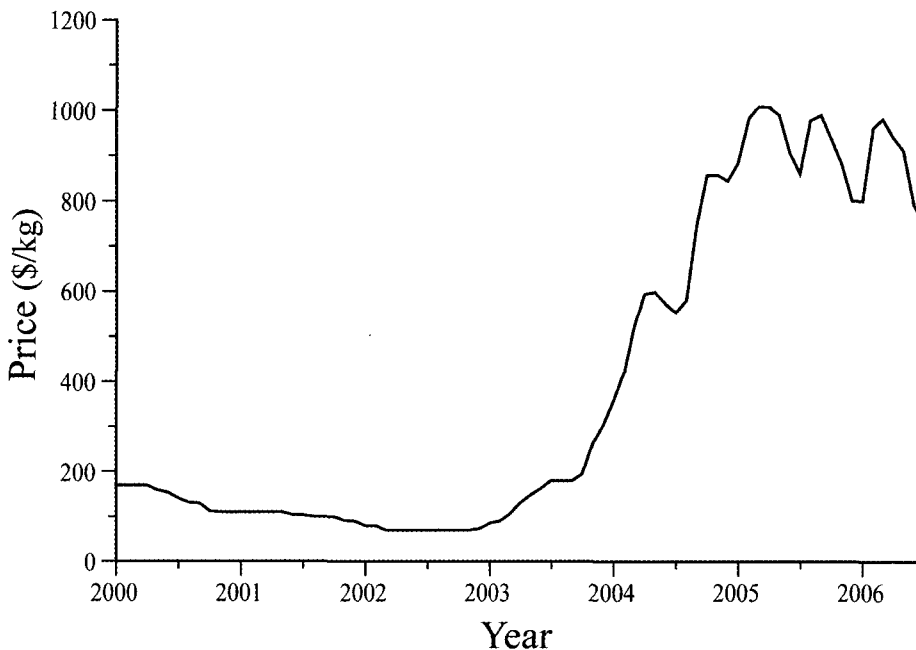


그림 5. 인듐의 국제가격 변화 추이.

정적인 장기수급대책이 요구되고 있다.

2005년까지 국내에서 사용되는 인듐은 전량 수입되었으나, 최근 고려아연에서 아연 및 연정광에 함유되어 있는 인듐을 회수하는 생산설비가 완공되어 2006년부터 가동 중에 있다. 또한, 울산 스키아연광상의 Cu-Zn광석에서 로퀘사이트와 In-섬아연석이 보고된 바 있으며(Imai and Choi, 1984), 자원지질학적 측면에서 국내 연-아연광상(연화, 장군광산)에 대한 인듐 부존 가능성에 대한 종합적인 검토가 요구된다.

LCD의 주 생산국인 동시에 인듐의 주요 소비국인 우리나라는 인듐수급 불안정과 가격 변화에 대응할 수 있는 장기 확보전략을 수립할 시점이다. 국내에서 소요되는 인듐 공급량을 확보하기 위하여 단기 대책으로 비정기적 수출국인 러시아, 우크라이나, 카자흐스탄, 중국 등의 인듐 제련업체와 직거래를 통하여 안정적인 인듐 수급대책을 강구할 필요가 있다. 최근 중앙아시아 지역에서 개발된 연-아연광상에서 인듐의 부존 가능성이 확인되었으며, 인듐과 같은 희유금속의 안정적 수급대책으로 국외 연-아연광상의 개발을 통하여 비철금속의 정광 확보와 함께 부산물로 회수되는 인듐의 부가가치를 유도할 수 있다. 이러한 소재 광물자원의 확보를 위하여 비철금속 광물자원의 탐사 및 개발사업에 대한 재평가와 함께 소재광물의 원활한 수급과 관련된 다양한 정책수립이 요구되고 있다.

참고 문헌

한국지질자원연구원, 2005, 자원총람. 한국지질자원연구원.

Carlin, J.F.Jr., 2006, Indium. In: Norton,

G.A., Leahy, P.P., eds., Mineral commodity summaries 2006, U.S. Geological survey, 199p.

George, M.W., 2005, Indium. In: Norton, G.A., Groat, C.G. eds., Mineral Commodity Summaries 2005, U.S. Geological survey, 197p.

Gorgenson, J.D., 2004, Indium. In: Norton, G.A., Groat, C.G. eds., Mineral Commodity Summaries 2004, U.S. Geological survey, 197p.

Imai, N., Choi, S.G., 1984, The first Korean occurrence of roquestite. Mineralogical Journal, v. 12, p. 162-172.

Jorgenson, J.D., George, M.W., 2004, Mineral commodity profile - Indium. USGS Open-file report 2004-1300, U.S. Geological Survey, 20p.

Roskill Information Services, 2003, The economics of indium. Rockskill Information Services Ltd., 8th edition, London, 121p.

Schwarz-Schampera, U., Herzig, P.M., 2002, Indium: geology, mineralogy, and economics. Springer, 257p.

Sinclair, W.D., Kooiman, G.J.A., Martin, D.A., Kjarsgaard, I.M., 2006, Geology, geochemistry and mineralogy of indium resources at Mount Pleasant, New Brunswick, Canada. Ore Geology Reviews, v. 28, p. 123-145.

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985, The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Science, 328p.