

금 제련에 사용되는 시안의 사용, 규제 및 처리 현황

박정현 · *신도연 · 박현식 · 정진기 · 이재천

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 희유자원융합연구센터 도시광산연구실

The Current Status of Cyanide Uses, Regulations, and Treatment in Gold Mining

Jeonghyun Park, *Doyun Shin, Hyunsik Park, Jinki Jeong and Jae-chun Lee

Mineral Utilization Convergence Research Center, Urban Mine Department
Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약

전세계적으로 시안화법은 일차 광물 혹은 정광으로부터 금을 회수하기 위해 널리 사용되어 왔다. 그러나 이 공정에서 발생하는 다량의 유독한 잔사 및 시안 함유 폐액은 주변 환경 및 생태계에 심각한 문제를 야기할 수 있어 그 사용에 대해 문제가 제기되어 왔으므로 시안화법 이용 시 반드시 시안 함유 폐액의 적절한 처리가 필요하다. 본 연구에서는 금광으로부터 금을 회수하기 위한 습식제련공정인 시안화법과 연계하여 시안 처리 공정을 설계하기 위한 기초연구로서 금 제련에 사용되는 시안화합물의 사용, 규제 및 처리 기술의 국내외 현황을 분석하였다. 또한 무배출 금 회수 및 처리 공정을 설계하기 위한 생물학적 공정에 대하여 소개하였다.

주요어: 시안, 시안화법, 금 제련, 시안 규제, 시안 폐액 처리

Abstract

Cyanidation has been used worldwide to recover gold from primary ore or concentrate. The use of cyanide is however becoming an emerging issue because of the toxic residue and wastewater made from the process. The cyanide-containing wastewater should be treated properly, obeying the environmental standard and regulations. In the present article, the domestic and international uses, regulations, and treatment technologies of cyanide in gold mining were investigated as a feasibility study to develop a cyanide treatment process as well as the cyanidation process. A biological cyanide treatment process to develop a zero-emission gold recovery and wastewater treatment process was also briefly introduced.

Key words : Cyanide, Cyanidation, gold mining, cyanide regulation, cyanide containing wastewater treatment

1. 서 론

시안화법은 1888년 MacArthur and Forrest¹⁾에 의해 제안된 이래 가장 널리 쓰이고 있는 금 습식 제련법

중의 하나이다. 시안화법은 시안화나트륨(NaCN), 혹은 시안 음이온(CN⁻)이 금, 은 등과 착염을 형성하여 용해 되는 원리를 이용한 공정으로, 아래 반응식 1²⁾를 따르며, 금 및 은에 대한 선택적 침출이 가능하다는 장점이

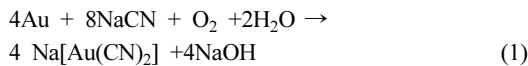
· Received : April 15, 2015 · Revised : June 9, 2015 · Accepted : June 15, 2015

*Corresponding Author : Doyun Shin (E-mail : doyun12@kigam.re.kr)

Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 시안화법 후 금을 포함하는 시안 용액에서 금을 회수하기 위해서는 일반적으로 활성탄 흡착법, 이온교환법, 아연치환침전법 등이 이용된다.³⁾



금 회수를 위한 시안화법은 매우 간단하고 효율적이며 공정에 드는 비용이 적다는 장점이 있어 처음 개발된 이후 큰 기술의 변화 없이 계속 사용되어 왔다. 시안화법의 상업적 사용은 1889년 뉴질랜드의 Crown 광산에서 금 침출을 위해 사용된 것이 최초이며 남아프리카공화국, 미국, 호주 등이 곧 뒤를 따라⁴⁾, 1948년 기준 세계 금 생산량의 약 48%를 생산했던 남아프리카공화국 Witwatersrand 광산에서는 대부분 시안화법을 사용하여 금을 생산했다고 알려져 있다.⁵⁾

그러나 시안화합물은 생물체에 노출 시 cytochrome-c oxidase와 결합하여 전자전달을 막아 세포호흡을 방해하므로 저혈압, 의식장애, 신경 손상, 심지어 사망에 이르기까지 하는 등 매우 유독한 물질로 알려져 있어 환경에 유입 시 수계 생물 및 야생 동물에 대해 악영향을 미치므로^{6,7)} 금 제련에 사용 시 적절한 관리 및 처리 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 친환경적이고 경제적인 시안화합물 처리 공정을 개발하기 위한 기초 연구로서 금 제련에 사용되는 시안화합물의 사용, 규제 및 처리 기술 현황을 분석하였다.

2. 사용 현황

시안화합물을 이용한 금 회수 공정은 금을 함유하고 있는 광물의 종류, 품위에 따라 달라진다. 전통적인 시안화법에 의해 20 - 30시간 내에 90% 이상의 금을 회수할 수 있는 경우 free milling gold ore라고 하며 이 경우 필요로 하는 시안의 농도는 100 - 250 ppm이다. 전처리를 하지 않으면 금 회수가 어려운 경우 complex ore, refractory ore라고 지칭하며, 50% 이하의 금 회수율을 보이는 경우 highly refractory ore라고 정의할 수 있다.⁸⁾ Free milling ore 중 산화광은 파쇄 후 바로 시안화법을 적용하는데, 이 경우 heap leaching이나 vat leaching 방법을 이용한다. Heap leaching법은 미국 광무국(U.S. Bureau of Mines, USBM)에 의해 1969년 처음 제시되었으며, 1970년대 이후 금 회수를 위한 시안화 공정의 많은 부분을 차지해 왔다.⁹⁾ Heap leaching

공정에서 금 회수 시 약 200 - 600 mg/L의 시안화나트륨이 사용되고, 은 회수를 위해 약 600 - 1000 mg/L의 시안화나트륨이 사용된다.¹⁰⁾ Heap leaching 공정은 금 광석의 탈수, heap 표면으로 시안 용액의 살수, 금 포함 용액 회수 등을 포함하는 공정이다. 광석의 금 품위가 낮을수록, 운전 비용이 낮은 heap leaching을 사용하는 경향이 있다. Complex ore와 refractory ore의 경우 시안을 소모하고 금 회수를 방해하는 황화광물 등을 부유선별 및 산화법 등으로 제거한 후 시안을 이용한 침출법을 이용한다.⁸⁾

시안화법은 2001년 기준 전 세계적으로 약 870개소의 금과 은 광산 중 약 50% 정도의 광산에 적용되었으며 이 때 약 347,000톤 이상의 시안화나트륨이 사용되었다.¹¹⁾ 미국의 경우, 1980년도에 약 24개소의 광산에서 heap leaching 공정이 사용되었으며, 금 시세가 급격히 상승 후 1991년도에 약 151개소의 광산에서 heap leaching 공정을 통한 금 회수가 이루어졌다.¹²⁾ 2012년 기준 Nevada, Arizona, California, Colorado, Idaho 등 많은 주에서 시안화법을 통한 금 또는 은 회수가 이루어지고 있다.¹³⁾ 캐나다의 경우 2004년 기준 광석에서 제련하는 경우 90% 이상의 금이 시안화법에 의해 회수된다고 알려져 있다.¹²⁾ 터키의 경우, 연간 약 1,600톤의 시안화합물이 소비되며, 이 중 약 600톤의 시안화나트륨이 Etibank 은광산에서 은 회수를 위해 사용된 바 있다.¹⁴⁾

또한 금 제련 시 사용되는 시안화합물 관리와 환경 오염 및 인간 건강 보호를 위해 시안 제조, 운송, 사용에 대한 프로그램(International Cyanide Management Code For the Manufacture, Transport, and Use of Cyanide In the Production of Gold; <http://www.cyanidecode.org>)이 운영되고 있다. 이는 미국 워싱턴 DC에 위치한 국제시안관리협회(The International Cyanide Management Institute, ICMI)에서 개발한 것으로, 금 제련 산업에서 시안화합물을 사용하기 위한 정보를 제공하는 것을 목적으로 하여, 시안화합물 및 제련 과정에서 발생하는 시안 함유 잔사 및 폐액의 안전한 관리에 중점을 둔다. 가입 회사들은 프로그램 준수 여부에 대해 제3자에 의한 이행 점검을 받아야 한다. 가입 회사는 업종별로 볼 때 2015년 기준 시안 제조업 22개, 시안 운송업 109개, 금광업 41개 회사가 참여하고 있으며, 홈페이지에 광산 이름 및 위치, 이 프로그램 인증 여부 등을 게시하고 있다. 나라별로 보면 북미, 특히 캐나다 회사가 많이 가입되어 있어 Barrick Gold Corporation 등 16개,

Newmont Mining Corporation 등 미국 회사 3개, 그 외 호주 5개, 남아프리카공화국 4개 및 멕시코, 페루, 영국, 사우디아라비아, 인도네시아, 프랑스령 가이아나, 불가리아 등에 위치한 회사들이 참여하고 있다.

3. 규제 현황

시안화합물 관련 규제는 크게 시안화법의 광업 사용에 대한 규제와 시안화합물 배출에 대한 규제로 나눌 수 있다. 시안화물은 시안이온(CN⁻)과 시안화수소(HCN) 같은 자유시안화물(CN_{free})과 광석 내 Ag, Cd, Cu, Hg, Ni 등 금속 이온들과 결합하여 비교적 약한 공유 결합성을 띠는 시안화합물(weak acid dissociable, CN_{WAD}), 위의 시안화합물을 모두 포함하며 Co, Au, Fe 등과 강하게 결합된 총시안화합물(CN_{total})로 구분할 수 있다.¹⁵⁾ 대부분의 시안 화합물은 불안정한 자유 시안이 아닌 금속과 결합한 형태로 존재한다. 시안화합물 사용 관련 규제를 살펴보면 다음과 같다. 미국은 기본적으로 Bureau of Land Management (USBLM)과 Environmental Protection Agency (EPA)의 규정을 따른다. EPA는 National Pollution Discharge Elimination System (NPDES) 프로그램을 운영하여 모든 지표수 오염원에 대해 허가를 필요로 하며 현재 가능한 기술 수준을 감안한 환경기준을 제시한다. USBLM의 경우 국토 관리를 위해, 시안 및 기타 제련 설비 운영에 대해 최소 용인 가능한 설계 기준, 배출 보고, 연방 공유지에 위치한 시설의 정기적인 조사 등에 대한 규정을 가지고 있다.¹⁶⁾ 주정부에서는 구체적인 사안에 따라 다른 규정이 설정되어 있어,¹³⁾ Nevada 주에서는 금 회수를 위해 시안화합물의 사용은 허용되나, 천재지변 대비 시설을 구축해야 하며 폐광 시 오염 물질들을 모두 정화해야 한다.¹⁷⁾ Montana 주에서는 시안을 이용한 heap leaching 공정을 전면 금지하고 있으며 새로운 노천광산 개발 역시 금지되어 있다.¹⁸⁾ Oregon 주에서는 시안 침출 운전 및 장비에 대한 구체적인 규제 프로그램을 개발하였다.¹⁹⁾ 유럽의 경우, 유럽연합(European Union, EU)에서의 가이드라인이 있고 각 국가에서는 그 가이드라인을 따라 개별 지침을 정한다. EU 가이드라인에서는 광산업에서의 시안화합물 사용을 규제하고 있지 않으나,²⁰⁾ 체코와 독일에서는 금 광산에서 시안화합물을 사용한 heap leaching 공정을 전면 금지한 바 있다.²¹⁾ 그 밖에도, 남아메리카의 아르헨티나와 코스타리카에서는 노천 광산에서 시안화합물 사용을 금지하였다.²²⁾ 이러

한 규제 현황을 볼 때 새로운 시안화합물 사용 광산 개발이 금지되는 등 시안화법 사용을 점차 금지하는 추세이나, 현재 가동되고 있는 광산에 대해서는 시안화법이 계속하여 사용되고 있는 것을 알 수 있다.

시안화법 사용 관련 규제 외에 시안화합물 자체에 대한 규정을 살펴보면, 거주자를 포함한 환경의 보호를 위한 환경기준과 배출에 관한 제한 기준을 각각 달리 규정하고 있다. 국내의 경우, 시안화법 등 시안화합물 사용 자체에 대한 규제는 특별히 없으나, 시안화합물의 경우 1978년 환경보전법상 특정 유해물질로서 지정되었으며, 2015년 시행된 화학물질관리법에 따른 사고대비물질로서 관리 대상이다. 먼저 환경기준을 보면, 국내의 경우 먹는물 수질기준 0.01 mg/L, 수질환경기준으로 0.01 mg/L로 규정하고 있다. 미국 USEPA와 캐나다의 경우, 먹는물 수질기준과 수질환경기준 모두 0.2 mg/L로 규정하고 있으며, 유럽에서는 먹는물 수질기준 0.05 mg/L, 수질환경 기준 0.005 mg/L로 규정하고 있다.²³⁾ 중국의 경우, 먹는물 수질기준 0.005 mg/L 와 수질환경기준 0.05 mg/L로 규정하고 있다.²⁴⁾ 전세계적으로 볼 때 대략적인 먹는 물 수질기준과 수질환경기준은 약 0.005 - 0.2 mg/L이다. 산업에서 배출기준 또한 크게 다르지 않아, 중국의 경우 산업에서 배출허용 기준을 CN_{total} 0.5 mg/L로 규정하고 있으며²⁵⁾, World Bank에서는, 광산업에서 배출기준을 CN_{total} 1 mg/L, CN_{free} 0.1 mg/L, CN_{WAD} 0.5 mg/L로 규정하였다.²⁶⁾ EU의 경우 광산업에서 10 mg/L 이상의 CN_{WAD} 배출을 금지하고 있으며²⁷⁾, 미국의 경우, 주마다 다르지만 CN_{free} 0.2 mg/L 이하, CN_{WAD} 0.2 - 0.5 mg/L 이하, CN_{total} 기준 1 mg/L 이하 등의¹⁶⁾ 규정을 갖고 있다. 캐나다에서는 광산업에서 배출기준은 CN_{total} 1 mg/L와 CN_{WAD} 0.1 mg/L로 규정하였다.²⁸⁾ 국내의 경우, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙에 따라 시안화합물의 배출 기준은 CN_{total} 기준 청정지역 0.2 mg/L 이하이며 그 외 지역에서의 배출기준은 1 mg/L 이하이다. 일반적으로 시안화법에 이용되는 시안화합물의 농도는 위에서 제시했듯이 100 - 1000 mg/L 가량이므로, 배출기준 CN_{total} 0.2 - 1 mg/L를 달성하기 위해서는 적절한 처리가 필요하다.

4. 처리 기술 현황

시안화법 사용 시 발생하는 시안 함유 폐액을 시안화법을 위한 청화제로 다시 회수하는 것은 경제적으로 매우 중요하므로 재생 공정이 반드시 필요하다. 시안 함

유 폐액을 청화제로 다시 재생시키기 위해서 사용되는 공정은 Crosse's process 등으로,²⁹⁾ sodium sulfide를 아연이 함유된 시안 용액에 첨가하여 아연을 황화아연 형태로 전환시켜 회수하고 아연과 결합된 시안을 시안화칼륨 혹은 시안화나트륨 형태로 재생한다. 또는 acidification과 volatilization을 통해 시안을 회수하는 AVR process도 개발된 바 있다.¹⁶⁾ 이렇게 재생되는 폐액 외에도 재생이 불가능하거나 사용이 종료된 정광의 heap 정화 과정에서 발생하는 시안화합물 함유 폐액은 해당 국가의 규정에 따라서 처리가 필요하다.

시안 정화 처리 방법은 크게 화학적 처리와 생물학적 처리로 나눌 수 있으며, 화학적 처리 방법으로는 alkaline chlorination, hydrogen peroxide, sulfur dioxide and air process 등 이 있다.³⁰⁾ Alkaline chlorination 기술은 가장 오래된 시안 처리 기술 중의 하나로, 폐액의 pH를 높인 후, chlorine 또는 hypochlorite 처리를 통해 시안을 독성이 약한 cyanate(CNO⁻)로 산화분해 후 처리하는 기술이다.³¹⁾ 이 기술은 캐나다 Giant Tellowknife 광산 폐액 중 CN_{total} 농도를 7.8 mg/L에서 0.02 mg/L로 처리 하였으며, Mosquito Creek 광산 폐액 중 CN_{WAD} 농도를 226 mg/L에서 0.5 mg/L로 처리한 바 있다.^{16,32)} 그러나, 금속과 시안 착염의 완전한 분해가 어렵기 때문에 배출기준을 종종 초과하는 경우가 발생하는 단점이 있다.³³⁾ Hydrogen peroxide 기술은 과산화수소를 사용하여 시안화물을 산화시켜 제거하는 방법으로 구리 이온을 촉매로 이용한다. 이 처리 기술은 파푸아뉴기니의 Ok TEDI 광산에 처음 적용되어 시안 폐수를 CN_{total} 기준 110 - 300 mg/L에서 1 - 10 mg/L로 처리한 바 있다.³⁴⁾ 또한, 미국의 Annie Creek 광산에 이 기술을 적용하여 시안 폐수를 배출기준인 0.2 mg/L 이하로 처리한 바 있다 (처리 후, CN_{total} 0.57 mg/L, CN_{WAD} 0.09 mg/L). 그러나, 최종 산물로 생성되는 암모니아에 의해 수계 오염을 야기시킬 수 있는 가능성과 고비용이라는 단점이 있어 많이 사용되지는 않는다.³⁴⁾ Sulfur dioxide and air process의 경우 INCO process와 Noranda process가 잘 알려져 있으며, 이 기술은 sulfur oxide, 산소, 물 과의 반응을 통해 시안이 시안산염(CNO⁻)으로 산화되고 부산물로 황산이 생산된다.³⁵⁾ 이 기술을 사용하여 미국의 Colosseum 광산에서 폐액 내 CN_{total} 농도를 하루에 배출할 수 있는 배출기준인 1.2 mg/L 이하로 처리한 바 있다.³⁶⁾ 또한, 캐나다 Golden Bear 광산에 적용되어 폐액에 함유된 시안을 CN_{total} 205 mg/L에서 0.3 mg/L로 처리하였다.³⁶⁾

이외에 친환경적인 공정으로 미생물을 이용하여 시안을 분해 및 무독화시키는 생물학적 처리 공정이 개발 및 사용되어 왔다. 이 경우 두 단계의 공정으로 구성되는데, 먼저 시안 이온, 혹은 금속과 결합한 시안 착염은 oxidative breakdown을 통해 분해되어 금속은 생물막에 흡착되고 시안은 탄산염(HCO₃)과 암모니아(NH₃)로 분해된다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 공정에서 부산물로 발생한 암모니아를 일반적인 하수처리공정에 따라 질산화-탈질산화 공정을 거쳐 무해한 N₂로 환원시켜 처리한다.^{30,37)} 이러한 생물학적 시안 폐액 처리 공정은 미국의 Homestake 광산과 Hecla Yellow Pine 광산에서 폐액 내 시안 농도를 시안의 배출기준인 CN_{WAD} 0.2 mg/L 이하로 낮추기 위해 사용된 바 있다.¹⁶⁾ Homestake 광산에서는 두 단계로 구성된 RBCs (Rotating Biological Contactors; 회전원판접촉조)를 이용하여 첫 번째 원판에서는 시안을 암모니아로 분해하고 두 번째 원판에서는 암모니아를 질산염으로 질산화시켜 처리하였다. Two-stage RBC 운전 결과 시안 농도를 0.3 mg/L 이하로 낮출 수 있었다.³⁰⁾ 이러한 생물학적 공정은 갑작스러운 시안 부하에 잘 대응하지 못한다는 약점이 있으나, 미생물을 이용하여 시안을 무해한 탄산염과 질소 가스로 전환시키므로 친환경적이고 기존 하수처리 공정에 편입시켜 사용 가능하며 추가 탄소원 주입이 필요하지 않아 경제적이라는 장점이 있다.

미생물을 이용한 공정의 경우 각 공정에서 다양한 미생물이 관여하게 되는데 질산화 및 탈질산화에 각각 관여하는 미생물 외에 시안 분해 미생물 군집의 유지가 가장 중요하다. 실제 광산 폐액 처리를 위해 운영할 경우 시안의 유입 농도가 달라질 수 있으며 다양한 환경 변화가 존재할 수 있으므로 폐액 처리 장치 운전 시 다양한 농도의 시안에 적용한 미생물 군집의 유지가 필요하며 또한 다양한 운전 조건에 따른 미생물 군집의 변화 분석을 통해 최적 운전 조건을 확립하는 것이 중요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 금광으로부터 금을 회수하기 위한 습식제련공정인 시안화법과 연계하여 시안 처리 공정을 설계하기 위한 기초연구로서 금 제련에 사용되는 시안화합물의 사용, 규제 및 처리 기술 현황을 분석하였다. 시안화법은 전세계적으로 금 제련의 주류를 이뤄 온 공정이나 시안을 함유하고 있는 다량의 유독한 폐액이 발

생하므로 심각한 환경 문제를 야기할 수 있어 최근 그 사용이 감소하는 추세에 있으나 여전히 일정 지역에서 사용되고 있다. 또한 각 국가별로 시안화합물의 사용 및 배출에 대한 규제, 환경기준 등이 강화되었으므로 시안 화법 이용 시 반드시 적절한 기술을 적용하여 시안 함유 폐기물을 처리하는 것이 필요하다. 금 제련에서 발생하는 시안 폐액 처리 기술로는 폐액에 포함된 시안을 재생하는 기술, 화학적 산화 분해 처리 기술, 생물학적 처리 기술 등이 있다. 이 중 생물학적 공정은 일반적인 하수처리 공정과 연계하여 처리 가능하여 경제적이며, 미생물을 이용하여 시안과 결합한 금을 흡착 회수하고 시안을 무해한 탄산염과 질소가스로 전환시키므로 환경 친화적이라는 장점이 있어 향후 무배출 금 회수 및 처리 공정 연구에 유용할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원 주요사업인 “금광 광미로부터 유가금속 회수 및 광미 자원화기술 개발 (GP2015-013)” 과제의 재정적 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

References

1. MacArthur, J., Forrest, R., and Forrest, W., 1888: *Improvements in obtaining gold and silver from ores and other compounds*, British Patent, 14174
2. Habashi, F., 1997: *Handbook of extractive metallurgy: Primary metals; secondary metals; light metals*: VCH.
3. Adams, M., Johns, M., and Dew, D., 1999: *Recovery of gold from ores and environmental aspects*: Wiley: Chichester, New York.
4. Fleming, C. A., 1992: *Hydrometallurgy of Precious Metals Recovery*, Hydrometallurgy, 30(1-3) pp. 127-162.
5. Scott, P., 1951: *The Witwatersrand Gold Field*, Geogr. Rev., 41(4) pp. 561-589.
6. Solomonson, L. P., 1981: *Cyanide as a metabolic inhibitor*. Cyanide in biology, ed. B. Vennesland, E. E. C., C.J. Knowless, J. Westley, F. Wissing (Eds.)11-28. New York: Acad. Press.
7. Donato, D. B., Nichols, O., Possingham, H. P., et al., 2007: *A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife*, Environ. Int., 33(7) pp. 974-984.
8. La Brooy, S. R., Linge, H. G., and Walker, G. S., 1994: *Review of gold extraction from ores*, Miner. Eng., 7(10) pp. 1213-1241.
9. Da Rosa, C. D., Lyon, J. S., and Hocker, P. M., 1997: *Golden Dreams, Poisoned Streams: How Reckless Mining Pollutes America's Waters, and How We Can Stop It*: Mineral Policy Center Washington, DC.
10. Kappes, D. W., 2005: *Heap leaching of gold and silver ores*. Developments in Mineral Processing, ed. Mike, D. A. and Wills, B. A. Vol. Volume 15. 456-478: Elsevier.
11. Akcil, A., 2001: *Cyanide versus environment: Turkey's final decision*, Min. Environ. Manage., 9(6) pp. 22-23.
12. Eisler, R. and Wiemeyer, S., 2004: *Cyanide Hazards to Plants and Animals from Gold Mining and Related Water Issues*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, ed. Ware, G. Vol. 183. 21-54: Springer New York.
13. Laitos, J. G., 2012: *The Current Status of Cyanide Regulations*, Eng. Min. J., 213(2) pp. 34-40.
14. Mert, B. K., Sivrioğlu, Ö., Yonar, T., et al., 2014: *Treatment of Jewelry Manufacturing Effluent Containing Cyanide Using Ozone-Based Photochemical Advanced Oxidation Processes*, Ozone Sci. Eng., 36(2) pp. 196-205.
15. Yazar, B. Cyanides in the environment and their long-term fate. in Proceedings of 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey À IMCET2001, pp. 85À93. 2001.
16. EPA, 1994: *Treatment of cyanide heap leaches and tailings*: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Special Waste Branch.
17. Kampf, S. K., Salazar, M., and Tyler, S. W., 2002: *Preliminary Investigations of Effluent Drainage from Mining Heap Leach Facilities*, Vadose Zone J., 1(1) pp. 186-196.
18. Crapo, M. A., 1999: *Regulating Hardrock Mining: To What Extent Can the States Regulate Mining on Federal Lands*, J. Land Resources & Envtl. L., 19249.
19. Coyle, J., 2008: *Oregon Toxics Monitoring Program Willamette River Basin Year One (2008) Summary Report* Oregon Department of Environmental Quality Laboratory and Environmental Assessment Division
20. Campbell, B., Centre, I. D. R., and Afrikainstitutet, N., 2009: *Mining in Africa: Regulation and Development*: Pluto Press.
21. Bernstein, P. L., 2004: *The Price of Gold URL: <http://www.ethicalmetalsmiths.org/ThePRICEofGOLD.pdf> [accessed 10th August 2008]*.
22. Yakovleva, N. and Vazquez-Brust, D., 2012: *Stakeholder Perspectives on CSR of Mining MNCs in Argentina*, J Bus Ethics, 106(2) pp. 191-211.
23. Nakles, D., Dzombak, D., Ghosh, R., et al., 2006: *Regulation of cyanide in water and soil*. Cyanide in water

- and soil: chemistry, risk and management ed. 351-386.
24. Yulin, J. The use of chemicals in aquaculture in the People's Republic of China. in Use of Chemicals in Aquaculture in Asia: Proceedings of the Meeting on the Use of Chemicals in Aquaculture in Asia 20-22 May 1996, Tigbauan, Iloilo, Philippines. 2000. Aquaculture Department, SEAFDEC.
 25. Meng, X., Zhang, Y., Zhao, Y., et al., 2012: *Review of chinese environmental risk assessment regulations and case studies*, Dose-response, 10(2) pp. 274-296.
 26. Group, W. B., 1998: *Pollution prevention and abatement handbook*. Oil and Gas Development (onshore) Guideline.
 27. Parga, J. R., Vazquez, V., Valenzuelab, J. L., et al., 2012: *Detoxification of cyanide using titanium dioxide and hydrocyclone sparger with chlorine dioxide*, Chem. Speciation Bioavailability, 24(3) pp. 176-182.
 28. Demopoulos, G. and Cheng, T., 2004: *A case study of CIP tails slurry treatment: comparison of cyanide recovery to cyanide destruction*, Eur. J. Miner. Process. Environ. Prot., 4(1) pp. 1-9.
 29. Hamilton, E. M., 1920: *Manual of cyanidation*: McGraw-Hill.
 30. Botz, M. M., Mudder, T. I., and Akcil, A. U., 2005: *Cyanide treatment: Physical, chemical and biological processes*. Developments in Mineral Processing, ed. Mike, D. A. and Wills, B. A. Vol. Volume 15. 672-702: Elsevier.
 31. Han, B. B., Shen, Z. S., and Sr, W., 2005: *Cyanide removal from industrial wastewaters using gas membranes*, J. Membrane Sci., 257(1-2) pp. 171-181.
 32. Kuyucak, N. and Akcil, A., 2013: *Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes*, Miner. Eng., 50-51(0) pp. 13-29.
 33. Sharma, V. K., Rivera, W., Smith, J. O., et al., 1998: *Ferrate(VI) oxidation of aqueous cyanide*, Environ. Sci. Technol., 32(17) pp. 2608-2613.
 34. Knorre, H. and Griffiths, A. Cyanide detoxification with hydrogen peroxide using the Degussa process. in Proceedings of the Cyanide and the Environment Conference, Tucson, Arizona. 1984.
 35. Borbely, G. J., Devuyt, E. A., Ettl, V. A., et al., 1985: *Cyanide removal from aqueous streams*, (U.S. Patent No. 4,537,686)
 36. Smith, A. and Mudder, T., 1991: *Chemistry and treatment of cyanidation wastes*, 345. London, UK: Mining Journal Books Ltd.
 37. Akcil, A., 2003: *Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments*, Biotechnol. Adv., 21(6) pp. 501-511.

박 정 현



- 전북대학교 자원·에너지공학과 학사
- 전북대학교 자원·에너지공학과 석사
- 한국지질자원연구원 도시광산연구실 석사후연수자

신 도 연

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 선임연구원
- 당 학회지 제 21 권 2 호 참조

박 현 식



- 연세대학교 금속공학 학사
- 연세대학교 신소재공학 석사
- University of New South Wales 재료공학 박사
- 현재 한국지질자원연구원 도시광산연구실 선임연구원

정 진 기

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제15권 5호 참조

이 재 천

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
 - 당 학회지 제10권 6호 참조
-