

2005년 이후 중국의 글로벌 희토류 공급망 장악과 미국의 대응*

김 연 규** · 안 주 홍***

2010년 중국의 대일 희토류 수출규제는 단기의 자원무기화로 인한 외교적 효과를 얻기 위한 것이라기보다는 중국의 희토류 부가가치 고도화, 국산화, 일괄 수직생산 체계의 완성이 하나의 사건을 통해 표출된 것이다. 희토류 공급망의 성격 때문에 중국의 희토류 생산 비중이 감소하고 미국을 포함한 중국밖(Rest of World)의 희토류 공급이 증가함에도 불구하고 중국의 희토류 공급망 장악은 크게 감소하지 않았다. 본 논문의 목적은 2010년 중국의 대일 희토류 수출금지 조치 이후 글로벌 희토류 수요 공급구도 변화를 재생에너지와 전기차 산업의 확대에 따른 중희토류 소재 네오디뮴과 디스프로슘 공급망 관점에서 분석하고 2019년 이후 중국의 대미 희토류 수출금지 조치 가능성이 다시 제기됨에 따른 미국 희토류 국산화 전략의 가능성과 한계를 분석하는 것이다.

주제어 : 희토류, 중희토류, 네오디뮴, 디스프로슘, 공급망, 희소금속

* 이 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015S1A3A2046684).

** 제1저자, 한양대학교 국제학부 교수

*** 교신저자, 한양대학교 생명과학과 교수

I. 서론

재생에너지와 전기차는 21세기 세계경제를 끌어갈 대표적 산업으로 선진국들이 기술과 산업주도권을 장악하기 위하여 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 최근에는 미래 디지털 4차 산업으로 까지 확대되면서 국가들간의 21세기 첨단 제조업 경쟁이 본격적인 단계로 진입했다. 이러한 21세기 세계경제 주도권 쟁탈전에서 빼놓을 수 없는 것이 희토류(Rare Earth Elements)와 희소금속(Rare Metal)등 전략광물 확보 경쟁이다. 주요국들은 이미 10여년전부터 국가차원에서 핵심광물자원(Critical Raw Materials) 확보와 지속가능한 관리 전략에 대해 고민해 오고 있다 (성동원 2018). 20세기동안 당시 세계경제를 끌어간 내연기관 자동차, 발전소, 산업의 원료로서의 정유화학 등의 원재료인 원유를 둘러싸고 치열한 쟁탈전이 벌어졌으며 결국 원유 공급망을 지배한 국가가 세계를 지배했었다. 이제 21세기 첨단산업과 기후변화대응, 첨단무기개발에 핵심적인 원료는 희토류와 희소금속이다. 디지털 트랜스포메이션과 함께 코로나 이후 중요한 변화 가운데 한 가지는 에너지 전환의 가속화로 희귀 금속과 광물에 대한 수요가 급증하고 있다는 점이다. 코로나 사태는 원유가스 시대가 예상보다 빨리 저물수 있다는 것을 보여주었다. 원유가스 시대가 가고 재생에너지가 대세가 되면 에너지를 둘러싼 지정학적 충돌이 사라진다는 환상이 점점 깨지고 있다. 재생에너지와 4차산업 디지털 시대는 많은 종류의 희귀금속과 광물을 필요로 하며 이러한 금속과 광물은 원유 가스보다 더욱 더 특정 국가와 지역에 치중해 있어 원유 가스 보다 더 치열한 지정학적 충돌이 예측된다. 미·중 무역분쟁으로 주요 금속과 광물 공급망이 새롭게 재편되고 있는 속에 구리, 코발트, 콜탄 등 디지털 경제 구축에 필수적인 원료들을 두고 미국과 중국의 치열한 경쟁이 가속화될 것이다 (김연규 2020a).

희토류에는 17개의 서로 다른 소재 광물이 있는데 풍력과 태양광, 전기차, 통신망, 해저 케이블, 미사일과 전투기 등 첨단 무기 등 제조에 없어서는 안 될 소재광물이자 녹색광물이라고 할 수 있다 (김경연·이광우 2016). 17개의 희토류 소재 광물은 1960년대 이후 우리가 사용해온 거의 모든 전자제품에 합금소재로 들어가 있었다. 희토류의 산업적 중요성은 일본의 기술개발로 1980년대 이후 더욱 확대되는데 희토류 소재가 가장 중요한 부품화 되어서 컴퓨터에서 의료장비, 무기 등에 사용되는데 그 부품이 바로 영구자석(permanent magnet)이다. 1990년대 이후 풍력발전 터빈과 전기차 모터에 필수적인 부품이 되면서 희토류의 소재로서의 중요성이 더욱 절실해졌다. 영구자석 부품에 대한 산업적 응용분야는 디지털혁명으로 더욱 확대될 것이며 영구자석 제조의 소재가 되는 희토류 광물인 네오디뮴

(Neodymium), 디스프로슘 (Dysprosium), 테르븀(Terbium) 등은 공급부족과 가격급등을 겪은 바 있다. 태양광 패널 제조에는 희소금속인 인듐, 갈륨, 텔루륨 등이 필수적인 소재들이다 (김태현·이태의 2019). 잘 알려져 있는바와 같이 전기차 리튬이온(Lithium Ion Battery: LIB) 배터리에는 하얀석유¹⁾라 불리는 리튬과 코발트와 같은 희소금속이 필수적인 소재이다 (한국광물자원공사 2018). 전기차 배터리에는 이외에도 니켈, 망간, 바나듐, 그래파이트, 희토류 등이 추가로 필요하다.

17개의 희토류와 40여종의 희소금속의 가장 뚜렷한 지정학적 특징은 압도적으로 중국에 매장량과 생산량이 치중되어 있고 미국은 1950-60년대 세계 최대 생산국 지위를 중국에 내어주고 생산이 거의 중단되어 있으며, 유럽과 일본은 부존량 자체가 없이 해외 도입에 의존해야 하는 상태라는 점이다. 중국은 ‘희토류와 희소금속의 사우디아라비아’라 불려도 전혀 손색이 없을 정도이다. 1992년 중국의 지도자 덩샤오핑이 “중동이 석유를 가졌다면 중국은 희토류를 가지고 있다”라고 말한데서 드러나듯이 오늘날 21세기 첨단제조업과 디지털 경쟁에 돌입한 미국과 중국의 향후 진로를 결정하는데 있어 양국의 희토류와 희소금속의 이러한 극명한 생산능력의 차이는 결정적인 요인으로 작용할 것이다.

1983-2005년은 중국의 글로벌 희토류 생산 독점시기였다. 미국, 일본, 유럽 등 선진국 경제는 정유화학, 자동차 배기가스 정화장치, 컴퓨터, 의료장비, 영구자석 등에 사용하는 희토류에 대한 수요가 점점 증가하였고 중국은 이러한 서구 선진경제에 필요한 희토류 원재료를 저렴하게 공급하는 역할을 하였다. 희토류가 가장 새롭게 응용된 산업분야 수요는 태양광, 풍력, 그리고 전기차 분야였다. 이 시기에는 중국내부의 수요보다는 수출비중이 훨씬 컸고 중국의 희토류 응용 기술 미비로 부가가치가 큰 다운스트림 희토류 중간재 부품보다는 원재료 수출이 훨씬 더 많았다 (Zhou, Li & Chen 2017, 204). 환경 규제 때문에 중국 밖의 희토류 생산시설은 미국을 포함해 거의 중단한 상태로 중국에 점점 의존하게 된 결과 중국의 희토류 세계 생산 점유율은 90%를 넘게 되었다 (Mancheri 2015; Mancheri & Marukawa 2016, 8-9).

2005-2010년은 중국의 정치경제적 부상이 본격화하고 재생에너지와 전기차 분야에서 괄목할만한 성장이 이루어진 시기이다. 중국의 재생에너지와 전기차 시장이 확대되기 시작하여 중국 희토류 총 생산량 가운데 내수 비중이 70%까지 늘어났다 (Mancheri & Murakawa 2016). 전 세계적으로나 중국내부 모두 재생에너지와 전기차에 필수적인 영구자석에 들어가는 희토류인 네오디뮴(Nd: Neodymium)과 디스프로슘(Dy: Dysprosium)에 대한 수요가 특

1) 은백색 희소 광물인 리튬은 2차전지인 LIB의 주요 소재로 검은 색의 석유를 대체한다고 해서 ‘하얀 석유’로 불린다.

히 많이 늘어나기 시작했다. 2005년 이후 중국정부는 다양한 정책적 수단을 활용해 국내 희토류 생산과 해외 수출을 통제하기 시작했다 (Mancheri 2015; Seaman 2019; Hou, Liu, Wang, & Wu 2018).

2010년 9월 7일 센카쿠 열도 (중국명 댜오위다오)에서 중국인 선장이 일본 해경에 체포되는 사건이 있었고, 중국의 희토류 수출이 알 수 없는 이유로 지연됐다. 2010년 연간 5만 톤 가량의 희토류 수출쿼터를 유지하던 중국은 2010년부터 수출쿼터를 연 3만 톤 수준으로 유지하겠다고 발표하였다. 전년 대비 약 40% 감소된 수출쿼터로 인해 국제 희토류 가격은 최대 16배까지 상승하였다. 영구자석 희토류 소재 수요가 급증하던 시기에 겹친 중국의 비공식 일본 수출 엠바고로 2011년 5월 이후 2011년 말까지 영구자석 희토류 소재 가격은 급등하였다. 중국에 대한 희토류 공급망 의존 심화에 대한 우려가 현실화되어 2011-2012년 미국 유럽 일본의 재생에너지와 전기차 스마트폰 업체들은 희토류 소재와 부품 공급 충격에 휩싸였다. 중국발 희토류 공급망 리스크 부각으로 재생에너지와 전기차 보급이 차질을 빚을 것이라는 전망들이 나오기 시작했다. 각국은 희토류와 기타 크리티컬²⁾ 광물(critical minerals) 리스트를 만들어 위기관리를 시작했고 공급망 회복탄력성(supply chain resilience) 복원 차원에서 우선은 비축된 광물로 공급중단을 견디면서 대체 공급자와 공급망을 구축하기 시작했다.

중국의 희토류 수출규제 이후 글로벌 희토류 생산 구도에서 가장 큰 변화는 세계 희토류 생산에서 차지하던 중국의 비중이 2010년 90%에서 2018년 70%로 낮아졌다는 점이다. 2025년경이 되면 중국의 비중은 50% 이하로 줄어든 것이라고 한다. 2019년 전세계 희토류 생산량 190,000톤 가운데 중국밖에서 생산된 희토류가 약 70,000톤 정도였다. 미국 지질연구소 (USGS)는 2019년 미국의 희토류 생산이 2018년 대비 8,000톤 증가해 26,000톤으로 증가했으며 이로써 중국에 이어 세계 2위의 희토류 생산국이 되었다고 발표하였다. 호주의 라이나스社 마운트웰드 광산은 2019년 현재 20,000톤을 생산하여 3위이다. 최근 언론에서는 중국이 2018년 약 4만톤의 희토류를 수입해 최대 수입국이 되었다는 보도까지 나오고 있다.

최근 미중 무역분쟁이 심화되고 있는 가운데 중국이 과연 미국으로의 희토류 수출 금지 카드를 꺼내들 것인가에 관심이 모아지고 있다. 2010년 중국의 희토류 수출 규제이후 글로벌 희토류 생산구도의 변화를 감안할 때 미국 유럽 일본은 중국의 희토류 공급으로부터 얼마나 독립해서 안정적인 공급망을 구축해 놓은 것인지 많은 사람들의 관심이 모아지고

2) critical 이란 의미는 절대적인 공급량이 수요량에 못 따라가거나 공급망(supply chain)에 차질이 생길 가능성이 있다는 의미.

있다. 절대적인 수요 공급 숫자상으로는 중국이외에 많은 생산자가 추가로 생산을 하면서 공급다변화가 이루어진 것은 사실이다. 하지만 공급망이라는 관점에서 보면 미국에서 생산된 희토류 원재료는 미국내에 분리 가공 시설이 없기 때문에 여전히 채굴된 대부분의 희토류 원재료는 다시 중국으로 수출되어서 중국에서 분리 가공되어 희토류 산화물의 형태로 미국으로 다시 수입되고 있다. 수출수입 통계만으로는 희토류 밸류체인과 공급망의 리스크를 정확히 파악하기 어렵다는 사실을 보여준다. 호주의 라이나스社가 생산한 희토류 원재료는 반면 말레이시아 퀴탄(Quantan) 분리가공 시설로 보내져 희토류 소재로 다시 일본으로 수출된다. 말레이시아 내부에서 분리 가공 시설 운용 관련 환경적 위험성에 대한 사회적 반발이 있어 향후 라이나스社의 공급분은 상당한 리스크에 노출될 가능성이 크다. 2020년 이후 글로벌 희토류의 가장 큰 쟁점은 급증하는 재생에너지와 전기차에 소요되는 특정한 희토류 소재 네오디뮴(Nd: Neodymium), 디스프로슘(Dy: Dysprosium)의 공급부족을 어떻게 확보하느냐이다. 중국정부가 수출과 생산규제를 하고 있는 희토류 종류도 Nd와 Dy이다. 특히 중희토류로 분류되는 Dy가 문제이다. 중국 정부 규제 주 대상인 남부중국 간저우시 주변의 희토류 분포 특징이 Dy가 다량 매장되어 있으며 중국 밖에서는 아직은 미국 알래스카주 와이오밍주 그린란드 등에서만 발견되는 것이다. 현재 2013년 이후 급증한 중국밖(ROW: Rest of World)의 미국 마운틴패스, 호주 라이나스 등 70,000만톤 가량의 희토류 생산은 대부분 경희토류 종류로 Dy를 포함하지 않는다.

본 논문의 목적은 2010년 중국의 대일 희토류 수출금지 조치 이후 글로벌 희토류 수요 공급구도 변화를 재생에너지와 전기차 산업의 확대에 따른 중희토류 소재 Nd와 Dy 공급망 관점에서 분석하고 2019년 이후 중국의 대미 희토류 수출금지 조치 가능성이 다시 제기됨에 따른 미국 희토류 국산화 전략의 가능성과 한계를 분석하는 것이다. 2장에서는 희토류라는 희소금속이 가진 매장량 분포, 생산방식, 산업수요 변화에 따른 독특한 공급망 안보의 특징을 규정한다. 3장에서는 2010년 중국의 대일 희토류 수출규제를 단기의 자원 무기화로 인한 외교적 효과를 얻기 위한 것이라기보다는 중국의 희토류 부가가치 고도화, 국산화, 일괄 수직생산 체계의 완성이 하나의 사건을 통해 표출되었음을 주장한다. 4장에서는 희토류 공급망의 성격 때문에 중국의 희토류 생산 비중이 감소하고 미국을 포함한 중국밖(Rest of World)의 희토류 공급이 증가함에도 불구하고 중국의 희토류 공급망 장악은 크게 감소하지 않았다고 결론 내린다.

II. 희토류 공급망 안보의 국제정치

최근 많은 연구들이 21세기의 첨단 제조업과 4차 산업이 어떤 원재료, 소재, 부품 등을 사용할 것이며 이러한 원재료들이 가장 낮은 단계의 밸류 체인상 주로 어떤 국가에서 채굴될 것이며 채굴된 원재료들이 어떠한 국가에서 중간 공정을 거쳐 첨단 제조업과 4차 산업의 최종 제품이 되기 위한 부품으로 제조되는가에 관한 공급망의 안정성을 평가하고 있다 (성동원 2018; World Bank Group 2017; Gulley, Nassar, and Xun 2018; Mancheri, 2018; Sprecher, Daigo, Spekkink, Vos, Kleijn, Murakami, & Kramer 2017; Foreign Policy 2019). 21세기에는 석유와 가스 등 액체형태의 에너지 원재료와 석유 가스 화학 공정이 아니라 희소금속이라 불리는 다양한 희귀한 금속과 광물이 원재료가 되어 다양한 밸류체인의 공정을 거쳐 첨단 제조업과 4차산업의 최종 제품으로 태어날 가능성이 크다 (Economist 2020). 일련의 연구들은 재생에너지와 전기차를 포함한 21세기 미래 디지털 4차 산업에 필수적인 희토류와 희소금속의 산업적, 기술적, 화학적, 자원개발적 특징을 분석하고 있다 (임경묵 한준희박승연 2019; 조희찬 2019; 이진영 2019). 희토류와 희소금속은 보통의 금속처럼 다량이 소요되지 않고 아주 소량으로 첨단 기능을 가능케 한다. 보통의 철과 금속에 소량의 희토류와 희소금속을 추가로 합금하여 고효율의 기능을 얻기 때문에 특히 희토류는 ‘산업의 조미료’ (MSG), 향료금속(spice metal), 첨단산업의 비타민 등으로 불린다. 원재료의 형태로 채굴함에 있어서도 다량의 채굴이 어렵다. 대체재를 찾기도 어렵다. 한국 무역협회 국제무역연구원 (2018)은 2018년 발표된 『첨단산업의 비타민, 희소금속의 교역동향과 시사점』이라는 보고서에서 희소금속을 첨단산업의 비타민이라고 칭하면서 첨단제조업과 4차 산업을 분류하고 해당 희소금속을 명시하고 있다.

2005년 이후 중국이 중국에서 생산된 희토류와 희소금속의 유럽, 일본, 미국으로의 수출 규제를 강화하고 아프리카와 남미, 호주, 캐나다 등의 희토류와 희소금속 광산에 대한 투자를 본격적으로 늘리자 미국과 유럽연합은 글로벌 전략광물 공급망에 대한 리스크 분석을 내놓고 대비하기 시작했다 (Bartekova & Kemp 2016). 유럽연합 집행위원회는 2008년 11월 광물자원기반 전략(Raw Materials Initiative: RMI)을 책정하고 수요확대가 예상되는 에너지 기술에 사용되는 40여 종의 전략광물과 희소금속을 평가하고 11가지를 핵심전략광물(Critical Raw Materials)로 지정하였다 (성동원 2018, 9).³⁾ 유럽연합 집행위원회(European

3) 안티몬, 베릴륨, 코발트, 형석, 갈륨, 게르마늄, 흑연, 인듐, 마그네슘, 니오븀, 백금족 (platinum group metals (PGM)), 희토류, 탄탈륨, 중석 등이다. 백금족(PGM)은 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 오스뮴(Os), 이리듐

Commission)는 2011년에 지정된 전략광물 리스트에 대해 각각의 소재별로 공급리스크와 경제적 중요성 차원에서 서로 다른 전략적 가치를 부여하였으며, 2014년, 2017년 2차례에 걸쳐 수정 보완한 리스트를 공개하였다 (European Commission 2017). 유럽연합의 전략광물 보고서들은 결론적으로 40여종의 전략광물들 가운데 가장 공급리스크가 큰 금속은 희토류이며 희토류의 세계 무역량은 연15만톤, 거래 규모로는 약 10조원 (US\$9 billion) 정도⁴⁾로 자체시장이 작아서 희토류의 경제적 중요성이 피상적으로는 낮아 보이지만 희토류가 중간 가공 부품으로 수많은 산업적 응용이 되는 점을 고려하면 희토류의 실질적인 경제적 가치는 8조달러 (US\$ 7 trillion)⁵⁾에 달한다고 보고 있다(Global Rare Earth Industry Association 2020). 특히 2017년에 나온 보고서는 처음으로 중희토류의 공급리스크를 강조하고 있다. 희토류는 경희토류(Light Rare Earth Elements, LREEs)와 중희토류(Heavy Rare Earth Elements, HREEs)로 구분된다. 경희토류는 중희토류에 비해 부존량이 10배 가까이 많고 전 세계에 많이 분포되어 있으며 채굴이 비교적 쉬운데 반해 중희토류는 현재까지는 중국남부 지역에서 주로 생산되고 중국밖에서는 생산량이 거의 없기 때문이다.

2005년부터 시작된 중국의 희토류와 기타 전략광물에 대한 생산과 수출규제에 대한 충격파가 유럽의 경우 주로 재생에너지와 전기차 등 분야에 대한 것이었다면 미국의 주된 우려는 국방과 방위산업 분야에서 나왔다. 미국의 경우 희토류와 전략광물의 60% 정도의 최대 수요처는 석유가스 산업 채굴과 정유화학 분야이다. 희토류와 전략광물은 그동안 잘 알려지지 않았지만 미사일 유도시스템, 차세대 전투기, 레이저 시스템, 각종 통신장비 등 첨단 군사장비에 전체 희토류 수요의 5% 정도의 적은 비중이지만 필수적으로 사용되어져 왔다. 미국은 1946년 제정된 전략물자비축법(The Strategic and Critical Materials Stockpiling Act)에 근거하여 국가방위비축(NDS, National Defense Stockpile) 제도를 운영하고 있다. NDS 제도는 국제 분쟁이나 자원파동 등 국가비상시에 대비하여 주요 군수물자를 비축하는 제도로써 국방부 산하 국방비축센터(Defense National Stockpile Center)에서 비축 물자의 구매와 보관, 방출의 전 과정을 관리하고 있다(정웅태 외 2011, 117). 이 제도에 따라 미국은 크롬, 텅스텐 등 16개 광물⁶⁾에 대한 비축을 진행하고 있으며, 2009년 말 기준으로 69만 톤을 비축 중이었다. 2009년 오바마 정부는 세계금융위기를 극복하기 위한 국가적 대응책으로, 재생에너지 등 환경산업에 대한 대규모 공공투자로 경기를 부양하는 그린뉴

(Ir), 백금(Pt) 등 6원소의 총칭이다.

4) 약 29억톤이 거래되어 7조 달러의 규모를 가지고 있는 철광석 등과 비교하면 매우 작은 시장이다.

5) 세계경제전체 GDP 합계가 US\$ 75 trillion 정도이다.

6) 베릴륨, 티타늄, 크롬, 망간, 코발트, 게르마늄, 니오븀, 백금, 팔라듐, 카드뮴, 주석, 안티모니, 탄탈륨, 텅스텐, 이리듐

딜 정책을 시행하고 희토류 확보와 비축 확대를 위한 각종 법안을 발의하였다 (정웅태 외 2011, 118). 2010년 4월 미국감사원(US Government Accountability Office)은 정부기관으로서 처음으로 희토류와 전략광물 공급리스크로 인한 미국 방위산업에 대한 여파를 미국의 회 해당 소위원회에 보고하였다 (US GAO 2010). 방위산업과는 별도로 2010년 12월 미국 에너지부(Department of Energy, 이하 DOE)는 재생에너지 확대 차원에서 재생에너지 기술과 관련된 CM 전략(Critical Materials Strategy)을 발표하였다.

미국입법조사처(US Congressional Research Service)는 2010, 2013, 2015년 연속으로 희토류와 전략광물 전 분야에 걸쳐 미국의 수입의존도와 공급리스크 정도를 분류 분석하였다. 미국지질연구소(USGS 2020a, 2020b) 조사가 밝히듯이 미국은 자국내에 희토류와 전략광물이 풍부히 존재함에도 불구하고 35개 중요광물 중 29개 광물의 절반 이상을 수입에 의존하고 있으며, 35개 광물 중 14개 광물의 경우 국내 생산이 전혀 안되는 것으로 밝혀졌다 (US Department of Commerce 2016). 다양한 광물의 경우 미국이 수입을 많이 하는 대상 국가는 중국이었다. 희토류의 경우는 미국의 對중국 수입의존도가 절대적으로 높았다. 지난 20년 동안 미국은 어느 사이에 중국산 희토류에 위협할 정도로 의존하게 된 것이다. 미국은 한 해 1만톤 전후로 희토류를 수입하는데, 이 중 80%가 중국의존이라는 사실이 드러났다. 중국은 2005-2015년 남미, 아프리카, 동남아 등의 해외 전략광물 개발과 지분투자를 통한 자원확보에도 치중하여 상당수의 해외 자원들도 중국지배하에 들어가는 결과가 초래되었다 (Ericsson, Löf, & Löf 2020; Economist 2020). 중국의 세계적 규모의 아프가니스탄 구리 원광석 채굴 프로젝트는 대표적인 예이다.

현재 글로벌 희토류 공급망의 가장 큰 문제는 중희토류를 생산하는 국가는 중국이 유일하다는 점이다. 박인섭·송재두 (2016)는 중국의 희토류 자원 매장 지역 분포의 특징을 ‘북경남중(北輕南重)’으로 정의하고 있다. 경희토류 광산은 주로 네이멍구 자치구 바오터우시, 산둥성 텅저우시 웨이산현 등 북방지역 및 쓰촨성 량산이족자치주에 매장되어 있는 반면에 이온형 중중(中重) 희토류 광산은 주로 장시성 간저우시, 푸젠성 롱옌시(福建省龙岩市)와 같은 남방지역에 매장되어 있다 (박인섭·송재두 2016, 304). 중국이 지배하고 있는 ‘희토류 자석(영구자석)’에 쓰이는 희토류 원재료인 네오디뮴 디스프로슘 테르븀 등이 모두 중희토류로 분류된다. 세계 희토류 생산량의 40% 이상이 희토류 자석 제조에 쓰이고, 2028년에는 그 비중이 68%로 높아질 것으로 전망되기 때문에 희토류 문제는 결국 중희토류 문제로 귀결된다. IEA(국제에너지기구)에 의하면 2050년에는 태양광이 현재보다 17배, 2038년에는 전기차가 신차판매의 50%, 2050년에는 90%까지 급증한다고 한다. 따라서 2030년까지 영구자석 소재 부품인 희토류 일종인 네오디뮴과 디스프로슘 수요는 각각 27배와 7배

까지 급증할 것이 예상된다.

희토류 공급망의 두 번째 문제는 소위 “밸런스 문제”라고 불리는 것이다. 희토류 소재는 17개나 될 정도로 종류가 많고 소재별로 매장량과 분포가 다르다. 일부 희토류 소재는 과거에는 산업수요가 높았으나 이제는 기술발전으로 산업수요가 감소했음에도 불구하고 지속적으로 대규모로 생산되고 산업수요가 높아가는 특정 희토류는 오히려 생산량이 적은 현상을 말한다. 보통 희토류 광석안에는 여러 가지의 희토류 소재가 혼재되어 섞여서 같이 있기 때문에 채굴과정에서 한가지 원하는 희토류를 마음대로 더 많이 생산 할 수도 없다. 한편 희토류의 소재를 산업에 활용하는 기술발전은 매우 빠른 속도로 이루어지고 있어 희토류 소재의 산업별 수요 패턴은 빠르게 변하고 있다 (Elshkaki & Graedel 2014; Binnemans, Jones, Müller & Yurramendi 2018). 희토류 산업 섹터별 수요는 응용 기술에 따라 영구자석 (permanent magnet), 촉매제 (자동차 배기가스 정화장치 (catalytic converters))와 정유화학 촉매제 (fuel cracking catalysts), 자동차 배터리 합금, 세라믹 가공, 연마제, 금속합금, 액정 디스플레이 등 8개 분야로 나누어지는데 최근 희토류 수요 증가를 견인하는 산업응용 분야는 영구자석이다. 대표적인 경희토류인 세륨(Cerium)과 란타넘(Lanthanum)은 1970-80년대 산업수요가 가장 높았던 석유화학분야에서 촉매제, 연마제, 형광램프와 텔레비전과 컴퓨터 스크린 등에 쓰였었다. 중국 밖에서도 충분히 수입 가능하며 경희토류는 전 세계적으로 공급 과잉 상태이다. LED 전구가 등장하면서 형광램프 수요가 줄어들면서 세륨에 대한 형광체 산업수요도 현재 감소하고 있다.

셋째, 밸류 체인 측면에서 기존 전통 금속인 금, 구리, 텅스텐 등 대부분의 전략광물과 구별되는 희토류가 가진 중요한 특징이 한 가지 있다. 희토류는 업스트림 단계의 채굴 직후 원재료와 화학적 가공과 분리의 다운스트림 단계의 산화물, 그리고 다운 스트림 단계의 영구자석과 같은 중간재 부품 등 각각의 부가가치가 엄청난 차이가 난다는 점이다. 예를 들어 원재료 상태의 희토류와 영구자석 중간재 부품의 가격차이는 1000배 이상 난다. 금이나 구리 등 전통 금속 또는 원유의 경우는 채굴직후의 원재료 자체가 상당한 가치를 지니는 것과 매우 다르다. 이러한 희토류 밸류체인의 특징이 원래 소재 분야 세계 최고 기술은 일본이 가지고 있었으나 중국으로 하여금 전략적으로 희토류 미드스트림 화학적 분리와 가공 분야 기술을 집중 개발하도록 만들었으며 중국은 희토류 다운스트림 중간재 부품으로 가장 활용도가 높고 부가가치가 높은 영구자석 분야 기술 국산화에 최대의 노력을 기울였다.

중국이 2005년부터 점진적으로 희토류 생산과 수출을 규제하기 시작했다는 의미는 중국의 이러한 희토류 부가가치 고도화, 국산화, 일괄 수직생산 체계가 어느 정도 완성되었다

는 점을 의미하는 것이다. 미국, 유럽, 일본이 아프리카, 남미, 동남아 국가들을 대상으로 전통적으로 해오던 원재료 무역의 형태가 이제 중국을 상대로는 불가능해졌음을 의미하는 것이었다 (UNCTAD 2014; 김연규 2020a, 2020b, 2020c). 중국의 희토류 전략의 최우선 목표는 중국 국산 전기차와 풍력터빈, 태양광패널, 절전형 조명 시스템을 중국에서 채굴된 희토류 원재료를 국내에서 화학적 가공 분리하여 최종 영구자석 부품으로 만들어 조립하는 것이다. 중국의 원재료가 충분하지 않을 경우를 대비해 호주, 캐나다, 아프리카, 남미, 동남아의 희토류, 전략광물 원재료를 확보하여 가능하면 중국에서 분리 가공하는 것이 두 번째 목표이다. 각각의 제품에 대하여 희토류 공급망이 다른 국가들에 의존하지 않고 온전하게 중국 국내에 남게 된 것이다. 바로 이것이 중국내에서 강조하는 서구 국가들로부터의 기술 자립의 대표적인 본보기였던 것이다.

<표 1> 희토류 소재별 공급망 리스크 현황

REE	Main (large volume) applications at present	Criticality level (2014)	Criticality level (2017 and near future)?	Market in balance?	New applications to mitigate the oversupply problem? ²⁴
Lanthanum (La)	NiMH batteries, optical glasses, green lamp phosphor (LAP), catalysts, mischmetal	None	None	Oversupply	PVC stabilizer, as mischmetal in new Al and Mg alloys
Cerium (Ce)	Polishing compound, decolorization agent, Ce-doped glass, catalyst, mischmetal	None	None	Oversupply	As mischmetal in new Al and Mg alloys, additive in Nd-Fe-B magnets
Praseodymium (Pr)	Green colorant for decorative glass, ceramic pigment	None	None	In balance	Not required
Neodymium (Nd)	Nd-Fe-B permanent magnets	High	Highest (Nd will likely become the most critical REE in the future)	In balance as Nd drives LREE production	Not required
Samarium (Sm)	Sm-Co permanent magnets	None	None	In balance	Not required
Europium (Eu)	Y ₂ O ₃ :Eu ³⁺ lamp phosphor	High	None	Slight oversupply as lamp phosphor market becomes smaller	No new applications in the pipeline, but available amounts of Eu are small
Gadolinium (Gd)	Contrast agents for magnetic resonance imaging (MRI), additive in some Nd-Fe-B magnets, green lamp phosphor (GdMgB ₅ O ₁₀ :Ce ³⁺ , Tb ³⁺)	None	None	Currently in balance, slight oversupply expected	If needed through additive in Nd-Fe-B permanent magnets
Terbium (Tb)	Green lamp phosphor LaPO ₄ :Ce ³⁺ , Tb ³⁺ (LAP))	Very high	High, but decreasing	In balance, slight oversupply expected as lamp phosphor market becomes smaller	As additive in Nd-Fe-B permanent magnets to replace Dy
Dysprosium (Dy)	Additive in Nd-Fe-B permanent magnets	Highest	High (Dy expected to become less critical)	In balance	Not required
Holmium (Ho) erbium (Er) thulium (Tm) ytterbium (Yb)	No large-volume applications	None	None	In balance	Not required
Lutetium (Lu)	Scintillator phosphors in PET scanners for medical imaging (new application)	None	None (but could become critical in the future)	In balance, but potential shortage in the near future	Not required
Yttrium (Y)	Red lamp phosphor Y ₂ O ₃ :Eu ³⁺ , yttria-stabilized zirconia (YSZ), and ceramics	High	Low	In balance, but potential oversupply may arise as lamp phosphor market is in decline	If oversupply arises, additive in new Mg alloys or use in YSZ or ceramics
Scandium (Sc)	No large-volume applications in use (although solid oxide fuel cells are a rapidly growing market)	None	Low	Large supply could be available from bauxite residue	Not required

출처: Binnemans, Jones, Müller & Yurramendi (2018), p. 133

III. 2010년 중국의 희토류 생산과 수출규제 원인

1983-2005년 중국의 글로벌 희토류 생산 독점시기 중국은 미국, 일본, 유럽 등 선진국 경제의 태양광 풍력 전기차 등에 소요되는 점증하는 희토류에 대한 수요를 충족시키는 저렴한 공급지 역할을 하였다. 이 시기 중국내부의 수요보다는 미국, 유럽, 일본, 한국 등 해외로 수출하는 비중이 훨씬 컸고 중국의 희토류 응용 기술 미비로 부가가치가 큰 다운스트림 희토류 중간재 부품 보다는 원재료 수출이 훨씬 더 많았다. 환경 규제 때문에 미국을 포함해 중국 밖의 희토류 생산시설은 거의 중단된 상태로 중국에 점점 의존하게 된 결과 중국의 희토류 세계 생산 점유율은 90%를 넘게 되었다. 2005-2010년 중국은 희토류 생산과 수출을 점점 규제하기 시작했고 글로벌 희토류 무역 뿐 아니라 중국-미국, 중국-유럽, 중국-일본관계에 중대한 전환점이 되었다. 중국의 희토류 보호무역주의 선회는 미국 유럽 일본 등의 미래 첨단 제조업과 전체 경제기반을 위협하는 것으로 미국과 유럽, 일본 등은 2012-2014년 2차례에 걸쳐 국제무역기구에 제소한 결과 미국 유럽 일본에 유리한 승소 판결이 내려졌다. 생산과 수출 규제 이면 중국의 희토류 전략은 크게 다음과 같은 몇 가지로 요약된다. 첫째, 2000년대로 오면서 중국의 재생에너지와 전기차 산업 등이 급성장하는 등 중국내부의 희토류 수요가 급증하면서 중국 내부 수요 충당을 위한 희토류 확보가 시급해졌다. 둘째, 희토류 원재료 수출보다는 영구자석 등 희토류 다운스트림 중간재 부품 수출을 위한 희토류 고부가가치 산업화가 중요한 목표가 되었다.

1. 마운틴패스 시기

글로벌 희토류 수요 공급과 무역 구도에서 1965-1983년은 마운틴패스 시기(Mountain Pass Era)로 알려져 있다 (Hoenderdaal, Espinoza, Marscheider-Weidenmann, & Graus, 2013, 349). 이 시기에 전세계 희토류 산업은 미국, 브라질, 인도, 호주, 남아프리카가 주도했다 (Medeiros & Trebat 2017, 512). 미국은 당시 캘리포니아와 네바다주 접경의 세계 최대 마운틴 패스 희토류광산에서 전세계 희토류 생산의 60%를 생산했다. 미국은 희토류 원재료 광석 (rare earth ore) 채굴 (extraction), 원재료의 분리와 가공 (separation & processing), 희토류 산화물 (REO: rare earth oxide) 제조, 희토류 금속 제조, 그리고 다양한 희토류 제품화⁷⁾로

7) 마운틴 패스 희토류 광산은 당시 세계 최대 규모로 1950년대부터 생산을 하고 있었는데 1960년대 컬러 텔레비전과 레이저 형광램프 등의 등장으로 활황기를 맞게 되었다. 마운틴 패스 광산에 다량으로 묻혀있는 유

이어지는 전 밸류체인이 통합된 일괄 공급망을 가지고 있었다.⁸⁾

Mamula & Bridges (2018)는 1990년대 초 미국 희토류 산업의 몰락을 환경규제의 결과라고 설명한다. 미국 캘리포니아의 전성기에 있던 미국 희토류산업에 환경 규제의 장애물이 등장한 것은 1980년 7월 국제원자력위원회(IAEA)와 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)가 광산 활동에 의한 방사능 물질의 처리와 운반을 엄격히 금지하는 합의안을 도출하면서 부터였다 (Mamula & Bridges 2018, 95). 모나자이트류의 희토류 광산 채굴에서 토륨이 동반되어서 채굴된다고 해서 희토류 광산 활동을 토륨 광산활동과 동일시해서 금지하는 합의문을 내놓은 것이다. 당시 희토류 업계의 입장은 희토류 광산에 부산물로 나오는 토륨 방사능 성분 때문에 희토류 광산 자체를 토륨 광산 자체와 동일시한 것은 지나치다는 것이었다. 미국의 희토류 기업들은 이후 채굴된 희토류 원재료들을 거의 모두 가공하지 못하고 다시 묻는 일이 생기고 플로리다의 인산염 (phosphate) 광산 등도 IAEA 규제보다 낮은 토륨 성분을 가졌음에도 불구하고 환경단체 등이 토륨 성분의 폐수가 지하수에 흘러든다고 고발하는 일이 발생함에 따라 폐광하게 되는 사례가 발생하였다 (Mamula & Bridges 2018, 96).

중국은 이러한 1980년대 이후 국제 원자력계의 규제에서 자유로울 수 있었다는 점이 중국의 희토류 산업 도약의 가장 큰 원인이었다. 중국은 우선 당시 국제원자력 위원회의 회원국이 아니었다. 대부분 중국의 희토류 매장량의 지질적 성격이 미국과 같이 모나자이트층에서 채굴되는 것이 아니라 철광석 (iron ore)의 부산물로 채굴되는 것이었기 때문에 국제원자력 위원회의 규정보다 훨씬 낮은 토륨 성분을 가지고 있었다 (Mamula & Bridges 2018, 96). 중국은 1984년에 IAEA 회원국이 되었는데 중국의 희토류 생산에 대한 무해성과 규제적 문제점은 해소된 상태였다. 이렇게 해서 중국은 희토류 글로벌 공급망에 처음 등장하게 된 것이다. 미국 최대 희토류 광산 업체 마운틴 패스는 1998년 폐업신고를 하게 되었는데 가장 큰 원인은 모하비 국립공원을 토륨 우라늄 바리움 등 희토류 광산에서 나오는 방사능 오염 폐수가 오염시킨 혐의로 다수의 법정 다툼에 휘말리게 된 것이고 더 결정적인 것은 중국으로부터 공급되는 저가의 희토류 원재료 때문에 수지 타산을 맞출 수 없었기 때문이었다.

로튬(europium) 이라고 하는 희토류가 밝은 빛을 내는 성질을 가지고 있기 때문이었다.

8) 채굴에서 분리 가공, REO 단계까지를 업스트림 (upstream), 금속제조와 제품화를 다운스트림(downstream)이라고 부른다. 다운스트림으로 갈수록 부가가치가 높다. 보통 희토류 자원이 풍부한 개도국들은 상류부문에서만 활동하고 원재료 광석이나 REO를 일본, 서구 유럽 등 선진국에게 공급하는 역할에 머물렀다.

2. 중국의 희토류 독점생산 시기

중국이 처음 희토류 글로벌 공급망에 등장한 것은 1980년대였다. 처음에는 여타 개도국과 마찬가지로 원재료 공급에 머물렀다. 중국은 매우 낮은 가격에 전세계에 희토류 원재료를 공급했다. 원자바오 전 총리는 이를 두고 중국이 원래는 금의 가격을 가진 희토류를 소금의 가격으로 공급하고 있다고 말한바 있다. Kalantzakos (2018)는 중국의 글로벌 희토류 공급망 독점 과정을 다음과 같이 설명한다. 1990년대로 오면서 중국은 국가적으로 희토류 산업에 대한 대대적 국가적 투자를 시작했다. 1990년대가 되면 REO 생산량이 1980년대에 비해 10배가 증가하였다. 1990년대 중국의 희토류 산업 굴기는 중국정부의 주도적인 R&D 투입과 기술혁신에 기인한다. 희토류 기술혁신을 이끈 기관은 네이멍구 바이윈어보 광산(Bayan Obo Mine)에 위치한 전세계 최대 규모의 희토류 연구소인 바오터우 희토류 연구소(The Baotou Research Institute of Rare Earths (BRIRE))였다. BRIRE가 처음 설립된 것은 1963년으로 바오터우 철강회사(Baotou Iron & Steel) 소속의 연구소로 출발하였다. 중국의 희토류 기술 수준에 대해서는 다양한 연구가 있다. 한중과학기술협력센터(2011) 보고서에 의하면 중국은 아직 희토류의 밸류체인 가운데 희토류 분리와 가공기술 등 상류와 중류 부문에서 기술력을 보이고 있다. 중국은 세계 최대 희토류 생산국과 수출국이지만 하류부문의 기능응용 핵심기술에는 세계수준과 많은 차이를 보이고 있다(한중과학기술센터 2011, 24). 중국은 희토류 응용 기술 개발에서 희토발광소재, 수소저장소재, 영구자석소재를 위주로 발전시키고 있다. 중국은 영구자석 분야에서 강점을 보이는데 해당분야 특히 보유수량이 일본 미국 유럽 총 합계의 2배가 넘는다. 1995년 당시 영구자석을 생산하던 제너럴 모터스의 자회사인 미국의 Magnequench를 중국의 국영기업 China Minmetals Corporation이 인수하게 되면서 영구자석에 대한 미국의 기술이 중국으로 유출된 것으로 보인다. 그러나 특히 보유 수량에도 불구하고 해당 기능성 소재의 정밀가공 관련 핵심기술은 아직 보유하지 못해 컴퓨터디스크나 모터의 마그네틱 실린더, 음향설비의 자기헤드와 같은 고부가가치 첨단제품 기술은 아직 보유하지 못했다(한중과학기술센터 2011, 24). 이를 극복하기 위해 중국정부는 12차 5개년 계획과 13차 5개년 계획을 통해 희토류 관련 기초기술연구와 응용 기능성 기술 확보를 위해 국가 연구지원을 대폭 강화하였으며 2000-2010년 기간 희토류 관련 과학 기술 논문만 43,270편에 달했다(한중과학기술센터 2011, 25).

3. 2010년 중국의 희토류 생산과 수출 규제 원인

박선령(2017)을 비롯한 많은 연구들이 2010년의 중국의 대일수출 금수 조치 단행과 수출 쿼터 삭감을 희토류 자원무기화의 시각에서 부각하였다 (An 2014; 방민진 2019; 이종민 2019; 토이로바 무비나·박인섭 2015; Chen & Zheng 2019; 남지은 2014). 중국의 희토류 전략은 중국내부의 희토류 수요가 급증하면서 중국 내부 수요 충당을 위한 희토류 확보와 희토류 원재료 수출보다는 영구자석 등 희토류 다운스트림 중간재 부품 수출을 위한 희토류 고부가가치 산업화로 설명된다.

(1) 중국의 국내 희토류 수요 증가

2000년대는 전기차가 상용화를 앞두고 미국, 일본, 유럽, 중국 등 주요 국가들 자동차 업계에서 기술개발이 한창 진행되던 시기였다. 2000년대는 또한 글로벌 기후변화 협상이 실질적인 진전을 가져오기 시작하던 시기로 각국은 앞다투어 태양광과 풍력 발전 등 재생에너지 도입을 서두르던 시기였다(Fishman & Gradael 2019; Cao, O'Sullivan, Tan, Kalvig, Ciacci, Chen, Kim, & Liu 2019). 각국의 전기차와 풍력과 태양광 기술개발과 밀접히 연관되어 있었던 것이 희토류를 사용한 효율적인 합금 개발과 모터 구동을 위한 희토류를 원료로 한 영구자석 개발이었다 (김효준 2019; 이종민 2019; 최유식 2019). 전력 사용의 효율화를 위해 각종 전자제품은 절전 기능을 강조하였고 이러한 가정용 산업용 에어컨 등 각종 전자제품의 절전 기능은 영구자석 사용에 의한 것이었다. 전구제조업체 네덜란드의 필립스(Philips)나 독일의 오스람(Osram) 등은 발광다이오드 조명 시스템(LED: Light Emitting Diode)개발로 세계 절전형 조명시장을 지배하였다. 2010년 중국의 희토류 생산은 130,000톤으로 전 세계 희토류 생산량인 133,600톤의 거의 98%에 가까운 수치였다. 미국, 유럽, 일본, 한국 등은 국내 희토류 수요의 85% 이상을 중국 공급에 의존하고 있었다 (박선령 2017, 251). 2000년대 동안 이루어진 전기차, 재생에너지, 절전형 조명 시스템 등의 주요한 기술 진보과정에서 중국은 초기에는 희토류와 주요 전략광물 원재료를 일본, 네덜란드, 독일, 미국에 수출하고 중국 자체의 전기차나 재생에너지 보급을 위해서는 희토류 중간재 부품이나 최종제품을 다시 원재료를 수출했던 일본, 유럽, 한국, 미국으로부터 수입하는 방식을 수용할 수밖에 없었다(An 2014, 19-20; Sun 2017).

전기차가 시장에 처음 모습을 드러낸 것은 2010년 일본의 ‘닛산’ 전기차 ‘리프’를 통해서였다. 최근까지도 ‘세계에서 가장 많이 팔린 전기차’란 타이틀을 가지고 있었다. 2012년

‘모델S’라 불리는 세단형 고성능 전기차라는 새로운 개념을 내세워 1회 충전 500km 이상의 주행가능거리를 실현함으로써 전기차의 대중화를 앞당긴 회사가 테슬라이다. 2009년 2월 중국정부는 전기차와 하이브리드 차량 등 신에너지차량 확산을 위해 상하이, 베이징 등 13개 대도시를 신에너지차량 시범도시로 지정하였다 (조정원 2018). 시진핑 집권 이후 중국정부의 완성차 업체들을 대상으로 시행된 전기차 생산 의무 할당제와 같은 정책이 전기자동차 확산에 결정적인 계기가 되었으며 2000년대 전 세계에 보급된 약 100만대의 전기자동차 가운데 2/3는 중국 국산 전기차였다(한국광물자원공사 2018).⁹⁾

1970년대 중반부터 1990년대 중반까지 태양광 시장을 견인한 것은 미국이었다. 1990년대 중반부터 태양광 시장을 이끈 것은 일본이었다. 1970년대부터 태양에너지의 보급과 연구개발에 관심을 가져왔던 일본은 반도체 강국으로서 실리콘을 주요 원료로 하는 태양전지에 강점이 있었다. 2004년 일본 태양광 설비용량은 세계 1위인 1,132MW를 기록했고, 같은 해 세계 태양전지 제조기업 상위 5개 중 4개(샤프, 교세라, 산요, 미쓰비시)가 일본 기업이었을 정도로 일본은 세계 태양광 시장을 주도했다 (김성진 2019). 2005년 이후에는 독일이 세계 최대의 태양광 시장으로 발돋움하였으며, 스페인과 이탈리아 역시 재생에너지에 대한 높은 보조금을 책정하여, 유럽은 세계 태양광 수요의 60%를 차지할 정도로 태양광 보급의 중심지가 되었다. 1990년대 후반 이후 중국은 유럽 시장으로 자국 생산 패널의 90% 이상을 수출하여 세계 최대의 태양광 패널 제조국이자 판매국으로 부상했다. 2009년을 계기로 중국은 자국 내 태양광보급을 늘리기 시작했다. 2009년 중국 정부는 약 30억달러 규모의 태양광 보조금정책인 ‘골든 썬(Golden Sun) 프로그램’을 가동하고 2020년까지 자국 태양광 설비용량을 20GW까지 키울 것을 목표로 하는 세계 최대의 태양광 시장으로 변화했다 (김성진 2019).

영구자석은 외부로부터 전기를 공급받지 않고 자체적으로 안정된 자기장을 발생 유지하기 때문에 다양한 전자제품과 풍력터빈 모터 전기차 모터 등에 필수적인 부품이다. 희토류 소재인 네오디뮴을 가공해 만든 네오디뮴-철-붕소(Nd-Fe-B)계 영구자석은 지금까지 인류가 만들어낸 최강의 영구자석이다 (김효준 2019, 19). 지난 20년동안 영구자석의 최대 수요처는 컴퓨터 분야였으나 (Hoenderdaal, Espinoza, Marscheider-Weidenmann, & Graus, 2013, 345) 전기차모터, 풍력터빈 모터와 스마트폰에 사용되기 시작했다. NdFeB계 영구 자석의 합금은 대부분 자석 무게의 70%의 철 성분에 30%의 네오디뮴이 들어감으로써 소형화가 가능하면서 강력한 자성을 유지하기 때문에 노트북컴퓨터, MP3 플레이어, 헤드폰, 하드디스크

9) 2018년 현재 전세계 전기차 판매대수는 200만대를 넘어섰다. 이 가운데 절반이상이 중국에서 판매되었다.

드라이브, DVD, 파워스티어링 핸들, 자동차 자동제어장치 등에 응용된다 (Wübbeke 2016, 55). 영구자석은 에어컨과 의료용 MRI 기계에도 들어가는데 영구자석을 활용한 산업용 에어컨은 전기소비가 50% 줄어든다 (Hoenderdaal, Espinoza, Marscheider-Weidenmann, & Graus, 2013, 345). NdFeB계 영구 자석은 300도까지 견디는 사마륨-코발트(Sm-Co)계 영구자석 등 다른 영구자석과 비교해 80도가 넘어가면 자석 성질이 약해지는 문제가 있기 때문에 자석 제조 합금에 4.4.5% 소량의 디스프로슘(Dysprosium)과 프라시오뎴(Praseodmium), 가돌리늄 (Gadolinium)을 추가해야 한다 (Wübbeke 2016, 52).

디스프로슘 수요의 95%는 영구자석에 소요되기 때문에 영구자석 수요증가에 따라 디스프로슘 수요가 지속적으로 확대되었다. 2010년 디스프로슘 전체 수요를 1800톤으로 볼 때 2050년에는 최저 14,000톤 최고 50,000톤의 디스프로슘 수요가 예측된다 (Hoenderdaal, Espinoza, Marscheider-Weidenmann, & Graus, 2013, 348). 영구자석에 필요한 디스프로슘 부족이나 가격 급등에 가장 민감한 산업분야는 풍력발전이다. 풍력 발전 기술의 획기적 진전을 가져온 희토류 응용기술은 희토류 소재 영구자석을 활용한 직접구동식 (direct-drive) 풍력발전 터빈이다. 기어박스를 없애고 영구자석이 약 450여개가 들어간다. 기어박스 대신 영구자석을 활용한 발전기(generator)가 들어가기 때문에 터빈의 무게가 줄어들고 크기가 훨씬 줄어든다 (Rabe, Kostka, and Stegen 2017, 697). 특히 유럽에서는 풍력발전 산업이 태양광 산업보다 훨씬 규모가 크고 독일의 지멘스(Siemens)와 에네르콘(Enercon), 덴마크의 베스타스(Vestas)등 풍력발전 대표기업들은 모두 중국에서 90% 이상 소재를 공급받고 있는 실정이다 (Rabe, Kostka, & Stegen 2017, 696). 유럽의 풍력기업들은 2011년 풍력터빈 소요 디스프로슘 가격이 급등하자 해당 소재의 안정적 공급을 위해 중국기업들과 합작기업을 설립해 소재를 좀 더 안정적으로 공급받는 방법을 모색하기도 하고 소재의 형태보다는 영구자석 부품을 직접 구매하는 전략을 택하기도 했다. 에네르콘은 영구자석을 사용하지 않은 직접구동식 풍력터빈을 개발하기도 했다 (Rabe, Kostka, & Stegen 2017, 697). 그러나 이러한 대체와 저감 방법들이 풍력터빈의 효율적인 구동과 비용에 문제를 가져와 영구적인 해결책이 되지는 못했다. 해상 풍력 터빈은 수리를 하는 것이 비용이 높고 번거롭기 때문에 영구자석 직접구동식을 쓰는 것이 불가피하고 해상에 설치되어 있다하더라도 영구자석의 온도가 올라가는 것은 불가피하기 때문에 영구자석 합금에 있어 디스프로슘의 양을 사용하는 것을 줄이는 것은 힘들다 (Stegen 2015, 6).¹⁰⁾

10) 앞으로는 풍력발전기의 용량이 10MW 이상으로 커지는 기술이 개발되고 있다고 하는데 이 경우는 영구자석을 사용하지 않고 반도체 발전기(superconducting generator)를 사용한다고 한다. 그러나, 반도체를 사용하는 풍력터빈 사용이 늘어나면 이트륨(yttrium)이라는 다른 종류의 희토류 소재가 필요하다.

중국의 희토류 생산과 수출 규제는 중국 국내의 전기차와 재생에너지 공급망을 별도로 구축함을 의미하는 것이었다. 미국, 일본, 유럽이 자체 전기차와 재생에너지 시장 확대를 위해 중국의 희토류 원재료를 이용해 일본 한국에서 부품화 하던 미국 유럽 일본이 주도 하던 공급망이 더 이상 유지될 수 없게 되었다. 태양광과 전기차 시장 중심이 중국으로 옮겨오자 중국의 희토류 전략도 바뀔 수밖에 없었다. 새로운 희토류 전략의 핵심은 중국의 내수용 희토류 가격과 수출용 해외 희토류 가격을 다르게 책정하는 것이다. 희토류 원재료, 가공품, 그리고 영구자석과 같은 중간재 부품 모두 해외보다 중국 내수시장에서 조달해서 사용하는 것이 저렴하게 만드는 것이다.

(2) 중국의 일본 수출 규제 시행 이후 희토류 가격과 생산량 변화

2000년대 전 세계 희토류 수요는 평균 120,000-140,000톤¹¹⁾ 사이였던 것으로 추정되는데 수출과 생산 규제 시행이전 블랙마켓 생산량을 포함한 중국의 희토류 생산은 125,000-140,000톤을 유지했었다 (Mancheri & Murakawa 2016, 28). 2000년대말 중국의 희토류 수요는 약 8-9만톤, 중국밖 (Rest of the World: ROW) 수요가 약 4-5만톤 이었다. 중국 정부가 본격적인 단속과 생산 규제를 통해 희토류 과잉생산 능력을 대폭 축소하고 6개의 국영기업으로 통합했을 때 전국에 퍼져있는 희토류 가공과 분리시설 규모는 450,000톤 실제 연 생산 규모는 200,000-300,000톤 규모였다 (Mancheri & Murakawa 2016, 28). 중국의 희토류 수출량은 2007년 57,400톤으로 최고치를 기록한 이래 수출쿼터가 도입된 2008년부터 지속적으로 감소해 2012년 16,793톤으로 최저치를 기록했다 (China Water Risk 2016. 20). 2014년 중국정부가 지침을 통해 내놓은 통합된 국영기업들을 통한 희토류 생산 쿼터는 경희토류 87,100톤, 중희토류 18,000톤으로 합치면 105,100톤이었다. 영구자석에 소요되는 희토류 소재인 네오디뮴, 디스프로슘, 프라시오뮴 가운데 공급리스크가 가장 큰 희토류는 디스프로슘이다. 이와 같은 현실을 반영하듯이 중국의 생산과 수출 규제 과정에서 가격 급등이 가장 극심했던 희토류 소재가 디스프로슘이었다. 2003년 5월 kg당 35달러였던 디스프로슘 가격은 2011년 2월에는 kg당 375달러, 같은 해 12월에는 kg당 3,500 달러까지 치솟았다.

11) 총희토류 산화물 생산 (TREO: Total Rare Earth Oxide) 기준. REO란 희토류 원재료를 분리하여 만들어진다. REO를 가공하면 금속이나 제품으로 만들어진다.

<표 2> 중국의 희토류 수출 규제 전후 주요 희토류 소재 가격 변동

Date	Lanthanum	Cerium	Neodymium	Europium	Terbium	Dysprosium	Yttrium
January 2006	1.85	1.45	9.55	220.00	320.00	50.00	4.55
January 2008	4.70	3.65	29.25	350.00	610.00	93.00	11.40
January 2010	5.55	4.15	22.75	480.00	350.00	116.50	10.25
Peak, July-August 2011	171.50	158.00	337.50	5,870.00	4,510.00	2,840.00	182.50
January 2012	51.00	42.50	195.00	3,790.00	2,810.00	1,410.00	90.50
January 2014	5.83	5.35	67.50	975.00	825.00	465.00	21.50
January 2016	1.98	1.85	40.00	97.50	420.00	225.50	4.23

*Data used with permission from Argus Media, last accessed online January 26, 2016 (<https://direct.argusmedia.com>).

출처: Eggert, Wadia, Anderson, Bauer, Fields, Meinert, & Taylor (2016), p. 3.

<표 3> 중국의 희토류 수출 규제 이후 중국과 중국밖 희토류 생산량 변화

Year	Use			Production				Implied market balance
	China	Rest of world	World	China		Rest of world	World	
				Production quota	Excess			
2010	79,500	47,000	126,500	89,200	25-30,000	5,000	122,500	-4,000
2011	81,500	36,000	117,500	93,800	30-35,000	6,000	132,500	15,000
2012	83,500	38,000	121,500	93,800	35-40,000	8,000	140,000	18,500
2013	86,500	41,500	128,000	93,800	40-45,000	13,500	160,000	32,000
2014	92,250	43,750	136,000	105,000	45-50,000	18,500	170,000	34,000
2015	97,000	49,000	146,000	115,000	40-45,000	38,500	195,000	49,000

출처: Eggert, Wadia, Anderson, Bauer, Fields, Meinert, & Taylor (2016), p. 6.

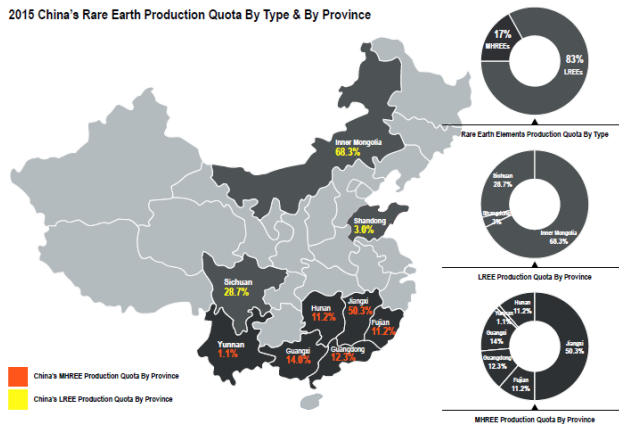
(3) 희토류 자원고갈과 환경 오염

희토류 불법 채굴과 희토류 거래 암시장은 중국정부의 오래된 문제이다. 불법 채굴과 암시장은 남방지역 중희토류 생산 지역에서 더욱 심한 것으로 알려져 있다. 남방 지역의 이온형 중희토류 광산(ion-adsorption deposits) 활동에 대한 생산과 수출규제가 취해진 이후에도 정부 공식 통계보다 훨씬 많은 생산과 수출이 지속적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 2010년 여름 중국정부는 불법 채굴과 암시장에 대한 불시점검에 들어가서 네이멍구 자치구 바오터우시와 장시성 간저우시 두 곳에서만 600여 곳의 불법 채굴 사례가 밝혀졌으며 13곳의 광산과 76곳의 분리와 가공 시설이 강제 폐쇄되었다 (China Water Risk 2016, 27).

중국의 2013년과 2014년 중국 국토자원부의 공식 수출 킬터는 17,900톤 이었다 (China Water Risk 2016, 27). 그러나 중국 희토류산업협회의 통계에 의하면 2013년 중국의 희토류 수출량은 5만톤, 2014년은 4만톤에 달했다. 이러한 문제는 장시성 간저우시에서 더욱

심각한 것으로 알려져있다. 간저우시는 중국정부에 의해 공식적으로 ‘희토류 왕국’ (Rare Earth Kingdom)이라는 별칭을 얻은 도시이다. 2015년 현재 간저우시는 중국의 모든 중희토류 생산의 45%를 차지하였다. 영구자석 생산의 중심지이다. WTO 무역 분쟁 재판에서 중국정부측은 희토류 수출규제의 배경은 이러한 전세계로 흘러들어가는 불법 채굴된 희토류가 저가 희토류를 만들어내고 있다고 주장하였다. 중국 희토류 산업협회에 의하면 2014년 9월 현재 불법 채굴 희토류 광석은 톤당 평균 RMB 100,000이지만 공식 가격은 RMB160,000-170,000라고 밝힌 바 있다 (China Water Risk 2016, 32).

<그림 1> 중국의 경희토류 중희토류 분포



출처: China Water Risk (2016), p. 8.

<표 4> 주요 희토류 생산지역의 희토류 소재별 분포

Deposit type	Bayan Obo, Inner Mongolia	Mountain Pass, California	Bear Lodge, Wyoming	Bokan Mountain, Alaska	Southern China clay deposits
	Carbonatite	Carbonatite	Peralkaline	Peralkaline	Ion-adsorbed clay
Lanthanum	31.81%	33.79%	29.28%	10.37%	19.30%
Cerium	49.42%	49.59%	45.86%	24.36%	31.18%
Praseodymium	3.61%	4.12%	4.42%	3.11%	4.05%
Neodymium	12.67%	11.16%	14.36%	12.20%	13.52%
Samarium	1.28%	0.85%	2.43%	3.11%	3.82%
Europium	0.21%	0.11%	0.58%	0.20%	0.34%
Total light rare earths	99.00%	99.60%	97.00%	53.30%	72.20%
Gadolinium	0.52%	0.21%	1.24%	3.47%	2.97%
Terbium	0.05%	0.02%	0.21%	0.60%	0.43%
Dysprosium	0.12%	0.03%	0.50%	4.19%	2.30%
Holmium	0.03%	0.00%	0.03%	8.69%	0.49%
Erbium	0.03%	0.01%	0.06%	2.39%	1.44%
Thulium	0.01%	0.00%	0.00%	No data	0.21%
Ytterbium	0.01%	0.00%	0.03%	No data	1.08%
Lutetium	0.00%	No data	0.00%	No data	0.16%
Yttrium	0.25%	0.13%	0.88%	27.31%	18.72%
Total heavy rare earths (including yttrium)	1.00%	0.40%	3.00%	46.70%	27.80%

*Information from Long et al. (13) and Weng et al. (20). Individual numbers may not sum to 100% because of rounding.

출처: Eggert, Wadia, Anderson, Bauer, Fields, Meinert, & Taylor (2016), p. 10.

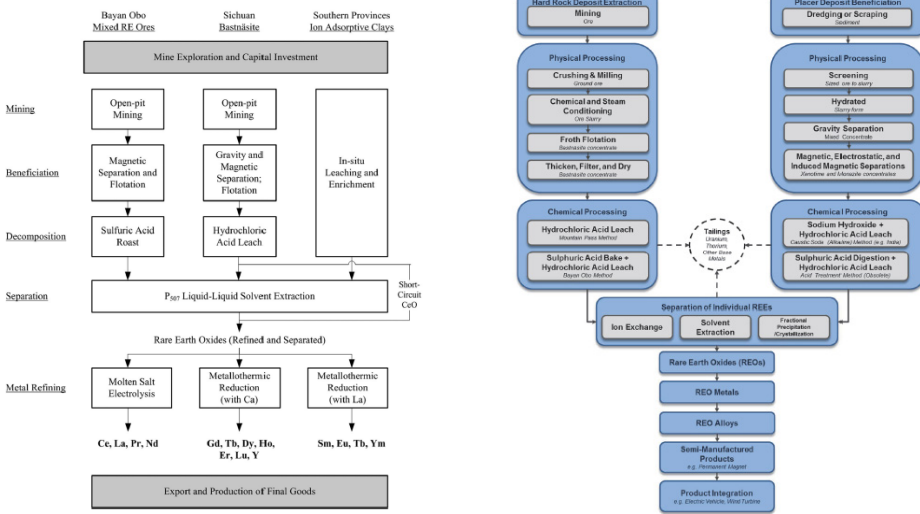
차이나 워터리스크 (2016)는 2016년 보고서에서 중국의 희토류 생산의 지속가능성에 의문을 제기하면서 희토류 자원고갈 우려에서 중국정부가 생산량과 수출 제한을 하기 시작했다고 보았다. 90%가 넘는 세계생산 가운데 중국의 비중은 중국의 매장량 비중보다 훨씬 높은 수치라는 점이다. 세계 희토류 매장량 가운데 중국의 비중은 기관마다 서로 다른 수치를 제시하고 있지만 2012년 6월 20일 중국 국무원이 발표한 중국의 희토류 현황 및 정책 백서에 의하면 공식 수치는 23%¹²⁾이다 (China Water Risk 2016, 6). 기관에 따라서는 최대 중국의 매장량을 전세계 대비 55%까지 제시하는 기관도 있다 (China Water Risk 2016, 23). 2010년 이전까지의 패턴대로 중국이 계속 희토류를 생산한다면 중국의 매장량을 감안해 보면 희토류 자원이 고갈될 가능성이 크다. 중국 정부는 2002-2009년 사이 중국의 희토류 매장량은 약 2100만 톤 (21.3 million tons)에서 1800만톤 (18.6 million tons)으로 감소하였다. 자원고갈을 측정 하는 단위로 현재의 생산 추세와 매장량을 감안해 몇 년동안 생산을 할

12) 중국의 백서에 공개된 매장량 수치는 미국 지질연구소(U.S. Geological Survey)가 발표한 수치인 37% (4300만톤)과 약 3배 가까이 차이가 나며, 현재 미국과 중국 두 국가의 매장량 데이터에 대한 이견을 보이고 있다.

수 있는가를 나타내는 reserve-to-production이라는 것이 있다. 중국국무원은 희토류 규제 강화를 발표하면서 ‘중국은 앞으로 870년 동안 생산할 희토류가 있다’라고 말하였다. 870년은 경희토류에 해당하는 수치임을 강조하였으며 중희토류의 경우를 특히 강조하면서 중희토류는 생산가능연한이 15년에서 50년밖에 안되기 때문에 희토류 생산과 수출을 규제해야 한다고 말했다 (China Water Risk 2016, 23).

중국 남방지역의 불법채굴과 밀수출을 이해하기 위해서는 중국 북방지역의 경희토류와 남방지역 중희토류의 채굴 방식과 가공 방식의 차이를 나타내는 그림 2에 대한 설명이 필요하다.

<그림 2> 중국 희토류 매장지별 가공 과정



출처: Lee & Wen (2016), p. 1279.

<그림 2>에 의하면 중국의 희토류는 전국적으로 흩어져 분포하는데 바이윈어보와 쓰촨 지역의 희토류는 베스나자이트라는 노천 광산 (open-pit) 광석 (rare earth ore) 형태로 채굴 되고 광석은 분리와 가공 과정이 여러 차례의 분쇄(milling)와 부유선광(flotation) 등 6-7개 단계를 거친다. 미국의 마운틴패스 광산도 베스나자이트로 비슷하다. 인도 브라질 베트남 등의 희토류는 모나자이트나 제노타임 형태로 존재하고 사광상(沙鑛床, placer deposit)이라고 한다. <그림 2>에 나오는 바와 같이 모나자이트도 복잡한 가공과정을 거친다. 희토류

는 채굴 후 추출 및 분리 과정에서 많은 화학약품을 사용하는데, 1톤의 희토류 추출 과정에서 황산이 포함된 6300만 리터의 독성가스, 20만 리터의 산성 폐수, 1.4톤의 방사성 물질 함유 폐수가 발생하는 것으로 알려져 있다. 중국은 대규모 환경오염을 감내하면서 희토류 생산과 처리를 독려해 희토류 시장을 석권하게 됐다. 희토류의 추출과 분리공정은 엄청난 양의 불소와 유황을 함유한 폐기, 산알칼리 폐수와 토륨 등의 방사성 물질을 배출하므로, 중국의 젓줄인 황하강 상하류 오염문제가 심각한 수준이다. 중국환경보호부에서도 「희토류 산업 오염물 배출표준」(2011년 10월 1일부터 발효)을 발표하여 희토류 산업과 관련 기업이 오염이 적은 분리공정을 채택하도록 유도하고 있다. 네이멍구에 위치한 중국 최대의 희토류 광산, 바이윈어보 주변 11km² 지역의 토양, 지하수, 식물은 방사성 물질로 오염된 상태다. 광산에서 생성된 방사성 물질이 포함된 분진이 바람에 날아가 바이윈어보 시가지의 토양에도 축적된 것으로 밝혀졌다. 토양 상부의 10cm 층에서 토륨 축적이 확인되었고, 광산 주변에는 가축이 폐사하거나 농작물이 자라지 않는다. 주민 중에는 40세 이하에도 불구하고 치아가 모두 손실되거나 각종 질환에 시달리는 비율이 높다 (Lee and Wen 2016).

중국남방 지역의 중희토류는 이온흡착형 점토(ion-adsorption clay)에서 추출된다. <그림 2> 에서 보듯이 이온흡착형 희토류는 가공과 분리 과정이 필요없다. 광석형태로 매장되어 있는 것이 아니기 때문에 화학적 리칭(침출: in-situ leaching)에 의해 추출된다. 중국이 지난 20년동안 고속으로 희토류 강국으로 등장하고 간저우시가 세계적 영구자석 제조 중심지가 된 것도 이와 같은 중국남방 지역 희토류의 지질적 특징 때문이었다.

IV. 2015년 이후 중국의 희토류 전략과 미국의 희토류 국산화 대응

2019년 5월 중국 정부는 미국의 대중 무역관세 인상과 중국 통신장비업체 화웨이에 대한 거래 제한 조치에 대응해 희토류 수출 제한을 검토하게 된다. 중국이 미국에 대해 희토류를 보복 카드로 쓸 가능성이 크다는 우려가 미국 내부에서 제기됐다. 중국은 2010년대 이후 경제·정치적으로 다른 국가와 마찰을 빚을 때마다 희토류를 무기로 꺼내왔다. 2018년 미국과 무역전쟁을 벌이기 시작했을 무렵부터 희토류를 카드로 활용해야 한다는 주장이 다시 나오기 시작했다. 희토류 대미 수출 금지를 2조달러 미국 국채 활용, 미국 기업의 중

국 시장 추방 등과 함께 3장의 무역전쟁 필승 카드로 꼽았다. 미국은 미국과 중국 간 갈등이 격화하는 가운데 중국이 미국에 대해 희토류를 보복 카드로 쓸 가능성이 높아지고 있는 가운데 국제 희토류 가격 급등과 밸류체인 급변동 가능성에 대비하고 있다. 미국정부는 국방부가 선두에 서서 국가안보의 차원에서 희토류 국산화 작업을 위한 정책들을 펼치기 시작했다 (Green 2019). 미국은 현 희토류 시장 상황이 아랍 수출국들이 서방국가로의 수출을 막았던 1970년대 '원유'와 유사하다고 보고 있다. 미국은 2018년 조업이 중단됐던 자국내 마운틴 패스 광구 채굴을 재개하고 호주 희토류 광산업체 라이너스와 미국 화학업체 블루라인이 합작으로 텍사스 지역에 희토류 분리·정제 공장 건설을 추진 중이다. 미국은 그린란드 자체를 통째로 매입하려고 시도했다. 비록 적은 양이지만 그린란드 남부의 크바네피엘드(Kvanefjeld) 희토류 광화대에 중희토류가 매장돼 있기 때문이다. 2020년 8월 미국은 우주탐사를 통해 희토류를 확보하겠다고 선언하고 캐나다, 일본, UAE 등과 협력체계를 선언한바 있다. 러시아는 세계2위의 희토류 매장량을 가지고 있으면서도 아직 개발에 나서지 못하고 있었다. 2020년 8월 러시아도 언론을 통해 4군데의 희토류 매장지에 대한 해외투자를 유치한다고 발표하였다. 결국 1983-2005년 중국의 글로벌 희토류 생산 독점시기를 지나 중국의 희토류 소비증가와 환경적 문제의 대두로 중국이 수출과 생산을 줄임으로써 초래된 영구자석 소재 중희토류인 디스프로슘의 공급망 리스크를 줄이고 미국을 포함한 중국밖에 생산다변화와 공급망 구축을 어떻게 할 것인가 하는 문제이다. 중희토류는 중국 남방지역에서만 대규모로 생산되기 때문에 중국에 대한 의존을 줄이는 것이 매우 힘들고 중국밖에 공급망을 구축하는 것이 시간이 걸리고 매우 어렵다.

1. 2015년 이후 중국의 희토류 전략

2014년 세계무역기구(WTO)는 중국의 희토류 수출 쿼터제와 수출관세가 세계 무역기구 규정에 위배된다는 판정을 내렸다. 2015년 1월과 5월 중국의 희토류 수출쿼터제와 수출관세 제도는 각각 철폐되었다. 이에 따라 중국의 희토류 수출량은 2014년의 27,640톤에서 2016년 46,562톤, 2018년에는 53,026톤으로 점차 증가하였고 희토류 평균 수출가격도 2014년의 \$12.82/kg에서 2018년에는 \$9.69/kg으로 점차 하락하였다. 2016년 10월 중국정부는 희토류 산업 5개년 계획을 발표하였다. 이 계획에서 중국정부는 향후 중국내부의 희토류 생산을 14만톤으로 상한을 정해서 6개의 희토류 국영기업만 생산할 수 있도록 할당을 하고, 수출은 쿼타가 아닌 수출 허가제 등 다른 방법으로 2025년 이후까지도 계속 줄여 나갈 것이라고 선언했다.¹³⁾ 이러한 정책은 희토류 개발로 인한 환경피해를 최소화하고 앞으로

2자리 숫자로 늘어나는 중국내부의 수요를 충족하겠다는 전략이다.

2005-2020년 기간 다양한 산업의 희토류 응용 가공분야가 늘어나면서 희토류에 대한 수요는 지속적으로 증가했다. 2018년까지 중국의 생산 킬터는 늘어나긴 했지만 120,000톤 수준을 유지하였다. 2018년 중국정부의 공식 발표에 의하면 2018년 REO 생산량은 112,000톤 이었는데 네이멍구 바오터우 지역에서 69,000톤, 쓰촨 지역 28,000톤, 장시성과 광둥 지역 등 남부중국에서 11,100톤 그리고 산둥지역에서 3,600톤으로 구성되어 있었다 (Argus Media 2019). 2015년 145,000톤 (Mancheri & Murakawa 2016, 33)에 달하던 전 세계 희토류 수요(TREO: Total Rare Earth Oxide)는 2018년 190,000톤으로 늘어났다 (Global Rare Earth Industry Association 2020).

<표 5> 희토류 주요 생산국과 생산량, 2018-2019 (톤)

국가	2018년 생산량	2019년 생산량
중국	120,000	132,000
미국	18,000	26,000
미얀마	19,000	22,000
호주	21,000	21,000
인도	2,900	3,000
러시아	2,700	2,700
마다가스카르	2,000	2,000
태국	1,000	1,800
브라질	1,100	1,000
베트남	920	900
부룬디	630	600

출처: <https://www.statista.com/statistics/268011/top-countries-in-rare-earth-mine-production/> (검색: 2020년 10월 5일)

- 13) 중국 전역의 22개 희토광산과 54개 제련분리기업에 대한 통폐합을 거쳐 2016년 말까지 6대 희토그룹의 구도를 갖추 (6대 희토그룹: 중국우광그룹, 중국알루미늄그룹, 북방희토그룹, 샤먼팅스텐그룹, 남방희토그룹, 광둥희토그룹).

<표 6> 중국 vs. ROW (Rest of World) 생산량 추이, 2013-2018

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
중국	93800	105000	105000	105000	105000	120000
ROW	18000	28000	38000	44500	64500	74500

출처: Mancheri, Sprecher, Bailey, Ge, and Tukker (2019)

2. 미국의 희토류 국산화 전략

2010년 중국의 희토류 수출 규제이후 전세계적인 희토류 개발붐이 일어나 전세계적으로 200개의 개발회사가 중국밖에서 탐사를 시작하였다 (Paulicka & Machacek 2017, 135). 이와 같은 중국밖에서의 희토류 탐사 개발 붐은 프리미엄 가격이 형성되어 있는 중희토류인 디스프로슘과 경희토류 가운데 네오디뮴을 목표로 하고 있는 것이었다. 2007년-2015년 기간 2개 희토류 소재의 가격 움직임은 이미 해당 희토류 소재의 고갈과 희소성을 반영한 것이었다. 글로벌 희토류 광산 개발 결과 경희토류 (LREE: La, Ce, Pr, Nd, Sm) 소재들은 중희토류 소재들 (HREE: Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y)들 보다 초과 공급되어 있다. 란타늄(La)과 세륨(Ce) 가격 움직임에 이러한 상황은 잘 나타나 있다. 영구자석에 소요되는 희토류 소재인 네오디뮴, 디스프로슘, 프라시오뮴 가운데 공급리스크가 가장 큰 희토류는 디스프로슘이다. 이와 같은 현실을 반영하듯이 중국의 생산과 수출 규제 과정에서 가격 급등이 가장 극심했던 희토류 소재가 디스프로슘이었다. 2003년 5월 kg당 35달러였던 디스프로슘 가격은 2011년 2월에는 kg당 375달러, 같은 해 12월에는 kg당 3,500 달러까지 치솟았다. 가격이 안정된 2020년 8월 현재 디스프로슘 가격은 여전히 kg당 350달러 내외에 형성되어 있으며 다른 희토류 소재에 비해 10배 정도의 가격이다. 디스프로슘 가격에 이와 같이 프리미엄이 책정되어 있는 이유는 희토류 분포의 성격 때문이다. 경희토류(Light Rare Earth Elements, LREEs)와 중희토류(Heavy Rare Earth Elements, HREEs)의 매장량과 생산량 비중은 18:1로 경희토류가 압도적으로 많다 (Zhou, Li & Chen 2017, 208). 경희토류 가운데 가장 풍부한 소재는 세륨(Cerium)으로 kg당 가격도 2020년 8월 현재 1.9 달러에 불과하다 (ISE 2020). 세륨 다음으로 풍부한 희토류 소재는 란타늄(Lanthanum)으로 kg당 가격은 2020년 8월 현재 4.5 달러이다. 세륨과 란타넘이 주로 사용되는 산업분야는 자동차 배기가스 정화장치와 연마제 등이다. 네오디뮴과 프라시오뮴은 2020년 8월 현재 kg당 67 달러와 88달러로 경희토류 중에서는 고가의 소재에 속한다. 중희토류 가운데 유토폴(Europium), 에르

븀(Erbium), 테르븀(Terbium) kg당 2020년 8월 현재 30 달러 22.5 달러 665 달러에 거래된다. 유로폼은 중희토류 가운데 형광물질의 성질을 가지고 있는 것으로 텔레비전 스크린과 LCD 모니터, 가스램프 등에 사용되어 왔으나 LED 전구가 일반화되면서 사용이 줄어들고 있다. 미국의 마운틴패스는 중희토류 가운데 유로폼 성분이 많이 나온다. 최근 가장 수요가 증가하고 있는 경희토류인 네오디뮴과 중희토류 디스프로슘은 호주의 마운틴 웰드 광산에 포함되어 있다.

글로벌 희토류 생산 구도에서 가장 큰 변화는 세계 희토류 생산에서 차지하던 중국의 비중이 2010년 90%에서 2018년 70%로 낮아졌다는 점이다. 중국의 생산 비중을 낮추고 ROW 비중이 확대되는데 가장 큰 역할을 한 희토류 기업은 호주의 라이나스(Lynas Corp.)이다. 라이나스는 2013년 1000톤에 불과하던 희토류 생산량을 2018년 19000톤까지 확대했다. 라이나스는 호주 주식시장에도 상장되어 있을 정도로 호주 최대 희토류 기업으로 서부호주에 마운트웰드 희토류 광산에서 생산을 한다. 마운트웰드에서는 희토류 원재료 생산만 하고 호주 국내의 환경적 반대에 부딪쳐 토륨 등 방사능이 나온다고 알려진 가공과 분리는 라이나스의 말레이시아 가공분리 시설에서 한다. 라이나스는 중국밖에 있는 최대의 디스프로슘과 네오디뮴 원재료 채굴과 가공 분리 기업이다 (Matsumoto 2019). 2009년 중국의 국영기업인 China Nonferrous Metal Mining이 라이나스를 인수하려고 시도하였으나 호주정부의 거절로 무산된 적이 있다. 2011년 중국의 수출규제이후 중국의 희토류 공급에 90% 이상을 의존하던 일본정부는 중국의존을 축소하기 위하여 라이나스의 마운트 웰드 광산에 투자를 하게 된다. 일본은 희소금속 확보를 위하여 새롭게 창설된 일본의 국영기업 JOGMAC (the Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)이 무역상사 소지츠(Sojitz)와 공동으로 2억5천만 달러를 투자하여 마운트웰드 광산에서의 생산을 시작하여 이제는 일본 희토류 수요의 30%를 라이나스가 공급하게 되었다 (Matsumoto 2019).

일본-호주 희토류 협력은 트럼프 정부 출범이후 미국-일본-호주 희토류 삼각동맹으로 확대되었다. 2017년 12월 트럼프 대통령은 주요 광물들의 안정적인 공급에 대한 국가의 취약성을 줄이는 행정명령에 서명하고 2018년 2월 호주총리와 공동 희소금속과 희토류 공동 탐사개발 가공에 대한 협약을 하였으며 2018년 12월에는 미국의 지질연구소(US Geological Survey)와 호주 자원연구소(Geoscience Australia)간 협력 체결로 이어졌다. 라이나스는 미국의 화학회사인 블루라인(Blue Line Corp.)과 협력하여 텍사스 샌안토니오에 호주 마운트웰드에서 생산된 희토류 원재료를 분리 가공하는 시설을 갖추기 위한 준비를 하고 있다.

미국 정부는 중국정부가 중국제조 2025 계획에 의해 영구자석 생산을 빠르게 늘려나가는 것에 주목하고 있다 (Stutt 2020). 영구자석 시장은 현재 16조원 (US\$14 billion) 규모이지

만 2027년이 되면 2배로 늘어나게 되는데 현재 중국이 60% 지배를 하고 있어서 당장 중국이 수출 규제를 하게 될 가능성도 있고 중장기적으로는 미국내에 영구자석 원재료 채굴 가공에서 제품 제조까지 공급망을 갖추어야 한다고 보고 있다 (Stutt 2020). 미국은 2019년 12,000톤의 영구자석 제품을 수입하였다. 세계 시장의 8%에 해당하는 규모이다. 이러한 추세로 미국의 영구자석 수요가 유지된다면 2027년 미국은 추가로 7,000톤을 더 수입하게 될 것이다.

2002년에 폐쇄되었던 미국 최대의 희토류 광산 마운틴 패스는 2008년에 다시 몰리코프(Molycorp) 운영사에 의해 부활되었지만 몇 차례의 생산개시와 부도를 반복하고 희토류를 다시 생산하게 된 것은 2017년이 되어서였다. 마운틴 패스 광산에 월가와 미국 국방성의 투자가 몰려들기 시작한 것은 중국에서 생산과 수출규제 움직임이 있기 시작하면서 부터였다 (Green 2019). 2010년 중국의 수출규제로 희토류 가격이 치솟자 몰리코프는 아리조나와 에스토니아에 분리 가공 플랜트시설을 확장하는 등 몸집 불리기에 나섰다. 2012년부터 다시 희토류 가격이 정상으로 떨어지자 중국과의 가격경쟁을 버티지 못하고 2015년 다시 생산이 중단되고 회사 재산은 중국으로 이전하거나 중국회사가 지분을 사들이게 되었다. 몰리코프는 법정관리에 들어가게 되었고 분식회계로 미국 증권거래 위원회의 조사도 받게 되었다. 약 2조원의 채무를 진 상태에서 마운틴 패스는 생산을 계속하였지만 중국과 에스토니아로 원재료를 보내 분리와 가공을 하게 되었다. 마운틴패스 광산은 2017년 미국이 주도하는 컨소시엄인 MP Mine Operations LLC에 의해 다시 인수되어 현재의 상태에 이르렀다.

2019년 미국 콜로라도에 본부를 둔 USA Rare Earth 주식회사가 설립되었다. USA Rare Earth는 최초로 미국내에 중희토류 원재료 생산에서 영구자석 부품 제조까지 완전한 공급망을 미국내에 구축한다는 목표로 설립된 회사이다. 이를 위해 서부텍사스 엘파소에서 85마일 떨어진 라운드탑(Round Top) 중희토류 광산을 사들이고 여기서 채굴된 중희토류는 콜로라도 휘트릿지(Wheat Ridge) 가공 분리 공장으로 가져가게 된다. 휘트릿지는 광산과 자원분야 최고 전문대학원인 콜로라도 광산대학원(Colorado School of Mines)이 위치한 장소로 산학협력을 위한 최적의 장소이기도 하다 (Stutt 2020). 콜로라도 처리시설은 중국밖에서는 최초로 경희토류에서 중희토류를 모두 분리 가공하는 시설이다. 영구자석 부품 제조를 위해 노스캐롤라이나에 과거 히타치 메탈이 운영하던 공장을 다시 가동하기 위해 장비를 구입해 재가동 준비를 하고 있다. 미국 지질연구소 (USGS)는 2019년 미국의 희토류 생산이 2018년 대비 8,000톤 증가해 26,000톤으로 증가했으며 이로써 중국에 이어 세계 2위의 희토류 생산국이 되었다고 발표하였다. 아직 분리 가공 시설이 충분치 않아 채굴된

대부분의 희토류 원재료는 중국으로 보내져서 중국에서 분리 가공되어 희토류 산화물의 형태로 미국으로 다시 수입되고 있다.

2010년 1500톤이던 디스프로슘 수요는 2020년 2400톤, 2050년 최소 14,000톤으로 증가하는 디스프로슘 수요 증가세를 감안할 때 중국밖의 공급을 확보하는 데에는 상당한 어려움이 있을 것으로 판단된다. 2020년 현재 약 2400톤의 디스프로슘은 다음과 같이 공급되고 있다.

<표 7> 디스프로슘 공급현황, 2013-2020

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
중국	남부	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
	북부	155	155	155	155	155	155	155	155
러시아	Lovozersk	3	5	5	5	5	5	5	5
	Kuttesay II	-	-	-	-	-	-	-	-
브라질	Buena Norte	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mt. Weld	50	50	50	50	50	50	50	50
호주	Nolans	34	34	34	34	34	68	68	68
	Dubbo	22	22	31	31	31	31	31	31
	Mt Pass	6	6	10	10	10	10	10	10
미국	Bear Lodge	-	-	20	20	20	20	20	20
	Deep Sands	-	71	71	71	71	71	71	71
	Thor Lake	-	-	158	315	315	315	315	315
캐나다	Hoidas Lake	-	14	14	18	18	18	18	18
	Strange Lake	-	-	-	205	205	205	205	205
	Benjamin Riv.	-	-	-	-	-	-	-	-
S. Africa	Douglas Riv.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Steenkampk	34	34	34	34	34	34	34	34
	Zandkopsdrift	-	-	-	55	55	55	55	55
그린란드	크바네펠드	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sarfartoq	-	-	-	-	-	-	-	-
스웨덴	Norra Karr	-	-	-	-	-	-	-	-
말라위	칸칸쿰데	3	3	3	3	3	3	3	3
합계		1660	1767	1957	2378	2378	2412	2412	2412

출처: Hoenderdaal, Espinoza, Marscheider-Weidenmann, & Graus (2013), p. 353.

ROW 새로운 희토류 광산들은 2010년 중국의 수출 규제이후 희토류 개발품의 일부로 개발된 광산들로 대부분 희토류 광산들의 경우는 개발에서부터 상업생산까지 10년 이상이 걸리기 때문에 많은 경우 과거 생산을 하다가 폐쇄된 것을 다시 생산 재개하는(reopening mines) 경우에 생산이 바로 재개됨을 알 수 있다. 노천광산의 경우 상업생산 시간을 단축할 수 있다. 50여개의 희토류 개발기업들이 전 세계에서 탐사를 한 결과 많은 경우 다양한 이유로 경제성이 떨어져 포기하는 경우가 많다. 다른 자원과 비교해 희토류 생산과 채굴의 가장 큰 특징은 채굴 자체 보다 화학적 가공을 필요로 하는 분리(separation) 단계에서 어려움에 직면해 포기한다는 것이다 (이진영 2019; 조희찬 2019; Stegen 2015, 5). 희토류 생산시설은 또한 개발시 동반 채굴되는 토리움과 우라늄과 같은 방사성 폐기물 시설을 어떻게 마련하느냐 하는 것이다. 중국의 희토류 가격이 세계에 비해 낮은 이유는 이러한 환경비용을 부담하지 않고 생산할 수 있었기 때문이었다. 수백개의 희토류 광산들이 개발이 되었지만 최종 경제성을 가지고 개발에 들어간 것은 소수에 불과한 이유는 이와 같이 산업적 경제성을 가지고 있으면서도 정부가 적극적으로 지원을 해야 하고 동시에 투자자가 나서야 하는 3박자가 잘 맞아야 하기 때문에 어려운 것이다. 아직 실현은 안되고 있지만 해저에도 대규모의 희토류가 매장되어 있다고 알려져 있으며 대부분이 중희토류 계열이라고 한다.

공급 갭을 줄이기 위해서는 호주의 네오디뮴과 디스프로슘 생산이 가능한 현재 논의되고 있는 추가 프로젝트가 활발한 생산에 들어가야 할 것으로 보인다. Northern Minerals 社의 Brown Range 프로젝트가 2018년 12월 시범 생산에 들어간 바 있다. Alkane Resources 社 Dubbo 프로젝트, Arafura Resources 社 Nolans 프로젝트, Hasting Technology Metal 社 Yangibana 프로젝트 등은 모두 네오디뮴과 디스프로슘 개발에 초점을 둔 사업들로 2025년까지 250-300 톤 생산이 가능한 사업들이다 (Adamas Intelligence 2018; Department of Industry, Innovation and Science, Australian Government 2019a & 2019b)

디스프로슘 생산과 관련하여 가장 관심을 끄는 지역이 그린란드의 크바네필드이다. 크바네필드의 희토류 개발이 관심을 끌기 시작한 것은 2007년부터이다. 크바네필드 희토류 개발권을 사들인 회사는 호주의 퍼스(Perth)에 본부를 둔 Greenland Minerals 라는 회사이다. 2015년 5월에 처음으로 크바네필드 개발 실행가능성 보고서가 나왔으며 2016년말 자본금 25조원 규모의 세계적 희토류 개발 회사인 중국의 성허 리소시스 (Shenghe Redources) 社가 지분 투자를 하면서 본격적으로 개발이 급물살을 타기 시작했다. 성허 리소시스는 중국의 쓰촨[四川]에 본부를 두고 있으며 주로 쓰촨과 중국 남부의 강서성 중희토류 개발을 하는 회사이다. 2016년 중국 정부가 중국희 희토류 산업을 6개의 공기업체제로 단일화했을 때 생긴 국영기업 Chinalco (the Aluminum Corporation of China)의 자회사에 해당되는 기업으

로 규모면에서 세계 2위에 해당된다. 중국은 2015년 이후 국내 희토류 개발과 수출은 제한하면서 해외 희토류 광산 물색에 본격적으로 나서기 시작했는데 성허 리소시스社は 호주의 그린란드 미네랄스社와 손을 잡기전 호주와 아프리카의 50여개의 희토류 개발사업들을 검토한 결과 유일하게 사업성이 있다고 지분을 투자하기로 한 지역이 그린란드 크바네필드이다. 2018년 8월 그린란드 미네랄스社와 성허리소시스는 양해각서를 체결하고 성허리소시스가 그린란드 미네랄스로부터 32,000-34,000톤의 희토류 산화물을 오프테이크로 구매하고 중국으로 도입해서 화학적 가공을하기로 합의하였다.

미국 프로젝트들 가운데에는 와이오밍 주의 Bear Lodge 프로젝트와 알래스카주의 Bokan-Dotson 프로젝트 생산증대가 괄목할만하게 이루어져야 한다. 보칸 산맥 희토류 광산은 매장량의 약 40%가 중희토류로 분리되어 트럼프 대통령이 2017년 12월 상무부에 지시해 35개 전략광물을 지정하고 공급망 구축방안을 강구할 것을 지시해서 만들어진 보고서에서도 보칸 희토류광산의 중요성을 강조하고 있다. 개발사로 지정된 Ucore Rare Metal社가 2012년에 마련한 보고서에 의하면 개발 첫해 2500톤의 희토류 생산이 가능하며 첫 5년 동안 105톤의 디스프로슘 생산이 가능할 것으로 보았다. Ucore Rare Metal社は 광산에서 35마일 거리의 항구에 분리 가공 시설도 갖추어 놓는 계획을 세워놓고 있다.

2020년 3월 일본의 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)은 아프리카의 나미비아와 로프달 (Lofdal) 중희토류 합작회사를 설립한다고 발표하였다. 합의서에 의하면 나미비아 북서쪽에 위치한 광산에서 총 희토류 생산 9,230톤 이 가운데 7,050톤의 중희토류 생산을 목표로 한다고 되어있다.

V. 결론

미국 유럽 일본의 재생에너지와 전기자동차 등 미래 핵심 산업이 중국의 희토류와 희소금속에 기반하고 있었다는 것은 이제까지 잘 알려지지 않은 사실이다. 2010년은 미중 전략 경쟁 연구자들 사이에서 흔히 중국의 부상이 본격화하고 중국이 자국의 핵심 이익을 적극적으로 주장하기 시작한 시점으로 알려져 있다. 트럼프 정부 출범 이후 미중은 이제 본격적인 경제적 결별 수순으로 들어가서 얽혀있는 산업적 공급망을 분리하기 시작했다. 본 논문은 이러한 기존의 중국의 부상과 미중 대립의 이면에 희토류가 핵심적인 사안임을 설명하고자 했다. 중국은 분명한 희토류의 전략적 목표를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 중

국의 희토류 전략의 최우선 목표는 중국 국산 전기차와 풍력터빈, 태양광패널, 절전형 조명 시스템을 중국에서 채굴된 희토류 원재료를 국내에서 화학적 가공 분리하여 최종 영구 자석 부품으로 만들어 조립하는 것이다. 중국의 원재료가 충분하지 않을 경우를 대비해 호주, 캐나다, 아프리카, 남미, 동남아의 희토류, 전략광물 원재료를 확보하여 가능하면 중국에서 분리 가공하는 것이 두 번째 목표이다. 각각의 제품에 대하여 희토류 공급망이 다른 국가들에 의존하지 않고 온전하게 중국 국내에 남게 된 것이다. 이를 통해 중국은 이제 서구 국가들로부터 기술자립을 이룬 것처럼 보인다.

본 논문이 대상으로 한 1990-2020년 시기는 주로 재생에너지와 전기자동차를 대상으로 한 것으로 이제까지 중국 부상의 경제적 기반이 해당 기간 희토류 영구자석 응용기술 확보에 있었음을 알 수 있었다. 2020년 이후 희토류의 산업적 중요성은 더욱 증가할 것이다. 지금부터의 경쟁은 디지털로 표현되는 훨씬 더 첨단 산업의 두고 중국, 미국, 일본, 유럽의 국가들이 경쟁을 할 것이며 희토류의 응용기술은 더욱 더 중요한 역할을 할 것이다. 이미 중국은 희토류의 응용된 수소저장 기술 개발에 집중 투자하고 있다. 미국이 중국의 희토류 공급망 독점에서 벗어나 자체의 희토류 공급망을 구축할 수 있을 것인지가 21세기 세계경제와 국제정치 질서를 바꿀 것이다.

우리나라는 희토류와 희소금속 원재료는 중국, 소재는 일본 의존도가 매우 높아 중국 일본이 자원을 무기화할 경우 국내 산업에 큰 타격이 우려되는 상황이다. 현정부가 추진하고 있는 디지털 그린뉴딜 정책을 성공적으로 추진하기 위해서는 핵심 광물자원의 안정적 확보가 중요하다. 한국은 미국보다 첨단분야 제조업에 대한 의존도가 크기 때문에 미중 무역 분쟁으로 인한 중국의 희토류 자석 수출 제한은 미국보다 한국에 더 큰 타격을 입힐 것이다. 현재 주요 생산국인 중국 외 베트남, 인도, 브라질, 우즈베키스탄, 키르기스스탄, 남아공, 호주 등의 국가에 적극 진출, 자원을 확보하는 방안을 검토해야 한다. 희토류와 배터리 금속 등 확보에 있어 우리의 대응방안으로는 국제협력을 통한 광산발굴 및 채굴, 희토류 희소금속 저장 및 대체기술 개발, 도시광산을 통한 폐태양광 패널, 폐전자제품, 폐전기차 배터리 금속 회수 등의 방안이 있을 것이다.

《참 고 문 헌》

- 김경연·이광우. 2016. “그린에너지 시대의 새로운 자원 전쟁.” 『LG Business Insight』 . 10월 12일.
- 김성진. 2019. “시장구조의 변화와 가치사슬을 고려한 한국 태양광 산업의 육성 방향.” 한양대 에너지거버넌스 센터 보고서.
- 김연규. 2020a. “미·중 패권경쟁과 아프리카 신흥 쟁탈전.” CSF 전문가 오피니언. 7월. 대외경제정책연구원.
- 김연규. 2020b. “중국의 전기차 굴기와 리튬그레이트 게임.” CSF 전문가 오피니언. 8월. 대외경제정책연구원.
- 김연규. 2020c. “미중 21세기 세계경제 주도권 쟁탈전: 희토류 패권경쟁.” CSF 전문가 오피니언. 9월. 대외경제정책연구원.
- 김태현·이태의. 2019. 『에너지 전환시대의 소재수요 변화에 대한 자원개발 전략』 . 정책이슈페이퍼 19-13. 에너지경제연구원.
- 김효준. 2019. “희토류 영구자석 기술의 진보와 최근 동향.” 『물리학과 첨단기술』 9월호, 19-23.
- 남지은. 2014. “중국 희토류 생산동향 및 전망.” KOTRA, 5월 6일
- 박선령. 2017. “중국의 자원무기화, 희토류 패권의 취약성.” 『세계정치』 Vol. 27, 243-295.
- 박인섭·송재두. 2016. “중국 희토류산업정책의 변화와 정책적 함의.” 『무역상무연구』 71, 297-324.
- 방민진. 2019. “희토류: 중국의 자원 무기가 통할 것인가.” 유진투자증권 5.23
- 성동원. 2018. 『4차산업혁명과 광물자원』 . VOL.2018-중점-02(2018.12.31.) 산업연구원.
- 임경묵·한준화·박승연. 2019. “희토류 생산 및 부존현황.” 『물리학과 첨단기술』 9월호, 3-8.
- 이진영. 2019. “4차산업혁명시대의 핵심소재 희토류! 어떻게 생산되나?” 9월호, 15-18.
- 이종민. 2019. 『중국 희토류 자원무기화, 그 위력과 한계』 포스코경영연구소
- 정웅태 외. 2011. 『녹색성장을 위한 희소자원의 개발과 관리 방안』 에너지경제연구원, 경제·인문사회연구회 녹색성장 종합연구 총서 11-02-05. 협동연구보고서 11-01.
- 조정원. 2018. 『중국의 에너지전환과 자동차산업의 변화: 전기자동차와 자율주행 스마트 카를 중심으로』 서울: 다해.
- 조희찬. 2019. “희토류 광물의 탐사, 채광, 선광기술.” 『물리학과 첨단기술』 9월호, 9-14.

- 최유식. 2019. “중국의 희토류 禁輸, 자신을 찌르는 칼이 될 수 있다.” 『조선일보』 7월 3일
http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2019/07/02/2019070203710.html (검색일:
2020.10.05.)
- 토이로바 무비나·박인섭. 2015, “중국의 희토류 산업정책과 글로벌 영향.” 『사회과학연구』 제54집 2호, 349-387.
- 한국 광물자원공사. 2018. 『리튬시장 분석보고서』
- 한국 무역협회 국제무역연구원. 2018. 『첨단산업의 비타민, 희소금속의 교역동향과 시사점』
- 한중과학기술협력센터. 2011. 『중국의 희토류 개발정책과 산업동향』
- Adamas Intelligence. 2018. *Spotlight on Dysprosium: Revving up for Rising Demand*. August.
- An, David L. 2014. *Critical Rare Earths, National Security, and U.S.-China Interactions A Portfolio Approach to Dysprosium Policy Design*. Pardee Rand Graduate School Ph.D. Dissertation, September.
- Bartekova, Eva and Rene Kemp. 2016. “National Strategies for Securing a Stable Supply of Rare Earths in Different World Regions.” *Resources Policy*, 49, 153-164.
- Binnemans, Koen, Peter Tom Jones, Torsten Müller, Lourdes Yurramendi. 2018. “Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets?” *Journal of Sustainable Metallurgy* 4, 126-146.
- Cao, Z. C. O’Sullivan, J. Tan, P. Kalvig, L. Ciacci, W. Chen, J. Kim, G. Liu. 2019. “Resourcing the Fairytale Country with Wind Power: a Dynamic Material Flow Analysis.” *Environmental Science Technology*, 53, 11313-11322.
- Chen, Y. and B. Zheng. 2019. “What Happens after the Rare Earth Crisis: A Systematic Literature Review.” *Sustainability* 11, 1-26.
- China Water Risk. 2016. *Rare Earths: Shades of Grey*. Hong Kong.
- Department of Industry, Innovation and Science, Australian Government. 2019a. *Australia’s Critical Minerals Strategy*.
- Department of Industry, Innovation and Science, Australian Government. 2019b. October. *Outlook for Selected Critical Minerals: Australia*.
- Economist. 2020. “The New Scramble for Africa.” March 7.
- Elshkaki, A., T. Graedel. 2014. “Dysprosium, the Balance Problem, and Wind Power Technology.” *Applied Energy*, 136, 548-559.

- Eggert, Roderick, Cyrus Wadia, Corby Anderson, Diana Bauer, Fletcher Fields, Lawrence Meinert, and Patrick Taylor. 2016. "Rare Earths: Market Disruption, Innovation, and Global Supply Chains." *Annual Review of Environment and Resources* 41, 1-24.
- Ericsson, Magnus, Olof Löf, and Anton Löf. 2020. "Chinese Control over African and Global Mining-Past, Present and Future." *Mineral Economics*, 33, 153-181.
- European Commission. 2017. *Study on the Review of the List of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets*. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
- Fishman, T. and T. Graedel. 2019. "Impact of the Establishment of US Offshore Wind Power on Neodymium Flows." *Natural Sustainability*, 2, 332.
- Foreign Policy. 2019. "Mining the Future." Special Report, May.
- Global Rare Earth Industry Association. 2020. *Rare Earth Elements: Small Market, Big Necessity*. <https://global-reia.org/about-rare-earth/> (검색: 2020.10.05)
- Green, J. 2019. "The Collapse of American Rare Earth Mining-And Lessons Learned." *Defense News*, Nov. 12.
- Gulley, A. L., N.T. Nassar, S. Xun. 2018. "China, the United States, and Competition for Resources that Enable Emerging Technologies." *Proceedings of National Academy of Science, USA*, 115, 4111-4115.
- Hoenderdaal S., L. T. Espinoza, F. Marscheider-Weidenmann, and W. Graus. 2013. "Can a Dysprosium Shortage Threaten Green Energy Technologies?" *Energy* 49, 344-355.
- Hou, W., H. Liu, H. Wang, & F. Wu. 2018. "Structure and Patterns of the International Rare Earths Trade: A Complex Network Analysis." *Resources Policy*, 55, 133-142.
- Howanietz, R. 2020. *China's Virtual Monopoly of Rare Earth Elements: Economic, Technological and Strategic Implications*. London and New York: Routledge.
- ISE (Institute of Rare Earths and Metals). 2020. *Rare Earth Elements-Prices*. Germany. <https://en.institut-seltene-erden.de/unser-service-2/metall-preise/seltene-erden-preise/> (검색: 2020.10.05.)
- Kalantzakos, S. 2017. *China and the Geopolitics of Rare Earths*. London and New York: Oxford University Press.
- Lee, Jason C.K. and Zongguo Wen. 2016. "Rare Earths from Mines to Metals Comparing Environmental Impacts from China's Main Production Pathways." *Journal of Industrial*

- Ecology*, Vol. 21, No. 5, 1277-1290.
- Mamula, Ned & Ann Bridges. 2019. *Groundbreaking! America's New Quest for Mineral Independence*. Washington, DC: Washington Times.
- Mancheri, N. A., B. Sprecher, G. Bailey, J. Ge, and A. Tukker. 2019. "Effect of Chinese Policies on Rare Earth Supply Chain Resilience." *Resources, Conservation & Recycling*, 142, 101-112.
- Mancheri, N. A. 2018. "Resilience in the Tantalum Supply Chain." *Resources, Conservation & Recycling*, 129, 56-69.
- Mancheri, N. A. & T. Marukawa. 2016. *Rare Earth Elements: China and Japan in Industry, Trade and Value Chain*. Tokyo: Japan: Tokyo University.
- Mancheri, N., A. 2015. "World Trade in Rare Earths: Chinese Export Restrictions, and Implications." *Resources Policy* 46, 262-271.
- Matsumoto, F. 2019. "US and Australia Team up against China's Dominance in Rare Earths." *Nikkei Asian Review*, July 28.
- Medeiros, C. and N. Trabet. 2017. "Transforming Natural Resources into Industrial Advantage: The Case of China's Rare Earth Industry." *Brazilian Journal of Political Economy* Vol. 37, No. 3, 504-526.
- Paulicka, H. & E. Machacek. 2017. "The Global Rare Earth Element Exploration Boom: An Analysis of Resources outside of China and Discussion of Development Perspectives." *Resources Policy* 52, 134-153.
- Rabe, W. G. Kostka, K.S. Stegen. 2017. "China's Supply of Critical Raw Materials: Risks for Europe's Solar and Wind Industries?" *Energy Policy*, 101, 692-699.
- Seaman, J. 2019. *Rare Earth and China: A Review of Criticality in the New Economy*. Paris: France, IFRI.
- Sprecher, B. I. Daigo, W. Spekkink, M. Vos, R. Kleijn, S. Murakami, & G.J. Kramer .2017. "Novel Indicators for the Quantification of Resilience in Critical Material Supply Chains, with a 2010 Rare Earth Crisis Case Study." *Environmental Science Technology*, Vol. 51, No. 7, 3860-3870.
- Stegen, Karen Smith. 2015. "Heavy Rare Earths, Permanent Magnets, and Renewable Energies: An Imminent Crisis." *Energy Policy* 79, 1-8.
- Stutt, A. 2020. "USA Rare Earth's Ambitious Plans for Domestic Supply Chain." *Mining.com*,

May 1.

Sun, I. Y. 2017. *The Next Factory of the World*. Cambridge, USA: Harvard Business Review Press.

UNCTAD. 2014. *Commodities at a Glance: Special Issue on Rare Earths*.

US Congressional Research Service. 2019. *Critical Minerals and US Public Policy*.

US Congressional Research Service. 2015. *China's Mineral Industry and US Access to Strategic and Critical Minerals: Issue for Congress*.

US Congressional Research Service. 2013. *Rare Earth Elements in National Defense: Background, Oversight Issues, and Options for Congress*.

US Congressional Research Service. 2010. *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*.

US Geological Survey. 2020a. *Rare Earths Statistics and Information*

US Geological Survey. 2020b. *Mineral Commodity Summaries 2020*.

US GAO (Government Accountability Office). 2016. *RARE EARTH MATERIALS Developing a Comprehensive Approach Could Help DOD Better Manage National Security Risks in the Supply Chain*. Report to Congressional Committees, GAO-16-161.

US GAO (Government Accountability Office). 2010. "Rare Earth Materials in the Defense Supply Chain." Briefing for Congressional Committees April 1.

World Bank Group. 2017. *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28312> (검색: 2020.10.05)

Wübbecke, J. 2016. *Problems, Strategy and Implementation in China's Rare Earth Industry*. Ph.D. Dissertation, Free University of Berlin.

Wübbecke, J. 2013. "Rare Earth Elements in China: Policies and Narratives of Reinventing an Industry." *Resources Policy* 38, 384-394.

Zhou, B. Z. Li and C. Chen. 2017. "Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies." *Minerals* Vol. 7, No. 11, 203-217.

■ 김연규

미국 퍼듀대학교 (Purdue University)에서 정치학 박사를 수여받았으며 현재 한양대학교 국제학부 교수이다. 주요논문으로는 "Russia and the Mediterranean in the Era of Great Power Competition" (2020), "Russia's Arms Sales Policy after the Ukrainian Sanctions" (2019) "트럼프정부하 미국-러시아 유럽가스공급경쟁: 노드스트림 가스관 II" (2018), 주요저서로는 『도시광산 정책: 국내외 사

레』 (편저, 2019) 『한국의 미래 에너지전략 2030』 (편저, 2018) 『동북아 에너지협력과 한국의 선택』 (편저, 2017) 등이 있다. 현재 중국의 디지털 실크로드 인프라 구축의 정치경제 문제와 디지털 지정학, 희토류 패권경쟁 등의 문제를 연구하고 있다

(연락처: youn2302@hanyang.ac.kr).

■ 안주홍

미국 럿거스 대학교에서 박사를 받았으며, 존스홉킨스 대학교 박사후 연구원, 광주과학기술원 교수를 지내고, 현재 한양대학교 생명과학과 교수이다. 동물모델을 이용한 유전학적 연구로 발생, 신경과학, 환경 독성 생태 등에 관련된 80여편의 SCI 논문을 발표한 바 있다.

(연락처: joohong@hanyang.ac.kr)

논문 접수일	: 2020년 10월 10일
심사 완료일	: 2020년 10월 22일
게재 확정일	: 2020년 10월 23일

Abstract

China's Control over the Global Supply Chain of Rare Earth Elements since 2005 and US Responses

Younkyoo Kim

Division of International Studies, Hanyang University, South Korea

JooHong Ahn

Department of Life Science, Hanyang University, South Korea

This paper analyzes changes in global trade of rare earth elements after China's export restrictions in 2010. Previous studies highlight China's weaponization of rare earths against Western countries. This paper breaks new ground by examining China's hidden goals of reallocating critical rare earth elements such as Neodimium and Dysprosium for domestic consumption in the expanding industrial applications of permanent magnets for wind turbines and electric vehicles. There emerges a gap problem between demand and supply for Dysprosium in the amount of 4,000-5000 tons at minimum and 20,000-30,000 tons at maximum for 2050 without doubling of China's production and exports and significant new supplies from Rest of World.

Our general knowledge suggests that some improvement has been made in supply chain resilience for rare earth elements after the 2010 China's export restrictions. For instance, in 2019 global production of rare earth elements reached 190,000 tons, out of which Rest of World produced 70,000 tons. Most of 70,000 tons produced outside China is composed of Light Rare Earth Elements (LREE), which is globally oversupplied and easily extracted. Rising industrial applications in the permanent magnets for wind turbines and electric vehicles requires Heavy Rare Earth Elements (HREE) such as Dysprosium which is mostly found and extracted in Southern China.

Key words: Rare Earth Elements, Heavy Rare Earths, Neodimium, Dysprosium, Supply Chain,
Rare Metal