



텅스텐 소재의 현황과 소재화 기술

글 _ 피재환, 김유진, 이미재, 서원선, 김형태
한국세라믹기술원

1. 텅스텐 소재의 현황

텅스텐 소재는 자동차, 반도체, 우주항공, 조선, 신재생 및 철도산업의 발전과 함께 금속, PCB, 세라믹, 및 그 복합체 등의 난삭재와 신소재 적용이 활발해 지면서 고강도, 고인성, 고수명, 고절삭성 초경공구가 요구되고 있다. 한마디로 텅스텐이 없으면 세계 제조 산업이 공황상태에 빠진 다해도 과언이 아닐 것이다. 이런 텅스텐 소재는 약 55%가 공구소재로 사용되고 이외에도 합금강(25%), 텅스텐(15%, 군사용 포함), 안료/축매(5%) 등의 소재로 널리 사용되고 있다. 이는 3,422°C의 높은 용점과 모오스 경도 7.5의 높은 경도가 역할을 하고 있다.

이러한 텅스텐 소재는 전체 매장량이 2,340,200톤이며 한해 공급량이 71,120톤이다. 여기에서 중국에 81%가



Fig. 1. Application industry of hard metal (Ilijin Diamond Co., Ltd., 2015).

Global: Estimated demand by major end-use, 2012 (Source: Roskill)

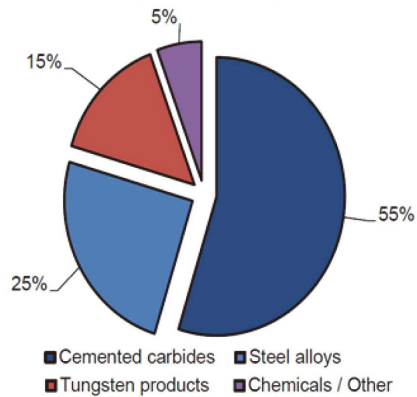


Fig. 2. Utilization of tungsten materials (Roskill, 2012).

매장되어 있고, 87%를 중국이 공급하고 있어 중국 의존도가 상당히 높은 현실이다. 이외에 러시아가 11% 매장량에 5% 공급량, 캐나다가 5% 매장량에 3% 공급량을 점유하고 있다.

텅스텐은 지각 구성 물질 중에 1.25mg/kg만이 존재하여 아주 희소하지만, 수요는 높아 시장 가격이 높게 형성되는 물질이다. Fig. 4는 텅스텐 연간소비량과 시장에서의 가격동향을 나타낸다. 텅스텐 주 공급처인 중국에서 2005년에 쿼터제를 실행하여 100\$/10kg이던 가격이 290\$/10kg까지 급상승했던 것을 알 수 있다. 이후 가격이 안정적이었다가 2011년에 텅스텐 수요증가와 공급제한의 유지로 또 한 차례 급상승하여 450\$/kg까지 상승했다. 텅스텐 매장량이 한정적이고 공급처가 제한적이다 보니 이와 같은 가격 요동은 언제든지 발생할 수 있는 산업 생

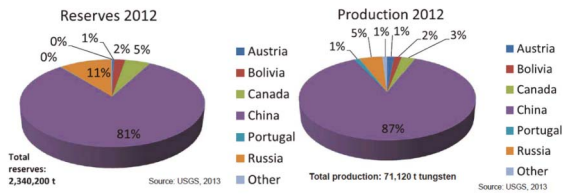


Fig. 3. Total reserves and production of tungsten (USGS, 2013).



Fig. 4. Market price tendency and annual consumption of tungsten (ITIA, 2014).

테계 구조이다.

2. 텅스텐 소재 value-chain

텅스텐 관련 제품을 생산하기 위해서는 1차 텅스텐 (Primary tungsten)에서 66%가 공급되고 35%는 2차 텅스텐(Secondary tungsten, 재활용)에서 공급되는 구조이다. 1차 텅스텐에서도 약 30%는 회중석(Scheelite)에서 70%는 흑중석(Wolframite) 광산에서 공급된다. 2차 텅스텐은 24%가 폐텅스텐 소재의 재활용으로, 10%는 제품 생산에서 발생하는 가공 scraps들로부터 공급된다. 제품이 수명이 다하고 나면 통계적으로 24%만이 재활용되고 76%의 폐텅스텐 자원의 유통은 정확하게 파악되지 않고 있다. 텅스텐 소재는 초경공구로 55% 이상이 사용된다. 초경공구의 원료로 사용되기 위해서는 텅스텐 카바이드(WC)가 필요하다. 텅스텐 카바이드를 제조하기 위해서는 다양한 방법이 있으나 최근에는 Fig. 6과 같이 텅스텐 광산으로부터 텅스텐이 75% 농축된 wolframite concentrate 75% tungsten oxide를 출발물질로 한다. 이를 기계화학적(분해, 추출, 고순도화 기술) 방법으로

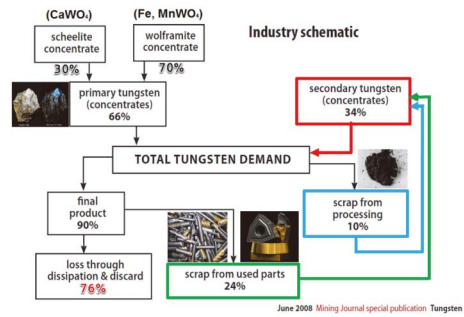


Fig. 5. Material flows of tungsten (Mining Journal Special Publication, Tungsten, 2008).

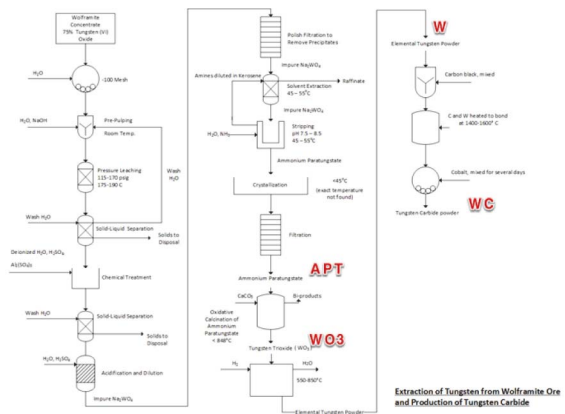


Fig. 6. Manufacturing process of tungsten carbide (Wikipedia, 2015).

APT(Ammonium Para-Tungsten)을 제조한다. 고순도의 텅스텐 중간물질(H₂WO₄, APT)를 제조하고 이를 산화처리하여 산화텅스텐(WO₃)을 제조한다. 이 산화 텅스텐을 환원처리 후 탄화처리하면 텅스텐 카바이드를 제조할 수 있다.

3. 폐 텅스텐 소재 재활용 기술

1차 텅스텐(Natural resources)으로부터 텅스텐 카바이드 100kg을 제조하기 위해서는 12톤이 필요하다. 많은 텅스텐 광물을 사용하고 많은 에너지를 소모해야하고 환경적 부담이 있는 제조법이라 하겠다. 그러나 2차 텅스텐 (Urban mine, scraps)으로부터 텅스텐 카바이드를 만들 고자 한다면 Fig. 7과 같이 단지 110kg의 폐텅스텐 스크

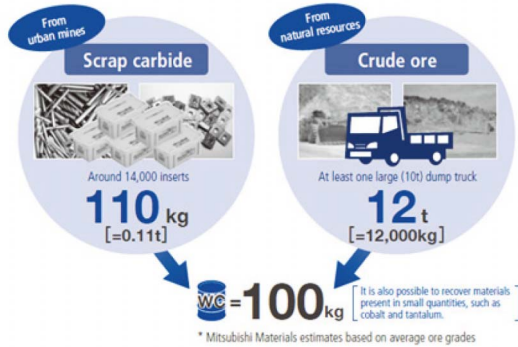


Fig. 7. Consumption of 1st and 2nd tungsten resources for manufacturing of tungsten carbide (Mitsubishi Materials CSR REport, 2011).

랩을 사용하면 된다. 하여 많은 연구자들이 폐텅스텐 소재 재활용 기술을 개발하고 있다. 초기 단계에서는 견고한 폐텅스텐 공구를 분해하고 여기에서 직접 텅스텐 카바이드를 추출하거나 아니면 화학적인 고순도화 처리 과정을 통해 고순도 텅스텐 중간화합물(H₂WO₄, APT)을 재생산하는 기술이 연구되어졌다. 이 폐텅스텐 공구를 재활용 하는 기술로 아연법, 산화법, 전기화학법, 용융염법이 있다. 각 재활용 기술에 대한 장단점과 현재 국내 특허 보유기관을 Table 1에 나타내었다. 아연법은 아연용탕에 폐텅스텐 공구를 넣고 분해 처리한 다음 아연을 휘발시키고 WC-Co 과/분말을 얻는 방식이다. 전기화학법은 초경공구의 바인더인 코발트를 전기화학적으로 용해하여 초경공구를 분해하고 이로부터 WC를 얻는 방법이

Table 1. Recycling technology of waste hard metal (KICET, 2015)

기술명	장점	단점	특허 보유기관
아연법	- 적은 에너지 사용 - 화학적 처리나 수용액을 사용하지 않음(친환경적) - WC-Co 조성 직접 회수	- 동일 폐 텅스텐 공구를 사용해야지만 순도 제어가 가능 - 텅스텐 카바이드의 입도 제어가 불가 - 재활용 소재의 재활용 비율이 낮음(30%미만)	한국세라믹기술원 등
산화법1	- 폐 텅스텐 공구를 산화시켜 분해한 다음 재 환원-탄화처리하여 건식공정의 장점	- 산화공정이 장시간 소요 - 순도 제어가 불능 - WC 입자 크기 제어가 불능	재료연구소 등
산화법2	- 폐 텅스텐 공구를 회전식 산화기구로 산화시켜 분해공정의 단축 - 산화를 화학처리(치환법, 이온교환법) 공정을 통해 고순도 중간물질 제조 가능	- 재활용 소재의 공구화 기술 미평가 - 산화물의 용액에 많은 에너지 발생 - 환경 부담 및 공정비용 발생 - 텅스텐 추출에 대한 기술이 국내 부족 - 재활용 텅스텐 소재의 공구화 기술 미평가	한국세라믹기술원 한국지질자원연구원 등
전기 화학법	- 초경공구의 바인더인 코발트를 용해처리하여 분해함으로써 WC를 직접 회수	- 공정시간이 길고 환경부담이 큼	없음
용융염법	- 폐 초경공구를 용융염에 직접 용해 산화법의 공정을 단순화	- 용융염 형성을 위한 초기 투자비용 과다 - 폐 초경공구 분해 후 고순도화를 위한 화학공정이 필요	없음

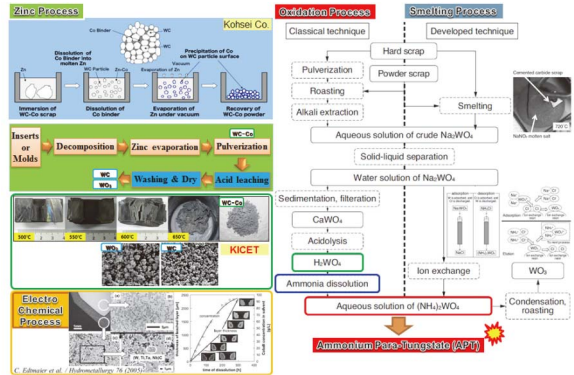


Fig. 8. Schematic diagram of recycling technologies of waste hard metal (zinc process, electro-chemical process, oxidation process and smelting process).

다. 산화법은 폐 초경공구를 산화시키고 화학적인 방법으로 텅스텐 중간물질을 생성하고 이를 산화-환원-탄화 처리하여 고순도의 WC를 제조하는 공정이다. 용융염법은 Na 용융염에 폐 초경공구를 넣고 분해시킨 후 화학적인 추출 방법으로 텅스텐 중간물질을 회수하고 이를 산화-환원-탄화 공정을 통해 고순도의 WC를 제조하는 공정이다. 전반적으로 재활용기술에 관한 연구는 많이 진행되었으나 고순도화, 재활용 텅스텐 소재의 공구화 분야에 대한 연구는 아직 미진한 상태임을 알 수 있다. 즉 재활용 기술로 폐 텅스텐 자원으로부터 재생 텅스텐 소재를 공급하고 이를 활용하여 소재화, 공구화를 해야지만 완전한 국내 텅스텐 소재의 생태계가 구축될 것으로 판단된다.

4. 텅스텐 산업 생태계 구축을 위한 세라믹-금속-화학 융합기술

텅스텐 소재를 생산하기 위해서는 1차(66%) 또는 2차(34%) 텅스텐으로부터 텅스텐 중간물질(H₂WO₄, APT, WO₃)을 공급받아야 한다. 텅스텐 광산으로부터 텅스텐 중간물질을 제조하기 위해서는 채광기술, 선별기술, 고농축화기술 등이 필요하다. 그러나 기존 기술과 차별화된 제품 생산을 위해서는 금속-화학-세라믹 융합기술이 접목되어 보다 효율적이고 고순도화된 텅스텐 중간물질제



조가 필요하다. 또한 텅스텐 소재가 초경공구이외에도 합금강, 안료/축매, 기능성 물질 등으로 45%가 사용된다. 국내에서는 WC 제조기술만이 구축되어 있고 텅스텐 중간물질(비정질금속, 산화질화물, 유기화합물, 탄질화물 등)의 제조기술은 미개발되어 산업계의 요구에 부응하지 못하고 있다. 텅스텐 소재의 완벽한 생태계 구축을 위해서는 우선 기존 기술의 문제점들을 해결하기 위한 융합 기술이 필요하고 응용분야의 개척을 위한 융합기술개발이 필요하다. 이러한 융합기술의 개발은 산업생태계의 안정화와 영역의 확장에 기여할 것이다.

4.1. 텅스텐 광물 원료화 기술개발

국내 텅스텐 광산은 0.4%급 광물이고 이를 바탕으로 75% 농축광물제조를 위해서는 신 선광-정련기술이 필요하다. 황화물 부유선광 공정개선, 신정련 공정기술 도입에 의한 농축도 향상기술은 금속-화학의 융합기술이 필요하다. 특히 75%급 농축광물에서 텅스텐 중간원료화 기술은 국내 한 개 기업이 단독보유하고 있어 국내 원료기업의 생태계가 취약하다고 하겠다.

기존 정련 공정기술을 개선하기 위해서는 금속-세라믹 기술이 융합된 건식 친환경 텅스텐(W)제조기술이 필요하다. 이에는 금속(제련, 환원기술)과 세라믹(비환원물질 제거기술)의 특유의 기술이 융합되면 달성 가능하리라 판단된다. 또한, 75%급 텅스텐 농축광물을 제조하는데 있어 금속(제련, 환원기술), 세라믹(분체화, 석출기술), 화학(정련, 고순도화기술)의 융합이 절대적으로 필요하다. 텅스텐 광물의 원료화에서 99.5%급 APT를 제조하기 위



Fig. 9. Tungsten materialization of crude ore with fusion technology.

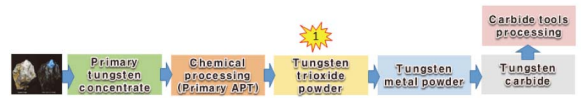


Fig. 10. Tungsten materialization process from 75% grade concentrate.

해서는 세라믹(석출, 추출기술)과 화학(고순도화기술) 기술의 융합이 필수적이며 이는 원료의 경쟁력 강화의 기본이라 하겠다. 텅스텐 중간원료로 가장 많이 세계적으로 생산되는 APT의 경우 현재 이온교환기술의 발전으로 고품질화, 친환경화, 고생산성화의 기술들이 개발되고 공급되고 있다. 또한 광물 제련에서 필수적으로 발생하는 (광무 무해화) 처리기술에도 세라믹(시멘트화기술, 유리화기술, 도자기화기술, 경량골재화기술)과 화학(고형화기술) 기술의 융합이 필요하다. 이렇듯 지금까지 개별적인 기술로 이루어진 산업생태계를 융합기술로 지원한다면 산업 생태계의 제품 경쟁력 강화에 필수적이라 하겠다.

텅스텐카바이드 제조에 필요한 원료인 산화 텅스텐(WO₃)의 경우 99.9%급이 필요하다. 물론 입도 제어가 중요한 인자이기도 하다. 그러나 전량 수입에 의존하여 국내에서는 한 개 기업만이 자체 공장에서 WO₃를 환원 처리하여 텅스텐(W) 분말을 제조하고 이를 탄화처리하여 WC를 분말을 제조하고 있다. 산화 텅스텐은 수소 분위기 1000℃ 부근에서 환원 처리되고 환원된 텅스텐 분말은 카본과 혼합된 후에 고온 진공로에서 탄화처리된다. 초경공구의 물성에 크게 영향을 미치는 입도나 순도는 전적으로 WO₃에 의존한다고 봐야 한다. 텅스텐카바이드를 제조하기 위해서도 세라믹-금속-화학의 융합기술이

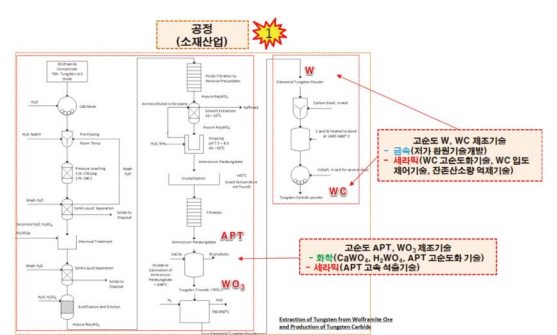


Fig. 11. 텅스텐 원료 소재화를 위한 융합기술



필요하다. Fig. 11의 텅스텐 원료의 소재화 기술 공정도에 서와 같이 고순도 APT, WO₃ 제조기술에는 화학(고순도 화기술) 및 세라믹(고속석출기술)의 융합기술이 필요하다. 또한 고순도 W 및 WC 제조를 위해서는 금속(저가 환원기술), 세라믹(WC입도제어기술, 잔존산소량 억제기술, 고순도화기술)의 융합기술이 필요하다. 이러한 융합 기술들은 텅스텐 원료의 소재화를 위한 필요기술이며 국내 소재기업의 경쟁력 강화에 필수적이라 하겠다.

5. 텅스텐 산업 생태계 구축의 효과

국내 부존 저품위 텅스텐 자원(광산, 폐자원)에 대한 세라믹-금속-화학 융합기술의 도입으로 신규 텅스텐 소재산업이 활성화될 것이다. 당장 현재 발생하고 있는 폐 텅스텐 자원(4천 톤/년)에 대한 재활용 산업의 활성화가 기대된다. 또한 고기능성 텅스텐 신제품 개발공급으로 국내 제조산업(자동차, 조선, 우주항공, 건설, 화학, 전기·전자 등)의 기초를 강화할 것이고 초경공구 등 제조산업의 핵심부품을 국내에서 안정적으로 공급 가능하다.

재활용 텅스텐 소재의 재 제품화로 국가전략 물질 선순화 체계 구축이 가능할 것이다. 재활용 텅스텐 소재를 재 제품화하는 기술공급으로 대외의존도가 높은 국내 공구산업의 경쟁력을 강화하여 중국 의존도를 저감 시킬 수 있다. 특히 텅스텐은 국가 전략물질 중 유일하게 국내에 광산을 보유하고 있으며 2차 텅스텐도 국내에서 다량 발생하므로 그 생태계 구축과 활성화의 가능성은 높다고 하겠다. 이렇게 되면 텅스텐 광물-원료-소재-제품-재생의 텅스텐 생태계 구축이 가능하리라 판단된다.

또한 직접적으로 텅스텐 관련 소재 수입억제가 가능하며 APT, WO₃, W, WC 등의 소재 7천여 톤, 3천5백만 불(2012) 규모의 수입억제가 가능할 것이다. 그리고 2조 원 규모의 공구산업 및 제조산업 경쟁력을 강화할 수 있다. 텅스텐 소재는 자원고갈지수가 높아 가격폭등 및 수급불안이 문제여서 국내 공구제조업체의 대외 경쟁력이 취약했으나 산업 생태계 구축으로 국내 산업이 안정화될 것이다. 이는 국내에서 안정적 텅스텐 공급 생태계 구축으로 공구산업-제조업의 대외 경쟁력 강화로 이어질 것으로 판단된다.

●● 피재환



- 1999년-2004년 Tottori University(일) 연구공학과 석/박사 졸업
- 2004-현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 김유진



- 1994-2004년 성균관대 화학과 학사, 석사, 박사
- 2004-2007년 MIT, University of Pennsylvania 화학과 박사후연구원
- 2007-현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 이미재



- 1991년 명지대학교 무기재료공학과 석사 졸업
- 2009년 명지대학교 신소재공학과 박사 졸업
- 1991-현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 서원선



- Univ. of Tokyo 공학박사
- Nagoya Univ. 부교수
- 현재 한국세라믹기술원 에너지환경소재본부장/수석연구원
- 현재 연세대학교 신소재공학과 / 경상대학교 나노·신소재공학부 겸임교수



●● 김형태



- 한양대학교 공학박사
- 현재 한국세라믹기술원 이천분원장/수석연구원
- 현재 Editor of Japanese Ceramic Society