

원심분무 고밀도 저농축 핵연료 제조기술을 활용한 고농축 우라늄 최소화

박종만

한국원자력연구원 연구로핵연료기술개발부 책임연구원



연세대 금속공학과 학사
KAIST 재료공학과 석사, 박사

한국원자력연구소 자체연구개발과제
책임자

한국원자력연구원 하나로핵연료
생산과제 책임자

연구로핵연료개발부장

차세대 U-Mo 연구로핵연료개발
과제책임자(중장기),

연구로 판형핵연료개발
과제책임자(주요사업)

원심분무법 이용 U-Mo 분말 100kg 제조, 미국에 전달

한국과 미국, 프랑스, 벨기에 등 4개국은 지난 2012년 서울 핵안보정상회의에서 핵심 의제 중 하나인 민수용 고농축 우라늄(HEU) 사용 최소화를 위해, 고성능 연구로의 저농축 우라늄(LEU) 전환(conversion)을 위한 「고밀도 U-Mo 핵연료 제조 실증 사업」을 공동성과 사업으로 추진하기로 합의한 바 있다.

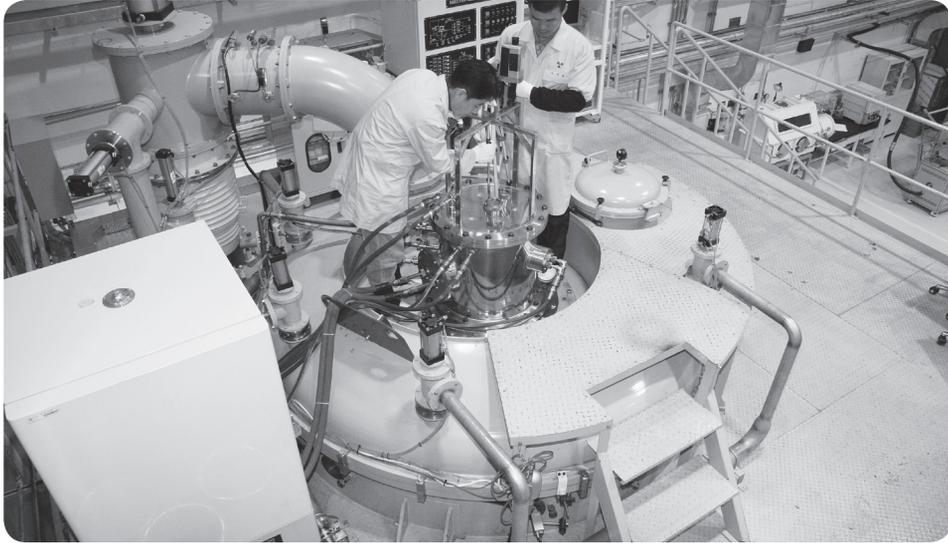
이를 위해 미국(DOE/NNSA)은 핵연료 분말 제조에 필요한 LEU 원료를 한국에 제공하고, 한국원자력연구원이 보유한 원천 기술인 원심분무법을 이용해 U-Mo 분말 100kg을 제조하면, 프랑스에서 한국 제조 원심분무 U-Mo 분말을 이용하여 검증 시험용 고밀도 U-Mo 핵연료 집합체를 제조한 후, 이를 유럽의 고성능 연구로(벨기에 BR-2, 프랑스 RHF-ILL)에 시범 장전하여 검증 시험을 수행한다는 계획이다.

한-미-프-벨 4개국 공동 사업이 성공적으로 완료될 경우, 2018년 이후 유럽의 고성능 연구로부터 우리 기술로 개발된 고밀도 저농축 U-Mo 핵연료로 노심 전환이 이루어지고 점차 HEU를 사용하는 모든 고성능 연구로가 U-Mo 핵연료를 전면적으로 사용할 계획이다.

2012 서울 핵안보정상회의 4개국 협력 사업 수행을 위해 2013년 6월 미국 DOE/NNSA는 LEU 원료 116kg을 한국에 제공하였고, 한국원자력연구원은 이를 이용해 2013년 8월 U-Mo 분말 100kg을 성공적으로 완료하였다.

제조된 U-Mo 분말 100kg을 미국에 전달하기 전에 미래부, 외교부의 담당 과장, 미국 에너지부/핵안보청(DOE/NNSA)의 연구로 전환 담당관, 그리고 DOE 산하 Y-12의 LEU 구매 담당자가 참석한 가운데 2014년 1월 24일 한국원자력연구원에서 전달식을 수행한 후, 미국(Y-12, 98k)과 벨기에(SCK-CEN, 2kg)로 U-Mo 분말을 인도하였다.

이로써 우리나라는 서울 핵안보정상회의에서 합의된 주요 핵심 의제



원심분무장치. 현재 하나로 연구로는 세계에서 유일하게 자체 개발한 원심분무 기술로 제조된 U_3Si 핵연료를 2005년부터 사용하고 있어 우리 핵연료 기술의 안전성 및 우수성을 증명하고 있다.

를 성공적으로 이행함으로써, 세계적으로 한국만이 보유한 원심분무 기술로 인하여 고농축 우라늄(HEU) 사용 최소화를 위한 국제적 핵비확산/핵안보에 주도적으로 기여하였으며, 국내 원전 기술의 우수성을 인정받는 계기가 되었다.

원심분무 기술 이용 U_3Si 분말 제조 성공

국제적인 핵비확산 정책에 따라 세계 각국은 연구용 원자로에 사용되는 고농축 우라늄 핵연료를 저농축 핵연료로 대체하고자 미국을 중심으로 「저농축 연구시험로 프로그램(RERT, Reduced Enrichment of Research and Test Reactors)」을 1987년부터 추진하여 왔다. 이에 따라 연구로 핵연료를 사용하는 국가들은 1980년대 중반부터 기존 고농축(HEU) 핵연료를 대체하여 우라늄 규화물(uranium silicide)의 저농축(LEU) 핵연료를 개발하여 현재 많은 연구용 원자로에서 사용하고 있다.

한국원자력연구원은 전량 수입하던 연구로 핵연료를 국산화하고자 연구 개발에 착수하여 우라늄 규화물(U_3Si) 핵연료를 원심분무 방법으로 분말을 만들어

분산핵연료를 제조하는 기술을 1987년에 세계 최초로 개발하였으며, 1990년대 초 한국, 미국, 캐나다, 프랑스, 영국, 일본 등에 특허를 등록하였다.

원심분무 기술의 원리는 비오는 날에 우산을 돌리면 원심력에 의해 빗방울이 우산 주위로 퍼져 나가는 예로서 쉽게 설명될 수 있다. 원심분무법은 재료 분야에서 널리 알려진 기술이다. 용접 분야에서 사용되는 soldering 분말은 500℃ 이하의 낮은 온도에서 용해하여 원심분무 방법으로 생산되고 있다.

그러나 이러한 원리를 다루기 까다로운 우라늄 금속에 적용하려면 많은 기술적 어려움이 있다. 산화성이 높은 우라늄 금속을 고온(1600~1800℃)의 진공 상태에서 합금 용해한 후, 분당 30,000번 이상 회전하는 작은 원판 위에 떨어지게 하여 원심력에 의해 미세한 구형 분말 형태로 날아가면서 금속 용해해야 하기 때문이다. 다시 말하면 고온에서의 우라늄 진공 용해 기술, 안정성이 우수한 도가니 설계 기술, 고속 회전 디스크 기술이 같이 어우러지는 융합 기술이 요구된다.

UO_2 소결체를 사용하는 농축도 5% 이하의 발전용 핵연료와 달리 발전로 대비 1/10 크기의 작은 노심에서 높은 중성자속(neutron flux)을 필요로 하는 연구



2012 서울 핵안보정상회의 4개국 협력사업 공동 기자회견(2012. 03. 27)



U-Mo분말 전달식(2014.01.24)

로 핵연료는 우라늄 농축도가 20% 정도로 높다. 대신에 연구로 핵연료는 핵분열 시 발생하는 열이 필요 없기 때문에, 일반적으로 열전도도가 높은 금속 형태의 우라늄합금 분말이 알루미늄에 분산된 형태(분산핵연료)로 사용된다.

그동안 연구로용 핵연료 분말은 우라늄 합금을 용해 주조한 후에 절구통에 넣어 깨는 파쇄 방법으로 제조하여 왔다. 이러한 파쇄법은 제조 시간이 오래 소요(2주/5kg batch)되며 비정형의 분말 형태로 인해 핵연료 제조(압연)과정에서 여러 종류의 결함(불순물 혼입, 핵연료 입자 내 기계적 결함, dog bone 등)이 발생되어 핵연료 제조 경제성 및 노심 성능을 떨어뜨리는 요인으로 작용하였다.

한국원자력연구원에서 1985년 착수된 ‘하나로’ 연구용 원자로 건설 시에 가장 중요하게 다뤄졌던 이슈는 핵연료 국산화였다. 1987년부터 핵연료 개발 연구를 시작하여 여러 공정을 거치는 파쇄분말법이 갖는 단점을 극복하고자 합금원료에서 바로 분말을 제조할 수 있는 원심분무 기술을 접목하는 새로운 접근을 시도하였고, 드디어 1991년에 경제성 및 핵연료 성능이 우수한 원심분무 U₃Si 분말을 제조하는 데 성공하였다.

한국, U-Mo 연구로 핵연료 분야에서 세계 유일 기술 보유

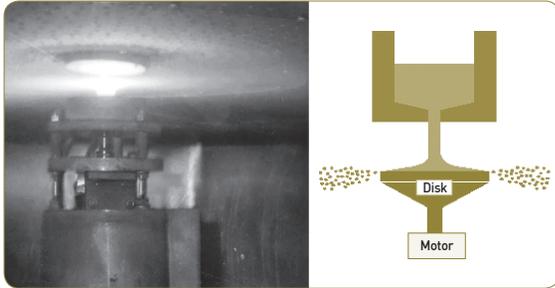
원심분무 기술은 기존의 파쇄법에 비해 공정이 간단

하여 제조 비용이 적게 들고, 입자 형태가 구형이므로 핵연료 가공 성형성이 우수할 뿐만 아니라 연소 성능과 수율(2일/5kg batch)도 매우 우수한 것으로 시험 평가되었다. 한국원자력연구원은 원심분무 기술 개발 결과를 1990년대 초 연구로핵연료 국제회의(RERTR)에서 발표하여 모든 참석자들의 기립 박수와 함께 국제 사회의 주목을 받게 되었다. 현재 하나로 연구로는 세계에서 유일하게 자체 개발한 원심분무 기술로 제조된 U₃Si 핵연료를 2005년부터 사용하고 있어 우리 핵연료 기술의 안전성 및 우수성을 증명하고 있다.

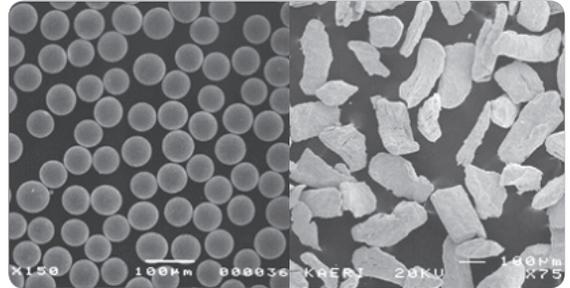
그러나 우리가 원천 기술을 개발한 이후에 현재의 기술 수준으로 도달하기까지는 많은 역경과 사연이 많았다. 방사성 규제 물질인 우라늄을 극한 조건에서 다루기 때문에 원심분무 작업은 더럽고, 어렵고, 위험한 이른바 3D보다 더하여 4D의 작업 환경이다.

여기에 수많은 시행착오를 통해 묵묵하게 기술 개발을 한 많은 연구원, 기술원들의 희생이 있었으며, 한때 원심분무 기술에 대한 연구 지원이 중단되어 반수 이상의 연구 참여자가 다른 연구 과제로 떠나는 아픔과 함께 기술 단절이라는 절체절명의 위기도 있었다. 그러나 한국의 원천 기술이 국제사회에 기여되도록 많은 분의 도움으로 명맥을 유지할 수 있었고 마침내 독보적인 기술로 완성될 수 있었다.

한편 더 높은 우라늄 밀도의 저농축 핵연료를 필요로 하는 고성능 원자로의 노심 전환을 위하여 1996년부터 미국을 중심으로 우라늄-몰리브덴(U-Mo)의 고



〈그림 1〉 원심분무 장면 및 개념도



〈그림 2〉 원심분무 분말(왼쪽)과 파쇄 분말

밀도 재료로 분산 핵연료를 개발하게 되었는데, U-Mo 핵연료도 역시 분말화 과정을 거쳐야 한다. 그러나 U-Mo 합금은 연성이 강해 기존 파쇄 방법으로는 분말화가 매우 어렵다. 하지만 한국이 개발한 원심분무 방법으로 제조하면 고순도의 U-Mo 분말을 95% 이상의 수율과 균일한 분포의 입자 크기로 대량 생산할 수 있어 세계 유일의 상용급 U-Mo 핵연료 분말 제조 기술로 인정받고 있다.

이러한 원심분무 U-Mo 분말은 1996년에 제조법이 개발된 이후 현재까지 미국(B&W, ANL, INL), 프랑스(CERCA, CEA), 벨기에(SCK·CEN), 아르헨티나(CNEA) 등에 총 15회에 걸쳐 성능 시험용 U-Mo 분말을 공급한 바 있으며, 그동안 세계 여러 연구소에서 노내 시험한 결과 핵연료로서 우수한 조사거동(irradiation performance)이 입증되었다.

이와 함께 한국이 U-Mo 연구로 핵연료 분야에서 세계 유일 기술을 보유함에 따라 국제 사회의 많은 질서와 견제를 받는 어려움이 있었다. 미국 DOE/NNSA는 2000년에 한국원자력연구원이 보유한 원심분무 기술 특허를 국제적인 핵비확산 정책의 취지에 맞게 포기하도록 압박하였다. 즉, 고농축 우라늄 최소화를 위해 전 세계 연구소에 저농축 핵연료를 사용하기 위해서는 모든 핵연료 연구 개발 내용이 공개되어야 하며 특허 기술로 보유되지 말아야 한다는 논리이다.

미국과의 특허 분쟁 협상에서 별다른 진전이 없자, 미국 정부는 연구로 핵연료 분야에서 한국과의 모든 협력을 단절하여 한국의 연구로 핵연료 연구 개발 담당자들이 미국 관계자들과의 접촉을 오랜 동안 못하

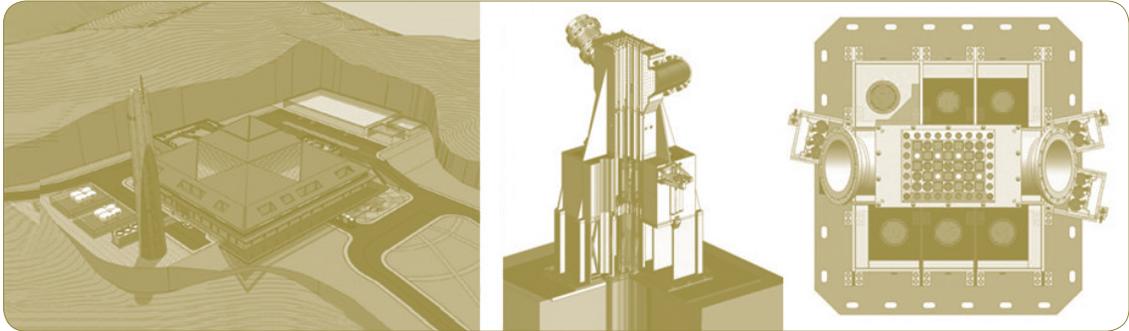
는 어려움을 겪기도 하였다. 이후 한국 정부는 2005년에 미국의 요구를 받아들여서 한국원자력연구원이 미국과 원심분무기술 공개협약(royalty free licensing agreement)에 서명하도록 허락하였다.

그러나 서류상의 기술 공개만으로 우리가 보유한 원천 기술을 외국에서 그대로 따라갈 수는 없다. 한 예로서 세계 최대 연구로 핵연료 공급업체인 프랑스 AREVA-CERCA는 한국의 원심분무 기술을 모방하여 비슷한 분말 제조 장치를 개발하려 시도하였으나, 한국이 오랜 기간 개발하여 쌓아온 know-how의 기술적 난제를 극복하지 못하고 개발을 포기하였다. 이와 함께 미국, 캐나다, 아르헨티나 등에서도 한국의 원천 기술을 피해가기 위해서 많은 노력을 하였으나 모두 실패하여 본의 아니게 한국의 원천 기술이 세계 유일 기술로 자리 잡게 되었다.

이후 프랑스는 국제 사회에 향후 한국의 원심분무 U-Mo 분말을 사용하겠다는 선언을 하였고 현재 원심분무 기술 이전을 위해 한국과 협상을 진행 중이다. 만약 기술 이전이 성사된다면 원자력 기술 분야에서 우리보다 앞선 선진국인 프랑스에 기술 수출을 하는 쾌거가 될 것이다.

기장연구로 - 세계 최초로 U-Mo 핵연료 적용 기록 예상

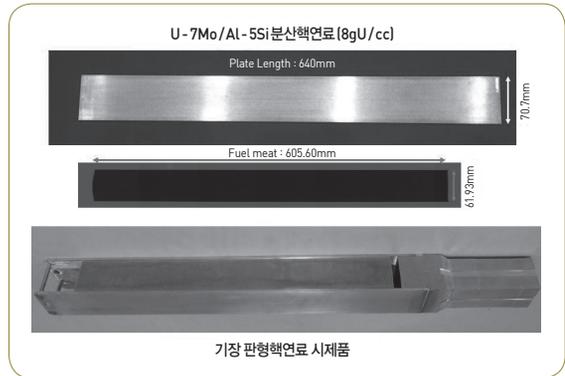
한국원자력연구원은 부산 기장에 15MW급 수출 주도형 신형 연구로를 건설 중에 있다. 여기에는 연구로 기술과 핵연료의 시너지 효과로 연구로 수출 경쟁력을



〈그림 3〉 기장 연구용원자로와 기장 노심



판형핵연료 제조 시설



기장 핵연료 판 및 집합체

강화하기 위하여 world-leading 기술인 원심분무 기술이 적용된 우라늄 고밀도 (8gU/cc) U-Mo 판형핵연료가 세계 최초로 사용될 예정이다.

U-Mo 판형핵연료의 기장연구로 적용을 위해, 한국원자력연구원은 지난 3년 동안 하나로 핵연료 국산화 경험을 토대로 판형핵연료 제조 설비를 단기간에 성공적으로 구축하였고, 관련 핵연료 제조/검사 기술도 같이 개발 완료하였다.

2017년 기장 연구로의 초기 임계를 위해서는 외국 고성능 연구로에서 국내 개발한 U-Mo 판형핵연료에 대한 건전성 입증을 위한 검증 시험이 필요하다. 이를 위해 한국원자력연구원은 미국 INL과 2015년 ATR (Advanced Test Reactor)에서 집합체 검증 시험을

위한 CRADA 협약을 체결하였으며 (2013년), 2014년 8월에 국내에서 제조된 검증 시험 핵연료 (Lead Test Assembly)가 미국에 인도될 예정이다.

만약 ATR에서의 조사 시험이 만족할만한 검증 시험 결과를 보인다면, 기장연구로는 세계 최초로 U-Mo 핵연료를 적용하는 기록을 남기게 될 것이며, 이를 통해 5,000억원/년 규모로 추정되는 세계 연구로 핵연료 시장에서 한국의 앞선 U-Mo 핵연료 기술로 주도적 핵연료 시장 진출이 예상된다. 아울러 명품 핵연료 기술과 우수한 연구로 설계/건설 기술이 융합되어 높은 경쟁력으로 2,000~3,000억원/기의 경제적 가치를 갖는 연구로 수출 시장에 활발한 진출이 기대된다. 🌐