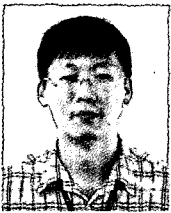




국내 경수로 핵연료 개발현황



김 대 호

한국원자력연구소 선임연구원
kdh@kaeri.re.kr

우리나라는 자원빈국이라는 환경과 중공업을 기반으로 하는 경제발전전략에 따라 에너지 소비 성 산업구조를 갖게 되었고, 더욱이 비약적인 경제발전과 더불어 사회복지의 향상으로 에너지의 소비가 매년 증가하고 있다. 한국무역협회의 보고서에 의하면 우리나라는 원유 수입 3위, 석유소비 7위, 천연가스 소비 26위, 전력소비 11위 등으로 분석되고 있다. 정부에서는 안정적인 에너지 공급을 위하여 장기전력 수급계획을 수립하고 이에 대응하고 있으나 화석연료의 고갈에 따른 에너지수입액 증가와 이산화탄소 배출 규제에 따른 에너지 정책은 극히 제한적일 수밖에 없다. 정부가 국가적 에너지확보 차원에서 선택한 원자력에너지는 자원빈곤과 고속화된 에너지소비에 대응할 수 있는 가장 현실적인 선택이며 기후변화협약(COP-7)의 현실적인 이행을 위해서는 적극성을 갖는 에너지 대안으로 판단된다. 현재, 우리나라에는 12기의 경수로형 원자력발전소(이하 원전)와 4기의 중수로형 원전이 가동 중에 있으며 2002년 기준으로 총 119,103 백만kWh의 전기를 생산하고 있다. 이는 국내 전체발전량의 40%

를 차지하는 양이며, 현재 건설 중에 있는 6기의 원전이 건설되면 국내 전기생산의 50% 담당하게 됨으로서 국가 에너지 자립에 기여하게 될 것이다. 각론하고 이러한 원자력발전소에 사용되는 핵연료가 국내 기술진에 의해 설계되고 제조되어 국내 발전소에 전량 공급되고 있다. 현재 국내에서 생산되는 핵연료는 1980년대 독일과 미국의 기술도입계약을 통하여 공장설립 및 설계/제조 기술을 습득하였고, 지금은 자체설계 및 년 간 300톤 규모의 핵연료 양산체제를 구축하여 가동 중에 있다.

본 기고에서는 방대하고 다양한 핵연료의 전체적인 내용을 다루기보다는 경수로 원전에 사용되고 있는 경수로 핵연료에 국한하여, 국내 연구진에 의해 개발되고 있는 내용을 중심으로 언급하고자 한다.

경수로 핵연료는 종합과학의 결산물이라고 해도 과언이 아니다. 구조설계/분석 및 내진 등 기술이 필요한 기계공학, 열전달 및 유체유발 해석 등의 열 수력 공학, 핵 적 특성의 해석 및 설계 등의 핵공학, 세라믹 소결체의 미세조직제어 및

제조기술 등의 요업공학, 기본적으로 핵연료의 소재에 필요한 재료공학 등 다양한 분야의 기술이 접목되어 만들어지는 제품이다. 지금까지 국내 경수로 원자력발전소에 공급되고 있는 핵연료는 해외에서 수입된 외국모델의 핵연료가 국내기술진에 의해 설계 및 제조되어 공급되고 있다. 참고로 경수로 핵연료의 세계시장은 양대 Major (BNFL+W사, Framatome+Siemens 사)로 구축되어 지속적인 개량과 개선을 통하여 세계시장을 독점하고 있으며, WTO에 의한 핵연료시장의 개방압력이 더욱 거세지고 있다. 더욱이, 기후변화협약의 이행과 대체에너지 활용으로 국제적 원자력 이용이 부흥하는 시기에 접하고 있으며, 개도국의 원전 도입에 따른 원전 및 핵연료주기 시장이 변화하고 있다. 이러한 분위기에서 국내에서도 1997년부터 한국고유의 고성능/고연소도 경수로용 핵연료가 정부주도하에

개발되고 있다. 국내기술진만으로 독자 개발되고 있는 경수로용 핵연료기술은 기술적 우수성뿐만 아니라 미래지향적 개념을 포함하여, 향후 지속적으로 발전하는 국제적 핵연료기술시장에서의 경쟁력 확보에 주안점을 두고 2006년에 개발이 완료될 예정이다.

경수로 핵연료의 핵심부품은 그림 1.에서 보는 것과 같이 에너지 Source인 이산화 우라늄(UO₂) 소결체, 소결체를 보호하는 피복관, 기계적/열수력적 성능을 좌우하는 지지격자와 골격체를 유지하는 상단 및 하단고정체로 구성된다. 개발되고 있는 한국 고유모델의 경수로 핵연료는 국제적 개발 추세에 따라 70,000 MWd/MTU이상의 고연소도와 핵연료의 안전성을 향상시킨 고성능의 핵연료로 다음과 같이 핵심요소기술별로 연구개발이 진행되고 있다.

고연소도용 핵연료 피복관 신합금 개발

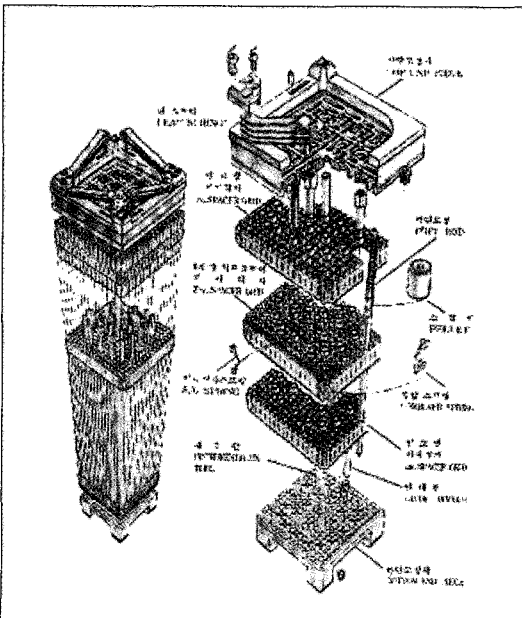
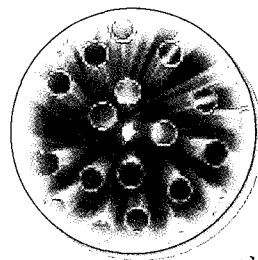


그림 1. 국산 경수로 핵연료집합체 구성도



핵연료의 1차 차폐역할을 하는 핵연료 피복관은 그 기능에 있어 안전성과 직접적인 관련이 있는 중요한 부품이다. 피복관은 핵연료인

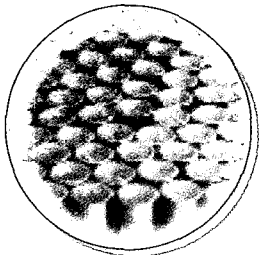
이산화우라늄이 안전하게 핵분열 반응을 일으키도록 보호하고 핵분열물질이 외부로 누출되는 것을 막아주는 핵심부품으로 핵연료 피복관이 파손될 경우 방사성물질이 냉각수로 유출되어 원자력발전소의 안전성에 심각한 문제를 일으키게 된다.

이러한 문제를 해결하고 세계적인 고연소도 핵연료 개발추세에 맞춰 국내 연구진은 핵연료 피복관이 고온, 고압의 가혹한 운전조건에서 수년



간 사용되는 점을 고려하여 핵연료 피복관의 부식저항성과 기계적 특성이 우수한 지르코늄 신합금을 개발하는데 성공하였다. 이는 세계적으로 우수하다는 외국 피복관보다 그 성능이 30%이상 향상된 것으로 국제경쟁력이 있는 기술로 관련업체가 인정하고 있다. 150여종의 예비합금설계를 통하여 1600여종의 시편을 제조하였고 이중 노외 정밀특성시험을 통하여 가장 우수한 피복관 신합금 6종을 선정하였다. 수많은 실험과 반복되는 실패를 통하여 기존의 외국 개량핵연료 피복관보다 우수한 신합금이 개발되었고 현재 미국, 일본, 유럽 등으로부터 신물질 특허 획득을 통하여 산업재산권이 확보된 상태이다. 현재 시제품 피복관을 제조한 후 상용 원자료를 모사한 Loop 조건에서 노외성능을 평가 중이며, 노르웨이의 Halden 연구로를 이용하여 원자로내 실증시험이 진행되고 있다. 국내에서도 피복관 제조공장을 건립할 계획으로 자체생산이 가능할 경우 연간 5,000만불의 수입대체효과가 있을 것으로 예상하고 있다.

고연소도용 소결체 제조기술개발



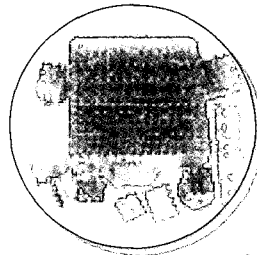
소결체 1개(5g)가 발생하는 전력은 1,280kWh로 1가구가 10개월간 쓸 수 있는 전력의 에너지를 생산한다. 이러한 핵연료 소결체는 핵연료비용의 80%를 차지하는 부가가치가 대단히 높은 기술이다. 핵연료의 경제성을 높이기 위해 연소기간을 늘리는 연구가 세계적인 진행되고 있다.

국내연구진은 경제성 향상과 안전성이 확보된

70,000 MWd/MTU이상의 고연소도 핵연료 소결체를 개발하는데 성공하였다. 이 기술은 첨가제를 사용하지 않고 불량 소결체를 재활용하여 소결체의 결정립 크기를 증가시키는 기술로 핵분열에 의한 기체의 외부방출을 억제함으로써 핵연료봉의 압력을 감소시키는 기능을 한다. 이로 인해 소결체의 열적 안정성이 30%이상 향상되고 재소결밀도가 2배이상 증가함으로써 제조생산성이 크게 향상되었다. 또한 핵연료 제조업체와 공동으로 대량생산 시험이 성공적으로 완료되어 기술이전을 준비 중에 있다. 이와 더불어 소결체 제조중에 발생하는 불량 소결체를 재활용하는 제조 기술을 개발하여 해외 특허등록을 마쳤으며, 해외 핵연료 생산국에서 많은 관심을 보이고 있다.

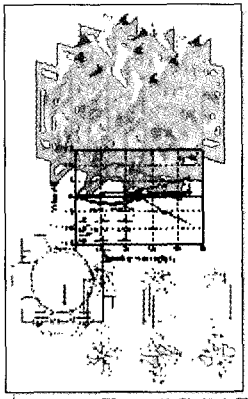
상용원자로의 안정적인 운전을 위해 노심의 침투출력을 제어하는 가돌리니아 가연성 흡수소결체 제조기술이 완성되었고, 초장주기 운전을 위한 보다 경제적인 이중 가연성 흡수소결체가 연구 중에 있다. 또한, 원자력자원의 극대화를 위한 토륨산화물 소결체와 고성능의 첨단소결체 제조 기술이 개발 중에 있다. 현재 소결체 제조기술에 있어 세계적인 기술적 우위를 선점해 가고 있다.

고성능 핵연료 구조부품 기술개발



핵연료집합체 지지격자와 상,하단 고정체는 핵연료의 수명과 성능을 좌우하는 골격체의 주요 핵심부품으로 핵연료집합체의 기계구조적 건전성과 열적 성능을 확보하는데 중요한 기능을 수행한다. 지지격자는 핵연료봉을 지지하여 진동과 이에 의한 프레팅 마

멸을 최소화하는 기술이 필요하다. 또한 원자로 노심의 열적 여유도 증가를 위해 냉각수의 유동 혼합을 증가시킬 수 있는 유동혼합장치가 필요하다. 아울러, 이물질로 인해 핵연료의 손상을 방지할 수 있는 여과장치가 하단고정체에 부착되어야 하며 핵연료 수리를 위한 분해 및 재조립이 편리한 상단고정체의 구조적 기능이 필요하다. 이 기술들은 세계적인 개량핵연료 개발추세이다.



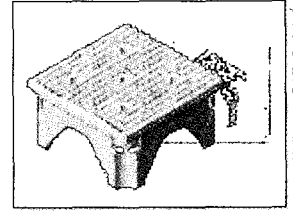
국내 연구진은 10여종의 고성능 핵연료 지지격자 및 냉각성능 증가장치인 혼합날개 지지격자를 개발하여 성능시험 중에 있다. 개발된 지지격자는 기계적 성능조건인 3g이상의 내진 확보와 진동 및 마멸을 최소화하여 기계적 손상이

나지 않도록 최적화를 통해 고안되었으며, 혼합유동날개는 냉각수의 유체혼합기능을 증가시켜 10%이상의 열적 여유도를 증가시킴으로서 원자로의 운전 여유도를 확보할 수 있도록 고안되었다. 지지격자는 기계적 충격시험, 좌굴시험 등과 유체유발시험, 풍동시험 및 임계열유속 시험 등의 열수력적 시험을 통하여 한국 고유모델의 핵연료집합체에 적용될 예정이다. 개발된 지지격자는 기술중주국인 미국 등에 특허등록을 마침으로서 기술의 우수성이 입증되었으며 국내외 산업재산권이 확보되어 있는 상태이다.

상단 고정체의 경우 핵연료의 조립 및 재조립이 용이하도록 개발되었으며, 원자로내의 이물질에 의해 핵연료가 파손되지 않도록 이물질 여과장치를 부착하여 100%의 이물질 여과 성능이 확

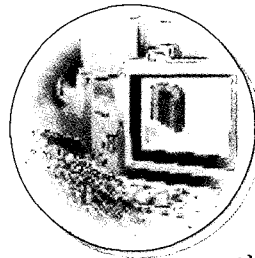
보된 하단고정체가 성공리에 개발이 완료되었다.

이러한, 핵연료 구조부품이 조립된 핵연료집합체는 반



드시 상용조건에의 노의 성능시험을 통하여 성능인증이 필수적이다. 이러한 시험은 대단위의 시험시설 및 복잡한 시험기술 개발이 필수적이다. 정부는 2003년부터 한국원자력연구소 내에 핵연료 집합체 실증시험시설을 구축하여 핵연료 개발의 완성도를 높일 계획이다.

고연소도 핵연료 성능 및 안전성 연구개발



경제성 향상 및 사용 후 핵연료 발생량 감소를 위해 핵연료의 고연소도화는 세계적인 추세이다. 핵연료의 성능 해석기술은 핵연료 개발 및 인허가를 위한 안전 검증에

필수적이다. 핵연료봉의 소결체 및 피복관은 원자로 내에서 연소 중에 열적, 기계적 및 물리적 성질들과 제원 등이 변하고, 또한 이들 인자들의 상호 영향으로 인하여 핵연료의 연소 중 거동에 측은 핵연료 성능분석 모델들이 종합적으로 고려된 코드를 통해서만 가능하다.

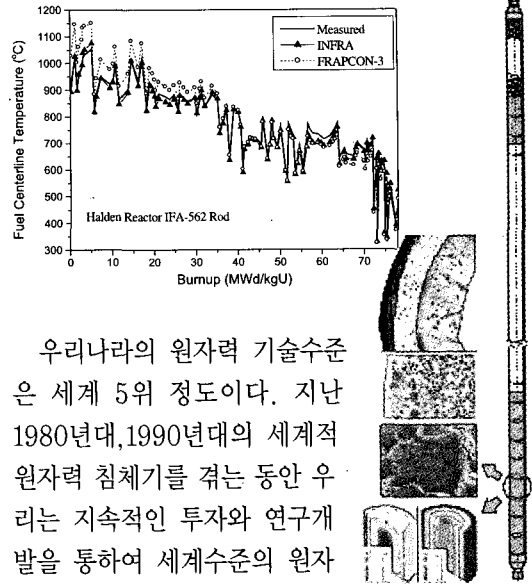
이러한 필수적 요소를 해결하기 위해 국내 연구진은 고연소도 핵연료봉 성능분석 코드 INFRA(INTEGRAted Fuel Rod Analysis)를 개발하였다. INFRA 코드는 70,000 MWd/MTU이상의 고연소도 산화물핵연료(UO₂, UO₂/Gd₂O₃ 및 ThO₂/UO₂)의 노내 거동을 분석하는 FORTRAN



프로그램으로써 140개의 서브프로그램(총 23,780 라인)으로 구성된 방대한 코드이다. Halden, OECD/NEA 및 IAEA 등과의 국제공동연구를 통해 고연소도 핵연료 데이터베이스 432 세트를 구축하여 코드의 검증에 활용하였다. 한편 서브 프로그램인 RAPID를 미국 PNNL 국립연구소에 기술 이전함으로써 국내기술의 우수성을 입증한 바 있다. 또한 이러한 핵연료 성능분석기술을 활용하여 차세대핵연료로서 초고연소도 및 초장주기용 토륨 핵연료를 미국과의 협력을 통해 개발하고 있다.

아울러, 고연소도 핵연료의 개발과 사용에 따른 안전성 시험과 평가가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 우리나라도 OECD/NEA가 지원하는 CABRI 국제공동연구에 참여하여 개발하고 있는 핵연료의 안전성 확보에 만전을 기하고 있으며, 국내에서 연소된 핵연료를 이용하여 국산 핵연료의 성능 데이터베이스를 생산하고 사고모사 및 성능기여인자들의 거동시험을 통하여 고연소도 핵연료개발에 이용할 계획이다.

국산 핵연료의 조사후 시험자료는 국내 핵연료 유관기관과 공동으로 평가하여 국산 핵연료의 성능을 검증하고, 개발된 연료봉 성능분석코드 INFRA에 반영하여 세계 최신 성능을 가진 고연소도 핵연료봉 성능분석코드를 개발완료할 예정이며, 고연소도 핵연료의 반응도 및 LOCA 사고모사시험 데이터베이스, 그리고 사고시 핵연료 거동 평가기술은 국내 산학연의 고연소도 및 초고연소도 핵연료의 설계, 개발, 인허가 평가 및 교육용으로 활용할 예정이다. 또한, SEM 및 EPMA 등의 전자현미경을 이용한 핵연료 정밀 조사후시험 기술, 조사된 핵연료의 핫셀 사고모사시험 기술 그리고 하나로 핵연료 조사 및 제조 시험 기술 등의 핵연료 시험 기술은 앞으로의 핵연료 연구개발에 활용될 예정이다.



우리나라의 원자력 기술수준은 세계 5위 정도이다. 지난 1980년대, 1990년대의 세계적인 원자력 침체기를 겪는 동안 우리는 지속적인 투자와 연구개발을 통하여 세계수준의 원자력 기술 보유국으로 거듭나고 있다. 2000년대 들어 세계는 화석연료의 고갈과 기후변화협약의 구체적 대안으로 다시 원자력 개발에 나서고 있다. 특히 석유자원을 대체할 수 있는 수소에너지 생산을 위하여 원자력을 이용할 계획으로, 국제 컨소시엄 형태의 장기적인 연구개발이 착수될 예정이다. 원자력은 기술적 특성에 따라 장기적인 연구개발이 불가피하고 특히, 자원의 대체와 산업의 근간이 되는 에너지 확보 기술이라는 차원에서 중차대한 시대적 역할을 담당하고 있다. 더욱이 자원빈국으로서의 후손에게 남겨줄 수 있는 것은 미래지향적 연구개발을 통하여 향후 20 ~ 30년 후를 예견하는 에너지 확보를 위한 과학기술이라 생각된다. 우리 국내기술진은 국가 에너지 확보라는 극명한 명제에 따라 산·학·연의 유기적인 연계연구개발 체제를 기반으로 핵연료의 해외기술 종속에서 탈피한 독자 기술 소유권과 실시권을 갖는 한국고유의 고연소도 핵연료 개발에 전력투구를 다하고 있다.

기획 : 권혁성 편집위원 hskwon@horizonlaw.com