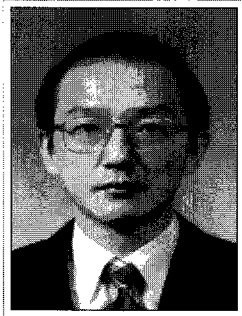


핵연료 설계 기술 자립 및 고성능 개량 핵연료 개발

전 경 략

한전원자력연료(주) 노심설계처장



한 국원자력산업회의에서 수여하는 제12회 원자력기술상 금상을 받게 되어 매우 기쁘게 생각하며, 필자와 함께 핵연료 설계/제조 기술 자립 및 ACE7 개량핵연료 개발에 참여한 한전원자력연료(주)의 모든 분들께 수상의 영광을 돌리고자 한다. 그리고 원자력산업회의 관계자를 비롯하여 본 상을 추천하고 심의하여 주신 분들께도 깊은 감사의 말씀을 전해 드린다.

필자가 대학에서 기계 설계를 전공하고서 우연히 원자력 분야에 발을 들여 놓은 지 벌써 20여년이 지났다.

한국원자력연구소에 입소하여 처음 참여한 프로젝트가 사용후 핵연료 1다발을 운반할 수 있는 수송 용기 국산화 개발이었는데, 그때 제작한 KSC-1 수송 용기와 그 취급 장비가 아직도 사용되고 있는 것을 보고 감회가 새로웠던 적이 있다.

여러 가지 불편한 점들에도 불구하고 유지/보수를 잘 하여 사용하고 있는 분들에게 더 감사드려야 할 것임은 물론이다.

개발자와 사용자, 핵공학 전공자나 타분야 전공자, 연구 개발 사업을 기획·관리하는 사람과 수행하는 사람, 모두 원자력 가족이고, 이 모두가 함께 해야 이루어지는 게 원자력산업이 아닌가 생각한다.

여기서는 본 원자력기술상 공적 대상 기간인 지난 10년간 한전원자

력연료(주)에서 필자가 주로 수행한 업무를 소개하고자 한다.

국내 웨스팅하우스형 핵연료 및 노심 설계 기술 자립

한전원자력연료(주)는 1982년에 설립되어 1989년 최초로 국산 경수로 핵연료를 상업 생산한 이래 제조 분야만 담당하다가 핵연료 설계·제조 일원화를 목표로 1992년 기술연구소를 설립하고 국내 웨스팅하우스형 원전의 핵연료 및 노심 설계 기술 자립을 추진하였다.

필자는 한국원자력연구소와 프랑스 원자력청(CEA) 산하 싸클레연구소에서 10여년간 원자력 기계 설계 분야의 연구 경험을 바탕으로, 1993년 한전원자력연료(주)에 입사하여 Vantage 5H 등 웨스팅하우스형 원전용 핵연료 집합체의 기계 설계 분야를 맡아 설계/제조 기술 자립 및 부품 국산화에 참여하였다.



필자는 비록 원자력 기계 설계 경험 인력이라고 하나 핵연료에 대해서는 잘 몰랐고 또한 연구 프로젝트가 아닌 상업 생산 경험은 거의 없었다.

더구나 불과 몇 명되지 않는 기계 설계 인력으로 14×14형, 16×16형, 17×17형 등 3가지 핵연료 집합체의 도면 및 시방서 백 수십여 종을 한꺼번에 발행하고 부품 국산화와 제조 공정 자격 인증 등 제조 지원 업무를 완수하여 이미 정해진 연료 공급 일정을 맞추는 것은 쉽지 않은 일이었다.

당시 웨스팅하우스형 핵연료의 첫 영역분을 생산하는데, 연료봉 스프링의 좌굴로 연료봉 용접 불량이나 다량 발생한 일이 있었다.

연료봉 압축 스프링은 이미 국산화 경험이 있고 설계도 웨스팅하우스와 거의 동일하여 별다른 문제점을 예상치 못했는데 양사간의 제조 공정상의 차이로 웨스팅하우스의 설계를 우리 공장에는 그대로 쓸 수 없었던 것이다.

마침 한전 전력연구원에서 주관하고 한전원자력연료(주)와 한국원자력연구소가 공동으로 참여한 고연소도 연료 개발을 위한 기반 기술 개발 연구 과제에서 연료봉 압축 스프링 설계 개선을 세부 과제로 맡고 있었다.

여기에서 최적 설계 개념을 도입하여 연료봉 스프링의 좌굴 특성을

강화함으로써 좌굴에 의한 용접 불량 발생을 근본적으로 해결할 수 있었으며, 고연소용 부등피치 압축 스프링에 대한 고유 설계 기술을 확립하여 이후 개량핵연료의 연료봉 압축 스프링 설계에 활용하였다.

이 최적 설계는 필자가 한국원자력연구소 연구원 시절 한국과학기술원의 곽병만 교수님이 주관한 산·학 협동 공개 강좌에서 며칠간 배운 것을 10여년이 지난 후 산업 현장에 적용한 것이니 비록 유예 기간은 지나치게 길었지만 대단한 활용 성과라 할 수 있을 것이다.

물론 10여년 전의 기억에만 의존했던 것은 아니고 당시 강좌를 함께 수강하였던 한국원자력연구소 이재한 박사의 도움이 컸다.

1995년부터 1996년까지는 열수력 설계실장으로서 웨스팅하우스형 원전의 노심 설계 기술 자립을 위해 연료봉 설계 및 열수력 설계 분야의 천이 노심 안전성 분석, 교체 노심 독자 설계 등 교체 노심 설계를 수행하였다.

특히 이 기간에는 미국 웨스팅하우스에서 도입한 Vantage 5H의 유동에 의한 집합체 진동 및 이에 따른 프레팅 마모에 의한 손상 가능성과 DNB 상관식의 적절성 및 새로운 통계적 열설계 방법론의 적용이 최대의 인허가 현안 사항이었으며, 한국원자력안전기술원과의 수많은 인허가 질의/답변을 통하여

우리나라의 노심 설계 기술이 한 단계 높아진 계기가 되었다고 할 수 있다.

1997년부터는 정부의 원자력 사업 조정에 따라 한전원자력연료(주)가 웨스팅하우스형 원전뿐만 아니라 한국표준형 원전의 핵연료 및 노심 설계 사업도 수행하게 되어 표준형 핵연료 집합체 기계 설계, 웨스팅하우스형 및 표준형 핵연료의 설계/검사 시방 표준화 등 명실상부한 설계/제조 일원화 업무를 수행하였다.

또한, 현재 신고리 3·4호기로 건설 추진중인 APR1400의 전신인 차세대 원자로 기술 개발 과제에서는 핵연료집합체설계실장으로서 차세대 원자로의 주요 설계 요구 사항 중의 하나인 0.3g 내진 해석 기술 개발을 성공적으로 수행하였다.

한국표준형 핵연료 집합체의 부품 및 조립 공정 국산화

한전원자력연료(주)는 지난 10여년간 국내 산업체와의 협력을 통하여 웨스팅하우스형 원전용 핵연료 집합체의 구조 부품은 원자재를 제외하고 거의 국산화하였으나, 한국표준형 원전에 사용되는 표준형 연료의 경우에는 상·하단 고정체 등만 국산화하고 지지격자를 포함한 골격체를 전량 완성품 상태로 수입하고 있었다.

독점 공급 업체(ABB-CE사)로부터 비싼 가격에 구매하고 있음에도 이 표준형 연료의 골격체는 다른 핵연료 집합체와 달리 여러 가지 기술적 제약으로 골격체를 구성하는 부품별로 국산화하기가 어려워 선뜻 개발을 추진하지 못하고 있었다.

다행히 1998년 과학기술부의 원자력 실용화 연구 사업의 지원을 받게 되어 CE형 골격체(한국표준형 연료) 국산화 사업을 추진하였다.

필자는 이 과제의 연구 책임자로서 제조 부서와 함께 국내 금형 전문 업체를 발굴하여 진영정기(주)와 상진미크론(주)를 협력 업체로 핵심 부품인 지지격자판과 계측관을 각각 국산화 개발하였다.

또한 골격체 조립을 위한 전기 저항 점용접 기술의 자체 개발에 성공함으로써, 이후 양산용 용접기 개발 등 3년여의 사업화 기간을 거쳐 2003년부터 한국표준형 원전에 국산 골격체를 상용 공급하게 된 기반을 마련하였다.

이로써 그 동안 전량 수입에 의존하던 한국표준형 핵연료 집합체의 골격체를 국산으로 공급하여 연간 약 70억원의 수입 대체와 약 20억원의 원가 절감을 이루었으며, 농축우라늄 및 연료봉 피복관 등 원자재를 제외한 전 부품을 국내 생산하게 되었다.

**웨스팅하우스형 원전용
개량핵연료 개발**

국내 경수로형 원자로는 크게 고리 1·2호기 등 웨스팅하우스형 원전과 영광 3·4호기 이후의 한국표준형 원전(OPR 1000)으로 나눌 수 있으며, 웨스팅하우스형 원전은 다시 14×14형(고리 1호기), 16×16형(고리 2호기), 17×17형(고리 3호기 등 6개 호기)으로 나뉜다.

국내 웨스팅하우스형 원전에서는 미국 웨스팅하우스사가 1980년대 후반에 개발한 17×17형 V5H 연료를 국산화하여 계속 사용하고 있는 반면, 해외 선진사인 미국 웨스팅하우스사는 이후에도 연구 개발을 계속하여 현재 1990년대 후반에 개발한 Robust Fuel Assembly (RFA)를 상용 공급하고 있으며, 프랑스의 프라마트샤도 이와 동등한 수준인 AFA 3G 연료를 상용 공급하고 있다.

이들 RFA나 AFA 3G 연료는 V5H 연료에 비해 고연소 성능이나 열적 성능뿐만 아니라, 이물질에 의한 손상 방지, 내마모 저지 성능 등 신뢰성 측면에서도 우수한 것으로 알려져 있다.

한편, 16×16형 연료는 대상 원전이 전 세계에 3기뿐이며 발전소 건설 당시 처음 사용된 이래 거의 개량되지 않은 연료로서, 지금까지 비록 큰 문제없이 잘 연소되고는 있

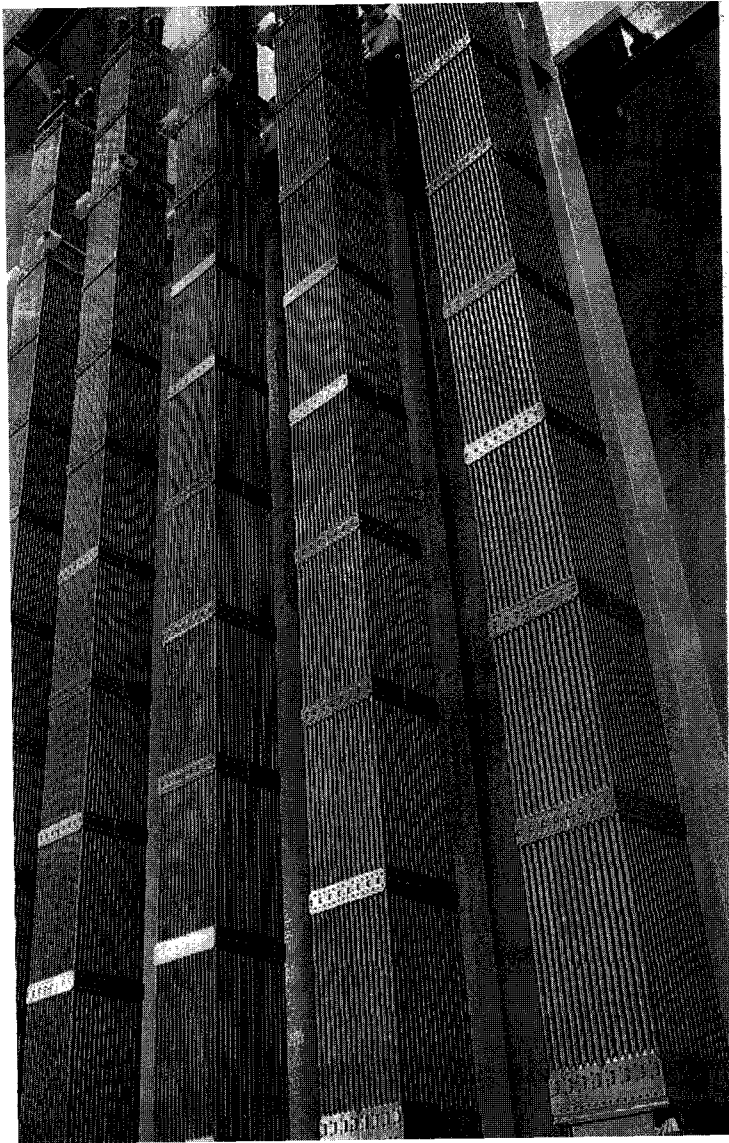
으나, 영역 평균 방출 연소도가 38,000MWD/MTU에 불과하며 아직도 증성자 단면적이 큰 인코넬 중간 지지격자를 사용하고 있어서 증성자 경제성 측면에서 불리할 뿐만 아니라 제조성 측면에서도 비효율적이다.

또한 하단 고정체에 이물질 여과 기능이 없고, 상단 고정체가 용접으로 연결되어 있어서 조립/재조립 또는 연료 수리에 어려움이 있다.

한전원자력연료(주)는 국내 핵연료의 성능 격차를 조속히 해소하고, 나아가 핵연료 기술을 세계 수준으로 향상시키고자 과학기술부의 원자력 중장기 계획사업으로 웨스팅하우스형 원전용 개량핵연료 개발을 추진하게 되었다.

필자가 연구 책임자로서 2001년부터 2004년까지 3년간 매년 100명 이상의 설계 및 제조 인력이 참여하였으며, 총219억원 규모(정부지원 100억원, 한전원자력연료(주) 부담 119억원)의 연구 개발비가 투입되었다.

4개월여의 사전 연구 기획 단계에서 총개발 기간 단축 및 경제성 제고를 위해 기술 격차가 큰 고리 2호기용 16×16형과 고리 3호기 등 6개 호기가 운전중인 17×17형을 동시에 개발하기로 하고, 개량핵연료의 연소 성능, 열적 성능, 신뢰성(무결함 연료), 안전 여유도 및 운전 여유도 등이 개발 당시뿐만 아니



시범 연소를 위한 개량 핵연료 집합체

〈표〉 ACE7의 7가지 주요 특성

① 고연소 성능 확보(>72GWD/MTU)
② 열적 여유도 향상(>20%)
③ 중성자 경제성 향상
④ 프래밍 마모 손상 방지
⑤ 집합체 휨 방지
⑥ 상단 고정체 해체/조립 용이 및 스프링나사 손상 방지
⑦ 이물질에 의한 연료 손상 방지

라 상용 공급 시점에서도 세계 최고 수준이 될 수 있도록 개발 목표 및 전략을 수립하였다.

한편, 상업용 개량핵연료를 단지

간에 확실히 개발하기 위해서는 해외 선진사와의 공동 개발이 전제되지 않을 수 없는 게 우리의 현실이었다.

따라서 과기부 과제 추진과 병행하여 다른 한편으로는 해외 협력사 선정 작업을 진행하였다.

1990년대 말에 진행된 원자력 사업자들의 인수 합병으로 세계 경수로 핵연료 시장을 사실상 양분하고 있는 웨스팅하우스사와 프라마튠사로부터 개발 제안서를 받아 기술성

및 가격을 평가한 결과, 웨스팅하우스가 우선 협상 대상으로 선정되었으며, 기나긴 협상 과정을 거쳐 2001년 10월 말 공동 개발 계약서에 서명하였다.

17×17형은 미국 웨스팅하우스사와 공동 개발하고, 16×16형의 경우에는 브라질의 핵연료공사(INB)도 참여하여 한국의 고리 2호기, 브라질의 앙그라 1호기, 슬로베니아의 크르스코(웨스팅하우스사가 연료 공급) 등 전세계 16×16형 발전소에 연료를 공급하는 3개사가 모두 참여하는 국제 공동 프로젝트가 되었다.

개량핵연료 개발을 위하여 전체적인 개발 목표를 기본으로 하여 각 부품별 성능 목표 및 설계 기준이 정해졌으며, 초기 선별 시험 등을 바탕으로 각 부품별 주후모 모형들을 선정하여 핵연료 집합체의 기본 설계를 수행하고, 이어서 이들에 대한 예비 시험 및 해석 결과를 이용하여 상세 설계를 완성하였다.

각 부품별 성능 목표 및 설계 기준의 만족 여부를 확인하기 위하여 시험용 부품의 제조 및 노외 시험을 수행하였으며, 마지막으로 최종 시험용 집합체 3다발씩을 제조하여 각종 노외 실증 시험을 수행하였다.

시험은 대부분 웨스팅하우스사의 콜럼비아 공장에서 수행되었으며, 임계 열속 시험, 부품 및 집합체 압력 강하 시험, 유체 유동에 의한 집

합체 진동 시험, 지지격자 고주파 진동 시험, 500시간 집합체 내구성 시험(프레팅 마모 시험), 집합체 기계적 특성 시험, 집합체 장전/인출 모의시험, 지지격자 충격 시험 및 스프링 특성 시험, 기타 구조적 강도시험 등 현재 세계 핵연료 공급사가 수행할 수 있는 거의 모든 시험을 망라하였다.

각 개발 단계마다 한전원자력연료(주), 웨스팅하우스사, INB사의 사내의 전문가로 구성된 종합 검토회의를 거쳐 최종 설계가 확정되었다.

공동 개발을 위해 연인원 30여명의 우리 회사 기술 인력이 미국 웨스팅하우스사에 파견되었으며, 필자도 전반기 1년여 동안 현지에서 웨스팅하우스사 및 INB사의 책임자들과 함께 공동 프로젝트를 이끌었다.

개발을 성공적으로 마치고, 설계가 최종적으로 확정된 후 노내 연소 시험을 위해 시범 집합체를 제조하였다.

이 시범 집합체는 상용 원전에 장전되므로, 상용 공급의 경우와 동일하게 원자재 공급부터 부품 제조, 집합체 조립의 전 공정에 대해 제조 공정 자격 인증 시험을 수행한 후, 16×16형 및 17×17형 시범 집합체 각 4다발과 발전소 내의 사전 취급 시험을 위한 모의 연료 각 1다발을 제조하였다.

이번에 개발된 웨스팅하우스형 원전용 개량핵연료의 주요 특성 및 기대 효과는 7가지로 요약될 수 있으며, 이를 지칭하여 'ACE7'으로 명명하게 되었다.

노내 장전을 위한 안전성 평가와 관련해서는 노심 핵설계, 연료봉 성능 해석, 집합체 기계 설계, 열수력 설계, 사고 해석 및 과도 해석 등 각 분야별로 영역 평균 방출 연소도 55,000 MWD/MTU (최대 연료봉 평균 연소도 75,000 MWD/MTU) 까지 성능을 입증하였으며, 향후 출력 증강을 고려한 해석도 수행하였다.

개량핵연료의 노내 연소 시험을 위해 16×16형 및 17×17형 ACE7 시범 집합체 장전 노심의 안전성 평가를 수행하였으며, 각각 2005년 1월과 6월에 과학기술부의 심의를 통과하였다.

16×16 ACE7 4 다발은 2005년 1월 고리 2호기에 시범 장전하여 현재 정상적으로 연소중에 있고, 이어서 17×17형 ACE7 시범 집합체 4다발을 금년 중반 고리 3호기에 시범 장전할 예정이다.

시범 집합체의 연소기간 동안 원자로내 계측기로부터 출력 이력 조사, 냉각수 방사능 분석을 통한 이상 유무를 평가하고, 매주기 예방 정비 기간 동안 발전소 내 정밀 검사를 실시하여 성능이 확인되면 2008년부터 고리 2호기 등 웨스팅

하우스형 원전 7개 호기에 상용 공급할 예정이다.

이 경우 핵연료 주기비(약 18개월인 한 주기 동안 발전하는 데 소요되는 핵연료 관련 총비용)가 원전 1호기당 약 6~20억원, 연간 총 40억원 이상 절감되고, 20% 이상 증대된 열적 여유도(과출력 여유도 10%)를 발전소 출력 증강에 활용하면 원전 1호기에서 1%당 연간 20~30억원의 이득을 얻을 수 있다.

또한 손상 가능성을 근본적으로 방지할 수 있는 무결함 연료 사용으로 연료봉 손상 발생시 약 2~3억원 이상 소요되는 수리 및 기타 부대 비용이 절감된다.

한편, 개발된 시제품 중 핵심 부품인 지지격자판을 연소 시험을 위한 시범 집합체 제조용으로 공동 개발자인 웨스팅하우스사 및 INB사에 수출하였으며, 향후 상용 공급시에도 부품 수출을 예상하고 있다.

지금까지 해외 기술을 도입하여 운용하던 단계에서 한 걸음 더 나아가 해외 선진사와 공동 개발을 수행함으로써 세계 최고 수준의 핵연료를 확보함은 물론, 국내 핵연료 기술을 선진화하고 개발 기술도 확보하였으며, 안전성과 경제성이 크게 향상된 고성능 개량핵연료의 개발로 원자력에 대한 신뢰성 및 사회적 수용성 증대에도 도움이 되기를 기대한다. ☉