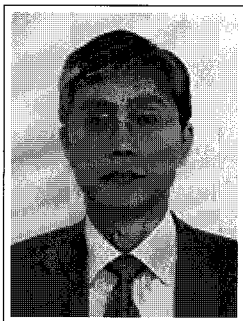


원전 노심 설계 코드 개발

이창규

한전원자력연료(주) 설계기술실 수석연구원



원전 노심 설계 기술 자립 경과

원전의 안전성, 운전성 및 경제성의 확보는 노심 설계가 얼마나 잘되었는가에 좌우될 만큼 매우 중요하며 이러한 노심 설계 기술은 노심 설계 코드의 성능과 기능에 기초하고 있다.

그러나 우리나라는 최초의 상업용 원전이 고리에 건설될 당시부터 노심 설계 코드는 차치하더라도 노심 설계 기술이 없었기 때문에 노심 설계가 외국에서 수행되었다.

이러한 상황에서도 지속적인 원전 건설은 이루어져 노심 설계 기술 확보의 필요성이 증대됨에 따라 외국으로부터 노심 설계 기술을 도입하게 되었다.

처음에는 재장전 노심에 대한

노심 설계 코드 및 기술을 들여오게 되었으며, 많은 연구원들이 외국에 파견되어 설계 기술을 배워 우리 기술로 재장전 노심을 설계하는 수준까지 도달하였다.

그러나 지속적인 원전의 건설과 함께 초기 노심에 대한 설계 기술 확보의 필요성도 대두되었으며 영광 3,4 호기 건설시 노심 설계 기술뿐만 아니라 원전 건설에 필요한 모든 설계 기술 및 설계 코드를 도입하게 되었으며, 이 설계 기술은 초기 노심 뿐만 아니라 재장전 노심 설계에도 적용되어 기존에 재장전 노심 설계만을 위하여 도입된 설계 기술을 대체할 수 있게 되었다.

이렇게 도입된 설계 코드와 기술을 바탕으로 설계 기술 자립도가 95% 수준에 이르렀으며, 영광

서울대 원자력공학과 졸업
한국원자력연구원 입사(1980)
한국과학기술원 졸업
한전원자력연료(주) 입사(1997)
한전원자력연료(주) 수석연구원
(2000~)

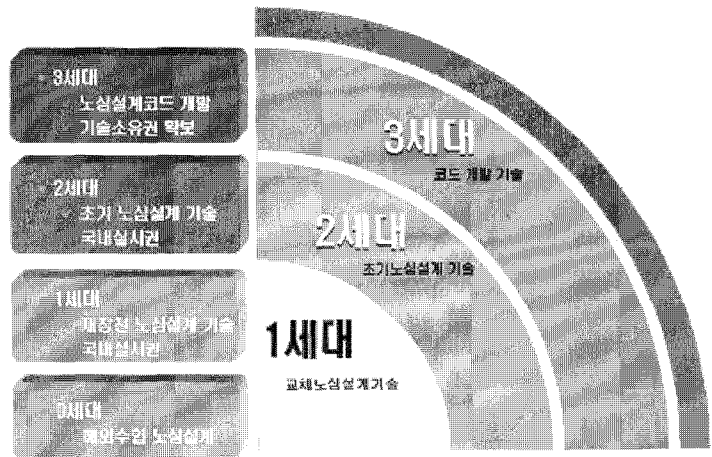
3,4호기 이후에 건설된 울진 3,4호기, 영광 5,6호기 및 울진 5,6호기 원전에 대한 설계를 독자적으로 수행하여 현재 가동되고 있으며, 기술 도입시의 원전보다 용량이 증가된 신고리 3,4호기를 비롯한 원전 설계도 성공적으로 수행되고 있다.

1980년 한국원자력연구원에 입사하여 원전의 노심핵설계에 참여하게 되면서 우리나라 원전 노심 설계 기술 자립 과정에서 좋은 경험을 많이 하였으나, 한 가지 아쉬운 점이 있다면 원전 설계의 핵심인 노심 설계 코드가 우리의 것이 아니라는 점이었다.

우리나라가 소유권을 갖고 있는 원전 설계 코드 개발을 위하여 많은 선배님들이 노력하였으나, 워낙 많은 예산과 우수한 인력이 필요하고, 설계 코드 검증에 소요되는 재원 역시 엄청나게 많이 필요하여 원전 설계 코드 개발이 계속 지연된 것이다.

이러한 예로 1998년도에 많은 기관의 전문 인력이 참여하여 작성한 「원전 설계 전산코드 개발 전략 연구」 보고서에는 코드 개발에 따른 타당성 검토 내용과 정책적 지원 방향에 대한 요약이 정리되어 개발의 타당성이 있다는 결론이 있었으나, 이 당시에 우리나라는 매우 어려운 시기에 봉착하여 이 보고서의 내용대로 연구 개발이 진척되지 못하였다.

그러나 최근에는 환경 문제가 대두되어 환경 친화적인 깨끗한 에너지에 대한 수요가 급속히 증대되고 이로 인하여 원자력 르네



〈그림 1〉 노심 설계 기술 발전 과정

상스라는 말이 나올 정도로 전세계에서 원자력 발전에 대한 수요 증가가 폭발적으로 증가함에 따라 원전의 해외 수출에

대한 관심도 상대적으로 증폭되어 원전 설계의 원천 기술인 원전 안전 해석 코드와 원전 노심 설계 코드로 구성되는 원전 핵심 코드 개발에 대한 관심이 높아지게 되었고, 2006년도에 전력산업 연구개발사업 국가 주도 연구 개발 과제로 선정되어 선배들이 원 하였던 원전 안전 해석 코드와 노심 설계 코드 개발 및 인허가 획득을 목표로 연구 개발 사업이 착수되어 원전 노심 설계 코드 개발 과제 책임자라는 막중한 중책을 맡게 되었다.

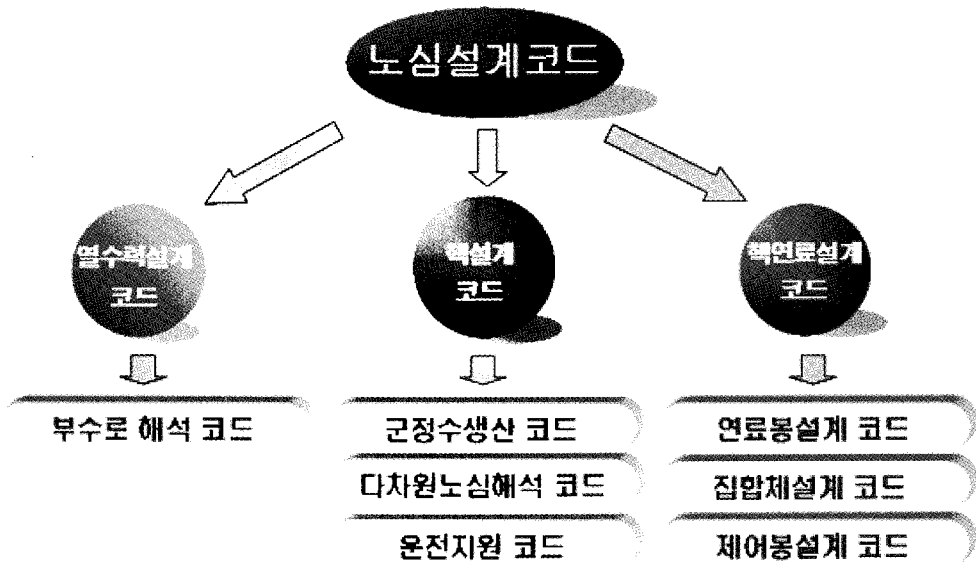
원전 노심 설계 코드 개발

원전 노심 설계는 핵설계, 열수력 설계, 핵연료봉 설계 및 핵연료 집합체 설계의 4분야로 이루어져 노심 설계 코드 개발은 이

4 분야의 설계에 필요한 모든 설계 코드를 개발하는 것으로, 1998년도의 보고서에서도 언급한 바와 같이 많은 재원과 인력을 필요로 한다.

다행히 우리나라는 설계 코드와 기술이 도입된 이래로 많은 경험과 설계 기술을 축적하고 있으며 코드 개발 경험도 상당히 구축한 상태였기 때문에 고급 인력이 많이 축적되어 코드 개발에 하나의 문제를 이미 해결한 상태이며, 정부 주도 과제로 개발이 진행되어 재원에 대한 문제도 해결된 상태가 되었다.

노심 설계 코드 개발은 핵설계의 주요 코드인 KARMA/ASTRA/AS-CORE, 열수력 설계의 THALES/ORCA, 연료봉 설계의 ROPER, 집합체 설계를 위한 DYTRAC 등 주요 코드를 근간으로 OPR1000, APR1400, WH형 원전에 적용 가능한 코드 체계(코드, 방법론, 설계 절차를 모두 포함하는 포괄적인 의미)를



〈그림 2〉 원전 노심설계 코드 개발 내용

개발하는 것으로 2010년 3월까지 코드 개발을 완료하고 2012년 9월까지 인허가를 획득할 예정으로 많은 원자력 관련 기관들이 성공적인 개발을 위하여 참여하고 있다.

1. 핵설계 코드 개발

핵설계 업무는 핵연료 집합체 장전 모형 탐색, 열수력 설계, 핵연료봉 및 핵연료 집합체 설계를 위한 자료 생산과 냉각재 상실 사고(LOCA) 해석 및 과도(Non-LOCA) 해석을 위한 자료 생산과 같은 설계 자료 외에 원전 운전을 위한 핵설계 보고서 및 원전 운전 지원 코드 입력 자료 생산 등 원전의 안전성, 경제성 및 운전성을 확보하는 것이 주요 업무이다.

이러한 업무를 수행하기 위한 필수적인 코드는 군정수 생산 코드, 다차원 노심 해석 코드, 그리

고 운전 지원 코드로 구성되고, 이러한 필수 코드 외에 다차원 노심 해석 코드 결과를 분석하는 편집 코드로 구성되어 있다.

KARMA로 명명된 군정수 생산 코드는 핵연료 집합체의 우라늄 농축도에 따라 원자로심에서 발생할 수 있는 핵연료 집합체 연소도, 핵연료 온도, 냉각재 온도 및 밀도가 변하는 모든 경우에 대하여 핵분열에 의하여 생성되는 모든 동위원소들이 중성자와 반응하는 확률과 자연 붕괴에 따른 핵종의 변화를 고려하여 다차원 노심 설계 코드에 필요한 군정수를 생산하며, 이 코드가 생산한 군정수의 정확성은 곧 다차원 노심 해석 코드로 계산된 집합체 출력 분포 및 반응도의 정확성을 좌우하게 된다.

ASTRA로 명명된 다차원 노심 설계 코드는 노심 핵설계의 근간이 되는 코드로 원자로에서 일어

날 수 있는 모든 상황을 미리 예측하여 앞에서 열거한 핵설계 업무를 수행하는 핵설계의 근간이 되는 코드이다.

운전 지원 코드인 AS-CORE는 원전의 운전에 따라 원자로 내에 있는 모든 연료가 건전성을 잃지 않는 범위 내에 있는지 여부를 확인하기 위한 코드로 노심내 집합체 출력 분포를 측정하는 코드이다.

현재 상기 3가지 주요 코드를 포함하여 OPR100형 및 WH형 원전 핵설계에서 사용하는 코드는 각각 56 및 42종이나, 개발될 코드 체계에는 모두 10종 이내로 설계가 이루어질 수 있도록 할 계획이다.

2. 노심 열수력 설계 코드 개발

노심 열수력 설계 업무는 연료 손상 여부를 판단하는 주요 지표



〈그림 3〉 핵설계 분야 주요 코드

인 설계 핵비등 이탈률 제한치 (Design DNBR Limit) 생산, 원자력발전소 현장에서 실시간으로 노심의 상태를 보여주는 노심 열적 여유도 모형 생산, 그리고 노심에서 핵연료가 냉각수의 흐름에 의하여 노심 상부로 들려지게 되는 부양력을 계산하는 수력 해석 등이 있다.

이 업무들에 사용하는 코드로는 노심 내부의 유동 상태를 핵연료 봉 단위로 모사하고 핵비등 이탈률을 계산하는 부수로 해석 코드를 주력으로 하여 실시간 노심 상태를 평가하여 핵비등 이탈률을 계산하는 DNBR 신속 계산 코드, 핵비등 이탈률 불확실도를 계산하는 관련 통계 코드, 노심의 수력 해석 코드, 노심 내의 비핵연료 부품들의 냉각 성능을 평가하는 NFBC 냉각 분석 코드 등 약 10여종이 있다.

이 코드들을 대체할 수 있는 고유 코드들이 현재 개발 중에 있으며, 개발된 코드를 사용하는 설계 방법론들도 개발하여 인허가를 신청할 것이다.

3. 연료봉 설계 코드 개발

연료봉 설계는 Condition 1과 2의 운전 조건하에서 연료봉이 수명 기간 동안 기본적으로 열을

생산하여 냉각수로 전달하는 것과 동시에 핵분열 기체 생성물들을 봉 안에 제한하여 냉각수가 오염되는 것을 방지하기 위한 기능 등의 목적하는 기능을 충분히 유지하고 있는지를 입증하기 위하여 연료봉의 건전성 분석을 수행한다.

이를 수행하기 위하여 운전 조건 1과 2에서 유지되어야 하는 성능 인자들이 설계 기준으로 설정되며, 이들 각각의 설계 기준들의 평가를 위하여 노심 내에서 조사 중인 연료봉의 열·기계적 거동들을 측정된 데이터를 이용하여 성능 모델들이 개발되고 이들이 종합되어 개발된 연료봉 성능 분석 코드를 이용한다.

한전원자력연료(주)는 기존에 도입된 국외의 연료봉 설계 코드를 이용하여 왔으나 기술 소유권이 확보되어 고유 핵연료의 설계와 수출시 제한 사항이 없도록 원전 노심 설계 코드 개발 과제하에서 고유 연료봉 설계 체계를 개발하고 있다.

이러한 배경하에 개발된 연료봉 설계 코드, ROPER는 일련의 출력 이력에 대하여 정상 상태시 연료봉에서 발생하는 소결체와 피복관의 온도, 소결체 고밀화와 팽윤, 핵분열 기체 방출, 봉내압, 소결체-피복관 간극 열전도, 탄

성, 열팽창, 크립, 소성 변형, 피복관 산화와 수소화 등의 상호 의존적인 열·기계적 조사 거동들을 반복적으로 계산한다.

설계 코드와 아울러 설계 기준들을 평가하기 위한 고유 연료봉 설계 방법론을 설정하여 상용 원전을 대상으로 그 적용성을 평가하여 연료봉 설계 체계를 구축하였다.

개발된 ROPER 연료봉 설계 체계는 한국표준형 및 WH형 원전 연료봉 설계뿐만 아니라 향후 개발되는 고유 핵연료의 설계 및 수출에 활용될 예정이다.

4. 핵연료 설계 코드 개발

핵연료 설계 분야에서는 집합체 설계 코드와 제어봉 설계 코드 분야로 나누어 개발을 진행하고 있다.

집합체 설계 코드 분야에서는 집합체 지진 해석 코드, 집합체 노내 성능 해석 코드, 연료봉 진동 및 안정성 해석 코드, 그리고 연료봉 압축 스프링 설계 코드에 대한 개발을 진행 중이다.

제어봉 설계 코드 분야에서는 제어봉 낙하 시간 해석 코드, 제어봉 응력 해석 코드, 그리고 제어봉 열적 성능 해석 코드에 대한 개발을 진행 중이다.

집합체설계코드 개발



제어봉설계코드 개발



〈그림 4〉 핵연료 설계 분야 주요 코드

집합체 지진 해석 코드는 지진 및 냉각재 상실 사고시에 발생하는 사고 하중이 핵연료 집합체에 작용하는 경우에 집합체의 구조적 건전성을 확인하기 위한 코드로서 핵연료를 발전소에 장전하기 위한 인허가에 필수적인 코드라 할 수 있겠다.

집합체 노내 성능 해석 코드는 집합체가 노내에 장전되어 연소되는 동안 집합체의 노내 구조적 거동을 해석하는 코드이며, 연료봉 진동 및 안정성 해석 코드는 연료봉에 대한 진동 해석과 교차류 등에 의해 발생할 수 있는 안정성을 확인할 수 있는 코드이다.

또한, 제어봉 낙하 시간 해석 코드는 제어봉이 집합체의 안내관 속으로 낙하하여 완전하게 삽

입되기까지 소요되는 시간을 분석하는 코드로서 노심의 안전 해석을 위한 입력 자료를 생산하는 코드이다.

제어봉 응력 해석 코드와 열적 성능 해석 코드는 각각 제어봉에 대한 응력 해석과 열적 성능 해석을 위한 코드이다.

수상 소감

먼저 2009년도 한국원자력기술상 금상을 수상하게 된 것에 대해 매우 기쁘게 생각한다. 그동안 물심 양면으로 열심히 도와주신 많은 분들에게 심심한 감사의 말씀을 드린다.

원전 노심 설계 코드 국산화에 대한 강력한 의지가 없었다면 원

전의 해외 수출에 걸림돌이 되어 수출에 많은 지장이 계속될 수 있는 상황이었으나, 코드 개발이 완료되면 원전 도입을 희망하는 모든 국가가 요구하는 자국 내 설계 기술의 토착화에 부응할 수 있으므로 지금까지 원전 설계 코드가 없어 당할 수밖에 없었던 불이익을 해소할 수 있는 계기가 될 것으로 판단한다.

끝으로, 영예로운 한국원자력기술상 수상하도록 도와주시고 같이 희노애락을 느끼며 개발에 박차를 가해 주신 분들과 개발이 순조롭게 진행될 수 있도록 보이지 않는 곳에서 도움을 주시고 격려해 주신 모든 원자력 가족 여러분들께 깊은 감사의 말씀을 드린다.