

‘고유 노심 및 안전해석 설계 시스템’ 의 완성 및 의의

조 범 진

한전원자력연료(주) 설계연구실장



한양대 원자력공학과 학사, 석사
한전원자력연료(주) 설계연구실장 (2011~)

개발 배경

전 세계의 관세 및 무역에 관한 일반협정의 우루과이 라운드로 시작된 세계무역기구(WTO, World Trade Organization)가 2004년 8월에 제네바에서 도하 라운드의 뼈대를 완성시킴에 따라 2005년의 화두는 세계 무역 시장의 개방이었다. 무역 장벽을 낮추고 무역 협상의 기반을 제공함으로써 자유로운 무역을 지원하며 무역 분쟁 조정, 관세 인하 요구, 반덤핑 등을 강력하게 규제할 수 있는 세계 무역법이 갖춰졌을 뿐만 아니라 서비스산업, 지적재산권 등의 새로운 문제점들의 해결 방안도 제시하게 된 것이다.

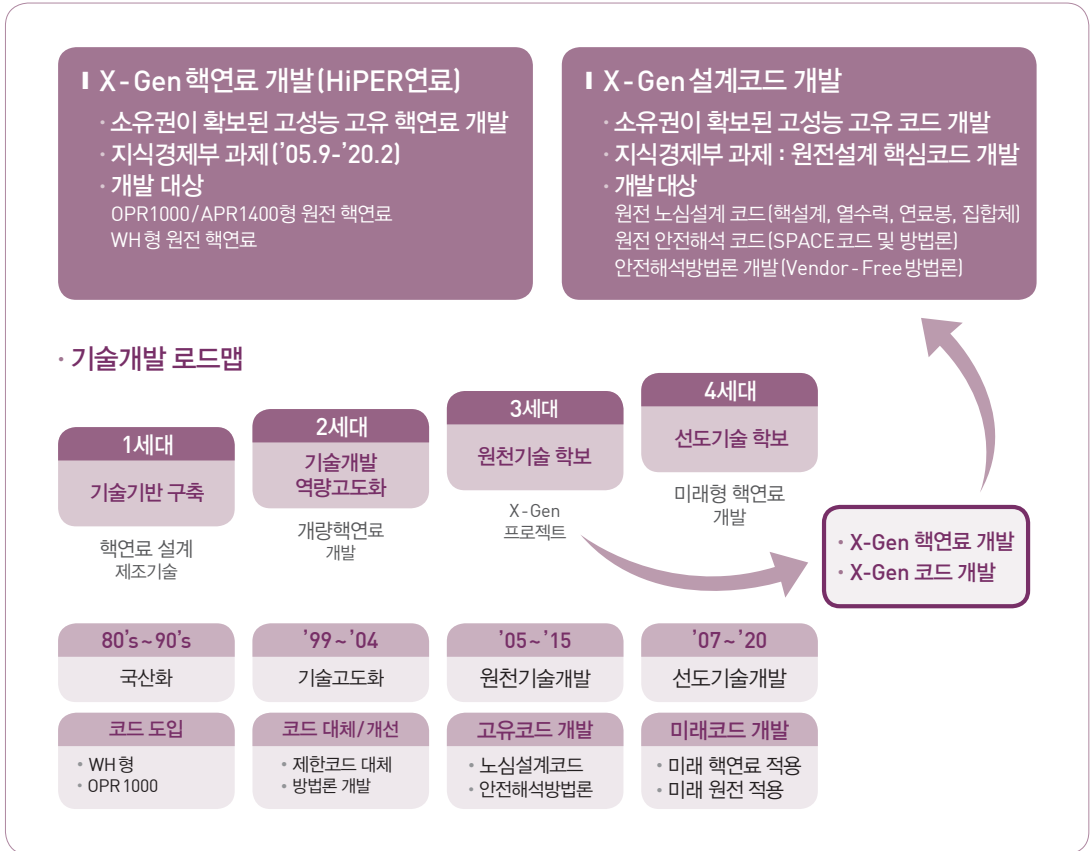
이에 따라 2005년도의 화두는 당연히 국내 시장 개방과 그에 따른 영향 및 대책이었으며 우리 회사(한전원자력연료, 사장 이재희)도 자연스럽게 핵연료 시장 개방에 대한 대비책을 마련하게 되었다.

1. Green Vision 2015

1994년 우리 회사는 고리 2호기 교체 노심 설계를 시작한 지 10년 만인 2004년 12월, Green Vision 2015라고 불리는 고유 핵연료 및 설계 코드를 개발하기 위한 장기 계획을 세웠다.

이 vision을 수립한 배경은 국내 핵연료 시장의 지속적 점유와 해외 시장 진출을 위해 핵연료 및 노심 설계 기술의 국제 경쟁력 확보가 절대적으로 필요하기 때문이었으며, 정부의 원자력 수출 산업화 정책에 적극 부응하기 위함이었다. 또한 고객 만족도가 기관 평가의 최우선이라는 시대적 변화를 반영하기 위해 고객의 기술 수요 및 인허가 환경에 적기에 적극적으로 대응하기 위함이기도 했다.

Green Vision 2015는 크게 고성능 핵연료 개발과 고성능 고유 설계 코드 체계 개발로 추진되었다. 고성능 핵연료 개발은 2005년 9월부터



〈그림 1〉 X-Gen 프로젝트를 통한 KNF 기술개발 로드맵

4년 6개월간 개발비 총214억원을 투입한 국가 과제로 추진되었고, 고성능 설계 코드 개발은 핵연료 개발 과제와 연계해 2006년부터 향후 10년간 우리 회사가 독자적으로 추진할 계획이었다.

당시의 국내 동향은 WTO로 인한 핵연료 국내 시장 개방 압력이 예상되었을 뿐만 아니라 한수원의 원전 운영 효율성 향상 노력에 따른 기술 수요가 발생했고, 해외 동향으로는 원천 기술 부재로 2004년 중국의 원전 건설 입찰에서 우리나라가 제외당하는 수모를 겪었으며, 개발도상국들은 장기적으로 신규 원전을 지으려는 움직임이 있었다.

우리 회사는 이러한 국내의 시장 환경 변화에 대해 단기적으로는 원전 운영자인 한수원의 기술 지원 요구

등에 대응이 필요했고, 중장기적으로는 국내 핵연료 시장 개방 및 해외 진출을 위한 경쟁력 확보가 생존의 차원으로 적극적인 대응이 필요했던 것이다.

2. 제3차 원자력진흥종합계획

우리 회사가 자체적으로 Green Vision2015를 추진하는 동안 2005년 5월에 정부는 제3차 원자력진흥종합계획을 세우면서 2011년까지 세계 5위의 원자력 기술을 보유한 원자력 강국으로 부상한다는 목표를 설정했다.

이를 위해 원자력 원천 기술 확보를 통한 원자력 기술 수출 기반 강화를 추진 과제로 선정하게 되었으며

〈표 1〉 고유 노심 설계 코드 및 안전 해석 방법론 인허가 현황(표준형원전 중심)

설계 분야	코드명/ 방법론	인허가 신청일	인허가 완료일		비고	
			계획	승인		
노심설계 코드 및 방법론 개발	핵설계	KARMA	'10.06	'12.11	'13.01	KAERI와 공동 개발
		ASTRA	'10.06	'12.11	'13.01	
	열수력	THALES	'10.06	'12.10	'13.01	
	연료봉	ROPER	'08.08	'14.04	'14.04	
	집합체	DYTRAC	'10.08	'12.04	'12.04	
Vendor-free 안전해석 방법론 개발	사고 해석 ^{주1)}	KREM	'05.08	'10.02	'10.02	LBLOCA 평가 방법론 SBLOCA 평가 방법론 장기냉각해석 방법론
		SEM	'05.08	'07.06	'07.06	
LTC		'12.11	'14.09	-		
	과도 해석 ^{주2)}	iSAM	'09.09	'12.09	'12.09	과도 해석 방법론

주1) RELAP 코드를 사용한 사고해석 방법론
주2) RETRAN 코드를 사용한 과도해석 방법론

세부적으로 원전 수출 장애 요인을 극복하기 위해 ‘핵심 원천 기술’을 개발하여 ‘소유권과 실시권을 확보한 설계 코드 개발 계획’을 세운 것이다.

이에 따라 우리 회사는 자체적으로 Green Vision 2015를 통해 추진 중이던 노심 설계 코드 및 안전 해석 방법론 개발을 정부 시책에 호응하기 위하여 정부 과제로 전환하여 NuTech-2015를 추진하게 되었다.

그러나 정부의 원전 수출 정책이 급물살을 타고 세계적으로 신규 원전 건설이 붐을 일으키면서 이를 이용할 수 있는 시기를 놓치지 않기 위해 기술 개발 기간을 단축시키고 앞당겨 해외 시장에 진출하기 위해 NuTech-2015는 NuTech-2012로 변경되었으며, 우리 회사도 고유 노심 설계 코드 및 고유 안전 해석 방법론 개발도 이에 맞추어 개발 시기를 앞당기게 된다.

이와 같이 우리 회사는 내부적으로 수립된 Green Vision 2015의 장기계획을 외부적으로 추진된 NuTech-2015에 맞게 수정을 하여 하드웨어(핵연료

개발)와 소프트웨어(설계 코드 및 안전 해석 방법론)를 균형있게 개발하는 X-Gen 프로젝트를 출범시켰다. (〈그림 1〉)

본 프로젝트는 우리 회사의 기술을 세계적 수준으로 끌어올리고 세계 핵연료 시장에서 Global Top 3에 진입하기 위한 발판을 마련하기 위함이었다. 이후 우리 회사는 많은 역량을 본 프로젝트에 투입하여 X-Gen 핵연료 개발은 HiPER 16과 HiPER 17 핵연료를 탄생시켰고 X-Gen 설계 코드 개발은 ‘KNF 고유 설계 시스템’ 구축을 완성시킴으로써 원천 기술 확보를 이루어 냈다.

원전 설계 핵심 코드 개발

앞서 언급한 바와 같이 정부는 2005년 5월에 제3차 원자력진흥종합계획에서 원자력 원천 기술 확보를 통한 원자력 기술 수출 기반 강화를 추진과제로 선정하

였고, 이를 위해 원전 수출 장애 요인을 극복하기 위한 ‘소유권과 실시권을 확보한 설계 코드 개발 계획’을 세웠다. 따라서 ‘원전 설계 핵심 코드 개발’은 원전의 해외 수출을 위해 필수적으로 가지고 있어야 하는 원전 기술을 확보하여 원전의 해외 수출이라는 정부의 정책 목표 달성에 이바지하고자 하는 취지로 출발하게 되었다.

‘원전 설계 핵심 코드 개발’은 크게 원전 노심 설계 코드 개발과 원전 안전 해석 코드 개발로 구분되어 추진되었다. 추진 체계를 살펴보면 사업의 총괄 주관은 한수원(주)가 담당하고 안전 해석 코드 개발은 한전 전력연구원(2011년 한수원 중앙연구원으로 통합), 노심 설계 코드 개발은 우리 회사가 주관 기관으로 선정되어 수행되었다.

‘원전 설계 핵심 코드 개발’의 최종 목표는 ‘완전한 소유권을 갖는 가압경수로형 원전 설계용 안전 해석 및 노심 설계 코드 개발’, 그리고 ‘인허가 획득’이다.

본 개발은 세부 1과제(원전 안전 해석 코드 개발)와 세부 2과제(원전 노심 설계 코드 개발)로 구분되었는데, 세부 1과제는 총 3단계, 세부 2과제는 총 2단계로 개발하는 것으로 기획되었으며, 2단계 개발부터는 세부 1과제로 개발된 안전 해석 코드를 기반으로 하는 방법론 개발을 별도의 세부 3과제로 분리하여 추진하게 되었다.

본고에서는 우리 회사가 주도하여 개발한 ‘원전 노심 설계 코드 개발’과 우리 회사가 자체적으로 개발한 ‘Vendor-free 안전 해석 방법론 개발’을 위주로 설명하고자 한다.

1. 원전 노심 설계 코드 개발

‘원전 노심 설계 코드 개발’은 핵설계 코드, 열수력 설계 코드, 연료봉 설계 코드, 집합체 및 제어봉 설계 코드 등 크게 4개 설계 분야에 대해 1, 2단계에 걸쳐 개발되었다.

1단계 개발은 2006년 10월부터 2010년 3월까지 73MY의 인력을 투입하여 고유 코드의 원형을 개발하는데 집중하였다. 국내 원자력 유관 기관의 연구 개발 인력을 최대한 활용하기 위해 산·학·연이 공동으로

참여하는 전략을 택하였고, 각 참여 기관은 기관별 특성에 맞는 코드 개발에 전념하였다.

우리 회사는 균정수 생산 코드인 KARMA를 제외한 모든 코드를 자체적으로 개발하며 모든 고유 코드 개발이 완료될 때까지의 전 과정을 주도하였다.

한국원자력연구원은 노심 설계와 안전 해석용 자료 생산의 기본이 되는 균정수 생산 코드인 KARMA를 우리 회사와 공동으로 개발하였고, 서울대는 3차원 노심 해석 코드인 ASTRA에 엔진 역할을 하는 중성자 분포 계산 수치 해석법(neutron solver)을 개발하여 제공하였다.

한수원 중앙연구원은 노심의 출력 분포를 측정할 수 있는 AsCORE를 담당하였으며, 경북대는 열수력 설계 코드에 사용되는 행렬계산법(matrix solver) 성능 검증을 수행하였고, 충남대는 미케니스트릭 기초 모델 연구를 수행하였다.

이와 같이 산·학·연이 공동으로 협력한 결과, 1단계 개발은 원래의 계획인 인허가보고서 작성까지 무사히 완료되어 모든 설계 분야에 대한 코드의 원형을 갖추게 되었다.

총 27MY의 인력이 투입된 2단계 개발은 2010년 4월부터 2012년 12월까지 진행되었다. 각 설계 분야별로 개발된 인허가 대상 코드의 인허가 심사를 위한 집중적인 기술 지원을 수행한 결과, 2012년 4월에 집합체 지진 해석 코드인 DYTRAC, 2013년 1월에 핵설계 코드인 KARMA와 ASTRA, 그리고 열수력 설계 코드인 THALES에 대해 인허가 승인을 득하였다.

연료봉 성능 해석 코드인 ROPER는 인허가 심사 종료 시점인 2012년 말에 국제적인 안전 현안 사항으로 대두된 ‘연소도에 따른 핵연료 소결체 열전도도 저하 현상’에 대해 충분히 보수적인 불확실도가 적용되지 않았다는 규제기관의 지적에 따라, 고연소도 연료 성능 데이터베이스를 추가 확보하여 핵연료 온도 계산 불확실도 평가 방법론을 개발하게 되었으며, 이에 따라 심사 기간이 당초보다 1년 4개월 연장되어 2014년 4월에 최종 인허가 승인을 받았다.

우리회사는 ROPER 코드의 인허가 승인을 마지막으로 명실상부한 독자 설계 코드 조합인 ‘KNF 고유 설계 시스템’을 구축하게 되었다. 2006년 10월부터 개발

〈표 1〉 고유 노심 설계 코드 및 안전 해석 방법론 인허가 현황(표준형원전 중심)

분야	개발 전				개발 후		
	WH형 코드	표준형 코드	KNF개발/수정		합계	고유 코드	비고
			WH형	표준형			
핵 설계	42	52	2	3	99	11	KARMA/ASTRA 외 9종
열수력 설계	26	47	1	1	75	6	THALES 외 5종
연료봉 설계	17	26	-	1	44	3	ROPER 외 2종
집합체 설계						8	DYTRAC 외 7종
과도 해석	12	11	1	1	25	12	SPACE 외 5종 KREM/iSAM외 4종
사고 해석	32	29	4	3	68		
보조 코드	14	14	-	-	28	-	-
기타	11	-	-	-	11	-	-
합계	154	179	17		350	40	-

에 착수하여 7년 7개월만에 노심 설계 분야에 대해 우리나라의 독자 코드 시스템을 완성한 것이다.

2. Vendor-Free 안전 해석 방법론 개발

고유 안전 해석 코드 개발은 ‘원전 설계 핵심 코드 개발’의 세부 1과제로 원천 기술 소유권 확보를 위해 한전전력연구원 주관으로 우리 회사, 한국수력원자력, 한국전력기술, 한국원자력연구원, 미래와도전 등이 참여하여 2006년 10월에 국가 과제로 착수되었다.

우리 회사는 1단계 개발 기간 동안에 원자로 냉각재 펌프 등의 원전 기기 모델 외 15개의 모델 개발을 담당하였고, 개발된 모델들은 2009년까지 각 기관에서 개발된 개별 모듈들과 함께 통합되어 SPACE라는 이름으로 명명되었다.

이와 같이 SPAC코드는 1단계에서 그 원형이 개발되었고 2단계에서는 코드의 완성도 제고와 SPACE를 이용한 방법론 개발을 완료한 후 현재는 3개의 안전 해

석 방법론에 대해 규제 기관의 인허가 심사가 수행되는 3단계 개발이 진행 중이다.

그러나 2015년 12월까지 진행되는 본 개발 과제는 정부의 국내 신규 원전 건설 계획 및 UAE 원전을 포함한 원전 수출 정책을 고려했을 때 개발 일정상 상용 설계 적용엔 어려움이 있는 실정이다. 정부의 원전 수출 정책은 본 과제가 시작되기 이전부터 추진되어 결국 2009년엔 UAE 원전을 수주하였으며 또한 그 이후에도 지속적으로 해외 시장을 두드리고 있다.

그러나 2013년부터 모든 설계를 고유 코드와 방법론으로 수행할 수 있는 노심 설계와는 달리 안전 해석 코드 및 방법론은 그 규모와 복잡성, 그리고 다양한 참여 기관으로 인해 2015년까지는 적용될 수 없는 상황이며 비록 2015년까지 인허가 승인을 받는다 해도 당장 상업 적용을 하기엔 좀 더 시간이 필요할 것으로 예상된다.

따라서 UAE 수출 원전은 물론이고 현재 노력중인 추가적인 수주를 원하는 해외 원전에 대해서는 고유 안

전 해석 코드와 방법론이 아닌 대체 방법론을 적용해야 하는 실정이다. 다행스럽게 우리 회사는 2004년에 Green Vision 2015를 수립하여 정부의 원전 수출 정책에 적극적으로 대처할 수 있게 Vendor-Free 안전 해석 방법론 개발을 준비하였다.

Vendor-Free 안전 해석 방법론은 비록 우리나라의 고유 코드는 아니지만 일정 금액 또는 기술적 기여를 할 경우 코드 사용에 제한이 없는 Vendor-Free 코드를 이용하여 우리 회사가 독자적으로 구축한 안전 해석 방법론을 말한다.

사고 해석 방법론으로는 미국 NRC 소유의 RELAP 코드를 이용해 KREM(대형 냉각재 상실 사고), SEM(소형 냉각재 상실 사고), LTC(장기 냉각 해석)이라는 해석 방법론을 개발하였고, 과도 해석 방법론으로는 미국 EPRI에서 개발한 RETRAN 코드를 이용해 iSAM이라는 우리 회사 고유의 과도 해석 방법론을 구축하였다.

이로써 우리 회사는 노심 설계 분야 및 안전 해석 분야에 대해서 ‘KNF 고유 설계 시스템’을 완성하였고 국내의 신규 및 가동 원전에 고유 설계 기술을 적용할 수 있는 기반을 마련하게 되었다. <표 1>은 ‘KNF 고유 설계 시스템’을 구성한 노심 설계 코드와 안전 해석 방법론에 대해 규제 기관의 인허가 승인 현황을 보여 준다.

KNF 고유 설계 시스템 상용 적용 계획

우리나라는 지금까지 노심 설계 및 안전 해석을 수행하기 위해 미국에서 도입된 설계 코드를 사용해오고 있다. 가동되는 원전의 유형과 도입된 시기에 따라 각각 적용되는 설계 코드의 종류는 거의 350여개에 이르는 상황이다. 사용되는 모든 코드들은 원전에 직간접적으로 안전한 원전 운전에 영향을 줄 수 있는 것들이기에 철저한 형상 관리를 요하고 있고 이는 유지 보수 비용의 증가를 의미한다.

이에 반해 ‘KNF 고유 설계 시스템’은 웨스팅하우스형이나 표준형 원전을 구분하지 않고 국내외 모든 경수로형 원전에 적용될 수 있도록 개발되었으며, 설계에 필요한 코드의 수는 노심 설계 및 안전 해석을 모두 포함하여 40여개에 지나지 않는다.(<표 2> 참조). 이

는 곧 설계 효율성 향상 및 유지 보수의 편의성이 획기적으로 증가되어 경쟁력이 상당히 제고되었음을 의미한다.

현 시점에서 가장 먼저 ‘KNF 고유 설계 시스템’이 적용될 대상은 APR1400 노형인 신고리 3호기 2주기 교체 노심이 해당된다. 이를 위해 신고리 3, 4호기의 최종 안전성분석보고서 개정을 위한 노심 설계와 안전 해석이 이미 진행 중에 있고, UAE의 BNPP 1, 2호기에 순차적으로 적용할 계획이다.

신고리 3, 4호기는 BNPP 1, 2호기의 참조 호기로서 BNPP 1, 2호기의 설계 코드와 설계 절차, 그리고 안전 해석 등 모든 설계 과정에 대해 참조 호기와 동일한 코드와 방법론을 사용해야 한다는 계약 조항으로 인해 고유 코드 및 방법론을 우선 적용 중이다.

APR1400형이 아닌 다른 노형의 원전으로의 설계 적용은 한수원의 원전 가동 계획과 우리 회사의 설계 일정을 고려하여 순차적으로 적용될 예정이다. 또한 앞으로 추가적인 수주가 예상되는 수출 원전을 포함하여 현재 연구 개발 중인 APR+ 원전의 최적화 및 후속 기술 개발에도 적용될 예정이다.

결언

우리 회사는 1994년부터 설계를 시작한 이래 지금까지 20년 동안 노심 설계 및 안전 해석을 수행해오면서 국내는 물론 국외 원전 경쟁사들도 부러워할만한 상용 설계기술을 풍부하게 축적해왔다.

이러한 경험은 노심 설계 코드와 안전 해석 방법론을 순수한 국내 기술로 개발하게 된 기반이 되었고, 마침내 가동 원전에 대한 교체 노심 설계뿐만 아니라 신규 원전과 해외 수출형 원전에 대한 초기 노심 설계까지도 수행할 수 있는 ‘KNF 고유 설계 시스템’을 완성하였다.

비록 노심 설계 코드와 안전 해석 방법론이 원전의 모든 기술을 대표하지는 않지만 원전의 수명이 다하는 동안 필수적으로 필요한 기술이며 원전 선진국에서 기술 이전을 꺼려하는 핵심 기술임을 고려할 때, ‘KNF 고유 설계 시스템’ 구축은 우리나라가 원자력 선진국으로 성큼 다가가는 초석을 마련했다고 할 수 있다. 