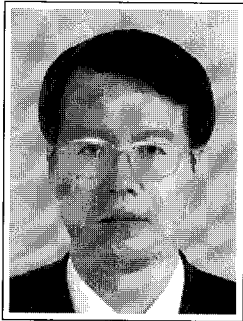


원자로 설비 기술 관리 체계 정립 및 원자로 냉각재 펌프 국산화 개발

권 용 현

두산중공업(주) 신규원전사업추진팀장



부산대 기계공학과 졸업
두산중공업(주) 입사(1983)
두산중공업(주) 계통기술팀장, 원
자력연구개발T/F팀장(겸) 역임
신규원전사업추진팀장(2009~)

국내의 원전 기술 자립
계 획 하에 ABB-
CE(현재 웨스팅하우
스에 통합)와 1987년에 기술전
수협정을 체결하고, 설계 및 제작
기술 등에 대한 기술 훈련을 통하
여 받아 기술 전수와 병행하여
ABB-CE와 협력으로 영광 3, 4
호기를 수행하여 1995년에 준공
하여 원전 건설 복제 기술 능력
확보를 달성하였다.

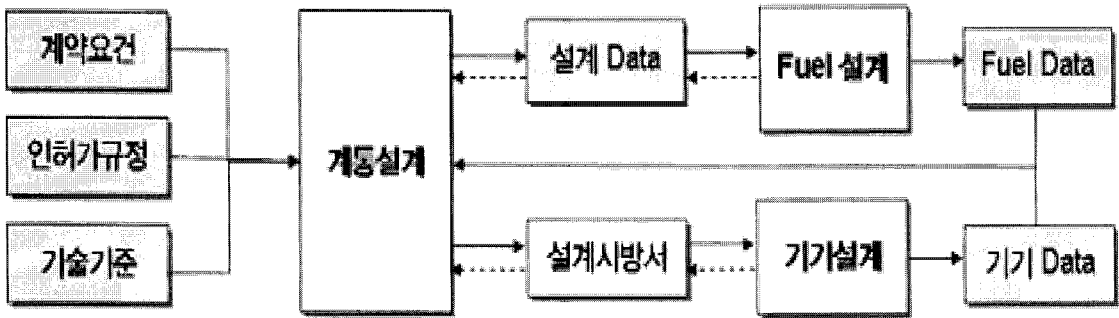
당시 기술 전수에는 ABB-CE
가 단독 수행하는 원자로 설비 설
계와 제작을 국내의 전문 인력 보
유 여건 등으로 인하여 원자로 설
비 계통 설계는 한국전력기술(당
시 원자력연구소가 참여하여
1997년에 사업 이관), 기기 설계
및 제작에는 두산중공업(구 한국
중공업)이, 원전 연료 설계 제작

에는 한전연료가 참여하였다.

원자로 설비는 확보한 원전 건
설 복제 능력과 영광 3,4호기의
설계를 참조하여 올진 3,4호기를
국내 기관들이 기술 이전을 받은
분야에 참여하여 설계 및 제작하
고 공급하여 한국표준형원전을
건설하였다.

계속적인 신규 원자력발전소
건설과 병행하여 정부의 지원과
원자력사업계의 자체 투자로 원
자력발전소 건설에 대한 기술 개
발을 추진하여, 개발한 기술을 영
광 5,6호기 원전부터 신월성 1,2
호기 원전까지 8기의 국내 원자
력발전소에 적용하여 지속적인
개량을 통하여 원전의 안전성 및
설계 최적화와 운전 신뢰성을 향
상시켜왔다.

1992년부터 차세대원자로 기



〈그림 1〉 원자로 설비 설계 연계 사항 협력 과정

술 개발 사업을 착수하여 2001년에 1400MWe 가압경수로 표준설계를 개발하여, 이를 기준으로 신고리 3,4호기 원자력발전소를 건설하고 있다.

국내 원전 산업의 육성과 진흥의 일환으로 원전 건설, 운영 관련 핵심 기술을 개발하여 관련 기술의 해외 수출 기반을 확보하기 위한 국가적 차원의 ‘원전 기술 고도화 사업’을 1999년부터 2006년까지 수행하였고, 2007년부터 ‘원전 기술 선진화 사업 (Nu-Tech 2012)’을 진행하고 있다.

계속적인 국내 신규 원전의 건설과 기술 개발을 통하여 국내의 원전 기술은 세계적인 수준에 도달하였으며, 경험이 많은 원자력 기술 인원을 가장 많이 보유하고 있다.

필자는 1989년에 영광 3,4호기 원전의 방사성 가스 분리 설비 및 봉산수 농축 설비 국산화를 주관하는 업무를 시작으로 국내 원전 건설에 대한 원자로 설비의 계통 설계와 기기 설계 및 원자로 설비와 타설비 간의 연계 사항을

처리하는 기술 관리 수행과 기술 개발에 참여하여 우리나라 원전 건설 기술 자립에 참여하여 왔다.

원자로 설비 기술 관리 체계 정립

우리나라에 원자로 설비 기술을 이전한 ABB-CE가 단독으로 수행한 원자로 설비의 설계와 공급을 국내에서 기술 이전에 참여한 기관이 기술 전수 분야에 대한 업무를 분담으로 수행하여 원자로 설비 설계에 대한 협력이 필요하다.

최초로 국내 기술로 독자적으로 추진한 표준형 원전인 울진 3,4호기 원전에서 원자로설비 역무 분담 수행에 따른 인위적인 역무 분장으로 인한 상대 기관이 수행하는 업무에 대한 이해 부족과 기관간의 이해 관계 등 복합적인 요인으로 인하여 협력을 위한 연계 사항 처리에 많은 기간과 애로가 있었으나, 효율적인 연계 사항 처리를 위해 지속적으로 개선을 협의하여 오늘날 효율적인 기술 관리 체계 정착 단계에 이르렀다.

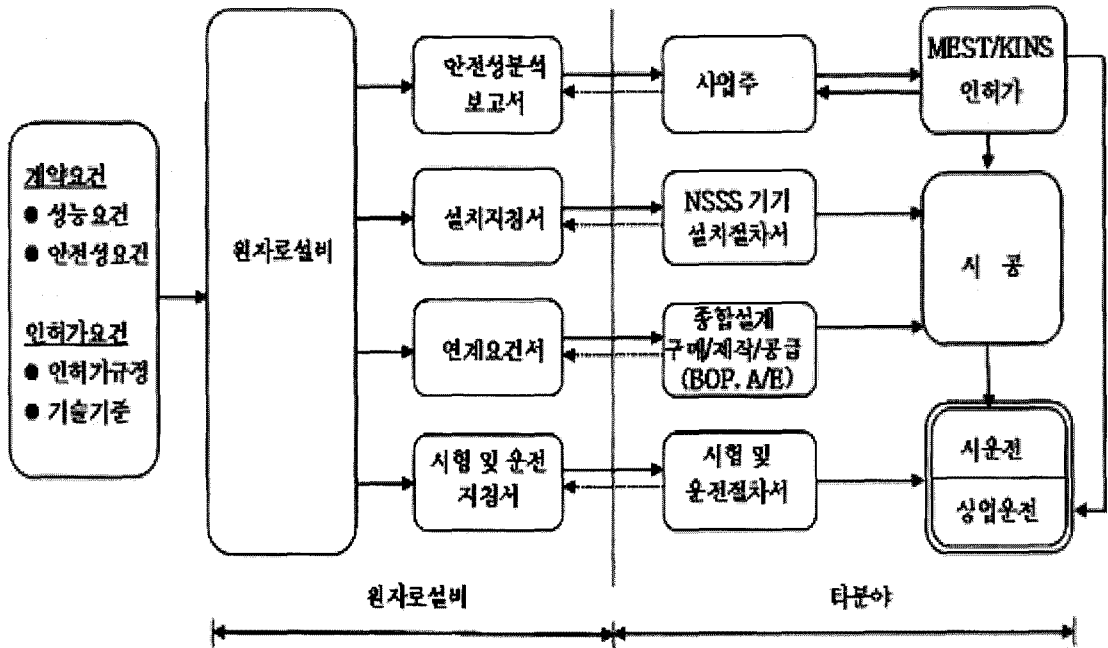
원자로 설비 설계와 관련한 내

부 협력은 〈그림 1〉과 같이 수행된다.

원자로 설비의 설계는 계약 요건 및 인허가 요건 등을 기준으로 계통 설계를 수행하고 후속으로 기기 설계 및 원전 연료 설계를 수행하여 기기 설계 결과물인 기기 및 원전 연료 자료를 계통 설계 입력으로 제공하여 계통 설계에 반영하고 후속 설계를 반복하는 시행 착오 과정을 거쳐 설계를 완성한다.

계통 설계자는 계통 설계를 수행하고 그 결과를 활용하여 설계시방서를 작성하고 두산중공업에 제공하여 기기 설계 요건과 설계에 필요한 연계 정보를 부여하며, 원전 연료 설계에 필요한 위해 설계 정보를 한전원자력연료에 제공하여 후속 업무를 추진할 수 있게 한다.

두산중공업과 한전원자력연료는 제공되는 요건과 자료에 대하여 계통 설계자와 협의하고 확정하여 기기 설계와 원전 연료 설계를 수행하고, 기기 및 원전 연료 정보와 각기 계통 설계자에게 제공한다.



〈그림 2〉 원자로 설비와 타분야와의 연계 사항

원자로 설비 기기 설계에 필요한 원전 연료 자료는 계통 설계자가 받아 설계시방서에 연계 정보를 포함시켜 제공한다.

계통 설계와 기기 설계 및 계통 설계와 원전 연료 설계를 연계시키는 문서에서 설계 등급을 부여하여 목적에 부합하도록 관련 업무에 이용할 수 있게 하여 일관성 있는 설계를 할 수 있도록 한다.

예비 검토를 위한 검증되지 않은 설계 정보는 설계 등급 3, 자재 발주 및 Size 계산, 예비 설계를 위한 설계 정보는 2를, 최종 설계를 위해 검증된 설계 정보는 1을 부여한다.

일반적으로 설계의 건전성 확보와 효율성 측면에서 국내 원전 건설 사업 계약 요건으로 계통 및 기기의 기본이 되는 선행 호기 설

계를 참조 설계로 활용하고, 참조 발전소 설계에 대한 개선 사항은 계약에 별도로 명시한다.

개선 사항도 원전의 안전성과 운전 신뢰성 확보를 위해 사전에 개발하여 검증된 기술을 적용하는 것이 일반적이다.

그리고 원자로 설비 수행 참여 기관은 인허가, 터빈 발전기 설계, 보조 기기 설계, 시공, 시운전에 대한 연계 사항을 <그림 2>와 같이 제공하여 협력한다.

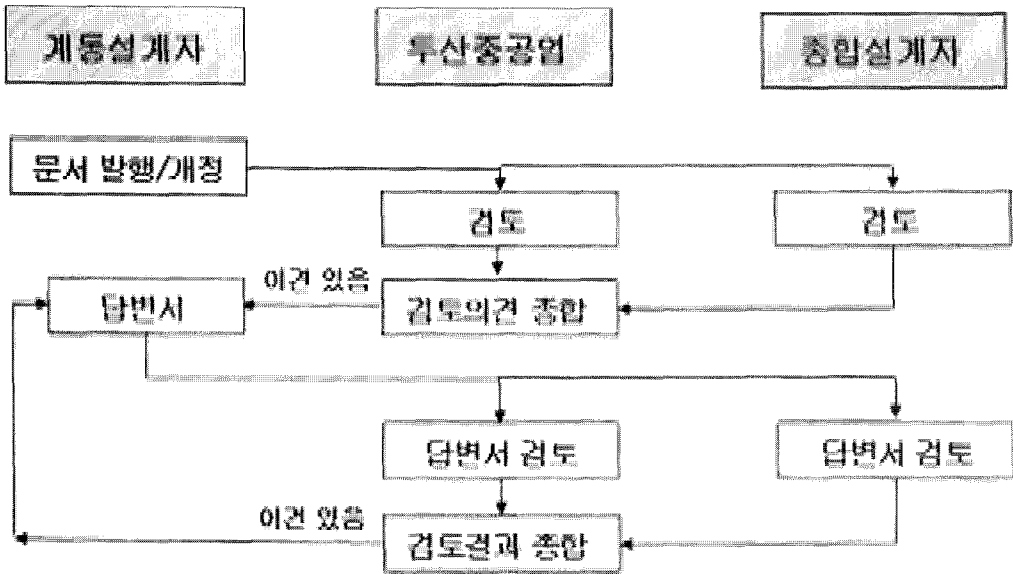
원자로설비 설계 및 공급자는 인허가 추진을 위하여 안전성분석보고서를 작성하여 사업주에게 제출하고, 설치 관련 설치 지침서, 원자로 설비의 안전성과 성능 확보 관련 터빈발전기 및 보조 기기 설계에 고려하기 위한 요건을 연계요건서에, 시운전 및 운전

필요한 지침을 시험 및 운전 지침서에 수록하여 종합 설계자에게 제공하여 협의한다.

이러한 연계 정보는 종합 설계자와 관련 분야 설계를 수행하는 해당 기관에게 제공하고 협의하여 결과를 원자로 설비 설계자와 협의한다.

앞에서 기술한 원자로 설비 계통 설계와 기기 설계 및 원자로 설비와 다른 분야의 업무에 대한 연계 사항을 효과적이고 효율적으로 추진하여 원자로 설비의 안전성과 운전 신뢰성 및 경제성을 확보하기 위해 긴밀한 상호 협조가 필요하다. 이러한 연계 사항은 <그림 3>과 같은 절차에 따라 협력한다.

계통 설계자가 발행하는 각종 연계 문서를 원자로 설비 공급 계



〈그림 3〉 원자로 설비 연계 문서에 대한 협의 과정

약 주계약자인 두산중공업과 종합 설계자는 문서를 검토하여 이견이 있는 요건에 대한 검토 의견을 제시하거나 승인을 하게 된다.

검토 의견에 대하여 계통 설계자는 평가한 후 답변하면 두산중공업과 종합 설계자는 검토하여 동의하거나 수용이 어려우면 의견을 제시한다.

이러한 이견 사항에 대한 협의는 문서로 작성하고 교환하여 이루어지며 장기간 합의가 되지 않으면 회의를 하여 협의하여 합의를 추진한다.

문서를 접수 후 종합 설계자가 4주 이내에 검토 의견을 두산중공업에 제시하면, 1주 이내에 두산의 검토 의견을 합쳐 계통 설계자에게 제시한다.

계통 설계자는 검토 의견을 평가하여 3주 이내에 답변하면, 종합 설계자는 4주 이내에 의견을 제시

하고 두산중공업은 1주 이내에 자체 의견을 종합하여 회신한다.

연계 요건에 대한 최초 검토 의견을 제시 후 계통 설계자와 2차례 서신 교환을 통하여 협의하여 합의에 도달하지 않으면 정기적인 연계 회의에서 협의한다. 실무자 협의에서 합의되지 않으면 사업 책임자 간 협의로 해결한다.

그리고 현재는 경험 축적에 따라 설계 등급 3의 문서는 관련사에 제공하지 않고, 설계등급 2문서를 최초로 제공하며 설계 등급 2 문서 내용에 대한 이견 사항에 대한 협의결과를 반영하여 1회만 개정하고 있다.

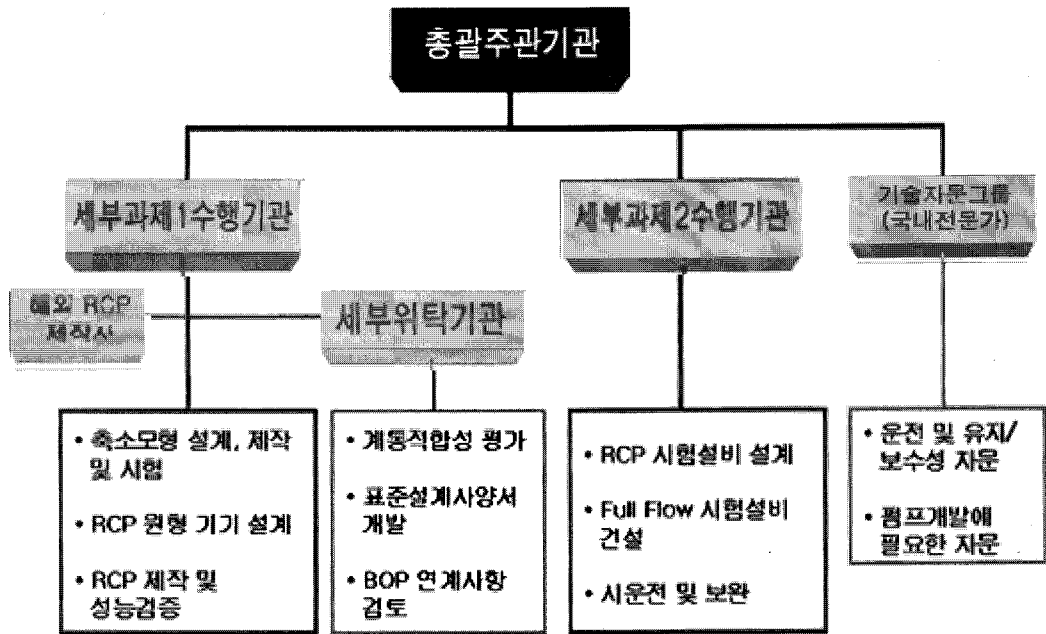
또한 계통 설계자가 계통 설계 측면의 설치 요건을 수록한 설치 지침서를 제공하면, 이에 추가하여 기기 설계/제작 측면의 설치 요건을 계통 설계자에게 제공하면 계통 설계자가 종합하여 발행

하고 있다.

계약 후 안전성 관련 인허가 및 기술기준 요건이 변경되거나 기술의 진보, 설계 최적화 등을 위해 설계 개선 사항 적용이 필요한 경우가 발생한다. 이러한 설계 개선 사항추진은 원전의 안전성과 성능 보장 차원에서 검토가 필요하며 원전 건설에 참여하는 다수의 관련 기관들의 협조로 수행이 필요한 경우가 많다.

설계 개선이 필요하게 될 경우 설계 개선 사항에 해당되는 분야를 수행하는 기관이 설계 개선 추진 배경과 추진 내용, 추진 관련 영향을 해당 기관에 요청하고 협의하여 추진 계획을 수립하여 사업주와 협의하여 확정하여 추진한다.

역무 분장에 따라 근원적인 기관 간의 이해 관계로 인해 한 기관이 단독으로 수행할 정도로 효



〈그림 4〉 원자로 냉각재 펌프 개발 추진 체계

울적으로 추진할 수 있는 단계에는 도달하지 못하였으나, 앞에서 기술한 기술 관리 체계 활용과 지속적인 원전 건설에 따른 경험 축적과 관련사의 적극적인 협조로 연계 사항 처리가 효율적으로 수행되고 있다.

원자로 냉각재 펌프 국산화 개발

원자로 냉각재 펌프는 원자로 냉각재 계통의 냉각재를 강제로 순환하여 노심에서 발생하는 열을 제거하여 증기발생기로 전달하는 인간의 심장에 해당하는 기기로, 원자로 설비 가격의 15% 정도를 점유하는 단일 기기로 가장 가격이 높은 핵심 기기이다.

원자로 냉각재 펌프는 대용량이고 원자로 정상 운전 기간에는 계속 가동될 수 있도록 모터 베어

링부의 냉각 계통이 필요하고, 1차 냉각수의 누출 방지와 밀봉 장치의 냉각을 위해 밀봉수를 주입하는 계통 설치와 펌프를 서서히 정지하도록 무거운 관성 바퀴가 부착되는 복합적인 기기이다.

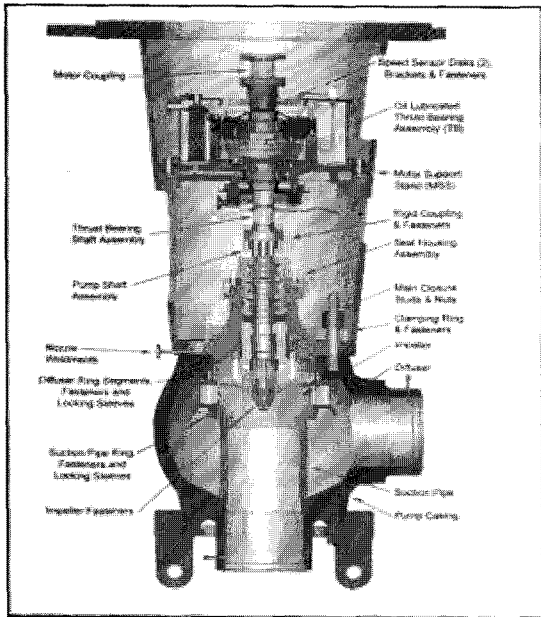
원자로 냉각재 펌프는 기술 이전에 제외되어 있는 품목이며, 해외 기술을 기반으로 확보한 원자로 설비에 대한 기술과 지속적으로 개발한 기술을 적용하여 국내에 8기의 OPR1000과 2기의 APR1400 원전을 건설하는 과정에 두산중공업을 비롯한 국내 여러 기관들이 개발의 필요성을 절감하고 추진을 검토하였으나 국내 기술 수준이 취약하여 독자적으로 추진할 경우 성공 가능성이 낮아 해외 전문 업체의 협력이 필요하였으나 기술 이전 기피와 대규모 투자 등의 이유로 추진되지

못하고 웨스팅하우스가 독점 공급하여 왔다.

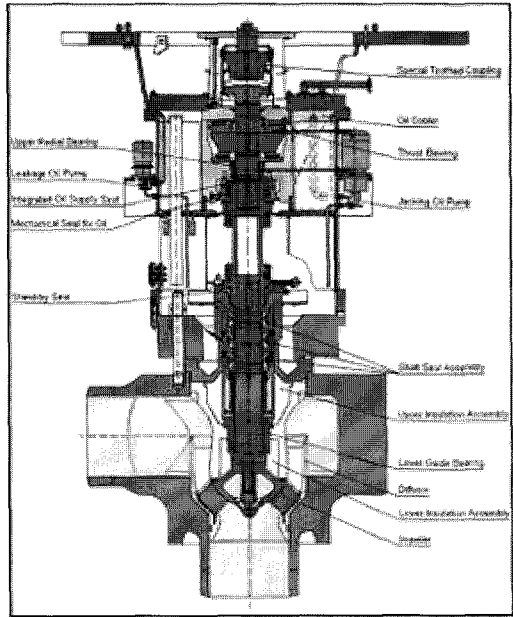
2004년에 이르러 두산중공업은 원자로 냉각재 펌프 국산화 추진에 대한 내부 방침을 정하고 신울진 1,2호기에 공급을 목표로 준비를 시작하였다.

처음에는 국내 원자로 냉각재 펌프를 독점적으로 공급한 웨스팅하우스/KSB와 기술 이전을 협의하였으나 소극적인 협조로 진전이 느려, 추가로 공급 실적이 많은 해외 전문 업체를 대상으로 협력을 요청하여 독점적인 공급 시장이 없는 Andritz사와 Flowserve사로부터 협력 의사를 접수하고 협의를 하였다.

해외 전문 업체와 개발할 APR1400 원자로 냉각재 펌프에 대한 기술적인 협의와 기술 개발 협력 조건 협의와 병행하여, 정부



신고리 3.4 원자로 냉각재 펌프



국산화 개발 원자로 냉각재 펌프

〈그림 5 원자로 냉각재 펌프 형상 비교〉

〈표 1〉 원자로 냉각재 펌프 주요 사양 비교

구분	신고리 3.4 펌프	국산화 펌프
적용 기술기준	ASME Section III, Class 1	동일
설계수명	60년	동일
펌프형식	반사류 수직원심펌프	반축류 수직원심펌프
설계 압력, 온도	220 kg/cm ² , 290.6 °C	동일
설계 유량 @ 수두	121,600 gpm @ 360ft	121,600 gpm @ 375ft
회전수	1190 RPM	동일
효율	83% 이상	동일
임펠러/ 디퓨저 수량	6/11	동일
케이싱 형상/제작	구형/주조	실린더형/단조
디퓨저	2부분으로 제작	일체형
트러스트베어링 냉각	모터스탠드외부에 오일보관	모터스탠드내부에 오일보관
밀봉유량 공급 방식	1단 -> 2단 -> 3단 유로 형성	각단(1, ~ 3) 에 각각 유량 공급
밀봉유량	6.6 gpm	6.8 gpm
밀봉장치	3단 밀봉	3단 밀봉 + Stand Still Seal
밀봉장치 교체방법	트러스트베어링을 상부 이동후 교체	트러스트베어링 이동없이 교체
펌프분해	밀봉장치 하우징과 임펠러 함께 분해 후 디퓨저 분해	밀봉장치 하우징, 임펠러, 디퓨저 함께 분해
입구배관	있음	없음
펌프 무게(모터제외)	72톤	69톤
케이싱 플랜지 누설감지	누설감지장치 미설치	누설감지장치 설치

에서 지원하는 원전 선진화 과제로 추진을 하기 위하여 국내 관련 기관인 한국전력기술, 원자력연구원, 한국기계연구소 및 학계 등과 2006년에 협의를 시작하고 수행 체계와 수행 계획 등을 준비하여 신청하였다.

해외 전문 업체의 원자로 냉각재 펌프 보유 모델에 대한 기술적 특성과 협력 조건을 종합적으로 평가하여 2007년 3월 초순에 Andritz사와 협정을 체결하고 개발에 착수하였으며, 2007년 7월부터 원전 선진화 과제로 선정되어 개발 추진력에 탄력이 붙게 되었다.

두산중공업이 관련사와 협력하여 원자로 냉각재 계통의 수력 설계 최적화를 통하여 원자로 냉각재 펌프의 설계 요건을 확정하고, 원형 펌프에 대한 기본 설계와 수력 설계에 대한 상사 법칙을 적용하여 원자로 냉각재 펌프 실물의 1/2.5의 축소 펌프를 설계하고 시험하여 원전 성능과 안전 해석에 필요한 자료를 2008년 5월 초순에 취득하였다.

이후 원자로 냉각재 펌프의 설계와 시험으로 확보한 자료를 기준으로 원전의 성능과 안전 해석을 수행하고 타분야에 대한 연계 사항을 평가하여 원전 적용성 평가를 수행하여 적용이 가능하고 기존 펌프보다 우수한 특성을 2008년 11월에 확인하였다.

원자로 냉각재 펌프 개발은 세부 과제 1(펌프 개발)과 세부 과제 2(펌프 시험 설비 구축), 국내 자문과 평가로 추진하였다.<그림

4>
전체 총괄과 펌프 개발은 두산중공업이 주관하고, 펌프 시험 설비는 한국원자력연구원이 추진하고 있으며, 기술 자문은 국내 정부, 산/학/연 전문가가 참여하는 별도 국산화추진단을 구성하여 추진하였다.

본 펌프 개발은 주관사인 두산중공업과 계통 설계자, Andritz사, 한국기계연구원, 원자력연구원, 필로소피아 등이 협력하여 추진하고 있으며, 현재 원형 펌프 상세 설계를 진행하고 있다. 펌프 시험 설비는 주관 기관인 원자력연구원과 기계연구원, 경희대 등이 참여하고 있다.

국산화추진단은 2007년 6월에 원자로 냉각재 펌프 개발에 대한 자문과 국내 원전에 대한 적용성을 검토하기 위하여 지식경제부, 한국수력원자력, 두산중공업, 원자로 계통 설계자, 발전소 종합 설계자, 원전연료, 기타 산업계 및 학계 전문가로 구성하여 활동하고 국내 원전 적용성 평가를 종료하였다.

신고리 3,4호기에 적용된 펌프와 원형 펌프 기본 설계 및 축소 모델 설계 및 시험을 하여 개발한 펌프의 형상과 주요 사양을 비교하면 <그림 5>, <표 1>과 같다.

개발한 국산화 원자로 냉각재 펌프는 기존 펌프와 같은 펌프의 맥동 주파수를 갖도록 동일한 임펠러와 디퓨저 수량을 적용하여 펌프 맥동 유량에 의한 원자로 냉각재 계통에 영향을 거의 동일하게 유지하며, 기존 펌프 대비 아

래와 같은 우수한 특성이 있다.

▶ 펌프 수두를 15ft 증가시켜 원자로 냉각재 운전 유량 범위를 증가시켜 충분한 증기발생기 세관 여유도 활용 가능

▶ 반축류 원심 펌프로 변경하고 단순한 실린더형 케이싱 구조로 설계, 단조하여 제작할 수 있어 재료의 신뢰성을 향상시키고, 주조 재료에 필요한 비파괴검사가 불필요하며, 내부 스테인리스 크래딩(Cladding)을 자동 작업으로 수행이 가능하여 제작 기간 단축과 무게 감소

▶ 실린더형 케이싱 구조에 따라 높이가 낮아져 무게 중심이 아래로 이동하여 지진가속도에 대한 구조적 건전성 확보에 유리

▶ 반축류 펌프의 특성상 입구 안내 배관이 불필요하여 구조 단순화

▶ 트러스트 베어링 냉각을 위하여 보관되는 냉각 오일 보관용 모터 스탠드 내부에 배치하여 다른 외부 구조물과 간섭 제거

▶ 밀봉 장치 유량을 약간 증가시켜 각각의 밀봉 장치로 독립적으로 공급하고 정상운전 때는 주입되는 공급 유량만으로 밀봉 장치를 냉각하여 밀봉 유량의 오염에 의한 수명 영향을 최소화하여 밀봉장치 수명 연장

▶ Stand Still Seal 추가로 원전의 외부 전력망이 단절될 경우에 밀봉수의 외부 누출이 되지 않도록 고려

▶ 밀봉 장치 교체를 트러스터 베어링을 상부로 들어 올리지 않고 수행하여 정비 편리

▶ 일체형 디퓨저를 적용하여 디퓨저를 밀봉장치 하우징과 임펠러와 함께 분해하여 정비용이

▶ 펌프 케이싱 플랜지에 누설 감지 장치를 부착할 수 있게 하여 누설을 감지하여 원자로 냉각재 계통의 운전안전성 향상 등

원자로 설비의 주요 기기 중 유일하게 국산화가 되지 않은 원자로 냉각재 펌프를 개발하여 국내 1400MWe 원전에 적용이 가능하다는 확인 결과에 따라 신울진 1,2호기 원전에 공급을 위해 상세 설계를 추진하고 있다.

기술 자립에 따라 앞으로 발전 소원자로 냉각재 펌프 운전 및 보수를 위해 국내 기술진이 신속하게 지원할 수 있어 원전 가동률을 높이고 안정적인 전력 공급이 기대된다.

국내 원전 적용으로 2020년까지 건설 예정이 6기의 원전에서 4,000억원 이상의 수입 대체 효과와 국내 원전 건설 단가 절감 등 경제성이 확보되고, 원자로 냉각재 펌프 관련 계통 설계, 기기 설계, 제작, 운전 및 보수 기술이 진일보하게 되어 원전전반에 걸친 기술 향상 및 대형 펌프에 대한 원전 설계 능력 확보가 가능할 전망이다.

이러한 국내 산업계의 기술력과 원전에 대한 경쟁력 향상으로 국내 산업계의 협력만으로 아랍에미리트, 요르단, 베트남, 인도네시아 등에 해외 업체들과 경쟁할 수 있는 수출 기반이 조성되어, 수출할 경우 호기별 700억원 이상의 수출 효과가 기대된다.

수상 소감

이번 제16회 한국원자력기술상 금상 수상을 개인적인 기쁨에 앞서 그 동안 업무에 대한 지원과 협조를 하여 주신 많은 분들에게 진심으로 감사를 드린다.

원자로 설비 기술 관리 체계 정착은 그동안 국내 원자력산업계 전반에 걸쳐 연계 사항에 대한 적극적인 협조가 있어, 원자로 냉각재 국산화 개발에는 원자력계의 정부 및 산/학/연 전반에 대한 협력으로 가능하였다.

따라서 두산중공업의 원자력 BG 임직원, 한수원 임직원, 원자로 계통 설계 및 원전 종합 설계에 참여하신 한국전력기술 임직원, 그리고 원자력연구원, 한국기계연구원, 정부 및 학계 및 Andritz사 인사 등 지면으로 일일이 열거할 수 없을 정도로 많은 분들의 도움이 있었기에 대표로 과분한 상을 받았다.

아울러 원자로 설비 기술 관리 정착은 효율적인 사업 수행을 위해 역무 분담에 따른 기관간의 이해 관계를 떠나 효율적인 업무 추진에 대한 공동 인식과 협조가 있었기에 가능하였고, 원자로 냉각재 펌프 개발은 두산중공업 추진 결정과 의지에 대해 관련 기관이 신뢰하고 적극적으로 참여하고 협조하여 주신 덕분에 가능하였다.

부단한 노력을 통하여 이룩한 원자로 설비 기술 관리 체계 정착은 역무를 분담하여 수행하는 수행 체계의 한계를 최소화하고, 원자로 냉각재 펌프 개발은 마지막

까지 자립되지 않은 원자로 설비의 핵심 기기의 기술 자립을 통하여 국내 산업계의 원전에 대한 전반적인 기술 기반을 구축한 점에 큰 의미가 있다고 생각한다.

이러한 성과는 향후 원자력 발전의 경제성을 향상시키고 국산 원전의 해외 수출 경쟁력을 높이는 데 크게 이바지할 것으로 기대한다.

많은 시행착오로 정착된 원자로 설비 기술 관리 체계에 대하여 최근 급격히 발전한 정보 통신 기술을 접목 등으로 개선과 개발된 원자로 냉각재 펌프에 대한 상세 설계 및 제작 기술 확보를 위한 후속 진행과 관련하여, 국내 원전 건설 경쟁력이 세계를 선도할 수준으로 도약할 수 있도록 관계자분들의 변함없는 지도와 지원을 부탁드립니다.

아울러 최근 직면한 세계적인 경제 여건 악화가 해결되면, 지구 온난화에 대비하고 유가 상승 등으로 원자력의 경쟁력이 더욱 상승하여 세계적으로 신규 원전 건설이 대폭 증가할 것으로 예상된다.

이러한 원전 건설 활황에 대비하여 적극적인 해외 수출 추진으로, 가장 경험 많고 우수한 국내 원자력 전문가들이 역량을 한껏 발휘하고 자부심을 가지고 참여할 수 있는 환경이 조성되기를 바라면서, 영예로운 원자력기술상을 수상할 수 있도록 그동안 지도와 지원을 아끼지 많은 분들에게 다시 한번 심심한 감사를 드린다. 