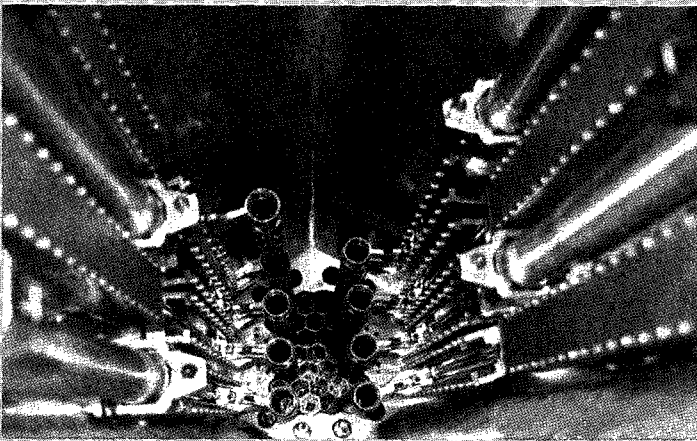


특 집

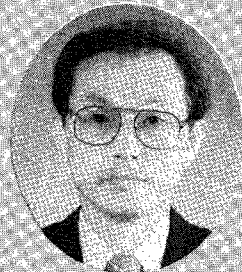
多目的研究用原子爐

4

設計建造過程에서의 技術開發



다목적연구로에 장착된 제어장치



최창웅

한국원자력연구소 연구로사업관리실장

다목적 연구로의 설계는 연구용 원자로의 특성으로 5가지 사항들을 만족토록 하였는데, ① 최대 이용가능 열중성자속이 $5 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 이상 되도록 하고, ② 실험장치들이 설치되는 부위에서 시간적·공간적 중성자속 변화율이 20% 이하가 되도록 하며, ③ 25mk 이상의 잉여 반응도가 핵연료 One Cycle당 지속적으로 유지되어 상응하는 실험장치들이 완전히 장착된 상태에서 운전이 가능토록 하며, ④ 여러 종류의 실험들이 상호 간섭됨이 없이 동시에 수행될수 있도록 구조적 특성도 지녀야 하며, ⑤ 고유 안전성을 유지할 수 있는 조건을 만족토록 하였다.

이러한 요구조건을 만족시키는 다목적연구로에 대한 개념설계를 1985년에 수행하였고, 이를 근거로 기본설계를 진행코자 하였으나 설계개념과 계산된 자료들을 기본설계 자료로 전환하는 기술이 국내의 설계회사들로서는 경험해본 실적을 갖지 못하였고, 더우기 처음 시도하는 일에 고도의 기술수준을 요하는 사업이라서 업무자체가 큰 부담이 되었다. 마침 Canada의 AECL이 기능과 특성이 다목적연구로와는 상이하지만 Maple-X 연구로를 개발하여 기본설계를 진행하는 중이라서, 기본설계 과정을 함께 Study 하면서 설계개념의 부분적 검증 실험을 수행할 수 있고 기본설계 자료를 함께 생산할 수 있는 이

점이 있어 AECL과 공동으로 기본설계를 수행하게 되었다. 원자력연구소의 핵설계 Team은 AECL의 WNRL에 연 13명이 파견되어 지금까지 자체적으로 생산한 핵설계 자료를 검증하여 기본설계의 입력 자료로 확정하였으며 156편의 기술보고서를 생산하였고 8종의 전산 Code를 개발 또는 개량하였다. 국내의 A/E (Architecture Engineering) 회사인 한국전력기술(주)는 연 12명의 각 분야 설계 Leader를 AECL의 COM에 보내어 기본설계 자료 (Design Requirement, Design Description, Design DWG, Specification 등) 250 여편을 AECL과 함께 생산하게 되었다.

기본설계 자료를 생산한 후 상세설계는 국내에서 국내기술의 능력으로 수행하려 했으나, 상세설계를 수행하는 과정에서 원자로 본체와 제어·정지계통의 설계는 국내 제작업체와의 기술적 협의가 이루어지지 못했다. 다목적연구로의 구조적 특성이 제작 전에 실증실험을 통한 제작 검증이 실행적으로 요청되었고 특수한 원자재(원자로 반사체는 1인치 두께의 Zircaloy-4 Plate 사용, 원자로 제어 정지봉은 Hafnium Shroud 사용) 구매의 어려움 때문에 제작을 기피함으로 상세설계 진행 자체가 어려웠다. 이와 같이 특수한 장치나 설비, 즉 국산화가 어려운 품목에 대해서는 정부측 배려로 공동 차관을

사용하여 AECL에 상세설계 및 제작을 발주하였고 AECL은 원자로 본체, 제어봉, 정지봉 및 이들의 구동장치를 다목적연구로의 특성에 맞도록 제작하게 되었다. 이 분야에 대해 연구소는 AECL의 설계를 관리하고 또한 설계업무에 직접 참여토록 AECL에 필요한 인원을 보내어 국외 능력활용의 최대화를 기하였다.

상세설계에 있어 노심설계 분야는 연구소가 전적으로 담당하였고 이 과정에서 기본설계 단계에서 개발된 노심설계 Code 체계의 개량, 분석 방법의 상세설계화 등이 이루어졌다. 또한 노심설계에 필요한 실험 자료를 AECL과의 공동연구를 통하여 생산하였고, 연구소 자체에서도 실험을 수행하여 이를 노심설계에 반영하였다. 노심설계의 시작인 핵자료 Library의 완성, 자체 노심설계 체계의 확립, 자체 실험결과와 설계에의 활용 등은 그간에 닦아온 연구소의 잠재적 기술력을 실제로 현실화 시킨 좋은 예라 하겠다.

한편, 산업체와 연구소간의 협력을 통한 기술 개발의 좋은 예도 다목적연구로의 설계과정에서 이루어졌는데, 이에 대한 예는 노심의 자연 대류냉각을 위해 설치되는 플랩밸브의 설계이다. 플랩밸브의 설계에 대해서는 다음 장에서 좀 더 자세히 기술할 것이다.

다시 요약해 보면 다목적연구

로의 설계 기술은 국내의 협력업체, 연구소 기술력의 총화를 통하여 이루어졌다. 이에 기술한 기술개발 과정이 모두 순탄한 과정을 걸쳐 이루어진 것은 아니고 여러 번의 시행착오와 반복 작업을 통하여 이루어졌다. 이러한 어려웠던 과정이 다목적연구로 설계기술의 의미를 더 깊게 한다고 하겠다.

설계기술 개발

노심설계 및 차폐설계 체제

확립된 노심설계 체제를 이용하여 설계가 수행되는 상업용 원자로의 경우와는 달리 연구용 원자로의 노심설계에는 반복 과정을 통하여 노심설계 체제를 확립하여 가면서 설계자료를 생산해야 하는 어려움이 따랐다. 계산코드의 검증, 모델링 방법의 검증 등의 과정을 통하여 다목적연구로 노심설계 체제를 확립하였다.

상세설계에 있어 노심의 핵설계, 열수력 설계, 안전성 분석, 차폐설계 등은 연구소가 독자적으로 수행하였고 원자로 구조물의 기계적 설계와 핵연료의 설계는 원자로 구조물과 핵연료를 공급하는 AECL이 담당하였다. 연구소가 독자적으로 수행한 부분은 연구로 사업조직의 인원뿐만 아니라 많은 소원의 협조로 이루어졌다.

노심의 핵설계와 차폐설계

최적의 핵설계를 이루기 위해서는 핵자료의 정확도를 유지하여야 한다.

한국원자력연구소가 1970년대부터 수집 정리해온 핵자료 Library들을 다목적연구로 설비에 적합토록 다시금 개선하고 조정하여 연구로 설계를 위한 KMR-R 핵자료 Library를 완성하였는데, ENDF/B-IV와 V를 사용하여 약 120개의 핵종 자료를 생산하였고, 주요 핵분열 생성물의 붕괴사슬을 상세히 개량하여 WIMKAL-88이라 명하였으며 IAEA의 NDS(Nuclear Data System)에 배포하므로써 국제적으로 활용토록 하였다. 이처럼 다목적연구로의 핵설계를 위해 핵자료 Library를 갖추어야 함은, ① 고밀도의 노심을 정밀하게 관리(Fine Control)하기 위해서 사용하는 Code에 정확성을 유지토록 개선하여야 했고, ② 다목적연구로의 핵종이 다른 원자료와는 다르기 때문이며, ③ 핵연료의 높은 연소도로 인해 Decay Chain을 개선해야만 하기 때문이다. 핵설계에 사용한 Code는 WINS.D. 4를 조정한 WIMS-KAERI Code와 VENTURE에 Input Module을 추가한 VENTURE-KAERI Code로서 WIMS-KAERI는 격자설계, 균정수 생산에 사용하였고 VENTURE-KAERI는 爐노심의 핵특성 계산, 핵연료 관리에 사용하였다. 그리

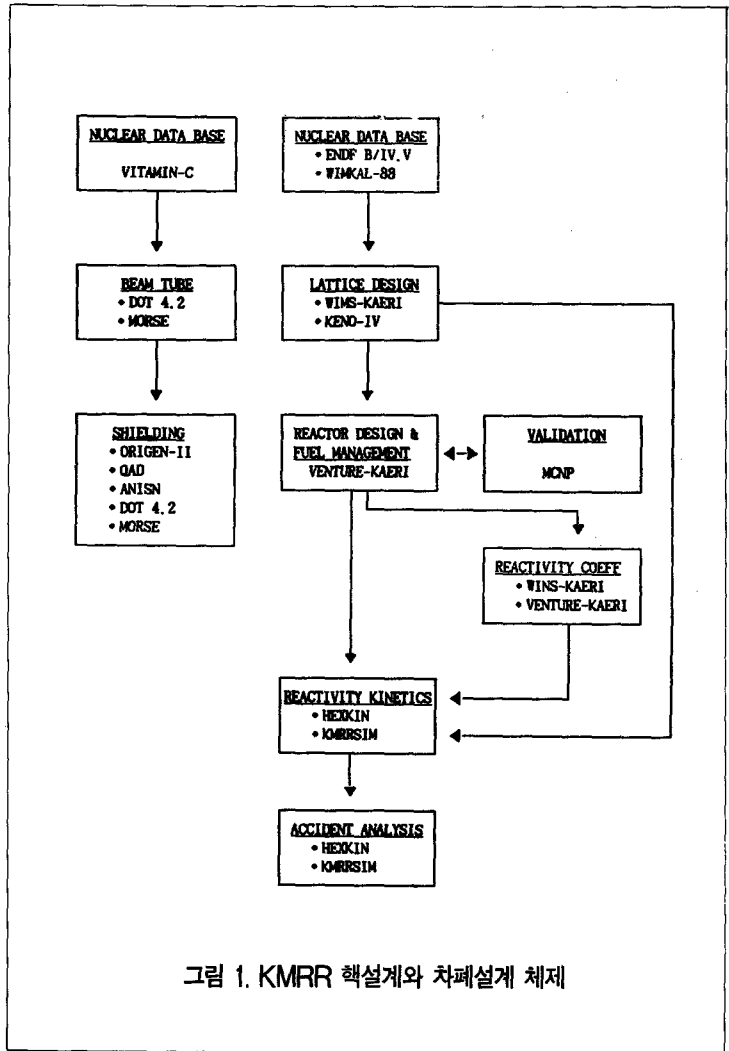


그림 1. KMR-R 핵설계와 차폐설계 체제

고 이들 Code를 검증 계산하는데에는 MCNP를 사용하였다. 연구로의 동특성 계산, 중성자 출력 변화 계산에는 다목적연구로 설계 Team이 개발한 KMRRSIM Code를 사용하였고, 핵연료의 국부출력 보정을 위한 계산에는 VENTURE-KAERI를 사용하

였다. 또한 Spent Fuel Pool의 임계도 해석에는 KENO Code를 사용하였다.

다목적연구로는 출력밀도가 높고 중성자 Beam의 유도관이 다양하므로 차폐설계는 최적화 기준에 의해야 했다. 중성자 Beam 유도관의 길이를 짧게 하여 Bea-

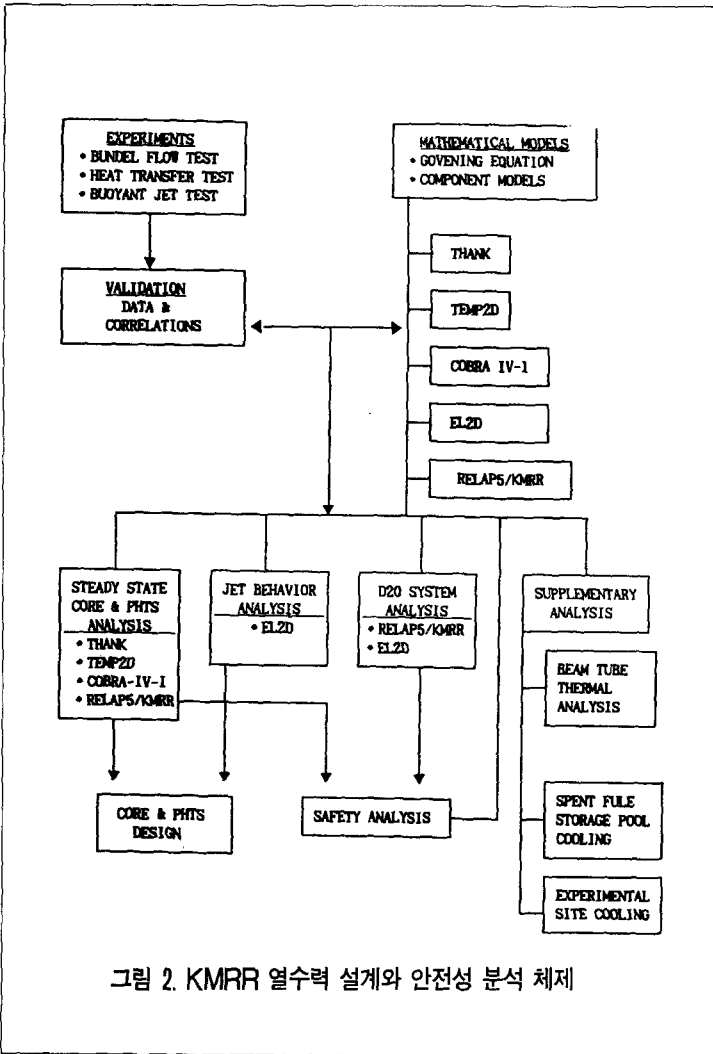


그림 2. KMRR 열수력 설계와 안전성 분석 체계

m 수송중 중성자 손실을 최소로 할 경우, 부족한 차폐벽 두께로 인하여 노실내에 높은 방사선 준위를 허용하게 되고, 이와는 반대로 노실내의 실험중사자의 방사선 피폭을 최소로 하기 위해서 차폐벽 두께를 증가시킬 경우, 중성자 Beam 유도관의 길이가 비

례하여 길어지면서 실험장치에 도달되는 중성자의 밀도가 감소되어 실험의 효율성이 저하된다. 다목적연구로의 차폐설계는, 각종의 가능 Model을 대상으로 계산의 정밀도를 높일수 있는 설계 방법을 연구하면서, 동시에 설계를 진행하였다. 여기에 이용된

Code로는 일반적으로 널리 사용되고 있는 ORIGEN-II(방사선원 분석), QAD-CG, ANISN(차폐벽 설계), DOT 4.2/MORSE(중성자 Beam 유도관 차폐설계) 등이다.

위와 같이 구성된 다목적연구로의 핵설계와 차폐설계 체계는 [그림 1]과 같다.

노심의 열수력 설계와 안전성 분석

다목적연구로의 열수력학적 특성은 다음과 같다.

- 저온, 저압에서 운전된다
- 정상 운전상태에서 냉각수는 항상 액상으로 유지된다.
- 열전달 능력의 향상을 위해 핵연료에 8개의 Fin이 달려있다.
- 우회유동에 의하여 노심 냉각수가 수조로 상승되는 것을 억제한다.
- 원자로 정지시, 냉각계통 배관을 통한 자연 순환 또는 수조를 통한 자연 순환에 의하여 잔열을 제거한다.

이러한 특성을 잘 예측하기 위하여 기존의 Code를 수정하거나 새로운 Code를 만들어 노심의 열수력 설계와 안전성 분석을 수행하였다. 다목적연구로는 저온, 저압의 운전조건을 가지므로 상용 발전로의 고온 고압에서 안전성 분석에 사용하는 RELAP5/MOD2 Code를 다목적연구로의 안전해석에 적합토록 열전달 상관식을 대체하여 RELAP5/K

MRR Code로 개선하여 사용하였다. 대체된 상관식에는 단상 열전달 상계식, 미포화비등의 열전달 상계식, 임계, 열속 상계식 등이 포함된다. 또한 다목적연구용에서는 판형의 열교환기를 사용하여, 상업용 발전로에서 사용하고 있는 U-Tube형 열교환기와 압력강하, 열전달 특성이 현저하게 다르므로 이같은 판형 열교환기를 잘 해석할 수 있도록 REL-AP5/KMRR Code를 꾸몄다. 이 Code는 예상운전 과도상태 및 사고상태에서 원자로 계통의 열수력 거동을 해석하는 데에 사용하였다. 또한 Chimney안에서의 1차 냉각수의 유동장 해석, Reflector Vessel안에서의 중수의 유동장 해석에 EL2D Code를 사용하였는데 실증실험을 통해서도 해석의 정당성이 입증되었다. 부수로(Sub-Channel)해석에 사용되는 COBRA-IV-1 Code의 열수력 상관식을 다목적연구용의 특성에 적합한 상계식으로 대체하여 COBRA-IV-1/KMRR을 만들어 정상 운전상태, 예상운전 과도상태, 사고 상황에서의 노심의 열적 여유도를 평가하는데 사용하였다. 1차 계통의 유량 분석 해석, 자연 순환해석에는 AECL과 공동으로 개발한 THANK Code를 사용하였고 핵연료 봉내의 2차원적 온도분석 해석을 위해 TEMP2D를 개발 하여 사용하였다. 또한 연구소내에서 개발한 KIRAP을 이용하여 확률론적

안전해석을 수행 하였고 그 결과를 원자로 운전조건의 분류등에 적용하였다.

위와 같은 노심 열수력 해석과 안전성 분석의 체제는 [그림 2]와 같다.

원자로 구조물의 기계적 설계

다목적연구용의 Reflector Vessel은 지르칼로이로 제작되어 중성자에 대한 기계적 특성은 우수하지만, 높은 속중성자속의 장기간 조사로 인하여 금속조직에 변화를 일으켜 Creep and Growth 현상이 나타나 기하학적 변형과 응력 집중을 일으키게 된다. 또한 구조체가 중성자를 흡수하므로써 발열반응을 일으키고 국부적 온도상승을 유발케 되므로 이들을 방지하기 위한 수단들이 고려되어야 하고, 정밀한 분석과 해석이 있어야 한다. Creep and Growth의 해석에는 MARC와 ABAQUS Code를 사용하였다. 국부적 온도상승에 열원추적에는 ANISN과 QADCG Code를 사용하였다. 원자로 구조물의 내진해석에는 ANSYS를 사용하였고, 응력해석에도 같은 Code인 ANSYS를 사용하였다.

배관계통의 응력해석에는 PIP-SYS를 사용하였으며 원자로 건물에 대한 내진해석과 응력계산에는 SAP-V-2와 MSAP를 사용하였는데 Creep and Growth 해석이나 내진해석, 응력계산 등에 사용한 Code는 이미 상용화된

전산들이다.

설계개념의 실증실험

다목적연구용은 국내외에서 최초로 설계, 제작하는 원형로의 특성을 가지고 있으므로 새로운 개념이 상용된 분야와 설계 자료의 생산이 필요한 분야에 대해서는 다수의 실증실험이 수행되었다. 연구소에서는 열수력 설계 자료의 생산을 위한 실험이 수행되었고, AECL에서는 노심에서의 냉각수 분포 시험, 반응도 제어 장치의 설계 검증시험 등이 수행되었다. 또한 자연 대류순환 유로를 유지하는데 중요한 부품인 플랩 밸브의 성능 시험도 국내 제작 회사인 삼신밸브(주)에 의해 수행되었다. 노심 열수력 설계에 대한 실험은 다른 자료(「KMRR의 열수력학적 설계를 위한 실증실험」, 원자력학회지 25권 2호, 1993년 6월)에 상세히 기술되어 있으므로 본 절에서는 이 부분에 대해서는 요약 기술하고 여타 부분에 대하여 상술하겠다.

열수력 설계실험

열수력 설계를 위한 실험자료는 다목적연구용과 비슷한 MAPLE-X10을 건조하던 AECL과 공동으로 실험을 수행하거나, AECL로부터 자료를 입수하거나, 연구소 독자적으로 실험을 수행하여 확보하였다. 핵연료봉 열전달 실험이 첫번째 부류에 속하고, 노심 냉각수 상승억제 시험, 핵연

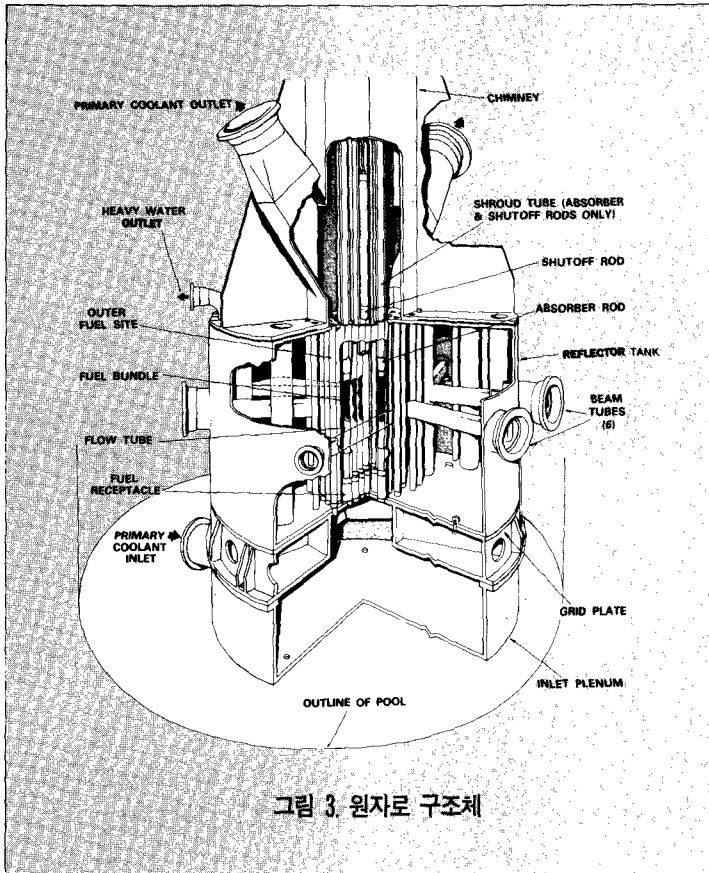


그림 3. 원자로 구조체

료집합체 임계열속 시험, 등이 두 번째 부류에 해당한다. 연구소 자체에서 수행한 실험으로는 집합체 유동시험, LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용한 핵연료집합체 내의 부수로 유속 측정 시험, Reflector Vessel내의 유동장 및 열전달 실험 등을 들 수 있다.

노심에서의 냉각수 분포실험

다목적 연구로의 구조체는 높이 13.4m, 직경 4m의 원통형 수

조의 바닥에 고정된 4단 구조물로서, [그림 3]에서 보는 바와 같이 하부구조로부터 Inlet Plenum, Grid-Plate, Reflector Vessel로 둘러 쌓인 노심, 그리고 냉각수의 Outlet Nozzle이 대칭으로 부착된 Chimney로 구성되어 있다.

수조의 관통부로부터 Inlet Plenum으로 연결된 14인치 구경의 스텐레스 강관을 통해 유입되는 1차 냉각수는 Inlet Plenum 내에서 균등하게 분산되어, 노심의 각 핵연료 Channel을 거치면

서 핵연료를 냉각시키고, Chimney로 나와서 Chimney에 대칭으로 부착된 Outlet Nozzle을 통하여 다시금 수조의 관통부까지 연결된 유로관을 통해 1차 냉각수 계통으로 순환된다.

Inlet Plenum으로 유입된 1차 냉각수는 균등하게 분산되어 31개의 Flow-Tube로 구성된 노심에 유입되어야 한다. 만일 핵연료가 장전된 Flow-Tube에 냉각수가 균등하게 유입되지 못하여 냉각수 유입부족현상(Coolant-Flow Starvation)이 발생하게 되면 핵연료에서 발생한 열을 적절히 제거치 못하게 되므로 노심 내부에 심각한 열수력적 문제를 야기하게 된다. 노심내 Flow-Tube에 냉각수 유입 부족 현상이 일어날 수 있는 가능성은 노심을 통과한 냉각수가 노심상부, 즉 Chimney안에 모아져서 Chimney 양측에 대칭으로 부착된 Outlet Nozzle을 통해 시간당 약 2,500 ton의 냉각수가 유출될 때, Outlet Nozzle 부위에 가까운 곳에 있는 Flow-Tube와 먼곳에 위치한 Flow-Tube를 각기 통과하는 냉각수의 유로에 서로 다른 유동의 간섭을 줄때 발생한다.

이념적인 계산 근거로서 Flow-Tube를 통과하는 냉각수량의 변동은 평균치에서 20% 이내가 되어야 한다는 설계 기준치를 설정하였고, 각 Flow-Tube 내의 냉각수 통과량을 정량적 수치로 분석하기 위해서는 오직 실험적

표1. 원자로 모형에서의 유량분산 측정결과

Site Low		Run 1		Run 2		Run 3		Run 4		Run 5		Final	
		Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow	Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow	Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow	Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow	Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow	Flow (Kg/s)	Ratio to Average Flow
Hexagonal Site	1	8.93	0.96	13.70	0.71	14.00	0.71	14.00	0.70	13.90	0.68	13.43	0.67
	2	9.30	0.99	20.00	1.03	20.10	1.01	20.40	1.02	20.90	1.03	21.12	1.05
	3	9.40	1.01	20.20	1.04	19.20	0.97	20.90	1.04	21.30	1.05	20.97	1.03
	4	9.78	1.05	16.80	0.87	15.70	0.84	17.60	0.88	17.60	0.86	16.69	0.83
	5	9.30	0.99	20.40	1.05	20.10	1.01	20.10	1.00	21.34	1.05	21.00	1.04
	7	9.34	1.00	19.80	1.02	20.50	1.03	20.40	1.02	20.60	1.01	20.13	1.00
	8	9.98	1.07	20.80	1.07	21.30	1.07	21.70	1.08	21.80	1.07	20.92	1.04
	9	9.50	1.02	19.00	0.98	19.80	1.00	20.30	1.01	20.00	0.98	20.95	1.04
	11	9.54	1.02	20.20	1.04	20.70	1.04	21.10	1.05	21.50	1.06	21.02	1.04
	12	9.16	0.98	19.30	1.00	20.20	1.02	19.40	0.97	20.30	1.00	20.87	1.04
	15	8.90	0.95	20.00	1.03	21.00	1.06	20.80	1.04	20.94	1.03	20.83	1.04
	16	8.70	0.93	20.50	1.06	21.20	1.07	21.30	1.06	21.50	1.06	21.26	1.06
	18	9.54	1.02	20.40	1.05	21.40	1.08	21.30	1.06	21.60	1.06	21.12	1.05
	IR1	9.80	1.05	19.80	1.02	20.70	1.04	21.30	1.04	20.90	1.03	20.44	1.02
	CT	9.03	0.97	20.00	1.03	20.90	1.05	20.80	1.04	21.10	1.04	21.05	1.05
	Circular Site	S4	5.75	0.89	12.70	1.07	13.20	1.09	12.90	1.06	13.60	1.10	14.56
C1		5.80	0.90	11.90	1.01	12.30	1.02	12.00	0.99	12.30	0.99	13.60	0.97
C4		6.97	1.08	10.70	0.91	10.90	0.90	10.40	0.86	11.40	0.92	14.50	1.04
S3		6.98	1.08	14.00	1.18	13.20	1.09	14.80	1.22	14.70	1.18	14.78	1.06
S1		6.90	1.06	9.80	0.83	10.80	0.89	10.80	0.89	10.10	0.81	12.34	0.88

측정만이 요구되었다. 아울러 다량의 냉각수가 Chimney안에 모아져서 Outlet Nozzle을 통해 빠른 속도로 유출될때 Chimney 내에서의 냉각수 유동현황과 이로 인해 원자로의 반응도를 제어하는 제어봉의 정밀성(Fine-Control, 0.02mm Per Step)에 어떤 영향을 미칠것인가는 반드시 실험을 통해 실측하고 검증할 수밖에 없었다.

이와 같은 실증실험을 수행하기 위해서 원자로 본체의 모형을 어느정도의 크기로 할 것인가도 연구과제가 되었다. 실험 실측치가 실증적 자료로 활용될 수 있기 위해서는 독특한 유로를 통과

하는 냉각수의 유량측정과 유동측정은 실제 크기가 아니면 그만큼 실험 실측치에 예측할수 없는 오차가 개입되기 때문에 다목적연구로의 본체와 같은 크기로 실험장치를 만드는 것이 가장 바람직하였다.

실험장치는 다목적연구로와 같은 실제 크기로 하였고 2개의 Loop로 구성된 1차 냉각수 계통을 1 Loop로 구성하여 실제 크기의 절반 노심(Full-Size Half Core)으로 구성 하였다. 6개에 걸친 실험 실측치는 [표 1]과 같으며 Hexagonal-Type(육각형)의 Flow-Tube 쪽에서는 2개가, Circular-Type(원형)의 Flow-Tube

쪽에서는 1개가 평균유량치 이하로 나타났으나 2 Loop으로 구성된 실제의 원자로 구조에 비해서 실험용 설비는 1 Loop 및 Half-Core로 했기 때문에 구조적 차이로 유로가 영향을 받은 것으로 평가되어 원자로 본구조에서는 문제가 없는 것으로 판단하게 되었다. 이와 같은 판단을 하게된 근거는 다목적연구로와 비슷한 노심구조를 갖고 있는 Maple-X10 원자로에서 원자로와 똑같은 Size로 실험설비를 제작하여 Flow-Tube의 냉각수 분산현상을 실측해본 결과 Flow-Tube의 위치에 따른 냉각수 유량의 분산치가 평균유량의 10% 이내가 되고

있음을 확인하였기 때문이다.

반응도 제어장치(Reactivity Control Unit, R. C. U)의 설계 및 검증시험

다목적연구로에 있어서 RCU라 함은 연구로의 출력을 제어하는 기능을 가진 제어봉장치(Control Absorber Unit, CA-Unit)와 연구로를 비상정지시키는 기능을 가진 정지봉장치(Shut off Unit, SO-Unit)를 말한다. 이들 2개의 장치는 개방수조내에 수중 설치된 원자로 구조체인 Chimney 상부에 장착되어 실험종사자가 수조상부의 원자로심 주변에서 연구실험을 하는 중에도 아무런 위험부담이나 실험활동에 지장을 주지 않도록 설계되었다. 제어/정지봉의 구조적 사양이나 구동 개념은 Compact Core(밀집노심)에의 정확한 삽입기능과 중성자속 변동이 거의 없도록 하는 정밀한 제어기능과, 높은 중성자속의 원자로에 이상이 생겼을 때 신속히 원자로를 정지시킬 수 있도록 하는 긴급 정지기능 때문에 기존의 발전로와는 판이한 초유의 구조적 개념과 특성을 지니고 있다. 이처럼 다목적연구로의 반응도 제어장치는 Proto-Type(원형) 설계로서, 성능시험(Performance Test), 내구성 시험(Endurance Test) 및 설계 요구조건인 내진시험(Seismic Test)을 통해 설계검증을 전반적으로 실시한 뒤 종합 결과에 따라 제작설

계가 확정된다. 원자로 제어계통의 설계에 경험과 실적이 있는 AECL은 개념설계로 부터 상세설계까지 진척시켜, 시제품을 다목적연구로 모형의 Chimney 상부에 장착하고, 성능 시험을 수행하는 과정에서 정지봉(또는 제어봉), Carriage/Track 및 원형유동관(Circular Flow Tube)의 제작오차, 설치정렬오차, 원자로 운전중의 열팽창에 의한 정렬상태 변화 등이 복합적으로 나타날 경우, 정지봉 및 제어봉 장치의 성능과 마모면에서 문제점이 있음을 발견하였다. 제기된 문제점들을 검토. 해결하기 위해 AECL-CA-NDU설계 Group은 능력있고 설계 및 제작에 경험이 많은 전문가들을 각 분야에서 차출하여 1991년 2월에 Task Force Team을 구성하였으며, 설계개념과 실험결과를 전반적으로 재검토한 후 제어/정지봉이 Flow-Tube에 삽입될 때 Self-alignment 개념을 적용토록 하고, 구동장치를 완전히 재설계토록 확정하였다(1991. 5). 재설계에서는 제어/정지봉을 Guide하는 Guide Shroud를 추가하게 되었고 Guide Shroud와 Flow-Tube는 제어/정지봉과 빈번한 마찰 접촉이 있게 되므로 원자로 수명기간 동안의 내마모성을 해결코져 이들의 재질인 Zircaloy-4에 Ceramic Layer를 형성하는 Oxidizing Technology을 새롭게 응용하였다.

상기한 것처럼, 다목적연구로의 반응도 제어장치는 초기의 설계개념으로 시제되어 실험하던중 개념의 부적합성이 발견되므로서 재설계를 착수하게 되었고, 새로운 설계개념으로 구동장치를 다시금 시제하여 성능 시험중 부분적인 문제점들이 다시금 나타나게 되었다. 또한 재설계로 시제된 반응도 제어장치는 성능시험, 내구성 시험, 내진시험 등 1년 9개월 동안의 시험을 통해서 부품 하나하나의 적합성까지 면밀하게 점검되었다.

플랩 밸브의 성능시험

다목적연구로의 정상운전 및 사고시 원자로와 일차 냉각펌프가 정지된 후 장기적인 노심 잔열제거는 일차 냉각 계통 회로를 통한 자연 대류 냉각과 수조를 통한 자연 대류 냉각의 두가지 방법으로 이루어진다. 수조를 통한 자연 대류 냉각은 이차 냉각 계통이 정지되어 더 이상 열교환기가 열제거원의 역할을 할 수 없을때 노심 입구 배관에 위치한 플랩밸브(Flap Valve)가 개방되어 이루어진다.

플랩밸브는 역지 밸브로서 0~100Pa 사이의 미세차압에서 밸브가 열려야 하기 때문에 기술적으로 매우 어려운 사항이 제작의 요구조건이었다. 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 제작회사를 찾는 일이 매우 힘들었으나 국내 밸브 업체인 삼신(주)이 제

작을 담당하게 되었다. 밸브는 Counter Weight가 Housing안에 내장된 특이한 형태로 설계되었으나 가장 어려운 부분은 성능시험이었다.

연구소나 삼신(주) 측 모두 처음 시도 해보는 작업으로서 어려움이 많았으나 500여회에 이르는 수두차와 온도차를 이용한 성능시험을 무사히 마칠수 있었다. 이 과정에서 연구소는 내진해석, 성능시험 방법등에 대하여 조언을 하였고 삼신(주)도 연구소원들의 제작, 시험, 해석에 관련된 요구조건을 만족시키는데 최선을 다하였다.

제작과정에서의 기술개발

다목적연구로의 본체와 반응도 제어장치(Reactivity Control Unit)를 설계하여 검증하는 과정에서 재설계하여만 할 부분들이 발견되었고, 이들을 다시 설계하여 검증하는 과정에서 내마모성 문제가 대두되어 이를 해결코자 Zircaloy Material의 Oxidizing을 통한 Seramic Layer을 표면에 형성시키는 기술이 적용 되었다.

또한 Chimney의 재료는 1인치 두께의 알루미늄 6061 T6를 사용하였는데, 알루미늄의 용접작업 시 고열로 인한 부분 팽창과 급속한 전열로 인한 표면의 냉각으로 용접후 빈번한 용접 결함(균열)이 발생하였으나 마침내 전열 관리로 용접결함을 해결할 수 있었다. 원자로 본체는 4단으로 구

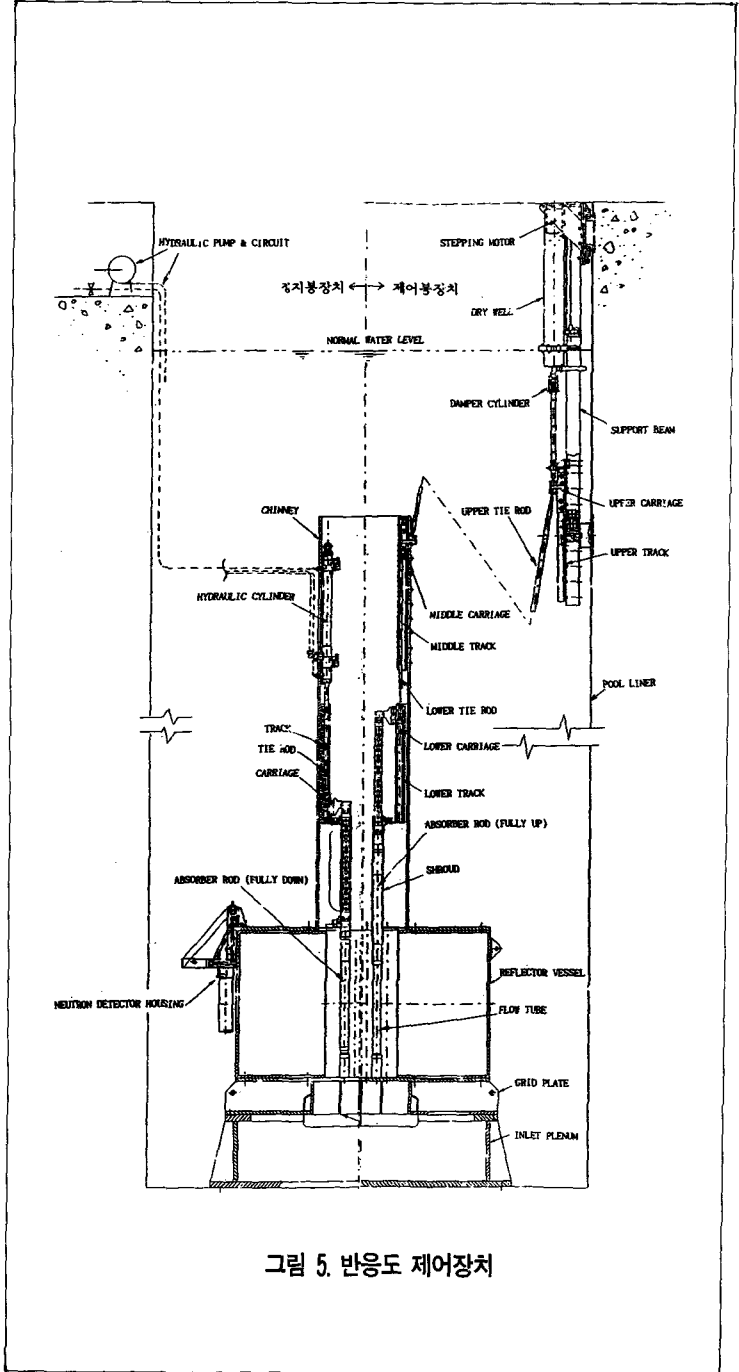


그림 5. 반응도 제어장치

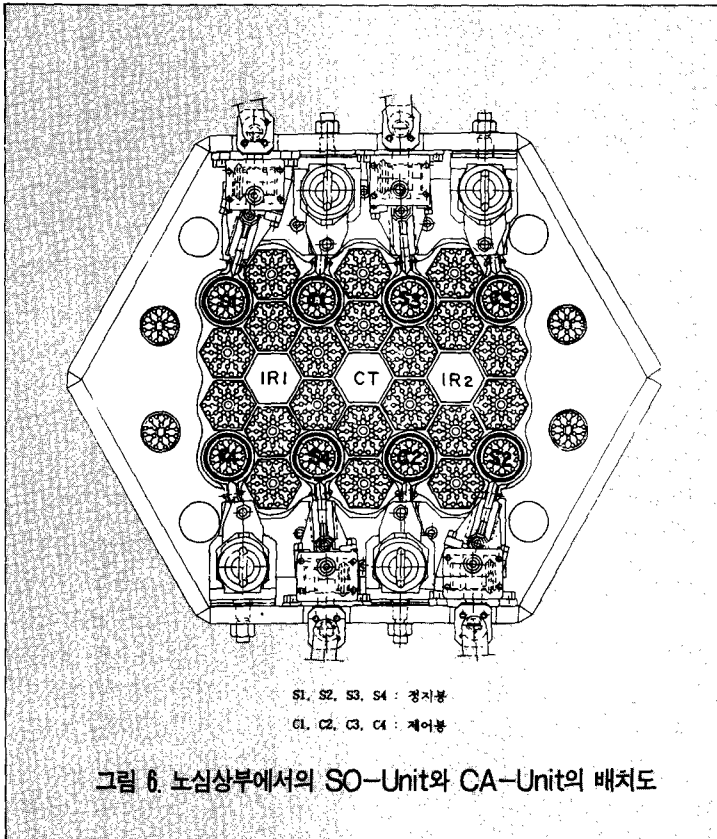


그림 6. 노심상부에서의 SO-Unit와 CA-Unit의 배치도

성되어 있어 연구로를 이용한 실험의 정밀성과 고질의 중성자속을 유지키 위하여 극도로 한정된 허용공차내에서 조립되어야만 하는 연구로의 특성때문에, 각 구조품들을 미리 조립해 보는 가조립 과정을 채택하였다. 가조립 작업을 통해 제작시 간과했던 사소한 부분들이 조립의 정밀성을 해치고 있는 사항이 파악되어 다시금 마무리 공정을 되풀이하게 되었다. 정밀성을 요하는 부분마다 미리 Marking하여 건설현장에서의 설치공사에 효율성과 정교성을

유지시키도록 한 일, 고가의 알루미늄재질로 된 Sealing Gasket의 누설시험을 위해 Beam Tube Embedment 7개에 사용되는 Aluminium Gasket을 전부 시험할 경우 표면의 변형으로 다시 사용할 수 없는 어려움이 있으므로 이문제를 해결코저 Gasket을 압착시키는 플랜지면의 Serration 상태를 먼저 점검해서 Serration 상태가 가장 불량한 Beam Tube Embedment를 선정하여 Gasket을 부착한채 플랜지를 조이고 그곳에 헬륨 누설 실

험을 실시하여 나머지 6개의 Flange Gasket의 건전성까지 판정하는 방법을 택하게 되일, Gasket이 플랜지면에 정확하게 놓일 수 있도록 알맞은 두께의 Shim을 6개씩 Seal Gasket 주변에 부착하여 설치 조립시 시행착오를 제거한 일들은 제작현황에서 개발되고 채택된 기술들이다.

Zircaloy Material의 Oxidization

대량의 1차 냉각수(시간당 약 2,500 ton)가 다목적연구로의 노심을 통과하여 Chimney에 부착된 Outlet Nozzle을 통해 1차 냉각수 순환계통으로 유입되므로 Outlet Nozzle 부위를 통해 노심으로 삽입되는 제어봉과 정지봉에 심한 진동 현상을 일으키게 되고, 이로 인해서 정지봉/정지봉이 노심에 정확하게 삽입되지 못하게 되며 설령 삽입된 후에도 노심에 진동현상을 전이하게 되므로 RCU의 재설계 개념에서는 진동 현상들을 막고자 Outlet Nozzle 부위에 Guide Shroud (8개)를 설치하였고, 봉들이 Shroud 내부를 통과토록 하였다. 봉과 Shroud 내부와의 접촉으로 마모현상이 발생케 되나 봉은 일정기간이 지나면 교체되지만 Guide Shroud는 영구시설로서 유지해야 한다. 따라서 Guide Shroud 내부와 외부표면을 Oxidizing하여 $0.046 \pm 0.005\text{mm}$ 두께의 균질한

Seramic Layer를 형성시켜 마모 현상을 방지하였다.

제어봉과 정지봉이 Guide Shroud를 통해 원형의 Flow-Tube (8개)로 삽입될 때에도 봉들이 경직. 고정된 상태로 삽입하게 되면 약간의 수직적 편차만 발생하여도 Flow-Tube와 부딪치게 되어 있어 구조적 건전성이 장기간의 운전기간 동안 유지될 수 없기 때문에 제어봉과 정지봉을 움직이게 하는 Carriage와 이들 봉과의 연결을 유니버설 조인트로 하였고 제어봉/정지봉 자체는 하프늄 윗부분 두곳에 유니버설 조인트 개념과 같은 Gimbol Joint를 도입하였다. 따라서 봉들이 옆으로 움직일 수 있는 약간의 여유를 갖게 함으로써 Flow-Tube에 삽입될 때 Self-Align 되도록 하여 삽입시에 무리한 마찰력이 발생치 않도록 하였다. 또한 하프늄 부분이 Shroud나 Flow Tube에 직접 마모되지 않도록 하기위해 지르칼로이 Bearing Pad를 정지봉/제어봉 하단에 부착하였다. Flow-Tube의 외부 표면도 마모를 방지하기 위하여 Oxidizing으로 Ceramic Layer를 형성시켰다. [그림 6]은 노심상부에서 본 SO-Unit 및 CA-Unit의 배치도이다.

Zircaloy-2와 Zircaloy-4의 Oxidizing으로 표면에 형성되는 Oxidized Layer는 Ceramic Layer로서 여러가지 용도에 활용되고 있는데

① 냉각수나 온수에서 내부식성 피막으로 사용되며,

② 압력관의 단열재 기능을 가지며,

③ 방사선 준위가 높은 곳에서 사용되는 유기물질의 전기절연 효과를 주며,

④ 수중에서 기계적 접촉부위에 내마모성 피막으로 사용되며,

⑤ 얇은 판의 강도를 높여주는 데 사용되며,

⑥ 기계적 마찰이 심한 Valve의 Stem에 사용된다.

Seramic Layer의 두께는 Oxidizing 시간에 비례한다. 650°C의 온도를 장기간 지속해서 유지하면 두꺼운 층(0.23 mm까지)의 Layer가 형성되고 짧은 기간동안 유지하면 얇은층(0.013 mm)의 Layer가 형성 되므로 Ceramic Layer를 어떠한 용도에 사용할 것인가에 따라 두께를 결정하게 된다. 예로서 단열 목적이라면 가장 두꺼운 Layer가 필요하다. 650°C의 온도로 약 48시간동안 지속하면 0.076mm의 Oxidized Layer가 형성된다고 한다. 다목적연구로의 Guide Shroud와 Flow-Tube는 0.046 ± 0.005mm Ceramic Layer를 형성시켰다.

Zircaloy Material을 Oxidizing 하려면 먼저 Trichloro-ethylene 용액으로 Zircaloy를 탈지하여 기름기가 전연 없도록 하고 완전하게 건조시킨 후에 비누를 사용한 깨끗한 물로 Trichloro-ethylene 을 완벽하게 제거시키도록 한다.

그리고 Demi Water로 세척한 후에 뜨거운 공기로 건조시킨다. 이렇게 한 다음에 Zircaloy 표면을 글라스 블라스팅(Glass Blasting) 하여 전 표면이 균질한 상태가 되도록 하고 ±0.2mg의 오차까지 무게를 측정하고 전체 표면(Oxidizing 하게 될)을 dm² 까지 계산토록 한다. 여기서 유의해야 할 사항은 Furnace 내에서 Zircaloy의 온도차가 전표면에서 생기지 않도록 해야 하며 Zircaloy를 중심해서 Furnace를 회전토록 함이 바람직스럽다. Oxidizing 과정에서 유의할 사항은 Electric Furnace를 이용토록 하고 Oxidization이 끝난 후 Furnace에서 꺼낼 때에도 Furnace는 Oxidizing 온도 650°C를 그대로 유지토록 해야 하고 Furnace내에서 Zircaloy를 다른 금속과 접촉되지 않도록 해야 하며 Furnace안에서 Zircaloy를 받치거나 지지할 때에도 깨끗한 불활성의 내화벽돌을 사용토록 해야 한다. Oxidization 후에 Zircaloy의 무게를 다시 측정해서 Layer형성으로 인한 증가된 중량을 g/dm²라는 단위로 측정토록 한다. Oxidizing 공정후 증가된 중량 1g/dm²는 Layer Thickness 0.00276 inch에 해당된다.

원자로 구조체의 가조립

다목적연구로의 구조체는 4단으로 구성되어 있는데 밑에서부터 Inlet Plenum, Grid-Plate,

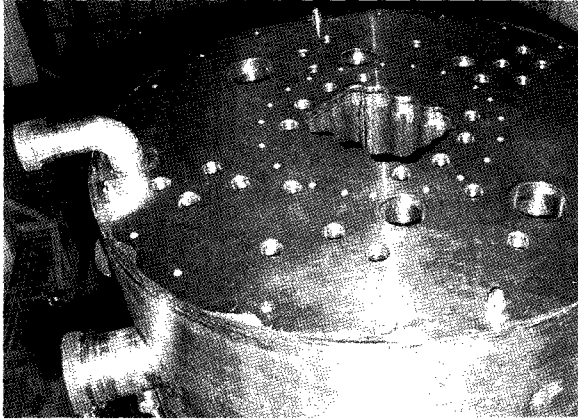


그림 7. 완제 Reflector Vessel

Reflector Vessel, 그리고 Chimney로 되어 있고 Chimney 내부 벽면에 반응도 제어장치(Reactivity control Unit)가 장착된다. 그러나 조립작업의 내용으로 볼 때 구조체중에서 Reflector Vessel의 중심부에 노심을 이루고 있는 31개의 Flow-Tube는 Grid-Plate에 부착된 Receptacle 31개와 나사형으로 조립된다.

다목적연구로의 구조체 가운데 작업공정이 가장 어렵고 까다로운 분야는 Reflector Vessel 이었다. Vessel 옆면에는 7개의 중성자 Beam Guide Tube가 Vessel 내부에서 부터 연결되어야 하고 33개의 크고 작은 수직공이 Vessel 상부에서 하부로 설치되어야 한다.

이 모든 구멍들은 연구로를 이용하기 위한 실험공들이므로 직진도와 직각도에 정밀성을 유지해야만 한다. 또한 Reflector 중심부의 Inner Wall은 파상형의 굴곡을 이루고 있다. 이 모든 것들이 Zircaloy-4로 만들어져야 하기 때문에 특수용접을 위한

Clean-Room에서만 작업이 수행되어야 하고 실험공마다 정확한 치수를 요구하고 있으므로 정밀성과 정교성이 지켜져야만 하였다. GEC-ALSTHOM사는 Canada에서도 CANDU 원자로 Vessel 전문 제작업체로서 월성-1, 2 및 3호기의 Vessel을 제작하고 있었으나 KMRR Reflector Vessel 제작이 훨씬 어렵고 까다로움을 시인하고 결국 Inner Wall과 Beam Guide Tube를 특수금속의 가공에 전문성을 지닌 불란서의 BSL사에 재발주하였다. BSL사는 파리 남쪽 약 140km 떨어진 SOISSONS 이라는 곳에 위치하고 있으며 지르칼로이, 티타늄, 알루미늄, 스텔레스 등 특수금속 가공에 전문적 기술을 지닌 회사로서 방사선 폐기물 처리시설의 전문제작업체이며 Europe Space Agency의 특수부품을 제작하고 있다. BSL에서도 Inner Wall을 파상형으로 제작하는 과정에서 많은 어려움은 겪었는데 Zircaloy의 밴딩시 절곡각이 어느 한계치를 넘게 되면

열처리를 해도 표면에 균열이 발생하기 때문이었다. BSL이 최종적으로 납품한 Inner Wall과 Beam Guide Tube(7개)는 GEC-ALSTHOM가 Reflector Vessel 내부에 용접부착하였다. [그림 7]은 완제된 Reflector Vessel의 모습이다. Reflector Vessel은 GEC-ALSTHOM사에서 제작하였지만 Gride-Plate, Receptacle, Inlet Plenum과 Chimney는 Quebec Tool사에서 제작하였고 Flow-Tube는 Nu-Tech사에서 제작하였다. 그러므로 3회에서 제작한 구조품들을 한곳에 모아 미리 조립해 봄으로써 상호간의 간섭 부분들을 얼마나 정확하게 맞추었는지 반드시 확인해야만 하였다.

Trial Assembly 작업 과정에서 크고 작은 많은 문제점들로 노출되었다. 제작 도면상에 표시할 수 없었던 부분들이 그 실례로서 Chimney를 Reflector 상부에 조립하는 볼트구멍이 진위치도가 맞지 않아 Chimney의 볼트구멍을 2mm씩 키워야 하였고 Grid-Plate의 Stiffness 용접부위의 용접비이드를 사상해야만 볼트 조립이 가능함을 발견케 되었고, NDH(Neutron Detector Housing)장치 3개를 Chimney의 Base Plate에 설치토록 되어 있으나 Base Plate를 스폴 페이싱(국부면 처리)하여야만 정확하게 설치하게 됨을 알게 되었다. 또한 Reflector Vessel에 수직으로 설치된

Cold Neutron Source Hole과 Grid-Plate Hole의 진위치도가 맞지 않아 Grid-Plate 구멍크기를 키워야 했고, Inlet Plenum의 Anchor 볼트면을 스폴 페이스링 해야만 함을 발견하였으며, Flow-Tube를 Receptacle에 전부 조립하였을때 2개의 Receptacle이 Flow-Tube와 동심이 맞지 않아 Flow Tube가 충분히 조립되지 않아 Receptacle 상단 내부를 수정하여 동심도를 이루도록 하였다. 최종적으로는 RCU를 Chimney Jig Plate에 장착하여 Track 및 Bracket 설치용 볼트구멍 위치의 타당성을 확인하였고, 또한 Chimney 벽면과 RCU Track/Bracket 사이에 설치된 Shim의 두께에 대한 설계의 타당성을 입증하였다.

제작도면을 AECL이 자세히 점검하였고 간접 사항을 도면상에 기술하였으며 제작업체들도 많은 도면을 수정하였으나 결국 최종제품을 예비 조립했을 때 여러곳에서 상기한 문제점들이 나타나남을 보게 되었고, 이들 하나하나를 기록하면서 제작기술을 쌓아가게 된것이다. 이외에도 술한 기술적 의견 차이 속에서 서로가 새로운 아이디어를 내놓아 다시 실험해 보면서 제작자/설계자가 함께 배워가는 현상은 오직 다목적연구로의 Proto-Type 특성에서만 체험할 수 있었던 고통이요, 기쁨이요, 보람이 되었다.

3. 결론

역사는 우리 인간에게 깊은 교훈을 주고 있다. 우리는 새로운 것을 만들어내고 개척해 낸 사람들의 이름을 역사속에서 많이 보았고, 그들이 해놓은 것에 대한 사실적 지식만으로 족하였지 그들이 겪은 상황에 대해서는 알려하지 않았다. 이제 그 무관심의 보상을 뒤늦게 체험한 느낌이다. 남을 이해하고 그들의 고통을 나의 고통으로 함께 느낀다고 하는 것은 진실된 체험이 없이는 본질적인 면에서 볼 때 위선적 동정이요 거짓된 자세인 것이다. 이같은 거짓된 자세들이 거두어질 때 진실에 대한 바른 인식속에서 참다운 발전과 창조의 틀이 형성되리라 믿는다.

우리나라는 공업화의 조급한 출발속에서 배우고 익히고 모방하며 비슷하게 만드는 일에 정신이 없었다. 새로운 것을 해본다는 것은 시간적으로나 경제적으로나 정신적인 면에서 비현실적인 착상이요 실현가능성이 희박한 꿈처럼 느껴졌다.

다목적연구로는 꿈의 실현인 것이다. 우리의 소망인 기술향상의 꿈을 실현시켜보고자 우리들이 소유한 기술능력을 스스로 평가하고 정리해가면서 의욕적으로 착수하고 추구하여온 연구로 건조사업은 설계개념부터 실험을 통해 실증해가면서 기본설계로

정리하고 상세설계로 제작된 것을 성능시험을 통해 다시금 상세설계/제작설계를 확정해가는 매 단계마다 불확정속에서 확정 가능성을 모색해가며 그 확정을 쌓아간 Proto-Type(원형)의 전형적 특성을 지닌 개발사업이었다. 지금까지 국내에 도입되고 설치된 원자력 설비들은 대개가 이미 기술기준, 분석 Model과 방법 절차 등이 확정되어 있어서 처음부터 끝까지 마치 정해진 궤도를 달리듯 일사불란한 업무의 흐름으로 정해진 업무량과 일정에 맞추어 일해온 작업환경으로는 연구로 개발의 의미가 이해되지 않을 것이다. 이제 다목적연구로 사업은 개념설계에서부터 기본/상세설계에 이르기까지 확립된 설계방법, 설계해석 및 검증체제를 바탕으로 앞으로 수행될 연구로의 시운전 및 성능시험을 총괄적으로 분석하여 다목적/다기능의 연구로로 활용되도록 마무리 해야 한다.

아울러 다목적연구로가 연구로 활용설비들의 설계 및 설치 기준 자료가 되게하며 나아가서는 국제적 공동이용의 근거를 제공하며 동시에 연구용원자로의 국제 시장에 독특한 연구 Model로서 제시토록 하여야 하겠다. 이와 같이 기술의 확립에서 부터 기술의 정착, 나아가서는 기술의 이전을 위해 다목적연구로의 기술진에게는 또다른 도전이 요청되고 있는 것이다.