

한현수, 조운갑, 홍순복, 박울재, 김선덕

한국원자력연구소 하나로이용연구단

RI 생산을 위한 하나로 노심내 조사장비 개발

1. 서론

방사성동위원소 생산은 일반적으로 자연에 존재하는 표적물질에 입자를 조사시켜 핵반응을 유발시키는 것으로부터 출발하며 주로 원자로와 가속기에 의해서 이루어진다. 가속기와 원자로 어느 경우나 표적 조사에 관한 기술이 RI(Radioisotope)의 생산량과 제품의 품질을 좌우하는 결정적인 요인 중의 하나다. 하나로는 중성자를 발생시키는 장치로 수직조사공이 25개(표 1) 있으며 IP(Irradiation pipe) 조사공은 I, S 두 가지 형태의 조사 튜브와 IP rig를 장착한 상태에서 표준조사용기를, HTS(Hydraulic transfer system)조사공은 HTS용 조사용기를 사용하여 RI생산에 활용하고 있으나 OR(Outer region), IR(Inner region), CT(Central thimble) 조사공은 조사장비가 개발되지 않아 RI 생산에 활용되지 못하고 있었다. 노심외 조사공인 OR, IR, CT 조사공은 상대적으로 열외중성

자와 속중성자의 선속이 높아 고품위 RI를 생산하는데 다른 조사공보다 효과적이다. 따라서 높은 중성자속에서만 생산할 수 있는 고비 방사능 RI 수요 증가에 대비하여 노심내 조사공과 노심 주변의 조사공 활용이 필수적이다.

한국원자력연구소는 원자력연구개발 중장기 사업의 “RI제조 및 이용기술 개발” 과제에서 중성자속이 $2 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 이상인 OR 조사공을 사용할 수 있는 조사장비를 개발하여 고품위 방사성동위원소 제조와 기타 시료의 중성자조사에 이용하여 하나로 활용성을 높이고자 하였다. 시제품을 제작하여 여러 가지 시험을 통해 보완·수정한 후 최종 제품화한 OR rig를 현재 RI 생산에 활용하고 있어서 소개하고자 한다.

앞으로 고비방사성 단반감기 핵종의 생산을 위해서 노심 또는 노심 주위의 조사공에서 원자로 운전중 표적 입인출이 가능한 장치와 보다 높은 속중성자속을 효과적으로 활용하기 위한 IR, CT 조사공을 이용할 수 있는 장비도 개발할 예정이다.

표 1. 『하나로』내 수직 조사공

조사공 위치	명칭	수량	열중성자다발밀도 (n/cm ² .sec)
노심내부 (Inner core)	CT	1	5.3×10^{14}
	IR	2	$4.6-7 \times 10^{14}$
노심외부 (Outer core)	OR	4	$2.2-3 \times 10^{14}$
반사체영역 (Reflector region)	HTS	1	8.8×10^{13}
	IP(I형)	5	$0.34-1.6 \times 10^{14}$
	IP(S형)	7	$0.4-1.9 \times 10^{14}$
	IP(Rig)	5	$0.24-1.5 \times 10^{14}$

2. 본론

가. 설계 및 구조

OR rig는 『하나로』에서 상대적으로 중성자 속이 높은 노심 주변의 OR 조사공에 장착되어 아래에서 위로 강제순환하는 1차 냉각수의 저항을 받으면서 각종 표적을 조사하는 장치이다. 따라서 조사용기가 장착된 상태로 조사공에 고정하였을 때 적정 유로를 확보하고, 열유동에 의한 진동을 허용값 이하로 유지하도록 하였다. 특히, 장착된 OR rig가 조사공과 일정한 틈새를 유지하도록 지지용 스프링을 사용하고, 조사 중에 이탈하거나 내장된 조사용기가 부상하는 위험이 발생되지 않도록 하부에 잠금장치를 부착하였다. 장치의 안전성과 견전성을 확보하기 위해 시제품을 제작하여 이를 시험한 후 설계요건과 기능을 만족하도록 제작방법, 간섭사항, 정밀도, 내구성을 보완하여 설계를 완성하였다.

OR rig는 상부의 캡, 실린더형 몸체, 하부의 잠금장치로 나누어져 있다. (그림 1. 참조)

상부 캡은 기존의 핵연료 취급기구로 잡을

수 있는 취급고리, 회전력 전달 장치, 냉각용 구멍, 지지용 스프링 등으로 구성되어 있다. 캡의 중앙에는 내벽을 위에서 아래 방향으로 톱니 모양의 원통형 홈을 내어 취급고리에 가해지는 회전력을 위치에 따라 전달 또는 소멸할 수 있게 한 구조로 설계하였다. 즉, 캡의 중심축 윗 부분에 스프링을 끼워 정상적으로 조립된 상태에서는 상부 캡에만 회전력이 전달되고 아래 방향으로 35 kgf 이상의 힘을 가하면 상부 캡의 회전력을 전달하는 치차는 분리되고 몸체의 내벽에 톱니 모양으로 가공한 연결치차가 모체의 안내치차와 결합하여 회전력이 몸체에 전달될 수 있도록 하였다. 취급고리의 하부는 캡이나 몸체에 회전력 전달을 위한 치차가 축과 나란히 조립되어 있으며, 상부는 핵연료 취급기구와 연결 조립되도록 되어있는 OR rig의 구동부로 핵연료 상부와 동일한 구조이다.

캡의 중앙 외부는 몸체와 조립하기 위한 나사가 있다. 냉각수가 흐르도록 캡 내부를 관통하는 $\varnothing 6$ 의 구멍을 외곽에 12개 배치하고 상부 가장자리에는 고리형의 스프링이 120° 간격으로 3개를 부착하여 OR rig가 진동하는

것을 흡수하고 조사공 벽과 일정한 가격을 유지하도록 하였다.

몸체는 가공성과 사용 후 폐기를 고려하여 알루미늄으로 제작하였다. 길이는 조사용기 4개를 수용할 수 있도록 68cm로 하였으며 밑부분에 8개의 구멍을 내어 1차 냉각수의 유로를 확보하고 조사용기를 위로 밀어 올려 고정시키는 스프링이 설치되어 있다. 상부 캡과는 나사 결합의 구조로 되어 조사용기의 장입·인출시 캡을 열고 닫을 수 있게 하였다. 특히 몸체의 내벽에 톱니 모양의 홈을 가진 안내 차차를 만들어 상부 캡에 가해지는 회전력이 몸체에 전달될 수 있는 구조로 하여 rig 전체의 조립과 장착에 활용할 뿐 아니라 조사용기가 장착된 상태에서 적정 유로를 확보하고, 열유동에 의한 진동을 허용값 이하로 유지하도록 하였다. 그리고 몸체의 밑 부분은 팔각으로 가공하여 상부 캡의 조립·해체를 쉽게하고 잠금장치도 부착하였다.

잠금장치는 핵연료 다발(18-봉)의 하부와 기능은 같으나 모양을 단순화하였다. 상부 캡을 35 kgf의 힘으로 눌러 고정판의 스프링이 압착된 상태에서 시계방향으로 90° 회전시키면 조사공의 고정장치에 rig가 장착되고 탈착할 때는 역순으로 장착할 때와 같은 힘으로 눌러 반시계방향으로 90° 회전시키면 고정장치로부터 분리시킬 수 있도록 되어 있다.

나. 제작

OR rig는 하나로 노심 주변의 높은 방사선 환경에서 방사선손상으로 인해 성능이 저하되지 않아야 하므로 제작부품의 재료선택은 중성자 흡수단면적이 작고 중성자 흡수로 인해 발생하는 감마선에너지가 낮거나 반감기가 짧

은 재료를 사용해야 한다.

이를 위해 캡솔하부 고정단과 상부캡의 재료는 SUS304를 사용하였다. OR rig 몸체는 알루미늄을 사용하였고 내부 스프링은 고온 및 높은 중성자속 환경에서 내구성이 우수한 inconel-750을 사용하였다. 제작은 외부에 의뢰하여 40개를 제작하였으며 부품구입, 기계가공, 용접, 조립 등 OR rig의 전 제작공정은 요구기술사양을 만족시키도록 사전에 승인받은 제작자 표준공정에 따라 수행하였다. (사진 1. 참조)

OR rig장비는 『하나로』노심 주변에 위치하여 높은 방사선에 노출되어 사용되므로, 장비의 안전성은 물론 내구성이나 건전성이 확보되어야 하므로, 이를 보증하기 위해 설계, 제작, 원자로내 이용 등에 원자력관련 품질등급 "T" 등급을 적용하였으며, 모든 장비의 설계, 제작, 시험검사 업무 및 재료와 부품은 ASME, ASTM, ANSI, AWS, JIS, KS 규격에 따라 수행되었다.

다. 발열량 계산 및 시험

원자력연구소 연구로기술개발실에 의뢰하여 제작하려는 OR rig를 사용하여 방사성동위원소 생산표적을 장전하여 원자로에서 조사할 때 표적과 Al 원통에서 발생하는 방사선에 의한 발열량을 계산하였다. 발열량은 몬테카를로 전산코드인 MCNP4B를 이용하여 계산하였고 MoO₃, TeO₂, SrO, Ir, Al 표적을 대상으로 중성자와 감마선에 의한 발열량을 각각 계산하여 합한 것을 총 발열량으로 하였으며 계산결과 총 발열량은 2.3-9.4 W/g으로 정상적인 하나로 운전조건에서 표적냉각에 문제가 없음을 알 수 있었다.

시험용으로 제작된 OR rig는 조사안전성을 검증하기 위하여 원자력연구소 열수력안전연구팀에 열유동 및 진동시험 의뢰하였다. 원자로를 안전하게 운전하려면 OR 조사공에 장착된 모의 핵연료 다발을 뽑아내고 그 자리에 OR rig를 장착하였을 때 통과 유량이 핵연료 다발(18-봉)을 장착한 경우와 같은 유량인 12.7 kg/sec이하로 유지하여 다른 핵연료 채널의 유량이 줄어들지 않아야 하고, 1차 냉각수 유동에 따른 진동을 허용값 이하로 억제할 수 있어야 한다. OR rig가 이와 같은 조건을 만족할 수 있는 구조임을 증명하기 위하여 상온 상압 유체유동 실험장치인 Cold Test Loop에서 하나로의 운전조건을 재현하여 압력강하실험 및 진동실험을 수행하였다.

그 결과 유량 1.8 kg/s 조건에서 압력강하는 약 200 kPa이었고 최대 진동범위는 약 $6\mu\text{m}$ 이하로 하나로의 운전제한조건을 만족시켰다.

라. 중성자 조사시험

제작된 OR rig는 규격 검사와 엄격한 제품질검사를 거친 후 하나로 OR 조사공에의 입·인출, 작업수조 내에 설치된 작업대에서의 rig 결합 및 해체 등의 현장시험을 수행하였다. Rig를 사용한 중성자조사는 핵연료 취급기구를 사용하여 미리 작성한 시험 절차서에 따라 다음과 같이 수행하였다. 제작된 rig를 작업수조의 고정 장치에 안착시킨 후, 핵연료 취급기구로 취급고리를 붙잡아 위에서 하중을 가하지 않는 상태에서 반시계 방향으로 돌려 캡을 열고, 조사용기 4개를 순차적으로 넣는다. 조사용기 장착이 완료되면 핵연료 취급기구에 매달려있는 상부 캡을 몸체와 결합

위치에 놓고, 나사를 시계방향으로 돌려 조립한다. 이때 위에서 하중을 가하면 회전력이 캡에 전달되지 않고 몸체에 전달되므로 주의를 요한다. 조립이 완료된 rig를 작업수조에서 노심으로 옮긴 후 하강시켜 OR 조사공에 안착시킨다. Rig의 잠금장치가 조사공의 고정장치 위에 놓인 것이 확인되면 핵연료 취급기구에 35 kgf 이상의 하중을 가한 상태에서 시계방향으로 90° 회전시켜 체결한다. 인출 작업은 역순으로 수행되며 잠금상태를 해제하기 위해 위에서 밑으로 35 kgf 이상으로 눌러준 상태에서 반시계 방향으로 90° 회전시켜 위로 들어올린다.

동위원소생산에 OR rig를 사용하기 위하여 지난 2월 OR-3 조사공에 장전하여 99mTc 생산용 표적을 조사한 결과를 분석하였다. 그 결과 해체과정에서 미비점이 발견되어 일부 부품의 설계를 변경하여 개량된 OR rig를 제작하여 하나로의 OR-3,5 조사공에서 MoO_3 , TeO_2 , Ir 표적을 조사하여 일상생산에 활용하고 있다.

3. 결론

제작된 OR rig는 높은 중성자속을 이용할 수 있는 OR 조사공에 동위원소생산용으로 사용하고 있으며 앞으로 표 2.에 나타낸 고품질의 동위원소를 대량으로 생산할 수 있어 하나로 활용에 기여할 것이다. 그 외에 연구용 핵종 개발, 중성자 조사에 따른 물성변화 관찰 및 기타 용도의 중성자조사 실험에도 활용될 것이다.

제작과정에서 축적된 경험과 설계기술은 노심내에 설치된 IR이나 CT 조사공의 높은 속 중성자속을 이용하기 위한 조사장비 개발에

지침으로 활용할 수 있을 것이다.

이번에 개발한 OR rig는 원자로 가동을 중지한 상태에서만 표적의 입인출이 가능함으로 단반감기 핵종 생산용 조사표적 입인출을 허용시간 내에 수행하지 못하면 원자로 재가동에 어려움이 있다. 하나로는 28일 운전, 7일 정지의 운전주기로 가동되기 때문에 fission moly 처럼 반감기가 짧은 핵종 생산은 가동 중 표적 입인출이 불가피하여 운전기간 중에 표적을 인출할 수 있는 장비의 개발이 필요하다.

특히 가동 중 원자로심 부근에서의 표적 입인출은 원자로 안전운전에 영향을 줄 수 있으므로 사전에 안전성이 충분히 검토되어야 한다. 그 밖에 Fission moly, Ir-192, Co-60 등을 대량 생산하기 위해서는 표적과 조사장비를 고려한 새로운 개념의 조사장치의 개발이 필요하다.

*본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기과제의 일환으로 수행된 것입니다.

KRIIA

표 2. OR 조사공을 활용한 RI 생산

구 분	핵 종	용도 및 비고
농축표적을 사용한 RI 생산	Fe-55, Ni-63, Yb-169	게이지용 방사선원
	Sr-89, Re-186, Sm-153	치료용 의약품
	Cr-51, P-33	진단 및 연구용
단반감기 핵종	(n, γ)Mo-99	열외중성자 사용
	Fission moly	Tc-99m 발생기 제조용
고비방사능 선원생산	Ir-192, Yb-169, Co-60	비파괴검사용
	Ir-192, Co-60	치료기 선원
	Gd-153	콜밀도측정용 선원
연속 중성자포획에 의한 RI생산	Re-188	발생기 제조 연구
	Eu-152	표준선원 제조