

## 액체금속로 KALIMER의 가동중검사 및 보수 개념설계

### Conceptual Design of In-Service Inspection and Maintenance of Liquid Metal Reactor KALIMER

주영상\*<sup>†</sup>, 김석훈\*, 이재한\*

Young-Sang Joo\*<sup>†</sup>, Seok-Hoon Kim\* and Jae-Han Lee\*

**초 록** 가동중검사와 보수는 원자력발전소의 원자로계통설계에서 매우 중요한 설계개념이다. 액체금속로 KALIMER의 가동성 검증을 위해서 기계계통 설계에 가동중검사와 보수개념이 반영되어야 한다. 본 연구에서는 KALIMER의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위하여 KALIMER의 개념설계 단계에 필요한 가동중검사와 보수의 기본 개념을 설정하였다. 액체금속로 가동중검사 규정인 ASME Section XI Division 3를 반영하고 KALIMER의 설계특성을 고려하여 원자로계통과 주요부품의 가동중검사와 보수에 대한 방법과 요건을 설계하고 기술하였다.

**주요용어:** 액체금속로, KALIMER, 가동중검사, 보수

**Abstract** The design concepts of in-service inspection and maintenance are very important for the reactor system design of the nuclear power plant. The strategy of in-service inspection and maintenance should be reflected in the mechanical system design for the verification of the operability of liquid metal reactor KALIMER. In this paper the fundamental approaches of the in-service inspection and maintenance of the KALIMER are established to ensure the safety and reliability of the reactor system. The general method and requirement of the in-service inspection and maintenance for the reactor system and components are proposed and described to satisfy the intents of the ASME Section XI Division 3 and the design characteristics of KALIMER.

**Keywords:** liquid metal reactor, KALIMER, ISI, maintenance

#### 1. 서 론

원자력발전은 20세기 후반부터 세계의 가장 중요한 에너지원 중의 하나가 되었고 부존자원이 부족한 우리나라의 경우 에너지의 안정적 확보를 위해 원자력이 주요한 에너지 원으로 자리잡고 있다. 상용 원자력발전소는 대부분 물을 냉각제로 사용하는

경수로이다. 경수로는 열중성자로 핵반응을 일으키며 천연 우라늄중의 일부인 U235를 주로 사용한다. 액체금속로는 소듐을 냉각제로 사용하는 원자로로서 고속중성자를 이용하여 핵분열반응을 일으켜 에너지를 생산함과 동시에 비핵분열성 물질인 U238을 핵분열성 물질인 Pu239로 변환시켜 처음에 연료로 사용된 U235보다 더 많은 양의 Pu239를 생산할

수 있어 부족한 우라늄 자원을 획기적으로 증가시킬 뿐만 아니라 원자력발전에 의해 발생하는 방사성 핵종을 태워버림으로써 방사성 폐기물의 발생을 경수로 대비 1/34 수준으로 감소시킬 수 있는 미래형 원자로이다. 미국, 영국, 프랑스, 일본 등의 원자력 개발선진국들은 원자력 연구개발 초기부터 액체금속로에 대한 연구개발을 수행하여 현재 상용화 직전단계에 이르고 있으며 우리나라도 원자력중장기 연구개발을 수행하면서 KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor)라고 명명한 액체금속로에 대한 개념설계 연구를 수행하고 있다[1]. 한국원자력연구소에서 개발되고 있는 KALIMER는 전기출력이 150MWe인 금속연료 장전 소듐냉각 풀(pool)형 원자로로서 설계수명이 30년이다. 현재 한국원자력연구소는 KALIMER의 설계수명을 40년으로 연장하고 출력용량을 600MWe로 격상시키는 개념설계 변경과 함께 지속성, 안전성 및 경제성의 특성을 갖는 액체금속로 개발을 위한 전략 핵심기술을 개발하고 있다.

Fig. 1은 KALIMER의 원자로계통에 대한 3차원 개념 설계도를 보여주고 있다. KALIMER는 대기압 정도의 저압에서 운전되지만 운전 온도가 530℃ 이상의 고온으로 과도한 열용량과 열변형에 대해 구조적으로 견딜 수 있도록 원자로 용기(RV)는 얇은 두께의 셸 구조로 설계되고 소듐 누설에 대비하여 외부에 격납용기(CV)가 설치된다. 원자로 내의 소듐 풀에는 노심을 비롯하여 중간열교환기(IHX), 전자펌프(EM Pump), 원자로 내부구조물이 위치한다. 원자로 용기와 격납용기는 원자로 헤드의 상부에 지지되어 고정되며 원자로 헤드에는 핵연료 교환시 회전기능을 갖는 회전플러그와 제어봉 구동장치가 설치된다. 원자로 내부구조물은 고정내부지지물, 고정차폐구조물 및 상부내부구조물(UIS)로 구성된다. 사고 또는 가동정지시 원자로의 열을 제거하는 잔열제거계통은 피동잔열제거계통(PSDRS)과 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)으로 구성되어 있다. PSDRS는 피동형 안전등급의 잔열제거 계통으로서 어떠한 외부의 조치도 필요치 않은 완전한 피동 개념으로 공기 유입구로부터 차가운 공기가 유입되어 공기유로분리기 외부의 환형공간을 통해 원자로용기 하단으로부터 위로 진행하면서 열을 제거하도록 설계되어 있다. 중간열전달계통(IHTS) 배관은 고온에 의한 열팽창을 흡수하기 위한 팽창루프 개념을 채택하였다. IHTS는 2개의 루프로 구성되

며 각 루프는 폐회로로서 비-방사능의 소듐이 순환하여 일차계통과 증기발생계통 사이에 방사능 오염 및 화학반응 가능성을 격리하는 역할을 담당하면서 필요한 열을 전달한다. IHTS는 또한 증기발생기 튜브 누출에 의한 소듐과의 화학반응에 대비하여 소듐 배출탱크와 파열판(Rupture Disk) 등을 구비하여 소듐-물반응을 완화하고 격리하는 압력완화계통도 포함하고 있다. 증기발생기(SG)는 IHTS의 소듐으로부터 열을 전달받아 응축기로부터 공급받은 물을 고온·고압의 과열증기로 바꾸는 장치이다. 증기발생기 내부에는 많은 개수의 튜브로 이루어진 헬리컬 코일형의 튜브다발이 있으며 튜브내부로 물/증기가 흐르도록 되어 있다. 또한 증기발생기 안쪽 상부에는 커버그스 영역이 있어서 중간계통 소듐의 온도변화에 따른 냉각재 부피 변화를 수용할 수 있게 되어 있으며 하부에는 파열판이 설치되어 증기발생기 튜브 누설에 의한 소듐-물 반응에 의한 압력 상승을 수용할 수 있게 되어있다.

KALIMER의 구조적 건전성과 안전성을 확보하고 가동성을 향상시키기 위하여 발전소 수명기간 동안 주기적으로 가동중검사와 보수유지가 수행되어야 한다. KALIMER는 소듐을 냉각재로 사용하므로 물을 냉각재로 사용하는 경수로 원전에서 적용되는 일반적인 가동중검사와는 다른 검사 기술이 요구된다[2]. KALIMER는 5기압 이하의 낮은 압력에서 운전될 뿐만 아니라 원자로와 주요부품이 스테인리스 강과 같은 인성이 큰 재료로 제작되기 때문에 구조적 파단이 점진적으로 일어나 파손에 대한 조치에 충분한 시간적 여유를 가질 수 있다. 이러한 특징으로 표면검사나 체적검사 보다는 연속감시가 주요한 가동중검사 방법으로 적용될 수 있다. 소듐 누설은 소듐 물 반응으로 인한 화재의 위험이 다르므로 소듐 경계면의 건전성에 대한 철저한 점검이 필요하다. 또한 소듐 내에 잠겨지는 원자로 내부 부품과 구조물 들은 소듐의 불투명성으로 일반적인 육안검사가 어려워 특수한 검사가 요구되며, 보호가스 사용과 이중 격리구조로 원자로 내부로의 접근성이 떨어져 구조건전성 검증은 연속감시에 의존하게 된다. 액체금속로 가동중검사 규정인 ASME XI Div. 3에서는 Table 1에서와 같이 이러한 특성을 반영하여 액체금속로에 적용될 가동중검사법은 체적검사가 아닌 육안검사와 연속감시 위주로 요건화되어 있다[2]. 외국의 액체금속로의 개념설계에서도 이러한 특성을 충분히 고려하여 가동

중검사와 보수유지 설계개념을 설정하고 있다[3-6]. KALIMER 기계계통 개념설계 단계에서 ASME 가동중검사 규정 적용과 검사 및 보수 개념을 우선적으로 고려하여 상위 설계요건으로서 기계계통의 구조설계에 반영하여야 한다. 본 논문에서는 KALIMER 기계계통 개념설계에서 ASME XI Div. 3의 규정과 KALIMER의 고유 설계특성을 고려하여 KALIMER원자로계통의 주요부품에 적용될 적절한 가동중검사 방법과 보수개념을 설정하고 기술한다.

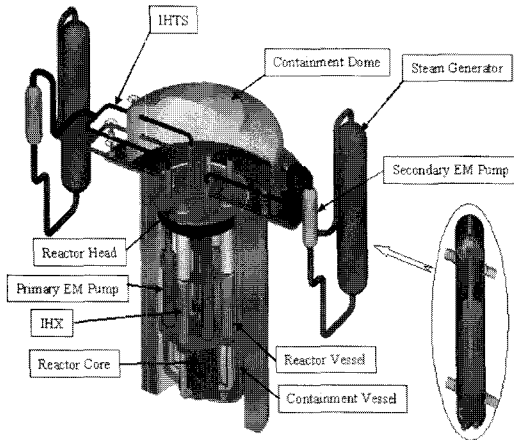


Fig. 1 KALIMER reactor system

## 2. 가동중검사 개념설계

### 2.1. 가동중검사법

경수로와 액체금속로 가동중검사 방법은 기본적

으로 육안검사(VTM-1,2,3), 표면검사(PT, MT) 및 체적검사(UT, RT, ECT)와 같은 비파괴검사법이 적용된다. 다만 액체금속로의 경우 고온 소듐 환경의 특수성으로 인하여 원격 육안검사(remote VT 및 under sodium viewing)와 연속감시(continuous monitoring) 그리고 대체검사법(alternative examination)이 주로 적용된다. ASME 규정에서는 공인 검사원이 인증한 다른 종류의 검사법이나 새로 개발된 신기술을 기존의 가동중검사법의 대체 검사법으로 사용할 수 있도록 하고 있다. 소듐과 방사능 보호가스를 담고 있는 부품과 시스템의 누설탐지에 연속감시법을 적용한다. 누설감시 이외의 연속 감시에 사용되는 주요 감시 parameter는 중성자속, 방사능, 온도, 압력, 유량, 변위, 진동 및 음향신호 등이 있다.

### 2.2. 주요 부품의 가동중검사

#### 2.2.1. 원자로용기

원자로용기(RV)에 적용되는 가동중검사법은 원격 육안검사와 소듐누설 연속감시 및 체적검사로 설정한다. 원자로용기에 대한 주기적 육안검사와 체적검사는 Fig. 2에서와 같이 원자로 헤드에 설치된 12개의 ISI포트에 의해 원자로용기(RV)와 격납용기(CV) 사이의 환형 갭 속으로 원격 소형 로봇을 접근시켜 수행한다. 환형 갭은 검사 기간에도 고온(약 150℃ ~ 200℃)이므로 검사장치를 냉각시켜야 한다. 소듐누설감시는 원자로의 안전성 확보를 위해 필수적으로 적용되어야 할 연속감시 기술이다. 원자로

Table 1 ISI requirement of ASME XI Division 3 for liquid metal reactor

Components	ISI Method
Reactor Vessel	VTM-2 , Continuous Monitoring
Reactor Internals	VTM-3
Reactor Head and Rotating Plug	Continuous Monitoring
Primary Cover Gas System	Continuous Monitoring
Control Rod Driving Mechanism	Continuous Monitoring
Containment Vessel	VTM-3
Plate and Shell type Support Structures	VTM-3
Dissimilar Welds	Continuous Monitoring, Volumetric Examination
Integral Attachment of Vessel and Pipings	Surface Examination or Volumetric Examination
Sodium Piping and Valves	VTM-2 , Continuous Monitoring

용기의 소듐 누설은 원자로용기와 격납용기 사이의 간격층에 소듐 이온화 탐지기와 스파크 플러그 탐지기를 이용하여 탐지한다. 원자로 용기에 대한 체적검사는 ASME 코드의 기본요건은 아니지만 안전성 확보를 위해 적용하도록 한다. 원자로용기 체적검사는 일반적으로 초음파검사를 적용한다. 고온에서의 초음파검사는 유체 접촉매질의 적용으로 어려운 점이 있다. 고온 초음파검사로써 유체 접촉매질이 필요하지 않고 적용 가능한 전자기 초음파검사(EMAT) 법을 적용할 수도 있다. 소형 이동 로봇을 원자로헤드에 있는 ISI 포트를 통하여 접근시킨다. 원자로용기의 용접부 개소를 적게 하여 설계 제작함으로써 원자로용기의 체적검사 영역을 최소화하여 검사의 효율성과 안전성을 제고하는 것이 바람직하다. 프랑스는 MIR로 명명된 원격 로봇을 개발하여 Super Phenix에 적용하였으며 러시아는 rail track 형상의 원격 로봇을 개발하여 SNR 300에 적용하였고 일본 미쯔비시와 CRIEPI는 육안검사와 체적검사를 수행할 수 있는 원격검사 로봇을 개발하여 Monju에 적용한 바가 있다[7]. 액체금속로 원자로용기 가동중검사용 원격로봇을 개발한 선진국들은 운전중인 액체금속로에서 적용시험을 통하여 원격로봇의 작동 제어성능을 검증하였다. 고온 고방사능 환경에서 장기간 안정적으로 검사를 수행하기 위해서는 정밀 원격로봇과 고온 내방사능 카메라 센서 및 초음파센서의 개발이 필요하다.

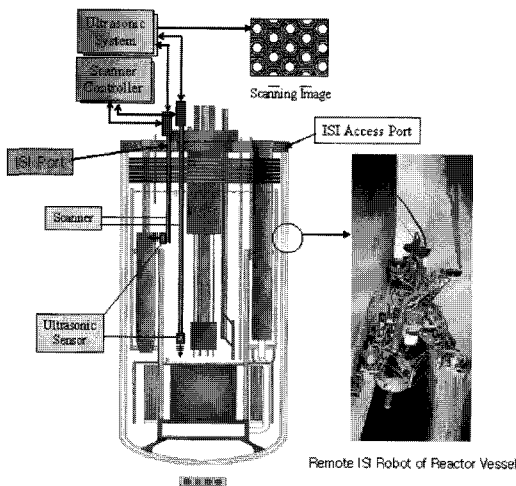


Fig. 2 Inspection of reactor vessel by remote robot and under sodium viewing of reactor internals

## 2.2.2. 격납용기

격납용기(CV) 용접부에는 VTM-2, 3 육안검사를 적용한다. 격납용기의 보호 기능을 검증하기 위하여 용기의 누설검사는 매우 중요하다. 격납용기와 원자로용기 사이의 환형 갭 내에는 불활성 알곤 가스가 충전 되어 있다. 알곤가스의 압력과 방사능 준위 측정으로 격납용기의 누설건전성을 연속적으로 감시할 수 있다. 누설징후 발견 시에는 후속 검사로 환형 갭에서의 가스를 추출하여 성분 분석을 수행한다.

## 2.2.3. 원자로 노심 및 내부구조물

풀형 액체금속로인 KALIMER는 원자로 내부에 1차 전자펌프와 중간열교환기와 같은 주요 부품과 내부구조물이 밀집되어 있다. 1차 전자펌프와 중간열교환기 등의 원자로 내부의 주요 기기와 원자로 내부구조물은 육안검사 VTM-3가 요구되며 연속감시나 치수측정 등의 대체 검사가 수행된다. 원자로 노심과 내부구조물 및 부품은 불투명한 고온 소듐 내에 잠겨져 있으므로 ASME 코드에서 규정하고 있는 육안검사를 가능하게 하기 위해서는 초음파를 이용한 소듐내부 가시화(under sodium viewing; USV) 검사기술이 적용되어야 한다. Fig. 2는 액체금속로 노심과 내부구조물의 가동중검사용 초음파를 이용한 소듐내부 가시화 육안검사를 수행하는 개념도를 보여준다. 액체금속로 노심의 핵연료에 중성자가 조사되면 voidage라는 현상으로 핵연료의 금속구조가 팽창된다. 연료봉의 길이가 고르게 팽창하지 않으면 연료봉이 구부러지게 되는데 가동중에 연료봉이 구부러지는 정도를 파악하는 것이 핵연료관리의 중요한 항목이다. 노심 핵연료 집합체 상부의 초음파 가시화에 의한 집합체의 형상과 그 위치로부터 핵연료의 변형 정도를 파악할 수 있다. 액체금속로 개발 초기부터 액체금속로 개발선진국들은 초음파 가시화 실험을 수행하여 액체금속로의 가동중검사와 노심 건전성 감시에서의 초음파 기술의 유용성을 충분히 입증하였으나[8] 아직까지는 고온 소듐내에서의 초음파기술 적용에는 고온과 접근성으로 인한 제한점이 있으며 이를 극복하기 위한 연구개발이 진행되어야 한다. 원자로 내부구조물과 부품은 연속감시를 통하여 가동상태와 그 건전성을 운전중에 감시할 수 있다. 온도, 압력, 유량, 변위,

소듐 액위(level), 방사능 및 음향신호로 소듐 및 상부 가스 누설, 내부 부품의 작동 상태, 금속파편의 존재 등을 찾아낼 수 있다. 노심, 전자펌프 및 중간 열교환기의 입출구 온도와 압력의 연속감시는 노심 및 기기의 건전성과 펌프 출력의 통계적 정보를 연속적으로 알려준다.

#### 2.2.4. 원자로헤드 및 커버가스 시스템

소듐 냉각재의 소듐-물 반응을 억제하기 위하여 원자로 소듐 액위 위에 헬륨 커버가스(cover gas)가 충전 된다. 원자로헤드는 커버가스의 차폐기능이 있어야 한다. 원자로헤드와 보호가스 시스템은 커버가스의 누설에 대한 연속감시가 수행된다. 커버가스 누설은 원자로헤드 상부 접근 영역에 설치된 방사능 모니터로 탐지한다. 누설지시가 발견되면 후속 검사로 헬륨누설검사법으로 누설 부위를 탐지하고 원자로 커버가스와 1차 소듐의 순도 분석을 실시한다.

#### 2.2.5. 원자로 지지구조물

원자로용기 지지구조물의 영구부착물 용접부는 표면검사와 체적검사를 수행하고 지지구조물은 육안검사VTM-3를 수행한다. 검사부위의 가동중검사는 카메라와 검사장치를 장착한 원격 제어 장치에 의해서 수행한다.

#### 2.2.6. 잔열제거계통 (PSDRS)

KALIMER 원자로의 공기의 자연대류를 이용하여 잔열을 제거하도록 설계되어 있다. 매 핵연료 교체 주기마다 입출구 공간, PSDRS 통로, 격납용기 외부에 대한 육안검사를 수행한다. PSDRS 유동 통로에 대한 주기적인 원격 육안검사로 산화물 등의 이물질의 축적을 점검하고 잔열제거계통의 건전성을 검사한다. 격납용기에서 사용한 원격 육안검사 장비를 사용하여 검사한다.

#### 2.2.7. 먼진계통

원자로용기는 고온 열응력을 완화하기 위하여 두께 50mm의 박판 구조로 설계되어 있어 지진 발생 시 좌굴손상이 발생하기 쉽다. KALIMER 설계에서

는 원자로용기 좌굴 구조손상을 최소화 하기 위하여 먼진설계 개념을 채택하고 있다. 원자로건물 하부매트와 상부매트 사이에 먼진 받침대 위에 먼진 베어링을 설치한다. 먼진베어링은 몇 겹의 강판과 고무층으로 만들어 진다. 원자로 정지기간 동안에 베어링의 높이와 고무의 상태를 직접 육안검사로 검사한다. 베어링이 위치한 공간에는 사람이 지나다닐 수 있게 하고 육안검사와 주기적인 기능시험을 실시한다. 가동전에 설치된 소규모 시험 베어링을 수거하여 먼진 기능을 시험한다.

#### 2.2.8. 격납돔

상부 격납돔의 용접부와 관통부에 대하여 육안검사를 실시한다. 핵연료 재장전이나 장비 교체에 사용되는 관통부는 사용 후에도 누설시험을 수행할 수 있도록 쉘 용접이 되어 있어야 한다. 격납돔은 사고 조건에서 허용 누설율을 1%/day 이하로 설계되어야 한다. 누설 설계조건이 허용 누설율은 초과하지 않는 것을 입증하기 위하여 종합누설시험(ILRT)을 실시한다. 종합누설시험은 모든 관통부, 프랜지, 핏팅부 및 기타 부품을 포함하여 완전한 격납 경계를 갖는 지를 평가한다.

#### 2.2.9. 중간열전달계통 (IHTS) 배관 및 지지구조물

IHTS 배관의 가동중검사는 소듐누설의 연속감시와 VTM-2 육안검사이다. 육안검사는 펌프 탱크, 영구 용접 지지스커트 및 배관 지지구조물의 영구부착물을 제외하고 단열재를 제거하지 않고 수행된다. 증기발생기와 소듐 배관사이의 이중금속 용접부의 가동중검사는 소듐누설에 대한 연속감시로 수행된다. IHTS 배관의 소듐누설은 소듐 배관에 소듐 이온화탐지기와 회로선 누설탐지기를 설치하여 탐지한다.

#### 2.2.10. 중간 전자펌프

중간 전자펌프의 가동중검사는 소듐누설의 연속감시와 온도, 진동, 압력의 연속감시로 수행된다. 중간 전자펌프 용기의 소듐누설은 용기외부에 설치한 소듐 이온화탐지기로 탐지한다. 액체금속 내재 용접부 및 지지구조물은 육안검사, 표면검사 및 체적검사를 수행한다.

2.2.11. 증기발생기 시스템

증기발생기는 소듐-물 경계를 이루기 때문에 불누출시 화재사고의 가능성이 매우 높은 부품이므로 튜브 파손에 대비한 체적검사와 누설 연속감시가 적용되어야 한다. 기존 경수로의 증기발생기는 비탄소강인 인코넬로 제작되어 와전류검사가 쉽게 적용되는데 액체금속로의 증기발생기 튜브는 Cr-Mo 강과 같은 탄소강 계열의 재료로 제작되어 와전류 검사 적용이 쉽지 않다. 액체금속로 증기발생기의 튜브는 나선형으로 용접부가 많다. IHTS의 소듐을 제거하고 증기발생기의 온도를 내리고 튜브 쉬트 커버를 제거한 후 원격장 와전류 탐촉자 또는 초음파 탐촉자를 튜브 내에 삽입하여 튜브 벽 두께 측정과 결함 검사를 수행한다. 가동중에 증기발생기 튜브의 파손은 소듐-물 반응으로 인한 화재 사고로 매우 중요하게 감시되어야 한다. 증기발생기 튜브 누설은 Fig. 3에서와 같이 증기발생기 상단부에 설치된 수소탐지기에 의한 수소탐지 방법과 용기 외벽에 부착된 음향센서를 이용한 음향감시법으로 감시한다. 수소탐지법은 전기화학센서를 이용한다. 막을 통과한 수소는 전해질과 반응하여 전류가 생성된다. 소듐 내에서 사용되는 수소탐지기(hydrogen-in-sodium detector)와 알곤 보호가스 내에서 사용되는 수소탐지기(hydrogen-in-argon detector)를 각각 소듐내부와 증기발생기 헤드 부근의 보호가스 층에 설치한다. 음향감시는 수동 음향감시법과 능동 음향감시법을 함께 적용한다. 소듐-물 반응은 음향신호(acoustic emission)를 발생시킨다. 수동음향감시법은 누설시 발생하는 음향신호를 증기발생기 용기 외부에 설치된 음향센서로 감지한다. 음향센서를 일정 간격으로 배열 설치하고 신호 도달시간 차이를 측정해서 누설 위치를 예측할 수 있다. 원자로 가동중에 잠음신호 레벨이 높은 경우 탐지 감도가 떨어질 수 있다. 능동음향감시는 수소기포에 의한 초음파 산란특성을 이용하여 누설 여부를 감시하는 방법이다. 증기발생기 외부에서 튜브를 향하여 초음파를 송신하고 그 반대편에서 초음파신호를 수신한다. 누설시 발생한 기포가 초음파의 전파를 방해하여 수신신호의 진폭이 감소한다. 주위 잠음 레벨이 높은 경우에 그 응용성이 매우 높으며 수동음향탐지기의 단점을 보완할 수 있다. 수동형 음향감시와 병행하여 사용함으로써 소듐-물 누설 감시의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

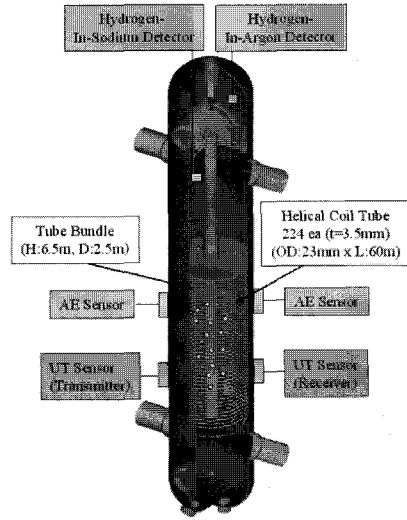


Fig. 3 Continuous monitoring of sodium leak of SG tubes

3. 보수 개념설계

3.1. 보수 요건과 특성

보수성은 발전소의 가동성과 경제성을 확보하는 중요한 설계 요건중의 하나이다. 액체금속로 KALIMER의 주요 부품에 대한 보수성을 확보하기 위하여서는 초기 개념설계단계부터 보수 개념이 설정되어 반영되어야 한다. KALIMER의 주요 부품은 발전소 운전기간 중에 계획에 의한 교체 보수가 없도록 발전소 수명 이상의 설계 수명을 갖도록 설계하여야 하나 고장난 부품이나 주기적 보수 대상 부품은 철거 교체보수를 원칙으로 한다. 철거하기 힘든 부품이나 손상 정도가 경미한 경우에는 설치 상태에서 수리 가능하도록 설계한다. 모든 시스템과 부품은 해체뿐만 아니라 세척, 수리와 재조립이 가능하게 설계해야 한다. 예상치 않은 파손이 발생하더라도 빠른 조치를 취하여서 재가동이 가능할 수 있어야 한다. 설계 수명 기간 내에 교체되어야 할 부품의 예비 부품이 준비되어야 하고 부품 철거와 수리시 부품 및 장비의 하치 공간이 확보되어야 하며 적절한 접근성을 가져야 한다. 외국의 액체금속로 운전경험과 보수경험을 조사 분석하여 설계에 반영하고 방사능 피폭을 최소화 하도록 보수개념을 설정한다. 실증시험을 통하여 신뢰성이 입증된 장

비와 부품을 사용하여야 하며 표준화된 부품을 사용한다. 밸브, 펌프 기타 부품의 종류를 최소화하여 보수 비용을 줄이고 여분의 부품을 적게 보유하도록 한다. 부품은 충분한 설계마진을 가져서 가동중에 마모나 부식, 방사능 효과, 열피로 효과 등에도 잘 견디게 한다. 고순도 소듐을 사용하여 스테인리스강과 탄소강에 부식을 유발시키지 않게 한다. KALIMER는 1, 2, 3차 계통이 각각 폐회로 시스템으로 이루어져 있어 경수로에 비해서는 원자로계통의 방사능 준위가 매우 낮아 보수유지에 따른 방사선 피폭 피해를 적게 할 수 있고 발전소 가동중에 검사 준비 및 보수가 가능하다. 또한, 안전 등급의 부품이 적고, 단순 수동형 안전 시스템을 채택하고 있어 보수 작업 기간을 줄일 수 있으며 보수 유지요원의 인원을 적게 유지할 수 있다

3.2. 주요 부품의 보수

KALIMER의 주요 부품은 주로 교체에 의하여 보수하며 철거할 수 없는 부품은 수리보수를 실시하도록 개념설계 하였다. 주요부품에 대한 보수개념은 Table 2와 같이 설정하였고 세부적인 보수 개념 설계 내용은 다음과 같다.

3.2.1. 원자로용기 및 격납용기

원자로용기와 격납용기는 발전소 수명으로 설계하여 주기적인 교체 보수가 필요하지 않게 한다. 연속 감시에 의한 누설 지시가 발생하면 체적 감사를 포함한 정밀 검사를 실시하여 누설 부위를 수리한다.

3.2.2. 원자로 내부구조물 및 부품

내부구조물은 철거하기가 어려우므로 주로 수리에 의해 보수를 실시하고 주기적 교체보수를 수행하지 않는다. 내부구조물 노심 상부는 소듐을 빼낸 후에 보수하고 주로 원격으로 수행된다. 노심 부분에 대한 보수는 핵연료다발을 제거한 후 수행한다. 검사, 세척, 보수 및 교체 등에 특수 장비가 필요하다. 중간열교환기와 전자펌프의 기본적인 보수 방법은 철거 교체이다. Fig. 4는 철거 교체보수 개념도를 나타낸다. 상부 지지부의 볼트 체결부의 볼트를 풀 후 용접부를 절단하여 중간열교환기를 철거

한다. 핵연료 이송장치와 제어봉 구동장치와 같은 구동관련 부품은 고정부품보다 고장 확률이 높다. 고장이 발생할 경우 교체보수를 실시하나 원자로 내에서 수리할 수도 있다. 가능한 설계수명 동안에는 보수하지 않도록 해야 하나 구동관련 부속품 들은 주기적으로 교체 보수한다.

3.2.3. 중간열전달계통

중간열전달계통은 접근성이 좋아 쉽게 보수할 수 있으며 가동중에도 보수가 가능하다. 배관 내의 소듐을 완전히 제거한 후 보수를 실시해야 하며 보수 작업시 공기가 들어가지 않도록 주의해야 한다. 공기가 주입되면 고온환경에서 부식이 발생하기 쉽다.

3.2.4. 증기 발생기

증기발생기의 주요 보수작업은 열교환기 튜브에 대한 세척 및 누수 튜브의 관막음, 증기 및 급수밸브 보수 및 교체, 순환펌프 누수 방지판 교체 등이다. 증기 발생기에 중대한 손상이 발생되면 교체보수를 실시한다. 증기발생기 내부의 소듐을 완전히 제거한 후 보수를 실시해야 하며 고온부식 억제를 위해서 보수작업시 공기가 들어가지 않도록 주의해야 한다. 튜브 다발은 유체기인진동이 발생하기 쉬우므로 진동이 발생하지 않도록 설계 제작해야 한다.

3.3. 소듐 제거 및 제어

캐스크와 어댑터를 이용하여 철거된 부품은 보수건물로 이송하여 Washing Pit에서 세척을 실시하여 소듐을 제거하고 제염을 수행한다. Washing Pit에는 물, 증기 및 다른 유체를 분사 할 수 있는 스프레이 링과 액체를 배수하거나 화학용매에 담글 수 있는 충전배수장치 및 가스 주입배기 장치로 구성한다. 세척은 CO<sub>2</sub> 가스 분사에 의한 소듐 중화 단계를 거쳐 물 분사에 의한 고화 소듐 세척으로 수행된다. 배기 시스템의 수소농도를 감시하여 수소가 발생하지 않으면 세척작업을 중단하고 세척된 부품을 질소분위기에서 건조 시키고 방사능 준위를 측정한다. 작업자가 부품에 직접 접근하여 작업을 수행할 경우에 화학용매를 사용하여 제염을 실시한다.

Table 2 Maintenance of KALIMER reactor system

Components	Maintenance Method	Remarks
Reactor Vessel	Repair	Repair of leaks and flaws
Containment Vessel	Repair	Repair of leaks and flaws
Reactor Internals	Repair	Remote repair after sodium drain
Intermediate Heat Exchanger	Replacement	Replacement after cutting of containment dome Using adaptor and transfer casks
Primary EM Pump	Replacement	Replacement after cutting of containment dome Using adaptor and transfer casks
Fuel Transfer Machine	Replacement	Replacement after cutting of containment dome Using adaptor and transfer casks
Control Rod Driving Mechanism	Replacement	Main body of CRDM : maintenance free Driving component : periodic replacement
Rotating Plug	Replacement / Repair	Replacement of drive bearing gear
Intermediate Heat Transfer System	Replacement / Repair	Valve repair and replacement
Steam Generator	Replacement / Repair	Plugging of leak tubes Repair and replacement of feed water line valves

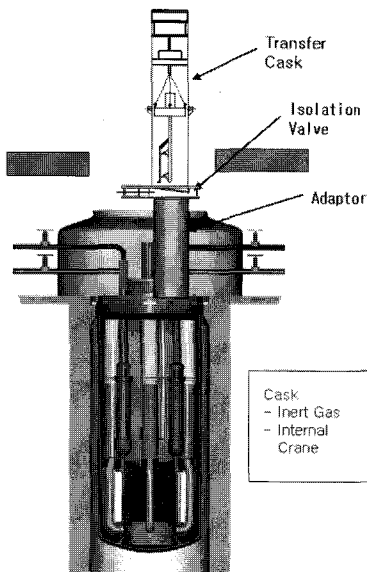


Fig. 4 Conceptual design of replacement maintenance

설정은 KALIMER의 구조건전성과 안전성 확보를 위하여 우선적으로 고려되어야 한다. 액체금속로 가동중검사 규정인 ASME XI Division 3에서는 액체금속로의 고온 저압의 운전조건과 소듐 냉각재의 화학반응 특성을 고려하여 소듐 경계면에서의 소듐 누설 탐지가 매우 신뢰성 있게 탐지되어야 하며 액체금속로 원자로 계통의 주요부품과 내부 구조물에 대한 검사성과 보수성을 확보할 수 있도록 요구하고 있다. 본 연구에서는 KALIMER의 고유 설계특성을 반영하고 ASME XI Division 3 규정에 근거하여 개념설계단계에서 필요한 가동중검사와 보수의 기본 개념과 방법을 설정하였다. KALIMER의 가동중검사는 육안검사와 연속감시 위주로 수행될 수 있도록 하고 가동중검사의 접근성과 적용성을 기계계통 개념설계에 반영하였으며 주요부품과 구조물 들은 고온소듐 환경으로 인해 주로 교체에 의해 보수가 이루어 지도록 보수개념을 설정하여 KALIMER의 가동성과 안전성을 확보할 수 있도록 설계하였다.

4. 결 론

액체금속로 KALIMER의 설계 단계에서 원자로 계통의 가동중검사와 보수에 대한 개념과 방법의

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.



**참고문헌**

- [1] D. H. Han et al., KAERI/TR-1636/2000, "KALIMER Preliminary Design Concept Report," (2000)
- [2] ASME B&PV Code, Section XI, Division 3, "Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Component," (1992)
- [3] GE, "Modular Liquid Metal Reactor Design Technology," USA, (1992)
- [4] C. H. Mitchell, "Structural Integrity of the CDFR Safety Related Structures," Nuclear Energy, Vol. 25, No. 2, pp. 107-114, (1986)
- [5] G. Seed, "In-service Inspection and Monitoring of CDFR," Nuclear Energy, Vol. 25, No. 2, pp. 129-135, (1986)
- [6] M. A. Kressman, "Improved Methods of Continuous Monitoring," EUR 16210 EN, (1995)
- [7] IAEA, "Status of LMFBR," IAEA Technical Report 246, (1985)
- [8] J.A. McKnight and P. Fenemore, "Under Sodium Ultrasonic Technology for LMFBR," Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London, pp. 585-590, (1986)