

액체금속로 SAILMER 개념 개발

남호윤, 이용범, 김용근, 최병해, 김종만

한국원자력연구소

요 약

환상형 이중벽 증기발생기와 환상형 전자펌프 신개념을 개발하여 중간열교환계통과 소듐 배관이 없는 단순하고 밀집된 형태의 액체금속로인 SAILMER 노형 개념을 제안하였다. 금속핵연료를 사용하는 모듈형으로 증기발생기에서의 소듐과 물 반응사고에 대비한 연구와 제작기술을 제고시키면 이 노형은 경제성과 고유안전성을 동시에 구현할 수 있다.

1. 서 론

액체금속로가 상업화되기 위해서는 안전성과 경제성을 동시에 구비하는 것이 필수적이다. 그러나 냉각재인 소듐은 반응성이 높아 경수로에 없는 중간열교환계통을 설치하는 등 원자로를 경제적으로 설계하는데 어려움이 있다. 중간열교환계통의 가장 중요한 역할은 증기발생기에서 발생할 가능성이 있는 소듐-물 반응사고시에 한개의 경계를 더 두어 노심을 보호하는 것인데, 증기발생기의 신뢰성을 높여 중간열교환계통이 없는 액체금속로 노형을 개발코자 하는 시도의 일부로 전열관을 이중관(double-wall-tube)로 만든 이중관 증기발생기의 개념들이 개발되었다[1]. 미국의 실험로인 EBR-II에 직관형 이중관 증기발생기를 중간열교환계통에 설치되어 20여년간 운전 경험한 바 있다. 그러나 이중관 증기발생기 제작상의 문제와 지금까지 이 개념을 도입하여 개발한 노형의 경제성 문제로 아직 연구개발 단계에 있다.

EBR-II에서는 소듐-물 반응사고를 없애기 위하여 이중관 증기발생기를 중간열교환계통에 설치하였지만 이중관 증기발생기를 채택하는 궁극적인 목적은 중간열교환계통을 없애 경제성을 높이는 것이다. 일본 PNC와 Hitachi 사에서 헬리칼 코일형 이중관 증기발생기를 설치하여 중간열교환계통이 없는 액체금속로 개념을 개발하였다[2]. 이 원자로는 경수로와 같이 노외에 증기발생기를 설치하고 기계식 펌프를 원자로 용기에 설치하는 노형으로 중간열교환계통이 있는 노형에 비해 4% 경제성을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 최근 일본 전력중앙연구소에서 제시한 노형 개념[3]에서는 중간열교환계통을 없애고 이중관 증기발생기를 원자로 용기 내부에 설치하고 있다. 용량이 1000MWe인 원자로에 4개의 원통형 전자펌프와 나선형(helical coil type) 전열관을 사용하는 증기발생기 8개를 노내에 설치하면 경수로에 대비해 30% 정도 경제성을 향상시킬 수 있다고 하였다. 나선형 전열관을 사용할 경우 제작상 축소할 수 있는 코일 반경이 제한되어 내부에 직경

1m 정도의 빈 공간이 생겨 증기발생기의 직경이 증가하게 되어 모듈형에는 설치하기가 어렵고, 또한 전체적으로 원자로 직경이 증가하여 직경이 16.5m에 달한다. 또 다른 단점으로는 원통형 전자펌프는 길이(6m)가 길어 전자펌프로 인하여 노심 내부에 역 U형의 배관이 형성되는 것이다.

이 논문에서는 액체금속로의 고유안전성을 확보하면서도 경제성을 제고시킬 수 있는 새로운 노형으로 중간열교환계통과 소듐 배관이 없는 원자로 즉, 환상형 이중관 증기발생기와 환상형 전자펌프를 원자로 용기내에 일직선상에 배치한 매우 단순하고 밀집화된 액체금속로 SAILMER (Simplified And Integrated Liquid MEtal Reactor) 개념을 제안하였다. 이 원자로는 금속핵연료를 사용할 경우 핵적 고유안전성을 가질 수 있는 용량 350MWe 이하인 모듈형 개념이지만 편의상 이 논문에서는 150MWe 급으로 설정하였고 같은 규모인 PRISM mod-A를 참고하여 대략적인 규격을 결정하였으며 고유개념을 중점적으로 기술하였다.

2. SAILMER의 개념

2.1 원자로의 구성과 냉각재 유로

중간열교환계통이 없는 모듈형 원자로인 SAILMER의 형상은 그림1 (a)에 보이고, 주요 부품의 배치 형태를 상부에서 보면 그림1 (b)와 같다. 이 원자로의 고유한 개념으로는

- 증기발생기 전체를 이중으로 만든 환상형인 이중관 증기발생기
- 1차계통 냉각재 구동용 환상형 전자펌프
- 양단 고정식 Pantograph 형 핵연료교환기
- 환상형 증기발생기와 환상형 전자펌프의 상하 배치

이다. 신형 액체금속로에 채용하고 있는 개념들 중에서 SAILMER에 채용한 주요 개념들로는

- 금속핵연료
- Na/NaK 열교환기와 NaK/Air 열교환기로 구성된 능동형 잔열제거계통
- Na/NaK 열교환기와 NaK/Air 열교환기로 구성된 피동형 보조잔열제거계통
- 큐리점 전자석을 이용한 피동형 노정지기구 및 가스팽창 모듈
- 면진 베어링에 의한 3차원 면진계통

등이다. 원자로 용기는 직경 6m, 높이 20m의 원통형으로 내부에 원통형 분리벽(Partition Wall)을 설치하였다. 내부 풀에는 노심과 상부구조물(UIS)을 설치하고 외부 풀에는 도너츠 모양의 환상형 증기발생기와 환상형 전자펌프를 설치하였다. 하부에는 외부에 방사선 차폐체를 설치한 금속핵연료 노심이 있다. 상부에는 제어봉 구동장치가 설치된 상부구조물과 핵연료교환기가 있고 소듐 자유액면 위의 공간은 알곤가스로 채워져 있다. 증기발생기 셀측 입구에 능동형 잔열제거계통(Active DHRS)용 반 환상형 Na/Nak 열교환기 2개가 대칭으로 설치하였고 증기발생기와 원자로 벽 사이에는 대칭으로 2개의 피동형 보조잔열제거계통(Passive ADHRS)용 Na/Nak 열교환기가 설치하였다.

노심에서 가열되어 상승한 소듐은 분리벽 상단부에 설치된 능동형 잔열제거계통의 셀측을 통과

하여 증기발생기의 셀측으로 들어가고, 증기발생기를 통과하면서 냉각된 소듐은 증기발생기 하부에 설치된 전자펌프의 구동력으로 노심 하부 플레넘을 거쳐 노심으로 되돌아 온다. 증기발생기가 환상형이기 때문에 상부 플레넘에서의 유동은 원주방향으로 균일할 뿐만 아니라 배관을 통과하지 않기 때문에 매우 단순한 유로가 원자로 용기 내에서만 형성된다.

2.2 노심

PRISM mod-A를 참고노형으로 금속핵연료 노심을 구성하였다. 핵연료집합체와 가스팽창 모듈(GEM)을 포함하여 총 199개의 육각형 집합체로 구성된 비균질 노심으로서 480MWt 출력을 갖는다. 노심의 입구와 출구의 냉각재 온도는 각각 350℃와 500℃이고, 유속은 35.2m/s 이다. 노심의 총 높이는 5m(유효노심은 1.35m), 직경은 3.5m이다. 노심 외각에 고정 방사선 차폐체를 0.5m 두께로 설치하였다.

2.3 환상형 이중관 증기발생기

원자로 내부에 설치된 분리벽과 원자로 용기벽 사이에 환상형 이중벽 증기발생기(그림2)를 설치하였다. 이 증기발생기의 상부와 하부에는 원통형 관을 환상형으로 만든 두껍으로 된 헤더들이 있고, 상부헤더(직경 0.5m)와 하부헤더(직경 0.4m)의 중심선의 직경은 4.75m, 두 헤더간의 중심간의 길이가 11m이다. 상부헤더와 하부헤더 사이에 이중벽 전열관을 격리벽을 따라 나선형으로 평균 3바퀴 정도 감는 형식이므로 직경(평균 4.75m)이 크므로 직관형에 가까운 완만한 나선형 전열관이다. 이 전열관은 이중벽 전열관으로 외경은 32mm, 외부관의 두께는 1.7mm, 내부관의 두께는 1.8mm, 내경은 25mm로 외부관 내벽에 깊이 0.3mm 홈이 4개 있다. 이중벽 전열관의 열전도를 단일관의 80% 정도로 가정하면 길이 50m인 전열관 440개로 구성되며 전열관 간의 피치가 1.7이면 8열로 배치되므로 증기발생기의 축방향 두께는 0.6m 정도로 얇은 형태이다.

유동격리벽과 원자로 용기벽 사이에 있는 2개의 급수에서 하부헤더로 들어온 물은 전열관을 따라 상승하면서 과열 수증기가 되어 상부헤더로 들어간다. 헤더의 내부관은 고압의 수증기가 채워지므로 무용접관으로 제작하고 외부관은 제작을 용이하도록 길이 방향으로 용접하여 사용한다. 이중벽 전열관 중에서 외부관은 헤더의 외부관에 외부에서 용접하고, 전열관의 내부관은 헤더의 내부관에 로봇트를 이용하여 내부에서 용접한다. 헤드의 이중벽의 사이 공간에는 헬륨가스를 통과시켜 관의 파손을 검출하는데 이용한다.

2.4 환상형 전자펌프

환상형 전자펌프(그림3)는 선형 유도형 전자식 펌프로 노심의 방사선 차폐체의 외각, 증기발생기 바로 아래 설치된다. 내경은 4.5m, 외경은 5.25m로 높이는 3m이다. 외부코어(Outer Core)에는 자장 발생장치로 전자석 코일이 설치되고 내부코어(Inner Core, 두께: 0.12m)에는 자장이 통과하도록 순철로 만들어지며, 외부코어와 내부코어 사이에 소듐이 흐르는 유로가 있다. 다른 사양이 일정할 경우, 대략적으로 유량은 유로의 간격에 비례하고 전자펌프의 수두는 전자펌프 길이에 비례하고 이 간격의 자승에 역비례한다. 이 환상형 전자펌프는 PRISM 등 신형 액체금속로에서 채

택되는 원통형 전자펌프와는 달리 유로의 둘레(14.9m)가 길기 때문에 간격이 좁아도 충분히 유로 면적을 확보할 수 있고, 펌프길이가 짧아도 요구되는 헤더를 만족시킬 수 있다. 이 전자펌프의 유속은 35.2m/s이고 수두는 800kPa이다.

2.5 핵연료교환기기

기존 액체금속로용 핵연료교환기기는 대부분 회전 프러그식을 사용한다. 이 방식은 상부 원자로 플러그들을 회전하며 핵연료를 교환하여야 하므로 상부구조물이 복잡하고 고가의 제작비가 소요된다. SAILMER에서는 신개념으로 로봇 팔 형식의 가변 arm 식인 Pantograph형 핵연료교환기기 2기를 대칭으로 배치하였다. 보통 운전시에는 접어 원자로 상부에 두었다가 사용할 때에는 내려 하부틀 고정홈에 끼워 고정시키고 arm이 상하 좌우로 움직여 핵연료를 삽입 또는 인발한다. 작동시에는 상부구조물은 상부로 끌어 올린다.

2.6 잔열제거 계통

정상 또는 비정상 원자로 정지시 잔열을 제거하기 위하여 능동형 잔열제거계통(Active DHRS)과 피동형 보조잔열제거계통(Passive ADHRS) 두 종류를 설치하고, 각각의 계통도 중복성을 주어 두개씩 설치한다. 각 잔열제거계통에는 NaK을 구동 유체로 사용하며, 원자로에서는 Na/NaK 열교환기가 사용되고 최종적으로 잔열은 NaK/Air 열교환기에 의해 공기로 배출된다.

능동형 잔열제거계통은 배관에 전자펌프를 설치하여 NaK를 강제대류시키고 NaK/Air 열교환기에서도 환풍기로 강제 냉각시킨다. 이 계통은 반 환상형으로 증기발생기의 셀측 입구에 설치하고 두 개를 서로 붙여 한 개의 환상형을 이루므로 원자로 내의 유동은 반경방향으로 균일하다. 1기의 용량은 12MWt로 총 24MWt이며 정상운전시 출력의 5% 열을 제거시킨다. 피동형 잔열제거계통은 구동유체인 NaK와 최종 냉각매체인 공기의 자연순환에 의해 열을 제거시킨다. 이 계통의 Na/NaK 열교환기는 증기발생기의 일부분인 원통형 유동격리벽(Flow Separation Wall)과 원자로 용기의 내벽 사이에 설치한다. 정상 운전상태시에는 펌프의 흡입헤드에 의해 증기발생기 셀측에서의 압력강하(80kPa) 만큼 이 공간의 소듐 수위가 내려가므로 이 열교환기가 소듐에 잠기지 않고, 펌프 정지시나 비정상 상태에서 소듐 온도가 550℃ 이상 상승하면 소듐이 이 벽을 넘쳐서 흐르므로 이 열교환기가 소듐에 잠기게 된다. 그러므로 정상운전시에는 소량의 열이 제거되고 비상시 및 정지시에는 많은 양의 열이 교환된다. 원자로 제어봉 인발사고 이외의 어떠한 경우일지라도 이 계통만으로 냉각재의 온도가 700℃이하로 유지하도록 설계한다.

3. 소듐-물 반응

3.1 가상되는 사고

단일벽 전열관일 경우 전열관의 파손 메커니즘에 의하면 용접부나 관에 미세한 균열부가 생기고 장기간 성장하면서 소듐과 물이 접하게 된다. 소듐과 물의 반응생성물은 부식성이 매우 강하므로 균열부가 부식하여 확대되고 어느 정도 이상이면 균열부가 갑자기 확대된다. 이중벽일 경우

균열부가 두 관의 접촉면을 통하여 확산되지 않으므로 인접한 부위에서 동시에 외벽, 내벽에 균열이 발생하여 갑자기 부식이 확대될 확률은 매우 낮으므로 한쪽 벽의 파손을 신뢰성 있게 감지할 수 있는 2종류 이상의 감지장치를 설치할 수 있다. 그러므로 이중벽 증기발생기의 외벽이나 내벽 중 하나가 파손되는 것을 설계기준사고로 정한다. 외벽과 내벽이 동시에 파손되어 소듐과 물이 반응하는 경우는 중대사고(beyond design basis accident)로 간주하고 중대사고시에는 압력의 상승을 방지하기 위하여 원자로 상부의 카버그스 공간에 파열판을 설치하였고, 사고시 발생한 수소나 반응생성물이 노심내로 들어 왔을 때에도 부반응도를 갖도록 노심을 설계한다. 모듈형의 소규모 노심일 경우에는 가스가 주입되어도 대개 부반응도를 가지며 액상 반응생성물에는 산소가 포함되므로 부반응도를 증가시키는 역할을 한다.

3.2 파손감지 장치

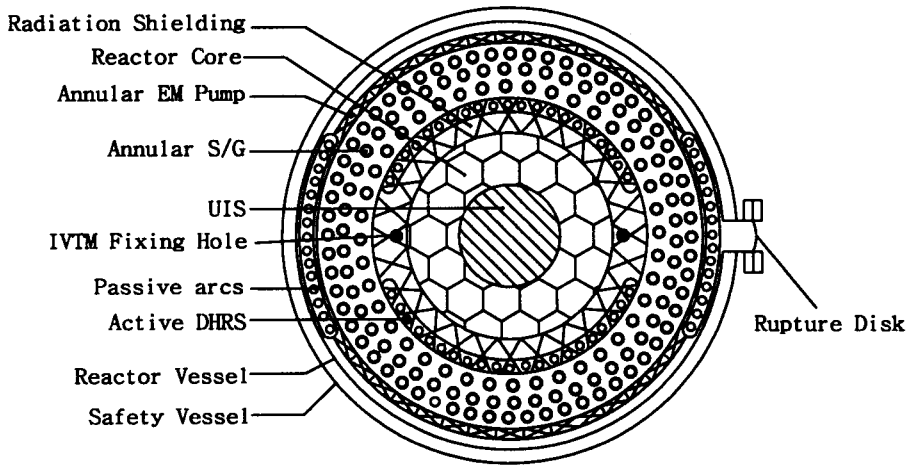
정상가동 및 정지시에도 이중벽 사이에 저압의 헬륨가스를 흐르도록 하여 미세 파손 부위에서 유입되는 소듐 이온이나 물 이온을 감지하고, 각 전열관의 헬륨가스를 별도로 계측하여 측정의 정확도를 높이고 파손시에는 파손된 전열관의 위치를 용이하게 식별할 수 있으므로 사고처리가 용이하고 핵연료교환시 정기적인 증기발생기 검사가 필요없다. 부차적으로는 카버그스인 알콘 속의 헬륨을 감지한다. 소듐-물 반응이 일어나는 중대사고에서는 기존 증기발생기의 누수 검출 방법인 카버그스속의 수소 감지, 카버그스의 압력 증가측정 및 소듐 수위의 측정 등의 방법을 사용하여 초기에 감지한다.

4. 결 론

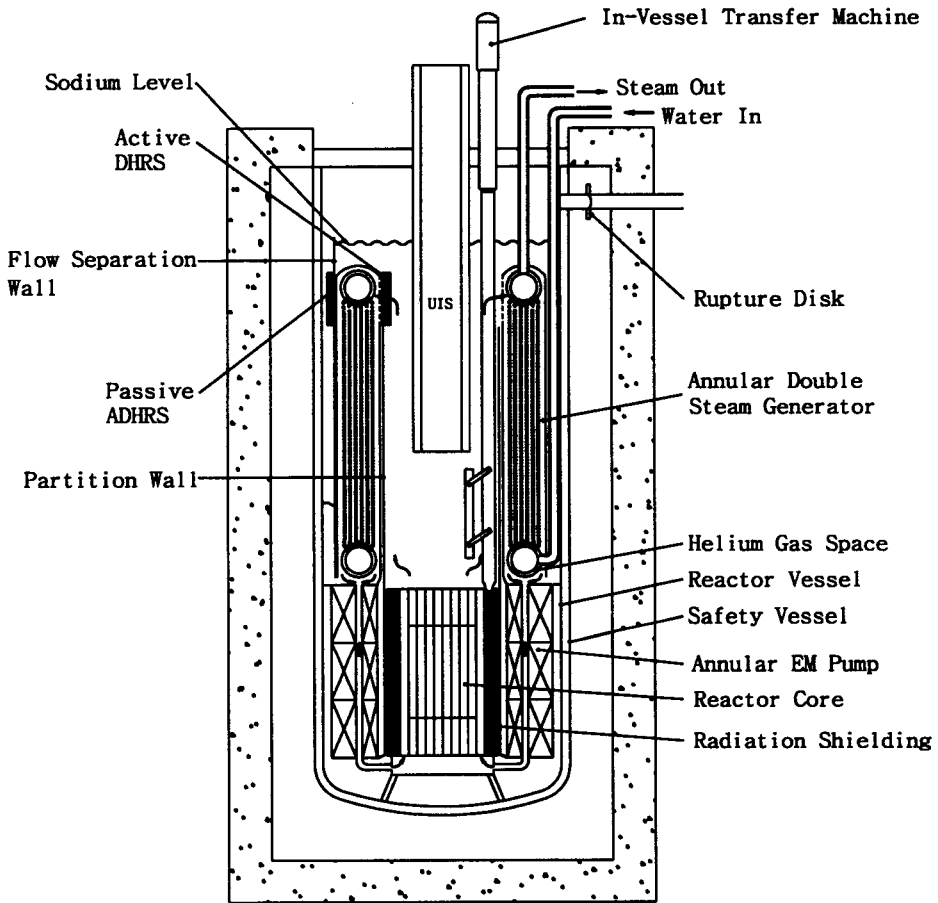
모듈형 액체금속로인 SAILMER 개념을 제안하였다. 이 노형은 고유 모델인 환상형 이중벽 증기발생기와 환상형 전자펌프를 원자로 내부에 설치하여 중간열교환계통과 1차 냉각재의 배관이 없는 단순하고 콤팩트한 액체금속로로서 기존의 개발 노형들 보다 경제성과 안전성이 우수한 형태이다. 중대사고인 소듐-물 반응사고는 액체금속로의 실용화를 제약하는 것들 중의 하나로서 증기발생기에서의 소듐과 물 반응사고에 대비한 연구개발과 증기발생기의 제작기술 개발이 심도있게 이루어지면 실현화가 가능할 것이다.

참고문헌

1. N. Kishihara, et al., "Feasibility Study on Double-Wall-Tube Type Primary Steam Generator," Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Japan, Oct., 1991.
2. K. Maeda, et al., "Design Study of the Large Scale FBR without Intermediate Heat Transport System," Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Japan, Oct., 1991.
3. K. Yosida, et al., "An Innovative LMFBR Concept Eliminating Intermediate Heat Transport System," 5th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-5), Nice, France, May, 1997.



(a) 원자로 상부에서 본 SAILMER 형상



(b) SAILMER Module

그림1. 액체금속로 SAILMER 개념도

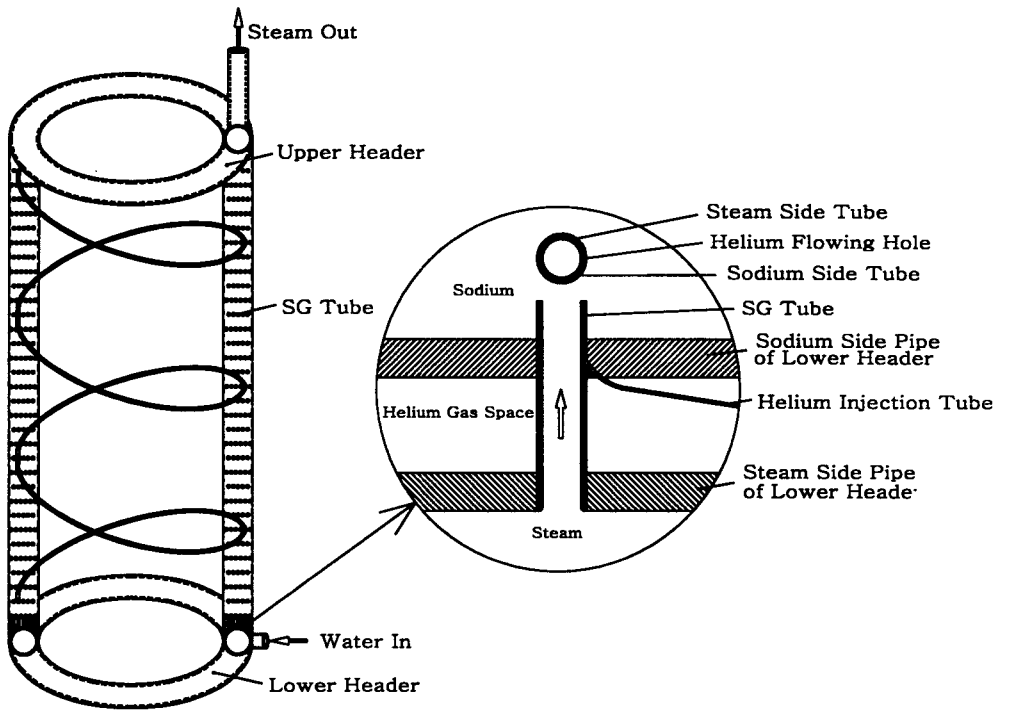


그림2. 환상형 이중벽 증기발생기

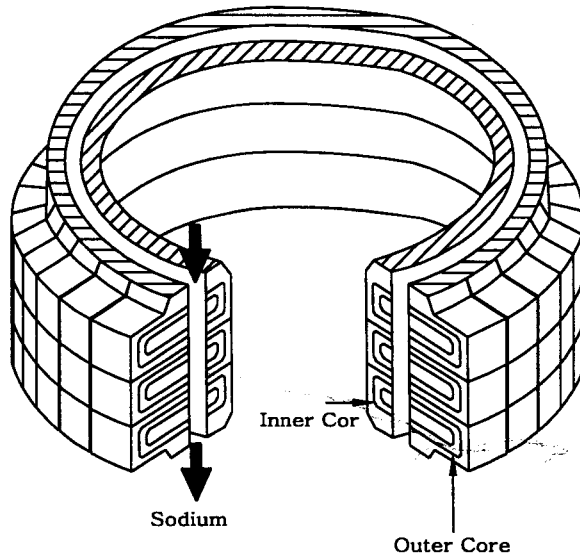


그림3. 환상형 전자펌프