

운전경험 분석을 통한 액체금속로 사고예방에 대한 연구

A Study on Accident Prevention of Liquid Metal Reactors through Operating Experience Analysis

윤영길, 안형준, 신안동, 정애주, 이재훈

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

우리나라는 1997년부터 국가 원자력중장기사업의 일환으로 액체금속로 실증로인 KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor)를 개발하고 있다. KALIMER의 안전성 향상을 위해서는 사고예방 및 완화능력을 강화해야 하며 이는 액체금속로에서의 사고사례를 조사 및 분석하여 설계단계에서 유사 사고의 예방 및 완화를 위한 수단과 대책을 반영함으로써 달성할 수 있다. 이를 위하여 MONJU, Superphenix, Phenix, PFR, JOYO, EBR-II, FFTF, BN-350, BN-600 등 국외 9개 액체금속로에 대하여 문헌에 나타난 운전경험을 조사하였으며, 주요 사고의 유형과 원인을 분석하였다. 분석결과 주요 사고 유형은 소듐누설, 소듐화재, 소듐-물 반응, 노심 반응도 이상 저하, 기기 진동, 소듐 에어로졸 침적 등으로 나타나고 있다. 그리고, 사고 유형별로 사고예방 및 완화를 위해 규제요건 및 설계에 고려해야 할 사항들을 도출하였다.

Abstract

A demonstration LMR (Liquid Metal Reactor), called as KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor), has been being developed as part of the nuclear mid and long-term projects of the government since 1997. To ensure the safety of the KALIMER, the capability to cope with accidents must be enhanced by incorporating means and measures to prevent and mitigate accidents into the design of the KALIMER. The means and measures can be found out through analyzing operating experience in LMRs. Therefore, operating experience reported in published literature was collected and analyzed for the following 9 foreign LMRs: MONJU, Superphenix, Phenix, PFR, JOYO, EBR-II, FFTF, BN-350, BN-600. The analyses results show that accidents can be categorized into the following major groups: sodium leakage, sodium fire, sodium-water reaction, abnormal decrease of core reactivity, components vibrations, sodium aerosol deposits. Based on the results of accident cause analysis for each category, the means and measures to prevent and mitigate the each accident category were obtained.

1. 서론

우리나라는 우라늄 자원 이용율의 획기적 향상, 사용후 핵연료의 재활용, 사용후 핵연료에 존재하는 초장주기 원소 (고준위 폐기물)의 소멸처리를 위해, 1997년부터 국가 원자력중장기사업의 일환으로 액체금속로 실증로인 KALIMER에 대한 설계기술을 개발하고 있다.

원자로의 안전성 향상을 위해서는 사고 대처능력을 향상시켜야 하며, 이는 가동중인 원자로에서 발생한 각종 사고에 대한 원인을 분석하여 사고의 예방 및 완화를 위한 수단 및 대책을 도출하여 설계에 반영하므로써 달성할 수 있다. 따라서 KALIMER의 안전성 향상을 위해서 액체금속로의 운전경험을 분석하여 규제요건 및 설계에 반영하는 것이 필요하다.

이를 위해서 이 논문에서는 액체금속로의 운전경험을 수집 및 분석하여 사고 예방 및 완화를 위해 규제요건 및 설계에 반영해야 할 사항들을 도출하였다. 우리나라에는 운전중인 액체금속로가 없으므로 가동중 경험을 갖고 있는 외국의 액체금속로를 대상으로 참고문헌 [1]-[17]에 나타난 사고를 조사하였다. 조사대상 액체금속로는 일본의 MONJU 및 JOYO, 프랑스의 Superphenix 및 Phenix, 영국의 PFR, 미국의 EBR-II 및 FFTF, 카자흐스탄의 BN-350, 러시아의 BN-600 등 9개 액체금속로이다.

2 사고 유형 및 원인

상기 9개 액체금속로에서 발생한 각종 사고를 참고문헌 [1]-[17]에서 조사하였고 주요 사고를 표 1에 요약하여 제시하였다. 표 1의 내용을 분석해 보면, 액체금속로에서의 사고는 다음과 같은 유형을 보이고 있다:

- ◆소듐누설, 소듐화재, ◆소듐-물 반응, ◆노심 반응도 이상저하,
- ◆기기 진동, ◆소듐 에어로졸 침적.

다음에서는 상기의 사고유형 별로 사고원인에 대한 분석을 수행하였다.

2.1 소듐누설, 소듐화재

소듐 누설은 주로 2차 소듐계통 및 관련 보조계통에서 발생하였고 누설위치는 대부분 배관이었다. Superphenix와 PFR에서는 핵연료 저장드럼 용기와 증기발생기 용기 등 대형용기에서도 소듐 누설이 발생하였으며 [1, 2], Phenix에서는 중간열교환기에서 [3], 그리고 Superphenix와 MONJU에서는 열전대 밀봉관 (thermocouple thimble) 용접부에서 누설이 발생하기도 하였다 [4, 5]. 한편 참고문헌 [6]에 따르면 DFR, KNK II, Phenix의 경우에는 1차 소듐계통에서도 소량의 소듐이 누설되는 경미한 사건이 발생한 것으로 보고되어 있다.

참고문헌 [6]에 의하면 1996년까지 유럽 및 러시아의 액체금속로에서는 125건의 소듐 누설 사건이 보고되었고, 일본의 JOYO에서는 누설사건이 없었으며, MONJU에서는 1회의 2차 소듐누설 사건이 있었으며, 미국의 FFTF와 EBR-II에서는 EBR-II에서의 보수기간 중 소듐화재를 제외하고는 누설사건이 없었다. 대표적인 소듐 누설사고는 다음과 같다:

- 1986년 Phenix 증기발생기 재가열기 입구 배관에서의 누설 (50kg 소듐 누설) [6, 7]
- 1987년 Superphenix 사용후핵연료 저장조에서의 누설 (20t 소듐 누설) [1]
- 1990년 BN-600 증기발생기 방출배관에서의 누설 (100kg 소듐 누설) [8]
- 1995년 MONJU 2차 소듐루프 고온관에서의 누설 (640kg 소듐 누설) [5]

소듐누설 사고의 원인은 소듐을 함유하고 있는 기기 (배관, 용기, 열전대 밀봉관 등)에서의 균열 발생, 밸브 씰의 손상, 부적절한 소듐가열, 보수결함 등으로 나타나고 있다. 참고문헌 [9]에 의하면 BN-600에서의 소듐누설 사고의 원인은 보수결함 (34%), 제작결함 (21%), 경년열화 (21%), 설계결함 (17%), 운전원인 (7%) 등인 것으로 분석되었다. 이 원인들 중에서 제작결함, 경년열화, 설계결함 등은 모두 재료에서의 균열발생과 연관이 되므로 결과적으로 재료에서의 균열발생이 소듐누설 사고의 가장 큰 원인인 것으로 판단된다. 기기에서의 균열발생 원인에 대해서는 "2.6 재료에서의 균열발생"에서 상세하게 논의할 것이다.

소듐화재는 소듐누설에 의해 발생하는데, 운전경험 자료가 불충분하여 분석을 수행하지 못하였

다. MONJU의 2차계통 루프 고온관에서의 소듐 누설로 화재가 발생하였고 [5], BN-600의 경우 1996년까지 28회의 소듐 누설이 발생하여 8회의 화재가 발생하였다 [10].

2.2 소듐-물 반응

증기발생기는 소듐과 물을 함유하고 있으므로 압력경계를 유지하고 있는 전열관의 건전성이 손상되면 물이 소듐으로 유입되어 소듐-물 반응이 발생한다. Phenix [3], PFR [3], BN-350 [8, 4], BN-600 [11]에서 소듐-물 반응이 발생하였음이 보고되었다. 전열관 손상의 원인은 고온력지점에서 피로현상, 전열관-전열관 고정판에서의 응력부식균열, 진동에 의한 접촉마모, 부식 등이었다. 대표적인 소듐-물 반응사고는 다음과 같다:

- 1975년 BN-350에서 가압된 물이 증발기 (evaporator)로 유입되어 120개 전열관 손상 [4]
- 1987년 PFR에서 다량의 물이 소듐과 반응하여 40개 전열관 파손, 70개 전열관 변형 [3]

2.3 노심반응도 이상 저하

1차 소듐에 불순물이 유입될 경우 소듐의 밀도변화로 노심 반응도가 변화되며, 심할 경우 원자로가 정지된다. 이러한 사건이 Phenix [6], Superphenix [3], PFR [3], BN-600 [8]에서 보고되었다. Phenix에서는 카바게스, Superphenix에서는 공기 및 카버게스, PFR에서는 1차계통 펌프 기름, BN-600에서는 보수과정 중에 수소함유 물질이 유입되었다. 이러한 사건으로 발전소의 안전성이 영향을 받지는 않았으나, 1차 소듐의 정화를 위해서 원자로를 정지하고 수개월에 걸친 보수작업을 수행해야 했다. 대표적인 사건은 다음과 같다:

- 1990년 Superphenix 소듐에 카버게스 유입으로 약 500kg의 소듐 산화물 생성
- 1991년 PFR 1차 소듐에 1차 계통 펌프 기름 35리터 유입

2.4 기기 진동

기기에서 발생하는 진동의 원인은 크게 유체의 유동에 의한 유동유발진동 (flow induced vibration) 과 회전기계의 축정렬 불량 등에 의한 기계적 진동으로 구분된다.

▣ 유동유발진동

이 현상은 기기 내부구조물의 고유진동수가 기기 내부를 흐르는 유체에 의해 생성되는 유동학적 하중의 가진 주파수 (exciting frequency)와 일치 또는 근접하게 될 경우 공진현상에 의하여 발생하게 된다. 이러한 경우 내부구조물에 과도한 진동과 소음이 발생하게되며, 진동의 결과로 변형 또는 피로균열이 발생하여 기기가 손상을 입게된다. 특히 좁은 틈새로 유체의 유동경로가 형성될 경우에 인접 내부구조물에서 빈번하게 발생한다. 유동유발진동에 의한 균열문제는 “2.6 재료에서의 균열발생”에서 다루고 있다. 유동유발진동은 원자로 내부구조물과 증기발생기의 전열관-전열관 지지봉에서 발생하였으며 대표적인 사건은 다음과 같다 [3]:

- 1984년 Superphenix에서 원자로 내부구조물에 계산치를 초과하는 진동 발생
- 1991년 PFR의 2개 증발기의 전열관 또는 전열관 고정봉의 진동에 의한 소음 발생

▣ 기계적 진동

Phenix, PFR, KNK II의 냉각재 펌프에서 기계적 진동이 발생하였다 [1]. Phenix의 경우에는 1차 펌프의 설계결함이 원인이었으며, PFR에서는 1차 펌프 shield plug의 표면처리 부적절로 인하여 샤프트가 휘게됨에 따라 hydrostatic bearing이 손상을 입어 진동이 발생하였다. KNK II에서는 소듐펌프의 축이 잔류응력 또는 크리프에 의해서 휘게 되어 진동이 발생하였다. 결론적으로 기계적 진동의 원인은 냉각재 펌프의 설계결함 및 제작결함이 주요 인자인 것으로 판단된다.

2.5 소듐 에어로졸 침적

PFR, Phenix, KNK II에서 소듐 에어로졸 침적이 발견되었다 [1]. PFR에서는 제어봉 구동장치의 자석표면에 소듐 에어로졸이 침적되었으며, Phenix에서는 제어봉의 차폐피스톤과 안내관 사이에 소듐이 침적되어 제어봉 삽입에 지장이 초래되었다. 또한 KNK II 의 대형 회전플러그와 원자로용기 사이에 소듐이 침적되어 플러그의 회전에 문제를 야기시켰다.

이러한 소듐 에어로졸 침적은 기기가 카버개스에 장시간 노출될 때에 발생하는 것으로 알려져 있으며, 특히 제어봉 구동장치와 회전플러그와 같이 부품 사이의 간극이 좁은 곳에서 주로 발생한다.

2.6 재료에서의 균열 발생

액체금속로 재료에서의 균열은 주로 배관, 용기, 열전대 밀봉관 (thermocouple thimble) 등의 용접부에서 발생하였으며, 발생원인은 크게 설계 및 제작 결함, 잔류응력 및 수소취화에 의한 지연 균열, 부식환경 및 잔류응력에 의한 응력부식균열, 열성층현상에 의한 열피로현상, 유동유발진동에 의한 피로균열 등으로 구분되어 나타나고 있다.

▣ 설계 및 제작 결함

Phenix [6, 7], PFR [2, 3], BN-600 [9]에서 설계 및 제작 시의 결함으로 인한 균열이 발생하였다. 일반적으로 이러한 결함이 액체금속로 재료에서의 균열발생 원인 중에서 가장 큰 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다 [3]. 배관의 설계 및 제작 시에 용접되는 배관의 벽 두께 변화 또는 정렬불량 등으로 배관에 기하학적 불연속성이 존재하게 되면 용접부에 고응력이 작용하게 되므로 균열이 발생하게 된다.

▣ 경년열화

일부 페라이트강 및 오스테나이트 강의 경우 소듐 또는 물과 계속적으로 접촉할 경우 고응력 지점에서 균열이 발생하는 경년열화현상을 보이고 있다. 대표적인 균열발생 사례는 다음과 같다:

■ 15Mo3 페라이트강

1987년 Superphenix 사용후핵연료 저장용기에서 발생한 소듐누설의 원인이 되었던 용접부 균열은 15Mo3 페라이트강 용접부의 잔류응력과 수소취화에 의한 것으로 밝혀졌으며 유사한 재료로 제작된 SNR 300의 소듐저장탱크 용접부에서도 수소취화에 의한 균열이 발생하였다. 15Mo3 페라이트강에서의 수소취화에 의한 균열발생은 일반현안인 것으로 판단된다 [4].

■ 321 스테인레스강

1989년 Phenix 2차 소듐계통의 AISI 321 스테인레스강 (티타늄으로 안정화시킨 스테인레스강)으로 제작된 기기에서 균열이 발생하였는데 유사한 균열이 동일한 재료로 제작된 버퍼탱크에서도 발견되었다. 1986년에도 3번 재가열기 입구 배관에서 유사한 균열이 발견되었으며, 321 스테인레스강으로 제작된 PFR 증기발생기 용기에서도 1987, 1988, 1990년에 균열이 발생하는 등 321 스테인레스강에서의 균열발생은 일반현안인 것으로 판단된다. 이 균열현상의 원인은 탄화물 석출에 의하여 취화된 용접부에 잔류응력에 의하여 입계응력부식 균열이 발생한 것으로 평가되었다. [8, 11]

■ 2¼ Cr 1 Mo 페라이트강

2¼ Cr 1 Mo 페라이트강으로 제작된 PFR 증발기 (evaporator)는 1979년 이후부터 전열관-전열관 고정판 용접부위에 균열이 빈번하게 발생하여 약 3000개의 전열관에 대한 슬리빙을 시행하였다. [8] 이 문제의 해결을 위해서 전열관 확장부위에 shot peening을 시행한 것으로 보고되었는데 이는 전열관 확장부위의 잔류응력을 제거하기 위한 것으로 판단된다. 따라서 이 문제는 전열관 확장과정에서 생성된 잔류응력이 전열관 확장부위에 존재하는 상태에서 고온의 물과 계속 접촉하여 확장부위에 응력부식균열이 발생한 것으로 추정된다.

▣ 열피로 및 기계적 피로

액체금속로 재료에 발생한 피로균열은 크게 열성층(thermal stratification) 현상에 의한 열피로와 유동유발진동에 의한 기계적피로에 의한 것으로 나타나고 있다.

■ 열성층현상

Phenix에서 1976년 및 1993년에 각각 중간열교환기와 확장탱크에서 열성층현상에 의한 균열이 발생하였으며 [8], Superphenix에서도 1990년 2차 소듐 밸브의 누설밀봉 실패에 따라 야기된 열성층현상에 의하여 균열이 발생하였다 [4]. 이러한 현상은 고온 및 저온의 소듐이 혼합되는 지역에서 혼합이 부적절하게 이루어 질 때, 또는 격리밸브에 의해 고온 및 저온의 소듐이 서로 격리되어 있는 상황에서 격리밸브의 누설밀봉이 실패할 때, 고온 및 저온의 소듐이 밀도 차이로 인하여 서로 섞이지 못하고 상하로 분리된채 유동층이 형성되어 발생하게 된다. 이 때 두 유동층의 큰 온도차로 인하여 용접부에 큰 열응력이 유도되며 이 유동층이 주기적으로 이동하거나 출렁거리서 용접부에는 열피로현상이 발생하여 결국에는 균열이 생성된다.

■ 유동유발진동

1985년에 Superphenix 증기발생기 소듐 출구배관에 설치되어 있는 열전대 밀봉관이 유동유발진동에 의해서 밀봉 용접부에 균열이 발생하여 소듐이 누설되었다 [9]. 또한, 1995년에 MONJU의 2차 소듐 루프 고온관에 설치된 열전대 밀봉관에서도 유동유발진동에 의해서 피로균열이 발생하여 그 결과로 밀봉관이 절단되고 그 내부를 통하여 대량의 소듐이 누설되었으며 화재가 발생하였다 [6, 12]. 이 두 사건은 동일한 원인에 의하여 발생하였다. 즉, 소듐이 열전대 밀봉관의 주위를 흐를 때 일어나는 vortex shedding에 의해 밀봉관이 소듐의 유동방향으로 진동하게 되고 고주파 피로에 의해 용접부 또는 기하학적 불연속성이 존재하는 부위에 균열이 발생한 것이다.

3. 사고예방 및 완화를 위한 설계 고려사항

여기에서는 “2 사고 유형 및 원인”에서 수행한 액체금속로의 사고원인 분석 결과에 기초하여 국내에서 개발중인 액체금속로의 안전성 향상을 위해 규제요건 및 설계에 반영해야 할 사항들을 도출하였다.

3.1 소듐누설

소듐누설의 원인은 소듐을 함유하고 있는 기기의 용접부 균열, 밸브씰 손상, 부적절한 소듐가열, 부적절한 보수공정 등이었다. 그리고 용접부 균열의 원인은 설계 및 제작 결함, 경년열화, 열피로 및 기계적피로 등이었다. 소듐누설의 방지를 위해서는 다음사항을 설계 시에 고려하여야 한다:

▣ 용접부 설계 및 제작결함 방지

설계단계에서 각종 배관 및 용기의 용접부에 벽두께의 차이에 의한 기하학적 불연속성이 존재하지 않도록 세심한 주의를 기울여야 하며, 배관의 설치단계에서 배관 정렬불량이 발생하는 것을 방지하여 용접부에 과도한 응력이 작용하지 않도록 하여야 하며, 수소취화를 예방할 수 있는 용접 공정을 채택하여야 한다.

▣ 입증된 재료의 사용

액체금속로 환경조건 하에서 경년열화현상을 보이는 15Mo3 페라이트 강, 21/4 Cr 1 Mo 페라이트 강, 321 스테인레스 강 등의 사용을 피해야 한다. 특히 21/4 Cr 1 Mo 페라이트 강은 KALIMER의 증기발생기 전열관 재료로서 선정되어 있는데 이미 영국의 PFR에서 확관부위의 응

력부식균열로 인하여 균열이 발생한 사례가 있으므로 응력부식균열에 대한 저항성이 큰 재료를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나, 사용이 불가피한 경우에는 잔류응력의 발생이 최소화되는 확관방법을 선택하여야 하며 해당 확관방법에 의하여 응력부식균열이 발생되지 않음을 입증하여야 할 것이다. 기기 재료의 선정 시에는 운전경험 또는 실험을 통해서 액체금속로 환경조건 하에서 수명기간 동안 경년열화 현상에 의해 건전성이 크게 영향받지 않는다는 것이 충분히 입증된 재료를 사용하여야 한다.

▣ 열성층현상 방지

고온 및 저온의 소동이 혼합되는 기기를 확인하여야 하며, 해당 기기에서 부적절한 소동 혼합이 발생하지 않도록 설계하여야 한다. 만약 유동조건이 개선이 어려운 경우 해석 또는 실험을 통하여 해당 기기에 가해지는 열하중을 평가하여 설계 시에 설계하중으로서 고려해야 한다. 특히 용접부의 건전성이 수명기간 동안 상실되지 않음을 확인하여야 한다. 또한 격리밸브에 의하여 고온의 소동과 저온의 소동이 격리되는 배관의 경우 만일에 발생할 수도 있는 누설밀봉의 실패를 고려하여 이중으로 격리밸브를 설치하여야 한다.

▣ 유동유발진동 손상방지

열전대 밀봉관의 경우, 실험 및 해석을 통하여 운전 유동조건 하에서 vortex shedding에 의해 발생하는 진동에 의해 열전대 밀봉관이 손상되지 않음을 검증하여야 한다. 설계단계에서 열전대 밀봉관에 기하학적 불연속성이 존재하지 않도록 설계하여 응력집중을 방지해야 하며, 가동중 검사가 가능하도록 설계해야 한다. 그리고 만일의 경우 밀봉관이 파손되더라도 소동이 누설되지 않도록 소동의 누설경로를 차단하는 설계를 도입해야 한다.

▣ 부적절한 소동가열 방지

설계시에 소동 가열설비의 설계기준을 강화하여 부적절한 소동가열을 방지하여야 하며, 부적절한 소동가열이 발생할 경우에도 소동누설을 방지할 수 있는 설계수단 및 대책이 강구되어야 한다.

▣ 소동누설 탐지설비 강화

참고문헌 [11]에 의하면 소동누설 사건의 약 1/2에 해당되는 사건이 운전원에 의해 탐지되거나 보수검사 시에 발견되었음을 보여주고 있다. 이는 소동이 누설된 지역에 누설탐지기가 설치되어 있지 않았거나 누설탐지 경보기가 작동하기 전에 운전원이 발견했기 때문이다. 또한, 기존 발전소의 경우 소동 에어로졸 탐지, 연기 탐지, 온도측정 등 다양한 소동 누설 탐지 방법에 의한 정보들이 제어실의 분산된 패널에 제공되는 관계로 운전원이 소동 누설을 신속하게 파악하는 것이 어려웠다. 따라서 소동 누설의 조기 발견을 위해서는 다음사항을 설계시 고려해야 한다:

- 누설탐지 감시시스템의 신뢰성 확보,
- 누설탐지 감시시스템의 감시범위에 대한 평가를 통하여 누설탐지의 사각지대 제거,
- 제어실에 소동 누설탐지 전용패널을 도입하여 운전원에게 소동 누설탐지와 관련된 모든 정보를 그룹화하여 제공.

3.2 소동화재

운전경험 자료에 의하면 소동의 연소특성이 나무, 고무, 오일 등과는 상당히 다르며, 소동누설에 대비한 기존의 설계요건들로 인하여 소동화재가 주변의 구조물에 화재를 야기시키지 않는 것으로 나타났다. [10] 소동 화재와 관련해서는 운전경험 자료가 부족하여 설계에 반영할 사항을 도출하지 못하였다. 향후 소동화재와 관련된 운전경험 자료에 대한 추가적인 조사 및 연구가 필요하다.

3.3 소듐-물 반응

소듐-물 반응사고는 증기발생기의 전열관 건전성이 상실될 때 발생하므로 이 사고를 예방하려면 전열관의 건전성을 보장하여야 한다. 액체금속로 전열관 손상의 원인은 유동유발진동에 의한 피로 현상 및 접촉마모, 전열관-전열관 고정판에서의 응력부식균열 등으로 나타나고 있다. 따라서 이러한 원인들을 제거하기 위해서는 설계단계에서 다음사항을 고려해야 한다:

- 전열관 재료의 선정 시에 응력부식균열 등 부식에 대한 저항성이 큰 재료를 선택하여야 하며,
- 유동유발진동에 대한 해석 및 실험을 통하여 증기발생기 내부 유동조건을 개선하여 전열관에 발생하는 진동의 크기를 최소화하고,
- 적절한 전열관 지지방법의 선택을 통하여 전열관이 전열관 고정판 또는 지지봉과의 접촉마모에 의해 건전성이 상실되는 것을 방지하여야 하며,
- 전열관을 전열관 고정판에 고정시키기 위한 확관방법의 선택시에 확관작업후 전열관 확관부위에서의 잔류응력이 최소화될 수 있는 방법을 선택해야 한다.

수집된 운전경험 자료에는 소듐-물 반응 사고시에 그 결과를 완화시키기 위해 설치된 계통 및 기기의 문제점이 잘 나타나 있지 않아서 관련 설비의 설계시 고려사항을 도출할 수 없었다. 이러한 사항들에 대해서는 향후 추가적인 조사 및 연구가 필요하다.

3.4 기기 진동

기계적 진동은 주로 기계식 펌프에서 발생하고 있으므로 전자식펌프를 채택하고 있는 KALIMER에는 해당되지 않으므로 고려의 대상에서 제외하였다. 유동유발진동이 문제가 되는 기기는 원자로 내부구조물이므로 원자로 내부구조물에서의 진동 문제 해결을 위해서 설계시 다음사항을 고려하여야 한다:

- 실험을 통하여 소듐 유동 가진함수에 대한 확인과 진동해석방법의 적합성을 평가하고,
- 원자로 내부구조물에 대한 진동해석을 통하여 원자로 내부구조물의 고유 진동수와 소듐 유동에 의한 하중함수의 가진 진동수를 격리시키므로써 원자로 내부구조물의 진동응답을 제한하여야 하며,
- 가동전시험 기간 중 원자로용기 내부에서 원자로 내부구조물에 대한 진동측정실험을 통해서 가진함수, 진동해석방법, 진동응답 등에 대한 타당성을 실증하여야 한다.

액체금속로의 경우에는 원자로 내부구조물의 진동이 노심의 반응도에 민감한 영향을 미칠 수 있으므로 특히 관심을 기울여야 한다.

3.5 소듐 순도관리

대부분의 소듐 오염사건의 경우 카버게스 또는 1차 소듐의 순도를 측정하는 설비가 없어서 불순물 유입 초기에 소듐이 오염된 사실을 발견하지 못하였고 불순물이 대량 유입되어 소듐 밀도가 변화되어 반응도 이상 저하로 원자로정지가 일어난 후에야 불순물이 유입된 것을 알게되었다. 따라서 불순물의 유입을 방지하고 유입되더라도 초기에 이를 탐지하여 불순물의 대량 유입을 막기 위해서는 설계시 다음사항을 고려하여야 한다:

- 카버게스 및 1차 소듐 농도에 대한 가동중 감시를 연속적으로 수행할 수 있는 설비를 구비하여야 하며,
- 카버게스 누설밀봉 능력을 향상시켜 공기가 유입되는 것을 막아야 하며,
- 카버게스 건조설비를 설치하여 카버게스 충전시에 수소함유 물질이 유입되는 것을 차단하여야 한다.

3.6 소듐 에어로졸 침적

제어봉 및 정지봉 구동장치, 회전플러그 등의 기기에서의 소듐 에어로졸 침적문제를 해결하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다 [4, 14]:

- 소듐 에어로졸을 함유하고 있는 카버개스에 노출되는 이동부품은 expansion bellow 또는 이중 밀봉 등의 구조적 요소에 의해서 보호되어야 하며,
- 만약 고정부품과 이동부품 사이에 공간을 허용할 수 밖에 없는 경우, 환기개스 (venting gas)를 사용하여 해당 부분에 카버개스가 직접 접촉되는 것을 막아야 하며, 환기개스의 순도를 계속하여 감시하여야 하며, 소듐 침적물의 고화방지를 위한 가열설비를 강구하여야 하며,
- 제어봉 및 정지봉에 대해서, 소듐 에어로졸 침적에 의한 작동이상 유무를 확인하기 위하여 토오크 (torque) 측정장치를 설치하여 해당 정보를 제어실에 제공하여야 하며, 토오크가 기준치를 초과할 경우에 운전원에게 알려줄 수 있는 경보장치를 설치하여야 하며, 필요시 hot cell에서 분해 및 조립할 수 있도록 설계되어야 하며,
- 보수작업 중에 소듐계통의 개방이 불가피할 경우를 대비하여 카버개스계통에 대한 효과적인 자동 압력조절을 수행할 수 있는 장치를 설치하여 회전플러그에 소듐 에어로졸이 침적되는 것을 방지하여야 하며, 회전플러그의 환형공간을 줄여야 한다.

4 논의 및 결론

액체금속로의 안전성 향상을 위해서는, 가동중 액체금속로에서의 사고원인을 분석하여 유사 사고의 발생을 예방 및 완화하기 위한 수단 및 대책을 도출하여 규제요건 및 설계에 반영하는 것이 필요하다. 이를 위하여 문헌상에 보고된 9개 액체금속로에 대한 사고를 조사하였고 그 유형을 분류하였다. 주요 사고유형은 소듐누설, 소듐화재, 소듐-물 반응, 노심 반응도 이상저하, 기기 진동, 소듐 에어로졸 침적 등으로 나타났으며, 각각의 사고유형에 대한 원인분석을 통하여 해당 사고의 예방 및 완화를 위한 설계 고려사항들을 도출하였다.

이러한 설계고려사항들이 액체금속로 규제요건 및 신규 액체금속로 설계에 반영된다면 기존의 액체금속로에서 발생한 사고의 발생을 예방할 수 있을 것이며, 만약 발생한다 하더라도 그 결과를 조기에 완화할 수 있을 것으로 기대된다.

관련 자료의 부족으로 소듐화재 관련 문제점과 소듐-물 반응사고 완화설비에 관련된 문제점에 대해서는 분석을 수행하지 못하였다. 향후 이들 분야에 대한 분석이 요구된다.

참고문헌

1. M. Sauvage, A. M. Broomfield, and W. Martin, "Overview on European Fast Reactor Operating Experience", Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol. I, p.2.1/1-2.1/10, Oct. 28 - Nov. 1, 1991, Kyoto, Japan.
2. C. V. Gregory, "Operating experience with the prototype fast reactor at Dounreay", Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto (Japan), 1991, Vol. I, p.5.3/1-5.3/10.
3. W. Marth, "The Story of the European Fast Reactor Cooperation", Kfk-5255, Kernforschung- szentrum Karlsruhe, Dec. 1993.
4. B. Barré and J. Leclere, "French Design Principles and R&D Related Activities to Enhance Sodium Heat Transport Systems Safety", Proceedings of 10th Pacific Basin Nuclear Conference, Oct. 20-25, 1996, Kobe, Japan, p.853-860.

5. Takeo Suzuki et al, "Monju secondary heat transport system sodium leak", Proceedings of 10th Pacific basin nuclear conference, vol. 1, Oct 1996, 906 p,843-852, Kobe (Japan), Oct, 20-25, 1996, Atomic Energy Society of Japan,
6. X. Elie and J-M. Chaumont, "Operation Experience with the Phenix Prototype Fast Reactor", Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto (Japan), 1991, Vol. I, p.5.1/1- 5.1/10.
7. L. Martin, J. Dubouis, J. D. C. Henderson, and W. Kathol, "Leak Before Break" Operating Experience from European Reactors, Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol. I, p.5.4/1-5.4/14, Oct, 28 - Nov. 1, 1991, Kyoto, Japan.
8. L. A. Kochetkov et. al, "Operating experience of fast breeder reactors in the USSR, Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Oct, 28-Nov. 1, 1991, Kyoto, Japan, vol.1, p.2.6/1-2.6/10,
9. Yu. K. Buksha, "Status of sodium cooled fast reactor development in the Russian Federation", IAEA-TECDOC-876, p.189-210, International Atomic Energy Agency, April 1996
10. V. M. Poplavski, "The Experience of Design and Operation of Sodium Heat Transport Systems in Russia", Proceedings of 10th Pacific Basin Nuclear Conference, Oct, 20-25, 1996, Kobe, Japan, p.861-865.
11. Yu. K. Buksha, "Status of sodium cooled fast reactor development in the Russian federation", IAEA-TECDOC-1015, p.149-178, International Atomic Energy Agency, April 1998
12. Tatsuya Inoue and Saburo Kikuchi, "Construction and Operating Experience of Prototype Fast Breeder Reactor MONJU", Proceedings of 10th Pacific basin nuclear conference, vol. 1, Oct 1996, 906 p,735-740, Kobe (Japan), Oct, 20-25, 1996, Atomic Energy Society of Japan.
13. W. Steiger and J. Schreibermaier, "Some experiences with sodium exposed components in KNK", Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol. I, p.5.2/1-5.2/10, Oct, 28 - Nov. 1, 1991, Kyoto, Japan
14. C. L. Rigoleur, "Fast Reactor Development Programme in France during 1994", IAEA-TECDOC-876, Progress in liquid metal reactor technology, p.35-100, IAEA, April 1996
15. J. I. Sackett, "Operating and test experience of EBR-II", Proceedings of international conference on fast reactors and related fuel cycles, Kyoto (Japan), Atomic Energy Society of Japan, 1991, vol. 1, p.2.4/1-2.4/19
16. F. Asakura, et al, "The experience of experimental fast reactor JOYO operation and maintenance, Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto (Japan), 1991, Vol. I, p.2.7/1- 2.7/10.
17. D. J. Swaim, et. al, "Ten years operating experience at the fast flux test facility: a decade of excellence", Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Oct, 28-Nov.1, 1991, Kyoto, Japan, p.2.3/1-2.3/11.

표 1. 액체금속로 운전경험 요약

원자로	연도	기기	위치	사고유형	원인	비고
Phenix	1976	IHX	상부카버 플레이트 용접부	노심으로 2차소듐 누설	열성증현상 관련 균열	
	1982/ 83	SG 재가열기	용접부	소듐-물 반응	피로균열	4회의 소듐-물 반응
	1984	IHX	관형공간	노심으로 2차소듐 누설	보수작업 결함에 의한 균열	1976년 보수작업 결함
	1986	SG 재가열기	tee 용접부	2차소듐 누설	잔류응력에 의한 지연균열	321 SS 경년열화, 약 50kg 소듐누설
	1988	IHX	관형공간	노심으로 2차소듐 누설	균열	IHX 설계변경
	1989	1차소듐	노심	반응도 저하	소듐에 카버게스 유입	소듐 밀도변화로 원자로 정지
	1989	321 SS 제작기기	용접부	균열발생	잔류응력에 의한 지연균열	321 SS 경년열화
	1990	노심		반응도 저하	노심의 기계적 진동 (추정)	
	1993	2차소듐계통 대형기기	용접부	균열발생	경년열화 관련 균열	321 SS 제작기기
	1993	2차소듐계통 대형기기	용접부	균열발생	열성증현상 관련 균열	304 SS 제작기기
		1차펌프		진동발생	설계결함	
	CRDM		소듐에어로졸 침적	카버게스에 노출		
Super- phenix	1984	원자로 내부구조물		진동발생	유동유발진동	반사체집합체 설계변경
	1985	열전대	thimble 밀봉용접부	균열발생	유동유발진동	thimble 길이 축소로 고유진동수 증가시킴
	1987	사용후핵연료 저장조	저장용기 용접부	균열발생	용접부 수소취화	15Mo3 페라이트강 경년열화

표 1. 액체금속로 운전경험 요약 (계속)

원자로	연도	기기	위치	사고유형	원인	비고
Super-phenix	1990	2차소듐계통	용접부	2차소듐 누설	열성증현상에 의한 피로균열	벨브 누설밀봉 실패로 열성증현상 발생
	1990	1차소듐		소듐에 물순물 유입	카버게스 펌프에 구멍 발생으로 공기유입	소듐산화물 500 kg 생성
	1994	HX	argon bell	소듐에 물순물 유입	카버게스가 1차소듐에 유입	
PFR	1976	SG 증발기	전열관-전열관 고정판 용접부	소듐-물 반응		
	1982/1986	붕괴열제거계통, 공기열교환기	전열관-헤더 용접부	균열발생	gas locking 과 pipe blocking에 의한 피로균열	설계 개선
	1987	SG 과열기	2호기 전열관	소듐-물 반응	전열관진동에 의한 접촉마모	40개 전열관파손, 70개 전열관 손상, 과열기 내부유동 변경
	1987	SG 재가열기	2호기 공기 용접부	균열발생	용접결함	321 SS 제작용기
	1988	SG 재가열기	1호기 공기 용접부	균열발생		321 SS 제작용기
	1990	SG 재가열기	1,2 호기 용접부	균열발생	잔류응력	321 SS 제작용기
	1991	1차소듐		소듐에 물순물 유입	펌프오일 누설밀봉 실패	
	1991	증발기		소듐 발생	유동유발진동	
		정지계통	흡수봉 구동장치	흡수봉 낙하문제	소듐 에어로졸 침적	
		1차 펌프		진동발생	샤프트킴, 베어링 손상	
	2차 펌프		진동발생	베어링 seizure		
JOYO		붕괴열제거계통, 전자펌프	여자코일	전자펌프 성능저하	염분침투로 절연저항 감소	
MDNJU	1995	2차소듐계통	열전대밀봉관	2차소듐누설	유동유발진동에 의한 파손	밀봉관 길이 축소, 내부누설경로 폐쇄
FFTF	1982/1986	노심	줄구 오리피스	냉각재 압력강하	물순물 퇴적에 의한 냉각재 유동저항 증가	
	1987/1989	핵연료 이송포트	플러그	플러그 고착 및 변형	산화우라늄 분말침적으로 압축응력발생	

표 1. 액체금속로 운전경험 요약 (계속)

원자로	연도	기기	위치	사고유형	원인	비고
BN-350	1973/ 1975	SG	전열관 용접부	소듐-물 반응		75년사건시 120개 전열관 손상, 약 800t의 물이 소듐과 접촉
	1989	SG		소듐-물 반응	전열관 부식	
BN-600	1987	1차소듐	노심	반응도 저하	수소함유물질 유입	보수 및 카버가스 증전과정에서 유입
	1990	SG	방출배관	2차소듐 누설		2차소듐 100kg 누설
	1991	SG	재가열기	소듐-물반응		4kg 물이 소듐에 유입
	1994	2차계통	IHX 방출배관 밸브	2차소듐 누설	보수작업 실수	1.3m ³ 소듐누설 화재발생
	~/ 1996	SG	전열관	소듐-물반응	전열관건전성 상실	12회 소듐-물 반응 사고 발생
	~/ 1996			소듐누설		28회 소듐누설 사건중 8회 소듐화재 발생