

KALIMER 설계기준사고 선정시 노심붕괴사고 배제에 대한 고찰 Exclusion of Core Disruptive Accident from Design Basis Accident Envelope in KALIMER

Young Min Kwon, Soo Dong Suk, Yong Bum Lee
Korea Atomic Energy Research Institute
ymkwon@kaeri.re.kr

1. 서론

액체금속로 설계기준사고(DBA)가 모든 원자로 사고를 포괄하기 위해서는 DBA 선정 절차시 물리적 확실성을 기본으로하여 일어날 수 있는 잠재적인 모든 사고를 평가하여야 한다. KALIMER 는 사고예방과 사고결과 완화 개념을 기본으로한 설계이지만 그 적절성을 증명하는 일은 인허가 측면에서 매우 중요하다. 일반적으로 노심붕괴사고(CDA) 방지계통은 높은 신뢰도를 가지기 위해서 많은 보수적인 여유도를 가지고 설계하지만, 반면에 CDA 완화계통은 DBA 해석에서 요구되는 보수적인 방법론 보다는 불확실성을 적절히 고려한 최적해석을 사용하여 평가한다. 본 연구에서는 CDA 방지계통의 설계특징과 가상사고시 계통변수의 논리적인 상호관계를 고려하여 KALIMER bounding DBA로부터 CDA 를 배제할 수 있음을 고찰하였다.

2. CDA 발생기준

액체금속로의 노심 안전성을 위협하는 모든 잠재적인 사고는 사고경로에 무관하게 결과적으로 노심 열제거가 부족하거나 또는 노심 열생성이 과도하여 발생한다고 볼 수 있다. 물론 이 두 요인이 복합하여 사고가 발생할 수 있다. KALIMER 는 중간열전달 계통이나 BOP 측의 사고로 인해 노심 안전성이 직접 위협 받지 않는다. 그림 1 은 노심 열생성과 열제거 간의 불균형으로 인해 발생 가능한 사고경로를 보여준다. 제시된 사고가 설계특성에 의해 적절하게 제한되거나 사고결과를 완화시키지 못하면 노심이 용융되는 CDA 로 확대될 수 있다.

CDA 는 노심 열제거가 유지되는한 발생하지 않는다. 핵연료 피복재가 구조적 건전성을 유지하면 소듐 냉각재의 유로를 확보할 수 있으므로 노심냉각이 가능하고 핵연료 재배치로 인한 반응도 삽입 가능성이 방지된다. KALIMER 피복재의 재료는 HT-9 합금으로 용융점이 1400 °C 이며 소듐 냉각재와는 화학적 반응을 일으키지 않는다. 반면 원자로 내 소듐 비등온도는 약 1070 °C 정도이다. 따라서 소듐비등 금지조건은 피복재 건전성과 노심냉각 능력을 만족시키므로 CDA 발생 여부를 판단하는 조건이 될 수 있다. 만약 사고로 인해 핵연료 중심이 일부 용융할지라도 피복재가 파손할 정도로 핵연료봉 내부압력이 증가하지 않으면 용융된 핵연료가 핵연료봉 외부로 분출하지 못해 소듐 비등은 발생하지 않는다. 피복재 온도가 공용온도인 790 °C 이상이 되면 피복재 침식이 발생하지만 피복재가 파손되기까지는 많은 시간이 걸린다.

KALIMER 의 CDA 방지계통은 다음과 같으며 높은 운전 신뢰도를 가진다.

- (1) 원자로 정지계통

- (2) 원자로 정지후 붕괴열제거계통
- (3) 사고저항성이 큰 핵연료 집합체

KALIMER 원자로정지계통은 정상적인 보호논리에 따라 작동되는 제어봉정지계통과 노심온도가 설정온도 이상으로 증가하면 피동적으로 작동하는 USS 두 계통으로 나누어 저 있으며 중복성, 다양성, 독립성 개념을 만족하는 고신뢰도의 설계이다.

3. 설계기준사고

DBA 에서 CDA 가 시작되는 경로는 앞에서 언급한데로 노심 열제거능력이 감소하거나 열생성이 과도한 경우에 해당하며 사고의 크기에 따라 전노심 사고와 국부 노심사고로 분류할 수 있다.

3.1 전노심 열제거감소 사고

전노심 열제거 감소사고는 일차계통 유량감소와 노심 입구온도 증가에 의해 발생한다. 일차계통 유량감소는 공급전원 상실사고, 기계적 고장으로 인한 펌프기능 상실사고 (펌프축 고착사고), 노심유입배관 파단사고 등이 속하며, 노심 입구온도 증가는 중간열전달계통 (IHTS) 및 SGS 고장, 또는 BOP 고장으로 인해 발생한다.

이들 중 가장 심각한 사고는 펌프전원상실 사고로서 모든 일차계통 펌프에 공급되는 전원이 동시에 상실되는 경우이다. 사고해석 결과, 펌프의 중성자속-대-압력비 신호에 의해 원자로는 자동정지되며 원자로 출구 냉각재 온도는 소듐 비등온도보다 훨씬 낮게 계산되었다. 이때 원자로정지를 고려하지 않은 보수적인 경우의 (ULOF) 사고해석 결과, 출력은 GEM 과 반응도 궤환효과 만에 의해 사고후 90 초에 붕괴열 수준으로 떨어진다. 핵연료와 피복재의 온도는 744 °C 와 541 °C 로 계산 되어 CDA 로 확대될 가능성은 없다.

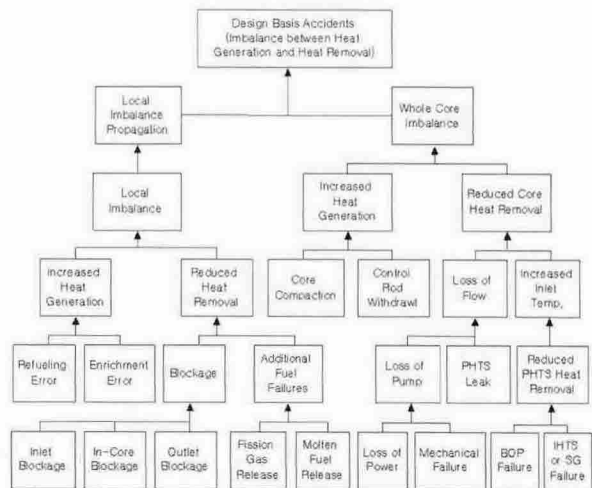


그림 1. 열적불균형에 의한 노심 설계기준사고 분류

IHTS 상실사고는 노심입구온도 증가사고의 bounding 사고이다. IHX 의 열전달 기능이 상실되면 손상된 IHX 를 통과한 일차계통 소듐의 온도는 급격히 증가하므로 고-노심출구온도 신호에 의해 원자로는 정지되고 붕괴열은 피동열제거계통(PSDRS)에 의해 제거된다. 사고해석 결과, 원자로정지를 고려하지 않은 경우(ULOHS)에도 출력은 반응도 궤환효과에 의해 2500 초 정도 지나면 붕괴열 수준으로 떨어지고 그동안 생성되는 노심열은 대 용량의 풀내부 소듐이 흡수한다. 따라서 노심 내 열적균형이 이루어지므로 CDA 는 발생하지 않는다.

3.2 전노심 과도열생성 사고

전노심 과도열생성 사고는 노심에 양의 반응도가 삽입되는 경우에 발생하며 제어봉인출사고와 노심 밀착사고가 이에 속한다. KALIMER shim motor 의 제어봉 인출속도는 2 cent/s 로 제한된다. KALIMER 는 노심사이클에 따른 반응도결손이 평형 노심의 경우 310 cent 정도로 작은 값을 가지므로 운전시 제어봉의 노심 삽입깊이는 크지 않다. 따라서 제어봉인출사고시 노심에 부과되는 양의 반응도 총량은 초기 삽입깊이에 의해 결정된다. 또한 KALIMER 는 대기압에서 운전 되므로 제어봉이 노심에서 압력차로 급격히 인출될 수 없으며, 제어봉 구동축 무게가 노심 내에서 위로 들어올리는 최대 수력학적 힘보다 크기때문에 소듐 유동에 의해 제어봉이 인출될수도 없다.

노심 형상이 가운데로 밀착되면 양의 반응도가 삽입된다. 노심 최외곽에 위치하는 집합체와 노심상단 구속링 간의 간극은 매우 작지만 제작오차와 원자로 운전 동안의 열팽창 변위를 흡수할 수 있을 정도의 크기를 가진다. 노심밀착 bounding DBA 는 설계가 허용하는 범위 내에서 순간적으로 모든 집합체가 노심중앙으로 밀착하는 경우이며 반응도는 스텝변화로 삽입된다. 이런 사고는 safe shutdown earthquake (SSE)와 동시에 발생한다고 추가 가정한다.

KALIMER 설계조건을 따라 총 30 센트의 반응도가 15 초간 선형적으로 삽입되고 원자로정지를 고려하지 않는 경우 (UTOP)에도 출력은 16 초에 정격출력의 1.5 배까지 증가하고 반응도궤환효과에 의해 새로운 평형출력으로 감소한다. 이때 핵연료 및 피복재 첨두온도는 853 °C, 548 °C 로 계산되어 CDA 로 확대되지 않음을 알 수 있다.

3.3 국부노심 과도열생성 사고

노심에서 국부적으로 열생성과 열제거간의 불균형이 발생할 수 있으며 국부적인 불균형이 노심 전체로 전파되면 CDA 가 발생할 수 있다. 국부 과도열생성은 핵연료 제조시 농축도실수와 핵연료 재장전실수로 인한다. 국부 열제거 감소는 유로폐쇄나 핵연료 파손이 전파되는 경우에 발생한다.

핵연료 펠릿이나 핵연료 봉을 잘못 제조하면 설계값 이상의 국부적인 열이 발생된다. 핵연료 농축도를

설정하고 제조하는 과정이 엄격하게 제어되므로 큰 편차의 농축도를 가진 핵연료 제조 가능성은 희박하다. 금속핵연료 조사실험결과에 따르면 핵연료가 파손되기까지는 매우 큰 안전여유도를 가진다. 따라서 핵연료 농축도실수사고는 발생하더라도 최악의 경우 과도상태 시 핵연료 파손 여유도를 감소시키는 정도이다.

KALIMER 핵연료집합체는 노심지지 구조물의 하부 그리드판에 꼽혀있다. 그리드판은 장착위치에 따라 특별한 접합구조를 가지고 있으므로 이와 상응하는 구조를 가진 집합체만이 장착될 수 있다. 또한 모든 집합체 출구는 독특한 코드체계를 가지는 홈을 가지므로 용기내 핵연료이송장치가 집합체를 노심에 장착하기 전에 이를 인식함으로써 부적절한 장착을 사전에 방지한다.

3.4 국부노심 열제거감소 사고

KALIMER 풀내부 유로와 집합체 입구 설계에 의해 이물질로 인한 핵연료봉다발 유로폐쇄가 발생하지 않는다. 특히 와이어랩 형태의 핵연료봉은 실험결과에 의하면 부수로가 완전히 막히는 현상은 발생하지 않는다. KALIMER 집합체의 유로폐쇄 해석결과에 의하면 집합체 유로의 20%에 해당하는 54 개의 부수로가 유로폐쇄되는 경우에도 소듐 냉각재 최대온도는 668 °C 로 계산되어 비등까지는 많은 여유도를 가진다.

집합체 출구와 상부내부구조물 (UIS) 영역은 유량 면적이 상대적으로 넓지만 핵연료 재장전 운전 중에 집합체 상부의 유로가 완전히 폐쇄될 수 있다. 붕괴열이 집합체 덕트를 통하여 주변으로 제거되어서 피복재의 최대온도가 정상상태 출력운전시보다 낮음을 확인할 필요가 있다.

광범위한 실험과 운전자료의 조사결과, 국부적인 핵연료봉 손상은 인접한 집합체에 영향을 미칠뿐 그 이상의 경계를 넘지 않는 것으로 밝혀졌다. 이런 사고가 발생 하더라도 급격한 손상전파로 인해 대량의 핵연료봉이 추가로 손상되지는 않으며 집합체 덕트 외부로 전파되지는 않는다. KALIMER 는 국부적인 핵연료 손상을 감시하기 위해 카바가스 감시계통(CGMS)과 지연중성자 감시계통 (DNMS) 을 갖추고 있으며 단일 핵연료봉 손상을 감지할 수 있을 만큼 민감한 성능을 가진다.

4. 결론

KALIMER 노심에서 열적 불균형을 기반으로하여 가상적인 설계기준사고를 도출하였으며, 신뢰도 높은 원자로정지계통, 붕괴열제거계통, 사고저항성이 큰 집합체 설계 등으로 인해 이들 가상사고의 발생 가능성은 매우 희박하다. 또한 KALIMER 피동설계특성과 고유 안전특성으로 인해 어떤 가상적인 사고라도 CDA 로 확대되는 것을 방지할 수 있으므로 설계기준 사고에서 CDA 는 배제될 수 있다.