2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Breakeven 노심특성의 KALIMER 계통 안전성 분석
Safety Analysis of KALIMER System with Breakeven Core

권영민, 이용범, 장원표, 한도희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국원자력연구소는 원자력연구개발 중장기 계획에 따라 안전성과 경제성이 우수한 신형 액체금속로인 KALIMER 개념설계를 개발하고 있다. Breakeven 노심특성을 갖는 KALIMER 설계는 안전성, 경제성, 핵확산 저항성 및 폐기물 감소와 관련된 뛰어난 성능을 갖추고 있다. KALIMER 노심과 계통은 원자로 제어와 보호계통을 작동하지 않고도 일련의 설계기준사고에 대하여 뛰어난 안전성능을 가지도록 설계되었다. 본 논문에서는 KALIMER 개념설계의 고유 안전성을 평가하기 위해 대표적인 ATWS 사고에 대해서 계통안전해석 전산코드인 SSC-K 를 사용하여 안전해석을 수행하였으며, 그 결과 KALIMER 설계의 고유안전성을 확인하였다.

Abstract

KAERI has developed the conceptual design of a Liquid Metal Reactor, KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) under the Long-term Nuclear R&D Program. KALIMER addresses key issues regarding future nuclear power plants such as plant safety, economics, proliferation, and waste. The KALIMER core and plant system are designed to assure benign performance during a selected set of events without either reactor control or protection system intervention. Safety analysis for the KALIMER design with breakeven core was performed using the SSC-K code and the inherent safety of the KALIMER system was indicated.

1. 서론

한국원자력연구소는 원자력연구개발 중•장기 계획에 따라 안전성과 경제성이 우수한 신형 액체금속로인 KALIMER 의 개념설계 [1]를 개발하고 있다. KALIMER 노심과 계통은 원자로제어와 보호계통을 작동하지 않고도 설계기준사고에 대하여 뛰어난 안전성능을 가지도록 설계되었다. 본 연구에서는 breakeven 노심특성을 갖는 KALIMER 설계의 고유 안전성을 평가하기 위해 대표적인 ATWS 사고에 대해서 계통안전해석 전산코드인 SSC-K [2]를 사용하여 안전해석

을 수행하였다. 해석 대상으로 선정한 UTOP, ULOF 및 ULOHS 와 같은 비보호사고는 다중고장 사고 (multiple failure event)이므로 기존의 원자로 사고분류에 따르면 중대사고 범주에 속하지만 KALIMER 개념설계에서는 설계 데이터 및 해석 방법론에 포함될 수 있는 불확실성을 고려하여 이들 사고를 설계기준사고 수준에서 결정론적인 방법으로 안전해석을 수행하였다.

2. UTOP

2.1 사고개요

UTOP 사고는 전출력 운전중 제어봉 구동계통의 고장 혹은 운전원 실수로 인해 제어봉이 인출되어 양의 반응도가 삽입되는 사고이다. 정상적인 경우에는 원자로 트립인자 중 고 중성자속, 일차계통 저 유량, 소듐 노심출구 고 온도 등에 의해서 원자로가 정지되지만 UTOP 사고의 경우 이와 같은 보호계통이 작동하지 않는다고 가정한다.

UTOP 의 초기사건은 제어봉의 노심 이탈이므로 초기에 노심에 삽입되는 양의 반응도 크기는 사고결과에 직접적인 영향을 미친다. 보통 산화물 핵연료 노심에서는 온도 및 출력 defect 와 burnup swing 이 3 4$에 이를 정도로 커서 UTOP 발생시 총 반응도 삽입 가능량이 커지므로 매우 중대한 결과를 초래할 수 있다. 그러나 금속연료 노심에서는 온도 및 출력 defect 와 burnup swing 이 상대적으로 작기 때문에 총 반응도 삽입 가능량이 작다.

총 반응도 삽입 가능량이 작음에도 불구하고 금속연료 노심에서 UTOP 사고가 중요한 것은 Doppler 효과가 작기 때문이다. 즉, 금속연료 노심에서는 중성자 스펙트럼이 고 에너지를 갖기 때문에 U-238 공명영역의 중성자수가 상대적으로 적어 Doppler 효과가 적게된다. 따라서 금속연료 노심의 경우 UTOP 사고시 Doppler 뿐만 아니라, 핵연료 축방향 팽창, 소듐밀도, 제어봉 구동축 팽창 및 노심 반경방향 팽창 등의 효과가 중요하다.

2.2 해석시 사용 가정

정격출력 운전중 제어봉 인출사고가 발생하여 2¢/초의 삽입률로 15 초간 총 30¢의 반응도가 삽입된다고 가정한다. 사용된 총 반응도 삽입량은 증식특성 노심의 burnup swing 등 반응도 계산결과와 제어봉의 과도한 인출을 제한하는 제어봉정지기구를 고려하여 결정되었다. 반응도 삽입으로 인하여 노심 출력 증가가 예상되나 보호계통에 의한 원자로 정지가 발생하지 않는다고 가정하고, 사고전개 과정 중 일차 및 이차계통 냉각재의 정격 유량이 유지된다고 가정하였다.

2.3 해석 결과

Breakeven 평형 및 초기 노심에 대해서 30¢ UTOP 사고분석 결과인 노심 출력 및 유량, 노심 반응도, 핵연료봉 온도 및 첨두 핵연료 및 냉각재 온도가 그림 1 부터 6 까지에 나타나 있다. 그림 1 에서 초기노심은 33 초에 최대출력이 정상출력의 약 148%에 도달하고 600 초 이후 약 107% 수준에서 안정되었다. 반면에 평형노심은 비슷한 최대출력이 사고 발생 후 16 초에 발생하였으며 이는 그림 2 와 3 에서 보이듯이 소듐반응도가 초기노심에 비해 큰 값을 가지기 때문

이다. 노심유량은 일반적으로 냉각재 온도 상승에 따른 밀도 감소로 인해 약간 감소한다.

노심의 고유안전성이 UTOP 사고결과에 미치는 영향은 그림 2와 3의 반응도 변화에 나타나 있다. 사고초기에 제어봉 인출로 인해 순 반응도는 양의 값을 가지게 되어 노심 출력이 초기에 상승하지만 주로 도플러 및 핵연료와 노심 구조물의 팽창에 의한 반응도 궤환효과에 의해 억제되므로 냉각재 온도는 소듐의 비등온도를 초과하지 못하고 핵연료 온도 역시 단기 허용안전기준을 만족하게 된다. 이때 출력 증가로 핵연료 온도가 상승하면 Doppler 효과에 의해 중성자 흡수가 증가함과 더불어 핵연료봉은 축방향으로 팽창한다. 반면에 소듐 온도가 상승함에 따라 중성자 스펙트럼 경화로 인한 양의 반응도가 삽입된다. 초기 첨두출력이 핵연료의 열적 효과에 의하여 빠른 응답시간으로 제한되는 동안 집합체 및 노심지지 구조물과 제어봉 구동축의 온도는 서서히 증가된다. 구조물의 팽창에 의한 추가적인 음의 반응도 궤환효과는 새로운 평형이 이루어질 때까지 노심 출력을 감소시킨다.

그림 4는 핵연료 중 최대 출력 위치에서의 온도분포를 평형 및 초기 노심에 대해 비교하였다. 그림 5와 6은 핵연료 온도와 노심 출구 소듐의 최대 온도를 계산한 결과이다. 핵연료봉 및 냉각재 온도가 정격출력 상태 보다 상승된 상태로 유지되지만 단기 및 장기 핵연료 건전성 기준인 제한온도를 초과하지 않음을 알 수 있다.

3. ULOF

3.1 사고 개요

유량상실사고는 노심으로 유입되는 유량의 상실이 사고원인이 되어 노심 열이 정상적으로 제거되지 못함으로써 노심이 과열되는 사고이다. 사고 조건에 따라 여러 종류의 유량상실사고가 있을 수 있으나 본 해석에서는 네 대의 펌프 모두가 동시에 coastdown하는 대표적인 사고를 선택하였다. 이런 사고는 소외전원이 상실되거나 펌프 자체의 고장으로 인하여 발생할 수 있다. 유량상실사고가 발생하면 정상적인 경우에는 노심 저 유량 신호나 노심 입구 및 출구 온도의 이상 증가로 인하여 원자로 정지신호가 발생되지만 본 해석에서는 원자로 보호계통의 고장으로 인하여 원자로 트립은 발생하지 않는다고 가정하였다. 이러한 비보호 유량상실사고를 ULOF (Unprotected Loss Of Flow)라고 하며 보호계통의 고장으로 인하여 원자로 트립이 되지 않으므로 다중고장 사고로서 일종의 ATWS 사고이다.

ULOF 사고는 노심 유량과 출력간의 불균형으로 인하여 사고 초기에 급격한 핵연료 온도 피크가 발생한다. 충분히 냉각되지 못한 소듐이 노심에 재 유입하면 노심 구조물의 열팽창으로 인해 음의 반응도를 노심에 삽입한다. 이때 펌프정지로 인한 GEM의 음의 반응도가 노심에 삽입하면 출력 및 핵연료 온도는 급격히 떨어진다. 한편 초기 핵연료 온도 피크 이후 핵연료 온도는 정상상태 시의 온도 이하로 감소하므로 도플러와 핵연료 축방향 수축이 양의 반응도 궤환효과를 발생시킨다. 핵연료의 열적 궤환효과에 의해 삽입되는 양의 반응도를 상쇄시키기에 충분한 음의 반응도 궤환효과를 발생시키는 원자로 온도에서 평형상태에 도달한다.

ULOF 해석의 목적은 breakeven 노심의 고유안전성을 확인하기 위함이다. 특별히 유량의 coastdown 현상 및 노심 입구 압력 감소에 따른 GEM의 음의 반응도가 노심에 적절히 삽입되

는가를 확인하는 것이 본 해석의 주요 목적이다. GEM 모델은 금속 핵연료의 반응도 특성모델과 더불어 SSC-K 에 추가된 모델이다. 네 대의 펌프가 동시에 coastdown 하는 ULOF 사고를 breakeven 초기 및 평형 노심에 대하여 각각 분석하였다.

3.2 해석시 사용 가정

KALIMER 는 일차계통 및 이차계통의 소듐 냉각재를 강제순환 시키기 위하여 전자식 펌프를 사용하고 있다. 전자식 펌프는 전원공급이 상실되면 설계 특성상 회전 관성력이 없으므로 관성운전 (coastdown)을 할 수 없다. 전자식 펌프의 이러한 단점을 보완하기 위하여 KALIMER 설계에서는 유량의 coastdown 기능을 보장하는 동기장치 (synchronous machine)를 사용하고 있다. 원자로 용기 내의 소듐에 침지되어 있는 네 대의 전자식 일차펌프는 각각의 동기장치를 가지고 있다. 발전소 정상 운전시에는 전자식 펌프와 연결된 동기장치의 모터로 동기장치의 flywheel 을 회전시키다가 외부전원 상실 등으로 인하여 전자식 펌프의 주전원이 차단되는 상황이 발생하면 동기장치는 flywheel 이 가지는 회전 관성에너지를 이용한 발전기 역할을 수행하여 전자식 펌프에 전력을 공급하는 기능을 한다. 따라서 동기장치의 flywheel 은 냉각재 유량 상실사고시 노심이 과열되지 않도록 충분한 유량을 확보하도록 설계되어야 한다. KALIMER 의 경우 펌프와 관련된 구체적인 설계자료가 생산되지 않아서 운전원리에 기반을 둔 전자식 펌프 모델은 사용하지 못하였다. 대신에 유체계통에서 일차계통 펌프의 성능요건으로 제안한 KALIMER coastdown 특성곡선을 유량 대 시간의 지수형태 상관식으로 만든 후 SSC-K 에 직접 입력하여 ULOF 사고에 사용하였다.

ULOF 사고는 100% 정격출력에서 발생하며 사고와 동시에 펌프가 정지되어 coastdown 운전을 시작한다고 가정하였다. 일반적으로 유량상실사고가 발생하면 열유속-유량의 불균형으로 원자로보호계통이 작동하지만 보수적인 관점에서 원자로 보호계통 고장으로 인하여 원자로 정지봉이 노심으로 삽입되지 못한다고 가정하였다. IHTS 는 정상적으로 운전되므로 IHX 를 통하여 노심 열은 정상적으로 증기발생기로 전달된다. 유량상실사고의 경우는 출력-유량간의 균형이 사고전개에 큰 영향을 미친다. 노심 열을 제거하기에 충분한 유량이 형성되면 핵연료 온도는 허용안전기준 이하로 유지 가능하므로 펌프의 coastdown 성능이 원자로 안전성에 직접적인 영향을 미친다.

ULOF 사고에서 노심 반응도에 영향을 주는 인자는 GEM, 도플러효과, 소듐 밀도, 축방향 및 반경방향 팽창과 제어봉 구동축 팽창 등이고, 이들 중 GEM 은 유량상실 사고를 대비하여 KALIMER 설계에 특별히 포함된 피동장치이다. ULOF 사고시 GEM 의 효과가 가장 크므로 이에 대하여 특별히 민감도 해석을 수행하였다. 즉, GEM 을 고려한 ULOF 사고와 GEM 을 고려하지 않고 순전히 금속핵연료의 반응도 특성에 의한 과도상태를 서로 비교하였다.

3.3 해석 결과

ULOF 과도기간 동안 원자로계통의 주요 변수들이 그림 7 에서 14 에 제시되어 있다. 사고 시작과 동시에 펌프는 정지되며 노심 유량과 출력은 곧장 감소한다. 그림 7 은 평형노심에서의

출력과 유량을 나타내며 초기노심의 경우에도 거의 비슷한 결과를 보였다. 그림 7 에서 GEM 이 고려된 경우는 노심 출력은 반응도 궤환효과에 의하여 단기간 내에 붕괴열 수준으로 감소하고 있으나 GEM 이 없는 경우는 비교적 높은 출력 수준에서 진동하며 감소하고 있다.

그림 8 은 평형노심의 경우 소듐 풀 온도를 나타내며 IHX 가 정상적으로 운전되므로 IHX 출구와 연결되어 있는 저온 풀의 온도는 GEM 의 영향을 크게 받지 않고 있다. 고온 풀의 온도는 GEM 이 없는 경우가 노심 출력이 크므로 예상한데로 GEM 이 있는 경우보다 높게 예측하고 있다. GEM 의 사용 유무에 따른 각각의 경우에 대해 반응도 변화가 그림 9 와 10 에 나타나 있다. 그림 9 에서 펌프헤드가 상실되면 GEM 내부의 소듐액위가 서서히 감소하여 음의 반응도가 사고 후 13 초부터 노심에 삽입되기 시작하여 50 초가 지나면 약 226 센트가 삽입된다. 반면에 GEM 이 없는 경우인 그림 10 은 노심의 반경방향 팽창으로 의해 음의 반응도 삽입이 비록 크게 나타나고 있으나 다른 양의 반응도 성분의 영향으로 순 반응도가 안정하게 음의 값을 유지하지 못하고 있다. 그림 11 은 초기노심 경우의 반응도 변화이다. 초기노심은 평형노심에 비해 잉여반응도가 크므로 GEM 의 반응도값 역시 크게 설계되어 있으며 GEM 내부의 소듐액위가 유효노심 하부까지 감소할 때의 반응도 값은 약 310 센트이다.

그림 12 는 평형노심의 경우 hot pin 의 6 번째 노드에서의 핵연료 온도를 보여주고 있으며 핵연료 관련 모든 허용안전기준을 만족한다. 평형노심과 초기노심의 출력 변화가 거의 비슷하므로 핵연료온도 분포 역시 비슷하게 예측하였다. 그림 13 은 초기 및 평형노심의 경우 GEM 내부의 소듐 액위의 변화를 보여주고 있다. GEM 의 기하학적인 형상 및 GEM 내부의 기체 압력 및 소듐 액위가 두 경우 모두 동일하다고 가정하여 계산한 결과이다. 그림 14 는 GEM 이 없는 평형노심의 경우 핵연료 및 노심 출구 소듐의 최대 온도를 나타내고 있다. 핵연료 중심온도는 1160 K 로서 허용안전기준 (1343 K)을 만족하지만 피복재의 온도는 초기 피크 온도기간에 약 1160 K 까지 증가하여 허용안전기준인 1063 K 를 상회하고 있다. 이 계산 결과로부터 GEM 은 KALIMER 의 안전설계에 필수적임을 알 수 있다. 본 해석에서는 PSDRS 에 의한 피동적인 열제거가 고려되었다.

4. ULOHS

4.1 사고개요

KALIMER 설계에서는 증기발생기에서 발생하는 소듐-물 화학반응의 전파, IHTS 의 파손, 혹은 파열판 (Rupture Disk) 개방 등의 원인으로 IHTS 가 격리될 경우 열제거원상실사고 (ULOHS)의 발생 가능성이 존재한다. ULOHS 사고해석은 IHTS 의 순간적인 유동 정지가 발생하면서 열제거원이 상실되는 것으로 가정한다. IHTS 의 배관파열 혹은 파열판 개방이 발생하면 IHTS 의 냉각재가 상실되므로 IHTS 내에서의 자연순환 능력도 상실된다. 따라서 노심에서 발생한 에너지는 모두 원자로 용기 내에 잔존하게 된다. 피동안전등급 잔열제거계통인 PSDRS 는 이러한 사고 발생시 심각한 노심 손상과 원전 외부로의 방사능 누출을 야기할 수 있는 일차계통의 과열을 궁극적으로 막기 위해 설계되었다.

PSRDS 는 KALIMER 설계에서 유일한 안전등급 열제거 계통이므로 이의 기능상실 형태에

대해 상세한 파악이 필요하다. 성능 저하나 부분적 기능 상실도 가능하지만 가장 심각한 사고 형태는 PSDRS 의 공기유동 통로의 막힘이다. 그러나 이 통로는 매우 크기 때문에 큰 지진이나 운전원의 sabotage 와 같은 극단적 경우를 제외하면 그 가능성이 희박하다.

4.2 해석시 사용가정

ULOHS 해석에 사용된 기본 가정은 다음과 같다. ULOHS 는 0.0 초에 IHTS 유동의 순간적 정지에 의해 정상적인 열제거원이 완전 상실한 것으로 가정한다. 이는 IHTS 내에서 배관파열 혹은 파열판 개방이 발생하여 IHTS 유량이 완전 상실되는 가상적인 사고 경우에 해당한다. 정상적인 원자로 운전 경우 노심 입·출구의 소듐 고 온도에 의해 원자로 정지가 발생하여야 하지만 본 해석에서는 원자로 보호계통의 고장으로 원자로 트립이 되지 않는 것으로 가정한다.

ULOHS 시 원자로 내부의 열제거는 오직 피동방식인 열전달에 의하여 운전되는 PSDRS 가 담당한다. PSDRS 의 열제거 능력에는 한계가 있으므로 ULOHS 사고가 발생하면 원자로 내부의 열생성원을 줄이기 위해 일차계통 순환펌프를 자동으로 정지시키는 안전등급의 비상펌프 정지계통이 KALIMER 설계에 구현되어 있다. 즉, 펌프 입구의 소듐 온도가 설정치를 초과하면 펌프에 공급되는 전원차단기가 개방된다. ULOHS 사고의 주 해석목적은 원자로의 장기냉각 성능을 평가하는 것이므로 노심 출력이 붕괴열 수준으로 낮은 상태에서 펌프열은 상대적으로 PSDRS 의 열 제거에 주요 열원으로 작용할 수 있다. 그러므로 펌프의 자동제어 계통과 운전원의 수동적 조치가 매우 중요하지만 본 해석에서는 펌프의 작동이 사고에 미치는 영향을 보기 위해 일차계통의 4 대 펌프가 모두 동작하는 것으로 가정하였다.

4.3 해석결과

과도기는 0.0 초부터 IHTS 의 유량상실에 의해 정상냉각이 불가능할 뿐 아니라, IHTS 냉각재의 자연순환도 배제한 상태를 가정해 시작된다. ULOHS 과도기간 동안 원자로계통의 주요 변수들이 그림 15 에서 20 에 제시되어 있다. 그림 15 는 시간에 대한 평형 및 초기 노심 경우의 Normalized 노심출력과 유량 변화를 나타낸다. 사고발생 직후 노심 열 발생은 소듐 및 CRDL 반응도 효과에 의해 초기 첨두를 나타내는데, 상대적으로 소듐 반응도가 주도적인 역할을 한다. 그림 16 과 17 에서 보여지듯이 반응도는 두 노심에 대해 모두 유사한 경향을 보여준다. 반면에 노심 유량은 서서히 감소하지만, 펌프가 운전되고 있기 때문에 초기 유량의 거의 96%를 계속 유지하고 있다. CRDL 의 양의 효과에도 불구하고 핵연료의 축방향 팽창과 노심 구조물의 반경방향 팽창에 의한 음의 반응도 효과 때문에 전체적인 반응도 효과는 미미하며, 순 반응도 값이 0 에 수렴하므로 출력 역시 안정적인 값을 보여준다 (그림 17).

저온 풀과 고온풀의 온도는 짧은 시간 내에 거의 같은 값을 유지한다(그림 18). 약 2,000 초까지는 냉각재 온도가 비등점과 큰 차이를 보이므로 단기적인 측면에서 소듐 비등의 가능성은 없다. 그림 15 에서 보듯이 두 경우의 출력 차이로 인해 평형노심의 경우가 조금 높은 풀온도를 보여준다. 그림 19 는 풀의 소듐액위를 보여주는데 역시 출력의 차이로 인해 평형노심의 경우가 약 1,200 초 먼저 저온풀 액위가 고온풀 액위에 도달함을 알 수 있다.

반응도 궤환효과에 의한 초기 첨두출력이 초기노심의 경우 약 101 % 가 되어 핵연료 중심 첨두온도는 약 1,120 K 가 된다. 이 값은 허용안전기준에 대해 상당한 여유가 있어 초기 반응도 궤환이 핵연료의 안전은 위협하지 않는 것으로 해석된다. 사고 초기에는 PSDRS 역할이 중요하지 않고 고온풀의 온도가 충분한 과냉도 유지한다. 그러나 펌프 열 때문에 PSDRS 의 작동에도 불구하고 장기적으로는 소듐 온도가 상당히 높아질 것으로 예상되며, 결국 노심 총열발생과 PSDRS 열 제거의 균형이 최종적인 노심 손상을 결정할 것으로 판단된다. 그림 20 은 핵연료 집합체 내부의 온도분포를 보여준다.

본 계산결과는 물리적으로 일관된 현상을 보여주기 때문에 전반적으로 SSC-K 의 예측은 타당하다고 생각된다. 또한 ULOHS 발생시 강한 음의 반응도에 의한 고유안전성이 입증되었다. 예상과 같이 노심에서 소듐밀도 반응도가 초기에는 전체 반응도에 크게 기여하지만, 시간이 갈수록 CRDL 반응도 효과가 전체 반응도에 더 큰 양의 반응도를 나타낸다. 안전성에 노심 반응도가 결정적인 영향을 미치기 때문에 이들 모델에 대한 보다 심도있는 검증과보완이 계속 수행되어야 할 것으로 생각한다.

5. 결론

Breakeven 노심특성을 갖는 KALIMER 설계에 대해서 계통안전해석 코드인 SSC-K 를 사용하여 비보호사고인 UTOP, ULOF, ULOHS 의 안전해석을 수행하였다. 종합적인 해석결과가 그림 21 에 요약 정리되어 있다. 그림에서 나타나듯이 KALIMER 설계는 핵연료의 건전성 및 구조물 관점에서 안전기준을 만족하고 있으며 상당한 안전 여유도를 보여주고 있다. 이러한 KALIMER 안전특성은 반응도 궤환에 의한 노심의 고유안전 특성과 피동적인 잔열제거계통 및 대용량 풀에 의한 열적 관성 증대에 기인한다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 주관 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] D. Hahn et al., “KALIMER Preliminary Conceptual Design Report,” KAERI/TR-1636/2000, KAERI (2000).

[2] Y. M. Kwon, Y. B. Lee, W. P. Chang, and Dohee Hahn, “SSC-K Code Users Manual (Rev.1),” KAERI/TR-2014/2002, KAERI (2002).

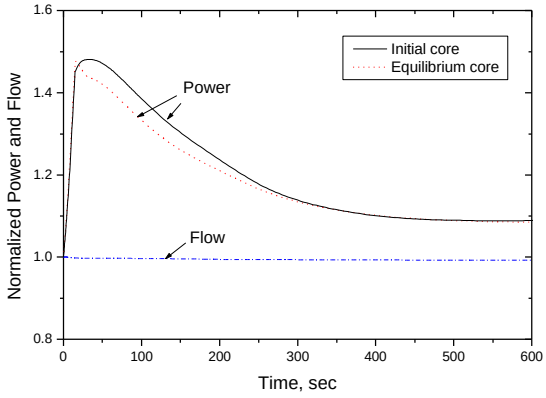

그림 1. UTOP 시 출력 및 유량

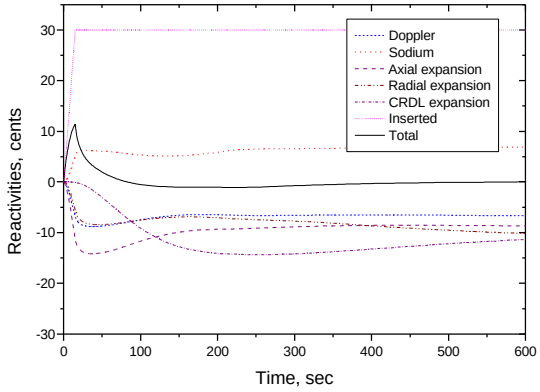

그림 2. UTOP 시 노심반응도 (초기노심)

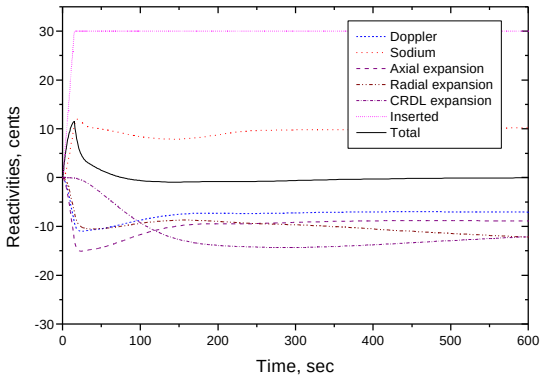

그림 3. UTOP 시 노심반응도 (평형노심)

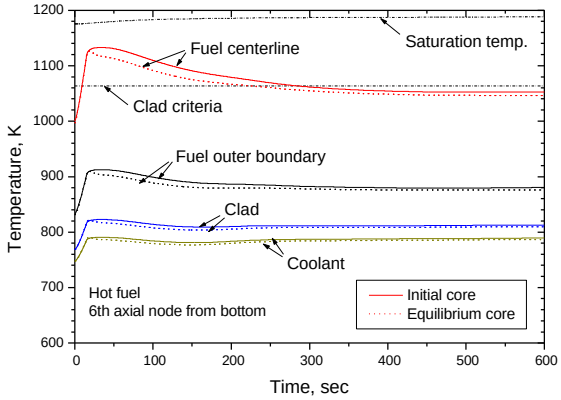

그림 4. UTOP 시 핵연료봉 온도

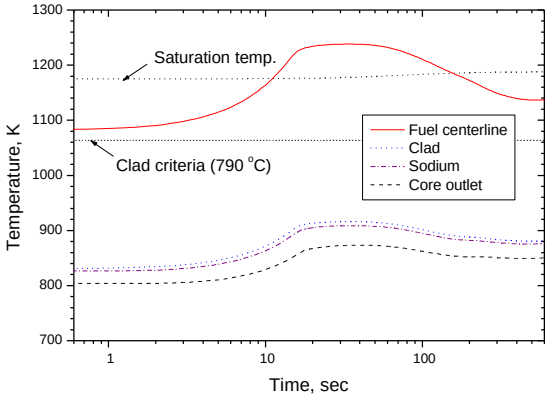

그림 5. UTOP 시 첨두핵연료 및 냉각재 온도 (초기노심)

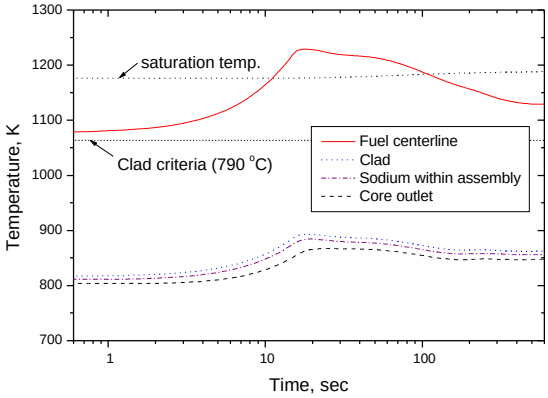

그림 6. UTOP 시 첨두핵연료 및 냉각재 온도 (평형노심)

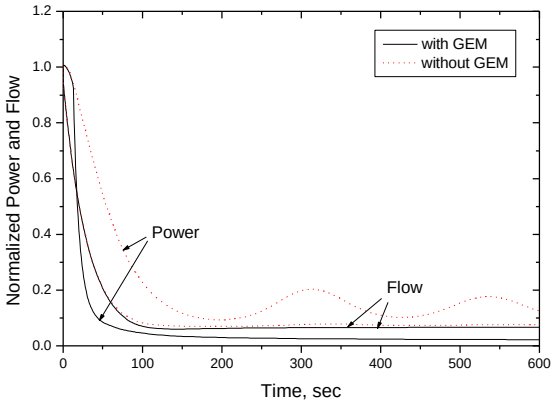

그림 7. ULOF 시 출력 및 유량 (평형노심)

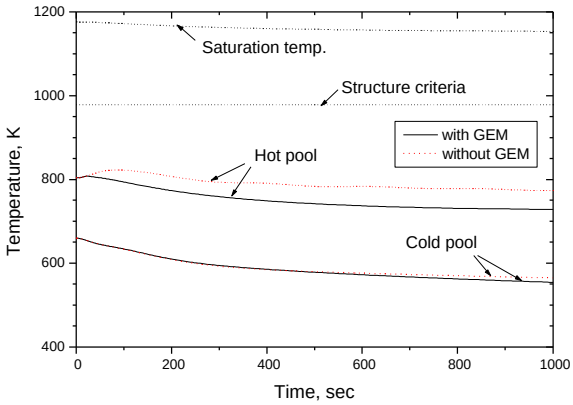

그림 8. 풀 온도(평형노심)

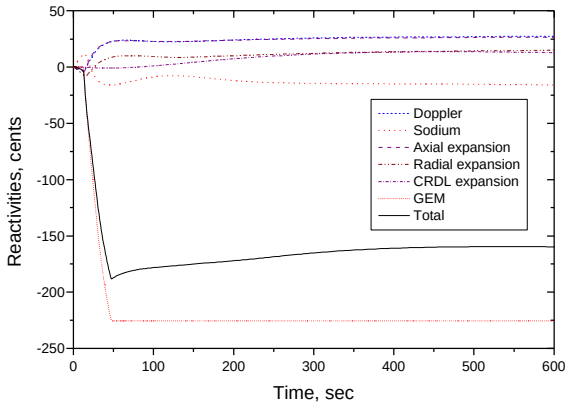

그림 9. GEM 을 고려한 ULOF 시 반응도 (평형노심)

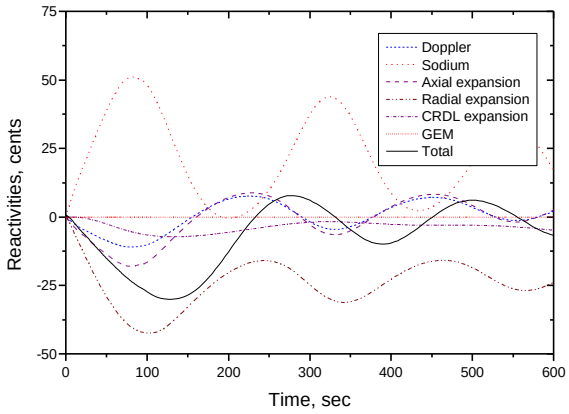

그림 10. GEM 을 고려하지 않은 ULOF 시 반응도 (평형노심)

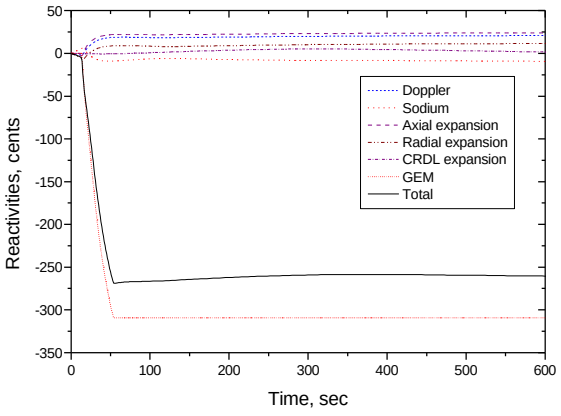

그림 11. GEM 을 고려한 ULOF 시 반응도 (초기노심)

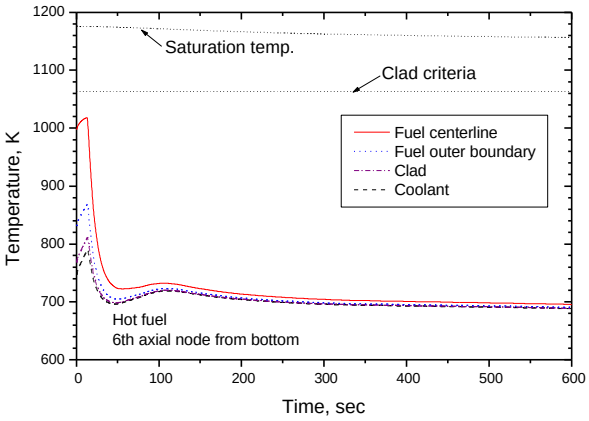

그림 12. GEM 을 고려한 ULOF 시 핵연료 온도 (평형노심)

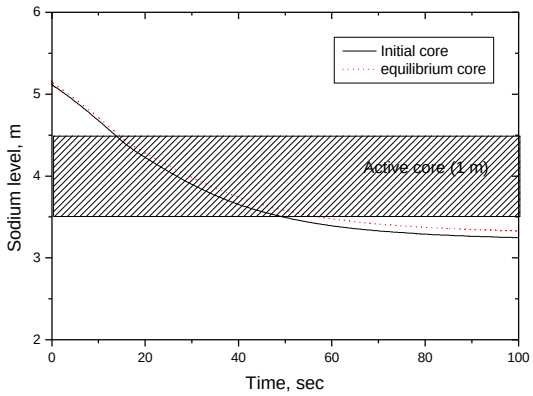

그림 13. GEM 내부의 소듐액위

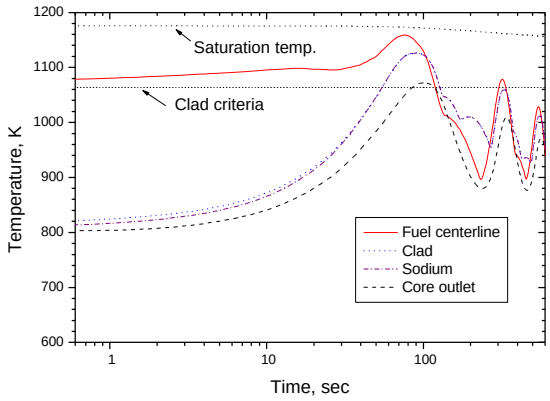

그림 14. 핵연료 및 노심출구의 소듐의 최대온도(ULOF w/o GEM 평형노심)

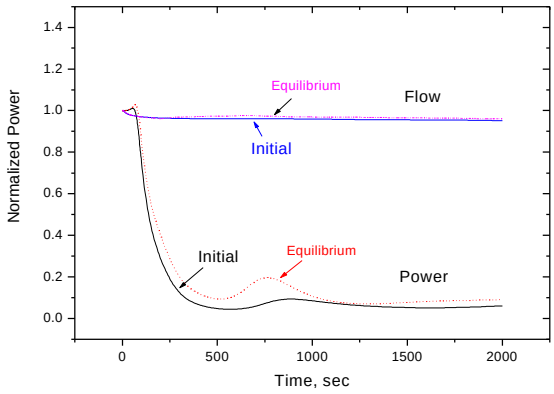

그림 15. ULOHS 시 출력 및 유량

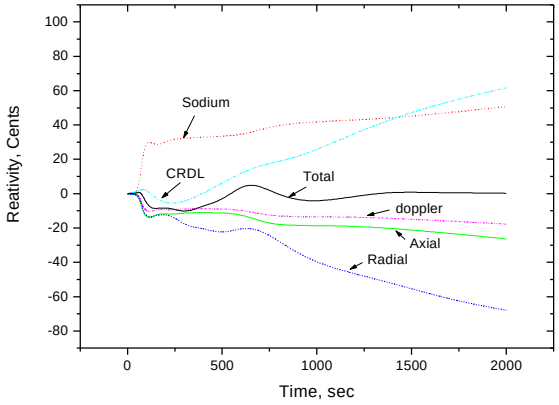

그림 16. ULOHS 시 반응도 (평형노심)

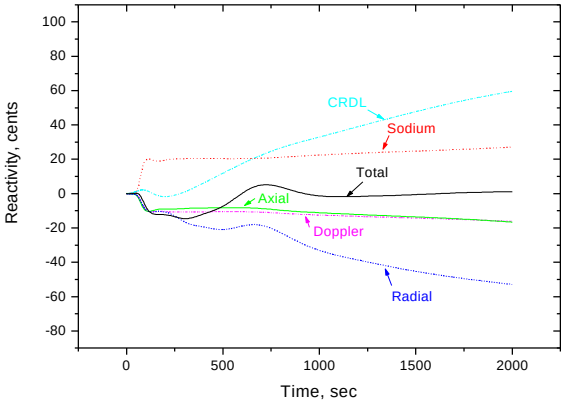

그림 17. ULOHS 시 초기노심 반응도

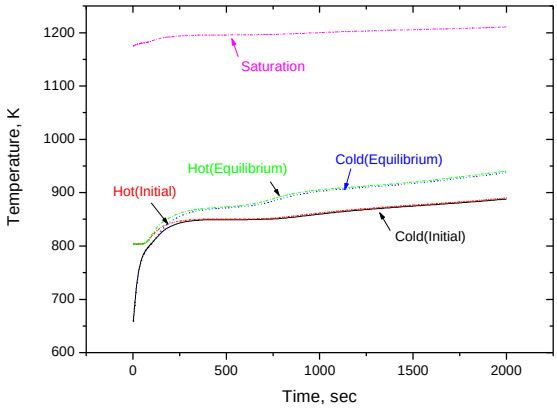

그림 18. ULOHS 풀온도

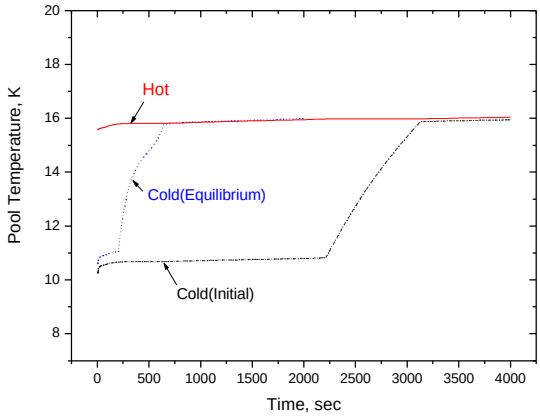

그림 19. ULOHS 시 풀의 소듐액위

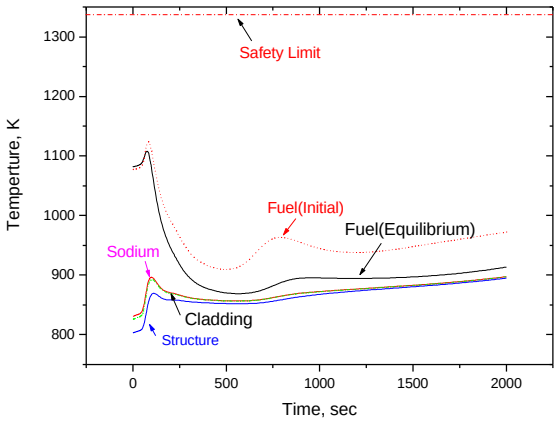

그림 20. ULOHS 시 핵연료, 냉각재, 구조물의 온도

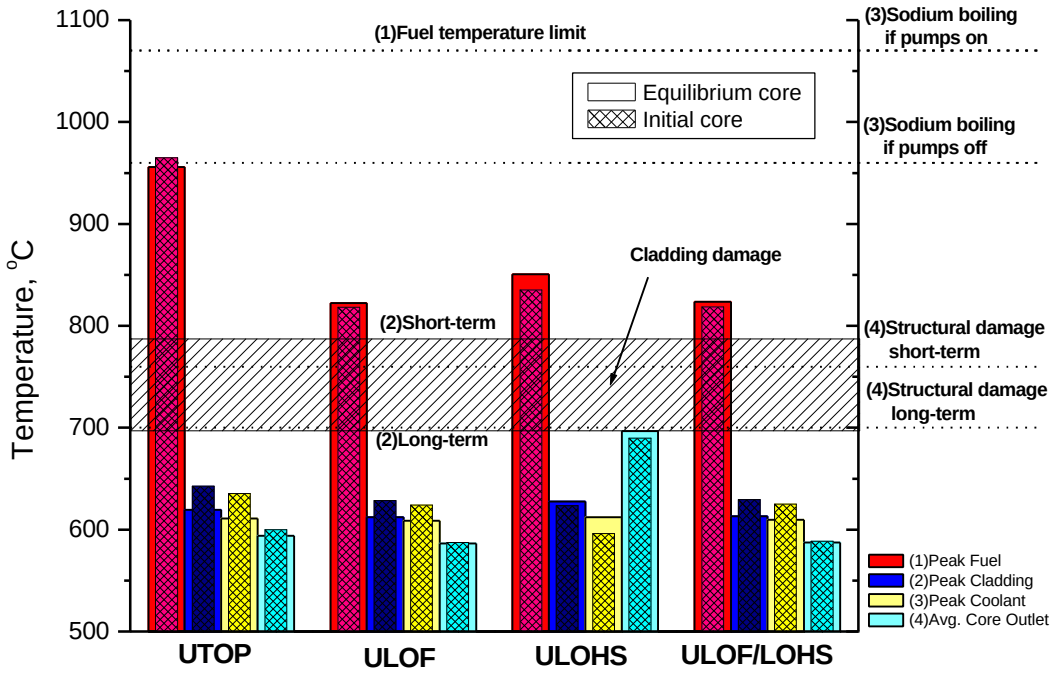

그림 21. Breakeven 노심특성의 KALIMER 안전해석 결과 요약