2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SSC-K 와 SASSYS-1/SAS4A 코드를 사용한 비보호과출력사고 비교계산

Comparative Analysis of an Unprotected Transient OverPower Event Using the SSC-K and the SAS4A/SASSYS Computer Codes

권영민, 이용범, 장원표, 한도희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
강창무
Advanced Energy Technology Inc.
1411 Main St. Suite 1, Montara, CA, U.S.A. 94037

요약

한국원자력연구소는 미국의 BNL 에서 개발한 SSC-L 코드를 기본으로 하여 기존 모델의 수정 및 새로운 모델의 개발을 통하여 국내 고유의 액체금속로 계통안전해석코드인 SSC-K 를 개발하고 있다. 본 연구의 목적은 SSC-K 코드의 모델 및 계산 결과의 타당성을 검증하기 위하여 KALIMER 비보호과출력사고 (UTOP)에 대한 SSC-K 계산결과를 SAS4A/SASSYS 해석결과와 비교하였다. 코드간 UTOP 비교계산 결과, SSC-K 의 반응도 궤환모델은 비교적 정확하여 전체적으로 SSC-K 의 계산결과는 신뢰성을 갖추고 있음을 알 수 있었다. 또한 두 코드는 원자로 풀 내부의 열수력 현상을 거의 비슷하게 예측하였다.

Abstract

Korea Atomic Energy Research Institute has developed a system-wide safety analysis code, SSC-K, through modifying the SSC-L code that originally developed by BNL. The purpose of this study is to validate the SSC-K analysis of the Unprotected Transient Overpower (UTOP) event in the KALIMER design by a comparative analysis using the SAS4A/SASSYS-1 computer code. By doing the code-to-code comparison analysis, a prediction performance of the SSC-K code is evaluated. The comparison analysis results indicates that the SSC-K calculation is reasonable and the feedback of reactivity in the SSC-K analysis is probably reasonably accurate. The comparison result also indicates that the thermal-hydraulic behaviors calculated by two codes during the UTOP event are very similar.

1. 서론

액체금속로 안전해석 기술개발의 궁극적 목표는 검증된 안전성 분석 전산체제를 구축하고 이와 같은 전산체제를 활용하여 신뢰도 높은 안전성 분석을 수행하는 것이라 할 수 있다. 안전성 및 경제성 향상을 위해 여러 가지 설계개념이 개발되고 있는 액체금속로의 경우는 이미 상용화된 경수로나 중수로의 경우와 달리, 일반화된 안전해석 코드가 존재하지 않으므로 국내 고유의 액체금속로 안전해석 전산체제 확보가 필요하다. 액체금속로 선진국은 안전성 분석을 위한 전산체제의 구축과 전산코드의 검증을 위하여 장기간 막대한 예산과 인력을 투입하여왔다. 국내에서 액체금속로 안전성 분석 전산체제의 구축 및 검증을 독자적으로 추진할 경우에는 외국의 경우와 같이 막대한 예산과 연구시간을 필요로 하게 되어 현실적으로 이를 수행하기는 불가능하다.

국내에서는 액체금속로의 과도 안전해석을 수행할 수 있는 전산코드 개발을 위하여 이미 세계적으로 계산의 신뢰성이 입증된 SSC-L [1] 코드를 도입하였다. SSC-L 전산코드는 Clinch River Breeder Reactor (CRBR)의 PSAR 작성에 활용된 바 있고 미국의 BNL 연구소는 GE 의 Advanced Liquid Metal Reactor (ALMR)의 안전성 평가에 동 코드를 사용하였었다. 그러나 SSC-L 전산코드는 산화핵연료를 사용하는 노심과 루프(loop)형 원자로를 위하여 개발된 코드이므로 이 코드를 풀(pool)형 원자로인 KALIMER 과도해석에 직접 사용할 수는 없다. 한국원자력연구소(KAERI)는 SSC-L 코드의 기존 모델에 대한 수정 및 보완과 새로운 모델 개발 등을 통하여 국내 고유의 전산코드인 SSC-K [2]를 개발하고 있다. KAERI 에서 개발한 과도안전해석 코드 SSC-K 의 모델 및 계산 결과의 검토를 위하여 미국 Advanced Energy Technology (AET)사와의 국제 공동연구를 수행하였다. SASSYS-1/SAS4A [3, 4] 전산코드는 미국 국립연구소 Argonne National Laboratory (ANL)이 개발하고 많은 실험 데이터와 비교 검증하여 국제적으로 코드의 신뢰성이 확보된 코드이다. 그러나 SASSYS-1/SAS4A 전산코드는 Applied Technology (AT) 제약을 받는 자료이므로 미국 외부로 반출이 허용되지 않을 뿐 아니라 코드와 관련 자료를 취급하는 데에도 많은 제한이 따른다. 따라서 본 연구를 위한 SASSYS-1/SAS4A 코드의 해석은 AET 에서 수행되었다.

2. SASSYS-1/SAS4A 의 KALIMER 모델링

SASSYS-1/SAS4A 를 해석에 사용하기에 앞서 SASSYS-1/SAS4A 코드의 특성 및 주요 모델과 관계식을 검토하였다. KALIMER 전 계통을 그림 1 처럼 모델링하고 KALIMER 설계자료 [5]를 사용하여 SASSYS-1/SAS4A 가 필요로 하는 입력자료를 생산하였다. 그림 1 에서 원자로는 고온 풀과 저온 풀로 구분하였으며 저온 풀의 downcomer 는 피동 안전열제거계통(PSDRS)을 모의하기 위하여 양쪽 벽면에서 열전달이 되도록 모델링 하였다. 그림에서는 나타나 있지 않지만 격납용기 외부의 좁은 환형 공간을 따라 공기의 자연대류를 통해 붕괴열을 제거하는 PSDRS 계통도 역시 모델링 하였다. 증기발생기와 중간열전달계통은 SSC-K 와

비슷하게 단순한 모델을 사용하였다. 그림 2 는 SASSYS-1/SAS4A 와 SSC-K 두 코드에서 KALIMER 핵연료 챈널을 모델링한 것을 비교한 그림이다. SASSYS-1/SAS4A 계산에서는 가능한 SSC-K 와 비슷한 열수력 모델링을 하였다. 전자식 펌프 모델은 아직까지 구체적인 KALIMER 설계자료가 생산되지 않았으므로 SSC-K 계산과 동일하게 단순히 KALIMER 펌프 특성곡선을 사용하였으나 추후 설계자료가 확보되면 이들 모델을 반영할 필요가 있다. 또한 UTOP 계산에서는 노심의 반응도 및 열수력 현상이 중요하고 중간열전달계통 (IHTS)은 노심에서 발생되는 열을 증기발생기로 단순히 전달하는 역할을 하므로 본 계산에서는 IHTS 및 증기발생기를 포함한 Balance-of-Plant 계통은 SASSYS-1/SAS4A 코드의 상세모델 대신에 단순 모델을 사용하였다.

SASSYS-1/SAS4A 는 노심 반응도 궤환효과를 고려하기 위하여 상세한 노물리 데이터를 필요로 하며 노심 반경방향 팽창 및 제어봉 집합체 팽창을 고려하기 위하여 복잡한 노심 내부 구조물의 설계 데이터를 요구하고 있다. 그러나 이에 해당하는 KALIMER 의 설계자료가 부족하므로 차선책으로 단순모델을 채택하거나 SASSYS-1/SAS4A 코드 사용자지침서에서 제안하거나 또는 전형적인 액체금속로 설계값들을 참조하였다.

3. Code-to-Code 비교계산 결과

과도해석을 계산하기 앞서 SASSYS-1/SAS4A 코드를 사용하여 100% 출력의 KALIMER 정상상태를 계산하였다. 해석에 사용된 가정 및 해석방법론은 참고문서 [6]에 자세히 기술되어 있다. KALIMER 의 중요한 설계변수에 대해서 SASSYS-1/SAS4A 의 정상상태 해석 결과를 SSC-K 결과와 표 1 에 비교하였다. 그림 3 과 4 는 고온 핵연료 집합체의 온도분포 및 압력분포를 나타낸 것으로 두 코드간의 계산 차이는 크지 않았으며 설계 값과 비슷하게 예측하였다.

정상상태 계산결과를 초기조건으로 하여 과도사고의 하나인 UTOP 해석을 수행하였다. 두 코드의 반응도 모델이 서로 다르므로 30 센트 UTOP 사고시 각각의 반응도 모델을 비교하고 SASSYS-1/SAS4A 입력변수를 조절함으로써 SASSYS-1/SAS4A 모델이 SSC-K 와 같아지도록 하였다. 그림 5 는 노심 출력변화를 계산 한 것으로서 출력 피크가 발생하는 시점은 두 코드가 동일하게 16 초로 예측하지만 피크값은 SASYS-1/SAS4A 가 정상출력의 1.56 배, SSC-K 가 1.48 배로 계산하고 있다. 피크 출력 이후 감소하는 모양의 차이는 두 코드간의 반응도 모델의 차이에 기인한다. 출력변화의 차이로 인하여 계통의 열수력 거동 역시 차이를 나타내고 있다. 그림 6 은 SASSYS-1/SAS4A 의 반응도 변화를 보여주고 있으며 동일한 경우의 SSC-K 계산결과는 그림 7 에 해당한다. 두 코드가 서로 다른 반응도 모델을 사용하고 있지만 계산한 각 반응도 성분의 전반적인 경향은 비슷하게 나타났다. SASSYS-1/SAS4A 는 소듐 반응도를 피크출력 이후에 SSC-K 보다 다소 높게 계산하는 반면, 축방향 팽창 반응도는 오히려 SSC-K 보다 낮게 계산하였다. SASSYS-1/SAS4A 의 반응도 모델은 SSC-K 보다 상세한 입력을 요구하고 있지만 이에 대한 설계자료 부족으로 공학적 판단이나 단순 가정을 사용하

여 코드 입력들을 작성하였으므로 이로 인한 불확실성을 고려하여야 한다.

그림 8 은 고온 핵연료집합체에서 출력이 최대인 지점, 즉 핵연료 하단에서 위로 6 번째의 노드에서 계산된 핵연료 온도분포이다. SSC-K 가 예측한 최고 온도는 1126 K 이며 SASSYS-1/SAS4A 는 이보다 약 130 K 높은 1257 K 로 계산하였다. 정상상태시 두 코드가 예측한 최고 핵연료 온도는 그림에서 보듯이 큰 차이가 없으므로 UTOP 시 핵연료와 피복재 및 소듐냉각재의 최고온도의 차이는 과도상태의 출력 차이 때문이다. 그러나 온도 변화의 전체적인 경향은 거의 비슷하다. 그림 9 는 고온 풀과 저온 풀의 온도 변화이다. KALIMER 의 두 풀은 열용량이 매우 크므로 두 코드간의 출력 차이로 인한 풀의 온도변화는 비교적 크지 않았다.

4. 결론

SASSYS-1/SAS4 코드를 이용하여 KALIMER 계통의 정상상태 및 UTOP 사고해석을 수행하고 그 계산결과를 SSC-K 계산결과와 비교하였다. SASSYS-1/SAS4A 코드의 정상상태 계산은 KALIMER 설계의 주요 운전변수를 SSC-K 와 비슷한 수준으로 잘 예측하였다. SASSYS-1/SAS4A 의 UTOP 과도해석 결과, 출력 및 노심반응도 관련 변수들은 일반적으로 SSC-K 와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 정량적인 측면에서는 코드간의 모델 차이로 인하여 상이한 값을 예측하고 있다. 그러나 원자로 내부의 열수력 현상은 두 코드가 매우 비슷하게 예측하였다. 본 UTOP 해석을 기본으로 하여 유량상실사고 또는 열제거원상실사고와 같은 비보호사고에 대해서도 코드간 비교계산을 통하여 SSC-K 코드의 검증을 계속할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 주관 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] J. G. Guppy, “Super System Code (SSC, Rev.0) An Advanced Thermo-hydraulic Simulation Code for Transient in LMFBRs,” NUREG/CR-3169 (1983).

[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).

[3] J. E. Cahalan, A.M. Tentner, and E.E. Morris, "Advanced LMR Safety Analysis Capabilities in the SASSYS-1 and SAS4A Computer Codes," CONF-940402-18 (1994).

[4] F. E. Dunn, F.G. Prohammer and D.P. Webber, "The SASSYS LMFBR Systems Code," CONF-830853-1 (1983)

[5] Y. M. Kwon, “Design Data for the Plant Safety Analyses for KALIMER Design (Breakeven

Equilibrium Core),” KALIMER/SA121-DO-01/01, Rev.0, KAERI (2001).

[6] Y. M. Kwon and C. M. Kang, “SAS4A/SASSYS Basedeck of KALIMER Breakeven Core for Code-to-Code Comparison Analysis,” KALIMER/SA212-CN01/01, Rev.0, KAERI (2002).

표 1. SAS4A/SASSYS-1 와 SSC-K 코드의 정상상태 계산결과

Plant Parameters	Design	SSC-K	SAS4A/SASSYS
Core Power, MWt	392.2	392.21	391.02
Primary flow rate, kg/s	2143.1	2143.1	2143.1
Core inlet temperature, ºC	386.2	390.15	385.19
Core outlet temperature, ºC	530.0	530.66	526.83
IHX inlet temperature, ºC	529.8	529.82	525.62
IHX outlet temperature, ºC	385.0	387.36	384.92
Cover gas pressure, Pa	10133	10133	10133
Cover gas temperature, ºC	NA	505.04	527.43
Cold pool level, m	10.63	10.631	10.687
Hot pool level, m	15.63	15.639	15.697
Pump head, m	83.61	83.61	83.61
Intermediate flow, kg/s	1803.6	1803.6	1803.6
SG outlet temperature, ºC	339.0	339.7	NA
SG inlet temperature, ºC	511.0	510.25	NA

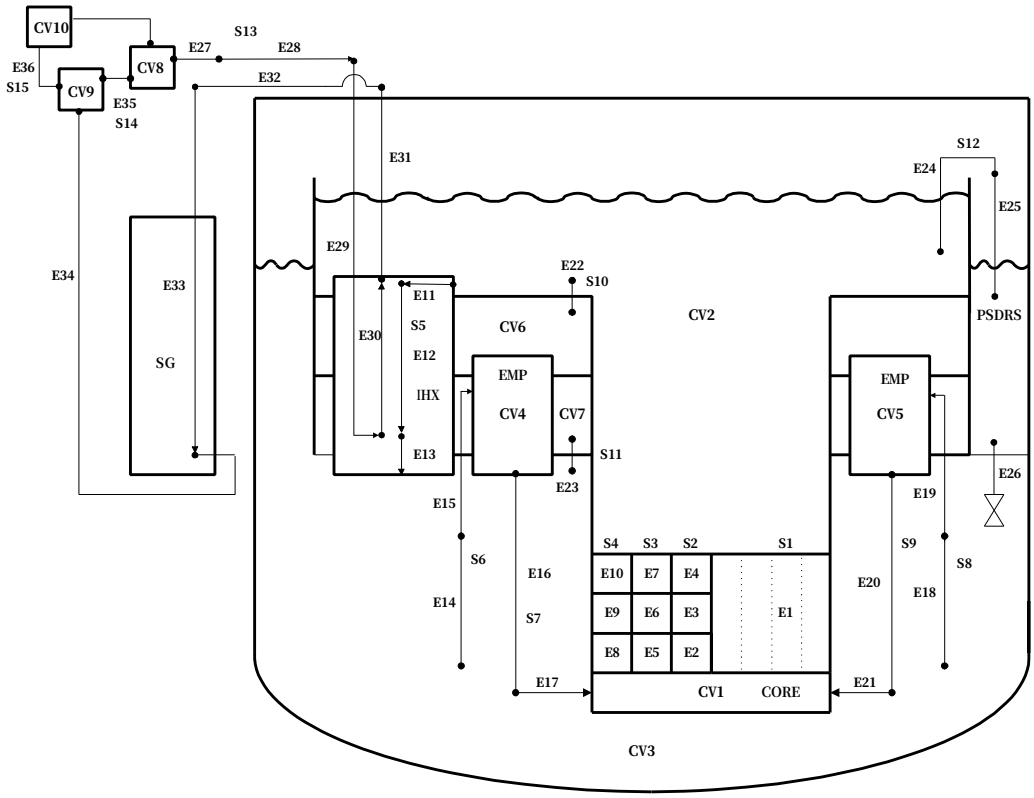
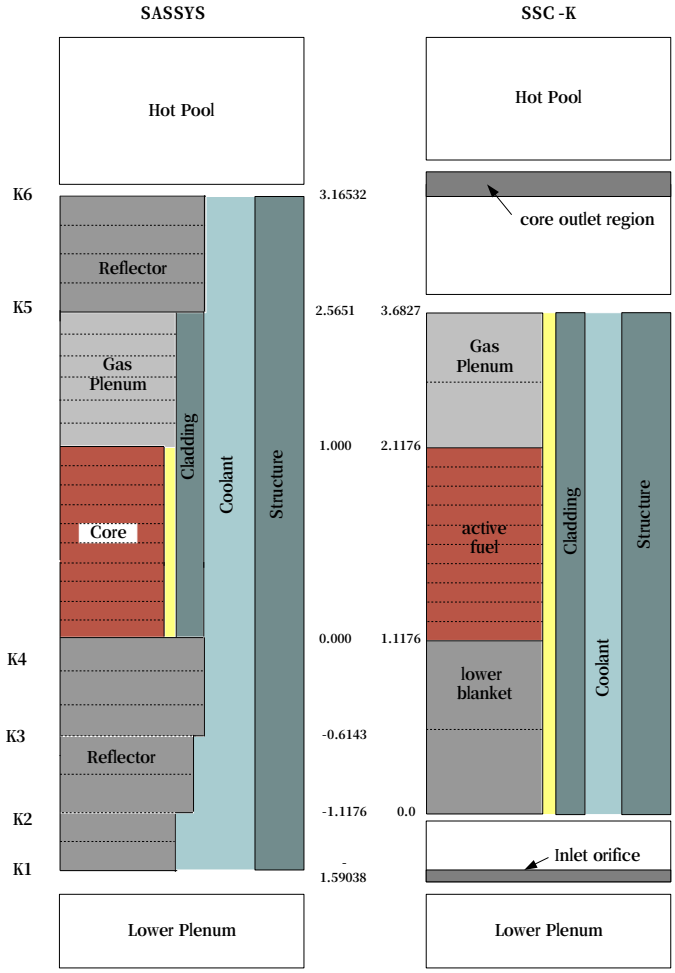


그림 1. SASSYS-1/SAS4A 해석을 위한 KALIMER Nodalization Scheme



Note: K1 ~ k6 are Orifice coefficients defined at Block 64, Loc48 -63

그림 2. SASSYS-1/SAS4A 와 SSC-K 의 노심채널 모델

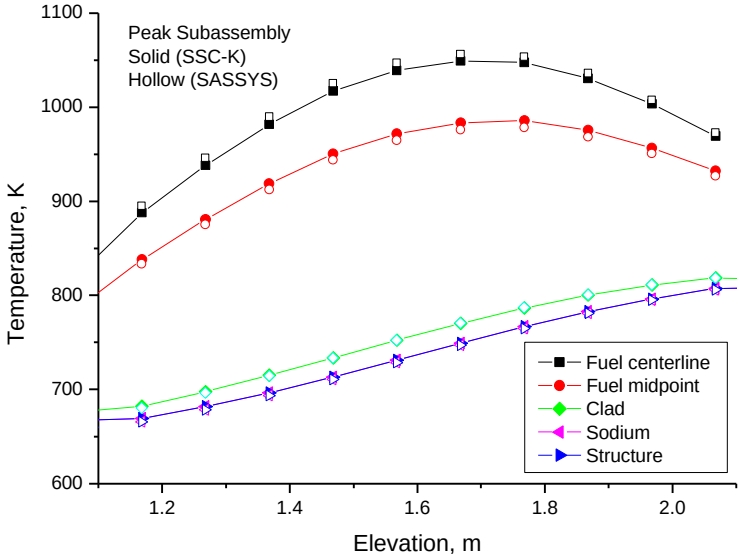


그림 3. 정상상태시 hot assembly 의 온도

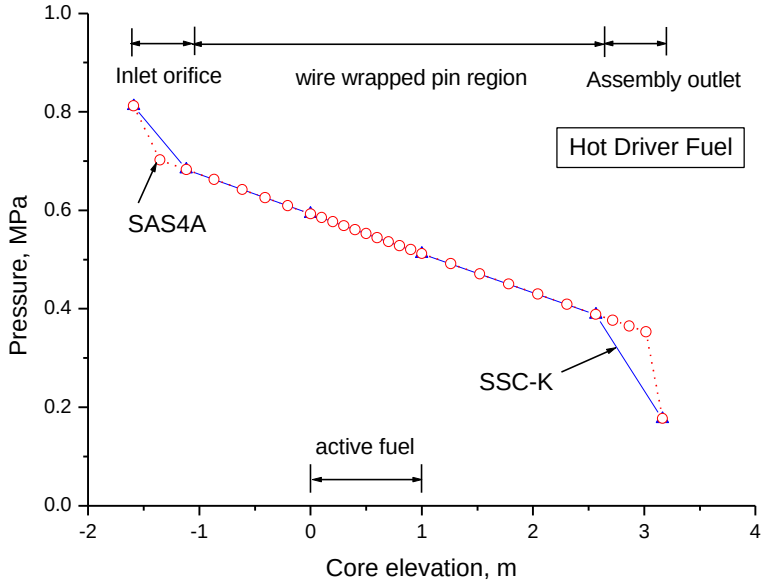


그림 4. 정상상태시 hot assembly 의 압력

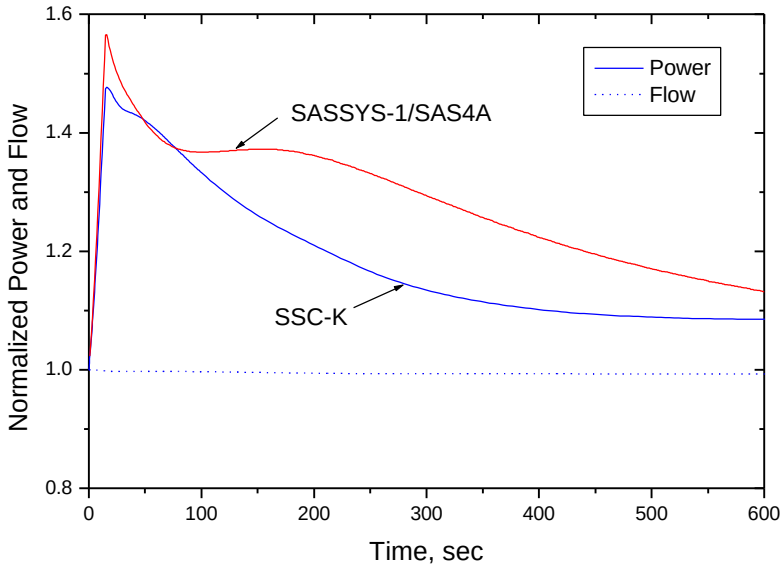


그림 5. UTOP 시 출력 및 유량

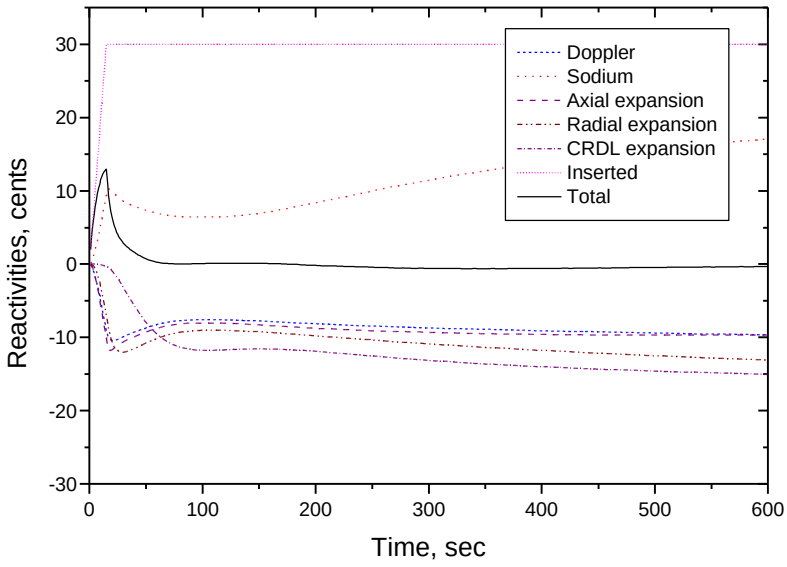


그림 6. UTOP 시 반응도 (SASSYS-1/SAS4A)

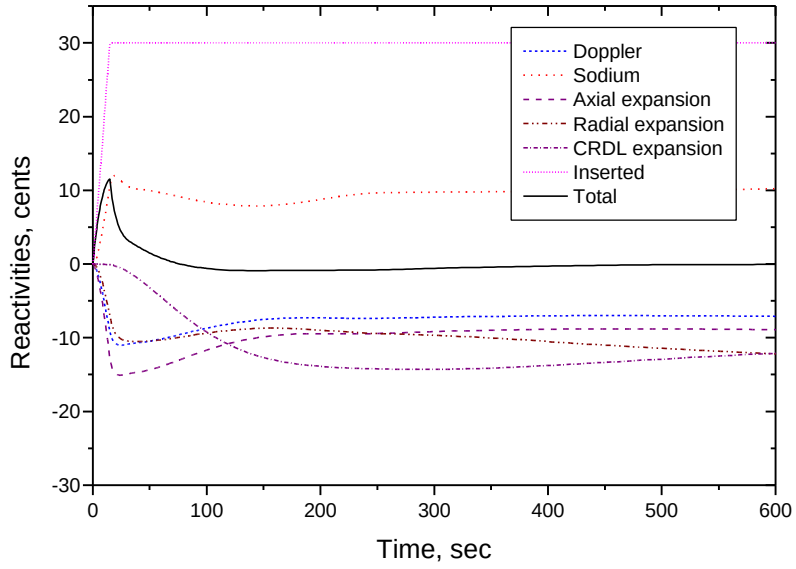


그림 7. UTOP 시 반응도 (SSC-K)

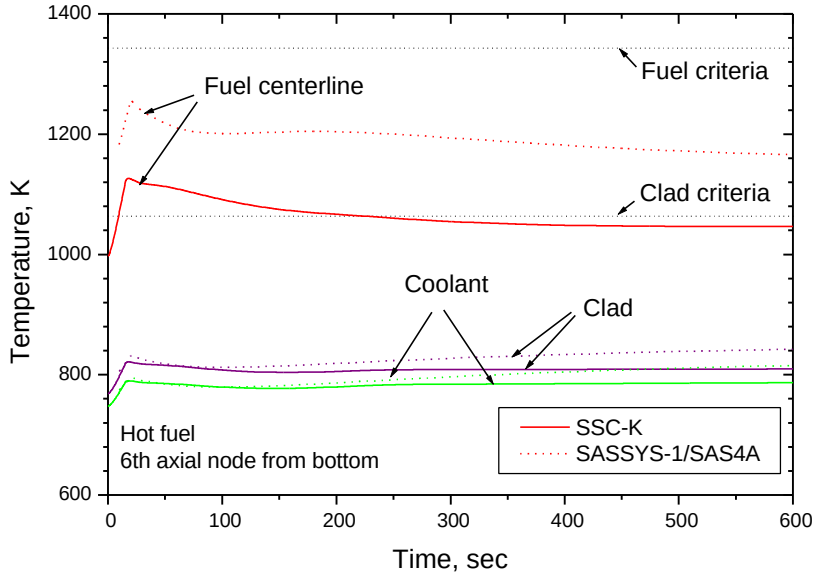


그림 8. UTOP 시 핵연료 온도

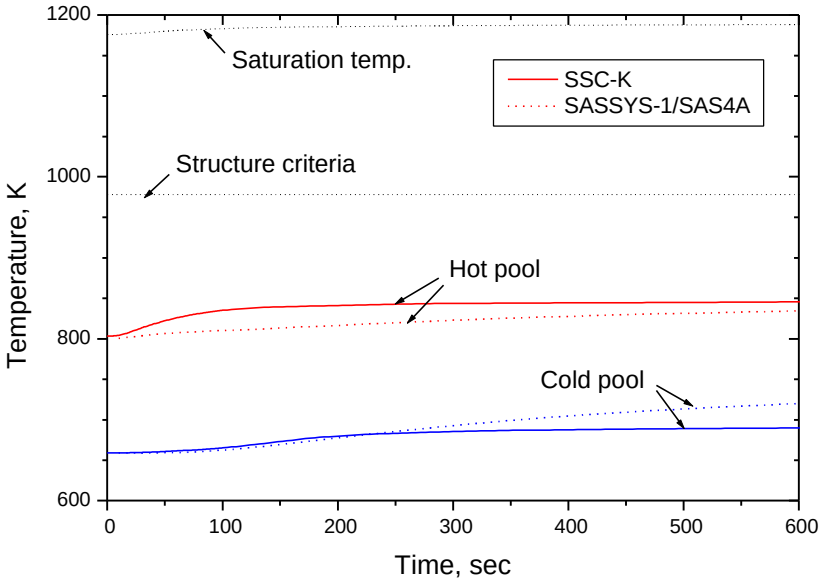


그림 9. UTOP 시 풀 온도