

발전소 정전사고 시 Hybrid SIT의 냉각성능 평가를 위한 안전해석에 관한 연구

류성욱*[†] · 김재민* · 김명준* · 전우진* · 박현식* · 이성재*

*한국원자력연구원

(2017년 6월 20일 접수, 2017년 7월 21일 수정, 2017년 7월 28일 채택)

Study on the Safety Analysis on the Cooling Performance of Hybrid SIT under the Station Blackout Accident

Sung Uk Ryu*[†] · Jae Min Kim* · Myoung Joon Kim* · Woo Jin Jeon* · Hyun-Sik Park* · Sung-Jae Yi*

*Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 20 June 2017, Revised 21 July 2017, Accepted 28 July 2017)

요 약

한국원자력연구원에서 제안한 혼합형 안전주입탱크 (Hybrid SIT)는 APR+ 원자로에 적용하기 위해 개발된 피동 안전주입시스템이다. 본 연구는 대표적인 고압사고인 발전소정전사고 시 Hybrid SIT의 냉각성능을 평가하기 위해 열수력 안전해석 코드인 MARS-KS 코드를 이용한 예비해석에 대한 것이다. PAFS 구동이 정지되면, 열제거량이 감소하게 되어 가압기와 증기발생기의 압력이 상승하기 시작하며, 가압기의 압력이 안전감압계통(Pilot Operated Safety and Relief Valve) 개방 설정치인 17.03 MPa에 도달하면, 그와 동시에 Hybrid SIT의 증기격리밸브가 열림으로서 가압기 상단의 증기가 Hybrid SIT로 주입되게 된다. 주입된 증기에 의해 압력평형이 빠른시간 안에 이루어졌으며, 주입배관을 통해 냉각수가 주입 되었다. 발전소정전사고시 PAFS와 같은 열제거수단이 상실됨에도 혼합형 Hybrid SIT가 주입되는 시간동안은 노심의 수위가 유지됨을 확인할 수 있었고, 수위가 유지됨에 따라 노심 출구 온도(CET)의 상승을 방지함을 확인하였다.

주요어 : 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크, 발전소정전사고, 노심 출구 온도

Abstract - The concept of Hybrid Safety Injection Tank (Hybrid SIT) proposed by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) has been introduced for the purpose of application to the Advanced Power Reactor Plus (APR+). In this study, the SBO situation of the APR+ was analyzed by using the MARS-KS code in order to evaluate whether the operation of the Hybrid SIT has an effect on the cooling performance of the Reactor Coolant System (RCS). According to the analysis, when the actuation valve on the pressure balancing line (PBL) is opened, the Hybrid SIT's pressure rises rapidly, forming equilibrium with the RCS pressure; subsequently, a flow is injected from the Hybrid SIT into the reactor vessel through the direct vessel injection (DVI) line. The analysis showed that it is possible to keep the core temperature below melting temperature during the operation of a Hybrid SIT.

Key words : Hybrid Safety Injection Tank, Station Blackout, Core Exit Temperature

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-042-866-4919 E-mail : rsu@kaeri.re.kr

1. 서론

그림 1에 표현한 피동고압충수용 혼합형 안전주입 탱크(Hybrid Safety Injection Tank, 이하 'Hybrid SIT')는 한국원자력연구원(KAERI)에서 제안한 피동안전주입 계통의 한 종류로 APR+(advance power reactor plus)에 적용하기 위한 목적으로 도입된 것이며, SIT의 상부와 가압기 또는 RCS를 연결하여 전 작동압력에서 SIT 냉각수의 주입이 가능하도록 개선한 시스템이다. [1, 2]

Hybrid SIT의 개념이 제시된 이후, 그것의 성능이나 적용 가능성을 파악하기 위한 해석관련 연구들 [3, 4]이 일부 진행되어 왔으며, KAERI에서는 2015년부터 2016년까지 Hybrid SIT 탱크 내부에서의 다양한 현상을 파악하기 위한 개별효과시험을 진행하였다 [5]. 개별효과시험을 통해 SIT 탱크 수위와 배관 길이, 밸브 개도량의 변화에 따라 SIT의 압력평형시간이 크게 달라지는 것을 확인하였으며, 배관 및 탱크 내부에서의 증기응축현상이 압력평형시간을 결정하는 주요 인자임을 파악하였다. 2017년에는 한국원자력연구원 엔지니어링 실험동에 설치된 ATALS (advanced thermal-hydraulic test loop for accident simulation) 종합 열수력 검증실험장치를 일부 개조하여 Hybrid SIT 성능검증용 종합효과시험을 진행할 계획이다.

본 연구에서는 종합효과시험 중 하나인 발전소정전사고 시 Hybrid SIT 성능검증 시험에 앞서 열수력 안전해석 코드를 이용한 예비해석을 수행하고, 그 결과에 대해 분석 할 것이다.

2. 혼합형 SIT MARS-KS 코드 모델링 및 해석 조건

본 종합효과시험 예비해석에서는 열수력 안전해석 코드인 MARS-KS v1.4를 활용하였고, 고압에서의 피동고압충수용 혼합형 SIT의 효과를 예측하기 위하여 대표적인 고압사고인 발전소정전사고 (SBO; Station Blackout)를 고려하였다. 사고 후 증기발생기의 수위에 따라 피동형 보조급수 계통 (PAFS; Passive Auxiliary Feedwater System) 1계열을 ATLAS의 척도비에 따른 시간척도비를 적용한 $8/\sqrt{2}$ 시간동안 가동하고, 그 후 안전감압계통(Pilot Operated Safety and Relief Valve, 이하 'POSRV') 작동 신호와 동시에 혼합형 SIT가 작동하는 시나리오를 가정하였다.

혼합형 SIT의 IET 예비해석 시나리오 요약하면 다음과 같다.

- 대상사고 : 발전소정전사고
- 원자로 정지, 터빈 정지, RCP 정지, 주급수 정지 : 0 초
- 고압안전주입펌프 작동불가
- PAFS 1계열 가용 ($8/\sqrt{2}$ 시간 작동 후 정지)
- 혼합형 SIT 4대 작동
- 혼합형 SIT 최초 작동 신호 : POSRV 최초 개방
- 혼합형 SIT 1대씩 순차적 주입 : SIT 1계열 수위 10% 미만 일 경우 다음 SIT 주입 (가압기와 SIT 간의 거리가 가까운 순서대로)

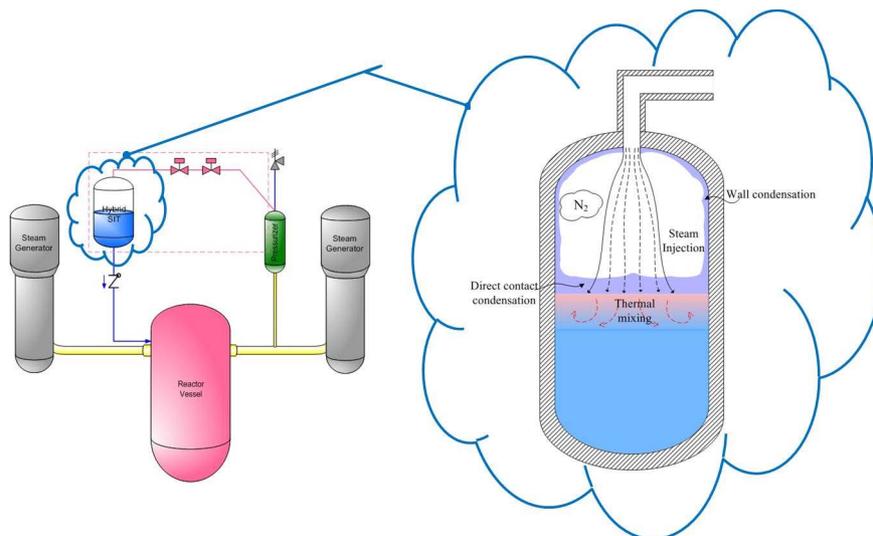


그림 1. Hybrid SIT 개념

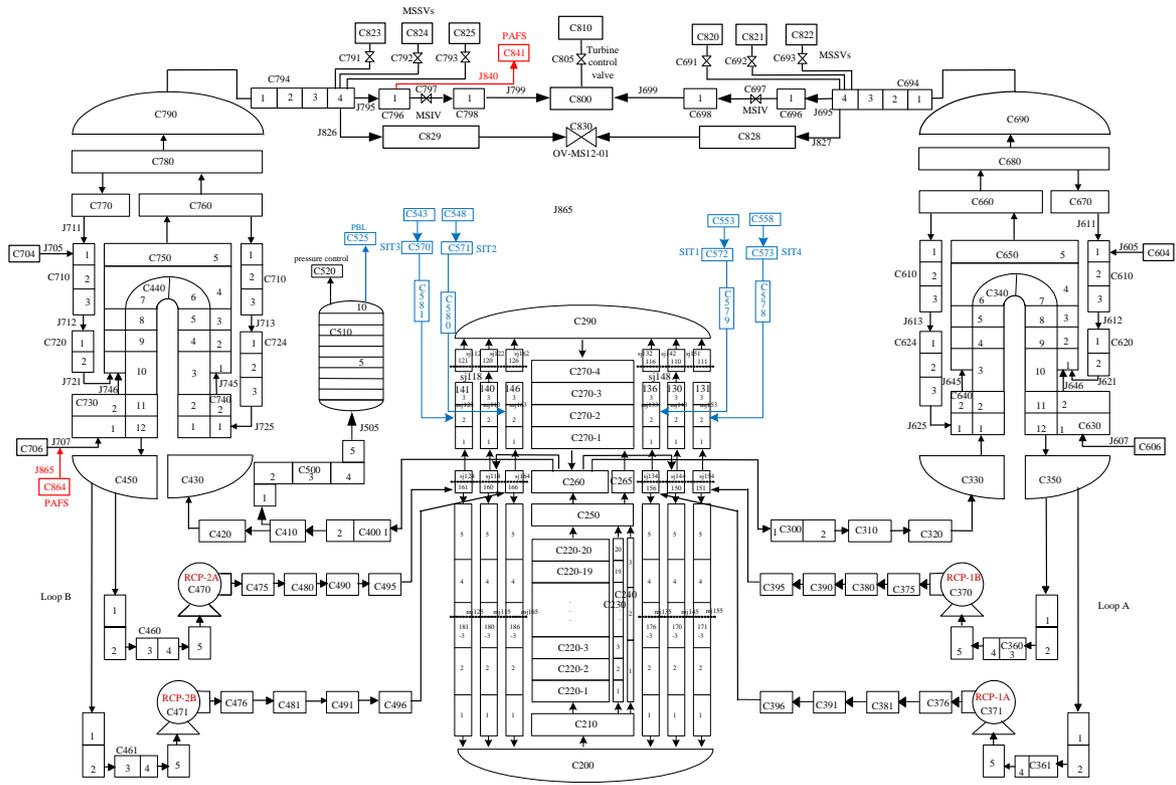


그림 2. MARS Nodalization

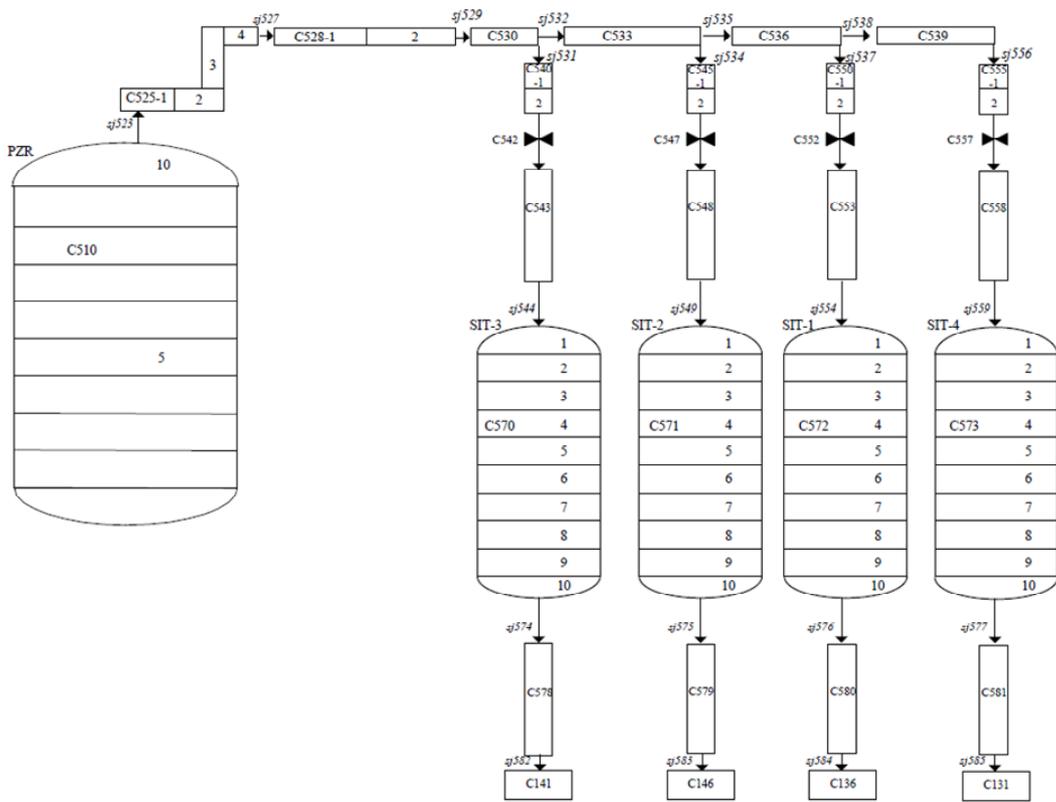


그림 3. Hybrid SIT Nodalization

표 1. 정상상태 주요변수 비교

| System | Parameter | Target Value | Steady State Value |
|------------------|--|---------------|--------------------|
| Primary System | Core power (MW) | 1.56 | 1.56 |
| | PZR pressure (MPa) | 15.5 | 15.5 |
| | Core inlet temperature (K) | 564.15 | 563.8 |
| | Core outlet temperature (K) | 599.99 | 597.3 |
| | Average Cold leg flow (kg/s) | 1.98 | 2.00 |
| Secondary System | Steam flow rate per each SG (kg/s) | 0.382/0.425 | 0.399/0.429 |
| | Feedwater flow rate per each SG (kg/s) | 0.410/0.413 | 0.444/0.445 |
| | Feedwater temperature (K) | 507.05/506.15 | 505.37/505.37 |
| | Steam pressure (MPa) | 7.83/7.83 | 7.83/7.82 |
| | Steam temperature (K) | 568.75/568.75 | 566.59/566.59 |
| | SG water level (m) | 4.99/4.99 | 4.93/4.93 |

혼합형 SIT에 대한 입력 자료는 가압기 상단부터 SIT 상단까지 연결하는 배관인 PBL (Pressure Balance Line), PBL과 연결된 SIT, 그리고 SIT 하단에서부터 강수부의 DVI 배관과 연결된 Injection line (IL)으로 크게 3 부분으로 구성되어 있다. 혼합형 SIT에 대한 MARS-KS 코드 모델링은 설계 도면을 토대로 상세히 작성되었다. 전체 ATLAS 실험장치의 노드화 도식도는 그림 2에 나타나있으며, 혼합형 SIT 부분의 상세 노드화 도식도는 그림 3에 정리하였다. 표 1은 정상상태에서의 주요변수값들을 정리한 것으로, 정상상태는 APR+의 축척 출력비 대비 8%의 노심출력으로 고려되었다. 1차 계통의 가압기 압력은 목표값과 차이가 없었으며, 노심 입출구 온도 및 저온관 유량 차이는 미미하게 나타났다. 2차 계통에서는 급수유량 및 온도와 같은 경계조건을 제외한 변수들인 증기발생기 압력과 수위, 증기 온도, 증기 유량은 목표값과 거의 일치하는 수준으로 모의되었다.

3. 과도상태 모의결과 분석

과도상태에서의 히터 출력은 APR+의 축척 출력비 대비 8%의 정상상태 출력에서 시작하여 그림 4의 잔열 곡선을 따라 모사되었다. 발전소정전사고 모의 시 주요 사건 이력은 표 2에 제시하였으며, 상세한 내용은 다음과 같다. 과도상태 시작과 동시에 원자로, 일차냉각재 펌프, 터빈이 트립되고, 보조급수 및 주증기 격리 밸브

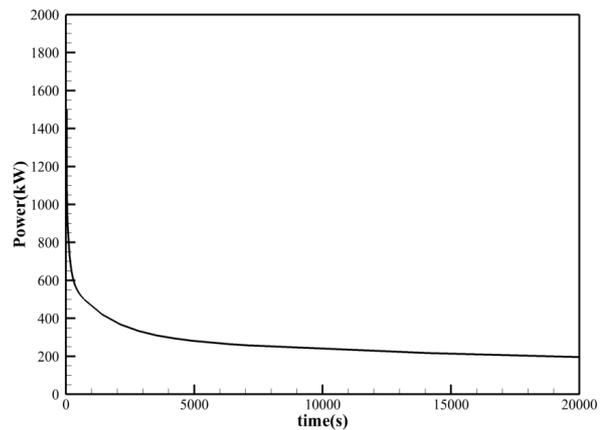


그림 4. 노심출력곡선

가 닫히게 된다. 증기발생기의 압력이 9.1 MPa에 도달하면 MSSV가 최초 개방을 하고, 증기발생기 수위가 25% 미만으로 내려가면 증기발생기 2의 PAFS가 작동한다. 20,365초 동안 PAFS가 구동이 되며 그 이후 PAFS 구동이 정지되면, 열제거량이 감소하게 되어 가압기와 증기발생기의 압력이 상승하기 시작한다. 가압기의 압력이 POSRV 개방 설정치인 17.03 MPa에 도달하면, 그와 동시에 SIT4의 증기격리밸브가 열림으로서 가압기 상단의 증기가 SIT4로 주입되게 된다. 주입된 증기에 의해 압력평형이 이루어지면 주입배관을 통해 냉각수가 주입이 된다. SIT4의 수위가 10% 아래로 하락하게 되면 SIT3의 주입 신호가 발생하고 순차적으로 SIT 수위에 따라 SIT2와 SIT1이 작동하게

표 2. 과도상태 사건 이력

| Event | Time (sec) | 설정치 |
|-------------------------|------------|--|
| SBO start /Reactor Trip | 0.0 | 초기 조건 |
| RCP, Turbine Trip | | |
| MFIV, MSIV close | | |
| MSSV 최초 개방 | 10.51 | 개방 설정치 : 8.1 MPa 달힘 설정치 : 7.7 MPa |
| PAFS on | 1461.55 | 작동 설정치 : 증기발생기 수위 25% 이하 SG2 1계열만 작동 |
| PAFS off | 21826.6 | $8/\sqrt{2}$ 시간 가동 후 종료 ($8/\sqrt{2} = 20365$ sec) |
| SG1 dryout | 30298.0 | - |
| SG2 dryout | 30703.0 | - |
| POSRV 개방 | 32325.0 | 개방 설정치 : 17.03 MPa 달힘 설정치 : 14.82 MPa |
| SIT4 on | 32325.0 | POSRV 개방과 동시에 작동 |
| SIT3 on | 37415.6 | SIT4 수위 10% 미만시 작동 |
| SIT2 on | 39288.9 | SIT3 수위 10% 미만시 작동 |
| SIT1 on | 41736.2 | SIT2 수위 10% 미만시 작동 |
| Core dryout | 49062.0 | - |
| 계산 종료 | 56613.28 | - |

된다. 모든 SIT의 주입이 종료하게 되어 열제거수단이 완전 상실하게 되면, 노심 및 강수부 수위가 감소하기 시작하고 수위 감소와 동시에 노심 출구 온도 (CET; Core Exit Temperature) 가 상승한다. 노심이 고갈되면 CET는 급격하게 상승하며, 열구조체 온도 상승으로 해석이 종료된다.

그림 5는 시간에 따른 압력변화를 나타낸 그래프이다. 1,461초에 PAFS 구동이 시작되면, 1차측 열제거가 원활하게 이루어지며, 이로 인하여 가압기와 증기발생기의 압력이 감소하기 시작한다. 21,827초에 PAFS 구동이 정지되면, 주요 열제거원이 상실하게 되고, 그 이유로 가압기의 압력이 급격하게 상승한다. 32,325초에 가압기의 압력이 17.03 MPa에 도달하게 되고, 바로 POSRV가 작동하여 가압기의 압력이 감소한다. 이와 동시에 SIT4 의 PBL에 설치된 기동밸브가 개방되며

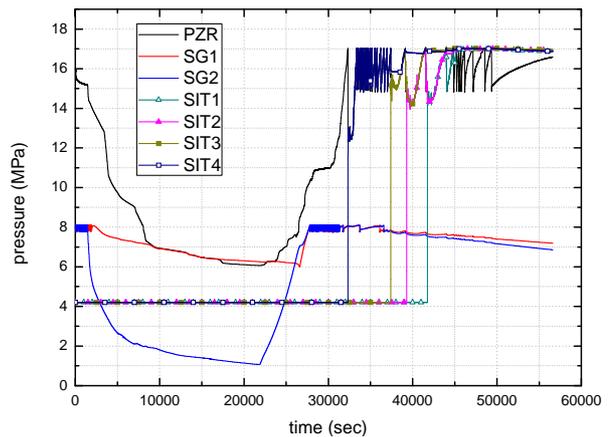


그림 5. 과도상태에서의 주요 계통 압력

SIT4의 주입이 이루어진다. 순차적으로 나머지 SIT의 주입도 이루어진다. PAFS가 구동되는 동안 증기발생

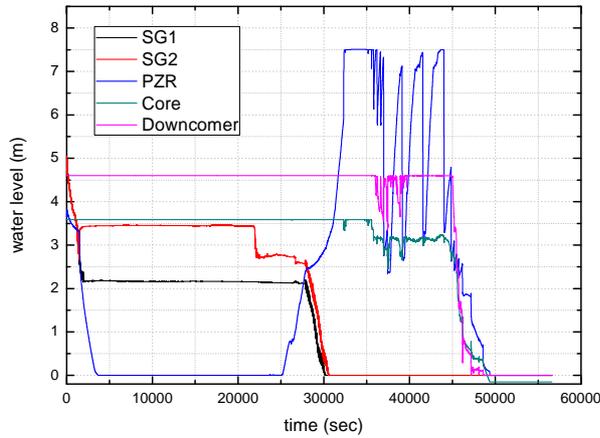


그림 6. 과도상태에서의 주요 계통 수위

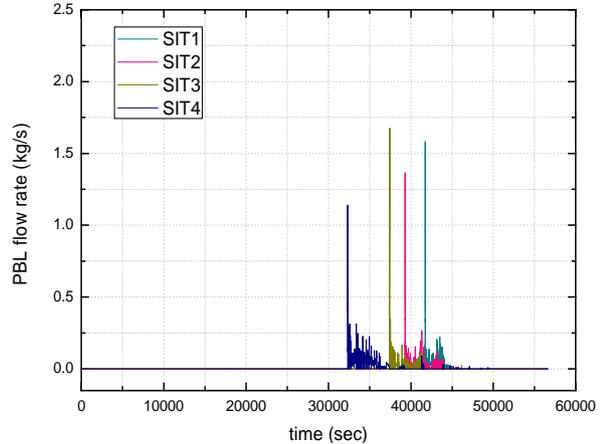


그림 8. 과도상태에서의 PBL 유량

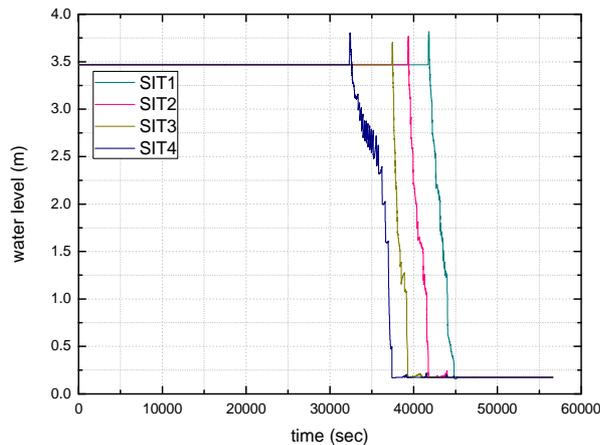


그림 7. 과도상태에서의 SIT 수위

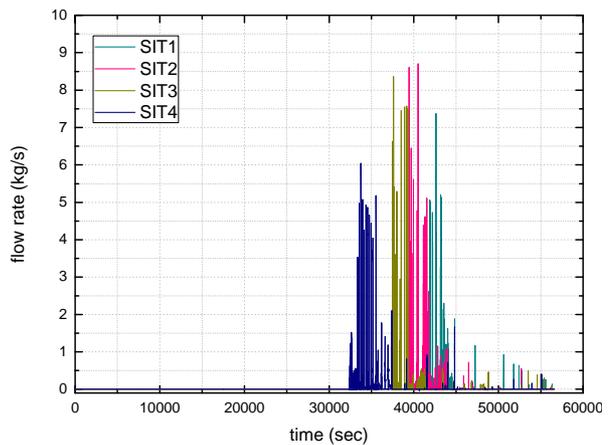


그림 9. 과도상태에서의 SIT 주입 유량

기 2의 압력이 낮게 유지되며, 증기발생기 1의 압력은 상대적으로 높게 유지된다.

그림 6은 수위변화를 나타낸 그래프이다. PAFS 구동과 동시에 가압기의 수위가 급격하게 내려가며 PAFS의 구동이 정지되면, 냉각수의 온도가 올라감에 따라 밀도가 감소하게 되어 가압기의 수위 또한 상승하게 된다. 30,298초에 증기발생기 1이 고갈되고 30,703초에 증기발생기 2가 고갈하게 되어 열제거 능력을 완전히 상실하여 가압기의 수위는 더 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 이후 SIT 냉각수의 주입에 따라 가압기 수위가 크게 변화한다.

그림 7은 SIT의 수위를 보여준다. SIT4는 POSRV의 개방과 동시에 작동하게 되며, SIT4의 증기 주입시 응축량이 다른계열의 SIT보다 많아 수위가 천천히 내려가고 주입시간이 길어지게 된다. SIT 주입 후에도 POSRV의 작동으로 인하여 가압기의 압력이 상승과

하락이 반복됨에 따라 가압기의 압력거동이 빠르게 변하게 된다.

그림 8과 9는 PBL 배관을 통한 SIT의 증기 주입 유량 및 SIT 냉각수 주입 유량을 각각 보여준다. PBL의 개방은 각 계열별로 순차적으로 이루어지며, SIT의 압력이 가압기의 압력과 같아지면서 주입배관을 통해 냉각수의 주입이 순차적으로 이루어짐을 알 수 있다.

그림 10은 PAFS 구동시 PAFS로 공급되는 2차측의 유량을 보여준다. PAFS로의 자연순환 유량이 형성되어 일정 유량을 계속 유지하고 있으며, 20,365초가 작동한 후 강제적으로 밸브를 차단하여 작동을 정지시켰다.

그림 11은 시간에 따른 노심 출구 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. SIT의 냉각수가 주입이 이루어지는 동안에는 노심에서 수위가 일정하게 유지되고 있으므로, 일정 온도가 유지되고 있다. SIT 주입이 종료된

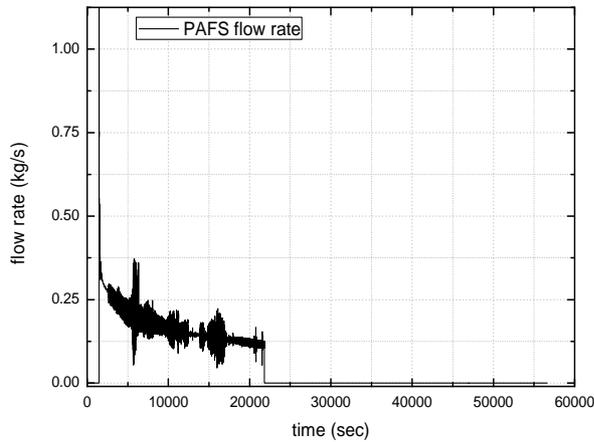


그림 10. 과도상태에서의 PAFS 유량

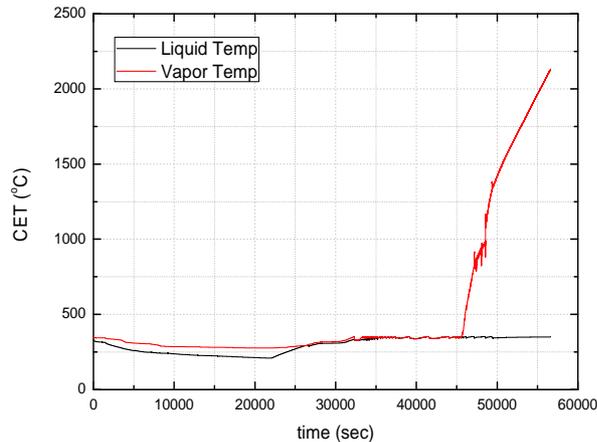


그림 11. 과도상태에서의 노심 출구 온도

이후에는 노심의 수위가 하강하게 되고 노심의 노출이 일어나 온도가 급격하게 올라가는 것을 알 수 있다.

4. 결론

ATLAS를 대상으로 피동고압충수용 혼합형 SIT에 대한 성능평가해석을 MARS-KS 코드를 활용하여 수행하였다. SIT는 pipe component를 사용하여 모의하였다. 고압에서의 혼합형 SIT 성능을 확인하기 위하여 대표적 고압사고인 발전소정전사고를 고려하였으며, PAFS가 일정 시간 작동하고 멈춘 후 POSRV의 개방 신호에 따라 순차적으로 혼합형 SIT가 작동하는 시나리오에 대해서 해석을 수행하였다. 발전소정전사고시 PAFS와 같은 열제거수단이 상실됨에도 혼합형 SIT가 주입되는 시간동안은 노심의 수위가 유지됨을 확인할 수 있었고, 수위가 유지됨에 따라 CET의 상승을 방지

함을 확인하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131510101670)

References

1. Kwon, T., Eun, D. J., Bae, J. and Park, C. K., 2011, Hybrid high pressure safety injection tank for SBO, Proc. of the KNS Autumn Meeting. Conf., Taebaek, Korea.
2. Kwon, T. and Park, C. K., 2013, Hybrid SIT for passive safety system, Proc. of the KNS Spring meeting. Conf., Gwangju, Korea.
3. Jeon, I.S., Kang, H.G., 2015. Development of an operation strategy for a hybrid safety injection tank with an active system. Nucl. Eng. Technol. Vol.47, pp. 443-453.
4. Kang, S. H and Kim, H. G., 2013, Preliminary performance and sensitivity analysis of hybrid safety injection system for passive emergency core cooling system, Proc. of the KNS Spring meeting. Conf., Gwangju, Korea.
5. Ryu, S. U., Ryu, H., Park, H. S. and Yi, S. J., 2016, An experimental study on the thermalhydraulic phenomena in the Hybrid Safety Injection Tank using a separate effect test facility, Annals of Nuclear Energy, Vol. 92, pp. 211-227.