2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

울진 1&2호기 전체 급수 상실 사고의 MARS 해석을 통한 비상운전절차서 설정치 검증

MARS Analysis of UCN1&2 Loss of Total Feedwater Accident for the EOP Set Point Study

홍순준

(주)미래와도전

서울시 관악구 신림동 산 56-1 서울대학교

윤덕주

한국전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 MARS 2.0 최적 계산을 이용하여 울진 1&2 호기 전체 급수 상실 사고 후 비상 절차서 중대-1 에 이르렀을 때 운전원 조치의 기준이 되는 '상태조치표'에 대하여 검증하였다. 노심 온도 계측의 불확실도를 고려하면 상태조치표에서 고온관의 온도 및 과냉각도 조건과 원자로 냉각재 재고량 상태에 대한 설정치는 적절한 것으로 사료된다. 또한 상태조치표에서의 각 단계가 가지는 시간적인 여유가 15 분 정도라는 것을 밝힘으로써 추후 여타 기술배경서 작성에도 참조가 될 뿐 아니라 운전원들이 미리 염두에 둘 시간으로 고려한다면 보다 안전한 비상 운전 절차가 될 것으로 기대된다

Abstract

This study discusses about the set points of U.1 phase of UCN1&2 (Ulchin 1&2) EOP (Emergency Operation Procedure) through the calculation of loss of total feedwater accident using best estimate code MARS 2.0. Considering the measurement uncertainties of core exit fluid temperature, the relation between hot leg temperature or hot leg subcooling and reactor

coolant condition seems appropriately set. The MARS calculation also showed that the duration of each step in ‘sequence table of operator action’ was about 15 min. This duration can be applied to another technical background and to the operator actions, which is expected to provide more safe emergency operation in the case of the postulated situation.

1. 서론

원자력 안전의 목적은 발전소 사고 방지와 사고 발생시 공공 대중의 방사능 피폭을 최소화하기 위한 것이다. 이는 노심 손상 방지, 원자로 용기의 파손 방지, 격납용기로부터의 방사능 물질의 누출 방지 등을 구현하기 위한 적절한 발전소 운전 절차서를 통해서 이루어진다. 원자력발전소에는 운전원이 정상, 비정상 및 비상상황시 사용하는 절차서들이 구비되어 있으며 발전소 비상상황 발생시 비상운전절차서를 이용하여 사고완화를 위한 운전원 조치를 취하게 된다

미국 TMI 사고 이후 미국원자력규제위원회와 발전사업자들은 징후지향 절차서 개발에 역점을 두었으며, 기존의 보수적 안전해석 가정에 의해 개발된 비상운전절차서의 결함을 인식하였다. 이에 따라 비상운전절차서 개선을 위한 규제기관의 여러 요건들이 발행되었다. 특히 NUREG-0737 의 항목 I.C.1 에서는 다중의 기기 및 계통의 고장을 고려한 과도사건과 사고에 대한 해석, 비상운전지침서 구비, 비상운전절차서 개선, 자연순환 상태에서의 발전소 운전, 운전원 교육에 대한 요건을 발행하였다. 이러한 요건들은 안전한 원전설계뿐만 아니라 운영측면의 중요성을 강조하여 비상운전절차의 새로운 개념을 정립케 하였다. 이러한 개념의 원칙은 운전원의 판단을 최소화시키고 기술배경에 의해 개발된 사고복구 절차에 따라 비상운전 조치를 취하는 것이다.

울진 1&2 호기의 비상운전 절차서[1]에는 사건중심 절차서인 I, A 및 H 절차서가 구비되어 있어 발전소 설계시 고려되어진 모든 사고 및 일부 설계 기준의 사고에 대처할 수 있도록 하였다. 그러나 이러한 절차서들은 모든 가능한 복합사고를 취급할 수는 없다. 또한 거의 일어날 것 같지 않은 아주 특별한 경우의 사고에는 부적합 할지도 모른다. 사건중심 절차서(I, A 또는 H)가 부적당하거나 효과적이지 못한 상황에서 최적의 핵증기 공급계통 냉각, 노심보호 그리고 방사능 누출제한을 보증하기 위하여 중대-1(U.1) 절차서를 개발하였다. 중대-1(U.1) 절차서는 발전소 상태의 심각성과 안전관련

계통의 이용가능성에 따라 노심손상과 방사능 누출을 방지하거나, 제한하거나, 지연시키기 위하여 사용된다 [2,3].

중대-1 로 진입하면 운전조는 ‘증기발생기 점검’절차와 ‘안전주입 점검’절차를 먼저 수행한 후, 이 두 가지 점검결과와 1 차측 냉각재 상태(TRIC(고온관 온도) 및 Δtsat(고온관 과냉각도))를 토대로 ‘상태 조치표’상의 해당 영역으로 진입하여 필요한 조치를 수행하게 된다. 상태 조치표는 참고문헌 [3]의 붙임 3.6 에서 보듯, 중대-1(U.1) 이전에 수행된 ‘연속감시 (SPI)’에서 이미 판정된 SG (Steam Generator; 증기발생기) 및 SI (Safety Injection; 안전주입)에 대한 운전 가능성 여부와 현재 1 차측 상태를 조합하여 구성된다. 상태 조치표의 4 개의 열(Column)은 2 차측(SG) 운전 가능 또는 운전 불가능한 상태가 조합되어 있고, 상태 조치표의 4 개의 행은 표 1 과 같이 원자로 냉각재 재고량의 상황을 기술하고 있다[3,4].

이 연구에서는 전출력 운전 중 증기발생기들에 완전급수 상실사고가 발생하고 보조급수 계통의 기동이 실패하여 중대-1 의 절차로 진입한 경우에 대하여 위 상태조치표상의 설정치들과 원자로 냉각재 재고량의 상황을 MARS2.0 (Gamma version) [5] 계산을 통하여 확인하고자 한다.

2. MARS 모델링 및 정상상태 계산

MARS2.0-Gamma 는 한국원자력연구소에서 개발한 다차원 최적해석 코드로서, Non-homogeneous, Non-Equilibrium 모델에 기반을 둔 Two-Fluid 모델과 여러 구성 방정식(Constitutive Equation)으로 구성된 이상 유동(Two-Phase Flow) 해석을 위한 최적 해석(Best Estimate) 전산 코드 이다. 이는 RELAP5/MOD3 코드[6]와 마찬가지로 Working Group Meeting 을 통하여 지속적으로 유지/향상되어 왔으며 사용자의 편의를 위하여 Graphic User Interface 방식을 채택하고 있다. 이 코드는 LOCA (Loss of Coolant Accident) 및 Non-LOCA 사고 모두에 있어서 우수한 계산 성능을 보여왔다[5].

2.1 울진 1&2 호기 모델링

울진 1&2 호기는 프랑스 Framatome 사의 3 Loop 형태의 가압경수로이다. 본 연구에서는 각 Loop 를 모두 모델링하였다. 기본적으로 1 차 계통 및 2 차 계통 각 기기에 대하여 열수력 입력뿐만 아니라 구조물, 트립, 발전소 제어 계통도 입력하였다. 기본적인 Nodalization 은 그림 1 과 같다.

주요 열수력 입력은 원자로와 그 내부 구조, 3 개의 증기발생기, 3 개의 원자로 펌프, 이들을 연결하는 각 고온관과 저온관, 가압기 및 유출/충전, 안전주입계통으로 일차 계통이 이루어지고, 이차계통은 증기발생기의 열교환 부분, 주급수 및 보조 급수, 주증기관, 증기 헤더 및 복수기와 터빈을 모사하는 Time Dependent Volume, 각종 안전 밸브 및 압력 방출 밸브들로 구성된다. 1 차 계통 및 2 차 계통의 구조물들을 모두 Structure Input 부분에 모사함으로서 구조물에 축적될 수도 있는 열량에 있어서도 충분한 실제성이 있도록 하였다.

계통의 과도 현상 진행시 각 기기들의 거동을 정확히 모의하기 위하여 각 기기들은 발전소와 같이 동작하도록 제어 계통을 모델링하였다. 가압기는 압력과 수위 제어 계통이 모델링 되어 있어 과도 현상의 진행에 따라서 적절히 압력과 수위가 제어 될 수 있거나 이에 따르는 각종 트립이 발생하도록 하였다. 충전과 유출이 모델링되어 있으며 압력방출 밸브, 안전 감압밸브, 전열기가 함께 모델링 되어 있다.

증기발생기는 수위 제어계통이 모델링되어 있으며 주급수, 보조 급수가 연결되어 있다. 증기 계통에는 증기 덤프 계통, 터빈 정지 밸브, 압력방출 밸브가 모델링 되어 있다.

2.2 정상상태 계산 및 모델 검증

정상 상태 계산 결과는 전출력 조건에서 비교되었으며 표 2 와 같다. 원자로 계통의 주요 변수들에 대하여 발전소의 값과 유사한 값을 얻었다. 노심 출력은 2775MW, 가압기 압력은 155.7bar, 가압기 수위 62.2%, 노심 평균 온도는 304.4℃였다. 이차계통은 압력 67.7bar, 증기발생기 협역수위는 44%의 값으로 정상상태 및 초기 조건을 계산하였다.

모델 검증은 참고문헌 [7]을 참조하였다.

2.3 전체 급수 상실사고 해석을 위한 주요 사고 시나리오 및 가정

본 연구에서는 주급수 완전 상실사고가 발생하여 보조급수의 기동이 실패하고 계통의 상황이 악화되어 비상운전절차서 상의 중대-1 로 진입하는 경우를 고려한다. 전형적인 경우를 고려하기 위하여 운전원은 어떠한 조치도 취하지 않으며 계통은 보조급수의 기동 실패 이외에는 모든 제어 계통들이 정상적으로 작동하도록 하였다. 이에 따라 원자로 계통의 거동은 서론에서 언급한 상태조치표의 단계를 하나씩 따라가도록 하였다.

노심 출력에 대하여 보수성을 적용하기 위하여 주기말 핵연료를 가정하였다.

3. 전체 급수 상실 사고에 대한 해석 결과 및 토의

과도 진행상에서 주요한 사건들을 표 3 에 정리하였다. 3 대의 증기발생기에 주급수가 정지됨으로 말미암아 27 초에 가압기 저수위에 의하여 원자로 정지 및 이에 따른 터빈 정지가 발생하였다. 32 초에는 주증기관의 잉여증기를 방출하기 위하여 증기 덤프 계통이 작동하며, 지속적인 1 차 계통의 압력 상승으로 말미암아 793 초에 가압기 살수 계통이 작동한다. 하지만 열제거원이 완전히 상실된 상황이므로 압력은 지속적으로 증가하여 1992 초에 가압기 압력방출 밸브가 개폐를 반복하면서 일차 계통의 압력을 밸브 개폐 설정치 근처로 유지시킨다.

3.1 압력 거동

그림 2 에 일차 계통 가압기의 압력과 이차계통의 증기발생기의 압력이 제시되어 있다. 일차 계통의 압력은 원자로 정지와 더불어 순간적으로 떨어졌다가 이후 가압기 히터의 영향으로 압력이 완만히 상승한다. 1992 초부터 가압기 압력방출밸브의 개폐가 반복하면서 압력은 진동하는 경향을 보이며, 이후 밸브 개폐 설정치 근처에서 압력은

진동하면서 유지된다.

한편 이차계통은 27 초에 원자로 정지에 의한 터빈 정지 및 증기덤프계통의 작동으로 순간적으로 압력이 10bar 정도 상승한 후 일정한 압력 (증기발생기 안전밸브 개방 설정치)으로 유지된다. 보조급수의 기동 실패로 말미암아 증기발생기 냉각재가 냉각되거나 증기가 응축되는 현상이 발생하지 않으므로 일정한 압력을 유지한다.

3.2 고온관의 온도 거동

그림 3 과 4 에 각 고온관의 온도 및 과냉각도 혹은 과열도를 나타내었다. 온도 그래프에서 증기의 온도와 물의 온도가 동시에 표시되어 있는데, 이는 MARS 가 Two-Fluid 모델을 사용함으로 말미암아 증기와 물의 온도가 각각 계산되기 때문이다. 따라서 기포율이 0 이면 물의 온도가 실제 유체의 온도이며, 기포율이 1 이면 증기의 온도가 실제 유체의 온도이다. 기포율이 0 과 1 사이의 값일 경우에는 증기와 물 각각의 온도를 나타내며 비평형(Non-equilibrium) 상태가 되면 두 온도는 각각 다르게 나타나고 평형(Equilibrium)일 경우에는 같은 온도, 즉 포화 온도를 나타낸다. 따라서 고온관과 거의 유사한 기포율을 나타내는 그림 5 의 기포율을 참조하면서 온도를 고찰해야 한다.

대략 2600 초 경까지는 기포율이 0 이므로 고온관의 온도는 오직 물에 의해서만 결정된다. 원자로 정지가 발생하는 초기에는 온도가 급격히 떨어진 후 온전한 열제거 없이 잔열이 발생하므로 온도는 완만하게 상승한다. 2600 초 경에는 원자로 출구 영역에서 기포가 발생하기 시작하고, 이때 고온관의 온도는 평형을 이루면서 증기와 물의 온도가 같아지며 포화온도가 된다. 그림 4 에서의 과냉각도는 초기에는 50K 정도 유지하다가 이후 점차적으로 과냉각도를 상실하게 된다.

이후 4000 초 혹은 4200 초 정도까지는 고온관에는 이상유동 형태로 유체가 존재하게 되고 그 온도는 포화 온도에서 유지된다. 이때의 온도는 대략 350℃정도로 165bar 정도에서의 포화온도이다.

4000 초 이후에는 고온관은 완전히 증기로 가득차게 되고 그 온도도 급격히 상승한다. 또한 그림 4 에서의 음의 과냉각도 (즉 과열도)는 급격히 상승하게 되는 구간이다.

4700 초 경에는 노심의 구조물이 물성치 범위를 초과하는 온도까지 올라가게 되어 계산을 중단하였다.

3.3 노심 출구의 기포율 거동

그림 5 에서는 원자로 출구 부분(V20001)과 핵연료 바로 위에 해당하는 제어 체적(V19001)에서의 기포율을 나타낸다. 기포가 발생한다는 것은 노심 노출이 일어난다는 것을 의미한다. 이 부분에는 열을 생성하는 부분이 없기 때문에 이곳의 기포들은 그 아래 체적에서 발생된 기포가 상승하여 축적된 것이 주를 이룬다.

두 체적 모두 2600 초 경에 기포가 발생하기 시작한다. 원자로 출구 체적에서는 3450 초 경에 기포율이 1 이 되고 V19001 에서는 그 보다 약간 늦은 4000 초 경에 기포율이 1 이 된다. 기포가 처음 발생하기 시작하여 완전히 기포로 채워지는 시간 사이 구간에서는 기포율은 약간 불안정한 거동을 보이면서 기포율이 증가한다.

3.4 상태조치표 검증

앞 절에서 논의한 고온관의 온도, 과냉각도 및 원자로 출구에서의 기포율을 종합적으로 고려하면 그림 3~5 에 표시된 바와 같이 4 개 혹은 5 개의 영역으로 구분하여 표 4 와 같이 정리할 수 있다. 노심 상부에서의 기포율은 원자로 냉각재 재고량의 상태를 의미한다.

표 1 과 표 4 를 서로 비교하면, 단계 1 과 Region A 은 비슷한 온도 조건에서 노심의 기포율이 0 이고 그 온도도 과냉각 상태이므로 서로 잘 일치한다. 다만 고온관 온도를 350℃로 설정해도 잘 일치하게 된다. Region B 에서 고온관의 온도 및 과냉각도 조건은 단계 2 의 원자로 냉각재 재고량 상태가 포화 상태라는 것과 일치한다. Region C 는 단계 2 에서의 원자로 냉각재가 과열 상태라는 것과 일치한다. Region D 는 단계 3 과 거의 일치하는데, 단계 1 에서의 고온관 온도 및 과냉도 조건이 서로 일치한다는 것도 보여준다. 즉 단계 3 에서의 고온관 온도가 355℃이상이면, 과열도는 30℃이상이고 고온관

온도는 700℃이하가 된다. Region E 는 MARS 에서 직접 계산하지는 않았지만 Region D 까지의 진행 경과로 판단컨데 충분히 단계 4 와 일치할 것으로 사료된다. 단계 4 에서는 오래 전에 노심이 심각하게 노출된 상태라고 언급하는데 노심이 노출 되어 있는 시간을 MARS 계산 결과로 판단하면 대략 1000 초 정도이다.

여기서 단계 1 에서 제시한 고온관 온도 355℃와 MARS 가 예측한 Region B 혹은 C 에서의 온도 350℃를 비교해보자. 355℃가 포화 온도라면 그에 상응하는 포화 압력은 175.77bar 이다. 포화 온도 350℃에 상응하는 포화 압력은 165.35bar 이므로 5℃의 차이에 의한 포화 압력의 차이는 10.42bar 이다. 참고 문헌 [2]에는 노심 출구 온도 불확실도가 최대 4.4℃, 가압기 압력은 최대 1.2bar 이므로 표 1 에서의 설정치들은 온도를 우선적으로 고려하여 설정된 것으로 사료된다. 따라서 MARS 계산 결과와 5℃정도의 차이가 나는 것처럼 보이지만 온도에 대한 불확실도를 고려하면 적절히 설정된 것으로 사료된다.

각 단계의 지속시간을 살펴보면 모두 15 분 이상의 여유가 있는 것을 알 수 가 있는데, 추후 여타 기술 배경서 작성할 때에도 15 분이상의 여유가 있다는 것을 참조할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 운전원들도 15 분이라는 시간을 염두에 두고서 일련의 초치를 취한다면 원자력 발전소의 바상 사태에 대한 위험도는 그 만큼 더 작아질 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 MARS 2.0 최적 계산을 이용하여 전체 급수 상실 후 비상 절차서 중대-1 에 이르렀을 때 운전원 조치의 기준이 되는 상태조치표에 대하여 검증하였다. 계산 결과들을 조심스럽게 분석하여 몇 개의 Region 으로 구분하였고 이를 상태조치표와 비교하였다. 계산 결과와 설정치에서 약간의 차이가 나는 부분은 압력 계측에서의 불확실도와 노심출구 온도 계측에서의 불확실도를 고려함으로써 그 차이가 극복되었다. 특히 노심 출구 온도 계측의 불확실도를 고려하면 주어진 고온관의 온도 및 과냉각도

조건과 원자로 냉각재 재고량 상태에 대한 설정치들은 적절한 것으로 사료된다. 또한 본 계산으로서 상태조치표에서의 각 단계가 가지는 시간적인 여유가 15 분 정도라는 것을 밝혔고, 추후 여타 기술배경서 작성에도 참조가 될 뿐 아니라 운전원들이 미리 염두에 둘 시간으로 고려한다면 보다 안전한 비상 운전 절차가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] 한국전력공사 울진원자력본부 제 1 발전소, “울진 1&2 호기 비상운전 절차서”

[2] 전력연구원 안전분석 그룹, “원전 운전공학 기술교류회 세미나”, 2001

[3] 한국전력공사 울진원자력본부 제 1 발전소, “울진 원자력발전소(1&2 호기) 비상운전 기술 배경서”

[4] 한국전력공사 울진원자력본수 제 1 발전소, “울진 1,2 호기 비상운전 절차서 설정치 기술배경서 (초안)”, 2000

[5] 이원재 외, “다차원 최적 열수력 계통분석 코드 MARS 1.3 개발 및 검증”, 한국원자력 연구소, 1998, KAERI/TR-1108/98

[6] The RELAP5 Code Development Team, "RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods", Idaho National Engineering Laboratory, 1995, INEL-95/0174, NUREG/CR-5535

[7] 이원재 외, “UCN 1&2 EOP 최적 사고해석”, UCN 1&2 EOP 제 4 차 과제진도회의자료, 2001.7.

표 1. 상태 조치표에서 고온관 과냉각도 및 온도와 냉각재 재고량 상태 관계

단계	고온관 과냉각도 및 온도	원자로 냉각재 재고량 상태
1	ΔTsat >10℃ 및 TRIC<355℃	원자로 냉각재는 과냉(Subcooled) 상태이며 재고량은 충분한 상태
2	-30℃< Δtsat < 10℃ 및 TRIC<355℃	노심 출구영역의 냉각재는 포화 상태이거나 과열 상태
3	TRIC>355℃ 또는 ΔTsat < -30℃ 및 TRIC<700℃	노심 출구영역의 냉각재는 과열 상태이며 노심은 상당히 노출되었고, 아마도 피복재 최대 온도는 그 제한치를 오랜 시간 초과한 상태
4	TRIC>700℃	노심은 이미 오래 전에 심각하게 노출된 상태

표 2. 정상상태 계산 결과 및 초기조건

변수	전출력	
	목표치	계산치
노심열출력 (MW)	2775	2775
가압기 압력 (bar)	155.1	155.7
가압기 수위 (%)	62.7	62.2
루프 유량 (m^3/hr)	23873	23869
노심 유량 (m^3/hr)	67320	67320
노심우회율 (%)	6	5.98
노심 평균 온도 (℃)	304.6	304.4
증기관 압력 (bar)	58	57.7
SG 수위 (%)	44	44
SG 재순환율	3.7	3.55

표 3. 주요 사건 전개

time(s)	event
0	증기발생기 3대 모두 Main Feed Water 격리
27	증기발생기 저수위에 의한 원자로 정지
27	원자로 정지에 의한 터빈트립
32	증기 덤프 시작
793	가압기 살수 계통 작동
1992	가압기 PSV Cycling 시작
4700	계산 종료

표 4. MARS 계산 결과로 판단한 영역 구분

Region	시간	기포율 (V20001)	기포율 (V19001)	고온관 과냉각도	고온관 온도
A	0~2600s	0	0	10 이상	355℃이하
B	2600~3400s	0~1	0~0.8	0	350℃
C	3400~4000s	1	0.8~1	0~30℃과열	350℃
D	4000~5000s	1	1	30℃이상 과열	355~700℃
(E)	5000s 이후	(1)	(1)	(심한 과열)	(700℃이상)

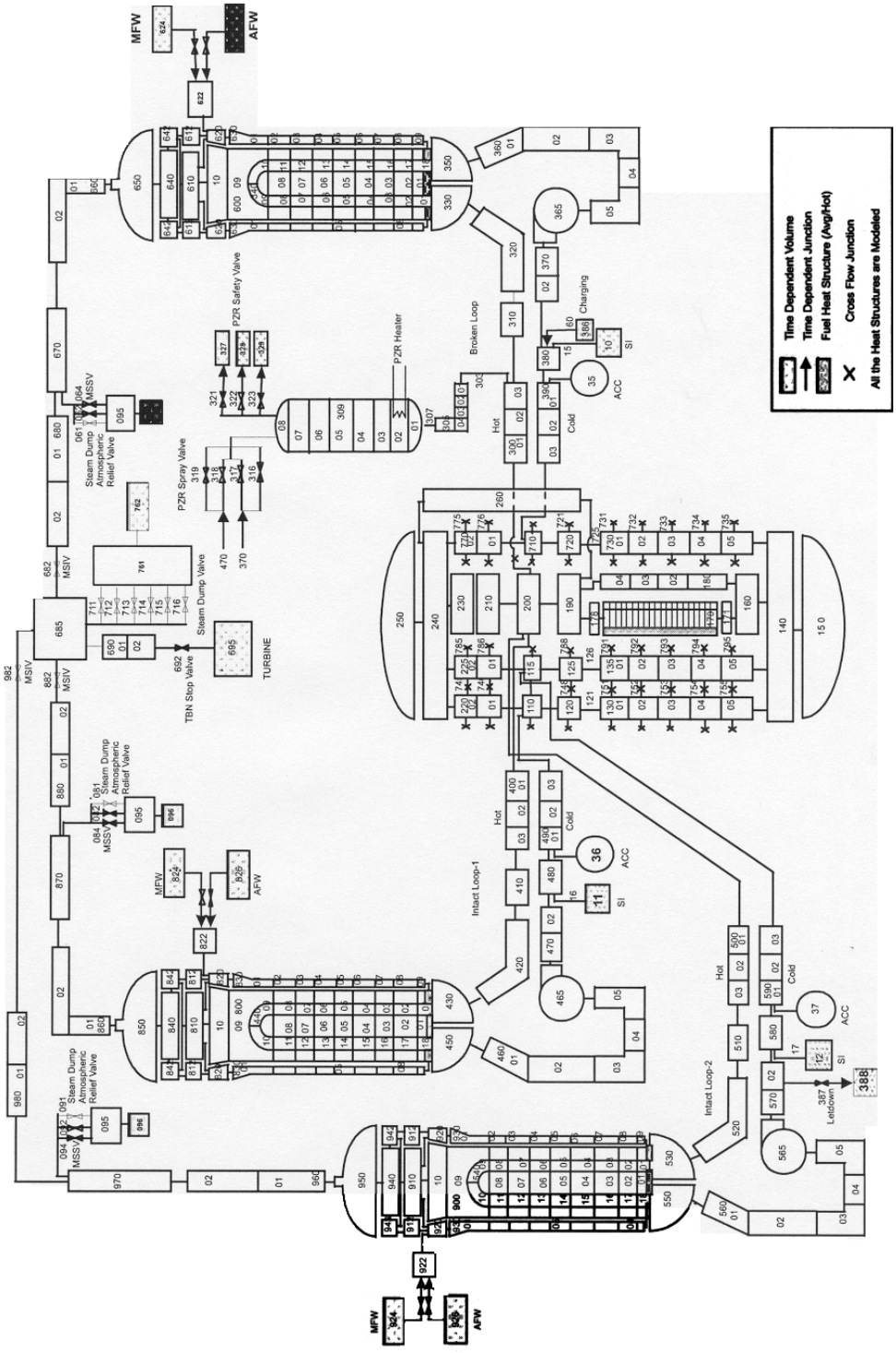

그림 1. 울진 1,2 호기의 MARS 계산을 위한 Nodalization

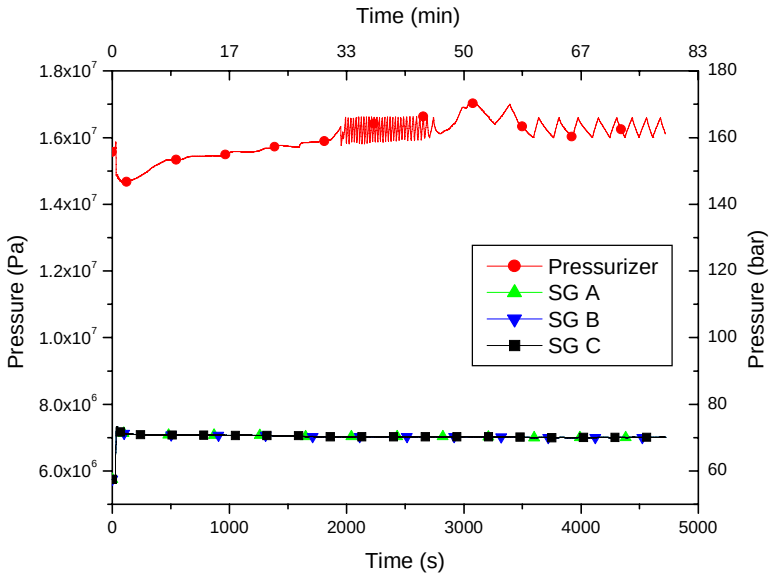

그림 2. 1 차 및 2 차 계통 압력 거동

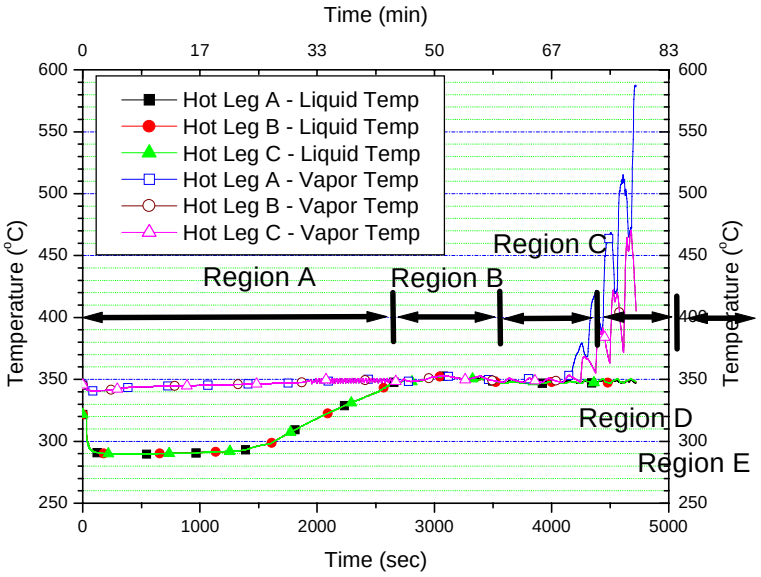

그림 3. 각 고온관의 온도 거동

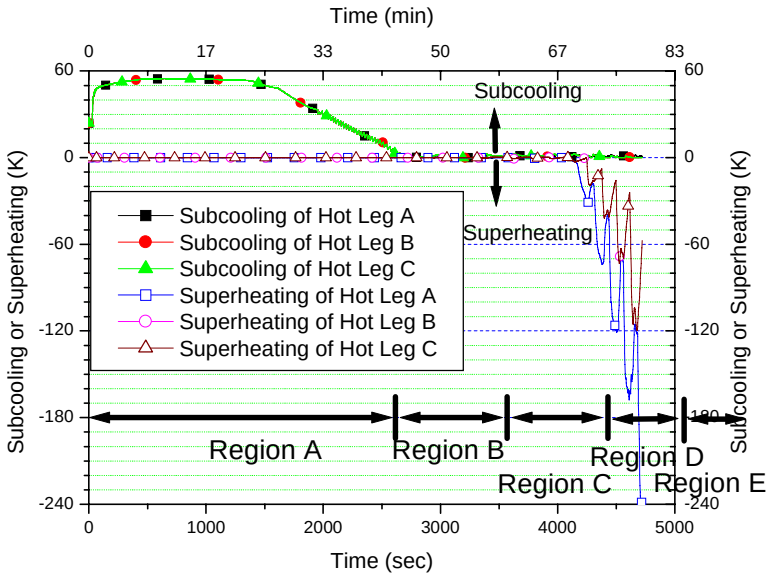

그림 4. 각 고온관의 과냉각도 혹은 과열도

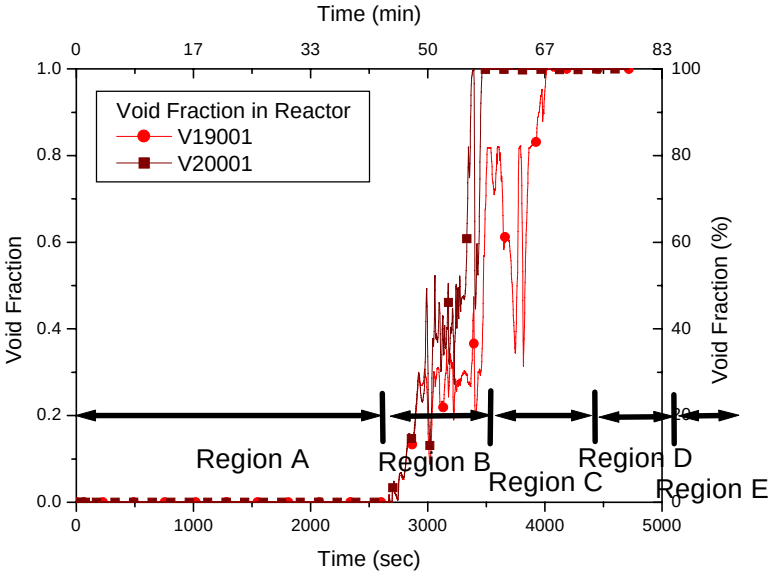

그림 5. 원자로에서의 기포율