

## 운전분석기를 이용한 고리 3,4호기 완전급수상실사고 해석

### TLOFW Analysis using Nuclear Plant Analyzer for Kori 3 & 4

김한곤, 배연경, 이영철, 이용희, 조성제

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 엔지니어링지원센터

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

본 논문은 고리 3,4호기의 설계 특성을 고려하여 설정된 허용기준을 바탕으로 MARS 코드를 기반으로 하는 원전 운전분석기를 이용하여 TLOFW 사고에 대한 대처능력을 평가한 것이다. TLOFW 사고에 대한 운전원의 인지시점을 보조급수 상실과 증기발생기 고갈 및 가압기 PORV 개방이 모두 만족되는 시점으로 하였다. 허용기준 첫 번째는 TLOFW 인지시점 30분 후에 3대의 PORV와 두 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위(two phase)가 노심상부에 2ft 여유도를 가져야 하고, 두 번째는 TLOFW 인지시점에서 2대의 PORV와 한 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위가 노심상부에 2ft 여유도를 가져야 한다. 해석 결과에 따르면 각각의 기준에 대하여 노심 이상수위는 2ft 이상의 충분한 여유도를 갖는 것으로 평가되었다.

#### Abstract

Analysis of TLOFW(Total Loss of Feed-Water) has been performed using NPA based on MARS code with acceptance criteria considering design features for Kori 3 & 4.

It is assumed that operator recognizes the event when the followings are satisfied : the loss of auxiliary feedwater, steam generator dryout, and pressurizer PORV automatic opening. Acceptance criteria are as follows : First, all the three PORV flow paths and all the two SI pumps have sufficient capacity to prevent core uncover with two feet margin during a TLOFW event when all PORV flow paths are manually opened at 30minutes after the operator recognizes TLOFW. Second, two of three PORV flow paths in conjunction with one-of-two SI pumps have sufficient capacity to prevent core uncover with two feet margin following a TLOFW event when two PORV flow paths are manually opened at recognition point of TLOFW. The analysis results show that the active core is covered with more than 2ft margin for the two cases, respectively.

#### 1. 서론

완전급수상실사고(TLOFW, Total Loss of Feed-Water)는 주급수 상실 후 보조급수 공급이 실

패하는 사고로 증기발생기를 통한 이차측 열제거 능력을 상실하면서 지속적인 붕괴열에 의해 가압되어 냉각재가 방출되면서 노심손상을 일으키는 설계기준초과사고이다[6]. 열제거원이 상실되는 사고이기 때문에 붕괴열을 제거하기 위해서 PORV나 PSV가 열리게 된다. 유체방출이 열제거 역할을 하나 다른 측면에서 보면 냉각재재고량이 감소되는 사고이며, 상실된 냉각재 재고량은 ECCS 기동에 의해 보충되어진다.

고리 3,4호기와 같은 WH형 원전은 가압기와 증기발생기에 PORV가 장착되어 있다. 안전밸브와 달리 PORV는 감압이 필요한 경우에 운전원이 수동으로 조절할 수 있으나 운전원의 실수에 의해 냉각재 상실을 유발할 수 있으며, TMI사고가 그 예이다. 그 이후에 설계된 KSNP는 PORV를 없애고 TLOFW 사고를 대비하여 안전감압계통을 설치하였다. 이에 따라 KSNP는 TLOFW 사고시 다음과 같은 허용기준[7]을 만족하도록 하고 있다.

- TLOFW 사고시 PSV의 자동 작동과 동시에 4계열의 안전감압계통중 2계열을 즉시 개방하고, 4계열의 안전주입계통중 2계열이 작동할 때, 노심의 이상수위가 노심상부에서 2ft 이상의 여유를 가지고 있어야 한다.
- TLOFW 사고시 PSV의 자동 작동후 30분 후에 4계열의 안전감압계통 및 4계열의 안전주입계통이 모두 작동할 때, 노심의 이상수위가 노심상부에서 2ft 이상의 여유를 가지고 있어야 한다.
- 상기 허용기준 만족 여부는 최적해석에 의해 입증한다.

그러나 이런 설비가 없는 고리 3,4호기 같은 WH형 원전은 위의 기준을 적용할 수 없다. 그 첫 번째 이유는 운전원이 수동으로 충전 및 방출 운전을 개시하는 증상으로 PSV 첫 번째 자동 개방을 요구하고 있으나, PORV가 작동하는 고리 3,4호기는 PORV 압력설정치 내에서 개방과 폐쇄를 반복하기 때문에 사고기간동안 PSV가 개방되지 않는다. 또한 PORV는 TLOFW 사고시가 아닌 다른 과압을 유발하는 사고에서도 개방될 수 있기 때문에 PORV의 개방시점이 TLOFW 인지시점으로 보기는 어렵다. KSNP의 안전감압계통은 안전계통으로 단일고장기준이 적용되지만 PORV는 비안전등급이기 때문에 단일고장기준이 적용되지 않는 게 두 번째 이유이다.

본 논문은 이러한 사항을 고려하여 고리 3,4호기의 설계특성과 비상운전절차서를 토대로 TLOFW 사고시 예상허용기준을 세워 이에 따라 정량적으로 평가하였다.

## 2. 예상 허용기준

고리 3,4호기 비상운전절차서[5]에 따르면 다음과 같은 증상이 나타나면 2차측 열제거원 상실로 판단하고 필요한 조치를 취하도록 지시하고 있다.

- 최소한의 보조급수 유량 확인 불능
- 증기발생기 협역수위 6% 미만

위의 조건에서 운전원은 급수회복을 위한 모든 조치를 강구하도록 지시받고 모든 조치가 실패했을 경우에 다음 조건이 되면 RCP를 정지시키고 충전 및 방출 운전을 하도록 지시받는다.

- 2대 이상의 증기발생기 광역수위 6% 이하 또는
- 가압기 압력이 2347psia 이상

이상을 종합해 볼 때, 고리 3,4호기는 다음과 같은 증상의 조합을 충전 및 방출 운전이 필요한 TLOFW의 판단기준으로 제시한다.

- 이차측의 모든 급수 상실
- 증기발생기 광역수위 6%이하 또는
- 가압기 압력이 2347psia 이상

고리 3,4호기는 충전 및 방출 운전시 3대의 PORV 중 2대 이상의 개방을 요구하고 있다. 이러한 점을 감안하여 고리 3,4호기에 대해서 다음과 같은 허용기준이 타당할 것으로 판단된다.

- TLOFW 인지시점 30분 후에 3대의 PORV와 두 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위가 노심상부에서 2ft 여유도를 가져야 한다.
- TLOFW 인지시점에서 2대의 PORV와 한 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위가 노심상부에서 2ft 여유도를 가져야 한다.
- TLOFW 인지시점은 보조급수 상실과 증기발생기 고갈 및 가압기 PORV 개방이 모두 만족되는 시점으로 한다.
- 상기 허용기준 만족 여부는 최적해석에 의해 입증한다.

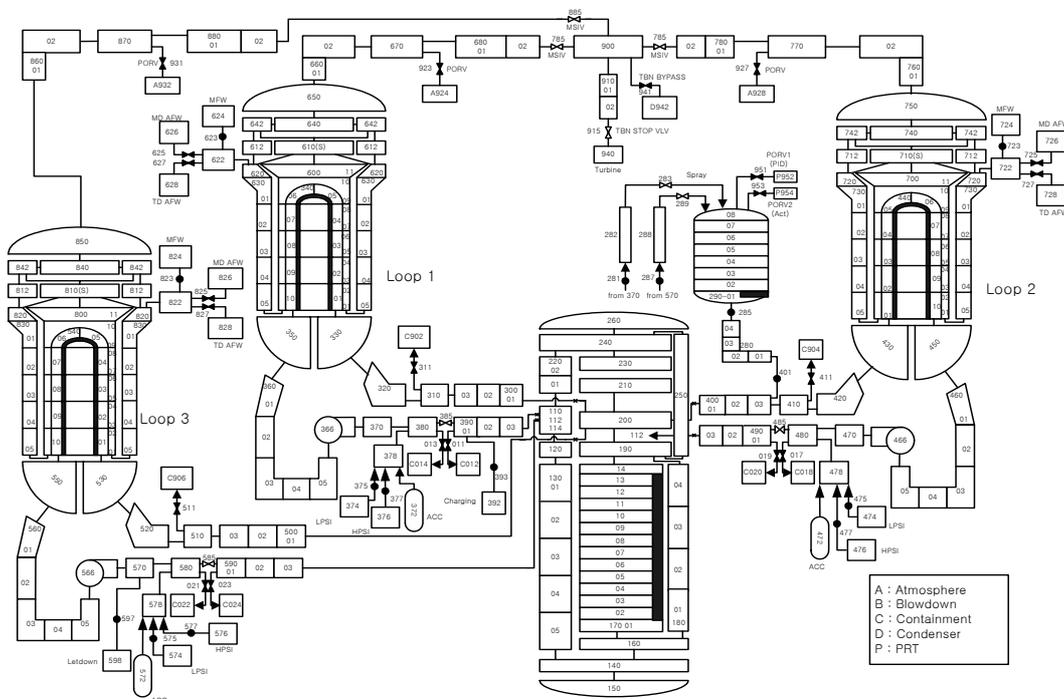
### 3. MARS 모델

고리 3,4호기 TLOFW 사고해석은 운전분석기의 MARS 모듈을 이용해서 수행하였다. 해석에 사용된 고리 3,4호기 MARS용 Noding Diagram은 [그림 1]과 같다. 원자로 계통의 최적 거동 분석을 위해 279개의 volume과 298개의 junction으로 구성하였다[2].

MARS 코드의 경우 노심의 수위를 알아볼 수 있는 지표인 mixture level 계산이 지원되지 않기 때문에 collapsed level과 노심 상부의 노드에서 기포율을 계산하여 노심 수위의 여유도를 판단하였다.

TLOFW 해석을 수행하기 위해 다음 입력들이 조정되었다.

- 주급수 펌프 정지 및 보조급수 기동 정지
- TLOFW 사고시 증기발생기 광역수위 6% 도달시 RCP 3대 정지
- TLOFW 사고시 SG 고갈 30분 후 및 SG 고갈시점에서 PORV 수동 개방
- PORV 대수 조정을 위해 area 조정



[그림 1] 고리 3,4 MARS Noding Diagram

#### 4. 해석 주요가정 및 초기 조건

TLOFW 사고도 설계기준초과사고이기 때문에 보수적인 조건 및 입력을 요구하지 않으므로 발전소 초기 조건들은 100% 정격출력 운전 중의 nominal 조건을 사용했다[3].

사고 초기에 주급수펌프를 정지시키는 데 이때 펌프의 관성서행은 고려하지 않고 0초에서 급수유량이 상실되는 것으로 가정하였다. 또한 주급수펌프 정지와 동시에 보조급수 기동이 실패하는 것으로 가정하였다.

가압기 PORV 면적은 설계 압력에서 포화증기 방출유량을 설계값에 맞도록 밸브 면적 및 유로 저항값을 조절하였다. SI 주입온도는 80.3°F이고 SI 주입신호 발생 7초 후에 주입되었다. 원자로가 트립되고 나서 증기발생기 광역수위가 6%이하가 되는 시점에서 운전원은 RCP 3대 모두를 정지시켰다. 이것은 고리 3,4호기 비상운전절차서 중 2차 열제거원 상실시 조치에 따라 운전원이 적절히 조치할 수 있다는 가정에 따른 것이다. 해석에서는 광역수위가 6%되는 시점에서 약 60초 정도 후에 RCP를 정지시키는 것으로 모델하였는데, 이것은 운전원이 광역수위 계기판으로부터 수위를 인지한 후 수동으로 정지시킬 때까지 소요되는 시간을 고려한 것이다. RCP가 정지되면 가압기 살수계통도 작동하지 않는다.

본 논문은 두 가지 Case에 대한 해석결과를 수록하였다. Case 1은 전 항의 예상 허용기준 중 첫 번째 허용기준의 만족 여부를 확인하기 위하여 수행한 것이다. 따라서 Case 1의 경우는 증기발생기 고갈 후 30분 후에 운전원이 수동으로 모든 가압기 PORV를 개방하고, 안전주입펌프는 2대 모두 정상적으로 작동하는 것으로 가정하여 충전 및 방출 운전이 수행되는 것으로 가정하였다.

Case 2는 두 번째 예상 허용기준의 만족 여부를 확인하기 위하여 수행되었다. 따라서 Case 2의 경우 증기발생기 고갈 직후 운전원이 수동으로 가압기 PORV를 개방하나, 이때 3대의 PORV 중 한 대는 고장으로 개방되지 않는 것으로 가정하였으며, 안전주입펌프 2대 중 한 대가 고장난 것으로 가정하였다.

MARS 모델의 경우 steady state input을 돌려서 정상상태 수립 여부를 확인하고 transient input을 돌려 과도사건을 해석하였다. 정상상태는 400초 동안 수행하였으며 발전소 주요 변수에 대한 운전분석기 계산값과 고리 3, 4호기 FSAR의 값을 [표 1]에 비교하였다[4]. 계산 결과에 따르면 증기 유량과 급수온도는 설계값과 약간의 차이를 나타내고 있으나, 허용오차 범위 내에 있어 MARS 운전분석기[1]에 의한 정상상태는 잘 모사되고 있는 것으로 판단된다.

#### 5. 해석 결과

##### (1) Case 1 결과

Case 1 사고는 완전급수상실사고 발생 후 증기발생기 광역수위가 6%이하가 되는 시점에서 운전원이 RCP를 수동으로 정지시키고 증기발생기 고갈 후 30분후에 가압기 PORV를 수동 개방하였다. 이때 PORV는 3대 모두 개방하고 SI는 2계열 모두 정상적으로 작동하는 것으로 가정하여 5000초까지 계산을 수행하였다.

초기 사고는 주급수펌프가 정지하면서 시작되고 보조급수 시스템이 작동하지 않는다. [표 2]에서 보듯이 주급수 정지후 30.5초 후에 증기발생기 저-저 수위 트립 신호에 의해 원자로가 트립되고 동시에 터빈이 정지한다. 원자로 트립 신호 후 2초가 지나면 제어봉이 삽입되기 시작한다. [그림 2]에서 보면 출력은 원자로 트립 후 잔열수준으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 사고 발생 후 약 30초 간 원자로는 전출력상태를 유지하고 있기 때문에 [그림 3]의 가압기 압력은 원자로 트립 이전에는 정상상태를 유지한 상태에서 서서히 증가하고 원자로 트립시 터빈정지에 의한 열제거율 감소로 일시적으로 증가하다 즉시 정지후 압력까지 감소한다.

사고초기에 급수유량이 모두 상실되었기 때문에 [그림 4]의 증기발생기 강수관 수위에서 보듯이 원자로 트립 이전에는 증기발생기 이차측 재고량이 급속히 감소하다가 원자로 정지 시점부터 수위감소율이 저하되어서 서서히 고갈되기 시작한다. [그림 4]에서 보듯이 증기발생기 강수관의 수위는 890초에서 고갈된다. 고갈 이전에 증기발생기 광역수위가 6%에 도달하면 60초의 시간 지연을 가지고 원자로냉각재 펌프는 정지된다. RCP의 정지에 따라 [그림 5]에서 보듯이 원자로냉각재계통 유량은 798초에 감소하여 최소한의 자연순환 유량을 유지하다가 이후 운전원이 수동으로 모든 PORV를 개방하는 시점에서 유량이 상실된다.

증기발생기가 고갈되면 이차측 열제거원이 완전히 상실되어 원자로에서 생성되는 잔열을 제거할 수 있는 수단이 상실된다. 이에 따라 냉각재가 가열되어 체적팽창이 일어나면서 가압기 압력이 PORV 설정치까지 상승하게 된다. 실제로 전 과도상태 기간 동안을 살펴보면 가압기 PORV는 사고 초기에 원자로 정지와 함께 과압발생시 개방된다. 따라서 증기발생기 고갈 시점의 개방이 이 사고기간 중 첫 번째 개방으로 볼 수는 없다. 증기발생기 고갈 이후, 가압기의 실제 압력으로 작동하는 2개의 PORV는 초기 개방 후 더 이상 개방되지 않는다. 반면에 PID Controller를 통과한 압력으로 구동되는 한 개의 PORV는 이후 계속 열림과 닫힘을 반복한다. 이는 한 개의 PORV 만으로 원자로냉각재계통 압력이 PORV 개방설정치 이내로 제어됨을 의미한다. ([그림 6] 참조)

증기발생기 고갈 후 30분이 지나서 운전원이 가압기 PORV를 모두 수동으로 개방하였다. 이때 [그림 7]에서 보듯이 압력이 200psia 정도 급격히 떨어지고 지속적인 방출에 의해 가압기 압력은 계속 감소하는 것을 볼 수 있다. 순간적인 PORV 개방에 따른 압력의 순간적인 감소 및 [그림 6]에서 나타나는 방출유량의 순간적인 증가는 밸브 내외부의 급격한 압력차로 인한 비평형상태에 따른 것이며 개방이 지속되면 곧바로 (수초 이내) 평형상태에 도달하여 안정적인 방출유량 및 압력 감소를 나타낸다.

[그림 8]에서 보듯이 안전주입수는 943초에서 주증기관 저압력에 의한 SI 주입 신호에 따라 주입되기 시작한다. 이후의 주입수량은 RCS의 압력에 따라 결정된다. 압력이 PORV 설정치에서 진동하고 있는 1000~2700초경에는 주입되는 양이 loop당 12~15lb/sec이지만, PORV가 수동 개방되는 즉시 loop당 7lb/sec정도 더 주입된다. 그리고 계속 증가하여 5000초 정도되면 43lb/sec정도 주입되는 것을 볼 수 있다.

[그림 9]는 가압기 수위를 나타낸 것으로 1384초에서 가압기 고수위 신호가 발생하고 1500초 정도에서 가압기는 만수위를 나타내고 PORV가 개방되면서 수위가 점점 내려가다가 4000초부터 회복되는 것을 볼 수 있다. 가압기 수위로만 보면 원자로냉각재계통의 재고량은 4000초부터 회복되는 경향을 나타낸다.

[그림 10]과 [그림 11]은 노심의 기포율과 collapsed level을 나타낸 것으로 완전급수상실사고 후 PORV가 수동 개방되는 시점까지 기포율 0과 노심 level 23ft는 그대로 유지되는 것을 볼 수 있다. PORV로의 방출량이 커지면서 수위가 점차 감소하고 노심 상부는 비등하기 시작하여 노심 상부의 기포율은 25%정도 증가하고 collapsed level은 21.3ft까지 내려가나 SI가 주입되면서 수위는 점차 회복되기 시작하여 5000초 정도이면 거의 원래수위로 회복된다. [그림 11]의 collapsed level은 이상수위를 나타내는 것이 아니기 때문에 본 Case에 대한 허용기준인 노심상부 2ft 여유도 여부를 확인할 수 없다. 통상적으로 이상수위는 해당 영역의 기포율이 70%인 지점으로 결정한다. 그런데 [그림 10]에서 보듯이 노심 최상부인 Node 13번과 노심 상부영역인 Node 14번 모두 기포율이 25% 미만으로 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 노심상부의 이상수위는 active fuel 상부 2ft 보다 훨씬 많은 여유도를 유지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 즉, 고리 3,4호기의 Case 1은 허용기준을 만족하는 것으로 판단된다.

[그림 12]는 냉각재 온도변화로 나타낸 것으로 자연순환이 유지되는 2700초까지는 고온관과 저온관 간의 일정한 온도차를 가지고 상승하는 경향을 보이다가, 운전원이 수동으로 PORV를 개방한 이후에는 자연순환의 상실과 상대적으로 차가운 안전주입수의 다량 주입으로 인해 저온관 온도가 급격히 감소하며, 고온관 온도는 상대적으로 천천히 감소하는 경향을 보인다.

결론적으로 사고 발생 후 비상운전절차에 따라 증기발생기 광역수위가 6%이하로 떨어졌을 때 RCP를 정지시키고 증기발생기 고갈 인지후 30분이 지나서 충전 및 방출 운전을 개시했을 경우, 고리 3,4호기는 완전급수상실사고 허용기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

## (2) Case 2 결과

Case 2의 경우는 두 번째 허용기준의 만족 여부를 확인하기 위해 증기발생기 고갈과 동시에 운전원이 3대의 PORV중 가압기 실제 압력에 의해 조절되는 PORV 2대만을 수동으로 개방하고, 2계열의 안전주입계통중 한 계열만 작동하는 것으로 가정하여 사고해석을 수행한다. 고리 3,4호기는 3대의 Charging/HPSI 펌프가 있다. 이 중 Charging 펌프 2는 Standby 상태이고 Charging 펌프 1과 3이 각각 별도의 비상디젤발전기로부터 전원을 공급받는다. 따라서 비상디젤발전기의 고장 또는 다른 단일고장의 경우 한대의 Charging 펌프만 작동 가능하다. RCP 정지는 Case 1과 같이 증기발생기 광역수위가 6%가 되는 시점에서 이루어진다.

[표 3]에 Case 2에 대한 사고 진행순서를 나타내었다. 890초에서 증기발생기 고갈전까지는 Case 1과 동일하게 진행되나, 증기발생기가 고갈될 때 2대의 PORV를 열면서 사고 진행순서는 뚜렷한 차이를 나타낸다. 가압기 PORV에 의한 방출로 인해 가압기 저압력 신호가 914초에서 나타나고 926.7초에서 가압기 저-저압력 신호와 함께 SI 신호가 발생한다. 954.7초에서 주증기 저압력 신호가 발생하며 가압기 고수위 트립이 1063.0초에서 나타난다.

[그림 13]은 원자로 출력을 나타낸다. 주급수 정지후 30초 후에 증기발생기 저-저 수위 신호에 의해 제어봉이 삽입되기 시작하여, 출력은 이후 잔열 수준이 유지된다.

[그림 14]의 가압기 압력을 보면 사고후 증기발생기 고갈전까지의 거동은 Case 1과 동일하나, [그림 15]에서 보듯이 증기발생기가 고갈됨과 동시에 2대의 PORV가 수동개방되면서 압력은 1200psia까지 급속히 감소한다. [그림 15]의 증기발생기 이차측 수위 거동은 Case 1과 동일하다.

[그림 16]에서 보듯이 운전원이 890초에 2대의 PORV를 개방함에 따라 PORV를 통한 방출이 시작된다. 초기 방출량이 급격히 증가하다가 1000초 부근까지 감소하는 현상은 전항에서 설명한 바와 같이 압력차에 의한 임계유속이 평형상태에 도달하기 때문이다. 이후 1050초부터 방출량이 다시 급격히 증가하는 이유는 가압기 PORV를 통해 증기가 아닌 이상유체가 방출되면서 밀도차에 의한 질량이 증가하기 때문이다. 이것은 [그림 18]의 가압기 수위 거동을 통해 확인할 수 있는데, 1050초부터 가압기 수위가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이 시점에서의 가압기 수위 증가는 PORV 개방으로 인한 압력의 급격한 감소와 냉각재 순환 정지로 인한 노심열제거 상실이 그 이유이다. 즉 압력 감소로 인해 원자로냉각재계통내에서 기포의 생성이 증가하고, 생성된 기포가 원활히 제거되지 않기 때문에 원자로계통내에 생성된 기포가 누적되고 이것이 체적팽창을 유발하여 가압기가 만수위 근처까지 상승하게 된다. 또한 이러한 체적 팽창은 PORV가 개방되어 있음에도 불구하고 [그림 14]에서 보듯이 1000초에서 2000초까지 원자로냉각재 계통의 압력을 재가압하는 결과를 초래한다. PORV의 개방 이후 원자로계통내의 기포 생성은 [그림 19]에서 보듯이 약 1000초부터 노심내까지 확산되는 것을 알 수 있다.

원자로냉각재계통의 체적팽창 및 재가압 현상은 노심-고온관-가압기-PORV를 통한 증기의 방출유로가 확보되는 시점까지 지속된다. 이러한 현상은 마치 소형냉각재상실사고시 Loop Seal이

Clearing되는 현상과 유사하다. Case 1에서는 보이지 않는 Clearing 현상이 나타나는 이유는 다음과 같다. Case 1의 경우에는 고갈 후 30분 동안 냉각재 방출이 상대적으로 적어 RCS내에 기포생성이 억제되고 이에 따라 자연순환이 이루어진다. ([그림 5] 참조) 반면에 Case 2는 즉시 PORV를 개방하여 냉각재 방출이 커서 RCS내에 증기가 빠르게 생성되어 자연순환이 형성되지 않는다 ([그림 22] 참조) 이에 따라 Case2에서는 일정시점에서 증기압에 의한 증기방출 및 이에 따른 자연순환의 재형성이 이루어져 Case1에서는 보이지 않는 Clearing 현상이 나타난다. [그림 21]의 저온관 온도 거동이나 [그림 22]의 고온관 유량 거동에서 보듯이 이러한 Clearing 현상은 약 1900초 시점에 이루어진다. Clearing이 되면서 고온관에 유량이 재형성되고, 저온관내에 차가운 ECCS의 주입으로 인해 감소하던 온도가 다시 노심으로의 유량이 형성되면서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 Clearing으로 인해 [그림 14]의 가압기 압력은 다시 감소하여 지속적인 감소 거동을 나타내며, [그림 18]에서 보듯이 가압기 수위도 정상적으로 회복되어 점차 감소하는 거동을 나타내며, 이로 인해 [그림 16]의 PORV 방출량도 압력 감소에 따라 서서히 감소하는 양상을 보인다. 압력의 지속적인 감소는 [그림 17]에서와 같이 안전주입수량을 지속적으로 증가시킨다. 원자로냉각재 재고량 측면에서는 약 4000초 이후부터는 PORV를 통한 방출량에 비해 주입되는 안전주입수량이 더 많아져서 이 시점부터 실질적인 원자로냉각재계통 재고량은 증가하기 시작한다.

[그림 19]의 노심 상부 기포율 거동에서 보듯이 노심상부의 기포율은 모두 20%대로 유지된다. 따라서 Case 2의 경우에도 허용기준이 노심상부 2ft 여유도는 충분히 만족하는 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 논문은 운전분석기의 MARS 모듈을 이용하여 고리 3,4호기 완전급수상실사고(TLOFW)시의 대처능력을 평가하였다. 고리 3,4호기는 가압기에 PORV가 장착되어 있는 등 계통구성이 KSNP와 다르므로 KSNP에 적용되는 허용기준을 그대로 적용하기는 어렵다. 따라서 고리 3,4호기의 설계특성에 맞는 허용기준을 재설정하였다. 재설정된 허용기준은 다음과 같다.

- TLOFW 인지지점 30분 후에 3대의 PORV와 두 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위가 노심상부에서 2ft 여유도를 가져야 한다.
- TLOFW 인지지점에 2대의 PORV와 한 계열의 ECCS가 작동하여 노심 이상수위가 노심상부에서 2ft 여유도를 가져야 한다.
- TLOFW 인지지점은 보조급수 상실과 증기발생기 고갈 및 가압기 PORV 개방이 모두 만족되는 시점으로 한다.
- 상기 허용기준 만족 여부는 최적해석에 의해 입증한다.

사고해석 결과 고리 3,4호기는 상기 허용기준을 충분히 만족하는 것으로 평가되었다. 즉, 첫 번째 허용기준인 TLOFW 인지지점에서 30분 후에 3대의 PORV와 두 계열의 SI가 작동하였을 때 노심 상부 노드의 기포율이 25%까지 내려가다가 시간이 지나면서 회복되었으며, 두 번째 허용기준인 TLOFW 인지지점에서 2대의 PORV와 한 계열의 SI가 작동하였을 때 노심 상부 노드의 기포율이 20%로 유지되었다. 이는 상부노드에서의 기포율이 70%이상이 되었을 때 노심이 노출되었다고 보는데 해석결과는 이보다 훨씬 낮은 기포율을 갖고 있으므로 노심에서 이상수위가 2ft이상 유지된다고 볼 수 있다.

최적해석결과를 고려해 볼 때 고리 3,4호기는 TLOFW 측면에서 충분한 여유도를 갖고 있다고 판단된다.

## 참고문헌

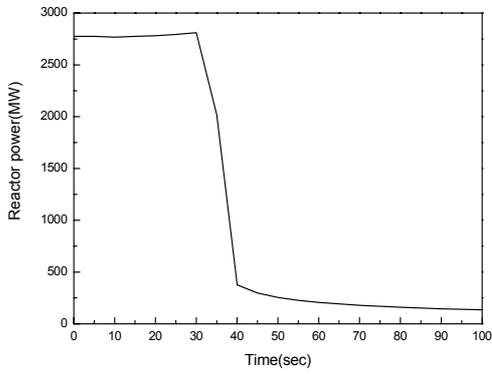
- [1] 원자로 과도분석 시스템 (Integrated Transient Analysis System) Ver. 2.05, KAERI, July 2003
- [2] 정재준 외, “고리 3/4호기 운전분석기용 MARS 코드 입력모델 개발”, KAERI /TR-2371/2003 (Rev.1), KAERI, March 2003
- [3] 이승욱 외, “고리 3,4호기 제어 및 보호계통 입력 및 입력배경서”, TAD/M2002-06 (Rev. 0), KAERI
- [4] 고리 3,4호기 최종안전성분석보고서, 한수원(주)
- [5] 고리 3,4호기 비상운전절차서(Rev. 4), 한수원(주), March 2000
- [6] Background information for westinghouse owners group emergency response guideline, “FR-H.1 Response to Loss of Secondary Heat sink”, September 1983
- [7] “Technical Report Determination of Safety Depressurization System Bleed Capacity for KNGR (Rev.1)”, N0797-SA-ER002, KEPCO, February 1999

[표 1] 고리3,4호기 완전급수상실사고 해석 주요가정 및 초기조건

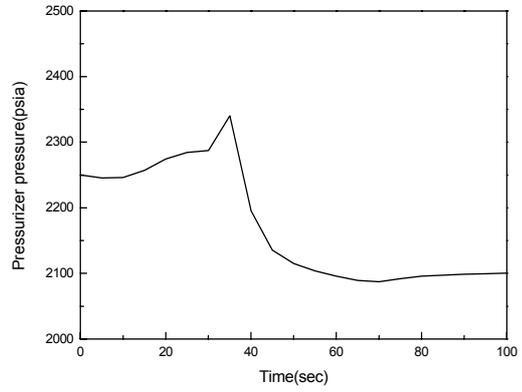
변 수	FSAR	계산값
노심 출력, 100%(MWt)	2775.0	2775.0
가압기 압력(psia)	2250.0	2250.0
일차 계통 온도 T <sub>hot</sub> (°F) T <sub>cold</sub> (°F)	619.9 557.0	619.8 556.8
펌프당 냉각재 유량 (lb/sec)	10101.9	10103.8
이차측 압력(psia)	964	964.5
증기유량 (lb/sec)	3413.9	3438.5
급수 온도(°F)	440.0	446.8

[표 2] 고리3,4호기 완전급수상실(TLOFW) 사고 진행순서-Case 1

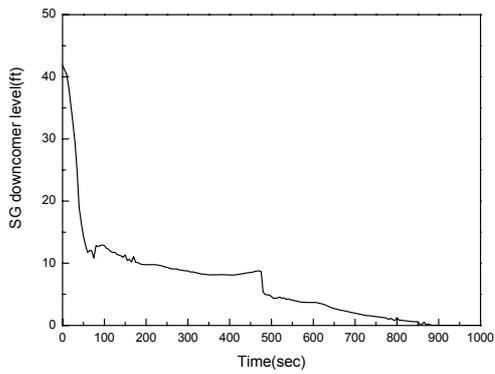
Events	Time(sec)
Main feedwater pump trip, auxiliary feedwater pump actuation fail	0.0
SG low-low level trip, Rx trip, TBN trip	30.5
Rod drop with 2s delay	32.5
Below 6% of SG wide range level	662.0
RCP 1/2/3 manual trip with 60s delay	722.0
RCS 1/2/3 Lo flow trip	798.2
SG inventory dryout	890.0
SL 1/2/3 Lo pres trip, SI signal, Letdown isolation	942.9
SI actuation with 7s delay	950.0
PZR Hi level trip	1384.0
PZR PORV 3ea manual open	2690.0
PZR Lo pres trip	3265.0
PZR Lo-Lo pres trip	3393.0



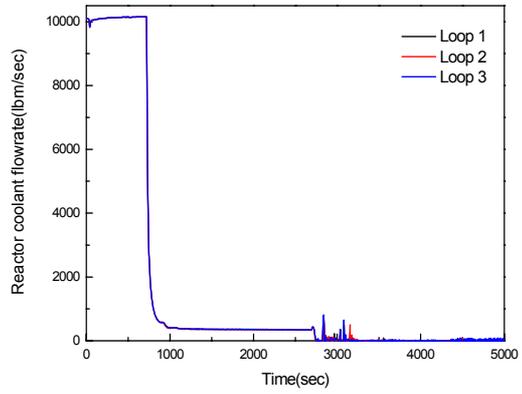
[그림 2] Case 1 - 원자로 출력



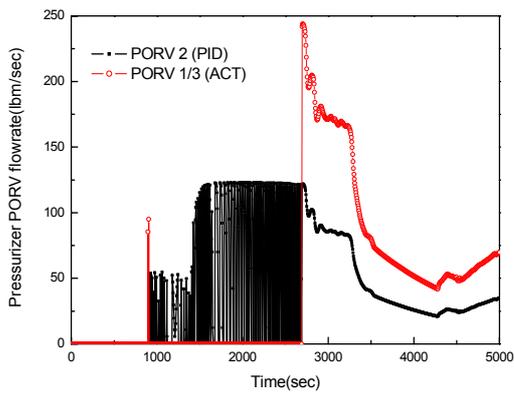
[그림 3] Case 1 - 가압기 압력(Short Term)



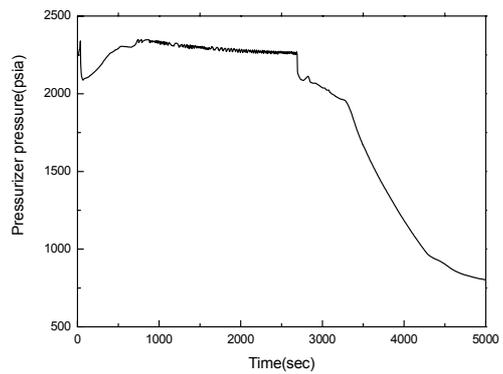
[그림 4] Case 1 - 증기발생기 강수관 수위



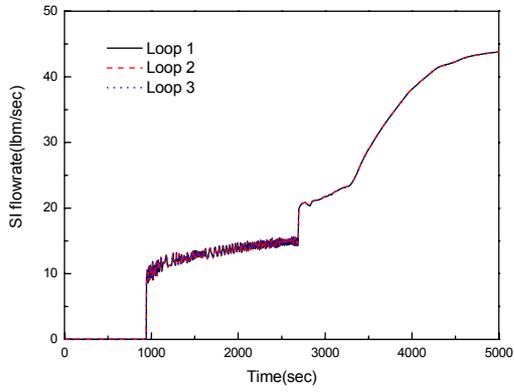
[그림 5] Case 1 - 냉각재 유량



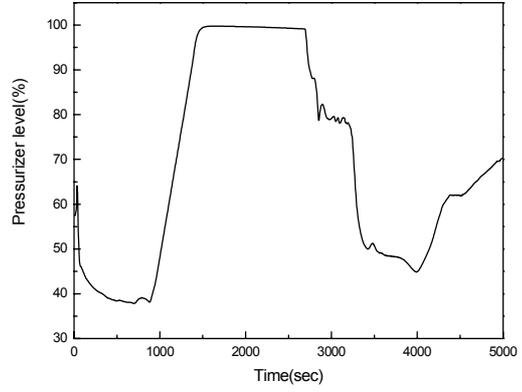
[그림 6] Case 1 - 가압기 PORV 방출량



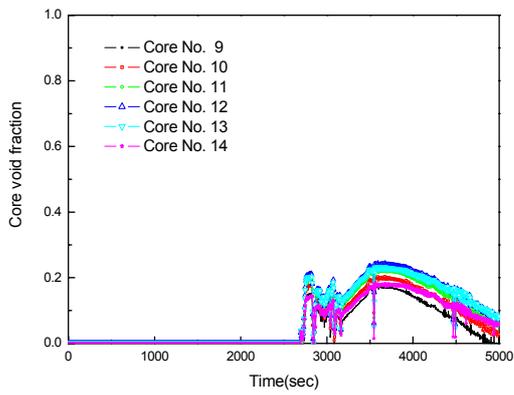
[그림 7] Case 1 - 가압기 압력(Long Term)



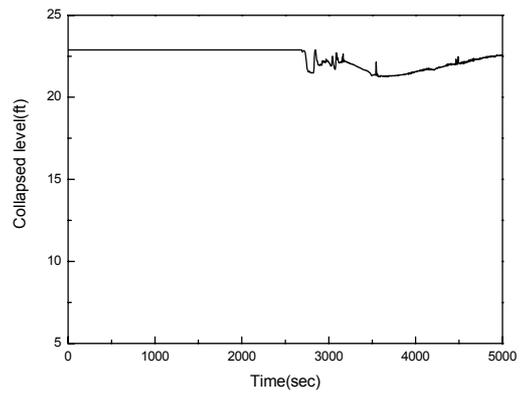
[그림 8] Case 1 - SI 유량



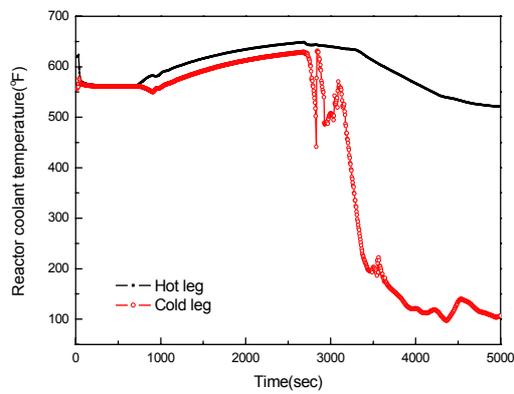
[그림 9] Case 1 - 가압기 수위



[그림 10] Case 1 - 노심 기포율



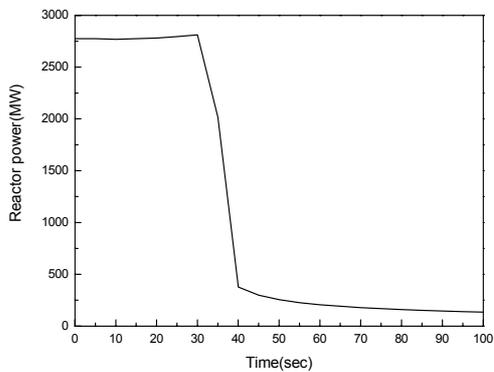
[그림 11] Case 1 - Core collapsed level



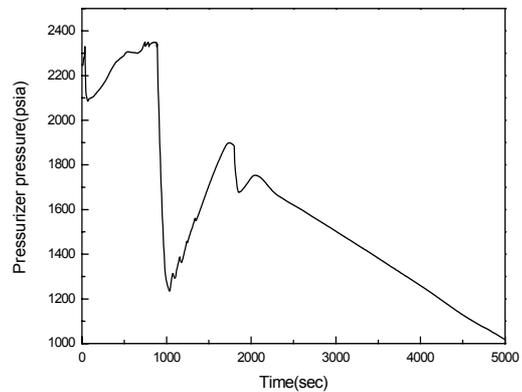
[그림 12] Case 1 - 냉각재 온도

[표 3] 고리3,4호기 완전급수상실(TLOFW) 사고 진행순서-Case 2

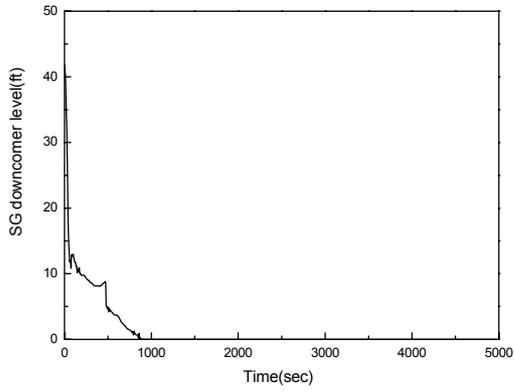
Events	Time(sec)
Main feedwater pump trip, auxiliary feedwater pump actuation fail	0.0
SG low-low level trip, Rx trip, TBN trip	30.5
Rod drop with 2s delay	32.5
Below 6% of SG wide range level	662.0
RCP 1/2/3 manual trip with 60s delay	722.0
RCS 1/2/3 Lo flow trip	798.2
SG inventory dryout, PORV 2ea manual open	890.0
PZR Lo pres trip	914.0
PZR Lo-Lo pres trip, SI signal, Letdown isolation	926.7
SI actuation with 7s delay	933.8
SL 1/2/3 Lo pres trip	954.7
	1063.0
PZR Hi level trip	1136.0
	1228.0



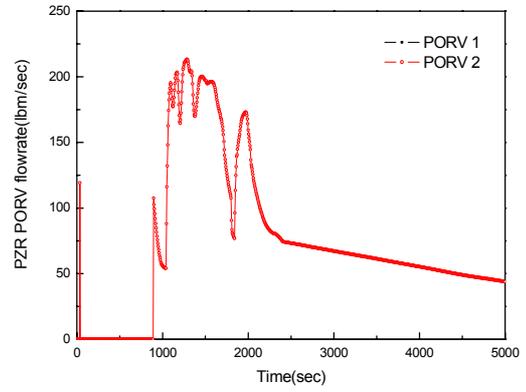
[그림 13] Case 2 - 원자로 출력



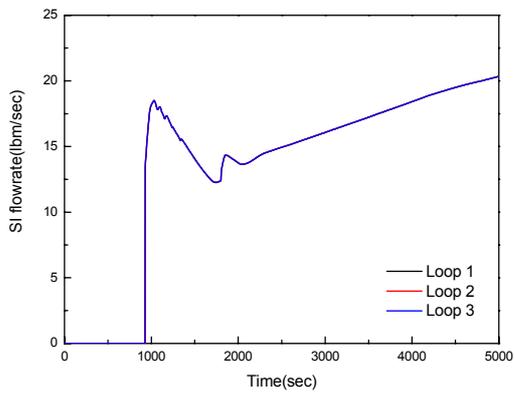
[그림 14] Case 2 - 가압기 압력



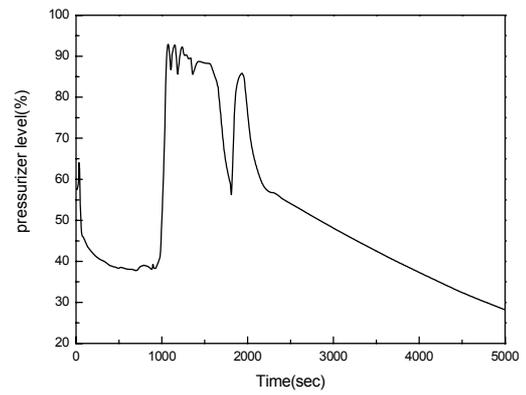
[그림 15] Case 2 - 증기발생기 강수관 수위



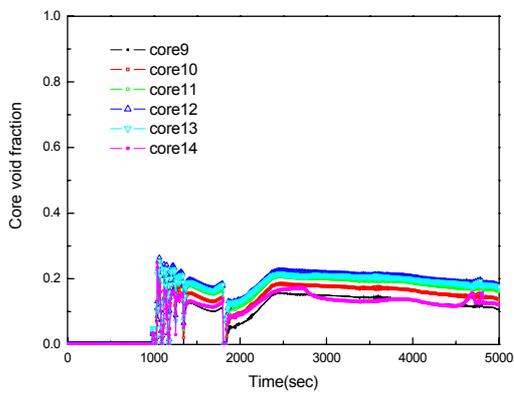
[그림 16] Case 2 - 가압기 PORV 방출량



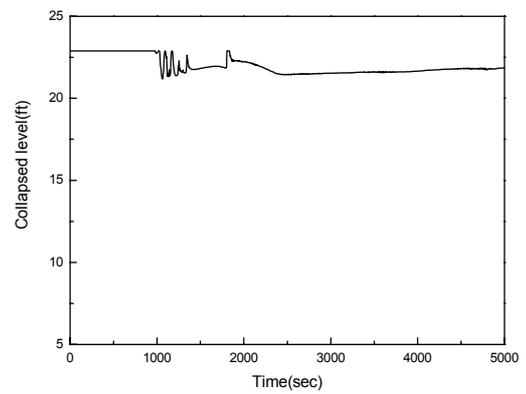
[그림 17] Case 2 - SI 유량



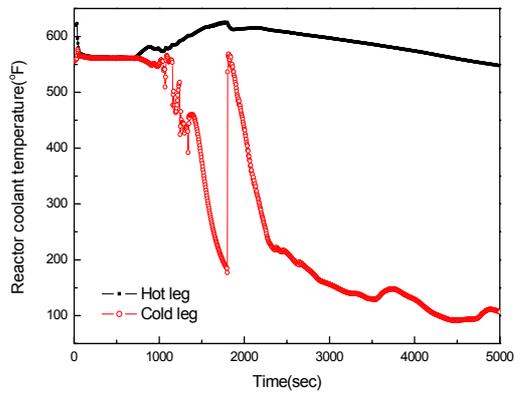
[그림 18] Case 2 - 가압기 수위



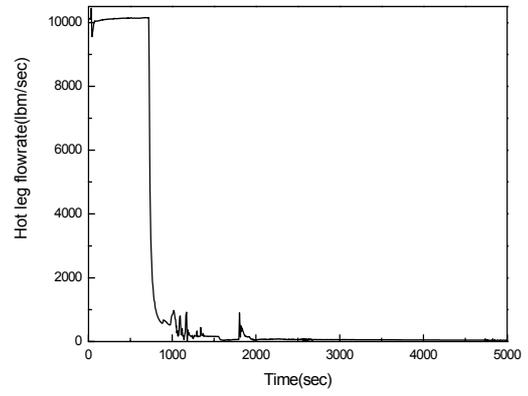
[그림 19] Case 2 - 노심 기포율



[그림 20] Case 2 - Core collapsed level



[그림 21] Case 2 - 냉각재 온도



[그림 22] Case 2 - 고온관 유량율