2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로원전 증기발생기 2차측 감압운전 타당성 평가
Validity Evaluation of Steam Generator Pressure Reduction of CANDU Reactor(Wolsong-1)

김종현, 최훈, 김윤호, 김용배

한전전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

요약

중수로원전의 운전이력이 늘어남에 따라, 냉각재 온도의 상승 등 각종 경년화 현상이 운전여유도를 감소시킨다. 이러한 입구모관의 온도상승에 따른 운전여유도 감소를 만회하기 위한 방법 중 하나인 증기발생기 2차측 감압 운전에 따른 열수력적 영향을 평가하였다. 본 연구는 월성1호기를 기준으로 2차측 감압에 따른 열수력적 거동을 예측, 모사하며, 증기발생기 감압운전이 영향을 미칠 수 있는 두 가지 설계기준사고(MSLB, SGTR)에 대해 분석하였다.

Abstraction

As the reactor year increases, the aging effects such as the increase of the reactor inlet header reduces the operating margin. The thermal hydraulic effects of the reduction of steam generator pressure which is one of methods to compensate the decrease of the operating margin, has been evaluated. This study focuses on the thermal hydraulic behavior resulting from the steam generator pressure reduction and the safety analysis for two DBAs(MSLB, SGTR) which are sensitive to the steam generator pressure reduction.

1. 필요성 및 배경

중수로 원전은 운전이력이 증가함에 따라 증기발생기 세관 일차측에 magnetite가 침적되고 이차측에 fouling이 증가하여 일차냉각재의 열이 충분히 전달되지 않아 충분히 온도가 내려가지 않은 상태로 원자로 입구모관으로 유입되면 임계채널출력(간헐적인 핵연료피복관비등이 발생하는 시점의 채널출력)이 감소되어 운전여유도에 영향을 미치게 된다. 이를 해소하기 위한 방법으로 증기발생기의 일차측에 침적된 magnetite를 제거하여 유량과 열전달성능을 향상시키는 방법과

증기발생기의 이차측 압력을 감소시켜 열전달량을 증가시킴으로써 일차냉각재의 온도를 감소시키는 방법 등이 있다. 증기발생기 이차측 감압운전은 증기발생기수위제어, 증기발생기압력제어 프로그램 등의 제어변수들에 영향을 미칠 수 있으며, 주증기관 파단사고(MSLB) 및 증기발생기 세관파단사고(SGTR)등의 설계기준 사고의 해석결과에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측된다.

월성 1호기의 참조발전소인 캐나다 Gentilly 2 발전소에서도 운전이력의 증가로 원자로 입구모관의 온도가 상승함에 따라 1993년과 1998년 두 차례에 걸쳐서 증기발생기를 150 kPa 감압한 경험이 있으며, 감압으로 인한 열수력적 거동의 변화는 표1과 같다.

표1 G2 증기발생기 감압 전후 계통 비교

S/G Pressure Reduction	143kPa
Decrease of RIH temperature	1.46 ℃
Increases of PHT flow	19 kg/s
Decrease of Pressurizer Level	0.93m
Decrease of PHT Quality	0.7%

2. 분석방법

증기발생기 감압의 열수력적 분석은 일차원, 2유체 열수력 전산코드인 CATHENA코드를 이용하여 95채널 평균계통모델에 대하여 수행하였다. 계통모델은 두 개의 냉각재계통 회로, 증기 및 급수계통 그리고 비상노심냉각계통으로 구성된다. 그림 1 은 분석에 사용된 월성1호기의 1차 계통, 2차 계통의 Nodalization이다. 증기발생기 2차측 감압 운전시 증기발생기 세관 파단 사고(SGTR)와 주증기관 파단 사고(MSLB)를 모사하기 위해서는 위의 계통모델에 각 사고모델을 추가하여 해석하였다. 증기발생기 2차측 감압은 증기발생기 압력조절 모드(SGPC)의 설정치를 150kPa 낮추어, Turbine Governor Valve의 개도를 크게 함으로 수행되었다.

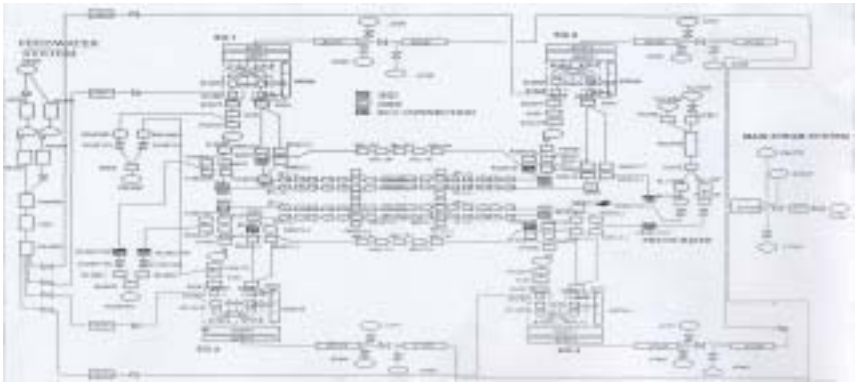

그림 1 월성 1 호기 1,2 차 계통 Nodalization

3. 감압에 따른 열수력 거동

월성1호기는 현재 4.60Mpa의 증기발생기 2차측 압력을 가지고 운전 중이다. CATHENA 코드를 이용한 본 평가에서는 보수적 평가를 위해 4.69Mpa의 정상상태 초기값을 가정한다. SGPC의 설정치를 150kPa 낮추었다. 현재의 대체운전모드에서는 터빈으로 가는 증기의 양을 조절함으로 증기발생기의 압력을 조정하기 때문에, 증기발생기 압력을 설정치까지 낮추기 위해서는 Turbine Governor Valve의 개도(Open Fraction)이 커져야 한다(그림 2). 그렇게 함으로써 146kPa만큼 증기발생기 2차측의 감압이 이루어졌다(그림 3). 증기발생기 2차측이 감압됨에 따라 증기발생기 세관을 통한 1차측에서 2차측으로의 열전달이 1.3MW 증가하였다(그림 4). 그럼으로써 1차측 냉각재의 온도가 2℃가량 낮아진 것을 알 수 있다.

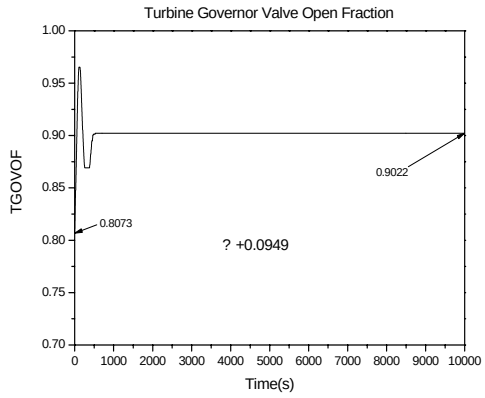

그림 2 Turbine Governor Valve 개도

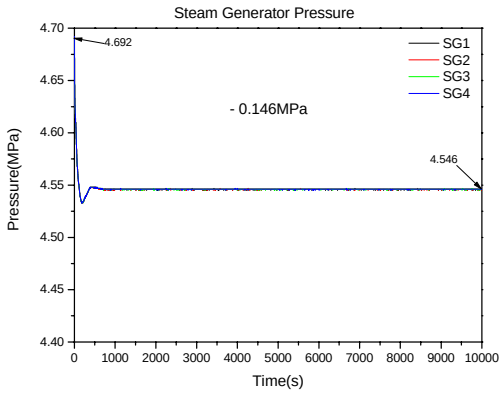

그림 3 증기발생기 2차측 압력

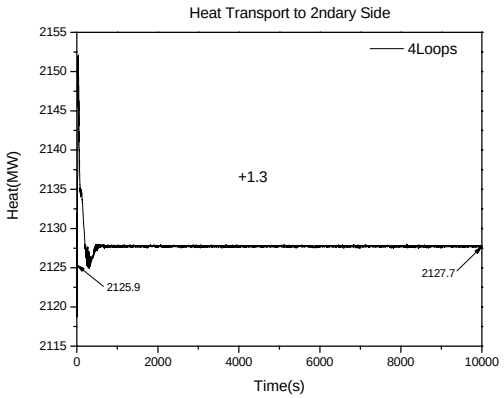

그림 4 증기발생기 2차측으로의 열전달율

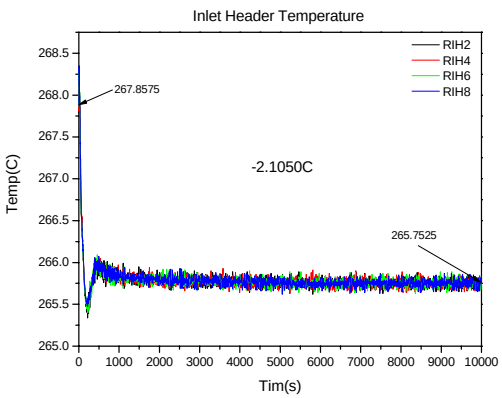

그림 5 원자로 입구모관 온도

1차 계통 냉각재의 온도가 내려가 핵연료의 냉각능력이 향상됨에 따라, 핵연료 피복관의 온도가 1.36℃ 낮아졌다(그림 6). 그리고 채널내 임계열유속(Critical Heat Flux)이 198kw/m^{2}만큼 증가하였다(그림 7). 채널내의 열유속은 변화가 없으므로 드라이아웃 여유도가 CHF의 증가분만큼 커졌다. 드라이아웃 여유도의 향상에 따라 원자로 운전여유도도 증가하였다. 그리고 1차 냉각재 온도가 낮아짐에 따라 원자로 출구헤더의 건도(Quality)와 1차 냉각재의 기포율이 낮아졌음을 알 수 있다(그림 8, 그림 9). 기포율이 낮아짐에 따라 1차 냉각제의 체적이 작아지므로 가압기의 수위가 1.35m 낮아졌고(그림 10), 채널 내 유량의 유동이 약 20kg/s 증가하였다(그림 11).

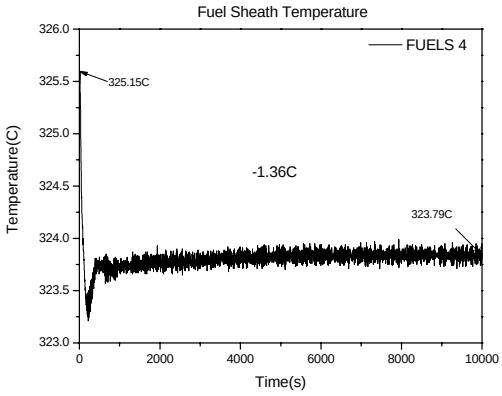

그림 6 핵연료 피복관 온도

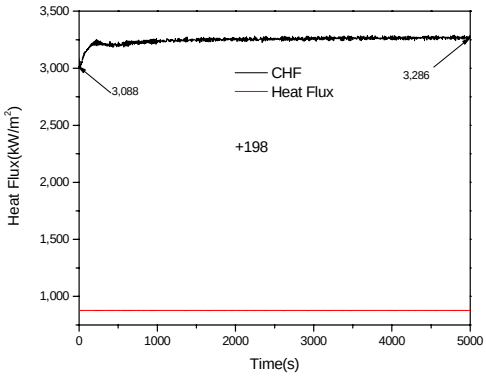

그림 7 채널 내 열유속

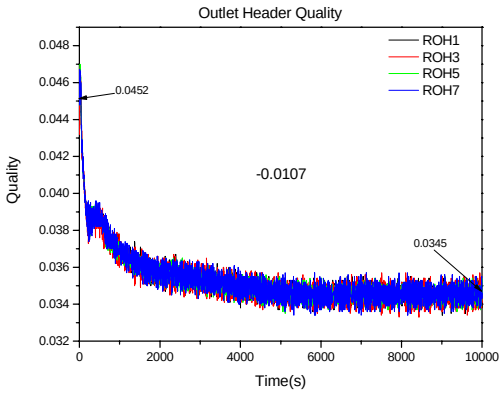

그림 8 원자로 출구헤더 건도

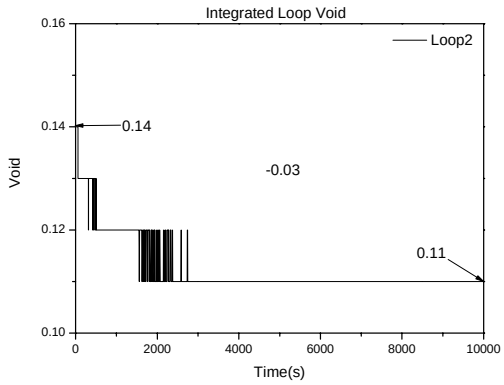

그림 9 냉각재 내 기포율

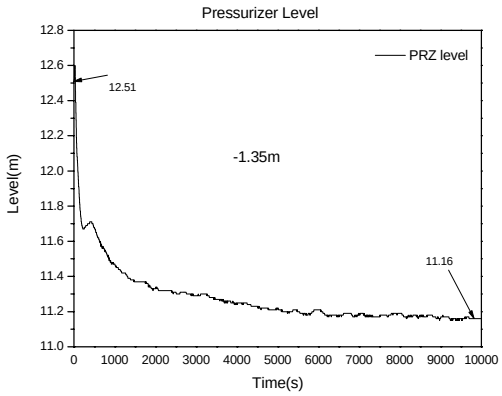

그림 10 가압기 수위

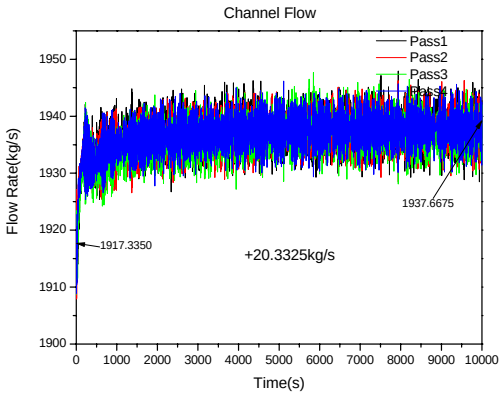

그림 11 채널 내 냉각재 유량

아래의 그림들은 증기발생기 2차측 감압에 따른 주증기 및 급수계통의 거동을 보여준다. 감압초기에 Turbine Governor Valve의 개도 확장과 감압에 따라 증기발생기수위의 일시적 변동이 있지만, 곧 급수계통을 통한 증기발생기 수위조절모드(SGLC)가 작동하여 감압전의 수위로 회복됨을 알 수 있다(그림 12, 그림 13). 그리고 감압중에는 터빈으로의 증기유량이 일시적으로 증가하지만, 감압이 완료된 후에는 감압전의 값으로 회복된다(그림 14, 그림 15).

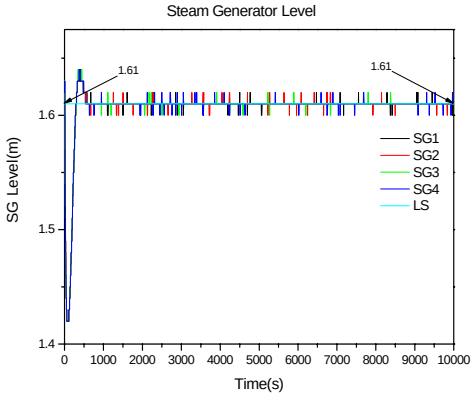

그림 12 증기발생기 수위

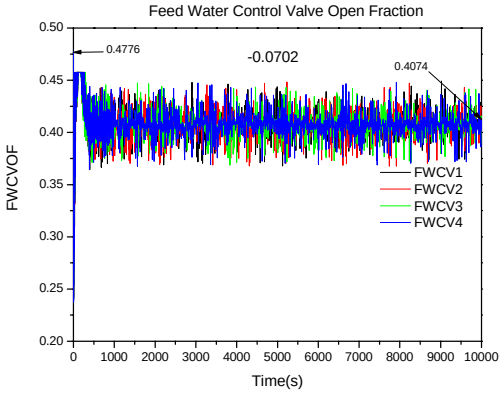

그림 13 급수 조절 밸브 개도

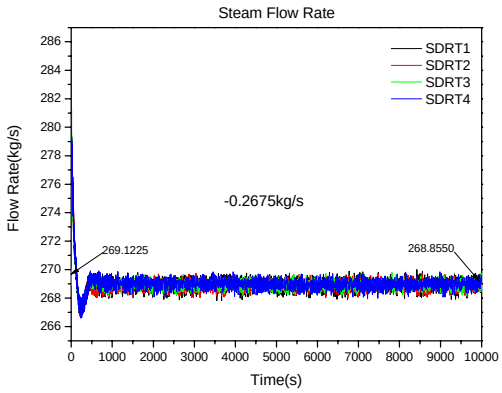

그림 14 증기발생기 증기 유량

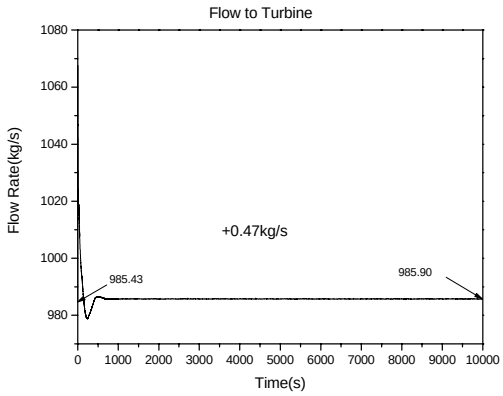

그림 15 터빈으로의 증기 유량

이상의 그림에서 보여준 감압에 따른 열수력 거동을 정리하면 다음 표3 같다.

표3. 증기발생기 2차측 감압전후의 열수력거동

	감압전	감압후	변화량
SG Pressure(Mpa)	4.69	4.55	0.15
SG level(m)	1.61	1.61	0.00
Temp of RIH(℃)	267.86	265.75	-2.10
Press of RIH(℃)	11.35	11.35	0.00
Pressurizer level(m)	12.51	11.16	-1.35
Pressurizer press(MPa)	9.98	9.98	0.00
STHDR Enthalpy (kJ/kg)	2795.83	2797.20	1.37
Flow to T/B(kg/s)	985.43	985.90	0.47
FWCVOF	0.48	0.41	-0.07
Channel Flow(kg/s)	1917.34	1937.67	20.33
Feed Water Rate(kg/s)	246.43	246.45	0.02
Steam Flow Rate(kg/s)	269.12	268.86	-0.27
PHTS Quality	0.05	0.03	-0.01
Loop Void	0.14	0.11	0.03
Fuel Sheath Temp(℃)	325.15	323.79	2.64

4. 감압운전이 사고해석에 미치는 영향

가. 주증기관 파단사고

103%FP로 운전중인 월성1호기의 2차측 증기균형모관 100% 파단을 가정한 주증기관파단사고 사고진행과정의 증기발생기 감압 전과 감압 후를 비교하면 표 2와 같으며, 파단을 통한 2차 증기의 누출과 채널의 냉각재 유량, 1차 계통의 압력 그리고 핵연료 피복관의 온도변화는 그림 16 부터 18에서 보여준다.

트립신호의 발생시간에서 증기발생기 2차측 감압에 따른 미미한 차이가 있지만, 그림에서 보듯이 사고가 전체계통에 미치는 영향은 무시할 만하다. 따라서 증기발생기의 150kPa 감압운전은 주증기관 파단사고의 결과에 영향이 없다.

표2. Steam Header 100% Break at 103%FP (Before & After Pressure Reduction)

	Sequences	Before	After		Sequences	Before	After
1	LTTURB	.367s	.284s	10	SDS2LP	31.705s	32.941s
2	LTH4	.367s	.284s	11	PWRTRP1	31.896s	33.149s
3	SDS1SL	2.805s	2.733s	12	PWRTRP2	31.896s	33.149s
4	SDS2SL	3.273s	3.289s	13	PWRTRP	31.896s	33.149s
5	LTCL4A	5.086s	3.289s	14	TGOVCLS	31.896s	33.149s
6	LFWFL	10.023s	8.008s	15	LOWHP	55.182s	57.518s
7	SDS1SP	22.670s	22.298s	16	PMPTRIP1	76.147s	80.608s
8	SDS2SP	22.670s	22.298s	17	TPHTP	196.208s	200.654s
9	SDS1LP	31.705s	32.941s				

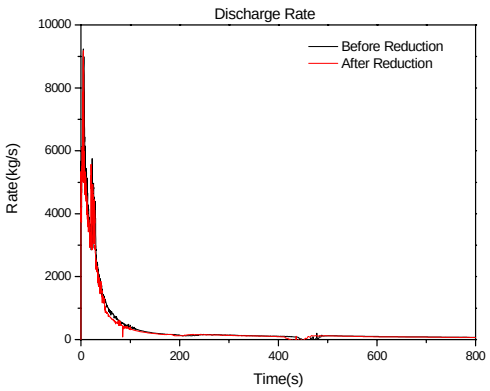

그림 16 주증기 누설율

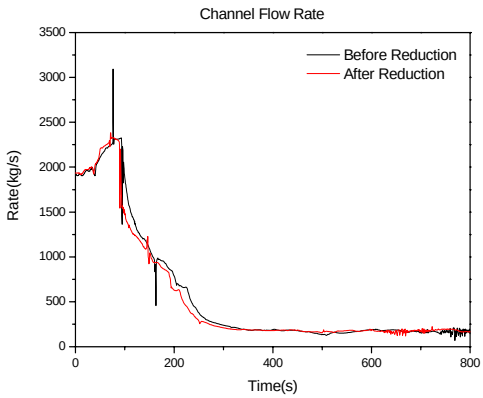

그림 17 채널 유량

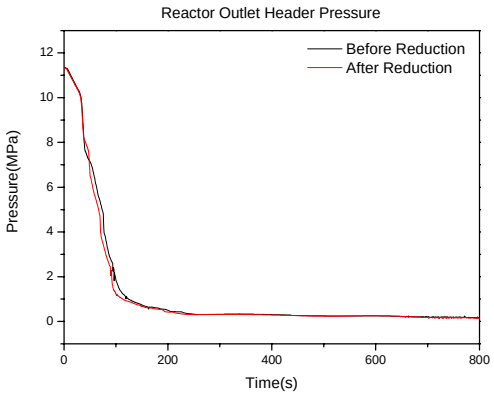

그림 18 1차 계통 압력

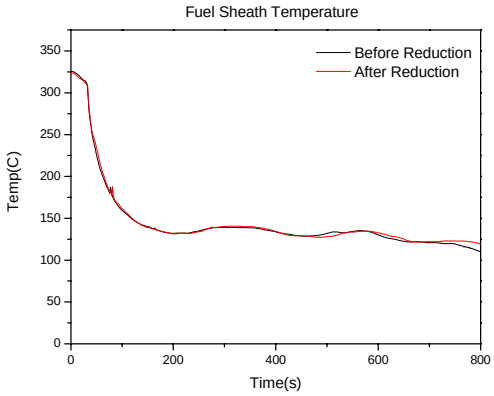

그림 19 핵연료 피복관 온도

나. 증기발생기 단일세관 파단사고

증기발생기의 단일세관파단사고로 인한 중수누설(약8kg/s)은 충수계통(15kg/s)에 의해 충분히 보충될 수 있다. 증기발생기 2차측 감압 전에는 8.046kg/s의 누설율을 가지는데, 감압 후에는 8.187kg/s의 누설율을 보인다. 이는 감압 전에 비해 1.7% 증가된 값이다(그림 20). 이 증가량은 사고해석의 결과에는 영향을 미치는 못한다. 그리고 1차측 냉각재 압력도 감압전과 감압후에 고려할 만한 차이가 보이지 않는다(그림 21). 2차 측으로의 중수누설로 인한 방사능물질의 대기방출량 역시 규제한도 안에 있을 것으로 예측된다.

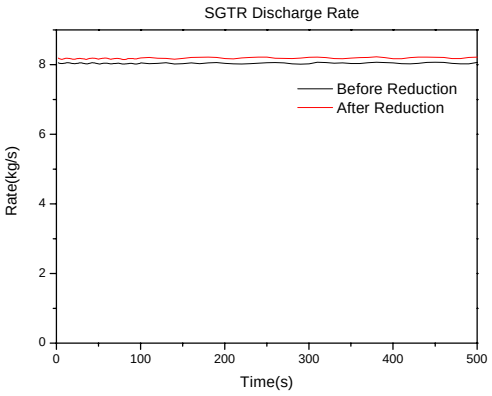

그림 20 중수 누설율

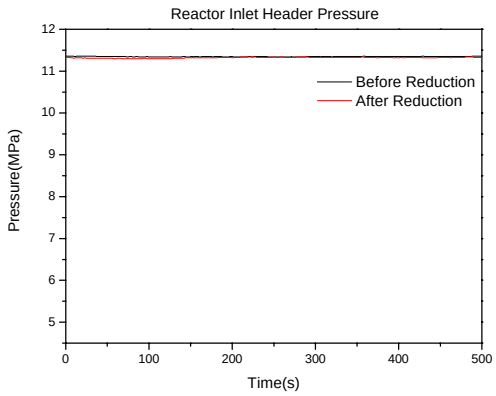

그림 21 1차 계통 압력

5. 결론

중수로 원전의 운전이력 증가에 따른 냉각재(RIH)온도상승에 따른 출력제한 문제를 해결하기 위한 한가지 방법인 증기발생기 2차측 감압에 따른 열수력 거동을 분석하고, 증기발생기 감압에 민감한 두 사고에 대해서 사고해석을 수행하였다. 1차측 냉각재의 온도가 내려감으로써 핵연료의 냉각이 향상되고, 채널내 유량의 흐름이 좋아짐으로써 운전여유도가 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 증기발생기 2차측 감압은 주증기관 파단사고(MSLB)와 증기발생기 세관파단사고(SGTR)의 사고해석결과에 고려할 만한 영향을 미치지 않는다.