'2000 춘계학술발표대회 논문집
한국원자력학회

차세대원자로 설계요건에 따른 주급수펌프 상실사고 평가

Evaluation of Loss of a Main Feedwater Pump for KNGR Design Requirements

이광호

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

한국표준형 원전은 정상운전 상태에서 2대의 급수승압/급수펌프가 운전되며, 이 중 1대의 급수펌프가 상실될 경우 나머지 1대가 공급할 수 있는 최대용량은 전체유량의 65%이므로 그 만큼 감소한 급수유량에 따라 터빈 및 원자로 출력을 줄여야 한다. 이러한 급수펌프 상실에 의한 출력감소는 안정적인 발전소 운전에 영향을 줄뿐만 아니라 경제적으로도 큰 손실을 가져오므로 이를 방지하기 위해 차세대원자로를 포함한 다른 ALWR들은 정상운전 중에 3대의 급수승압/급수펌프를 작동하도록 하여, 만일 1대의 펌프가 정지하더라도 나머지 2대가 100% 급수유량을 유지하므로서 터빈 및 원자로 출력의 감소 없이 발전소를 계속적으로 운전할 수 있게 요구하고 있다. 한편, 본 연구에서는 한국표준형 원전의 성능해석에 쓰이는 코드인 KISPAC의 급수계통을 수정하였고, 개선된 프로그램의 검증을 위해 울진 3,4호기에 대하여 1대의 급수펌프 상실사건 해석을 정상운전 상태에서 2대의 급수펌프가 작동 중 일 때와 3대가 운전 중 일 때로 각각 구분하여 계산하고 그 결과를 비교하여 3대의 급수펌프 운전의 유효성을 입증하였다. 그리고 차세대원자로에 대한 사고해석도 수행하여 그 결과가 설계요건을 만족함을 보였다.

Abstract

Two main feedwater pumps are running in full power operation for KSNP, and the turbine power as well as the reactor power should be lowered in accordance with the reduced feedwater flow rate in loss of a main feedwater pump event. KNGR and other ALWRs are going to adopt three main feedwater pumps in normal operation to prevent the power defect in the case of feedwater pump loss event since this event affects the stable plant operation and a lot of economic loss is expected. When a main feedwater pump is failed, the feedwater flow is maintained by two intact pumps so that the continuous plant operation is possible without any reduction of turbine and reactor powers. In this paper, the feedtrain model in KISPAC code is changed to simulate three feedwater pumps, and the test calculation of pump loss event is performed for UCN 3&4 in order to evaluate this new KISPAC models. The calculation results, then, are compared between three and two pump simulations to show the advantage of three feedwater pump operation. Also, the same event is analyzed for KNGR to guarantee the design requirements.

1. 서 론

주급수펌프 상실사고는 성능관련 설계기준사고(PRDBE)에 명시된 사건으로 성능해석분야에서는 이와 같은 운전조건에서의 발전소 성능을 보장할 수 있도록 설계해야 한다. 한국표준형 원전은 정상운전 상태에서 2대의 급수승압/급수펌프가 운전되며, 이 중 1대의 급수펌프가 상실될 경우 나머지 1대가 공급할 수 있는 최대용량은 전체유량의 65%이므로 그 만큼 감소한 급수유량에 따라 터빈 및 원자로 출력을 줄여야 한다. 이 때에 원자로출력 급감발계통에 의해 출력이 크게 감소되고 이러한 출력변화는 안정적인 발전소 운전에 영향을 줄뿐만 아니라 경제적으로도 큰 손실을 가져오므로 이를 방지하기 위해 차세대원자로를 포함한 다른 ALWR들은 정상운전 중에 최대용량 55%인 3대의 급수승압/급수펌프를 작동하도록 하여, 만일 1대의 펌프가 정지하더라도 나머지 2대가 100% 급수유량을 유지하므로서 터빈 및 원자로 출력의 감소 없이 발전소를 계속적으로 운전할 수 있도록 요구하고 있다. 이들의 설계요건들은 표1에 기술되어 있다.

한편, 한국표준형 원전의 성능해석에 쓰이는 코드인 KISPAC은 급수펌프를 2대만 모사하도록 고정되어있기 때문에 여기서는 3대의 급수펌프를 모사하도록 프로그램을 수정하였고, 개선된 프로그램의 검증을 위하여 현재 운전중인 울진 3,4호기에 대하여 급수펌프 상실사건 해석을 수행하였다. 즉 정상운전 상태에서 2대의 급수펌프가 작동 중 일 때와 3대가 운전 중 일 때로 각각 구분하여 1대의 급수펌프가 상실되는 경우의 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그리고 차세대원자로에 대해서도 같은 사고해석을 수행하여 설계요건을 만족함을 보였다.

2. 주급수펌프 상실사고 해석

2.1 한국표준형 원전의 주급수펌프 상실사고에 의한 과도현상

발전소가 100% 출력에서 2대의 급수펌프 중 1대가 상실되면 급수유량이 약 60% 정도까지 급격히 감소하며, 증기발생기의 수위도 유량감소와 증기발생기의 압력증가에 따른 수축현상으로 줄어들게 된다. 이러한 증기발생기 수위의 감소는 주급수 제어계통에 의해 나머지 1대의 급수펌프 회전속도를 증가시키고 이코노마이저 급수유량 조절밸브를 열도록 하는 요구신호를 발생한다.

한편, 원자로출력 급감발계통은 급수펌프 상실시에 급수펌프 제어계통에서 발생되는 신호를 받아 자동적으로 동작되어 원자로출력과 터빈출력 급감발 신호를 동시에 발생시키므로서 원자로와 터빈출력을 빨리 감소시켜 증기발생기 저수위로 인한 원자로 정지를 방지시켜 준다. 터빈 제어계통은 원자로출력 급감발계통으로부터 받은 터빈출력 급감발 신호에 의해서 터빈 출력을 60% 정도까지 480%/분의 비율로 감소시킨다. 그 후에는 133%/분 비율의 터빈출력 감발에 의해서 원자로 냉각재의 평균온도와 증기발생기의 압력이 안정될 때까지 2차측의 부하가 서서히 감소되어 원자로 출력과 터빈 출력의 균형을 맞추게 된다. 즉 원자로 출력 감발계통이 작동된 후에 원자로 출력이 터빈출력보다 클 경우에는 1차측 온도, 압력이 올라가게 되면, 증기우회 제어계통과 원자로 출력 제어계통을 작동시켜 1차측과 2차측 출력이 평형을 이루게 된다.

2.2 급수계통 변경 및 해석 결과

앞절에서 기술한 바와 같이 2대의 급수펌프 중 1대가 상실될 경우에 일어나는 출력변화를 방지하기 위해 급수펌프 1대를 추가로 설치할 경우를 가정하여 해석을 수행하였다. 새로운 급수계통의 개념도는 다음의 그림 1과 같으며, 이를 위해 KISAPC 코드의 급수계통 모델을 수정하였다. 또한 각 펌프의 용량을 65%에서 55%로 감소시키기 위해 펌프의 상사법칙을 이용하여 그 비율만큼 펌프토출유량을 감소시켰다. 그리고 1대의 급수펌프가 상실되면 운전 중인 나머지 2대의 펌프들은

주급수 제어계통으로부터 급수유량 증가 및 감소 요구신호에 따라 두 펌프의 속도 및 수두 등이 같은 조건에서 운전되는 것으로 가정하였다. 울진 3,4호기에 대한 사고해석 초기조건은 표2와 같으며, 운전 중인 급수펌프가 2대일 때와 3대일 때를 구분하여 각각에 대한 1대의 급수펌프가 상실되었을 경우 사고해석을 수행하고 그 결과를 그림2에서부터 그림9에 나타냈다.

정상상태에서 2대의 급수펌프가 작동 중 20초에서 1대의 펌프가 상실되자 원자로출력 급감발계통에 의해서 터빈 및 원자로 출력이 급격히 감소했다. 이에 따라 고온관 온도와 평균온도는 떨어지며 저온관 온도는 2차측으로 열전달이 잘 이루어지지 않으므로 약간 상승하게 된다. 이와 같이 원자로 출력과 냉각재 평균온도가 감소하므로 가압기의 압력도 줄어들고 가압기 수위는 냉각재 평균온도에 따라 변하므로 온도가 감소한 만큼 수위도 약간 떨어진다. 한편, 증기발생기의 수위변화는 터빈 출력 감소에 따라 증기발생기 압력이 갑자기 증가하여 발생하는 수축현상과 펌프 상실로 인한 급수유량 감소에 의해 증기발생기 수위가 순간적으로 크게 감소하고 시간이 지남에 따라 수위가 서서히 회복된다. 또한 급수유량도 만찬가지로 급수펌프 1대가 상실될 때 순간적으로 감소하다가 급수 제어계통이 급수유량 요구신호를 발생시켜 나머지 급수펌프의 속도를 높이고 유량밸브를 열어 급수유량을 증가시켜 적정수준으로 유지하게 된다. 증기발생기 압력은 원자로출력 급감발계통에 의해 터빈 출력을 갑자기 감소시키기 위해서 증기유량을 줄여야 하므로 증기발생기 내의 압력은 증가하게 되고 증기우회 제어계통에 의해서 잉여 에너지를 방출하게 된다.

이에 반하여 급수펌프 3대가 운전되다가 1대가 정지되었을 경우에는 일단 원자로출력 급감발계통이 작동하지 않도록 제어논리를 수정하였기 때문에 원자로 및 터빈 출력의 변화가 없다. 또한 원자로 냉각재 온도, 가압기의 압력과 수위에도 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 그러나 급수유량이 순간적으로 변화함에 따라 증기발생기 수위는 조금 줄어들었다가 서서히 회복되는 것을 알 수 있다. 그리고 펌프 상실시에 순간적인 급수유량 감소의 정도가 비교적 적기 때문에 전출력에 맞도록 유량도 빠르게 회복되는 것을 볼 수 있으며, 증기발생기 압력이 거의 변화하지 않으므로 증기우회 제어계통도 작동하지 않는다. 또한 이 경우에 만회해야 할 급수유량이 적으므로 그에 따라 급수유량 요구신호의 증가량도 적고 따라서 나머지 건전한 펌프들의 회전속도 및 이코노마이저 밸브의 열림도 조금 증가함을 알 수 있다.

다음은 차세대원자로에 대한 주급수펌프 상실사고 해석을 수행한 것으로 그 결과가 그림10부터 그림15에 나타나있다. 이 해석결과도 위에서 기술한 울진 3,4호기의 경우와 마찬가지로 주급수 펌프 3대가 운전 중 1대가 상실되었을 때에 2차측의 증기발생기 수위 및 급수유량의 변화만 조금 나타났을 뿐 1차측은 거의 변화없이 안정된 상태를 보여주었다.

3. 결 론

앞에서 기술한 바와 같이 한국표준형 원전에서는 2대의 급수펌프로 정상운전 중 1대가 상실될 경우에 핵증기공급계통(NSSS)에 여러 과도현상들이 발생하였다. 그러나 KISPAC 코드의 급수계통을 수정하여 해석한 결과, 3대의 펌프가 운전 중일 때는 그 중 1대가 상실되더라도 나머지 2대에 의해 100% 급수유량을 곧바로 유지할 수 있어 원자로 및 터빈 출력의 급감발없이 계속적으로 전출력 운전이 가능함을 보여줌으로써 이 수정된 모델이 계통에서 발생하는 현상을 예상대로 잘 모사함을 검증하였고, 이를 이용하여 현재 개발 중인 차세대원전의 설계요건에 따라 3대의 급수펌프를 적용하면 실제 발전소 운전시에 효과적으로 작용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 차세대원자로 기술개발 (I), 차세대원자로 설계개발, 1권 차세대원자력 발전소 계통 구성 개념 (최종보고서 1/2), 한전 전력연구원, 1994.

[2] Korean Utility Requirements Document, Chapter 1 Overall Requirements, Rev.0, 한국전력공사, 1999.

[3] Korean Utility Requirements Document, Chapter 2 Power Generation Systems, Rev.0, 한국전력공사, 1999.

[4] ALWR Utility Requirements Document, Volume II, ALWR Evolutionary Plant, Chapter 1 Overall Requirements, EPRI, 1995.

[5] ALWR Utility Requirements Document, Volume II, ALWR Evolutionary Plant, Chapter 2 Power Generation Systems, EPRI, 1995.

[6] CESSAR DC for System 80+, ABB-CE, 1994.

[7] 차세대원전 설계를 위한 급수펌프 상실사고 해석, Technical Memo, 전력연구원, 1998.

[8] 영광 4호기 주급수펌프 1대 상실 시험 결과 평가 보고서, 한국원자력연구소, 1996.

[9] LTC User's Manual, ABB-CE, 1986.

표 1. 발전소 성능 및 급수계통 관련 요건

◇ **차세대원전의 설계요건** - **발전소 정상운전 중 3대의 급수펌프가 모두 운전되도록 한다.** - **운전중인 1대의 복수펌프 또는 급수승압펌프/급수펌프가 정지되더라도 발전소는 100% 출력운전이 가능하여야 한다.**
◇ Korean Utility Requirements Document & EPRI Utility Requirements Document <u>3.5 Event Capabilities</u> 3.5.5 Response to Loss of a Feedwater System Pump Loss of a running main feedwater system pump or condensate system pump while at full power shall not result in a reactor trip. <u>4.2 Performance Requirements</u> 4.2.1.2 Plant operation shall be possible at 100 percent power with one operating condensate pump, or booster/main feedwater pump assembly out of service. 4.2.1.8 The feedwater and condensate pumps and pump control systems shall be designed so that loss of a single booster/main feedwater pump assembly or condensate pump in a multiple pump system shall not result in trip of the turbine-generator or reactor trip. The pumps and other system components shall be designed to avoid the need for an immediate trip of the condensate, feedwater booster or feedwater pumps on low NPSH. <u>4.3 System Features</u> 4.3.5.1 The feedwater system shall include three turbine-driven main feed pumps. All three pumps shall normally be operating.
◇ System 80+ CESSAR DC 2.3.1 Design Basis - The system is designed such that failure of a feedwater supply line coincident with a single active failure will not prevent safe shutdown of the reactor. 2.3.2 Pumps - Three 50% capacity motor-driven feedwater booster pumps (three operating) - Three 50% capacity motor-driven main feedwater pumps (three operating) 2.3.3 System Performance - Plant operation can continue at 100% power with loss of one operating feedwater pump. - All three booster/main feedwater pumps are normally operating during power operation. Upon isolation or loss of one of the three operating main feedwater, the remaining two pumps are capable of providing a runout flow of a minimum of 110% of the system rated flow against a steam generator pressure of 1050 psia. This provides sufficient flow to preclude a reactor trip.

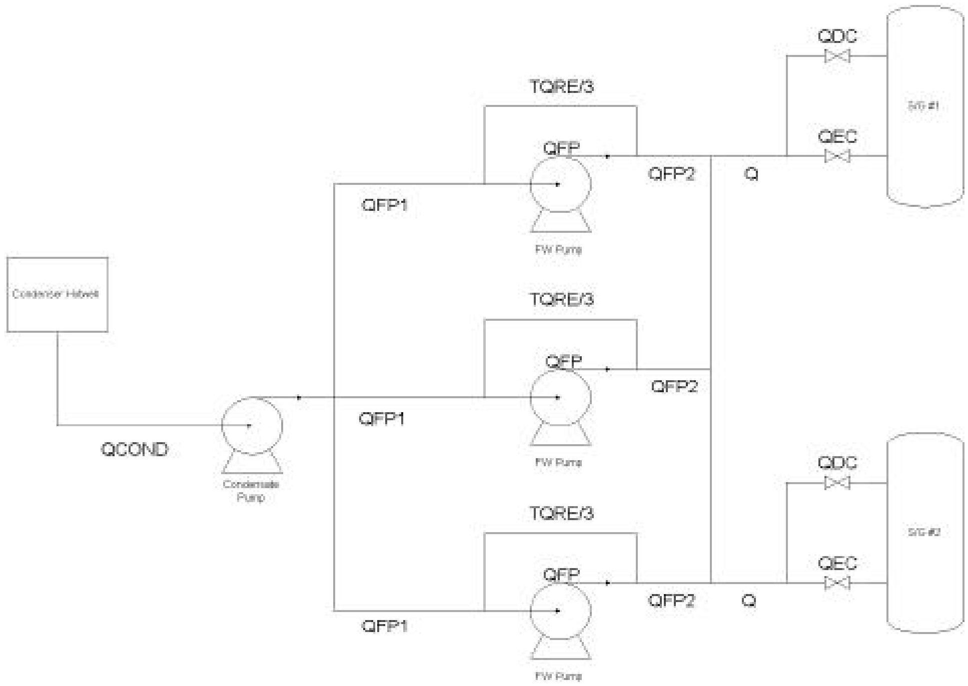

그림 1. 변경된 급수계통 모델 개념도

표 2. 울진 3,4호기 정상상태에서의 초기조건

<u>Primary System</u>	
NSSS Power (at Steam Generator Outlet Nozzles)	2825.0 MWt
Core Power	2815.0 MWt
RCP Power (4 pumps)	10.0 MWt
Pressurizer Pressure	2250.0 psia
Pressurizer Level	52.6 %
Cold Leg Temperature	564.5 °F
Hot Leg Temperature	621.2 °F
Number of RCP Operating	4
Pressurizer Spray Flow Rate (continuous)	0.5 6 gpm
Pressurizer Proportional Heaters On (normal)	150 kW
Primary Flow Rate (100% Design)	82500 gpm
<u>Secondary System</u>	
Steam Conditions	Saturated
Steam Generator Pressure (at SG steam nozzle outlet)	1070.0 psia
Steam Generator Temperature	552.9 °F
Steam Moisture Content (maximum)	0.25 %
Feedwater Temperature	450.0 °F
Steam/Feedwater Flowrate (w/o Blowdown)	6,359,500 lbm/hr/SG
Steam Generator Level (Narrow Range)	44.0 %
Economizer/Downcomer Feedwater Flow Split	90.0 % / 10.0 %
Feedwater Pump Runout Capacity	65.0 %
Steam Bypass System Capacity	55.0 %
<u>Auxiliary Systems</u>	
Number of Charging Control Valve Operating	1
Letdown Flowrate	72.0 gpm
Number of Charging Pumps Operating	1
Charging Flowrate	88.0 gpm
Reactor Coolant Pumps Bleedoff (4 pumps)	12.8 gpm
Seal Injection Flow Rate	26.4 gpm

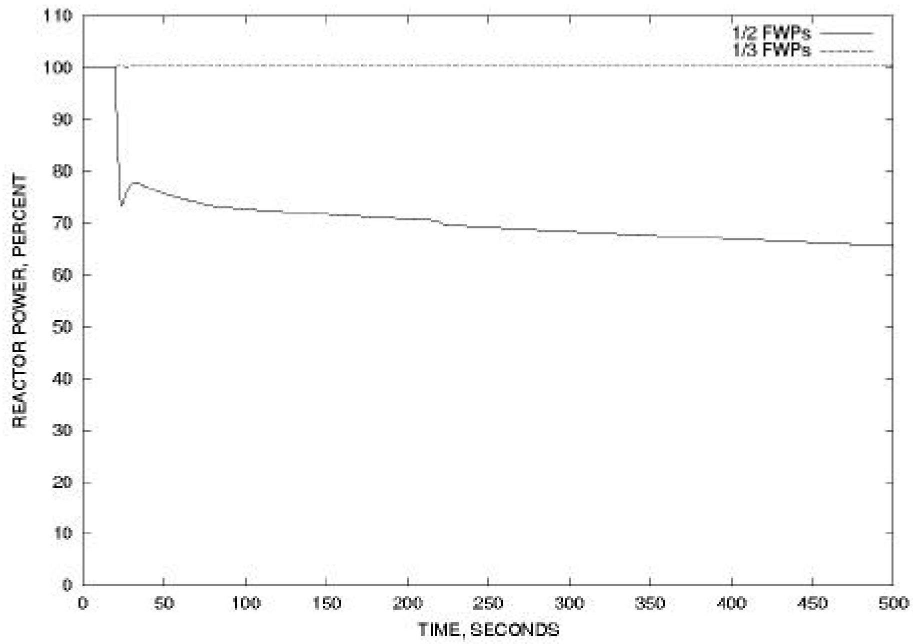

그림 2. **울진** 3,4**호기의 원자로 출력 비교**

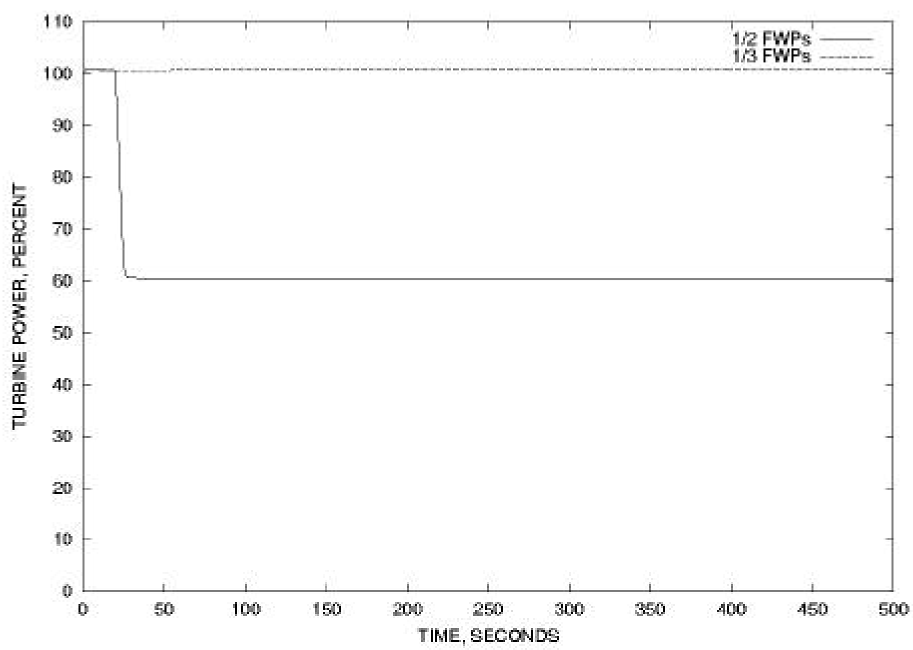

그림 3. **울진** 3,4**호기의 터빈 출력 비교**

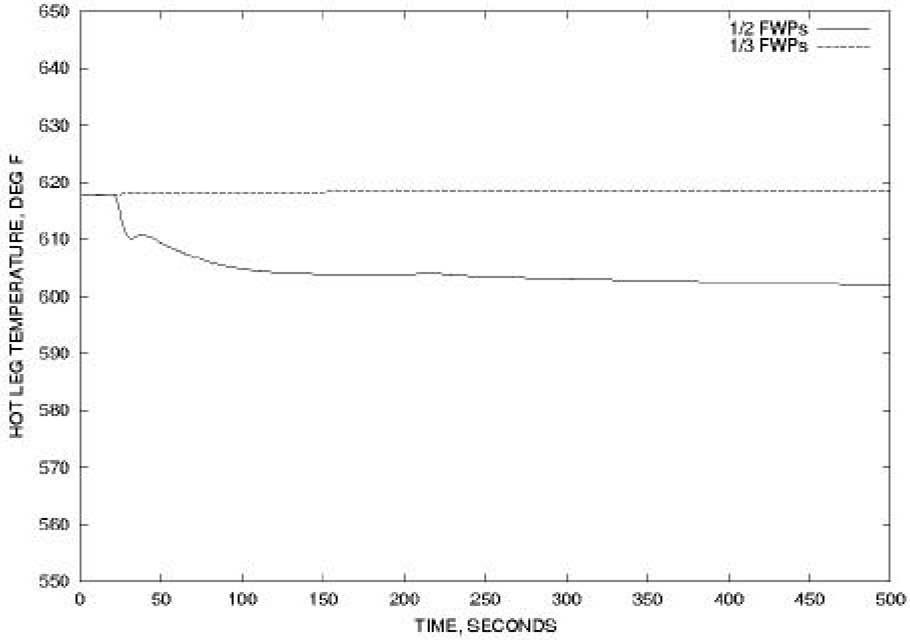

그림 4. **울진** 3,4**호기의 고온관 온도 비교**

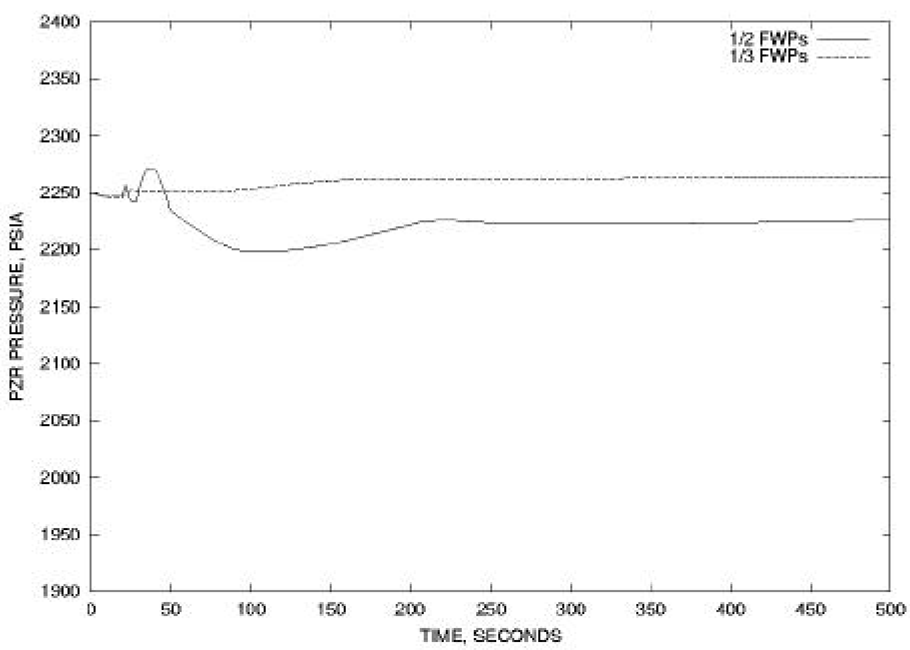

그림 5. **울진** 3,4**호기의 가압기 압력 비교**

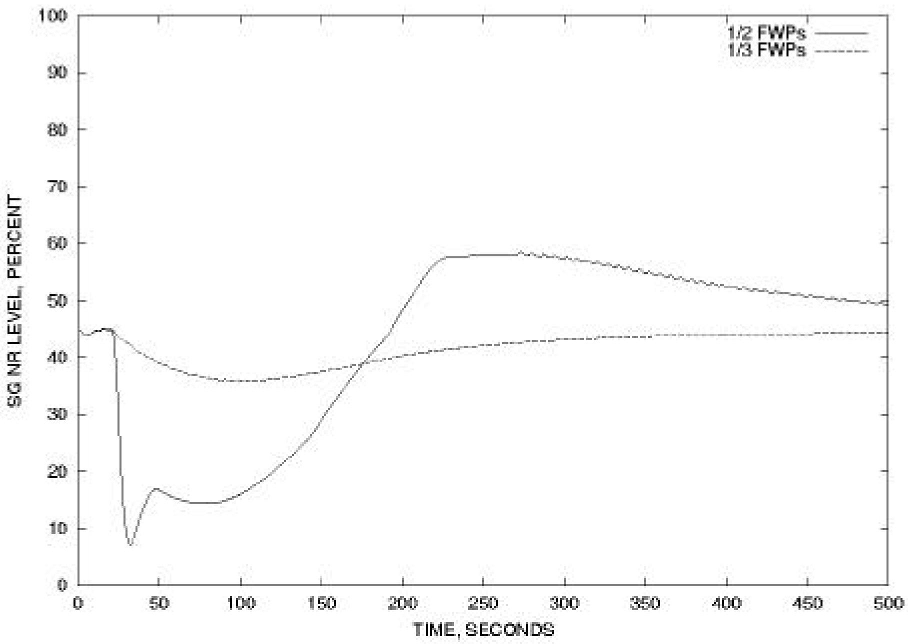

그림 6. **울진** 3,4**호기의 증기발생기 수위 비교**

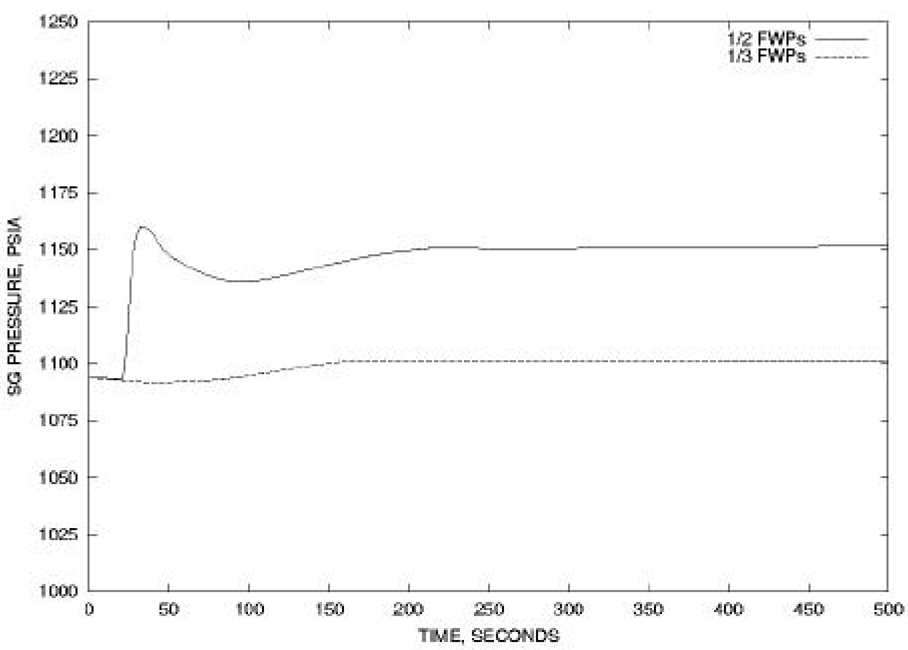

그림 7. **울진** 3,4**호기의 증기발생기 압력 비교**

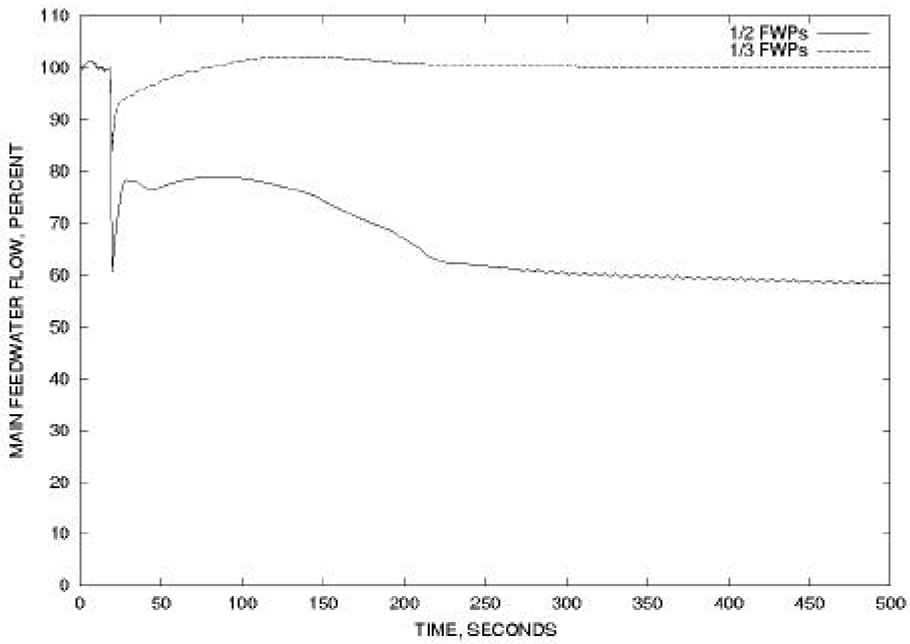

그림 8. **울진** 3,4**호기의 급수유량 비교**

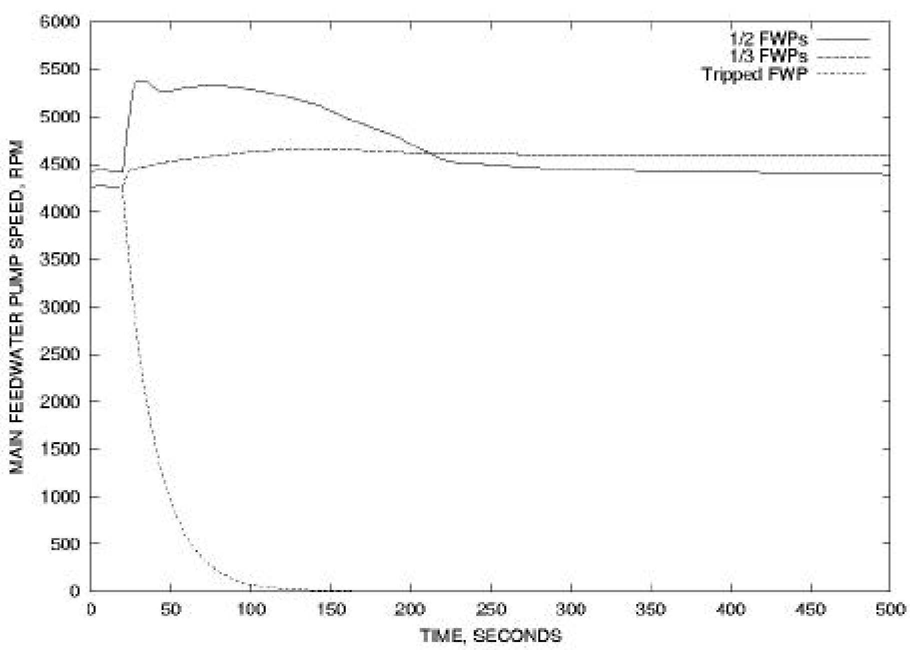

그림 9. **울진** 3,4**호기의 급수펌프 회전속도 비교**

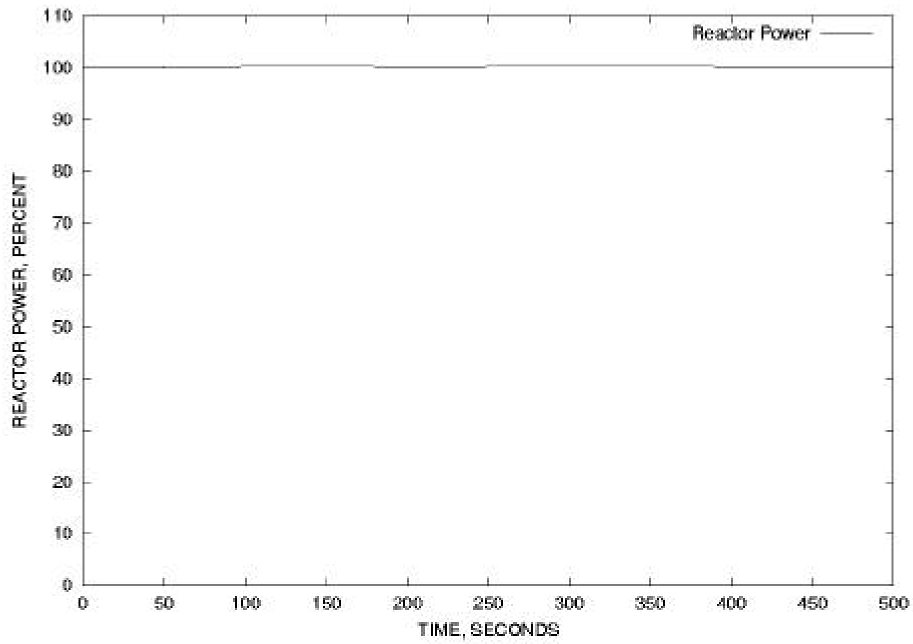

그림 10. **차세대원전의 원자로 출력**

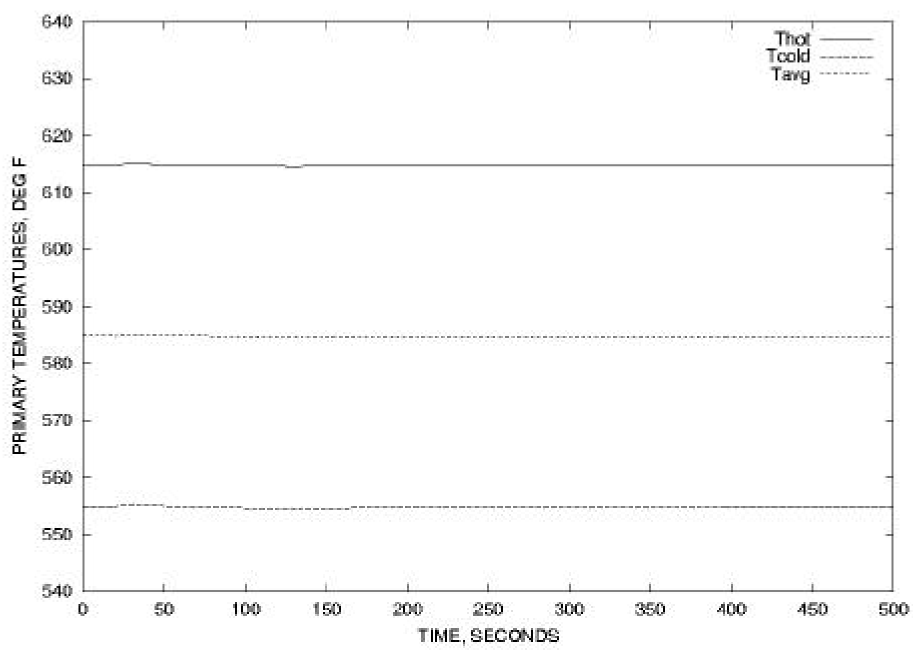

그림 11. **차세대원전의** 1**차측 온도**

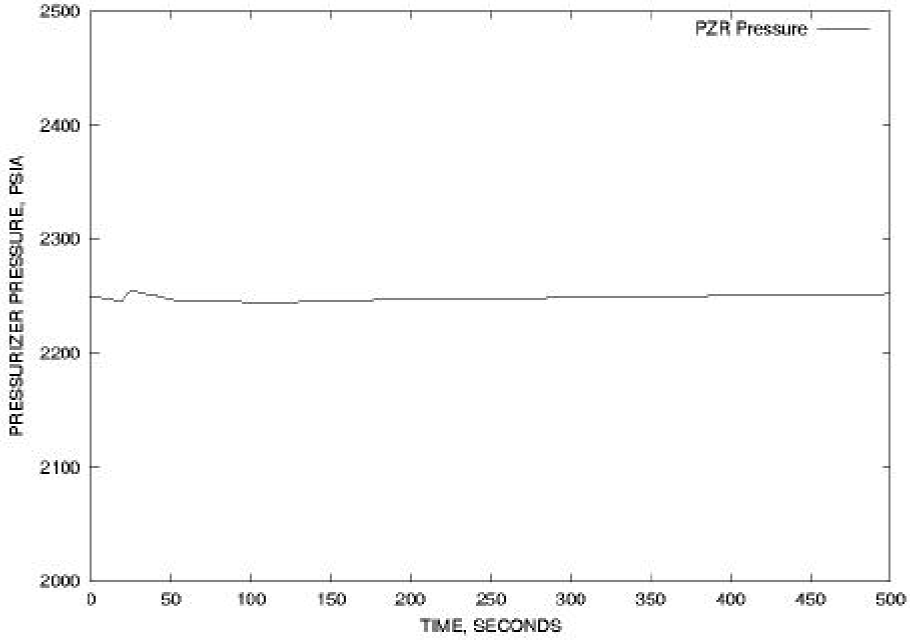

그림 12. **차세대원전의 가압기 압력**

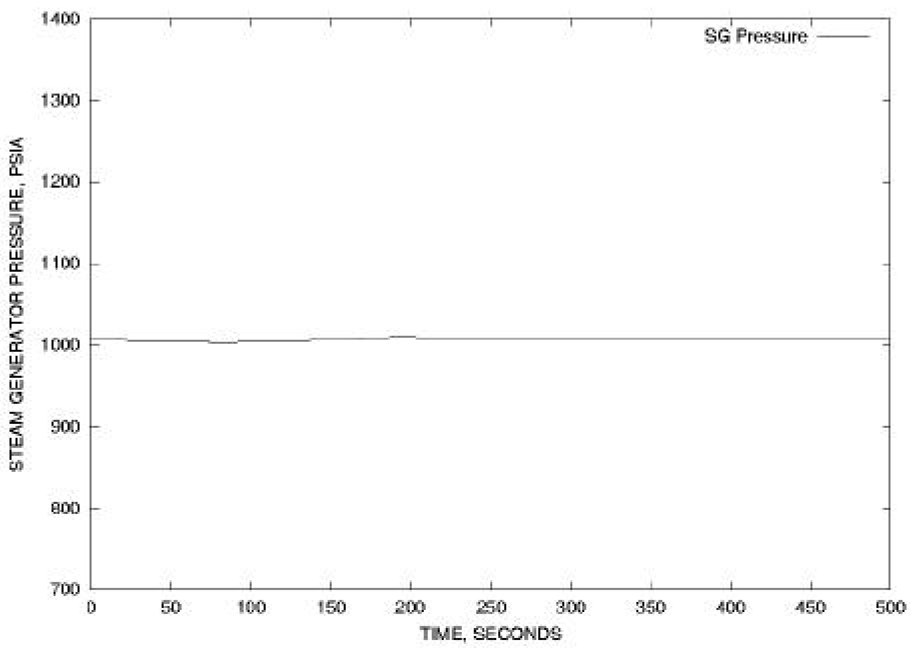

그림 13. **차세대원전의 증기발생기 압력**

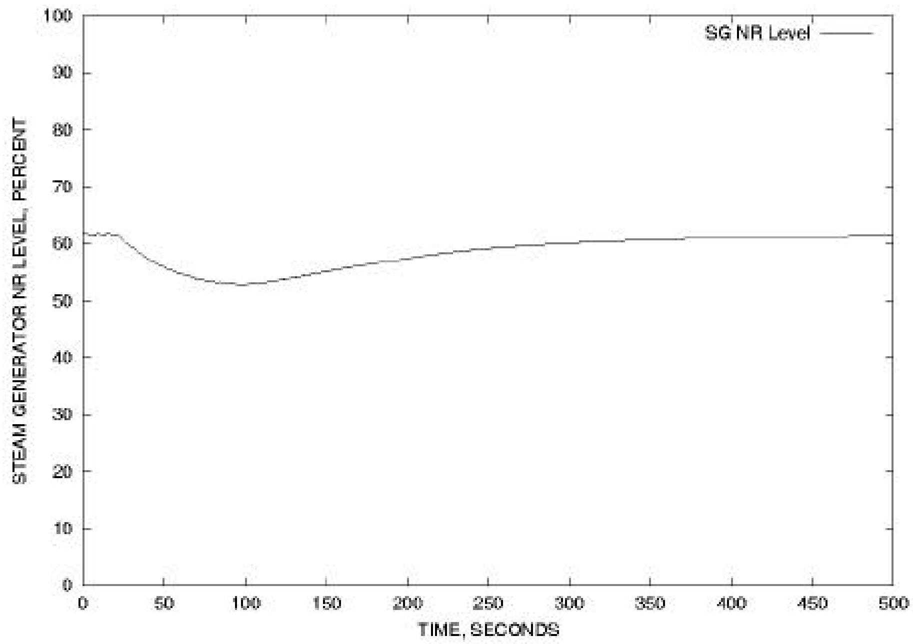

그림 14. **차세대원전의 증기발생기 수위**

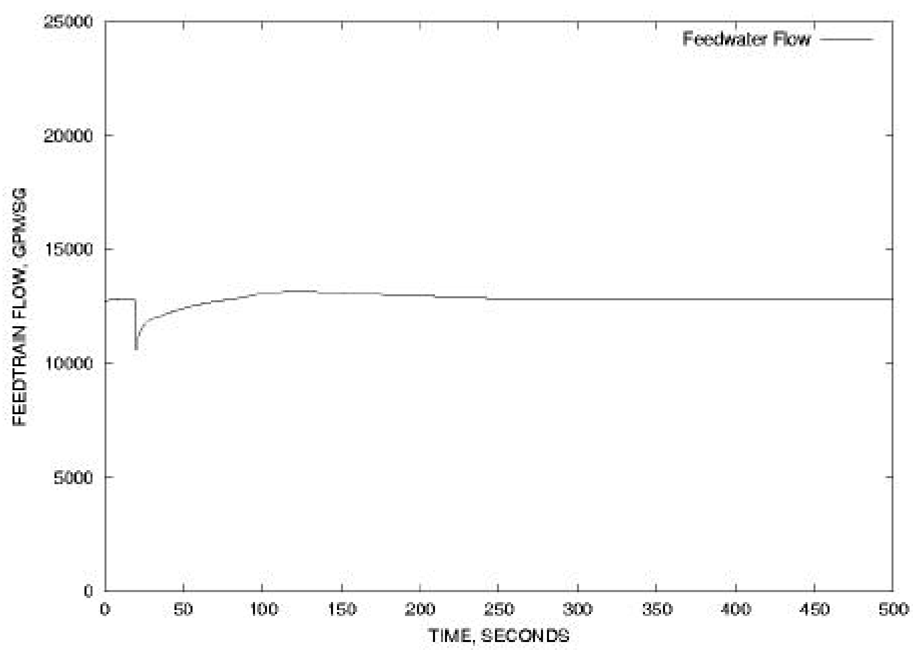

그림 15. **차세대원전의 급수유량**