

## 안전주입 유량감량 해석에 대한 민감도 분석

### A Study on the Sensitivity Analysis of Safety Injection Reduction

윤덕주\*, 전황용

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

안전주입이 발생하고 있을 때 안전주입 유량과 원자로냉각재의 누출유량이 서로 평형을 이루는 지점의 압력에서 안정을 이루게 된다. 과냉각상태하에서 냉각재 누출량은 안전주입유량에 직접적으로 영향을 받게된다. 그래서 원자로냉각재의 누출량을 최소화하기위해 안전주입유량은 감량되어야한다. 반면에 안전주입유량은 이차측으로 열전달을 원활히 하기 위해 냉각재를 가압하는 역할을 하게된다. 여기서 상충이 생긴다. 이러한 상반된 점을 고려하여 최적의 유량감량을 이루기 위한 유량감량 최적프로그램을 통해 고리1,2,3,4호기에 대해 유량감량해석을 수행하고 여러변수에 대해 분석하였다. 그 결과를 종합하면 안전주입감량 전의 원자로냉각수 유동상태(강제순환 또는 자연순환)는 안전주입 감량기준인 과냉각도에 거의 영향을 끼치지 못한다. 그래서 강제순환과 자연순환의 계산결과는 거의 비슷한 결과를 나타낸다. 고압안전주입펌프와 충전펌프의 운전수량을 줄이는 단계에서 고압안전주입펌프가 1대라도 운전되는 경우 운전영역이 넓다는 것을 알 수 있으며 충전펌프만 운전되는 경우 주입유량이 상대적으로 적기 때문에 운전영역이 좁다. 포화상태로의 회복을 결정하는 단계는 안전주입유량을 줄이기 전 냉각수압력에서 계산한 계기오차를 적용하며 때문에 운전영역이 상대적으로 넓다.

#### Abstract

With SI in service, RCS pressure will tend toward an equilibrium value where SI flow matches leakage from the RCS. For subcooled conditions, the amount of leakage from the RCS is directly related to the capacity of the operating SI pumps. Hence, in order to minimize the loss of coolant from the primary system, SI flow must be reduced. On the other hand, some SI flow is necessary to maintain coolant inventory and pressurize the RCS sufficiently to promote primary-to-secondary heat transfer. A conflict arises between keeping the SI pumps running to maintain adequate coolant inventory and reducing SI flow to minimize leakage from the RCS. A program SIREPRO has been developed for calculating various pressure/temperature relationships for stopping or realigning SI pumps which ensures that the reduced SI flow will be sufficient to maintain adequate coolant inventory. This Program showed that various parameter is related to the requirement to reduce SI pump.

#### 1. 개요

노심비상냉각계통은 냉각재상실사고후 원자로냉각재계통으로 고압의 냉각수를 보충하여 적절한 노심냉각을 확보하기위한 충분한 용량을 가지도록 설계된다. 소형 파열사고에서 잔열제거계통 운전압력보다 훨씬 높은 압력에서 안정화된다. 가압기 압력제어에 의한 RCS 압력감소는 누출량을 감소시키고 안전주입량을 증가시켜 결국엔 가압기에 수위가 높아져 압력제어가 불가능하게 된다. RCS압력을 줄이고 보충수를 유지하기 위해서는 잔열제거계통을 통한 냉각과 격납용기내부로의 누출량을 최소화하기 위해서는 안전주입유량감량이 뒤따라야한다. 원자로 냉각재계통으로의 안전주입펌프 유량은 주입배관 마찰저항과 냉각재계통의 압력에 의해 결정된다. 대부분의 발전소는 안전주입 유량을 밸브로 조절할 수 없기 때문에 안전주입 유량은 운전중인 펌프의 수를 줄이거나 늘림으로써 조절하게 된다. 운전중인 펌프의 수를 줄일 경우 냉각재계통으로의 안전주입유량은 불연속적으로 감소되기 때문에 냉각재계통의 압력은 순간적으로 떨어지게 된다. 이에 비하여 계통의 온도는 서서히 변화하여 유량감량시 냉각재 계통 압력이 포화압력 이하로 되고 이러한 결과로 계통내에 기포가 발생하여 노심 냉각효과를 저하시키는 등 악영향을 미칠 수도 있다. 따라서 주어진 사고에 따른 적절한 안전주입 감량을 하기위해서 발전소의 비상노심냉각계통은 펌프특성별로 계통의 과냉각을 유지시킬 안전주입 감량기준이 마련되어야 한다.

## 2. 이론식

안전주입량과 누출량은 냉각재계통 압력과 관계가 있으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_{SI}(PC_{N-1}) - A_{BRK}G(P, T) - V\beta \frac{dT}{dt} = 0 \quad (1)$$

- $W_{SI}(PC_{N-1})$  ;  $PC_{N-1}$ 에서의 안전주입량(lbm/sec)
- $A_{BRK}$  ; 과단면적(ft<sup>2</sup>)
- $G$  ; 과단 부위를 통한 유출유량(lbm/ft<sup>2</sup>-sec)
- $V$  ; 원자로 냉각재계통 부피(ft<sup>3</sup>)
- $\beta$  ; 단위 온도 변화당 밀도 변화율,  $d\rho/dT$  (lbm/ft<sup>3</sup>-°F)
- $PC_N$  ; 운전중인 펌프 배열
- $PC_{N-1}$  ; 안전주입 감량한 상태의 펌프 배열
- $PC_{N+1}$  ; 재기동할 상태의 펌프 배열
- (I,J,K) ; 펌프 배치 상태
- I ; 붕소주입탱크를 통하여 주입하는 펌프 수
- J ; 고압안전 주입펌프수
- K ; 정상운전 충전펌프수

제한 과단 면적은 냉각재 압력의 함수로 표현된다.

$$A_{BRK} = \frac{W_{SI}(PC_{N-1}) - V\beta \frac{dT}{dt}}{G(P, T)} \quad (2)$$

여기서 과단면적이  $A_{BRK}$  보다 클 경우 냉각재 재고량 및 압력이 감소하게 되어 과냉각을 상실할 가능성이 높아지게 되며 또한 기포가 발생할 가능성이 커진다. 반대로 과단면적이  $A_{BRK}$  보다 작을 경우 냉각재재고량 및 과냉각도는 증가하므로 이러한 안전주입단계에서는 유량감량이 가능한 단계라 할 수 있다. 안전주입 유량감량 이전 단계에서는 안전주입유량이 과단 유출유량과 냉각재 수축의 평행조건의 계통압력을 유지하려는 경향을 띠게 된다. 이러한 평형압력 P'는 제한과단크기 ( $A_{BRK}$ ), 안전주입 펌프단계( $PC_N$ )와 관련되며 다음의 식으로 주어진다.

$$W_{SA}(PC_N) - A_{BRK}G(P, T) - V\beta \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

RCS 압력이 P'보다 클 경우 파단면적은 제한파단 면적보다 적은 값을 가지므로 안전주입유량은 PC<sub>N</sub>에서 PC<sub>N-1</sub>로 유량감량을 할 수 있다. 반대로 RCS 압력이 P'보다 작을 경우 안전주입 유량감량은 불가하다.

(2)식에서 원자로 냉각재계통 압력을 변화시키고 최소 과냉각에 일치하는 온도를 계산하면서 안전주입 유량감량 기준 설정을 위한 압력/온도 관계식을 전개시킬 수 있다.

$$G(P', T) = \frac{W_{SA}(PC_N) - V\beta \frac{dT}{dt}}{A_{BRK}} \quad (4)$$

비압축성방정식을 이용하여 냉각재유량을 구하면 다음과 같다.

$$G_{CRIT} = C_1 \sqrt{2g\rho[P - C_2 P_{SAT}(T)] \times 144} \quad (5)$$

여기서 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 상수이며, Zaloudek model에서 L/D=20일 때 C<sub>1</sub>=0.95, C<sub>2</sub>=1.0을 사용하여 좋은 결과를 얻었으며 Modified Zaloudek Correlation에서 L/D의 값이 20보다 적을 때 C<sub>1</sub>=1.018, C<sub>2</sub>=0.90을 적용하였다. ρ은 밀도, g는 중력가속도이다.

Unchoked Flow는 대기에 방출되는 오리피스스의 비압축성유체의 유량방정식과 동일하다.

$$G = C \sqrt{2g\rho[P - 14.7] \times 144} \quad (5-1)$$

여기서 C=1이다. 표1은 상기의 여러 가지 파단 유량 방정식을 이용하여 안전주입 유량감량시 과냉각도 요건을 계산한 결과를 나타내었다. 과냉각 상태회복에서는 Modified Zaloudek Correlation이 가장 보수적인 결과를 보여주었다. 포화상태회복에서는 Moody Correlation(포화상태)와 Zaloudek Correlation(과냉각상태)이 가장 보수적인 결과를 보여주었다.

표1. 안전주입 유량감량 기준 과냉각도

단계	계산된 과냉각도 요건				
	과냉각상태회복		포화상태회복		
	ZAL	MZAL	Moody-ZAL	MZAL-ZAL	Moody-MZAL
1	66.9	70.2	36.6	32.7	30.6
2	50.9	52.9	26.5	24.0	20.2
3	63.1	66.5	34.8	30.6	28.4
4	76.9	81.2	44.1	39.2	36.5
5	55.7	58.1	30.7	27.5	22.7
6	68.1	73.8	38.8	32.6	29.1
7	57.7	61.5	31.9	27.2	24.4
8	77.5	81.8	44.4	39.5	37.0
9	59.6	62.3	32.7	29.4	25.2

식(2)와 식(3)으로부터 안전주입 감량기준을 결정하기 위하여 원자로 냉각재계통 압력과 여러 냉각재 온도에 대한 P'를 구하기 위하여 (4)의 G(P',T)를 만족하는 P'를 식(5)에서 얻게된다. 최종적으로 P'와 P의 차가 원하는 과냉각 여유가 되며 이를 온도로 표시하면

$$T_{SUB}(PC_N, PC_{N-1}) = T_{SAT}(P) - T_{HL} \quad (6)$$

이 된다. 실제 적용되는 RCS 과냉각도를 구하기 위해서는 계기(온도와 압력)의 오차를 고려하여 온도차로 표시된 다음의 식을 적용한다.

$$T_{SUBUNC} = \sqrt{[T_{UNC}^2 + \{T_{SAT}(P) - T_{SAT}(P - P_{UNC})\}^2]} \quad (7)$$

식(7)을 식(6)의 결과에 더하면 계기 오차를 고려한 과냉각도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{SUB} = T_{SAT} - T_{SUBUNC} \quad (8)$$

### 3. REDUCE sequence 결정

펌프의 정지배열 순서를 결정하는 것이 Reduce sequence로서 발전소 특성에 따라 달리 결정된다. High Pressure 발전소인 영광1,2호기/고리3,4호기 원전의 경우 두 단계의 step으로 하는 것이 바람직하다. 안전주입 초기 단계에서는 충전/안전주입펌프가 2대 운전된다. Reduce의 첫 step은 두 대의 충전/안전주입펌프 중에서 한 대를 정지하며, 제 2 step은 나머지 운전중인 한 대의 충전/안전주입펌프는 정상충전 유로로 유로변경을 실시하고 봉산주입탱크 입·출구밸브를 격리하여 충전/안전주입펌프를 정지하는 효과를 주는 것으로서 한 대의 충전펌프가 운전되도록 한다.

### 4. 입력자료

#### 가. 입력자료

유량감량 해석프로그램의 입력변수의 개략적인 설명은 표1 과 같다.

표1 유량감량프로그램 입력변수

입력변수	개요
CZAL1	과냉각 상태의 임계토출유량계수 (0.9)
CZAL2	과냉각 상태의 임계토출유량에 대한 불안정계수 (1.018)
DTDT	노냉각수의 냉각율 [ $^{\circ}\text{F} / \text{sec}$ ]
MODEBRK	과단부위의 유량모델을 결정할 때 사용되는 flag (1) 1. Modified Zaloudek model 2. Moody model
MODESUB	계기오차계산방법의 선택을 위한 flag (1) 1. 노냉각계통의 상태변화에 관계없이 일정한 계기오차 2. 안전주입유량을 줄인 후의 노냉각수 압력에서 계산한 계기 오차일 과냉각상태회복시 사용한다. 3. 안전주입유량을 줄이기 전의 노냉각수계통압력에서 계산한 계기오 차 포화상태로의 회복시 사용한다.
NCHG	정상충전유로로 주입할 수 있는 충전펌프의 수 [K]
NCHGSI	안전주입탱크(BIT) 유로를 통해 주입할 수 있는 충전/안전주입펌프의
NHHSI	안전주입탱크(BIT) 유로를 통해 주입할 수 있는 고압안전주입펌프의
NLPUMPS	안전주입 감소의 단계수 (<4)
PADD	압력단위가 psia가 아닐 때 psia부터의 변환될 때의 상수값
PCONV	사용압력단위의 psia에 대한 변환계수 (1.0)
PHEAD	노냉각수의 압력 [psia]
PUNC	압력계기오차로서 MODESUB가 2 및 3일때만 사용한다.
TADD	온도단위가 $^{\circ}\text{F}$ 가 아닐 때 $^{\circ}\text{F}$ 로부터 변환될 때의 상수값
TCONV	사용온도단위의 $^{\circ}\text{F}$ 에 대한 변환계수 (1.0)
TCORE	노심부를 통과한 노냉각수의 상승온도로서 과손부위의 유체온도와 과냉각도를 유지하고 있는 부위의 유체온도 차이를 의미한다.(자연순환시 : $30^{\circ}\text{F}$ , 강제순환시 : $2^{\circ}\text{F}$ )
TSUB	과냉각 요구량
TUNC	온도계기오차로서 MODESUB가 2 및 3일때만 사용한다.
VRCS	가압기를 포함한 노냉각수계통의 부피 [ft <sup>3</sup> ]
WCHGMAX	충전유로를 통해 공급할 수 있는 최대유량 [lb / sec]
WCHGP (1)	한 대의 충전펌프로써 충전유로를 통해 공급하는 유량
WCHGP (2)	두 대의 충전펌프로써 충전유로를 통해 공급하는 유량
WECCS (1)	한 대의 안전주입펌프로써 안전주입유로를 통해 공급하는 유량 [lb / sec]
WECCS (2)	두 대의 안전주입펌프로써 안전주입유로를 통해 공급하는 유량 [lb / sec] (0.0)
WECCS (3)	한 대의 충전 / 안전주입펌프로써 안전주입유로를 통해 공급하는 유량 [lb / sec] (0.0)
WECCS (4)	두 대의 충전 / 안전주입펌프로써 안전주입유로를 통해 공급하는 유량 [lb / sec] (0.0)

나. 노심유통상태에 따른 프로그램의 입력유형

REDUCE 프로그램은 노심의 냉각상태, 노심유통상태 및 격납용기 환경조건에 따라 달리되는 6가지 경우에 대하여 계산되어진다. 각 경우에 대한 전산입력자료를 요약하면 다음 표3,4와 같다.

표 3. 안전주입 감량계산에 요구되는 노심유통상태

Case No.	Loop flow	Fluid state	Containment Condition
1	강제순환	과냉각 상태	정상
2	자연순환	과냉각 상태	정상
3	강제순환	과냉각 상태	비정상
4	자연순환	과냉각 상태	비정상
5	—	포화 상태	정상
6	—	포화 상태	비정상

표 3 안전주입 감량계산시 각 특성에 따른 전산입력 변수

입력변수	Case Number					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
CZAL1	1.018	1.018	1.018	1.018	0.95	0.95
CZAL2	0.90	0.90	0.90	0.90	1	1
DTDT	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778	0.02778
MODEBRK	2	2	2	2	2	2
MODESUB	2	2	2	2	3	3
TCORE	2.0	30.0	2.0	30.0	0.0	0.0
TSUB	-	-	-	-	30	30

다. 펌프의 안전주입 유량결정

유량감량 프로그램 입력에는 원자로 냉각재계통 압력에 따른 펌프의 유량을 계산해 주어야 한다. 고압안전주입펌프는 원심식이기 때문에 1.25배로 보수적으로 적용한다. 이는 동일 배관을 통해 2대의 펌프를 운전할 때 마찰계수가 유량의 제곱에 비례해 증가하기 때문에 유량은 2배 보다 적은 유량을 적용한다.

표 5 영광1,2호기/고리3,4호기 충전/안전주입펌프 제원

구 분		고리 3,4/영광1,2호기	비 고
정기점검 시험결과 유량	펌프재순환유량	약 40 gpm	기준치 : 60 gpm 이하
	밀봉주입수	약 60 gpm	기준치 : 55 ~ 65 gpm
	안전주입유량	530 ~ 560 gpm	기준치 : 530 ~ 560 gpm
안전주입유량 시험근거		고리 3,4/영광1,2호기 FSAR 16.4.5.2.1-H	
고압안전주입펌프의 질체 수두		2,688 Psig (6,200 Ft)	
Tech. Spec 요구유량	안전주입 최소유량	318 gpm	
	펌프출구 총유량	675 gpm	
충전/안전주입 펌프 유량		대기압(14.7Psig)에서 안전주입유량인 530 ~ 560 gpm의 평균보다 작은 값인 530 gpm(74.3 lbm/sec)의 값을 적용하여 유량감량해석을 수행함	

표 6 고리1,2호기 고압안전주입펌프 및 충전펌프 제원

구 분		고리 1호기	고리 2호기
고압안전 주입펌프	펌프 재순환유량	80 gpm	80 gpm
	안전주입유량	720 gpm	705 gpm
	안전주입펌프	800 gpm	785 gpm
안전주입유량 시험근거			고리 2 호기 FSAR 16.4.5.2.1.h
고압안전주입펌프의 절체 수두		153.83 BAR (2,231 Psig)	155.45 BAR (2,211 Psig)
Tech. Spec 요구유량	안전주입 최소유량	언급되지 않음	516 gpm
	펌프출구 충유량		785 gpm
충전 펌프 유량		유형 : 용적식 충전펌프(PDP) 대기압 충전유량 : 60.5 gpm 충전유량 : 60.5 gpm 정상운전시 : 60.5 gpm	유형 : 원심충전펌프 (Centrifugal Pump) 대기압 충전유량 : 318 gpm 밀봉주입수 : 16 gpm 재순환유량 : 32 gpm 충전유량 : 270 gpm 정상운전시 : 65 gpm

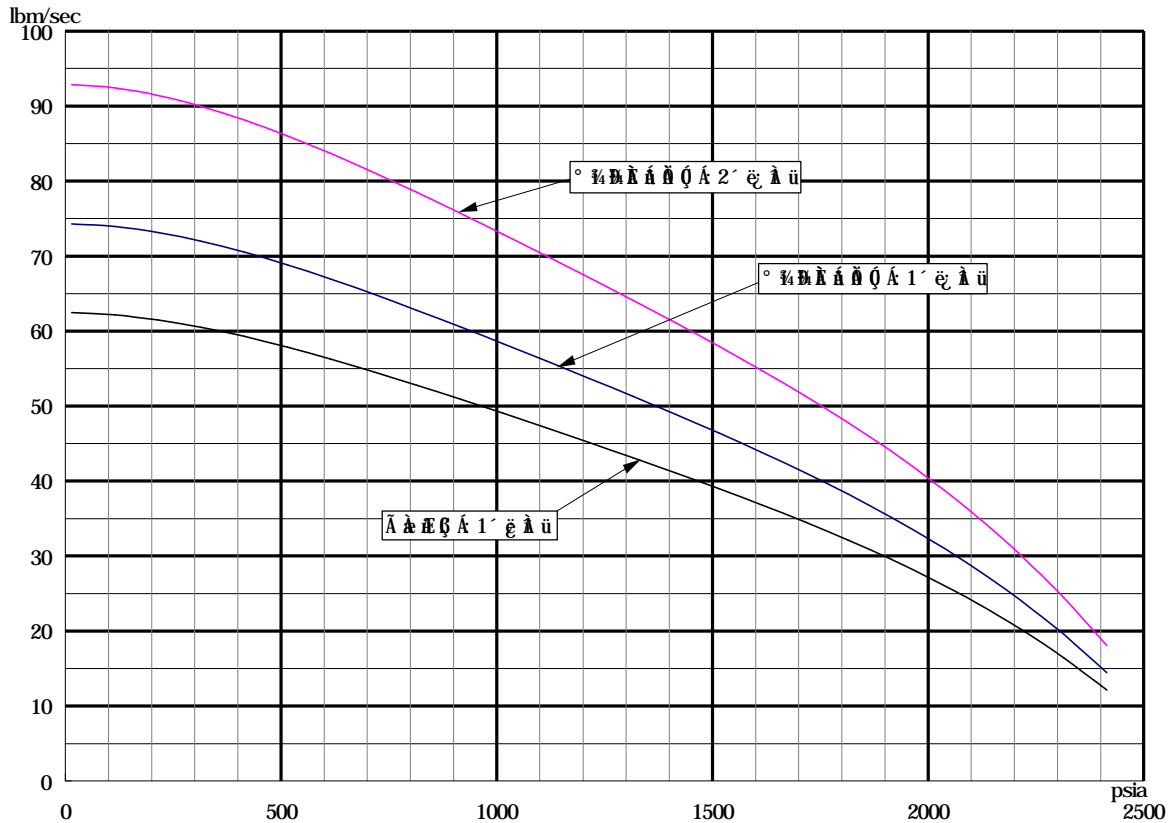


그림1. 원자로 냉각재 압력에 따른 충전/안전주입 펌프 및 충전펌프 유량(단위 : lbm/sec)

## 5. 결과 및 적용

안전주입 유량감량 프로그램을 이용하여 6가지 경우에 대해 안전주입 유량감량 해석을 수행하여 그래프와 표로 작성하여 비상운전절차서에 적용할 수 있도록 배경자료를 작성하였다. 비상운전절차서 과냉각상태로의 회복 및 포화상태로의 회복단계중에서 노심의 압력이 확보되었을 때 안전주입펌프를 줄여서 유량입감량을 하기위한 기준으로 온도와 압력의 불확실도는 큰값을, 안전주입 유량은 적은값을 적용하여 보수적으로 계산하였다. 안전주입감량 해석결과 특징은 안전주입감량 전의 원자로냉각수 유동상태(강제순환 또는 자연순환)는 안전주입 감량기준인 과냉각도에 거의 영향을 끼치지 못한다. 그래서 강제순환과 자연순환의 계산결과는 거의 비슷한 결과를 나타낸다. 각 해석 case별로 Reduce sequence를 결정하는 step은 고압안전주입펌프와 충전펌프의 운전 수량을 줄이는 것이며 고압안전주입펌프가 1대라도 운전되는 경우 운전영역이 넓다는 것을 알수 있으며 충전펌프만 운전되는 경우 주입유량이 상대적으로 적기 때문에 운전영역이 좁다. 포화상태로의 회복을 결정하는 단계는 안전주입유량을 줄이기 전 냉각수압력에서 계산한 계기오차를 적용하며 때문에 운전영역이 상대적으로 넓다. 이러한 해석결과는 비상운전절차서에 적용된다.

표7. 안전주입 유량감량 기준 과냉각도

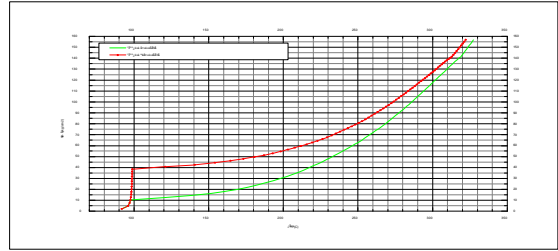
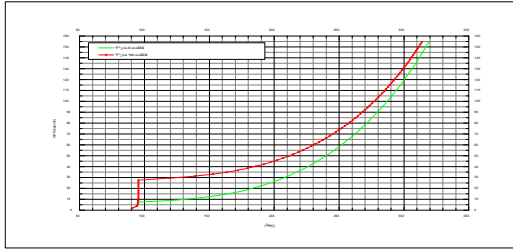
단계	RCP운전중(강제순환)	RCP 정지(자연순환)	과냉각도(포화상태)
		ECA-1.2 STEP 13,14,15 ECA-3.1 STEP 18,19,20 FR-H.1 STEP 23,24,25	
1	2-0-0 <sup>1</sup> ⇒ 1-0-0 (표1, 그림1 참조)	2-0-0 ⇒ 1-0-0 (표3, 그림3 참조)	2-0-0 ⇒ 1-0-0 (표5, 그림5 참조)
2	1-0-0 ⇒ 0-0-1 (표2, 그림2 참조)	1-0-0 ⇒ 0-0-1 (표4, 그림4 참조)	1-0-0 ⇒ 0-0-1 (표6, 그림6 참조)

주1) I-J-K : 펌프 배치 상태 ( I : 붕소주입탱크를 통하여 주입하는 충전/안전펌프 수, J : 고압안전 주입펌프수, K : 정상운전 충전펌프수)

## Reference

1. F.R. Zaloudek, "Steam-Water Critical Flow From High Pressure System", HW-80535, Hanford Atomic Products Operation Richland Wash,1964
2. F.J. Moody, "Maximum Flow Rate of a Single Component", Two Phase Mixture, Journal of Heat Transfer, Tans. ASME Series C Volume 87 No 1 Feb. 1965
3. Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, HP Version 1996
4. Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, LP Version 1996
5. 고리3,4호기 비상운전절차서 고유기술배경서
6. 고리3,4호기 비상운전절차서
7. 영광1,2호기 비상운전절차서 고유기술배경서
8. 영광1,2호기 비상운전절차서

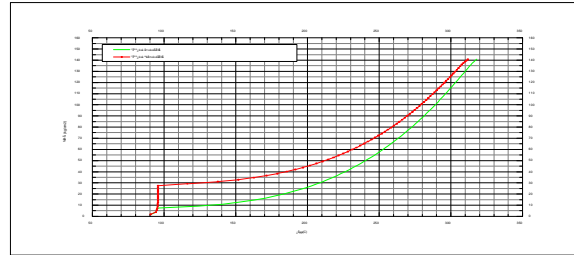
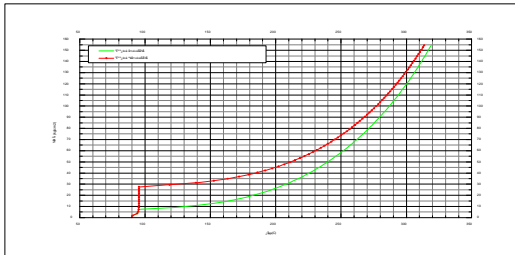




< 2-0-0⇒1-0-0 >

< 1-0-0⇒0-0-1 >

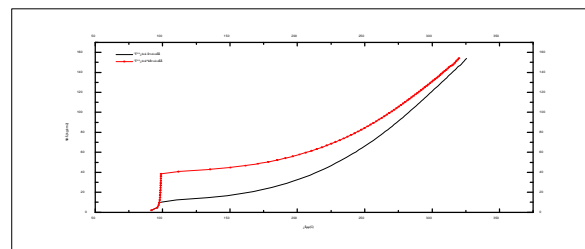
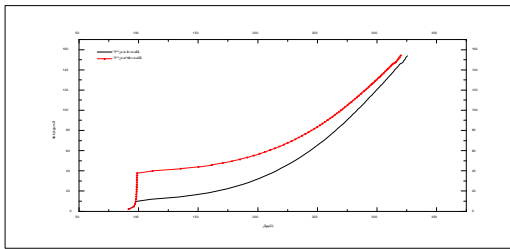
그림2. 3루프 발전소 안전주입감량시 운전제한곡선(과냉각상태회복, 강제순환)



< 2-0-0⇒1-0-0 >

< 1-0-0⇒0-0-1 >

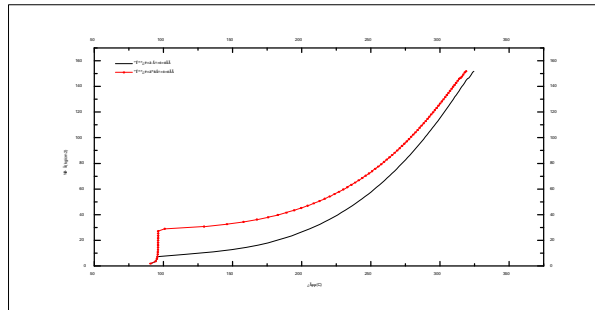
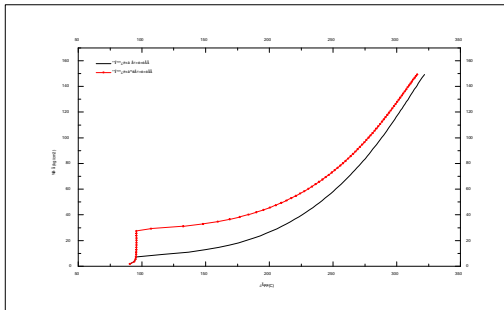
그림3. 3루프 발전소 안전주입감량시 운전제한곡선(포화상태회복)



< 2-2-0⇒1-2-0 >

< 2-1-0⇒1-1-0 >

그림4. 2루프 발전소 안전주입감량시 운전제한곡선(과냉각상태회복, 강제순환)



< 2-2-0⇒1-2-0 >

< 2-1-0⇒1-1-0 >

그림5. 2루프 발전소 안전주입감량시 운전제한곡선(포화상태회복)