

## 한국표준형 원전의 안전주입계통 설계최적화

### Optimization of Safety Injection System Design for Korean Standard Nuclear Power Plant

최한림, 이상일, 김택모, 한기수, 송증효, 김철우,  
최철진, 서종태, 김도현, 오종필, 오광석, 최해운, 양재영

한국전력기술주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150

전태주, 안재민

한국전력공사  
서울특별시 강남구 삼성동 167

#### 요 약

한국표준형 원전의 안전주입계통의 설계최적화를 위하여 인허가된 해석방법론을 적용하여 사  
고별로 안전주입계통 주요기기인 고압안전주입펌프, 저압안전주입펌프 및 안전주입탱크의 용량을  
각각의 변수로 하여 일련의 범위해석을 수행하였다. 해석결과, 고압안전주입펌프 관련해서는 가압  
기에 3-train POSRV 계통을 채택하고, 저압안전주입펌프 관련해서는 정지냉각계통의 열교환기  
용량증대 또는 NSSS 설계요건 완화를 병행할 경우, 원전의 안전성관점에서 안전주입계통 주요기  
기의 용량은 표준원전인 울진3,4호기의 설계용량 대비 75%로 축소설계가 가능한 것으로 평가되었  
다.

#### Abstract

A series of scoping analyses have been performed, using safety analyses methodology  
approved from regulatory authorities, for the safety injection system (SIS) of Korean standard  
nuclear power plant (KSNP) to optimize the designs of the high pressure safety injection  
pump (HPSIP), the low pressure safety injection pump (LPSIP) and the safety injection tank  
(SIT). The result of these analyses provides the possibility of reducing the SIS down 75% of  
current capacity subject to design changes such as adopting a 3-train power operated safety

relief valve (POSRV) system on the pressurizer for HPSIP, and increasing capacity of the heat exchanger of the shutdown cooling system (SCS) or relaxing the design requirements of nuclear steam supply system (NSSS) for LPSIP.

## 1. 서 론

한국표준형 원전(울진3,4호기, 열출력 2815MWt)은 열출력 3800MWt인 SYS80(Palo Verde 원전) 대비 원자로 노심과 용기 및 증기발생기를 축소 설계하였으나, 냉각재 상실사고와 주증기관 파단사고 등 설계기준사고(DBA)뿐만 아니라 완전급수상실사고(TLOFW) 등의 설계기준초과사고(Beyond DBA)시 원자로계통 안전성을 확보하기 위하여 설치된 안전주입계통(SIS)은 표1에서 보듯이 SYS80의 기본설계를 큰 변화없이 그대로 적용함으로써 열출력 대비 안전주입계통 용량이 필요이상으로 크게 설계되어 있을 가능성이 높다. 따라서 원전의 안전성 확보와 관련계통에 대한 최적설계 영향 등의 평가결과를 근거로 안전주입계통의 과도한 설계보수성이 확인될 경우 계통의 최적화가 필요하다.

## 2. 본 론

표준원전의 설계최적화 개념을 정립하기 위해, 안전주입계통 주요기기의 용량 최적화는 현재 인허가된 해석방법론 및 허용기준 (Acceptance Criteria)을 동일하게 적용하며, 이의 내용은 울진 3,4호기 최종안전성분석보고서[1]에 자세히 기술되어 있다. 한편 이러한 계통설계 및 안전해석 방법론을 사용하여 관련 기기 용량 최적화를 수행하기 위해 안전주입계통의 주요기기인 고압안전주입 펌프, 저압안전주입펌프 및 안전주입탱크용량을 변수로서 안전계통의 작동이 요구되는 사고별 범위해석(Scoping Analysis)을 수행하였다.

### 2.1 냉각재상실사고(LOCA)관련 안전해석

#### 가) 소형냉각재상실사고(SBLOCA)

SBLOCA 관점에서 안전주입계통의 관련기기인 HPSIP 및 SIT의 용량을 변경시키며 수행한 scoping 해석결과는 참고문헌2의 불임1에 상세히 기술되어 있다. SIT용량에 따른 영향을 많이 받는 상대적으로 큰 소형파단( $0.5 \text{ ft}^2 / 465 \text{ cm}^2$  토출관 파단)에 대해 SIT용량 변화에 대한 민감도해석을 한 결과 SIT용량을 60% (100% HPSIP용량 기준)까지 줄일 수 있는 것으로 밝혀졌다. HPSIP용량에 영향을 많이 받는 상대적으로 작은 소형파단 ( $46.5 \text{ cm}^2$  토출관 파단)에 대해 HPSIP

유량을 60% (75% SIT 용량기준)까지 줄일 수 있음을 보였다. 그리하여 SIT와 HPSIP의 용량을 동시에 올린 3,4호기 SIS 용량 대비 60%까지 줄여도 비상노심냉각계통(ECCS) 성능평가 허용기준을 만족함을 확인하였다.

#### 나) 대형냉각재상실사고(LBLOCA)

LBLOCA 관점에서 SIT 및 LPSIP의 용량을 변경시키며 수행한 scoping 해석결과는 참고문헌2의 붙임 2와 3에 기술되어 있다. LBLOCA 초기인 취출(blowdown)단계와 재충수(refill)단계 및 재관수(reflood) 초기 단계에 열수력학적으로 큰 영향을 미치는 SIT는 60% (100% HPSI와 100% LPSI 펌프유량 기준)까지 축소설계를 하더라도 ECCS 성능평가 허용기준을 만족하는 결과를 보인다. 그러나 이는 격납건물 압력 및 온도해석관점에서 보면 바람직하지 않다. 왜냐하면 안전주입탱크의 용량이 작아질수록 고갈시점이 빨라져서 원자로냉각재계통(RCS)내의 증기 응축이 덜 이루어져 격납건물 압력을 높이기 때문이다. 그리하여 SIT와 HPSIP를 75%로 축소한 경우를 가정하여 LPSIP 용량축소를 위한 범위해석 결과 50% (75% SIT 용량과 75% HPSI 펌프유량 기준) 이상이면 ECCS 성능기준을 만족한다.

#### 다) 격납건물 압력 및 온도

LBLOCA시 격납건물로의 질량 및 에너지(M/E) 방출량에 영향을 주는 SIS의 주요기기는 SIT, LPSIP, HPSIP이 있다. 격납건물의 압력 및 온도(P/T)관점에서 분석하기 전, 먼저 M/E 방출량을 계산하여야 한다. 참고문헌2의 붙임 4에 따르면 SIT 용량이 축소되면 탱크유량이 일찍 고갈되고 RCS의 높은 에너지를 덜 냉각시켜 격납건물로의 누적 M/E 방출량은 다소 증가한다. 이는 증기발생기(SG)세관을 통과한 과열된 증기가 SIT로부터 유입되는 유량에 의하여 응축되는데 SIT 용량이 작을수록 고갈시점이 빨라져 응축되는 양이 적어지기 때문이다. 그리고 SIT 고갈이후인 취출후 단계에서는 HPSIP 및 LPSIP 유량이 감소하면 RCS에서 격납건물로 쏟아져나가는 LOCA M/E 방출량이 줄어 격납건물 압력을 높이지 못하는 관계로 격납건물 압력 설계여유도가 증가하는데, 이는 범위해석을 위한 제한사항으로 작용하지 않기 때문에 2.1의 가)와 나)항에서 고려된 HPSIP 및 LPSIP 유량 축소범위로 정한다. 따라서 격납건물로의 LOCA M/E 방출량으로 인한 격납건물의 압력 및 온도 관점에서 격납건물 압력 설계여유도가 만족되는 안전주입탱크는 75% 용량(LPSIP와 HPSIP의 75% 용량기준)으로 축소설계가 가능하다.

## 2.2 비냉각재상실사고(Non-LOCA) 및 기타 관련계통 사고

### 가) 주증기관 파단(MSLB) 사고

안전주입(SI) 유량이 감소할수록 MSLB 사고시 재임계 도달 가능성이 증가하게 되나 60%까지의 HPSI 유량에 대해서는 원자로 정지 후 재임계에 도달하지 않는 것으로 나타났으며, 그 이하의 HPSI 유량에 대해서는 재임계에 도달하는 것으로 나타난다. 이 경우 핵연료 손상 정도를 평가하는 새로운 해석방법이 필요하나 기존의 해석방법을 적용하는 것이 인허가 관점에서 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. LPSIP 및 SIT로부터의 안전주입유량은 MSLB에 미치는 영향이 없다. 이와 관련한 해석결과는 참고문헌2의 붙임 5에 기술되어 있다.

#### 나) 기타 Non-LOCA 관련사고

MSLB외에 안전주입유량과 관련이 있는 Non-LOCA로서 증기발생기 세관파단(SGTR) 및 가압기 수위제어계통(PLCS) malfunction 등을 선정하였으나 이중 SGTR은 관련 요건이 제공되지 않으며, PLCS malfunction과 관련한 안전주입 최대유량요건은 현 표준원전 설계에 대한 기존의 안전해석 결과에 근거한 것으로 인허가상의 추가적인 문제는 예상되지 않는다.

#### 다) 안전감압계통(SDS)설계를 위한 완전급수유량상실(TLOFW) 사고

한국표준형 원전의 원형인 영광3&4호기 SDS의 'Feed and Bleed' 개념설계는 이미 설계된 SIS을 기준으로 설계가 이루어짐으로써 현재의 SDS 설계를 유지하는 경우 2.1 가)항에서 도출된 HPSIP 용량 축소설계 여유가 없음을 참고문헌2의 붙임 6에서 보여주고 있다.

#### 라) POSRV 계통설계를 위한 완전급수유량상실사고

HPSIP 용량을 75%로 축소하고, 기존의 2 Train SDS 밸브를 3 Train POSRV로 교체하여 TLOFW사고, 부주의한 POSRV 개방(IOPOSRV) 사고 및 급수관파단(FWLB) 사고 각각에 대한 분석을 수행하였다. TLOFW사고 분석결과 기존의 SDS를 이용하면 사고의 허용기준을 만족할 수 없으며, 3 Train의 POSRV(cold Solution Type)를 채택하는 경우 허용기준을 만족할 수 있는 것으로 나타났다. IOPOSRV 사고시에도 75% HPSI 유량 조건으로 사고의 허용기준을 만족하는 것으로 보이나 POSRV 사고 조건(Condition) 분류에 따라 핵연료설계제한치(SAFDL)를 만족시키지 못하는 경우가 발생할 수 있어 인허가 쟁점사항이 될 수 있을 것으로 판단되어 상세분석이 요구된다. FWLB 사고 분석 결과도 가장 보수적인 0.2 ft<sup>2</sup> 파단 사고시 RCS 최대 압력이 '낮은 확률 사고(Low Probability Events), Condition IV 사고'에 대한 허용치인 설계압력의 110%를 초과하는 것으로 나타난다. 이러한 해석결과는 참고문헌2 붙임 7에 기술되어 있다.

#### 마) 정지냉각계통(SCS) 설계관점

2.1 나)와 다)항의 결과는 LPSIP 유량에 대한 축소설계 여유가 있을 것으로 판단되지만, 참고 문헌2 붙임 8에 의하면 기존 LPSIP 유량은 SCS의 열교환기 설계에 이미 반영됨으로써 LPSIP 용량축소시 설계 최적화를 위해서는 정지냉각계통 열교환기(SCS Hx)의 용량증대가 병행되거나 또는 NSSS 설계요건인 '원자로 정지후 27.5시간 내에 재장전 온도인 125°F에 도달'을 완화시키는 방안을 고려할 수 있다.

위와 같이 안전주입계통의 주요기기인 HPSIP, LPSIP, SIT와 관련한 사고해석 및 설계 관점에서의 영향평가를 한 결과는 표2와 같이 요약 정리된다.

### 3. 결 론

한국표준형 원자력발전소의 설계개선사업 일환으로 수행된 안전주입계통 설계최적화를 위해, 인허가된 해석방법론 및 허용기준을 동일하게 적용하고, 안전주입계통의 고압안전주입펌프, 저압안전주입펌프 및 안전주입탱크 용량을 변수로 하여 안전계통이 요구되는 사고에 대한 범위해석(Scoping Analysis)을 수행하였다. 해석결과에 따르면 원전의 안전성관점에서 안전주입계통 주요 기기의 용량은 한국표준형 원전인 울진3,4호기의 설계용량에 비하여 75%로 축소설계가 가능한 것으로 평가되었다. 그러나 이 평가된 축소량은 고압안전주입펌프에 대해서는 가압기에 3-train POSRV 계통이 채택되고, 저압안전주입펌프에 대해서는 정지냉각계통 열교환기 용량증대 또는 NSSS 설계요건 완화가 병행되어야하는 전제가 내포되어 있다. 한편 이러한 기기용량 축소설계는 추후 상세설계시 심도있는 계통설계 및 관련 타 설계분야간의 긴밀한 협조가 뒷받침되어야 가능 하리라 판단된다.

### 참고문헌

1. 한국전력공사, 울진3,4호기 최종안전성 분석보고서,
2. 한국전력공사, 한국표준형 원전의 설계개선(안전주입계통 설계최적화) 과제검토서(초안), 1998.12.15.

표 1 울진3,4호기와 Palo Verde 원전의 용량비교

	설계변수	Palo Verde (Sys80)	울진3,4호기 (KSNP)
고압 안전주입펌프	정격유량(gpm)	815*	815*
	정격수두(ft)	2850	2850
	Runout Flow(gpm)	1130*	1130*
	Runout Head(ft)	1580/2250	1580/2250
	Shutoff Head(ft)	4100/4530	4100/4530
	최소우회 유량(gpm)		85
저압 안전주입펌프	정격유량(gpm)	4200*	3850*
	정격수두(ft)	335	335
	Runout Flow(gpm)	5000*	4670*
	Runout Head(ft)	290/320	290/320
	Shutoff Head(ft)	410/470	410/470
	최소우회 유량(gpm)	100	450
안전주입탱크	Normal Fluid Volume (gal)	13898	13898

\* 최소우회유량 제외

표 2 안전주입계통 기기별 관련한 사고해석관점에서의 기기용량 최적화 평가결과 요약

사고/설계해석	고압안전주입펌프	저압안전주입펌프	안전주입탱크
SBLOCA	> 60*	N/A**	> 60
LBLOCA	> 75	> 50	> 75
격납건물 M/E & P/T	> 75	> 75	> 75
SLB	> 60	N/A	N/A
TLOFW	100***	N/A	N/A
SCS Hx용량	N/A	100****	N/A

\* 한국표준형 원전의 SIS 용량기준은 100 % (단위%)

\*\* N/A: Not Applicable

\*\*\* 3 Train POSRV 채택시 75% 용량축소 가능

\*\*\*\* 현 계약요건인 27.5 시간을 35시간으로 완화시 용량축소 가능