

## 차세대원전에 대한 POSRV의 작동 설정치 분석 Setpoint Analysis of POSRV for KNGR

박민수, 김철우, 최철진, 이상용, 서종태

한국전력기술주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

차세대원전의 원자로냉각재계통 과압보호를 위한 안전밸브로서 Pilot Operated Safety Relief Valve (POSRV)가 채택됨에 따라 밸브의 작동 설정치를 결정하기 위한 민감도 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 복수기 진공상실 사건과 부주의한 (Inadvertant) POSRV 개방 사건에 대한 민감도 분석 결과를 기술하였다. 이들 사건을 사용한 민감도 분석에서는 원자로 노심 입구온도, 원자로냉각재 유량, 가압기 압력 및 냉각재 체적, 증기발생기 수위 등에 따른 다양한 POSRV 작동 설정치를 가정하였다. 초기조건에 대한 민감도 분석 등의 결과에 따라 결정된 가장 보수적인 초기조건하에서 원자로냉각재계통 첨두압력과 최소 핵비등이탈률이 관련 허용기준(설계압력의 110% 미만과 허용핵연료설계제한치 이상)을 만족하는 작동 설정치를 선정하여 POSRV 설계의 적절성을 검증하였다.

### Abstract

*In accordance with adoption of POSRV, as a safety valve to protect overpressure of reactor coolant system for KNGR, the sensitivity study were performed to determine the actuation setpoint of POSRV. The results of the sensitivity studies for the loss of condenser vacuum and the inadvertant opening of POSRV were described in this paper. Various actuation setpoint of POSRV were assumed for sensitivity study in conjunction with initial conditions, that is, the core inlet temperature, reactor coolant flow, pressurizer pressure and level, and steam generator water mass. The actuation setpoint of POSRV was determined so that the results of these sensitivity studies under the most conservative conditions could meet the acceptance criteria (below 110% of design pressure and above the specified acceptable fuel design limit) and it was verified that the design of POSRV was pertinent to KNGR.*

## 1. 서론

차세대원전은 일차측 과압보호를 위한 가압기 안전밸브로서 기존 발전소의 스프링장착 가압기안전밸브 (Pressurizer Safety Valve) 대신 Pilot Operated Safety Relief Valve (POSRV)를 채택하였으며, 이로 인해 영향을 받는 비냉각재 상실사고는 주급수관 파단 (FWLB) 사고, 복수기 진공상실 (LOCV) 사건, 부주의한 POSRV 개방 (IOPOSRV) 사건 등이 있다. 그러나 POSRV 작동 설정치에 가장 큰 영향을 미치는 사건으로서 LOCV와 IOPOSRV 사건을 선정하여 POSRV 작동 설정치를 결정하고 이에 대한 적절성을 평가하고자 한다.

LOCV 사건은 일차계통의 열제거능력 상실로 인해 일차계통의 압력이 상승하는 사건이며, IOPOSRV 사건은 일차계통의 압력이 감소하는 사건이다. 따라서 POSRV 작동 설정치는 LOCV와 IOPOSRV 사건으로 인한 원자로냉각재계통 (RCS)의 첨두압력과 최소 핵비등이탈률 (DNBR)이 각각 허용기준인 설계압력의 110%인 2750 psia와 허용핵연료설계제한치 (SAFDL)인 1.3을 만족하도록 결정되었으며, 이를 위해 주증기안전밸브 (MSSV)의 작동논리 및 설정치도 조정하였다. 본 분석에서는 POSRV 설계관점에서 제시된 두가지의 최소용량 (485,000 lbrn/hr/valve 및 540,000 lbrn/hr/valve)에 대하여 POSRV 작동 설정치를 평가하였다. LOCV 사건에 가장 큰 영향을 주는 POSRV 유량은 최소유량이므로 POSRV의 최소용량에 대한 작동 설정치 분석을 수행하였으며, POSRV 최대유량은 설계관점의 허용 최대치를 적용하여 결정되는데 이 값은 IOPOSRV 사건에 적용되었다.

POSRV 설계를 위한 민감도 분석에서는 POSRV를 모사할 수 있도록 CESEC-III 전산 프로그램[2]을 수정하여 NSSS 열수력학적 거동을 분석하였고, CETOP-D 전산프로그램 [3]을 이용하여 핵비등이탈률 (DNBR)을 분석하였다.

## 2. 사건 개요 및 POSRV 설계 특성

복수기 진공상실 (LOCV) 사건은 냉각수를 공급하는 순환수계통의 파손, 비응축성 기체를 제거하는 주 복수기 진공계통의 파손 또는 터빈 글랜드 (gland) 를 통한 공기의 과잉누설 때문에 발생하는 사건으로서 일차계통에 의한 열제거 상실로 인해 일차계통의 압력이 급속히 상승하는 사건이다. LOCV 사건으로 인한 원자로냉각재계통 (RCS)의 첨두압력은 설계압력의 110%를 초과해서는 안된다.

부주의한 POSRV 개방 (IOPOSRV) 사건은 한 개의 POSRV가 부주의하게 개방되어 일차계통의 압력을 감소시켜 핵연료 손상을 초래할 수 있는 사건이다. IOPOSRV 사건은 안전기능의 POSRV와 직렬로 설치된 POSRV 격리밸브가 닫히면 일차측 압력감소가 정

지된다. IOPOSRV 사건으로 인한 핵비등이탈률 (DNBR) 은 허용핵연료설계제한치 (SAFDL) 이상으로 유지되어야 한다.

한편, 차세대 원전에 채택된 POSRV는 직렬로 연결된 안전밸브와 격리밸브가 서로 접합되어 하나의 밸브 집합체를 이루고 있다. 안전밸브와 격리밸브는 같은 구조로 되어 있으며 안전밸브는 U 모양의 밀봉수 배관 (loop seal)을 통해 가압기와 연결되어 있어 가압기 증기와외 직접 접촉에 의한 안전밸브 시트 손상을 방지할 수 있다. 표 1은 차세대원전 설계에 고려된 POSRV와 기존 발전소에 설치된 PSV (Pressurizer Safety Valve)에 대한 특성을 나타내고 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 안전밸브는 정상 운전시 닫혀 있다가 설정치에 도달하면 일정시간 (dead time)이 경과한 후 열리기 시작하여 과압방지 기능을 수행하며, 격리밸브는 정상운전시 열려 있다가 압력이 설정치 이하로 떨어지면 일정시간 (dead time)이 경과한 후 닫히기 시작하여 냉각수의 유출을 방지하는 기능을 수행한다. 특히 U 모양의 밀봉수 배관에는 온도차에 의한 응축수가 항상 존재하므로 압력이 개방 설정치에 도달시 약간의 지연시간 (water plug 방출시간)을 갖고 밸브가 열리게 되며 Water Plug의 영향은 최초 개방시에만 적용된다. 이와 같은 POSRV 특성은 설정치에 도달시 즉시 개방 (pop open)되어 가압기 압력을 감소시키는 PSV와 완전히 다른 압력 거동을 나타내므로 사건 진행 동안 일차계통의 압력이 약 1초에 100 ~ 150 psia가 상승하는 LOCV 사건에 많은 영향을 준다. 사건 분석시에는 표 2의 POSRV와 MSSV의 특성이 사용되었다. 특히 MSSV의 작동논리에 대한 논의는 4절에 기술되어 있다.

### 3. 초기조건에 대한 민감도 분석

민감도 분석에서는 모든 밸브가 동시에 작동하는 동시 개방 및 폐쇄 설정치를 가정하였다. LOCV 사건에 대한 민감도 분석에서는 CESEC-III 전산프로그램[2]에 사용된 초기 조건들 중 특히 원자로 노심 입구 온도, 원자로냉각재 유량, 가압기 압력 및 냉각재 체적, 증기발생기 수위 등의 다양한 조합이 해석 결과에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 각각의 초기 조건들이 사건에 미치는 영향은 다음과 같다.

그림 1은 초기 원자로 노심입구 온도에 대한 원자로냉각재계통 (RCS) 첨두압력의 변화를 나타내고 있다. 초기 노심입구 온도가 감소할수록 높은 RCS의 첨두압력을 나타내는데 이는 노심입구 온도가 감소할수록 초기 이차측 압력이 낮으므로 주증기안전밸브 (MSSV)의 개방시점을 지연시키고 따라서 MSSV 개방에 의한 일차계통의 가압방지가 늦게 발생하기 때문이며, 가압기 고압력에 의한 원자로 정지 후에도 RCS를 계속 가압시켜 높은 첨두압력이 발생하게 된다.

초기 원자로냉각재유량은 민감도 분석결과 RCS 압력변화에 심각한 영향을 주지 않았다. 그러나 그림 2에서 보는 바와 같이 최대유량이 조금 더 높은 RCS 첨두압력을 초래

하는 것으로 나타났다.

그림 3에서 보는 바와 같이 초기 증기발생기 냉각수 수위가 감소할수록 RCS 첨두압력은 증가한다. 이는 초기 수위 감소로 인한 이차계통의 열제거능력이 감소되어 일차계통의 압력을 상승시키는 요인으로 작용하였기 때문이다.

그림 4와 그림 5는 각각 초기 가압기 냉각재 수위와 압력에 대한 RCS의 첨두압력을 나타내고 있으나 결과에 큰 영향을 보이지 않는 것으로 나타나고 있다. 그러나 이들은 상호 종속적인 관계를 갖고 RCS 첨두압력에 영향을 미치므로 가장 제한적인 결과를 평가해야 한다.

그림 4에서 보는 바와 같이 초기 가압기 냉각재 수위가 증가할수록 RCS 첨두압력은 증가한다. 이는 초기 수위가 높을 경우, 가압기내의 포화증기의 체적이 초기 수위가 낮은 경우보다 상대적으로 감소하므로 사건 초기의 급속한 압력 상승시 완충작용을 하지 못해 가압기와 RCS의 압력이 더욱 빨리 증가하기 때문인 것으로 나타났다. 이때 증기발생기 저압력에 의한 원자로정지는 보수적으로 신뢰하지 않았다.

초기 가압기 압력의 경우, 초기 가압기 압력이 높으면 가압기 고압력에 의한 원자로정지 시점과 POSRV 개방 설정치에 빨리 도달하게 되고 이에 따라 RCS의 첨두압력이 감소하게 된다. 그러나 그림 5에서 보는 바와 같이 2250 psia에서 RCS의 첨두압력은 최대값을 나타내었으며, 이 압력을 중심으로 증감시 RCS 압력은 감소한다. 이는 초기 가압기 압력 감소시 POSRV의 개방시점이 늦게되어 MSSV가 POSRV보다 상대적으로 일찍 개방되고 이로 인해 이차계통에 의한 열제거 현상이 발생되어 RCS 압력이 감소하기 때문이다. 또한 초기 가압기 압력 증가시 가압기 고압력에 의한 원자로 정지와 POSRV 개방이 초기 압력이 낮을 때 보다 상대적으로 빨리 발생하고 이로 인한 일차계통의 압력 감소에 직접적으로 영향을 주기 때문이다.

상기에서 언급한 초기조건들의 영향을 고려해서 다양한 조합을 만들어 LOCV 사건을 분석한 결과, 사고 후 RCS의 첨두압력은 MSSV가 POSRV보다 늦게 열리되 가능한 서로 근접 (약 1초)해서 발생할 때 나타났으며, 사건 발생에 따른 RCS의 가압상승률과 가압기간을 길게할 때 가장 높은 첨두압력이 나타났다. 가장 제한적인 주요 초기조건들은 표 3에 나타난 바와 같다.

IOPOSRV 사건의 경우 핵연료 건전성 관점에서 최소 핵비등이탈률 (DNBR)을 초래하도록 표 3과 같이 CETOP-D 전산프로그램[3]을 위한 초기조건들이 선정되었다. 일반적으로 원자로 출력과 노심입구 온도가 높을수록, 원자로냉각재 유량과 계통 압력이 낮을수록 더 낮은 최소 DNBR이 발생하고, 운전제한조건에서의 반경방향 첨두계수 (Radial Peaking Factor)가 클수록 DNBR은 낮아진다. 그러나, 표 3에서 보는 바와 같이 초기 가압기 압력은 최대값으로 결정되었다. 이는 민감도 분석 결과 상기 초기조건들보다 반경방향 첨두계수가 핵비등이탈률에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다. 즉 초기 가압기 압력이

높으면 압력이 낮을때보다 상대적으로 반경방향 침투계수가 더 커지고 이때 더 낮은 최소 DNBR을 초래하였다.

#### 4. POSRV 작동 설정치에 대한 민감도 분석

앞에서 결정된 보수적인 초기조건들을 사용하여 POSRV 용량과 작동 설정치 변화에 따른 분석을 수행하였다. POSRV 용량은 설계관점에서 제시된 두 가지의 최소 밸브용량 즉, 밸브 당 485,000 lbn/hr 및 540,000 lbn/hr의 최소 밸브유량을 선정하였으며, 밸브 작동 설정치는 일차계통 설계압력인 2500 psia를 기준으로 선정하였다. 특히, 작동 설정치의 하한값은 가압기 용량과 관련된 KURD[4]의 요건중 정상 운전에서 가압기안전밸브가 열리지 않도록 하는 요건과 SRP (Standard Review Plan)[5]의 일차계통의 과압보호 요건을 동시에 만족시키기 위해 2480 psia (불확실도 17 psia 포함)로 가정하였다. 따라서 표 4는 POSRV 개방(동시개방) 설정치를 2480 psia에서 일차계통 설계압력인 2500 psia 까지 변화시킨 경우의 복수기 진공상실 (LOCV) 사건에 대한 분석 결과를 나타낸다.

분석 결과, 밸브 용량이 작은 경우가 다소 높은 침투압력을 나타내었으나 POSRV 개방 설정치를 높일수록 높은 침투압력을 나타내었다. 이는 표 4에 주어진 바와 같이 밸브 용량이 작을수록 POSRV 개방에 따른 가압기의 압력 감소가 적으므로 침투압력이 높게 되고, 가압기 고압력에 의한 원자로정지 설정치 (2404 psia) 및 주증기안전밸브 (MSSV)의 개방 시점이 일정할 때에는 POSRV 개방시점이 늦을수록 더 높은 침투압력을 나타내기 때문이다. 표 4에서 보는 바와 같이 RCS의 최대 침투압력은 Case 4, 7 및 8 만이 허용기준인 설계압력의 110% (2750 psia)보다 낮게 나타났으나, 안전해석의 여유도를 고려하여 Case 8을 POSRV 최소 용량과 작동 설정치로 결정하였다. 또한, 표 4는 침투압력이 밸브의 용량보다는 작동 설정치에 따라 민감한 변화를 나타냄을 보여주고 있다.

POSRV 격리밸브의 최소 폐쇄 설정치를 결정하기 위한 분석시, CESEC-III 전산프로그램[2]에는 POSRV 격리밸브의 모델이 없으므로 POSRV 중 한 개의 폐쇄 설정치를 POSRV 격리밸브의 폐쇄 설정치로 가정하였다. 폐쇄 설정치의 상한값은 정상운전 중 격리밸브가 닫히지 않고 원자로정지 후 최소 핵비등이탈률 (DNBR)이 허용핵연료설계제한치 (SADFL) 이하로 떨어지지 않는 조건을 동시에 만족하도록 설정되었다. 이와 같은 초기조건과 가정을 사용하여 POSRV 격리밸브 폐쇄 설정치에 따른 분석 결과는 표 5에 나타난 바와 같이 POSRV 격리밸브의 폐쇄 설정치가 낮을수록 최소 DNBR은 점점 낮아졌으나 모두 SADFL (1.3)을 만족하였다. 그러나 안전해석의 여유도를 고려하여 Case 1의 2098 psia를 POSRV 격리밸브의 최소 폐쇄 설정치로 결정하였다. 또한, 민감도 분석에서 사용된 MSSV의 작동 논리는 사건 발생시에도 일차계통과 이차계통의 건전성을 유지하도록 동시개방으로 선정하였다.

표 6과 그림 6은 MSSV의 다양한 작동 논리에 따른 RCS 첨두압력을 보여주고 있으며, 첫 번째 Bank의 밸브수가 RCS 첨두압력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표 6에서 보는 바와 같이 Case 1과 2는 RCS 첨두압력이 허용기준을 만족하지 않는 것으로 나타났으며 Case 3, 4 및 5는 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 안전해석의 여유도를 고려하여 Case 5의 MSSV 동시개방을 선정하였으며, 증기발생기의 압력이 설정치에 도달하면 모두 동시에 개방되어 일차계통의 압력을 감소시키도록 하였다.

#### 4. 결론

초기조건 민감도 분석을 통해 얻은 가장 보수적인 조건하에서 다양한 POSRV 작동 설정치에 따라 분석을 수행한 결과, 540,000 lbm/hr/valve의 최소유량을 갖는 POSRV의 최대 개방 설정치는 2480 psia, 격리밸브의 최소 폐쇄 설정치는 2098 psia로 결정하였다. 이들 설계값을 적용하여 설계기준사건인 복수기 진공상실 (LOCV) 사건 및 부주의한 POSRV 개방 (IOPOSRV) 사건 해석을 수행한 결과 원자로냉각재계통 (RCS) 첨두압력은 허용기준인 2750 psia보다 작은 2744 psia로 나타났으며, 최소 핵비등이탈률 (DNBR)은 허용핵연료설계제한치 (SAFDL)인 1.3 보다 큰 1.54로 나타났다[1]. 따라서 상기에서 결정된 POSRV의 작동 설정치는 안전해석 허용기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

분석시 선정된 주증기안전밸브 (MSSV)의 동시개방은 기존 발전소에서 채택된 적이 없으므로 설계 관점에서 보다 깊이있는 검토와 함께 이로 인한 영향 평가를 수행할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- [1] KNGR SSAR CHAPTER 15, KEPCO.
- [2] "CESEC Digital Simulation of a Combustion Engineering Nuclear Steam Supply System," CE-CES-78-REV O-P, May 1987.
- [3] "CETOP-D Code Structure and Modeling Methods for Arkansas Nuclear One - Unit 2," CEN-214(A)-NP, July 1982.
- [4] "Korean Utility Requirement Document," KEPCO, Rev.0, Jun, 1988.
- [5] NUREG-0800, "Standard Review Plan," July 1981.

표 1. POSRV 및 PSV 설계 특성

인 자	POSRV	PSV**
지연(dead) 시간, 개방/폐쇄 (초)	0.3/0.3	N/A
행정(stroke) 시간, 개방/폐쇄 (초)	1.7/1.7	0.02/0.02
Water Plug 방출시간 (초)	0.25	N/A
불확실도, 개방/폐쇄 (psia)	± 17	±40/Blowdown 18.4%
작동 특성	4개 동시 작동	3개 동시 작동
최대유량 (lbm/hr/valve)	630,000	630,000
최소유량 (lbm/hr/valve)	540,000*	460,000

\* 민감도분석에 의해 결정된 값임  
 \*\* PSV : Pressurizer Safety Valve

표 2. 사건 분석에 사용된 POSRV 및 주증기안전밸브 특성

인 자	사용된 값	
	복수기 진공상실 사건	부주의한 POSRV 개방 사건
POSRV		
작동 특성	4개 동시 작동	N/A
최대유량 (lbm/hr/valve)	N/A	630,000
최소유량 (lbm/hr/valve)	540,000	N/A
주증기안전밸브		
작동 설정치 (psia)	1206.5	1206.5
최소유량 (lbm/hr/all valves)	1900,000	1900,000
Blowdown/Accumulation, %	5.0/3.0	5.0/3.0
불확실도, 개방/폐쇄 (%)	± 1	± 1
작동 특성	5 Bank 동시 작동	N/A

표 3. 주요 초기 조건

인 자	사용된 값	
	복수기 진공상실 사건	부주의한 POSRV 개방 사건
노심 출력 (정격출력의 102%, MWt)	4062.66	4062.66
가압기 압력 (psia)	2259	2325
원자로냉각재 유량 (정격 유량의 %)	116	95
노심 입구 온도 (°F)	550	565
가압기냉각재 체적 (ft <sup>3</sup> )	1384	1384
증기발생기 수위 (%WR)	40.7	97.1
가압기고 압력에 따른 원자로정지 설정치 (psia)	2404	2404
반경방향 침투계수 (Fr)	N/A	1.41

**표 4. LOCV 사건시 POSRV 최소 벨브유량 및 작동 설정치에 따른 원자로냉각제 계통 침투압력**

Case	POSRV		HPPT** 발생 (초)	MSSV*** 개방시간 (초)	POSRV 개방시간 (초)	RCS 침투압력 (psia)
	개방설정치* (psia)	용량 (lbm/hr)				
1	2500	485,000	4.41	5.53	4.80	2767
2	2494	485,000	4.41	5.53	4.72	2761
3	2485	485,000	4.41	5.53	4.62	2753
4	2480	485,000	4.41	5.53	4.56	2748
5	2500	540,000	4.41	5.53	4.80	2764
6	2494	540,000	4.41	5.53	4.72	2758
7	2485	540,000	4.41	5.53	4.62	2749
8	2480	540,000	4.41	5.53	4.56	2744

- \* 개방설정치는 불확실도 +17 psia가 포함됨.
- \*\* HPPT : High Pressurizer Pressur Trip
- \*\*\* MSSV : Main Steam Safety Valve

**표 5. IOPOSRV 사건시 POSRV 격리벨브 작동 설정치에 따른 최소 핵비등이탈률**

Case	폐쇄 설정치* (psia)	최소 핵비등이탈률
1	2098	1.54
2	2078	1.53
3	2020	1.45
4	1998	1.43

- \* 폐쇄설정치는 불확실도 -17 psia가 포함됨.

**표 6. LOCV 사건시 MSSV 작동 논리에 따른 원자로냉각제 계통 침투압력**

Case	MSSV 작동 논리*	RCS 침투압력 (psia)
1	1/1/3	2752
2	1/2/2	2752
3	3/1/1	2747
4	3/2/0	2747
5	5/0/0	2744

- \* MSSV는 주증기관 (2개/증기 발생기)마다 5개가 설치되어 있으며 발전소에 총 20개가 설치됨. 작동 논리는 Back당 벨브수 (주증기관 1개당)를 나타내며, 각 Bank의 MSSV 개방 설정치는 1180/1205/1230 psig에 1%의 불확실도를 더한 것임.



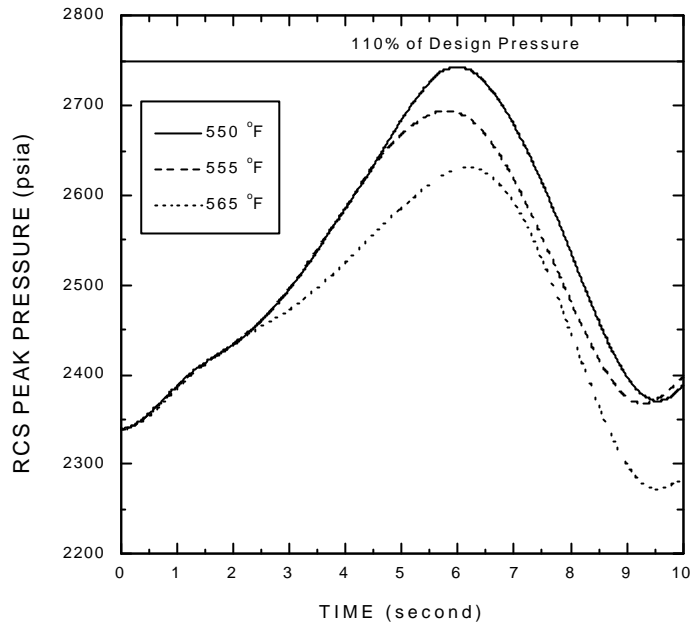


그림 1. 초기 노심입구 온도에 따른 원자로냉각재계통 침투 압력

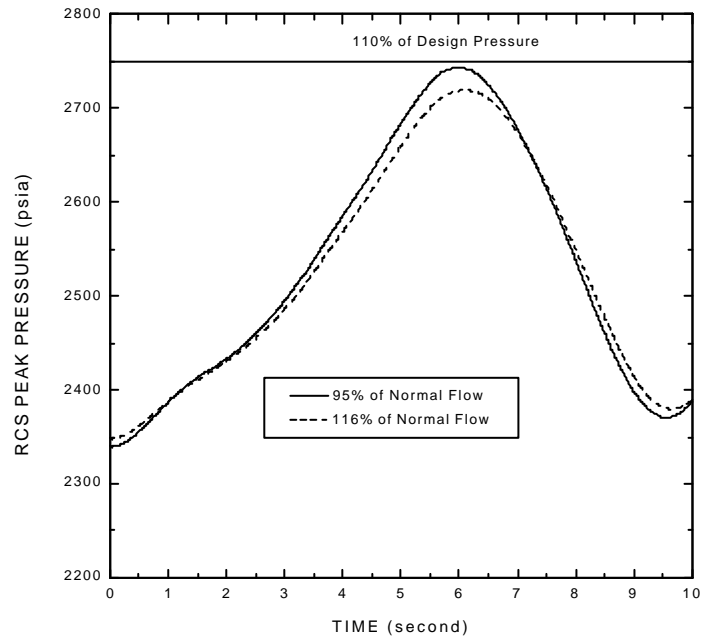


그림 2. 초기 원자로냉각재 유량에 따른 원자로냉각재계통 침투 압력

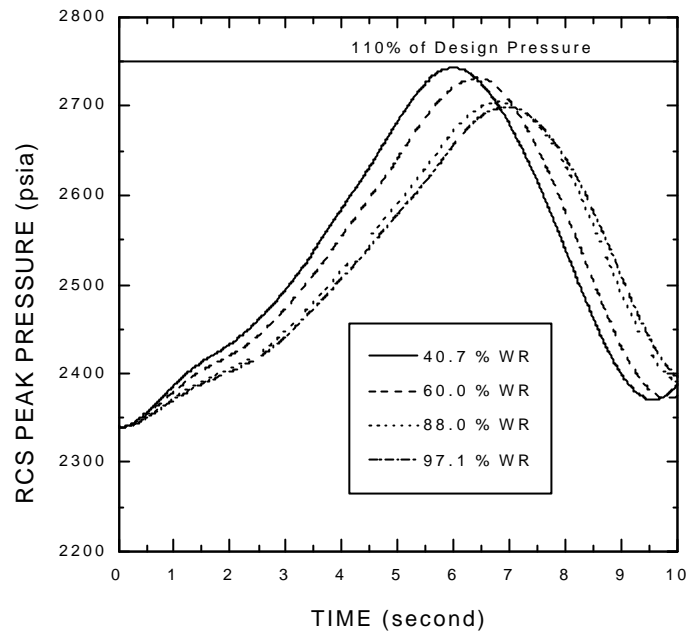


그림 3. 초기 증기발생기 냉각수 재고량에 따른 원자로냉각재계통 침투압력

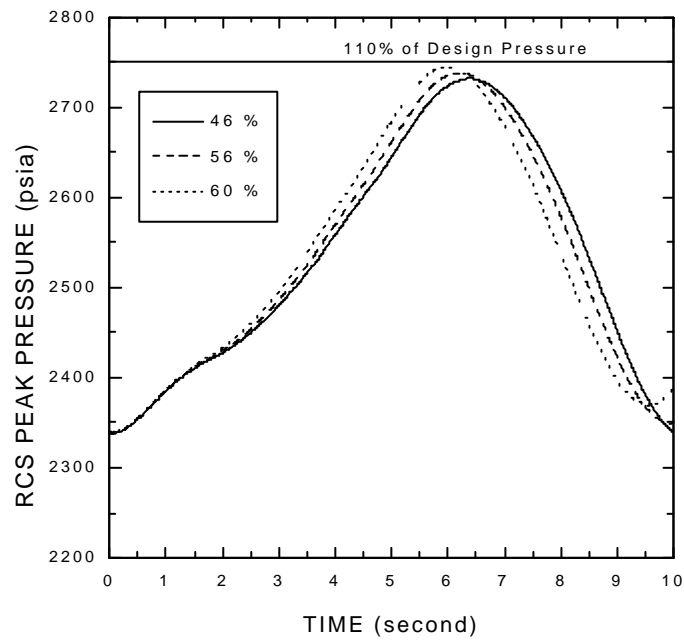


그림 4. 초기 가압기 냉각재 수위에 따른 원자로냉각재계통 침투압력

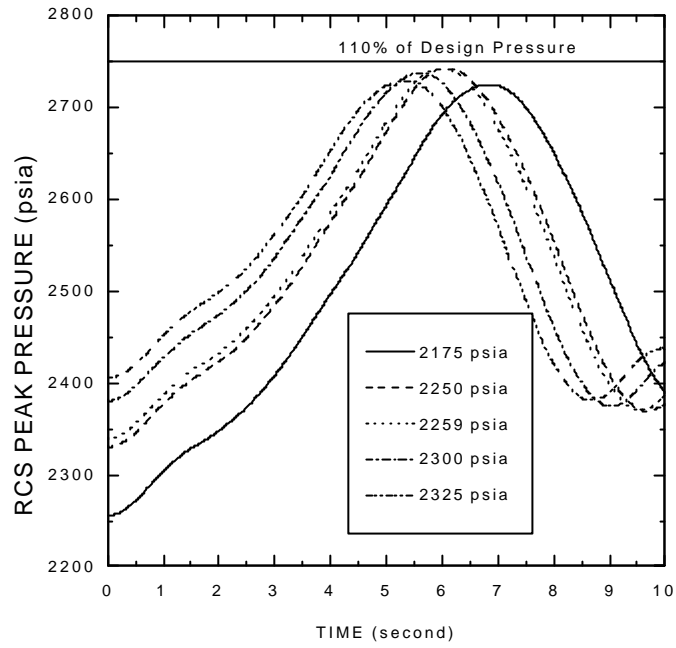


그림 5. 초기 가압기 압력에 따른 원자로냉각재계통 침투압력

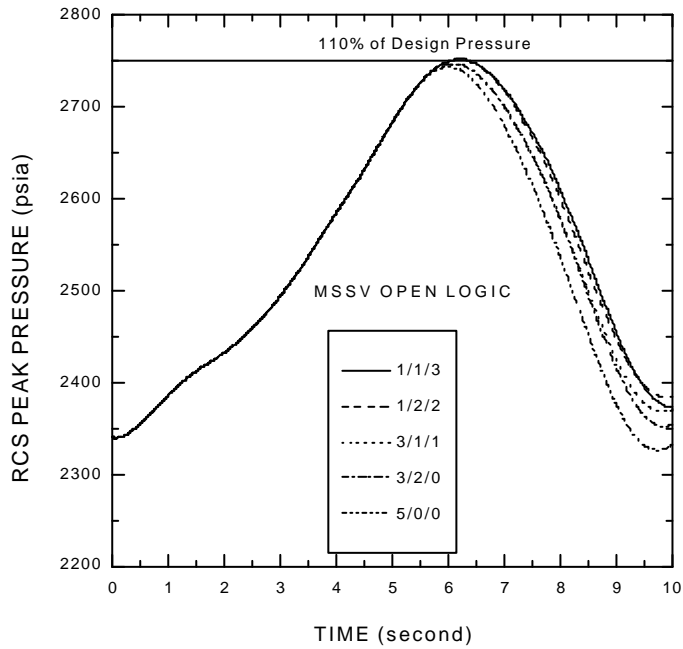


그림 6. MSSV 작동논리에 따른 원자로냉각재계통 침투압력