

## 가압경수로의 저온과압사고에 대한 안전성 분석 방법 개발

김요한 · 전황용 · 이창섭

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

김경두 · 장원표

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

가압경수로의 기동과 냉각시 발생할 수 있는 저온과압사고는 원자로 압력용기의 취성파괴를 유발할 위험이 있다. 따라서 발전소는 저온과압을 방지하기 위해 기술지침서의 온도-압력 곡선을 토대로 운전온도에 따른 압력경계를 제한하고 있으며, 과압방지설비로 가압기 PORV나 잔열제거계통의 방출밸브를 갖추고 있다. 미 NRC에서는 GL90-06을 통해 저온과압사고에 대한 안전성 분석을 권고하고 있으며, 이에 따른 표준 기술 지침서를 제시하였다. 국내 가동 원자력발전소중 영광 3,4호기 이후에는 설계시 이를 반영하였으나, 타 발전소에는 반영되지 않았다. 이 논문에서는 이들 운전중인 가압경수로의 저온과압사고에 대한 안전성 분석을 수행하기 위해 개발한 안전성 평가 방법을 제시하였다.

### 1. 서 론

1970년대 후반 저온운전시 기술지침서의 온도-압력 경계를 초과하는 사례가 다수 보고되었으며, 이에따라 미 NRC는 저온과압을 USI A-26[1]으로 제정하였다. 이후 NRC에서는 GI 94, 'Additional Low-Temperature Overpressure Protection (LTOP)' [2]을 제정하여 운전 및 설계중인 모든 원전에 대해 저온과압 보호설비를 고려하도록 하였다. 특히 'Regulatory Analysis for the Resolution of GI-94' [3]에서는 원자로가 만수위(Water-solid) 운전중일 때는 모든 저온과압 보

호계통이 운전가능하도록 기술지침서를 개정할 것을 권유하였다. 여기서 얻어진 기술적 이해를 통해 NRC는 GL 90-06[4]을 발표, 기존 기술지침서에 가압기 PORV와 차단밸브 신뢰성 측면과 LTOP 기능을 보완한 수정 표준기술지침서를 제시하였다. GL 90-06에 따르면 LTOP의 설정치는 저온 운전중 원자로냉각재펌프(RCP)의 재기동과 운전 가능한 고압안전주입(HPSI)펌프와 충전펌프의 수에 대한 추가적인 제한에 기초하여 정해져야 하며, 과도현상 해석은 10CFR50, Appendix A에서 규정 한 단일고장조건에 의해 수행해야 한다. 이와 관련하여 국내에서는 1993년 과거처에서 고리 2호기의 운영 변경 허가조건으로 가동중인 가압경수로에 대한 저온과압사고 분석 및 대처방안을 강구할 것을 요구하였다.

가압경수로의 경우 정지운전시(Mode 4, 5, 6) 거짓신호에 의한 안전주입펌프 기동(질량유입) 또는 증기발생기 2차측 온도가 1차측보다 높은 상태에서의 RCP의 부주의한 기동(에너지유입) 등에 의해 저온과압 사고가 발생할 수 있다. 현재 국내 가동중인 가압경수로에서는 이런 사고를 방지하기 위해 고리1, 2, 울진1, 2, 영광3, 4호기의 경우 잔열제거계통(RHRS) 입구에 위치한 방출밸브(RV), 고리3, 4, 영광1, 2호기의 경우에는 PORV를 저온과압 보호설비로 운용하고 있다.

## 2. 분석 대상 선정

저온과압사고로부터 원자로 압력용기의 건전성을 확보하기 위해 국내 각 발전소의 기술지침서를 기초로 다음과 같은 두 가지의 과도현상을 설정, 이에 대한 안전성 분석 방법을 개발하였다.

### 가. 질량주입 과도현상 :

가장 제한적인 질량주입 과도현상은 만수위운전중 부주의한 안전주입기동신호(SIAS)에 의한 SI의 발생이다. USI A-26의 해결을 위해 제시된 Multi-Plant Action Item(MPAI) B-04에서 저온 운전중 가용한 SI계통의 수를 한 개로 제한하고 있으므로 RCS압력이 충분히 낮은 경우 부주의한 SIAS가 발생하면, 한 개의 HPSI펌프와 LPSI펌프에 의해 재장전충전탱크의 냉각수를 RCS에 주입하게 된다. 그러나, 저온과압 보호밸브의 개방설정치(약 450psig)가 LPSI펌프의 Shut-off Head(고리2호기의 경우 147.8 psig)를 훨씬 상회하기 때문에 LPSI펌프의 유량으로 인한 밸브개방 설정압력의 초과(overshoot)는 무시할 수 있으므로 가장 제한적인 과도현상은 RCS가 만수위운전중일 때 부주의한 SIAS에 의한 한 대의 HPSI펌프 가동으로 볼 수 있다.

### 나. 에너지주입 과도현상 :

에너지주입 과도현상은 증기발생기 2차측 온도가 1차측보다 높을 경우 부주의한 RCP의 기동에 의해 발생할 수 있다. MPAI B-04에서는 RCS가 만수위운전중일 때 RCP의 기동조건을 증기발생기 1, 2차측 온도차가 50°F 이하일 때로 제한하고 있기 때문에 증기발생기 2차측 온도가 1차측보다 50°F 높을 때 부주의한 RCP기동을 가장 제한적인 에너지주입 과도현상으로 설정할 수 있다.

### 3. 주요 가정

분석대상 과도현상 선정시 보수성에 추가하여 저온과압사고 안전성 평가에 다음과 같은 몇가지의 가정을 적용하였다.

- 과도현상 분석시 한 개의 LTOP계통만이 가용하다고 가정하였다.
- RCS 압력 상승에 따른 금속 팽창은 고려하지 않는다.
- 에너지유입 과도현상 분석에서는 초기 RCS 온도를 높게 책정하였다.
- 에너지유입 과도현상 분석시 증기발생기 2차측에서 1차측으로의 열전달에 따른 2차측의 온도 감소는 무시하였다.
- RHR 입구의 RV(혹은 가압기 PORV)의 후단 압력경계를 제공하는 PRT의 압력은 PRT 파단판의 파단 설정압력을 유지한다고 가정하였다.
- RHR 입구의 RV는 전단압력이 설정치의 3% 축적후 개방되어, 10% 축적후 완전히 개방된다고 가정하였다.

### 4. 과도현상 분석 방법

통상적으로 원전의 LTOPS는 가압기의 PORV가 담당하며, 초기의 WH원전과 가압기 PORV가 없는 CE원전은 RHR입구의 RV가 LTOPS 기능을 담당하고 있다. 따라서 대부분의 참고문헌[5-9]에는 PORV에 의한 저온과압과도기의 분석방법이 기술되어 있다. PORV와 RHR입구 RV로 LTOPS를 담당하는 경우의 과도기의 분석은 서로 상이하다. PORV는 전동기에 의하여 밸브가 구동되기 때문에 압력설정치에 도달후 밸브가 개방될 때까지 일정한 시간이 지연되며, 이에 따른 압력의 초과가 발생하게 되어 이에 따른 PORV의 압력설정치를 결정하게 된다. 하지만 RHR입구 RV가 LTOPS를 담당하는 경우는 밸브개방 지연에 따른 압력 초과는 거의 없으나, 밸브의 개방압력이 설정치와 일치하지 않을 수가 있기 때문에 기기시험시 사용되는 RV 설정압력의 최대허용오차에 따라 결정하여야 한다. WH는 가압기 PORV의 개방지연에 따른 개방 설정압력과 최대 RCS압력의 차이(Pressure Overshoot)를 결정하기위하여 LOFTRAN코드를 저압과도기 모의에 적합하도록 수정하여 사용하였다. 여기서 계산된 Pressure Overshoot에 근거하여 기술지침서의 온도-압력 제한치를 초과하지 않는 밸브의 최대 개방압력설정치를 결정하였다[7]. 미국의 Salem원전의 LTOPS 설정치를 결정하기 위하여 R. J. Dodson[9]은 질량유입 과도기의 경우 코드를 자체 개발하여 사용하였고, 에너지유입의 경우는 RETRAN-02/MOD5를 사용하여 과도기 분석을 수행하였다. 또한 국내 영광 3,4호기의 저온과압보호계통의 안전성분석에서는 질량유입은 매 시간단계에서의 압력변화를 수계산함으로 수행하였고, 에너지주입은 CE에서 개발한 OVERP코드를 사용하여 계산하였다.[10,11] 하지만 국내 기존발전소에 대한 저온과압사고의 안전성평가를 위한 방법론의 체계는 아직 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이 연구에서는 PORV 혹은 RHR입구 RV를 LTOPS로 사용하는 기존 원

전에 대한 저온과압사고의 안전성 분석 방법을 개발하였다.

#### 가. 질량주입 과도기의 안전성 분석 :

분석의 효율성과 보수적 평가를 위하여 LTOP\_MI를 개발하였다. 이 코드는 질량유입 과도기 모의중 LTOPS를 통해 RCS에서 방출되는 유량을 계산하고, 이에따른 압력용기의 압력변화 및 최대 압력을 계산하는 코드이다. 이 코드의 계산결과로부터 얻어진 RCS 최대압력과 발전소 기술지침서의 온도-압력 제한치를 비교하여 저온과압사고의 안전성 여부를 평가할수 있다.

LTOP\_MI의 보수성 검증을 위해 고리 2호기를 기준으로 LTOP\_MI와 RETRAN-03의 계산 결과를 비교하였다.[그림1,2] 초기압력에 대한 민감도를 분석하기 위해 아주 낮은 경우와 높은 경우에 대해 모사, 비교하였다. 우선 초기 온도 변화에 따른 최대 압력 변화를 살펴보면 RETRAN의 두 결과에 나타났듯이 그 최대 압력의 크기에 대한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 다만 그 진행시간에 차이가 있을 뿐이다. 다음으로 LTOP\_MI와 RETRAN의 최대 압력을 비교하면 LTOP\_MI의 결과가 더 보수적인 결과를 나타냄을 알 수 있다.

#### 나. 에너지주입 과도기의 안전성 분석 :

에너지주입 과도기의 안전성평가에는 미국 EPRI에서 개발한 RETRAN-03을 사용하였다. 이 코드는 저압/저출력과도기 모의를 위하여 기존 RETRAN-02/MOD5를 개선한 코드로 저온과압 과도기 모의에 매우 적합하다.[12] 에너지주입 과도기 모의를 위해 증기발생기 2차측은 Time Dependent Volume으로 설정하였다.[그림3] 초기 정상상태 계산에서는 증기발생기 2차측의 온도를 1차측과 동일하게 주어, 증기발생기 1차측과 2차측의 열전달이 없도록하였다. 에너지주입과도기는 증기 발생기 2차측의 온도를 50°F만큼 증가시킴으로서 시작된다. 계산의 편의상, RCP는 초기 정상상태 부터 운전되는 것으로 가정하였다. 이렇게 가정함으로써 코드에 내장된 정상상태 초기화를 위한 선택사양을 사용하여 쉽게 과도기의 초기 정상상태를 얻을 수 있다. 또한, 이 가정은 계산초기 부터 1차측에 유량을 형성하여, 과도기 초기에 더 많은 에너지가 증기발생기 2차측에서 1차측으로 유입되게 하기 때문에 계산에도 보수적으로 작용한다. RCP의 회전속도는 전출력운전시 펌프 회전속도와 같다고 가정하였다. 펌프가 동일회전속도로 운전되면 부피유량은 냉각재의 밀도와 관계없이 일정하며, 저온 운전중에는 온도감소에 따라 냉각재의 밀도가 높아지게 되어 결과적으로 원자로 1차계통의 질량유량을 증가시키게 된다. 증가된 양은 초기온도에 따라 다를 수 있으나, 원자로 1차계통의 온도를 저온과압이 가능한 최대온도인 350°F로 가정하더라도 질량유량은 전 출력운전시와 비교하여 약 25% 증가하게 된다. 이는 결과적으로 증기발생기 1,2차측간의 열전달 율을 높이는 효과로 작용하게 되어 보수적 계산을 하게한다. RCP에서 발생하는 열은 증기발생기 2차측의 온도를 증가시키는 시간과 일치시켜서 과도기 시작시간에 원자로 일차계통에 유입되는 에너지를 최대로 하였다.

## 5. 결론 및 향후 계획

이상과 같이 개발된 방법론에 입각하여 수행된 예비계산의 결과가 그림 4-6에 나와 있다. 그림 3,4에 나타난 바와 같이 압력제한치(558 psia)에 해당하는 요구배출량은 870 gpm 이다. 실제 잔열제거계통 방출밸브의 용량은 562.5psig일 때 1646gpm 이며, 495psig일 때 990gpm이므로 지금 계통으로 안전성을 유지할 수 있다고 본다. 에너지유입 과도현상은 그림5에서와 같이 질량주입 보다 훨씬 덜 심각함을 알 수 있다. 이상의 결과로 저온과압사고는 질량유입 과도현상이 안전성 분석 제한치를 나타냄을 알 수 있다.

향후 개발된 분석방법을 적용하여 고리1,2,3,4, 영광1,2, 울진1,2호기에 대한 저온과압사고에 대한 안전성을 평가하여 GL90-06 요건을 만족시킬 예정이다.

## 참고문헌

1. USNRC, "Approved Category A Task Action Plans, Unsolved Safety Issue A-26" NUREG-0371, Vol. 1, No. 1, November 1977.
2. Memorandum from H.R. Denton to R.M. Bernero, "Schedule for Resolving and Completing Generic Issue 94 - Additional Low-Temperature Overpressure Protection for Light Water Reactors," dated July 23, 1985.
3. USNRC, "Regulatory Analysis for the Resolution of GI-94:Additional Low-Temperature Overpressure Protection for Light Water Reactors," NUREG-1326, December 1989.
4. USNRC, "Generic Letter 90-06 : Resolution of Generic Issue 70 and 94 Pursuant to 10CFR50.54(f)", June 25, 1990.
5. J. D. Andrachek, et al., "Methodology used to Develop Cold Over- pressure Mitigating System Setpoints and RCS Heatup and Cold- down Limit Curves," Rev. 1, WCAP-14040, Westinghouse Electric Corporation, December 1994.
6. Westinghouse Electric Corporation, "Transmittal of Sample LAR, Tech. Spec. Changes and Sample PTLR, MUHP-3024," WOG-94- 107, dated July 1994.
7. L.E. Engelhardt, "Setpoint Program Determination for the Westing- house Overpressure Mitigating System in the Byron/Braidwood Plants," October 1982.
8. Westinghouse Electric Corporation, "Response to U.S. Nuclear Regu- latory Commission Generic Letter 88-11 for Braidwood Unit 1 Reactor Vessel," November 1988.
9. R. J. Dodson and M. A. Feltus, "Low-Temperature Overpressuriza- tion Protection System Setpoint Analysis using RETRAN-02/MOD5 for Salem," Trans. ANS, Vol. 71, pp. 323-324, Washington, DC, November 13-17, 1994.
10. S.C.Park, "LTOP Relief Valve Peak Pressure Analysis for the Limiting Mass Input Event," YGN-3&4 Design Data, Status 1, KAERI, K-FS-C-114, Rev. 1, March 18, 1992.
11. S.C.Park, "LTOP-Overpressure Transient due to Secondary Heat Transfer," YGN-3&4 Design Data Status 1, KAERI, K-FS-C-114, Rev. 1, March 18, 1992.
12. J.H.McFadden, et al., "RETRAN-03: A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow System," EPRI NP-7450s, Electric Power Research Institute, May 1992.

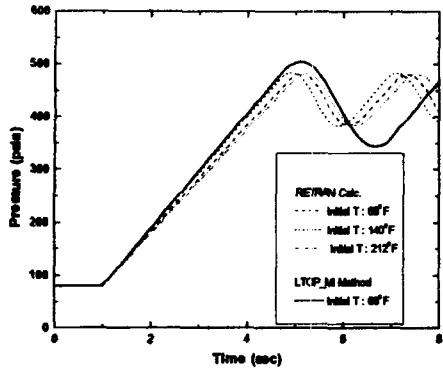


그림 1. 초기압력 80psig일 때 RCS 압력

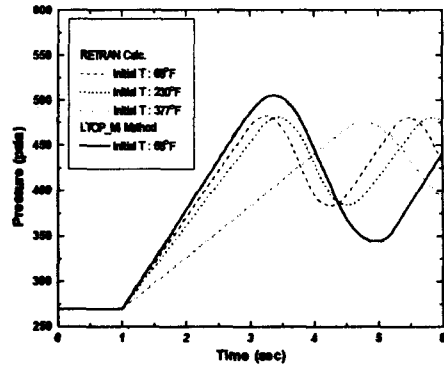


그림 2. 초기압력 270psig일 때 RCS 압력

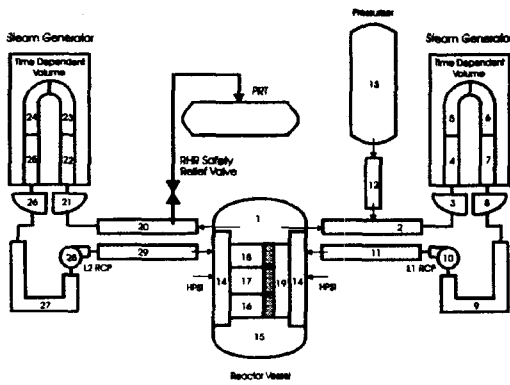


그림 3. 고리 2호기 RETRAN 모델

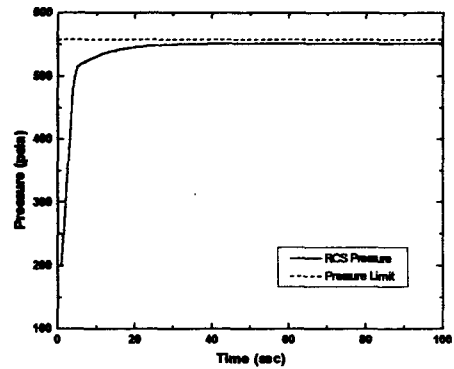


그림 4. 질량유입시 RCS 압력 변화

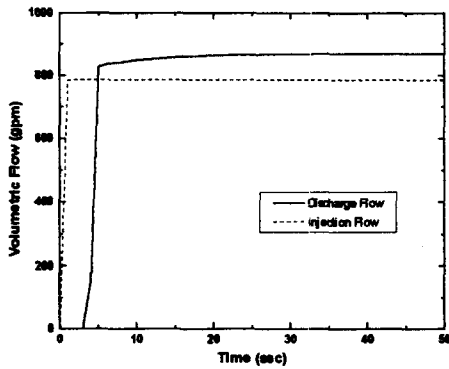


그림 5. 질량유입시 유량비교

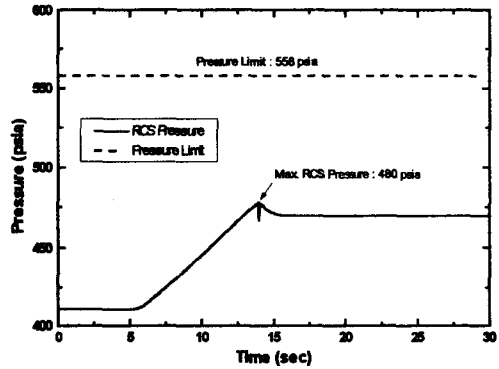


그림 6. 에너지유입시 RCS 압력 변화

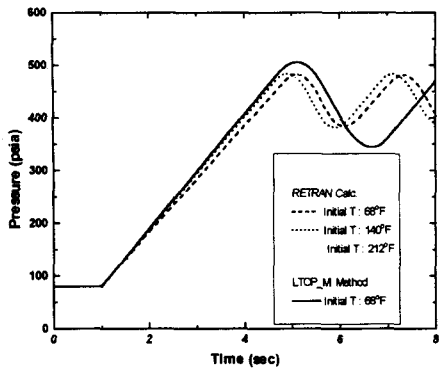


그림 1. 초기압력 80psig일 때 RCS 압력

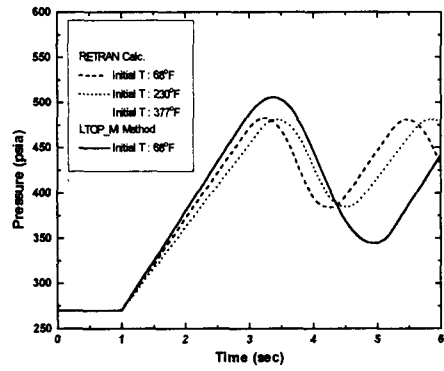


그림 2. 초기압력 270psig일 때 RCS 압력

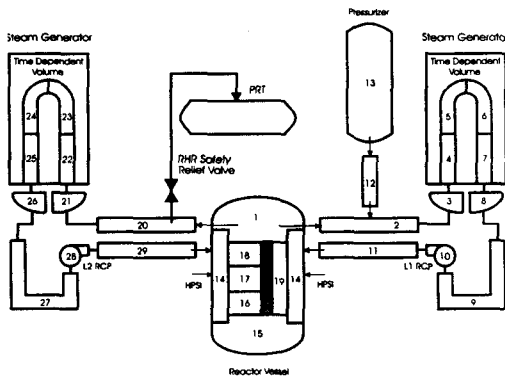


그림 3. 고리 2호기 RETRAN 모델

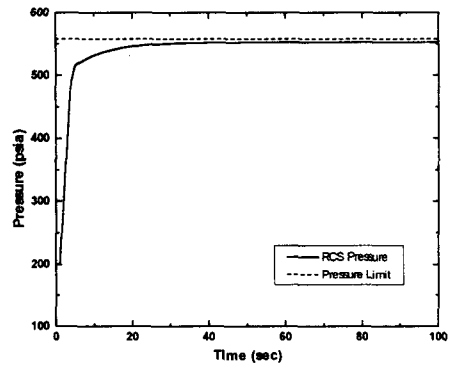


그림 4. 질량유입시 RCS 압력 변화

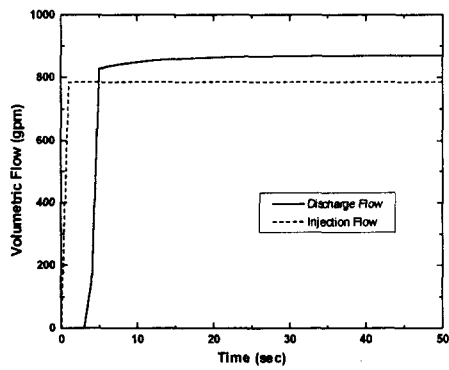


그림 5. 질량유입시 유량비교

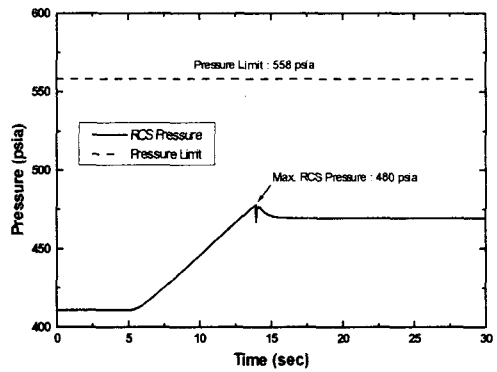


그림 6. 에너지유입시 RCS 압력 변화