

## 가압경수로 가압기 안전밸브 보수후 압력설정치 시험

신 대수, 류 용호  
한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

### 요 약

국내 가압경수로 가압기 안전밸브는 운영기술지침서에 따라 운전 중과 같은 환경조건에서 압력설정치(2,485 psig) 시험을 수행하도록 규정되어 있다. 가압기 안전 밸브는 일정한 주기로 압력설정치 시험이 수행되고 있으나, 시험시의 주변 온도, 사용 유체 등 그 시험 조건에 따라 압력설정 허용치  $\pm 1\%$  이상의 편차가 발생할 수 있음이 확인되고 있다. 본 연구에서는 압력설정치 시험시의 주변온도 상태에 따른 설정치 변동 사례를 조사하고, 보수 후 압력설정치 조정을 위한 대체 방안과 그 문제점을 고찰하였다.

### 1. 서론

국내 가압경수로의 가압기 안전밸브는 압력설정치 시험 시 즉, 5년을 주기로 점검되고 있으며 누설 등 이상이 발견되면, 분해 정비 후 발전소 기동 시, 시험을 통하여 압력설정치를 재확인하도록 절차화 되어있다.

국내 발전소 중에는 10년 이상의 운전 동안 일정 주기로 Set Pressure 시험을 겪어 가압기 안전밸브의 Disk가 여러 번 손상되고 보수되어 현재 일부 밸브는 한 번의 Popping에 있어서도 누설의 가능성이 70% 이상인 것도 있다. 이러한 밸브는 발전소 Hot Standby 조건에서의 Popping Pressure 시험 중 발생한 누설로 인하여 분해 보수가 빈번히 이루어지고 있다. 밸브의 분해 보수 후, 저온상태에서의 Bench Test로 압력설정치를 확인한다 할 지라도, 운영기술지침서의 요건과 가동중시험 규정인 ASME Code<sup>(1)</sup>의 요건에 따라, 발전소 기동시 Hot Standby 상태에서 압력설정치 시험이 다시 요구되고 있다.

이러한 밸브 Popping Test는 또 다시 누설을 초래하여 계획예방 정비 기간을 며칠씩 연장시키는 비효율을 유발하는 등 보수후 시험으로 결국, 재보수와 재시험의 악순환이 되풀이 될 수 있다.

안전밸브의 시험 조건에 따른 압력설정치 변동 사례는 80년대 이후 발표된 U.S. NRC Information Notice에서 확인할 수 있으며, 국내에서도 원전의 운전 이력이 많아 질수록 이와 관련된 문제점은 점차 증가하리라 예상된다. 미국이나 원전 선진국에서는 가압기 안전 밸브 제작사나 관련 전문 시험기관에서 발전소 계통을 모사할 수 있는 밸브 시험설비가 구축되어, 밸브의 시험, 보수, 정보 축적을 하고 있어 발전소 운영 및 안전에 적절히 대응하고 있다. 그러나 국내의 경우에는 그러한 시험 설비가 갖추어 있지 않은 상황에서 안전밸브의 압력설정 확인을 위한 현실적인 방안을 구할 수 밖에 없는 실정이다.

본 연구에서는 압력설정치 시험 시의 온도 상태에 따른 설정치 변동 경험을 조사하였으며, 안전밸브 보수후 압력설정치 조정을 위한 대체 방안을 제시하고 그 문제점을 고찰하였다.

## 2. 저온<sup>1)</sup> 및 고온<sup>2)</sup> 상태에서의 Popping Pressure 변동

안전밸브의 압력설정치가 시험 주변조건에 따라 달라질 수 있다는 사례는 일반 산업계에서 이미 발표된 적이 있으며, 원자력 계에서도 계통으로부터의 방사성 물질의 누출 가능성을 우려하여 중요하게 다루어 왔다.<sup>(2), (3), (4), (5)</sup> 이하에서는 고리 1, 2 및 4 호기의 가압기 안전밸브 시험조건에 따른 압력설정치 시험 경험에 대하여 조사하였다.

### 2.1 고리 1호기 저온 및 고온상태에서의 Popping Pressure의 변동<sup>(6)</sup>

96년 2월 저온상태에서의 안전밸브 시험 결과와 97년 3월 고온상태에서의 시험 결과를 표 1에서 비교하였다. 8010A의 경우, 96년 저온상태 시험시 2,465 psig, 97년 고온상태 시험에서는 2,457 psig, 8010B의 경우, 96년 2,475 psig, 97년 2,500 psig로 Popping Pressure가 확인되었다. 두 시험 사이의 시간 경과에 따른 Set Pressure 변화가 어느 정도 있다고 가정하더라도, 두 Set Pressure의 차이는 -8 및 +25 psig를 나타내고 있어, 고리 1호기 안전밸브의 저온 및 고온상태에 따른 Popping Pressure의 변동은 다소 적은 수준임을 확인할 수 있었다.

### 2.2 고리 2호기 저온 및 고온상태에서의 Popping Pressure 변동<sup>(7)</sup>

94년 12월 저온상태에서의 안전밸브 시험 결과와 97년 2월 고온상태에서의 시험 결과를 표 2에서 비교하였다. 저온상태 시험의 경우인 93년 10월, 94년 12월의 시험 값들은 각각 안정되어 있고, 연도별 시험 결과를 비교하여 볼 때, 14개월간의 설정치들(2,462와 2,460 psig)의 변동은 거의 없음을 알 수 있었다.

그러나 8010A의 경우, 94년 저온상태 시험시 2,443 psig, 97년 고온상태 시험에서는

주: 1) 상온 25 °C, 사용 유체는 공기

2) 발전소 hot standby 상태의 가압기 안전밸브 온도, 사용 유체는 증기

2,375 psig, 8010B의 경우, 94년 2,460 psig, 97년 2,502 psig로 확인되었다. 두 시험 사이의 시간 경과에 따른 Set Pressure 변화가 없다고 가정한다면, 두 Popping Pressure의 차이는 -68 및 +42 psig(약 2~3%의 압력설정치의 오차)를 나타내고 있어, 압력설정 허용치  $\pm 1\%$ 를 만족하기 어려운 상태로 나타났다.

### 2.3 고리 4호기 저온 및 고온상태에서의 Popping Pressure 변동<sup>(8)</sup>

Loop Seal 충수 및 배수 상태에서의 설정치 변동을 확인하는 과정에서 저온 및 고온상태간의 Popping Pressure 변동을 확인할 수 있었다. 표 3의 굵은 선 안의 수치가 고온 및 저온상태에서의 설정 압력차를 비교해 볼 수 있는 부분이다. PSV-8의 경우, 고온상태에서 2,398 psig, 저온상태에서는 2,490 psig를 나타내어 -92 psig의 차이를 보였으며, PSV-9의 경우는 고온상태에서 2,377 psig, 저온상태에서는 2,490 psig를 나타내어 -113 psig의 차이를 보였다. 두 밸브에서는 압력설정치인 2,485 psig의 약 4%의 변동을 보였다.

### 2.4 시험 결과에 대한 고찰

고리 1호기의 경우, 8010A 및 B의 Popping Pressure의 차이는 -8 및 +25 psig를 나타내고 있어, 저온 및 고온상태에 따른 변동은 압력설정치 2,485 psig에 비교하여 상당히 적은 수준인 1% 이내로 나타났다. 고리 2호기의 경우, 8010A 및 B의 Popping Pressure의 차이는 각각 -68 및 +42 psig로써, 약 2 ~3% 변동을 나타내었으며, 그 변화 방향이 (+) 나 (-) 의 일정한 방향이 아닌 것으로 나타났다. 고리 4호기의 경우 PSV-8과 9의 Popping Pressure 차이가 -92 및 -113 psig로 나타나 4%라는 큰 변동상태를 나타내었다.

이상의 시험 결과에서 가압기 안전밸브의 Popping Pressure는 온도 및 사용되는 유체에 따라 설정 허용치인 1% 이상으로 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 1차적으로 밸브 주변 온도 및 사용 유체가 다른데서 나타난 것으로 판단된다.

### 3. 보수 후 압력설정치 조정을 위한 대체 방안

원자력발전소 운영자는 고온상태 시험의 누설 가능성과 이에 따른 보수 및 시험의 반복을 우려하여 가능한 발전소 기동 시에는 가압기 안전밸브 시험을 수행하지 않으려고 한다. 발전소 기동시 가압기 안전밸브의 고온상태 시험을 대체하기 위해 다음 방안이 제안될 수 있다.

#### ● Jack Device 사용

Jack Device는 밸브 분해시, Spring의 상태를 분해 전 상태로 유지할 수 있도록 Spring을 고정시켜 주는 장비로써 밸브 Spring의 장력을 보수 전, 후 그대로 유지함으로 밸브의 압력설정치를 그대로 유지하게 한다.

- 저온, 고온상태 설정치 차압을 이용한 압력 설정치 추정 방법  
발전소 Hot Standby 상태에서 시험을 수행하여 Popping Pressure를 설정하고 밸브 분해 전 저온상태의 Popping Pressure를 확인하여 그 차압을 산출한다. 밸브의 분해, 보수 및 조립 후, 저온상태에서의 Popping Pressure를 확인하여 Hot Standby 상태의 Popping Pressure를 추정함으로써 압력설정치 시험을 대체하는 방안이다.
- 압력설정치 시험 설비 개발  
발전소 계통이 아니지만, 발전소 Hot Standby 상태와 같은 조건에서 밸브의 압력 설정치 시험할 수 있는 설비를 구축하는 것이다. 미국의 대부분 발전소에서 가압기 안전밸브를 이러한 시험 설비가 갖추어져 있는 곳으로 이송하여 시험하고, 보수하고, 조정하여 다시 원래의 계통에 안착시키고 있다.

Jack Device와 차압을 이용한 압력설정치 추정 방법은 이론적으로는 타당하게 보이지만, 그 실제 적용에 있어, 대체 방안의 이용 원인과 상충되는 다음과 같은 초기 요건들이 만족되어야 하는 문제점이 있다.

- 고온상태의 압력설정치 시험 시에 밸브의 Popping 전 그리고 후, 누설이 없다는 사실이 확인되어야 한다. 밸브 누설은 Huddle Chamber의 압력을 상승시켜 Popping Pressure를 하향 변동시킬 수 있다.<sup>(9), (10)</sup> 밸브 누설이 없다면 당연히 밸브의 분해 보수는 필요가 없을 것이다.
- 보수에 있어, 압력설정치 유지에 변화를 줄 수 있는 부품의 교체나 심각한 보수는 없어야 한다. 과도한 Lapping이나 형상이 다른 부품의 교체는 압력설정치에 변화를 줄 수 있기 때문이다.
- Hot Standby에서의 Popping Pressure는 기준값 2,485 psig 수치에 상당히 가깝게 조정되어야 한다. 허용치  $\pm 1\%$ 의 수치는 시험에 대한 오차에 비하여 결코 충분한 수치가 아니기 때문이다.
- 분해 및 조립 절차에 있어, 압력설정치에 영향을 줄 수 있는 실수가 없어야 한다. 보수에 참여한 작업자가 얼마나 숙련되고, 정직하게 작업을 이행하는가 하는 품질 관리에 관계된 문제이다.

#### 4. Jack Device 사용에 의한 Popping Pressure 경험

97년 3월, 고리 2호기 PSV-8010B는 시험에서 누설이 확인되어 Lapping이 요구되는 보수가 수행되었다. Jack Device를 이용한 분해 보수 후, 발전소 계통 가압시에 고온상태 시험이 수행되지 않았으며 98년 2월 발전소 출력 감발 시에 시험이 수행되었다. 표 4에 나타난 시험결과는 Jack Device를 이용한 보수의 신뢰성을 확인하는 하나의 사례로 제시될 수 있다.

97년 2월 발전소 출력 감발 시, 시험된 PSV-8010B의 설정 압력은 시험 정황으로

보아 2,502 psig로 보는 것이 적절하다. Jack Device 신뢰성을 판단하기 위한 허용오차를 2,502 psig의  $\pm 1\%$  즉, 2,477~2,527 psig 이내로 정하였다. 1회 Popping은 2,508 psig로 상기 허용치를 만족하였으며, 2회 Popping은 2,465 psig로써 기준값 2,502 psig에서 -1.48% 차이를 보였다. 1회 Popping시 Chattering 현상에 따른 Seat 재안착의 불안전에 기인하여 1% 보다 더 큰 오차를 보인 것으로 추정된다. 2회 Popping시 적절한 행정상태를 보였기에, 3회의 Popping Pressure인 2,481 psig는 정상적인 Popping Pressure로 볼 수 있다.

따라서, 97년 3월 PSV-8010B에 대한 Jack Device를 사용한 보수는 그 압력설정치를 그대로 유지함에 있어 신뢰성이 있었다고 판단할 수 있었다. 그러나 한 번의 시험 사례를 통하여 Jack Device에 의한 보수에 신뢰성을 부여하기에는 아직 이르며 충분한 신뢰성을 위해서는 더 많은 자료가 축적되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

가압기 안전밸브의 압력설정치 시험시 주변 온도 및 사용 유체에 따른 실제 설정치 변동 경험 사례를 조사하고, 안전밸브 보수후 압력설정치 조정을 위한 대체 방안과 그 문제점을 고찰하였다. 압력설정치 시험 결과에서 밸브 Popping Pressure는 저온 및 고온상태에서 시험 조건에 따라 차이가 날 수 있으며, 그 차이는 4% 이상까지도 가능한 것으로 확인되었다. Jack Device를 사용한 보수는 작업에 대한 품질 관리가 적절한 경우, 그 압력설정치가 허용한계이내로 유지될 수 있다는 가능성을 보여 주었으나, 충분한 신뢰성을 충분히 부여하기에는 더 많은 자료가 축적되어야 할 것으로 판단된다.

## 6. 참고자료

- (1) ASME OMc code ISTC appendix 1- 1990
- (2) ICONE5-5-2269: Effects of medium and temperature on set point of spring loaded pressurizer safety valves, 1997. 5. 26-30
- (3) NRC information notice 86-92: Pressurizer safety valve reliability
- (4) NRC information notice 88-68: Setpoint testing of pressurizer safety valves with filled loop seals using hydraulic assist devices
- (5) NRC information notice 96-03: Main steam safety valve setpoint variation as a result of thermal effects
- (6) KINS/AR-110 vol. 5, 고리원자력 1호기 정기검사보고서, 1997. 6
- (7) KINS/AR-105 vol. 6, 고리원자력 2호기 정기검사보고서, 1997. 4
- (8) KINS/AR-109 vol. 6, 고리원자력 4호기 정기검사보고서, 1997. 12
- (9) NRC information notice 91-74: Changes in pressurizer safety valve set points before installation
- (10) NUREG-1482, 4.3.5 Jack and lap process

표 1. 고리 1호기 97년 3월 고온상태 test 시험 결과

| 시험일자      |       | 96.02        |    | 97.03        |         |
|-----------|-------|--------------|----|--------------|---------|
| 시험방법      |       | 저온           |    | 고온           |         |
| 밸브명       | 시험 횟수 | 입력 설정치, psig | 조정 | 입력 설정치, psig | 조정      |
| VRC-8010A | 1회    | 2,465        |    | 2,457        | -       |
|           | 2회    | 2,465        |    | 2,455        | correct |
|           | 3회    |              |    | 2,490        | -       |
|           | 4회    |              |    | 2,472        | -       |
| VRC-8010B | 1회    | 2,475        | -  | 2,500        | -       |
|           | 2회    | 2,475        | -  | 2,490        | -       |

표 2. 고리 2호기 97년 2월 고온상태 test 시험 결과

| 시험일자      |       | 93.10        |    | 94.12        |    | 97.02        |         |
|-----------|-------|--------------|----|--------------|----|--------------|---------|
| 시험방법      |       | 저온           |    | 저온           |    | 고온           |         |
| 밸브명       | 시험 횟수 | 입력 설정치, psig | 조정 | 입력 설정치, psig | 조정 | 입력 설정치, psig | 조정      |
| VRC-8010A | 1회    |              |    | 2,443        | -  | 2,375        | correct |
|           | 2회    |              |    | 2,443        | -  | 2,470        | -       |
|           | 3회    |              |    | 2,443        | -  | 2,468        | -       |
| VRC-8010B | 1회    | 2,460        | -  | 2,460        | -  | 2,478        | -       |
|           | 2회    | 2,462        | -  | 2,460        | -  | 2,502        | -       |
|           | 3회    | 2,462        | -  | 2,460        | -  | 2,502        | -       |

표 3. 고리 3호기 97년 3월 고온상태 test 시험 결과

| 시험일자   |       | 96.06.05         |    | 97.09.14         |    | 97.10.24     |         | 97.11.04         |         |
|--------|-------|------------------|----|------------------|----|--------------|---------|------------------|---------|
| 시험방법   |       | 고온, loop seal 흡수 |    | 고온, loop seal 배수 |    | 저온           |         | 고온, loop seal 흡수 |         |
| 밸브명    | 시험 횟수 | 입력 설정치, psig     | 조정 | 입력 설정치, psig     | 조정 | 입력 설정치, psig | 조정      | 입력 설정치, psig     | 조정      |
| PSV-8  | 1회    | 2,479            |    | 2,398            | -  | 2,490        | correct | 2,490            | correct |
|        | 2회    | 2,468            |    | 2,402            | -  | 2,520        | correct | 2,487            | -       |
|        | 3회    |                  |    |                  |    | 2,500        | -       |                  |         |
| PSV-9  | 1회    | 2,492            | -  | 2,377            | -  | 2,490        | correct | 2,502            | -       |
|        | 2회    | 2,482            | -  |                  |    | 2,520        | correct | 2,497            | -       |
|        | 3회    |                  |    |                  |    | 2,530        | correct |                  |         |
|        | 4회    |                  |    |                  |    | 2,503        | -       |                  |         |
| PSV-10 | 1회    | 2,489            | -  |                  |    | 2,430        | correct | 2,480            | -       |
|        | 2회    | 2,501            | -  |                  |    | 2,508        | -       | 2,477            | -       |

표 4. 고리 2호기 jack device 사용한 보수 후 popping pressure test 결과

| 시험방법      | 시험횟수 | 97. 02 system | Jack-device 이용한 보수 후, 12개월 경과 | 98. 02 system |
|-----------|------|---------------|-------------------------------|---------------|
| PSV-8010B | 1    | 2,478         |                               | 2,508         |
|           | 2    | 2,502         |                               | 2,465         |
|           | 3    | 2,502         |                               | 2,481         |