

2016-10호(160613SKN3)

원전 사고 · 고장 조사 보고서

제 목 : 신고리 3호기 주증기우회밸브(SBCV) 정비를 위한 원자로
수동정지 (사건발생일 : 2016.06.13.)

2016. 6. 20.



한국원자력안전기술원
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

원전 사고·고장 조사 보고서

보고서 번호 : 제2016-10호(160613SK3)
제 목 : 신고리 3호기 주증기우회밸브(SBCV) 정비를 위한 원자로 수동정지
발생 호기 : 신고리 3호기
발생 일시 : 2016년 6월 13일(월), 18시 36분
발전소 운전모드/원자로 출력 : 운전모드 1 (출력운전) / 30% 정격열출력
원자로형 : PWR(APR1400) 2 Loops
발전소출력 : 3,983 MWth / 1,455 MWe
운영허가일 : 2015년 10월 30일

사건 요약

2016년 6월 13일(월) 18시 36분, 시운전 중인 신고리 3호기에서 주증기우회밸브 개도 조정을 위하여 원자로를 제어 정지하였다.

원자로정지 후 발전소는 절차에 따라 고온대기 안정상태로 진입·유지되었으며, 열제거 기능을 포함한 필수안전기능이 적절히 유지되었고 소내·외로의 방사성물질 방출은 없었음을 확인하였다.

사건조사 결과, 원자로 출력 30%에서 수행된 주증기우회밸브 방출용량시험 결과가 일부 밸브의 방출량이 11% 이하를 유지하여야 하는 기준을 만족하지 못하고 초과하였으며, 이는 주증기우회밸브의 스트로크 설정 문제임을 확인하였다.

주증기우회밸브의 열림 개도 설정치에 대한 검토를 통하여 최대 증기방출량이 11% 이하가 되도록 개도 제한치를 축소 조정하였으며, 이후 수행된 주증기우회밸브 조절/급속 개방 시험을 통하여 밸브의 작동 건전성은 적절함을 확인하였다. 다만, 개도 제한치 축소로 인하여 실제 밸브 방출용량 적절성은 원자로출력 30%에서 시운전 시험을 통하여 최종 확인될 예정이다.

원전운영자는 이번 사건에 대한 원인 및 영향 평가 결과에 근거하여 단기조치로 1) 주증기우회밸브 스트로크 설정치 조정, 2) 급속개방, 급속단힘, 조절개방 및 단힘 시험 수행 등을 완료하였으며, 중장기조치로 3) 원자로출력 30%에서 방출 시험 재수행, 4) 방출시험 적합시 밸브 개도 설정치를 유지 관리하기 위한 계획을 수립하는 등 향후 주증기우회밸브 성능의 중장기 성능 유지관리 계획을 수립하였다. 특히, 밸브 스트로크 조정 설정치 유지를 보증하기 위하여 밸브 스트로크 고정 및 향후 밸브 성능을 개선하기 위한 계획을 수립하였다. 이에 대해 검토한 결과 조치의 절차 및 과정 등 측면에서 적절한 것으로 판단한다.

따라서, 사건발생 원인이 확인, 조치되었고, 방사선영향을 포함한 안전관련 사항도 없는 것으로 확인되었으므로, 기술적 측면에서 신고리 3호기 재가동은 문제가 없는 것으로 판단한다.

1. 개요

- 2016년 6월 13일(월) 18:36, 정격대비 30% 시운전 중이던 신고리 3호기에서 주증기우회밸브의 방출용량 시험이 불만족함에 따라 이의 점검 및 정비를 위하여 원자로를 수동정지하였다.
- 이 사건은 원자력안전위원회고시 제2014-17호 별표 3.1 “원자로가 자동 또는 수동으로 정지된 경우”에 해당하는 보고사항으로, 규제기관의 원전 재가동 사전안전성 확인 및 승인 대상사건이다.
- 한국원자력안전기술원(KINS)은 사건의 원인 및 영향 파악과 원전운영자 조치 적절성 확인 등을 위하여 현장조사를 수행하였다.

※ 주증기우회밸브는 비정상 상황 발생시 증기발생기에서 생산된 증기를 터빈을 거치지 않고 복수로 우회 시키는 기능을 수행하는 밸브이며, 안전등급 설비가 아닌 공정제어 설비임.

2. 사건 경위

2.1 원자로 수동정지 전 발전소 운전상태 (6.13.(월))

- 원자로 열출력 : 30.0%
- 발전기 출력 : 356.0 MWe
- 원자로냉각재계통 압력 : 157.8 kg/cm²
- 원자로냉각재계통 평균온도 : 295.4 °C
- 증기발생기 평균압력 : 74.4 kg/cm²

2.2 시간대 별 사건전개 과정

2016.06.10.(금)

- 23:00 • 원자로출력 50% 출력 시험중 주증기우회밸브 방출량 시험을 위한 원자로출력 감발(→30%)

2016.06.11.(토)

- 20:50 • 원자로출력 30%에서 주증기우회밸브 방출량 시험 결과 불만족

2016.06.12.(일)

- 9:25~11:19 • 주증기우회밸브(V1001) 방출량 재시험 결과 불만족

2016.06.13.(월)

- 14:00 • 원자로출력 30%에서 정지를 위한 출력감발 착수
- 18:36 • 원자로 미임계 도달

3. 안전성 평가

- KINS 조사팀은 재가동을 위한 사전안전성 평가를 위해 1) 사건발생 원인 평가 2) 관련 기기 정비 및 개선조치 결과와 3) 원전운영자의 재발방지조치에 대한 적절성 평가를 수행하였다.

3.1 원자로 수동정지 원인 및 조치내용 평가

3.1.1 원자로 수동정지 원인

- 원전운영자는 2016.6.11.(토) 계획된 시운전시험 절차(9S-I-521-01, PAT ADV and Steam Bypass Valve Capacity)에 따라 원자로출력 30%에서 주증기우회 밸브 성능 시험을 수행하였으며, 주증기우회밸브 8대 중 5대 밸브의 방출용량이 기준치 11%¹⁾를 초과하였음을 확인하였다.
 - 최대 초과 밸브는 V1007 밸브로써 11.5%로 확인됨.
 - * 주증기우회밸브(SBCV)는 총 8대로 구성되어 있으며, 각 밸브의 방출 용량은 100% 출력기준 증기유량의 11%이하, 8대 밸브의 총 방출 용량은 100%출력기준 증기유량의 55% 이상이 되어야 함. (붙임 1)
 - ** 원자로출력 30%에서 SBCV 1개 개방에 의한 방출량은 주급수공급유량 증가와 터빈출력 변동치의 합으로 계산함.

표 1. 주증기우회밸브(SBCV) 방출 시험 결과 ('16.6.11~12)

구 분	밸브번호	측정값(%)	판정기준	결 과
SBCV	1001	11.25	< 11%	불만족
	1002	10.95		만족
	1003	10.48		만족
	1004	11.13		불만족
	1005	11.15		불만족
	1006	10.81		만족
	1007	11.50		불만족
	1008	11.08		불만족

- 이후, '16.6.12.(일)에 V1001 밸브에 대한 재시험을 수행하였으나, 11.07%로 판정 기준을 초과함에 따라 원전운영자는 SBCV의 점검을 위하여 원자로 수동정지를 결정하였다.

1) 밸브 성능확인 기준치(11%)는 SBCV 1개의 부주의한 개방에 의한 주증기 유량 증가 사고 해석 조건 (FSAR 15.1.3, 15.1.4)을 근거로 설정됨

- 기준치 초과 밸브는 정비 등의 조치가 필요하며, 이러한 조치는 밸브 급속/조절 개방/닫힘 시간에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 재시험(정상운전 온도/압력 @고온대기모드)을 위하여 원자로 정지가 필요함.

3.1.2 주증기우회밸브 방출용량 초과 원인

- 원전운영자는 주증기우회밸브에 대한 설계요건서, 밸브 제작사 설계계산자료, 도면 등을 검토한 결과, 해당 밸브의 최대개방시 유량은 부하탈락 등의 과도 상태에서도 주증기우회계통의 원자로정지 방지기능을 위한 전체 밸브의 최소 증기방출량 요건(> 최대증기량의 55%)을 충분히 만족하도록 설계되어 있으며, 또한 단일 밸브의 최대 증기방출량 제한요건(< 최대증기량의 11%)은 밸브 완전 개방 시 또는 밸브 개방 범위 조절을 통해 만족하도록 설계되어 있음을 확인하였다.
- 주증기우회밸브는 부하탈락 등의 과도 발생시, 원자로의 과잉 열출력을 제거하여 원자로 정지를 방지할 수 있도록 2차측 최대증기량 (17.95×10^6 lb/hr)의 55%인 9.87×10^6 lb/hr / 8 valve를 방출 할 수 있어야 하며, 이를 개별적 밸브용량으로 환산하면 6.9% (1.24×10^6 lb/hr/1valve) 이상 증기를 방출하여야 함. 단일 밸브의 최대 방출량 제한은 사고해석(2차측 열제거 능력 과다 사고)의 초기조건으로 사용된 2.0×10^6 lb/hr(최대증기량의 11%)을 초과하지 않음을 보이는 것을 목적으로 함.
- 이러한 요건을 만족하기 위해 신고리 3호기 주증기우회밸브는 밸브 스트로크(Stroke) 최대 238 mm에서 완전 개방되도록 설계되었음.
 - 최소 증기방출량 요건은 설계상 스트로크 219 mm에서 만족되며, 최대 증기방출량 제한요건은 238 mm 스트로크에서 만족되어야 하며 필요시 Adjustable Limiter의 조절을 통해 스트로크 238 mm 이하의 값을 선정 함으로 해서 만족되도록 제작됨.
- 밸브 제작사 설계계산서에서 밸브 완전 개방 상태, 즉 스트로크 거리 238 mm 에도 최대 증기방출량 제한요건(< 11%)을 만족하는 것으로 평가되어 있으나, 원전운영자는 밸브 제작 시 고려하는 일반적인 제작사의 추가 여유도로 인하여 많은 증기가 방출된 것으로 평가하였다. 밸브 스트로크 거리를 조정할 수 있는 Adjustable Limiter가 설치된 이유도 설계보다 더 큰 증기방출량이 발생할 가능성에 대비한 제작사의 설계의도라 평가하였다.

- 신고리 3호기의 주증기우회밸브는 최대 스트로크가 238 mm로 설정된 상태로 설치되었으며, 원전운영자는 이로 인해 주증기우회밸브 용량시험 시 밸브가 완전 개방된 상태로 유지되면서 증기방출량이 최대 증기방출량 제한요건을 초과한 것으로 평가하였다. 제작사에서 고려한 여유도와 시운전시험 이전에는 실제 제작여유도를 확인할 수 없었다는 것을 근거로, 사건 조사팀은 원전운영자의 방출량 기준 초과 원인 분석 결과가 타당한 것으로 판단한다.

3.1.3 주증기우회밸브 정비 및 시험 결과

- 원전운영자는 주증기우회밸브 8대에 대한 밸브 스트로크를 238 mm에서 219 mm로 조절하였으며, 이를 통하여 밸브 개별 방출량이 11% 미만으로 축소될 것으로 평가하였다. 이는 원자로출력 30%에서의 밸브용량시험에서 최종 확인되어야 할 것이다.
- 원전운영자는 스트로크 조절(219 mm) 이후 원자로냉각재계통 정상온도 및 압력 조건하에서 밸브 조절·급속 개방·닫힘 시간측정 시험을 수행하였다. (붙임 2)
 - 8대의 밸브에 대한 급속 개방 시간은 0.78 ~ 0.84 초로 기준값 1초 이내를 만족하며, 급속 닫힘 시간은 2 ~ 2.66 초로 기준값 5초 이내를 만족함. 또한, 조절 열림은 17.4 ~ 19.6 초, 조절 닫힘은 15.1 ~ 18.9 초로 기준값 15 ~ 20 초를 각각 만족하는 등 밸브의 작동 성능은 건전함을 확인함.

3.3 발전소 계통·기기 거동 및 소내외 방사선영향 평가 (붙임 3)

- 사건조사팀은 사건전개기록지, 경보목록, 1/2차측 주요 운전변수 등을 통해 수동정지 전·후 원자로 및 방사선 측면에서의 안전성 영향을 검토하였다.
 - 이번 사건은 주증기우회밸브 정비를 위해 원자로를 수동 제어정지한 것으로 원자로는 고온대기(Mode 3)에 진입하여 안정적으로 유지되었음을 확인함.
 - 또한, 원자로의 안전성에 미치는 영향은 없었고, 원자로 정지 전·후 소내/외 방사선 감시기 측정치의 변화를 확인하여 이번 사건으로 인한 방사선영향도 없었음을 확인함.

3.4 재발방지 조치 적절성

원전운영자는 사건 발생 이후 확인된 사건발생 원인과 관련하여 재발방지대책을

다음과 같이 제시하였다.

○ 단기 조치 : 완료

- 주증기우회밸브 스트로크를 238 mm에서 219 mm 로 조정하고, 관련계측기 위치 조절 완료 (6.15.)
- 주증기우회밸브 조절·급속 개방·닫힘 작동시간 측정시험 재수행 완료 (6.16.)

○ 중장기 조치 : 임계후 및 중장기 대책

- 주증기우회밸브 limiter 기계적 잠금 설치 (방출용량 시험 수행 전)
 - Limiter 부위에 Cap 씌움 후 용접
- 주증기우회밸브 방출용량 시험 재수행 (임계후 출력 30%)
- 밸브 열림 위치 경보설정 및 운전 중 감시 방안 수립 및 이행 (시운전후 간이정비)
- 주증기우회밸브 정비절차서(SK34M-521-VV-D-013A-R) 및 관련 시험절차서 (정비-6521-03) 개정 (간이정비 전)
 - 스트로크 측정 절차를 반영하여 주기적으로 확인·관리하고 정비이력을 DREAMS에 등록
- 주증기우회밸브 신뢰성 제고를 위한 개선 시행
 - 현 공급사를 통한 개선 또는 기기 교체 방안 검토
 - 제1차 계획예방정비 전까지 개선계획 수립·제출 (밸브 개선 시행일정 포함)

○ 원전운영자의 재발방지대책에 대해 검토 결과, 단기조치로 주증기우회밸브 방출량 조절을 위한 스트로크 변경 및 성능 시험을 수행하였고, 장기조치로 우회밸브 스트로크 길이 고정 장치 및 감시, 경보 회로 변경 계획을 수립하였으며, 우회 밸브 방출량을 근원적으로 설계치 이내로 만족하기 위한 조치로 밸브 내장품 교체 검토 계획을 수립하는 등 재발방지 대책을 적절히 제시하였다.

4. 보완요구사항

○ 없음.

5. 결론

- 이번 사건은 시운전 중인 신고리 3호기에서 주증기우회밸브 점검 및 정비를 위하여 원자로를 수동 제어 정지한 사건이다.
- 원자로 수동정지 이후 원자로냉각 등 안전기능이 적절히 확보되었으며, 방사성물질 누출 등 안전 관련 사항도 발생하지 않아 발전소 안전성에는 영향이 없었음을 확인하였다.
- 사건 조사결과, 주증기우회밸브는 최대 스트로크(238 mm)에서도 방출유량 제한치(11%)를 초과하지 않도록 설계되었으나, 제작 과정에서의 과도한 여유도로 인하여 최대 스트로크에서 제한치를 초과하는 방출량이 확인된 것으로 평가되었다. 이에 따라 운영자는 밸브를 제한된 스트로크(219 mm)에서 운전되도록 조치하였다.
- 원전운영자는 이번 사건에 대한 원인 평가 결과에 근거하여 단기조치로 주증기우회밸브 스트로크 조정 및 성능 시험을 수행하였고, 중장기조치로 우회밸브 스트로크 고정 장치 설치 및 감시, 경보 회로 변경 계획을 수립하였으며, 우회밸브 방출량을 밸브 내장품 교체 혹은 밸브 교체 검토 계획을 수립하여 제시하였으며, 이에 대해 검토한 결과 절차 및 과정 등의 측면에서 적절한 것으로 판단한다.
- KINS는 사건발생의 직접적인 원인 및 기여원인이 확인, 조치되었으므로 기술적 측면에서 신고리 3호기 재가동은 문제가 없는 것으로 판단한다.