

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

영광 3 호기 부분충수운전중 정지냉각펌프 안전성 평가

류용호, 김세원

한국원자력안전기술원

유병철

한국전력공사

요 약

영광 3호기의 정지냉각펌프 성능감시 설비로는 펌프 유량계, 입구압, 출구압, 모터전류 등이 있으며 현장에서 펌프의 소음 감시나 진동 측정 등을 통하여 펌프 건전성을 확인할 수 있다. 부분충수운전중 여러 연구결과 제시된 펌프의 이상징후 증상은 펌프의 소음 증가, 유량계 또는 모터전류의 불규칙 요동이 있으나 정량적인 값을 제시하지 못하고 있으며 공기유입량에 대한 운전제한 근거만 정량적으로 제시되고 있다. 즉, WCAP-11916에 따른 펌프의 손상 판단 근거는 연속적인 공기 흡입의 경우 2%이내, 간헐적인 공기흡입의 경우 5%를 제시하고 있다. 영광 3 호기의 부분충수운전시 펌프 입구압력을 제외한 다른 펌프 성능감시 변수들은 허용오차 이내로 별다른 펌프 이상 징후를 발견하지 못하였다. 그러나 펌프 입구압력 기록계의 입구압력 및 진동폭 변화는 정지냉각유량률, RCS 수위, 증기발생기 노즐땀 설치 유무에 따라 민감한 변화를 보여주었으며, 펌프의 건전성 감시에 가장 효과적인 변수임을 보여주었다.

1. 서 론

영광 3 호기는 증기발생기 노즐땀 설치, 제거를 위한 부분충수운전중 다른 국내 원전의 가압경수형 원자로와 비교하여 정지냉각펌프의 수위 여유가 적으며 시운전중 부분충수운전 실증시험을

수행한 바 있다. 실증시험 결과 펌프 안전운전을 위한 임계 수위는 4000 gpm 에서 103'2" 로 나타났으며 이는 모터전류와 유량계의 불규칙 변동에 기준하였다. 그러나 시운전 실증시험 결과로 도출된 임계수위와 유량 관계는 핵연료가 노심에 위치하지 않은 상태였으며, 모터전류 및 유량계의 불규칙 변동 값이 어떤 값을 지시할 때 임계수위 인지 정확한 근거가 되지 못하였다. 따라서 부분충수운전중 펌프의 안전 운전을 감시하기위한 추가 설비로 펌프 입구압 기록계를 주제어실에 설치하여 펌프 성능을 계속적으로 감시하였으며 본 연구에서는 부분충수운전중 동 입구압력계의 변화를 정지냉각계통 운전감시와 더불어 중점적으로 검토하였다.

2. 부분충수운전시 RCS 운전 감시 설비

2.1 RCS 수위지시기

RCS 수위지시기는 배수운전 및 고온관 부분충수운전중 RCS의 수위를 운전원에게 제공하여 냉각재의 수위를 필요한 목적에 맞게 배수하거나 배수된 상태로 안전하게 운전할 수 있어야 한다. 동 설비는 독립성/다중성 요건을 만족해야 하며 하나의 고장 발생시에도 연속적인 수위 감시가 가능하여 필요한 운전 정보를 운전원에게 제공할 수 있어야 한다. 영광 3 호기에 설치된 수위감시설비는 가압기수위지시계(LI-103, LI 110 X/Y), Tygon Tube (각 유로당 1개씩 설치), Level Transmitter (각 유로당 2개씩 설치), Sight Glass (정지냉각펌프가 운전되지 않는 유로 2 에 설치) 등이 있다.

2.2 정지냉각펌프 성능감시 설비

정지냉각펌프는 부분충수운전중 노심의 잔열을 제거하는 기능을 담당하며 동 펌프의 고장 발생시 적절한 회복조치가 일정시간 이내에 이루어지지 않으면 노심 비등 및 노심 노출 사고가 발생하게 된다. 따라서 동 펌프의 성능을 감시할 수 있는 여러 계측설비의 설치가 요구되며 영광 3 호기에 설치된 감시설비는, 펌프 입구압력계, 펌프 출구압력계, 펌프 모터전류계, 유량계 등이 있다.

3. 정지냉각펌프의 부분충수운전 결과 평가

3.1 노즐탐 설치시 펌프 입구압 변화

3.1.1 노즐댐 설치전

펌프 입구압력계의 측정범위는 0- 2 kg/cm² 이었으며 운전원은 입구압 지시치 및 진동폭을 보면서 유량을 증감하여 운전을 하였다. 노즐댐 설치를 위한 배수 운전중 정지냉각유량 및 비운전유로의 RCS 수위지시값에 따른 입구압과 진동폭은 대략 다음과 같은 변화 추이를 보여주었다.

| 유량 | RCS 수위 | 입구압력 | 진동폭 |
|-----------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 15200 lpm | 104' | 1.25 Kg/cm ² | ± 0.03 Kg/cm ² |
| 15200 lpm | 104' - 103'7" | 1.24 Kg/cm ² | ± 0.04 Kg/cm ² |
| 15200 lpm | 103'7" - 103'6" | 1.23 Kg/cm ² | ± (0.07/0.13) Kg/cm ² |
| 15200 lpm | 103'6" - 103'5" | 1.23 Kg/cm ² | ± (0.1/0.2) Kg/cm ² |
| 15200 lpm | 103'5" | 1.2 Kg/cm ² | ± (0.2/0.3) Kg/cm ² |
| 14600 lpm | 103'5" | 1.25 Kg/cm ² | ± (0.05/0.15) Kg/cm ² |
| 14200 lpm | 103'5" | 1.27 Kg/cm ² | ± (0.13/0.27) Kg/cm ² |
| 15000 lpm | 103'5" - 103'3" | 1.2 -1.1 Kg/cm ² | ± (0.1/0.3) Kg/cm ² |
| 13300 lpm | 103'3" | 1.3 -1.2 Kg/cm ² | ± (0.1/0.3) Kg/cm ² |

상기 표에서 보듯이 RCS 수위가 103'7" 이상에서는 수위 감소에 따라 입구압만 서서히 감소하는 추세를 보여주었으나 103'7" 이하 부터는 수위 감소에 따른 입구압력의 감소와 더불어 진동폭도 불규칙 진동을 하며 커지는 추세를 보여주었다. 103'5"로 운전하던중 입구압 감소 및 진동폭이 증가하여 운전원은 유량을 14200 lpm 까지 감소하였다가(기술지침서 요구유량인 15200 lpm 불만족) 다시 유량을 15000 lpm 으로 증가하여 운전을 시도했으나 노즐댐 설치를 위한 작업자의 배수 요청으로 2"의 배수운전을 하던중 입구압의 감소 및 진동폭이 증가하여 다시 유량을 13300 lpm으로 감소시켜 펌프의 안전운전을 도모하였다. 상기 입구압 추이를 볼때 15200 lpm에서 입구압이 심하게 흔들리는 수위는 103'5" 정도로서 RCS수위를 더이상 낮추기 위해서는 유량 감소운전이 필요한 것으로 판단 된다.

3.1.2 노즐댐 설치 작업중

증기발생기 고온관의 2개 노즐댐 및 저온관의 4개 노즐댐을 설치하는데 소요된 시간은 대략 2시간이 소요되었으며 저온관 노즐댐 설치후 고온관 노즐댐을 설치하였다. 노즐댐 설치중 비운전중 인 유로의 협역 수위지시값은 103'3" 이었으며 운전원은 입구압 지시치 및 진동폭을 보면서 유량을 13300 lpm 으로 맞추어 일정하게 운전을 하였다. 노즐댐 설치전 진동폭은 아래 방향으로 치우쳐 있었으나 저온관 측의 노즐댐 설치후 진동폭 변화는 상하 진동폭이 같은 현상을 보여주었으며 간헐적으로 진폭 범위가 증가하여 입구압이 지시되었으나 전체적인 진폭 범위는 노즐댐 설치

전과 비교하여 안정화된 추세를 보여주었다. 입구압 지시치는 대략 1.25 - 1.3 kg/cm² 사이의 값을 지시하였으며 최대입구압은 1.9 kg/cm², 최소입구압은 0.72 kg/cm² 으로 기록되었다.

3.1.3 노즐댐 설치후

노즐댐 설치후 RCS 충수 운전중 정지냉각유량 및 비운전유로의 RCS 수위지시값에 따른 입구압과 진동폭은 대략 다음과 같은 변화 추이를 보여주었다.

| 유량 | RCS 수위 | 입구압력 | 진동폭 |
|-----------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|
| 13200 lpm | 103'3" - 103'4" | 1.3 Kg/cm ² | ± 0.1Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'4" - 103'5" | 1.32 Kg/cm ² | ± (0.03/0.1)Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'5" - 103'8" | 1.34 Kg/cm ² | ± 0.02 Kg/cm ² |
| 15200 lpm | 103'8" | 1.24 Kg/cm ² | ± 0.02 Kg/cm ² |

상기표에서 보듯이 RCS 충수 운전에 따라 펌프 입구압이 서서히 증가하였으며 103'5" 이상에서는 진동폭이 급속히 감소되어 안정된 펌프운전이 수행되었다. 노즐댐 설치후 RCS 충수 운전중 수위가 103'8" 에 도달했을때 운전원은 유량을 13200 lpm 에서 15200 lpm 으로 증가시켰으며 입구압은 1.34 kg/cm² 에서 1.24 kg/cm² 으로 감소하는 현상을 보여주었다. 이는 속도수두에 의한 영향을 정량적으로 보여주는 것으로 정지냉각유량 감소에 따른 입구압을 평가하여 펌프 안전운전에 참고로 사용할 필요성이 있다.

3.2 노즐댐 제거시 펌프 입구압 변화

3.2.1 노즐댐 제거전

노즐댐 설치를 위한 부분충수운전중 정지냉각펌프 입구압력계는 측정범위가 0 - 2 kg/cm² 인 계측기로 설치되어 있었으나 노즐댐 설치중 진동폭이 너무 커서 중간값을 찾기 어려운 상태였다. 따라서 노즐댐 제거시에는 측정범위가 0 - 6 kg/cm² 인 계측기로 교체하여 입구 압력을 감시하였으나 입구압이 예측값과 다른 값을 보여주어 편차 원인을 조사한 결과 계측기의 오결선으로 인하여 HPSI 펌프 압력계의 전류 신호가 더해져서 약 1.5 kg/cm² 정도의 압력이 증가된 상태로 기록지에 나타난 것임이 추후 판명되었다. 노즐댐 제거전 정지냉각유량은 13200 lpm 이었으며 RCS 배수운전에 따른 입구압 및 진동폭 변화는 다음과 같다.

| 유량 | RCS 수위 | 입구압력 | 진동폭 |
|-----------|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| 13200 lpm | 103'5" - 103'4" | 2.82(1.32)Kg/cm ² | ±0.08 Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'4" - 103'3" | 2.8(1.3)Kg/cm ² | ±0.1Kg/cm ² |

펌프 입구압력계의 측정범위가 0- 6 kg/cm² 로 증가되어 진동폭 추이를 감시하는데는 도움이 되었으나 상세한 입구압력의 변화 추이는 취득하지 못하였다. 상기표의 입구압력에서 지시된 값은 기록지상에서 얻은 값으로 실제 펌프의 입구압은 1.5 kg/cm² 를 감한 괄호안의 값이 적용된다. 노즐댐 제거전 운전 상황은 노즐댐 설치후의 운전 상황과 같으며 노즐댐 설치후의 입구압 및 진동폭 기록과 잘 일치하고 있다.

3.2.2 노즐댐 제거중

노즐댐 제거중 유량 및 RCS 수위에 따른 정지냉각펌프의 입구압과 진동폭은 다음과 같다.

| 유량 | RCS 수위 | 입구압력 | 진동폭 |
|-----------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|
| 13200 lpm | 103'3" - 103'2" | 2.8(1.3)Kg/cm ² | ±(0.1/0.12)Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'2" | 2.76(1.26)Kg/cm ² | ±(0.1/0.2)Kg/cm ² |

노즐댐 제거작업은 RCS 수위가 노즐댐 설치시 보다 약 1" 정도 내려간 103'3" 부터 시작하여 고온관과 저온관의 노즐댐을 모두 제거하는데 1시간 15분이 소요되었으며 작업자는 노즐댐 설치시 때 요구한 배수운전을 노즐댐 제거시에는 요구하지 않았다. 노즐댐제거중 103'2" 에서 입구압이 하향하는 추세 및 진동폭이 불규칙하게 증가하는 경향을 보여주었으며 최소 입구압력은 2.50 kg/cm² (HPSI 펌프의 압력추가분 1.5 kg/cm² 를 감하면 1 kg/cm²)로서 노즐댐 설치중의 0.72 kg/cm² 와 비교해서는 안정된 변화를 나타내었다.

3.2.3 노즐댐 제거후

노즐댐 제거후의 운전상황은 노즐댐 설치전의 운전과 비교가 될 수 있으며 노즐댐 제거를 확인한 후 12 분후에 RCS 충수를 하여 노즐댐 설치전과 충분히 비교하기는 어려우나 제거완료후 펌프 입구압이 아래방향으로 치우치면서 진동폭이 증가하는 현상을 보여주었다. 이는 노즐댐 제거로 인하여 고온관내 수위가 자유롭게 흔들리는 영향이 나타난 것으로 노즐댐 설치전의 입구압 및 진동폭 변화 추이와 같은 현상이다. 노즐댐 제거후 수위 증가 운전에 따른 펌프 입구압과 진동폭 변화는 다음과 같다.

| 유량 | RCS 수위 | 입구압력 | 진동폭 |
|-----------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 13200 lpm | 103'2" | 2.76(1.26)Kg/cm ² | ±(0.1/0.25)Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'2" - 103'3" | 2.80(1.30)Kg/cm ² | ±(0.08/0.2)Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'3" - 103'4" | 2.82(1.32)Kg/cm ² | ±(0.03/0.1)Kg/cm ² |
| 13200 lpm | 103'4" - 103'5" | 2.82(1.32)Kg/cm ² | ±(0.02/0.05)Kg/cm ² |

상기표에서 나타난 주요 현상을 보면 노즐댐 설치전과 유사하나 진동폭이 수위 증가에 따라 급격히 감소하는 현상이 노즐댐 설치전과 약간 다르며 입구 압력은 수위증가에 따라 빠른 속도로 증가하다가 103'4" 이상에서는 증가 추세가 없이 거의 일정한 입구압을 보여주었다.

4. 결론

영광 3호기 노즐댐 설치/제거의 부분충수운전중 정지냉각펌프의 입구압 변화 감시에 따른 주요도출 결과는 다음과 같다.

- 1) 영광 3호기의 증기발생기 노즐댐 설치/제거를 위한 고온관의 부분충수운전중 정지냉각펌프의 입구압 지시치는 펌프의 안전운전을 감시하는데 가장 효과적인 변수임을 보여주었다.
- 2) 펌프의 유효흡입수두 확보 및 안전운전을 위해서 영광 3호기 정지냉각펌프의 공기유입을 고려한 속도수두영향을 평가할 필요성이 있다.
- 3) 고온관의 부분충수운전중 노즐댐이 설치된 상태 및 설치되지 않은 상태에서 입구압 지시치는 서로 다른 현상을 보여주므로 노즐댐 설치 유무에 따른 펌프 입구압의 영향 평가가 요구된다.
- 4) 영광 3 호기 부분충수운전중 나타난 불안정한 펌프 입구압은 공기가 유입되는 징후일 수 있으므로 펌프의 안전운전을 위해서는 수위증가 또는 유량감소 방안이 모색되어야 한다.

참 고 문 헌

- 1) Generic Letter 88-17, "Loss of Decay Heat Removal", Oct. 17, 1988.
- 2) WCAP-11916, "Loss of RHR Cooling While the RCS is Partially Filled", July, 1988.
- 3) RCS 배수 및 노즐 부분충수운전, 영광 제2발전소 운영절차서, 종합-06.