

## 역여유도로 확인된 안전관련 모터구동밸브에 대한 규제 입장

### Regulatory Position for the Safety-related Motor-Operated Valves having Negative Operational Margin

신대수, 금오현, 성계용, 김월태,  
한국원자력안전기술원

성풍현  
한국과학기술원

#### 요 약

모터구동밸브의 설계기준 성능은 설계기준분석, 정적시험, 동적시험 및 PPM 분석을 통하여 밸브에 요구되는 쓰러스트와 구동기의 출력을 비교함으로써 평가된다. 가동중 원전에 대한 모터구동밸브의 여유도는 발전소 핵연료 재장전 기간 중에 수행한 동적시험 결과 또는 PPM 분석결과를 이용하여 계산한다. 밸브의 여유도가 (-) 여유도를 가진 것으로 평가된다면, 설계기준 조건 시 해당밸브는 안전기능이 적절히 수행될 수 없다고 예상된다. 따라서, (-) 여유도 밸브 확인시, 원전 재기동에 따른 안전성이 검토되어야 하며, 또한 효율적인 규제 절차를 통하여 사업자의 발전소 운영을 지원해야 할 필요도 있다.

본 논문에서는 모터구동밸브의 규제경험 및 사례를 통하여 (-) 여유도가 확인된 밸브에 대한 규제 입장을 수립하고자 한다.

#### Abstract

The design basis performance of motor operated valves is evaluated comparing the required thrust of the valve with the actuator output, and operational margin can be determined through design basis analysis, static tests, dynamic tests and PPM analysis. The operational margin of motor operated valves in the operating plants is calculated by using the result of dynamic tests or PPM analysis performed during the refueling outage. If the margin of a evaluated valve shows negative value, the valve would not provide properly its safety function at the design basis condition. Therefore, the plant safety should be reviewed for the restart of the plant in case of identification of valves having the negative operational margin. And it is needed to support the plant re-operation through the efficient regulatory procedure.

In this paper, the regulatory position for valves having the negative operational margin was established based on regulatory experiences and examples on motor operated valves.

#### 1. 서 론

안전관련 모터구동밸브 성능시험 및 분석은 국내 모든 원전에 설치된 안전관련 모터구동밸브에 대하여 각 밸브의 설계기준 조건을 검토하여, 밸브가 설치된 계통의 설계기준 사고시의 조건을 확인하고 모터구동밸브가 그 조건 즉, 가장 열악한 차압, 유량, 온도 상태에서 적절히 동작할 수 있도록 설계되었는지 확인하는 것을 목적으로 한다.

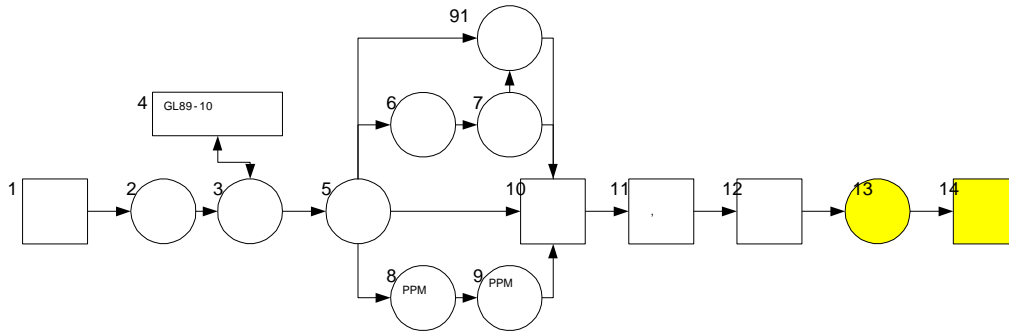
미국 NRC는 이미 1989년 6월, GL 89-10[1]을 통하여 원전 사업자에게 안전관련 모터구동밸브에 대하여, 설계기준을 검토하고, 제어 스위치 설정값이 적합한 위치에 조정되어 있는지를 입증하고, 실현 가능한 설계기준 조건에서 밸브를 시험하고, 모터구동밸브 고장을 평가하여 필요시 시정 조치하고, 모터구동밸브의 문제점을 분석하고 관리하도록 요구한 바 있다. 미국 모터구동밸브 사용자 그룹 발표에 따르면, 2001년 1/4 분기 D. C. Cook 발전소에 대한 NRC의 규제검사가 완료되면, 미국내 모든 원전에 설치된 안전관련 모터구동밸브의 성능평가는 종료되는 것으로 알려져 있다.

국내에서도 97년 6월, 모터구동밸브 및 동력구동 게이트 밸브에 관한 과학기술부 규제 권고사항 [2]이 발행되었다. 권고사항에는 원자력 발전소의 모든 안전관련 모터구동 밸브에 대하여 설계기준 검토를 수행하고, 그 검토결과에 따라 적절한 시정조치를 취하고, 설계기준 조건에서의 시험을 통하여 밸브의 성능을 입증하도록 요구하고 있다. 1999년 4월, 영광 1호기 시범원전 시험을 선두로 2001년 3월 현재, 15개 원전 250여대 모터구동밸브의 성능진단 시험 및 분석이 수행되었으며, 2005년 6월, 16개 가동중 원전 1,700 여대의 밸브가 평가될 예정이다.

## 2. 모터구동밸브 성능진단 평가 절차

모터구동밸브의 설계기준 평가는 설계기준분석, 정적시험, 동적시험 및 PPM 분석을 통하여 밸브에 요구되는 요구 쓰러스트와 구동기의 출력을 비교함으로써 모터구동밸브의 작동 가능성을 평가한다. 한전은 계획예방정비(O/H) 2개월 전에 설계기준분석보고서를 규제기관인 과기부를 통하여 원자력안전기술원에 제출한다. 설계기준분석보고서에는 밸브의 설계기준 차압을 계산하는 계통 설계기준분석, 차압이 발생할 때 밸브에 미치는 부하를 계산하는 쓰러스트/ 토크 분석, 해당 사건 발생시 구동기에 미치는 전압강하를 계산하는 전압강하 분석, 밸브의 취약부를 계산하는 취약부 분석, 밸브 구동기가 출력할 수 있는 최대 쓰러스트를 계산하는 구동기 출력분석이 포함되어 있다. 발전소가 계획예방정비 기간에 진입하면, PPM(Performance Prediction Methodology) 분석[3]에 필요한 밸브 데이터를 취득하기 위하여 밸브분해 점검이 수행된다. 또한, 계통 차압 및 유량이 제로인 상태에서 정적시험이 수행되고, 산출된 신호가 분석되어 밸브 및 구동기에 있을 수 있는 결함 등의 이상유무를 점검하게 된다. 일정 설계기준 차압 이하인 밸브는 정적시험으로 밸브의 최종 여유도가 산출된다. 일정 설계기준 차압 이상인 밸브그룹의 30%는 설계기준 차압 90% 이상에서 동적시험이 수행되고, 그 시험 결과를 이용하여 최종 여유도가 결정된다. 계통배열 상 동적시험이 수행 불가능한 밸브는 PPM 분석으로 동적시험이 대체되어 최종 여유도가 계산된다. 평가의 흐름도는 그림 1과 같다[4, 5].

그림 1 모터구동밸브 성능평가 흐름



### 3. (-) 여유도 및 성능저하 밸브 처리 규제절차

#### 규제절차의 필요성

안전관련 모터구동밸브 성능시험 및 분석에 대한 심, 검사를 수행함에 있어, 여러 가지 기술적으로 판단하여야 할 부분들이 있지만, 가장 논란이 될 수 있는 핵심적인 요소는 그림 1의 (2) 정적시험 후 발견될 수 있는 모터구동밸브의 결함 또는 고장이며, (10) 동적시험, 정적시험, PPM 분석 후 계산된 여유도가 (-) 값을 가지는 경우이다. 즉, 모터구동밸브의 성능이 설계기준 조건에 미달하는 경우가 확인되었을 때이다. 한전은 이러한 성능저하 확인 시에 대비하여 기술적 대책을 절차화하였지만, 그 절차는 원전 사업자의 측면에서 고려한 것으로 판단된다. 사업자가 수립한 성능개선절차는 해당 밸브의 성능이 설계기준 조건에 미달한다 할지라도, 발전소 계획예방정비 후 임계진입과의 관계에 대하여 언급하고 있지 않아, 발전소 안전 운전을 충분히 보장해 주지 못한다는 문제점을 가지고 있다고 판단된다. 이러한 문제점으로 인하여 발전소 비정상 상태 또는 사고 발생 시 (-) 여유도 밸브가 설계기준 성능을 적절히 발휘하지 못할 수 있는 위험 잠재성을 가지게 된다.

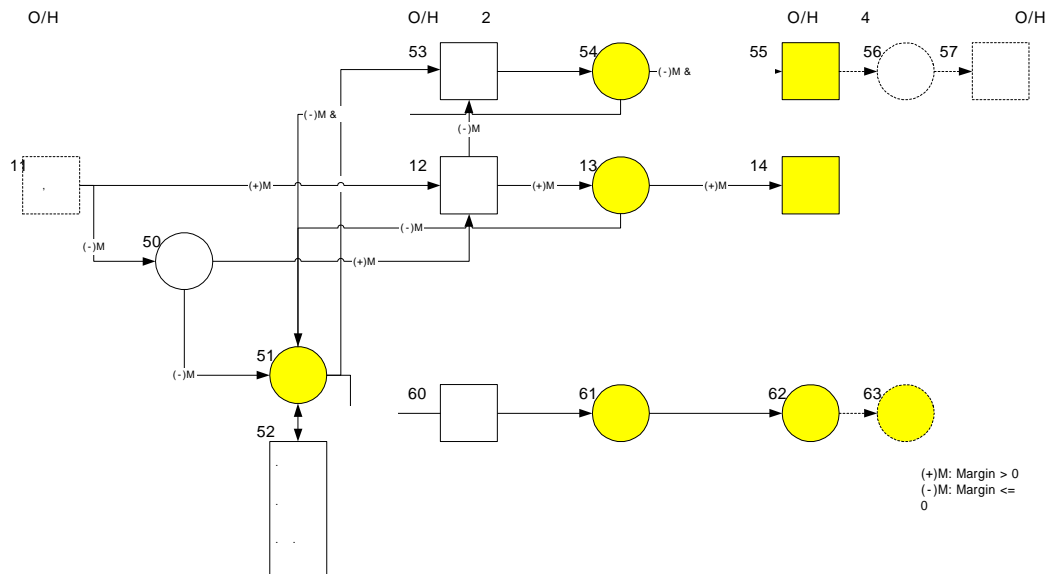
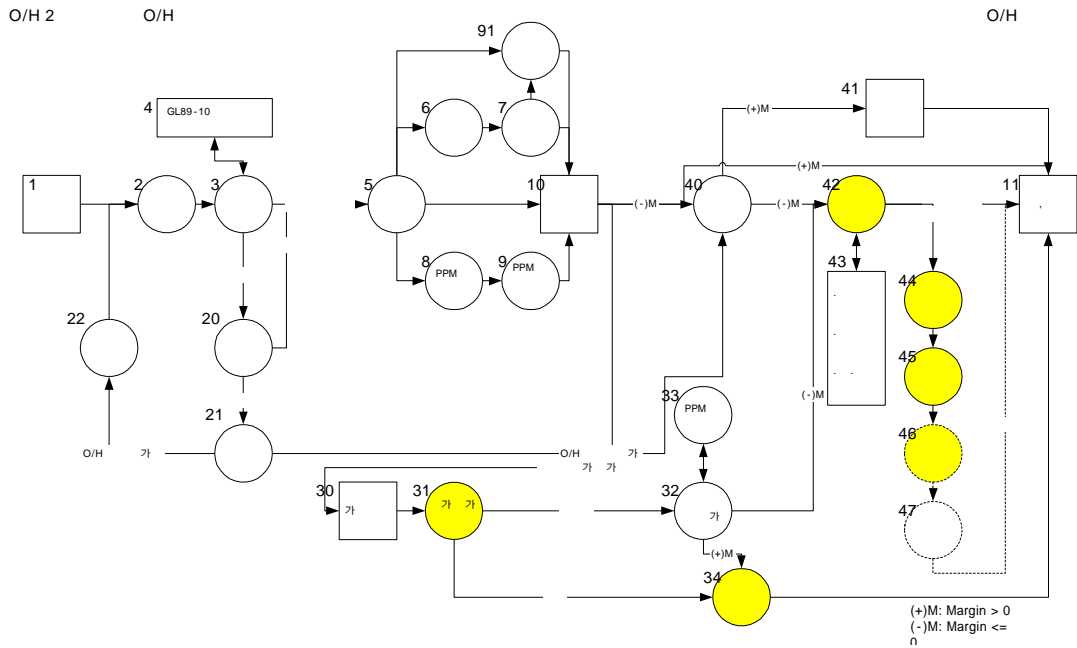
#### 규제절차의 수립

원전 임계진입 며칠 전에 (-) 여유도를 갖는 밸브가 확인된 상태에서 어떠한 규제절차를 따라 해당 밸브를 포함한 원전의 안전성을 평가하여야 하는지에 대한 규제절차가 수립되어 있지 않아 다음과 같은 사항에 문제점이 제기되었다.

- (-) 여유도 밸브 확인시 사업자가 규제기관에 보고하여야 하는 사항 및 절차
- 발전소 운전 사업자의 안전성 평가에 대한 규제기관의 검증활동

이러한 문제점을 제거하기 위하여 안전기술원 내부회의를 거쳐 2000년 안전기술정보회의에 “안전관련 모터구동밸브 역여유도 및 성능저하 처리절차에 대한 규제입장”[6]을 발표하였다. 안전관련 모터구동밸브 성능시험 및 분석에서 결함, 고장 또는 역여유도가 확인될 시, 발전소의 안전성을 유지하기 위하여 필요한 규제처리 절차를 그림 2와 같이 수립하였다.

그림 2 가동중 원전에 대한 역여유도 모터구동밸브 발생시 처리절차



**주요 결정요소**

상기와 같은 가동중 원전에 대한 역여유도 모터구동밸브 발생시 처리절차를 수립함으로써 가동중 원전에서 시험대상 밸브에서 결함, 고장 또는 역여유도가 확인된 경우, 가능한 사업자의 원자로 임계진입을 방해하지 않으며, 원전 안전을 확보할 수 있는 효율적인 규제방안을 마련하였다. 다음은 문제점의 주요 결정요소에 대한 설명이다.

첫째, 정적시험 결과에서 결함 또는 고장이 발견된 상황(그림 2의 3번)이다. 성능저하 분석결과에서 결함 또는 고장의 상태가 계획된 정비기간 내 완료될 수 있다면, 문제가 없겠지만, 보수의 기간이 계획된 정비기간을 초과할 것으로 예측된다면, 사업자는 조속히 그 사실을 안전기술원에 통보하고 해당 밸브에 대한 안전성 분석을 수행하여야 한다. 사업자의 안전성 분석보고서를 기초하

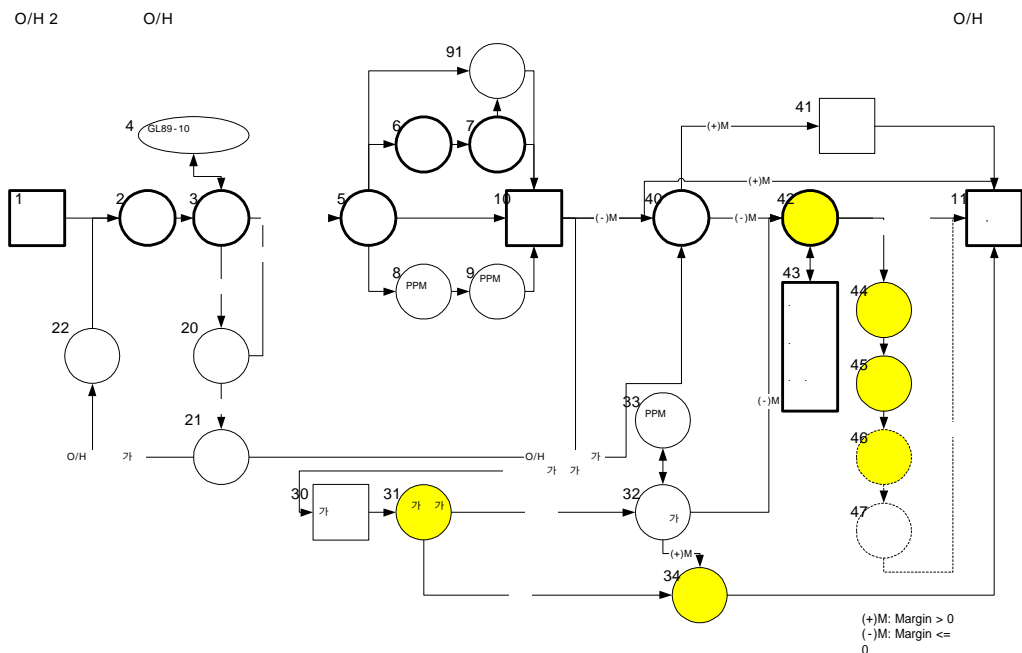
여 규제기관은 임계진입 가능 여부를 결정할 것이다.

둘째, 정적시험, 동적시험 또는 PPM 분석이 완료된 결과에서 밸브의 여유도가 (-)로 산출된 경우 (그림 2의 10번)이다. 밸브성능에 대한 상세검토 결과에서 (+) 여유도로 확인되거나, 어떠한 부품의 보수 또는 교체로 (+) 여유도로 확인된다면 문제가 없겠지만, 계획예방정비 기간내 (+) 여유도에 대한 확인이 곤란한 경우가 있을 수 있다. 또한, 이러한 역여유도 확인시기는 밸브 동적시험이 발전소 운전 모드 4에서 수행될 수도 있으므로 원자로 임계 며칠 전에 발생할 가능성이 높다. 이러한 상황이 발생한다면, 사업자는 해당 밸브에 대한 안전성분석보고서를 제출하여야 하며, 관련 운전 절차서를 수립하거나 개정함으로써 원전의 안전성을 입증하여야 한다. 규제기관은 사업자가 제출한 자료를 기초하여 원전의 안전성을 평가하여 임계진입을 허용할 수 있다.

셋째, 제출된 시험계획서에는 해당 계획예방정비 기간 중에 시험되도록 계획되어 있으나, 어떠한 이유로 밸브의 시험을 차기 정비기간으로 연기하고자 하는 경우이다. 시험이 필연적으로 연기될 만한 사유가 있다면, 연기사유는 검토되어 시험은 연기될 수 있을 것이다. 하지만, 설계기준분석 단계나, 정적시험 완료단계에서 동적시험 결과가 (-) 여유도가 발생할 가능성이 높은 것으로 예상되어 밸브의 성능 분석완료를 연기하고자 함은 발전소 안전운전에 중대한 위해를 미치는 것이기에 이러한 시험 또는 분석연기는 허용되지 않는다.

#### 4. 실제사례의 적용

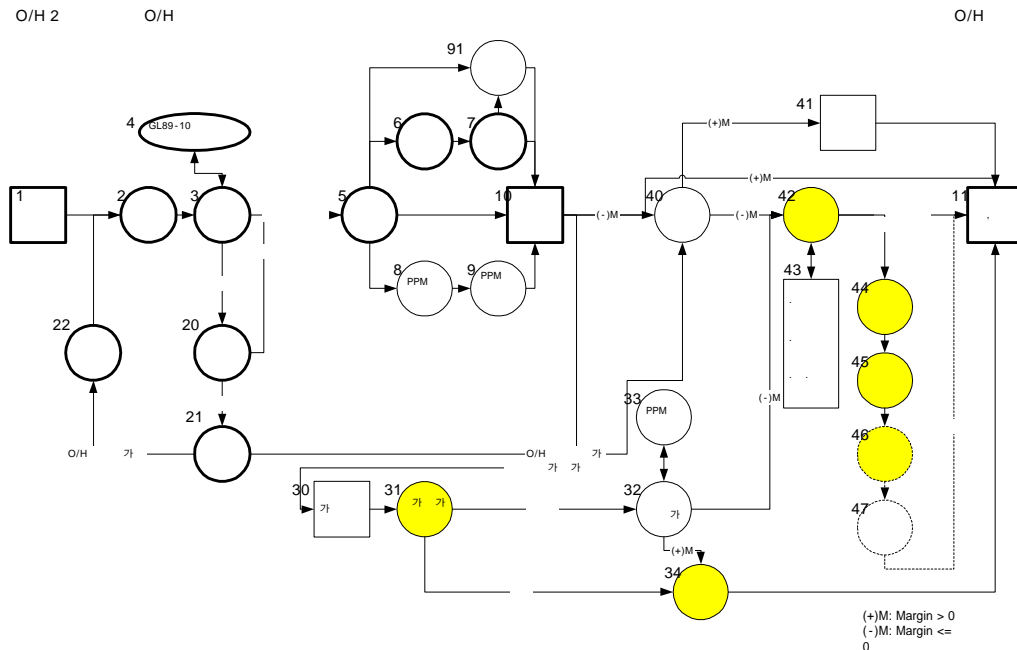
##### 사례 1- 울진 4호기 고압안전주입 펌프 후단 격리밸브 SI-V698, V699



2000년도 울진 4호기 고압안전주입 펌프 후단 격리밸브 SI-V698, V699에 대한 동적시험 준비 중, 상기 2대 밸브의 동적시험에 필요로 되는 압력 전송기에 이상이 발생하였다. 상기 2대 밸브는 정적시험이 수행되었으며, 정적시험결과 낮은 여유도를 보였기에 동적시험에서 (-) 여유도를 보일 가능성도 있었다. 동적시험 준비 중 압력 전송기 고장으로 인하여 동적시험이 불가하다는 사실이 통보되었다. 해당 밸브에 대한 규제 검토절차는 사례 1. 그림에서와 같이 사업자는 여유도 평가 미수행 사유를 안전기술원에 보고(30)하였으며, 안전기술원은 보고된 평가 불가 사유가 타당하지를 검토(31)하였다. 불가사유가 타당한 것으로 판단되었기에(34), 해당 밸브의 시험은 차기 계획에

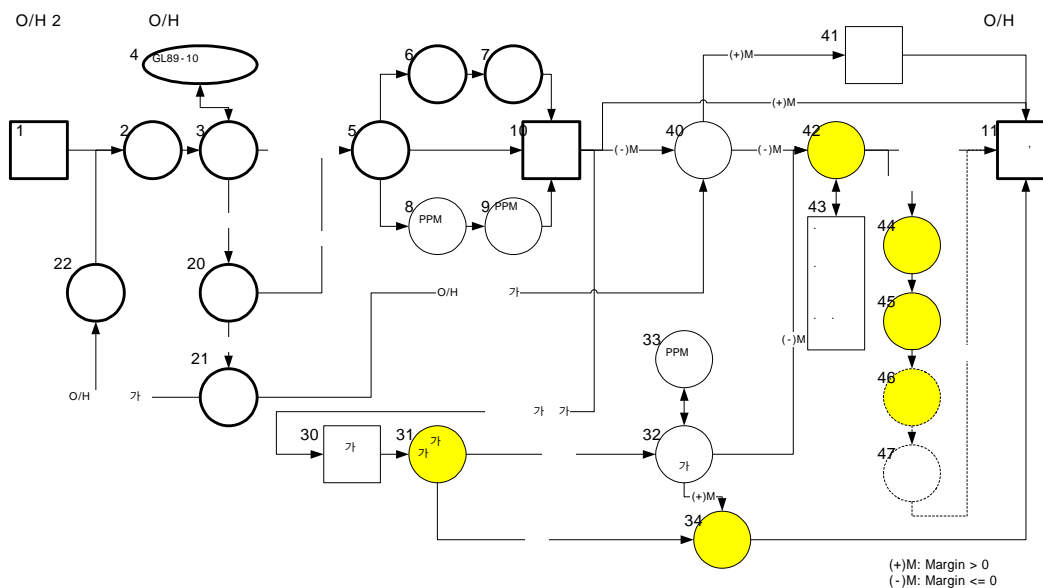
방정비 기간으로 연기되었다.

**사례 2- 영광 3호기 보조급수계통 차단 및 크로스 타이 밸브 AF-V043, V044, V049, V050**



2000년도 영광 3호기 보조급수계통 차단 및 크로스 타이 밸브 AF-V043, V044, V049, V050 동적시험 결과, (-)30%를 초과하는 역여유도로 1차 평가되었다. 사업자 자체의 여유도 상세검토(40)가 있었지만, 역여유도는 변동이 없는 것으로 확인되었다. 영광 2발전소는 해당 밸브에 대한 안전성 검토(42) 필요문서로서 안전성분석보고서, 관련 운전 절차서 및 중, 장기 대책을 안전기술원으로 제출하였다(43). 안전기술원은 사업자가 제출한 문서를 검토하고, 시험 책임자와의 면담을 통하여 밸브의 역여유도는 있지만, 비정상 상태에서 운전절차를 수정함으로써, 발전소 운전 안전성에는 위해가 없는 것으로 판단되었다.

**사례 3- 고리 1호기 보조급수계통 밸브 AFE-4A, 4B, 5A, 5B**



2000년도 고리 1호기 보조급수계통 밸브 AFE-4A, 4B, 5A, 5B 정적시험에서 구동기의 워기어가 손상되었음이 발견되었다(3). 해당 밸브의 보수 필요성이 확인되었으며, 4개 밸브 구동기의 워기어가 새로이 제작되고 교체되었다(22). 정적시험이 재수행되었으며, 동적시험 결과 (+) 여유도를 갖는 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

모터구동밸브 시험 및 분석에서 결함, 고장 또는 (-) 여유도가 확인된 경우, 이러한 사실이 누락된 채 발전소가 임계에 진입한다면, 원전 운전에 상당한 위험 잠재성을 가지게 된다. 해당 밸브가 원전 안전 운전에 미치는 중요성에 따라 발전소의 임계진입은 허용되지 않을 수 있다. (-) 여유도의 밸브가 확인될 시에는 조속히 규제기관에 보고되어야 하며, 사업자가 원전 안전성 분석을 수행할 수 있는 시간 및 규제기관이 사업자의 안전성 분석결과 및 대책을 평가할 수 있는 시간이 확보되어야 한다. 밸브의 (-) 여유도 확인은 원자로 임계 며칠 전에 확인될 수도 있으므로, 이러한 상황 발생 시에는 행정적인 절차 및 안전성 평가시간이 상당한 논란거리가 될 수 있다.

(-) 여유도 밸브의 확인사실 보고와 해당 밸브가 발전소 안전 운전에 미치는 영향에 대한 평가 활동을 절차화함으로써, 규제기관과 사업자간 있을 수 있는 논란의 소지를 미연에 방지하고자 한다.

## 참고문헌

1. USNRC Generic Letter No.89-10 "Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance", June 28, 1989 and Supplements 1 through 6, June 13, 1990 to March 8, 1994
2. 과학기술부 규제권고사항 원검 71233-205(1997. 6) "모터구동밸브 및 동력구동게이트 밸브의 안전성 확인을 위한 권고 사항 "
3. Performance Prediction Methodology(PPM) Implementation Guide - Revision 2, EPRI, TR-103244-R2
4. NP-6660-D, Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants, Final Report, MPR, 1990
5. 한국전력공사 표준 절차서
  - 1) 기술-01 rev. 0 평가 기술기준 절차서
  - 2) 기술-02 rev. 0 계통설계기준 분석 절차서
  - 3) 기술-03 rev. 0 쓰러스트 및 토크 분석 절차서
  - 4) 기술-04 rev. 0 취약부 분석 절차서
  - 5) 기술-05 rev. 0 전기제어 분석 절차서
  - 6) 기술-07 rev. 0 구동기성능 분석 절차서
  - 7) 진단-01 rev. 0 정적 진단시험 절차서
  - 8) 진단-02 rev. 0 동적 진단시험 절차서
  - 9) 기술-11 rev. 0 성능예측(PPM 전산코드) 절차서
6. KINS/PR-020 Vol. 1 No. 3, 한국원자력안전기술원 제 6회 원자력안전기술정보회의, 2000. 12