

모터구동밸브 운전성 평가 사례 연구

An Evaluation of Motor Operated Valve Operability

이도환, 김범년, 박성근, 김대웅

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 논문에서는 원자력 발전소에 설치된 모터 구동 밸브의 평가 사례를 통해 밸브의 운전성 평가 방법을 제시하였다. 밸브 성능 평가를 위해 설계 기준 해석과 발전소 현장 시험에서 얻어진 데이터에 편의 및 랜덤 불확실성을 고려하여 최소 요구 쓰러스트 제한값과 허용 가능 최대 쓰러스트 제한값을 계산하였으며 해석 평가와 시험 결과로부터 평가 밸브에 대한 운전성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The evaluation methodology of motor operated valve operability is presented in this paper through the exemplary study of a valve in a Nuclear Power Plant. To estimate the valve performance, minimum required thrust and maximum available thrust limits are calculated, which are obtained by design basis analyses and in-situ tests. The uncertainties including bias and random components are taken into account in the above-stated analysis. From the observations of analysis and test results, it is found that the valve focused in the study is verified to be operable under the design basis conditions.

1. 서론

모터구동밸브는 직접적인 구동이 불가능한 장소나 밸브와의 거리가 먼 제어실에서 밸브 동작 위치 지시를 이용한 플랜트 배관 계통의 정확하고 안전한 운전에 사용되어 왔으며 밸브 개폐에 많은 동력이 필요하거나 빈번한 동작이 필요한 경우에 채택되어 왔다⁽¹⁾.

발전소 및 화학 플랜트 엔지니어링에 있어 모터구동밸브의 용량 산정은 1980년 대 후반까지 밸브 및 구동기 제작사의 경험에만 의존되어 왔으나 1980년대 발달하기 시작한 밸브 진단 기술 및 INEL (Idaho National Engineering Laboratory)에서의 실험을 계기로 모터구동밸브에 대한 기술은 크게 향상되어 왔으며⁽²⁾ 이러한 성장 결과와 더불어 미국 NRC (Nuclear Regulatory

Committee)는 원자력 발전소 (이하 원전) 계통에서 가장 운전 신뢰성 보장이 요구되는 기기 중 하나인 모터구동밸브에 대한 평가 지침 (Generic Letter 89-10 또는 GL89-10)을 발행하였다⁶³⁾. 이 지침에는 모터구동밸브 운전이 요구되는 모든 조건에서의 설계 기준을 재검토하고 유동이 존재하지 않는 상태의 정적 시험을 통한 제어 스위치 설정 및 발전소 계통 운전을 통해 설계 기준 차압 조건을 형성하고 실제 발전소 운전성을 진단 장비를 통해 평가하는 내용이 포함되어 있다. 미국은 1998년 8월까지 2개의 원전을 제외한 101개의 원전에 대해 이 지침과 관련된 프로그램의 이행이 종료되었고 이에 대한 NRC 검토가 완료된 상태이다⁶⁴⁾.

미국의 성공적인 수행 사례를 반영하여 정부 (과학기술부)에서도 2006년 6월까지 운영 또는 건설 중인 총 18개 원전에 대해 모터구동밸브의 운전성을 확인을 요구하는 지침을 발행하였다⁶⁵⁾. 이 지침은 미국 NRC가 발행한 GL 89-10을 포괄하고 있으며 밸브 설계 용량의 적정성 검토 및 설계 기준 조건하에서 실증 시험을 통한 운전성 입증 등이 주요 내용으로 포함되어 있다.

미국의 경우 100 여대 (즉, 1개의 원전)의 밸브 설계 기준 및 운전성 평가를 위해 막대한 비용과 많은 기간 (지침 발행부터 NRC 검토 완료까지 약 10년)이 소요되었다는 점을 반영해 보면 국내 원전 18개 호기에 설치된 주요 모터구동밸브의 수가 약 1600여대에 달하고 지침에 명시된 평가 완료 기간이 5년에 불과한 현실과 발전소 계획 예방정비 기간 동안 제한된 운전 조건에서만 실증 시험이 가능하다는 점에서 많은 기술 인력과 소요 비용이 예상된다.

국내 유일의 원전 사업자인 한전은 상기의 어려움을 조기에 없애고 전 원전 평가 프로그램을 계획적이고 체계적으로 수행하기 위해 본격적인 시행에 앞서 '99년 6~8월 사이에 계획 예방 정비가 예정된 발전소 (본 논문에서는 발전소의 요청에 의해 발전소명 및 구체적인 대상 밸브 명을 생략)의 12대의 밸브에 대해 '99년 8월까지 설계기준조건 검토 및 현장 시험을 수행, 완료하였다. 본 논문의 목적은 이들 밸브 중 한 밸브에 대한 운전성 평가 사례를 제시하여 발전소 및 화학 계통상에 설치된 다수의 모터구동밸브에 대한 제작 및 유지 보수 (Maintenance) 그리고 플랜트 계통 설계에 참고 자료로 제공하는 데 있다.

2. 운전성 평가 방법

그림 1은 본 논문에서 다룬 모터구동밸브 운전성 평가 절차를 개략화하여 나타낸 것이다. 원전 모터 구동밸브의 운전성 평가 프로그램에는 밸브 및 구동기에 대한 구조적 건전성 평가가 포함되나 화학 공정 등의 일반적인 적용 범위를 고려하여 이에 대한 내용은 본 논문에서 생략하였다. 아래에 기술된 내용 중 일부는 방법상의 흐름을 위해 참고 문헌 (6), (7), (8) 및 (9)에 포함된 내용을 요약하였으며 일부는 자세히 기술하였다.

2.1 대상 밸브 사양

본 연구에서 평가 대상으로 선정한 밸브는 안전 주입 계통에서 격리 기능을 수행하는 밸브 중 하나이며 표 1에는 이 밸브에 대한 주요 사양을 나타냈다.

2.2 설계 기준 차압 계산

설계 기준 차압 계산은 2.4절에 기술된 최소 요구 쓰러스트를 평가하고 동적 시험시 기준 차압 조건을 형성하기 위해 필요하다. 설계 기준 차압은 밸브가 작동되는 모든 운전 모드 검토와 각 모드에 대한 차압 계산을 통해 결정된 최대 차압으로 정의된다. 차압 계산에는 참고 문헌 (7)과 (8)에 상세하게 언급된 SFM (System Flow Model)이 사용되었으며 계산 결과에 의해 결정된 설

계 기준 차압 및 계통 조건을 표 2에 제시하였다.

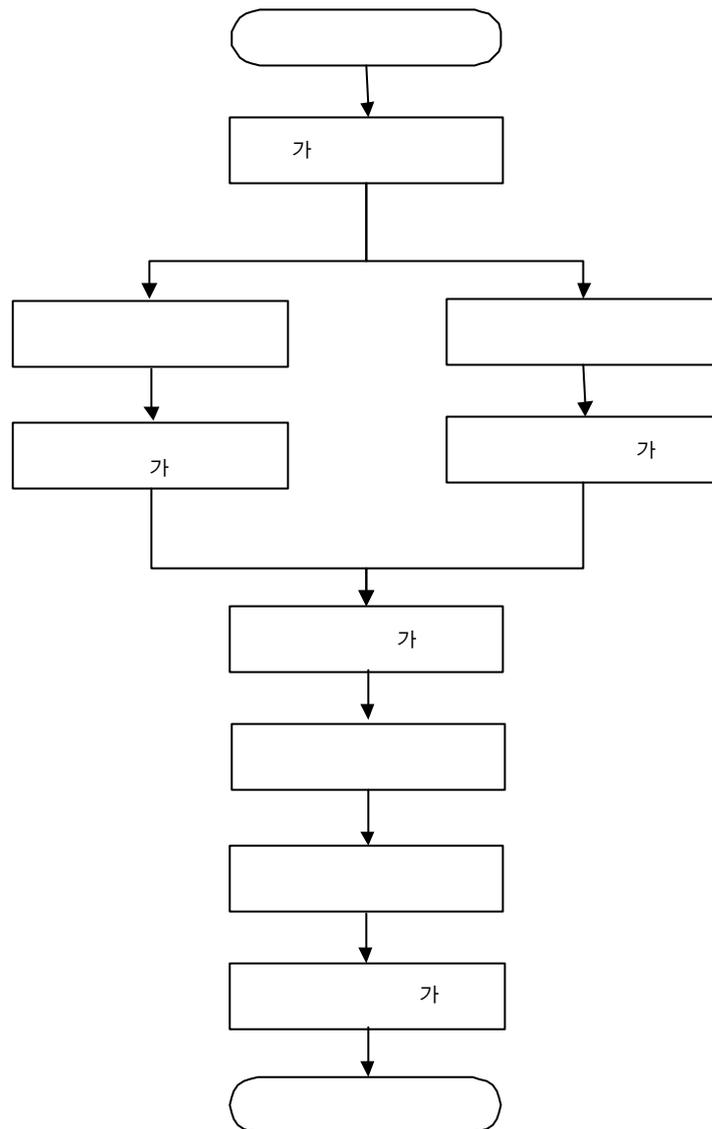


그림 1. 모터구동밸브 운전성 평가 흐름도

2.3 전압 강하 분석

전압 강하 분석은 모터구동밸브 모터에 인가되는 최소 전압을 구하여 전압강하에 의한 구동기 출력 감소를 평가하는 데 필요하다. 본 연구에서는 현재 한국 표준형 경수로 (Korean Standard Nuclear Power Plant) 설계에 사용되는 프로그램인 ELMS-AC를 사용하여 설계 기준 사건 발생 시의 최소 입력 전압을 계산하였다.

전압 강하를 구하기 위해서는 먼저 최소 운전 전압이 발생하는 운전 조건을 선정하고 대상 모터 구동밸브의 입력 단자에서의 전압을 산출할 수 있도록 소내 전력 계통에 대한 모델링이 필요하다. 케이블 길이 및 모터 제어반 (Motor Control Center)의 열동 계전기(Thermal Overload Relay) 등에 의한 저항체의 임피던스 (Impedance)를 모델링에 반영하고 ELMS-AC 프로그램에 적용하여 설계 기준 운전 모드시 모터 입력단에서의 최소 전압을 계산한다. 상기의 전압 강하 분석을 통해 얻어진 대상 밸브에 대한 최소 전압은 정격전압 (즉, 460 Volts)의 82.5%였다.

| 밸브 | | | |
|-------------------|--------------------|---------------|-------|
| 제작사명 | Westinghouse 10 in | | |
| 밸브형태 | 플렉스 웨지 게이트 | 행정길이 (in) | 9.3 |
| 스템 | | | |
| 스템직경 (in) | 2 | 쓰레드 형태 | ACME |
| 리드 (in) | 0.5 | 피치 (in) | 0.25 |
| 모터 | | | |
| 제작사명 | Reliance 3 Phase | | |
| 정격 기동 토크 (lbf-ft) | 40 | 풀아웃 효율 | 0.45 |
| 회전속도 (RPM) | 3400 | 정격 전압 (Volts) | 460 |
| 구동기 | | | |
| 제작사명 | Limitorque SMB | | |
| 구동기 규격 | 1 | 총 기어비 | 30.46 |
| 제어스위치 | | | |
| 열림시 | 리밋 | 닫힘시 | 토크 |

표 1. 대상 밸브 사양

| 항목 | 설계기준 조건 | 비고 | |
|--------------------|---------|--------|--------|
| 유체 형태 | 보론수 | | |
| 설계 유량 (psig) | 3283 | SFM 결과 | |
| 외부 온도 (°F) | 120 | | |
| 최대 밸브 전단 압력 (psig) | 열림시 | 150 | SFM 결과 |
| | 닫힘시 | 170 | SFM 결과 |
| 설계 기준 차압 (psig) | 열림시 | 147 | SFM 결과 |
| | 닫힘시 | 256 | SFM 결과 |

표 2. 대상 밸브에 대한 설계 기준 조건

2.4 최소 요구 쓰러스트 평가

최소 요구 쓰러스트 (Thrust) 평가는 세 단계에서 수행한다. 정격 시험전에는 토크 스위치에 의해 제어될 경우 정격시험에서 사용할 최초의 목표 스위치 설정치를 결정하고 운전 여유도를 평가하여 여유도가 부족한 경우에는 현장 시험전에 여유도 증진 방안을 모색하기 위한 것이다. 완전 배수상태에서 수행하는 정격시험으로부터 실제 패킹 마찰력이 얻어지며 이 마찰력은 정밀한 스위치 설정을 하기 위해 필요한 최소 요구 쓰러스트를 재 계산하는 데 사용된다. 설계 기준 조건에서 수행하는 동적시험에서는 진단 장비로부터 최소 요구 쓰러스트가 측정되어 운전 여유도 계산시 직접 사용될 수 있으나 설계 기준보다 높거나 낮은 차압 조건에서 동적시험을 수행할 경우 차압에 의한 쓰러스트를 내삽 또는 외삽하고 적절한 피스톤 효과를 고려하여 설계 준 조건에서의 최소 요구 쓰러스트를 구해야 한다.

본 연구에서는 동적 시험 전 주어진 계통 조건에서 밸브 동작을 하는 데 필요한 최소 요구 쓰러스트를 평가하기 위해 지금까지 밸브 산업계에서 많이 사용해 온 밸브 팩터 (Valve Factor) 방법

을 사용했다⁽⁸⁾.

$$F_R = F_{PACK} + F_P + F_{DP} \quad \text{또는} \quad F_R = F_{PACK} - F_P + VF \cdot A_{disk} \cdot \Delta P \quad (1)$$

여기서, F_R = 최소 요구 쓰러스트 (lbf)

F_{PACK} = 패킹 마찰력 (lbf)

F_P = 피스톤 효과 (lbf)

F_{DP} = 차압에 의한 힘 (lbf)

VF = 밸브 팩터 (무차원)

A_{disk} = 디스크 면적 (lbf)

ΔP = 차압 (psid)

식 (1)에서 패킹 마찰력 (F_{PACK})에는 디스크와 스템 무게에 의한 효과도 포함된 것이다⁽⁸⁾.

정적시험 전 최소 요구 쓰러스트 계산에는 식 (2)를 이용하고 표 1의 스템 직경을 사용하여 평가했다.

$$F_{PACK} = 1000 \cdot D_S \quad (2)$$

여기서 D_S 는 스템의 직경 (in)이다. 식 (2)는 참고문헌(10)의 Asbestos 패킹에 대한 계단형 (Stepwise) 평가 값을 선형화한 식이다. 시험전 초기 패킹 마찰력에 대한 추정 값은 2000 lbf였다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 완전 배수 상태에서 행정 시험 (즉, 정적 시험)을 수행하고 쓰러스트를 측정하면 실제 패킹 마찰력이 얻어진다. 본 시험 대상 밸브에 대해 열림과 닫힘 정적시험을 수행하여 얻어진 측정 패킹 마찰력 중 최대값은 3592 lbf였다. 시험전 추정된 패킹 마찰력 (2000 lbf)와 정적시험 측정값 (3592 lbf)을 평가하면 식 (2)에 의한 추정이 보수적이지 않음을 알 수 있다. 타 밸브에 대한 시험 결과와 식 (2)에 의한 패킹 마찰력 추정 값을 비교해 보면 식 (2)에 의한 예측은 많은 오차가 포함될 수 있음을 알 수 있다. 이는 패킹 마찰력이 패킹 재질 및 스템 직경뿐만 아니라 패킹 길이, 온도 및 패킹 체결력 등의 함수이기 때문이다⁽¹⁰⁾.

식 (1)의 피스톤 효과는 설계 기준 차압 조건에서의 동적 시험을 수행하지 않고는 정확한 설계 기준 값을 평가할 수 없으므로 시험 전 및 정적 시험 그리고 설계 기준을 벗어난 차압 시험에서는 밸브의 설계 기준 전단 압력과 식 (3)을 이용하여 평가하며⁽⁸⁾ 최소 요구 쓰러스트 계산시 열릴 때는 최소 요구값이 감소하는 방향 (즉, 음의 값)으로 닫힐 때는 증가하도록 (즉, 양의 값) 적용한다.

$$F_P = P_U \cdot \frac{\pi}{4} D_S^2 \quad (3)$$

여기서 P_U 는 밸브 전단 압력 (psig)이다. 표 2의 설계 기준 전단압력을 사용하여 계산한 열림시와 닫힘시의 피스톤 효과는 각각 471.2 lbf와 534.1 lbf였다.

차압에 의한 힘 (F_{DP})은 밸브 전 후단 차압이 존재할 때 밸브 디스크를 움직이는 데 필요한 힘이며 최소 요구 쓰러스트 (F_R)를 구성하는 힘 중 가장 지배적인 것으로 알려져 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 밸브 팩터(VF)는 같은 밸브에 대해서도 사용 디스크 면적 (A_{disk})에 따라 변할 수 있는 데 본 논문에서는 디스크 면적 (A_{disk})은 90%의 밸브 공칭 직경을 사용하였고 0.4의 밸브 팩터 (VF)를 사용하여 동적 시험 전 차압에 의한 쓰러스트 (F_{DP}) 계산에 사용하였다.

2.5 구동기 성능 평가

구동기는 설계 기준 조건하에서 최소 요구 쓰러스트 이상을 제공할 수 있도록 충분한 용량이 확보되어야 하며 구동기 출력은 전압 강하시의 구동기 성능, 구동기 정격 하중 및 토크 스위치인 제어 경우 스위치 설정과 관련된 인자 등에 의해 제한된다. 전압 강하시의 구동기 출력 토크는 일반적으로 다음식에 의해 평가 된다⁽¹¹⁾.

$$TQ_{out} = TQ_{motor} F_{temp} F_{app} EFF_{gearbox} OAR \quad (4)$$

여기서 TQ_{out} =구동기 출력 토크 (lbf-ft)

TQ_{motor} =모터 토크 (lbf-ft)

F_{temp} =온도 손실 계수 (무차원)

F_{app} =적용 계수 (무차원)

$EFF_{gearbox}$ =기어 박스 효율 (무차원) OAR =총 기어비 (무차원)

식 (4)에 포함된 각 항은 구동기 제작사가 모터 인가 전압 및 온도, 밸브 하중 등을 가변할 수 있는 설비를 이용하여 시험적으로 결정되는 데 적용 계수 등의 정의에 따라 각 항의 계수 및 지수가 달라질 수 있다. 본 연구에서 다루어진 밸브의 구동기는 교류 모터를 장착한 Limitorque사의 제품이므로 식 (4)에 나타난 각 항은 이 구동기에 대해 최근 얻어진 연구 결과와 최신 기술 공고 (Technical Update)를 중심으로 평가한다.

교류 모터 토크 (TQ_{out})는 설계 기준 전압 강하시 모터에 인가될 수 있는 최소 전압의 제공에 반비례한다.

$$TQ_{motor} = TQ_{start} \cdot \left(\frac{V_{min}}{V_{rate}} \right)^2 \quad (5)$$

여기서 TQ_{motor} =모터 토크 (N-m 또는 lbf-ft)

TQ_{rate} =모터 정격기동토크 (N-m, lbf-ft)

V_{min} =설계 기준 최소 전압 (Volt)

V_{rate} =모터 정격 전압 (Volt)

식 (5)은 표 1에 나타난 모터 사양과 2.3절의 전압 강하 분석 결과를 이용하여 계산한다. 온도 손실 계수 (F_{temp})는 주위 온도의 상승 또는 높은 하중 상태에서 지속적인 운전을 할 때 발생하는 모터 온도 상승에 기인한 모터 권선 (Winding)의 저항 증가에 의한 손실이며 본 연구에서는 Limitorque사의 기술 공고 93-03에 따라 이 값을 평가하였다⁽¹¹⁾.

$$F_{temp} = 1 - \frac{\Delta TQ}{155^{\circ}C} \cdot \left[Temp_{DBA} - 40^{\circ}C + \left(\frac{75^{\circ}C \cdot t_{max_stroke}}{900\ sec} \right) + \left(\frac{75^{\circ}C \cdot t_{max_start}}{t_{max_stall}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서 ΔTQ =토크 손실 (무차원)

$Temp_{DBA}$ =설계기준 환경온도 ($^{\circ}C$)

t_{max_stroke} =최대 행정 시간 (sec)

t_{max_start} =최대 기동 시간 (sec)

t_{max_stall} =최대 스톱(Stall) 시간 (sec)

본 연구에서 최대 기동 시간 (t_{max_start})과 최대 스톱 (Stall) 시간 (t_{max_stall}) Reliance 3상 모터에 일반적으로 적용되는 0.1 sec와 10 sec를 각각 가정하여 평가했다. 식 (6)에서 최대 행정 시간 (t_{max_stroke})은 모터, 구동기 및 밸브의 기구학적인 분석에 의해 평가될 수 있다.

$$t_{max_stroke} = \frac{\ell_{travel} \cdot 60 \cdot OAR}{RPM \cdot \ell_{lead}} \quad (7)$$

여기서 ℓ_{travel} =행정 길이 (in)

ℓ_{lead} =스텝 리드 (in)

RPM=모터 RPM (rpm)

OAR=총 기어비 (무차원)

적용 계수 (F_{app})는 장착될 수 있는 모터의 차이와 공급 전압의 미소 변동을 고려한 값이며 보통 0.9 또는 1.0을 사용하는 데 본 평가에서는 보수적으로 0.9를 사용했다. 식 (4)에 포함된 기어박스 효율 ($EFF_{gearbox}$)은 모터와 스텝 및 스텝 너트의 마찰을 제외한 구동기에 장착된 기어들과 베어링에서 발생하는 마찰 손실을 고려한 값이며 일반적으로 갑작스런 스톱 발생시 모터 관성 효과를 고려할 때 사용하는 스톱 효율 (Stall Efficiency), 정격 하중 및 모터 정격 속도 하에서의 구동기 효율 평가에 사용되는 러닝 효율 (Running Efficiency) 및 매우 높은 하중 상태에서 모터가 매우 느린 속도로 움직이거나 (Lugging) 기동할 때 적용되는 풀아웃 효율 (Pullout Efficiency) 등 3가지로 분류된다. 이 중 모터 스톱 발생시 밸브 및 구동기의 구조적 건전성 평가에 사용되는 스톱 효율이 가장 크고 구동기 용량 설계시 가장 제한적인 조건 상태를 고려한 풀아웃 효율이 가장 작다⁽²⁾. 본 연구에서는 가장 보수적인 효율인 풀아웃 효율을 사용했으며 Limitorque사가 제공한 값은 0.9였다⁽¹²⁾. 총 기어비 (OAR)는 구동기 기어비 감소에 따라 얻어진 토크 증가를 고려한 값이다^{(2),(12)}.

구동기의 회전 운동과 출력 토크는 스텝 및 스텝 너트를 거쳐 직진 운동과 쓰러스트 (즉, 힘: F_{out})으로 변환되며 이 힘은 스텝과 스텝 너트 사이의 마찰 계수 및 나사부의 기하학적 조건의 함수인 스텝 팩터 (SF) 및 출력 토크로부터 평가된다⁽¹⁰⁾.

$$F_{out} = \frac{TQ_{out}}{SF} \quad (8)$$

여기서, F_{out} = 구동기 출력 쓰러스트 (lbf)

TQ_{out} =구동기 출력 토크 (lbf-ft)

SF = 스텝 팩터 (ft)

스텝 팩터 (SF)는 정적시험에서 밸브 작동시 토크와 쓰러스트를 동시에 측정함으로써 얻어질 수 있다. 본 평가에서는 정적시험시 밸브 동작 중 4점에서 측정된 값 중 최대 값인 0.01850 ft이 사용되었고 이에 따라 계산된 구동기 출력 쓰러스트는 18010.8 lbf였다.

2.6 운전 여유도 (Operational Margin) 평가

보통 동력 구동에 의한 밸브의 운전 여유도는 불확실성 (Uncertainty)이 고려된 실제 출력과 계통 또는 공정이 요구하는 최소 출력과의 차이를 비율로 나타내며 여기에서 불확실성은 제어 스위치 (Control Switch)가 작동 또는 트립 (Trip) 할 때 나타나는 쓰러스트 변화와 관계된다⁽⁶⁾. 일

반적으로 여유도는 트립 값에 불확실성을 직접 반영하여 평가하지 않고 최소 요구 쓰러스트와 구동기 출력 쓰러스트를 조정하여 계산하는 데 이 조정된 최소 요구 쓰러스트와 구동기 출력 쓰러스트를 각각 최소 요구 쓰러스트 제한값과 허용 가능 최대 쓰러스트 제한값이라 정의한다⁶⁾. 본 논문에서 사용한 토크 스위치 제어 및 리미트 스위치 제어시의 쓰러스트 기준 여유도 계산 방법은 식 (9) 및 (10)과 같다.

$$\text{Margin}_{\text{TS}} = \frac{F_{\text{CST}} - F_{\text{R_MIN}}}{F_{\text{R_MIN}}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Margin}_{\text{LS}} = \frac{F_{\text{A_MAX}} - F_{\text{R_MIN}}}{F_{\text{R_MIN}}} \times 100 \quad (10)$$

여기서, $\text{Margin}_{\text{TS}}$ = 토크 제어시 여유도 (%)

$\text{Margin}_{\text{LS}}$ = 리미트 제어시 여유도 (%)

F_{CST} =토크 스위치 트립시 쓰러스트 (lbf)

$F_{\text{R_MIN}}$ =최소 요구 쓰러스트 제한값 (lbf)

$F_{\text{A_MAX}}$ =허용 가능 최대 쓰러스트 제한값 (lbf)

평가된 밸브의 여유도 및 불확실성은 참고 문헌 (9)에 기술된 내용을 근거로 분석되었으며 여유도 계산시 편의 (Bias) 불확실성인 부하율 (Rate of Loading)과 스프링 팩 풀림 (Spring pack Relaxation), 스템 윤활 저하 (Stem Lubrication Degradation)은 각각 10%, 5%와 10%를 고려하였고 랜덤 (Random) 불확실성인 측정 장비, 센서 및 토크 스위치 반복성 (Torque Switch Repeatability)에 의한 불확실성은 각각 1.5%, 8.3%와 5%를 고려하였다.

2.7 정적 시험 (Static Test)

정적시험의 주요 목적은 스템 팩터 및 패킹 마찰력을 실측하여 최소 요구 쓰러스트 제한값과 허용 가능 최대 쓰러스트 제한값을 재계산하고 이들에 의해 형성된 토크 스위치 설정 창 (Torque Switch Window)을 분석하여 토크 스위치를 설정하는 것이다. 정적시험시 식 (9)과 (10)에 의해 평가된 닫힘 및 열림시 여유도는 각각 12.1%와 118.7%였으며 이 여유도는 동적시험 후 최소 요구 쓰러스트 측정 값을 이용하여 재 평가 되었다. 본 논문의 대상 밸브에 대한 정적시험은 참고 문헌 (8)에 기술된 바와 같이 완전 배수 상태에서 수행되었고 측정장비와 센서는 CRANE MOVATS사의 MOVATS 3500과 TELEDYNE사의 쓰러스트 및 토크 측정 센서인 QSS (Quick Stem Sensor)를 사용하였다.

2.8 동적 시험 (Dynamic Test)

동적 시험은 발전소 현장의 계통 조건을 이용하여 밸브 전·후단에 차압을 발생시키고 이때 밸브를 작동시켜 밸브의 운전성을 직접적으로 확인하며 실제 최소 요구 쓰러스트를 측정하여 2.6절에 기술된 운전 여유도를 평가하기 위해 수행되는 시험이다. 최소 요구 쓰러스트에 대한 측정값은 설계 운전 조건하에서 시험을 할 때 디스크가 움직이기 시작하는 직후부터 밸브가 완전히 열리거나 유동 격리가 발생하는 점까지 측정된 쓰러스트 중 최대값으로 정의한다⁰³⁾.

형성된 차압 조건이 설계 기준 차압보다 높거나 낮은 경우는 식 (1)을 분석하여 차압에 의한 힘을 계산하고 최소 자승법 (Least Square Method)를 사용하여 설계 기준 차압에서의 힘 (F_{DP})을 평가하며 정적시험에서 얻은 패킹 마찰력 및 2.4절의 방법을 이용하여 구해진 피스톤 효과를 고

려하여 열림시 및 닫힘시 설계 기준 차압 조건에서의 최소 요구 쓰러스트를 평가한다⁰³⁾.

본 평가에서 닫힘시 형성된 최대 차압은 설계 기준 차압의 약 72%였으므로 설계 기준 차압에 의한 힘 (F_{DP})을 계산하기 위해서 열림과 닫힘시에 대해 각각 4번의 시험을 수행하였다. 표 3에는 측정된 최대 차압 및 차압에 의한 쓰러스트를 나타내었다. 표 3의 압력은 불확실성이 0.5%인 압력 Transmitter 사용하여 측정한 것이다. 그림 2는 표 3에 나타낸 닫힘시의 시험 차압과 차압에 의한 힘을 그림으로 묘사한 것이며 낮은 차압에서의 데이터를 제외하면 차압과 차압에 의한 쓰러스트는 선형성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 설계 기준 차압의 50% 이상에서 수행한 시험에서는 선형 (Linear) 최소 자승 외삽 법을 사용하여 최소 요구 쓰러스트 (F_{DP}) 평가가 가능함을 추정할 수 있다.

2.4~2.8절까지 기술된 내용을 이용한 최종 밸브 평가 결과가 표 4에 나타나 있다. 불확실성을 고려한 여유도의 최종 평가 결과, 시험시 현장 및 주 제어실 (MCR)에서 확인한 밸브 동작의 정상 유무, 그리고 신호 상태의 정상 유무를 종합하여 판단한 결과 본 연구에서 분석한 밸브는 설계 기준 조건에서도 성능을 충분히 발휘할 수 있음을 확인할 수 있었다.

| 닫힘시 | | |
|-----|-------------|-------------------|
| 회수 | 최대차압 (psid) | 차압에 의한 쓰러스트 (lbf) |
| 1 | 135 | 3550 |
| 2 | 145 | 3487 |
| 3 | 175 | 5041 |
| 4 | 185 | 5332 |
| 열림시 | | |
| 회수 | 최대차압 (psid) | 차압에 의한 쓰러스트 (lbf) |
| 1 | 130 | 2516 |
| 2 | 130 | 2342 |
| 3 | 155 | 2969 |
| 4 | 150 | 2873 |

표 3. 측정 최대 차압 및 차압에 의한 쓰러스트

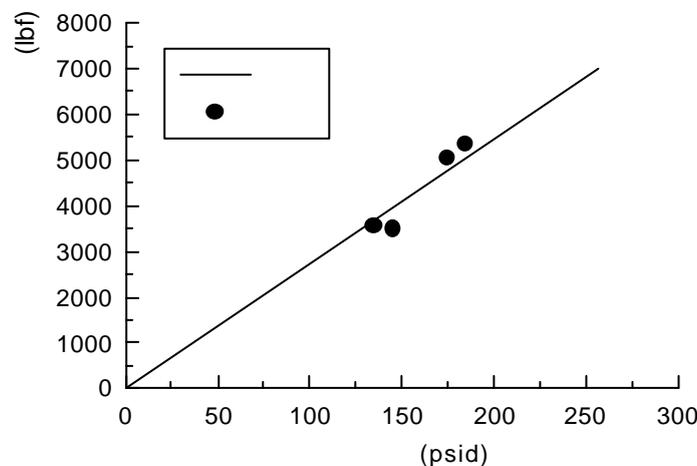


그림 2. 닫힘시 차압에 의한 쓰러스트

| 항목 | 달힘시 | 열림시 |
|------------------------------|---------|--------|
| 설계 기준 최대 차압 (psid) | 256 | 147 |
| 최소 요구 쓰러스트 제한값 (lbf) | 15021.3 | 5907.4 |
| 정적 시험시 토크 스위치 트립시 쓰러스트 (lbf) | 16081.9 | - |
| 허용가능 최대 쓰러스트 제한값 (lbf) | 16401 | 15008 |
| 여유도 (%) | 6.6 | 154.1 |

표 4. 최종 여유도 평가 결과

3. 결론

본 논문에서는 10 in 플렉스 (Flex) 웨지 게이트형 밸브의 발전소 현장 시험 사례 및 해석 평가 결과를 통해 모터 구동 밸브에 대한 일반적인 운전성 평가 방법을 제시하였으며 이를 위해 필요한 설계 기준 차압 계산, 전압 강하 분석, 최소 요구 쓰러스트 및 구동기 성능 평가, 그리고 정적 및 동적 시험을 통한 여유도 분석 방법 등을 단계별로 설명하였다. 불확실성을 고려한 여유도 분석 및 행정의 적절성 여부 그리고 진단 신호의 이상 유무를 종합하여 평가 밸브에 대한 설계 기준 조건하에서의 운전성을 확인했다.

참고문헌

- (1) Sarget and Lundy, 1988, *Valves*, Transfer of Technology Course No. CL-PD-3, Project No. 8025-01, pp. 3-1 ~3-5.
- (2) Steele, R. Jr. et al., 1995, *Gate Valve and Motor-Operated Research Findings*, NUREG/CR-6100, Idaho National Engineering Laboratory.
- (3) Partlow, J. G., 1989, *Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance (Generic Letter 89-10)-10CFR50.54(f)*, Nuclear Regulatory Committee.
- (4) *Summary of Joint Owners Group (JOG) PV Core Meeting*, 1999 Feb. 9-10, Scottsdale, pp. 1 ~33.
- (5) *모터구동밸브 및 동력구동 게이트 밸브에 관한 규제 권고사항*, 1997, 원검 71233-205.
- (6) 김인환 등, 1999, *모터구동밸브 안전성 평가 방법*, 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집, 발행 예정.
- (7) 김대웅 등, 1999, *시스템 유동 모델을 사용한 모터구동밸브의 차압 계산 해석 및 평가*, 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집, 발행 예정.
- (8) 정희권 등, 1999, *원전 안전계통 MOV의 구동 요구력 계산 및 시험*, 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집, 발행 예정.
- (9) 양승욱 등, 1999, *원전모터구동밸브 여유도 평가 및 스위치 설정*, 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집, 발행 예정.
- (10) Grant, W. and Keating, R., 1990, *NMAC Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants*, NP-6660-D, EPRI Nuclear Maintenance Application Center, pp. 5-1 ~5-23.

- (11) *Limitorque Technical Update 93-03*, 1993, Limitorque Corporation,
- (12) *Limitorque Selection Index 1~17*, Limitorque Corporation,
- (13) *EPRI MOV Performance Prediction Program : Topical Report-Revision 2*, 1997, TR-103237-R2, pp. E-12 ~E-17.