

## 모터구동밸브의 안전성평가

### A Safety Evaluation of the Motor Operated Valve

김인환, 한진호, 김양석

한전전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

모터구동밸브는 배관내를 흐르는 유체의 유량을 제어하거나 차단하기 위해 사용되며, 특히 원자력발전소에 설치된 밸브중에는 원자로의 노심을 보호하고 발전소의 안전을 유지하는 기능으로 사용되는 것들도 있는 데, 이러한 밸브들의 경우 설계기준 조건에서의 운전성이 입증되어야 한다. 본 논문에서는 모터구동밸브의 안전성 평가 방법중 진단 평가에 해당하는 정적시험 및 동적시험에 대하여 고찰하였으며, 특히 동적시험을 수행하는 데 있어서 고려해야 할 사항과 설계기준조건에 해당하는 시험조건을 형성하기 위한 배관 배열 방법에 대해 검토하였다.

#### Abstract

The Motor Operated Valves(MOVs) are used for flow isolation or flow control in various piping systems. Especially, when these Valves are used to perform safety function(as to prevent Reactor Core damage or Loss of Coolant Accident) in Nuclear Power Plant, the operability of the MOVs should be verified at design basis condition. The purpose of this study is to summarize the static and dynamic test methods of the MOVs, and to present system configuration methods to make design basis differential pressure & flow during the dynamic test.

#### 1. 개 요

원자력 발전소를 구성하는 계통에는 유량을 조절하거나 차단하기 위하여 게이트 밸브, 글로우브 밸브, 체크 밸브, 버터플라이 밸브, 니이들 밸브, 코크 등을 사용하는 데, 이 밸브들을 구동하는 방식은 전기, 공기 및 유체, 전자, 수동조작 등 다양한 방식을 취하고 있다. 이중 전기에 의해 구동되는 방식인 모터 구동밸브는 밸브를 닫거나 열 때 토크 스위치에 의해 쓰러스트

를 제어함으로써, 일정한 seating force를 제공하고 과부하로부터 부품을 보호하는 장점을 가지고 있다.

원자력 발전소는 비상시에 제어봉을 사용하여 원자로를 정지하거나, 비상 노심 냉각수를 주입하여 노심에 부반응도를 제공하고 노심을 냉각하여 핵연료의 손상을 방지하기 위한 안전 관련 계통들이 있다. 이러한 안전 관련 계통에는 밸브의 적절한 seating force 제어를 위해 모터 구동밸브가 설치되어 있으며, 비상시에 적절히 동작되어야 한다.

그러나 원전의 일부 모터구동밸브의 운전성에 의문이 제기되어, 미국 원자력 규제위원회에서는 89년에 Generic Letter를 발행하였고, 미국내 원전의 모터구동밸브에 대한 안전성평가 작업이 이루어졌다. 국내에서도 과기부에서 97년 6월에 안전관련 모터 구동밸브의 운전성 입증을 권고하였다.

설치되어 있는 밸브의 운전성을 입증하기 위해서는 밸브가 운전되어야 하는 설계기준들을 고려한 모터 용량 및 제어 스위치 설정값의 평가는 해석 평가 방법에 의해 수행되고, 설정된 제어 스위치 및 구동기의 적절성은 정적 및 동적시험인 진단 평가 방법에 의해 입증된다.

## 2. 모터 구동 밸브의 구조

모터 구동밸브를 구성하는 부분은 크게 세부분으로 나누어, 동력을 제공하는 모터, 모터로부터의 동력을 밸브에 전달하는 역할을 하는 구동기, 유로를 차단하거나 유량을 조절하는 기능을 수행하는 밸브로 분류할 수 있으며 세부 구조 및 기능은 아래와 같다.

### 2.1 모터

모터는 밸브에 직접 동력을 제공하는 부분으로, 전기 제어반(Motor Control Center)에 위치하여 모터를 열고 닫는 데 사용되는 제어기, 모터의 과부하를 감지하여 밸브의 작동을 멈추게 하는 열동 과부하 계전기(Thermal Overload Relay)와 현장에 설치되어 밸브를 직접 구동하는 모터(AC 혹은 DC)로 구성된다.

### 2.2 구동기(Operator)

구동기는 모터의 회전 운동을 스템 축의 수직 상하 운동으로 변환하는 기능을 가지며, 그림 1의 구동기 구조도에 나타난바와 같이, 모터의 회전 속도를 변화시켜 주는 부분인 speed changing gear(helical gear)와 gear train(worm과 worm gear로 구성), 구동기의 출력 토크를 스템의 쓰러스트로 바꾸어주는 역할을 하는 stem과 stem nut, 구동기의 토크를 측정하는 spring pack과 토크 스위치, 밸브의 위치를 제어하고 위치 지시 및 연동과 토크 스위치 우회를 제어하는 리미트 스위치, 토크 스위치를 우회하여 특정 구간에서 밸브의 동작을 보장하는 토크 스위치 바이패스 리미트 스위치, 밸브를 수동 조작하기 위한 handwheel, worm gear에 drive sleeve가 engage되기 전에 무부하 상태에서 모터의 속도 상승을 도와주는 hammer blow, 디스크가 seat를 친 후 스템의 inertial load를 줄여주는 충격 흡수 기능을 갖고 과도기에는 seating load를 일정하게 유지하는 기능을 갖는 compensating spring

pack, 구동기의 출력 토크 이상으로 토크 스위치를 설정하는 것을 방지할 위한 torque limiter plate 등으로 구성된다.

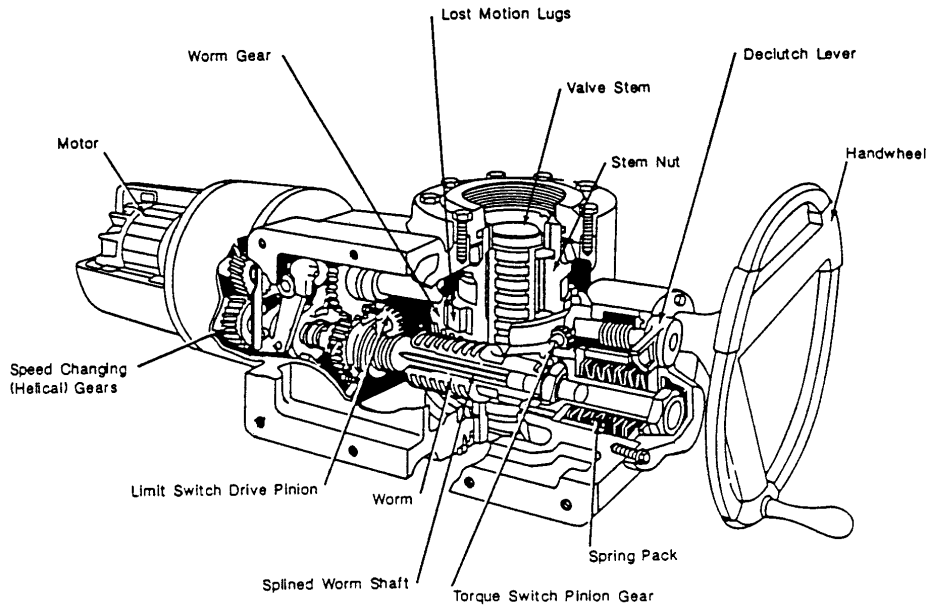


그림 1. 구동기 구조도

2.3 밸브

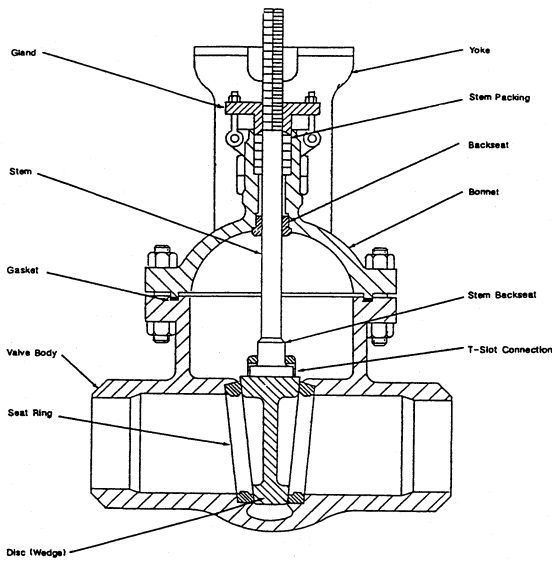


그림 2.a 게이트 밸브 구조도

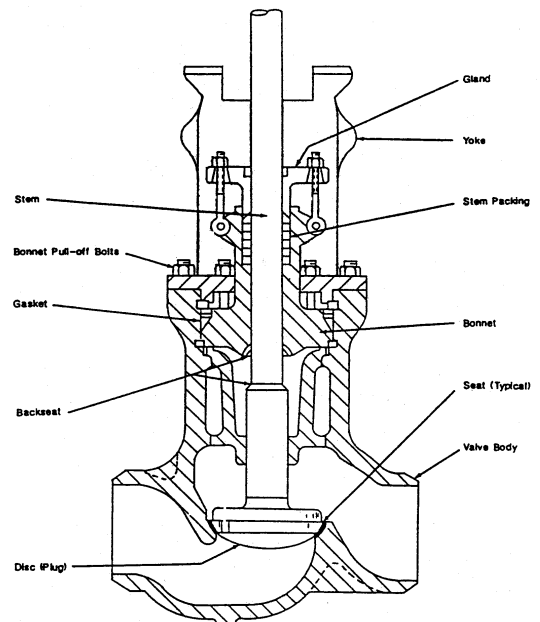


그림 2.b 글로브 밸브 구조도

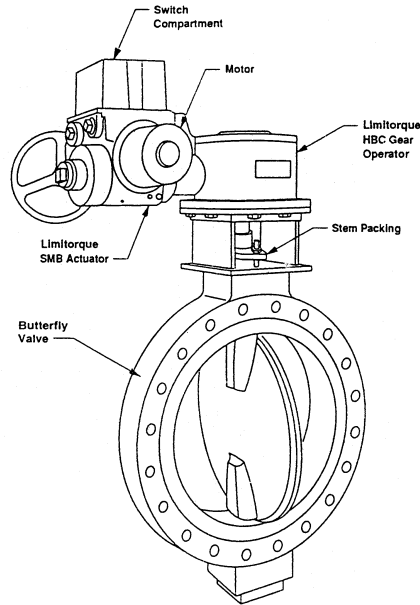


그림 2.c 버터플라이 밸브 구조도

밸브는 실제 유량을 차단하거나 제어하는 데 사용되는 부분으로서 그림 2의 밸브 구조도에 나타난바와 같이, 배관과 연결되어 밸브를 지지하는 밸브 몸체, 밸브의 덮개 역할을 하는 본넷, 스템과 구동기를 지지하는 요크, 몸체와 본넷 연결부의 누설 방지를 위한 가스켓, 열려있을 때 스템을 통한 누설을 방지하기 위한 backseat, 디스크와 연결되어 구동기에 의해 상하 운동하는 스템, 스템과 연결되어 유로를 차단하거나 유량을 제어하는 디스크, 디스크를 안내하는 seat ring, 스템의 누설을 방지하기 위한 패킹, 패킹을 압착하기 위한 글랜드 등으로 구성된다.

### 3. 진단 평가 방법

토크스위치에 제어되는 밸브에 설치되는 토크 스위치의 설정값을 결정하기 위해서는, 계통설계요건, 안전성 분석보고서, 계통운전 절차서, 비상 및 비정상시의 운전 절차서, 밸브 구매 시방서, 밸브 도면, 배관 설치도면, 계통내에 설치된 펌프의 성능 곡선 및 시험자료, 관련 탱크의 설계자료 및 운전 자료등의 광범위한 자료를 분석하여 밸브가 운전되는 모든 조건을 검토하여, 이중 가장 제한적인 운전 조건을 결정한다. 이 조건에서 밸브 운전을 위해 필요한 최소 요구 스템 쓰러스트를 계산하고, 밸브의 취약부 분석을 통해 밸브의 survivable 로드를 계산한다. 또한 구동기 출력 쓰러스트 능력 평가를 위해 구동기가 제공 가능한 토크 계산하고, 구동기의 stall 쓰러스트 및 토크가 밸브 및 구동기의 survivable 쓰러스트와 토크보다 작은지 평가한다. 밸브 설계기준검토를 통해 계산된 최소 요구 쓰러스트에 측정장비와 제어 스위치에 의한 불규칙적인 불확실성과 부하율, 스프링팩 풀림, 스템 윤활 저하에 따른 규칙적 불확실성 등을 고려하고, 토크에는 측정장비와 제어 스위치에 의한 불규칙적인 불확실성을 고려하여 최소 제어스위치 설정 가능값을 계산하고, 구동기 출력 분석 및 취약부 분석을 통해 구해진 최대 허용 가능 토크에, 측정장비와 제어 스위치에 의한 불규칙적인 불확실성을 고려하여 최대 제어스위

치 설정 가능값을 계산한다. 최소 및 최대 제어 스위치 설정 가능값 범위내에서 여유도를 고려하여 스위치 설정값을 조정한다. 이러한 해석 평가 방법에 의해 계산되어 설정된 값은, 밸브의 운전성을 높이기 위해 대부분 보수적으로 계산되기 때문에 밸브의 운전 여유도가 없거나, 운전이 어려운 것으로 판단되는 경우가 있다. 이와같은 MOV에 대해서는 진단 평가 방법인 정적 및 동적시험을 통하여 불확실성이 감소될 수 있고, 운전조건에서의 밸브 성능을 입증할 수 있다.

### 3.1 정적시험

토크스위치에 제어되는 밸브의 최소 스템 요구 토크 및 쓰러스트와 최대 허용가능 토크 및 쓰러스트를 기준으로 설정한 토크 스위치, 리미트 스위치와 토크 스위치 바이패스 리미트 스위치, 리미트 스위치에 제어되는 밸브의 리미트 스위치 설정값 확인은, 밸브에 압력이 작용하지 않도록 배수 및 배기 밸브를 열어 관내의 유체를 배수하거나, 현실적으로 배수가 곤란할 경우에는 배기 밸브 또는 배수 밸브를 열어 밸브 작동시에 압력이 디스크에 작용하지 않는 조건에서 밸브를 작동하며 자료를 취득하는 정적시험에 의해 이루어지며, 그 측정 인자로는 토크 스위치 작동과 스템 쓰러스트와의 관계, running load, inertia 효과, 스위치 작동 및 위치 지시 확인 등이 포함된다.

### 3.2 동적시험

정적시험에 의해 토크 스위치, 리미트 스위치 및 토크 스위치 바이패스 리미트 스위치의 적절한 설정의 확인은 이루어지지만, 밸브를 실제 운전조건은 정적시험 조건과 다르기 때문에 밸브의 운전성이 실제 운전조건에서 검증되어야 한다. 이 시험의 목적은 실제 조건에서 밸브가 작동되는 것을 입증하고 제한적 조건에서 구동기에 의해 발생하는 쓰러스트와 토크의 크기를 제공한다. 이를 위해 실제 차압하에서의 열림 시험과 전 유량 및 전 차압에서의 닫힘시험을 수행한다.

## 4. 동적시험 방법

설계기준 검토시에 확인된 조건들에서 모든 시험이 가능하여야 하지만, 이미 설치되어 있는 밸브들을 시험 할 경우에 밸브가 설치된 계통 또는 관련 계통들이 운전되는 상황에서는 설계기준 차압을 형성하기가 쉽지 않다. 따라서 시험을 적절히 수행할 수 있도록 하기 위한 방법과 시험시에 적용해야할 사항을 정리하면 다음과 같다.

### 4.1 일반적 사항

동적시험은 설계기준 차압 조건에서 정상 운전 유로의 유체 유동 방향으로 시험하며, 가능한 밸브를 열 때와 닫을 때 모두 수행한다. 동적시험 수행조건이 설계기준 차압보다 낮을 경우에는 최소한 세번 이상(가능한 50, 70, 80% 차압)의 차압 조건을 형성하여 시험한 후 압력에

해당하는 계산은 설계기준 차압까지 외삽한다. 동적시험의 유량은 설계기준 유량 조건에서 실시하여야 관성효과를 정확히 알 수 있으므로 가능한 설계기준 유량으로 시험하는 것이 바람직하나, 여의치 않을 경우에는 설계기준보다 낮은 유량에서 시험을 수행할 수도 있다. 동적시험의 온도는 설계기준 온도와 같거나 낮은 온도 조건에서 실시하여 설계기준에서 검토된 값 이상의 밀도를 가진 유체에 의해 밸브 시험이 보수적으로 이루어지도록 한다.

#### 4.2. 펌프에 의해 압력을 받는 밸브 시험

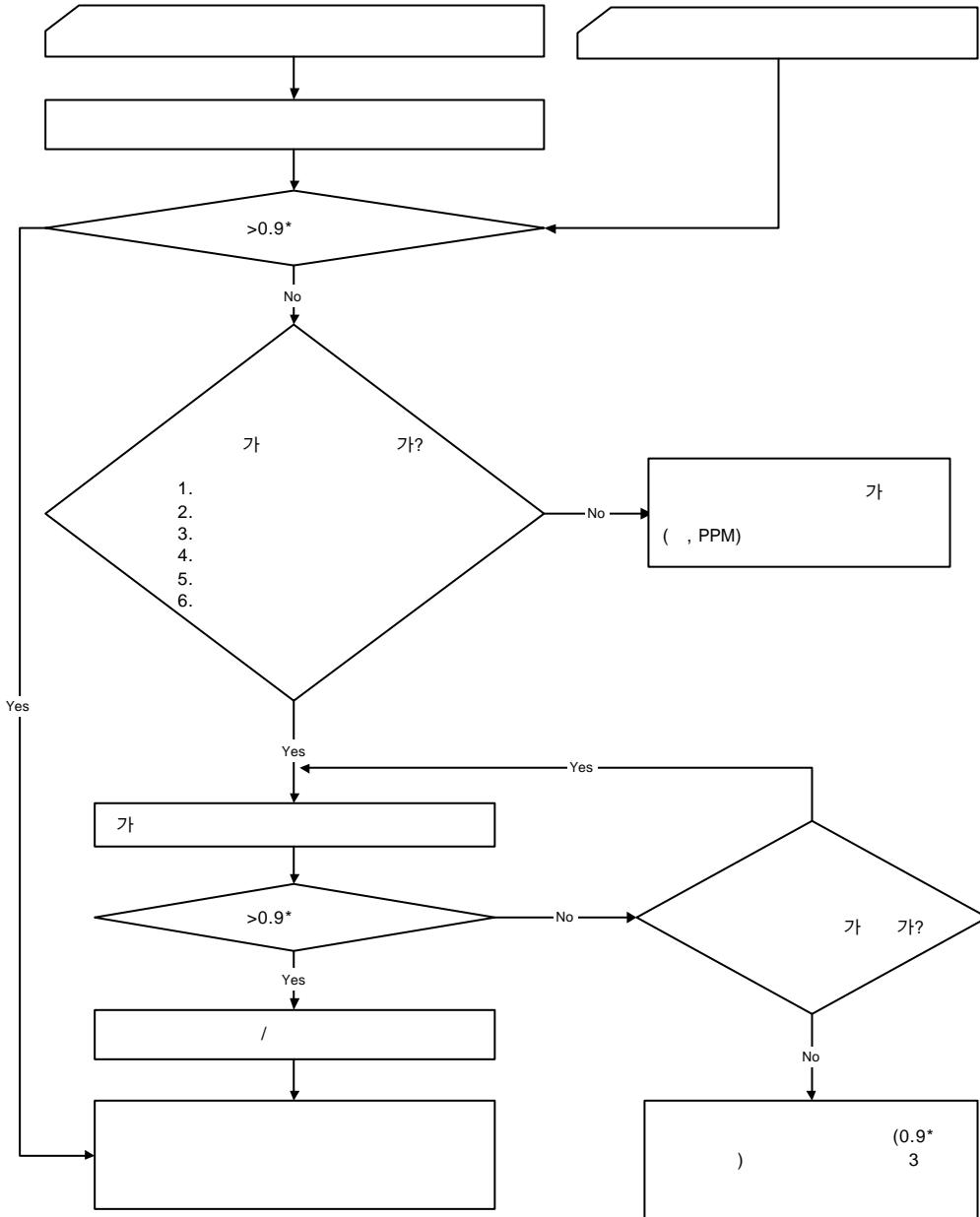


그림 3 밸브 전후단 설계기준 차압 형성을 위한 흐름도

밸브 전단에 펌프가 설치되어 있는 경우에는 펌프의 성능에 따라 동적 압력을 받게되므로 밸

브 작동에 큰 토크가 필요한 경우로서 설계기준 차압을 형성하기 위한 계통 구성 검토 흐름도 및 도면은 그림 3, 4와 같으며, 다음의 방법들 중 쉬운 방법을 적용하거나 2가지 이상의 방법을 조합하여 검토후 계통 차압조건을 형성한다.

첫째 방법으로는 밸브 후단에 복수의 유로(탱크 또는 계통)가 설치되어 있는지 확인하여 복수로 설치되어 있는 경우에는, 유로 변경을 통해 출구 압력을 변화시켜 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

둘째는 펌프 입구의 수원이 복수의 유로(탱크 또는 계통)에 의해 공급받는 지 확인하여 복수로 설치되어 있는 경우에는, 유로 변경을 통해 출구 압력을 변화시켜 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

셋째는 밸브 후단에 설치되어 밸브에 배압을 제공하는 계통 또는 탱크의 압력을 변화시키면서 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

넷째는 펌프 입구에 설치되어 펌프의 유효흡입수두를 제공하는 계통 또는 탱크의 압력을 변화시키면서 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

다섯째 방법으로는 밸브 후단이 2개 이상의 유로인 병렬 배관으로 구성되어 있는 경우에는 병렬배관으로 흐르는 유량을 조절하여, 설계기준 차압 또는 다른 시험 차압을 형성할 수 있는 방안을 검토한다

여섯째는 펌프 재순환관의 운전형태의 변경 가능성을 검토(압력방출밸브의 열림, 연계배관 영향 검토 등)하여 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

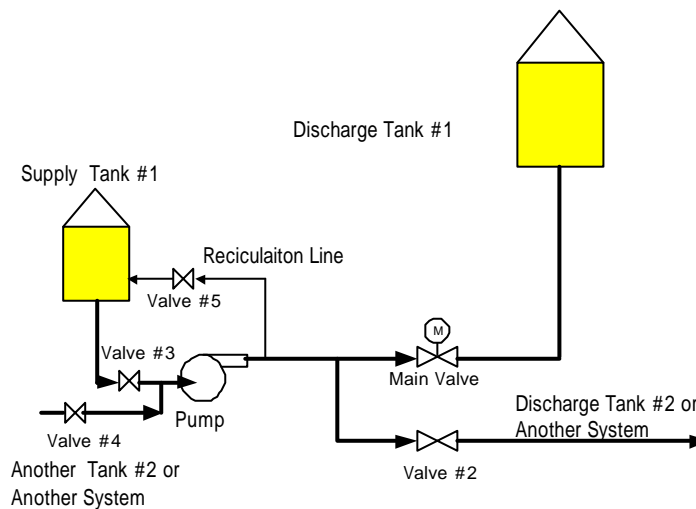


그림 4 펌프에 의해 압력을 받는 밸브

#### 4.3 Blowdown 배관에 설치된 밸브

Blowdown 배관이란 밸브 전후단이 탱크나 계통에 연결된 경우로서, 계통 구성 검토 흐름도 (펌프 및 재순환 부분 제외) 및 도면은 그림 3, 5와 같으며, 그 내용을 정리하면

첫째 방법으로는 밸브 입구의 수원이 복수의 유로(탱크 또는 계통)에 의해 공급받는 지 확인하여 복수로 설치되어 있는 경우에는, 유로 변경을 통해 출구 압력을 변화시켜 차압을 증가시

키는 방안을 검토한다.

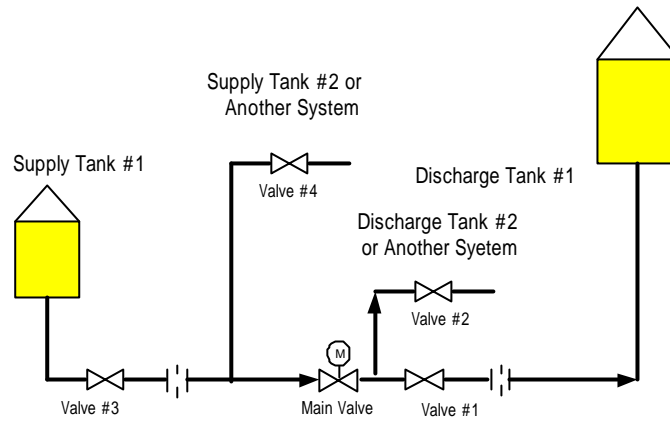


그림 5 Blowdown 계통에 설치된 밸브

둘째는 밸브 후단에 복수의 유로(탱크 또는 계통)가 설치되어 있는지 확인하여 복수로 설치되어 있는 경우에는, 유로 변경을 통해 출구 압력을 변화시켜 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

셋째는 밸브 후단에 설치되어 밸브에 배압을 제공하는 계통 또는 탱크의 압력을 변화시키면서 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

넷째는 밸브 입구의 계통 또는 탱크의 압력을 변화시키면서 차압을 증가시키는 방안을 검토한다.

## 5. 시험결과 평가

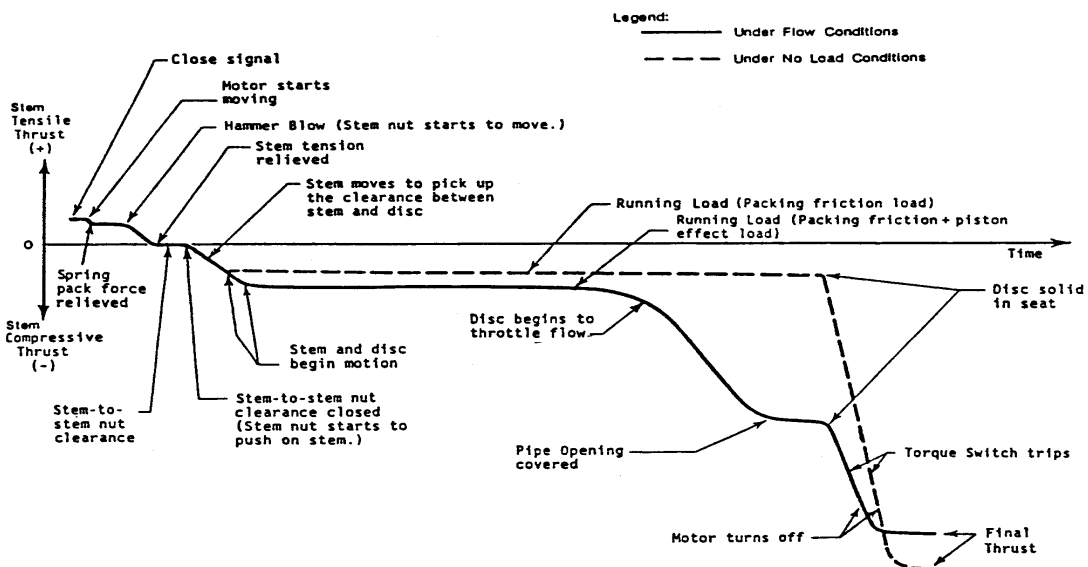


그림 6 밸브 닫힘시 행정에 따른 Stem Thrust



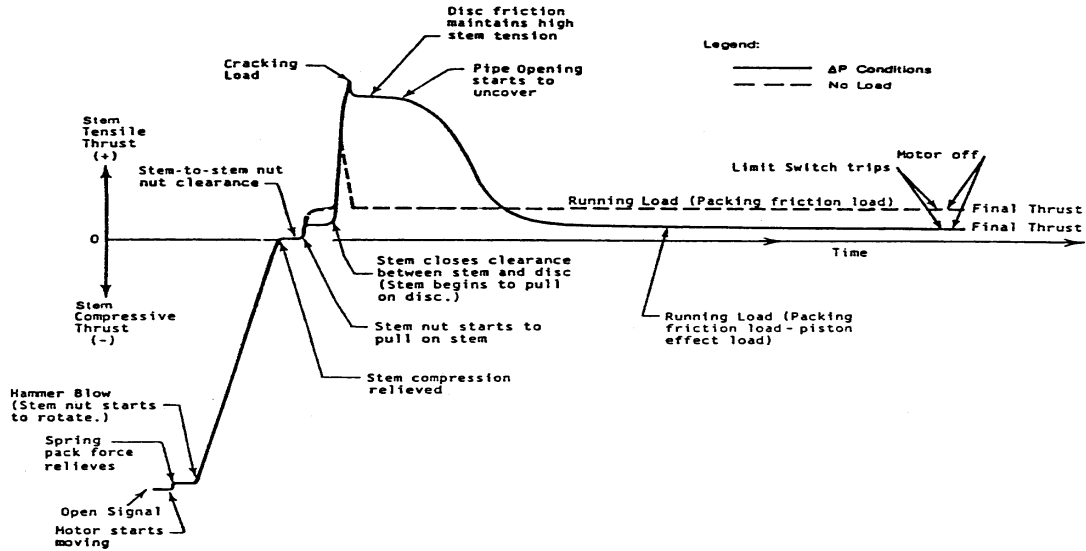


그림 7 밸브 열림시 행정에 따른 Stem Thrust

정적 시험에 의해 계통내에 유체가 없는 상태에서 스템에 작용하는 토크와 쓰러스트, 제어스위치 트립, 바이패스 스위치의 트립, 스템이동 변위등의 값을 취득하여 제어스위치 설정상태를 확인하거나 조절하고, 동적시험 결과를 이용하여 밸브에 설계기준 차압이 작용할 때에도 밸브가 운전됨을 입증한다. 그림 6과 7는 전형적인 밸브 시험시의 신호를 나타낸 것으로, 밸브를 열고 닫을 때에 밸브를 구성하는 구성품과 압력등의 영향으로 나타나는 쓰러스트 신호로서 점선은 정적시험, 실선은 동적시험시의 쓰러스트를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동적시험의 경우에는 정적시험과 달리 밸브가 닫히기 직전이나 열리기 시작 할 때에 관내의 압력으로 쓰러스트가 증가하는 것을 알 수 있으며, 닫힘시에 최대 쓰러스트의 값이 계통의 영향으로 정적시험때보다 작아짐을 알 수 있다.

## 6. 결론

해석 평가 방법에 의해 모터 구동 밸브를 평가하면 관련 인자들을 보수적으로 가정하게 되고, 각종 불규칙적 및 규칙적 불확실성을 고려함에 따라 밸브의 토크 스위치를 설정하기 위한 여유가 적게 나오거나, 설정하기 위한 여유가 없는 곧 운전성이 없는 것으로 판정되기도 하지만, 실제 시험에 의해 평가를 수행하면 보수적으로 가정했던 값들이 실제값을 가짐으로, 밸브의 운전 여유가 충분한 경우가 대부분이다.

또한 밸브 전후단에 설계기준 차압보다 낮은 차압조건에서 밸브의 동적 시험을 수행하면, 시험결과를 기준으로 평가시에 압력 항에 대해 설계기준 차압까지 외삽하기 위해서는 여러 차례의 시험을 수행해야 하며, 이들을 보수적으로 적용하여 평가해야하기 때문에 밸브의 운전 여유 측면에서 불리하게 평가되므로, 설계기준 차압에서 시험을 수행하는 것이 안전성 분석 측면과 경제적인 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서 설계기준 차압을 형성할 수 있는 시험 방법을 검토함으로써 밸브 시험시의 불확실성을 줄이고, 시험에 소요되는 비용을 줄이는 방법을 제안

하였다.

## 7. 참조 문헌

- 1) EPRI, 1990, "Application guide for Motor Operated Valves in Nuclear Power Plant, Final Report", NP-6660-D
- 2) EPRI, 1992, "EPRI MOV Performance Prediction Program-MOV Margin Improvement Guide", TR-100449
- 3) EPRI, 1998, "Thrust Uncertainty Method", Addendum 2 to EPRI TR-103237-R2
- 4) EPRI, 1990, "In Situ Test Guide for Motor Operated Valves", NP-7078
- 5) IEEE, 1996, "IEEE Guide for Motor Operated Valve Motor Application, Protection, Control, and Testing in Nuclear Power Generating Station", IEEE Std 1290-1996
- 6) EPRI, 1994 "EPRI MOV Performance Prediction Program-System Flow Model Description Report", TR-1032425
- 7) J Kemplay CEng, FIMechE, 1980, "Valve Users Manual"
- 8) NRC, 1989 "Safety-Related Motor Operated Valve Testing and Surveillance", GL 89-10