

## 모터구동 게이트 밸브의 진단시험 결과 분석

# An Analysis of Diagnostic Test Results of the Motor Operated Gate Valves

김인환, 박성근, 이도환, 김대웅, 강신철

한전전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

계통에 설치된 모터구동게이트밸브는 대부분 관내를 흐르는 유체의 유량을 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 국내 원자력 발전소에 설치되어 있는 모터구동 게이트밸브의 정적진단시험 및 동적진단시험을 통한 안전성 평가 결과를 고찰하였으며, 이 결과를 현재 방안을 수립중인 임시 주기적 안전성 평가 프로그램 개발에 활용할 수 있는 지 가능성을 검토하였다.

### Abstract

The Motor Operated Gate Valves(MOGVs) installed in piping systems are mostly used for flow isolation. 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 MOGVs should be verified at design basis condition. The purpose of this study is to review the safety evaluation results of MOGVs, through static and dynamic test, and the possibility of adopting this result to plan temporary Periodic Verification(PV) Program.

## 1. 개 요

원자력 발전소 계통에 유량을 차단하기 위하여 설치된 밸브는 게이트 밸브, 글로우브 밸브, 체크 밸브, 버터플라이 밸브, 니이들 밸브, 코크 등이 있으며, 이들은 전기, 공기 및 유체, 전자, 수동조작 등의 방식으로 제어되고 있다. 이중 전기에 의해 구동되는 방식인 모터 구동밸브는 밸브

를 닫거나 열 때 토크 스위치 또는 리밋 스위치에 의해 제어됨으로써, 일정한 seating force를 제공하거나 정해진 위치에서 멈추어 밸브 고유의 기능을 수행하고 있다.

미국 원자력 규제위원회에서는 모터구동밸브의 운전성 입증에 위해 89년에 Generic Letter를 발행하여 설계기준조건에서의 운전성을 입증하도록 하였으며, 국내에서도 과기부에서 97년 6월에 안전관련 모터 구동밸브의 운전성 입증에 권고함에 따라, 국내 원자력 발전소에 설치된 밸브들도 99년부터 안전성 평가를 수행하고 있다.

설치되어 있는 밸브의 운전성은 밸브가 운전되어야 하는 설계기준들을 고려한 해석 평가 방법에 의해 일차적으로 평가하고, 진단시험에 의해 입증된다.

본 논문에서는 위의 권고사항에 따라 안전성 평가가 수행중인 모터구동 게이트밸브중, 웨스팅 하우스사에서 제작한 밸브의 해석적 평가인 설계기준분석과 진단시험인 정적진단시험 및 동적진단시험을 통한 안전성 평가 결과를 고찰하였으며, 이 결과들을 현재 방안을 수립중인 주기적 안전성 평가 프로그램 개발에 사용하였을 경우에 자료의 사용 가능성을 검토하였다.

## 2. 설계기준분석

설계기준분석과정에서는 설계기준조건에서의 최대 차압을 극복하기 위한 최소 요구 쓰러스트와 이 조건에서 공급 가능한 최저 전압에서 구동기가 제공할 수 있는 최대 유용 쓰러스트, 밸브가 구조적으로 견딜 수 있는 최대 허용 쓰러스트, 이 세가지 값을 분석하여 밸브의 운전 여유를 평가한다.

### 2.1 계통 설계기준 분석

계통설계요건, 안전성 분석보고서, 계통운전 절차서, 비상 및 비정상시의 운전 절차서, 밸브 구매 사양서, 밸브 도면, 배관 설치도면, 계통내에 설치된 펌프의 성능 곡선 및 시험자료, 관련 탱크의 설계자료 및 운전 자료등의 광범위한 자료를 분석하여 밸브가 운전되는 모든 조건을 검토한다. 이 중 가장 제한적인 운전 조건에서 밸브에 작용하는 최대 차압 요건을 계산하고, 운전기능을 수행하는 데 필요한 행정 소요시간을 확인한다.

### 2.2 최소 요구 쓰러스트 및 survivable 쓰러스트/토크 분석

최소 요구 쓰러스트는 밸브가 계통설계기준 분석시에 계산된 차압을 극복하고 고유 기능을 수행하기 위해 밸브에 제공되어야하는 최소의 힘을 말하며, 밸브를 열거나 닫을 경우 밸브 seat 근처 즉 거의 닫혔을 때(flow cutting) 또는 열리기 시작(flow cracking)할 때 가장 큰 값을 갖는다.

survivable 로드는 밸브의 제한적 조건을 이루는 스템의 Load를 결정하기 위해 사용하는 데, 밸브의 취약부 분석을 통해 얻어진다.

#### 2.2.1 최소 요구 쓰러스트 계산

밸브의 최소 요구 쓰러스트는 밸브 형태와 행정시간에 따라 경험적으로 결정되는 coefficient에 민감하며, 밸브의 진단시험 자료 없이 순수한 해석적 방법으로는 정확한 값을 계산할 수 없다.

밸브의 최소 요구 쓰러스트를 계산하기 위한 기본적인 가정은, 디스크와 seat 링 사이에 tilting 이나 binding을 없애기 위해 스템과 디스크간의 연결은 충분히 rigid하며, 디스크는 잘 견디며 가이드로부터 seat 링 사이가 smooth하게 변화하고, 밸브 스템은 수평배관의 상부로 수직이며, 열고착이나 본넷의 압력잠김 현상이 없어야 한다. 또 최고 쓰러스트는 seating이나 unseating시 seat근처에서 발생하며 추가의 동적 유동효과가 요구스템 쓰러스트에 영향을 미치지 않는다는 조건하에 아래와 같이 계산한다.

$$F_R(lbf) = F_{PACK} + F_P + F_{DP} \quad \dots \dots \dots \text{식 2-1}$$

여기서,

$F_{PACK}$ 는 스템이 패킹을 미끄러질 때 생기는 마찰력

$F_P$ 는 배관내의 압력이 스템에 작용함으로써 생기는 피스톤 효과에 의한 load

$F_{DP}$ 는 배관내의 압력이 스템에 작용함으로써 생기는 load를 나타낸다.

$F_{PACK}$ 은 패킹의 재질에 따라 아래 표 2-1의 값을 적용하며, Flexible Graphite Packing의 경우에는 내삽법을 사용하여 패킹 쓰러스트를 구한다.

표 2-1 패킹쓰러스트 적용값

스템 지름(in)	Asbestos Packing (lbf)	Flexible Graphite Packing (lbf)
$d \leq 1$	1000	700 - 1200
$1 < d \leq 1.5$	1500	1000 - 1800
$1.5 < d \leq 2.5$	2500	1600 - 3000
$2.5 < d \leq 4$	4000	3500 - 6000
$4 < d$	5000	4000 - 7000

$$F_P = P_U \times \frac{\pi}{4} D_s^2 \quad \dots \dots \dots \text{식 2-2}$$

$$F_{DP} = VF \times A_o \times DP \quad \dots \dots \dots \text{식 2-3}$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} D_{Orifice}^2 \quad \dots \dots \dots \text{식 2-4}$$

여기서,

$P_U$ 는 밸브 전단에 작용하는 압력,  $D_s$ 는 밸브 스템의 직경, VF는 밸브 팩터로 설계기준분석 시에는 0.5, DP는 계통설계기준 차압,  $D_{Orifice}$ 는 밸브 seating의 내경을 나타내며 확인이 안될 경우에는 밸브 공칭 직경의 90%를 적용하며  $A_o$ 는 그 단면적을 말한다.

### 2.2.2 밸브의 정격 및 survivable 쓰러스트 및 토크 결정.

밸브의 제한적 조건을 이루는 스템의 Load를 결정하기 위해 사용하는 데, 밸브의 정격 로드는 정상 상태에서 작용하는 부하를 말하고 survivable 로드는 단 한번 가해졌을 때를 기준으로 전

기계적 또는 수동 운전시 고장을 일으키지 않는 로드를 말하며 이 값은 밸브의 취약부 분석을 통해 얻어진다.

### 2.3 모터 구동기 평가

구동기는 밸브를 열거나 닫을 경우 밸브 평가에서 계산된 요구 스템 쓰러스트를 제공할 수 있는 능력을 가지고 있어야 하며, 구동기 출력이 불충분할 경우에는 높은 기동 토크를 가진 모터를 설치하거나 스프링 팩 교체, gear train 교체, 모터 구동기 교체등을 통해 구동기의 출력을 증대시키거나, thread 마찰 계수 감소, stem과 stem nut 수정, 구동기 정격 쓰러스트 증대등을 통해 토크 대 쓰러스트 변환 효율을 증대시키거나, 디스크 guide 수정, 패킹 설계 변경, 밸브 교체등을 통해 stem 쓰러스트를 감소시키는 방법이 있다.

모터구동밸브를 기계적 과부하로부터 보호하기 위해서는 구동기의 stall 쓰러스트 및 토크가 밸브 및 구동기의 survivable 쓰러스트와 토크보다 작아야 한다

#### 2.3.1 구동기 출력 쓰러스트 능력 평가

구동기는 요구 스템 쓰러스트를 제공할 수 있는 능력을 가지고 있어야 하는 데, 이는 구동기 정격, 전압 강하시 모터에서 제공 가능한 힘, 스프링 팩 최대 설정값으로부터 구해지는 설계기준 최대 운전 토크를 말한다. 이 토크는 구동기에서 쓰러스트로 변환되어 스템을 작동하게 되는 데 이 값을 설계기준 최대 운전 쓰러스트라하며 그 계산 방법은

$$AOTH_{DBC} = \frac{AOTQ_{DBC}}{SF15} \quad \dots \dots \dots \text{식 2-5}$$

여기서,

$AOTH_{DBC}$  : 설계기준 최대운전 쓰러스트 (lbf)

$AOTQ_{DBC}$  : 설계기준 최대운전 토크(ft-lb)

SF15 : 마찰 계수  $\mu$ 가 0.15일 때 스템 팩터

$$SF(StemFactor) = \frac{d \times [ (0.96815 \times \tan \alpha) + \mu ]}{24 \times [0.96815 - (\mu \times \tan \alpha) ]} \quad \dots \dots \dots \text{식 2-6}$$

$d$  = Pitch Diameter

= Stem Dia. - 0.5 × Stem Pitch (For General ACME Pitch)

= Stem Dia. - 0.3 × Stem Pitch (For Stub ACME Pitch)

$\tan \alpha$  = Stem Lead / ( $\pi \times d$ )

$\mu$  = Stem 마찰계수(0.1, 0.15)

#### 2.3.2 구동기 Stall 쓰러스트 및 토크 평가

모터를 stall로부터 보호하기 위해서는 낮은 정격 기동 토크를 갖는 모터를 설치하거나, 높은 최소 전압, 밸브 수정, 밸브 교체, 모터구동밸브 전체 교체등의 방법을 채택한다. 밸브의 수동운전시 밸브나 구동기의 손상을 방지하기 위기 위해서는 위치 경보 신호를 설치하거나, 과부하 방

지를 위하여 토크렌치를 사용한다.

위의 구동기 출력 능력인 설계기준 최대 운전 쓰러스트와 stall 쓰러스트 평가에 의해 구해진 값중 작은 값을 구동기 유용 가능 쓰러스트라고 한다.

## 2.4 여유도 분석 및 토크 스위치 설정

벨브 운전에 필요한 최소 요구 쓰러스트, 취약부 분석값과 구동기 유용 가능 쓰러스트중 작은 값인 최대 유용 쓰러스트를 가지고 운전 여유도를 계산하지만, 여기에는 여러 가지의 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 이러한 불확실성을 보정하기 위해서, 불규칙적인 불확실성과 규칙적 불확실성 등을 고려한다. 이렇게 계산된 최소 요구 쓰러스트/토크 제한값 및 최대 유용 쓰러스트/토크 제한값 범위 내에서 여유도를 고려하여 스위치 설정값을 결정한다.

### 2.4.1 최소 요구 쓰러스트 제한값

#### 2.4.1.1 토크 스위치 제어

최소 요구 쓰러스트 조정계수

$$AF_{Th} = \text{불규칙적 불확실성} + \text{규칙적 불확실성} \\ = \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} + ROL + SPR + SLD \quad \dots \text{식 2-7}$$

최소 요구 쓰러스트 제한값

$$F_{R, \min} = F_R \times (1 + AF_{Th}) \quad \dots \text{식 2-8}$$

#### 2.4.1.2 리밋 스위치 제어

최소 요구 쓰러스트 조정계수

$$AF_{Th} = 0 \quad \dots \text{식 2-9}$$

최소 요구 쓰러스트 제한값

$$F_{R, \min} = F_R \times (1 + AF_{Th}) \quad \dots \text{식 2-10}$$

### 2.4.2 최대 유용 쓰러스트 제한값

#### 2.4.2.1 토크 스위치 제어

최대 허용 쓰러스트 조정계수

$$AF_{Th} = \text{총 불규칙적 불확실성} \\ = \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} \quad \dots \text{식 2-11}$$

허용 가능 최대 쓰러스트 제한값

$$F_{A, \max} = \frac{F_A}{(1 + AF_{Th})} \quad \dots \text{식 2-12}$$

#### 2.4.2.2 리밋 스위치 제어

최대 허용 쓰러스트 조정계수

$$AF_{Th} = \text{총 규칙적 불확실성} \\ = ROL + SLD \quad \dots \dots \dots \text{식 2-13}$$

허용 가능 최대 쓰러스트 제한값

$$F_{A, \max} = \frac{F_A}{(1 + AF_{Th})} \quad \dots \dots \dots \text{식 2-14}$$

여기서,

ROL은 정적 및 동적시험시에 쓰러스트가 다르게 나타나는 부하율, SPR은 토크 스위치 제어 시 스프링 팩이 장기간 압축되어 있을 경우 나타나는 로드 감소 현상, SLD는 스템과 스템 너트 사이의 윤활 저하 현상으로 인한 규칙적 불확실성을 나타낸다. TE는 장비와 센서에 의한, TSR은 제어 스위치 반복에 의해 나타나는 불규칙적 불확실성을 나타낸다.  $F_R$ 는 최소 요구 토크와 쓰러스트를,  $F_A$ 는 최대 유용 쓰러스트를 나타낸다.

### 3. 시험 평가 방법

밸브의 구동기에 설치되는 토크 스위치와 리미트 스위치의 설정값은 제작자 자료, 토크스위치 설정 가능값 계산, 시험장비의 정확도 및 운전 경험에 의해 정해진다. 이 값은 밸브의 운전성을 높이기 위해, 위 항목에서 알 수 있는 바와 같이 대부분 보수적으로 계산된다. 이와같이 해석적 평가 방법인 설계기준분석에 의해 평가된 결과는 정적 및 동적 진단시험에 의해 밸브의 실제 운전 조건에서 운전성이 입증된다.

#### 3.1 정적진단시험

설계기준 검토를 통해 계산된 최소 요구 쓰러스트, 모터 구동기의 구동기 출력분석, 취약부 검토등을 통해 확인된 모터 구동기에 의해 제공 가능한 최대 유용 쓰러스트를 기준으로 토크 스위치와 리미트 스위치를 설정한다. 이 설정값의 적절성을 입증하기 위해서는 밸브와 구동기의 특성에 대한 정확한 정보가 요구되는 데 이것은 정적진단시험에 의해 얻어지며, 그 인자로는 토크 스위치 작동과 스템 쓰러스트와의 관계, 패킹 쓰러스트, 스위치 작동 및 위치 지시 확인등이 포함된다.

위의 2.2에서 패킹의 재질을 기준으로 패킹 쓰러스트를 구하여 최소 요구 쓰러스트를 계산하고, 2.3항에서는 스템 설계 사양과 가정한 마찰계수를 사용하여 스템팩터를 계산하여 최대 유용 쓰러스트의 인자가 되는 설계기준 최대 운전 쓰러스트를 계산하는 데, 정적진단시험을 통해 이 두가지 곧 패킹 쓰러스트와 스템 팩터를 측정하여 실제 값을 반영한다.

#### 3.2 동적진단시험

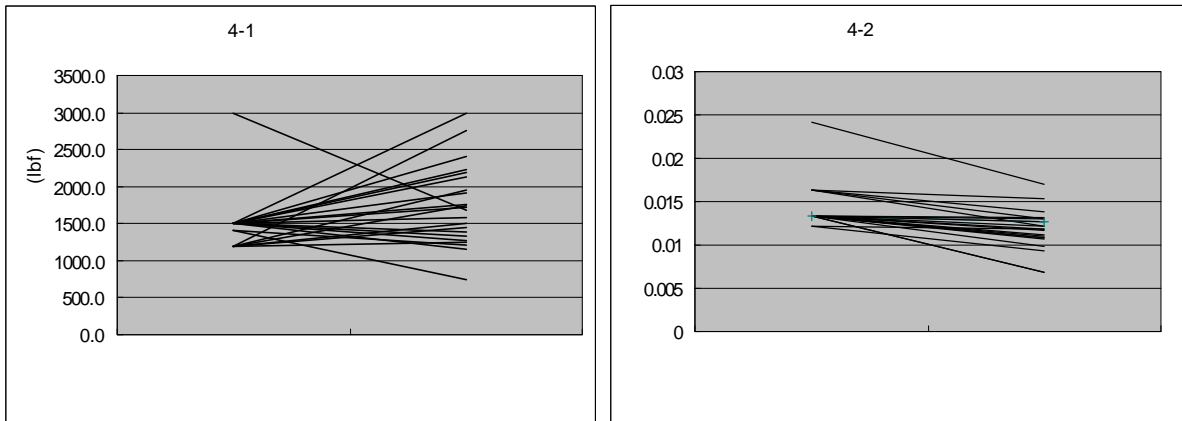
정적진단시험에 의해 토크 스위치와 리미트 스위치의 적절한 설정 여부는 확인되지만, 밸브의 실제 운전조건은 정적진단시험 조건과 다르기 때문에 실제 운전조건에서 밸브의 운전성이 검증되어야 한다. 위의 2.2항에서 차압에 의한 쓰러스트를 계산시에 밸브 팩터를 0.5로 가정하고, 실제 밸브 오리피스 단면적을 적용 또는 90%로 가정하여 계산하였으나, 동적진단시험시 측정된 쓰러스트와 실제 차압을 통해 밸브 팩터를 계산하여 실제 값을 취득한다.

#### 4. 안전성 평가 결과

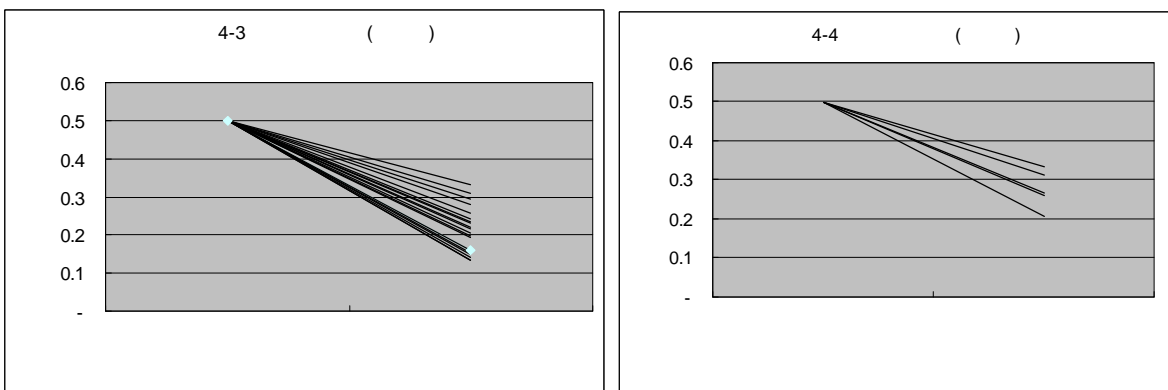
웨스팅하우스에서 제작하여 국내 원자력 발전소에 설치한 모터 구동 게이트 밸브중 현재까지 정적진단시험 및 동적진단시험을 수행한 4개발전소 22대 밸브의 시험결과를 검토하였다. 이중 밸브 17대는 열림, 2대는 닫힘, 3대는 양방향으로 안전 기능을 가지고 있어서, 진단시험 결과 분석 시에 열림 방향으로 20대, 닫힘 방향으로 5대의 시험 결과를 사용하여 분석하였다.

스탬의 직경 및 패킹의 재료에 따라 패킹 쓰러스트, 스탬 피치의 직경과 리이드 및 가정된 마찰계수를 이용하여 계산한 스탬 팩터, 밸브 팩터를 0.5로 가정하여 설계기준을 분석하였을 때, 고압 안전주입 계통에 설치되어 안전주입 기능을 수행하거나 충전기능을 수행하는 밸브의 경우 밸브 양단에 높은 차압이 발생하며 안전 기능에 대하여 운전 여유도가 없는 것으로 분석되었다.

정적 진단시험을 수행한 결과 패킹 쓰러스트는 그림 4-1에 나타난바와 같이 밸브의 운전 및 정비이력에 따라 설계기준분석 단계에서 가정했던 값보다 높거나 낮게 나타났으나, 토크와 쓰러스트와의 관계를 나타내는 스탬팩터는 4-2에 나타난바와 같이 모든 밸브가 설계기준분석시의 계산 값보다 낮게 나타났다.

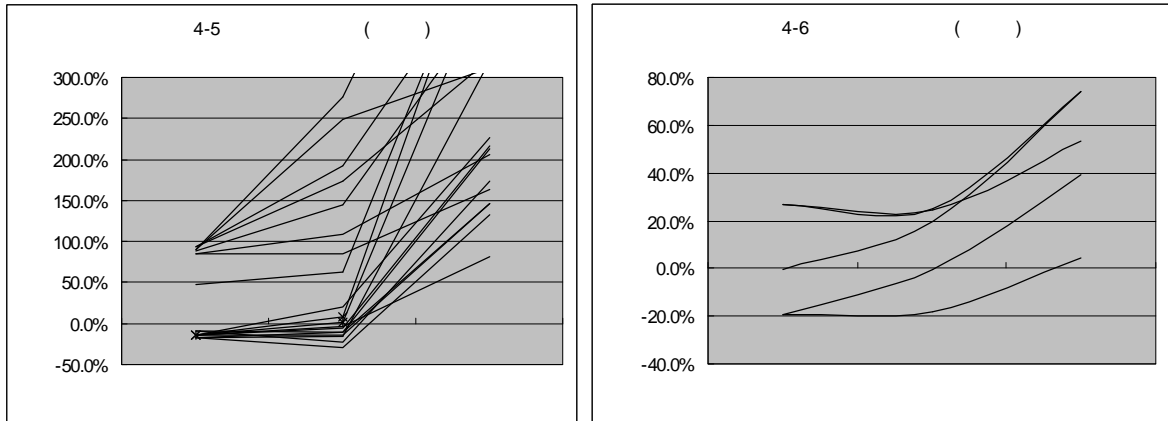


동적 진단시험을 수행한 결과 차압과 차압에 의한 쓰러스트와의 상관 관계를 나타내는 밸브 팩터는 그림 4-3 및 4-4에 나타난바와 같이 가장 큰 값이 설계기준분석 단계에서 가정했던 값의 60% 이내로 나타났다.



시험 결과를 기준으로 각 단계별로 운전 여유도를 분석하면, 그림 4-5 및 4-6에 나타난바와

같이 정적진단시험 자료를 반영한 운전 여유도는 설계기준분석단계와 비교하여 일정한 규칙이 없이 증가 또는 감소하는 것으로 나타났으나, 동적진단시험 자료를 반영한 운전 여유도는 정적진단시험 자료만 반영한 값에 비하여 증가하는 것으로 나타났다.



## 5. 결과 고찰

밸브의 해석적 평가인 설계기준분석을 수행한 결과, 대체적으로 높은 차압이 발생하는 밸브의 경우 안전 기능에 대하여 운전 여유도가 없는 것으로 분석되며, 정적진단시험 자료를 반영하여 보다 실제 상황에 맞게 분석하여도 운전 여유도의 개선 효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

제한된 시험결과에 의한 것이긴 하지만, 동적진단시험을 수행한 결과를 분석한 결과 모든 밸브의 밸브 팩터가 가정된 값보다 작게 나타남으로써, 정적진단시험 결과만 반영하여 평가하였을 때 보다 운전 여유도는 증가하는 것으로 분석되었다.

현재 모터구동밸브의 주기 점검을 위하여 프로그램을 수립중에 있으며, 주기점검 프로그램이 확정될 때까지는 임시 프로그램을 개발하여 주기점검을 수행할 예정이다. 임시 프로그램은 해당 밸브의 안전 중요도를 정하고 설계기준분석 또는 정적진단시험 결과 확인된 운전 여유도 값에 따라 시험 주기를 정하고, 이 주기에 따라 점검을 수행 할 예정이다.

추후의 진단결과를 더 살펴보아야 하겠지만, 지금까지 수행된 동적진단시험 결과 확인된 밸브 팩터 및 이를 반영하여 분석한 운전 여유도를 살펴보면, 임시 주기점검 프로그램에 설계기준분석 또는 정적진단시험 결과를 사용하여 점검 주기를 결정하여도 큰 문제가 없음을 간접적으로 확인할 수 있다.

## 6. 결론

웨스팅하우스사에서 제작하여 국내 원전에 설치한 모터구동 게이트 밸브의 경우, 정적진단시험 결과만 반영한 밸브의 운전 여유도는 설계기준분석시의 여유도에 비하여 커거나 작아진다. 그러나 동적진단시험 결과를 반영하면 설계기준분석 및 정적진단시험 결과만 반영하였을 때 보다 운전 여유도가 커진다. 따라서 임시 주기점검 프로그램에 밸브의 안전 중요도와 함께 설계기준분석 또는 정적진단 시험 결과를 반영하여 점검주기를 결정하는 것이 무리가 없음을 간접적으로 확인하였다. 단, 본 분석결과는 전체 평가대상밸브중 극히 일부 평가결과를 근거로 하였으므로 이의 적정성 확인을 위하여는 보다 많은 평가결과 분석을 수행하여야 할 것이다.



## 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