

# 밸브의 종류 및 선정

글/민경화 <한국전력기술(주) 원자력사업단 배관기술부>

## 5) 모타구동 밸브

모타구동 밸브는 현대화된 프로세스 플랜트에서 시스템의 원활한 공정제어에 가장 일반적으로 사용되고 있는 제어요소이다. 특히 시스템의 원격제어에 있어서 밸브의 제어특성에 맞는 구동장치의 선정은 매우 중요한 사항으로서 원격제어용 구동장치는 구동원(驅動源)에 따라 다음의 네가지로 대별할 수 있다.

- ①모타구동장치(Electric Motor Operated)
- ②공압(空壓) 또는 유압(油壓) 구동장치(Pneumatically or Hydraulically Operated)
- ③스프링과 유공압(油空壓) 실린더 조합(Spring and Pneumatic or Hydraulic Cylinder Assistance Combination)
- ④전자력 이용 구동장치(Solenoid Valve)

이들중 모타구동 방식은 그 사용범위의 다양성으로 인하여 가장 널리 쓰이는 구동장치로서 약 50여년의 역사를 갖고 있는 미국의 LIMITORQUE Co.가 가장 유명하고 이외에 영국의 ROTORK Co.가 널리 알려진 모타구동 장치의 생산자이다.

특히 LIMITORQUE의 모타구동 장치는 밸브업체의 표준 모타구동 장치로 통할 만큼 널리 쓰이고 있다. 본고에서는 LIMITORQUE사와 ROTORK사의 모타 구동장치를 중심으로 모타 구동밸브의 프로세스

응용시에 고려되는 제반 문제점 및 이에따른 효율적인 관리방안에 대하여 논하고자 한다.

### (1) 모타구동밸브의 적용에 있어서 TROUBLE 발생 원인

모타 구동밸브의 구동장치 고장 원인을 객관성있고 심도있게 조사 분석한 것은 무엇보다도 미국의 원자력 발전소 규제기관의 제반 보고서<sup>(1)</sup>와 원자력발전소 운전협회(INPO : Institute of Nuclear Operation) 발행의 SOER (Significant Operating Experience Report) 및 SER (Significant Experience Report) 등 INPO 보고서등을 들 수 있다. 이들 보고서들에 의하면 특별히 LIMITORQUE사의 SB, SBD 및 SMB스타일의 구동장치가 전체 구동장치 고장의 90%를 점하고 있음을 보여주고 있는데, 이것에 대한 주요 10가지 고장원인 분석은 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

- ①토포크 스윗치 문제-스윗치의 재설정, 접촉부의 세척 또는 스윗치 자체를 교환함으로써 문제 해결
- ②리미트 스윗치 문제-리미트 스윗치의 재조정 설치, 접촉부의 세척 또는 스윗치 자체를 교환함으로써 문제 해결
- ③모타 자체의 문제-스윗치 손상으로 인한 모타의 문제는 제외하고 순수히 모타 자체 문제의 경우로서 모타의 교환

**모타구동 밸브는 현대화된 프로세스 플랜트에서  
시스템의 원활한 공정제어에 가장 일반적으로  
사용되고 있는 제어요소**

④디클러치 트리퍼 몽치(Declutch tripper Assembly) 문제-이 문제는 수동으로 밸브를 동작시킬 수 없거나 또는 자동으로 전원 가압이 불가능한 경우로서 구동장치 내부의 기계부품의 손상에 기인하는 경우가 많음.

⑤전기배선 및 연결 문제-주로 전선의 연결단자의 풀림, 파손 또는 접지상태의 불량등에 의하여 발생

⑥스프링 팩의 문제-스프링 팩의 노화, 부적절한 크기의 스프링 팩 선정과 스프링 팩의 유압적 고정(Hydraulic Lockup) 등으로 인한 손상

⑦기계적 부품의 문제-전반적인 기계부품의 손상을 말함. 즉, 웜 기어, 베어링, 키 또는 키홈등의 마모와 하우징이나 밸브등의 손상

⑧윤활(Lubrication) 문제-이 손상은 밸브 스템, 기어 박스 또는 LIMIT SWITCH등의 부적절한 윤활로 인한 손상을 말함.

⑨스템 너트의 문제-스템 너트의 마모 또는 스템 너트 고정구의 풀림으로 인한 손상.

⑩구동부 마운팅 볼트의 문제-밸브의 요크와 구동 장치의 고정에 있어서 체결 볼트의 손상으로 인한 문제.

미국 원자력 규제위원회(NRC)의 Bulletin 85-03<sup>(1)</sup>의 발행 시점을 기준한 1985년 5월 이후 부터 각 발전소로 부터 보고된 모타구동 밸브의 문제건수는 1988년 10월까지 총 1480건으로서 이를 위의 10개 항목별로 분류하면 아래의 <표12>와 같다.

이 표에서 보는 바와 같이 모타구동 밸브의 주된 손상 요인은 어떤 기계적인 손상(구조적인 문제를 포함)

보다도 전기적 또는 모타 제어의 기술적 문제인 토오크 스위치 및 리미트 스위치의 설정문제가 전체 손상 건수의 2/3를 넘고 있음을 보여주고 있다. 또한 품질의 향상이 지속적으로 이루어져 기계적 또는 기구학적 원인에 의한 손상은 점차 감소되어 가고 있지만 전기 전자적 원인에 의한 손상은 크게 개선되지 않고 있는데 그 이유는 부품의 불량에 있는 것이 아니고 유지 보수중의 제 스위치 설정 잘못등 인간의 실수에 의한 것이 많다.

**<표12> Motor Operated Valve (MOV) Failures by Category since May 1985**

CATEGORY	Number of Failures	Percentage of Total
1. Torque Switch	472	31.9
2. Limit Switch	348	23.5
3. Motor	212	14.3
4. Declutch Tripper Assembly	116	7.8
5. Wiring and Connection	85	5.8
6. Spring Pack	78	5.3
7. Mechanical	77	5.2
8. Lubrication	37	2.5
9. Stem Nut	36	2.4
10. Mounting Bolts	19	1.3

(1) NRC Report AEOD/C203, Survey of Valve Operator-Related Events Occurring During 1978, 1979, and 1980. Issued in May 1982.

(2) Based on NRC Bulletin 85-03.

## (2) 모타구동 밸브 구동장치의 선정

모타구동 밸브의 구동장치의 적합한 선정은 인간사의 결혼에 비유될 만큼 불가분의 관계이며 밸브의 수명기간동안 평생을 온갖 역경속에서 동거동락할 운명으로 맺어지기 때문에 전문가에 의한 선정과 더불어 밸브 제작회사에 의한 조립이 전제되어야 한다.

일반적으로 모타구동장치는 모타 출력에 따른 힘을 구동장치내의 기어열(Gear Train)을 통하여 밸브조작에 필요한 힘, 속도, 작용방향, 제어조건에의 부응여부등을 기계, 전기적인 방법으로 수행하는 역할을 하도록 되어 있으며, 이에 따라 그 구조 또한 복잡할 뿐더러 아울러 고도의 신뢰성이 요구됨으로 밸브구동장치를 모타구동 방식으로 생산하는 것은 지극히 높은 기술을 요구한다. 따라서 현재 모타구동 장치를 생산하는 업체는 선진국 몇개 회사로 국한되어 있으며, 각 나라마다 1, 2개의 업체만이 브랜드화 되어 있을뿐이다. 이들중 우리나라에서 가장 널리 알려진 브랜드는 일본계를 제외하고 미국계의 LIMITORQUE와 영국계의 ROTORK이 있다.

### ①모타구동장치의 크기 계산

모타구동장치의 크기는 밸브형태 및 사용조건에 따라 결정된다. 일반적으로 구동장치 크기의 선정은 밸브의 설계(최고운전)압력과 디스크 포트의 크기와 형상(내경등), 스템의 크기(직경), 패키징의 가압력 및 밸브회사 고유의 설계여유(Design Margin)가 고려된다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

설계추력 (DESIGN THRUST) = 밸브계수 (C.)

× 밸브디스크의 힘 (F<sub>d</sub>) + 스템의 힘 (F<sub>s</sub>) + 팍킹마찰력 (F<sub>f</sub>) + 스템 및 디스크의 자중 (W<sub>sd</sub>)

설계토크 (DESIGN TORQUE) = 스템계수 (C.)

× 설계추력

여기서,

$$F_d = \pi \cdot D^2 \cdot \Delta P / 4$$

$$F_s = \pi \cdot d^2 P / 4$$

$$F_f = 1000 \text{ lbf}, d \leq 1"$$

$$1500 \text{ lbf}, 1" < d \leq 2"$$

$$2500 \text{ lbf}, 2" < d$$

단, 패키징의 마찰력은 스테핑 박스의 설계방식에 따라 다르며 일반적으로 패키징에서의 누설을 최소화시킬 목적으로 가압력을 크게 하는 경우가 많으며 설계 LIVE LOADING의 패키징구조에서는 위의값보다 크다.

d = 스템의 직경 (inc)

C<sub>v</sub> = 밸브 계수

= 0.25내외 (Parallel Slide & Flex. or Double Disc Gate)

= 0.35내외 (Solid Wedge Gate)

= 1.15내외 (Screw down Globe above 2")

= 1.5내외 (Screw down Globe unde 2")

P = 설계압력 (psig)

D = 밸브 시트의 직경 (inch)

ΔP = 설계차압 (psi)

C<sub>s</sub> = 스템계수

$$= \frac{D_s (\cos \phi \tan \alpha + \mu)}{24 (\cos \phi - \mu \tan \alpha)}$$

D<sub>s</sub> = 스템 직경 (Mean Stem Diameter)

φ = 나사각 (Thread Angle)

tan α = Thread Lead / D<sub>s</sub>

μ = 마찰계수 (0.12 ~ 0.2, 통상 0.14 ~ 0.16)

밸브계수라 함은 밸브 디스크와 시트간의 마찰에 의해 정해지는 마찰계수이며 스템계수는 윤활, 온도, 불순물의 유무등 운전환경에 따라 변하게 된다. 또 이들 계수의 결정은 시험 및 경험 축적자료에 의하여 결정된다. 특히 스템계수는 모타구동장치의 토오크를 결정하는데 중요한 요소로서, 모타의 출력토크가 스템 너트 또는 드라이빙 부싱을 통하여 스템의 추력으로 변화하는데 생기는 변환기구의 기하학적 형상 및 마찰기구의 특성으로 구성된다. 따라서 구동장치에 적절한 윤활, 테스트등 유지관리가 소홀한 경우에는

스텝계수는 증가한다. 이렇게 스텝계수가 증가하면 모터의 설계토크가 커져서 모터에 과부하가 발생될 우려가 생긴다. 아울러 이러한 사항을 고려하지 않고 구동장치를 선정하면 통상 스텝계수를 적게 잡거나 메이커 표준 스텝계수를 사용하게 됨으로 유지관리가 부적절한 경우 구동장치의 트러블을 야기하게 된다. 한 예로 1.25"φ의 스텝, 1/3"의 피치, 1/3"의 리이드를 가진 스텝에서 윤회등의 적정여부에 따라 스텝계수가 0.012~0.03정도로 측정되는 것을 보아 적어도 30~35%의 스텝계수 변화가 있음을 고려하여야 한다. 따라서 모터구동장치의 토크 출력 선정에 있어서는 이러한 설계여유 이외에도 경험적인 여유를 고려할 필요가 있으며 스텝계수의 경우에는 제작자의 값을 사용하고 여기에 효율을 90~95%정도 고려하는 경우가 일반적이다.

②모터출력 토크의 변화

모터구동장치에서 고려할 중요한 사항의 하나는 전압에 따른 모터의출력 토크의 변화이다. 모터의 출력 토크는 전압의 좌승으로 변화하기 때문에 10%의 전압 강하시를 고려한다면 모터의 크기(출력 토크) 선정은 1.23배로 하여야 될 것이다.

즉, Design Torque = α · V<sup>2</sup>, 여기서 α는 비례상수이고, V는 전압

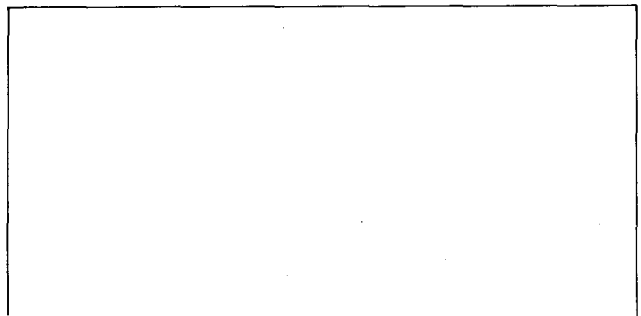
$$\frac{\text{Design Torque (100)}}{\text{Torque at 100\% Voltage}}$$

$$= \frac{\text{Sizing Torque considering 70\% Voltage (70)}^2}{(100)^2}$$

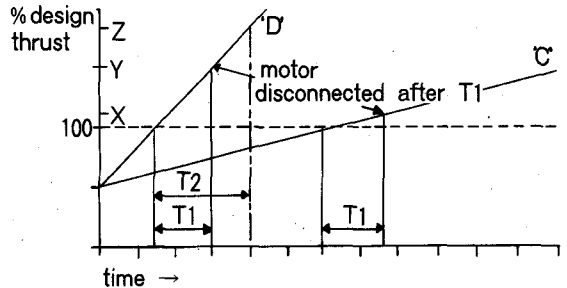
$$\text{Sizing Torque} = \frac{10000}{4900} = 2.04$$

at 30% Voltage Drop

$$= \frac{10000}{6400} = 1.56$$



〈그림 40〉 스톱상태-밸브의 강성과 추력속도와의 관계



〈그림 41〉 토크시팅-토크 스위치 단락시간의 영향

at 20% Voltage Drop

$$= \frac{10000}{8100} = 1.23$$

at 10% Voltage Drop

$$= \frac{10000}{12100} = 0.83$$

at 10% exceed of Rated Voltage

따라서 10~30%의 전압변화를 고려한다면 그 범위는 약 2.5배(2.04/0.83)의 출력 토크 변화를 예상할 수 있다.

③밸브의 시팅 기준 (SEATING RATE)

모타구동장치에서 전기적 부품 특히 모타의 부적절한 결선이나 리미트 또는 토오크 스위치의 손상등으로 인한 완전부하(Full Power) 하에서의 밸브의 시팅(또는 백시팅)시의 모타의 Overrun과 같은 스톨(Stall) 상태에서는 밸브의 시팅 레이트가 증가하게 된다. 다음의 <그림 40, 41, 42>에서 보는 바와 같이 밸브스텝의 운동속도, 트림구조의 강성, 단락시간(Disconnecting)의 장단 및 토오크 스위치의 제어형식에 따라 그 특성을 달리한다. 이들 그림들에 대한 설명은 다음호에서 구체적으로 설명한다.

### (3) 모타구동밸브의 운전

#### ① 정상적인 운전

일반적으로 모타구동밸브의 운전은 밸브가 닫힐때는 토오크 스위치의 동작에 의하고 반대로 열릴때는 리미트 스위치의 동작에 의하여 제어 운전된다. 밸브의 디스크 및 시트의 완전한 밀착은 밸브시트의 내누설 등급에 따라 토오크의 크기로 정해질 만큼 최적의 닫힘상태를 이루기 위해서는 설계된 모타 출력 토오크가 밸브 디스크의 제위치에서 동작되도록 하여야 한다. 그러나 토오크 스위치가 밸브의 최적 닫힘위치에서 즉시 동작한다 하더라도 다음의 그림에서 보는 바와 같이 모타를 실질적으로 정지시키는 접촉자(Contactor)가 동작하는데는 20 내지 70밀리 초(Millisecond)가 걸린다. 즉, 이 시간 사이에는 모타가 계속 동작하고 있기 때문에 추가의 토오크(Inertia of Motor)가 밸브 스텝에 작용한다(Torque Overrun). 이 Torque Overrun은 실험적으로 기준 정격 토오크의 10%~20%정도이다. 그러나 이 경우는 실제 사용조건하에서 고려되는 사항으로서 밸브 제작사에서의 시험조건으로는 만족시킬 수 없기 때문에 제작자는 계통의 무부하상태하에서 정격 최고 속도로 시험함으로써 보다 높은 토오크가 측정된다. 이 측정결과를 실제조건에 이용하는 것(Simulation)은 밸브제작사의 Know-how이다. 대략적으로 이의 측정 토오

크의 값은 실제조건에 비하면 상당히 높을 것으로 생각된다. <그림 43>은 차압이 없는 상태 또는 드라이 운전(Dry-Run)시와 차압상태하에서 토오크 시팅 상태를 보여주는 것으로서 같은 배관계통의 운전압력 및 설계차압에 따라 선정된 토오크량은 실제 시팅시의 차압에 의한 디스크의 힘과 트림의 접촉 마찰에 의한 힘 즉, 추력이 Dry-Run시에는 작용하지 않음으로, 운전상태하에서 설정(Setting)한 토오크 스위치는 밸브를 Dry-Run시 설계추력보다 높은 스텝의 추력하에서 동작(Decontacting)하게 됨으로, 과도한 스텝 힘에 의하여 시트에 디스크가 감합(Fitting)되는 경우도 있다. 이러한 예는 운전온도가 150°F이상되는 고압 배관계통이 정지되어 상온이 되었을 때 밸브를 닫을 경우 위에서 설명한 바와 같이 과도한 추력에 의하여 밸브 디스크가 시트에 꽂 끼어, 이후 계통을 워밍업(Warming up)한 후 밸브를 열고자 하였을 때 열리지 않는 경우가 이러한 이유에서이다.

밸브의 제반특성 및 운전환경에서 토오크의 변화 즉 운전 추력의 변화는 다음과 같다.

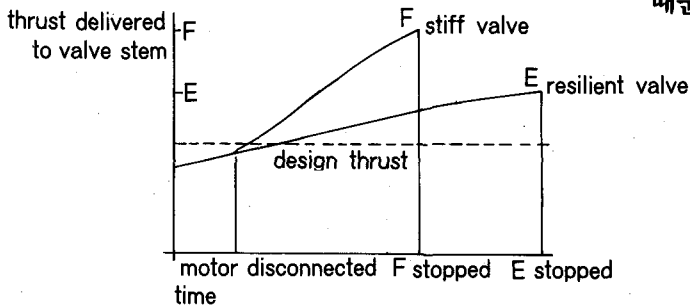
① 밸브 트림구조가 튼튼할수록 밸브 토오크 스위치는 정격 토오크에 비교적 빨리 추종하므로 운전 신뢰성이 증가한다.

② 밸브의 스텝 운전속도가 커질수록 높은 회전수의 모타가 필요하고, 따라서 접촉자의 지연동작등의 원인으로 인하여 높은 여분의 힘(High Inertia Thrust)이 발생하기 때문에 문제의 발생여지가 많다.

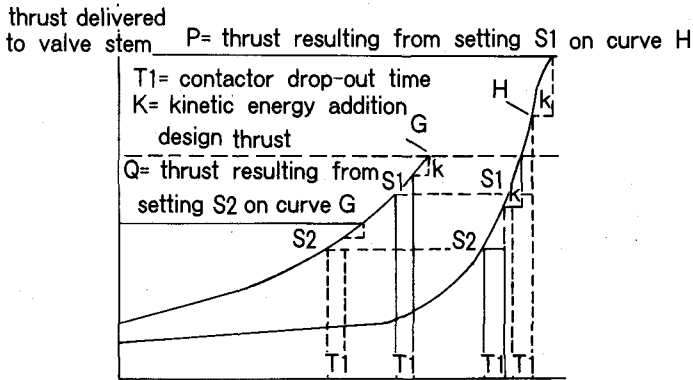
③ 게이트 밸브 스텝의 적정 운전속도는 12"/minute, 그로브 밸브의 경우는 4"/minute가 좋다.

④ 만약 게이트 밸브에서 스텝의 속도가 36"/minute 이상일 경우에는 설계 추력과 디스크가 닫힐때의 최종 추력이 분명 높게됨을 주의하여 밸브 및 구동장치를 설계하여야 한다.

밸브의 스템 운전속도가 커질수록 높은 회전수의 모터가 필요하고, 따라서 접촉자의 지연동작등의 원인으로 인하여 높은 여분의 힘이 발생하기 때문에 문제의 발생여지가 많다.



〈그림 42〉 토오코시팅-밸브 강성의 영향



〈그림 43〉 토오코시팅-차압의 영향(G)과 DRY-RUN(H)