

## 모터구동 게이트밸브의 열림행정시 차압 작용에 의한 부하율 연구

김범년\* · 홍성인\*\*

### Study on the Rate-of-Loading by the Differential Pressure of Motor Operated Gate Valves in Opening Stroke

Bum Nyun Kim\* · Sung In Hong\*\*

#### ABSTRACT

The rate of loading in motor operated valve(MOV) can be defined as a variation of correlation between the actuator torque and the thrust upon the variation of operating load. This paper contains the analysis of characteristic and the validity of loading rate in the opening stroke of gate type motor operated valve. Also, this paper describes the evaluation result of loading rate for 40 MOVs' opening stroke using newly derived methodology in this study. Author has found a result that loading rate of opening stroke gets a negative value when the differential pressure is higher than 150 psi and this value goes up depending on the amount of the differential pressure.

#### 초 록

부하율은 모터구동 밸브에서 밸브 스템에 가해지는 부하(load) 변화에 따라 구동기 torque와 스템 thrust 사이의 상관관계가 변하는 현상이다. 본 논문에서는 게이트밸브의 열림행정에서 발생하는 부하율 특성을 분석하고 밸브 성능평가지 적용하는 부하율의 타당성에 대해 기술하였다. 또한, 총 40대의 게이트밸브에 대해 정적시험 및 동적시험을 수행하고 본 연구에서 개발한 열림행정에서의 부하율 평가 방법론을 적용하여 각 밸브의 열림행정 부하율을 평가한 결과를 수록하였다. 연구결과로서 열림행정의 부하율은 차압이 150 psi보다 높은 경우 (-)값으로 나타났으며, 이러한 현상은 유체 차압이 높을수록 크게 나타나는 결론을 얻었다.

Key Words: Rate-of-Loading(부하율), Stem Thrust(스템발생 수직방향힘), Differential Pressure(차압), Motor Operated Gate Valve(모터구동 게이트밸브)

† 2007년 10월 11일 접수 ~ 2007년 12월 10일 심사완료

\* 정회원, 한전 전력연구원

\*\* 충남대학교 기계공학과  
연락처 : hsi@cnu.ac.kr

#### 1. 서 론

모터구동밸브는 산업체의 유체 배관계통에 설

치되어 유체 유동을 제어하는 기능을 담당하고 있다[1]. 특히 원자력발전소의 안전관련 계통에 설치된 밸브들의 경우 오동작이나 구동기 용량 부족으로 밸브 동작에 이상이 발생된다면 유체의 공급과 차단이 적절히 이루어지지 않기 때문에 발전소 운전성에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 모터구동밸브의 운전성 확보는 발전소 운영의 신뢰성 및 안전성과 매우 밀접한 관계에 있다고 할 수 있다.

현재 국내 원자력발전소에서는 안전관련 모터구동밸브들에 대한 운전성 검증을 위한 평가가 수행되고 있는데[2], 평가방법은 밸브에 장착된 구동기의 출력과 밸브 동작시 요구되는 힘을 상호 비교하는 것이며 밸브 진단장비와 센서를 사용하여 밸브와 구동기에서 발생하는 주요 힘과 신호를 측정하고 각 부품들의 기계적 동작시 나타나는 불확실성 요소들을 고려해주고 있다. 밸브 평가시 적용하고 있는 불확실성 요소에는 부하율(Rate of Loading)과 토크스위치 반복성(Torque Switch Repeatability), 스템 윤활저하(Stem Lubrication Degradation), 스프링 팩 풀림(Spring Packing Relaxation) 등이 있다[3]. 이들 중에서 부하율 현상은 밸브에 부하(load) 작용시 구동기에서 발생하는 토크가 마찰저항에 의해 밸브 스템에 전달되는 스러스트로 변환시 그 크기가 감소하는 현상으로[4], 현재 국내외 산업계에서는 밸브 성능평가시 열림행정 및 닫힘 행정 모두 10%의 부하율을 적용하고 있다. 본 연구에서는 국내 원자력발전소에 설치되어 있는 게이트 밸브에 대해 열림행정에서 발생하는 부하율 특성을 분석하고 현재 적용되고 있는 부하율 값이 타당한지를 확인하기 위해서 발전소 현장에 설치된 밸브들에 대해 정적시험과 동적시험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 스템과 스템너트 사이의 마찰계수

모터구동밸브의 힘전달 메커니즘은 모터에서 발생하는 토크가 모터와 구동기 사이의 각종 기

어간의 동력전달을 통하여 최종적으로는 밸브 스템에 스러스트로 변환되어 전달된다. 특히 구동기의 스템너트와 밸브의 스템은 토크가 스러스트로 변환되는 최종 기계적 장치로 스템에 부가된 스러스트는 밸브 디스크에 전달되어 밸브가 열림 및 닫힘 운전을 수행하게 된다. 여기서 스템너트와 스템의 나사산 영역은 회전력인 토크가 직선운동인 스러스트로 전환되는 지점이며, 스템너트와 스템 나사산간의 맞물림에 의한 마찰저항을 감소시키기 위해 윤활유로 채워져 있다. 나사산 영역의 스템과 스템너트 사이의 접촉마찰에 의한 스템마찰계수(Stem-Stem Nut Coefficient of Friction,  $\mu$ )는 다음과 같이 정의된다[3].

$$\mu = \frac{0.96815 \times (24 \times SF - d_{pitch} \times \tan \alpha)}{24 \times SF \times \tan \alpha + d_{pitch}} \quad (1)$$

여기서,  $d_{pitch} = D_s - \frac{P_s}{2}$  (스템 나사산 직경)

$D_s$ : Stem Diameter [mm]

$P_s$ : Stem Pitch [mm]

$$\tan \alpha = \frac{l_s}{\pi \times d_{pitch}}$$

$l_s$ : Stem lead [mm]

$$SF = \frac{\text{Torque}}{\text{Thrust}} \left[ \frac{\text{N-m}}{\text{N}} \right]$$

여기서 SF(Stem Factor)는 구동기 출력토크가 스템 스러스트로 전환되는 효율을 나타내며, 정적 및 동적시험에서 측정된 결과를 이용하여 평가된다.

### 2.2 부하율

부하율은 구동기에서 발생한 동일한 토크가 유체 차압의 크기에 따라 각각 다른 크기의 스러스트로 변환되는 현상이다. 대체적으로 유체 차압이 큰 조건에서 토크에 대한 스러스트 값이 적게 나타나는데, 이것은 유체 차압이 클수록 스템마찰계수가 증가하여 스러스트로 변환시 마찰손실이 크게 발생하는 현상과 밀접한 관계가 있

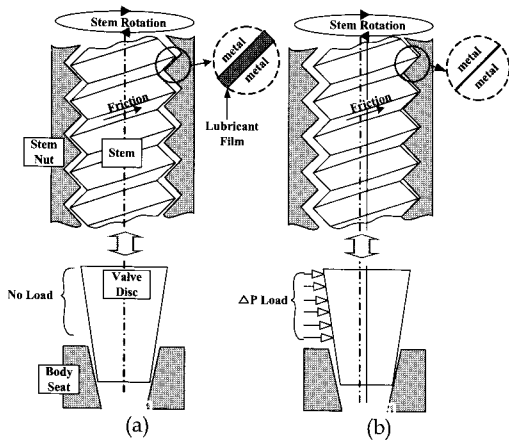


Fig. 1 Friction Characteristics at contact area between stem nut and stem

다[3].

P. S. Damerell과 S. Daubresse[5]의 연구결과는 부하율 현상의 원인으로 스템의 이동속도와 스템과 스템너트 사이의 윤활유 막(Lubricant film)에 의한 "Squeeze Film Effect"로 제시하였으며, 부하의 시간 변화율, 윤활유 성질, 스템과 스템너트 사이의 기하학적 형상이나 접촉면 상태 요소들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

Fig. 1은 유체 압력 부하작용 여부에 따른 스템과 스템너트 사이의 윤활유와 디스크의 상태를 나타낸 것이다. 디스크에 유체차압이 작용하지 않는 경우 나사산 접촉부위(metal)에는 윤활유막(Lubricant film)이 충분히 형성되어 스템이 윤활유막 위를 미끄러지듯이 진행한다(Fig. 1 a). 그러나 디스크에 유체차압이 작용하는 경우에는 유체 유동방향 쪽으로 스템은 스템너트로, 디스크는 몸체시트로 상호 밀착하기 때문에 마찰력이 증가하고 스템 운동에 대한 저항력이 커지게 된다. 또한 스템과 스템너트의 나사산 접촉부위에서 윤활유가 빠져나가 버리므로 "Metal-Metal"의 접촉을 하며 진행하게 된다(Fig. 1 b). 따라서 유체 부하가 작용하지 않는 경우에는 윤활유막 위를 작은 마찰저항을 받으며 진행하고, 유체 부하가 작용하는 경우에는 "Metal- Metal"접촉으로 큰 마찰저항을 받으며 진행하기 때문에 동일한 구동기 토크에 대해서 유체 부하가 작용하지 않

는 경우보다 유체 부하가 작용하는 경우에 스템에 전달되는 스러스트가 감소하는 부하율 현상이 발생한다. 동일한 구동기 토크가 밸브에 작용하였을 때 유체 차압이 작용하지 않는 정적상태에서 발생하는 스러스트( $Th_{static}$ )와 유체 차압이 발생하는 동적상태에서 발생하는 스러스트( $Th_{dynamic}$ )의 관계를 바탕으로 유체 부하율 계산식[5]는 다음과 같이 정의된다.

$$ROL = \frac{Th_{static} - Th_{dynamic}}{Th_{dynamic}} \quad (2)$$

### 2.3 게이트밸브 동작시 발생 스러스트

Fig. 2는 모터구동 게이트밸브의 열림과 닫힘 행정에서 정적 및 동적시험시 나타나는 이상적인 스러스트 신호[3,6]이다. 정적시험 열림행정의 경우 스템에 가해진 압축력이 완전히 풀리는 zero load 상태에서 디스크가 몸체시트를 빠져나오기 위해 최대의 스러스트가 발생하는 cracking지점을 지나 패킹력(packing force)만 작용하는 running load 구간으로 진행하게 된다. 닫힘 행정은 열림행정과 반대로 running load 구간을 지난 디스크가 최초로 몸체 시트에 접촉하는 initial seating지점에 이르고 스러스트와 토크는 제어스위치에 의해서 트립될 때까지 급격히 증가하게 된다. 여기에서 음영부분은 유체 차압이 없는 정적상태와 유체 차압이 작용하는 동적상태에서 발생하는 스러스트 차이를 나타내며,

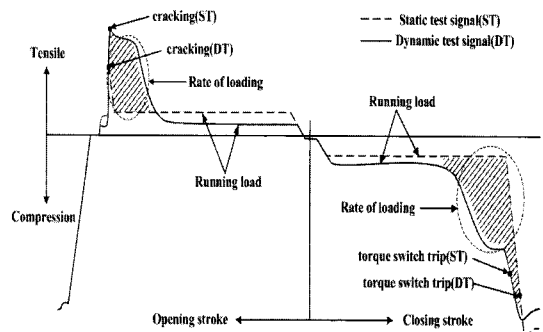


Fig. 2 Typical stem thrust signal in both strokes of the static and dynamic test

부하율의 발생을 보여주고 있다. 즉 단힘의 경우 토크스위치 트립 지점에서 정적상태보다 동적상태에서 스러스트가 작게 나타나는 것을 알 수 있으며, 유체 차압의 영향으로 동적상태에서는 스러스트가 감소되는 것을 알 수 있다[7].

### 3. 실험 및 부하율 평가 결과

#### 3.1 평가대상 밸브

평가대상밸브는 국내 원전에 설치된 Flexible wedge형 게이트 밸브로서 열림행정은 리미트스위치, 단힘 행정은 토크스위치에 의해서 제어되며, 총 40대의 밸브에 대해 시험 및 평가를 수행하였다.

#### 3.2 데이터 취득 장치

Fig. 3은 데이터 취득 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 밸브에 대한 정적과 동적시험시 데이터 취득은 모터구동밸브 전용 진단시험 장치인 UDS (Universal Diagnostic System)장비[8]를 사용하였고, 스러스트 및 토크 측정은 Strain gauge형 타입의 QSS(Quick stem sensor)를 사용하였다. QSS 센서는 밸브 스템 중심부에 설치하며, 오차를 방지하기 위해 반드시 스템 부위중 나사산이 없는 곳에 설치해야한다. 진단장비를 사용하여 스러스트, 토크, 전압, 전류, 이동거리 및 압력 신호를 측정하였으며, 토크스위치 트립이 순간적으로 발생되기 때문에 sampling rate를 1kHz로 설정하여 신호를 취득하였다. 시험은 동일 토크스위치 상태에서 반복 시험을 수행하고, 취득되는 데이터의 반복성이 일정할 때 최종 2회 시험결과를 취득하여 평가에 사용하였다.

#### 3.3 데이터 평가

밸브들에 대한 부하율 평가는 유체차압이 작용하지 않는 상태에서 시험하는 정적시험 2회와 유체차압이 작용하는 상태에서 시험하는 동적시험 2회의 수행 결과 데이터들을 분석하였다. 열림행정 부하율 평가는 스템 스러스트에 압축력과 인장력이 모두 가해지지 않은 상태인 "zero

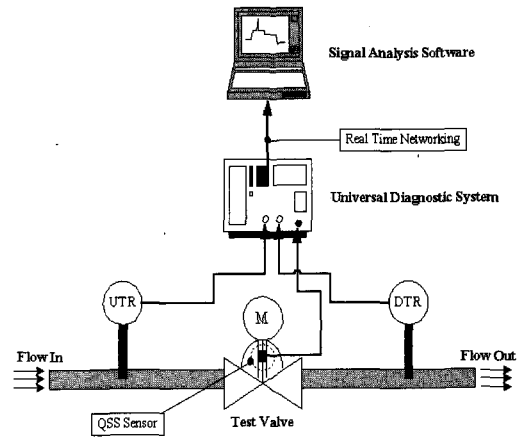


Fig. 3 Data acquisition system

load" 지점에서부터 열림시 최대스러스트가 작용하는 cracking지점까지의 스러스트 및 토크 측정값을 사용하였고, 단힘 행정 부하율은 "zero load 지점부터 밸브 완전 단힘 이후 제어스위치가 동작하여 모터가 트립되는 지점까지의 스러스트 및 토크 측정값을 사용하였다.

#### 3.4 부하율 평가 방법

최근까지 부하율에 대한 평가는 단힘 행정에 대해서 주로 연구되었으며, 단힘 행정 결과를 열림행정에 그대로 적용하였다. 모터구동기의 특성상 토크 트립 지점에서 구동기 토크와 스러스트의 반복성이 우수하여 단힘 행정에서 부하율 연구가 활발히 수행되었으며, 열림행정에서는 토크스위치 트립이 되지 않는 밸브가 대부분이기 때문에 열림행정에 대한 부하율 연구는 별도로 수행되지 않는 경향이 있었다. 본 연구에서는 부하율이 토크스위치 제어인 경우에 구동기의 토크가 동일한 값에서 트립 되어도 부하에 따른 스템 마찰력의 변화에 의해 밸브에 전달되는 스러스트가 달라지는 현상에 근거하여 열림행정시 부하율 효과 평가를 위하여 cracking시에 발생하는 동일한 토크에 대한 정적시험 스러스트와 동적시험 스러스트의 차를 구하여 부하율 평가에 적용하였다. Fig. 4는 열림행정에 대한 정적시험

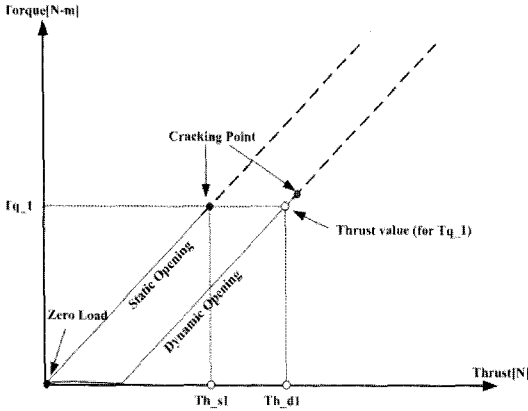


Fig. 4 Evaluation method for the ROL in opening strokes

및 동적시험후 cracking 지점의 토크( $T_{q_1}$ )와 스러스트를 나타낸 것이다. 시험 결과 단함 행정의 경우 일반적으로 알려진 경향인 동일 토크 값에 대해 동적시험 스러스트 값보다 정적시험 스러스트 값이 크게 나타난 반면 열림 행정에서는 동적시험 스러스트가 크게 발생하는 반대 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. Cracking 지점을 기준으로 했을 때 열림행정에 대한 부하율( $ROL_{open}$ )에 정의는 아래 식(3)과 같다. 여기서  $T_{q_1}$ 은 cracking 지점의 토크,  $Th_{sl}$ 는 정적시험 스러스트,  $Th_{dl}$ 은 동적시험 스러스트를 나타낸다.

$$ROL_{open} = \frac{Th_{sl} - Th_{dl}}{Th_{dl}} \quad (\text{for } T_{q_1}) \quad (3)$$

열림행정시 cracking 지점에 작용하는 최대 스러스트/토크는 단함 행정의 토크스위치 트립 지점에 작용하는 것보다 그 값이 작게 나타나기 때문에 열림 및 단함 행정에서의 부하율을 상호 비교 평가하기 위해서는 단함행정시 토크스위치 트립 지점에서 발생하는 토크와 동일한 토크가 발생하는 열림행정 지점에서 스러스트 값들을 결정해야 하며, 그 지점은 cracking 지점보다 높은 가상의 지점을 의미한다.

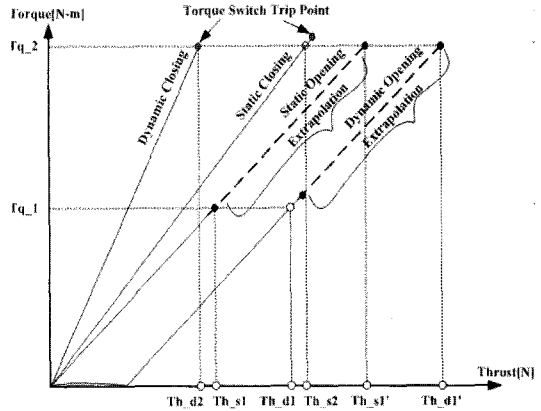


Fig. 5 Evaluation method for the ROL in both strokes

이를 위하여 정적 및 동적시험 데이터에서 열림 행정시 zero load 지점부터 cracking 지점까지의 토크 값 분포를 분석하였으며, 그 결과 모든 밸브들에서 거의 선형적인 토크 값 분포를 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 단함행정시 측정된 최대 토크 값까지 열림행정의 최대 토크를 외삽하여 선형적으로 확장한 후 스러스트를 결정하는 방법으로 열림행정의 스러스트 값들을 예측 결정하였다(Fig. 4). Fig. 5는 위에서 제시한 방법을 적용하여 단함 행정 토크 값( $T_{q_2}$ )을 기준으로 동일 토크 값에 대해 선형적으로 연장한 열림행정 스러스트 값을 나타낸 그림으로 열림 행정에서는 단함 행정과 반대로 동적시험에서 스러스트값이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 위의 연구결과를 근거로 수정된 스러스트를 이용한 열림행정 부하율과( $ROL_{open-correct}$ )과 단함행정 부하율( $ROL_{close}$ )은 식 (4)와 (5)로 정의할 수 있다.

$$ROL_{open-correct} = \frac{Th_{sl'} - Th_{dl'}}{Th_{dl'}} \quad (\text{for } T_{q_2}) \quad (4)$$

$$ROL_{close} = \frac{Th_{s2} - Th_{d2}}{Th_{d2}} \quad (\text{for } T_{q_2}) \quad (5)$$

여기서  $Th_{sl}'$ 는 열림행정 정적상태에서  $T_{q_2}$  토크

에 해당하는 스러스트 값,  $Th_{dl}$  '는 열림행정 동적상태에서  $Tq_2$  토크에 해당하는 스러스트 값을 나타내며,  $Th_{s2}$ 는 닫힘행정 정적상태에서  $Tq_2$  토크에 해당하는 스러스트 값,  $Th_{d2}$ 는 닫힘행정 동적상태에서  $Tq_2$  토크에 해당하는 스러스트 값을 나타낸다.

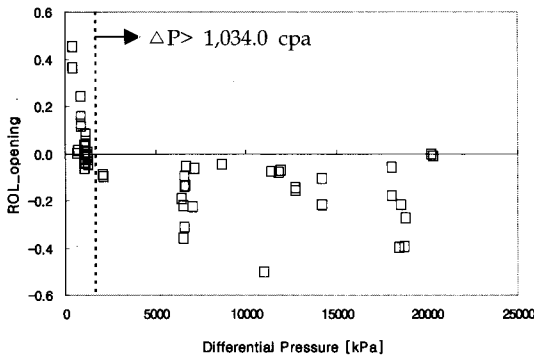


Fig. 6 Distribution of ROL with differential pressure for the opening stroke

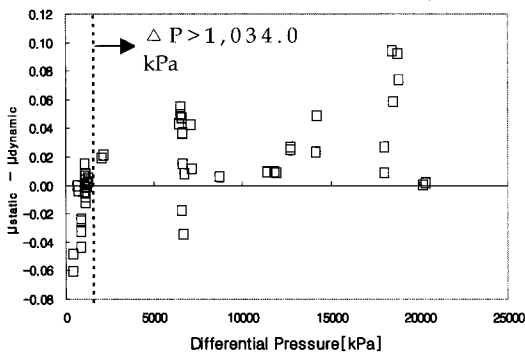


Fig. 7 Distribution values for stem friction coefficient between the static and dynamic test

### 3.5 열림행정의 부하율 평가

Fig. 6은 40대의 게이트밸브를 다양한 차압조건에서 동적시험을 수행하고 열림행정 cracking 시점에서 발생한 동일한 토크( $Tq_1=equal$ )를 기준으로 부하율을 평가한 결과를 나타낸 그래프로써, 차압이 증가함에 따라서 부하율 분포가 (+)값에서 (-)값으로 이동하는 것을 알 수 있다. 대략적으로 차압이 1,034 kPa 이상 작용하는 밸브

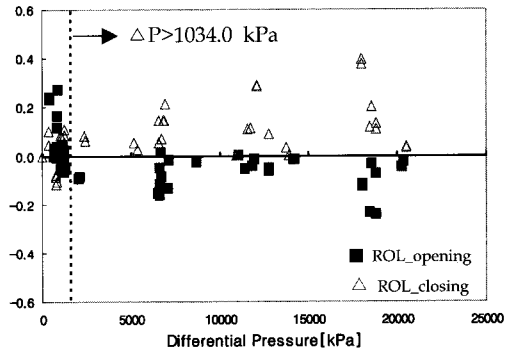


Fig. 8 Distribution of ROL for the opening and closing stroke

들에서 (-)값이 나타나고 있는데, 이것은 위에서 제시한바와 같이 열림행정의 피스톤 효과가 1,034 kPa 정도에서 나타나, 스템과 스템너트의 마찰력이 급속히 감소한다는 것을 의미한다. Fig. 7은 정적시험시 발생되는 스템마찰계수와 동적시험시 발생되는 스템마찰계수의 차( $\mu_{static} - \mu_{dynamic}$ )를 차압에 따라 나타낸 그래프로 차압 1,034 kPa 이상에서는 정적 스템마찰계수가 동적 스템마찰계수보다 크게 발생되는 것을 알 수 있으며, Fig. 6의 결과가 나타나는 이유를 잘 설명해 주고 있다. Fig. 8은 위의 3.4항에서 제시한 부하율 평가방법을 적용하여 시험결과로부터 도출된 열림행정에 대한 부하율을 닫힘행정의 부하율과 동시에 나타낸 그래프이다. 부하율을 평가하기 위해 닫힘행정 토크스위치 트립시에 발생한 동일한 토크( $Tq_2=equal$ )를 기준으로 하여, 두 행정에서 발생한 부하율을 비교 분석한 결과 닫힘행정의 부하율은 (+)값을 나타내고 열림행정의 부하율은 (-)값을 나타내는 매우 상반되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 현상은 차압이 큰 경우에 두 행정간의 부하율값 차이가 점점 더 커지는 것으로 나타나고 있다. 이것은 위에서 언급한 피스톤 효과의 영향으로 설명될 수 있으며, 차압이 커질수록 피스톤 효과의 영향도 더 커지므로 높은 차압에서 닫힘행정과 열림행정의 부하율값 차이는 더 커지는 것으로 나타났다.

## 4. 결    론

## 참 고 문 헌

Flexible wedge형 모터구동 게이트밸브의 열림 행정에 대한 부하율을 평가하기 위해 다양한 차압 조건에서 밸브 시험을 수행하였으며, 그 결과 정적상태의 토크값 변화와 동적상태의 토크 값의 변화가 선형적인 관계가 있음을 확인하고, 이를 근거로 하여 cracking 시점에서 발생하는 동일한 토크를 기준으로 외삽법에 의한 열림행정 부하율 평가 방법론을 제시하였다. 또한 시험 밸브들의 열림행정 및 닫힘 행정시의 부하율을 비교 분석하였다. 열림행정 부하율 평가 결과 닫힘 행정과 유사한 부하율 분포를 보일 것으로 예상하였으나, 오히려 차압이 증가 할수록 동일한 토크에 대해 동적상태의 스러스트가 정적상태의 스러스트보다 크게 나타나 닫힘행정과는 상반된 결과가 나타났으며, 특히 유체차압이 1,034 kPa 이상 작용하는 밸브들에서는 열림행정 부하율이 (-)값으로 나타났다. 이러한 현상이 나타나는 것은 밸브 열림시 유체 압력이 밸브 디스크를 밀어 올리는 피스톤 효과에 의한 것으로 판단되며, 피스톤 효과는 유체의 차압이 높을수록 크게 나타나는 경향이 있다는 것을 본 연구를 통하여 알 수 있었다. 본 연구 결과로 볼 때 현재 밸브 성능평가지 적용하는 부하율을 닫힘행정에서 도출된 값을 열림행정에 그대로 적용하는 것은 너무 보수적인 평가 방법이며, 특히 차압이 1,034 kPa 이상인 밸브에 대해서는 본 연구에서 제시한 열림시 부하율을 평가하는 방법[3.4 참조]을 적용하여 열림행정에 대해서도 별도의 부하율 평가를 수행한 다음 그 값을 적용하는 것이 밸브 성능 평가의 정확성을 높이고 구동기를 너무 보수적으로 설계하지 않는데 도움이 될 것으로 판단된다.

1. 주상현, 최호진, 박중승, 임진석, "초소형 터보엔진용 PWM 연료조절장치의 설계 및 모델링에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.95-101
2. 김효정, 성계용, "Development of Regulatory Techniques for Operational Performance Evaluation of Nuclear Power Plants," KINS Report, 2004, pp.157-180
3. A. P. Wise, "Application Guide for Motor Operated Valves in Nuclear Power Plants," EPRI Report-NP-6660D, 1990, pp.1-11
4. Kim, D. W., Yoo, S. Y., "A Method of ROL Improvement for the Motor Operated Gate Valve Operated in the High Differential Pressure Condition", Journal of Fluid Machinery No. 8, 2005, pp.16-22
5. P. S. Damerell, S. Daubresse, "Methods to Address Rate-of-Loading in Torque Switch Controlled MOVs," EPRI Report TR-103226, 2000, pp.1-13
6. J. Hoster, "Use of Static Closure Data for Determining the Stem-to-Stem nut Coefficient of Friction at Unwedging," EPRI Report TR-113989, 1999, pp.1-10
7. J. K. Wang, and M. S. Kalsi, "An Improved Gate Valve for Critical Application in Nuclear Power Plants," Fourth NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing, 1996, pp.1B-55-56
8. Universal Diagnostic System MOV User's Manual