

모터구동 게이트밸브 열림행정시 차압 작용에 의한 부하율 연구

김대웅* · 박성근 · 정래혁 · 이도환 · 홍승열

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

Dae Woong Kim*, Sung Keun Park, Rae Hyuck Jeoung, Do Hwan Lee,
Sung Yull Hong

Key Words : Rate-of-Loading(부하율), Stem Thrust(스텝 쓰러스트), Differential Pressure(차압), Motor Operated Gate Valve(모터구동 게이트밸브), Required Thrust(요구 쓰러스트)

ABSTRACT

The Rate-of-Loading(ROL) effect of motor operated gate valves causes a decrease in the thrust delivered at a specific torque by the actuator under dynamic flow ΔP conditions as compared to the no-flow, static conditions. This effect needs to be studied for the quantitative evaluation of motor operated gate valve operability. This study is performed to verify the validity for the application of ROL in the evaluation of operability of motor operated gate valves for the opening stroke. The ROL is assessed on the basis of in-situ test data for the opening and closing strokes. The results show that the distribution of the ROL for the opening stroke has a tendency to the negative value when DP is higher than 150psid.

1. 서론

원자력발전소에 설치된 모터구동밸브는 대부분의 유체계통에 설치되어 발전소 기동·정지 및 운전기간 중 유체 유동을 제어하는 기능을 담당하고 있다. 특히 안전계통에 설치된 밸브들의 경우 오동작이나 구동기 용량 부족으로 밸브 동작이 실패한다면 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 국내에서는 전원전 안전관련 모터구동밸브들

에 대한 운전성 확보를 위해 안전성평가가 수행되고 있는데, 평가방법은 밸브에 장착된 구동기의 출력 쓰러스트와 계통 설계기준 최대차압 조건에서의 밸브 동작시 요구되는 쓰러스트를 이용하는 것이며 진단장비나 센서 그리고 밸브 구성요소들의 기계적 동작이나 타나는 불확실성 요소들을 밸브의 안전기능에 따라서 각각 다르게 고려해주고 있다. 안전성 평가시 적용하고 있는 불확실성 요소에는 부하율(ROL)과 토크스위치 반복성(TSR), 스텝 윤활저하(SLD), 스프링 팩 풀림(SPR) 등이 있다. 이들 중에서 부하율 현상은 밸브에 부하 작용시 마찰저항이 변하여 스텝에 전달되는 쓰러스트가 감소하는 것으로서, 현 안전성 평가에서는 해외 관련기관(Crane Nuclear Inc.)이 권고한 값 10%를 반영하고 있다. 따라서 본 논문은 열림행정에 대한 안

* 한전 전력연구원 원전 설비 운영그룹
E-mail : kimdw@kepri.co.kr

전성 평가시 부하율 적용값이 타당한지를 확인하기 위해서 발전소 현장에 설치된 밸브들에 대해 정적시험과 동적시험을 수행하였고, 측정 결과를 분석하였다.

2. 본론

2.1 이론적 고찰

2.1.1 스템과 스템너트 사이의 마찰계수

모터의 회전력은 각종 기어로 맞물려 있는 동력전달 축을 통해서 스템너트와 스템 그리고 디스크에 전달되어 밸브 고유기능을 수행한다. 여기서 스템너트와 스템의 나사산 영역은 회전토크가 직선 쓰러스트 운동으로 전환되는 지점이며, 마찰저항을 감소시키기 위해 윤활유로 채워져 있다.

나사산 영역의 스템과 스템너트 사이의 접촉마찰에 의한 스템마찰계수(Stem-Stem Nut Coefficient of Friction, μ)는 다음과 같이 정의된다. [2,3]

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

where, $d_{pitch} = D_s - \frac{P_s}{2}$

D_s : Stem Diameter [inch]

P_s : Stem Pitch [inch]

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

l_s : Stem lead [inch]

$$SF = \frac{\text{Torque}}{\text{Thrust}} \left[\frac{\text{ft-lbf}}{\text{lbs}} \right]$$

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

2.1.2 부하율

부하율은 밸브 디스크에 미치는 유체 힘의 변화에 따라 밸브 스템과 스템너트 사이의 마찰이 변해서 동일한 구동기 토크에 대해 쓰러스트값이 변하는 현상으로 정의된다.

EPRI(Electric Power Research Institute)의 연구결과는 부하율 현상의 원인으로 스템의 이동속도(V_s

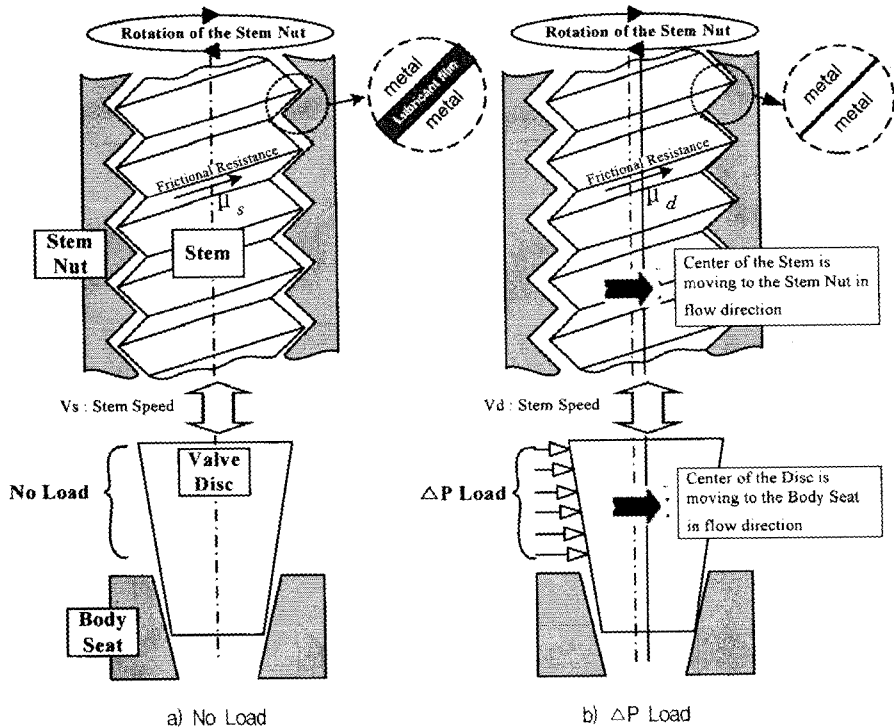


Fig. 1 Frictional Characteristics at contact area between Stem and Stem Nut

Vd)와 스템과 스템너트 사이의 윤활유 막(Lubricant film)에 의한 "Squeeze Film Effect"로 제시하였으며, 다음과 같은 요소들에 의해 영향을 받는 것으로 보고 하였다.^[25]

- 부하의 시간 변화율
- 윤활유 성질
- 스템과 스템너트 사이의 기하학적 형상이나 접촉면 상태

Fig. 1은 부하작용 여부에 따른 스템과 스템너트 사이의 윤활유와 디스크의 상태를 나타낸 것이다. 디스크에 유체차압이 작용하지 않는 경우 나사산 접촉부위에서 "Metal-Lubricant film-Metal"을 형성하며 스템이 윤활유 막(Lubricant film) 위를 미끄러지듯이 진행한다.[Fig. 1 a)참조] 그러나 디스크에 유체차압이 작용하는 경우에는 유체 유동방향 쪽으로 스템은 스템너트로, 디스크는 몸체시트로 상호 밀착하기 때문에 마찰계수가 변하여 스템 운동에 대한 저항력이 증가하므로 스템의 이동속도(Vd)가 감소하고 행정시간이 길어진다. 또한 스템과 스템너트의 나사산 접촉부위에서 윤활유가 빠져나가 버리므로 "Metal-Metal"의 접촉을 하며 진행하게 된다.[Fig. 1 b)참조] 따라서 부하가 작용하지 않는 경우에는 윤활막 위를 작은 마찰저항(μ_s)을 받으며 진행하고, 부하가 작용하는 경우에는 "Metal-Metal"접촉으로 큰 마찰저항(μ_s)을 받으며 진행하기 때문에 동일한 구동기 토크에 대해서 부하가 작용하지 않는 경우보다 스템에 전달되는 쓰러스트가 감소하는 부하율 현상이 발생한다.

부하율 계산식은 다음과 같이 정의된다.^[5]

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

동일한 구동기 토크가 밸브에 작용하였을 때 유체차압이 작용하지 않는 경우와 유체차압이 작용하는 경우에 나타나는 쓰러스트 값의 차를 부하율로 정의한 것이다.

2.1.3 작용 쓰러스트^[2]

Fig. 2는 모터구동 게이트밸브의 열림과 닫힘행정에서 정적 및 동적시험시 나타나는 이상적인 쓰러스트 신호이다. 정적시험 열림행정의 경우 스템에 가해진 압축력이 완전히 풀리는 Zero Load 상태에서 패키징에 의한 쓰러스트와 토크를 극복하고 디스크가 몸체시트를 빠져 나오기 위해 최대로 걸리는 Cracking(또는 Unwedging)지점을 지나 패키징력만 작용하는 런닝구간(Running load)으로 진행하게 된다. 닫힘행정은 열림행정과 반대로 런닝구간을 지난 디스크가 몸체 시트에 접촉하는 Initial Seating지점에 이르고 구동기의 지속적인 동작으로 쓰러스트와 토크는 제어스위치에 의해서 트립 될 때까지 급격히 증가하게 된다.

동적시험 열림행정의 경우 초기 디스크에 작용하는 고차압으로 인해서 디스크가 몸체 시트에 웨징되어 있는 것이 떨어지는 순간(Cracking)에 정적시험 보다 큰 쓰러스트가 발생하고, 그 이후에도 디스크가 몸체시트의 한쪽 면 위를 미끄러지듯이 빠져 나오기 때문에 완전히 빠져나올 때 까지는 큰 쓰러스트가 작용하게 된

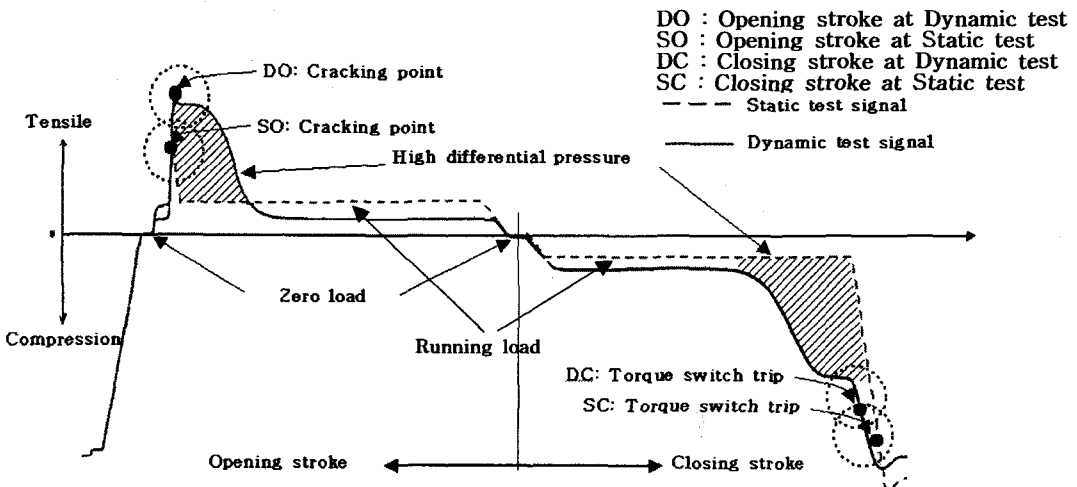


Fig. 2 Stem thrust in both strokes of the static and the dynamic test

다. 단힘행정 경우에는 열림행정과 동일한 과정을 역으로 압축력을 받으며 진행하게 된다.

2.2. 평가방법

2.2.1 평가대상 밸브

본 평가는 국내 원전에 설치된 밸브 27대를 대상으로 모든 밸브는 디스크가 몸체시트에 안착되는 플렉시블 웨지형 디스크(Flexible Wedge disc)이고, 열림행정은 리미스위치, 단힘행정은 토크스위치에 의해서 제어된다.

2.2.2 데이터 취득 장치

Fig. 3는 데이터 취득장치의 개략도를 나타낸 것이다. 밸브에 대한 정적과 동적시험시 데이터 취득은 일반적으로 널리 알려진 UDS(Universal Diagnostic System)장비를, 쓰러스트/토크 측정엔 Strain gauge형 타입의 QSS(Quick stem sensor)를 사용하였다. QSS

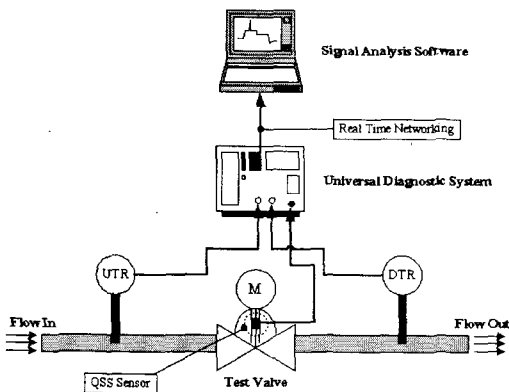


Fig. 3 Data acquisition system

센서는 구동기의 출력토크를 디스크에 전달하는 스템의 중심부에 위치하며, 밸브 동작에 방해되지 않도록 나사산이 없는 곳에 설치하였다. 쓰러스트와 토크, 압력 측정시 Sampling rate를 1kHz로 설정하였다.

2.3. 데이터 평가

밸브들에 대한 부하율 평가는 유체차압이 작용하지 않는 상태에서 시험하는 정적시험 2회와 유체차압이 작용하는 상태에서 시험하는 동적시험 2회의 수행 결과들을 이용하였다. 열림행정 부하율 평가는 스템 쓰러스트가 완전히 풀린 상태인 "Zero Load"지점부터 최

대쓰러스트가 작용하는 Cracking지점까지의 쓰러스트-토크 경로상의 측정값을, 단힘행정 부하율은 "Zero Load"지점부터 제어스위치가 동작하는 트립 지점까지의 경로상의 측정값을 사용하였다.

2.3.1 부하율 평가

부하율은 토크스위치 제어인 경우에 구동기의 토크가 동일한 값에서 트립되어도 부하에 따른 스템 마찰력의 변화에 의해 밸브에 전달되는 쓰러스트가 달라진다는 사실에 근거하므로 열림시 부하율 효과를 평가할 때에도 동일 토크에서 얻어진 정적시험에서의 쓰러스트와 동적시험에서 얻어진 쓰러스트의 차를 구함으로써 얻을 수 있다. Fig. 4는 열림행정시 작용하는 정적과 동적시험시 쓰러스트-토크 변화를 이상적으로 나타낸 그림이며, 열림행정시 부하율(ROL_{open})은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

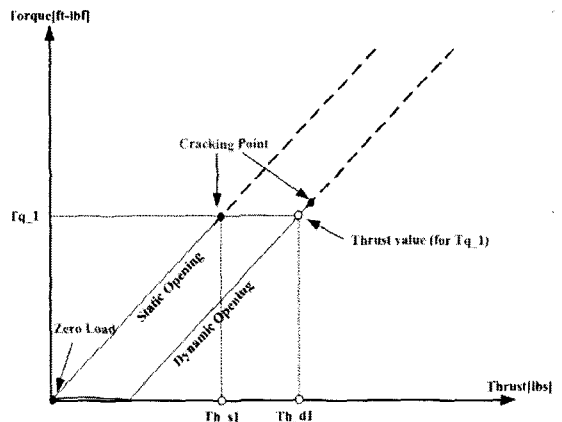


Fig. 4 Evaluation method for the ROL in opening stroke

$$ROL_{open} = \frac{Th_{sl} - Th_{dl}}{Th_{dl}} \quad (\text{for } Tq_1) \quad (3)$$

where, Th_{sl} : Thrust value of static test at Tq_1

Th_{dl} : Thrust value of dynamic test at Tq_1

여기서 열림행정시 부하율 계산에 기준이 되는 토크(Tq_1)는 정적시험의 최대 토크와 동적시험의 최대 토크 중에서 작은값을 기준으로 하였다.

열림행정시 작용하는 최대 쓰러스트/토크는 단힘행정에서 작용하는 것보다 작기 때문에 각각의 행정에서 나타나는 부하율을 비교 평가하기 위해서는 단힘행정시 작용하는 최대토크와 동일한 토크를 가지는 열림행

정의 쓰러스트 값을 결정해야 한다. 이를 위해서 밸브 크기 및 발전소 별로 11대 밸브를 선정한 후 정적과 동적시험 데이터를 가지고 열림행정시 Zero Load 지점부터 최대 쓰러스트/토크가 작용하는 Cracking 지점까지의 경로를 분석하였고, 모든 밸브들에서 관계가 거의 선형인 경로를 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 닫힘행정시 최대토크까지 열림행정의 최대토크를 외삽(Extrapolation)하여 확장한 후 쓰러스트를 결정하는 것은 타당성 있는 적용이라고 판단된다.

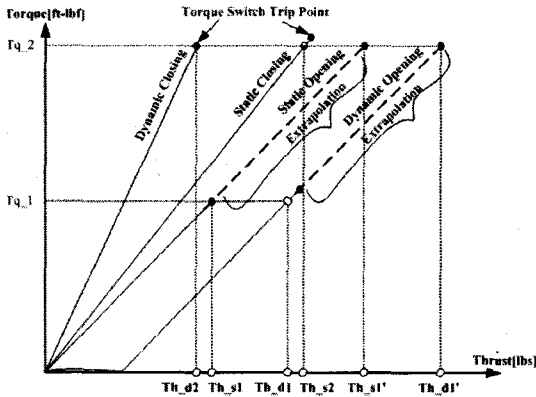


Fig. 5 Evaluation method for the ROL in both strokes

Fig. 5는 열림과 닫힘행정 부하율을 평가 및 비교하기 위해서 위의 기술내용을 이상적으로 나타낸 그림이며, 수정된 쓰러스트를 이용한 열림행정 부하율 ($ROL_{open-correct}$)과 닫힘행정 부하율 (ROL_{close})은 다음과 같이 정의된다.

$$ROL_{open-correct} = \frac{Th_{s1}' - Th_{d1}'}{Th_{d1}'} \quad (\text{for } Tq_2) \quad (4)$$

where, Th_{s1}' : Extended thrust at static test at Tq_2

Th_{d1}' : Extended thrust at dynamic test at Tq_2

$$ROL_{close} = \frac{Th_{d2} - Th_{d2}}{Th_{d2}} \quad (\text{for } Tq_2) \quad (5)$$

here, Th_{d2} : Thrust value of static test at Tq_2

Th_{d2} : Thrust value of dynamic test at Tq_2

3. 결과 및 고찰

3.1. 열림행정 부하율

Fig. 6은 밸브 크기별로 차압에 따른 열림행정 부하율을 나타낸 그래프로써, 차압이 증가함에 따라서 부하율 분포가 (+)에서 (-)값으로 이동하는 것을 보이고

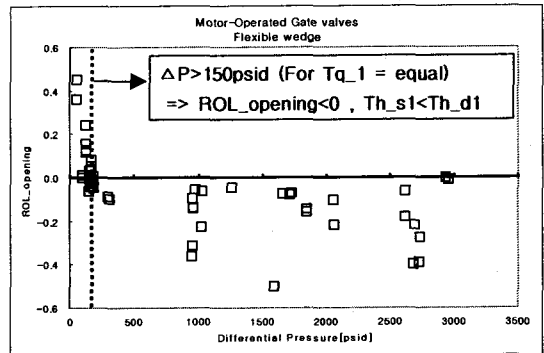


Fig. 6 ROL changing with differential pressure for the opening stroke

있다. 대략적으로 차압이 150psid 이상 작용하는 밸브들에서 (-)값이 나타나고 있는데, 이것은 동일 토크에서 측정된 정적시험의 쓰러스트 보다 동적시험시 측정된 쓰러스트가 크다는 것을 의미하는 것으로써 부하변화에 의해 스템과 스템너트 사이의 마찰 저항이 증가하여 동적시험에서 측정된 쓰러스트가 정적시험 보다 감소 한다는 부하율의 정의에 위배되는 결과이다. 이러한 사실은 Fig. 7의 정적과 동적시험시 스템과 스템너트 나사산 사이의 접촉면에서 가지는 스템마찰계수의 차를 차압에 따라서 나타낸 그래프에서 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 스템마찰계수의 차가 크개는 대략 0.1정도까지 차이를 보이고 있으며, 열림행정 부하율에서 차압이 150psid 근처에서 (-)에서 (+)로 전환되는 것과 동일하게 스템마찰계수의 차도 나타났다.

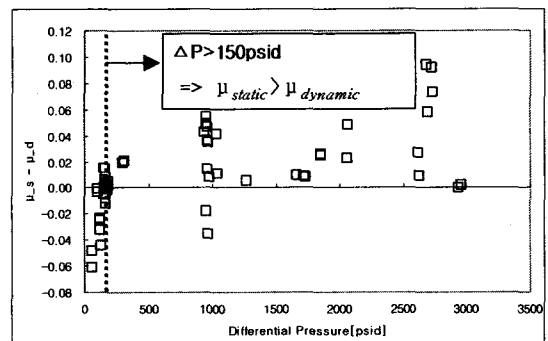


Fig. 7 The difference of the Stem-Stem Nut Coefficient of Friction changing with differential pressure

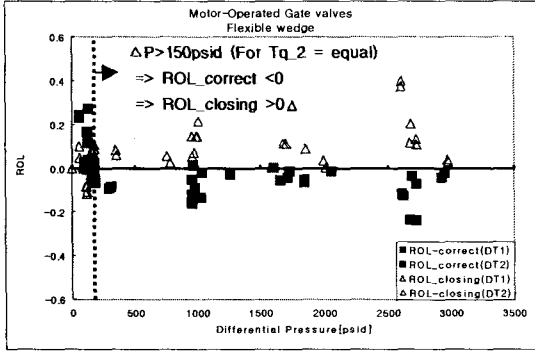


Fig. 7 ROL changing with differential pressure for both strokes

3.2. 열림과 닫힘행정 부하율

Fig. 7은 열림($ROL_{open-correct}$)과 닫힘(ROL_{close})행정의 부하율을 닫힘행정 트립 토크값 기준으로 평가하여 나타낸 그래프로써, 열림과 닫힘행정의 부하율 값이 매우 상반되는 경향을 보이며 차압 증가에 따라서 그 경향은 점점 더 커지는 것을 보여주고 있다. 이것은 동적시험시 밸브 디스크에 작용하는 유체차압이 행정 방향별로 밸브동작을 도와주거나 방해하는 힘이 다르기 때문에 스템과 스템너트 사이의 윤활유 막에 의한 작용 마찰력이 달라져서 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결론

플렉시블 웨지형 디스크를 가진 모터구동 게이트밸브들 27대에 대해서 열림행정에 대한 부하율 평가가 수행되었고, 동일한 토크 기준으로 외삽법을 이용한 열림행정 부하율과 닫힘행정 부하율을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 열림행정 부하율 평가결과 닫힘행정과 유사한 부하율 분포를 보일 것으로 예상했으나, 오히려 차압 증가에 따라 상반된 경향이 더욱더 크게 나타났다.

- 2) 특히 유체차압이 150psid이상 작용하는 밸브들에서는 열림행정에 대한 부하율이 (-)값으로 나타났다.
- 3) 열림행정에 대한 안전성 평가시 유체차압이 150psid이상 작용하는 밸브들에 대해서는 부하율에 의한 불확실성 요소를 고려할 필요가 없다는 것을 예측할 수 있다.
- 4) 부하율 현상에 대해서 명확한 원인규명을 위해서는 향후 윤활유에 대한 영향 평가가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) S. Burns and T. Walker, 1998, "Thrust Uncertainty Method," EPRI TR-103237-R2
- (2) J. K. Wang and P. D. Alvarez, M. S. Kalsi, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants", EPRI TR-106563, Vol. 1, Rev. 1, pp 5.36~5.38
- (3) R. H. Jeoung and S. K. Park, D. H. Lee, Y. S. Kim, " A Study on the Stem Coefficient of Friction of Motor Operated Gate/Globe Valves", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 35, pp 133-143
- (4) L. S. Dorfman, R. Bolt, D. Godfrey, J. Carroll, P. Sock, A. DiGiovanni, R. Elfstrom, F. Szanyi, G. Laird, "EPRI Motor-Operated Valve Performance Prediction Program Stem/Stem Nut Lubrication Test Report", EPRI TR-102135
- (5) P. S. Damerell, S. Daubresse, "Methods to Address Rate-Of-Loading in Torque Switch Controlled MOVs", EPRI TR-103226