

모터구동 글로브밸브의 Side Flow에 의한 디스크-몸체 마찰부하 평가

정래혁* · 박성근 · 이도환 · 송석윤 · 강신철

Evaluation of the Disk-to-Body Friction Load by the Side Flow in Motor-Operated Globe Valves

Rae-Hyuck Jeoung*, Sung-Keun Park, Do-Hwan Lee, Seok-Yoon Song,
Shin-Cheul Kang

Key Words : Side Flow(측면유동), Disk-to-Body Friction(디스크-몸체 마찰), Motor-Operated Globe Valve(모터구동
글로브밸브), Differential Pressure(차압), Required Thrust(요구 쓰러스트)

ABSTRACT

EPRI PPM (Performance Prediction Methodology), a method used for the prediction of required thrust of valves, can not be applied to unbalanced-disk globe valves operated in the fluid when the fluid temperature is above 150°F because the thrust increase caused by the friction between the valve disk and body is not considered in the PPM. In order to apply PPM to the valves, EPRI suggested new friction prediction method to be added in the code. This paper analyzes the applicability of the prediction method comparing the disk-to-body friction load predicted from the method with the measured friction load from the field tests. The maximum values from the prediction method and those obtained from the test were 268lbs and about 1500lbs, respectively. It is included that the prediction method should be improved for the realistic prediction of disk-to-body friction load.

1. 서론

모터구동밸브(Motor-operated Valve)는 계통에 설치되어 유량을 제어하거나 차단하는 필수적인 기기이다. 모터구동밸브들에 대한 운전성능 평가는 구동기에서 낼 수 있는 쓰러스트와 밸브가 작동하기 위해서 요구되는 쓰러스트를 평가하는 것인데, 요구 쓰러스트를 평가하는 방법으로는 진단장비를 가지고 밸브 동작시험을 수행하여 얻는 방법과 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 PPM(Performance Prediction Methodology)을 이용하여 얻는 방법 등이

있다. PPM은 유체 차압이 작용하는 상태에서 밸브 동작시험을 수행하는 동적시험이 불가능하거나 어려운 경우에 산업계에서 잘 알려진 방법이나, 적용하기 위해서는 여러 가지 제약 조건들이 있기 때문에 적용이 어려운 경우가 있다. 그 중 하나로 언밸런스 디스크를 가진 모터구동 글로브밸브에 대해서 온도 150°F이상의 유체가 밸브를 관통하여 흐를 때는 PPM을 적용할 수 없다.^[1] 이것은 모델 개발 당시 디스크와 밸브 몸체 사이에 작용하는 마찰부하로 인해 증가하는 쓰러스트를 고려하지 않았기 때문이다. 그리하여 최근 EPRI와 PECO Energy에서는 온도 150°F이상의 조건에서 2대의 밸브에 대해 9회의 시험을 통해 디스크-몸체 마찰부하 예측방법을 검증하였으나 시험 횟수가 작아 언밸

* 한전 전력연구원 원전 설비 지원그룹
E-mail : raebari@empal.com

런스 디스크를 가진 글로브밸브들에 대한 검증된 방법으로는 아직까지 산업계에 활용되고 있지 않다.

본 논문에서는 모터구동 글로브밸브들에 대한 현장 측정 데이터를 이용하여 디스크-몸체 마찰부하를 평가 하였고, 평가결과를 이용하여 EPRI에서 제시한 예측방법의 적용성을 알아보았다.

2. 본론

2.1. 이론적 고찰

2.1.1 Side Load

Fig. 1은 디스크의 전단에 작용하는 압력과 출구 포트 쪽에 작용하는 압력 사이에 차압이 작용하는 언밸런스 디스크를 가진 글로브밸브로써 유체 유동 방향이 디스크를 중심으로 하부에서 상부로 이동하는 Flow Underseat인 경우를 보여주고 있다. 밸브 입구를 통해 들어온 유체는 대부분이 유동저항이 작게 걸리는 PS1을 통해서 바로 빠져나가지만 일부는 디스크 주변을 우회하여 PS2와 PS3의 유로를 따라서 흐르게 된다. 디스크의 위치 이동에 따라서 우회 유량이 증가하게 되면 P_{side} 와 하류 출구포트의 압력 사이에 국부적인 차압이 형성되고, 그 차압은 디스크 투영 단면적에 작

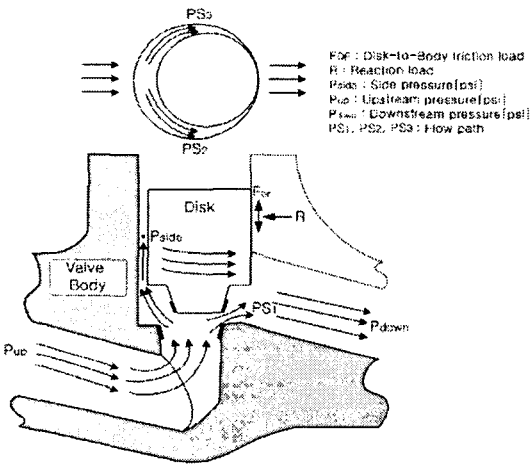


Fig. 1 Fluid Flow in Globe Valve

용하여 디스크를 밸브 몸체 쪽으로 미는 힘 Side Load를 생성 시킨다. 디스크가 완전히 열린 상태(100% Open)에서는 유체가 PS2와 PS3을 거의 통과하지 않거나 그 양이 매우 작기 때문에 Side Load는 거의 작

용하지 않는다. 그러나 닫힘 행정을 진행함에 따라서 그 양은 점차적으로 증가하게 되고 국부적으로 걸리는 P_{side} 와 P_{down} 사이의 차압도 또한 증가하게 된다. 결국에는 디스크가 몸체 시트에 근접한 지점에서 흐르는 유량과 국부적으로 걸리는 차압이 최대가 되기 때문에 디스크를 밸브 몸체로 미는 Side Load 최대 지점이 나타날 것이다. 디스크가 몸체 시트에 안착한 완전 닫힘 상태(0% Open)에서는 유동이 정체되고 디스크 주변 PS2와 PS3 유로를 따라 흐르는 유체가 없기 때문에 Side Load는 존재하지 않는다. Side Load에 대한 정의는 다음과 같다.

$$F_{Side} = \Delta P_{Side} \cdot A_{Side} \quad (1)$$

여기서 A_{side} : 측면차압이 작용하는 디스크 투영 단면적

2.1.2 디스크-몸체 마찰부하

디스크-몸체 마찰 부하는 Side Load에 의해서 밸브 몸체와 디스크가 발생하는 마찰부하로써 행정방향에 관계없이 항상 밸브 동작을 방해하는 방향으로 작용하며, 접촉 표면 사이의 재질, 가공 마무리, 유체온도 등의 영향을 받는다. [2]

따라서 가장 크게 디스크-몸체 마찰부하가 작용하는 위치는 Side Load가 가장 크게 작용하는 디스크 시팅 근처 지점에서 나타날 것으로 예측되며, 이 마찰력에 대한 정의는 다음과 같다.

$$F_{Side} = \Delta P_{Side} \cdot A_{Side} = R \quad (2)$$

여기서 μ : 디스크와 몸체 사이의 작용 마찰계수

2.2 디스크-몸체 마찰부하 예측

밸브 시험결과를 이용한 모델링을 통해 다음과 같은 디스크-몸체 마찰부하 계산식이 EPRI에 의해서 제시되었다. [1]

$$F_{DF} = \frac{\mu \times DP_v \times d_{seat} \times d_{port} \times f_G}{2} \quad (3)$$

여기서 d_{seat} : 디스크 시트 최대직경(inch)

d_{port} : 포트 직경(inch)

f_G : 가이드 개수에 따른 적용계수 (=1)

μ : Apparent Disk-to-Body Coefficient of Friction

(3)식에서 DP_V 는 디스크 위치에 따라 변하는 밸브 차압으로써

$$DP_V = DP \left(\frac{K_V}{K_V + K_{SYS}} \right) \quad (4)$$

$$K_V = \frac{891 \times d_{port}^4}{(x \times C_V)^2} \quad (5)$$

$$K_{SYS} = \frac{894.01 \times d_{port}^4 \times DP}{Q_{max}^2} \times \frac{62.4}{\rho} \quad (6)$$

여기서 K_V : 밸브 손실계수

K_{SYS} : 시스템 등가저항

C_V : 완전 열림시 유량 계수[gpm/ psi^{1/2}]

DP : 설계 차압[psid]

와 같다.

EPRI가 밸브시험을 통해 얻은 접촉표면 재질, 유체 온도 및 유속에 따른 마찰계수를 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Apparent Disk-to-Body Friction COFs

| Guide Material | Temperature | Flow Rate | Apparent COF | |
|----------------|-------------|-----------|--------------|---------|
| | °F | | ft/sec | Mean |
| S.S.-on-S.S. | 70 | 15 | 0.6 | 0.5-0.7 |
| S.S.-on-S.S. | 70 | 50 | 0.6 | 0.5-0.9 |
| S.S.-on-S.S. | 180 | Blowdown | 1.5 | 1.1-1.6 |

* Blowdown (flows greater than 50ft/sec at 180°F)

* COF : Coefficient of Friction, * S.S. : Stainless Steel

2.3. 평가방법

2.3.1 평가대상 밸브

본 논문에서 사용된 3대 밸브는 모두 동일한 형상 치수와 설계조건을 가진 언밸런스 디스크를 가진 글로브밸브이며, 기초정보는 Table. 2와 같다.

Table. 2 Design Conditions

| Stroke Length [inch] | d_{port} [inch] | d_{seat} [inch] | C_V [gpm/psi ^{1/2}] | Q_{max} [gpm] | DP [psid] |
|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|-----------|
| 1.38 | 1.378 | 1.614 | 17.7 | 25 | 1835.2 |

디스크는 원통모양의 일체형이고, 밸브 크기가 매우 작기 때문에 밸브 몸체가 직접 디스크를 유도하는 가이드 역할을 수행하도록 설계되어 있다. 또한 완전 닫힘시 디스크가 몸체 시트에 안착되면서 유체 차압이 디스크 시트에만 작용하는 Seat-Based 밸브들이다.

2.3.2 데이터 취득 장치

밸브 시험 데이터 취득은 CNI(Crane Nuclear Inc.)사의 UDS(Universal Diagnostic System) 장비, QSS(Quick Stem Sensor) 진단센서를 사용하였다.

Fig. 2는 데이터 취득장치의 개략도를 나타낸 것인데, QSS센서는 스템(Stem) 중심부 나사선이 없는 영역에 설치되어 쓰러스트와 토크를 측정할 수 있는 스

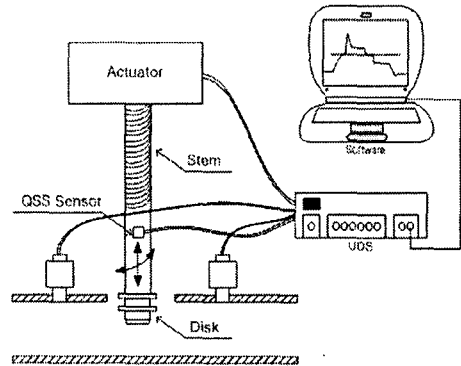


Fig. 2 Data acquisition system

트레인 게이지형 센서이다. 본 시험에서 압력과 쓰러스트 데이터 취득시 적용한 sampling rate는 1KHz였다.

2.3.3 밸브 시험

유체가 정체된 상태에서 단순 밸브의 기계적인 작동만을 수행하여 밸브의 운전성과 제어스위치의 적절성을 측정하는 정적 시험(Static Test)과 유체 차압이 밸브 디스크 양단에 걸려있는 상태에서 밸브 동작 시험을 수행하는 동적 시험(Dynamic Test)이 있다. 밸브

Table 3 Test Conditions

| Valve | Maximum Differential Pressure [psid] | Fluid Temperature [°F] | Guide Material |
|--------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Test Valve 1 | 1786.7 | 300 | Stainless steel F316 |
| Test Valve 2 | 1800.5 | | |
| Test Valve 3 | 1808.6 | | |

디스크-몸체 마찰부하를 평가하기 위해서 2inch 모터

구동 글로브밸브 3대에 대해 정적시험을 수행한 후 Table. 3과 같은 시험 조건에서 밸브마다 2회씩 동적 시험을 수행하였다.

2.4. 데이터 평가

밸브 디스크-몸체 마찰부하를 구하기 위한 행정 방향별 밸브 작용 쓰러스트 요소들을 보면 다음과 같다.

$$F_{Open} = \frac{-F_{DP} + F_{DF} - F_{SR} + F_{PF} + F_G}{TRF} \quad (7)$$

$$F_{Close} = \frac{-F_{DP} - F_{DF} - F_{SR} - F_{PF} + F_G}{TRF} \quad (8)$$

여기서 F_{Open} : 열림시 최소 요구 쓰러스트[lbs]

F_{Close} : 닫힘시 최소 요구 쓰러스트[lbs]

F_{DP} : 차압 쓰러스트[lbs]

F_{DF} : 디스크-몸체 마찰 쓰러스트[lbs]

F_{SR} : 피스톤 효과[lbs]

F_{PF} : 패킹 쓰러스트[lbs]

F_G : 디스크 및 스템 중력부하[lbs]

TRF : Torque Reaction Factor[무차원]

(7) 와 (8)식에서 패킹 쓰러스트는 정적시험에서 측정하였고, 디스크와 스템의 중력부하는 정적 시험 패킹 쓰러스트에 포함되어 있기 때문에 무시하였다. TRF는 Torque Reaction 쓰러스트가 총 요구 쓰러스트의 3%미만의 작은 값을 가지기 때문에 (즉 TRF = 0.97) 1을 적용한다.^[1] 또한 피스톤 효과는 밸브 본넷에 있는 내부압력의 함수로써 디스크-몸체 마찰부하와 무관하기 때문에 제거하면 다음과 같은 식이 된다.

$$F_{Open - WSR} = F_{Open - meas} + \frac{\pi}{4} \cdot d_{Stem}^2 \cdot P_{Bonnet} \quad (9)$$

$$F_{Close - WSR} = F_{Close - meas} + \frac{\pi}{4} \cdot d_{Stem}^2 \cdot P_{Bonnet} \quad (10)$$

여기서

$F_{Open - WSR}$: 피스톤 효과 제외된 측정 쓰러스트[lbs]

$F_{Close - WSR}$: 피스톤 효과 제외된 측정 쓰러스트[lbs]

$F_{Open - meas}$: 열림 행정시 측정 쓰러스트[lbs]

$F_{Close - meas}$: 닫힘 행정시 측정 쓰러스트[lbs]

d_{Stem} : 스템 직경[inch]

P_{Bonnet} : 본넷 내부압력[psi]

(9)와 (10)식을 다시 정리하면

$$F_{Open - WSR} = -F_{DP} + F_{DF} + F_{PF} \quad (11)$$

$$F_{Close - WSR} = -F_{DP} - F_{DF} - F_{PF} \quad (12)$$

이고, (11)과 (12)식으로부터 디스크-몸체 마찰부하를 구하면

$$F_{DF} = \frac{(F_{Open - WSR} - F_{PF}) - (F_{Close - WSR} - F_{PF})}{2} \quad (13)$$

그러나 열림과 닫힘 행정 각각에서 동일한 밸브 디스크 위치에 대해 약간의 압력차이가 발생할 수 있기 때문에 식(13)에 대한 압력 차이를 수정 보완하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$F_{DF} = \frac{\left(\frac{F_{Open - WSR} - F_{PF}}{\Delta P_{Open}} \right) - \left(\frac{F_{Close - WSR} + F_{PF}}{\Delta P_{Close}} \right)}{2} \times \left(\frac{\Delta P_{Open} + \Delta P_{Close}}{2} \right) \quad (14)$$

여기서 P_{Open} : 열림 행정에서 측정된 차압[psid]

P_{Close} : 닫힘 행정에서 측정된 차압[psid]

3. 결과 및 고찰

국내 밸브 제작사에서 설계된 2inch 크기의 모터구동 글로브밸브에 대해서 유체 차압이 존재할 때 나타나는 작용 쓰러스트와 디스크-몸체 마찰부하를 평가한 결과 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

3.1. 작용 쓰러스트

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 밸브 디스크가 열림/닫힘 행정을 수행시 디스크의 위치(%)별로 측정된 쓰러스트와 디스크 양단에 걸리는 차압을 나타낸 그림이다. 쓰러스트에서 (+)방향은 밸브 스템에 작용하는 힘이 인장력(Tensile Thrust)이고, (-)방향은 스템 작용력이 압축력(Compressive Thrust)을 말한다. 디스크 0% Open 위치 선정은 열림 행정의 경우 이전 닫힘 행정에서 받고 있는 스템의 압축력이 급격하게 제거되며 디스크가 몸체 시트로부터 떨어지는 언시팅 지점을, 닫힘 행정의 경우에는 디스크가 몸체 시트에 완전히 안착하여 쓰러스트가 급격하게 압축력을 받기 시작하는 시팅 시작점으로부터 결정하였다.

Test Valve 1과 2, 3에서 측정된 쓰러스트 신호는

일반적으로 고차압이 디스크 양단에 걸릴 때 나타나는 글로브밸브에 대한 일반적인 쓰러스트 신호와 매우 유사한 결과를 보여줌으로써 정상적인 작동이 이루어진 것으로 판단된다. 즉 유체 차압이 크게 작용하는 구간(대략적으로 0~40% Open구간)에 대해서는 열림 행정시 밸브의 동작을 방해하는 쓰러스트 요소들에 의해 인장력을 받고 있는 스템에 점차적으로 감소하는 유체 압력에 의한 압축력이 작용하여 스템 작용 쓰러스트가 증가하는 현상과 닫힘 행정의 경우 디스크가 시트에 접근함에 따라서 유체 압력이 디스크나 스템 단면에 작용하여 밸브 동작을 방해함으로써 압축력이 증가하는 현상을 보여주고 있다. 유체 압력에 의한 영향이 작게 작용하는 구간(50~100% Open구간)에 대해서는 입구를 통해서 들어온 유체 대부분이 출구 포트를 향해서 직접적으로 빠져나가므로 디스크에 미치는 영향이 매우 작게 작용하여 양 방향 행정에 대한 쓰러스트 변화가 거의 발생하지 않는 일반적인 특성이 관찰된다.

3.2. 디스크-몸체 마찰 부하

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 행정간 작용하는 디스크 위치별로 디스크-몸체 마찰 부하를 나타낸 그림이다. Test Valve 1의 경우 동적 1, 2차 시험을 통해서 디스크 위치가 12.38%, 11.40% Open지점에서 최대 디스크-몸체 마찰부하 641.8lbs와 613lbs가 나타나고, Test Valve 2는 13.60%, 12.85% Open 지점에서 최대값 967.3lbs와 1000.5lbs, Test Valve 3은 13.04%, 13.04% 지점에서 1457.9lbs와 1507.3lbs를 보여 주었다. 여기서 동일한 설계조건과 유사한 최대 차압이 디스크가 열리기 전에 작용하나 최대 마찰부하 크기에 차이가 나타나는 것을 알 수가 있는데 이것은 최대 마찰부하가 발생하는 지점에서 작용하는 차압을 비교해 볼 때 차압이 가장 작은 Test Valve 1에서 가장 작은 마찰부하가 작용한다는 사실로부터 디스크 주변에 흐르는 유량이 상대적으로 크다는 사실을 추정할 수 있다.

디스크-몸체 마찰부하 최대 작용 지점은 대략 11~14% Open지점 즉 디스크가 시트로부터 떨어진 직후에 나타나는데, 이것은 디스크의 위치가 완전 열림 행정에서 닫힘 행정을 진행함에 따라서 디스크 주변을 우회하는 유량이 증가하여 시트 근접지점에서 최대 디스크-몸체 마찰부하가 나타난다^[1]고 제시한 EPRI 결과와 잘 일치한다.

위와 같은 결과들과 EPRI에서 제시한 평가식에 벨

브 정보와 Table. 1로부터 보수성을 고려한 마찰계수 1.6을 적용한 결과에 대해 비교 평가한 결과 EPRI 평가식에서 예측된 디스크-몸체 마찰부하는 약 268lbs로 예측되었고, Test Valve 1보다 373.8lbs, Test Valve 2보다 732lbs, Test Valve 3보다 1239.3lbs정도 작게 나타나 실제 시험 결과와 상당한 차이가 있음을 보여 주었다. 디스크-몸체 마찰부하에 지배적으로 작용하는 마찰계수에 대해서 시험 결과값을 평가식에 적용하여 역으로 환산하며 Test Valve 1은 3.83, Test Valve 2는 5.98, Test Valve 3은 9.01정도 되며, EPRI에서 수행한 시험 자료와 대략 2.4배에서 5.6배의 차이를 보였다. 이러한 차이가 나타나는 것은 EPRI에서 평가식을 도출하기 위해 사용한 밸브 시험(2대 밸브에 9회 시험) 정보가 부족하여 모든 조건에 나타날수 있는 마찰계수가 적절히 반영되어 있지 않기 때문이라 판단된다.

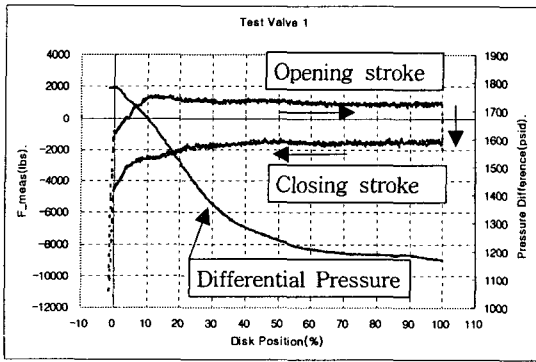
4. 결론

300°F 유체가 통과하는 2inch 모터구동 글로브밸브를 이용하여 디스크-몸체 마찰부하를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

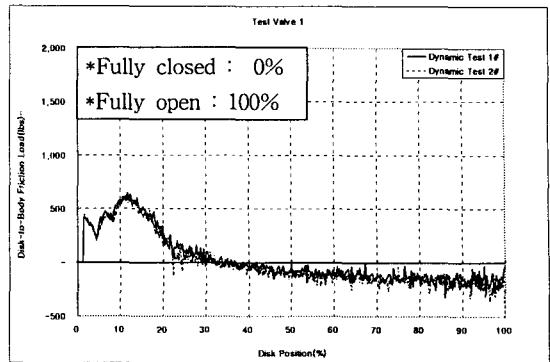
- 1) 모터구동 글로브밸브에 대한 쓰러스트 측정결과 밸브가 정상적으로 작동함을 확인하였다.
- 2) 측정된 쓰러스트를 이용하여 디스크와 밸브 몸체 사이에 작용하는 마찰부하를 평가한 결과 최대 마찰부하량이 약 600lbs~1500lbs정도 작용하였으며, 디스크가 전체 행정길이의 약 11~14% 열림 지점에서 나타났다.
- 3) EPRI에서 제시한 디스크-몸체 마찰부하 평가식을 이용하여 계산한 결과 약 268lbs정도 나타났다.
- 4) EPRI에서 제시한 언밸런스 디스크를 가진 모터구동 글로브밸브의 마찰부하 예측 평가식을 PPM 요구 쓰러스트 계산에 적용하기 위해서는 좀더 많은 시험을 통해 적절한 마찰계수를 구하는 것이 필요하다.

참고문헌

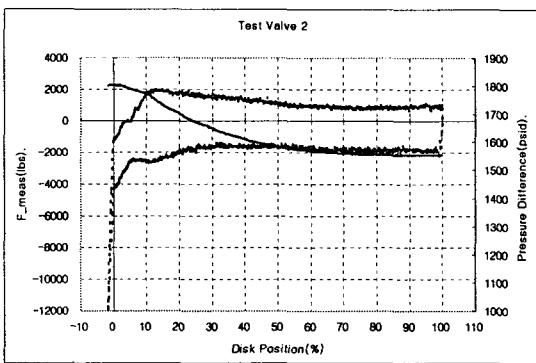
- (1) K. Kenneally and T. Walker, 2000, "A Refined Model for Prediction of Unbalanced Disk Globe Valve Thrust Requirements," EPRI Topical Report
- (2) J. K. Wang and P. D. Alvarez, M. S. Kalsi, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants", EPRI TR-106563, Vol. 1, Rev. 1, pp 5.36~5.38



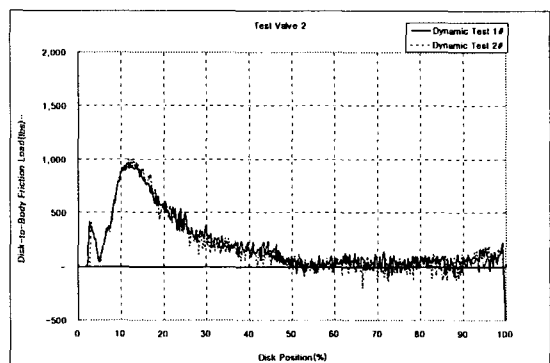
(a)



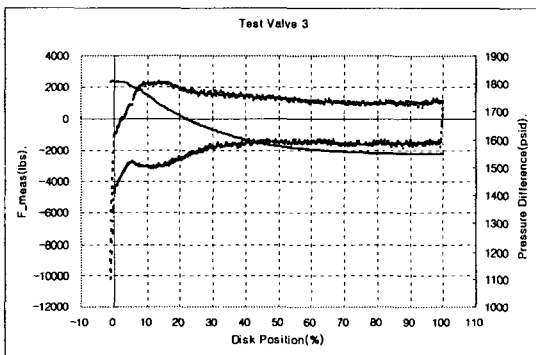
(a)



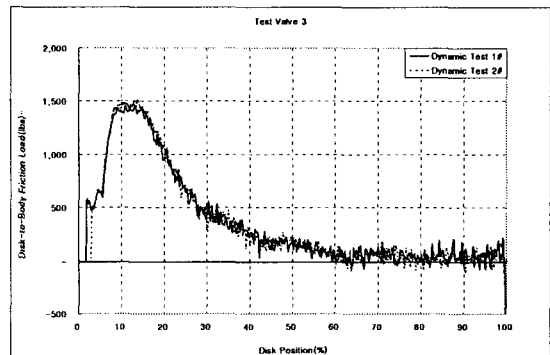
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 3 Measured Stem Thrust/ Differential Pressure with the Disk Position(%) - (a) Test Valve 1, (b) Test Valve 2, (c) Test Valve 3

Fig. 4 Disk-to-Body Friction Load with the Disk Position (%) - (a) Test Valve 1, (b) Test Valve 2, (c) Test Valve 3