

< 기술논문 >

다이아프램 구동형 글로브 밸브의 진단장비 개발

양 상 민* · 신 성 기*

(2007년 3월 26일 접수, 2007년 7월 24일 심사완료)

Development of Diagnosis System for Diaphragm Operated Globe Valve

Sang-Min Yang and Sung-Ky Shin

Key Words: Air-Operated Valve(공기구동형 밸브), Fault Diagnosis(고장진단), Control Valve(제어 밸브), Diaphragm Actuator(다이아프램 구동기)

Abstract

Air-operated valve is one of principal valves that are used to control fluid flow in nuclear power plants. A periodic diagnosis for the safety of power plants is necessary. But there are many difficulties such as economic loss caused by income of high cost devices and a matter hard to deal with users. In this study, we developed the diagnostic system that users of power plants are easy to handle. The diagnostic system is composed of database module, diagnosis test module and analysis module.

1. 서론

기호설명

- A_{act} : 구동기의 유효면적(cm^2)
- BS_{min} , BS_{max} : 최소, 최대 벤치셋(Kgf/cm^2)
- F_p : 패킹마찰력(N)
- F_{SL} : 밀봉력(N)
- F_{SP} : 스프링 프리로드(N)
- k : 스프링 상수(N/mm)
- P_O : 열림시 구동기의 공기압력(Kgf/cm^2)
- P_C : 닫힘시 구동기의 공기압력(Kgf/cm^2)
- P_{delta} : 열림과 닫힘시의 공기압력차(Kgf/cm^2)
- P_{seat} : 밀봉시점에서의 공기압력(Kgf/cm^2)

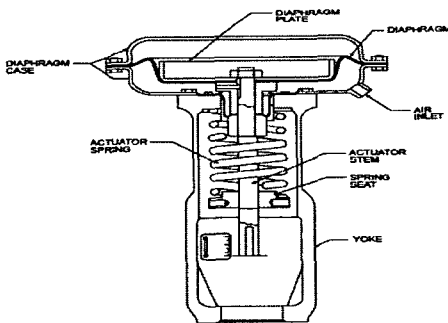
밸브는 발전소 및 대형 플랜트에 설치되어 유체의 유량 및 압력을 제어하는 배관요소 중의 하나로 원자력발전소는 전체 시스템의 안전성을 확보하기 위해 모든 기기에 대한 고장진단을 주기적으로 수행하고 있다. 최근 원자력발전소는 밸브의 고장 및 성능저하를 예측하기 위해 성능평가를 수행 중에 있으며 밸브 유형중의 하나인 공기구동형 밸브의 고장진단 및 성능평가를 위한 기술개발을 수행 중에 있다^(1,2). 그동안 공기구동형 밸브의 고장진단은 밸브를 분해하여 외적인 손상의 유·무로 판단하거나 간단한 밸브의 작동을 통해 제어신호와 밸브의 행정 및 공기압력의 적절성을 숙련된 작업자의 경험을 바탕으로 한 교정시험을 통해 수행하였다. 그러나 이러한 진단 방법은 밸브의 고장부품을 판단하기 어렵고 부품의 성능저하로 인한 밸브의 성능저하를 예측하기 어렵다. 밸브의 진단시험은 밸브의 고장 유·무 및

* 책임저자, 회원, (주)한빛파워서비스 AOV팀
E-mail : s_smyang@cnu.ac.kr
TEL : (042)611-7526 FAX : (042)611-7527
* (주)한빛파워서비스

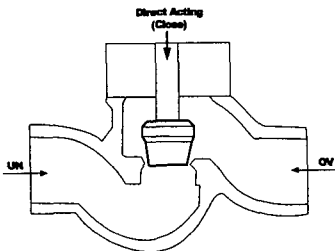
제작사에서 제공한 밸브 설계데이터와 비교하여 밸브의 상태를 진단하는 것으로 밸브 내의 유체의 유입의 유무에 따라 정적시험과 동적시험으로 구분하고 그 시험결과를 밸브의 성능평가에 적용하여 왔다^(3~5). 본 연구에서는 공기구동형 제어밸브의 고장 및 성능평가를 수행할 수 있는 진단장비를 개발하여 원자력 발전소에 설치된 밸브와 동일유형의 시험밸브에 적용하여 그 적용성을 검증하였다.

2. 공기구동형 제어밸브의 진단방법

공기구동형 제어밸브는 구동부와 밸브 몸체의 유형에 따라 구분한다. 밸브 몸체의 형상에 따라 글로브밸브(globe valve), 게이트밸브(gate valve), 버터플라이밸브(butterfly valve), 볼밸브(ball valve)로 분류하고 구동기의 유형에 따라 다이어프램(diaphragm)과 실린더(cylinder) 유형으로 구분한다. Fig. 1은 다이어프램 구동기와 글로브밸브의 외형을 보여주고 있다.



(a) actuator



(b) globe valve

Fig. 1 The schematic of diaphragm operated globe valve

공기구동형 제어밸브는 다양한 기계요소(요크, 스템, 디스크, 스프링, 패킹 등)와 계측요소(구동기, I/P, 포지셔너, 리미트스위치, 솔레노이드밸브 등)로 구성되어 있어 밸브의 고장 및 성능을 저하시킬 수 있는 많은 요인을 포함하고 있다. 공기구동형 제어밸브에서 발생할 수 있는 고장 유형은 구동부의 손상, 솔레노이드 밸브 고장, 밸브 포지셔너 고장, 스프링 및 공기공급 튜브의 손상 등이 있다.

구동기의 고장은 구동기내에 장착되어 있는 다이어프램의 손상 또는 피스톤의 마모로 인한 공기의 누설이 발생할 수 있고 이는 구동기에 공급되는 공기압력에 의한 힘을 스템에 전달하지 못함으로써 원하는 밸브의 개폐를 보장할 수 없다.

밸브 구성요소인 스프링, 스템 휨, 패킹의 부적절한 조임 등의 고장은 단순히 구조적 손상보다 성능저하 또는 설계의 착오로 인해 발생할 수 있다. 성능저하 및 설계의 착오는 가시적으로 판단할 수 없고 밸브 진단시험에 의한 정확한 분석이 수행되어야 한다. 즉, 스프링의 강성이 저하되었거나 패킹 마찰력이 설정값의 한계를 벗어난 경우와 같은 문제점이 발생하였을 경우 밸브의 진단시험을 통해 얻은 결과를 밸브 제작사에서 제공한 설계값과 비교하여 밸브의 상태를 진단할 수 있는 진단장비의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 구성요소의 성능저하 또는 교정 오류를 진단하기 위해 진단시험을 통해 얻은 측정신호의 분석을 수행할 수 있는 알고리즘을 적용한 밸브 진단장비를 개발하였다. Table 1에서는 밸브를 진단하기 위한 진단장비의 측정신호 및 진단항목을 제시하였다.

본 연구에서 개발한 공기구동형 제어밸브의 진

Table 1 Measuring signal and diagnosis parameter

Measurement signal	Diagnosis parameter
Valve travel	Total travel
	Linearity
	Hysteresis
Travel vs. Actuator pressure	Bench set
	Friction
	Spring rate/preload
	Seat road

단장비는 구동기의 공기압력(actuator pressure)과 밸브 개도(valve travel)의 상관관계를 이용하여 분석한 결과로부터 진단항목을 결정하고 제작사에서 제공한 값 또는 진단자의 경험으로 설계값을 고려한 설정값과 비교하여 밸브의 고장 및 성능을 판단하였다.

Fig. 2는 밸브의 진단시험을 위해 밸브 IP의 제어 입력신호로 열림시와 닫힘시 4mA에서 20mA까지 선형적인 증가와 감소를 1회 반복하여 밸브의 진단시험을 수행하는 baseline 시험 모드이다.

Fig. 3은 밸브 개도와 구동기의 공기압력의 변화를 이용하여 밸브의 상태를 진단하는 방법을 보여주고 있다. 밸브 진단을 통해 얻은 측정신호(밸브개도와 구동부 공기압력)의 상관관계로부터 밸브 행정(총 행정, 선형성, 히스테리시스), 벤치셋(Min. & Max. bench set), 마찰력(friction), 스프링상수(spring rate) 그리고 밀봉력(seat load)을 계산할 수 있다.

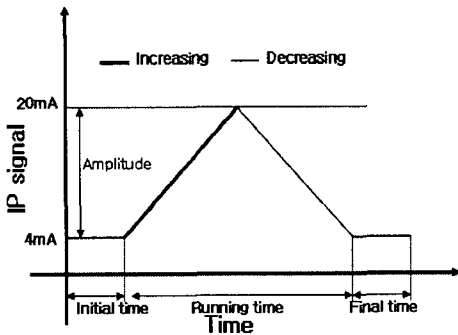


Fig. 2 Control signal on baseline test mode

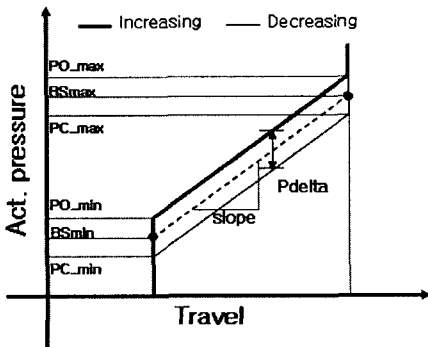


Fig. 3 Actuator pressure vs. valve travel

밸브개도의 분석은 IP 제어 입력신호에 대한 밸브개도의 총행정, 선형성 그리고 히스테리시스 오차를 판별하는 것으로 선형성(linearity)은 밸브개도의 선형오차를 구하고 히스테리시스 오차는 밸브의 열림(open)과 닫힘(close)을 1회 수행 했을 때, 열림시의 밸브개도와 닫힘시의 밸브개도의 차이로부터 구한다.

구동부의 공기압력에 대한 분석은 밸브가 열리는 시점에서의 IP 입력신호와 밸브가 완전히 열리는 시점에서의 IP 입력신호를 분석하여 밸브교정의 적절성을 판단하는 것이다.

벤치셋(bench set)은 밸브의 완전닫힘 위치에서 밸브가 열리는 시점의 공기압력과 밸브의 완전열림 위치에서 밸브가 닫히는 시점의 공기압력을 분석하는 것으로 이 위치에서 구동기의 공기압은 증가 또는 감소하나 밸브개도는 변하지 않는 시점이다. 벤치셋은 이 위치에서 구동기 공기압의 최소값과 최대값을 구하여 제작사에서 제공한 설정값과 비교하여 판단한다.

$$BS_{min} = \frac{PO_{min} + PC_{min}}{2}$$

$$BS_{max} = \frac{PO_{max} + PC_{max}}{2} \quad (1)$$

여기에서, P_{min} 와 P_{max} 은 열림시와 닫힘시의 구동기 공기압력을 의미한다.

스프링상수(k , spring rate)는 밸브의 열림과 닫힘시에 측정된 밸브 개도량과 구동기의 공기압력의 관계로부터 얻은 직선의 기울기와 구동기의 유효면적의 곱으로부터 구한다.

$$k = Slope \times A_{act} \quad (2)$$

여기에서, $Slope$ 는 밸브개도와 구동기의 공기압력 신호의 기울기이고 A_{act} 는 구동기의 유효면적이다.

밀봉력(F_{SL} , seat load)은 밸브의 닫힘 행정에서 밸브의 디스크가 시트에 도달했을 때 밸브의 개도가 변하지 않는 위치에서 구동기의 공기압력을 증가하여 밸브의 누수를 방지하는 구동기의 힘이다. 밀봉력은 밸브의 완전 닫힘시점에서 구동기의 공기압력 증가량(P_{seat})과 구동기의 유효면적의

곱으로 구한다. 분석된 결과는 제작사에서 제공한 밸브 설계값과 비교하여 크면 상태가 양호한 것으로 판단하고 그렇지 않으면 밸브의 교정이 필요한 것으로 판단한다.

$$F_{SL} = P_{seat} \times A_{act} \tag{3}$$

여기에서, P_{seat} 는 PC_{min} 과 같다.

마찰력(friction)은 밸브의 열림과 닫힘을 1회 수행했을 때 밸브의 열림시와 닫힘시 구동기 공기압력 차이의 1/2과 구동기의 유효면적의 곱으로 구한다.

$$F_P = \frac{P_{delta} \times A_{act}}{2} \tag{4}$$

여기에서, P_{delta} 는 밸브 열림시의 공기압력과 닫힘시의 공기압력의 차이이다.

3. 진단장비의 구성 및 진단절차

Fig. 4는 밸브를 진단하기 위해 본 연구에서 개발한 공기구동형 제어밸브의 진단장비의 개략도이다. 진단장비는 측정센서, 신호 취득장치(DAQ) 그리고 신호분석을 위한 소프트웨어로 구성되어 있다. 신호 취득장치는 16 bit resolution과 샘플링 주파수는 1.25 MS/s인 PCMCIA로 진단시험에서 20 ~ 1000 Hz의 샘플링 주파수를 선택할 수 있다. 진단시스템에서 생성된 제어 입력신호를 밸브에 장착된 I/P(전류압력 변환기)로 전송하면 입력된 신호에 비례한 공기압력을 밸브의 구동기로 공급해 준다. 밸브는 구동기에 유입된 공기압력에 비례하여 스템이 이동함으로써 밸브 개도량이 제어된다. 밸브의 개도는 스템에 장착된 변위센서를 이용하여 측정하고 공급압력과 구동기에 유입되는 공기압력은 압력센서로 측정하며 측정된 센서신호는 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 전송되어 제어기(컴퓨터)에 내장된 밸브 진단알고리즘을 적용하여 IP 입력신호와 밸브 개도의 상관관계를 분석함으로써 밸브의 상태를 진단하는 장치이다.

진단장비의 소프트웨어는 데이터베이스 모듈

(Fig.5), 진단시험 모듈 및 진단분석 모듈(Fig.6)로 구성되어 있다. 데이터베이스 모듈은 공기구동형 제어밸브의 설계정보, 시험 및 진단정보를 입, 출력할 수 있고 진단시험 모듈은 밸브를 1회 개폐하여 밸브에 설치된 센서신호를 측정하여 분석을 위한 시험정보를 생성하는 모듈이다. 진단유형에 따라 baseline 시험과 step 시험으로 구분한다. 진단분석 모듈은 진단시험으로부터 취득한 시험정보를 이용하여 진단항목을 추출하고 밸브의 상태를 판단하는 모듈이다.

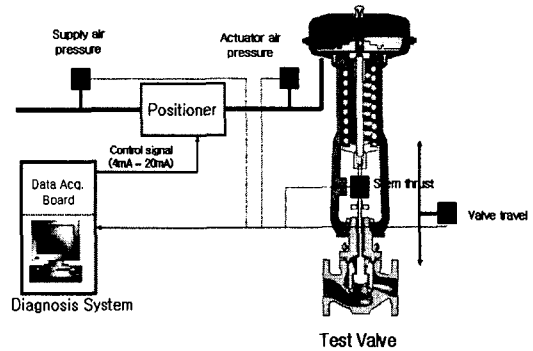


Fig. 4 Schematic diagram of diagnostic system

밸브의 진단시험은 진단절차에 따라 수행하며 밸브의 진단을 위한 시험 절차 및 방법은 다음과 같다. 첫 번째 단계는 진단신호를 얻기 위해 밸브에 공기라인과 센서를 밸브에 설치한다. 센서는 밸브의 개도를 측정하는 개도센서를 스템에 설치하고 밸브에 공급되는 공기압력과 구동기에 유입되는 공기압력을 측정하기 위해 설치되어 있는 공기 튜브를 포지셔너의 전단부와 구동기의 top 또는 bottom부분을 분해하여 3-way 피팅을 각각 설치하여 추가된 공기 유로에 공기압력 센서를 연결한다. 두 번째 단계는 진단시험 이전에 센서 및 밸브의 교정을 수행하는 단계이다. 밸브의 교정은 포지셔너의 입력신호의 범위(4 mA-20 mA)에 따라 밸브를 개폐하여 공기압력과 밸브의 개도를 확인하여 밸브가 정상으로 작동되는지 점검한다. 세 번째 단계는 진단시험의 시험모드를 결정하고 진단시험을 수행한다. 진단시험의 시험모드는 baseline 시험과 step 시험이 있고 진단장치에서 생성된 파형이 I/P에 전송되면 I/P 변환기

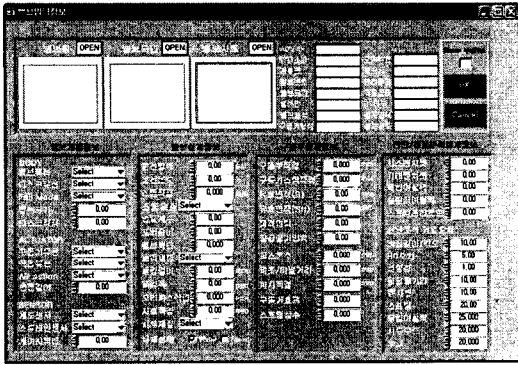


Fig. 5 Valve information frame

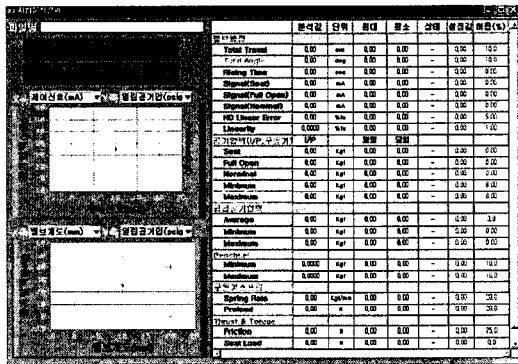


Fig. 6 Valve analysis frame

는 입력된 신호에 따라 설정된 공기압을 밸브의 구동부로 송출한다. Baseline 시험은 밸브의 상태를 진단하고 step 시험은 밸브의 응답성을 진단하기 위한 시험모드이다. 각 시험모드에 따라 IP 제어 입력신호를 인가하면 구동기에 공급된 공기압력에 따라 밸브가 작동하고 밸브에 설치된 센서로부터 밸브 개도량과 공기압력을 측정한다.

4. 진단시험 및 측정신호 분석 결과

밸브 크기가 50.8 mm인 다이아프램 구동형 글로브 밸브(Diaphragm Operated Globe Valve)에 대한 진단시험을 수행하였다.

Fig. 7은 시험밸브에 대한 진단시험 분석결과 화면으로 시험을 통해 얻은 밸브의 개도와 구동부의 공기압력신호의 상관관계를 이용하여 분석한 결과를 보여주고 있다. 밸브의 상태에 대한 판단은 밸브 제작사에서 제공한 설계값과 시험분석

Table 2 A list of the components and specifications of test valve

Component	Specification
Control valve	Type : unbalanced disk
	Size : 50.8 mm
	Travel : 29 mm
	Packing : graphite
Actuator	Type : diaphragm
	Area : 677 cm ²
	Air acting : reverse
Pressure transducer	Input range : 3, 7, 10 Kg _f /cm ²
	Range : 4 - 20 mA
Position sensor	Type : wire
	Range : 0 - 500 mm
	Signal Range : 0 - 10 Vdc

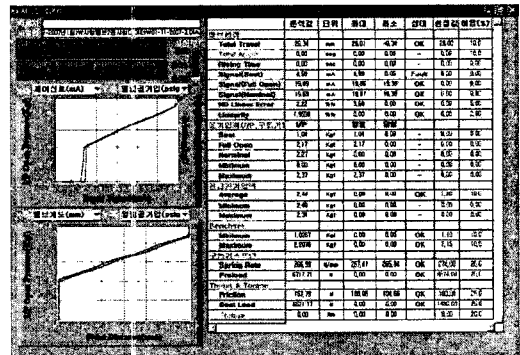


Fig. 7 Analysis Results on baseline test of the test valve.

결과를 비교하여 허용치 값 이내에 존재하면 정상(OK), 그렇지 않으면 비정상(Fault)으로 표시하였다. 본 시험에 사용된 밸브는 행정, 공기압력, 벤치셋, 스프링을, 마찰력, 밀봉력을 분석하였으나 모두 허용값 이내에 존재함으로써 밸브의 상태가 정상임을 알 수 있었다.

밸브 개도와 구동부의 공기압력과의 관계로부터 얻은 분석결과로 밸브의 총 행정은 29.3 mm, HD error는 2.2 % 그리고 선형성은 1.95 %로 원하는 설정값(HD error : 10%, Linearity : 2%) 이내임을 알 수 있다. 최소 벤치셋은 1.02 Kg_f/cm²이고 최대 벤치셋은 2.2 Kg_f/cm²임을 알 수 있다. 벤치셋은 제작사에서 제공한 설정값보다 다소 낮으나 밸브의 전·후단 압력 차이에 의한 밸브 저항을 고려하여 밸브를 교정한 결과로 판단된다. 구동부에 설치되어 있는 스프링의 상태를 점검하

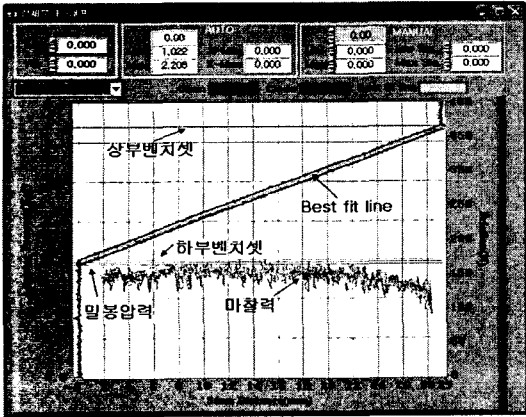


Fig. 8 Analysis results on baseline test of test valve.

Table 3 Comparisons of design data with analysis results

Parameter	Design	Analysis
Travel(mm)	29	29.3
Min. benchset(Kg_f/cm^2)	1.1	1.02
Max. benchset(Kg_f/cm^2)	2.15	2.2
Spring rate(N/mm)	274	267

기 위한 스프링상수는 $267 N/mm$, 스프링 프리로드는 $6717 N$ 이고 제작사에 제공한 설계값 $274 N/mm$ 과 허용오차 범위(20%) 이내에서 존재함을 알 수 있다. Fig. 8은 벤치셋, 밸브의 마찰력(friction) 그리고 밀봉력에 대한 분석결과를 결과화면에서 보여주고 있고 Table 2는 제작사에서 제공한 설계값과 시험분석 결과를 비교한 표이다. 시험분석 결과로부터 평균마찰력은 $157.8 N$ 이고 밀봉력(seat load)은 $6521 N$ 이었으나 밸브 제작사에서 제공한 설계값이 없어 밸브시험 결과와 비교할 수 없었다.

5. 결론

다이어프램 구동형 글로브 밸브(Diaphragm-operated globe valve)의 진단을 위한 진단방법 및 진단시스템의 개발에 관한 연구를 수행하였다.

밸브 진단을 위한 진단항목은 밸브행정(총행정, 선형성, 히스테리시스), 벤치셋(최소 & 최대 벤치셋), 스프링(rate, preload), 마찰력 그리고 밀봉력을 선정하였고 밸브 제작사에서 제공한 밸브 설계값과 비교하여 밸브의 상태를 진단하였다.

크기가 50 mm, 밸브 행정은 29 mm인 밸브에 대한 진단시험을 수행하여 분석한 결과 밸브의 총개도는 29.3 mm, HD error는 2.2% 선형성은 1.95%, 최소 벤치셋은 $1.02 Kg_f/cm^2$, 최대 벤치셋은 $2.2 Kg_f/cm^2$, 스프링상수는 $267 N/mm$ 로서 밸브 제작사에서 제공한 허용범위내에서 작동되어 밸브 상태가 양호함을 알 수 있었다. 그러나 마찰력과 밀봉력은 밸브 제작사의 밸브 설계값이 없어 이에 대한 평가는 판단할 수 없었다. 따라서 향후 설계정보를 취득할 수 없는 경우에 대한 대처 방안을 검토해야 할 것으로 사려 된다.

참고문헌

- (1) UltraCheck Diagnostic Group, 2002, "Benefits of AOV and MOV Diagnostic Systems," *KINS 4th MOV/AOV Workshop*, pp. 253~262.
- (2) Tony Morris, 2002, "Comparing MOV and AOV Diagnostic Testing Techniques and Equipment," *KINS 4th MOV/AOV Workshop*, pp. 222~239.
- (3) Kaseda C, Ohtsuka A, Nagasaka F, Kagawa T, 1999, "An Experimental Study on Diagnosis of Operating Characteristics in Pneumatic Control Valve," *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 35, No. 5, pp. 594~599.
- (4) Cho, T. D., Lee, H. Y. and Yang, S. M., 2004, "The Dynamic Test Modeling of the Air-Operated Valve," *Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp 88.
- (5) Cho, T. D., Yang, S. M., Lee, H. Y. and Ko, S. H., 2007, "A Study on the Force Balance of an Unbalanced Globe Valve," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 814~820.