

공기구동 밸브의 진단장비 개발

양상민* · 홍성대 · 신성기 · 박종근 · 송동섭**

The Development of Diagnostic System for Testing Air-Operated Valves

S.M. Yang*, S.D. Hong, S.K. Sin, C.K. Park, D.S. Song**

Key Words : Air-Operated Valve(공기구동 밸브), Diagnostic System(진단장비),

ABSTRACT

Air-operated valve is one of principal valves that are using to control fluid flow in nuclear power plants. A period diagnosis for 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 evaluation module.

1. 서론

원자력 발전소에는 다양한 유형의 밸브가 설치되어 있고 그 유형 중의 하나인 공기구동 밸브(AOV-Air Operated Valve)는 원자력 발전소의 주요 안전계통의 유체 흐름을 제어하기 위해 사용되는 대표적인 밸브 유형 중의 하나로서 원자력 발전소의 안전을 확보하기 위해 밸브의 성능을 유지하는 것이 필요하다. 이를 위해 주기적인 밸브 시험을 통한 밸브의 신뢰성을 확보하는 것은 필수적이나 고가의 공기구동 밸브의 진단을 위한 진단 시스템의 수입으로 인한 경제적인 손실이 크고 밸브의 성능 진단을 수행하는 사용자의 의도에 따라 유연하게 수정할 수 없는 어려움

이 있다. 따라서 국내 원전의 안전을 보장하고 현장 사용자의 실정을 고려한 밸브 진단시스템의 개발이 요구됨에 따라 본 연구에서는 공기구동 밸브의 성능을 진단할 수 있는 밸브 진단장비 개발에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 개발하고 있는 공기구동 밸브의 진단 시스템은 기존의 진단 시스템의 기능인 밸브의 하드웨어적 진단에서 벗어나 원전에 적용된 공기구동 밸브의 계통정보 및 설계정보를 추가하여 사용자로 하여금 공기구동 밸브에 대한 최대한의 접근이 용이하도록 개발하였다. 공기구동 밸브의 진단 시스템은 하드웨어와 소프트웨어로 구성되어 있으며 하드웨어는 센서, DAQ 그리고 컴퓨터로 구성되어 있고 소프트웨어는 밸브 정보의 입, 출력이 가능한 Database 모듈과 정적시험과 동적시험을 통해 얻은 센서의 신호를 처리하고 분석한 후 공기구동 밸브의 건전성 진단을 수행하는 진단 해석 모듈로 구성되어 있다. 신호 측정부는 유체의

* (주)한빛파워서비스 AOV 팀

** (주)한빛파워서비스 AOV 팀

E-mail : s_smyang@hanvitpower.com

압력 및 유량을 획득하기 위한 압력센서와 유량 센서, 공기구동 밸브의 공기 압력을 측정하기 위한 공압센서 및 밸브의 개도를 측정하기 위한 LVDT 센서가 있다.

2. 공기구동 밸브의 유형 및 고장 유형

2.1. 공기구동 밸브의 유형

밸브는 기본적으로 유체 흐름을 제어하는 부품과 이들 내장부품들을 구조적으로 안전하게 유지시키는 몸체로 구성되어 있다. 밸브의 분류는 유체제어 요소의 특성, 밸브구조의 형식 및 운전조작의 방법 등에 따라 매우 다양하게 구분된다. 이러한 다양한 종류의 공기구동 밸브에 대한 성능평가를 수행하기 위해서는 밸브의 유형별 분류가 선행되어야 하며 밸브의 유형에 따라 성능평가 및 진단을 위한 최적의 분석방법의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 원전 현장에 설치되어 있는 공기구동 밸브의 성능평가를 위해 스템 조작 특징(작동형태), 밸브 몸체의 형상 및 구동부의 유형에 따라 분류하였다.

공기구동 밸브의 스템 조작 특징에 따라 Rising type과 Quarter turn type이 있고 밸브 몸체의 형상에 따라 Globe valve, Gate valve, Butterfly valve, Ball valve 등으로 분류할 수 있다. 또한 공기구동 밸브의 특성상 구동부의 유형에 따라 Diaphragm type과 Piston type으로 분류한다. Fig. 1은 공기구동 밸브의 유형에 따른 분류를 보여주고 있고 Fig. 2는 대표적인 공기구동 밸브의 밸브 몸체의 구조를 보여 주고 있다.

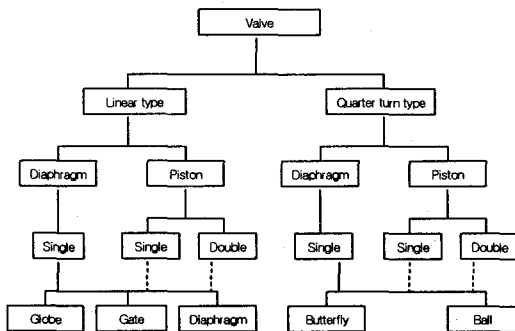


Fig. 1 밸브의 스템 조작에 따른 분류

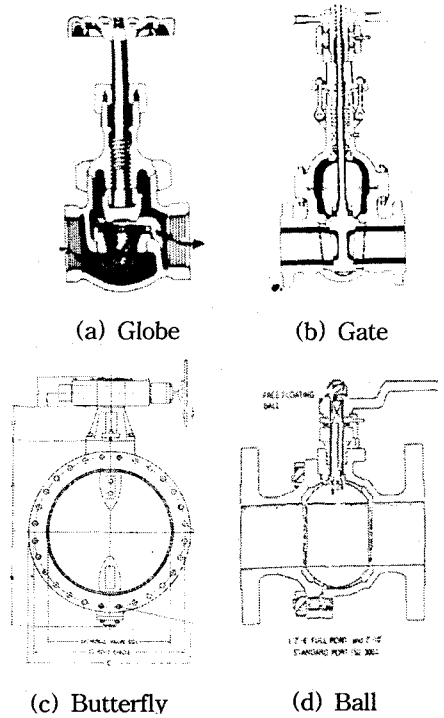


Fig. 2 밸브의 몸체 형상에 따른 분류

2.2. 공기구동 밸브의 고장 유형

공기구동 밸브는 많은 요소로 구성되어 있어 각 요소에서 밸브의 성능을 저하시킬 수 있는 요인을 포함하고 있다. 이러한 밸브의 고장 유형을 분류하고 그 원인을 정확히 진단하기 위한 밸브 진단 알고리즘을 개발하고 진단 시험을 통해 얻은 신호의 상관관계로부터 밸브의 성능을 진단하였다. 공기구동 밸브에서 발생할 수 있는 고장 유형은 다음과 같다.

• 제어용 공기의 누설

밸브의 구동부에 유입되는 공기 호스 및 체결부의 누설과 구동부의 다이어프램의 손상으로 인한 공기 누설이 발생할 수 있다. 이러한 공기누설은 제어용 신호에 대한 적절한 공기압력을 공급하지 못함으로써 원하는 밸브의 성능을 보장할 수 없다. 공기누설에 의한 고장은 제어용 공기호스의 압력 손실과 구동부에 유입된 공기압의 변화를 통해 판단할 수 있다.

• 제어 입력신호의 오류

I/P에 공급되는 제어 입력신호에 비례하는 공기압력이 생성되어 구동부에 유입되거나 positioner

의 교정 오류로 인해 제어입력 신호에 대한 부적절한 공기압이 생성되어 적절한 밸브의 구동을 수행할 수 없는 경우가 발생한다. 이것은 밸브의 교정시험을 통해 입력제어 신호와 positioner의 출력 공기압의 상관관계를 분석하여 오류를 교정할 수 있다.

- 스템 고착 및 변형

스템 부위의 고착 및 변형은 제어 입력신호, 밸브 개도, 구동부 공기압력, 스템 쓰러스트 등의 신호의 상관관계로부터 판단할 수 있다.

- 내부 누설

I/P 입력 제어 신호에 따라 밸브의 닫힘 명령이 수행된 후 구동부에 유입되는 공기압의 부족이나 시트의 마모로 인해 디스크(플러그)가 시트에 완전히 접촉하지 못함으로써 유체의 누설이 발생하는 것으로 동적시험을 통해 유체의 유량을 측정하거나 밸브의 소음을 측정하여 유체 누설을 판단할 수 있다.

- 교정 오류 및 부속장치(accessory)의 고장

밸브의 교정오류는 밸브 교정시험을 통해 얻은 제어 입력신호와 공기압력, 밸브의 개도에 대한 상관관계를 통해 오류를 판단할 수 있고 밸브의 부속장치의 고장은 공기압력과 전기신호의 점검을 통해 판단할 수 있다.

3. 진단시스템의 구성 및 유효변수

3.1. 진단장비의 구성요소

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 진단시스템으로 이 시스템은 센서, 신호취득장치(DAQ) 그리고 제어기와 같은 하드웨어와 신호처리 및 분석을 위한 소프트웨어로 구성되어 있다. 밸브진단에 적용되는 신호의 입, 출력은 제어부에서 생성된 제어 입력신호를 밸브에 장착된 I/P(전류압력 변환기)로 전송하면 I/P에서는 입력된 신호에 비례한 공기압력을 밸브의 구동부로 송출하며 구동부에 유입된 공기압력에 따라 밸브의 스템이 이동함으로써 밸브 개도량이 변화한다. 밸브의 개도는 요크에 장착된 변위센서(LVDT 또는 wire type 변위센서)를 이용하여 측정하고 구동부에 유입되는 공기압력 및 공급압력은 압력센서로 측정한다. 또한 구동부에서 스템에 전달되는 힘은 스트레인 게이지로 측정하여 측정된 센서의 신호는 A/D 변환기를 통하

여 컴퓨터로 전송되어 제어기(컴퓨터)에 내장된 진단알고리즘을 적용하여 제어 입력과 센서 출력 신호의 상관관계를 분석함으로써 밸브의 상태를 진단하는 장치이다. 진단시험은 교정(calibration) 모드와 진단시험 모드로 구성되어 있고 교정모드는 밸브에 설치된 변위센서와 스트레인게이지 등의 센서에 대한 초기값 설정 및 보정값의 정보를 얻기 위한 센서 교정모드와 I/P에 입력되는 전류에 의한 밸브 포지셔너(positioner)의 교정을 위해 공기압을 조정하는 밸브 교정 모드가 있다. 진단시험 모드는 정적시험과 동적시험이 있고 정적시험은 밸브에 유체가 흐르지 않은 조건에서 진단을 수행하는 것으로 밸브의 입력신호에 대한 밸브의 개도량과 구동부에 유입되는 공기 압력과의 관계를 이용하여 밸브를 진단을 수행하며 동적시험은 밸브에 유체가 유입되는 환경에서 밸브의 전, 후단 차압을 고려하여 밸브의 동적 거동 특성을 분석하여 진단을 수행하는 것이다. 밸브에 유체가 유입되는 경우 밸브의 전, 후단 유체의 차압에 의한 유체 저항에 의해 밸브의 거동에 영향을 미치므로 동적 거동이 달라질 수 있다. 따라서 동적 진단에서는 유체의 유량을 계측하기 위한 유량센서, 유체온도를 계측하기 위한 온도센서 그리고 밸브 전후단의 유체압력을 계측하기 위한 유체 압력센서가 추가적으로 장착된다.

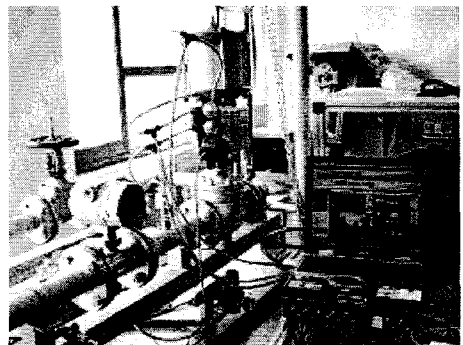


Fig. 3 Valve diagnostic system

진단 시스템의 소프트웨어는 데이터베이스 모듈과 시험 및 진단분석 모듈로 구성되어 있다. 데이터베이스 모듈은 공기구동 밸브의 계통정보, 설계정보, 시험 및 진단정보를 입력하거나 저장할 수 있고 시험 및 진단분석 모듈은 교정시험과 진

단시험으로 구성되어 있다. 교정시험은 센서 및 밸브의 초기 설정치를 교정하기 위한 것으로 진단 시험을 수행하기 전 반드시 수행해야 하는 절차이며 진단 유형에 따라 baseline test와 step test로 구분한다. 진단분석은 시험 중 취득한 정보를 이용하여 trace display와 analysis 분석을 통해 밸브의 상태를 판단한다.

3.2. 진단 유효변수 및 설정치

공기구동 밸브를 진단하기 위한 유효변수를 선정하고 센서로부터 얻은 측정신호의 상관관계 또는 측정신호의 분석결과를 밸브 제작사에서 제공한 밸브 설계자료와 비교함으로써 밸브의 상태를 진단하였다. 본 연구에서 밸브의 진단을 위해 선정한 유효변수들은 다음과 같다.

- I/P control input signal
- Air pressure(supply, inlet/outlet, actuator)
- Valve travel
- Thrust / Torque
- Valve Friction
- Air temperature / humidity

밸브 진단을 위한 데이터의 분석은 밸브 시험을 통해 측정된 유효변수의 측정데이터의 상관관계로부터 신호의 선형성(linearity and hysteresis error), bench set, friction, spring rate, seat load 등을 구할 수 있다.

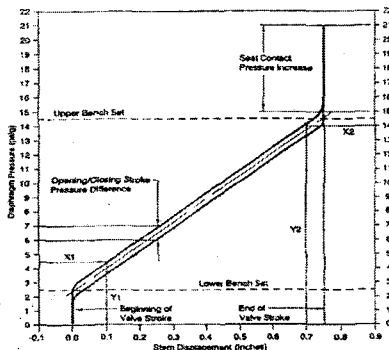


Fig. 4 Actuator pressure vs. stem travel
신호의 선형성은 제어 입력신호에 대한 I/P, 구

동부의 공기압력 그리고 밸브 개도에 대한 선형성과 히스테리시스 오차를 분석하는 것으로 선형성(linearity)은 센서의 출력신호에 대한 최적의 직선(best line)을 구하여 선형오차를 구하고 히스테리시스 오차는 밸브의 열림(open)과 닫힘(close)을 1회 수행했을 때, 동일 제어입력 신호에 대한 센서 신호의 차이로부터 구한다. Bench set, friction 그리고 spring rate는 밸브 개도와 구동부의 공기압력 신호의 관계로부터 Fig. 4에서처럼 분석할 수 있다.

Friction은 밸브의 열림(open)과 닫힘(close)을 1회 수행했을 때 밸브 열림시와 닫힘시 구동부의 공기압력의 차이와 구동부의 유효면적과의 곱으로 구한다.

$$\text{Friction} = (\text{AirPress}_{\text{open}} - \text{AirPress}_{\text{close}}) * \text{Area}_{\text{act}} / 2 \quad (1)$$

여기에서, $\text{AirPress}_{\text{open}}$ 는 밸브 열림시의 구동부의 공기압력, $\text{AirPress}_{\text{close}}$ 는 밸브 닫힘시의 구동부의 공기압력 그리고 Area_{act} 는 밸브 구동부의 유효면적이다. Bench set은 외부 힘이 없는 조건에서 구동부의 공기압의 최소값과 최대값을 의미한다. 이것은 single acting actuator에만 적용된다. Spring Rate는 밸브의 열림과 닫힘시에 측정된 밸브 개도량과 구동부의 공기압력의 관계로부터 구한 기울기와 구동부의 유효면적의 곱으로부터 구한다.

$$\text{Spring Rate} = \text{Slope} * \text{Area}_{\text{act}} \quad (2)$$

여기에서, Slope는 밸브개도와 구동부의 공기압력 신호의 기울기이다. Seat Load는 밸브 닫힘 행 정에서 밸브의 플러그 또는 디스크가 시트에 도달했을 때 발생하는 마찰력으로 시트의 단위면적당 구동부의 힘의 관계로부터 구한다.

$$\text{Seat Load} = \text{AirPress} * \text{Area}_{\text{act}} / (\pi * \text{Dia}_{\text{seat}}) \quad (3)$$

여기에서, AirPress는 구동부의 공기압력이고 Dia_{seat} 는 Seat의 내경이다. 분석된 결과는 제작사에서 제공한 밸브 설계값과 비교하여 설정오차 내에 존재하면 상태가 양호한 것으로 판단하고 그렇

지 않으면 밸브의 점검이 필요한 것으로 판단하였다.

4. 진단시험 및 결과

4.1. 진단시험 절차 및 방법

밸브를 진단하기 위해서는 하드웨어 및 소프트웨어에 대한 설치가 선행되어야 한다. 하드웨어는 진단을 원하는 밸브에 센서를 장착하고 필요한 신호 케이블 및 튜브를 밸브와 진단장비의 각 채널에 연결해야 한다. 밸브의 진단을 위한 시험 절차 및 방법은 다음과 같다.

- 밸브에 센서를 장착한다. 센서는 밸브의 개도를 측정하는 LVDT를 스템에 설치하고 밸브에 공급되는 공기압력과 구동부에 유입되는 공기압력을 측정하기 위해 설치되어 있는 공기 튜브를 포지셔너의 전단부와 구동부의 top 또는 bottom부분을 분해하여 3-way 피팅을 각각 설치하고 추가된 공기 유로에 공기압력 센서를 연결한다.

- 센서 및 밸브의 교정을 수행한다. 센서는 밸브의 완전 열림과 완전 닫힘 상태에서 공기압력과 개도를 측정하여 최소와 최대의 수치를 검토하고 원하는 신호출력결과가 생성되는지 확인한다. 밸브의 개도를 측정하기 위한 LVDT는 밸브에 설치된 위치에 따라 영점의 위치가 달라지기 때문에 밸브를 진단하기 전에 밸브의 개폐를 수행하여 영점을 인식해야 한다. 밸브의 교정은 포지셔너의 입력신호의 범위(4mA-20mA 또는 10mA-50mA)에 따라 밸브를 개폐하여 공기압력과 밸브의 개도를 확인하여 밸브가 정상으로 작동되는지 점검한다.

- 진단시험의 유형을 결정하고 시험을 수행한다. 진단시험의 유형(baseline test와 step test)을 선택하면 선택된 시험 유형에 따라 진단장치에서 생성된 파형이 I/P에 전송되며 I/P 변환기는 입력된 신호에 따라 설정된 공기압을 밸브의 구동부로 송출한다. 공기공급부에서 공급되는 공기압력을 계측하기 위해 레귤레이터 후단과 I/P의 입력단 사이에 연결된 공기 호스에 공기압력 센서를 설치하여 정보를 얻는다. 이는 공급 공기압의 상태를 진단하는데 사용된다.

- 구동부에 유입된 공기압의 크기에 따라 밸브의 스템에 연결된 플러그 또는 디스크가 이동하며

로 밸브의 개폐(개도량)가 이루어진다. 이때 밸브의 개도량을 측정하기 위해 요크에 장착한 변위센서를 이용하여 계측하고 이 변위센서의 출력신호를 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 전송된다. 이때 밸브의 개도량을 측정하기 위한 변위센서는 접촉센서(LVDT)를 사용하며 변위센서의 초기치 설정은 진단을 하기 전 센서의 교정(calibration)을 통해 수행한다.

- 스템에 작용하는 힘은 스트레인 게이지를 스템에 설치하여 측정된 센서 신호를 이용하여 스템에 작용하는 힘을 구한다. 이 결과는 구동부의 힘, 밸브 시트의 마찰력 및 유체의 차압에 따라 변화하기 때문에 정적진단과 동적진단에 따라 밸브 진단을 수행할 수 있다.

4.2. 밸브 진단시험 결과

진단시험은 밸브 크기가 200mm인 다이어프램 구동형 글로브 밸브(Diaphragm Operated Globe Valve) 2종(시험밸브 1과 시험밸브 2), 진단시험의 유형은 baseline test와 step test를 수행하여 밸브에 대한 진단을 수행하였다. 시험밸브 1은 진단결과 정상적인 경우이고, 시험밸브 2는 진단결과 일부 부속장치(accessory)가 고장 또는 교정이 필요한 경우로 판단되었다.

Fig. 5은 시험밸브 1에 대한 시험결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 baseline test 대한 분석결과 화면으로 진단을 통해 얻은 신호의 상관관계를 이용하여 분석 또는 계산하여 얻은 결과를 제작사에서 제공한 설정값과 비교하여 밸브의 상태를 판단한 결과이다. Fig. 5(b)는 baseline test를 수행하여 얻은 입력전류와 밸브 개도와의 관계로부터 밸브의 총 개도(Total travel), HD error 그리고 선형성(Linearity)을 구한 결과를 보여주고 있다. 밸브 총 개도는 86.36mm, HD error는 9.04% 그리고 선형성은 0.024%로 원하는 설정치(HD error : 10%, Linearity : 1%)내에서 밸브가 동작됨을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 baseline test를 수행하여 얻은 밸브 개도와 구동부의 공기압력과의 관계로 Min. bench set은 1.104 Kgf, Max. bench set은 3.361 Kgf이고 average friction은 87.54 Kgf 그리고 spring rate은 31.24 Kgf/mm이다. bench set은 제작사에서 제공한 설정값보다 다소 높으나 밸브의 전, 후단 압력 차이에 의한 밸브

저항을 고려하여 밸브를 교정한 결과로 판단된다. friction과 spring rate는 제작사에 제공한 정보를 얻지 못하여 판단할 수 없었다. Fig. 6은 step test를 수행한 결과로 settling time은 10.55 sec이고 오차는 4.97%로 제작사에서 제공한 stroke time인 20이내에서 작동하였다.

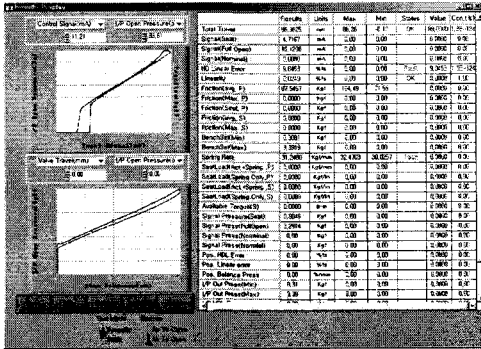


Fig. 5(a) Analysis Results on baseline test of test valve 1

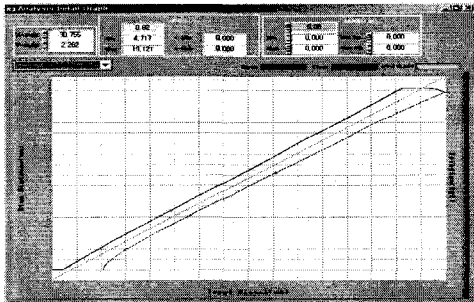


Fig. 5(b) HD error and linearity results on baseline test of test valve 1.

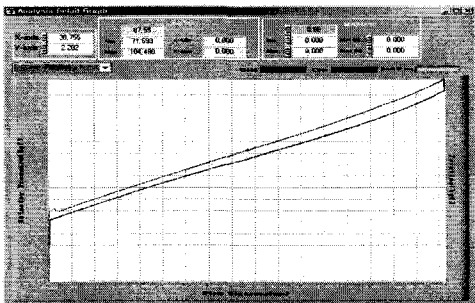


Fig. 5(c) Bench set, friction and spring rate results on baseline test of test valve 1.

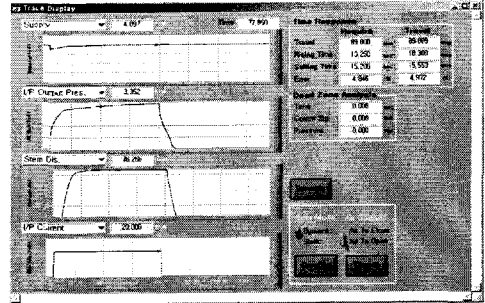


Fig. 6 Results on step test of test valve 1.

Fig. 7은 시험밸브 2에 대한 시험결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 baseline test 대한 분석결과이고 Fig. 7(b)는 baseline test를 수행하여 얻은 입력전류와 밸브 개도와의 관계로부터 밸브 총 개도는 72.84 mm, HD error는 8.26% 그리고 선형성은 0.167%로 밸브가 완전히 열리지 않음을 알 수 있다. 이것은 구동부에 유입되는 공기 압력이 밸브 개폐에 필요한 압력만큼 공급되지 않기 때문이다. 동적개도(Dynamic travel)에서 입력전류가 6.92mA에서 zero point인 것은 구동부에 유입되는 공기의 유입이 지연되는 것을 알 수 있고 이것은 포지셔너(positioner)의 교정이 필요하다. Fig. 7(c)는 baseline test를 수행하여 얻은 밸브 개도와 구동부의 공기압력과 관계로 Min. bench set은 1.316 Kgf, Max. bench set은 3.158 Kgf이고 average friction은 105.63 Kgf 그리고 spring rate은 31.36 Kgf/mm이다. Fig. 7(c)로부터 구동부에 유입되는 공기압력의 채터링 현상이 발생하는 것을 알 수 있고 밸브의 부속장치인 booster의 점검이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 step test를 수행한 결과로 settling time은 원하는 개도가 열리지 않아 분석값은 의미가 없고 공기의 공급압력은 정상이나 입력전류 20 mA에서 구동부의 최대 공기압력이 3.39 Kgf로 밸브가 완전히 열리는데 필요한 공기압력을 제공하지 못하는 것을 알 수 있다. 이것은 밸브 부속 장치의 하나인 레귤레이터(regulator)가 정상으로 작동하는 경우, 포지셔너(positioner)의 교정보다 점검이 필요한 것으로 판단된다.

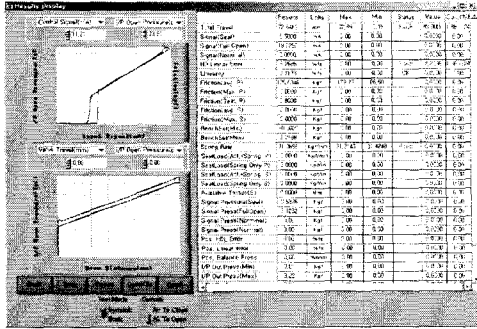


Fig. 7(a) Analysis results on baseline test of test valve 2.

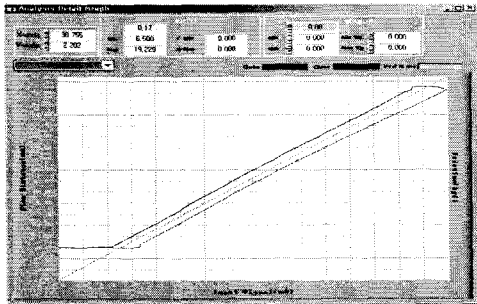


Fig. 7(b) HD error and linearity results on baseline test of test valve 2.

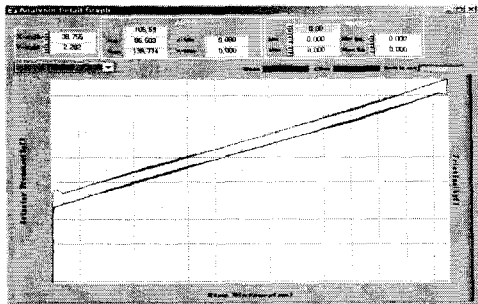


Fig. 7(c) Bench set, friction and spring rate results on baseline test of test valve 2.

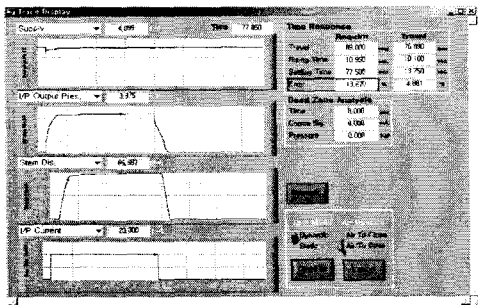


Fig. 8 Results on step test of test valve 2.

5. 결론

공기구동 밸브(AOV)의 진단시스템을 개발하기 위한 하드웨어(H/W) 및 소프트웨어(S/W)의 개발에 대한 연구를 수행하였으며, 본 연구에서 개발한 밸브 진단시스템은 원전 현장의 사용자가 공기구동 밸브를 진단하기 위해 필요한 밸브 정보에 쉽게 접근할 수 있고 진단시험을 통해 얻은 센서의 신호를 자동으로 분석하여 사용자에게 제공할 수 있도록 개발하였다. 원전 현장의 밸브인 2개의 다이어그램형 글로브 밸브에 대한 밸브 진단시험을 수행하여 분석한 결과 정상적인 밸브와 교정 또는 점검이 필요한 밸브를 판단할 수 있었으나 부분적으로 밸브 설계정보에 대한 정확한 정보를 취득하지 못함으로써 완전한 진단은 수행하지 못했다. 따라서 전 원전 발전소에 설치된 공기구동 밸브의 고장 정보와 설계정보를 취득할 수 있는 방법을 검토해야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부 전력산업 연구개발 사업의 일환으로 진행되고 있으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Tony Morris, 2002, "Comparing MOV and AOV Diagnostic Testing Techniques and Equipment," KINS 4th MOV/AOV Workshop, pp. 222-239.
- (2) Chosei Kaseda, Akira Ohtsuka, Fumio Nagasaka, "Online Control Valve Diagnostics," Yamatake Corporation, Japan
- (3) UltraCheck Diagnostic Group, 2002, "Benefits of AOV and MOV Diagnostic Systems," KINS 4th MOV/AOV Workshop, pp. 253-262.
- (4) OGATA, "System Dynamics," Prentice-Hall.