

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

규제활용을 위한 공기구동 액추에이터 성능감시 시스템 개발

Development of An Air-Operated Actuator Performance Monitoring System for Regulatory Usage

성계용, 권석준

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19
k109sky@kins.re.kr

요 약

원전에서 규제활용을 위해 공기구동 액추에이터의 성능을 진단할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이를 위해 AOV 성능진단을 위한 필수 요소 및 구동기 성능 영향 변수들을 살펴보고, 감시시스템의 구성 요소인 실험장치 및 개발 중인 성능감시 소프트웨어를 소개하였다. AOV에서 발생 가능한 고장에 대해 개발된 시스템을 통하여 모의로 분석해 본 결과 고장상태 및 고장으로 인한 성능 변화를 확인할 수 있었다. 현재 개발 중인 이 시스템은 차후 보완 및 확장을 통하여 발전소 규제 및 검사요원 교육에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

The performance monitoring system of air-operated actuators for regulatory usage has been being developed. Essential elements and operating parameters affecting the actuator performance have been investigated to provide basic information for system development. The monitoring system including an air-operated actuator testing facility and analysis softwares for monitoring and evaluation are also introduced in this paper. As a result of simulated tests, it was known that the system could be a useful tool for the effective monitoring of actuator performance change and fault conditions. This system would be applied to regulatory inspection for utility's data validation and to the training of regulatory staff in future after some modification and expansion.

1. 서 론

공기구동밸브(Air-Operated Valve : AOV)는 전기구동기를 적용하기 어려운 계통에서 급속유로차단이나 유량제어에 자주 적용되고 있다. 가압경수로형 원전에서는 안전관련계통인 보조급수계통, 가압기방출계통, 핵연료재장전수저장탱크계통 등에 설치되어 있고, 비안전 관련이라도 급수 및 대기방출 계통과 같이 위험도관점에서 매우 중요한 AOV들이 상당수 존재한다[1].

AOV 및 모터구동밸브(MOV)가 설계기준(Design Basis : DB) 조건에서 운전 요구성능을 만족시키지 못하는 사례가 많이 발생되고, 이에 따라 미국 사업자들은 규제명령에 의해[2] '90년대 중반까지 MOV에 대한 DB 안전성 평가를 완료하였고, AOV에 대해서는 사업자 자발적으로 현재 DB 안전성평가를 수행하고 있다[3]. 국내에서는 MOV DB 안전성평가에 대한 규제요건이 '97년 권고사항[4]으로 발행된 후, '04년에 MOV 안전성평가가 완료될 예정이다. 아울러 국내 AOV DB 안전성 평가 이행을 현재 추진 중에 있다.

미국의 AOV 안전성평가 수행사례를 보면[5], 설계기준 조건에서 요구힘을 만족시키기 위한 충분한 구동기 용량을 갖췄는지, 이에 대한 밸브 설정이 적절한지를 확인하기 위해 AOV의 운전변수, 즉 공급공기압력, 스템행정, 제어용공기압력, 제어스위치, 스템힘(필요시) 등에 대한 신호를 진단장비로 분석하여 구동기 운전여유도 및 고장여부를 진단하고 있다. AOV는 구동기유형(stem-rising, butterfly)과 작동방식(스프링/공기, direct/ reverse acting, single/double 등)이 매우 다양하다. 또한 공기 및 스프링으로 작동되는 구동기의 경우, 개폐시 양방향 힘에 대한 제어가 MOV처럼 상호독립적이지 않고, 서로 의존적이기 때문에 공기 및 스프링 초기설정이 비교적 어렵다. 따라서 AOV 구동기 종류에 따라 적절한 초기 설정 및 적합한 성능계산식 선정이 매우 중요하다.

본 논문에서는 AOV의 효과적 규제를 위하여 현재 개발중인 AOV 운전신호 분석 및 감시시스템을 소개하고, Bench-Set 설정 및 고장 감시시스템, 다양한 구동기 종류에 대한 성능분석시스템 등을 소개하고자 한다 (현재는 stem-rising 구동기에 대해서만 개발). 차후, 개발된 시스템을 활용하여 사업자의 AOV 이행결과에 대한 선택적 규제검증, 규제요원의 교육 등에 활용하므로 AOV 규제 기술제고에 이바지 할 수 있을 것이다.

2. AOV 성능 진단 필수 요소

AOV 작동과 관련된 주된 힘은 다이어프램이나 피스톤의 힘, 스프링의 힘, 밸브 스템 패킹 마찰력, 밸브 디스크와 스템의 무게, 밸브 디스크 안착력 그리고 밸브 유체력을 포함한다. 구동기 출력의 용량은 요구되는 스템 쓰러스트 또는 토크를 초과하여야 하며, 최대 구동기 출력은 AOV의 쓰러스트 또는 토크 용량(rating)을 초과하지 않아야 한다. AOV를 시험하는 기본적인 목적 중 하나는 밸브가 설계기준조건 하에서 요구되는 기능을 수행할 수 있는지를 진단하는 것이다. 이를 위해 AOV에 수행되는 시험은 Bench Set

시험, 정적 시험, 동적 시험이 있고, 이를 근거로 구동기출력성능 평가, 운전여유도 계산 및 고장 진단을 수행한다.

2.1 벤치셋(Bench Set) 압력 설정

Spring Return 또는 Spring Biased 다이어프램 및 피스톤 형식의 구동기는 벤치셋 압력범위 선정을 통하여 작동 범위가 설정된다. 벤치셋은 스템 패킹 마찰력과 같은 외부 힘이 없는 상태에서 구동기 스템의 정격 행정을 움직이는데 필요한 공기압력 범위를 나타낸다. Air-to-Open 밸브에서 벤치셋 시작압력은 스프링에 의한 안착부하를 극복할 수 있는 충분한 추가압력이 제공되도록 설정되어야 하고, Air-to-Close 밸브에서도 벤치셋 끝압력은 스프링부하, 밸브 마찰부하, 안착부하를 고려하여 충분한 추가압력이 제공될 수 있도록 설정되어야 한다. 만약 스프링의 용량이 커지면 동일한 행정거리를 유지하기 위해 초기 벤치셋 압력 범위도 조정되어야 한다. 따라서 벤치셋 압력설정은 AOV의 작동에 있어 매우 중요하며 성능 및 고장진단에 있어서 가장 기본이 되는 정보이다.

2.2 정적진단 신호 분석

정적시험(static test)에서는 배관 내 유체의 흐름이나 차압이 없는 상태에서 밸브가 작동되는 동안 시험 데이터가 취득된다. 취득된 데이터에서 밸브의 고장, 손상 또는 성능저하가 발견될 수 있다. AOV 정적시험을 수행하는 동안 취득되어야 하는 운전변수는 다음과 같다.

- Control signal : AOV 제어장비에서 Positioner로 보내지는 제어신호(mA).
- Control air pressure : I/P(전류/압력) Converter에서 발생하는 계기용 제어 공기압.
- Supply air pressure : Electro-Pneumatic Positioner에 공급되는 계기용 공기압.
- Diaphragm pressure : 구동기 다이어프램에 공급되는 Positioner 출력 공기압.
- Stem displacement : 스템의 위치
- Stem thrust : 스템의 쓰러스트.

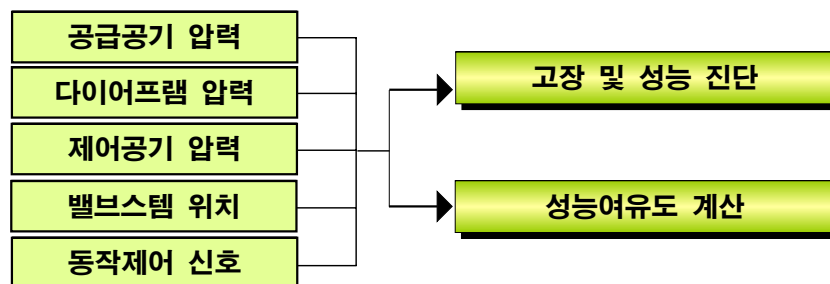


그림 1. AOV 성능 및 고장 진단

이 운전변수들을 이용하여 성능 진단 및 운전여유도 계산에 필요한 다음 항목들이 계산될 수 있다.

가. 벤치셋(Bench Set) : 밸브 여단힘 행정시 밸브행정에 대한 압력 트레이스의 중심에 평균선을 형성함으로, 밸브 및 구동기 마찰력의 효과는 제거되며, 벤치셋은 평균 데이터 선과 스템 완전 개폐 위치 양끝단의 교차점에서의 평균 공기압으로 설정된다.

나. 스템 패킹 마찰(Stem packing friction) : 정적시험 조건에서 밸브가 열리고 닫히는 행정 압력 차의 $1/2 \times$ 다이어프램 유효면적으로 계산될 수 있다. 정적시험의 총 마찰력의 대부분은 스템 패킹 마찰력에 기인한다.

다. 안착 부하(Seat load) : 밸브 닫힘 행정에서 밸브 디스크가 밸브 시트에 접촉하는 점에서 부가적인 다이어프램 압력은 시트 접촉부하를 만들어 낸다.

라. 스프링 율(Spring Rate) : 스프링 율은 스템이 움직이는 동안 여단힘 행정의 공기 압력의 변화율 \times 유효 다이어프램 면적과 같다.

마. 밸브 행정거리 및 시간 : 스템 위치 신호를 이용하여 밸브 행정거리 및 시간 측정이 가능하다.

바. 공기 공급압력 : 공급 공기압 신호를 이용하여, 밸브 작동 동안 적합한 공급 공기압력원의 용량을 알 수 있다. 과도한 공기 압력 강하 또는 느린 압력 회복시간은 공급 공기배관이 충분한 양의 공기를 공급하지 못함을 의미하므로 더 큰 공기배관으로 교체되거나 공기 승압기가 설치되어야 한다.

2.3 동적 진단 신호 분석

AOV 설정의 적절함은 실제 운전조건(동적시험) 하에서 진단시험을 수행함으로써 확인될 수 있다. 동적시험의 목적은 제한된 계통조건에서 특정 AOV가 열리고 닫히는 기능을 할 수 있음을 보이는 것이다. 따라서 동적시험은 유체의 흐름, 유체조건, 온도 그리고 차압과 같은 가장 가혹한 계통조건이 포함되도록 설계된 상태에서 수행되어야 한다. 동적시험 데이터를 정적 시험과 비교함으로써, 스템 탈출부하(Stem Ejection Load), 디스크-가이드 또는 디스크-시트 간의 마찰, 동적 밸브스템패킹부하 등과 같은 유체와 차압에 의하여 발생하는 힘을 극복하는데 필요로 되는 부가적인 구동기 쓰러스트 또는 토크를 계산할 수 있다. AOV가 동적 시험되는 동안 기록되어야할 운전변수는 2.2 항의 정적시험 변수들 외에 다음과 같은 사항이 포함된다.

- 밸브 디스크 차압
- 유체 온도 및 유량
- 스템 쓰러스트(혹은 토크)
- 밸브 배관 상부 압력(Upstream Line pressure)

2.4 구동기 출력성능 평가

Rising 스템형 구동기 출력은 쓰러스트 값으로 계산되고 Rotary형 구동기 출력은 토크 값으로 계산된다. 구동기 최소 출력은 밸브를 열림에서 닫힘으로 혹은 닫힘에서 열림으로 동작시키기 위한 성능을 평가하기 위함이며, 구동기 최대 출력은 구조적인 건전성 한계와 비교하기 위함이다. 구동기 출력을 밸브 열림/닫힘 요구힘과 비교함으로써 밸브 운전여유도를 도출할 수 있다.

2.5 고장 진단

위의 벤치셋 시험, 정적 진단신호 분석, 동적 진단신호 분석, 구동기 출력성능 평가를 통해 건전한 상태의 AOV에 대한 기본 데이터를 저장한다. 이를 기준으로 주기적인 시험 분석을 시행해 AOV 성능의 변화를 비교 분석함으로써 AOV의 성능 및 고장을 진단할 수 있다.

3. AOV 성능 감시 시스템 구성

3.1 실험 장치 구성

AOV 성능 감시 시스템은 AOV의 특성 신호를 디지털 데이터로 변환 취득하여, 이를 분석 소프트웨어로 분석함으로써 이루어진다. 이를 위해, 그림 2와 같이 실험 세트를 구성하였다. 실험에 사용한 AOV는 Reverse-Acting Diaphragm 구동기를 장착하고 있고, Globe 밸브와 연결되어 있다. 주변 장치는 Pressure regulator, I/P converter를 내장하고 있는 Positioner가 설치되어 있고, Positioner에 위치센서가 부착되어있다. Regulator를 통해 공급되는 압력, I/P converter의 출력인 Control pressure, 구동기로 공급되는 Output pressure(Diaphragm)의 3부분 압력을 측정하기 위해 Positioner 입출력 단에서 신호를 분기시켰고, Pressure sensor와 연결시켰다. Pressure measuring device에서는 Pressure sensor에 24V의 전원을 공급하여 4~20mA의 전류 출력을 입력받고, DAS(Data Acquisition System)로 상응하는 전압신호를 출력한다. Pressure measuring device로부터 출력된 압력신호 및 Position 신호를 DAS(Data Acquisition System)를 통해 디지털 데이터로 취득하고, 개발중인 AOV 분석 소프트웨어를 사용하여 분석하였다.

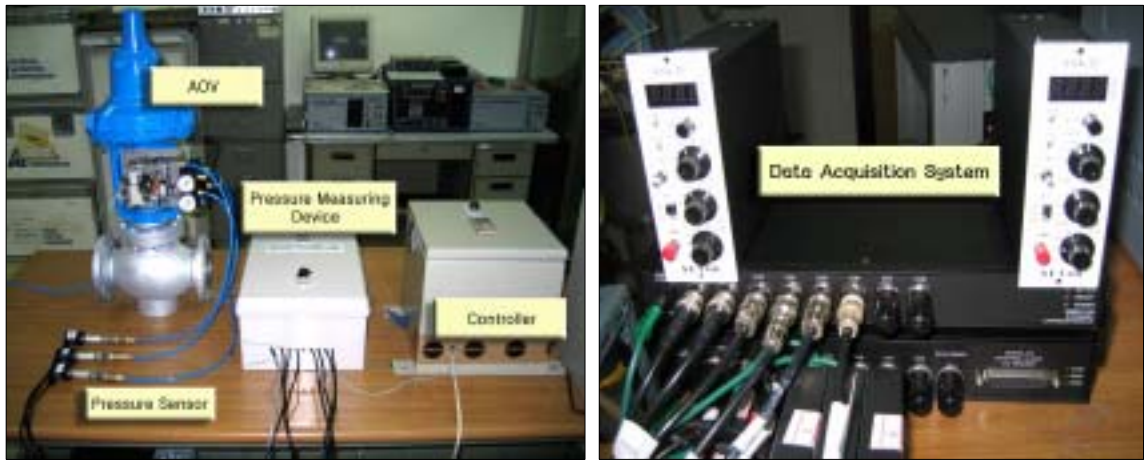
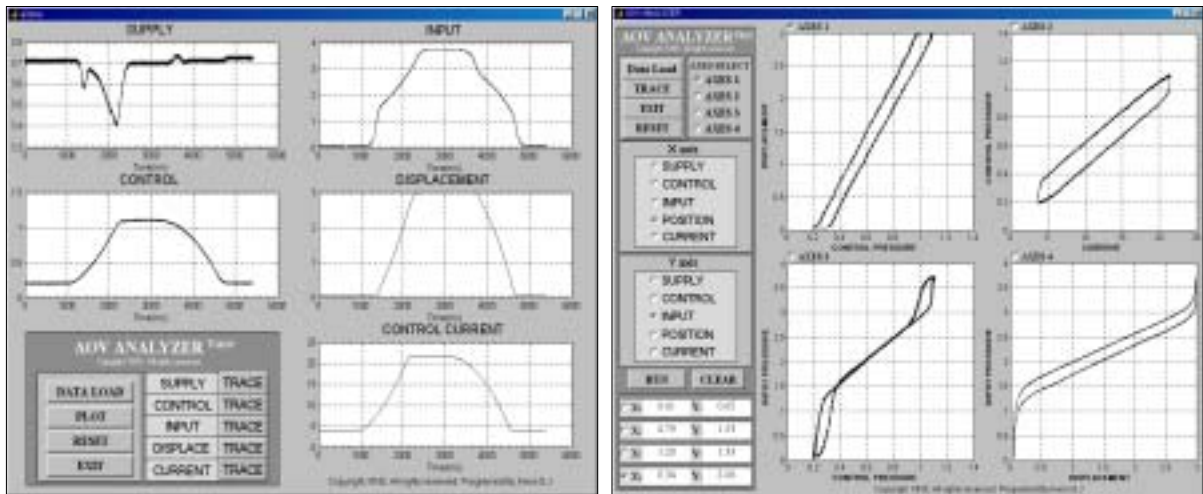


그림 2. AOV 성능 및 특성분석 실험장치

3.2 분석 소프트웨어

가. 신호 취득 및 감시 (그림 3) : Controller에서 제어신호를 공급하여 AOV를 구동함으로써 측정된 신호는 제어신호, 공급 공기 압력, 제어공기 압력, 다이어프램 압력, 스템 변위의 5가지이다. 그림 3-(a) 프로그램에서 이들 신호를 시간의 함수로, 시간에 따른 측정신호를 관찰함으로써 각 신호의 건전성을 판단할 수 있다. 그림 3-(b)에서 측정 신호들을 조합하고, 재구성하여 전반적인 AOV의 특성, I/P converter의 특성, Positioner의 특성, 밸브의 특성을 보여줄 수 있다. 이는 AOV의 정상 상태의 결과로 결함을 판단하는 기본 데이터로 사용된다.

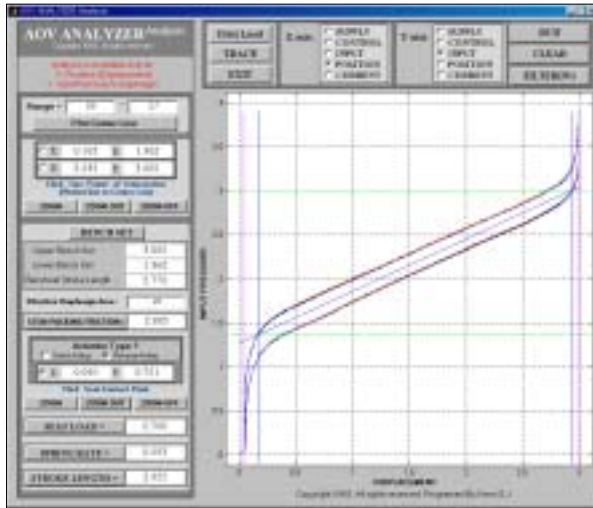


(a) Data trace

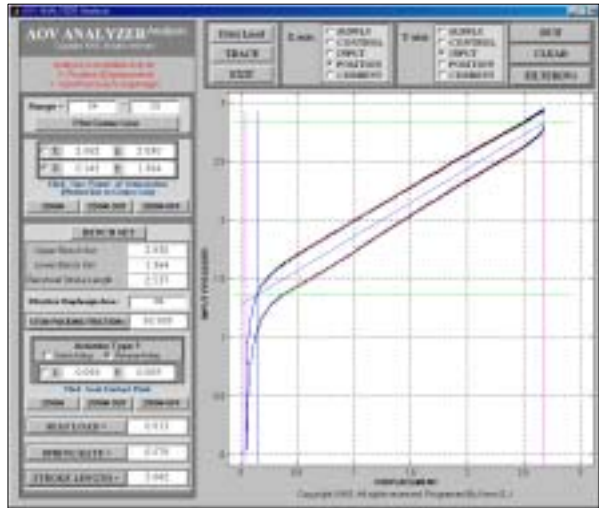
(b) Data plot

그림 3. AOV 분석 소프트웨어(신호 취득 및 감시)

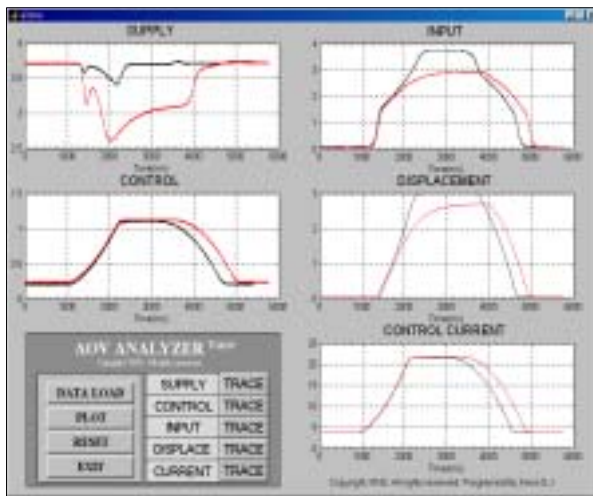
나. 신호 분석 : 그림 4-(a)의 프로그램에서 밸브 특성신호를 분석하여 Bench set, 스템 패킹 마찰력, Seat Load, Spring rate, 행정 거리등의 운전변수 값들을 계산할 수 있다. 그리고 정상 신호에 대해 고장 신호를 비교 분석 할 수 있다(그림 4-(b, c, d)).



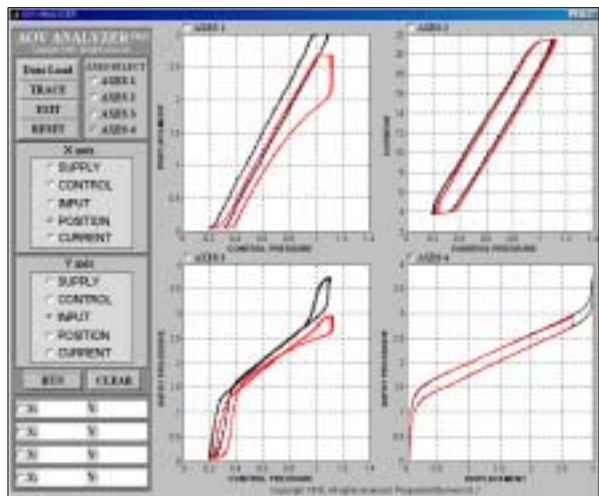
(a) Benchset 분석



(b) Benchset 분석(고장신호)



(c) Data trace (고장신호)



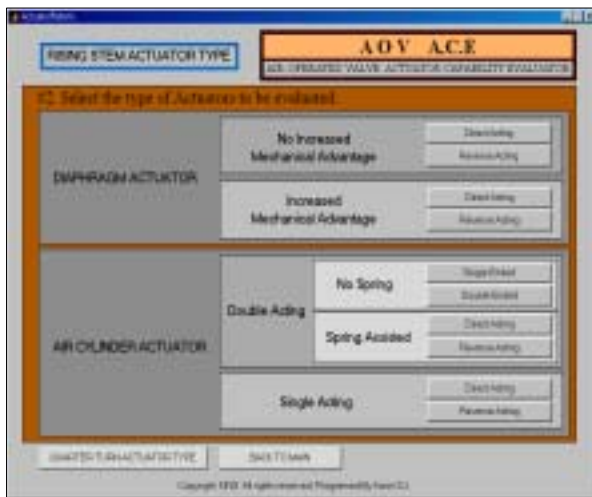
(d) Data plot(고장신호)

그림 4. AOV 분석 소프트웨어(신호 분석)

다. 구동기 성능 분석 : AOV 구동기의 종류는 표 1과 같이 매우 다양하며 그에 따라 성능계산도 복잡하다. 그림 5의 프로그램에서 AOV의 구동기의 종류를 선택하고(그림 5-(a)), 취득된 운전변수 값과 밸브의 제원을 이용하여 출력성능을 계산(그림 5-(b)) 하므로, 다양한 구동기 용량 계산에 용이하게 접근할 수 있다.

표 1. 구동기의 종류

구동기의 종류									
Diaphragm 구동기				공기 Cylinder 구동기					
출력 증강기 없음		출력 증강기 있음		Double Acting				Single Acting	
				스프링 없음		스프링 있음			
Direct Acting	Reverse Acting	Direct Acting	Reverse Acting	Double Ended	Single Ended	Direct Acting	Reverse Acting	Direct Acting	Reverse Acting



(a) 구동기 종류 선택



(b) Reverse Acting Diaphragm

그림 5. AOV 분석 소프트웨어 (구동기 성능 분석)

4. AOV 모의 신호 분석 예

AOV의 성능 감시 시스템의 기능을 확인하기 위해 실제 발생 가능한 고장을 모의 실험하여 정상 상태의 신호와 비교 분석하였다.

4.1 모의 고장 실험

AOV 운전 중에 발생 가능한 고장에는 여러 가지가 있지만, 그중 구동기로 공급되는 공기압의 누설의 경우를 가정하고, AOV 실험 장치에 모의로 고장을 내어 특성신호의 변화를 관찰하였다. Positioner로부터 Actuator의 Diaphragm으로 연결되는 공기압 튜브의 연결 너트를 50%정도를 풀어서 Diaphragm 공급 압력이 누설되는 상황을 만들었다.

4.2 실험 결과 및 분석

Diaphragm pressure의 누설로 인한 운전변수들의 변화와 AOV의 성능의 변화를 그림 4-(c)를 통해 살펴보면(검은색 선: 정상상태의 신호, 붉은색 선: 고장 상태의 신호), Supply pressure(공급공기압)와 Diaphragm pressure 그리고 Displacement(밸브 스템 변위)가 현저하게 변한 것을 알 수 있다. 이는 공기압 튜브의 고장으로 인해 Actuator에 Diaphragm pressure의 공급이 제한을 받았고, Control signal에 대한 Actuator의 정상적인 출력(Displacement)이 이루어지지 않아 Positioner에서 공기압(Supply air pressure)을 더욱 소모하게 되는 현상으로 나타나게 됨을 의미한다.

그림 4-(d)에서 Diaphragm pressure의 누설로 인해 AOV 부속에 대한 특성들의 변화를 분석해 볼 수 있다(검은색 선: 정상상태의 신호, 붉은색 선: 고장 상태의 신호). Control pressure와 Displacement 조합 그래프인 좌상 그림을 보면, 동일 control pressure에 대한 AOV의 출력인 Displacement의 응답이 정상적인 값에 미치지 못하고 있고, 동일한 Displacement 값을 얻기 위해 보다 큰 Control pressure가 요구되는 것을 볼 수 있다. 그리고 Control pressure와 Control signal(Current)의 조합 신호인 우상 그림은 큰 변화가 있지는 않지만, 동일한 Control signal에 대해 I/P Converter가 약간 증가된 Control pressure를 출력하고 있는 것을 알 수 있다. Control pressure와 Diaphragm pressure의 조합 신호인 좌하 그림에서는 Control pressure에 대한 Positioner의 출력(Diaphragm pressure)이 현저히 감소한 것을 알 수 있고, Displacement와 Diaphragm pressure의 조합신호인 우하 그림을 통해 AOV가 충분한 행정이 이루어지지 않음을 알 수 있어, 정상적인 운전이 이루어지지 않고 있다는 것을 판단할 수 있다.

표 2는 그림 4-(a)의 AOV Analysis 프로그램을 통해 시험 AOV의 운전 변수 값의 변화를 분석한 결과이다. Upper Benchset, Benchset Stroke Length, Spring Rate, Stroke Length의 운전변수 값이 고장 전후로 현저히 바뀐 것을 확인하므로 고장으로 인한 AOV의 성능의 변화가 발생한 것을 판단할 수 있다.

표 2. 고장 전후의 운전변수

운전 변수 (단위)	분석 값 (정상/ 고장)
Upper Benchset (bar)	3.003 / 2.830
Lower Benchset (bar)	1.363 / 1.364
Benchset Stroke Length (cm)	2.769 / 2.537
Stem Packing Friction (bar · cm ²)	38.684 / 36.983
Seat Load (bar · cm ²)	0.808 / 0.813
Spring Rate (bar · cm)	0.592 / 0.578
Stroke Length (cm)	2.955 / 2.642

그림 5의 AOV 출력성능 계산 프로그램에 위에서 얻은 시험 AOV 운전변수(정상 및 누설시)들을 입력해서 표 3와 같은 결과를 얻었다(단, 이 값은 Diaphragm의 면적의 오차와 공급 공기압의 변동 오차 등의 오차값이 없다고 가정한 것으로 정확한 출력값이 아닌 비교 분석을 위한 값이다). Reverse-Acting Actuator의 특성상 밸브 stem의 완전 Extended와 Retract 시작 위치에서는 Diaphragm 압력과는 상관없이 스프링의 힘에 영향을 받기 때문에 구동기 출력 값은 큰 변화가 없고, 완전 Retracted와 Extend 시작 위치에서의 출력값이 고장 전후로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이 값들은 AOV의 성능여유도를 구하는데 사용되는데, 고장으로 인한 출력값의 변화가 성능여유도에 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 3. AOV 정상 및 누설 고장시 각 위치별 출력값 비교. (단위 : bar · cm²)

스텝의 위치	가용 구동력	출력값(Available Force)	
		정상	고장
완전 Extended	스프링	458.369	458.735
완전 Retracted	공기	333.241	383.814
Retract 시작 위치	공기	812.688	812.376
Extend 시작 위치	스프링	1009.89	951.712

이상과 같이 AOV의 모의 고장 실험을 통해 AOV의 고장으로 인한 성능의 변화를 개발 중인 분석 소프트웨어를 이용하여 분석해 보았다. 다른 고장의 유형에 대해 실험 결과를 보이지는 않았지만, 실험 장치에서 측정된 운전변수들을 프로그램을 통해 분석함으로써 AOV에 발생한 고장 및 성능의 변화를 그래프 및 수치상으로 적절히 확인할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 차후 연구 내용

본 연구에서는 현재 개발 중인 AOV 구동기에 대한 성능감시시스템을 통해 AOV의 고장 진단 및 성능의 거동을 확인해 보았다. 이를 위해 AOV 성능진단을 위한 필수 요소 및 성능 영향변수들을 살펴보고, 실험장치 구성 및 개발 중인 성능감시 소프트웨어를 소개하였다. AOV에서 공급공기누설 고장에 대해 개발된 시스템을 통하여 모의로 분석해 본 결과 고장상태 및 고장으로 인한 성능의 변화를 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 토대로 차후 Rotary 밸브 유형에 대한 성능진단 Software, 공기압력 및 스프링에 대한 초

기 설정치 Set-Up box 소프트웨어를 추가로 개발하고, 동적실험 및 다양한 고장 모의실험을 통하여 개발된 시스템을 확인, 보완하므로 규제기술력 제고 및 규제요원 훈련 등 규제 활용도를 최대한 높일 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- [1] NUREG/CR-6654, " A study of AOV in U. S. NPPs", USNRC ('00.2)
- [2] USNRC, Generic Letter 89-10 및 Supplements 1~7, " Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance" ('89. 7)
- [3] NRC RIS 2000-3, " Resolution of Generic Safety Issue 156 : Performance of Safety-Related Power-Operated Valves Under Design Basis Conditions" ('00.3.15)
- [4] 과학기술부 규제 권고사항, 문서번호 : 원검 71233-205 ('97.6.13)
- [5] Joint Owners Group AOV Program (Rev.1), Duke Eng. ('00.12.13)
- [6] J.Holer, Final Report, "Air-Operated Valve Evaluation Guide", EPRI. ('99.5)
- [7] Patric Marchand, "Graphics and GUIs with MATLAB, CRC Press LLC. ('99)