

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

공기구동밸브의 이상 진단 연구

Study on the Diagnosis for an Air-Operated Valve

채장범, 김윤철, 최현우

아주대학교

경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5번지

김우식

세종대학교

서울시 광진구 군자동 98번지

요 약

원자력 발전소의 안전성 향상을 위해, 고장을 자체적으로 진단할 수 있는 기술의 연구가 요구되고 있다. 공기구동밸브는 고장시 발전소 안전에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로, 자체 진단 감시 시스템이 요구되는 부품이다. 본 연구에서는 공기구동밸브의 자체 진단 감시 시스템 구성에 대한 연구의 한 단계로, 공기구동밸브의 작동원리 파악, 특성에 중요한 영향을 미치는 변수 파악을 위한 모델 구성 그리고 결함에 대한 응답 실험으로 fault recognition library를 구성하였다. 이 library는 자체 진단 감시 시스템을 구성하기 위한 진단 알고리즘 개발에 사용된다.

Abstract

For the sake of the nuclear power plant safety, a self-diagnostic monitoring system(SDMS) has been requested to monitor defects in the safety-related components. An air-operated valve is one of those components to be monitored since the failure of its operation might cause catastrophic consequences. In this paper, the model of the AOV is developed with the variables which affects on the characteristics of operation. It is useful to understand the principle operation and to correlate the parameters and the defects. Fault library is constructed to be used in pattern recognition approach. Various defects are considered in the experiments and the validity of fault library was tested.

1. 서 론

원자력 발전소는 화석 연료 자원의 고갈 등으로 예상되는 에너지 부족에 대한 대안으로 여겨짐에도 불구하고 안전성에 대한 논란이 국내외에서 제기되고 있다. 그리고 원자력 발전소의 성능 저감이나 불시 정지는 산업계에 주는 영향이 매우 크며, 구성품의 성능 저하에 따른 작동 실패는 원자력 발전소 운영에 커다란 위협을 초래할 수 있으므로, 이를 미연에 방지하기 위해서는 시스템의 주요 구성품에 대한 성능 감시가 이루어져야 한다. 주요 구성품 중 공기구동밸브는 원자력 발전소에서 안전 계통 및 열효율과 직접적 관련이 있는 계통에서 유량을 제어하거나 차단 기능을 수행하기 위해 필수적으로 사용되는 밸브이다. 그런데 공기구동밸브는 많은 부속품으로 구성되어 결함이 발생할 수 있는 가능성이 매우 크다. 기존의 연구는 공기구동밸브의 성능 감시보다는 주로 설정에 중점을 두고 연구가 이루어져, 이를 이용해 작업자가 공기구동밸브의 성능을 판단하기는 어려웠으며, 설계 기준하에서 성능을 내기 위한 가이드라인만을 제시하였다.¹⁾ 따라서 공기구동밸브를 자체적으로 진단하여 공기구동밸브의 성능을 판단해 줄 수 있는 감시 시스템이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 자체 진단 방법에는 모델을 이용하는 방법, 패턴을 이용하는 방법 그리고 neural network을 이용하는 방법 등이 있지만 본 연구에서는 PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)에서 사용한 패턴 인식 방법^{2),3)}을 적용하고자 한다. 이 방법을 적용하기 위해 필요한 다양한 fault library는 실험을 통해 구성하였고 구성된 fault library의 타당성도 살펴보았다.

2. 공기구동밸브의 작동원리

공기구동밸브의 구동기는 작동되는 원리에 따라 다이어프램 구동기, 피스톤 구동기, 랙과 피니언 구동기 그리고 스카치 요크 구동기 등이 있다. 본 연구의 대상이 되는 구동기는 direct acting 다이어프램 구동기로 복원력으로 스프링을 사용한다. 그리고 연구 대상 밸브는 글로브 밸브를 선정하였다. 선정된 구동기와 밸브는 원자력 발전소에서 가장 많이 사용되는 공기구동밸브이다⁴⁾.

먼저 공기구동밸브의 작동원리를 살펴보기 위해, 다이어프램 공기구동밸브의 개략도를 그림 1에 제시하였다. 공압 장치로부터 공급된 공압은 필터/레귤레이터에서 수분이나 오일 성분을 제거한 후 구동기의 작동 압력으로 조정되어 위치 제어기와 전기-공압 변환기로 공급한다. 전기-공압 변환기는 공기압과 함께 제어기로부터 전기 신호를 받아, 전기 신호에 해당하는 압력을 위치 제어기에 공급하게 되고 위치 제어기는 다시 밸브 스템이 움직이도록 압력을 다이어프램에 공급하게 된다. 이 압력으로 다이어프램이 팽창되고 밸브 스템이 이동하게 되는 것이다. 이때 스템에 연결된 레버를 통해 스템의 위치에 대한 정보를 위치 제어기에 전달하게 되고 위치 제어기에서는 스템의 위치 정보를 받아 다이어프램 압력을 조정해 주게 된다.

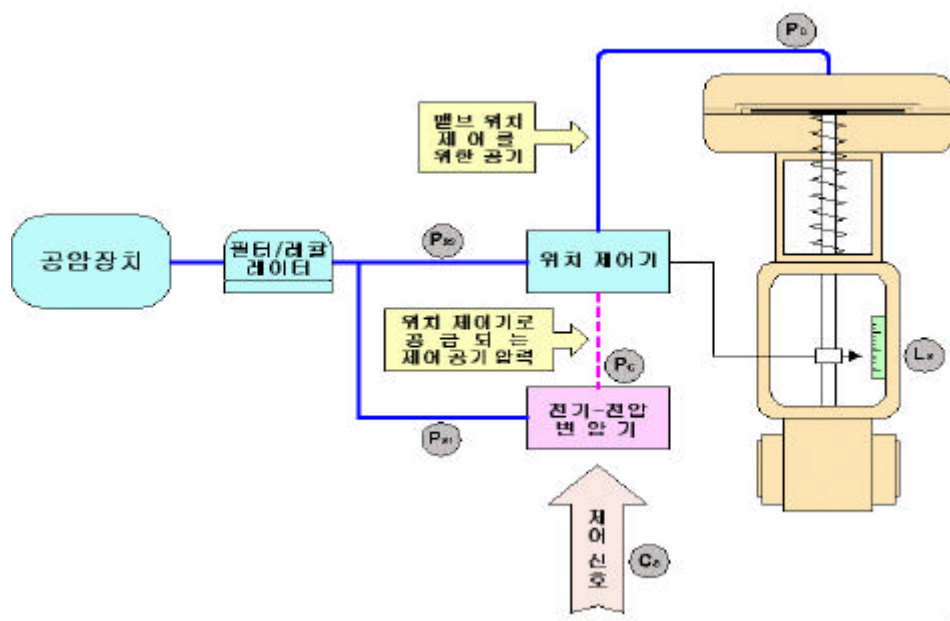


그림 1 공기구동밸브의 개략도

3. 공기구동밸브의 모델

공기구동밸브의 특성에 중요한 영향을 미치는 변수를 살펴보기 위하여 공기구동밸브의 모델을 개발하였는데 여기에는 구동기와 밸브 모델 그리고 위치 제어기 모델이 있다.

가. 밸브 모델

그림 2에 공기구동밸브에 작용하는 힘을 개략적으로 표시하였다. 다이어프램 압력(P_D)이 증가하게 되면, 이 압력이 다이어프램 판에 작용하여 스프링의 프리로드와 패킹력을 이기고 스템을 이동하게 한다. 다음은 열림 행정에 대한 다이어프램과 스템 변위 사이의 관계식이다.

$$P_D A_{eff} = k_v (x_s + x_{pre}) + F_p - F_{no} \quad (1)$$

여기서

P_D : 다이어프램 압력

A_{eff} : 다이어프램 유효 면적

k_v : 밸브 스프링 상수

x_s : 스템 변위

x_{pre} : 밸브 스프링의 프리로드에 해당하는 변위

F_p : 패킹에 의한 부하

F_{no} : 디스크 무게 등과 같이 방향이 변하지 않는 부하

이를 다시 P_D 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$P_D = \frac{k_v(x_s + x_{pre}) + F_P - F_{no}}{A_{eff}} \quad (2)$$

마찬가지로, 닫힘 행정에 대해 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$P_D = \frac{k_v(x_s + x_{pre}) - F_P - F_{no}}{A_{eff}} \quad (3)$$

위의 식 2와 3에서 알 수 있듯이 같은 스템 변위(x_s)에 대해 열림과 닫힘 행정에서 다른 다이어프램 압력을 가지는 것을 알 수 있다. 이 차이는 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$P_{D(open)} - P_{D(close)} = \frac{2F_P}{A_{eff}} \quad (4)$$

이 관계식은 패킹력이 간접적으로 측정이 가능함을 보여준다.

나. 위치 제어기 모델

밸브가 설치되어 시간이 지남에 따라 밸브 부속품의 성능이 변화하게 된다. 이는 관리자가 보수 관리의 필요성과 일정을 결정하는 데 주요한 정보이므로 이를 구하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 위치 제어기에 대한 모델을 개발하였다.

그림 3에 표시된 위치 제어기에 대하여 열림 행정의 평형 관계식을 세우면 다음과 같다.

$$l_1\{A_B P_C - k_B(l_1 \theta + x_0)\} = l_2\{k_L(l_2 \theta + x_s)\} \quad (5)$$

여기서

P_C : 제어 공기 압력

P_D : 다이어프램 압력

A_B : 위치 제어기 벨로우즈 면적

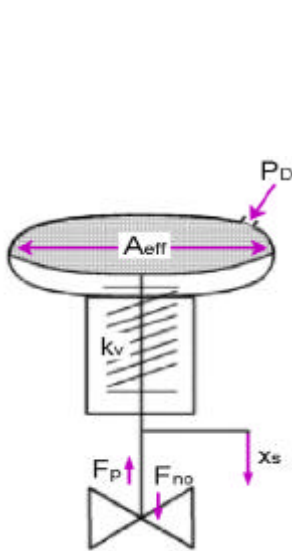


그림 2 공기구동밸브 개략도(열림 행정)

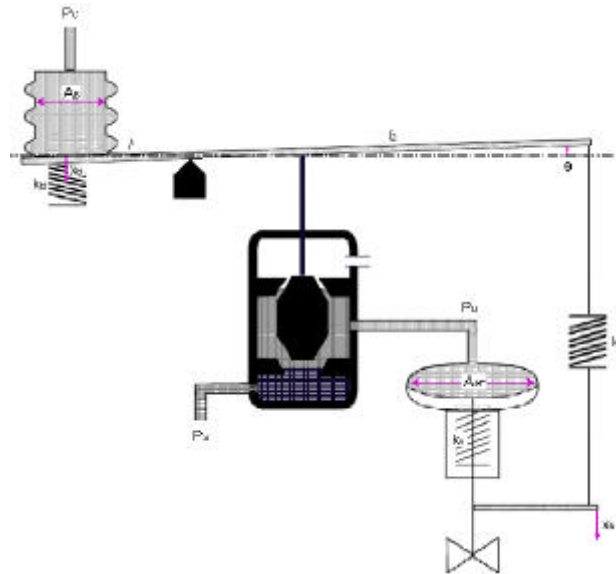


그림 3 위치 제어기 개략도

k_B : 위치 제어기 내부 스프링 상수
 x_0 : 위치 제어기 내부 스프링의 프리로드에 해당하는 변위
 l_1 : 제어 공기 압력 작용점과 힌지점 사이의 거리
 l_2 : 피드백 링크지 암의 스프링 연결점과 힌지 점 사이의 거리
 θ : 피드백 링크지 암의 회전각도
 k_L : 피드백 링크지 암 스프링 상수
 x_s : 스템 변위

그리고 피드백 링크지 암의 각도에 따라 다이어프램의 압력이 변화하게 되므로 이를 수식으로 정의하면 다음과 같다.

$$P_D = k_P \theta + P_{D0} \quad (6)$$

여기서

k_P : θ 와 P_D 의 관계에서 θ 에 대한 P_D 의 비례 상수

P_{D0} : θ 와 P_D 의 관계에서 상수

다이어프램의 압력과 스템의 변위의 관계는 앞에서 살펴본 바와 같이 식 2와 3의 관계를 가지므로 식 2와 6을 식 5에 대입하여 정리하면,

$$AP_C - BP_D + C = 0 \quad (7)$$

여기서

$$A = l_1 A_B$$

$$B = (k_B l_1^2 + k_L l_2^2) / k_P + k_L l_2 A_{eff} / k_v$$

$$C = P_{\phi} (k_B l_1^2 + k_L l_2^2) / k_P - k_B l_1 x_0 + k_L l_2 (F_p - F_{no}) / k_v$$

이다. 그런데 결과에서 알 수 있듯이 계수에 사용되는 파라미터가 위치 제어기의 내부 사양을 많이 포함하고 있어 내부 사양에 대한 정확한 자료가 없이는 정확한 모델을 구성하기 어려움을 알 수 있다. 그러나 앞으로 개발될 자체 진단 감시 시스템 기술이 결함을 판별했을 때, 그 판별된 결함이 논리적으로 발생가능한 지는 위에서 개발된 모델로 검증이 가능하여 진단의 정확성과 신뢰도를 높이는데 사용하게 된다. 예를 들어, 피드백 링크지의 스프링 상수가 작아지면 계수 A의 값은 그대로이나 계수 B의 값은 작아지게 된다. 따라서 주어지는 제어 공기 압력에 대해 다이어프램의 압력의 기울기가 커지게 된다. 그러나 이러한 현상은 계수에 포함된 수식에서 알 수 있듯이 피드백 링크지 스프링 상수가 작아질 때뿐만 아니라 밸브의 스프링 상수가 커진 경우에도 나타나게 된다. 즉, 위의 모델로 어느 부위가 고장이 발생했는가에 대한 정보는 얻기 어려우나 고장이 판별된 후에 그 진단의 타당성을 검증하는데 사용될 수 있음을 보여준다.

공기구동밸브에서 발생한 결함을 정확히 진단하기 위해서, 본 연구에서는 패턴 인식 방법을 이용하게 되는데, 이를 위해서 결함에 대한 실험을 수행하여 fault library를 작성한다.

4. 실험 장치 설정 및 방법

실험에서 측정된 신호는 제어 신호, 공급 공기 압력, 제어 공기 압력, 다이어프램 압력 그리고 스템 변위까지 총 5가지 신호이다. 공급 공기 압력은 레귤레이터를 통해 전기-공압 변환기와 위치 제어기로 공급되는데 압력을 측정하였다. 제어 신호는 전기-공압 변환기에 공급되는 전압 신호로 전기-공압 변환기의 전기 신호 입력 단자에서 측정하였고 제어 공기 압력은 전기-공압 변환기의 출력 신호이자 위치 제어기의 입력 신호로서 전기-공압 변환기와 위치 제어기 사이에서 측정하였다. 그리고 다이어프램 압력은 위치 제어기의 출력 신호로 위치 제어기와 구동기 사이에서 측정하였고 스템 변위는 구동기의 상부 스프링 시트에 연결된 판에 LVDT를 고정하여 측정하는 방법과 밸브 바닥의 캡을 가공하여 LVDT를 스템 디스크에 연결하여 측정하는 방법 두 가지를 병행하여 측정하였다. 실험 장치의 사진은 그림 4와 같다.

실험은 유동이 없는 상태에서 수행되었으며, 밸브 구동에 필요한 공기 공급은 공압 장치를 이용하여 공급하여 주었고 전기-공압 변환기에 필요한 제어 신호는 그림 5와 같이 사다리꼴 모양으로 공급하여 주었다. 공급된 제어 신호는 그림에서 알 수 있듯이 열림 행정과 닫힘 행정을 한 행정으로 하고 있다. 그림 6은 실험을 통해 취득한 실험 결과이다. 그림 6(a)는 측정된 신호를 시간의 함수로 나타낸 그림으로, 위에서부터 공급된 공기 압력, 제어 공기 압력, 다이어프램 압력, 스템 변위이다. 이렇게 시간에 따른 측정 신호를 살펴으로써 측정의 건전성을 판단할 수 있다. 그러나 각 부품들의 이상을 살피기 위해서는 각 부품의 특성을 잘 보여줄 수 있는 형태의 그림으로 재구성하는 것이 필요하다. 따라서 그림 6(b)에는 측정 변수들의 조합 그림으로, 위에서부터 전반적인 공기구동밸브의 특성을 보여주는 제어 신호-스스템 변위 그림, 전기-공압 변환기의 특성을 보여주는 제어 신호-제어 공기 압력 그림, 위치 제어기의 특성을 보여주는 제어 공기 압력-다이어프램 압력 그림 그리고 마지막으로 밸브의 특성을 보여주는 다이어프램 압력-스스템 변위 그림을 나타내었다. 그림 6에서 보여주는 데이터는 공기구동밸브가 정상적으로 작동하는 경우에 측정한 결과로 결함을 판단하는 기본 데이터로 사용된다.

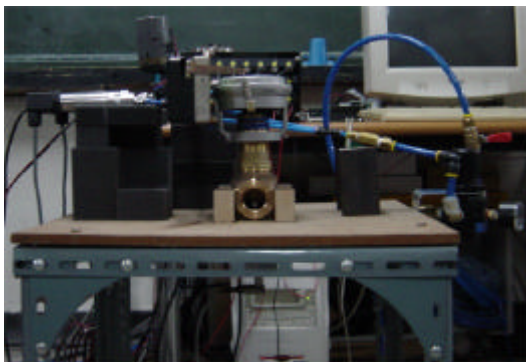


그림 4 실험 장치 사진

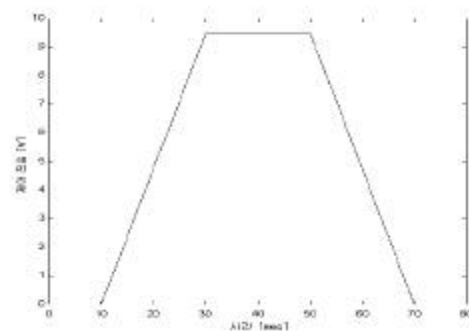


그림 5 전기-공압 변환기에 공급된 제어 신호

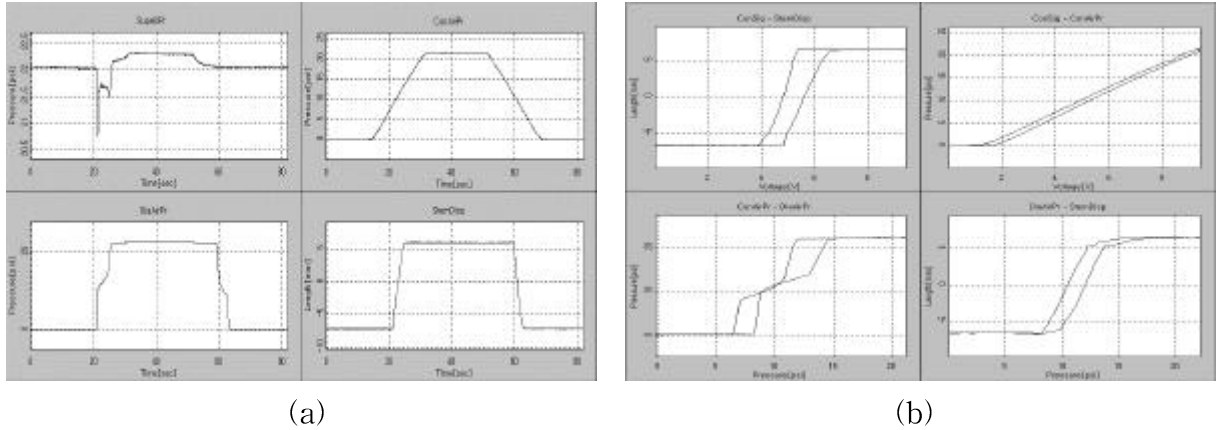


그림 6 실험으로부터 취득한 측정 신호

5. 결함 신호 구축

공기구동밸브의 자체 진단 감시 시스템에서 사용될 패턴 인식 방법을 적용하기 위해서는 발생 가능한 결함에 대한 데이터베이스를 구축하여야 한다. 본 연구에서는 데이터베이스 구축을 위해 12 종류, 18개 항목의 결함을 선정하였으며, 선정된 결함 항목은 표 1에 정리하였다. 그림 7은 12종류의 결함을 실험 장치 구성도에 표시한 것이다. 이렇게 선정된 결함에 대해서 실험을 수행하여 각 결함의 특징이 기술된 경향 테이블을 작성한다. 경향 테이블은 그림 8과 같이 결함의 특징을 표현할 수 있는 특정점을 설정하고 이것을 이용한 파라미터를 정의하여 정상적인 경우의 신호와 비교함으로써 완성된다. 특히 결함별로 중요한 파라미터는 *로 표시하여 중요도를 부여하였다. 이렇게 작성된 경향 테이블은 자체 진단 감시 시스템의 진단 알고리즘에서 결함을 판별하기 위하여 사용된다.

본 연구에서는 12 종류 중 3 종류에 대한 결과만을 예로 살펴보도록 하겠다.

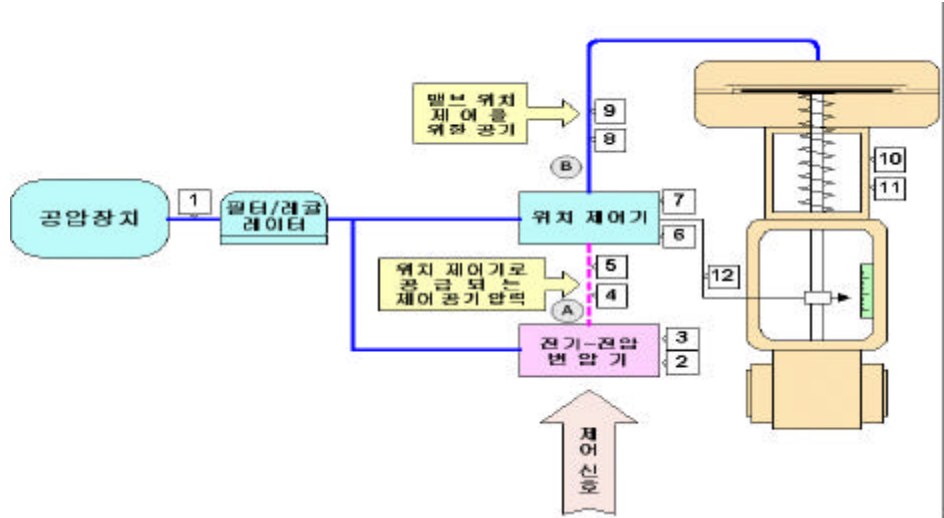


그림 7 이상 신호의 종류와 결함이 발생한 위치

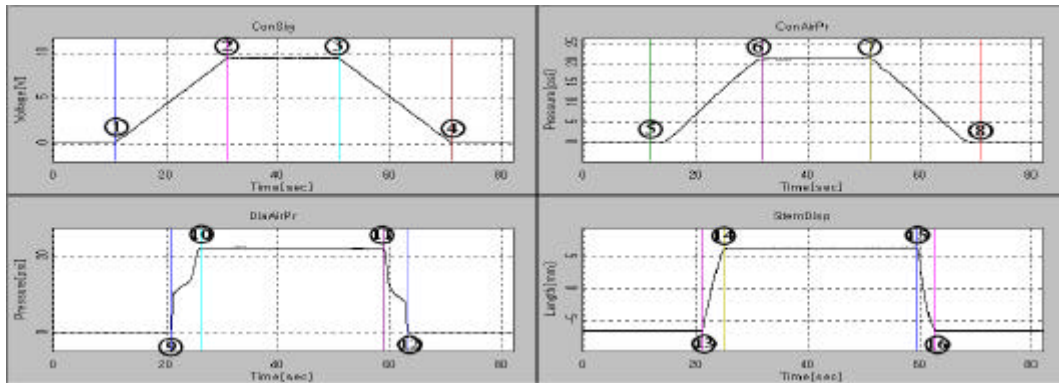


그림 8 특정점 설정

표 1 결함 실험의 종류

결함 번호	결함 항목
1	제한된 공급 공기
2	2-1 전기-공압 변환기 영점 높게 변함
	2-2 전기-공압 변환기 영점 낮게 변함
3	3-1 전기-공압 변환기 작동 범위 크게 변함
	3-2 전기-공압 변환기 작동 범위 작게 변함
4	A 위치 누설
5	A 위치 막힘
6	6-1 위치 제어기 시작점 빠르게 변함
	6-2 위치 제어기 시작점 늦게 변함
7	피드백 링크지 고착
8	B 위치 누설
9	B 위치 막힘
10	10-1 구동기 스프링 프리로드 크게 변함
	10-2 구동기 스프링 프리로드 작게 변함
11	11-1 패킹 부하 크게 변함
	11-2 패킹 부하 작게 변함
12	12-1 피드백 링크지 스프링 강성 크게 변함
	12-2 피드백 링크지 스프링 강성 작게 변함

가. A 위치 누설

전기-공압 변환기와 위치 제어기 사이의 튜브에서 누설이 발생된 경우에 대한 실험이다. 누설 효과를 구현하기 위해 튜브에 구멍을 뚫어 실험을 수행하였다. 구멍은 누설 정도를 조절하기 위해 세 가지 크기에 대해 실험하였다. 그림 9는 구멍의 크기를 달리한 튜

브의 사진으로 왼쪽의 튜브만이 정상적인 튜브이다.

그림 10은 A 위치에서 누설이 발생한 실험 결과이다. 그림 10(a)에서 알 수 있듯이, A 위치에서 누설이 발생하면, 전기-공압 변환기에서 출력되는 제어 공기 압력이 낮아지게 되고 따라서 제어 공기 압력으로 조정되는 위치 제어기의 출력인 다이어프램 압력의 증가 시점 및 감소 시점이 변하게 된다. 이와 같은 현상을 특징지어 주는 신호 패턴을 표 2에 표시하였다.



그림 9 누설 실험용 튜브

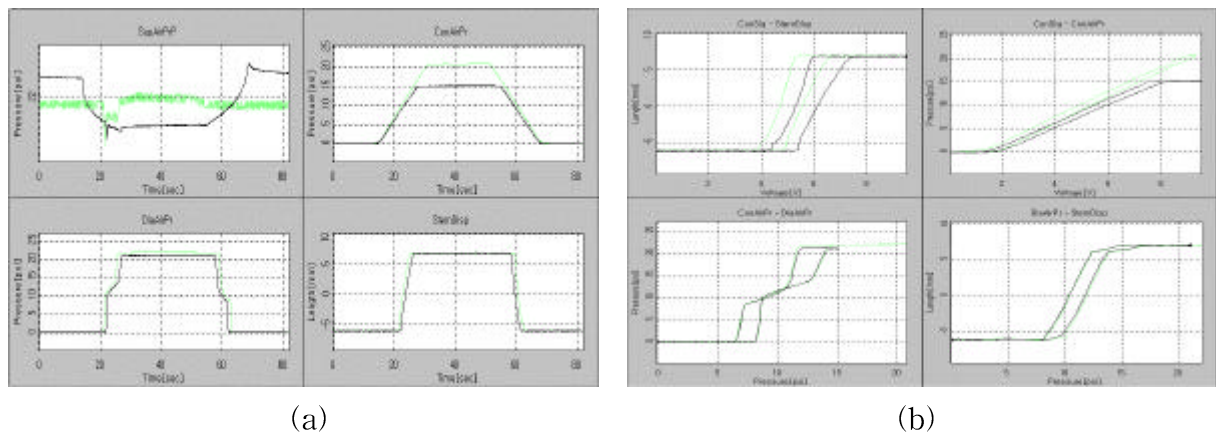


그림 10 A 위치 누설 실험 결과 그래프

표 2 A 위치 누설 경향 테이블

■ Control Air Pressure

P _C (⑤)		P _C (⑥)		P _C (⑦)		②~③ Slope		②~③ Slope*		P _C (⑧)	
↖		↘*		↘*		↖		↖		↖	
P _C (⑧)	t(⑤)-t(①)	t(⑥)	t(⑦)	t(⑦)-t(⑥)	t(⑧)-t(③)	t(⑥)-t(②)	t(⑦)-t(③)				
↗	↗	↘*	↗*	↗*	↘	↗*	↗*				

나. A 위치 막힘

전기-공압 변환기와 위치 제어기 사이의 튜브가 막힌 경우에 대한 실험이다. 그림 11은 막힘 효과를 얻기 위해 튜브의 공기 통과 단면을 볼트를 이용하여 축소시킨 사진이다. 볼트의 조절량을 조정하여 다양한 막힘 정도에 대한 실험을 수행하였다.

그림 12는 A 위치에서 막혔을 때의 실험 결과이다. 그림 12(a)에서 알 수 있듯이, A 위치에서 튜브가 막히게 되면 전기-공압 변환기에서 출력되는 제어 공기 압력의 증가 및 감소가 천천히 발생하게 되고 이 영향으로 다이어프램 압력 곡선이 정상적인 경우에 비해 전체적으로 오른쪽에 이동하게 된다. 이와 같은 현상을 특징지어 주는 신호 패턴을 표 3에 표시하였다.



그림 11 막힘 실험용 튜브

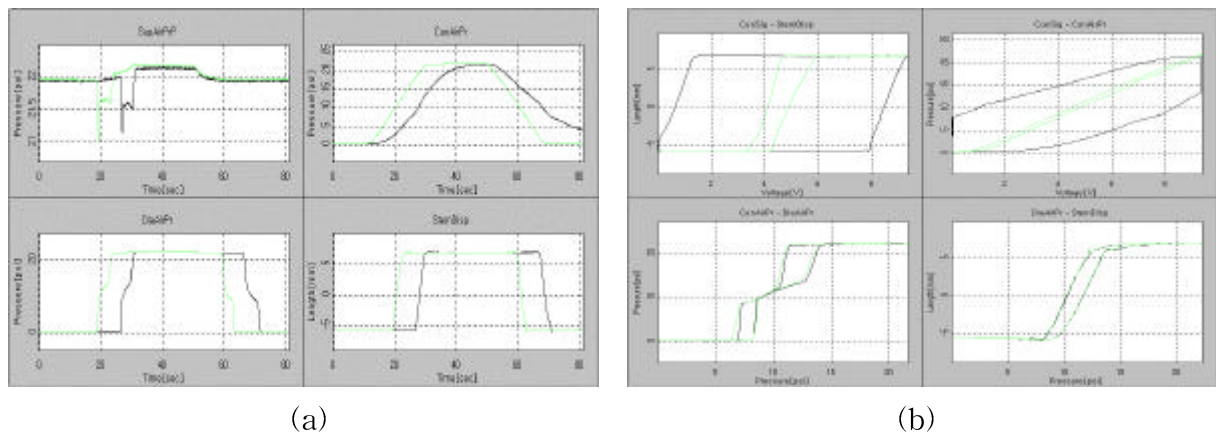


그림 12 A 위치 막힘 실험 결과 그래프

표 3 A 위치 막힘 경향 테이블

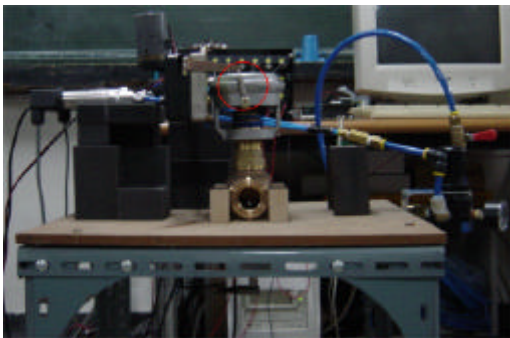
■ Control Air Pressure

Pc(⑤)		Pc(⑥)		Pc(⑦)		②~③ Slope		②~③ Slope*		Pc(⑧)	
↖		↖		↖		↖		↖		↖	
Pc(⑧)*	t(⑤)-t(①)	t(⑥)	t(⑦)	t(⑦)-t(⑥)	t(⑧)-t(③)	t(⑥)-t(②)	t(⑦)-t(③)				
↖	↗	↗*	↗	↘*	↗*	↗*	↖				

다. 피드백 링크지 스프링 강성

위치 제어기의 구성품인 피드백 링크지 스프링의 강성이 변하였을 경우에 대한 실험이다. 이 실험은 스프링 강성이 다른 스프링을 정상 스프링 대신 삽입하여 수행되었다. 그림 13(a)에서 왼쪽으로 표시한 부분이 피드백 링크지의 스프링을 표시한 것이고 그림 13(b)는 사용된 스프링으로 왼쪽이 정상 스프링이고 오른쪽이 강성이 작은 경우이다.

그림 14는 피드백 링크지 스프링의 강성이 변한 경우의 실험 결과이다. 피드백 링크지 스프링의 강성이 변하게 되면 스템 거동 구간에 해당하는 다이어프램 압력의 기울기가 바뀌게 된다. 이 영향은 스템 변위의 기울기에도 영향을 미치게 된다. 피드백 링크지 스프링의 강성이 크게 변한 경우와 작게 변한 경우는 그 결과가 서로 반대의 경향을 나타내기 때문에 여기서는 작게 변한 경우만을 설명하도록 한다. 피드백 링크지 스프링의 강성이 작게 변하게 되면 같은 제어 공기 압력에 대해 발생하는 스템 변위로 인한 피드백 링크지의 스프링 힘이 작아지고 이로 인해 위치 제어기의 파일럿 밸브의 열림 정도가 커져 다이어프램으로 입력되는 공기 압력이 증가하게 된다. 그러므로 그림 14(a)에서 다이어프램 압력 그래프에서 스템 거동 구간에서 기울기가 정상적인 경우에 비해 커지게 된다. 이는 그림 14(b)의 제어 공기 압력-다이어프램 압력 그래프에서도 볼 수 있다. 이와 같은 현상을 특징지어 주는 신호 패턴을 표 4에 표시하였다.

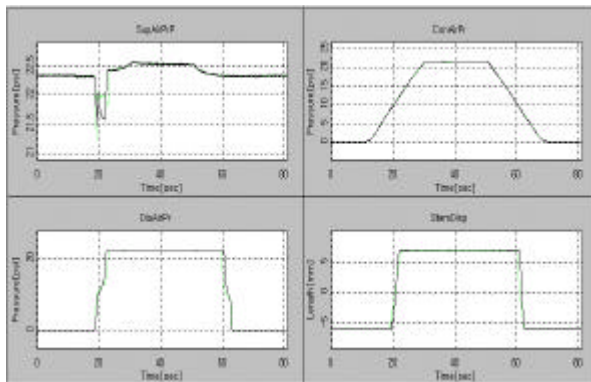


(a)

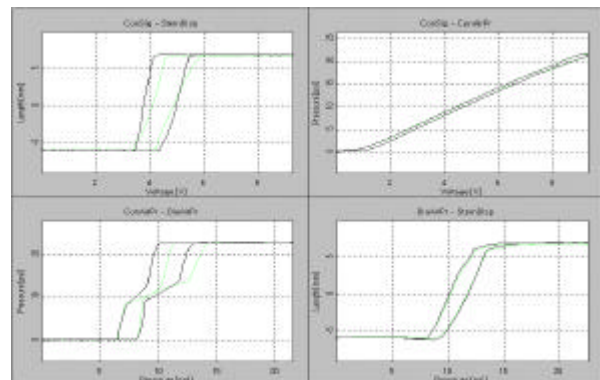


(b)

그림 13 피드백 링크지 스프링 강성 변화 실험



(a)



(b)

그림 14 피드백 링크지 스프링 강성 변화 실험 결과

표 4 피드백 링키지 스프링 강성 작계 변환 경향 테이블

■ Diaphragm Air Pressure

Pd(⑨)	Pd(⑬)	Pd(⑭)	Avg(Ps(⑥~①)) -Pd(⑩)	Avg(Ps(⑥~①)) -Pd(⑪)	⑥~⑦ Slope	⑥~⑦ Slope'	Pd(⑮)	Pd(⑯)
↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
Pd(⑫)	Pd(⑩)	Pd(⑪)'	Pd(⑫)'	t(⑨)-t(①)	t(⑬)-t(①)	t(⑭)-t(①)	t(⑩)-t(①)	
↖	↖	↖	↖	↖	↖	↘*	↘*	
t(⑪)-t(⑩)	t(⑪)-t(③)	t(⑮)-t(③)	t(⑯)-t(③)	t(⑫)-t(③)	abs(tb(⑨)-t(⑨))	abs(tb(⑩)-t(⑩))		
↗*	↗*	↗*	↖	↖	↖↗	↖↗		

이상에서 12가지, 18개의 공기구동밸브에서 발생할 수 있는 결함 중 3가지에 대한 예를 살펴보았고, 이에 대해 경향 테이블을 작성하였다. 여기서 제시된 경향 테이블은 전체 경향 테이블의 일부분으로 각 결함에 대한 특징을 나타내주는 부분이다. 표 1에서 제시한 결함들에 대해서 경향 테이블을 작성하여 보면, 경향 테이블이 중복되지 않고 각각 구분되는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 공기구동밸브에 대한 자체 진단 감시 시스템을 구성하고 fault library의 타당성을 살펴보았다. 이를 위해 먼저 공기구동밸브의 작동원리를 살펴보았고, 특성에 중요한 영향을 미치는 변수들을 살펴보기 위하여 밸브와 위치 제어기의 모델을 구성하였다. 그리고 공기구동밸브에서 발생할 수 있는 결함에 대한 실험을 수행하고, 이 결과를 이용해 각 결함에 대한 경향 테이블 작성하여, 공기구동밸브에 대한 fault recognition library를 완성하였다. 이 library는 결함에 따라 각각 다른 경향을 나타내고 있으며 서로 중복되지 않으므로 결함 원인을 파악하는데 중요한 자료로서 사용될 수 있다.

이상의 결과는, 차세대 원자력 발전소에 적용할 공기구동밸브의 자체 진단 감시 시스템을 구성하는데 있어서 중요한 역할을 수행하여 궁극적으로는 원자력발전소의 안전성 확보 및 공기구동밸브의 유지 보수 주기 결정을 위한 정보를 제공하게 될 것이다.

7. 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 선진기술확보사업으로 아주대학교가 주관하여 수행되었습니다. 관계자 여러분의 협조에 감사드립니다.

8. 참고 문헌

- [1] Tom Walker, 2001, "AOV Setup Parameters", Air Operated Valve User's Group 20th Annual Conference
- [2] L.J. Bond et al., 2000, "On-line Intelligent Self-Diagnostic Monitoring for Next Generation Nuclear Power Plants", NPIC&HMIT.
- [3] Don B. Jarrell et al., "Prognostic and Condition Based Maintenance(CBM) - A Scientific Crystal Ball, ICAPP paper
- [4] DR. Harold L. Ornstein, 2001, "Air-Operated Valve Failure Data", Air Operated Valve User's Group 20th Annual Conference