

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.613>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

공기구동 제어밸브 비정상상태 운전변수에 관한 실험적 연구 §

김양석^{*†} · 김대웅^{*} · 이병오^{*} · 정래혁^{**} · 이승호^{**}

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, ** (주)엠앤디 대덕연구센터

Experimental Study of Operating Parameters for Pneumatic Control Valve in Abnormal Conditions

Yang-seok Kim^{*†}, Dae-wong Kim^{*}, Byoung-oh Lee^{*}, Rae-hyuk Jeoung^{**}
and Seung-ho Lee^{**}

* Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

** Daedeok R&D Center, M&D Corp.

(Received January 29, 2016 ; Revised April 8, 2016 ; Accepted April 25, 2016)

Key Words: Pneumatic Actuator(공기구동기), Control Valve(제어밸브), Positioner(위치전송기), Diagnostics (진단)

초록: 공기구동 제어밸브는 여러 유형의 발전소에서 유체계통의 유량을 제어하거나 탱크의 수위를 조절하는 중요한 기능을 수행하며 발전소 수명기간 동안 성능이 보장되어야 한다. 공기구동 제어밸브는 공기구동기에 공기를 공급하거나 배기하여 작동시키며, 다양한 기능을 하는 부속기기로 구성된 제어설비를 이용하여 공기량을 조절함으로써 밸브 위치를 제어한다. 본 논문에서는 2인치 공기구동기에 I/P 변환기, 포지셔너 등이 장착된 제어밸브 동작모사 실험 장치를 이용하여 공기공급배관에서 공기누설, 밸브 패킹마찰력 변화, 포지셔너 설정 불량 등을 모사하고, 약 67% 개도에서 ±2% 이하 제어구간에서의 밸브-구동기 거동을 측정하여 비교하였다.

Abstract: A pneumatic control valve performs a major role in controlling the flow of a system or the level of a key tank in many power plants, and its performance should be guaranteed during the plant's lifetime. Its operation starts by supplying air to the pneumatic actuator or by exhausting the air from the actuator. To control the valve position, the amount of air supply or exhaust is adjusted by a control loop where various accessories are equipped. In this paper, air leakage in the air supply line, changes in the valve packing force, and false adjustments of zero and the span of the positioner are simulated and analyzed using a 2-in pneumatic valve with a position control loop including an I/P converter and positioner, where the valve position is controlled within ±2% of the control pressure at 67% opening position.

1. 서론

공기구동 제어밸브는 열림-단함 기능 이외 유량, 압력, 수위 등 발전소 운전에 중요한 공정변수들을 일정범위로 조절하는 중요한 기능을 수행

한다. 따라서 차단밸브와 달리 포지셔너, I/P 또는 E/P 변환기, 볼륨 부스터, 레귤레이터 등의 제어용 부품들이 필요하다. 밸브에 따라서는 시스템 요구조건에 따라 완전 단함 위치에서 완전 열림 위치까지 원격으로 지시하기 위한 리미트 스위치, 솔레노이드 밸브 등이 장착되기도 한다. 따라서 제어밸브에서 발생하는 문제의 상당부분도 밸브-구동기 자체 손상이나 결함 이외에 제어용 부품에 기인한다. 특히, 포지셔너의 Zero 또는 Span

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015.11.10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimysrj2015@khnp.co.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

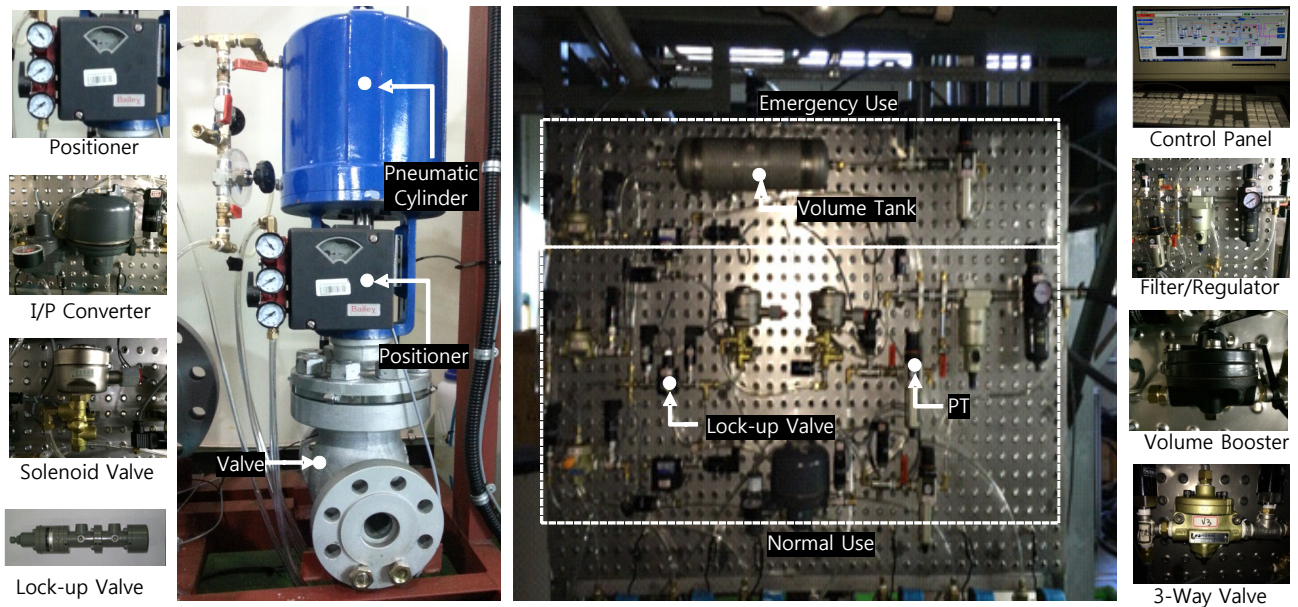


Fig. 1 Pneumatic control valve test rig

설정 오류, 릴레이 결함, 공기 누설 등도 주요 고장 원인으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 제어밸브에 대해서는 제어성을 진단하고 교정하는 방법들이 이미 정립되어 있으며, 공기구동기 실린더 마찰 및 진동 특성에 대한 연구,⁽²⁻⁴⁾ 또는 격리용 공기구동밸브를 대상으로 모델기반 예측진단 방법을 제안하기도⁽⁵⁾하였으나 정상운전 중, 특히 제어구간이 진행정에 비해 크지 않은 경우 온라인으로 밸브-구동기 상태를 진단하는 방법은 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 제어설비를 갖춘 양방향 실린더형 공기구동기가 장착된 공기구동 제어밸브 동작모사 실험장치를 이용하여 공급 공기누설, 밸브 패킹부하 변동, 포지셔너 설정 오류와 같은 다양한 이상상태에서의 밸브-구동기 거동, 특히 제어구간에서의 거동을 측정하여 비교하였다. 제어밸브가 설치된 계통에 따라 정상운전시 개도 및 제어구간은 다를 수 있으나 본 연구에서는 급수량이 일정하게 유지되는 발전소 정상운전 상태에서의 급수제어밸브 열림 위치에 해당하는 약 67% 정도의 개도에서 $\pm 2\%$ 이하의 제어동작을 수행하는 것으로 가정하였다.

2. 본 론

2.1 공기구동 제어밸브 동작모사 실험장치

공기구동 제어밸브 동작모사 실험장치는 Fig. 1~2와 같이, 2인치 글로브밸브, 실린더형 양방향

공기구동기, 공기구동기에 공기를 공급하고 밸브 위치를 제어하기 위한 제어설비 및 각종 계측기로 구성되어 있다. 제어설비는 I/P 변환기, 포지셔너, 볼륨 부스터 등으로 구성되어 있으며, I/P 변환기의 출력 압력은 포지셔너로 입력되어 포지셔너 출력 압력을 조절하고, 포지셔너의 출력 압력은 볼륨부스터의 출력 압력을 조절하여 구동기로 공급되는 공기량을 제어한다. 주요 계측기로는 구동기 공급압력 및 주요 액세서리들의 입·출구 압력을 측정하기 위한 압력계(PT), 밸브 스템변위를 측정하기 위한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer), 밸브 스템에 작용하는 힘을 측정하기 위한 스트레인게이지형 힘 센서가 있다.

본 실험장치를 이용하여 공기구동기 실린더로의 공기공급 이상, 포지셔너 zero 및 span 설정 오류, 밸브 패킹마찰력 이상 등의 이상상태를 모사할 수 있으며, 본 연구에서의 제어신호는 Fig. 3에 나타난 바와 같으며, 약 67%의 개도에서 $\pm 2\%$ 조절 후 다시 $\pm 1\%$ 의 제어동작을 수행하도록 하였다.

2.2 구동부 누설 실험

구동부 누설 실험에서는 구동기 실린더로의 공기 공급배관 연결부 손상 또는 조립 불량 등으로 인하여 공기가 외부로 누설되는 경우를 모사한 것이다. 실험 대상인 공기구동기는 실린더 내 피스톤의 상부 또는 하부에서 각각 누설이 발생할 수 있으므로 구동기 상·하부 실린더 누설에 대한

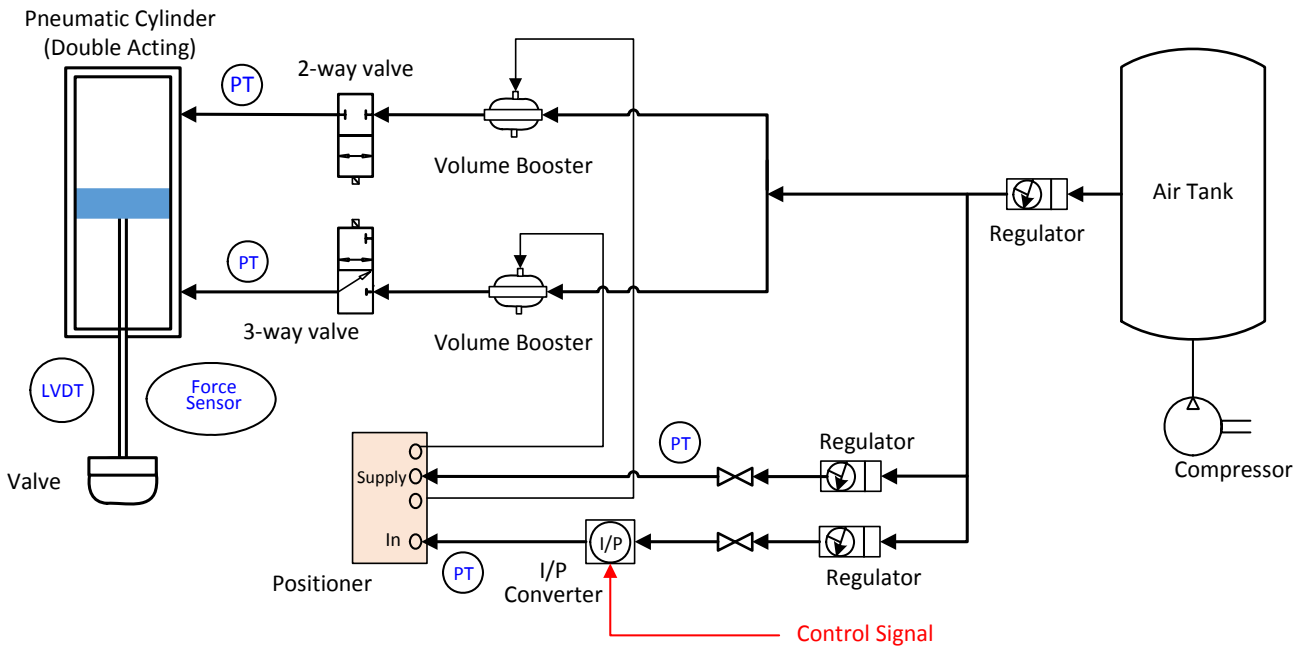


Fig. 2 Schematic diagram for pneumatic control valve test rig

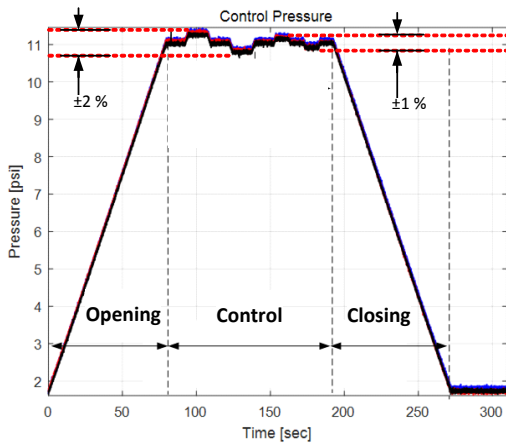


Fig. 3 Control pressure for the experiments

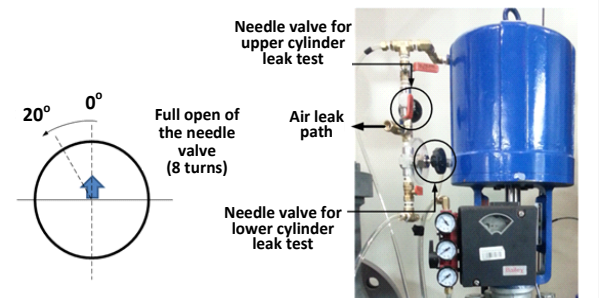


Fig. 4 Pneumatic cylinder leak simulation with needle valve

실험을 각각 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 누설을 모사하기 위해 니들 밸브를 구동기 상·하부의 공기 공급배관에 각각 설치하고 니들 밸브 각도를 조절하여 공기누설을 모사하였다. 본 실험에 사용한 니들 밸브는 각도에 따른 유량 특성이 선형인 밸브로 밸브 손잡이를 8회 회전시키면 완전 열림 상태가 된다. 니들 밸브 각도에 따른 누설량을 정량화 할 수 있으나 누설량을 측정하지는 않았다. 실험에 사용한 밸브는 제어밸브이므로 누설량에 따라 상·하부 실린더 압력이 자동으로 조절되고 실린더 압력 변화에 따라 누설량도 변하게 된다. 따라서 본 실험에서는 특정

누설량을 정의하여 비교하기보다 상대적인 누설의 크기를 니들 밸브 각도로 모사하고 이에 따른 밸브 거동을 비교하였다. 니들 밸브 각도는 누설이 없는 정상상태에 해당하는 0도 이외에 10도, 20도 등 세 가지로 하였고, 세 가지 조건에 대해 제어신호(Fig. 3)에 따른 밸브 스템 변위, 구동기 상·하부 실린더로의 공급공기 압력, 상·하부 실린더 압력차(구동압력), 스템 쓰러스트 변화를 각각 측정하여 밸브-구동기 작동상태를 비교하였다.

Fig. 5~7에 나타낸 바와 같이 구동기 상부 실린더에서 누설이 발생하여도 포지셔너에서 스템 변위 정보를 피드백 받아 구동기 하부 실린더로의 공급 압력을 조절하기 때문에 누설량이 증가하여도 스템 변위와 구동기 구동압력에는 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 6(a)를

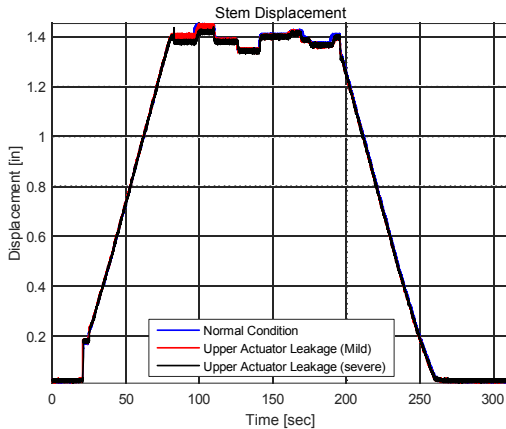


Fig. 5 Valve stem displacement during the upper cylinder leak test (mild leak condition: needle valve angle = 10°, severe leak condition: needle valve angle = 20°)

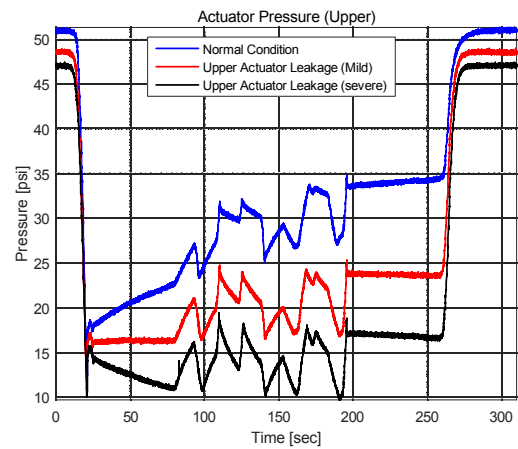
보면, 제어구간에서의 구동기 상부 실린더 압력은 누설량 증가에 따라 최소 21.4%에서 최대 63.7%까지 크게 감소하였으며, Fig. 6(b)의 하부 실린더 압력도 따라서 낮아지는 특성은 누설 감지에 매우 유용한 정보가 될 수 있다. 구동기 상부 실린더 누설과 마찬가지로 하부 실린더 누설 실험에서도 구동기 상부 실린더 누설 실험과 유사하게 스템 변위와 구동압력 및 스템 쓰러스트 신호에서는 뚜렷한 변화가 없지만, 구동기 상·하부 실린더 압력은 누설량에 따라 현저히 감소하는 특성을 보여주었다.

2.3 밸브 작동 불량 실험

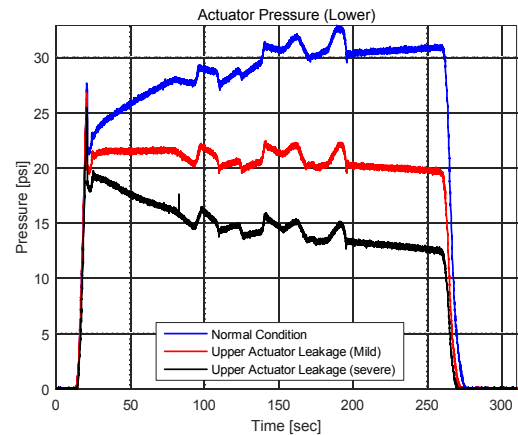
밸브를 통과하는 유량을 제어하기 위해서는 밸브의 개도를 적절하게 제어해야 하나 밸브의 마찰력이 증가하는 경우 헌팅과 같은 현상이 나타나거나 심각한 경우 디스크 고착이 발생할 수 있다. 이를 모사하기 위해 패킹마찰력을 20~60 lbf로 조절하여 밸브-구동기 거동을 살펴보았다.

Fig. 8은 밸브 패킹부를 나타낸 것으로써, 패킹을 조립한 후 글랜드 너트를 조절하여 글랜드를 위아래로 이동시켜 패킹 조임력을 조절할 수 있다. 예비실험을 통해 밸브 스템에 설치된 스트레인 게이지형 힘센서를 이용하여 정상상태의 패킹마찰력(20 lbf)을 측정하고 글랜드 너트를 조절하여 40 lbf, 60 lbf에 해당하는 동일한 글랜드 너트 조절량을 구한 뒤 본 실험에서의 패킹 마찰력 조정에 활용하였다.

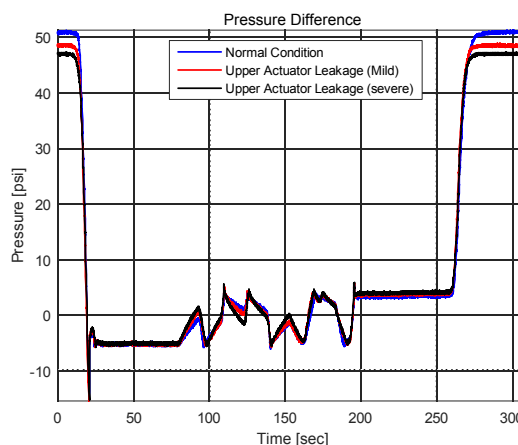
Fig. 3과 동일한 제어신호를 이용하였고, 제어



(a) Supply air pressure to the upper cylinder



(b) Supply air pressure to the lower cylinder



(c) Supply air pressure difference between to the upper and lower cylinders

Fig. 6 Supply pressure variations during the upper cylinder leak test (mild leak condition: needle valve angle = 10°, severe leak condition: needle valve angle = 20°)

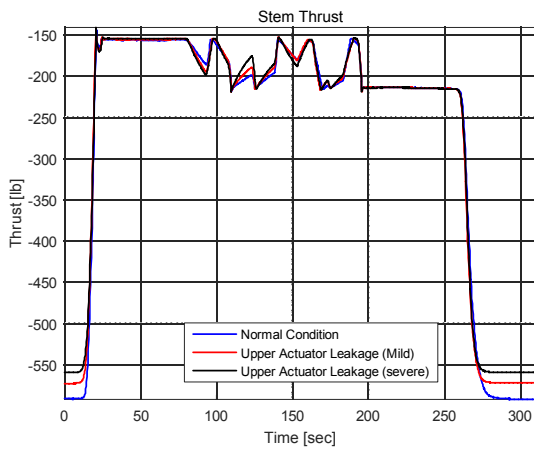


Fig. 7 Valve stem thrust variation during the upper cylinder leak test (mild leak condition: needle valve angle = 10°, severe leak condition: needle valve angle = 20°)

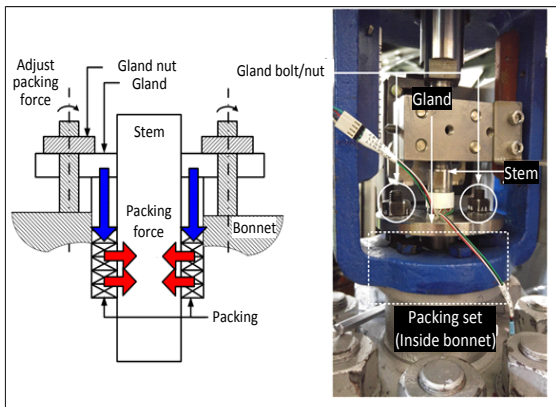


Fig. 8 Schematic of packing force adjustment

신호에 따른 밸브 스템 변위 신호에서는 열림 또는 닫힘 운전 시 패킹 마찰력 증가에 따라 선형에서 계단형으로 스템 이동이 점차 불안정해지는 Stick-slip 특성을 보여 주었다. 또한 제어운전 구간에서도 $\pm 2\%$ 제어는 정상적이거나 $\pm 1\%$ 제어 동작은 수행하지 못하는 것으로 나타났다. 즉, 밸브 제어동작을 위해 구동기 상·하부 실린더 압력차에 의한 구동기의 힘이 피스톤의 정지마찰력 보다 크면 이동하고 작으면 정지 상태로 있게 되는데 이는 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 패킹 마찰저항이 증가하여 그 영향이 더 크게 나타난 것이다. 제어구간에서 쓰러스트 값이 크게 변하기 시작하는 시점들을 기준으로, 패킹 마찰력 증가에 따른 밸브 스템 쓰러스트 값의 변화를 살펴보면, 정상상태 대비 0.5배에서 최대 4.4배까지 증가하

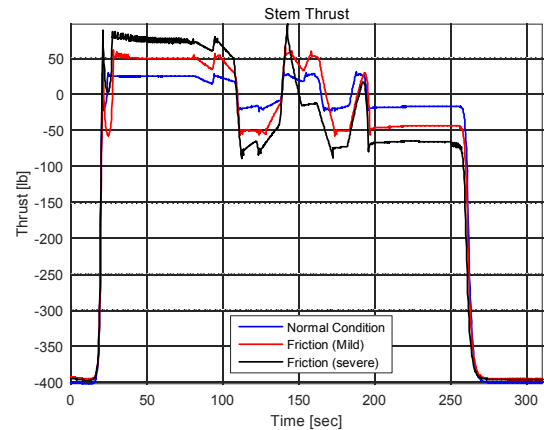


Fig. 9 Valve stem thrust variation in the abnormal packing conditions (normal: 20 lbf, mild: 40 lbf, severe : 60 lbf)

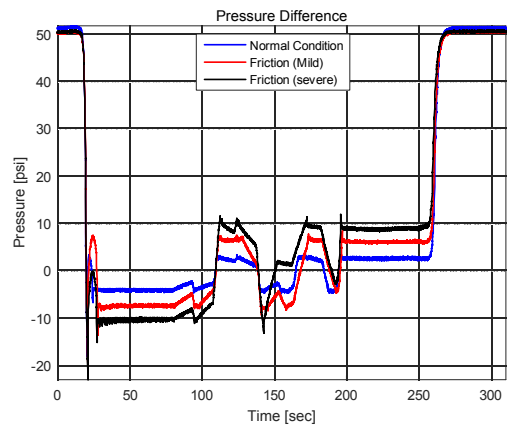


Fig. 10 Supply air pressure difference between to the upper and lower cylinders in the abnormal packing conditions (normal: 20 lbf, mild: 40 lbf, severe : 60 lbf)

는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 10에 나타낸 구동기 상·하부 실린더 압력차에서도 확인할 수 있었다. 따라서 마찰 저항 증가로 인한 쓰러스트 측정신호 또는 구동압력의 특성 변화로부터 특징정보를 추출하여 밸브 동작 불량을 진단하는데 이용할 수 있을 것이다.

2.4 포지셔너 설정치 이상 실험

포지셔너는 제어기와 공기구동기 사이에 위치하여 제어신호에 따른 설정값과 실제의 스템 위치를 비교하여 위치 편차를 감소시키는 방향으로, 즉 구동기 스템이 설정된 위치에 도달할 수 있도록 구동기에 공급되는 공급 공기압을 조절한다. 그러나 포지셔너 Span과 Zero 설정값 변화가

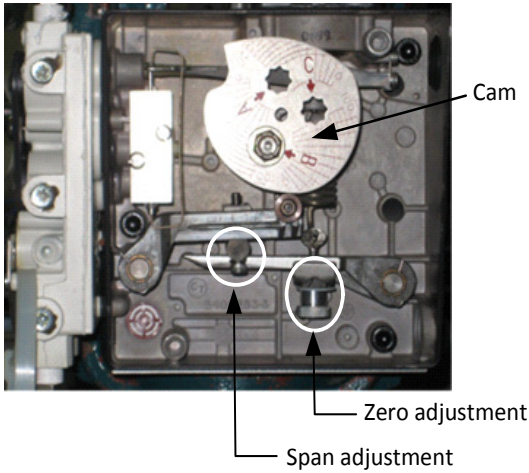


Fig. 11 Photo to show the inside of positioner for the span and zero adjustments

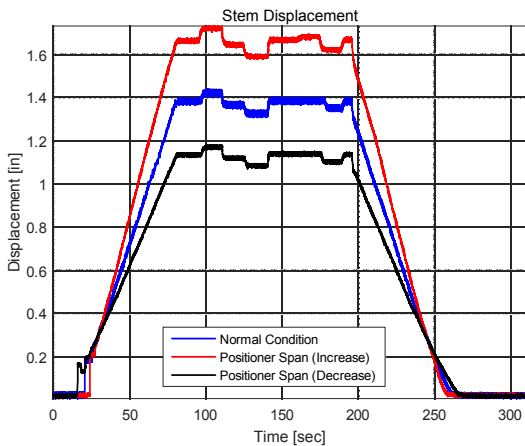


Fig. 12 Valve stem displacement with the false adjustment of span of the positioner

발생하면 밸브의 제어동작이 원활하지 못하게 된다. Span 설정은 밸브 전체 행정거리를 사양에 맞게 조정하고, Zero 설정은 제어신호에 따라 밸브가 움직이기 시작하는 전류값을 조정하는 것이며, 이들 설정치가 어떤 원인에 의해 변경된다면 전행정 운전이 안될 뿐만 아니라 정확한 밸브 위치 제어가 어렵다.

본 연구에서는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 포지셔너 내부에 있는 조절 나사들을 이용하여 포지셔너 Span과 Zero 점을 조정하였다. 밸브 행정 50 mm를 기준으로 -4 mm, 0 mm, +6 mm로 Span을 조정하여 실험을 수행하였는데 이는 양측으로 조정이 가능한 최대값에 해당된다. Zero 점은 3.5 mA를 기준으로 시계방향과 반시계방향으로 180도 조정했을 경우의 제어신호가 각각 2.5 mA, 4.6

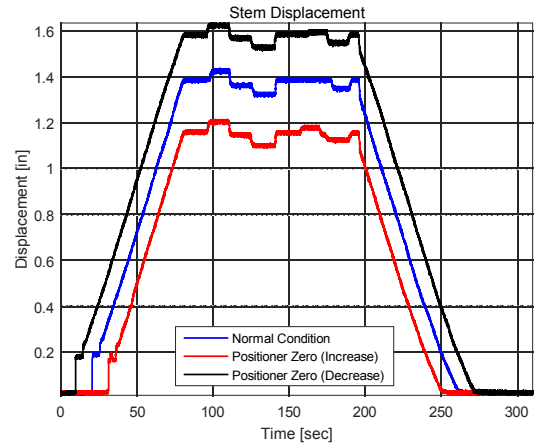


Fig. 13 Valve stem displacement with the false adjustment of zero of the positioner

mA였으며, 이를 기준으로 Zero 점은 밸브 작동 시작점을 2.5 mA, 3.5 mA 그리고 4.6 mA가 되도록 설정하여 실험하였다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 Span이 증가하면 동일 제어압력에 따른 스템변위 값이 약 19.4~21.5% 증가하고 기울기 속도 0.543 mm/sec (0.021 in/sec)에서 0.681 mm/sec (0.027 in/sec)로 증가하여 제어압력에 대한 반응도가 증가함을 알 수 있다. 반대로 Span을 감소시키면 스템변위 값은 약 18.1~18.7% 감소하고 기울기 속도 또한 0.543 mm/sec에서 0.419 mm/sec (0.017 in/sec)로 감소함을 알 수 있다. 또한 포지셔너 Span의 변화는 포지셔너 Zero 점의 변화를 동반하게 되어 밸브 작동시점과 구동기 압력 증감 시점에도 영향을 미친다. 유사하게 포지셔너의 Zero 점을 조정하면, Fig. 13과 같이 스템변위의 시작점이 변하게 되는데 Zero 점을 증가시킬 경우 시작점이 약 10.4초 지연되고 반대로 Zero 점을 감소시키면 시작점이 약 10.2초 빨리 나타남을 알 수 있다. 또한 Zero 점을 증가시키면 동일한 제어압력에 따른 스템변위가 약 14.8~17.2% 감소하고 Zero 점을 감소시키면 스템변위가 약 13.3~14.8% 증가하였으나 span 조정 결과에서 나타났던 기울기의 변화는 발생하지 않았다.

3. 결론

실린더형 공기구동 제어밸브를 대상으로 공기 구동기 공급공기 누설, 밸브 패킹마찰력 변동, 포지셔너 설정치 이상 등의 조건에서 동일한 제어신호에 대한 제어밸브 거동 실험을 수행하고 제

어구간에서의 운전변수 변화를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구동압력과 스템 힘 신호는 구동기 누설, 포지셔너 불량 조건에 대해서는 크게 변하지 않았으나 20 lbf에서 60 lbf까지의 패킹 마찰력 변화 조건에서는 정상상태 대비 최대 4.4배까지 스템 쓰러스트 값이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 구동기 상부 또는 하부 실린더압력 신호는 구동기 누설량 증가에 따라 최소 21.4%에서 최대 63.7%까지 크게 감소하였으며 구동기 누설진단에 유용한 신호로 판단된다.

(3) 포지셔너 Span 및 Zero 설정 불량은 스템변위값을 각각 18.1~21.5%, 13.3~17.2% 증가 또는 감소시키는 것으로 나타나 제어구간에서의 스템 변위신호가 포지셔너 설정 불량 진단에 유용함을 알 수 있었다.

(4) 밸브 기동·정지시 스템변위신호 또한 포지셔너 이상상태가 스템변위 시작점을 이동시키는 것으로 나타나 포지셔너 설정 불량 진단에 추가로 이용할 수 있다.

향후, 제어신호의 단계변화시점에서의 운전변수 변화 유형과 이상상태와의 상관관계를 좀 더 규명하고, 다양한 이상상태를 진단할 수 있는 특징을 도출하여 제어구간에서의 온라인 진단 방법 개발에 활용할 예정이다.

참고문헌 (References)

- (1) Heishman, J., 2008, Nuclear Maintenance Applications Center: Air-Operated Valve Maintenance Guide: Revision 2, EPRI, 1016682.
- (2) Zhang, B. H., Ma, Y. F., Cheng, H. F. and Peng, G. Z., 2005, "A New Method to Predict the Occurrence of Stick-slip in Pneumatic Cylinders," *Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power*, pp. 812~816.
- (3) Chang, H., Lan, C. W. and Chen, L. C., 2006, "Dynamic Measurement of Extra Long Stroke Cylinder in the Pneumatic System," *International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, Vol. 48, pp. 605~610.
- (4) Wakasawa, Y., Ito, Y. and Yanada, H., 2014, "Friction and Vibration Characteristics of Pneumatic Cylinder," *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science*, pp. 155~159.
- (5) Matthew, J.D and Kai. G., 2011., "A Model-Based Prognostics Approach Applied to Pneumatic Valves," *International Journal of Prognostics and Health Management*, www.phmsociety.org/node/602.