

< 논문 >

게이트밸브의 성능평가를 위한 실험적 연구

조택동* · 양상민†

(2007년 6월 20일 접수, 2007년 8월 10일 심사완료)

Experimental Study for Performance Evaluation of Gate Valve

Tack-Dong Cho and Sang-Min Yang

Key Words: Gate Valve(게이트밸브), Performance Evaluation(성능 평가), Differential Pressure(차압), Air-Operated Valve(공기구동 밸브), Required Thrust(요구 힘)

Abstract

It is necessary to evaluate periodically the performance of the AOV(air-operated valve) which is used for controlling flow and pressure in nuclear power plant. The required thrust for actuating valve and available thrust of actuator are calculated with conditions of flow through a valve in this study and operating performance is analyzed through comparing two thrusts. In general, differential pressure is increased according to increase the flow rate and differential pressure affects the required thrust of valve. We found the fact that it is possible not to close the valve perfectly because required thrust becomes bigger than available thrust of actuator.

기호설명

A_{Act} : 구동기 유효면적(cm^2)
 F_O : 구동기 열림시 출력 힘(N)
 F_C : 구동기 닫힘시 출력 힘(N)
 F_{AO} : 구동기 열림시 출력 힘(N)
 F_{AC} : 구동기 닫힘시 출력 힘(N)
 F_{DP} : 차압에 의한 힘(N)
 F_P : 패킹마찰력에 의한 힘(N)
 F_S : 스프링에 의한 힘(N)
 F_{SL} : 밀봉력(N)
 F_{SP} : 스프링 프리로드(N)
 F_{SR} : 스템 역하중에 의한 힘(N)

F_{UW} : 언웨이 힘(N)
 P_A : 구동기 공기압력(kg_f)
 P_U : 언웨이 공기압력(kg_f)
 P_F : 마찰력 공기압력(kg_f)
 P_D : 밀봉력 공기압력(kg_f)
 k : 스프링 상수
 x : 스프링 변위(mm)
 OD_{SEAT} : 시트의 외경
 ID_{SEAT} : 시트의 내경
 S_{SEAT} : Required seating stress
 μ_s : 디스크-시트 마찰계수
 θ : 디스크 웨지 각
 B, C : 밀봉력 계산을 위한 상수

† 책임저자, 회원, (주)한빛파워서비스 AOV팀
 E-mail : s_smyang@cnu.ac.kr
 TEL : (042)821-7625 FAX : (042)825-7625
 * 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

1. 서론

공기구동형 제어밸브는 유체의 유량 및 압력을 제어하는 배관요소로 밸브를 구성하는 각 요소에

서 성능을 저하시킬 수 있는 요인을 포함하고 있다. 따라서 원자력 발전소 및 대형 플랜트의 안전성을 확보하기 위해서 밸브의 고장 및 성능 저하를 예방하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있고 최근 원자력 발전소에서는 주기점검 기간동안 밸브의 성능평가를 수행하기 위한 절차서를 개발 중에 있다.^(1,2) 밸브의 운전성능은 밸브의 구동 중 발생하는 요구힘과 구동기가 허용할 수 있는 최대 출력힘을 이용하여 평가한다.^(3,4)

밸브의 요구힘은 밸브의 작동에 영향을 미치는 부하 저항력으로 밸브의 전단과 후단에 의한 유체차압에 의한 힘, 밸브의 마찰력 그리고 밀봉력 등이 있고 구동기의 출력힘은 구동기가 밸브를 작동시키기 위해 제공하는 힘으로 구동기의 공기압력에 의한 힘과 구동기에 설치된 스프링의 힘에 의존한다.^(5,6)

본 연구에서는 밸브의 전단과 후단의 압력차에 따라 게이트 밸브의 운전 중 발생하는 요구힘과 구동기의 출력힘을 계산하고 두 힘의 비교를 통해 밸브의 운전성능을 평가하였다.

2. 시험밸브 및 장치

게이트 밸브는 밸브 디스크의 모양에 따라 여러 가지 형태로 분류될 수 있으나 디스크의 형태에 상관없이 밸브의 요구힘은 동일한 계산식에 의하여 계산할 수 있다. 본 연구에 사용된 시험밸브는 Valmak사의 3인치 게이트 밸브이고 구동기는 스프링이 있는 단방향 실린더 구동기이다. Fig. 1은 게이트 밸브의 형상과 열림과 닫힘시의 밸브에 작용하는 힘의 개략도를 보여주고 있다.

여기에서 F_O 와 F_C 는 밸브의 열림과 닫힘시 요구힘, F_P 는 마찰력, F_{DPC} 와 F_{DPO} 는 유체차압에 의한 힘, F_{UW} 는 엔웨지 힘이다. 공기구동형 게이트 밸브의 동작은 밸브에 장착된 I/P(전류압력 변환기)로 제어입력신호(4mA ~ 20mA)를 전송하면 입력된 제어신호에 비례한 공기압력을 밸브의 구동기로 공급한다. 구동기에 유입된 공기압력에 비례하여 밸브의 스템이 이동함으로써 밸브의 개도를 제어할 수 있다. 밸브의

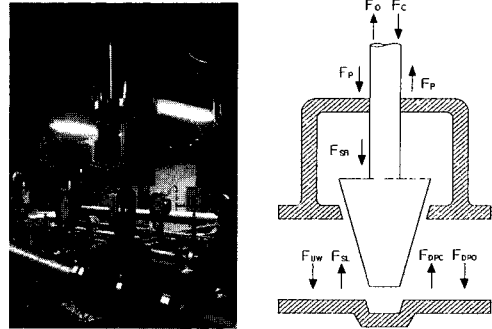


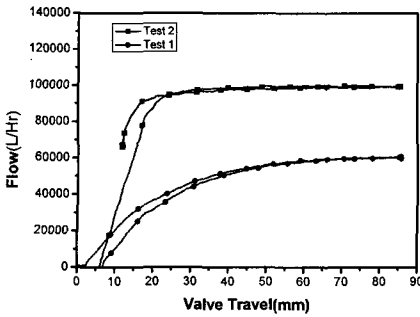
Fig. 1 A diagram of the force acting on the valve stem

Table 1 Fluid pressure on the valve position

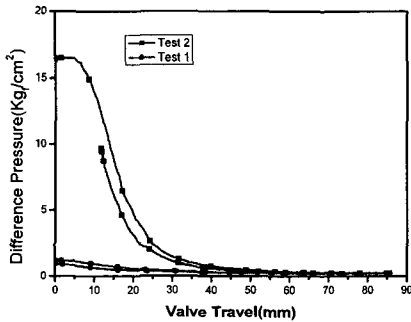
Test No.	Inlet pressure on full open	Differential pressure on full close
Test 1	0.35 Kg _f	0.45 Kg _f
Test 2	1.27 Kg _f	16.4 Kg _f

개도는 요크에 장착된 변위센서를 이용하여 측정하고 구동기에 유입되는 공기압력은 공급부와 구동기에 연결된 공기튜브에 장착된 압력센서로 측정한다. 밸브의 차압은 전단과 후단에 설치된 유체압력센서로 측정하며 측정된 센서신호들은 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 전송되고 밸브의 개도와 구동기의 공기압력과의 상관관계를 분석하여 밸브의 운전성능을 평가할 수 있다.

Fig. 2는 게이트 밸브의 개도 변화에 따른 밸브의 전단과 후단의 차압과 유량을 보여주고 있다. 게이트밸브를 통과하는 유량이 없거나 적은 경우(Test 1), 밸브는 완전한 열림과 닫힘을 수행하였으나 유량이 큰 경우(Test 2), 밸브가 완전히 닫히지 않음을 알 수 있다. 이것은 밸브의 전단과 후단의 차압이 증가하여 구동기의 출력힘보다 요구힘이 커짐으로써 밸브가 완전한 동작을 할 수 없음을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 게이트 밸브의 운전조건에 따른 요구힘과 구동기의 출력힘을 계산하여 밸브의 운전성능을 평가하였다. 밸브의 동적시험은 밸브의 차압의 크기밸브의 행정에 따른 밸브의 입구측 압력과 차압은 Table 1과 같다.



(a) Comparison of flow rate with stroke position



(b) Comparison of differential pressure with stroke position

Fig. 2 Flow rate and differential pressure of gate valve

3. 밸브의 요구힘과 구동기의 출력힘

밸브의 요구힘은 밸브의 작동 중 밸브 스템에 발생하는 축방향 힘으로 밸브의 열림시와 닫힘시 요구힘에 영향을 미치는 요인이 다르다. 게이트 밸브에 대한 요구힘은 패킹마찰력, 스템 역하중에 의한 힘, 차압에 의한 힘, 언웨이지 힘 그리고 밀봉력이 있다. 본 연구에서는 밸브 디스크와 시트 사이에 서로 다른 열수축에 의해 발생하는 열고착(thermal binding)과 압력잠김(pressure locking)에 의한 영향은 고려하지 않았다.

게이트 밸브의 개폐에 필요한 열림시의 요구힘과 닫힘시의 요구힘은 식 (1)과 식 (2)와 같다. 여기에서, 언웨이지 힘 F_{UW} 은 초기 열림시에만 적용하며 밀봉력 F_{SL} 은 밸브의 누설을 방지하지 위

한 구동기의 여유힘으로 완전 닫힘시에만 적용한다.

$$F_O = F_P - F_{SR} + F_{DP} + F_{UW} \quad (1)$$

$$F_C = F_P + F_{SR} + F_{DP} + F_{SL} \quad (2)$$

여기에서, F_P 는 패킹마찰력으로 정적시험에 의해 구하였다.

$$F_P = P_F / 2 \times A_{Act} \quad (3)$$

F_{SR} 은 스템을 밀어내려는 힘으로 밸브 시트 내부에서의 압력에 의해 발생하며, 시트내부의 압력대신 밸브 입구측압력과 스템 단면적의 곱으로 나타낸다.

$$F_{SR} = \frac{\pi}{4} (d_S)^2 P_{up} \quad (4)$$

d_S 는 밸브 스템의 직경이고 P_{up} 은 밸브의 입구측 압력이다. 밸브 디스크의 양단에 차압이 존재하는 경우 차압에 의해 발생하는 스템의 힘 F_{DP} 은 밸브 요구힘에 가장 지배적인 요소로 밸브의 마찰계수와 디스크의 형태에 따라 다르다.

$$F_{DP} = \frac{\pi}{4} (VF)(d_{MS})^2 DP \quad (5)$$

여기에서, VF 는 밸브 팩터로 밸브제작사에서 제공하거나 밸브 시험결과로부터 얻은 값을 이용하여 보수적인 값인 0.5를 적용하였다.

언웨이지 힘 F_{UW} 은 밸브의 디스크가 시트에 잠기어 디스크가 시트로부터 분리될 때 발생하는 힘으로 밸브의 초기 열림시에만 고려하며 이론적으로 식 (6)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F_{UW} = (F_{CT})(B) + (F_P)(1 - B) + (DP) \left(\frac{\pi}{4} \right) (d_{MS}^2 \times C - d_S^2) \quad (6)$$

F_{CT} : Maximum allowable closure thrust

F_P : Stem thrust due to packing friction

d_{MS} : Mean seat diameter

d_S : Stem diameter

B, C : Constant used to calculate unwedging load

그러나 일반적으로 언웨이지 힘을 계산하기 위한 밸브 설계값을 제작사에서 취득하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 정적시험의 분석결과를 적용한 식 (7)을 이용하여 언웨이지 힘을 계산하였고 식 (8)을 이용하여 밀봉력을 계산하였다. 언웨이지 힘은 초기 열림시에만 적용하며 밀봉력은 밸브의 누설을 방지하지 위한 구동기의 여유힘으로 완전 닫힘시에만 적용한다.

$$F_{UW} = P_U \times A_{Act} \quad (7)$$

$$F_{SL} = P_D \times A_{Act} \quad (8)$$

게이트 밸브의 구동기 출력힘은 구동기에 유입되는 공기압력에 의한 힘과 구동기의 스프링 힘을 계산하여 구한다. 구동기의 출력힘은 식 (9)와 식 (10)과 같이 밸브의 열림시와 닫힘시 구동기의 출력힘은 서로 다른 작동원을 가지고 있다. 본 연구에서 이용된 시험밸브는 밸브의 열림시는 구동기에 유입되는 공기압력에 의한 힘으로 작동되며 밸브의 닫힘시는 구동기에 장착된 스프링의 힘에 의해 작동된다.

$$F_{AO} = F_{Air} - F_S - F_{SP} \quad (9)$$

$$F_{AC} = F_S + F_{SP} \quad (10)$$

여기에서, F_{Air} 는 구동기의 공기압력에 의한 힘, F_S 는 스프링의 변위에 의한 힘 그리고 F_{SP} 는 스프링 프리로드이다. 스프링계수와 스프링 프리로드는 밸브에 유체의 힘이 작용하지 않는 무부하 조건에서 수행된 정적 진단시험에 의해 구할 수 있다. 또한 F_{Air} 는 구동기의 유효면적과 구동기의 정격공기압력의 곱으로 구한다.

Table 2 Specification of valve and actuator

Valve	Type Size Stem dia. Disk dia.	Gate 75 mm 20 mm 77.6 mm
Actuator	Effective area Acting type Air pressure Travel	314.2 cm ² reverse 3.5 Kg/cm ² 84 mm

Table 2는 본 연구에서 이용된 시험밸브와 구동기의 설계값을 보여주고 있다. Fig. 3은 시험밸브인 3인치 게이트 밸브의 정적시험 데이터로 밸브개도에 대한 구동기의 공기압력을 나타낸 것이다. 게이트밸브에 대한 정적 시험을 수행하여 스프링 프리로드와 스프링 계수, 밀봉력, 언웨이지 힘 그리고 마찰력을 구하였다. Fig. 3의 정적시험을 통해 분석한 결과 스프링 프리로드는 2099.3 N, 스프링상수는 40.9 N/mm, 밀봉력은 1541 N, 마찰력은 415.2 N 그리고 언웨이지 힘은 1516 N 이다. 언웨이징 힘은 밸브가 열리는 위치에서 구동기의 최대 힘으로부터 스프링 프리로드의 차이를 이용하여 구한다.

본 연구에 이용된 게이트밸브의 구동기는 reverse 작동유형으로 열림시는 공기압력의 힘에 의해 작동되고 닫힘시는 스프링의 힘에 의해 작동된다. 따라서 열림시에 구동기의 출력힘은 공기압력과 구동기의 유효면적의 곱으로 계산된다. 닫힘시는 스프링의 프리로드와 스프링의 행정에 의한 힘을 합하여 계산한다. 이때 각 행정에서의 구동기 출력힘은 구동원의 최대힘을 고려한다.

Table 3과 Table 4는 각 시험조건에서 밸브의 요구힘과 구동기의 출력힘을 밸브의 행정에 따라 계산된 결과이다. 제시된 결과로부터 시험조건 1에서는 밸브의 열림시와 닫힘시 구동기의 출력힘이 밸브의 작동에 필요한 요구힘보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 밸브가 정상적으로 작동할 수 있는 충분한 운전여유가 있음을 알 수 있다. 그러나 시험조건 2에서는 밸브의 열림시는 구동기의 출력힘이 밸브의 요구힘보다 커서 밸브

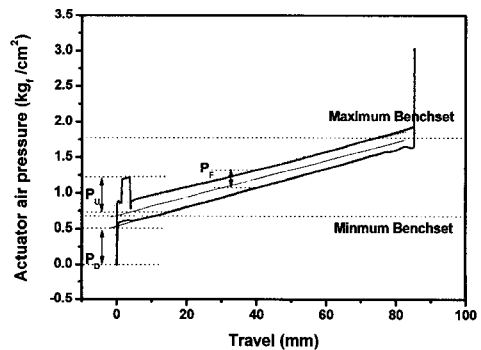


Fig. 3 Static test analysis of gate valve

Table 3 Evaluation results of gate valve(Test 1)

Force	Open(N)		Close(N)	
	0%	100%	0%	100%
F_P	415.2	415.2	415.2	415.2
F_{SR}	-39.1	-10.8	10.8	39.1
F_{DP}	100.7	0	0	100.7
F_{UW}	1516	0	0	0
F_{SL}	0	0	0	1541
Required	2116.7	404.4	426	2096
F_{Air}	10786	10786	0	0
F_{Spr}	-2099	-5534	5534	2099
Actuator	8687	5252	5534	2099

Table 4 Evaluation results of gate valve(Test 2)

Force	Open(N)		Close(N)	
	0%	100%	0%	100%
F_P	415.2	415.2	415.2	415.2
F_{SR}	-505.2	-13.9	13.9	505.2
F_{DP}	3668.5	0	0	3668.5
F_{UW}	1516	0	0	0
F_{SL}	0	0	0	1541
Required	5094.5	401.3	429.1	6129.9
F_{Air}	10786	10786	0	0
F_{Spr}	-2099	-5534	5534	2099
Actuator	8687	5252	5534	2099

4. 결론

가 정상적으로 열리지만 닫힘시는 구동기의 출력힘이 밸브의 요구힘보다 작다. 따라서 밸브의 닫힘 동작에서 밸브의 차압이 증가하여 밸브의 요구힘이 출력힘보다 커지는 개도에서 밸브가 작동하지 않는다. 이것은 Fig. 2의 시험조건 2에서 밸브가 완전히 닫히지 않는 결과를 반영하고 있다.

원자력 발전소에 설치된 공기구동형 제어밸브는 유체의 유량 및 압력을 제어하는 배관요소로 시스템의 안전성을 확보하기 위해서 주기적으로

성능평가를 수행해야 한다. 본 연구에서는 밸브의 입구측과 출구측의 차압의 증가에 따른 게이트 밸브의 운전 중 발생하는 요구힘과 구동기의 출력힘을 계산하고 두 힘의 비교를 통해 밸브의 운전성능을 분석하였다. 밸브의 입구측과 출구측의 차압이 증가함에 따라 구동기의 출력힘 보다 요구힘이 커짐으로써 밸브 누설이 발생함을 알 수 있었다. 본 연구결과를 활용하여 게이트 밸브의 운전성능 평가를 수행함으로써 구동기 및 밸브의 설계에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Chuck Linden and Bill Fitzgerald, 2004, "Upgrading to Digital Positioners on Feedwater Regulating Valves," *NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing*, Vol. 5, pp. 2B:35-46.
- (2) Heiko Ebert and Georg Zanner, 2004, "Engineering Based Valve Testing and Evaluation," *NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing*, Vol. 5, pp. 1B:41-49.
- (3) Kim, I. H., Kim, B. N., Lee, D. H., Han, J. H., Kim, Y. S. and Kim, D. W., 1999, "A Safety Evaluation Method of Motor Operated Valve," *Proceedings of the KSME 1999 Spring Annual Meeting*, pp. 55-60.
- (4) Jeong, H. K., Han, J. H., Park, S. G. and Yang, S. O., "Calculation and Test Method of the Required Stem Thrust of Safety-Related Motor Operated Valves," *Proceedings of the KSME 1999 Spring Annual Meeting*, pp. 512-517.
- (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.
- (6) 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.