

# 공기구동밸브의 열노화에 따른 성능평가

## Performance Analysis of Air Operated Valve by Thermal Aging

이선기\*†  
Sun-Ki Lee\*†

(Received 02 September 2015, Revision received 05 October 2015, Accepted 05 October 2015)

**Abstract** : Nuclear power plants has a number of valves, which are operating at a high temperature - high pressure and radiation environment conditions. Nevertheless, it is important to maintain the reliability of the valves to ensure safe operation of the nuclear power plant. However, the aging of the valves by increasing of years of plant operation and the system transients due to the sudden load change are working the failures of the reliability of the valve. In this paper, we evaluate experimentally the performance change according to the thermal aging of the valve. Results show that the valve stem and the actuator leakages were enlarged by the thermal aging.

**Key Words** : Thermal Aging, Air Operated Valve, Valve Performance, Plant Design Life Time, Nuclear Power Plant

### 1. 서 론

원자력발전소에는 수많은 밸브/펌프 등의 능동 기기가 고온-고압 및 방사능 환경 하에서 운전되고 있으며 각 기기는 고 신뢰성이 요구되고 있다. 그러나 발전소의 경년 노후화로 인한 기기의 열화, 급격한 부하변동 운전으로 인한 계통의 과도 현상 등은 밸브/펌프의 신뢰성 확보의 장애요인으로 작용하고 있다.

밸브/펌프 등의 기계기기의 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계 및 제작단계에서의 품질확인 및 최악의 운전조건에서 기기 고유의 의도된 성능이 보장되어야 한다. 또한 규정된 환경조건에서 주어진 신뢰수준을 만족하며 설계된 기능을 수명기간

동안 고장 없이 수행하여야만 한다.

현재 밸브의 성능평가에 대해서는 유량에 대한 실험적/해석적인 방법<sup>1)</sup>, 구동기 내구성 평가<sup>2)</sup> 및 밸브 누설평가<sup>3)</sup> 등의 연구가 진행되어 밸브 품질 향상에 많은 기여를 하고 있다.

본 논문에서는 원자력발전소 밸브의 품질 및 수명관리, 최적 예방정비 등 종합적인 품질관리 방안 수립을 목적으로 발전소에서 가장 많이 사용하고 있는 2인치 공기구동밸브(AOV, Air Operated Valve)를 대상으로 성능검증 시험을 통한 성능확인을 수행하고 더불어 발전소의 운전 환경으로 밸브를 가속 열노화시키면서 밸브의 누설성능 및 행정시간 변화를 실험적으로 평가하였다.

\* 이선기 : 한수원(주) 중앙연구원 기계재료연구소  
E-mail : sunkilee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5513

\*† Sun-Ki Lee : Machinery & Materials Laboratory, KHNP  
Central Research Institute  
E-mail : sunkilee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5513

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험 시편

Table 1 및 Fig. 1에는 시험시편인 밸브의 사양 및 사진을 나타낸다. 밸브는 글로브 타입의 2인치 공기구동 밸브로써 설계유량, 압력은 각각 2050psi, 200gpm이며 허용 행정시간은 10초 이내, 허용 시트 누설율은 1.0 cc/min 이내 이다.

본 시험시편인 글로브 타입의 공기구동밸브는 원자력발전소에서 가장 많이 사용되고 있는 형식의 밸브임을 고려하여 선정하였다.

Table 1 Specifications of test valve

Title	2inch Air Operated Valve
Type	Globe
Design pressure	2050 psig (144 kgf/cm <sup>2</sup> )
Design temp	350 °F (177 °C)
Design flow rate	200 gpm (0.76 m <sup>3</sup> /min)
Operation Pressure	1000 psig
Open-Close Time	< 10.0 sec
Seismic	5 g
Acceptance Leakage	< 1.0 cc/min
Material	Body/Trim : ASTM A182
Air Supply Pressure	5 bar
Fluid	H <sub>2</sub> O
Valve Weight	140 lb



Fig. 1 Test air operated valve

### 2.2 밸브 성능검증시험

원자력발전소의 안전성과 관련된 밸브는 ASME<sup>4)</sup> 또는 KEPIC<sup>5)</sup>의 기술기준을 만족하는 성능검증 시험을 수행하여 성능에 이상이 없음을 확인해야 한다.

Table 2에는 밸브의 성능검증 시험항목을 나타낸다. 표에 나타난 바와 같이 밸브의 성능검증에는 총 15종류의 시험이 있으며 밸브의 종류에 따라 적용되는 검증시험 항목이 상이하다.

Table 2 Functional test item of valves

No	Test item	AOV*	CV**	PRV***
1	Pretest Inspection	O	O	O
2	Performance and Leakage	-	-	O
3	Fundamental Frequency Determination	O	△	O
4	Environmental & Aging Simulation	△	△	-
5	Intermediate Inspection	O	O	O
6	Cycle Test	O	-	-
7	End Loading Test	O	O	-
8	Seismic Test	O	△	O
9	Discharge Pipe & Reaction	-	-	O
10	Combined Seismic and Discharge	-	-	O
11	External Environment Test	-	-	O
12	Thermal Effect Test	-	-	O
13	Flow Interruption	O	O	-
14	Performance and Leakage	-	-	O
15	Post Test Inspection	O	O	O

\* Air Operated Valve

\*\* Check Valve

\*\*\* Pressure Relief Valve

Table 2에 따르면 공기구동밸브는 시험 전 검사부터 시험 후 검사 까지 총 8개 항목의 시험을 수행해야 한다. 대표적인 시험의 목적 및 내역은 다음과 같다.

#### (1) 시험 전 검사(Pretest Inspection)

시험밸브 조립품의 적절성 및 기능 확인을 위한 기준 설정이 목적이다. 구동기의 최소 원동력

으로 밸브 시트, 스템 누설시험 및 행정시간을 측정한다.

(2) 기본진동수 결정시험(Fundamental Frequency Determination)

고유진동수를 측정하기 위한 시험으로 고유진동수가 33Hz 이상(강성체) 여부를 확인한다.

(3) 상온 및 고온 주기시험(Cycle Test)

밸브의 개폐능력을 입증하는 시험으로써 최소 원동력 및 최대원동력에서 개폐시간을 측정한다.

(4) 단부하중시험(End Loading Test)

밸브가 설치된 배관이 어떠한 사건으로 파단 되었을 경우의 작동성 입증이 목적이다. 밸브에 단부하중이 가해진 상태에서 누설시험 및 행정시간을 측정한다.

(5) 내진시험(Seismic Test)

지진이 발생한 상황에서도 밸브가 이상 없이 작동되는지를 확인하기 위한 것으로 밸브에 지진 발생시의 하중을 가하면서 개폐능력을 확인한다.

(6) 유동차단과 기능능력 시험(Flow Interruption Test)

밸브 운전환경에서의 개폐능력을 확인하는 것으로써 밸브의 주어진 유량, 온도, 압력 하에서 누설여부 및 행정시간 등을 측정한다.

2.3 가속 열노화 시험

발전소에 설치되는 밸브는 설치 환경 따른 온도에 노출되며 이로 인해 밸브 구성요소의 물성 변화를 야기한다. 이러한 열노화를 빠른 시간에 모사하기 위하여 다양한 가속노화 시험방법이 제안되어 사용되고 있다<sup>6)</sup>. 본 논문에서는 아레니우스 상관식(식1)을 통해 계산된 가속열화 조건을 이용하여 발전소의 온도조건에 따른 열노화를 5년 단위로 모사하였다.

$$t_2 = t_1 \times \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \quad (1)$$

여기에서  $t_1$ : 실제 노화시간,  $t_2$ : 가속 열노화 시간,  $T_1$ :환경온도,  $T_2$ : 가속 열노화 온도,  $E_a$ : 활성화 에너지,  $k$ : 볼츠만 상수이다.

열노화된 밸브에 대하여 구동기 누설시험, 행정시간 측정시험, 밸브 스템 누설시험 등을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 성능검증 시험

Table 1 사양의 밸브 3대에 대하여 성능시험의 대표적인 결과를 정리하여 나타내면 다음의 Fig. 2~Fig. 4와 같다.

Fig. 2는 밸브의 열린 상태에서 닫히는 시간을 측정한 결과를 나타낸다. 3대 밸브 모두 열린 상태에서 닫히기까지의 시간은 8초에서 9초 사이를 나타내고 있다.

Fig. 3은 밸브의 닫힌 상태에서 열리기까지의 시간을 측정한 결과로써 5초에서 7초 사이를 나타내고 있다.

따라서 밸브의 행정시간은 설계 허용기준인 10초 이내를 만족하고 있음을 알 수 있다.

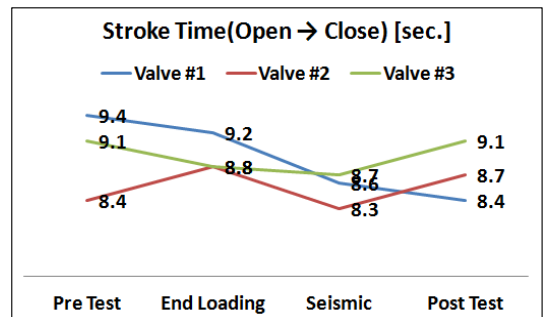


Fig. 2 Results of the valve stroke time test (1)

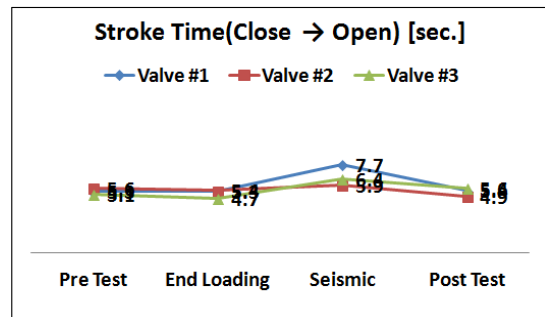


Fig. 3 Results of the valve stroke time test (2)

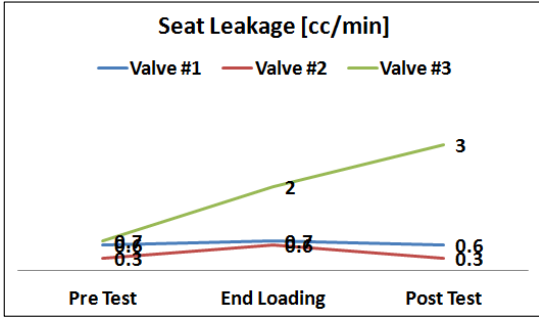


Fig. 4 Results of the valve seat leakage test

한편 시트 누설시험(Fig 4)에서는 밸브 No.3의 단부하중시험 및 시험 후 검사에서 허용 누설량인 1.0cc/min을 초과하고 있다. 이것은 단부하중시험시 일시적인 과도한 하중(시험 설정치를 초과한 하중)이 잘못 가해져 밸브 구성품에 손상을 입힌 결과로 판명되어 향후의 노화시험에서는 No.1 및 No.2 밸브를 사용하기로 하였다.

참고로 Fig. 5에는 단부하중시험 사진을 나타낸다.

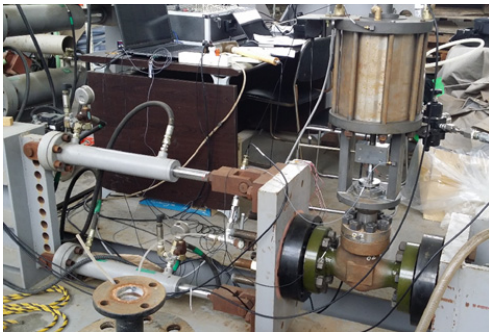


Fig. 5 Valve end loading test

### 3.3 가속 열노화 시험

밸브의 열노화는 원자력발전소의 밸브 운전환경 온도 50°C를 가정하여 5년 단위로 최대 90년간 노출되는 경우에 대해서 수행하였다.

본 연구에서는 밸브 구성 재질 중 가장 작은 활성화 에너지 값을 나타내는 Vition(1.09 eV)을 기준으로 식(1)을 적용하면 50°C에서 5년간 노출은 136°C에서 11시간 노출되는 것에 상응한다.

Fig. 6에 시험밸브의 열노화 시험 챔버를 나타내

며 Table 3에는 가속 열노화 시험조건을 나타낸다.

시험은 Table 1에 나타난 시험시편에 대하여 열노화에 따른 구동기 누설시험, 행정시간 측정시험 및 스템(Stem) 누설시험 등을 수행하였다.



Fig. 6 Thermal aging chamber and test valve

Table 3 Thermal Aging Test Condition

Test No.	Aging Temp [°C]	Test Time [min]	Aging Time [year]	Cumulative Aging Time [year]
1	135.5	667.4	4.77	4.77
2	136.2	700.3	5.21	9.98
3	134.5	686.5	4.49	14.47
4	136.2	741.4	5.48	19.95
5	134.3	486.8	4.39	24.34
6	135.6	741.4	5.26	29.60
7	135.3	800.8	6.23	35.83
8	135.7	615.7	4.42	40.24
9	134.5	677.8	4.50	44.74
10	135.4	761.8	4.33	50.07
11	135.1	1485.7	10.08	60.15
12	135.3	1452.5	9.98	70.13

Fig. 7에는 밸브 구동기 누설시험 결과를 나타낸다. Fig.의 가로축은 밸브의 노화된 누적 연수(가동 연수), 세로축은 누설압력(bar)으로 밸브의 가동 연수 증가에 따라 구동기의 누설압력(누설량)이 증가한다.

구동기의 누설압력 증가는 2단계로 증가하는데 먼저 가동 년수 20년까지는 거의 직선적으로 증가하며 이후 20~40년 사이에는 기울기가 완만하게 증가한다. 한편 밸브 가동 년수 약 45년 부근에서 누설압력 증가가 급격하게 일어나고 있으며 이후에는 큰 변화가 없이 완만하다.

그러나 누설압력의 양은 최대 약 0.25 bar의 미미한 양으로 구동기 허용기준(설계압력 5 bar의 10% 이내)인 0.5 bar 이하를 나타냄으로써 열 노화의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

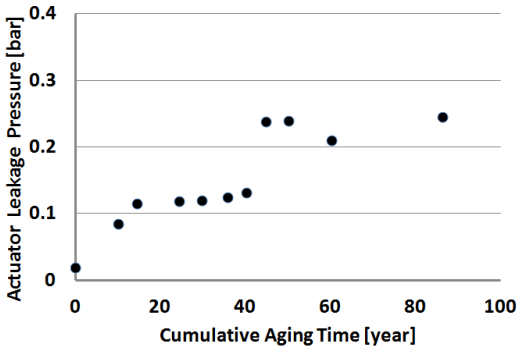


Fig. 7 Results of the actuator leakage test

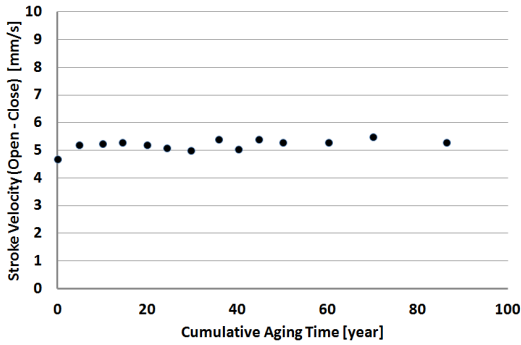


Fig. 8 Results of the valve stroke time test(O→C)

Fig. 8, Fig. 9에는 밸브의 행정시간 측정결과를 나타낸다. Fig.의 가로축은 밸브의 노화된 누적 년수(가동 년수), 세로축은 밸브의 행정거리 변화 속도(mm/s), 즉 행정시간을 나타낸다. Fig. 8, Fig. 9로부터 밸브가 Open→Close시 Close→Open시 보다 빠르게 작동하고 있음을 알 수 있다. 이것은

시험에 사용한 밸브가 Fail to Close로 설계되어 발전소 이상발생시 유로를 차단하도록 설계된 밸브이기 때문이다.

한편 밸브의 가동 년수 증가에 따른 행정시간의 뚜렷한 변화는 나타나지 않고 있다.

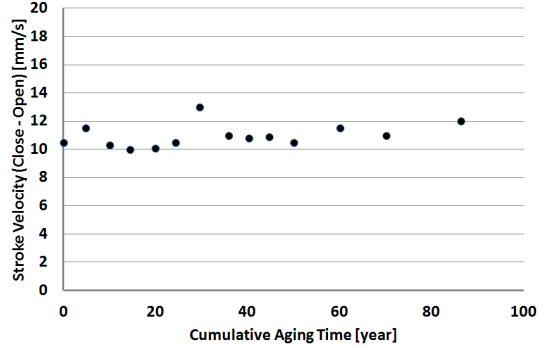


Fig. 9 Results of the valve stroke time test(C→O)

Fig. 10에는 밸브 시트 누설시험 결과를 나타낸다. Fig.의 가로축은 밸브의 노화된 누적 년수(가동 년수), 세로축은 누설량(ml/min)으로 밸브의 가동 년수 증가에 따라 시트의 누설량은 증가한다. 특히 가동 년수 30년 이후에 누설량이 급격히 증가하여 밸브의 허용 누설량 1cc/min을 초과하고 있다.

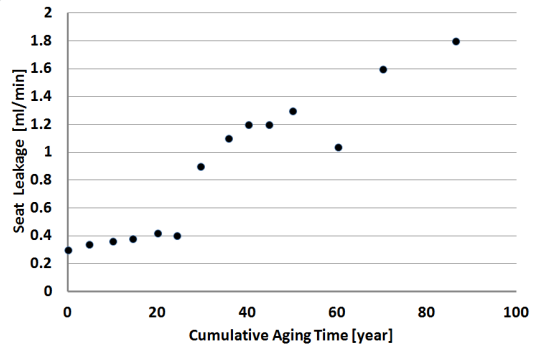


Fig. 10 Results of the seat leakage test

Fig. 11에는 밸브 스템(Stem) 누설시험 결과를 나타낸다. Fig.의 가로축은 밸브의 노화된 누적 년수(가동 년수), 세로축은 누설압력(bar)으로 밸브의 가동 년수 증가에 따라 스템(Stem)의 누설압력

(누설량)이 증가함을 알 수 있다.

밸브 스템의 누설압력 증가는 가동 년수 20년 근방까지 직선적으로 증가하며 이 후에는 완만한 증가를 나타내고 있다. 즉 밸브의 스템 누설을 좌우하는 패키징은 20년 근방까지 급격히 열화되어 수명은 최대 20년 근방으로 판단된다.

원자력발전소의 안전과 관련된 밸브에서는 스템(Stem) 누설을 엄격히 제한하고 있기 때문에 가동 년수 증가에 따른 밸브의 스템 정비에 세심한 주의가 필요하다.

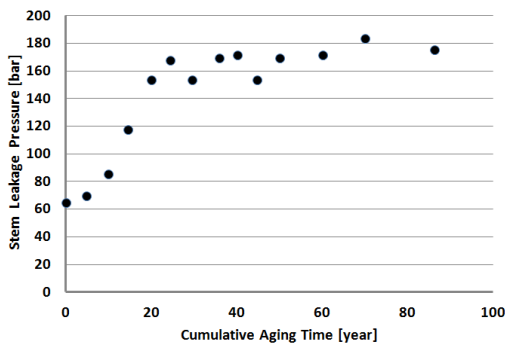


Fig. 11 Results of the stem leakage test

### 5. 결 론

원자력발전소에서 사용되는 밸브의 품질 및 수명관리, 최적 예방정비 등 종합적인 품질관리 방안을 수립을 목적으로 KEPIC 또는 ASME의 성능 검증 시험기준에 따라 초기 기초성능시험을 수행하여 성능을 확인한 후, 밸브를 가속 열적 노화시켜 나아가면서 성능변화 추이를 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 밸브의 열적 노화는 밸브 시트 및 스템(Stem) 누설에 많은 영향을 미치고 있는 반면 구동기 누설 및 행정시간에는 큰 영향을 미치지 않는다.

(2) 특히, 밸브 시트 누설은 노화 년수(가동 년수) 30년에서 허용 누설량을 초과하였다.

(3) 스템 누설을 좌우하는 패키징은 노화 년수(가동 년수) 20년 근방까지 급격히 열화되어 수명은 최대 20년 근방으로 판단된다.

(4) 원자력발전소의 밸브에서는 스템(Stem) 누설을 엄격히 제한하고 있기 때문에 가동 년수 증가에 따른 밸브의 스템 정비에 세심한 주의가 필요하다.

### References

1. J. J. Lee, et al, 2014, Technical Trend of Performance Analysis of Pilot Valve for Ultralow Temperature, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 5-10.
2. S. N. Yun, et al, 2014, Endurance of Pneumatic Valve with a Multi-bender PZT Actuator, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 31-36.
3. S. G. Lee, et al, 2011, A Study on the Fluid Leakage Evaluation for Power Plant Valve Using Acoustic Imaging Technique, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 18-23.
4. ASME QME-1, 1997, "Qualification of Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plant".
5. KEPIC - MF, 2007, "Qualification of Mechanical Equipment in Nuclear Power Plant".
6. IEEE 382, 2006 Edition, "Standard for Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations".