

고무시트 버터플라이밸브의 가속수명시험을 통한 수명특성 연구

이기천* · 이용범*†

A Study of Life Characteristics of Butterfly Valve Seated Rubber by Accelerated Life Test

Gi-Chun Lee*, Young-Bum Lee*†

Key Words : Butterfly valve(버터플라이밸브), Accelerated life test(가속수명시험), Rated pressure(정격압력), Leakage(누수), Valve seat(밸브시트), Disc(디스크)

ABSTRACT

Butterfly valve seated rubber has been widely used in water works and industrial fields because it has advantages which are small installation area and low weight. The size and material of butterfly valve have been selected by service environments and purposes. But there are out of the ordinary to find papers for the life characteristics of the butterfly valve.

So, this study carries out the accelerated life test, which has an acceleration factor with pressure, using performance and life test equipment. Accelerated model is adopted with 3 stress level and the inverse power law model to estimate the life of the test samples. After the analysis of the test result, accelerated index has 7.0 and the acceleration factor has 208 which is applied with field condition with the pressure 6.3 bar.

1. 서 론

반복적으로 밸브는 아주 오래 전부터 유체의 흐름을 제어 하는데 사용되어 왔고, 유체에서 물리적 특성으로 표현되는 압력 및 속도 즉 유량을 조절한다. 밸브는 파이프계의 유체 흐름을 각각의 프로세스에서 요구하는 유체의 물리적 조건과 양에 맞도록 각 제어단계의 마지막 단계에서 유체의 흐름을 제어하는 가장 일반적이고 중요한 제어요소이다.⁽¹⁾

화력발전소, 석유화학제품 운반선 및 유조선 등에 사용되고 있는 중 소형밸브는 그 사용 용도에 따라 볼 밸브 및 게이트 밸브 등 다양한 밸브를 사용하고 있다. 그러나 대형 밸브는 설치 면적과 중량의 문제점 때문에 버터플라이 밸브가 많이 사용되고 있는 실정이다. 버터플라이 밸브는 원과 내부에 설치된 원형디스크를 회전시킴으로써, 비교적 낮은 압력에서 유체의 큰 흐름을 포함하는 개폐와 유량을 조절하는 목적으로 사용된다.⁽¹⁾ 버터플라이 밸브는 축에 대한 회전 원권의 회전으로 유량이 조절되기 때문에 구조가 간단하고, 다른 밸브에 비해 경량이므로 부가적인 지지대를 필요로 하지 않아

작은 크기를 가지는 장점이 있다.⁽²⁾

현재 산업용으로 사용하는 버터플라이밸브에 대한 국내의 표준으로는 ISO10631, ANSI/ASME B16.34, ANSI/AWWA C504, KS B 2333 등이 있다. 이러한 표준에서는 밸브 사용에 대한 압력등급을 규정하고 있으며, ISO 5208, IEC 60534-4, KS B 2304에서는 밸브의 검사방법과 압력시험에 대하여 규정하고 있다.⁽³⁾

산업분야에서 연구가 진행되고 있는 여러 인자들에 대한 개선을 적용하였을 경우 성능 및 수명시험이 필요하게 된다. 그렇지만 국내에서는 일정규모 이상의 기업체 외에는 간단한 성능시험을 진행하여 시장에 출시하는 상황이다. 또한 산업용으로 사용되는 버터플라이밸브는 현장에서 설치되어 내구 수명에 대한 고장자료나 분석이 어려운 실정이다. 이를 체계적으로 분석하고 연구하는 과정들이 인력과 비용의 문제로 인하여 정리되고 있지 못하다. 그러므로 본 연구에서는 버터플라이밸브의 압력을 가속인자로 하는 가속 수명시험을 수행하여 현장에서의 수명을 예측하고, 시험 중 발생하는 고장 현상이 재현되는 상태를 연구하고자 한다.

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 (Mechanical Systems Safety Research Division, Korea Institute Of Machinery & Materials)
† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : lyb662@kimm.re.kr

2. 실험장치 및 고장모드 분석

2.1. 실험장치

일반적으로 버터플라이밸브의 수명에 영향을 주는 인자는 압력, 물의 온도, 주변온도, 유체의 성질, 진동 등 외부환경이 될 수 있다.

Fig. 1에서는 시험장치 상부에 시험대상품인 버터플라이밸브를 5대를 설치하고, 하부에는 물을 이송시키고 압력을 가하는 유압동력발생장치(hydraulic power unit)를 설치하였다. 겨울철의 온도를 일정하게 유지하기 위해 물 탱크와 배관에 열선을 부착하여 일정 범위에서의 온도를 유지할 수 있도록 하였다. Fig. 2에서는 시험장치의 유압회로도를 나타내어 전체적인 시스템을 확인할 수 있도록 하였다. 시험대상품 하부에는 물탱크와 물을 송출할 수 있는 물펌프가 장착되어 있으며, 이를 시험대상품까지 압력을 공급할 수 있도록 하였다. 또한 물을 공급하는 배관에는 압력 게이지와 압력센서를 설치하여 육안으로 압력확인 뿐만 아니라 데이터를 저장할 수 있도록 제작하였다.



Fig. 1 Life & performance test equipment for butterfly valves

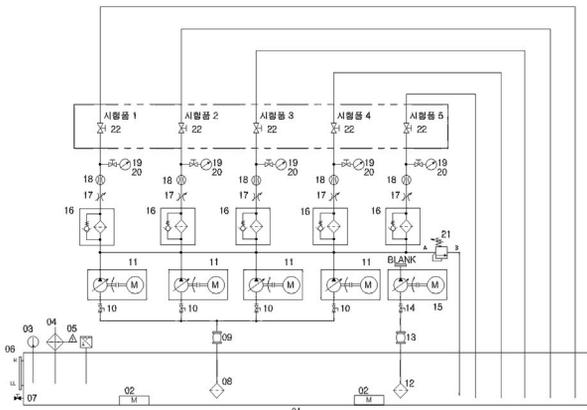


Fig. 2 Hydraulic circuit for butterfly valve test

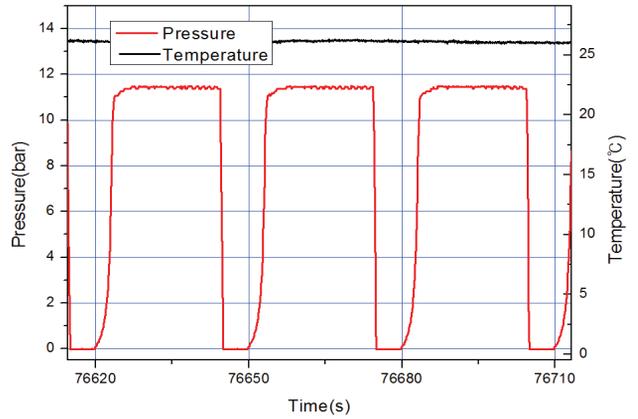


Fig. 3 Plot of test pressure wave at 11 bar

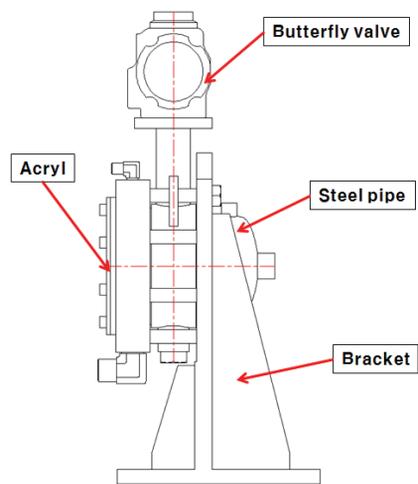


Fig. 4 Butterfly valve life test equipment



(a) Open condition during test



(b) Close condition during test

Fig. 5 Inspection the leakage during test

Fig. 3은 버터플라이밸브의 내부에 가해지는 압력을 나타낸 것으로, 시험 압력과 물의 온도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 압력은 반복적으로 승압과 감압을 반복하였으며, 온도는 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다. 밸브는 일반적으로 온도 영향도 많지만, 본 연구에서는 시험 유체의 온도는 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ 를 유지하며 시험을 수행하였다.

Fig. 4는 버터플라이밸브의 주고장 모드는 시트부에서의 누설이 가장 많은 것으로 확인되었다. 그렇지만 버터플라이밸브를 사이에 두고 배관을 연결 할 경우, 누설 여부를 확인하기 위해서는 배관을 분해하여 재설치를 해야하는 불편함과 시료가 설치된 부분을 변경하여 시험 조건의 변화 가능성의 어려움을 없애기 위해 누설 확인 창을 설치한 장치를 사용하였다. Fig. 5에서는 버터플라이밸브가 설치된 실물 사진으로 (a)의 경우는 밸브가 닫혀져 있는 상태를 육안으로 확인이 가능하며, (b)의 경우는 밸브시트가 열린진 상태를 나타내고 있다.

2.2. 현장사용조건

고무시트 버터플라이밸브는 아파트 단지, 댐, 배수펌프장, 수도배관 등 사용되는 곳이 다양하고 광범위하다. 그러므로 사용되는 외부환경이나 사용조건은 여러 조건들에서 사용된다. 유속의 흐름이나 압력의 범위등도 각각 사용처에 따라 다르



Fig. 6 Photos of the operating conditions for butterfly valves (a) drainage pump room (b) water pump room (c) filtration room (d) water pipe underground (e) reverse osmosis type of membrane device (f) micro filtration type of membrane device

게 설정하여 사용된다. Fig. 6과 같이 배관과 배관들 사이에 연결되는 조건은 내부환경이나 외부환경조건에 따라 밸브에 미치는 영향은 다르다.

2.3. 시험계획

2.3.1 시험대상품 사양

시험 대상품의 주요사양은 Table 1과 같으며, 밸브의 정격압력은 10 bar이고, 크기는 50mm이다. 일반적인 밸브의 사용조건은 현장조사를 통하여 확인한 결과 약 6 bar정도인 것으로 확인되었다. 밸브를 동작시키기 위해서는 수동형과 자동형으로 구분되며, 동작이 빈번하지 않은 경우는 수동형 밸브를 사용하지만, 설비등에서 자주 반복되는 동작을 해야 할 경우에는 주어진 토크등을 고려하여 유압식 또는 공압식 액추에이터를 사용한다. 본 연구에서는 공압식 액추에이터가 장착된 밸브를 사용하여 시험을 하였다.

Table. 1 Specification of butterfly valve

Name	Specification
Rated Pressure	10 bar
Inside Diameter	50 mm
Test Temp.	$25\pm 5^{\circ}\text{C}$
Operating Pressure	6 MPa
Operating Type	Pneumatic

2.3.2 가속시험 계획

고무시트 버터플라이밸브의 경우 고장에 영향을 주는 인자는 주로 압력과 온도인 것으로 현장 조사 결과 확인되었다. 그중에서도 압력은 밸브의 수명에 많은 영향을 주므로 가속시험 계획에서 압력을 가속인자로 선정하였다. 또한 Table. 2에서와 같이 압력을 3단계로 가속할 수 있도록 1st 단계에서는 13.5 bar, 2nd 단계에서는 11 bar, 3rd 단계에서는 9 bar의 압력을 인가하도록 하였다. 각 시험압력은 현장 작동 조건과 문헌을(6~8) 참조하였으며, 가속시험을 진행하기 전에 예비시험을 통하여 시험 압력을 선정하였다. 시험대상품의 수량은 각 단계에서 5 EA로 하였으며, 총 15 EA의 시료를 확보하고 시험하였다.

Table. 2 Acceleration level & Q'ty

Acceleration Factor	Acceleration Level		Q'ty
	1st	13.5 bar	
Pressure	2nd	11 bar	5 EA
	3rd	9 bar	5 EA

3. 시험 결과 및 분석

3.1. 고장모드

버터플라이밸브의 주요 구성품은 주로 몸체, 시트, 디스크 및 스템부로 구성되어 있다. 이러한 밸브의 구성품에서 누설은 주요 고장모드이다. 다른 부품의 고장보다도 더 현장에서 많이 발생하는 고장으로는 시트부에서 발생하는 누수현상을 들 수 있다.

현장조사에서 주로 발생하는 고장의 60% 이상이 시트부에서의 누설인 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 장기간의 사용을 필요로 하는 버터플라이밸브의 경우 단기적 성능에만 만족하는 것은 장기적인 안목에서 피해야 할 내용이다. 왜냐하면, 버터플라이밸브는 한번 현장에 설치될 경우 일반적으로 플랜트 설비의 경우 10년 이상을 사용하여야 하는데 단

기간에 확인이 가능한 성능시험만으로 제품을 출시할 경우 장기간 사용 시 고장이 발생하여 경제적 손실을 가져올 수 있기 때문이다. 그러므로 현장조건에서 발생할 수 있는 고장모드를 확인하고 고장모드를 재현할 수 있는 시험장비의 개발을 통해 종합성능 및 수명시험을 진행하는 것은 필수적이다. 따라서 현장에서 발생하는 고장모드의 조사 및 고장 메카니즘은 제품의 시장진출에 필히 조사되어야 하는 항목이다. Table 3은 고장모드 및 고장 메카니즘을 나타낸 것이다.

3.2. 수명 분포 및 가속 모형 선정

3.2.1 수명분포 및 가속모델 분석

일반적으로 기계류 부품의 수명분포는 와이블 분포를 적용하고 있으며, 와이블 분포의 확률밀도함수 $f(t)$, 분포함수 $F(t)$, 신뢰도 함수 $R(t)$, 그리고 고장률 함수 $h(t)$ 는 아래와 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \beta > 0, \eta > 0 \quad (1)$$

여기서, β 는 형상 모수 (shape parameter : 분포의 형상을 결정), η 는 척도 모수 (scale parameter : 시간의 척도를 결정)를 나타낸다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이, 분포에 대한 적합도 검정의 방법으로 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 적용하였으며, 이를 통해 AD(anderson-darling) 통계량을 얻을 수 있다. AD 통계치는 확률지에 도시된 점과 이들을 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정하는 값으로 후보 분포 중에서 더 적은 A-D 통계치를 가지는 분포에 잘 적합 된다는 것을 의미한다. 고무시트 버터플라이 밸브의 가속수명시험 데이터에 대해 분포 적합도 검정을 수행하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 3 Failure modes and failure mechanisms

No	Primary Components	Function	Failure Modes	Failure Mechanisms
1	Body	Steel member covered up the internal pressure	Crack & Fracture	Vibration & crack caused by fluid force
			Corrosion	Corrosion caused by water
			Permanent deformation & loose assembly part	Deformation & loose caused by vibration, impact and fluid force
2	Seat	That portion of a seat ring or valve body which a valve plug contacts for closure	Leakage	Wear of seat
			Leakage	Seat damage
3	Disc	The valve closure member in a butterfly valve which provides a variable restriction in a port	Crack & Fracture	Vibration & crack caused by fluid force
			Looseness between stem and disc	Vibration and impulse
4	Stem	A special case of top guided in which the valve plug is aligned by a guide acting on the valve plug stem	Crack & Fracture	Vibration, impulse, and fluid force
			get out of the control with switch over	breakaway
5	Actuator	Actuate the valve by pneumatic source	Leakage	Increasing the pressure
			Wear & not operating	Damage caused by vibration or impact

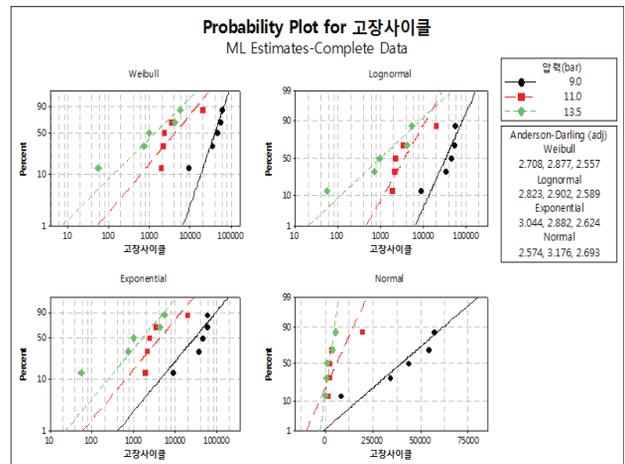


Fig. 7 Probability plot for failure cycle

와이블(Weibul)분포, 대수정규(Lognormal)분포, 지수(Exponential)분포, 정규(Normal)분포 분석 결과의 AD 통계치를 살펴보면, 기계류 부품에 널리 사용되는 와이블 분포와 나머지 분포들 간의 큰 차이는 존재하지 않으며, 비교적 와이블 분포의 AD 통계치가 낮은 값을 가진다. 따라서 고무시트 버터플라이 밸브의 수명분포는 와이블 분포가 적합하다고 볼 수 있다.

고무시트 버터플라이 밸브의 주요 고장모드를 가속화할 수 있는 가속 스트레스 인자로는 압력을 선정하였다. 이에 따라 가속모델은 역승 모델(Inverse power law model)로 선정하였으며, 수명과 스트레스 인자와의 관계식은 식(1)과 같다.

$$L = \frac{1}{K \cdot P^n} \quad (2)$$

여기서, L은 수명(와이블 분포의 특성수명), K는 모델의 상수, n은 압력 가속지수, P는 스트레스 인자(압력)를 나타낸다.

3.2.2 가속성 확인

고무시트 버터플라이 밸브의 가속수명시험 데이터에 대해 가속성이 성립하는지, 즉 와이블 분포의 형상모수가 동일한지에 대해 ALTA 소프트웨어의 우도비 검정을 실시하였다. Fig. 8과 같이 유의수준 5%에서 $T = 3.7533 < \chi^2 = 5.9915$ 이므로 가속성이 성립한다는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 분포모수 및 가속지수의 추정

고무시트 버터플라이 밸브에 대해 3가지 압력 수준에서 시험한 데이터를 이용하여 신뢰성 분석을 실시하였다. 먼저,

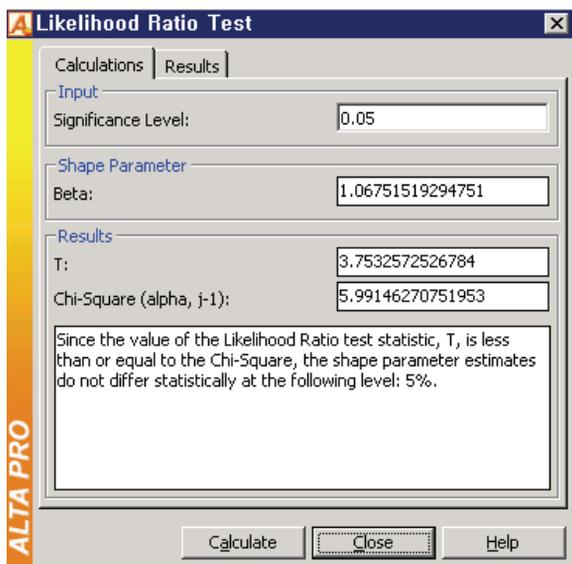


Fig. 8 Result of the likelihood ratio testing

와이블 분포의 형상모수 β 는 1.0675이며, β 에 대한 95% 신뢰구간은 (0.7066, 1.6128)이다. 그리고 고무시트 버터플라이 밸브에 적용한 역승모델의 상수 K는 5.998E-12이며, 압력에 대한 가속지수 n은 7.0012로 추정되었다. 가속지수 n에 대한 95% 신뢰구간은 (4.3105, 9.6919)이다.

Fig. 9는 고무시트 버터플라이 밸브의 각 스트레스 수준별 와이블 플롯을 나타내며, Fig. 10은 고무시트 버터플라이 밸브의 수명과 압력 스트레스와의 관계를 의미한다.

고무시트 버터플라이 밸브의 가속시험법을 통해 추정된 중요한 신뢰성 정보를 정리하면 Table 4와 같다.

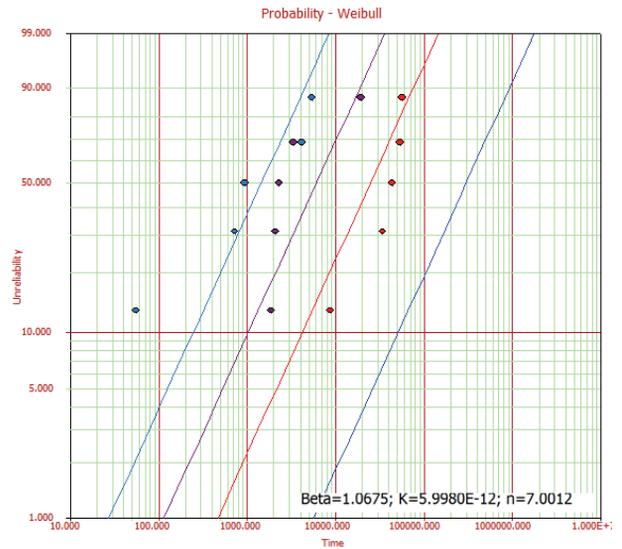


Fig. 9 Weibull plot of stress level

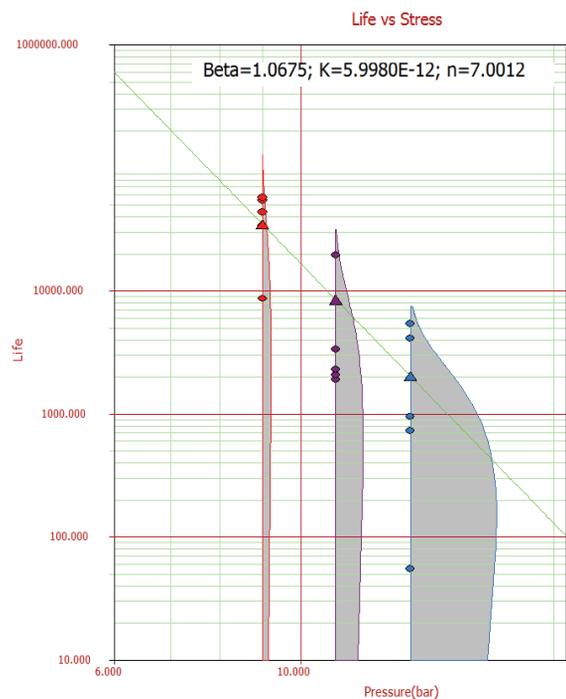


Fig. 10 Relation with stress vs life

Table 4 Reliability information for the butterfly valve

Information Parameters	Point Estimate	95% Confidence Lower Limit	95% Confidence Upper Limit
Shape Parameter(β)	1.07	0.71	1.61
Pressure Acceleration Index(n)	7.00	4.31	9.69

3.2.4 사용조건에서의 수명 예측

가속모델을 통한 고무시트 버터플라이 밸브의 사용조건(압력 6.3 bars)에서의 특성수명을 계산한 결과는 다음과 같으며, 특성수명의 95% 신뢰구간은 (8.8351E+4, 2.0175E+6) 사이클이다.

$$L = \frac{1}{K \cdot P^n} = \frac{1}{5.998 \times 10^{-12} \cdot 6.3^7} = 4.222E+5 \text{ 사이클} \quad (3)$$

특성수명을 사용하여 MTTF와 B10 수명을 계산한 결과는 아래와 같으며, MTTF의 95% 신뢰구간은 (8.618E+4, 1.967E+6) 사이클이며, B10 수명의 95% 신뢰구간은 (8745, 3.0098E+5) 사이클이다.

$$\begin{aligned} MTTF &= \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ &= (4.222E+5) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1.07}\right) \\ &= 4.1172E+5 \text{ 사이클} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B_{10} &= \eta \times (-\ln(1-p))^{\frac{1}{\beta}} \\ &= (4.222E+5) \times (-\ln(1-0.1))^{\frac{1}{1.07}} \\ &= 5.1302E+4 \text{ 사이클} \end{aligned} \quad (5)$$

고무시트 버터플라이 밸브의 사용조건에 대한 가속 스트레스 수준 13.5 bars에서의 가속계수(AF)는 아래와 같으며, 가속계수 AF의 95% 신뢰구간은 (27, 1614)이다.

$$AF = \left(\frac{P_{\text{가속조건}}}{P_{\text{사용조건}}}\right)^n = \left(\frac{13.5}{6.3}\right)^{7.0} \approx 208 \quad (6)$$

고무시트 버터플라이 밸브의 가속시험법을 통해 사용조건 의 다양한 수명 예측 및 가속계수에 대한 예측 결과를 정리 하면 Table 5와 같다.

Table 5 Butterfly valve life prediction & acceleration factor

Information Parameters	Point Estimate	95% Confidence Lower Limit
Characteristic Life(η)	4.2220E+5	8.8351E+4
MTTF	4.1172E+5	8.618E+4
B10 Life	5.1302E+4	8,745
Acceleration Factor(AF)	208	27

위의 결과로부터 고무시트 버터플라이 밸브는 점추정 특성수명 42,220 사이클과 B10 수명 51,302 사이클을 보장할 수 있으며, 신뢰수준 하한 95%에서는 특성수명 88,351 사이클과 B10 수명 8,745 사이클을 최소로 보장할 수 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 가속수명시험을 통하여 시험대상품인 버터플라이 밸브의 신뢰성 인자를 도출하였고, 이를 토대로 가속모형 개발하였으며, 실사용 조건에서의 수명을 예측하는 수명 모형을 개발하였다. 아래와 같이 본 연구의 내용을 요약하고자 한다.

- ① 본 연구는 일반 산업분야에서 사용하는 버터플라이 밸브로 압력을 가속인자로 하여 가속수명시험을 수행하였다.
- ② 수명을 예측하기 위한 가속모형은 역승 모형으로 적용하였으며, 현재 3 수준에서의 시험이 완료되어 형상모수를 분석하여 1.07의 값을 얻었고, 가속지수 $n=7.0$ 을 얻을 수 있었다.
- ③ 가속지수 7.0을 사용하여 실사용 조건에서의 수명을 예측하여 6.3 bar의 경우에는 42만 사이클의 수명을 예측하였다.
- ④ 가속계수는 실사용 조건에서의 6.3 bar와 가속했을 경우의 13.5 bar를 적용하였을 경우, 208의 가속계수를 얻을 수 있다.

후 기

본 과제는 “부품·소재 신뢰성기반기술 확산사업”과 발전소용 유압액추에이터 기술개발(IN2520)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 공유식, 김선진, 정민화, 2009, “1000A용 버터플라이밸브

- 주요부품의 구조해석,” 해양공학회지, Vol. 23, No. 1, pp. 140~145.
- (2) 윤석호, 이정호, 유청환, 박상진, 정장환, 2010, “버터플라이 밸브의 유량측정 불확도에 대한 영향,” 유체기계저널, Vol. 13, No. 4, pp. 18~24.
- (3) 신명섭, 윤준용, 박인원, 이성환, 박한영, 정승화, 2011, “산업용 표준의 압력시험 방법에 의한 버터플라이 밸브 구성품의 구조해석에 관한 연구,” 유체기계저널, Vol. 14, No. 3, pp. 05~09.
- (4) J. W. Hutchison, 1976, “ISA Handbook of Control Valve,” Instrument Society of America, 2nd Edition.
- (5) Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner, “Machinery Failure Analysis and Troubleshooting” 3rd edition, Vol. 2.
- (6) 신뢰성평가기준, 2011, “플랜트용 테프론시트 버터플라이 밸브”, RS-KIMM-2011-0101.
- (7) 이기천, 김형의, 정동수, 김재훈, “버터플라이밸브 수명시험 장비 개발과 개선에 관한 연구,” 유체기계저널, Vol. 15, No. 2, pp. 51~56.
- (8) 지식경제부 기술표준원, 2012, KS B 2333, “수도용 버터플라이 밸브.”