

과일릿형 공기압 방향제어 밸브의 누설 고장판정 기법에 관한 연구

강보식^{1*} · 김경수² · 장무성¹

¹한국기계연구원 신뢰성평가센터, ²건설기계부품연구원 친환경기술본부

Leakage Failure Determination Method of Pilot Pneumatic Directional Control Valve

Bo Sik Kang^{1*} · Kyung Soo Kim² · Mu Seong Chang¹

¹Reliability Assesment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

²Dept. of Green Technology, Korea Construction Equipment Technology Institute

The failure modes of pneumatic directional control valves include leakage, wear of the spool seal, and sticking of the spool. Among them, the main failure mode of the valve is leakage. The leakage is caused by the wear of the spool seal. However, due to the characteristics of the seal material, the leakage rate is fluctuated a lot rather than constantly increased over time. If life analysis is performed using the first time data of leakage failure, predicted life cycles can be different from the real life cycles. This paper predicts life cycles of the pilot pneumatic directional control valve based on the three point moving average which considers the average of the fluctuating leakage rate.

Keywords: Pneumatic Valve(공기압 밸브), Leakage Measurement Test(누설 측정 시험), Directional Control Valve(방향제어 밸브), Failure Determination(고장판정), Life Prediction(수명 예측)

1. 서론

공기압 시스템은 비용 및 안정성 측면에서 산업현장의 자동화 라인에 폭넓게 사용되고 있으며, 또한 그 적용범위가 점차 확대되고 있다. 자동화 라인의 특성상 관련 부품의 고장이 발생할 경우에는 생산 중단 등으로 인해 막대한 손실이 발생하므로 고장이 발생하기 전에 사전에 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하는 것이 좋다. 하지만 공기압 부품의 수명예측 및 신뢰성 개선을 위한 데이터 확보와 분석이 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다.

공기압 방향제어 밸브(이하 공기압 밸브)는 공기압 회로에서 구동기인 실린더, 액추에이터 등에 공급되는 압축 공기의 방향을 제어하는 공기압 시스템의 핵심 요소이며, 스톱, 솔레노이드, 스프링 및 기밀을 위한 각종 씰 등으로 구성되어 있는 복합체이므로 각 구성요소의 성능변화에 의해 다양한 고장 원인을

가지고 있다. 그러한 이유로 공기압 밸브는 누설 솔레노이드 통전 불량, 스프링 파손 및 스톱 고착과 같은 고장 모드가 존재하지만 밸브의 수명을 결정하는 주 고장모드는 스톱 씰 마모에 의한 누설로 볼 수 있다. 그러나 주 고장모드인 누설은 고무 재질인 씰의 특성상 시간이 지남에 따라 누설량이 일정하게 증가되는 것이 아니라 증감 변화가 크게 나타난다. 따라서 최초 누설 고장이 난 시점의 데이터를 이용하여 수명 분석을 수행하게 되면 실제 수명보다 짧게 수명이 예측 될 수 있다.

공기압 밸브에 대한 신뢰성 관련 연구들 중에서 강보식 외(2007)는 공기압 밸브의 고장모드 분석과 ISO 기준에 따라 실시한 수명시험 데이터를 이용하여 와이블 분포에 적용한 후 관련 모수 값을 추정하였다. 강보식과 김경수(2008)는 공기압 전자밸브의 주요 특성인 누설량과 최저작동압력에 대해 시간에 따른 열화패턴 분석과 수명분석 결과를 제시하였다. 강보식 외(2011)는 동일 사양의 플러그인형 소형 공기압 매

* 교신저자 kbs668@kimm.re.kr

2014년 9월 10일 접수; 2014년 11월 10일 수정본 접수; 2014년 11월 13일 게재 확정.

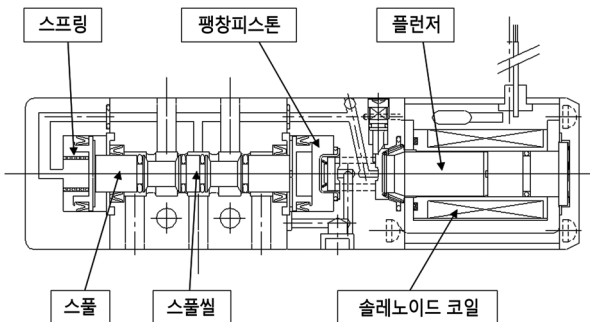
니플드 밸브 2종류의 대상품에 대한 수명시험 데이터를 이용하여 얻은 신뢰성 모수 값을 제시하였다. 결과 형상모수는 유사한 값을 얻었으며, 척도모수는 약 3,000만 사이클 정도 차이가 발생하였다. 그리고 강보식 외(2013)는 압력과 온도를 가속인자로 하여 가속수명시험을 실시한 후 공기압 5포트 전자밸브의 사용조건 수명을 예측하였고, 압력에 대한 가속지수와 온도에 대한 가속효과는 없다는 결론을 제시하였다. 이러한 연구들은 규격에 제시된 고장기준에 따라 수명시험을 실시한 후 얻은 고장 데이터를 분석하여 수명을 예측하였다.

본 연구에서는 공기압 부품에 대한 국제규격인 ISO 19973-2 (2007)에 따라 수명시험 장비를 구성하여 수명시험을 수행하고, 밸브 주요 성능특성인 누설에 대한 성능 데이터를 확보하였다. 누설 성능 데이터를 이용하여 누설량이 고장기준을 최초로 초과하는 시점을 고장으로 판정하여 공기압 밸브의 수명을 예측한 결과와 3기간 누설량의 이동평균이 고장기준을 초과하는 시점을 고장으로 판정하여 공기압 밸브의 수명을 예측한 결과를 비교하고, 끝으로 3기간 이동평균법을 이용하여 예측한 수명을 공기압 밸브의 수명으로 제안하고자 한다.

2. 공기압 밸브의 구조 및 고장 분석

2.1 공기압 밸브의 기능 및 구조

본 연구에서 사용되는 공기압 밸브는 파일럿형 공기압 방향 제어 밸브로서 <그림 1>과 같이 밸브바디 내에 스톱, 스톱셀, 팽창 피스톤, 스프링이 있으며, 솔레노이드에 전원을 인가하면 플런저가 밸브바디 내 파일럿 라인으로 공급되어 대기 중인 압축 공기를 열어 어댑터 내부의 팽창 피스톤을 밀게 되고, 이와 연동하여 팽창 피스톤의 미는 힘으로 스톱이 절환하게 된다. 이로 인해 밸브 내부 유로는 변경되고 밸브바디에 공급된 주 압축 공기의 방향을 제어하게 되는 기능을 가진 밸브이다.

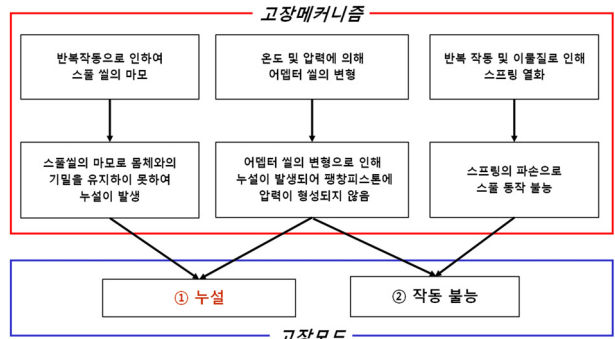


<그림 1> 공기압 밸브의 구조 및 주요 구성품

스톱에 장착되어 있는 셀은 O-ring 형상을 띄고 있으며, 밸브바디부 내면과 스톱 사이에 장착되어 스톱 전·후진 작동으로 발생할 수 있는 공기의 누설을 방지한다. 셀의 구성 재질은 NBR(acrylonitrile-butadiene rubber)를 사용하고 있다.

2.2 고장분석

공기압 밸브의 고장 현상은 반복적인 작동에 의해 스톱 셀의 마모가 진행되고, 이로 인하여 누설이 발생하는 것이 주 고장 모드로 분석되어 졌다. 또한 스톱의 반복적 전·후진 작동 특성으로 인하여 스톱의 위치를 복귀시켜 주는 스프링의 파손도 발생하였다. 공기압 밸브의 대표적인 고장 메커니즘과 고장 모드는 <그림 2>와 같으며, 고장 현상은 <표 1>과 같다.



<그림 2> 공기압 밸브의 고장 메커니즘 및 고장 모드

<표 1> 공기압 밸브의 고장 현상

구 분	부품 사진	고장 현상	고장 원인
스톱(셀)			반복 작동, 열화에 의한 마모 (누설 고장)
어댑터 셀			압력, 온도에 의한 변형 (누설 고장, 작동 불능)
스프링			반복 작동, 열화, 이물질에 의한 마모 (작동 불능)

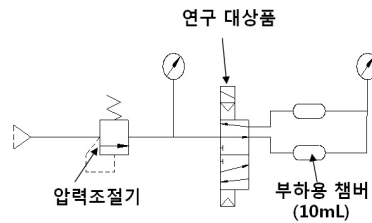
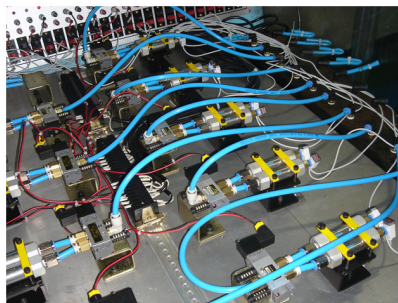
3. 시험조건 및 방법

3.1 시험조건

공기압 밸브의 수명시험을 수행하기 위해, 국제 규격인 ISO 19973-2(2007)에 따라 <표 2>와 같은 시험 조건을 결정하였다. 공기압 밸브의 수명은 공급되는 압축 공기의 품질과 밀접한 관련이 있기 때문에, 수명 시험을 진행할 때에 ISO 19973-1(2007)에 명시되어 있는 압축 공기 품질을 준수하였다. <그림 3>과 같이 수명시험 장비를 구성하여 9개의 시료에 대해 수명시험을 수행하였으며, 100만 또는 200만 사이클마다 누설시험을 수행하여 누설 값을 기록하였다.

<표 2> 수명시험 조건

항목	내용
시험 압력	(630±30) kPa
공급 공기 이슬점 온도	(-15~5) °C
공기 내 포함된 미세먼지 크기	5 μm 이하
공급 전압	DC 24V
On/Off Time	0.2초
주변 온도	23±10 °C
시료 수	9개



<수명 시험 회로도>

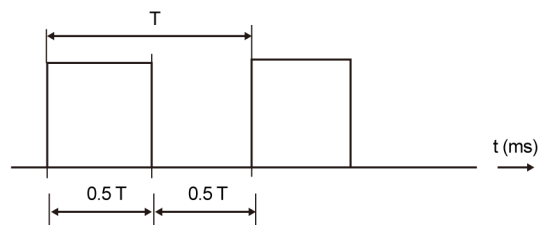
<그림 3> 공기압 밸브의 수명시험 장비

3.2 시험 방법

수명 시험은 입구포트에 630 kPa의 압력을 인가하고, 정격 전압을 <그림 4>와 같이 On-Off 시간이 1:1 비율이 되도록 한다. 여기서 1사이클(= T)은 0.4초이며, On-Off 시간은 각각 0.2초가 된다. <그림 3>과 같이 출구 포트에 10 mL의 챔버를 부착한 상태로 수명시험을 수행한다. 수명 시험 중 일정한 시점에서 성능 시험을 실시하고 실시된 성능 시험의 결과가 그 판정 기준을 만족하여야 한다.

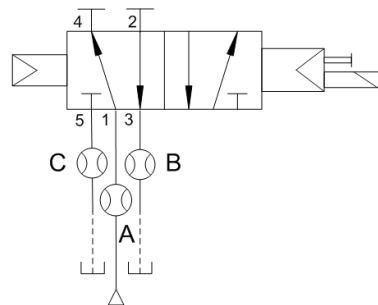
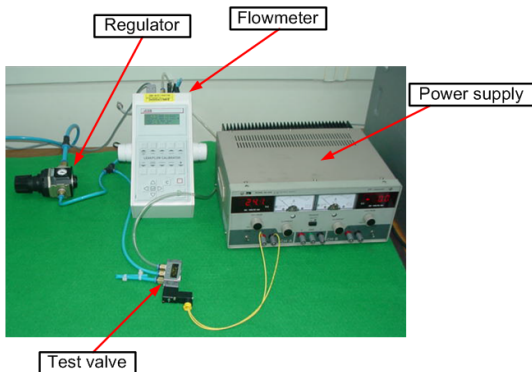
누설 시험은 시험 밸브를 <그림 5>와 같이 누설 측정기에 연결한 후, 시험 밸브에 1분간 630 kPa의 압력을 가한 상태에서 내부 누설과 외부 누설을 측정하여 기록한 후, 측정된 값

이 11 L/h를 초과하지 않아야 한다.



Key
T Cycle
t Time

<그림 4> 수명시험 공급 전원 사이클



<누설 시험 측정 회로도>

<그림 5> 누설 시험 장비

4. 시험 결과 분석

누설량을 주기적으로 측정된 결과<표 3>과 같이 누설량이 선형적으로 증가하는 것이 아니라 증가와 감소를 반복적으로 나타나는 현상을 확인하였다. <표 4>와 같이 누설 고장 기준을 초과하고 다시 고장 기준 미만으로 측정되는 경우도 발생하였다. 이 부분은 스풠의 형상 및 쉴 재질의 특성으로 인해 발생하는 현상으로 추정된다.

<표 3> 공기압 밸브의 누설량 측정 결과(시료 6의 예)

Cycles (×10,000)	OFF		ON	
	Port 3	Port 5	Port 3	Port 5
0	0	0	0	0
70	0	0	0	0
150	0	0	0	0
220	0	0	0	0
300	0	0	0	0
380	0.01	0	0	0.01
480	0.01	0.01	0.01	0.01
580	0.02	0.01	0.01	0.01
680	0	1.17	0.209	0
830	0	15.5	0.49	0.016
880	0.01	12.5	0.02	0.01
980	0.01	14.4	0.05	1.16
1,080	0.05	16.5	1.98	0.12
1,180	0.01	25.1	2.52	0.01
1,280	0.01	14.1	0.49	0.02
2,050	0.51	16.4	0.47	0.02
2,410	0.78	17.9	0.87	0.05

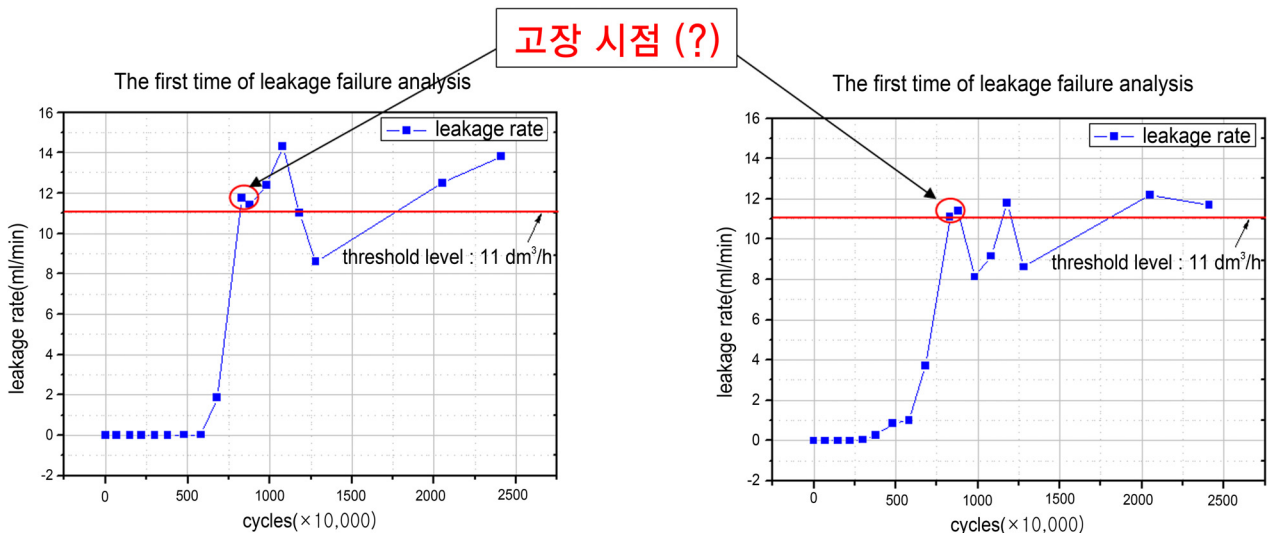
Threshold level : 11 dm³/h.

<표 4> 공기압 밸브의 누설량 측정 결과(시료 7의 예)

Cycles (×10,000)	OFF		ON	
	Port 3	Port 5	Port 3	Port 5
0	0	0	0	0
70	0	0	0	0
150	0	0	0	0
220	0	0	0	0
300	0.01	0.01	0.04	0.01
380	0.01	0.01	0.26	0.01
480	0.01	0.01	0.85	0.01
580	0.01	0.02	1.01	0.02
680	0.001	0.045	3.73	0
830	0.013	1.49	11.1	0.002
880	0.01	0.47	11.41	0.01
980	0.01	0.25	8.12	0.01
1,080	0.01	0.24	9.16	0.01
1,180	0.01	0.33	11.8	0.01
1,280	0.02	0.22	8.62	0.01
2,050	0.03	1.17	12.9	0.01
2,410	0.01	1.48	12.3	0.15

Threshold level : 11 dm³/h.

<그림 6>과 같이 고장 기준을 중심으로 누설량이 오르락내리락 하게 되면, 누설 고장기준인 11 dm³/h가 넘는 최초 시점을 고장으로 판정하게 되면 보수적으로 수명을 예측할 수는 있으나 이러한 결정을 적절하다고 볼 수는 없다. 누설량의 변동은 실제 제품의 성능이 저하된 것이 아니라 성능 이외의 요인으로 인해 일시적으로 성능이 감소되었다가 다시 정상적으로 작동하는 것으로 볼 수 있기 때문이다 따라서 변화가 심한 누설량과 같은 데이터의 고장 시점을 판정하기 위해서는 다른 고장판정



<그림 6> 시간 변화에 따른 누설량 변화 그래프

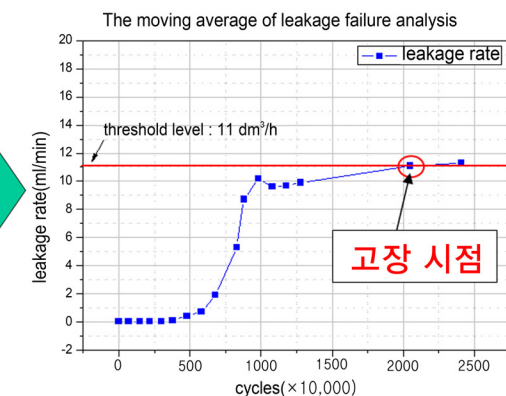
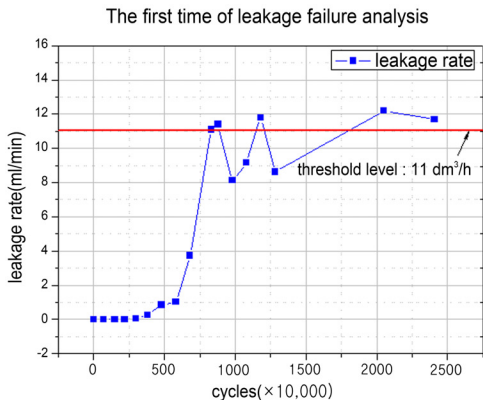
기법이 필요할 수 있다. 일반적으로 이동평균법(moving average)은 주기(cycle)나 불규칙성(randomness)이 존재하는 과거의 몇 개 데이터를 평균하여 데이터의 전반적인 추세를 파악할 수 있는 방법이다. 대개 제품의 고장 판단을 하기 위한 특성은 시간이 지남에 따라 열화 되기 마련이지만 누설량과 같이 불규칙성이 존재하는 특성을 평가하기 위해서는 이동평균법을 활용하는 것이 효과적인 방법일 수 있다.

<표 5>와 같이 3개 기간에 측정된 누설 값의 평균을 구하여 고장판정을 하는 이동평균법을 적용하게 되면 <그림 6>에서 변동되는 누설 값이 <그림 7>과 같이 <그림 6>에 비해 선형적으로 증가하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. 선형적으로 증가하게 되면 고장판정 기준을 넘은 최초 시점을 고장 시점으로 판정하기 수월해 진다.

<표 5> 이동평균을 적용한 공기압 밸브의 누설량 측정 결과 (시료 7의 예)

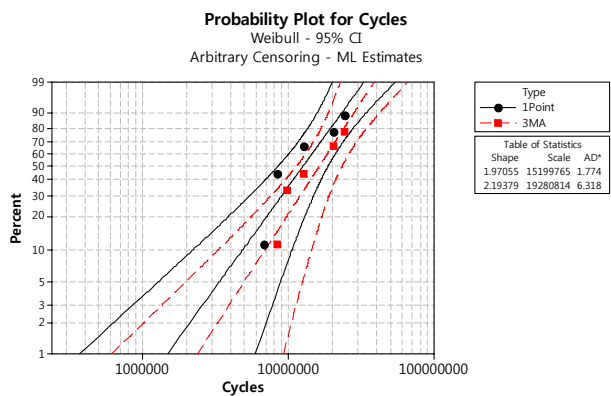
Cycles (×10,000)	OFF		ON	
	Port 3	Port 5	Port 3	Port 5
0	0	0	0	0
70	0	0	0	0
150	0	0	0.0	0.0
220	0	0	0.0	0.0
300	0.04	0.01	0.0	0.0
380	0.26	0.01	0.1	0.0
480	0.85	0.01	0.4	0.0
580	1.01	0.02	0.7	0.0
680	3.73	0	1.9	0.0
830	11.1	0.002	5.3	0.0
880	11.41	0.01	8.7	0.0
980	8.12	0.01	10.2	0.0
1,080	9.16	0.01	9.6	0.0
1,180	11.8	0.01	9.7	0.0
1,280	8.62	0.01	9.9	0.0
2,050	12.9	0.01	11.1	0.0
2,410	12.3	0.15	11.3	0.1

Threshold level : 11 dm³/h.



<그림 7> 이동평균법을 적용한 누설량 변화 그래프

공기압 밸브의 수명분포는 기존 문헌들에 적용되었고, 기계류 부품에 많이 적용되는 와이블 분포를 고려하였다. 9개 공기압 밸브 시료에 대한 수명시험을 통해 얻어진 데이터의 최초 고장 시점을 이용하여 분석한 결과는 형상모수(β) 1.97, 척도모수(η) 15,199,765 사이클(1,689시간), B₁₀ 수명은 4,851,465 사이클(539시간)이고, 3기간 이동평균법을 적용하여 분석한 결과는 형상모수 2.19, 척도모수 19,280,814 사이클(2,142시간), B₁₀ 수명은 6,912,436 사이클(768시간)로 나타났다. <그림 8>은 공기압 밸브의 와이블 분석결과를 나타내며, <표 6>은 2가지 방법으로부터 얻은 신뢰성 척도에 대한 점 추정 및 95% 신뢰구간을 나타낸다.



<그림 8> 공기압 밸브의 와이블 분석 결과

<표 6> 공기압 밸브에 대한 점 추정 및 구간추정 결과

분석방법	신뢰성 척도	점 추정	95% 신뢰 하한	95% 신뢰 상한
최초 고장시점을 활용한 방법	형상모수	1.97	1.14	3.40
	척도모수	15,199,765	10,581,370	21,833,927
	B ₁₀ 수명	4,851,465	2,218,377	10,609,879
3기간 이동평균법을 활용한 방법	형상모수	2.19	1.18	4.08
	척도모수	19,280,814	13,713,206	27,108,891
	B ₁₀ 수명	6,912,436	3,308,624	14,441,582

2가지 방법에 대한 신뢰성 분석 결과에서 공기압 밸브의 고장 메커니즘을 설명하는 형상모수는 서로 유사한 값을 가지는 것으로 나타났으며, 공기압 밸브의 수명을 결정하는 척도모수는 3기간 이동평균법을 적용할 경우 약400만 사이클(약 444시간) 정도 증가한 것으로 나타났다(Abernethy, 2004).

5. 결 론

본 연구에서는 공기압 밸브의 수명시험을 위한 장비를 구성하고, 수명시험을 실행한 후 누설에 대한 성능 데이터를 확보하였다. 누설 데이터의 경우, 시간에 따라 변동이 커져 최초 누설 고장이 발생한 시점 데이터로 수명을 예측하는 것은 공기압 밸브의 실제 수명이라고 판단하기에는 어려울 수 있다. 이에 본 연구에서는 3기간의 누설 데이터 평균을 사용하는 이동평균법을 활용하여 공기압 밸브의 수명을 예측하였다. 분석결과로부터 최초 고장 시점을 사용하여 수명을 예측하는 것이 비해 3기간 이동평균법을 적용할 경우, 형상모수는 유사한 값을 가졌으며, 수명을 나타내는 척도모수는 약 400만 사이클 정도 증가하였다. 이동평균법을 활용하여 얻은 공기압 밸브의 와이בל 분포 모수들은 형상모수 2.19, 척도모수는 약 1,900만 사이클(2,142시간)로 나타났다.

정확한 공기압 밸브의 수명을 예측하게 되면 산업 자동화 라인에서 발생할 수 있는 고장을 사전에 방지하고, 적절한 부품 교체시기로 인해 유지보수 비용도 절감할 수 있어 높은 경

제적 효과를 기대할 수 있다. 이동평균법을 활용하는 방법은 누설량 이외에 시간에 따라 측정값의 변동이 큰 성능 데이터를 분석하는데 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 강보식 · 김경수 (2008), 공기압 전자밸브의 대표성능에 따른 고장 패턴과 수명분석, 대한기계학회 춘계학술대회.
- [2] 강보식 · 김경수 · 장무성 (2013), 가속수명시험을 통한 공기압 5포트 전자 밸브의 수명예측, 대한기계학회 춘계학술대회.
- [3] 강보식 · 이승훈 · 김경수 · 임남구 · 김형의 (2007), 공기압 밸브의 수명분석, 대한기계학회 춘계학술대회.
- [4] 강보식 · 이충성 · 김형의 (2011), 플러그인형 소형 공기압 매니폴드 밸브의 수명 및 성능열화특성에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 A권, 제35권, 제11호, pp. 1445-1451.
- [5] Abernethy, R. B. (2004), *The new Weibull handbook*, Abernethy, R. B.
- [6] ISO No. 19973-1 (2007), Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing-Part 1: General procedures.
- [7] ISO No. 19973-2 (2007), Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - Part 2: Directional control valves.