

산업용 솔레노이드 액츄에이터의 신뢰성 특성

성백주*, 이은웅**, 김인수*
한국기계연구원*, 충남대**

The Reliability Characteristics of the Industrial Solenoid Actuator

Baek-Ju Sung*, Eun-Woong Lee**, In-Su Kim*

Korea Institute Machinery & Materials*, Chung Nam National University**

Abstract - In order to evaluate a solenoid actuator's reliability, the following three-step approach was used: (1) we analyzed the cause and effect of major failures through FMEA and FTA, decided the main test items through 2-stage QFD; (2) after a performance test was carried out, five-sampled data were collected from the it; finally, we decided the reliability parameters for the industrial solenoid actuator. The reliability parameters, such as the shape parameter(β), the scale parameter(θ), etc., were analyzed inductively by the use of MINITAP and the Weibull probability model which has been used practically in the study of the reliability.

1. 서 론

자동차, 항공기 등에 사용되는 솔레노이드 액츄에이터는 사용환경에 따라 요구되는 그 성능과 함께 변함없이 안정한 성능을 유지해야 하는 장수명의 신뢰성이 요구되며 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 본 연구에서는 공압밸브 구동용 솔레노이드 액츄에이터에 대한 신뢰성 평가기술을 정립하기 위해, 문헌, 제조사의 고장 데이터, 그리고 전문가들의 의견을 종합하여 이에 대한 고장분석을 실시하고 신뢰성 설계와 실험을 위한 신뢰성 파라미터를 산출하였다.

고장분석자료로서 고장모드 영향분석(FMEA : Failure Mode Effect Analysis), 2단계 품질기능 전개(QFD : 2-Stage Quality Function Deployment), 고장수지분석(FTA : Fault Tree Analysis)을 각각 작성하여 솔레노이드 액츄에이터의 고장원인 및 영향을 분석하고 이를 시험하기 위한 시험항목을 결정하였다. 그리고 신뢰성 파라미터를 산출하기 위한 작동시험을 실시하여 솔레노이드 액츄에이터의 정수 중단 데이터 5개를 확보하고 이를 와이블 확률지에 의한 도식적 방법과 신뢰성 분석 소프트웨어인 MINITAB을 이용한 해석적 방법으로 분석하여 솔레노이드 액츄에이터 고유의 신뢰성 파라미터를 산출하였다.

2. 솔레노이드 액츄에이터의 고장 분석

2.1 고장영향분석(FMEA)

고장모드와 고장메카니즘 분석은 구성 부품에 따른 주요 고장모드를 결정하고 전체 시스템에 미치는 영향과 고장원인 등을 분석하는 단계로서, 표 1에 그 결과를 나타내었다[1,2]. 치명도 매트릭스 분석은, 고장모드별 치명도의 분포를 정성적(定性的)으로 표시하기 위하여 심각도와 고장발생빈도를 MIL-STD-882D의 절차에 따라 매트릭스 형태로 표 2와 같이 나타내었다[3].

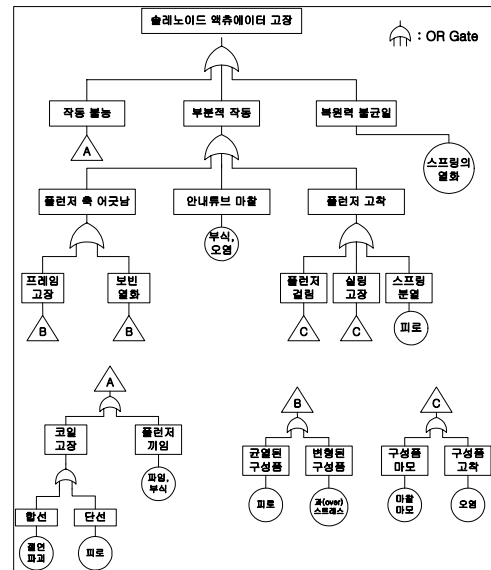
〈표 1〉 고장모드와 고장메카니즘 분석 결과

#	부품명	부품의 역할	고장 형태	고장영향		고장메카니즘	
				국부적 영향	상위레벨 영향	메카니즘	부하인자
1	프레임	구조, 자속통로	균열, 변형, 마모	힘 감소	부적절한 동작	부식, 피로	습도, 오염, 진동
2	플런저	동작	결림, 구속	전류 증가	동작불능, 부적절한 동작	파임, 부식, 오염	온도, 습도, 오염
3	고정자	구조, 자속통로	변형, 마모	소음 증가	부적절한 동작	마모, 파임	반복작동
4	실링	밀폐	균열, 변형	부적절한 동작	유체 누유	스트레스, 마모	부적절한조립, 반복작동
5	스프링	복귀력 발생	부러짐	복귀력 상실	부적절한 동작	피로	반복작동
6	코일	힘 발생	단선	통전불능	작동불능	피로	온도
7	코일	힘 발생	합선	힘 감소	작동불능	절연파괴	온도
8	안내 튜브	마찰감소	오염	전류 증가	부적절한 동작	오염	먼지, 온도

〈표 2〉 치명도의 매트릭스 분석

심각도	상	III	5,8	II	2	I	6,7
	중	IV	4	III	1	II	
	하	V	3	IV		III	
		하		중		상	
고장발생빈도							

2.2 고장수지분석(FTA)



〈그림 1〉 솔레노이드 액츄에이터의 고장수지분석

고장수지분석은 고장 원인규명 시간의 단축을 목적으로 고장원인과 그에 따른 고장 발생의 과정을 수지(樹枝)형태로 나타내는 것으로서, 이에 대한 분석 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 원의 내용은 세부고장 원인이고, 사각형의 내용은 세부고장의 원인에 의해 발생하는 고장현상이다. 세부고장의 원인이 많은 경우 OR Gate로 고장원인들을 취합하고, 삼각형에 연결부호를 기입하여 작성한다. 그림 1에 제시된 솔레노이드 액츄에이터의 고장수지분석을 통해 △A에 연결된 고장원인에 의해 작동불능이 발생하고, △B, △C와 부식이나 오염, 피로에 의해 플런저 속 어긋남, 안내튜브 마찰, 플런저 고착과 같은 부분적 고장이 발생하며, 스프링 열화로 인해 복원력 불균일이 발생함을 확인할 수 있다.

3. 신뢰성 파라미터 결정을 위한 MINITAB 분석

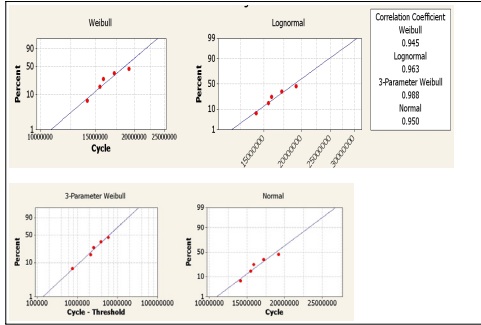
3.1 수명데이터

수명 데이터의 통계적 분석을 통하여 수명분포 또는 분포의 파라미터들을 산정하기 위해서는 최소한의 수명시험 데이터가 필요하다. 본 논문에서는 신뢰성실험 과정에서 획득한 수명시험 데이터인 작동횟수를 수명의 척도로서 사용하여 파라미터를 산출하였다. 수명시험 데이터는 통계분석을 위한 자료로서 충분하다고 판단되는 5개의 시료가 고장날 때까지 실험을 실시하여 얻었다. 수명 데이터 취득 방법은 총 10개의 솔레노이드 액츄에이터 시료를 시험하여 5개의 고장이 관측되는 시점에서 시험을 중단한 정수중단(Type II Censoring) 시험방법을 택하였으며, 취득된 수명 데이터 내역을 표 3에 나타내었다.

〈표 3〉 수명 데이터 내역

No.	수명데이터(Cycle)	시험결과	도수
1	14,115,684	Failed	1
2	15,502,311	Failed	1
3	15,890,000	Failed	1
4	17,204,256	Failed	1
5	19,189,630	Failed	1
6	19,189,630	Censored	5

3.2 분포의 적합도 분석

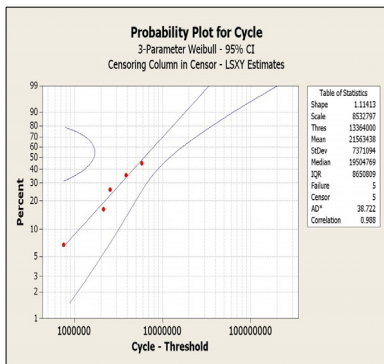


〈그림 2〉 분포의 적합도 검정 결과

신뢰성 자료의 통계적 분석을 위한 첫 단계로서, 획득한 수명 데이터가 어떤 수명분포에 적합한지 판단하기 위하여 와이블분포, 대수정규(Lognormal)분포, 3-파라미터 와이블분포, 정규(Normal)분포 등 4개의 대표적인 수명분포에 대한 적합도(Goodness of Fitness) 검정을 수행하였으며, 그림 2에 그 결과를 나타내었다. 분포의 적합성 척도로는, 관측된 자료가 어떤 분포에 가장 적합한지를 나타내는 상관계수(Correlation Coefficient)를 사용하였고, 상관계수 값이 1에 가까울수록 그 분포에 적합하다는 것을 의미한다[4]. 그림 2의 적합도 분석 결과를 통해 와이블분포는 상관계수값이 0.945, 대수정규분포는 0.963, 3-파라미터 와이블분포는 0.988, 정규분포는 0.950 임을 확인할 수 있다. 따라서 상관계수 값이 1에 가장 가까운 3-파라미터 와이블분포가 솔레노이드 액츄에이터의 수명분포로 가장 적합함을 알 수 있다.

3.3 수명분포의 파라미터 추정

그림 2를 통해 결정된 3-파라미터 와이블분포를 와이블 확률지에 도시하므로서 파라미터 값의 추정이 가능하다. 그림 3에 확률지 타점결과 및 파라미터 추정값을 나타내었으며, 여기에서 형태파라미터(β)는 1.11, 척도파라미터(θ)는 8,532,797, 위치파라미터(γ)는 13,364,000으로 추정되었다. 또한 평균수명(MTTF)은 21,563,438 cycle, 중앙값(Median)은 19,504,769 cycle, B_{10} 수명은 14,496,105 cycle로 확인되었다. 표4에 본 연구를 통해 얻은 신뢰성 파라미터 추정 결과를 정리하여 나타내었다.



〈그림 3〉 와이블 분포의 확률지 타점 및 파라미터 추정

〈표 4〉 신뢰성 파라미터 추정 결과

구분	추정치	95% 신뢰구간	
		하한(lower)	상한(upper)
형태파라미터(β)	1.11413	0.401263	3.09346
척도파라미터(θ)	8,532,797	3,205,212	22,715,696
위치파라미터(γ)	13,364,000	13,364,000	13,364,000
평균수명(MTTF)	21,563,438	13,676,462	33,998,693
B_{10} 수명	14,496,105	13,364,000	16,545,689

3.4 가속모델

수명시험은 시험시료에 정격의 시험조건을 부여하여 고장이 날 때 까지 실시하는 것이 가장 바람직하지만, 소요되는 시간과 비용을 고려하여 과도한 시험조건으로 시험시간을 짧게하여 수명시험을 해야한다. 본 연구에서는 수명시험시간을 획기적으로 단축시킬 수 있도록 제품에 대한 가속계수를 산정하여다.

다음의 식(1)은 직류 솔레노이드 액츄에이터의 고장율 모델(Failure Rate Model)을 나타내고 있다[5].

$$\lambda = \lambda_B \cdot C_T \cdot C_V \cdot C_I \cdot \prod_{i=1}^n C_i \dots \dots \dots \text{식 (1)}$$

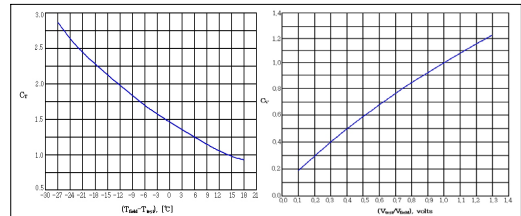
여기서, λ_B 는 기본 고장율, C_T 는 온도인자, C_V 는 인가전압 인자, C_I 는 전류인자, C_i 는 기타 특성 인자들이다. 전류인자는 주위온도에 의한 코일 저항값 변동 또는 인가전압의 변화에 따라 결정되어지기 때문에, 전기적 관점이 아닌 고장을 모델 관점에서는 전류인자를 소거해도 무관하다. 이와같이 솔레노이드 액츄에이터의 가속모델을 정의하면, 식 (2)로 표현된다.

$$AF = \frac{C_{T(test)} \cdot C_{V(test)}}{C_{T(field)} \cdot C_{V(field)}} \dots \dots \dots \text{식 (2)}$$

그림 4 (a)는 시험온도와 정격온도차에 대한 온도인자 값의 변화를 나타내고, 이 그래프를 사용하여 C_T 와 온도차와의 관계식을 도출하면, 식 (3)으로 나타내어진다. 그림 4 (b)는 시험전압과 정격전압의 비에 대한 전압인자 값의 변화를 나타내고, 이 그래프를 사용하여 C_V 와 전압비와의 관계식을 도출하면, 식 (4)로 나타내어진다.

$$C_T = 2.28e^{-0.027(T_{test} - T_{ref})} \dots \dots \dots \text{식 (3)}$$

$$C_V = \left(\frac{V_{test}}{V_{field}}\right)^{1.33} \dots \dots \dots \text{식 (4)}$$



〈그림 4〉 (a) 온도차에 따른 온도인자 값 (b)전압비에 대한 전압인자의 변화

식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 솔레노이드 액츄에이터에 대한 최종적인 가속모델 식을 얻을 수 있다.

$$AF = \left(\frac{V_{test}}{V_{field}}\right)^{1.33} \exp\left(0.027\left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right) \dots \dots \dots \text{식 (5)}$$

4. 결 론

공압밸브 구동용 솔레노이드 액츄에이터의 신뢰성 평가 연구의 일환으로서, 솔레노이드 액츄에이터의 잠재적 고장 형태와 그 영향에 대한 정확한 분석을 실시하고 각 고장모드별 중요도를 점수로 환산하여 나타내었으며, 고장분석을 통해 파악된 고장을 사전에 점검하기 위한 시험항목들을 결정하였다. 그리고 수명 시험을 통해 획득한 솔레노이드 액츄에이터 5개의 정수중단 데이터를 와이블 확률지에 의한 도식적 방법과 신뢰성 소프트웨어인 MINITAB을 이용한 해석적 방법으로 분석하고 솔레노이드 액츄에이터의 신뢰성 파라미터를 산출하여 형태파라미터 1.11, 척도파라미터 8,532,797, 위치파라미터 13,364,000을 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라, 식 (5)를 구성하는 전압조건과 온도조건을 시험조건으로서 적절하게 설정하여 가속 실험한다면, 솔레노이드 액츄에이터의 수명시험시간을 수 십배에서 수 백배 까지 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Lie et al., "Micromachined magnetic actuators using electroplated permalloy", IEEE transactions on magnetics, 5(3), pp.1976~1985, 1999.
- [2] A. Steck, "Modeling the Magnetic Properties and Dynamic Behaviour of MRF-Valves in Flow Mode", Actuator 2002 No. B5.3 pp.347, 2002.
- [3] 산업자원부 기술표준원, "신뢰성용어 해설서", 산업자원부 기술표준원 신뢰성과, 2003.04
- [4] MIL-STD-690C, "Guide for Life Test", Agencies of the Department of Defense, U.S.A, 1999.
- [5] NSWC-98/LE1, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", September 30, 1998.