

솔레노이드 액츄에이터의 고장분석 및 신뢰성 파라미터 산출

성백주 이은웅* 이재규
한국기계연구원 충남대학교*

Failure Analysis and Production of Reliability Parameter for Solenoid Actuator

Baek-Ju, Sung Eun-Woong, Lee* Jae-Gyu, Lee
Korea Institute of Machinery & Materials Chung Nam National University*

Abstract - For the reliability assessment of solenoid actuator, firstly, we analyzed the cause of major failures and the effect of each failure modes through FMEA and FTA, and decided the main test items through 2-stage QFD. And then, as a measure of life of solenoid actuator, Typell censored five data were collected from and operation test which was performed as the life test of solenoid actuator.

In this paper, we present the reliability parameters of solenoid actuator like shape parameter, scale parameter, etc., which they are produced by MINITAB analysis and marking of Weibull probability paper using the measure of life, and also present the 6 kinds of detailed failure mode analysis.

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 파라미터들을 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 와이بل 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 이를 고장이 전체 시스템에 미치는 영향과 고장원인 등을 분석하는 단계로서, 표 1에 그 결과를 나타내었다[3,4]. 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 나타내고[5], 고장모드와 치명도 분석은, 앞서 실시한 고장모드와 고장메카니즘 분석 결과와 치명도의 매트릭스 분석 결과를 정량적인 값으로 나타낸 것으로 표 3에 그 결과를 나타내었다.

표 1 고장모드와 고장메카니즘 분석 결과

No.	부품명	부품의 역할	고장 형태	고장영향		고장메카니즘	
				국부적 영향	상위래벨 영향	메카니즘	부하인자
1	프레임	구조, 자속통로	균열, 변형, 마모	힘 감소	부적절한 동작	부식, 피로	습도, 오염, 진동
2	플런저	동작	결립, 구속	전류 증가	동작불능, 부적절한 동작	과일, 부식, 오염	온도, 습도, 오염
3	고정자	구조, 자속통로	변형, 마모	소음 증가	부적절한 동작	마모, 과일	반복작동
4	실링	밀폐	균열, 변형	부적절한 동작	유체 누유	스트레스, 마모	부적절한 조립, 반복작동
5	스프링	복귀력 발생	부러짐	복귀력 상실	부적절한 동작	피로	반복작동
6	코일	힘 발생	단선	통전 불능	작동불능	피로	온도
7	코일	힘 발생	합선	힘 감소	작동불능	절연과피	온도
8	안내 튜브	마찰감소	오염	전류 증가	부적절한 동작	오염	먼지, 온도

표 2 치명도의 매트릭스 분석

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

표 3 솔레노이드 액츄에이터의 고장모드 영향과 치명도 분석 결과

No.	부품명	부품의 역할	고장 형태	고장영향		고장메카니즘		치명성 해석		
				국부적 영향	상위래벨 영향	메카니즘	부하인자	고장 발생 빈도	심각도	치명도
1	프레임	구조, 자속통로	균열, 변형, 마모	힘 감소	부적절한 동작	부식, 피로	습도, 오염, 진동	중	중	5
2	플런저	동작	결립, 구속	전류 증가	동작불능, 부적절한 동작	과일, 부식, 오염	온도, 습도, 오염	중	상	7
3	고정자	구조, 자속통로	변형, 마모	소음 증가	부적절한 동작	마모, 과일	반복 동작	하	하	1
4	실링	밀폐	균열, 변형	부적절한 동작	유체 누유	스트레스, 마모	부적절한 조립, 반복동작	하	중	3
5	스프링	복귀력 발생	파손	복귀력 상실	부적절한 동작	피로	반복동작	하	상	5
6	코일	힘 발생	단선	통전 불능	작동불능	피로	온도	상	상	9
7	코일	힘 발생	합선	힘 감소	작동불능	절연과피	온도	상	상	9
8	안내 튜브	마찰감소	오염	전류 증가	부적절한 동작	오염	먼지, 온도	하	상	5

2.2 고장수지분석(FTA)

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 △에 연결된 고장원인에 의해 작동불능이 발생하고, △△와 부식이나 오염, 피로에 의해 풀러저 축 어긋남, 안내튜브 마찰, 풀러저 고착과 같은 부분적 고장이 발생하며, 스프링 열화로 인해 복원력 불균일이 발생함을 확인할 수 있다.

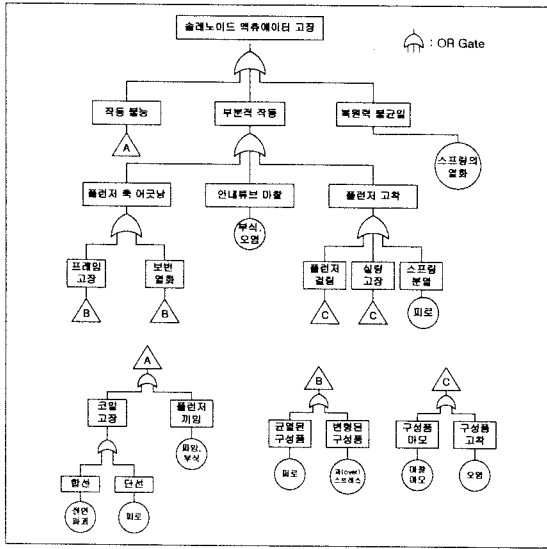


그림 1 솔레노이드 액츄에이터의 고장수지분석

2.3 품질기능전개(QFD)

표 4는 솔레노이드 액츄에이터의 품질기능전개(I)로서, 요구되는 각 품질기능에 대응되는 고장모드를 나타내고 각 모드 of 중요도를 점수로 환산하여 나타내었다. 품질기능전개(II)는 품질기능전개(I)의 분석결과를 사용하여 최종 시험항목을 결정하는 단계로서 분석결과를 표 5에 나타내었다.

표 4 솔레노이드 액츄에이터의 품질기능전개(I)

고장 형태	프레임 균열 및 변형	실링 마모	풀러저 결빙 및 구속	고정자 변형 및 마모	스프링 변형 및 부러짐	코일 단선	코일 합선	안내 튜브 오염
요구품질 및 기능								
풀러저의 원활한 작동	○	○	●	○	●	●	●	●
저소비전력	△			○			●	○
고출력	△		○	●	△	●	●	△
낮은 코일 온도 상승	○		●	○	○	●	●	○
높은 절연저항						●	●	
저오염		●	△					
저소음					●			△
부식방지		●	○		△		○	○
고내구성	●	△	○	△	●	●	●	△
고장위험도	25	26	36	27	38	45	59	33
위선순위	8	7	4	6	3	2	1	5

[평가척도 용례 : △약한 연관성(3), ○보통 연관성(5), ●강한 연관성(9)]

표 5 솔레노이드 액츄에이터의 품질기능전개(II)

고장형태 및 위험도	프레임 균열 및 변형	실링 마모	풀러저 결빙 및 구속	고정자 변형 및 마모	스프링 변형 및 부러짐	코일 단선	코일 합선	안내 튜브 오염	중요도	우선 순위
시험항목	25	26	36	27	38	45	49	33		
구조시험	○							△	224	13
소음시험		△	△	●					429	10
소비전력시험			○			○	○		650	6
유지전류시험			○	○					560	9
시동전류시험			○			○			405	11
흡인력시험	○		△	○	○		○	○	968	2
온도상승시험			△			●	○		758	4
절연저항시험						●	○		650	6
내전압시험						●	○		650	6
고온시험		○				○	●		706	5
저온시험		○					△		265	12
습도시험			△		△	△	○	●	899	3
수명시험	○	●	●	○	●	●	●	○	2171	1

[평가척도 용례 : △약한 연관성(3), ○보통 연관성(5), ●강한 연관성(9)]

3. 신뢰성 파라미터 결정을 위한 MINITAB 분석

3.1 수명데이터

수명 데이터의 통계적 분석을 통하여 수명분포 또는 분포의 파라미터들을 산정하기 위해서는 최소한의 수명 시험 데이터가 필요하다. 본 논문에서는 신뢰성 실험 과정에서 획득한 수명 시험 데이터인 작동횟수를 수명의 척도로써 사용하여 파라미터들을 산출하였다. 수명 시험 데이터는 통계분석을 위한 자료로서 충분하다고 판단되는 5개의 시료가 고장날 때 까지 실험을 실시하여 얻었다. 그림 2는 수명 시험을 통해 얻은 솔레노이드 액츄에이터의 수명 데이터이다.

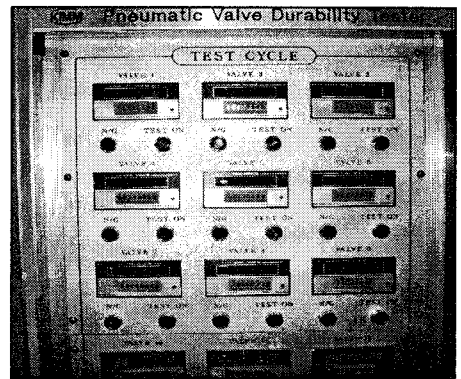


그림 2 수명 데이터

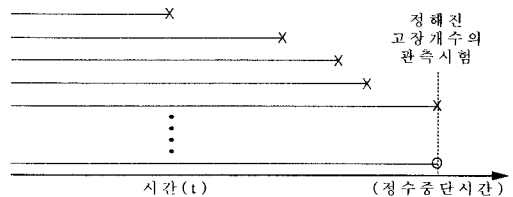


그림 3 정수중단 데이터

표 6 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

수명 데이터 취득 방법은 총 10개의 솔레노이드 액츄에이터 시료를 시험하여 5개의 고장이 관측되는 시점에서 시험을 중단한 그림 3의 정수중단(Type II Censoring) 시험방법을 택하였으며, 그림 2의 수명 데이터 내역을 표 6에 나타내었다.

3.2 분포의 적합도 분석

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 4에 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[6]. 그림 4의 적합도 분석 결과를 통해 와이블분포는 상관계수 값이 0.945, 대수정규분포는 0.963, 3-파라미터 와이블분포는 0.988, 정규분포는 0.550임을 확인할 수 있다. 따라서 상관계수 값이 1에 가장 가까운 3-파라미터 와이블분포가 솔레노이드 액츄에이터의 수명분포로 가장 적합함을 알 수 있다.

Probability Plot for Cycle
3-Parameter Weibull - 95% CI
Censoring Column in Censor - LSXY Estimates

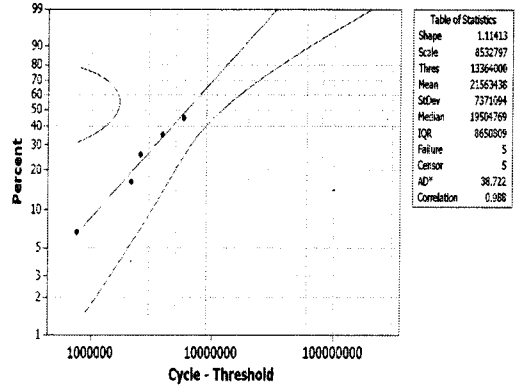


그림 5 와이블 분포의 확률지 타점 및 파라미터 추정

표 7 신뢰성 파라미터 추정 결과

구 분	추정치	95% 신뢰구간	
		하한(lower)	상한(upper)
형태파라미터(β)	1.11413	0.401263	3.09346
최도파라미터(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

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 시험항목을 결정하였다. 그리고 수명 시험을 통해 획득한 솔레노이드 액츄에이터 5개의 정수중단 데이터를 와이블 확률지에 의한 도식적 방법과 신뢰성 소프트웨어인 MINTAB을 이용한 해석적 방법으로 분석하고 솔레노이드 액츄에이터의 신뢰성 파라미터를 산출하여 형태파라미터 1.11, 척도파라미터 8,532,797, 위치파라미터 13,364,000을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국기계연구원, "고속저충형 시스템의 신뢰성 평가기술 개발", 산업자원부, 2002. 8
- [2] Takashi Arakawa, Shigeki Niimi, "Optimization Technology of Magnetic Circuit for Linear Solenoid", SAE Technical Paper Series, 2002-01-0565
- [3] C. Lie et al., "Micromachined magnetic actuators using electroplated permalloy", IEEE transactions on magnetics, 5(3), pp.1976-1985, 1999.
- [4] A. Steck, "Modeling the Magnetic Properties and Dynamic Behaviour of MRF-Valves in Flow Mode", Actuator 2002 No. B5.3 pp.347, 2002.
- [5] 산업자원부 기술표준원, "신뢰성용어 해설서", 산업자원부 기술표준원 신뢰성과, 2003.04
- [6] MIL-STD-690C, "Guide for Life Test", Agencies of the Department of Defense, U.S.A., 1999.

Probability Plot for Cycle
LSXY Estimates-Censoring Column in Censor

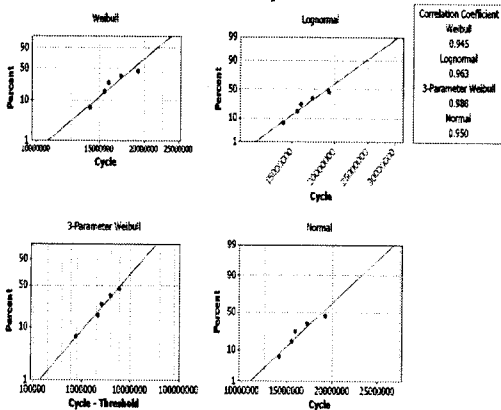


그림 4 분포의 적합도 검정 결과

3.3 수명분포의 파라미터 추정

그림 4를 통해 결정된 3-파라미터 와이블분포를 와이블 확률지에 도시하므로써 파라미터 값의 추정이 가능하다. 그림 5에 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 cycle 로 확인되었다. 표 7에 본 연구를 통해 얻은 신뢰성 파라미터 추정 결과를 정리하여 나타내었다.