

직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 신뢰성 연구

성백주*, 김도식*, 이종배*
한국기계연구원*

A Reliability Study of Direct Drive Type High Speed Solenoid Actuator

Baek-Ju Sung*, Doh-Sik Kim*, and Jong-Bae Lee*
Korea Institute of Machinery & Materials*

Abstract - 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터는 자동차, 항공산업 등의 고정밀을 요구하는 산업시스템에 주요부품으로 사용되기 때문에 고신뢰성이 요구된다. 본 연구에서는 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 신뢰성 평가를 위하여 2단계 품질기능전개를 통해 신뢰성시험항목을 결정하였다. 신뢰성평가 시험 중에서 가장 큰 우선도를 차지하는 수명시험에 대해 문헌, 연구계 및 현장실무자를 통한 무고장 수명시험 시간을 산출하였다. 또한 장기간 소요되는 무고장 수명시험 시간의 시간을 단축하기 위해 가속모델을 제안하고 실제 조건을 충족하는 가속수명시험시간을 산출하였다.

중 첫 번째 단계는 각 주요부품들에 대하여 요구되는 성능을 나열하고 각 주요 성능에 대한 중요도를 매기게 된다. 품질기능전개의 두 번째 단계에서는 요구 성능을 통한 신뢰성평가시험항목을 결정하게 되고, 각 시험항목에 대한 중요도 및 선호도를 책정하게 된다[4]. 2단계 품질기능전개에 대한 자세한 내용은 표 1과 표 2에 기술하였다.

1. 서 론

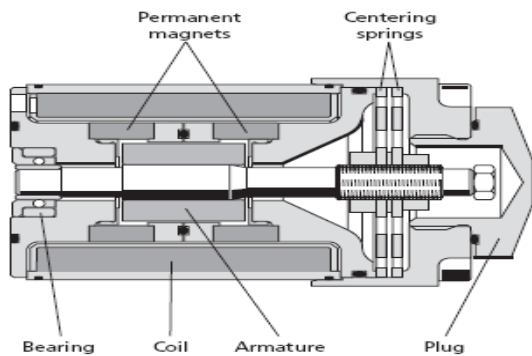
솔레노이드 액추에이터는 전자기적 에너지를 기계적 운동 에너지로 변환하는 장치로서 시스템의 단순성, 신뢰성 및 경제성 때문에 자동차 및 항공기의 핵심부품으로 사용되고 있으며, 유공압밸브, 자동차 연료분사기, 전기 릴레이, 자동차 브레이크, 전기 스위치 등 산업 기계에 광범위하게 적용되고 있다.

본 논문에서는 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터에 대한 신뢰성평가를 위해 2단계 품질기능전개를 통한 신뢰성평가시험항목을 결정하였고, 가장 큰 비중을 차지하는 수명시험에 대해 무고장수명시험시간을 산출하고, 장기간 소요되는 무고장수명시험시간의 단축을 위해 실제 구동 조건을 적용한 가속모델 및 가속수명시험시간을 산출하였다.

2. 본 론

2.1 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터

그림 1은 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 구성을 나타낸다. 전자장 형성을 위한 코일, 자력선의 통로인 요크, 기계적 운동을 하는 플런저, 플런저를 흡인하는 고정자, 운동을 안내하는 베어링, 센터링 스프링 등으로 구성된다[1]. 영구자석은 솔레노이드가 발생하는 전자력을 독립적으로 보완하여, 동일 흡인력 발생대비 소비전력 저감, 작동속도 향상에 기여한다.



〈그림 1〉 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 구조도

2.2 신뢰성평가 시험항목

2단계 품질기능전개를 작성하기 위해서는 선행작업으로 고장모드 및 메커니즘분석(Failure Modes Mechanisms Analysis; FMMA), 고장모드, 영향 및 치명도 분석(Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis; FMECA), 결함나무분석(Fault Tree Analysis; FTA) 등의 고장분석자료의 작성이 필요하다[2-3]. 선행 작업을 통해 작성된 2단계 품질기능전개

〈표 1〉 품질기능전개 1단계

고장형태와 고장원인	결 환 고 장										영구 변형 또는 파손	내 구 성				표 시 의 품 목 및 변 색		
	스프링 소손	플런저 고착	스프링 소손	솔레노이드 코일 소손	유압유 누출	알루미늄 부식	스프링 소손	솔레노이드 코일 소손	이송 소손	관 소손		구 변형	부식	파손	오염			
요구품 및 기능 고장위험도	9	8	9	8	7	6	6	8	8	6	7	6	7	8	7	5	7	5
사중도범위 -10~70℃에서 성능 저하율	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
특각 중 이상 소음이 발생하지 않을 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
중과전압과 90도에서 최대 게이 유압, 압력 손실을 견딜 수 있는 구조일 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
사용 유압에 의한 충격 및 기계적 충격과 서비스에 견딜 수 있는 강도가 있을 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
필요는 규격된 압력 및 유압 응답 성능을 만족시켜야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
사용 최대 온도 조건에서 코일 온도 상승은 규격된 절연 온도 전압 만족할 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
절연 등급이 높을 때, 모든 전기 절연 및 회로는 상호 전기적으로 격리되어 있을 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
필드의 각 작동 위치에서 서로 차단되고 있는 포트간에 누설은 규격된 요구 조건을 만족해야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
필드는 최대 사용 압력의 1.5배의 압력에 충분히 견딜 수 있어야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

고장형태와 고장원인	결 환 고 장										영구 변형 또는 파손	내 구 성				표 시 의 품 목 및 변 색		
	스프링 소손	플런저 고착	스프링 소손	솔레노이드 코일 소손	유압유 누출	알루미늄 부식	스프링 소손	솔레노이드 코일 소손	이송 소손	관 소손		구 변형	부식	파손	오염			
요구품 및 기능 고장위험도	9	8	9	8	7	6	6	8	8	6	7	6	7	8	7	5	7	5
필드에 사용된 설계는 작동유에 대한 저항성이 있어야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
스프링과 다른 작동부품은 부식이 없어야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
필드는 내구 수명 동안의 반복 사용 중 원활히 작동되어야 하고, 성능 조건을 만족하여야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
필드의 포트는 누설 및 저장 중 티끌, 먼지 등에 오염되지 않도록 할 것	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
표시는 필드의 관 보이는 곳에 규격된 방법에 따라 선명하게 기록되어야 한다.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
중요도	24	30	24	19	22	17	15	8	16	11	15	7	6	14	22	13	6	15
우선 순위	2	1	2	5	4	6	8	15	7	13	8	16	17	11	4	12	17	8

비 고 중요도 : ○ 가장 중요(5점), ○ 중요(3점), △ 보통(1점)

〈표 2〉 품질기능전개 2단계

고장형태와 고장원인	시험방법	고장위험도	시험방법															
			자기력시험	제어압력시험	제어유량시험	히스테리시스시험	스텝시험	주파수응답시험	사용온도시험	내부결시험	외소비전시험	운용가진시험	겨은및고온시험	습도시험	수명시험			
결 환 고 장	스플고각	9	◎	◎	◎	◎										△		
	권선동전분량	8	◎	○	◎	◎										△		
	플런저고각	9	◎	△	◎	◎										◎		
	스프링손상	8	◎	○	◎	◎										○		
	슬리브표면 파힘,소각	7		○	○											△		
	유량방출 지연	6		○	◎											△		
누 설	압력유량 지연	6		○	◎	◎										△		
	스플파모	8			◎		◎								△			
	스플셀손상	8			○										◎			
	슬리브파모	8			◎										◎			
내 구 성	슬리브셀손상	6			○										◎			
	이 상 소 습	7		○														
	균 열	6	○		○										△			
내 구 성	영구변형, 휨 또는 비틀림	7														△		
	누 수 견	8		△	△	◎	△	◎								◎		
	조립부 풀림	7	△													○		
	모체부식및틀림	5														◎		
내 구 성	오염 및 파손	7		◎												△		
	표 시 의 틀림 및 변색	5														○		
중요도			96	491	575	198	412	369	153	387	153	98	180	380	616			
우선 순위			13	3	2	8	4	7	10	5	10	12	9	6	1			

비고 1. 평가 척도 : ◎ 가장 중요(9점), ○ 중요(5점), △ 보통(3점)
 2. 시험 항목별 유효성 점수 = 2(중요도 점수 × 평가 척도)

2.3 수명시험

2.2.1 무고장수명시험

앞 절에서 결정된 신뢰성평가시험 항목 중 수명시험에 대하여 무고장수명시험시간을 산출하였다. 무고장수명시험시간은 국내 산업체를 대상으로 현장 사용 조건 및 요구되는 보증수명을 조사한 결과 신뢰수준 90%로 B_{10} 수명 1.0×10^7 사이클을 보장하는 것으로 하였다. 또한 문헌 조사에 의하면 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터는 형상 모수(베타)가 1.1인 와이블(Weibull) 수명분포를 따른다[5]. 따라서 신뢰성평가를 위한 기준에서 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 수명 1.0×10^7 사이클(B_{10} 수명)을 보장한다는 의미는 다음과 같이 정리된다.

- 수명분포 : 형상모수(베타)가 1.1인 와이블(Weibull) 수명분포
 - 보증수명 : 1.0×10^7 사이클(B_{10} 수명)
 - 신뢰수준(C Confidence Level) : 90%
 - 시료수 : 3개
- 위의 내용을 적용하여 산출된 무고장수명시험시간은 식 (1)과 같다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{1}$$

$$= 1.0 \cdot 10^7 \left[\frac{\ln(1-0.9)}{3 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{1.1}} = 60\,815\,606.51 \text{ 사이클}$$

≃ 6.1×10^7 사이클

여기에서 t_n : 무고장 시험 시간
 B_{100p} : 보증 수명
 CL : 신뢰 수준(confidence level)
 n : 시험 중인 전체 아이템의 개수(시료수)
 p : 불 신뢰도(B_{10} 수명이면 $p = 0.1$)
 β : 형상 모수

시험 시료 3개가 6.1×10^7 사이클 동안 고장이 없고 중간 및 사후시험을 실시하여 그 기준에 만족하면, 신뢰수준 90%에서 보증수명 1.0×10^7 사이클(B_{10} 수명)을 보장한다. 수명시험시간 6.1×10^7 사이클은 현실적으로 수행하기가 어렵다. 이럴 경우 해당 시험시료에 대해 적당한 스트레스를

주입하여 시험시간을 단축할 수 있다. 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 주고장모드가 액추에이터가 장착되는 밸브에 의해 가해지는 압력 및 유량 임을 감안하여 압력 및 유량을 시험시료에 가하는 스트레스 요소로 정하고, 아래의 식 (2)와 같이 가속모델을 제안한다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}} \right)^m \left(\frac{F_{test}}{F_{field}} \right)^l \tag{2}$$

$$= \left(\frac{250}{70} \right)^2 \left(\frac{110}{50} \right)^1 = 28.06$$

여기에서, AF : 가속계수
 P_{test} : 수명 시험 압력
 P_{field} : 실제 현장 작동 압력
 m, l : 가속 지수 (스플밸브의 경우 $m=2, l=1$)[6]

산출된 가속계수 28.06과 앞서 산출한 무고장수명시험시간을 이용한 가속수명시험시간 산출방정식은 식 (3)과 같고, 산출된 가속수명시험시간은 다음과 같다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} \tag{3}$$

$$= \frac{60\,815\,606.51}{28.06} = 2\,167\,247.07 \text{ ≃ } 2.2 \times 10^6 \text{ 사이클}$$

시험 시료 3개를 2.2×10^6 사이클 동안 가속수명시험을 수행하고, 중간 및 사후 시험을 실시하여 합격기준에 부합되면 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 보증 수명 1.0×10^7 사이클 (B_{10} 수명)을 보장하는 것이 된다.

3. 결 론

직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 주요 신뢰성평가 시험항목을 결정하고, 내구수명평가를 위한 수명시험에 대하여 가속모델을 제안하고 가속수명시험시간을 산출하였다.

- 1) 2단계 품질기능전개를 수행하여 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터에 대해 신뢰성평가를 수행할 수 있는 종합성능시험, 내환경성시험, 안전성시험, 수명시험 등의 신뢰성시험항목을 결정하였다.
- 2) 현장사용조건을 고려하고, 현장전문가 및 문헌조사를 통해 직구동방식 고속 솔레노이드 액추에이터의 내구수명 보증 기준을 작성하고 작동횟수 6.1×10^7 사이클의 무고장수명시험시간을 산출하였다.
- 3) 장시간 소요되는 무고장수명시험시간에 대하여 주요 고장메커니즘을 분석하여 액추에이터에 가해지는 압력(25MPa) 및 액추에이터가 장착된 밸브를 통해 흐르는 유량(110L/min)를 스트레스요소로 결정하고, 가속모델을 제안하였으며, 시간 및 비용을 절감할 수 있는 작동횟수 2.2×10^6 사이클의 가속수명시험시간을 산출하였다.

[참 고 문 헌]

[1] B.J.Sung, E.W.Lee, H.E.Kim, "Development of design Program for on and off type Solenoid Actuator", Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference 2002(B), pp929-931, 2002.7.10
 [2] Logistics Engineering Technology Branch Carderock div, "Hand book of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Naval Surface Warfare Center Carderock Division, 1998. 9
 [3] MIL-STD-882D, "Standard Practice for System Safety", Agencies of the Department of Defense, U.S.A, 2000.
 [4] "Machinery Failure Analysis and Troubleshooting", Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner, Gulf Publishing Company
 [5] Barringer & Associates, Inc., Weibull database
 [6] KATS, "Reliability Term Guide", Korean Agency of Technology and Standards, 2003. 4