

전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프의 신뢰성 연구

성백주*, 김도식*
한국기계연구원*

A Reliability Study of Direct Flow Control Type Hydraulic Pump by the Electric Motor

Baek-Ju Sung*, Doh-Sik Kim*
Korea Institute of Machinery & Materials*

Abstract - 공작기계에 유압동력을 공급하는 유압동력발생장치의 신뢰성은 공작기계 전체의 신뢰성과 밀접한 관계를 가진다. 전기모터에 의해 유량을 직접제어하는 유압펌프의 시제품에 대한 신뢰성을 평가하기 위해 성능시험, 내환경시험, 그리고 수명내구시험을 실시할 필요가 있다. 본 연구에서는 2단계 품질기능 전개를 통해 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프의 신뢰성평가 시험항목을 결정하였다. 시험항목에는 전기모터에 대한 항목, 유압펌프에 대한 항목, 하우징 및 냉각시스템에 대한 항목이 포함되어 있다. 신뢰성평가 시험 항목 중, 가장 큰 비중을 차지하는 수명내구시험에 대해 무고장수명시험을 산출하고, 시험소요시간 단축을 위한 가속모델을 제안하고, 실제 구동 조건을 적용하여 가속수명시험시간을 산출하였다.

1. 서 론

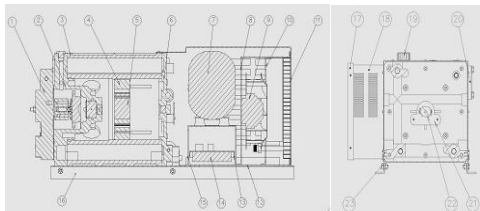
공작기계, 농기계, 그리고 건설기계 등에서 유압동력을 발생하는 유압동력발생장치는 회전력을 생산하는 전동기와 회전축에 의한 작동유의 토출 및 흡입공정을 통해 유압동력을 발생하는 펌프로 구성된다. 그 외에 작동유를 보관하는 오일탱크, 오일 냉각을 위한 냉각시스템등이 주요 구성품들이다. 기존 유압동력발생장치는 시스템 안정을 위한 압력설정과 유로방향 제어만의 단순기능만을 가진다. 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프는 유압동력발생장치의 일종으로 전기모터가 작동유를 보관하는 하우징 내에 존재하고, 전기모터와 유압펌프가 하나의 회전축으로 연결되어 있는 구조를 가진다. 그로 인해 기존의 유압동력발생장치에 비해 공간효율성과 설치효율성, 에너지효율 및 소음발생부분에서 우수한 성능을 가진다. 또한 전기모터의 제어를 통한 직접유량 제어방식으로 사용자의 요구에 부합되는 유압동력발생이 가능하다.

본 논문에서는 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프에 대한 신뢰성평가를 위해 2단계 품질기능전개를 통한 신뢰성평가시험항목을 결정하였고, 가장 큰 비중을 차지하는 수명시험에 대해 무고장수명시험시간을 산출하고, 장시간 소요되는 무고장수명시험시간의 단축을 위해 실제 구동 조건을 적용한 가속모델 및 가속수명시험시간을 산출하였다.

2. 본 론

2.1 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프

그림 1은 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프의 구성을 나타낸다. 전기모터의 회전축과 유압펌프의 토출 및 흡입공정을 수행하는 구동축이 일체형으로 구성되어 있고, 전기모터가 작동유를 보관하는 하우징 내부에 위치해 있다. 또한 오일쿨러 및 제어부, 하우징이 하나의 플레이트에 위치하여 공간효율 및 설치효율면에서 우수성을 가진다.



- | | | | |
|----------|--------------|---------------|--------------|
| 1 펌프 몸체 | 7 콤프레서 | 13 열 변환 덮개 | 19 공기 구멍 |
| 2 하우징 | 8 팬 모터 지지대 | 14 열 변환기 | 20 오일 레벨 게이지 |
| 3 하우징 몸체 | 9 팬 | 15 콤프레서 지지대 | 21 엔코더 브라켓 |
| 4 모터 고정자 | 10 팬 가이드 | 16 지지대 플레이트 | 22 엔코더 |
| 5 모터 회전자 | 11 콘덴서 | 17 컨트롤러 몸체 덮개 | 23 하우징 브라켓 |
| 6 후면 덮개 | 12 오일 쿨러 지지대 | 18 컨트롤러 몸체 | |

〈그림 1〉 직접유량 제어방식 유압펌프의 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[1-2]. 선행 작업을 통해 작성된 2단계 품질기능전개 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[3]. 2단계 품질기능전개에 대한 자세한 내용은 표 1과 표 2에 기술하였다.

〈표 1〉 품질기능전개 1단계

주요구성품	유압 펌프	전기 모터	방진마운트	하우징	에어 브리더	열교환기	유압 필터	센서	필리프 벨브	요구사항	
										내력/유량 특성 분량	외부 누설 고장
고장모드	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
요구사항	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
저소음	◎	▲	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
고성능	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
내진동성	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
고냉각능력	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
내구성	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
내저온 작동	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
내고온 작동	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
고수명	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
중요도 점수	31	22	14	20	18	19	14	11	21	17	12

비고 중요도: ◎ 가장중요(5 점), ● 중요(3 점), ▲ 보통(1 점)

〈표 2〉 품질기능전개 2단계

주요 구성품	고장모드	중요도 점수	시험 항목											
			메이저 유류	정격 압력	정격 유량	매동 유량	유압 용량	누유 시험	소음 측정 시험	진동 측정 시험	연속 운전 시험	내환경 시험		
유압펌프	▲	31	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
전기모터	외부 누설 고장	22	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	코일손상	14	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
방진마운트	베어링 손상	20	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	고무와산	18	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
하우징	내부코팅 벗겨짐으로 인한 내부 이물질 발생	19							◎	◎	◎	◎	◎	◎
	외부 누유 발생	14							◎	◎	◎	◎	◎	◎
에어 브리더	공기 공급 부족	11	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	가스켓 손상	21	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
열교환기	누유열관 변형	17	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	필터의 막힘	12	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
유압필터	엘리먼트의 균열	12	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	스트레인게이지	13	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
센서(온도, 레벨)	개회로	13	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	스트레인게이지 단락회로	13	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
필리프벨브	포켓 마모 손상	21	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	스트림 열화	19	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
시험 유효성 점수 및 순위 (test effectiveness score and rank)			89	89	936	589	646	327	365	911	911	699	399	
			4	4	11	4	10	8	14	13	2	2	7	12

비고 1. 평가척도: ◎ 가장중요(5 점), ● 중요(3 점), ▲ 보통(1 점)

2. 시험 항목별 유효성 점수 = 2(중요도 점수 × 평가척도)

주요 구성품	고장모드	중요도 점수	시험 항목				
			수송가진 시험	저온 시험	고온 시험	습도 시험	수명 시험
유압펌프	압력, 유량 특성 불량	31	●	▲	▲		◎
	외부 누설고장	22	◎				◎
전기모터	코일손상	14	●				◎
	베어링 손상	20	●				◎
방진마운트	고무파손	18	◎	▲	▲		●
하우징	내부코팅 벗겨짐으로 인한 내부이물질 발생	19	●	●	●	●	●
	외부누유 발생	14	◎	▲	▲	▲	◎
에어 브리더	공기 공급 부족	11	▲				◎
열교환기	가스켓 손상	21	●				◎
	누유열관 변형	17					◎
유압필터	필터의 막힘	12					◎
	엘리먼트의 균열	12					◎
센서(온도, 레벨)	스트레인게이지 개회로	13	●	●	●	●	●
	스트레인게이지 단락회로	13	●	●	●	●	●
밸리프밸브	포켓 마모 손상	21		●	▲	▲	◎
	스프링 열화	19					◎
시험 유효성 점수 및 순위 (test effectiveness score and rank)			600	261	219	170	128
			9	15	16	17	1

비 고 1. 평가척도 : ◎ 가장중요(5 점), ● 중요(3 점), ▲ 보통(1 점)
2. 시험 항목별 유효성 점수 = (중요도 점수 × 평가척도)

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 80%로 B_{10} 수명 20,000시간을 보장하는 것으로 하였다. 또한 문헌 조사에 의하면 직접유량 제어방식 유압펌프는 형상 모수(베타)가 3.0인 와이블(Weibull) 수명분포를 따른다[4]. 따라서 신뢰성평가를 위한 기준에서 전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프의 수명 20,000시간(B_{10} 수명)을 보장한다는 의미는 다음과 같이 정리된다.

- 수명분포 : 형상모수(베타)가 3.0인 와이블(Weibull) 수명분포
- 보증수명 : 20,000시간(B_{10} 수명)
- 신뢰수준(C Confidence Level) : 80%
- 시료수 : 10개

위의 내용을 적용하여 산출된 무고장수명시험시간은 식 (1)과 같다.

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

$$= 3.0 \times 10^4 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{10 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{1.2}} = 42702.33 \approx 42702 \text{ 시간}$$

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 10개가 1,300시간동안 고장이 없고 중간 및 사후시험을 실시하여 그 기준에 만족하면, 신뢰수준 80%에서 보증수명 20,000시간(B_{10} 수명)을 보장한다. 수명시험시간 1,300시간은 현실적으로 수행하기가 어렵다. 이럴 경우 해당 시험시료에 대해 적당한 스트레스를 주입하여 시험시간을 단축할 수 있다. 직접유량 제어방식 유압펌프의 주요고장모드가 유압펌프 및 전동기 임을 감안하여 유압펌프의 압력 및 전동기의 회전속도를 시험시료에 가하는 스트레스 요소로 정하고, 아래의 식 (2)와 같이 가속모델을 제안한다.

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}} \right)^m \times \left(\frac{\omega_{test}}{\omega_{field}} \right)^l \quad (2)$$

$$= \left(\frac{5.1}{3.4} \right)^8 \times \left(\frac{2000}{1563} \right)^1 = 32.79451 \approx 32.8$$

여기에서, AF : 가속계수

P_{test} : 가속압력 (MPa)

P_{field} : 사용압력 (MPa)

ω_{test} : 가속속도 (r/min)

ω_{field} : 사용속도 (r/min)

m, l : 가속지수 ($m=8, l=1$)[5]

산출된 가속계수 32.8과 앞서 산출한 무고장수명시험시간을 이용한 가속수명시험시간 산출방정식은 식 (3)과 같고, 산출된 가속수명시험시간은 다음과 같다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} \quad (3)$$

$$= \frac{42702}{32.8} = 1302.118 \approx 1300 \text{ 시간}$$

시험 시료 10개를 1,300시간 동안 가속수명시험을 수행하고, 중간 및 사후 시험을 실시하여 합격기준에 부합되면 직접유량 제어방식 유압펌프의 보증 수명 20,000시간 (B_{10} 수명)을 보장하는 것이 된다.

3. 결 론

전기모터에 의한 직접유량 제어방식 유압펌프의 주요 신뢰성평가 시험항목을 결정하고, 내구수명평가를 위한 수명시험에 대하여 가속모델을 제안하고 가속수명시험시간을 산출하였다.

1) 2단계 품질기능전개를 수행하여 직접유량 제어방식 유압펌프에 대해 신뢰성평가를 수행할 수 있는 종합성능시험, 내환경성시험, 안전성시험, 수명시험 등의 신뢰성시험항목을 결정하였다.

2) 현장사용조건을 고려하고, 현장전문가 및 문헌조사를 통해 직접유량 제어방식 유압펌프의 내구수명 보증 기준을 작성하고 42,702시간의 무고장수명시험시간을 산출하였다.

3) 장시간 소요되는 무고장수명시험시간에 대하여 주요 고장메커니즘을 분석하여 펌프의 압력(5MPa) 및 전동기의 회전속도(2000rpm)를 스트레스요소로 결정하고, 가속모델을 제안하였으며, 시간 및 비용을 절감할 수 있는 1,300시간의 가속수명시험시간을 산출하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Logistics Engineering Technology Branch Carderock div, "Hand book of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Naval Surface Warfare Center Carderock Division, 1998. 9
- [2] MIL-STD-882D, "Standard Practice for System Safety", Agencies of the Department of Defense, U.S.A, 2000.
- [3] "Machinery Failure Analysis and Troubleshooting", Heinz P. Bloch, Fred K. Geitner, Gulf Publishing Company
- [4] Barringer & Associates, Inc., Weibull database
- [5] Ivantysyn Jaroslav and Ivantysynova Monika, Hydrostatic Pumps and Motors, Academia Book International, New Delhi, India, 2001