

토크 발생기의 신뢰성 향상 Reliability Evaluation of Torque Generator

정동수*† · 이용범** · 박종원**

D. S. Jung*† , Y. B. Lee** and J. W. Park**

(접수일 : 2012년 08월 06일, 수정일 : 2012년 08월 16일, 채택확정 : 2012년 08월 17일)

Key Words : Torque Generator(토크 발생기), Gerotor(제로터), Reliability(신뢰성), Acceleration Test(가속 시험), Qualification Life(보증 수명)

Abstract : Torque Generator is a product which has function to transform hydraulic energy to mechanical energy of torque and rotating speed, and be used for direction change device of agricultural machines. This study proposes failure analysis and test analysis on torque generator and introduces a process that reliability of a product is enhanced by design improvement. And also it presents improvements of maximum output torque by modifying design and surface treatment. Lastly it verifies reliability improvement by analyzing test results of before and after life test.

1. 서 론

토크 발생기는 차량의 파워 스티어링 시스템에 적용되는 유압 핵심부품으로써 방향제어 및 액추에이터 기능을 수행한다. 펌프에서 공급되는 유압 에너지를 토크 및 회전속도의 기계적인 에너지로 변환하는 기능을 갖는 제품으로써 이앙기와 같은 농기계의 방향 전환 장치, 선박의 조타 시스템, 대형 수문의 개폐 시스템 등 산업 전반에 적용된다.

본 연구에서의 토크 발생기는 조향 축과 조향 바퀴 간에 기계 장치로 연결되어 있는 유압-기계 방식으로 조향 축의 토크를 증폭하여 바퀴에 전달한다. 농업 경작, 건설 현장 등의 열악한 작업조건에서 사용되는 장비에 적용되기 때문에 제품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 부하변동에 따른 제반 조건을 고려한 시험평가를 수행해야 한다. 국내 중소기업의 연구 기반을 고려하고, 현실적으로 제품의 생산, 판매에만 집중하고 있는 업계의 현실로 볼 때, 신뢰성 분석 및 시험을 위한 고급 인력 및 장비 확보를 위해서는 많은 간접비용이 투자되어야 하므로 중소기업이 독자

적으로 추진하기가 어려운 실정이다.

신뢰성 시험평가는 현장의 작업환경에서 직면하는 다양한 시험조건을 재현하고 시험결과를 평가할 수 있는 평가기준을 제시하고 있기 때문에 기존의 시험 규격들과 차별화된다. 평가항목들은 현장고장 및 고장모드 분석을 통하여 고장에 영향을 미치거나 평가에 필요한 시험항목들로 선정되며 크게 성능시험, 수명시험, 그리고 환경시험으로 구분된다¹⁾. 이러한 시험평가는 고장재현을 통하여 고장개선이 가능하기 때문에 제품의 신뢰성을 향상시키는 효과도 있다.

본 연구에서는 토크 발생기에 대하여 고장분석 및 시험평가를 제안하고 설계개선을 통하여 제품의 신뢰성이 향상되는 전체의 과정을 소개한다. 마지막으로, 수명시험 전·후의 시험결과를 분석하여 신뢰성 향상을 입증한다.

2. 토크 발생기의 작동원리

Fig. 1은 조향 휠의 토크를 증폭하여 바퀴에 전달하는 농기계의 조향 시스템을 보여주고 있다. 작동구

*† 정동수(교신저자) : 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실
E-mail : jds667@kimm.re.kr, Tel : 042-861-7154

**이용범, 박종원 : 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실

*† D. S. Jung(corresponding author) : Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery and Marterials.
E-mail : jds667@kimm.re.kr, Tel : 042-861-7154

**Y. B. Lee and J. W. Park : Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery and Marterials.

조를 살펴보면, 유압펌프로부터 공급된 작동유체는 운전자의 회전입력에 따라 토크 발생기 내의 압력 및 방향제어 기능에 의해 방향을 선택하고 토크를 증폭하여 바퀴를 작동시킨다. 릴리프 밸브는 압력설정에 의하여 과부하시에 시스템을 보호함과 아울러 토크 발생기의 출력토크를 제한한다.

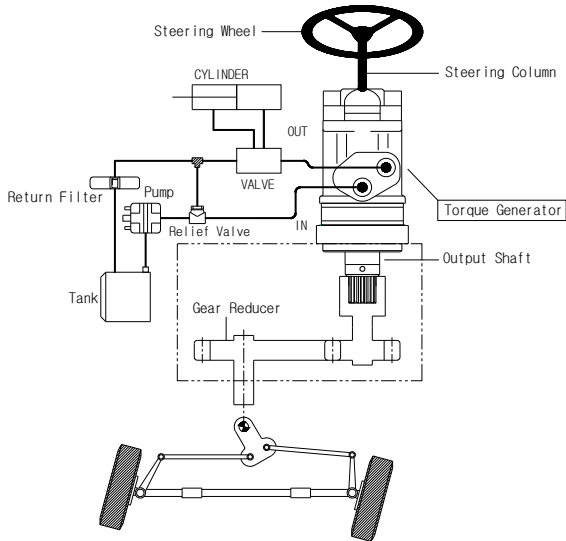


Fig. 1 Torque generator steering system

Fig. 2에 도식된 토크 발생기는 작동유체를 공급받는 입구포트 및 탱크로 통하는 출구포트를 가진 밸브 하우징과, 트로코이드로 형식으로 출력토크를 형성하는 제로터, 조향각도 및 회전속도 조절에 의해 입·출구 포트와 제로터 간의 작동유체의 흐름을 제어하는 슬리브, 제로터 세트의 회전력을 외부로 전달하는 출력 축 등으로 구성되어 있다.

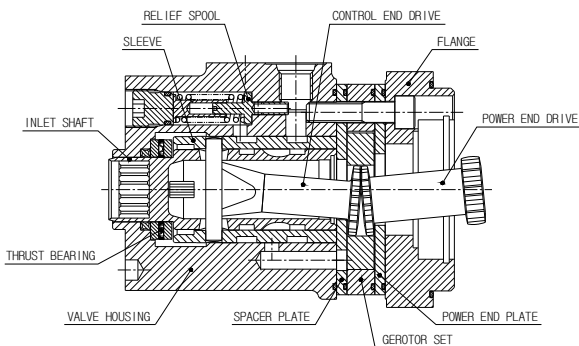


Fig. 2 Schematic of torque generator

본 제품은 한 개의 펌프로 두 개의 액추에이터를 구동할 수 있는 시스템이다. 즉 토크 발생기 출구포

트를 보조 작업기에 직접 연결하여 입구포트에 유입된 유체를 항상 출구포트를 통해 보조 작업기에 흐르게 한다. 하우징내의 드레인 된 작동유체도 드레인 포트에 배출됨으로써 거의 전량의 작동유체를 보조 작업기에 공급할 수 있다. 이러한 시스템은 한 개의 펌프로 차량의 동시작업을 가능하게 한다.

3. 고장 모드 및 영향 분석

3.1 고장 영향 분석

토크 발생기의 신뢰성 평가를 진행하기에 앞서, 주요고장을 야기할 수 있는 시험항목들을 선정하기 위하여 제품의 고장 영향과 고장 모드를 먼저 조사하여 Table 1과 같이 FMEA를 작성한다. 이는 제품의 설계, 제작, 조립, 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성요소들의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다.

Table 1 Failure modes and effects analysis

Component	Failure modes	Failure Mechanisms
Spool	(a) Not work, Switched out	Spool Sticking
	(b) Wear	Wear, Heat Distortion
Sleeve	(a) Switched out	Sticking
	(b) Wear	Wear, Heat Distortion
Drive	(a) Transformation, Failure	Wear, Fatigue, Crack
Gerotor	(a) Wear	Internal leakage
	(b) Malfunction	Internal Rotor Sticking
Relief Valve	(a) Malfunction	Degradation, Corrosion
	(b) Internal Leakage	Wear, Degradation
	(c) Transformation, Failure	Fatigue, Crack

3.2 품질 기능 전개

고장모드와 고장영향을 조사한 후 제품에 대한 요구조건들로부터 Table 2와 같은 1단계 품질기능 전개를 수행하여 각 고장모드들에 대한 위험도 점수를 구한다. 여기서, ◎ : 5, ● : 3, ▲ : 1을 부여한다. Table 2에 의하면 토크 발생기의 주요 고장형태는 스푼의 소착과 지로타의 내부누유 및 고착으로 나타

Table 2 Quality Function Deployment (Level 1)

Component	Spool		Sleeve		Drive	Gerotor		Relief Valve		
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)	(c)
Failure modes										
Requirements										
Steering Control	◎	●	◎		●	●	◎			▲
Control Response	◎	●	◎				●	●		●
Output Torque	●		▲		◎	●	◎	●		●
Pressure Set up	●		●	●		●		◎	◎	◎
Noise	●		▲		▲		●	◎		
Wear Resistance				◎	●	◎	●			●
Repeatability	◎	●	◎		●		●	◎	●	
Life	●	●	●	◎	●	●	●	◎	●	◎
Score	27	12	23	13	18	17	25	26	11	20

Table 3 Quality Function Deployment (Level 2)

Component	Failure modes	Score	Test Items			
			Simultaneous Operation	Torque Deviation	Maximum Torque	Life
Spool	(a)	27	◎	●	●	●
	(b)	12			▲	●
Sleeve	(a)	23	◎	●	●	●
	(b)	13			●	◎
Drive	(a)	18	●	◎	◎	◎
Gerotor	(a)	17			●	◎
	(b)	25	●	●	◎	●
Relief Valve	(a)	26	▲	●	◎	●
	(b)	11			●	●
	(c)	20		▲	▲	◎
Score and Rank			405	413	650	712
			4	3	2	1

난다. 이러한 위험도 점수들에 의하여 시험항목들의 중요도를 판단하기 위하여 Table 3과 같이 2단계 품질기능 전개를 수행하였다. Table 3에서 도출된 중요도 점수로 판단할 때, 수명시험이 시험항목들 중에서 가장 중요함을 알 수 있다.

4. 시험평가기준 개발

4.1 시험평가기준

시험평가 기준을 작성하는 기본방침은 다음과 같

다. a) 가능한 국제성이 있는 것으로 한다. b) 신뢰성을 충분히 파악, 해석 가능한 시험 방법, 안정성을 확보할 수 있는 요구 성능으로 한다. c) 국가 기준으로서의 이행을 전제로 하므로 기술적 수준이 높은 것으로 한다. d) 필요성이 높은 것으로부터 취급하여야 한다. 그리고 시험항목들에 대한 시험조건 및 평가기준은 제품의 사양 및 작업환경에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 이앙기, 골프카트, 스윙퍼 등 소형 운반 및 작업 차량에 적용되는 토크 발생기에 대하여 고장 영향 분석으로 시험항목들을 선정하고, 시험방법과 평가기준을 정립하였다. 수명시험을 제외한 3가지 시험항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 수명시험 후에 각 시험항목들은 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.

- 동시작동 시험 : 최대 출력부하에서 출구포트에 순간적으로 최대 보조압력이 주어졌을 때 발생하는 조향토크 변화는 10% 이내이어야 한다.
- 토크편차 시험 : 최대 조향속도에서 측정된 우조향과 좌 조향의 최대토크 편차가 ±5% 이내이어야 한다.
- 최대토크 시험 : 최대 조향속도에서 입·출구 포트의 압력차가 릴리프 밸브의 설정압력에 도달하였을 때 출력토크는 최대치를 초과하여야 한다.
- 수명 시험 : 최대 조향속도를 유지한 후, 무부하조건으로 5초, 최대 부하조건으로 5초를 1사이클로 하여 1.5×10^5 사이클을 수행한다.

4.2 보증수명

토크 발생기의 수명은 실제 사용시간을 감안하여 신뢰 수준 80%로 B_{10} 5.0×10^5 사이클(평균 5년 등가수명)을 보장하는 것으로 하였다. 주요 고장 모드가 스프링 및 슬리브의 마모이므로 형상모수(β)는 3.0인 와이블 분포를 따른다²⁾.

4.2.1 무고장 시험시간

신뢰성 평가기준에서 규정된 보증수명을 보장하기 위하여 무고장 합격기준을 만족하는 시험시간의 계산은 식 (1)과 같다. 아래에 주어진 신뢰성 목표³⁾를 식 (1)에 적용하면 무고장 시험시간(t_n)은 약 725,513 사이클이 된다.

- 수명 분포 : 형상 모수(β)가 3.0인 와이블 분포
- 보증 수명 : 5.0×10^5 사이클(B_{10} 수명)
- 신뢰 수준 : 80%

- 시료 수 : 5개

$$t_n = B_{10} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

여기에서 CL : 신뢰 수준(confidence level)
 n : 시료 수
 p : 불 신뢰도(B_{10} 수명이면 $p = 0.1$)
 β : 형상 모수

4.2.2 가속 시험시간

제품의 개발주기가 점점 단축되는 시대적 상황에 대응하고 글로벌 시장에서 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 기업들은 단기간에 높은 신뢰도를 갖춘 제품을 개발하는데 노력하고 있다. 수명시험은 제품의 신뢰도를 평가하는 하나의 시험기술로 사용되지만 많은 시간과 비용이 필요하다. 가속시험은 제품의 신뢰도가 증가할수록 늘어나는 시험시간 문제를 해결하기 위해 인위적으로 제품의 수명을 단축시키는 시험방식이다. 즉, 사용조건보다 가혹한 조건에서 시험하여 짧은 시간에 제품의 고장을 발생시켜 얻은 수명데이터를 가지고 신뢰성을 평가한다. 따라서 식 (2)와 같이 시험조건을 현장조건보다 가혹하게 인가함으로써 시험시간을 줄일 수 있다⁴⁾. 토크 발생기의 가속계수(AF)는 식 (2)에 의하면 약 4.89로 계산된다. 이때, 역승모델의 지수는 일반적으로 유압 회전에 적용되는 8을 선택하였다.

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

$$= \left(\frac{P_{max}}{0.85P_{max}} \right)^{8.0} \times \left(\frac{\omega_{max}}{0.75\omega_{max}} \right) = 4.89$$

여기에서 P_{test} : 시험 압력
 P_{field} : 누적 등가 사용 압력
 P_{max} : 최대 압력
 ω_{test} : 시험 속도
 ω_{field} : 누적 등가 사용 속도
 ω_{max} : 최대 속도
 m : 가속 지수($m=8.0$)

따라서, 무고장 시험시간(725,513사이클)과 가속계수로부터 토크 발생기의 가속 수명 시험 시간(t_{na})을 산출하면 약 1.5×10^5 사이클이 된다.

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

발췌 시료 5개를 1.5×10^5 사이클까지 가속 수명시험을 수행한 후, 5개 모두 고장이 없으면 신뢰 수준 80%에서 작동시간 5.0×10^5 사이클(B_{10} 수명)을 보장한다.

5. 고장분석 및 신뢰성 개선

5.1 조향 작동성 개선

Fig. 3은 토크 발생기의 유압회로를 보여주고 있다. 보조 작업기에 부하가 생성되면 보조 작업기로 유량이 공급되는 출구포트(EF 라인)에 압력이 발생하고 제어밸브인 슬리브(②)와 스펴(③)간의 간섭을 유발하거나 고착현상을 일으키는 경우가 있다. 이 경우 제어 밸브간의 고착 또는 잠김 현상으로 인해 조향작동이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 상대 운동을 진행하는 부품들의 간극 확보뿐만 아니라 윤활성 증대가 필요하다. 이들의 개선은 스펴-슬리브간의 걸림 현상을 방지하고 마찰력을 감소시킴으로써 조향 토크의 변화를 줄일 수 있다.

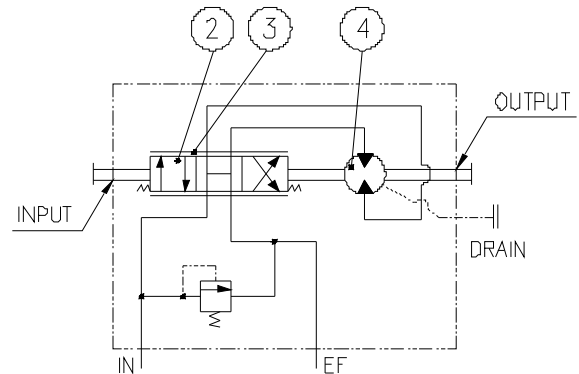


Fig. 3 Structure and hydraulic circuit of torque generator

본 제품에서는 고압의 작동압력 조건에서 입력 토크가 무거워지는 현상을 확인하고 특히 오일의 점도가 떨어지는 고온조건에서 더 심해지는 것을 알 수 있었다. 이의 개선을 위해 스펴의 외경부에 탱크와 연결되는 오일 홈을 형성하여 윤활성을 증대시켰다. 이러한 오일 홈은 정압베어링 역할을 수행하므로 상대 부품들 간의 힘의 평형을 유지하여 직접적인 고체마찰을 방지하게 한다⁵⁾. 그리고 적정 조립공차를 형성하여 윤활 막의 손상에 의한 제품의 고착 현상을 줄이는 방향으로 공차설계를 개선하였다.

이의 개선으로 스펴과 슬리브의 등분각도 공차를

±0.1도 관리기준을 설정하였으며, 추가적으로 밸브의 언더 램을 조정하여 정격유량에 대한 개폐 유로를 확보하였다.



(a) Before (b) After

Fig. 4 Surface treatment of gerotor set

5.2 최대출력 토크 향상

토크 발생기의 성능 평가 중요 요소인 최대 부하 조건에서 출력 토크를 향상시키기 위해 다음과 같이 개선을 추진하였다. 먼저 고압 조건에서 내부 누유에 의한 효율 저하를 개선하기 위해 제어밸브의 조립공차 및 플레이트의 형상공차의 개선을 추진하였다. 또한 저압 조건에서의 효율 저하 부분은 제로터 세트의 마찰저항을 줄이는 방향으로 개선하였다. 이를 위해 내부 로터와 외부 로터에 망간계의 코팅처리(약 3~4 μm)를 적용하였다. 코팅처리에 의하여 곡률 변화가 급격한 부분에서 치차간의 마찰 손실을 줄이면 출력토크를 증대시킬 수 있다. 아울러 치차간의 소음 또한 감소되는 효과를 거두었다. Fig. 4는 표면처리한 제로터 세트를 보여주고 있다. 망간계의 코팅이 처리된 부품은 검은 색으로 나타나고 있다.

5.3 밸브 맥동 저감 추진

시스템내의 최대 사용압력을 제어하는 릴리프 밸브에 있어서 중요하게 언급되는 사항은 다음과 같다.

- 개폐 시에 발생하는 채터링
- 초기 설정압력 변화
- 유량과 압력의 특성변화

본 제품에 있어서는 릴리프 밸브 내에 댐퍼 오리피스스를 형성하여 압력 피크 저감을 위한 설계보완을 하였다. 그리고 스펴의 개폐 시에 급격한 유로 면적 변화로 인해 시스템 안정성에서 보완이 요구되었고 이를 위해 노치 가공요소를 추가하여 미세한 면적변화를 유도 하였다. 이로 인하여 릴리프 밸브의 개폐 시 발생하는 유속에 의한 소음을 저감시키는 효과를

거두었다.

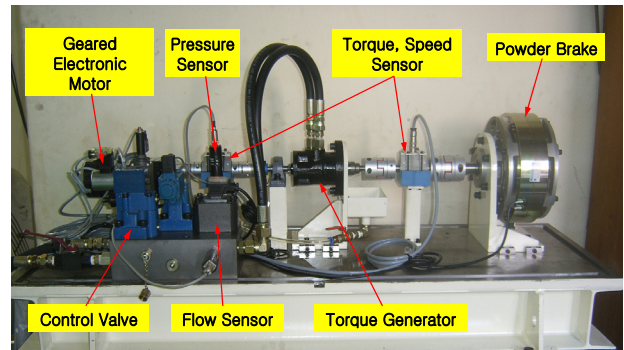


Fig. 5 Performance and life testing equipment

6. 시험장비의 구성 및 시험평가

6.1 종합 성능 및 수명 시험 장비

Fig. 5는 토크 발생기의 성능시험 및 수명시험을 수행하는 시험장비이다. 본 시험장비는 토크 발생기를 구동하는 변속제어 전기모터, 출력토크를 제어하는 파우더 브레이크, 입력토크 및 출력토크를 측정하는 토크센서, 토크 발생기 입구와 출구의 작동유체의 압력과 유량을 측정하는 압력센서 및 유량센서 등으로 구성된다. 그리고 주변장치로는 작동유체를 공급하는 유압동력장치와 센서로부터 측정된 물리량을 나타내는 지시반 그리고 시스템을 제어하는 제어반이 있다. 본 시험장비는 수동운전에 의하여 시험장비 Calibration이 가능하며 자동운전에 의하여 시험장비 제어 및 실시간 데이터를 취득하도록 LabView 7.1 프로그램에 의하여 운영된다.

6.2 신뢰성 평가 결과 분석

본 연구에서는 상용화 제품인 토크 발생기에 대한 시험평가를 진행하였으며 고장분석을 통하여 성능 및 신뢰성이 향상된 시제품을 설계 및 제작하였다. 그리고 신뢰성 향상을 확인하기 위하여 개선된 시제품에 대한 시험평가도 수행하였다. Fig. 6 ~ Fig. 8은 개선전과 후의 시험결과들을 보여주고 있다.

Fig. 6은 동시작동에 대한 개선전과 후의 시험결과들을 보여주고 있다. 최대 출력부하에서 출구포트에 순간적으로 최대 출력압력이 주어졌을 때 개선전의 조향토크 변화는 시험평가 기준에서 제시된 기준치인 10%에 부합한 약 6% (평균 80Nm, 최대 : 81.6Nm, 최소 : 77.1Nm)를 나타내고 있다. 간혹 발생하는 스펴-슬리브간의 걸림 현상을 방지하고 마찰력을 감소시키기 위하여 조립공차를 개선하고 스펴의

외경부에 오일 홈을 추가로 설계하였다. 이들의 개선으로 조향 토크 변화를 약 4% (평균 80Nm, 최대 : 81.4Nm, 최소 : 78.6Nm) 수준까지 향상시켰다.

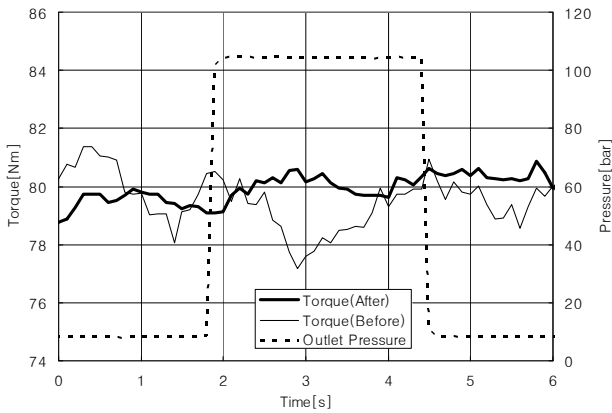


Fig. 6 Simultaneous operation test results

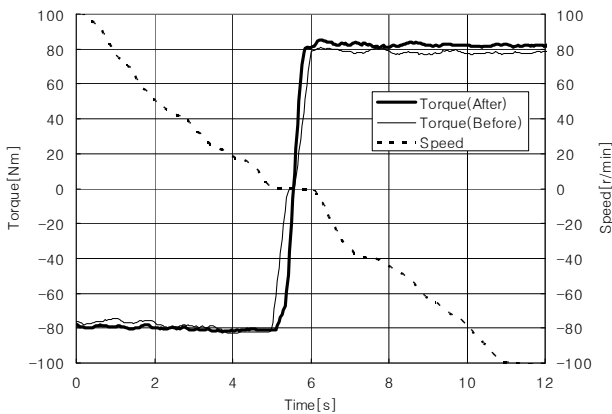


Fig. 7 Torque deviation test results

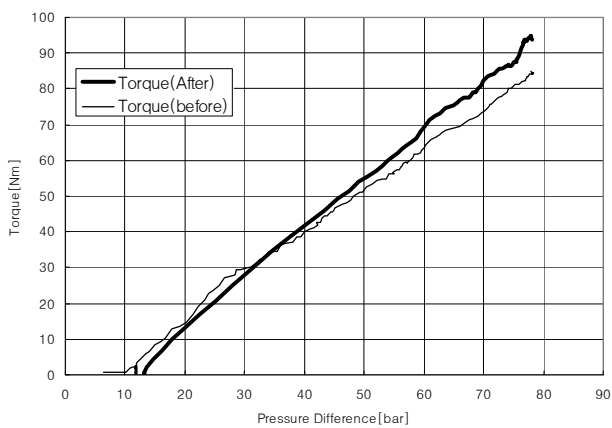


Fig. 8 Maximum torque test results

Fig. 7은 토크편차에 대한 개선전과 후의 시험결과들을 보여주고 있다. 최대 조향속도에서 우 조향과 좌 조향을 인가하였을 때 개선전의 좌·우조향의 토크편차는 $\pm 5\%$ 기준치에 근사한 약 $\pm 4\text{Nm}$ 를 나타내

고 있다. 이를 개선하기 위하여 스플과 슬리브의 등분각도 공차를 $\pm 0.1^\circ$ 관리기준을 설정하고 밸브의 언더 랩을 조정하였다. 이들의 개선으로 토크편차를 $\pm 3\%$ 수준인 약 $\pm 2.2\text{Nm}$ 까지 향상시켰다.

Table 4 Life test results

Test	Evaluation					
	Life Test	Samples				
		1	2	3	1	2
Simultaneous Operation	Before[%]	3.7	4.5	2.9	3.5	4.7
	After[%]	4.1	5.1	4.9	4.3	5.5
Torque Deviation	Before[Nm]	± 2.2	± 1.1	± 2.3	± 1.1	± 1.2
	After[Nm]	± 2.3	± 1.2	± 1.1	± 1.1	± 2.3
Maximum Torque	Before[Nm]	87	86	87	87	88
	After[Nm]	86	85	85	86	86

Fig. 8은 최대토크에 대한 개선전과 후의 시험결과들을 보여주고 있다. 최대 조향속도에서 입·출구 포트의 압력차가 릴리프 밸브의 설정압력에 도달하였을 때 개선전의 출력토크는 설계치 84Nm 보다 다소 부족한 82Nm를 보여주고 있다. 내부 로터와 외부 로터에 망간계의 코팅처리를 적용하여 곡률 변화가 급격한 부분에서 치차간의 마찰 손실을 줄임으로써 출력토크를 87Nm로 향상시켰다.

Table 4는 개선된 제품에 대하여 수명 시험 전·후의 시험결과들을 보여주고 있다. 수명 시험은 5개 샘플 모두 1.5×10^5 사이클을 수행하였다. 수명 시험을 완료한 후에도 모두 시험항목들이 시험기준치를 만족하고 있으며 열화현상도 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 기대수명이 보증 수명보다 훨씬 클 수 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 토크 발생기에 대한 고장모드 및 고장영향을 분석하고 신뢰성 시험평가기준을 개발하였다. 특히, 주어진 신뢰성 조건에서 무고장 시험시간을 산출하였으며 현장 사용조건과 가혹한 시험조건에 의한 가속모델을 제시하여 수명 시험시간을 크게 감소시켰다. 제안된 신뢰성 평가기준을 이용하여 상용화 제품에 대한 사전시험을 수행하였으며 고장요인을 분석하여 신뢰성 향상을 위한 설계개선을 하였다.

첫째, 스플-슬리브간의 걸림 현상을 방지하고 마찰력을 감소시키기 위하여 조립공차를 개선하고 스플

의 외경부에 오일 홈을 추가로 설계하여 조향 토크 변화를 6%에서 4% 수준까지 향상시켰다.

둘째, 스펀과 슬리브의 등분각도 공차를 ± 0.1 도 관리기준을 설정하고 밸브의 언더 랩을 조정하여 토크 편차를 $\pm 5\%$ 에서 $\pm 3\%$ 까지 향상시켰다.

셋째, 내부 로터와 외부 로터에 망간계의 코팅처리를 적용하여 곡률 변화가 급격한 부분에서 치차간의 마찰 손실을 줄임으로써 출력토크를 82Nm에서 87Nm로 향상시켰다.

그리고 개선된 제품들에 대하여 무고장으로 가속 수명시험을 완료함으로써 신뢰수준 80%에서 보증수명 5.0×10^5 사이클(B_{10} 수명)을 확보하였다.

참고문헌

1. D. S. Jung, 2011, "Reliability Test Assessment Technique for Pressure Compensation Type Hydraulic Pump", Journal of Applied Reliability, Vol. 11, No. 4, pp. 371-385.
2. W. Nelson, 1985, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 140-146.
3. J. W. Evans and J. Y. Evans, 2001, "Product Integrity and Reliability in Design", Springer.
4. W. Nelson, 1990, "Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis", Wiley.
5. H. Hashimoto and S. Wada, 1986, "The Effects of Fluid Inertial Forces in Squeeze Film Bearings Lubricated with Pseudo-plastic Fluids", Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 252, pp. 1913-1918.