

정압 베어링 볼 조인트의 신뢰성 향상

정동수 · 박종원

한국기계연구원 신뢰성평가센터

Reliability Evaluation of Hydrostatic Bearing Ball Joint

Dong Soo Jung · Jong Won Park

Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

Hydrostatic bearing improves performance and life time of a product by avoiding solid friction and reducing viscosity friction with the help of creating pressure equilibrium between two faces doing relative motion. This study suggests failure analysis and test evaluation for a ball joint that adopts the hydrostatic bearing and introduces the entire process to improve reliability of the product by design improvement. A typical failure is growth of friction torque by solid friction, and its failure cause is determined and the improvement is proposed. Finally, reliability improvement is established by analysis of the results of before and after acceleration test.

Keywords: Hydrostatic Bearing, Ball Joint, Viscosity Friction, Reliability, Acceleration Test, Qualification Life

1. 서 론

정압 베어링은 하중을 받아 서로 접촉하려는 두면 사이에 외부 펌프에 의해 작동 유체를 공급하여 틈새 내에 압력이 형성되게 함으로써 움직이는 두 고체 표면을 유체 필름으로 완벽하게 분리함으로써 고체 마찰을 없애고 점성 마찰로 움직이는 작동부의 성능을 향상시킬 수 있다. 정압베어링의 기술적인 효과는 Hashimoto and Wada(1986)에 잘 나타내었다. 정압 베어링은 슬라이딩 패드 또는 유압펌프와 같이 윤활을 이용한 미끄럼 운동이나 공작기계의 고속 회전축, 커다란 하중을 지지해야 하는 대형 회전기계에서 오늘날 많이 적용되고 있다. 국내 제품은 선진 외국제품에 비해 하중 지지력이 부족하여 고용량 제품에 적용이 어려워 고부가가치 제품을 생산하지 못하고 있는 실정이며, 선진 외국에 비하여 내구 수명이 떨어져 국내 판매는 물론 해외 수출에도 큰 어려움을 겪고 있다. <그림 1>과 같이 정압 베어링을 적용한 볼 조인트는 점성 마찰력으로 움직이는 작동부의 성능을 향상시켜주는 제품으로 공작기계의 고속 회전축이나 서보 액추에이터를 채택하는 대부분의 산업기계 에 적용되고 있다.

열악한 국내 중소기업의 연구기반을 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 독자적으로 추진하기가 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내 제품의 신뢰성 확보 문제가 필수적이며, 이러한 추세는 정압 베어링에도 해당되어 신뢰성 확보가 시급하다. 더 나아가 추후 유사한 제품을 개발할 때에도 확보된 신뢰성 평가기술을 바탕으로 생산원가의 절감과 개발시간을 단축할 수 있다. 신뢰성 평가기술에 관련된 자료는 정동수(2011)에서 설명하였다.

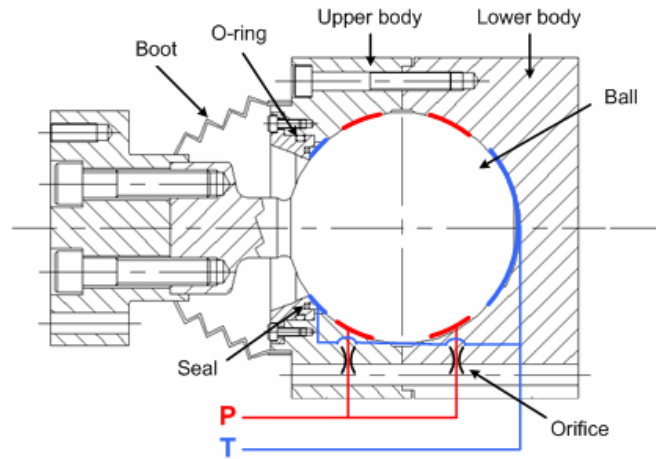
본 연구에서는 정압베어링을 채택한 볼 조인트에 대하여 고장분석 및 시험평가를 제안하고 설계개선을 통하여 제품의 신뢰성이 향상되는 전체의 과정을 소개한다. 대표적인 고장사례는 고체마찰에 의한 마찰토크의 증가이며 이에 대한 고장원인을 규명하고 개선방안을 제시한다. 마지막으로, 수명시험 전·후의 시험결과를 분석하여 신뢰성 향상을 입증한다.



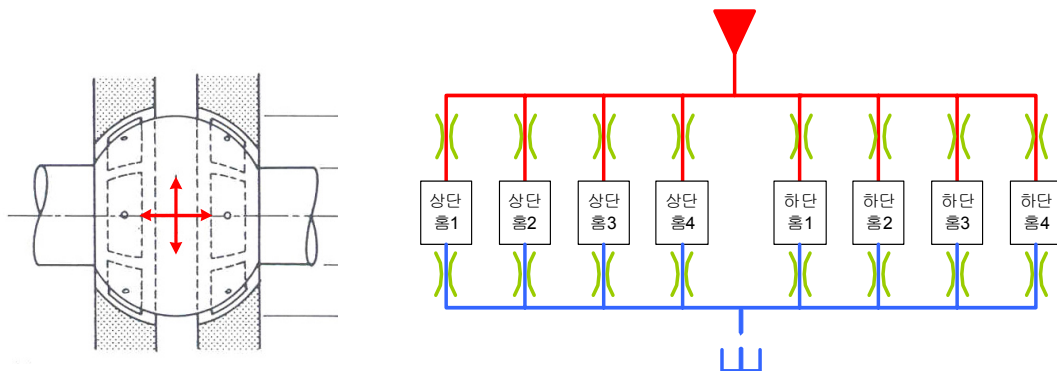
<그림 1> 정압 베어링 볼 조인트의 응용분야

2. 정압 베어링 볼 조인트의 작동원리

<그림 2>는 정압 베어링이 적용된 볼 조인트의 구조를 보여주고 있다. 정압 베어링 볼 조인트는 하중을 받아 서로 접촉하려는 두면 사이에 외부에서 높은 압력을 갖는 작동유체를 유입시키고 틈새 내에서 압력평형을 형성되게 함으로써 두면이 고체접촉을 하지 않고 일정한 틈새를 유지하면서 미끄럼 운동을 수행하게 해준다. 일반적으로 볼, 상부 바디, 하부 바디로 구성되어 있다. <그림 3>은 볼 조인트에 작동유체가 공급되는 정압 베어링의 유로를 보여주고 있다. 앞·뒤에 각각 4개의 작동 면과 오리피스를 통하여 작동 면으로 유체가 들어 오고 나가게 함으로써 상·하와 좌·우로 작용하는 힘의 평형에 의해 볼과 바디 사이의 간격이 일정하게 유지된다. 만약, 외부에 의한 힘의 불균형이 발생되면 큰 힘이 인가되는 반대 방향으로 볼과 바디의 간격이 좁아지게 된다. 이때, 좁아진 부위는 출구유로의 막힘 현상이 발생되어 압력이 상승하게 되고 이로 인하여 그 압력에 상당하는 상승된 반력으로 간격을 회복한다.



<그림 2> 정압베어링 볼 조인트의 내부구조



<그림 3> 정압 베어링의 공급유로

3. 고장 모드 및 영향 분석

3.1 고장영향 분석

정압 베어링 볼 조인트의 신뢰성 향상을 위한 평가에 앞서, 제품의 고장 영향과 고장 모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인한다. 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. <표 1>에서 나타낸 바와 같이 정압 베어링의 주요 고장형태는 회전체의 마모, 쉘 파열, 오리피스 막힘 등으로 나타난다.

<표 1> 정압 베어링의 고장 영향 분석

주요 구성품	기능	고장 모드	고장 메커니즘
회전체	정압 베어링	스코링	작동유 오염
		마모	연속적인 고체 마찰
		부식	연속적인 화학 마찰
		응착	과대 하중, 온도 상승
		변형	과대 하중, 온도 상승
셸	누유 방지	파열	과도한 온도와 압력
		마모	미흡한 표면 마무리, 오염물
		열적인 노화	과도한 온도 상승
		경화 및 찢어짐	재질, 과도한 조임
오리피스	압력차 발생	막힘	작동유 오염

3.2 품질기능 분석

고장 심각과 발생 빈도로부터 치명적인 심각성을 도출하고 1단계 품질기능 전개를 수행하여 2단계 품질기능 전개에 이용되는 중요도의 점수를 구한다. <표 2>는 정압 베어링 볼 조인트에 대하여 구성품의 고장모드와 시험항목들 간의 관계를 정리한 2단계 품질기능 전개의 결과를 보여주고 있다(여기서, ◎ : 5, ● : 3, ▲ : 1). 2단계 품질기능 전개는 시험항목들을 선정하고 각 시험항목들의 중요성을 판단하기 위하여 수행된다. <표 2>에 정리된 시험 유효성 점수로 판단할 때 수명시험이 가장 중요하다.

<표 2> 정압 베어링의 2단계 품질기능 전개

주요 구성품	고장 모드	중요도 점수	시험 항목					수 명
			정밀도	응답성능	정적누설	동적누설	마찰토크	
회전체	스코링	8	◎	▲			◎	◎
	마모	6	●	●			●	◎
	부식	6	●	●			●	◎
	윤착	19	▲	◎			◎	◎
	변형	18	◎	●	●	●	◎	◎
셸	파열	15			◎	◎		◎
	마모	9			◎	◎		◎
	노화	9			◎	◎		◎
	경화/찢어짐	15			▲	●	●	▲
오리피스	막힘	16	▲	▲			◎	◎
시험 유효성 점수 및 순위			201	209	234	264	386	545
			6	5	4	3	2	1

4. 시험평가기준 개발

4.1 시험평가기준

정압 베어링 볼 조인트의 2단계 품질기능 전개로부터 선정된 시험항목들에 대하여 시험방법과 평가기준을 정립하여 <표 3>에 정리하였다. 수명시험을 제외한 5가지 시험항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 수명시험 후에 각 시험항목들은 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.

<표 3> 정압 베어링 볼 조인트의 시험방법 및 평가기준

시험 항목	시험방법	평가기준
정밀도 시험	정격압력을 10분 동안 공급한 후, 전면과 후면의 공급유량을 측정한다.	전면과 후면의 공급 유량의 차이가 총 공급 유량의 5 % 이내여야 한다.
응답 성능 시험	50 %의 동하중으로 작동시키면서 2분 동안 전면과 후면의 압력을 측정한다.	전면과 후면에서 인가한 작동 주파수를 관찰할 수 있어야 한다.
마찰 토크 시험	최대 회전속도를 4등분하여 인가하고 최대 동하중까지 점차 증가시키면서 마찰 토크를 측정한다.	마찰 토크는 설계 기준치의 110 %를 초과하지 않아야 한다.
정적 누설 시험	정격 공급 압력, 최대 정하중, 정지 상태에서 2시간 동안 누유를 검사한다.	외부 누설이 없어야 한다.
동적 누설 시험	정격 공급 압력, 50 %의 동하중, 정지 상태에서 2시간 동안 누유를 검사한다.	외부 누설이 없어야 한다.
수명 시험	정격 회전속도를 유지하고 최대 동하중을 인가하면서 가속 수명 시험을 수행한다.	3개 시료 모두 700 시간의 가속 수명 후에도 고장이 없어야 한다.

4.2 가속 수명시험 시간

정압 베어링 볼 조인트의 수명은 실제 사용시간을 감안하여 신뢰 수준 90 %로 B_{10} 2000시간(평균 5년 등가 수명)을 보장하는 것으로 하였다. 보증수명에 대한 자세한 이론은 Evans and Evans(2001)을 참조하기 바란다. 유압으로 구동되는 회전체의 수명분포는 문헌 조사에 의하면 형상 모수(β)가 1.1인 와이불 분포를 따른다. 와이불 분포 및 형상모수에 대한 자세한 내용은 Nelson(1985)을 참조하기 바란다.

4.2.1 무고장 시험시간

신뢰성 평가기준에서 규정된 정압 베어링 볼 조인트의 수명 2000시간을 보장하기 위하여 무고장 합격기준을 만족하는 시험시간의 계산은 식(1)과 같다. 다음의 신뢰성 조건을 식(1)에 적용하면 무고장 시험시간(t_n)은 약 12,165시간이 된다.

- 수명 분포 : 형상 모수(β)가 1.1인 와이불(Weibull) 분포
- 보증 수명 : 2000시간(B_{10} 수명)
- 신뢰 수준 : 90 %
- 시료 수 : 3개

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

- 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

무고장으로 산출된 시험시간은 수명시험으로 채택하기에 비현실적이다. 따라서 식(2)와 같이 시험조건을 가혹하게 인가함으로써 시험시간을 줄일 수 있다. 정압 베어링 볼 조인트의 가속계수(AF)는 식(2)에 의하면 약 17.3으로 계산된다. 이때, 역승모델의 지수는 일반적으로 유압 회전체에 적용되는 8을 선택하였다. 역승모델에 대한 자세한 내용은 Nelson(1990)을 참조하기 바란다.

$$AF = \left(\frac{F_{test}}{F_{field}} \right)^m = \left(\frac{F_{max}}{0.7F_{max}} \right)^8 = 17.3 \text{-----} (2)$$

- 여기에서 F_{test} : 수명 시험 동하중
 F_{field} : 실제 현장 등가 동하중
 F_{max} : 최대 동하중
 m : 역승 모델 지수

따라서, 무고장 시험시간(12,165시간)과 가속계수(17.3)로부터 정압 베어링 볼 조인트의 가속 수명 시험 시간(t_{na})을 산출하면 약 700시간이 된다.

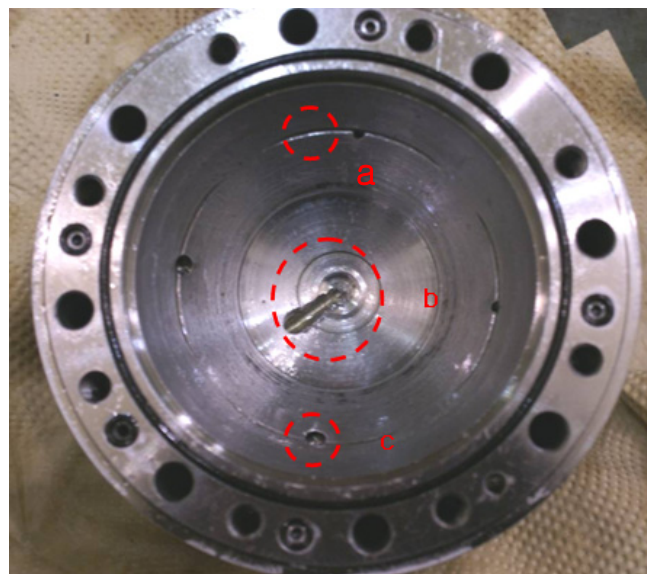
$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} \text{-----} (3)$$

발체 시료 3개를 700시간까지 가속 수명시험을 수행한 후, 3개 모두 고장이 없으면 신뢰 수준 90 %에서 작동시간 2000시간(B_{10} 수명)을 보장한다.

5. 고장사례 분석 및 신뢰성 개선

5.1 고장사례 분석

대부분의 고장사례는 오리피스 막힘 현상이 발생하거나 가공할 때 표면조도가 불량하여 정압 베어링의 기능이 상실 또는 저하됨으로 나타난다. 이로 인하여 교체마찰이 발생하여 굵은 흔적 및 마찰토크가 증가한다. <그림 4>는 사전 시험에서 마찰토크가 기준치를 초과하여 고장으로 간주하고 원인을 구명하기 위하여 분해한 정압 베어링 볼 조인트의 바디를 보여주고 있다. (a)부분은 정압 베어링에 압력의 불균형을 초래 할 수 있는 포켓의 면적이 초과된 가공불량이다. (b)부분에서는 가공할 때 형성된 오염입자의 흔적이 보였다. 이는 오리피스 유로의 막힘 또는 조임 현상을 야기한다. (c)부분에서는 오리피스 유로의 사이즈가 다른 오리피스에 비하여 크게 가공되었다. <그림 4>에서 발견된 흔적들은 모두 정압 베어링의 기능을 상실시키는 직접적인 원인이 된다. 또한 큰 하중이 인가되면 교체마찰에 의하여 심각한 마모로 진행되므로 궁극적으로 수명을 저하시킨다.

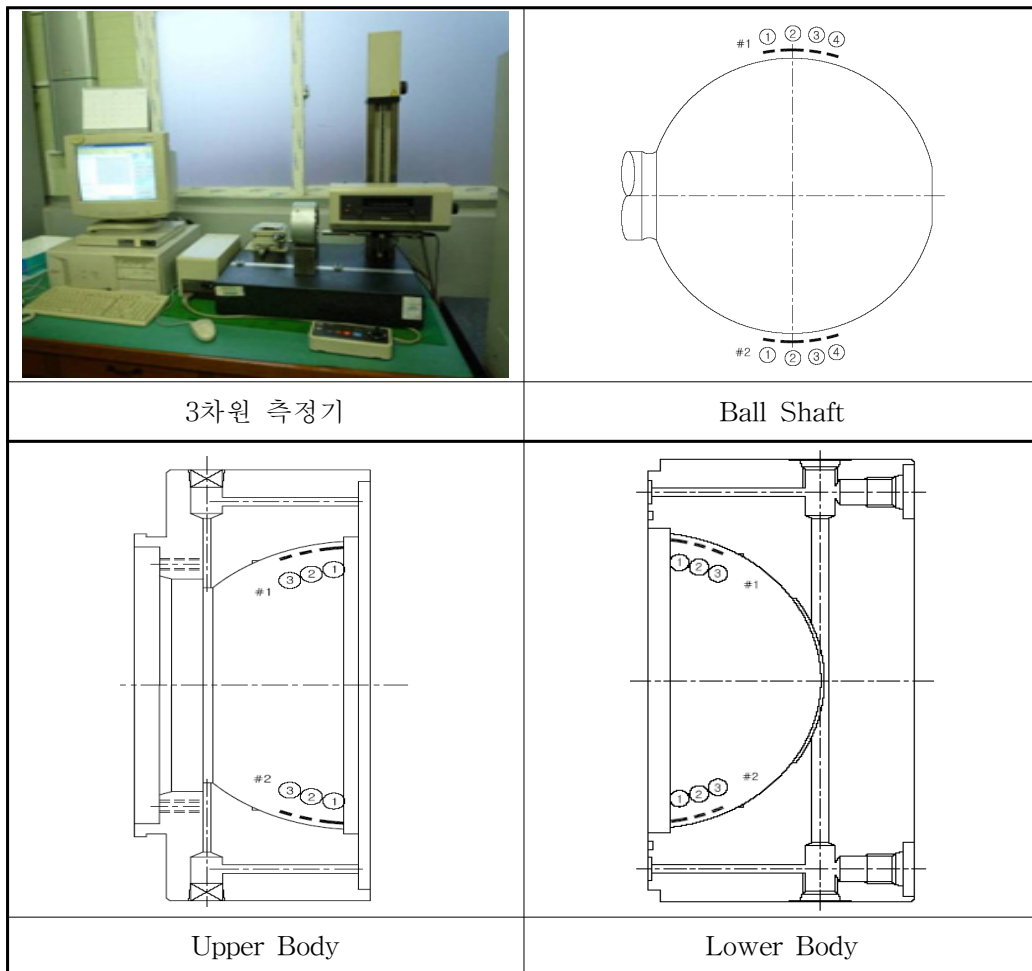


<그림 4> 정압 베어링 볼 조인트의 고장 흔적

5.2 신뢰성 개선

정압 베어링의 성능을 향상시키기 위하여 표면조도 가공 정밀도를 개선시키고, 동시에 수명에 가장 문제가 되는 마찰토크를 감소시키기 위하여 2개의 홈에서 유압을 제공하는 형상에서 앞·뒤에 각각 4개의 작동 면에 오리피스를 통하여 작동유체가 들어오고 나가게 하였다. 상·하와 좌·우로 작용하는 힘에 의해 볼 조인트와 바디 사이의 간극이 작아지면 나가는 쪽의 유로를 줄여서 작동면의 압력이 상승하여 볼 조인트와 하우징이 분리되어 움직일 수 있도록 설계를 변경하였다. 또한 볼과 바디의 작동 면적들이 동일하도록 설계를 변경하였으며, 구성품의 표면조도를 향상시켰다. 기존의 문제점들을 개선하여 수명증대와 마찰토크를 줄일 수 있었다.

<그림 5>는 정압 베어링 볼 조인트의 표면조도 및 틈새 균일화를 확인하기 위하여 3차원 측정기를 이용하여 각 주요 부품들의 측정지점들을 보여주고 있다. <표 4>는 개선 전과 개선 후에 각 지점들에서 측정된 평균치와 개선결과를 보여주고 있다.



<그림 5> 정압 베어링 볼 조인트의 표면조도 측정

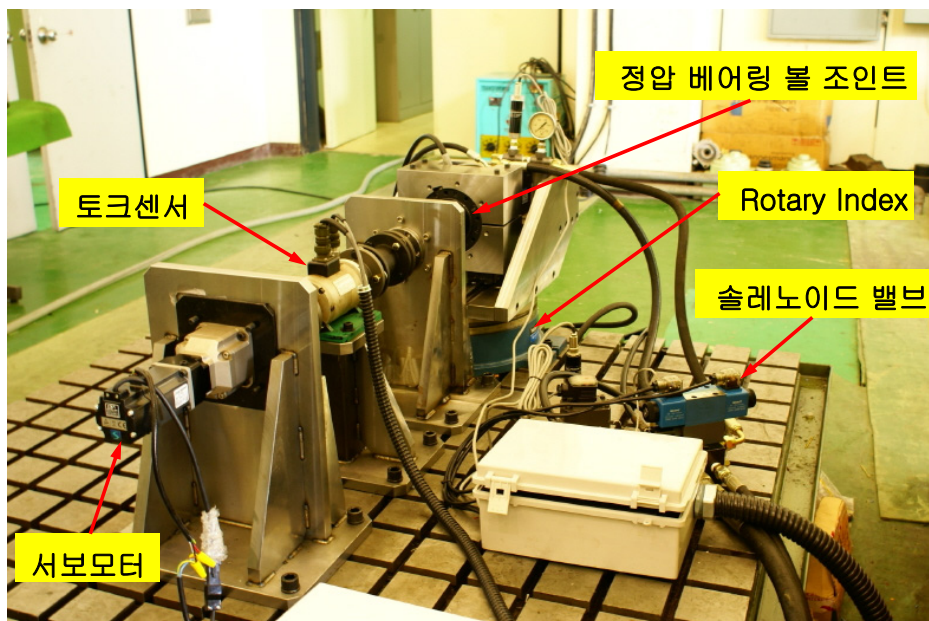
<표 4> 개선 전과 후의 표면조도

부 품 명	개선 전 (μm)	개선 후 (μm)	개선 결과 (μm)
Ball	1.726	1.263	0.463 감소
Upper Body	6.535	1.441	5.094 감소
Lower Body	8.065	1.400	6.665 감소

6. 시험장비의 구성 및 시험평가

6.1 종합 성능 및 수명 시험 장비

<그림 6>은 정압 베어링 볼 조인트의 성능시험 및 수명시험을 수행하는 시험장비이다. 본 시험장비는 솔레노이드 밸브에 의하여 정하중 및 동하중을 인가하는 부하실린더, 설계사양에서 요구되는 회전수를 제어하는 서보모터, 정압 베어링 볼 조인트의 허용 각을 구현하는 Rotary Index, 그리고 마찰토크를 측정하는 토크 계측기로 구성된다. 부하실린더에는 외부에서 제어압력을 공급하는 70bar 저압용 유압장치와 유량 계측기가 설치된다. 마찬가지로, 정압 베어링 볼 조인트에도 내부로 공급되는 250bar 고압용 유압장치와 유량 계측기가 설치된다. 본 시험장비는 수동운전에 의하여 시험장비 Calibration이 가능하며 자동운전에 의하여 시험장비 제어 및 실시간 데이터를 취득하도록 LabView 3.0 프로그램에 의하여 운영된다.

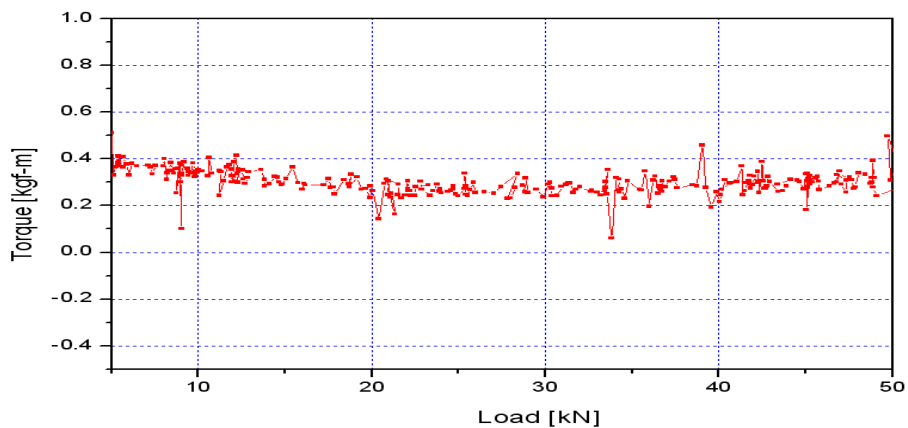


<그림 6> 종합성능 및 수명시험장비

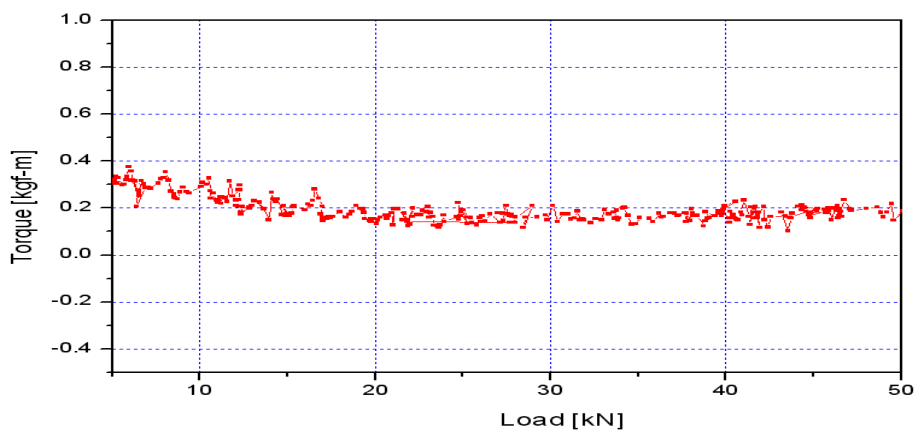
6.2 신뢰성 평가 결과 분석

<그림 7>은 정압 볼 조인트에 회전속도를 일정(1000rpm)하게 유지하고 동하중을 최소에서 최대까지 증가시키면서 입력토크를 측정하여 개선 전과 개선 후의 마찰토크 시험결과이다. 개선 전·후의 시험결과(개선 전 : 0.379 kgf-m, 개선 후 : 0.193 kgf-m)에 의하면 개선 후에는 마찰토크가 상당히 감소되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 개선 전에는 전 구간에서 마찰토크가 불안정하고 부하가 증가함에 따라 마찰토크가 증가하는 추세를 보이고 있지만 개선 후에는 부하가 변동되더라도 마찰토크가 안정된 결과를 보여주고 있다.

<표 5>는 시료 3개에 대한 개선 전·후의 시험결과를 보여주고 있다. 개선 전에는 마찰토크가 0.2 kgf-m인 기준치를 초과하여 수명시험을 진행하지 않고 개선작업을 진행하였다. 개선 후에는 수명시험을 완료한 후에도 모두 시험항목들이 시험기준치를 만족하고 있으며 열화현상도 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 기대수명이 보증수명보다 훨씬 클 수 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.



(a) 개선 전



(b) 개선 후

<그림 7> 마찰 토크 시험결과

<표 5> 시험 평가 결과 요약

평가 항목 [단위]	평가 결과						
	수명 시간	시료					
		개선 전			개선 후		
		1	2	3	1	2	3
정밀도 시험 [%]	0 %	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	3.2
	100 %	-	-	-	3.2	2.9	3.1
응답 성능 시험 [ms]	0 %	만족	만족	만족	만족	만족	만족
	100 %	-	-	-	만족	만족	만족
마찰 토크 시험 [kgf-m]	0 %	0.379	0.287	0.476	0.193	0.189	0.194
	100 %	-	-	-	0.185	0.191	0.186
정적 누설 시험 [cc]	0 %	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음
	100 %	-	-	-	누유없음	누유없음	누유없음
동적 누설 시험 [cc]	0 %	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음	누유없음
	100 %	-	-	-	누유없음	누유없음	누유없음
수명 시험 [Hr]	0 %	부적합	부적합	부적합	부합	부합	부합
	100 %				부합	부합	부합

7. 결 론

본 연구에서는 고장모드 및 영향분석에 의하여 시험평가기준을 개발하고 현장고장 및 시험고장을 통하여 설계개선안을 도출하여 정압 베어링 볼 조인트의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 대표적인 고장사례로는 정압베어링의 기능저하가 야기되어 연속적인 고체마찰로 인한 마찰토크의 증가이다. 이를 개선시키기 위하여 볼과 바디의 표면조도를 개선시키고 볼과 바디의 작동 면적들이 동일하도록 설계를 변경하여 정압 베어링의 기능과 성능을 향상시켰다. 개선 전·후의 시험결과(개선 전 : 0.379 kgf-m, 개선 후 : 0.193 kgf-m)에 의하면 개선 후에는 마찰토크가 상당히 감소되었음을 확인할 수 있었다. 그리고 개선 전에는 전 구간에서 마찰토크가 불안정하고 부하가 증가함에 따라 마찰토크가 증가하는 추세를 보이고 있지만 개선 후에는 부하가 변동되더라도 마찰토크가 안정된 결과를 보여주었다. 그리고 개선된 제품에 대하여 무고장으로 가속수명시험을 완료함으로써 신뢰수준 90 %에서 보증수명 2000 시간을 확보하였다.

참고문헌

- [1] 정동수(2011), 압력보상형 유압펌프 신뢰성 시험평가 기술, 신뢰성응용연구, 11권, 4호, 371-385.
- [2] Jhon W. Evans and Jillian Y. Evans(2001), Product Integrity and Reliability in Design, Springer.
- [3] Wayne Nelson(1990), Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis, Wiley.
- [4] Hiromu Hashimoto and Sanae Wada(1986), The Effects of Fluid Inertial Forces in Squeeze Film Bearings Lubricated with Pseudo-plastic Fluids, Bulletin of JSME, Vol.29, No. 252, 1913-1918.
- [5] Wayne Nelson(1985), Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures, Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 3, 140-146.
- [6] Ye, R. Z.(1985), Kinematics of Axial Piston Pumps with Swashplate and Hydrostatic Bearings, The BFPR Journal, Vol. 18, No. 1, 77-85.