

에너지절감형 대형기계류부품용 수명시험장치의 개발

이용범*·신석신**·박종호**

한국기계연구원 시스템신뢰성연구실*·충남대학교 기계공학과**

Development of energy saving type life testing device for large machinery parts

Yong Bum Lee*·Suk Shin Shin**·Jong Ho Park**

Department of System Reliability KIMM*·Department of Mechanical Engineering CNU**

Abstract

For a reliability assessment of large machinery parts, reliable data should be obtained from testing many samples for a long time. However, in case of testing these samples, testing cost is excessive; in case of life test for long time, power consumption is high; and in case of accelerated test by over load, very high cost is required to build the life testing device. Especially it is very frequent that the expensive device's life has ended during a accelerated test by over load. In this study, the design mechanism of the life testing device which excels in energy saving during the reliability test of large machinery parts has been introduced.

Keywords: Energy saving type life testing device, Hydraulic cylinder, Mechanical feedback, Planetary gear box, Torque generator

1. 서론

대형기계시스템의 안전성 확보를 위해서는 대형기계류부품들의 신뢰성 확보가 요구되며, 이를 위해서 'James A. McLinn(2005)'는 충분히 많은 수의 샘플을 시험하거나, 적은 수량의 샘플로 장시간 동안 수명시험을 했을 때 신뢰할 수 있는 데이터의 확보와 분석 및 평가가 가능하다. 그러나 고가의 샘플을 다수 시험하는 것은 과도한 샘플비용문제와 여러 대의 시험장비가 요구되는 문제가 있다. 또한 적은 수량의 샘플을 장시간 동안 수명시험을 하는 경우는 동력소모가 크고 시험시간이 길어지는 문제가 대두된다. 따라서 과부하(over load)에 의한 가속 수명시험을 실시해야하지만 가속시험장비 구축비용이 매우 높고, 과부하 조건으로 작동되는 시험장비의 수명이 평가제품의 수명과 유사한 경우가 빈번하여 시험 후 시험장비의 보수에 큰 비용이 추가로 요구된다. 본 논문에서는 대형기계류부품의 신뢰성 시험에서 에너지절감이 탁월 했던 유압실린더와 유성기어박스의 수명시험장치의 설계메커니즘을 소개한다.

2. 본 론

2000년에 대형배수갑문용 초대형 유압실린더는 피스톤지름 630mm, 로드지름 320mm, 행정거리 8300mm, 전체길이 15m, 견인력 450 ton이며 1개의 샘플 중량이 30ton이었고, 1개의 샘플 제작비용이 1.5억원인 샘플 2개를 <그림 1>과 같이 7개월 동안 시험하였는데 4억원의 시험장비 구축비용과 2억원의 전력비용이 소요되어 '이용범(2010)'은 중소기업이 큰 비용을 감당하는 데는 한계가 있음을 확인하였다.



수명 시험 (여름, 고온 다습)



수명 시험 (가을)



수명 시험 (겨울, 저온 결빙)

<그림 1> Life test of extra-large hydraulic cylinder for sluice gates

2.1 유압실린더의 수명시험 메커니즘 개발

2.1.1 에너지 소요량 분석

기계류 부품 중 수명시험에 동력소모가 큰 부품 중 하나가 유압실린더로서 특히 고압대형 제품을 1,000km 이상 수명시험 할 경우 소요되는 전력비가 수억원에 이르며, 시험장비 구축

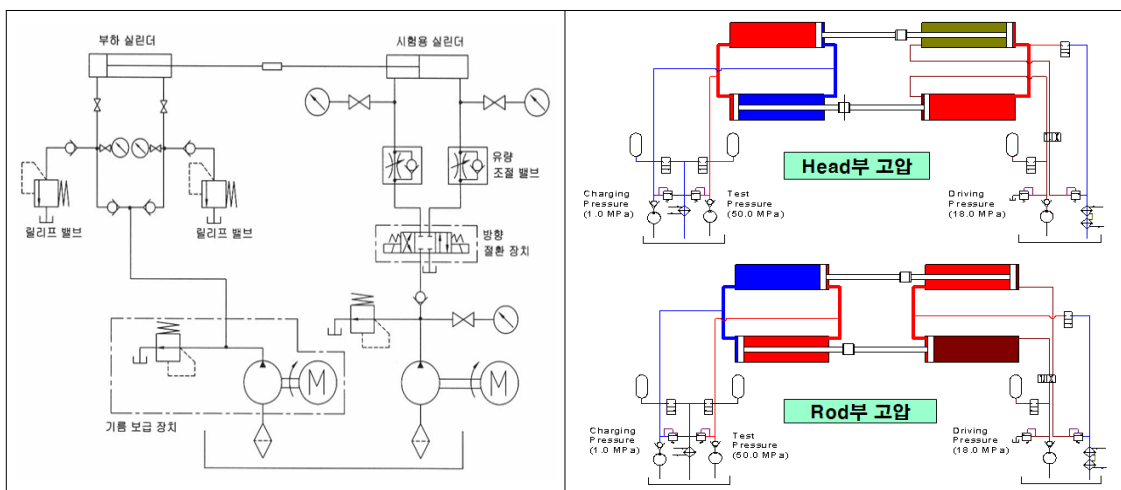
비용 또한 매우 높고 실린더 수명에 비해 시험장치의 펌프나 밸브의 고장이 빈번하고 수명이 길지 못한 경우가 많다. 따라서 상기의 문제점을 보완한 본 연구는 30톤급 굴삭기의 상용압력 34.3 MPa, 작동속도 0.5 m/sec, 행정거리 1800 mm인 고압고속 유압실린더를 신뢰수준 80%에서 2.5×10⁵ cycle(B10 수명 보장) 보장하기 위하여 약 2,100시간 시험에 활용 하였던 에너지 절약형 유압회로로서 <표 1>과 같이 기존에 비해 약 20% 수준의 작은 동력으로 시험을 하였다.

<표 1> Comparison of electric power consumption and device building cost

No	장 비 명	기존 시험방식		개발된 시험방식	
		내용	소비전력(kW)	내용	소비전력(kW)
1	Driving power unit	300 Kw x 1개	300	5 Kw x 1개	5
2	Load power unit	55 Kw x 1개	55	60 Kw x 1개	60
3	Controller	1Kw	1	1Kw	1
전기료		356 kW x 2,083 h x 120 원/kWh = 70,551,210 원		66 kW x 2,083 h x120 /kWh = 13,997,760 원	
유압동력발생장치(HPU)		50 MPa * 350 L/min : 약 5억		50 MPa*10 L/min : 약 0.2억	

2.1.2 수명시험장치 설계 개발

에너지 절약형 유압실린더 수명시험 장치는 <그림 2>와 같이 단면적이 동일한 2개 혹은 4개의 유압실린더의 실험부와 구동부가 배관이 연결되어 실험부에 고압을 작용시켜 힘 평형을 이룬 상태에서 구동부에 저압을 공급하여 실린더를 실험함으로써 고압 유체의 연속적인 공급 없이 구동부의 저압 유체의 공급만으로 실린더의 수명 실험을 수행함으로써 소요되는 에너지의 80%절약할 수 있었다.



<그림 2> Hydraulic circuit diagram of life test of the hydraulic cylinder newly developed and KS B 6370

<그림 2>와 같이 고압 수명시험용 실린더인 제1구동실린더와 제1시험 실린더의 로드를 상호 연결한 후 펌프를 통해 시험압력(50 MPa)의 유체를 로드 부 또는 헤드부와 이에 연결된 제 1시험 실린더의 로드 부 또는 헤드부에 공급한 후 펌핑을 중단하면 고압의 시험 압력이 제1구동실린더와 제1시험 실린더의 로드 부 또는 헤드부에 충만 되어 두 실린더는 힘 평형 상태로 있게 된다.

한편, 수명시험을 위해서 저압(10MPa)의 펌프를 구동하게 되고 이로부터 나온 유체가 제 1 구동실린더 또는 제1시험 실린더의 헤드 부 또는 로드부에 입력되게 되면 두 실린더의 힘의 평형은 깨어지게 되어 두 실린더내의 피스톤이 움직이게 된다. 즉, 저압의 유체를 공급하는 구동펌프의 전방에 설치된 방향전환밸브의 조작만으로 유체의 방향을 반복하여 바꾸어줌으로써 두 실린더의 반복 수명을 동시에 수행할 수 있으며 공급되는 유체는 저압의 유체만이 필요하게 된다.

2.2 기계동력 순환 형 유성기어박스 수명시험 메커니즘 개발

2.2.1 에너지 소요량 분석

유성기어감속기의 연속 수명시험은 제품의 신뢰도 확보를 위해서 매우 중요하며, 가속수명 시험을 위하여 과부하(over load) 및 Over Speed Test가 필수적으로 요구된다. 약 400 Kw 이상의 동력이 요구되는 시제품을 1,000시간이 넘는 수명시험을 위해서는 시험용 전기료만 수천만 원(471 kW x 400 h x 120 원/kWh = 2,260만원)에 해당하고, 동급의 유압모터가 내장되었을 경우 안전계수 약 120% 수준의 과부하(over load) 및 Over Speed Test만 가능하다. ‘이용범, 한승호(2010)’에서 <표 2>와 같이 소요 동력의 20% 만을 사용하고 최대 200% 과부하(over load) 및 Over Speed Test가 가능한 기계식 동력순환 기어박스 시험 장치를 개발하여 시험하였다.

<표 2> Comparison of electric power consumption and device building cost

No	장 비 명	기존 시험방식		개발된 시험방식	
		내용	소비전력(kW)	내용	소비전력(kW)
1	Driving power unit	420 Kw x 1개	420	50 Kw x 1개	50
2	Load power unit	50 Kw x 1개	50	12 Kw x 1개	12
3	Controller	1Kw	1	1Kw	1
Total			471		63
전기료		471 kW x 400 h x 120 원/kWh = 22,608,000 원		63 kW x 400 h x 120 /kWh = 3,024,000 원	
Test Mechanism 구축		유압식 Test Mechanism구축 : 약 7억		Mechanical feed back type test mechanism 구축 : 약 1.5억	

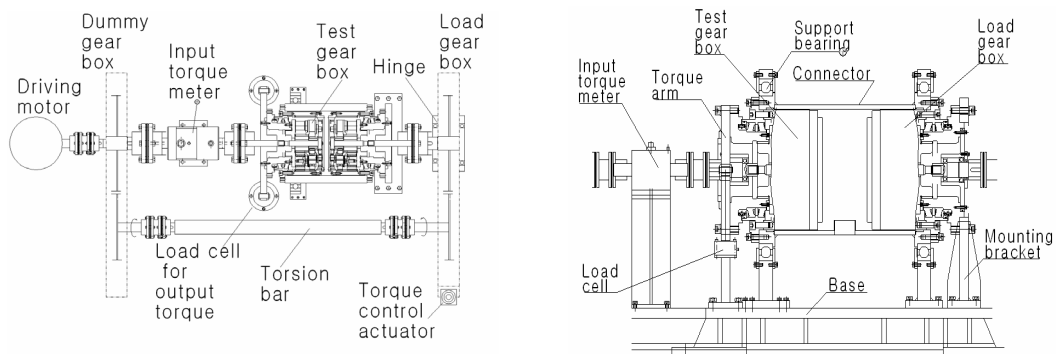
2.2.2 유성기어박스 수명시험 장치 개발

기계식 동력 순환 형 유성기어박스 시험 장치는 정지된 상태에서 최대 토크 시험이 가능한 것은 물론 회전 방향에 관계없이 토크를 가할 수 있고, 최대 부하 시험에서 입력동력은 기계적 폐 회로의 동력 순환 중 마찰 손실(약 15%이하)정도만 소요된다.

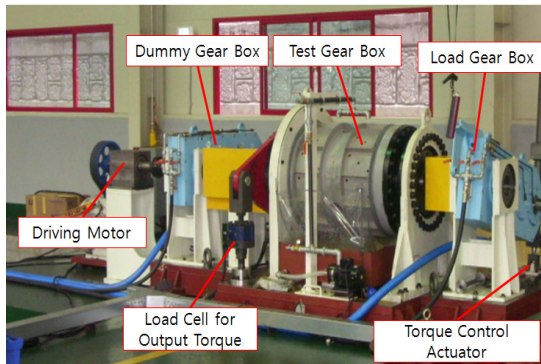
본 연구에서는 차체중량 85ton급 초대형 굴삭기의 주행 감속기는 3단 유성기어 트레인으로 구성되어 감속비는 128:1, 출력 회전속도는 15rpm이고 출력토크는 200,000Nm에 달한다. 이 유성기어박스를 400시간 이상 연속 내구수명시험을 위해 입출력 동력을 폐회로로 구성하여 상쇄시킬 수 있는 기계식 동력 순환 형 유성기어박스 시험장치(mechanical feed back type planetary gear box test device)를 <그림 3>과 같이 설계 구성 하였다.

시험용과 부하용 유성기어박스를 원통형 드럼형태의 커넥터(connector)로 연결하고 외주에 베어링으로 지지 해줌으로서 동심도 확보와 회전이 가능하도록 하였고, 부하용 유성기어 캐리어에 연결된 지지플렌지를 고정브래킷으로 견고하게 베이스에 고정하고, 시험용 유성기어 3단 캐리어에 연결된 지지플렌지에 토크 암을 부착하고 중심높이에 링크를 만들고 좌우 대칭이 되는 곳에 로드 셀이 부착되어 유성기어박스에서 토크가 발생 할 때 로드 셀에 힘이 나타나도록 하였다. 한편, 부하용 기어박스에 발생한 토크는 Torsion bar와 더미기어박스(dummy gear box)통해 기계식 동력 순환을 이룰 수 있도록 하였다.

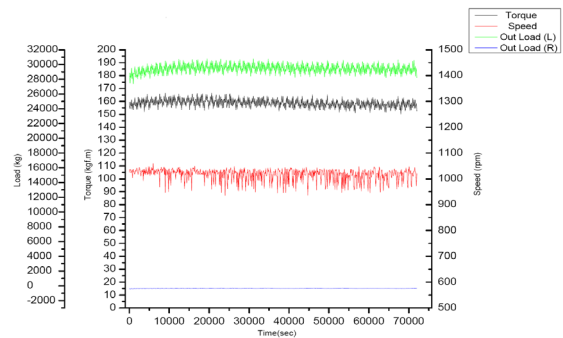
이 시험장치의 크기는 4.5m(L)X1.3m(W)X1.5m(H)로서, 기존의 토크미터를 부하 및 시험용 유성기어박스 사이에 장착하는 방식에 비하여 길이 방향으로 1.5m 이상 짧아져 시험공간의 효율성과 시험설비 규모가 대폭 축소되었고, 이 시험 장치를 통하여 과부하(over load) 및 초과속도(over speed) 시험을 한 결과 수요업체에서의 장비 장착한 후 Field Test에서 발생 하지 않은 문제점을 조기에 발견하는 성과를 획득 하였다.



<그림 3> Newly developed torque measurement system of mechanical feedback type test mechanism for planetary gear box



<그림 4> Picture of the mechanism for a mechanical power cycle type planetary gear box



<그림 5> Test results using mechanical feedback type test device

2.3 유압실린더를 이용한 대형유성기어박스 정역충격 수명시험 메커니즘 개발

대형유성기어감속기는 건설기계의 주행구동 및 선회유닛을 포함하여 크레인 등에 사용되며, 소형유성기어감속기는 자동화기계에 널리 사용되고, 유성기어 증속기는 풍력발전기의 메인 기어박스과 조류발전기 등에 사용 되고 있다. 이러한 대형유성기어박스를 생산을 할 경우 신뢰성 확보를 위하여 반드시 정역충격수명시험을 실시하여야만 한다.

기존의 정역충격수명시험 장치는 유압모터에 고압 고 유량의 유체에너지를 공급하여 급격하게 정회전과 역회전시켜 시험감속기를 구동하고, 시험감속기의 기계적 출력을 유압펌프를 사용하여 유체에너지로 변환하는 <그림 6>의 정역 수명시험 장치를 사용하였다. ‘이용범, 김광민(2012)’의 유성기어박스가 대용량화됨으로서 시험장비구축에 소요되는 유압모터와 펌프의 대형화와 이를 구동하기 위한 유압동력발생 시험비용이 높아지는 문제가 있었다.

따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 대형 유성기어박스의 선 기어(sun gear), 캐리어(carrier) 및 링 기어(ring gear)로 나눌 때 1 개의 입력과 1 개가 고정될 경우 다른 하나가 출력이 되는 회전(구동) 특성을 이용하여 유압실린더와 링크를 사용해 $\pm\alpha$ 각도의 시험 동력을 가함으로서 높은 기어 비에 의해 작은 각도의 변위로 급격한 정역회전이 가능한 <그림 7~8>과 같이 시험 장치를 설계하였다.

유압실린더에 의한 구동은 ‘Anthony Esposito(2004)’에서 유압모터에 비해 낮은 압력으로 고 토크를 발생시킬 수 있고, 내부 및 외부누유(internal & external leakage)에 따른 용적 손실이 없어 효율이 높고, 응답성이 빠른 특징을 갖고 있으며, 별도의 부하부에 저압 대용량의 유압을 공급하지 않아도 됨으로 약 30%의 동력 손실을 저감 할 수 있다. 새롭게 제안된 유성기어박스 시험동력 입력장치는 <그림 9>와 같이 유성기어박스 3단 캐리어 고정 단의 중심높이에 토크 암을 장착하고, 좌우 대칭 양쪽에 링크와 동일한 사양의 유압실린더 2개를 장착하고 하단에 핀 형 로드 셀로 고정을 하였다. 시험결과는 Fig. 10과 같으며 시간지연이 줄어들고 요구하는 토크 값에 98%수준의 결과를 보였다.

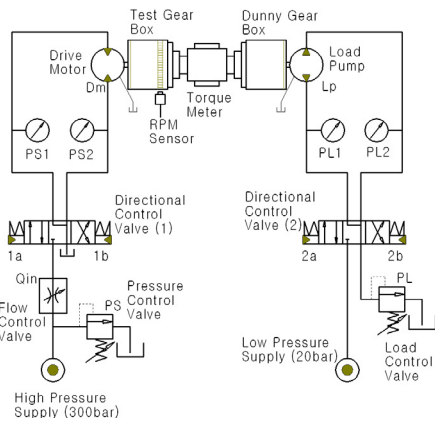
토크 암의 반경 L 의 위치에서 두 개의 유압실린더가 직선운동을 하여 시험에 필요한 입력을 가하는데 이때 이론적인 유압실린더의 출력(F_{th})은 ‘이용범, 김광민(2011)’에서 식 (1)과

같다. 그러나 실제적으로는 이론적인 유압실린더출력에서 유압실린더의 실 마찰손실과 링크의 마찰 손실을 제외한 힘(F_a)이 시험 장치에 입력이 되며, 이때 입력토크 T_{in} 는 로드셀(pin type load cell)에서 측정되는 F_a 와 토크 암의 반경 L 의 곱으로 식(3)과 같다.

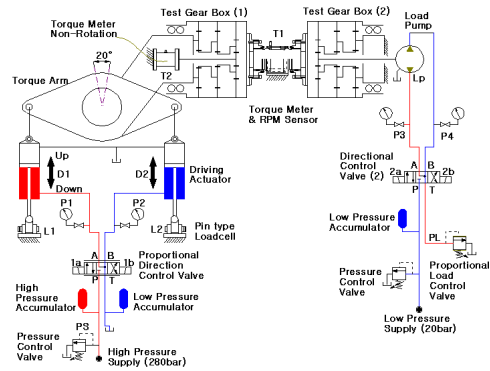
$$F_{th} = \Delta P \times A \text{ [N]} = \Delta P \times \left(\frac{\pi D^2 - d^2}{4} \right) \text{ [N]} \quad (1)$$

$$F_a = F_{th} \times \eta_{mc} \times \eta_{ml} \text{ [N]} \quad (2)$$

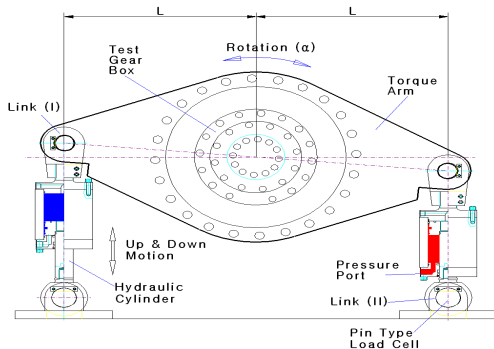
$$T_{in} = \pm \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times F_a \times L \text{ [Nm]} \quad (3)$$



<그림 6> Hydraulic circuit diagram of a testing device for the existing planetary gear box



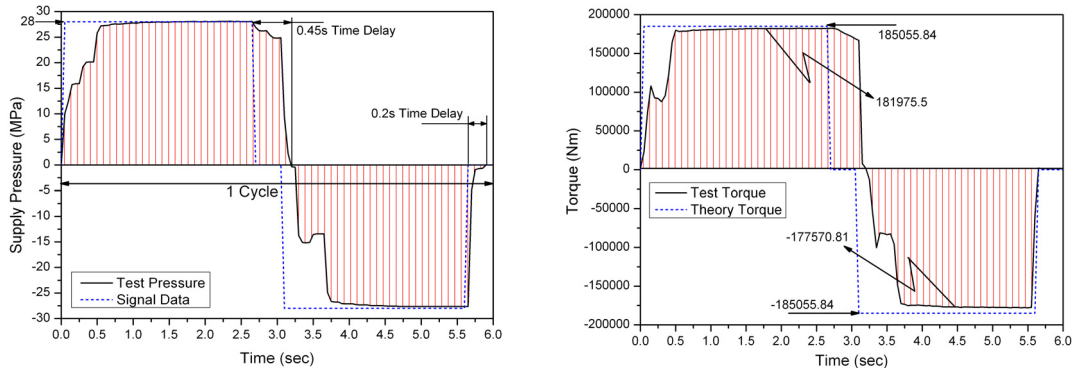
<그림 7> Circuit diagram of a testing device for the planetary gear box newly developed



<그림 8> Schematic diagram of a normal-opposite rotational shock torque generator using a hydraulic cylinder



<그림 9> Picture of a normal-opposite rotational shock torque generator using a hydraulic cylinder



<그림 10> Test results of a normal-opposite rotational shock torque generator using a hydraulic cylinder

3. 결론

본 논문에서는 대형기계류부품의 신뢰성 시험에서 에너지절감이 탁월 했던 유압실린더와 유성기어박스의 수명시험장치의 설계메커니즘을 소개했다.

주 고장 모드가 실 내마모인 유압실린더의 수명시험은 에너지절약형 시험회로를 사용할 경우 기존 동력소모의 약 20% 수준이며 특히 시험장비 구축비용이 매우 낮았다. 또한 대형 유성기어박스의 연속 수명시험은 기계적 동력 순환방식(mechanical feed back type)을 사용할 경우 유압다이내모미터 식 또는 전기다이내모미터 식에 비해 동력소모가 약 25% 수준으로 나타났다. 대형 유성기어박스의 기어 치면 및 캐리어 등의 강도확인 하기 위한 정역 충격 수명시험은 구동 장치로 유압실린더를 이용할 경우 에너지 절약과 장비구축이 효과적 이었다.

Acknowledgement

이 연구는 2012년도 부품소재개발사업 “14톤급 중형 휠 굴삭기용 유압식 변속기 국산화 개발 MI3670”의 일부지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] James A. McLinn(2005), Assuring hydraulic component reliability, NCFP 105-3.1, 67-73.
- [2] 이용범(2010), 배수갑문용 초대형 유압실린더 신뢰성평가, 유공압시스템학회 논문집, 제7

- 권, 제1호, 6-10.
- [3] 이용범, 한승호(2010), 로드셀과 토크암을 이용한 대용량 토크측정 장치개발에 관한 연구, 유공압 시스템학회 논문집, 제7권, 제1호, 6-10.
 - [4] 이용범, 김광민(2012), 대형 유성기어박스의 정역회전 내구성시험장치 개발에 관한 연구, 한국 생산제조시스템학회지, 제21권, 제2호, 305-310.
 - [5] Anthony Esposito(2004), Fluid power with application, Prentice Hall, Inc, Sixth Edition, 197-222.
 - [6] 이용범, 김광민(2011), 굴삭기용 유성기어 감속기의 가속수명 시험, 대한기계학회 신뢰성 부문 춘계학술대회 논문집, 144-146.