유공압시스템학회논문집 제7권 제1호 pp. 6~10 2010년 3월

로드셀과 토크암을 이용한 대용량 토크 측정장치 개발에 관한 연구
Development of device measuring very high torque via torque arm with attached load cells

이용범 · 한승호
Y. B. Lee and S. H. Han

Key Words : Torque measurement device(토크 측정장치), Planetary gear box(유성기어박스), Torque arm(토크 암), Load cell(로드 셀), Mechanical feed back(기계식 동력 순환)

Abstract: A measurement of very high torque for track drive unit in construction equipment is usually in difficulties due to the requirement of a torque meter with high capacity, and the limitation of geometry for an experimental set-up. To improve the troublesome problem, a new device was proposed, where a torque transmitted through the torque arm can be measured by load cells attached at each torque arm. The experimental set-up of the new device was carried out in order to measure the torque values for a mechanical feedback type planetary gear box, in which the power flow circulates itself in a closed-loop. The new device enables to measure torque values of 60,000Nm. Additionally, the measured values were estimated statistically in the aspect of their repeatability and reproducibility, so that an acceptable behaviour as a measuring device can be confirmed.

1. 서 론

회전축의 토크를 측정하기 위한 가장 일반적인 방법은 토크미터를 축의 길이 방향으로 설치하여 이에 장착되어 있는 스트레인 게이지로부터 얻어지는 신호를 토크로 환산하는 것이다. 이러한 방법은 저용량의 토크가 요구되는 동력전달 장치인 감속기의 기계적 효율의 계측과 검증에 효과적으로 활용되고 있다[1].

그러나, 대표적인 건설장비인 대형 굴삭기 또는 크레인 그리고 풍력발전기의 증속기 등에 활용되는 유성기어 방식의 동력전달 장치의 성능평가를 위해 대용량 토크측정이 요구된다. 기존의 토크미터를 이용하여 대용량 토크를 측정하는 경우, 다음과 같은 문제점이 있다. 즉, 고가의 대형 토크미터를 구입해야 하는 점과 토크미터와 연결되는 커플링의 길이가 길어지고, 중량도 많이 나가 실험을 위한 설치공간의 제약 및 작업효율이 매우 낮아지는 문제점 등이다.

접수일 : 2009년 11월 24일
이용범(책임저자) : 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실
E-mail : lyb662@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7151
한승호(교신저자) : 동아대학교 기계공학과
E-mail : shhan85@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7655

본 연구에서는 유성기어박스의 구조적 특성을 이용하여, 부하 및 시험용 기어박스 각 한 쌍을 서로 맞대어 컨넥터로 연결하고 이를 볼베어링으로 지지하여 유성기어 2단 케리어를 통해 전달되는 대용량 토크를 토크암과 로드셀로 측정하는 방식을 제안하였다. 이때, 토크는 케리어와 연결된 토크암의 길이와 각각의 암의 끝단에 장착된 로드셀로부터 얻어지는 힘을 고려하여 측정된다. 상기 제안된 측정방식의 신뢰도는 자체 제작된 기계식 동력순환 기어박스 시험장치(mechanical feedback type test device)에서 실제 조건에 맞추어 실험을 수행하여 계측된 토크 값의 신뢰도로 검증하였다.

2. 유성기어박스의 거동과 토크 측정법

유성기어 열은 선기어(sun gear), 유성기어(planet gear), 링기어(ring gear), 그리고 캐리어(carrier)로 구성되는데, 이를 이용한 감속기에서는 각 구성품의 배치에 따라 기어비나 동력전달 방법이 효율적으로 바뀌게 된다.[2] 본 연구의 대상품인 유성기어 감속기는 Fig. 1과 같이 2단 유성기어 열로 구성되어 있고, 모터로부터 고속, 저 토크의 동력을 선기어가 입력받

아 1단 유성기어에 동력을 전달하게 되고, 1단 링 기어의 구속으로 1단 캐리어가 회전하여 2단 선 기어의 입력 이 이루어져 최종적으로 2단 링기어가 저속, 고토크의 출력을 토출하게 된다.

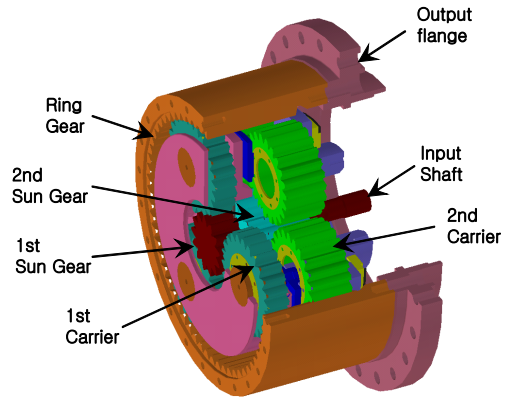

Fig. 1 Schematic illustration of planetary gear box with 2 steps gear trains

유성기어박스의 속도 감소에 따른 토크의 증대량은 감속비 I 로 표현되는데, 이는 식(1)과 같다[1,3].

$$I=-(k_1k_2+k_2+k_1) \tag{1}$$

여기서, $k_1=\frac{B_1}{A_1}$, $k_2=\frac{B_2}{A_2}$

$A_{1,2}$: 1, 2 단 선기어 잇수

$B_{1,2}$: 1, 2 단 링기어 잇수

유성기어박스의 기계효율 η_m은 출력토크 T_{out}을 입력토크 T_{in}에 감속비 I 를 곱한 값을 나누어 산출하며 식(2)와 같다[4,5].

$$\eta_m=\frac{T_{out}}{I\times T_{in}}\times 100 \tag{2}$$

유성기어박스의 기계효율 η_m을 실험적으로 확인하기 위해서 입, 출력토크의 측정이 요구된다. 일반적으로 토크를 측정할 때는 부하 및 시험용 유성기어박스를 커플링으로 연결하고 중앙에 토크미터를 설치하는 방식을 따른다. 출력이 낮은 경우, 상기 방식의 적용에 문제가 없으나, 토크용량이 상승하게 되면 고가의 토크미터의 구입과 연결 커플링 사이에 토크미터를 삽입하여 장착함으로서 시험설비가 방대하게 되는 단점을 갖고 있다[6,7].

이러한 단점을 보완하기 위하여, 부하 및 시험용 유성기어박스를 커플링으로 연결한 사이에 토크미터를 삽입하지 않고, 시험용 유성기어박스 출력단(2단 링기어)에 Fig. 2와 같은 토크암을 설치하고, 양 끝단에 링크로 연결된 로드셀을 이용하여 토크 T를 측정하는 방식을 제안하였다. 이때, 로드셀은 슬라이딩 및 지지 장치(sliding and support)와 클램프 사이에 약 1mm 정도 틈새(gap)를 갖고 있어, 압축 방향의 힘은 계측이 되지 않도록 하였다. 즉, 로드셀은 토크암에 의한 재하시(loading-unloading) 인장 방향의 힘만을 계측하여, 압축하중 작용시 발생할 수 있는 메커니즘의 불안정성(unstability) 문제를 피할 수 있는 특징을 갖고 있다.

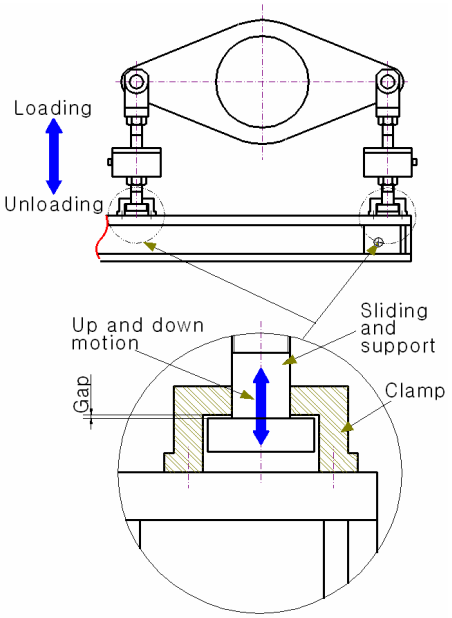

Fig. 2 Sliding and support device for loading and unloading

Fig. 2와 같이 새롭게 제안된 토크측정장치를 이용하여 고정 단의 중심높이에 링크를 만들고 좌우 대칭이 되는 토크암의 반경 L의 위치에 작용하는 토크 T는 로드셀에서 측정되는 F와 거리의 곱으로 식(3)과 같이 구해진다.

$$T=F\times L \quad [Nm] \tag{3}$$

3. 기계식 동력 순환 기어박스 시험장치의 설계 및 구현

시험대상 유성기어 감속기는 2단의 유성기어 트레인으로 구성되어 감속비 I 는 39.9, 출력 회전속도는 43rpm이고, 출력토크는 61,500Nm에 달한다. 이의 출력토크를 측정하기 위하여 입출력 동력을 폐회로로

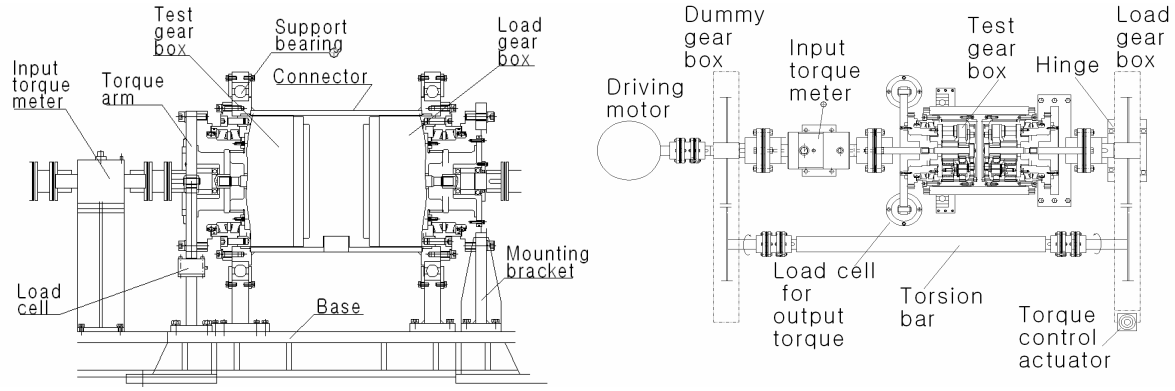

Fig. 3 Newly developed torque measurement system of mechanical feedback type test mechanism for planetary gear box

구성하여 상쇄시킬 수 있는 기계식 동력 순환 기어박스 시험 장치(mechanical feedback type test device)를 Fig. 3과 같이 설계, 구성하였다. 시험용 유성기어박스와 부하용 유성기어박스를 원통형 드럼 형태의 컨넥터로 연결하고 외주에 베어링으로 지지해줌으로서 시험부와 부하부의 동심도 확보와 회전이 가능하도록 하였다. 부하용 유성기어 캐리어에 연결된 지지플렌지를 고정브래킷으로 견고하게 베이스에 고정하고, 시험용 유성기어 2단 캐리어에 연결된 지지플렌지에 토크암을 부착하고 중심높이에 링크를 만들고 좌우 대칭이 되는 곳에 로드 셀이 부착되어 시험용 유성기어박스에서 토크가 발생 할 때 로드셀에 힘 F가 나타나도록 하였다. 한편, 부하용 기어박스에서 발생한 동력은 토션바를 통하여 더미기어박스로 회수되어 시험장비 전체적으로 힘의 평형상태를 이룰 수 있다.

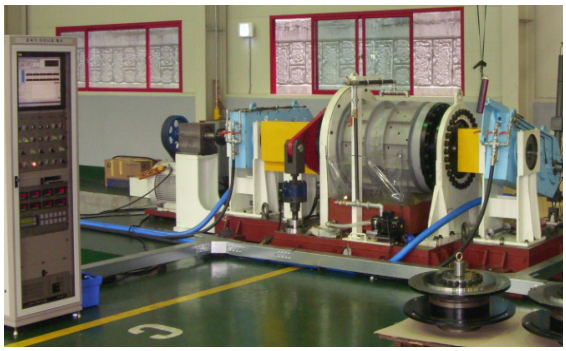

Fig. 4 Test set-up for torque measurement system

Fig. 4는 기계식 동력 순환 기어박스 시험장치가 구현된 모습이다. 본 시험장치의 크기는 4.5m(L)×1.3m(W)×1.5m(H)로서, 기존의 토크미터를 부하 및 시험용 유성기어박스 사이에 장착하는 방식에 비하여 길이 방향으로 1.5m 이상 짧아져 시험공간의 효율성과 시험설비 규모가 대폭 축소되었다.

4. 토크 측정시험 결과 및 분석

기계식 동력 순환 기어박스 시험장치를 이용하여, 출력토크가 61,500Nm인 유성기어 감속기의 성능을 측정하였다. 입력 기준압력 P는 15, 20, 25, 30 및 35MPa로 5단계로 설정하여, 토크미터로 측정되는 입력토크 T_{in}을 660~1,570Nm 범위에서 5 구간으로 나누었다. 각 구간 별로 토출되는 출력토크 T_{out}을 Fig. 2와 같은 토크측정장치로 계측하였다. 이때, 출력 회전수는 43rpm이 되도록 하였고, 각 구간에서 5분 이상 장비를 가동시켜 출력이 충분히 안정화된 후 로드셀의 계측 값인 힘 F를 기록하였다. 여기서 얻어진 F를 식(3)으로부터 T_{out}으로 환산하였고, 최종적으로 기어박스의 기계효율 η_m을 계산하였다. 이와 같은 실험을 모두 5회 반복하여 Table 1과 같은 실험결과를 얻었다. 얻어진 실험결과에 대하여 단순회귀분석과 동일성 분석을 통해 측정결과의 신뢰성을 분석하였다.

4.1 시험데이터의 단순회귀분석

입력 기준압력 P에 대하여 토크측정장치로 계측된 T_{out} 실험결과에 대하여 단순회기분석을 실시하였다. 이때, 서로 다른 실험 그룹에 대한 수준을 비교하고, 이에 대한 분산을 적용하는 F-검정을 도입하였다. 즉, 실험결과를 회귀직선 식으로 구하고, 이 식이 각 구간별로 x와 y간의 함수관계를 어느 정도 잘 표현하고 있는가를 판단하기 위하여 분산분석이 수행된다[7]. F-검정을 포함한 단순회귀분석 절차는 다음과 같다.

Table 1 Test results using mechanical feedback type test device

No	T_{in}(Nm)	T_{out}(Nm)	η_m (%)
1	663.3	24335.3	92.03
	896.0	34171.7	95.66
	1114.4	42653.2	96
	1348.1	51478.6	95.79
	1569.1	58714.0	93.86
2	666.5	24500.7	92.21
	895.2	34030.6	95.36
	1112.8	42410.3	95.6
	1347.9	51080.4	95.06
	1567.8	58824.2	94.12
3	663.3	24379.5	92.2
	896.0	34239.2	95.85
	1110.1	42586.4	96.22
	1345.6	51394.4	95.81
	1567.6	58607.2	93.78
4	664.6	24445.4	92.27
	895.7	34231.4	95.86
	1110.7	42560.7	96.13
	1344.1	51302.2	95.74
	1565.3	58436.1	93.64
5	664.3	24407.2	92.16
	895.8	34266.6	95.95
	1111.4	42678.0	96.33
	1345.8	51229.2	95.49
	1566.7	58461.3	93.6

회귀(regression) 및 잔차(residual)의 제곱합 SS를 SSR과 SSE라 하면, 이에 대한 제곱평균 V는 각각 $V_R = SSR,\ V_E = SSE/(n-1)$로 얻어진다. 이때, n은 총 경우의 수로서 본 연구에서는 25이다. $F-ratio$는 V_R과 V_E의 비로 표현되는데, 이 값이 유의한 $F(\alpha)$ 보다 크면 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택한다. 여기서, 귀무가설은 각 구간별 T_{out}이 직선이 되지 않을 것이라는 가설이고, 대립가설은 이의 반대 가설이다. 또한 $F(\alpha)$가 유의수준 α보다 작으면 귀무가설을 기각하는데, 본 연구에서는 유의수준을 α=5%로 설정하였다. 이상과 같은 조건을 따르게 되면 회귀분석식이 직선을 추종함을 의미하여, 결국 입력 기준압력 P에 대한 T_{out}의 실험결과가 선형성(linearity)이 됨을 확인 할 수 있다.

5번의 반복실험에 대하여 각각의 산점도(scatter plot)와 회귀직선 식을 그래프로 표현하여 분산분석을 실시하면, 다음과 같은 5개의 회귀직선 식을 도출할 수 있다[8]. 여기서 $x = P,\ y = T_{out}$이다.

[Test 1] $T_{out1} = -762 + 1721P_1$

[Test 2] $T_{out2} = -679 + 1714P_2$

[Test 3] $T_{out3} = -564 + 1712P_3$

[Test 4] $T_{out4} = -331 + 1701P_4$

[Test 5] $T_{out5} = -327 + 1701P_5$

상기 회귀직선식에 대하여 분산분석을 실시한 결과는 Table 2와 같다. 유의한 $F(\alpha)$는 1.078x10^{-3}으로 0에 가까운 값으로서 입력 기준압력 P에 대하여 실험결과로 얻어진 T_{out}의 회귀직선식이 직선에 유의하다고 할 수 있고, 이는 Table 1의 결과와 회귀직선식으로 표현된 Fig. 5의 결과로도 확인 할 수 있다.

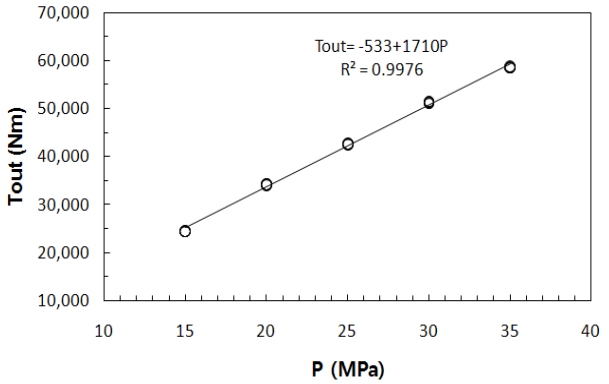

Fig. 5 Regression curves for whole experimental data

4.2 시험데이터의 동일성 분석

시험데이터의 동일성을 분석하기 위하여 5개의 회귀직선식을 이용하여 로드셀 값을 추정하였다. 측정자가 동일한 장치와 제품을 측정하였을 때 발생되는 변동을 알아보기 위하여 MINITAB 소프트웨어의 Gage R&R study 방법을 이용하였다[9].

측정 시스템의 총변동(total variance)은 부품간의 변동과 측정장치의 변동으로 구분한다. 따라서, 측정 시스템의 신뢰성은 각 구성요소의 영향에 대한 통계분석을 통하여 얻어진다. 본 연구에서 부품간의 변동은 다루지 않고, 측정장치의 변동만을 고려한다. 여기서, 측정장치의 변동은 반복성(repeatability)과 측정자의 변동에 따른 재현성(reproducibility)의 합으로 구성된다. Table 1의 실험결과는 동일한 측정자에 의하여 얻어진 것으로 간주되므로, 본 연구에서는 반복성 분석만을 실시하였다. Table 4는 반복성 분석의 결과로서, 반복성의 변동성이 0.03%로 측정장치에 대한 변동은 발생하지 않고, 동일한 측정값을 보인다는 결과를 보여주고 있다.

Table 4 Results from repeatability analysis

Source	Variance	Contribution (%)
Total Gage R&R	50122	0.03
Repeatability	50122	0.03
Part-To-Part	178015998	99.97
Total Variation	178066120	100.00

5. 결 론

본 연구에서는 유성기어 방식 감속기의 성능평가를 위한 기계식 동력 순환 기어박스 시험 장치를 설계하고, 이의 토크를 효율적으로 측정하기 위하여 토크암과 로드셀을 조합한 새로운 토크 측정법을 개발하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 유성기어 구조로 된 기어박스의 성능평가를 위한 기계식 동력 순환 기어박스 시험 장치에 새로운 토크 측정장치를 적용한 결과 시험설비 규모가 4.5m(L)×1.3m(W)×1.5m(H)로 기존방식 대비 길이가 1.5m 이상 축소되는 효과를 얻었다.

2) 토크암과 양 끝단에 링크로 연결된 로드셀은 재하시 인장 방향의 힘만을 계측하여, 압축하중 작용시 발생할 수 있는 메커니즘의 불안정성 문제를 피할 수 있는 특징을 갖고 있다.

3) 실험데이터의 단순 회기분석과 반복성·재현성 분석을 실시하여 측정장비의 신뢰도를 분석한 결과, $F(\alpha)$=1.078x10^{-31}으로 측정결과의 선형성 확보는 물론 반복성의 변동성이 0.03%로 측정장치에 대한 변동이 발생하지 않고 동일한 측정값을 보임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1) N. P. Chironis, “Gear design and application”, McGRAW-Hill Book Co., New York, pp. 94~208, 1967.
2) P. Lynwander, “Gear drive systems”, Marcel Dekker, Inc., pp. 293~382, 1998.
3) R. Southard, “New assembly drills without reactive torque”, SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, Volume 1, pp. 143~149, 2007.
4) Y. B. Lee, J. H. Park, “Accelerated Life Analysis of Track Drive Unit”, KFPS, Volume 2, pp. 1~7, 2005.
5) 지식경제부, “건설기계용 고효율 고강도 유성기어 감속기 개발”, 최종보고서, pp. 153~240, 2009.
6) 건설교통부, “대차용 감속구동장치 개발”, 최종보고서, pp. 513~534, 1999.
7) D. C. Montgomery, G. C. Runger, “Gauge Capability and Designed Experiments Part 1: Basic Methods”, Quality Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 115-135, 1993.
8) D. C. Montgomery, G. C. Runger, “Gauge Capability and Designed Experiments Part 2: Experimental Design Models and Variance Component Estimation”, Quality Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 289-305, 1993.
9) 이레테크미니텝사업부 & 세한미디어(주), 2001, “Six-Sigma 추진자 및 품질관리자를 위한 MINITAB 실무 완성”, 이레테크, pp. 9-1~12-12, 2001.