

단일입력 다출력 PTO 기어박스의 내구성시험에 관한 연구

Study of a Durability Test for Single-input Multi-output Power Take-off Gearboxes

이용범^{1*} · 유한주²

Yong Bum Lee and Han Ju Yoo

Received: 29 Nov. 2016, Accepted: 14 Feb. 2017

Key Words : PTO gearbox(PTO 기어박스), Hydraulic excavator(유압 굴삭기), Durability test(수명 시험), Single-input multi-output(단일입력 다 출력), Torque distribution(토크 분배)

Abstract: This study analyzed a life test method for a power take-off (PTO) gearbox. An engine transfers mechanical power (rotation and torque) to a hydraulic pump through a PTO Gearbox with one input shaft and three output shafts. PTO gear box durability under high loads over long time periods was tested using dynamometers. In order to reflect the rated operating conditions, power must be distributed to each output shaft, and experiments were conducted under various conditions to verify the characteristics of the distributed power. An accelerated life test was designed using speed and torque as acceleration factors. Also, efficiency tests were conducted under various load conditions. Also, a lubrication oil composition analysis was performed to analyze gearbox wear status.

기호 설명

t_n : success run test time
 B_{100p} : 100p th percentile of life time
 CL : confidence level
 p : non-reliability
 β : shape Parameter
 n : number of test sample
 AF : acceleration factor
 t_{na} : accelerated life test time
 Sc : contact stress

1. 서 론

현재 유압식 굴삭기의 연비효율을 개선하기 위해 다양한 연구가 진행 중이다. 연비효율을 개선할 목적으로, PTO 기어박스(이하 기어박스)는 85 ton 이상의 초 대형급 유압식 굴삭기의 엔진과 3대의 유압 펌프 사이에 설치하여 사용한다.

Fig. 1과 같이 기어박스의 출력 3축은 소형 유압 펌프 한 대와 중형 유압 펌프 두 대에 엔진 동력을 분배하여 전달한다. 따라서 기어박스는 굴삭기의 대동맥과 같으며, 엔진이 작동되는 장 시간동안 계속적으로 펌프를 구동하므로 고효율과 내구성에 대한 신뢰성이 요구되고 있다.

기어박스의 출력 3축은 기어열에 의해 동력이 분배되고, 장착되는 유압 펌프에 의해서 부하를 받는다. 따라서 현장 부하 조건을 반영한 내구성 시험을 위해서는 유압 펌프를 장착하는 것이 좋은 방법이다.

그러나 장 시간동안의 내구성 시험에 있어 경제성을 고려하여 입/출력 측에 Dynamometer를 설치하여 부하를 제어하는 방식을 채택하였다.

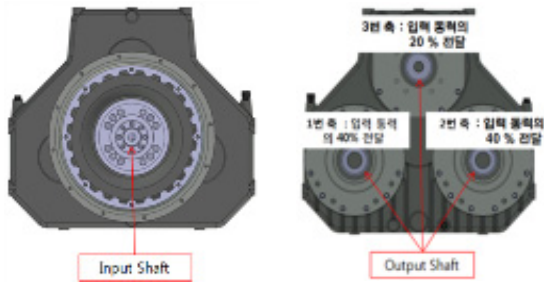
* Corresponding author:

1 Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials, Deajeon, 34103, Korea

2 Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials, Deajeon, 34103, Korea

Copyright © 2017, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a) Input shaft (b) Output shaft

Fig. 1 Gearbox for Hydraulic Pump Driving

Table 1 Specification of gearbox

Item	Unit	Specification
Max. torque / speed	Nm / r/min	3,000 / 1,800
Max. power	kW	570
Input/Output Speed	r/min	1,800/1,838
Torque distribution of output	-	3 Axis (1*20 %, 2*40 %)
Gear ratio	-	0.979/1 (중속)
Life ime	C.L.70% B5	20,000 h

이러한 시험 장비에서 기어박스의 각 출력축에 동력을 분배시키기 위해서는 시험 장비의 초기 조립 시 실시해야할 일련의 작업들이 있다.

본 연구에서는 기어박스의 내구성을 평가하는 기술로서 2대의 기어박스를 마주보게 설치하고, 기어의 위상차와 Backlash를 이용하여 서로 다른 토크를 부가하는 방법을 개발하였고, 장시간 내구성 시험에서 에너지 절감을 위한 전기 회생식 시험 장비를 구축하였으며, 수명 분석을 위한 효율 시험, 윤활유 오염도 분석을 실시하였다.

2. 가속 수명 시험 설계

기어박스는 현장에서의 요구수명이 약 10년(250 day × 8 hr × 10 year = 20,000 hr)이다. 유압 굴삭기에서 기어박스의 사용률은 100 %이므로 보증수명은 20,000 hr으로 볼 수 있다. 기어박스의 고장 모드는 기어의 피팅으로써 A사의 현장 취득 데이터에서 형상 모수(β) 1.7과 참고문헌의 내용을 비교하여 보수적으로 1.7을 적용하였다.

규정된 기어박스의 수명 2.0×10^4 hr (B_5 수명)을 보장하기 위한, 무 고장 합격 기준을 만족하는 시험 시간의 계산은 다음에 따른다. 수명 분포의 형상 모수 (β)가 1.7인 와이블 (Weibull) 분포를 따르고, 보증

수명은 2.0×10^4 hr (B_5 수명)이다. 신뢰 수준은 70 %, 시료는 2개 일 경우 무 고장 시험 시간(t_n)은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 t_n &= B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\
 &= 20,000 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.7)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{1.7}} \\
 &= 72,511.7 \text{ hr}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기에서 t_n 은 무 고장 시험 시간, B_{100p} 는 보증 수명, CL 은 신뢰수준(confidence level), n 은 시험 중인 전체 아이템의 개수(시료 수), p 는 불 신뢰도(B_5 수명이면 $p = 0.05$), β 는 형상 모수이다.

무 고장 수명시험시간은 72,511.7 hr이고, 등가 수명시험을 수행해야 신뢰성을 확보할 수 있으나 장기간의 시험시간과 큰 비용으로 인해 과부하(over load)에 의한 가속 수명 시험을 수행해야 한다. 따라서 굴삭기의 현장조건에서 기어박스의 주 고장모드인 기어 피팅을 고장 인자로 하고, 토크와 회전 속도를 가속인자로 한 가속 수명 시험을 설계하였다. 가속계수 AF 는 현장에서의 조건과 시험인가조건의 비로 나타내면 식 (2)와과 같이 표현된다. 기어 피팅에 대한 토크의 가속 지수(λ)는 Fig. 2의 S-N 곡선을 통하여 S_c 의 지수 값인 10임을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 AF &= \frac{t_f(\text{field})}{t_f(\text{test})} = \left(\frac{\tau_{\text{test}}}{\tau_{\text{field}}} \right)^{0.5\lambda} \left(\frac{n_{\text{test}}}{n_{\text{field}}} \right) \\
 AF &= \left(\frac{\tau_{\text{test}}}{\tau_{\text{field}}} \right)^5 \left(\frac{n_{\text{test}}}{n_{\text{field}}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

정상조건의 등가 토크는 1,453 Nm이며, 가속조건의 등가 토크는 3,000 Nm으로 하였다. 정상 조건의 회전 속도는 1,500 r/min이고, 가속 조건의 등가 회전 속도는 1,800 r/min으로 하여 가속 수명 시험을 설계하였다. 가속 시험 조건으로 부터 가속 계수(AF)는 식 (3)의 계산 결과로 부터 45.03을 적용한다.

$$\begin{aligned}
 AF &= \left(\frac{T_{\text{test}}}{T_{\text{field}}} \right)^m \left(\frac{N_{\text{test}}}{N_{\text{field}}} \right)^n = \left(\frac{3000}{1453} \right)^5 \left(\frac{1800}{1500} \right) \\
 &= 45.03
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기에서 T_{field} 와 N_{field} 는 사용 조건의 토크 및 회전수이고, T_{test} 와 N_{test} 는 가속 시험 조건의 토크 및 회전수며, m 과 n 은 가속지수이다. 따라서 펌프구동용 기어박스의 가속시험시간(t_{na})은 식 (4)와 같이 1,620 hr이다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} = \frac{72,511.7}{45.03} = 1,610.46 \approx 1,620 \text{ hr} \quad (4)$$

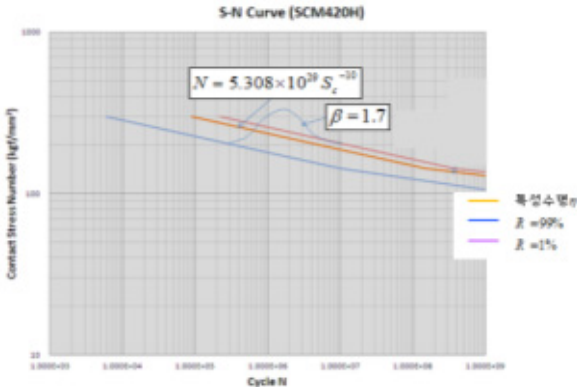
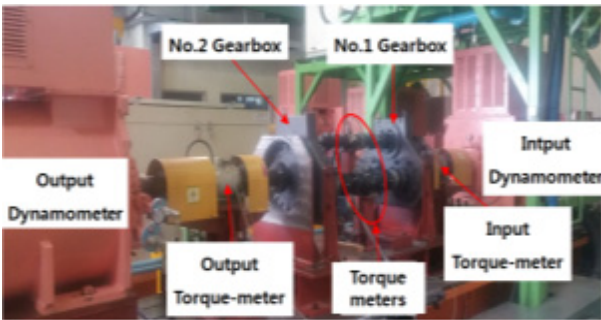


Fig. 2 S-N Curve for the gear pitting

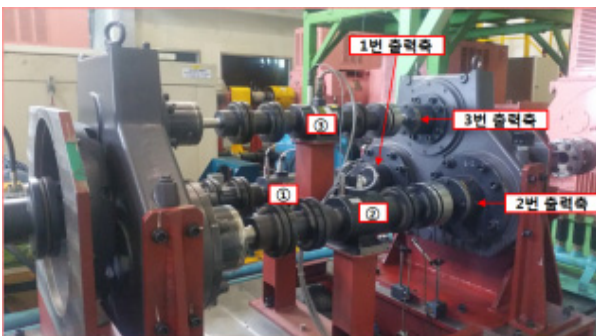
3. 시험 장치 소개

3.1 시험 장치의 구성

기어박스의 시험 장치는 Fig. 3과 같이 속도와 토크를 Dynamometer로 제어하며, 두 대를 마주보게 설치하여 동시에 시험 할 수 있도록 하였다. 내구성 시험 중 효율을 확인하기 위해 입/출력 다이내모미터 출력축과 기어박스의 출력 3축에 각각 토크 미터를 설치하여 토크를 확인할 수 있도록 하였다.



(a) Composition of test equipment



(b) Torque meters of output shaft

Fig. 3 Test equipment of gearbox

3.2 토크 분배 기술

앞서 언급했듯이 기어박스의 출력 3축은 기어열에 의해 동력이 분배되나 유압 펌프에 의해 부하를 받게 되므로, 다이내모미터를 활용할 때에는 적절한 토크 분배 작업이 실시되어야 한다. 토크 분배는 출력 각 축에 비틀림을 인가한 상태에서 축을 고정시켜야 하므로, Fig. 4와 같이 출력 1번 축을 제외한 2, 3번 축은 Power lock으로 연결한다.

또한, Backlash 제거와 함께 각 축에 초기 비틀림 (토크)을 인가하기 위해서 Fig. 5와 같이Torque-arm을 사용한다.

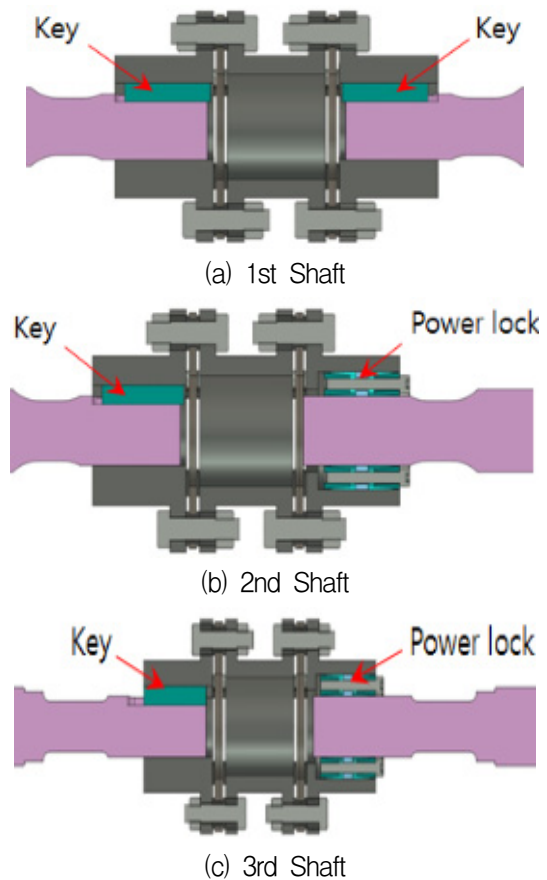
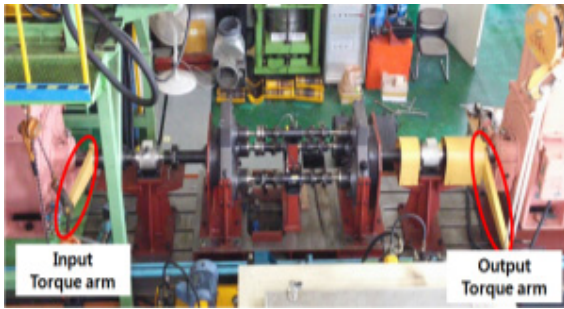
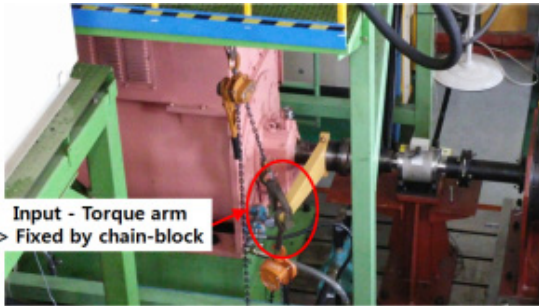


Fig. 4 Connecting type of output shaft

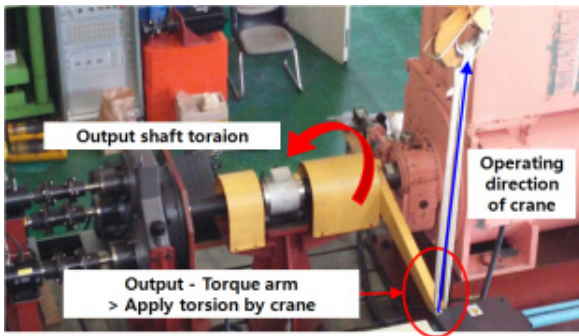
토크 분배 기술의 핵심은 기어의 백래쉬(back lash)와 위상차(phase difference)를 이용하여 각 축의 기어 물림량을 달리할 수 있도록 하는데 있다. 따라서 기어박스 출력 3축에 대한 토크를 분배하기 위해서는 초기 조립 상태에서 시운전을 통해 각 축에 인가되는 토크의 경향을 알아야한다. 시운전 결과 1번 축으로 토크가 많이 몰려 있음을 확인하였고, 이를 2번 축으로 인가시키기 위해 다음과 같이 조치하였다.



(a) Total scene



(b) Input - fixed by chain block



(c) Output - normal force (torsion)

Fig. 5 Torque distribution device

2번 축에 회전방향으로 비틀림을 50 Nm 인가한 후 Power lock을 체결하였고, 그 결과, Table 2와 같이 1번 축에 몰렸던 토크가 2번 축으로 옮겨가는 것을 확인하였다. 그러나 과도한 비틀림으로 인해 2번 축으로 토크가 몰렸고, 3번 축으로는 토크가 거의 생성되지 않음을 알 수 있다.

따라서 2번 축은 회전 반대방향으로 비틀림을 인가하여 분배되는 토크를 낮춰야 하며, 3번 축은 회전 방향으로 비틀림을 인가하여 분배되는 토크를 높여야한다.

Table 3은 상기와 같은 방법으로 여러 차례 시도하여 1,800 r/min과 3,000 Nm의 정격 실험 조건을 포함하여, 다양한 부하 조건에서 각 축에 분배되는 토크 분배율을 나타낸다.

Fig. 1의 토크 분배율과 다소 오차는 있으나, 목표

로 한 토크 분배율에 근접할 수 록 좀 더 미세한 비틀림을 조정해야 하므로, 이러한 조정이 가능하다면 오차를 더 줄일 수 있을 것으로 판단한다.

Table 2 Result of torque distribution

[unit : Nm]

Test condition	No.1	No.2	No.3
600 r/min*500 Nm	145	300	28
1,000 r/min*600 Nm	185	364	24
1,000 r/min*1,000 Nm	350	590	36

Table 3 Torque distribution ratio

[unit : %]

Input Torque	Gear ratio	1st Shaft	2nd Shaft	3rd Shaft
1,000 Nm	1 : 0.979	41.6	38.8	18.4
1,500 Nm		40.8	40.2	18.0
2,000 Nm		40.9	40.6	18.0
3,000 Nm		40.7	41.0	17.6
Average		41.0	40.2	18.0

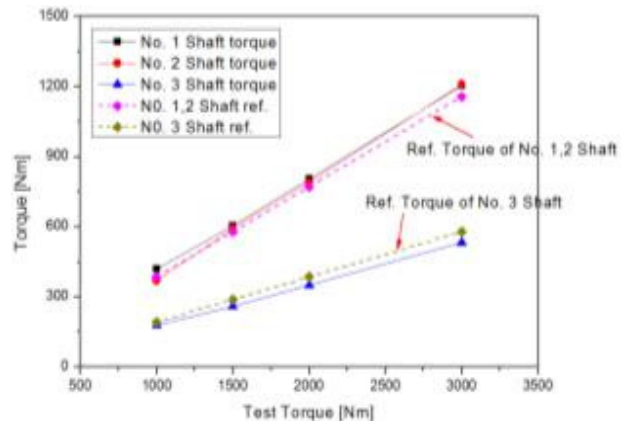


Fig. 6 Result of torque distribution

4. 기어박스의 가속수명시험 결과

4.1 수명 시험 전과 후의 효율 비교

기어박스의 가속시험 전과 후의 효율을 비교하였다. Table 4의 시험 결과와 같이 다양한 부하 조건에서 효율 시험을 실시하였으며, 수명 시험 전과 후의 효율을 비교하였을 때, 수명 시험 후의 효율이 다소 높아진 것을 확인하였다.

시험 전의 평균 효율은 97.9 %이고, 시험 후의 평균 효율은 98.8 %이다.

Table 4 Test result of efficiency

Metal	Before life test	After life test
1800 × 3000	97.95	98.13
1800 × 2750	97.93	98.54
1800 × 2500	97.81	98.64
1800 × 2250	97.32	99.24
1800 × 2000	97.58	99.65
1650 × 3000	98.31	97.89
1650 × 2750	98.1	97.70
1650 × 2500	98.12	97.94
1650 × 2250	97.17	98.56
1650 × 2000	98.22	99.38
1500 × 3000	98.16	98.37
1500 × 2750	98.48	98.84
1500 × 2500	97.97	99.28
1500 × 2250	97.25	99.47
1500 × 2000	98.03	99.65
1350 × 3000	98.1	98.64
1350 × 2750	98.1	98.80
1350 × 2500	97.73	98.84
1350 × 2250	97.57	99.06
1350 × 2000	97.78	99.18
1100 × 3000	98.24	98.54
1100 × 2750	98.26	98.95
1100 × 2500	98.12	98.84
1100 × 2250	97.26	98.97
1100 × 2000	97.35	98.78
1750 × 3000	98.09	98.21
1750 × 2750	97.84	98.96
1750 × 2500	98.03	99.01
1750 × 2250	97.13	99.65
1750 × 2000	97.93	99.75

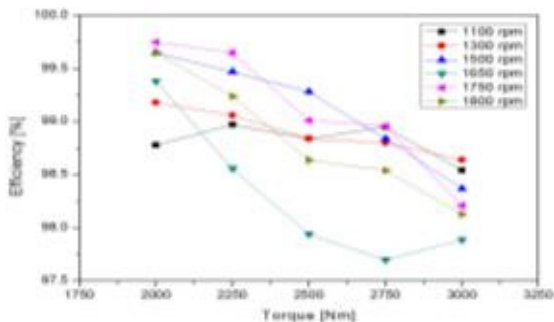


Fig. 7 Result of efficiency test

4.2 윤활유의 오염도 분석

기어박스의 가속시험 수행 중에 시험 대상품의 열화 정도를 확인하는 방법으로 유육윤활 방식을 적용하고 있는 기어박스에 윤활유의 오염도 분석을 수행

하여 기어박스 내부 상태를 확인하는 방법을 수행하였다[7][8]. Table 4는 오염도 분석을 위해 기어의 주요 성분인 철과 크롬 등을 ppm으로 분석하여 정상상태와 주의상태 등으로 구분한 오일의 오염도를 분석하는 기준을 나타내고 있다[6].

Table 4 Reference for used oil elements

Metal	Normal	Marginal	Caution	Critical
Iron (Fe)	0-100	101-150	151-300	>300
Chromium (Cr)	0-4	5-10	11-15	>15
Lead (Pb)	0-30	31-50	51-80	>80
Copper (Cu)	0-30	31-50	51-80	>80

기어박스의 오염도를 확인하기 위해 시험 초기에 서부터 수명시험 완료 시간까지 일정한 구간으로 나누어서 오염도 분석을 실시하였다. 기어유의 마모 성분을 분석한 결과 Fig. 6와 같이 철과 크롬의 성분이 마모 원소로 주로 검출되었다.

기어박스 시험 초기에는 신유를 주입하고 약 498 시간까지 오일을 교체하지 않고 수명시험을 수행하였다.

Fig. 6에서와 같이 498시간 이후부터는 오일분석을 추가로 실시하여 그래프 상에서는 구분되도록 표시하였다. 498시간, 936시간을 시험한 후 오일을 교체하였고, 시험 중 윤활유를 채취하여 성분 분석을 실시하였다.

초기 200시간 이후의 결과에서 보듯이 철(Fe) 성분이 Table 4의 기준 값인 100 ppm보다도 현저히 높은 402 ppm과 165 ppm이 입력 측과 출력 측 각각에서 나타남을 알 수 있었다. 이는 기어박스의 가공 중에서 발생하는 치면의 가공 흔적들로 인한 마모량 증가로 볼 수 있다.

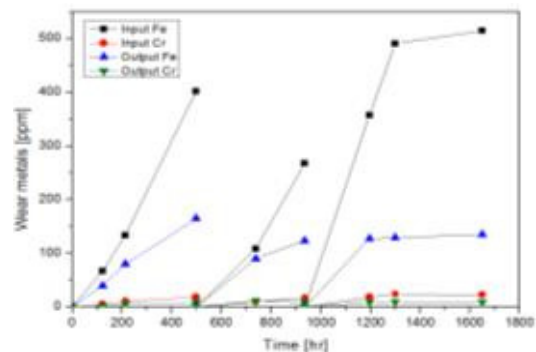


Fig. 8 Analysis result of oil contamination

첫 번째 윤활유 교체 후 936시간까지 철(Fe) 성분이 증가하고 있으나, 그 변화가 상대적으로 작은 구간으로 볼 수 있다. 두 번째 윤활유 교체 후 수명 시험 종료 될 때까지 철 성분이 매우 많이 검출되고 있고, 이는 기존의 오일을 전부 배유할 수 없는 상황에서 신유로 교체하였기 때문에 내부 잔량과 마모량의 증가가 합산되어 나타난 결과로 파악한다.

5. 결 론

본 연구에서는 단일입력 다출력 PTO 기어박스의 내구성 시험을 위한 토크 분배 기술을 적용한 시험 장치 구축하고, 가속 수명 시험을 실시하였으며, 시험 중 효율 및 윤활유 성분 분석을 실시하여 내구성을 확인하였다.

1) PTO 기어박스의 작동 조건을 재현하기 위해서는 유압 펌프로 부하를 인가하는 것이 정확한 방법이다. 하지만 오랜 시간 동안 시험을 실시함에 있어서 Dynamometer 제어 방법을 채택하는 것이 경제적이고, 토크 분배 기술을 적용함에 따라 현장 작동 조건을 재현하는 것에도 그 실효성을 검증하였다.

2) 내구성 시험은 회전 속도와 토크를 가속 인자로 하여, 1,800 r/min과 3,000 Nm의 시험 조건에서 1,620 hr 동안의 가속 수명 시험을 실시하였다.

3) 내구성 시험 전과 후에 효율 시험을 실시하여 효율 변화를 관찰하였고, 시험 전에 비해 시험 후 효율이 다소 높아진 것을 확인하였다. 이는 시험 중 길들여지기 된 것으로 볼 수 있으며, 시험 후 효율이 98.8 %로 업계에서 요구하는 효율 98 %를 만족함을 확인하였다.

4) 또한, 윤활유 오염도 분석을 주기적으로 실시하여 기어박스의 마모 경향을 분석하였다. 936시간 이후 철(Fe) 성분이 급증한 것은 오일 교체 시 기어박스 내부에 남아있는 오일을 전부 배유시키지 못한 이유로 파악된다.

후 기

본 연구는 차세대 건설기계부품 특화단지 조성사업 "90ton 굴삭기의 유압펌프구동용 PTO 기어박스(PTO Gearbox) 개발"의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

References

- [1] H. G. Kim, J. W. Choi, S. J. Yoo, K. S. Yi, "Development of Power Management Strategies for a Compound Hybrid Excavator," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 12, pp. 1537-1542, 2011
- [2] K. Y. Kim, D. S. Jang, "Development of the Close-Loop Swing System for a Fuel Efficiency Excavator," KSFC Spring Conference, pp. 113-115, 2012
- [3] K. M. Lee, 2005, "Failure Analysis and Accelerated Life Test for Hydraulic Sealing Component of Heavy Equipment", The Korean Reliability Society, Spring conference, pp. 311~325
- [4] S. R. Lee, H. E. Kim, 2006, "Determination of No-Failure Test Times for the Life Test of Hydraulic System Components", Journal of Applied Reliability, Vol. 3, No. 3, pp. 8~13
- [5] ANSI/AGMA 2001-D04(2001) Fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gear teeth
- [6] J. C. Fitch, "Source book for Used Oil Elements" Transmissions Common Wear Metal Ranges
- [7] S. Ebersbach, Z. Peng, N.J. Kessissoglou, "The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques," Wear, Vol. 260, pp. 16-24, 2006
- [8] A. R. Breeds, S. N. Kukureka, K. Mao, D. Walton, C. J. Hooke, "Wear behaviour of acetal gear pairs," Wear, Vol. 166, pp. 85-91, 1993