

하이포이드 회전감속기의 가속 수명시험 방법에 관한 연구

윤상환^{*,**}, 백권인^{**}, 김현경^{**}, 류성기^{**,#}

^{*}창원대학교 산학협력단, ^{**}경상대학교 대학원 기계항공공학부, 항공연

A Study on Accelerated Life Test of Hypoid Gear Rotary Reducer

Sang-hwan Yoon^{*,**}, Kwon-in Beak^{**}, Heonkeong Kim^{**}, and Sung-ki Lyu^{**,#}

^{*}Changwon National University,

^{**}School of Mechanical & Aerospace, ReCAPT, Gyeongsang National University

(Received 28 March 2017; received in revised form 16 April 2017; accepted 9 May 2017)

ABSTRACT

In order to process more complicated and higher-precision parts, generally, an additional axis for a machine tool is needed which was an approach to minimize the cost of tool modification. A table with a rotary reducer that can rotate through the axis of the gear system was employed to a machine tool to achieve the purpose of adding an extra motion axis. In general, the motion of the rotary reducer is driven by a worm/wheel or helical gear system, which is different from the hypoid helical gear structure that used in this research. Reliability of guarantee of high accuracy throughout the whole life cycle is one of the critical factors to evaluate a rotary reducer in this field. In this paper, in order to evaluate life-time of rotary reducer, a low-cost accelerated life test was developed to satisfy the demands of clients.

Key Words : Accelerated Life Test(가속 수명시험), Rotary Reducer(회전감속기), Condition Monitoring(상태감시), High Speed Machining(고속가공), Cutting Force(절삭력)

1. 서 론

금속 소재를 주절삭으로 하는 공작기계에 복잡한 형상의 공작물을 가공하고자 할 때 부가축이 필요하게 되는데 새로운 기계를 구입하지 않고 한 개 이상의 축을 더 부착하여 사용하게 되면 투자비용을 절감할 수 있는 잇점이 있다. 부가 축을 만들어 주는 방법으로 로터리 감속기의 테이블을 사용하게 되는데 기계의 기본축과 동일한 매우 높은 정밀도

를 요구하게 되므로 감속기에 관한 연구들이 많이 수행되고 있다.^[1-8]

고정밀 절삭가공용으로 사용하는 로터리 감속기의 테이블 회전구조는 워름과 워휠, 또는 헬리컬 기어를 사용하는데 본 연구에서 시험한 구조는 하이포이드 헬리컬 기어를 사용한 구조로서 회전 감속비는 1/30이다. 로터리 감속기 테이블은 수명이 다할 때 까지 고정밀도를 유지할 수 있는 신뢰성 확보가 매우 중요한 개발요소가 되고 있다. 즉 폐기되기 전까지는 정밀도를 유지하고 내환경성과 내구성 등을 갖추어야 한다. 특히 회전 정밀도를 유지하기 위해서는 기어의 마모가 최소화 되어야하므로

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

기어의 이물림과 정밀도를 높이기 위해 치형수정이 필요하며, 브레이크 시스템의 동작상태 변동이 없어야 한다.^[9-13]

본 연구에서는 로터리 감속기 테이블을 개발할 때 시장에서 요구하는 내구성에 대한 검증 방법으로 시간과 비용을 절감할 수 있도록 부가 축용 하이포이드 회전감속기의 가속 수명시험 방법을 연구하고자 한다.

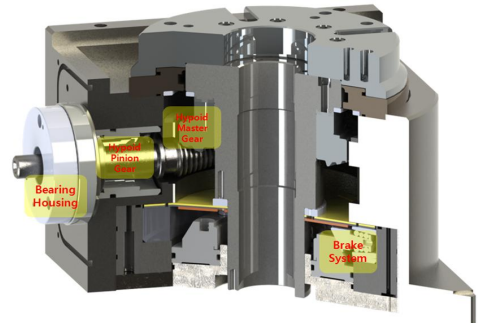
2. 로터리 감속기 테이블의 고장 종류

로터리 감속기 테이블의 구조 및 3차원 모델링을 Fig. 1에 나타냈다. 잠재적인 로터리 테이블의 고장 형태는 헬리컬기어 마모, 브레이크 마모, 베어링 마모, 발열, 오일 링(oil ring)의 파손에 의한 누유, 윤활부족, 조립상태 불량 등 그 형태는 여러 가지로 구분할 수 있다. 이러한 고장 요소들은 최종적으로 로터리 테이블의 가장 중요한 성능요소인 위치 및 반복정밀도를 나쁘게 하여 신뢰성을 낮추는 원인이 된다.

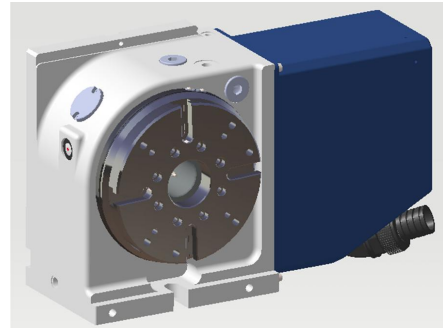
고장 내용별로 보면 위치 및 반복정밀도 저하 원인은 주로 하이포이드 기어(hypoid gear)의 고속 구동으로 인한 마모 발생과 발열에 따른 팽창으로 인한 오차가 발생하기 때문이다. 브레이크 밀림 현상으로 인하여 반복 정밀도가 떨어지게 되는데 이는 브레이크 패드 및 가공시 일어나는 진동에 의한 것으로 추정할 수 있다. 또한 진동이 가장 크게 일어나는 이유로 피동축과 구동축의 편심 및 편각 현상으로 회전시 발생한다. 한편 외관에서 볼 수 있는 현상으로 누유가 일어나는데 고속 회전으로 썰이 마모되거나 축 및 내부회전 부품의 표면 거칠기 불량이 원인으로 예측된다.

Table 1 Possible troubles of rotary table and its reason

Possible trouble	Reason
Accuracy drop	Generation of heat
Brake slip	Vibration of brake pad
Generation of heat	High speed of hypoid gear
Vibration	Misalignment between transmission axle and driving axle
Oil leakage	Seal wear caused by high speed



a) Structure of rotary table



b) 3D modeling of rotary table

Fig. 1 Structure and 3D modeling of rotary table

이와 같이 고장이 일어나기 쉬운 고장 종류와 고장발생 주요 원인을 종합하면 Table 1과 같다.

3. 가속수명시험 설계

3.1 가속수명시간 산출

산업용 하이포이드 기어 구조의 로터리 감속기 목표수명은 일반적으로 작업현장에서 20,000시간 이상을 보장하여야 한다. 감속기의 동력전달 기어의 고장은 문헌조사에 의해 형태모수 $\beta = 2.0$ (Barringer & Associates, Inc.자료)의 와이불(Weibull) 분포를 따른다.

로터리 감속기의 수명 20,000시간을 보장하기 위한 무고장 합격기준을 만족하는 시험시간은 식 (1)과 같다. 이때 신뢰수준(CL)을 80%로 하고 시료수(n)를 2로 할 때 무고장 시험시간(t_n)은 55,272시간이다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

여기서 t_n 은 무고장 시험시간, B_{100p} 은 보증수명, p 는 불신뢰도 ($B_{10} p=0.1$) 이며, β 는 형태모수이다. 이는 신뢰수준 80%에서 B_{10} 수명보장으로 20,000시간을 만족하기 위해서는 산업용 하이포이드 복합감속기 시료 2개를 55,272시간 동안 실제 사용 조건으로 시험을 실시하여 고장이 없어야 한다는 것이다. 그러나 현실적으로 55,272시간 동안 실제 사용조건으로 시험을 수행한다는 것은 불가능하므로 시험시간을 단축시키기 위한 가속시험을 실시하여야 한다.

로터리 감속기의 가속수명 시험시간의 산출을 위한 가속계수를 구하기 위해서는 작동시간에 따른 등기부하를 알아야 한다. 감속기의 경우 작동시간에 따른 평균부하는 실작동 조건에서 사용되는 부하를 측정함으로써 알 수 있다.

그러나 현실적으로 개발 중인 로터리 감속기 테이블의 실작동 부하를 측정하는 것이 어려운 관계로 로터리 감속기가 대체하고자 하는 직교축 워 감속기의 실제 사용 조건에서의 부하를 측정하여 평균 등가부하를 추정하였다. 평균 등가부하에 대한 등가토크 T_{min} 은 아래식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$T_{min} = \left[\frac{\sum N_i t_i T_i^n}{\sum N_i t_i} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

여기서 T_i 는 감속기의 작동토크 N_i 는 감속기의 회전속도 t_i 는 감속기의 작동시간이며, n 은 피로손상지수이다. 감속기의 정격속도에서 작동부하에 대한 실제 사용 조건을 측정한 결과를 정리한 등가토크는 아래식과 같이 최대토크 T_{max} 의 22%이다.

$$T_{min} = 0.22 T_{max} = 0.22 \times 5.0 = 1.1 \quad (3)$$

따라서 등가 부하에 따른 가속계수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이때 기어의 피로 손상지수를 10/3으로 하면 가속계수는 155.6이다. 이때 등가속도에 대한 가속계수는 감속기의 경우 일정한 속도로 사용하는 경우가 대부분이므로 적용하지 않았다.

$$AF_T = \left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^n = \left(\frac{1.00 T_{max}}{0.22 T_{max}} \right)^{10/3} \\ = \left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^n = \left(\frac{1.00 \times 5}{0.22 \times 5} \right)^{10/3} = 155.6 \quad (4)$$

그러므로 실제 무고장 가속수명 시험시간은 다음과 같다.

$$t'_n = \frac{55,272}{155.6} = 355.22 \approx 355 \quad (5)$$

무고장 시험시간으로 355시간은 100% 부하와 정격속도로 시험을 실시하여 고장이 없을 경우 실제 사용 조건하에서 신뢰수준 80%로 B_{10} 수명보장 20,000시간을 만족하는 시험시간이다.

3.2 가속수명 시험을 위한 스트레스 가속 방법 결정

시험방법으로 가속시험에서는 시험시간이나 시료 수의 감소를 위해 사용조건보다 가혹한 조건을 부과함으로써 고장 메커니즘을 촉진시키는 방법을 주로 사용한다. 사용목적에 따라 정성적 가속시험 (qualitative accelerated tests)과 정량적 가속시험 (quantitative accelerated tests)으로 구분되는데, 로터리 테이블은 고장율에 대한 신뢰성이 우선시 되므로 정량적 가속시험 방법을 선택하였다.

또한 로터리 테이블은 주로 절삭가공용으로 사용되고 현장의 사용조건에 따라 절삭조건의 차이가 크므로 사용조건보다 높은 스트레스를 가하는 방법인 고 스트레스(over stress)가속방법을 선택하였다. 고 스트레스 가속방법은 가속인자로서 온도, 습도, 진압, 진동, 부하 등을 사용하므로 로터리 테이블의 사용조건과 유사하다.

시험을 위한 조건 설정으로 하나의 스트레스를 사용조건보다 높은 수준으로 설정해 놓고 시험하는 경우에는 설정된 가속수준에서의 데이터들을 사용하여 그 수준에서의 수명분포나 신뢰도를 구한 다음 사용조건에서 신뢰도를 구한다. 이때 사용조건에서의 수명을 구하기 위해서는 스트레스 수준과 수명과의 관계식이 필요하다.

스트레스를 적용하는 방법으로는 스트레스를 일정한 크기로 증가시키는 방법, 계단형으로 증가시

키는 방법, 연속적으로 증가시키는 방법, 주기적으로 증가시키는 방법 등이 있는데 로터리 테이블은 수준인자(절삭력, 절삭유사용, 속도 등)가 다양하므로 서로 다른 수준의 스트레스를 가하는 방식을 적용한다.

가속시험을 위한 스트레스 수준은 사용조건에서 관측하고자하는 고장을 유발시킬 수 있도록 선택되어야 하며 기본적으로 스트레스의 수준을 규격한계(specification limit)는 초과하되 설계한계(design limit)는 초과하지 않도록 선정한다. 스트레스 수준을 높일수록 시험기간은 단축되나 사용조건에서의 수명에 대한 외삽(extrapolation)의 불확실성은 증가한다.

4. 시험방법 및 결과

4.1 시험방법

산출된 가속 수명시험 시간 및 스트레스 방법을 시험하기 위해서는 무하중 반복 회전만 할 수 없다. 왜냐하면 실제 로터리 테이블은 공작물에 따라 절삭력이 크게 작용하기도 하고 반대로 무부하로 동작하기도 하므로 이와 유사한 시험 조건을 마련하여야 한다. 본 연구에서 사용한 로터리 테이블 가속수명 시험 테스트 장치와 회전 및 반복 정밀도 측정 장치를 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타냈다. 본 연구에서는 아래 내용에서 몇 가지 시험 조건을 마련하고 시험조건별 동작 시간을 설정하였다. 이러한 시험조건은 실제 로터리 테이블이 산업현장에서 사용될 때와 유사한 조건을 고려하여 설정하였다.

시험조건을 설명하면, 먼저 정규 시험을 하기예 앞서 무부하 상태로 정규 시험조건을 축소 또는 간단하게 점검 차원에서 예비시험을 1회 사이클 시험을 실시한 후 정규시험 실시여부를 판단한다.

워밍업시험(warming up)은 저속상태(100 rpm이내)에서 15분 정회전, 15분 역회전 실시하고, 최고 회전수 운전은 무부하 상태에서 최고회전수로 정회전 5분, 역회전 5분씩 각각 30분 실시한다.

그리고 편심 하중시험(1)은 테이블 수평상태에서 최대 적재하중의 2배 이상을 한쪽(0~180도 이내)

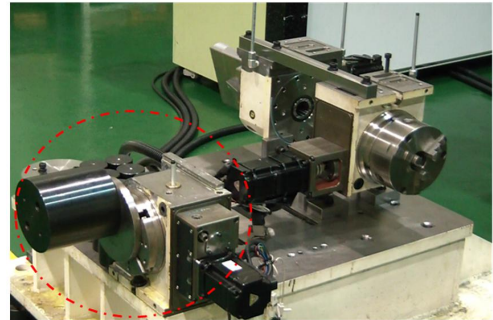


Fig. 2 Accelerated life tester of rotary table



Fig. 3 Precision measuring instrument of reciprocating motion

에만 적재하여 최고회전수로 30분 동안 운전하고, 편심 하중시험(2)은 테이블 수평상태에서 최대 적재하중의 2배 이상을 한쪽(180~360도 이내)에만 적재하여 최고회전수로 30분간 운전한다. 편심 하중시험(3)은 편심하중(1) 조건에서 테이블을 수직으로 하여 실시한다. 편심하중시험(4)은 편심하중(2)조건에서 테이블을 수직으로 실시하고, 균형하중시험(1)은 테이블 수평상태에서 최대 적재하중의 2배를 양쪽 동일하게 분배하여 최고 회전수로 30분 동안 운전한다. 균형하중시험(2)은 균형하중 시험(1)상태에서 테이블을 수직으로 하여 30분 동안 운전한다.

절삭시험(1)은 직경이 150 mm인 SM45C(Hrc 20 이하)소재를 사용하고, 공구는 직경이 10 mm인 엔드밀/3날 측면가공용/초경합금(비코팅)을 사용하며, 절삭조건은 절입깊이 15 mm, 절입폭 5 mm, 절삭유는 습식, 작업시간은 30분 동안 실시한다.

절삭시험(2)는 직경이 150 mm인 SNCM8(Hrc 20이하)소재를 사용하고 공구는 직경이 10 mm인 엔드밀/3날/측면가공용/초경합금(비코팅)을 사용한다. 이때 절삭조건은 절입깊이 15 mm, 절입폭 5 mm, 절삭유는 습식, 작업시간은 30분 동안 실시한다.

정지시간은 회전을 하지 않고 전원만 연결된 상태에서 1시간 단위로 한다. 검사시간(1)은 소음, 누유 등 외형 이상상태를 1시간 이내에 확인하고, 측정시간은 위치정밀도 반복정밀 측정을 5시간 이내에 실시한다. 휴지시간은 모든 전원을 off 상태에서 1시간 정지하며, 다음시험을 위한 준비시간은 1시간 이내로 한다.

4.2 시험결과 및 고찰

산출된 가속수명 시간과 시험방법을 기준으로 새로 개발될 로터리 테이블에 적용하여 다양한 시험결과를 얻었다. 일자별 시험결과를 정리하였고 시험 기간 동안 주변 시험환경온도, 테이블의 표면 온도 변화, 위치 및 반복정밀도, 클램프력 등을 측정하여 그 결과를 정리하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 주변 온도 변화가 5°C 내외로 변동하였지만 테이블 표면의 온도 변화는 35~38°C로 변화하였는데 이는 내구성에 이상상태 변화를 줄 만큼 크지 않다는 것을 회전 정밀도 측정 결과 등으로부터 알 수 있었다.

Fig. 5는 시험기간 동안 회전정밀도와 반복정밀도의 측정값이다. 그림에서는 보는 바와 같이 정밀

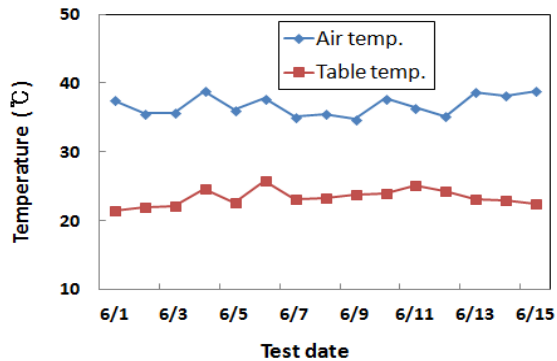


Fig. 4 Temperature variation of ambient air and table

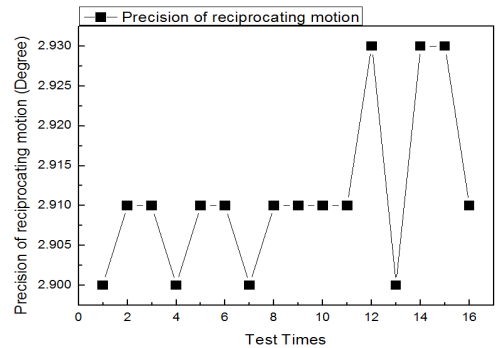


Fig. 5 Precision measured value of reciprocating motion

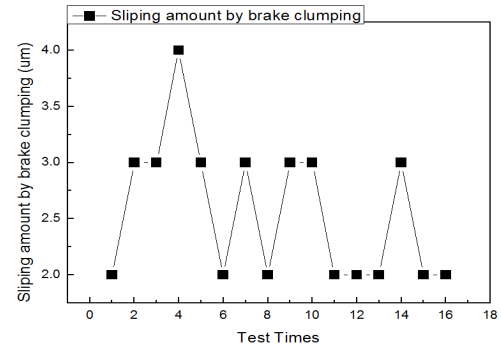


Fig. 6 Slipping amount variation by brake clumping

도의 변동은 크게 나타나지 않는 것으로 보여 진다. Fig. 6은 가속시험 기간동안 브레이크의 클램프력 변화량을 측정한 값이다. 클램프력은 동일하게 작용하여 브레이크가 슬립되는 양을 측정하였다. 슬립량은 2~3μm으로 시험 전후 변동되지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 절삭사공용 정밀 로터리 감속기 테이블의 내구성 평가를 위한 가속수명시험 기법 개발과 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 무고장 가속 수명을 위한 시험시간은 지금까지 알려진 고장 원인을 분석을 바탕으로 와이בל 분포를 적용한 결과 355시간으로 산출되었다.

2. 가속수명 시험을 위한 가장 적합한 시험 방법은 스트레스 가속방법으로 고스트레스(over stress) 가속방법을 적용하였고 시험 결과 시료 분해를 통한 각부의 마모나 변형, 파손 등을 육안 확인 결과 미세한 수준의 마찰흔, 기어 물림 자국 등이 나타났으나 심각한 수준의 표면 손상 및 변형, 파손은 없는 것을 확인하였다.
3. 가속 수명 시험을 위한 가속 인자로서는 절삭력, 테이블의 회전속도, 테이블 위의 하중 편심량에 따라서 매우 큰 영향을 받는 다는 것을 알았다.

후 기

본 연구는 한국산업단지공단 산업집적지경쟁력강화사업(과제번호 2016-0661)과 창원대학교 산학협력단 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Seo, S. G., Kim, H. G., "Reliability Engineering", Kyobomungo, pp. 105-210, 2010.
2. Hong, J. P., Gong, B. C., Choi, S. D., Choi, H. J., Lee, D. S., "Study on Structure Design of High-Stiffness for 5 - Axis Machining Center", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 7-12, 2011.
3. Kim, S. H., Kim, B. H., Choi, W. G., "A Study on the Measurement Method and Uncertainty Factors for Precision Inspection to Feed Unit of High Precision Machine Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 55-61, 2012.
4. Lee, H. Y., Choi, H. J., Son, J. H., Lee, D. S., "Analysis of 3D Volumetric Error for Machine Tool using Ball Bar", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers., Vol. 10, No. 5, pp. 1-6, 2011.
5. Son, D. S., Kim, S. H., Park, I. H., "A Study on the Thermal Effects Measurement and Uncertainty Estimation for High Precision Machine Tools", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 106-112, 2013.
6. Cho, S. J., Park, Y. J., Han, J. W., Lee, G. H., "Fatigue Life Prediction of the Carrier of Slewing Reducer for Tower Crane", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. Vol. 14, No. 3, pp. 131~140, 2015.
7. Kim, T. H., Jang, J. H., Lee, D. G., Kim, L. S., Lyu, S. K., "Study on Optimal Design and Analysis of Worm Gear Reducer for High Place Operation Car", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. Vol. 14, No. 6, pp. 98~103, 2015.
8. Lee, W. K., Park, S. M., "A Study on the Embodiment of a Transfer Case with High-Speed Reduction of the Planetary Gear Type Applied to Big Industrial Vehicles", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. Vol. 14, No. 6, pp. 14~20, 2015.
9. Park, J. W., "Study on Accelerated life of Swing Reduction Gear Box for Hybrid Excavator", " Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 11, pp. 1407-1413, 2013.
10. Thoe, B., Aspinwall, K. and Wise, H., "Review on Ultrasonic Machining," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, No. 4, pp. 239-255, 1998.
11. Kim, N. K., Bae, K. Y., Kim, N. H., Jang, J. H., "Development of Jig Type Chuck for Roundness improvement in a Machining of High Stage Speed Gear", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 20-25, 2016.
12. Kim, H. J., Kim, Y. J., Kim, H. S., "Effect of Changes in Metal Characteristics of Hot-Forged Alloy Steel on Mechanical Properties of an Automotive Automatic Transmission Gear", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 135-146. 2016.
13. Kim, H. J., "Experimental Study on Production Characteristics of Straight Bevel Gear using a Polyjet Method 3D Printer", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers., Vol. 14, No. 6, pp. 63-68, 2015.