

# 다물체 동역학 시뮬레이션을 이용한 작동기용 기어박스 가속시험법 검증 Validation of Actuator Gearbox Accelerated Test Method Using Multi-Body Dynamics Simulation

이동건<sup>1,2</sup> · 문상곤<sup>1</sup> · 박영준<sup>3</sup> · 심우람<sup>4</sup> · 심성보<sup>2</sup> · 김수철<sup>1\*</sup>

Donggun Lee<sup>1,2</sup>, Sanggon Moon<sup>1</sup>, Young-Jun Park<sup>3</sup>, Woo-Ram Shim<sup>4</sup>,  
Sung-Bo Shim<sup>2</sup> and Su-Chul Kim<sup>1\*</sup>

Received: 7 Dec. 2023, Revised: 26 Jan. 2024, Accepted: 14 Feb. 2024

**Key Words** : Gearbox(기어박스), Accelerated Test(가속시험), Multi-Body Dynamics Simulation(다물체 동역학 시뮬레이션), Actuator(작동기)

**Abstract:** Gearboxes designed for reciprocating motion operating mechanisms operate under conditions where both the load and speed undergo continuous variations. When conducting durability tests on gearboxes designed for such applications, operating the target gearbox under conditions similar to the intended usage is essential. The gearbox must be operated for the required number of cycles to validate its durability under conditions mirroring its intended usage. This study devised an accelerated test method for gearboxes, which reduces operating angles and operational strokes. The reliability of the accelerated test was verified by comparing the stresses imposed on the gears under general and acceleration conditions through multi-body dynamic simulations. The results confirmed that the maximum contact stress levels under normal and accelerated conditions were within a 0.1% error range, indicating a minimal difference in the gear damage rates. However, a difference in the maximum contact stress results between the normal and accelerated conditions was observed when inertial forces acted on the output shaft due to the operational acceleration of the gearbox. Therefore, when conducting this acceleration test, caution should be exercised to ensure that the operational load on the gearbox, which affects inertia, does not significantly deviate from the conditions observed under normal operating conditions.

## 1. 서 론

기어박스는 기계시스템에서 회전운동의 속도와 토크를 조절하는 장치로서 항공, 자동차, 농업 및 건

설기계와 같은 산업기계에서 필수적으로 사용되고 있는 핵심 구성 요소 중 하나이다. 기어박스는 용도에 따라 다양한 설계와 사양을 가질 수 있으며, 실제 운영 환경에서 기어박스의 장기적인 사용에 대한 신뢰성을 보장하기 위해 설계단계에서 내구성 시험이 반드시 수행되어야 한다. 이에 따라 기어박스의 고장모드 분석과 내구성 및 고효율에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 연구는 여러 분야에서 활발히 진행되어 왔다.

기어박스 내구시험은 주로 일정한 부하와 속도 조건으로 수행되며, 이러한 시험은 부하 케이스를 여러개로 구성하여 실제 부하 스펙트럼과 시험 간의 차이를 최소화하는 방식으로 구성된다. 내구시험 코드는 Miner의 누적 손상 이론과 S-N 선도를 기반으

\* Corresponding author: sckim@kimm.re.kr

1 Department of Smart Industrial Machine Technologies, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

2 Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

3 Department of Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

4 Electric Propulsion System Division, Hanwha aerospace, Seoul, Korea

Copyright © 2024, 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.

로 한다. Miner의 누적 손상 이론은 반복되는 부하에 의해 재료가 언제 파손될지 예측하는 이론으로, 각각 다른 크기와 횟수로 주어진 여러 부하 조건들을 고려하여 각 부하 조건에서 예상되는 손상을 계산하고 그 값들을 합산한다. 합산된 값이 1 이상이면, 재료가 파손될 것으로 예측한다<sup>1)</sup>. S-N 선도는 특정한 스트레스 사이클 수 (N)에 대한 스트레스 진폭(S)을 나타내는 그래프로, 재료가 얼마나 많은 스트레스 사이클을 견딜 수 있는지 추정하는데 사용한다<sup>2)</sup>. 이를 가속시험에 적용하면, 부하나 속도를 조절하여 시험에서의 손상량과 실제 부하 스펙트럼의 손상량을 동일하게 일치시키면서 시험 시간을 단축할 수 있다. Han 등(2014)은 Miner의 누적 손상 이론을 활용하여 차량용 변속기 기어 설계에 이용되는 복합 유성기어 기어시스템의 내구성 해석을 수행하였다. 이를 통해 기어의 굽힘응력 및 접촉응력에 대한 안전율과 손상량에 대한 내구성을 평가하였으며, 강도 및 내구성이 취약한 기어에 대해서는 변수를 설정하여 최적설계안을 도출하였다<sup>3)</sup>. Lee 등(2018)은 터널 굴착기 커터헤드 구동용 유성기어박스의 신뢰성을 검증하기 위하여 가속수명시험을 수행하였다. 그 결과 기어 파손 및 베어링 손상 등 유성기어박스의 실제 고장모드를 확인하였고, 유성감속기의 적절한 유효 교환시기를 파악하였다<sup>4)</sup>. Huh 등(2021)은 항공용 기어박스를 위한 설계 요구도 도출과 이를 반영한 설계를 진행하였으며, 성능 시험과 내구성 시험을 수행하여 항공용 100 kW급 동력전달장치인 기어박스의 설계 및 시험평가 기술의 기반을 확립하였다<sup>5)</sup>. Lee 등(2022)은 군에서 사용되는 무인 수색 차량 휠 내부에 장착되는 인 휠 드라이브 기어박스의 내구성을 입증하기 위하여 기어박스의 주 고장 모드를 분석하고, 내구성 시험을 수행하였다. 시험 결과 생 산제품이 실차에 장착되어 유사한 환경과 부하에서

사용될 때 신뢰수준 90%로 요구조건을 보장할 수 있음을 확인하였다<sup>6)</sup>.

작동기용 기어박스의 경우 일정한 부하 및 속도에서 작동하는 것이 아니라, 진자의 왕복운동과 같이 부하와 속도의 방향이 지속적으로 변화하는 조건에서 작동된다. 이와 같은 기어박스를 대상으로 내구 시험을 수행할 때는 일반적으로 일반조건과 유사한 조건에서 대상 기어박스가 요구하는 작동 횟수만큼 작동시켜 내구성을 검증해야 한다. 이때 시험시간을 단축하기 위해 작동 속도를 높여 기어박스의 작동 횟수를 증가시킬 수 있다. 하지만 짧은 시간에 일반 조건과 동일한 작동 행정으로 시험이 수행되면 기어박스의 작동 가속도가 증가하게 된다. 이와 같이 가속도가 증가하면 기어박스에 실제 작동조건에서는 발생하지 않는 고장모드가 나타날 수 있으며, 가속 시험을 구현하기 위해 요구되는 시험장치 성능이 높아질 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 작동기용 기어박스의 가속시험을 수행할 때 작동 행정을 줄여 기어박스의 작동 가속도를 최소화하고자 한다. 또한 다물체 동역학 시뮬레이션을 활용하여 작동기용 기어박스의 가속시험법을 구상하고, 기어에 가해지는 응력을 비교하여 가속시험이 실제 일반조건을 잘 반영하는지 검증하고자 한다.

## 2. 대상 기어박스

### 2.1 기어박스 사양

본 연구의 대상은 왕복운동을 하는 작동기의 기어박스이다. 이 작동기는 항공기의 날개와 꼬리 표면을 움직여 비행하는 동안 안정성을 유지하거나 비행 경로를 조절하는데 필요한 제어와 운영을 돕는 장치이다. Fig. 1 및 Table 1은 대상 기어박스의 제원을 나타낸 그림과 표이다. 이는 평기어 2쌍으로 구성된 2단 기어박스이다.

Table 1 Gearbox specifications

	1st gear Pinion	1st gear Wheel	2nd gear Pinion	2nd gear Wheel
Pressure angle (°)	22.5	22.5	20	20
Helix angle (°)	0	0	0	0
module (mm)	1	1	1	1
Number of teeth	13	37	16	35
Face width (mm)	6	6	7	7
Total gear ratio	6.23			

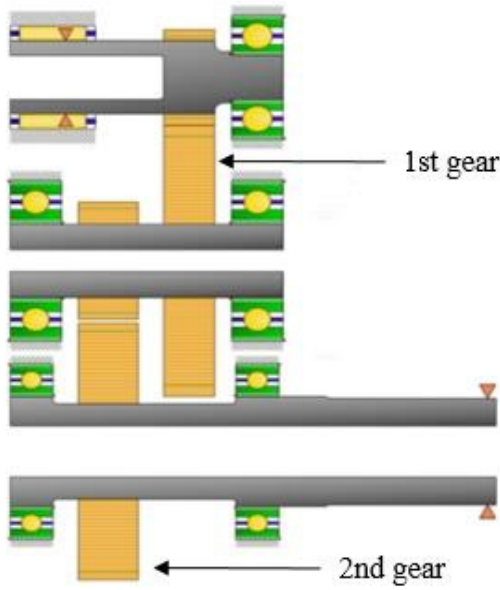
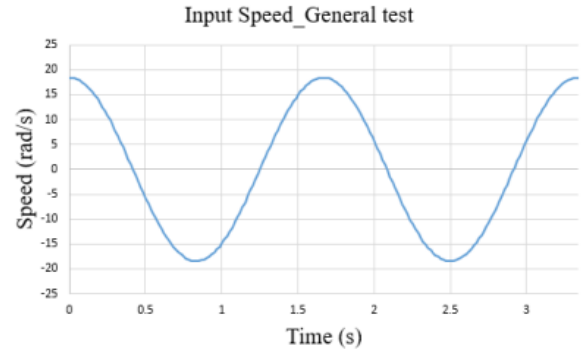


Fig. 1 Gearbox system used in this study

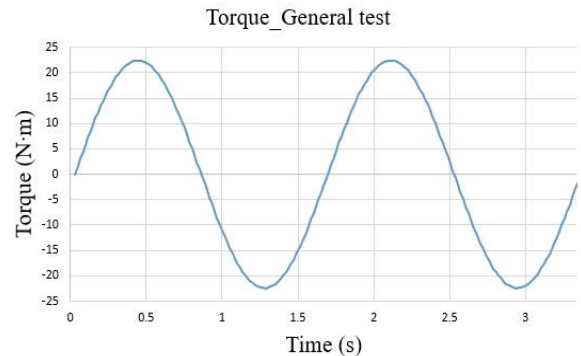
### 2.2 작동조건

Fig. 2는 대상 기어박스의 일반 작동조건을 나타내는 그래프이다. 여기서 (a), (b), (c)는 각각 입력축 속도, 출력축 토크, 운영각도를 나타낸다. 대상 기어박스는 정현파로 왕복 운동을 하며,  $-18.435 \text{ rad/s} \sim 18.435 \text{ rad/s}$ 의 입력속도,  $-22.5 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 22.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 의 출력 토크,  $-45^\circ \sim 45^\circ$ 의 운영각도로 작동한다.

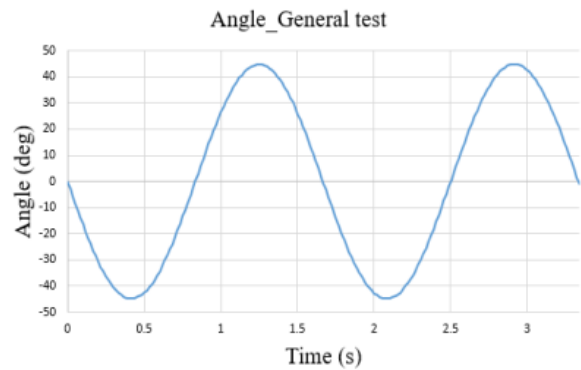
기어박스의 주요 고장모드를 확인하기 위해 기어 강도평가에 관한 국제 표준인 ISO 6336을 이용하여 기어 강도평가를 수행하였다. Table 2는 기어박스의 작동조건에 따른 기어의 면압 안전률과 굽힘 안전률을 나타낸 표이다. 기어박스의 기어 안전률은 전반적으로 면압 안전률이 굽힘 안전률보다 낮게 나타났으며, 가장 낮은 안전율은 출력축 기어의 면압강도로 나타났다. 따라서 기어박스의 주 고장모드는 출력축 기어의 치면손상으로 예상되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Operating conditions of gearbox

### 3. 가속시험 구성

일반조건인 운영각도는  $-45^\circ \sim 45^\circ$ 이며, 가속조

Table 2 Gear safety factor

	1st gear Pinion	1st gear Wheel	2nd gear Pinion	2nd gear Wheel
Contact safety factor	1.0944	1.3179	1.0489	1.2091
Bending safety factor	2.9143	3.1733	1.8095	1.9225
Endurance limit for contact pressure (MPa)	1650			

건의 운영각도는  $-14.14^\circ \sim 14.14^\circ$ 로 설정하였다. 이는 기어 치물림 위치를 두 조건에서 동일하게 일치시키면서 작동행정을 최소화하기 위해 설정된 범위이다. 동일한 치물림 위치를 검증하기 위해 Fig. 3의 그림과 같이 2단 평기어 쌍이 초기 위치에서 회전 축을 기준으로  $45^\circ$ 회전 했을 때와  $14.14^\circ$ 회전 했을 때 두 개의 모델이 일치하는 것을 확인하였다. 그리고 피니언 기어와 휠 기어의 기초 원을 그렸을 때 기어 치물림이 시작되는 점 (a)와  $45^\circ$  및  $14.14^\circ$ 회전한 위치에서 기어가 작용선과 만나는 지점 (b)가 동일한지 확인하였다.

본 가속시험법은 Fig. 3와 같이 가속조건에 따른 작동행정이 줄어들어 따라 기어에 물리는 치 개수가 일반조건에서 물리는 치 개수보다 적어진다. 그러나 최대 접촉응력을 받는 기어 치 외에 다른 치의 경우

기어박스의 전체 내구수명에 미치는 영향이 작기 때문에 작동 행정에 따른 물림 치 개수는 내구시험에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단하였다.

Fig. 4는 운영각도에 따른 일반조건과 가속조건에 따른 가속도를 나타낸 그림이다.  $-45^\circ \sim 45^\circ$ 의 일반조건에서 최대 가속도는  $69.5 \text{ rad/s}^2$ , 운영 각도를 줄이지 않고 가속시험을 진행 했을 때의 최대 가속도는  $686.5 \text{ rad/s}^2$ 으로 나타났다. 그리고 일반조건과 치물림 위치를 동일하게 설정하여  $-14.14^\circ \sim 14.14^\circ$ 의 운영 각도로 가속시험을 진행 했을 때의 최대 가속도는  $218.1 \text{ rad/s}^2$ 으로 나타났다. 이를 통해 작동행정을 줄임으로써 작동 가속도가 큰 폭으로 감소된 것을 확인하였다.

Fig. 5은 가속시험을 수행할 때 기어박스에 적용된 부하사이클을 일반조건과 비교하여 나타낸 그래

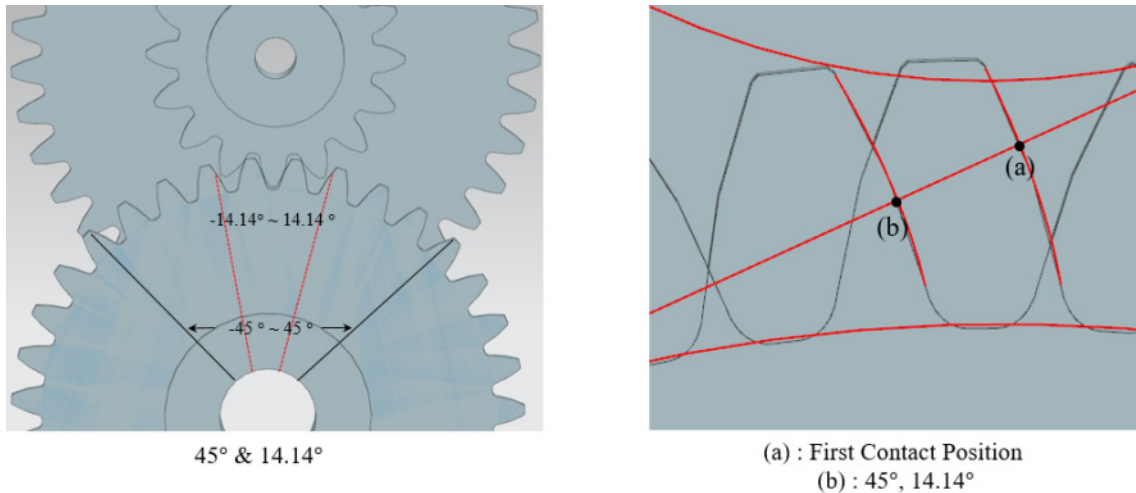


Fig. 3 Gear engagement position in accelerated test

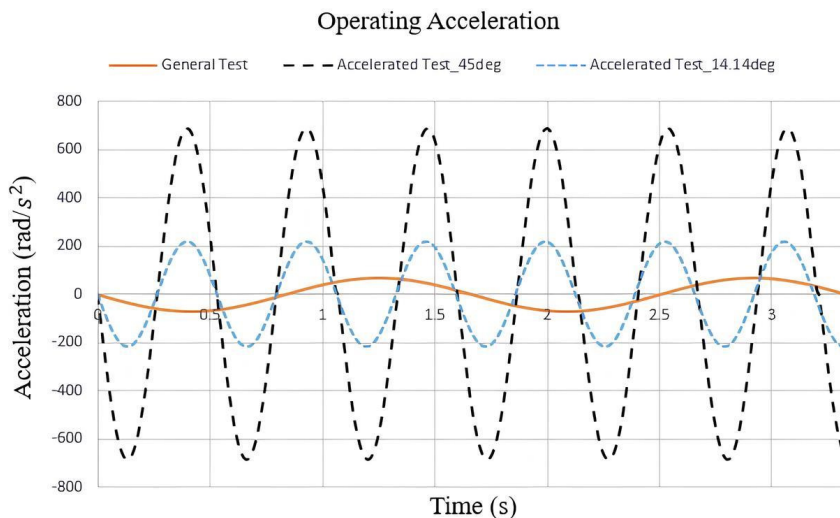


Fig. 4 Operating acceleration according to operational characteristics

프이며, Table 3는 이를 정량적으로 나타낸 것이다. 여기서 (a), (b), (c)는 각각 입력축 속도, 출력축 토크, 운영각도를 나타낸다. 이를 통해 가속조건과 일반조건을 비교할 때 속도가 증가하고 작동행정이 감소하며 부하 토크는 동일함을 확인하였다.

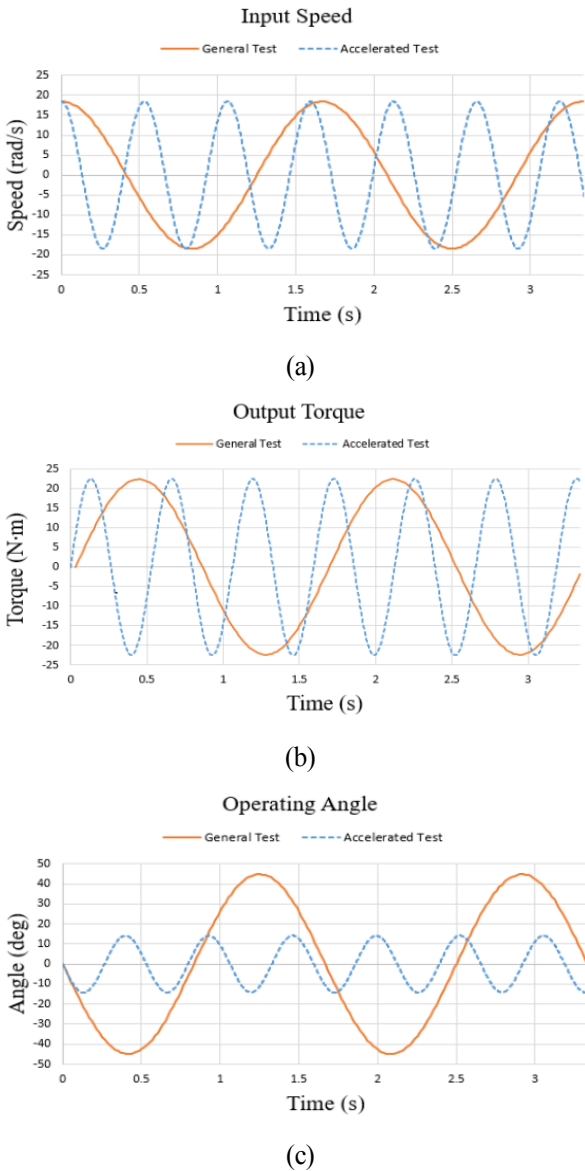


Fig. 5 Load cycle in gearbox

#### 4. 기어박스 시뮬레이션 모델

작동기의 기어박스 시뮬레이션 모델은 Fig. 6과 같이 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 RecurDyn (FunctionBay, Korea)을 활용하여 구성하였다. 전체 기어박스의 모든 요소를 고려하여 시뮬레이션을 수행할 경우, 해석 시간이 크게 증가하기 때문에 이를 단축하기 위해 베어링 등 기타 부속품은 제외하고 축과 기어만으로 모델링과 해석을 진행하였다. 또한 출력축의 관성을 고려하기 위해 기어박스의 출력축에 관성체 모델인 실린더를 추가하였다.

Fig. 6에서 제시된 모델의 축과 기어는 강철 재료로 생성하였다. S1, S2 및 S3 축 양쪽에 회전 조인트 r1~r6을 생성하여 축이 회전할 수 있도록 구성하였으며, 축과 기어를 고정시키기 위해 고정 조인트 f1~f4를 생성하였다. 회전 조인트 r1에 정현파로 작동하도록 회전각도 및 작동속도를 부여하였으며, 기어의 치면에는 접촉요소를 생성하여 모션에 따라 기어 치면이 서로 맞물려 동작하도록 구속 조건 C1 및 C2를 생성하였다. 그리고 관성체 역할을 하는 실린더에 회전스프링 rs1을 적용하여 출력축 부하에 해당하는 토크를 부가하였고, 실린더를 고정 및 회전 시키기 위해 고정 조인트 f5와 회전 조인트 r7, r8을 설치하였다.

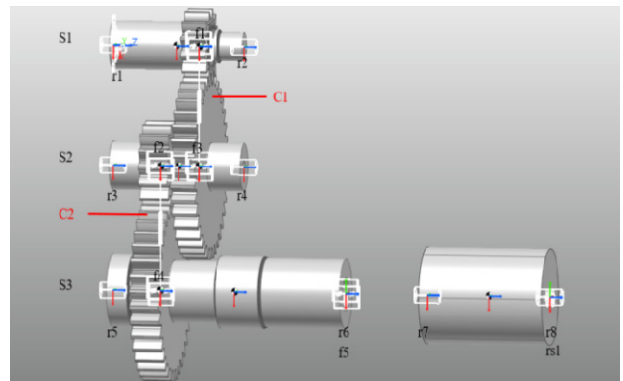


Fig. 6 Model of gearbox used in this study

Table 3 The specifications for the gearbox load cycle

	General Test	Accelerated Test
Operating cycle (Hz)	0.6	2.7
Input speed (rad/s)	18.435	18.435
Operating angle (deg)	90	28.28
Maximum torque (N · m)	22.5	22.5
Rated torque (N · m)	18	18

## 5. 기어박스 해석

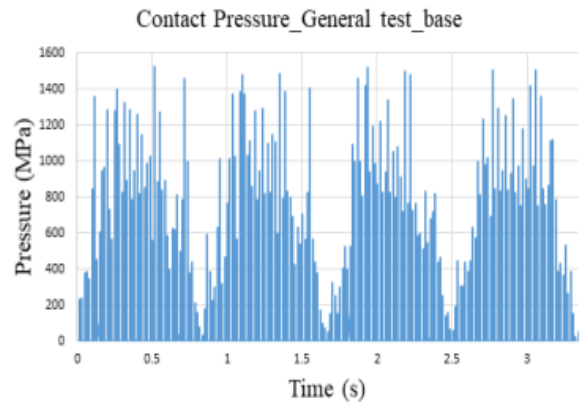
### 5.1 가속시험 검증

연구대상 기어박스의 설계 강도평가 결과에서 예상되는 주 고장모드는 출력축 기어의 치면손상으로 확인되었다. 기어의 치면손상을 유발하는 주요 원인은 치면의 최대 접촉응력으로 나타났으며, 본 연구에서는 다물체 동역학 시뮬레이션을 통해 치면의 최대 접촉응력을 확인하여 일반조건과 가속조건에서 동등한 치면하중이 발생하는지 검토하였다.

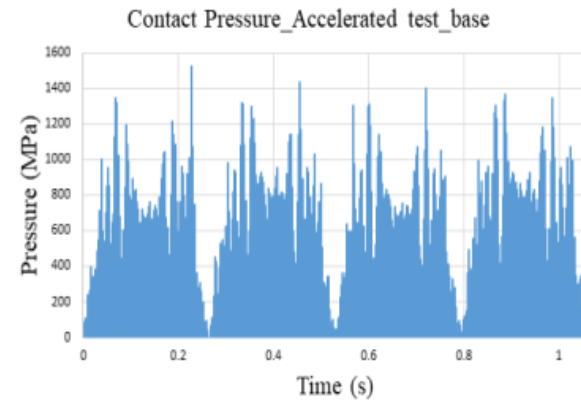
Fig. 7은 출력축의 관성량이 0일 때 기어박스의 출력축 기어가 맞물려 작동할 때의 최대 접촉응력을 나타낸 그래프로 (a)는 일반조건에서의 접촉응력, (b)는 가속조건에서의 접촉응력을 나타낸다.

일반조건과 가속조건에서의 최대 접촉응력의 크기는 각각 1526.61 MPa 및 1525.42 MPa으로 나타났으며, 이들 간의 오차율은 0.08%이다. 두 조건의 작동 가속도 차이에도 불구하고 최대 접촉응력의 크기 차이가 거의 없기 때문에 출력축 관성이 없는 조건에서 가속조건에서의 가속도는 기어의 수명에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

또한 일반조건에서 1400 MPa 이상으로 높은 접촉응력이 발생하는 빈도가 가속조건보다 더 높게 나타났다. 이는 일반조건에서의 작동행정이 가속조건보다 더 길어서 작동 행정 내에서 최대접촉응력이 발생하는 치물림 위치에 상대적으로 많은 치가 물리기 때문이다. 따라서 일반조건에서 더 많은 치가 높은 접촉응력을 받을 것으로 예상된다. 그러나 기어의 최대접촉응력은 하나의 치에서 반복적으로 발생되기 때문에 두 조건 간의 최대접촉응력의 크기가 유사하다면 기어의 수명 피로는 유사할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 7 Tooth contact stress of the output shaft gear

### 5.2 관성량에 따른 기어 접촉응력 해석

작동가속도에 따라 기어박스 출력축의 회전 관성이 기어 치면의 접촉응력에 미치는 영향을 검토하기 위해 출력축에 회전관성량을 각각 0.01 kg · m<sup>2</sup>, 0.05 kg · m<sup>2</sup>, 0.1 kg · m<sup>2</sup> 을 추가하여 치면 접촉응력이 변화하는지 비교하였다.

Fig. 8과 Fig. 9은 각각 일반조건과 가속조건에서 기어박스 출력축에 관성체가 추가됐을 때의 최대 접촉응력을 나타낸 그래프이다. 여기서 (a), (b), (c)는 각각 회전방향의 관성량 0.01 kg · m<sup>2</sup>, 0.05 kg · m<sup>2</sup>,

Table 4 Maximum contact pressure of gears due to changes in inertia

Inertia Change Conditions (kg · m <sup>2</sup> )	Maximum Contact Pressure in General Test (MPa)	Maximum Contact Pressure in Accelerated Test (MPa)	Error (%)
0	1526.61	1525.42	0.08
0.01	1483.17	1430.87	3.53
0.05	1442.86	1318.10	8.65
0.1	1354.96	1200.42	11.41

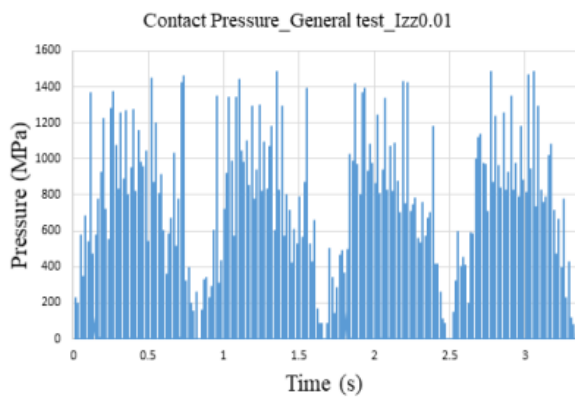


0.1 kg · m<sup>2</sup>을 추가로 부가했을 때의 기어 접촉응력을 나타낸 그래프이다. 각 조건에서 최대 접촉응력의 크기는 Table 4에 정리하였다.

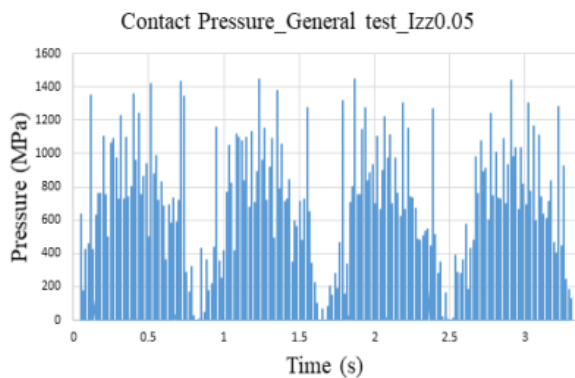
일반조건과 가속조건을 비교하였을 때, 두 조건 모두 관성의 크기가 증가할수록 기어의 최대 접촉응력이 감소하는 경향을 보였다. 이는 가속도에 의한 관성토크가 부하토크의 반대 방향으로 발생하기 때문이다. 또한 일반조건에서의 작동가속도가 가속조건에서의 작동가속도보다 더 작기 때문에 일반조건에서의 최대 접촉응력 감소 폭이 더 작게 나타

났다. 이에 따라 관성량이 커질수록 두 조건 간의 최대 접촉응력 오차가 커지는 경향을 확인하였다.

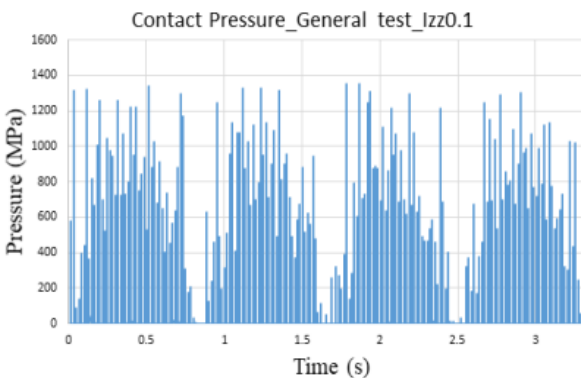
만약 허용 오차범위를 5% 이내로 설정한다면 0.01 kg · m<sup>2</sup>의 관성량은 허용되지만, 0.05 kg · m<sup>2</sup>의 관성량은 허용되지 않는다. 따라서 본 가속시험을 수행할 때는 기어 수명에 큰 영향을 미치지 않는 한도 내에서 허용 오차 범위를 정하고 출력축에 작용하는 관성량을 최소화하여 일반조건과 가속조건 간의 최대접촉응력 오차율이 허용 범위 내에 들어오도록 구성해야 한다.



(a)

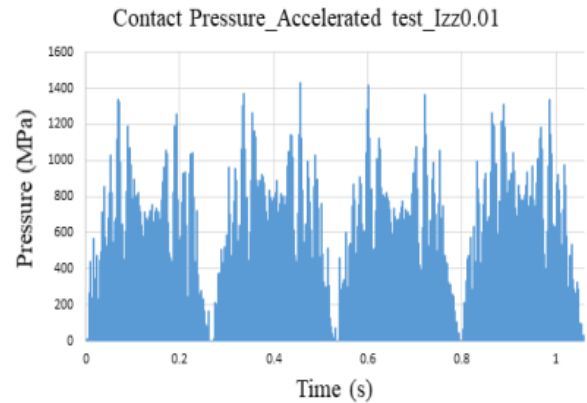


(b)

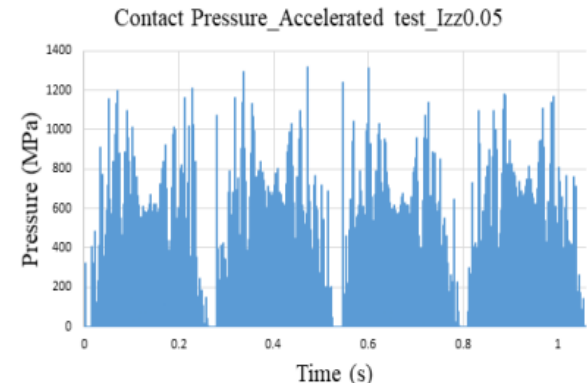


(c)

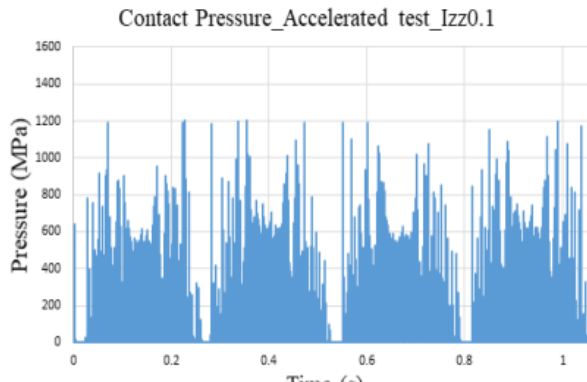
Fig. 8 Gear contact stress in general tests due to changes in inertia



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Gear contact stress in accelerated tests due to changes in inertia

## 6. 결 론

본 연구에서는 다물체 동역학 시뮬레이션을 활용하여 왕복운동 하는 기어박스의 내구시험을 수행하기 위한 가속시험 방법을 구상하고, 치면 접촉응력을 통해 일반 작동조건과 가속조건에서의 하중 차이를 비교 검증하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가속시험을 수행할 때 작동속도를 증가시켜 시험시간을 단축하는 방법은 기어박스에 작용하는 가속도가 일반조건과 달라질 수 있다. 또한 가속도가 달라짐에 따라 기어박스에 작용하는 부하는 관성량에 의해 일반조건과 가속조건에서 차이가 발생할 수 있다.

2. 일반조건과 가속조건에서의 치물림 시작위치와 끝 위치를 동일하게 설정하면, 출력축에 관성량이 없을 때 기어 치에 작용하는 최대 접촉응력은 오차율이 0.1% 이내로 거의 동일하게 나타났다.

3. 출력축에 작용하는 관성량이 증가함에 따라 일반조건과 가속조건에서의 최대 접촉응력의 크기 차이가 증가하였다. 따라서 운영각도를 줄이고 작동 행정을 단축시키는 가속시험법은 시험장치를 구성할 때 기어박스의 출력축에 작용하는 관성량을 최소화하여 시험 부하에 큰 영향을 미치지 않도록 설계해야 일반조건과 유사한 조건에서 작동시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## Reference

- 1) Wang, X., Hou, J., Guo, H., Wang, Y., Sun, Y., & Teng, B. "A Miner's rule based fatigue life prediction model for combined high and low cycle fatigue considering loading interaction effect", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(12), 4525-4540, 2023
- 2) Bonaiti, L., & C. Gorla. "Estimation of gear SN curve for tooth root bending fatigue by means of maximum likelihood method and statistic of extremes." *International Journal of Fatigue* 153:10645, 2021.
- 3) S. G. Han, Y. I. Shin, C. H. Yoon, & C. K. Song, "Strength and Durability Analysis of the Double Planetary Gears", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 13(5), 28-34, 2014.
- 4) J. H. Lee, D. S. Kim, B. J. Sung & T. Y. Nam, "Reliability Assessment of a Planetary Gearbox for Driving the Cutter Head of TBM." *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, 2018.
- 5) J. S. Huh, K. H. Lee, Y. J. Park, M. K. Kim, & J. H. Kim, "Development of a High-Speed Reduction Gearbox for a Small Gas Turbine Engine of an Unmanned Aerial Vehicle", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, 45(2), 167-173, 2021.
- 6) Y. B. Lee, G. C. Lee, J. J. Lee, S. Y. Lim, W. J. Kim, & K. M. Kim, "A Study on the Acceleration Durability Test of In-Wheel Drive Gearbox for Military Special Vehicles", *Journal of Drive and Control*, 19(3), 32-38, 2022.
- 7) Karpat, F., Ekwaro-Osire, S., Cavdar, K., & Babalik, F. C. "Dynamic analysis of involute spur gears with asymmetric teeth", *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(12), 1598-1610, 2008.
- 8) Amarnath, M., Chandramohan, S., & Seetharaman, S. "Experimental investigations of surface wear assessment of spur gear teeth", *Journal of Vibration and Control*, 18(7), 1009-1024, 2012.
- 9) Bravo, A., Koffi, D., Toubal, L., & Erchiqui, F. "Life and damage mode modeling applied to plastic gears", *Engineering Failure Analysis*, 58, 113-133, 2015.
- 10) Zorko, D., Kulovec, S., Duhovnik, J., & Tavčar, J. "Durability and design parameters of a Steel/PEEK gear pair", *Mechanism and Machine Theory*, 140, 825-846, 2019
- 11) Zhang, B., Liu, H., Zhu, C., & Li, Z. "Numerical simulation of competing mechanism between pitting and micro-pitting of a wind turbine gear considering surface roughness", *Engineering Failure Analysis*, 104, 1-12, 2019.
- 12) Lu, Z., Liu, H., Zhang, R., Zhu, C., Shen, Y., & Xin, D. "The simulation and experiment research on contact fatigue performance of acetal gears",



- Mechanics of Materials, 154, 103719, 2021.
- 13) Lu, Z., Li, Z., Liu, H., Wei, P., Xia, B., & Ye, M. "An accelerated fatigue test method of polymer gears based on thermostress conversion relation", Engineering Fracture Mechanics, 266, 108388, 2022.
  - 14) J. S. Kim, J. H. Sohn, M. G. Kim, G. H. Lee, & S. C. Kim, "Analysis of the Transmission Error of Spur Gears Depending on the Finite Element Analysis Condition", Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, 36(2), 121-130, 2023.
  - 15) Y. B. Lee, & Han. Ju. Yoo, "Study of a Durability Test for Single-input Multi-output Power Take-off Gearboxes", Journal of Drive and Control, 14(1), 29-34, 2017.
  - 16) Jun. Y. Kim, Y. J. Yu, & C. H. Lee, "Accelerated Life Test Selection Study for Life Evaluation of Engine Type Drive Axle for Forklift", Journal of Drive and Control, 20(3), 9-14, 2023.
  - 17) J. G. Kang, Y. R. Yoo, & K. T. Park, "Structural Safety and Critical Speed Analysis of 2-Speed Shift Reducer", Journal of Drive and Control, 19(4), 1-9, 2022.
  - 18) Y. B. Lee, & S. H. Han, "Development of device measuring very high torque via torque arm with attached load cells", Journal of Drive and Control, 7(1), 53-57, 2010.
  - 19) J. S. Shin, J. H. Kim, J. G. Kim, & M. Jin, "Development of a Lifetime Test Bench for Robot Reducers for Fault Diagnosis and Failure Prognostics", Journal of Drive and Control, 16(3), 33-41, 2019.