

기어 전달오차 계측 시스템 개발 및 검증에 관한 연구

문석표^{*,**}, 이주연^{***}, 문상곤^{**}, 김수철^{**,#}

^{*}충남대학교 스마트농업시스템학과, ^{**}한국기계연구원, ^{***}서울대학교 농업생명과학연구원

A Study on the Development of Gear Transmission Error Measurement System and Verification

Seok-Pyo Moon^{*,**}, Ju-Yeon Lee^{***}, Sang-Gon Moon^{**}, Su-Chul Kim^{**,#}

^{*}Department of Smart Agriculture System, Chungnam national university., ^{**}Department of Smart Industrial Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials., ^{***}Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul national University.

(Received 05 August 2021; received in revised form 17 September 2021; accepted 18 October 2015)

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop and verify a precision transmission error measurement system for a gear pair. The transmission error measurement system of the gear pair was developed as a measurement unit, signal processing unit, and signal analysis unit. The angular displacement for calculating the transmission error of the gear pair was measured using an encoder. The signal amplification, interpolation, and transmission error calculation of the measured angular displacement were conducted using a field-programmable gate array (FPGA) and a real-time processor. A high-pass filter (HPF) was applied to the calculated transmission error from the real-time processor. The transmission error measurement test was conducted using a gearbox, including the master gear pair. The same test was repeated three times in the clockwise and counterclockwise directions, respectively, according to the load conditions (0 - 200 N·m). The results of the gear transmission error tests showed similar tendencies, thereby confirming the stability of the system. The measured transmission error was verified by comparing it with the transmission error analyzed using commercial software. The verification showed a slight difference in the transmission error between the methods. In a future study, the measurement and analysis method of the developed precision transmission error measurement system in this study may possibly be used for gear design.

Keywords: Transmission Error(전달오차), Measurement System(계측 시스템), Gearbox(기어박스)

1. 서 론

최근의 산업 기계는 고속화, 정밀화되고 있으며,

산업 환경에 대한 관심의 증가로 소음 발생억제 또한 요구되고 있다. 특히 기계의 동력전달을 담당하는 기어 구동 시스템은 주요한 진동 및 소음 발생원으로^[1] 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되었다^[2-4]. 전달오차는 기어 구동 시스템 진동, 소음의 주요 원인으로 일반적으로 마이크로

Corresponding Author : sckim@kimm.re.kr

Tel: +82-042-868-7918

단위로 나타나며, 이를 계측하기 위해서는 정밀한 계측 시스템이 필요하다.

전달오차를 계측하는 방법으로는 입출력 축의 각변위를 측정하고 이론적인 입출력 축의 각변위 차와 측정된 각변위 차를 비교하여 계산하는 방법이 있다. 그러나 각변위를 직접적으로 측정하는 경우 고속의 작동영역에서 너무 많은 데이터가 발생하기 때문에 동적인 효과가 포함된 동적 전달오차는 기어 측면에 가속도 센서를 부착하여 전달오차를 측정하는 방법이 일반적이다.

정적 전달오차는 저속에서 측정하기 때문에 각변위를 통해 계측할 수 있다. 이때 마이크로미터 단위의 전달오차를 측정하기 위해 매우 높은 해상도의 각변위 센서가 필요하다. 또한 정적 전달오차는 DAQ(Data Acquisition System)의 측정된 신호 전달 속도 등에도 영향을 크게 받을 수 있어 이들을 고려한 정밀 계측 시스템을 구성해야 한다.

Wright(2009)는 모터, 브레이크, 엔코더 등을 통해 정적 전달오차 계측 시스템을 개발하였으며, 반복적인 시험 검증으로 개발한 시스템을 통해 정적 전달오차의 계측이 가능함을 보고하였다^[5]. Lee 등(2014)은 기어의 품질 개선을 위해 엔코더를 통해 무부하 상태의 전달오차를 측정하는 장비를 개발하였다^[6].

기어의 제원 및 가공 정밀도에 따른 전달오차 특성을 분석하기 위해서는 정밀 각변위 측정 시스템뿐만 아니라 부하 인가 시스템 및 측정된 데이터를 계측하고 비교 분석하기 위한 후처리 소프트웨어가 필요하다. 대부분의 선행연구에서는 기본적인 하드웨어 구성에 대해 상세히 설명하고 있으나, 측정 및 분석을 위한 소프트웨어에 대해서는 상세한 설명이 제시되어 있지 않다. 특히 기어비가 다른 경우 계측 신호의 시간 동조로 인한 후처리 방법 등이 제시되어 있지 않아, 다양한 기어 사양에 대해 정밀한 전달오차 측정이 어렵다.

본 연구는 기어의 제원 및 가공정밀도 등에 따라 나타나는 전달오차의 특성을 분석하기 위한 정밀 계측 시스템과 후처리 프로그램을 개발하기 위해 수행되었으며, 특히 기어비가 다른 경우에도 계측 및 분석이 가능한 측정 및 분석방법을 상세히 제시하였다. 이를 위한 주요 연구 목적은 1) 기어의 정

밀 전달오차 계측 시스템 개발, 2) 계측 시스템의 측정 및 분석 방법 개발, 3) 계측 데이터의 후처리 소프트웨어 개발, 4) 기어 박스의 전달오차 계측 시험 및 상용 시험장비와의 비교 결과를 통한 신뢰성 검증이다.

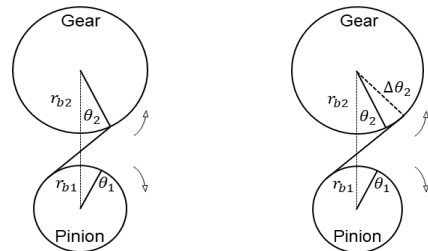
2. 재료 및 방법

2.1 전달오차 계측 이론

Fig. 1과 같이 마주하는 기어의 속도는 기어가 맞물려 회전할 때 기어치 형상이 완벽한 이벌류트 곡선(Involute curve)이며, 변형이 없다면 기어비에 따라 일정하게 유지될 것이다^[7]. 하지만 피동 기어의 회전각은 부하에 의한 치탄성 변형, 축 처짐, 치형상 오차 등의 비정상 성분으로 인해 실제 회전 위치와의 차이($\Delta\theta_2$)가 발생한다^[8,9]. 이러한 차이를 기어의 전달오차라고 하며, 기어의 기본적인 운동 전달 성능을 평가하는 중요한 지표가 된다^[10]. 전달오차는 식 (1)과 같이 기어의 각변위와 기초원의 곱과 피니언의 각변위와 기초원의 곱의 차로 계산된다.

$$\Delta\theta_2 = \theta'_2 r_{b2} - \theta_1 r_{b1} \quad (1)$$

where, $\Delta\theta_2$ = transmission error (μm)
 θ'_2 = angular displacement of gear ($\theta_2 + \Delta\theta_2$) (rad)
 r_{b2} = reference diameter of gear (mm)
 θ_1 = angular displacement of pinion (rad)
 r_{b1} = reference diameter of pinion (mm)
 θ_2 = theory angular displacement of gear (rad)



(a) Ideal rotation of gear (b) Actual rotation of gear
Fig. 1 Definition of transmission error

2.2 전달오차 계측 시스템

기어 박스의 전달오차는 Fig. 2와 같은 계측 프로세스로 계측할 수 있다. 계측 장비를 통해 시험 대상 기어 박스의 각변위를 계측하며, 신호 변환기와 DAQ를 통해 계측된 각변위를 수집 및 증폭하고 후처리 소프트웨어를 통해 전달오차를 계산 및 분석한다. 본 연구에서의 기어박스 전달오차 계측 시스템은 Fig. 3과 같이 정반 위에 서보 모터, 감속기, 입·출력 엔코더, 시험용 기어박스, 출력 토크미터, 브레이크 등으로 구성하였으며, 실제 전달오차 계측 시스템은 Fig. 4와 같다.

전달오차 계측 시스템의 입력 모터는 높은 제어 성과 응답성으로 정밀한 회전속도를 유지할 수 있는 서보모터를 사용하였다^[11]. 서보모터의 제원은 Table 1과 같이 정격 출력, 회전속도, 토크는 각각 2.70kW, 500rpm, 51.0N·m이며, 최대 출력, 회전속도, 토크는 각각 5.54kW, 3,000rpm, 112.3N·m이다. 입력 모터의 속도와 토크는 약 20:1의 감속비를 갖는 감속기를 통해 감속 및 증가되어 계측 시험 기어박스로 전달된다. 시험 기어박스 입·출력축에 설치된 엔코더(TTR ERA 4400, HEIDENHAIN, Germany)는 기어 회전축의 각변위 계측을 위해 설치되었다. 엔코더는 Table 2와 같이 1회전에 10,000 pulse의 신호 수집이 가능하며, 각도의 정확성은 3초(”), 계측 가능 최대 회전속도는 6,250rpm, 계측 가능 최대 각가속도는 6,600rad/s²이다.

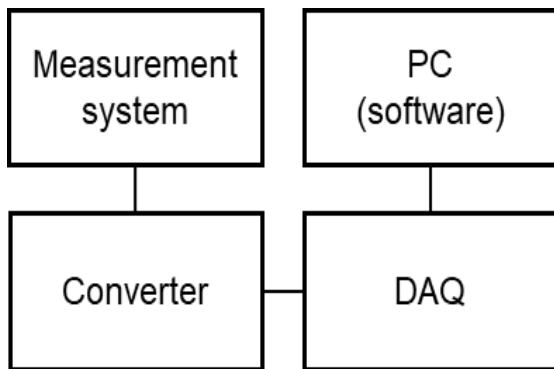


Fig. 2 Schematic diagram of transmission error measurement

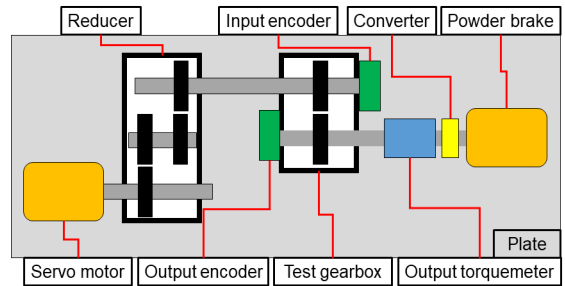


Fig. 3 Schematic diagram of Transmission error measurement system

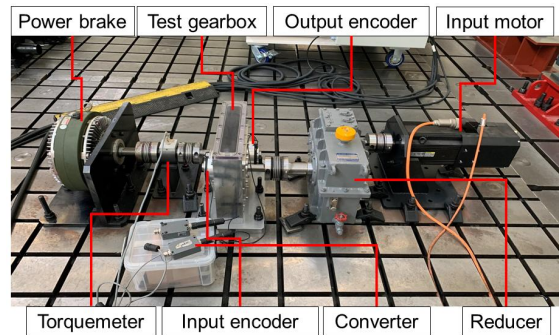


Fig. 4 Transmission error measurement system

시험 기어박스 출력 축에 설치된 토크미터(T22, HBM, Germany)는 시험 기어박스로부터 출력되는 토크를 계측하기 위해 설치되었으며, 정격 계측 토크와 회전 속도는 각각 1,000N·m, 9,000rpm이다. 시험 기어박스 출력 축 끝단에 설치된 파우더 브레이크는 시험 기어박스의 출력축에 부하 발생을 위해 설치하였다.

Table 1 Specification of input motor

Specification	Value
Type	Servo motor
Rated power (kW)	2.70 @ 500rpm
Rated torque (N·m)	51.0 @ 500rpm
Maximum power (kW)	5.54
Maximum speed (rpm)	3,000
Maximum torque (N·m)	112.3

Table 2 Specification of encoder

Specification	Value
Signal periods (pulse/rev)	10,000
Accuracy of graduation (")	3
Permissible speed (rpm)	6,250
Maximum angular acceleration (rad/s ²)	6,600
Permissible axial movement (mm)	±0.5

2.3 전달오차 계측 및 분석 프로세스

입·출력 엔코더를 통해 계측된 각변위 신호는 Fig. 5와 같이 FPGA (Field Programmable Gate Array)로 입력되며, Real-time processor를 거쳐 후처리 소프트웨어로 전달된다. FPGA는 계산량이 적지만 고속으로 처리가 가능하며, Real-Time Processor는 FPGA에서 처리하기 어려운 소수점 계산이나 대량의 데이터 연산을 담당한다. 후처리 소프트웨어는 연산된 데이터를 필요에 따라 필터링 및 저장하고 전달오차를 분석한다.

기어박스에 설치된 입·출력 엔코더는 기어 1회전 시 10,000 pulse로 입·출력 기어의 각변위 신호를 계측한다. 각변위 신호는 사인파 형태로 계측되기 때문에 이를 보다 정밀한 분석을 위해 변환기(Converter)에서 디지털 신호로 변환된다. 디지털 신호는 각변위 신호를 1회전당 100,000 pulse로 변환시켜 원래의 계측 신호보다 10배로 증폭된 해상도를 가지게 된다. 변환된 각변위의 신호는 FPGA의 신호 처리를 통해 4배로 증폭되어 총 400,000

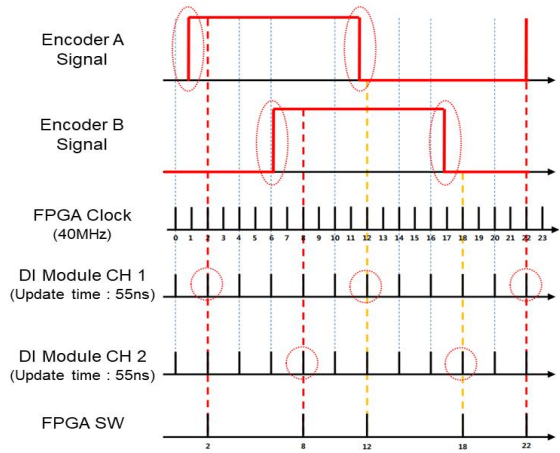


Fig. 6 FPGA signal processing to calculate transmission error

pulse/rev의 해상도를 갖는다. FPGA에서의 신호처리 방법은 Fig. 6과 같다. 디지털 형태로 변환된 엔코더의 신호는 90°의 위상차를 갖는 A, B상으로 나타난다. A상의 신호는 DI 모듈의 채널 1번에서 신호의 상승, 하강을 측정하며, B상의 신호는 DI 모듈의 채널 2번에서 상승, 하강을 측정한다. 따라서 1개의 각변위 신호는 A상의 상승/하강, B상의 상승/하강으로 총 4가지 신호로 구분되어 계측된다. 이는 곧 1개의 신호가 4배로 증폭되는 것을 의미한다. FPGA Clock은 DI 모듈에서 측정된 신호를 전달받는다. 따라서 엔코더에서 전달받은 1개의 pulse 당 FPGA에서 인식하는 신호 수는 4개가 되어 400,000 pulse/rev의 해상도로 각변위의 측정이 가능하다. FPGA에서 계측하는 400,000 pulse/rev의 신호를 단위 펄스 당 각도로 표현하면 0.0009°/pulse로 나타낼 수 있다.

FPGA에서 Real-Time Processor로 전송된 입력과 출력 엔코더 각각의 계측 신호는 엔코더의 계측 시점 및 기어비에 의한 속도차 등에 따라 Fig. 7과 같이 시간 동조(Time sync.)가 어긋나기 쉽다. 시간 동조가 맞지 않는 경우 동일 시점의 입력과 출력의 각변위를 비교하려면 입력과 출력 중 하나를 기준으로 나머지 하나를 보간해야 한다. 본 연구에서는 상대적으로 데이터 개수가 적은 출력 각변위를 기준으로 입력 각변위를 보간하여 동일 시

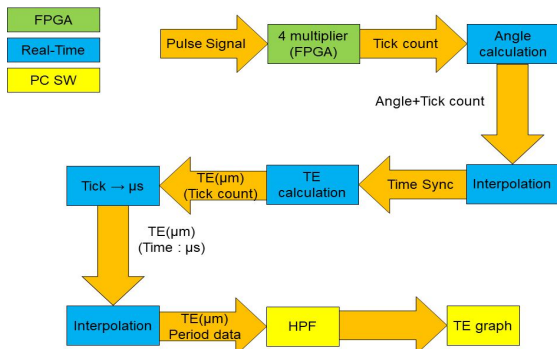


Fig. 5 Signal processing for Transmission error calculation

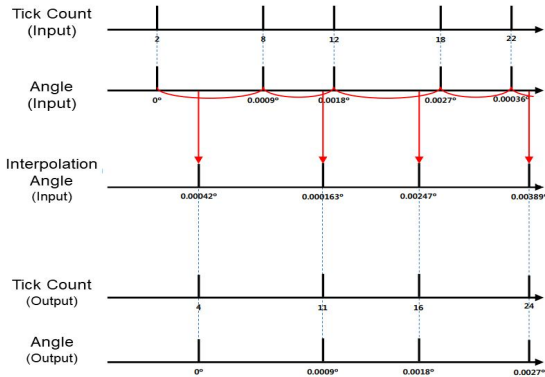


Fig. 7 Interpolation of Input angular displacement

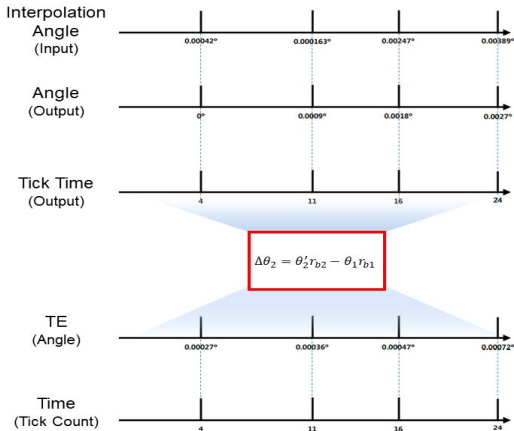


Fig. 8 Transmission error calculation of real-time signal processing

점에서의 입·출력 각변위를 비교하였다.

보간된 입력 각변위와 출력 각변위를 이용하면 Fig. 8과 같이 각변위를 전달오차로 계산할 수 있다. 계산된 전달오차는 각변위 단위이며, 출력 기어의 기초원 반경과 곱을 통해 길이 단위로 변환된다. 변환된 전달오차는 DAQ의 계측시간을 기준으로 기록 및 계산되지만, 이는 각도에 대한 주기적 데이터이며, 시간에 대해서는 비주기적 데이터이다. 따라서 FFT 등을 수행하기 위해서는 Fig. 9와 같이 보간법을 통해 시간에 대한 주기적 데이터로 변환할 필요가 있다. 본 연구에서 계산을 위해 사용한 주기 단위는 $0.2 \mu\text{s}$ 이며, 전달오차는 주

기 단위에 맞게 보간되어 최종 데이터로 활용된다. 이를 통해 전달오차의 FFT 및 고역 통과 필터 (High pass filter) 등의 데이터 분석이 가능하다.

전달오차 데이터는 런-아웃 효과를 포함해 계측되며, NI LabView로 구성된 후처리 소프트웨어의 고역 통과 필터(High-Pass Filter)를 통해 Fig. 10과 같이 런-아웃 효과를 제거할 수 있다. 기어의 소음에 영향을 미치는 주요 인자인 전달오차 진폭(Peak to Peak Transmission Error, PPTE)은 런-아웃 효과가 제거된 전달오차 데이터로부터 계측된 입출력 기어의 치물림 수만큼 계산할 수 있다. 기어 제원에 대한 전달오차 성능을 비교하기 위해서는 측정된 전달오차로부터 대표 PPTE를 계산해야 한다.

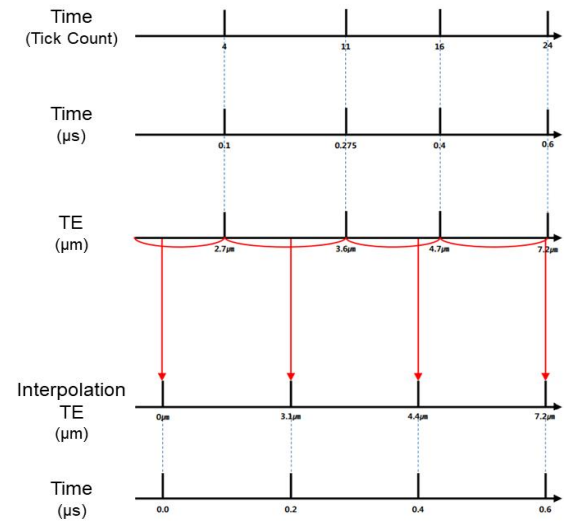
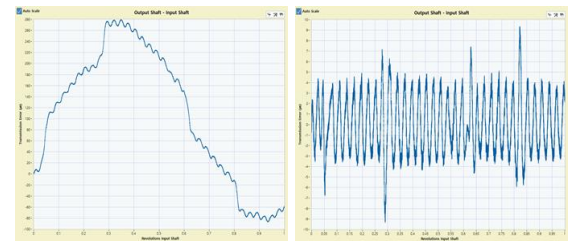


Fig. 9 Interpolation to calculate final transmission error



(a) Before (b) After

Fig. 10 Examples of transmission error measurement result and application of run-out filter

본 연구에서는 전달오차 데이터의 대표 PPTE를 계산하기 위해 입력 축의 1회전 시 측정된 치물림 사이클에 대한 PPTE를 모두 계산하고, 최소 PPTE와 최대 PPTE를 제외한 값들의 평균으로 이를 계산하였다.

2.4 정적 전달오차 계측 시험

본 연구에서 개발한 전달오차의 계측시스템 검증에 위해 정적 전달오차(static transmission error) 시험을 수행하였다. 시험 기어 쌍의 상세 기어 제원은 Table 3과 같다. 정적 전달오차 시험은 Table 4와 같이 입력 회전속도를 10rpm으로 설정하고 시계 방향과 반시계 방향 모두를 대상으로 수행하였으며, 출력축의 부하를 25N·m의 간격으로 0~200 N·m까지 증가시키면서 3회 반복 수행하였다.

Table 3 Specification of test gear pair

Specification	Value
Gear type	Helical (15°)
Number of teeth	36
Module	3
Center distance (mm)	111
Profile coefficient	-0.1314
Grade	1
Material	SCM 420H

Table 4 Test condition to measure transmission error of test gearbox

Case No.	Rotation speed (rpm)	Load of output shaft(N·m)
1		0
2		25
3		50
4	10	75
5	(Clockwise/Cou	100
6	nterclockwise)	125
7		150
8		175
9		200

2.5 전달오차 계측 결과 검증

계측된 데이터는 앞서 제시한 방법을 통해 대표 전달오차로 변환할 수 있다. 계산된 대표 전달오차가 적절한지 검증하기 위해 전달오차 분석 상용 소프트웨어인 Rotec의 RAS를 이용하여 대표 전달오차를 비교하였다. 상용 소프트웨어는 기어 치물림 경우의 수에 따라 전달오차를 측정하며, 내부 계산 알고리즘에 의해 대표 PPTE를 계산한다. 계측 시험은 Table 4와 같이 수행하였으며, 반복 시험은 수행하지 않고 상용 소프트웨어에서 요구하는 회전수만큼 작동시켜 데이터를 계측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전달오차 계측 결과

본 연구에서 개발한 시스템을 통해 계측한 기어 쌍의 전달오차는 Table 5와 같이 나타났다. 계측된 전달오차는 저부하에서의 전달오차에 비해 고부하에서의 전달오차가 크게 계측되었으며, 무부하에서의 전달오차는 저부하에서의 전달오차보다 크게 계측되었다. 무부하 전달오차가 저부하 전달오차에 비해 크게 나타나는 현상과 저부하(25-100 N·m) 시험에서 전달오차가 감소하는 현상은 시험 기어 박스 내 베어링과 축의 공차, 축의 스플라인과 기어의 공차 등과 기어 치면에서의 프로파일 오차로 인해 발생한 전달오차가 무부하 시 크게 나타났다가 부하가 가해지면 일부 상쇄되어 감소되는 것으로 판단된다. 저부하에 비해 고부하에서 전달오차가 증가되는 것은 부하가 증가되어 무부하 전달오차가 일부 상쇄되며 기어 변형에 의한 부하 전달오차가 증가되면서 전달오차가 커지는 것으로 판단된다.

3.2 전달오차 비교

상용 소프트웨어를 통해 분석한 전달오차는 Table. 6과 같이 나타났으며, 개발한 시스템을 통해 계측한 결과와 같이 무부하에서의 전달오차는 저부하보다 크고, 저부하에서 고부하로 부하가 증가할수록 전달오차가 증가하는 경향이 동일하게 나타났다. Fig. 11은 시계 방향 시험에 대한 개발 시스템의 전달오차와 상용 소프트웨어의 전달오차 결과를

보여준다. 반복시험에도 계측시스템의 전달오차 결과는 큰 차이 없이 반복성이 유지되었으며, 상용 소프트웨어의 결과와도 큰 차이가 나타나지 않았다. 시계 방향 시험 시 상용 소프트웨어를 통해 분석한 전달오차와 개발한 계측 시스템을 통해 계측한 전달오차 차의 최솟값 및 최댓값은 100 N·m, 75 N·m 시험에서 나타났으며, 차이 값은 각각 0.001 μm, 1.1 μm로 나타났다. 반시계 방향 시험 시 계측 전달오차 검증 결과는 Fig. 12와 같이 나타났다.

Table 6 The transmission error result of commercial software

Output load (N·m)	PPTE (μm)	
	Clockwise	Counterclockwise
0	3.70	2.61
25	1.23	2.14
50	1.07	1.23
75	1.42	1.12
100	3.07	1.93
125	3.79	2.78
150	4.39	3.79
175	5.43	4.47
200	5.55	4.86

Table 5 The result of transmission error measurement

Output load (N·m)	PPTE (μm)					
	Clockwise			Counterclockwise		
	1	2	3	1	2	3
0	4.45	2.97	2.87	3.64	3.42	3.71
25	1.77	1.81	1.88	2.67	2.81	2.42
50	2.01	1.89	2.00	2.27	2.33	2.42
75	2.28	2.48	2.44	2.14	2.21	2.44
100	3.04	3.07	3.17	2.26	2.63	2.39
125	3.40	3.59	3.53	2.92	2.75	2.90
150	3.97	3.95	4.10	3.59	3.44	3.50
175	4.51	4.45	4.52	3.92	3.85	3.76
200	4.95	4.97	4.94	4.34	4.26	4.45

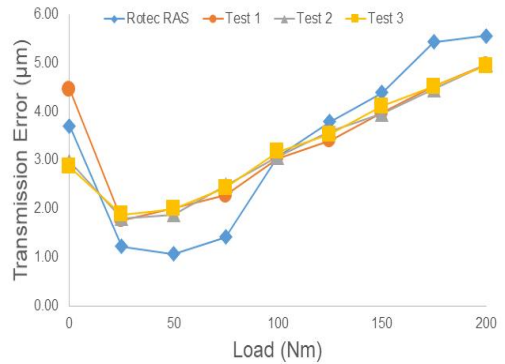


Fig. 11 Result of clockwise transmission error test



Fig. 12 Result of counterclockwise transmission error test

시계방향과 마찬가지로 부하에 따른 전달오차의 경향은 동일하게 분석되었다. 반시계 방향 시험 시 상용 소프트웨어를 통해 분석한 전달오차와 개발한 계측 시스템을 통해 계측한 전달오차 차의 최솟값 및 최댓값은 125 N·m, 75 N·m 시험에서 나타났으며, 이때 차이 값은 각각 0.03 μm, 1.3 μm로 나타났다.

본 연구에서 개발한 전달오차 계측 시스템은 반복 시험에도 동일한 경향성을 보였으며, 이에 따라 시스템의 안정성을 확인할 수 있었다. 또한 상용 소프트웨어와의 결과 비교에도 동일한 경향성을 보였고, 절대값 차이도 크지 않았다. 따라서 본 연구에서 개발한 계측 시스템과 후처리 프로세스를 통해 전달오차를 계측하고 이를 기어 설계에 활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 기어 시스템의 정밀 전달오차 계측 시스템 개발을 위해 수행되었다. 개발 시스템에서 계측된 전달오차의 검증에 위해 시험용 기어 쌍의 전달오차를 계측하였으며, 상용 소프트웨어의 전달오차 분석결과와 비교함으로써 검증을 수행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 전달오차 계측 시스템은 계측 장치, 변환기, DAQ, 후처리 소프트웨어로 구성되며, 전달오차 특성 분석을 위해 입력기어의 치물림 수에 따른 평균 PPTE를 이용하여 대표 값을 계산할 수 있도록 구성하였다.
2. 전달오차 계측 시험은 기어비가 1:1인 기어 쌍을 대상으로 부하의 크기와 회전방향을 고려해 수행하였다. 시험 기어쌍의 전달오차는 고부하 시험에서 비교적 높게 나타났으나, 무부하 시험의 전달오차는 일부 저부하 시험보다 높게 나타났다. 이는 제작오차 및 조립공차 등에 의한 무부하 전달오차가 부하가 가해짐에 따라 상쇄되어 감소하다가 특정 부하 이상에서는 크게 상쇄되지 않고 변형에 의한 전달오차가 커짐에 따라 전체 기어 쌍의 전달오차가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
3. 계측 전달오차 값은 상용 소프트웨어인 Rotec RAS를 통해 분석한 시험 기어쌍의 전달오차 결과와 비교를 통해 검증하였다. 시험 결과 기어 전달오차는 동일한 경향성을 보였으며, 절대값 차이도 크지 않았다. 또한 반복 시험에서도 동일한 경향성을 보여 계측시스템의 안정성도 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 계측 시스템과 후처리 프로세스는 기어 전달오차를 계측하고 분석하는데 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

This work was supported by the “Development of load reduction technology for wind turbine reliability improvement and light-weighting” of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and

Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20193010025810)

REFERENCES

1. Kim, C. S., Lee, W. C. and Lee, J. P., “A study on the vibration/noise reduction of a gear driving system by adjusting the distance between gear shaft,” Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 697-703, 2006.
2. Bae, M. H. and Park, N. K., “A study in vibration characteristics by gear transmission error of vehicle transmission,” Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 11, No. 8, pp. 364-373, 2001.
3. Choi, B. J., Oh, J. E. and Park S. G., “Identify hypoid gear whine noise for deflection test and transmission error measurement,” Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 19 No. 2, pp. 127-137, 2009.
4. Lee, H. G., Do, J. G., Hong, S. M., Yoo, D. K., Won, K. M., Chae, G. M. and Lee, T. H. “Research for a development of the test equipment for transmission error of the planetary gear carrier pack,” Transactions of the Korean society for noise and vibration engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 549-554, 2014.
5. Wright, B. S., “Loaded transmission error measurement system for spur and helical gears,” A Thesis for a master, Ohio State University, USA, 2009.
6. Lee, S. H., Lee, H. G., Kang, S. C., Kim, S. Y., Yoo, D. K., Won, K. M., Chae, G. M., and Lee, T. H., “A research for the development of the transmission error measuring system and transmission error specification for the gear noise quality,” Transactions of the KSNVE, Vol. 24, No. 6, pp. 470-475, 2014.

7. Song, J. S., Lee, G. H., Park, Y. J., Bae, D. S., and Lee, C. H., "Development of Gear Stiffness Module for Multi-Body Dynamic Analysis on Gears," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21, No. 1, pp.130-136.
8. Lee, H. G., Lee, S. H., Ku, H. I., Yoo, D. K., Won, K. M., and Lee, T. H., "Development of a transmission error measurement system and its adaptation to a manufacturing line," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26 No. 4, pp. 420-427, 2016.
9. Park, C. I., "Vibration and Noise of Mechanical System", Journal of the KSME, Vol.53, No.2, pp. 30-34, 2013.
10. Lee, N. G., Kim, Y. J., Kim, W. S., Kim, Y. S., Kim, T. J., Baek S. M., Choi, Y., Kim, Y. G., and Choi, I. S., "A study on the improvement of transmission error and tooth load distribution using micro-geometry of compound planetary gear reducer for tractor final driving shaft," Journal of Drive and Control, Vol. 17, No. 1, pp. 1-12, 2020.
11. Yun, H. S. and Kim, S. D., "A study on cycle time and power saving effect of a hydraulic hybrid injection molding machiner using a servo motor," Journal of Drive and Control, Vol. 17, No. 3, pp. 15-25, 2020.