

# 유성기어 캐리어팩 전달오차 측정 장비 개발에 관한 연구

## Research for a Development of the Test Equipment for Transmission Error of the Planetary Gear Carrier Pack

이 현 구<sup>†</sup> · 도 종 구<sup>\*</sup> · 홍 사 만<sup>\*</sup> · 유 동 규<sup>\*</sup> · 원 광 민<sup>\*</sup> ·  
채 금 목<sup>\*</sup> · 이 태 휘<sup>\*\*</sup>

Hyun Ku Lee, Jong Gu Do, Sa Man Hong, Dong Kyu Yoo, Kwang Min Won,  
Geum Muk Chae and Tae Hwi Lee

(Received May 28, 2014 ; Revised May 28, 2014 ; Accepted July 7, 2014)

**Key Words** : Planetary Gear Noise(유성기어 소음), Transmission Error(전달오차), Carrier Pack(캐리어팩)

### ABSTRACT

In general, there has been a lot of research concerned about the gear noise known to be proportional to gear transmission error for external gears likewise spur, helical gear, and hypoid gears. But, In the case of planetary gear set, gear noise study is insufficient because of the difficulty of designing, manufacturing, and understanding of its mechanical system. This study is aimed to develop the transmission error measurement equipment for the planetary gear sets used in the automatic transmission. By comparing the results of the transmission error and noise objectively, user could select the optimized planetary gear set which has quiet noise level before manufacturing the automatic transmission.

### 기 호 설 명

- $\delta X$  : 전달오차
- $m$  : 기어비
- $N_{alt}$  : 1회전당 출력신호 갯수
- $N_1$  : 입력축 계산 신호 갯수
- $N_2$  : 출력축 계산 신호 갯수

### 1. 서 론

최근 세계 각국의 연비 규제 및 출력, 승차감, 저

소음 요구 등에 부합하기 위하여 변속기의 다단화가 경쟁적으로 추진되고 있는 실정이다. 이러한 변속기의 다단화로 변속기의 구조는 더욱 더 복잡한 형태로 설계되고 조립된다.

차량의 엔진룸 안에서 허용할 수 있는 공간에서 다단화를 구현하다 보면 원주 방향으로 동력을 전달하는 유성기어세트의 조합을 통해서만 구성이 가능하다. 따라서 유성기어 시스템은 차량의 동력을 전달하는 시스템에서 없어서는 안될 중요한 시스템이다.

효율적인 다단화를 위해서는 소형화된 부품 요소들이 더욱 복잡하게 조립되는 형태로 설계 되어야 한다. 그러나 조립된 변속기가 특정 부품이나, 조립자의 실수로 인해 불량률이 발생한다면, 분해 및 재

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Hyundai Motor Company  
E-mail : hk-lee@hyundai.com  
Tel : +82-31-8036-1936, Fax : +82-31-368-6095  
<sup>\*</sup> Hyundai Motor Company  
<sup>\*\*</sup> Psylogic Inc.

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference  
<sup>‡</sup> Recommended by Editor SungSoo Na  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

조립 시에 소요되는 시간과 비용은 기업의 경쟁력을 악화시킬 수 밖에 없고, 고객에게 인도되어 필드에서 문제를 유발한다면 고객의 생명과 직결될 수 있어 그 관리는 무엇보다 중요하다.

따라서 제조사는 조립단계 이전부터 모든 부품의 무결점 제작과 검사에 심혈을 기울이고 있으며 이를 극복하기 위하여 기존의 검사시스템보다 효율적이고 신뢰성 있는 검사시스템을 개발하기위해 노력하고 있다.

자동변속기를 구성하는 핵심부품중 가장 대표적인 것이 유성기어 캐리어팩(planetary gear carrier pack)이다. 유성기어 캐리어 팩은 선기어, 피니언 기어, 캐리어, 링기어, 베어링 등의 다양한 요소들의 결합체로 구성되어 있으며, 유성기어 소음을 개선하기 위한 노력들이 많은 연구결과에서 나타나고 있다.

기존의 연구결과들은 대부분 소음을 줄이거나, 최적화 하는 프로그램 개발에 대한 것과 완성품 변속기에서 불량품을 검출하는 방법들에 대한 것이 대부분이다<sup>(1-6)</sup>.

이 연구는 유성기어세트가 변속기에 조립되기 이전의 품질을 점검하기 위한 시스템을 개발한 것을 기술한 것이다. 입력요소와 출력요소와의 회전시 발생하는 오차를 엔코더를 이용하여 기어비에 비례하여 측정하고, 측정결과를 통하여 문제품과 양호품을 선별할 수 있는 설비 개발에 중점을 두었다.

외접기어의 전달오차를 측정하는 시스템은 서로 다른 축상에서 계측이 이루어지는 시스템이다<sup>(7)</sup>. 하지만, 유성기어 시스템의 경우는 입력과 출력축이 동일 축상에 배치되어 있어서 각 축에 엔코더와 구동모터 등을 장착해야 하는 어려움이 있다.

이 연구는 세계최초로 유성기어 전달오차 측정장비를 개발한 것으로 현대자동차의 6속 자동변속기에 탑재된 유성기어 세트의 전달오차를 측정하고, 대상에서의 진동 및 소음 비교 평가를 통하여 검사장치의 신뢰성을 검증하였다.

태에 따라 각속도가 느려지거나 빨라지는 것을 반복하게 되며 이 속도의 변화는 기어의 소음 및 진동의 주 원인으로 작용한다. 이상적인 기어의 경우 회전력을 전달하는 기어와 회전력을 전달받는 기어의 각속도가 동일해야 하나, 현실적으로 기어의 제작오차와 조립오차 등으로 인하여 서로 맞물려 돌아가는 두 기어의 각속도에서 차이가 나게 된다. 이를 전달오차(transmission error)라고 말하며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\delta X = \frac{2\pi N_1}{N_{all}} - m \frac{2\pi N_2}{N_{all}} \tag{1}$$

Fig. 1은 이 연구에서 사용한 전달오차 연산 알고리즘을 나타낸 것이다. 구동과 종동이 되는 기어축에 고정밀 엔코더를 설치하여 기어가 맞물려 돌아갈 때 발생하는 신호를 측정한다. 각 기어 회전축에 설치된 고정밀 엔코더로부터 각각의 회전속도에 기어비를 곱하여 서로 빼면 ‘0’이 되어야 하지만, 가공, 조립 등의 여러 가지 원인들에 의해 차이가 발생한다. 이러한 속도차(rad/sec)를 적분하면 각도 단위의 전달오차를 얻을 수 있다. 기어 검사 장치에서 전달오차는 수십 urad 정도의 작은 값을 갖는다.

2.2 유성기어 전달오차측정

전달오차를 측정하는 검사는 기어의 불량원인 등에 대한 근본적인 원인 규명이 가능하다. 이러한 치합전달오차는 레이저(laser velocimeter)나 로터리 엔코더(rotary encoder) 등을 이용한 측정방법 등이 제시되어왔다<sup>(11,12)</sup>.

자동변속기의 유성기어 조합은 여러 개의 선 기어, 피니언 기어, 캐리어, 그리고 링 기어를 포함한 복잡한 구조를 가지고 있으며 이러한 복잡성에 의해

2. 본 론

2.1 전달오차

기어 화인성 소음은 기어 쌍의 불완전한 운동에 기인된 치합 전달오차가 기진원으로 작용하여 발생한다<sup>(8-10)</sup>. 회전시 기어는 치형의 형태와 맞물림 상

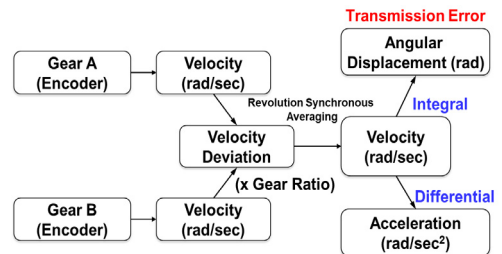


Fig. 1 Algorithm of the transmission error calculation

**Table 1** The components of the 6th speed automatic transmission of the Hyundai Motors Company

Speed	OD/C	35R/C	LR/B	26/B	UD/B
1st			●		●
2nd				●	●
3rd		●			●
4th	●				●
5th	●	●			
6th	●			●	
Rev		●	●		

품질 문제가 더해지면 소음이 유발되고, 내구 문제로까지 진전될 수 있다.

Table 1은 현대자동차에서 생산되는 6속 자동변속기의 각 단별 클러치 및 브레이크의 작동요소를 표시한 것이다.

이 연구에서는 Table 1을 참조하여 모든 구성요소가 작동을 하고, 계측 가능한 조건을 구성하는 1속 조건으로 유성기어 검사 시스템을 구성하였다.

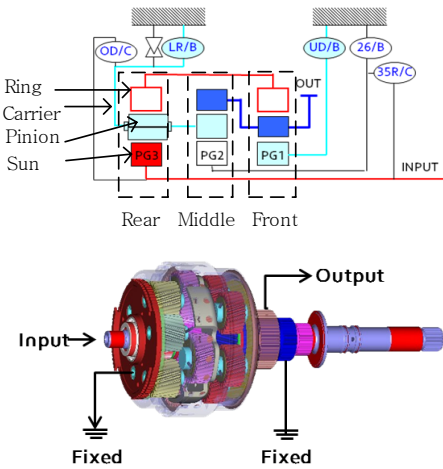
Fig. 2는 1속 주행시 동력전달 계통도를 나타낸 것이다. 1속에서 프론트 선기어(front sun gear)는 고정되고, 미드 선기어(mid sun gear)는 자유단이 되며, 프론트 캐리어(front carrier)는 바퀴로 연결되어 동력을 전달하게 된다.

Fig. 3은 이 연구를 통하여 개발된 수직방식 유성기어 전달오차 검사장치 개략도를 나타낸 것이다. 출력축인 프론트 캐리어를 하부로 향하도록 하였고, 입력축인 리어선(rear sun) 기어를 상부로 배치하였다. 이것은 양산라인에서 유성기어 캐리어팩이 조립된 상태로 이 측정장치에 장착되면, 입력 구동부가 하부로 이동하여 입력축인 리어선기어를 회전시킬 수 있도록 구성하였다. 출력 구동부는 프론트 선기어 축을 고정하고, 출력축인 프론트 캐리어에 부하를 인가할 수 있도록 구성하였다. 이렇게 하여 모든 축의 중심이 일직선 상에 있도록 구성하였다.

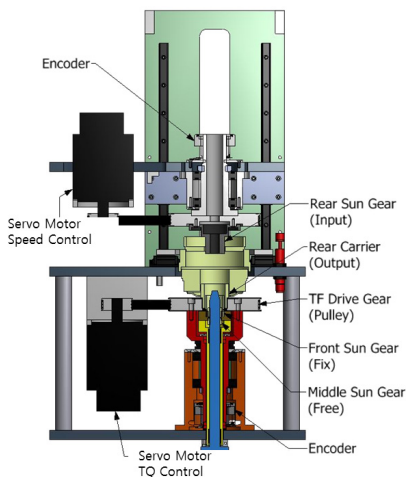
Table 2는 기구부 주요 설계사양을 나타낸 것이다. 구동은 100 rpm 내외의 낮은 회전속도에서 측정되며, 입력 및 출력에 예씨 서보 모터(AC servo motor)와 정밀 엔코더(encoder) (25,000 Pulse/rev)를 구성하여 속도 및 토크 제어가 가능하도록 하였다. 뿐만 아니라, 100 MS/s의 카운터보드(counter board)를 이용하여 각 회전축의 속도를 측정하여 계산하도록 구성하였다.

**Table 2** Specifications of the T.E. measuring equipment

	Items	Characteristics
Servo	Input	100~300 rpm
	Output	4~8 Nm
	AMP	TQ, rpm control
Design	Motor pulley	Belt
	Carrier	Fixed
	Encoder(pulse/rev)	25,000



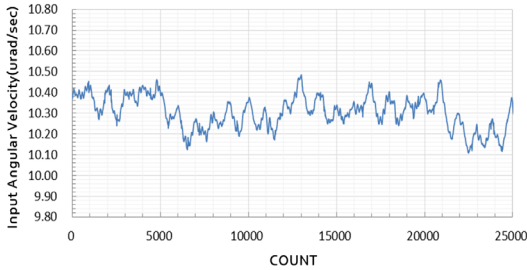
**Fig. 2** A schematic diagram of the planetary gear sets(1st speed)



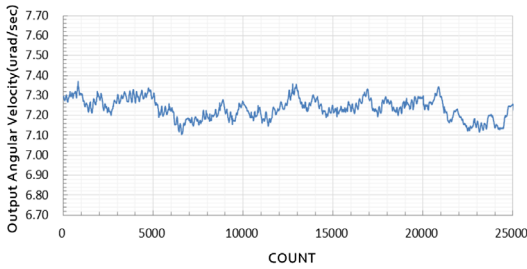
**Fig. 3** A detail picture of the planetary gear transmission error measuring system

### 2.3 유성기어의 전달오차 측정

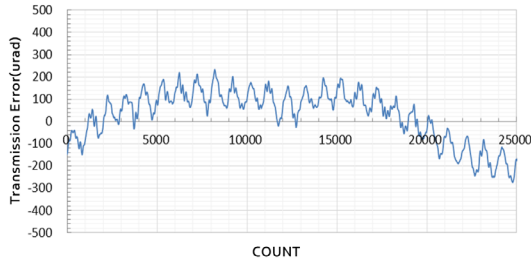
Fig. 4(a)는 입력축의 각속도(rad/s)를 Fig. 4(b)는 출력축의 각속도(rad/s)를 그리고 Fig. 4(c)는 입력축과 출력축 사이의 전달오차를 나타낸 것이다. 입력축과 출력축의 각속도 오차를 적분하여 얻어진 전달



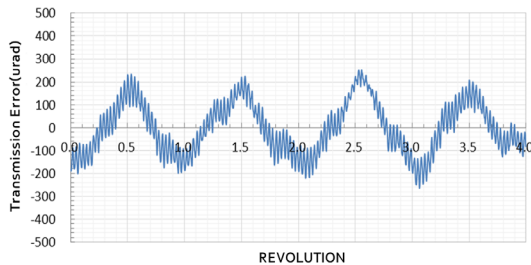
(a) Input angular velocity



(b) Output angular velocity

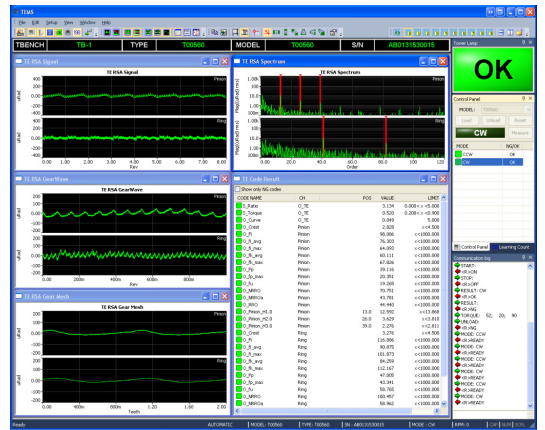


(c) Transmission error



(d) Transmission error 4 rotations

**Fig. 4** Transmission error charts



**Fig. 5** TEMS main screen

**Table 3** TEMS's specifications and functions

Items		Characteristics
Signal processing	DAQ	100 MS/s(counter)
	Encoder	50,000 pulse/rev
	Analysis	RSA order analysis
Items	RMS	T.E. avg.
	Peak	T. E. max
	Crest	Nick
	H1	Mesh order
	Fi/fi	T. E.
	Fk	Profile error
	fu, fp	Pitch error

오차는 오더 분석을 위하여 4회전의 오더 신호로 리샘플링(resampling)한 것으로 Fig. 4(d)는 그 결과를 보인 것이다. 이를 주파수 분석하면 오더 스펙트럼을 얻을 수 있다. 오더 신호에 회전동기화 평균방법(revolution synchronous averaging method)를 적용할 경우, 재현성이 높은 신호를 얻을 수 있다.

또한 이러한 계측이 가능하도록 유성기어 전달오차를 측정 및 분석할 수 있는 소프트웨어 시스템을 개발하여 전달오차 측정 시스템(transmission error measurement system)인 TEMS v1.0이라고 명명하였다. Fig. 5는 전달오차 측정 시스템의 메인 화면을 나타낸 것으로 모터 회전속도, 테스트 모드, 그리고 통신상태, 측정결과 및 각종 차트 등으로 구성되어 있다. Table 3은 TEMS의 성능과 여러 가지 함수를 나타낸 것이다.

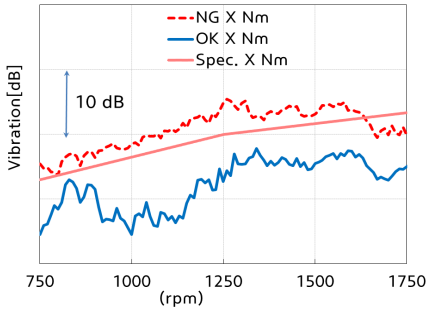


Fig. 6 A vibration test results of the planetary gear

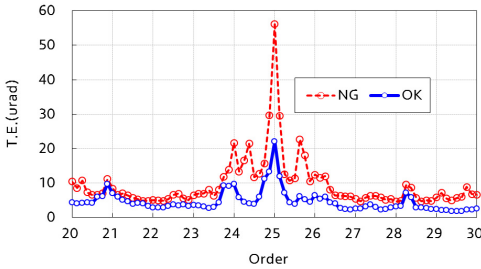


Fig. 7 A transmission error test results of the NG and OK planetary gear sets

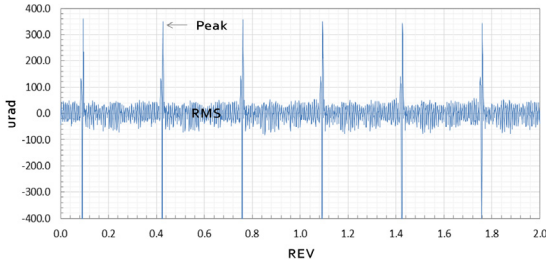


Fig. 8 A ring gear nick test result

2.4 대상 평가와 유성기어의 전달오차

유성기어 전달오차 측정시스템의 측정결과와 실제 변속기에서 발생하는 노이즈와 상관성을 확인하기 위하여 대상 평가를 실시하였다. Fig. 6은 부분부하, 1단 완가속 조건에서 양품 및 불량품의 유성기어를 장착한 자동변속기의 유성기어 성분 진동을 측출한 결과이다. 불량품(NG)의 경우 750 rpm~1,750 rpm 전 영역에서 양품(OK)대비 5~10 dB 정도 높은 진동 수준을 나타내며, 기준도 벗어나고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 이렇게 측정된 양품(OK)과 불량(NG)품

의 유성기어 캐리어를 전달오차 측정장비에서 계측한 결과를 보인 것이다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 동일 조건에서 전달오차 값이 양품은 22 urad이고 불량품은 56 urad으로 약 3배 가까이 전달오차 값이 큰 것을 확인 할 수 있다. 이를 통하여 개발된 유성기어 전달오차 측정 장비가 소음의 양호한 유성기어 세트와 불량인 유성기어세트를 명백하게 구분할 수 있다는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 링기어에 흠집을 인위적으로 만들고 전달오차를 측정한 것이다. 크레스트 팩터(crest factor = peak/rms) 함수를 이용하여 기어의 손상여부도 확인이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 이 시험에서는 크레스트 팩터가 17.5 수준으로 기존 이오엘(EOL : end of line)장비에서 검출 가능하던 3.5 수준의 약 5배 정도로 검출 효과가 뛰어나다는 것을 확인하였다.

뿐만 아니라, 전달오차 측정 데이터를 이용하여 앞서 언급한 회전동기화 평균법(revolution synchronous averaging method)를 적용할 경우, 유성기어 성분을 선기어, 피니언 기어, 링기어 등의 성분으로 분리할 수 있다. 각 신호에 크레스트팩터를 적용함으로써 어떤 기어에 손상이 있는지를 구분할 수 있으며, 사이드 밴드(sideband) 성분을 연산함으로써 어떤 기어의 중심도(eccentricity), 런아웃(runout), 축 흔들림 량 등을 구분할 수 있다.

3. 결론

이 논문에서는 자동변속기 유성기어 캐리어팩 전달오차 검사장치를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 세계 최초로 자동변속기 유성기어 캐리어팩의 전달오차를 측정하는 전달오차 검사 장비를 개발하였다.
- (2) 유성기어 캐리어팩 전달오차 검사장치와 변속기 대상 시험 결과를 통하여 상관성이 있음을 확인하여 전달오차 측정 시스템의 신뢰성을 검증하였다.
- (3) 뿐만 아니라, 기어 손상에 대한 부분도 점검이 가능한 것을 확인하였다.
- (4) 이 장비와 검사 기술의 개발로 변속기 품질평가 방식이 조립 후 완성품 평가방식에서 변속기 조

립 전 단품 평가방식으로 전환이 가능하여 양산라인의 생산성 및 직행률을 개선할 수 있다.

## References

- (1) Lee, H. K., Kang, S. C., Hur, J. W., Bae, D. H. and Kang, K. T., 2008, An Experimental Study for Predicting the Planetary Gear Noise in the Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 503~508.
- (2) Lee, H. K., Kim, M. S., Hur, J. W. and Kang, K. T., 2011, A Research For the Planetary Gear Noise Development in FF 6th Speed Automatic Transmission, ASME, DETC 2011-PTG 47129.
- (3) Lee, H. K., Kim, M. S., Suh, H. S., Kim, J. H., Kahraman, H., Harianto, J. and Kwon, H. S., 2013, Research for the Development of a pRMC Program, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 669~674.
- (4) Lee, H. K., Kim, M. S., Lee, S. H., Suh, H. S., Baek, S. B. and Kahraman, A., 2013, Development of a pRMC Program for the Developing the Planetary Gear Noise in the Concept Design Stage, KSAE13-B0039, pp. 150~155.
- (5) Kwon, H. S., Kahraman, A., Lee, H. K. and Suh, H. S., 2014, An Automated Design Search for Single and Double-planet Planetary Gear Sets, ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 136, 061004-1~13.
- (6) Lee, H. K., Kim, M. S., Hwang, S. Y., Yoo, D. K., Kang, K. T. and Lee, T. H., 2011, A Development of the Noise Quality Checking System EOL of the 6th Speed Automatic Transmission in the USA, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 657~664.
- (7) Lee, S. H., Lee, H. K., Kim, S. C., Kim, S. W., Yoo, D. K., Won, K. M., Chae, G. M. and Lee, T. H., 2014, A Research for the Development of the Transmission Error measuring System and Transmission Error Specification for the Gear Noise Quality, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 470~475.
- (8) Tarutani et al., 1994, Analysis of Gear Transmission Error, Fisita International Congress at Beijing, No.945029, pp. 250~259.
- (9) Kubo, A. et al., 1990, Representative form Accuracy of Gear Tooth Flanks on the Prediction of Vibration and Noise of Power Transmission, Transaction of JSME, Vol. 56, No. 532, pp. 3398~3403.
- (10) Yuruzume, I., 1979, Transmission Errors and Noise of Spur Gears Having Uneven Tooth Profile Errors, Transactions of the ASME, Vol. 101, pp. 268~273.
- (11) Kato, S., 1993, Measurement of Transmission Error of Gears Using Laser Velocimeters, JSME(C), Vol. 59, No. 564, pp. 288~293.
- (12) Smith, J. D., 1990, Comparing Encoder and Accelerometer Measurement of Transmission Error or Torsional Vibration, Proc. Inst. Mech. Eng., c404/027, pp. 43~49.



**Hyun Ku Lee** is a NVH senior research engineer in the Hyundai - Kia Motors Research and Development Division. He received his BS and MS degrees of Mechanical Engineering from The Konkuk University in 1995 and in 1997 respectively. He authored several papers on the automatic transmission noise. His current research on automatic transmission's noise problems focuses on the planetary gear, oil-pump, EOL and so on.