

기어 소음 품질 안정화를 위한 전달오차 측정 시스템 개발 및 전달오차 스펙 개발에 대한 연구

A Research for the Development of the Transmission Error Measuring System and Transmission Error Specification for the Gear Noise Quality

이 상 화*. 이 현 구†. 강 석 찬*. 김 시 응*. 유 동 규*.
원 광 민*. 채 금 목*. 이 태 휘**

Sang Hwa Lee, Hyun Ku Lee, Seok Chan Kang, Si Yoong Kim, Dong Kyu Yoo,
Kwang Min Won, Geum Muk Chae and Tae Hwi Lee

(Received April 8, 2014 ; Revised May 28, 2014 ; Accepted May 28, 2014)

Key Words : Transmission(변속기), Gear Noise(기어소음), Transmission Error(전달오차)

ABSTRACT

In the past, transmission error(T.E.) has been identified as one of the main sources of gear whine noise, which cause serious passengers irritation at high frequency. In this study, to identify the correlation of the T.E. and gear whine noise, a T.E. measuring system was developed. By comparing the T.E. and gear whine noise level, T.E. target value which can represent the gear noise was proposed. The conclusions are followed: (I) It is possible to measure T.E. of the gear pairs (II) Similar trends are observed between T.E. and gear whine noise. (III) By observing the T.E. pattern, presence of sideband noise can be predicted. (IV) Proposed T.E. target value can be adopted to the gear manufacturing for gear noise quality management.

기 호 설 명

d : 치합전달오차($d = \theta_p \cdot r_p + \theta_w \cdot r_w + \varepsilon$)
 ε : 제작 오차

P : 자력기진력
 K_t : 치합접계의 강성
 θ_p : 피니언기어 회전 각도
 r_p : 피니언기어 반경
 θ_w : 휠기어 회전 각도
 r_w : 휠기어 반경

1. 서 론

최근 자동차가 단순한 이동수단을 넘어 다양한 감성적 가치를 지닌 하나의 생활 문화 공간으로 변화하면서 차량의 동력 성능뿐만 아니라 진동소음과 같은 감성측면에 대한 고객의 기대가 커지고 있다. 특히 변속기의 기어 화인 소음은 주파수 특성상 작

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

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

은 크기의 소음에도 차량 내에서 인지되기 쉬워 그 품질 관리가 매우 중요하다.

변속기 기어소음의 품질은 설계와 제작의 결과물이다. 대량생산이 요구되는 현 상황에서 변속기 불량품이 출하되는 것을 막기 위하여 품질 점검 시스템인 ‘EOL(end of line)’을 도입하여 전수 점검을 통한 품질관리를 하고 있다⁽¹⁾. 그러나 이러한 EOL 시스템은 기어 단품의 불량이 있어도 최종 조립 후 변속기 출하직전에 불량여부를 확인한다.

분해 조립을 통한 양품의 생산은 직행률 저하 즉, 공장 가동률을 저하시키는 원인 중 하나이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기어소음이 우수한 양품의 기어를 선별하여 변속기에 투입하는 것이 필요하다.

변속기 기어 화인 소음은 기어쌍의 불완전한 운동인 치합 전달오차가 자력기진원으로 작용하여 발생하며 이러한 치합전달오차를 줄이는 것이 기어 화인 소음을 저감하는 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다⁽²⁻⁴⁾. 따라서 기어쌍간의 전달오차를 정확히 측정하여 스펙화할 수 있다면 기어 품질관리를 통한 변속기 소음을 안정화 시킬 수 있다.

이 논문에서는 기어의 전달오차를 측정하는 장비를 개발하여 기어 품질에 따른 변속기 소음과 전달오차의 상관관계를 규명하였고 나아가 기어 생산공장에서 기어쌍간의 품질점검이 가능하도록 스펙을 제시하였다.

2. 기어 진동 소음과 치합 전달 오차

2.1 기어 진동 소음

기어는 치(tooth)의 접촉을 통하여 구동축의 동력을 피동축으로 전달한다. 이러한 치 접촉에 의하여 발생한 하중은 치와 축(shaft), 베어링(bearing)에 전달되어 변형을 일으키고, 하중이 제거되면 다시 회복되는 현상이 반복된다. 기어의 치 접촉이 이상적으로 완벽하다면, 이로 인한 진동이 거의 발생하지 않아 기어 화인 소음도 발생하지 않을 것이다.

기어에서 작용 하중의 변화가 반복되는 동안 발생한 치나 축 등의 변형은 치의 치줄(lead)방향이나 치형(profile)방향의 치형 수정을 통하여 보상이 가능하다.

Fig. 1은 발생한 기어의 진동이 변속기에서 전달

되는 경로를 나타낸 것이다⁽⁵⁾.

2.2 기어 치합 전달 오차

기어에서 치의 탄성변형, 축의 처짐, 치형오차 등의 비정상 성분은 구동축에서 피동축으로 전달되는 각운동을 불완전하게 한다. Fig. 2는 이를 개략적으로 설명한 것이고, 치합전달오차에 의한 자력기진력은 다음 식 (1)과 같다.

$$P = K_t \cdot d \tag{1}$$

식 (1)에서 언급된 것과 같이 치합전달오차가 작으면 자력기진력을 줄일 수 있어서 진동과 소음을 저감할 수 있다.

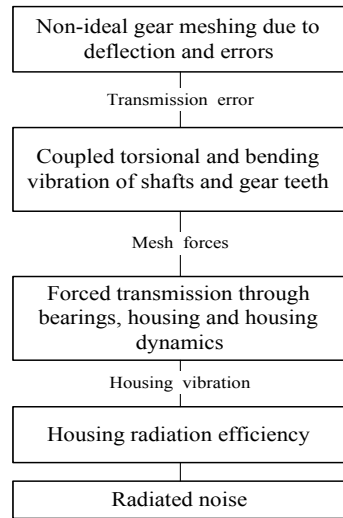


Fig. 1 Vibration and noise transfer paths in a gearbox

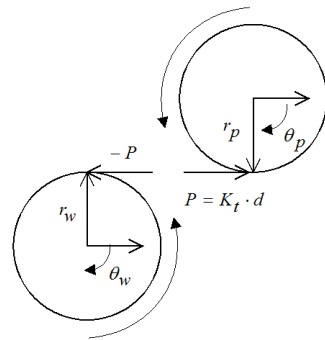


Fig. 2 A schematic diagram of the transmission error

3. 치합 전달오차 측정

3.1 기어 치합 전달오차

치합 전달오차의 중요성을 인식한 연구자들은 이를 측정하는 방법으로 로터리 엔코더(rotary encoder)를 이용하거나, 레이저(laser velocimeter)를 이용하여 치합 전달오차를 측정하는 방법 등을 제시하였다(6,7).

이 연구에서는 로터리 엔코더를 이용한 방법을 적용하였다. 구동시 출력축(output shaft) 엔코더에서 나온 신호는 구동부 기어(wheel) 잇수로 나누어주고, 입력축(input shaft) 엔코더에서 나온 신호는 피동부 기어(pinion) 잇수로 나누어준다. 이렇게 하면 두 신호는 같은 주파수를 가진 신호가 된다. 그러나 두 신호는 구동부에서 피동부로 동력을 전달하면서 발생하는 치의 굽힘, 흔들림, 축의 처짐 등의 원인으로 정확하게 같지 않다. 이 두 신호를 가지고 위상차이를 구한다. 이 위상차가 치합 전달오차인 것이다. Fig.3은 그 예를 설명한 것이다.

3.2 치합 전달오차 측정 장비 개발

Fig.4는 실험에 사용된 전달오차 측정장비이다. 두 개의 축에 측정하고자 하는 대상기어가 각각 장착되며 축의 하단에 고분해능 엔코더가 설치되어 서보모터로 구동되는 축의 회전속도를 계측한다. 계측된 데이터는 제어기를 통하여 분석되어 전달오차를 도출한다. Table 1은 시험에 사용된 장비의 사양을 나타낸 것이다.

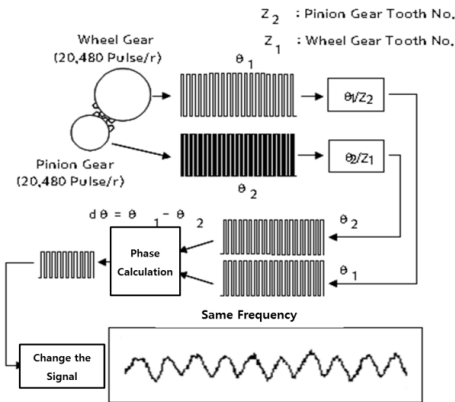
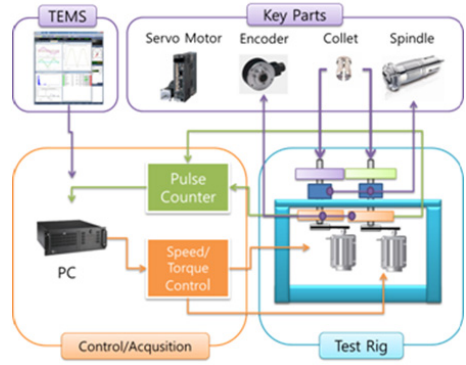


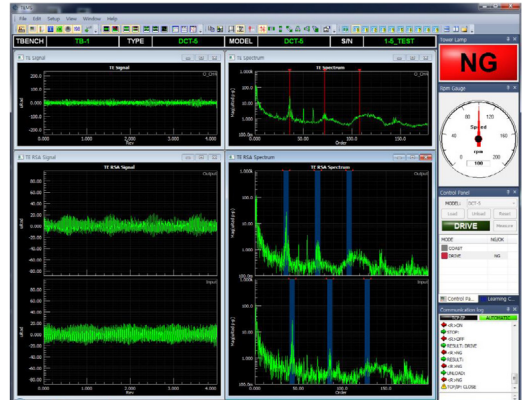
Fig. 3 A schematic diagram of the transmission error signal processing procedure



(a) Total system



(b) Measuring system



(c) Analysis system(TEMS)

Fig. 4 Transmission error measuring system and analysis system

Table 1 TE measuring system specifications

Items	Specification	
Equipment	Servo motor	1.3 kW, 8.34 N-m, Max.1500 RPM Operation speed
	Shaft run-out	Max. 10 μm
	Encoder	50,000 pulse/rev
	DAQ	100 MS/s(Counter)

3.3 대상기어 소음 측정

무향실에서 대상소음은 가속과 감속 상태에서 측정하고, 변속기 내부 오일온도는 일정하게 유지한 상태에서 변속기 케이스로부터 방사되는 소음을 인접한 위치에서 측정하였다. 이 실험에서는 5쌍의 기어를 선정하여 동일한 샤프트에 기어쌍만 교체한 후 변속기에 조립하여 평가를 진행하였다.

4. 실험 결과

4.1 대상소음 측정 결과

시험에 사용된 변속기와 기어는 수동변속기이며 Table 2는 실험에 사용된 기어쌍의 제원을 나타낸 것이다.

대상시험은 선정된 기어 5쌍을 시험변속기에 각각 조립한 후 무향실에서 1,000~2,500 rpm까지 가속조건으로 근접 소음을 측정하였다. Fig. 5는 측정된 기어 오더의 소음을 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 나타난 바와 같이 가장 소음이 우수한 기어쌍은 #1번이며 가장 소음이 나쁜 #5번과는 약 10 dBA의 소음차이가 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 기어의 소음 스펙을 기준으로 보면 #1, #2번 쌍을 제외한 나머지 기어쌍은 해당 스펙을 초과하고 있다. 이것은 차량에서 운전자가 기어소음을 인지할 가능성이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 #3번 쌍과 #2번 쌍의 소음 파워스펙트럼 분석결과를 나타낸 것이다. #3번 기어쌍에서는 기어 맞물림 오더 주위에 사이드밴드 소음이 존재하는 것을 확인할 수 있으나, #2번 쌍에서는 사이드밴드 소음이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

기어의 사이드밴드 소음은 지지축의 모듈레이션 또는 기어쌍의 모듈레이션에 의하여 주로 발생하는 것으로 이 실험에서는 동일한 축을 사용하여 평가하였으므로 이때 발생한 사이드밴드 소음은 기어쌍의 모듈레이션에 의해 발생한 것으로 예측할 수 있다.

Table 2 Gear pair specifications

Items	IP gear	OP gear
Tooth No.	47	33
Module	1.654	
Pressure angle	1.6°	
Helix angle	32°	

4.2 치합 전달오차 측정 결과

Fig. 7은 각 기어쌍이 1회전할 때 발생하는 치합 전달오차를 나타낸 것이다.

측정 결과 #1기어쌍의 PPTE(peak to peak transmission error)가 38 μm로 가장 작으며 #5기어쌍의 PPTE는 115 μm로 가장 크게 나왔다. #3, #4기어쌍의 치합 전달오차는 #1과 #5의 중간 수준이며 #2기어쌍은 #1 기어쌍과 비슷한 수준의 치합 전달오차를 확인할 수 있다.

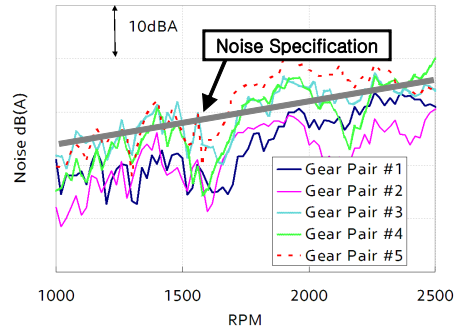
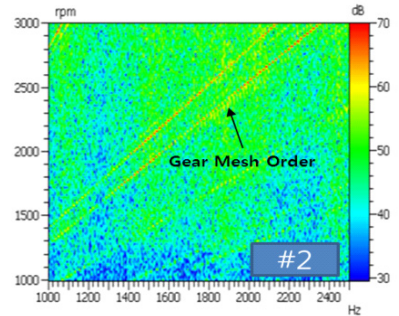
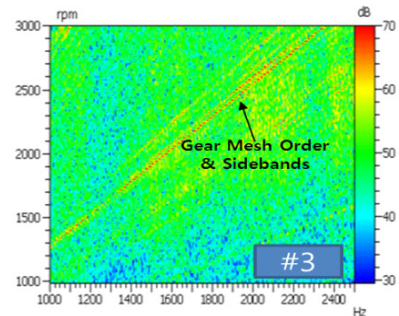


Fig. 5 Order analysis plot of the measured gear noise



(a) Gear pair #2



(b) Gear pair #3

Fig. 6 Auto power spectrums of the gear noise

Table 3 Noise level & PPTE

No.	PPTE(μm)	Noise level (dBA)	Sideband	Modulation
#1	38	Base	x	x
#2	40	Base+1	x	x
#3	68	Base +7	o	o
#4	68	Base +7	o	o
#5	115	Base +10	o	o

Base : a specific noise level

Fig. 5와 Fig. 7을 비교해 보면 치합 전달오차 측정 결과가 대상 소음평가와 상관성이 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 치합 전달오차가 가장 작은 #1 기어쌍의 소음이 가장 우수했으며, 치합 전달오차가 가장 큰 #5 기어쌍의 기어소음이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

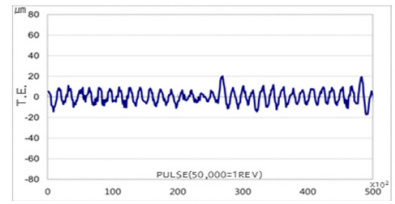
또한 Fig. 7의 (c), (d), (e)의 전달오차 형상을 보면, #3, #4, #5 기어쌍에서는 기어 모듈레이션이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 기어의 사이드밴드 소음의 원인이 될 수 있으며 Fig. 6의 결과와 비교해 보면 #3 기어쌍의 경우 대상소음에서 기어 맞물림 오더 성분 이외에 사이드밴드 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 기어쌍의 모듈레이션은 기어 가공상에 발생하는 런아웃 오차(run-out error)가 주 원인이며 이를 통하여 가공공정의 런아웃 오차를 예측 관리할 수 있다.

Table 3은 5쌍의 기어의 전달오차값과 소음레벨, 사이드밴드와 모듈레이션의 발생여부를 표로 나타낸 것으로, 치합 전달오차(PPTE)와 대상소음간의 우수한 상관관계를 확인할 수 있다.

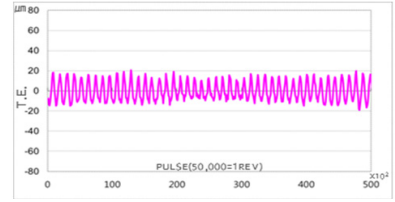
4.3 측정 결과 비교 및 스펙 제안

4.2절에서 언급된 것과 같이 대상소음과 치합전달오차 사이의 밀접한 상관관계를 토대로하여 치합 전달오차 스펙을 개발할 수 있다. 기어 단품에서 전달오차가 일정한 수준 이하로 관리가 된다면 변속기 완성품에서의 기어소음 품질도 일정 수준 이하로 관리가 가능할 것이다.

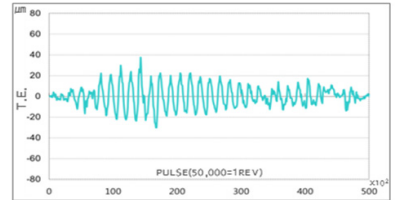
이 연구에서 사용된 기어쌍의 경우, 치합 전달오차와 대상소음 스펙을 비교해 보면, PPTE가 68 μm 이상인 기어쌍은 대상소음 스펙을 초과한 것을 확인할 수 있다. 또한 PPTE가 40 μm 이하인 기어쌍은 기어 소음이 매우 우수한 것을 확인할 수 있다.



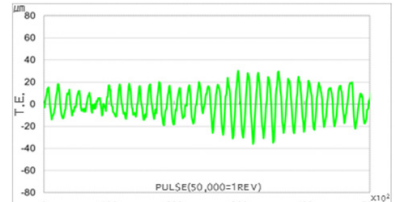
(a) #1 gear pair



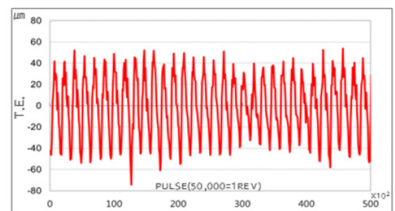
(b) #2 gear pair



(c) #3 gear pair



(d) #4 gear pair



(e) #5 gear pair

Fig. 7 Transmission error of the gear pairs

치합 전달오차 이외에 소음에 영향을 미칠 수 있는 다른 인자들의 산포 등을 고려했을 때 기어 치합 전달오차가 40 μm 이하에 있다면 기어 소음은 문제가 없을 것으로 판단되며, 평가 제원 기어의 치합 전달오차 스펙을 40 μm 이하로 제안할 수 있다.

뿐만 아니라, 치합 전달오차 데이터의 형상 결과를

통하여 변속기의 사이드밴드 소음 발생 유무도 예측할 수 있다.

5. 결 론

(1) 기어쌍만의 치합 전달오차 측정 시스템을 개발하였다.

(2) 치합 전달오차와 기어 소음간에 양의 상관관계가 있음을 확인하였다.

(3) 평가된 기어 제원의 PPTE가 68 μm 이상인 기어쌍은 대상 평가 결과 소음레벨이 스펙을 초과하였으며 40 μm 이하인 기어쌍은 소음 스펙 대비 우수하였다. 이를 통하여 평가된 기어 제원의 PPTE 스펙을 40 μm 로 제안하였다.

(4) 뿐만 아니라, 기어 사이드밴드 소음이 발생한 기어쌍은 전달오차 측정 결과에서 모듈레이션이 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 기어 가공의 문제도 예측이 가능한 것을 확인하였다.

(5) 이 연구에서 개발된 치합 전달오차 설비 및 스펙은 기어 가공라인에 적용 가능하며, 이를 통하여 변속기 조립 전 양품 기어를 선별 투입하여 변속기 조립라인의 불량률과 직행률을 근본적으로 낮출 수 있어 비용 및 시간 절감효과가 클 것으로 예상된다.

References

(1) Lee, H. K. et al., 2011, A Development of the Noise Quality Checking System EOL of the 6th Speed Automatic Transmission in the US, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 657~664.

(2) Tarutani, et al., 1994, Analysis of Gear Transmission Error, Fisita International Congress at Beijing, No.945029, pp. 250~259.

(3) 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.

(4) Yuruzume, I., 1979, Transmission Errors and Noise of Spur Gears Having Uneven Tooth Profile Errors, Transactions of the ASME, Vol. 101, pp. 268~273.

(5) Houser, D. R., 1982, Research in the Gear Dynamics and Gear Noise Research Laboratory, SAE821066.

(6) Smith, J. D., 1990, Comparing Encoder and Accelerometer Measurement of Transmission Error or Torsional Vibration, Proc. Inst. Mech. Eng., c404/027, pp. 43~49.

(7) Kato, S., 1993, Measurement of Transmission Error of Gears Using Laser Velocimeters, JSME(C), Vol. 59, No. 564, pp. 288~293.



Sang Hwa Lee is a NVH research engineer in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received his B.S. and M.S. degrees of Mechanical Engineering from The Korea University in 2007 and in 2009 respectively.

His current research on automatic transmission's noise problems focuses on the planetary gear, oil-pump, EOL and so on.



Hyun Ku Lee is a NVH senior research engineer in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received his B.S. and M.S. 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.