

유성기어 소음을 고려한 pRMC 프로그램 개발 및 적용에 관한 연구

Research for the Development of a pRMC Program for the Planetary Gear Noise

이 현 구[†] · 김 무 석* · 서 현 승* · 김 진 호* ·
칼만아멧** · 하리안또자니** · 권 현 식**

Hyun Ku Lee, Moo Suk Kim, Hyun Seung Suh, Jin Ho Kim,
Ahmat Kahraman, Jonny Harianto and Hyun Sik Kwon

(Received May 23, 2013 ; Revised June 25, 2013 ; Accepted July 2, 2013)

Key Words : Planetary Gear Noise(유성기어소음), Transmission Error(전달오차), Contact Ratio(물림률), Pressure Angle(압력각), Lead Angle(나선각), Contact Stress(접촉응력)

ABSTRACT

To design the optimized low noise planetary gear sets, a program called pRMC(planetary run many cases) is developed. The pRMC is especially using a combination analysis method for all gear specifications and also able to analyze any type of planetary gear sets. The pRMC is composed of the 5 sections those are generate, setting, evaluate, combine and analysis. After calculating all candidate gear sets, the pRMC could show many results that represent the character of each gear set including the transmission error which is the main gear noise factor, the contact ratios, the bending stress and so on. By comparing the results objectively, user could predict and select the optimized gear set which has quiet noise level and desired durability. The planetary gear designed by pRMC could have reduced noise and vibration level from 5 to 10 dB than previous-designed one.

1. 서 론

일반적으로 자동변속기 설계의 시작은 차량의 동력성능을 만족할 수 있는 기어비와 이를 구성하는 유성기어 세트의 구성에서부터 시작된다. 기어비는 차량에서 요구되는 엔진성능과 차량속도의 비로 구성된다. 필요로 하는 각 단 기어비가 선정되면 설계 엔지니어는 그것을 구현할 수 있도록 유성기어 세트를 설계하고 그 소음 수준은 설계자의 경험에 좌우되는 경우가 많다.

자동변속기내의 유성기어 소음 문제를 방지할 수 있는 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 하나는 구조적인 시스템 분석을 통하여 레이아웃(layout)상 유성기어 소음이 강건하도록 구성하는 것이고 다른 하나는 소음에 강건한 유성기어 제원으로 설계 및 개발을 하는 것이다.

이러한 유성기어 소음 개발과 관련된 최근의 연구들 중 대표적인 것은 레이아웃 검토와 유성기어 세트를 구성하는 기어들의 치합주파수 분석을 통하여 차량에서 특정 유성기어 세트의 소음 문제 여부를 미리 예측할 수 있다는 연구와 차량 전달계 및 유성기어

[†] 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

** Ohio State University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Spring Conference

† Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

세트 구성 요소들의 최적화 및 위상차 개선을 통하여 소음을 개발한 연구들이 있다⁽¹⁻⁵⁾.

유성기어 소음은 유성기어가 제작된 이후 수많은 시행착오를 거쳐서 개발된다. 그러나 현실적으로 그 한계가 있고 품질에 의해 상당한 영향을 받고 있다.

특히 6속 이상의 자동변속기가 요구되는 현시점에서 최적의 레이아웃 선택, 그리고 소음에 강건한 최적의 유성기어 세트의 제원 등을 사전에 완벽하게 미리 분석하고 예측할 수 있다면, 개발시간과 노력, 그리고 완성도를 높일 수 있을 것이다.

이 연구의 목적은 유성기어 세트를 구성하기 위한 기본적인, 복잡한 경우들을 극복하면서도 소음에 강건한 유성기어 설계가 가능한 모든 경우의 유성기어 제원들을 객관적으로 분석할 수 있는 프로그램인 pRMC(planetary run many cases)를 개발하고 이를 통하여 소음에 영향을 미치는 인자들을 고찰해 보고 실제로 적용한 것을 기술한 것이다. 이 연구 개발의 성과는 다음과 같다.

- (1) pRMC를 이용하여 현재 양산되고 있는 자동변속기의 특정 유성기어 세트의 제원을 재설계하였다.
- (2) 이를 통하여 기존 설계 방식으로 개발한 것에 비하여 변속기 대상에서 유성기어의 소음과 진동을 5~10 dB정도 개선되는 것을 검증하였으며, pRMC를 이용한 설계 결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- (3) pRMC프로그램을 이용한 분석을 통하여 개발 초기 단계에 압력각, 나선각, 물림률 등이 소음에 미치는 영향성을 파악할 수 있었으며, 일반적인 물림률의 증대가 항상 소음 개선을 의미하지는 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 pRMC 프로그램

자동변속기의 유성기어 세트를 설계하는데 있어서 모든 복잡한 상황을 극복하고, 최단시간에 주어진 요구조건 안에서 조건 별 조합을 형성하는 모든 경우의 수를 객관적으로 분석하여, 그 중 최적의 제원을 찾아 설계를 한다면, 설계자 및 개발자들이 겪어야 할 시행착오 등은 최소화 될 것이다. 이러한 것이 가능하도록 구성된 것이 pRMC 프로그램이다.

유성기어의 설계는 축간 거리, 기어비, 기어크기,

잇수 범위, 헬릭스각 범위, 압력각 범위, 유성기어 형태, 백레쉬 등 검토해야 할 항목들이 많다. pRMC는 이러한 유성기어를 구성하는 모든 요소들을 고려하고 설계하고자 하는 범위 내에서 모든 조건의 조합을 구성하여 모든 가능한 경우의 기어쌍에 대한 제원을 분석하여 최적의 제원을 도출할 수 있는 결과를 제시한다.

특히 pRMC는 소음뿐 아니라, 내구 등 에서도 최적의 제원을 선정하기 위한 분류작업이 가능하도록 구성되어 있는 프로그램으로 설계자가 원하는 특정한 목적들을 모두 달성할 수 있는 제원을 선정할 수

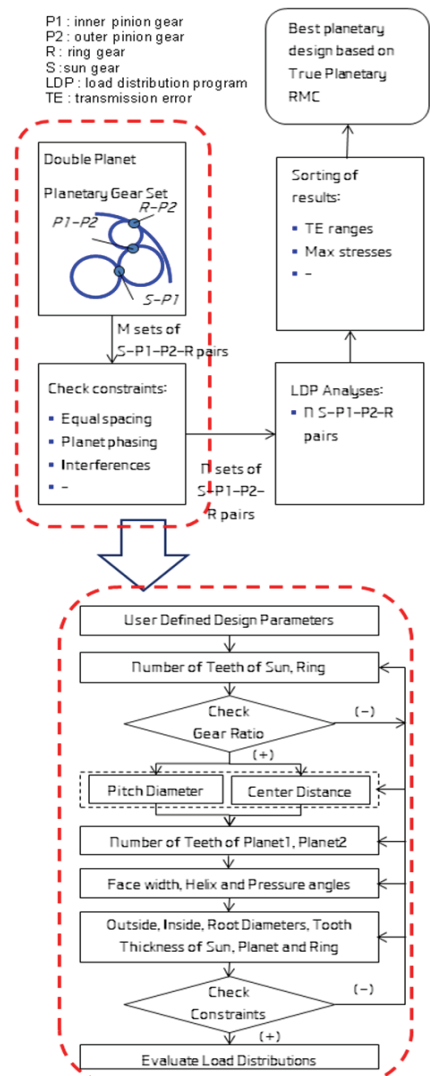


Fig. 1 pRMC algorithm structure

있다. Fig. 1은 pRMC프로그램의 알고리즘 구조를 표기한 것이다⁶⁾. 앞서 언급된 것과 같이 기어를 구성하는 기본적인 설계 조건인 기어비, 축간 거리와 피치경 등의 범위를 입력한다. 피니언 기어의 잇수를 선정하고 설계하고자 하는 압력각, 헬릭스각 등의 범위를 선정한다. 이때 각 항목의 단계를 설정하여 조합을 구성할 수 있도록 한다. 그리고 나서 유성기어를 구성하여 동력을 전달하기 위한 유성기어 개수, 위상차 분배 등 유성기어가 제대로 작동하도록 설계자가 제약 조건 등을 입력한다.

입력된 제약조건과 이미 선정된 조합에 의해 생성된 전체 기어 제원들의 교집합을 만들어 분포를 구성한다. 이렇게 선별된 유성기어 세트를 가지고 치형을 분석하여 특정 조건에 최적화된 유성기어 세트의 상세 제원을 선택한다. pRMC 프로그램은 입력과 결과 처리에 대한 시스템의 시각적 전개를 위하여 GUI(graphic user interface) 방식을 포함하고 있어 설계자가 사용하고 이해하기 쉽도록 구성되어 있다.

2.2 pRMC 분석을 통한 제원별 영향성 분석

Fig. 2는 약 3.5만개의 ‘A’ 유성기어 세트의 제원 인자별 해석을 통하여 각각의 인자별 영향성을 분석한 것을 보인 것이다.

‘A’ 유성기어 세트의 경우, Fig. 2의 (a)에 나타난 것과 같이 물림율의 경우 2.0~3.2의 범위 내에서는 전달오차(transmission error)가 급격하게 변하나 3.2 이상이 되는 경우는 전달오차 값이 수렴됨을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 2의 (b)와 (c)를 통하여 압력각은 작아질수록 유리하며, 나선각은 21° 조건에서 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

이는 정해진 제원들의 분포 조건에서 초기 해석 수행시 기본적인 틀을 가지고 접근할 수 있다는 것을 보여주는 예라고 할 수 있다.

2.3 pRMC를 이용한 적용사례

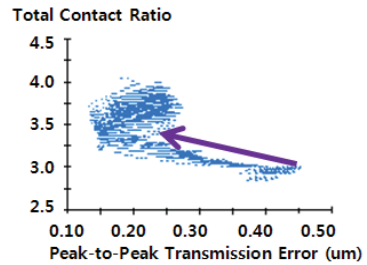
(1) ‘A’ Planetary gear sets 설계

기존 설계 방식과 pRMC를 이용한 설계 방식을 비교하기 위하여 현재 양산되고 있는 ‘A’ 자동변속기의 더블피니언 유성기어 세트를 pRMC 프로그램을 이용하여 재설계하였다. 캐리어와 오일가이드 등 기타 부품들을 공용으로 사용하면서 양산성을 고려하여 동일한 잇수를 가지나 기어의 상세 제원인 모

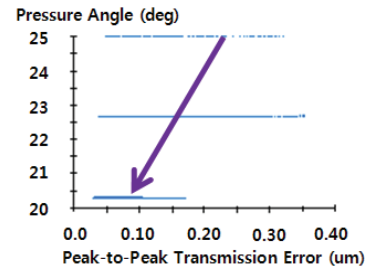
듈, 압력각, 그리고 리드각 등을 변경하여 제원을 재선정하였다.

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 선정된 제원들의 선 기어와 이너피니언 기어, 이너피니언 기어와 아우터피니언 기어, 아우터피니언 기어와 링 기어 간의 내구를 만족할 수 있는 접촉응력과 전달오차의 상관관계의 전체 분포를 나타낸 것이다. 이의 분포를 통하여 내구도 만족하고, 소음도 만족하는 pRMC 제원을 선정하였다.

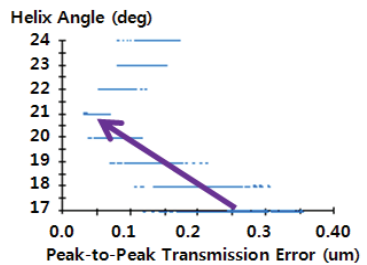
Table 1은 기존 양산하던 제원과 pRMC를 이용하여 새로 설계된 제원의 결과를 비교한 것이고, Fig. 4(a), (b), (c)는 기존 제원과 pRMC를 이용한 제원의



(a) The distributions of the total contact ratios versus transmission errors

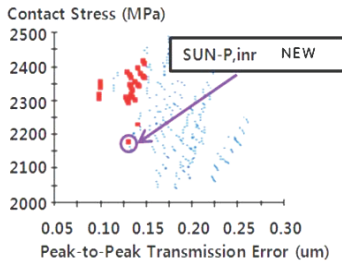


(b) The distributions of the pressure angles versus transmission errors

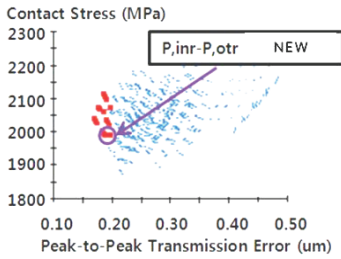


(c) The distributions of the helix angles versus transmission errors

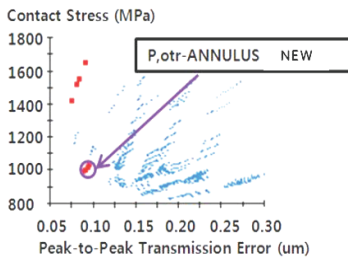
Fig. 2 Effects of the design factors



(a) The distributions of the contact stresses versus transmission errors between the sun and inner pinion gears



(b) The distributions of the contact stresses versus transmission errors between the inner pinion and outer pinion gears



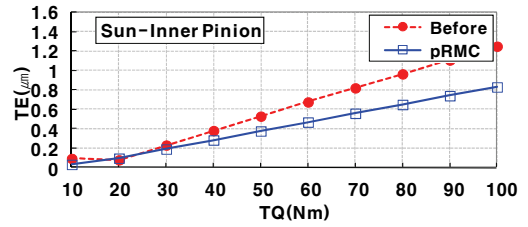
(c) The distributions of the contact stresses versus transmission errors between the ring(annulus) and outer pinion gears

Fig. 3 Analysis results of the contact stresses versus transmission errors

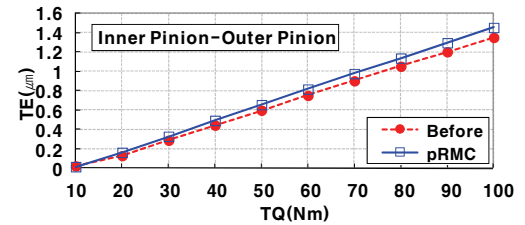
Table 1 The comparisons of the planetary gear set's specifications designed by pRMC and before design methods

	Before	pRMC
# of teeth	25/20/21/79	25/20/21/79
Module	1.3	1.294
Pressure angle	X	X +2
Lead angle	Y	Y + 0.88

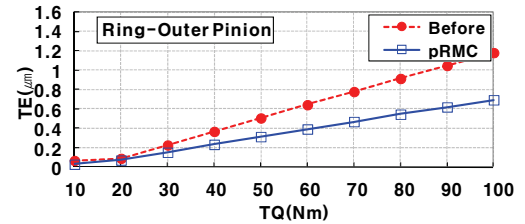
X, Y : arbitrary values



(a) Transmission errors versus torques of the sun and inner pinion gears



(b) Transmission errors versus torques of the inner pinion and outer pinion gears

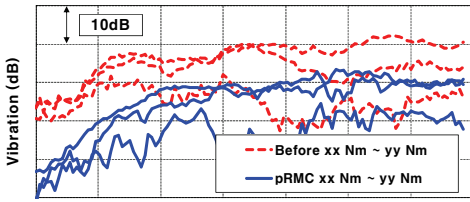


(c) Transmission errors versus torques of the ring and outer pinion gears

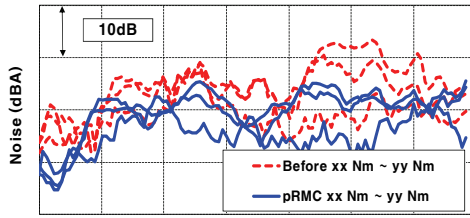
Fig. 4 The compare results of the transmission errors versus total torques between before and pRMC design of the 'A' planetary gear sets

전달오차 값을 토크별로 비교한 것이다. Fig. 4의 (a)와 (c)를 보면 pRMC제원이 기존 제원 대비 약 45% 정도의 전달오차가 개선된 것을 볼 수 있으나, (b)를 보면 이너피니언 기어와 아우터피니언 기어 사이의 전달오차 값이 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 피니언 기어가 장착되는 캐리어를 변경하지 못하고 잇수 제약조건에 대한 조건들을 회피할 수 없다 보니 제원 선정에 있어서 한계가 있었던 것으로 보여진다. 따라서 소음에 최적의 제원의 설계는 컨셉 설계 단계에서 선정하는 것이 좋다는 것을 보여주는 예라 할 수 있다.

Fig. 5는 무향실에서 동일한 조건에서 평가하여 예측된 진동과 소음의 결과를 보인 것이다. Fig. 5에서 보인 것과 같이 소음은 약 5 dBA, 진동은 10 dB



(a) Vibration test results



(b) Noise test results

Fig. 5 The vibration and noise test results of the before and pRMC design of the ‘A’ planetary gear sets

정도 개선되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 초기 설계가 어떻게 되느냐에 따라서 개발기간을 단축할 수도 있다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

이 연구는 유성기어 설계 프로그램인 pRMC의 개발과 적용에 대한 것을 기술한 것으로 결론은 다음과 같다.

(1) pRMC를 이용하여 유성기어 제원 등에 따른 전달오차, 성능 등의 비교가 객관적으로 가능하여 내구성, 효율, 소음 등에 최적화된 유성기어의 제원 설계가 가능하고 그 결과는 신뢰성이 있다.

(2) pRMC프로그램을 이용한 분석은 개발 초기 단계에 압력각, 나선각, 물림률 등이 소음에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 특히 물림률이 크다고 항상 소음이 좋은 것은 아님을 확인할 수 있었다.

(3) pRMC를 초기 컨셉부터 이용하면 소음에 최적의 유성기어 제원을 선정하여 조기에 개발할 수 있고, 기존 설계 방식을 이용하여 설계한 제원 대비 대상에서의 소음과 진동을 5~10 dB정도 개선할 수 있었다.

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., Hwang, S. Y., Kwon, O. J. and Kang, K. T., 2010, A Research for the Noise of the FF 6th Speed Automatic Transmission, KSAE10-A0259, pp. 1518~1523.
- (3) Lee, H. K., Kim, M. S., Hur, J. W., Kang, K. T., 2011, A Research For the Planetary Gear Noise Development in FF 6th Speed Automatic Transmission, ASME, DETC 2011-PTG 47129.
- (4) Park, K. H., Kim, T. H., Jung, S. J., Wee, H. and Lee, G. S., 2011, A Study on the Design of the Carrier Phase Difference for the Planetary Gear Noise Reduction, Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 230~231.
- (5) Shin, W., Kanase, A., Hwang, S. W., Baek, S. B., Shim, H. T. and Oh, S. W., 2011, 6 Speed Automatic Transmission Vibration Magnitude Prediction and Whine Noise Improvement through Transmission System Modeling, SAE 2011-01-1553.
- (6) 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.



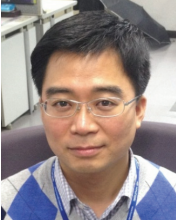
Hyun Ku Lee is a NVH senior research engineer in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received his BS and MS degrees of Mechanical Engineering from The Konkuk University in 1995 and in 1997

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.



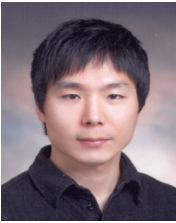
Moo Suk Kim is a NVH research engineer in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received BS degree of Mechanical Engineering from university of Inha in 2006. He has worked for 8 years and developed

the noise and vibration of the several automatic transmissions.



Hyun Seung Suh is a senior research engineer at auto transmission engineering team in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received his BS and MS degrees of Mechanical Engineering from

Yonsei University in 1997 and 1999 respectively. His research focuses on design of an automotive gear train, especially the gear NVH.



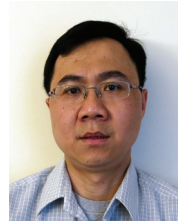
Jin Ho Kim is a research engineer at auto transmission engineering team in the Hyundai-Kia Motors Research and Development Division. He received his BS degrees of Mechanical Engineering from

Kookmin University in 2003. His research focuses on design of an automotive gear train, especially the gear NVH.



Ahmet Kahraman is the Winbigger Professor of Mechanical Engineering at Ohio State University. He is the Director of Gear and Power Transmission Research Laboratory and Pratt & Whitney Center of Excellence in Gearbox

Technology. After receiving his PhD degree from Ohio State University in 1990, he worked for GM for 10 years. His current research on gears focuses on design and analysis, dynamics, lubrication and efficiency, wear and fatigue life. His current research programs are funded by more than 65 companies. He authored more than 150 papers on gear research. He is a fellow of ASME and member of STLE.



Jonny Harianto is a senior research engineer at Gear and Power Transmission Research Laboratory in the Department of Mechanical Engineering at The Ohio State University. He received his MSc. degree from The

Ohio State University in 1995. His current research on gears focuses on design, analysis, robustness and optimization. He is a committee member of ASME Power Transmission and Gearing.



Hyun Sik Kwon is a graduate research associate at Gear and Power Transmission Research Laboratory in the Department of Mechanical Engineering at The Ohio State University. He received his MS and BS degrees of

Mechanical Engineering from University of Michigan in 2007 and Hanyang University in 2005 respectively. His research focuses on design and analysis of an automotive automatic planetary gear train.