

# 구조적 공진에 의한 자동변속기 유성기어 치합진동 영향성 검증과 해석적 개선안 도출에 관한 연구

## An Investigation into the Effects of Structural Resonance on Planetary Gear Meshing Vibration

### in Automatic Transmissions and Derivation of Analytical Improvements

오 종 민<sup>†</sup> · 양 재 호<sup>\*</sup> · 강 상 옥<sup>\*</sup> · 박 수 인<sup>\*</sup> · 서 유 철<sup>\*</sup> · 이 혜 진<sup>\*\*</sup>

Jongmin Oh<sup>†</sup>, Jaeho Yang<sup>\*</sup>, Sang Wook Kang<sup>\*</sup>, Suin Park<sup>\*</sup>,  
Yucheol Seo<sup>\*</sup> and Hyejin Lee<sup>\*\*</sup>

(Received August 27, 2024 ; Revised October 8, 2024 ; Accepted October 10, 2024)

**Key Words :** Structural Resonance(구조공진), Planetary Gear(유성기어), Operational Deflection Shape(동적거동), Modal Analysis(모달해석), Modal Test(모달시험), Global Mode(글로벌 모드), Frequency Response Function(주파수 응답함수)

#### ABSTRACT

With the accelerated trend toward powertrain electrification and increased demand for fuel efficiency, hybrid vehicle adoption has been growing rapidly. In particular, for hybrid vehicles, the development of transmission planetary gear noise and vibration control is crucial to ensuring customer satisfaction regarding vehicle quietness, as these vehicles may lack the masking effect of engine combustion noise. Unlike previous studies that focused on optimizing gear micro-geometry through transmission error analysis to reduce planetary gear vibration, this study experimentally verifies that planetary gear vibration is amplified by the structural resonance of transmissions and its internal components. Based on these findings, an analytical improvement approach is proposed.

#### 1. 서 론

자동변속기에 적용되는 유성기어(planetary gear)는 구조적 특성상 내접과 외접이 동시에 맞물리면서 치 접촉(tooth contact) 상태 및 위치가 서로 간에 다른 위상차가 존재하기 때문에 하중이 집중적으로 작용하여 차량에서 많은 소음 문제를 야기한다. 더불어 각 국 정부의 강화된 환경 규제로 파워트레인 전동화 추

세가 가속화되고 동시에 연비향상에 대한 고객들의 요구가 증대됨에 따라 하이브리드 차량 수요가 증가하고 있다. 특히 하이브리드 차량의 경우, 유성기어 작동 주파수영역 특성상 엔진연소 소음에 의한 마스킹 효과(masking effect)를 기대할 수 없는 운전조건이 존재하게 되어 시대적으로 높아지는 고객의 소음 요구 수준을 만족시키는데 어려움을 겪고 있다. 이에 많은 제조사들은 초기 컨셉 단계부터 유성기어 소음에 강건한 설계구조를 가지기 위해 많은 연구를 수행

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Hyundai Transys Company, Senior Engineer

E-mail : 3737425@hyundai-transys.com

<sup>\*</sup> Hyundai Transys Company, Engineer

<sup>\*\*</sup> Hyundai Transys Company, Senior Engineer

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2024 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Wonseok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

해 왔음에도 불구하고 품질문제, 설계적 제원에 의한 위상변조 등 다양한 원인으로 여전히 소음문제가 발생하고 있다<sup>(1-4)</sup>. 이 논문에서는 유성기어 소음개선을 위한 전달오차(transmission error) 해석과 이에 따른 치형최적화(gear micro-geometry optimization)에 관한 기존 연구와<sup>(5)</sup> 다르게 변속기와 내부 부품의 모달(modal) 시험과 해석, 동적거동(operational deflection shape, 이하 ODS) 시험을 수행하여 기어류의 구조적 공진 및 변속기 글로벌 모드 공진에 의해 유성기어 진동 성분이 증폭되는 것을 시험적으로 검증하고 이에 대한 해석적 개선안을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 변속기 구조

이 논문에서는 반무향실(semi-anechoic room)에서 중대형 SUV차량(2.2 L diesel engine)에 탑재되는 컨벤셔널 후륜 자동변속기로 검증하였으며 시험조건은 1단 가속, 입력 토크는 L.T.I(low tip in) 로 수행하였다. 상세 구조 및 시험환경은 Fig. 1에 묘사되어 있다.

### 2.2 유성기어 문제 공진성분

Fig. 2는 양산품 변속기의 대상조건(bench test)에서 측정된 프론트 및 미드 유성기어 진동데이터이다. 1단 L.T.I(low tip in) 가속 조건에서 프론트와 미드 유성기어 진동에서 640 Hz 부근 공진성 성분이 동일하게 관측된다. 특히 해당 공진 대역은 차량기준, 저

차속(low vehicle speed)에서 유성기어가 작동하는 영역으로 NVH 측면에서 감성품질에 주요한 영향을 미치는 운전조건이다. 실제로 해당 주파수 영역에서 프론트 및 미드 유성기어 소음 이슈가 자주 발생하였으며, 해당 공진에 대한 원인 조사 및 개선이 필요하다고 판단하였다.

### 2.3 공진원인 조사를 위한 추정원인 선정

먼저 프론트 유성기어에 구조적으로 공진을 발생시킬 수 있는 인자를 선별하고 각 부품들에 대한 모달 시험 및 해석을 실시하였다. 그 결과, Table 1과 같이 640 Hz 에 유사한 공진 주파수를 가진 인자를 추려내었다.

### 2.4 추정원인별 공진영향성 검증

#### (1) Mid Sun Gear Assembly

Mid sun gear assembly(이하 미드선 기어)는 프론트 캐리어(front carrier)와 사각치 구조로 동력이 전달되어 서로 영향을 받는 구조이다. 상호 영향을 주는 구조에서 미드선 기어 사각치는 714 Hz 부근 oval mode 공진 특성을 갖고 있으며, 이러한 특성이 프론트 캐리어에 영향을 주어 프론트 유성기어의 치합성분에 공진성으로 발생하는 것으로 보고 검증을 진행하였다.

미드선 기어의 oval mode 영향성을 검증하기 위해

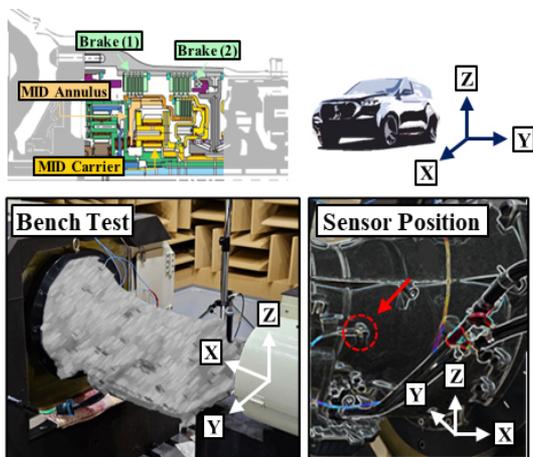


Fig. 1 Cross-section view on FR type automatic transmission and test layout

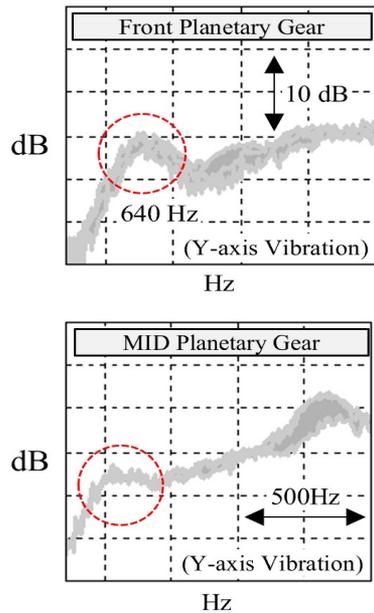
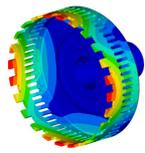
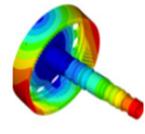


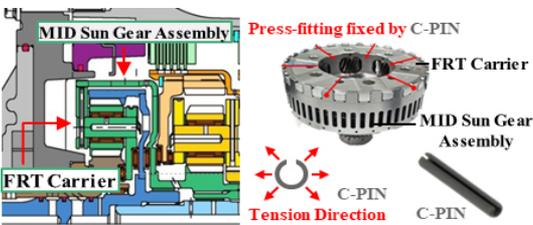
Fig. 2 Front/mid planetary gear vibration on bench

여 Fig. 3과 같이 미드선 기어와 프론트 캐리어에 구멍을 만들고 반경방향으로 벌어지는 특성을 지닌 캐리어핀을 압입하여 고정하였다.

캐리어 핀 압입고정 평가 결과, Fig. 4와 같이 미드 유성기어의 진동은 캐리어 핀 고정 전/후 동등수준이나 프론트 유성기어 진동의 경우, 640 Hz 부근 공진성 피크영역에서 4 dB 개선효과와 이의 주파수 대역에서는 동등수준임을 확인하였다. 상기 시험 결과를 통해 프론트 유성기어 진동에서 나타나는 640 Hz 부근 공진은 미드선 기어의 oval mode 영향이 있음을 시험적으로 검증하였다. 미드 유성기어의 경우, 미드선 기어와 oval mode가 발생하는 콘플레이트 간 구조적으로 거리가 있기 때문에 영향이 없는 것으로 판단된다.

**Table 1** Modal test and analysis results about presumptive cause parts

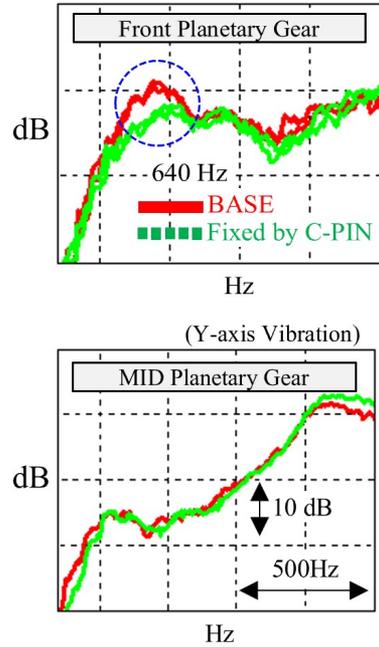
Parts name	Mid sun gear assembly	Input shaft	Valve body
Shape			
Mode shape			
	Oval mode (1st mode)	Bending mode (1st mode)	Bending mode (2nd mode)
Freq. (test)	714 Hz	562 Hz	710 Hz
Freq. (CAE)	748 Hz	580 Hz	-



**Fig. 3** Fixed by carrier pin on mid sun gear

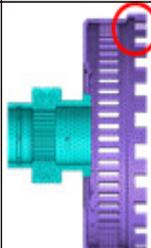
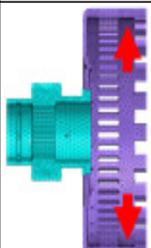
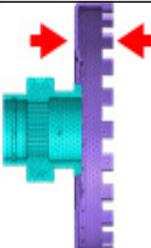
미드선 기어의 oval mode를 개선하기 위하여 해당 모드가 발생하는 부분의 높이 축소, 두께 증대 등의 방안을 Table 2와 같이 해석적으로 검토하였다. 단차 형상을 제외하고 나머지 검토된 개선안은 oval mode 주파수가 크게 상향되나 변속기 레이아웃의 제약과 양산성의 문제로 적용가능한 현실적인 개선안으로 보기에 무리가 있다.

이처럼 단품의 모드 주파수 상향을 위해 형상을 변



**Fig. 4** Test results for fixed by carrier pin on mid sun gear

**Table 2** Modal analysis results about mid sun gear assembly to improve

	Shape modification	Increasing thickness	Height reduction
Shape			
Freq. (CAE)	755 Hz (+7 Hz)	1004 Hz (+256 Hz)	1055 Hz (+307 Hz)

경하는 개선안은 한계가 있음을 확인하였다. 이러한 상황을 고려하여 Table 3과 같이 oval mode를 효과적으로 제어하기 위해 동력전달 구조를 기존 사각치에서 스플라인 체결 형식으로 변경하였다. 해당 개선안에 대한 단품 모달 해석 결과, 기존사양 대비 43 Hz 상승되었다. 단품의 주파수 상향 효과는 형상을 변경하는 개선안 대비 열세이나, 미드선 기어와 프론트 캐리어 체결 조건에서 전달되는 공진에 대한 구조적 강건성은 개선될 것으로 판단된다.

(2) Input Shaft

Input shaft(이하 인풋샤프트)는 프론트 에놀러스 기어와 샤프트가 용접으로 체결되어 있어 인풋샤프트의 거동이 프론트 유성기어에 영향을 미칠 수 있는 구조이다. Table 4는 인풋샤프트와 이를 분리했을 경우의 모달해석 결과이다. 해석결과를 살펴보면 562 Hz에서 bending mode가 발생함을 확인하였으며, 이는

문제 주파수인 640 Hz에 인접하여 프론트 유성기어의 치합성분에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있다.

Table 4는 인풋샤프트의 프론트 에놀러스 기어와 샤프트를 분리하여 단품 모달 해석을 수행한 결과이다. 결과를 살펴보면, 에놀러스 기어와 샤프트 분리시 모드 주파수가 크게 상향되는 것을 알 수 있었다. 상기 해석 결과를 토대로 분리 구조의 인풋샤프트를 Fig. 5와 같이 제작을 하였다. 프론트 에놀러스 기어와 샤프트가 기존 용접 대신 스플라인으로 체결될 수 있도록 샘플을 제작하였으며 평가 결과는 Fig. 6과 같다. 인풋샤프트 분리구조 검증 결과, BASE 대비 개선효과가 없었으며 따라서 인풋샤프트의 bending mode는 문제 주파수인 640 Hz 공진성분에 영향이 없는 것으로 판단된다.

Table 3 Optimized improvement

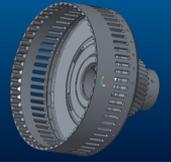
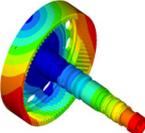
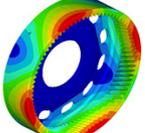
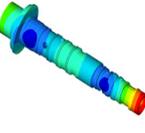
	BASE	Optimized improvement
Mid sun gear assy		
Freq.(CAE)	748 Hz	791 Hz(+43 Hz)
Frt carrier		



Fig. 5 Separation structure input shaft

Table 4 Modal analysis results about input shaft

	Input shaft assy	Annulus	Shaft
1st mode	 (bending mode)	 (oval mode)	 (bending mode)
Freq. (CAE)	642 Hz	1396 Hz	3269 Hz

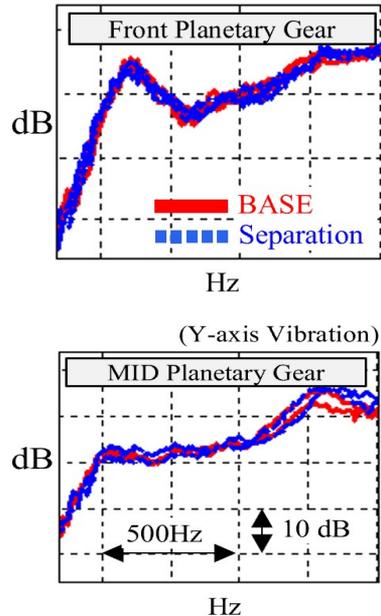


Fig. 6 Test results of separation structure input shaft

(3) Valve Body

Fig. 7과 같이 케이스에 볼트로 체결된 조건에서 valve body 모달 시험을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

1000 Hz 미만에서 3개의 모드가 나타났으며, 1st mode는 460 Hz 부근에서 상하방향 bending mode이며, 2nd mode는 710 Hz 부근 좌우방향 bending mode, 2nd mode와 인접한 3rd mode 역시 좌우방향 bending mode로 나타났다. 주파수를 고려해 보았을 때, 2nd mode가 640 Hz 공진에 영향을 줄 가능성이 있다고 판단하였다. Fig. 9는 전륜 및 후륜 변속기의 valve body 구조적 차이점을 도식화하여 나타낸 그림이다. 후륜 변속기의 valve body는 구조적으로 전륜 대비 길고 케이스에 체결되는 볼트위치가 위, 아래에 집중되어있어 bending mode 발생 주파수 관점에서 보면 상대적으로 불리하다. 상기 모달시험 결과와 구조적 불리함을 종합적으로 고려했을 때, valve body의 2nd mode(bending)로 인해 발생하는 공진이 케이스를 통해 전달되어 유성기어 치합에 영향을 미칠 수 있음을 고려하여 검증을 진행하였다.

Valve body의 좌우방향 bending mode를 제어하기 위해 Fig. 10과 같이 valve body 측면에 볼트로 구속을 하였다.

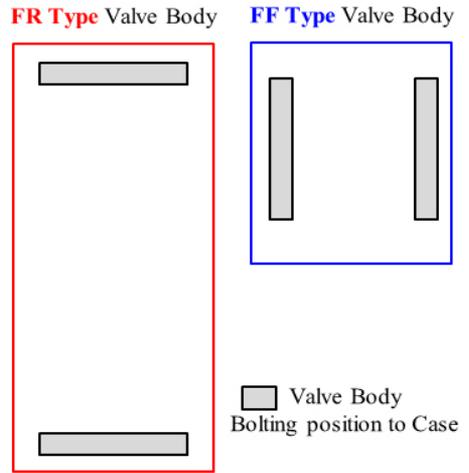


Fig. 9 Valve body bolting position to case

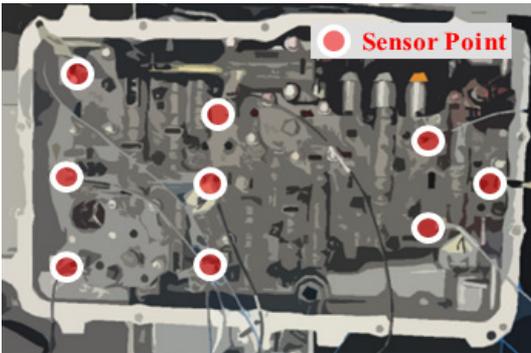


Fig. 7 Modal test layout of valve body

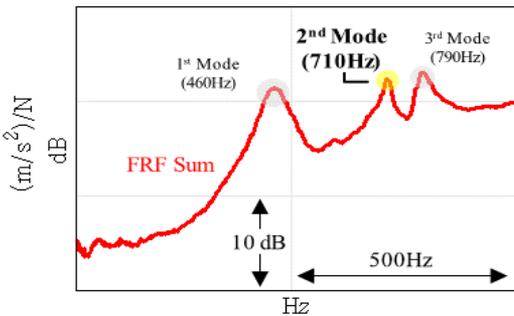


Fig. 8 Modal test results of valve body

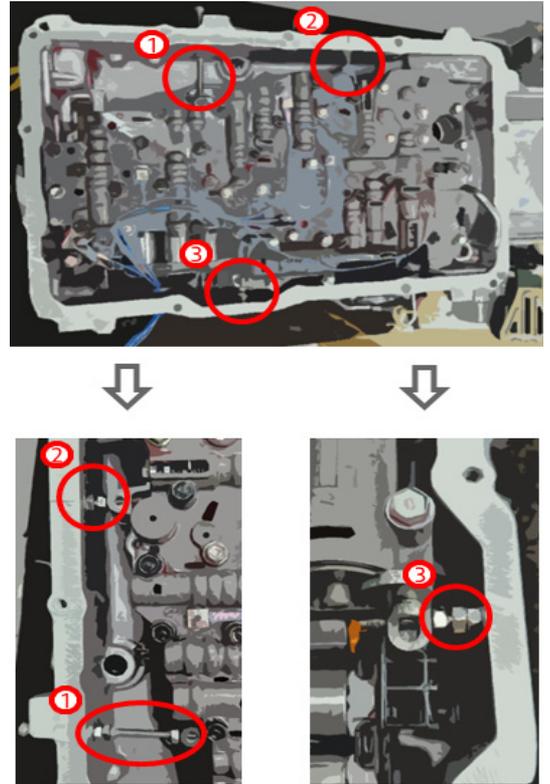


Fig. 10 Additional constrained of valve body

Fig. 11은 valve body 추가 구속 후의 평가 결과이다. 검증결과, 구속 전/후의 진동 변화가 나타나지 않았다. valve body 모달 시험을 통해 확인한 FRF에는 710 Hz 부근에서 공진성 응답이 확인된 반면, 변속기 내부부품 중 구조적으로 큰 비중을 차지하는 valve body를 추가적으로 구속했음에도 불구하고 공진영역의 진동 수준이 차이를 보이지 않는 것으로 보아 내부 부품이 아닌 변속기 전체의 글로벌 모드(global mode)에 의한 공진이 의심되며 이에 대한 추가적인 검증이 필요하다고 판단하였다.

(4) 변속기 글로벌모드

공진에 대한 변속기 글로벌모드 영향성을 확인하기 위하여 Fig. 12와 같이 변속기의 ODS 시험을 진행하였다.

Fig. 12의 640 Hz 영역 ODS를 보면, 케이스 하단부 벨브 바디 커버가 체결되는 부위에서 skirt mode가 나타나며, 프로펠러 샤프트가 장착되는 변속기 후단에는 케이스의 torsional mode가 나타났다. 또한 ODS 시험과 동일하게 대상(bench) 장착 조건에서 모달 시험을 진행한 결과는 상기 Fig. 13과 같다. ODS 상에서 640 Hz에 나타난 것과 동일한 모드가 590 Hz에서 확인되었다. 모달 시험 주파수와 ODS 시험결과 간에

50 Hz 주파수 차이는 실제 변속기 구동 중에 발생하는 기어의 하중과 유압 작동 요소 영향으로 판단된다. 다시 본론으로 돌아와서 프론트와 미드 유성기어에서 확인되는 640 Hz 공진에 대한 변속기 글로벌 모드 영향성을 검증하기 위해 양산 케이스 금형을 수정할 수는 없으므로 Fig. 14와 같이 구조적인 강성을 보강하였다. 해당 강성보강 형상은 변속기 하단부의 skirt mode와 변속기 후단의 torsional mode제어를 목적으로 제작하였다.

강성 보강안에 대한 시험 결과, Fig. 15와 같이 해당 공진 영역에서 최대 4 dB 이상 개선되는 것을 확인하였다. 강성 보강 시 특정 주파수 영역에서만 개선효과가 나타나기 때문에 구조물의 질량 효과(mass effect)로 보는 것은 적절하지 않으며 이는 글로벌 모

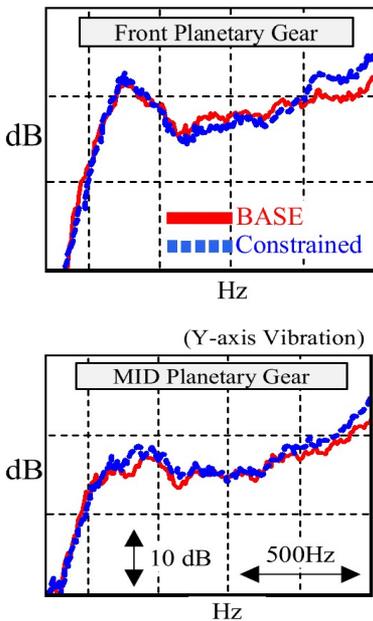


Fig. 11 Test results of additional constrained of valve body

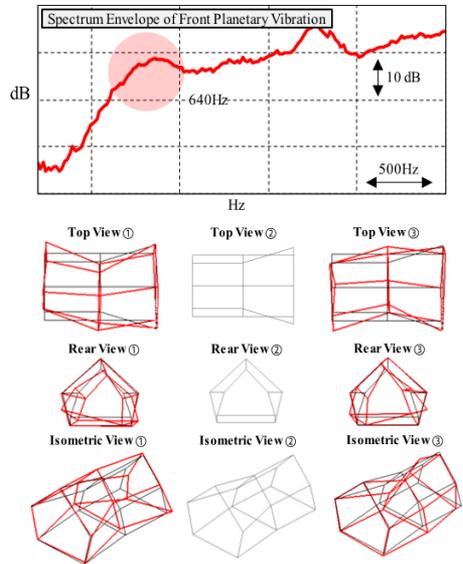


Fig. 12 Operational deflection shape on 640 Hz

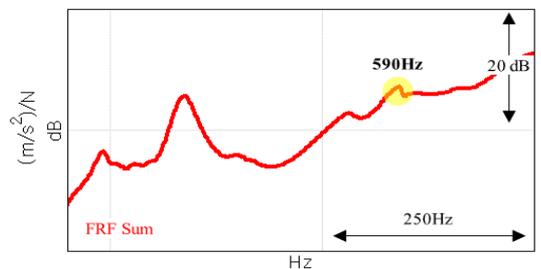


Fig. 13 Modal test results

드 제어에 의한 영향으로 판단된다.

추가적으로 Fig. 16과 같이 640 Hz 부근 공진 영역에 대해 1단 및 2단 유성기어 진동 성분에 대한 분석을 실시하였다.

Fig. 16 그래프를 살펴보면, 프론트 유성기어는 기어 단수에 상관없이 공진영역에서 크게 증폭되는 반면 미드 유성기어는 1단에서는 크게 증폭되지만, 2단에서는 상대적으로 공진 영향이 작게 나타난다. 프론트 유성기어의 경우 앞서 검증된 oval mode의 영향으로 기어 단수에 상관없이 공진영역에서 크게 증폭되는 것으로 판단된다. 반면 미드 유성기어의 경우, Fig. 17 단면도를 살펴보면 1단에서는 brake (1)이 작동하여 미드 에놀러스 기어가 케이스에 고정되어 미드 유성기어 치합이 케이스 글로벌 모드 영향을 직접적으로 받게 되나, 2단에서는 미드 유성기어와 상대적으로 멀리 떨어져있는 brake (2)가 작동하여 미드

유성기어 치합이 케이스 글로벌 모드 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

프론트 유성기어의 경우, 글로벌 모드에 의한 영향과 앞서 검증한 미드선 기어의 oval mode의 영향으로 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 5는 글로벌 모드에 대한 강건화를 위해 리브(rib) 보강안을 해석적으로 검토한 결과이다. 먼저 skirt mode를 제어하기 위해 해당 부위의 외측과 내측에 리브를 추가하였으며 torsional mode를 제어하기 위해 상부방향 탐부를 기준으로 전반적인 리브를 보

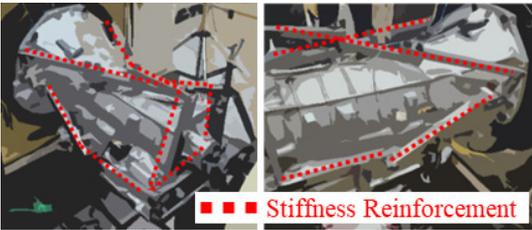


Fig. 14 Stiffness reinforcement

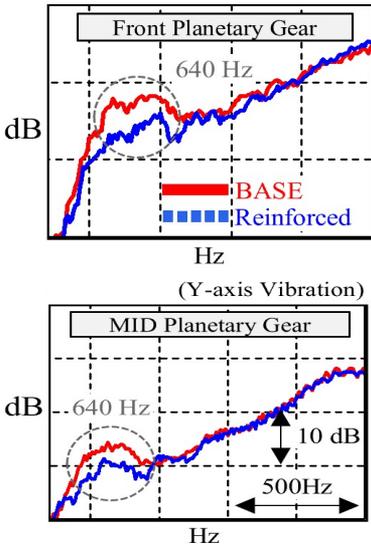


Fig. 15 Test results of stiffness reinforcement

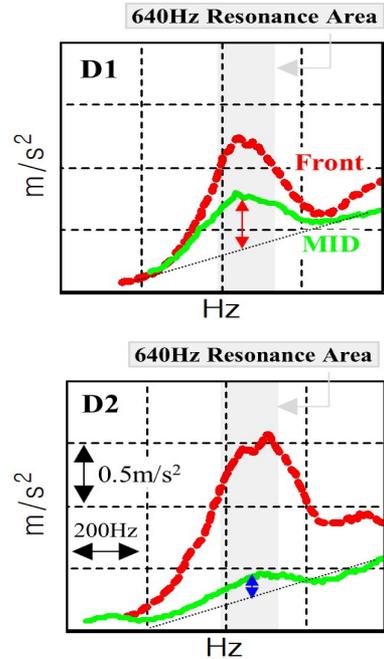


Fig. 16 Planetary gear vibration compare on resonance area 1st gear with 2nd gear

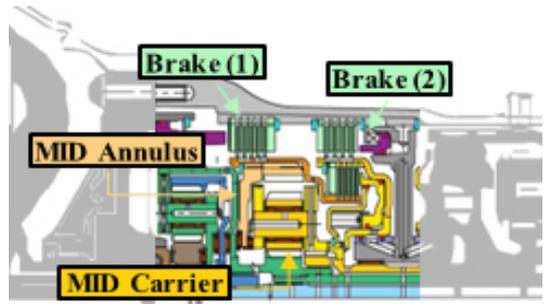
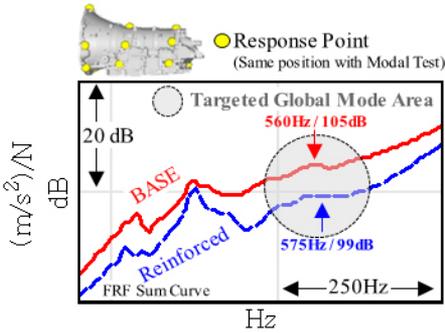


Fig. 17 Cross section view on about brake

**Table 5** Case stiffness reinforcement to improve global mode

	BASE	Stiffness reinforcement
Top		
Right		
Left		



**Fig. 18** Modal analysis results

**Table 6** Results of resonance validation

Part name	Effect of 640 Hz resonance	
	Frt planetary	Mid planetary
Mid sun Gear assy	Effect	None
Input shaft	None	None
Valve body	None	None
Case (global mode)	Effect	Effect

강하였다. 다만 후륜 변속기 자체의 구조적 특성과 차량 탑재 시 레이아웃에 대한 간섭문제로 강성 보강에 한계가 있었다. Fig. 18은 글로벌 모드에 대한 모달 시험 및 해석간 상관성 확보 후 강성보강 최적

화 모델에 대해 보강 전과 후의 모달 해석결과이다. 해석결과, 리브 보강 후 문제가 되는 글로벌 모드 주파수 영역의 응답이 6 dB 이상 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

이 연구에서는 유성기어의 치합 진동 성분에서 관측되는 640 Hz 공진 원인을 찾기 위해 부품 별 모달 시험과 해석을 통해 인자를 추려내어 Table 6과 같이 각각의 항목들에 대해 시험적으로 검증하였으며 연구 결론은 다음과 같다.

추정 원인 별 검증결과, 미드선 기어의 oval mode 및 변속기 글로벌 모드가 640 Hz 공진 영역에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며 이에 대한 해석적 개선안을 도출하였다. 이 연구에서 도출한 oval mode 개선품 및 글로벌 모드 개선을 위한 강성 보강 케이스를 제작하여 향후 검증할 예정이다.

미드선 기어의 oval mode 검증결과를 통해 초기 설계단계에서 기어류 단품에 대한 모달 해석의 필요성을 확인하였다. 기어 단품 모달 해석을 통해 기어 치합 주파수와 단품의 모드가 중첩되지 않도록 설계 단계에서 충분한 검토가 필요하다.

마지막으로 어셈블리 모달 해석을 통해 글로벌 모드의 FRF 응답수준에 대한 개발목표를 관리할 필요가 있다고 판단된다.

### References

- (1) Lee, H. K., Hong, S. M., Kim, M. S., Hur, J. W. and Yoo, D. K., 2016, A Research for the Noise Development of the FF 8th Speed Automatic Transmission, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 559-566.
- (2) Lee, Y. K., Kim, M. S., Suh, H. S., Kim, J. H. and Kahraman, A. et al., 2013, Research for the Development of a pRMC Program for the Planetary Gear Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 669-674.
- (3) 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.

(4) Lee, H. K., Kim, M. S., Hong, S. M., Yoo, D. K., Kahraman, A. and Talbot, D., 2019, Research for the Modeling of the Dynamic Analysis for the Planetary Gear Sets under the Torque Fluctuation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 445~452.

(5) Oh, J. M. and Yang, J. H., 2024, Gear Micro-geometry Optimization for Improvement of Planetary Gear Noise on Automatic Transmission, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 48, No. 1, pp. 69~75.



**Jongmin Oh** received his B.S. degrees in mechanical engineering from Sungkyunkwan University. Since 2011, he has worked for Engine NVH in Hyundai-infracore until 2018. And he has been working for Automatic Transmission NVH in Hyundai-transys from 2018 to now. His research interests are development of gear noise and torsional vibration on powertrain system.



**Jaeho Yang** received his B.S. and M.S. degree in Automotive Engineering from Kookmin University in 2019 and 2021, respectively. He has been working for Automotive Transmission NVH in Hyundai-transys from 2021 to now. His research interests are development of gear noise.



**Sang Wook Kang** received B.S. degree in mechanical engineering from Sungkyunkwan University. He has been working for Hybrid Transmission engineering design in Hyundai-transys since 2017. His research interests are design of HEV drivetrain system structure and optimal design of housing structures.



**Suin Park** received B.S. degree in mechanical engineering from Hanyang University in 2017. He has been working for Hybrid Transmission engineering design in Hyundai-transys since 2017. His research interests are design of HEV drivetrain system structure and optimal design of housing structures.



**Yucheol Seo** received M.S. degree from Hanyang University in 2022. He has been working as an NVH simulation engineer at Hyundai-transys from 2022 to the present. He is interested in virtual simulation using optimization and A.I.



**Hyejin Lee** received M.S. degree from Yonsei University in 2010. She has been working as a CAE engineer at Hyundai-transys since 2011. Her main interests are in development of analysis method based on CAE for structure NVH of the electric drive system.