

다물체 동역학 해석을 통한 EV 구동시스템의 축계 볼 베어링 예압과 스플라인 피치 에러에 따른 진동 영향도 분석

황승규 · 이상한 · 김동준*

현대모비스

Vibration Effects of EV Drivetrain Shaft Systems Considering Bearing Preload and Spline Pitch Error via Multibody Dynamics

Seung Gyu Hwang · SangHan Lee · Dong-Jun Kim*

Hyundai Mobis, 37, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi 16082, Korea

(Received 16 June 2025 / Revised 14 August 2025 / Accepted 20 August 2025)

Abstract : In electric vehicles, high-frequency noise from the electric drive unit (EDU) becomes more noticeable due to the absence of engine noise, which otherwise would mask such sounds. This can make the sound more annoying. With the growing adoption of electric vehicles, Noise, vibration, and harshness (NVH) performance has become increasingly important. Wave washers are frequently used components that apply preload to motor bearings to increase bearing stiffness, and splines are structures commonly used to couple rotating parts. Both spline pitch errors and wave washers can significantly affect NVH performance. Designing an optimal structure that considers vibration across various design factors is important. In this study, we aim to introduce the vibration analysis results of the effects of wave washers and spline pitch errors on the bearings of the electric vehicle's drive motor shaft. To accomplish this goal, simulations were performed using the ADAMS multibody dynamics analysis software, and the results are expected to contribute to the improvement of NVH performance in electric vehicles. Future research will focus on conducting more precise analyses that examine the vibration impact of varying preload levels applied by wave washers.

Key words : Electric drive unit(전기 구동장치), Multibody dynamic analysis(다물체 동역학 해석), Wave washer(웨이브 와셔), Spline(스플라인), Pitch error(피치 에러)

Subscripts

EDU : electric drive unit
 MBD : multibody dynamics
 WW : wave washer
 SPE : spline pitch error

1. 서론

전기차(Electric Vehicle, EV)의 보급이 확대됨에 따라, 전기구동장치(Electric Drive Unit, EDU)의 NVH에 대한 요구가 점점 더 엄격해지고 있다. 특히, EDU는 모터와 감속기를 통합한 구조로 회전력을 바퀴에 전달하는 핵심 시

스템이며, EDU에서 발생하는 진동/소음 특성은 차량의 전반적인 정숙성과 승차감에 결정적인 영향을 미친다.

EDU 내부에는 다양한 기계요소들이 포함되어 있으며, 각 요소는 동역학적 특성 및 진동 전달 경로에 영향을 미친다. 그 중에서도 볼 베어링은 직접적으로 회전 전달 경로에 위치하며, 정렬성, 강성, 유격, 제조 오차 등 다양한 기계적 변수에 따라 시스템 거동에 민감하게 반응한다. 특히, 베어링의 축 방향 예압(Preload)은 시스템의 강성과 감쇠 특성에 관여하며,¹⁾ 이는 일반적으로 웨이브 와셔(Wave Washer, WW)를 통해 제어된다.²⁾ 과도한 예압은 베어링 손상의 원인이 될 수 있고, 부족한 예압은 유격

*A part of this paper was presented at the KSAE 2025 Spring Conference

*Corresponding author, E-mail: dongjunkim@mobis.com

*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

(Looseness)에 따른 진동 증가로 이어질 수 있다.

또한, 스플라인(Spline)은 두 축 또는 축과 기어를 연결하는 토크 전달 요소로, 비틀림 하중을 안정적으로 전달하는 기능을 가진다. 그러나 실제 제조 및 조립 공정에서 발생할 수 있는 스플라인 피치 에러(Spline Pitch Error, SPE)는 이상 토크 변동, 비선형 응답,³⁾ 럼블 소음(Rumble noise)⁴⁾ 등의 원인이 된다. 특히 최근 연구에 따르면, 스플라인 결합부에서 발생하는 미세한 간극과 정렬 오차는 시스템 내 진동 응답의 주요 변수 중 하나로 작용한다.⁵⁾

기존 문헌에서는 EDU 시스템의 NVH 특성을 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으나,⁶⁾ 대부분은 모터⁷⁾ 또는 감속기 자체의 구조 강성,⁸⁾ 기어 치형 최적화⁹⁾ 등에 초점이 맞추어져 있으며,¹⁰⁾ 베어링 예압과 SPE가 실제 동역학 시스템 전체 진동 응답에 미치는 영향을 동시에 분석한 연구는 상대적으로 드물다.

이에 따라 본 연구에서는 다물체 동역학(Multi-body Dynamics, MBD) 해석 기법을 활용하여, WW와 SPE의 유/무에 따른 베어링 진동 변화를 시간에 따라 해석하였다. WW의 적용 여부는 원가 절감 및 조립 공정 단순화와 직결되는 중요한 결정 요소이므로 WW 유무에 따른 진동 영향도를 분석하였다. 또한 SPE의 경우 품질 기준 상한 등급이 명확히 정의되어 설계 및 제조 공정에서 중요한 검토 항목이므로 품질 상한 등급과 이상적인 조건 간의 시스템 응답을 비교하였다. 이를 통해 WW와 SPE가 EDU 시스템 진동에 미치는 영향을 분석하고, EV 구동 시스템 설계에 반영할 수 있는 결과를 제공하고자 한다.

2. Simulation Method

2.1 EDU 다물체 동역학 모델

Fig. 1은 ADAMS SW를 기반으로 모델링한 EDU의 동력전달계에 대한 다물체 동역학 모델을 보여준다. 모델은 로터 샤프트, 기어 1쌍, 스플라인, 베어링, 질량 관성

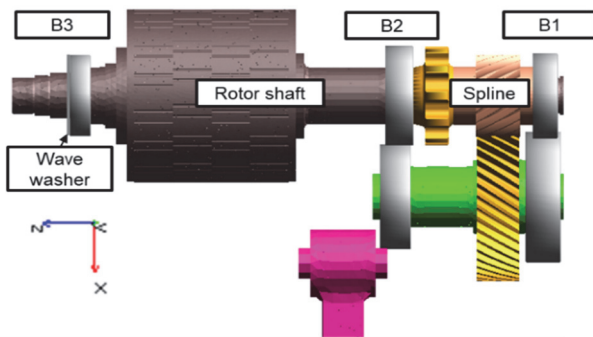


Fig. 1 Multibody dynamic model for the EV driveline developed using Adams SW

및 모드 해석 정보만 반영된 심플 하우징으로 구성된다. 로터 샤프트(Rotor shaft)는 3개의 볼 베어링으로 지지되고, B3 베어링 좌측면에는 WW가 적용된다.¹¹⁾ 로터 샤프트와 기어는 스플라인으로 연결되고, 로터 측 스플라인에만 SPE를 모사하였다.^{12,13)} 좌표 축의 경우 샤프트 축 방향이 Z축이고 반경 방향은 X, Y축이다. 참고로 중력 방향은 +Y축, 차량 장착 시 전방이 -X축으로 모델링되었다.

2.2 구동 시나리오 및 해석 조건

시뮬레이션은 Table 1과 같이 총 8가지의 구동 시나리오에 대해 수행하였다. SPE는 Fig. 2에 제시된 사인파 형태의 누적 SPE를 기준으로 하였으며, 산업용 일반 치합 정밀도 수준의 ISO 등급을 적용하였다. SPE의 유무에 따라 각각 해석을 진행하였다. A N은 설계 값을 반영한 WW의 예압이며, 보안 상 값은 알파벳 A로 대체 표기하였다. WW 조건 또한 유무에 따라 구분하여 분석하였다. 부하 조건은 부하율 기준으로 저부하(20%)와 고부하(95%)의 두 가지로 나누었으며, 각 부하 조건별로 4가지 케이스를 해석하였다. 회전 속도는 2초 동안 14,000 RPM까지 가속하는 조건을 적용하였다.

Table 1 Simulation condition

Case	Load	Speed (RPM)	Pitch error	Wave washer preload (N)
1	Low	0 - 14,000	Not include	0
2				A
3			Include	0
4				A
5	High		Not include	0
6				A
7			Include	0
8				A

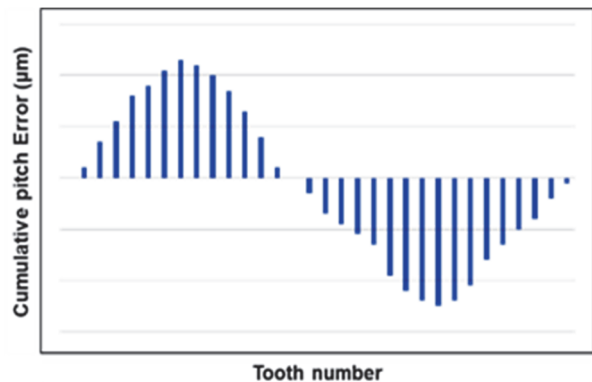


Fig. 2 Cumulative pitch error of spline teeth by tooth number

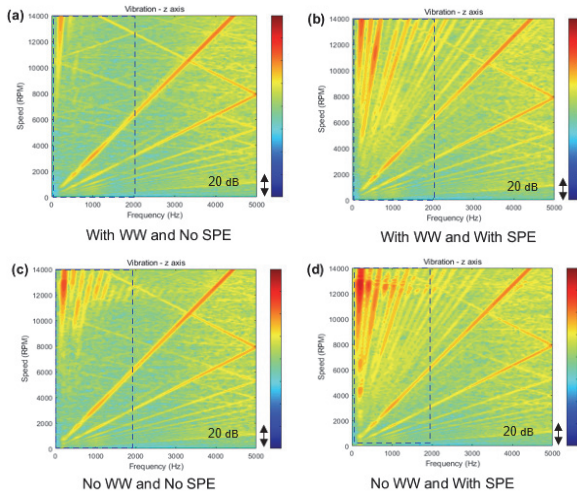


Fig. 3 Axial vibration colormaps of B3 under low load condition: effects of WW and SPE

3. 진동 영향도 분석

본 연구에서는 B3 베어링의 가속도(dB)를 칼라맵(Colormap)과 오더 트래킹(Order tracking)을 활용하여 WW와 SPE의 유무에 따라 비교하였다. 칼라맵을 통해 전체적인 경향성을 파악하고, 중요 차수진동을 추가적으로 분석하였다. 차수 진동은 칼라맵 상에서 변화가 있거나 샤프트나 기어의 영향을 받는 차수를 기준으로 선정하였다.

3.1 저부하 조건 해석 결과 분석

3.1.1 저부하 축 방향(Z 방향) 진동 칼라맵 분석

Fig. 3은 저부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 대한 B3의 Z 방향 진동 칼라맵을 보여준다.

Figs. 3(a)와 (b)에서 WW는 (c)와 (d)에서 발생한 약 400 Hz 대역의 N 차 진동을 전체적으로 저감시킨다. 이는 WW가 축 방향 하중으로 가함으로서 베어링의 내부유격을 줄여 볼과 레이스 간 접촉을 더 안정적으로 만들기 때문이다(베어링 축 방향 강성 증가 효과).

Figs. 3(b)와 (d)를 보면, SPE는 2,000 Hz 이하 대역의 N 차 진동을 증폭시킨다. 이는 SPE의 균일하지 않은 치간 간격이 주기적인 불균일 접촉을 만들어 새로운 가진력을 만들기 때문이다.

3.1.2 저부하 반경 방향(Y 방향)진동 칼라맵 분석

Fig. 4는 저부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 대한 B3의 반경 방향(Y 방향) 진동 칼라맵을 나타낸다. (a), (b)와 같이 WW를 적용하면, (c), (d)에서 발생하는 약 400 Hz 대역의 반경 방향 진동이 축 방향 진동과 유사하게 전체적으로 감소한다.

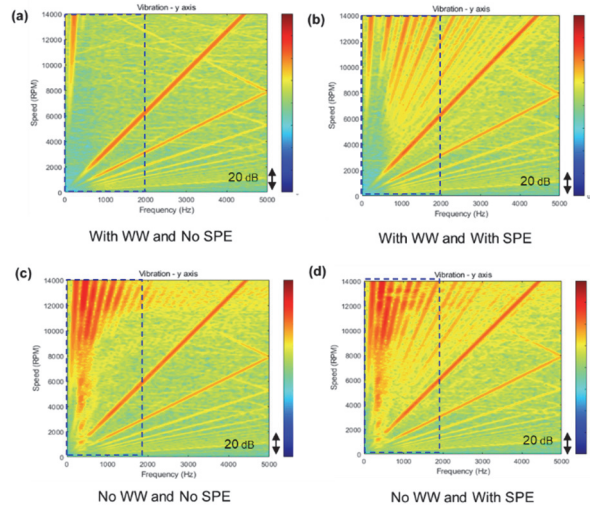


Fig. 4 Y-direction vibration colormaps of B3 under low load condition: effects of WW and SPE

적으로 감소한다. WW는 일반적으로 축 방향 예압을 통해 주로 축 방향 진동을 억제하지만, 본 해석 결과에서는 반경 방향 진동도 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 WW에 의해 축 방향 유격이 제거되면 베어링과 하우징 사이의 반경방향 결합 상태가 견고해지며, 이에 따라 반경 방향에서도 진동이 억제됨을 볼 수 있다.

Fig. 4(c)와 (d)를 보면, WW가 없을 때 반경 방향 진동은 Fig. 3(d)와 유사하게 2,000 Hz 이하 대역의 N 차 성분이 전체적으로 증폭된다. SPE는 치 접촉 불균형을 발생시키므로 축 방향과 함께 반경 방향 진동에도 악영향을 미침을 알 수 있다.

3.1.3 저부하 진동 차수 분석

칼라맵 상에서 WW와 SPE에 대해 영향을 받는 주요 진동 차수(3차, 13차)와 기어 차수(18차, 19차)에 대하여 추가 분석하였다.

Fig. 5는 저부하에서 WW와 SPE의 유무에 대한 3차 진동으로, (a)와 (b)는 각각 X 방향, Z 방향 진동을 나타낸다. 3차 진동은 칼라맵 상에서 약 400 Hz 대역에서 WW의 유무에 따라 차이가 크게 발생하였다.

Fig. 5(a)의 X 방향 진동도 마찬가지로 SPE가 있더라도 WW에 의해 최대 약 30 dB까지 크게 감소한다. WW는 8,000 RPM 이하에서 SPE에 의한 진동을 억제하는 효과가 강하고, 8,000 RPM 이상 구간에서는 WW의 효과가 다소 감소한다. 이는 저속에서는 관성력의 영향이 작아 WW의 예압만으로도 진동을 충분히 억제할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5(b)에서 SPE가 없을 때 WW를 적용하면 최대 약

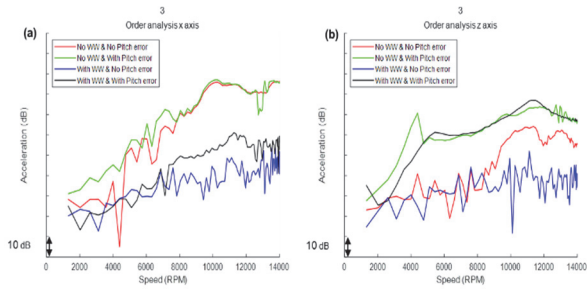


Fig. 5 (a) X-direction and (b) Z-direction 3rd vibrations under low load conditions with and without WW and SPE

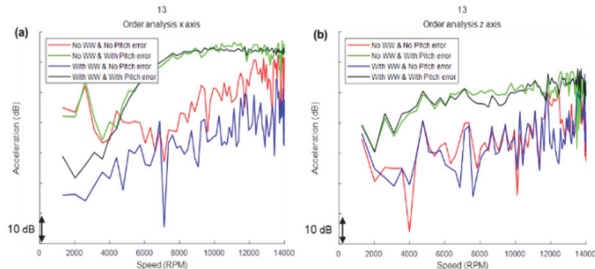


Fig. 6 (a) X-direction and (b) Z-direction 13th vibrations under low load conditions with and without WW and SPE

10 dB까지 진동이 저감되지만 SPE로 커진 진동은 WW를 적용되더라도 효과적으로 감소하지 않는다. 따라서 3차 진동의 경우 WW는 Z 방향보다 X 방향 진동을 억제하는데 효과가 더 크다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 저부하에서 WW와 SPE의 유무에 대한 13차 진동으로, (a)와 (b)는 각각 X 방향, Z 방향 진동을 나타낸다. Fig. 6(a)에서 4,000 RPM 이하에서는 WW에 의한 최대 약 10 dB 진동저감 효과가 있지만, 4,000 RPM 이상에서는 SPE에 의한 진동 효과가 지배적이다.

Fig. 6(b)의 축 방향 진동도 마찬가지로 WW가 SPE에 의한 진동감소에 영향을 미치지 못한다. 따라서 13차 진동에서는 SPE가 주요진동 유발 인자이고, WW를 적용하여 개선하는데 한계가 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 저부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 따른 기어 사이드 밴드 18차 진동으로, (a)와 (b)는 각각 X 방향, Z 방향 진동을 나타낸다.

Fig. 7(a)를 보면, X 방향 진동은 3,000 – 7,000 RPM 구간에서 기어 사이드 밴드 효과가 SPE가 존재하면 WW 유무와 관계없이 최대 약 20 dB 커진다. 12,000 RPM 이상의 고속 구간에서는 WW 적용이 SPE가 있음에도 유의미하게 진동을 저감하였다. 이는 SPE가 특정 속도 구간에서 접촉이 일정하지 않아 진동을 유발시키지만, 고속 구간에서는 WW 예압이 베어링 진동을 안정적으로 만들 수 있음을 의미한다.

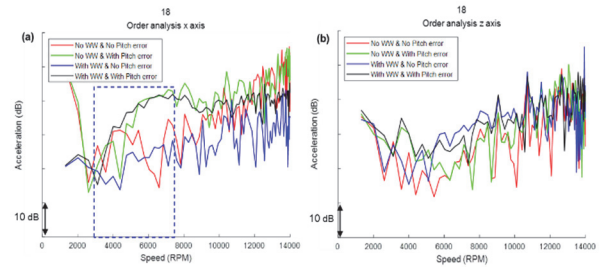


Fig. 7 (a) X-direction and (b) Z-direction 18th vibrations under low load conditions with and without WW and SPE

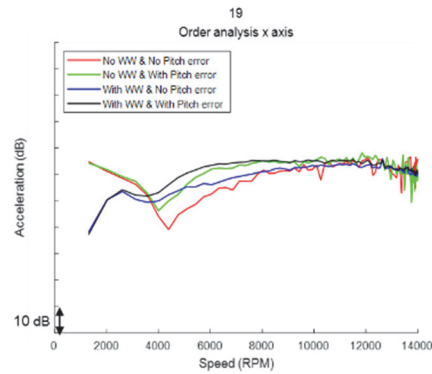


Fig. 8 X-direction 19th vibrations under low load conditions with and without WW and SPE

Fig. 7(b)를 보면, Z 방향 진동은 반경 방향과 다르게 전체 구간에서 SPE와 WW 적용 유무와 관계없이 유사하였다.

Fig. 8은 저부하 조건에서 WW와 SPE 유무에 따른 기어 19차 X 방향 진동을 나타낸다. 전영역에서 주요한 peak 진동은 없었다. 4,000 RPM 이하 구간에서는 WW 적용에 따라 진동크기가 감소하였으나, 4,000 – 10,000 RPM 이상에서는 WW가 적용되었을 때 진동크기가 오히려 큰 것을 볼 수 있었다. 참고로 반경 방향(Y 방향)과 축 방향(Z 방향) 차수 선에서는 전체 구간에서 WW와 SPE의 영향이 거의 나타나지 않았다. 따라서 두 인자가 기어 차수 진동에 영향을 덜 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2 고부하 조건 해석 결과 분석

3.2.1 고부하 축 방향(Z 방향) 진동 칼라맵 분석

Fig. 9는 고부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 대한 B3의 축 방향(Z 방향) 진동 칼라맵을 보여준다. 고부하 조건에서 축 방향 진동은 SPE 적용 시 2,000 Hz 이하 대역의 N 차 진동이 관찰되지만, 고부하 조건에서는 스플라인 치가 강하게 맞물려 있어 저부하 조건(Fig. 3)에 비해서는 크기가 작은 것을 알 수 있다. 더불어 WW의 영향도도 저부하에 비해 작음을 알 수 있다. WW는 저부하 조건에서는 베어링의 축 방향 유격 제거와 미세 진동억제에 효과

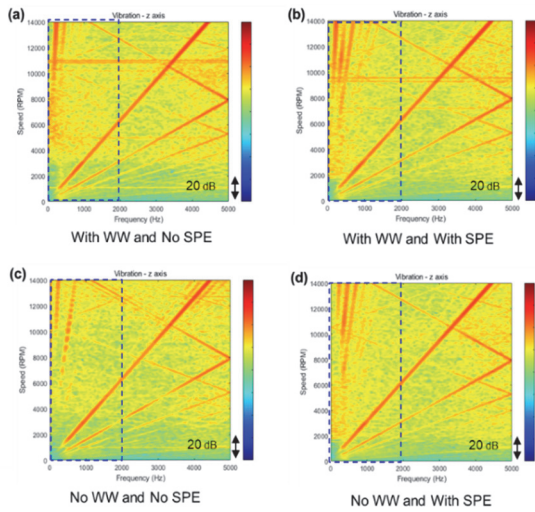


Fig. 9 Axial vibration colormaps of B3 under high load condition: effects of WW and SPE

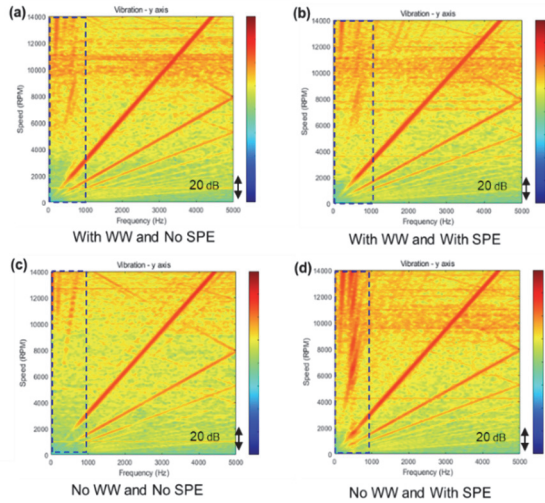


Fig. 10 Y-direction vibration colormaps of B3 under high load condition: effects of WW and SPE

적으로 작용하지만, 고부하 조건에서는 전체 시스템의 부하 규모에 비해 예압 영향이 미미해지므로 진동 억제 효과가 일부 제한된다고 추정할 수 있다.

3.2.2 고부하 반경 방향(Y 방향) 진동 칼라맵 분석

Fig. 10은 고부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 대한 반경 방향(Y 방향) 진동 칼라맵을 보여준다. 반경 방향 진동도 축 방향 진동(Fig. 9)와 마찬가지로 다양한 N 차 진동이 관찰되지 않았다. 다만, SPE가 있고 WW가 없는 Fig. 10(d)에서 약 400 Hz 대역에서 가장 큰 진동이 발생하는 구간이 존재하였다. 이 진동은 Fig. 10(b)에서 보여주듯이 WW에 의해 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

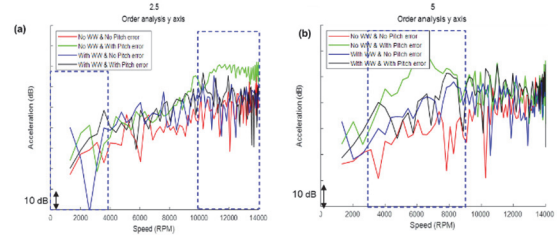


Fig. 11 Y-direction (a) 2.5th vibrations and (b) 5th vibrations under high load conditions with and without WW and SPE

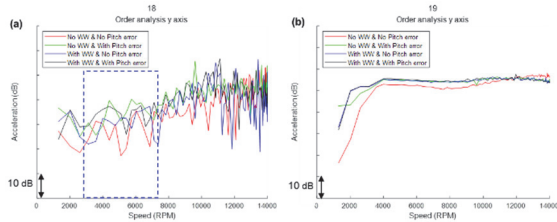


Fig. 12 Y-direction (a) 18th vibrations and (b) 19th vibrations under high load conditions with and without WW and SPE

3.2.3 고부하 진동 차수 선 분석

고부하에서 칼라맵 상 WW와 SPE에 대해 영향을 받는 주요 진동 차수(2.5차, 5차)와 기어 차수(18차, 19차)에 대하여 추가 분석하였다.

Fig. 11은 고부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 따라 변화가 있던 반경 방향(Y 방향) 진동 차수로, (a)는 2.5차, (b)는 5차 진동을 나타낸다. 2.5차는 칼라맵 상에서 SPE 유무에 따라 차이가 존재하였고, 5차는 WW와 SPE의 유무에 따라 차이가 존재하여 확인하였다.

2.5차 진동은 10,000 RPM 이상 구간에서 SPE가 있고 WW가 없을 경우 최대 약 10 dB 더 큰 진동이 나타났다. 5차 진동도 동일조건일 때 3,000–9,000 RPM 사이 구간에서 진동이 최대 약 20 dB 크게 증가한다. 이는 2.5차와 5차 모두에서 SPE가 존재해도 WW 적용을 통해 진동을 저감할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 고부하 조건에서는 WW 적용을 통해 SPE에 의한 저차수 진동 저감 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 12는 고부하 조건에서 WW와 SPE의 유무에 따른 기어 Y 방향 진동으로, (a)와 (b)는 각각 18차 사이드밴드, 19차 진동을 나타낸다.

18차 사이드밴드 진동은 저부하의 동일 3,000–7,000 RPM 구간을 비교하였을 때(Fig. 7(a)), SPE가 존재하면 WW와 관계없이 최대 약 10 dB 진동이 증가하나 저부하에 비해 차이가 적다. 참고로 다른 X, Z 방향도 마찬가지로 차이가 적었다. 19차 진동은 모든 방향에서 WW 적용과 SPE에 따른 차이가 거의 없었다. 따라서 두 인자는 저

부하 조건과 마찬가지로 고부하 조건에서 기어 관련 차수 진동에 영향을 적음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 EDU 구조 내 축계 예압을 가하는 WW와 제조 오차인 SPE가 베어링 진동에 미치는 영향을 MBD 해석을 통하여 고찰하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) WW는 저부하 조건에서 약 400 Hz 대역의 N차 진동을 저감한다. 이는 WW가 베어링에 축 방향 예압을 가함으로써 유격을 제거하고 접촉 조건을 안정화하기 때문이다.
- 2) WW는 저부하 조건에서 베어링의 축 방향 유격 제거와 진동 억제에 효과적이지만, 고부하 조건에서는 시스템 전체 하중에 비해 예압의 영향력이 상대적으로 작아지므로 진동 저감 효과는 제한적으로 나타나는 것으로 판단된다.
- 3) WW는 기어 및 기어의 사이드밴드 진동 저감에는 거의 영향을 주지 못하였다. 이는 WW가 저주파 진동의 억제에는 효과적이지만, 고주파 기어 차수 진동에는 영향이 제한적인 것으로 보인다.
- 4) WW의 진동 저감효과는 차수별로 유효한 회전속도 구간이 다르므로, 차수 기반의 주파수 응답 분석을 통해 진동 저감을 위한 최적의 적용 구간을 예측해야 한다.
- 5) SPE는 저부하 조건에서 2,000 Hz 이하 대역의 N차 진동을 증폭시킨다. 이는 SPE의 균일하지 않은 치간 간격이 회전에 따른 주기적인 불균일 접촉을 만들어 새로운 가진원을 만들기 때문이다.
- 6) SPE는 저부하 조건에서 고부하 조건에 비해 더 큰 진동 증가효과를 나타내는 것으로 확인되었다. 저부하 조건에서는 스플라인과 허브 간 간극이 있어 피치에러로 인한 형상 불균형이 자유롭게 진동할 수 있는 공간을 존재하지만, 고부하 조건에서는 스플라인의 치면들이 꼭 맞물린 상태가 되어 피치에러가 있더라도 진동할 수 있는 공간이 없어지기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 예압 AN의 WW가 적용이 부하 20% 조건의 약 400 Hz 대역에서 품질 기준 상한 등급의 SPE로 인한 진동을 저감하여 NVH 측면에서 개선효과가 있음을 해석적으로 확인하였다. 다양한 차수진동에 대하여 WW가 적용되지 않은 경우 진동 응답이 유의하게 증가하는 경향이 반복적으로 확인되었다.

전기차 EDU 설계 시 진동이 증가하는 차수가 실차 조건 NVH에 중요한 영향을 미치는 구간일 경우, SPE 관리

와 WW의 적용이 설계 가이드로 활용 가능한 기초 자료로 작용할 수 있다. 향후 연구에서는 WW 예압에 따른 진동 영향도를 분석하여 설계 최적화를 수행하고, 시험을 통하여 해석결과와 정확도를 검증한 후 실차 설계에 적용 가능한 기준을 도출하는 방향으로 확장할 예정이다.

References

- 1) H. Bal, K. Ates, T. Karacay and N. Aktürk, "Effect of Preload on the Vibrations of EHL Angular Contact Ball Bearings: Theoretical and Experimental Results," *Lubricants*, Vol.10, No.3, Paper No.46, 2022.
- 2) Y. Park, S. Woo, J. Lee, J. Heo, S. Kim and B. Lim, "A Study on the Optimal Pre-Pressure Derivation of EPS Motor's Constant Prepressure Axial System," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.216–221, 2023.
- 3) L. Xiao, Y. Xu, Z. Chen and L. Zhang, "Non-Linear Dynamic Response of Misaligned Spline Coupling: Theoretical Modeling and Experimental Investigation," *Journal of Vibration and Control*, Vol.29, No.7–8, pp.1590–1605, 2022.
- 4) J. Choi, T. Ha, E. Chung, H. Jeong, K. Jungr, O. Harris, A. Gale, T. Harvey and S. Kim, "Development of Rumble Noise Analysis Method for Electric Powertrain," *SAE 2023-01-0459*, pp.1–5, 2023.
- 5) H. K. Lee, M. S. Kim, H. S. Mun, J. D. Park and J. H. Lee, "A Study on the Improvement of Impact Noise Caused by the EV Spline Quality and Axial Imbalance," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.32, No.4, pp.368–374, 2022.
- 6) H. K. Lee, J. H. Lee, M. U. Lee, M. S. Kim, T. H. Lee and J. H. Kim, "A Study on the Effects of Gear Specifications in Electric Vehicle Motor Gearboxes on Shaft Rotational Orbit Behavior and Gear Noise," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.35, No.2, pp.211–217, 2025.
- 7) K. Horváth and A. Zelei, "Simulating Noise, Vibration, and Harshness Advances in Electric Vehicle Powertrains: Strategies and Challenges," *World Electric Vehicle Journal*, Vol.15, No.8, Paper No.367, 2024.
- 8) S. Wischmann, A. Mann, G. Jacobs, C. Brecher, G. Hoepfner and C. Westphal, "Validation of Models for Calculating the NVH Behavior of Gearbox Systems in an Elastic Multibody Simulation," *Forschung im Ingenieurwesen*, Vol.89, No.33, pp.1–19, 2025.
- 9) S. Zhaoyao, L. Shikai, Y. Huijun and W. Xiaoxiao, "Noise Analysis and Optimization of the Gear Transmission System for Two-Speed Automatic Transmission of Pure Electric Vehicles," *Mechanical Sciences*, Vol.14, No.2, pp.333–345, 2023.

- 10) Z. Shi, B. Liu, H. Yue, X. Wu and S. Wang, "Noise Reduction of Two-Speed Automatic Transmission for Pure Electric Vehicles," *Mechanical Sciences*, Vol.5, No.1, pp.248–265, 2023.
- 11) J. Kim, "Dynamic Analysis and Modeling of a Non-Circular Cross-Sectioned Ball-Screw Reducer for MDPS," *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.9, pp.773–778, 2024.
- 12) J. Kim, "Analysis of Synchronizer Engagement Characteristics According to Variations of Clutch Body Gear Tooth Shape," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.6, pp.419–425, 2019.
- 13) S. G. Hwang, D. J. Kim, and S. H. Lee, "Vibration Effect of Wave Washer and Spline Pitch Error on Electric Vehicle Traction Motor Bearings through Multibody Dynamic Analysis," *KSAE Spring Conference Proceedings*, p.1113, 2025.