

인휠 모터 시스템 NVH 성능 분석 툴 개발과 이를 이용한 인휠 모터 NVH 개발

Development of In-wheel Motor System NVH Performance Analysis Tool and Its Application for In-wheel Motor NVH Development

이 현 구[†] · 김 무 석^{*} · 인아폴랏 무랏^{**} · 오자미르 에네스^{***}
Hyun Ku Lee[†], Moo Suk Kim^{*}, Murat Inalpolat^{**} and Enes Ozdemir^{***}

(Received January 23, 2024 ; Revised February 23, 2024 ; Accepted March 3, 2024)

Key Words : In-wheel Motor(인휠 모터), Modeling(모델링), Noise(소음), Pole-slot(폴-슬롯)

ABSTRACT

This study developed and applied an IWM modeling and analysis tool for predicting the NVH performances of IWM systems. Using the developed tool, the influences of various air-gap size and pole-slot (p-s) combinations on the NVH performance of an IWM were studied. Decreasing the air-gap resulted in a gradual increase in the motor sound power level. Furthermore, a comparison between the 64p-60s and 64p-72s IWM configurations showed that the 64p-72s IWM exhibited a superior NVH performance. Through vehicle testing, the 64p-72s IWM achieved a reduction in the overall noise of 9 dBA, along with noise and vibration reductions of more than 20 dB and 40 dB for specific components (8th, 16th, and 64th harmonics), respectively, compared to the 64p-60s IWM. This innovative tool will empower engineers to conduct virtual NVH analyses, enabling early design optimization for quieter, more efficient, and innovative IWM systems.

1. 서 론

세계적인 이상기온 문제로 온실가스의 배출을 저감하기 위하여 대부분 자동차 산업은 2050년 이후 zero emission vehicle(ZEV) 개발을 목표로 하여 전동화 차량의 개발과 생산 전환이 가속화되고 있다. 전동화 구동시스템 개발 측면에서 인휠모터(in-wheel motor, 이후 IWM) 시스템은 대표적인 차세대 전동

화 시스템이다^(1,2).

IWM 시스템은 구동모터가 차량의 휠 안에 장착되는 시스템으로 4개 또는 2개의 휠을 모터로 구성하여 개별 제어하는 시스템이다. 이를 통하여 감속기를 삭제하거나 차동기어와 드라이브 샤프트가 불필요하여 차량의 중량을 절감할 수 있을 뿐 아니라 실내공간의 확대도 가능하다. 또한, 각각의 휠을 개별 제어할 수 있어서 토크벡터링 기능으로 운전성 향상도 가능하다. Elaphe사에서는 IWM 개발 평가시 전자기력, 조

[†] Corresponding Author ; Member, Hyundai Motor Company, Global R&D Master

E-mail : hk-lee@hyundai.com

^{*} Hyundai Motor Company, Senior Research Engineer

^{**} University of Massachusetts Lowell, Associate Professor

^{***} University of Massachusetts Lowell, Research Engineer

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2023 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Wonseok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

립 편차, 주행조건 등 다양한 환경에서 발생할 수 있는 시나리오를 구성하여 주요 성능인자인 에어갭 (air-gap) 수준을 확인하고 예상되는 주요 고장 항목의 우선순위 등을 정하여 개발하고 있다⁽³⁾. 국내에서 IWM 소음 개발에 대한 연구로는 인휠 모터 시스템이 구동할 때의 소음과 진동 신호를 측정하고, 회전 속도에 따른 스펙트럼을 분석하여 기어물림주파수, 구동 모터의 고조파 그리고 고유진동수를 파악하고 소음을 유발하는 주요 요인으로 너클-모터 하우징의 목부분이 변형하는 고유모드를 확인하고 공진이 발생하는 주파수 영역에서 고유진동수를 회피하기 위하여 부재를 보강하여 강성과 고유진동수를 증가시켜 시스템의 강건성을 높이는 방안을 제시하였다⁽⁴⁾. 또한 능동소음제어를 이용하여 IWM소음의 250 Hz 이하 대역의 차량 실내 소음을 개발한 연구도 진행되었다⁽⁵⁾.

소음원 측면에서 저소음 IWM 설계와 개발에 대한 연구는 현재 미흡하며 소음을 개발하기 위해서는 일반적으로 큰 비용과 오랜 시간, 많은 경험이 필요하고 어렵다. 따라서, 개발 차량의 여건 등을 반영할 수 있는 IWM 시스템 모델링을 개발하여 컨셉 설계 단계에서 IWM 시스템의 NVH 성능 등을 미리 예측하여 개발하는 것은 제품의 완성도, 개발 시간, 개발 비용 등을 줄일 수 있는 중요한 전략 기술이 될 수 있다. 이 논문에서는 컨셉 설계 단계에서 IWM 시스템의 NVH 성능을 예측할 수 있는 해석 모델링을 개발하고 이를 통한 케이스 스터디를 통하여 에어갭과 폴 (pole)-슬롯(slot) 조합 등에 따른 영향성을 분석하였다. 뿐만 아니라, 해석 결과를 토대로 실제 IWM 샘플을 제작하여 차량에 탑재하고 주행하면서 소음과 진동을 개발한 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 IWM 시스템

일반적으로 IWM 시스템은 모터의 회전하는 로터 위치에 따라 in-runner, out-runner로 구분하고, 영구자석을 이용하거나 코일 등을 이용하는 것으로 구분할 수 있다. 또한 모터만 이용하는 경우와 동력성능을 위하여 감속기어를 장착하는 것이 있다. 그리고 차량에 장착되는 링크 구조에 따라 다양한 IWM제품이 만들어질 수 있다.

다양한 시제품들을 제작하고 평가하여 최적의 성

능을 가진 IWM를 개발하는 것이 이상적이나, 이는 시간과 비용, 기술적인 측면에서 한계가 있다. 이러한 점을 컨셉 설계 단계에서 극복하기 위하여 IWM 시스템의 구성 요소들을 선택적으로 구성하고 해석을 진행하여 최적 사양을 선정 개발하는 방법이 필요하다. Fig. 1은 이를 구현하기 위하여 개발한 IWM 시스템 모델링의 흐름도를 도시한 것이다. 모델링에는 타이어, 주행저항, 노면가진, 서스펜션, 진동흡수장치, 모터, 기어 시스템 등의 모델을 선정할 수 있도록 구성하였고, 운전 조건 등에 따른 비선형 방정식을 포함한 수치해석 등을 실시하며, 주행 성능, 모터 전자기력, 기어 시스템의 전달오차, 차량의 승차감 결과 등을 도출하도록 구성하였으며, 구성 요소들의 산포 등에 따른 결과 비교가 가능하도록 구성하였다.

2.2 모터 제어기 모델링

IWM의 모터 구성은 영구자석을 이용한 permanent magnetic synchronous motor(PMSM)과 코일을 이용하는 switched reluctance motor(SRM)을 선택할 수 있도록 모델링을 구성하였다. PMSM 전류 제어 모델링은 직류 전원을 3상 교류 전원으로 변환하는 인버터와 3상 교류 전류를 조절하는 제어기가 포함되도록 구성하였고, SRM 전류제어기는 인버터 제어를 위해 전류 히스테리시스 제어기의 on-off 각도가 일정하게 유지되도록 구성하였다.

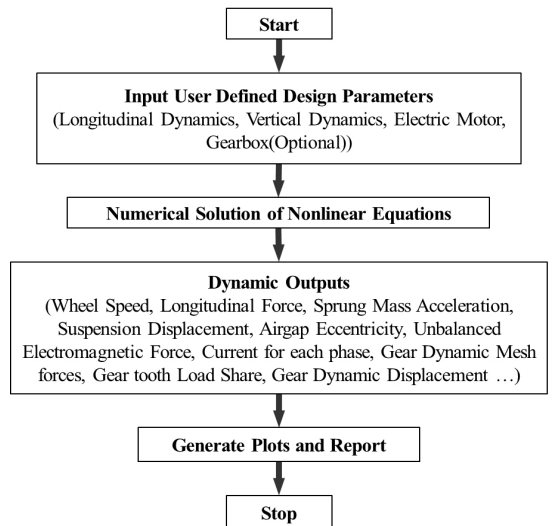


Fig. 1 Flow chart for IWM analysis modeling

Fig. 2(a)는 PMSM 모듈의 전류제어 흐름도를 나타낸 것이고 Fig. 2(b)는 SRM 모듈의 전류제어 흐름도를 나타낸 것이다. 해석을 위한 각각의 제어기 서브시스템은 matlab simulink 모델을 이용하였다.

모터 제어는 최대 가용 전력에 대하여 필요로 하는 총 출력의 비율을 비교하고 이를 모터로 전송하는 사각파형의 듀티 사이클을 사용하는 pulse width modulation(PWM)을 적용하였다(6,7).

2.3 모터 모델링

PMSM 가진력은 회전자와 고정자 사이의 에어갭에서 발생하는 전자기적 상호작용이 주요 가진력이다. 이 연구에서 PMSM 모델은 전기자 전류 및 고정자에 대한 회전자의 상대적인 위치에 대한 에어갭 내의 자속 밀도를 예측하도록 구성하였다. 에어갭 내의 자속 밀도에 영향을 미치는 여러 요소 중 고정자에 대한 회전자의 위치 편심은 2D로 구현하였다. Fig. 3은 편심의 정의와 PMSM에서 편심에 의한 방사형 자속밀도(radial magnetic flux density)의 영향성 사례를 도시한 것이다.

방사형 자속밀도 크기에 영향을 미치는 또 다른 요소는 슬롯(slot)이다. Fig. 4와 같이 PMSM은 슬롯이 있는 모터와 슬롯이 없는 모터 2가지가 있다. Fig. 5는 슬롯이 있는 경우와 슬롯이 없는 경우의 PMSM에서

방사형 자속밀도 차이에 대한 사례를 도시한 것이다.

모터 모델링에서 회전자와 고정자는 강체로 구성하며, 표면은 이상적인 실린더라는 가정하에 Maxwell 관계식과 Zarko, Ban, Lipo 등이 구현한 모델과 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 에어갭 내부의 자속밀도를 계산하였다(8).

SRM에서 발생하는 주요 가진력은 회전자의 구조적 불균형에 의한 불평형 전자기력과 상전류의 스위

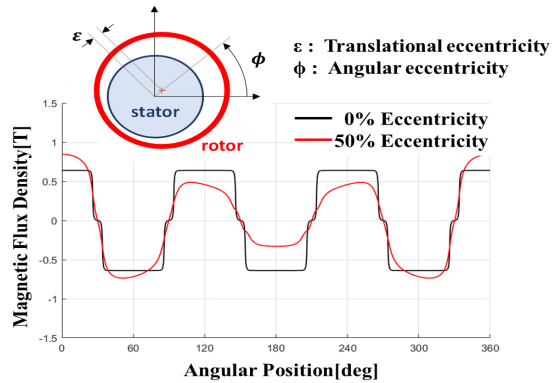


Fig. 3 Effect of eccentricity and radial magnetic flux density distribution

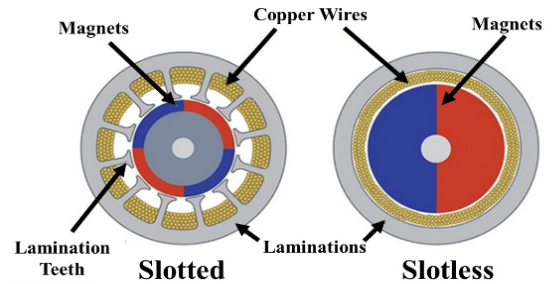


Fig. 4 Slotted and slotless motor type

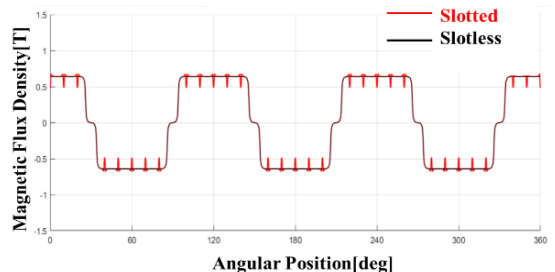
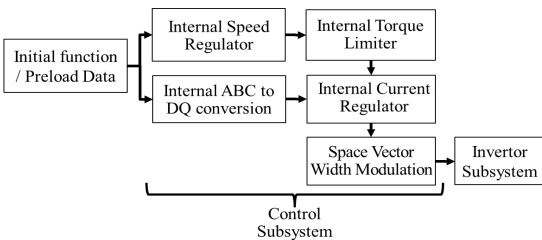
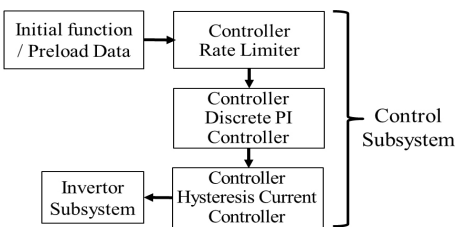


Fig. 5 Radial magnetic flux density distribution for slotted and slotless



(a) Current control flowchart for PMSM



(b) Current control flowchart for SRM

Fig. 2 Current control flow for IWM

칭에 의한 토크 변동이다.

SRM모델링에서 쇠교자속은 식 (3)으로, 자기에너지(W)는 식 (4), 토크(T)는 식 (5), 로터와 스테이터 사이의 반경방향힘(F_r)은 식 (6)으로 구성하였다.

$$\dot{p}_r = \frac{B_r^2 + B_\theta^2}{2\mu_0} \tag{1}$$

$$\dot{p}_\theta = \frac{B_r B_\theta}{\mu_0} \tag{2}$$

$$\psi(\theta, i_k) = \int_0^{i_k} L(i_k, \theta) di_k \tag{3}$$

$$W(i, \theta) = \int_0^i \psi(\theta, i) di \tag{4}$$

$$T = \left. \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \right|_{i = \text{constant}} \tag{5}$$

$$F_r = \left. \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial l_g} \right|_{i = \text{constant}} \tag{6}$$

P_r, P_θ : Radial and tangential air gap pressures
 B_r, B_θ : Radial and tangential magnetic flux densities for the slotted air gap

μ_0 : Permeability

Ψ : Magnetic flux density

l_g : Air gap between stator and rotor

θ : Rotor position

T : Torque generation

F_r : Force distribution

편심은 PMSM과 SRM 모두에서 불균형 전자기력에 영향을 주며, 차량의 수직 역학에도 영향을 주기 때문에 반경방향 힘의 수직성분 계산은 무엇보다 중요하다. Fig. 6은 편심에 의한 불평형 전자기력 성분을 도시한 것이며, 불평형 전자기력의 수직 성분(F_{wv})은 식 (7)로 계산하였다⁽⁹⁾.

$$F_{wv} = \sum_{k=1}^4 \left\{ \left[-\frac{T_k \delta}{I_g - \epsilon \cos \beta_k} + \frac{T_k \delta}{I_g + \epsilon \cos \beta_k} \right] \cos \beta_k \right\} \tag{7}$$

δ : Overlap angle between stator and rotor

ϵ : Gap variation

β_i : Energized stator pole pair location

2.4 감속기 모델링

IWM은 모터 직구동 방식 이외에 감속기가 적용된 방식도 있다. 감속기가 적용되는 경우 내부에 기어가 장착되며, 기어 종류는 크게 유성기어와 외접기어 등으로 구성할 수 있다. 이 연구에 적용한 기어 모델링은 Fig. 7에 도시한 사례와 같이 Kubur의 기어 모델링을 사용하였다⁽¹⁰⁾.

샤프트 모델링은 Fig. 8과 같이 Euler-bernoulli beam 모델을 적용하여 6자유도의 3D 유한요소로 구성하였다. 베어링은 multi-body구조이나, 계산의 효율성 등을 고려하여 식 (8)과 같이 단일 노드에 작용하는 베어링 강성 매트릭스 모델을 적용하였다.

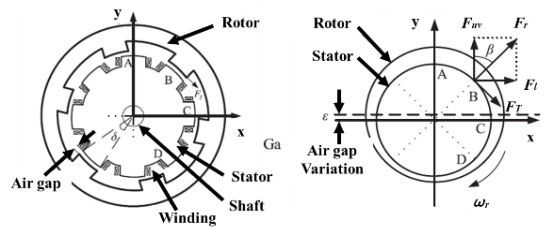


Fig. 6 Unbalanced electromagnetic force generation schematic diagram

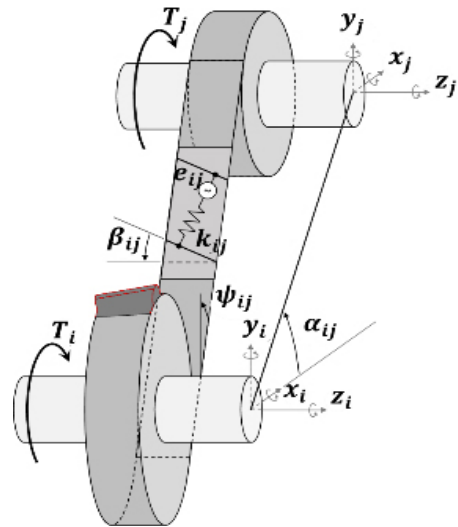


Fig. 7 External gear 3D modeling

$$[K_b] = \begin{bmatrix} k_{yy} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & k_{xx} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_{\theta yy} & 0 & 0 \\ sym. & & & & k_{\theta xx} & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.5 방사소음 모델링

IWM의 외관 형상을 고려한 소음과 진동 해석을 위하여 Fig. 9와 같이 원통형 셸을 적용하였으며, 셸 구조물은 직사각형 표면 세그먼트로 나누고 진동속도는 균일하다고 가정하였다. 식 (9)를 통하여 사운드 파워를 식 (10)을 통하여 사운드 파워 레벨을 도출하여 방사소음을 확인하도록 구성하였다.

$$\Pi(\omega_{npi}) = u^H(\omega_{npi}) R(\omega_{npi}) u(\omega_{npi}) \quad (9)$$

$$SWL = 10 \log \left(\frac{\sum_{n=1}^N \Pi(\omega_{npi})}{10^{-12}} \right) \quad (10)$$

()^H : Hermitian transpose
 u : A vector, containing the normal surface velocities of elements at frequency ω_{pi}

2.6 분석용 틀

Fig. 10은 앞서 언급된 각각의 모델링을 조합하여 개발한 틀을 보인 것이다. IWM 종류와 구성, 감속기 유/무, 케터카 모델 등을 선정하고 운전 환경에 따른 조건 등을 입력하고 솔버로 해석하는 과정을 거쳐 결과를 도출한다.

2.7 케이스 스터디: 에어갭과 폴-슬롯 영향성

Table 1과 같이 샘플 IWM의 기본 제원 데이터를 이용하여 3가지 경우의 케이스 스터디를 실시하였다.

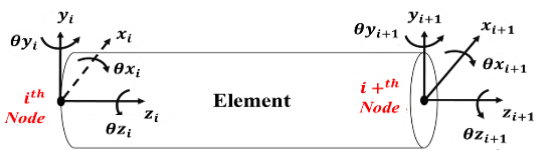


Fig. 8 Euler-bernoulli beam model for shaft

Fig. 11은 케이스 스터디의 결과를 도시한 것으로 Fig. 11(a)는 에어갭에 따른 소음 해석 결과를 Fig. 11(b)는 에어갭 1 mm 공통 조건에서 폴과 슬롯개수에 따른 해석 결과를 각각 도시한 것이다. 에어갭은 회전자와 고정자 사이의 거리에 해당하는데 회전자 내부

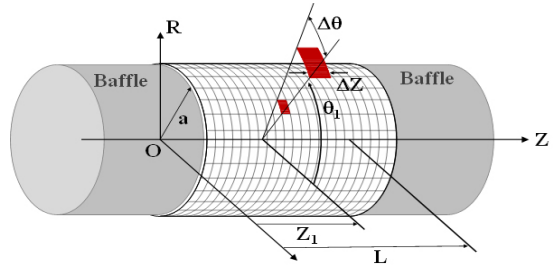


Fig. 9 The discretized cylindrical shell structure

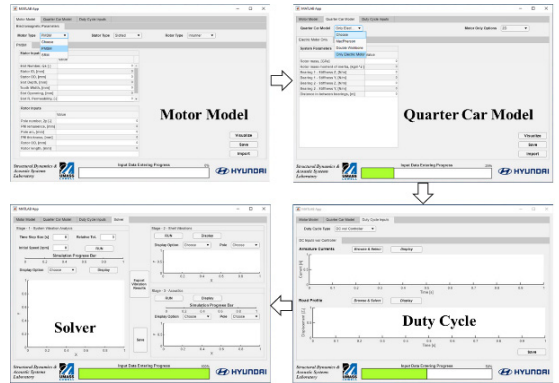


Fig. 10 Analysis tool for IWM

Table 1 Parameters of IWM for case study

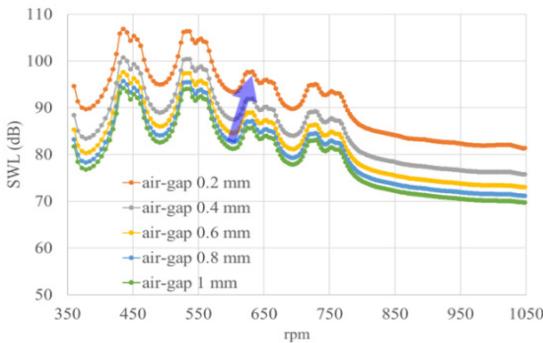
Parameters	Case study '1'	Case study '2'	Case study '3'
Number of slots	60	←	72
Number of poles	64		
Magnet thickness	'a' mm	'a' ~ 'a' + 0.8 mm 0.2 mm increase	'a' mm
Stator outer dia.	'b' mm		
Rotor outer dia./ Inner dia.	'b' + 49 mm/'b' + 32 mm		

'a', 'b': arbitrary values

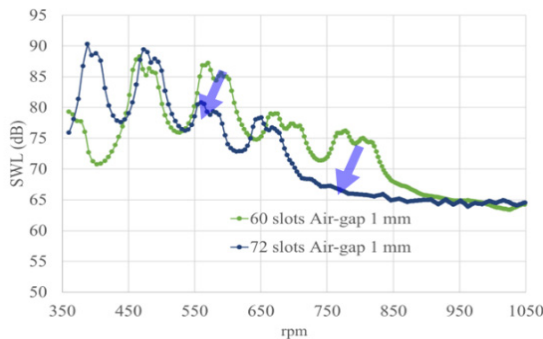
의 자석에 의한 자기력과 고정자에 부여된 전자기력에 의해 모터가 회전할 때 상호 작용하는 자기력에 의한 토크 변동 가진력은 에어갭이 작으면 자기력이 크게 되어 토크 변동이 커져서 진동이 크게 발생한다. 또한 3상 모터에서 폴과 슬롯개수의 선택은 폴과 슬롯 갯수의 최대 공약수가 크면 반경 방향 대칭과 언벨러스에 의한 하중이 좋고 최소공배수가 크면 코깅 토크를 작게 하여 소음진동 측면에서 우세한 설계를 할 수 있다⁽¹¹⁾.

이러한 측면에서 승용차량에 장착하기 적당한 IWM의 크기를 고려하고 제조성 등을 고려하면 통상 1 mm 이내의 에어갭을 가지며 64폴 60슬롯을 가지거나 64폴 72슬롯을 가진 IWM를 설계할 수 있다.

Fig. 11(a)의 해석결과에서 보여진 것과 같이 에어갭이 0.2 mm씩 작아짐에 따라 모터의 사운드파워 레벨이 2 dB, 3 dB, 4 dB, 8 dB씩 증가하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Effects of air-gap(64P/60S)



(b) Effects of pole and slot numbers (64P/60S : 64P/72S)

Fig. 11 Case studies with IWM design tool

Fig. 11(b)는 64폴 60슬롯과 64폴 72슬롯 두가지의 모터 방사소음의 해석 결과를 비교한 것으로 저속 조건은 64폴 60슬롯이 유리하나, 450 r/min이상은 64폴 72슬롯이 최대 10 dB 우세한 결과가 도출되었다⁽¹²⁾.

2.8 폴-슬롯 변경품 실차 적용 평가

2.7절의 케이스 스터디에서 언급되었던 64폴 60슬롯과 64폴 72슬롯 IWM 제품을 각각 제작하여 판매되는 전기차 후륜에 장착하여 평가하였다. 제품은 동일한 로터를 이용하고 스테이터의 슬롯 개수만 변경하여 제작하였다. Fig. 12는 가속과 감속 주행 조건에서의 차량 실내 소음 컬러맵을 도시한 것이고 Fig. 13은 가속조건에서 전체 차량 실내 소음을 비교한 것으로 64폴 72슬롯 제품이 64폴 60슬롯 대비 OA 소음에서 약 9 dBA 정도 우세한 것을 확인할 수 있다⁽¹²⁾. Fig. 14(a)는 모터의 8차, 16차, 64차 등 대표적인 3가지 성분의 모터 진동을 비교한 것으로 64폴 72슬롯

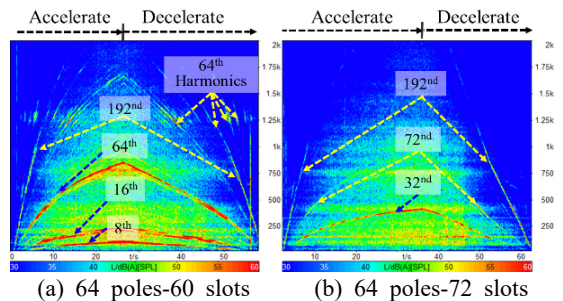


Fig. 12 Comparison of vehicle interior noise between the 64poles-60slots and 64poles-72slots

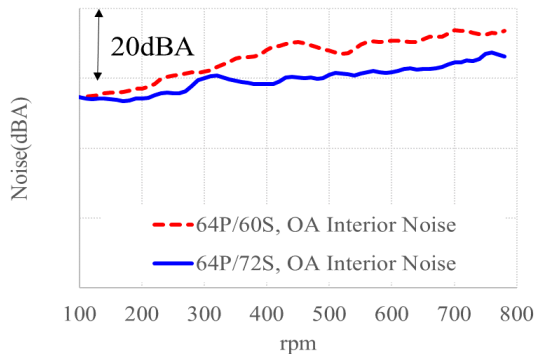
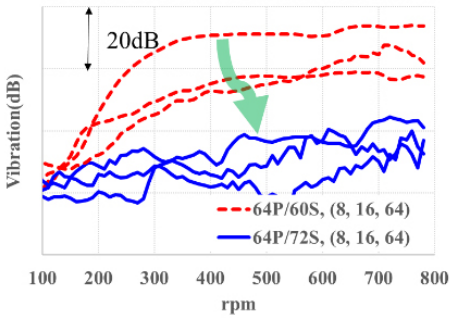
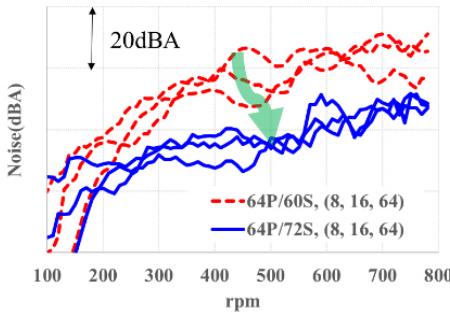


Fig. 13 Comparison of vehicle interior noise OA level between the 64poles-60slots and 64poles-72slots



(a) IWM vibration



(b) Vehicle interior noise(driver seat)

Fig. 14 Comparison of IWM vibration and vehicle interior noise of 8th, 16th, 64th order between the 64poles-60slots and 64poles-72slots

제품이 최대 40 dB 이상 우세한 것을 확인할 수 있고 Fig. 14(b)는 차량 운전석에서의 8차, 16차, 64차 소음 성분을 비교한 것으로 64폴 72슬롯 제품이 최대 20 dBA 이상 우세한 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

이 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) IWM를 구성하는 다양한 요소들의 모델링을 통하여 컨셉 단계부터 IWM의 NVH 성능을 예측하고 상대적으로 비교 분석할 수 있는 툴을 개발하였다.
- (2) IWM 구성 재료의 케이스 스터디를 통하여 에어갭과 폴-슬롯 조합 등이 IWM 소음과 진동의 중요 영향인자임을 확인하였다.
- (3) 에어갭이 0.2 mm씩 작아짐에 따라 모터의 사운드파워 레벨이 2 dB, 3 dB, 4 dB, 8 dB씩 증가하고 64폴 72슬롯 제품이 64폴 60슬롯 대비 우세한 것을 해석적으로 확인하였다.

(4) 해석상 우세한 결과가 도출된 64폴 72슬롯 제품을 제작하고 차량에 장착하여 평가한 결과, 64폴 60슬롯 대비 차량 실내 OA 소음이 9 dBA, 모터 8차, 16차, 64차 등의 진동 성분이 최대 40 dB 우세하고 차량실내소음에서 20 dBA 이상 우세하였다.

(5) 컨셉 개발 단계부터 IWM NVH 성능을 예측하고 분석할 수 있는 툴을 개발하고 제작하여 검증함에 따라 다양한 IWM 시스템을 개발할 때 개발 기간과 비용 등을 축소할 수 있을 뿐 아니라 NVH 상품성 향상도 가능하여, 미래 모빌리티 시장의 선두 주자로 발돋움할 수 있는 계기를 마련하였다.

References

- (1) Yun, S.-Y. and Lee, J., 2013, Implementation of In-wheel Motor Driving System for Electric Vehicle, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 6, pp. 750~755.
- (2) Chawrasia, S. K., Chanda, C. K. and Banerjee, S., 2020, Design and Analysis of In-wheel Motor for an Electric Vehicle, Proceedings of 2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON), pp. 351~355.
- (3) Frajnkovic, M., Omerovic, S., Rozic, U., Kern, J., Connes, R., et al., 2018, Structural Integrity of In-wheel Motors, SAE Technical Paper 2018-01-1829.
- (4) Kim, B., Hong, J., Yun, S., Shin, G., Min, G. and Chung, J., 2019, Noise Reduction of an In-wheel Motor System for an Electric Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 422~428.
- (5) Lee, H. K., Oh, C. S., Kim, M. S. and Lee, J. H., 2024, Development of In-wheel Motor Noise Reduction for Electric Vehicles Using Active Noise Control(ANC), Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 12~18.
- (6) Rundqwist, L., 1990, Anti-reset Windup for PID Controllers, Proceedings of the 11th IFAC World Congress on Automatic Control in the Service of Mankind, pp. 453~458.
- (7) Peddapelli, S. K., 2017, Pulse Width Modulation: Analysis and Performance in Multilevel Inverters, De Gruyter Oldenbourg, Berlin, Germany.
- (8) Zarko, D., Ban, D. and Lipo, T. A., 2006, Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in

the Slotted Air Gap of a Surface Permanent-magnet Motor Using Complex Relative Air-gap Permeance, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1828~1837.

(9) Qin, Y., He, C., Shao, X., Du, H., Xiang, C. and Dong, M., 2018, Vibration Mitigation for In-wheel Switched Reluctance Motor Driven Electric Vehicle with Dynamic Vibration Absorbing Structures, Journal of Sound and Vibration, Vol. 419, pp. 249~267.

(10) Kubur, M., Kahraman, A., Zini, D. M. and Kienzle, K., 2004, Dynamic Analysis of a Multi-shaft Helical Gear Transmission by Finite Elements: Model and Experiment, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 126, No. 3, pp. 398~406.

(11) Dogan, H., Wurtz, F., Foggia, A. and Garbuio, L., 2011, Analysis of Slot-pole Combination of Fractional-slots PMSM for Embedded Applications, Proceedings of International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion Joint Conference (ACEMP), pp. 627~631.

(12) Lee, H. K., Kim, M. S., Inalpolat, M. and Enes, O., 2023, Development of In-wheel Motor System NVH Performance Analysis Tool and Its Application to In-wheel Motor NVH Development Study, Proceedings of the KSNVE 2023 Annual Autumn Conference, p. 98.



Hyun Ku Lee is a NVH global R&D master engineer in the Hyundai - Kia Motors Research and Development Division. He received his B.S. and M.S. degree of Mechanical Engineering from The Konkuk University in 1995 and in 1997 respectively. He won a Jang Young-sil Award in 2010 and won the 1st Yang Bo Suk Technical Award in 2016 from the KSNVE. He has developed several 6th and 8th-speed automatic transmissions, a CVT and equipment for measuring transmission errors in external gear and planetary gear sets. Additionally, he developed a pRMC and PTA program for planetary gear design and has authored several papers on automatic transmission and reducer gear noise. Currently, his research focuses on driveline noise, particularly related to planetary gear NVH and efficiency, EOL, transmission error, total backlash, as well as noise and vibration in electric vehicle reducers and in-wheel motors.