Check for updates
Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 34(1) : 12~18, 2024
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2024.34.1.012
한국소음진동공학회논문집 제 34 권 제 1호, pp. 12~18, 2024
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

ANC를 통한 전기자동차 인휠 모터 소음 개발

Development of In-wheel Motor Noise Reduction for Electric Vehicles Using Active Noise Control(ANC)

이 현 구† · 오 치 성* · 김 무 석* · 이 정 한**
Hyun Ku Lee†, Chi Sung Oh*, Moo Suk Kim* and Jeong Han Lee**

(Received July 26, 2023 ; Revised September 13, 2023 ; Accepted October 5, 2023)

Key Words : In-wheel Motor(인휠 모터), Active Noise Control(능동 소음 제어), Electric Vehicle(전기자동차), Noise(소음), Error Mic(에러 마이크)

ABSTRACT

To overcome global warming caused by air pollution and carbon dioxide, the automotive industry is responding to changes in the market by developing electric vehicles. Among the various types of electric vehicles, an in-wheel motor (IWM) is regarded as a suitable solution for future drive train architecture owing to its simple structure, high efficiency, and good space availability. Through the analysis of various IWM noise sources, the 8th and 16th orders, which are less than 250 Hz are selected as the subjects to reduce using the ANC application technology. A multi-correlation, optimal filter, and secondary noise path analysis are conducted. Moreover, a time frequency-filtered least mean square algorithm is adapted. Four accelerometers and six speaker positions are chosen through the optimization of ANC. With ANC technology, the 8th and 16th noise are reduced by 20 dBA and the overall noise is successfully reduced by 6 to 8 dBA, respectively.

1. 서 론

최근의 지구 환경문제에서 가장 중요한 이슈는 대기 오염과 이산화탄소에 의한 온난화 현상이다. 이를 극복하고자 세계 자동차 산업은 전기 자동차 개발로 시장의 변화 요구에 대응하고 있다. 다양한 종류의 전기자동차 동력원 구성 중에서도 바퀴 내에 모터와 제동 장치가 동시에 장착되어 구동하는 방식인 인휠 모터(in-wheel motor, 이후 IWM) 시스템은 다음과 같은 이점이 있다.

첫째, IWM의 가장 중요한 장점은 우수한 효율이다. 클러치 시스템, 기어류 등과 같이 모터와 휠 사이에 복잡하고 무거운 구동력 전달 요소가 없으며 모터와 휠이 직접 연결되어 구동력을 전달하기 때문에 에너지 손실이 최소화된다. 이를 통한 에너지 전달 효율 개선으로 기대 이상의 운행 거리 증대를 달성할 수 있다[1].

둘째, 모터와 휠 사이의 다양한 요소가 필요 없기 때문에 설계가 간단하다. 모터 컨트롤러에 의해 쉽게 회전 방향을 변경할 수 있기 때문에 후진을 위한 기어가 필요 없다. 또한, 기존 드라이브 트레

† Corresponding Author ; Member, Hyundai Motor Company, Global R&D Master
E-mail : hk-lee@hyundai.com
* Hyundai Motor Company, Senior Research Engineer
** Hyundai Motor Company, Vice President

A part of this paper was presented at the KSNVE 2023 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Jong-Seok Oh
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

인 시스템 대비 기술적인 단순성으로 부품 수를 줄일 수 있다[2].

셋째, 전기적인 제어를 이용하는 드라이브 시스템으로 다양한 요소와 기능들을 통합할 수 있다. 예를 들어, 모터 설치 공간과 통합 냉각에 필요한 전력 전자 장치를 통합하면 전력 공급 라인을 최소화할 수 있다. 이러한 통합 전자 장치는 짧은 케이블 경로 등으로 높은 제어 안전성을 보장한다. 또한, 제동, 댐핑, 서스펜션과 스티어링 등을 하나의 구성요소로 결합할 수도 있다[3].

넷째, Fig. 1과 같이 기존 부품의 삭제를 통하여 넓은 공간을 확보할 수 있다[4]. 이를 통하여 차량 설계자는 차량의 외관과 성능 방식을 좀더 폭넓고 자유롭게 변경할 수 있다. 필요한 부품이 언더바디에 배치되는 스케이트보드 형태로 구성하여 PBV(purposed built vehicle) 등의 새로운 개념으로 차량을 개발할 수도 있다.

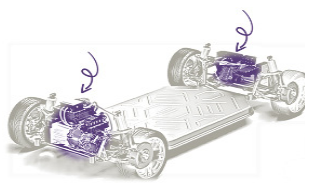
IWM의 가장 큰 단점은 휠에서의 선택적 토크 제어이다. 운행 중에 휠 토크를 잘못 조정하면 심한 경우 차량이 전복될 수도 있다[5]. 또한 인휠 모터 운행 중에 부득이하게 연석에 충돌하거나 도로의 포트홀 등을 주행하는 상황이 발생하면 예상치 못한 파손으로 모터의 고정자와 회전자 사이의 공극이 영향을 받아 모터의 성능이 저하되거나 소음이 악화될 수 있다. 모터의 공극은 모든 주행과 부하 조건하에서 최소값 이상, 일정한 범위내에서 유지되어야 한다. 즉, 일정한 수준의 제조 품질 유지와 외부의 충격 부하 등을 극복하고 구동력을 휠에 전달되도록 구성되어야 한다[6].

앞서 언급한 장점과 단점 사이의 모든 관계를 고려해 보면, IWM시스템은 일정 수준 이상의 강성 확보와 제어 등을 통하여 주행과 부하 조건하에서 안정성이 확보되면, 효율이 높고 구조가 간단하며 공간의 이용성이 좋아 미래형 전기자동차의 드라이브 트레인(drive train) 아키텍처(architecture)에 적합한 시스템으로 판단된다. 일반적으로 IWM은 허브베어링에 고정자와 회전자가 장착되어 회전하면서 진동과 소음이 발생한다. 이때 발생한 진동이 차량의 현가계와 마운트를 거쳐 실내로 전달되며 운전자에게 이전에 경험하지 못한 불쾌한 소음을 제공하기도 한다. 따라서 저소음, 고성능 IWM개발 기술은 미래형 전기차에서부터 목적 기반 차량, 대형 버스, 전동열차 뿐만 아니라, 도심형 항공기 등에 이르기까지 다양한 분야에서 강력한 시장 경쟁력을 확보할 수 있는 중요한 전략 기술이다. 이 연구에서는 IWM 시스템의 소음 발생 메커니즘을 분석하고, 능동 소음 제어(active noise control, 이후 ANC)기술을 이용하여 250 Hz 이하 대역의 소음을 개선한 것을 기술하였다.

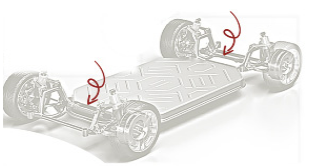
2. 본 론

2.1 IWM

대표적인 IWM는 Elaphe, Protean, Schaeffler 등 여러 드라이브 트레인 회사에서 개발하고 있다. Fig. 2는 다양한 IWM를 보인 것으로 Elaphe와 Protean 제품



(a) Conventional EV



(b) IWM EV

Fig. 1 Comparison between a 4 × 4 EV platform configurations of conventional and IWM

(a) Protean (b) Elaphe

(c) Schaeffler (d) Test Sample

Fig. 2 IWMs system

은 모터 직구동 방식으로 구성되어 있고 Schaeffler 제품은 모터와 유성기어 타입의 감속기로 구성되어 있다[7]. Fig. 3은 이 연구에 사용한 IWM를 차량에 장착한 것을 보인 것으로 최대 토크와 출력이 1500 Nm, 50 kW이고 64 poles/60 slots의 모터 직구동 방식으로 구성되어 있다[14,15].

2.2 IWM 소음

Fig. 4는 아이오닉 5 전기 차량의 후륜에 IWM를 장착하고 0 kph ~ 100 kph 가속 주행 중에 발생하는 소음을 계측 도시한 것으로 약 250 Hz 미만에서 모터 8차, 16차, 성분과 그 이상의 주파수 조건에서 64차 성분과 그 하모닉, 그리고 80차 성분과 하모닉 등으로 구성된 화인 소음이 있다. 64차 이상은 3상 인버터를 통한 모터 제어와 64폴(pole)과 60슬롯(slot)의 개수로 구성된 모터 구성 특징과 축을 지지하는 제작 품질 등의 복합 문제에 의한 영향으로 판단된다. 반면에 250 Hz 미만의 8차와 16차 화인성 소음은 모터에 공급되는 전원의 품질과 하중을 받는 휠 허브 베어링의 볼 개수 등의 영향으로 판단된다. 주된 소음

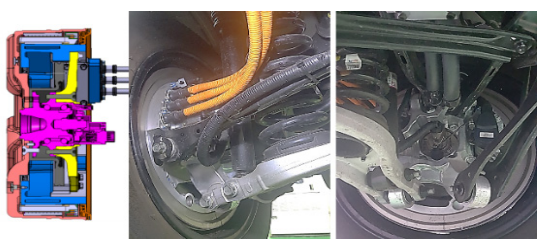


Fig. 3 An IWM system

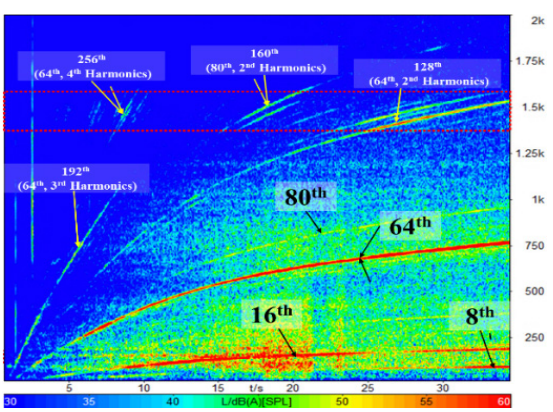


Fig. 4 IWM noise in the electric vehicle cabin

원은 차량 실내에서 부밍성으로 인지되는 16차 성분과 화인성 순음으로 인지되는 64차 성분으로 승객에게 청감상의 상당한 불쾌함을 주는 수준이다.

2.3 ANC 적용 알고리즘

1936년 독일의 엔지니어 Leug는 능동 소음 제어에 대한 최초의 특허를 출원했다. 1950년대 말까지 Fogel, Simshauser 등이 다양한 아날로그 ANC(active noise control) 장치를 발명하였다. 그러나 아날로그 ANC는 변동성이 있는 소음의 특성과 환경 조건에는 사용할 수 없었다. ANC 장치를 자동으로 조정하는 디지털 적응형 ANC 이론이 1975년 widrow에 의해 확립된 이후부터 ANC가 발전하기 시작했다[7~13].

현재는 특정한 로컬(local) 영역의 소음을 저감하는 ANC 기술이 이어폰이나 헤드폰 등의 노이즈 캔슬링 제품에 많이 적용되고 있다.

이 연구에서 적용한 ANC 알고리즘은 입력이 차량의 서스펜션을 가진하고 그 진동이 차체로 전달된 후 차량 실내 공간(cavity)를 가진하여 수음자의 귀까지 도달하는 노이즈 특성에 따라 입력 진동인 참조 신호를 이용하여 제어 신호를 생성하는 피드포워드(feed forward) 알고리즘을 이용하였다. 참조 신호 위치를 선정하기 위해 차량 전달계에 가속도 센서를 붙여 실내음과 동시에 측정하였다. 특히, 이 연구에서는 주행 중에 발생하는 소음을 제어하기 위한 ANC 시스템이 다양한 변화에 대응해야 하므로 적응형 필터로 LMS (least mean square) 알고리즘을 사용한 횡단형 FIR (finite impulse response) 필터를 사용하였다. Fig. 5는 FxLMS(filtered-x least mean square) 알고리즘을 사용하는 ANC의 블록선도를 나타낸 것이고[13] Fig. 6은 이 연구에서 FxLMS 알고리즘을 이용한 ANC의

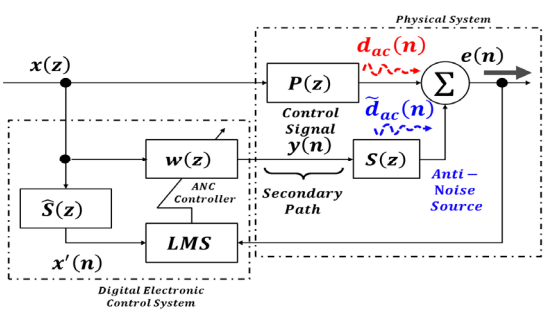


Fig. 5 A block diagram for digital electronic control system in FxLMS-based ANC

블록선도를 상세하게 나타낸 것이다. 저주파 대역을 제어하기 때문에 reference signal에 aliasing을 방지하기 위한 low pass filter와 가속도 센서의 DC 성분과 극 저주파의 높은 에너지로 인해 제어 대역의 정상 수렴이 방해 받는 것을 방지하기 위한 high pass filter도 같이 적용되었다. 제어기의 연산량을 고려하여 제어 필터 업데이트 연산은 센서의 sampling rate보다 낮게 수행되므로 센서로부터 받은 신호를 down sampling 하였다. 귀 근처를 제어해야 성능 체감이 가능하기 때문에 VMT(virtual microphone technique)이 적용되었다. Sp는 스피커에서 physical mic간 2차 경로, Sv는 virtual mic간 2차 경로, G path는 physical mic에서 virtual mic까지 경로를 나타낸다. Sp는 실제 물리적인 경로, $S\hat{p}$, $S\hat{v}$는 각 경로의 전달함수 모델이다. VMT는 physical mic에서 측정된 error signal을 앞서 언급한 전달함수를 이용하여 연산하고 실제 제어해야 하는 귀 위치의 virtual mic의 error signal을 도출하게 된다.

2.4 ANC 적용

ANC를 이용하여 IWM 소음을 저감하기 위하여 IWM가 적용된 차량에서 진동과 소음을 계측하고 소음원의 발생 주파수 영역을 구분하였다.

Fig. 7과 같이 부밍성 소음으로 인지되는 250 Hz 이하 대역에 존재하는 8차와 16차 화인성 소음의 기

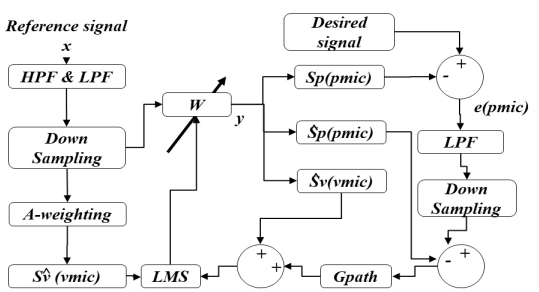


Fig. 6 An applied ANC algorithm block diagram for IWM

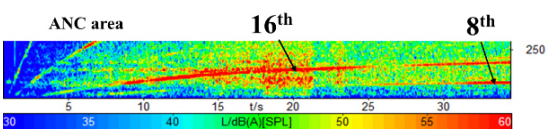


Fig. 7 Noise area for adapting the ANC

여도가 높은 진동 전달 경로 분석을 실시하였다.

실내소음과 상관성(coherence)이 가장 높은 진동센서의 위치를 선정하기 위하여 다중 상관성(multiple coherence, MC) 분석을 실시하였다.

MC 분석은 다중 입력과 단일 출력 사이의 선형 종속의 척도를 나타내기 위한 기여도 함수로 외부 잡음을 포함하는 전체 출력 스펙트럼과 외부 잡음이 포함되지 않고 입력들에 의해 발생하는 스펙트럼의 비를 나타낸 것이다. 이 연구에서는 차량 전달계에 부착한 총 14개의 가속도 센서 중 4개의 센서 위치를 선정하고자 했으며, 이때 구성된 조합의 수는 약 1000여개이고, 구성된 조합들에 대하여 차량 실내 8개 위치의 마이크와 MC 분석을 실시하여 상관성이 높은 1개의 조합을 선정하였다. 이때 판단 기준은 8개 마이크와의 상관성 평균값을 이용하였다. Fig. 8은 MC 분석을 통한 결과의 예를 도시한 것으로 선정된 위치에서 100 Hz ~ 150 Hz 대역의 상관성이 '1'에 가까운 상관관계임을 확인할 수 있다. 이러한 상관성 분석에서 초기 분석시 상관성이 매우 낮게 나오면 이 시스템은 제어하기 어렵다고 판단할 수 있다. MC 분석법을 통하여 제어가 충분히 가능함을 판단한 후, 최적의 가속도 센서 개수와 위치 조합을 찾기 위해 최적 필터(optimal filter) 분석법을 이용하였다. 센서의 장착성과 좌우 밸런스 등을 고려하여 실내 승객의 귀 위치에서 소음 기여도가 가장 큰 4곳의 가속도 센서 위치를 선정하였다. Fig. 9는 가속도 센서 설치 위치를 나타낸 것으로 차체 프레임 좌측과 우측 2곳, 서브프레임 절연전의 좌측과 우측 2곳을 각각 선정하였다.

이를 기반으로 제어 성능 시뮬레이션을 수행하였

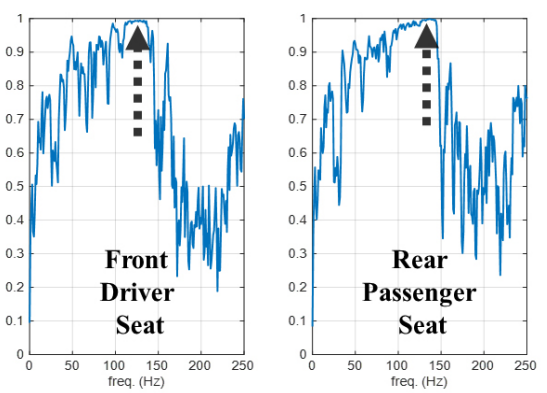


Fig. 8 Multiple coherence analysis for ANC

다. 시뮬레이션에는 기 측정된 4개의 가속도 센서 신호와 차량에 장착된 4개의 스피커, 좌우 귀를 모두 제어하기 위해서 4개의 좌석 기준 8개의 마이크 신호, 스피커에서 마이크까지의 32개의 2차 경로 모델이 적용되었다. 그 결과 소스측 진동과 차량 실내 소음 사이의 높은 상관성이 확보되었음에도 제어 성능은 낮았다. 추정 원인으로는 차량 실내의 3차원 조건에서 부족한 스피커 개수로 많은 위치를 제어하려고 하면 제어 필터의 해를 찾기 어려워 제어가 잘 되지 않았던 것으로 판단된다. 이 연구에 사용된 차량에서 제어가 가능한 기본적인 스피커 개수는 4개이고 이를 기준으로 제어하고자 하는 실내 마이크 개수를 1개부터 순차적으로 증대하여 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 마이크 개수가 5개가 넘어서면서부터 급격한 성능 저하를 나타냈다. 다른 변경 없이 마이크 개수가 증대될 때, 성능 저하를 나타낸다는 것은 제어하고자 하는 마이크 개수에 따라 필요한 최소한의 스피커 수가 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 제어하고자 하는 마이크 위치 수와 스피커(actuator)의 개수가 유사해야 어느 정도의 제어 성능이 확보가 된다는 것을 확인하였다. 스피커의 위치도 영향을 줄 수 있으나 기본적으로 차량에 장착된 스피커를 그대로 사용하기 때문에 위치를 따로 고려하지는 않았다. 또한 스피커들로 chirp 신호를 출력하여 탑승객 귀 위치의 마이크로폰 응답을 측정하여 FRF를 측정하였다. Fig. 10은 새로 설치된 2개의 우퍼스피커의 FRF 측정결과를 보인 것으로 제어 목표주파수인 50 Hz ~ 250 Hz 대역의 재생이 가능함을 확인하였다. 이를 다시 점검하기 위하여 2차 경로와 스피커 개수의 정합성을 검토하여 전석과 후석에 총 2개의 스피커를 추가하였다. 이를 통하여 Fig. 11과 같이 약 15 dBA 정도 소음이 개선되는 성능을 확인하였다.

성공적인 ANC 적용을 위하여, 총 4개의 가속도 센서(3축, 12채널)와 각 좌석당 2개씩 8개의 에러 마이크(error mic)를 설치하고, 6개의 스피커와 TI(사)의 700 MHz dual core를 가진 DSP(digital signal processor) 제어기를 사용하였다. Fig. 12는 차량에 설치된 제어기와 스피커, 에러 마이크 등을 보인 것이다[15].

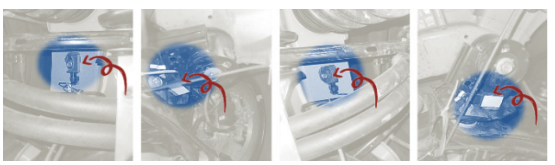


Fig. 9 Accelerometer positions to optimize the ANC

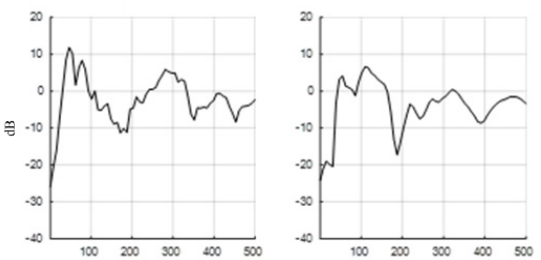


Fig. 10 FRF test results of the woofer speakers in the cabin

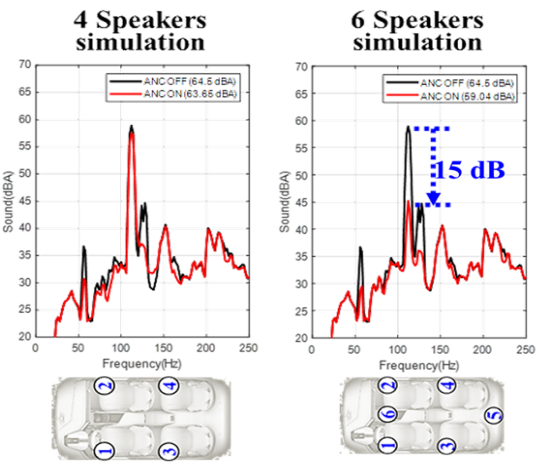


Fig. 11 ANC simulation results between 4 speakers and 6 speakers

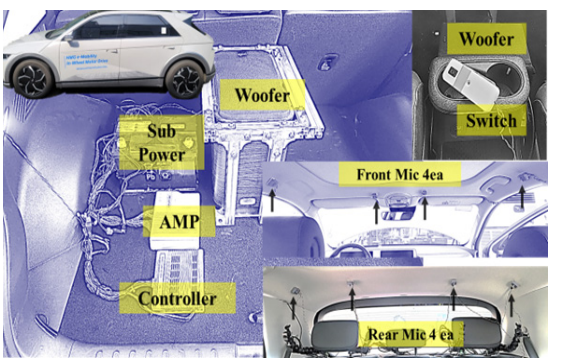
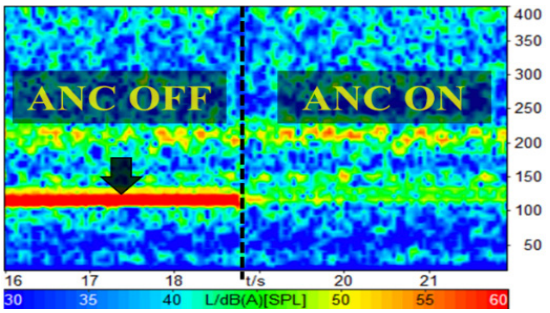
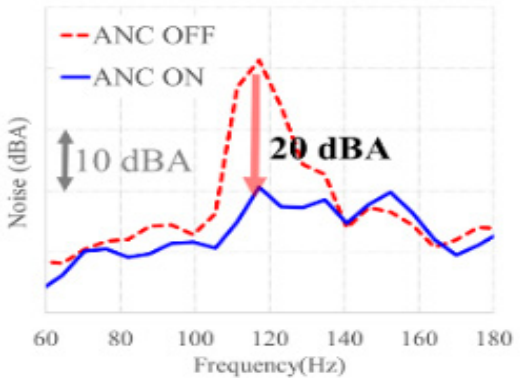


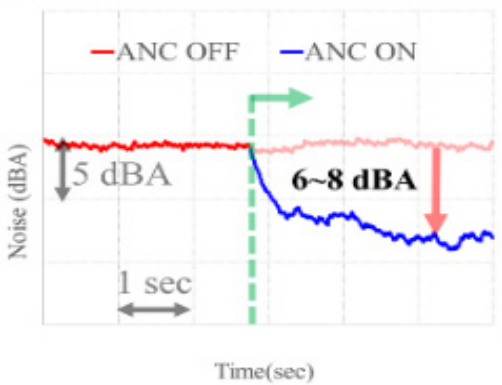
Fig. 12 ANC devices(amp, controller, 2 woofer speakers, 4 door speakers, sub power, 8 error mics)



(a) FFT color map data



(b) FFT data



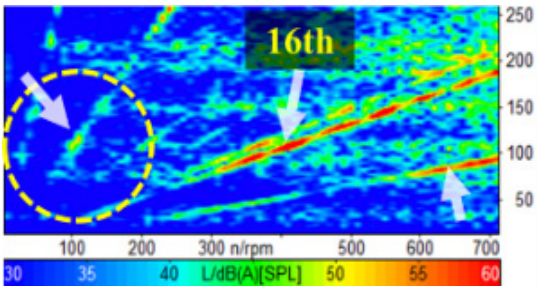
(c) Overall data

Fig. 13 IWM noise reduction by ANC(60 kph, APS 20 %)

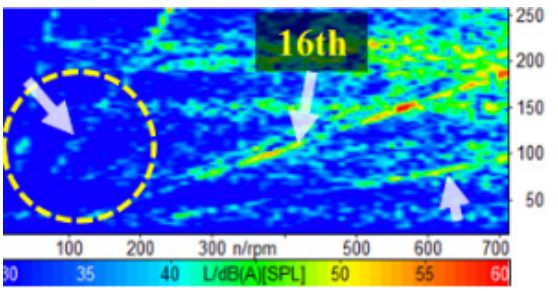
2.5 ANC 적용 실차 평가 결과

Fig. 13은 60 kph 정속 주행 조건에서 ANC를 적용한 실차 평가 결과를 보인 것이다[14]. ANC를 적용하여 차량 실내 OA 소음이 6 dBA ~ 8 dBA 개선되고 운전석에서 16차(120 Hz 대역) 성분이 약 20 dBA 저감되었다.

Fig. 14는 정지상태에서 시속 100 kph까지 가속



(a) ANC off



(b) ANC on

Fig. 14 IWM noise reduction by ANC(0 kph ~ 100 kph)

주행하면서 ANC가 작동하지 않을 때와 작동할 때의 실내 운전석에서의 소음 데이터를 보인 것이다[15]. 250 Hz 이하 대역에 존재하는 다른 화인성 소음 성분도 효과적으로 개선되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

IWM이 탑재된 전기차에 ANC 기술을 적용하여 IWM 소음을 개발한 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) IWM 소음원 분석을 통하여 발생 주파수 대역별 소음원과 전달계 특성을 분석하였다.

(2) 이를 통하여, 250 Hz 이하 대역의 IWM의 8차와 16차 소음 성분을 ANC 기술 적용 대상으로 선정하고 다중 상관성 분석, 최적 필터 분석, 실내 소음 2차 경로 분석 등을 실시하였다.

(3) ANC 성능 최적화를 통하여 4개의 가속도 센서와 6개의 스피커 위치 등을 선정하고 이를 통하여 좌석 위치별로 250 Hz 이하 대역에 존재하는 8차와 16차 화인성 소음을 약 20 dBA 저감하고 차량 실내 OA 소음을 6 dBA ~ 8 dBA 저감하였다. 이를 통하여 ANC 기술이 차량의 저주파 대역에 존재하는 순음 소음 저감에도 적용이 가능함을 확인하였다.

(4) ANC 기술을 적용하여 전기차 드라이브 트레인의 새로운 아키텍처인 IWM의 소음을 저감할 수 있는 기술을 개발하였다.

References

(1) Heim, R., Krause, I. and Weingärtner, S., 2008, Der Rad-Straßen-Simulator: Evolution in der Prüftechnik, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 110, No. 9, pp. 788~794.

(2) Keller, M., 2016, Lohner-Porsche-Fahrzeuge die ihrer Zeit weit vorraus waren, Posted on Autowallpaper.de, Markus Keller, Betrieb von Internetseiten und Internetdienstleistungen, 16.02.2020

(3) Krebs, G., Weber, R., Leppelsack, S. and Hochberg, U., 2010, Elektrische Radnabenmotoren für Leichte Stadtfahrzeuge, ATZ Elektronik, Vol. 5, No. 1, pp. 20~27.

(4) Chris Borroni-Bird, Integrated Wheel Motors Rethinking the corner module for EVs, 2021, AUTOMOTIVE ENGINEERING, July/Augus, pp. 15~19.

(5) Griffin, M. J., 2007, Discomfort from Feeling Vehicle Vibration, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 7-8, pp. 679~698.

(6) Perekopskiy, S., 2020, On the Analysis and Design of In-wheel Motor for Vehicle Application, Doctoral Dissertation, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg, Germany.

(7) Leug, P., 1936, Process of Silencing Sound Oscillations, United State Patent 2,043,416.

(8) Fogel, L. J., 1958, Method of Improving Intelligence under Random Noise Interference, United State Patent 2,866,848.

(9) Simshauser, E. D. and Hawley, M. E., 1955, The Noise-cancelling Headset - An Active Ear Defender, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 27, No. 1 Supplement, p. 207.

(10) Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hearn, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E., Jr. and Goodlin, R. C., 1975, Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 12, pp. 1692~1716.

(11) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations, John Wiley & Sons, New York.

(12) Elliott, S. J., 2001, Signal Processing for Active Control, Academic Press, San Diego.

(13) Ardekani, I. T. and Abdulla, W. H., 2011, FxLMS-based Active Noise Control: A Quick Review, Proceedings of the APSIPA ASC 2011, pp. 1~11.

(14) Lee, H. K., Oh, C. S., Kim, M. S. and Lee, J. H., Development of In-Wheel Motor Noise Reduction for Electric Vehicles Using Active Noise Control, Proceedings of the KSNVE 2023 Annual Spring conference, p. 114.

(15) Lee, H. K., Oh, C. S., Kim, M. S. and Lee, J. H., 2023, A Study on the Development of In-wheel Motor Noise by Using the Active Noise Control, Proceedings of the KSAE 2023 Annual Spring Conference, p. 679.

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. degrees 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.